# ウエアラブル機器へ適用するための 最大酸素摂取量推定方法の検討

笹原英生,崔宇飛\*\*\*\*, 黒田真朗,前澤秀和,永富良一\*,\*\*\*
セイコーエプソン株式会社 VSM プロジェクト,長野県諏訪郡富士見町富士見 281,〒399-0293
\*東北大学大学院医学系研究科運動学分野,\*\*東北大学大学院医工学研究科健康維持増進医工学分野宮城県仙台市青葉区星陵町 2-1,〒980-8575

(2020年8月11日受付, 2020年11月4日再受付, 2020年11月12日採録)

Estimation Method of Maximum Oxygen Uptake for Applying to Running with

Wearable Equipment

Hideo SASAHARA, Yufei CUI \*,\*\*\*, Masao KURODA, Hidekazu MAEZAWA, and Rvoichi NAGATOMI\*,\*\*

VSM project, Seiko Epson Co., Ltd., 281, Fujimi, Fujimi-machi, Suwa-gun, Nagano-ken 399-0293, Japan

\* Department of Medicine and Science in Sports and Exercise, Graduate School of Medicine, Tohoku University

\*\* Division of Biomedical Engineering for Health and Welfare, Laboratory of Health and Sports Sciences

Graduate school of Biomedical Engineering, Tohoku University

2-1, Seiryo-machi, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi-ken 980-8575, Japan (Received August 11, 2020, Revised November 4, 2020, Accepted November 12, 2020)

#### ABSTRACT

Indicators of training effects in endurance race include  $\dot{V}O_2max$ . Measurement of  $\dot{V}O_2max$  is not easy because it requires a research facility. Therefore, simple estimation methods have been investigated. They include the Astrand and Ryhming nomogram, which allows the estimation of  $\dot{V}O_2max$  from heart rates and  $\dot{V}O_2$  during submaximal exercise. However, since it was developed for those in 20s, it lacks accuracy in estimating  $\dot{V}O_2max$  in 30s or older with lower maximum heart rates. In recent years, wearable wristwatch-type equipment with sensors, such as GPS, have been widely used, facilitating the measurements of heart rates and running speeds during exercise. Therefore, if  $\dot{V}O_2max$  can be estimated from running speed, it can be conveniently measured simply by wearing wearable equipment and using the Astrand and Ryhming nomogram. In addition, the above issue relevant to the Astrand and Ryhming nomogram can be solved by taking the maximum heart rates of individuals into consideration, allowing the estimated from heart rates and running speeds during running using the Astrand and Ryhming nomogram by taking the maximum heart rates of individuals into consideration. Thirty-five healthy men (age:  $36.7 \pm 12.7$ , height:  $170.0 \pm 5.1$  cm, body weight:

 $65.8 \pm 7.3$  kg) and twenty-eight healthy women (age:  $37.4 \pm 11.8$ , height:  $158.8 \pm 5.3$  cm, body weight:  $51.3 \pm 5.3$  kg) were included. For each subject, running speeds and heart rates were measured using low-, medium-, and high-intensity constant load tests after measurement of  $\dot{V}O_2max$  and maximum heart rates by an incremental load test.  $\dot{V}O_2$  was estimated from the running speeds using the ACSM running equation.  $\dot{V}O_2max$  was estimated using the formulated  $\dot{V}O_2max$  estimation nomogram of Astrand et al., and compared with the  $\dot{V}O_2max$  measured in the incremental load test, demonstrating a significant correlation between the measured and estimated  $\dot{V}O_2max$  in both males (r = 0.81) and females (r = 0.75) (p < 0.01). In conclusion, the novel Astrand and Ryhming nomogram is applicable to wearable equipment by taking the maximum heart rates of individuals into consideration and using running speeds and heart rates during running.

# 1. はじめに

最大酸素摂取量は、個人の有酸素運動能力の最大値を意味し、Fick の方程式、すなわち最大努力運動時の心拍出量と動静脈血酸素較差の積で表される。最大酸素摂取量は全身持久能力の高さを示す有効な指標の一つとされ、持久系競技におけるトレーニングの効果指標として扱われることが Ribisl<sup>1)</sup>や Davies ら <sup>2)</sup>により報告されている。田畑ら <sup>3)</sup>の報告にあるように長距離ランナーの競技成績が最大酸素摂取量と強く関連することはよく知られている。また最大酸素摂取量は、生活習慣病、生活機能低下のリスク低減と関係し、日本人の性・年代別の平均以上の最大酸素摂取量を有する群は、最大酸素摂取量が乏しい群よりも生活習慣病などのリスクが約 40%低かったことが厚生労働省 <sup>4)</sup>がまとめているシステマティックレビューに基づいた健康づくりのための身体活動基準 2013 で報告されている。

運動時の酸素摂取量の計測は、実験室内でエルゴメータやトレッドミルなどの運動負荷装置を用いて運動中の被験者の呼気ガス分析測定によって行われる。最大酸素摂取量は被験者が最大努力で運動を行ったときに得られる最大の酸素摂取量である。酸素摂取量は、1分当たりに摂取される酸素量 [mL/min]、もしくは体重 1 kg 1 分当たりに摂取される酸素量  $[mL/(kg \cdot min)]$ として表される。本論文では以後、前者を $\dot{v}$ 02max、後者を体重当た $\dot{v}$ 00maxとする。

 $\dot{v}O_2max$ の直接計測には、かつてはダグラスバッグ法により運動時の呼気を収集し質量分析計などを用いて酸素分圧の測定を行っていた。最近では装着型の呼気流量計とポンプによりサンプリングした呼気を、酸素電極を搭載した呼気ガス分析器に導入する方法が主流である。また測定室内では自転車エルゴメータやトレッドミルなどの運動負荷装置が必要である。最近普及している携帯型の呼気ガス分析装置により屋外での測定も可能となっている。しかしいずれにしても直接測定は研究機関などの専門的施設に限定され、一般の競技者のトレーニング効果や競技レベルの評価、あるいは健康づくりの指標として測定するのは困難である。そこで、 $\dot{v}O_2max$ を簡便に推定する方法が提案されてきた。その方法のひとつに、 $\dot{A}$ strand ら $\dot{v}O_2max$ 推定ノモグラムがある。

 $^{\circ}$ Astrand らの $\dot{V}O_2$ max推定ノモグラムは,最大下運動時の心拍数が $\dot{V}O_2$ とほぼ直線的に増加する

こと,同一年齢の最大心拍数がほぼ一定であるという観察所見から作成されたものである.年齢から推定する最大心拍数は誤差が大きいため,Siconolfi ら  $^{6}$ ,Davies $^{7}$ により適応する年齢範囲別に補正する方法も提案されている.しかし $\dot{V}O_{2}max$ の測定値を競技レベルやトレーニング効果評価のために利用するのであれば,実際の運動時の個人ごとの最大心拍数を考慮する方が実用的であると考えられる.

近年さまざまなセンサーが搭載されたウエアラブル機器が一般にも利用されるようになってきている. 従来から測定が可能であった心拍数に加え GPS センサー,加速度センサーなどが搭載され



Fig. 1 WristableGPS SF-850PJ

た腕時計型のウエアラブル機器がランナーに普及しつつあり、運動中の速度、距離、ピッチ、ストライドなどが計測できる。当社も2012年からランナー向けWristableGPSシリーズを発売している(Fig. 1).

Åstrand らの $\dot{v}O_2$ max推定ノモグラムに必要な運動中の $\dot{v}O_2$ と心拍数がウエアラブル機器を用いて計測できれば、簡便に $\dot{v}O_2$ maxを計測できる可能性がある。そこで、ウエアラブル機器の測定値を用いて Åstrand らの $\dot{v}O_2$ max推定ノモグラムから $\dot{v}O_2$ maxを推定するために、運動中の走速度から $\dot{v}O_2$ を推定することと、得られた推定値から $\dot{v}O_2$ maxを推定するために数式化したÅstrand らの $\dot{v}O_2$ max推定ノモグラムの妥当性を検証することとした。

本研究では、 $^{\rm A}$ strand らの $^{\rm VO}_2$ max推定ノモグラムに個人ごとの最大心拍数を考慮する方法と、ウエアラブル機器の測定値を $^{\rm A}$ strand らの $^{\rm VO}_2$ max推定ノモグラムに当てはめるための方法を検討するために、以下の4つの推定方法の比較検証を行うこととした。

- 1) HRmax-ACSM Method: ACSM のランニング方程式に基づき走速度から推定した $\dot{V}O_2$ と、トレッドミル走で実測した最大心拍数を用いる場合.
- 2) ACSM Method : ACSM のランニング方程式に基づき走速度から推定した $\dot{V}O_2$  と個人の最大心拍数を考慮しない場合.
- 3) Age-ACSM Method: ACSM のランニング方程式に基づき走速度から推定した $\dot{V}O_2$ と220 Age [yr]から推定した最大心拍数を用いる場合.
- 4)  $HRmax-\dot{v}O_2$  Method: トレッドミル走行中に呼気ガス分析装置で計測した $\dot{v}O_2$ と実測した最大 心拍数を用いる場合.

これら 4 つの推定方法を検証するために、18 歳から 60 歳までの日本人男女を対象に、トレッドミル、呼気ガス分析装置を用いて漸増運動負荷時の $\dot{\mathbf{v}}\mathbf{0}_2$ max、最大心拍数、安静時心拍数を最初に測定した。その後、トレッドミルを用いて低強度、中強度、高強度における定常負荷運動時の心拍

数を測定し、各運動強度におけるトレッドミル速度と心拍数から数式化したAstrand らの $VO_2$ max 推定ノモグラムを用いて、体重当たり $VO_2$ maxを推定し、漸増運動負荷試験で実測した体重当たり $VO_2$ maxと比較検討を行った.

# 2. 方法

# 2. 1 測定方法

対象者は、18~60歳の健常な男性 35 名 (年齢 36.7±12.7 歳, 身長 170.0±5.1 cm, 体重 65.8±7.3 kg), 女性 28 名 (年齢 37.4±11.8 歳, 身長 158.8±5.3 cm, 体重 51.3±5.3 kg) を対象とした。また、本研究を行うにあたり、被験者には事前に調査の内容を説明したうえで、書面で同意を得た。本研究は、東北大学大学院医学系研究科倫理委員会とセイコーエプソン株式会社ヒト研究倫理審査委員会それぞれの承認を得て実施した。

# 2. 1. 1 心拍数の測定方法

心拍数は胸部にベルト電極(PolarElectro, Finland)を装着し、腕時計型心拍計 (SF-710: セイコーエプソン、長野)を用いて計測した.

2. 1. 2 漸増運動負荷試験を用いた体重当たり $\dot{v}O_2max$ ,最大心拍数の測定体重当たり $\dot{v}O_2max$ ,最大心拍数の測定は、漸増運動負荷運動およびトレッドミルランニングへの慣れを考慮して1週~2週間あけて2回の漸増運動負荷試験をトレッドミル(Rhode NL Variant, Holland)を用いて行った。その際、呼気ガス分析装置(AE300:ミナト医科学、東京)と腕時計型心拍計を併用した。呼気ガス分析装置では安静時およびランニング中の $\dot{v}O_2$ を測定した。腕時計型心拍計では、安静時およびランニング中の心拍数を測定した。負荷方法は、症候限界性漸増運動負荷とし、初期走速度を100 m/min,1分ごとに20 m/min増加し、勾配は2%とした。各被験者の体重当たり $\dot{v}O_2$ peakを、測定時における体重当たり $\dot{v}O_2$ 0最大値とした。最高心拍数は、体重当たり $\dot{v}O_2$ peak発現時の心拍数とした。最大心拍数は二度の試行のより高い方とし、同じく体重当たり $\dot{v}O_2$ maxは、二度の試行のうち、体重当たり $\dot{v}O_2$ peakの値のより高い値を用いた。また、安静時心拍数は、各漸増運動負荷試験で、運動負荷試験実施前に5分間の安静座位を行ったときに得られた心拍数の最小値とした。

# 2. 1. 3 定常負荷運動試験を用いた体重当たりVO2, 走速度, 心拍数の測定

2 度目の漸増運動負荷試験から 1 週~2 週後に、トレッドミルを用いて、各被験者の低強度、中強度、高強度ごとの 6 分間の定常運動負荷試験を行い評価した。その際、漸増運動負荷試験時と同

様に呼気ガス分析装置,腕時計型心拍計を使用し体重当たり $\dot{v}O_2$ ,と心拍数を測定した。運動負荷は,被験者ごとに漸増運動負荷試験で得られた最大心拍数,安静時心拍数を用いて低強度 50 %心拍予備[%HRR:% Heart rate reserve],中強度 65 %HRR,高強度 80 %HRR に相当する心拍数を目標心拍数とし,心拍数に対応した運動負荷条件を導いた。運動強度ごとに 6 分間の定常負荷のランニングを行い,各強度での負荷試験実施後 15 分間の休憩をはさみながら,低強度,中強度,高強度の順で測定した。測定した心拍数が,腕時計型心拍計の装着不具合などが起因で計測値が異常であるものは測定から除外した。

# 2. 2 推定方法

#### 2. 2. 1 運動時心拍数の補正方法

Astrand らっによれば、ノモグラムは 18 歳から 30 歳の男性被験者の測定結果に基づき心拍数の軸が設定されている。したがって年齢や運動能力によって最大心拍数が異なれば、心拍数の補正を行う必要性が生じる。そこで補正を行うためにAstrand らのノモグラムの心拍軸の最大心拍数を、25 歳男性と想定し、American College of Sports Medicine(ACSM)ガイドラインのより、最大心拍数の年齢調整式220 – Age [yr]から 195 bpm とした。安静時心拍数は、佐藤ららが報告している成人の座位安静時心拍数から、70 bpm と仮定した。Astrand らのノモグラム式に代入する心拍数は、まずそれぞれの被験者の実測した最大心拍数と安静時心拍数、各運動強度時に計測した心拍数を用いて、心拍予備を求める。求められた心拍予備から、仮定した最大心拍数 195 bpm、安静時心拍数70bpm からノモグラム式へ代入するための心拍数を求めた。

# 2. 2. 2 走速度からのŸ02推定

ACSM ガイドライン %より、ACSM ランニング方程式と呼ばれる走速度と勾配から体重当たり  $\dot{V}0_2$  を求める式 $\dot{V}0_2$  [mL/(kg·min)] =  $(0.2 \times Speed$  [m/min]) +  $(0.9 \times Speed$  [m/min] × Grade) が与えられている. HALL ら  $^{10}$ によれば、ACSM ランニング方程式の精度は他の推定モデルに比べて精度がよいと報告されている. そこで漸増運動負荷試験測定前に計測した体重を用いて、走速度から推定した体重当たり $\dot{V}0_2$ を $\dot{V}0_2$ ~変換した.

# 2. 2. 3 Astrand らのVO<sub>2</sub>max推定ノモグラムの数式化

Astrand らの $\dot{V}O_2$ max推定ノモグラムから得られた値をもとに最小二乗法を用いて、心拍数、 $\dot{V}O_2$ を変数とする 2 次多項式を導き、以下の式が得られた.

