

技術論文

# シチズン独自の表面硬化技術デュラテクト 新技術『DLC ブルー』の開発

吉田陸人

シチズン時計株式会社, 東京都西東京市田無町 6-1-12, 〒188-8511

(2024年9月26日受付, 2024年11月18日再受付, 2024年11月20日採録)

## CITIZEN Original Surface Treatment Technology “Duratect” Development of New Technology “DLC-BLUE”

Rikuto YOSHIDA

CITIZEN WATCH CO., LTD., 6-1-12, Tanashi-cho, Nishi-Tokyo-shi, Tokyo, 188-8511, Japan

(Received September 26, 2024, Revised November 18, 2024, Accepted November 20, 2024)

### ABSTRACT

“DURATECT” is Citizen Watch's proprietary surface hardening technology. “DLC-Blue” was developed as a new color for “DURATECT”. “DLC-BLUE” uses diamond-like carbon technology to configure a titanium or stainless steel surface with an adhesion layer, a DLC layer, and a transparent DLC layer, which causes interference of light and achieves a blue color. It has been confirmed that the new “DLC-BLUE” maintains the excellent hardness, scratch resistance, and corrosion resistance of the conventional “DURATECT DLC” while expressing an unprecedented blue color.

### 1. はじめに

シチズン時計株式会社（以下シチズン時計）では1972年から次世代の表面処理としてイオンプレーティングの開発をスタートさせ、1977年にTiNを被覆した『ミラドール』という時計を発売した。その後、日常傷から時計を守る概念が生まれ、1999年に表面改質技術による表面硬化処理を開発したことをきっかけにシチズン時計ではこの概念を『デュラテクト』と名付けた<sup>1)</sup>。

今回は、シチズン時計製品ラインナップのひとつ ATTESA の生誕35周年である2022年11月にデュラテクト DLC を進化させたものとして開発したデュラテクト DLC ブルーについて述べる (Fig. 1)。



Fig. 1 Products using “Duratect DLC-Blue”

## 2. DLCについて

DLC (Diamond-Like Carbon) 膜は、ダイヤモンドの  $sp^3$  結合とグラファイトの  $sp^2$  結合が混在するアモルファス炭素膜であり<sup>2)</sup>、1950年代にダイヤモンドを人工的に合成する研究の過程で生まれ、1971年にダイヤモンドとグラファイトの特性を併せ持つことからその名がついた<sup>3)</sup>。DLCと言ってもダイヤモンドの  $sp^3$  結合の比率や水素含有量、添加物を制御することにより、用途に応じて様々な材料物性を付与することができる。総じて高硬度、低摩擦係数、耐摩耗性、耐食性、化学安定性、生体親和性、ガスバリア性という特長を有しているため自動車をはじめとする機械の摺動部品や身近なところではペットボトルの内面にも使われている<sup>4)</sup>。

その中でも高硬度、低摩擦係数、耐食性と従来の金属や樹脂では表現できなかった独特な黒色の審美性にいち早く着目し、シチズン時計では1984年から時計外装用コーティングとして開発をスタートさせ、1987年にDLCコーティングを施した腕時計を「バーゼル・フェア'87」にて出展し、商品としては2004年に国内で発売を開始した。

腕時計へDLCをコーティングした際の特長として下記が挙げられる。

- ・高硬度/低摩擦係数：傷つきにくい 長持ちする
- ・耐食性：錆びにくい
- ・生体適合性：人体に優しい、耐メタルアレルギー
- ・色：黒過ぎない落ち着いたダークグレー色

さらにシチズン時計の DLC が他業種の DLC と比較しても優れている点としては下記がある。

- ・ 中間層：密着力向上のための中間層に Cr を用いないことで製品として耐メタルアレルギーを実現
- ・ 審美性：宝飾品としても使用できる外観品質
- ・ 付き回り性：立体形状にも均一に成膜

### 3. 開発の経緯

シチズン時計製品のラインナップである ATTESA はチタニウムが持つ、錆びにくい、軽い、人体に優しいといった特長とシチズン時計のチタニウム加工技術を全面に打ち出したブランドとなっており、現在では全てのモデルにデュラテクトを施している。その中でもデュラテクト DLC を施したブラックチタンモデルが人気を博している。

その中でブランド 35 周年を迎えるにあたり、デュラテクト DLC を進化させた青色のコーティングが欲しいという同社内の要望により、デュラテクト DLC ブルーを開発した。

### 4. 開発のコンセプト

デュラテクト DLC の進化ということで、既存の長所を残したまま、青色を表現できることを目標とした。

### 5. 色調と薄膜干渉

デュラテクト DLC は炭素と水素の結合で構成されており、金属のように合金化や化合物とすることで膜そのものの色を変えることは容易ではないため、薄膜の干渉を用いることで青色を表現できないかと考えた。

薄膜干渉とは薄膜の上面で反射する光と、薄膜の下面で反射する光の波が干渉を起こし(Fig. 2), 特定の波長を打ち消したり強めたりする現象のことであり、シャボン玉や水たまりの油膜に見られる虹色は、この薄膜干渉の例である(Fig. 3)。

この薄膜干渉は(1)式で表すことができる。

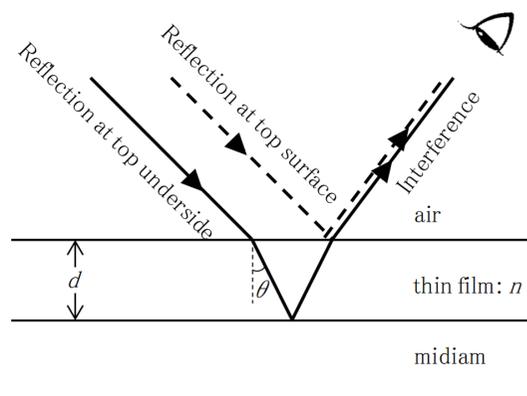


Fig. 2 Image of thin film interference.



Fig. 3 Soap bubble (left) and oil film (right).

$$2nd \cos \theta = \begin{cases} m\lambda & \text{波が打ち消し合う条件} \\ (2m+1)\lambda/2 & \text{波が強め合う条件} \end{cases} \quad (1)$$

ここで  $n$ ,  $d$ ,  $\theta$ ,  $\lambda$ ,  $m$  はそれぞれ薄膜の屈折率, 薄膜の厚み, 屈折角, 波長, 正整数である. 薄膜干渉により可視光域でどんな色が得られるかは, 薄膜の屈折率  $n$  と薄膜の厚み  $d$  によって制御することができる<sup>5)</sup>.

ここで DLC の屈折率が  $n_{\text{DLC}}$ , 膜厚が  $d_{\text{DLC}}$  となるよう制御し DLC 膜での波長  $\lambda_{\text{DLC}}$  を変える事で様々な色調を生み出すことができ, その中の一つである青色の外観を得ることが可能となる (式(2)).

$$\lambda_{\text{DLC}} = \begin{cases} \frac{2n_{\text{DLC}}d \cos \theta}{m} & \text{波が打ち消し合う条件} \\ \frac{4n_{\text{DLC}}d \cos \theta}{(2m+1)} & \text{波が強め合う条件} \end{cases} \quad (2)$$

ただし, 基材上に DLC 薄膜を成膜するだけでは膜厚は数 10~100 nm 程度となり, 耐傷性試験を実施すると膜厚が薄すぎるため, 傷が膜を貫通してしまい当初の目標であるデュラテクト DLC の長所を維持することは難しくなる. そこで, これまでのデュラテクト DLC 上に屈折率  $n$  を  $n_{\text{DLC-B}}$  に調整した DLC ブルー薄膜を膜厚  $d_{\text{DLC-B}}$  が 50~70 nm となるように成膜することにより, 被膜全体の厚みをデュラテクト DLC 膜で維持したまま薄膜干渉を発生させた. このとき, 波長が  $\lambda_{\text{DLC-B}}$  となることで, 光源を D65, 視野を 10° としたときの  $L^*a^*b^*$  表色系<sup>6)</sup>における  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  がそれぞれ 30~31, 1~2, -11~-9 の値を示す深みのある青色に見えるデュラテクト DLC ブルー膜を実現させた (式(3)).

$$\lambda_{\text{DLC-B}} = \begin{cases} \frac{2n_{\text{DLC-B}}d_{\text{DLC-B}} \cos \theta}{m} & \text{波が打ち消し合う条件} \\ \frac{4n_{\text{DLC-B}}d_{\text{DLC-B}} \cos \theta}{(2m+1)} & \text{波が強め合う条件} \end{cases} \quad (3)$$

デュラテクト DLC では基材であるチタニウムと DLC の界面に密着力強化のために中間層を設けているため, 実際には Fig. 4 のような膜構成とした.

## 6. 結果

実際に作成したサンプルに対して「硬度」「耐傷性」「耐食性」について評価を行った。

### 6. 1 硬度

基材であるチタニウム、デュラテクト DLC、デュラテクト DLC ブルーのマイクロビッカース硬度を測定したものを Fig. 5 に示す。チタニウムに比べて DLC 膜は高硬度であり、DLC と DLC ブルーで硬度に差が無いことが分かる。

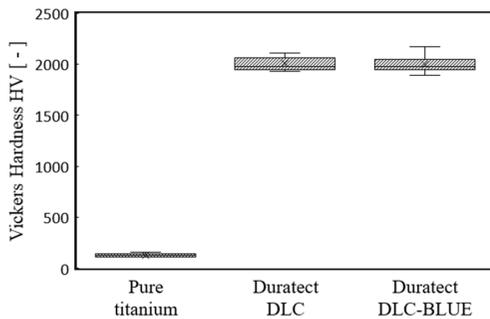


Fig. 5 Vickers hardness.

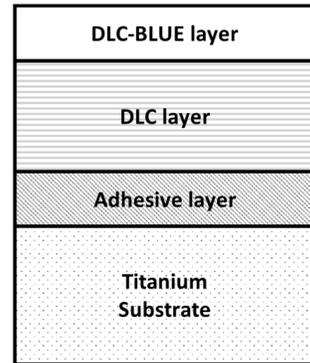


Fig. 4 DLC-BLUE layer composition.

### 6. 2 耐傷性

同一条件で耐傷性試験を行ったサンプルを Fig. 6 に示す。チタニウムに比べて DLC 膜は傷がつきにくく、DLC と DLC ブルーで傷付きにくさに差が無いことがわかる。

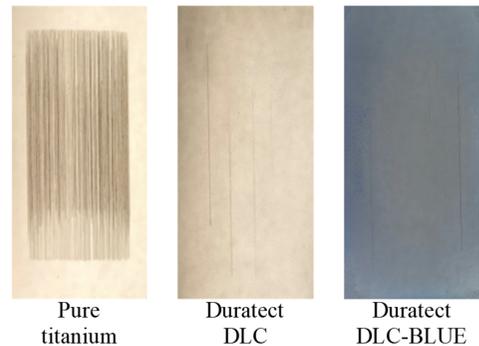


Fig. 6 Scratch test results.

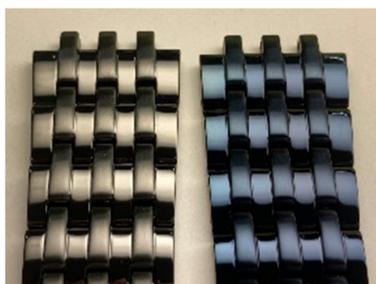
### 6. 3 耐食性

CASS 試験<sup>8)</sup>、人工汗試験の結果を Table 1, サンプルの写真を Figs. 7, 8 に示す。DLC と DLC ブルーはどちらも孔食や錆などの腐食は発生しておらず、耐食性があることが分かる。

Table 1 Corrosion resistance test results.

Sample	CASS test	Artificial Sweat test
Duratect DLC	Pass	Pass
Duratect DLC-BLUE	Pass	Pass

Criterion: Visually invisible



Duratect  
DLC                  Duratect  
DLC-BLUE

Fig. 7 Samples after CASS test.



Duratect  
DLC                  Duratect  
DLC-BLUE

Fig. 8 Samples after artificial sweat test.

## 7. まとめ

これまでのデュラテクト DLC の優れた点である「高硬度」, 「耐傷性」, 「耐食性」を維持したまま, 深い青色を表現した「デュラテクト DLC ブルー」を開発した(Fig. 9).

今後も腕時計を長く使用して頂けるようにデュラテクトの開発を続け, サステナビリティにも貢献していきたい.



Fig. 9 “Blue Universe Collection”  
limited edition model.

## 参考文献

- 1) 佐藤惇司, 渋谷義継, 佐藤雅浩: チタンの表面改質と時計外装への応用, マイクロメカトロニクス, Vol. 45, No. 4, pp. 41-46 (2001).
- 2) 中谷達行: 小特集「様々なプラズマプロセスによるダイヤモンドライクカーボン薄膜の作成とその評価」 1. はじめに, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 92, No. 6, pp. 450-453 (2016).

- 3) S. Aisenberg and R. Chabot: Ion-beam deposition of thin films of diamondlike carbon, *J. Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 7, pp. 2953-2958 (1971).
- 4) 鹿毛剛: ダイヤモンド状炭素薄膜によるペットボトルのガスバリア性向上, 表面化学, Vol. 38, No 5, pp. 240-243 (2017).
- 5) 前島雅子: 各種基板上の高分子薄膜の呈色性, 繊維製品消費科学, Vol. 45, No. 9, pp. 707-718 (2004).
- 6) 日本工業規格 JIS Z 8781-4 (2013) : CIE 1976 L\*a\*b\*色空間.
- 7) 吉田陸人: 特開 2023-64859 (2023).
- 8) 日本工業規格 JIS Z 2371 (2015) 塩水噴霧試験方法.

## TECHNICAL LECTURE

# **Isochronism (3): As a Keyword of Japanese Mechanical Horology**

Shoichiro KOMAKI

Former General Manager of R&D Department, Seiko Instruments Inc., Japan

### PREFACE

This paper is an English version of the 3rd technical lecture (revised) that has been serialized four times<sup>1-4)</sup> since 2000 in the Journal of the Horological Institute of Japan.

本稿は、日本時計学会誌に2000年から4回連載された技術講義<sup>1-4)</sup>の第3回を改訂し英訳版として発行するものである。

### ABSTRACT

As a history of the calculation of the force from the outer end fixed hairspring and the calculation of the influence to the motion of the hairspring were done formerly by Prof. Hasunuma (The University of Tokyo, Former President of The Horological Institute of Japan) around 1949.

In this lecture, the new calculation is explained along these histories and also how these lectures are fit with actual experimental result.

Including the last lecture there must be used long pages for the introduction for these fundamental equations explanations mainly for the horizontal isochronism. It will be allowed for the main explanation of the regulating system of mechanical watches.

There are some unconfident points, such as the differences of the actual experimental results and the classical theory. These are appointed out here.

Thus it must be said there are so many unsolved points in the theoretical region of mechanical watches.

本講ではひげぜんまいの外端が固定されたときのひげぜんまいに加わる力、運動などの計算を1949年(昭和24年)頃の蓮沼教授などの理論を紹介しながら進め、最後にはこのような古典的な理論がどの程度実際と合うのかについて簡単に紹介する。前講も含めて平等時性に関する基本的な方程式の誘導にはかなりのページを割いてしまったが、機械腕時計の調速機の中心課題であるという点でご容赦いただきたい。この推論の中にもいくつか未検証な部分もあるし、実際の結果と古典的な結論とに大きな差があることも指摘しておいた。このような点では機械時計の理論領域にも未解決の部分があるというべきであろう。

## **1. Theory of Isochronism**

### **1.1 Equation of motion for outer end fixed hairspring**

In this lecture, the equation of motion of outer end fixed hairspring is considered and the mathematical expression of the nonlinearity of the restoring force of the hairspring is examined. As a result, isochronism is discussed. The coordinates (complex coordinates), tangential direction (angle between the positive directions on  $x$

axes) and curvature of any point of the hairspring are expressed as with a suffix “a” respectively. It is the same way to adopt the same parameter: distance  $s$  and curvature  $\varphi$  from the inner end point of hairspring and as the main parameter. with the suffix of “a”, as  $z_a, \psi_a, \varphi_a$ .

