

Change in thermal resistance related to infrared radiation

Toshiharu Tada^{*a)} Member of IEEJ

Keywords : thermal energy, infrared ray, thermal resistance, reflection, thermal current formula

This paper builds on the published paper⁽¹⁾.

1. Change in thermal resistance

1.1 Effect of τ On a double-layered complex model, the condition $c_1\rho_1/c_2\rho_2 = \psi_{c0-air1}/\psi_{c0-air2} = \Delta V_{2n'}/\Delta V_{1n'}$ is needed to form τ , although $c\rho$ and ψ_{c0} are independent variables, as shown in Fig. 1. Subscripts 1 and 2 indicate the layer number in the studied objects. The values of ψ_{c0-air} are commonly determined by standard lines when the objects 1 and 2 are measured independently, as shown in Fig. 2. The levels indicate the ratios of reflection energy IR_{ref} to diffraction energy IR_{tr} . Depending on the situation where infrared rays (IR) hits the ions, from the values on the standard line, $IR_{st1} > IR_{st2}$ and $IR_{st1} < IR_{st2}$, have $\Delta R_1 < \Delta R_2$ and $\Delta R_1 > \Delta R_2$, respectively. However, because τ is formed when two objects are incorporated, a single IR_{st} flows with IR reflection, and thus $IR_{st1} = IR_{st2}$. The reflection and diffraction energies on ion 1, IR_{ref} and IR_{tr} , respectively, change with the type of reflection on the interface between layers 1 and 2, which in turn change the frequencies and amplitudes of IR_{ref} and IR_{tr} . Reflection energy IR_{ref} from the interface flows to compensate the IR energies of the inner layers and establish a single IR stream, yielding $IR_{in,af} = IR_{in} - IR_{ref}$. Thus, IR_{tr} through layers 1 and 2 is determined by ΔR_2 regardless of ΔR_1 . Consequently, large reflection of IR waves on the interface bundles the local IR radiation event on ions 1 to form τ . Thus, either smaller or larger $\psi_{c0-air1}$ than the values from the standard line can be obtained. Subscripts *st*, *in*, *tr*, *ref* and *af* indicate stream, input, transparent, reflection, and post-reflection, respectively.

1.2 Reflection on the interface The interface exists between the divided layers $n' = m_1$ and $m_1 + 1$ where IR_{in} and IR_{tr} belong, respectively. However, they have the same divided layer number m_1 because $IR_{tr,m1}$ requires to exclude newly generated $\Delta IR_{st2,m1+1} = \Delta IR_{ori,m1+1}$ from $IR_{st2,m1+1}$. Namely, $IR_{tr,m1} = IR_{st2,m1} = \theta_{m1}/\Delta R_{2,m1} = (m_2 - m_1 + 1)IR_{oriunit,m1} \approx IR_{st2,m1+1} - \Delta IR_{st2,m1+1} \approx (m_2 - m_1)(IR_{oriunit,m1+1} - \Delta IR_{oriunit,m1+1})$ at $m_1 \approx m_1 - 1$ ⁽¹⁾. Thus, ΔR_{in} and ΔR_{tr} correspond to $\Delta R_{1,m1} = \psi_{c0-air1}\Delta V_{1,m1}$ and $\Delta R_{2,m1} = \psi_{c0-air2}\Delta V_{2,m1}$, respectively, where $\Delta V_{2,m1}$ is the fictitious volume because layer 2 begins from $n' = m_1 + 1$ layer, and $\theta_{1,m1} = \theta_{2,m1} = \theta_{m1} = m_1\Delta\theta$ because layers 1 and 2 depend on the same $\theta - n'$ linear property. Therefore, ΔR can be compared to be evaluated. With the difference of ΔR , IR is reflected. IR_{in} after reflection is denoted as $IR_{in,af}$, whose $A_{IRin,af}$ and $\Delta v_{Tin,af}$ vary with λ_{ir} . The curve of $IR_{ref} = A_{IRref}\sin(-2\pi\Delta v_{Tref}t)$ is derived using $A_{IRref} = A_{IRin}$ and $\Delta v_{Tref} = \lambda_{ir}\Delta v_{Tin}$, as shown in Eqs. (1) and (2). Figure 3 shows the IR curves, demonstrating the waveforms corresponding to E_f and H_f . From the continuity of IR waves, $IR_{in,af}$ is shown as $\theta/\Delta R_{in,af}$ in Fig. 3. $\theta/\Delta R_{in,af}$, $IR_{in,af}$, and IR_{tr} have the same IR energy and are treated as $\theta/\Delta R_{in,af} = IR_{in,af} = IR_{tr}$ on IR energy.

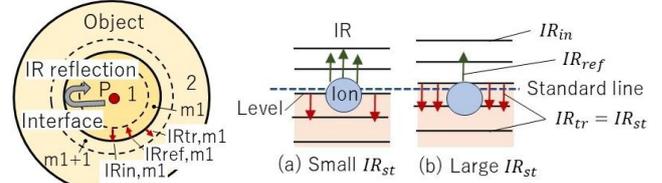


Fig. 1. Model

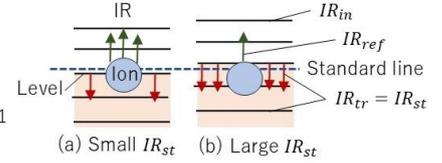


Fig. 2. Changes in R

1.3 Physical mechanisms On the model for $\Delta R_1 > \Delta R_2$, $IR_{st1} = IR_{in,af}$ increases with negative reflection. In addition, $IR_{tr} = IR_{in,af}$ is larger than IR_{in} , resulting in the reduced ΔR_1 . In this case, IR radiation that should be reflected is diffracted. The reflection ratio is affected by the IR frequency. The $IR_{in,af}$ frequency (red line) in case 4 of Fig.3 is lower than the IR_{in} frequency, leading to the increase in IR_{tr} due to reduced ΔR_1 and reflection ratio λ'_{ir} , which is defined by the situation that ions 1 are placed in the space where IR_{ori} exists, as shown in Eq. (3). When such as large IR_{st} in Fig. 2, ions 1 in layer m_1 are exposed to the output changing from $IR_{in,m1} = \theta_{m1}/\Delta R_{1,m1}$ to large $IR_{in,af,m1} = \theta_{m1}/\Delta R_{2,m1}$ forcibly caused by $\lambda_{ir,m1} = (\Delta R_{2,m1} - \Delta R_{1,m1})/\Delta R_{2,m1} < 0$ in $\Delta R_{1,m1} > \Delta R_{2,m1}$, $\Delta R_{1,m1}$ and $\lambda'_{ir,m1}$ are reduced by low frequency $IR_{in,af,m1-1} = \theta_{m1-1}/\Delta R_{2,m1-1} = IR_{in,m1-1}(1 - \lambda_{ir,m1-1})$ as level returns to standard line. Here, $\lambda_{ir,m1-1} = (\Delta R_{2,m1-1} - \Delta R_{1,m1-1})/\Delta R_{2,m1-1} < 0$ using $\Delta R_{2,m1-1}$ from $IR_{st2,m1} - \Delta IR_{st2,m1} \approx IR_{st2,m1-1}$ and $IR_{in,af,m1} = IR_{st2,m1}$. At $\Delta R_{in} = \Delta R_1$ and $\Delta R_{tr} = \Delta R_2$, $\lambda_{ir} = (\Delta R_2 - \Delta R_1)/\Delta R_2$ is derived from Eq. (5). Once $\Delta R_1 = \Delta R_2$ due to $IR_{in,af}$ with low frequency, $\theta/\Delta R_{in,af} = IR_{tr}$ (green broken line) changes from $IR_{in,af}$ with $\lambda_{ir} = 0$. After $\lambda_{ir,m1} = 0$, $\Delta R_{1,m1}$ reduced by $\lambda_{ir,m1-1} < 0$ begins. In this way, τ expands sequentially toward layer $n' = 1$. Above, it is assumed that forced IR flow ignoring λ'_{ir} exists at the instant. In transient phenomena, events at $t = 0+$ are recognized. There is a time delay between the generations of λ_{ir} and change in ΔR_1 . Therefore, ΔR_1 can change by $IR_{in,af}$ frequency. From $\Delta R_1 = \psi_{c0-air1}\Delta V_1$, ΔR_1 depends on divided volume $\Delta V_1 = \Delta V_2 c_2\rho_2/c_1\rho_1$. Therefore, with the low frequency of $IR_{in,af}$, $\psi_{c0-air1}$ from λ_{ir} on ions 1 under $\Delta R_1 > \Delta R_2$ reduces after coupling. Moreover, when layers 1 and 2 exhibit $\psi_{c0-air0} \propto c\rho$, ΔV_1 is small with $c_1\rho_1 > c_2\rho_2$. Thus, large IR_{st} flows.

$$\begin{aligned} IR_{in,af} &= KA_{IRin,af}^2 \Delta v_{Tin,af} = IR_{in} - IR_{ref} \\ &= K(1 - \lambda_{ir,A})^2 A_{IRin}^2 (1 + \lambda_{ir,vT}) \Delta v_{Tin} \\ &= KA_{IRin}^2 (1 - \lambda_{ir}) \Delta v_{Tin} \quad (K = 12\pi^2 K_{\epsilon\mu} S^2 v_{eigen-f}) \\ \therefore IR_{ref} &= KA_{IRref}^2 \Delta v_{Tref} = KA_{IRin}^2 \lambda_{ir} \Delta v_{Tin} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ir} &= 1 - \left(\frac{1 + \lambda_{ir,vT}}{1 - \lambda_{ir,A}} \right)^2, \therefore \lambda_{ir,vT} = \lambda_{ir,A} \approx \lambda_{ir} \\ &\left(\lambda_{ir,vT} = \frac{\Delta v_{Tin} - \Delta v_{Ttr}}{\Delta v_{Tin}} = \frac{\Delta v_{Tref}}{\Delta v_{Tin}}, |\lambda_{ir,A}|, |\lambda_{ir,vT}| \ll 1 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\lambda_{ir,A} = \frac{A_{IRtr} - A_{IRin}}{A_{IRin}} = \frac{A_{IRref}}{A_{IRin}}, \lambda_{ir,A} = \lambda_{ir,vT} \quad (3)$$

1.4 Calculation of λ_{ir} λ_{ir} varies linearly with $\lambda_{ir,A}$ and $\lambda_{ir,vT}$, as shown in Eq. (2) and Fig. 4. Under the conditions $|\lambda_{ir,A}|, |\lambda_{ir,vT}| \ll 1$ and $\lambda_{ir,A} = \lambda_{ir,vT}$, λ_{ir} is

a) Correspondence to: Toshiharu Tada, E-mail: tadafamily@dream.com
*Ikoma-gun, Nara Prefecture, Japan (retired from the Power Engineering R&D Center, The Kansai Electric Power Co., Inc.).

approximately equal to $\lambda_{ir,vT}$. Hence, the same value of λ_{ir} is derived for the IR energy, frequency, and amplitude. A_{IRin} and Δv_{Tin} of IR_{in} are affected by reflection and are approximated by adding IR_{ref} comprising $A_{IRref} = A_{IRin}$ and $\Delta v_{Tref} = \lambda_{ir}\Delta v_{Tin}$ to result from $\Delta v_{Tin,af}$ readily influenced by reflection in the approximation of $IR_{in,af}$ in Eq. (1). In this approximation, $\Delta v_{Tin,af}$ excludes the large value of frequency $v_{eigen-f}$ of latent heat at 0 K, however; the overall $A_{IRin,af}$ is preserved, as discussed in Chapter 2⁽¹⁾. Thus, A_{IRref} is independent of $\lambda_{ir,A}$, and $A_{IRref} = A_{IRin} = A_{IRtr}$ is used. The IR_{ref} formulas would also be applicable to general electromagnetic waves.

1.5 Explanation using graphs For the single layer of ΔR_1 and models of $\Delta R_1 < \Delta R_2$ and $\Delta R_1 > \Delta R_2$, IR_{tr} , IR_{ref} , and $IR_{in,af}$ are examined assuming steady IR_{in} . For case 1, $\Delta R_1 = \Delta R_2$ after IR reflection under $\Delta R_1 < \Delta R_2$ ⁽¹⁾. When $\Delta R_1 = 0.1$ and $\Delta R_2 = 0.15$ were set, $\lambda_{ir} = 0.3$, and the graphs were shown in Fig. 3 –(a). IR_{ref} is nearly identical to the reflection waves reported for a fixed end of boundary, owing to the effect of amplitude reflection. As IR_{ref} that is in inverse phase with IR_{in} hinders the flow of IR_{in} , the transparent thermal energy IR_{tr} is small. For case 2, a single object of small ΔR_1 , $\Delta R_1 = R_0$ has reflection ratio $\lambda'_{ir} = 0.1$ for ion 1. The IR curves are shown in Fig. 3 –(b). Compared with case 1, the IR_{tr} frequency (green line) reduces after coupling with layer 2. Hence, $\psi_{c0-air1}$ increases with coupling. For case 3, a single object of large ΔR_1 is considered, obtaining the results for $\lambda'_{ir} = 0.5$ shown in Fig. 3 –(c). Because IR_{tr} frequency in case 3 is lower than that in case 1, IR_{ref} is generated with negative frequency on the interface for the model, indicating reduced $\psi_{c0-air1}$. For case 4, When $\lambda_{ir} = -0.3$ from $\Delta R_1 = 0.2$ and $\Delta R_2 = 0.15$ under $\Delta R_1 > \Delta R_2$, IR_{tr} frequency is higher than IR_{in} frequency, as shown in Fig. 3 –(d). The frequency and amplitude of $IR_{in,af}$ are lower and higher than those of IR_{in} , respectively. IR_{ref} is in inverse phase relative to that of case 1 owing to the opposite effect of A_{IRref} and Δv_{Tref} on IR_{in} . IR_{ref} at $\lambda_{ir} < 0$ also comprises $A_{IRref} = A_{IRin}$ and $\Delta v_{Tref} = \lambda_{ir}\Delta v_{Tin}$. As IR_{in} and IR_{ref} are in phase, considerably larger IR_{tr} is radiated from layer 2. Therefore, IR_{in} , which should be restricted by ΔR_1 , increases and becomes $IR_{in,af}$ with decreasing $\Delta R_1 = \Delta R_2$.

2. Fractional formula of IR stream

2.1 Fractional expression

ΔR_1 consists of inherent value R_0 of thermal resistance measured on the standard line and change in thermal resistance, ΔR , affected by the IR reflection on the interface, as shown in Eq. (4). The IR stream expression obtained by subtracting IR_{ref} from IR_{in} is expressed as a fraction, using the thermal resistance impacted by IR reflection, using approximation $1/(1+x) \approx 1-x$, $1 \gg |x|$, as shown in Eq. (5). When $\Delta v_{T,in} = 42.6$ THz at 0°C (273 K) and $\Delta v_{T,in,af} = \Delta v_{T,in} + \Delta v_{T,re} = 44.4$ THz at 20°C (293 K) are derived from $y = 0.0883x + 18.541$ in Fig. 1 of the previous study⁽¹⁾, $\lambda_{ir} = 0.04$. Thus, the approximation is appropriate.

$$\Delta R_1 = R_0 + \Delta R \quad (4)$$

$$\theta/\Delta R_1 = IR_{st1} = \theta/\Delta R_2 = IR_{st2} = IR_{tr} = IR_{in,af}$$

$$= IR_{in} - IR_{ref} = \frac{\theta}{R_0(1+\Delta R/R_0)} \approx \frac{\theta}{R_0} \left(1 - \frac{\Delta R}{R_0}\right)$$

$$\lambda_{ir} = \frac{IR_{in} - IR_{tr}}{IR_{in}} = \frac{\Delta R_{tr} - \Delta R_{in}}{\Delta R_{tr}} = 1 - \frac{1}{1 + \Delta R/R_0} \approx \frac{\Delta R}{R_0}$$

$$(\theta/R_0 = IR_{in}, IR_{ref} = IR_{in}\lambda_{ir}, |\lambda_{ir}| = |\Delta R|/R_0 \ll 1) \quad (5)$$

2.2 Increase in R with IR reflection The reflected IR frequency, Δv_{Tref} , increases with λ_{ir} , leading to large ΔR according to $\lambda_{ir} = \Delta v_{Tref}/\Delta v_{Tin} = \Delta R/R_0$. Hence, the increase in Δv_{Tref} corresponds to the increasing ΔR , indicating the increase in λ'_{ir} . In addition, λ'_{ir} equals reflection ratios λ_r and λ_c in Eq (39)⁽²⁾ when $\gamma_\lambda = \lambda_c/\lambda_r = 1$. Although, for example, the expressions of $\lambda'_{ir}IR_{oriunit}$, $\lambda'_{ir}W$, and λ_cW are suitable for the IR reflection energy, $\lambda'_{ir} = f(\lambda_r, \lambda_c)$ is not used because $\lambda'_{ir}W$ and λ_cW do not exist together unless $\lambda'_{ir} = \lambda_c$, where $IR_{oriunit} = IR_{radunit} + W$.

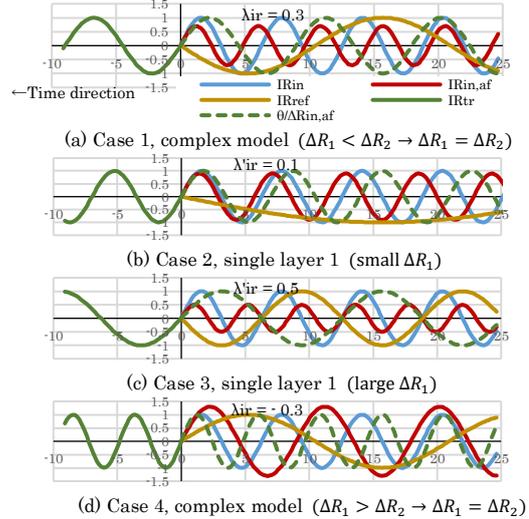


Fig. 3. Curves of IR_{tr} and $IR_{in,af}$ for different cases

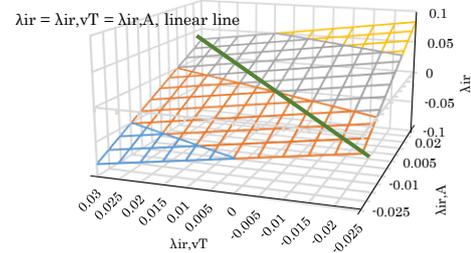


Fig. 4. Relationship with λ_{ir} , $\lambda_{ir,vT}$, and $\lambda_{ir,A}$

Here, T , θ , $\Delta\theta$: temperature, increase in T , θ per 1 unit (one divided layer); P : thermal source; R , ψ_{c0-air} : thermal resistance, R per unit volume; cp : volumetric specific heat; IR_{in} , IR_{tr} , IR_{ref} : IR energy of input, transparent, reflection; λ_{ir} , $\lambda_{ir,A}$, $\lambda_{ir,vT}$, λ'_{ir} : IR reflection ratios of energy, amplitude, and frequency on the interface, reflection ratio on ions 1; R_0 , $\psi_{c0-air0}$: inherent thermal resistance, ψ_{c0-air} of R_0 ; E_f , H_f : electric field, magnetic field; A_{IR} , Δv_T : amplitude and frequency of IR; $K_{\epsilon\mu}$, $v_{eigen-f}$: factors; IR_{ori} , IR_{rad} , $IR_{oriunit}$, $IR_{radunit}$, W , S , n' , m_1 , m_2 , N , t , τ : origin of IR radiated from ions, radiation energy, IR_{ori} and IR_{rad} per 1 unit, thermal current, area, number of divided layers, n' on the front of interface, total number of divisions, number of ions, time, time constant.

References

- (1) T. Tada, "Incorporation of radiant heat into the temperature equation and research on infrared generation mechanism –(3)–", in *IEEEJ Annual conference Tran. PE*, no. 48, Paper pp. 9-1-7– 9-1-20, (2025)
- (2) T. Tada, "Incorporation of radiant heat into the temperature equation and research on infrared generation mechanism", in *IEEEJ Annual conference Tran. PE*, no. 50, Paper pp. 10-3-9– 10-3-16, (2023)

逆バイアスショットキーバリアダイオードを用いた温度測定教材

豊嶋 奏多(兵庫教育大学(院), 広島商船高専)*, 小山 英樹 (兵庫教育大学)

Temperature Measurement Teaching Tool Using a Reverse-Biased Schottky Barrier Diode

Kanata Toyoshima (The Joint Graduate School (Ph.D. Program) in Science of School Education Hyogo University of Teacher Education, National Institute of Technology (KOSEN), Hiroshima College), Hideki Koyama (Hyogo University of Teacher Education)

1. まえがき

ショットキーバリアダイオード (SBD) の逆方向電流は高感度の温度センサ教材として利用可能であり, 温度センサの動作 (温度センサは温度変化によって電流や電圧, 抵抗が変化する) そのものの学習に用いることができる¹⁾。また, SBD の逆方向電流は指数関数的に増加するが, ツェナーダイオードを直列に接続し, その電圧降下を測定すると, 温度変化に対する応答を線形化できる²⁾。

これを用いて SBD の逆方向電流を測定に用いることができれば, SBD を用いて温度センサの基礎的な学習を行った後, SBD をそのまま用いて, 温度測定の実験が可能になる。さらに, 逆バイアスされた SBD 単体の温度に対する応答は指数関数的なものであるため, ツェナーダイオードを直列接続した場合の応答と比較させることで温度測定の仕組みの学習への利用可能性がある。

本研究では, 逆バイアスされた SBD とツェナーダイオードを用いた温度測定の原理を学習させる温度測定教材を作製し, その学習効果を評価することを目的としている。

2. 温度測定教材

作製した温度測定教材の外観を図1, 回路図を図2に示す。棒状温度計に絶縁テープで SBD を固定し, ニクロム線を巻き付け, 断熱材で覆ったものである。学習者はニクロム線で温度センサを加温しながら, 温度計で SBD の温度を確認し, テスタを用いて温度変化に対する電圧の変化を記録することができる。

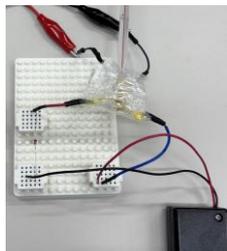


図1 温度測定教材

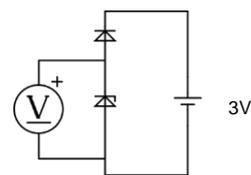


図2 測定回路

また, 実際に, SBD (11EQS03L), ツェナーダイオード (GDZJ4.7C), 電源 (単三電池2本 (3 V)), デジタルマルチメータ (Agilent U3606B) を用いて 25-34°C の範囲で測定を行った。結果を図3に示す。測定範囲において, 約 19mV/°C の線形性が認められた。

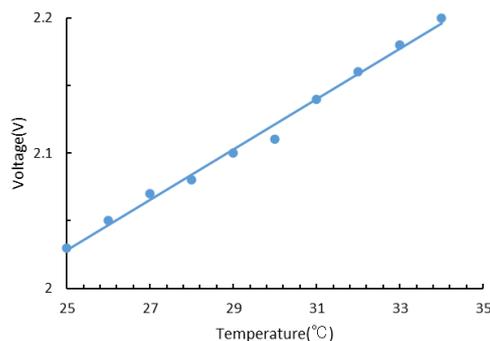


図3 実際の測定結果

3. まとめ

逆方向 SBD とツェナーダイオードを用いて温度測定の仕組みを教えるための教材として応用した。

作製した教材を用いて測定を行ったところ, 測定範囲において応答の線形性が認められた。

文献

- (1)豊嶋奏多・大谷真司・小山英樹：電気学会論文誌 A, 145, 3, 45～51 (2025)
- (2)豊嶋奏多・小山英樹：令 6 電気学会部大, 4-C-a1-2

COMPASS 5.0 蓄電池分野における 蓄電池利活用人材育成のための実験教材の開発

上町 俊幸*, 田中 文章, 山田 悟 (石川工業高等専門学校)

Development of Experimental Teaching Materials for Educating Battery Utilization Engineers in the COMPASS 5.0 Batteries Project
Toshiyuki Kanmachi, Fumiaki Tanaka, Satoru Yamada (National Institute of Technology, Ishikawa College)

1. まえがき

蓄電池は、カーボンニュートラル社会やデジタル社会を実現するための重要な技術とされている⁽¹⁾。国立高専機構では、Society 5.0 型未来技術人材育成事業を進めており、その中に一つとして蓄電池分野の人材育成を目的としたCOMPASS 5.0 蓄電池分野のプロジェクトに取り組んでいる。このプロジェクトでは、育成する蓄電池分野の人材を開発人材と利活用人材に分け、新居浜高専と石川高専を拠点校として、教材開発やカリキュラム開発を行っている。本稿では、利活用人材の育成に向け、石川高専で開発した実験教材について報告する。

2. 蓄電池利活用人材向け実験教材

蓄電池に電力を蓄えたり、蓄えた電力を利用したりするには、半導体電力変換器が必要である。この半導体電力変換器の必要性や、原理、特性を学習するため、三種類の実験教材を開発した。

<2・1>チョップ回路教材 図1は、各種チョップ回路の構成を示している。チョップ回路には、降圧チョップ、昇圧チョップ、昇降圧チョップがあるが、スイッチ S、インダクタ L、ダイオード D の配置を変えることで、それぞれ構成できる。これらのチョップ回路を手軽に構成し、原理や特性を学習するための実験教材を開発した。

図2は、開発したチョップ回路実験教材の外観である。スイッチ S やインダクタ L、ダイオード D、コンデンサ C の基板にはプラグが取り付けられており、これをアルミケースに取り付けられたターミナルに差し込むことで配線できるよう構成している。そのため、素子の配置が簡単に変更でき、各種チョップ回路の実験が手軽に実施できる。また、可変抵抗でデューティ比が変更できるスイッチング信号発生回路や、各素子の電流波形を観測するための電流セ

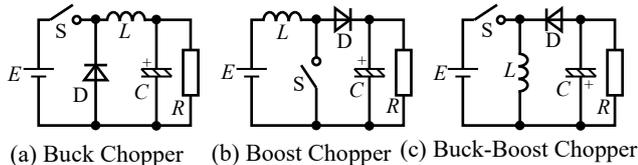


図1 チョップ回路の構成
Fig.1. Configuration of the Chopper Circuit

ンサがアルミケース内に設置されている。実験では、デューティ比と出力電圧の関係を調べたり、各素子を流れる電流波形を観測したりして、各種チョップ回路の特性や動作原理を学習する。

<2・2>昇圧回路教材1 変圧器を用いた昇圧回路の例として、イグナイタを用いた教材を開発した。図3は、昇圧回路教材1の外観である。電源としての乾電池とスイッチ、イグナイタおよび電極で構成されている。スイッチを押すと、直流12Vから約20kVの高電圧が作られ、電極間で放電の様子を観察することができる。この教材は、回路各部の波形観測が困難なことや、非常に高い電圧を扱うことから、実験では波形観測等はせず、放電現象により高電圧が作られていることを体験してもらう。

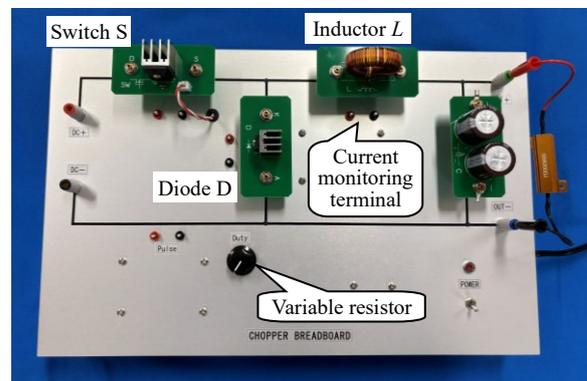


図2 チョップ回路教材の外観
Fig.1. Appearance of the Chopper Circuit Teaching Material

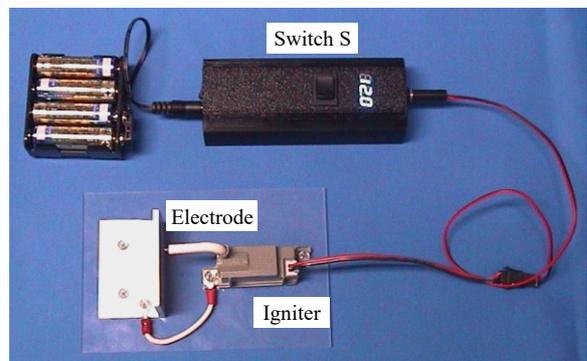


図3 昇圧回路教材1の外観
Fig.3. Appearance of the boost circuit teaching material 1

<2・3>昇圧回路教材2 直流高電圧を発生させる回路と高電圧の計測法の学習を目的として、コッククロフト・ウォルトン回路(CW回路)を用いた昇圧回路教材2を開発した。図4は、開発した昇圧回路教材2の外観である。電源には1.2Vの蓄電池1本を用いており、昇圧チョップ回路により84Vのパルス電圧を発生させ、これをCW回路に入力する。CW回路はダイオードとコンデンサを多段に組み合わせた昇圧回路で、通常は交流電源を用いるが、本教材のチョップ回路の出力電圧が正極性のみであるため、昇圧に寄与する段数は半分の13段である。CW回路の出力電圧は、無負荷のとき約1.3kVとなる。

この回路は、プリント基板上に構成され、各部の波形観測が容易であるため、実験では波形観測をしながら昇圧チョップやCW回路の動作原理を学習する。また、高電圧の計測法についても習得することができる。さらに、放電やプラズマの基礎を学ぶための教材としても利用できると考えている。

本教材は、安価で入手が容易な素子を用いることで、製造コストを抑えている。また、電源を乾電池とし、コンデンサも小容量のものを用いるなど、大事故につながりにくいよう、安全面に配慮している。

3. アンケート調査

開発したチョップ回路教材について、アンケート調査を行った。ここでは、蓄電池の用途や電力変換器の必要性、チョップ回路の動作原理を説明したあと、各種チョップ回路を構成し、デューティ比により出力電圧が変化していく様子を見てもらった。対象は、現段階で実験を体験している石川高専 電気工学科3年生の25名である。

図5に、アンケート調査の結果を示す。Q1の「蓄電池を活用するために、電力変換(パワーエレクトロニクス)の技術が必要であることは理解できましたか?」という問いに対して、96%の学生が「十分に理解できた」、「おおむね理解できた」と回答している。また、Q2の「電力変換(パワーエレクトロニクス)技術について、関心を持ちましたか?」という問いに対して、全員が「関心を持った」、「少し関心を持った」と回答した。これらの結果から、開発し

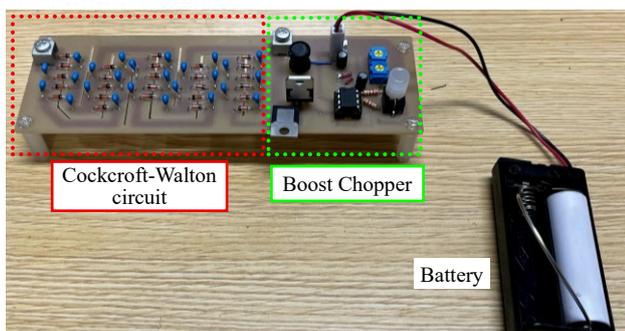
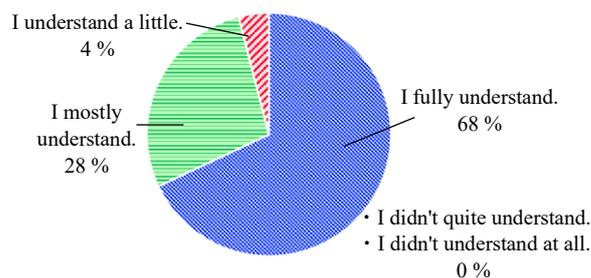
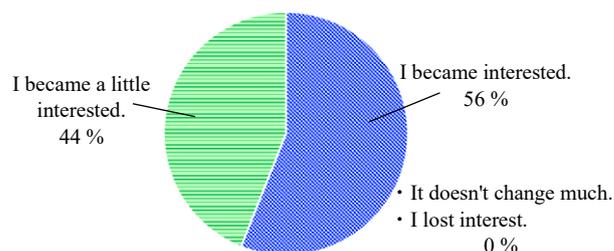


図4 昇圧回路教材2の外観
Fig.4. Appearance of the boost circuit teaching material 2

Q1 : 「Do you understand that power conversion (power electronics) technology is necessary to utilize batteries?」



Q2 : 「Have you developed an interest in power electronics technology?」



Q3 : 「Do you think conducting experiments will deepen your understanding of chopper circuits?」

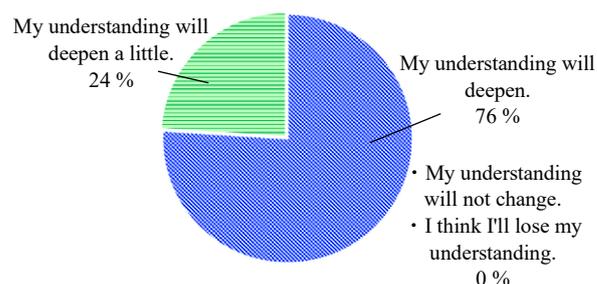


図5 アンケート調査の結果
Fig.5. Results of the questionnaire survey

た教材が、電力変換技術の必要性を理解し、その分野に興味を持ってもらうことに役立つものと考えられる。また、今回は回路の動作を見るだけであったが、Q3の「実験をすることで、チョップ回路について理解が深まると思いますか?」という問いに対して、全員が「理解が深まる」、「少し理解が深まる」と回答しており、動作原理を理解する上でも、開発した実験装置が役立つものと考えられる。

4. まとめ

COMPASS 5.0 蓄電池分野の事業において、蓄電池の利活用人材育成に向けた三つの実験教材を開発した。アンケート調査からも、開発した教材は、蓄電池分野における電力変換技術の必要性を理解し、その分野に興味・関心を持ってもらうことに役立つものと考えられる。今後は、実験の試行を重ねて実験内容を精査したあと、全国の高専に展開する予定である。

文 献

(1)小澤暁人：環境情報科学, 53-2, 4~8 (2024)

三相インバータを用いたモジュール実験の提案

研究 永井 楓斗* (芝浦工業大学)

Proposal for a Module Experiment Using a Three-Phase Inverter

Nagai Futo (Shibaura Institute of Technology)

1. 背景・目的

近年、世界的に脱炭素社会の実現が急務となっており日本政府も2050年カーボンニュートラルの実現に取り組んでいる。それに伴い電力系統がより複雑になり電力技術関係者の需要が増加している。電気・電力業界では少子高齢化による技術者不足が懸念されており、高度な専門知識と実践的技術を備えた人材の育成が重要な課題となっている。

こうした課題の解決のため電力変換や制御の基礎から応用までを段階的に学べる教育体系を整えることは、将来の電気系技術者を育成するうえで大きな意義を持つ。特に三相インバータは産業機器、再生可能エネルギー設備、パワーエレクトロニクス分野など幅広く用いられておりその動作原理や制御手法を理解することは電気工学を学ぶ学生にとって欠かせない学習内容である。

本研究では、三相インバータを実験モジュール化し直流から三相交流を生成するプロセスや基本的な制御手法を実践的に学習できる教育プログラムを構築する。

2. モジュール型電力系統実習装置^[1]

モジュール型電力系統実習装置は既存の電力系統実習装置とは異なり、コンパクトな箱型である。既存の市販品である大型の実習装置は高価であり、また改造が困難であるため様々な実験に対応する柔軟性に欠けている。これらの問題を踏まえ作成された実習装置が図1に示すようなモジュール型電力系統実習装置である。

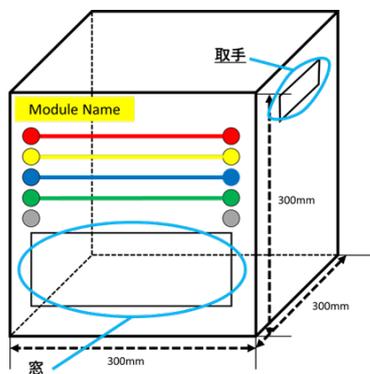


図1. モジュール型電力系統実習装置の規格

Fig. 1 Specifications of the Modular Power System Training Unit

3. 学習用教材としてのインバータの提案

3.1 三相インバータを用いる目的

パワーエレクトロニクスにおいてインバータは基本的かつ重要な要素である。そのため実験を通して動作原理や特性を確認することで、学習時の内容の定着と理解の深化を目的としている。特に三相インバータは単相インバータと比べ構成が複雑であるものの構造や制御の基本原理は明瞭であるためより高い学習効率が見込まれる。また、実験においてオシロスコープ等を使用し電圧・電流の測定や波形解析を行うことで計測スキルを実践的に習得できる点も利点として挙げられる。

以上の理由から、大学学部レベルの学生実験での使用を目的とした学習用教材として三相インバータを用いたモジュール実験を導入することを提案する。

3.2 搭載する機能

三相インバータモジュールは学生実験での使用を想定しているためインバータに対する理解促進は必須である。そのためPWM、デッドタイム生成回路を取り付け入力する周波数や波形を変化させることでさまざまな実験や考察が行えるように設計した。PWM生成回路を図2に示す。

デッドタイムはショートスルーを確実に防ぐために余裕をもって設計を行った。また、ファンクションジェネレータの仕様上3相目を反転増幅回路で生成している。

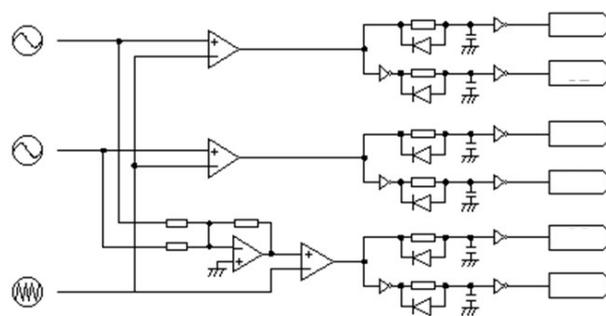


図2. PWM生成回路

Fig. 2 PWM Signal Generation Circuit

3.3 PCB の設計

DesignSparkPCB を用いて基板の設計を行った。左の回路は図2のPWM生成回路に加えてオシロスコープでの計測用のピンに信号を送り、右の回路はLEDスイッチング回路でありインバータに送る信号通りに光るように設計したものになっている。左右の基板はモジュール内で設置場所が異なるため基板を切断し、左側をインバータにつなげるためモジュール下部に右側はスイッチング確認用に上部に分けて使用する。設計したPCBを図3に示す。

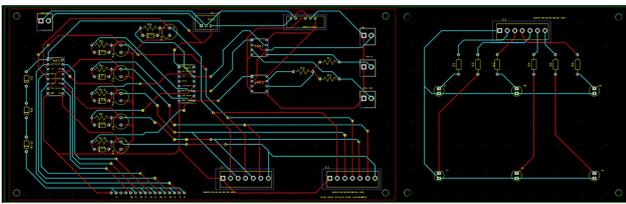


図3. PCB (左側: Main回路 右側: LEDスイッチング回路)

Fig. 3 PCB Layout (Left: Main Circuit, Right: LED Switching Circuit)

3.4 パネルの設計

正面パネルは Auto CAD で図面を作成し Adobe illustrator でデザインを行った。パネル上部は三相インバータの基本的な回路を示しその横にLEDスイッチングを視認できるようにすることで低周波時に空いた穴から動作の確認が可能である。パネル下部は図2に示したPWM生成回路を載せ実験中にどのような回路を動作させているかを理解しやすくした。また、ファンクションジェネレータやオシロスコープといった各種計器との接続や計測が理解しやすいデザインとなっている。正面パネルイラストを図4に示す。ポリカーボネートパネルを使用し、外部加工サービスを利用して作成を行った。

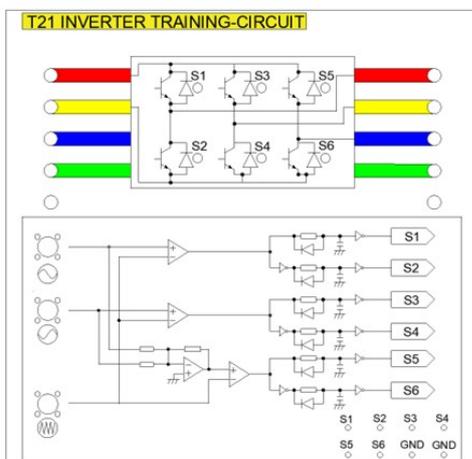


図4. 正面パネルイラスト

Fig. 4 Illustration of the Front Panel

4. 実験・評価方法

4.1 実験方法

本モジュールと直流電源機、三相モータを用いた直流から三相交流への変換実験を主に行う。併せて入力する電圧や周波数の条件により変化するLEDのスイッチングやモータの動作を体感することで動作に理解を深めさせる。また、回路上では理解が難しくなってしまう反転増幅回路やデッドタイム生成回路についてもブレッドボード上での動作確認を行う。このような実験内容は、段階的な理解を促す教育プログラム構成が有効であるとの報告^[2]を参考に設計した。

実験は事前・実験中・事後の3つに分けて以下のように教育プログラムを構築している。

事前ではPWM信号の生成方法やPSIMを用いた動作原理を事前レポートとしてまとめる。

実験中では実施する内容の理解は指示役をつけて安全な実験を実施することで各種計器の使用法を学ばせる。

事後では実験を通して取得した各種電圧・電流波形から読み取れる考察・事前シミュレーションとの誤差・単相インバータとの比較等を事後レポートとしてまとめる。

4.2 評価方法

本研究の評価はモジュール実験の学習効果の有用性を知るために事前・事後の2回アンケートを実施する。アンケートはいくつかの設問とそれらに対する5段階評価で構成し、得られた結果を基に本実験の有用性を検討する。

5. 今後の展望

本研究では三相インバータを学習用教材として用いることを目的とし教育実験に適したモジュールの設計及び実験内容の検討を行った。

今後は、アンケート結果を基に学習効果や操作性の観点から本実験の有効性を評価し実験の改善、モジュールの改良を行う予定である。

文献

[1]一松洋右, 藤田吾郎, 坂井直樹, 三岡功治: モジュール型電力系統実習装置の提案, 日本工学教育会, 工学教育, vol. 61, no. 2, 2013.

[2]水口拓弥, 松本和幸, 堀内貴之: ものづくりのための企業内教育(職場内教育)ーパワーエレクトロニクス教育の実施ー, 電気学会教育フロンティア講演論文集, FIE-13-038, 2013

クドバスチャートとリンクしたパワエレ用初級技術者教材の開発 — 降圧チョップ主回路編 —

門 晃司*, 五十嵐 智彦, 吉水 健剛 (職業能力開発総合大学校)

Development of The Power Electronics Training Tool Linked to CUBAS-Charts for Novice Engineers
About A Buck Converter

Koji Kado, Tomohiko Igarashi, Kengo Yoshimizu (The Polytechnic University of Japan)

1. まえがき

パワーエレクトロニクス (以下、パワエレという) は様々な技術領域の集合技術であることから、企業におけるパワエレの教育訓練の難しさについて問題意識が共有されている。2000年以降、電気学会でもパワエレ教育に関する調査協同研究委員会が設置され、現在に至るまで継続的に活動が行われている⁽¹⁾。

筆者らは、職業訓練で広く用いられている教育訓練カリキュラム開発手法である「CUBAS (クドバス: A Method of CUrriculum Developing Based on Ability Structure)」⁽²⁾を活用して、企業の初級技術者が共通に身につける必要があると思われるパワエレ回路設計技術の基本技術要素について整理、体系化することを試み、実際に降圧チョップ回路における技術要素の体系化を行った⁽³⁾。本稿では、文献(3)で整理した降圧チョップの、特に図1に示す主回路設計技術要素の部分のCUBASチャートとリンクし、1.5万円程度で作製可能な教育訓練用教材を開発したので報告する。

2. 提案教材

本稿で提案する教材を図2に示す。当該教材は、主回路および制御回路の2つの基板から構成されている。主回路基板は、もっとも一般的な降圧チョップとなっており、MOSFET、インダクタ、ダイオード、コンデンサ、負荷抵抗およびゲート駆動回路から構成されている。それぞれの部品は、端子台やソケットを介して接続するため、回路素子を

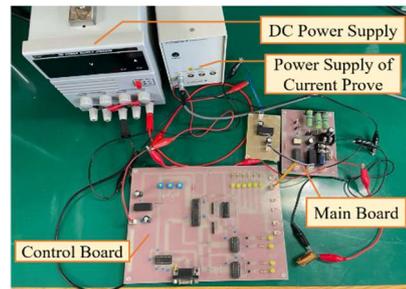


図2 開発した教材
Fig.2. Overview of the developed training tool

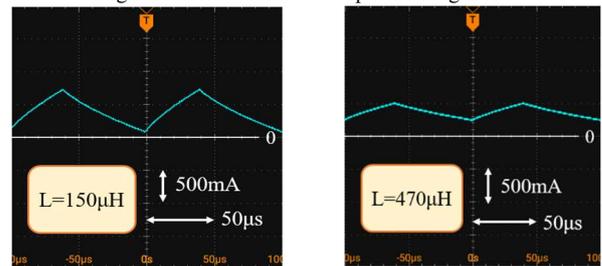


図3 インダクタを変更した場合の電流波形の変化
Fig.3. Compare of the current waveforms by changing an inductor

容易に交換できる。一例として、図3にインダクタを変更した場合の電流波形を示す。

制御回路基板は、dsPIC マイコン(dsPIC30F4012)をはじめとする信号生成部と、RS-232C インターフェース回路から構成されている。マイコンのプログラム開発にはMathWorks社の「Simulink」向けアドオンである「MPLAB Device Blocks for Simulink」を用い、C言語に精通していなくてもコード開発が可能となるようにした。

3. まとめ

本稿では、降圧チョップ主回路の設計技術要素が学習できる教材を、整理したクドバスチャートをもとに開発した。今後は主回路以外の部分の教材について提案していく。

文献

- (1)南政孝: 電気学会産業応用部門大会, 1-S5-1 (2024)
- (2)森和夫: 企業と人材, vol. 52, No. 1077, pp.33-39 (2019)
- (3)増尾終人・五十嵐智彦: 令7 電気学会全大, 1-005

1-1	1-1-1	A	1-1-2	A	1-1-3	A
降圧チョップ回路の動作原理が分かる	回路素子の役割・性質が分かる		回路の構成が分かる		ON/OFF時の電流経路が分かる	
1-2	1-2-1	A	1-2-2	A	1-2-3	A
回路の仕様在设计できる	デューティ比の計算ができる		各部の電流が計算できる		使用素子の定格や特性を調べられる	リップル率の計算ができる
1-3	1-3-1	A	1-3-2	A	1-3-3	A
半導体素子を選定できる	パワー半導体の種類とその特徴が分かる		パワー半導体の動作原理が分かる		寄生容量が分かる	ダイオードの特性が分かる
	1-3-5	B	1-3-6	B		
1-4	1-4-1	A	1-4-2	B	1-4-3	B
コイルの種類を選定できる	適正な許容電力の部品が選定できる		コア形状による特徴が分かる		コア材料による特徴が分かる	
1-5	1-5-1	A	1-5-2	A	1-5-3	B
負荷抵抗の種類・容量を選定できる	電力が計算できる		適正な許容電力の部品が選定できる		抵抗の種類とその特徴を知っている	抵抗温度特性を知っている

図1 降圧チョップ主回路の設計技術要素
Fig.1. The CUBAS-chart of buck converter design elements

サンドボックス型デジタルゲームを活用した 再生可能エネルギー教材の製作と有用性の検討

荻津 桜子*, 山本 敏和, 橋本 慎也 (福島工業高等専門学校)

Development and Evaluation of a Renewable Energy Educational Material Utilizing Sandbox-style Digital Games
Sakurako Ogitsu, Toshikazu Yamamoto, Shinya Hashimoto (National Institute of Technology, Fukushima College)

1. はじめに

<1・1>背景 気候変動対策および持続可能な社会の実現に向け、カーボンニュートラル達成を目指した取り組みが進められている。そのため、将来を担う子どもたちが再生可能エネルギー（以下、再エネ）や環境問題に関心を持ち、理解を深めるためのエネルギー教育は重要である。しかし、環境省が令和2年度に実施した全国の教職員等教育関係者1,000人対象のアンケート調査によると、「適切な教材やプログラム等の準備ができない」(27.9%)、「教え方や取組方法が分からない」(13.9%)、「専門的な内容を相談できる場所がない」(13.2%)といった課題があげられた⁽¹⁾。

<1・2>先行研究 これまで本研究グループでは、再エネをテーマとした体験型教材を製作し、小学生を対象とした出前授業で活用してきた。低学年向けには遊びを通して学べる教材⁽²⁾、中学年向けには学習アプリ、高学年向けにはレゴブロックによるソーラーカー製作・走行体験や廻り水車の製作・実験⁽³⁾などの体験学習を出前授業で実践してきた。これらの取り組みでは、アンケート結果から関心度や理解度の向上が確認され、体験型教材の有効性が示されている。

2. 目的

本研究では、これまでの出前授業の取り組みを踏まえ、デジタル環境を活用した再エネ教材の製作を目的とする。具体的には、Minecraftの拡張機能を活用し、仮想空間上で発電の仕組みや特徴を理解できる教材を製作する。また、体験学習を通して、教材の操作性や学習への影響を考察し、エネルギー教育における有用性について検討する。

3. 教材の製作

<3・1>MinecraftとMODの概要 Minecraftは、3Dの立方体ブロックで構成された仮想空間内で自由に活動できるサンドボックス型のデジタルゲームである。また、Minecraftには、プレイヤーがゲームの仕様を追加・変更するためのMOD(Modification)と呼ばれる拡張機能がある。本研究では、この拡張機能を用いて再エネ教材を製作した。

<3・2>製作したMOD 風力発電、水力発電、太陽光発電を模した発電所ブロックを追加するMODを製作した。各発電所ブロックは、設置環境や条件に応じて発電量が変

化する仕組みがあり、再エネが自然条件に左右される特徴を表現した。発電量は、発電所ブロックから、レッドストーン信号として出力される。ここで、レッドストーン信号とは、回路の動作や出力の有無を表現できる仕組みであり、本教材では発電量の変化を視覚的に示す手段として用いた。具体的には、風力発電では設置高度、水力発電では水との接触、太陽光発電では時間や天候といった条件に応じて信号の大きさが変化するように設定した。

4. 教材の活用

本研究で製作した教材を用いて、小中学生に対して体験学習を実施した。参加者はMinecraft上で発電所ブロックをクラフト・設置し、発電条件の違いによる信号の変化を観察していた。多くの参加者が発電所ブロックの設置条件を変え、信号の変化を確認しようとする様子が観察された。特に中学生は、複数の発電方法を比較しながら、発電量の違いに注目していた。一方で、小学生は、発電条件を変えることで結果が変化する点に興味を示していた。これらより、本教材は、再エネの特性を体験的に理解するきっかけとなり得ると考えられる。

5. まとめと今後の展望

本研究では、Minecraftの拡張機能を用いて、再エネをテーマとした再エネ教材を製作した。発電条件に応じて出力が変化する発電所ブロックを実装し、レッドストーン信号による可視化を通して、再エネの特徴や不安定さを直感的に理解できる教材とした。また、体験学習では、小中学生が条件を変えながら試行錯誤する様子が観察された。

今後は、発電と環境の関係についてより深い理解を促す教材へ発展させたい。

文 献

- (1) 環境省・総合環境政策 https://www.env.go.jp/policy/post_154.html
- (2) 橋本慎也ら：コロナ禍における小学生向け出前授業の紹介Ⅰ～小学校低学年向けエネルギー教材の紹介～、令和4年電気学会全国大会講演論文集、1-002(2022)
- (3) 山本敏和ら：コロナ禍における小学生向け出前授業の紹介Ⅱ～「廻り水車」実験キットの紹介～、令和4年電気学会全国大会講演論文集、1-003(2022)
- (4) Minecraft <https://www.minecraft.net/ja-jp>

昇降圧コンバータの設計・製作および教育教材への応用

椎 萌乃*, 小田 愛花, 藤田 吾郎 (芝浦工業大学)

Design and Fabrication of Buck-Boost Converters and Application in Educational Materials

Moeno Shii*, Aika Oda, Goro Fujita (Shibaura Institute of Technology)

1. 背景・目的⁽¹⁾

日本政府は2050年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする「カーボンニュートラル」の達成を目指しており、その実現に向けて再生可能エネルギーの活用が重要視されている。特に、近年は自然災害が増えており、太陽光発電と蓄電池を組み合わせたシステムが、停電時の非常用電源として期待されている。また、日本では少子高齢化が進んでおり、将来の電力供給を支える電力技術者の育成が、高等専門学校や大学などの教育機関に求められている。さらに、実際の装置を用いた体験的な学習⁽²⁾は、電気設備の仕組みを理解するために有効である。本研究の目的は、このような背景を踏まえて、大学で太陽光発電システムについて学ぶことができる教育環境を整えることである。特に、インバータにつながる前段の電力変換回路に着目し、パワーコンディショナ (Power Conditioning System: PCS) に接続される DC-DC コンバータとして、SEPIC コンバータと ZETA コンバータの設計・製作を行った。

2. SEPIC コンバータと ZETA コンバータ⁽³⁾

今回、昇降圧コンバータとして ZETA コンバータと SEPIC コンバータの 2 種類のコンバータを製作した。一般的に用いられる昇圧チョップと降圧チョップを組み合わせたコンバータに比べ、出力電圧のリプルが小さいことや、入力と出力の極性が一致しているなどの特徴を持っている。本回路が汎用性、効率性に優れ、また ZETA コンバータ、SEPIC コンバータについても回路を通して学ぶことができると考え採用した。

実際に製作した回路を図 1、図 2 に示す。この回路図において、左側を入力で右側を出力としている。

3. 昇降圧試験

3.1 試作回路試験

図 3、図 4 に SEPIC コンバータと ZETA コンバータの試作回路を示す。これらの回路に直流安定化電源を入力として昇降圧回路につなぎ、ファンクションジェネレータで 20 kHz、 $V_{Low} = 0V$ 、 $V_{High} = 0V$ の PWM 波形を出力し、出力側に電子負荷装置をつなぎ、100Ω の負荷を接続した。

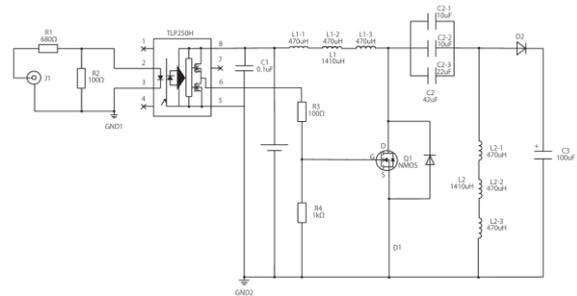


図 1 SEPIC コンバータ

Fig.1. SEPIC Converter

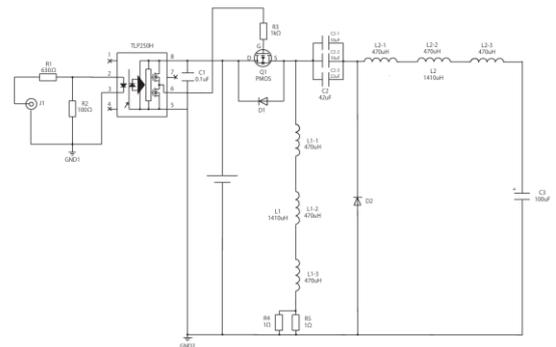


図 2 ZETA コンバータ

Fig.2. ZETA Converter

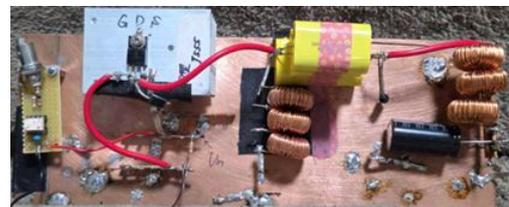


図 3 SEPIC コンバータの試作回路

Fig.3. SEPIC Converter Prototype Circuit

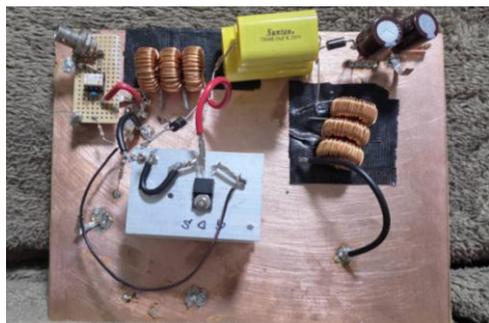


図4 ZETA コンバータの試作回路

Fig.4. ZETA Converter Prototype Circuit

3.2 出力電圧

図5にデューティ比における出力電圧の変化を示す。ZETA、SEPICともにデューティ比によって出力電圧がコントロール出来ていることを確認できた。

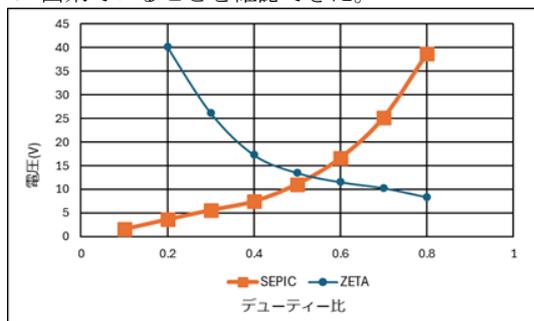


図5 デューティ比による出力電圧変化

Fig.5. Output Voltage Change Due to Duty Ratio

4. 基板設計⁽⁴⁾

基板の設計にはKiCadを使用した。特定の会社が販売しているソフトではなく、フランスの研究者 Jean-Pierre Charras氏によって開発され、現在は世界中の開発者コミュニティによって維持・発展しているオープンソースの電子設計自動化(EDA)ソフトウェアである。完成したデータは株式会社ユニクラフトに発注をした。

図6、図7に発注した2つの基板設計図を示す。この基板設計の特徴は、基板の構造が見えやすい配置にしていることである。BNC端子やフォトカプラの動作回路を左側の一箇所にまとめ、ターミナル端子をできる限り一直線上に配置した。よって、ZETAコンバータ、SEPICコンバータそれぞれ回路構成が見えやすいようになっている。また配線は大電流(最大3A)、高周波(20kHz)に対応するため、配線幅を大きく取り、折れ曲がりが生じないように配慮して設計した。

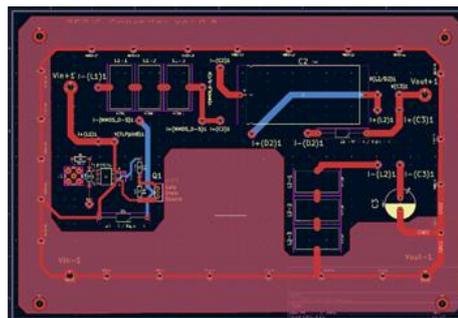


図6 SEPIC コンバータ基板設計図

Fig.6. SEPIC Converter Board Design Diagram

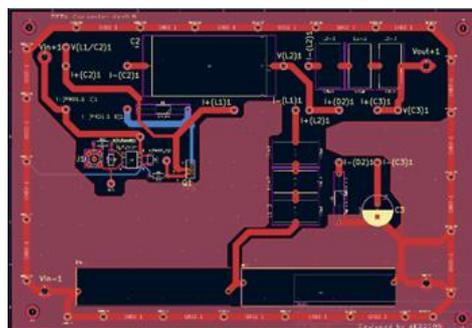


図7 ZETA コンバータ基板設計図

Fig.7. ZETA Converter Board Design Diagram

5. まとめ

本研究では、2種類の昇降圧コンバータの設計および動作検証に加え、完成した実験基板の評価と必要に応じた修正を行うことで、太陽光発電システムの学習環境整備に向けた基板を構築した。今後は、本基板を用いたさらなる性能評価と回路・部品構成の見直しを進めることで、より安定した動作と高い信頼性を実現するとともに、教育現場での使用結果や学生の理解度に基づくフィードバックを反映させて実験マニュアルを充実させ、より効果的な学習教材として発展させていくことを目指す。

文献

- (1) ISEP 環境エネルギー政策研究所「2023年の自然エネルギー電力の割合(暦年・速報)」
https://www.isep.or.jp/archives/library/14885?utm_source=chatgpt.com
- (2) 一松祥右, 藤田吾郎, 坂井直樹, 三岡功治「モジュール型電力系統実習装置の提案」, 工学教育, vol.62, No.2 (2013)
- (3) 西方正司, 高木亮, 高見弘, 鳥居肅, 栢川重男「基本からわかるパワーエレクトロニクス」
- (4) 降旗 翔太, 藤田吾郎「単相インバータを用いた教育プログラムの構築」, 令和7年電気学会全国大会, 1-006

磁束密度の空間分布測定と可視化への応用

神山 勝哉*, 松友 真哉(新居浜工業高等専門学校), 吉本 拓輝, 岡本 吉史(法政大学)

Measurement of Spatial Magnetic Flux Density and Its Application to Visualization
Katsuya Kamiyama, Shinya Matsutomo (National Institute of Technology, Niihama College),
Hiroki Yoshimoto, and Yoshifumi Okamoto (Hosei University)

1. まえがき

我々は、磁束密度測定基板を使用し、永久磁石周辺磁界の測定を行い可視化への応用を検討してきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、これまでの装置では磁界の測定点の座標を三次元的に取得することができなかったため二次元平面上での測定に限定されていた。そこで、我々は、VRヘッドセット環境を使用することで三次元空間中での磁束密度測定と、可視化を行う装置を開発した。本装置は、空間中の磁束密度を測定し、可視化できることから教育面での活用が見込まれる。

2. 磁束密度測定

本装置では VR コントローラを使用することで、磁束密度測定点の三次元座標を取得している。VR コントローラの三次元座標は VR 環境下で認識されているため、その情報をセンサーの三次元座標の取得に利用する。磁束密度の測定装置として、50 mm 四方に 10 mm 間隔で 36 個のホールセンサ (TMAG5273A2QDBVR) を配置した基板を使用した。また、Raspberry Pi pico を使ってホールセンサからのデータを I2C 通信で収集している。本基板を自作の治具を使用し、VR コントローラに固定している。測定装置の外観を図 1 に示す。

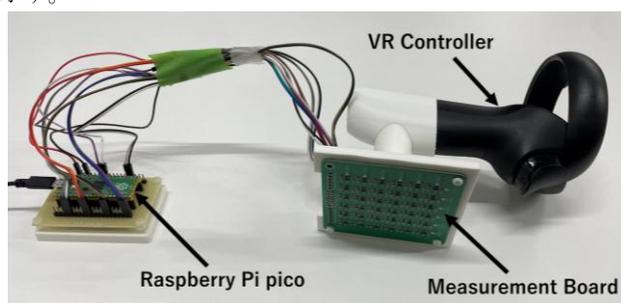


図 1 測定装置の外観
Fig.1. View of entire equipment.

測定者は HMD(Head Mounted Display)を装着して磁束密度を測定する。測定時は、HMD の外部カメラで現実世界の映像を捉え、その映像に CG を重ねて表示するビデオシースルー機能を使用することで、測定位置を視認しながら磁束密度を測定することができる。測定した結果は即座に可視化される。永久磁石の周辺磁界を測定した際の HMD 映像をキャプチャした画像と測定の様子を図 2 に示す。

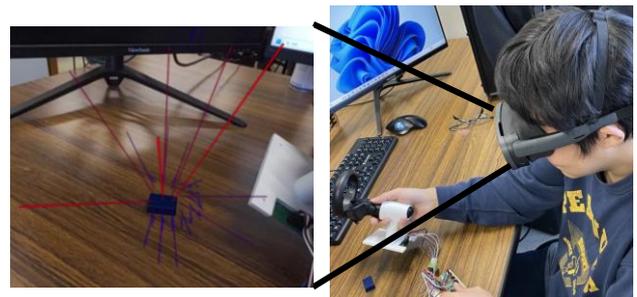


図 2 測定結果の可視化
Fig.2. Visualisation of measurement results.

3. 三次元グリッド点での磁束密度測定

前述の手法では、測定結果を即座に可視化できるというメリットがあるが、広範囲を測定した場合、可視化する量が多くなり、視認性が悪化するという問題点がある。それを解決するために、複数点の測定データを集約する機能を実装した。測定結果は、測定範囲をグリッド状に分割し、グリッド点近傍の測定結果を IDW 法(逆距離加重法)で処理し、その点でのベクトルを生成している。

ネオジウム磁石を異極対向配置して周辺磁界を測定し、2cm 間隔のグリッド状に測定結果を表示した際の HMD 映像のキャプチャ画像を図 3 に示す。このように、測定者は磁束密度の空間分布を三次元的に観察することができる。

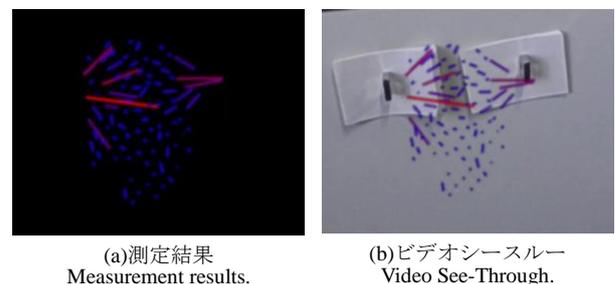


図 3 グリッド状の可視化
Fig.3. Grid-based visualization.

<謝辞>

回路基板を製作した法政大学塩山将英氏(2023 年度修了)に感謝します。本研究は JSPS 科研費 25K06615 の助成を受けたものです。

<参考文献>

- (1) S. Matsutomo, et al. in *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 531-534, Feb. 2012
- (2) 神山勝哉・中西空・松友真哉・岡本吉史, 令 7 電気学全大, No1-014

脳波を用いた学術論文のマンガ化における 読者の興味と理解の変化の計測

勝間田 武治^{*}, 塩尻(斎藤) 亜希, 浦田 航介 (東京国際工科専門職大学)

Evaluating the Effect of Manga-Based Academic Abstracts on Readers' Interest and Comprehension Using EEG
Takeharu Katsumata, Shiojiri(Saito) Aki, Urata Kousuke
(International Professional University of Technology in Tokyo)

1. はじめに

学術論文は科学知識の普及に重要である一方、非研究者にとって可読性の確保が課題である⁽¹⁾。そこで本研究では、論文のアブストラクトをマンガ形式で提示した場合に読者の興味と理解に与える変化を検証した。

2. 方法

本研究は、第1著者が所属する機関における倫理委員会の承認を得て実施された(承認番号 TK 倫 2025-0012)。

<2・1>マンガ形式の作成 査読付き論文2種(生体工学系論文・教育系論文)のアブストラクトを対象に、Chat GPTによる画像生成を用いてマンガ化を行った。

<2・2>実験方法 被験者(本学工科学部に属する学生)10名を対象に、2種の論文を従来形式かマンガ形式で読んでもらう実験を行った。脳波で興味を測定するために、被験者は読解時に脳波測定器を装着した。また読解後は、論文内容を問うテストと、興味と理解に関するアンケートを実施した。

<2・3>脳波計測 脳波測定にはEmotiv社製EPOC Xを用い、128Hzで取得したデータに0.5-40Hzのバンドパスフィルタを適用した。各電極について4秒窓・1秒間隔で標準偏差を算出し、標準偏差が15 μ V以上の区間を除去した。さらに、残存データが50%未満の電極は解析から除外した。被験者の興味は、先行研究で提案されたエンゲージメント指標($\beta/(\alpha+\theta)$)により評価した⁽²⁾。

3. 結果・考察

<3・1>興味度 興味($\beta/(\alpha+\theta)$)の解析結果を図1に示す。生体工学系論文においては、従来形式の興味がマンガ形式を僅かに上回った。一方、教育系論文では、マンガ形式の興味が従来形式を上回る結果となった。これは、被験者である学生にとって生体工学系論文の内容が馴染みの薄いものであり、マンガ化による興味喚起の効果が十分に発揮されなかった可能性が考えられる。

<3・2>理解度 理解(テスト正解率)の結果を図2に示す。両論文ともに、マンガ形式では、従来形式より高い正解率を示した。これは、マンガの視覚的表現や物語的な説

明が理解の促進に寄与した可能性がある。

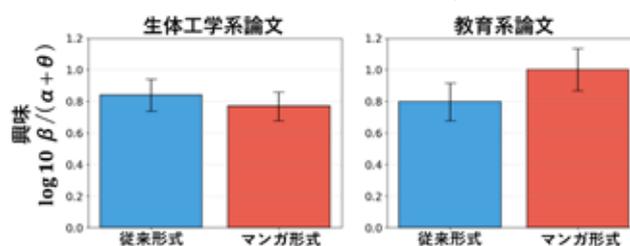


図1. 興味度 (log10 $\beta/(\alpha+\theta)$) の比較

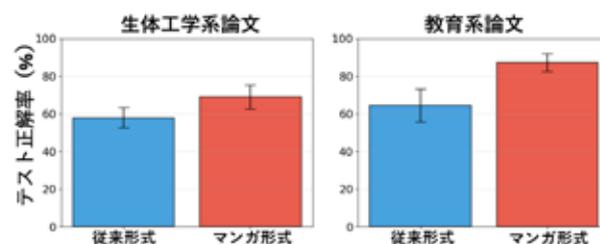


図2. テスト正解率の比較

4. まとめ

本研究では、マンガ形式の論文が読者の興味と理解に与える変化を検証した。結果、マンガ形式は読者にとって身近な内容において興味の喚起に有効であることが示された。また、マンガ形式は理解促進において有効である可能性が示唆された。

謝辞

本研究は、東京国際工科専門職大学共同研究費の助成を受けたものである。

文献

- (1) Hubbard, K. E., & Dunbar, S. D. (2017). Perceptions of scientific research literature and strategies for reading papers depend on academic career stage. *PloS one*, 12(12), e0189753.
- (2) Pope, A. T., Bogart, E. H., & Bartolome, D. S. (1995). Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task. *Biological psychology*, 40(1-2), 187-195.