Male:

$$\begin{split} \dot{V}O_2 max &= hr \times (0.020 \ + \ hr \times 0.011) \ + \ \dot{V}O_2 \times \left(15.059 \ + \ \dot{V}O_2 \times -0.002\right) \\ &+ \dot{V}O_2 \times hr \times \left(-0.163 \ + \ \dot{V}O_2 \times 2.330 \times 10^{-5}\right) \\ &+ \dot{V}O_2 \times hr^2 \times \left(4.785 \times 10^{-4} \ + \ \dot{V}O_2 \times -7.704 \times 10^{-8}\right) - 170.493 \end{split}$$

Female:

$$\dot{V}O_2 max = hr \times (-0.201 + hr * 0.011) + \dot{V}O_2 \times (16.737 + \dot{V}O_2 * -0.002)$$
$$+ \dot{V}O_2 \times hr \times (-0.173 + \dot{V}O_2 \times 2.484e - 5)$$
$$+ \dot{V}O_2 \times hr^2 \times (4.785e - 4 + \dot{V}O_2 \times -7.704e - 8) - 169.588$$

 $\dot{V}O_2$ max: Maximum Oxygen Uptake [mL/min]  $hr: Heart\ rate \quad [bpm]$   $\dot{V}O_2: Oxygen\ Uptake\ [mL/min]$ 

そして、式から得られた $\dot{V}O_2max$ に対して漸増運動負荷試験測定前に計測した体重を用いて、体重当たり $\dot{V}O_2max$ へ変換した.

# 2. 2. 4 体重当たりVO<sub>2</sub>max推定方法

上記を用いて、Åstrand らの $\dot{V}O_2$ max推定ノモグラムに個人ごとの最大心拍数を考慮する方法と、ウエアラブル機器の測定値をÅstrand らの $\dot{V}O_2$ max推定ノモグラムに当てはめるための方法を検討するために、以下の4つの推定方法を提案する。

- 1) HRmax-ACSM Method:数式化されたAstrand らの $\dot{V}O_2$ max推定ノモグラムの式に,運動開始後3分目から6分目までに計測した平均心拍数,被験者ごとに漸増運動負荷試験で測定した最大心拍数,安静時心拍数を用いて求めた運動強度%HRR と,計測した平均走速度からACSM ランニング方程式より得られた $\dot{V}O_2$ を用いて $\dot{V}O_2$ maxを推定する。平均走速度は,定常運動負荷試験時に設定した被験者ごとのトレッドミル速度を用いた。最大心拍数,安静時心拍数は,漸増運動負荷試験で測定した値を用いた。
- 2) ACSM Method:数式化されたAstrandらの $\dot{v}O_2max$ 推定ノモグラムの式に,運動開始後3分目から6分目までに計測した平均心拍数,計測した平均走速度からACSM ランニング方程式より得られた $\dot{v}O_2$ を用いて $\dot{v}O_2max$ を推定する.平均走速度は,定常運動負荷試験時に設定した被験者ごとのトレッドミル速度を用いた.

- 3) Age-ACSM Method: 数式化されたAstrand らの $\dot{v}O_2max$ 推定ノモグラムの式に,運動開始後3分目から6分目までに計測した平均心拍数,被験者ごとに年齢より推定した最大心拍数,安静時心拍数を用いて求めた運動強度%HRRと,計測した平均走速度から ACSM ランニング方程式より得られた $\dot{v}O_2$ を用いて $\dot{v}O_2max$ を推定する. 平均走速度は,定常運動負荷試験時に設定した被験者ごとのトレッドミル速度を用いた. 最大心拍数は,年齢より推定する220 Age [yr]の式を用いて被験者の年齢から最大心拍数を推定した. 安静時心拍数は,佐藤ら  $^{80}$ が報告している成人の座位安静時心拍数から,被験者によらず一律70 bpm とした.
- 4)  $HRmax-VO_2$  Method:数式化されたAstrandらの $VO_2max$ 推定ノモグラムの式に,運動開始後3分目から6分目までに計測した平均心拍数,被験者ごと漸増運動負荷試験で測定した最大心拍数,安静時心拍数を用いて求めた運動強度%HRRと、呼気ガス分析装置で測定した平均 $VO_2$ を用いて $VO_2max$ を推定する.最大心拍数,安静時心拍数は、漸増運動負荷試験で測定した値を用いた. $VO_2$ は屋内における定常運動負荷試験で呼気ガス分析装置から得られた値を用いた.

# 2. 3 統計解析

各推定方法の評価は次の方法で行った。 $\dot{V}O_2max$ の測定値と各推定方法による $\dot{V}O_2max$ の推定値に対して、平均絶対誤差率(MAPE:Mean Absolute Percentage Error) $\pm$ SD、相関係数、相関係数に対しての 95%信頼区間で示した。また、運動強度、推定方法を要因とした繰り返しのある一元配置分散分析法を実施後、効果作用がなく主効果がある要因に対してボンフェローニ法の多重比較を実施した。有意水準は 5%未満とした。さらに、各推定方法の精度、傾向を検証するために Bland-Altman Plot を用いて、Bias と LOA(Limits of Agreement)を示した。解析ツールは、Python(Python Software Foundation、State of Delaware)を用いた。

# 3. 結果

#### 3. 1 屋内における定常負荷運動試験の評価

推定方法, 運動強度ごとの MAPE ± SD を示した(Table 1).

また,推定方法ごとに散布図と相関係数,相関係数に対しての 95%信頼区間を示した (Fig. 2, Table 2).

Table 1 MAPE and SD associated with  $\dot{V}O_2max$  with respect to measured  $\dot{V}O_2max$ .

		1) HRmax-ACSM 2	) ACSM	3) Age-ACSM	4) HRmax-VO <sub>2</sub>
		MAPE $\pm$ SD [%]	$MAPE \pm SD~[\%]$	$MAPE \pm SD~[\%]$	$MAPE \pm SD \ [\%]$
Male	80%HRR(N=34)	$6.68 \pm 4.75$	$20.87 \pm 11.91$	$8.79 \pm 7.46$	$6.86 \pm 6.17$
	65%HRR(N=33)	$7.13 \pm 6.10$	$23.48 \pm 11.84$	$10.97\pm8.26$	$6.49 \pm 5.31$
	50%HRR(N=27)	$9.88 \pm 8.14$	$23.70 \pm 11.49$	$11.78\pm7.84$	$6.97 \pm 6.15$
	ALL(N=94)	$7.75 \pm 6.49$	$22.60 \pm 11.84$	$10.41 \pm 7.96$	$6.77 \pm 5.88$
Female	80%HRR(N=28)	$6.80 \pm 5.00$	$13.64 \pm 10.47$	$12.60 \pm 8.03$	$7.43 \pm 5.76$
	65%HRR(N=25)	$7.93 \pm 6.18$	$14.74 \pm 12.42$	$14.18 \pm 10.90$	$6.51 \pm 5.79$
	50%HRR(N=16)	$9.95 \pm 8.63$	$14.08 \pm 11.35$	$12.98 \pm 9.61$	$10.03 \pm 9.20$
	ALL(N=69)	$7.94 \pm 6.53$	$14.14 \pm 11.42$	$13.26 \pm 9.54$	$7.70 \pm 6.86$

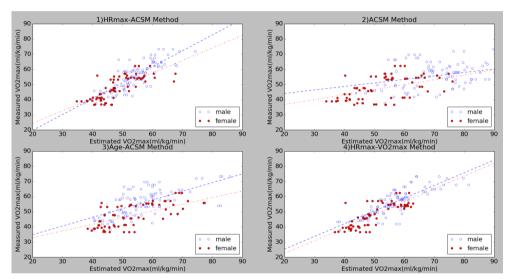


Fig. 2 Relationship between measured and estimated by 1) HRmax-ACSM Method, 2) ACSM Method, 3) Age-ACSM Method and 4) HRmax-VO<sub>2</sub> Method  $\dot{V}O_2max$  by male and female.

Table 2 Correlation coefficient and 95%CI associated with  $\dot{V}O_2max$  with respect to measured  $\dot{V}O_2max$ .

	Method	R	95%CI
Male	1) HRmax-ACSM	0.80	$0.72 \sim 0.87$
ALL(N = 94)	2) ACSM	0.33	$0.14\sim0.50$
	3) Age-ACSM	0.64	$0.50 \sim 0.75$
	4)HRmax-VO2	0.82	$0.74 \sim 0.88$
Female	1) HRmax-ACSM	0.76	$0.64 \sim 0.84$
ALL(N=69)	2) ACSM	0.50	$0.30 \sim 0.66$
	3) Age-ACSM	0.65	$0.48 \sim 0.76$
	4)HRmax-VO2	0.80	$0.69 \sim 0.87$

繰り返しのある一元配置分散分析法の結果より、推定方法、運動強度による効果作用は認められなかった。また、運動強度による主効果は認められなかったが、推定方法に関しては主効果が認められた。そこで、推定方法を多重比較で比較した結果、男性、女性共に 1)HRmax-ACSM Method、4)HRmax-VO<sub>2</sub> Method 間以外に有意差が認められた。最大心拍数を考慮する 1) HRmax-ACSM Method、3) Age-ACSM Method、4) HRmax-VO<sub>2</sub> Method は、最大心拍数を考慮しない 2)ACSM Method よりも、推定精度がよくなるという結果が得られた。

次に、推定方法ごとに Bland-Altman Plot で精度と傾向を示す.

# 1) HRmax-ACSM Method

男性は, Bias = 1.06 [mL/(kg·min)], LOA = -7.93~10.06 [mL/(kg·min)], 女性は, Bias = -0.70 [mL/(kg·min)], LOA = -9.11~7.72 [mL/(kg·min)]を示した(Fig. 3).

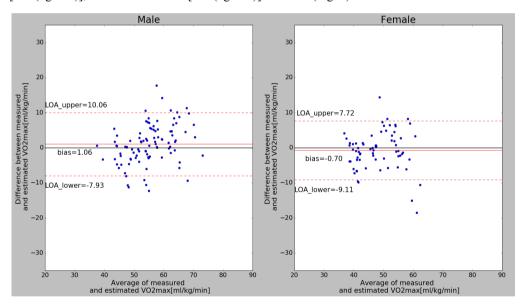


Fig. 3 Bland-Altman plots to the agreement between measured and estimated by 1) HRmax-ACSM Method  $\dot{V}O_2max$  by male and female.

# 2) ACSM Method

男性では、Bias = -15.76 [mL/(kg·min)], LOA = -36.22~4.7 [mL/(kg·min)], 女性では、Bias = -5.79 [mL/(kg·min)], LOA = -21.50~9.92 [mL/(kg·min)]を示した(Fig. 4).

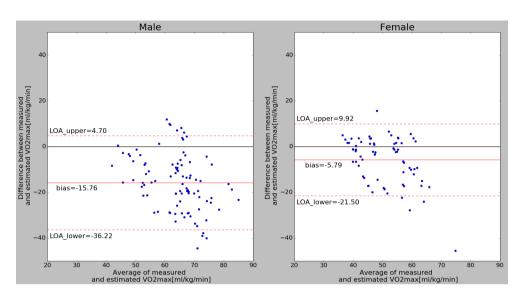


Fig. 4 Bland-Altman plots to the agreement between measured and estimated by 2) ACSM Method  $\dot{V}O_2max$  by male and female.

# 3) Age-ACSM Method

男性は、Bias = -1.89 [mL/(kg·min)], LOA = -16.50~12.73 [mL/(kg·min)], 女性は、Bias = -6.57 [mL/(kg·min)], LOA = -21.94~8.79 [mL/(kg·min)]を示した(Fig. 5).

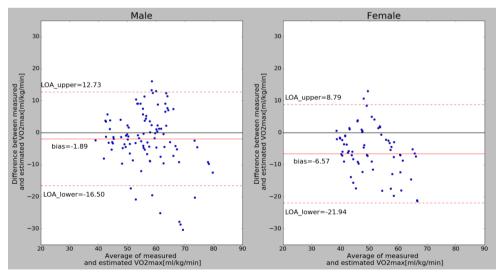


Fig. 5 Bland-Altman plots to the agreement between measured and estimated by 3) Age-ACSM Method  $\dot{V}O_2max$  by male and female.

# 4) HRmax-VO<sub>2</sub> Method

男性は、Bias = -0.85 [mL/(kg·min)], LOA = -9.23~7.53 [mL/(kg·min)], 女性は、Bias = -2.08 [mL/(kg·min)], LOA = -9.20~5.04 [mL/(kg·min)]を示した(Fig. 6).

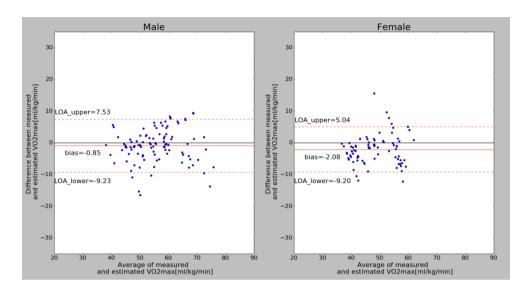


Fig. 6 Bland-Altman plots to the agreement between measured and estimated by 4) HRmax-VO<sub>2</sub>Method  $\dot{V}O_2max$  by male and female.

## 4. 考察

本研究では、数式化したÅstrand らの $\dot{v}O_2$ max推定ノモグラムを用いた 4 つの推定方法を比較検討した. 心拍数と走速度から $\dot{v}O_2$ maxの推定が可能であることがわかった. また、Åstrand らの $\dot{v}O_2$ max推定ノモグラムは運動強度に依存せず、最大心拍数を考慮することで $\dot{v}O_2$ maxの推定精度が向上することがわかった.

また, 測定試験のリミテーションとして, 漸増運動負荷試験前に測定した安静時心拍数と, 定常運動負荷試験時に各強度での試験実施後 15 分間休憩をはさんだことに関して述べる.

# 4. 1 心拍数と走速度からVO<sub>2</sub>maxの推定が可能

ウエアラブル機器適用に向けて、ウエアラブル機器で計測できる心拍数と走速度から、Astrand らのノモグラムを用いて、 $\dot{v}$ 0<sub>2</sub>maxを推定することが示唆された。本研究ではトレッドミルで設定した速度、勾配を用いたため、ウエアラブル機器に搭載される GPS センサーによる走速度の誤差影響が検証されていない。今後 GPS センサーで計測した走速度の影響を検証する必要がある。し

かし、1)HRmax-ACSM Method と 4)HRmax-VO2 Method 間に男性女性共に有意差がなかったことからも、走速度を用いて ACSM ランニング方程式から推定される $\dot{v}$ O2の推定精度は、 $\dot{v}$ O2max推定には十分な精度であったといえる。また、本研究での制約として、平地走行に限定した。平地走行に限定した理由は、GPS センサーによる高さ方向の精度が悪いためである。GPS の測位は、受信機と少なくとも 4 機の人工衛星との距離をそれぞれ計算し、4 つの距離が一点に交わる点が受信機の測位位置となる。そのため、高さ方向の精度は水平方向と比べると悪い傾向にある。現在では、GPS センサーに併せて気圧センサーが搭載されているウエアラブル機器もある。気圧センサーは、気圧変化によって高度を求めており、特に、勾配のような相対的に値を求める場合は、精度がよい。さらに、今回 $\dot{v}$ O2の推定に使用した ACSM ランニング方程式に対して、起伏があるコースによる $\dot{v}$ O2の推定精度の報告は見つけられなかった。平地走行に対しては、ACSM ランニング方程式は有用であるが、上昇や下降が含まれる勾配コースに対して、走速度と勾配から $\dot{v}$ O2を推定する方法も今後検討する必要がある。

# 4. 2 Astrand らのVO2max推定ノモグラムは運動強度に依存しない

心拍数と走速度には比例関係があることが数多く報告されている。実際、ノモグラムにある心拍数の範囲は男性  $122\sim170$  bpm、女性  $120\sim172$  bpm であった。これらの心拍数は、最大心拍数 190 bpm、安静時心拍数 70 bpm と想定した場合に運動強度 48% HRR $\sim70\%$  HRR(男性)、42% HRR $\sim85\%$  HRR(女性)に相当する。また、 $^{\text{A}}$  strand ら  $^{5}$  は「最大下作業時の心拍数が $\dot{\text{VO}}_2$  とほぼ直線的に増加すること」を仮定してノモグラムを作成しているため、運動強度 50% HRR $\sim80\%$  HRR 内であれば推定方法にあたえる作用がない結果が得られたと考えられる。

# 4. 3 最大心拍数を考慮することでVO<sub>2</sub>maxの推定精度が向上する

本研究であげられた、 $^{A}$ strand らの $^{\dot{V}}$ O<sub>2</sub>max</sup>推定ノモグラムに個人ごとの最大心拍数を考慮することで、測定した $^{\dot{V}}$ O<sub>2</sub>maxにより近い値を示すと仮説通りの結果となった。屋内においては、男性女性共に 1)HRmax-ACSM Method が 4 つの推定方法の中で一番よい結果となった。実際のウエアラブル機器を装着する装着者の使用シーンで考えた場合、安静時心拍数の測定は、安静を保つことで測定できるため装着者も安静時心拍数を測定し入力がしやすい。しかし、最大心拍数の測定には、最大強度までの運動が必要となるため、測定が難しいことがあげられる。そのため、最大心拍数がわからない人に向けて、年齢から最大心拍数を推定する220 – Age [yr]の式を用いた Age-ACSM Method を検証した。しかし、 $^{3}$ Age-ACSM Method では、測定した最大心拍数から極端に離れた人に対しては $^{\dot{V}}$ O<sub>2</sub>max</sub>推定値の誤差が大きい要因となっていた。測定した最大心拍数が年齢から推定する220 – Age[yr]の式と離れている人の原因の一つに、運動経験、習慣が影響していると

いわれている <sup>11,12</sup>). 最大心拍数を推定するためには、年齢だけでなく、運動経験、習慣を加味した 新たな推定式の開発が必要となる.