Then since the outer end is fixed at  $s = L$ , the coordinates of the end point are  $z_a(L) = \text{constant}$ , that is,

$$z_a = z_a(0)e^{i\alpha} + \int_0^L ds e^{i(\psi+\varphi_a)} = \text{constant.}$$

Rewriting this with  $x, y$  coordinates give Eqs. (1), (2).

$$\begin{aligned} x_a(L) &= x_a(0) \cos \alpha - y_a(0) \sin \alpha + \int_0^L ds \cos(\psi+\varphi_a) \\ &= \int_0^L ds \left[ \frac{x_a(0) \cos \alpha - y_a(0) \sin \alpha}{L} + \cos(\psi + \varphi_a) \right] = \text{constant.} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_a(L) &= y_a(0) \cos \alpha + x_a(0) \sin \alpha + \int_0^L ds \sin(\psi + \varphi_a) \\ &= \int_0^L ds \left[ \frac{y_a(0) \cos \alpha + x_a(0) \sin \alpha}{L} + \sin(\psi + \varphi_a) \right] = \text{constant.} \end{aligned} \quad (2)$$

Under the conditions of Eqs. (1), (2), the hairspring should have a shape that minimizes the potential energy (Eq. (18) in *Isocronisum* (2)<sup>2</sup>) at any rotation angle.

$$V = \frac{EJ}{2} \int_0^L \varphi'(s)^2 ds. \quad (3)$$

Here, Lagrange’s undetermined coefficient method is used. The following integral  $P$  may be minimized by using multiplier of Lagrange of  $2\lambda$  and  $2\mu$  under the conditions of Eqs. (1), (2).

$$\begin{aligned} P = \int_0^L ds \left[ \varphi_a'^2 + 2\lambda \left\{ \frac{x_a(0) \cos \alpha - y_a(0) \sin \alpha}{L} + \cos(\psi + \varphi_a) \right\} \right. \\ \left. + 2\mu \left\{ \frac{y_a(0) \cos \alpha + x_a(0) \sin \alpha}{L} + \sin(\psi + \varphi_a) \right\} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Here, same as in the case of the free outer hairspring,  $P$  is minimized when  $\delta\varphi_a(0) = \delta\varphi_a(L) = 0$  from the boundary condition as an arbitrary micro-function. Here,  $\delta P = P(\varphi_a + \delta\varphi_a) - P(\varphi_a)$ . Then,

$$\begin{aligned} \delta P = \int_0^L [2\varphi_a' \delta\varphi_a' + (\delta\varphi_a')^2 + 2\lambda \{ \cos(\psi + \varphi_a + \delta\varphi_a) - \cos(\psi + \varphi_a) \} \\ + 2\mu \{ \sin(\psi + \varphi_a + \delta\varphi_a) - \sin(\psi + \varphi_a) \}] ds. \end{aligned}$$

$$= \int_0^L [2\varphi_a'' \delta\varphi_a' + (\delta\varphi_a')^2 + 2\lambda\{\cos(\psi + \varphi_a)(\cos\delta\varphi_a - 1) - \sin(\psi + \varphi_a)\sin(\delta\varphi_a)\} \\ + 2\mu\{\sin(\psi + \varphi_a)(\cos(\delta\varphi_a) - 1) + \cos(\psi + \varphi_a)\sin(\delta\varphi_a)\}]ds. \quad (5)$$

Here, the first and the second terms are already calculated. By the way,

$$\cos(\delta\varphi_a) = 1 - \frac{\delta\varphi_a^2}{2!} + \dots, \quad \sin(\delta\varphi_a) = \delta\varphi_a - \frac{\delta\varphi_a^3}{3!} + \dots.$$

Using these approximation formulas,

$$\delta P = \int_0^L [-2\varphi_a'' \delta\varphi_a - \delta\varphi_a'' \delta\varphi_a + 2\lambda\{\cos(\psi + \varphi_a)(-\frac{\delta\varphi_a^2}{2} + \dots) - \sin(\psi + \varphi_a)(\delta\varphi_a - \frac{\delta\varphi_a^3}{3!} + \dots)\} \\ + 2\mu\{\sin(\psi + \varphi_a)(-\frac{\delta\varphi_a^2}{2} + \dots)\} + \cos(\psi + \varphi_a)(\delta\varphi_a - \frac{\delta\varphi_a^3}{3!} + \dots)]ds. \quad (6)$$

Therefore, the following equation is conditional equation that minimizes

$$\varphi_a'' + \lambda\sin(\psi + \varphi_a) - \mu\cos(\psi + \varphi_a) = 0. \quad (7)$$

And substituting Eq. (7) into Eq. (6) shows that  $P$  is minimized.

Now, when  $\varepsilon(s)$  is minute amount, Eq. (8) displays the outer fixed hairspring.

$$\varphi_a(s) = \varphi_f(s) + \varepsilon(s) = \alpha\left(1 - \frac{s}{L}\right) + \varepsilon(s), \quad \varepsilon(0) = \varepsilon(L) = 0. \quad (8)$$

Substitute Eq. (8) into Eq. (7),

$$\varepsilon''(s) = \lambda\sin(\psi + \varphi_a) - \mu\cos(\psi + \varphi_a) = 0.$$

$$\varepsilon''(s) + \lambda y_a' - \mu x_a' = 0.$$

Integrate this,

$$\varepsilon'(s) + \lambda y_a - \mu x_a = C.$$

Integrate further,

$$[\varepsilon(s)]_0^L + \lambda \int_0^L y_a ds - \mu \int_0^L x_a ds = CL. \quad (9)$$

Therefore, if  $X_a = \frac{1}{L} \int_0^L x_a ds$ ,  $Y_a = \frac{1}{L} \int_0^L y_a ds$ , then due to  $C = \lambda Y_a - \mu X_a$  then Eq. (9) becomes Eq. (10).

$$\varepsilon'(s) = -\lambda(y_a - Y_a) + \mu(x_a - X_a). \quad (10)$$

Here,  $(X_a, Y_a)$  is the coordinate of the center of gravity of the hairspring.

Now, the potential energy  $V$  cannot be calculated without finding  $\lambda$  and  $\mu$ . If  $\lambda$  and  $\mu$  are obtained here, the potential energy can be calculated. Since the movement  $\Delta$  of the outer end point of the free outer end hairspring is a known function in Eq. (24) of *Isochronism (2)*<sup>2)</sup>, it is sufficient if  $\lambda$  and  $\mu$  can be expressed by  $\Delta$ .

$$\begin{aligned}
\Delta &= z_f(L) - z(L) = z_f(L) - z_a(L) = \int_0^L ds \left( e^{i(\psi+\varphi_f)} - e^{i(\psi+\varphi_a)} \right) = \int_0^L ds e^{i(\psi+\varphi_a)} (e^{-i\varepsilon} - 1) \\
&= \left[ (e^{-i\varepsilon} - 1) \int_0^s ds e^{-i(\psi+\varphi_a)} \right]_0^L + i \int_0^L ds \varepsilon' e^{-i\varepsilon} \left( \int_0^s ds e^{i(\psi+\varphi_a)} \right) = i \int_0^L ds \varepsilon' e^{-i\varepsilon} z_a(s) \\
&\doteq i \int_0^L ds \varepsilon' z_a(s). \tag{11}
\end{aligned}$$

Substituting Eq. (10) into (11),

$$\begin{aligned}
\Delta &= i \int_0^L [-\lambda(y_a - Y_a) + \mu(x_a - X_a)](x_a + iy_a) ds = \int_0^L [\lambda(y_a^2 - y_a Y_a) - \mu(x_a y_a - y_a X_a) \\
&\quad - i\lambda(x_a y_a - x_a Y_a) + i\mu(x_a^2 - x_a X_a)] ds = \lambda LI_A - \mu LI_F - i(\lambda LI_F - \mu LI_B). \tag{12}
\end{aligned}$$

However, each is as follows.

$$LI_A = \int_0^L y_a^2 ds - LY_a^2, \quad LI_B = \int_0^L x_a^2 ds - LX_a^2, \quad LI_F = \int_0^L x_a y_a ds - LX_a Y_a. \tag{13}$$

Here, when  $\Delta = \Delta_x + i\Delta_y$ , Eq. (12) is rewritten as,

$$\Delta_x = \lambda LI_A - \mu LI_F, \quad \Delta_y = -\lambda LI_F + \mu LI_B.$$

And  $\lambda, \mu$  becomes Eq. (14) when expressed by the equations including  $\Delta_x$  and  $\Delta_y$

$$\begin{aligned}
\lambda &= \frac{I_B \Delta_x + I_F \Delta_y}{L(I_A I_B - I_F^2)} \doteq \frac{\Delta_x}{LI_A}, \\
\mu &= \frac{I_F \Delta_x + I_A \Delta_y}{L(I_A I_B - I_F^2)} \doteq \frac{\Delta_y}{LI_B} \doteq \frac{\Delta_y}{LI_A}. \tag{14}
\end{aligned}$$

then,  $\varepsilon'(s)$  is calculated from Eq. (10) and Eq. (14).

Therefore, potential energy becomes Eq. (15) from Eqs. (3), (8), (10), (13) and (14).

$$\begin{aligned}
V &= \frac{EI}{2} \int_0^L \varphi_a'^2(s) ds = \frac{EI}{2} \int_0^L (\varphi_f'(s) + \varepsilon'(s))^2 ds = \frac{EI}{2} \int_0^L \left( -\frac{\alpha}{L} + \varepsilon'(s) \right)^2 ds, \\
&= \frac{EI}{2L} \alpha^2 + \frac{EI}{2} (\lambda^2 LI_A - 2\lambda\mu LI_F + \mu^2 LI_B) \alpha \doteq \frac{EI}{2L} \left( \alpha^2 + \frac{LI^2}{I_A} \right). \tag{15}
\end{aligned}$$

The equation of vibration of the outer fixed hairspring is obtained from  $\frac{d}{dt} \left( \frac{J}{2} \alpha'^2 + V \right) = 0$  and becomes Eq. (16).

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{EI}{L} \left( \alpha + \frac{1}{2} \frac{d}{d\alpha} \frac{LI^2}{I_A} \right) = 0. \tag{16}$$

This Eq. (16) contains the term  $\frac{EI}{2L} \frac{d}{d\alpha} \frac{|\Delta|^2}{I_A}$ , unlike the linear equation of vibration derived as the free outer hairspring. This means that when the stiff of the outer end point of the free outer end hairspring is fixed, or just when the outer end fixed hairspring is used, a force proportional to  $|\Delta|$  is generated at the outer endpoint of the hairspring.

Therefore, this becomes a torque called  $-\frac{EI}{2L} \frac{d}{d\alpha} \frac{|\Delta|^2}{I_A}$ , which disturbs equation of motion of balance wheel and the hairspring, and makes equation of motion to non-linear motion. The following is a form that expresses isochronism.

As described in *Isochronism (I)*<sup>1)</sup>, when the equation of vibration of the balance-spring system is written as  $J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + K\alpha = f(\alpha)$ . Since the period error due to the disturbance  $f(\alpha)$  as described in *Isochronism (I)*<sup>1)</sup>,

$$\delta = \frac{1}{A^2TK} \int_0^T \alpha f(\alpha) dt,$$

it is equivalent to setting these  $K$  and  $f(\alpha)$  as

$$K = \frac{EI}{L}, \quad f(\alpha) = \frac{EI}{2L} \frac{d}{d\alpha} \frac{|\Delta|^2}{I_A}.$$

Therefore, the isochronous error  $\delta$  is calculated as Eq. (17)

$$\delta = -\frac{1}{A^2TK} \int_0^T \alpha f(\alpha) dt = -\frac{1}{A^2T} \frac{EI}{L} \int_0^T \alpha \frac{EI}{2L} \frac{d}{d\alpha} \frac{|\Delta|^2}{I_A} dt = \frac{1}{2A^2TI_A} \int_0^T \alpha \frac{d|\Delta|^2}{d\alpha} dt. \quad (17)$$

Multiplying Eq. (17) by 86,400 gives an expression of the rate per day. In short, it means that if the outer end is fixed, a force which is not proportional to the amplitude is generated.

Furthermore, it changes how the situation of isochronism depending on the angle between the inner and outer ends (isochronal effective spiral angle) and also depending on the eccentricity of the hairspring. After all, the amplitude characteristic of the rate, i.e., the isochronism changes. Eq. (17) is a general form that is easy to understand as a form of its influence.

## 1.2 Theory of horizontal isochronism and Isochronal effective spiral angle

Consider what the above-mentioned isochronous error actually becomes. This calculation must be simplified by the approximate calculation, but it is quite complicated and I will introduce here the outline of the calculation by Professor Hiroshi Hasunuma in 1949<sup>5)</sup>.

The force generated at the free outer end point changes with the rotation of balance-spring, as described above,

which is given by Eq. (17).

The shift of end point is given by Eq. (18) as explained in *Isochronism (2)*<sup>2)</sup>.

$$\Delta = i \frac{\alpha}{L} e^{i\alpha} \int_0^L z(s) e^{-i\frac{\alpha}{L}s} ds. \quad (18)$$

The complex coordinate display of the hairspring is shown as “ $z = a\theta e^{i\theta}$ ”, where the display of arbitrary point of the hairspring is used and the distance “ $s$ ” from the wind off is shown by “ $s = \frac{1}{2}a(\theta^2 - \varphi_0^2)$ ”.

Substituting these two equations into Eq. (18) becomes Eq. (19).

$$\Delta = i \frac{\alpha}{L} e^{i\alpha} \int_{\varphi_0}^{\varphi} a^2 \theta^2 e^{i\theta} e^{-i\frac{\alpha}{2L}(\theta^2 - \varphi_0^2)} d\theta. \quad (19)$$

Professor Hasunuma performed an approximate calculation, assuming that  $\alpha$  of this integral is at most 1 radian in the actual displacement or swing angle. The result is Eq. (20).

In reality, the amplitude is  $300^\circ$ , 5.3 radian, so the degree of approximate may be a problem. For the present, I will hold this point and proceed the introduction.

$$\Delta = \frac{a^2 \alpha}{L} (\varphi^2 e^{i\varphi} - \varphi_0^2 e^{i(\varphi_0 + \alpha)}). \quad (20)$$

This is the displacement of the free outer point, but in reality, the outer end of hairspring is fixed, so a force proportional to the above  $\Delta$  is generated there. Eq. (20) suggests that  $\Delta$  changes significantly depending on the relationship between  $\varphi$  and  $\varphi_0$ . The result of approximate calculation obtained by substituting this into Eq. (17) and integrate it is as follows.

$$\delta = \frac{4a^2}{L^2} \frac{\varphi^2 \varphi_0^2}{\varphi^2 + \varphi_0^2} \cos(\varphi - \varphi_0) \{A J_1(A) - J_0(A)\}. \quad (21)$$

Here,  $J_0(A)$ ,  $J_1(A)$  are Bessel function and the changes are shown in Fig 1. In this Eq. (21), when the distance from the rotation center of the balance wheel to the inner end point of the hairspring is  $R_0$  and the distance to the outer end point is  $R$ , then  $R_0 = a\varphi_0$  and  $R = a\varphi$ . And since  $R_0^2 \ll R^2$ , the coefficient of Eq. (21) can be approximately by as Eq. (22).

