

研 究

EU REACH 規制対応 6 価クロム除去剤の開発

赤尾 祐司

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

(2017 年 9 月 21 日受付, 2017 年 11 月 14 日再受付, 2017 年 11 月 15 日採録)

Development of the Hexavalent Chromium (Cr VI) Elimination Agent for EU REACH Regulation

Yuji AKAO

Product Development Department, CITIZEN Watch Co., Ltd.,

6-1-12, Tanashi-cho, Nishi-Tokyo-shi, Tokyo 188-8511, Japan

(Received September 21, 2017, Revised November 14, 2017, Accepted November 15, 2017)

ABSTRACT

From May 2015, leather products come in contact with human skin may not be placed on the EU market by REACH regulation if they are shown to contain over 3 ppm of Hexavalent Chromium (Cr VI). For watch strap, a large amount of chromium is contained because of chromium tanning. Even if only Trivalent Chromium is contained when manufacturing the straps, it was already proved that Hexavalent Chromium is generated subsequently by oxidation. Therefore, Hexavalent Chromium (Cr VI) Elimination Agent was developed. This agent restores Hexavalent Chromium to Trivalent Chromium and prevent oxidation of Trivalent Chromium.

1. はじめに

これまで RoHS 指令により, 6 価クロムの含有量は 1000 ppm 以下に管理して使用することが提案されていた¹⁾. しかし, 2015 年 5 月より欧州 REACH (Registration Evaluation Authorisation and Restriction of Chemicals) 規制 (Annex XVII Entry 47) により肌に触れる革に対して 3 ppm 未満に規制が強化された²⁾. RoHS 指令では, 6 価クロムを使用することを前提に, 量を管理するものであったが, REACH 規制では, 測定器の検出限界の 2 から 3 ppm を考慮すれば不使用を求められる規制であると理解できる. 時計用革バンドは, 肌に触れることから, EU REACH 規制の対象となる.

クロムは, 主に 3 価と 6 価がある. 3 価は人体に有用な成分であり, サプリメント等にも含まれ摂取できる. 一方, 6 価クロムは皮膚炎などを発症する有害物質として知られている³⁻⁵⁾. 一般に 3 価から 6 価クロムを得るには高温にしなければならず, 3 価クロムは安定であると考えられ

ている．この為，革製品の場合も製造時点で6価クロムを含有していなければ安全と考えられていた．

本報では3価と6価の形態を有するクロムの革中での挙動と，前記規制に準拠する革を得る為の6価クロム除去剤について報告する．

2. 革とクロム

皮の腐敗を防ぎ長期に亘って使用可能とするために“なめし”と呼ばれる化学処理を行う．“なめした皮”のことを“革”と呼ぶ．皮から革製の時計バンド（製品）ができるまでの流れを Fig. 1 に示す．動物から皮を採取し，なめし，着色等の表面を加工と加脂を行ない時計バンドの原材料となる革を得る．次に，革を適切な大きさに裁断し，厚みを調整し，心材に巻きつけるなどして時計用革バンドを作る．皮から革を得るまでの工程を前工程と呼び，革から時計用バンドを得るまでの工程を後工程と呼ぶ．

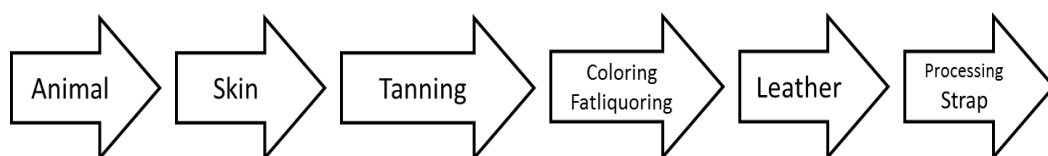


Fig. 1 Process flow of watch strap.

皮から革を得る工程を Fig. 2 に示す．例えば鱧革製の時計バンドの場合，原材料の皮はアフリカなどで生産されるカイマン鱧などが好適に使用される．この種は，小型の鱧で，時計用バンドのサイズに適合した小さな鱗を持っている．皮は塩漬けされた状態でなめし工場へ搬入され，後述する工程で革へと処理をされる．

処理方法としては，塩漬けされた皮を洗浄した後，水に浸漬して塩を抜き生皮に戻す作業を行なう．続いて，消石灰に浸すことで硬い鱗の除去と脱脂の他，皮の繊維をほぐす作業を行なう．余分な消石灰と不要なたんぱく質を除去して繊維を残しなめし前の下準備を終える．この時必要に応じて酸化作用のある薬品を用いて表面の汚れや余分な色素を漂白する．次に皮を酸性にしてなめし剤を浸透しやすくし，なめし剤によりなめし処理を行う．鱧の場合は主にクロムなめしが行なわれる．なめしは，なめし剤を含む水溶液で満たしたドラムや水槽に皮を浸漬・混合して処理を行う．処理された革の厚みを揃えた後，着色や加脂などの化粧や後処理を行い目的の革を得る．道具としてはクロムなめしの場合はタイコと呼ばれるドラムを用いて工程のはじめから終わ

りまで処理される⁶⁾。

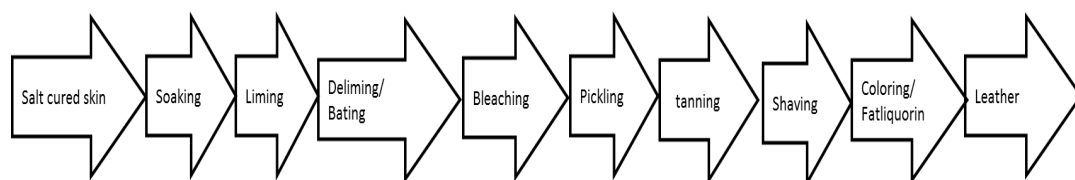


Fig. 2 Scheme of tanning process.

なめしの工程では、なめし剤と呼ばれる薬剤と皮を化学反応させて処理を行う。その為なめし剤の種類によって、得られた革の特性が異なることが知られている⁷⁾。皮をなめすと、腐敗・耐熱性・強度などを付与した革となる。なめしに使うなめし剤の種類は複数あるが、時計バンドに適した耐熱性・柔軟性・弾力性などを考慮すれば最適ななめし剤としては、特に塩基性（3価）クロムが最も優れている。この様にクロムなめしは時計バンドにとって有用な処理であるが、一方で、革にクロムが多く含まれる原因を作ることにもなる。

3. 市場調査による3価クロムの挙動の考察

3. 1 市場調査

6価クロムに対して非含有であることを宣言された革を用いて製造された時計用革バンドにおいて、市場に出回る革バンドの6価クロム含有量を調査した。分析はREACH規制に規定された測定方法ISO17075により分析を行なった。分析機関としてはSGSに依頼した。また、併せてRoHS指令に基づく測定方法EC62321でも測定を行なった。両者の測定方法の違いは抽出方法で、ISO17075の場合は室温で3時間の抽出であるがEC62321の場合は、95°C 3時間である。尚、総クロム量はエネルギー分散型X線分析装置を用いた。結果をTable 1に示す。表から、REACH規制に該当する測定方法ISO17075の5検体中2検体から本来含まれないはずの6価クロムが検出されたことが判る。6価クロムの検出量が総クロム量と関係せず総クロム量が約10000 ppmのもので検出しないものがある中で、総クロム量の最も少ない試料Gから最も多い8 ppmが検出されている。すなわち、総クロム量と6価クロムとの含有量に相関が見出せない。この結果は、クロムなめしを施された革が特定の条件下に革が置かれた時に、3価クロムが酸化され6価クロムが生成されたと推察できる。すなわち、製造初期に6価クロムが非含有であっても、その後意図せず6価クロムが発生してしまうことがあることが推察される。EC62321の測定結果とISO17075との結果を比較すると抽出温度が高いEC62321の方が高濃度で、測定した全ての検体から6価ク

ロムが検出されていることが判る．ここで検体Bに着目すると、ISO17075 の場合は検出しなかったものが EC62321 の場合は 109 ppm 検出している．このことから革中にはより多くの 6 価クロムが含有されている可能性もある (Table 1) ．

Table 1 Present situation of products containing Cr(VI).

Band Code	Material	Analysis method	Amount of Cr(VI)	Total amount of chromium
A	crocodile	IEC62321	173	14,500
B	crocodile	IEC62321	109	11,400
C	crocodile	IEC62321	132	15,100
D	Calf	ISO17075	ND	9,481
E	Calf	ISO17075	ND	12,598
F	Calf	ISO17075	3	16,362
G	Crocodile	ISO17075	8	7,141
B	crocodile	ISO17075	ND	10,080

3. 2 考察 (EU REACH 規制準拠の革製品を得る手法検討)

6 価クロムが、革の保管中・製品への加工中・輸送中・商品展示中などに後天的に意図せず 6 価クロムを生成すると仮定すれば、革製品の生産者から非含有の証明をされても規制準拠の革は得られないことになる．そこで、この問題の解決手段としては、規制に適合させる為の処理剤により 6 価クロムを含有させない革とすることが最も理にかなうと考えられる．そこで 6 価クロム除去剤を開発することとした．

4. 有効成分の検討

4. 1 6 価クロム除去剤に求められる性質

6 価クロム除去剤に求められる性質を Table 2 にまとめた．本剤に求められる機能は 5 つある．まず第 1 に、革中に 6 価クロムがすでに含まれている場合があるので、これを 3 価クロムに還元する機能である．この機能により革中に 6 価クロムをなくす効果がある．次に、すでに含まれている 3 価クロムおよび還元した 3 価クロムを再び酸化して 6 価クロムを生成させないよう酸化防止機能が必要である．この機能を有することで測定上は規制準拠の革を得られることになる．一

方、時計用の革バンドという観点から見れば革の質感を損ねないようにすることも重要である。処理したことにより、革の手触りや色合いなどが変化しては商品として成立しなくなる。この為、処理による革の質感の変化は抑え、処理前後で処理したことが判別できないようにすることも重要である。また、人体に有害な6価クロムを除去する処理剤が人体に影響し、肌荒れなどを起こしては6価クロムを除去する意味合いがない。この為、人体への影響についても考慮する必要がある。加えて時計用革バンドは工業製品であり、多量に生産される。この為、大量生産に導入できるよう使用方法を簡便にする必要がある。処理に手間がかかると処理費用がかさみ製品価格に影響することが懸念される。よって、処理は簡便であることが望まれる。

Table 2 Requirements for the Hexavalent Chromium (Cr VI) elimination agent.

- **Change chemically** the Cr(VI) to harmless Cr(III) . (Reduction)
- Needs to remain on the leather and be
effective against Cr(VI) for long period.
- **Maintain texture** of leather products
- **Low risk** upon human bodies
- **Simple and easy to use**

4. 2 還元・酸化防止機能を有する化合物の検討

6価クロムを3価クロムに還元し、3価クロムの酸化防止機能を有する化合物を検討した。土壌の6価クロムの還元剤としては、理論値の10倍量の硫酸第一鉄による3価クロムへの還元を利用した方法⁸⁾や、おがくずを原料として化学処理した6価クロム用環境浄化剤⁹⁾などが知られているが、このまま革に対して同様の処理を行うことは難しい。そこで、還元性・酸化防止性を有する有機化学物質で目的に適合する化合物を種々検討した。この結果、Fig. 3に示す部分構造を有する化合物が適合することがわかった。

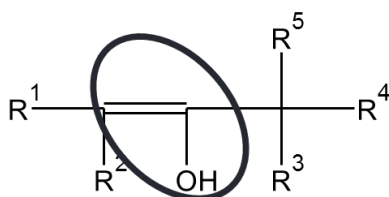


Fig. 3 Substructure of reducing and antioxidizing group.