また、ウエアラブル機器を用いた最大心拍数を推定する方法を検討する必要がある。一つ目は、ウエアラブル機器で計測した日々のトレーニングを解析し、走速度と心拍数の最高値から最大心拍数を推定する方法である。この方法は、年齢から推定される最大心拍数よりも高い人に対してはより近い最大心拍数の推定値を提供できる可能性がある。しかし、低い人に対しては最大強度までの運動であったかの判定が難しく、最大強度までの運動であったかをウエアラブル機器使用者に入力をしてもらう必要がある。二つ目は、ウエアラブル機器で最大強度までの運動テストを提供することである。ウエアラブル機器使用者に、漸進負荷運動がプログラムされたテストモードを提供し、テスト中の走速度、心拍数を解析する。ウエアラブル機器使用者が運動負荷についていけなくなった時の心拍数を最大心拍数として推定する。この方法においては、最大負荷までの運動を実施するため、漸増運動負荷試験を用いた体重当たり、VO2max測定と同様のリスクがある。

最大心拍数の推定精度をあげることで、多くの人により測定値に近い値として提供できるため、 これらの方法を今後検討する必要がある.

# 4. 4 測定試験のリミテーション

Table 3 にて、性別ごとに漸増運動負荷試験前、50%HRR 運動強度の定常運動負荷試験前に計測した座位安静中の5分間の心拍数、VO2の平均値と標準偏差、65%HRR、80%運動強度の定常運動負荷試験前に測定した座位安静中の1分間の心拍数とVO2の平均値と標準偏差を示した。漸増運動負荷試験1回目、2回目、50%HRRの座位安静時の心拍数、VO2に有意差は見られず、佐藤らが報告し

Table 3 Mean and SD of the resting heart rate before the each tests.

		Heart Rate [bpm]	VO2[ml/kg/min]
Protocol	N	$Mean \pm SD$	$Mean \pm SD$
VO2max 1st(5min rest)	35	$72.83 \pm 10.96$	$4.62 \pm 1.14$
VO2max 2nd(5min rest)	35	$71.21 \pm 10.54$	$4.82\pm0.92$
50%HRR(5min rest)	27	$67.58 \pm 11.81$	$4.59 \pm 0.83$
65%HRR(1min rest)	33	$80.90 \pm 14.43$	$5.96 \pm 1.57$
80%HRR(1min rest)	34	$85.75 \pm 15.69$	$6.38 \pm 2.05$
VO2max 1st(5min rest)	28	$72.48 \pm 12.65$	$4.86\pm0.60$
VO2max 2nd(5min rest)	28	$71.81 \pm 11.17$	$4.82 \pm 0.57$
50%HRR(5min rest)	16	$69.44 \pm 10.48$	$4.69 \pm 0.66$
65%HRR(1min rest)	25	$78.69 \pm 19.26$	$5.56 \pm 5.76$
80%HRR(1min rest)	28	$84.35 \pm 18.00$	$5.74 \pm 6.90$
	VO2max 1st(5min rest) VO2max 2nd(5min rest) 50%HRR(5min rest) 65%HRR(1min rest) 80%HRR(1min rest) VO2max 1st(5min rest) VO2max 2nd(5min rest) 50%HRR(5min rest) 65%HRR(1min rest)	VO2max 1st(5min rest)       35         VO2max 2nd(5min rest)       35         50%HRR(5min rest)       27         65%HRR(1min rest)       33         80%HRR(1min rest)       34         VO2max 1st(5min rest)       28         VO2max 2nd(5min rest)       28         50%HRR(5min rest)       16         65%HRR(1min rest)       25	Protocol         N         Mean ± SD           VO2max 1st(5min rest)         35         72.83 ± 10.96           VO2max 2nd(5min rest)         35         71.21 ± 10.54           50%HRR(5min rest)         27         67.58 ± 11.81           65%HRR(1min rest)         33         80.90 ± 14.43           80%HRR(1min rest)         34         85.75 ± 15.69           VO2max 1st(5min rest)         28         72.48 ± 12.65           VO2max 2nd(5min rest)         28         71.81 ± 11.17           50%HRR(5min rest)         16         69.44 ± 10.48           65%HRR(1min rest)         25         78.69 ± 19.26

ている成人の安静時心拍数 70 bpm に近い値となった.本研究では、漸増運動負荷試験前に計測した 5 分間の座位安静時の心拍数における最低値を安静時心拍数として用いた.安静時心拍数の平均値は、男性 59.33±7.40 bpm(N=35)、女性 60.29±8.96 bpm(N=28)であり、Table3 で示した漸増運動負荷試験 1 回目、2 回目の安静時の平均心拍数よりも低い値となった.安静時心拍数が  $\dot{V}$ 02max推定の精度に与える影響は、特に低強度部分で、高強度では影響が小さいと考えられる.例えば、最大心拍数 180 bpm、安静時心拍数 70 bpm の被験者と最大心拍数 180 bpm、安静時心拍数 60 bpm の被験者の場合に、運動強度ごとの心拍数を Karvonen 法から求め比較する.安静時心拍数が 70 bpm の被験者では、50%HRR 125 bpm、65%HRR 141.5 bpm、80%HRR 158 bpm となる.安静時心拍数が 60 bpm の被験者では、50%HRR 120 bpm、65%HRR 138 bpm、80%HRR 156 bpm となり、低強度のほうが高強度よりも影響が大きいことがわかる.

また、定常運動負荷試験では、各強度試験実施後 15 分の休憩をとったが、Table3 で示されているように、65%HRR 運動強度測定試験前、80%HRR 運動強度測定試験前の心拍数、 $\dot{V}O_2$ は 50%HRR 運動強度測定試験前の場合と比較して有意差がみられた。このことからも、15 分の休憩時間は安静状態前に戻すには短かったと思われる。

 $\dot{V}O_2max$ 推定値の統計分析の結果,運動強度による有意差がなかったことからも,漸増運動負荷 試験前に測定した安静時心拍数と,定常運動負荷試験時に各強度での試験実施後の休息時間が 15 分であったことが $\dot{V}O_2max$ 推定精度に大きな影響を与えなかったと考えられる.しかし,今後はこれらのことも十分に加味してから試験に臨みたい.

## 5. 結論

本研究は、 $^{\text{A}}$ strand らの $\dot{\text{V}}\text{O}_{2}$ max推定ノモグラムに最大心拍数を考慮する方法と、 $^{\text{A}}$ strand らの $\dot{\text{V}}\text{O}_{2}$ max推定ノモグラムをウエアラブル機器へ適用するための方法の 2 つを検討した. その結果、ウエアラブル機器で計測できる運動中の心拍数と走速度から数式化した $^{\text{A}}$ strand らの $\dot{\text{V}}\text{O}_{2}$ max推定ノモグラムを用いることで $\dot{\text{V}}\text{O}_{2}$ maxの推定が可能であることが示唆された. 特に,個人ごとの最大心拍数を考慮する新たな推定方法を用いることで,より測定値に近い値が推定できることが示唆された.

## References

- 1) P. M. Ribisl: Effects of training upon the maximal oxygen uptake of middle-aged men, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol*, Vol. 27, pp. 154-160 (1969).
- 2) C. T. Davies, and M. W. Thompson: Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol*, Vol. 41, pp. 233-245 (1979).

- I. Tabata, K. Nishimura, M. Kouzaki, Y. Hirai, F. Ogita, M. Miyachi, K. Yamamoto: Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO2max.: *Medicine Sci. Sports Exerc.*, Vol. 28, pp. 1327-1330 (1996).
- 4) 厚生労働省:健康づくりのための身体活動基準 2013 (https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple-att/2r9852000002xpqt.pdf), pp. 8-9 (2013).
- 5) P.-O. Åstrand, and I. Ryhming: A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work, *J. appl. physiol.*, Vol. 7, pp. 218-221 (1954).
- 6) S. F. Siconolfi, E. M. Culliname, R. A. Carleton, and P. D. Thompson: Assessing VO2max in epidemiologic studies: modification of the Astrand-Rhyming test, *Medicine Sci. Sports Exerc.*, Vol. 14, pp. 335-338 (1982).
- 7) C. T. M. Davies: Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements. *J. Appl. Physiol.*, Vol. 24, pp. 700-706 (1968).
- 8) 佐藤方彦,安河内朗:安静時酸素摂坂量心拍水準に及ぼす姿勢の影響とその性差,人類學雜誌, Vol. 84, pp. 165-173(1976).
- American College of Sports Medicine: ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription Ninth edition. LWW: 2013.
- 10) C. Hall, A. Figueroa, B. Fernhall B, J. A. Kanaley: Energy expenditure of walking and running: Comparison with prediction equations, *Medicine Sci. Sports Exerc.*, Vol. 36, pp. 2128-2134 (2004).
- 11) H. Tanaka, K. D. Monahan, and D. R. Seals: Age-predicted maximal heart rate revisited, *J. Am. Coll. Cardiol.*, Vol. 37.1: 153-156(2001).
- 12) B. M. Nes, I. Janszky, U. Wisløff, A. Støylen, and T. Karlsen: Age-predicted maximal heart rate in healthy subjects: The HUNT Fitness Study, *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 23.6: 697-704(2013).

# 技術報告

# 薄型ランニングウオッチ(S690)の開発

中島健一, 小庄司秀昭, 野村隆幸 セイコーウオッチ株式会社,東京都中央区銀座1丁目26番1号,〒104-8118 (2020年9月25日受付,2020年11月2日再受付,2020年11月4日採録)

# Development of the Thin Digital Watch (S690) for Running

# Kenichi NAKAJIMA, Hideaki KOSHOJI, and Takayuki NOMURA

Seiko Watch Corporation, *1-26-1, Ginza, Chuo-ku, Tokyo 104-8118, Japan* (Received September 25, 2020, Revised November 2, 2020, Accepted November 4, 2020)

#### ABSTRACT

We have developed a thin digital running watch. Set 4 points to improve basic performance. (1) Wearability (2) Easy to see (3) Long-term use (4) Easy to use. The product was realized by developing elements such as the size and thinness of the movement, display, button layout, and power supply. Then, through hearings with runners, we worked to improve the usability of the product.

# 1. はじめに

2007年開始の東京マラソンに代表される市民マラソンの定着. 箱根駅伝など学生マラソンの歴史. 健康志向による趣味のマラソンなど,一般ランナーからシリアスランナーまで、マラソンには幅広い層のユーザーがいる. ランニング時の計時需要から一定のランニングウオッチ市場が形成されている.

Table 1 Super runners product history.

# 2. 既存製品

セイコーウオッチ株式会社は, さまざまなマラソンランナーに向けたスポーツデジタル時計をこれまで開発してきた(Table 1). 薄型の基本となる S650. 2011 年学会発表の加速度センサ付 S670<sup>1)</sup>, 電池交換不要のソーラ充電式 S680. 2016 年学会発表のマラソンマット活用のスマートラップ S620<sup>2)</sup>, 小型サイズの S601, S602 等を上市してきた.

Model	Year	Main functions
S640	1995	1stModel, Target time
S650	2001	Thin running watch
S750	2007	Solar Radio Runner
S601	2010	Runners for women
S670	2011	Sensor, distance
S602	2011	Runners for women
S680	2011	Solar charging
S611	2014	Large screen runners watch
S620	2015	Marathon mat measurement
S690	2018	Solar charge Ultra-thin DQ

# 3. 製品企画

薄型ランニングウオッチ S690 (Fig. 1)の製品企画にあ たり、基本性能を磨き上げることで、スーパーランナー ズの原点である使い勝手の良いベーシックスポーツデ ジタル時計の実現を目指した.

基本性能の向上として、4つの開発項目を設定した.

- (1) 装着性
- (2) 見易さ
- (3) 長期間の使用 (4) 使いやすさ.

学生や社会人ランナーへのヒアリングを通じて、製品 開発において使い勝手向上に努めた.



Fig. 1 Super runners S690.

# 4. 製品開発

# (1) 装着性

開発にあたり, 平面サイズの最適化, 断面厚みの薄型化に注力 し、装着感の良い時計サイズの実現を目指した、歴代スーパーラ ンナーズの中で、定番とされる製品サイズの考察を行い、平面サ イズの最適化については、視認性に配慮した液晶パネル表示面積 を確保しつつ、女性にも快適に装着してもらえるよう腕周り方向 (Y 方向) の時計サイズを 40 mm に定めた(Fig. 2, 3).

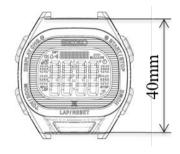


Fig. 2 S690 Y direction dimension.

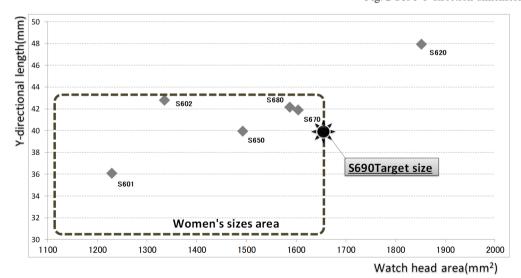


Fig. 3 S690 target size.

装着性を向上させる要件として、時計の薄型化は特にランニングウオッチにおいては有効である。学生ランナーなどへのヒアリングにおいても、薄型化が製品力向上に必要であることが分かった。本開発においては、歴代スーパーランナーズ最薄を目指し、3つの開発要素を投入した。(a) 見返しレス構造 (b) 片面実装 (c) Film ソーラが3要素である。

(a) 見返しレス構造とは、外装の固定構造として新規に要素開発を行ったもので、ムーブメントと外装の断面隙間を限界まで詰めた構造である. 部品構成としては、ムーブメントを受ける外装部分に改良を加え、ムーブメント受け面と液晶パネルを平面的に分散することで、従来構造では積層して厚くなるところを抑制した構造である. 既存製品の厚みは 10.86 mm であったが、本構造を採用した S690 では 8.52 mm まで薄型化が図れた(Fig. 4, 5).