脳波 / と心拍数に基づく授業集中状態推定の基礎検討

塩尻(斎藤) 亜希*, 角園 ユウ, 上條 浩一, 門田 裕次, 神沼 充伸,
大関 和夫, 鈴木 雅実 (東京国際工科専門職大学)

A Fundamental Study on Estimating Classroom Concentration States Based on the EEG β/α Ratio and Heart Rate
Aki Shiojiri(Saito), Yu Sumizono, Koichi Kamijo, Yuji Kadota, Atsunobu Kaminuma,
Kazuo Ohzeki, Masami Suzuki (International Professional University of Technology in Tokyo)

1. はじめに

高等教育では一斉授業が主流である一方、学習者一人ひとりの学習状態を授業中に把握することは容易ではない。そこで本研究では、実授業において脳波から集中度指標を算出し、当該指標を心拍情報のみから推定できる可能性に関する基盤的知見を得ることを目的とした。

2. 方法

<2・1> 実験方法 倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号:TK 倫 2025-0003)。TOEIC®対策の授業とし被験者を募り、同意した10名が実験に参加した。授業の構成は、Pretest 5分、Lecture 40分、Posttest 5分とし、テストは授業に関する知識を問う内容とした。

<2・2> 計測と解析 脳波の測定には、Muse2 (InteraXon 社)を使用した。300Hz サンプリングで取得し75Hz でダウンサンプリングした後、5 - 40Hz 帯域幅をもつバンドパスフィルタを適用し、さらに標準偏差を電極毎に4秒間に記録されたデータを1秒間隔毎で算出し、4秒単位で標準偏差が15 μ V未未満でないデータを除去し、残ったデータ数が50%未未満の場合その電極のデータそのものを破棄した。なお、学生の状態把握について本研究では先行研究を参考に、脳波の α 波と β 波を用い β/α を算出し、学生の集中レベルとした⁽¹⁾。心拍の測定には、myBeat® (TOOL 株式会社)を使用した。心拍数は50 bpm以上100bpm未未満を正常範囲と定義し、この範囲を逸脱する値を異常値として除外した。異常値と判定された心拍数は欠損値として扱い線形補間を適用した。その後、講義フェーズごとに脳波(β/α)と心拍数(HR)の相関係数およびそのp値を算出した。

3. 結果・考察

最も相関係数(r)が高い被験者と低い被験者の脳波(β/α)と心拍数(HR)の変位をFig.1に記す。 β/α の数値が高い被験者程HRとの高い相関があることが示唆された。 β/α は覚醒/認知負荷の指標として用いられてきた。HRも同じく覚醒・緊張・姿勢・呼吸で動くので、同じ原因(ストレス/集中/課題負荷)で同方向に変動しており、同じ背景因子を共有していると示した先行研究と合致した。一方で、 β/α の低下はHRとの相関が認められなかった。 β/α 低下時はHRのみ

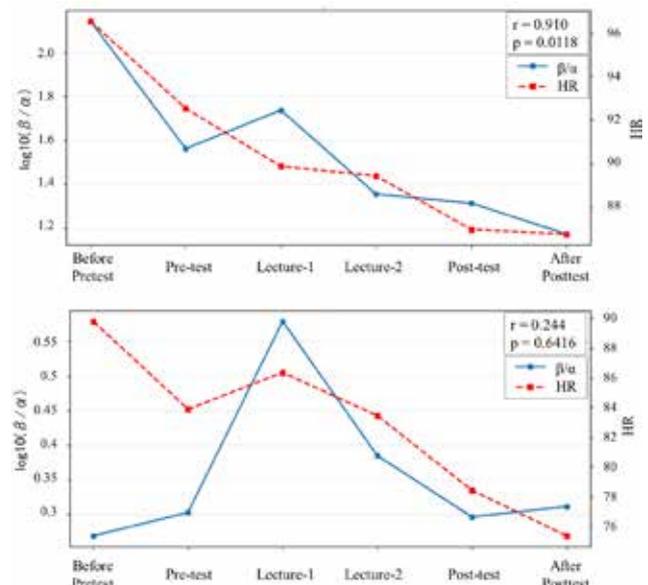


Fig.1. Phase-wise Changes in β/α and Heart Rate (HR):
【Top: highest r, Bottom: lowest r】

では集中状態を捉えにくい可能性があるため、例えば、表情筋活動や瞬目頻度などの補助指標を併用する必要がある。なお、被験者全員の相関係数(r)の平均は0.599であった。

4. まとめ

本研究では、補講授業を対象にウェアラブル脳波と心拍を同時計測し、授業フェーズ別に集中指標 β/α とHRの関連を評価した。結果として、 β/α が高い被験者ほどHRとの関連が強い可能性が示唆された一方で、 β/α が低下する局面ではHRとの相関が認められない例も見られた。学生の β/α の把握に対し心拍以外の補助指標を併用した多面的評価が必要である。今後は、対象授業・参加者数の拡大とともに、指標の組み合わせに基づく状態推定の安定化を進める。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(22K02868, 24K06270)の助成を受けたものである。

文献

(1) Charles, R. L., and Nixon, J.: Appl. Ergon., 74, 221-232 (2019)

産官学連携による蓄電池人材育成教育プログラムの 高専向けカリキュラム開発

嶋田 直樹*, 倉部 洋平, 山田 悟 (石川工業高等専門学校)
松木 剛志, 柴田 亮, 松英 達也, 香川 福有 (新居浜工業高等専門学校)

Curriculum Development for KOSEN in the Industry-Government-Academia Collaborative Education Program for Training Battery Technology

Naoki SHIMADA, Youhei KURABE, Satoru YAMADA (National Institute of Technology, Ishikawa College)

Tsuyoshi MATSUKI, Ryo SHIBATA, Tatsuya MATSUE, Tomomichi KAGAWA (National Institute of Technology, Niihama College)

1 はじめに

2021年に開催されたCOP26において2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする目標が示され、産官学において様々な取り組みが進められている。蓄電池は自動車などの機械システムの電動化、スマートグリッドにおける電力調整など、環境技術のキーデバイスとして極めて重要である。一方で、蓄電池における日本メーカーの世界シェアは年々低下しており、産業規模の拡大と競争力の教科が急務となっている。このような背景のもと、蓄電池関連人材の育成・確保を目的として、産業界、教育機関、自治体、国の行政機関、そして支援団体が一体となって取り組む「関西蓄電池人材育成等コンソーシアム」が設立され、国立高専機構はCOMPASS5.0高専発「Society5.0型未来技術人材」育成事業（蓄電池分野）と連携して、蓄電池分野に関する専門知識や技術力の育成だけでなくGX社会において幅広く活躍できる高度な工学的人材の養成を目指している。

本発表では、COMPASS5.0蓄電池分野グループ（以下、Kc-BATT）における蓄電池人材育成カリキュラム開発の活動を紹介する。高専独自の教育によって育成する人材像を具体化したモデルコアカリキュラム（以下、MCC）をベースとして、産業界からのアドバイスに基づいて、蓄電池の開発・製造、および蓄電池の利活用に必要の人材を育成するカリキュラムについて検討を進めている。

2 蓄電池人材育成を目的とした産官学による教材開発活動

本プロジェクトは令和5年度に活動を開始し、既に活動が進んでいる「関西蓄電池人材育成等コンソーシアム」に参加する形で、業界団体と協力して工業高校・高専低学年を想定した教材、STEP1教材を開発した（図1）。STEP1教材は蓄電池製造におけるボリュームゾーン人材の育成を目的としたもので、蓄電池に関する興味関心の向上をねらいとしている。

翌年度の令和6年度には大学・高専高学年を想定した教材であるSTEP2教材を開発した（図2）。蓄電池の研究開発に必要な知識だけでなく、セル製造やモジュール設計に必要な機械分野の内容、利活用に必要なパワーエレクトロニクス等の電気の内容、また電池材料の調達に関わる地政学、リサイクルの取り組みなど、より専門的な知識を身につけた蓄電池技術者の養成を目的とした包括的な内容となっている。本教材の開発にあたっては、テーマ選定から教材内容のレビューを通じた改善案の提案、完成教材の実践等、Kc-BATTの高専教員メンバーが学術界として主体となって取り組んだ。

STEP1、STEP2教材ともに、学習内容の趣旨を変えないことを前提としてある程度の変更が許可されているため、教育機関の現状や担当教員のニーズに合わせて、教えた内容の選択や他教材との組み合わせ



図1 蓄電池人材育成教材『STEP1』

Fig.1 Battery Personnel Training Text for beginner. 『STEP1』

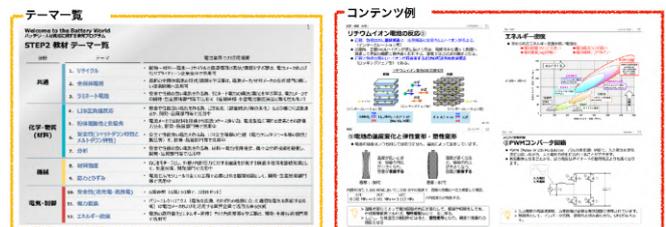


図2 蓄電池人材育成教材『STEP2』

Fig.2 Battery Personnel Training Text for advance. 『STEP2』

わせも可能である。

今年度は蓄電池人材育成に取り組む教員、また企業の若手社員教育等での利用を目的としたワンフレーズ集を開発中である。こちらは蓄電池に関する専門用語ごとに解説したものとなっており、STEP1教材、STEP2教材を活用して授業を行う教員の補助資料として活用できる。また、蓄電池製造企業、利活用企業の若手社員教育にも活用できることが期待されている。ワンフレーズ集の開発についても昨年度から引き続き、Kc-BATTメンバーが学術界として、キーワードの選定、教材内容のレビューを担当しており、高等教育機関での現場活用を意識した取り組みを進めている。

3 高専における蓄電池人材育成教育カリキュラムの概要

高専における蓄電池人材育成教育カリキュラムは、高専全体で実施する基礎レベル人材、各学科や学科の実情に合わせて実施することを想定した開発人材、利活用人材を柱としている。図3に示しているように、基礎レベル人材の内容は高専低学年向け、開発人材、利活用人材は3年生以上の高学年を想定したカリキュラムとして検討を進めている。本プロジェクトは全国の国立高専で実施することを目的としているため、MCCを活用した負担感の少ないカリキュラムの開発を目指している。従来より全国の国立高専では、各高専の教育内容を均一化させるための教育内容を分野ごとにまとめたMCCに基づいて、各

校および学科の特性に合わせた専門教育を実施している。これによって、教育内容の独自性を維持しつつも、全国高専において一定水準以上の教育の質が保証される仕組みとなっている。

従来より実施している高専教育が蓄電池業界のニーズに対してどの程度対応できているかを調べる必要があるため、Kc-BATTは教材作成を通じて協働している蓄電池業界団体に協力を依頼し、現行MCCにおける蓄電池人材育成に必要とされる教育内容の該当項目選定を行った。蓄電池人材育成に向けた高専における教育状況の現状把握、学科の特性を調べることを目的とした。

これらの結果から、当初3区分としていた人材像をさらに細分化し、6区分の人材像を定義した。

基礎レベル人材は全国の高専で実施することを想定しており、蓄電池の製造や利活用に必要な基礎的な知識を修得させることを目的としている。

開発レベル人材は機械系、材料系、化学系などの学科を想定したものになっており、蓄電池の原理や仕組みについてより深く学び、電解液、電極材などの蓄電池そのものの研究開発、また利用ニーズに合わせた電池セルの外装、モジュール設計等の設計開発に従事する人材を想定した2区分に分類した。

利活用レベル人材は機械系、電気系、電子系、情報系などの学科を想定したものになっており、バッテリーパスポートに代表される蓄電池の利用サイクル、安全な組み込みや充放電を含めた安全教育、電池を電源として活用するのに必須となるパワーエレクトロニクスを含めた幅広い内容となっている。自動車産業、電力産業、小型電子情報産業等を想定した3区分に分類した。

現行の各高専各学科で実施されている教育内容が、蓄電池6区分にどの程度対応できているか確認することができるようにするため、図4に示すようなチェックシートを作成した。今後各高専に配布して蓄電池人材教育の対応状況をチェックできるようにする予定である。

4 実施する科目を想定した基礎人材向けモデル教材の開発

本プロジェクトでは、授業時間数の増加や教員の負担増につながらない、蓄電池人材育成の推進を目指している。そこで、STEP1教材、STEP2教材を活用した授業を提案するために図5に示すような実施科目を想定したモデル教材を3編作成した。これらの教材は低学年向けを想定したものとなっており、大半がSTEP1教材、STEP2教材から引用したスライドで構成されている。教材の内容と想定科目の詳細は以下の通りとなっている。

① 基本原理と安全性編

【対象科目：化学、実験科目など】

蓄電池の原理について学ぶとともに、電池の容量計算、充放電特性、安全な取り扱いのための基礎知識を学習する。

② 社会を支える電池編

【対象科目：工学基礎科目など】

定置用蓄電池をはじめとした、スマートグリッドにおける蓄電池の重要性について学ぶ。また、蓄電池のリユース、リサイクルについても学習することにより、資源として最大限有効活用するための正しい廃棄方法を学習する。

③ 電池と国際社会の関わり編

【対象科目：地理など】

電池の材料に必要な重要鉱物（レアアース）の産地、原料の精製地などを学ぶことによって、蓄電池に関わる国際的な地政学について学ぶ。また、使用済み蓄電池から回収したリサイクル材の重要性、また回収・リサイクルに関連した法律についても学習する。

従来から電池の原理について学ぶ化学系科目に留まらず、どの学科

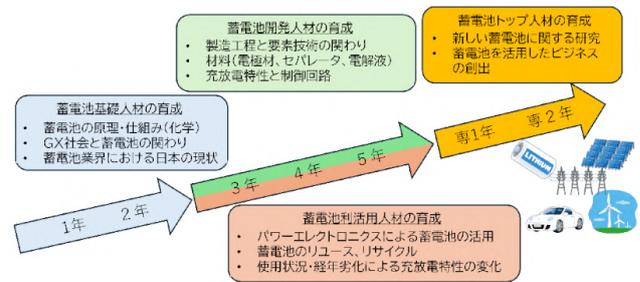


図3 高専における蓄電池人材育成カリキュラムの概要図
Fig.3 Outline Diagram of the Battery Personnel Training Curriculum at KOSEN

各人財に求められる学習項目	科目に対応する学習項目					
	1	2	3	4	5	6
蓄電池の原理・仕組み(化学)	○	○	○	○	○	○
GX社会と蓄電池の関係	○	○	○	○	○	○
材料(電極材、セパレータ、電解液)	○	○	○	○	○	○
充放電特性と制御回路	○	○	○	○	○	○
製造工程と要素技術の関わり	○	○	○	○	○	○
蓄電池業界における日本の現状	○	○	○	○	○	○
新しい蓄電池に関する研究	○	○	○	○	○	○
蓄電池を活用したビジネスの創出	○	○	○	○	○	○
パワーエレクトロニクスによる蓄電池の活用	○	○	○	○	○	○
蓄電池のリユース、リサイクル	○	○	○	○	○	○
使用状況・経年劣化による充放電特性の変化	○	○	○	○	○	○

図4 蓄電池人材区分別MCC対応チェック表

Fig.4 MCC Compatibility Checklist by Battery Personnel Category



図5 高専各教科向け基礎レベル人材モデル教材

Fig.5 Basic level Battery textbooks for KOSEN subjects

でも実施可能な工学基礎科目、地理などの一般科目においても利用シーンを提案して、より多くの教員に蓄電池人材育成に携わってもらおうことが、モデル化教材を作成した狙いとしている。

5 まとめ

本稿では、Kc-BATTによる高専の蓄電池人材育成の取り組みのうち、全国国立高専での実施を目指したカリキュラム開発状況について報告した。本プロジェクトのカリキュラムは、蓄電池業界団体の協力によって選定されたMCC学習項目に基づいて、蓄電池人材育成教育の現状確認、追加で実施が必要な学習項目の選定を行うことができるよう検討を進めているところである。今後は他分野間との連携も含めた、MCCの項目にない追加の学習項目選定など、高専における多様な人材育成の更なる充実を図っていきたく考えている。

6 謝辞

蓄電池人材育成教育プログラム教材の作成にあたり、事業主体である経済産業省および近畿経済産業局の皆様のご支援に深く感謝申し上げます。また、教材作成に際しては、関西蓄電池人材育成等コンソーシアムに加盟する産業界の皆様にご協力いただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

画像認識簡易体験システムの開発

岡部 忠*, 橋本 雅史 (東京都立産業技術研究センター)

Development of a Simple Image Recognition Demo System

Tadashi Okabe, Masafumi Hashimoto (Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute)

1. 背景と目的

近年、AI技術の普及に伴い、画像認識技術の需要が高まっている。しかし、AI初心者や情報学を修めていない社会人にとって、画像認識システムの構築は技術的な障壁が非常に高い。本研究開発では、Yolo⁽¹⁾ (You Only Look Once)を用いた画像認識を簡易的に体験できるシステムを開発し、ユーザーが認識させたい画像を登録し、アノテーションや学習を簡単に行えるハンズオン環境を提供することを目的とする。

また、著者らが所属する機関は東京都内中小企業の技術支援を目的として設立されている。その一環で、AIに精通していない中小企業のエンジニアでも、製造ラインの外観検査として容易に画像認識を活用できるような技術シーズの確立が求められている。そのようなニーズに応えるため、本研究開発で試作した画像認識の簡易体験システムを通して、中小企業における画像認識技術の社会実装が進むことを企図している。

2. システム概要

本節では、試作したシステムの概要として、2.1節においてシステムの構成を、2.2節では試作システムの主だった機能について箇条書きで記す。

2.1. システム構成

- フロントエンド：Web インターフェース (Python)
- バックエンド：Yolo v10, Python (Ultralytics)
- データ管理：画像データとアノテーションデータの保存・管理

2.2. 主な機能

- 画像登録：認識させたい画像をアップロード
- アノテーション支援：画像上で対象物を囲む GUI ツール
- 学習実行：登録された画像とアノテーションデータを用いた Yolo モデルの学習
- 認識実行：学習済みモデルを用いた画像認識

本研究で用いた技術やツールとして、Yolo は高速かつ高精度な物体検出モデルである。また、アノテーションツールとして LabelImg を使った。更に、試作システムの開発では、画像認識の初心者向けのハンズオンを体験するこ

と、つまりユーザーが実際に画像を登録し、アノテーションから学習、画像の認識までを一連の流れで体験できる点を特に重視した。また、非エンジニアのような情報学を修めていない社会人でも一通り体験できるように、システムの簡易化としてコマンドライン操作を最小限に抑え、GUI を使って直感的な操作を実現している。

3. 試作システムの評価

システムのハンズオンを体験する流れは次の図 1 のとおりである。このような流れに沿って新たな認識対象物を設定し、画像認識システムの構築を簡易的に体験するのに、概ね 30 分から 1 時間程度を要し、認識率 80% 程度のシステム構築を体験した。試作システムをハンズオンで体験し、画像認識システムの構築を行った風景を撮影した写真を図 2 に示す。

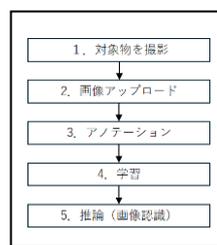


図1 ハンズオン体験の流れ
Fig.1. Hands On Flow



図2 ハンズオン風景
Fig.2. Hands On Image

4. 考察と今後の展望

GUI による直感的な操作とすることで、非エンジニアでも簡単に画像認識システムの構築を体験できるシステムを実現している。けれども、学習データの質と量が画像認識の精度に影響することを実感できるような仕掛け、具体的には学習曲線の描画機能を組み込んでおらず、この点が直近の課題である。

今後は、先述の課題へ対応することに加えて、Web ブラウザ上で完結するようにシステムのクラウド化を進めること、今回試作したシステムで最も時間を要する作業工程であるアノテーションについて、生成 AI 等を使った自動アノテーションの支援機能を追加することを計画している。

文 献

(1) Ao Wang, et al., YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection, arXiv:2405.14458 (2024)

教育用インバータモジュールの設計と教育プログラムの構築

学生員 安達 史敦 上級会員 藤田 吾郎

Design of Educational Inverter Modules and Development of Educational Programs
Student Member, Shido Adachi, Senior Member, Goro Fujita,

1. はじめに

現在、日本政府は2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言している。この目標実現に重要になるのが、二酸化炭素排出量を削減する再生可能エネルギーである。しかし、再生可能エネルギーの導入増加に伴い送電網が複雑化する問題が発生している。そのため、電力技術者の需要が増加することが予想される。しかし、電気安全協会では管理技術者協会会員の大半が50代以上で20代の協会会員は全体の15%以下となっている⁽¹⁾。そのため、新たな電力技術者の育成が必要となってくる。育成の一環として、電気設備の学習を行うことにより、実用的な電気の概要を理解することができる。本研究では再生可能エネルギーである太陽光や蓄電池など直流から交流への変換に不可欠なインバータの動作原理の学習を可能とする、単相インバータを用いたモジュール⁽²⁾、そしてモジュールを使った教育プログラムを作成し、電力技術者の育成に貢献することが目的である。

2. 単相インバータモジュールの概要

本研究では、学校規模の環境において、単相インバータの動作原理⁽³⁾を学習するためのシステムの構築を行っている。実験では、Myway インバータと自作 PCB を組み込んだ単相インバータモジュール、ファンクションジェネレータ、直流電源器、単相モータを用いて行った。実際に単相インバータモジュールの実験を行う際の構図を図1に示す。また、実際の実験の外観を図2に示す。ファンクションジェネレータから供給された信号を、モジュール内のPCBによってデッドタイム処理を施し、パルス信号またはPWM信号として変換する。この信号はインバータ内のIGBTのON/OFFを制御するゲート信号として使用される⁽⁴⁾。

以下に動作原理を理解するため単相インバータモジュールに搭載した機能を記載した。

- 入力信号をパルス信号、PWM信号のどちらかを選択できる。
- オシロスコープを用いて出力信号波形や、電圧・電流波形を観測できる。
- 低周波時のみ、インバータのスイッチングを正面パネルに組み込んだLEDで視認できる。

ルに組み込んだLEDで視認できる。

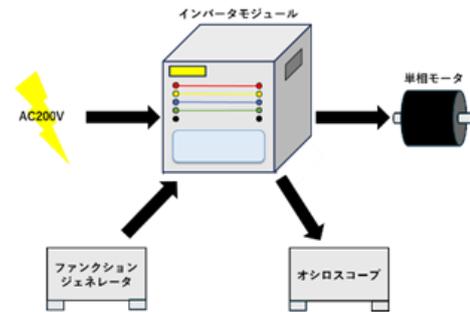


図1 モジュール実験の構成
Fig.1. Module experiment setup

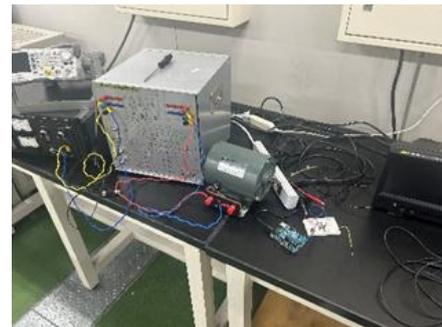


図2 実験の外観
Fig.2. Experiment Appearance

3. PCB・パネル設計

今回使用するインバータ基板は DSPCB (Design Spark PCB) にて作成した。実際に DSPCB 上で設計した基板を図3に示す。この基板は、PWM生成回路とLED動作回路で構成されている。PWM生成回路では、三角波搬送波比較方式を用いてPWMを生成し、デッドタイム回路を通してインバータに送られる。LED動作回路は、モジュールの概要で記した低周波時にインバータのスイッチングを確認するために設計した。

単相インバータモジュールの正面パネルはAutoCADにて設計した。設計時に考慮したことを以下にまとめる。図4に正面パネルの設計図を示す。

- 実験を行う学生が実際にどのような回路で波形が生成されているか視認で理解できるようにするために、パネル下部にPWM、デッドタイム生成回路をデザイ

ンした。

- アルミパネルとポリカーボネイトパネルの厚さは 2 mm あるため、機器の取り付け穴をデザインする際にアルミパネルより、0.5~1.0 mm 余裕を持たせた。

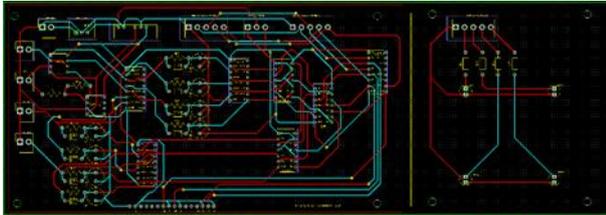


図3 設計した基板
Fig.3. Designed board

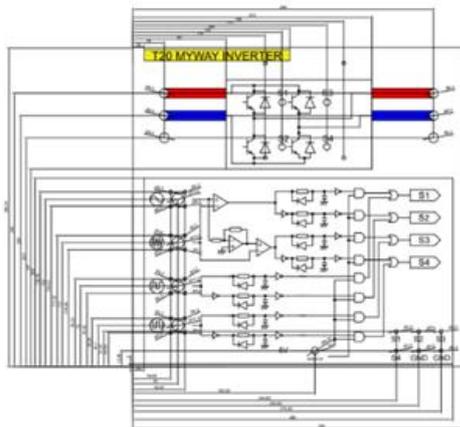


図4 設計したパネル
Fig.4. Designed panel

4. 教育プログラムの構築

実際に、単相インバータモジュールを用いた際の、PWM 信号とパルス信号の波形を図5、6に示す。

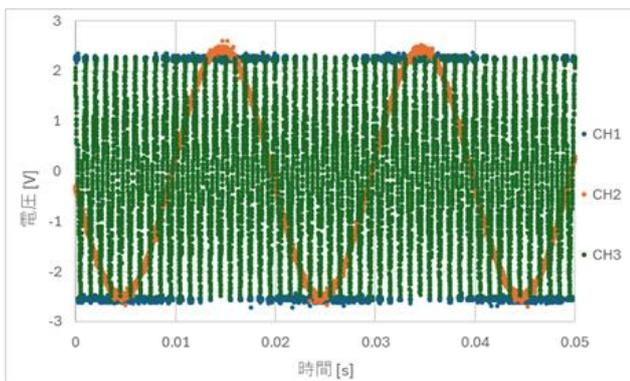


図5 PWM 信号
Fig.5. PWM signal

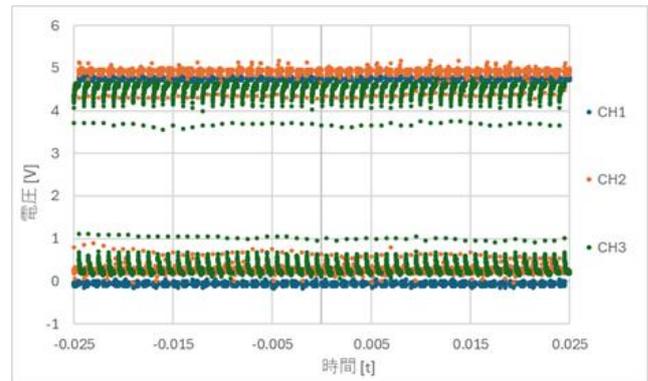


図6 パルス信号
Fig.6. Pulse signal

この結果と単相インバータモジュールの概要をもとにして教育プログラムを構築する際のレポート内容を以下に示す。

- ブレッドボードを用いてデッドタイム生成回路図作成し、デッドタイムについて理解を深める。
- 単相モータを PWM 信号とパルス信号のそれぞれで動作させ、効率を比較する。
- 両信号を低周波にし、IGBT のスイッチング動作を LED で視認する。

5. まとめと今後の展望

本研究では、単相インバータを用いた机上実験と、それに連動した教育プログラムの作成を進めた。学生が単相インバータの動作をより深く理解できるよう、多様な機能を盛り込んだ実験構成や教材内容を検討した。しかし、実際にモジュールを動かし実験を行ってみると、事前には気づかなかった問題点が数多く明らかとなり、教育活動の難しさと多くの改善点を改めて認識する結果となった。これらの課題を踏まえることで改善の方向性も見えてきたため、今後は学習効果をさらに高められる教材や実験内容の開発に取り組んでいきたい。

文献

- (1) 経済産業省「電気主任技術者制度について」
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/hoan_seido/pdf/013_01_00.pdf
- (2) 一松祥右, 藤田吾郎, 坂井直樹, 三岡功治「モジュール型電力系統実習装置の提案」, 工学教育, vol.62, No.2 (2013)
- (3) 西方正司, 高木亮, 高見弘, 鳥居肅, 枘川重男「基本からわかるパワーエレクトロニクス」
- (4) 降旗翔太, 藤田吾郎「単相インバータを用いた教育プログラムの構築」, 令和7年電気学会全国大会, 1-006

学会と連携した電気エネルギーSTEAM 学習展開

高木 浩一* (岩手大学)

Development of STEAM-Oriented Electric Energy Learning Collaborating with Academic Institutions
Koichi Takaki (Iwate University)

1. はじめに

持続可能な社会の構築を目指し、世界全体共通の概念としてSDG's (Sustainable Development Goals) が、2015年9月の国連サミットで採択された。この特徴は、普遍性、包摂性、参加型、統合性、透明性の5つであり、エネルギー学習もこれらを意識した、STEAM 型の探究活動を基調とした取り組みが望ましい。岩手県では、これまでも持続可能社会実現の観点から、大学や小中高校、教育委員会、NPO、企業やこども科学館などの機関が連携して、Fig. 1のように、広い年代を対象に取り組んできた⁽¹⁾。ここでは、電気学会 A 部門や社会連携委員会、静電気学会と連携した静電気・電気エネルギーのSTEAM 型学習の実践について述べる。

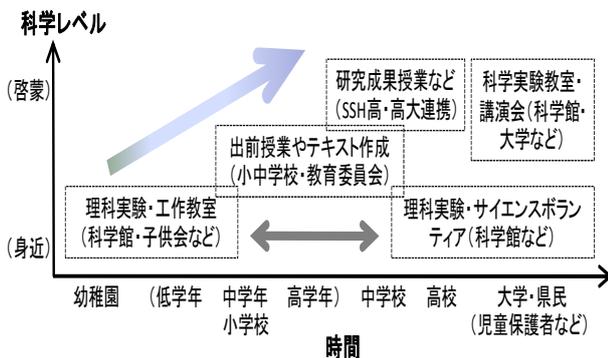


Fig. 1. Age-learning stage mapping on energy learning in Iwate.

2. Society 5.0 指向型エネルギー・環境学習構築

Society 5.0 を意識したエネルギー・環境学習では、①システムとしてのエネルギー需給の理解、②現象を支配するモデルおよび数値化への意識、③多様なエネルギーの理解とエネルギーミックス基本リテラシー(グリッドを含む)の付与が重要になると考え、これらを反映させたコンテンツを作成した。対象が、大学生や高校生の場合、PBL・共創型でベストミックスを課題とした学習プログラムとした。対象が小中学生の場合、小学校3・4年で学習する「コンセントのむこう側」のような、家庭から一次エネルギーの産地までのつながりを教材とした。モデル化・数値化では、「多様なエネルギー」のなかで、エネルギー密度をそれぞれ算出し、化石燃料と風力・太陽光の桁の差などを求めさせ、加えて変動性も示し、(スマート)グリッドの必要性を意識させた。

3. 学会と連携した学習プログラムの多相・多域展開

エネルギー・環境学習の実効性を持たせるには、世代を交えた実践(多相展開)が望ましい。このため、①小学校低学年まで、②高校まで、③それ以上の世代と3つのカテゴリーに分けて実践した。①は科学館や児童センター活動などと、②は学習指導要領に順じて学校現場と、③はNPO 団体などと連携した地域連携は多域展開に必須となる。この一環として、電気学会東北支部岩手支所が共催した岩手県彦部地区教育振興運動実践協議会が主催するイベント「作ってあそぼ おもしろ科学教室」を毎年1月に紫波町彦部公民で実施している。このイベントは星出地区児童センターとも連携していて、冬休みの期間に行っている。また静電気学会として初めての企画として、「静電気 見てさわって作ってみよう」を2025.11.29に、HOKUSYU 仙台科学館でも実施した。20組の親子が静電気の実験や工作に取り組んだ。また12月から2か月にわたって実施される「静電気の世界」でも協力している。電気学会 A 部門の活動として、2024年から行っている「こども工作教室」は、今年度から社会連携委員会電気理科体験教室WGとも連携して、芝浦工業大学を会場として、2025.9.6に、「えれき塾 こども工作教室」として実施した。その様子の一部をFig. 2に示す。本イベントは、次年度のA部門大会(朱鷺メッセを予定)での実施も検討を進めている。

なお本活動は電気学会や静電気学会関係者との連携で実施している。関わられた方々を代表しての報告となる。



Fig. 2. Science event at Shibaura Institute of Technology.

文 献

(1) 高木浩一：電学誌 127(8) 537(2007).

児童向け酪農 DX 体験教材の試作と学習実践

白石 巧*, 八本 剛琉, 金井 徳兼 (神奈川工科大学)

Prototype of Experiential DX Educational Materials for Children in Dairy Farming
Takumi Shiraishi, Takeru Yamoto, Norikane Kanai (Kanagawa Institute of Technology)

1. はじめに

2020年度から小学校でプログラミング教育が必修化された。目的はプログラミング技術の習得ではなく、論理的に考える「プログラミング的思考」を育てることにある。

本学においては、地域貢献の一環として児童・生徒を対象としたプログラミング講座を実施している。本報告では、2025年11月に北海道中標津町との連携事業で実施した「酪農のDX化をテーマとした児童向けプログラミング体験講座」を企画・実践し、その考察について報告する。

2. 教材の検討・課題制作

プログラミング教材の検討にあたり、中標津町の地域基幹産業の酪農について調査した。酪農はさまざまな課題を抱えていることを理解した。今回はその課題を先進的な取り組みとして実践されているロボットとの協働をテーマとして、酪農場をモチーフにした課題コースを設計した。Fig.1は、設計した課題コースである。

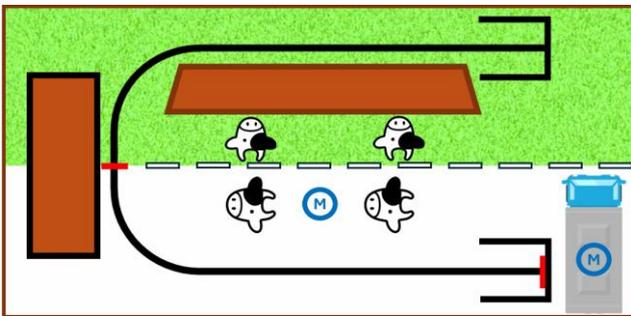


Fig.1. Dairy Farming DX Experience Course

課題コースには餌やり・餌保管・生乳の搬出などの酪農の3つの作業を課題として設定した。課題の達成に必要なロボットの動作については、講座を通して基本的なプログラム要素と共に理解できるようにした。

ロボットはレゴエデュケーション SPIKE プライムで組み立てたものを利用した。カラーセンサーと複数のモーター、ブロックを動かすアーム等を利用したロボットを組み立て、課題に対応できるようにした。ロボットの基本動作をライントレースにすることで、モーターの個体差による数値制御の再現性の低さが無くなるように工夫した。プログラミングをするソフトウェアは、ワードブロック式の、プログラムを初めて行う人にも視覚的にわかりやすい SPIKE アプリを利用した。

3. プログラミング講座の実施・考察

中標津町立丸山小学校の5年生2クラス、6年生2クラスを対象にロボットプログラミング講座を実施した。講座では、酪農の問題とロボットの関係性、ロボットとプログラムの仕組みについて説明し、ロボットの基本動作をプログラミングで体験した。前述の課題コースを攻略する過程でプログラミングの基礎が身に付くよう講座を構成した。課題攻略は児童2-3人のグループで課題に取り組んだ。Fig.2は、児童が課題に取り組む様子である。児童同士で協力し、積極的かつ楽しそうに取り組む様子が見受けられた。ほとんどのグループが3つの課題の全てを達成できていた。



Fig.2. Robot Programming Experience Workshop

講座終了後にアンケートを実施した。「酪農とロボットの関係は理解できたか、授業は難しかったか、楽しかったか」の3つを5段階、感想を自由記述とした。結果では「理解できた、楽しかった」との回答が多かった。また「難しい」という回答をした児童も少なからずいたが、同時に「楽しかった」と回答をしていた。

プログラムを初めて体験する児童も多い中、講座がつまらないと回答した児童が一人も居なかった事から、適切な難易度設定や、地域産業と関連付けた課題コースを制作した効果が得られたと考えられる。

4. まとめ

本報告では、地域産業と関連付けたロボット教材を利用したプログラミング講座を実施した事について述べた。講座の実施により児童がロボットとプログラムの仕組みについて学び、同時に地域産業について考える機会となった。

今後は、さらに児童が興味を持って取り組める教材を検討していきたいと考える。

学生レポートから見る技術者倫理の ジレンマと研究不正の分析

松原 裕之* (福岡工業大学)

Dilemmas of Engineering Ethics and Research Integrity Issues in Students' Reports
Hiroyuki Matsubara (Fukuoka Institute of Technology)

1. まえがき

毎年、技術不正や研究不正の事例が多く報告されており、技術者倫理教育の重要性が一層高まっている。電気学会の倫理委員会でも、不正防止と倫理意識の向上を目的とした啓発活動⁽¹⁾⁽²⁾が継続的に行われている。著者は所属学科において、学部2年のオムニバスの必修科目(情報システム工学概論)の担当回の90分枠から、30分程度は技術者倫理に関する話題を取り上げている。その内容は①技術不正に関する倫理的なジレンマ、②大学院における研究不正事例の2点を取り上げ、講義後に学生にレポート課題を課している。

近年の生成AIの深化により、我々の日常生活に生成AIが普及している。大学においても、学生はレポート作成の効率化ツールとして、レポート課題の要約、参考資料の整理、レポート構成案の提案などの活用によって、執筆時間の短縮を図っている。一方、生成AIの出力結果を丸写して提出すると不正と見なされやすい。大学側で留意事項の啓発に加え、近年では、AI検知ツールの導入、学生レポートの過程評価の導入、などの動きもある。

教員側にも生成AIの活用は利点が多い。例えば、2024年10月発行のIPSJ会誌、情報処理のべた語録⁽³⁾において、3名の執筆者は講義や演習コンテンツの作成、学生レポートの添削や採点、データ分析、論文査読と学生の学会予稿のレビュー、などに幅広く活用している記事を掲載している。

本発表では、学生レポートから見る技術者倫理のジレンマと研究不正の分析を述べる。著者は学生に生成AIを適切に活用すること、その倫理的な側面を啓発する立場である。なお、余談であるが、IPSJ全国大会のQ&Aでは、下記のガイドラインが示されている。

Q. [全国大会] 生成AIを使用して論文を作成してもいいですか？

A. 生成AIの使用は禁止しません。但し、いかなる場合においても、生成AIを利用した結果についての責任は著者が負う*ものとします。(*例えば、研究の着想、研究計画、制作したプログラムの目的・設計・実装・挙動などの独自性について、その内容について十分な理解を持って自分の言葉で説明できることなど)

技術者倫理のジレンマ

- ・ジレンマは、二つの選択肢(両方ともやりたくない悪いこと)の何れかの選択肢を選ぶときに生じる
- ・選択肢Aと選択肢Bがあるとき、
 - 選択肢Aを選ばない(避ける)と選択肢Bを選ぶはめに
 - 選択肢Bを選ばない(避ける)と選択肢Aを選ぶはめに
- ・(技術者)倫理上の問題では、選択肢Aと選択肢Bの何れかを本当に選ばなければならないのか？
- ・トレードオフは二つの選択肢が両立できない状態のこと。ジレンマと混同しないこと。

学生レポートの課題1

1-1: 「海外で通関手続きの賄賂を贈らず不利益をこうむる」に対する「倫理上のジレンマを示さない。二つの選択肢(両方ともやりたくない悪いこと)をあなたの考えで具体的に記述しなさい。(先ほどのハインツの事例と無関係です。)

- 選択肢A: (記述例)ハインツが特効薬を盗むと罪を犯すこととなる。
- 選択肢B: (記述例)ハインツが何も手を打たないままだと妻がガンで死んでしまう。

1-2: これらのジレンマを解決するためには、あなたはどう行動するのか、具体的に記述しなさい(指定行数あり)。

課題1: 2022年の倫理的な事例

(2) 海外で通関手続きの賄賂を贈らず不利益をこうむる。



【事故のあらまし】

2015年、「三菱日立パワーシステムズ」(MHPS)が、タイに火力発電所を建設する工事を進める中、資材の陸揚げ用栈橋の使用が、役所への申請の不備により、却下されてしまう。荷揚げをしないと工事は進まないわけで、企業側が苦慮していると、現地の役人が賄賂を要求したという。荷揚げにはこれ(賄賂)しかない、と思ったA氏の部下2人は、この件を取締役だったA氏に説明した上で、現地の関係者にコーサインを出して約4000万円の賄賂を支払った。

引用元: 部下からの相談に「仕方ないな」で有罪判決 会社員が「犯罪人」になる最高裁判決の注目ポイント、yahoo news 2022/5/29 6:02配信、デイリー新潮

図1 課題1: 組織不正と倫理上のジレンマ

Fig. 1 Exercise 1: Organizational misconduct and ethical dilemmas.

2. 技術者倫理教育の事例とレポート課題

<2・1> 事例1: 海外の通関手続きにおける賄賂

事例1は、組織による技術不正の事例を取り上げた。図1に技術者倫理のジレンマの解説、レポート課題、事例のあらましに関するスライドをそれぞれ示す。学部2年生の必修科目のオムニバスであるが、選択科目である技術者倫理未履修の学生が多数いる。そのため、最初に技術者倫理におけるジレンマの概要、ハインツの事例を説明した後、海外の通関手続きの賄賂に関する組織不正を出題した。

学生レポートの課題2

大学院生による論文データ捏造による研究の不正行為(捏造・改ざん・盗用)が発覚した。その事件における「研究の不正行為」、「倫理上の問題点」、「不正行為の背景」、「大学院生の立場であればあなたの行動」、の4点を述べよ。

課題2の事件の概要を参考に、研究不正は何かを文献やWebで調査してみよう。また、類似事件をWeb等で調査してみよう。それらを踏まえて、レポート課題2の上記4点を指定行数を満たすように回答しなさい。

大学院生が論文データを捏造(あらまし)

【事故のあらまし】

2006年、院生(修士2年)が、応用物理学会英文誌に発表した半導体に関する論文のデータの捏造(ねつぞう)したことが発覚した。論文は、同学会の英文誌に掲載された薄膜トランジスタについての研究。論文の中核をなす実験は、同院生が単独で実施し、所属研究室の担当教授らと共著論文として投稿していた。また、院生は2005年9月の同学会で前段となる論文を発表し、奨励賞を受賞していた。

2007年2月に〇〇大で開かれた修士論文発表会で院生が同じ発表をしたところ、トランジスタの特性を示す二つのグラフのデータのとり方の不自然さに助手らが気づいた。院生がパソコンやノートなどに残したデータを調べると、実験をした証拠がないことがわかった。院生に聞いたすと、「実験はせず、グラフは自分でつくった」と捏造を認めた。

引用元: 〇〇大学院生が論文データを捏造 理想的な数値1千個、2006/2/27配信, asahi.com
(注) 上記の記事を要約して、一部、匿名化しています。

図2 課題2: 大学院生の論文データの捏造

Fig. 2 Exercise 2: Research data fabrication by a graduate student.

<2・2> 事例2: 大学院生の論文データの捏造

事例2は、研究不正の事例を取り上げた。図2にレポート課題、事例のあらましに関するスライドをそれぞれ示す。ここでは文科省の特定研究不正である捏造、改ざん、盗用の概要を説明した。レポート課題は、①研究の不正行為の概要、②倫理上の問題点、③不正行為の背景、④もし大学院生の立場であればあなたの行動、の4点を考えさせて記述する内容とした。

加えて、2025年度では講義内で生成AIのサービスの一つである<https://www.perplexity.ai>をその場で利用して、上記4点の解答が高品質でリアルタイムで入手できること、要約や字数制限もプロンプトで簡単に入手できること、生成AIの出力結果をそのままレポートに書き写して提出すると研究不正になることを説明した。学生には、生成AIの利用はレポートの答えを求めるのではなく、生成AIを適切に活用する考え方、例えば、疑問点の質問、対話をする、誤字脱字の校正、記述のブラッシュアップ、などを指導した。

3. 学生レポートの分析

<3・1> 分析対象と採点基準

2024年度の履修学生のうち、当該レポートの提出者は98名、2025年度は93名である。レポートはワードファイル内に記載させ、講義の1週間後の〆切までに学内の教務システムにアップロードさせた。これらのアップロードされた全員の提出レポートを、自作のPythonスクリプトから採点用CSVファイルを一括抽出した。採点は5点満点である。

●課題1のジレンマの選択肢についての採点基準(2点満点)

・2点: 2つの選択肢がそれぞれ悪いになっている

ジレンマの記述例:

選択A: 〇〇のために賄賂を渡すと罪を犯す

選択B: 〇〇のために賄賂を渡さないと通関手続きが

進まず、工事が遅れてしまう

・1点: 2つの選択肢がジレンマになっていない

・0点: 未記入、または事例と無関係の記述

●課題1のジレンマを解決する行動(採点対象外)

●課題2の4つの設問回答(合わせて3点満点)

・3点: 4つの設問すべて、倫理的に適切で具体的である

・2~1点: 一部の設問の記述があいまい、不足している

・0点: 未記入、または事例と無関係の記述である

<3・2> 分析結果の概要

2024年度において、課題1のジレンマの選択肢は98名中73人が2点満点、課題2の研究不正について93人が3点満点であった。以上により、学生は技術者倫理のジレンマの抽出、研究不正のトピックについて概ね理解できたと考えられる。一方、一部の学生のジレンマの不十分な記述から、技術者倫理の理解が不十分というより、論理的思考能力、テクニカルライティング能力に課題があった。講義スライド(図1)では、ジレンマの二つの選択肢は「両方ともやりたくない悪いこと」としている。この条件を満たしていない。

2025年度のレポートでは、課題1と課題2の記述に生成AIの生成結果をほぼそのまま書き写したと推定できる箇所が散見された。教員は3つの生成AIのサービス(ChatGPT、Perplexity、Gemini)において、その生成結果を確認した。現時点のPerplexityの生成結果は中点「・」を多用している。例えば、「捏造・改ざん・盗用」、「倫理的・社会的」などである。一部の学生は、講義でデモしたPerplexityをレポート作成に活用したが、単語の列記に使われる「・」が多用されたまま引用したため、新たに倫理的な不正が発生した。

4. おわりに

本報告では、技術者倫理教育にジレンマと研究不正を取り上げ、学生に生成AIを適切に活用することを促した。発表当日は、学生レポートの分析結果の詳細を紹介するよである。

謝辞

本報告の一部は JSPS 科研費 21K02914 の助成を受けた。

文献

- (1) 電気学会倫理委員会技術者倫理教育の実態調査(第二次) WG: 技術者倫理教育の実態調査(第二次)WG最終報告書, 電気学会全国大会シンポジウム講演「H3 科学者・技術者が安心して楽しく仕事するために学会ができること - 技術者倫理教育・研修面からの支援-」(2025)
- (2) 電気学会倫理委員会 編: 「科学者・技術者として活躍しよう 技術者倫理事例集第3集」, 電気学会(2024)
- (3) 掛下哲郎ら: べた語録 Vol.157, IPSJ 情報処理, Vol. 65, No. 10, pp. 519-527 (2024)

Moodle アクセスログを用いた初年次専門科目 における学習行動パターンと成績の関係分析

小渡 悟* (沖縄国際大学)

Analysis of Learning Behavior Patterns and Academic Performance
in a First-Year Specialized Course Using Moodle Access Logs
Satoru Odo* (Okinawa International University)

1. まえがき

大学初年次の専門科目では、高校までの学習様式からの移行期にあり、学習習慣が十分に確立していない学生が一定数存在する。その結果、課題未提出や学習活動の停滞が成績不振の固定化、さらには履修放棄につながりやすい。近年、LMS (Learning Management System) に蓄積されるアクセスログを用いて学習過程を可視化し、早期警告や個別支援につなげる Learning Analytics が注目されている⁽¹⁾。Moodle ログと学修成果の関連分析や成績予測に関する実証研究も報告されている⁽²⁾⁽³⁾。

本報告では、完全対面授業で LMS を併用する (2024 年度後期に開講した 1 年次専門科目を対象に、Moodle アクセスログから学習行動パターンを抽出し、(i) 形成的評価との関係、(ii) 期末試験 (総括的評価) との関係、(iii) 学期前半ログのみでの成績不振リスク把握可能性を検討する。

2. データと方法

対象は再履修者も含む講義登録者 132 名である。授業は完全対面で実施し、毎回の演習問題、単元テスト、確認テストを Moodle で実施した。形成的評価はこれらの合計点 (未提出・未受験は 0 点) とし、総括的評価は期末試験得点とした。評定データが取得できた 129 名を主解析対象とし、期末試験得点が突合できた 113 名で総括的評価との関係を検討した。

Moodle イベントログ (2024 年 9 月～2025 年 2 月) から、総イベント数、小テスト関連イベント数、教材閲覧 (コース/モジュール閲覧)、評定関連イベント数、活動日数・活動週数、夜間比率 (0-5 時および 22-23 時) 等を算出し、標準化後にウォード法 (ユークリッド距離) による階層的クラスタリングを行った。クラスタ数は解釈可能性に基づき 3 とした。クラスタ間の得点差は Kruskal-Wallis 検定と事後比較により評価した。早期分析では、11 月に実施した確認テストまでのログのみから同様にクラスタを作成し、期末試験得点との関係を検討した。

3. 結果

形成的評価合計 (n=129) は平均 291.3 点 (SD=124.4) であり、内訳は演習 104.1 点 (SD=39.2)、単元 62.2 点 (SD=27.6)、確認 124.9 点 (SD=67.3) であった。期末試験得点 (n=113) は平均 65.1 点 (SD=14.1) であった。

全期間ログのクラスタリングにより、低活動群 27 名、中活動群 64 名、高活動群 38 名が得られた。総イベント数平均は順に 384.9 回、1218.2 回、2177.9 回であり、活動週数平均は 9.2 週、16.9 週、18.1 週であった。形成的評価平均は 126.1 点、312.8 点、372.3 点であり、高活動群ほど高かった。期末試験平均も低活動群 52.1 点 (n=14)、中活動群 63.5 点 (n=62)、高活動群 72.5 点 (n=37) となり、学習活動量・継続性が高い群ほど総括的評価も高い傾向を示した。

学期前半ログに基づく早期クラスタでも 3 群が得られ、期末試験平均は 56.0±16.7 点 (n=18)、64.4±11.7 点 (n=42)、68.7±13.7 点 (n=53) であった。群間差は有意であり、学期途中段階で成績不振リスクを区別できる可能性が示された。

4. まとめ

以上より、Moodle アクセスログに基づく学習行動パターンは形成的評価だけでなく期末試験とも関連し、学期前半ログのみからでもリスク群を抽出できる可能性が示唆された。完全対面授業であっても、課題・テストを LMS で実施する設計ではログが安定して得られるため、初年次専門科目における早期介入 (学習計画の助言、追加演習提示、個別連絡等) をデータに基づき設計できる。限界として単一科目・単年度の事例であること、クラスタリングが探索的手法であることが挙げられる。今後は複数科目・年度での再現性検証と、予測モデル化を含む運用評価が課題である。

文 献

- (1)G. Siemens and R. S. J. d. Baker: Proc. 2nd Int. Conf. on Learning Analytics and Knowledge, 252-254 (2012)
- (2)R. Cerezo, M. Sánchez-Santillán, M. P. Paule-Ruiz, and J. C. Núñez: Computers & Education, 96, 42-54 (2016)
- (3)P. Yadav and R. K. Yadav: Education and Information Technologies, 27, 5027-5049 (2022)

AI 組み込み技術者育成のための教材試作と 授業への展開

谷地 藍* (福島工業高等専門学校)

Prototyping Educational Materials for Training AI Embedded Engineers and Their Implementation in Instruction
Ai Yachidate (National Institute of Technology, Fukushima College)

1. 概要

近年、AIが実装された製品が多様な分野で数多く販売されるようになり、全世界で開発スピードが加速している。高専においても、AIを活用できる技術者の育成、学生による起業推進のため DCON (ディープレARNINGコンテスト) を新設し、AI時代に対応しようとしている。本校でも、AI技術者育成のための取り組みを行っているが、その一つとして AI 実装のための教材を試作した。本講演では、試作した教材の紹介と、実際の授業で活用した事例を報告する。

2. 教材試作の経緯

福島高専で技術指導⁽¹⁾⁽²⁾を行う中で、DCONに出場希望の学生達から AI 技術について質問される機会が多くなっている。自身も学習を進める中で、学生向けの適切な教材が市場に無いことに気が付いた。AI 開発に関しては Google Colaboratory 等の無料ツールを利用して個人である程度のレベルまで学習することが可能となっており、ソフト的なハードルは低い。一方、AI をハードウェアに実装する・組み込むといった、社会で実用するための学習環境・教材の整備は不十分なのが現状である。具体的には、ロボットやドローン、自動運転車や各種監視システム等に実装するような、“エッジ AI” 開発のハード的なハードルは高く、技術習得のためには多くの時間が必要となる。本研究ではこの点に着目し、AI をより簡潔にハードウェアへの実装する手法を模索し、大学・高専等で機械・電気系分野を学んだ学生が、次段階として、AI 実装・組み込み開発に着手できるような教材の試作を行うこととした。

3. 試作した教材と実際の授業での検証

<3・1>教材の構成 AI 実装用として、シングルボードコンピュータである NVIDIA 社製 Jetson Nano に LinuxOS をインストールし、開発環境を構築した。Jetson の出力ピン (GPIO) と、DC モーターやサーボモーターの制御基板との通信は PC を用いて制御できるようにした。初歩のハードとして、RC 車に Jetson を搭載し、カメラで撮影した車線画像を機械学習させ、自律走行可能な教材とした。学生への指導用に、説明スライドや資料・テキストも作成した。試作した教材を図 1 に示す。

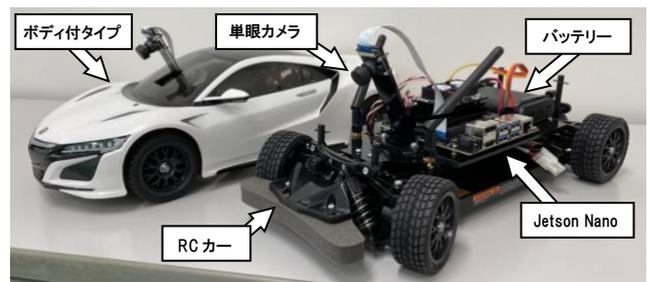


図 1 試作した教材
Fig.1. Prototype educational materials

<3・2>授業での検証 教材の有効性を検証するため AI 開発未経験の学生向けに授業を実施した。「ミニ研究」という科目の実習の 1 テーマとして、高専 2 年生 (機械・電気・化学系所属の学生 6 名) を対象に検証した。授業では、学生を 2 班に分け、それぞれ 90 分間で機械学習させた車を走行させ、どちらがより正確な自律走行ができるかを競わせた。授業後にアンケート調査を実施した。

4. まとめ

本報では、試作した教材と実際の授業に展開した様子を報告した。実施したアンケートには、AI 開発・実装に関して、より身近に感じることができたとの回答があった。一方、授業時間が短い・プログラム内容が理解できないといった意見もあり、実施方法や教材構成を改善する必要があるなどの課題も明らかとなった。今後も DCON 出場者や将来 AI 関連の技術者を目指す学生の一助となるよう、本教材の改良・検証を継続し、AI 組み込み技術者の育成に貢献していく所存である。また、本研究の成果をもとに新たに予算を獲得し、より規模を拡大した授業の実施を目指したい。なお本研究は JSPS 科研費 JP25H00155 の助成を受けて実施した。

文献

- (1) 谷地 藍:「ドローン開発体験を通して学ぶスタートアップ教育教材の試作」, 電気学会 教育フロンティア研究会, FIE-25-001 (2025)
- (2) 谷地 藍, 安藤 守, 植 英 規, 豊 島 晋, 山 田 貴 浩, 伊 藤 淳, 鈴木 晴彦:「電気自動車の自動運転化技術を段階的に学習するための教材開発」, 電気学会 基礎・材料・共通(A)部門大会, 13-B-p2-3 (2022)

忠別川発電所と野花南発電所の連系 ～北海道における系統周波数 50Hz 統一への経緯～

石田 隆張* (IEEJ プロフェッショナル)

Interconnection of the Chubetsu-gawa Power Plant and the Nokanan Power Plant
-The History of 50Hz System Frequency Unification in Hokkaido-
Takaharu Ishida (IEEJ Professional)

1. はじめに

筆者はこれまで、日本における系統周波数統合の歴史⁽¹⁾⁽²⁾について調査結果を報告してきた。その過程で、特に北海道における系統周波数の 50Hz 収束の経緯⁽³⁾、そこに大きな影響を及ぼした製紙業の貢献⁽⁴⁾について着目してきた。先行文献によれば、北海道の周波数が 50Hz に統一される大きな契機は、当時の富士製紙（後に分社化した富士電気）が運用していた野花南発電所と、建設中であった旭川電気の忠別川発電所が連系したことにあると記述されている⁽⁵⁾。しかし、その具体的な連系の実態については当時の社史（『大日本電力二十年史』）や関連文献を精査しても、現時点では明記された資料が見当たらない。本報告は、過去の文献に基づき、忠別川発電所と野花南発電所の連系に至る歴史的経緯を紐解くことを目的とする。

2. 忠別川発電所と野花南発電所の連系の経緯

<2・1>産業主導の電力系統の形成 北海道で電灯が点火されたのは 1889 年、北海道製麻(株)によるものが最初であり、電気事業としては 1891 年に札幌電燈舎にて直流で始まったものとの記録がある⁽²⁾。この後、北海道では鉱工業、製紙業、製鉄業、食品業の工場の設立とともに工場の自家発電が成長して電力系統が形成されていく。その中で大きな役割を果たしたのが製紙業である。当時の富士製紙と王子製紙が事業拡大を目指し、北海道の森林資源に目をつけ、工場を建設する中で、電力の調達が問題となる。北海道の支笏湖(図 1)の水利権をいち早く獲得し、豊富な水資源を利用して千歳川発電所を建設して、水力発電(60Hz)を動力源とした苦小牧工場を建設した王子製紙に対し、北海道の道央地区の江別に富士電気はモンドガス発電、火力発電(50Hz)を動力源とした江別工場を建設した。江別工場の発電機は発電の効率が悪く、王子製紙から札幌変電所における周波数変換を介して電力の供給を受けていたこともあり、富士製紙は王子製紙と同様に、水力発電により江別工場への動力源を開発することとなった。

支笏湖の水利権を得ることができなかった富士電気は調

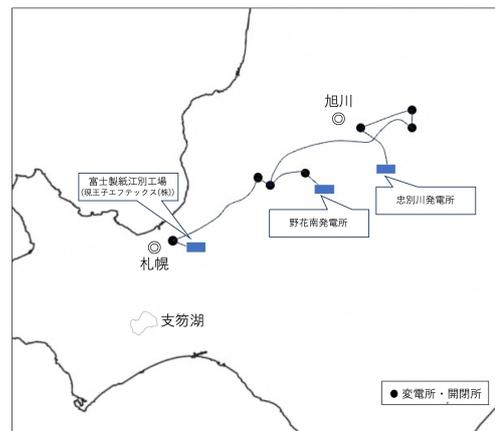


図1 製紙工場と主な発電所の位置関係⁽⁶⁾(位置は概略である)
Fig. 1 Location of the paper mill and major power plants

査の結果、大規模水力発電所として空知川流域に野花南発電所の開発を決定し、手続きを経て 1916 年 9 月に着工した。野花南発電所は自家用施設であり、近隣の芦別村への電力供給に迫られ、準用電気事業の認可を 1917 年 12 月に受けた。このように王子製紙の千歳川発電所と、富士製紙の野花南発電所という、いずれも専門の電気会社よりも大きい規模と、優れた設備を持っていた製紙会社が北海道の電力系統の形成に大きな貢献を果たしたと言える。このことは北海道が他の地域とは異なる電力系統の形成の過程を経たことを物語っていると言える。

<2・2>富士製紙から富士電気へ 先に述べた富士製紙の江別工場をはじめとした工場の動力源に悩んでいたのが、1918 年に富士製紙の専務取締役となった穴水要七であった。先ほど示したように、当時の電気事業者はまとまった電力供給が可能な業者が存在しなかったことから、工場自身が設備を有する必要があった。先に述べた野花南発電所は 1918 年 9 月に使用を認可される。送電ルートとして砂川と旭川を 2 万 V の送電線で結んだことから、富士製紙のこの

事業は独立するに足りる電気事業と目された。そのため、富士製紙は1919年10月に江別工場の準用電気事業を富士製紙から切り離して富士電気を創立した。この時、江別工場の設備は自家用施設として残ったとのことである⁽⁵⁾。

<2・3>旭川電気との合併と系統周波数 旭川電気は1906年10月に創設された⁽⁷⁾。設立当初は専ら火力発電を主としていたものの、1909年7月から1911年10月にかけて土木電気専門の技師・技術員の調査により忠別川発電所(図1)に対する工事の設計を完成させる。容量は1000kWの発電所建設のために、1000kW用に対する水路の建設と、発電容量の半分の500kWの発電機設置を第一期工事(1912年11月竣工)とし、残り500kW分を第二次工事(1915年1月竣工)とした。なお、当初忠別川発電所の周波数は米国のGE製を導入していたため60Hzであった。当時の旭川電気の久保誠之社長は「これからは、電力はいくらあっても足りない」との信念のもと、忠別川発電所の増強を行った。時勢の要求もあり、このような経緯の中、昵懇の仲であった当時の窪田富士電気社長と旭川電気の重役であった久保兵太郎が意気投合し、合併話がとんとん拍子で進んだ⁽⁸⁾。先に述べた穴水要七は当時取締役販売部長の職にあり、旭川電気の買収に関わった。穴水要七は旭川電気との合併契約の調印が終了するとともに、富士電気の社長に就任し、もともと悩んでいた工場の動力源の改善として、合併した旭川電気の忠別川発電所の系統周波数を50Hzに改造し、江別工場に送電することにした。この結果は一般にはあまり知られていない道北・道東の系統周波数を50Hzに統一する大きな一歩ともなった。それでは、いつの時点で60Hzから50Hzになったかという点、現時点では文献(9)~(13)を時系列に調べた結果から、忠別川発電所において、1920年の電気事業要覧⁽¹²⁾では忠別川発電所の周波数は60Hzとして登録されているものの(表1)、1922年の電気事業要覧⁽¹³⁾では忠別川発電所は富士電気から北海道電燈の管轄下となり、発電所の周波数は芝浦電気の50Hz発電機、GE社の50Hz発電機が登録されている(表2)。なお、1921年版の『電気事業要覧』には忠別川発電所に関する記載は確認できない。もちろん野花南発電所も50Hzで登録されている。このことから、この前後1年ほどの時期に忠別川発電所の50Hz化が完成され、野花南系と忠別川系が連系されたものと考えられる。

3. おわりに

本報告では、明治から大正にかけて北海道での電力系統が構成される簡単な経緯と、北海道内で当初50Hz、60Hzの2種類の系統周波数が50Hzに収斂する大きな契機となったと考えられる富士製紙から富士電気の分離設立、並びに富士電気と旭川電気の合併による、野花南発電所と忠別川発電所の連系の経緯について示した。

表1 1920年の電気事業要覧(抜粋)

Table 1. Electric Utility Directory 1920 (excerpt)

	種類	容量 [kVA]	箇数	電圧 [V]	周波度数 [Hz]	製造者	発電所出力 [kW]
忠別川	三相式	500	1	11,000	60	G.E	950
	三相式	500	1	11,000	60	G.E	

表2 1922年の電気事業要覧(抜粋)

Table 2. Electric Utility Directory 1922 (excerpt)

	種類	容量 [kVA]	箇数	電圧 [V]	周波度数 [Hz]	製造者	発電所出力 [kW]
忠別川	三相式	500	1	11,000	50	G.E	1425
	三相式	500	1	11,000	50	G.E	
	三相式	500	1	11,000	50	芝浦	

関連する多くの文献を調査した結果からではあるものの、北海道における電力系統の構成過程は「必然」というよりも、たまたま「電力はいくらあっても足りない」と見通していた経営者の存在、たまたま当事者が昵懇の中であった、さらに、たまたま富士製紙において主力工場の発電機の周波数が50Hzであった、という多くの「偶然」の積み重ねがもたらしたのもののような気がする。もちろんその裏には創業しては吸収、合併された多くの配電会社、発電会社、送電会社等におけるドラマが存在することはもちろんである。本報告の内容に限らず、歴史的な変遷を再検証することは、現代の電力ビジネスにおける新たな知見やヒントを得る上でも意義深いものと考えられる。

文献

- (1) 石田 隆張:「概説:東日本と西日本の周波数が決まった経緯」電気学会誌, 2025, 145 巻, 7 号, p. 358-361
- (2) 石田 隆張:「北海道における50Hzのなかの60Hz」電気学会誌, 2025, 145 巻, 7 号, p. 362-365
- (3) 石田 隆張:「製紙業のエネルギー戦略から見た北海道における電力系統の発展経緯」電気学会スマートファシリティ研究会, SMF-25-024(2025).
- (4) 石田 隆張:「北海道の系統周波数50Hz化の契機となった発電所建設」電気学会電力系統・システム・スマートファシリティ研究会, SMF-25-040(2025).
- (5) 北海道電気事業史編纂委員会 編『北海道電気事業史』,北海道電気協会,1978.11. 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/12108146> (参照 2025-11-12)
- (6) 日本発送電株式会社 編『電気事業報告書』昭和26年4月度, 日本発送電, 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/1879191> (参照 2025-11-12)
- (7) 『殖民公報』(71),北海道庁,1913-03. 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/1480268> (参照 2025-11-12)
- (8) 『大日本電力二十年史』,大日本電力,1940.7. 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/3464881> (参照 2025-12-04)
- (9) 通信省電気局 編『電気事業要覧』第9回,電気協会,大正6. 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/975002> (参照 2025-11-12)
- (10) 通信省電気局 編『電気事業要覧』第10回,電気協会,大正7. 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/975003> (参照 2025-11-12)
- (11) 通信省電気局 編『電気事業要覧』第11回,電気協会,大正8. 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/975004> (参照 2025-11-12)
- (12) 通信省電気局 編『電気事業要覧』第12回,電気協会,大正9. 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/975005> (参照 2025-11-12)
- (13) 通信省電気局 編『電気事業要覧』第14回,電気協会,大正11. 国立国会図書館デジタルコレクション <https://dl.ndl.go.jp/pid/975007> (参照 2025-11-12)

2カ所の電荷分布を同時に測定する PEA装置の製作と評価

廣木 脩*, 安 永國, 三宅 弘晃, 平井 直志, 田中 康寛 (東京都市大学)

Development and Evaluation of a PEA Device for Simultaneous Measurement of Charge Distribution at Two Locations
Shu Hiroki*, Yeongguk An, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

1. はじめに

長距離直流送電ケーブルの接続部は誘電率の異なる絶縁材料が複雑に積層した構造を有し、それに高電圧が印加される。その結果、部分的に不均一な電界が生じ、界面の電荷蓄積や、それにもなう電界の歪みが生じやすい。これを実測するために、パルス静電応力 (PEA) 法により電荷分布を測定する場合、異なる位置の空間電荷分布を同時に測定することは困難である。そこで PEA 装置の下部電極に音響遅延材料を導入し、各箇所が発生した波形を時間領域で分離して同時に測定する装置を製作した。既報⁽¹⁾では、帯電状態の異なる PET 試料を用いて、電荷分布を独立に測定可能であることを示した。

本報告では1つのフィルム状試料に電子線を部分的に照射し、照射領域とそれ以外の部分について同時に電荷分布を測定した結果について報告する。

2. 測定手法及び条件

Fig.1(a)に電子線照射試料の概略図を示す。厚さ $125\ \mu\text{m}$ のポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムの右半分は、厚さ $1\ \text{mm}$ のアルミニウム (Al) 板で電子線を遮蔽し、左半分には直接電子線を照射して、同一試料に、電子線未照射領域と照射領域を設けた。電子線照射条件は、加速エネルギー $30\ \text{keV}$ 、照射電流密度 $2.5\ \text{nA}/\text{cm}^2$ 、照射時間 20 分とした。

測定は Fig.1(b)に示す試料構成に基づき、短絡状態で、未照射領域を遅延信号として、パルス電圧 $600\ \text{V}$ を印加して測定した。Fig.1(b)より、音響遅延材料 (PMMA) を挿入しない領域では、Al の接地電極のみを通過した音響波が圧電素子に到達して観測され、その後、PMMA を通過した圧力波信号が遅延して観測される。この手法により、2つの領域の信号を時間領域で分離して測定することが可能となる。

3. 測定結果及び考察

Fig.2(a)は電子線照射を遮蔽した境界を PMMA の遅延領域の境界と一致させて、遅延領域と遅延なしの領域で観測された波形を示している。電子線照射領域からの信号を遅延させているため、右側 (遅延なし) で測定した信号には電子線照射の影響は現れないと考えられる。しかし、Fig.2(a)

に示す結果では、遅延なしの信号にも電子線の蓄積を示す波形が観測された。そこで念のため、測定時の試料の境界を徐々に左側 (PMMA 側) へずらして測定を行った。その結果を Fig.1(b)中の赤線で示す。境界を $2\ \text{mm}$ 移動させた条件で、電子の蓄積が観測されなくなった (Fig.2(b))。既報⁽¹⁾では、界面を一致させれば、帯電領域と非帯電領域の区別ができたので、今回の試料では、電子線照射時に、Al で遮蔽した領域の下に、電子が回り込んだ可能性があるが、これについては、現在のところ原因は不明であり、さらに詳細に実験を行い検討する予定である。

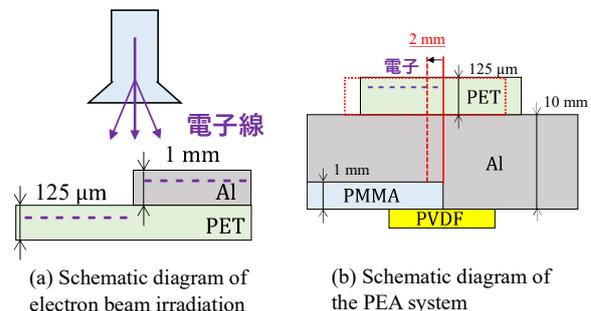
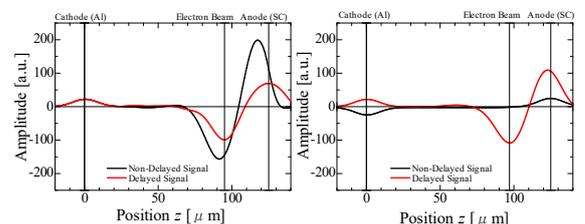


Fig.1. Schematic diagrams of sample preparation and measurement



(a) Results obtained with the boundaries of the irradiation area aligned
(b) Results obtained by measuring after moving the sample 2mm

Fig.2. Measurement results of charge distributions in e-beam irradiated sample

文献

- (1) 安, 他; 第 56 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, MVP-7, 164-167 (2025)

電磁波吸収シート評価を目的とした 低損失アルミナ TRL 校正器の試作と評価

早坂 淳一* ((公財) 電磁材料研究所), 吉田 信 ((株) シーデックス)

Development and Validation of a Low-Loss Alumina TRL Calibration Substrate
for Electromagnetic Wave Absorbing Sheet Evaluation

Junichi Hayasaka* (Research Institute for Electromagnetic Materials), Makoto Yoshida (CEDX.Co.,Ltd.)

1. まえがき

通信機器やレーダ、センシングシステムの高周波化に伴い、不要反射や漏洩電磁波を抑制する電磁波吸収シートの重要性が高まっている。一方、電磁波吸収シートは材料損失が大きいため、測定系や基板特性に起因する誤差の影響を受けやすく正確な特性評価が難しい。従来の SOLT (Short-Open-Load-Thru) 校正ではこれらの影響を十分に分離できずミリ波帯における高精度評価が課題であった。これに対し、TRL (Thru-Reflect-Line) 校正は、既知の伝送特性に基づいて測定系内部に基準面を定義できる手法である⁽¹⁾⁽²⁾。本研究では低損失アルミナ基板を用いた 40GHz 帯対応 TRL 校正器を試作し電磁波吸収シート評価における有効性を検証した。

2. 実験方法

図 1 は、試作した TRL 校正基板の外観写真である。基材には試料基板と同一条件の低損失アルミナ基板(純度 99.9%, 誘電率 10, 厚さ 0.2mm)を用いた。線路構成は GCPW とし、GSG プローブピッチは 250 μ m, グランドはビア径 150 μ m のスルーホールにより接続した。TRL 標準は, Thru, Reflect (Short), Line を同一基板上に形成した。校正の妥当性はステップインピーダンス線路 (50 Ω -40 Ω -50 Ω , 各区間 7.5mm) を同一基板上に試作・評価し, その S パラメータの反射特性 S_{11} , 透過特性 S_{21} から検証した。

3. 実験結果

図 2 にはステップインピーダンス線路の S_{11} 特性を示す。一般的な SOLT 校正を適用した場合, 10GHz 帯以上において反射特性に顕著なゆがみが観測され, 高周波域での再現性に制約が認められる。一方, 本研究で設計・試作した TRL 校正基板を適用した場合, 全周波数域に渡り滑らかに変化し, 高周波域においても安定した S_{11} 特性が得られた。また, 8.38, 16.84, 25.05, 33.25GHz に共振点が観測され, これらは線路長 7.5mm に対応する半波長共振およびその高調波による定在波の形成によるものと推定される。これらの共振周波数から求めた実効誘電率は約 5.7 であり, アルミナ基板の GCPW 構造として妥当な値である。これらの結果から,

本研究で試作した TRL 校正器は 40GHz 帯プローバ測定, ならびに電磁波吸収シートの特性評価に有効である。

謝辞: 本研究は, 令和 6 年度採択経済産業省成長型中小企業等研究開発支援事業 JPJ005698 の支援を受けた。

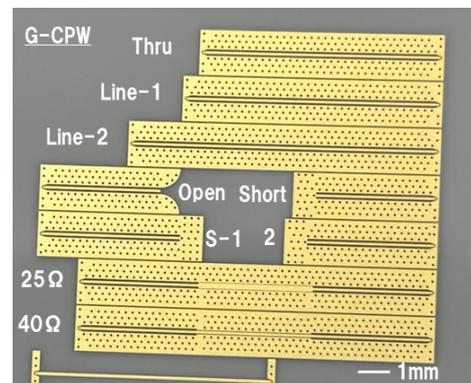


図 1 TRL 校正基板の外観写真
Fig.1. Photograph of the TRL calibration substrate

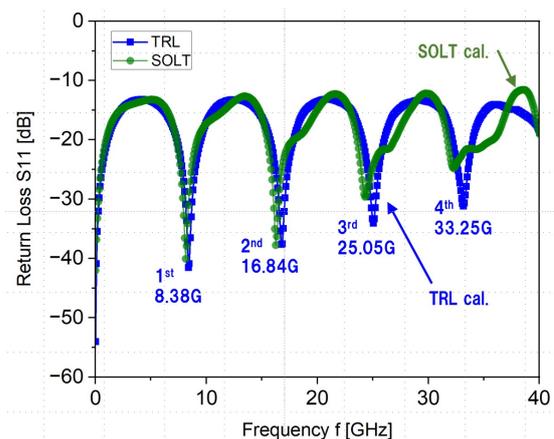


図 2 TRL と SOLT 校正の比較
(40 Ω ステップインピーダンス線路, S_{11})
Fig.2. Comparison of TRL and SOLT Calibration
Using a 40 Ohm Stepped-Impedance Line (S_{11})

文 献

- (1) 吉田信, 川原祐紀, 早坂淳一: 電子通信情報学会 (信学技報) MW2025-134, 48, 2025
- (2) 早坂淳一, 吉田信: 第 42 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 10P4-PS-89, 2025

電力設備の活線計測に向けた電界誘起第二高調波発生法による可搬型電界計測装置の開発

趙 駿*, 佐藤 丈尚, 梅本 貴弘, 佐藤 正寛, 藤井 隆 (東京大学),
谷口 栄, 坪井 敏宏, 衛藤 淳 (東京電力ホールディングス), 熊田 亜紀子 (東京大学)

Development of a Portable Electric-Field Measurement Device Using the Electric-Field-Induced Second Harmonic Generation Method for Live-Line Monitoring

Jun Zhao, Takenao Sato, Takahiro Umemoto, Masahiro Sato, Takashi Fujii (The University of Tokyo),
Sakae Taniguchi, Toshihiro Tsuboi, Atsushi Eto (TEPCO HD), Akiko Kumada (The University of Tokyo)

1. 序論

電力設備の劣化診断や異常監視の高度化のため、空間電界を非接触で計測する手法が求められている。近年、電界誘起第二高調波発生 (Electric-Field-Induced Second-Harmonic Generation, E-FISH) が、非接触・非侵襲の電界計測法として注目されている⁽¹⁾。しかし、これまで現場における実機への適用を想定した可搬型システムの報告はない。そこで本研究では、E-FISH を用いた小型で送受光一体型の可搬型電界計測装置を試作し、遠隔測定⁽²⁾における性能評価を行った。

2. 実験装置および方法

図 1 に示すように、送信光学系 (レーザー伝送・偏光制御・集光) と受信光学系 (バンドパスフィルタ・光電子増倍管 (PMT)) を 600×300 mm のブレッドボード上に配置し、遮光・防塵用のカバーを設置した。図 2 に送受信系部分の写真を示す。Nd:YAG レーザ光 (波長: 1064 nm, パルス幅: 7 ns, エネルギー: 40 mJ) を焦点距離 5 m のレンズで、電圧を印加したギャップ 10 mm の平行棒電極間に集光した。発生した第二高調波を焦点距離 5 m のレンズでコリメートし、ダイクロイックミラーで基本波を減光した後、リトロリフレクタで折り返すことで受光系へ約 10 m 伝搬させ、PMT で SHG 信号を取得した。この実験系を用い、10 kV 印加時に半波長板を回転させて偏光角を変えた時、入射光の偏光面を外部電界に平行にして印加電界を変えた時の、SHG 信号をそれぞれ取得した。

3. 実験結果

図 3(a) に半波長板角度に対する SHG 信号強度を示す。SHG 信号強度は偏光角度に対して理論的に予測される π 周期の正弦波動的挙動を示した。また、最大値と最小値の比は 6.7:1 であり、直線偏光を仮定した理論値 9:1 に近い結果となった⁽¹⁾。図 3(b) に印加電圧を変化させた際の SHG 信号強度を示す。理論通り、SHG 信号は印加電圧の二乗に比例した。以上の結果より、今回試作した可搬型計測装置により、離隔距離 5 m において電界の定量計測が可能であることが示さ

れた。

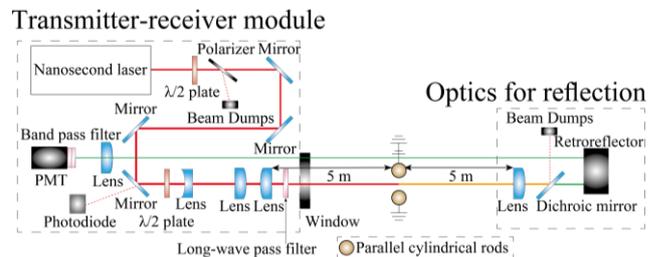


図 1 可搬装置を用いた実験系

Fig.1. Conceptual diagram of the experimental setup using the portable device

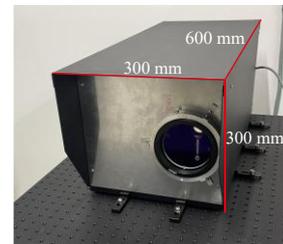


図 2 送受信系部分の写真

Fig.2. Photo of the transmitter-receiver module

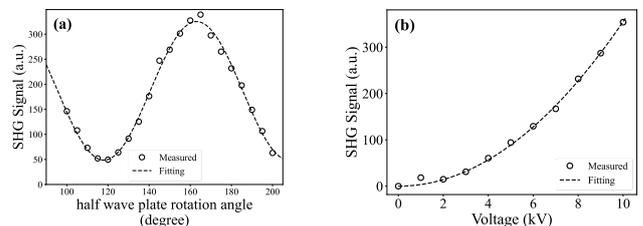


図 3 (a)偏光依存性と(b)電圧依存性

Fig. 3. Dependence of SHG signal intensity on (a) polarization and (b) applied voltage.