Fig. 3 に示した化合物誘導体を複数用意してそれぞれの機能について評価した．式中の R1 を水素(H), R2 を単結合の炭素(C)で結合させたアルキル基誘導体(Ak), R4 と R5 を 2 重結合の炭素(C)で結合させたアルキル基誘導体(Ak)とし, R3 を水素(H)や水酸基(OH)とした化合物で, 1 分子中に部分構造を 2 個ないし 3 個有する化合物 A から D の 4 種を用意した．評価項目は, 処理速度に関係する反応性, 革の変色性に関係する反応時の発色性, 長期にわたって機能が維持できるかの長期機能性の 3 点から行なった．結果を Table 3 に示す．反応性は 1 分子中の部分構造の数だけでなく, R3 において, 化合物 A の水酸基を水素に置換する (化合物 B) ことで反応性を向上させることができる．変色性は, 1 分子中の部分構造の数が少ないほうが良好な結果であった．長期機能性においては, 部分構造の数や置換基の構造により可変できることが判った．以上のように, R1 から R5 の内, R3 の構造を変えただけで, さまざまな特性を発現できることから, R3 以外の構造を変化させることでも種々の性質を発現できると推察した．次節ではその方法により最適構造を検討する．

Table 3 Characteristic of functional chemical compound.

compound	Regand (total)	n	R1	R2	R3	R4	R5	reactivity	chromogenic reaction		long-life warking
A	2	2	H	-C-Ak	OH	=C-Ak		low reagency	pale green	good	long-life
B	2	2	H	-C-Ak	H	=C-Ak		medium reagency	pale brown	good	middle-life
C	3	2	H	-C-Ak	OH	=C-Ak		high reagency	dark red-brown	bad	short-life
		1	H	-C-Ak	H	=C-Ak					
D	3	3	H	-C-Ak	H	=C-Ak		high reagency	dark-red	bad	short-life

4. 3 最適化

時計用バンドは, 革の寿命まで長期に渡って使用される．機能を製造初期から使用を完了するまで保持する必要がある．成分の構成要素としては, 即効性のある化合物, 長期に渡って機能を発現する化合物, 更に 2 つの中間に立つ化合物とを組み合わせる持続的に革の寿命まで維持できるよう設計した．

標的化合物を得る為に R1 から R5 までの置換基を変えた種々の化合物と機能との関係を検討し, 革製品に適した化合物を見出し, 6 価クロム除去剤を作成した．構成を Table 4 に示す．

Table 4 Consist of the Hexavalent Chromium(Cr VI) Elimination Agent.

Compound	Regand (Total)	Polymerization Number	n	R1	R2	R3	R4	R5	raactivity	chromogenic reaction	lifetime
longlife	35	5	3 1 1	H OH -O-Ak	-C-Ak -C-Ak -C-Ak	OH OH OH	=C-Ak =C-Ak =C-Ak		low reagency	pale brown good	middle to latter period
middlelife	3	-	2 1	H OH	-C-Ak -C-Ak	OH OH	=C-Ak =C-Ak		high reagency	pale green good	previous to middle period
shortlife	3	-	1 1	OH OH	-C-Ak -C-Ak	-O-Ak -O-Ak	=O -C-Ak	H	high reagency	colorless good	previous period

4. 4 希釈溶媒の検討

革中のクロムに対して有効成分を作用させるためには、革の内部に有効成分を浸透させ、保持させる必要がある。前工程で製造中の革は、水系の処理剤で処理され、革に装飾する過程ではイソプロピルアルコール(IPA)水溶液が用いられていることが多い。よって、前工程の革を処理する場合には水溶媒、後工程の場合は IPA 水溶液が好ましい。前工程の場合には、革が水中に浸漬されていることから有効成分をそのまま添加することで処理ができる。後工程の場合は、加脂剤を含む乾燥した革に対して処理を行うため、溶媒が水だけでははじかれ革内部へ簡便に浸透し難い為、有機溶媒を用いて浸透させることが好ましい。IPA 濃度としては、35%程度が適当で、少ないと浸透性に劣ることがある。

5. 機能評価

5. 1 長期機能性評価

6 価クロムの還元後、その後も 6 価クロムが生成しないかをモデル物質を用いて評価した。モデル物質としてはセルロース繊維を用いた。まず、セルロース繊維を 6 価クロムで汚染した。この時の 6 価クロム含有量は 870 ppm であった。これは、一般革の 6 価クロム含有量調査結果のおおよそ 100 倍の濃度にあたり、機能評価には十分な濃度と考えられる。これを、6 価クロム除去剤で処理を行い、更に 120°C×3 時間のエイジング処理を行った。この時の 6 価クロムの含有量を測定したところ 6 価クロムは検出されなかった。以上のことから、還元性と酸化防止性の基本性能を有することが確認された。

5. 2 革での還元性評価

牛革を用意し、これを 6 価クロムで汚染した。汚染後の 6 価クロム濃度は 75.7 ppm であり、一般革の 6 価クロム含有量調査結果のおおよそ 10 倍の濃度にあたる。この革を 6 価クロム除去剤

で処理を行い6価クロムの含有量を測定した。この結果6価クロムは検出されなかった。以上のことから革中でも6価クロム除去剤が機能することが確認された。

5. 3 6価クロムが自然発生した革での評価

2.5 ppm の6価クロムを自然発生しているクロコダイル革を用意した。この革に6価クロム処理剤を用いて処理を行った。未処理の革と、処理した革とを80℃×24時間エイジングし、その後の6価クロム含有量を測定した。

その結果、未処理のものは5.8 ppm と6価クロムの含有量が約2倍に増加した。処理した革からは処理後、エイジング後ともに6価クロムは検出されなかった。エイジング条件の80℃×24時間は、革における6価クロム発生を評価する一般的条件で、本評価でも同じ条件を採用した。この結果、開発した6価クロム除去剤を用いて革を処理することで、6価クロムを生成していない革はもとより、6価クロムを生成した革においても、6価クロムを除去することが可能であり、その後も6価クロムが生成しないことがわかった。よって、本開発の6価クロム除去剤を用いて革を処理することにより、EU REACH 規制に準拠する革を得られることが判った (Fig. 4 参照)。

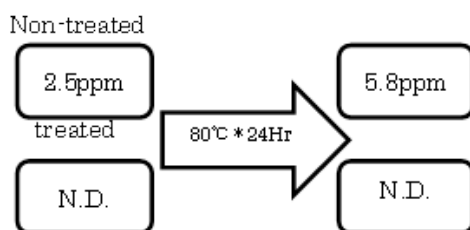


Fig. 4 Results of crocodile leather evaluation.

6. 革の質感変化評価

時計バンドに主に使用するクロコダイル、牛の革で、種々の色の革を用意した。この革に対し、6価クロム除去剤（溶媒 IPA の35wt%水溶液）を用いて処理を行ったところ、色、手触り等の質感は処理前後で変化しないことがわかった。

7. 人体への安全性評価

6価クロム除去剤で処理することで、炎症などの発祥原因である6価クロムを除去することができるが、この処理剤によって人体に影響することが無いよう配慮する必要がある。現在は、全てのシチズン製本革バンドをはじめ手袋などに採用されており、安全性は確認されているが、開発に当たっては、体への影響がないかを以下の様に評価した。

7. 1 人体による評価

6価クロム除去剤で処理した革製の腕に巻ける擬似バンドを用意した。検体は男女それぞれ10名ずつ、合計20名とした。検査期間は3日間を1サイクルとし、同一検体で4回繰り返し合計12日間腕に巻き、繰り返し暴露を行なった。測定方法は、毎日皮膚の状態を観察し、異常が認められないか評価した。この結果、特に異常はなく問題のない結果を得た。

7. 2 公認第三者機関を利用した安全性評価

時計や雑貨には、人体への安全性に関する評価基準が設けられていないため、医療機器等の評価に準じて評価を行なった。試験項目は、A) EpiDermSIT (EPI-200)を用いる in vitro 皮膚刺激性試験、B) マウスを用いる皮膚感作性試験(Local Lymph Node Assay: BrdU-ELISA)、C) 微生物を用いる変異原性試験を、OECD Principles of Good Laboratory Practice, November 26, 1997 の GLP に従い実施した。この結果、バンドへの使用条件ではいずれの場合も安全な見解を得た。

8. 使用方法

開発した6価クロム除去剤には、液体の AO-C6R-I35 と、粉末の AO-C6R-N2 がある。それぞれの使用箇所を Fig. 5 に示す。液体状の I35 は、後工程に使用できる。粉末状の N2 は、前工程の染色加脂工程後、および I35 と同様に後工程に使用できる。

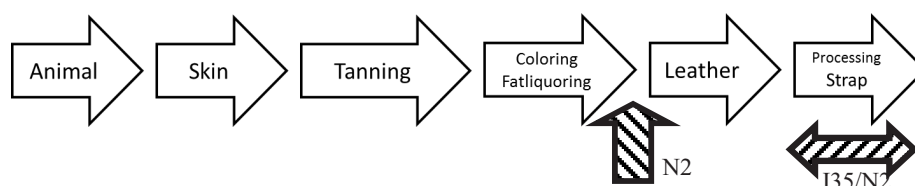


Fig. 5 Process instruction of Hexavalent Chromium (Cr VI) Elimination Agent, AO-C6R-N2 and I35.

8. 1 AO-C6R-N2の後工程での使用方法

革を処理する方法は、まず粉末（有効成分）を溶媒に溶解させ液体とし、これを革内部に浸透させ、6価クロムの除去処理を行う。

・処理液の作成

水 650 g (650 mL)と、IPA 350 g (450 mL)を混合して IPA の 35wt%水溶液を作成し、これに N2 (1 L 用) を1袋加えて攪拌し溶解させ6価クロムの処理液を作成する。

- ・ 処理液の使用方法

作成した処理液を，革の裏側からスプレーし浸透させる（Fig. 6 左）方法や，製品に筆等を用いて浸透させる方法（Fig. 6 右）の他，浸漬等で浸透させることでできる．処理液を浸透させた革を室温で乾燥させて処理を完了する．

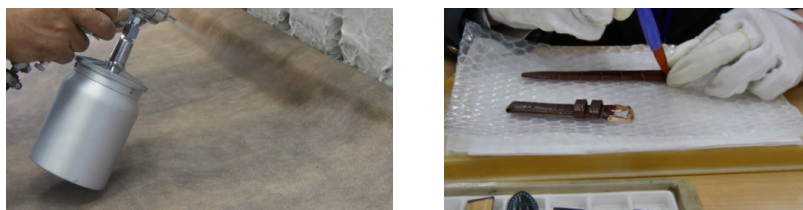


Fig. 6 Treatment process of Hexavalent Chromium (Cr VI) Elimination Agent (Left: Spraying / Right: Painting).

- ・ 処理過程と 6 価クロム除去処理

Fig. 7 に 6 価クロム除去剤で処理を行なっている過程でのクロムの挙動について示した．初めの段階で革中にすでに 6 価クロムが発生していた場合を想定している．スプレー等で処理液が浸透した部分から順次還元反応が起こり，6 価クロムは 3 価クロムに還元され無害化が進行する．そして，完全に浸透し，乾燥処理後は全ての 6 価クロムは還元され，無害な 3 価クロムとなる．また，酸化防止能を有する成分が革中に安定に残留し，経時的に 6 価クロムの生成を抑制することになる．

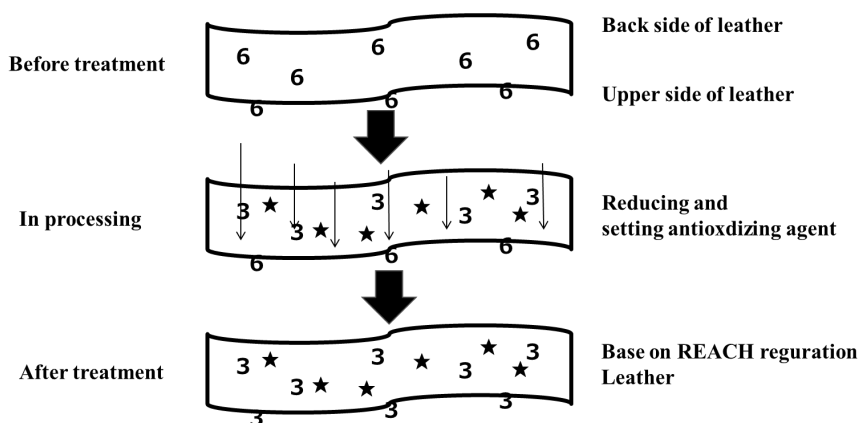


Fig. 7 Treatment process of leather.