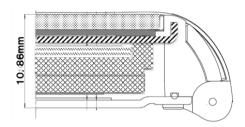


Fig. 4 Existing structure.

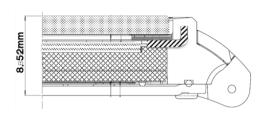
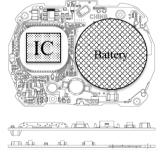


Fig. 5 S690 Mikaeshi-less structure.

(b) 片面実装とは、通常デジタル時計の回路ブロックは、裏蓋側に電池を配置し液晶パネル側に IC (集積回路) を配置するのが一般的であるが、裏蓋側に電池と IC を並列配置させた実装形態である。電池サイズや IC の実装面積、素子類のレイアウト等、回路のレイアウト設計難度が高い構成ではあるが、素子高さを含めた各要素の最適選択ならびに回路配線の設計密度を高めて片面実装を成立させた。(Fig. 6, 7, 8)





Light guide plate
Circuit
Battery

Fig. 6 Circuit appearance.

Fig. 7 Circuit block drawing.

Fig. 8 Cross-sectional structure.

(c) Film ソーラ. 今回の開発においては、薄型化を推し進めるため Film ソーラ要素を投入した. 一般的にデジタル時計は電力収支の関係でソーラパネルはガラス下に透過率 100%での使用を

前提にレイアウトを行う. 薄型化のための Film ソーラであるが、外観的にはガラスソーラと比較し、そりやうねりが目立つ要素であった. ソーラパネル自体の表面の反射率の適正化により、外観のそりやうねりを目立ちにくくさせた. 更にソーラパネル面積を最大限確保し、電力収支に余力を持たせ、ガラス透過率は若干低下するがガラスにデザイン上の加飾を入れてそりやうねりをより目立たなくさせた. (Fig. 9)



Fig. 9 Horizontal striped glass printing.

# (2) 見易さ

ランニングウオッチにおいて、表示の見易さは製品の使い勝手の面で大変重要である.スーパーランナーズは、グラフィック文字1段とデジット数字2段の計3段表示を基本としていて、ユーザーヒアリングにおいてもこの表示レイアウトは好評であった.3段表示を前提に、平面サイズの最適化により、既存のソーラ充電製品S680比で文字サイズを1.2倍大型化した(Fig. 10).また液晶パネル配線を工夫し、上下段をつなげた表示も選択できるようにして、通常表示に対して1.7倍の表示大型化も実現させ、見やすい表示パネルに仕立てた(Fig. 11, 12).

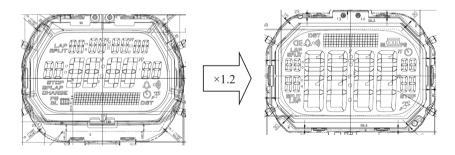


Fig. 10 LCD character size up.

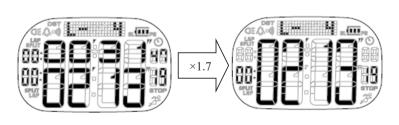


Fig. 11 LCD dual display mode.

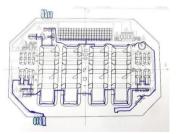


Fig. 12 LCD common drawing.

# (3) 長期間の使用

学生ランナーへのインタビューで、電池交換のわずらわしさが挙げられた。電池交換のタイミングが買い替えのタイミングとの意見もあった。機能付加した既存製品、加速度センサやスマートラップのランニングウオッチは、一次電池を使用している。本製品は、ソーラ充電を搭載することで長期間の使用を可能とし、ソーラパネル自体の発電効率の向上を図り電力収支に余力を持たせ、前項記載のガラス印刷加飾によるデザイン性の向上を図った。新たにソーラレベルモニタ機能も搭載した。一定時間リアルタイムにソーラの受光レベルを10段階表示する機能で、対環境におけるソーラ受光度合いが簡便にわかる機能である。更に電池残量表示も、電池アイコンのみならず10段階の数値表示により残量把握の精度を上げた。

# (4) 使いやすさ

セイコーのランナーズウオッチは、基本フロントにラップ用のボタンを搭載している。学生ランナーへのヒアリングから、このフロントボタンの搭載がトラック練習などの計時に大変有用であることがわかった。歴代のスーパーランナーズは、垂直軸を基本としたフロントボタン構造であったが、本開発の S690 は薄型化の為この垂直軸構造が採用できず、Fig. 13 断面図のようにフロント軸に傾斜角を設けた構造とし厚みの抑制を図った。フロントボタンの有用性は、ランニング時のブラインド操作にあり、軸の角度と合わせてフロントボタンの立体形状も工夫し、斜め押しでありながらこれまでと同様なブラインド操作が可能なフロントボタンを創出した。バックライトについては、高輝度白色 LED を採用した。明るい場面でも点灯がわかり、夜間のランニングなどにも背面発光の液晶パネルと相まって視認性の向上が果たせた。ライト点灯の操作はボタンではなくタップ操作とすることで、いっそうの操作性向上に貢献している(Fig. 14)。タップ式バックライトの回路構成は、圧電ブザーの回路を一部兼用し、裏蓋へのタップ衝撃を逆起電力で感知し、バックライトスイッチとするものである。通常の圧電素子の接着材ではタップの感度ばらつきが大きいため、量産化にあたっては新規の圧電素子接着材を導入し感度安定化に努めた。

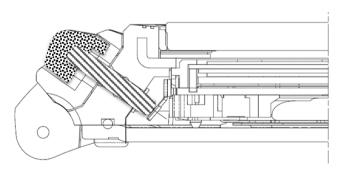


Fig. 13 Front button.



Fig. 14 Tap backlight.

# 5. まとめ

マラソンランナーへのヒアリングにより,製品力強化のポイントを定め,装着性,見易さ,使い勝手を向上させた薄型ベーシックスポーツデジタル時計が実現できた(Fig. 15).

- (1)装着性:男女に最適サイズ、製品薄型構造
- (2) 見易さ:大画面、デュアル文字表示
- (3)長期間の使用:ソーラ充電
- (4) 使いやすさ:高輝度タップ式バックライト

装着性の観点で、製品開発時に注力した製品厚みは、10 気圧防水を確保しつつ、8.52 mm の薄さを実現させた.



Fig. 15 Super runners S690 (dual display).

# 6. おわりに

本開発により、薄型ランニングウオッチのプラットフォームが完成した.今後、この薄型で装着性の良い時計をベースに、機能の追加など付加価値向上を行い、更に幅広いランナーの方々に使って頂ける時計の製品化を行っていく.

# 参考文献

- 1) 酒井聡, 津端佳介: 歩数検出機能を備えた腕時計の開発, マイクロメカトロニクス, Vol.56, No. 207, pp. 36-42, 2012.
- 2) 野邉哲也, 野村隆幸: スマートラップ機能搭載ランニングウオッチの開発, マイクロメカトロクス, Vol. 61, No. 217, pp. 19-24, 2017.
- 3) セイコーウオッチ株式会社 https://www.seikowatches.com/jp-ja/products/prospex/super-runners-solar

# 学術論文予稿\*

# 女性向け GPS ソーラーウオッチの開発

杉本 亮、中島 恭央(セイコーエプソン株式会社)

概要: GPS ソーラーウオッチは地球上どこにいても、その場所の正確な時刻を指し示してくれるウオッチである. 今回開発した Cal.3X は、女性にとっても使い勝手の良い時計サイズ、シンプルなデザインや操作性を実現した、その技術開発について説明する.

## 1. はじめに

2012 年,地球上どこにいてもボタン操作ひとつで、いつでも現在地の正確な「時」を手にすることができる GPS ソーラーウオッチを開発した。それが GPS ソーラーアストロン第一世代に当たる Cal.7X である。さらに、2014 年に第二世代となる Cal.8X、2018 年には第三世代 Cal.5X を開発した。その過程では、GPS ソーラーウオッチの使い勝手を追及し、時計の省電力化、小型・薄型化、そして、GPS 電波の受信性能向上を実現してきた。

今回は、女性向け GPS ソーラーウオッチとして Cal.3X の開発を行った. 開発に当たり,女性向け GPS ウオッチとして、女性にとっても腕馴染みの良い時計サイズや、機能時計としての印象を廃したシンプルなデザインが求められた. そこで、Cal.3X について、以下の開発課題を挙げた.

- ① 時計の小型化・薄型化
- ② 操作性の簡易化

これらの内容を中心に以下に説明を述べる. Fig.1 には, Cal.3X を製品化したセイコーアストロンを示す.



Fig. 1. SEIKO ASTRON Cal. 3X22

#### 2. 時計の小型化・薄型化

従来の機種では、7X は $\phi$ 47mm、t15mm のサイズを有していた。また、続いて開発した8X では、 $\phi$ 45mm、t13mm となったが、これらは、一般的な時計と比較するとまだ大きなサイズ感と言える。その後に開発した5X では、 $\phi$ 42mm、t12.2mm のサイズとなり、男性にとっては、腕馴染みの良い十分な小型化・薄型化を実現した。

今回の女性向け GPS ソーラーウオッチ 3X の開発では、二次電池の薄型化と新アンテナの採用により、ムーブメントの薄型化を実現している. Fig.2 に従来機種 5X と 3X のムーブメント断面の比較を示す.

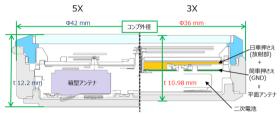


Fig. 2. Cross-sectional view of the movement

3X では従来の5X で使用されるリチウムイオン二次電池 CLB937 ではなく、新規に開発を行った CLB927 を使用した.これにより二次電池を1mm 薄くすることができた.また、従来のアンテナと比べて薄い特徴を持つ平面アンテナと組み合わせることで、時計の大幅な薄型化(△1.2mm)を実現した.これにより、φ36mm, t11mmの時計サイズを可能としており、設計値では、世界最小・最薄のGPS ソーラーウオッチとなる.次節2.1では、平面アンテナの開発による時計小型化とGPS 受信性能の両立について詳細を述べる.

# 2.1. 平面アンテナの開発

5X ではムーブメント内に箱型アンテナを組み込むことで 8X より小型化することを実現した. しかし, さらなる小型化を試みた場合,

- ・アンテナとムーブメント内時計部品との干渉の回避
- ・小型化による受信性能低下の抑制

という課題があった. そのため女性向け GPS ソーラーウ オッチ Cal.3X の実現には、小型化と受信性能を両立させ る新アンテナの開発が必要であった.

新アンテナは、EPSON が GPS ランニングウオッチ (WristableGPS) 用に開発した円偏波板状逆 F アンテナの技術を応用し、アナログ時計用として 3X のサイズを満たすために、新たな平面アンテナの開発を行った.

Fig.3 にムーブメント内での 3X の平面アンテナの構造を示す。新開発の平面アンテナは、樹脂でできた日車押さえにめっきを施し放射部として利用するとともに、金属でできた耐磁板をアンテナの GND (グランド) として利用している。従来のムーブメント部品を利用してアンテナを構成することで、新たなアンテナ部品を不要とし、アンテナとムーブメント部品との干渉というレイアウト上の課題を解決した。

<sup>\*</sup> 本年度の学術講演会にて発表予定であった講演予稿. 研究論文は 2021 年 6 月号に掲載予定.

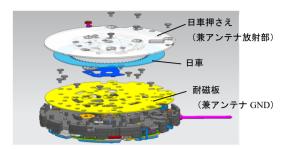


Fig. 3. The configuration of GPS solar watch

	5X	3X
	箱型アンテナ	平面アンテナ
アンテナ		
サイズ	10 mm × 10 mm	φ 28 mm
	t3.7mm	t1.25 mm

Fig. 4. Antenna comparison of GPS solar watch

Fig.4 に従来機種 5X と 3X に搭載されている GPS 電波 受信用アンテナの比較を示す。3X では平面アンテナの開発により、箱型アンテナのスペースを回路基板の電子部 品実装エリアとして利用できるため、5X と同等機能を維持しながら 5X 比 16%の回路基板面積の小型化を可能とした。さらにムーブメントの径も 4.6mm 小型化を実現することができた。

ここで平面アンテナの原理について説明する。平面アンテナは、放射部、GND部、および両者を短絡する短絡部から構成された逆 F アンテナの原理で受信を行っている。逆 F アンテナは携帯電話やスマートフォンの Wi-Fi 等のアンテナとしても一般に利用されている。5X で使用した箱型アンテナは $\lambda/2$  で共振するのに対して、逆 F アンテナは $\lambda/4$  で共振するため、小型化に有利なアンテナである。

Fig.5 に 3X で使用される平面アンテナを示す. アンテナの共振周波数調整は、日車押さえ側面にある短絡部の長さを変更することで行っている. モデル毎の周波数の変動も短絡部の長さを調整することで対応できるため、モデル展開への対応も容易である.

Fig.6 に従来機種 5X と 3X の受信評価結果を示す. 受信評価はビルの谷間 (Urban Canyon) にてタイムゾーン 受信と歩行中での時刻受信を実施し, 受信成功率, 受信

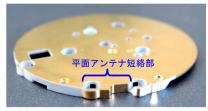


Fig. 5. Short-circuit in planar antenna

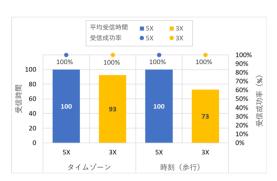


Fig. 6. Reception characteristics of GPS solar watch

が成功するまでの時間を記録した. 受信時間は 5X の受信時間を 100 とした場合の割合で表している. 受信評価の結果, 受信成功率は 5X, 3X 共に全ての条件で 100%である. タイムゾーン受信時の受信時間は 5X, 3X で同等の結果となった. 一方, 歩行中の時刻受信の受信時間は, 3X の平面アンテナでは, 指向性が歩行時に天頂を向くように設計しているため, 5X との比較で 27%改善することができた. この受信評価の結果より, 3X では小型・薄型化を実現するとともに, 従来の 5X と同等以上の受信性能が確保できていることが示された.

#### 3. 操作性の簡易化

一般的に操作が複雑である GPS ウオッチでは、女性を含めたより幅広いユーザー獲得のために、機能時計としての印象を抑え、一般時計のようなシンプルなデザインと操作性へ落とし込む必要があった。そのために、タイムゾーンを指定することで時差修正をする方式やサマータイムの設定を省略した操作仕様を構築した。

従来のアナログ GPS ウオッチでは、時計外装に表記された都市やタイムゾーンを針で指示することにより時差修正を行っていた.一方、3Xでは Fig.1 の外観からも分かるように、外装上の都市標記を廃止し、機能時計としての印象を抑えることを優先した.時差修正は、りゅうず操作により、1 時間単位もしくは、15 分単位で行うことができる仕様としており、りゅうず操作で時刻修正を行う一般的な時計と同様な操作感が得られる.さらに、個々のタイムゾーンでサマータイムの設定を行う必要をなくし、操作の煩雑さを回避した.

