マイクロメカトロニクス
（日本時計学会誌）Vol. 66, No. 227

研　究

年差±1 秒の光発電ムーブメントの開発

長瀬智

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

（2022 年 9 月 20 日受付，2022 年 11 月 25 日再受付，2022 年 11 月 27 日採録）

Development of the Solar-Powered Movement with Annual Rate of ±1 Second

Satoshi NAGASE

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

（Received September 20, 2022, Revised November 25, 2022, Accepted November 27, 2022）

ABSTRACT

CITIZEN has developed solar-powered movement with a target accuracy of ±1 second per year. First, we examined a standard of ±1 second per year with reference to "JIS B 7025," which has established accuracy standards. In addition to the two items of "aging" and "temperature characteristics", four additional items of "humidity characteristics," "attitude difference," "power supply voltage characteristics," and "adjustment error" were added to set the target accuracy and aimed to achieve it. The target accuracy of ±1 second per year was achieved by employing a new AT-cut quartz oscillator, temperature compensation using a higher-order polynomial, and other technologies. In addition, by reducing power consumption through technologies such as dynamic frequency divider circuits, we have developed the Cal.0100 as a solar-powered movement that can operate for more than six months in the dark when the battery is fully charged.

１．はじめに

現在，正確な時刻を表示する腕時計として，長波電波時計や衛星電波時計が挙げられる．電波時計は，原子時計をもとに作られた時刻情報を重畳した電波を受信し，時刻を修正して正確な時刻を表示する．その一方で，精度を追求した，腕時計自身が電波を受信することなく，自律して正確な時を刻む高精度時計もある．

1967 年に世界初のクオーツ時計が登場して以降の主な高精度の時計について Table 1 [1,2]に記す．1975 年にシチズンが AT カット型水晶振動子を採用した年差±3 秒の高精度腕時計 [3]を発売，1978 年にセイコーがツインクオーツ方式を採用した年差±5 秒 [4]と年差±3 秒の高精度時計を発売した．1981 年にはシチズンが IC の温度補償機能 [5]を採用した年差±10 秒の高精度時計を発売，1983 年にはセイコーが FT カット型水晶振動子 [6]を採用した年差±20 秒の高精度時計を発売した．1990 年代も高精度時計が発売されていくが，2000 年代以降は電波時計が主流となっていった．しかし，

高精度への追及が途切れたわけでなく，2010 年に BULOVA から 3 脚ねじれ振動モードを採用した年差±10 秒，2011 年はシチズンが光発電式の年差±5 秒 [7]，2017 年にロンジンから年差±5 秒 [8] の高精度時計が発売された．

シチズンではさらに高精度化への追及を続け，2019 年に世界初の光発電式の年差±1 秒の腕時計 Cal.0100 を発売した．(Fig. 1)

Cal.0100 は「1 秒の美学」というコンセプトを掲げ，シチズングループ各部門が連携して開発した．

Table 1 Representative high-precision watch.

release year	model	method	accuracy	brand
1973	1510	Convex crystal oscillator	±1 [s/m]	OMEGA
1975	8650	ATcut quartz	±3 [s/y]	CITIZEN
1978	9983	twin quartz	±5 [s/y]	SEIKO
1978	9256	twin quartz	±3 [s/y]	SEIKO
1981	1730	ATcut quartz	±3 [s/y]	CITIZEN
1981	1930	IC temperature compensation	±10 [s/y]	CITIZEN
1982	2730	IC temperature compensation	±10 [s/y]	CITIZEN
1983	9091	FTcut quartz	±20 [s/y]	SEIKO
1986	#77	FTcut quartz	±20 [s/y]	SEIKO
1987	8N40	IC year difference	±20 [s/y]	SEIKO
1989	#5E	IC year difference	±20 [s/y]	EPSON
1993	#03	IC year difference	±10 [s/y]	CITIZEN
1993	#9F	IC year difference	±10 [s/y]	SEIKO
1995	4220	IC year difference	±10 [s/y]	CITIZEN
1997	A735	IC year difference	±10 [s/y]	CITIZEN
1997	A610	IC year difference	±5 [s/y]	CITIZEN
1998	#8F	FTcut quartz	±20 [s/y]	EPSON
2010	P112	Tripod torsional	±10 [s/y]	BULOVA
2011	A010	IC year difference	±5 [s/y]	CITIZEN
2017	L288.2	IC year difference	±5 [s/y]	LONGINES
2019	0100	ATcut quartz	±1 [s/y]	CITIZEN

Fig. 1 Cal.0100.

２．年差±1 秒の規格

２．１　精度規格について

時計の精度については，JIS B 7025 [9]にて規格が定められている．年差精度に起因する項目は，“エージング”と“温度の季節変化”の 2 項目で定められている．エージングによる 1 年間の日差の累積値と，温度の季節変化による 1 年間の日差の累積値の和が A 秒以下であれば，年差 A 秒となる．

エージングによる累積値の求め方について JIS B 7025 に基づき説明する．エージングによる日差の変化を式(1)の様に対数関数と定める．c :定数(s/d)，a :定数(d^{-1})，t :時間(d), M_t : t d 後の日差（M_bは後述の通り日差の初期値）とする．

定数 c と a を求めるために，まず 0 日目と 30 日目，60 日目に日差を測定する(Fig. 2)．それぞれの日差を M_b，M_m，M_e として式(2)と式(3)より定数 a と c を計算する．1 年間の日差の累積値 V_a は，定数 c と a の値を代入した式(1)を積分することで導かれる．(式(4))

$$M_t - M_b = c\ln(1+at) \tag{1}$$

$$\frac{M_m - M_b}{M_e - M_b} = \frac{\ln(1+30a)}{\ln(1+60a)} \tag{2}$$

$$c = \frac{M_e - M_b}{\ln(1+60a)} \tag{3}$$

$$V_a = \int_0^{360} c\ln(1+at)\,dt = \frac{c(1+360a)}{a}\ln(1+360a) - 360c \tag{4}$$

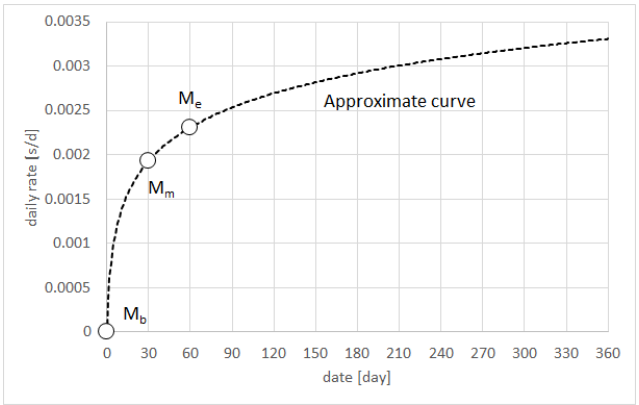


Fig. 2 Approximate curve of aging.

温度の季節変化による累積値の求め方について JIS B 7025 に基づき説明する．春夏秋冬のシミュレーションとして，各季節の温度を 25℃ /35℃ /25℃ /15℃ とする．それぞれの温度環境下の日差を M_p，M_s，M_a，M_w とする．各季節は 90 日とし，各日差の 90 日ずつの合計が，季節変化における 1 年間の日差の累積値 V_t として導かれる．

$$V_t = 90(M_p + M_s + M_a + M_w) \quad (5)$$

導かれたエージングによる 1 年間の日差の累積値と，温度の季節変化による 1 年間の日差の累積値の和をもって，腕時計の年差精度 A_y が決定される．

$$A_y \geqq |V_a + V_t| \quad (6)$$

２．２　規格の追加

年差±1 秒となる日差は 1 秒を 360 日で割った±0.0027 s/d となる．この値を満たすには，エージングと温度の季節変化以外の微小な精度影響も検討する必要がある．そこで本開発では，精度の誤差に起因する項目として 4 つの項目を追加した．項目の内容は湿度の一年間の変化，姿勢による日差の変化，電池電圧による日差の変化，出荷時の調整による誤差の累積の 4 項目である．

1 つ目の湿度による影響につて説明する．クオーツ腕時計は湿度が高くなるにつれ日差が遅れる傾向にある．湿度による日差の変化量の最大値を M_h とし，1 年間の累積量 V_h を定めた．

$$V_h = 360 \times M_h \quad (7)$$

2 つ目の時計の姿勢による影響につて説明する．クオーツ腕時計の要の水晶振動子は，物理的な振動を行っている．そのため微小ではあるが重力の影響を受けて振動の様子が変わり日差に影響がでる．平置き状態を基準として，6 方向の姿勢による日差変化の最大値を M_{at} とし，1 年間の累積値 V_{at} を定めた．

$$V_{at} = 360 \times M_{at} \quad (8)$$

3 つ目の電池電圧による影響につて説明する．クオーツ時計に搭載されている発振回路は電池電圧が変化すると日差も変化する．二次電池を搭載した光発電式では電池電圧が様々な値となり，日差に影響する．動作最大電圧での日差と動作最小電圧での日差との差を M_v とし，1 年間の累積値 V_v を定めた．

$$V_v = 360 \times M_v \quad (9)$$

4 つ目の出荷時の調整による影響につて説明する．出荷工程では日差を最終調整して出荷となる．この時の調整された日差値は精度への積み重ねとなる．出荷時の調整された日差を M_f とし，1 年間の累積値 V_f を定めた．

$$V_f = 360 \times M_f \quad (10)$$

２．３　規格の改善

２．２の４項目に加え，温度の季節変化に関する項目については JIS B 7025 に対してさらに改善を行った．現状の規格では春夏秋冬の和であるため，例えば夏に 1 秒遅れ，冬に 2 秒進んでも，1 年では計＋1 秒であり年差±1 秒といえる．しかし，1 年たたずに 1 秒ずれるのは顧客の期待に応えていないと考える．そこで，動作温度範囲での日差の最大値を M_t とし，1 年間の累積値 V_t を定めた．

$$V_t = 360 \times M_t \tag{11}$$

２．４　年差±1 秒の規格の設定

JIS 規格にあるエージング・温度の季節変化と新たに追加した湿度の季節変化・時計の姿勢による変化・電池電圧による変化・出荷時の調整の誤差の 1 年間の日差の累積値の和をもって，年差±1 秒の規格を定めた．

$$1 \geqq |V_a + V_t + V_h + V_{at} + V_v + V_f| \tag{12}$$

３．年差±1 秒の実現

３．１　ＡＴ振動子の開発

エージング，時計の姿勢の対策として，1975 年の年差±3 秒 [3]の腕時計にも採用された AT カット型水晶振動子を検討した．一般の AT カット型水晶振動子では，精度を満たせないため，シチズンファインデバイス株式会社との協業のもと，年差±1 秒専用の AT カット型水晶振動子を開発した．

一般的なクオーツ時計に採用されている音叉型振動子（Fig. 3 左）は名称の通り，振動子片の形は音叉の形をしている．音叉型振動子は 2 本の脚が折れるように動く屈曲振動と言われる振動を行う．脚の振動が重力の影響を受けるため，時計の姿勢によって周波数が変化する．それに対し，AT カット型水晶振動子（Fig. 3 右）は断面が直方体の振動子片である．AT カット型水晶振動子は中央部が微小に振動する厚み滑り振動と言われる振動を行う．振動子の中央部が微小に振動しているため重力による影響が少なく，時計の姿勢による周波数の変化は起きにくい特徴となっている(Fig. 4).

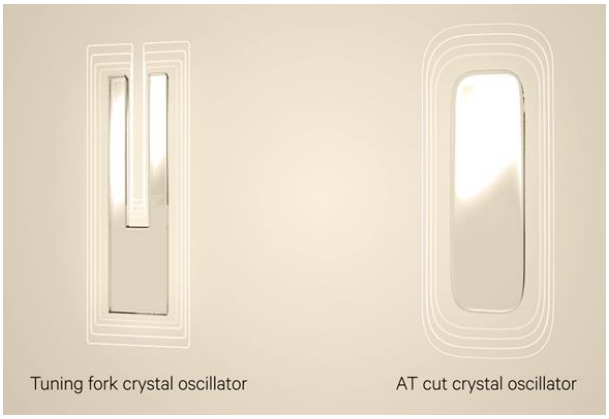


Fig. 3 Shape of tuning fork crystal and AT cut crystal.

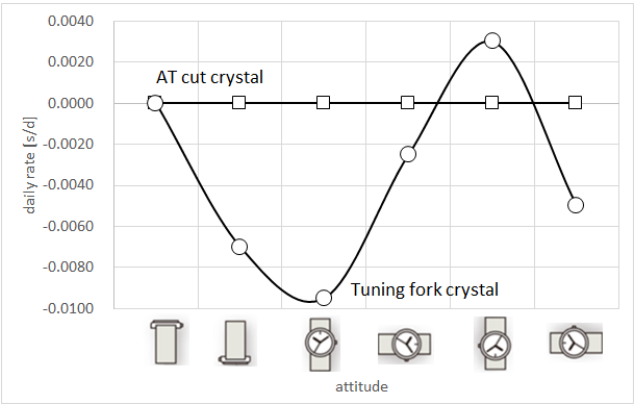


Fig. 4 Daily rate vs attitude.

Fig. 5 に音叉型水晶振動子のエージングと AT カット型水晶振動子のエージングを計算結果の一例で記す．音叉型水晶振動子の定数 c と a は，0.3494 s/d と 0.95 d^{-1} で計算している．AT カット型水晶振動子の定数 c と a は，0.0065 s/d と 0.91 d^{-1} で計算している．360 日後の値は 0.0033 s/d となる．

年差 1 秒を満たすには式(4)の a の値を 0.91 d^{-1} の場合，c は 0.0065 s/d 以下となる必要がある．これはエージングの変化だけで 1 秒となるため，実際には c の値は 0.0065 s/d の半分以下の実力を必要とした．この厳しい条件を満たすために，量産された振動子を 60 日以上検査して，良品を選別している．

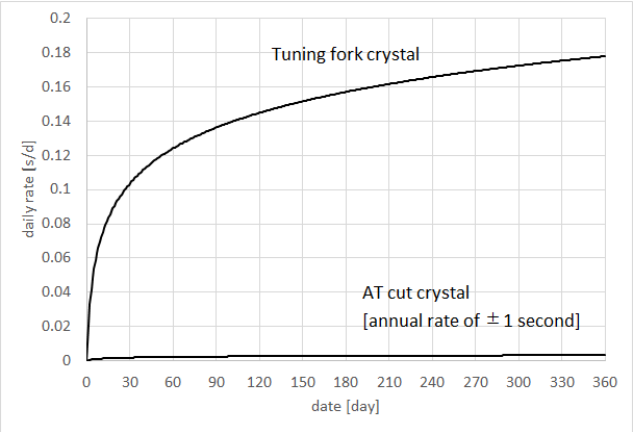


Fig. 5 Ageing of tuning fork crystal and AT cut crystal.

３．２　システム設計

湿度の影響について説明する．回路基板の材料を吸水率毎に選定し，湿度による周波数の変化を確認した．結果を Table 2 に記す．吸水率と周波数の変化には相関関係が確認できる．また，配線保護のためのレジストも湿度に対して影響が確認できた．本システムでは，コストと量産性よりエポキシ基板を採用し，振動子の周りの配線やレジストなどを考慮し湿度影響が小さくなるように設計した．

Table 2 Humidity characteristics.

	material	water absorption	humidity 40[%]→70[%]
①	BTresin	0.11%	-0.042[s/d]
②	epoxy	0.05%	-0.038[s/d]
③	silicone	0.03%	-0.033[s/d]
	non-resist		-0.023[s/d]
④	PPE	0.02%	-0.035[s/d]
	non-resist		-0.028[s/d]
⑤	fluorine	0.01%	-0.028[s/d]
	non-resist		-0.015[s/d]

AT カット型振動子の温度特性について説明する．AT カット型振動子の特性は Fig. 6 が示すように，音叉型振動子に比べて温度に対する周波数の変動は小さい．しかしながら，年差±1 秒の規格を満たすことはできていない．そのため，各温度環境下で周波数を補正する必要がある．

まず一定のタイミングでシステムが温度を測定する．次に，システムに保存された AT カット型振動子の温度特性の近似式より，現在の温度では周波数がどの程度ずれているのかを計算する．計算された結果をもとに周波数を補正して，年差±1 秒の規格に収まるようにする．

補正するための計算式は，量産の工程でムーブメント 1 個 1 個に対して求めている．AT カット型振動子の温度特性は一般的には温度に対する 3 次式で表現される．しかし，実験の結果 3 次式では計算値と実測値の差があり近似式としては不十分であった．そのため，式(13)の様に，温度に対する日差を f_t とし，$n>3$ の高次式で近似した．a_n :定数((s/d)/℃)，T :温度(℃)とする．

近似式を求めるには各温度での日差を測定し，定数 a_n を算出する．しかし，補正後に求める日差に対し，AT カット型水晶振動子の素の日差が約 100 倍大きいため，1 回目の近似式では補正後に誤差が生じることがある(Fig.7)．1 回目の近似式を f_{t_1st} とした場合，振動子の温度に対する日差の真値と f_{t_1st} の差が Fig.7 で表される誤差となる．誤差の温度特性を式(13)の様に近似した式を f_{t_2nd} とした場合，温度に対する日差 f_t は式(14)ように表すことができる．2 回目の近似式でも誤差で規格に達しない場合は，同様に 3 回 4 回と近似式を求めて重畳していく．繰り返し行っていくと，高次の係数は 0 に限りなく近づいていくため，近似式の次数を減らしていくこともできる．

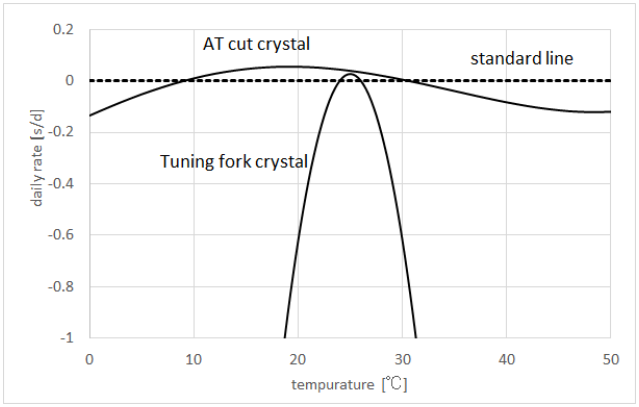


Fig. 6 Temperature characteristics.

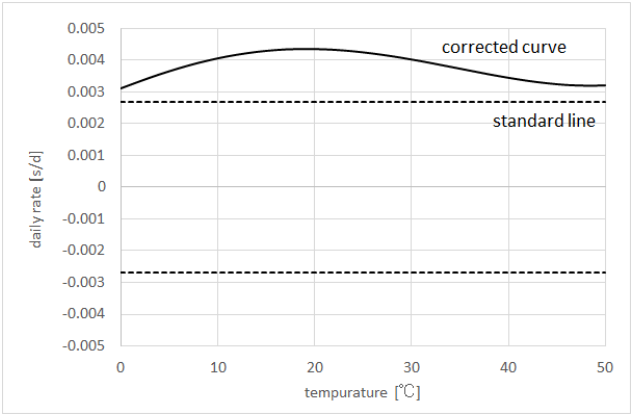


Fig. 7 Daily rate after first correction.

$$f_t = a_n T^n + a_{n-1} T^{n-1} + \cdots + a_1 T + a_0 \quad (13)$$

$$f_t = f_{t_1st} + f_{t_2nd} \quad (14)$$

３．３　低消費電力化

AT カット型水晶振動子を採用する上で，一番の課題となるのが消費電力である．主に使用されている音叉型水晶振動子は周波数が 32.768 kHz である．それに対して，今回使用した AT カット型水晶振動子の周波数は 8.388608 MHz である．周波数が大きいとその振動で動かすための電力が必要となり，消費電力が格段に増加する．そこで，主に分周回路と定電圧駆動回路の 2 つの改善で低消費電力化を行った．

高周波から必要な低周波まで周波数を下げる分周回路は，一般的に周波数を 1/2 にしていく回路が採用される．AT カット型水晶振動子の 8.388608 MHz の場合，8.388608 MHz → 4.194304 MHz → 2.097152 MHz …と分周していく．しかし，実際の時計動作必要周波数に対して不要な周波数 4.194304 MHz で動く回路が存在するため，消費電力の無駄がある．そこで，ダイナミック分周回路 [10]で低消費電力化を実現した．ダイナミック分周回路はリングオシレータ回路を分周元の信号でロックさせて，1 度に 1/*N* の周波数にする回路である．本システムでは，*N* = 16 として，8.388608 MHz → 524.288 kHz と周波数を分周して無駄な電力を削減した．

次に電源システムの検討を行った．消費電力を下げるためには，電池電圧をシステムが駆動する電圧に下げる必要がある．一般的には Low Dropout (LDO)などのレギュレータ回路を用いてシステムが駆動する電圧を作る．本システムでは，LDO の損失電力も小さくするため，Fig.8 に示す構成とした．電池電圧を降圧回路で 1/*n* することで，消費電力を 1/*n* とした．また定電圧駆動回路を 2 段にすることで，電池の電圧変動による影響を少なくしている．

これら 2 つの改善により，電池をフル充電にすれば暗闇でも 6 ヶ月以上動作することが可能になった．

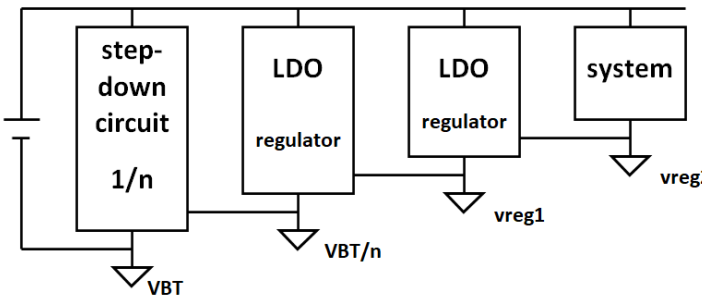


Fig. 8 Power system.

４．携帯試験結果

10 名による Cal.0100 の 1 年間の携帯試験の結果を Fi.9 に記す．10 名の 1 年後の秒のずれは全て年差±1 秒に収まっていることが確認できる．この結果より年差±1 秒を実現できたと判断した．

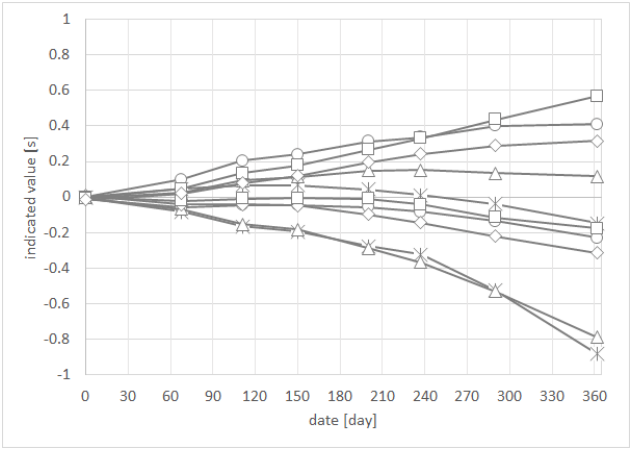


Fig. 9 Change in seconds a one-year portable test.

５．まとめ

シチズンファインデバイス株式会社と協業して，高精度な AT カット型水晶振動子を開発した．AT カット型水晶振動子の特性を把握し，年差±1 秒になるようにシステムの設計を行った．無駄な電力を削減する分周回路と，降圧回路を用いた電源システムの採用で低消費電力化を実現した．これらより，年差±1 秒の光発電式高精度腕時計 Cal.0100 を実現できた．

参考文献

1) 政木広幸：年差時計の技術動向と展望，マイクロメカトロニクス，Vol. 53, No. 200, pp. 74-83(2009).
2) 樋口晴彦：「時計技術解説」クオーツ時計－XII.クオーツ時計の高精度化－，マイクロメカトロニクス，Vol. 62, No. 218, pp. 75-88(2018).
3) シチズン時計株式会社：シチズン<クオーツ>クリストロン メガ，日本時計学会誌，No. 76, p. 58(1976).
4) 赤羽好和，小河徳門：ツインクオーツによる高精度腕時計の開発，日本時計学会誌，No. 89, pp. 1-19(1979).
5) 関根光雄：高精度周波数温度補償システム，日本時計学会誌，No. 106, pp. 1-10(1983).
6) 高橋邦博，松山信義：小型高精度水晶振動子，日本時計学会誌，No. 110, pp. 1-23(1984).
7) 最高の技術と永く愛用して頂けるロングライフデザイン『ザ・シチズン』：光発電エコ・ドライブ時計として世界初、最高峰高精度"年差±5 秒"を実現（製品紹介），マイクロメカトロニクス，Vol. 55,

No. 204, pp. 53-54(2011).

8) 「コンクェスト V.H.P.」 クォーツの新たな次元へ　https://www.gressive.jp/brand/longines/news/156115

9) JIS B 7025:1995 時計－精度表示

10) 諸川滋，岩倉良樹，関谷福雄：高周波低電力時計回路システム，日本時計学会誌，No.103, pp. 42-50(1982).

11) シチズン時計株式会社　https://citizen.jp/the-citizen/special/lineup/cal0100/index.html

技術報告

脱進機効率向上のためのシリコンがんぎ車開発

舟川剛夫，永坂栄一*

セイコーエプソン株式会社プロセス技術開発部，長野県諏訪郡富士見町富士見 281，〒399-0293

*セイコーエプソン株式会社 WP 開発設計部，長野県塩尻市塩尻町 390，〒399-0796

（2022 年 3 月 18 日受付，2022 年 11 月 2 日再受付，2022 年 11 月 4 日採録）

Development of Silicon Escape Wheel to Improve Escapement Efficiency

Takeo FUNAKAWA and Eiichi NAGASAKA*

Process Technology Development Department, Seiko Epson Co., Ltd.,

281, Fujimi, Fujimi-machi, Suwa-gun, Nagano-ken 399-0293, Japan

* WP Product Development & Design Department, Seiko Epson Co., Ltd.,

390*, Shiojiri-machi, Shiojiri-shi, Nagano-ken 399-0796, Japan*

（Received March 18, 2022, Revised November 2, 2022, Accepted November 4, 2022）

ABSTRACT

Mechanical watches need to run for longer. A thinner, longer mainspring was used to increase the running time without increasing the size of the movement. The thinner mainspring reduces the torque of the barrel, which reduces the amplitude of the balance wheel and may cause poor watch accuracy. The escape wheel was made from silicon instead of alloy in order to reduce the energy consumed by the escapement. Silicon is expected to reduce the amount of engagement and the moment of inertia. The silicon wheels were fabricated using a simple process with only a single photolithography and etching step. The surface was smoothed using thermal oxidation and removal to prevent chipping. Since silicon is a brittle material and cannot be press-fitted, a unique mating design was devised. In addition, a metal washer was used to prevent the wheel from slipping off the pinion. In the movement using the silicon wheel, the energy transmitted from the barrel to the balance wheel was improved by about 30%. As a result, it was possible to increase running time by more than 20 hours at the same or higher amplitude. In addition, the movement equipped with a silicon wheel has passed our internal standards for reliability tests. A three-layer film structure has been formed to achieve a vivid blue color with a reflectance of more than 50% at 450-550 nm. The silicon escape wheel enabled us to improve both the practicality and the aesthetic appeal of the watch.