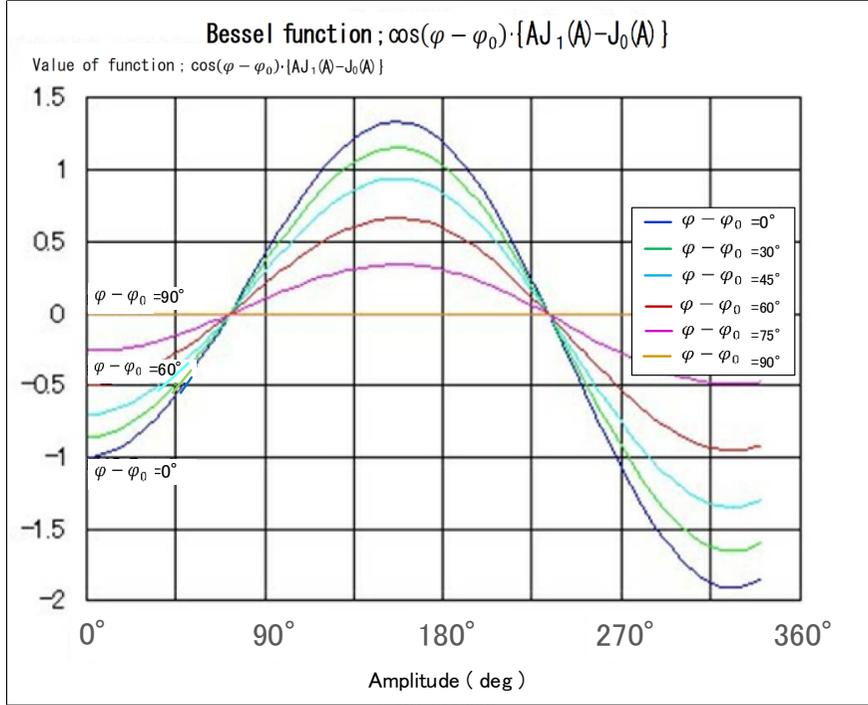


Fig. 1 Calculated Bessel function ;  $\cos(\varphi - \varphi_0) \{AJ_1(A) - J_0(A)\}$ .

$$\frac{4a^2}{L^2} \frac{\varphi^2 \varphi_0^2}{\varphi^2 + \varphi_0^2} = \frac{4}{L^2} \frac{R^2 R_0^2}{R^2 + R_0^2} \doteq \frac{4R_0^2}{L^2}. \quad (22)$$

By the way, since  $(\varphi - \varphi_0)$  is so-called total “*Isochronal effective spiral angle*” of the hairspring. Therefore, as the most practical understanding, the influence of the isochronal effective spiral angle may be understood as Eq.(23).

$$\delta = \frac{4R_0^2}{L^2} \cos(\varphi - \varphi_0) \{AJ_1(A) - J_0(A)\}. \quad (23)$$

What can be seen from Eq. (23) is that the isochronism of the horizontal position is uniquely determined by the diameter of inner end and the length of the hairspring to the outer end. The smaller the inner diameter and the longer the hairspring, the flatter the isochronism of horizontal position. It can be said that hairspring coiled with 4 pieces has a flatter characteristic of isochronism than coiled with 5 pieces. The actual situation will be shown in the next section.

### 1.3 Actual example of the horizontal position

Table 1 shows the actual numerical specifications of the hairspring and the numerical value of the horizontal isochronism that can be calculated by Eq. (23) for a 5.5 lines women's and a 10.5 lines men's watch. As an index of the state of isochronism, the change in rate between two amplitudes of 270° and 180° is calculated.

Table 1 shows the calculation results, assuming that this difference  $I_s = R_{180} - R_{270}$  is the eigenvalue of the horizontal isochronism.

Table 1 Calculation example of horizontal position eigenvalue.

	Unit	Women's watch	Men's watch
Inner diameter $2R_0$	0.01mm	134	145
Outer diameter $2R$	0.01mm	340	465
Number of turns $N$	—	14.4	13.3
Hairspring pitch $2\pi p$	0.01mm	7.154	12.03
Hairspring length (actual measured value)	0.01mm	9,875	12,200
Hairspring length (calculated value) $L = \frac{1}{2p}(R^2 - R_0^2)$	0.01mm	10,722	12,744
Bessel function value $I_0 = AJ_1(A) - J_0(A)$ , $A = 270^\circ$	—	-1.061	-1.061
Bessel function value $I_1 = AJ_1(A) - J_0(A)$ , $A = 180^\circ$	—	1.198	1.198
Bessel function value $I_v = I_1 - I_0$	—	2.260	2.260
Horizontal isochronous eigenvalue $I_s = \frac{4R_0^2}{L^2} I_v \times 86,400$	s/day	36.0	27.6

The horizontal isochronous eigenvalues calculated here are seemingly reasonable. The expression “reasonable” here means that the isochronous value, which is about 30 s/day with a swing angle difference of 90 degrees, is an ideal value. The actual products do not look like this value.

The actual isochronal data were measured for the above women's watch, approximately 250 samples. They were taken with widely adopted isochronal effective spiral angles. The results are shown in Fig. 2. Fig. 2 has the isochronous values on the horizontal axis with stratified every 20 s/day. Similarly, the isochronal effective spiral angles were taken on the vertical axis with stratified every 30°.

In this Fig. 2 horizontal isochronous eigenvalue means  $I_s$ : the difference of daily rate between 270° and 180° of amplitude, that is  $I_s = R_{180} - R_{270}$ . Here,  $R_{180}$ : the rate at amplitude of 180°,  $R_{270}$ : the rate at amplitude of 270°.

Value of Isochronism (sec./day)		-90	-70	-50	-30	-10	10	30	50	70	90
		~-71	~-51	~-31	~-11	~+9	~29	~49	~69	~89	~109
Winding Angle ( $\varphi - \varphi_0$ )		-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
-75° ~-46°	-60°							//	###		
-45° ~-16°	-30°						###//	###-###	###/	//	//
-15° ~14°	0°		/				/	###/	###//	//	
15° ~44°	30°					/	###//	###/	###-	///	/
45° ~74°	60°		/			###	###//	###-###	###-	/	
75° ~104°	90°	/	//		###//	###-###	###-###	###-	/		
105° ~134°	120°			//	//	/					
135° ~164°	150°		//	###//	###-###	###//					
165° ~194°	180°		//	###//	###//	###/					
195° ~224°	210°		/	///	###/	###-###		//		//	
225° ~254°	240°				///	///	///	//	/		
255° ~284°	270°										

Fig. 2 Horizontal isochronous eigenvalue of 5.5 lines women’s watch.  
Horizontal axis: value of isochronism (-80 to +100 s/day).  
Vertical axis: winding angle  $\varphi - \varphi_0$  (-60° to +270°).

As shown in Fig. 2, the isochronous value changes like as “S” sine wave between all range of the isochronal effective spiral angles and it can be understood because of the fact that the coefficient  $\cos(\varphi - \varphi_0)$  included in Eq. (23). When the isochronal effective spiral angle that means the difference angle between the inner and outer end point of hairspring is around 0 degree, the values of isochronism are distributed around 70 s/day at most positive position.

The samples used in the experiment were those with no play between the balance spring and the regulator pins. At the time when this data was taken (1965), it was decided to adjust no play between the balance spring and the regulator pins. Today this instruction is not thought as better.

Concerning the result of data of isochronous value, escapement errors also must be considered. Escapement error is thought as between -30 to -60 s/day at the amplitude of 180° to 270° in horizontal positions. As in the case of the club-tooth escapement, the value of escapement error goes to always negative. Smaller the amplitude, bigger the value of error of escapement goes to negative.

After considering above conditions, actual eigenvalue of horizontal isochronism of hairspring which is fixed both end of inner and outer ends must be larger positive value. The aimed values of isochronal effective spiral angle were not around 0 degree and often goes to 30° or 60° even today.

Thus, the result of observation of isochronous value could not be agreed as the values are in so positive data. There must be another reason that the eigenvalue goes to so positive region.

In Fig. 2 it is observed that the value of isochronism changes along as the shape of “S” following to the shape of Cosine (isochronal effective spiral angle  $(\varphi - \varphi_0) + \alpha$ ). Hairspring is not fixed completely at the pins of regulator, hairspring always playing between the regulator and outer fixing stud will be actual end point as operation. Thus, the summit of “S” curve comes outside of the regulator. This is a real observation of end point of hairspring and is the end report this time.

As the case of Fig. 2, the 5.5 line caliber, the fixing area between regulator and fixing stud was around 60°, the effective fixing point is 15° outside from the regulator. That means the “ $\alpha$ ” is estimated about 15°, the top of sine curve at Fig. 2 is just left position from the center position of stratified section.

This concludes the lecture on horizontal isochronism.

**Acknowledgement:** I would like to express the deepest appreciation to Mr. Ryuzo Okamoto and Mr. Kenji Noguchi for valuable efforts in translating into English and to Mr. Takashi Sasaya for revisions overall.

## References

- 1) Shoichiro Komaki: Isochronism (1), *Micromechatronics*, Vol. 44, No. 4, pp. 86-90 (2000) , (in Japanese).  
Shoichiro Komaki: Isochronism (1), *Micromechatronics*, Vol. 64, No. 223, pp. 34-42 (2020) , (in English).
- 2) Shoichiro Komaki: Isochronism (2), *Micromechatronics*, Vol. 45, No. 1, pp. 48-52 (2001) , (in Japanese).  
Shoichiro Komaki: Isochronism (2), *Micromechatronics*, Vol. 65, No. 224, pp. 21-29 (2021) , (in English).
- 3) Shoichiro Komaki: Isochronism (3), *Micromechatronics*, Vol. 45, No. 3, pp. 43-49 (2001) , (in Japanese).
- 4) Shoichiro Komaki: Isochronism (4), *Micromechatronics*, Vol. 46, No. 1, pp. 67-75 (2002) , (in Japanese).
- 5) Hiroshi Hasunuma: On the isochronism of hair spring (1) Case of a flat spring, *J. Mech. Lab.*, Vol. 3, No. 3, pp. 18-21 (1949), (in Japanese).

## 研究会報告

### 次世代電源 全固体電池の現状と今後の展望

講師	山田 将之 氏 マクセル株式会社 新事業統括本部 担当本部長
参加者	36名 (正会員 13名, 協賛学会員 1名, 非会員 22名, 学生会員 0名)
	カシオ計算機 (株) 1名 (正会員 1名)
	川西時計店 1名 (正会員 1名)
	京セラ (株) 1名 (非会員 1名)
	京都大学 1名 (非会員 1名)
	合同会社りんぎ 1名 (非会員 1名)
	産業技術高等専門学校 1名 (正会員 1名)
	シチズン時計 (株) 9名 (正会員 3名, 非会員 6名)
	シチズン時計マニュファクチャリング (株) 2名 (非会員 2名)
	セイコーウオッチ (株) 5名 (正会員 2名, 非会員 3名)
	セイコーエプソン (株) 5名 (正会員 2名, 非会員 3名)
	セイコータイムクリエーション (株) 1名 (非会員 1名)
	東海大学 1名 (正会員 1名)
	東京大学 1名 (非会員 1名)
	東静工業 (株) 1名 (協賛学会員 1名)
	日本特殊陶業 (株) 1名 (非会員 1名)
	パナソニックエナジー (株) 1名 (非会員 1名)
	マクセル (株) 1名 (非会員 1名)
	リズム (株) 1名 (正会員 1名)
	その他 1名 (正会員 1名)
日時	2024年4月12日 (金) 14:00~15:40
会場	中央大学 後楽園キャンパス 2号館2階製図室 (2215・2221室) およびオンライン (Webex) にて開催
司会・報告 協賛団体	中宮 信二 セイコーエプソン (株) ウェアラブル機器事業部 WP 設計技術部 (一社) エレクトロニクス実装学会, (公社) 応用物理学会 (公社) 計測自動制御学会, (公社) 精密工学会, (一社) 電気学会 (一社) 電子情報通信学会, (一社) 日本機械学会, (公社) 日本磁気学会 (公社) 日本設計工学会, (一社) 日本ロボット学会

## 第1部 講演

### 1. 概要

様々な社会課題の解決に向けて、電池に対するニーズが多様化している。従来の高エネルギー密度化要求に加え、高耐熱・長寿命・高信頼性・高安全性など、現行のリチウムイオン電池では実現困難な特性を持つ電池が求められるようになってきた。特にリチウムイオン電池では達成し得ない高耐熱・長寿命を実現するため、我々はセラミックパッケージ型全固体電池を開発・製品化した。開発した電池は、高耐熱・長寿命の特性が必須となるFAなど産業機器市場から導入されていく。その後、長寿命の特性などを活かしウォッチなどウェアラブル市場などにも展開されていくと想定している。現在、GPS機能が付加されたソーラーウォッチには当社のコイン形リチウムイオン電池（CLB）が多く採用されている。今後の多様化社会においてはさらにロバスト性の高い電池が必要であり、その有効なソリューションとして全固体電池が最も有望である。長寿命・高信頼性の全固体電池を採用することで、ウォッチの高性能化、デザイン性の向上、メンテナンスフリー化などが実現できると期待されている。本講演では、開発したセラミックパッケージ型全固体電池の特徴を紹介し、ウォッチなどウェアラブル機器市場への展開についても議論する。

### 2. 全固体電池の開発経緯

様々な社会課題のうち最も深刻なものとして労働人口の減少があり、それに伴って強いメンテナンス工数の削減要求がある。なかでも、使い捨ての1次電池を交換するための作業工数やコストは無視できない状況となっており、さらに大量の廃電池を処分するエネルギーや環境に対する課題もある。たとえば産業機器の市場では、現行の1次電池を2次電池化してメンテナンス

工数を削減するには、100°C以上の過酷環境での使用や10年以上の寿命といった特性が必要となる場合がある。このような高い要求には従来のリチウムイオン電池では応えられないため、我々は全固体電池の開発・製品化を強く推進することとした。（Fig. 1）

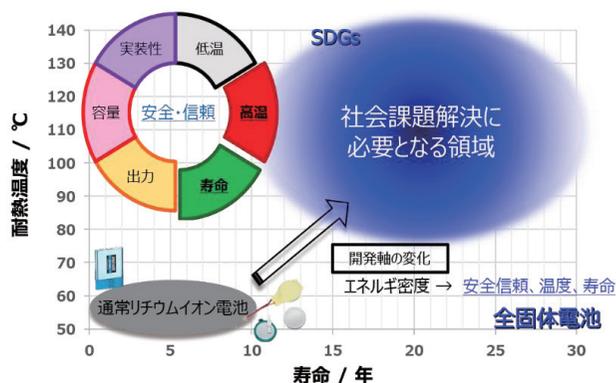


Fig. 1 社会課題の解決に必要な特性

### 3. 全固体電池の特徴

有機電解液を用いた従来のリチウムイオン電池（以降、液系電池と表す）と全固体電池の充電時におけるリチウムイオンの挙動を表1に示す。液系電池では、充電時にリチウムイオンは①～⑥に表す様々な抵抗の影響を受けながら正極から負極へ移動する。一方、全固体電池では液系での複雑な抵抗成分はほとんど存在せず、基本的にリチウムイオンは固体電解質（SE）粒

Table 1 充電時におけるリチウムイオンの挙動

種類	液系電池	全固体電池
Liイオン移動 (充電)		
代表的な抵抗	①溶媒和 ②電解液内の移動 (Li <sup>+</sup> とPF <sub>6</sub> <sup>-</sup> ) ③セパレータ内の移動 ④脱溶媒和 ⑤SEI* 内の移動 * 負極表面の電解液分解物 ⑥溶媒の拡散	①固体電解質内の移動 ②固体電解質間の移動
特徴	低輸率 (リチウムイオン) 反応が複雑	高輸率 (リチウムイオン) 反応がシンプル

子内と SE 粒子間の 2 つの抵抗のみとなる。つまり、液系電池と比較して輸率が高く、シンプルな反応系であるといえる。SE 内のイオン伝導は十分に高いことが想定され、SE 間の抵抗を下げることで理想的なイオン移動を実現することができる。加えて、反応機構がシンプルかつアニオン移動がほとんどないため劣化が起こりにくく、輸送経路が限定されていることから劣化機構もシンプルとなる。以上のことから、全固体電池は高精度での寿命予測が容易となり、耐熱長寿命の要求に高い次元で応えることができる電池と考えられる。

### 4. 全固体電池の開発課題

上述したように、全固体電池には液系電池と同等の充放電特性を持ちつつ、さらに高耐熱・長寿命の要求を満足することが期待されている。それを実現するためには、以下に示す 3 つの課題を解決する必要がある。