# 4. まとめ

GPS ソーラーウオッチ Cal.3X では、新たに平面アンテナを開発し、二次電池を薄型化することで「時計の小型化・薄型化」を図り、「操作性の簡易化」により機能時計の印象を脱却しシンプルデザインへ昇華させた、世界最小・最薄サイズで女性にとっても使い勝手のよいGPS ウオッチを実現することができた。

#### 参考文献

1) 本田 克行, GPS ソーラーウオッチの開発, マイクロメカトロニクス, Vol.58, No.210, 2014

# <u>解 説</u>

# 「時計技術解説」機械式時計 - Ⅱ.動力 小澤 孝

## 1. はじめに

紀元前数千年ころから人類は既に「時」を意識していたと言われています。太陽の動きを意識し、 影の長さや角度で「時」の存在を感じ取り、季節を把握していたであろう痕跡が世界中の遺跡に残さ れています。季節により、どんな獲物を捕獲するか、いかに確実に農作物を収穫するかを主な目的と していました。

人類が狩猟、農耕の時代から産業を手に入れるには時間の正確な把握が必要でした.

暦から始まり、日を計測し、日を細分化して時を計測し、さらに細分化して... 時間をつかさどる努力の結果「時計」が生まれました。

最初に作られた機械式時計は西暦 1300 年頃とされており、大きな錘をぶら下げて重力を動力源に したものがイタリアの礼拝堂に設置されました。これにより人々は規則正しい生活を手に入れること になります。

その後,数百年の進化を経てドイツで「ぜんまいばね」が発明され、時計は飛躍的に小型化の道を たどり、懐中時計が人々のポケットに入る事になります。

人々が時計を自分で持つことによりあらゆる場面で文明や技術の進化が加速されました。

化学実験における反応時間の管理,自動車をはじめとする動力性能の指針,移動時間の短縮の指針, 労働時間の管理などなど.時計無くして人類はここまで進歩出来なかったとも言えます.

現在では電波による時刻修正やGPS 衛星電波による時刻修正を駆使した非常に正確な時計も開発され、その上、発電機能を持った時計が多くを占めています。

そんな中、機械式腕時計はそれらの時計と比べて精度の面では比較にならないほど劣りますが実用 的な精度としては十分に満足できることと、趣味・嗜好性を持ったものとして世界中に根強いファン を確保しています.

本稿では機械式腕時計の動作に必要な動力に関する技術についてまとめます.

#### 2. 機械式腕時計における動力部品:香箱車

機械式腕時計の駆動は電気による力ではなく「ぜんまい」が解ける力によります.

ぜんまいが全巻の状態から時計が放置されてから停止するまでの時間を「持続時間」と呼ばれ、時 計性能の指針として歩度や振幅性能と並んで重要な項目となります.

<sup>\*</sup> シチズン時計株式会社

また、ぜんまいが解ける際に発生するトルクは脱進機構を介しててんぷを動かす原動力となるため、 時計の時間性能に大きく影響します.

このぜんまいを収納した部品を日本語で「香箱車」と呼びます.

機械式腕時計に縁が遠い人にとっては「香箱」と言う部品名は非常に違和感を覚えるかも知れません.

「香箱」の語源は諸説あるようですが、日本ではお香を入れる蓋つきの箱を語源としているようです。英語では「barrel」と表記し「蓄える」機能の意味が伝わってきて解りやすい呼び名です。

機械式腕時計ムーブメント内、歯車の中では最も大きなもので「一番車」とも呼ばれます。



図1 香箱車(表裏)

# 3. 香箱車の動作

機械が動作するためにはどんな場合でも必ず動力源が必要です.機械式時計に於いてその原動力は ぜんまいが解ける力となります.



図2 輪列構造

りゅうずを回転させると、「角穴車」を介して香箱の中心部にある「香箱真」が回転してぜんまいが 巻き上げられます。巻き上げられたぜんまいは反力により元に戻ろうとします。しかし、「コハゼ」に よって角穴車と香箱真はストッパーとなり逆回転できません。そのため、巻き上げられた時と同方向 にゼンマイの外側がほどけようします. ぜんまいの外端は「香箱車」の内壁に密着して保持していて、「香箱車」はその方向につられるように回転することになります.

その結果、香箱車が回転し時計に動力が生じます.

時計のぜんまいを巻き上げるための構造としては大きく分けて2種あり、手巻上げと自動巻上げに 分かれます.

# 4. 香箱車にまつわる計算式

機械式時計を設計する上で香箱車に要求される重要な性能は大きく分類するとトルク性能と持続 時間性能及び耐久性となります.

そのうち、トルク性能は下記の式で与えられます。1)

① ぜんまいトルク 
$$T=rac{Ee^3\hbar\pi N}{6L}$$
 -----(1)

E: ぜんまいのヤング率 e: ぜんまいの厚み h: ぜんまいの幅 N: ぜんまいの巻き数 L: ぜんまい長さ

また、持続時間はぜんまいの巻数によって決定され、下記の式によって与えられます.

② ぜんまい巻数 
$$N = \frac{1}{e} \left( \sqrt{r^2 + \frac{Le}{\pi}} + \sqrt{R^2 - \frac{Le}{\pi}} - r - R \right)$$
 -----(2)

r: 香箱真半径 R: 香箱内半径 e: ぜんまいの厚み L: ぜんまい長さ

香箱車に求められる重要な①トルク性能はぜんまいの厚みの3乗に影響されるということが(1)式で分かり、②持続時間を決定する香箱内のぜんまい巻数は(2)式により、薄いほうが巻き数を稼げるということが分かります.

すなわちぜんまいを厚くすればトルクを稼ぐことができるが、持続時間は短くせざるを得ない、持 続時間を稼ぎたければトルクを小さくしなければならなくなり、時計全体の性能に影響が出てくる、 という関係があります.

これを踏まえながら各部品の解説を行っていきます.

# 5. 構成部品

香箱車は4つの部品から構成されています.

それぞれの部品に重要な役割がありますので個々に解説していきます.

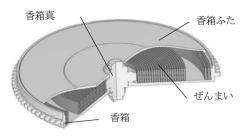


図3 香箱車の部品構成



図4 ふたを開けた香箱車



図 5 香箱車分解写真

# 5. 1 香箱

香箱は内部にぜんまいを収納し、動力を蓄える機能、回転力を次の二番歯車に伝える歯車としての機能の二つの重要な役割があります.

ぜんまいが解ける際に発生する回転トルクはこの外周の歯車から二番車へ伝達されます。

香箱内のぜんまいが全て巻締められた時に発生するトルクをぜんまいの端と香箱の内壁で保持しなければ時計を運針する為の動力を得ることが出来ません。そのため、手巻き時計用の香箱内壁にはぜんまい後端が固定できるような切り欠き等、自動巻き時計用の香箱内壁にはトルクを保持しながらスリップできるような掘り込み等が加工配置されています。

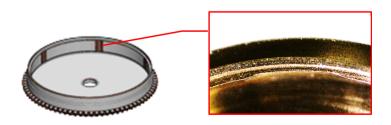


図 6 自動巻香箱車内壁

自動巻の機械式腕時計ではぜんまいが全巻された状況でさらに自動巻上げを行なった場合, ぜんまいはストップせずに巻上げ続けます. この時, 前出の香箱内壁に設置されている彫り込みや切り欠きによってスリップが制限され, 適正なトルクを発生する事が出来ます.

内壁の形状は様々で、設計者のポリシーが詰まっている箇所です.

香箱の最外周には歯が形成されており機械式腕時計輪列で最初の歯車「一番車」として役割を果たしています。ムーブメント内部の輪列用歯車は通常は平板からホブカッターを用いて歯車を切削加工するため、材料を重ねて加工して複数枚の歯車を一度に作る事が出来ますが、この香箱という部品は筒状の部品の外側に歯車を生成しなければならないため、個別の加工が必要となります。

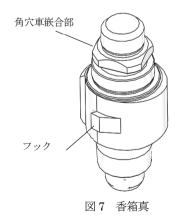
一般的には真鍮 (Brass) が使われ、必要に応じてめっき等の表面処理が施されます.

# 5. 2 香箱真

香箱真は香箱の中心にあり、ぜんまいを巻上げる働きをします.

巻上機構から角穴車に伝達された巻上げ回転動作は嵌合部を介して香箱真を回転させ、ぜんまいに 開けられた四角穴にフックが引っ掛かり香箱真にぜんまいを巻き付けていきます。この時、フック部 及び嵌合部にはぜんまいの大きなトルクが掛かるため、材料には硬度と靭性が求められます。香箱真 材料は一般的には炭素鋼が使用されることが多く、切削加工後に熱処理が行われます。

部品の加工は軸形状部品なので旋盤を基本とします. 香箱真の両端軸は地板や受けに配置された諸 穴と貴石やブッシュ材を介して回転出来るよう,適正な軸受けクリアランスを必要とします. そのた め直径管理の要求精度は高くなります. また,角穴車嵌合用の角形状生成,ぜんまい内端部引っ掛け 用のフック形状生成,ぜんまい巻き込み時のスパイラル内端形状生成等….複雑かつ精密な加工が出来 なければ成立しない部品です.



#### 5.3 香箱ふた

香箱ふたは文字通り「ふた」の役目を担っており、ぜんまいを収めた香箱からぜんまいが飛び出ないようにするための働きをしています。組立の際は、一般的には香箱に圧入固定の方式を用います。

香箱ふたを組立後、内部部品の隙間寸法に影響を及ぼすことが多くあります.

全巻状態から均一な動力トルクを発生させながらぜんまいを解放させるためには香箱内のぜんまいと香箱真はスムーズに動かなければなりません。そのためには香箱とふたの間に存在する部品に適切な隙間が必要で一般的に「あがき」と呼びます。

このあがきが大きいと回転時の香箱車全体の振れが大きくなり周辺部品との干渉を起因とするトルク変動が起こり、あがきが小さい場合は香箱車内部部品の干渉摩擦によりトルクの変動が引き起こされて歩度・振幅に変動を引き起こしたり、最後までぜんまいが解放できずに持続時間が短くなったりします.

香箱と圧入嵌合される際に香箱ふたは薄く変形しやすいため、ふた締め後のあがきには細心の注意 と管理が必要となります。

#### 5. 4 動力ぜんまい

ぜんまいは機械式腕時計の動力源であるトルクを発生させる部品となります.

動力ぜんまいは機械式腕時計部品の中で各歯車が動く動力の源となり、時計性能に大きく影響を及ぼします.

機械式腕時計の中で使われるぜんまいはひげぜんまいと,香箱に使われる動力ぜんまいに代表され、それぞれ非常に重要な働きをします.

動力ぜんまいにも様々な技術が注ぎ込まれているので順番に解説していきます.

# 5. 4. 1 ぜんまい材料

ぜんまいの特性は材料で決定されます.

ぜんまいに求められる主な機能特性は錆びない・切れない・ヘタらない・ことですが 1940 年代 前半まではこの要求を満足させることが出来る動力ぜんまい材料は存在しませんでした.

1940年代後半にアメリカのELGIN社は戦場の過酷な環境に耐える事が出来ずに錆による不具合を克服できなかった反省から「錆びない・切れない」ぜんまいとしてELGILOYという材料を開発しました。それまでの動力ぜんまいは青みがかった色をしていましたが、このコバルトとニッケルを多量に含むELGILOYは白く仕上がるため「白ぜんまい」と呼ばれるようになりました。

現在,一般的に機械式腕時計に使用される動力ぜんまい材料はCo(コバルト)とNi(ニッケル)を高率で含有する特殊金属材料です.

材料メーカの独自な研究により、合金元素を組み合わせて材料を商品化しており、その配合率は 微妙に異なります.

	Co.	Ni	Cr	Fe	W	Мо	Ti	Ве
Nivaflex®	45	21	18	5	4	4	1	0.2
Phynox®	39-41	15-18	19-21	BAL		6. 5-7. 5		< 0.001
Elgiloy®	39-41	14-16	19-21	BAL		6. 0-8. 0		0. 1

表1 著名な動力ぜんまいの材料 2)3)4)

(Nivaflex®, Phynox®, Elgiloy® はそれぞれ Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, Aperam Alloys Imphy, Combined Metals of Chicago LLC の登録商標です)

ぜんまい合金を精製する工程で各元素の果たす役割はそれぞれ有り,各元素について大まかに記 します.

元素記号	元素名	働き
Со	コバルト	粘り強さ, 硬度向上
Ni	ニッケル	粘り強さ、強度、耐熱性向上、Cr と組み合わせて耐食性向上
Cr	クロム	耐摩耗性,耐食性,耐熱性向上
W	タングステン	高温時の強度,硬度向上
Мо	モリブデン	粘り強さ、焼戻し時の耐軟化及び耐脆化性向上
Ti	チタン	表面硬化,耐食性向上,時効性抑制効果
Ве	ベリリウム	表面硬化,耐食性向上,時効性抑制効果

表2 各元素の働き 5)

# 5. 4. 2 ぜんまいの成形

通常, 材料メーカから購入するぜんまい材料は断面が丸い線状か, 若しくは圧延された状態の条材です.

設計通りの圧延厚みと幅を実現するためには素材の直径を決める必要があります.この直径を精 度良く確保しながら行う工程は伸線と呼ばれ、材料の加工工程の初期に於いて非常に重要な位置づ けになります.

4章の①と②で与えられるぜんまいの諸計算式によると、機械式腕時計の歩度・振幅性能に影響するぜんまいトルクはぜんまい厚みの3乗に比例し、持続時間を支配する巻き数は厚みに反比例する事からぜんまいの厚み管理は非常に重要な項目でその公差は通常±数 $\mu$ mと非常に狭い範囲の製造能力が求められます。圧延機の剛性はもとより、温度管理、加工圧力管理、張力の管理等、そ

れぞれの値に対して厳重な管理を行わなければぜんまい材料は製品に繋がりません。

厳しい管理をされた圧延工程が終了したぜんまい材料は必要長さに切断される工程や香箱真フックが掛かる四角の穴をあけられる工程、先端ループを成形する工程を経てぜんまい巻き込みの工程に入ります。



図8 先端ループ加工された材料

香箱内ではぜんまいは渦巻き状に収納されていますがぜんまいを香箱から外に出すと形状は写真の如く変わった形状を形成しています.この形状のぜんまいばねを「S字ぜんまい」と呼びます.この形状のぜんまいは全巻状態から全解放までのトルク変動が少ない事が大きな特徴です.

機械式腕時計にとって全巻から解放までの発生トルクが大きく変動しないということは時計の 歩度・振幅性能の安定化にとって非常に重要です.

S 字ぜんまいの成形加工方法は特徴的で ①製品とは逆巻方向の渦巻き状に巻き込む. ②その形状を保ったまま熱処理用治具に収める. ③渦巻き状に収まった治具ごと熱処理炉に入れて熱処理を行う. ④香箱に入れる際には渦巻きを逆に巻き込む.

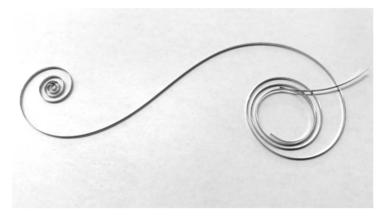


図9 S字に成形されたぜんまい

この4工程を経て、張力がばね全体に均一に働き、滑らかに巻き戻るようになるS字ぜんまいが

# 完成します.

ぜんまい先端には香箱真のフックがひっかかる為の四角の穴があけられ、後端部にはスリッピングアタッチメントと呼ばれる板状部品が取り付けられています.

このスリッピングアタッチメントは、全巻時に香箱内壁に向かってぜんまい後端を押し付ける役目をしていて、全巻のトルクを保持したままぜんまいを巻上げる事を可能にする部品です.

ぜんまいの性能を目一杯出し切るために、ぜんまい線同士の摩擦を低減する目的で完成したぜん まいを液状潤滑剤の槽にどぶ付けしてコーティングを行うこともあります.