１．はじめに

ぜんまいを動力源とする機械式腕時計は，止まっている状態からでも即座に自分で動かせること，巻き上げ操作が容易で巻き心地が良いこと，運針パワーが大きいため長く重い針でも使用でき，デザイン自由度が高いことなど，多くのメリットを持っている．一方，フル巻きからの連続駆

動時間（持続時間）が短く，止まるたびに時刻合わせをしなければならない煩わしさもある．持続時間の向上は従来から強い要望があり様々な対策[1-3]もなされてきている．

本報告では長持続化の課題と対策，およびそれに使用したシリコンがんぎ車について報告する．

２．長持続化の課題と対策

機械式時計の駆動時間を長くするには香箱の巻き数を多くする必要がある．これまでは香箱を大型化して主ぜんまいを長くする，マルチバレル方式を採用するといった方法がなされてきた．しかし，このような方法では時計サイズも大型化してしまう課題があった．そこで，時計サイズを大型化することなく持続時間を増加する商品開発に取り組んだ．

香箱を大型化することなく，主ぜんまいを長くするため，主ぜんまいを薄くすることとした．薄化によって，同じ香箱サイズでも主ぜんまいを長くすることが可能となる．しかし，主ぜんまいの薄化は香箱トルクの減少をもたらす．香箱トルクは輪列，脱進機を通しててんぷに伝わり，てんぷが振動する．すなわち，香箱トルクの減少はてんぷの振動エネルギー減少に繋がる．その結果，てんぷの振り角が小さくなり，一般的な機械式時計は精度が悪くなってしまう．

そこで，主ぜんまいを薄くした低トルクの香箱であってもてんぷの振り角を確保できるよう，エネルギー伝達効率を向上する施策を行った．各ユニットでの消費エネルギーを算出したところ，輪列で約 20%，脱進機で約 50%消費され，残りの約 30%がてんぷに伝達されることが分かった．そこで，Fig. 1 に示すように，脱進機で消費されるエネルギーを低減し，低トルクの香箱を用いてもてんぷで使用可能なエネルギーが同等になるよう対策を行った．

脱進機での消費エネルギーを低減するため, がんぎ車の材料を合金からシリコンに変更することを検討した．合金とシリコンとの比較を Table 1 に示す. シリコンに変更することで以下 2 点の観点から脱進機での消費エネルギーの低減が可能となる．

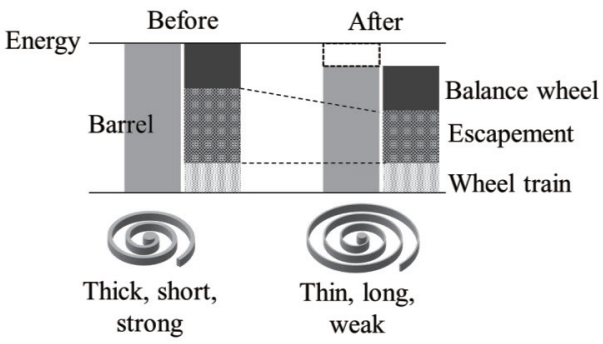


Fig. 1 Conceptual image of energy use.

1 点目は，がんぎ車とアンクル爪石との総停止量を小さくできる点である. シリコンはフォトリソグラフィーとエッチングプロセスによって加工可能であり，Table 1 に示すように機械加工で形成される合金がんぎ車の加工精度が数十 μm であるのに対し，シリコンがんぎ車では数 μm と，高い寸法精度で作ることができる． 従って，がんぎ車とアンクル爪石の係合の余裕を小さくすることが可能とな

る．

2 点目は，がんぎ車の回転エネルギーを小さくできる点である．シリコンは合金に対して比重が約 30%程度と軽量であるため，がんぎ車の慣性モーメント低減に繋げられる．

Table 1　Comparison of silicon and alloy.

	Alloy	**Silicon**
Fabrication process	Mechanical	Photolithographic
Accuracy	Several 10s of μm	Several μm
Specific gravity	7 - 9	2.3

３．シリコンがんぎ車の製造プロセス

Fig. 2 に製造プロセスを示す．(1) 通常半導体で用いられる厚さ 625 μm, ⌀6 インチのシリコンウェハを研削し所定の厚さにする．(2) ウェハ上にフォトリソグラフィーによってレジスト(感光性樹脂)をパターニングする．(3) Deep reactive ion etching (DRIE) によってシリコンをがんぎ車形状に加工する．DRIE は SF_6 ガスを使用したエッチングステップと C_4F_8 ガスを使用したデポジションステップを交互に繰り返す，いわゆるボッシュプロセスによって行う．(4) レジストおよび DRIE 時に生じた側壁保護膜を除去する．シリコン加工後は角部や凹凸形状が存在し，欠けや割れが発生しやすい構造体となっている．(5) (5-1) 酸素雰囲気中で 1000°C 以上の高温で熱し，シリコン表面に酸化膜(SiO_2)を形成する．この反応は雰囲気中の酸素とシリコン表面で起こり，シリコンの一部が SiO_2 となる．Fig. 3 のように，形成された SiO_2 膜厚の約 44%は元のシリコン内部が酸化した分である．シリコン構造体は熱酸化前に比べて，SiO_2 膜厚の約 56%分だけ全体のサイズが大きくなる．(5-2)フッ化水素酸に浸漬し，表面に形成された SiO_2 膜を除去する．フッ化水素酸は SiO_2 を溶解するが，シリコンは溶解しない性

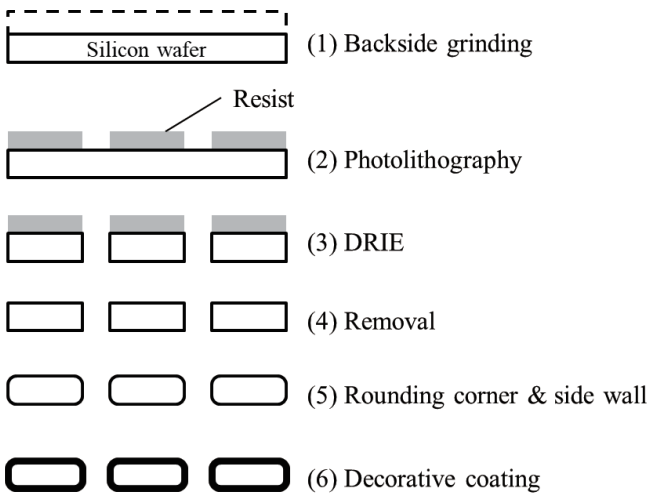


Fig. 2　Process flow of manufacturing silicon escape wheel.

質を持つ．この性質を利用することで基材のシリコン形状に影響を与えることなく表面の酸化膜のみ除去することができる．先に説明した SiO_2 膜の 44%分だけ，元のシリコンが除去されることになる．結果，Fig. 4 に示した Scanning electron microscope (SEM) 像のように，角部や側壁の凹凸形状が無くなり，表面が滑らかで欠けや割れが発生しにくい構造体にすることができる．(6)シリコン基材全面に SiO_2 膜とポリシリコン膜を形成し，見た目を青色にする．加飾については“５．加飾”の項にて詳細を説明する．

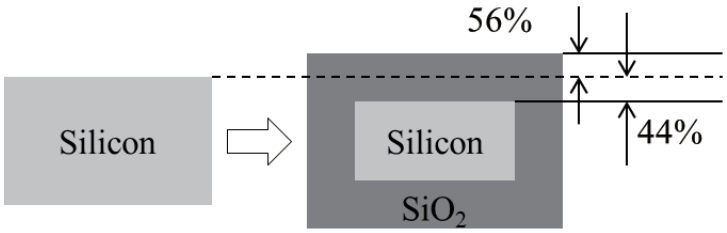


Fig. 3　Image of the ratio of the thickness of the film that has penetrated the silicon and the amount by which the thermal oxide film increases.

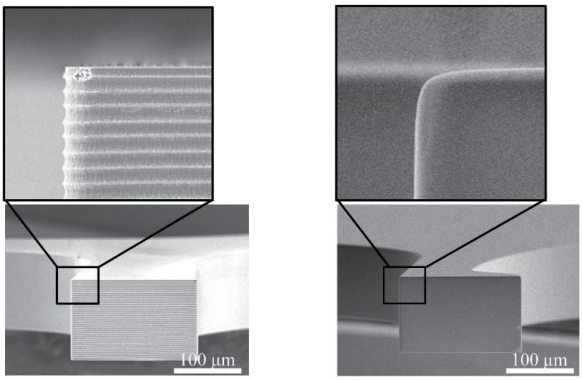


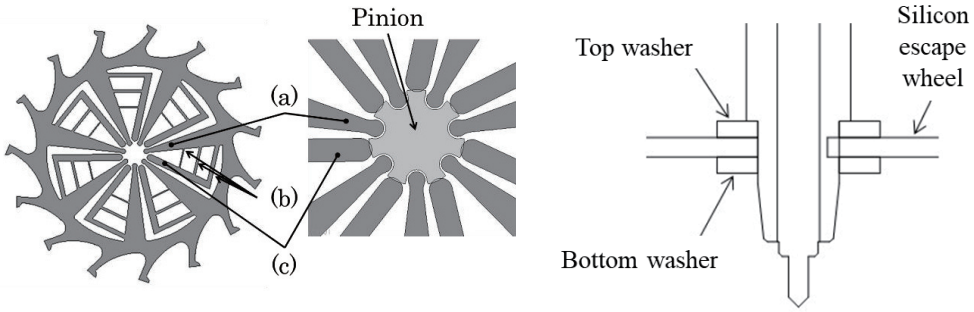
Fig. 4　SEM image before and after smoothing.

４．シリコンがんぎ歯車と“かな”との嵌合

合金がんぎ車の場合，歯車と“かな”は圧入による嵌合が可能であった．しかし，脆性材料であるシリコンの場合，前述した表面平滑化処理を施したとしても欠け，割れが生じてしまうため，圧入ができない．そこで，シリコンであっても欠け，割れ無く，抜け止めの固定力，固定トルクを確保し，振れや偏心の無い嵌合可能な独自設計を行った．

Fig. 5 にシリコンがんぎ車の嵌合部の断面形状を示す．以下説明の(a)部～(c)部は横方向の断面

イメージである Fig. 5-1 に対応している．“がんぎかな” には 3 番車との組み合わせのために，7 個の溝が形成されている．(a)部が“かな”の溝に入り込むことで回転止めの役割を果たす．シリコンは脆性材料である一方，薄い形状にすることで可撓性を持たせることができる．(b)部は適度な可撓性を持つように長さと幅が設計されており，板バネの働きをすることができる．(b)部のバネ性によって(c)部が“かな”の凸部に押し当てられる．歯車内に 7 個ある(b)部および(c)部の作用によって歯車と“かな”の中心を一致させる構造となっている．(a)部，(b)部および(c)部で回転止めと中心出しができるが，軸からの抜け防止のための固定力が確保できない．そこで，Fig. 5-2 に示した縦方向の断面図のように，シリコンがんぎ歯車を 2 枚の座(washer)で挟持する構造とした．2 枚の座は金属でできており，圧入によって十分な固定力を得る事ができる．上部の座(top washer)は衝撃時の欠けを防止する役割を持ち，下部の座(bottom washer)は歯車の抜け防止の役割を持つ．Fig. 6 に嵌合した状態の全体像を示す．



(5-1) Horizontal direction　　(5-2) Vertical direction

Fig. 5　Cross-sectional view of the pinion mated with the escape wheel.

Fig. 6　The whole image of the silicon escape wheel.

５．加飾

歯車の色は時計性能に影響しないものの，審美性が商品価値に繋がる機械式腕時計においては重要な要素となる．シリコン単体構造やシリコン表面に 1 層だけ SiO_2 膜を付加した構造では，光の反射率が低く，ムーブメントに組み込まれた際に黒く見えるため，デザイン的にマッチしない場合がある．

今回開発したシリコンがんぎ車は，見た目を鮮やかな青色にすることとした．そのため，前述した表面平滑化工程の後，シリコン基材上に，SiO_2 膜，ポリシリコン膜，SiO_2 膜をこの順で成膜し，Fig. 7 に示した光学干渉構造を形成した．SiO_2 は熱酸化，ポリシリコンは Low pressure chemical vapor deposition（LP-CVD）で成膜する．どちらの膜も炉で成膜することによって，全面均一に成膜できる．従って，ムーブメントに組み込んだ際，文字板側からであっても裏ぶた側からであっても鮮やかな青色のがんぎ車を認識できる．

Fig. 8 にシミュレーションによる設計値と分光計による垂直光の反射率測定結果を示す．約 450 nm～550 nm の波長範囲において 50%以上の反射率を出しつつ, 550 nm 以上の波長の反射率は 50%以下に抑える光学特性を実現した．結果，ムーブメントに組み込んでも鮮やかな青色に見えるシリコンがんぎ車が実現できた．

本構造における光学特性は膜厚に対して敏感であり，設計膜厚に対して 5 nm 以下の誤差で製造する必要がある．膜厚が設計値より 5 nm 以上ずれた場合，緑色や紫色となってしまう．従って，大量生産では高精度な膜厚の均一性，再現性が重要となる．

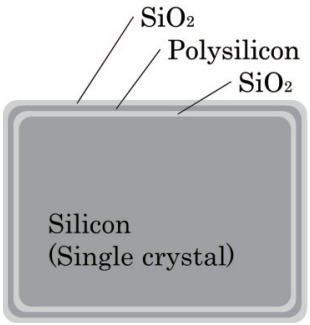


Fig. 7　Cross-sectional structure of the layers.

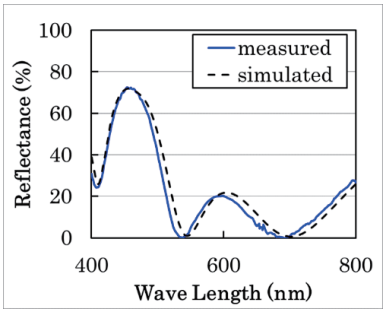


Fig. 8 Comparison of simulated and measured reflectance.

６．製品評価結果（合金がんぎ車との比較）

シリコンがんぎ車をムーブメントに組み込んで評価した結果を Table 2 に示す．

Table 2　Product evaluation result.

What	Silicon escape wheel benefits
Energy efficiency	Change of escape wheel material + improved engagement: 30% increase
Amplitude and running time	Same or higher amplitude Increased running time by ≥ 20 hours
Reliability tests	Internal standards met - Drop test - Vibration test - Environment test - Durability test

タイムグラファーを用いて振り角を測定し，てんぷのエネルギーを見積もったところ，シリコンがんぎ車を搭載したムーブメントの方が合金がんぎ車の物と比較して約 20%高いことが分かった．更に総停止量の低減も合わせることでテンプのエネルギーが約 30%以上向上することが確認できた．また，主ぜんまいを薄長くした香箱とシリコンがんぎ車を使用したムーブメントにて駆動時間と振り角を測定した結果を Fig. 9 に示す．薄化したトルクの小さな主ぜんまいを用いた香箱であっても，従来のムーブメントと比較して同等以上の振り角を得る事ができ，20 時間以上の持続時間向上ができた．

また，脆性材料であるシリコンは衝撃による割れや欠けの懸念があったものの，落下試験，振動試験，環境試験，耐久試験において当社で定める基準をクリアすることができた．Fig. 10 に示すように，合金のがんぎ車では耐久試験後に一部摩耗が見られたが，シリコンがんぎ車では摩耗は見られず耐摩耗性の高さが確認できた．加飾の目的で付加した最表面の SiO_2 膜が耐摩耗性にも効果的であると考えられる．結果，香箱の改善も合わせて，精度とサイズを維持したまま 20 時間の長持続化が実現できた．

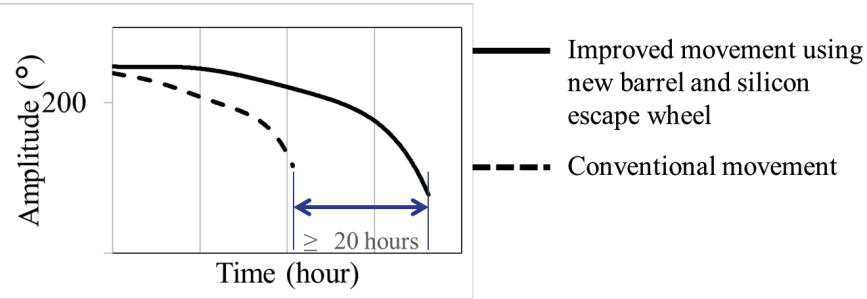


Fig. 9　Relationship between running time and amplitude of the movement before and after improvement.

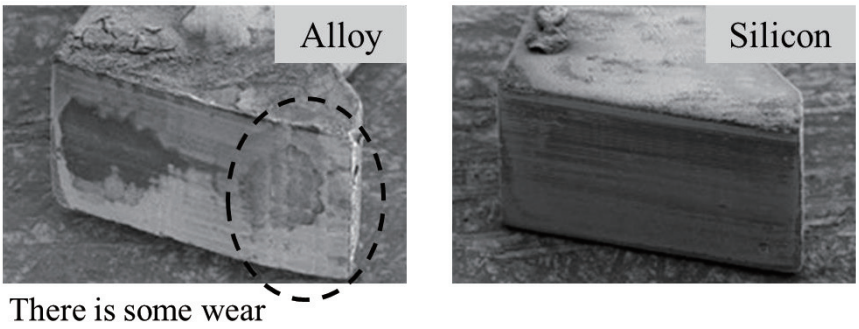


Fig. 10　Gear tip after durability testing.

7．まとめ

機械式時計の持続時間を改善するため，主ぜんまいを長くし，20 時間以上の長持続化を実現した．この際，時計サイズの大型化を避けるために，主ぜんまいを薄くすることとした．主ぜんまいを薄くすることでトルクが減少したものの，がんぎ車の材料を合金からシリコンに変更し，軽量化と総停止量低減によってエネルギー伝達効率を向上させ，従来と同等以上の振り角を得る事ができた．

脆性材料であるシリコンがんぎ歯車と“かな”との嵌合において，“かな”の溝を利用して固定トルクを確保し，シリコンのバネ性を利用して軸と歯車の軸を一致させ，2 枚の座で挟持することで抜け止めの固定力を確保する構造を考案した．結果，割れ，欠け無く嵌合が可能となり，衝撃試験や耐久試験においても当社基準をクリアできる信頼性を確保する事ができた．

また，シリコンに SiO_2 膜，ポリシリコン膜，SiO_2 膜の 3 層膜の光学干渉構造を形成することで，波長 450 nm～550 nm の反射率を高め，歯車を鮮やかな青色にすることができた．耐久試験結果より，光学干渉膜として形成した最表面の SiO_2 膜は耐摩耗性を確保する効果もあることが示唆された．

結果，実用性と審美性を両立した時計の実現に成功した．

参考文献

1) 原辰男：SPRING DRIVE ウォッチ巻過ぎ防止と運針停止機能，マイクロメカトロニクス, Vol. 45, No. 3, pp. 1-9 (2001).
2) 加藤幸則：セイコーの高級腕時計への取り組み：グランドセイコーにおけるこだわり，マイクロメカトロニクス, Vol. 49, No. 193, pp. 73-79 (2005).
3) 重城幸一郎：機械式時計の高精度技術の動向と展望，マイクロメカトロニクス, Vol. 53, No. 200, pp. 67-73 (2009).

解　説

「時計技術解説」　機械式時計
－　VI. 脱進機（様々な脱進機）　－

幸田　雅行　*

1.　はじめに

本稿を執筆するにあたり，脱進機という言葉の定義について調べたところ，「機械工学に於いてはステップ運動を制御する装置．時計に於いては動力源から計数機構へのエネルギー伝達を制御する装置」との記載があった[1]．これを踏まえて脱進機の起源を遡ってみると，計数機構を制御するという意味では，古くは8世紀（723年）の唐に於いて，僧侶で天文学者でもあった一行(Yi Xing)と役人の梁令瓚(Liang Lingzen)により，水時計に水車（水輪）を組み込むことで脱進機として機能させて日出，日没，月齢などの計数制御を行っていたという記録が残っている[2]．水時計と水車を組み合わせた脱進機構としては北宋の蘇頌（Su Song）等により設計され1092年に完成したとされる水運儀象台などが有名な一例である[3)4)]．（日本では長野県下諏訪町にある「儀象堂」に水運儀象台が復元されており，見学することが可能）

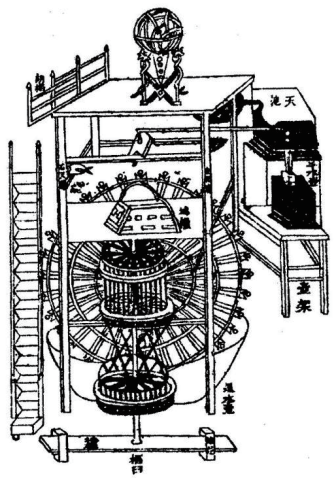


Fig.1 蘇頌による時計台の構造図[101)]

Fig.2 儀象堂の水運儀象台[102)]

一方で機械式時計の起源は9世紀のヴェローナの助祭長パシフィカス(Pacificus)であるとする説や，後に教皇シルベスタ2世(Pope Sylvester II)となる修道士ゲルベルト(Gerbert)により996年頃に発明されたとする記録も残されているが[3)5)]，機械式時計として脱進機の構造がある程度明確になっているのは13世紀後半～14世紀頃のヨーロッパの時計とされている．北イタリア～南ドイツの塔時計[6)]や，ロンドンのセ

*セイコーウオッチ株式会社

ントポール大聖堂(1286 年)，ウェストミンスターホールの時計塔(1288 年)，同じくイギリスのカンタベリー大聖堂(1292 年)などに時計が設置されていたと記録に残っている [5]．この頃の塔時計がすべて機械要素のみの脱進機構というわけではなく，前述した水時計と組み合わせた脱進機構を用いている時計も併在していた．機械式時計の一例として，時計職人であったヘンリー・ド・ヴィック(Henri de vic)が，1370 年にフランスのシャルル 5 世の依頼によりシテ宮殿（現在のパレ・ド・ジャスティス）に棒てんぷ（フォリオ）とヴァージ脱進機(Verge Escapement)を用いた塔時計を製作した記録あるが [5)7)]，このヴァージ脱進機が“機械要素のみで構成された初期の脱進機”と言われている．

本稿では，ヴァージ脱進機を皮切りに，機械式時計の歴史を共に歩んできた様々な脱進機について，筆者の見解を交えつつ紹介していく．尚，本稿に於いては棒てんぷ，振り子，てんぷ等を便宜上まとめて振動子と表現することがあることを予めご了承いただきたい．また前回(マイクロメカトロニクス Vol.66, No.226)の脱進機の解説記事では以下 3 点,

① 輪列の回転速度を制御する．

② 調速機にエネルギーを供給する．

③ 運動方向を変換する．

の脱進機の基本的な役割を紹介している．今回紹介する各種脱進機に於いても基本的に上記の役割を担っているが，クラブツースレバー脱進機(Club Tooth Lever Escapement)とは異なる手段を用いている場合もあり，理解を深めていただく目的で各種脱進機の作動や解説が公開されている URL を本稿末に付録することとした．そちらをご参照いただきながらお読みいただければ理解の一助になるだろう．

2. 古典的な脱進機

2.1 脱進機の種類

脱進機は作動状態や構造により幾つかの形式に分類できる．脱進機の解説に入る前に，表 1 に脱進機の形式と各型式を代表する古典的な脱進機について示す．尚，本稿に於ける“古典“とは現在の主流であるクラブツースレバー脱進機が隆盛し始める 20 世紀初頭頃までとしている．

表 1　脱進機の形式と名称

型式		脱進機名称
退却型 Recoil		ヴァージ脱進機(Verge Escapement)
		退却式アンクル脱進機(Anchor Escapement)
停止式 Frictional Rest		直進式脱進機(Deadbeat Escapement)
		シリンダ脱進機(Cylinder Escapement)
		二重脱進機(Duplex Escapement)
自由式 Detached	自由式レバー Detached Lever	ラチェットツースレバー脱進機 (Ratchet Tooth Lever Escapement)
		ピンレバー脱進機(Pin Lever Escapement)
		クラブツースレバー脱進機 (Club Tooth Lever Escapement)
	デテント脱進機(Detent Escapement)	
	ロビン脱進機(Robin Escapement)	
	ナチュラル脱進機(Natural Escapement)	
その他	等力式 Constant Force	重力脱進機 (Gravity Escapement)
		弾性力脱進機 (Strasser's Escapement)
		アンリ・ジャンヌレ(Henri Jeanneret)の定力機構 他
	フリーバランス式 Free Balance	リーフラー型(Sigmund Rieflers) 他

2.2　ヴァージ脱進機(Verge Escapement)と退却型(Recoil)脱進機

ヴァージ脱進機は機械式時計に於ける初期の機械式脱進機であるとされており，脱進機の形式としては“退却式脱進機”に分類される．Fig.3 にヴァージ脱進機の構造例と作動模式図を示す．

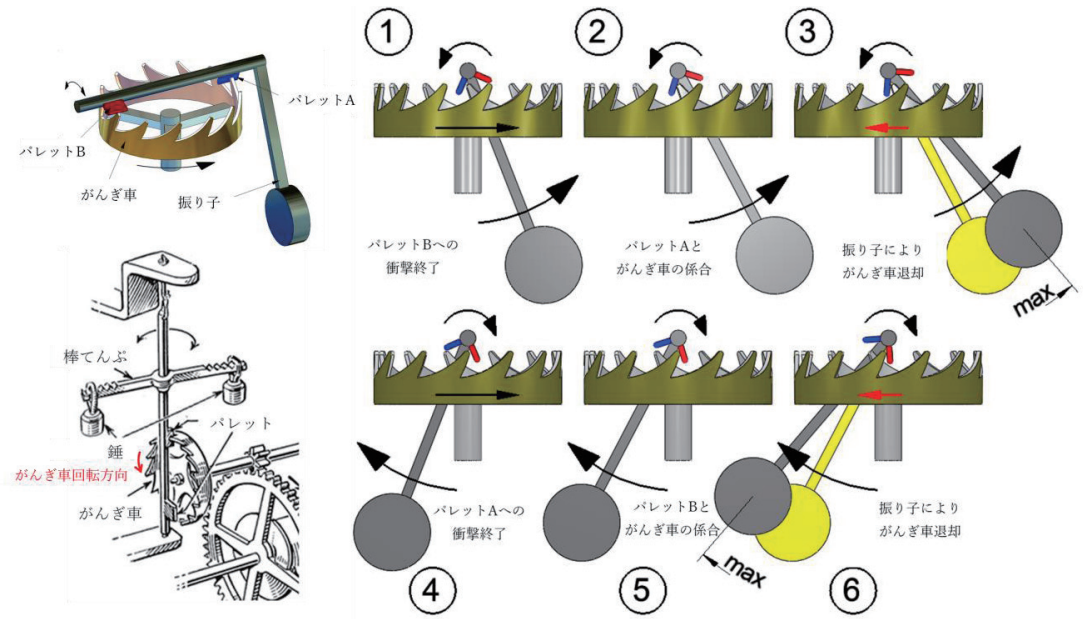


Fig.3　ヴァージ脱進機の構造例と作動模式図 [103)104)105)]

また退却式脱進機には Fig.4 のような退却式アンクル脱進機(Recoil Anchor Escapement)等もある.