文 献

(1) A. Dogariu, *et al.*, Phys. Rev. Applied, 7, 024024 (2017).

(2) T. Sato, *et al.*, Opt. Express, 33, pp.37192–37203 (2025).

四端子対フィクスチャを用いた 蓄電池インピーダンス測定

坂本 憲彦*, 森 風歌 (産業技術総合研究所)

Rechargeable Battery Impedance Measurement Using a Fixture Based on the Four-Terminal-Pair Definition
Norihiro Sakamoto, Fuka Mori (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1. まえがき

リチウムイオン電池などの高容量蓄電池の普及に伴い、インピーダンス測定が蓄電池の性能評価に利用されてきている。しかし、ミリオームレンジの低い値を示す蓄電池が多いため、精密測定に適した四端子対定義⁽¹⁾に基づく評価が徐々に利用され始めている。一方で、同一材料を利用した電池であっても、円筒型やパウチ型などの形態の相違によりインピーダンスの周波数依存性に有意な差が生じる⁽²⁾。特にキロヘルツ帯域など、電池評価としては比較的高周波な帯域で顕著に表れる。本研究では、蓄電池の精密インピーダンス測定を目的として、四端子対定義に基づいたフィクスチャを設計製作し、ピン形プローブによるインピーダンス測定との比較評価を行った。

2. 実験手順

HIOKI BT4560 を用いて、抵抗とリアクタンスの周波数依存性を測定した。BT4560 の測定端子は四端子対である。測定周波数帯域は 100 Hz - 10 kHz、測定対象物 (DUT) として円筒型リチウムイオン電池 Panasonic UR18650AA、23 °C ± 2 °C の温度環境で実施した。

BT4560 と DUT との接続治具として、以下の 2 種類を用いた。

[I] 市販のピン形プローブ

[II] 銅筐体同軸フィクスチャ

いずれも四端子対定義に極力忠実に基づき設計されている。[I]は DUT の電極表面において電流用および電圧用のピン形プローブがコンタクトするが、各々のコンタクト配置が隣接しており独立である。一方、本研究で製作した[II]は、図 1 のように、DUT は銅筐体内に格納される。その電極表面において、電流用および電圧用のプローブが同軸状に配置されており、各々外部導体および内部導体となっている。従って、DUT の電極表面上で各々のコンタクト配置が同軸状である。銅筐体は同軸 BNC を 4 ポート備えており、インピーダンス測定器と四端子対で接続可能な状態に設計されている。

3. インピーダンス測定結果と考察

ナイキストプロットを図 2 (A) に示す。Pin cable、4TP

で示したプロットは、各々[I]、[II]の治具で測定した結果である。概ね 1 kHz 以上の高周波帯域において誘導性の挙動を示した。低周波帯域では、治具による測定の相違は認められなかったのに対し、高周波帯域では、有意な差が認められた。図 2 (B) はリアクタンスの周波数依存性である。概ね 1 kHz 以上で、周波数に比例する挙動が認められた。インダクタンスが支配的な要因と考えられる。比例係数は、Pin cable による測定は 4TP に対して約 1.3 倍と推定された。これにより、蓄電池のインピーダンス測定において、フィクスチャは有意な影響を及ぼすと考えられる。

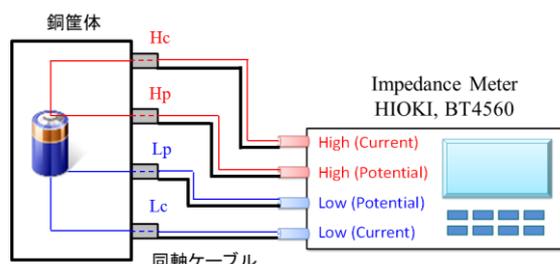


図 1 四端子対定義に基づく蓄電池のインピーダンス測定回路の概念図。

Fig.1. Schematic circuit of impedance measurement for a storage battery based on the four-terminal-pair definition.

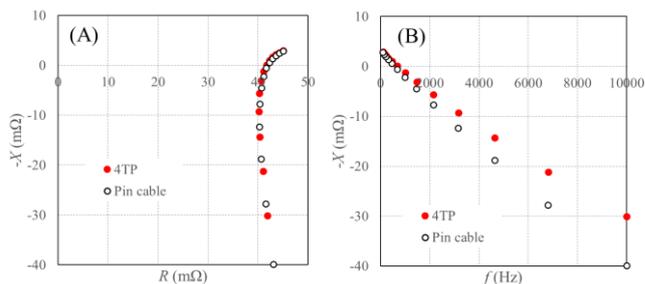


図 2 円筒型蓄電池のインピーダンスの周波数特性。周波数帯域は 100 Hz から 10 kHz: (A) ナイキストプロット、(B) リアクタンスの周波数依存性。

Fig.2. Frequency dependences of a storage battery from 100 Hz to 10 kHz: (A) Nyquist plot, (B) frequency dependence of reactance.

文 献

- (1) R. D. Cutkosky: *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **74C**, pp. 63-78 (1970).
(2) K. Ariyoshi *et al.*: *Electrochemistry*, **90**, p. 102008 (2022).

有機薄膜太陽電池モジュールの温度依存性評価 とその評価手法

下向 陽太*, 三澤 洸陽 (公立諏訪東京理科大学)
齋藤 英純 (神奈川県立産業技術総合研究所)
渡邊 康之 (公立諏訪東京理科大学)

Evaluation of Temperature-Dependent Characteristics for Organic Photovoltaic Modules
Using Novel Evaluation Methodology

Yota Shimomukai*, Kohyoh Misawa (Suwa University of Science)
Hidenori Saito (Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology)
Yasuyuki Watanabe (Suwa University of Science)

1. はじめに

有機薄膜太陽電池 (OPV) は軽量かつ柔軟性に優れ、発電に利用する光の波長を使用する有機材料によって選択可能なため、従来の電源では実現できなかった用途が検討されている。その一例として、OPV を農業用ハウスに設置し、ハウス内の農作物の生育に必要な波長の光を透過させ、他の波長の光で発電するといった、農作物栽培と太陽光発電を両立したソーラーマッチング⁽¹⁾という技術がある。この技術と蓄電システムを組み合わせることでOPVの発電電力による完全オフグリッドの農業用ハウスといった新たな試みが検討されている⁽²⁾。この農業用ハウスの実現のためには、主電源となる OPV の発電特性を把握することが重要である。しかし、OPV を設置した際に生じる温度変化に対する発電特性への影響が明確にされていない現状にある。

本研究では、農業用ハウス内で時々刻々と変化する温度に着目し、OPV モジュールに与える温度を変化させたときの発電特性への影響を調べ、OPV の温度依存性について明らかにすることを目的としている。

本報告では、小型サイズ (10cm 角程度) の OPV モジュールの温度依存性の評価を考慮した発電量測定装置を用いて取得した発電特性の結果について報告する。

2. 実験方法

<2・1> OPV モジュールの発電量測定

まず OPV モジュールの発電量測定の概略図を図 1 に示す。本測定では、光源として自然太陽光の可視光領域のスペクトルに近い疑似太陽光 LED を使用した。OPV モジュールへ光を照射させた状態でソースメータを用いて電圧印加時の電流値から I-V 特性及び P-V 特性を取得した。本報告における発電特性は、この I-V 特性及び P-V 特性を指す。

<2・2> 温度依存性の評価手法

次に受光部の温度制御の仕組みについて図 2 に示す。本

測定では温度依存性の評価手法として、恒温プレート(クールプレート)と呼ばれる、冷熱源にペルチェモジュールを搭載した、伝熱部の温度を一定に保つことができる装置を用

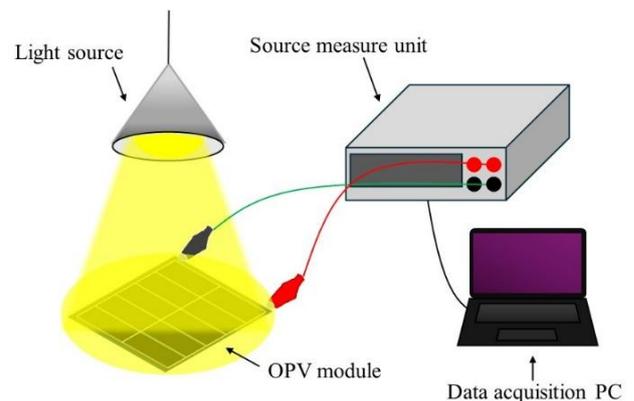


図 1 発電量測定の概略図

Fig.1. Schematic illustration of output power measurement

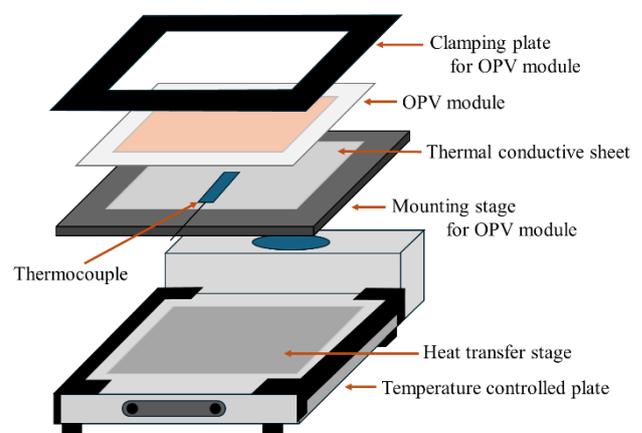


図 2 受光部の温度制御の仕組み

Fig.2. Temperature control mechanism of light receiving stage

いて温度制御を行った。この受光部は、伝熱部の上部にモジュール固定台、熱伝導シート、熱電対、OPV モジュール、モジュール押さえ板の順に構成されている。このようにOPV モジュールの裏面から間接的に温度負荷を与え、熱電対で常に温度を一定に保つよう確認しつつ光を照射させ、各温度設定下（10℃から 80℃まで）における発電特性を取得した。

<2・3> 発電量測定条件

表 1 に温度依存性の評価における発電量測定の条件を示す。使用した OPV モジュールは、光透過型の赤色の 10cm 角サイズである。受光部面積は、活性層が製膜されている部分のみとしている。

表 1 発電量測定条件
Table.1. Conditions for power output measurement

光源	疑似太陽光LED
光強度（放射照度）	56.26mW/cm ²
恒温プレート設定温度範囲	10℃→80℃
使用したOPVモジュール	光透過型赤色
OPVの活性層	p型：P3HT n型：PCBM
OPVモジュールサイズ	10cm角
有効面積（受光部面積）	46.2cm ²

3. 実験結果

<3・1> 温度変化に対する I-V 特性

本測定では、設定温度を 10℃から 80℃まで上昇させ（これを昇温過程と呼称する）、その後 80℃から 10℃まで低下させた（これを本報告では降温過程と呼称する）。図 3 に OPV モジュールの温度変化に対する I-V 特性結果を示す。この図 3 では I-V 特性の一つとして、短絡電流と開放電圧の昇温過程及び降温過程における推移を示している。昇温過程では温度上昇に伴い、短絡電流及び開放電圧の上昇がみられた。降温過程では、短絡電流の 40℃までの上昇と、その後の低下、開放電圧の上昇がみられた。いずれも照射時間に対して特性が変化している可能性がある。しかし、短絡電流の低下が一部みられ、OPV の発電において電流を取り出すための最適な温度が存在する可能性が考えられる。

<3・2> 昇温及び降温過程における P-V 特性

図 4 に OPV モジュールの昇温及び降温過程における P-V 特性結果を示す。この図 4 では 80℃の黒の実線を境に、昇温過程及び降温過程それぞれの P-V カーブを示している。図 4 より、昇温、降温過程ともに最大出力電力の上昇が確認できた。また本測定に用いた、活性層が P3HT/PCBM である OPV は、“ライトソーキング効果”という OPV に照射することで、初期状態で低かった発電特性が時間とともに改善する現象がみられることが報告されている⁽³⁾。したがって本測定結果は、照射時間の経過に伴い出力電力や発電特性が向上している可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究では、有機薄膜太陽電池モジュールの温度変化に対する発電量変化を明らかにする評価手法を用いて、光透過型の赤色 OPV モジュールの発電特性を取得した。その結果、温度変化に対し短絡電流と開放電圧の上昇と一部の低下、出力電力の上昇が確認された。またライトソーキング効果による影響で照射時間に対して発電特性が向上した可能性が考えられる。今後は、他パラメータの結果も踏まえ、受光部の照射ムラなども考慮し、測定方法や条件の再検討を行う予定である。

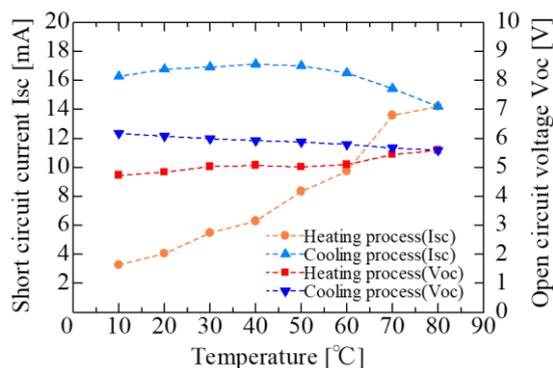


図 3 温度変化に対する I-V 特性結果

Fig.3. Results of I-V characteristics under different temperatures

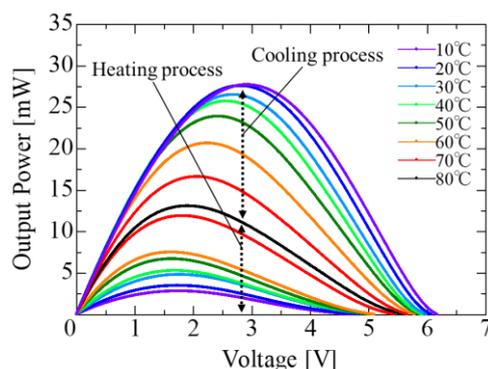


図 4 昇温及び降温過程における P-V 特性結果

Fig.4. Results of the P-V characteristics during Heating and Cooling processes

文献

- (1)K.Hosokawa, R.Sei, T.Yachi, Y.Hirata, and Y.Watanabe, "Characteristics and Estimation of Power Generation for Solar Matching House", Journal of Japan Solar Energy Society, 2019,45(1), pp.101-107
- (2)濱健斗, 渡邊康之, 有機薄膜太陽電池を活用したソーラーマッチングシステムの検討, 2023, pp.76-98
- (3) T.Kusumi, T.Kuwabara, K.Fujimori, T.Minami, T.Yamaguchi, T.Taima, K.Takahashi, T.Murakami, V.A.S.A.Rachmat, and K.Marumoto, "Mechanism of Light-Soaking Effect in Inverted Polymer Solar Cells with Open-Circuit Voltage Increase" ACS Omega 2017, 2, pp.1617-1624

電流調整機構の改良による交流抵抗測定 の周波数拡張

森 風歌*, 坂本 憲彦(産業技術総合研究所)

Extending the Frequency Range of AC Resistance Measurements by Improving the Current Adjustment Unit
Fuka Mori, Norihiko Sakamoto (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1. まえがき

電子部品や電池、それらの材料の開発、製造現場で用いられる性能評価方法のひとつにインピーダンス測定がある。インピーダンス測定においては、測定対象物の特性をみるために、kHz から MHz に至る周波数範囲での測定が必要である。一方で、産総研計量標準総合センター (NMIJ) で供給している標準は、高精度な測定が可能だが、精密性を有するブリッジの特性上 1.592 kHz のみに限られる。そこで、高い精度を維持した状態で、インピーダンス測定の周波数範囲を拡張することを目的として、既存のインピーダンス測定装置の改良を試みた。本研究では、インピーダンス測定装置の中の交流抵抗ブリッジを改良した回路を考案し、適切な調整機構を施した。その結果、交流抵抗測定の測定周波数範囲を 15.92 kHz まで拡張できた。

2. 電流調整拡張型交流抵抗ブリッジの設計

NMIJ では、四端子対定義⁽¹⁾に基づき構築された 10 : 1 比交流抵抗ブリッジを保有する。100 kΩ 抵抗器を仲介器、交直差計算可能 10 kΩ 抵抗器 (AC / DC) を基準器として、測定対象物である 10 kΩ 抵抗器 (DUT) を置換測定する。このブリッジを使用した場合、約 10 kHz より高い周波数範囲では平衡せず、測定ができない。この原因としては、測定信号の高周波化に伴い、既存の電流調整機構の電流成分調整可能範囲から逸脱したことが考えられる。そこで、図 1 に示すように回路を設計した。電流調整機構の測定範囲を拡張するために、赤枠で示した誘導分圧器 (Inductive Voltage Divider; IVD) を既存の交流抵抗ブリッジに追加した。

3. 試作と置換比較の実証

設計に基づき、2 台の IVD を接続することで電流調整拡張型交流抵抗ブリッジを試作した。図 2 には、測定対象物の公称値 10 kΩ からの偏差の周波数依存性を示す。従来の交流抵抗ブリッジでは約 10 kHz までしか測定できなかったのに対して、電流調整拡張型交流抵抗ブリッジでは 15.92 kHz まで測定できた。測定において、追加した IVD の有無や性能に起因した測定値のばらつきが確認された。そのばらつきの程度は周波数に依存しなかった。

4. まとめ

既存の交流抵抗ブリッジを改良することにより、測定可能な周波数範囲を 15.92 kHz までに拡張した。今後、測定の不確かさを見積もる。

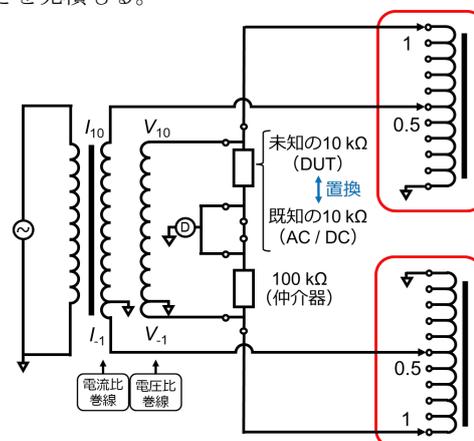


図 1 電流調整拡張型交流抵抗ブリッジ。追加した誘導分圧器を赤枠で示す。

Fig.1. Circuit of the current-adjustable extended AC resistance bridge. The added inductive voltage divider is shown in red frame.

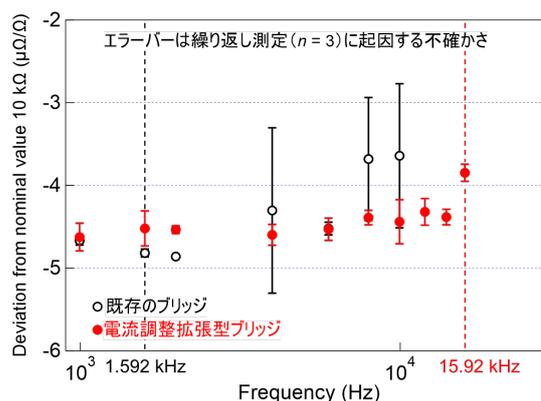


図 2 既存の交流抵抗ブリッジ、または電流調整拡張型交流抵抗ブリッジで測定した公称値 10 kΩ からの偏差の周波数依存性。

Fig.2. Frequency dependence of deviation from nominal value 10 kΩ using in existing AC resistance bridge and in current-adjustable extended AC resistance bridge.

文献

(1) R. D. Cutkosky: J. Res. Nat. Bur. Stand., 74C, 63-78 (1970).

有機薄膜太陽電池モジュールの屋外実証における 発電特性推移解析とシステム開発

三澤 洸陽*, 下向 陽太 (公立諏訪東京理科大学)
渡邊 康之 (公立諏訪東京理科大学)

Analysis of Power Generation Characteristics and System Development in Outdoor
Demonstration for Organic Photovoltaics Modules
Kohyoh Misawa*, Yota Shimomukai (Suwa University of Science)
Yasuyuki Watanabe (Suwa University of Science)

1. はじめに

近年、農地を有効活用する手段として「営農型発電」(ソーラーシェアリング)が普及している。これは農地上部にシリコン太陽電池を間隔を空けて設置し、太陽光を発電と農作物でシェアする手法を指す。しかし、この手法は農作物への遮光が避けられず、栽培可能な品種が日陰に強い作物に限定されるという課題がある。

そこで、特定の波長の光を透過する有機薄膜太陽電池(OPV)モジュールを農業用ハウスに設置し、発電と栽培を両立する「ソーラーマッチング」が新たに注目され、研究が盛んに行われている。⁽¹⁾ この手法は、農作物の光合成に必要な波長を透過できる「波長選択性」を持つ点や、軽量で設置が容易である点において、従来の営農型発電よりも農業親和性が高いと期待されている。

しかし、ソーラーマッチングの実環境における発電特性や、システムとしての有効性は十分に検証されていない。そこで本研究では、ソーラーマッチング用発電量計測システムを開発し、その有用性を検証することを目的とする。具体的には、日射条件の異なる複数のOPVモジュールの発電量を同時測定し、発電特性の推移を解析した。また、上記の過程や結果から測定器の改良点を抽出し、改良IVカーブトレーサーの設計に反映させた。

2. 実験方法

<2・1> IVカーブトレーサー1号機の基本構造

太陽電池の出力を計測するのに用いられるソースメータは、高価で持ち運びができないため複数のOPVモジュールを同時に測定するのが困難である。そこで、複数の太陽電池の出力特性を測ることのできるIVカーブトレーサー1号機を開発した。

Fig.1にIVカーブトレーサー1号機の回路図(一部)を示す。回路図右側のPV in端子に太陽電池を接続する。マイクロコントローラからPWM信号を出力し、RCローパスフィルタを介してMOSFETのゲートへ入力する。こうして平滑化された直流電圧がゲートに印加され、負荷抵抗を連続的に変化させている。

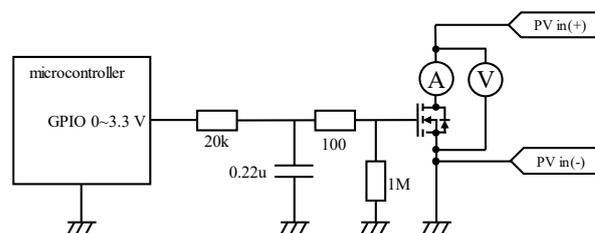


図1 IVカーブトレーサー1号機の回路図(一部)

Fig.1 Partial schematic diagram of IV Curve Tracer No. 1

この回路を5つ搭載することで同時に複数の太陽電池の特性を計測することが可能となる。

<2・2> 実験条件

受光部が約1000mm×300mmである緑色OPVモジュール2枚(OPV No.1, OPV No.2)を屋外に設置し、OPVモジュールとIVカーブトレーサー1号機を接続した。9月17日から9月30日までと、10月6日から10月24日にかけて平均約20分間隔でIVカーブを取得した。

3. 実験結果

<3・1> 太陽電池の特性変化

横軸を日付、縦軸を1日の全天日射量(GHI)⁽²⁾と短絡電流(Isc)とした実験結果をFig.2に、横軸を日付、縦軸を開放電圧(Voc)とした実験結果をFig.3に示す。

Fig.2において、全天日射量が15.0MJ/m²付近のときのOPV番号1の電流値に着目する。実験の前半ではOPV番号1が250mA前後であるのに対し、実験後半では200mA前後と、低下していることがわかった。一方、開放電圧は実験の前半、後半でほぼ一定の値を維持し、変化が小さいことがわかった。

実験前と実験後でOPVの外観を比較すると、OPVモジュールの封止フィルムが2つとも白く変色しており、封止フィルム内の剥離や内部に気泡の発生も見られた。

OPVの短絡電流が低下したのは、熱や光などによってOPVを封止しているフィルム層の剥離が生じたことと、フィルムの白濁が原因だと考える。発電層と封止層が剥離す

る現象はSi太陽電池でも発生⁽³⁾しており、今回の実験では封止フィルムの白濁および剥離に伴う光散乱が、発電層への有効入射光量を減少させたと推察される。

<3・2> IVカーブトレーサー1号機の改良点
屋外実証実験を通して、開発したIVカーブトレーサー1号機において以下の改良点が抽出された。

- ・環境データの欠損

IVカーブトレーサー1号機ではIVカーブを取得するのみで、OPVモジュールの温度や入射する日射量を測定する機能はなかった。OPVの特性変化の要因解明には環境センサーの統合が必要である。

- ・同時測定チャンネル数の制限

IVカーブトレーサー1号機は入力端子を5つ搭載し、最大5つの太陽電池を同時測定できる。しかし、今後より大きな規模の実証実験を行う可能性があることを考慮すると、それ以上の個数を測定できるようにする必要がある。

- ・測定における長期安定性

測定を続けるにつれて、IVカーブの取得間隔が伸びていく不具合が確認された。より長期の測定や、正確な電力量の計測のため、長期安定性を求めた設計が求められる。

4. 改良IVカーブトレーサーの開発

前章の課題に基づき、ハードウェアおよびソフトウェアの刷新を行った。多点同時測定の制約を解消するため、Bluetooth通信機能を有したマイクロコントローラーを採用した。各太陽電池に対して個別に測定機を接続し、それぞれの測定機が測定データを親機に無線通信で送信することで計測点数の拡張を実現した。また、環境データの取得のため、照度計、熱電対温度計をそれぞれI2C通信、SPI通信を用いてマイクロコントローラーに接続した。

ソフトウェア面では、測定を続けるにつれて、IVカーブの取得間隔が伸びていく不具合を修正した。この原因は、新しい測定データをストレージに書き込む際、ファイル名が重複しないようストレージ内にあるすべてのファイル名を確認していたことに起因すると思われる。

4. まとめ

本研究では、ソーラーマッチングの実環境評価を目的としたIVカーブトレーサーを開発し、屋外実証実験による有用性の検証を行った。その結果、OPVモジュールの封止層の剥離や白濁に伴う短絡電流の低下を確認し、実環境における耐久性の課題を抽出した。一方、開放電圧はほぼ一定を維持し、発電量低下の原因は短絡電流の低下によるものであることがわかった。また、1号機の運用を通じて得られた環境データ必要性や測定周期の不安定性、チャンネル数の

制限といった課題に対し、アルゴリズムの最適化や無線通信による分散型計測を導入することで、より高度な実証試験が可能な改良型システムの構築を実現した。今後は、改良したシステムを用いて、OPVの劣化メカニズムのさらなる詳細な解析を行う予定である。

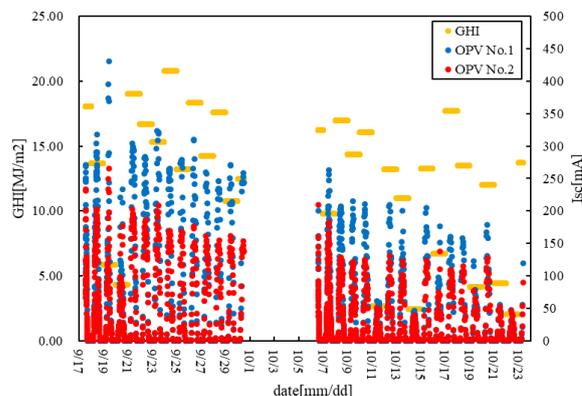


図2 OPVモジュールの短絡電流推移

Fig.2 Short circuit current transition of OPV module

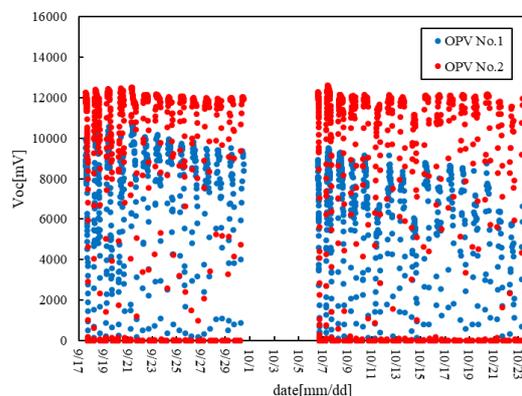


図3 OPVモジュールの開放電圧推移

Fig.3 Open circuit voltage transition of OPV module

文献

- (1) K.Hosokawa, R.Sei, T.Yachi, Y.Hirata, and Y.Watanabe, "Characteristics and Estimation of Power Generation for Solar Matching House", Journal of Japan Solar Energy Society, 2019,45 (1), pp.101-107
- (2) 気象庁 "過去の気象データ検索" 気象庁ホームページ <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php> (2025/12/20)
- (3) Pramod Rajput et al., A comprehensive review on reliability and degradation of PV modules based on failure modes and effect analysis (International Journal of Low-Carbon Technologies, Volume 19, 2024), Pages 922-937

不等間隔で変調された信号のロックイン検出法

田丸 慎吾* (産総研)

Lock-in detection of signals modulated at uneven intervals

Shingo Tamaru (AIST)

1. はじめに

被測定信号を変調し、狭帯域フィルターを用いて変調周波数成分をノイズ成分から分離する手法はロックイン検出法と呼ばれ、ノイズに埋もれた微小信号を測定する手段として、様々な計測において幅広く用いられている。しかし従来のロックイン検出法は変調間隔が一定であることを前提としており、被測定信号が不等間隔で変調された場合、ノイズ除去性能が大幅に悪化するという問題があった。

我々は、磁性材料の高周波透磁率測定装置の開発において、信号を不等間隔で変調することが不可避な状況に遭遇した。そこでそのような信号をロックイン検出するアルゴリズムを新たに考案して実装したところ、従来と比較し約 40 dB という劇的なノイズ除去性能の向上が確認された。

2. 本アルゴリズムの基本概念

一般にノイズは幅広い帯域に渡り存在するが、高周波ノイズは平均化により容易に除去できること、多くの測定系では周波数が低いほどノイズが大きくなることから、本アルゴリズムは変調信号より低周波のノイズ成分を除去することを目的とし、以下の4条件を仮定した。

- 1, 被測定信号は、不等間隔で変調される。
- 2, 総信号は被測定信号とノイズの和で表される。
- 3, 総信号は変調間隔に同期してサンプリングされる。
- 4, ノイズは変調間隔よりも十分ゆっくりと変化する。

条件1より、変調後の被測定信号スペクトルが広がってしまうため、従来のロックイン検出法で取り出すことはできない。本アルゴリズムでは、低周波ノイズは多項式で近似できるものとし、不等間隔サンプリングのタイムスタンプから、ノイズ多項式より高次の微分演算子を導き、これを総信号データに作用させる。すると微分により低周波ノイズが除去される一方、被測定信号は微分演算子を作用させても残り、その振幅を定量的に見積もることができる。これらの数学的記述は参考文献1に示されており、また発表においても説明する。

3. 従来のロックイン検出アルゴリズムとの比較

図1は、開発した透磁率測定装置によって得られたマイクロ波透磁率 $\text{Re}(S_{21})$ の生データである。測定装置の詳細や測定条件は本発表の本筋から外れるので割愛するが、本装置は測定磁場と飽和磁場の2値の磁場を交互に印加しながら S_{21} を測定する。それらは図1においてそれぞれ赤線と青

線で示されている。試料の透磁率スペクトルは S_{21} の赤線と青線の差分 ΔS_{21} に比例する。しかし生データには大きな低周波ノイズも重畳されているため、ロックイン検出により、低周波ノイズを除去して差分だけを取り出す必要がある。だが赤丸と青丸の間隔は同一でないため、従来のロックイン検出アルゴリズムではノイズ除去性能が悪化してしまう。

図2は、本測定を10回繰り返し、 ΔS_{21} 従来及び新アルゴリズムで取り出した結果の比較である。従来と比較し、新アルゴリズムの方が明らかにばらつきが小さくなっている。その標準偏差を比較すると、新アルゴリズムの方が約 1/100(40 dB)ばらつきが小さくなる事が示された。

4. 謝辞

本研究は、文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 の助成を受けたものです。

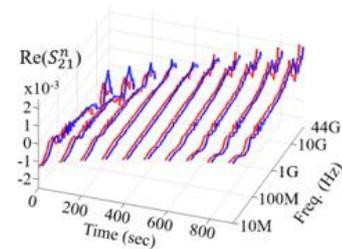


図1 高周波透磁率測定装置によって取得された $\text{Re}(S_{21})$ 生データ
Fig.1. Law $\text{Re}(S_{21})$ data obtained by the permeameter

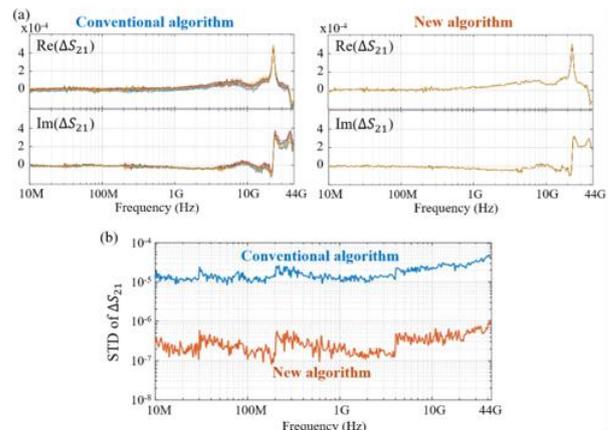


図2(a)従来と新アルゴリズムによる ΔS_{21} と(b)標準偏差の比較
Fig.2. Comparison of (a) ΔS_{21} and (b) standard deviation between the conventional and new lock-in detection algorithms

文献

- (1) S. Tamaru: Measurement., 117894 (2025)

半値全幅の異なる複数の同一波長のファイバブラッグ グレーティングを用いたひずみ測定の検討

村田 亜優*, 山口 達也, 篠田 之孝 (日本大学)

Investigation of Strain Measurement Using Multiple Fiber Bragg Gratings
with Different Full Widths at Half Maximum at Same Wavelength
Ayu Murata, Tatsuya Yamaguchi, Yukitaka Shinoda (Nihon University)

1. はじめに

光ファイバセンサであるファイバブラッググレーティング (FBG) は高い耐久性を有し, 土木構造物のモニタリングや航空宇宙産業など幅広い分野で応用が拡大している^{(1),(2)}。FBG の多点化には主として波長分割多重が用いられているが, 光源の波長帯域により使用可能なセンサ数が制限される課題がある。本研究では, FBG の同一波長多重の実現を目的とし, 反射スペクトルが複雑に重なる状況に対して, 機械学習による解析手法の開発を推進している^{(3),(4)}。本文では, 畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いたピーク検出法を構築し, 4つのFBGのピーク波長を解析した結果を報告する。

2. 実験と結果

図1に実験装置の構成を示す。本装置は広帯域光源, サークキュレータ, カップラ, 光スペクトラムアナライザ, およびFBGセンサから構成される。4つのFBGはすべてブラッグ波長が1550nmで同一であり, 単一の波長域を共有して配置した。この構成により, 波長分割多重と比較して4倍のセンサ密度が可能となる。しかし, 光スペクトラムアナライザでは反射スペクトルが複雑に重なり合っ観測されるため, ピーク波長解析は困難である。そこで本研究では, CNNを用いたピーク検出法を開発した。CNNは畳み込み層8およびプーリング層7から構成され, 各FBGに固有の半値全幅を付与することで識別性能の向上を図った。

図2に43回のひずみ印加時におけるFBG反射スペクトルを示す。反射スペクトルはひずみに応じて波長シフトしているが, 大きく重なり合うため個々のFBGの識別は困難である。そこでCNNを用いてピーク波長を検出した結果, FBG1およびFBG3のひずみ感度はそれぞれ $1.20 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ($R^2=0.99996$) および $1.18 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ($R^2=0.99877$) となり, 一般的なFBGの感度と一致した。また, FBG4の標準偏差を評価した結果, 約 4.5 pm となった。以上より, 本手法により波長分割多重の限界を4倍に拡張でき, 同一波長多重の開発に有用であることを示した。

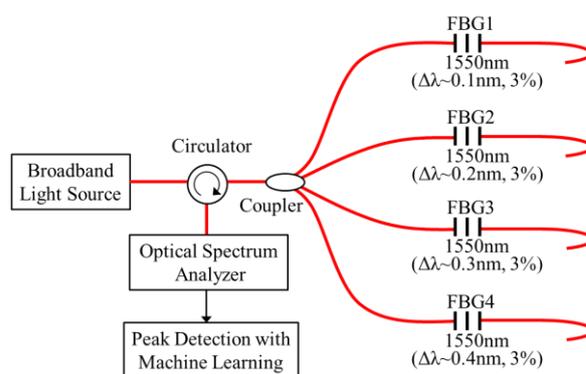


図1 実験装置
Fig. 1. Experimental setup

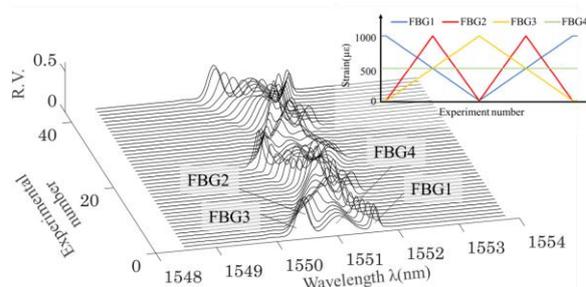


図2 FBGの反射スペクトルの結果
Fig. 2. Result of reflection spectra of FBGs

謝辞

この研究の一部は, 科研費若手研究 20K14754, 24K17288, 及び日本大学理工学部研究助成金の援助を受けて行われた。

文献

- (1) A D Kersey et al.: J. Lightw. Technol., 15(8), 1442~1463 (1997)
- (2) Y C Manie et al.: J. Lightw. Technol., 38(6), 1589~1603 (2020)
- (3) T Yamaguchi et al.: IEEE Sensors J., 23(9), 9343~9352 (2023)
- (4) 村田亜優 他: 令7 電気学会光応用・視覚研究会, No. LAV-25-008

屋外実構造物の塩分測定に向けた リモートダブルパルス LIBS システムの開発

倉橋 慎理^{1)*}, 染川 智弘^{1,2)} (レーザー技術総合研究所¹⁾, 阪大レーザー研²⁾)

Development of Remote Double-Pulse LIBS System for Salinity Measurement on Outdoor Structures

Shinri Kurahashi¹⁾, Toshihiro Somekawa^{1,2)} (Institute for Laser Technology¹⁾, Institute of Laser Engineering²⁾)

1. はじめに

高架橋などの鉄筋コンクリート (RC) 構造物の劣化要因の一つである塩害は、コンクリート中の塩分濃度が一定以上になると鉄筋が錆びて膨張し、ひび割れや表面の剥離を生じさせる現象である。RC 内部の鉄筋は、通常不導体被膜に覆われており腐食しにくいですが、周囲の塩化物イオン濃度が一定以上になると不導体被膜の一部が破壊されその部分から腐食が発生する。

筆者らの研究グループは、遠隔かつ実時間塩分計測を実現するためレーザー誘起ブレイクダウン分光 (LIBS: Laser Induced breakdown Spectroscopy) 法を用いた手法を開発してきた。これまでに、ナトリウム原子を測定対象とした扱い易い可搬型のリモート LIBS システムを開発し、実際に高架橋での実証試験を実施した¹⁾。LIBS は被測定対象に短パルスレーザーを照射し、発生したプラズマ発光を分光測定することでその場でリアルタイムに物質の元素分析を行う手法であり、電位差滴定法などの従来手法と比べ対象のコア抜きや前処理が不要といった特長がある。

本稿では、開発した LIBS システムを用いて現在使用中の高架橋の床版を対象とした屋外試験を実施した結果を報告する。

2. 屋外実証試験

2台のレーザー発振器と CMOS 型高速分光器からなるダブルパルス LIBS システムを構築し、地上から 7 m 程度離れた高架橋のコンクリート床版の LIBS スペクトルを測定す

る屋外試験を実施した。構築したシステムで計測する様子を Fig.1 に示す。レーザーヘッド部に内包された2台の発振器は、波長 1064 nm, パルス幅 6 ns, 1パルスあたりのエネルギーは約 300 mJ であり、2つのパルスの間隔を 1 μs でシングルショット照射するよう同期制御を行った。両パルスを同軸で、焦点距離を 7 m とし、レーザー光をコンクリート床版の表面に集光した。発生したプラズマからの発光のうち波長 200 ~ 900 nm の成分を抽出し、2台の異なる分光器 (波長範囲:200 ~ 750 nm, 波長分解能: 0.6 nm と波長範囲:700 ~ 900 nm, 波長分解能: 0.3 nm) を用いて LIBS スペクトルを測定した。

Fig.2 にシステムを用いて測定したコンクリート床版の LIBS スペクトルを示す。Mg, Si, Al, Ca, K などのコンクリートの代表的な構成元素に加え、Na や H, また大気由来と見られる O や N の輝線を検出している。また、検出された輝線の多くはカルシウムによるものであった。構築したシステムは屋外におけるコンクリート構造物の遠隔計測に適用可能であることを示した。

謝辞：本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「先進的なインフラメンテナンスサイクルの構築」によって実施されました。関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 染川 智弘 他, レーザー研究, 50 (2022) 318.



Fig.1 An experimental layout of a LIBS system

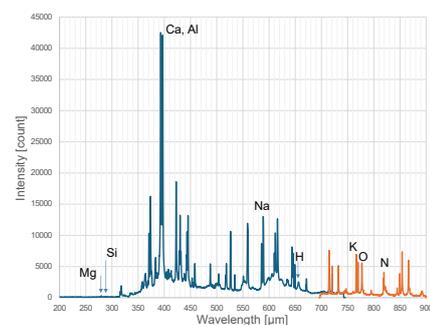


Fig.2 LIBS spectrum of the concrete slab

シグマ型ファイバリングレーザによるファイバブラッグ グレーティングを用いた動的ひずみ測定の検討

永喜多 真佳*, 山口 達也, 篠田 之孝 (日本大学)

Consideration of Dynamic Strain Measurement with Fiber Bragg Gratings Using Sigma Type Fiber Ring Laser
Manaka Nagakita, Tatsuya Yamaguchi, Yukitaka Shinoda (Nihon University)

1. はじめに

ファイバブラッググレーティング (FBG) は、特定の波長成分のみを反射する光学デバイスである。反射波長がひずみや温度の変化に応じてシフトする特性を有することから、高感度かつ耐久性に優れた光ファイバセンサとして広く応用されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。本研究では、FBG センサの多点計測性能の向上を目的として、シグマ型ファイバリングレーザを用いた FBG 多点計測法を提案する⁽⁴⁾。本文では、シグマ型ファイバリングレーザの異なる光路長位置に FBG を配置することで多点化を行い、掃引周波数制御に基づく FBG の距離選択的計測および動的ひずみ計測について検討した。

2. 実験と結果

図 1 に実験装置を示す。本装置はシグマ型ファイバリングレーザをベースに構成した。レーザは、波長 1550 nm 帯の光増幅器およびファイバファブリペローチューナブルフィルタ (FFP-TF) を用いたリング共振器からなる。共振器内には、8 本の FBG センサを光路長の異なる A 点および B 点に配置した。FBG のブラッグ波長は 1530~1550 nm、反射率は 80%とした。リングレーザでは、共振器周回時間と FFP-TF の掃引周波数が一致したときにレーザ発振が生じる。このため、光路長に対応した二つの掃引周波数を切り替えることで、特定距離に配置された FBG によるレーザ光を選択的に観測する。FBG によるレーザ光は A/D コンバータで取得し、FPGA のピーク検出処理を用いて解析した。

図 2 は、掃引周波数 49.214 kHz (B 点) で動作させた際に測定した FBG_{B4} の反射波長の時間応答を示す。実験では、FBG_{B4} に 100 μE の引張ひずみを 2 s 周期で印加した。ひずみに対する反射波長変化は 0.12 nm であり、一般的な FBG のひずみ感度と一致した。反射波長の標準偏差は 15.1 pm であり、掃引周波数から決定される時間分解能は約 20 μs であった。また、光スペクトラムアナライザによるスペクトル解析から、異なる距離に設置された同一波長の FBG_{A4} の影響を受けることなく独立して計測できることを確認した。以上より、開発したレーザは FBG の距離選択的検出および動的ひずみ計測に応用可能であることを示した。

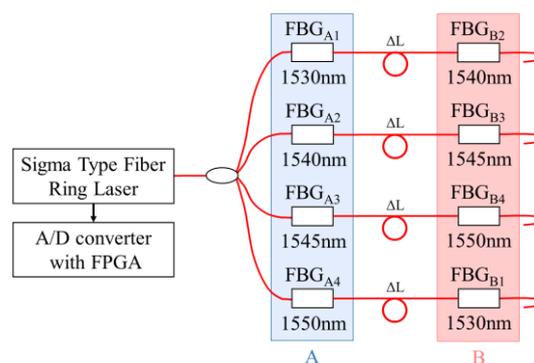


図 1 実験装置
Fig.1. Experimental setup

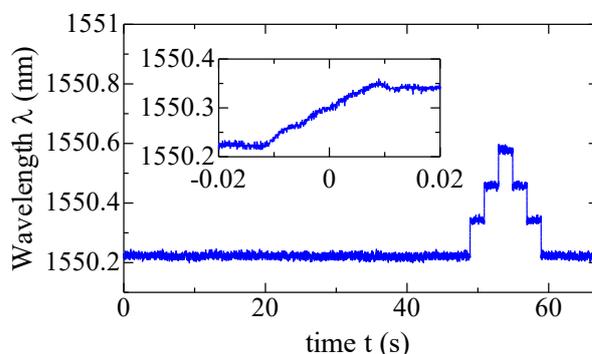


図 2 FBG_{B4} の反射波長測定の結果
Fig.2. Result of reflection wavelength of FBG_{B4}

謝辞

この研究の一部は、科研費若手研究 20K14754, 24K17288, 及び日本大学理工学部研究助成金の援助を受けて行われた。

文献

- (1) R Huber et al.: Opt. Exp., 14(8). 3225~3237 (2006)
- (2) D Chen et al.: Opt. Lett., 33(13). 1395~1397 (2008)
- (3) T Yamaguchi et al.: IEEE Sensors J., 21(15). 16659~16669 (2023)
- (4) 永喜多真佳 他: 令 7 電気学会光応用・視覚研究会, No. LAV-25-009

光センサによる高周波電流計測と標準化

高橋 正雄 (株式会社東芝)

Development and Standardization of High-Frequency Current Measurement Methods Based on Optical Sensor Technology
Masao Takahashi (Toshiba corporation)

1. まえがき

光電流センサは絶縁性に優れ、小型で高精度測定ができることから、高電圧・大電流測定を中心に各所に適用されている。周波数特性にも優れ、直流から高周波まで平坦な特性を持っていることから、HDVC 用の電流計測にも用いられ、安全な運用を支えている(1)。課題として大電流領域では光電流センサ以上に周波数特性の良い計測器は見当たらず、校正時の基準計測器がないことから、周波数に制限される物理現象と、電流変化速度に制限される現象を分けて評価することを提唱し(2)、開発を進めてきた。今までに直流から 1MHz まで感度変化 1%以下の電流センサを実現したのでこの結果と、関連する標準の整備状況について報告する。

2. 光電流センサの構成

開発した光電流センサの構成を図 1 に示す。ファラデー回転を直接光の強度変化としてとらえる強度変調方式を採用した。

光ファイバのファラデー効果は GHz を超えて平坦な特性を示すことが知られており、また、センサファイバでのファラデー効果を強度信号に変換するための SM カプラ、偏波分離ファイバも周波数特性を持たない。周波数特性を制限するのは、検出器以降の信号処理の周波数帯域と、センサファイバ中の光の伝搬時間である。使用したセンサファイバは 1m であるので、伝播時間での制限は約 400MHz となる。

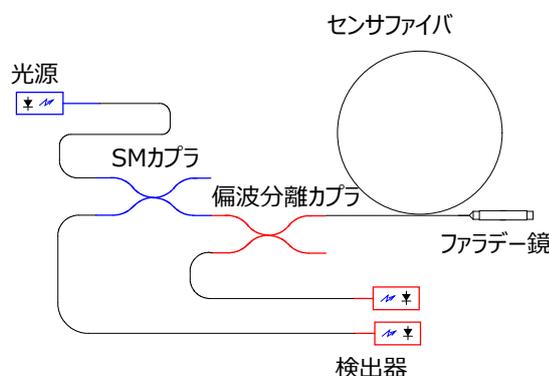


図 1 光電流センサの構成

2. 周波数特性

光電流センサの周波数特性を図 2 に示す。校正時の基準計測器としては、シャント抵抗器を用いたが、高周波特性での精度を確保するためには低インダクタンスの小型の抵抗器が必要で、1A 程度の電流で測定し、平均をとることで特性を取得している。この測定点を図中の赤丸で示す。逆に低電流域では平均回数を多くすると測定時間がかかりすぎるので、10A 程度の電流を 400T のコイルを用いて通電し、平均化を実施していない。この測定点を図中の青丸で示す。0.1~1MHz まで 1%以下の感度変動が実現できている。

3. 高周波光変成器評価手法の標準化

今まで送配電線に適用されている電流センサ・電圧センサは、50Hz または 60Hz の商用周波数とその高調波しか考慮されておらず、IEC や JEC の規格も商用周波（とその高調波）の特性しか規定していない。これが実用上のネックであった。このため、高周波特性を含め、温度特性等光特有の現象に対する評価方法をまとめ、光電流センサ規格 IEC61757-4-3、光電圧センサ規格 IEC61757-7-3 を日本が中心となり成立させた。電流変化速度に制限される現象の評価法については標準化できていないので、引き続き、規格の拡充を実施していく。

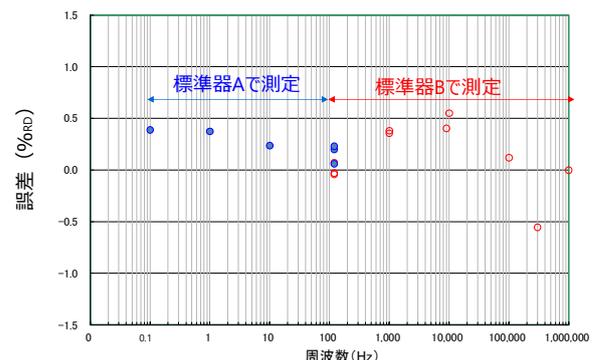


図 2 光電流センサの周波数特性

文献

- (1) 高橋 正雄, 高橋 紹大「高圧直流送電 (HVDC) を担う直流計測技術」、電気学会誌 2014 年 134 巻 11 号 p. 764-767
- (2) 高橋正雄「光電流センサの高周波特性評価」2024 電気学会全大

Wiegand 素子を活用した減肉探知センサ

吉田 大祐*(株式会社神戸製鋼所)

Thinning detection sensor utilizing a Wiegand element
Daisuke Yoshida (Kobe Steel Ltd.)

1. はじめに

工場などの生産現場には配管が無数に存在し、保全対応に多大な人的負荷がかかることが問題となっている⁽¹⁾。この問題を解決するために、本報告では Wiegand 素子⁽²⁾ を活用した減肉監視方法を提案する。この素子は環境発電素子の一つであり、外部磁場変化のエネルギーを電圧に変換する。この素子は、軟磁性・硬磁性の二層構造の磁性体と巻線で構成される。この素子に、応答閾値を超える外部磁場の変動を与えると、大バルクハウゼンジャンプという磁性体の磁化変化が生じ、これがコイルにて誘導起電力に変換され、素子の出力端子からパルス電圧が出力される。特筆すべきは、この動作が無給電で実行できる点である。

2. 装置構成

図1に本装置⁽³⁾の構成例を示す。本装置は、磁石、ヨーク、Wiegand 素子、Wiegand 素子の出力を受けて報知動作を開始する発報機構から成る。本装置の測定対象物は、軟磁性を示す構造材 (S45C, SS400 等) とする。本機構の動作の流れについて述べる。まず、閉磁路内の測定対象物が減肉することで、測定対象物内部を通過する磁束が飽和し、外部に磁束が外部に漏洩する。これが Wiegand 素子に作用し、パルス電圧を出力する。この信号が発報機構のラッチ回路に入電することで、発報機構が動作開始し、減肉の発生を監視者に知らせるといものである。本構成の特長は、Wiegand 素子の動作特性から、減肉が所定の漏れ磁束を超えるまでの間、無給電で待機することができ、かつ遠隔の減肉監視システムを構築することが可能な点である。

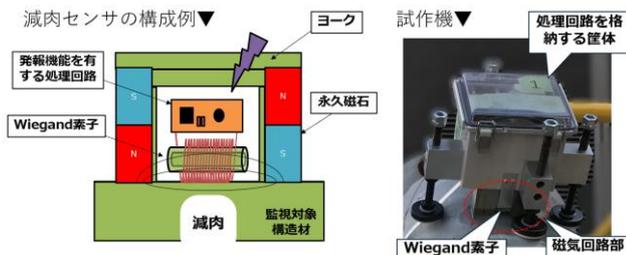


図1 Wiegand 素子を用いた減肉探知センサの構成例
Fig.1. An example configuration of thinning detection sensor using the Wiegand element

3. 基礎検討結果

現実での配管にて動作することを確認するため、試作を行った。減肉モデルは、円筒配管内部に球を差分ブーリアンして生じる形状として仮定した。その上で、減肉の最薄部が所望の板厚となる際の漏洩磁束密度が Wiegand 素子の動作点となるよう、磁路形状を設計した (図2)。また、Wiegand 素子の信号を処理する発報機構を含めた回路部を製作、並びに、実際の配管内部の減肉を模擬し、減肉を想定通りに検出することを確認した。本方式の性能について、感度マップを作成し、各種ダメージ位置に対する監視範囲の定量化を行った (図3)。

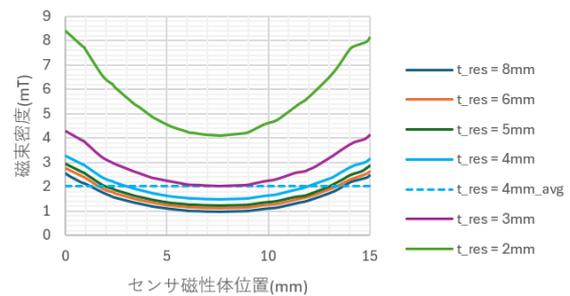


図2 減肉に対する漏洩磁束密度の解析結果
Fig.2. Leakage Magnetic Flux Analysis for Thinning

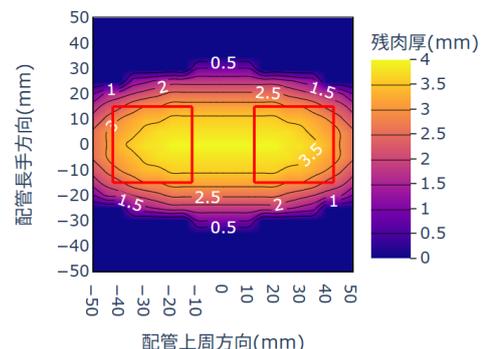


図3 配管上座標における残肉厚の感度マップ
Fig.3. Sensitivity map of remaining thickness at pipe Coordinates

文 献

- (1)遠藤英樹、日下卓也：神戸製鋼技報, Vol. 64 No. 2 (2014)
- (2) J.R. Wiegand: US Patent No. 3820090 (1974)
- (3)吉田大祐他：特開 2023-168288 (2023)

動画像による配管振動解析の基礎検証

高田 巡, 伊藤 憲彦 (電力中央研究所),
宮岡 俊, 佐藤 克良 (中部電力株式会社)

A Fundamental Verification of Video-based Piping Vibration Analysis
Jun Takada, Norihiko Itoh (Central Research Institute of Electric Power Industry)
Shun Miyaoka, Katsura Sato (Chubu Electric Power Co., Inc.)

1. はじめに

配管振動はプラントの運転効率低下や部材損傷等を招くため、迅速な問題把握・対策が必要である。従来こうした目的で、配管上の代表点の振動計測値に基づいて配管全体の振動モード解析を行い、適切な固定サポート導入箇所を提示する配管振動抑制自動提案システム⁽¹⁾が開発されてきた。しかし本システムは振動計測に接触式センサの利用を想定しているため、高冷温・高所・狭隘など接触式センサが利用しにくい環境への適用が難しかった。そこで本研究では、本システムへの入力として、カメラと動画像解析に基づく非接触振動計測技術⁽²⁾の活用可能性を検証した。

2. モックアップ配管の振動解析実験

検証では屋内の実験用配管 (材質: STPG370SH、配管規格: 1B Sch40、管路長: 3,200 mm) を片振幅 0.1 mm、周波数 23.75 Hz (事前に調査した対象管路の共振周波数) の三角波で鉛直方向に加振した。管路上 27 点の加速度を接触式センサ (小野測器製: NP-3560B) で計測するとともに、管路全体を Ximea 社カメラ MC124MG-SY-UB (2056×1504 画素 100 fps) で正対方向 距離 1.4m から撮影し、前述の動画像解析処理を適用して管路上 24 点の時系列変位を計測した。画像に映っていない 3 点は隣接点の値から補間して算出した (図 1)。計測値をもとに周波数解析および振動モード解析を行ったところ、いずれも 23.75 Hz 付近が卓越し (図 2(a)), 同形状の振動モードが観測されることを確認した (図 2(b))。また管路上 6 点の各部を撮影した動画から各点の片振幅を求めたところ、接触式センサから推定された片振幅と概略一致することを確認した (図 2(c))。

3. おわりに

配管振動抑制自動提案システムにおいて、接触式センサの代替として動画像による非接触振動計測が利用可能であることを示唆する結果が得られた。これにより多様な環境での配管振動の対策立案が可能になるものと期待される。今後は実設備への適用に向けて、現場環境 (撮影距離・角度・照明条件、共振周波数・振幅など) での検証を進める。

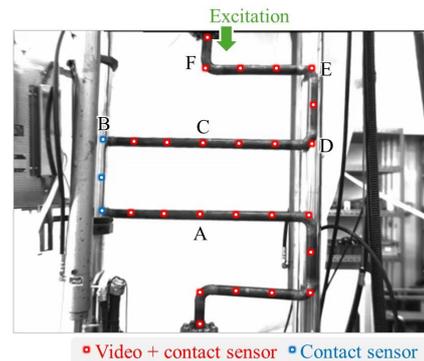
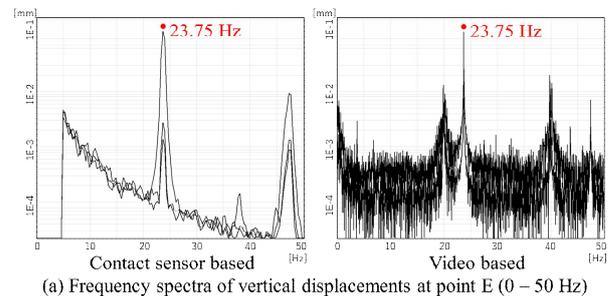
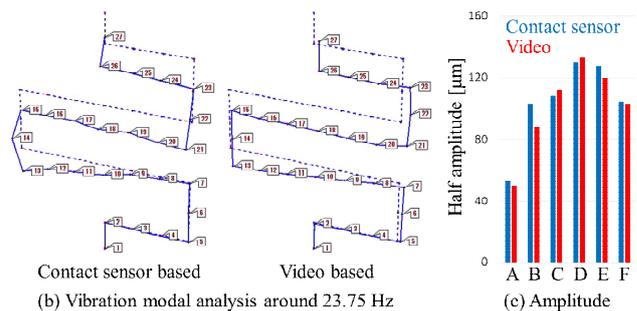


図 1 対象配管と計測点

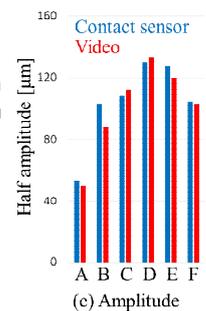
Fig.1. Target pipe and measurement points by each method.



(a) Frequency spectra of vertical displacements at point E (0 - 50 Hz)



(b) Vibration modal analysis around 23.75 Hz



(c) Amplitude

図 2 計測結果

Fig.2. Measurement results.

文献

- (1) 佐藤克良・宮岡俊・小林大輔・立石利勝: 配管振動抑制自動提案システムを用いた実機配管の故障解析, 日本機械学会 2025 年度年次大会, J101-05 (2025)
- (2) 高田巡: カメラによる振動計測法の発電設備への適用性検証—水車発電機振動の試験計測—, 電力中央研究所報告 GD20013 (2021)

高速化した皮膚がん診断装置による 過渡温度応答の検証

野中 崇*, 町屋 健心 (八戸高専)

Verification of Transient Temperature Response using High-Speed Skin Cancer Diagnostic System
NONAKA Takashi, MACHIYA Kenshin (National Institute of Technology, Hachinohe College)

1. 研究背景・目的

皮膚がんの一種であるメラノーマ(悪性黒色腫)は進行が速く、高ステージでは転移の恐れがあるため、早期発見が重要である。したがって、簡易的、非侵襲的かつ定量的な診断手法が検討されている^[1]。私達の研究グループでは、皮膚の有効熱伝導率を測定する手法^[2]を用いた皮膚がん診断装置(以降、診断装置)を開発している。皮膚がんの病変部は有効熱伝導率が健常部と異なるため、この差を検知することで定量的な診断が可能である。

診断装置実用化の課題の一つに、サンプリングレート向上が挙げられる。熱パルス付加直後の過渡的な温度変化を正確に捉えるには、温度情報を高速サンプリングし、平均化処理によってノイズを低減することが重要である。しかし、現在の診断装置における温度測定ではサンプリングレートが約 250 S/s に留まっている。本報告では、制御システムの処理フローを改善することでサンプリングレートの高速化を実現し、急峻な変化に対する応答性を大幅に高めたシステムの動作検証を行った。

2. 皮膚がん診断装置の構成

診断装置はペン型温度プローブ (Fig. 1)、CompactRIO (cRIO-9040)、ノートパソコンによって構成する。CompactRIO には電圧測定モジュール (NI 9239 : 4 ch, 24 bit, 50 kS/sec) と電圧出力モジュール (NI 9269 : 4 ch, 16 bit) を接続した。温度プローブは SEMITEC 社薄膜サーミスタ (2.2 k Ω @ 25 $^{\circ}$ C, 厚さ 0.15 mm, 底面積 0.5 mm²) と分圧用抵抗 270 Ω を用いた。一定電力の熱パルスを数秒間与え、温度応答を測定することで有効熱伝導率を算出する^[2]。

現在のシステムでは、平均化処理を行うことでノイズを低減しているが、この処理が律速となりサンプリングレートが低下していた。加えて、平均化処理の完了タイミングが負荷等により不定となるため、サンプリングレートが一定とならず、時間的に変動するという問題があった。

熱パルス付加直後の過渡応答を正確に解析するためには、高いサンプリングレートに加え、サンプリング周期が一定であることが重要である。そこで、FPGA を用いたシステムの並列化によりこれらの問題を解消した。

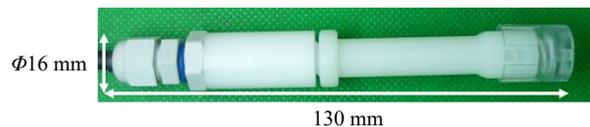


Fig. 1 Pen-type temperature probe

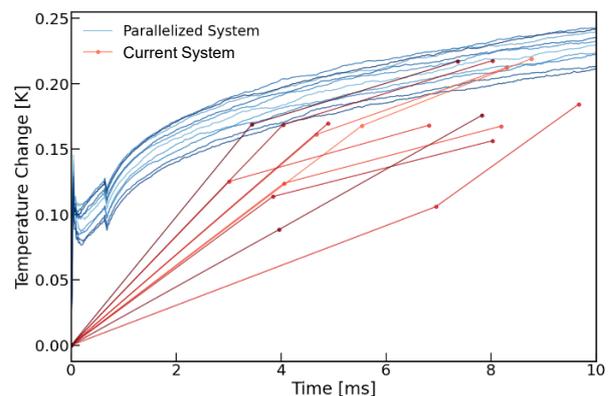


Fig. 2 Comparison of initial temperature rise between Parallelized System and Current System

3. システムの動作検証

システム検証のため、熱パルス印加時の初期温度応答波形を現在のシステムと並列化システムで比較した。Fig. 2 にプローブをシリコンゴムシートに接触させ、20 秒後に 3 秒間 3 mW の熱パルスを与えたとき、10 ms 間の温度変化を示す。現在のシステムと並列化システムで 10 回測定を行った。シリコンゴムシートはヒーターを用いて 34 $^{\circ}$ C 一定とした。

並列化システムのサンプリング周期が現在のシステムは約 4 ms で 10 ms 間にデータ点が 2、3 点しか存在しない。並列化システムは電圧入力モジュールと同等のサンプリングレートを有し、10 ms 間に約 500 点のデータを取得でき、熱パルス付加直後の過渡応答をより正確に把握できた。

本研究は JSPS 科研費 JP25K15945 の助成を受けたものです。

文 献

(1) Okabe, T. et al., Sci. Rep. 9, 3853 (2019).

(2) M Kharalkar et al., Meas. Sci. Technol., Vol. 19, No. 7, 075104 (2008).

フレキシブル多点表面電極による 筋疲労評価システムの構築

赤澤 淳* (明治国際医療大学)

Development of a Muscle Fatigue Evaluation System Using Flexible Multi-Point Surface Electrodes
Jun Akazawa (Meiji University of Integrative Medicine)

1. はじめに

超高齢化社会の進行に伴い、負担なく装着でき運動を妨げないシームレスな筋疲労評価システムが求められている。しかしながら、医療およびスポーツの分野において使用されている受動電極では、モーションアーチファクトや接触不良を防ぐために複雑な前処理が必要であり、計測時に電極の存在を認識せざるを得ず、自然な動作環境下での筋電図計測が困難である。運動単位は一つの α 運動ニューロンとそれに支配される筋線維群であり、神経筋の機能的最小単位である¹⁾。本研究では、 α 運動ニューロンレベルで筋疲労評価をシームレスに行うことを目的として、2024年度に試作した運動単位の発火周波数、波形変化および伝播速度を算出するシステム²⁾の改良を行い、フレキシブル基板を用いた多点表面電極を適用した計測システムの構築を試みたので報告する。

2. 計測方法

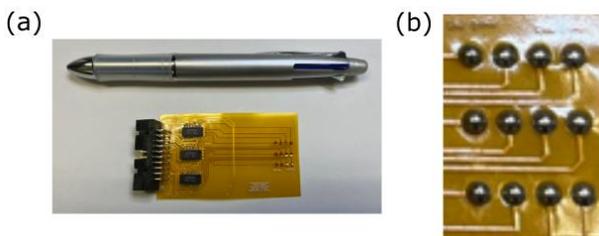


図1 試作したフレキシブル多点表面電極
Fig.1 Prototype flexible multi-point surface electrode

電極間隔 2.54 mm の 4×3 配列 (12 ピン) を用い、双極誘導により 4×2 配列の 8 ch 筋電信号を計測するため、厚さ 0.11 mm のフレキシブル基板を用いた多点表面電極を試作した (図 1)。図 1(a)は上面から、図 1(b)は下面の皮膚接触面から撮影したコンタクト部のはんだ (すず 63%, 鉛 37%) の写真である。コンタクト部は半球形となるようにはんだを用いた。計測対象筋は上腕二頭筋とした。アンプのゲインは 2500, カットオフ周波数は 995 Hz とし、サンプリング周波数 10 kHz で LabVIEW を用いて表面筋電図を 30 秒間記録した。被験者への視覚的フィードバックとして運動単位

活動電位波形を表示するため、メモリハイコーダ (HIOKI 8826) を用いた。また、運動単位活動電位の伝播速度、発火周波数および波形形状の変化の算出には MATLAB R2021b を用いた。

3. 計測・解析結果

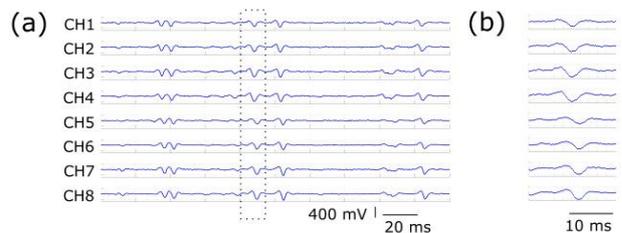


図2 フレキシブル多点表面電極による表面筋電図
Fig. 2 Surface Electromyography Using Flexible Multi-Point Surface Electrodes

フレキシブル多点表面電極を用いて記録した表面筋電図の一部を図 2(a)に示す。図 2(a)では運動単位の活動電位波形を確認することができる。図 2(b)は、図 2(a)の点線で囲んだ運動単位の活動電位波形を拡大したものである。運動単位の活動電位波形は、CH1- CH4 から CH5- CH8 へと伝播していることが確認できる。活動電位波形の振幅の絶対値が最も大きい CH3 のピーク時刻と、これに対応する CH7 のピーク時刻との差、および電極間隔から算出した運動単位の活動電位波形の伝播速度は 3.9 m/s であった。

4. まとめ

筋疲労の評価に必要な運動単位の発火周波数を算出するフレキシブル基板を用いた格子状多点表面電極を用いたシステムを構築した。今後は表面電極先端部の材質と形状、フレキシブル基板の柔軟性を確保しつつ基板を保護する素材について検討を行い、有用性のさらなる検証と、限界を明確にする必要がある。

文献

- (1) G. Marco, B. Alberto, et al., *Physiol. Meas.*, 38(5), 27~60 (2017)
- (2) 赤澤淳: 令 6, 電気学会全大, 3-058

ノイズ入力方式がユーティリティポールの異常検知に与える影響の違い

齋藤 巧武*, 岩月 栄治, 小塚 晃透, 岩田 隆弘 (愛知工業大学),
本多 祐二 (本多電子), 津田 紀生 (愛知工業大学)

Differences in the Effects of Noise Input Methods on Anomaly Detection in Utility Poles
Takumu Saito, Eiji Iwatsuki, Teruyuki Kozuka, Takahiro Iwata (Aichi Institute of Technology),
Yuji Honda (Honda Electronics Co., Ltd), Norio Tsuda (Aichi Institute of Technology)

1. 背景

日本は地形や地質の条件、地理的要因から災害の影響を受けやすい国である。近年は、地球温暖化の進行に伴い、日本近海の水温が上昇し、勢力を保ったまま上陸する台風が増えている。その結果、ユーティリティポール（電柱）は、強風にさらされ、倒壊する事例が近年多発している。一般に電柱の標準期待寿命は65年とされており、耐用年数近くの電柱が増加している[1]。

電柱の劣化診断は、打音調査、目視調査が主流であるが、少子化による人手不足の影響から、将来的な継続性が懸念される。そこで本研究では、電柱に設置可能な新たな劣化診断装置の開発を目指し、その技術的検討を行った。

2. 測定環境と原理

実験の配置図を図1に示す。ファンクションジェネレータ(FG)より1周期の方形波パルスを出力し、バイポーラ電源により電圧を増幅する。また、ホワイトノイズも測定を行い、それらを用いてキャリブレーションを行った。送信側探触子は地面から1.5m上に、受信側探触子は、その0.5m下に設置した。

試験体は、プレキャスト・プレストレス(PCaPC)構造の分割柱ユーティリティポールである。劣化試験体については、製造後に曲げ試験を行い、電柱表面にひび割れを発生させたものである。電柱は建柱した状態で測定を行なった。

健全な電柱と劣化した電柱に対し、探触子を用いて超音波を送信し、受信波形を記録する。キャリブレーションに用いるホワイトノイズの入力の違いによる受信結果(STFT)の比較を行った。

3. 測定結果

測定結果を図2、図3に示す。これは80 kHzの方形波1波20 V_{p-p}を入力した時のデータである。上段の図は探触子のキャリブレーションにホワイトノイズ(0.02sのパルス波)を使用し、下段はホワイトノイズ(連続波)を使用した。

図2と図3を比較する。双方ともピークが立つ位置に大きな違いはでなかった。しかし、連続波のホワイトノイズを

使用した方が、パルス波のホワイトノイズを使用した時に比べ、周波数方向に広がりがあることが分かった。尚、当該内容に関しては特許出願済みである。

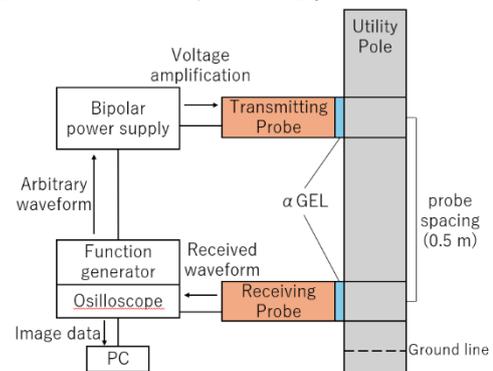


Fig. 1. Experimental setup

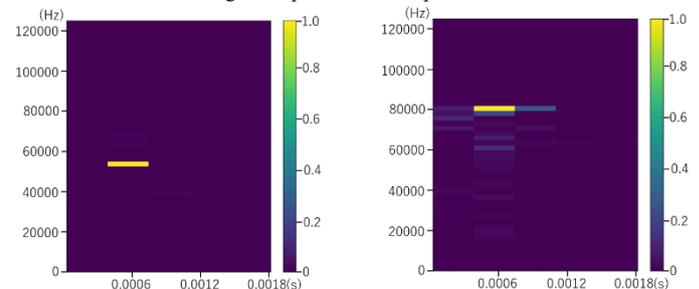


Fig. 2. Measurement data of pulse wave (Left: with crack, Right: without crack)

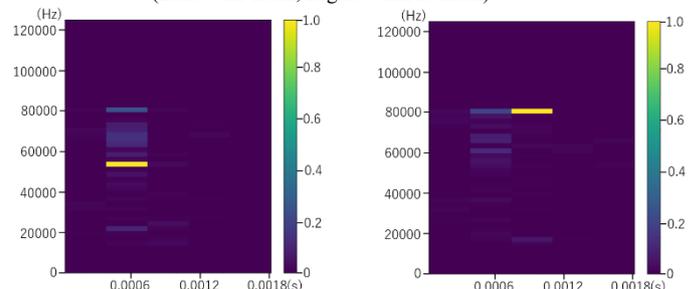


Fig. 3. Measurement data of continuous wave (Left: with crack, Right: without crack)

文献

[1] 電力広域的運営推進機関：高経年化設備更新ガイドライン（発行日2021年12月17日），2021.