# 5. 5 油脂類

手巻き時計用の香箱は全巻になるとそれ以上巻上げが不能になるように止まりますが自動巻き時計用香箱は必要なトルクを維持しながら内部で滑り続けるという複雑な関係を成立させながら動作しています。注油する油脂には二つの目的が課せられます。

- a) 香箱真やぜんまいがお互いに接触する部分は良く滑り、ロスが少なく摩耗が無いように.
- b) 香箱内壁とぜんまい外端部は発生したトルクを蓄積できるように滑りづらく,壁面の摩耗が少ないように.

万が一, b) のグリスを a) に使ったとしたら,解放している最中のトルクが不安定になり,時計性能が悪くなる可能性があります.

また万が一, a) のグリスをb) に使った場合は香箱真が巻上げるぜんまいトルクを香箱内壁は 受け止められず全巻が不可能になり, 持続時間不足という現象に直結します.

このように、グリスの役割は非常に重要ですが自動車産業等に比べて消費量が極端に少ないため、 新しい潤滑油を開発する事は難しいテーマになりがちで、市販品も選択肢が少ないのが実情です.

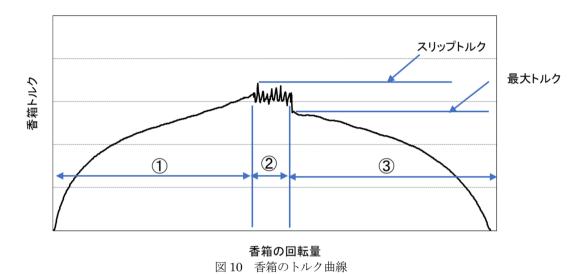
# 6. 出来上がり性能

最終的に香箱車が完成すると機械式腕時計の一部品として性能を発揮します.

香箱車がどのような挙動をするかを香箱車の回転量とトルク発生の関係をグラフで示します。

- ① 巻上げ:りゅうずまたは自動巻機構によってトルクゼロ(全解放)から巻き上げます. 回転量に従ってトルクが上昇していきます.
- ② スリップ:スリッピングアタッチメントの働きにより香箱内壁とぜんまい後端がスリップします。スリップ時のトルクはグラフのように保持→スリップを繰り返します。全巻時よりさらにりゅうずを巻上げたり、錘によって巻き上げられている状態です。この時の保持トルクはスリップトルクとして重要な管理項目になります。
  - ・スリップトルク大の場合:振当たりが発生しやすく歩度が異常に進む等の不良になります。

- ・スリップトルク小の場合:持続時間が極端に短くなったり,歩度・振幅の不良になります.
- ③ 解放:全巻から徐々にトルクが下がりながらゼロになり、最終的には時計が止まります.



# 7. まとめ

機械式腕時計の部品の中でひと際重要な部品が香箱車ですが、何故かこの香箱車は脚光を浴びるチャンスが非常に少ない部品です。

時計部品の中で「ぜんまい」というとひげぜんまいはイメージできるが、この動力ぜんまいをイメージできる人はあまり多くありません.

時計を構成する部品は多くの計算から成立しており、香箱車も例外ではありません. 本稿ではモノづくり寄りの視点から動力の解説を書かせていただきましたゆえ、各種数値計算等は過去の寄稿等を良く参照していただけたらと思います.

これを機に動力部分の興味をさらに湧かしていただき、今後の機械式腕時計の進歩に貢献していた だけたら幸いです

# 参考文献

- 1) 腕時計用動力ゼンマイに要求される諸性質とその材料について 佐藤二郎 池田国男 鎌田伸男東京大学生産技術研究所
- 2) Vacuumschmelze GmbH & Co. KG ALLOY INFORMATION
- 3) Aperam Alloys Imphy SAS PHYNOX® DataSheet
- 4) Combined Metals of Chicago LLC ELGILOY® DataSheet
- 5) 機器用ばねの条件と材料 坂本光雄 日本ばね学会 1962 年 1962 巻 8 号

# TECHNICAL LECTURE

# Isochronism (1): 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 first technical lecture that has been serialized four times<sup>1-4)</sup> since 2000 in the Journal of the Horological Institute of Japan. Twenty years after the original publication, the reason why I created the English version is to tell the world that the attitude toward "isochronism" shows the uniqueness of Japanese watch engineers. I think that the reason why they emphasized "isochronism" in the theory of mechanical watches is that "isochronism" has evolved independently in Japan and has achieved good results. And, through all four technical lectures, I would like to convey what kind of content is being educated to engineers and further applied to precision adjustment by watchmakers.

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>14</sup>の第 1 回を英語版として発行するものである。オリジナルの発行から、20 年を経て、私が英語版を作成した背景としては、「等時性」に対する姿勢が日本の時計技術者のユニークさを示すものだと世界に伝えるためである。彼らが機械式時計理論の中でも「等時性」を重要視した理由として、「等時性」が日本で独自に進化し、成果を上げてきたからだと私は考えている。そして、全 4 回の技術講義を通じて、私はどのような内容が技術者へ教育され、さらに、時計師による精度調整に応用されているのかを伝えていきたい。

#### Abstract

In this chapter 1, the fundamental equation of vibration for the free damped case and its power consumption are described. The consumption power of the balance-spring system should be regarded as the solid friction resistance of the pivot of the balance staff and the viscous resistance of balance-wheel rotating in the air. Moreover, the relationship between the Q value which represents the goodness of the vibration system and the frequency of vibration, effect of high vibration frequency and the improvement of wearing accuracy are described. In chapter 2 in the next book, basic theory of isochronism, the nonlinearity portion of hairspring action. In chapter 3, explanation of isochronism of horizontal positions, mainly based from the outer end fixation of hairspring. In chapter 4, explanation of the isochronism of vertical positions based on the unbalance moment of inertia of balance-wheel and the inner terminal fixation of hairspring. Weighing method of middle place of hairspring is explained here.

第1章 (本稿) においてはテンプひげ系の振動系の基本的な表現を自由減衰振動とそれに要するエネルギー, および振動系の良さ Q に関しても学ぶ. さらに, 次回, 第2章においては等時性の基本, 主としてひげの内外端の影響の扱い方を学び, 外端の影響の詳細に関して学ぶ. 第3章ではひげぜんまいの外端, 第4章では姿勢差に関する理論, ひげ内端のテンワの片重りの影響, およびひげの重り付けの理論について解説した.

# 1. Characteristics of the balance-spring system

Since the balance-spring system is a speed regulator for the watch, the constant vibration period is the main purpose and the main characteristic. Especially the isochronism that means mainly the relations with amplitude of the balance-spring system and vibration period is the main problem for explanation here, but first, we overview the various characteristics of the vibration system. The various characteristics are listed below.

- 1) Expressions of the Vibration Patterns and their Equations
- Energy for continuing the Vibration and Relationship between the Mainspring Torque and the Amplitude
- 3) Influence of the Disturbance Elements on the Vibration Period of the Vibration System

Here is described these characteristics.

# 1.1 Equation of Vibration

When the balance-spring system is free-damped vibrated, it's equation of vibration is expressed as follows.

$$I\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} + F\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + K\theta \pm R = 0. \tag{1}$$

When t = 0, the amplitude  $\theta = A$ , the initial velocity  $\frac{d\theta}{dt} = 0$ . Here,

*I*: moment of inertia of the balance-wheel,

F: viscous friction resistance,

K: spring constant of hairspring,

R: solid friction resistance.

By rewriting equation (1) and using the parameters  $\mu$ ,  $\omega$ , and r,

$$\frac{\mathrm{d}^2 \theta}{\mathrm{d}t^2} + 2\mu \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + \omega_0^2 (\theta \pm r) = 0, \tag{2}$$

$$\mu = \frac{F}{2I}$$
,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{I}}$ ,  $r = \frac{R}{K}$ .

By solving this, (3), (4) are obtained,

$$\theta \pm r = \theta_0 e^{-\mu t} \cos(\omega t - \delta), \tag{3}$$

$$\omega = \sqrt{{\omega_0}^2 - \mu^2},\tag{4}$$

where the plural sign  $\pm$  takes + when  $\frac{d\theta}{dt}$  < 0, and takes - when  $\frac{d\theta}{dt}$  > 0. Then two vibrations are continuous when  $\frac{d\theta}{dt}$  = 0.

When  $\frac{d\theta}{dt} = 0$  at which the sign of  $\frac{d\theta}{dt}$  reverses, that is, when  $\theta$  takes a local maximum value (as  $A_0$  in Fig. 1) or a local minimum value ( $A_1$  in Fig. 1), the center of vibration is deviated from the true center by r. This is illustrated in Fig. 1.

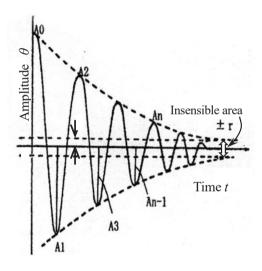


Fig.1 Free damped vibration of the balance-spring system.

Then, when the amplitude  $A = \theta \pm r$  becomes smaller than r, the vibration stops.

Let's see what this vibration equation looks like in actual watch dimensions.

When  $\theta$  takes a positive local and maximal value at t = 0 ( $A_0$  point in the case of Fig. 1), it becomes  $\frac{d\theta}{dt} = 0$  at t = 0.

And starts  $\frac{d\theta}{dt} < 0$  at t = 0, the plural sign becomes –. Then equation comes as

$$\theta = (A_0 - r)e^{-\mu t}. (5)$$

Therefore, the angular velocity is expressed as (6),

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = -\frac{{\omega_0}^2}{\omega} (A_0 - r) \mathrm{e}^{-\mu t} \sin \omega t. \tag{6}$$

Next, the first negative maximum value  $A_1$  becomes (7).

$$|A_1| = r - (|A_0| - r)e^{-\mu \frac{\pi}{\omega}}.$$
 (7)

Assuming that only the viscous friction acts on the balance staff, using the damping ratio (8) for each half of vibration,

$$v = e^{\mu \frac{\pi}{\omega}} = e^{\frac{\mu t}{2}},\tag{8}$$

equation (7) becomes equation (9). (Hereinafter, half of vibration is expressed as one vibration, according to a custom saying of the watch terminology.)

$$|A_1| = r - \frac{1}{v}(|A_0| - r). \tag{9}$$

Also finding the relationship between  $|A_N|$  and the amplitude  $|A_{N+n}|$  after n vibrations, (10) is obtained.

$$\Delta A = |A_N| - |A_{N+n}| = a|A_N| + b, \tag{10}$$

where

$$a = 1 - \frac{1}{n^n},\tag{11}$$

$$b = r \frac{1+v}{1-v} \left(\frac{1}{v^n} - 1\right). \tag{12}$$

Decrease of the swing angle,  $\Delta A$  after *n* vibrations is obtained. This actual mode is shown in Fig. 2. Then from Fig. 2, the values of the equation of vibration are shown in Table 1.

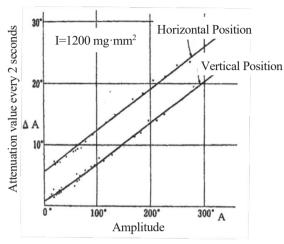


Fig. 2 shows the actual free damped vibration using the 10-vibration men's watch.

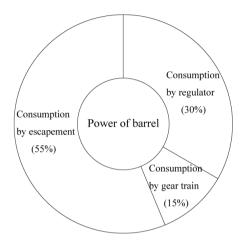


Fig. 3 Breakdown of the energy consumption of the mechanical watch.

Table 1	An actual	sample of data	for a gent's w	atch of $10$	vibrations

	Horizontal position	Vertical position
а	0.068	0.068
b	0.8°	5.4°
μ	$0.035 \text{ s}^{-1}$	0.035 s <sup>-1</sup>
r	0.00036 rad	0.00024 rad
F	84.1 mg· mm²/s	84.1 mg·mm <sup>2</sup> /s
R	0	2.85×10 <sup>3</sup> mg·mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>

#### 1.2 Power Consumption of the Balance-Spring system

The energy given by the mainspring is lost through the motion of gear train, the escapement and the balance-spring system. Regarding the gear train and the escapement, their efficiencies  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  were estimated theoretically and experimentally, then the output of the barrel is consumed as the rate of Fig. 3. Consider the energy consumption of the balance-spring system here. Since the balance-spring system vibrates as in equation (2), the energy of the

balance-spring system is consumed by

- 1) the solid friction at the pivot of balance-wheel,
- 2) the viscous friction due to the air resistance of vibrating balance-wheel, and which becomes finally the frictional heat.

From (2), the swing angle loss  $\Delta A$  per a period is:

$$\Delta A = \mu T A + 4r. \tag{13}$$

Moreover, since the holding energy of the balance-spring system can be expressed as  $E = \frac{1}{2}KA^2$ , substitute this equation (13) into next differential equation  $\Delta E = KA\Delta A$  and we get the equation (14).

$$\Delta E = KA(\mu TA + 4r). \tag{14}$$

Substitute  $\mu$ , r,  $\frac{K}{I}$  as follows,

$$\mu = \frac{F}{2I}$$
,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{I}}$ ,  $r = \frac{R}{K}$ ,

then we get the equation (15), the power consumption of balance-spring system.

$$\Delta E = \frac{2\pi^2 F}{T} A^2 + 4RA. \tag{15}$$

Therefore, the energy consumption per hour, that is, the power consumption  $P_0$ 

$$P_0 = \frac{\Delta E}{T} = \frac{2\pi^2 F}{T^2} A^2 + \frac{4R}{T} A. \tag{16}$$

Here parameters mean, as

F: viscous friction resistance coefficient,

R: solid friction resistance,

T: vibration period of the balance-spring system,

A: swing angle of the balance-spring system.

The first term of (16) equation is that of power consumption by the viscose friction at surface of balance-wheel. It is proportional to the square of amplitude. The second term is that of power consumption at the pivot of balance-wheel. It is proportional the amplitude of balance.

The balance-spring system of 10 vibrations shows in Fig. 2 is used to calculate the power consumption at the amplitude of 240° and the vertical position, is estimated as follows,

$$T = 0.2 \text{ s}, A = 2\pi \frac{240}{360} \text{ rad}, F = 84.1 \text{ mg} \cdot \text{mm}^2/\text{s}, R = 2.85 \times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{mm}^2/\text{s}^2.$$

Then, the power consumption at the amplitude of 240° was estimated about

Viscous friction term = 
$$\frac{2\pi^2 F}{T^2}A^2 = 7.28 \times 10^{-7}$$
 W, solid friction term =  $\frac{4R}{T}A = 2.39 \times 10^{-7}$  W.

It was found that 75% of energy the balance-spring system is consumed by the viscous resistance and the air resistance around the balance-wheel and the remaining 25% is consumed by the solid frictional resistance at the pivots of the balance-wheel.

The total power consumption of the balance-spring system above is about 1  $\mu$ W, which shows that it is almost the same power consumption with the crystal oscillator of the quartz watch which was about 0.1 to 0.5  $\mu$ W in the years around 1970.

The fact that such a system had been manufactured 100 years ago shows that the watch system is well advanced in terms of power reduction technologies compared to others.

#### 1.3 Q Value and Vibration Number (1/2 of frequency)

The Q value of the quality of the vibration system is defined in equation (17):

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Lambda F}.\tag{17}$$

Where E: the holding energy of the balance-spring system

 $\Delta E$ : the energy consumption per period

Furthermore, pay attention to  $E = 1/2 KA^2$  and substitute (14) into (17).

Then it can be expressed as (18).

$$Q = \pi \frac{A}{\Delta A} = \frac{\pi A}{\mu T A + 4r} = \frac{\pi}{\frac{\pi F}{\sqrt{IK}} + \frac{4R}{AK}}.$$
 (18)

When F and R are obtained experimentally, the Q value can be calculated.