8. 2 AO-C6R-I35の後工程での使用方法

本製品は、有効成分を溶媒に溶解させた処理液である。本製品は前述8. 1項の処理液の使用方法に従って使用する。溶媒に溶解する手間がかからず便利に使用できる。

8. 3 AO-C6R-N2の前工程での使用方法

革を処理する方法は、まず粉末（有効成分）を溶媒に溶解させ液体とし、これを革内部に浸透させ、6価クロムの除去処理を行う。

・処理液の作成

40°C程度の温水 1000 g (1000 mL)に N2（1 L 用）を1袋加えて攪拌し溶解させ6価クロムの処理液を作成する。

・処理液の使用法

染色加脂が終了したドラムに、処理液を注入し、攪拌浸透させた後に乾燥させれば処理が完了する。

・使用量の目安

革の重量が1 ft²あたり 50 g の場合、5000 ft²革の重量は、250 kg となる。染色加脂後の浸漬に革の重量に対して 100%の水を使用した場合、250 Lの水が必要になる。この場合、2.75 kgの製品が必要である。

9. まとめ

クロムなめしの革は耐熱性・柔軟性・強度に優れているので時計用バンドの革に適する。

クロムなめしの革は、光・熱・湿度等の影響を受け革中に6価クロムを発生する場合がある。

EU REACH 規制は人体に触れる革に於いて、有害な6価クロムを3 ppm未満に規制している。

EU REACH 規制に準拠した革を得る為に、革中の6価クロムを還元し、無害な3価クロムとし、その後も6価クロムの生成を抑制できる6価クロム除去剤を開発した。

製品は、粉末と液体の2系統を提供している。液体の製品（AO-C6R-I35）はそのままスプレーや筆などを用いて革に塗布することで処理できる。粉末の製品（AO-C6R-N2）は、後工程ではIPAの35wt%水溶液に粉末を溶解させ、これを革へ塗布することで処理できる。前工程に使用する場合は、染色加脂後のドラムに投入することで処理ができる。

10. 参考文献

- 1) 市川芳明:改正 RoHS 指令および整合規格の徹底理解, 情報機構, 東京, p. 160, 2012.
- 2) 松浦徹也:REACH 規則とSVHC(高懸念物質)リストの動向, 表面技術, Vol. 66, No. 5, pp. 178-181, 2015.

- 3) 原田昭太郎:クロム, コバルト及びニッケル皮膚炎の研究, 日本皮膚科学会雑誌, Vol. 83, No. 2, pp. 79-100, 1973.
- 4) 鈴木弘実, 相場節也:汗と金属アレルギー, アレルギー・免疫, Vol. 22, No. 3, pp. 70-75, 2015.
- 5) 加藤則人:金属と接触皮膚炎, 日本皮膚科学会雑誌, Vol. 121, No. 10, pp. 2049-2052, 2011.
- 6) 小木曾健, 今井哲夫, 田辺忠次, 入江昌宏, 島岡紀江:エキゾチックスキンの基礎知識, 全日本爬虫類皮革産業協同組合, 東京, pp. 25-28, 2017.
- 7) 出口公長, 杉田正見:印伝革と様々な鞣し革の特性比較に関する研究, 皮革科学, Vol. 46, No. 2. pp. 141-148, 2000.
- 8) 佐藤克春:市街地土壤汚染問題の政治経済学, 旬報社, 東京, pp. 115-119, 2015.
- 9) 金子聡, 勝又英之, 鈴木透:海底泥の有効活用ー6価クロム除去および室内アレルギーの低減化ー, コンバーテック, Vol. 43, No. 2, pp. 26-19, 2015.

技術報告

QUADセンサー搭載の多機能電波ソーラーアナログ時計の開発

橘田典幸, 山崎晋, 丸山弘尚, 桜沢正, 花田剛

カシオ計算機株式会社時計事業部モジュール開発部, 東京都羽村市栄町 3-2-1, 〒205-8555

(2017 年 3 月 17 日受付, 2017 年 5 月 29 日再受付, 2017 年 7 月 1 日採録)

Development of the Analog Watch with Radio Controlled, Tough Solar Powered, Multiple Function, and with Quad Sensor

Noriyuki KITTA, Susumu YAMAZAKI, Hirohisa MARUYAMA,
Tadashi SAKURAZAWA, Takeshi HANADA

Casio Computer Co., Ltd., 3-2-1, Sakaecho, Hamura-shi, Tokyo 205-8555, Japan

(Received March 17, 2017, Revised May 29, 2017, Accepted July 1, 2017)

ABSTRACT

Due to the diversification of users' tastes and preferences in recent years, we have already released the solar powered analog watch with the TripleSensor system as an outdoor watch. However, since further multifunctional demand has increased, we have developed a radio wave solar powered analog watch with multiple functions achieved by the development of a quad sensor system. This quad sensor system has a newly developed water depth sensor and the TripleSensor system with an improved digital compass achieved by an automatic horizontal correction function with an acceleration sensor.

1. はじめに

本技術報告では Fig. 1 に示す GWN-Q1000 の機種の開発における下記の 4 つの技術概要について述べる.

- ・ 3 軸地磁気センサと加速度センサと低消費電力・高性能の水圧センサの開発
- ・ 計測時演算処理の高速化
- ・ 機能構成の異なる 2 つのモデル同時設計 (Fig. 2)
- ・ 使い勝手の良いモジュール部品レイアウトの追求



Fig. 1 GWN-Q1000.

このモデル以前においては, ROM 容量及びセンサ実装のための空間の不足により方位計, 気圧計/高度計, 温度計のトリプルセンサシステムでの構成が限界となっていたり.

ここで新しい大容量 ROM のハードを使用し、センサ配置を工夫することにより、上記トリプルセンサシステムに加えて水深計を搭載した QUAD センサーの搭載が可能となった。特に方位計については、時計が傾いても正確な計測が可能となり、加速度センサを用いた自動水平補正機能を追加することで、さらなる測定精度向上を行なっている。



Fig. 2 PROTREK PRW-7000 / G-SHOCK GWN-Q1000.

2. 低消費・高性能の水圧センサと3軸地磁気センサと加速度センサの開発

従来の3軸地磁気センサによる方位計測機能では、環境温度変化も含めて $\pm 10^\circ$ という精度（時計が水平であり、かつ正確な2点補正実施の前提）を実現していたり、今回、この精度を超える角度での自動水平補正機能付方位計を実現するために、時計の傾きを検知するための加速度センサを追加する必要があった。この時、使用するセンサが1つ追加されることになり、当然誤差要因も増えることになるのだが、その上でシステムとしての精度は従来同等を目指した。

上記問題点と水中での使用想定を加味し、実現に必要な要素の開発目標を以下に設定した。

- ① 地磁気センサの直線性、感度、原点の安定性、温度特性
- ② 加速度センサの直線性、感度、原点の安定性、温度特性
- ③ 地磁気センサ、加速度センサ共に3軸の原点補正及び3軸の感度補正
- ④ 水圧センサは、防水性能及び、計測する水圧の計測範囲と必要な分解能を保持

上記①、④では各センサに対して開発をセンサメーカーに依頼し、この時にこちら側から必要とする各センサ性能の数値の明確化及び具体的な目標値を示し、結果これをクリアし、且つ低消費電力であるセンサの開発を行った。

また②の加速度センサについては、すでに今回の開発目標を満たすセンサが市販されていたため、そのまま使用することとなった。

さらに③では、各センサの生産工程で2つのセンサの正確なトリミング方法と、量産を加味したトリミング装置を開発することにより、それぞれの3軸の原点、搭載誤差、さらに各軸感度の統一の補正を実施することが可能となった。

3. 計測時演算処理の高速化

時計マイコンは腕時計という非常に小型の製品に使用されるのを前提として低消費電力に特化しているため、外部デバイスへのアクセスや演算を高速に処理することは不得意であった。

加えてソーラー駆動のため電力の制約もあり、今までの最新センサシステムである TripleSensor Ver3 を搭載する前の機種においては、センサ計測周波数と連続計測時間はそれぞれ 1 Hz で 20 秒間での動作にとどまっていたり。

しかし、その後 TripleSensor Ver3 のシステム搭載により各センサの計測間隔等のセンサ測定システムを大幅に改善させることが可能となり、現在は 2 Hz で 60 秒間の連続計測を実現している。

だが、今回の QUAD センサでの自動水平補正機能付方位計では方位計測時に計測するセンサ及び軸数が増え、さらにユーザー補正で 3 軸の原点補正機能 (Fig. 3) を搭載したことにより演算量も増加している中で、以前の TripleSensor Ver3 を含む従来のシステムと同等の表示更新頻度、方位精度、計測スピード、消費電流を実現する必要があった。

上記の問題点を踏まえて今回採用した新マイコンは、従来より高周波の clock 設定が可能になっており、演算速度を向上させることが可能になったが、その反面として高周波動作時の電流は大幅に増加した。

それに伴い、自動水平補正機能付方位計測を 2 Hz 以上の周波数で表示更新させ、低消費電力での動作を実現することを目標として、新しいアルゴリズム開発を行った。

結果、本機種においては TripleSensor Ver3 を含む従来のシステムよりも計測するセンサが増え、演算量が大幅に増えたにもかかわらず、方位計測全体での計測時間は 10%、消費電流は 17% の増加に留めて同等の使用感を維持することができた。

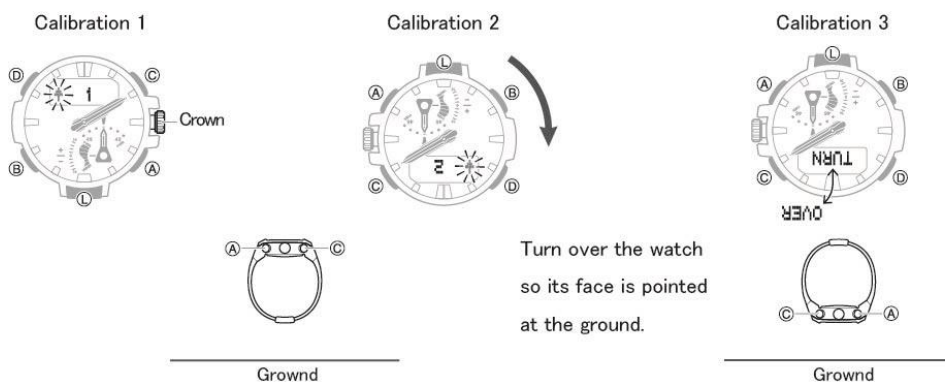


Fig. 3 Perform 3-point calibration.

4. 機能構成の異なる2つのモデル同時設計

今回開発するモデルでは、複数のセンサ測定をほぼ同時に駆動させるような高負荷下での制御条件設定等の想定や、時計に搭載されている照明、報音などの様々な機能との絡みも増大した。

上記要因に加えて今回の QUAD センサ機種の設計に際しては、すべてのセンサを使用し海難救助隊を想定ユーザーの一つとした G-SHOCK 仕様、水深センサを外し TripleSensor Ver3 搭載までのトリプルセンサ機種の大幅なブラッシュアップモデルとした PROTREK 仕様と、全く異なる使用環境を想定した2機種を同時並行での機種開発を行うこととなった。

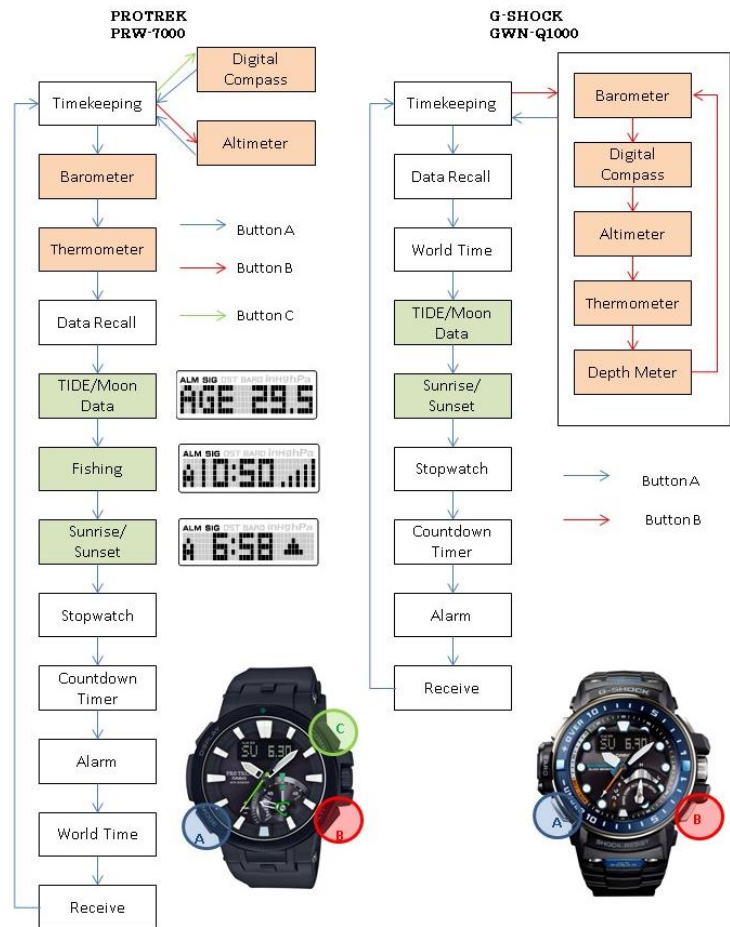


Fig. 4 PROTREK PRW-7000/G-SHOCK QWN-Q1000 Modes.