環境振動下でのミリ波レーダ厚み計測の基礎検討

森 浩樹*, 三井 悠輔 (株式会社 東芝)

Fundamental Study on Millimeter-Wave Radar Thickness Measurement under Environmental Vibration
Hiroki Mori, Yusuke Mitsui (Toshiba Corporation)

1. まえがき

ミリ波レーダによる非接触厚み計測は、生産ラインにおける高精度・高信頼なモニタリング手段として期待される一方、 μm 級の精度を確保するには、位相雑音や周波数ドリフトに加えて機械振動の影響を抑える必要がある。既報の多くは静止環境での性能評価にとどまり、発振器位相雑音や環境振動が厚み推定誤差に与える影響を系統的に整理した例は少ない。本研究では、79 GHz 帯レーダ 2 台による上下挟み込み構成を用いて、ハードウェア同期と参照反射体補償の効果を実験的に評価し、振動条件下 ($0.1\text{ G} \cdot 20\text{ Hz}$) で $12.5\ \mu\text{m}$ の標準偏差を達成した結果を示す。

2. 測定原理と誤差補償について

ミリ波レーダでは送信周波数を線形に掃引し、送受信信号のビート周波数の bin 値及び位相値から対象までの距離を求めるが、工業環境で対象物が $10\sim 200\text{ Hz}$ 程度で振動する場合[1], 2 台のレーダの計測タイミングにわずかなズレがあると、上下距離の差から算出する厚みに振動と同じ周期の残差誤差が生じる。この誤差は時間ずれに比例して増大するため、発振器・クロック・トリガを共通化したハードウェア同期により両レーダの掃引開始タイミングを一致させることが有効である。また、発振器位相雑音や回路共通のドリフトに対しては、被測定体と固定参照反射体からの反射位相の差をとる差動測定を用い、共通モード成分を打ち消すことで距離・厚み計測の長期安定性を高める。本研究では、これらの同期手法と参照反射体補償を組み合わせることで、低コスト水晶発振器 (XO) を用いつつ、振動環境下でもミリ波レーダ厚み計測の高精度化を図る。

3. 実験構成と結果

実験では中心周波数 79 GHz・帯域幅 3.49 GHz のミリ波レーダ 2 台をアルミ板の上下に配置し、両レーダ間距離 D と上下のレンジ R_t, R_b から $T = d - (R_t + R_b)$ として厚みを算出した。静止環境でアルミ板を $R_t = R_b = 0.58\text{ m}$ に固定して測定した結果、SNR は約 38 dB, Cramér-Rao 下限に基づく理論距離誤差 $0.168\ \mu\text{m}$ に対して実測厚みの標準偏差は $0.265\ \mu\text{m}$ と理論値の約 1.6 倍に収まり、サブミクロン精度が確認された。さらに、従来の「独立発振器+host トリガによる非同期構成」と、「ローカル・クロック・トリガ信号を共通化した同期構成」を比較し、参照反射体補償を併用した XO 構

成が恒温槽付水晶発振器 (OCXO) 単体より標準偏差を $1.4\ \mu\text{m}$ 低減して最も高い長期安定性を示すことを確認した。 $0.1\text{ G} \cdot 20\text{ Hz}$ の上下振動を印加した条件では、非同期構成でピーク約 $48\ \mu\text{m}$ ・標準偏差 $23.9\ \mu\text{m}$ の周期誤差が生じたのに対し、同期構成ではピーク $12.5\ \mu\text{m}$ ・標準偏差 $4.2\ \mu\text{m}$ まで低減され、提案する同期・補償手法が振動環境下での高精度厚み計測に有効であることを実験的に示した。

4. まとめ

ミリ波レーダ厚み計測系について静止および振動環境での実験を通じて、ハードウェア同期と参照反射体補償が計測で誤差と長期ドリフトを大幅に抑制し、低コスト XO でも OCXO を上回る安定性を達成し得ることを示した。

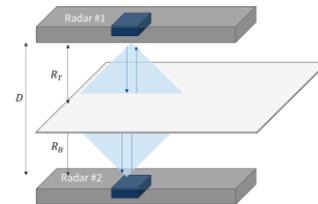


図1 厚み計測の概略

Fig.1. Schematic of dual-radar thickness measurement setup

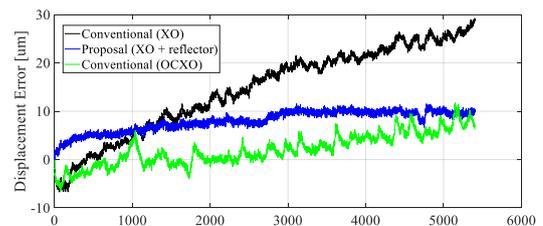


図2 距離誤差の長時間変動

Fig.2. Distance error over 3-hour measurement for different oscillators

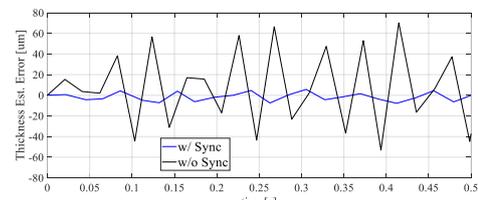


図3 振動環境下での厚み誤差の比較

Fig.3. Thickness error under $0.1\text{ G}/20\text{ Hz}$ vibration

文献

- [1] Mechanical vibration, ISO 10816-3, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- [2] S. Gütgemann, et al., "Radar-Based High Precision Thickness Measurement for Rolling Mills," 2018 EuRAD, pp. 122-125.

ドローンと差分型グラジオメータとAIを用いた 磁気探査・信号源推定システムの開発

上川 翔平*, 鈴木 舜史, 高橋 歩夢, 宮澤 龍季, 廿日出 好 (近畿大学)

Development of a Magnetic Survey and Source Estimation System using a Drone with Differential Gradiometer and AI
Shohei Kamikawa, Shunshi Suzuki, Ayumu Takahashi, Ryuki Miyazawa, Yoshimi Hatsukade (Kindai University)

1. まえがき

第二次世界大戦の影響で、現在でも沖縄県に多くの不発弾が残っており、不発弾探査技術の開発が行われている。近年、ドローンに磁力計を搭載した不発弾探査への応用が進んでいるが、ドローン由来の磁気ノイズや姿勢変動の影響を強く受けるため、磁場3成分の高精度な検出が困難という課題があった^[1]。

本研究では、ドローンに高感度なフラックスゲートセンサ(以下FGセンサ)を搭載し、地面と非接触でリモートセンシングが可能な磁気探査装置と、計測した磁場分布からDeep Neural Network(DNN)を用いてリアルタイムに信号源の推定を行うシステムの開発を行った。

2. 磁気探査システム

開発した磁気探査装置は主に3軸ベクトル型FGセンサ、IMUセンサ、Raspberry Pi5(以下RPI5)から構成される。FGセンサは磁場3成分 B_x , B_y , B_z を計測する。IMUはRPI5と接続し、ドローンの3軸(roll, pitch, yaw)の角度を計測する。計測した磁場および角度データはRPI5で集計し、開発した磁場計測・送信プログラムを用いて、PCに無線転送する。PCでは、受信したデータを用いて、ドローン揺動による B_x , B_y , B_z の変動を補正する。PCには深度センサを接続し、DNNベースのドローン検出ソフトを用いて、ドローン(センサ)を検出し、その位置と受信・計算した磁場3成分を記録する。

FGセンサ間の最適なベースライン長を決定するため、両センサのベースライン長を100~400mmで変更して地表に磁石を設置し、両センサで測定した。測定した磁場の差分を計算した結果、距離が増えるほど差分信号強度は飽和した。センサ間距離400mmで飽和に近づいていたため、本装置のFGセンサのベースライン長を400mmとした。

PCで記録した B_x , B_y , B_z の磁場分布データから、信号源推定を行うアプリケーションを開発した。ここでは、測定した磁場分布からConvolutional Neural Network(CNN)を用いて磁気源の位置・モーメントの推定を行う。CNNの学習には、磁気ダイポールの磁場計算式を用いて訓練データを作成し、学習回数は20,000回とした。学習の結果、Lossが0.04、Accuracyが0.97であった。

3. 磁場分布計測および信号源推定

2m×2mの水平面に25点の測定点を設定した測定フィールドの中心表面の地表近くに鉄アレイを設置した。その上に励磁コイルを設置し、直流電源からN極が上向きになるように直流電流を印加し、磁化を行った。高度0.3mでドローンを飛行させ、磁場分布 B_x , B_y , B_z を計測した。測定した磁場分布計測データから、コンターマップを作成した。一方、磁化したアレイの磁化モーメントを推定し、磁気ダイポールの磁場計算式を用いて、理想的な発生磁場を計算した。計測および計算結果のコンターマップを図1に示す。計測した磁場分布は計算結果と類似性が見られ、 B_z 成分の磁気信号ピークは約12.05 μ Tであった。この計測結果に対して信号源推定システムを用いて磁気源を推論した。その結果、信号源が地表から0.02m上に位置推定され、磁気モーメントは m_z が支配的となった。

深さを変えて配置・磁化した信号源の磁気分布も計測し、これら計測結果に対して信号源推定を行った。その結果、信号源の深さが深くなると、推論された信号源の深さ z もほぼ比例して深くなり、磁気モーメントは m_z 成分が減少した。深さ200mmの信号源まで検出・推論できた。

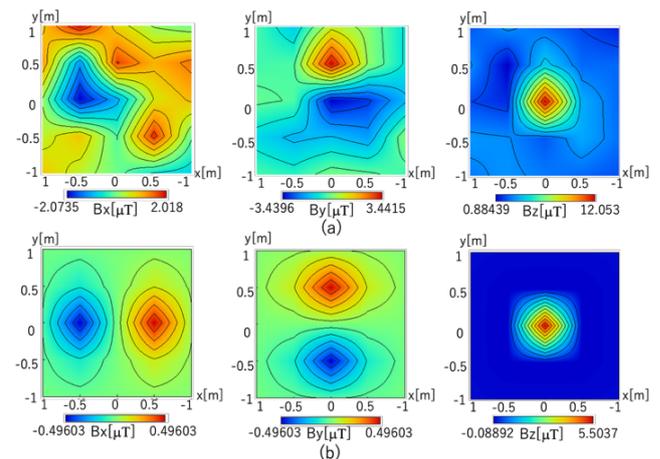


図1 磁場分布 B_x , B_y , B_z
(a) 計測結果 (b) 計算結果
Fig.1. Magnetic field distributions of B_x , B_y , B_z
(a) Measurement results (b) Analysis results

文 献

(1)S.Luoma, X.Zhou :Remote Sensing, 12 (4), 2551~2561(2020)

RTK-GNSS による位置情報表示システムの利用

南條 拓也*, 渡部 雅也, 多田 覚, 山内 将行, 田中 武 (広島工業大学)
西米 武, 若岡 裕則, 大地 秀二 (株式会社中電工)
河部本 尚樹, 森 弘樹 (株式会社インタフェース)

Utilization of a Positioning Display System Using RTK-GNSS

Takuya Nanjo, Masaya Watanabe, Satoru Tada, Masayuki Yamauchi, Takeshi Tanaka, (Hiroshima Institute of Technology)

Takeshi Nishiyone, Hironori Wakaoka, Shuji Oji (Chudenko Corporation),

Naoki Kabemoto, Hiroki Mori (Interface Corporation)

1. まえがき

位置情報は測量, 自動運転, 建設施工, 災害対応など多様な分野で利用されており, 社会インフラとしての重要性が高い。位置推定の代表的手法として GPS を用いた単独測位が挙げられるが, 瞬時の点測位では 10-30 m 程度の誤差を生じ得ることが報告されている⁽¹⁾。

より高精度な位置推定を実現する方法として, 搬送波位相観測に基づく RTK (Real-Time Kinematic) がある。

本研究では, 大学構内に簡易な RTK-GNSS 基準局および移動局を仮設し, cm 級の相対測位を行った。

2. GNSS 受信機とソフトウェア、ツールについて

u-blox 社製 L1 帯のみ対応の NEO-M8P-2-11 を基準局に, NEO-M8P-0-11 を移動局に用いた。

観測データの記録, 処理, および配信には RTKLIB (demo5 ver. b34k)⁽²⁾ を用いた。また, 補正データの配信サーバーとして無料で使用できる Emlid Caster⁽³⁾ を用いた。

3. 実験方法と結果

広島工業大学の屋外広場に簡易な RTK 基準局と移動局を仮設しノートパソコンに接続して設置した (Fig. 1 参照)。まず, 基準局の位置を求めるために, GPS のデータを記録した。記録時間は 1.5 時間, サンプリング間隔は 1 Hz とした。記録したデータファイルと既知点として国土地理院が提供する近隣の電子基準点である広島 2 A の観測データを用いて測位演算を行った。得られた結果から整数アンビギュイティが固定された FIX 解⁽⁴⁾のみを抽出し, その平均値を基準局の位置として設定した。基準局データを開設した NTRIP サーバーに送信した。次に, 仮設した移動局と基準局の測位演算を行い, FIX 解を求めることができた (Fig. 2 参照)。基準局のデータは先ほど開設した NTRIP サーバーから取得できた。

4. おわりに

簡易な RTK 基準局と移動局を仮設し, 相対測位を行った。結果, 測位解の標準偏差が水平方向で 0.008 m, 上方向で 0.017 m 以下の FIX 解を求めることができた。今後は,

大学にさらに高性能な基準局を設置したい。



Fig. 1. 仮設した簡易な基準局と移動局, ノートパソコン

Fig. 1. Temporary simplified base station, rover, and laptop computer.

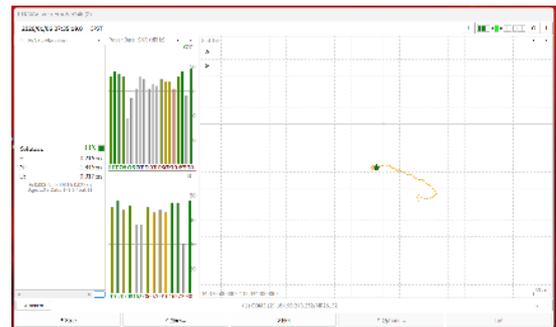


Fig.2. RTKNAVI における FIX 解取得時の表示画面

Fig. 2. RTKNAVI display showing FIX solution.

文献

- (1) B. W. Remondi, "Global positioning system carrier phase: Description and use," *Bull. Geod.*, vol. 59, pp. 361-377, (1985)
- (2) <https://github.com/rinex20/RTKLIB-demo5>, (2026/1/8 閲覧)
- (3) <https://emlid.com/ntrip-caster/>, (2026/1/8 閲覧)
- (4) J. M. Castro-Arvizu, D. Medina, R. Ziebold, J. Vila-Valls, E. Chaumette, and P. Closas, "Precision-Aided Partial Ambiguity Resolution Scheme for Instantaneous RTK Positioning," *Remote Sensing*, vol. 13, Article no. 2904, (2021)

高感度磁気センサ SQUID とドローンを用いた磁気探査システムの開発に向けた基礎的研究

鈴木 舜史*, 上川 翔平, 高橋 歩夢, 宮澤 龍季, 廿日出 好 (近畿大学)

A Fundamental Study for the Development of Magnetic Exploration System Based on Drone and HTS SQUID
Shunshi Suzuki, Shohei Kamikawa, Ayumu Takahashi, Ryuki Miyazawa Yoshimi Hatsukade (Kindai University)

1. まえがき

沖縄県では、戦後 70 年以上が経過した現在でも不発弾が多数埋没しており、その探査と撤去作業が継続的に行われている。不発弾探査のため、ドローンとフラックスゲート磁力計 (FG) を活用した磁気探査装置が開発されている^[1]。しかし、これら手法は検出可能な深度に限界があり、特に地中深部に埋没した不発弾の発見は困難である。一方、高性能な高温超伝導 (HTS) SQUID が開発されており、FG と比較して 3 桁ほどノイズが小さい。磁気信号は距離の 3 乗に反比例するため、FG を SQUID で置き換えることで、1 桁深い信号源を検出できる可能性がある。

本研究では、ドローンを用いた磁気探査システムに HTS-SQUID を導入する際に課題となる、ドローン由来の磁気ノイズの影響、ドローンの揺動などの移動の際に地磁気と鎖交した際の SQUID の挙動などについて調査を行った。

2. SQUID 計測システム

高温超伝導 SQUID として、13.5 mm 角の検出コイルを有するマグネトメータを用いた。SQUID 冷却用液体窒素クライオスタット、Flux Locked Loop (FLL) 回路装置、スペクトルアナライザ、ADC コンバータ (24 bit)、データ記録用 PC ソフトウェアなどから測定装置を構成した。携帯電波などの外部磁場ノイズを低減するため、電磁シールド布でクライオスタットを覆って SQUID を動作させた。

SQUID の電圧磁場変換係数は約 400 nT/V で、磁気シールドを用いない場合、SQUID の磁場ノイズレベルは、約 170 Hz で約 4860 fT / Hz^{1/2}、二重のパーマロイ磁気シールドケース内では、約 260 Hz で約 800 fT / Hz^{1/2} であった。

3. ドローン駆動時の SQUID への影響

まず、ドローンを SQUID 近傍で駆動させた際の電磁ノイズの影響について調査した。SQUID を冷却したクライオスタットを床面に置き、電源を入れた農業用ドローンと SQUID との距離を 0.2~1.0 m の間隔で変化させて、プロペラを外したモータをリモートコントローラで駆動したときの SQUID 出力電圧波形とスペクトルを測定した。測定した出力波形とスペクトルには、商用電源 60 Hz とその高調波が発生しており、モータを駆動した際には 20 Hz とその 2 倍高調波が現れた。SQUID とドローンの距離に応じて、20

Hz とその 2 倍高調波の強度は変動した。図 1 に、モータ駆動時における SQUID とドローン間距離 と、20 Hz 成分の磁場ノイズ強度の関係を示す。SQUID とドローン間の距離がある程度離れると磁場ノイズは距離の 3 乗に反比例して減少した。また、コントローラ等による電磁波ノイズの影響はほとんど見られなかった。

4. 地磁気中直線移動時の SQUID 応答

次に、ドローンで地磁気中をセンサが移動させることを模擬し、人力で SQUID を移動させた。その際に、SQUID に鎖交する磁気量が増加した際の出力応答を調査した。SQUID をインストールしたクライオスタットと IMU センサ (WTGAHRS2) を、部品の多くが非磁性体で作製した移動架台に設置した。手動により、架台ごと前後に速度を上昇させながら SQUID を複数回前後に直線移動させた。このとき、SQUID 電圧出力と移動架台の加速度と速度を測定した。その結果、移動架台は最大約 1 m/s の速度で地磁気中を移動し、実験部屋の不均一な磁気分布により SQUID は約 10 μT 程度の磁場変動に曝されたが、FLL のロックが外れることなく、SQUID は安定に動作した。実験の結果、約 40 μT/s 以上のスルーレート特性を持つことがわかった。

謝辞

本研究に対して多大なサポートを頂いた超電導センサテクノロジー株式会社に感謝致します。

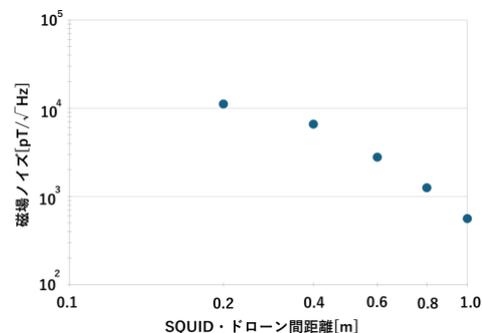


図 1 ドローン・ SQUID 間距離と 20Hz の磁場ノイズの関係
Fig. 1 Distance between drone and SQUID vs. magnetic peak noise at 20 Hz at operation of drone

文献

[1] S. Luoma, X. Zhou: Remote Sensing, 12 (4), 2551~2561 (2020)

気圧センサを用いた高度計測における キャリブレーション手法

瀬島 紀夫*, 三谷 康夫(福山大学), 平島 隆洋(株式会社エイチエレクト)

Calibration Method for Altitude Measurement Using a Barometric Pressure Sensor
Norio Seshima, Yasuo Mitani (Fukuyama University), Takahiro Hirashima (Eichi-elec)

1. まえがき

昨年度、自作 IoT 機器用として人気の Arduino 互換機 (M5Stack) と気圧センサ (DPS310) で計測器を作製し、それを使用した低層域での高度計測について報告した。本稿では、低層域での高度計測におけるキャリブレーション手法について考察を行う。

一般的に高度計測では、基準点と計測点の間に遮蔽物がないことが前提となるが、気圧センサを用いた高度計測では、基準点と計測点の間に遮蔽物があっても、高度計測が可能である。このため、気圧センサを利用した高度計測は、簡便な高度計測方法として有効な選択肢の一つになると考える。

2. 高度計測環境

本稿では、建屋の室内で高度計測を行う。高度計測には2台の自作計測器を使用する。1台目は部屋の床に設置して基準計測器とし、2台目は計測点に設置し計測点計測器とする。計測点は、部屋の壁にL字型の棚を設置して、その上に計測点計測器を置いて計測した。計測点の棚はメジャー、レーザー距離計および水準器などを使用して位置を調整し、0.5m~3.0mまで0.5m刻みに計6架設置した。

3. 高度算出手法

本稿では気圧を用いた高度算出に幅広く使用されている式1を使用する¹⁾。

$$H = \frac{\left(\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{5.257}} - 1\right) \cdot (T_0 + 273.15)}{0.0065} \quad (1)$$

式1においてHは高度[m]、 P_0 は基準計測器の気圧[hPa]、Pは計測点計測器の気圧、 T_0 は基準計測器の気温[°C]、0.0065は気温減率[K/m]である。本稿ではPに後述する補正値を加えた値を用いて高度を算出する。

4. 高度計測方法

高度計測は、次に示す2段階で行う。

(1) 自作計測器のキャリブレーション

高度計測にあたり、まず始めに気圧センサ毎の個体差、計測日の気圧状況などを考慮するために自作計測器のキャリブレーションを行う。本稿では、キャリブレーションを行う

位置を0.0m、1.0m、2.0mの3点とした。まず基準計測器を基準点である床に設置する。次に計測点計測器を0.0m、1.0m、2.0mの順に設置し、基準点と各キャリブレーション点に設置した時の計測器2台の気圧を元に3個の補正値を求め、以降の高度計測に使用した。

(2) 高度計測実験

基準計測器は床に設置したまま、計測点計測器のみ計測毎に各計測点に設置して順次計測を行った。

自作計測器の各計測データはWi-Fi経由でパソコンに読み出してパソコン上で計測結果の確認を行った。

5. 高度計測結果

高度計測実験を20回行い、計測した高度の誤差を求め、その誤差について、平均、標準偏差、分散を算出した。本稿では紙面の都合上、計測高度1.0mのみを表1に示す。計測誤差の平均は、キャリブレーション位置C0.0mで19mm、C1.0mで12mm、C2.0mで13mmであった。いずれの条件においても誤差は20mm未満であり、良好な結果を得られた。続いて計測誤差の標準偏差は0.014mと小さく、計測誤差の分散は0.0002m²と非常に小さい値となっていた。

表1 高度計測におけるキャリブレーション位置別の計測誤差
Table 1. Measurement Errors by Calibration Position in Altitude Measurement

計測点	キャリブレーション点	計測誤差 平均(m)	計測誤差 標準偏差(m)	計測誤差 分散(m ²)
1.0m	C0.0m	0.019	0.0136	0.00018
	C1.0m	0.012	0.0106	0.00011
	C2.0m	0.013	0.0111	0.00012

6. むすび

自作計測器で高度計測を行い計測高度1.0mにおいて計測誤差平均が20mm未満と良好な結果を得た。1.0m以外の高度計測の詳細について発表で報告する。

文 献

- (1) 坂井丈泰・惟村和宣・新美賢治: 気圧高度計による高度測定誤差とその補正、電子航法研究所報告、No.114、PP.1~13 (2005)

ガスセンサを用いた排泄臭構成成分の濃度測定 に対する一検討

田中 悠貴*, 山口 拓人, 佐伯 勝敏(日本大学)

A Study on Concentration Measurement of Excreta Odor Constituents Using a Gas Sensor

Yuki Tanaka, Takuto Yamaguchi, Katsutoshi Saeki (Nihon University)

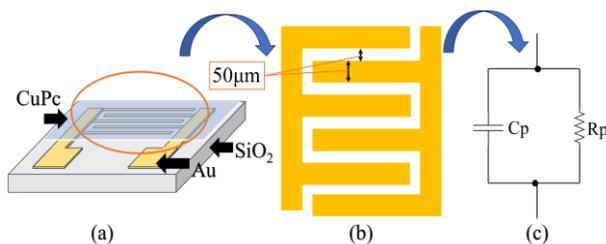
1. まえがき

便失禁で排泄物が皮膚に接触することでIAD(失禁関連皮膚炎)が起こる。便失禁は65歳以上の男性では8.7%, 女性では6.6%, IADの有病率は17.0%と報告されている。特に高齢者など大人用おむつが常態化した人は, 加齢と共に皮膚が薄くなるため便が皮膚に長時間放置されることにより, 皮膚表面のみならず組織の内側から侵害されてしまうことが報告されている⁽¹⁾。

本研究は, IAD 予防を目的に, 銅フタロシアン(CuPc)をくし形電極に蒸着したガスセンサを用い, 便臭に含まれるトリメチルアミン(TMA)ガス, 尿臭に含まれるアンモニア(NH₃)ガスが人間の排泄臭構成成分の濃度範囲での定量的測定について検討を行った。

2. 本論

Fig. 1 に使用するガスセンサの模式図, 電極の拡大図および等価回路を示す。(a)にガラス基板(10mm×12mm×1.1mm)上に金を使用したくし形電極を構築し, その上に真空蒸着装置を用いて感応膜であるCuPcを膜厚180nmで蒸着した模式図を示す。同図においてCuPcにガス分子が吸着することで複素インピーダンスが変化する。その変化量によってガス濃度検知が可能である⁽²⁾。(b)にくし形電極の拡大図を示す。電極は片方30本, 電極の幅と間隔は50μmを用いた。(c)にガスセンサの等価回路を示す。本センサは, 抵抗成分と容量成分が並列に接続されているRC並列回路と等価である。この回路のインピーダンス実部Reを測定することで, 単体気体の濃度測定が可能となる⁽³⁾。



(a) Schematic diagram (b) Comb electrode (c) Equivalent circuit

Figure 1. Gas sensor

Fig. 2 に TMA ガス, NH₃ ガス濃度測定実験のブロック図を示す。コンプレッサーでパーミュータ PD-1B に空気を送り込み, パーミュータ内で空気流量を調整し, 既知濃度の TMA ガス, NH₃ ガスを恒温槽内に送る。恒温槽内部には, LCR メータに接続したガスセンサを入れた三口丸底フラスコを設置した。フラスコの右から既知濃度ガスを注入, 左から換気を行い, LCR メータで測定を行った結果を PC へ出力しデータ処理を開始する。

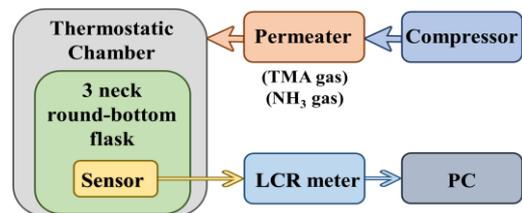


Figure 2. Experimental block diagram

Fig. 3 に NH₃ ガス 0.4~2.2ppm, TMA ガス 0.06~0.3ppm に対する時間-インピーダンス実部 Re 特性を示す。恒温槽内とパーミュータ内共に 35°C に保ち測定を行った。ガス測定後に恒温槽を 35°C から 55°C に温度を上昇させ, ガス剥離を確認してから再度 35°C で測定を行う。複数の濃度を測定する際, ガス暴露によるガスセンサの変化を観察しやすいように初期値をノーマライズした。開始 30s にガスを 1 分間注入し, 90s から換気を行う。同図は, ガスセンサが TMA ガス, NH₃ ガスそれぞれに反応し, 濃度が高いほどインピーダンスの上昇率が大きくなることを示している。

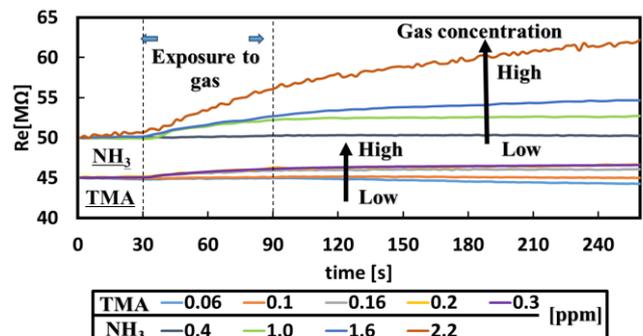


Figure 3. Time-Real Part (Re) of Impedance Characteristics

Fig. 4 に NH₃ ガス 0.4~2.2ppm, TMA ガス 0.06~0.3ppm に対する時間-インピーダンス虚部 X 特性を示す. 同図は, Fig. 3 と同様の測定方法で実験を行い, ガスセンサが TMA ガス, NH₃ ガスに反応し, 濃度が高いほどインピーダンス虚部の減少率が大きくなることを示している.

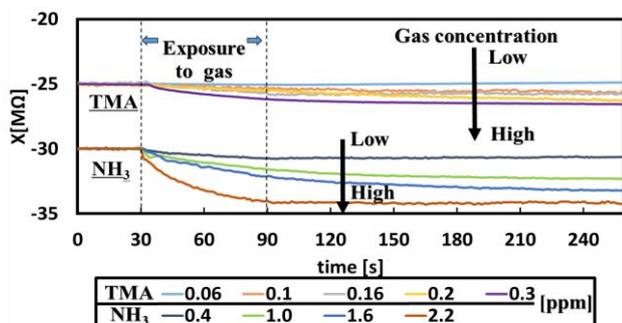


Figure 4. Time-Reactance (X) of Impedance Characteristics

Fig. 5 に 0.4~2.2ppm の NH₃ ガス, 0.06~0.3ppm の TMA ガスを 5 回ずつ測定した実部の検量線を示す. 図中, 横軸はガス濃度, 縦軸はインピーダンス実部の変化率 ΔRe を示している. 同図より, 人間の排泄物のガス濃度範囲で測定が可能であることを示している.

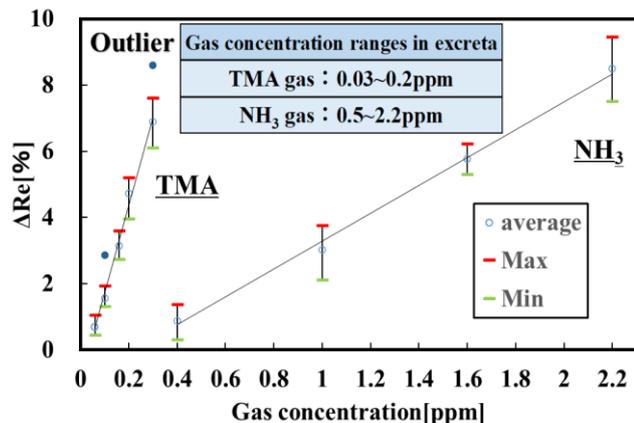


Figure 5. Calibration Curves for TMA and NH₃ gas (ΔRe)

Fig. 6 に 0.4~2.2ppm の NH₃ ガス, 0.06~0.3ppm の TMA ガスを 5 回ずつ測定したインピーダンス虚部の検量線を示す. 同図は, 横軸を Fig.5 と同様のガス濃度, 縦軸はインピーダンス虚部の変化率 ΔX を示す. 同図より, NH₃ ガス, TMA ガスにおける外れ値が 2 つずつ検出されたのを除き, 未知の濃度を測定した場合, 濃度検知が可能であることを示している.

以上より, 人間の排泄物のガス濃度範囲で測定した TMA ガス, NH₃ ガス濃度における ΔRe , ΔX の値が異なることより混合ガス下でも検知できる可能性を示している.

Fig. 7 に NH₃ ガス 2.2ppm を固定し, TMA ガスを 0.06~0.3ppm と変化させ混合した場合と, TMA ガス 0.3ppm

を固定し, NH₃ ガス 0.4~2.2ppm と変化させ混合した場合の ΔRe - ΔX 特性を示す. 横軸は ΔRe , 縦軸は ΔX を示す. 図中, NH₃ ガスと TMA ガスそれぞれを固定とした混合ガス下でガスセンサの複素インピーダンスが線形的に変化することから, 尿臭(便臭)がある状態でもガス濃度範囲で便臭(尿臭)を検知可能であることを示している.

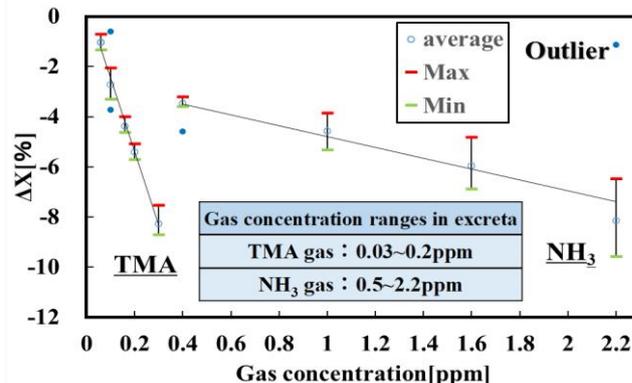


Figure 6. Calibration Curves for TMA and NH₃ gas (ΔX)

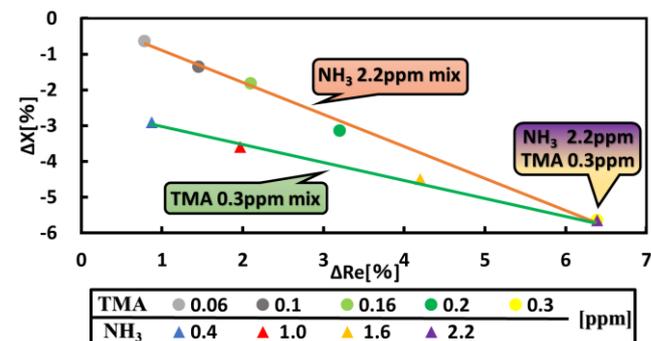


Figure 7. ΔRe - ΔX Characteristics of TMA and NH₃ gas mixture

3. まとめ

本研究は, IAD 予防を目的に, CuPc をくし形電極に蒸着したガスセンサを用い, 便臭に含まれる TMA ガス, 尿臭に含まれる NH₃ ガスが人間の排泄臭構成成分の濃度範囲での定量的測定について検討を行った. その結果, TMA ガス濃度 0.06~0.3ppm, NH₃ ガス 0.4~2.2ppm の濃度測定が可能であり, 尿臭(便臭)がある状態でもガス濃度範囲で便臭(尿臭)を検知できることを明らかにした.

今後は, TMA ガスと NH₃ ガスの混合ガスの定量的測定に対して検討する予定である.

文献

- (1) 有賀洋文:「IAD-setに基づく IAD の予防と管理 IAD ベストプラクティス」, 株式会社照林社, pp.4-10, 2019
- (2) 佐伯勝敏, 堀口拓:「複素インピーダンスを用いた低濃度酸化性ガスセンサ」, 電気学会論文誌 A, 138 巻 5 号, pp.244-249, 2018
- (3) 田中悠貴, 梶山晴生, 佐伯勝敏:「銅フタロシアニンを用いたトリメチルアミンガス検知に対する一検討」, IEEE 学生研究発表会, IM-S24-023

走査型プローブ顕微鏡による断面観測像に基づく パワー半導体デバイス内部の数値解析

金子 万理夫*, 塚田 大貴, 佐藤 宣夫 (千葉工業大学)

Numerical analysis of internal electric field and current density in power semiconductor devices based on cross-sectional images by scanning probe microscopy

Kaneko Mario*, Tsukada Hiroataka, Satoh Nobuo (Chiba Institute of Technology)

1. 研究背景と目的

パワー半導体は、電力変換技術を支える中核的な要素である。その製造技術や供給能力の優劣が、産業競争力のみならず国家安全保障にも直結すると指摘される⁽¹⁾。一方、パワー半導体の小型化および微細化の進展により、デバイス内部で発生する故障事象の解明や、物理的性能限界の把握はますます困難になっている。

加えて、電源回路における故障の30%以上がパワー半導体に起因すると報告されている⁽²⁾。故障事象の多くは、デバイス内部における局所的な電界集中や電流経路の偏在といった、ナノスケールでの不均一性に起因すると考えられている。

しかしながら、従来の電気的特性評価手法や断面観測手法では、実際の動作状態におけるデバイス内部の物理情報をナノスケールで直接的に捉えることは困難であった。そのため、「動作中のデバイス内部で何が起きているのか」を実測に基づいて可視化できる新たな評価手法の確立が強く求められている。

我々は、パワー半導体の性能限界およびデバイス内部で生じる物理現象を把握するために、ナノスケールでの観測データに基づきデバイスの数値解析を行うシミュレータの開発を進めている。本報告ではその基礎検討として、電位分布および電流起因磁界の観測データから、電界強度分布と電界ベクトル、そして電流密度分布を算出、その解析結果について述べる。

2. 実験方法

ナノスケール実測データに基づいて解析モデルを検証するにあたって、走査型プローブ顕微鏡 (SPM: Scanning Probe Microscope) によるナノスケール観測にて、動作状態にあるデバイス内部の表面形状像、表面電位像、微分容量像の同時・同一観測に成功しているが⁽³⁾、新たにデバイス動作状態下の表面形状と表面電位のほか、電流導通に起因する磁界強度という三つの物理情報を、同一時刻に取得することが可能になりつつあるため、それらのデータから、電界強度および電流密度の算出を試みる。

3. 実験結果と考察

図1および図2に、スーパー・ジャンクション (SJ) 構造を有する Si 製パワー MOSFET の動作中に取得された表面電位像および電流起因磁界像 ($V_{GS} = 3.3$ V, $V_{DS} = 2.5$ V, $I_D = 14$ mA) を数値的に解析した結果を示す。いずれも、計算領域は $32 \times 32 \mu\text{m}^2$ とし、これを 256×256 メッシュに等間隔で離散化している。また空間微分演算には、内部格子点では中心差分、境界格子点では前進差分および後退差分を用いて、数値的に勾配を算出した。

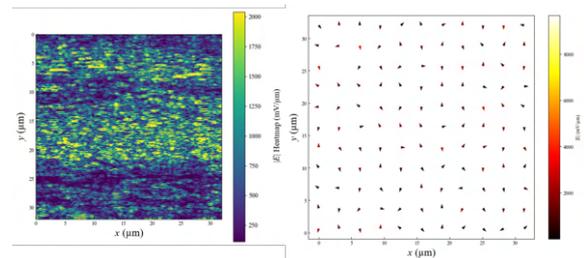


Fig.1. 観測データに基づいた電界強度および電界ベクトル図

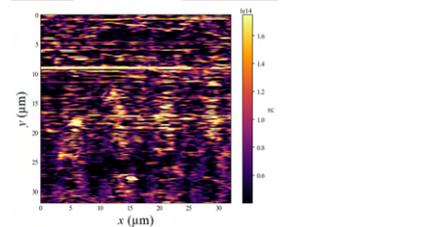


Fig.2. 観測データに基づいた電流密度分布図

観測データを基に実デバイス内のどの領域において電界集中が生じているか、それを視覚的に把握することは、デバイスの故障事象を解明する上で重要な観点となる。特に、絶縁破壊や耐圧性能を裏付ける要素的指標として、局所的な電界強度分布を定量的に評価することができれば、従来の設計指針では捉えきれなかった脆弱領域を明示できると期待される。

また電流導通経路を磁界強度分布から算出することで、電位差と電流値から抵抗値分布が取得できるようになることから、パワー半導体内部のキャリア挙動を模擬できると考えている。

4. まとめと今後の課題

本報告では、SPM 実測データに基づく電界・電流密度解析を行い、ナノスケール実測データから物理量の空間分布を再構成できることを確認した。今後の展望として、電流密度分布を用いてデバイス内部の局所的なキャリア移動度を算出し、既存のドリフト拡散モデルにおける物性パラメータの精度向上を図る。これにより、従来モデルでは十分に再現できなかった実デバイス内部の電流経路や電界分布の非一様性を反映した、高精度な数値解析手法の構築を目指す。

参考文献

- (1) 経済産業省: 「経済安全保障に関する産業・技術基盤強化アクションプラン再改訂に向けた検討状況と今後の方向性」, (最終閲覧 2025/11/15).
- (2) S. Yang et al., *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 25, No. 11, pp. 1441–1451 (2010).
- (3) A. Doi et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 58, S11A04 (2019).

変分法による二次元静電容量値の近似計算法 ～ 上下界値の計算式に関する Dirichlet and Neumann 問題 ～

渡辺 和夫* (元フジクラ / 元千葉大学 / 元芝浦工業大学)

Approximate Calculation Method for Two-dimensional Capacitance Using The Calculus of Variations
 ~ Dirichlet and Neumann Problem for The Calculation of Upper and Lower Bounds ~
 Kazuo Watanabe*(Former Fujikura / Former Chiba University / Former Shibaura Institute of Technology)

1. はじめに

二次元抵抗媒質と誘電媒質の抵抗値と静電容量値の近似計算の手法として変分原理を用いた上下界値の計算法が提案され⁽¹⁾、その具体的計算例を筆者は報告してきた⁽²⁾。それは単連結領域の Dirichlet and Neumann 境界問題 である。しかし誘電媒質の場合には、この境界条件を満たすのは現実的には比誘電率 $\epsilon_r \gg 1$ の高誘電率媒質のみである。一方通常の誘電率をもつ二重連結領域の Dirichlet 問題 は単連結領域の Dirichlet and Neumann 問題 に帰着される。

本稿ではその具体例として、同軸正方形筒電極間の静電容量計算を述べる。この二重連結領域の Dirichlet 問題 を単連結領域である直角台形領域の Dirichlet and Neumann 問題 に変換して行く。まず Schwarz-Christoffel 変換を用いて複素上半平面に写像し、次に長方形領域に変換して求める。このときの連立積分方程式を実際に解くことは容易ではない。そこでまず変分原理による上下界値を求め、変数をこの上下界の範囲で適宜ふらし数値積分により積分値を求めることで、逐一真値にアプローチした。本手法の特長として解の近似値が手計算レベルで比較的容易に求まる。

2. 二次元静電容量値の上下界の計算原理⁽²⁾

二次元対象領域は図1に示す無限長の誘電媒質で表面に無限長の電極が取り付けられ、その有限長 t 当たりの静電容量を考える。図2は誘電率 ϵ 及び厚さ t の一様な誘電体板 S で、面誘電率 (仮称) $\epsilon_s = \epsilon \cdot t = 1$ と基準化すると、電極 L_1, L_3 間の静電容量値 C は、 S の面積素片を dS として

$$1/\int_S v^2 dS \leq C \leq \int_S (\text{gradu})^2 dS \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 u, v はそれぞれ規格化した条件

$$\left. \begin{aligned} &u: L_1 \text{で} 1, L_3 \text{で} 0 \text{となる関数 (Dirichlet 条件)} \\ &v: \text{div}v = 0, L_2, L_4 \text{で} v_n = 0 \text{ (Neumann 条件)} \\ &\int_{L_1} v_n dL = 1 (n \text{は} S \text{内に向いた法線}) \end{aligned} \right\} (2)$$

を満たすものであり、(1)式は無次元の式となる。この u, v を適当に仮想すれば、簡略化された変分問題として静電容量値の上限及び下限が定まる。仮想等電位線は上界を、仮想電束線は下界を与える。等号はこの u, v がそれぞれ

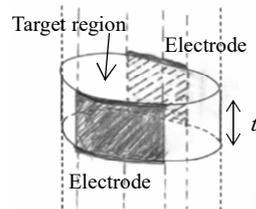


図1 二次元対象領域
 Fig.1. Two-dimensional target area.

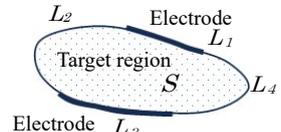


図2 計算原理説明図⁽¹⁾
 Fig.2. Calculation principle.

真の電位分布、電束分布の時に成り立つ。この上下界値に実際の面誘電率 ϵ_s を乗じれば求める静電容量値となる。なお、(2)式の「 $v: L_2, L_4$ で $v_n = 0$ 」は現実的には誘電領域の比誘電率 $\epsilon_r \gg 1$ の条件となることに留意されたい

3. Dirichlet and Neumann 混合境界条件

二次元静電容量値の上下界の式の境界条件(2)式は、いわゆる Dirichlet and Neumann 混合境界条件 である。今仮に対象が抵抗領域で外部を空気媒質とした場合、空気は絶縁体であるので抵抗領域から電流が外部に漏れることはなく Neumann 条件 が成り立つ。一方、誘電領域の場合には通常比誘電率 $\epsilon_r = 10$ 程度以下であるので、境界では電束の法線方向成分が $\partial v / \partial n \neq 0$ で一定でないため Neumann 条件 は成り立たない。Dirichlet and Neumann 条件 が成り立つのは比誘電率 $\epsilon_r \gg 1$ の高誘電率領域の場合である。

<3・1> 通常の誘電率をもつ単連結誘電領域で Dirichlet and Neumann 問題 を考えることに意義があるか？

これに対する回答は「二重連結誘電領域の Dirichlet 問題 を単連結領域の問題に等角写像変換する過程で意義をもつ」となる。以下に説明する。誘電領域の比誘電率が $\epsilon_r \gg 1$ を満たさない $\epsilon_r = 10$ 程度以下の通常の固体誘電体の場合を考える。図3(a)に示すように二重連結領域の二つの境界(周)線上に電極がある場合の二つの電極間の静電容量を求める。電束線に沿って切れ目を入れても、電束分布と等電位分布は変わらないから、ある一つの電束線に沿って切れ目を入れると図3(b)のようになる⁽²⁾。境界線上をたどれば一つの閉曲線となる。切れ目の線上には電極がなく、電束の法線方向成分はない。したがって、単連結領域の Dirichlet and Neumann 問題 となる。

〈3・2〉二重連結領域の Dirichlet 問題が単連結領域の Dirichlet and Neumann 問題に帰着される一例

図4(a)は同心正方形筒電極間の静電容量を求める問題である。正方形の対称性から(a)図の対角線および各辺の垂直二等分線は電束線となるので、それらに沿って切れ目を入れると八つの直角台形領域(b)図の並列接続となる。(a)図の二重連結領域は Dirichlet 境界問題に相当する。(b)図の単連結領域は Dirichlet and Neumann 境界問題となっている。比誘電率が $\epsilon_r \gg 1$ を満たさなくても(b)図台形の2辺BCとDA線上では電束の法線方向成分はないので、Dirichlet and Neumann 境界条件となる。この台形領域を(3)式の Schwarz-Christoffel 変換を用いて複素上半平面に写像すると(c)図となる⁽³⁾。ここでAは複素定数である。

$$w = A \int \frac{1}{\sqrt{z(z-1)^{3/4}(z-x_0)^{1/4}}} dz \quad \dots\dots(3)$$

図(b)と(c)の対応関係と(3)式より次式が成り立つ。

$$\begin{cases} \overline{AB} = 1 = A \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{z(z-1)^{3/4}(z-x_0)^{1/4}}} dz \quad \dots\dots(4) \\ \overline{BC} = -0.5 + 0.5i = A \int_1^{x_0} \frac{1}{\sqrt{z(z-1)^{3/4}(z-x_0)^{1/4}}} dz \quad \dots\dots(5) \end{cases}$$

x_0 はこの連立積分方程式を解いて得られる。つぎにこれを母数 $k=1/\sqrt{x_0}$ とする第一種楕円積分で等角写像すれば(d)図の長方形領域となる。対向する二辺電極間の静電容量 $C = K(k)/K'(k)$ を計算すればよい。しかし、実際にこの連立積分方程式を解くことは容易ではない。そこでまず〈3・3〉節の変分法による静電容量の上下界値の式に図4(b)の具体的な数値例を代入して

$$1.238 < C < 1.441$$

が得られる。ここで、等電位線と電束線とでどちらの仮想が真に近いかを考慮して、図4(c)の x_0 の座標を適宜ふらして(4)(5)式の積分を二重指数関数型数値積分(カシオ高精度計算サイト)より求め連立方程式の解にアプローチした。その結果を表1に示す。 $x_0=1.33$ で $C=1.282$ と求まる。

〈3・3〉直角台形誘電領域の静電容量の上下界値の式

直角台形の抵抗値の上下界の式は寺門氏により図5に示す仮想等電位線と電流線から $\alpha = \pi/2$ とおいて導かれており⁽¹⁾、静電容量値は $CR = \epsilon \rho = 1$ から、その逆数をとって次式となる。

$$\frac{ma}{c} + \frac{\tan^{-1} \frac{b-a}{c}}{\ln \frac{b-ma}{a-ma}} < C < \frac{\sin \phi}{b-a} \{c \sin \phi + (b-a) \cos \phi\} \ln \frac{bc \sin \phi}{a \{c \sin \phi + (b-a) \cos \phi\}} \quad \dots\dots(6)$$

そのとき最良の上界値を与える ϕ の値は次式で示される。

$$\frac{c}{a} < \frac{1}{3} \left(\frac{b}{a} + 2 \right) \text{ のとき } \phi \doteq \frac{\pi}{18} \left[\frac{1}{5} \left\{ \frac{c}{a} - \frac{1}{3} \left(\frac{b}{a} + 2 \right) \right\}^2 - \frac{b}{4a} + \frac{19}{2} \right]$$

また m の値は $\frac{b}{a} \leq 5$ のとき $m \doteq 1 - \frac{c}{2b} \sqrt{\frac{c}{a}}$ となる。

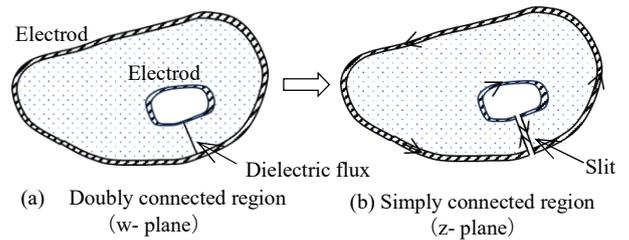


図3 二重連結誘電領域から単連結領域への変換
Fig.3. Conversion from doubly connected region to simply connected one.

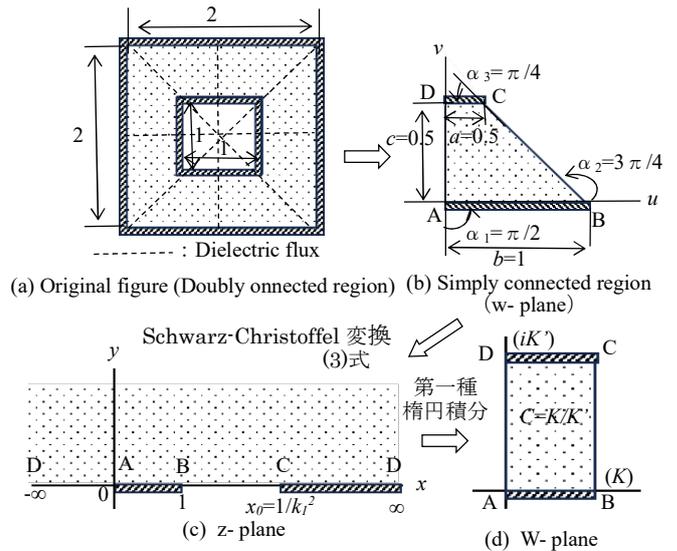


図4 同軸正方形筒電極間の静電容量計算(等角写像過程)
Fig.4. Capacitance calculation between concentric square cylindrical electrodes.

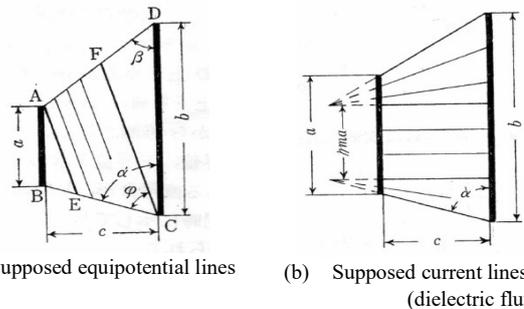


図5 台形の仮想等電位線と電流線(電束線)⁽¹⁾
Fig.5. Supposed equipotential lines and current lines(dielectric flux).

表1 連立積分方程式(4)(5)式の解へのアプローチ
Table1. Approach to the solution of the simultaneous integral equations.

x_0	A ((4)(5)式)	(5)式の右辺の値 (目標値 $0.5+0.5i$)	$k=1/\sqrt{x_0}$	$C = \frac{K(k)}{K'(k)}$
1.35	-1/6.005	-0.5030+0.5030i	0.8607	1.266
1.34	-1/6.035	-0.5014+0.5014i	0.8639	1.273
1.33	-1/6.066	-0.4993+0.4993i	0.8671	1.282

〈謝辞〉 故寺門龍一名誉教授に感謝の意をささげます。

文 献

- 寺門龍一、安納義人：「台形抵抗板の対辺電極間の抵抗値上下界の計算」茨城大学工学部研究集報第16巻(1968年12月)
- 例えば 渡辺和夫：「変分理による二次元抵抗値と静電容量値の近似計算法」, 第54回電磁界理論シンポジウム, EMT-25-106(2025)

回路解析における変圧器の取扱に関する一考察

多田 泰之* (志操館技術士事務所)

Considerations on Transformer Modeling in Circuit Analysis

TADA, Yasuyuki (Shiso-kan Professional Engineer Office)

1. まえがき

電力系統解析における基本は回路モデルに Y 行列を活用することである。変圧器は非常に身近で、電力を安全/安定に利用するためにはなくてはならない電気機械であるが、電気回路理論の一丁目一番地に位置する Y 行列との親和性が高くないために、変圧器モデルの回路計算における考察にはまだ多くの余地があると考えられる。筆者がインターネットを検索したところ、二巻線変圧器を Y 行列に組み込む定式化を見出した⁽¹⁾が、三巻線変圧器や複数の変圧器を同時に扱うような汎用的な回路計算への統合への拡張は文献 1)の方法では困難である。

もちろん電力系統解析(基幹系統における潮流計算や過渡安定性解析等)においては、正相回路を対象にした単位法の導入により変圧器モデリングについては、適切な形で整理されている。しかし、電圧レベルの低い高圧/低圧回路においては、単位法を導入したところでフィールドの課題を解決する計算機による計算の合理化にはつながらない。例えば、多分一番利用形態の多い単相三線式変圧器周りの回路計算を計算機で行おうとしても、Y 行列を構築できないので、個別の回路毎に手間をかける必要がある。分散型電源など、様々な回路形態が想定される現在、線形連立方程式を解くだけで高圧/低圧回路の回路計算を実現することは、多くのフィールドエンジニアが計算機による電気現象分析の合理化に貢献できると考える。

2. 提案する変圧器モデル

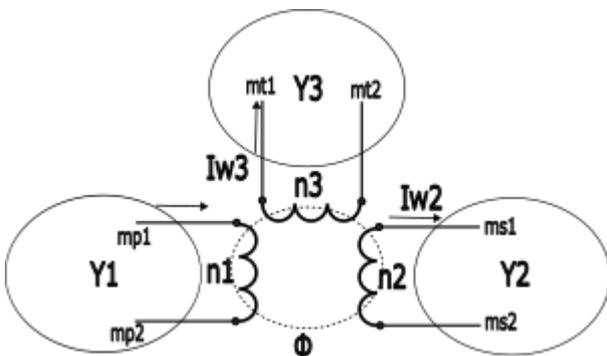


図1 三巻線変圧器の構成例
Fig.1. An example of figures

図1に一般的な三巻線変圧器が回路に組み込まれた場合を例として考える。もちろん本稿で説明する内容をもとに一般的な回路での変圧器を扱うことは容易に拡張可能である。

変圧器は巻線間で同じ磁束を共有し、コイル巻線数に比例した誘導起電力を発生させることで交流電圧の大きさを比較的容易に変成することができる。また、磁束はコイル端子間の電圧により決定されるものであるから、巻線電流による起磁力は当然キャンセルされなければならないから、巻線毎の巻線数と当該巻線電流の積を合計すれば零になる。

本稿では、この変圧器の作用を変圧器が接続されているノードの電圧と電流の関係に直接組み込んで Y 行列を拡張することを考えた。

3. 変圧器モデルによる Y 行列の拡張

従来の一次、二次、三次巻線が接続されている Y 行列は独立している。それぞれの回路の Y 行列を Y1、Y2、Y3 とすれば、Y1、Y2、Y3 はブロック対角行列を形成する。

それぞれの変圧器巻線が接続されている端子は変圧器の性質を加味して、電流源と電圧源を設定して、Y1、Y2、Y3 のブロック対角行列と協調する形で定式化すればよい。

例えば、一次巻線が接続されている端子は、以下の条件を満足するように定式化すればよい。なお、以下はすべてフェーザー表現で示す必要があるが、わかりやすさを優先し、スカラで表現した。

- mp1 の端子から I_{w1} が流出し、mp2 の端子に I_{w1} が流入する
- 起磁力がゼロになるためには、 I_{w1} は以下の式を満足する必要がある。

$$I_{w1} = -\frac{n_2}{n_1} I_{w2} - \frac{n_3}{n_1} I_{w3}$$

- mp1 と mp2 の電位差は、巻線間で共有している磁束数 ϕ と巻線巻回数 n_1 を利用すれば以下で表現される

$$V_{mp1} - V_{mp2} = n_1 \phi$$

以上をまとめるとノード電圧に加えて、二次、三次巻線の電流と磁束数を未知数に加えて、回路状態を決定することになる。

拡張された Y 行列のイメージをまとめると図2のようになる。

LTspiceによるHTSテープ線材短絡電流試験での電流電圧解析-1

新谷 高生*, 仁田野 陽菜, 神田 昌枝, 山口 作太郎 (中部大学)

Short-circuit experiments of HTS tapes and their circuit analysis using the LTspice

Koki Shintani, Hina Nitano, Masae Kanda, Sataro Yamaguchi (Chubu University)

1. まえがき

電力ケーブルでは、短絡電流事故を想定する必要がある。本グループでは、高温超伝導(HTS)ケーブルの短絡電流特性を調べるためにHTSテープ線材の大電流パルス通電試験を基礎研究として進めてきた⁽¹⁾。その中の複数の実験では、電圧が0Vのときに流れる電流が、RE123ではほぼ臨界電流(I_c)と同じであり、Bi2223では、 I_c より2倍以上大きくなる現象が観測された^(2,3)。このため、直流電流による I_c よりもパルス通電では高い I_c を有すると思われる。本研究では検証するためにHTSテープ線材の回路モデルを作り、回路計算ソフト(LTspice)を用いて、回路解析を行うことにした。

2. 回路モデルと解析方法

超伝導線材は、超伝導体(SC)が銅・銀などの金属安定化材(NC)に埋め込まれる構造であるため、超伝導体と常伝導体が並列接続構造になっている。

観測電圧波形とHTSテープ線材の抵抗とインダクタンスをパラメータとして入力し、計算電流波形を求め、観測電流波形と比較を行い、計算電流波形が観測波形と合うように抵抗及びインダクタンス値を決めた。このため、複数の回路計算を行った。解くべき方程式は、式(1)で与えられる。

$$L_s \frac{dI_s}{dt} + R_s I_s + M \frac{dI_n}{dt} = L_n \frac{dI_n}{dt} + R_n I_n + M \frac{dI_s}{dt} = V_{input} \quad \dots(1)$$

L はインダクタンス、 R は抵抗、 I は電流、 M は相互インダクタンス、 V_{input} は入力電圧である。

この解析手法が有効であるかを確かめるため、常温と低温での銅テープの解析を先に行った。このとき、抵抗とインダクタンスは一定値で計算した。その結果、極めて良い一致を得た。次に、HTSテープ線材の抵抗値は、物理的特性から温度を考慮して決定した。式(2)にNC部分の電気抵抗モデル(R_n)、式(3)にRE123のSC部分の電気抵抗モデル(R_s)、式(4)に n 値のモデルを示す。

$$R_n = R_n(77\text{ K}) + a \left[\int_0^T I_n^2 dt + \int_0^T I_s^2 dt \right] \quad \dots(2)$$

$$R_s = \frac{bl}{I_s} \left(\frac{I_s}{I_c - c \left[\int_0^T I_n^2 dt + \int_0^T I_s^2 dt \right]} \right)^n \quad \dots(3)$$

$$n = n_0 - d \left[\int_0^T I_n^2 dt + \int_0^T I_s^2 dt \right] = \text{const.} \quad \dots(4)$$

$R_n(77\text{ K})$ は77 KでのNC抵抗、 I_n はNC電流、 I_s はSC電流、 I_c は臨界電流、 n は n 値、 l は電圧タップ間距離、 a, b, c, d はフィッティングパラメータである。

R_n は、77 KでのNC抵抗値の項とNC部分とSC部分の温度上昇にともなう抵抗の増大の項からなる。 $R_n(77\text{ K})$ は、臨界温度測定の見積もり手法を使用した。温度上昇に伴う抵抗の増大には、パルス電流に対する半導体素子のジャンクション温度の見積もり手法を使用した。 R_s は、 I_c 特性から求め、温度上

昇に伴う I_c 及び n 値の低下をモデルに組み込んだ。 I_c 及び n 値の温度依存性は、データベース⁽²⁾を参考にした。 n 値は一定値と温度変化に伴い低下するモデルの2種類で計算した。

NCインダクタンス(L_n)及びSCインダクタンス(L_s)の値は、銅テープの低温での解析結果を使用した。相互インダクタンスも考慮して計算を行った。結合係数(k)を変えて複数回計算を行い、観測電流と計算電流を合わせた。

3. 実験方法

使用した線材は、ニラコ製の銅テープ(CU-110657, 幅 5.0 mm, 厚さ約 0.5 mm)、フジクラ製のRE123テープ線材(FYSC-SCH04-PI, 幅 4.0 mm, 厚さ約 0.13 mm, I_c 160 A級)、の3つである。

短絡回路は、コンデンサバンクとサイリスタスイッチからなり、RE123テープ線材を銅ブロック電極で上下から挟み込み、電圧タップを取り付け、測定した⁽³⁾。パルス電流は、電流トランスデューサ(YOKOGAWA CT2000A 変換比 1:2000)等を用いて測定した。データはオシロスコープを用いた。

4. 回路解析結果

図1に低温でのRE123の電流電圧観測波形とLTspiceによる電流の計算波形の一例を示す。この例では、 I_c 特性試験で得られた $I_c=190\text{ A}$, $n=35$ と $L_n=L_s=13\text{ nH}$, $k=0.75$ のときに観測電流波形と計算波形はほぼ一致した。インダクタンス値は、電流波形が一致するように選んだ値である。並列回路のため、10~20 nHの幅で合わせた。

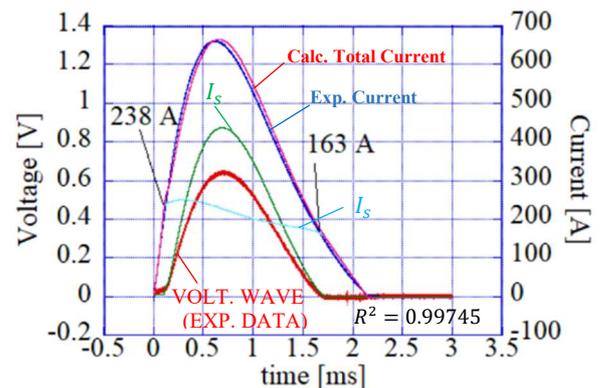


Fig.1. Experimental waveforms of current and tap voltage, and the calculated current for Fujikura FYSC-SCH04-PI @77 K

文献

- (3) 仁田野陽菜 他：電気学会・全国大会, No.5-110, 2025.
 (2) HTS wire critical current database, Victoria University of Wellington A <https://htsdb.wimbush.eu/>
 (1) S. Yamaguchi *et al.*, "A Short-Circuit Experiment of High-Temperature Superconductor Tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 34, No. 5, 2024, 8000805.

無線信号の電力スペクトル密度と電磁干渉に関する一評価

土屋 弘昌*, 加川 敏規, 宮下 充史 (電力中央研究所)

An Evaluation of the Power Spectral Density of Wireless Signals and Electromagnetic Interference

Hiroaki Tsuchiya, Toshinori Kagawa, Michifumi Miyashita (Central Research Institute of Electric Power Industry)

1. まえがき

無線通信機器の使用時に放射される電波が、電気所の制御・保護装置や通信機器（以下、制御装置等）に与える影響が懸念されている。制御装置等のイミュニティ試験は、IEC 61000-4-3 規格⁽¹⁾に準拠する 경우가多く、試験対象装置には、帯域幅 1 kHz、変調度 80%の振幅変調信号や、電力スペクトル密度が非常に高い信号を印加した際の電界強度試験レベルが示されている。一方、無線通信機器の送信電波による影響を評価する際には、電力スペクトル密度も重要な要素である。本稿では、無線通信機器の電力スペクトル密度による影響の違いを把握することを目的とし、デジタル簡易無線機を複数台同時送信した場合の影響を定量的に評価し、その結果について述べる。

2. 電磁干渉の測定方法

測定は、デジタル簡易無線機 4 台と直流回生電源装置を用いて実施した。デジタル簡易無線機は、送信出力 0.25 W、1 W、2.5 W および 5 W の 4 つのモードと、チャンネル帯域幅 5.8 kHz の 30 チャンネルから設定可能である。直流回生電源装置は、デジタル簡易無線機で電波照射すると、装置の液晶パネルに表示される電力値が電界強度の上昇に応じて増加したため、影響度合いを定量的に評価できると判断した。測定では、デジタル簡易無線機 4 台をそれぞれ異なるチャンネルに設定し、直流回生電源装置の液晶パネルから約 1.2 m 離れた位置から電波を照射した。4 つの送信出力モードにおいて、デジタル簡易無線機を 1 台、2 台同時、3 台同時および 4 台同時に送信し、全 16 パターンで測定を行った。また、各パターンにおいて液晶パネルに表示される電力値を 5 回記録し、その平均値を算出した。

3. 測定結果と考察

図1に各パターンにおける測定結果を示す。測定結果は、電波照射による電力値の上昇率で整理した。なお、上昇率の誤差の標準偏差は 0.03~0.19 の範囲にある。各送信出力モードにおいて、同時送信台数（合計送信出力）の増加に伴い電力値の上昇率は増加するが、合計送信出力が倍になっても上昇率は比例して倍にはならない。例えば、送信出力モード 5 W のデジタル簡易無線機を 1 台から 2 台に増や

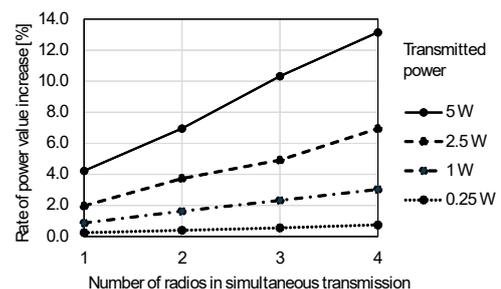


図1 測定結果

Fig. 1. Measurement results

表1 電力スペクトル密度における影響

Table 1. Effects on power spectral density

合計送信出力	5 W		1 W	
	5 W	2.5 W	1 W	0.25 W
送信出力モード	5 W	2.5 W	1 W	0.25 W
同時送信台数	1台	2台	1台	4台
電力スペクトル密度*	1	0.5	0.2	0.05
電力値の上昇率	4.2%	3.7%	0.9%	0.7%

*5 W/5.8 kHz を 1 とした時の相対値。

した場合、電力値の上昇率は 4.2% から 7.0% となり、倍増しない。他の送信出力モードや 2 台から 4 台に増加させた場合も同様であり、平均で約 80% の増加に留まることが確認された。また、合計送信出力が同じで同時送信台数が異なる場合（例：5 W を 1 台と 2.5 W を 2 台、1 W を 1 台と 0.25 W を 4 台）、電力値の上昇率は同時送信台数が多い（電力スペクトル密度が低い）方が低いことが明らかとなった（表 1）。

4. まとめ

無線通信機器の電力スペクトル密度と電磁干渉への影響を評価するため、複数台のデジタル簡易無線機を用いて照射試験を実施し、その結果を示した。近年、広帯域マルチキャリア伝送方式を用いる大容量無線通信機器が増加しており、電気所の制御装置等に影響を与えることなくこれらの無線通信機器を運用するためには、所要離隔距離の策定が重要である。本研究の成果がその指針策定に寄与することを期待する。

文献

- (1) IEC, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test. IEC 61000-4-3, 2020.

TDR/TDT による GTEM セルの時間領域特性測定

大友 悠真*, 石上 忍, 川又 憲(東北学院大学), 禰 真悟 (エレナ電子)

Yuma Otomo, Shinobu Ishigami, Ken Kawamata, (Tohoku Gakuin University), Shingo Inori (Elena Electronics)

1. まえがき

GHz 以上の周波数帯域で使用可能である TEM 導波路として GTEM セルが開発された⁽¹⁾。GTEM セルは、放射エミッション試験や放射イミュニティ測定に用いるだけでなく、HEMP シミュレータのような過渡電磁界発生装置としても用いられる⁽²⁾。GTEM セルの重要な特性として、電界の均一性およびセル内の周波数応答がある。しかし、静電気放電 (ESD: Electro-Static Discharge) による電磁界など、広帯域波形を測定する際には、GTEM セルの時間領域特性を知ることが重要である。本報告では、TDR/TDT (Time Domain Reflect / Transmission) 測定器及び広帯域長六角形折返しアンテナ (FLHA: Folded Long-Hexagon Antenna)⁽³⁾を用いて GTEM セルの時間領域反射特性及び電界過渡特性の測定結果について報告する。

2. 測定方法

図 1 に GTEM セルの時間領域反射特性及び電界過渡特性の測定セットアップを示す。両者の測定には TDR/TDT 測定器 (Agilent 86100A) を用いた。測定器の TDR 出力は、2 m の同軸ケーブルを介して最大セブタム高 500 mm の GTEM セル (Elena EGT-500B) の入力部分に接続した。また FLHA は、給電点が床導体より 240 mm となる距離に合わせて設置した。給電点位置におけるセブタム高は 500 mm である。FLHA の出力端子は、5 m の同軸ケーブルを介して測定器の TDT 入力に接続した。

3. 測定結果

図 2 は GTEM セルの TDR 機能による反射特性測定結果である。同図より、18 ns~20 ns の小さい変動 (図中(A)) は GTEM セル入力コネクタによるもの、また 33 ns 以降の変動 (図中(B)から(C)) までは GTEM セルの抵抗ボード及び背面の電波吸収体からの反射によるものと考えられ、反射係数は最大 0.1 (電圧定在波比で 1.22) 程度である。図 3 は GTEM セルの電界過渡特性測定結果である。FLHA 受信波形における第 1 ピークの立ち上がり時間及び立ち下がり時間はそれぞれ 0.39 ns 及び 1.07 ns である。また第 1 ピーク以降の波形については、第 2 ピークの第 1 ピークに対する振幅比は約 0.25 であり、反射特性における電圧定在波比に相当すると推測できる一方、測定波形には FLHA 自身の特性が含まれており、今後アンテナ特性除去の方法について検討する必要がある。

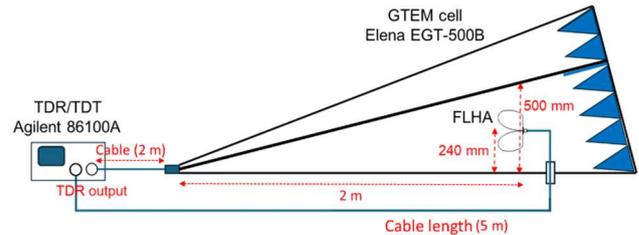


図 1 GTEM セルの時間領域測定セットアップ
Fig. 1. Measurement setup for GTEM cell in time domain.

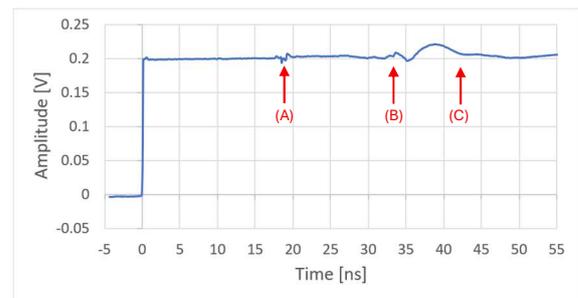


図 2 GTEM セルの反射特性測定結果
Fig. 2. Measurement result of reflection property of GTEM cell.

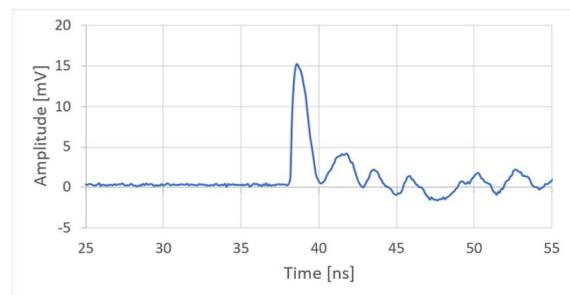


図 3 GTEM セルの電界過渡特性測定結果
Fig. 3. Measurement result of transient E-field response of GTEM cell.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24K07439 の助成を受けたものである。

文献

- (1) D. Konigstein and D. Hansen, "A new family of TEM-cells with enlarged bandwidth and optimized working volume." Proc. 7th Int. Zurich Symp. and Tech. Exh. on EMC, pp. 127-132, March 1987.
- (2) IEC 61000-4-20 Ed.3.0: 2022.
- (3) K. Kobayashi, S. Ishigami, K. Kawamata, K. Harima, and S. Inori, "Improvement of Broadband Folded Long-Hexagon Antenna for EMI Measurements", APMC 2022, pp. 426 - 428, 2022.