課題①：緻密な固体・固体界面の形成（4. 1 項記載）

課題②：正極における副反応の抑制（4. 2 項記載）

課題③：筐体の高気密化（4. 3 項記載）

#### 4. 1 緻密な固体・固体界面の形成

電池の内部抵抗を小さくするためには、良好なリチウムイオン伝導経路の構築が必要である。液系電池の場合、電極内の活物質と電解液は固液界面を形成し、密接に接触してリチウムイオンの伝導経路（パス）が維持される。一方、全固体電池では固体界面の形成が必要となるため、そのままでは密接な接触を継続することが困難である。Fig. 2 に分散条件を変えた場合の電極イメージ、Fig. 3 にそれぞれの放電特性を示す。分散状態 A は、SE と活物質が接触しない、または点接触の状態であり、イオンの伝導パスが十分に形成されていない。また、導電助剤も十分に分散しておらず、電子の伝導パスもうまく形成できていない。このような状況では、イオンや電子の移動が各所で阻害されるために内部抵抗が大きくなる。一方、分散状態 B では SE と活物質の間で良好な界面が構築されて

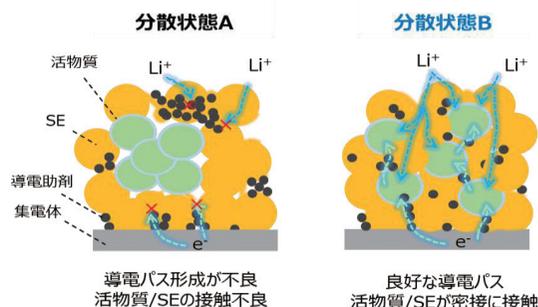


Fig. 2 電極の分散状態の模式図

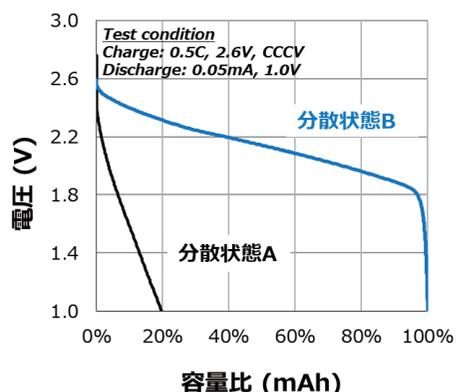


Fig. 3 分散状態を変えた電極の放電

おり、かつ導電助剤も高分散しているためイオンや電子のパスは十分に確保されている。我々は、材料の混合分散や電極作製のプロセスを工夫することで、形状や比重の異なる各種材料を理想的に配置して、上述した分散状態 B の実現に成功した。分散条件を最適化することで電池の内部抵抗を小さくし、定電流でより多くの容量を取り出せていることが放電特性からも把握できる。

#### 4. 2 正極における副反応の抑制

電池の劣化メカニズム解明など正負極それぞれの独立した振る舞いを調べるための手法として、3電極式セルがよく用いられる。当社は全固体電池に使用できる3電極式セルを新たに開発、それを活用することで105°Cでの電池特性劣化は正極での副反応の寄与が大きいことを明らかにした。正極活物質の充電電位はアルジロダイト型SEの酸化電位よりも高いため、正極活物質との界面でSEが一部酸化することが想定される。正極における高温での劣化につながる副反応はこの酸化反応と考え、正極活物質をナノレベルで被覆する材料の改良や活物質の添加元素調整に取り組み、劣化要因となる副反応低減に成功した。

#### 4. 3 筐体の高気密化

全固体電池のポテンシャルを十分に引き出すには、外部から電池内部への水分侵入を防ぐ必要がある。内部に水分が侵入すると SE と反応し抵抗が増加するなど特性低下を引き起こす。これを抑制するには従来の樹脂製パッキングによる封止では困難であったため、我々は金属溶着による完全密閉が可能なセラミックパッケージに着目した。セラミックパッケージは高気密性筐体として水晶振動子や半導体チップなどで実績がある。我々はこのセラミックパッケージ内に電極体を収める構造を開発設計した。Fig. 4 にはセラミックパッケージおよびコイン形筐体のヘリウムリーク試験結果を示す。従来のコイン形筐体は  $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  であったが、セラミックパッケージでは  $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  以下とコイン形と比べて 2 桁以上の高い気密性を持つことが確認できた。Fig. 5 に筐体種を変えた電池を  $85^\circ\text{C}$ 、

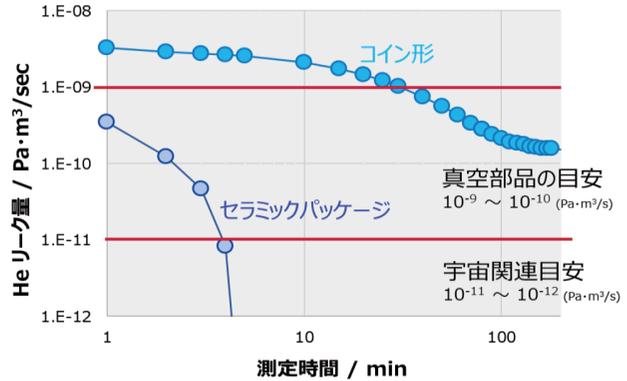


Fig. 4 各筐体での気密性評価

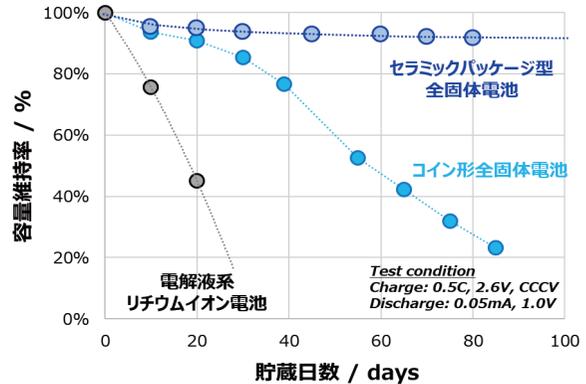


Fig. 5 各筐体を用いた電池の貯蔵特性 ( $85^\circ\text{C}$ 、相対湿度 90%環境)

相対湿度 90%の環境下で貯蔵保管した際の容量維持率を示す。コイン形およびセラミックパッケージ型全固体電池には同一仕様の電極を封入している。液系電池と比較し、コイン形全固体電池の方が高温高湿下における保存特性が良好であり、セラミックパッケージ型全固体電池ではさらに特性が向上した。この結果から、全固体電池の高耐熱長寿命の特徴を最大限活かすには、セラミックパッケージのような完全密閉可能な筐体が必要であることが明らかになった。

## 5. セラミックパッケージ型全固体電池の特性

開発したセラミックパッケージ型全固体電池 PSB401010H の仕様を Table 2, 外観を Fig. 6 に示す. PSB401010H は縦横 10.5 mm, 高さ 4.0 mm, 容量 8 mAh の小型全固体電池であり, 外観が示す通り正負極端子が同一面にあるため, 表面実装が可能である. 上記 4 項の開発課題を解決したことで, 従来困難であった 245°C 付近のリフローはんだによる実装にも対応できる. 一般的な電子部品と同様に基板実装が可能となったことで, 特に産業機器市場において生産性や信頼性が向上し全固体電池の価値向上に寄与している. 動作温度範囲は充電が -20~115°C, 放電が -50~125°C であり, 一般的な液系電池の温度範囲 -20~60°C と比較して広範な動作が可能となっている. 開発したセラミックパッケージ型全固体電池は, これまで適用困難であった環境においても良好に使用することが可能である. Table 2 に示す通り, 0 V まで放電できることも PSB401010H の特徴である. Fig. 7 に過放電状態での貯蔵特性を示す. 0 V まで CCCV 放電した後, 60°C で 20 日間に渡って貯蔵した際の容量維持率を液系電池と比較した. 一般的な液系電池では約 87% 劣化するのに対し, PSB401010H では劣化がみられず過放電に強い電池であることが確認できた. 過放電保護に関する素子が不要になるだけでなく, 在庫などで電池保管する際に電圧管理が不要になるという価値を顧客に提供することができる.

Table 2 PSB401010H の仕様

形式		PSB401010H
寸法	縦(mm)	10.5
	横(mm)	10.5
	高さ(mm)	4.0
重量(g)		1.4
充電 (CCCV)	定電圧値(V)	2.6
	標準電流(mA)	4.0
	温度(°C)	-20~115
放電 (CC)	放電終止電圧(V)	1
	下限電圧(V)	0
	最大電流*1(mA)	30.0
	温度(°C)	-50~125
公称電圧(V)		2.3
標準容量*2(mAh)		8.0
特長		表面実装可能

\*1 放電最大電流: 摂氏+25度(°C)環境下において初度満充電状態で1秒間放電後に1.8V以上を維持できる最大電流値

\*2 標準容量: 充電 (CCCV: 4.0mA / 2.6V / 終止 15h)、放電 (CC: 0.05mA / E.V.=1.0V)、環境温度摂氏+23度(°C)で測定したときの容量

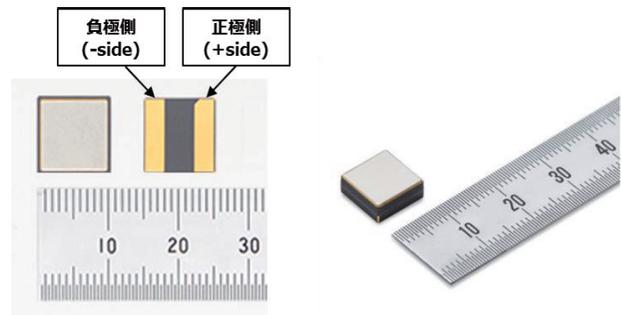


Fig. 6 PSB401010H の外観

Fig. 8 には PSB401010H の寿命シミュレーションの結果を示す。これは貯蔵試験の実測値を基に、寿命予測で実績のある第三者機関に委託して行ったものである。本結果より、25°C環境で 20 年後に約 90%の容量を、105°C環境で 50%以上の容量を維持する寿命予測となり、過酷環境においても長期間にわたって使用可能な電池であることが示唆された。全固体電池は、100°Cなど従来の液系電池では対応困難な環境においても、メンテナンスフリーの価値を提供することができる。Fig. 9 に各種安全性試験の結果を示す。加熱試験、釘差し試験、外部短絡試験など、各種の安全性試験を実施した結果、いずれも発火発煙がなく発熱温度も非常に小さいことから、全固体電池は非常に高い安全性を持つことが確認できた。一般的な液系電池では電解液に関連した化学反応が連鎖的に生じ、場合によっては継続した発熱反応によって熱暴走を起こす。一方、全固体電池は自己発熱が非常に小さく熱安定性も高いため、発火や発煙が許されない絶対的な安全性が求められる環境へ適用できる。PSB401010H はリフロー基板実装など電子部品としての使用を想定した設計となっている。

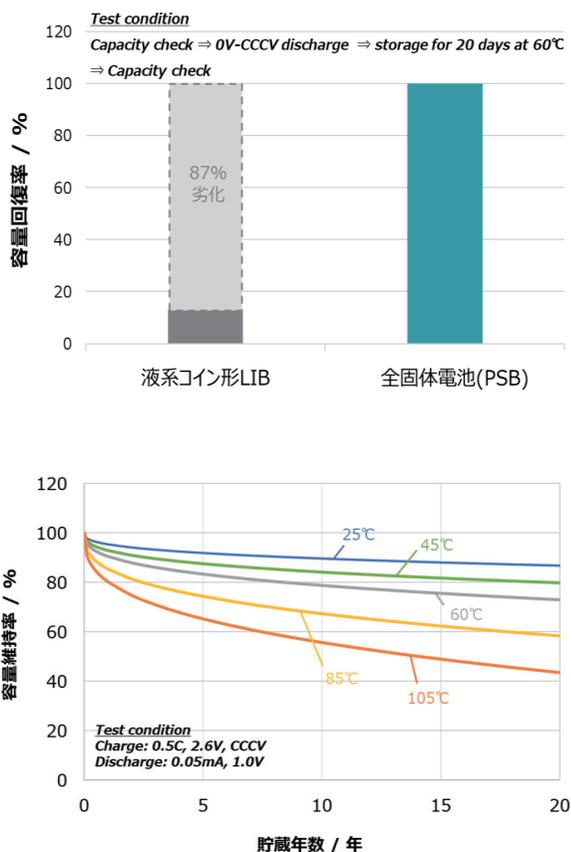


Fig. 8 PSB401010H の寿命予測

Fig. 9 各種安全性試験のまとめ



Fig. 9 各種安全性試験のまとめ

Fig. 10 に電子部品としての信頼性試験結果を示す。各種の電子部品規格の試験においても劣化は見られず、一般的な電子部品と同様の取り扱いが可能となっている。



Fig. 10 各種信頼性試験のまとめ

## 6. 全固体電池の技術展開

更なる社会課題解決に向け、高耐熱長寿命の開発軸に加え、大容量化の開発も進めている。Table 3 には開発した円筒形電池 PSB23280 の仕様、Fig. 11 にはその外観を示す。PSB23280 は直径 22.7 mm、高さ 27.3 mm、容量 200 mAh の全固体電池であり、PSB401010H と同様に広範な温度で動作可能である。全固体電池の特徴を活かすため、高密閉の円筒形外装体の開発を行うことで、大容量化の実現とともに長期信頼性や耐熱性を維持することにも成功している。本電池はインフラモニタリングなどのセンシング用途をターゲットに開発しているが、同様の技術を用いることで高耐熱長寿命の高密閉コイン形全固体電池も実現することが可能である。

Table 3 PSB23280 の仕様

形式		PSB23280
寸法	縦(mm)	22.7
	高さ(mm)	27.3
重量(g)		22
充電 (CCCV)	定電圧値(V)	2.6
	温度(°C)	-20~105
放電 (CC)	放電終止電圧(V)	1
	下限電圧(V)	0
	温度(°C)	-50~125
公称電圧(V)		2.3
標準容量*3(mAh)		200

\*3 標準容量：充電 (CCCV : 100mA / 2.6V / 終止 2.0mA)、放電 (20mA / E.V.=1.0V)、環境温度摂氏+23 度 (°C) で測定したときの容量



Fig. 11 PSB23280 の外観



Fig. 12 バイポーラ電池

Fig. 12 には開発したバイポーラ電池の外観とその電圧を示す。電池電圧は 5.14 V を示し、小型コイン電池一つで 5 V を超える高電圧を達成している。また、本電池は高い入出力特性も有していることから、高耐熱長寿命と合わせて多様なニーズに対応できる可能性がある。

全固体電池の価値を広く提供する上で障壁となるのが充電手法である。従来電池で使用困難な過酷環境を想定した場合、充電手法も含めたソリューション提案が必須であり、その手段の一つがハーベスティングである。Fig. 13 には他社との協業で開発したハーベスティングモジュールを示す。全固体電池に加え、ハーベスタ向けの充電ICと昇圧DCDCを搭載した基板となっている。入力電圧は0~3.6 Vと低電圧からでも入力することが可能となっており、ソーラー発電等のエナジーハーベストに接続することで容易に充電可能なモジュールとなっている。また、出力電圧は2.3 Vに加え3.0 Vや3.3 Vといった一般的なアプリケーション用途を想定した電圧にも対応している。



Fig. 13 ハーベスティングモジュール

## 7. 最後に

全固体電池は高耐熱・長寿命・高信頼性・高安全性を兼ね備えており、従来の液系電池を大幅に越えるポテンシャルを有している。これら特性を活かし、産業機器、インフラ、医療など多方面の市場で全固体電池の活用が検討されている。ウォッチ用途に注目すると、全固体電池の高い安定性をベースとした安全安心の提供、長寿命特性によるメンテナンスフリー化、高信頼性や広範な使用温度範囲によるロバスタ性向上、廃電池削減による脱炭素化、デザインやサイズなど多様な嗜好への適用性向上、など多方面に貢献できると期待している。一般的なソーラーウォッチで用いられる太陽電池との併用でも問題なく使用することができ、過放電特性に強く0 Vで長期間の保管が可能という特徴からも、全固体電池はウォッチとの親和性も非常に高いと言える。今後、全固体電池の特別な性能から、その用途は多方面に拡大できると考えられ、引き続き電池技術を通じて社会課題を解決し、持続可能な社会の実現に貢献していきたい。