In the Calculation of the Q values for the balance-spring system of Fig. 2 and Table 1, Q values of 448 in the horizontal position and 337 in the vertical position were obtained.

In the mechanical watch, the Q value is generally not so large, like these empirically Q of women's watch is 50 to 250 and men's watch is 150 to 400.

Since the balance-spring system of Table 1 has 10 vibrations per second, higher vibration is very effective to realize a more precise speed regulator. Here, the influence of the vibration number on the Q value is discussed.

The relationship between the Q value and the vibration number is as follows.

When R = 0 in the equation (18), the Q value becomes as follows.

$$Q = \frac{\sqrt{IK}}{F} = \frac{\pi I f}{F},\tag{19}$$

here

The moment of inertia of the balance-wheel.

F: The viscosity coefficient, this is determined by size and shape of the balance-wheel.

f: vibration number.

Accordingly, with a similar size of the balance-spring system, the Q value increases with the vibration number, but to do so is not so easy for the watch design.

Normally the size of the barrel is almost determined by the size of the base plate. From this, the output power of the barrel, i.e. the power that can be supplied to the balance-spring system is determined. Therefore, when the vibration number of the balance-spring system is increased, for example, from 5 to 10 vibrations, the power is required 4 times to maintain the same amplitude under the same condition. To this end, the size of the balance-wheel must be reduced to 1/4.

Therefore, if the vibration number is raised from this relationship, it is not always possible to raise the Q value. However, there is a design margin to increase the spring torque. In other words, since there is a margin to increase the power consumption, by increasing the vibration number, then the Q value can be finally increased.

In the last 20 years such a design margin has been achieved by improving the mainspring material, gear train and the escapement, etc. and this is the result of improving the integrated technologies.

#### 1.4 Benefits of higher vibration

The benefit of higher vibration includes not only improves Q value which follows the better temperature property and positional errors improvements, but also improves the accuracy of the watch while wearing the watch. It is effective to raise the frequency from the viewpoint of wearing accuracy when wearing. The outer spectrum energy of disturbances when wearing is concentrated in rather low frequency area.

Then higher the frequency of balance-hairspring system, smaller the result of influences on the step of watch going, simply the response of low-pass filter. When the base plate vibrates slowly, the balance-spring system can follow to the disturbance, but it cannot follow to the disturbances of higher frequency than its own resonance frequency. That is, the gain or loss of the watch is disturbed. This characteristic is a response characteristic of a simple low-pass filter. In this respect, the higher the frequency, the more the actual wearing accuracy in actual watch design. As a concrete example, as a result of increasing the frequency from 2.5 Hz to 5 Hz, the Q value increased by more than 1.5 times (1980 result).

For many years, the vibration number of watches has been 5 to 6, but in recent years luxury men's watches have adopted 8 vibrations or more. Nevertheless the Q value was improved only by 20 to 30% as compared with case of 5 to 6 vibrations, under the actual design point of view, the author feels that the overall design level has been improved greatly in the past twenty years.

**Acknowledgments:** I would like to express the deepest appreciation to Mr. Ryuzo Okamoto for valuable efforts in translating into English.

#### References

- 1) Shoichiro Komaki: Isochronism (1), Micromechatronics, Vol. 44, No. 4, pp.86-90(2000)
- 2) Shoichiro Komaki: Isochronism (2), Micromechatronics, Vol. 45, No. 1, pp.48-52(2001)
- 3) Shoichiro Komaki: Isochronism (3), Micromechatronics, Vol. 45, No. 3, pp.43-49(2001)
- 4) Shoichiro Komaki: Isochronism (4), Micromechatronics, Vol. 46, No. 1, pp.67-75(2002)

## 製品紹介

「TRUME (トゥルーム)」に新機構「SWING GENERATOR」搭載モデル登場

# - 昼夜問わず人の動きで発電する新ムーブメント -

セイコーエプソン株式会社

エプソンは、「TRUME (トゥルーム)」の「L Collection (エルコレクション) -Break Line-」に 新たな機構「SWING GENERATOR (スイングジェネレータ)」を搭載した 1 型 9 モデルを追加 し、2020 年 11 月 19 日 (木) より全国で順次発売します。



TR-ME2001<Limited Model> ¥88.000 (税込み) 希望小売価格

TRUME は、1942 年の創業以来ウオッチの開発から製造までを自社で行い、匠を育て、ものづくりに情熱を注ぎ続けてきたエプソンが 2017 年に新たに立ち上げたウオッチブランドです。新たに登場するモデルは、昼夜問わず人の動きで発電する新ムーブメント「SWING GENERATOR」を搭載。高精度な自社製クオーツに自動巻き式発電装置を組み合わせる独自技術により、電池交換を最小限に抑える環境配慮型ムーブメント。循環型社会への貢献に取り組むエプソンが開発したムーブメントは、光が無くても身に着けていることで動き続け、昼夜を問わず活動する冒険者を 365 日サポートします。

本格的な機能を有したフィールドウオッチでありながら、オンオフ問わずに使える精緻なデザインに、アースカラーを含む豊富なカラーバリエーション全9モデル。金属ならではの質感が美しく、絶妙な色合いのカラーダイヤルには、アウトドアにマッチするナイロンバンド3モデル、エイジングを楽しむレザーバンド3モデル、オフィスシーンにもマッチするチタン製メタルバンド

3 モデルを取り揃えました。ナイロンバンドおよびレザーバンドモデルの裏材には抗菌素材を使用しています。

より多くのTRUMEファンに手に取っていただけるよう、高機能素材であるチタンとセラミックを使用しながらも、8万円台~の価格を実現しました。

#### 新商品特長

#### ●SWING GENERATOR

腕の動きで自ら発電し、クオーツ精度(月差±15 秒)で時を刻み続ける画期的機構。回転錘の動きで発電された駆動エネルギーでクオーツ回路とモーターを制御。TRUME のロゴをあしらった回転錘が自家発電する様をシースルーバックから確認できます。暗闇でも腕の動きで充電し、半年間使用していないと自動的に針の動きを止め、エネルギー消費を最小限に抑える機能搭載。循環型社会への貢献に取り組むエプソンが今の時代に送り出す環境配慮型のムーブメントです。

#### ●GMT 機能

2 つの時間を表示する機能であると同時に、24 時間計の機能も有し、洞窟など昼夜判別が難しい 状況において、有用性を発揮。また、北半球の太陽が見える所では、GMT 針を太陽に向けると 12 時方向が北になるため方位計測も容易です。





### ●セラミックベゼル

昼夜が分からない状況において重要な GMT ベゼルには、刻印の視認性を損なわないよう、すれ 傷に強いセラミックを採用。セラミックベゼルの外周には、側面からの衝撃による欠けなどを防 ぐ、金属リングを装備しています。

## ●プロテクトコーティングチタンケース

軽量で錆に強く肌に優しいチタンケースには、プロテクトコーティングを施し、耐傷性を高めま した。

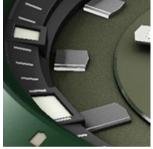
## ●ダイヤカットインデックス

インデックスの側面にダイヤカット加工を施し、光のコントラストを上げて、視認性を高めました。

## ●ルミナスライト

暗闇での視認性を確保するルミナスライト。一般的な蓄光より厚く塗布し、輝度を向上。さらに、時間の把握を容易にするためベセルの 6、12、18、24 の 4 か所にもルミナスライトを塗布しました。







- 商品概要 (LINE UP から抜粋) -







TR-ME2007

# ●スペック [ウオッチ本体]

	L COLLECTION -BREAK LINE
駆動方式	SWING GENERATOR
ケース材質	チタン(ベゼル部:セラミック)
ケースコーティング	プロテクトコーティング(表面硬化処理)
	TR-ME2001:ナイロン
バンド材質	TR-ME2007: チタン
バンド幅 (かん幅)	22mm
ガラス材質(表)	サファイアクリスタル
ガラスコーティング (表)	内面無反射コーティング
ガラス材質(裏)	サファイアクリスタル(内面蒸着)
	縦 52.9mm×横 45.4mm×厚さ 12.4mm
サイズ	(ボタン・りゅうず含まず)
精度	平均月差: ±15 秒
駆動時間	約6ヶ月
充電	自動巻発電
防水	10 気圧防水(ねじ式りゅうず)
24 時針(GMT)	○ (時差修正機能付)
動作温度	-10°C∼+60°C

# 製品紹介

# 製品紹介

# 心拍計と GPS 機能を搭載した"G-SHOCK"

カシオ計算機株式会社



 ${\rm GBD\text{-}H1000-1A7}$ 

カシオ計算機は、耐衝撃ウオッチ "G-SHOCK" の新製品として、心拍計と GPS 機能を搭載した 『GBD-H1000』を 2020 年 5 月 22 日に発売しました。

『GBD-H1000』は、血管の血流量の変化を感知して心拍数を測定できる光学式センサー、方位・気圧/高度・温度を計測するトリプルセンサー、歩数や移動距離を計測する加速度センサーといったセンサーに加え、位置情報を取得する GPS 機能を搭載。専用アプリケーションと連携し、各種センサーで計測したデータを解析することで、心肺能力の指標を時計上で表示します。さらに、アプリケーション上では、消費カロリーや移動軌跡といった計測データの履歴を管理することができます。

外装面では、高精細・高コントラストで見やすい MIP 液晶をはじめとし、運動中にボタンを見ないでも操作がしやすいベゼル形状、滑り止めを施した大型ボタン、手の甲への干渉を配慮しカーブがかかったバックカバーやソフトウレタンバンドを備え、フィット感と実用性を実現しています。また、USB 充電に加えて、バイブレーションによる着信通知機能など日常での使用はソーラー充電で賄うことで、使いやすさにも配慮しました。日頃の健康チェックやトレーニングに最適な "G-SHOCK" です。

型番	カラー (ベゼル)	メーカー希望小売価格	発売日
GBD-H1000-1A7	ブラック×ホワイト	55,000 円(税込)	2020年5月22日
GBD-H1000-1	オールブラック	55,000 円(税込)	2020年5月22日
GBD-H1000-4	レッド	55,000 円(税込)	2020年5月22日
GBD-H1000-8	グレー×レッド	55,000 円(税込)	2020年5月22日







GBD-H1000-4



GBD-H1000-8

# GBD-H1000の主な仕様

構造・性能		耐衝撃構造、20 気圧防水	
通信仕様	通信規格	Bluetooth* low energy (※1)	
	通信距離	~2m (環境により変化)	
測位機能	·	GPS、GLONASS、みちびき対応	
センサー		光学式センサー(心拍)、磁気センサー(方位)、圧力センサー(気圧/高度)、温度センサー、加速度センサー(歩数)	
手首式心拍測定機能		最大計測値:220bpm、心拍数、目標心拍設定、心拍ゾーングラフィック表示、心拍数遷移グラフ、最大心拍数、最小心拍数	
トレーニング機能		GPS または加速度センサーによる距離、速度、ペースなどを計算して表示、自動/手動ラップ機能、オートポーズ機能、自動走行計測開始機能、到達お知らせアラート設定機能(時間、高度、消費カロリー)オン/オフ切り替え機能、トレーニング表示カスタマイズ機能	
トレーニング分析機能		トレーニングステータス、フィットネスレベル傾向、トレーニング負荷傾向、VO2MAX、リカバリータイム	
トレーニングログデータ		メモリー最大 100 走分、ラップデータはそれぞれ最大 140 本 計測タイム、距離、ペース、消費カロリー、心拍数、最大心拍数、有酸素 トレーニング効果、無酸素トレーニング効果	
ワールドタイム		世界 38 都市 (38 タイムゾーン (※2)、サマータイム自動設定機能付き) +UTC (協定世界時) の時刻表示	
ストップウオッ	チ	1 秒、100 時間計、スプリット	
タイマー		最大5つの時間設定が可能なインターバル計測用のタイマー(セット単位: 1秒、最大セット:60分、1秒単位で計測、オートリピート)	
アラーム		時刻アラーム4本(スヌーズ機能付き)	
その他の機能		モバイルリンク機能、バッテリーインジケーター表示、パワーセービング機能(暗所では一定時間が経過すると表示を消して節電します)、フルオートカレンダー、12/24時間制表示切替、操作音ON/OFF切替機能、LEDバックライト(フルオートライト、スーパーイルミネーター、残照機能、残照時間切替(1.5秒/3秒)付き)、機内モード、バイブレーション機能	
使用電源		ソーラーパワー (ソーラー充電システム)、専用充電ケーブルによる充電システム (USB 端子 (Type-A) のある機器が必要です)	
持続時間		トレーニングモード(GPS 連続計測)+心拍計測機能:最大約 14 時間 時刻モード(歩数計測、通知機能含む):約 12 か月 ※使用環境により変動します、フル充電からソーラー発電なしの場合	
時刻修正		GPS 衛星電波受信:自動受信(モバイルリンク機能未使用時:時刻受信、最大1回/日)、手動受信(位置受信、時刻受信)、Bluetooth®:スマートフォンと接続し、時刻を自動修正	
大きさ	63.0 × 55.0 × 20.4 mm		
質量		約 101g	

- %1 Bluetooth ワードマークおよびロゴは、Bluetooth SIG, Inc. が所有する登録商標であり、カシオ計算機 (株) はこれらのマークをライセンスに基づいて使用しています。
- ※2 スマートフォンとの連携により更新される場合があります。

# 製品紹介

# 世界初<sup>※1</sup>の光発電 GPS 衛星電波ダイバーズウオッチ登場 世界の名だたるダイビングスポット名を見返しリングに表記

シチズン時計株式会社



『シチズン プロマスター』 エコ・ドライブ GPS 衛星電波時計ダイバー200m 品番 CC5006-06L

シチズン時計は、プロフェッショナルスポーツウオッチとしての高い性能に加え、「想像力」という価値を提案する『シチズン プロマスター (以下プロマスター)』から、光発電エコ・ドライブ GPS 衛星電波時計の新ムーブメント Cal.F158 を搭載したダイバーズウオッチ 2 モデルを 2020 年 7 月 10 日に発売しました。

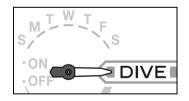
本モデルは、世界初の ISO 規格 200mに対応した光発電 GPS 衛星電波時計の本格派ダイバーズウオッチです。Cal.F158 は、フル充電すれば、光のないところでも約7年(パワーセーブ作動時)動き続ける持続時間を実現しました。また、2 時と 4 時位置にあるプッシュボタンを 2 つ同時に押すことで衛星電波受信機能(自動時刻受信も含む)をオフにするダイブモード機能を装備しています。 ダイブモードは、ダイビング時の受信による時刻修正動作やプッシュボタンに触れることによる誤操作を防ぐ、ダイバーの安全を最優先した時刻表示に特化できる機能です。ダイブモード設定中は、衛星電波受信機能をオフにするだけでなく、プッシュボタンによる充電量や発電量、受信結果の確認機能やパワーセーブ機能、針位置補正機能\*\*2 も働かなくなります。

見返しリングには、世界最大の旅行プラットフォーム『TripAdvisor(以下トリップアドバイザー)』とのコラボレーションにより選出された、世界の名だたるダイビングスポット8カ所を表記しています。GPS衛星から位置・時刻情報を取得し、時刻・カレンダーを修正することで、世界中のダイバーが憧れるダイビングスポットはもちろん、世界中のどこにいても正確な時刻を表示できます。