金属衝突により生じる電波の波形解析 ：金属種と気候の依存性

猪野 一将*, 高野 忠, 三枝 健二, 瀧川 道生 (日本大学)

Waveform Analysis of Radio Waves Generated by Metal Collisions : Dependence on Metal Species and Climate

Kazumasa Ino, Tadashi Takano, Kenji Saegusa, Michio Takikawa (Nihon University)

1. まえがき

以前から、高速物体による金属破壊⁽¹⁾や、静的圧力による岩石破壊⁽²⁾、金属同士の衝突⁽³⁾により、電波が放射されることが確認されている。いずれも観測周波数は、300 MHz, 2 GHz, 18 GHz あるいは 22 GHz である。

金属同士の衝突による電波放射現象は、放射要因や電波特性が解明されれば、金属材料の非破壊検査やスペースデブリ衝突検知⁽⁴⁾といった分野への応用可能性があると考えられる。そのため金属衝突による電波放射に、気候要素、金属試料、落下高さが与える影響について検討された⁽⁵⁾。

本研究では、落下ガイドの有無を変えて金属衝突実験を行い、金属試料の種類、気候要素が電波放射に及ぼす影響を検討する。また、受信波形の特徴を抽出し、観測波形を形状ごとに分類して比較する。

2. 実験構成

図1に本研究の実験構成を示す。金属板と金属球は同じ金属であり、鉄、銅、アルミニウムの3種類を用いる。落下ガイドは、金属球の落下を安定させるために用いるが、塩化ビニル製である。また、落下ガイド内部で金属球を安定に通過させるため、落下ガイドは10°傾けて設置している。図1では落下ガイドがあるが、ない状態も実験している。

金属板は厚さが10 mm、幅50 mm、長さ100 mm、金属球は直径が20 mm、落下ガイドは長さが40 cm、内径が25 mmである。落下させる高さは50 cmとする。

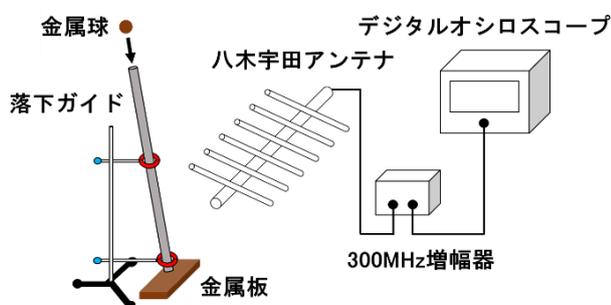


図1 実験構成 (落下ガイドあり)

Fig.1. Experimental setup (with a drop guide)

測定周波数は300 MHzである。受信アンテナに八木宇田アンテナを用いて、金属衝突位置から約1 m離して設置する。金属試料の帯電を防ぐため、金属球を持つ際にはシリコン製のトングを使用している。

実験方法としては、金属球を落下ガイドを通してもしくは自由に落下させ、金属板に衝突させる。そこで発生した電波を観測している。受信した電波は、増幅器で増幅したあとデジタルオシロスコープにて記録する。その後、Origin Pro (グラフ作成・データ分析ソフト)のFFTフィルタ(BPF)の機能を用いてノイズを除去している。

3. 気候と受信確率

異なる気候条件下において、金属の種類および落下ガイドの有無を組み合わせた金属衝突実験を行い、受信状態を観測した。試行した実験回数(ここでは50回)に対して、電波が発生した割合を受信確率と定義し、相対湿度との関係を整理した。

落下ガイドなしの場合を図2に示す。相対湿度の増加に伴い、受信確率が3種類の金属共に同じように低下し、かつ55%あたりに急峻な変換点を持っていることがわかる。

落下ガイドありの場合を図3に示す。この場合、データにばらつきがあり、金属による差も大きい。これは、金属球が落下ガイド内部と接触して帯電し、かつ帯電・放電が金属により差があるためと考えられる。

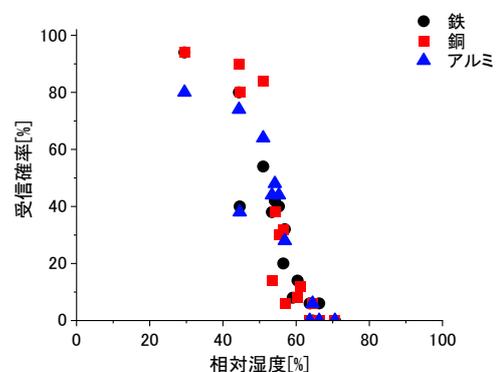


図2 相対湿度と受信確率 (落下ガイドなし)

Fig.2. Relative humidity and reception probability (without a drop guide)

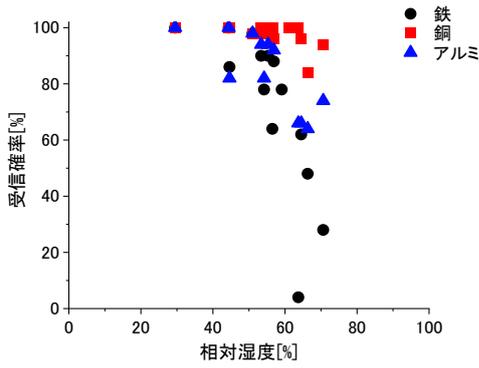
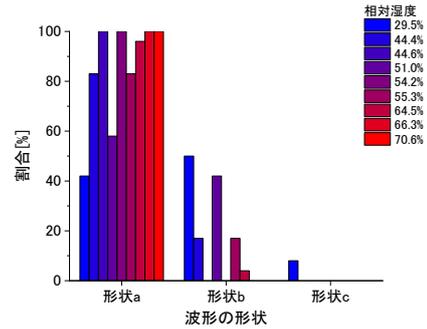


図3 相対湿度と受信確率 (落下ガイドあり)
Fig.3. Relative humidity and reception probability (with a drop guide)



(c) アルミニウム
図4 波形の形状と割合
Fig.4. Waveform shapes and proportions

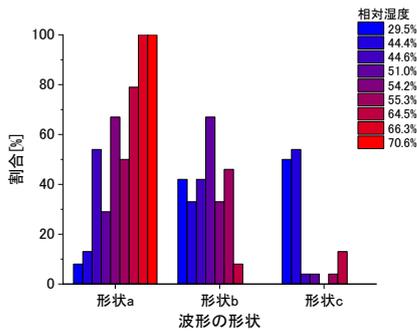
4. 受信波形の分類

落下ガイドありの条件において受信された電波波形には、立ち上がりおよび立ち下がりの形状に違いが見られた。そこで、受信波形を次の3種類に分類した。

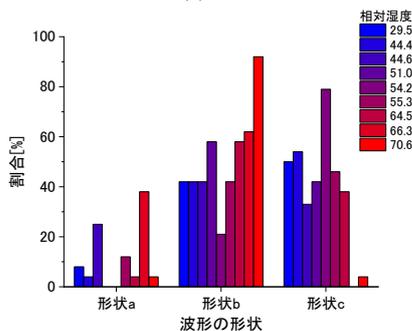
- a. 立ち上がりが急で、立ち下がりが緩い
- b. 立ち上がりと立ち下がりが同じ
- c. 立ち上がりが緩く、立ち下がりが急

図4に、各金属試料における波形形状の割合を示す。凡例は、実験時の室内における相対湿度を示す。

図4より、鉄は湿度が高くなるにつれ形状aが優位であり、銅は形状bとcに分散し、アルミニウムは形状aが優位で湿度に依らないことがわかる。このことから、受信波形の形状分布は、金属表面に形成される酸化膜や湿度による表面状態の違いが、帯電および放電過程に強く影響している可能性が考えられる。



(a) 鉄



(b) 銅

アルミニウムの酸化膜は、絶縁性が比較的高い。そのため、電荷が蓄積しやすく、かつ容量を通して急激な放電が生じるので、立ち上がりが急な波形が多く観測されたと考えられる。表面状態は、湿度により大きく変化しないようである。また、鉄においては湿度が増加するとアルミニウムの様に電荷が蓄積しやすくなり、形状aの割合が増加したものと推察される。一方、銅では酸化膜が比較的導電的であるため放電過程が分散し、かつ湿度により導電率が変化するためb型が増えるようである。

5. まとめ

本研究において、次のことが明らかになった。

- (i) 相対湿度が増加するにつれ、金属衝突による電波の受信確率は低下した。
- (ii) 特に落下ガイドを用いない場合、受信確率は金属試料による差が少なく、急峻な低下が顕著であった。
- (iii) 落下ガイドを用いた場合には、受信確率の湿度による変化が分散する。また受信波形の形状に、金属試料ごとの違いが確認された。
- (iv) 金属衝突による電波放射は、微小放電によると思われるので、湿度に伴う受信確率の低下は帯電量の減少によると推察される。
- (v) 落下ガイドを用いた場合に波形形状に差が生じたことは、金属球と落下ガイド内部との接触や金属表面特性の違いが、金属球の帯電・放電状態を変化させた可能性を示唆している。

文献

- (1) T. Takano *et al.*, "Microwave emission due to hypervelocity impacts and its correlation with mechanical destruction", J. Appl. Phys, Vol.92, No.9, pp.5550-5554 (2002).
- (2) 埴陸也, 他, "岩石破壊実験によるマイクロ波放射状況—金属接触ノイズ除去下での実験—", 電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門誌), Vol.136, No.5, pp.227-234 (2016).
- (3) 猪野一将, 他, "金属衝突により生じる電波の波形および落下ガイドと接地による影響の検討", 電気学会大会, 1-030 (2025).
- (4) 相馬央令子, 他, "マイクロ波によるデブリ衝突検出系の検討", 日本航空宇宙学会論文集, Vol.56, No.650, pp.105-109 (2008).

カーボン粉末複合シートにおける 伝導ノイズ抑制効果のシートアドミタンス依存性

鎌野 瑛斗*, 阿加 賽見, 遠藤 恭, 室賀 翔 (東北大学)

Sheet Admittance Dependence on Conductive Noise Suppression Effect for Composite Sheet with Carbon Powder
Eito Kamano, Saijian Ajia, Yasushi Endo, Sho Muroga (Tohoku University)

1. まえがき

電磁ノイズ抑制シート (NSS) の設計指針構築に向けて, NSS の高周波電磁界モデル化技術の確立が重要である。これまでに, 非磁性導電性シートについては, 材料を一様なシート抵抗 R_s を有する連続体と仮定することによって, 損失を推定できることを示した⁽¹⁾。一方で, カーボン粉末等の導電性フィラーを誘電体中に分散した複合シートの場合には, 導電性と誘電性の影響を考慮した単純なモデルが必要である。そのモデルの一つは, 抵抗と静電容量の並列回路であり, その特性は, シートアドミタンス Y_s によって表される。

本研究では, グラウンド付きコプレーナ線路 (GCPW) 上に配置した複素誘電率 $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ および導電率 σ を有する複合シートを評価対象として, シートアドミタンス Y_s と伝導ノイズ抑制効果の関係について検討する。

2. 解析方法

有限要素法に基づく電磁界シミュレーション (Ansys HFSS 2023 R2, Ansys) を用いて, 線路長 5 mm, 信号線幅 0.50 mm, グラウンドギャップ 0.16 mm の GCPW およびその上に配置した複合シートの電磁界モデルを作成した。複合シートは, Y_s を有する均一な連続体と仮定した。その寸法は長さ 4 mm, 幅 10 mm とし, 厚さ t は 1~300 μm の範囲で変化させた。電気特性は周波数に依存しない変数とし, 複素誘電率の実部 ϵ_r' は 1~ 10^2 , 虚部 ϵ_r'' は 10^{-2} ~ 10^3 , 導電率 σ は 10^{-1} ~ 10^7 S/m の範囲で変化させた。

シートアドミタンス Y_s は, 変化させた複合シートの σ , ϵ_r' , ϵ_r'' , t を用いて,

$$Y_s = (\sigma + 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r'')t - j2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' t \quad (1)$$

と表される。異なる Y_s を有する複合シートを配置した GCPW に 1 mW の電力を印加した場合について, 印加電力に対する損失の比を算出した。

3. 解析結果および考察

図 1 に, 30 GHz における電力損失比の Y_s 依存性を示す。この結果から明らかなように, 電力損失比は Y_s の関数として表せる。また, $\text{Re}(Y_s) = 10^{-2}$ S 付近で電力損失比が極大となり, $\text{Im}(Y_s)$ を変化させてもこの条件は変化しなかった。ミリ波帯で高い伝導ノイズ抑制効果を得るためには, $\text{Re}(Y_s)$

が 10^{-2} S 付近となるように複合シートを設計する必要があると考えられる。

もみ殻炭複合シート⁽²⁾における σ , ϵ_r' , ϵ_r'' , t の測定値を例として用いてシミュレーションを実施し, その結果を図 1 に追加した (\square , \triangle , \diamond)。Sheet A および Sheet B は, $\text{Im}(Y_s)$ は異なるものの, $\text{Re}(Y_s)$ がいずれも損失の極大条件である 10^{-2} S 程度であり, 実測でも高い伝導ノイズ抑制効果を示した。Sheet C は, $\text{Re}(Y_s)$ が 10^{-4} S 程度と損失の極大条件より低く, 実測においても, 十分な伝導ノイズ抑制効果を示さなかった。

以上の結果から, 伝導ノイズ抑制効果が Y_s の関数として表現でき, 提案するモデルは妥当であることを確認した。

謝辞

本研究の一部は, 総務省 FORWARD (受付番号: JPMI240210003) の委託を受けた。また, JSPS 科研費 25K07860 の助成を受けた。

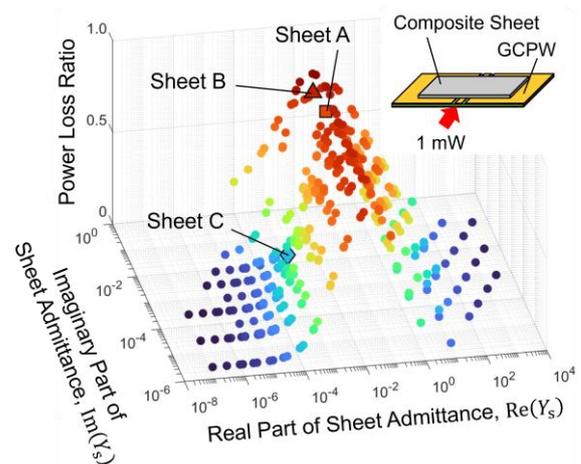


図 1 複合シートにおける電力損失比の Y_s 依存性
Fig. 1. Dependence of power loss ratio on Y_s for composite sheets

文 献

- (1) S. Muroga, et al. : IEEE Trans. Magn., Vol. 45, No. 10, pp. 4804-4807 (2009)
- (2) 鎌野 瑛斗, ほか: 第 38 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 14B2-3 (2024)

人体数値モデルを用いた IH 調理器の 使用時における体内誘導電界評価

檜原 佑空*, 太良尾 浩生(香川高等専門学校)

Evaluation of induced electric fields in human body model during use of induction cooker
Tasuku Kashihara, Hiroo Tarao (National Institute of Technology, Kagawa College)

1. 背景・目的

近年、IH 調理器が普及しておりそれに伴い、安全性の証明として様々な研究が行われてきた。先行研究では、成人男性モデルにおけるの直立体勢や腕を鍋に向かって伸ばした体勢などの姿勢を変形させた場合や成人女性モデルなどの様々な人体数値モデルを用いて解析を行っている。さらに、解析した誘導電界の値と ICNIRP ガイドライン⁽¹⁾を比較して曝露評価を行っている。本研究では、人体数値モデルにおける組織導電率や鍋サイズの違いによるモデル誘導電界を比較し、曝露評価を行う。

2. 解析条件

本研究では、人体数値モデルとして日本人の成人男性の平均的な体型を持つ Taro モデルを使用する(図 1)(2)。本モデルは、ボクセルと呼ばれる微小立方体(各辺 2mm)で構成され、組織ごとに適した導電率を割り当てることができる。図 1 のように、IH 調理器の高さを 81 cm、エッジからヒーターの中心までの距離を 21.1 cm とした。稼働周波数は 20 kHz とし、調理時の鍋の直径が 14cm、16cm、18cm の 3 通りで解析を行った。さらに、モデル内の全 51 組織に割り当てた導電率は、IT IS Foundation が公表している値を用いた(3)。ここで、各組織の導電率(公表値)には測定条件などにより幅があり、特に脳脊髄液など 16 の組織では導電率の最大値と最小値に 0.5 S/m 以上の差があった。したがって、各組織の平均的(標準的)な導電率を割り当てた場合の他に、上の 16 組織に対して導電率の最大値を割り当てた場合と最小値を割り当てた場合についても誘導電界の解析を行った。

3. 結果

鍋の直径が 14cm における解析結果について、例として心臓における誘導電界の分布図とパーセンタイル分布を図 2 に示す。解析結果から、どの導電率の場合においても 90% を超えたあたりから急激に誘導電界の値が大きくなっていることがわかった。また、導電率の最小値を割り当てた場合においては、平均値を割り当てた場合よりも誘導電界が全体的に大きくなっていることがわかった。なお、モデル全体を見ると、腹部の皮膚で誘導電界が最大となり、その値(99%値)は 43 mV/m であった。しかし、これは稼働周波

数 20 kHz 時の基本制限(2.7 V/m)よりも十分に小さいといえる。

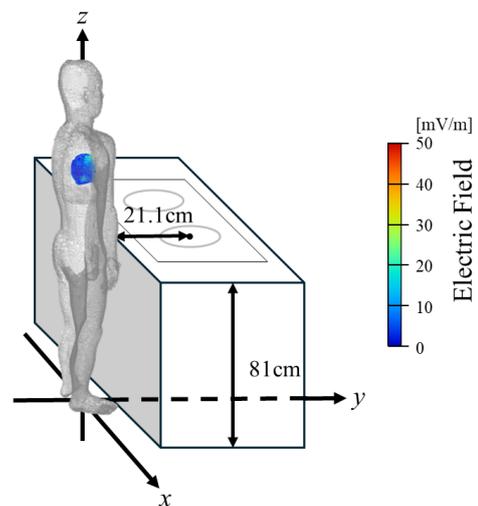


図 1 成人男性モデル
Fig.1. Adult male model

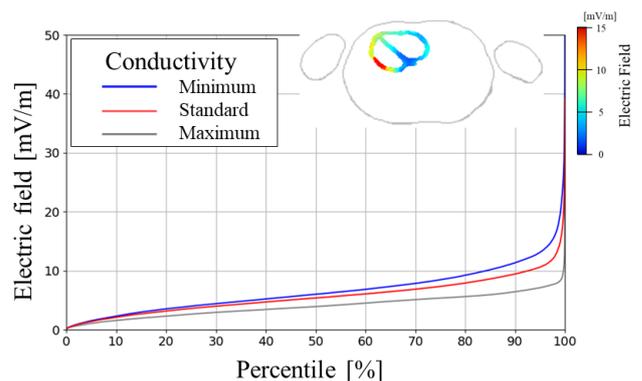


図 2 心臓における誘導電界の分布図と%タイル分布
Fig.2. Percentile and distribution of induced E-field in heart

文 献

- (1) ICNIRP, Health Physics, 99(6):818-836、 2010.
- (2) NICT, Phys. Med. and Biol., 49(1):1-15, 2004.
- (3) IT'IS Foundation, <https://itis.swiss/> (online).

直流電車内における磁界の測定

室谷 真一*, 種崎 征利, 福井 博道, 大久保 千代次
(一般財団法人電気安全環境研究所 電磁界情報センター)

Measurement of Magnetic Fields in DC Electric Train Car

Shinichi Muroya, Masatoshi Tanezaki, Hiromichi Fukui, Chiyoji Ohkubo (Japan EMF Information Center)

1. 測定の目的

電磁界情報センター（以下、JEIC）は、電磁界の健康影響に関するリスクコミュニケーションの活動の一環として、身近にある電力設備や電化製品等から発生する磁界（磁束密度）を測定し、その結果を一般に公表している。また、これらの測定結果は一般市民からの電磁界の健康影響に関する問い合わせに対応する際の基礎データとしても活用している。

近年、JEICでは鉄道設備からの磁界ばく露による健康影響を懸念する一般市民からの問い合わせが増えているが、国内では鉄道設備からの磁界の測定報告が少ないことから、本論文では、リスクコミュニケーションに資するデータを収集することを目的として、首都圏内の在来線の直流電車内を対象に磁界を測定するとともに、その結果を国際的なガイドラインと比較し評価した。

2. 測定方法

鉄道環境における人体ばく露を考慮した磁界の測定手順を定めた規格である IEC 62597:2019⁽¹⁾ならびに JIS E 0201:2024⁽²⁾を参考に測定を実施した。本測定の目的は、規格への適合性評価等の厳密なばく露評価ではなく、リスクコミュニケーションに資する基礎データの収集であることを踏まえ、磁界のばく露を把握するうえで重要となる測定高さ等の一部条件は規格に準拠させる一方、その他の条件については現有の測定機器や体制等を勘案し、実施可能な範囲で測定を実施した。

<2・1>測定器 測定器は直流磁界及び交流磁界を測定可能で、かつ携帯性に優れた Fields at Work GmbH 製の三軸測定器 ExpoM-ELF（測定可能周波数 DC~100 kHz, 最小サンプリング時間 4 秒）を使用した。

<2・2>測定対象 走行中の首都圏内の在来線（直流 1500V, 架空電車線方式）の車両内を測定の対象とした。また、編成車両のうち、トロリ線から電気を受電するパンタグラフ設置車両、ならびにその車両の前後に接続されるモーターや補助電源等を搭載した車両には、高い磁界が発生していると想定されることから、図 1 に示すとおり、車両 B（パンタグラフ設置車両）とその前後の車両 A, 車両 C を測定の対象とした。

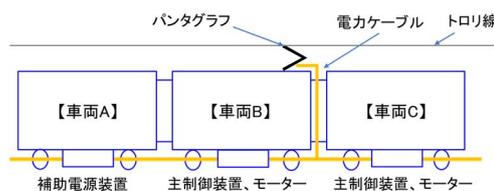


図1 測定車両

<2・3>測定位置 IEC 62597:2019 ならびに JIS E0201:2024 は、車両内における測定位置として床上から 0.3m, 0.9m, 1.5m の測定高を定めているので、本測定においてもこれに準拠した。

3. 測定結果

<3・1>車両設備による影響

パンタグラフやモーターの有無による影響を比較するため、図 2 の車両側面（上段）と平面（下段）に示す測定位置の各車両ドア近傍で磁界（直流）を測定した。なお、測定は乗車率が少ない時間帯・区間で実施した。

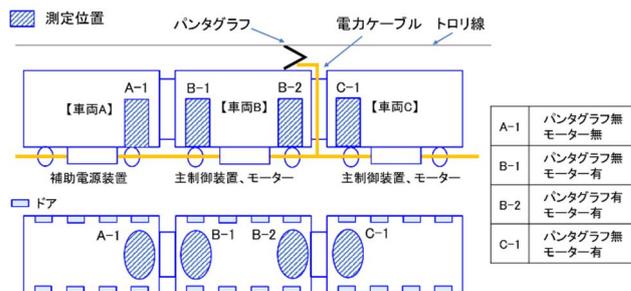


図2 各車両のドア付近における測定位置

各箇所で測定された磁界（直流）の最大値を表 1 に示す。最大の磁界（直流）が測定された位置は B-2 であった。B-2 はパンタグラフの下部付近やモーターの上部付近に位置することから、これらが影響していると考えられる。

表1 各車両のドア付近の磁界（直流）の最大値 [μT]

測定高	測定位置			
	A-1	B-1	B-2	C-1
0.3m	264.1	287.0	322.6	264.4
0.9m	272.6	244.3	314.2	262.6
1.5m	294.5	238.8	307.1	256.0

<3・2>測定箇所による差異

3・1の測定で測定値が最大であった図2のB-2やその近傍において、最大の磁界(直流)が発生している箇所をさらに詳しく特定するため、B-2やその近傍を6箇所に分けて測定を実施した。測定箇所を図3に示す。なお、3・1と同じく、測定は乗車率が少ない時間帯・区間で実施した。

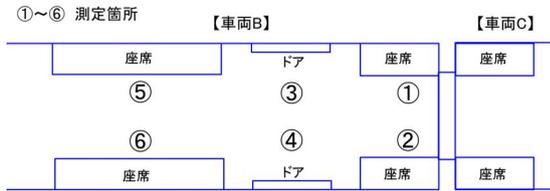


図3 車両B(図2のB-2)における測定箇所

測定された磁界(直流)の最大値を表2に示す。車両の先頭部である①の測定値が最大であった。車両Bと車両Cの連結部付近にはパンタグラフから引下ろされる電力ケーブルがあるため、その影響によるものと考えられる。

表2 車両B(図1のB-2)の磁界(直流)の最大値[μT]

測定高	測定箇所					
	①	②	③	④	⑤	⑥
0.3m	565.7	221.4	477.9	181.0	412.5	242.2
0.9m	436.2	219.8	347.0	228.7	277.4	266.7
1.5m	460.6	206.1	321.8	237.5	255.7	262.8

<3・3>走行中の磁界の変化

3・2の測定で最大の磁界(直流)が発生する箇所として特定された図3の①において、今回対象とした在来線区間を走行している間、測定を連続して実施し、走行状況による磁界の変化を調べた。測定は上り線、下り線とも実施した。また、車両内では空調設備等の運転に交流(60Hz)の電気も使用されているため、交流の磁界も併せて測定した。

測定された磁界(直流, 交流[60Hz])の最大値と平均値を表3, 表4に示す。

表3 上り走行中の車両内の磁界の最大値と平均値[μT]

磁界の区分	測定値の区分	上り		
		測定高		
		0.3m	0.9m	1.5m
直流	最大値	763.8	678.1	687.1
	平均値	187.3	149.1	149.9
交流[60Hz] (実効値)	最大値	7.10	6.30	2.78
	平均値	1.26	0.50	0.31

表4 下り走行中の車両内の磁界の最大値と平均値[μT]

磁界の区分	測定値の区分	下り		
		測定高		
		0.3m	0.9m	1.5m
直流	最大値	812.1	628.1	683.0
	平均値	180.7	142.5	141.3
交流[60Hz] (実効値)	最大値	3.71	2.23	1.83
	平均値	1.32	0.51	0.31

磁界(直流)の測定値の時間変化の一例を図4に示す。同図には、測定器のGPS機能で記録した速度の時間変化も

示している。

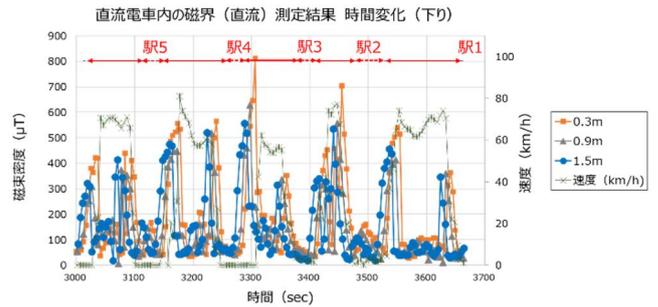


図4 走行中の磁界(直流)の測定値と速度の変動の例

磁界(直流)は区間(駅間)によって変動し、特定の区間で測定値が大きくなる傾向が見られた。これには、区間ごとの勾配や乗車率等の違いが影響していると考えられる。また、図4から分かるとおり、磁界(直流)は駅の到着前や駅の出発後に一時的に磁界のピークが立つ傾向が見られ、表3, 表4に示した最大値もこのようなピーク時に測定された。これは、加減速に伴う力行運転や回生運転時に、車内のケーブルに流れる電流が一時的に大きくなるためと推定される。測定高による差異も見られ、直流, 交流とも測定高0.3mの測定値が大きくなるケースが多かったが、これには、床下機器等が影響していると考えられる。

磁界(直流)の測定値の累積確率曲線を図5に示す。80%が325μT未満であった。また、95%タイル値の最大値は、上り時の測定高0.3mの524.4μTであり、表3, 表4の最大値のような大きな磁界(直流)は稀であることが分かる。

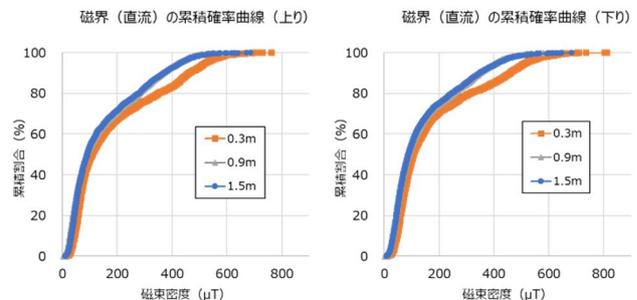


図5 磁界(直流)の測定値の累積確率曲線

4. 国際的なガイドラインとの比較

車両内で測定された磁界の最大値(直流: 812.1μT, 60Hz: 7.10μT)は、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)の一般公衆への参考レベル(直流: 400,000μT, 60Hz: 200μT)(3), (4)よりも低い値であった。

文献

- (1) IEC 62597:2019, Magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure – Measurement procedures
- (2) JIS E 0201:2024, 鉄道環境における人体ばく露を考慮した電子・電気機器から発生する磁界レベル測定手順
- (3) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), ICNIRP Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields, Health Physics 96 (4):504-514, 2009.
- (4) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz), Health Physics 99(6):818-836,2010.

新幹線車内における磁界の測定

種崎 征利*, 室谷 真一, 福井 博道, 大久保 千代次
(一般財団法人電気安全環境研究所 電磁界情報センター)

Measurement of Magnetic Fields in Bullet Train

Masatoshi Tanezaki, Shinichi Muroya, Hiromichi Fukui, Chiyoji Ohkubo (Japan EMF Information Center)

1. 測定の目的

電磁界情報センター(以下、JEIC)は、経済産業省のワーキンググループによる政策提言を受け2008年に設立された中立的な常設機関である。JEICは、リスクコミュニケーションの実践を通じて電磁界の健康影響に関する利害関係者間のリスク認知のギャップを縮小することを目的に様々な活動を実施しており、その一環として、身近にある電力設備や電化製品等から発生する磁界(磁束密度)を測定し、その結果を一般に公表している。また、これらの測定結果は一般市民からの電磁界の健康影響に関する問い合わせに対応する際の基礎データとしても活用している。

近年、JEICでは鉄道設備からの磁界ばく露による健康影響を懸念する一般市民からの問い合わせが増えているが、国内では鉄道設備からの磁界の測定報告が少ないことから、本論文では、リスクコミュニケーションに資するデータを収集することを目的として、新幹線を対象に車両内の磁界を測定するとともに、その結果を国際的なガイドラインと比較し評価した。

2. 測定方法

鉄道環境における人体ばく露を考慮した磁界の測定手順を定めた規格である IEC 62597:2019⁽¹⁾ならびに JIS E 0201:2024⁽²⁾を参考に測定を実施した。本測定の目的は、規格への適合性評価等の厳密なばく露評価ではなく、リスクコミュニケーションに資する基礎データの収集であることを踏まえ、磁界のばく露を把握するうえで重要となる測定高さ等の一部条件は規格に準拠させる一方、その他の条件については現有の測定機器や体制等を勘案し、実施可能な範囲で測定を実施した。

<2・1>測定器 測定器は直流磁界及び交流磁界を測定可能で、かつ携帯性に優れた Fields at Work GmbH 製の三軸測定器 ExpoM-ELF(測定可能周波数 DC~100 kHz, 最小サンプリング時間 4 秒)を使用した。

<2・2>測定対象 走行中の新幹線(16両編成、交流 25,000 V・60Hz, 架空電車線方式)の車両内において一般の人が利用する座席とデッキを測定の対象とした。また、編成車両のうち、トロリ線から電気を受電するパンタグラフが設置されている車両、ならびにその車両の前後に接続され

る変圧器や変換装置等を搭載した車両においては、高い磁界が発生していると想定されることから、図1に示すとおり、車両2(パンタグラフ設置車両)とその前後の車両1、車両3を測定の対象とした。

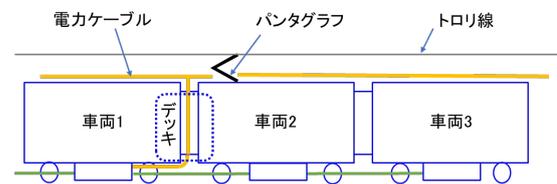


図1 測定車両

<2・3>測定位置 IEC 62597:2019 ならびに JIS E 201:2024 は車両内における測定位置として表1のとおり床上測定高を定めている。本測定においても測定位置は表1に準拠した。

表1 車両内における床上測定高

測定位置	測定規格が定める位置
床上測定高	床上から 0.3m, 0.9m, 1.5m

<2・4>測定条件 以下の①、②に示す条件のもと、走行中の車内の座席、デッキにおいて測定を実施した。

① 座席

- 測定区間：駅 A~駅 D(上りまたは下り)
- 測定箇所：座席の位置及び、車両による測定値の差異を確認するため、図2に示す S1~S11の座席で測定を実施した。

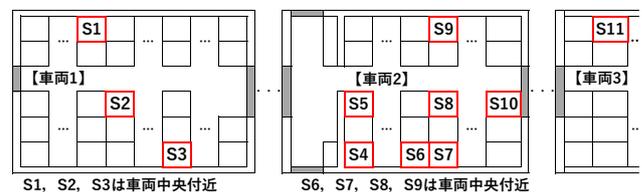


図2 座席の測定位置

② デッキ

- 測定区間：駅 C~駅 D(上りまたは下り)*
- * 駅 D を出発後または到着前の 5~10 分間で測定
- 測定箇所：車両1~車両2のデッキにおいて、図3に示すとおり、通路やドア周辺を 8 箇所に分けて測定した。

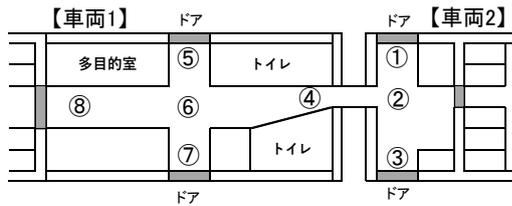


図3 デッキの測定位置

3. 測定結果

<3・1>最大磁界レベル

各測定箇所にて測定された磁界の最大値（実効値）を表2、表3に示す。なお、表中の太字は、各測定箇所の測定高0.3m、0.9m、1.5mの測定値のうち最大のものを表している。

① 座席：最大値は窓側の座席（車両3のS11）で測定された6.78 μ Tであった。位置や測定高によって測定値に差異が見られ、窓側では測定高0.9mの測定値が大きくなる傾向があった。車両天井の電力ケーブルや床下機器等に加えて、側壁内の配線等による影響を受けているためと考えられる。一方、通路側では測定高0.3mと1.5mの測定値が大きくなる傾向が見られたが、これは車両天井の中央付近に配された電力ケーブルや床下機器等の影響によるものと考えられる。

表2 座席の磁界（60Hz）の最大値（実効値）[μ T]

測定高	座席					
	S1 (窓側)	S2 (通路側)	S3 (窓側)	S4 (窓側)	S5 (通路側)	S6 (窓側)
0.3m	2.00	2.03	2.93	2.27	0.77	1.03
0.9m	5.22	0.47	2.33	3.09	0.79	4.32
1.5m	3.25	0.39	1.72	2.14	4.18	1.74

測定高	座席				
	S7 (窓側)	S8 (通路側)	S9 (窓側)	S10 (通路側)	S11 (窓側)
0.3m	1.56	0.64	1.75	3.13	2.39
0.9m	4.26	0.72	5.00	3.51	6.78
1.5m	3.35	1.30	2.73	2.48	4.09

② デッキ：位置や測定高によって差異はあるが、測定値は座席より大きい傾向が見られた。これは、遮蔽構造の違いのほか、天井、側壁、床下に配線されているケーブルとの離隔距離等が座席とデッキで異なるためだと考えられる。また、車両1と車両2の接続部付近（図3の④）において、最大の磁界（40.8 μ T）が測定された。同箇所の近傍には、車両2前方のパンタグラフから車両内に引下ろされる電力ケーブルが通っているためと考えられる。

表3 デッキの磁界（60Hz）の最大値（実効値）[μ T]

測定高	測定位置							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
0.3m	5.20	21.7	6.13	14.5	11.0	1.61	3.19	0.30
0.9m	5.32	7.54	5.86	15.0	6.30	3.49	2.29	0.28
1.5m	5.21	7.53	20.6	40.8	10.5	5.45	11.3	0.97

<3・2>走行中の磁界の変動

駅A～駅Dを走行する車両内の座席（図2のS7）で測定した磁界の実効値の時間変化を図4に示す。同図には測定器のGPS機能で記録した速度の時間変化も示している。

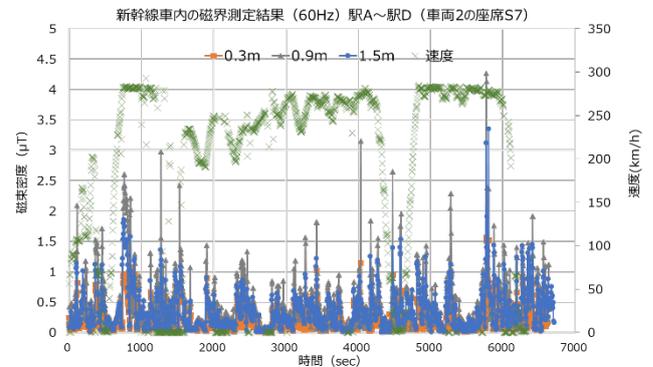


図4 走行中の磁界測定値と速度の変動

同図より、走行中の車内における磁界は所々でピークが発生していることが分かる。測定器のGPS機能を活用して測定時の位置を確認した結果、トンネルの出入口、き電区分所、異相区分切替セクションの付近で磁界のピークが発生するケースが多く見られた。また、速度と磁界の変動を比較したところ、速度が上昇または減少するときに、磁界のピークが発生するケースも多く見られた。これは、特定の区間を走行する際や加減速に伴う力行運転や回生運転時に、車内のケーブルに流れる電流が一時的に大きくなるためと推定される。

4. 国際的なガイドラインとの比較

車両内の座席およびデッキで測定された磁界の最大値は国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）の一般公衆への参考レベル（60Hz・200 μ T）⁽³⁾よりも低い値であった。

また、60Hz以外の高調波の磁界もわずかながら測定されたが、これらを加算した場合でもICNIRPガイドラインの参考レベルより低い値になることを確認した。

5. まとめ

走行中の新幹線の車両において磁界を測定した結果、車両内の磁界は場所や走行状況によって大きさが変動するものの、国際的なガイドライン値（ICNIRPガイドラインの参考レベル）よりも低いことが確認された。本測定で得られた知見やデータは、電磁界に関する一般市民へのリスクコミュニケーションに活用できるものである。

文献

- (1) IEC 62596:2019, Magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure – Measurement procedures
- (2) JIS E 0201:2024, 鉄道環境における人体ばく露を考慮した電子・電気機器から発生する磁界レベル測定手順
- (3) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz), Health Physics 99(6):818-836,2010.

夏季雷中心エリアと冬季雷中心エリアの -10°C の関係

正員 米田 稔 (一般)

Relationship between -10°C in summer thunderstorm center areas and winter thunderstorm center areas

Minoru Yoneda (general)

1. まえがき

本研究では、日本国内における雷発生の季節特性に着目し、冬季雷の代表地点である金沢気象台と、夏季雷の代表地点である柿岡地磁気観測所における雷電流と -10°C 高度の関係について調査・分析を行った。両地点の雷活動と気象条件の違いを比較することで、季節による雷放電メカニズムの違いに関する知見を得ることを目的とする。

2. 夏季雷中心エリアと -10°C 高度の関係

1) 柿岡地磁気観測所の位置と雷特性

柿岡地磁気観測所は茨城県に位置し、落雷密度マップ(IEC規格準拠)によると夏季雷中心エリアに該当する。夏季雷の特徴として、雷雲の高度が高くなる傾向がある。(図1)

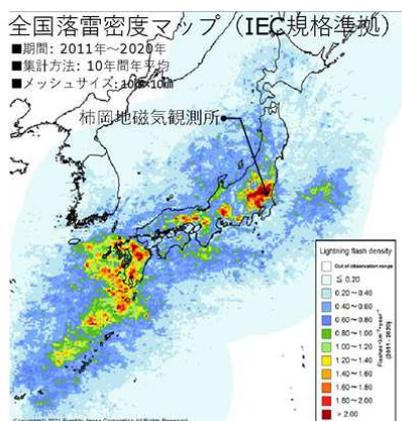


図1.夏季雷エリアの全国落雷密度マップ

2) 柿岡地磁気観測所の -10°C 高度の変化と季節的特徴

柿岡観測所の2020年のデータによると、春から夏にかけて -10°C 高度が上昇し、最大で約8600mに達している。これは夏季の気温上昇により、等温面(-10°C)の高度が押し上げられているためと考えられる。

図2のように、 -10°C 高度が低い(4506m)期間に強い雷電流147kA,159kAが確認されている。負極性雷が多く、強い電流も負極性に集中していることが分かる。

3) 柿岡地磁気観測所の -10°C 高度と雷電流の関係

柿岡地磁気観測所の2020年の観測データからは、 -10°C 高度が低いほど大電流の雷が発生する傾向があり、両者の間には反比例的な関係があると考えられる。特に、 -10°C 高度

が4506mで観測された雷には100kAを超える大電流が含まれていた。一方で、8000m付近の -10°C 高度では、雷電流はおおむね20~40kA程度にとどまっている。(図3)

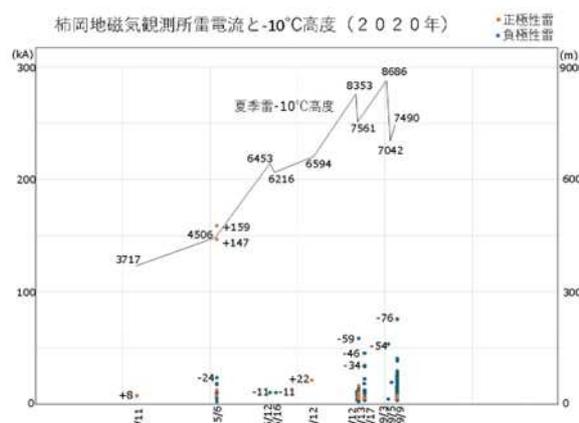


図2.夏季雷エリアの雷電流と -10°C 高度の季節変化

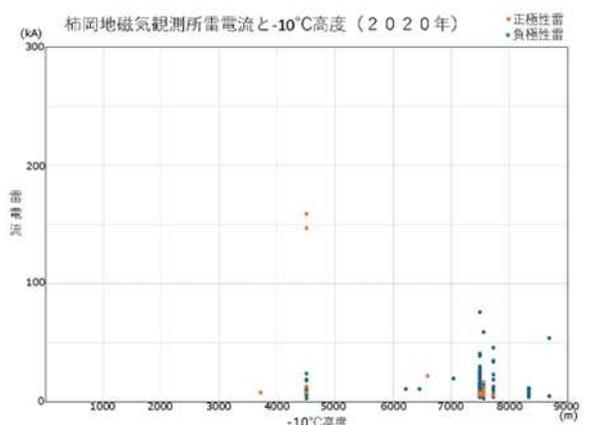


図3.夏季雷エリアの -10°C 高度と雷電流の関係

3. 冬季雷中心エリアと -10°C 高度の関係

1) 金沢気象台の位置と雷特性

金沢気象台は北陸の日本海沿岸に位置し、冬季の落雷密度が全国でも高い領域にある。(図4)

2) 金沢気象台の -10°C 高度の変化と季節的特徴

冬季雷シーズンの -10°C 高度は約2000~4000mと低く、 -10°C 高度が低い時期に114kA,110kA,139kA,244kAなどの大電流が現れている。(図5)

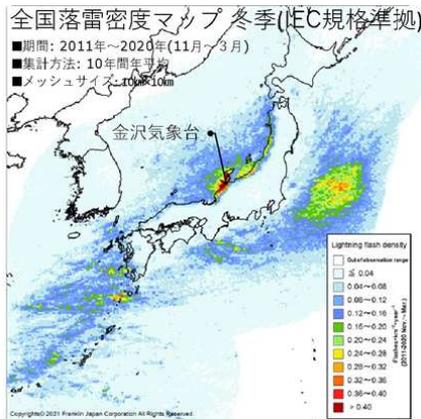


図4.冬季雷エリアの全国落雷密度マップ

の発生は多いものの、雷電流は小～中電流域に集中し、大電流雷はほとんど見られない。したがって、 -10°C 高度は冬季雷における大電流雷発生指標となり得る。

4. 夏季雷と冬季雷における電荷分布の違い

夏季雷の電荷 雷雲高さ: 6500m 雷雲: $0.24\mu\text{C}$ 金沢気象台: $3.15\mu\text{C}$

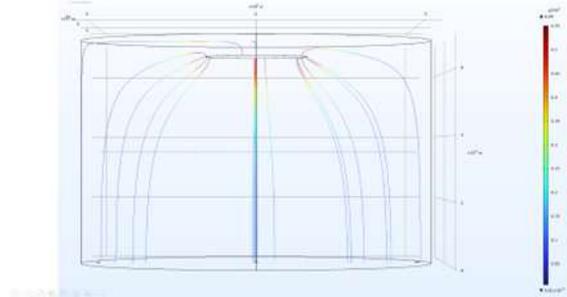


図7. 夏季雷の電荷分布

1)夏季雷の特徴 (図7)

雷雲高度は約 6500 m と高く、雲電荷は $0.24\mu\text{C}$ 。地上(ここでは金沢気象台)に誘導される電荷量は $3.15\mu\text{C}$ 。電束線は大きく広がりながら地上に到達し、誘導電荷は比較的少ない。高高度にあるため、地上構造物への影響(雷誘道雷荷)は限定的

冬季雷の電荷 雷雲高さ: 1500m 雷雲: $0.23\mu\text{C}$ 金沢気象台: $9.61\mu\text{C}$

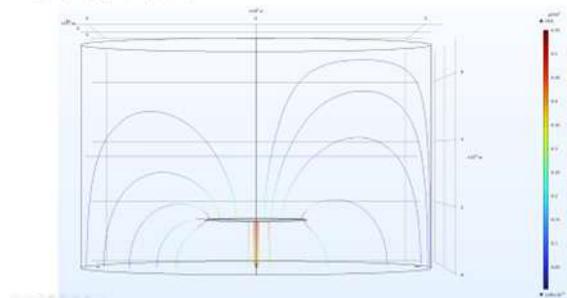


図8. 冬季雷の電荷分布

2)冬季雷の特徴 (図8)

雷雲高度は 1500 m と低く、雲電荷は $0.23\mu\text{C}$ と夏季と同程度。しかし、金沢気象台に誘導される電荷量は $9.61\mu\text{C}$ と約3倍に増加。電束線が地上に集中し、鋭く強い電界が形成される。低い雲底と地表との距離が短いため、地上構造物(鉄塔、ビルなど)に強い影響を与える。

文献

- (1)COMSOL Multiphysics
- (2)フランクリンジャパン落雷解析データ
- (3)Franklin Japan Corporation (2021). 全国落雷密度マップ
- (4)気象庁 過去の気象データ

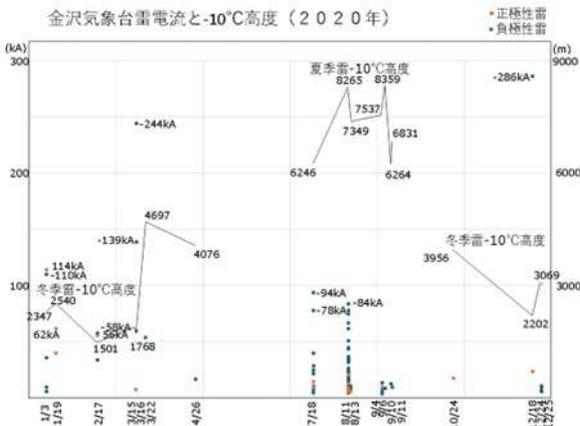


図5. 冬季雷エリアの雷電流と -10°C 高度の季節変化

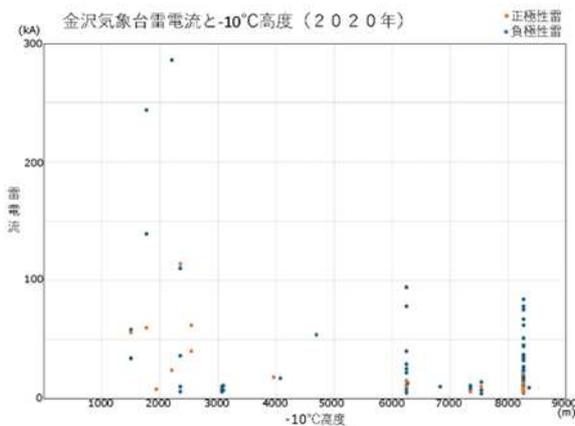


図6. 冬季雷エリアの -10°C 高度と雷電流の関係

夏季雷シーズンの -10°C 高度は約 6000m～8000m と高く 100kA を超える大電流は発生していない。

3) 金沢気象台の -10°C 高度と雷電流の関係

金沢(冬季雷エリア)における2020年のデータでは、 -10°C 高度が低い条件(約 1500～3000m)で、100 kA を超える大電流雷が現れており、雷電流の上限値が顕著に増大している。一方、 -10°C 高度が高い条件(約 6000～9000m)では雷

雷印

バースト波放電を利用した 金属粉末積層造形法に関する予備検討

古谷 克司*, 西崎 佑哉 (豊田工業大学)

Preliminary Study on Additive Manufacturing with Metal Powder Using Burst Discharge
Katsushi Furutani, Yuya Nishizaki (Toyota Technological Institute)

1. はじめに

近年、3Dプリンタは装置価格の低下や造形材料、モデルの色彩の多様化に伴い、広く活用されるようになってきた。金属粉末をレーザーや電子線を熱源として粉末の選択的固化を行う方法は装置が高価になる。そこで著者らは安価な熱源として放電を利用し、その熱で鉄粉を局部的に焼結、固化させる積層造形法を提案した。しかし直流電源による放電では、帯電による鉄粉が飛散する問題があった⁽¹⁾。そこで本報ではバースト波による高周波放電の利用を提案する。

2. 実験装置

実験装置の概念図を図1に示す。薄く敷かれた粉末へ狭い間隔で配置された2本の工具電極を近づける。電極対間から粉末を介して放電することにより、粉末層が局部的に溶融、焼結され固化される。ファンクションジェネレータで発生したバースト高周波をバイポーラアンプで増幅して漏れ磁束トランスの1次側に印加した。2次側には放電しない時には高電圧が発生し、アーク放電が発生すると電圧が下がる。金属粉末が帯電するのを防ぐために、2次側中点を高抵抗を介してグラウンドと接続した。

3. 実験

実験条件を表1に示す。電圧、電流波形も同時に観察し

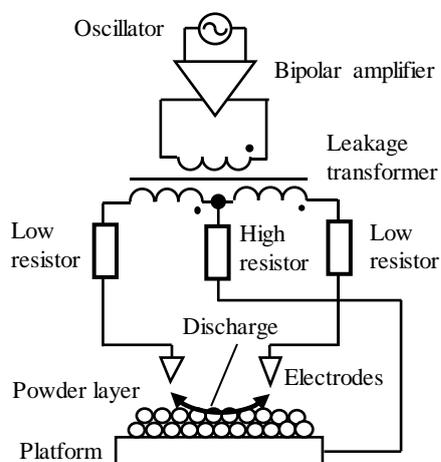


図1 実験装置
Fig. 1. Experimental setup

た。

アーク放電で固化された堆積物の例を図2に示す。バースト波電圧を印加した状態で、電極対をステッピングモータで駆動されるリニア駆動機構で粉末層に上から近づけた。図中の円は電極位置を示す。電極Aでは放電が発生し、その熱により周囲の鉄粉が蒸発したが、残った粉末は溶融、再凝固していた。電極Bは電極Aで放電が開始した時には金属粉末と接触していたが、電極Aから約2ms遅れて放電が発生した。溶融した部分は観察されなかったが、焼結されていた。

謝辞

本研究の一部にはJSPS 科研費基盤(C) JP25K07520を用いました。記して感謝します。

表1 加工条件

Table 1. Machining conditions

Primary voltage	300 Vp-p, 200 kHz, sine wave
Burst (on, off) in cycle	4, 6
Number of turns in leakage transformer	8:24×2
Tool electrode	Tungsten rod, 0.3 mm in diameter, interval of 0.8 mm in parallel
Powder	Iron, mixture of 150 and 75 μm, 400 μm in layer thickness

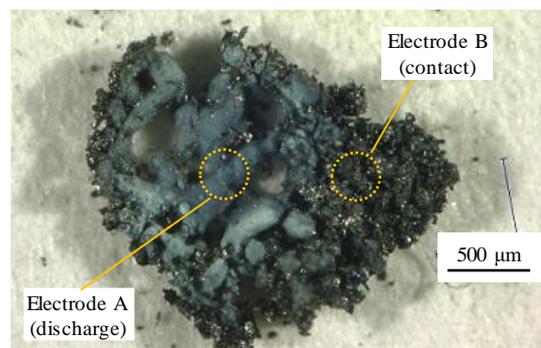


図2 堆積物の例
Fig. 2 Example of deposition

文献

(1) K. Furutani et al.: Int. J. Elect. Mach., 25, 14-20 (2020)

圧電センサを用いた負極性雷インパルス放電の 衝撃力波形の観測

多田隈悠太郎*, 荒岡 信隆, 高村 紀充 (福岡大学)

Observation of Impact Force Waveforms

Generated by Negative Lightning Impulse Discharges Using Piezoelectric Sensor

Yutaro Tadakuma, Nobutaka Araoka, Norimitsu Takamura (Fukuoka University)

1. まえがき

放電が絶縁物を貫通する現象は風力発電機等にて報告されており、著者らはその要因の一つと考えている放電圧力を測定している⁽¹⁾。本稿では雷インパルス放電が平板電極に着雷した時の衝撃力を圧電センサで観測したので報告する。

2. 実験方法

本実験ではポリフッ化ビニリデン (PVDF) の圧電センサ (100 mm 四方, 計測サポート) を使用した。図 1 のように圧電センサはステンレス鋼 (SUS) 円板 (Φ200, 厚さ 5 mm) 上に配置し, SUS 製のねじと SUS 製のナットで固定した。圧電センサの上にアルミ円板, 70 mm 四方で厚さ 50 μm のポリエチレンテレタレート (PET) フィルム (ルミラー #50S10, 東レ), 銅製の平板電極 (500 mm 四方, 厚さ 3.2 mm) の順に重ね, ポリカーボネート製のねじで圧電センサが平板電極の中央に位置するように固定した。各材料を重ねた境界面には接触媒質 (BS-150, 大陽物産) を一様に塗布した。図 2 のように, 圧電センサを取り付けた平板電極の中央直上に真鍮製の棒電極 (SR10, Φ20) を配置した。電極間距離は 100 mm とした。平板電極はシールドボックスを介して接地銅板 (Φ500 mm, 厚さ 100 μm) と導通させた。さらに接地面を広げるため, 平板電極を囲むように中央に 504 mm 四方の開口部を有する 1100 mm 四方の銅箔付き木板を配置し, 銅条を介して接地銅板と導通させた。棒電極直下には放電を誘雷するため対角線で 90°に折ったアルミホイル (5 mm 四方) を配置した。圧電センサの出力は 1 nF のコンデンサによる積分回路を介してオシロスコープ (DLM3032, 横河電機) に接続した。インパルス電圧発生装置 (IG) により電極間に -500 kV の負極性雷インパルス電圧 (1.8/53 μs) を印加し放電を発生させ, 2つの時間レンジにオシロスコープを設定してそれぞれ 10 回放電の衝撃力を測定した。

3. 実験結果および考察

図 3(a)に短時間レンジで測定した衝撃力波形を示す。0 μs 付近にフラッシュオーバーのノイズが生じた。銅板, PET フィルム, アルミ円板, センサ上部 (厚さ 5 mm) の各縦波速度

(5010 m/s, 1950 m/s, 6420 m/s, 6420 m/s⁽²⁾) から算出した最短伝搬時間を $t_p = 2.54 \mu\text{s}$ とし点線で図示した。 t_p 付近では波形の立ち上がりは観測されなかった。図 3(b)に長時間レンジで測定した衝撃力波形を示す。0 μs 付近のノイズ後, 約 38 μs をピークとする平均約 66 N の信号が観測された。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 23K03827 の助成を受けた。

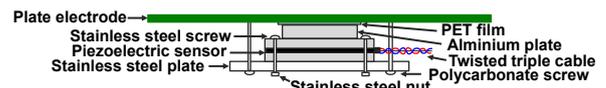


図 1 センサ固定部の概略図

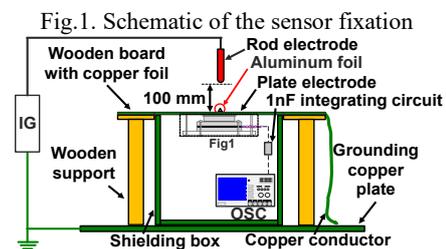
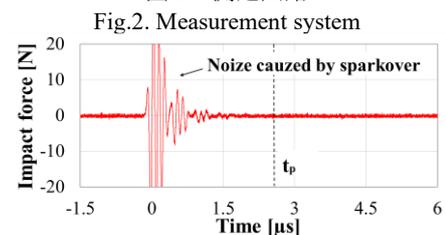
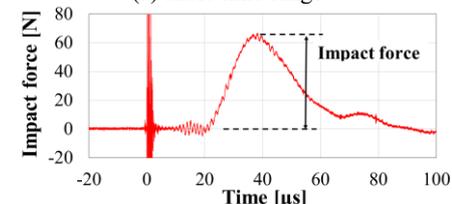


図 2 測定回路



(a) short-time range



(b) long-time range

図 3 典型的な衝撃力波形

Fig.3. Typical impact force waveforms

文献

- (1) 荒岡ら：電気学会論文誌 A, Vol.145, No.10, pp.323-329 (2025)
- (2) 国立天文台編：理科年表 2020, 丸善出版, pp.446-449 (2020)

富士山測候所 接地線サージインピーダンス及び接地抵抗

安本勝*, 土器屋由紀子 (富士山環境研究センター)
 鴨川仁, 鈴木智幸 (静岡県立大学), 佐々木一哉, 伊高健治 (弘前大)
 向井啓祐 (核融合研)

Mt. Fuji Weather Station Earthing Conductor Surge Impedance and Earthing Resistance
 Masaru Yasumoto, Yukiko Dokiya (Laboratory for Environmental Research Mount Fuji)
 Masashi Kamogawa, Tomoyuki Suzuki (University of Shizuoka)
 Kazuya Sasaki, Kenji Itaka (Hirosaki University)
 Keisuke Mukai (National Institute for Fusion Science)

1. まえがき

富士山測候所は、接地線内蔵高圧ケーブルを山麓から引き込み使用していることに着目して2012年から雷現象により接地線に流れる電流を測定している。当初は測候所直撃雷のみを考えたが、それだけではなく複数の雷現象により接地線に電流が流れることから、測定結果を整理し、図1に示すように五つの現象による雷電流を測定可能であることを明確にした⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。対地雷では①直撃雷電流、②測候所電極捕集電流、及び③山麓からの逆流電流である。その他に④電磁誘導電流、⑤静電誘導電流である。今回は新たに測候所の対山麓地電位を測定可能にすることで測候所の接地線サージインピーダンス及び接地抵抗測定を可能にし、測定結果について報告する。

2. 測定方法

測候所の接地線サージインピーダンス及び接地抵抗は、接地線電流と対山麓地電位を同時測定し後者を前者で除すことで求められる。接地線サージインピーダンスは、接地線電流と同相の対山麓地電位を接地線電流で除すことから求められ、接地抵抗は山麓から逆流する接地線電流と逆位相の対山麓地電位を接地線電流で除すことから求められる。対山麓地電位の測定は、測候所の高圧電源の零相電位を測定することで求めることになる。測定系は図2に示すように、零相電位と接地線に

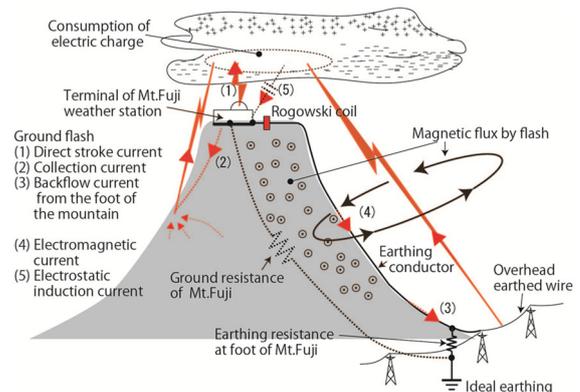


図1 富士山周辺の落雷で流れる測候所と山麓を接続する接地線電流
 Fig.1. Current flowing in the earthing conductor connecting the weather station and the grounding electrode at the foot due to lightning strikes around Mt. Fuji

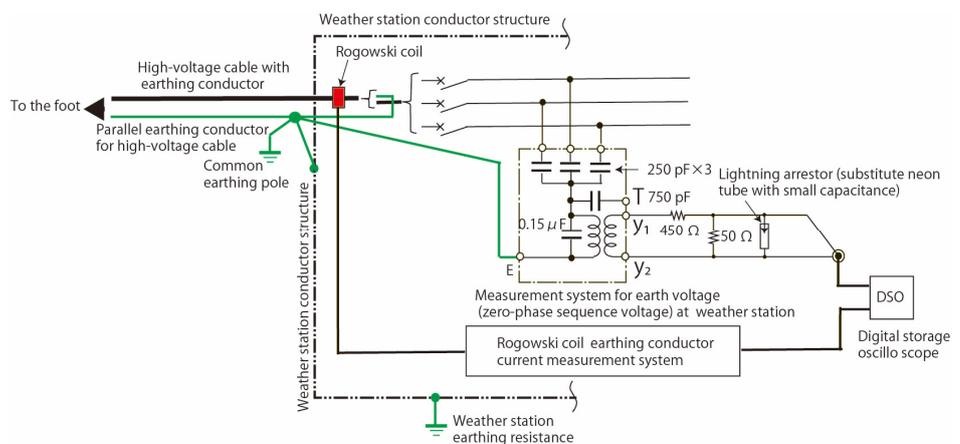
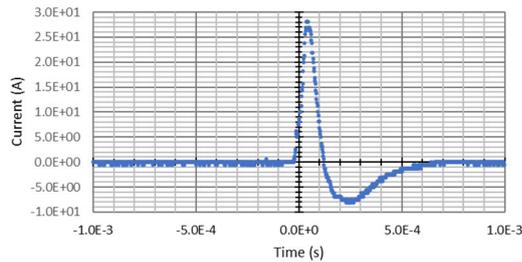
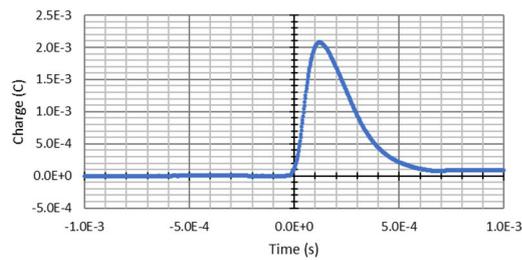


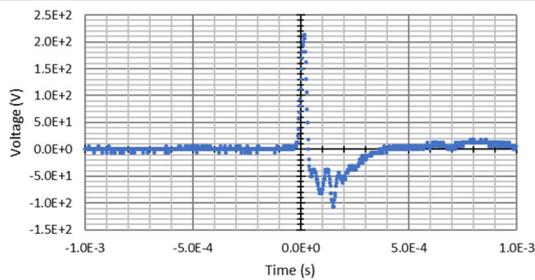
図2 富士山測候所の山麓側に接続される接地線のサージインピーダンスと接地抵抗の測定系
 Fig.2. Measurement system for Mt. Fuji weather station earthing conductor surge impedance and the earthing resistance



(a) Earthing conductor current



(b) Earthing conductor current integral value



(c) Voltage relative to the mountain foot

図3 測候所の接地線電流と対山麓地電位の測定結果(2025年8月3日 18:55:19.8)
Fig.3. Measurement results for the earthing conductor currents and earth potentials at the weather station relative to the foot (2025年8月3日 18:55:19.8)

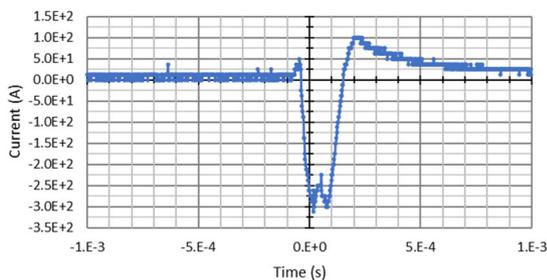


図4 富士吉田登山道9合目落雷事故時(2024年8月5日 13:13:28)に観測された高圧ケーブル接地線電流
Fig.4. The high-voltage cable earthing conductor current observed during the lightning accident at the 9th station of the Fujiyoshida trail (13:13:28, August 5, 2024)

流れる電流を同時に測定する構成である⁽¹⁾。対山麓地電位を測定可能にすることで、接地線サージインピーダンス、及び

接地抵抗の測定を可能にしている。

高圧電源はEVTによる中性点の接地があり、また広範囲の浮遊容量で高圧電源の中心電位は0Vに保持され山麓大地と接続状態になっている。

3. 測定結果

<3・1>接地線サージインピーダンス 図3(a)の接地線電流の時間積分値は電荷量を示すが図3(b)のように電荷量は0になり、測定電流は落雷電流の電磁誘導によるものである。先行電流の極性と零相電圧の極性は同じ正である。サージインピーダンスはピーク電圧をピーク電流で除すことで求められる。測定電流は28A、全接地線で56Aになる。対山麓地電位220Vを除すことでサージインピーダンスは4Ωになる。今回は2点測定できもう一点は5Ωであった。集積数を増やし誤差(標準偏差)を小さくする必要がある。

<3・2>測候所接地抵抗 接地抵抗の導出には、同時に接地線電流(山麓からの逆流電流)と逆極性の零相電圧が必要であるが、未確認である。

<3・3>山体岩盤抵抗 2024年8月5日 13:13:28に富士吉田登山道9合目落雷事故時に図4に示す負極性電流が測候所接地線に観測された。接地線で山麓接地極に接続される測候所を経由した抵抗値が無視できないほど小さいため、落雷点と山麓間の抵抗が、山頂域落雷電流を測候所電極捕集電流として集めていることを示している。

4. まとめ

- ①測候所の接地線サージインピーダンス、及び接地抵抗を求める方法を明らかにした。
- ②接地線のサージインピーダンスは4-5Ωであった。
- ③山体の岩盤抵抗は大きく広範囲の山頂落雷電流を測候所電極捕集電流として集めることが確認できた。

文献

- (1)安本勝・鴨川仁・佐々木一哉・土器屋由紀子・鈴木智幸・向井啓祐・伊高健治: 2024年夏期富士山の雷現象により富士山体接地線に流れた電流の特徴, 第18回富士山測候所を活用する会成果報告会, 7~13 (2025)
- (2)M.Yasumoto, K.Sasaki, H.Takahashi, Y.Nakamura, T.Ookoda, Y.Dokiya: Lightning Protection of the Mt. Fuji weather station, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.132, No.11, pp. 984-992(2012)
- (3)M.Yasumoto, M.Kamogawa, K.Sasaki, Y.Dokiya: Lightning Observation System by Measuring Current Flowing through the Grounding Conductor on the Mt. Fuji, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.142, No.3, pp. 67-79(2023)

異なる O₂ 混合率の He/O₂ 大気圧非平衡 プラズマの発光分光診断に与える 電子エネルギーの分布関数の影響

村松 直輝^{*}, 明石 治郎, 中野 俊樹, 北嶋 武 (防衛大学校)

Influence of Electron Energy Distribution Functions on Optical Emission Spectroscopy Diagnostics of Atmospheric-Pressure, Non-Equilibrium He/O₂ Plasma Generated at Different O₂ Addition Ratios
Naoki Muramatsu, Haruaki Akashi, Toshiki Nakano, Takeshi Kitajima (National Defense Academy)

1. まえがき

発光分光診断は大気圧非平衡性プラズマの状態を検討する際に有効な手法である。昨年の報告⁽¹⁾では、O₂混合率5%のHe/O₂ガスで生成したプラズマ中のO原子密度は、パルス電圧の立ち上がり時間の減少によって上昇することを示した。本報告では、O₂混合率を15%に増加した際のO原子密度の増減を診断する。電子エネルギー分布関数(EEDF)が診断結果に与える影響を検討する。

2. 実験および診断方法

プラズマは、He/O₂ガス(O₂混合率5%および15%)をステンレス断面-白金メッシュで構成される最短ギャップ長10μmの電極系に大気圧下で流量350sccmで供給し、パルス幅150nsのパルス電圧を周波数10kHzで印加して生成する。プラズマ発光はメッシュ電極を通して採光する。その分光スペクトルを既報⁽²⁾の手法を用いて分析し、O₂混合率15%のプラズマのO原子相対密度(RD_O)をO₂混合率5%のO原子密度を基準として診断する。EEDFに

マクスウェル分布(MD)とボルツマン方程式数値解(BES)を用いてRD_Oを算出し、RD_Oの診断に与えるEEDFの影響を検討する。

3. 実験および診断結果

図1にRD_Oの診断に用いたMDおよびO₂混合率15%のBESの一例を示す。BESの電子温度(kT_e)は平均電子エネルギー(ε_{av})との関係ε_{av} = $\frac{3}{2}$ kT_eから定める。図1より、BESは6eV以上でMDより低い値を取り、速く減衰することがわかる。

図2にRD_Oの診断結果を示す。RD_OはBESおよびMDの両方で、O₂混合率5%の基準プラズマ中で想定したkT_eによらず1以上となり、O₂混合率15%のプラズマでO原子密度は上昇することがわかる。この結果は、昨年の報告⁽¹⁾と同様に、MDを用いても定性的にはBESのEEDFと同じ診断結果が得られることを示し、MDによる診断の有用性を示唆している。

参考文献

- (1) 中野俊樹・明石治郎・北嶋武：令7電気学会全大, No. 1-094
(2) 中野俊樹・北嶋武：令4電気学会全大, No. 1-048

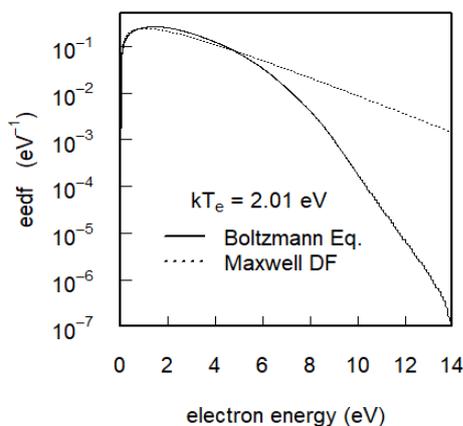


図1 O原子相対密度の診断に用いた電子エネルギー分布関数

Fig.1. Electron energy distribution functions used for diagnostics of O-atom relative density by optical emission spectroscopy.

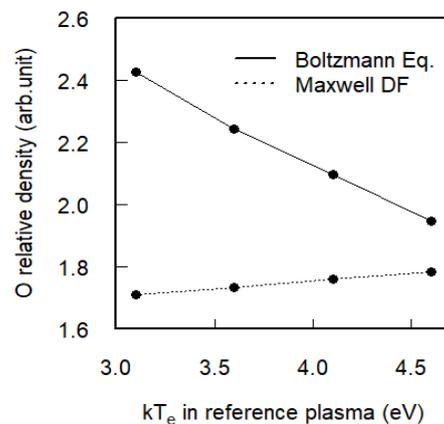


図2 O原子相対密度の診断結果

Fig.2. O-atom relative density in plasma for 15% O₂ addition to He. The density is normalized by O-atom density in plasma for 5% O₂ addition to He.

大気圧プラズマジェット中におけるプラズマバレットの進展速度の解釈

加藤 葵*, 鈴木 進 (千葉工業大学)

Interpretation of Propagation Velocities of Plasma Bullets in Atmospheric Pressure Plasma Jets
Aoi Kato*, Susumu Suzuki (Chiba Institute of Technology)

1. はじめに

これまで著者らは、大気圧プラズマジェット中にワイヤープローブを挿入し、その位置を変えながら電流測定を行うことで、プラズマバレットの進展速度を評価してきた⁽¹⁾。本報告では、プラズマジェット発生器には高電圧電極および接地電極が設けられていることから、ワイヤープローブに接続した抵抗を流れる電流に加えて、接地電極にも抵抗を接続し、両者を流れる電流を同時に測定した。これら二点で観測される放電パルス電流波形の立ち上がりの時間差からプラズマバレットの進展速度を求め、従来のワイヤープローブの位置の差から求めた進展速度との比較した結果を報告する。

2. 実験装置および測定方法

実験装置の概略を図1に示す。外径6 mm、内径3.8 mmの石英ガラス管を用い、ガラス管左端をテフロン製の接続部を介してガス導入管に接続した。ガラス管右端はガスの噴出口とした。ガラス管のガス導入側には銅製の高電圧電極を巻き付け、高電圧電極にはインバーターネオントランスを用いて交流高電圧を印加した。ガスは流量計を通してArガスを管内に流すことによりプラズマジェットを発生させた。電流測定では、プラズマジェット発生器に設けた接地電極に抵抗 R_1 を接続し、そこを流れる電流とプラズマジェット中に挿入したステンレス鋼線のワイヤープローブ(直径0.8 mm ϕ 、長さ10 mm)に抵抗 R_2 を接続し、これら二カ所を流れる電流を同時に測定した。

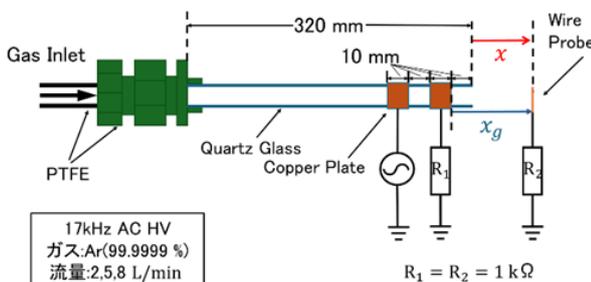


図1 実験装置の概略図
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

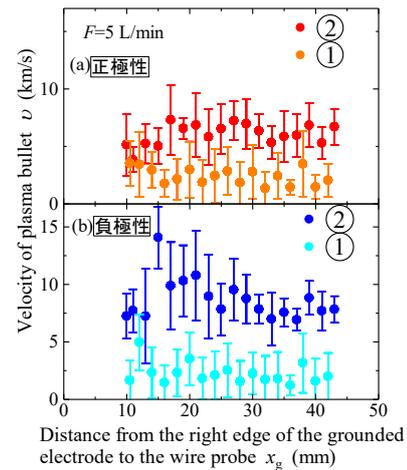


図2 プラズマバレットの進展速度
(a)正極性(b)負極性
Fig. 2. Propagation velocity of a charged-particle swarm
(a) positive polarity, (b) negative polarity.

3. 実験結果

図2に測定したプラズマバレットの進展速度を示す。同図(a)は印加電圧波形が負のピーク値から0 Vへ向かう際の進展速度である。従来の方法として、ワイヤープローブを流れる放電パルス電流波形の立ち上がり時刻を、プローブの位置を変えながら測定し、位置と時刻の差から求めた進展速度を①としてオレンジの丸印で示した。また、赤色の丸印は、図1に示した接地電極とワイヤープローブの二カ所を流れる放電パルス電流を同時に測定し、その立ち上がり時刻の差から求めた進展速度②である。同図(b)は印加電圧波形が正のピーク値から0 Vへ向かう際の放電パルス電流波形から求めた進展速度で、水色の丸印は①の方法、青色の丸印は②の方法で求めた結果である。図2(a), (b)のいずれにおいても、②で求めた進展速度の方が速いことがわかる。

図3(a)は②の方法により進展速度を求めるために接地電極側で観測した電流波形(青)と、印加電圧波形(黒)である。時刻39 μ s付近で正の電流が流れ、66 μ s付近で負の電流が流れている。同図(b)はこの電流を変位電流(赤)と放電パルス電流(緑)に分離した結果である。さらに、同図(c)はワイヤープローブ側で観測した電流波形であり、同図(d)はこれ

を変位電流(赤)と放電パルス電流(緑)に分離した結果である。同図(c), (d)において正の放電パルス電流が流れた時刻と同時に、同図(a), (b)では正の放電パルス電流の後に逆極性の負のパルス電流が流れていることが確認できる。この逆極性のパルス電流は、プラズマバレットがワイヤプローブに到達し導電路が形成された後、ワイヤプローブを通過した電子が接地電極を経由して流れる戻り電流であると考えられる。

図4は、図1に示した装置図において、接地電極に検出用コンデンサ(静電容量 1 pF)を接続し、ガラス管内表面に蓄積する電荷を測定した結果である。この測定ではワイヤプローブを取り除いた状態で測定を行った。同図(a)には

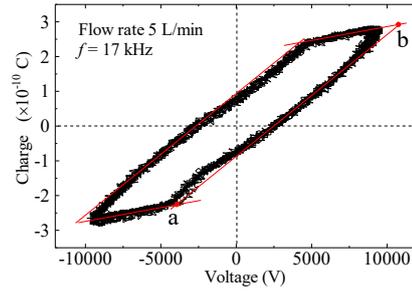


図5 リサージュ図形
Fig.5. Lissajous figure.