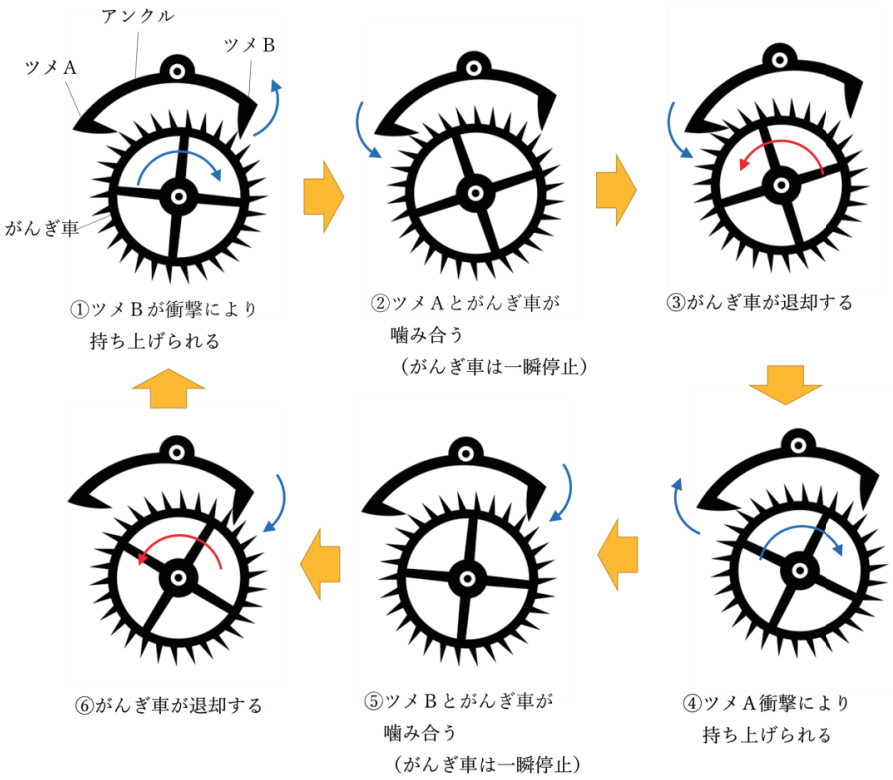


Fig.4 退却式アンクル脱進機の作動模式図 [106)]

振動子（棒てんぷや振り子）の振幅増加に伴い，がんぎ車が振動子と一体となったパレットに押し戻され退却することが退却式脱進機の特徴である．退却式脱進機は，

①がんぎ車が振動子と共働するパレットに落下した後の退却量が大きい為，退却時の摺動によりエネルギー損失が大きく，脱進機から調速機に伝わるエネルギーの伝達効率（脱進機効率）が非常に悪い．

②棒てんぷや振動子と共働するパレットとがんぎ歯が常に摺動する為，摩耗しやすい．

③棒てんぷや振動子が常にがんぎ車からの力を受けており，振動子が自由振動出来ないため，脱進機誤差（脱進機が振動子の等時性に与える誤差影響で，通常は自由振動する振動子の等時性に対して日差が遅れとなる影響が出ることが多い．）が大きい．

④パレットとがんぎ歯の摺動による摩耗が進むと，脱進機誤差も経年変化してしまい計時精度が変化していく．

⑤退却の動きに連動して時刻を指示する針が逆回転する．

等の欠点を有していた．

2.3　停止式脱進機(Frictional Rest)

退却式脱進機は長く採用されていたが，17 世紀になると振動子の振動に連動してがんぎ車が退却しない“停止式(Frictional Rest)脱進機”が登場する．停止式脱進機は退却式脱進機と同様に，振動子が振動している際，振動子のツメとがんぎ歯が常に摺動する為，程度の違いはあれ，前述した退却式脱進機と同様の欠点を有していた．しかしがんぎ車の退却が無い為，退却により生じる指示針の逆転は改善されることとなる．

2.3.1　直進式脱進機(Deadbeat Escapement)

主に振り子時計に用いられた停止式脱進機の一例として直進式脱進機とその作動を紹介する．直進式脱進機は 1670 年代中頃にリチャード・タウンリー(Richard Towneley)とトーマス・トンピオン(Thomas Tompion)により開発され，1715 年頃にトンピオンの弟子であるジョージ・グラハム(George graham)により改良され普及したとされている [9)10)]．Fig.5 を用いて直進式脱進機の特徴を説明する．

直進式脱進機の特徴は，がんぎ歯と噛合う停止面の形状が振動子（振り子）と一体化したアンクルの回転軸を中心とした円弧になるように設計されている点であり，別途，衝撃面が設けられている．この工夫によりがんぎ車を退却させることなく脱進することが可能となった．

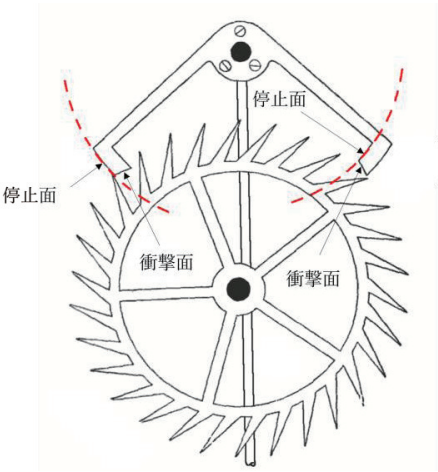


Fig.5 直進式脱進機の特徴 [107)]

2.3.2　シリンダー脱進機(Cylinder Escapement)

シリンダー脱進機はトーマス・トンピオン等により 1695 年に発明され，ジョージ・グラハムの改良を経て 1725 年頃に普及し始めた [10)11)12)]．この頃にはひげぜんまいやてんぷが発明されており，がんぎ歯車をムーブメントに対し水平に配置できることから薄型化できる為，置時計のほか，懐中時計にも搭載されていた．構造的な特徴は，天真に半円筒型で一部に切り欠きが入った“シリンダー”が設けられており，このシリンダーと歯先が二層になっているがんぎ車の歯とが噛合うことで，脱進する構造になっている．Fig.6 にシリンダー脱進機の構造，Fig.7 にシリンダー脱進機の構造と作動模式図を示す．

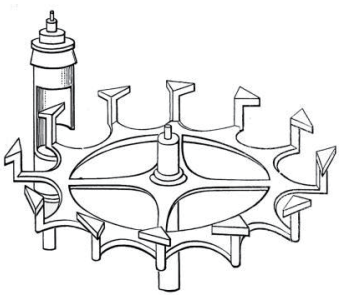


Fig.6 シリンダ脱進機の構造 [108)]

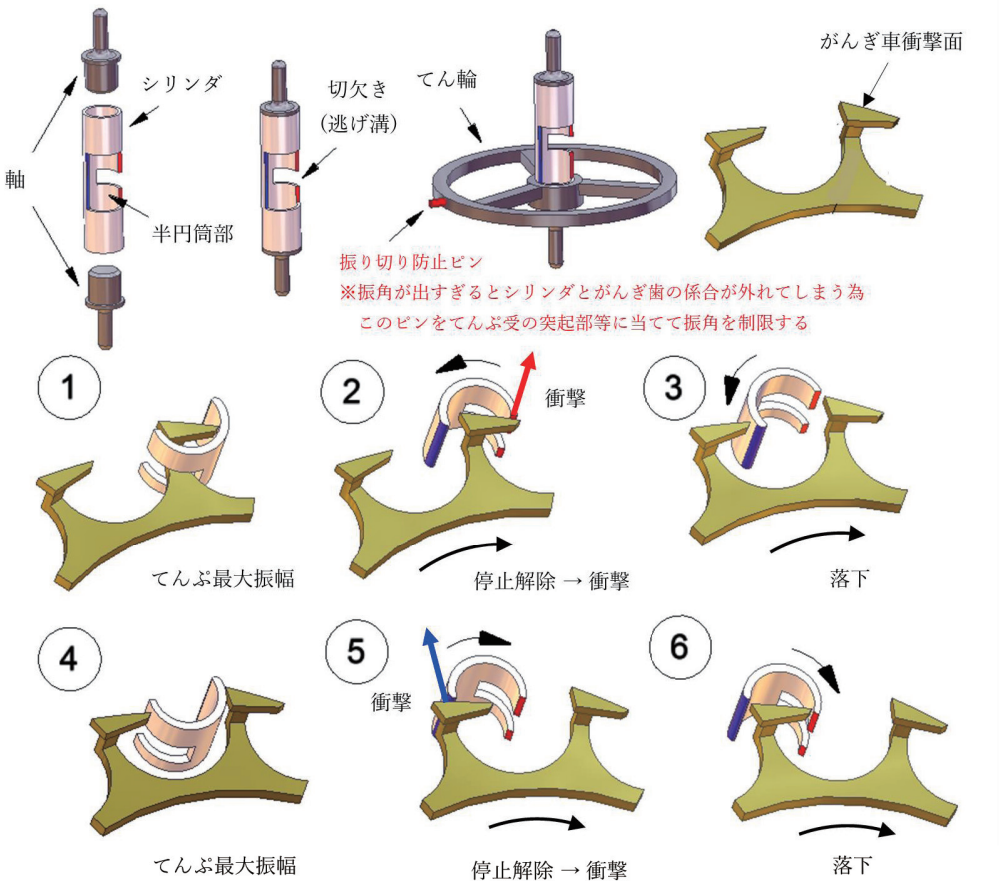


Fig.7 シリンダー脱進機の作動模式図 [109)]

シリンダー脱進機についても摩耗は課題であり，ルビー等でシリンダーを製作し摩耗対策をした例もあるが，自由式レバー脱進機と比較すると製造も難しく，構造上 180° 程度までしか振角が上げられない制限もあり，後述する自由式レバー脱進機のように現在まで広く普及するには至らなかった.

2.3.3 二重脱進機(Duplex Escapement)

ロバート・フック(Robert Hooke)が発明し，ジャン・バティスト・ドゥテルト(Jean Baptiste Dutertre)による改良を経て，ピエール・ル・ロワ(Pierre Le Roy)が完成させたとされている [9)13)]. Fig.8 に二重脱進機の構造，及び作動模式図を示す.

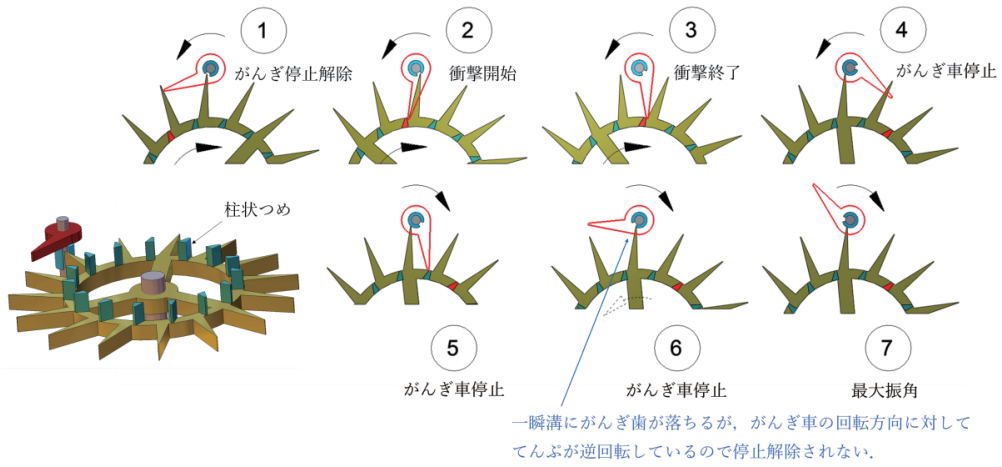


Fig.8 二重脱進機の構造と作動模式図 [110)111)]

シリンダー脱進機同様，ムーブメントに対し水平にがんぎ車を配置出来る為，懐中時計にも用いられた．停止式脱進機であることや，がんぎ歯車が複雑であることもあり，シリンダー脱進機同様，自由式レバー脱進機のように現在まで広く普及するに至らなかった．

2.4 自由式脱進機(Detached Escapement)

振動子の振動中に僅かに生じる脱進機の停止解除や衝撃時以外で，振動子と脱進機との接触を切り離し，振動の大部分で振動子が自由振動出来るようなったことが自由式脱進機（分離型脱進機とも言われる）の最大の特徴である．これにより退却式，停止式の課題であった摩耗や脱進機効率，脱進機誤差の安定性が改善されることになり，特にクラブツースレバー脱進機は製造が容易で，安全作用の確保もしやすく，他の自由式レバー脱進機よりも脱進機効率や自起動性，再起動性に優れる為，現在の脱進機の主流となるに至っている．以下，主な自由式脱進機について紹介する．

2.4.1 自由式レバー脱進機(Detached Lever Escapement)

初期の自由式レバー脱進機はトーマス・マッジ(Thomas Mudge)により 1755 年頃発明されたとされている．(Fig.9)．振動子とがんぎ車間にレバー（アンクル）を設けることで，脱進機の停止解除や衝撃時以外の接触が生じない構造としている．しかし，マッジのレバー脱進機は構造が複雑であり製造数も限定的であった．その後，アブラアン・ルイ・ブレゲ(Abraham-Louis Breguet)やエドワード・マッセイ(Edward Massey)等による改良が加えられ，やがてラチェットツースレバー脱進機(Ratchet Tooth Lever Escapement)(イングリッシュレバー脱進機)として完成に至る [14)15)16)]．その後も改良が加えられクラブツースレバー脱進機が発明されたほか，廉価版自由式レバー脱進機としてアンクルのつめ石を主に金属製のピ

ンで代用したピンレバー脱進機(Pin Lever Escapement)が登場[17]し，自由式レバー脱進機はクロックや腕時計のムーブメントに搭載され普及していくこととなる．

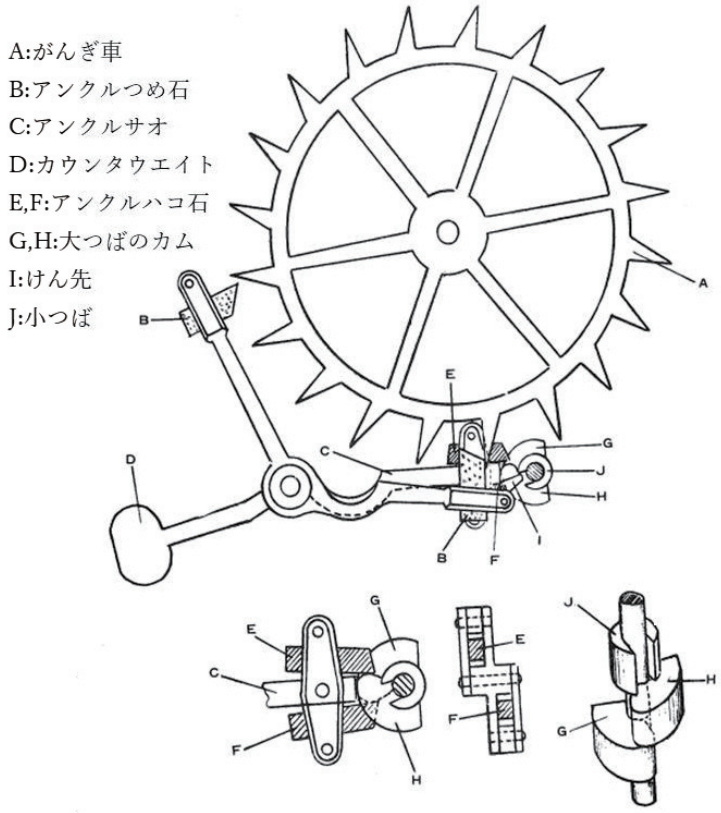


Fig.9 トーマス・マッジの自由式レバー脱進機

クラブツースレバー脱進機については，前回(マイクロメカトロニクス Vol.66, No.226)の解説記事で，その作動について解説がなされているが，クラブツースレバー脱進機に対し，ラチェットツースレバー脱進機やピンレバー脱進機はがんぎ歯の形状変更やアンクルつめ石の変更があるものの基本的にほぼ同じ作動原理である．クラブツースレバー脱進機の衝撃はつめ石衝撃面上をがんぎ歯が摺動する前半衝撃と，つめ石衝撃面上をがんぎ歯が摺動する後半衝撃とに分けられており，後半衝撃では前半衝撃に対しアンクルを介して，てんぷに伝達するトルクが増大するという特徴がある．これに対しラチェットツースレバー脱進機やピンレバー脱進機には後半衝撃が無いため(Fig.10)，クラブツースレバー脱進機に対して伝達トルクが弱くなり，脱進機効率が若干低下するという欠点がある．

さらに伝達トルクが弱い為，動力ぜんまいが解かれて時計が静止している状態から動力ぜんまいを巻き上げていった時に，クラブツースレバー脱進機に対して，自起動しにくいという欠点がある．またピンレ

バー脱進機のピンは金属製であることが一般的で摩耗も多いという欠点があった．

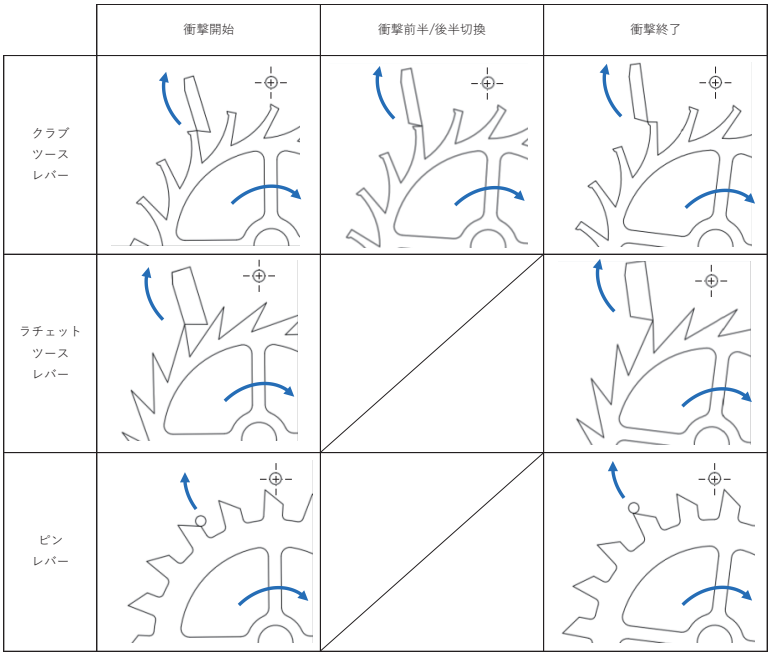


Fig.10 各種自由式レバー脱進機の衝撃の違い

2.4.2 デテント脱進機(Detent Escapement)

デテント脱進機はクロノメーター脱進機(Chronometer Escapement)とも言われ，自由式レバー脱進機同様にがんぎ車と振動子(てんぷ)を分離させた自由式脱進機である．デテント脱進機には自由式レバー脱進機のようにてんぷへの衝撃を仲介するアンクルが無い代わりに，“掛け金(Blade of Detent)“と呼ばれるがんぎ車の停止と停止解除を担うレバーが存在する．このレバーには”金ばね(Gold Spring または Passing Spring)”と呼ばれる細い板バネが取り付けられている．そして掛け金には渦巻ばね，または“カマバネ(Spring of Detent)”と呼ばれる板バネが設けられており脱進機作動中に原位置復帰できるような構造になっており，渦巻ばねのタイプは掛け金に回転軸を設けて渦巻ばねを取り付けられていることから軸止め式デテント脱進機(Pivoted Detent Escapement)と呼ばれ，一方，カマバネのタイプは板バネ式デテント脱進機(Spring Detent Escapement)と分類される．

初期のデテント脱進機は軸止め式でピエール・ル・ロワにより発明され，その後ジョン・アーノルド(John Arnold)やトーマス・アーンショウ(Thomas Earnshaw)による軸止め式も発明されたが，1782 年にアーンショウが特許を取得した板バネ式(Fig.11)やジョン・アーノルドの板バネ式が精度も良好で，マリンクロノメーターや懐中時計に搭載され普及することとなった[8)18)19)]．

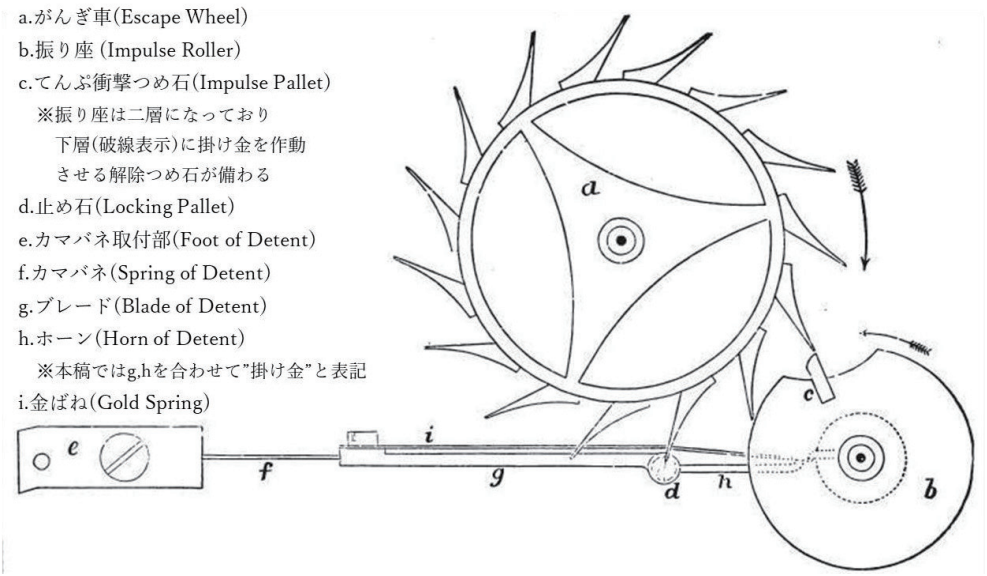
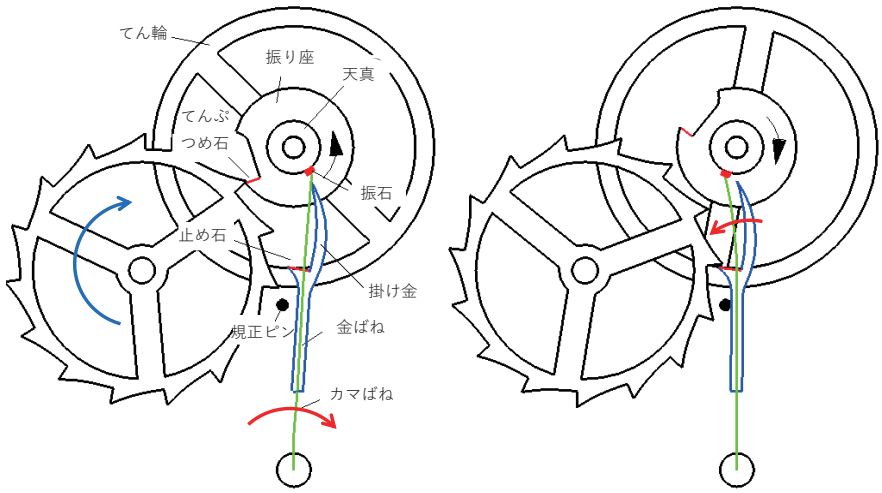


Fig.11 アーンショウの板バネ式デテント脱進機 [112)]

デテント脱進機の作動を Fig.12 にて簡単に示す.（基本的に掛け金レバーの原位置復帰を渦巻きばねで行っている（軸止め式）か，板バネで行っている（板バネ式）かの違いである為，板バネ式で解説する.）



振石によりカマばねが曲げられて，掛け金と一体となっている動く止め石が倒され，がんぎ車の停止解除がされた状態．がんぎ車は回転してててんぷつめ石に当たり，直接衝撃を開始している.

直接衝撃終了後に掛け金は原位置に戻り，てんぷは最大振角を取って時計回りに回転して金ばねを作動させている状態．この時、掛け金は動かず、がんぎ車は停止したままで，てんぷへの衝撃も発生しない

Fig.12 デテント脱進機の作動 [113)]

自由式レバー脱進機が，がんぎ車のトルクをアンクルを介して，てんぷに伝え，間接的にてんぷにエネルギーを供給する間接衝撃であるのに対し，デテント脱進機はがんぎ車から直接てんぷに衝撃を伝えエネルギーを供給する直接衝撃である事が自由式レバー脱進機との大きな違いである．更に自由式レバー脱進機はてんぷが往復回転するいずれに於いても衝撃が加えられる(てんぷ 1 周期(2 振動)の間に 2 回衝撃)が，デテント脱進機はてんぷが往復するいずれか一方向の回転でのみ衝撃が加えられる(てんぷ 1 周期(2 振動)の間に 1 回衝撃)ようになっている．また衝撃の仕方もアンクルを用いた自由式レバー脱進機では衝撃面を摺動しつつ，アンクルを押し上げるようにトルクを伝達する“摺動衝撃(Sliding Impulse)”であるのに対し，デテント脱進機の直接衝撃では，がんぎ歯の回転円弧とてんぷ衝撃つめ石の回転円弧が重複する範囲で円周方向の動きで衝撃を伝える“ラジアル衝撃(Radial Impulse)”であり(Fig.13)，ラジアル衝撃にすることで単位時間当たりの摺動距離を短く，且つ摺動部（具体的にはがんぎ歯先やてんぷつめ石衝撃面）にかかる圧力を小さくできる．これらによりデテント脱進機には以下のメリットがある．

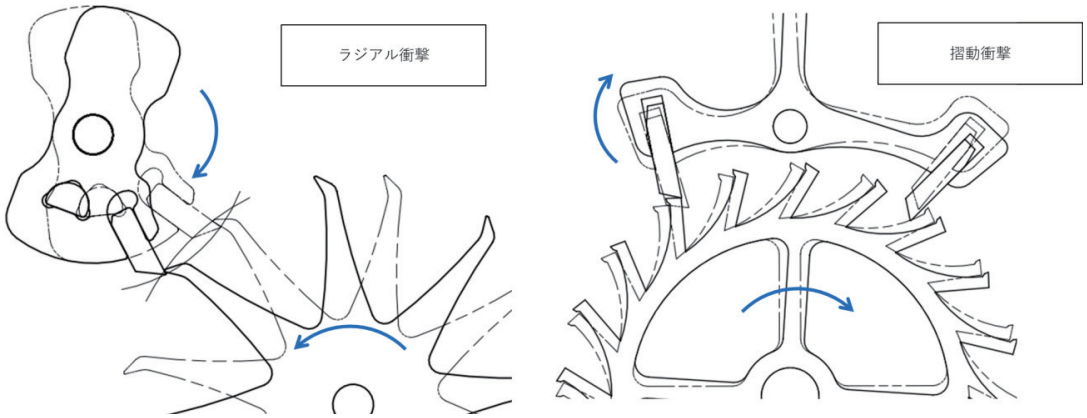


Fig.13 ラジアル衝撃と摺動衝撃

【デテント脱進機のメリット】

① 直接衝撃の為，脱進機効率が非常に高い．

② 設計次第で拘束角を小さくできる為，脱進機誤差を小さくできる．

③ 衝撃の方式がラジアル衝撃の為，衝撃時の摺動による負荷が小さく，摩耗しにくい．

尚，ラジアル衝撃を採用している脱進機について，無注油が謳われることがあるが，摺動距離や接触部の圧力が 1/10 や 1/100 になる程の大幅な効果があるわけではない為，筆者個人の見解としては，長期的な機能保持という観点から作動の抵抗にならない程度に摺動部に適度な注油することが望ましいと考えている．

一方でデメリットは以下が挙げられる．

【デテント脱進機のデメリット】

① 自由式レバー脱進機と比較し，細かな調整が難しい．

※例えば衝撃を受けるつめ石の調整などを取っても，つめ石がてんぷ(振り座)に組み込まれているデテント脱進機のつめ石調整は，アンクルのつめ石調整ほど容易に出来ないし，アンクルつめ石と同じ量のてんぷつめ石調整を実施したとしても，調整前後の振角の変化はアンクルつめ石の調整前後と比較しても影響が大きく出る等，より調整に繊細さが求められる．

② 金ばねが摩耗しやすい．摩耗が進行するとがんぎ車の停止解除が出来なくなり，作動不良が発生する．

③ 外乱によりがんぎ歯とデテントの噛合いが外れる等，脱調しやすい構造である．

④ 構造上，自起動，再起動が出来ない．

てんぷの振動数が同じ場合，自由式レバー脱進機と秒針の動き（単位時間あたりの運針ステップ数）を見比べると 1/2 となり，1 回の運針で針が動く量（運針角度）が 2 倍となる為，現在，一般的に搭載されているクラブツース脱進機を搭載した時計の運針と比較すると一見して運針の違いを感じることが出来ることも特徴である．

近年ではジャガールクルトのエリプスイゾメーター脱進機(Ellipse Isometer Escapement)を搭載した時計[20]や，噛合い外れ防止構造を追加したデテント脱進機を搭載した時計がブルガリ[21]やウルバンヤーゲンセン[22)23)]等から発表されている．

2.4.3　ロビン脱進機(Robin Escapement)

1791 年にロバート・ロビン(Robert Robin)より発表されたロビン脱進機は，自由式レバー脱進機とデテント脱進機の特徴を併せ持つ脱進機である．レバークロノメーター脱進機(Lever Chronometer Escapement)と呼ばれることもある．ロビン脱進機の構造を Fig.14 に示す．

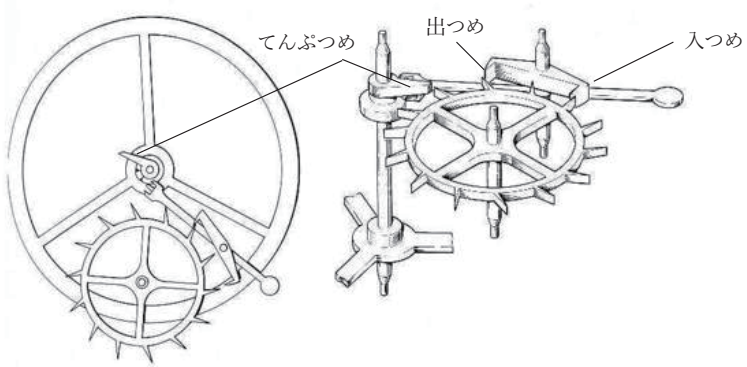


Fig.14 ロビン脱進機の構造

ロビン脱進機はデテント脱進機同様，てんぷ 1 周期(2 振動)に 1 回，がんぎ車からてんぷへの直接衝撃が加えられるが，原位置復帰をする板バネ式デテント脱進機のブレードとカマばね(同じく軸止め式デテント脱進機のレバーと渦巻きばね)に相当するものが無く，代わりに自由式レバー脱進機のような 2 つの“つめ”を持つアンクルを備えている．そして自由式レバー脱進機と同様にアンクルはてんぷの振動に伴い，左右に回動してがんぎ車の回転を停止，停止解除しながら作動する．Fig.14 に於いて入つめの停止解除後はがんぎ車がてんぷつめに直接衝撃を加え，直接衝撃後にがんぎ車は出つめに落下して停止する．そして出爪の停止解除後はがんぎ車は回転するが，てんぷつめと接触することなく，無衝撃で入つめに落下するという作動を繰り返す．