この異なる2つの機種はそれぞれ各モードでのスイッチ操作によるオペレーションから、さらに搭載しているセンサ以外の機能までかなりの部分で各モデルに特化したものになっており、膨大な設計及びチェック期間を必要としていたが、新規開発プロセスや新チェックツールの導入活用により設計効率を向上させ、従来では難しかった日程で完成させることが可能となった (Fig. 4)。

5. 使い勝手の良いモジュール部品レイアウトの追求

センサ計測結果を判読しやすく表示するため、このモデルでは機能表示針をレトログラード配

置（5時位置）とした。また幅広い使用者の要求に応えるためのセンサ数増加や、感性に適応したスムーズな針動作が可能なモーターシステム採用，従来の LED に対して大幅な明るさ向上となる超高輝度 LED 採用など，様々な面で使い勝手を向上させる一方，部品の実装面積は増加した。

これらを適正なサイズに収めるため，このモデルでは全体の部品配置の見直しを行い，地磁気センサ，水深センサ用コネクタ，高度+温度センサ用コネクタを搭載可能とするために，電波アンテナを傾けて配置する等の工夫を凝らすことにより，受信感度への影響が懸念される電池などとの距離を最大化，位置の最適化を実現して従来にない配置となっている。これによる副次的な効果として，照明用 LED に前述した輝度の高いタイプを採用することが可能となった (Fig. 5)。

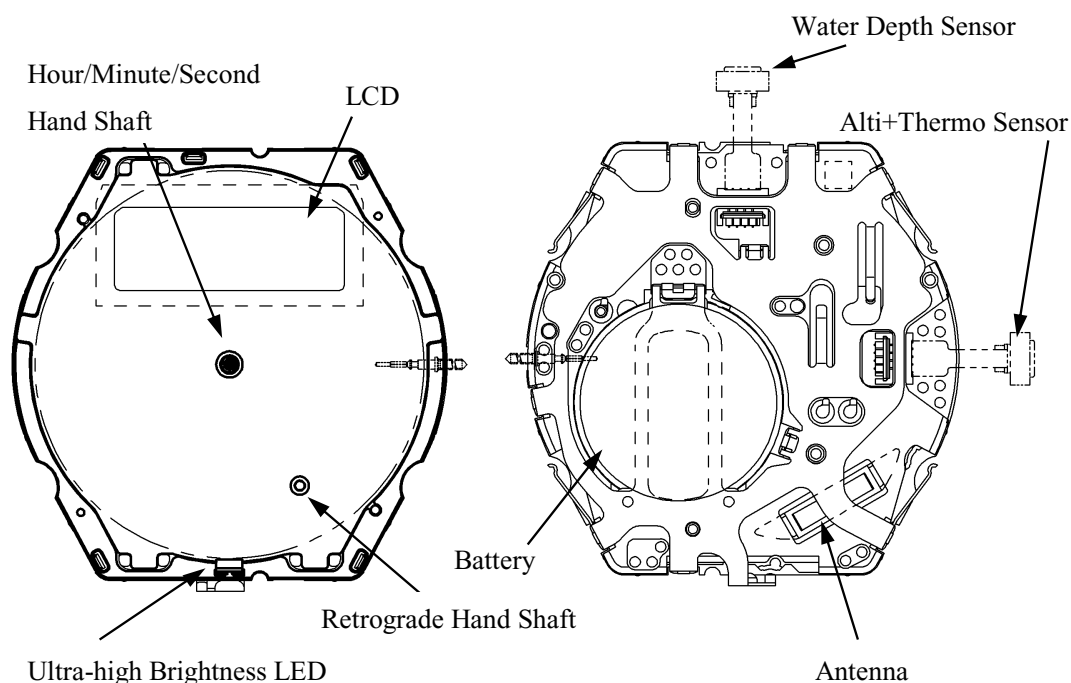


Fig. 5 G-SHOCK QWN-Q1000 Module.

6. おわりに

今回，4つのセンサ機能を含め非常に多機能である電波ソーラーアナログ時計を上市することができた。今後もお客様の要望を踏まえつつも，驚きと感動を与える商品の開発を行っていきたい。

7. 参考文献

- 1) 常葉輝久：トリプルセンサ電波ソーラーアナログウォッチの開発，マイクロメカトロニクス，Vol. 57, No. 208, pp. 19-25 (2013)

技術報告

スマートラップ機能搭載ランニングウォッチの開発

野邊哲也, 野村隆幸

セイコーインスツル株式会社, 千葉県千葉市美浜区中瀬 1-8, 〒261-8507

(2017 年 9 月 20 日受付, 2017 年 11 月 13 日再受付, 2017 年 11 月 14 日採録)

Development of SMART-LAP Watch for Runner

Tetsuya NOBE, Takayuki NOMURA

Seiko Instrument Inc., 1-8, Nakase, Mihama-ku, Chiba-shi, Chiba 261-8507, Japan

(Received September, 20, 2017, Revised November, 13, 2017, Accepted November, 14, 2017)

ABSTRACT

We have developed SMART-LAP which is a new function of digital watch for marathon runners. The watch can automatically record the passing time of the timing system laid in the marathon course. We devised a method to detect the passage of the timing system from the trigger signal and examined arrangement of the receiving antennas from the analysis of the watch position during running. Furthermore, we optimized the receiving sensitivity and detection algorithm to achieve accurate time measurement.

1. はじめに

第 1 回の東京マラソンが開催された 2007 年以降国内のランニング人口が増加し, 各地で開催されるマラソン大会も増加の傾向を続けている. 2008 年に全国で開催されたマラソン大会は 100 前後だったが, 2016 年には 350 を超える大会が開催されるようになった¹⁾ (Fig. 1).

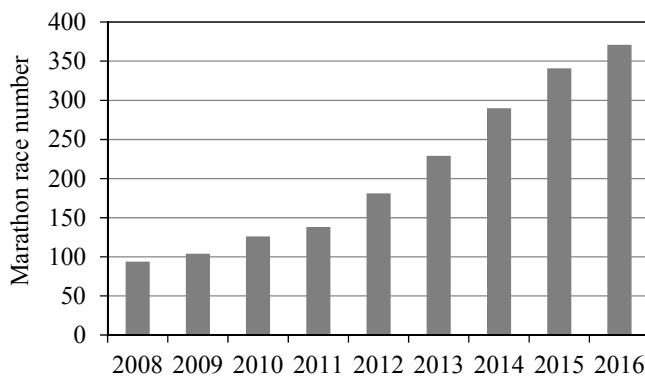


Fig. 1 Trends of marathon race number.

また、近年のマラソン大会においては、トータルタイムや区間タイムを自動で計測するシステムの利用が増加している。このシステムでは、コース上にアンテナ内蔵のマットを敷設しランナーに取り付けた RF タグの通過を読み取ることでタイム計測を実現している。参加人数の多い大規模の大会では、特にタイム計測システムの利用が盛んとなっている。

そこで、このタイム計測システムの信号を腕時計で受信し自動で計測地点の通過タイムを記録する、「スマートラップ」機能を搭載したスーパーランナース Cal.S620 を商品化した²⁾ (Fig. 2)。

スマートラップ機能を使用することで手動計測時のようなボタン操作の必要がなく、自動で正確なタイム計測が可能となる。



Fig. 2 SUPER RUNNERS SMART-LAP(Cal.S620).

2. 腕時計におけるタイム計測システムの検出方法

大会のタイム計測システムでは、コース上に敷設されたアンテナマットが継続的にトリガ信号を発信している。RF タグを取り付けたランナーがアンテナマットに近づくと、トリガ信号を受信したタグが ID を発信し、アンテナマットが ID 情報を受信することでランナーの通過を検知している(Fig. 3)。

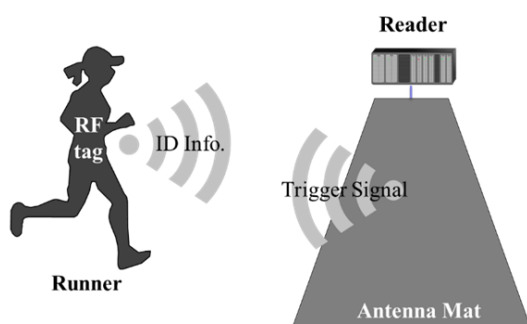


Fig. 3 Timing system structure.

計測タイムシステムには複数のタイプが存在しており、基本的なシステム構成は同一でも通信に利用される周波数はそれぞれのシステムによって異なっている(Table 1)。

ただし、国内では 90%近い大会において C と D の 2 つのシステムが利用されているため、このシステムに対応する検出方法の検討を実施した。

対象の 2 つのシステムにおいては、トリガ信号の周波数が共に LF 帯 となっており共通の受信回路構成で信号の検知が可能なこと、また、マットの出力レベルが設置環境のノイズに対して

20dB 以上強く誤検出の防止が可能と判断できた(Fig. 4).

そこで、90～130 kHz 範囲のトリガ信号を腕時計で受信し、自動でラップ取得を行う方式を採用することとした。

Table 1 Type of measurement system.

System	Signal frequency		Tag position	Receiver position
	Trigger	ID		
A	125 kHz		Bib	Mat
B	134 kHz		Shoe	Mat
C	125 kHz	6.8 MHz	Shoe	Mat
D	94 kHz	300 MHz	Bib	Mat
E	13.56 MHz		Bib	Mat
F	920 MHz		Shoe/Bib	Mat/Stand

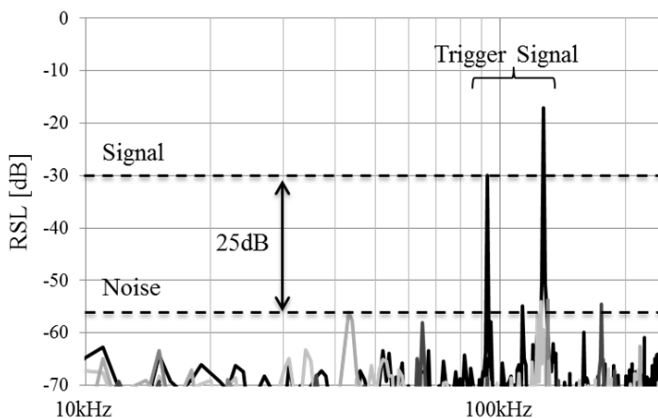


Fig. 4 Comparison of the signal and noise.

3. 受信アンテナの配置

アンテナマットにはループアンテナが内蔵され、磁界発生方向が路面に対し垂直となるように設置される。よって、トリガ信号の磁界はアンテナマット手前では、ランナーに対し上下方向と進行方向の合成成分として現れる。(Fig. 5)

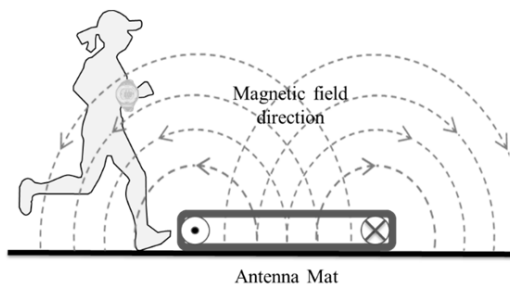


Fig. 5 Magnetic field of trigger signal.

計測用タグはゼッケンや靴に取り付けるため、タグに内蔵されたアンテナはマットに対し概ね一定の姿勢を保つことができる。一方、ランナーの腕に取り付けられた腕時計では、競技中に大きく姿勢が変化し、アンテナが指向性を持つことから受信感度が変化することが想定される。そこで、走行中に取りえる姿勢を(ア)から(エ)に分類した。

(ア) 走行時に肘を曲げ、腕を前後に振る

(イ) ゴール時などに腕を高く上げる

(ウ) 歩行時等に肘を伸ばし、腕を下げる

(エ) タイム確認のため腕を水平にする

走行中には、一般的に (ア)の姿勢であることが多く、次に (イ) や (ウ) の姿勢が考えられる。よって、アンテナマットを通過する際には、地面に対して時計の 3 時-6 時-9 時側が上向きの状態である可能性が高いといえる。この状態において安定した感度が得られるようアンテナ配置を検討した結果、時計の 3 時 9 時方向の磁界成分を検出できるように、フェライトアンテナを配置することとした。(Fig. 6)

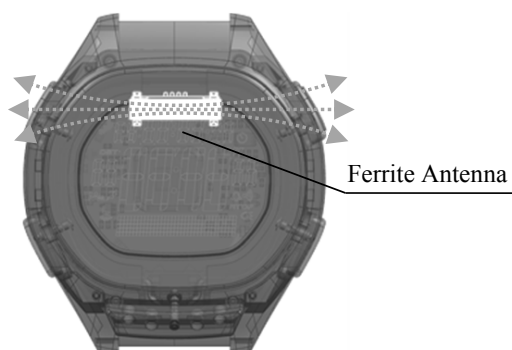


Fig. 6 Ferrite antenna layout.