## 8. 講演を終えて

本学会で講演できる機会を設けていただいた関係各位に感謝する。講演参加者の方々から電池特性のみならず安全性、信頼性、コスト、法規制など多角的な視点でのご質問を頂き、我々の達成すべきミッションもブラッシュアップされたと感じている。皆様のご期待に応えられるよう改善に努め、時計市場の発展に貢献していきたい。

## 第2部 質疑応答

Q1：全固体電池が電子機器に組み込まれた場合、全固体電池は性能を維持しているが、他の電子部品が寿命をむかえ廃棄しなければならない時、全固体電池はどのような扱いとなるのか。

A1：現時点は全固体電池が立ち上がったところで数量が少ないこともあり、産業廃棄物として廃棄することになる。通常のリチウムイオン電池は電解液、樹脂、金属等、色々な材料が組み込まれているが、セラミックパッケージ型全固体電池は金属とセラミックのみで構成されているので、リサイクルしやすいと想定している。リサイクルコストの点では、全固体電池は安全性が高いため、数量など制限なしに輸送できる可能性があるので、将来的に輸送コストを含めてリサイクルコストを下げられると考えている。

Q2：全固体電池はサイクル性や急速充電など理想的な電池と理解したが、例えば全固体電池を小型機器に使用する際、全固体電池ならではの注意点はあるのか。

A2：全固体電池は、寿命、耐熱性、信頼性および安全性の高い電池である。万一、中身が暴露したとしても、小型であれば大きな問題がないことを確認している。ただ劣化という観点では、セル内に水分が侵入して電解質と反応すると劣化するので、高密閉なパッケージ構造を採用する必要がある。

Q3：電池業界として全固体電池は車載向けなど大型化の方に向かうのか、また小型化の方にも可能性を感じているのか、全固体電池の将来に向けた成長はどのような方向性となるのか。

A3：今後は電気自動車など大型化の方向性はあるが、エネルギー密度を上げることが課題である。一方で体内に埋め込むシーンなど、小型で高信頼・長寿命の方向性もあり、大型から小型のあらゆる領域で全固体電池が活用されることを想定している。当面はエネルギー密度の課題もあるので、耐熱性や長寿命に重点を置くアプリケーションに最適なソリューションになると考えている。

Q4：電極は厚い方が高容量にできるという認識でよいか。

A4：同じ体積で考えた場合、電極を薄くすると積層数を増やす必要があるので、厚い電極の方がエネルギー密度は上がる方向になる（電極が厚くなると負荷特性は低下する）。

Q5：全固体電池の形状はセラミックパッケージの方が主流となり、コイン形にトライすることはないのか。

A5：セラミックパッケージは大型化した時のコストが高くなると想定しているのので、コイン形や円筒形などの全固体電池が必要と考えており、現在開発を進めている。

Q6：車載含め色々なメーカーとコンタクトを取られ開発を進めている中、全固体電池に対するお客様からの要望はなにか。またコイン形でΦ9.5 mm や Φ6 mm など、小型電池の展開を考えているのか。

A6：大容量化のニーズが強いため、それに向けてコイン形や円筒形を開発している。コイン形についてはウェアラブル系や医療系で要望があり、Φ6 mm などの開発を検討している。

Q7：電気自動車は充電時間が長く、通常リチウムイオン電池は急速充電が難しいということだが、全固体電池では急速充電は可能となるのか。

A7：全固体電池の急速充電ポテンシャルは高く、しかも今の我々のケミストリではリチウム析出の懸念なく急速充電できる。その特長を活かしてEV や HEV に全固体電池を適用するのであれば、急速充電に特化したものが出てくると想定している。なお、全固体電池であってもカーボン系材料を負極に使用すると、従来の液系リチウムイオン電池と同様に急速充電による劣化リスクが発生するので、電極材料の選定は重要となる。

Q8：国内外メーカーにおいて色々な着眼点で全固体電池の開発競争があると思うが、全固体電池の業界全体のトレンドや今後の市場規模の情報について教えてほしい。

A8：小型化と大型化のトレンドに分かれており、小型化はセラミックコンデンサ（MLCC）を製品化しているメーカーにて、MLCC 類似構造で全固体電池が開発されている。酸化物系の固体電解質は一般的に伝導度が低く、焼結プロセスが必要になるので、大型化が難しいと考えている。大型化についてはOEM や電池メーカーで開発されているが、現在の液系リチウムイオン電池が非常に高性能なので、それを打ち負かすような全固体電池というと非常に開発難度が高くなる。我々は全固体電池の本来の特徴はエネルギー密度ではなく長寿命と耐熱性と考え、その特徴で勝負できる領域を探しており、FA や医療などの事業領域で検討している。

Q9：全固体電池のセラミックパッケージ内にはパワーマネジメントなどの集積回路は内蔵しているのか。

A9：現在、セラミックパッケージ内には電池としての機能しかない。パッケージ内部に隙間があるので、充電制御 IC などを内部に実装するというアイデアはある。

Q10：過充電を継続すると何が起きるのか。電流が入らなくなるのか。

A10：過剰に充電が継続しても、基本的に負極電位が下がるだけで、何も起こらず安全である。過充電の継続、釘差し、外部短絡全て発熱は1~2°C以下に収まる。

Q11：将来、電気屋さんなどでパッケージとして売られるようなことがあるのか。その時の価格はどのようになると想定できるか。

A11：全固体電池は非常に安全性が高いため、将来的な市販製品としての可能性はあると考えている。価格は、将来、単三電池のように膨大な数量を生産するようになれば、数量効果で価格は下げられる可能性がある。

Q12：材料の充填が重要とのことだが、振動や衝撃で異常が発生することはないか。

A12：固体電解質が非常にやわらかいため、電極体の充填率は非常に高めることが可能である。そのため電極体の硬度は非常に高く、ウェアラブル機器で想定されるような衝撃や振動では構造は崩れないと考えている。

Q13：現在中国など多くの地域や国でリチウムイオン電池の規制が強化されているが、全固体電池に対する規制の動向について教えてほしい。

A13：現在、電池工業会のワーキンググループにて、全固体電池の輸送規制緩和に関する検討を行っている。全固体電池で輸送規制が緩和されれば、日本で製造して世界中に輸送することが容易となるため、日本を中心とした産業に発展させることができると期待している。

## 特別研究会報告

### 日本時計学会 2024 年度 特別研究会(見学会付き) 職人技を超える難作業の自動化に挑むロボット技術の最前線

企画委員会 木村 南

1. 【テーマ】 職人技の伝承そして職人技を超える先進ロボット技術の開発と実際のロボット作業の見学を通して、ロボットの現在と AI 利用について展望する。
2. 【概要】 セイコーエプソン株式会社では 1973 年にウォッチムーブメントの組立に自社製スカラロボットを導入し、最近では手作業組立作業や目視による色検査などの熟練した職人の技を誰でも行えるロボットを開発しマスメディアで話題となりました。ロボット開発の拠点である豊科事業所で技術者の方から力覚・色覚などの各種センサの開発と製品化についての特別講演と開発された精密ロボットによる職人技のデモンストレーション(H7 の穴に h7 軸を挿入・電子部品の基盤実装・カラータイルの色むら検知など)と質疑応答があった。
3. 【日時】 2024 年 8 月 30 日(金) 13 時~16 時 20 分
4. 【会場】 セイコーエプソン株式会社・豊科事業所 (長野県安曇野市豊科田沢 6925)
5. 【特別講演】 13:10~14:45
  - 1) 「力覚センサ・分光ビジョンシステムとロボット融合技術」  
講師：エプソン販売(株) 鹿島航氏, セイコーエプソン(株) 上田純也氏
  - 2) 「熟練者による手先作業や目視による色検査の自動化を可能にする独創のテクノロジー」  
講師：エプソン販売(株) 梶田佳蓮氏, セイコーエプソン(株) 田澤哲夫氏
6. 【見学会】 15:00~16:15 力覚センサ付きロボット・分光ビジョンシステムロボット見学
7. 【主催】 (一社) 日本時計学会
8. 【協賛】 (一社) エレクトロニクス実装学会, (公社) 応用物理学会, (公社) 計測自動制御学会, (公社) 精密工学会, (一社) 電気学会, (一社) 電子情報通信学会, (一社) 日本機械学会, (公社) 日本磁気学会, (公社) 日本設計工学会, (一社) 日本ロボット学会
9. 【参加者】 講師を含めて 22 名, 正会員 (協賛学会員含む) 8 名, 一般 (賛助会員含む) 9 名, 講師 4 名, セイコーエプソン(株)関係者 1 名
10. 【講演要】

#### 1) 「力覚センサとロボット融合技術」

クォーツ時計から発展した水晶圧電式力覚センサは高感度 0.1N, 高剛性 XYZ 荷重 250N, モーメント 18Nm・・・0.5 $\mu$ m の嵌合可能

- ① はめあいの場合=穴を探る→穴を発見→軸を回転→押込む
- ② ねじ締め = 締め具合を力覚センサで制御
- ③ コンデンサーの挿入 = 足の長い方を先に挿入→短い足を挿入
- ④ 研磨 時計外装品など
- ⑤ コネクタの挿入 端子を 3D カメラ計測→向き制御→挿入

#### 【質疑】 力覚センサと力覚センサ搭載ロボットシステムに関して

- Q) 多角の嵌め合い：穴の検知と多角軸方向合わせの仕方を教えてください。
- A) ロボット制御ソフト EPSON RC+7.0・・・GUI 可能  
力覚センサでトルク・抗力推定, 接触→面合せ→探り→食い→押込み



写真1 力覚センサ講演の様子  
講師: エプソン販売(株) 鹿島航氏

## 2) 「目視による色検査の自動化を可能にする独創のテクノロジー」

外観検査での目視による色検査では判定基準があいまいで、職人技術による属人性のためデータ化できなかつた。RGBカメラや $L^* \times a^* \times b^*$ 表示の分光測色計では色むらが区別できなかつた。そこで測定面の色スペクトル撮像する分光カメラを開発した。1枚のタイルにおける色むらや複数枚あるタイルにおける色むらの測定ができた。エプソンロボットに分光ビジョンシステムを組み込み色違い・色むらの選別ができた。

【質疑】 分光ビジョンに関する測定方法・精度について質疑があった。

Q) ベルトコンベア搬送部品の色むら取り除きの仕方を教えてください。

A) 分光スペクトルは 20nm 間隔で 16 回撮像するので 2~3 秒静止が必要。

Q) グラデーション印刷面の色検査はできますか？

A) 現在試しているところです。



写真2 分光ビジョンシステム講演の様子 講師: エプソン販売(株) 梶田佳蓮氏

## 【見学会】

力覚センサ付きロボット・分光ビジョンシステムロボットのデモンストレーションを見学した。

写真3の高精度八角柱の挿入について、参加者の8割以上の方がトライしたが誰も挿入できなかったが、力覚センサ付きロボットは八角柱を把持後に穴に接触させて微い動作をしたのちに簡単に八画穴に挿入させていた。



写真3 高精度八角柱の挿入 写真4 色検査する分光ビジョンシステムロボットのデモンストレーション (写真提供: セイコーエプソン(株) 藤沢照彦氏)

## まとめ

力覚センサ、分光ビジョンの技術背景が詳しく説明され、ロボットを実際に開発されているエンジニアの方から直接お話が伺え職人技ロボットのデモンストレーションも体験的に見学できる新しい企画でした。参加された方からも「大変凄い技術」「発想が素晴らしい」「とても真似ができない」「質問にわかりやすく答えていただいた」など多くの声を寄せていただきました。

## 謝辞

今回の企画運営にご協力いただいたセイコーエプソン株式会社 MS 営業部原明様をはじめとする関係各位に厚く御礼申し上げます。

## 見学会報告

### 専門学校 ヒコ・みづのジュエリーカレッジ

小笠原 健治

セイコーウオッチ株式会社

見学先：学校法人 水野学園

ヒコ・みづのジュエリーカレッジ 東京校 青山校舎

〒150-0002 東京都 渋谷区 渋谷 1-20-5

日 時： 2024年6月14日（金） 14:00 ～ 16:00

スケジュール：

14:00 ～ 14:45： 学園全体説明および各コースの説明

14:45 ～ 16:00： ウオッチ、シュー&バッグ、ジュエリー、自転車の各コース見学

参加者数： 22名（正会員： 7名、賛助会員： 15名）

本年も日本時計学会見学会が上記の要領で開催された。

見学会では、学校法人 水野学園の沿革や各専門コースに関しての紹介を受けた。

水野学園は、1966年にヒコ・みづの宝石デザイン学校として設立され、1983年に学校法人 水野学園として認可され、1990年にヒコ・みづのジュエリーカレッジに校名を変更した。ジュエリーから始まった水野学園だが、1997年にウオッチメーカーコース開設、2004年にシューメーカーコース開設、2007年にバッグメーカーコース開設（現在はシュー&バッグコースとして両方学べる）、2008年に大阪校開校（当初はジュエリーコースのみであったが、現在はウオッチメーカーコース、自転車メカニックコースの3コースがある）。2012年に東京サイクルデザイン専門学校が開設、2016年に東京すし和食専門学校が開設、2024年には講義よりも実習に重きを置いた日本さかな専門学校が開設され、様々な業界への就職が期待されている。



図1 青山校舎外観



図2 学校紹介

学園の紹介後、ウォッチ、バッグ、シュー、ジュエリー、自転車の各コース見学を行った。

東京校のウォッチメーカーコースは、2022年に2年制のウォッチメーカーコースが廃止され、3年制のウォッチメーカーマスターコースに統一されており、部品製作などを含む時計修理の基本をマスターし、クロノグラフ時計まで習得するカリキュラム構成となっている。2024年には時計製作研究生からインスティチュートコースに変更され、3年間で学んだ修理技術を応用して時計を製作または修復作業に特化したプログラムが行われている。

インスティチュートコースの学生には日程の都合で会うことが出来なかったが、それぞれの学生が自ら設定したテーマに沿った製作過程の作品を見せて頂くことができた。

ウォッチメーカーマスターコースの見学では、時計組立に必要な工具を3Dプリンタで自作している学生が紹介され、作業効率を改善するために従来の概念に囚われない柔軟な発想で授業に取り組んでいる姿勢に驚きを感じた。

シューコースの見学では、講師から一人の学生に現在制作している靴について説明するよう指示が出されると、作品のコンセプトやこだわりについて分かりやすい説明が行われ、プレゼン能力も含めたスキルを身に付けていることが垣間見られた。

今回の見学会では、全コース共に教室にお邪魔させていただき学生から生の声を聴くことができたため、見学者にとって有意義な見学会になったのではないかと考える。

見学会後の質疑応答においても多数の質問があり、盛況のうちに見学会を無事終了することができた。

最後に、この場をお借りして今回の見学会を受け入れて頂いた学校法人水野学園並びに、ご説明頂いた担当者の方々、授業中のお邪魔を快く受け入れて頂いた学生の皆様に感謝を申し上げます。



図3 授業風景  
(ウォッチコース)



図4 授業風景  
(バッグコース)



図5 授業風景  
(シューコース)



図6 授業風景  
(ジュエリーコース)



図7 授業風景  
(自転車コース)

## 学術講演会報告

### 2024年度マイクロメカトロニクス学術講演会実施報告

鳴野 彰従\*

\*リズム株式会社、埼玉県さいたま市大宮区北袋町 1-299-12、郵便番号 330-9551

2024年9月17日、中央大学後楽園キャンパスにて2024年度マイクロメカトロニクス学術講演会をオンライン併用で開催いたしました。会員参加者28名、一般参加者41名、時計メーカー、大学等から合計69名のご参加をいただきました。今年度も会場に多くの皆様にご来場いただき、対面での講演と活発な質疑応答で盛況となりました。