デテント脱進機より構造が簡素である為，製造が容易であるメリットがある一方で，停止解除後に衝撃が発生しない側で，動力ぜんまいが完全に解放され停止したり，てんぷの規正をかけたりすると脱進機の自起動，再起動ができないという欠点のほか，脱進機の作動条件，安全作用を確保しつつ高効率を実現しようとする設計が非常に難しいという課題がある．

2.4.4　ナチュラル脱進機(Natural Escapement)

1802 年に完成したアブラアン・ルイ・ブレゲの No.1135 に搭載されたのが初出とされる脱進機 [24]．デテント脱進機をベースとして，アンクルに対して対称となるように互いに噛合っているがんぎ車を 2 個配置して，てんぷ 1 周期(2 振動)あたり 1 回直接衝撃のデテント脱進機に対し，2 回の直接衝撃(ラジアル衝撃)でてんぷにエネルギーを供給できるようにしている(Fig.15)．これにより耐摩耗性に優れたデテント脱進機の特性を踏襲し，デテント脱進機の自起動，再起動できないという課題や，外乱により脱調しやすいという課題を改善している．

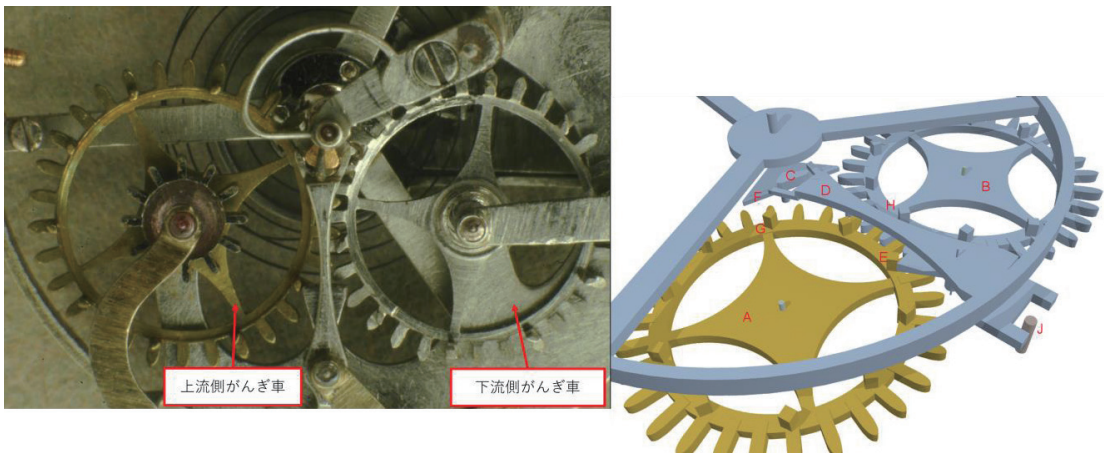


Fig.15 ナチュラル脱進機の構造 [114)115)]

しかし，表輪列と直接噛合いがある上流側がんぎ歯車と直接噛合いが無い(上流側がんぎ車とのみ噛合っている)下流側がんぎ車との間のバックラッシにより，上流側がんぎ車がアンクルと噛合い停止している時，下流側がんぎ車は保持されず，バックラッシ分の回転がフリーになる為，下流側がんぎ車とてんぷ等の周辺部品に予期せぬ接触により予期せぬ作動不良も生じていたという[24)25)]．

また比較的大きいがんぎ車を 2 個配置するナチュラル脱進機の構造は，互いのがんぎ車に等価慣性の影響が乗る為，がんぎ車が停止解除されてからてんぷに衝撃を伝えるまでの空転角度がデテント脱進機のがんぎ車に対して増加してしまい，てんぷにエネルギーを供給できる実質的な衝撃角度が小さくなると考えられ，デテント脱進機のような高い脱進機効率は得られなかったと推測される．近年のナチュラル脱進機の例としては，

・ユリスナルダン デュアルダイレクト脱進機(Dual Direct Escapement)
※現在は直接衝撃ではなくなり Dual Ulysee Escapement に改名されている
・カリヴティライネン　ダブルダイレクトインパルス脱進機(Double Direct Impulse Escapement)
・ローランフェリエ ナチュラル脱進機

等があり[25)]，バックラッシの課題等も対策がなされているという．一方で，ジョージ・ダニエルズ(George Daniels)はがんぎ車の連結を廃止して，2 つの別々の香箱，輪列を介して 2 つのがんぎ車を駆動させることでナチュラル脱進機が持つバックラッシの課題に対応したインディペンデントダブルホイール脱進機(Independent Double Wheel Escapement)を発明している．これは 2018 年にチャールズフロッシャム(Charles Frodsham and Co Ltd.)により製品化された[26)]ほか，近年ではベルナルドレデラーよりセントラルインパルス脱進機(Central Impulse Escapement)として製品化されている[27)]．

2.5　その他の古典的な脱進機

前述した退却式，停止式，自由式以外の振動子へのエネルギー供給が特殊な脱進機を紹介する．

2.5.1　等力式(Constant Force)

通常の機械式ムーブメントは動力ぜんまいのトルク変化や，輪列を構成する歯車の歯形の噛合い状態で脱進機に伝達されるトルクが変動する為，脱進機から振動子に伝達されるエネルギーが変化し，振幅が変化する．これに伴い，等時性の影響で計時精度が変化するという課題がある．等力式は動力や輪列のトルク変動や摩耗などによる駆動損失変化など影響によらず，一定，或いは極めて小さい変動に抑制して振動子にエネルギー伝達できる脱進機構で以下のような例がある．

2.5.1.1　重力脱進機(Gravity Escapement)

振り子時計等に用いられたクロック用の脱進機で，がんぎ車はがんぎ車の左右に配置された 2 つのレバーの一方が振り子によって持ち上げられることにより，停止解除され回転し，その回転力で他方の大型レ

バーを持ち上げる．やがて振り子が最大振幅となり，逆側に振り出すといずれ他方側の大型レバーを持ち上げて再びがんぎ車を回転させる．この時，振り子と一体となって動いている他方側の大型レバーは既にがんぎ車により少し持ち上げられているので，重力によりレバーが原位置に戻ろうとするわけだが，この原位置復帰しようと重力に引っ張られる力が振り子に伝わることで常に一定のエネルギーを振り子に供給できる機構となっている．(Fig.16)

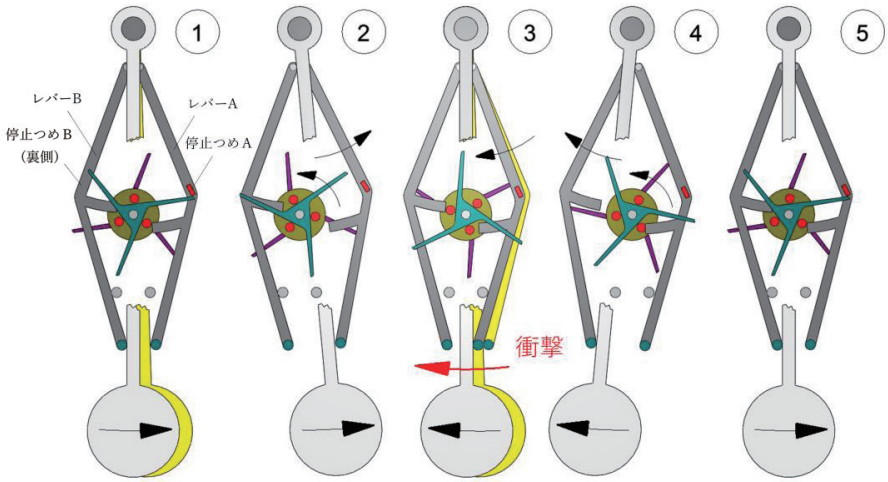


Fig.16 重力脱進機の作動 [116)]

2.5.1.2 弾性力脱進機(Strasser's Escapement)

振り子時計等に用いられたクロック用の脱進機．Fig.17 に脱進機の構造を示す．

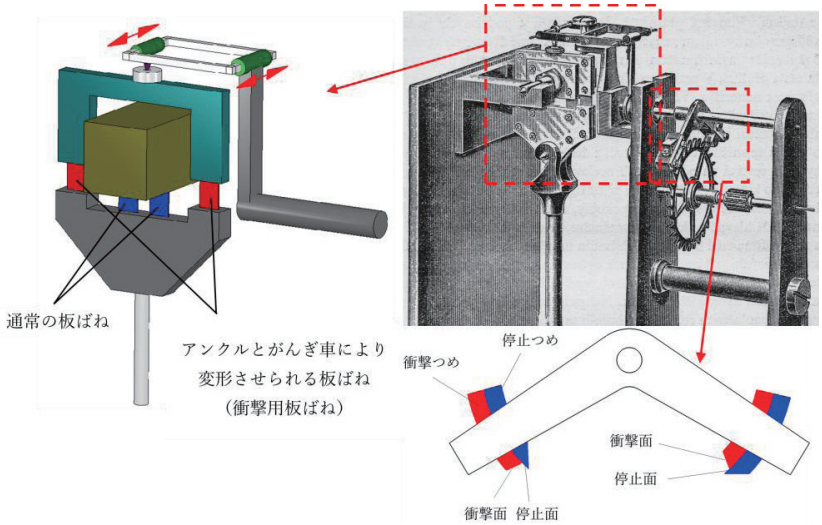


Fig.17 弾性力脱進機の構造 [117)118)119)]

板ばねにより吊るされた振り子が揺動すると板ばねを介して接続されたアンクルを回動させ，がんぎ車を停止解除する．停止解除されたがんぎ車は，停止していたアンクルのつめとは逆側のつめの衝撃面に落下し，アンクルを板ばねにより回動した方向とは逆方向に曲げる．アンクルのつめは段付きになっており，がんぎ歯が衝撃面を摺動し，段付き部に至るとがんぎ車は停止するが，衝撃により振り子の揺動に逆らうように曲げられた板ばねには弾性エネルギーが蓄えられ，振り子に供給される．常に板ばねを一定量曲げたことにより蓄積されたエネルギーが振り子に供給される為，振り子の振幅を一定に保つことが出来る．ただし動力が錘駆動ではなく，ぜんまいであった場合，動力ぜんまいからの出力トルクが低下すると，がんぎ車トルクが低下する為，衝撃面を摺動しきなくなり，板ばねの曲げ量が減る為，振り子に供給されるエネルギーも低下し振幅が低下するようになる．

2.5.1.3　アンリ・ジャンヌレの定力機構

ウオッチに用いられる定力機構で 1949 年，アンリ・ジャンヌレ(Henri Jeanneret)により特許登録された振動毎に脱進機からてんぷに対して供給するエネルギーを一定とする機構である(Fig.18)．

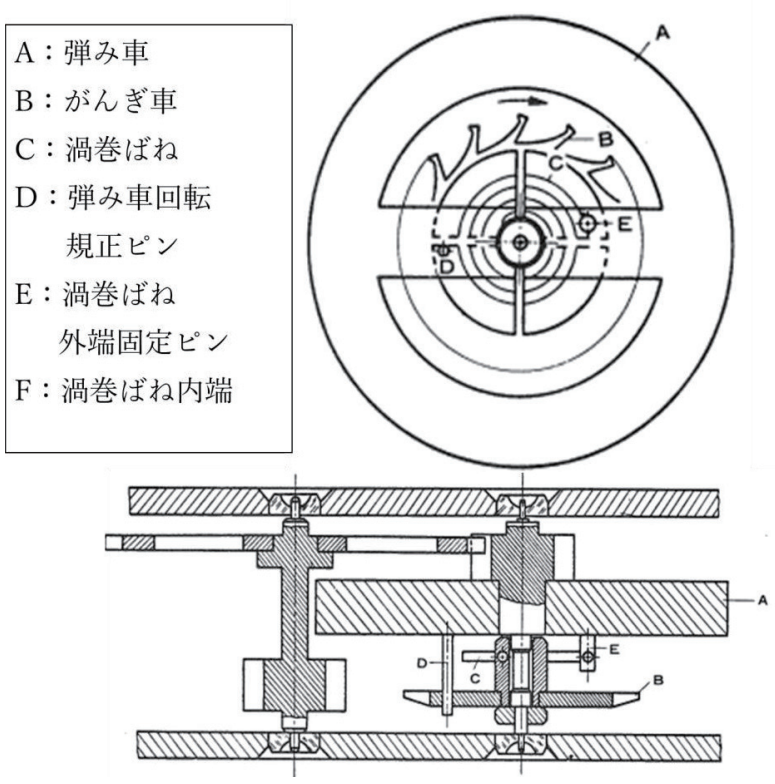


Fig.18 アンリ・ジャンヌレの定力機構

がんぎ車は中空軸となっており，前段の歯車と直接噛合わず慣性モーメントが非常に大きい弾み車と呼ばれる番車とひげぜんまいのような渦巻きばねで連結され，がんぎ車の中空軸に弾み車の真を通し，がんぎ車と弾み車は同軸で回転する構造になっている．弾み車とがんぎ車を連結する渦巻きばねをある程度巻き締める形で組立て，弾み車のかなは前段の番車の歯車と噛合うように組み立てられる．この時，弾み車のピンとがんぎ歯車のアミダが引っ掛かるようになっており，渦巻きばねが緩まないようになっている．その後，アンクル，てんぷを組み込んで動力ぜんまいを巻上げて脱進機を駆動させると，がんぎ車は停止解除後，巻き締まった渦巻きばねにより発生するトルクでアンクルを介して，てんぷにエネルギーを伝達する．弾み車の慣性モーメントが大きい為，がんぎ車の回転が先行して渦巻きばねは一瞬緩むが，弾み車が前段の歯車からトルクを受けている為，再び弾み車のピンとがんぎ車のアミダが接触する位置まで回転し渦巻きばねは再度巻き締められる．これにより，脱進の度に一定量巻き上げられた渦巻きばねのトルクによりてんぷにエネルギー供給が出来る．

尚，脱進機に用いられる定力機構としては，二重歯車式やカム式ルモントワール機構(Remontoire：毎回の脱進の度に一定のエネルギーをてんぷに供給する Constant Force とは異なり，がんぎ車のトルク変動を数回の脱進分の変動に抑制して，てんぷにエネルギー供給するタイプの定力機構)等もあるが，菊池悠介氏による解説記事[28)29)]にて非常にわかりやすく解説されており，参照されたい．

2.5.2　フリーバランス脱進機(Free Balance Escapement)

この型式の脱進機は，前述で紹介してきた脱進機のようにアンクルを介した間接衝撃やがんぎ車による直接衝撃がなされない為，無衝撃型と称されることもある．色々な脱進機が過去に提唱されてきているが，いずれの脱進機に於いても，てんぷ，またはアンクルによりがんぎ車の停止解除された後，ひげぜんまいを直接巻き締める（または巻き広げる）ようにひげぜんまいの外端位置をてんぷの周方向に回転させてエネルギーを供給する．外端（ひげ持）がてんぷ受に固定されず，可動するプレート（受）等に取り付けられる為，フリーバランス脱進機と称される．近年では ACHI のメンバーであるクリスチャン・クリングス(Christian Klings)より腕時計に搭載されたモデルが発表されている[30)]．

今回，詳細な作動の説明は割愛するが，本稿末の付録に無衝撃型脱進機の作動動画の URL を幾つか掲載しておいた．これらが作動を理解するうえで非常にわかりやすい為，是非，ご確認いただきたい．

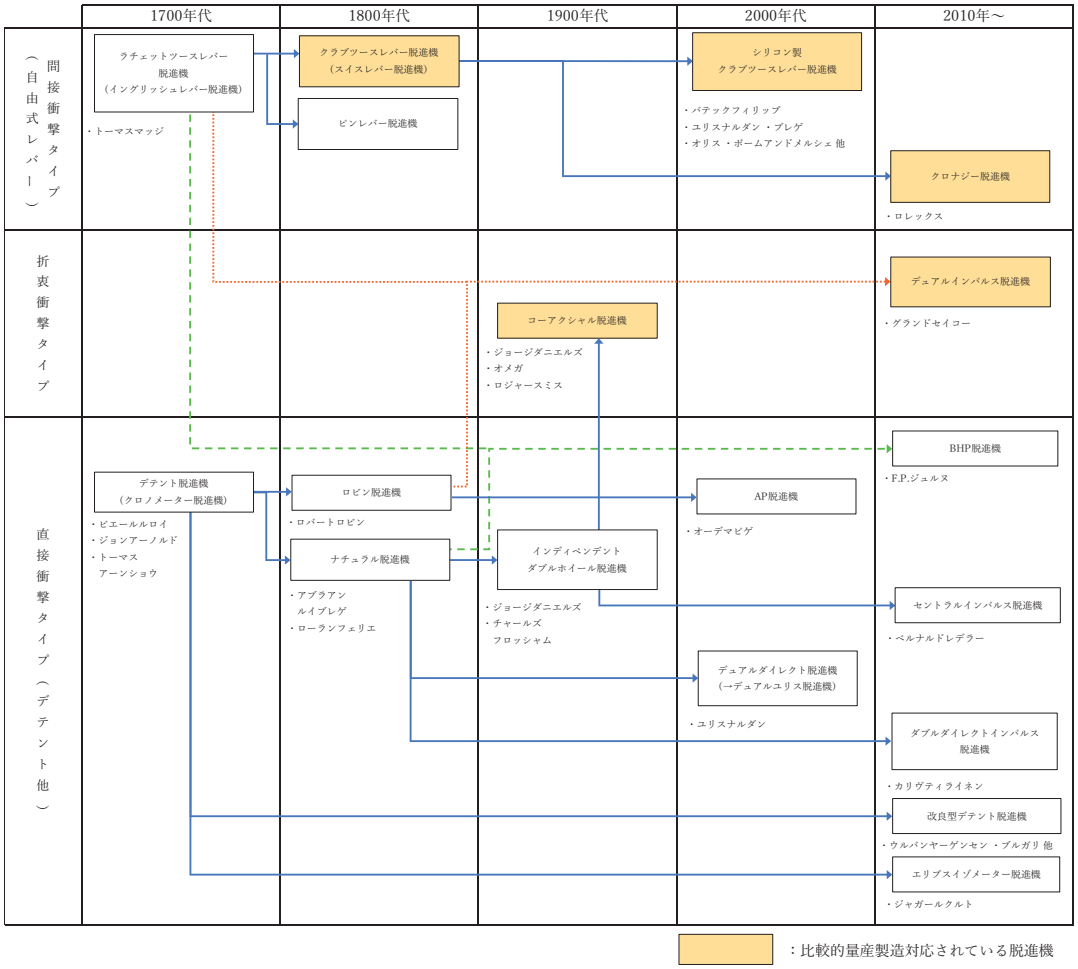
一例として，ジグムンド・リーフラー(Sigmund Rieflers)考案したタイプの模型を Fig.19 に示す．

Fig.19 リーフラー型フリーバランス脱進機 [120)]

3. 現在の機械式腕時計用脱進機

脱進機作動の信頼性の高さや製造の容易性，そして自由式脱進機であるため耐久性や脱進機誤差，脱進機効率を適度に担保出来るクラブツースレバー脱進機が機械式脱進機の主流となった．その後，電気及び磁石でてんぷやアンクルを駆動させ，その駆動力でがんぎ車を動かして輪列を回転させ運針を制御する“逆アンクル脱進機（逆脱進機）”や，ブローバ社のアキュトロン等の音叉時計に搭載されたツメ送り式の脱進機構などが 1960 年代～1970 年代に登場している．1970 年代～1980 年代はクォーツ時計全盛となるが，1990 年代に入ると機械式時計に再び注目が集まるようになり，2000 年頃から機械式時計の脱進機についても新たな動きが見られるようになる．解説に入る前に，前述してきた古典的な脱進機からこれから紹介する現在の新しい脱進機への変遷をまとめてみた．表 2 に示す．

表 2　現在までの自由式脱進機の大まかな変遷



3.1　機械式新型脱進機

3.1.1　コーアクシャル脱進機(Co-Axial Escapement)

ダニエルズが考案したインディペンデントダブルホイール脱進機はナチュラル脱進機が抱えている課題を解決したが，香箱や輪列を 2 組備える必要がありムーブメントが大型化してしまう課題があった．香箱を 1 つにしてもラジアル衝撃を確保しつつ，てんぷの往復両方で衝撃を伝え，自起動，再起動を可能とし，且つ，ナチュラル脱進機の課題を解決すべくダニエルズが考案したのがコーアクシャル脱進機である．コーアクシャル脱進機のアンクルにはつめ石は 3 個取り付けられており，両側にあるつめ石が入つめ，出つめの役割を果たし，真ん中のつめ石でラジアル衝撃をアンクルに伝え，アンクルを介してんぷにエネルギーを伝達する構造となっている．Fig.20 にコーアクシャル脱進機の作動模式図を示す．

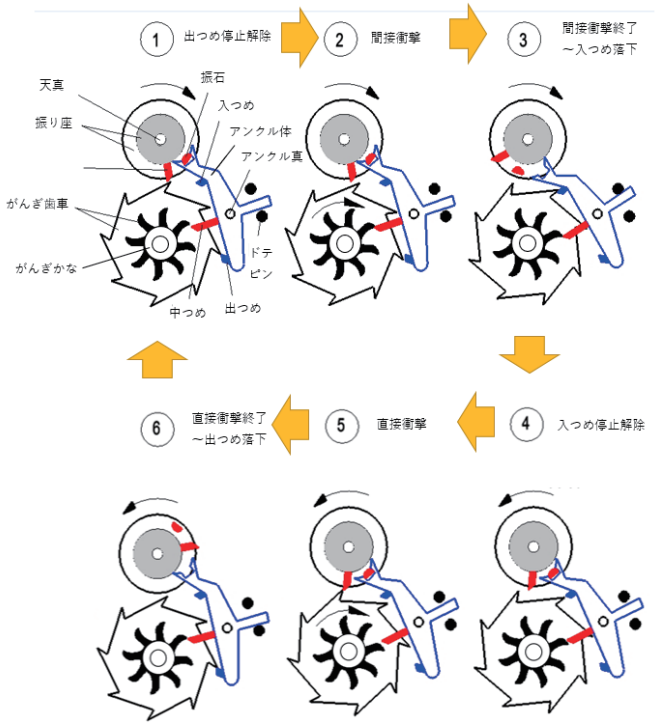


Fig.20　コーアクシャル脱進機の作動模式図 [121)]

コーアクシャル脱進機は何度かの変更を経て，現在の構造に至っている．変更の過程でがんぎ車はがんぎ歯車 2 枚＋かな 1 枚の 3 層構造になっているが，2 枚のがんぎ歯車は厳格な位相合わせが必要であると考えられる．しかし，オメガはこの課題をクリアし，量産可能な新型脱進機として成功を収めている．

3.1.2　AP 脱進機(AP Escapement)

AP 脱進機はオーデマピゲ(Audemars Piguet)がロビン脱進機をベースとして改良した脱進機である [31)]．基本的な作動はロビン脱進機と同じであるので作動に関する言及はしないが，安全作用構造に AP 脱進機ならではの工夫がみられる．筆者はロビン脱進機の解説の際，設計が非常に難しいと言及した．その理由は，ロビン脱進機が片側衝撃であることに起因する．直接衝撃が生じる際の“がんぎ車とアンクルの作動が関連づいたアンクル作動”は大まかに

(a)がんぎ車の停止解除による作動＋停止解除後の直接衝撃時のてんぷによる作動

（がんぎとアンクルが間接的に係合）＋逆側のつめ石にがんぎ歯が落下し引きによる作動

となるが，直接衝撃が生じない側のがんぎ車とアンクルのアンクル作動は

(b)がんぎ車の停止解除＋逆側のつめ石にがんぎ歯が落下し引きによる作動

となる．つめ石の係合量が入つめ，出つめである程度同じとすると，(b)側には(a)側のような直接衝撃で生じるがんぎ車とアンクルの間接的な係合が存在しないので，がんぎ車がフリーになり，空回りして脱調してしまう危険性がある．出つめの噛合い，または入つめの噛合いを深くすることで，(b)の状態に於けるがんぎ車とアンクルの係合が発生しない状態を極力減らすことが出来るが，

・入りつめの噛合いを増やすと，停止解除の損失が増えるほか，停止解除が遅くなる為，直接衝撃でてんぷにエネルギー供給する範囲が小さくなり，脱進機効率が低下する．

・出つめの噛合いを深くすると，停止解除の損失が増え，且つ，がんぎ歯との背隙が狭くなり，作動条件が確保できない．

等の課題が生じ，ある程度適正な部品クリアランスや作動条件，そして効率を確保しようとすると，自由式レバー脱進機のようにてんぷの振動によりアンクルの作動切換が生じるロビン脱進機は，どうしても噛合いを浅くしてアンクルの作動角が小さくなる傾向になる．しかしアンクル作動角を小さくすると，今度はけん先のレイアウトが難しくなる弊害が出てくる．

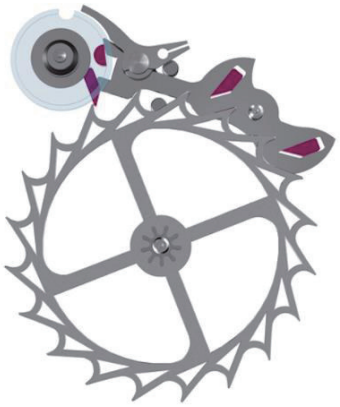


Fig.21 AP 脱進機 [122)]

実際に AP 脱進機ではがんぎ歯とつめ石の噛合い量を 0.05mm 程度にしていることが公表されているが，これはアンクル作動角が小さくなっている為と考えられる．そこで AP 脱進機はけん先のような安全作用が得られるように，クリップ型のレバーをアンクルに取り付け(Fig.21)，一方，側面に切り欠きを設けた特殊な形状の振り座を採用し，アンクルの回転中心からけん先に相当する作用を遠ざけることで小さい作動角でも，十分なレバー先端の作動量を確保し，安全作用が担保される構造を採用したのではないかと筆者は考えている．結果，この安全作用機構により理想的な形で，AP 脱進機を実用化に至ったのではないだろうか．一方で，ロビン脱進機の自起動，再起動を確実に担保できないという課題は残る形となったと考えられる．

3.1.3　デュアルインパルス脱進機(Dual Impulse Escapement)

グランドセイコーの新キャリバーである Cal.9SA5 に初めて搭載された脱進機であり，この脱進機はデテント脱進機，そして AP 脱進機同様，ロビン脱進機をベースに設計されたものである．Fig.22 にて脱進機の作動を説明する．

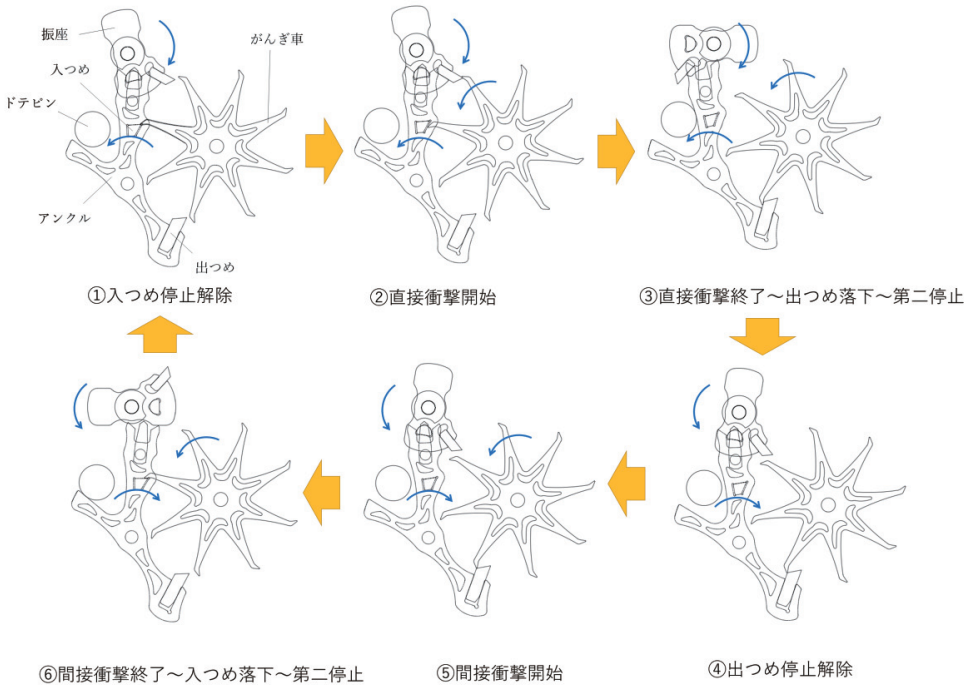


Fig.22 デュアルインパルス脱進機の作動模式図

AP 脱進機の解説にて筆者は，ロビン脱進機の課題を“片側衝撃であるがゆえに，左右にアンクルが作動した時の作動角のバランスが悪く，設計が困難である”と提唱した．デュアルインパルス脱進機はこの課題に対し，直接衝撃が発生しない側のアンクル作動時に，安全作用に於いて実績のある自由式レバー脱進機の摺動衝撃による間接衝撃を追加して“がんぎ車とアンクルの作動が関連づいたアンクル作動”の範囲を設けることで，アンクル作動角のアンバランスを解消し，てんぷへのエネルギー供給を効率的に行えるようになり，且つ，自起動，再起動を可能とした．