4. トリガ信号受信距離

腕時計内部のトリガ信号受信回路は、アンテナで受信した信号をアンプで増幅、検波回路で波形整形し CPU で処理する構成となっている。(Fig. 7)

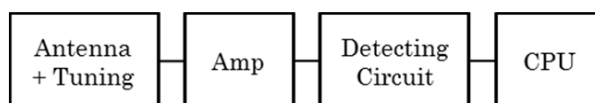


Fig. 7 Receiver circuit.

受信回路の増幅率を決定するにあたり、想定した各姿勢にてトリガ信号を漏れなく受信可能な設

定を行った。

確認のため、実際のアンテナマットを使用し、トリガ信号の受信距離を測定した。測定姿勢は、走行中メインの姿勢である、時計 6 時側上と 3 時側上 (=9 時側上) に加えて、時計を水平にした状態で行った。測定高さについては、走行中の腕の高さとなる 1 m - 1.5 m と、腕を上げたときを想定し 3 時上姿勢のみ 2 m まで確認を行っている。(Fig. 8)

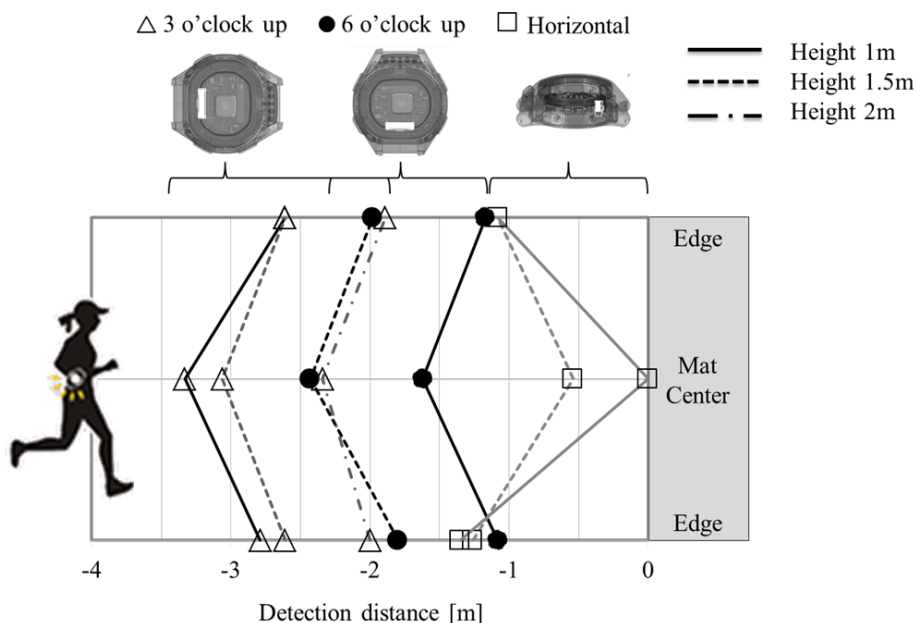


Fig. 8 Detection distance from antenna mat.

測定結果から、各条件にて受信距離に変化はあるものの漏れなく受信可能なことがわかった。

さらに、計測精度の向上やノイズによる誤検出を防ぐため、信号処理の過程で一定の継続した信号を受信した後タイムを確定するアルゴリズムを採用した。

実際のマラソン大会における

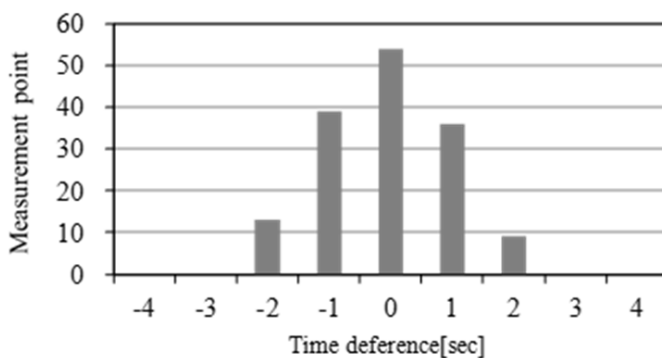


Fig. 9 Distribution of time difference from the official record.

モニタ調査では、大会発表タイムに対し十分な精度で測定が可能ことが確認できた。(Fig. 9)

5. おわりに

今回の開発により得られた成果は以下の通りである.

- ・トリガ信号を利用し、タイム計測システムの通過を腕時計にて検出する方法を考案した.
- ・走行中の腕時計姿勢変化の考察から、トリガ信号受信アンテナの配置を最適化した.
- ・開発したシステムを用いて、実際の大会で精度よくタイム計測が可能であることを確認した.

弊社では、マラソン人口の増加を見据えて、今後もお客様のニーズをとらえ、ユーザーベネフィットを提供できるランニングウォッチの開発、製品化をおこなっていく.

参考文献

- 1) <http://runnet.jp>
- 2) <https://www.seiko-watch.co.jp/prospex/run/superrunnerssmartlap>

技術報告

近距離無線通信機能搭載ウォッチの開発

土屋忠士, 野邊哲也

セイコーインスツル株式会社, 千葉県千葉市美浜区中瀬 1-8, 〒261-8507

(2017 年 9 月 21 日受付, 2017 年 11 月 13 日再受付, 2017 年 11 月 14 日採録)

Development of a Watch Equipped with Near Field Communication

Tadashi TSUCHIYA and Tetsuya NOBE

Seiko Instruments Inc., 1-8, Nakase, Mihama-ku, Chiba-shi, Chiba 261-8507, Japan

(Received September 21, 2017, Revised November 13, 2017, Accepted November 14, 2017)

ABSTRACT

We equipped near-field wireless communication (NFC) and commercialized a training watch with connection function to training site (MY ASICS) operated by ASICS Co., Ltd. via dedicated application. In order to commercialize, we evaluated the influence of antenna position and magnetic sheet for communication distance. By optimizing the antenna position, it was possible to obtain a sufficient communication distance without a magnetic sheet

1. はじめに

セイコーインスツル株式会社では, 3 軸加速度センサによる走行計測機能を搭載し, タイム/SPM/ペース/距離によるランデータとして記録保存が出来るランニングウォッチを製品化している. また, アシックス社の運営する My ASICS にはトレーニングプログラム生成等によってランニングレベル向上を補助する機能がある¹⁾. 更に, 実際のトレーニング結果を入力する度に今後のトレーニングプランを修正する機能も持っている.

セイコーインスツル株式会社は My ASICS へのトレーニング結果入力を補助し, トレーニングプランを表示する近距離無線通信 (Near-field wireless communication, NFC) 機能を搭載したランニングウォッチ AP02 を商品化した²⁾.



Fig. 1 Running watch AP02.

2. アンテナ搭載位置の検討

2. 1 回路ブロック - LCD 間

NFC 用のアンテナを搭載するにあたり、まずは最も構造上の課題が少ない「回路ブロック - LCD 間」にアンテナを配置した。この構成はシート状の部品を積層する場所でありモジュールとして完結するため、組立製造も品質管理も容易である。一方、ESD (Electrostatic Discharge)保護部材や回路ブロックといった金属部品が近く、更にアンテナが時計厚みの中央辺りに来るため、通信性能を確保するには不利な条件となっている。

ESD 保護部材や回路ブロックによるアンテナへの影響を防ぐため、アンテナと ESD 保護部材の間に磁性シートを挿入し、PC 用リーダライタ（以下、NFC リーダ）とスマートフォンの通信可能距離を確認した。

磁性シートは入手が容易な厚み 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm を用いた。（Fig. 2）

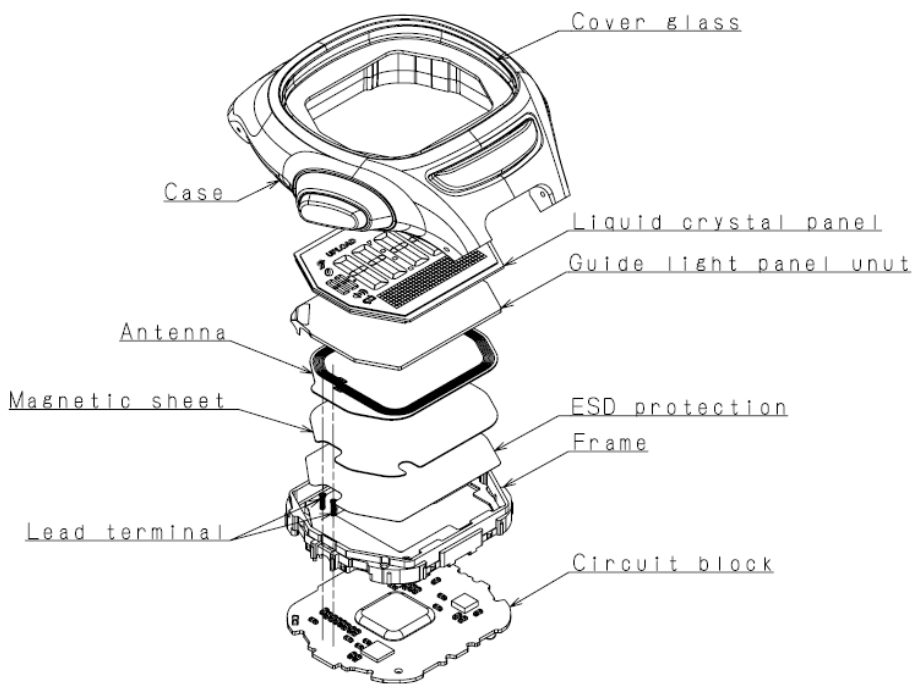


Fig. 2 Antenna layout 1.

その結果、厚み 0.05 mm を搭載した時計では通信できないスマートフォンがあった。厚み 0.2 mm を搭載しても通信可能距離は 1.8 mm であり、スマートフォンにケースが装着されていることを想定すると通信が困難であると判断した。（Table 1）

Table 1 Communication distance.

		Condition			
		①	②	③	④
Insert part	ESD protection	NG	OK	OK	OK
	Magnetic sheet	NG	$t = 0.05$	$t = 0.1$	$t = 0.2$
Communication distance (Worst case)	NFC reader	20	6	8	10
	Smartphone	6.0	NG	0.8	1.8
		Examination [mm]			

共振周波数におけるアンテナインピーダンスを測定すると ESD 保護部材の有無でピーク値に大きな差があり，ESD 保護部材によってアンテナの受信感度が低下していることが確認できた．(Fig. 3)

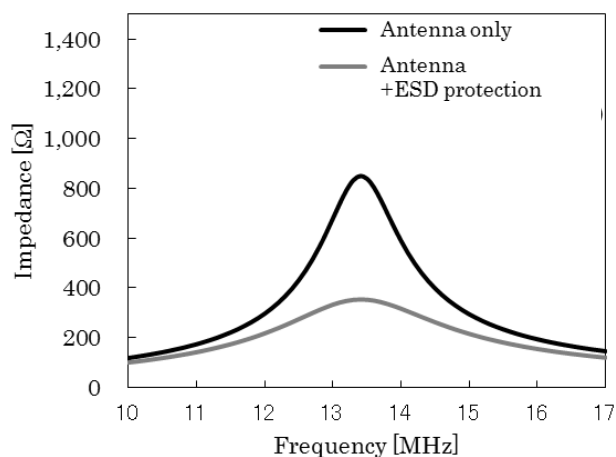


Fig. 3 Antenna impedance of layout 1.