印加電圧 $V(t)$ (黒), ガラス管内のギャップ電圧 $V_g(t)$ (青), ガラス管表面電圧 $V_w(t)$ (薄緑)に加え、ガラス管の外側に巻き付けられた接地電極を通して観測される電荷波形 $q(t)$ (赤)を示している。ここで、ギャップ電圧 $V_g(t)$, ガラス管表面電圧 $V_w(t)$ は、図5に示す V-Q(電圧-電荷)リサージュ図形から求めた⁽²⁾。

図4(b)には、ガラス管内表面に蓄積する電荷 $q_a(t)$ (赤)を示している。ガラス管内でプラズマジェットが発生している際には交流電圧の極性が反転するごとに電子が一度大きく移動していることがわかる。これを図3の電流波形と比較すると、接地電極において観測した正の放電パルス電流と負の放電パルス電流が、それぞれこの電子の移動に対応していることが確認できる。したがって、接地電極で観測された放電パルス電流は、プラズマバレットによって直接流れた電流ではなく、プラズマバレットが接地電極を通過する前にガラス管内表面に蓄積した電子による起因する電流であると考えられる。

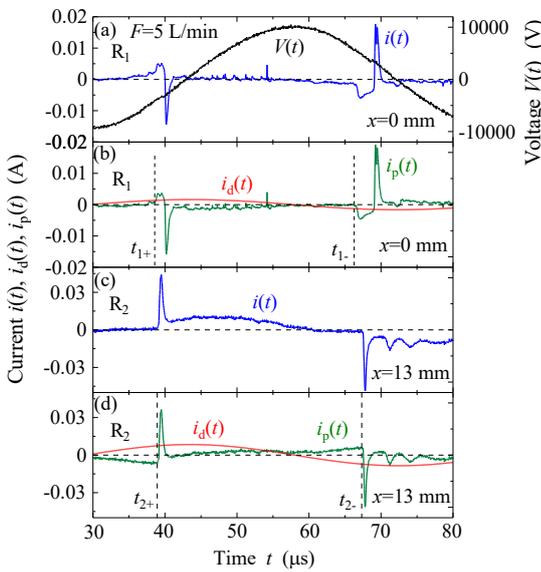


図3 印加電圧波形と R_1 と R_2 で観測した電流波形
Fig.3. Applied voltage waveform and current waveform observed at R_1 and R_2 .

4. まとめ

プラズマバレットはストリーマの先端において電子が前方に先行し、正イオンが後方に残ることで形成される強い自己電界の進展現象であるとされているが、接地電極とワイヤプローブの二点で電流測定を行った結果それぞれで観測される電流は同一の現象に起因するものではないことが明らかとなった。すなわち、接地電極で観測された電流は、プラズマバレットが到達する前にガラス管内表面に蓄積した電子に起因する先行現象による電流であり、必ずしもプラズマバレットの進展速度を反映していないことを示した。そのため、ワイヤプローブの位置を変えながら測定して求めた進展速度と、接地電極とワイヤプローブの二点測定から求めた進展速度とでは、異なる現象を観測していると考えられる。

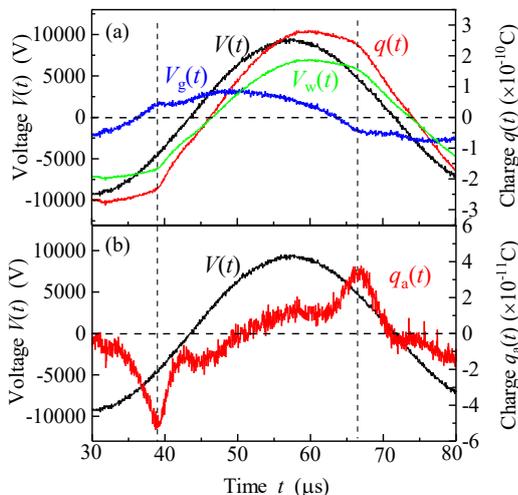


図4 電圧波形と電荷波形
Fig.4. Voltage and charge waveforms.

文献

- (1) 鈴木, 寺西, 伊藤: 電学論 A, Vol.144, No.7, pp.280-286(2024)
- (2) S. Suzuki, T. Sekizawa, Y. Kashiwagi and H. Itoh, JJAP, Vol.50, 106002 (2011)

大気圧 O_2 中の三体付着による O_2^- 形成過程における超弾性衝突の影響

中野 敏清, 奥山 由* (苫小牧高専), 菅原 広剛 (北海道大学)

Effect of superelastic collision on formation processes for O_2^- by three-body attachment in atmospheric O_2
 Satokiyo Nakano, Yui Okuyama (National Institute of Technology, Tomakomai College),
 Hirotake Sugawara (Hokkaido University)

1. まえがき

近年プラズマは幅広い分野への応用を目的とした研究が行われている。プラズマ生成過程検討のため、移動度や反応速度係数、衝突断面積といった基礎データの収集が古くから行われてきた。しかしながら報告値の多くは低ガス圧力下で収集されたものであり、大気圧を含む高ガス圧力下での検討例は不足している。

そこで本研究では、衝突断面積セットを用いた大気圧下でのイオンドリフトシミュレーションを行い、イオンと分子間の衝突断面積を検討することを目的として研究を行っている。本稿では、超弾性衝突を考慮した衝突断面積⁽⁴⁾を用いた結果との比較を行い、その影響について検討する。

2. シミュレーション方法

本研究では、電子エネルギーから酸素分子の衝突断面積を参照し電子衝突確率を求め、乱数値との比較を行うことで、電子-酸素分子衝突の生起を判定している。

ここで超弾性衝突とは、電子が回転励起したガス分子に衝突した際に、電子がガス分子からエネルギーを得る反応過程である。回転準位が J' から J に下がる超弾性衝突の衝突断面積 $q_{J' \rightarrow J}(\varepsilon)$ は、回転励起の断面積 $q_{J' \rightarrow J'}(\varepsilon + \varepsilon_{th})$ より(1)式で表される。ただし ε_{th} は回転励起断面積のしきい値である。

$$q_{J' \rightarrow J}(\varepsilon) = \frac{P_J}{P_{J'}} \times \frac{\varepsilon + \varepsilon_{th}}{\varepsilon} \times q_{J' \rightarrow J'}(\varepsilon + \varepsilon_{th}) \quad (1)$$

ここで P_J は回転準位の多重度 ($P_J = 2J + 1$) である。また回転準位 J の分子密度 n_J の気体分子数 N に対する比は、ガス温度 T_g でのボルツマン分布に従うとして(2)式で表される。

$$\frac{n_J}{N} = \frac{P_J \exp(-E_J/k_B T_g)}{Z} \quad (2)$$

ここで E_J は回転準位 J の励起エネルギー[eV]、ボルツマン定数 $k_B = 8.617 \times 10^{-5}$ eV/K である。また Z は奇数 J での(2)式右辺分子の総和であり、 $Z = \sum_{\text{odd } J} P_J \exp(-E_J/k_B T_g)$ である。

3. シミュレーション結果

図1はそれぞれの断面積を用いたシミュレーション結果であり、破線は Pack and Phelps の反応速度係数の報告値⁽²⁾である $k_{12} = 2.0 \times 10^{-30}$ cm⁶/s を用いた計算結果である。黒線、赤線はそれぞれデータベース lxcat⁽³⁾における MuroanIT に

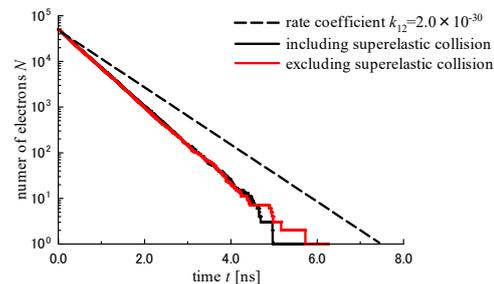


図1 シミュレーション結果
 Fig.1 Simulation results

よる断面積の報告値⁽⁴⁾を用いてシミュレーションを行った結果であり、赤線は超弾性衝突の断面積を除き、超弾性衝突を考慮せずに計算を行った結果である。シミュレーション結果において電子数が不足している範囲においては、モンテカルロ法における統計変動が顕著になるため、電子数が1.0%以下の範囲を無視し、直線性の良い範囲で反応速度係数の計算を行った。超弾性衝突を考慮した場合、電子付着の反応速度係数 k_{12}' は 2.68×10^{-30} cm⁶/s となったのに対し、考慮しない場合は k_{12}' は 2.71×10^{-30} cm⁶/s となり、電子付着の速度においてよく一致した結果が得られた。しかしながら、電子のドリフト速度、電子付着時の位置分布等への影響が生じる可能性があると考えられるため、検討を行っていく。

4. まとめ

超弾性衝突の考慮の有無によって、電子付着の速度に大きな影響は生じなかった。今後はドリフト速度、電子付着の位置分布等への影響に関して、更なる検討を行っていく。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K03828 の助成を受けたものであり、感謝の意を表します。

文献

- (1) 中野敏清, 奥山由, 菅原広剛: 令和7年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No. 14 (2025)
- (2) J. L. Pack and A. V. Phelps: J. Chem. Phys. Vol. 44, pp. 1870-1883 (1966)
- (3) Phelps database, www.lxcat.net, retrieved on December 4, 2025
- (4) S. Kawaguchi, Y. Iwabe, K. Takahashi: Plasma Sources Sci. Tech., Vol. 34, 075002 (28 pp.) (2025)

PINNs を活用した 合成空気中の電子スオームパラメータの推定

川口 悟*, 富澤 諒成, 高橋 一弘 (室蘭工業大学)

Estimation of electron swarm parameters in synthetic air using PINNs

Satoru Kawaguchi, Ryosei Tomizawa, Kazuhiro Takahashi (Muroran Institute of Technology)

1. はじめに

電子スオームパラメータは、気体中の電子群(電子スオーム)のふるまいを表す基礎データであり、種々の気体材料に関して、広範囲の換算電界にわたって明らかにすることが望まれる。Z. Donkóらの研究グループは直流電界を形成した Scanning drift tube 内における電子スオームの数密度 $n(t, z)$ を測定している⁽¹⁾。この測定データは電子スオームマップとよばれ、2種類の電子数連続の式に従うと考えられる⁽²⁾。

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \omega_0 + \omega_1 \frac{\partial}{\partial z} - \omega_2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \omega_3 \frac{\partial^3}{\partial z^3} - \dots \right] n(t, z) = 0 \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} - \alpha_0 + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial t} - \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \alpha_3 \frac{\partial^3}{\partial t^3} - \dots \right] n(t, z) = 0 \quad (2)$$

ω_0 は実効電離衝突周波数, ω_1 は重心の位置の移動速度, ω_2 は縦方向拡散係数, ω_3 は高次の係数, α_0 は実効電離係数, α_1 は平均到着時間ドリフト速度 W_m の逆数を表す。

著者らは Physics-informed neural networks (PINNs) を活用して、電子スオームマップと矛盾しないように(1)式および(2)式の各係数を決定することで、電子スオームパラメータを明らかにする方法を検討している⁽³⁾。本稿では、(2)式に現れる各係数(α パラメータ)を決定する方法について紹介し、合成空気中の電子スオームマップの測定データ⁽¹⁾を用いて α パラメータを決定した結果について報告する。

2. 方法

高次の係数が十分に小さいとして、(2)式の左辺第5項以降を打ち切り、次のように表記する。

$$\hat{L}n(t, z) = 0 \quad (3)$$

$$\hat{L} = \frac{\partial}{\partial z} - \alpha_0 + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial t} - \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \alpha_3 \frac{\partial^3}{\partial t^3} \quad (4)$$

ニューラルネットワーク(NN)を用いて、(3)式と電子スオームマップの測定データと適合する $n(t, z)$ を学習する。NN が表現する関数を $n(t, z; \theta)$ とする。 θ は NN 内のパラメータを表す。(5)式に示す損失関数が小さくなるように、 θ および $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ を最適化する。

$$\mathcal{L} = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} |\hat{L}n(t_i, z_i; \theta)| + \lambda \sum_{i=1}^{N_d} |n(t_i, z_i; \theta) - n_i| \quad (5)$$

n_i は (t_i, z_i) における電子スオームマップの測定値を表す。(5)式の右辺第一項および第二項は、 $n(t, z; \theta)$ の(3)式への適合度および電子スオームマップの測定データとの適合度をそれぞれ評価する項である。 (t_i, z_i) はランダムにサンプリングする。 λ は第一項と第二項のバランスを調整するハイパーパ

ラメータであり、本研究では $\lambda = 100$ とした。

3. 結果

Fig. 1 は本研究で得られた合成空気中の $\alpha_0/N, W_m = \alpha_1^{-1}, Na_2, N^2\alpha_3$ を従来の実験値^(4,6)と併せて示す。 N は気体分子数密度を表す。 α_0/N と電子ドリフト速度に関しては、従来の実験値に近い値となった。ただし、Lisovsky and Yegorenkov⁽⁶⁾の電子ドリフト速度の測定法は W_m の定義とは異なるため、彼らのドリフト速度が W_m と一致する保証はない。合成空気中の Na_2 および $N^2\alpha_3$ に関しては、本研究による報告が初めてであり、換算電界に対して単調減少する傾向がみられた。これらのデータは、窒素と酸素の電子衝突断面積セットの評価に有用であると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25K01209 の助成を受けて行われた。また、電子スオームマップの測定値をご提供いただいた Prof. Z. Donkó (HUN-REN Wigner Research Centre for Physics) に感謝の意を表します。

文献

- (1) I. Korolov et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 415203 (2016)
- (2) K. Kondo and H. Tagashira, J. Phys. D: Appl. Phys. **23**, 1175 (1990)
- (3) S. Kawaguchi et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **56**, 244003 (2023)
- (4) M. Aints et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 135205 (2018)
- (5) D. K. Davies, Theoretical Notes, Note 346 (Pittsburg, PA: Westinghouse RD Center) (1983)
- (6) V. A. Lisovskiy and V. D. Yegorenkov, J. Phys. D: Appl. Phys. **31**, 3349 (1998)

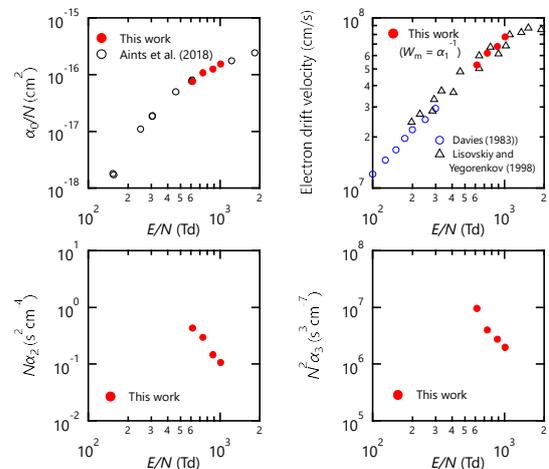


Fig. 1. Electron swarm parameters in synthetic air as functions of reduced electric field.

窒素中電子衝突周波数気圧依存性のモンテカルロ解析

大久保 祐馬*, 岡崎 凌大, 菅原 広剛 (北海道大学)

Monte Carlo Analysis of Pressure Dependence of Electron Collision Frequency in Nitrogen
Yuma Okubo, Ryota Okazaki, Hirotake Sugawara (Hokkaido University)

1. はじめに

パワー半導体材料 GaN や光電デバイス用希薄窒化物材料 GaNAs などの作成に必要な中性窒素ラジカル N* は rf 窒素プラズマにより生成するが、プラズマ駆動条件はしばしば経験的に決定されている。本研究は N* の効率的な生成を目的とし、窒素中電子群の基本的な挙動の理解と N* 生成の定量評価のため、N* 生成過程に着目した粒子モデルによるモンテカルロ解析を行っている。本解析では低気圧下で N* を生成する解離過程を中心に、電界周波数一定の条件下、各衝突過程の換算衝突周波数 ν/N の気圧依存性を観察した。

2. 解析条件

電界周波数 13.56 MHz, 換算電界振幅 $E/N = 283$ Td の余弦波とし、自由空間で電子運動を追跡した。初期電子は平均エネルギー 1 eV のマクスウェル分布で放出し、時間刻みを一周期の 1/96,000 として周期的定常状態まで数周期、最終電子数が 10^6 以上になるまで追跡した。窒素の電子衝突断面積 q_k (k は衝突の種類) のセット⁽¹⁾ は運動量移行, 振動励起, 電子励起, 電離, 中性解離を含む。E/N 一定のコールドガスモデル (回転励起状態窒素分子との超弾性衝突は考慮しない) で分子数密度 N の値を, 0°C, 0.05–10 Torr に対応する範囲で変化させ、各衝突周波数 ν_k を一周期当たり 240 回、電子エネルギー分布 $f(\epsilon)$ を 24 回それぞれサンプリングした。

3. 結果と考察

図 1 は振動励起 (vib), 準安定励起状態への励起 (meta), 中性解離 (dis1: $N_2 + e \rightarrow (N_2)^* \rightarrow 2N + e$, dis2: effective), 電離 (ion) の周期平均換算衝突周波数 $\nu_{k,ave}/N$ の気圧依存性である。図 2 は各気圧における $f(\epsilon)$ の周期平均 $f_{ave}(\epsilon)$ と vib, meta, dis1, dis2, ion の衝突断面積である。図 1 から、各 $\nu_{k,ave}/N$ は高気圧条件で相似則に従い一定に落ち着いた。しかし、低気圧条件では衝突が少ないため緩和が遅く、相似則から逸れた。衝突の種類により、逸れの方に増減二傾向が見られた。図 2 から、 $f_{ave}(\epsilon)$ は 2 eV 辺りと 12 eV 辺りで $f_{ave}(\epsilon)$ の気圧に応じた大小順が入れ替わり、低・高エネルギー帯では高気圧ほど電子分布割合が高いが、3–12 eV 程度の中エネルギー帯では低気圧ほど電子分布割合が高かった。また、図 1 で低気圧において $\nu_{k,ave}/N$ が高くなる傾向が見られる衝突の種類は図 2 の q_k のしきい値が比較的低く、 q_k はあるエネルギー帯に集中し閉じた分布をしている。一方、低気圧で $\nu_{k,ave}/N$ が低くなる傾向が見られる衝突の種類はしきい値が比較的高く、 q_k はエネルギーが高いほど増加する形状を

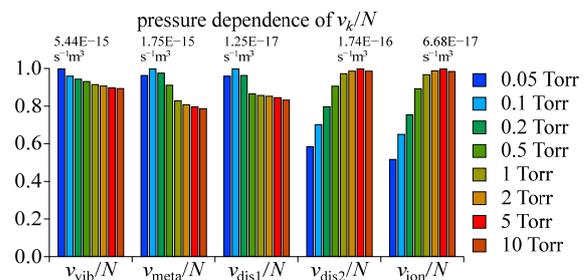


図 1 $\nu_{k,ave}/N$ の気圧依存性
Fig. 1. Pressure dependence of $\nu_{k,ave}/N$.

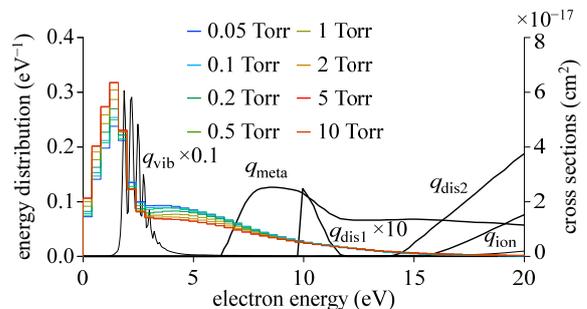


図 2 各気圧における $f_{ave}(\epsilon)$ (左軸) と q_k (右軸)
Fig. 2. $f_{ave}(\epsilon)$ at each pressure and q_k .

している。 $f_{ave}(\epsilon)$ の形状から、 q_k が主に低または高エネルギー帯に集中している衝突の種類は高気圧時に衝突が増え、 q_k が 3–12 eV 程度の中エネルギー帯にある衝突の種類は低気圧時に衝突が増えると考えられる。

本解析では、N* を生成する過程に着目し、 $\nu_{k,ave}/N$ の気圧依存性を観察した。 $\nu_{k,ave}/N$ は高気圧では相似則に従うが、低気圧では q_k のしきい値の大小と q_k が存在するエネルギー帯が影響し、逸れ方が増減二傾向観察された。この傾向を踏まえると、N* 生成に支配的な dis2 は低気圧で $\nu_{k,ave}/N$ が減少するため、全体的な N* 生成量を増やすには本解析範囲では高気圧条件が好ましい。また、 $\nu_{k,ave}$ 自体は気圧にほぼ比例することから、高気圧ほど N* 生成の絶対量が増える点でも高気圧条件は N* の効率的生成に適すると考えられる。

本研究は内閣府地方大学・地域産業創生交付金事業「次世代半導体をトリガーとした半導体の複合拠点の実現と地域経済の活性化」により内閣府と北海道から補助金を受け行われた。連名者岡崎は北海道大学 EXEX フェロウシップ奨学生である。

文献

(1) S. Kawaguchi, K. Takahashi and K. Satoh, Plasma Sources Sci. Technol. **30** 035010 (2021)

誘導結合プラズマ制御用対向発散磁界中の弱磁界域における電子束縛

米本 裕貴*, 岡崎 凌大, 菅原 広剛 (北海道大学)

Electron Binding in Weak Magnetic Field Region
in Confronting Divergent Magnetic Fields to Control Inductively Coupled Plasmas
Yuki Yonemoto, Ryota Okazaki, Hirotake Sugawara (Hokkaido University)

1. まえがき

誘導結合プラズマの一種X点プラズマ⁽¹⁾の制御のため印加する対向発散磁界 (図1) はその分界面が電子閉じ込めの機能を持つことから、異方性エッチング等の材料プロセスに用いる場合、プラズマを上部では高密度・高エネルギー、下部では低密度・低エネルギーとすることで、低気圧でプラズマを維持しつつ、底部に置く基板の損傷低減が期待される。また、電子サイクロトロン共鳴により電子加熱が起こる共鳴域 (磁界強度が $B_{\text{ECR}} = 2\pi(m/e)f$ の領域付近, m/e は電子質量電荷比, f は電界周波数, $f = 13.56$ MHz において $B_{\text{ECR}} = 0.4844$ mT) を設定できる。X点プラズマ中の電子加熱解析のためアンテナ付近から初期電子を放出した先行研究⁽²⁾では、電子数密度は放出位置付近の強磁界域で磁力線沿いに高く、中心軸付近の弱磁界域では低かった。こうした傾向に対し、プラズマ流制御の観点からは強弱磁界域間の電子輸送の詳細に関心がもたれる。本研究では、対向発散磁界下での電子輸送について調べるため、初期電子放出位置を変えた場合の電子空間分布を観察・比較した⁽³⁾。本稿では、初期電子放出位置付近での電子束縛の様子について述べる。

2. 解析条件

内径 40 cm, 高さ 40 cm の円筒容器を想定し、中心を原点として径方向位置 r , 軸方向位置 z を定めた。ガスは Ar, 300 K, 5 mTorr とした。一巻 RF アンテナは $z = 10$ cm の高さに設置し、振幅 10 A, $f = 13.56$ MHz の RF 電流を通じて電界を誘起する。同軸コイルは 36 巻, $z = \pm 10$ cm の高さに設置し、16.7 A の電流を逆向きに流し対向発散磁界を印加する。 r - z 面内 2 cm 間隔 81 個の格子点から平均エネルギー 1 eV の初期電子を等方的に放出し、モンテカルロ法により追跡した。サンプリング時間は $80T_{\text{RF}} \leq t \leq 100T_{\text{RF}}$ ($T_{\text{RF}} = 1/f$) とした。電子数は $t = 100 T_{\text{RF}}$ において 10^6 以上とした。

3. 結果と考察

図2は初期電子放出位置が $(r, z) = (4 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ のときの電子数分布である。零磁界のX点に近い弱磁界域に多数の電子が束縛される様子が観察された。また、これら電子の平均エネルギーは低かった。初期電子をX点付近から放出しても同様の分布が観察された。図3は図1上部領域に示した13本の磁力線それぞれに沿った、境界 (天井または側壁上部) からの長さに応じた磁界強度である。各磁力線 (内→

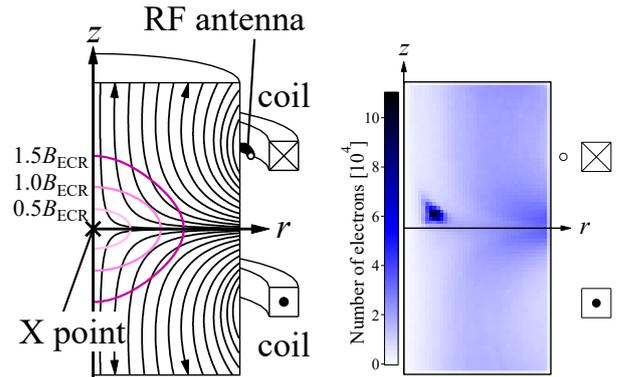


図1 対向発散磁界
Fig. 1. Confronting divergent magnetic fields

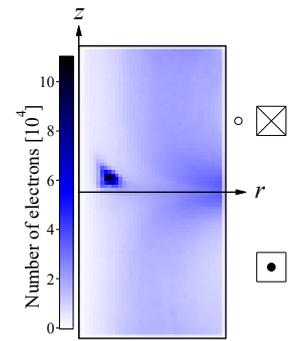


図2 初期電子放出位置 $(r, z) = (4 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ の場合の電子数分布
Fig. 2. Distribution of electrons released from $(r, z) = (4 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$

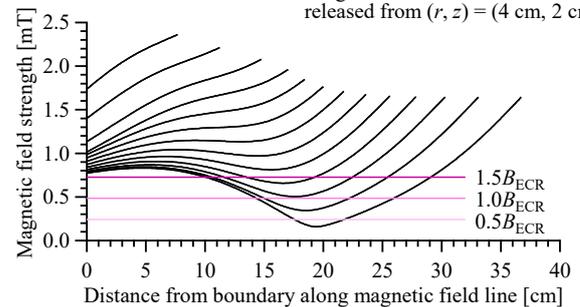


図3 磁力線に沿った境界からの長さに対する磁界強度
Fig. 3. Magnetic field strength versus distance from boundary along magnetic field line

外の並び) は図3のグラフ (下→上の並び) に順に対応する。最内側の磁力線は 20 cm 付近に磁界強度の谷があり、そこに低エネルギー電子が束縛されている。電子は磁力線に沿って移流することから、低エネルギー電子に対する磁気ミラー効果による束縛と考えられる。この束縛は先行研究の強磁界域で見られた電子束縛とは仕組みが異なると思われる。共鳴域付近での電子束縛をうまく利用できれば、効率的な電子加熱・プラズマ維持に繋がることも期待される。

本研究は日本学術振興会科研費24K07448を受け行われた。連名者岡崎は北海道大学EXEXフェロウシップ奨学生である。

文献

- (1) T. Tsankov and U. Czarnetzki, IEEE Trans. Plasma Sci. **39**, 2538 (2011).
- (2) R. Okazaki and H. Sugawara, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 126001 (2024).
- (3) Y. Yonemoto, R. Okazaki, and H. Sugawara: The 8th Japan-Taiwan Workshop on Plasma Leading Science and Technology, P-7, Muroran Institute of Technology, Hokkaido, Japan (2024).

水車発電機固定子巻線の 運転中部分放電診断事例

中村 信*, 倉石 隆志, 金神 雅樹, 宮寄 悟 (電力中央研究所)

A Case Study on On-line Partial Discharge Diagnosis for Hydrogenerator Stator Windings
Shin Nakamura, Takashi Kuraishi, Masaki Kanegami, Satoru Miyazaki (CRIEPI)

1. 序論

水車発電機の固定子巻線は、電気、機械、熱、及び環境の複合ストレスに長時間暴露されるため、例えば巻線絶縁内部のボイド成長に伴う劣化現象や巻線表面の摩耗によるスロット放電発生等の異常現象が発生する⁽¹⁾。そこで、著者らは、巻線の状態を診断するため、発電機の運転中に発生する部分放電を発電機に接続した結合コンデンサにより測定し、巻線の絶縁を診断する手法の実用化を検討している⁽²⁾。本稿では、水力発電所にて発電機の運転中に部分放電測定を連続で行い、絶縁の劣化や異常の診断を行った事例を報告する。

2. 発電機運転中の部分放電測定手法

測定対象の発電機は、水車を原動機とした三相同期発電機 (定格電圧 6.6 kV, 定格周波数 60 Hz, 定格容量 2.6 MVA) である。固定子巻線で発生する部分放電による信号と発電機電圧を、結合コンデンサを介して、検出インピーダンスにより検出し、部分放電測定システム (Omicron, MPD800) で測定した。測定周波数帯域を(100±15) kHz, (5.5±0.5) MHz とした。それぞれの測定周波数帯域で、1回の測定時間は10秒、測定間隔は1時間、測定日数は15日間連続とした。なお、発電機を系統から切り離し、発電機の停止中に巻線に電荷量校正器から 10 nC の部分放電電荷量に相当する模擬信号を注入し、電荷量の校正を行っている。また、発電機固定子巻線の温度を測温抵抗体で測定した。

MPD800 のソフトウェア上で、3相の各相で発生した部分放電を区別できる機能を使用し、各相の部分放電信号を抽出し、解析対象とした。

3. 発電機運転中の部分放電診断結果

<3・1>異常診断 図1に観測された PRPD パターンの一例を示す。測定周波数帯域は(5.5±0.5) MHz である。図1の PRPD パターンは、電圧極性の正負で相似形状であるため、コイル導体を絶縁するエポキシとマイカ中のボイド放電と考えられる。また、連続測定中にスロット放電やコロナ放電由来と推定される PRPD パターンは観測されなかった。
<3・2>劣化診断 発電機を系統から切り離し単独運転した励磁状態において、(100±15) kHz の周波数帯域にて、

ボイド放電がノイズに埋もれて観測されなかった。このときノイズレベルが 7 nC であるため、最大放電電荷量 Q_m は 10 nC⁽¹⁾以下であり、絶縁劣化は進んでいないと考えられる。

図2に Q_m の温度依存性を示す。測定周波数帯域は(5.5±0.5) MHz である。この周波数帯域では、部分放電信号の減衰により Q_m の絶対値の校正ができないため、絶対値に着目した診断は利用できない⁽³⁾。そこで、著者らは、発電機の運転中に取得した Q_m の温度依存性から絶縁診断を行う手法を提案している⁽⁴⁾。温度の増加と共に Q_m が減少・変化しない場合は、絶縁が良レベルと判断する。一方、温度の増加と共に Q_m が増加する場合には、絶縁が不良レベルと判断する。図2に示すように、温度の増加と共に Q_m が減少しているため、絶縁が良レベルと考えられる。

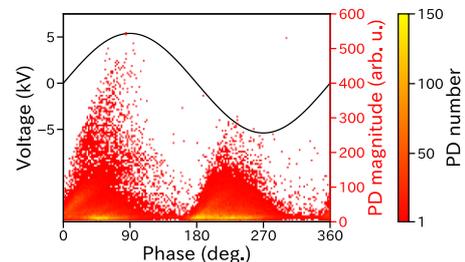


図1 PRPD パターンの例

Fig.1. Example of PRPD pattern

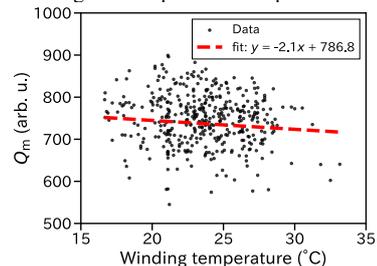


図2 最大放電電荷量 Q_m の巻線温度依存性
Fig.2. Q_m as a function of winding temperature.

文献

- (1)河村達雄・田中祀捷:「電気設備の診断技術」, 電気学会, 2003
- (2)倉石隆志・宮寄悟: 電中研報告, GD23020, 2024
- (3)倉石隆志・宮寄悟: 電中研報告, GD22031, 2023
- (4)中村信・倉石隆志・金神雅樹・宮寄悟: 電中研報告, GD25003, 2025

UHF 帯アンテナを用いた低気圧条件下における 部分放電の検出

松井 良樹*, 門脇 和丈 (三菱電機(株))

Partial Discharge Detection under Low Pressure using UHF Antenna

Yoshiki Matsui, Kazutake Kadowaki (Mitsubishi Electric corp.)

1. まえがき

機器や設備の絶縁診断技術において、部分放電を検出することは重大な事故を未然に防ぐことができるため非常に重要である。特に、部分放電から放出される電磁波をアンテナで検出する手法は、非接触で部分放電の発生を検知できることから様々な製品に適用できる可能性が高い。

近年、電動航空機の開発が進んでおり、低気圧環境での部分放電起因の電磁波についてその特性を理解することは重要である。本報告では大気圧条件下での部分放電周波数特性と、低気圧条件下における部分放電周波数特性の変化を確認するために部分放電発生時の信号を2種類のアンテナで測定し、ノイズとの差分を確認できる気圧条件の検討を行った。

2. 気圧変化時における部分放電信号の測定

図1 (Fig.1) にデータ測定時の装置構成を示す。使用したアンテナは30 MHz から2 GHz までの帯域をもつバイログアンテナ (SCHAFFNER 製)、1.6 GHz の信号を検出するパッチアンテナ (マイクロ波センサ、三菱電機製) の2点である。放電サンプルにはツイストペアを用いており、サンプルを設置したデシケータ内の気圧を減少させながら放電信号の測定を行った。バイログアンテナでは測定した信号の周波数特性を確認し、パッチアンテナでは1.6 GHz における放電信号強度および位相特性を確認した。測定した気圧は大気圧(101.3 kPa)、80 kPa、60 kPa、40 kPa、20 kPa、15 kPa、10 kPa、5 kPa であり、印加電圧は0.76 kV とした。これは大気圧条件下においてバイログアンテナが部分放電に対して反応を示した時の電圧である。

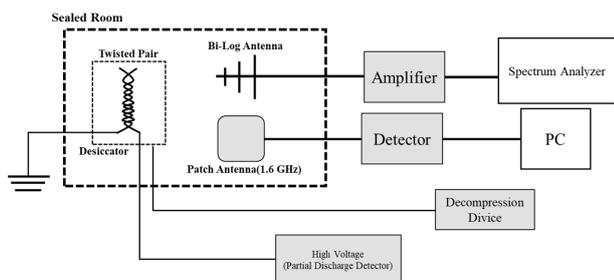


図1 試験装置構成概略図

Fig.1 Test Equipment Configuration Schematic Diagram

3. 測定結果

図2 (Fig.2) にバイログアンテナで測定した部分放電電磁波の周波数特性を示す。この測定結果では、各周波数において大気圧から減圧していくにつれて信号強度が減少していくことが確認できた。

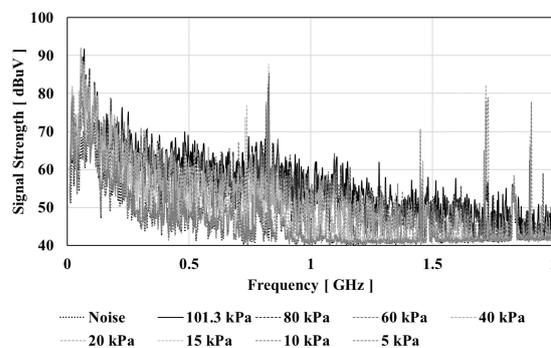


図2 放電電磁波の周波数特性

Fig.2 Frequency Characteristics of Discharge Electromagnetic Waves

また、図3 (Fig.3) に1.6 GHz のパッチアンテナで測定した各気圧における放電信号強度とノイズの比較結果を示す。この結果から、15 kPa 以上ではパッチアンテナで部分放電信号とノイズの識別が可能である事が明らかとなった。

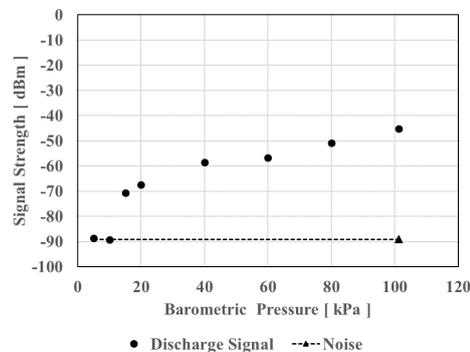


図3 各気圧における信号強度(1.6 GHz パッチアンテナ)

Fig.3 Signal strength at each pressure level (1.6 GHz patch antenna)

異物形状が CO₂ ガス中部分放電の電流波形形成に与える影響の理論検討

環 友翔*, 松藤 拓也, 大塚 信也 (九州工業大学)

Theoretical Study on the Influence of Particle Shapes on PD Current Waveform Formation in CO₂ Gas
Yuto Tamaki, Takuya Matsufuji, Shinya Ohtsuka (Kyushu Institute of Technology)

1. まえがき

筆者らはこれまで、SF₆ ガス中の部分放電 (PD) メカニズムとしてピコ秒オーダの PD 電流波形の形成メカニズムの検討と共に、SF₆ 代替ガス中の PD 特性の基礎的検討を行っている⁽¹⁾。SF₆ 代替ガスとして、新 F 系ガスと呼ばれる C4-FN 混合ガスと共に自然系ガスが着目されている。何れの代替ガスも CO₂ 単体や CO₂ 混合が検討されているため、CO₂ ガスの特性を理解することは重要である。本論文では、別報⁽²⁾と同様の手法で 0.1MPa の CO₂ ガス中の PD 電流波形を対象に、電極先端形状が PD 電流波形に及ぼす影響を、実験での計測器による検出特性を考慮して理論的に検討した。

2. 解析手法

PD 電流波形の計算は別報⁽²⁾と同様の手法である。電極系は針電極先端の曲率半径 r を 10~500 μm まで変化させ、CO₂ の実効電離係数⁽³⁾を用いて電離指数 $k = 18$ となる条件で波形を計算した。計算した理論電流波形から立ち上がり時間 t_r とピーク値 I_p を検討した。計測器(オシロスコープ OSC)の検出特性として、OSC 帯域の模擬として LPF 処理による帯域制限を行った。

3. 解析結果

Fig.1 に、一例として $r=10\ \mu\text{m}$ と 500 μm の電極系での理論 PD 電流波形と帯域制限処理をした処理波形を示す。10 μm の電極系では理論 PD 電流波形の立ち上がりは 500 μm の結果と比べてより急峻でピーク値 I_p も大きいことがわかる。処理波形を見ると、10 μm の電極系では理論波形と相違が認められ、4GHz、2.5GHz、1GHz と検出帯域が低下するほど波形の変化が大きい。即ち I_p は低下し、立ち上がり時間 t_r は増加することがわかる。他方、500 μm の電極系では処理波形はほぼ理論波形と一致しており、帯域制限の影響をほとんど受けないことがわかる。即ち、異物先端形状が鋭いほど、PD 電流波形の計測には帯域の広い OSC が必要であることがわかる。このような理論波形と処理波形の関係を r 依存性としてまとめた。

Fig.2 に、0.1 MPa の CO₂ ガス中の理論 PD 電流波形とその処理波形の t_r と I_p の r 依存性を示す。同図から r が大きくなるにつれて t_r は大きく、 I_p は小さくなり帯域制限をした処理波形との差は小さくなるがわかる。 I_p は t_r に比べて帯域制限の影響が小さく、 $r = 300\ \mu\text{m}$ の電極系から理論波形と処理波形の相違はほとんどない。一方、 t_r は処理波形との差が大きくなっており、 $r = 500\ \mu\text{m}$ の波形でも明らかな差が生じる。以上の結果から、CO₂ ガス中の PD 電流測定には測

定器帯域が影響を与える可能性が示唆される。

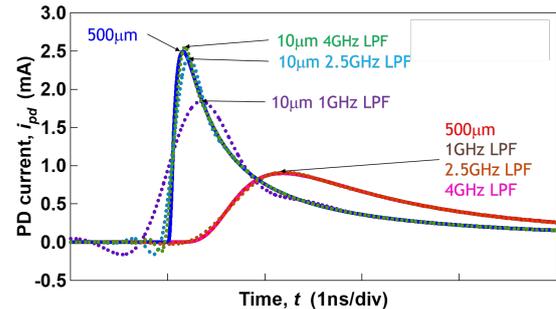


Fig.1 Examples of calculated theoretical and processed PD current waveforms with different needle electrodes $r = 10$ and 500 μm in CO₂ gas at 0.1 MPa.

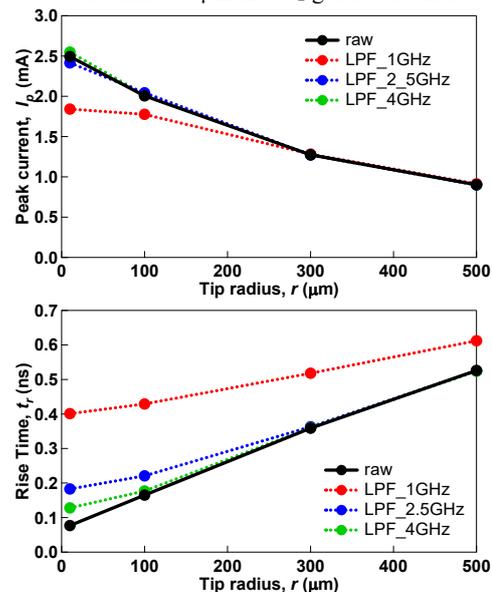


Fig.2 Dependence of defect shape r on rise time t_r and peak current I_p of PD current waveforms in CO₂ gas at 0.1 MPa.

4. まとめ

本論文では、0.1 MPa の CO₂ ガス中 PD 電流波形形成に及ぼす異物形状の影響を同一規模の放電($k=18$)として理論計算した。今後は、実験との比較と共にガス圧力変化の影響や放射電磁波との関係を検討する予定である。

本研究は JSPS 科研費 JP23H01401 の助成を受けた。

文献

- (1)大塚, 他: 電気学会論文誌 A, Vol.141, No.1, pp.40-41(2021)
- (2)大塚, 他: R8 年電気学会全国大会 (同時投稿中)
- (3) T.Liu, et al., IEEE PS, Vol. 48, 10, pp.3321-3331 (2020)

CFRP 複合材端部のエッジグロ現象解明のための 直流電圧印加時の炭素繊維束端部の放電発光現象の観測

古田陣平* 古林宗* 大塚信也* 西孝祐樹** 神山晋太郎** 平野義鎮**
(*九州工業大学 **宇宙航空研究開発機構)

Observation of Discharge Luminescence at Carbon Fiber Bundle Tips under DC Voltage for Understanding Edge Glow in CFRPs
Jimpei Furuta, Sou Furubayashi, Shinya Ohtsuka (Kyushu Institute of Technology)
Takayuki Nishi, Shintaro Kamiyama, Yoshiyasu Hirano (JAXA)

1. はじめに

筆者らはこれまで、航空機燃料タンク環境下におけるCFRP複合材雷撃時のファスナーからのスパーク現象を光学的に観測し、着火に至る現象やメカニズムを検討している⁽¹⁾。この成果はSAE ARP5416 Bの試験法改訂に反映されている。他方、CFRP複合材端部ではエッジグロが発生することが知られているが、その詳細なメカニズムは明らかになっていない。

本研究ではエッジグロ現象の解明の取り組みとして、炭素繊維のみに大気中で高電圧を印加し、放電発光の観測を試みた。印加電圧の極性や電圧値を変化させ、炭素繊維束先端の放電発光現象に与える影響を調査した

2. 実験方法

航空機に使用されている炭素繊維束(長さ約13cmで12,000本の束)を鉛直方向に吊るし、上端部は高電圧電源(MATSUSADA HAP-30B10)と接続し、もう一方の端部は接地平板から1.5cm離して配置した。印加電圧は5秒周期的で電圧オンとオフを繰り返す矩形波を印加し、電圧(5kVステップ)ならびに極性を変えて実験した。炭素繊維束先端の放電発光をデジタルカメラ(Nikon D7000)による静止像と共に分光器(OCEAN-FX-UV-VIS-ES)で発光スペクトルを観測した。なお、炭素繊維束は長手方向に渡って熱収縮チューブにより固定し、先端0.8cmほどは固定せず実験に用いた。

3. 実験結果

Fig.1に一例として、放電発光が観測された±15kV印加時の静止発光像を示す。同図に示されるように、紫色の放電発光が観測されているが、その像は負極性の方が明るい。また、両極性とも背景に写っている無課電時の状態より発光位置は広がっていることわかる。これは、炭素繊維束に電圧を印加すると、極性によらず先端の繊維は静電気力により広がるためである⁽²⁾。発光像の観測からは、負極性では-5, -10, -15kVで、正極性では10, 15kVで放電発光が観測され(5kVは未測定)、電圧値が高くなるほど発光像は明るくなった。Fig.2に、Fig.1で示した±15kV印加時に観測された発光スペクトル特性を示す。同図の縦軸は、無課電時のバックグラウンドとなるスペクトル分布で除した相対値である。同図から、負極性印加時は300nm~400nm付近に複数の大きなスペクトルが確認され、さらに600nm~800nm付近でも相

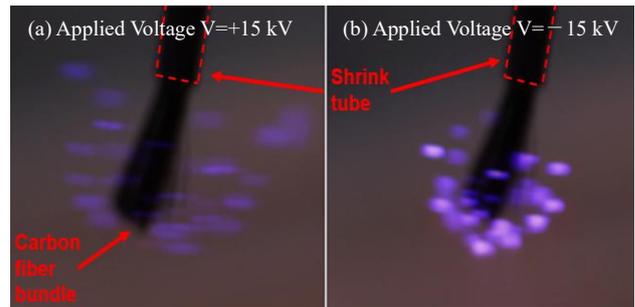


Fig.1. Difference in discharge light emission at the tip of carbon fibers with different polarity of DC high voltage application.

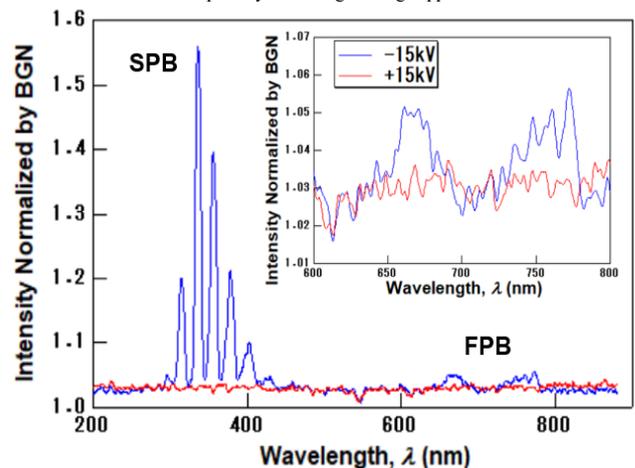


Fig.2. Intensity distribution of the emission spectrum normalized by BGN

対的に小さいがスペクトルの発生が認められる。これは、前者は大気中の N_2 の2nd Positive Band (SPD)、後者は1st Positive Band (FPB)による発光スペクトルである。一方、正極性ではこれらスペクトルは観測されず、これ以下の電圧では、発光像が観測されてもスペクトルは感度不足で観測されなかった。なお、同様の実験を直径1mm程度の相対的に太い銅電極で実施したところ、正負ともにSPDによるスペクトルが観測されたが、FPBは観測されなかった。

4. まとめ

直流電圧を印加して炭素繊維束先端の放電をデジタルカメラおよび分光器で観測した。その結果、負極性放電方が発光は明るく、 N_2 のSPBとFPBの発光スペクトルが観測された。

5. 参考文献

- [1] S.Ohtsuka, et. al, ICOLSE 2019, 2019
- [2] Y. Kisanuki, et. al, Int. J. Plasma Environmental Science and Technology, Vol. 13, No. 1, pp. 21-25 (2019)

CFRP 製航空機複合部材の抵抗特性と 直流電圧印加時の放電特性に関する基礎検討

古林 宗*, 古田 陣平, 大塚 信也 (九州工業大学), 青木 一行 (株式会社 SUBARU)

Resistance Characteristics and Discharge Characteristics of CFRP Aircraft Components under DC Voltage Application
Sou Furubayashi, Jimpei Furuta, Shinya Ohtsuka (Kyusyu Institute of Technology), Kazuyuki Aoki (SUBARU Corporation)

1. まえがき

航空機用部品に CFRP 製複合材の適用が進んでいる。このような複合材部品への雷撃時の安全性や信頼性向上の観点から、複合材部材の大電流、高電圧に対する特性を明らかにする必要がある⁽¹⁾。筆者らはこれまで、航空機燃料タンク雰囲気での CFRP 複合材への雷撃時にファスナーで発生するスパーク現象を観測し、評価する技術を有する⁽²⁾。

本研究では、CFRP 製プロペラブレードを対象に、その金属台座からブレード各部の抵抗特性を調べると共に、金属台座に直流高電圧を印加して放電特性を検討した。放電特性は、航空機認証に必要な着雷位置を特定する技術に繋がる可能性があるため重要である。

2. 実験方法

Fig.1 に示すようなブレード長さ 61 cm の CFRP 製プロペラブレードを対象に、ブレード各部位の抵抗を金属製台座からの距離依存性として測定した。測定は主に、ブレード前縁(LE)、後縁(TE)および上面(US)の3カ所とし、対象位置に 3cm 角のアルミホイルを貼り付けを行った。放電特性は、接地面から 60 cm 程度の机上にプロペラブレードを垂直に立て、金属台座部に正極及び負極性の直流高電圧を印加し、放射電磁波ならびに発光の測定により行った。放射電磁波は、UHF 帯に感度を持つホーンアンテナ HA と、VHF 帯に感度を持つモバイルアンテナ MA を用いて測定した。放電発光はデジタルカメラを使用して静止像を撮影した。

3. 実験結果

Fig.2 に CFRP 製プロペラブレードの各部位の抵抗の金属台座からの距離依存性を示す。プロペラブレードの各部位の抵抗は、前縁 LE と後縁 TE では上面 US と比べて抵抗値は低く、位置による変化が見られたが、それぞれ 15Ω と 5Ω 程度だった。このような金属台座との導通部分は台座の電位が上昇すると放電が発生する可能性が示唆される。金属台座に直流高電圧を印加すると、負極性では -9kV から、正極性では 15kV から、Fig.3 のような電磁波波形が観測された。即ち、放電発生は負極性電圧のほうが正極性より低かった。なお、放射電磁波は、VHF 帯のアンテナ MA では観測されたが、UHF 帯のアンテナ HA では観測されなかった。また、音波による放電信号およびデジタルカメラによる静止発光像は本条件では測定できず、プロペラブレードの放

電発生部位の特定には至らなかった。

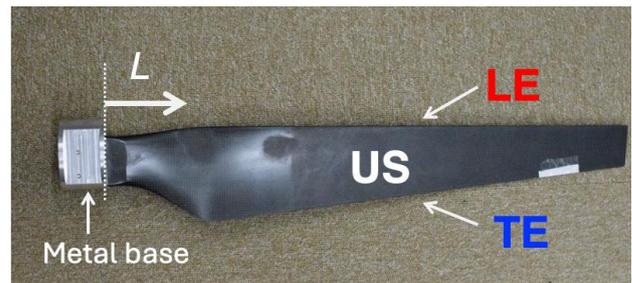


Fig. 1. CFRP propeller blade used in the experiment

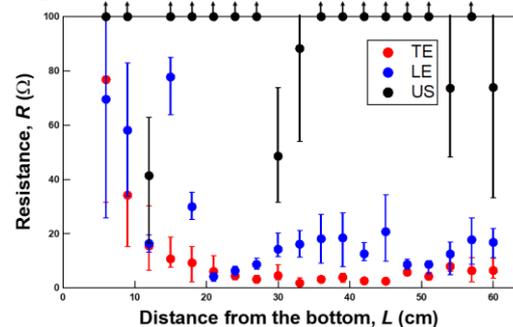


Fig. 2. Distance dependence of resistance at each location on the CFRP propeller blade from the metal base

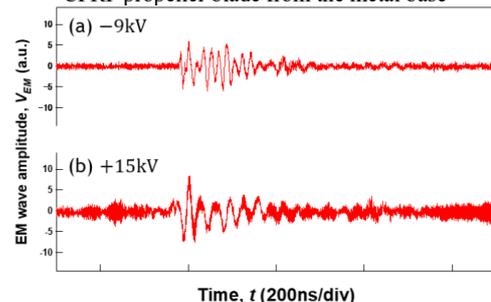


Fig. 3. Radiated Electromagnetic Wave Measurement Results at Antenna MA

4. まとめ

本研究では、航空機用 CFRP 製プロペラブレードの金属台座からの抵抗特性と共に金属台座に直流高電圧を印加して放電特性を測定した。今後は発光測定の感度を向上させ発光部位の特定と抵抗値の関係を検討すると共に、雷撃電流試験を行う予定である。

文献

- (1) 平野,他: 日本複合材料学会誌 51, 2, 56-62, (2025)
- (2) S. Ohtsuka, et. al, ICOLSE 2019, 2019

気中ギャップの絶縁破壊からアークへの遷移時間

菊池 桜輝*, 腰塚 正 (東京電機大学) 大塚信也 (九州工業大学)

Translation Time from Gap Breakdown to Arc Formation

Haruki Kikuchi, Tadashi Koshizuka (Tokyo Denki University), Shinya Ohtsuka (Kyushu Institute of Technology)

1. まえがき

気中ギャップの火花放電からアークへに至るまでの時間はSF₆ガス中に比べて長いことが分かっている^[1]。本論文ではギャップの材質を銅とアルミニウムの2種類としたときの火花放電からアークへの遷移時間について実験で検討した結果を報告する。

2. 実験方法

IG (Impulse Generator) によって発生させた高電圧を電極に印加し、ギャップに絶縁破壊を起こす。IGは充電電圧を70kVから5kVずつ変えていき、それぞれ3回ずつ放電を行い、その平均を結果とした。実験条件は以下の通りである。

- ・ギャップ間距離：50mm
- ・雰囲気：1気圧 気温 20-22°C 湿度 30-40%
- ・電極形状：針 (円錐)
- ・比較材質：銅 (Cu) とアルミ (Al)

3. 実験結果

図1に測定結果波形例を示す。ギャップの絶縁破壊が生じた後アーク放電に移行することで約200kHzの電流が流れている。

図2,3は絶縁破壊付近の拡大波形である。アルミは約2.46μs、銅は約1.72μsから電流が立ち上がっている。この時に火花放電が発生したと考えられる。一旦ピークに達した後電流は減少し、アーク電流として再び増加する。今回の絶縁破壊からアークへの遷移時間は上記の間とした。

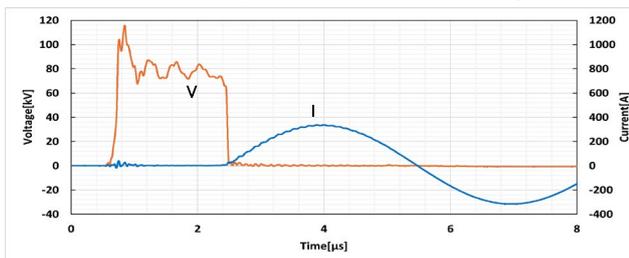


図1 測定結果波形例 (アルミ)

Fig.1. Measured waveforms (Aluminum)

表1,2に測定結果を示す。遷移時間は全体的にアルミの方がやや長いという結果であった。また、アルミの測定結果は銅と比較すると遷移時間にばらつきがあり、不安定な点も見られた。アーク遷移時間が長いことによって、測定波形の最大電流値はアルミの方が大きいと考えられる。

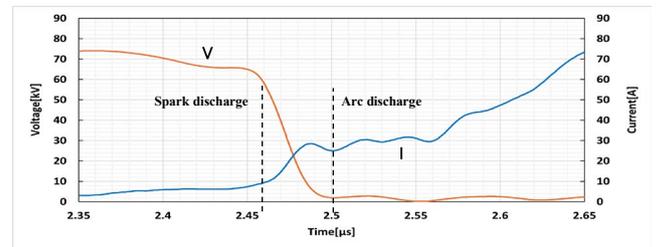


図2 拡大波形 (アルミ)

Fig.2. Enlarged view of measured waveforms (Aluminum)

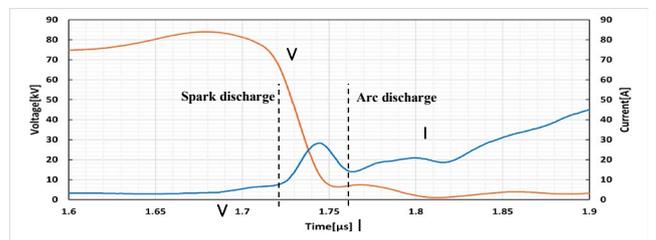


図3 拡大波形 (銅)

Fig.3. Enlarged view of measured waveforms (Copper)

表1 測定結果 (アルミ)

Table 1. Measured result (Aluminum)

電圧 [kV]	時間 [μs]			
	1回目	2回目	3回目	平均
70	0.044	0.036	0.062	0.047
80	0.065	0.071	0.067	0.068
90	0.089	0.078	0.065	0.077
100	0.070	0.070	0.074	0.071

表2 測定結果 (銅)

Table 2. Measured result (Copper)

電圧 [kV]	時間 [μs]			
	1回目	2回目	3回目	平均
70	0.043	0.045	0.039	0.042
80	0.048	0.032	0.043	0.041
90	0.031	0.036	0.058	0.042
100	0.050	0.033	0.033	0.039

4. まとめ

- 1) アークへの遷移時間は比較的アルミの方が長い。
- 2) 銅の遷移時間は安定的であったが、アルミの遷移時間はばらつきが多く、不安定であった。

文 献

- (1) 腰塚 正, 森 俊樹, 佐々木 真大, 前川 俊浩: 「気中ギャップの絶縁破壊とその模擬」、令和7年電気学会全国大会、No.6-015

エポキシ中微小ボイドにおける部分放電現象 の粒子シミュレーション

岩渕 大行* (湘南工科大学), 田中 斗志貴, 青木 康二郎 (東京電力ホールディングス)

Particle-in-Cell Simulation of Partial Discharge in Microscopic Cavities within Epoxy Resin

Hiroyuki Iwabuchi (Shonan Institute of Technology)

Toshiki Tanaka, Kojiro Aoki (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

1. まえがき

固体絶縁材料中に形成される微小ボイドは、部分放電 (Partial Discharge: PD) の発生起点となり、絶縁劣化・破壊の主要因となる⁽¹⁾⁽²⁾。特にエポキシ樹脂に代表される硬化樹脂では、真空脱泡工程によりボイド内圧が極めて低くなる可能性が指摘されている。このような低気圧・狭ギャップ環境では、従来の Paschen 則に基づく破壊電圧推定が適用困難であり、電子放出過程が放電開始に大きく影響すると考えられる。本研究では、GIS (Gas Insulated Switchgear) 中エポキシ絶縁スペーサの劣化診断技術への応用を見据え、ボイド中で生じる部分放電の形成過程を PIC-MCC (Particle-in-Cell / Monte Carlo Collision) 法により解析し、気体密度・表面二次電子放出係数の影響を調べた。

2. シミュレーションモデル

シミュレーションには PEGASUS を用い、エポキシ中に存在する直径 mm オーダのボイドを、二次元直交座標系の 1mm×1mm のサイズにモデル化した。ボイド内部および界面に以下の条件を設定し、ガス領域における電荷の移動を PIC-MCC 法によりシミュレートした。電荷の移動から変位電流波形を出力して、部分放電パルスと対応付けた。

- ・ガス密度：空気 (N₂/80%, O₂/20%), 7.6 mmHg 以下
- ・印加電圧：1-5 kV (DC)
- ・衝突モデル：弾性衝突・励起・電離 (代表断面積)
- ・表面電子放出：誘電体界面における正イオン衝突による二次電子放出係数 γ_i (0.01-1.0)

3. シミュレーション結果

本研究で得られたシミュレーション結果の概要を以下にまとめる。

<3・1>低気圧条件における電離 気体圧力が 1/100 気圧 (7.6mmHg) 以下では、平均自由行程がギャップ長に近づき、電子が電極間を往復する際の衝突回数が減少する。このため、衝突電離と二次電子放出を考慮したモデルでは、Paschen 則の左側領域のように、放電成立に高い電界が必要となる結果がシミュレーションから得られた。

<3・2>表面二次電子放出 γ_i の影響 誘電体表面におい

て正イオン衝突による二次電子放出を考慮すると、 γ_i の増加とともに電子数が増大することが確認された。 γ_i を増加させると、放電の成立する電圧は低下した。低圧条件では、誘電体表面から放出される電子が初期電子供給源として支配的となることが予想される。

<3・3>変位電流パルス 図1に $\gamma_i = 0.5$ 、印加電圧 3000 V-5000 V とした際の、シミュレーションで得られた変位電流波形を示す。変位電流は、電子とイオンの移動タイミングのずれにより正・負両極性のパルスを示した。電流波形は電子およびイオン移動に伴う電界の時間変化を直接反映しているが、実際の PRPD 計測では測定系の帯域特性の影響により、パルスのパターンが変わってくるのが考えられる。

4. まとめ

エポキシ中の微小ボイドは、製造時の真空脱泡により極めて低い圧力にある可能性がある。そのため、ボイド内部における初期 PD の発生においては、衝突電離ではなく誘電体表面からの電子放出機構が主要な役割を担うと考えられる。また、実験で測定される PD の位相依存性は、印加電圧の反転に加え、反転時の誘電体表面の電荷蓄積の影響を考慮する必要がある。今後は、PD モデル構築とあわせて、実際の PRPD パターンの測定を行っていく予定である。

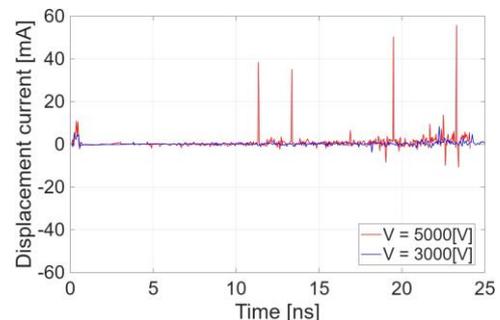


図1 変位電流波形の例
Fig.1. An example of displacement current

文献

- (1) 山本尚史他：令和3年電気学会全国大会, 6-001, 2021
- (2) 北村洋一, 谷功, 平林庄司：電気学会研究会資料 EIM-79-74, 1974

電極間隔および誘電体材質が沿面コロナ予備電離に及ぼす影響

齋藤 高輝*, 南谷 靖史 (山形大学)
永井 一喜, 佐々木 陽一, 梅田 博 (ギガフォトン)

Influence of Electrode Gap and Dielectric Material on Surface Corona Pre-ionization

Koki Saito, Yasushi Minamitani (Yamagata University)

Kazuki Nagai, Youichi Sasaki, Hiroshi Umeda (Gigaphoton Inc.)

1. はじめに

近年、半導体デバイスの需要の高まりにより、量産工場では低コストで歩留まりよく安定供給できることが求められている。そのため半導体のリソグラフィにおいても、高効率で出力安定性のよい光源が求められている。そのようなリソグラフィ光源として高出力の紫外線を放射できるエキシマレーザが広く利用されているが、さらなるレーザ発振の高効率化と出力安定性が求められている。これらを実現するためには、主放電電極間に電子を生成する予備電離が重要であり、予備電離による主放電電極間の電子密度の向上はレーザ発振の高効率化、安定動作に直結する。

本研究では、予備電離電極の構造および印加条件が生成電子密度に与える影響を調査することで、より生成電子密度の高い予備電離を実現するための設計指針を得ることを目的とした。

2. 実験装置および方法

図1に沿面放電を発生させるためのパルス電源を示し、図2に予備電離強度測定装置を示す。予備電離強度は予備電離電極および電子のドリフト電流測定電極を用い、予備電離電極からの沿面放電に伴い発生した紫外線による光電

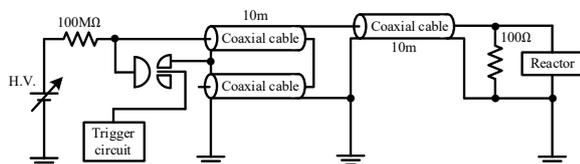


図1 ブルムラインを用いたパルス電源発生装置
Fig.1. Pulsed power generator using a Blumein circuit

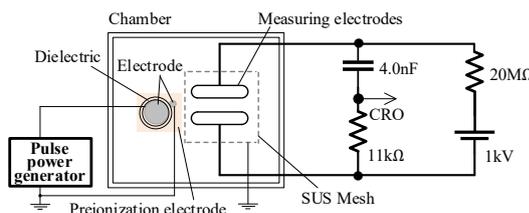


図2 沿面放電による予備電離強度測定用実験装置
Fig.2. Experimental setup for measuring intensity of pre-ionization

離で、生成した電子密度を測定することで評価した。測定電極は直径 64.5 mm、電極間隔 10 mm の並行平板電極とし、電極間には電圧 1 kV を印加している。沿面放電開始地点から測定電極中心までの距離を 70 mm とした。またステンレス製の金網で測定電極を囲むことで、放電部で発生したイオンおよび電子が、測定電極に侵入することを防いだ。放電を容易に発生させるため、容器内は He (1 気圧) で充填した。誘電体として、不透明セラミック (白色) および透明セラミックを用いた。また外電極と誘電体の間に空隙を設けることで、生成する電子密度に影響を与えるか評価を行った。電子密度は、測定電極で生成された電子によるドリフト電流のピーク値から算出した。

3. 実験結果

図3にドリフト電流から算出した外電極と各誘電体を 0.5 mm 離れた場合の生成電子密度の結果を示す。間隔を設けた場合、生成電子密度は増加し、特に不透明セラミック電極でその傾向が顕著であった。これは外電極の陰部にも放電光が到達し、電子生成に寄与したためと考えられる。一方、透明なセラミック電極は透明度の高さから陰部が少なく、もともと予備電離効果が高いため、間隔を設けても変化は小さかったと考える。

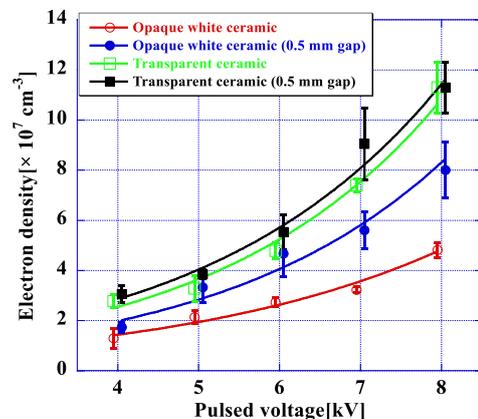


図3 外電極と各誘電体を 0.5 mm 離れた場合の生成電子密度
Fig.3. Electron density for a 0.5 mm gap between the outer electrode and dielectrics

針—平板電極系における壁面設置型センサ信号のギャップ長依存性に関する検討

樋口 瑞樹*, 岡田 翔, 上野 秀樹 (兵庫県立大学)
久保 直也, 森田 祐志, 谷口 和彦 (株式会社きんでん)

Study on Gap Length Dependence of Wall Mounted Sensor Signals in Needle-Plane Electrode

Mizuki Higuchi, Sho Okada, Hideki Ueno (University of Hyogo)

Naoya Kubo, Hiroshi Morita, Kazuhiko Taniguchi (Kinden Corporation)

1. はじめに

近年では電気設備の劣化状態を把握できるようになることで事故の未然防止が図れることから、劣化診断技術に対する期待が高まっている⁽¹⁾。

機器の劣化要因となる部分放電(PD)を、運転中に使用可能な壁面設置型センサを用いて早期に検出し、設備の劣化状態を識別可能にすることは、絶縁信頼性の観点から非常に重要であると考えられる。

本研究では、針—平板電極上で印加電圧及びギャップ長を変化させることで異なる放電形態を生成し、その時の部分放電電流及び、壁面設置型センサ信号の変化に対して検討を行った。

2. 実験方法

PD源として針—平板電極を用いた。平板電極上に絶縁体として厚さ1mmのガラスを設置し、針先端から絶縁体上部までの距離を0.1~1.0mmの間で変化させた。

60Hzの交流電圧を波高値2.5kVで印加したときのPD発生時の電圧瞬時値・PD電流・壁面設置型センサ(日新電機, DCM)信号波形をデジタルオシロスコープ(横河計測, DL6154, 1.5GHz, 10GS/s)にて10回ずつ測定した。また、壁面設置型センサは1辺15cmで正方形の鉄板(非接地)表面に取り付け、針先端を基準として、 $d=27\text{cm}$ の位置に配置した。また、各ギャップ長における発光を高速カメラ(MEMRECAM Q1v)にイメージインテンシファイアを取り付けて撮影した。撮影速度は1500fpsとし、露光時間は電流の1パルスが十分に測定できる663 μs とした。

3. 実験結果

図1にギャップ長0.1mm及び1.0mmのときの発光写真を示す。図1より、印加電圧を2.5kVで固定した場合、ギャップ長0.1mmでは針先からガラス表面を進展する沿面放電のような発光がみられる。また、ギャップ長1mmでは針先が小さく発光しており、部分放電が発生していると考えられる。

次に、図2に各ギャップ長のときの代表的なPD電流波

形・センサ信号波形・センサ信号にFFTを行った結果を示す。図2より、 $g=0.1\text{mm}$ と $g=1.0\text{mm}$ のFFT波形に強度の違いが見られ、 $g=0.1\text{mm}$ において170~300MHz付近の信号が大きく強まっていることがわかる。特にこの周波数帯域のうち280MHz付近では、PDに伴って発生する電磁波を信号として取得していることが先行研究で確認できている⁽²⁾。本研究において280MHz付近の信号が $g=1.0\text{mm}$ に比べ $g=0.1\text{mm}$ で強まった要因としては、ギャップ長が小さくなるにつれて針先端の電界強度が非常に強くなったことで、放電電流の立ち上がり急峻となり、それに伴い電磁波信号の強度が増加したためと考えられる⁽³⁾。

発表では、針先端の電界強度を同程度に揃えた際の結果を加えて報告する。

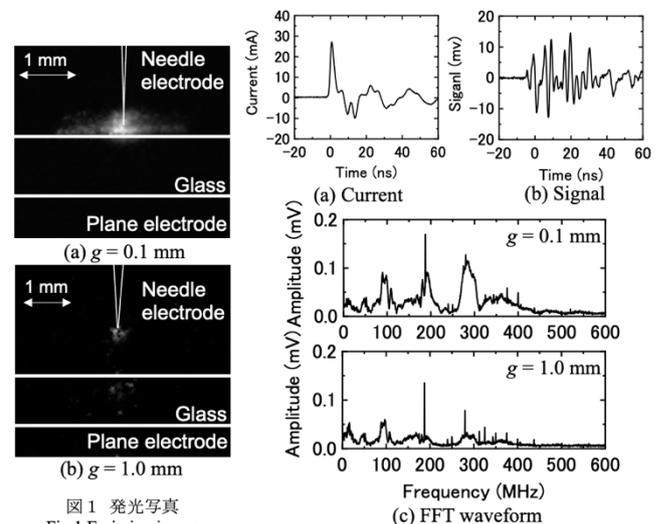


図1 発光写真
Fig.1 Emission image

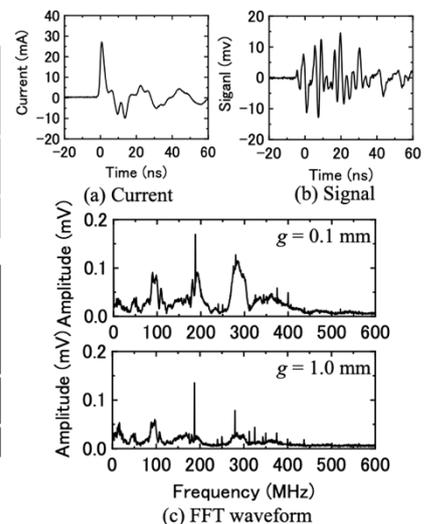


図2 代表的な電流・センサ信号・FFT波形
Fig.2 Typical Current, Sensor Signal, and FFT Waveforms
文献

- (1) 中島渉:「電気設備の劣化診断技術の現状」, 電気設備学会誌, Vol.32, p.893-896 (2012)
- (2) M.Higuchi, S.Okada, H.Ueno, N.Kubo, H.Morita, K.Taniguchi, Proc. Int'l Symp. High Voltage Eng (ISH2025), PS3-11(2025) (PDF file)
- (3) T. Mutakamihigashi, R.Sakurai, S.Okada and H.Ueno, Proc. of 18th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH2013), pp.651-656 (2013)

ガラス上マイクロギャップ放電における 電極先端の曲率半径の影響

岡本 昂大, 岡田 翔, 上野 秀樹* (兵庫県立大学)

Effect of electrode tip radius of curvature on glass micrometer-scale gap discharge

Koki Okamoto, Sho Okada, Hideki Ueno* (University of Hyogo)

1. はじめに

近年、電子機器内部の高集積化に伴い、静電気放電 (ESD) による機器の損傷の対策として、ESD 保護デバイスが実用化されている⁽¹⁾。ESD 保護デバイスの中で信号の高速伝送という観点からマイクロギャップ放電を用いたものが有用であるが、低電圧化が課題である。背後電極を用いて低電圧化を考えており、先行研究により背後電極を配置することで放電電圧が低下した⁽²⁾。また、電界集中源を作製することで電界強度が強くなり放電電圧が低下すると考えられる⁽³⁾ため電極先端の曲率半径に着目した。

そこで本研究では、背後電極を有する数 μm ～数十 μm 下の電極の曲率半径を変化させた際、電極の曲率半径がBDVに与える影響とそのときの放電機構について調査した。

2. 実験方法

電極構成の概略を Fig.1 に示す。電極には、円錐台形の銅電極(上面の直径:9 mm, 底面の直径:10 mm, 厚さ:1 mm)を使用した。電極先端の曲率半径 r を 0, 5, 10, 15, 20 μm の丸みを持たせて実験を行った。なお、曲率半径が nm オーダのものを曲率半径 $r=0 \mu\text{m}$ とした。電極間のギャップ長 d を 5~20 μm で 5 μm ごとに測定した。電極の下には硼珪酸ガラス(比誘電率:7, 体積抵抗率: $1.1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$, ガラス厚さ:0.05 mm)をおき、ガラス板の下に二つの銅電極の中心が真上にくるように背後電極(厚さ:10 mm, 幅:0.11 mm)を接地した。また、すべての条件で10回ずつ測定した。パルス電圧(負極性, 2500 V, 立ち上がり時間:30 ns)を印加し、すべて電圧波頭部での絶縁破壊に統一し、そのときの電圧瞬時値を絶縁破壊電圧とした。電界解析では COMSOL Ver.6.4 を使用し、解析手法には有限要素法を用いた。Fig.1 の断面図を模擬したモデルで電界解析を行った結果が Fig.2 のような電界分布となる。

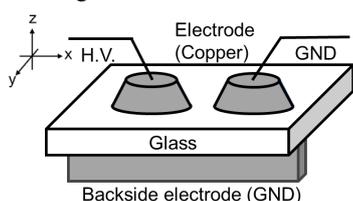


Fig.1 Electrode configuration

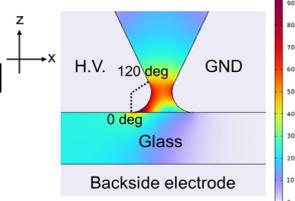


Fig.2 Electric field analysis results

3. 実験結果

横軸をギャップ長、縦軸を絶縁破壊電圧 (BDV) としたときの実験結果を Fig.3 に示す。プロットは平均値でエラーバーは標準偏差を示す。曲率半径変化した際の結果は以下の凡例のように示す。

Fig.3 より、ギャップ長 $d=20 \mu\text{m}$ において電極先端の曲率半径 $r=20 \mu\text{m}$ のとき BDV が 1180 V となっており、 $r=15 \mu\text{m}$ のとき BDV が 1070 V、 $r=10 \mu\text{m}$ のとき BDV が 980 V、 $r=5 \mu\text{m}$ のとき BDV が 960 V、 $r=0 \mu\text{m}$ のとき BDV が 860 V となっている。以上のことから $d=20 \mu\text{m}$ において曲率半径を小さくすると BDV が低下した。また、 $d=10, 15 \mu\text{m}$ では、 $d=20 \mu\text{m}$ のときと同様に曲率半径を小さくすると BDV が低下した。一方で、 $d=5 \mu\text{m}$ のとき $d=10 \sim 20 \mu\text{m}$ と違い BDV にほとんど差が見られなかった。

電極先端は丸みを持たせているため、Fig.2 のように電極とガラスの接点を 0 deg として 0 deg から 120 deg までの電界強度を電界解析によって算出した結果を Fig.4 に示す。

Fig.4 より電極先端の曲率半径を小さくすることで三重重点部の電界強度が強くなる。そのため今回の結果より曲率半径を小さくすることで BDV が低下したと考えられる。曲率半径変化に対するマイクロギャップ放電への影響についての詳細は当日報告する。

本研究は、JSPS 科研費 JP24K07438 の助成を受けた。

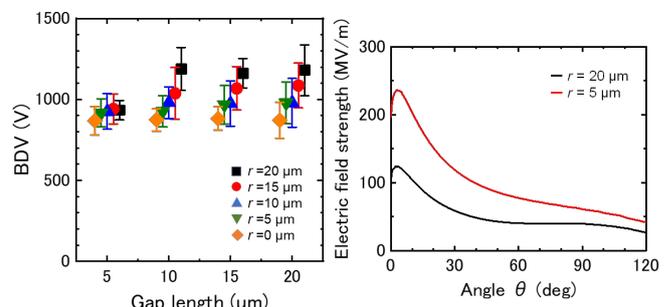


Fig.3 Gap length - BDV characteristics

Fig.4 Electric field intensity at the electrode tip

文献

- (1) 難波田恵 他, 静電気学会誌, Vol.40, No.6, pp.295-301(2016)
- (2) 岡本昂大 他, 令和7年電気学会基礎・材料・共通部門大会, No.5-B-a2-2 (2025)
- (3) 山本修 他: 「高電圧工学」, オーム社, pp.128 (2013)

高湿環境下の気中放電電圧の実測と推定

宮路 仁崇*, 石川 裕卓 (三菱電機), 菊池 祐介 (兵庫県立大学)

A Study on Measurement and Estimation of Discharge Voltage in Humid Air

Yoshitaka Miyaji, Hirotaaku Ishikawa (Mitsubishi Electric Corp.), Yusuke Kikuchi (University of Hyogo)

1. まえがき

パワーエレクトロニクス機器やモータの適用拡大に際し、様々な環境影響に対する高信頼化が求められている。これに対し、著者らは湿度影響を考慮した被覆電極系の放電電圧の推定手法を提案し、数 mm 以下の空気ギャップにおける高湿下の放電電圧低下には、吸湿に伴う皮膜の誘電率上昇に因る空気ギャップの電界強調等が寄与することを示した⁽¹⁾。他方、湿度上昇に伴う空気ギャップ中の負イオン増加の影響は小さいと机上推定された。そこで今回、皮膜の影響を除外すべく裸電極系を用い、実験・計算の両面から、上述の机上推定結果の検証を行った。

2. 実験方法

図 1 に実験系を示す。空気ギャップを介して平行に並べた 2 枚の電極チップから成る裸電極系⁽²⁾を環境槽内に設置し、一方の電極を接地し、他方に商用 AC 電圧を印加して放電電圧を測定した。環境槽内の温度を 25 °C で固定し、標準状態の空気の絶対湿度 11 g/m³ を念頭に、絶対湿度を約 11-21 g/m³ (相対湿度を約 50-90%RH)、気圧を約 0.01-0.1 MPa で変化させた。

3. 計算方法

次の Schumann の条件式に基づき、放電電圧を推定した。

$$\int_{x_{cr}} \alpha_{eff} dx \geq k \quad (1)$$

x_{cr} は電気力線に沿う経路、 α_{eff} は実効電離係数、 k は電離閾値である。空気の α_{eff} 、 k は次の実験式で与えられる⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$\alpha_{eff}/p = \begin{cases} 0.22(E/p - 24.4)^2 & (24.4 < E/p \leq 50) \\ 0.50(E/p - 24.4)^{1.75} & (50 < E/p \leq 120) \\ 17.7 E/p - 725 & (120 < E/p \leq 250) \\ 11020 \exp[-271/(E/p)] & (250 < E/p) \end{cases} \quad (2)$$

$$k = 13 + \ln(d/10) \quad (3)$$

p [MPa] は気圧、 E [kV/mm] は電界強度、 d [mm] はギャップ長である。式(2)は湿度に依存すると指摘されていることから、本報では、次式⁽⁵⁾に従って α_{eff} を補正した。

$$\alpha_{mod} = [1 + r_w(x_w)] / [1 + r_w(x_{w_std})] \cdot \alpha_{eff} \quad (4)$$

$$r_w(x_w) = 1.108x_w + 3.453x_w^2 \quad (5)$$

α_{mod} は補正した空気の α_{eff} 、 x_w は空気中に含まれる水分のモル分率、 x_{w_std} は標準空気における同モル分率である。

4. 実験・計算結果

図 2 に実験・計算結果を示す。プロットは実験結果 (エラーバーは Max-Min)、点線は計算結果であり、それらがよく一致することからいずれも妥当と思われる。また、常圧 0.1 MPa 下のいずれのギャップ長においても、常湿 11 g/m³ 下と高湿 20 g/m³ 下で放電電圧は殆ど変化しないことが分かった。低圧 0.01 MPa 下でも同様であった。以上より、高湿下の放電電圧低下に対する空気ギャップ中の負イオン増加の影響が小さいことを、実験・計算の両面から検証した。

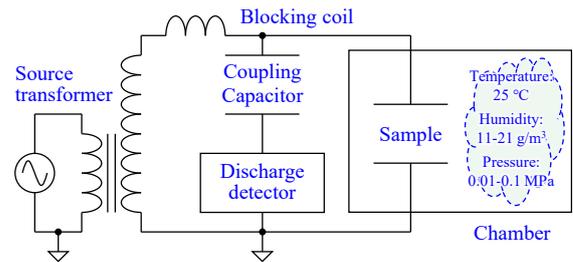


図 1 実験系

Fig.1. Experimental setup.