今年度の学術講演会は午後からの開催となり、第1と第2セッションを合わせて6件の研究成果が発表されました。モノづくりの技術による時計の魅力向上に加え、マーケティングに繋がる成果発表もあり、とても興味深いものとなりました。

また第2セッション開始前には青木賞授賞式が行われ、マイクロメカトロニクス誌 Vol.66, No.227 に掲載の「年差±1秒の光発電ムーブメントの開発」が受賞され、シチズン時計株式会社の長瀬智氏へ表彰状が授与されました。

学術講演会の最後は特別講演として、時計 Web メディア「Hodinkee」日本版編集長の関口優氏にご登壇され、「時計デザインの変調と変わる製品設計」と題してご講演をいただきました。自社ムーブメント開発の軌跡、ケースデザインの変化、デザインソースの深化、文字盤が果たす重要性という4つの切り口か

ら変遷を詳しく語って頂きました。

学術講演会終了後は同学内5号館にて各セッションの講演者、特別講演の関口氏を囲んで技術交流会を開催いたしました。時計メーカー、大学等から多くの皆様にご参加いただき、活発な意見交換が行われました。また技術交流会ではベストプレゼンテーション賞が発表され、『月齢自動計算機能「ルナプログラム」を搭載したムーブメントの開発』を発表されたシチズン時計株式会社の原口大輔氏、宮原太郎氏が受賞され、表彰状が授与されました。

ご参加いただいた皆様、理事運営委員、スタッフ皆様のご尽力により、今年度も無事に学術講演会を終えることができました。オンラインと会場の同時開催がすっかり定着してきておりますが、オンライン参加という利便性も感じつつ、会場参加ならではの体験価値というものを改めて確認する事ができました。引き続き満足度の高い学術講演会の開催・運営に努めてまいります。

本学術講演会は、時計メーカー、大学が一堂に会して交流を深め、業界動向や技術革新について意見交換が行える貴重な機会です。これからも積極的なご参加をよろしくお願いたします。



Fig.1 セッションでの発表の様子



Fig.2 セッションでの発表の様子



Fig.3 関口優氏による特別講演の様子



Fig.4 技術交流会の様子

## 特別講演 時計デザインの変調と変わる製品設計

関口優

HODINKEE Japan 編集長

\*株式会社ハースト・デジタル・ジャパン，東京都港区南青山 3-8-38 クローバー南青山，〒107-0062

(2024 年 10 月 18 日受付)

### 略歴

- ・ 1984 年埼玉県生まれ
- ・ 新卒にて出版社に入社，2014 年からスイス・バーゼルでの取材に赴き，2016 年より腕時計専門誌の編集長に就任
- ・ 業界最年少編集長にして同誌を専門誌売上 NO.1 に導き，2019 年 9 月より HODINKEE Japan 編集長に就任
- ・ 2020 年 12 月には HODINKEE Magazine Japan Edition を創刊
- ・ 2023 年 10 月よりラグジュアリーメディア Richesse Digital を創刊し編集長を兼任，現在に至る



### プロローグ

小型化が進む近年の時計デザインのトレンドは，単にケースの直径を小さくするだけにとどまらず，ディテールにも変化が見られる．まず，簡単に，ここ最近の小型化潮流に至るまでのトレンドの変遷を振り返ってみたい．2011 年ごろからは大きなケースサイズが主流で，ウブロやブライトリング，タグ・ホイヤーといったブランドが存在感を増していた．2016 年にはタグ・ホイヤーが 200 万円を切るトゥールビヨンを発表し，ヴァシュロン・コンスタンタンもオーヴァーシーズをリニューアル．2019 年以降はコロナ禍の影響もあり，より高価格帯のスポーティウォッチが注目を集めるようになり，そのブームをロイヤル オークによって牽引する一方で，オーデマ ピゲが四半世紀ぶりに新作 CODE 11.59 バイ オーデマ ピゲを発表した．そして 2024 年，これまでのトレンドの逆をいくように 40 mm を切る新作が存在感を増し，ドレスウォッチが再び注目を浴びている状況．グランドセイコーが手巻きのハイビートキャリバーを 50 年ぶりに発表するなど，小型かつ精巧な時計が再び注目されている．これらの流れがどのように時計デザインや設計思想

の変化に影響を与えているかを追求する。

## 目次

1. 自社ムーブメント開発の軌跡
2. ケースデザインの変化
3. デザインソースの深化
4. 文字盤が果たす重要性

### 1. 自社ムーブメント開発の軌跡

#### サマリー

- ・ 2011年から2024年における主要ブランドによるムーブメント開発の歴史と変遷
- ・ 特に新技術と製造工程の進化によるムーブメントの小型化と耐久性向上
- ・ スイスウォッチの対外輸出額の変遷

2014年から2024年にかけて、各ブランドが自社ムーブメント開発に取り組み、耐久性や機能性が強化された。ロレックスはキャリバー3255、3235、4131などを発表し独自のクロナジーエスケープメントを標準化、オメガはマスター クロノメーター規格を推進して業界随一の耐磁性を誇るなど、量産品における精度追求と耐磁性の向上がスタンダードとなった。また、パテック フィリップは工作技術の発達（LIGA）により、3番車の歯先をバネ状の弾性をもたせたものとし、摩耗しやすい秒カナ規制バネが不要に。このアンチバックラッシュ機構を導入し、ムーブメントの安定性を高めた。

メーカー	ムーブメント	直径 (mm)	厚さ (mm)	製造年
ロレックス	キャリバー 3255	28.5	6	2015
ロレックス	キャリバー 3235	28.5	6	2016
ロレックス	キャリバー 4131	30.5	6.5	2023
オメガ	キャリバー 8900/8901	29	5.45	2015
オメガ	キャリバー 3861	27	6.87	2019
オメガ	キャリバー 8806	29	4.6	2020
パテック フィリップ	キャリバー 324 SC	27	3.3	2015
パテック フィリップ	キャリバー 26-330 SC	26.6	3.3	2019
パテック フィリップ	キャリバー CH 29-535 PS	29.6	5.35	2020

Fig. 1 ムーブメント開発の歴史と変遷 (1)

一方で、ムーブメント開発はコンプリケーションの拡張やケースデザインに合わせた最適化が進み、オーデマピゲやブレゲなどは複雑なキャリバーを展開し、高精度と信頼性を兼ね備えたモデルを生み出している。オーデマピゲは、CODE 11.59 でローンチされた新作自動巻きの 4302 がひとつの軸で、クロノグラフバージョンの 4401 も同時開発。巻き上げ方式がリバーサー式に改められて、自動巻きの安定性が増した。なお、径が拡大されており、コンプリケーションを豊富に展開するためのベースづくりであることが見て取れる。キャリバー7121 はロイヤル オーク エクストラ シン用の新型極薄ムーブメントでジャガー・ルクルト製 920 ベースの 2121 から大幅改良。ブレゲはレマニア、フレデリック・ピゲ製ベースのキャリバーから、完全新作となる 777A をマリーンに搭載。15 リーニュの大きなキャリバーで、耐久力が求められるスポーティウォッチ市場に乗り出した。タグ・ホイヤーが開発したキャリバー ホイヤー02 は、当初トゥールビヨンを搭載して初登場し業界内外を驚かせた。垂直クラッチとコラムホイールを搭載した自動巻きクロノグラフという、日常使いする上での安定性を高次元で実現したこのムーブメントは、現在では同社の基幹クロノグラフキャリバーとなっている。近年、キャロル・フォレストイエ・カザピ氏の加入によりブラッシュアップが図られ、一部の歯形と巻き上げ方式が両方向へと変更された。これに伴い、MPS 製のリバーサーを採用している (Cal.TH20-00 へと名称も改められた)。

メーカー	ムーブメント	直径 (mm)	厚さ (mm)	製造年
オーデマピゲ	キャリバー 4302	32	6.8	2019
オーデマピゲ	キャリバー 2950	31.5	7.9	2020
オーデマピゲ	キャリバー 7121	29.6	3.2	2022
タグ・ホイヤー	キャリバー 1887	29.3		2010
タグ・ホイヤー	キャリバー Heuer 02	31	6.95	2017
タグ・ホイヤー	キャリバー 5 COSC	26	4.6	2019
タグ・ホイヤー	キャリバー TH30-00	31.8	6.5	2022
ブレゲ	キャリバー 777A	33.8		2016
ブレゲ	キャリバー 581DR	36	3	2018

Fig. 2 ムーブメント開発の歴史と変遷 (2)

カルティエが用いるキャリバー1847 MC はリシュモングループの多くのブランドが個別にベースムーブメントとして採用。小型で汎用性に優れ、高い耐磁性も備えている。ジャガー・ルクルトの 925/1 は、パテック フィリップの 26-330S C と同様にアンチバックラッシュ歯車を用いて秒カナ規制バネを省略。この歯車は元々アジェノー社が開発したもので、2016 年に特許フリー化されたことで徐々に採用の輪が広がった。

メーカー	ムーブメント	直径 (mm)	厚さ (mm)	製造年
カルティエ	キャリバー 1847 MC	25.6	3.8	2015
ジャガー・ルクルト	キャリバー 822/2	20.2	2.94	2016
ジャガー・ルクルト	キャリバー 925/1	26.6	4.9	2020
セイコー	キャリバー 9S86	28.4	5.89	2014
セイコー	キャリバー 9SA5	31	5.18	2020
シチズン	キャリバー 0100	25.6	3.9	2019
シチズン	キャリバー 0200	30	4.1	2021

Fig. 3 ムーブメント開発の歴史と変遷 (3)

近年のムーブメント開発はスポーティモデルの流行を背景に、ベーシックな3針キャリバーの基礎体力向上が図られたと言える。スポーティモデルに耐える頑強なムーブの開発やアップデート、また、これまでルクルトやレマニアなどのムーブをベースとしていたクロノグラフを中心とした複雑機構の内製化が急がれたというのがよりリアルな実情だと思われる。なお、ケニッシ社を中心とした新興勢力も出現しており、ムーブメントを大きくETA社に依存していた産業構造が変革に向かっている。

メーカー	ムーブメント	直径 (mm)	厚さ (mm)	製造年
ケニッシ	MT5621	31.8	6.5	2015
ケニッシ	MT5612	31.8	6.5	2015
ケニッシ	MT5813	30.4	7.23	2017
ケニッシ	MT5652	31.8	6.52	2018
ケニッシ	MT5402	26.0	4.99	2018
ケニッシ	MT5400	30.4	4.99	2020
ケニッシ	NN20/1	31.0	4.95	2020
ケニッシ	NN20/2	31.0	5.1	2020
ケニッシ	T10	28.4	4.12	2021
ケニッシ	KMT-07	31.8	6.5	2022

Fig. 4 ムーブメント開発の歴史と変遷 (4)

～KENISSI 社～

## 2. ケースデザインの進化

サマリー

- ・ケースの薄型化，スポーティケース，ユニーク形状のケース，小型ドレスウォッチの進化
- ・例として，ロイヤル オーク RD2 やオクト フィニッシモ ウルトラのケースデザイン
- ・チタンやセラミックなどの異素材を取り入れたケースデザインの広がり

ケースデザインは年々多様化し，薄型ケースやスポーティケース，ユニークな形状を強調したケースが市場に登場している．薄型では，永久カレンダーの構造を統合し，ケースとベゼルの 2 ピース構造を突き詰めたオーデマ ピゲのロイヤル オーク RD2 のようなモデルや，ムーブメントの地板をケースとして用いたことでわずか 1.80 mm の厚さを実現した，ブルガリのオクト フィニッシモ ウルトラのような革新的モデルが注目を集めている．

さらに，異素材を活用したスポーティなケースデザインは，近年のラグジュアリースポーツウォッチブームの中で花開いた．従来，加工が難しいとされて，美しい仕上げを与えることが困難だったチタンやセラミックなどの素材が積極的に使用されている．その好例は，ラドーやシャネル．そしてチタンにおいては，セイコー クレドールから復刻を果たしたロコモティブは驚異的だ．

カルティエが牽引したと言っても過言ではない，独自のケースシェイプを持つ時計もその絶対数が増えている．これは，ムーブメント開発の成熟によってサイズ面，耐久性の面からケースデザインの自由度が向上したことが寄与しているだろう．これまででは一部のジュエラー系メゾンに限られていたユニークシェイプのデザインだが，ANOMA ウォッチのように近年増加中であるマイクロブランドからも発表され始めた．カルティエをフォローするような動きは今後も予想されるが，独創的なデザインを具現化できる工作技術やムーブメントの成熟が，この現象を後押ししそうだ．

大定番となったスポーティウォッチの存在があるからこそ，カウンターパートとして小型ドレスウォッチの存在感が強まっている．小型かつ繊細なムーブメントを搭載しながらも，スポーティな時計にはないクラシカルかつ，線と曲線が織りなすプリミティブなデザインバランスに傾倒するファンが増加した．単純にクラシカルな見た目が好感されたロンジンのマスターコレクションのような例，ショパールの L.U.C や現代の名工による彫金を施されたクレドールのように，付加価値の高いハイエンドムーブメントを搭載して，機械式時計の根源的な魅力に立ち返るモデルも確実に存在感を増している．

### 3. デザインソースの進化

サマリー

- ・アール・デコ，バウハウス，ブルータリズムといったデザイン潮流が時計に与えた影響
- ・1920-30年代のデザイン要素を持つ角形ウォッチのトレンド
- ・建築様式から影響を受け，ブルータリズムの特徴をケースデザインに反映

時計デザインには，アール・デコ，バウハウス，ブルータリズムといった歴史的なデザイン潮流が影響を与えている。アール・デコは，1920年代から1930年代にかけて生まれた幾何学的でシンメトリックなデザインが特徴で，現代でもカルティエやジャガー・ルクルトの角形ウォッチは，過去に創造されたそのシェイプを堅持しており影響の強さが見られる。また，1930年代初頭のバウハウススタイルは，お膝元であるドイツブランドを中心に，デザインと機能のバランスを追求した多くの時計に影響を与えた。スイスウォッチの象徴的存在であるが，なかでも1932年に初めて登場したパテックフィリップのカラトラバはその代表例とされており，現在もドレスウォッチのデザインの模範とも言われる。さらに，2024年にはオーデマピゲが，1960年前後に流行したブルータリズムという建築様式に影響を受けた時計デザインを復刻。当時，7本だけ製造されたという Ref.5159BA をソースとして，リマスター02 というオマージュモデルを発表した。戦後，デザインのトレンドも大きく揺れ動くなか，ル・コルビュジェらが主導した建築様式であるブルータリズムは，素材の質感を活かしたものであり，もともとは打ちっぱなしコンクリートやガラスといった素材をそのまま用いる，粗野ともいえる様式。そのコンセプトと共鳴し反響させるように，大胆なシェイプを荒々しい素材感で視覚的にも強いインパクトを与えている。ただし，この場合，ケースへの巧みな仕上げ技術によってその様式を成立させており，決して素材の生のテクスチャが活かされているわけではない。

### 4. 文字盤が果たす重要性

サマリー

- ・文字盤のトレンドカラーの推移，ラッカー技術の進化による色彩の安定性向上
- ・耐久性を持つPVDコーティングの活用，型打ち技法による金属文字盤のデザイン
- ・エナメル文字盤の高付加価値化とブランド専属アトリエの役割

文字盤のデザインとその表現技法は，時計の個性を決定づける重要な要素だ。例えば，ラッカーの質が向上したことで，より鮮明で安定したカラーが実現し，ロレックスのオイスターパーペチュアルに代表されるようなポップな色彩が，ファンの中で新鮮に受け取られて人気を博してい

る。ロレックスの成功によって各社も様々なカラー文字盤に挑戦する潮流が生まれているが、近年のカラートレンドが、保守的だと目されるロレックスによって作り出されているという事実も面白い。なお、無反射コーティングの質向上によってロレックスは2020年ごろからガラス風防の両面にこれを施すようになり、文字盤がクリアに見えるようになったことも、カラーダイヤルが増加した理由のひとつだと言われている。スイスのMäder, CADORといった企業が文字盤の質向上に大きく寄与している。