以上の結果から，「回路ブロック - LCD 間」にアンテナを配置すると十分な通信可能距離が得られないとの結論に至り，インピーダンスを確保するために ESD 保護部材からアンテナを離れた別の構成を検討することにした．

2. 2 カバーガラス - LCD 間

次に，「カバーガラス - LCD 間」にアンテナを搭載する構成を検討した．この構造は，アンテナがムーブメント内装部材とならないため組立工数のアップとなる．更に磁性シートがリング状になってしまうため，磁性シートの性能が十分発揮されないことが懸念される．

一方アンテナサイズを大きくとることができ、ESD 保護部材からも離すことが出来るため、通信性能への影響は最も小さいと考えられる。(Fig. 4)

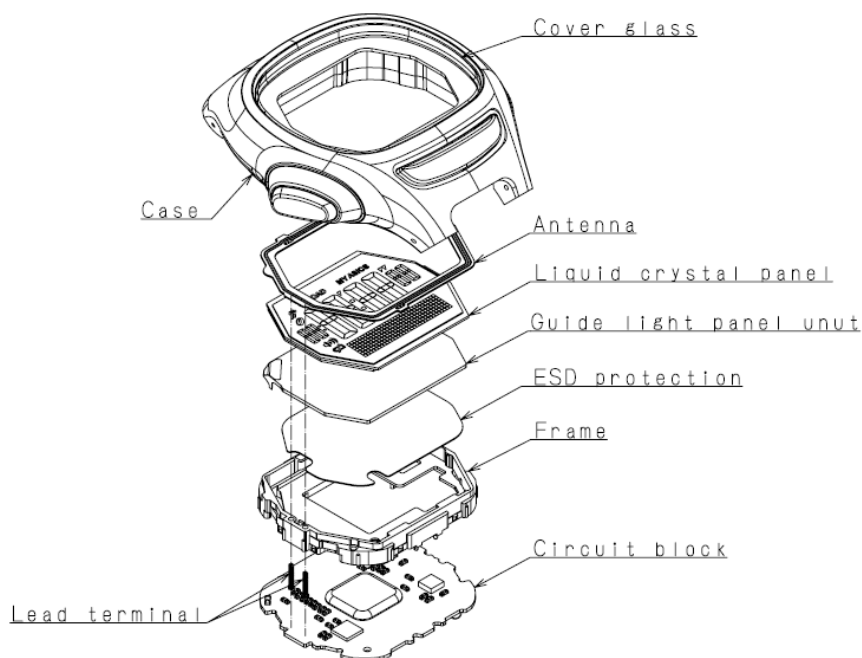


Fig. 4 Antenna layout 2.

共振周波数におけるアンテナインピーダンスの測定では、ESD 保護部材の影響を確認したが、Fig. 3 の Antenna only と同等のインピーダンス値を得ることが出来た。(Fig. 5)

また、この値は Table 1 の Condition ①と同等のため、通信距離は約 6 mm 程度と推定できた。

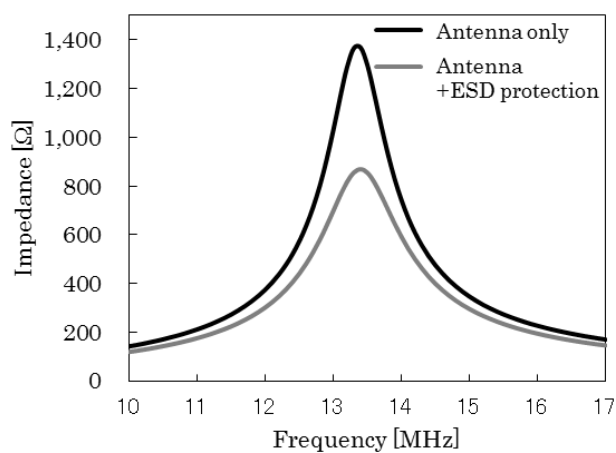


Fig. 5 Antenna impedance of layout 2.

通信可能距離を確認した結果,磁性シートを使用せずともスマートフォンで通信可能距離が5.7 mm 確保できているため,市販されているカバーを装着したスマートフォンでも通信可能な距離であると判断した。(Table 2)

Table 2 Communication distance.

		Condition		
		④	⑤	⑥
Insert part	ESD protection	NG	OK	OK
	Magnetic sheet	NG	$t = 0.05$	NG
Communication distance (Worst case)	NFC reader	27	20	20
	Smartphone	>6	6.0	5.7
		Examination [mm]		

3. スマートフォンでの通信距離

2. 2に記載の構造で,スマートフォン 18 機種(ここでは機種名を伏せて A~R とする)の通信可能距離を測定した. 18 機種の中には同一メーカーの物も含まれている.(Fig. 6)

PC 用の NFC リーダの通信距離が 20 mm だったのに対し,スマートフォンは全機種でそれ以下の結果となった. また,機種によって通信距離に大きな差があることが分かった. しかしながら,通信距離が 6 mm 以上確保できているため,ユーザーの実使用上問題無いと判断した.

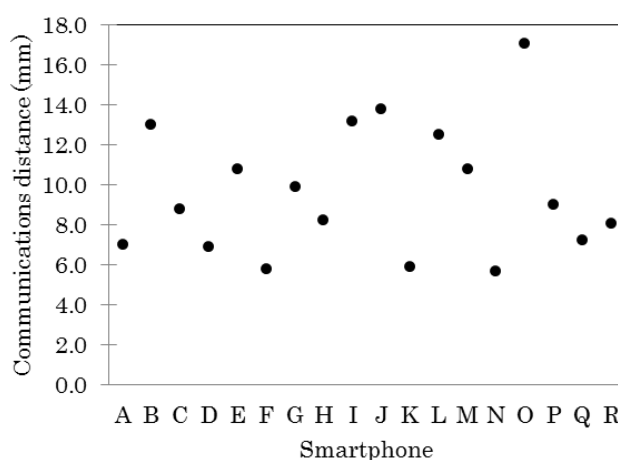


Fig. 6 Communications distance (Smartphone).

4. まとめ

「カバーガラス - LCD」間にアンテナを搭載することで磁性シートが無くとも NFC リーダ，スマートフォン共にお客様がストレスを感じることなく通信可能であるという判断に至った．

セイコーインスツル株式会社では，今後もお客様ニーズやネットワークサービス等のインフラ動向に対応し，ベネフィットを提供できるランニングウォッチの開発・製品化を行っていく．

5. 参考文献

- 1) <https://my.asics.com/us/ja-jp>
- 2) <http://asics-watch.com/products/ap02.html>

特集

機械式時計の歴史 1 *

ー誕生からクロノメーターの完成までー

土屋 建治**

1. 緒言

機械式時計の歴史を2回に分けて解説する。1回目の本稿はクロノメーターの開発と時間精度向上の歴史を中心に扱う。

2. 初期のクロックとウォッチ

ヨーロッパで機械式時計が製作されるようになったのは13世紀とされるが、どこに誰が発明したかは明らかでない。初期の時計は櫓、教会、役所などに設置された塔時計であり、ムーブメント(機械部分)の枠や歯車は鉄製であった。重錘式の原動力が歯車を介してヴァージと呼ばれる脱進機、そして棒てんぷと呼ばれる調速機に伝わり、棒てんぷが左右に往復運動する。その往復にかかる時間の長さによって針の回転速度が決まる、という基本構造は今の機械式時計と大きくは変わらない。図1に典型的なヴァージ脱進機と棒てんぷを示す。冠型をしたヴァージ脱進機の歯が棒てんぷの上下2枚のパレットへ交互に力を与える。棒てんぷはひもで吊るされ、往復運動する。進み遅れの調整は2個の分銅の位置をずらすことで行う。

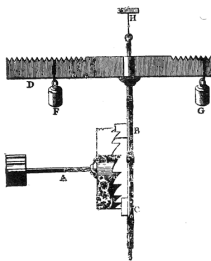


図1 脱進機と調速機 (ヴァージと棒てんぷ)

Chamberlain Paul M.: It's about time, The Holland Press Ltd, 1964, p.141
より転載

現在広く普及している調速機は振り子やひげぜんまい付てんぷだが、これらは各々に所定の振動数が与えられ、多少条件が変わっても周期はあまり変化しない。だからこそ時計は正確に時を刻むわけであるが、初期の時計に用いられた棒てんぷは少々事情が異なる。棒てんぷ体の慣性モーメントと、それに対して左右交互に力を与える脱進機の回転トルクの釣合いで周期が決

まるので、摺動部分の油の状態やきしみ具合で時間精度は大きくばらつき、日差15分程度が実力であった¹⁾。

16世紀には持ち運びができるウォッチ(ポータブル時計)が南ドイツを中心に作られるようになった。原動力が脱進機、調速機と伝わる仕組みは塔時計と同じであるが、ウォッチの動力に重錘は使えないので、代わりに動力ぜんまいが用いられた。動力ぜんまいは巻縮めた時とほどけてきた時の出力に差があり、進み遅れの原因となる。動力ぜんまいのトルクを均一化するための装置として、フュゼと呼ばれる円錐状の中間車に腸線(ガット)または鎖を巻き付け、トルクを平坦化する機構が普及した。調速機は小型の棒てんぷや丸てんぷであるが、ひげぜんまいが普及する18世紀初頭まで、ウォッチの時間精度は日差30分程度であった²⁾。

3. 振り子時計

振り子の等時性、すなわち振幅が変化しても周期がほぼ一定であるという法則を発見し、時間計測に振り子を用いたのがガリレオ・ガリレイ(1564-1642)である。彼は天体観測の計時に振り子を用いたが、振り子の振幅は減衰して止まってしまう。そこで1周期毎に振り子に力を与え、同時に振り数をカウントする機械、つまり振り子時計を考案した。しかし、すでに視力が衰えていた彼は死の1年前に振り子時計の構造をスケッチさせただけで実際に動く時計を製作することはなかった。

初めて振り子時計を製作させた人物はオランダの科学者、クリスチャン・ホイヘンス(1629-1695)であり、その最初のものは1657年製であった。糸で吊るしただけの単振り子の場合、周期は振幅にわずかに依存し、振幅が大きければ大きいほど周期は遅れてしまう。これを時計に用いた場合、例えば、経時変化等によって振り子の振幅が落ちると、時間精度が進みに転じることになる。ホイヘンスは振幅に応じて振り子の有効長を補正する「当て板」を発明した(図2、左)。1657年の時点でこの板の形状は経験により合わせ込まれていたが、1659年頃にはサイクロイド曲線が適していることが明らかになっている³⁾。ホイヘンスの振り子時計により、時計の精度は従来の日差15分程度から日差10~15秒程度へと劇的に向上した⁴⁾。また、すでに設置されている塔時計の棒てんぷを振り子に差し替える改造は比較的簡単であり、振り子がもたらす高精度は瞬く間にヨーロッパ中に広がった。

その後イギリス人による重要な発明が相次ぎ、振り子時計は精度を上げた。ホイヘンスは1657年の振り子時計にヴァージ脱進機を使用したため、その振幅は数

* 原稿受付 平成29年10月20日

** シチズン時計株式会社

10° にもなったが、1670 年代にロバート・フックが振幅を 5° 程度まで落とした脱却式アングル脱進機を考案し、等時性を高めた。(発明者に関してはウィリアム・クレメント説もある)。ロンドンの時計師、ジョージ・グラハム (1673-1751) は 1715 年に摩擦の影響を低減した直進式アングル脱進機を、そして 1725 年には温度による振り子の伸縮を自動補正する水銀式補正振り子を発明した。この時点で、良く調整されたクロックの時間精度は日差 1 秒程度となった⁵⁾。

4. ひげぜんまい

1675 年、クリスチャン・ホイヘンスは渦巻き型のひげぜんまいを発明した (図 2, 右)。渦巻き型のばねの内端部分はてんぷの真 (てん真) に、外端部分はムーヴメント本体側に固定される。脱進機を介して動力を受けたてんぷはてん輪の慣性モーメントとひげぜんまいの復元力の釣合いによって、安定した周期で往復運動する。これを調速機に用いることによりウォッチの時間精度は日差 30 分程度から日差 5 分程度まで向上し⁶⁾、その後現在に至るまで無くてはならない部品となった。

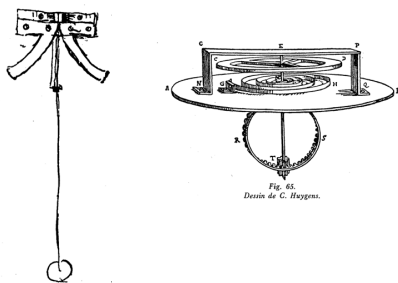


図 2 ホイヘンスの振り子とひげぜんまい

Defossez L.: Les savants du 17e siècle et la mesure du temps, Edition du Journal Suisse d'Horlogerie et Bijouterie, 1946, p.98, p.193 より転載

ホイヘンスに対し、科学者、ロバート・フック (1635-1703) はただちに発明の先取権を主張した。実際はどちらがひげぜんまいの発明者なのであるか? 渦巻き型のひげぜんまいを最初に公にしたのはホイヘンスであるが、仮に渦巻き型に限らなければ、つまり「てんぷとムーヴメント本体を連結するばね」はすべてひげぜんまいに含まれるとするならば、その発明者はフックとされる。少なくともフックは 1660 年頃には 20 種類に及ぶばね付てんぷを考案し、それについて講義を行っていた⁷⁾。彼が考案したばねが渦巻き型であったかについては多くの証言が否定的である。例えばゴットフリート・ライプニッツ (1646-1716) は「フック氏はばねの振動による携帯時計をホイヘンス氏以前に製作していたと表明したが、少なくとも渦巻き型のひげぜんまいを用いた彼の時計を見た者はいなかった」としている⁸⁾。遡ること 10 年前、1665 年にホイヘンスはフックがばね付てんぷを考案していることについてフックの