3.2　クラブツース脱進機の改良

クラブツース脱進機についても近年，素材の変更や，部品形状，レイアウトの見直しにより大きな改良が図られている．以下に紹介する．

3.2.1　LIGA(Lithographie Galvanoformung Abformung)技術を取り入れた脱進機

LIGA は感光性の物質を塗布した物質の表面を，パターン状に露光することで，露光された部分と露光されていない部分からなるパターンを生成する技術で部品の形状型を作成し，電気鋳造を用いて高アスペクト比で高い形状精度の MEMS デバイス部品を成形する微細加工技術である(Fig.23)．2000 年代に入って

から徐々に機械式時計の部品への展開がなされ，高い精度が要求される脱進機部品への利用も増加している．非常に微細な形状が高精度で成型出来る為，設計の機能確保やデザインの自由度が上がり，例えば，がんぎ歯車を肉抜き構造にデザインし，慣性モーメントを低減させて，脱進機効率の向上に寄与する等の実績がある．

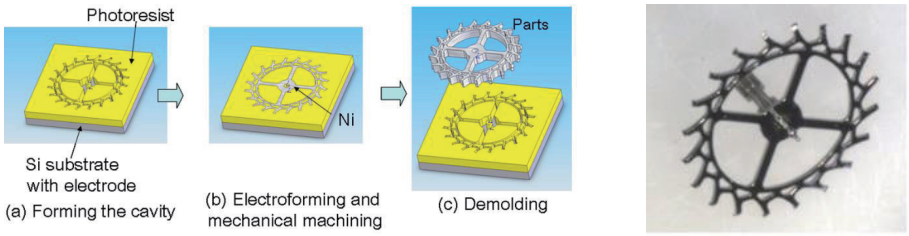


Fig.23 LIGA プロセス概要と時計部品サンプル(がんぎ歯車)

3.2.2　脱進機部品へのシリコンの活用

同じく半導体デバイスなどを製造する DRIE(Deep Reactive Ion Etching)を活用して，シリコンウェハから時計部品を製造する技術の利用も 2010 年以降，増加傾向にある．DRIE だけでは，シリコンはすぐに破損してしまうが，酸化炉で酸化膜を繰り返し成膜，除去することで DRIE によるエッチング断面のスキャロップを滑らかにし，最終的に適度な膜厚で成膜することで，強度を確保して実用化に至っている．

特にスイスでは研究が進んでおり，がんぎ歯車だけでなく，複雑な多層構造であるアンクル体をシリコンで製造し軽量化を図ることで脱進機効率を向上さているほか，ひげぜんまいにも適用されている．シリコンの軽さと形状自由度を活かすことで，ひげぜんまいの等時性と姿勢差の改善に効果を発揮している．日本ではオリエント(エプソン)の Cal.F8 に初めて搭載され，実用化されている（Fig.24）．DRIE によるシリコン部品も高精度，且つ形状自由度が高い加工が出来る為，LIGA により製造される部品同様，部品の肉抜きによる軽量化や，外観向上にも寄与している．

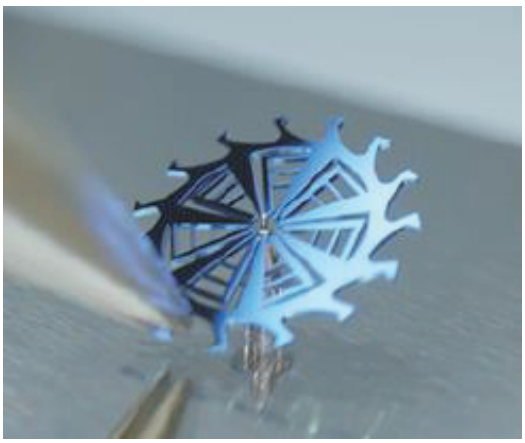


Fig.24 シリコンがんぎ歯車製品例 [123)]

3.2.3　クロナジー脱進機(Chronergy Escapement)

ROLEX の新型クラブツース脱進機で，LIGA プロセスを用いたニッケル-リン製のがんぎ歯車，アンクルを使用している．材料の変更により耐磁性能を向上させている事も特徴であるが，特筆すべきはがんぎ

歯車形状，アンクルつめ石形状を大幅に変更していることにある，クラブツース脱進機の衝撃はつめ石衝撃面上をがんぎ歯が摺動する前半衝撃と，つめ石衝撃面上をがんぎ歯が摺動する後半衝撃とに分けられており，後半衝撃では前半衝撃に対しアンクルを介してテンプに伝達するトルクが増大するという特徴がある事を，前述したが，クロナジー脱進機はこの衝撃後半の範囲をより広く取れるように部品形状を見直し，脱進機効率向上を図っている．

Fig.25 ROLEX クロナジー脱進機 [124)]

3.3　その他の新型脱進機

3.3.1　コンスタント脱進機（Constant Escapement）

最後に形状自由度の高いシリコンを用いたジラールペルゴのコンスタント脱進機を紹介する(Fig.26)．

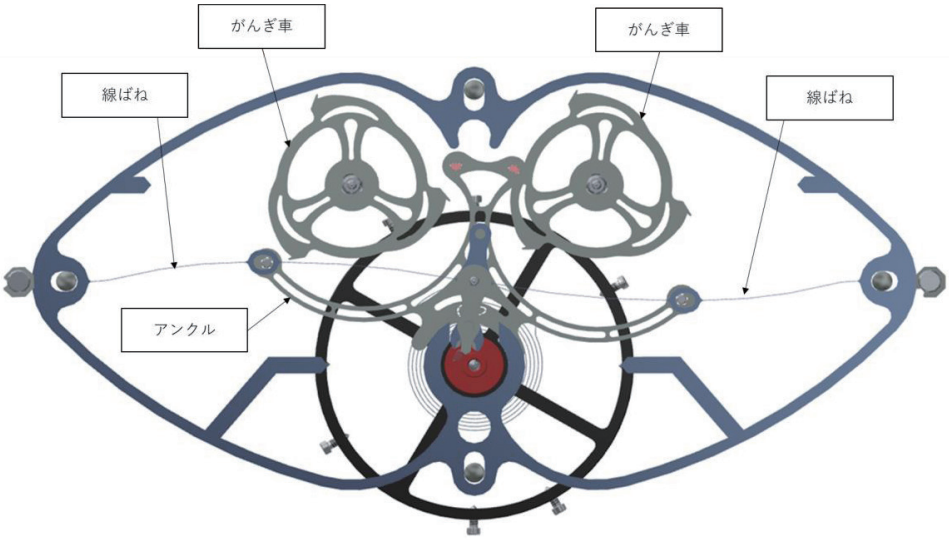


Fig.26 ジラールペルゴ コンスタント脱進機 [125)]

この脱進機はがんぎ車からのトルクをアンクルを介してテンプに伝達するのではなく，シリコン製の線ばねをアンクルとがんぎ車で，一定量座屈させ，てんぷがアンクルを作動させることでその座屈状態が切り替わる反発力を利用してアンクルを駆動させ，アンクルを介してテンプにエネルギーを伝達する脱進機で

ある．2 個のがんぎ車は動力側から連なる 1 つの番車と噛合い，アンクルが作動しがんぎ車が停止解除すると同時に回転し，やがて線ばねの反発で逆側に倒れるアンクルと一方が噛合い，定位置にアンクルと保持する．これにより，一定の座屈量をキープして，脱進の際に一定のエネルギーを，アンクルを介して供給できることになる．停止をしていないがんぎ車は恐らくフリーになっていると思われるが，周辺のクリアランスは十分確保されているようであり，ナチュラル脱進機のようなバックラッシの影響による作動不良など発生しないような構造であると考えられる．この作動原理は，先に紹介したシュトラッセルの弾性力脱進機を想起させる．シリコンデバイスにより過去の脱進機構のコンセプトを現代風にアレンジしているように感じられ非常に興味深い脱進機である．

4. おわりに

機械式時計の歴史に深くかかわってきたであろう脱進機と筆者が個性的と考える一部の脱進機について列挙し簡単に紹介してきた．今回紹介できたのは長い機械式時計の歴史の中に存在した脱進機のごく一部であろうと感じている．また機会があれば，特徴的な脱進機を語るうえで欠かすことが出来ないであろうグラスホッパー脱進機や，その概念を踏襲したであろうと思われるパルミジャーニのコンセプトウオッチに搭載されたシリコン製コンプライアント構造脱進調速ユニットなどにも触れてみたいと考えている．

時計情報サイト HODINKEE の記事を執筆しているジャック・フォースター氏は，脱進機の解説記事の中で「時計のオーナーや愛好家は，時計学の技術的な分野，その中でも特に難解な分野だと思われがちなエスケープメントに関する知識と，ある程度の距離を置くようになったのだと思う．しかし，努力をすれば，エスケープメントに深い愉しみを感じることができる。なぜなら，エスケープメントの設計を支える原理は，物理学と力学の永久普遍的な原理と繋がっているからだ。ダイヤル下の暗闇の中で，エスケープメントが何をしているのかを理解すれば，２度と時計を以前と同じ目で見ることはないし，世界の見方さえ変わるかもしれない.」（HODINKEE 日本版より引用）と述べている [32]．筆者は時計のオーナーや愛好家が須らく技術的分野から距離を置いているとは考えていないが，少なくとも技術的分野，特に機械式時計の黎明期から搭載され続け，多様な変化をしながら機械式時計の歴史と密接な関わりを持ってきた各種脱進機の構造，機能，開発に至った経緯等の知識を持つことは，博物館や展示会，店頭などで様々な機械式時計に触れる際に，より広い視野でその時計を観察し，深い考察が出来るようになり，見た目だけではわからない１つ１つの時計の隠された個性を感じ取れる楽しみが味わえるのではないかと考えている．本稿がそのような楽しみ方に至る一助になれば幸いである．

～引用，参考文献～

1） https://www.britannica.com/technology/escapement

2） https://en.wikipedia.org/wiki/Escapement#Liquid-driven_escapements

3） https://ja.wikipedia.org/wiki/時計の歴史#水時計へのギアと脱進機の組み込み

4） https://ja.wikipedia.org/wiki/蘇頌

5） https://www.infoplease.com/encyclopedia/science/tech/terms/clock/the-evolution-of-mechanical-clocks
※The Columbia Electronic Encyclopedia,　6th ed.(2004)

6） https://museum.seiko.co.jp/knowledge/MechanicalTimepieces01/

7） https://www.britishmuseum.org/collection/term/BIOG82434

8） https://en.wikipedia.org/wiki/Escapement

9） https://en.wikipedia.org/wiki/Anchor_escapement

10) https://www.britannica.com/biography/George-Graham

11) https://escapements.weebly.com/mechanical-escapements.html

12) Frederick James Britten:Old Clocks and Watches and their Makers,　pp.172,　pp.350(1899)

13) Chambre Syndicale de l'horlogerie de Paris[etc.]: Revue chronométrique,　Volume 19,　pp.51 (1897)
(https://archive.org/details/revuechronomtri10parigoog/page/n54)

14) Frederick James Britten:Old Clocks and Watches and their Makers,　pp.350(1899)

15) https://en.wikipedia.org/wiki/Lever_escapement#Invention

16) George Daniels：WATCHMAKING,　pp.214(2002)

17) https://museum.seiko.co.jp/knowledge/MechanicalTimepieces09/

18) Frederick James Britten:Old Clocks and Watches and their Makers,　pp.231(1899)

19) 土屋 建治：特集 機械式時計の歴史 1 -誕生からクロノメーターの完成まで-,　マイクロメカトロニクス(日本時計学会誌),　Vol.61,　No.217,　pp.35,　(2017)

20) https://quillandpad.com/2020/09/06/85-years-of-the-jaeger-lecoultre-reverso-reprise
(ジャガールクルト Ellipse Isometer Escapement)

21) https://www.youtube.com/watch?v=TqUkr9i2ckI　(BVLGARI : AMMIRAGLIO DEL TEMPO)

22) https://www.europastar.com/magazine/features/1004084007-urban-jurgensen-the-first-detent-escapement-made.html（ウルバンヤーゲンセン(旧タイプ)）

23) https://en.worldtempus.com/article/watches/innovation-and-technology/urban-jrgensen-detent-escapement-movement-20446.html（ウルバンヤーゲンセン(新タイプ)）

24) https://en.wikipedia.org/wiki/Echappement_naturel(ナチュラル脱進機)

25) https://watchesbysjx.com/2019/08/breguet-natural-escapement-evolution.html(ナチュラル脱進機)

26) https://frodsham.com/wristwatch/(チャールズ・フロッシャム)
27) https://ledererwatches.com/central-impulse-chronometer/(レデラー)
28) webChronos：ルモントワールとコンスタントフォース概論（前編),
https://www.webchronos.net/features/37640/
29) webChronos：ルモントワールとコンスタントフォース概論（後編）
https://www.webchronos.net/features/37902/
30) https://www.christianklings.com/timepieces/tourbillon-no-4/(クリスチャンケリングス)
31) https://www.europastar.com/magazine/highlights/1003087196-the-new-escapement-by-audemars-piguet-44-a.html(AP 脱進機)
32) https://www.hodinkee.com/articles/the-modern-watch-escapement-and-how-it-got-that-way
https://www.hodinkee.jp/articles/the-modern-watch-escapement-and-how-it-got-that-way(日本版)

～画像引用元～
101) wikimedia commons：
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Clock_Tower_from_Su_Song%27s_Book.JPG
102) 時計工房 儀象堂：https://konjakukan-oideya.jp/儀象堂/
103) セイコーミュージアム：https://museum.seiko.co.jp/knowledge/MechanicalTimepieces01/
104) Manfredgoellner：wikimedia commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spindelhemmung_01.tif
105) Manfredgoellner：wikimedia commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spindelhemmung_02.tif
106) Mario Frasca：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anchor_escapement.gif
107) Frederick J. Britten：wikimedia commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Graham_Escapement.png
108) Morten Bisgaard：wikimedia commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tidens_naturl%C3%A6re_fig27.png
109) Manfredgoellner：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zylinderhemmung.tif
110) Manfredgoellner：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Duplex_01.tif
111) Manfredgoellner：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Duplex_02.tif

112) wikimedia commons：
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagram_of_the_chronometer_detent_escapement_Britten%27s_Clock_and_Watchmaker%27s_Handbook_9th_Edition_1896.jpg
113) Manfredgoellner：wikimedia commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chronometerhemmung_04.tif
114) Kjorford：wikimedia commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Echappement_naturel_from_Breguet_watch_number_1135.jpg
115) Kjorford：wikimedia commons
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Diagram_of_Echappement_Naturel_by_Breguet.tif
116) Manfredgoellner：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denison_02.tif
117) Karel K.：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Strasser_Hemmung_00.jpg
118) Manfredgoellner：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Strasser_02.tif
119) Manfredgoellner：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Strasser_03.tif
120) Deutsches Uhrenmuseum：https://www.deutsches-uhrenmuseum.de/en/museum/knowledge/clock-facts/sigmund-rieflers-precision-regulators.html
121)Manfredgoellner：wikimedia commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Co-axial_02.tif
122) MONOCHROME：https://monochrome-watches.com/a-technical-perspective-the-evolution-of-the-escapement-and-recent-innovations/
123) オリエント時計株式会社：https://www.orient-watch.jp/orientstar/brand-value_manufacture.php
124) ROLEX：https://www.rolex.com/about-rolex-watches/science-friction.html
125) Pierre EmD：wikimedia commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Constant_Escapement.png

～付録～　脱進機関連 URL 一覧

型式	脱進機名称	URL
退却型 Recoil	ヴァージ脱進機 (Verge Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=BoeP0adbDKg（作動） https://www.youtube.com/watch?v=r_W4WwnKf_o（作動）
	退却式アンクル脱進機 (Anchor Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=3qrRyHfNx1o（作動） https://www.youtube.com/watch?v=N240IYgClKI（作動）
停止式 Frictional Rest	直進式脱進機(Deadbeat Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=D9UT6YwzmBU（作動）
	ピンパレット脱進機 (Pin Pallet Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=vh1rH6WGv60（作動） ※Brocot escapement
	ピンホイール脱進機 (Pin Wheel Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=u4owO5W56HA（作動）
	シリンダ脱進機 (Cylinder Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=habEd6uCB8s(作動) https://www.youtube.com/watch?v=W6zl1xd1QYg（作動） https://www.youtube.com/watch?v=VtdXV3AaQSg(作動) https://museum.seiko.co.jp/knowledge/MechanicalTimepieces04/ (解説)
	二重脱進機 (Duplex Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=kULgoiQ8EXQ（作動） https://www.youtube.com/watch?v=sRTYQ1pWs5k（作動） https://www.youtube.com/watch?v=59rCIruI2cc（作動） ※Jacot Duplex Escapement
自由式 Detached	デテント脱進機 (Detent Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=JSNDjuKPdng(作動)※軸止式 https://www.youtube.com/watch?v=iiVviLxxZSc(作動)※軸止式 https://www.youtube.com/watch?v=9oebraRc3WM(作動) ※軸止式 Urban Jürgensen https://www.youtube.com/watch?v=3X6lzMSy2aE(作動) ※板ばね式 https://www.youtube.com/watch?v=6NYr3NZeDGI(作動) ※板ばね式

自由式 Detached	デテント脱進機 (Detent Escapement)	https://quillandpad.com/2020/09/06/85-years-of-the-jaeger-lecoultre-reverso-reprise(解説) ※ジャガールクルト Ellipse Isometer Escapement https://www.youtube.com/watch?v=TqUkr9i2ckI(作動) ※BVLGARI : AMMIRAGLIO DEL TEMPO https://www.youtube.com/watch?v=9oebraRc3WM(作動)※ウルバンヤーゲンセン(旧タイプ) https://www.europastar.com/magazine/features/1004084007-urban-jurgensen-the-first-detent-escapement-made.html (解説)※ウルバンヤーゲンセン(旧タイプ) https://en.worldtempus.com/article/watches/innovation-and-technology/urban-jrgensen-detent-escapement-movement-20446.html (解説)※ウルバンヤーゲンセン(新タイプ)
	ロビン脱進機(Robin Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=AJDg9bXjsgs
	ナチュラル脱進機 (Natural Escapement)	https://en.wikipedia.org/wiki/Echappement_naturel(解説) https://www.hodinkee.com/articles/how-modern-watchmakers-are-grappling-with-one-of-breguets-greatest-inventions-and-its-not-the-tourbillon(解説) https://watchesbysjx.com/2019/08/breguet-natural-escapement-evolution.html(解説) https://www.youtube.com/watch?v=auBjaE9BNAg(作動) ※ベルナルドレデラー https://www.youtube.com/watch?v=naGKFCXihpQ(作動) ※ローランフェリエ https://www.youtube.com/watch?v=lfBtw5xXJNA(作動) ※チャールズフロッシャム
	ラチェットツースレバー脱進機 (Ratchet Tooth Lever Escapement)	http://reverso.txt-nifty.com/blog/2006/01/1_4ab3.html
	ピンレバー脱進機 (Pin Lever Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=UQsZCaS-Peo(作動)

自由式 Detached		クラブツースレバー脱進機 (Club Tooth Lever Escapement)	https://en.wikipedia.org/wiki/Lever_escapement#Lever_watch_movement（解説） https://www.youtube.com/watch?v=KEHYy9HDsTY（作動）
その他	等力式 Constant Force	重力脱進機 (Gravity Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=S2nI1oWw2Z4（作動）
		弾性力脱進機 (Strasser's Escapement)	https://www.youtube.com/watch?v=rIW_bzwRL60 https://www.youtube.com/watch?v=jjXTSfJJ3rM https://www.youtube.com/watch?v=ALr6tMDq-4I https://mb.nawcc.org/threads/building-a-strasser-regulator-clock.98369/#post-747218
		ジャンヌレ型の コンスタントフォース (Henri Jeanneret)	https://pocketwatchdatabase.com/reference/patent/2464316/watch-movement-movements(特許)
		ルモントワール機構（カム式） (Remontoire Mechanism)	https://www.youtube.com/watch?v=MK0jqCB0Goc#t=13m37s ※Ferdinand Berthoud Chronomètre FB 2RE https://www.facebook.com/DerekWatches/videos/how-the-pratt-constant-force-escapement-works/362328317701072/ ※Derek Pratt (その他) https://www.webchronos.net/features/37640/(解説) https://www.webchronos.net/features/37902/(解説)
	フリーバランス式 Free Balance	ゴーランド型(Gowland)	https://www.youtube.com/watch?v=Z5_-Zt3VpRM(作動)
		ブノワ型(A.H.Benoit)	https://www.youtube.com/watch?v=1zh8koyHkbw(作動) https://www.youtube.com/watch?v=4iQeoD5cpCg(作動) https://fr.wikipedia.org/wiki/Achille_Benoit(ブノワ解説)
		リーフラー型(Sigmund Rieflers)	https://www.youtube.com/watch?v=zSYDTkA8pXk(作動) https://www.deutsches-uhrenmuseum.de/en/museum/knowledge/clock-facts/sigmund-rieflers-precision-regulators.html(リーフラー解説)
		ランバート型(J. A. Lambert)	https://www.youtube.com/watch?v=p75mryIJuHY(作動) https://www.youtube.com/watch?v=Ft3IFJKK-gk(作動) ※ランバートの改良型？(製作者オリジナル？)

その他	フリーバランス式 Free Balance	クリスチャン クリングス (Christian Klings)	https://www.christianklings.com/timepieces/tourbillon-no-4/(解説)
現在の脱進機	コーアクシャル脱進機		https://www.youtube.com/watch?v=3mJDk4e_AbU　※現行型 https://www.youtube.com/watch?v=PVhSQ_Azkr8　※初期型 https://www.youtube.com/watch?v=1sCE60ArNT8　※Patek Philippe 試作品
	AP 脱進機		https://www.youtube.com/watch?v=jQAMH8r5sdU(作動) https://www.europastar.com/magazine/highlights/1003087196-the-new-escapement-by-audemars-piguet-44-a.html(解説)
	デュアルインパルス脱進機		https://www.youtube.com/watch?v=ITl7FJYSAwY#t=0m30s(作動) https://www.youtube.com/watch?v=bLhOZW6l76I#t=1m10s(解説)
	LIGA 技術を取り入れた脱進機		https://watchesbysjx.com/2021/05/rolex-chronergy-analysis.html(解説)
	脱進機部品への Si（シリコン）への活用		https://www.europastar.com/watch-knowledge/1003843153-the-silicon-revolution.html(解説)
	Girard-Perregaux The Constant Force Escapement		https://www.youtube.com/watch?v=MQJFRt-2hDk(作動) https://www.youtube.com/watch?v=Ocx8VdAm37g(解説)
	コンプライアント構造振動子＋脱進機(停止型)	Zenith defy lab(inventor)	https://www.youtube.com/watch?v=X7lpj76O6M0(作動) https://www.youtube.com/watch?v=ywnpetdt7w0(解説)
		フレデリックコンスタント (Silimline monolithic)	https://frederiqueconstant.jp/features/monolithic/innovation/ (解説) https://www.hodinkee.com/articles/the-silicon-powered-speed-of-the-frederique-constant-slimline-monolithic-manufacture-40hz (解説) https://frederiqueconstant.jp/features/monolithic/feature/(作動)

■ NAWCC

http://theindex.nawcc.org/HorologicalScience.php

■ WATCH AND CLOCK ESCAPEMENTS

https://escapements.weebly.com/

https://escapements.weebly.com/mechanical-escapements.html

■clockwatch

http://www.clockwatch.de/index.html?html/tec/hem/str.htm

http://www.clockwatch.de/index.html?html/tec/hem/str.htm

■Ken Kuo（youtube）※CG アニメーション

https://www.youtube.com/user/kenkuoescapement/videos

■Waterpearl（youtube）※脱進機模型

https://www.youtube.com/c/Waterpearl_escapement

研究会報告

国内クロック技術の歴史と展望

講師　　鈴木哲郎　氏　　セイコーミュージアム 銀座　アーカイブズ担当
国立科学博物館 産業技術史資料情報センター　元主任調査員

参加者　　24 名　　（正会員 12 名，非会員 12 名）

シチズン時計（株）	5 名（正会員 4 名，非会員 1 名）
セイコーエプソン（株）	2 名（正会員 1 名，非会員 1 名）
セイコータイムクリエーション（株）	12 名（正会員 2 名，非会員 10 名）
一文機工株式会社	1 名（正会員）
神奈川工科大学	1 名（正会員）
その他	3 名（正会員）

司会　　横山正尚　セイコータイムクリエーション株式会社　技術部 開発設計グループ

日時：2022 年 11 月 4 日（金）14:00〜15:30
会場：中央大学後楽園キャンパス 5133 号教室　及びオンライン（Webex ミーティング）にて開催

協賛学会　（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）電子情報通信学，（公社）日本磁気学会，（一社）日本機械学会，（公社）日本設計工学会，（一社）日本ロボット学会

講演概要：
国立科学博物館 産業技術史資料情報センター発行の「クロック技術の系統化調査報告」をもとに機械式から電子式へ，更に多様化するクロックの技術について講演いただいた．

クロックの誕生と高精度化

時を告げる鐘（Cloccam）として誕生したクロックは，調速機と脱進機の進化によって高精度な機械式時計となった．

調速機は棒てんぷから振り子を経ててんぷへ，脱進機は冠型脱進機から脱却式アンクル脱進機，クラブツース・レバー脱進機へと進化し，機械式時計は小型化するとともに 15 分/日レベルから数十秒/日レベルへと高精度化した．

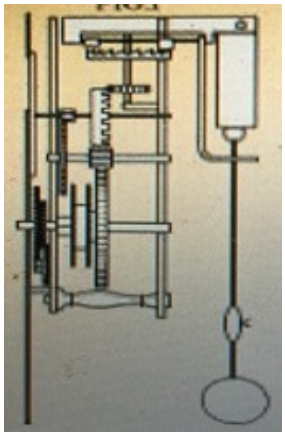


図１　振り子と冠型脱進機
精度：　約 15 分/日

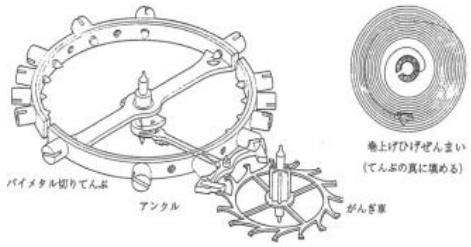


図２　てんぷとクラブツース・レバー脱進機
数秒/日

製品としての国内クロックは，戦前に行われた欧米製品の模倣に始まり，戦後各社独自技術開発を進め，1966 年の「マイアラーム」を最後に機械式から電子式へと移り変わった．