文字盤への着色法としてポピュラーなPVDコーティングも技術が進化。限られた色しか再現できない、剥離リスクがあるなど、従来PVDがはらんでいた欠点が近年解消され続けている。これにより色の再現性や耐久性が向上し、さまざまなカラー文字盤の開発が進む。特にタグ・ホイヤーはスイス最大手であるポジティブコーティング社とタグを組み、これまでラインナップに少なかったカラー文字盤を多数用意。ケースにまでブラックPVDを採用するモデルが登場している。

日本では、グランドセイコーが主導する、型打ち技法を用いた文字盤デザインが注目されている。これは、型打ち職人によって型が作られ、金属文字盤にスタンプ処理を施すもので、型打ちされた金属にさらに塗装を重ねることで、深みのある質感を実現。耐候性への配慮から、文字盤表面に厚く塗装やクリアを施すのが特徴的な日本メーカーにとっても、質感を失いづらい型打ちに相性の良さを見出し表現の幅を広げている。

高付加価値を生む文字盤の例としては、スイスで伝統的なエナメル文字盤が高く評価されている。特にアニタ・ポルシェ氏による作品は群を抜いており、高級メゾンがこぞって彼女との共作を作る。アニタ氏は親戚のエナメル作家、ピエール・シュネーベルガーから才能を見出され、12歳からエナメルを手掛けるようになった人物。彼女は特定のブランドに属さず自身の工房を構えており、他のメンバーも関わった工房作のものには「AP」というサインが入る。フルスペルサインの場合のみ、御本人の作品。より美しい色表現を叶えるエナメルに不可欠な、かつて製造されていた釉薬が入手困難になっていることは、この工芸が断絶しないためのひとつの課題。鉛を多く含んだかつての金属用釉薬は環境配慮から生産されなくなり、アニタ氏のような一部のエナメルリストがデッドストックを収集しているという。

ハイエンドモデルを製造するメゾンのなかには、独自の文字盤、特にエナメルアトリエを構えるところも少なくない。ラ・ショー・ド・フォンにあるカルティエのメゾン デメティエダールでは、クロワゾネやシャンルベといった伝統的エナメルやジュエリーを駆使した文字盤が製作され、伝統と革新の融合が図られている。

こうした伝統工芸は作り手と買い手、さらにそれを伝える人がいてこそ、伝承されていく価値。希少な技術をそのままにせず現代の産業を結びつけることは、腕時計のような実用価値から解放されたプロダクトが担うべき役割だと考えている。

## 終章

### サマリー

時計デザインの変調を受け、ブランド哲学や感性を表現するために新技術が開発される経緯

2000年代には、時計業界において新技術の発表や新キャリバーの開発競争が盛んに行われてきた。これは時計自体に付加価値を与え、また高騰していく価格を裏付けるためのマーケティングに用いられた側面も否定できない。しかし、現在ではブランドの哲学や感性を表現するために新たな技術開発が進んでおり、ファンの個人的価値観にリーチするようなものづくりが主流となってきた。時計デザインは、技術の進化と豊潤なブランドの歴史と高まりつつあるファンの成熟度を背景として、より多様な方向へと展開している。

### 質疑応答

- Q1：エナメルが高額品で価値として認められているとの話だが、職人としての手間暇がかかる、伝統工芸として歴史があるなど色々な理由があると思うが、スイスではどのようなところが価値として認められているのか。
- A1：ブランドによって変わり、ユーザーがどの部分に価値を見出しているのかになるが、一般的にはエナメルは揺らぎがあることがよいといわれており、工業製品だと許されないような空気の気泡が残るなど職人による癖のようなものが残るからこそ、エクスクルーシブなものとしての価値が好まれている。日本人的な発想だと、ぶつぶつがあつたら駄目ではないかという見方をしてしまうが、むしろ違うという気付きがあり、完璧にきれいな絵を描くようなものもあるが、揺らぎがあることがエナメルのよさという考えである。
- Q2：時計業界においてスマートウォッチの出現が大きなトピックスと考えているが、スマートウォッチは時計のデザインへ影響を与えたのか。
- A2：スマートウォッチ出現前後で、高価な機械式時計に関してはシンプルなものが増えたと思っている。2011年頃はクロノグラフとか大きな時計が多く、この時代の時計は久しぶりに見ると、デザイン的にも悪く言えばビジーで色々な要素がある時計が多かったが、スマートウォッチやアップルウォッチがメジャーとなり機械式時計にとって大きな存在となってから、シンプルなものが増えた印象がある。おそらくスマートウォッチはグラフィック的に自分で色々変えて楽しむことができるので、同じような付加価値というよりも、よりモノの美しさを際立たせるような方向へデザイナーがシフトさせたのではないかと考えている。

Q3：中国の勢いが増したり，コロナ影響などで市場や時計各社の戦略に変化があったと思うが，その時代におけるお客様が誰かというところでのデザインへの影響や関連性はあるのか。

A3：直近の市場の落ち込みはコロナ影響でお店がほとんど閉まっていたことによるが，そこからの市場のジャンプアップは中国勢の影響が大きい。中国の方々はシンプルかつゴールドの時計が好きで高価なものがよく売れた。これだけが理由ではないかもしれないが，高価でシンプルな時計が増えたのは中国勢の影響が一端になった可能性はある。一方で大多数の人にはスポーティーで大型の時計がよく売れているが，世界最大の時計消費国であるアメリカで好まれていることから，これらの時計は非常に固い存在として定着したと言える。

Q4：時計のサイズトレンドにおいて小さいサイズの時計が好まれる理由について教えてほしい。また今後の時計のサイズトレンドは大部分がより小さいサイズの時計が好まれるようになっていくのか，それとも多様化し大小のサイズの時計が共存するようになるのか。

A4：ドレスウォッチがカウンターパートであると話をしたが，小さいサイズの時計が増えていることが，はたして40mmを超える大きいサイズの時計を覆すことになっているのか，細かく統計をみないとわからない。現在の小径トレンドは同時多発的にヴィンテージ市場も注目されてきたことが大きいとみている。特に5，6年の流れではアメリカでヴィンテージが注目を集めており，ヴィンテージはサイズが小さいので，それを好んで着けている方々が現行の時計もヴィンテージと近いサイズのものを選ぶ流れがあったと想像している。アメリカの方からすると，39mmなどヴィンテージの時計はかなり小さく違和感があるが，ヴィンテージが好きな方は現行も小さいサイズの時計を選ぶ傾向がある。あと最近アジアのシェアが伸びているが，特に日本人は40mm以下の方が着けやすいことがリアルな体感としてあると思うので実需に伴ったものになってきている。このトレンドが続くかはわからず，再び大きいサイズの時計が好まれる時代が来るかもしれないが，ここ5年10年だと，ドレスウォッチのようなものがもう少しマジョリティになるのではと想像している。あまり目立たないというか，本人が満足して自分だけのために着けるといった時計のカルチャーが若い世代を中心に醸成されてきており，これがもう少し広がっていくのではと予想している。

(特別講演報告担当：セイコーエプソン株式会社 中宮 信二)

## 2024年度マイクロメカトロニクス学術講演会 ベストプレゼンテーション賞報告

日本時計学会企画委員会 今村美由紀\*

2024年度マイクロメカトロニクス学術講演会は昨年に続き対面とオンラインのハイブリッド開催となり4社1機関から6件の学術講演が発表された。10名の審査員により内容（新規性）・発表（わかりやすさ）・質疑応答・予稿の4項目で審査を行った。その結果『月齢自動計算機能「ルナプログラム」を搭載したムーブメントの開発』を発表されたシチズン時計株式会社の原口大輔氏、宮原太郎氏が最高評価を得て一般社団法人日本時計学会2024年度マイクロメカトロニクス学術講演会ベストプレゼンテーション賞に選ばれた。

表彰の様子を写真1に示す。

また受賞後に原口大輔氏より「光発電電波時計とムーンフェイズ機能という、既に世の中にあるもののこれまでに無かった組み合わせに着目できたことで、想定以上の反響を頂ける結果となりました。月齢計算に関しては手探りの研究になったものの、最終的には多くの知見が得られ、製品にも落とし込むことができました。腕時計の製品化・発売は多くの方々の協力があって初めて成立できるものではあり

ますが、何よりも技術部門の信念と意地こそが、完成品をより良いものにしていくのだと思います。今後も時計業界の発展のため、ベストを尽くしてまいります。

宮原太郎氏より「ルナプログラムはこれまでの電波時計が提供してきた正確な時刻を表記して生活を便利にする価値ではなく、メンテナンスフリーに月の表情を文字板で表現することで、ユーザーが自身の忙しい日々の中でホッと一息夜空を見上げる、そんな“とき”を提供する機能です。腕時計の役割は時代と共に移り変わり、よりユーザーの感情や心を豊かにする価値が重要になったと感じています。良きライバルたちと切磋琢磨しながら、豊かなときを多くの人々に届けていきたいと考えています。」のコメントをいただいた。

ハイブリッド開催でのベストプレゼンテーション賞審査にあたり講演者の方々、審査委員の方々、システムを管理していただいた大隅久代表理事のご協力に感謝する。



写真1 2024年度ベストプレゼンテーション賞受賞  
シチズン株式会社 宮原太郎氏（写真左）、原口大輔氏（写真中央）、  
日本時計学会 大隅久代表理事（写真右）

\* セイコータイムクリエーション株式会社

一般社団法人 日本時計学会 2024年4月度 理事会議事録  
— 2024年度 第3回理事会 —

(記録：横山 正尚 2024年4月12日)

1. 開催日時：2024年4月12日(金) 16:00～17:15
2. 場所：中央大学後楽園キャンパス 製図室, オンライン開催 (Web会議システムとして Webex を使用)
3. 出席者：

<理事>

大隅 久, 重城 幸一郎, 今村 美由紀, 木村 南, 土肥 徹次, 中川 誠, 永田 洋一, 横山 正尚 (以上8名)  
以下の出席者は Web 会議システムを用いて参加した。

<理事>足立 武彦, 中島 悦郎, 中宮 信二, 増田 純夫 (途中参加) (以上4名)

<監事>岸 良一 (以上1名)

理事総数13名の過半数につき理事会成立

<運営委員>小笠原 健治, 鳴野 彰従, 藤井 浩司, 藤沢 照彦 (以上4名)

以下の出席者は Web 会議システムを用いて参加した。

<運営委員>樋谷 和義, 萩田 拓史, 松島 怜志, 越地 福朗 (途中参加) (以上4名)

定刻, 議長 代表理事 の大隅 久が開会を宣言した。議長は理事足立 武彦, 中島 悦郎, 中宮 信二および監事 岸 良一が Web 会議の方法により本理事会に出席する旨を説明し, Web 会議システムにより, 出席者の音声と映像が即時に他の出席者に伝わり, 出席者が一堂に会するのと同等に適時的確な意見表明が互いのできる状態となっていることを確認し, 議事に入った。

#### 4. 議事の経過の要領及びその結果

##### (1) 2024年3月度理事会議事録確認

3月度(第1回, 総会, 第2回)理事会の議事録(案)に問題無いことが確認された。

##### (2) 出版編集関係 (別紙資料配布 今村理事より説明)

マイクロメカトロニクス 2024年6月号(Vol.68, No.230)に向けて, 入稿状況等の説明がされた。

- ・研究/技術論文 校閲中3件
- ・依頼原稿関連 入稿済み1件, 校正中1件, 入稿待ち7件

##### (3) 2024年度春季研究会 (速報) (中宮理事, 幹事会社: セイコーエプソン (株))

以下で開催された。

- テーマ: 次世代電源 全固体電池の現状と今後の展望
- 日時: 2024年4月12日 14:00～15:40
- 会場: 中央大学後楽園キャンパス 製図室, オンライン開催
- 参加者: 36名 (正会員14名, 非会員22名, 内23名はオンライン参加)  
収支その他詳細は次回理事会にて報告する。

##### (4) 見学会について (小笠原運営委員より説明, 幹事会社: セイコーウオッチ (株))

- テーマ: 専門学校 ヒコ・みづのジュエリーカレッジ  
同校の全課程を見学予定。時間割の都合上開始時間を14:00とすることとなった。

##### (5) 学術講演会について (土肥理事より説明)

詳細資料まとめ中。次回理事会にて報告する。

##### (6) 第58回青木賞選考について (藤沢運営委員より説明)

- ・4月に選考委員, 表彰委員の選任
- ・6月に表彰候補論文の決定, 第4回理事会にて確認する。

### (7) 2024 年度特別研究会について (木村理事より別紙説明)

木村理事より以下のテーマによる特別研究会・見学会の同時開催が提案された。

- テーマ :

特別講演:「熟練者による手先作業や目視による色検査の自動化を可能にする独創のテクノロジー」

見学会:「力覚センサ・分光ビジョンシステムとロボット融合技術」

- 会場:セイコーエプソン株式会社・豊科事業所 (長野県安曇野市豊科田沢 6925)

以下の開催候補からセイコーエプソン社と調整することとなった。

8月23日(金), 8月30日(金), 9月13日(金), 9月27日(金)

### (8) 時計技術解説の書籍化について (木村理事より別紙説明)

マイクロメカトロニクス誌に連載中の記事をそのまま書籍化しただけでは読者のターゲットが少ない(各時計会社, 修理会社, 時計学校生徒に絞られてしまう?)。より購買層を拡げるため記事の追加をすることが提案された。

追加する記事の詳細, 今後の動きについては別途企画委員会にて検討, 報告することとなった。

### (9) 2024 年度理事会の日程について

- ・2023年6月14日(金) 17:00~: 第4回理事会 (見学会日程により開始時間変更)

## 5. 報告事項

- ・総会の情報がまとまったため学会 HP の更新をする。
- ・学会誌に学術刊行物指定を受けるため会員名簿に情報を追加する。その際各社に内容の確認をお願いする。

## 5. 報告事項

入会: なし

退会: 正会員 1 名

1. 正会員 平岡 弘之 (中大) 届出 3月7日

## ・会員数状況

正会員 126 名 学生会員 2 名 賛助会員 14 社 (80 口) (2024/4/12 承認後)

以上をもって議案の審議等を終了したので, 議長が午後 17 時 15 分に閉会を宣言し, 解散した。  
本日の Web 会議システムを用いた 2024 年 4 月度第 3 回理事会は, 終始異状なく議題の審議を終了した。

以上

---

## 一般社団法人 日本時計学会 2024 年 6 月度 理事会議事録 - 2024 年度 第 4 回理事会 -

(記録: 横山 正尚 2024 年 6 月 14 日)

1. 開催日時: 2024 年 6 月 14 日 (金) 17:15~18:40

2. 場所: 中央大学後楽園キャンパス 製図室, オンライン開催 (Web 会議システムとして Webex を使用)

3. 出席者:

<理事>大隅 久, 重城 幸一郎, 今村 美由紀, 木村 南, 土肥 徹次, 永田 洋一, 横山 正尚 (以上 7 名)  
以下の出席者は Web 会議システムを用いて参加した。

<理事>足立 武彦, 中島 悦郎, 中川 誠, 中宮 信二, 増田 純夫 (以上5名)

<監事>岸 良一, 吉村 靖夫 (以上2名)

理事総数13名の過半数につき理事会成立.

<運営委員>梅田 和昇, 小笠原 健治, 嶋野 彰従, 萩田 拓史, 藤井 浩司 (以上5名)

以下の出席者は Web 会議システムを用いて参加した.

<運営委員>越地 福朗, 藤沢 照彦, 松島 怜志 (以上3名)

定刻, 議長 代表理事 の大隅 久が開会を宣言した. 議長は理事 足立 武彦, 中島 悦郎, 中川 誠, 中宮 信二, 増田 純夫および監事 岸 良一, 吉村 靖夫が Web 会議の方法により本理事会に出席する旨を説明し, Web 会議システムにより出席者の音声と映像が即時に他の出席者に伝わり, 出席者が一堂に会するのと同様に適時的確な意見表明が互いにできる状態となっていることを確認し, 議事に入った.