同僚、ロバート・モレイ卿からの手紙で知ったが、その返信の中で「ばね付てんぷは姿勢の差によって振動の速さに差が出るはずだ」とその実用性に疑問を示している。姿勢の差で周期に差が出てしまうばね、ということは渦巻き型ではなく直線型が少なくともとも平衡が取れていないもの、とホイヘンスは解釈していたと思われ⁹⁾。従って、フックのものが渦巻き型であるという認識は当時の学者間にも無かったと推察される。

なお、ホイヘンス、フック以外では、1660 年頃にフランスでロアネ公とパスカルが、そして 1674 年には同じフランスのドゥ・オットフェューユ神父が渦巻き型ではないばね付てんぷを考案している。同時期に複数の学者がてんぷにばねをつないで振動させることを考えていたことは間違いないが、渦巻き型ひげぜんまいの発明者という荣誉が与えられるのはホイヘンスである。

5. 経度問題とクロノメーター

遠洋航海が盛んになるにつれ、航海や海図作成に携わる者にとって海上で正しく経度を測定する方法がいつになったら実用化されるのが重大な関心事となった。天文学の発達とともに、天体の観測で経度を測定する手法がいくつも提唱されたが、なかなか実用には至らなかった。複雑な天体観測や計算に頼らず、シンプルに経度を測定するには正確な時計 (クロノメーター) を用いるのが最も良い方法のように思われた。クロノメーターで出港地の時刻を保管できれば、天測で得たローカル時刻とクロノメーターの指示値を比較することでたちまち経度が判明するわけだが、17 世紀末の時点で、上質なウォッチの精度は日差 1 分が限界であり、経度測定には誤差が大きすぎた。しかも、遠洋航海で使用する以上、温度と湿度の変化、船の揺れ、そして当時から時計師の悩みであった時間精度の経時変化の問題に直面することになり、時計による経度問題の解決は困難であらうと思われていた。

17 世紀以前から海上での経度測定に時計を使用する試みは始まっていた。スコットランド出身でオランダに亡命していたキンカーディン伯・アレクサンドル・ブルス (?~1680) はさまざまな科学技術に通じた実力者であった。経度問題に関心を寄せていた彼は、ホイヘンスと話し合い、1662 年に振り子時計を 2 台製作させ、イギリス海軍士官、ロバート・ホルムスに託した。この時計には海上で振り子の振動の向きが狂わないようにするガイド機構が追加されたが、これはブルスの考案であった。1664 年、ホルムス指揮によるアフリカ沖での作戦中、時計によって示された経度が従来の船位推算法より 3~4 倍も精度が高かったと報告され、ホイヘンスも喜んだが、それに対する異議は当時からあった¹⁰⁾。1669 年、クレタ島派兵を命ぜられたフランスの軍人、ボーフォール公が指揮するモナーク号に別のホイヘンスの振り子時計が搭載された。この時計には脱進機へ伝わる動力が均一化されるルモントワール機構が用いられた¹¹⁾。南仏のトゥーロンからクレタ島までの 17 日

間の航海で、実際の経度差 $19^{\circ} 13'$ に対し測定結果 $20^{\circ} 5'$ と良好な結果を残しているが、これについても評価は分かれるところである。有名なクロノメーター師で、時計史家としても有名だったフェルディナン・ベルトゥー (1727-1807) はこの時の実験結果を「満足のいくもの」と評したが、フランス海軍士官で航海史家のフレデリック・マルゲ (1874-1951) は「本当に成功だったのかもしれないが、一回きりの評価で判定すべきではないだろう。当時、地中海の海図が正確なものではなかった点も考慮すべきだ」としている¹²⁾。ホイヘンスは船の揺れに影響されづらい「三角振り子」(図3)も考案したが、この振り子が実際に海上で評価されたかについてはよく分かっていない¹³⁾。その後、1685年から1687年にかけて、ホイヘンスの振り子時計は海上で複数回評価されたが、期待通りの結果を得ることはなかった。

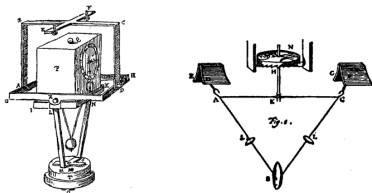


図3 ホイヘンスの三角振り子

Defossez L.: Les savants du 17e siècle et la mesure du temps, Edition du Journal Suisse d'Horlogerie et Bijouterie, 1946. p.100 より転載

6. 経度のハリソン

1714年、イギリス議会は経度法を可決した。イギリスからアメリカまでの航海において、経度を誤差 1° 以下で測定する手法を開発したものに10,000ポンド、経度を誤差 $40'$ 以下で測定する手法を開発したものに15,000ポンド、経度を誤差 $30'$ 以下で測定する手法を開発したものに20,000ポンドの賞金を与えるという内容であった。(経度 $1^{\circ} = 60' = 3600'' =$ 赤道上の60海里)。この法律に励まされ、クロノメーター開発が進むわけだが、当時のクロノメーターの評価方法は概して次のとおりであった。まず地上で初期の時間精度を検定し、平均日差を記録した後、時刻を出港地に合わせ、出港する。例えば検定で平均日差が $+10$ s/d (秒/日) と記録された場合、出港から10日後に経度測定するときにはクロノメーターの指示値から補正值100秒を差し引く。補正後の指示値と、出港地の正しい時刻の差を本稿では便宜的に「計時誤差」と呼ぶことにする。計時誤差は検定で記録された平均日差に対する日々の偏差の累積であり、経度の測定精度に直接反映するので、これがクロノメーターに求められる基本性能となる。経度 $30'$ は時間にして120秒に相当するが、仮にイギリスからアメリカまでの航海が42日間かかったと仮定すると、その期間中クロノメーターに許される計時誤差は1日にならして3秒弱となる。18世紀初頭のウォッチの実

力からみて、経度法の要求は法外に高かった。

最終的に賞金を獲得することになるイギリス人時計師、ジョン・ハリソン (1693-1776) はヨークシャー地方出身で、大工の子として生まれた。彼は幼少の折、病氣療養中に与えられた時計に魅せられ、時計製作を独学で学び始めた。牧師から借りたニコラス・サウンダーソンの機械物理講義録をもれなく筆写するなど、理論に対する知識欲も強かったという。彼が1726年頃に製作したロングケーススタイルの振り子時計にはガラスホッパーと呼ばれる脱進機を備え、温度が変化しても鉄と黄銅の熱膨張率の差で有効長を一定に保つ簀子(すのこ)型振り子が用いられた。歯車の多くは木製であり、その自己潤滑性から給油が不要であった。彼の言を信ずるならば、この時計は数年にわたり月差1秒前後を維持したという¹⁴⁾。

ハリソンは1735年のH1を皮切りに、生涯で5台のクロノメーターを製作した。H1, H2, H3は設置型であり、いずれもガラスホッパー脱進機と温度補正装置が用いられた。最終的に賞金を獲得したのは1759年に完成したH4(図4)だが、これはケース外径が132mm、大型ウォッチのような体裁で、持ち運びも可能であった。1923年の初版以来、何度も再版されているルペルト・グールドの「マリンクロノメーター、その歴史と発展」の記述を基にH4の仕様をおさらいしたい。調速機はひげぜんまい付の鉄てんぶ(直径約55mm)で振動数は当時としてはかなり高い2.5Hzである。鉄と黄銅の熱膨張率の差を利用したバイメタル式温度補正装置がひげぜんまいの有効長を調整し、温度変化によるひげぜんまいの弾性変化の影響、すなわち進み遅れが打ち消される。脱進機は意外なことに「伝統的な」ヴァージ式であるが、てんぶの振幅が 90° を超えても振り当てることはなく、サイクロイド型に切られたダイヤモンド製パレットの背面でがんぎ歯を受けるという特殊な構造であった。なお、てんぶの振幅限界値は 145° であった。7.5秒毎に四番車がルモントワール機構に内蔵された渦巻きばねを巻き上げ、その定トルクが脱進機と調速機に与えられることで、安定した振動を得ている¹⁵⁾。なお、H5はH4の複製可能性を証明するために1770年に製作された同型機である。

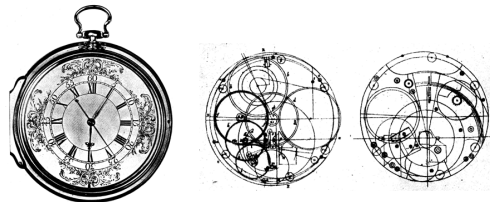


図4 ハリソンのクロノメーター「H4」

Gould Rupert: The marine chronometer, its history and development, The Holland Press, 1973. p.53 より転載

Ditishheim Paul: Le 250^{ème} anniversaire de l'Observatoire de Greenwich, Journal Suisse d'Horlogerie, 1926. p.16 より転載

1761年から翌年にかけて、H4はポーツマス～ジャマイカ間の航海で評価された。使用された船は往路が軍艦デットフォード、復路が軍艦マーリンであった。往路の61日間で計時誤差-5秒、経度誤差1' 15"とこの時点で経度法の要求（経度誤差30'）を十分に満たすことができたが、復路も評価は継続され、往復の5か月間で計時誤差1分53秒5、経度誤差28' 22"を記録し、評価は成功に終わった¹⁶⁾。しかし、月と恒星の角度を観測し、月の運行表で経度を推定する方法（月距法）を支持する学者達の意向が働いたとも見られ、1回の評価結果だけでは賞金の一部しか出ず、H4は1764年にポーツマス～バルバドス（西インド諸島）間の航海で再評価されることになった。その結果は、往路の43日間で計時誤差38.4秒、経度誤差10' 弱、往復の156日間で計時誤差54秒、経度誤差14' 弱と規格30'を満たすものであり¹⁷⁾、1回目の評価結果が一時の幸運ではなかったことが証明された。ハリソンはあらかじめ実測した温度と時間精度の相関を「補正表」にして航海に立ち会った息子ウィリアムに手渡していた。この補正表に基づいて時計の誤差を計算し直すと156日間の航海におけるH4の計時誤差はたった-15秒、すなわち1日あたりにならずと0.1秒という結果であった。

ホイヘンスがひげぜんまいを発明してから100年もたずして、時計は厳しい環境下でも正しく時間を測定できる精密機器になった。ハリソンは明らかに20,000ポンドを受ける資格があり、亡くなる4年前の1772年、国王ジョージ3世の強い意向で賞金の残金を受けることができた。

7. ル・ロワのクロノメーター、「A」と「S」

フランスにおいてもクロノメーター開発は盛んであった。ピエール・ル・ロワ（1717-1785）やフェルディナン・ベルトゥー（1727-1807）という才能ある時計師によって製作されたクロノメーター実験機は複数回の航海で評価され、良好な成績を残している。しかし、彼らに続く世代ではルイ・ベルトゥー、ブレゲらが少数のクロノメーターを製作したのみで、イギリスや後に続くスイスのように産業化されることはなかった。

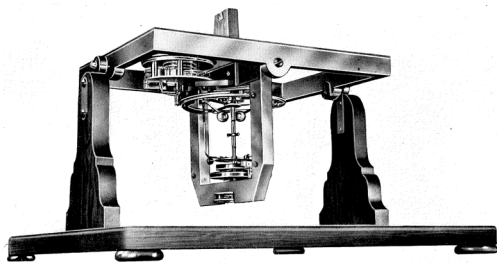


図5 ル・ロワのクロノメーター（AまたはS）

Conservatoire National des Arts et Métiers : Catalogue du Musée section JB Horlogerie, 1949, p.246 より転載。

ピエール・ル・ロワの設計思想は、下に詳細する通り、1) ひげぜんまいによる等時性の保証、2) てんぷ（慣性モーメント）による温度補正、3) 自由脱進機、の3要素から成り¹⁸⁾、ひげぜんまい付てんぷが持つ本来の特性を最大限に伸ばし、外乱に対して頑強な構造とするもので、この考え方はアーノルドやアーンショウがイギリスの時計師達の手によって発展することになる。ル・ロワはこれらの思想を盛り込んだクロノメーター「A」（Ancienne, 古い、の意）と「S」（Seconde, 2番目、の意）を1766年に製作した（図5）。