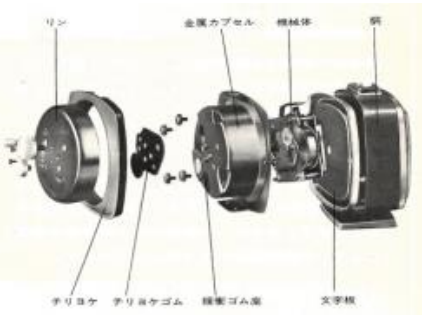


図３ マイアラーム

機械式から電子化への進化

1955（昭和 30）年頃から電子化の取組みが始まる．

トランジスタの発明により，機械式接点を持たない非接触の検出・駆動回路方式が考案され，信頼性および精度は格段に向上した．

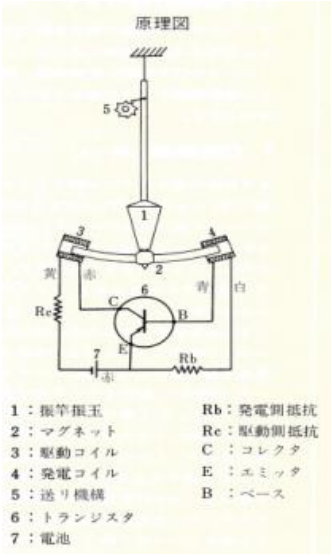


図 4　トランジスタ駆動による振子・てんぷクロックと原理図（昭和 30 年代）

精度：　約 10 秒/日

昭和 43 年には世界初の水晶掛時計が誕生し，後に国立科学博物館 2020 年度「未来技術遺産」に登録された（No.00299）．水晶振動子の登場により精度は日差から月差（20 秒/月），年差（10 秒/年）へと向上した．

図 5 世界初の水晶掛時計（昭和 43 年）と最初の水晶振動子

電波修正クロックへ（昭和 38 年 NHK 放送電波，平成 11 年 NICT 標準電波）

おおよそ 10 万年に 1 秒の誤差という超高精度の「原子時計」の情報を基に NICT により管理・運用される標準電波を個々の時計に表示するため，秒，時分の針（歯車）位置を光学センサーで検出する機構が採用された．

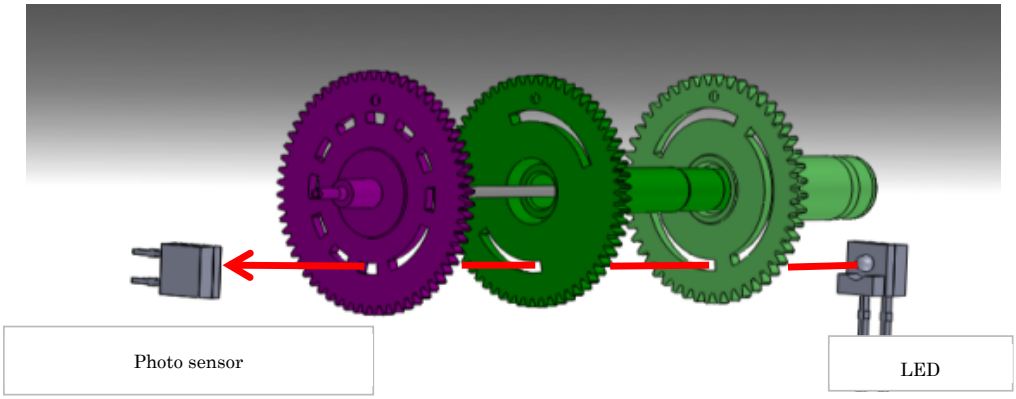


図 6 歯車の位置検出機構

クロックの変革

機械式から電子式へ進化し，IC の集積化技術が向上するとともに図 7 に示す方向性マップのようにクロックの多様化が進んだ．

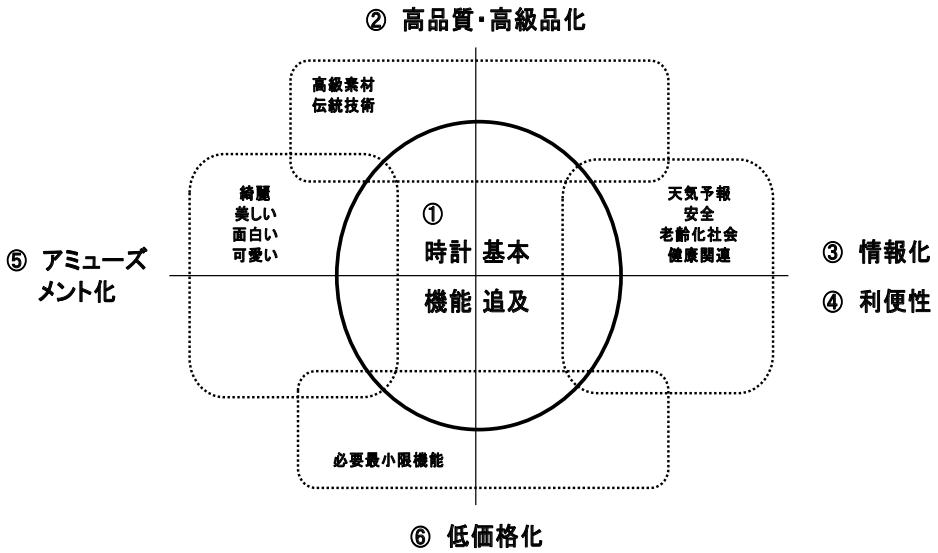


図 7 クロックの方向性マップ

基本機種の高度化設計

10 年電池寿命高精度薄型機械体（1985 年）

・電池寿命 10 年

・年差 10 秒　（高精度水晶振動子）

・完成品厚み 9.5 ㎜

国立科学博物館 2020 年度「未来技術遺産」に登録された（No.00301）.

図 8 10 年電池寿命高精度薄型掛時計

多様化するクロックの開発

文字板を持たず，音声で報時する時計

ピラミッドトークは頂上部を押下することで音声報時する．国立科学博物館 2020 年度「未来技術遺産」に登録され（No.00300），その後電波化することで復刻した．また，音声を認識，反応して時刻を返事するアミューズメント要素を持った時計も発売された．

図 9 ピラミッドトーク（1983 年）

また，当初単純な鐘やベルの音であった報時・アラーム音も，メロディ IC の登場によって様々な音楽で表現されるようになり，更には音を鳴らすことに特化したスピーカークロックが登場した．

図 10 セイコーエプソン製メロディ IC を採用した電子メロディアラームクロック

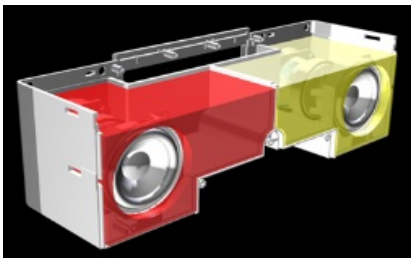


図 11 アクティブスピーカークロックと内部構造

高品質・高級品化

中国北宋時代の「水運儀象台」をモチーフにした「悠久」や，外装に七宝焼きなどの伝統技法やオニキスなどの高級素材を採用したクロックが室内装飾用，贈答用として開発された.

図 12 水運儀象台をモチーフとした 悠久（2005 年）

図 13　七宝焼き枠

図 14 オニキス枠

クロックの完成度向上を目指して

電波修正時計において，標準電波の受信しにくい環境での受信対策として窓際で受信した標準電波を特定小電力無線（短波）に変換して屋内に送信するタイムリンク，GPS 衛星の時刻情報を利用する衛星電波修正クロックやスマートフォンの時刻情報を Bluetooth®で送信する NEXTIME といったクロックが登場した.

デジタル表示クロックの推移

指針ではなく，様々な方法で数字を用いて時刻を表示するデジタルクロックが一般的になり，時刻の他にもカレンダー，温湿度や快適度,天気予報など多岐にわたる情報を表示するようになり，表示色もモノクロからカラーへと進化した.

図 15 RGB LED によるフルカラー表現が可能なデジタルクロック

からくり時計の技術推移

14 世紀ヨーロッパにおいて，時（鐘）打ち機構の付いた塔時計から現代の商業施設に設置されるモニュメント的なからくり時計へと姿を変え，更には小型化して家庭へと導入された．

今後のクロックの展望

クロックは視線を集める空間上のゴールデンスペースに設置される．元々は正確な時を知るためのものであったが，技術の進化と共に「新しさ」「楽しさ」を提供するハードウェアへと変化した．今後はさらに新しい何かを繋げていくコネクティビティを追求することで人間の生活にもっとも身近な新しい存在へとなっていくことができるのではないか．

第２部　　質疑・応答

質問１：　ウォッチ，特にヨーロッパでは機械式を中心に高級化路線へと進んでいる．クロックにおける機械式時計の今後についてはどのように考えるか．

回答１：　個人の意見としては今後広がっていって欲しいと思う．

質問２：洋の東西を問わず，時計の表示が 12 時間制（あるいは 24 時間制）であるのには何か理由が考えられるか．

回答２：　はっきりとはしないが暦の 12 か月から来ているものではないか．

後記　（一社）日本時計協会ホームページより

古代バビロニア人が数学・天文学で使用していた「12 進法、60 進法、円周 360 度」から時間の単位は作られたと言われています。獲物を分ける、農作物を分ける等、分割しやすい数というのが、便利な単位であったということも背景にあったようです。

円を分割するのに 6 等分をベースにした分割方法は使いやすかったのだと思われます。6 等分は 1 辺が半径の長さになる正三角形となるので、半径の長さで円周上を切っていくと簡単に 6 等分することができます。更にそれぞれ半分に分けると 12 等分が完成します。

12 等分されたものは、半分にも、4等分にも分けられるし、3等分、6等分、そして 12 等分にも分けられる、分割するのに便利な数字なのです。

更にそれぞれを 5 等分したものが 60 分割になります。60 分割にすると 5 等分や 10 等分も可能になりより使い勝手がよかったのでしょう。（60 は 100 までの数字で最も約数の多い数字）

質問３：　ウォッチは高級化，し好品化しているがクロック産業の展望として，例えば価格帯，伸びていきそうなメーカー，生産国，どういった製品が伸びていくかなど見解があれば聞いてみたい．

回答３：　ウォッチの部品は生産技術的な面から中国等での低価格化が難しく，日本やスイスで付加価値を高める方向へ進んでいる．一方でクロックは単純なクォーツムーブメントではなく，総合力を必要とするからくり時計では日本が優位であるし，金属部品の加工に技術が必要となる機械式クロック等はドイツが優位である．製品の分野としては時計そのものよりも周囲の新しい技術を取り込み，設置される良いロケーションを活用できるようなアイディアがあると良いと考える．

参考文献　国立科学博物館 技術の系統化調査報告 共同研究編 Vol.12 クロック技術の系統化調査　2019 年 3 月

以上

学術講演会報告

2022年度マイクロメカトロニクス学術講演会実施報告

横山　正尚*
*セイコータイムクリエーション株式会社，東京都江東区 2-4-3，郵便番号 135-8610

2022 年 9 月 16 日，中央大学後楽園キャンパスにおいて 2022 年度マイクロメカトロニクス学術講演会をオンラインとの同時開催いたしました. 会員 27 名，一般参加者 30 名，学生会員 1 名，時計メーカー，大学等から合計約 60 名の参加をいただきました.

今年度の学術講演会は午後からの開催となり，第 1 セッションで 3 件，第 2 セッションで 3 件，合計 6 件の研究成果発表が行われました.

その後の特別講演では，大阪大学よりピエール=イヴ・ドンゼ教授をオンラインにてお招きし「スイス時計産業のラグジュアリー化：工業と戦略のチャレンジ（2000-2022 年）」という題目で，スイス時計業界の明暗を分けたラグジュアリー化という戦略，日本の時計業界の今後の方向性などについて示唆に富むご講演をいただきました.

最後に閉会式に先立ち，青木賞授賞式が実施されました. 今年度の青木賞は，マイクロメカトロニクス誌 Vol.65, No.224 に掲載されたセイコーエプソン株式会社の杉本亮氏，中島恭央氏の共著による論文「女性向け GPS ソーラーウオッチの開発」が受賞され，代表して杉本亮氏に表彰状が授与されました.

2022 年度はオンライン・対面同時という変則開催となりましたが，ご参加いただいた皆様，理事運営委員，スタッフの皆様のご尽力により予想されたトラブルもなく盛会のうちに学術講演会を終えることができました. 一昨年は新型コロナ感染拡大のため中止，昨年はオンライン開催だったため実に 3 年ぶりの現地開催となり，対面ならではの活発な質疑応答，参加者同士の交流を見ることができたことを喜ばしく感じます. 本学術講演会は，関係各社・大学が一堂に会して意見交換が行える貴重な機会です. オンラインの活用により遠方からのご登壇，ご聴講の可能性も拡がっております. これからも積極的にご参加いただけますようお願いいたします.

Fig.1 オンラインのため登壇者不在の発表

Fig.2 活発な質疑応答

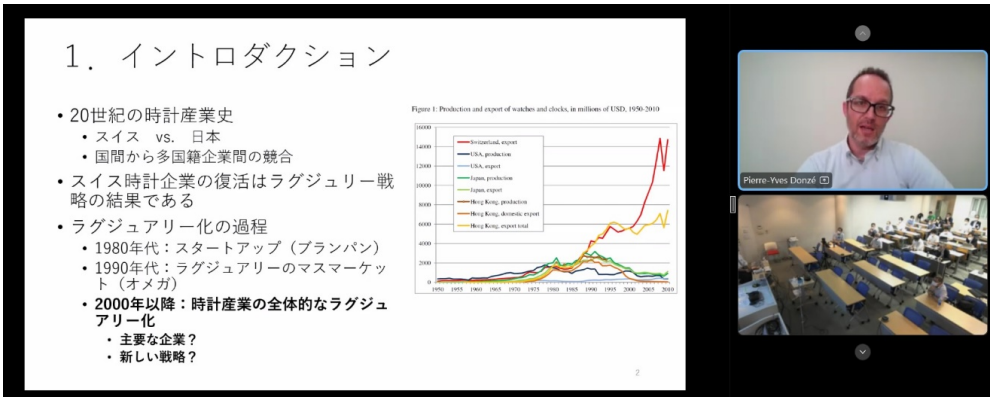


Fig.3 ピエール＝イヴ・ドンゼ教授の特別講演（オンライン）

学術講演会報告

特別講演

スイス時計産業のラグジュアリー化：工業と戦略のチャレンジ（2000-2022 年）

ピエール＝イヴ・ドンゼ（Pierre-Yves Donzé）
大阪大学 大学院経済学研究科 教授
〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

（2022 年 10 月 5 日 受付）

１．イントロダクション

20 世紀の時計産業史を簡単に振り返ると、1980 年代に日本が米国を抜いて世界 No.1 となったが、1990 年代にスイス/香港が逆転し、2000 年代からはスイスの一人勝ちが続いている。しかし、20 世紀の時計産業では、スイス vs.日本というような国による対比という図式で見るのではなく、多国籍企業間の競合という構造へ変化したと捉えるべきである。この構図において、スイス時計企業の復活はラグジュリー戦略の結果である。

スイス時計企業がどのようしてラグジュアリー化は、次に挙げる３つのステップを経て進んだと考えることができ、本講演では第三段階の 2000 年以降のスイス時計産業の動きを講演するため、イントロダクションとして、前段階である第一、第二の両ステップについて説明する。

① 1980 年代：スタートアップ
② 1990 年代：ラグジュアリーのマスマーケット
③ 2000 年以降：時計産業の全体的なラグジュアリー化

第一ステップであるスタートアップとして、「Blancpain(ブランパン)」社が挙げられる。当時の Blancpain 社は、1961 年に Omega 社により買収された後、ブランドとしては休眠常態であった。1982 年にジャン-クロード・ビバーは、友人のジャック･ピゲとともに、ブランドの名義を買い取った。現存する世界最古の時計ブランドであり、「1735 年以来、ブランパンにはクォーツ時計はありません。これから先もクォーツとは無縁です」というスローガンを掲げると共に、機械式時計の技術の結晶として「シックス・マスターピース」を発表した。さらに、本社が無くなっていたため、最も機械式時計の歴史があるジュウ渓谷に新たに販売会社を設立など、矢継ぎ早にマーケティング施策を行い、ビバー氏は瞬く間にブランドを復活させた。

第二ステップであるマスマーケットは、Omega 社の復活に見て取れる。1980 年代前半、ROLEX と SEIKO との競争に敗れた Omega は非常に厳しい経営状況であった。このような状況下からの復活劇にも、前出のビバー氏が大きな役割を果たしている。1992 年、SMH グループ（後のスウォ

ッチグループ）は、ブランパンを買収し、ビバー氏はニコラス G.ハイエックのマネージメントチームに加入した。さらに、1995 年には、ビバー氏は 10 年ぶりにオメガに戻り、オメガ ブランドの国際マーケティング部長として、次の３本の柱から成り立つ施策でその手腕を発揮した。

・技術的優越＝マーケティングのための技術開発

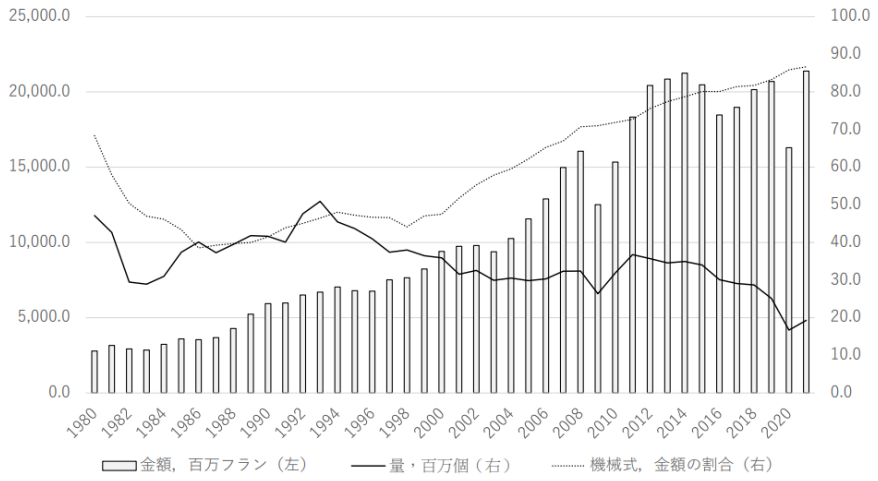
・歴史・伝統＝キレイな過去の歴史からストーリーを作り

・グラマー（魅惑的な美しさ、魅力）＝アンバサダーの活用等

これらの手法が功を奏し、Omega は Rolex、Cartier と並ぶ Top3 ブランドしての地位を確立。

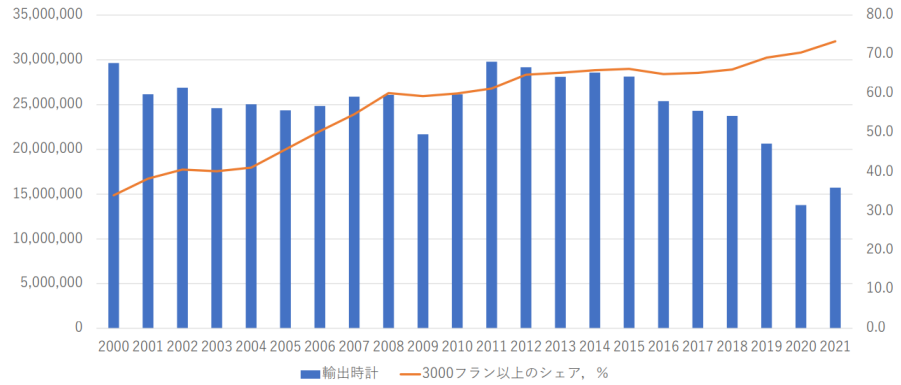
なお、著書『「機械式時計」という名のラグジュアリー戦略』により詳しい内容を記載。

２．スイス時計産業のラグジュアリー化



出典：スイス貿易統計

本講義のメインテーマにある 2000 年以降のスイス時計産業がどうなっているのかを表したのが、上図である。この図を見てわかるように、長期的に数量はダウントレンドにあるものの、2000 年あたりを境に、金額は大きな伸びを示しており、これに比例する形で機械式時計の割合も高くなっている。



次の図は、スイス時計の輸出数量とその中で 3000 フラン（小売価格で 100 万円相当）以上の製品が占める割合を示したものです。この図からもスイスの時計の輸出数量の減少と、一方で、3000 フラン以上のシェアが 2000 年の 40%に対して、2021 年では 75%程度の大幅に増加していることがわかる。

他のデータとして、Swatch と Patek Phillippe の 2 つブランド売上を比較すると、2006 年の同程度の売上を持っていた両ブランドだが、2019 年の売上を見ると明暗がはっきりと分かれた。低価格帯を主力する Swatch は約 30%売上を失い、高価格帯を主力とする Patek Phillippe は、250%の成長を遂げるという結果となっている。

以上述べてきたように、スイス時計産業は、2000 年以降ラグジュアリー化が進み、その原動力となっているのが、高額な機械式時計の復活であることがわかる。

３．会社の戦略

スイス Vontobel 銀行が推測したスイス時計ブランド売上 Top10 を 2006 年と 2020 年に比較すると、３つのグループに分けることができる。１つ目のグループは Top3 の Rolex、Cartier、Omega のブランドであり、これらはほとんど世界中どこに行っても同じ顔ぶれである。２つ目のグループは、大きく成長したブランド群で、Patek Phillippe、Audemars Piguet、IWC、Hublot、Longines などがある。Longines は、あまり高価格のイメージは無いが、特に中国ではラグジュアリーブランドとしての地位を確立している。最後の３つ目のグループは、衰退したブランド群で Tag Heuer、Swatch など低価格ブランドである。

スイス時計産業のラクジュアリー化を成し遂げるために、どのような戦略で平均価格を急増させたのかを、前述の第一／第二グループから４つブランドの実例を通じて解説していく。

ａ）ロレックス：勝利の戦略の継続

1905 年にハンス・ウィルスドルフが ROLEX の前身となる時計専門商社を創立後、1920 年にジュネーブでロレックス株式会社が登録された。その後、1926 年にはオイスターケースと呼ばれる防水ケースを、1931 年にはパーペチュアルと呼ばれる自動巻機構を、1945 年にはデイトジャストと呼ばれる瞬間日送り機構という３大発明を礎に成長したというのが、よく聞かれるロレックス成功の物語である。

ロレックスの成長戦略として、従来とは異なる点に着目している。初めにロレックスの製品を振り返ってみると、①1931 年 Oyster Perpetual、②1945 年 Datejust、③1953 年 Submariner、④1963 年 Cosmograph Daytona という４種類のアイコニックな製品を開発した後、大きくモデルは変わっていない。つまり、製品ではない要因として、1960 年代からのアメリカの広告会社（J. Walter Thompson 社）との提携で始まったマーケティング・イノベーションが重要であると考えている。ロレックスは高性能な時計＝技術という視点での広告ではなく、優秀な人のための優秀な時計というモノからコトへの概念の転換が図られ、1990 年代まで時計業界他社が技術的な優越を主要メッセージにしている状況においても、宣伝でもほとんど技術を全面に出すことが無かった。私がロレックスの宣伝コピーで好きなものは、「A rolex will never change the world. We leave that to the people who wear them.（ロレックスは決して世界を変えることはない。それは身につける人に委ねられる。）」があり、時計産業において最初の近代ラグジュアリー戦略の証左であると考えている。特別な人は特別な時計をするという社会的通念を普遍化することを狙いとして、現在までも続けれられている。

蛇足になるが、2009 年以降，Longines、Tag Heuer という中間セグメントに対抗し、ロレックスを守るため、TUDOR をグローバル市場への積極的な展開を開始している。

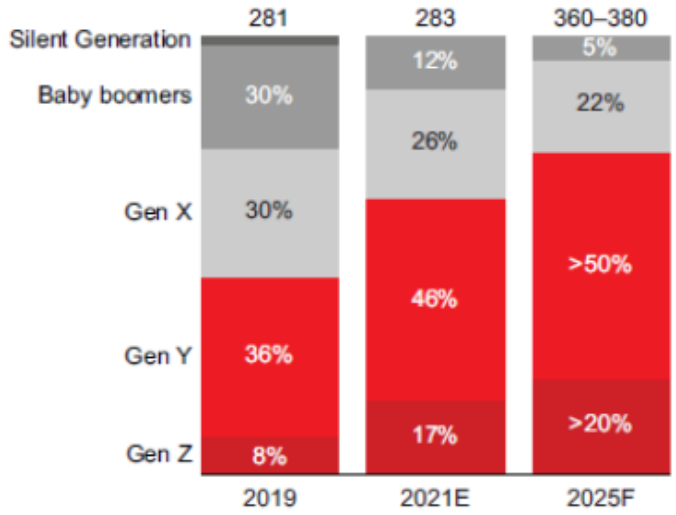
ｂ）オーデマ・ピゲ：アイコニックな製品

コンプリケーションウォッチのムーブメントメーカーとして 1875 年に設立し、他社へ供給をしていた。転換点となったのは、1972 年に発売された初のスチール製高級時計ロイヤルオークであり、これをアイコニックな製品として育てたことが挙げられる。その証拠となるデータとして、オーデマ・ピゲの生産量とロイヤルオークの占める割合と平均単価を下表のように紹介する。この表からもわかるように、オーデマ・ピゲの成長がロイヤルオークに支えられていることが、生産数量、占有率、平均単価のいずれからも分かると思う。

オーデマ・ピゲの生産量	12,000 個	（1987 年）	45,000 個	（2021 年）
ロイヤルオークの割合	40%	（1993 年）	90%	（2021 年）
ロイヤルオークの平均単価	9,500 フラン	（1972 年）	40,000 フラン	（2021 年）

別の話題として、2022 年にオーデマ・ピゲがロイヤルオーク 50 周年として公開した動画（https://www.youtube.com/watch?v=YP4mbGPy0vA）を紹介する。この動画でいくつか注目するポ

イントがあるが、ポイントの１つ目として、時計メーカーが従来宣伝してきた「技術」、「会社」には全く触れていないことが挙げられる。２つ目のポイントとして、商品である「時計」については、50 年間のファッションの変化の中で、ロイヤルオークがアイコンとしてデザインが残っていることを伝えるだけに留めている。



Bain & Co. (2021)

なぜこのような広告スタイルになったのかという点について解説したい。この広告は、新世代（Ｙ世代：1980-1995 年生まれ、Ｚ世代：1996-2010 年生まれ）のラグジュアリー消費者に向けたものであり、彼らの特徴が SNS 等を使いこなすデジタルネイティブであること、伝統的な社会に興味が無く、新しい価値観として、「ダイバーシティ」、「サステナビリティ」を大事にしていることが挙げられる。そして、彼らはクラシックデザインでなく、現代アートなど近代的デザインに興味を持っており、フランスのファッション業界では、ルイビトン、シャネル、ディオールなどが既に方向転換を図っている。新世代をターゲットにすることを裏付けるデータとして、コンサルティング会社のベインがまとめたラグジュアリー製品の消費者層のグラフがある。グラフを見て分かるように、2019 年で既にＹ世代とＺ世代の合計が 44%を占めており、2021 年には 63%、2025 年には 70%を超えると推定されている。

ただ、日本の消費構造は、グローバルで見た場合、特殊な環境にあるため、Ｙ世代、Ｚ世代へラクジュアリー商品の購買層が変化したことが、実感しにくい。これは、日本の場合、ラクジュアリー商品を購入するのは、いわゆるバブル世代（1960 年代生まれの 50 代）が中心となっており、バルブ世代以降は平均所得が徐々に低下していることもあり、ラグジュアリー商品の消費の主力となっていないためだと思われる。

ｃ）リシャール・ミル：「ハイパーテクノロジー」

リシャール・ミルは、1999 年に設立された新興時計メーカー。その概念は、「ハイパーテクノロジー」であり、「機械式時計の技術」と「新素材」がその両輪を成している。前者の機械式時計技術は、資本関係にあるオーディマ・ピゲからの技術協力であり、ケースやムーブメントに採用されている後者の新素材は、スイス連邦工科大学（ＥＰＦＬ）への委託研究により獲得された。特に、カーボン等の新素材を用いたケースの採用などにより、「非常に軽く、耐久性がある時計」を完成させ、この特徴を生かした宣伝として、プロテニスプレーヤーのラファエル・ナダルをアンバサダーとし採用。実際にテニスの試合中にプレーヤーが装着することで、軽さと耐衝撃性の高さを広くアピールすることに成功。

今年 2022 年は、RM 47 トゥールビヨン（赤穂浪士 47 志士をモチーフ）としたモデルで、サムライ、武士道をリスペクトした甲冑をモチーフにしたデザインで小売価格約 1.4 億円（税込み）、世界限定 75 本が既に完売。

ｄ）ウブロ：技術革新・近代デザイン

ウブロは技術革新と近代デザインというリシャール・ミルと似たアイデンティティを持ち、1980 年に設立された。当初は中小企業で、ステンレスケースで唯一高級品として存在していたオーデマ・ピゲのロイヤルオークを参考に、新しい概念であるゴールド製ケースにラバーストラップという異色の組み合わせで参入。しかし、うまく行かずに、2000 年代初頭には赤字化。