ケースには、シチズンが1970年に世界で初めて腕時計に採用したチタニウム素材を使っており、以来50年かけて進化させてきたスーパーチタニウム $^{\text{TM}}$ は、キズに強く、軽く、錆びにくいのが特長です。今回ケース本体に採用したスーパーチタニウム $^{\text{TM}}$ は、チタニウム素材にガスを表面から浸透させて素材の表層を硬化させるデュラテクトMRKを施したもので、打ちキズに強い仕様です。CC5006-06L(写真参照)のケース本体は、デュラテクトMRKの上から滑らかな触り心地と擦りキズに強いことが特長のデュラテクトDLCを重ねることで、艶のあるブラックカラーに仕上げています。

文字板は、ダイビングスポットの海をイメージしたエメラルドグリーンやマリンブルーカラーを採用しました。ウレタンバンドは波をモチーフにデザインしています。さらに、ウエットスーツ着用時に便利な延長バンドも付属します。夜光を施した視認性の良いインデックスと針、ダイビンググローブを着用したままでも操作のしやすいローレット(凹凸形状の加工)付きの逆回転防止ベゼル、ねじロックりゅうず、サファイアガラス風防、充電量表示機能、ライトレベル インディケーターなど、ダイバーズウオッチとしての本格機能とデザインを高い次元で融合させたモデルです。

■ダイブモード機能:2時と4時位置のプッシュボタンを同時に押すことで、時刻表示に特化し、受信による時刻修正動作やプッシュボタンに触れることによる誤操作を防ぐ。



■『トリップアドバイザー』とのコラボレーションにより選出された、世界の名だたる8つのダイビングスポットを 見返しリングに表記



8つのダイビングスポット:シャルム・エル・シェイク、 モルディブ、プーケット、グレート・バリア・リーフ、フィジー諸島、ハワイ諸島、ガラパゴス諸島、フェルナンド・ デ・ノローニャ諸島

## 【商品仕様】





<b>ブニ</b> ヽ, じ			
ブランド / 商品名	シチズン プロマスター / エコ・ドライブGPS衛星電波時計ダイバー200m		
商品番号	CC5006-06L	CC5001-00W	
発売日	2020年7月10日発売		
希望小売価格	¥165,000(税込) (税抜価格 ¥150,000)	¥154,000(税込) (税抜価格 ¥140,000)	
ケース/バンド	スーパーチタニウム™(デュラテクト MRK+DLC・ デュラテクト DLC) /ウレタン(延長バンド付)	スーパーチタニウム™(デュラテクト MRK・ デュラテクトチタンカーバイト) /ウレタン(延長バンド付)	
ガラス	サファイアガラス		
ケース径/厚み	47.0mm / 15.6mm(設計値)		
重量	101 g		
主な機能	Cal. F158/ 光発電エコ・ドライブGPS衛星電波時計 /月差±5 秒 (非受信時) / フル充電時約7年可動 (パワーセーブ作動時) /衛星電波受信機能・位置情報取得機能・自動時刻受信機能/充電量表示機能/ダイブモード機能/ワールドタイム機能 (38時差) /サマータイム機能/パーペチュアルカレンダー/ライトレベル インディケーター*3/衝撃検知機能/針自動補正機能/JIS1種耐磁 ■200m潜水用防水■耐ニッケルアレルギー		

※1 光発電GPS衛星電波時計として。2020年1月、当社調べ。

※2 針補正機能:時針、分針、秒針の基準位置自動補正機能。一定時間ごとに各針の位置をチェックし、ずれがあったときは自動的に補正し、正しい時刻を保持します。

※3 ライトレベル インディケーター:シチズンの基幹技術である光発電エコ・ドライブならではの機能で、文字板にあたる光による 発電量を7 段階で表示する機能です。角度や場所が変わることによる発電量の違いがわかり快適な充電環境選びの目安を知ることが できます。

- ★Tripadvisorロゴおよびtripadvisor、トリップアドバイザーはTripAdvisor LLC.の商標または登録商標です。
- ★Eco-Drive(エコ・ドライブ)、スーパーチタニウム、DURATECT (デュラテクト)、ライトレベル インディケーターはシチズン時計 株式会社の商標または登録商標です。

## 会 報

# 一般社団法人 日本時計学会 2020 年 4 月度 理事会議事録 - 2020 年度 第 3 回理事会 -

(記録: 常葉 輝久 2020年4月17日)

- 1. **開催日時**: 2020 年 4 月 13 日 (月) ~2020 年 4 月 17 日 (金) コロナウイルス影響によりメールでの開催
- 2. 場所:
- 3. 出席者:

<理事>木原,大隅,足立,飯田,今村,梅田,大谷,木村,佐々木,滝澤,中島,増田,常葉(以上13名)

<監事>山本, 吉村(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>岩崎, 片野, 橘田, 小池, 重城, 鈴木, 槌谷, 土肥, 永田, 廣川, 藤沢, 横山(以上12名)

#### 4. 審議事項

(1) 2020年2月度理事会議事録確認

2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)

マイクロメカトロニクス 2020 年 6 月号(Vol.64, No.222)に向けて、入稿状況等の説明がされた、内容と継続確認事項は以下の通り、

- ・研究論文:0件,技術報告:3件が校閲中.
- ・技術報告 64-222-03 「GPS ソーラーウオッチにおける小型化・使用感向上技術の開発」 校閲中で、4月17日までに校閲意見を著者に送付
- (3) 企画委員会検討課題について

コロナウイルス状況に合わせて、再検討

(4) 春季研究会

コロナウイルス状況により予定日程での中止決定. 状況収束に合わせて, 再検討.

(5) 学術講演会について

学術講演会の講演の件について (別紙資料配布:土肥運営委員)

- 講演申込締切:7月17日(金),原稿締切:8月21日(金).
- ・講演募集を実行の可否を、次回の第4回理事会,6月19日(金)に決定.
- (6) 青木賞選考について
  - ・5月に選考委員,表彰委員の選出
  - ・6月に表彰候補論文の決定
- (7)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.

正会員大澤 範之時計修理専門店アトリエスピ3/14 届出正会員片野 広大リズム時計工業(株)3/18 届出

(8) 見学会について

コロナウイルス状況により予定日程での中止決定. 状況収束に合わせて, 再検討.

(9)新運営委員について

新たに以下の運営委員の選任が提案された. 特に異議はなく一同これに同意し承認された. 新任運営委員 片野 広大氏(リズム時計工業(株))

#### (10) 次回理事会

第 4 回理事会: 2020 年 6 月 19 日 (金) 16:00~17:00

中央大学 後楽園キャンパス

※コロナウイルスの影響を考慮して,第4回理事会(6月19日(金))の開催可否に関して, 5月末に判断をする、状況によっては、メールベースでの開催も検討する.

#### 5. 報告事項

(1) 会員数状況(2020年4月17日承認後)

・正会員 158 名 (+2) , 学生会員 1 名 (±0) , 賛助会員 16 社 (±0) (83 口 (±0))

· 入会: 正会員 2 名

・退会: なし

#### (2) その他

- ・研究会, 見学会が年度中に開催できない場合は、最終的に総会で計画通りに開催出来なかった 事を報告する
- ・2000 年代に時計学会誌で掲載された新講機械時計学入門の原稿の中で英語化された原稿を、 時計学会誌へ掲載するか、

以下の内容を継続検討する

- ・言語を変える毎に再掲載するかの方針決定
- フォーマットを整えた上で、今回の原稿の掲載を行うかどうか
- ・学術講演会で2件の特別講演を目指し、理事/運営委委員各位が、次回理事運営委員会までに 講演テーマを検討する

以上

# 一般社団法人 日本時計学会 2020年6月度 理事会議事録 - 2020年度 第4回理事会 -

(記録: 常葉 輝久 2020年6月19日)

- 1. 開催日時: 2020年6月19日(金)
  - コロナウイルス影響によりWEBミーティングでの開催 (事前メール共有)
- 2. 場所:
- 3. 出席者: WEB ミーティング

<理事>木原,大隅,足立,飯田,今村,梅田,大谷,木村,佐々木,滝澤,中島,増田,常葉 (以上13名)

<監事>山本, 吉村(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>岩崎、片野、橘田、重城、鈴木、槌谷、永田、廣川、藤沢、横山(以上10名)

## 4.審議事項

(1) 2020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)

- ・マイクロメカトロニクス 2020 年 6 月号(Vol.64, No.222)の配布が、コロナ影響により、 7 月に遅れる見込み
- ・マイクロメカトロニクス 2020 年 12 月号(Vol.64, No.223)に向けて、コロナ影響、学術講演会の開催 状況と合わせて原稿が集まらないことが予想される為、各理事運営委員が過去の学術講演会発表 案件を中心に、原稿確保に向けて検討する.

#### (3) 青木賞に関して (別紙資料配布 大谷理事より説明)

- 第54回青木賞選考の経緯について、大谷理事(青木賞表彰委員長)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。

「新型時計用潤滑油 "AO-オイル" の開発」

2018 年度 Vol.62, No.219

著者:赤尾 祐司

- 青木賞表彰式は、シチズン時計で行い、来年のマイクロメカトロニクス学術講演会で紹介を行う、
- 青木賞規定の記述に関して、分かりにくい表現の見直しを行い、次回理事運営委員会で報告予定.

#### (4) 学術講演会について

・コロナウイルスの状況からWEB開催を含めた検討を進めた結果,今年度の学術講演会は中止とする.

日本時計学会HPへ、代表理事名で学術講演会を中止する旨を掲載する.

・理事運営委員会後,理事運営委員で検討を行い,予稿1件を学会誌12月号に掲載することとなった. 掲載方法については編集委員会にて検討する.

#### (5) 企画委員会検討課題について

オンラインでの研究会開催が提案された.

木村理事から開催に向けた調査に関して、次回理事運営委委員会で報告予定 課金システム、録画禁止等のセキュリティ等.

#### (6) 新入会員の承認

新入会員無し

#### (7) 英語化された原稿の掲載について

- ・英語化された原稿を時計学会誌に掲載することが、承認された. ただし、どの様な扱いで掲載する かを編集委員会で継続検討することになった.
- ・英文校正は、執筆者自身で行っていただく

#### (8) 次回理事会

第5回理事会: 2020年9月18日(金)16:00~17:00

コロナウイルス影響によりWEBミーティングでの開催 (事前メール共有)

#### 5. 報告事項

(1) **会員数状況** (2020年6月19日承認後)

・正会員 157 名 (-1) , 学生会員 1 名 (±0) , 賛助会員 16 社 (±0) (83 口 (±0))

入会: なし

• 退会: 正会員1名

#### (2) その他

・秋季研究会は、春季研究会、見学会と同様に、コロナウイルス状況により予定日程での中止決定. 状況収束に合わせて、再検討.

以上

## 一般社団法人 日本時計学会 2020年9月度 理事会議事録 - 2020年度 第5回理事会 -

(記録: 常葉 輝久 2020年9月18日)

1. 開催日時: 2020 年 9 月 18 日 (金)

コロナウイルス影響によりWEBミーティングでの開催 (事前メール共有)

2. 場所:

3. 出席者: WEB ミーティング

<理事>木原,大隅,足立,飯田,今村,梅田,大谷,木村,佐々木,滝澤,中島,増田,常葉

<監事>山本,吉村(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>岩崎, 片野, 橘田, 重城, 鈴木, 槌谷, 永田, 廣川, 藤沢, 横山(以上10名)

#### 4. 審議事項

(1) 2020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)

マイクロメカトロニクス 2020 年 12 月号(Vol.64, No.223)に向けて、今村理事(編集委員長)より入稿 状況等の説明がされた。

- ・入稿済み原稿が、投稿規定(原則 12 ページ)を超えるページ数となっている. 投稿規定に基づき、 超過を許容するか否か、別途、編集委員会で検討する.
- ・中止になった学術講演会で発表予定だった予稿のうち1件を、学術論文予稿として掲載。
- (3) 企画委員会検討課題について(別紙資料配布:木村理事)
  - ・web研究会/学会/セミナーの実施事例の調査結果が報告された.(媒体,費用支払い,URL連絡)
  - ・日本時計学会でweb研究会を行う場合の手法に関して、議論がされた.
    - 媒体:中央大学のアカウントで WebEx (1000 人まで対応) を第一候補として進める. 講師の方も自身の環境から WebEx に入っていただく.
  - 費用支払いと URL 連絡:日本時計学会口座に参加費入金確認後, URL を連絡する.
  - 来年度, WEB委員の新設を検討する.

#### (4) 新入会員の承認

新入会員無し

#### (5) 次回理事会

第6回理事会: 2020年11月6日(金) 16:00~17:00 コロナウイルス影響により、WEBミーティングでの開催(事前メール共有) または、会議室とWEBの併用も検討

#### 5. 報告事項

- (1) **会員数状況** (2020年9月18日承認後)
  - ·正会員 154 名 (-3) , 学生会員 1 名 (±0) , 賛助会員 16 社 (±0) (83 口 (±0))

・入会: なし

· 退会: 正会員3名

#### (2) その他

- ・シチズン時計(株)社屋において、青木賞表彰式の開催が報告された.
- ・青木賞規定改訂は、次回11月度理事運営委員会で報告予定.
- ・来年度の理事,運営委員の継続/新任状況に関して,次回の理事運営委員会で確認する.
- ・webExで次回の理事運営委員会を行う.
- ・コロナ影響を見ながら、会議室とWEB併用での理事運営委員会の開催について議論がされた. 中央大学 製図室が、広い会議室として活用できる見込み.

以上

# 第54回 青木賞表彰委員会報告

第 54 回青木賞選考は、マイクロメカトロニクス 2018 年度 Vol.62、No.218-219 及び 2019 年度 Vol.63、No.220-221 に掲載された研究論文 3 編,技術報告 8 編,合計 11 編に対して行なわれた。選考は選考委員による予備審査と表彰委員による本審査との二段階で行なわれた。

選考に先立ち,選考委員9名,表彰委員6名の選出を行なった.

予備審査は、各選考委員がそれぞれ与えられた 4 編または 5 編の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、本審査を行なう表彰委員会へ推薦した。

これら 4 編の論文を表彰委員が査読し、その評価を予備審査と同様に集計、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 54 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 54 回青木賞表彰論文に決定した。





写真 上:授賞の様子 下:受賞者

第 54 回青木賞表彰論文 : 新型時計用潤滑油"AO-オイル"の開発

マイクロメカトロニクス, Vol.62, No.219, pp.1-12(2018)

執筆者:赤尾 祐司

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 54 回青木賞の授賞式は、日本時計学会マイクロメカトロニクス学術講演会が中止となったため、 2020 年 9 月 18 日にシチズンミュージアムにて行なわれた。

(委員長 大谷, 幹事 今村, 藤沢)

### 編集後記

今年はコロナー色の様相で、本学会においても学術講演会をはじめ研究会、見学会等各行事の中止や制約を受けた形での運営となり、会社生活や私生活においても大いにストレスの多い1年となりました。

そんな中でも在宅勤務によるリモート会議の普及など、まさに働き方改革に直結するような行動様式の変化が一気に加速する1年でもありました。

消費低迷に関しては時計業界も例外ではありませんが、下期以降徐々にではありますが明るい兆しも見えつつあるかと思います。今後は店頭販売からeコマースへと確実に加速していくでしょうし、SDGsに代表されるような目標や変化に対していかに取り組み対応していくかが重要となってくるでしょう。

まさにピンチはチャンス!来年はコロナも多少落ち着いてくる事を願いつつ、日本時計学会も変化に対応しながら、より発展していけるよう皆さまとともに歩んでいければと思います。

(滝澤 勝由 記)