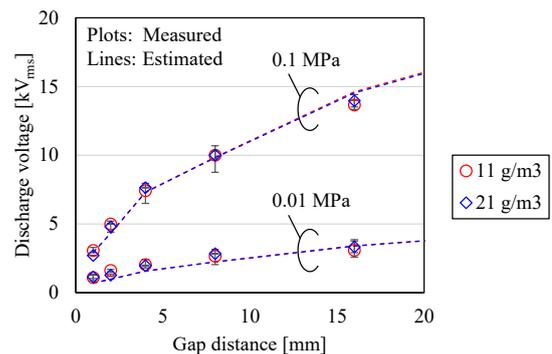


図 2 実験・計算結果

Fig.2. Measured and estimated results.

文献

- (1) Y. Miyaji, et al.: *IEEE CEIDP*, Manchester, UK, 3B-13 (2025).
- (2) 石川, 他: 電気学会 A 大, 種子島, 14-C-a1-3 (2022).
- (3) S. Berger: *IEEE TPAS*, vol.95, no.4, pp.1073-1079 (1976).
- (4) 宅間: 電学誌, vol.91, no.1, pp.148-156 (1971).
- (5) R. Färber, et al.: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.57, 075202 (2023).

火花放電による圧力分布推定のための 数値解析モデルの構築

荒岡 信隆*, 多田隈悠太郎, 高村 紀充 (福岡大学)

Construction of Numerical Analysis Model for Estimating Pressure Distribution due to Spark Discharge
Nobutaka Araoka, Yutaro Tadakuma, Norimitsu Takamura (Fukuoka University)

1. まえがき

風力発電の風車ブレードが雷撃により貫通破壊される被害が報告されており、著者らはその主要因の一つと考えられる放電による圧力⁽¹⁾ (=衝撃力/面積)を調査している。これまでに図 1(a)のように接地電極の下面に取り付けた圧電センサにより放電の衝撃力を測定してきた⁽²⁾。本稿では衝撃力波形から圧力分布を推定するための数値解析モデルの構築と計算を行った結果を報告する。

2. 解析方法

接地電極で受けた放電の衝撃波による衝撃力を数値解析するため、図 1(b)のように実験構成のモデル化を行った。高圧電極を軸とする軸対象二次元とし、接地電極を半径 1 mm 間隔で円環状に分割した。火花放電は電極直下の直線で模擬し、球面状の衝撃波が一定の速度 v で各点から伝播すると仮定した。計算の時間幅を Δt としたとき、ある時刻 $t_i = i\Delta t$ における衝撃波の進展距離 d_i は(1)式で求まる。

$$d_i = vt_i \quad (1)$$

放電や爆発等により生じる衝撃波は高圧の波面が伝播し、波面前後はほぼ大気圧であるため⁽³⁾、衝撃波が到達した瞬間のみ圧力 p_w をその地点に加圧すると仮定した。また、圧力 p_w は放電発生時の圧力初期値 p_0 から時定数 τ で減衰しつつ伝播すると考えられるため、(2)式にて圧力 p_w を求めた。

$$p_w = p_0 e^{-\frac{t_i}{\tau}} \quad (2)$$

ここで時刻 t_i において、半径 r_{j-1} および r_j で区切られた区分 j の半径方向の midpoint (図 1(b)中の黒丸) における鉛直方向の圧力 $p_j(t_i)$ は、衝撃波の圧力方向と接地電極のなす角を θ_{ij} として(3)式で求まる。

$$p_j(t_i) = p_w \sin \theta_{ij} = p_0 e^{-\frac{t_i}{\tau}} \sqrt{1 - \left(\frac{r_{j-1} + r_j}{2vt_i}\right)^2} \quad (3)$$

時刻 t_i における圧電センサの測定値 $F(t_i)$ は、(3)式と各区分の面積の積から(4)式により求められる。

$$F(t_i) = \sum_j p_j(t_i) \cdot \pi(r_{j-1}^2 - r_j^2) \quad (4)$$

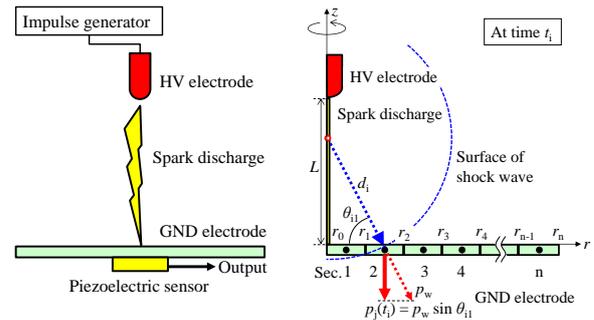
3. 結果

解析結果の例として、衝撃波速度 v を 2100 m/s、圧力初期値 p_0 を 0.25 MPa、また時定数 τ を 15 ms としたときの衝

撃力波形を図 2 に示す。また、各時刻における圧力分布を図 3 に示す。解析結果は実験結果⁽⁴⁾と近い衝撃力波形となったが、衝撃波の速度が超音速で一定という解析条件での結果である。発表時には速度に対しても減衰を加味した結果を報告する予定である。

謝辞

本研究の一部は科研費 23K03827 の助成を受けた。



(a) Experimental setup (b) Numerical analysis model
図 1 実験構成および数値解析モデルの概略図
Fig.1. Schematic of experimental setup and numerical analysis model

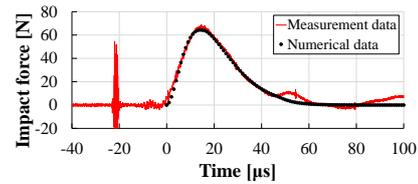


図 2 火花放電による衝撃力波形
Fig.2. Waveform of impact force by spark discharge

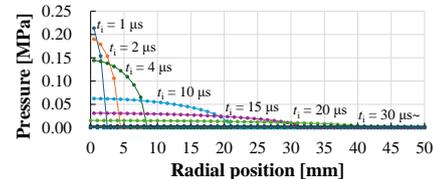


図 3 衝撃波による圧力分布
Fig.3. Pressure distribution by shock wave

文献

- (1) 荒岡ら：電気学会論文誌 A, Vol.145, No.10, pp.323-329 (2025)
- (2) 荒岡ら：令和 3 年電気学会全国大会, 1-076 (2021)
- (3) Uman et al.: *J. Appl. Phys.*, Vol.41, Issue 7, pp.3148-3155 (1970)
- (4) 多田隈ら：令和 8 年電気学会全国大会 (2026) (印刷中)

酸化クロム薄膜コーティングしたアルミナ基板 のフラッシュオーバー電圧の表面抵抗値依存性

小倉 暁雄*, 片桐 創一, 野木 広光, 蓮沼 隆 (筑波大学)

Effect of surface resistance on the flashover voltage of Cr₂O₃-coated alumina substrates in vacuum
Akio Ogura, Souichi Katagiri, Nogi Hiromitsu, Ryu Hasunuma (University of Tsukuba)

1. まえがき

真空中で直流高電圧を印加した時のフラッシュオーバー電圧を向上させるために、絶縁体表面に僅かな導電性を付与して帯電除去する手法を検討してきた⁽¹⁾。本研究では、酸化アニール温度を変化させて種々の表面抵抗を持った Cr₂O₃ を作製し、そのフラッシュオーバー電圧を評価した。

2. 実験方法

絶縁基板としてアルミナ (純度 99.5%) を使用した。直流スパッタリングにより 10 nm の金属 Cr をアルミナ表面に成膜し、酸化アニール処理で Cr₂O₃ とした。表面抵抗を制御するために、450 °C、475 °C、900 °C をそれぞれ 60 分アニール処理した。フラッシュオーバー電圧を測定するために、真空チャンバー内 (10⁻⁴ Pa 程度) で 2.0 kV/s のランプ電圧を印加し、高速カメラで放電発光像を取得した。陰極には曲率半径 5 μm の導電性ダイヤモンド針を使用し、放電起点を特定させる構造とした。電極間距離は 10 mm とし、コーティングしていないアルミナとアニール処理した試料のフラッシュオーバー電圧の比較を行った。

3. 実験結果および考察

図 1 はアニール処理した各サンプルの表面抵抗値を示しており、アニール温度によって 10¹⁰–10¹³ Ω で制御可能であることが分かる。アニール温度によって膜内の Cr と Cr₂O₃ の含有量が変わっているためであると考えられる。図 2 は、アルミナにランプ電圧を印加した時の電圧変化である。9.2 kV で電圧変動が発生しており、そのタイミングで陰陽極間でフラッシュオーバー放電が発生していることを高速カメラで確認した。このフラッシュオーバーが発生している電圧を各サンプルで取得した結果が図 3 となる。コーティングしていないアルミナは 16 回、450 °C、475 °C、900 °C でアニール処理した試料は 8 回 放電実験を行った。それぞれの平均放電電圧は 7.4 kV、24.5 kV、16.2 kV、14.6 kV であった。アルミナと比較して 3.3 倍、2.2 倍、1.97 倍となり、全ての試料において放電耐圧の向上を確認できた。また表面抵抗値が減少していくにつれて耐圧が向上していることから、三重重点における電界緩和、表面帯電緩和といった効果が影響していると考えられる。

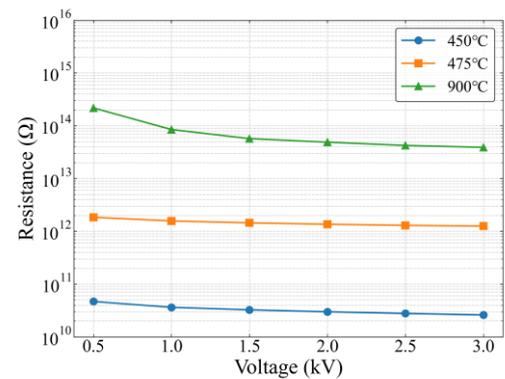


図 1 表面抵抗値のアニール温度依存性
Fig.1. The annealing temperature dependence of the surface resistance

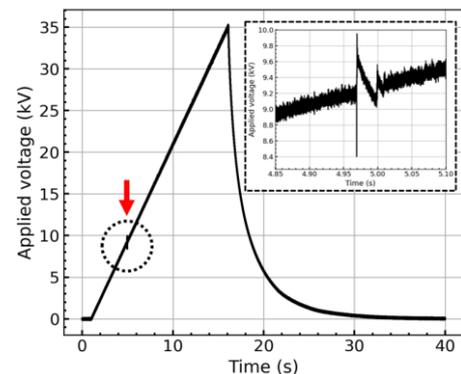


図 2 フラッシュオーバー放電発生時の電圧変化
Fig.2. Ramp voltage change during the occurrence of flashover discharge

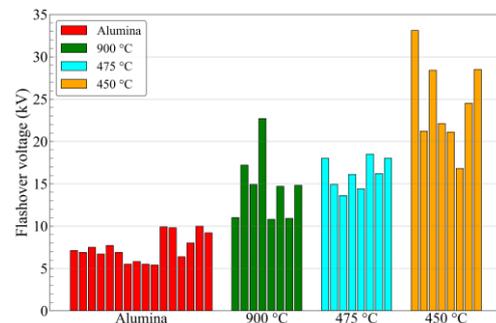


図 3 各サンプルのフラッシュオーバー放電電圧
Fig.3. Flashover voltage for each sample

文献

(1) A. Ogura et al., Proceedings of CEIDP 2024.

放電生成物のバブリングおよび 生成水溶液の電気分解による成分変化

川田 吉弘*, 黒水 将史 (職業能力開発総合大学校)

Study of Aqueous Solutions of Electrical Discharge Products and Component Changes with Electrolysis
Yoshihiro Kawada, Masafumi Kuromizu (The Polytechnic University of Japan)

1. まえがき

旧来、稲妻が米の収穫量に影響を与える可能性について伝来があるように⁽¹⁾、大気中での放電からはオゾンのほか窒素酸化物が生じる。これらを窒素肥料のうち硝酸態窒素として、植物の生育に用いることが研究されている⁽²⁻³⁾。

放電を利用し植物の成長促進に用いた研究例は多い。大気処理したガスのバブリングのほか、水溶液中で放電させるなどの例がある。水面が帯電することから放電が安定しない等の問題もある。しかし窒素酸化物を作り、水へ溶解させることで、大気中では寿命が短い活性な物質も有効に使用できる技術である。大気中で放電生成した物質は窒素酸化物が多く、酸性の水溶液となることが多い。

植物が生育するためには pH 5~7 程度の弱酸性から中性である必要がある。そのため放電生成物から硝酸イオンを溶解した水溶液で植物育成を目的とした過去の研究では、水酸化ナトリウム等を添加し pH 調整する例が多い。

本研究では大気を放電処理し、その気体を蒸留水にバブリングさせることで、放電生成物を含む水溶液を生成した。溶存した放電生成物の選択および調整を目的に、電気分解を試みた⁽⁴⁻⁵⁾。本研究では、単純な系で電気分解を行い、成分変化を評価した。評価方法は 190-300 nm の紫外線吸収スペクトルを測定し、さらにガウス分布に沿ってピーク分離を試みた。電気分解で溶液を中性に近づけることが最終的な目的である。しかし電気分解においては、硝酸イオンに対し、水分子の還元反応が主に生じる。また亜硝酸イオンになると還元が進むと考えられる。本研究ではその過程について明らかにする。

2. 実験手順

本実験の方法として、図 1 の手順にて進めた。室内大気を誘電体バリア放電に通し、処理後の大気を蒸留水にバブリングした。バブリング後の水溶液は、常温常圧で 72 時間放置したのち電気分解を実施した。

3. 大気プラズマ処理とバブリング

厚み 1 mm、長さ 10 cm のガラス円筒の外側にアルミ箔接地電極、内部には直径 0.75 mm のステンレス線電極を配置し、誘電体バリア放電を発生させた。室内大気を流量 0.5

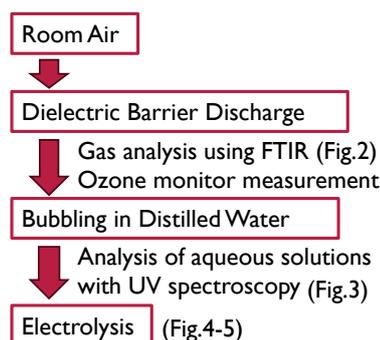


図 1 放電生成物の生成と溶解、電気分解の手順
Fig.1 Procedure of Generation and dissolution of discharge products, and electrolysis.

L/min で放電処理し、蒸留水 100 mL に 15 分間、ガス洗浄瓶 (Climbing 板フィルタ付、250 ml) を用いてバブリングさせた。放電処理ガスの FTIR スペクトルを図 2 に示す。FTIR (島津製作所 IR-Tracer100) は分解能 1 cm^{-1} 、積算回数 32 回とし、アポタイズ関数 (Happ-Geplzel) による処理を行った。バックグラウンドは大気減圧下、ガスセルは光路長 2.4 m、窓材は KBr とした。放電生成物として、波数 2210、2230 cm^{-1} 付近の N_2O のほか、図 2 に示された波数 1040 cm^{-1} のオゾン、波数 1320 cm^{-1} 、1370 cm^{-1} 、1700 cm^{-1} 付近の硝酸性生物を確認した⁽⁶⁾。またオゾン濃度は気中オゾンモニタ (荏原実業 PG610) でも測定した。放電開始直後からオゾン濃度は増加し、最大で 1330 ppm、放電開始 4 分後には安定し、オゾン濃度は 500 ppm であった。

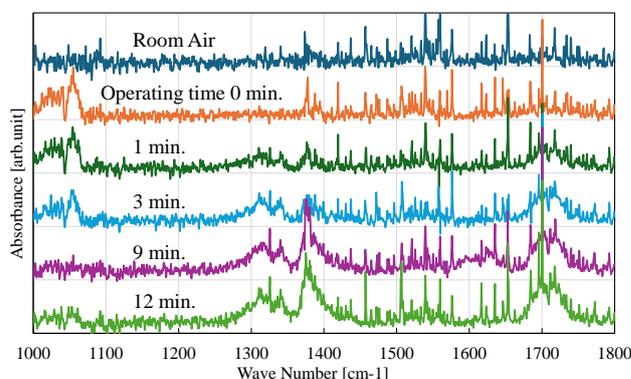


図 2 誘電体バリア放電処理後の大気の FTIR スペクトル
Fig.2. FTIR spectra of air after dielectric barrier discharge treatment

4. 電気分解と UV スペクトル変化

放電処理した大気をバブリングし、水溶液を 72 時間放置した。放置後の水溶液の紫外線吸収スペクトルを図 3 に示す。放置により溶存オゾンが低下することから UV スペクトルに変化があると考えたが、スペクトルに大きな変化がないことを、他の試験で確認している。また電気分解を行うにあたり、10 倍に希釈した水溶液を用いた。

溶液 50 mL をビーカーにとり、炭素棒（直径 5 mm、液体に 25 mm 含浸）を 2 本、20 mm の間隔で配置し、スターラーで攪拌しながら、直流 20 V を印加し電気分解した。印加時間に対し電流はほぼ一定であり、平均 21.2 mA であった。電気分解時の紫外線吸収スペクトルの変化を図 4 に示す。本スペクトルは対象のピークから蒸留水のピークを引いた、差スペクトルとした。電気分解の実施とともに波長 200 nm 付近のピークが大きくなり、また波長 220-250 nm 付近の吸収が大きくなった。この変化を解析するため、溶存酸素のピークを 190 nm、硝酸イオン NO_3^- のピークを 200 nm、亜硝酸イオン NO_2^- のピークを 210 nm とした半値全幅 25 nm のガウス分布を用いて、ピーク分離ソフト fityk (Ver.1.3.1) ⁽⁸⁾ によりフィッティングした。それぞれのガウス分布のピークを図 5 に示す。ただし縦軸は電気分解開始時の吸光度を 1

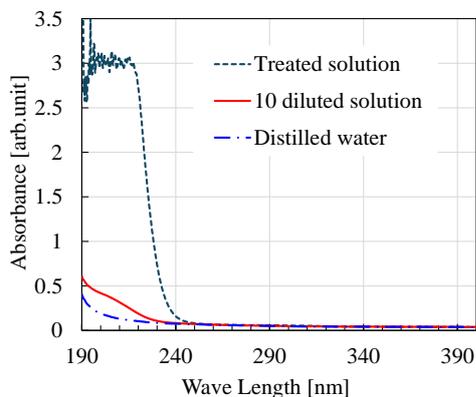


図 3 放電処理ガスを処理した水溶液の UV スペクトル
Fig.3 UV spectra of aqueous solution treated with gas through dielectric barrier discharge.

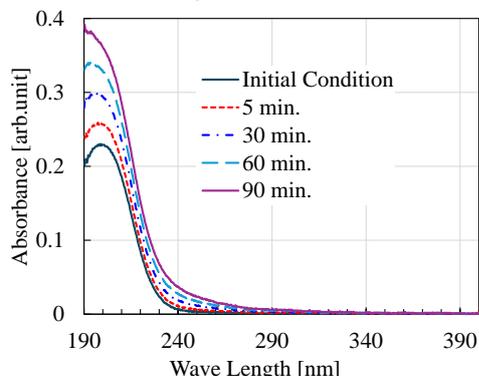


図 4 電気分解実施時間に対する UV スペクトル変化
Fig.4 UV spectra changes for the treated solution with electrolysis time.

とし規格化した。酸素と NO_2^- の増加、 NO_3^- の低下が考えられる。水の電気分解により酸素と水素が十分にあり、酸素の増加は考えられる。亜硝酸の増加については、還元が進んだと考えられる。陰極付近は水素イオンも多い。ただし NO として、 NH_3^+ 等へ還元が進むか疑問であり、還元を進める方法、ピーク分離を含めた計測方法を、今後検討する。

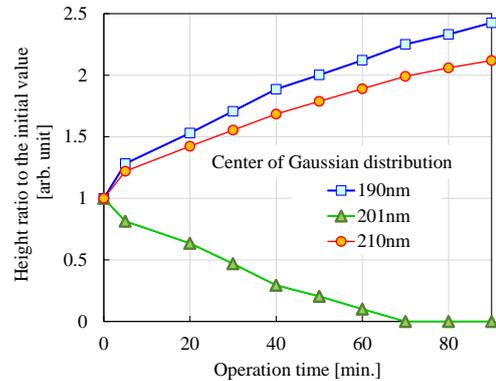


図 5 UV スペクトルに対する各ガウス分布のピークと時間変化
Fig.5 Time variation of peaks of each Gaussian distribution fitting for UV spectra.

5. おわりに

水中での放電のような水と放電が近接状態ではなく、放電処理後の大気を蒸留水にバブリングさせた。溶解後の放電生成物に対して、電気分解を用い改質できることが示唆された。水の電気分解が平行して進み O_2 や H_2 が飽和している水溶液中で、硝酸イオンの還元反応を進めるため、電極配置や電圧条件の探究を進める。

文献

- (1) 伊藤泰郎:オゾンの不思議, ブルーバックス B-1270, 講談社 (1999)
- (2) 江原ほか: 放電生成物による農作物への成長促進作用. 電気学会論文誌 A, 135, 4, 211~216 (2015)
- (3) 高野ほか: 水中気泡内放電を用いたコマツナ水耕栽培における育成改善. 電気学会論文誌 A, 135, 8, 467~472 (2015)
- (4) 佐々木ほか: N_2O_5 のプラズマ合成と循環型農業に向けた応用展開, 静電気学会誌, 49, 5, 172~176(2025)
- (5) 川田ほか: 誘電体バリア放電と電気分解を用いた水溶液中の窒素化合物生成, 静電気学会誌, 41, 1, 20~25 (2017)
- (6) Y.Kawada et al. : Combined of dielectric barrier discharge and electrolysis methods to generate nitrogen compounds in aqueous solution from room air, Int. J. Plasma Env. Sci. Tech., 15, 2, e02001 (9pp) (2021)
- (7) Jun-Seok Oh et al.: UV-vis spectroscopy study of plasma-activated water: Dependence of the chemical composition on plasma exposure time and treatment distance, Jpn. J. Appl. Phys., 57, 0102B9(2018)
- (8) Fityk — curve fitting and peak fitting software, <https://fityk.nieto.pl/> (2025 年 12 月 18 日確認)

プラズマ照射により生成された OH ラジカルが Jurkat 細胞に及ぼす影響

田中 千智*, 白井 昭博 (徳島大学), 中川 忠彦(島根県立大学)
曾我部 正弘, 岡久 稔也, 寺西 研二 (徳島大学)

Effects of OH radicals Generated by Discharge Plasma Irradiation on Jurkat Cells

Chisato Tanaka, Akihiro Shirai (Tokushima University), Tadahiko Nakagawa (The University of Shimane)
Masahiro Sogabe, Toshiya Okahisa, Kenji Teranishi (Tokushima University)

1. まえがき

筆者らは、プラズマ照射した生理食塩水を自己免疫疾患の治療に応用することを目的とし、プラズマ照射生理食塩水 (Plasma-treated saline: PTS) が自己免疫モデル細胞である Jurkat 細胞に及ぼす影響について調査してきた⁽¹⁾。これまでの研究において、PTS 中に長寿命活性種である過酸化水素が生成されていることや、PTS が Jurkat 細胞にアポトーシスを誘導することなどを確認している⁽¹⁾。一方、PTS 中には短寿命活性種も生成されていることが予想されるが、その影響については十分に理解できていない。そこで本研究では、Jurkat 細胞を懸濁した生理食塩水にアルゴン誘電体バリア放電を直接照射することにより生成される OH ラジカルが Jurkat 細胞に及ぼす影響について調査した。

2. 実験方法と装置

図 1 は本研究で使用した放電プラズマ照射装置である。放電ガスにはアルゴンを使用し、マスフローメータを通して 1 L/min で放電ガスを供給した。生理食塩水には大塚生食注を使用し、試験管と液面との間に形成されるギャップ長が 3 mm になるように電極間距離を調整した。直流安定化電源とネオンインバータトランスを用いて、正弦波交流高電圧を発生させ、これを高電圧電極に印加することで液面上に誘電体バリア放電を生成した。

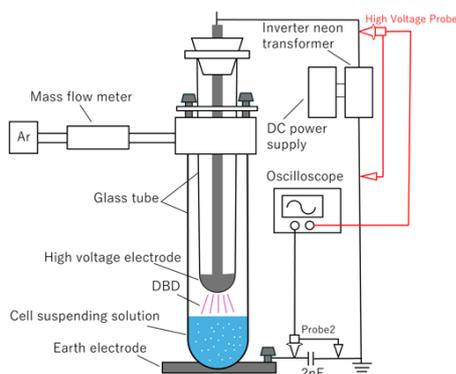


図 1 : プラズマ照射装置の回路図

Fig. 1 Schematic diagram of Plasma treatment device

3. 実験結果と考察

図 2 は生理食塩水および濃度 0.5% の DMSO を含む生理食塩水にそれぞれ Jurkat 細胞を懸濁し、15 分間アルゴンプラズマ照射した後、最大 24 時間培養した際の培養時間と細胞生存率の関係を示している。同図中の細胞生存率は、Jurkat 細胞を 0.5% DMSO を含む生理食塩水に暴露したものの (プラズマ照射なし) を陰性対照 (A) とし、Jurkat 細胞を懸濁した生理食塩水にプラズマを照射した場合 (B)、および Jurkat 細胞を懸濁した 0.5% DMSO を含む生理食塩水にプラズマ照射した場合 (C) を示している。陰性対照 (A) の細胞生存率が培養時間に対してほぼ変化していないのに対して、プラズマ照射した (B) と (C) では、細胞生存率が培養時間とともに減少した。これはプラズマ照射により Jurkat 細胞が不活化したためと考えられる。一方、0.5% DMSO を含まない (B) と 0.5% DMSO を含む生理食塩水 (C) に暴露した場合の細胞生存率を比較すると、両者に違いが認められなかった。なお、生理食塩水にプラズマ照射することで OH ラジカルが生成され、0.5% の DMSO を添加することで OH ラジカルが捕捉されることを別の実験により確認している。従って、DMSO により OH ラジカルを捕捉していない (B) と捕捉した (C) の間で細胞生存率に違いが認められない結果は、OH ラジカルが Jurkat 細胞の不活化に影響しないことを示唆している。

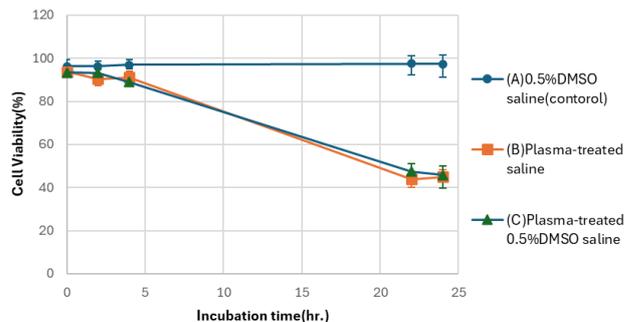


図 2 : Jurkat 細胞の生存率の時間変化

Fig. 2 Cell viability with respect to incubation time

文 献

(1) E. Oyama *et al.*, 74th Annual Gaseous Electronics Conference, Online, Oct. 2021.

大気圧非平衡プラズマを用いた 有機物分解とその反応機構の解明

橋本 夢花*, 前田 優希, 高橋 克幸, 高木 浩一 (岩手大学)
呉 準席 (大阪公立大学)

Decomposition of organic compounds using atmospheric pressure non-equilibrium plasma and
elucidation of the reaction mechanism

Yumeka Hashimoto*, Yuki Maeda, Katsuyuki Takahashi, Koichi Takaki, (Iwate University)
Jun-Seok Oh, (Osaka Metropolitan University)

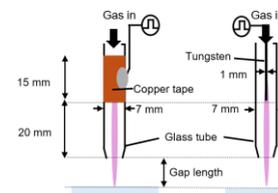
1. 序論

大気圧低温プラズマジェットは、大気中において反応性の高い荷電粒子および中性のラジカルを常温で生成でき、殺菌、創傷治療、材料表面処理など、産業・医療分野への応用が期待されている。従来は、交流電源を用いた研究が中心であったが、近年はナノ秒からマイクロ秒の高電圧パルスにより高密度電子およびラジカルを生成するプラズマジェットが注目されており、放電の均一性やエネルギー利用率における優位性が報告されている。一方、パルス電源 He プラズマジェットにおける液中有機化合物分解と放電様相の関係は未解明であり、活性種の液中輸送効率の把握は、最適化および実用化に不可欠である。

本研究では、液相中への活性種輸送効率を明らかにすることを目的とし、誘電体バリアを介したプラズマジェットと、線電極から直接放電を生じるプラズマジェットをそれぞれ液面に照射した場合の有機化合物分解特性を比較した。放電様相は ICCD カメラにより観察した。有機化合物分解実験では、ギャップ長および処理時間を変化させ、プラズマ処理性能への影響を評価した。電源には、小型軽量な誘導性エネルギー蓄積方式 (Inductive Energy Storage: IES) パルス電源を用いた。

2. 実験装置および実験方法

図 1 に、それぞれのプラズマジェットノズル先端の拡大図を示す。バリア放電ありプラズマジェットの電極には、外径 6 mm のガラス管を用い、ノズル先端から上方 20 mm の位置に幅 15 mm の銅テープを巻き、高電圧パルスを印加した。バリア放電なしプラズマジェットの電極には、直径 1 mm のタングステン線を外径 7 mm のガラス管内に挿入し、ノズル先端から上方 20 mm まで配置した。高電圧パルスはタングステン線に印加した。ガスは、ガラス管内にヘリウムを流量 2 L/min で注入した。ギャップ長は、ノズル先端から液面までの距離として定義した。電源には、IES 方式高電圧



(a) バリア放電あり (b) バリア放電なし
図 1 プラズマジェット先端の拡大図

(a)DBD (b) Non-DBD
Fig.1. Schematic diagram of an enlarged view of the plasma jet nozzle.

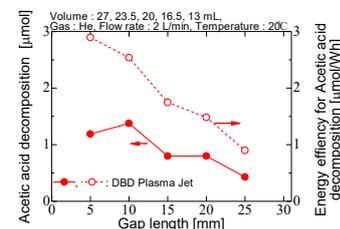


図 2 酢酸分解率と酢酸分解エネルギー効率の
照射距離依存性

Fig.2. The Acetic acid decomposition rate and energy efficiency as a function of gap length.

パルス電源を用いた。試料には、酢酸 (富士フィルム和光純薬, 017-00256) を用いた。

3. 実験結果

図 2 に、0.2 mM 酢酸溶液にプラズマを照射した場合のギャップ長による分解率および分解エネルギー効率の変化を示す。バリア放電ありプラズマジェットでは、ギャップ長の増加とともに分解エネルギー効率が単調に低下した。これは、ICCD 観察より、ギャップ長が増加するとプラズマブルーム (プラズマバレット) が液面に到達して接触している時間割合が短くなることに起因すると考えられる。

4. まとめ

ICCD による放電様相観察および有機化合物分解実験の結果から、ギャップ長の違いが分解特性に大きく影響することがわかった。

CBPTW の OH ラジカル生成量評価のための テレフタル酸二ナトリウム濃度の調査

江口 佳吾*, 今田 愛子, 村上 健人, 岩橋 充樹, 岡 好浩 (兵庫県立大学)

Investigation of Disodium Terephthalate Concentration for Evaluation of OH Radical Generation in CBPTW
Keigo Eguchi, Aiko Imada, Kento Murakami, Mitsuki Iwahashi, Yoshihiro Oka (University of Hyogo)

1. はじめに

キャビテーションプラズマ(CBP: Cavitation bubble plasma)法は効率よく液中に低温プラズマを生成することができる手法である⁽¹⁾。CBP 法によって処理された水(CBPTW: CBP treated water)には、 H_2O_2 および放電電極の消耗に由来する金属成分がナノ粒子またはイオンの状態で含まれており、これらの共存によって活性酸素種が生成されると考えられる⁽²⁾。これまでに、テレフタル酸二ナトリウム(NaTA)を用いた化学プローブ法により、CBPTW において持続的な OH ラジカルの生成が確認されている⁽²⁾。しかしながら、CBPTW への影響を考慮して NaTA 濃度が最適化されていない。

本報告では、CBPTW の OH ラジカル生成量評価のための NaTA 濃度を調査した結果について述べる。

2. 実験方法

CBPTW はこれまでの報告と同様の CBP 装置を用いて作製した⁽¹⁾。ローターを 7200 rpm で回転させることにより、ローター部で発生したキャビテーション気泡を含むイオン交換水を循環させ、水温を 30 °C に安定させた。プラズマ反応室内に ϕ 2.0 mm の W 電極 2 本をギャップ長 1.0 mm で対向させた。CBP 処理時間は 5 min とした。CBPTW 作製から 2 min 後に濃度 5 - 500 mM の NaTA 水溶液 20 g を CBPTW 180 g に添加し、NaTA 濃度 $C_{NaTA} = 0.5 - 50$ mM の試料水を作製した。NaTA が CBPTW 中で生成された OH ラジカルを捕捉して生成された 2-ヒドロキシテレフタル酸(HTA)の蛍光を蛍光分光光度計 (RF-6000、島津製作所)を用いて、NaTA 水溶液添加後経過時間 $t_e = 3, 8, 24$ h のとき測定した。励起波長を 315 nm とし、425 nm の蛍光ピーク強度を取得した。なお、測定 2 min 前に NaOH を用いて試料水の pH を 6 ~ 8 に調整した。

3. 実験結果

図 1 に各経過時間における NaTA 濃度と蛍光ピーク強度の関係を示す。 $t_e = 3$ h における蛍光ピーク強度は $C_{NaTA} = 0.5$ mM のとき 1500 であり、傾きが緩やかになりながら増加し、 $C_{NaTA} = 50$ mM のとき 4500 である。 $t_e = 8, 24$ h における各

NaTA 濃度の蛍光ピーク強度は $t_e = 3$ h に比べて、それぞれ約 2, 3 倍であり、持続的に OH ラジカルが生成されていることがわかる。NaTA 濃度増加に伴う蛍光ピーク強度増加量の減少は、OH ラジカル生成量に対して NaTA 量が十分存在している、または、NaTA 水溶液添加によって OH ラジカル生成量が低下していることが考えられる。CBPTW の pH は 3.6、NaTA 水溶液は約 6 であるため、混合比 9 : 1 の試料水の pH は理論上 3.7 である。しかしながら、試料水の pH は、 $C_{NaTA} = 0.5$ mM のとき 4.6 であり、NaTA 濃度増加に伴い傾きが緩やかになりながら増加し $C_{NaTA} = 50$ mM のとき 6.2 に達する。このことから、NaTA 添加によって CBPTW の OH ラジカル生成反応が変化している可能性がある。

当日は NaTA 水溶液の pH 調整により試料水の pH を一定にしたときの結果についても合わせて議論する。

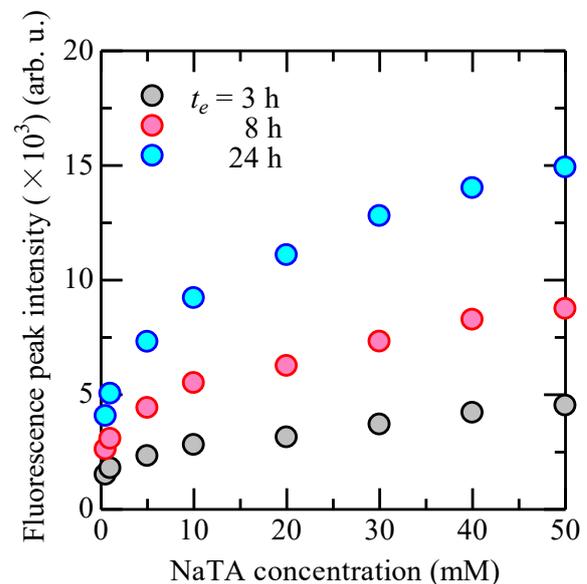


図 1 各経過時間における NaTA 濃度と蛍光ピーク強度の関係
Fig.1. Fluorescence peak intensity as a function of NaTA concentration at different elapsed times.

文献

- (1) Y. Oka, Japanese Journal of Multiphase Flow, 33, 374 (2019).
(2) K. Kawano and Y. Oka, Liquids, 5, 26 (2025).

球雷放電による基材の濡れ性改善処理特性

金子 響*, 前山 光明, 稲田 優貴 (埼玉大学)

Treatment characteristics for improving wettability of substrates using ball lightning discharge
Hibiki Kaneko, Mitsuaki Maeyama, Yuki Inada (Saitama University)

1. まえがき

球雷放電は、大気圧放電の一種で、他の放電と比較して大体的に広い表面積を持ち、高い酸化ポテンシャルを持つOHラジカルを高密度で生成できる⁽¹⁾ことから、大面積の基材への高速な濡れ性改善処理を持つことが期待される⁽²⁾。

我々は、球雷放電処理の高効率化並びに基材へ損傷のない範囲での効果の最大化を実現する手法の確立を目的とし、放電条件(放電時間、回数、極性、高さ)による効果の違い、材料による効果の違いとその表面状態について調査した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置を図1に示す。円筒水槽内の下部リング電極、液面下のロッド電極間で放電が起こり、ロッド電極を起点として、液面上から直径100mm程度の球形となって浮上する。この球雷放電が板状試料の底面と接触するよう、ロッド電極と試料の中心を治具で合わせた。なお、水槽の容量は600mlで液体は水道水を使用し、水位は一定である。

実験では、1放電の放電時間を75ms一定にした上で、試料材料、放電条件(放電時間、回数、極性、高さ)を変更したときの試料の表面特性を比較した。測定には接触角測定(協和界面化学, DMs-401)、一部試料にはFT-IR測定(ブルカー・オプティクス, TENSOR II)を合わせて実施した。

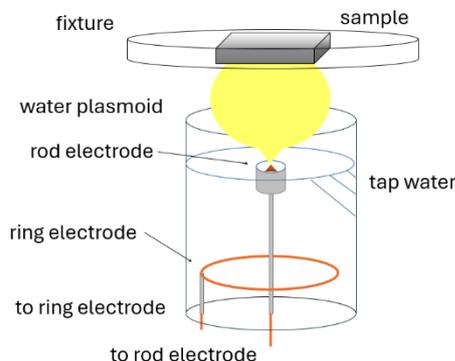


図1 実験装置

Fig.1. The schematics of the ball-lightning discharge

3. 実験結果及び考察

負極性放電(ロッド電極: 負極、リング電極: 正極、電極材

料は共に銅)、印加電圧3.5kV、放電回数25回の下で、30mm四方アクリル板試料の接触高さを30mm、50mm、70mmと変化させたときの接触角を比較した。図2.1、2.2に接触角の測定位置とその比較を示す。球雷処理によって表面の濡れ性が改善したことが分かる。また球雷放電のOHラジカル分布⁽¹⁾と照合すると、生成されたOHラジカルによって表面の分子構造が親水基に置換されていると推測できる。

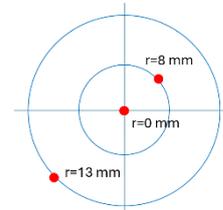


図2.1 接触角測定位置

Fig.2.1. Schematic of contact angle measurement points

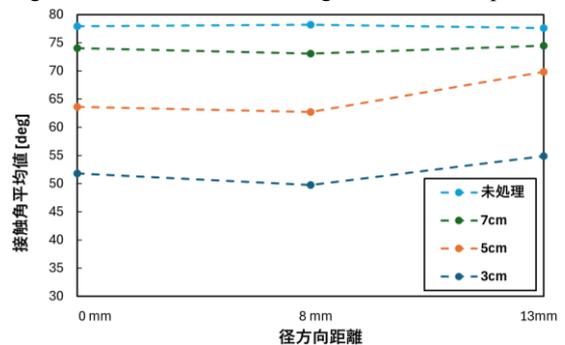


図2.2 接触高さの違いによる接触角変化

Fig.2.2. Dependence of contact angle on exposure height

また、極性による違いについては、負極性の方がより接触角が改善し、径方向の濡れ性改善領域も大きかったが、これは負極性時に生成される球雷の方が大きいことに起因すると推測される。

詳細は講演で述べる。

文献

- (1) Massive, long-time generation of OH(X) in ball lightning discharge
Y. Shibuya, M. Maeyama and Y. Inada. Phys. Plasmas 32, 042110 (2025)
- (2) 齊藤 伸二, “コロナ処理による表面改質”, 1997, 日本ゴム協会誌

放電プラズマと気液スラグ流を組み合わせた ナノ粒子生成システムの検証

安部 楓汰*, 寺島 武杜, 喜屋武 毅 (近畿大学)

Verification of nanoparticles generation system combined a discharge plasma and gas-liquid slug flow
Futa Abe, Taketo Terashima, Tsuyoshi Kyan (Kinki University)

1. はじめに

ナノ粒子の高機能化には粒径の微小・均一化が求められる。主流の化学還元法は環境負荷が高く、代替となる放電プラズマ法も粒径制御や連続処理に課題があった。そこで本研究では、スラグフロー場でのプラズマ還元による、粒径制御に優れた低環境負荷な生成システムの開発を目指す。

既報^[1]で示唆されたスケールアップの可能性に基づき、本稿では拡大流路でのスラグフロー形成および銀を含んだ前駆体の還元処理によるシステム検証結果を報告する。

2. 実験条件

表1にスケールアップしたスラグフローの形成条件を示す。また、製作したシステムの概念図を図1に示す。システムの検証のため、前例のある硝酸銀を用いた銀ナノ粒子生成実験を実施した。

本稿の生成実験では、まずシステムの反応進行の検証を優先するため、比較的小規模な流量条件と1つの放電電極対にて実施した。

3. 検証結果

図2に、スケールアップしたスラグフローの様子を示す。先行研究^[2]から流量を10倍以上にしたスラグフローの形成を確認することができた。

実験から得たサンプルの吸光スペクトルをUV-visによって確認した。放電の様子を図3に、得た吸光スペクトルを図4に示す。青線が供給溶液、赤線が処理後のスペクトルであり、処理後のサンプルでは銀の生成を示唆する410nm

表1 スラグフローの形成条件

Table 1 Formation conditions of Slug Flow

液体	硝酸銀溶液 + デンブ (2m mol/L + 0.2wt%)
気体	アルゴンガス
管の内径	2 mm
(ボンド数 Bo)	($Bo = 0.543$)
流量(気体:液体)	20:20 mL/min
(キャピラリー数 Ca)	($Ca = 0.001344$)
生成実験時の流量(気体:液体)	約 15:1.5 mL/min
(キャピラリー数 Ca)	($Ca = 0.00109$)

付近を境にブロードピークが検出され、放電処理によって溶液中の銀イオンが還元されたことが確認された。

本稿では、スケールアップしたスラグフローの形成と、処理後の銀の生成確認のみを実施したため、より詳細な解析や今後の展開については口頭発表で報告する。

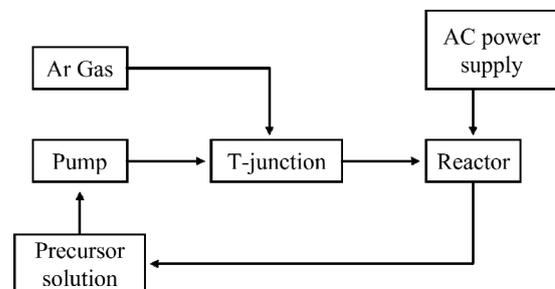


図1 システムの概念図



図2 スケールアップしたスラグフローの様子

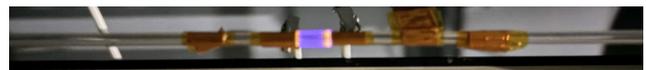


図3 グロー状放電の様子

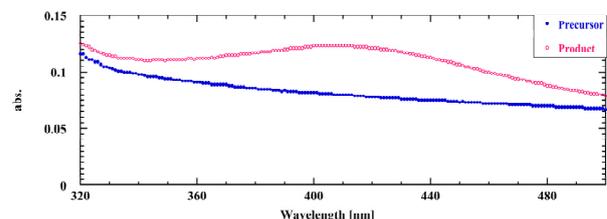


図4 UV-vis による吸光スペクトル

文献

- (1) T型接合部を備えたマイクロリアクタにおけるスラグ流の数値解析および実験的検証, 安部ら, 2025年度第78回電気・情報関係学会, 九州支部連合大会
- (2) Synthesis of silver nanoparticles by atmospheric pressure pulsed discharge plasma in a slug flow system, Motoki Yamada et al., IOP science, DOI 10.7567/1347-4065/aaec1b

球雷放電における電流電圧及び放電の観測

大野 瑞生*, 全 俊豪 (青山学院大学)

Observation of Current, Voltage, and Discharge in Ball Lightning Discharges
Mizuki Ohno, Shungo Zen (Aoyama Gakuin University)

1. 研究背景

現在、工業廃水に含まれる PFAS (ペルフルオロアルキル化合物) は、非常に強い炭素- フッ素 (C- F) 結合を持つため、環境中での残留性が高く、深刻な汚染問題を引き起こしている。従来の処理技術では分解が困難であるため、新たな除去技術の開発が求められている。この難分解性物質の処理法として、高電圧・短時間放電である球雷放電現象に着目した。水中での球雷放電は、強力な酸化力を持つ OH ラジカルなどの高エネルギー活性種を大量に生成する。これにより PFAS の C- F 結合を切断し分解することが期待されている。本研究では、工業廃水の分解への応用が期待されている球雷放電現象の観測及び調査を目的とする。

2. 実験手法

実験に用いた回路を図 1 に示す。直流電圧源を用いて 3.0 から 4.0 kV の間の電圧を印加し、440 μ F のコンデンサに電圧を充電した。その後、MOS FET switch を用いて放電時間を 100 から 160 ms の間で設定し、水中の電極へと放電した。そうして球雷放電が発生した時の電圧及び電流、プラズマの様子を観測し、グラフを作成して比較、検討を行った。

3. 実験結果

図 2 は充電電圧 3.0 kV、放電時間 160 ms のときの放電の様子を示す。また、時間経過に対する電流と電圧の変化の様子のグラフを作成した。0.02 秒経過したタイミングでコンデンサに充電された電圧が急激に低下していることが実験結果から確認できた。さらに、それと同じタイミングで電流値が急激に上昇していることも確認できた。球雷放電の様子と電流及び電圧の値の時間経過ごとの比較を行ったところ、放電開始からおよそ 0.02 秒で球雷放電現象が確認され始めたということも確認できた。また、放電が終了する 100 ms 付近まで電圧値と電流値は維持されているということも確認できる。

これらの実験結果から、球雷放電が発生するまでの時間はおよそ 0.02 秒であり、球雷放電の発生によって多くの電流が急激に流れはじめると考えられる。さらに、放電現象の終了と放電時間の終了が同じタイミングであったことから、放電時間を長くすることで球雷放電の発生時間もさらに長くすることができると考えられる。

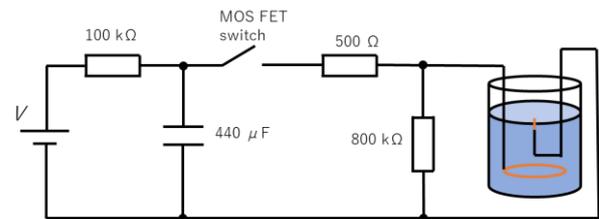


図 1 球雷放電発生装置

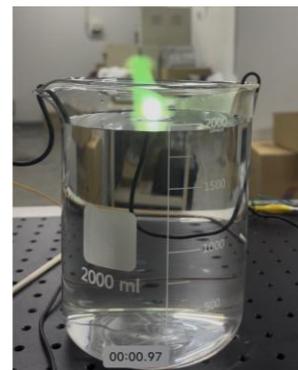


図 2 球雷放電の様子

4. まとめ

今回の実験で、球雷放電が発生する条件として、0.02 秒以上の放電時間が必要であることが確認できた。球雷放電は発生させることが可能であることが確認できたので、今後は放電現象による水中の生成物質の調査を中心に行っていく予定である。

文献

- (1) 加藤 愛梨、桶川 雄生、卿 珊杉、沈 克成、竹内 希 (東京科学大学)「水面上プラズマを用いた PFAS 分解における処理水導電率の影響調査」(2025.6.12 電気学会放電・プラズマ・パルスパワー研究会 EPP-25-072)

プラズマ生成活性種による養殖魚成長促進技術

村上 太一*, 樋野 和司, 斎藤 大樹, 池田 善久, 神野 雅文 (愛媛大学)

Growth Promotion Technology for Aquaculture Fish Using Plasma Generated Reactive Species

Taichi Murakami, Kazushi Hino, Taiju Saito, Yoshihisa Ikeda, Masafumi Jinno (Ehime University)

1. 緒言

世界的な人口増加および食用魚介類の消費量の増加に伴い、養殖による水産物生産の拡大が求められている。海面養殖は近年の気候変動の影響が大きく、陸上養殖が注目されているが、海面養殖に比べてコスト増が課題である。養殖期間の短縮を実現する技術として、我々は、プラズマによって生成された活性種を供給することで、ナイルティラピア (*Oreochromis niloticus*) の成長が促進したことを報告している(1)。しかし、これまでの検討は水槽容量が約 20 L と小さく、大容量水槽を用いた実証評価がされていないことが課題であった。本研究では、1.5t 水槽を用いた場合においても養殖魚の成長促進効果を確認したので、報告する。

2. 実験方法

図 1 に、本研究で用いたプラズマ活性種供給システムの概略図を示す。活性種の生成方法にアーク放電を用いた。放電リアクタ内に空気を導入して放電を行い、生成された活性種はエアストーンを用いて水槽に供給した。供試魚にはキジハタ (*Epinephelus akaara*) の幼魚を使用した。1.5 t 容量の水槽に約 1.0 t の海水を満たし、活性種を供給した水槽 (供給群) と供給を行わない水槽 (対照群) を設けて飼育した。各群の飼育個体数は 30 尾 ($n = 30$) とした。実験開始から 150 日後に至るまで一定期間ごとに体重・全長・標準体長を測定し、成長を評価した。また、給餌は飽和給餌とした。

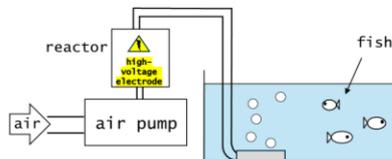


図1 プラズマ生成活性種供給システムの概図
Fig.1. Schematic diagram of the plasma-generated reactive species supply system.

3. 結果と考察

図 2 に、実験開始から 150 日間におけるキジハタ幼魚の体重推移を示す。各水槽の給餌量はほぼ同程度であった。活性種を供給した群では、実験期間を通じて対照群に比べ

て成長が良好であり、実験開始から 120 日目で体重が約 10%高い値を示した。p 値は 0.018 となり、統計的に有意な差が認められた。全長および標準体長においても同様の傾向が見られ、プラズマ生成活性種の供給が魚の全体的な成長促進に寄与していることが示唆された。一方で、150 日目において、p 値は 0.14 となった。理由として、120 日以降に頻発した装置の動作不良が影響を与えていると考えられる。リアクタに用いた電極の摩耗により、放電が発生しやすい位置が時間的に変動し、放電条件を一定に保つことが困難となった。その結果、放電が不安定化したと考えられる。

以上の結果より、装置の安定性に課題が残るものの、プラズマによって生成された活性種を水槽に供給することは、大規模水槽においても成長率向上に有効であることを示している。活性種供給量の最適化を行うことで、さらなる成長促進効果の向上が期待される。

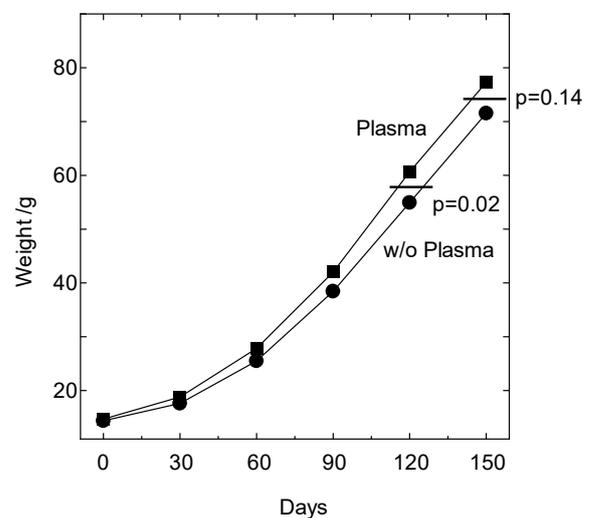


図2 プラズマ生成活性種の供給の有無によるキジハタの体重の経時変化 ($n = 30$)
Fig.2. Time-course change in body weight of juvenile red-spotted grouper with and without plasma-generated reactive species supply ($n = 30$).

文献

(1) Y. Ikeda et al., Free Radical Research, vol. 57, no. 1, pp.1-9 (2023).

プラズマ照射ミスト中の OH ラジカルが大腸菌 の不活化に及ぼす影響

寺邊 心菜*, 白井 昭博, 寺西 研二 (徳島大学)

Effect of OH Radical in Plasma Treated Mist on the Inactivation of *Escherichia coli*
Kokona Terabe, Akihiro Sirai, Kenji Teranishi (Tokushima University)

1. はじめに

大気圧非熱平衡プラズマを用いた殺菌技術の研究が盛んに行われている^{(1), (2)}。筆者らは、生理食塩水にプラズマを照射すると同時にミスト化する技術(プラズマ照射ミスト)を考案し、同ミスト中に含まれる短寿命活性種が大腸菌(*Escherichia coli*)の不活化に寄与する結果⁽³⁾や、同ミスト中に OH ラジカルが生成されていることを確認⁽⁴⁾している。本研究では、プラズマ照射ミスト中の OH ラジカルが大腸菌の不活化に及ぼす影響について調査することを目的とし、DMSO を用いたプラズマ照射ミスト中の OH ラジカル捕捉実験と DMSO の大腸菌生菌数への影響について調査した。

2. 実験方法と装置

本研究で使用したプラズマ照射ミスト装置は、既報⁽³⁾の装置と同じものである。プラズマ原料ガスにはアルゴンを使用し、13 L/min のガス流量で装置に供給した。ミスト原料水は塩化ナトリウム濃度 0.85% の生理食塩水である。

OH ラジカルの捕捉剤には、ジメチルスルホキシド(DMSO)を使用した。細胞培養用ディッシュに濃度 0, 0.5, 1, 2% の DMSO と 20 mM のテレフタル酸(TA)二ナトリウム水溶液をそれぞれ 30 μ L と 300 μ L 滴下し、ここにプラズマ照射ミストを噴霧した。TA により OH ラジカルが捕捉されると 2-ヒドロキシテレフタル酸 (HTA) が生成され、これに 310 nm の励起光を照射した際に放射される 425 nm の蛍光強度は OH ラジカル濃度と対応するといわれている⁽⁵⁾。本実験では、プラズマ照射ミスト噴霧後の溶液を石英セルに移し、蛍光分光光度計を用いて 310 nm の励起光を照射した際に HTA から放射される蛍光スペクトルを測定した。

DMSO の大腸菌生菌数への影響の調査では、濁度 $OD_{600}=0.1$ に調整した菌液 30 μ L を、生理食塩水(コントロール)と 2% DMSO 入り生理食塩水に添加し、3 分間暴露した。暴露終了後、段階希釈した菌液を標準寒天培地に塗抹し、37°C で 24 時間培養した後、そのコロニー数から大腸菌の生菌数を評価した。

3. 実験結果と考察

<3・1> DMSO による OH ラジカルの捕捉実験 図 1 は蛍光分光光度計で測定した HTA からの 425 nm の蛍光強度と

DMSO の濃度の関係を示している。同図より、添加する DMSO の濃度が増加すると蛍光強度は低下し、濃度 0.5, 1, 2% の DMSO を添加することで、DMSO 添加無し(0%) の場合と比較して、それぞれ 50.8%, 68.8%, 81.3% の OH ラジカルが捕捉されることが分かった。これらの結果から、本実験における OH ラジカルの捕捉には、濃度 2% の DMSO を用いることとした。

<3・2> DMSO の大腸菌生菌数への影響 DMSO 添加なしと 2% DMSO を添加した生理食塩水に 3 分間暴露した際の大腸菌の生菌数は、それぞれ $8.7 \pm 0.53 \times 10^5$ CFU/mL と $9.1 \pm 0.87 \times 10^5$ CFU/mL が得られた(表 1)。これらの結果について、*t* 検定を実施したところ、両者に有意差は認められなかった。このことから、本実験において濃度 2% の DMSO は大腸菌生菌数にほとんど影響しないと判断し、今後行う予定のプラズマ照射ミスト中の OH ラジカルが大腸菌の不活化に及ぼす影響の調査では、濃度 2% の DMSO を使って OH ラジカルを捕捉する。詳細については講演で述べる。

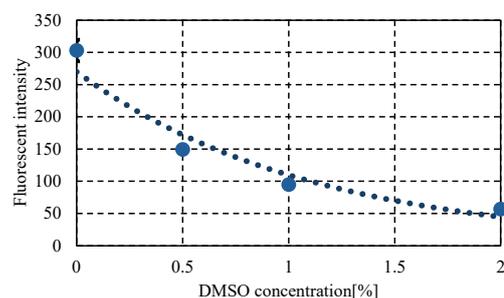


図 1 DMSO の添加濃度と HTA からの蛍光強度の関係
Fig.1. Relationship between added DMSO concentration and fluorescent intensity from HTA

表 1 DMSO の大腸菌生菌数への影響
Table 1. Effect of DMSO on the viable *E. coli*

	DMSO 添加なし	2% DMSO 添加
生菌数 ($\times 10^5$ CFU/mL)	8.7 ± 0.53	9.1 ± 0.87

文 献

- (1) H. Aboubakr et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**, 204001 (2016)
- (2) Xiao Hu et al., *J. Water Process Eng.*, **56**, 104332 (2023)
- (3) 寺西ら: 令和 4 年電気学会基礎・材料・共通部門大会 (2022)
- (4) 前坂ら: 第 34 回日本オゾン協会年次研究講演会講演集, pp. 21-24 (2025)
- (5) F. Tochikubo et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53**, 126201 (2014)

流通式ダイヤフラム放電プラズマによる PFOA 分解特性に及ぼす初期濃度の影響

高橋 知宏*, 卿 珊杉, 竹内 希 (東京科学大学)

Influence of initial concentration on PFOA decomposition by Passing-through Type Diaphragm discharge plasma
Tomohiro Takahashi, Qing Shanshan, Nozomi Takeuchi (Institute of Science Tokyo)

1. はじめに

PFOA (C₇F₁₅COOH) は有機フッ素化合物である PFAS の一種であり、耐熱性や耐薬品性などの優れた物理化学的性質を有しているため、産業分野での用途は多岐にわたる。しかし近年、PFAS の難分解性や高蓄積性、長距離移動性⁽¹⁾という性質があるために国内で規制やリスク管理に関する取り組みが強化されている。我々は、外部からのガス供給が不要であり、小規模な設備での処理と水中に遊離したフッ素イオンの回収が可能な流通式ダイヤフラム放電プラズマを用いて、PFOA の分解を行っている⁽²⁾。流通式ダイヤフラム放電プラズマは、セラミックの微細孔に処理液が通過する構造を有しており、微細孔に電流を集中させることで処理液を蒸発させ、生成される気泡の内部でプラズマを生成するという仕組みである。本研究では、PFOA の初期濃度が 5 mg/L の時の分解実験を行い、従来の PFOA の初期濃度 50 mg/L の時との比較を実施した。

2. 実験手法

<2・1>実験回路 直流安定化電源(菊水電子工業, PWR801MH)とインバータ(OBOLAB, GPINV-M2)を用いて高電圧矩形波を発生させ、昇圧トランス(ユニオン電機, HFT-1K-303.3K-F20K, 昇圧比 1:11)で昇圧して、流通式ダイヤフラム放電プラズマリアクタに印加した。

<2・2>処理液 処理液として、濃度 5 mg/L と濃度 50 mg/L の PFOA 溶液を作成し、硫酸ナトリウムを添加して導電率を 20 mS/cm に調整した。

<2・3>流通式ダイヤフラム放電リアクタ 本研究で用いたダイヤフラム放電リアクタは内径 26 mm の金属管と微細孔の孔径 1 mm, 孔長 10 mm のセラミック板, 内径 26 mm のアクリル管で構成される。処理液は金属管からセラミック板の微細孔を通過し、ガラス管に流れ込む構造となっており、ワンパス式での処理を行った。処理液の輸送には送液ポンプ(FLOM, KP-22-33P)を用いた。

<2・4>実験条件と評価方法 印加電圧の周波数を 20 kHz, Duty 比を 50%として、処理液の流量を 5~20 mL/min で変化させ、直流電源電圧を 60~120 V で変化させて、300 s の処理を行った。実験の評価には分解前の処理液に含まれ

るフッ素原子量に対する分解後の処理液中に含まれるフッ素イオン量の割合である脱フッ素分解率と、処理液中に含まれるフッ素イオン量を消費エネルギーで除して得られる脱フッ素効率を用いた。

3. 実験結果

<3・1>実験結果 PFOA の初期濃度 5 mg/L で、直流電源電圧と流量を変化させて分解した結果を図 1 に示す。点線が効率で実線が分解率の結果である。効率は、直流電源電圧が 100 V の時には流量が 10 mL/min の時に最大となった。また、直流電源電圧が 120 V, 流量が 10 mL/min の条件の時に最も良くなった。分解率に関しては直流電源電圧を高く、流量を小さくするほど向上した。

<3・2>考察 初期濃度 50 mg/L の先行研究⁽²⁾と比較すると、分解率に関しては、ほとんど同じ値であったが、効率に関しては約 1/10 の結果となった。このことから流通式ダイヤフラム放電プラズマは、初期濃度によって分解率は変わらないが、効率は濃度に依存することが分かった。したがって、初期濃度を高くした方が、効率は良くなり、多くの PFOA を分解できることが分かった。

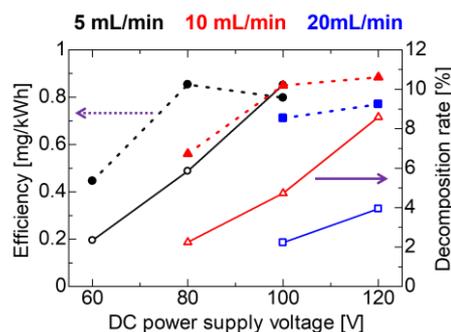


図1 直流電源電圧に対する効率, 分解率の変化
Fig.1. Dependence of efficiency and decomposition rate on DC power supply voltage

文 献

(1) J.P. Giesy and K. Kannan : , Environ. Sci. Technol., Vol.35, No.7, pp.1339-1342(2001)

(2)高橋知宏・卿珊杉・竹内希: 電気学会研究会資料.EPP=The papers of technical meeting, pp.75-78, (2025)

液面上パルス放電プラズマによる カドミウム(II)テトラフェニルポルフィリンの脱金属化

山田 雅拓*, 関川 辰哉, 葛原 大軌, 高橋 克幸, 高木 浩一 (岩手大学)

Demetallation of Cadmium (II) Tetraphenylporphyrin by Pulsed Discharge Plasma over Liquid Surface
Masahiro Yamada*, Tatsuya Sekikawa, Daiki Kuzuhara, Katsuyuki Takahashi, Koichi Takaki (Iwate University)

1. 序論

有機金属錯体は、配位構造の安定性を考慮して設計され、触媒反応や機能性材料に広く利用されている。一方で、これらの錯体が強電場や高反応性化学種を伴う反応環境にさらされた際の構造変化や金属イオン放出挙動については、十分には解明されていない。特に、液相中に存在する有機金属錯体に対するプラズマの影響に関する研究例は限られており、錯体の配位構造や金属-配位子結合がどのように変化するかについては未解明である。

近年、パルス放電プラズマは気液界面においてヒドロキシラジカルをはじめとする高反応性活性種を生成し、溶液中の化学種に対して従来とは異なる反応経路を形成することが報告されている。しかし、これらの活性種が有機金属錯体に作用した場合の反応過程や金属放出機構については検討がほとんど行われていない。本研究では、化学構造および電子状態が明確なカドミウム(II)テトラフェニルポルフィリン(cadmium(II) tetraphenylporphyrin, CdTPP)をモデル系として用い、パルス放電プラズマが錯体構造に与える影響および金属イオン放出挙動を基礎的に評価することを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

図1に、本研究で用いた液面放電リアクタの概略図を示す。高電圧側電極にはタングステン線を用い、接地側にはガラス製バイアル (Synthware™) を誘電体バリアとして配置した。さらに、誘電体バリア外側にはSUS316プレートを接地電極として配置し、タングステン線先端と誘電体バリア表面との間に誘電体バリア放電が形成される構造とした。

高圧電源には磁気パルス圧縮型電源(末松電子製作所, MPC-3000SP)を使用した。印加電圧は20 kV, 周波数5 kHzとし、Arガスを50 mL/minで供給した。

試料はCdTPPを蒸留水または希硫酸に分散させ、容量100 μ Lの溶液をリアクタに導入した。比較として液体を用いないガス放電条件も設定した。放電処理後、トルエン20 mLに抽出し、50倍希釈してUV-Vis吸収スペクトル(300-700 nm)を測定した。得られたスペクトルをCdTPPおよびフリーベーステトラフェニルポルフィリン(free-base tetraphenylporphyrin, H₂TPP)の標準スペクトルと比較し、錯体分解挙動を解析した。

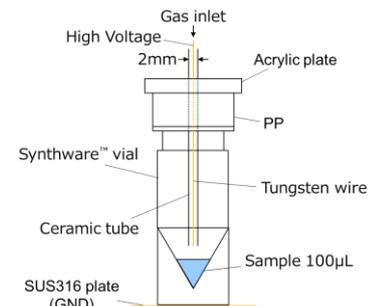


図1 リアクタ概略図
Fig.1. Schematic diagram of the reactor

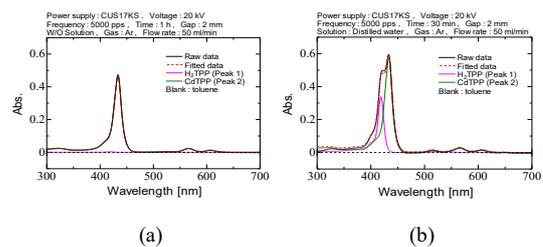


図2 放電処理後のCdTPPの吸収スペクトルとフィッティング結果 (a) 液体なし (b) 蒸留水
Fig.2. Absorption spectra of CdTPP after discharge treatments and fitting results (a) Without liquid (b) Distilled water

3. 実験結果

図2に、放電処理後試料の吸収スペクトルおよびCdTPPとH₂TPPの標準スペクトルを用いたフィッティング結果を示す。Raw dataは放電処理後試料の吸収スペクトル、Fitted dataはCdTPPおよびH₂TPPの標準スペクトルを線形加算したフィッティング結果である。図2に示すように、液体なしでの放電処理ではSoret帯に変化はなかったのに対し、蒸留水を用いた液面放電処理ではH₂TPPに由来する吸収成分が出現した。これは、液面放電により生成した活性種がCd-N配位結合に作用し、部分的な脱金属化が進行したと考えられる。

4. まとめ

本研究では、ポルフィリンのカドミウム錯体をモデル物質として、液面放電プラズマによる錯体分解挙動を評価した。液体なしの放電処理では分解が生じず、液面放電処理により脱金属化が進行することがわかった。

液相流通式高周波放電リアクタの 特性と硝酸生成

上屋敷 蒼太*, 高橋 克幸, 高木 浩一 (岩手大学)
玉井 鉄宗 (龍谷大学), 竹内 希 (東京科学大学), 田中 学 (九州大学)

Characteristic of a Liquid Flow Type High-Frequency Discharge Reactor and Nitric Acid Production

Sota Kamiyashiki, Katsuyuki Takahashi, Koichi Takaki (Iwate University)

Tessyu Tamai (Ryukoku University), Nozomi Takeuchi (Institute of Science Tokyo), Manabu Tanaka (Kyusyu University)

1. 序論

ハーバーボッシュ法に代わる代替的な窒素固定技術として、気液界面プラズマを利用した手法が提案されている。従来法と比較して、本手法は常温・大気圧下で反応が進行する点に特徴がある。さらに、高い反応効率が利点である。