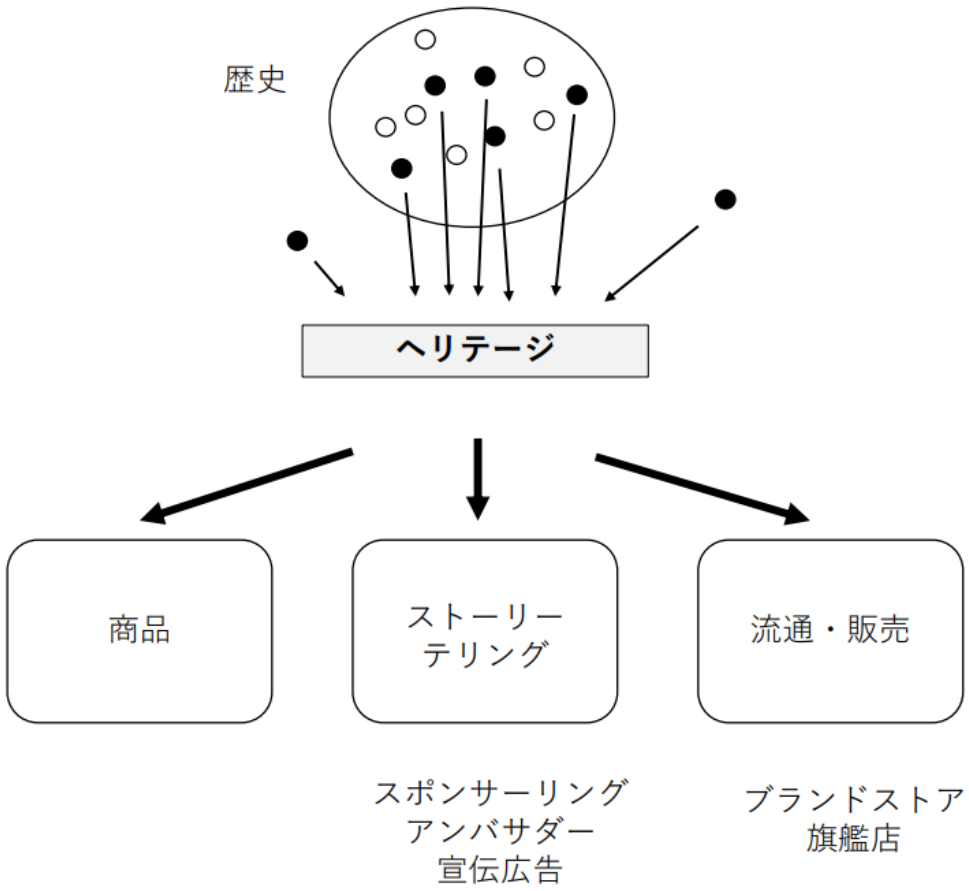
2004 年に、前述のビバー氏が出資、経営陣として参画。新しい概念として、「フュージョン」を打ち出した。このフュージョンという概念の基、スイス連邦工科大学ＥＰＦＬにケース用の新素材を委託開発し、新しいセラミック、新しいゴールド等で出来た高価なケースと安価な素材でありブランド設立当初から使ってきたラバーストラップと組み合わせることで、フュージョンというコンセプトを成立させた。

さらに、Ｙ世代、Ｚ世代への開拓を進めるために、ラクジュアリーとは無縁であったサッカーとの提携を高級時計ブランドとしては初めて 2006 年より実施しており、著名なエムバペ選手とのアンバサダー契約を結ぶなど連携を深めている。

以上、ロレックスからウブロまでのラクジュアリー化に成功したブランドについて述べてきたが、共通する内容は生産技術では無く、ヘリテージです。ヘリテージというのは、概念であり、ブランドのアイデンティティであり、自身のブランドは何かを表すものだと解釈するのがポイントである。元々、ヘリテージとは遺産、伝統などを表し歴史から生まれるものである。この歴史から生まれた遺産を上手に使ったのが、世界最古の時計メーカーとして伝統を持つブランパンであり、月に行った、オリンピックでの計時を担当したなどの遺産を持つオメガである。一方、オーデマ・

ピゲ、ウブロ、リシャール・ミルなどは歴史から生まれた遺産ではなく、良いアイデンティティ、良い概念というヘリテージを最初に作り上げた例がある。彼らは、ヘリテージを作り出した後に、商品の開発を行う。そして、的確なストーリーテリングとして顧客に伝え、販売店の雰囲気統一などチャネルを作り上げる。

このようなヘリテージという意味を概念であり、ブランドのアイデンティティであり、自身のブランドは何かを表すものだと解釈することが、非常に大きな本日のメッセージである。そして、下図にこれらの関係を一つにまとめたものを作成したので、ぜひ参考にして欲しい。



４．工業化へのチャンレジ

次に、説明する内容は、「工業化へのチャレンジ」である。これまで述べてきたように、アイデンティは非常に重要だが、一方で、アイデンティが具現化したものとしての製品をどう実現するかも忘れてはならない点である。そして、この工業化という点については、Swatch Group が採用した生産戦略によって、スイス時計のラクジュアリー化を後押ししたという点について解説を行う。

ａ）生産システムの変貌

1980-1990 年代以前は、Rolex、Swatch Group 以外のブランドは、ムーブメント・部品製造を製造しておらず、外注として、ETA(Swatch Group)からの調達を行っていた。しかし、1990 年代になると、Swatch Group はブランパン、ブレゲ、グラスヒュッテ・オリジナルなどのブランド買収を開始したため、他社にムーブを供給するよりも、G 内ブランドへの完成品供給を優先する戦略へ変更され、2002 年には部品供給を停止、2011 年には機械式ムーブメントの供給を停止すると発表された。だが、ETA がスイス製ムーブメント供給では独占に近い状態だったため、独禁法により、部品供給停止は 2010 年、機械式ムーブメント供給停止は 2019 年となった。

このような背景の元、いかに良いアイデンティがあっても、機械式時計という製品として製造する手段が無ければラグジュアリー戦略を実現できないという事実が浮き彫りになった。この課題に対して、スイス時計各社がどう対処したのかが、2000 年以降の大きなポイントである。

ｂ）生産能力の内部化戦略

前述の ETA によるムーブメント供給禁止に伴い、スイス各ブランドは、ムーブメントの調達では無く、内部生産に切り替えざる負えない状況になっていた。この生産能力の内部化には、次の２つの方法が行われた。

① グループとして買収：Swatch Group

・ムーブメント関係

通常仕様：開発・生産は ETA に集中

複雑時計：中小企業の買収（2008-2010 年）し、Manufacture Blancpain に統合

・外装関係

ケース，針，文字盤などを買収し，各ブランドに提供

② グループ内の各ブランドが個別に買収：LVMH

・ TAG Heuer：ケース，文字盤，ストラップ製造者の買収

・ Christian Dior：ムーブメントサプライヤー2 社の買収・合併（2001 年）

・ Louis Vuitton：ムーブメントと文字盤サプライヤー2 社の買収・合併（2010 年）

・ Bvlgari：コンプリケーションウオッチのムーブメントサプライヤーの買収（2000 年）

外装部品の内部化（2005-2007 年）

c）独立系機械式ムーブメントメーカーの成長

ETA によるムーブメント供給禁止に伴うもう一つの流れとして、ETA 製ムーブメントを活用し改造してきたムーブメントメーカーは、存続をかけ、自社ムーブメントの開発・製造に参入した。あるいは、独立系ブランドや小規模ブランドでも自社でムーブメントを開発・製造し、自社で使用するだけでなく他社への供給を開始した。このようにして、独立系ムーブメントメーカーが成長した。下表は、これら独立系機械式ムーブメントメーカーの一覧である。

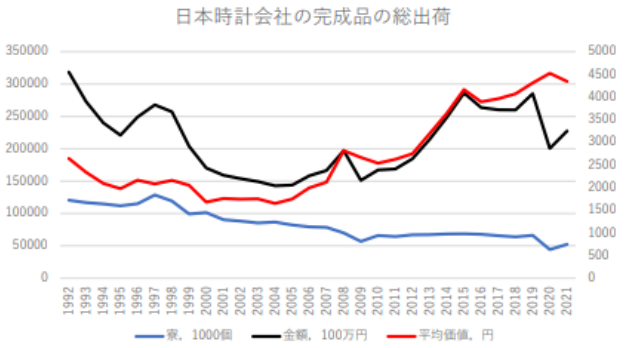
会社	オーナー	設立
Sellita	Miguel Garcia	1950 年
Soprod	Festina	1970 年代/ 2008 年
Vaucher Manufacture	FleurierFamily Sandoz Foundation(75%), Hermès (25%)	2003 年/ 2006 年
La Joux Perret	Citizen Watch	1990 年/ 2012 年
Dubois Dépraz	Family Dubois	1901 年
Christophe Claret	Christophe Claret	1986 年
ConceptoWatch Factory	ValérienJacquet	2006 年

以上、ETA の供給停止に始まった一連の動きによって、スイスの各時計ブランドは内製化を余儀なくなされたことがわかったと思う。ムーブメントの内製化により各ブランドはその開発費を捻出するために、ラグジュアリー化を進める必要性が出てはずである。また、独立系ムーブメントメーカーは、その存続を掛けて、大手とは異なるラインナップ拡充と新興小規模ブランドなどへの販路拡大が、より豊かなラクジュアリー製品を生み出し、スイス時計業界全体の活性化につながった。

5．日本の時計メーカーのラグジュアリー化

これまで説明してきた 2000 年以降スイス時計企業の急速な発展・ラグジュアリー化に対して，日本時計企業はどのように評価が出来るのか？について説明する。

下図は、日本時計会社の完成品総出荷を 1992 年から 2021 年までまとめたものであるが、量を見たら圧倒的減少し、平均価格としては



出典：『日本の時計産業統計』日本時計協会

2005 年以降着実に上昇しており、マクロ的に見ると、日本の時計メーカーも高級化のプロセスは進んでいる。

ａ）技術的イノベーションの位置づけ

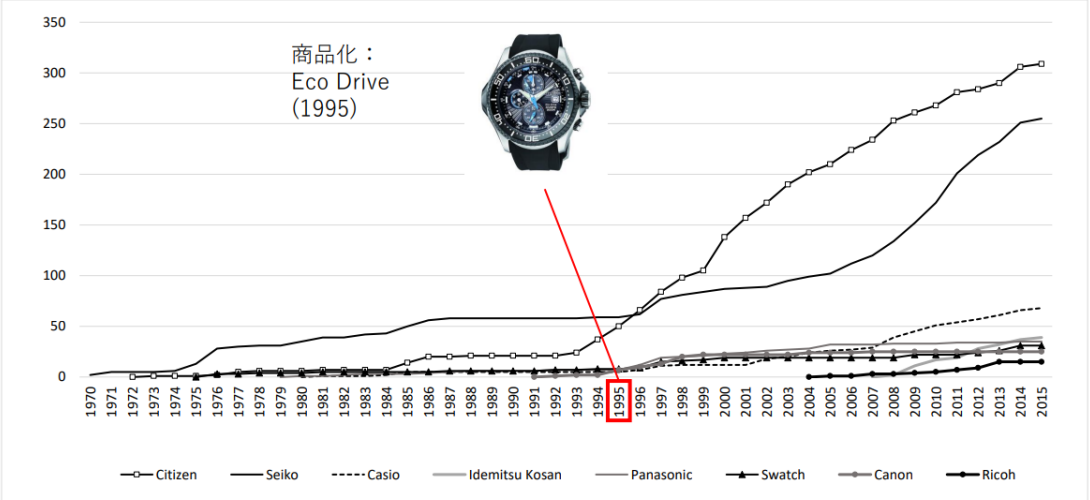
続いて技術的イノベーションはどうだったのかを考えてみたい。

1950-1980 年代、技術的イノベーションはセイコー, シチズン, カシオの成長の基盤であり、「Process innovation としての大量生産システム」と「Product innovation としてのクォーツ時計」が、その最たるものだった。

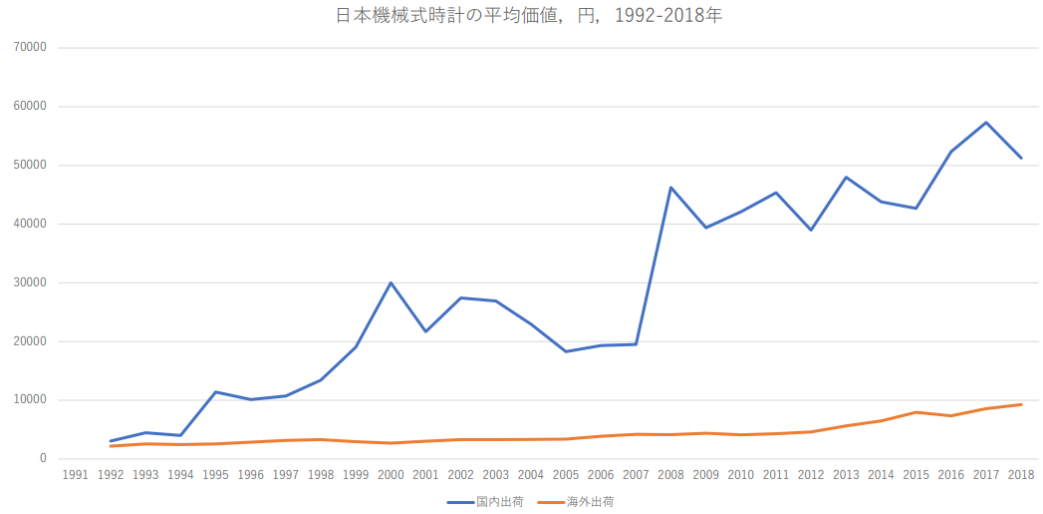
しかしながら、その後の技術的イノベーションは踊り場を迎え、これを打破するために、新製品開発戦略として、日本のエンジニア達は、クォーツ時計の課題解決に乗り出した。第一の課題解決として、取り組んだのが、電池交換の排除であり、その結果として、「Seiko Kinetic (1988)」、「Citizen Eco Drive (1995)」、「Seiko Spring Drive (1999)」などを生み出した。さらに、第二の課題解決として、時刻が狂わない時計を目指し、「Seiko radio wave control (2005)」、「Citizen SATELLITE WAVE: 衛星電波時計 (2011)」などが開発された。

下図は、ソーラー時計に関する特許の累積件数の推移を表したものである。1975 年あたりから、SEIKO が特許の出願を開始し、ある程度の技術まで育成した後は特許の出願が行われていない。その後 1993 年ごろから Citizen が急速に特許出願を伸ばし、SEIKO を逆転。約 10 年経過後の 2003 年頃から再度 SEIKO が出願を伸ばしている。さらに遅れること 2007 年頃から、CASIO の出願が伸び始めており、現在では、こられ３社ともにソーラー時計は一般化されている。

このように、日本の時計メーカーは新しい技術による新製品開発がその成長戦略の基盤となっていることが分かる。



ここで、面白いデータを１つ紹介する。下図は、日本製機械式時計の平均価値の推移を表したものである。興味深いことに、国内出荷向けでは大きく価格を上げているが、一方、海外出荷向けでは、若干の価格増加で留まっている。スイス人である私の目から見ると、非常に興味深く、国内と海外で、未だに区別されていることが読み取れる。



b）日本時計メーカーの動向（SEIKO）

SEIKO のブランド戦略の特徴としては、Swatch-G のように社内に複数のブランドを持ち、それらのブランドがセグメンテーションされている点が挙げられる。SEIKO の新しいアイデンティティは、「日本ものづくりの伝統の代表者」であり、特に、ラクジュアリー分野では、保有していた機械式時計の生産能力を活かした GrandSeiko で 1997 年に機械式時計を投入、2010 年に本格的に海外進出を果たし、海外市場において外国人の経営者、専門店網の拡大などの施策により成功している。

また、Longine のように古いモデルの近代化にも取り組んでいるが、あくまでもヘリテージを「概念」としてではなく、「遺産」として捉えている範囲でしかない。この事実は、ブランドのセグメンテーションが「技術」により行われてことからも示唆されており、高精度な機械式時計は GranadSeiko、GPS は Astron、小型クオーツ時計は Lukia、日本の伝統的知識は Credor などに区分されている。

また、ブランドポートフォリオとして、海外市場と国内市場で異なる動きをしている二重ボートフォリオを行っている点が興味深い。

ｃ）日本時計メーカーの動向（CITIZEN）

CITIZEN のブランド戦略は、グローバル M&A として、ムーブメントから完成品への移動を図ろうとしている。

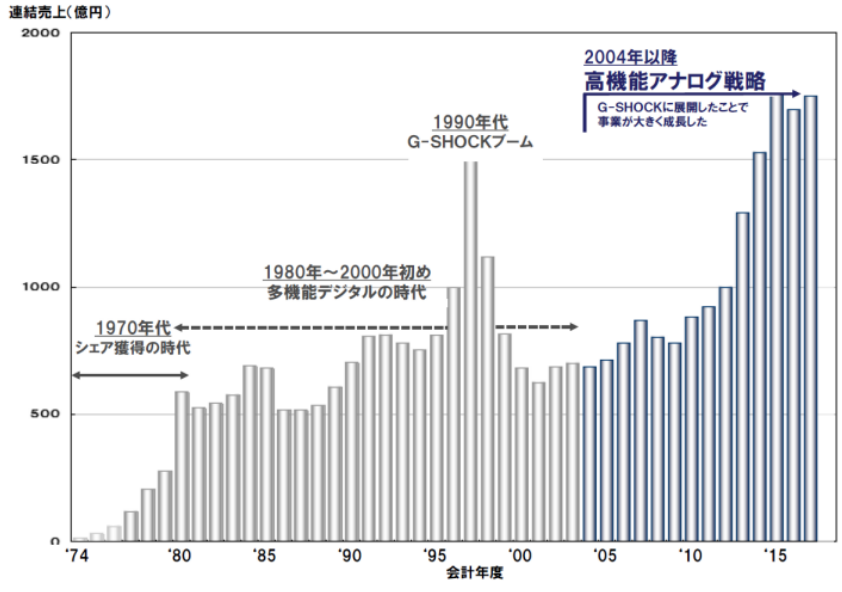
CITIZEN の元々の戦略は、ムーブメントの大量生産であり、1985 年には 6580 万個、 2000 年には 3 億 1760 万個の生産により、世界一位の生産量を誇った。しかし、その弊害として、「CITIZEN」のブランド知名度の低下をもたらし、さらには、2000 年以降，中国の電子時計ムーブメント製造企業からの競争激化により、ついに 2010 年には･　シチズンは赤字転落となった。

そこで、M&A を通してグローバルブランドポートフォリオの形成するため、2008 年の Bulova（アメリカ）から始まり、2012 年に傘下に機械式ムーブメントの製造企業である La Joux-Perret（スイス）、部品メーカー、時計ブランドの Arnold & Son（イギリス）を持つ Protor Holding（スイス）などを買収し、2012 年に新しい戦略として、「From a product to a brand」を打ち出し、2016 年には Frederique Constant（スイス）を買収した。

また、CITIZEN も SEIKO と同様に、国内と海外では異なる動きをしている。

ｄ）日本時計メーカーの動向（CASIO）

CASIO のブランド戦略は、シングルブランド戦略と呼ぶべきもので、ＲＯＬＥＸやオーデマ・ピゲと同様に安定のアイコニック製品である「G-Shock」に基づいて成長を模索する戦略である。



1974 年に、ディジタル時計の開発・販売によって時計ビジネスに参入した CASIO の転換点は、1983 年に発売された「G-Shock」であり、1990 年代半ばから現在にかけて、カシ

オ時計部門売上高の約半分を占めている。しかし、その過程は決して平坦ではくなく、1997年の G-Shock ブームとその後の衰退を経験し、 2004 年に、新しい戦略として、「国内市場とグローバル市場を区別しない」、「高品質のアナログ時計投入」、「新しい技術（ソーラー，GPS など）への注力」、「新しいブランド（Oceanus, Edifice, Sheen）」を矢継ぎ早に実行し、下図の売上推移が示すように、着実に成果を上げている。

６．終わりに

スイス時計企業は 1990 年代以降世界ナンバーワンに戻ったが, 2000 年以降にラクジュアリープロセスが導入されるという非常に大きな転換であった。そして、ラクジュアリーを超える超高級化（スーパーラクジュアリー）とも言うべき転換を可能にしたのは、新しい顧客である中国人、欧米の新世代（Y 世代、Z 世代）である。さらに、これらの新しい顧客は、伝統に縛られること無く新しいメッセージを発揮しており、これに合わせて、新しい戦略、新しい概念、新しい商品が必要であるとうのが、本日の 1 つ目のメッセージである。

もう一つのメッセージとしては、競争優位は依然として「ヘリテージ」経営だが、ヘリテージは歴史から概念と捉えるので、近代ラグジュアリー戦略である。概念を補足説明する例として、出発点を考えて欲しい。元々時計の技術が無かったリシャール・ミルの例を思い出してもらえば分かるように、出発点は技術では無い。かれらの出発点、すなわち、概念はハイパーテクノロジーであった。時計製造技術はオーデマ・ピゲに依存していた。1980 年代、90 年代は、確かにヘリテージ＝歴史であったが、現在は歴史ではなく、もっと新しいアイデンティティである。

最後に、日本の時計メーカーがスイスの時計産業から何が学べるのかを考えてみると、次の点が挙げられる。

・ 研究開発／製造／マーケティングの統合

スイスでは、研究開発→製造→マーケティングというリレー形式というか垂直的な分業が行われていない。これらの機能は統合され、一緒に頑張って概念を作るという点に注力している。

・ ヘリテージ（概念）

ヘリテージを旧来の歴史ではなく、概念という新しく幅広い捉え方をしていること

・ トップダウンの経営

オーナー社長は、良いアイデンティティがあると思えば、それを

実現するために、ヘリテージを開発している。

以上のように、時計産業のラグジュアリー化戦略について説明してきたが、右図の本には、時計産業だけではなく、ファッションなどヨーロッパのラグジュアリー産業の動きをまとめた本が出版されるので、興味がある方は、是非一読して欲しい。

質疑応答

Q：スイスでは、ロイヤルオークなどアイコニック製品をヘリテージとして継続させるなど、戦略に一貫性を感じるが、日本メーカーは、保有ブランドに一貫性を感じないとの話だったが、このような日本メーカーに対して、このようにしたら良いという提言があれば教えて欲しい。

A：毎回、同じような質問を受けるが、私はビジネスマンではなく研究者である。このため、上手に分析することは得意であり、ウブロやリシャール・ミルを見ても分かるように、アイデンティティがポイントであることは分かるが、なぜ、ウブロのフュージョン、リシャール・ミルのハイパーテクノロジーというような概念が出てきたのかはわからない。

いずれにしても、重要な点はアイデンティティであると思う。例えば、社内だけでなく、時計産業以外の異業種の方とブレインストーミングをしてみるのはどうだろうか？そこでは、既存の日本時計ブランド（SEIKO、CITIZEN、CASIO）以外のブランドを始めるにはというような切り口で考えてみるのは一つのやり方ではないか？そうすると、新たなスタートアップするための概念を出すことができるかもしれない。

Q：ヘリテージが歴史だけでなく、コンセプトして、新たに作り上げられるという点に勇気づけられた。日本の時計技術は、電子技術がユニークな点であるが、スイスの時計技術は機械式時計が中心となっており、ヘリテージを考える上ではやはり機械式が中心にならざる負えないのか？

A：直接的にはヘリテージに歴史は入っていないと説明してきたが、機械式時計は歴史の一部であるというのは事実である。しかし、時計という商品が現在我々の日常生活で必要不可欠なものかと言われれば、そうでは無いと言えるのも事実だと思う。つまり、時計はアクセサリーであり、特に冷たくないアクセサリーとして、男性が好きな歯車や機構の動きなどを魅せることができる機械式時計が好まれると考えている。また、ラグジュアリー商品は価格の高さを説明するため、職人が作ったというメッセージを活用しており、この点からも職人が手掛けていない電気・電子技術が中心となっているクォーツ時計は難しいと思う。

Q：本日はスイス時計が中心で、一部日本の時計メーカーの動きについても言及して頂いたが、中国でも新興ブランドが伸びてきている。先生の知見の中で、ラグジュアリー化されているあるいはラグジュアリー化する可能性がある中国ブランドがあれば教えて欲しい

A：中国ブランドはすごく発展しているが、海外にはあまり売れていない。彼らは中国国内向けビジネスモデルとして、中国人に顧客に認められるように「我々にこんなに良いものが作れる」という技術中心のコミュニケーションとなっている。例えば、ツールビヨンを作っても、スイスで作られる製品と同じものが我々中国メーカーも作ることができるという表現になっている。宣伝でも同じ例が見られ、オメガが月に行った時計という謳い文句を使っているが、FIYATA という中国ブランドも宇宙に行った時計というアピールをしている。別の観点から見ると、中国の新世代はナショナリストであると言われており、彼らに向けては自国である中国メーカーが高い技術力を持っているということをアピールすることは非常に大事なことである。

これらの中国メーカーの戦略は、ラグジュアリーという方向ではなく、中国人のための中国人による時計というヘリテージを用いた国内向けのものであり、現在の知見では、ラクジュアリー化を目指しているブランドは無い。

Q：スイスの時計メーカーに設計者やデザイナーは何名ぐらいいるのでしょうか？
日本企業は多くの新製品や新モデルを日々作っており、スイス時計メーカーは日本に比べ、新製品や新モデルが少なく、従来商品のマイナーチェンジが多いイメージがあるため、日本メーカーほど必要無いのではと考えています。

A：確かに、ROLEX は、大量に新商品を作っていない。また、OMEGA についても同様に多くの新モデルを展開していない。しかし、スイスではデザイナーはモノをデザインするだけでなく、概念をデザインすることをより重要な仕事して取り組んでおり、ウブロのように、近代デザインと時計を組み合わせるために、フュージョンという概念を作り出している。これの概念に基づいて、EPFL に新しいセラミック開発を委託するなどは技術者が行っているが、概念を実現するための活動が中心となるため、あまり自由ではない。
スイスの時計メーカーの設計者やデザイナーの人数は分からないが、以上説明したように、仕事のやり方、内容が日本とスイスでは異なるため、単純な人数比較にはあまり意味が無いと思われる。

（特別講演報告担当：重城　幸一郎）

報　告

日本時計学会 2022 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ついて

日本時計学会企画委員会　　木村　南**

2022 年度マイクロメカトロニクス学術講演会は初の対面と Web のハイブリッド開催となり 4 社 1 大学から合計 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「次世代型スプリングドライブ Cal.9RA の開発」を発表されたセイコーエプソン株式会社佐藤直氏が最高評価を得て一般社団法人日本時計学会 2022 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.

写真 1　2022 年度ベストプレゼンテーション賞受賞
セイコーエプソン株式会社　佐藤　直氏

また受賞後に佐藤氏より「この度は日本時計学会学術講演会ベストプレゼンテーション賞という大変名誉ある賞をいただき, 身に余る光栄です.

今回の発表内容は, ぜんまい駆動式電子調速時計であるスプリングドライブを約 20 年ぶりに一新するという試みの中で, 特に課題となった技術テーマについて検討・開発を行ったものです. 開発には多くの方々が関わっており, 今回の賞は私個人の受賞ではなく私が代表していただいたものと思っています. 開発に携わったすべての方々及び, 資料作成のご指導いただきました関係者の皆様に心より感謝申し上げます.

私としては入社以来初めて開発当初から携わった基礎機種であり, その開発でこのような賞を頂けたことは大変うれしく, 感激しております. また Cal. 9RA は多くの特徴を持ちますが, 発表時間の関係で, 商品の魅力を向上させるその他の開発要素についてお伝えし切れなかったことは少々残念ではあります.

学術講演会の場では業界の皆様方から非常に興味深い発表を聴講させていただくことができ, 様々な考え方に触れることで視野が広がり, 私自身とても成長に繋げることができました. そのような中でベストプレゼンテーション賞をいただいたことで, 皆様から注目と期待をしていただいているということを改めて深く実感しました.

まだまだ未熟ではありますが, 今後もお客様の皆様と時計学会発展のために時計開発業務に尽力して参ります. この度は本当にありがとうございました.」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中央大学土肥徹次先生のご協力に感謝する.