#### 4. 議事の経過の要領及びその結果

##### (1) 2024年4月度理事会議事録確認

4月度 (第3回) 理事会の議事録(案)に問題ないことが確認された.

##### (2) 出版編集関係 (別紙資料配布 今村理事より説明)

マイクロメカトロニクス 2024年6月号(Vol.68, No.230)が発行された.

また, マイクロメカトロニクス 2024年12月号(Vol.68, No.231)に向けて, 入稿状況等の説明がされた.

・研究論文/技術論文 未定

・依頼原稿関連 校正中1件, 入稿待ち2件

時計技術解説で本号(Vol.68, No.231)に掲載予定の「衝撃への対応」について, 著者都合により次号(Vol.69, No.232)「温度への対応」と入れ替えるよう調整することとなった.

##### (3) 青木賞について (別紙資料配布 藤沢運営委員より説明)

第58回青木賞選考の経緯について藤沢運営委員より説明があり, 次の論文が推薦された.

出席理事より異議なく, 下記論文が青木賞表彰論文として決定した.

「年差±1秒の光発電ムーブメントの開発」

2022年度 Vol.66, No.227

著者: 長瀬 智

##### (4) 学術講演会について (土肥理事より説明)

・会場について: 5号館2階5233号室, 5234号室, 5235号室を確保.

※5号館は地下工事のため騒音の可能性有.

・日時, 実施形態について: 9/17(火), ハイブリッド形式(使用)とすることとなった.

・実施内容

学術講演, 特別講演, 理事運営委員会, 青木賞表彰, ベストプレゼンテーション賞, 技術交流会.

機器展示は非実施, 休憩コーナーは簡易的なものを準備する.

・参加費用について: 会場, オンラインでの参加を問わず参加費は一律とする. また支払方法は原則振り込みとする.

・企業協賛金について: 技術交流会開催の場合, 協賛金は5万円を依頼する.

・予稿集について: 昨年同様pdfでの配布とする.

・特別講演について: 「HODINKEE Japan編集長 関口優氏」に打診する(担当: 中宮理事).

・締切関係

申込締切: 2024年7月22日(月) 必着

原稿締切: 2024年8月19日(月) 必着

・講演テーマは各社2件+大学で6件以上は欲しい

・講演件数に応じて午前からの開催, 午後からの開催を決定する. →次回理事運営委員会の時間決定.

**(5) 2024 年度春季研究会について (中宮理事より報告)**

- テーマ：次世代電源 全固体電池の現状と今後の展望
- マクセル 株式会社 新事業統括本部 担当 本部長 山田 将之 氏
- 日時：2024 年 4 月 12 日 14:00～15:40
- 会場：中央大学後楽園キャンパス 製図室，オンライン開催
- 参加者：36 名 (会員 14 名 (協賛学会員を含む)，非会員 22 名，内 23 名がオンライン参加)

**(6) 見学会について (速報) (小笠原運営委員より報告)**

ヒコ・みづのジュエリーカレッジを見学。  
参加者 22 名。

**(7) 2024 年度秋季研究会について (鳴野委運営員より提案)**

- テーマ：GPS/GNSS の現状と今後の動向
- ポジション株式会社 GNSS 事業部 取締役 湯浅 明弘 氏
- 概要：軍事技術から始まった GPS は現在ではカーナビ，ウォッチ，スマートフォンなど民生機器や建機，農機，測量機器などの産業機器まで幅広く利用されています。  
また，日本の衛星としては 2018 年 11 月より 4 機体制でサービスを開始したみちびきが 2024 年度から 2025 年度にかけて順次衛星を打ち上げ 2026 年度から 7 機体制となり，より高精度のデータを活用したサービス開始が計画されています。  
今回は GNSS モジュール開発でご活躍されているポジション株式会社 湯浅様をお招きし，GNSS の現状と今後の動向に関してご講演いただきます。
- 日時：2024 年 11 月 15 日 14:00～15:40
- 会場：中央大学後楽園キャンパス 2 号館 7 階 2735 室，オンライン開催  
特に異議なく，進めることが確認された。

**(8) 特別研究会について (木村理事より報告)**

【タイトル】 職人技を超える難作業の自動化に挑むロボット技術の最前線

【特別講演】 「熟練者による手先作業や目視による色検査の自動化を可能にする独創のテクノロジー」

【講師】 エプソン販売株式会社企画推進課 鹿島氏・梶田氏

【概要】 職人技の伝承そして職人技を超える先進ロボット技術の開発と実際のロボット作業の見学を通して，ロボットの現在と AI 利用について展望する。

【開催日時】 8/30 (金) 13:00～15:00(特別講演) 15:00～16:00 (見学会)

・【会場】 セイコーエプソン株式会社・豊科事業所  
学会 HP にて参加者募集中。

**(9) 時計技術解説の書籍化について (木村理事より報告・提案)**

2012 年～現在までマイクロメカトロニクス誌に連載中の「時計技術解説」に技術的な内容を追加した上で書籍化を検討する。追加記事については一部依頼済み。課題としては「想定読者」「出版形態」等がある。

理事・運営委員の中での出版イメージを確認するためアンケート調査を実施，次回理事運営委員会で報告することとなった。

**(10) 2025 年度見学会幹事について (重城理事より提案)**

2025 年度見学会幹事はセイコーエプソン (株) の予定であるが，LVMH 社の国内施設見学の目処が立ったということでセイコーウオッチ (株) が担当することが提案され，承認された。

**(11) 新入会員の承認**

2名の正会員の入会申し込みがあり，承認された。

- |        |       |        |      |    |
|--------|-------|--------|------|----|
| 1. 正会員 | 石井 慶子 | (中央大学) | 4/20 | 届出 |
| 2. 正会員 | 奥井 学  | (中央大学) | 4/20 | 届出 |

## (12) 次回理事会の日程について

・2024年9月17日(火)：第5回理事会、(学術講演会)時間については学術講演会の日程による。

## 5. 報告事項

### ・会員数状況

入会：上記の通り

退会： 1. 正会員 川上 常太 (株精工舎) 2021より会費滞納  
2. 正会員 櫻井 教尊 (株ジャグジィ) 2021より会費滞納

会員数増減(2024.6.14承認後)

正会員 126名 学生会員 2名 賛助会員 14社(80口)

### ・HPについて

・学会HPサーバがセキュリティ(SSL)対応に変更になり、URLが変更となった。

旧：<http://hij-n.com/>

新：<https://hij-n.com/>

なお、旧URLからも自動的に転送されるため特に告知はしない。

### ・学会誌発送業者について

従来のヤマト運輸「クロネコDM便」が廃止となったため、佐川急便の「飛脚ゆうメール便」を使用することとなった。

以上をもって議案の審議等を終了したので、議長が午後18時40分に閉会を宣言し、解散した。本日のWeb会議システムを用いた2024年6月度第4回理事会は、議題の審議を終了した。

以上

---

## 一般社団法人 日本時計学会 2024年9月度 理事会議事録 — 2024年度 第5回理事会 —

(記録：横山 正尚 2024年9月17日)

1. 開催日時：2024年9月17日(金) 10:30~11:40
2. 場所：中央大学後楽園キャンパス 5号館 5234教室、オンライン開催 (Web会議システムとしてWebexを使用)
3. 出席者：  
<理事>  
大隅 久, 重城 幸一郎, 今村 美由紀, 木村 南, 佐々木 健, 中川 誠, 中宮 信二, 永田 洋一, 横山 正尚 (以上9名)  
以下の出席者はWeb会議システムを用いて参加した。  
<理事>足立 武彦, 増田 純夫 (以上2名)  
<監事>  
岸 良一 (以上1名)  
理事総数13名の過半数につき理事会成立  
<運営委員>小笠原 健治, 嶋野 彰従, 萩田 拓史, 藤井 浩司, 藤沢 照彦, 松島 怜志 (以上6名)

定刻、議長 代表理事 の大隅 久が開会を宣言した。議長は理事 足立 武彦, 増田 純夫がWeb会議の方法により本理事会に出席する旨を説明し、Web会議システムにより、出席者の音声と映像が即時に他の出席者に伝わり、出席者が一堂に会するのと同様に適時的確な意見表明が互いに行える状態となっていることを確認し、議事に入った。

#### 4. 議事の経過の要領及びその結果

##### (1) 2024年6月度理事会議事録確認

6月度（第4回）理事会の議事録（案）に問題ないことが確認された。

##### (2) 出版編集関係（別紙資料配布 今村理事より説明）

マイクロメカトロニクス 2024年12月号(Vol.68, No.231)に向けて、入稿状況等の説明がされた。

- ・ 学術論文 入稿待ち1件
- ・ 依頼原稿関連 入稿済み2件、校正中1件、入稿待ち1件

「時計技術解説」の連載について、著者都合により次号休載の予定。

##### (3) 2024年度見学会実施報告（幹事会社：セイコーウオッチ（株））

ヒコ・みづのジュエリーカレッジを見学。

参加者 22名。

参加費無料のため収支なし。

##### (4) 2024年度秋季見学会について（幹事会社：リズム（株））

- ・ テーマ：GPS/GNSSの現状と今後の動向（予定）
  - ・ 日時：11/15（金）14:00～15:40
  - ・ 会場：中央大学2号館 2735教室およびオンライン。
- 協賛団体への依頼を準備中。

##### (5) 特別研究会・見学会について（木村理事より報告）

【タイトル】 職人技を超える難作業の自動化に挑むロボット技術の最前線

【日時】 2024年8月30日（金）13時～16時20分

【会場】 セイコーエプソン株式会社・豊科事業所

【参加者】 正会員8名（協賛学会員を含む）、一般9名（賛助会員を含む）

台風の接近が伝えられ、実施の判断等に苦慮したが無事開催することができた。

以下が課題として挙げられた。

- ・ 荒天等やむを得ない事情により主催イベントを中止とする場合の判断基準、時期およびその周知方法。
- ・ 徴収済みの参加費返金方法、および学会の負担範囲の明確化。  
→負担範囲は振込手数料までとし、来年度以降の予算に計上することとなった。

##### (6) 2024年度以降のベストプレゼンテーション賞について

これまで選考委員長を木村理事が選任していたが、今年度は登壇者となったため急遽今村理事を選考委員長に任命した。次年度以降は登壇者及び連名者が確定した時点で選考委員長を企画委員より選定、選考委員長は原則として学術講演会当日に対面出席する理事・運営委員より選考委員を任命するものとした。

##### (7) 時計技術解説書籍化について（木村理事より報告）

企画委員内にて実施されたアンケートについて報告があった。

回答数：6/11件

全体として書籍化に対して消極的な回答が多く、特に初版部数については慎重に検討する必要性が指摘された。連載が2025年まで継続の予定のため26年度の出版をめどに以下を検討することとなった。

- ・見本誌の作成
- ・既存の時計技術書籍等の確認

#### (8) 2024 年度理事会の日程について

- ・2024 年 11 月 15 日（金）：第 6 回理事会，（秋季研究会後）

#### 5. 報告事項

##### ・会員数状況

入会：なし

退会：正会員	小長谷 政広	6/21	届出
正会員	池田 淳一（ラピステクノロジー）	7/30	届出
正会員	志村 穰（拓殖大学）	9/5	届出

会員数増減（2024.9.17 承認後）

正会員 123 名 学生会員 2 名 賛助会員 14 社（80 口）

以上をもって議案の審議等を終了したので、議長が午後 11 時 30 分に閉会を宣言し、解散した。

本日の Web 会議システムを用いた 2024 年 9 月度第 5 回理事会は、終始異状なく議題の審議を終了した。

以上

2024年9月17日

## 第58回 青木賞表彰委員会報告

第58回青木賞選考は、マイクロメカトロニクス2022年度 Vol.66, No.226-227 に掲載された5編、2023年度 Vol.67, No.228-229 に掲載された3編、合計8編に対して行なわれた。選考は選考委員による一次審査と表彰委員による二次審査との二段階で行なわれた。

選考に先立ち、選考委員7名、表彰委員4名の選出を行なった。

一次審査は、各選考委員がそれぞれ与えられた論文を査読し評価した。その評価を集計、数値化し、合計点数の高い4編について、二次審査を行なう表彰委員会へ推薦した。

二次審査は、選考委員の推薦を受け、表彰委員会による議論の結果、二次審査対象論文4編を了承した。

これら4編の論文を表彰委員が査読し、その評価を一次審査と同様に集計、数値化した。この結果を基に表彰委員会にて議論した結果、最も高い評価を得た下記の論文を第58回青木賞表彰論文として推薦することに決定した。この結果を後日開催された日本時計学会理事会で報告し、下記の論文が第58回青木賞表彰論文に決定した。



第58回青木賞表彰論文：年差±1秒の光発電ムーブメントの開発

マイクロメカトロニクス, Vol.66, No.227, p.1-11(2022)

執筆者:長瀬 智

所属:シチズン時計株式会社

推薦理由:「独創性」,「有用性(貢献度)」,「困難性(努力度)」の3項目に関して評価が行われ、各項目及び総合評価として、A, B, Cの3段階で採点された。その結果、本表彰論文は独創性、有用性、困難性のすべてにおいて高い評価を受け、総合評価でも表彰委員から最高点を得た。

第58回青木賞の授賞式は、2024年9月17日に開催された日本時計学会、マイクロメカトロニクス学術講演会会場で行なわれた。

(委員長 藤沢, 幹事 今村, 中川)

## 時計技術解説「機械式時計」の掲載号変更のお知らせ

マイクロメカトロニクス Vol.63, No.221 に掲載いたしました時計技術解説シリーズ「機械式時計」の連載号を、下表のとおり変更することをお知らせするとともに謹んでお詫び申し上げます。

年	巻	号	タイトル	概要
2024	68	231	非掲載	
2025	69	232	衝撃への対応	耐振軸受の構造と歴史
2025	69	233	温度への対応	バイメタルとひげ材料に関する歴史
2026	70	234	高精度への対応（その1）	トゥールビヨン、コンスタントフォース
2026	70	235	高精度への対応（その2）	高振動、巻上ひげ

## 会員募集

日本時計学会は時計技術で培った微小化・省電力化技術をベースに、マイクロメカトロニクス技術を基礎から応用までカバーするべく活動中です。活動の幅をより広げるためより多くの方の入会をお待ちしております。

入会されますと会員専用ページよりマイクロメカトロニクスの最新号が閲覧可能となります。また、紙媒体のマイクロメカトロニクスはモノクロ印刷ですが、電子データ版はカラー表示ですので写真や図表も鮮やかで判りやすく、印刷では見にくい細かい文字も拡大して見る事が可能です。

詳細につきましてはホームページ (<https://hij-n.com/>) の入会案内をご覧ください。

## 講演募集

日本時計学会では毎年9月に学術講演会を開催しており、常時講演を募集していますので、研究発表を希望される方は下記へお申し込みまたはお問い合わせください。2021年よりオンライン開催またはオンラインと会場とのハイブリッドで開催しておりますので、遠方からの参加も容易になりました。

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 精密機械工学科 大隅 久

Tel : 03-3817-1824 e-mail : [osumi@mech.chuo-u.ac.jp](mailto:osumi@mech.chuo-u.ac.jp)

## 編集後記

AI技術の普及が進む中、本年の「マイクロメカトロニクス学術講演会」においても、生成AIを活用したデザイン開発に関する発表があり、新たな耐衝撃構造や革新的なデザインの実現について報告されました。今後も、デザイナー含めた時計技術者が有する伝統技術とAIによる革新が融合することで、より個性的で洗練された情緒的価値を備えた腕時計の創出が期待されます。さらに、AIを用いた予測分析を通して構造設計の改良を進めることで、長期間にわたる耐久性および信頼性の向上が図られることも予想されます。このようにAIの活用は、時計に新たな付加価値を提供するだけでなく、時計技術者の創造力、技術力を新たなステージへと導く契機となり、腕時計のさらなる魅力向上に寄与するものと考えられます。

末筆になりますが、時計産業および日本時計学会の一層の発展に向けて、学術講演会での発表および論文投稿を今後ともよろしく願いたします。

(中川 誠 記)