本研究では、流通式リアクタを用いた方式について実験的に検討した。電源には交流高圧パルス電源を用い、高速度カメラによる撮影、電圧電流波形の解析、発光スペクトルの取得により放電特性を評価した。硝酸イオンおよび亜硝酸イオン濃度を測定し、高効率な硝酸生成条件を検討した。

2. 実験方法

図1に、流通式リアクタの模式図と実際の放電の様子を示す。ポンプおよび流量計を用いて、リアクタ上部から針状電極方向に液体試料を任意の流量で流入可能な構造である。電極の材質はモリブデンであり、ギャップ長を1mmとした。リアクタ内部のガスには空気を用いた。試料には、水道水を用いた。溶液量は10Lとし、流量は3L/minとした。

電源には、交流高圧パルス電源(栗田製作所, MPP-HV03)を用いた。印加電圧は7kVとし、放電周波数を25~220kHzの範囲で変化させた。

電圧電流波形の取得にはオシロスコープ(Tektronix, TDS2024)、高電圧プローブ(Tektronix, P6015A)、カレントトランス(Bergoz, CT-D1.0B)を用いた。放電様相の観測には高速度ビデオカメラ(nac, ACS-1)を用いた。オシロスコープと接続し、出力電流の立ち上がりトリガーとした。焦点距離50mm, フレームレート50,000fpsとした。プラズマ長は、撮影映像からピクセル数を測定し、1mmを70.89pixelとして換算し算出した。

3. 実験結果

図2に、典型的な放電時の各パラメータの時間変化を示す。図2(a)より、周期2~4msのバースト状の電圧電流波形が観測された。図2(b)より、時間経過に伴い、バーストの電圧値とともに、プラズマ長が周期的に増減した。これは、プラズマは電極の最短距離で点弧するが、プラズマの進展に

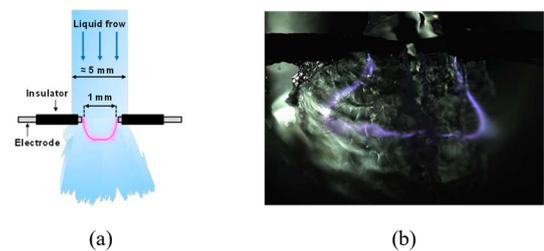


図1 流通式リアクタ
(a) リアクタ模式図, (b) 放電の様子
Fig.1. Flow-through reactor
(a) Schematic of the reactor, (b) Discharge image

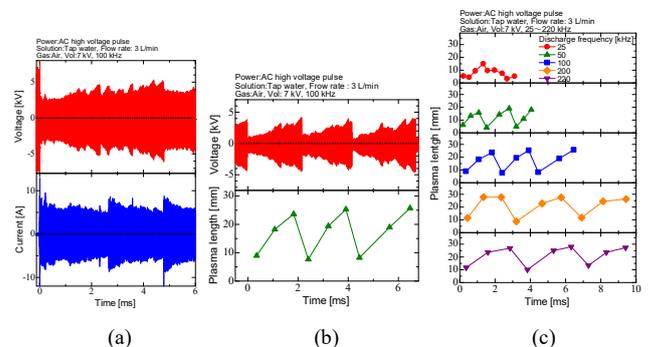


図2 典型的な放電時における各パラメータの時間変化
(a) 電圧電流波形, (b) 電圧およびプラズマ長
(c) 周波数によるプラズマ長の時間分布変化
Fig.2. Typical temporal evolution of discharge parameters
(a) Voltage and current waveforms, (b) Voltage and plasma length
(c) Effect of frequency on the temporal distribution of plasma length

ともないインピーダンスが増加し、その維持が困難となった時点で再点弧するためであると考えられる。図2(c)より、放電周波数の増加によりプラズマ長の最大値が増加した。これは、周波数の増加により放電によるガス加熱が顕著となることが要因であると考えられる。

4. まとめ

高速度カメラを用いた放電観測の結果から、電圧電流波形とプラズマ長には強い相関があることがわかった。さらに、放電は進展および再点弧を周期的に繰り返す。

流通式ダイヤフラム放電を用いた PFOA 分解 における孔長の影響

門脇 芽衣*, 卿 珊杉, 高橋 知宏, 竹内 希 (東京科学大学)

Effect of Hole Length on PFOA Decomposition Using Passing-through Type Diaphragm Discharge
Mei Kadowaki, Qing Shanshan, Tomohiro Takahashi, Nozomi Takeuchi (Institute of Science Tokyo)

1. はじめに

代表的な有機フッ素化合物 (PFAS) である PFOA は、炭素・フッ素間の強固な結合に由来する高い熱安定性や撥水・撥油性を有している。その優れた特性から、半導体製造に用いられるフォトレジストなどのフッ素系材料の製造過程において、重合助剤や界面活性剤として使用されてきた。しかし、その難分解性と生物蓄積性が危惧されており、現在、国内外で製造制限や排出管理の厳格化が進められている。これに対し本研究では、外部ガス供給を必要とせず、オンサイトでの迅速な処理やフッ素成分の再資源化が期待できる「流通式ダイヤフラム放電」を用いた分解プロセスを提案している。本手法は、セラミック隔壁に設けた微細孔へ大電流を集中させることでジュール熱を発生させ、自己生成した水蒸気気泡内でプラズマを発生する点に特徴がある。本報告では、プラズマの発生場となる微細孔の「孔長」に着目し、孔長が PFOA の分解特性やエネルギー効率に及ぼす影響を検証した。

2. 実験手法

<2・1>実験回路 直流安定化電源 (菊水電子工業, PWR801MH) とインバータ (OBOLAB, GPINV-M2) を用いて高電圧矩形波を発生させ、昇圧トランス (ユニオン電機, HFT-1K-303.3K-F20K, 昇圧比 1:11) で昇圧して、流通式ダイヤフラム放電プラズマリアクタに印加した。

<2・2>処理液 処理液として、濃度 50 mg/L の PFOA 溶液を作成し、硫酸ナトリウムを添加して導電率を 20 mS/cm に調整した。

<2・3>流通式ダイヤフラム放電リアクタ 本研究で用いたダイヤフラム放電リアクタは、内径 26 mm の金属管、孔径 1 mm の微細孔を有するセラミック板、および内径 26 mm のガラス管で構成される。微細孔の孔長は 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm と変化させて実験した。処理液は金属管からセラミック板の微細孔を通過し、ガラス管に流れ込む構造となっており、ワンパス式での処理を行った。処理液の輸送には送液ポンプ (FLOM, KP-22-33P) を用いた。

<2・4>実験条件と評価方法 印加電圧の周波数を 20

kHz, Duty 比を 50% として、処理液の流量を 5 mL/min, 直流電源電圧を 80 V として 300 s の処理を行った。実験の評価には分解前の処理液に含まれるフッ素含有量に対する分解後の処理液に含まれるフッ素イオン量の割合である脱フッ素分解率と、処理液に含まれるフッ素イオン量を消費エネルギーで除して得られる脱フッ素効率を用いた。

3. 実験結果

<3・1>実験結果 孔長 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm と変化させたときの分解効率, 分解率の関係を図 1 に示す。黒線が効率, 赤線が分解率の結果である。効率, 分解率ともに孔長とは負の相関があることがわかった。

<3・2>考察 実験の結果、孔長が短いほど脱フッ素効率および脱フッ素率が向上することが示された。この要因として、微細孔内で発生するジュール熱の影響が考えられる。孔長が短いほど微細孔部の電気抵抗が小さくなり、流れる電流値は増大する。その結果、気泡内でのプラズマ放電がより安定かつ活発に生じるようになり、PFOA の分解量が増加したものと推察される。

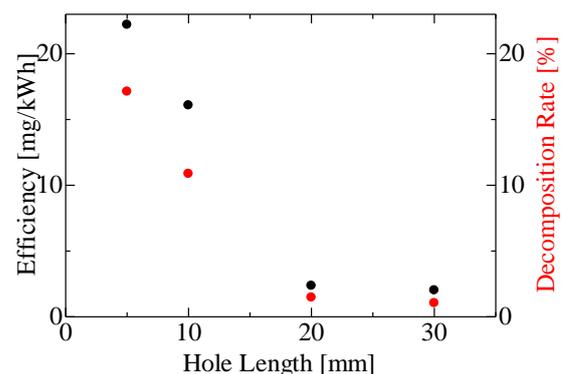


図 1 孔長と脱フッ素効率, 脱フッ素分解率の関係
Fig.1 Relationship between hole length and defluorination Performance

文 献

- (1) J.P. Giesy and K. Kannan : Environ. Sci. Technol., Vol.35, No.7, pp.1339-1342 (2001)

気泡と気液界面プラズマを組み合わせた PFOA 分解における処理水導電率の影響調査

加藤 愛梨*, 卿 珊杉, 沈 克成, 竹内 希 (東京科学大学),
浪平 隆男, 王 斗艶 (熊本大学)

Investigation of the influence of solution conductivity on PFAS decomposition using bubbles and gas-liquid interface plasma

Airi Kato, Qing Shanshan, Kecheng Shen, Nozomi Takeuchi (Institute of Science Tokyo)
Takao Namihira, Douyan Wang (Kumamoto University)

1. はじめに

PFAS (ペルフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物) は強い炭素-フッ素結合を持つ有機フッ素化合物の総称であり、広く使用されている合成化学物質である。耐熱性、耐薬品性などの優れた物理化学的性質を有することから、半導体などの産業分野において多岐にわたる用途で用いられている。一方、PFAS の環境水中への流出、蓄積が問題視されており、水中の PFAS 分解手法への関心が高まっている⁽¹⁾。PFAS は高い熱的および化学的安定性のため、分解が非常に困難であり、従来の水処理手法、例えば促進酸化プロセスは PFAS の分解に効果的ではない。最近では、PFAS のプラズマ分解が最も有望な方法の一つとして浮上しており、多くの研究が PFAS 分解の効率を向上させ、その分解経路を解明している⁽²⁾⁽³⁾。中でも気液界面プラズマと気泡発生を組み合わせた手法は、物質移動と反応性物質の生成を促進し、PFAS 分解効率の向上が期待される。しかし、この気泡導入プラズマシステムに対する溶液特性、特に電気伝導度の影響は依然として不明である。本研究では、PFAS の中でも代表的な界面活性剤である PFOA に着目した。プラズマを用いた処理において、処理水の導電率が分解効率に与える影響を調査した。導電率を変化させた実験により、プラズマ処理の最適条件に関して検討を行った。

2. 実験手法

<2・1>実験回路 PFOA 溶液面にプラズマを発生させるために、タングステン製の高電圧針電極を溶液表面から約 5 mm 上方に設置した。アルゴンガスは散気管を通して、溶液下部から 200 sccm で導入した。

<2・2>実験手順 濃度 5 mg/L, 300 mL (3.47 μ S/cm) の PFOA 溶液に Na₂SO₄ を加えて導電率を 10 μ S/cm, 100 μ S/cm, および 1 mS/cm に調整した。それぞれの処理水を 30 分間プラズマ処理したのち、PFOA の分解によって生成されるフッ素イオン (F⁻) の定量測定を行い、フッ素イオン生成量を消費エネルギーで除して分解効率 [mg/kWh] を

算出した。

3. 実験結果

導電率の増加に伴い放電電流および放電電力が増加した。導電率を変化させたときの F⁻増加量 [mg/L] および効率 [mg/kWh] の変化を図 1 に示す。導電率の増加により、処理水に沿って生成される沿面放電の枝分かれ数が増加したことで、プラズマと処理水との接触面積が拡大し、PFOA の分解が促進された。導電率 10 μ S/cm 以下では、導電率の増加に対して、F⁻の増加は相対的に小さく、分解効率は低下した。一方、導電率が 10 μ S/cm を超えると、F⁻の生成量が増加し電力消費の上昇を上回り、分解効率が向上した。効率の向上は、プラズマ処理水の接触部における電力密度の低下によると考えられる。

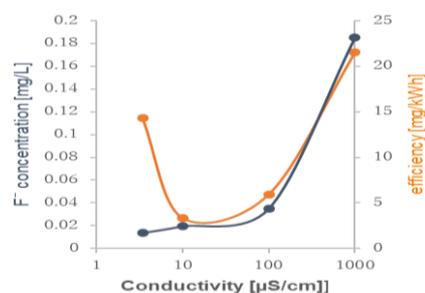


図 1 導電率の変化に対する F⁻増加量および効率の変化
Fig.1. F⁻ amount and efficiency as a function of conductivity

文献

- (1) S. Woodard, J. Berry, and B. Newman : "Ion exchange resin for PFAS removal and pilot test comparison to GAC", Remed., Vol.27, No.3, pp.19-27 (2017)
- (2) R. K. Singh, S. Fernando, S. F. Baygi, N. Multar, S. M. Thagard, and T. M. Holsen : "Breakdown Products from Perfluorinated Alkyl Substances (PFAS) Degradation in a Plasma-Based Water Treatment Process", Environ. Sci. Technol., Vol.53, No.5, pp.2731-2738 (2019)
- (3) S.M. Thagard, G.R. Stratton, F. Dai, C.L. Bellona, T.M. Holsen, D.G. Bohl, et al. : "Plasma-based water treatment: development of a general mechanistic model to estimate the treatability of different types of contaminants", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.50, No.1, 014003 (2016)

楕円形二重陽極構造を用いた 反射三極管型仮想陰極発振器の電子挙動評価

須藤 舜音*, 伊藤 弘昭, 竹崎 太智 (富山大学)

Evaluation of Electron Dynamics in Reflex Triode Virtual Cathode Oscillator
with ellipse-shape double Anode

Suon Sudo, Hiroaki Ito, Taichi Takezaki (University of Toyama)

1. はじめに

仮想陰極発振器は、相対論的大電流電子ビームの空間電荷効果を利用し、GW 級の高出力マイクロ波を発振することが可能な装置である。しかし、低いマイクロ波電力変換効率や発振周波数が広帯域であるという問題を抱えており、性能改善に向けた研究が行われている。

先行研究では、楕円形電極や円形二重陽極構造による特性改善に取り組んできた。本研究では、さらなる出力改善に向けて楕円形二重陽極構造を用いている。今回の発表では、発振周波数特性の評価を行うことにより、電子挙動の推定を行った。さらに、放射角度分布特性により電子挙動推定の妥当性の向上を図った。

2. 動作原理・実験装置

本実験では、反射三極管型仮想陰極発振器を用いた。電極構造は陰極とメッシュ状の陽極から構成される。マルクス発生器により陽極に正の高電圧パルスを印加すると、陰極表面にプラズマが発生する。電極間の高電界によりプラズマから引き出された電子は電極間で加速され、陽極を通過後、ドリフト空間上で空間電荷制限電流を超えると仮想陰極が形成され、後続の電子によって維持される。その結果、陰極-仮想陰極間の電子の往復運動と仮想陰極自身の時間的・空間的な振動によってマイクロ波が発振する。

本装置では、電極形状は楕円形、陰極材料はベルベット、陽極は開口率 64.5% のステンレススチール製メッシュを用いた。陰極-陽極間距離 d_{AK} は 7 mm で固定し、陽極-陽極間距離 d_{AA} は 10–21 mm の間で変化させた。

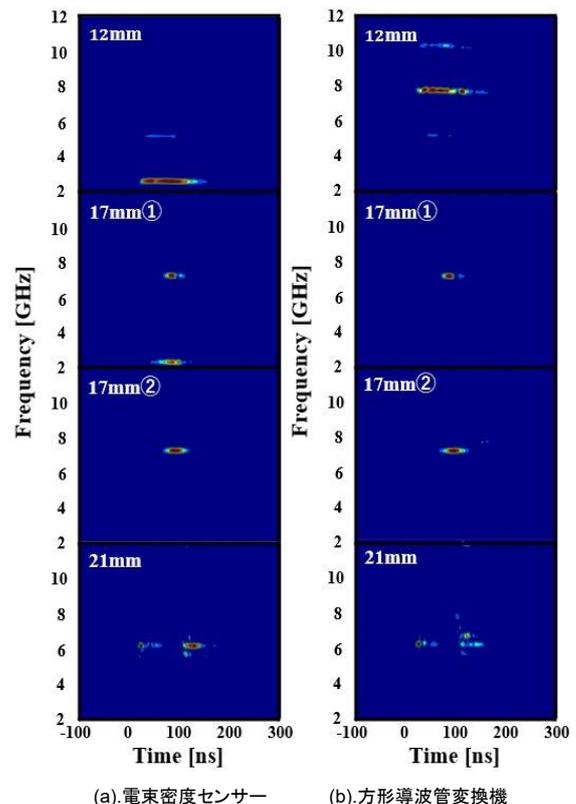
出力マイクロ波の発振周波数は、出力窓から 1200 mm 離れた軸上に設置された電束密度センサーおよび方形導波管変換器(8.2–12.4 GHz)でマイクロ波を受信し、その信号を周波数帯域 12 GHz のオシロスコープで測定し、高速フーリエ変換することで評価した。

放射角度分布特性では、各 d_{AA} 距離における発振周波数特性から主成分の発振周波数を測定可能な方形導波管変換器を使用した。出力窓の軸上から地面に対して水平方向に 0–90 度(各 10 度)、垂直方向に 0–20 度(各 10 度)の計 30 点

で測定を行った。

3. 実験結果

図 1 に d_{AA} を変化させたときのマイクロ波の時間周波数解析結果の一部を示す。図 1 (a), (b)はそれぞれ同一ショットにおける電束密度センサーおよび方形導波管変換器の結果である。 $d_{AA} = 17$ mm においては、ショット依存によって異なる特性が測定されたため、①、②と区別した。出力マイクロ波の発振周波数が、 $d_{AA} = 10–16$ mm では 2 GHz 帯、 $d_{AA} = 18–21$ mm では 7 GHz 帯を主成分とする特性が確認された。これらの発振周波数特性の結果と理論式を用いて、楕円形二重陽極構造における電子挙動の推定を行った。詳細な結果と推定方法については発表にて報告する。



(a).電束密度センサー (b).方形導波管変換機
図 1 発振周波数特性
(a).D-field Sensor (b).Rectangular Waveguide Antenna
Fig.1. Frequency Characteristics

プラズマフォーカス装置におけるプラズマシート 進展速度とプラズマ柱形成との関係

須藤 雛子*, 勝山 智哉, 伊藤 弘昭, 竹崎 太智 (富山大学)

Relationship between Plasma Sheet Propagation Velocity and
Plasma Column Formation in Plasma Focus Devices

Hinako Suto, Tomoya Katsuyama, Hiroaki Ito, Taichi Takezaki (University of Toyama)

1. はじめに

プラズマフォーカスはコンデンサバンクと電極から構成され、構造が単純かつ容易に高温・高密度のプラズマを生成することが可能な装置である。プラズマの自己収縮によってプラズマから高エネルギーのイオンビーム、中性子線、X線などが放出され、これらの特性は作動ガス圧や陽極形状などによって変化する。これまでイオンビームの応用を目指して研究を行っているが、イオンビームのエネルギーは充電電圧よりも非常に大きいことが示されており、イオンの加速機構については詳細に解明されてはいない。一方、イオンビーム発生に強い相関のあるピンチプラズマに関しても、ガス圧や陽極形状の影響を受けることが観測されている。

プラズマフォーカスのピンチプラズマ生成メカニズムにおいて、プラズマシートが生成され、進展してピンチするまでの時間やプラズマシートを流れる放電電流にガス圧依存性がある点を考えると、プラズマシート特性を測定することは重要である。本発表では、作動ガスや陽極形状を変化させて、プラズマシートの進展速度がピンチプラズマ柱に及ぼす影響について測定・評価を行ったので、その結果について報告する。

2. 動作原理

本装置は同軸の陽極と陰極、及び絶縁物からなる。真空状態の電極間にイオン源用のガスを充填した後、高電圧パルスを加えると絶縁物表面に沿って放電が発生し、プラズマシートが生成される。このプラズマシートを通り、陽極から陰極に流れる電流 I と自己生成磁場 B とのローレンツ力によりプラズマシートは陽極先端へと加速される。加速されたプラズマシートが陽極先端に到達すると、陽極表面に沿って半径方向に進展して電極中心へと収縮する。これにより、高温・高密度のプラズマ柱が形成され自己ピンチが起きる。その後、プラズマ柱が不安定性により崩壊することでイオンビームや中性子線、X線などが放出される。

3. 実験装置

本実験では充電電圧を30 kVに設定し、真空容器内を $6.0 \times$

10^{-3} Pa以下に排気後、水素を封入した。プラズマシートの進展速度は、電極根元から126~240 mmの位置に設置された光ファイバーを經由してプラズマシートの自発光をアバランシェフォトダイオードで計測することでプラズマシートの到達時間差から評価した。また、陽極先端におけるプラズマシート及びプラズマ柱の形状や進展挙動は、YAGレーザーを用いたシャドウグラフ法により観測した。イオンビームについては陽極軸上にバイアスイオンコレクターを設置してイオン電流密度を測定した。

4. 実験結果

電極先端形状がCylindrical Hollow型である陽極電極を用いたときのプラズマシートの進展速度とガス圧との相関関係を図1に示す。また、撮影時間が異なる2枚のシャドウグラフ像の進展距離から陽極先端部の軸方向の進展速度を測定したグラフを図2に示す。図1, 2より、ガス密度が高くなると軸方向の進展速度が減少する傾向がある。ガス圧によるプラズマ柱の直径やピンチについては発表にて報告する。

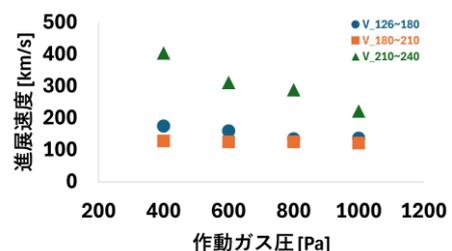


図1 プラズマシート進展速度とガス圧

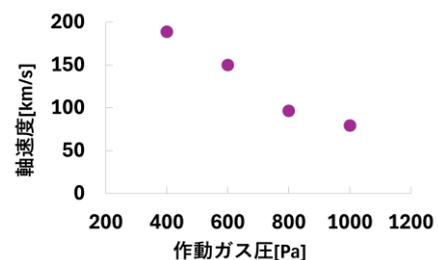


図2 陽極先端付近進展速度とガス圧

パルス高電圧が異なる栽培環境下で タモギタケ収穫量と有用成分に及ぼす影響

野崎 瑛慎*, 三重野 海斗, 小野寺 秀太, 高橋 克幸, 高木 浩一 (岩手大学)
脇 豊樹, 高石 喜久, 小林 晃希 (KTT 貿易株式会社)

Effects of Pulsed High Voltage on the Yield and Beneficial Compounds of
Pleurotus citrinopileatus under Various Cultivation Conditions

Eishin Nozaki*, Kaito Mieno, Shuta Onodera, Katsuyuki Takahashi, Koichi Takaki (Iwate University)
Atsushige Waki, Yoshihisa Takaishi, Koki Kobayashi (KTT Corporation)

1. 序論

タモギタケに含有されるエルゴチオネインは抗酸化機能および光老化抑制作用を有していることから機能性成分として注目されている。これまで、高電圧印加によりタモギタケの子実体発生量およびエルゴチオネイン含有量が増加することが報告されている。一方、栽培環境と高電圧による増収効果の影響は未解明である。

本研究では、異なる環境下におけるパルス高電圧処理がタモギタケの子実体増収およびエルゴチオネイン含有量に及ぼす影響を評価した。栽培条件として、二酸化炭素濃度の高い密閉インキュベータ内で栽培した場合と、遮光シート、加湿器、局所エアコンを用いて栽培した場合で比較した。

2. 実験方法

アクリル板上に菌床を配置し、菌床中央に全長 155 mm の高電圧端針電極を 70 mm 挿入した。高圧端電極を囲むように 4 本の針電極を 30 mm 間隔で配置し、菌床に 100 mm 挿入して針金で連結し接地した。菌床への印加電圧は、ギャップスイッチにより 25 kV に調整した。電源には、高電圧パルス発生装置 (グリーンテクノ, GM100) を使用した。印加条件は、タモギタケ菌床に対して 5 s, 10 s, 30 s, 60 s, Control の 5 条件とした。環境条件の影響を評価するため、密閉インキュベータでの栽培と、遮光シートを用いて通気性を確保した環境で栽培した。栽培温度は 18°C および 17-20°C, 湿度は 90% 以上とした。収穫した子実体は、乾燥・粉碎後、100°C 温浴で抽出し、HPLC で分析した。

3. 実験結果

図 1 に、両栽培環境下における 1 菌床あたり子実体収穫量の平均を示す。エラーバーは標準誤差である。密閉インキュベータ環境では、すべてのパルス高電圧処理群で子実体収穫量が増加し、60 s 印加で最大となった。一方、通気性を確保した環境では、パルス高電圧印加による収穫量の増加はなかった。二酸化炭素濃度が高い環境は子実体形成に不

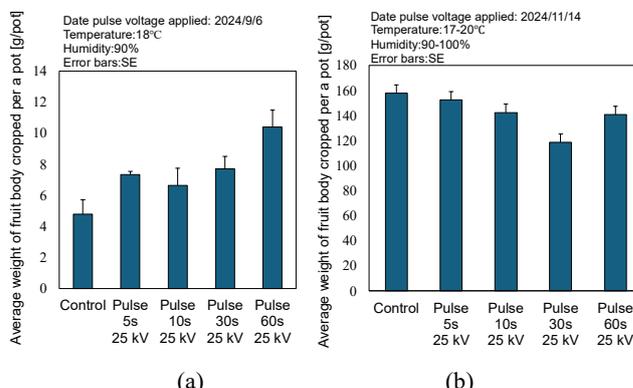


図 1 子実体平均収穫量 (n=5)
(a) 密閉型インキュベータ, (b) 通気性を確保した環境
Fig. 1. The average yield of fruiting bodies
(a) Sealed incubator, (b) Environment with sufficient ventilation

利であると報告されている⁽¹⁾。この環境下において、パルス高電圧処理は子実体収量を向上させる手法となる可能性がある。また、両栽培条件下において、乾燥子実体 1 g あたりのエルゴチオネイン含有量は約 6 mg であり、高電圧印加で増加しなかった

4. まとめ

異なる栽培環境下においてパルス高電圧処理が子実体収量およびエルゴチオネイン含有量に及ぼす影響を評価した。インキュベータ栽培では、Control と比較してすべてのパルス高電圧処理群で子実体収量が増加した。一方、通気性を確保した環境では、収量は増加しなかった。両栽培条件下で、子実体中エルゴチオネイン含有量は増加しなかった。本結果は、高二酸化炭素環境下における子実体形成の改善手法としてパルス高電圧処理が有効である可能性を示す。

参考文献

- (1) N. Ravinder, C. Ravalitha, N. Parijatha, P. Hari Singh, T. and Vardhan, "STRAW MUSHROOM CO₂ AND CO CONDITION CONTROL USING IOT", *J.IJDIM* 4 (2025), pp371-375

中段 H₂ ガス導入を伴うタンデム型変調誘導熱プラズマの Si ナノ粒子生成解析

小林 義隆, 岡野 里桜, 田中 伶郎, 田中 康規, 中野 裕介, 石島 達夫 (金沢大学)
渡邊 周, 中村 圭太郎 (日清製粉グループ本社)

Numerical Analysis of Si Nanoparticle Generation in Tandem-Modulated Induction Thermal Plasma with Mid-Torch H₂ Gas Injection

Noritaka Kobayashi, Rio Okano, Reo Tanaka, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima (Kanazawa University)

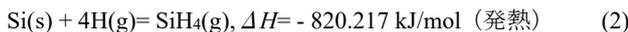
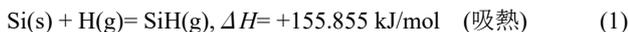
Shu Watanabe, Keitaro Nakamura (Nisshin Seifun Group Inc.)

1. まえがき

筆者らはタンデム型パルス変調誘導熱プラズマ (Tandem-PMITP) と原料粉体の時間制御供給 (TCFF) 法によるナノ粒子生成の実験および数値解析モデル開発を行ってきた⁽¹⁾. これまでに, トーチ最上部からシースガス Ar に H₂ を加えて導入すると原料の蒸発レートが向上し小粒径のナノ材料生成が可能なることを見出した⁽²⁾. しかし, H₂ などの分子性ガスをトーチ最上部から導入した場合熱プラズマ全体が不安定化する課題があった. そこで, トーチ中段から H₂ を導入することで, 上段プラズマへの H₂ 導入を避けられ上段プラズマを Ar で安定化しつつ, 下段コイルプラズマへの H₂ の直接供給が期待できる. 本検討では, Tandem-PMITP へのトーチ中段からの H₂ 導入による熱プラズマ温度場および原料蒸発レートへの影響を数値解析により評価した.

2. 数値解析条件

Tandem-PMITP は, 上段コイルを無変調, 下段コイルを振幅変調(On/Off = 15/15 ms, 213 A_{rms}/107 A_{rms})とし, 時間平均投入電力 10 kW の条件で生成・維持した. Ar シースガスを 90 L/min 供給した. Ar キャリアガス 4 L/min とともに Si 原料粉体を 1.0 g/min/rad で供給した. 原料供給は On-time と同期させ, デューティ比 50% の間歇供給とした. さらに, 中段フランジ(z = 205 mm)から H₂ ガス 0.1 L/min を径中心方向に導入した. 本数値解析モデルでは, 固体原料 Si 粒子の表面における H 原子との次式の化学反応熱を考慮した:

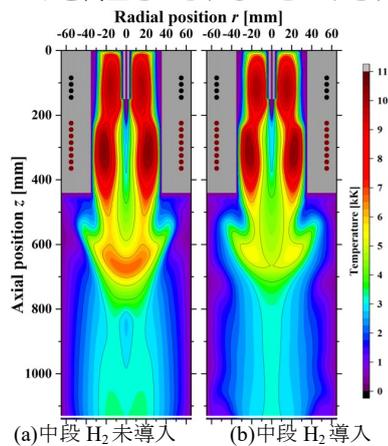


SiH₄(g)生成反応を 1 としたとき, SiH 生成反応に重み x として計算し, 本計算では $x=4$ とした.

3. 数値解析結果

図 1 に, On-time($t=0$ ms)の中段 H₂ ガス供給の有無による 2 次元ガス温度分布を示す. H₂ ガス供給の有無による上段コイル部($z=0-220$ mm)における温度場の変化は見られなかった. 一方, 下段コイル部, およびチャンバ上流部($z=220-800$ mm)において, H₂ ガスの供給時, 熱プラズマの温度が

低下したことがわかる. これは, H₂ 解離のためにエネルギーを消費するためと考えられる. 図 2 に Si 原料の蒸発量の時間変化の図を示す. 熱プラズマの温度が低下したにもかかわらず, 中段 H₂ を導入することで Si 原料の蒸発レートは向上した. これは, Si と H 原子が反応した際に生じる反応熱により原料蒸発が促進されたためと考えられる. 数値解析結果から Tandem-PMITP において, トーチ中段から H₂ ガスを導入することでプラズマの安定性を維持しつつ, 原料の蒸発レートを向上させられることが示された.



(a)中段 H₂ 未導入 (b)中段 H₂ 導入
図 1 中段 H₂ 導入時のガス温度分布
Fig. 1. Gas temperature distribution for with/without H₂ gas injection from middle flange.

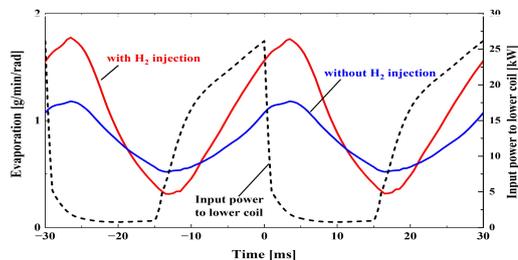


図 2 チャンバ領域における Si 原料の蒸発レートの時間変化
Fig. 2. Temporal variation of evaporation rate of Si feedstock.

文献

- (1) R. Furukawa, et al., *Plasma Chem. & Plasma Process.*, Vol.42, No.3, pp.435-463 (2022)
(2) 長瀬 他, 令和 4 年度電気学会全国大会, 1-094 (2022)

O₂ の電子衝突振動励起損失を考慮した ループ型 Ar/O₂ 誘導熱プラズマの数値モデル

酒井 達貴*・宮本 匠・田中 康規・中野 裕介・石島 達夫(金沢大学)
川浦 廣(株式会社シー・ヴィー・リサーチ)

Loop-Type Ar/O₂ Induction Thermal Plasma Model Incorporating O₂ Vibrational Excitation Losses
Tatsuki Sakai, Takumi Miyamoto, Yasunori Tanaka, Yusuke, Tatsuo Ishijima (Kanazawa University)
Hiroschi Kawaura (CV Research Corporation)

1. まえがき

筆者らは、材料の大面积かつ高速表面改質技術確立のため、ループ型誘導熱プラズマ装置(Loop-ICTP)を開発している⁽¹⁾。これまで、ループ型 Ar/O₂ 誘導熱プラズマの3次元2温度反応非平衡電磁熱流体解析モデルに対して酸素原子の電離・解離を考慮してきた⁽²⁾。本報では、基板の酸化に必要な O 原子生成の解析精度を向上させるため、酸素分子の基底状態から 0.1 eV オーダから生じる振動励起のエネルギー損失を考慮した数値計算結果を報告する。

2. 計算空間、境界条件および反応速度計算

図1にループ型誘導熱プラズマトーチの計算空間および境界条件を示す。内部圧力は 10 Torr, コイル電流は 110 Arms, 周波数は 360 kHz とした。トーチ上部から Ar ガスを 1.0 slpm, トーチ中央部から Ar/O₂ ガスを 0.2/0.2 slpm 導入した。本計算では、各 3 次元位置における重粒子温度, 電子温度, 電子密度, 流れ場および電磁場を解く。Ar の電離反応のほか, 酸素原子, 酸素分子および振動励起酸素分子の分布を, 次の解離反応(1)-(5), 電離反応(6)-(8)および新たに振動励起反応(9)を 2 温度状態における反応速度を考慮して計算した。
(1) O₂ + Ar ↔ O + O + Ar, (2) O₂ + O ↔ O + O + O, (3) O₂ + e ↔ O + O + e, (4) O₂ + Ar⁺ ↔ O + O + Ar⁺, (5) O₂ + O₂ ↔ O + O + O₂, (6) O₂ + e ↔ O₂⁺ + e + e, (7) O₂ + e ↔ O₂⁺ + e + e, (8) O₂ + e ↔ O₂⁻ + O, (9) O₂ + e ↔ O₂^{*}(v) + e。酸素分子の振動励起反応の反応速度係数 $k_{O_2^*(v)}$ は電気学会推奨データセット⁽³⁾から, O₂ の個別の振動衝突断面積の和(図2)を取り, 式(A)から求めた反応速度係数を解析モデルに取り入れた。

$$k_{O_2^*(v)} = \int_0^{\infty} \sigma_{e-O_2}^{\text{total-vib}} \sqrt{\frac{2\epsilon}{m}} F(\epsilon) d\epsilon \quad (A)$$

3. 基板ホルダ付近の電子温度分布の比較

図3にトーチ内の電子温度分布を示す。電子温度は O₂^{*}(v) の考慮後, ガス流入口近傍では 1500 K 程度の低下した。一方, 基板ホルダ上部ではいずれも約 10000 K と変化は見られなかった。O₂ 分子への電子衝突振動励起によるエネルギー損失がガス流入口近傍の低電子温度領域で顕著であり, O₂ 分子はトーチに流入するとすぐに電子との衝突により振動励起され, 高電子温度状態に移流することが示唆された。

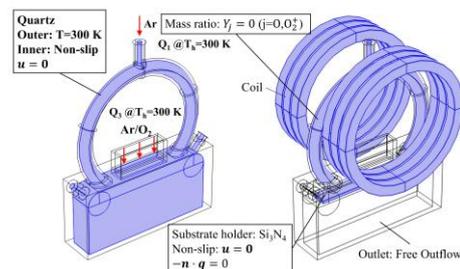


図1 計算空間および境界条件

Fig. 1. Calculation space and boundary condition.

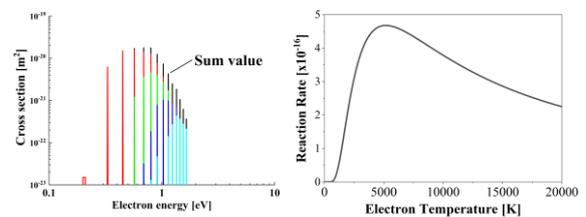


図2 酸素分子の各種振動励起の衝突断面積および算出した酸素分子振動励起の反応速度係数

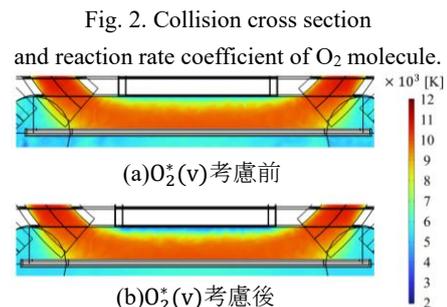


図3 基板ホルダ近傍の電子温度分布

Fig. 3. Electron temperature distribution above substrate holder.

文 献

- (1) T. Tsuchiya et al., PCPP, 38, 599-620, (2018)
- (2) T. Fuwa, Proceeding of ICRP, FT3.00005, Japan, (2022)
- (3) 原子・分子の電子衝突断面積の推奨データセット, NIFS Database, <http://dpc.nifs.ac.jp/DB/IEEJ/>, (2025)

ダイヤモンド膜生成用変調誘導熱プラズマにおける CH₄ ガス間歇供給遅れの影響

松田 航征*, Htet Wanna Oo, 田中 康規, 中野 裕介, 石島 達夫 (金沢大学)

Influence of Intermittent CH₄ Gas Supply Delay Time in Modulation-Induction Thermal Plasmas
Kosei Matsuda, Htet Wanna Oo, Yasunori Tanaka, Yusuke Nakano, Tatsuo Ishijima (Kanazawa University)

1. まえがき

筆者らは、入力電力波形を任意に変調する変調誘導熱プラズマ(MITP)⁽¹⁾を用いた単結晶ダイヤモンド膜成長を検討している。本報告では、Ar/CH₄/H₂ MITP に対し、電力変調制御に加え、原料 CH₄ ガスの間歇供給タイミングを制御した。CH₄ の解離により生成される炭素系および水素系ラジカルの時間的流束制御を目的とし、時分解分光計測から放射強度比の時間変化を評価した。

2. 実験条件

実験装置はプラズマトーチと下流チャンバから構成される。プラズマトーチ内にシースガス Ar を流量 40 slpm で流し、コイルに 450 kHz の高周波電流を流すことで、トーチ内に Ar 熱プラズマを発生させた。Ar 熱プラズマ内にトーチヘッドから中心軸に挿入した水冷導入管を通じて CH₄/H₂ ガスを平均流量 0.08/4 slpm で供給した。コイル電流の変調波形は周期 $T_{\text{cyc}}=15$ ms の鋸波(最低値 110 A_{rms}/最高値 250 A_{rms})とし、プラズマへの平均入力電力は約 11.3 kW とした。水冷管先端から 290 mm 下に単結晶(100)ダイヤモンド基板(2.6 mm 角)を設置した。図 1 に電力および CH₄/H₂ ガス供給タイミング図を示す。H₂ ガスは連続供給、CH₄ ガスの供給/停止時間を 7.5 ms とし、コイル電流変調に対する CH₄ ガス供給遅れ時間 t_d を 0 ms, 3.75 ms, 7.5 ms, 11.25 ms とした。分光計測は基板上 5 mm の位置の発光を対象とし、露光時間 0.5 ms で 1 ms ごとに行った。

3. 実験結果

図 3 に各スペクトルの放射強度の時間変化を示す。これらは連続スペクトル成分を差し引いたものである。同図(a), (b)から H α , H β の放射強度は鋸波状に時間変化した。一方で、C₂, CH の放射強度は $t_d=3.75$ ms では概ね鋸波に対応して放射強度が増大したが、 $t_d=11.25$ ms では顕著に低下する時間帯 ($t = 12$ ms) が現れた。図 3 に H α と C₂ の放射強度比の時間変化を示す。本条件では H α の放射強度は主に励起温度に依存、C₂ の放射強度は主に励起温度と密度に依存する。したがって、両者の放射強度比は温度変化とともに H 原子密度に対する C₂ 分子密度の比の時間変化が反映されている。同図から $t_d=3.75$ ms の条件では $t = 7-13$ ms で放射強度比が高くなったのに対し、 $t_d = 11.25$ ms の条件では $t = 4-8$ ms で高くなった。別途のダイヤモンド成長実験の結果、 $t_d=3.75$ ms ではグラファイト膜が生成された一方、 $t_d=11.25$

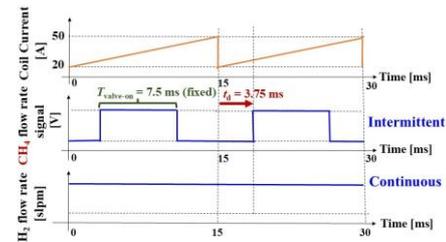
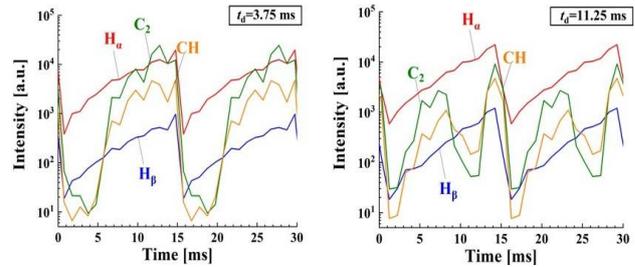


図 1 コイル電流波形と原料ガス供給のタイミングチャート

Fig.1. Timing chart of coil current waveform and feed gas supply



(a) $t_d=3.75$ ms (b) $t_d=11.25$ ms

図 2 各スペクトルの放射強度の時間変化

Fig.2. Time variation of the radiant intensity for each spectrum

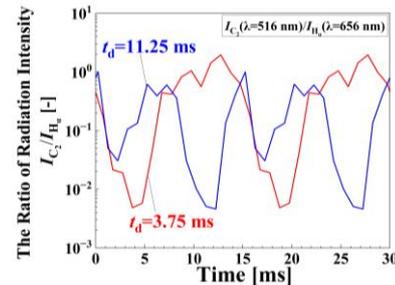


図 3 放射強度比の時間変化

Fig.3. Time variation in radiation intensity ratio

ms ではダイヤモンド成長が確認された⁽²⁾。この結果から、 $t_d=3.75$ ms では水素系ラジカルによるエッチング作用よりも炭素膜の堆積作用が優位となる反応環境が形成されたと考えられる。一方、 $t_d=11.25$ ms では、炭素膜堆積が優位となる時刻とエッチングが優位となる時刻が周期的に現れる反応環境が形成されたと推察される。このような反応環境は、炭素種の供給とエッチングの時間的分離を促進し、その結果、ダイヤモンド成長に有利に作用した可能性がある。

文 献

(1) T. Betsuin, et al., *J Phys. D: Appl. Phys.*, 52, 095601 (2018)

(2) 松田 他, 第 42 回プラズマ・核融合学会年会, 01Bp03 (2025)

ディーゼル排ガス用高電界電気集じん装置 における集じん率と運転時間の関係

長谷川 達海, 伊藤 颯人, 久保田 雅也, 篠崎 広幸, 瑞慶覧 章朝 (神奈川工科大学)
高崎 弘康, 永木 啓太 (ミウラ化学装置)

Relationship between collection efficiency and elapsed time in a high-electric-field type electrostatic precipitator for diesel exhaust gas
Tatsumi Hasegawa, Hayato Ito, Masaya Kubota, Hiroyuki Sinozaki, Akinori Zukeran (Kanagawa Institute of Technology)
Hiroyasu Takasaki, Keita Nagaki (Miura Chemical Equipment)

1. 背景と目的

船舶や工場などからの排ガスには、浮遊粒子状物質(PM)が含まれ、呼吸器系疾患などを引き起こす可能性がある。その対策として、電気集じん装置(Electrostatic Precipitator: ESP)の利用が検討されている。ESPはコロナ放電を用いる方式が一般的だが、放電により電力を消費する。

そこで、ディーゼル排気微粒子が自然帯電していることを利用して、コロナ放電を用いずに集じんする高電界型 ESP を考案した。その結果、風速 10 m/s の条件で電力をほぼ消費することなく、約 80% の高集じん率を達成した⁽¹⁾。

本研究では長時間稼働時の集じん率を明らかにすることを目的とし、24 時間稼働時の性能を評価したので報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig.1 に示す。装置はディーゼルエンジン、熱交換器、風量調整ダンパー、高電界型 ESP で構成した。ESP は、高電圧印加用内側電極と接地用外側電極からなる同軸円筒構造とした。電極長を 1 m または 2 m、電極間隔を 6.1 mm とし、直流電圧 -11.6 kV を電極間に印加し高電界を形成した。排ガスを熱交換器で温度 30 °C、風量調整ダンパーで風速 10 m/s に調整した後、ESP に流入させた。ESP の運転時間は 24 時間とした。粒子質量濃度を測定するため、定期的に ESP の上流及び下流側から排ガスの一部を流量 0.01 m³/min で 15 分間吸引し、フィルター上に排ガス微粒子を採取した。採取前後にフィルターを恒温槽で 50 °C で 2 時間乾燥させ、電子天秤でフィルター質量を測定し、質量差から粒子質量濃度を算出した。算出した濃度から、(1)式を用いて集じん率 η を算出した。

$$\eta = \left(1 - \frac{M_d}{M_u}\right) \times 100 \quad (1)$$

ただし、 M_u と M_d はそれぞれ ESP 上流および下流側の粒子質量濃度 [mg/m³]である。

3. 実験結果

集じん率と運転時間の関係を Fig.2 に示す。いずれの条件においても電流値は検出限界(0.01 mA)以下であり、電力はほとんど消費されていない。電極長 1000 mm と 2000 mm のいずれも 24 時間安定した集じん率が得られた。

電極長 1000 mm の初期集じん率は 63%であり、24 時間後は 50%、平均は 61%であった。電極長 2000 mm の初期集じん率は

80%であり、24 時間後は 68%、平均値は 77%であった。電極長 2000 mm の方が 1000 mm より集じん率が高いのは、ESP 内における排気微粒子の滞在時間が長くなるためである。また、どちらの電極長においても初期値に比べ 24 時間後の集じん率が若干低下している。その要因として、再飛散とスパークの発生が考えられる。運転時間の経過とともに、電極上で捕集粒子が凝集肥大化し気流の影響で剥離し下流へ排出される。さらに、粒子が堆積することで電極間が狭くなりスパークが発生し、その衝撃でも捕集粒子が電極から剥離する。今後、これらの対策が重要といえる。

4. まとめ

高電界型 ESP に直流電圧を印加し、24 時間稼働における集じん率を検討した。その結果、10 m/s の高風速下において、電力をほとんど消費することなく、電極長 2000 mm で初期集じん率 80%、24 時間の平均集じん率 77%を達成した。

本研究は JSPS 科研費 25K01440 の助成を受け実施した。

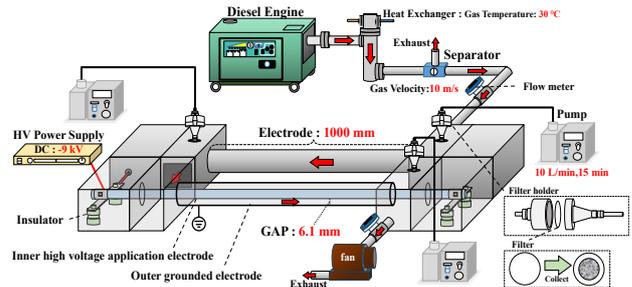


Fig.1 Schematic diagram of experimental system.

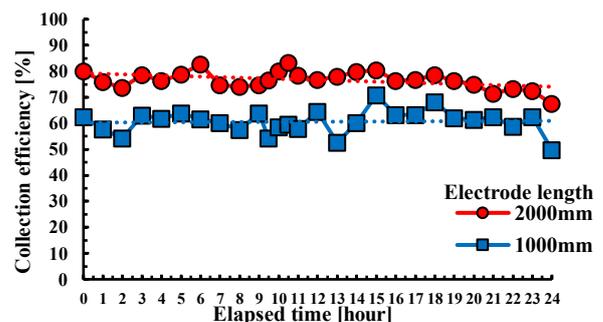


Fig.2 Relationship between collection efficiency and elapsed time.

文献

- (1) Hayato Ito, et al. Proc. The 17th International Conference on Electrostatic Precipitation, PS.13, 2024

2 軸延伸 PET フィルム同士の直接接合における 接合前大気圧プラズマ処理用ガス種の影響

小山 拓海*, 齋藤 直輝, 平栗 健二, 金杉 和弥 (東京電機大学)
杉村 智, 松浦 慶 (春日電機株式会社)

Effect of Atmospheric Pressure Plasma Treatment Gas Species on the Direct Bonding of PET Films

Takumi Koyama, Naoki Saito, Kenji Hirakuri, Kazuya Kanasugi (Tokyo Denki University)

Satoshi Sugimura, Ken Matsuura (KASUGA DENKI, INC.)

1. まえがき

産業界では、濡れ性や剛性などの要求機能を満たすため、樹脂フィルムが接着剤を介して積層されている。しかし、接着剤の劣化や成分溶出などの懸念が生じる場合があるため、接着剤を使用しない接合技術が検討されている。難接合材料である 2 軸延伸ポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムを対象にした直接接合において、これまでに PET フィルム接合面を真空下で O₂ プラズマ処理を施した後、それら接合面を重ねて低温プレスすることで接合力が発現することが報告されている⁽¹⁾。しかし、生産性を考慮した場合には大気圧プロセスが有効と考えられる。そこで本研究では、PET フィルム同士の直接接合における接合前大気圧プラズマ処理効果を確認するために、接合前大気圧プラズマ処理用ガス種と接合力、表面特性の関係を調査した。

2. 実験方法

本実験では、大気圧プラズマ処理システム (春日電機(株)) を用いて、厚み 50 μ m の PET フィルム (#50-S10、東レ(株)) の接合面に対して大気圧プラズマ処理を行った。大気圧プラズマ処理用ガス種としては、Ar と N₂ ガスを用い、処理雰囲気中の O₂ 濃度が 2% 程度となるように調整した。また、比較として、ガスを意図的に装置内に供給しない Air 雰囲気 (O₂ 濃度約 20%) での処理も行った。大気圧プラズマ処理強度 (E 値: 電力/搬送速度 \times 電極幅) は 40~8000W \cdot min/m² の範囲で変更した。表面処理後、それら接合面を重ねて圧力 2MPa、プレス時間 1min、プレス温度 80~140 $^{\circ}$ C の条件で低温プレスすることで接合サンプルを作製した。接合サンプルの接合力は、90 度剥離試験により確認した。また、接合前サンプルの表面特性は、X 線光電子分光法による表面組成分析、原子間力顕微鏡による表面粗さ測定、接触角測定による表面自由エネルギー評価を実施した。

3. 実験結果

異なるガス種で作製したサンプルの接合力とプレス温度の関係を図 1 に示す。この際、接合前大気圧プラズマ処理の E 値は 40W \cdot min/m² に固定した。その結果、未処理品はプ

レス温度を上げてても接合力が発現しなかったものの、大気圧プラズマ処理品は、ガス種に関わらず、一定のプレス温度 (約 100~120 $^{\circ}$ C) 以上になると接合力が発現することを確認した。また、いずれのガス種もプレス温度の上昇に伴って、接合力が向上することが分かった。これは極性官能基の脱水縮合反応による共有結合の形成や分子鎖の相互拡散による分子間力の向上が影響しているものと考えられる。さらに、大気圧プラズマ処理用ガス種の違いに着目した場合、Air よりも Ar や N₂ の方が効果的に接合力が向上する傾向が見られた。これは、ガスの種類によって生成される官能基の種類やエッチング速度の違いが生じたためと考えられる。

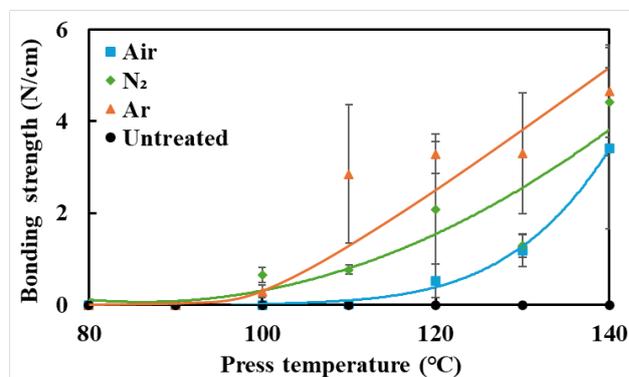


図 1 異なるガス種で作製したサンプルの接合力

Fig.1. Bonding Strength of Samples Treated with Different Gas Species

4. まとめ

本研究では、PET フィルム同士の直接接合を対象に、接合前大気圧プラズマ用ガス種の影響を調査した。その結果、ガスを導入しない Air 雰囲気 (O₂ 濃度約 20%) よりも、Ar や N₂ ガス雰囲気 (O₂ 濃度約 2%) の方が効果的に接合力が向上できることを示唆した。

文 献

- (1) T. Endo, et al., "Composite engineering – direct bonding of plastic PET films by plasma irradiation", *Procedia Engineering*, vol. 171, pp. 88-103, 2017.

プラズマ処理によるイネ種子成長促進

斉藤 拓巳*, 池田 善久, 神野 雅文 (愛媛大学)

Growth Promotion of Rice Seeds by Plasma Treatment

Takumi Saito, Ikeda Yoshihisa, Jinno Masafumi (Ehime University)

1. 序論

低温プラズマを種子に照射することで、発芽率や初期生育の向上をもたらすことが報告されており、近年「プラズマ種子科学」として研究が進められている。九州大学の古閑らは、プラズマジェットによるイネ種子処理が発芽特性および初期生育を改善することを示した[1]。一方、発生方式の異なるマイクロプラズマによる植物生育応答は十分に検討されていない。そこで本研究では、マイクロプラズマを用いてイネ種子を処理し、苗期から圃場栽培までの生育を調査することで、プラズマ発生方式の違いが生育および生産形質に及ぼす影響を評価した。

2. 実験方法

標的にはイネ種子(ひめの凜)を用いた。接地電極上に配置した3.5 cm ディッシュにイネ種子を静置し、真上1 mmの位置に電極を配置してプラズマ処理を行った。プラズマ処理は11 kV_{p-p}の制限は電圧を印加し、1回の処理を100 msとした。プラズマ処理と無処理を圃場試験にて収穫まで行った。

3. 結果と考察

図1に苗期における草丈の写真を示す。プラズマ処理区では、無処理区と比較して根の張りが不良であり、草丈もやや低く推移した。一方、圃場試験における分けつ期、出穂期、成熟期の草丈の推移を図2に示す。また、穂長、穂数、一穂粒数、千粒重の比較結果を表1に示す。これらの生育指標において、プラズマ処理区は無処理区と同等の値を示した。また、最終的な収量および品質についても、両区間に有意な差は認められなかった。本研究では、マイクロプラズマ処理により苗期において根の張りや草丈の一時的な低下が観察された。一方で、圃場栽培における生育後期および最終的な収量・品質には影響が認められなかった。このことから、マイクロプラズマ処理が生育後期における成長回復あるいは補償的成長を促進した可能性が示唆される。

4. 結論

本研究では、マイクロプラズマ処理を施したイネ種子において、苗期に根の張りや草丈の一時的な低下が認められた。一方で、圃場試験における生育後期および最終的な草丈、茎数、収量、品質はいずれも無処理区と同等であった。こ

れらの結果は、初期生育における影響が生育過程において回復・補償されることを示しており、マイクロプラズマ処理が成長促進的な生体応答を誘導する可能性を示唆している。



図1 苗期のプラズマ処理と無処理の比較

Fig. 1 Comparison of seedling growth between plasma-treated and control rice at the seedling stage.

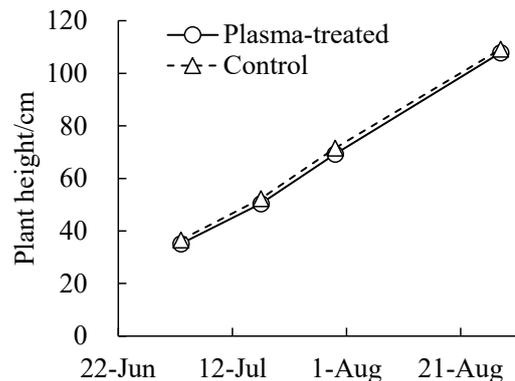


図2 圃場試験における草丈の推移

Fig. 2 Changes in plant height during field cultivation.

表1 プラズマ処理と無処理における収穫量と品質比較
Table 1. Yield and grain quality of *Himenorin* rice in control and plasma-treated groups.

	Plasma	Control
Panicle length (cm)	21.9	21.5
Number of panicles (1/mm ²)	322	332
Number of grains per panicle	92	86
Thousand grain weight (g)	23.3	23.5

文献

(1) Suriyasak, C. et al., *ACS Agric. Sci. Technol.*, 1, 5-10 (2021)

CFRP 電極を用いた高電界電気集じん装置の開発

島田 正太郎*, 小島 拓海, 瑞慶覧 章朝 (神奈川県立大学)
北林 功一 (アマノ(株)), 水野 彰 (アマノ(株)), 豊橋技術科学大学)

Development of a High-Electric-Field Electrostatic Precipitator Using CFRP Electrodes

Shotaro Shimada, Takumi Kojima, Akinori Zukeran (Kanagawa Institute of Technology)

Koichi Kitabayashi (Amano Corporation), Akira Mizuno (Amano Corporation, Toyohashi University of Technology)

1. 背景および目的

空気汚染の原因物質である浮遊粒子状物質や空気中の新型コロナウイルスやインフルエンザウイルスを除去する装置として電気集じん装置(ESP)がある。一般に ESP はコロナ放電を利用しており、高濃度になると有害なオゾンが発生する。また、コロナ放電による電極劣化や電力消費も改良すべき課題といえる。そこで、コロナ放電を用いずに高電界のみで集じんする高電界 ESP を開発してきた¹⁾。

本研究では、高電界型 ESP の高性能化、小型化、軽量化を目的とし、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)電極を短ギャップで配置した場合の集じん性能について検討をしたので報告する。

2. 実験装置及び方法

高電界型 ESP の電極構造を図 1 に示す。ESP は高電圧印加用平板電極 (5 枚) と接地用平板電極 (6 枚) が交互に配置された構造となっている。電極素材は CFRP、電極長は 170 mm、電極間ギャップは 5 mm または 1.2 mm とした。実験装置の概要を図 2 に示す。装置はダクト、ESP とシロッコファンで構成し、ガス流速は 0.5 m/s とした。電極間に負極性直流高電圧を最大 7 kV 印加し、電極間に静電界を形成した。印加電圧の最大値はギャップ 5 mm が 7.0 kV、1.2 mm の場合は 2.5 kV とした。使用する粒子は大気じんとし、ESP 前後のダクトから流通ガスの一部を吸引し、パーティクルカウンターを用いて、粒子濃度を測定した。そして、(1)式を用いて集じん率を算出した。

$$\eta = (1 - N/N_0) \times 100\% \dots (1)$$

ただし、 N_0 、 N はそれぞれ ESP 上流、下流の粒子濃度 [parts/m³] である。

3. 実験結果

集じん率の電圧特性を図 3 に示す。どちらのギャップ長においても、印加電圧が大きくなるほど集じん率は高くなった。ギャップ 5 mm の集じん率は印加電圧 1.0 kV で約 15%、印加可能な最大電圧 7 kV では約 45% となった。これに対してギャップ 1.2 mm の集じん率は 0.5 kV で約 52% であり、2.5 kV では約 70% を達成した。ギャップ 5 mm、印加電圧 7 kV における電界強度は約 1.4 kV/mm であるが、ギャップ

1.2 mm、印加電圧 2.5 kV では約 2.1 kV/mm である。これはパッシェンの法則で説明ができ、短ギャップにすることで最大電界強度が大きくなったため、集じん率が向上したといえる。またアルミニウムの比重が約 2.7 g/cm³ であるのに対して CFRP は約 1.5 g/cm³ であり、軽量化も可能といえる。

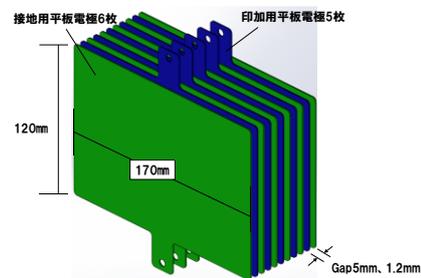


図 1 高電界型電気集じん装置の電極構造

Fig.1 Electrode structure of high electric field ESP.

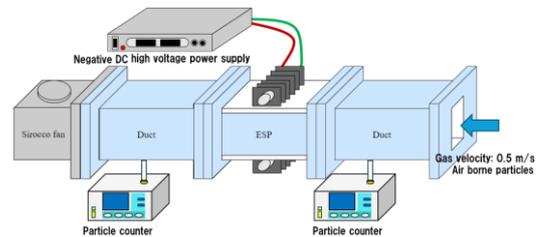


図 2 実験装置の概要

Fig.2 Schematic diagram of experimental system.

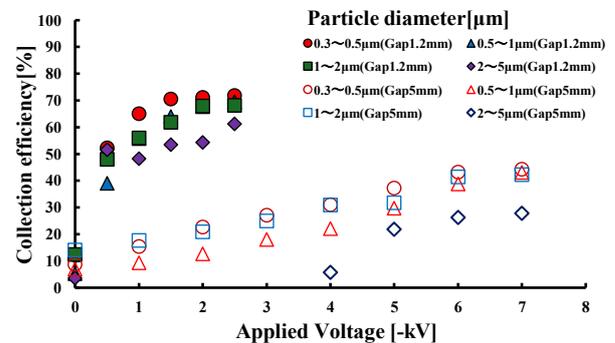


図 3 集じん率の電圧特性

Fig.3 Collection efficiency as a function of applied voltage for various particle diameters.

文献

(1)小島ら、静電気学会講演論文集 2025、pp.99~100、2025

沿面放電型遺伝子導入法による *Ex Vivo* 遺伝子治療法の検討：1型糖尿病をモデルとしたインスリン発現及び生体内応答

西浦 志武*, 池田 善久, 大塚 智哉, 佐伯 拓哉, 佐藤 晋(愛媛大学),
神野 雅文(愛媛大学, 株式会社 iGENE)

Ex Vivo Gene Therapy using Surface Discharge Gene Delivery Method:
Regulation of Insulin Expression and *In Vivo* Response in a Type 1 Diabetes Model
Nozomu Nishiura*, Yoshihisa Ikeda, Tomoya Otsuka, Takuya Saiki, Susumu Satoh (Ehime University),
Masafumi Jinno (Ehime University, i-Gen Corp.)

1. 目的

ex vivo 遺伝子治療は安全性や制御性に優れるが、既存の遺伝子導入技術には導入効率や細胞損傷の課題が残されている。我々は、細胞とプラスミド溶液に対する沿面放電処理(本法)により、高効率かつ低侵襲な遺伝子導入が可能であることを示してきた[1]。他方、インスリン分泌が低下する1型糖尿病は、遺伝子治療によって体内でインスリンを産生させる手法が根本的治療として期待されている。本研究では、1型糖尿病をモデル疾患として、本手法を用いた *ex vivo* 遺伝子治療の有効性を検証するため、本法によりインスリン発現遺伝子を導入したマウス肝実質細胞を生体内投与し血糖値応答を評価した。

2. 実験方法

C57BL/6 マウス由来肝実質細胞に対し、沿面放電型遺伝子導入法を用いてインスリン発現遺伝子を導入し、インスリンを分泌する形質転換細胞を作成した。放電処理条件は、電極数4極、印加電圧5 kVp-p、電極-シャーレ間距離0.1 mm、放電時間6 msとした。プラスミド溶液中のPBS濃度を9~24%で3%間隔で変化させて導入結果を比較した。導入後のインスリン分泌量はELISAにより評価した。

生体内応答として、12時間絶食後にグルコースを投与したマウスへ形質転換細胞を400 μ L 腹腔内投与し、尾静脈採血により血糖値を測定した。

3. 実験結果・考察

導入細胞数はPBS濃度によらず2万個程度で一定であったが、PBS濃度が21%、24%の条件下で発現が強くなり、それぞれ6000 pg/ml、3500 pg/ml程度分泌されていた。

図1に本法で作成したインスリン分泌形質転換細胞を体内投与したマウスにブドウ糖を経口投与した後の血糖値変動の結果を示す。Control条件(形質転換細胞の投与無し)で

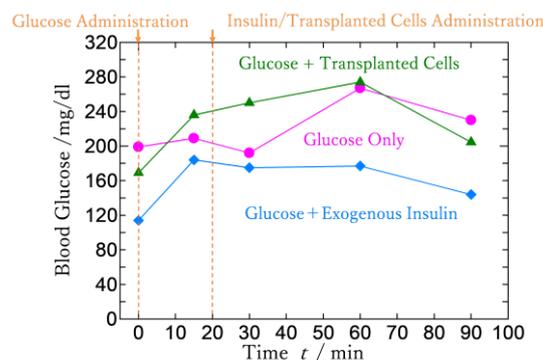


図1：経口ブドウ糖負荷後の血中グルコース動態
Fig.1. Post-prandial glucose dynamics.

の血糖値変動は約40 mg/dlであるのに対して、形質転換細胞投与群では、投与30~60分後にControl条件での変動よりも十分に大きな約100 mg/dlの血糖値低下が確認され、形質転換細胞の働きによることが示唆された。

4. 結論

沿面放電処理により作成したインスリン発現肝実質細胞がマウス生体内投与後に期待通りインスリンを発現し血糖値を低下させた。本結果は、本手法が *ex vivo* 遺伝子治療において機能的遺伝子発現を誘導可能であり、1型糖尿病治療への応用可能性を示している。

5. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(21H04455, 24K21540)の支援を受けて実施された。

文 献

[1]田村亮太:プラズマ遺伝子導入による1型糖尿病の細胞治療に向けた基礎研究,愛媛大学学位論文(1965)

マイクロプラズマ種子処理による幼苗の初期生育促進機構の解明に向けた植物組織の三次元等価回路モデルの構築と検証

廣島 大輝* (愛媛大学), 池田 善久 (愛媛大学), 本村 英樹 (愛媛大学),
木戸 祐吾 (パール工業株式会社), 神野雅文 (愛媛大学)

Development and Validation of a 3D Equivalent-Circuit Model of Plant Tissues Toward Investigating the Mechanism of Seedling Growth Promotion by Microplasma Seed Treatment

Taiki Hirohata (Ehime University), Ikeda Yoshihisa (Ehime University), Hideki Motomura (Ehime University),
Yugo Kido (Ehime University), Masafumi Jinno (Ehime University)

1. 序論

人口増加および気候変動に伴い食料需要は増大しており、植物の生育促進や作物生産性向上に向けた技術の重要性が高まっている。著者らは、マイクロプラズマによる種子の芽の成長促進手法を開発している。本研究で用いるマイクロプラズマは極めて細かい放電であり、また、接地されたディッシュ上に置かれた植物体へ電流を供給する点に特徴がある。

成長促進の機構を理解するには、プラズマに関連する主要因の同定が必要である。マイクロプラズマによる生体への作用は、化学的側面と電気的側面に大別される。著者らの先行研究（動物細胞へのプラズマ遺伝子導入）では、緩衝液・細胞・ディッシュからなる電気的等価回路網モデルを構築し、電気的要因、特に細胞へ流れ込む電流が支配的に寄与することを示した[1]。同様に、植物におけるプラズマ誘起の成長促進においても電気的刺激が重要な役割を果たす可能性がある。そこで本研究では、植物組織に印加される電気的刺激を解析するため、植物組織の電気的等価回路網を構築し、測定結果と比較して妥当性を検証する。

2. 植物細胞の最小単位等価回路モデル

植物細胞の最小単位モデルでは、細胞壁、細胞質、液胞を抵抗要素として表現する。一方、細胞膜および液胞膜（トノプラスト）は、抵抗とコンデンサからなる並列 RC 素子としてモデル化する[2]。このモデルにより、膜の電荷蓄積（容量成分）とリーク（抵抗成分）を同時に表現できる。

3. 植物組織の三次元等価回路網化

植物組織は膨大な数の細胞から構成されるため、細胞同士は三次元空間内で直列および並列に接続されているとみなせる。厳密には分布定数回路となるが、電流に対応する波長が細胞組織のサイズに比べ十分長い場合、分布定数回路は集中定数回路として近似できる。これにより、過度な回路複雑化を避けつつ、植物組織の三次元等価回路網を構築できる（図1）。

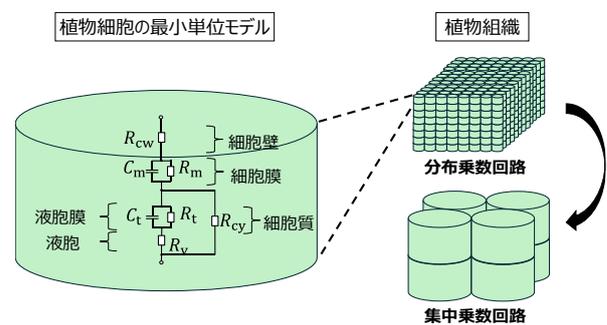


図1 植物組織の三次元等価回路モデル化に向けた概念図
Fig. 1. Conceptual diagram for 3D equivalent-circuit modeling of plant tissue

4. 解析と検証方法

アナログ回路シミュレータ LTspice を用いて植物組織の三次元等価回路網を構築し、マイクロプラズマによって植物組織に与えられる電気的刺激（電流・電圧分布など）を解析する。さらに、オオムギ種子の周波数依存インピーダンス測定を実施し、得られたインピーダンス特性と回路解析結果を比較することで、モデルの妥当性を検証する。

5. まとめ

本研究では、マイクロプラズマ放電によるスプラウト成長促進機構の理解に向け、植物組織の三次元等価回路網を構築した。あわせて、周波数依存インピーダンス測定との比較により、解析結果の妥当性を検証した結果を報告する。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費（課題番号:21H04455、23K25862、24K21540、24H02250、25H02215）の助成を受けたものです。

文献

- (1) Yugo Kido, Hideki Motomura, Yoshihisa Ikeda, Susumu Satoh, Masafumi Jinno., PLoS ONE, **16**(1), e0245654 (2021).
- (2) M. I. N. ZHANG and J. H. M. WILLISON, Journal of Experimental Botany, **42**(244), 1465-1475, (1991).

湿式コロナ放電を用いたウイルスサンプリング装置の捕集特性

座間 滉人*, 木原 聖次, 和田 理征, 澤井 淳, 高村 岳樹,
瑞慶覧 章朝, (神奈川工科大学), 沖野 晃俊(東京科学大学)
神田 一弘(横浜電子), 細田 悟(雷神の風, 大田病院)

Collection Characteristics of a Virus Sampling Device Using Wet Type Corona Discharge

Hiroto Zama, Seiji Kihara, Risei Wada, Jun Sawai, Takeji Takamura, Akinori Zukeran, (Kanagawa Institute of Technology), Akitoshi Okino (Institute of Science Tokyo) Kazuhiro Kanda (Yokohamadenshi), Satoru Hosoda (Raijin No Kaze/Ohta Hospital)

1. はじめに

インフルエンザや新型コロナウイルスの感染対策には、空気中のウイルス濃度の測定が重要であるが、一般に用いられているバブリング法では粒径20~300 nmのウイルス粒子に対する捕集効率が低く高感度な定量には課題がある¹⁾。

微小な粒子を捕集できる方法の一つに電気集じん装置(ESP)が挙げられる。ESPは、コロナ放電によって帯電させ、クーロン力により電極上に浮遊ウイルスを捕集する。しかし、例えばPCRで測定するためには、電極上に捕集したウイルスを水溶液中に取り込む必要がある。また、室内で使用する場合は、コロナ放電で発生するオゾンも抑制しなければならない。

そこで本研究では、湿式コロナ放電型ウイルスサンプリング装置を提案し、大気じんおよび浮遊ウイルスの捕集率と電圧の関係について評価したので報告する。

2. 実験装置及び方法

実験装置の概要を図1に示す。実験装置は、主にポンプ、流量計、ダクト、カーボンブラシ電極と水電極によって構成されている。ダクトはアクリルパイプを使用し、内径は30 mmとした。直径6 μm 、長さ5 mmのカーボンファイバー(約6000本、ケンエー製)から成るカーボンブラシを放電電極、水電極にはリン酸緩衝生理食塩水(PBS)を用い捕集部とした。カーボンブラシ電極をダクト中央に配置し、水面との間隔は10 mmとした。水電極を接地し、カーボンブラシ電極に最大11 kVの直流正極性電圧を印加した。また、大気じん、または浮遊ウイルスを模擬したエアロゾル状のQ β ファージをダクト内風速0.2 m/sで流した。装置上流および下流のダクトから流通ガスの一部を吸引し、パーティクルカウンタ(リオン, KC-01C)を用いて粒径0.3~0.5 μm の粒子濃度を測定した。浮遊ウイルス濃度も同様にインピンジャーを用いて測定した。測定した濃度から捕集率を算出した。

3. 実験結果

各粒子における印加電圧と捕集率の関係を図2に示す。いずれの粒子においても、電圧の増加に伴い捕集率は上昇した。大気じんの捕集率は印加電圧3.5 kVで15%、9 kVで最大78%となった。浮遊ウイルスの捕集率は、印加電圧5 kVで

97%、6.5 kVで99%以上を達成した。大気じんと浮遊ウイルスで捕集効率が異なるのは粒径の違いによるものと考えられる。ESPの捕集率は一般に粒径0.3 μm 付近で極小値となり、それ以上において向上する。また、本実験条件における発生オゾン濃度は0.1 ppm以下であり、比較的低いオゾン濃度で浮遊ウイルスをサンプリングできていることがわかる。

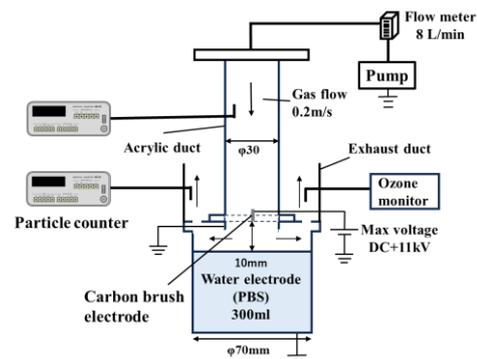


図1.実験装置の概略

Fig.1 Schematic diagram of experimental system.

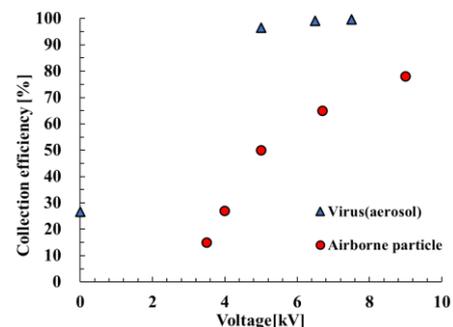


図2.印加電圧と捕集率の関係

Fig.2 Relationship between applied voltage and collection efficiency.

文献

1)明星敏彦 他,「サブミクロン粒子に対するミゼットインピンジャーの捕集性能」,エアロゾル研究 13(1),35-43,1998.