*　原稿受付 2022 年 11 月 24 日
**　神奈川工科大学

製品紹介

「Orient Star」コンテンポラリーコレクション初となるスケルトンモデルのご紹介

- 洗練された上質感とリラックス感を兼ね備えたスケルトンウオッチ -

セイコーエプソン株式会社

エプソンは、「Orient Star」のコンテンポラリーコレクションからシリコン製がんぎ車や 70 時間パワーリザーブが特長の最新ムーブメントを搭載する『スケルトン』を 2022 年 11 月 10 日に発売いたしました。モダンでスタイリッシュな新しいデザインを用い、凝ったディテールによってムーブメント全体で宇宙を表現するユニークなモデルです。

1951 年に誕生したオリエントスターは、70 周年を迎えた 2021 年に高度な先端技術と審美性を併せ持つ新世代の「スケルトン」を発売し、「NOWHERE, NOW HERE（どこにもないもの。それがいま、ここにある。）」を体現するマイルストーンを築きました。クラシックコレクションに続く新作はコンテンポラリーコレクション初のスケルトンモデルです。この『スケルトン』は、グレーめっきを施した新色のムーブメントや、現代のさまざまなシーンで使いやすいデザインが特長です。

ワークスタイルの多様化によってオンとオフの境界が曖昧になった今、時計に求められる価値も変化してきました。この『スケルトン』では、フォーマル過ぎず、カジュアル過ぎず、すなわち洗練された上質感とリラックス感の両方がモダンでスタイリッシュなデザインに表現されています。高品質ステンレススチール（SUS316L）に細かな筋目と鏡面仕上げを効果的に施すことによって、エッジの効いたケースやメタルバンドに加え、グレーを基調とした文字板は、洗練された上質感とスタイリッシュな印象を与えます。また、径 39 ㎜、全厚 10.8 ㎜というコンパクトでスリムなケースや、ピッチの短いH駒を使用し腕なじみに配慮した新しいメタルバンド、視認性の高い文字板、アクセントを添えるブルーの針などは、普段使いしやすいリラックス感を演出します。

ケースの厚みは 10.8 ㎜、またケース径（横）は 39 ㎜ のコンパクト設計で心地よい装着感が味わえます。

ピッチの短いH型の駒を使用した腕なじみの良いメタルバンド。立体的な凸型のエンドピースは力強さも感じさせます。

ムーブメントの骨格のみを残し、内部の機構全体が見えるようにした「スケルトン」は、機械式ならではの表現スタイルとして親しまれ、2021 年の新世代モデル発表により、オリエントスターの新たなアイコンを担っています。最新のコンテンポラリーコレクション『スケルトン』に搭載されているのは、このモデルのスタイリッシュなデザインを引き立てる自社製 F8B61 ムーブメントです。

手巻きムーブメントの F8B61 は、日差＋15～－5 秒の高精度を実現するだけでなく、先端の MEMS 加工技術によるシリコン製がんぎ車を搭載し、パワーリザーブを 70 時間以上に延ばして実用性を大幅に向上させています。さらにムーブメントの地板や受けにグレーのめっき処理を施し、深遠な宇宙空間を象徴的に表現している点が特長です。エプソンの独自技術＊を用いた特許取得済みのシリコン製がんぎ車は、渦巻き状の形状や鮮やかなブルーが天の川銀河をイメージさせ、彗星を思わせる形状の 9 時位置にあるテンプ周辺のムーブメントパーツなど、すべてがハーモニーを成して宇宙のロマンへと誘います。

自社開発のシリコン製がんぎ車は、天の川銀河系をイメージした鮮やかなブルーの渦形状で形作られています。

9時位置にあるムーブメントの特徴的な抜き形状は、彗星特有の2つの尾を持つ形状をモチーフとし、端面には高精度な面取り加工を施すことで、美しい輝きを実現しています。

ケースの裏側からは、グレーにめっき処理され、切削による美しい波目模様を施した優美なムーブメントが覗かせます。

漆黒の宇宙空間を想起させるため、落ち着きのあるグレー色でめっき処理したパーツの数々。

モダンでスタイリッシュなデザインと、宇宙全体を表現する手巻きスケルトンムーブメントを融合した『スケルトン』は、他に類のないユニークなモデルです。メタルバンドに加えグレーの本ワニ皮革バンド が付属します。

＊独自技術

回転ずれ防止形状: 日本:特許第 6915602 号、米国:US11409244、欧州:EP3644128、中国:CN111090229

バネ性構造: 日本:特許第 6891622 号、特許第 7107405 号、米国:US10747178、欧州:EP3396471、中国:CN108803297

鮮やかな青色: 日本:特許第 6908064 号

RK-AZ0102N
¥341,000
(¥310,000+税)

― 商品概要 ―

コレクション	コンテンポラリー
商品名	スケルトン
発売日	2022 年 11 月 10 日
品番	RK-AZ0102N
メーカー 希望小売価格	¥341,000 (¥310,000+税)
ムーブメント	自社製キャリバーF8B61　手巻き
駆動時間	70 時間以上
精度	日差＋15 秒～－5 秒
ケース素材	ステンレススチール（SUS316L）
ケースサイズ	縦 46.5mm ／ 横 39.00mm ／ 厚さ 10.8mm
ガラス	表：両球面サファイアクリスタル（SAR コーティング） 裏：サファイアクリスタル
バンド	ステンレススチール（SUS316L）／プッシュ三つ折式（中留）／幅 20mm 本ワニ皮革替えバンド付き
ダイヤル色	グレー
主な特徴	日常生活用強化防水（5 気圧）、パワーリザーブ表示機能 秒針停止装置付き、22 石、シースルーバック

製品紹介

製品紹介

新開発のデュラテクト DLC ブルー※1を配した「Blue Universe Collection」が登場

『シチズン アテッサ』ブランド誕生 35 周年記念限定モデル第 3 弾

シチズン時計株式会社

『シチズン アテッサ』
エコ・ドライブ
GPS 衛星電波時計
品番 CC4066-69E

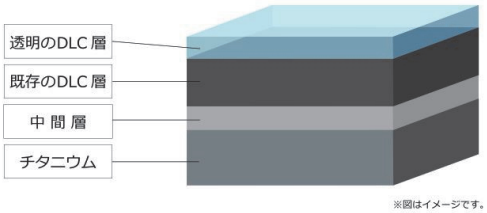
シチズン時計株式会社は、最先端技術を搭載し、グローバルに活躍するビジネスマンをサポートする『CITIZEN ATTESA（シチズン アテッサ）』ブランド誕生 35 周年記念第 3 弾として、ACT Line から、ベゼルやバンドの中駒に新開発のデュラテクト DLC ブルー（以下 DLC ブルー）を施した数量限定モデルを 2022 年 11 月 10 日に発売しました。

シチズンがコーポレートパートナー契約を結ぶ株式会社 ispace（所在地：東京都中央区／Founder, Representative Director & CEO：袴田 武史）の民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」のランダー（月着陸船）の着陸脚パーツには、シチズンのスーパーチタニウム™※2 が使用されています。「HAKUTO-R」は、2022 年末頃に打ち上げを予定※しており、「Blue Universe Collection（ブルーユニバースコレクション）」は、スーパーチタニウム™が宇宙へ飛び立っていくことに思いを馳せ、美しく輝く宇宙をイメージし誕生しました。※打ち上げ時期は 2022 年 10 月時点の想定です。

DLC ブルーをベゼル とバンドの中駒 に施し、針やインデックスのシルバーカラーとのコントラストが美しい仕上がりです。機能面では、時刻情報のみの受信では、世界最速レベル※3 の「最短 3 秒」で受信、ホームタイムの時針と分針を高速で稼働し時刻を表示する光発電エコ・ドライブ GPS 衛星電波時計※4 の最上位ムーブメント F950 を搭載しています。文字板には漆黒の宇宙空間に浮かぶ星々をラメで表現しており、限定ならではの美しい仕上がりになっています。

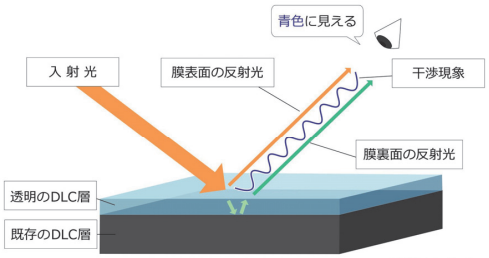
【技術説明】

「DLC ブルー」は、独特の深い青色を素材表面に施すことができる表面硬化処理技術で、キズに強く、滑らかな触り心地のデュラテクト DLC の特性を維持しつつ青色を実現。シャボン玉が虹色に見える現象と同じ「薄膜干渉」という原理に着目し、高度な DLC 成膜技術を用いて開発しました。



※図はイメージです。

「DLC」とは Diamond-Like Carbon の略で、ダイヤモンドと黒鉛(えんぴつの芯)の間の性質を持つ炭素の膜です。炭素（C）同士のつながり方次第で、黒鉛のような黒色にもなり、ダイヤモンドのような透明にもなります。



※図はイメージです。

今回、成膜条件を最適化したダイヤモンド寄りの透明に近い DLC 膜を開発。これを通常の DLC 膜（黒色）の上に成膜して積層構造としました。これに光を当てると、透明の DLC 膜の表面で反射する光と、透過して下の黒色の DLC 膜表面で反射する光とに分かれ、それぞれが干渉し合う「薄膜干渉」を起こします。その際、膜の厚みによって、特定の波長が強くなったり、弱くなったりすることで色が変わりますが、当社は、数十ナノメートルレベルで膜厚を均一に制御する高度な技術を用いて青色の波長を強め、DLC のみを用いて深い青色を生み出すことに成功しました。

デュラテクト DLC はすりキズに強いだけでなく、非常に滑らかな触り心地が特長です。シチズンは業界でいち早く、2001 年から腕時計に DLC を採用し、男性モデルを中心に数多くの商品を展開していますが、ブラックに限られていた DLC に新色「DLC ブルー」が登場することで、デザインのバリエーションが広がります。

【商品仕様】

ブランド/商品名	シチズン アテッサ/ ACT Line エコ・ドライブ GPS 衛星電波時計 F950 ダブルダイレクトフライト※6 Blue Universe Collection
商品番号	CC4066-69E
発売日	2022 年 11 月 10 日
限定数量	世界限定 1,000 本
希望小売価格	319,000 円（税抜価格 290,000 円）
ケース/バンド	スーパーチタニウム™（デュラテクト DLC・デュラテクト DLC ブルー）
ガラス	デュアル球面サファイアガラス（クラリティ・コーティング※7）
ケース径/厚み	径 44.6mm ／ 厚み 16.0mm（設計値）
主な機能	■Cal.F950 / 月差±5 秒（非受信時） / 光発電エコ・ドライブ / フル充電時約 5 年可動（パワーセーブ作動時） / パワーセーブ機能 / 衛星電波受信機能・位置情報取得機能・自動時刻受信機能 / ワールドタイム機能（39 時差） / パーフェックス※8 / デュアルタイム表示 / クロノグラフ機能（1/20 秒・24 時間） / アラーム / ライトレベルインディケーター※9 / 充電量表示機能 / パーペチュアルカレンダー※10 / サマータイム機能 ■夜光（針＋インデックス）■10 気圧防水■耐メタルアレルギー■第 1 種耐磁時計 ■フィットアジャスター*11■wena 3 替えバンド対応

※1 :デュラテクト DLC ブルー：デュラテクトはシチズン独自の硬化技術。ステンレスやチタニウムなどの金属表面硬度を高め、優れた耐摩耗性により、すりキズや、小キズから時計本体を守り、素材の輝きを長時間保つ技術の総称です。DLC は Diamond-Like Carbon の略で、工業製品にも使用されている耐摩耗性に優れた技術です。デュラテクト DLC ブルーは、シチズン独自のデュラテクト DLC のキズに強く、滑らかな触り心地という性質を維持したまま、独特の深い青色を表現できる高度な DLC 成膜技術です。デュラテクト DLC と同等のビッカース硬度 1,000ー1,400HV を実現しています。（ステンレスのビッカース硬度は約 200Hv）

※2 スーパーチタニウム™：シチズン独自の技術により、チタニウムに表面硬化技術デュラテクトを施しステンレスの約5倍以上の硬さを実現。キズに強く、軽く肌にもやさしいので、快適な着け心地で使用できます。（ステンレスのビッカース硬度は約200Hv）

※3 世界最速レベル：アナログ式光発電GPS 衛星腕時計として。2022 年 9月当社調べ。

※4 エコ・ドライブGPS衛星電波時計：「エコ・ドライブ」は定期的な電池交換不要の光発電時計で、シチズン独自の技術です。時計で初めて「エコマーク商品」に認定されました。地上から約2万km、宇宙空間を周回するGPS衛星から位置・時刻情報を取得し、時刻・カレンダーを自動で修正。地球上のどこにいても広い空がある限り正確な時刻を得ることができます。

※5 デュラテクトDLC：デュラテクトはシチズン独自の硬化技術。ステンレスやチタニウムなどの金属表面硬度を高め、優れた耐摩耗性により、すりキズや、小キズから時計本体を守り、素材の輝きを長時間保つ技術の総称です。DLCはDiamond-Like Carbonの略で、工業製品にも使用されている耐摩耗性に優れた技術です。シチズンのデュラテクトDLCは中間素材にこだわることで密着性を向上し、剥がれにくく耐久性にすぐれています。すりキズに強いだけでなく、美しい艶をもつブラックカラーと触り心地が非常に滑らかなのが特長です。ビッカース硬度1,000-1,400Hvを実現しています。（ステンレスのビッカース硬度は約200Hv）

※6ダブルダイレクトフライト：「ダイレクトフライト」は都市選択ワールドタイム機能。りゅうずのみの簡単操作で、世界39時差の時刻とカレンダーを表示。「ダブルダイレクトフライト」は、さらに、ホームタイムとローカルタイムに設定した2つの都市時刻を同時に表示し、1ステップで入れ替えることができるデュアルタイム機能を搭載しています。

※7クラリティ・コーティング：サファイアガラスの表裏面にシリコン化合物を多層構造コーティングすることにより、光の反射を抑えて時計の文字板を見やすくしました。さらに高機能化を進め、表面に撥水膜を付加することで約99%の透過率※や、耐久性と防汚性の向上を実現しました。※透過率は許容差として約1%の差異が生じる場合があります。

※8パーフェックス：「JIS 1種耐磁」「衝撃検知機能」「針自動補正機能」という三位一体の機能で、エコ・ドライブGPS衛星電波時計やエコ・ドライブ電波時計のより正確な時刻表示を可能にしたシチズン独自の先進技術です。

※9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。

※10パーペチュアルカレンダー：2100年2月28日までのうるう年などの月末のカレンダー修正を一切不要にしたカレンダー機能です。

※11 フィットアジャスター：中留めボタンを押すことで、簡単にバンドの長さを3段階（最大約7mm）の微調整が可能です。

＜株式会社ispaceとは＞
「Expand our planet. Expand our future. ~人類の生活圏を宇宙に広げ、持続性のある世界へ~」をビジョンに掲げ、月面資源開発に取り組んでいる宇宙スタートアップ企業。2022年7月時点で総計約268億円超の資金を調達。月への高頻度かつ低コストの輸送サービスを提供することを目的とした小型のランダー（月着陸船）と、月探査用のローバー（月面探査車）を開発。民間企業が月でビジネスを行うためのゲートウェイとなることを目指し、月市場への参入をサポートするための月データビジネスコンセプトの立ち上げも行っています。http://ispace-inc.com/jpn

●Eco-Drive(エコ・ドライブ)、スーパーチタニウム、DURATECT（デュラテクト）、FIT-ADJUSTER（フィットアジャスター）、Light-Level Indicator（ライトレベル インディケーター）、Direct Flight(ダイレクトフライト)、ダブルダイレクトフライト、Perfex(パーフェックス)、およびクラリティ・コーティングはシチズン時計株式会社の登録商標または商標です。
●wena はソニー株式会社の登録商標です。

会　報

一般社団法人 日本時計学会 2022 年 4 月度 理事会議事録
― 2022 年度 第 3 回理事会 ―

（記録：常葉　輝久　2022 年 4 月 22 日）

1．開催日時：2022 年 4 月 22 日（金）16:00～17:00
2．場所：中央大学　後楽園キャンパス　2 号館 2 階 2221 号室（製図室），オンライン同時開催
3．出席者：
<理事>大隅，重城，足立，飯田，今村，梅田，大谷，木村，佐々木，鈴木，増田，常葉（以上 12 名）
<監事>岸（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>岩崎，小笠原，小川，鴫野，槌谷，土肥，萩田，廣川，藤沢，横山（以上 10 名）

4．審議事項
（1）2022 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　今村理事より説明）
マイクロメカトロニクス 2022 年 6 月号(Vol.66，No.226)に向けて，入稿状況等の説明がされた．
・研究／技術報告　入稿済み，校閲中 5 件
・依頼原稿関連　　入稿済み，校閲中 5 件
（3）春季研究会について（小笠原運営委員より説明，幹事会社：セイコーウオッチ（株））
講師の会社の承認待ちとなっていたが，承認が通らずに正式に断りが入った．
別テーマを再検討する事となり，次回理事運営委員会で検討結果を報告予定．
（4）見学会について
「羽田クロノゲート」の施設の見学自体は再開になったが，団体での利用見合わせとなっている為，施設の見学状況を継続確認し，見学会の開催タイミングを継続検討する事となった．
（5）学術講演会について
中央大学では通常授業が行われている為，会場での開催が可能な見込み．
新型コロナウイルス感染症の状況，大学の受入れ方針を継続確認した上で，会場のみ，オンラインのみ，会場とオンラインの同時開催に関しても継続検討を行う．
（6）青木賞選考について（藤沢運営委員より説明）
・5 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
（7）監事からの提案について
追加検討報告は無し．次回理事運営委員会に向けて継続検討となった．
（8）次回理事会
第 4 回理事会：2022 年 6 月 17 日（金）16:00～17:00
新型コロナウイルス感染症の状況に合わせて，会場，オンライン，併用を検討する

5．報告事項
（1）会員数状況（2022 年 4 月 22 日承認後）
・正会員　134 名（-2），　学生会員 2 名（±0），　賛助会員 15 社（±0）（81 口（±0））
・入会：　なし
・退会：　2 名
（2）その他
なし

以上

一般社団法人 日本時計学会 2022 年 6 月度 理事会議事録
― 2022 年度 第 4 回理事会 ―

（記録：常葉　輝久　2022 年 6 月 17 日）

１．開催日時：2022 年 6 月 17 日（金）16:00～17:45

２．場所：中央大学　後楽園キャンパス　2 号館 2 階 2221 号室（製図室）　，オンライン同時開催

３．出席者：

<理事>大隅，重城，足立，飯田，今村，梅田，大谷，木村，佐々木，鈴木，中島，増田，常葉（以上 13 名）
<監事>岸，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，小笠原，小川，鴫野，土肥，永田，萩田，廣川，藤沢，横山（以上 10 名）

４．審議事項

（１）2022 年 4 月度理事会議事録確認

4 月度（第 3 回）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 2022 年 12 月号(Vol.66，No.227)に向けて，入稿状況等の説明がされた．
　- 研究／技術報告　入稿済み，校閲中 1 件
　- 依頼原稿関連　　入稿待ち，校正中 2 件

・ニッセイエブロ社より印刷材料の価格高騰により価格改定の申し入れがあり，審議の上承認された．
　280 部発行した場合，7,260 円金額 UP となる見込み．
　本文上質紙：0.6 円／枚 UP　，広告項のマットコート紙：1,500 円 UP　(280 部発行想定)

・図書館や研究機関向けに学術情報サービスを提供している EBSCO(米国企業)から問い合わせが有り，EBSCOhost(学術論文データベース)に「マイクロメカトロニクス」の記事の収録依頼があった．情報収集結果の共有と審議をした結果，編集委員を中心に EBSCO と収録に向けて契約を進める事になった．

（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 56 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．

「女性向け GPS ソーラーウオッチの開発」
2021 年度　Vol.65, No.224
著者：杉本 亮

（４）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）
審議の結果，下の内容で学術講演会開催に向けて進める事となった．

・9 月 16 日での会場とオンラインの同時開催．
・会場は，3 号館 3300 号室として，新型コロナウイルス感染症を考慮し，定員 60 名とする．
・オンラインツールは，会場での使用可能状況を確認した上で，Webex，または，Zoom とする．
・申し込み募集の際に，会場参加，または，オンライン参加の選択をする形式とし，会場参加に関しては，定員 60 名の先着順となる事を明記する．
・予稿集は，昨年同様，PDF データでの配布とする．
・実施：学術講演，特別講演，青木賞表彰
　非実施：技術交流会，休憩コーナー，製品展示セッション
　ベストプレゼンテーション賞は，昨年同様、11 月度の理事運営委員会で確定．
・学術講演会参加費：昨年同様，各社協賛金：20,000 円とする．
・講演発表者は，会場での発表を基本として，特別な理由がある場合は，オンラインでの発表も可とする．
・各セッションの司会は，事業委員会，学術講演会司会担当で会話の上決定．

・講演申込締切：7 月 25 日（月），原稿締切：8 月 22 日（月）

（5）夏季研究会について（小笠原運営委員より説明，幹事会社：セイコーウォッチ（株））

以下の開催案が提案され承認されたが，学術講演会の特別講演に向けて，講師と日時を含めた再確認となった．講師に承諾が得られた場合は，学術講演会の特別講演での開催となる．

- テーマ案：ラグジュアリー時計市場に関して，近年のスイスの時計業界に関して
- 講師：大阪大学　Pierre-Yves Donzé 教授

（6）見学会について

「羽田クロノゲート」の施設の団体見学の人数枠がまだ少ないため，施設の見学状況を継続確認し，見学会の開催タイミングを継続検討する事となった．

（7）新入会員の承認

新入会員は無し．

（8）監事からの提案について

追加検討報告は無し．次回理事運営委員会に向けて継続検討となった．

（9）次回理事会

第 5 回理事会：2022 年 9 月 16 日（金）　10:30～11:45

中央大学　後楽園キャンパス　3 号館 3300 号室　，　オンライン同時開催

5．報告事項

（1）会員数状況（2022 年 6 月 17 日承認後）

・正会員　134 名（±0），　学生会員 2 名（±0），　賛助会員 14 社（-1）（80 口（-1））

・入会：　なし

・退会：　1 社

（2）その他

無し。

以上

一般社団法人 日本時計学会 2022 年 9 月度 理事会議事録
― 2022 年度 第 5 回理事会 ―

（記録：常葉　輝久　2022 年 9 月 16 日）

1．開催日時：2022 年 9 月 16 日（金）10:30～11:45

2．場所：中央大学　後楽園キャンパス　3 号館 3 階 3300 号室　，　オンライン同時開催

3．出席者：

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

<監事>岸，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，小笠原，小川，鴫野，土肥，永田，萩田，廣川，藤沢，横山（以上 10 名）

4．審議事項

（1）2022 年 6 月度理事会議事録確認

6 月度（第 4 回）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 2022 年 12 月号(Vol.66，No.227)に向けて，入稿状況等の説明がされた．

・研究／技術報告　入稿済み，校閲中 1 件

・依頼原稿関連　入稿待ち 1 件

・学術講演会報告記事担当：横山運営委員

・マイクロメカトロニクス Vol.66,No.226 の発行後に論文著者名，企業名に誤植がある事が判りデータの差替え対応を行った．マイクロメカトロニクス Vol.66,No.227 へ訂正記事を掲載予定．

・EBSCOhost(学術論文データベース)に「マイクロメカトロニクス」の記事収録に対して，
エンバーゴ期間（会員のみ閲覧可能な期間）を 1 年とする．

（3）夏季研究会について

・日時を含めて講師に承認が得られた為，提案されていたテーマが学術講演会での特別講演での開催となった．
- テーマ案：ラグジュアリー時計市場に関して，近年のスイスの時計業界に関して
- 講師：大阪大学　Pierre-Yves Donzé 教授

（4）見学会について　（廣川運営委員より報告，幹事会社：カシオ計算機（株））

「羽田クロノゲート」の施設の団体見学の人数枠がまだ少ないため，施設の見学状況を継続確認し，見学会の開催タイミングを継続検討する事となった．

（5）秋季研究会について　（横山運営委員より報告，幹事会社：セイコータイムクリエーション（株））

以下の開催案が提案され，承認された．

会場となる教室の空き状況に合わせて，開催日時の変更の可能性有り．
- テーマ：クロック技術の系統化調査
- 内容：国立科学博物館 産業技術史資料情報センター発行の「クロック技術の系統化調査報告」をもとに機械式から電子式へ，更に多様化するクロックの技術について講演いただきます．
- 講師：産業技術史資料情報センター　元主任調査員／鈴木　哲郎 氏
- 日時：2022 年 11 月 4 日（金）15:00～16:40
- 会場：中央大学とオンライン（ツールとして Webex を使用予定）によるハイブリッド開催

（6）監事からの提案について

追加検討報告は無し．次回理事運営委員会に向けて継続検討となった．

（7）新入会員の承認

・正会員 1 名，学生会員 1 名の入会申し込みがあり承認された．

（8）次回理事会

第 6 回理事会：2022 年 11 月 4 日（金）　16:00～17:00

新型コロナウイルス感染症の状況に合わせて，会場，オンライン，併用を検討する．

秋季研究会の開催日時に合わせて変更の可能性有り．

（9）2022 年度ベストプレゼンテーション賞について

会場とオンラインのハイブリッド開催の学術講演会に合わせて，選考方法，発表について下記の提案がされ，承認された．

・審査委員

理事運営委員会にて，セッション 1、セッション 2 の審査委員を事前に依頼決定する．

会場参加の審査員：選考用紙を会場で配布→審査→企画委員会

オンライン参加の審査員：選考用紙をメールで送信→審査→事務局→企画委員会

・発表

次回理事運営委員会で結果報告．

学会誌への受賞報告記事を掲載し，表彰者へは表彰状を別途郵送する．

5．報告事項

（1）会員数状況（2022 年 9 月 16 日承認後）

・正会員　134 名（±0），　学生会員 3 名（+1），　賛助会員 14 社（±0）（80 口（±0））
・入会：　2 名
・退会：　1 名

（2）その他

なし

以上

第56回　青木賞表彰委員会報告

第56回青木賞選考は，マイクロメカトロニクス2020年度 Vol.64，No.222-223 及び 2021 年度 Vol.65，No.224-225 に掲載された研究論文1編，技術報告5編，合計6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6名，表彰委員4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2編について，本審査を行なう表彰委員会へ推薦した．

本審査は，これら 2 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 56 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，下記の論文が青木賞表彰論文に決定した．

授賞された中島恭央氏(左)，杉本亮氏(右)

第 56 回青木賞表彰論文 ： 女性向け GPS ソーラーウオッチの開発
マイクロメカトロニクス，Vol.65, No.224，pp.2-11（2021）

執筆者：杉本亮，中島恭央

所　属：セイコーエプソン株式会社

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 56 回青木賞の授賞式は，2022 年 9 月 16 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 大谷親，幹事 今村美由紀，藤沢照彦）

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。活動の幅をより拡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ことが可能です。

詳細につきましてはホームページ（http://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　土肥 徹次

Tel : 03-3817-1832　Fax : 03-3817-1820　e-mail : tokei@msl.mech.chuo-u.ac.jp

お詫びと訂正

本学会誌「Vol. 66, No. 226」の pp. 1-11 に掲載した論文「定荷重ばねの解析に関する考察 ― Votta の式の有効性の確認と定トルクばねの解析への適用 ―」および pp. 12-23 に掲載した論文「定トルクばねの新規解析方法」の著者名に関し誤った記載をしてしまいました．著者諸氏並びに会員の皆様に深くお詫びして訂正させていただきます．なお，学会誌 web 版は訂正済みとなっております．

正誤表

掲載箇所	誤	正
目次 2 箇所	志村穣	志村穣
p.11 参考文献 8)	志村譲	志村穣
p.12 著者名	志村譲	志村穣

編集後記

暗いニュースが多かった 2022 年でしたが、11 月 8 日の夜に皆既月食と天王星食が同時にありました。歳のせいか肉眼では月がぼやけて3つに重なって良く見えず、動画サイトのライブ配信を探して見てみると、こちらは月の表面まで見えそうな鮮明な画像。

肉眼で見えるぼやけた月とライブ配信の月、リアルと言えるのは果たしてどっちなのか？
次にみられるのは約400年後と言われているが、今回の動画は見たい時にいつでも見られる為、中々見られないという希少性が薄れてしまい、少し考え物だなと思ってしまいましたが、身近に天文学が感じられる為にはこのようなる動画も大事だと実感しました。

時計学会の方も学術講演会、研究会、見学会、学会誌等を通じて皆様と共に日本時計学会を盛り上げていければと思っています。引き続き積極的なご協力を宜しくお願い致します。

（鴫野　彰従　記）