1) 等時性ひげぜんまい

一般に渦巻き型のひげぜんまいが膨張伸縮運動する時、てんぷには水平方向の圧が加わる。てんぷは軸受により支持されているので、てん真には振幅に応じて変化する側圧がかかることになる。ル・ロワはこの側圧が等時性（振幅が変わっても周期が変化しない性質）を損ねることを知っていた。AとSに用いられたひげぜんまいは側圧を相殺するために対称に配置された2重タイプで¹⁹⁾、巻込角（ひげぜんまいの巻出しと巻終りの角度）は巻数プラス1/4周に設定された²⁰⁾。後世になってちょうちんひげやブレゲひげで側圧を低減し、巻込角で等時性を合わせこむ技術が一般化するが、ひげぜんまい設計で等時性を保証するという思想の先駆者はル・ロワであった。彼の等時性への自信は実験機にあえてフュゼヤルモントワールといった動力を均一化する装置を用いず、動力ぜんまいのトルク変動がそのまま脱進機、调速機に伝わる構造としたことから分かる。

2) てんぷの慣性モーメントによる温度補正

ル・ロワは温度変化によるひげぜんまいの弾性変化の影響、すなわち進み遅れを補正するため、温度によっててんぷの慣性モーメントを変化させ、ひげぜんまいによる誤差を打ち消すべきであるとした。ハリソンの温度補正装置はひげぜんまいの有効長を変えるが、ル・ロワは等時性をひげぜんまいの長さで最適化するという考えを持っていたのでハリソンの方式を好まなかった²¹⁾。彼がAとSに使用したのはアルコールの熱膨張でガラス管に充填した水銀の位置を変え、慣性モーメントを調整するという補正てんぷであった。実はそれ以前の1761年に彼は鉄と銅の熱膨張率の差を利用して有効径すなわち慣性モーメントを変えるバイメタルてんぷも考案していたが、製法も含め、これを完成させることになるのはイギリスのアーンショウである²²⁾。

3) 自由脱進機

ル・ロワは「デテント脱進機」を考案した。それまで使用されていたヴァージ脱進機やシンダー脱進機はてんぷの振動中、常にかんぎ車（脱進機）とてんぷ（调速機）が接する構造のため、ひげぜんまい付てんぷ自身が本来持っている安定した振動特性を損なう要因となっていたのである。彼の提案はまったく妥当なもので、脱進機と调速機が力の受け渡しをする瞬間のみ両者を

接触させ、それ以外の時間はてんぷを自由振動させるというものであった。この特性から、ル・ロワのデテント脱進機と、イギリスのトーマス・マジ (1715-1794) が考案したレバー脱進機は「Échappement libre (自由脱進機)」として分類されるようになった。デテント脱進機はその後 20 世紀に至るまで機械式クロノメーターの標準仕様となった。

科学アカデミー会員で科学技術の庇護者を自任するクルタンヴォー侯・フランソワ・セザール・ル・テリエはクロノメーターコンクール用にどうぞと優美な帆船、ロロール号を建造させた。1767 年 5 月、ロロール号はル・ロワの A と S、その他の時計師が製作した実験機を載せてル・アーヴルを出帆、北海の旅に出た。航海は 3 か月半で、ダンケルクやアムステルダムなどに寄港しながらクロノメーターの評価が進められた。

A は前半調子が悪かった。寄港地で観測するたびに日差は進み傾向を示し、出港地、ル・アーヴルで記録された検定結果、平均日差 $+27$ s/d に対し、ダンケルクで日差 $+30$ s/d、ロッテルダムで日差 $+33$ s/d と偏差は開く一方であった。航海の中盤でアムステルダムに寄港した際に観測された日差は $+37$ s/d、すなわち偏差 10 s/d に達してしまい、前半 52 日間の成績は計時誤差 4 分 52 秒、経度にして $1^{\circ} 10'$ であった²³⁾。実は A はパリからル・アーヴルへの搬送中にてんぷを吊るすワイヤーが切れ、現地の宿屋で修繕された経緯があり、ル・ロワはこの前半 52 日間の経時変化はこれに起因するものと主張した。実際、航海の後半から A の時間精度は安定に転じ、アムステルダムで記録された日差を基準として後半 40 日間のみ見ると、計時誤差 51 秒、経度誤差 $13'$ 弱という良好な結果であった²⁴⁾。一方、もう 1 台の S については後半のみの評価となったが、40 日間で計時誤差 15.5 秒、経度誤差 $4'$ と完璧な結果であった²⁵⁾。

ロロール号での評価結果は A、S とともに良好であったと言えるが、あくまでも近海での評価であり、より条件の厳しい遠洋航海での評価が求められた。翌 1768 年にフランス海軍のフリゲート艦、ロンジュエ号に A と S は載せられ、ル・アーヴルから、現在のカナダ、ニューファウンドランド島までの往復航海で再評価されることになった。往路 42 日間で観測された経度誤差は A がわずかに $0' 21''$ (!)、一方の S はやや安定せず $52' 39''$ であった。またスペインまでの復路も含めた往復 109 日間の経度誤差は A が $56'$ 、S が $1^{\circ} 45'$ であった²⁶⁾。

A と S は軸受けに穴石を 1 つも使用せず、フゼもルモントワールも備えていなかったが、イギリスの経度法が求めた性能、すなわち「イギリスからアメリカまでの航海で誤差 $30' \sim 1^{\circ}$ 以下」の実力は備えていたのである。「作りやすいこと、丈夫なこと、修理がしやすいことを重視すべきであり、将来使われる全てのクロノメーターはこの実験機に近いものになるであろう」²⁷⁾ とル・ロワは書き残したが、その通りになった。現在、A か S かは特定できないが、そのうちの 1 台がパリの工芸博物館にひっそりと展示されている。

8. アーノルドとアーンショウ

ジョン・ハリソンは 1761 年から 1764 年にかけて行われた H4 の評価でクロノメーターが経度測定に使用できることを実証し、自身による H5 や、ラーカム・ケンダルによる K1 などによってその複製可能性も証明されていたが、例えばサイクロイド形状のダイヤモンドを部品に使用するなど、量産が難しいことは明らかであった。ル・ロワの精神を引き継ぎ、クロノメーターの量産化に成功したのがイギリスのジョン・アーノルド (1736-1799) とトーマス・アーンショウ (1749-1829) である。アーノルドは 1770 年代から等時性に優れる「ちょうちんひげ」、ならびにてんぷの慣性モーメントによる温度補正装置をクロノメーターに使用し始め、アーンショウとはほぼ同時期に耐久性に優れるスプリング・デテント脱進機を考案した。これらにより、シンプルで振幅変化、温度変化、経時変化に強いクロノメーターが量産可能となった。なお、アーノルドとアーンショウの工房で作られたクロノメーターはそれぞれ 2,000 台と推計される²⁸⁾。アーノルドは携帯されることを前提とし、すべての姿勢で調整されたポケット・クロノメーターも多く製作している。中でも 1779 年にグリニッジ天文台に提出された N° 36 は優秀であった。初期の 1 か月で検定した平均日差に対し、13 か月間の携帯試験中に累積した計時誤差は 2 分 33 秒、そして日較差 (2 日間連続して確認された日差の差) は 3 s/d を超えることがなく、また、6 姿勢間の最大姿勢差は 4.2 s/d という結果を残している²⁹⁾。

9. クロノメーター技術の展開

19 世紀を通じ、クロノメーター技術、特に等時性調整、温度補正調整を含む調速技術全般、そして時計の時間精度を観測する検定技術は一般用ウォッチにも展開され、それらの精度向上につながった。

アーノルドやアーンショウはクロノメーターにちょうちんひげを用いた。ちょうちんひげは同心状に膨張伸縮する。従って、てん真にかかる側圧が小さく、振幅とひげぜんまいから与えられる力が完全な比例関係となり、等時性が向上する。しかし、ちょうちんひげの欠点はその円筒形状そのものであり、当時一般に流行しはじめていた薄い懐中時計に用いることは難しかった。パリで活躍していた時計師、アブラハム・ルイ・ブレゲ (1747-1823) は従来の平ひげぜんまいを二段構造とすることでひげぜんまいを同心状に膨張伸縮させた。これが今なお用いられているブレゲひげである。アーノルドやブレゲは手探りで最適なひげぜんまい形状を求めたが、それに理論的な根拠を与えたのはフランス人鉦山技師、エドゥアール・フィリップス (1821-1882) である。1861 年、彼はディエップのクロノメーター師、ジャン・エメ・ジャコブの依頼を受け、初めてちょうちんひげの外端カーブの数学的解析を行い、最適な条件を示した。スイス、ル・ロックルの調整師、ジュルス・グ

ロスマン (1829-1907) は実地経験からフィリップスの条件が正しいことを確信し、後にそれを補った人物である。彼はひげぜんまいの内端巻出し位置と垂直姿勢間の姿勢差に相関があることを見出し、その解決法として内端に特殊なカーブをつけることを提唱した。グロスマン父子はスイスの時計教育に深くかわかり、調整法の知見を広げた (図 6)。



図 6 フィリップス・カーブとグロスマン・カーブ

Ditisheim Paul : Le spiral réglant et le balancier depuis Huygens jusqu'à nos jours, Editions du Journal Suisse d'Horlogerie, 1945. p.64 より転載

温度補正に関しては鉄と黄銅から成るバイメタルてんぶの普及で一次温度誤差 (低温と高温の日差の差) の問題については解決を見ていたが、二次温度誤差 (常温と低温、常温と高温の日差の差) について課題を残していた。スイス、フルリエ出身の物理学者、シャルル・エドゥアール・ギヨーム (1861-1938) は 1899 年からこの問題に取り組み、バイメタルてんぶの材料を鉄ニッケル合金と黄銅とすることで二次温度誤差を限りなく無くすことに成功、1900 年のパリ万博で展示された。ギヨームはこのてんぶを「Intégral (アンテグラル)」と名付けたが、その性能に魅せられた時計師達により次第に「Balancier Guillaume (ギヨームてんぶ)」と呼ばれるようになった。

スイスの天文台 (ヌーシャテル、ジュネーヴ) やクロノメーター検定機関 (B.O.) はデテント脱進機以外の時計でもカテゴリーごとに定められた規格を満たせばクロノメーターの称号を与えたことから、一般用に製造されたスイスレバー脱進機の懐中時計や腕時計をクロノメーターとして販売する道が開かれた。現在でも C.O.S.C. という中立機関がスイスメイドムーヴメントの腕時計クロノメーター検定業務を実施しており、その認定が製品に付加価値を与えつづけている。

参考文献

- Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.178
- Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.178
- Defossez L. : Les savants du 17^e siècle et la mesure du temps, Edition du Journal Suisse d'Horlogerie et Bijouterie, 1946. P.98
- Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.181
- Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.211
- Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.199
- Defossez L. : Les savants du 17^e siècle et la mesure du temps, Edition du Journal Suisse d'Horlogerie et Bijouterie, 1946. p.216
- Defossez L. : Les savants du 17^e siècle et la mesure du temps, Edition du Journal Suisse d'Horlogerie et Bijouterie, 1946. p.218
- Defossez L. : Les savants du 17^e siècle et la mesure du temps, Edition du Journal Suisse d'Horlogerie et Bijouterie, 1946. p.217-218
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.133
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.133-134
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.133-134
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.134
- Ditisheim Paul : Le 250^{ème} anniversaire de l'Observatoire de Greenwich, Journal Suisse d'Horlogerie, 1926. p.12
- Gould Rupert : The marine chronometer, its history and development, The Holland Press, 1973. p.50-53
- Gould Rupert : The marine chronometer, its history and development, The Holland Press, 1973. p.56
- Gould Rupert : The marine chronometer, its history and development, The Holland Press, 1973. p.60
- Conservatoire National des Arts et Métiers : Catalogue du Musée section JB Horlogerie, 1949. p.248
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.150
- Conservatoire National des Arts et Métiers : Catalogue du Musée section JB Horlogerie, 1949. p.248
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.151
- Ditisheim Paul : Le spiral réglant et le balancier depuis Huygens jusqu'à nos jours, Editions du Journal Suisse d'Horlogerie, 1945. p.75
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.163
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.163
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.164
- Marguet F. : Histoire générale de la navigation du 15^e au 20^e siècle, Société d'Editions géographiques, maritimes et coloniales, 1931. p.166-167
- Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.250
- Mercer Tony : Chronometer makers of the world, N.A.G.Press Limited, 1991. p.9
- Ditisheim Paul : Le 250^{ème} anniversaire de l'Observatoire de Greenwich, Journal Suisse d'Horlogerie, 1926. p.24



土屋 建治

昭和 53 年東京生まれ。平成 12 年学習院大学法学部法学科卒業、同年シチズン時計株式会社入社。時計開発部に配属される。平成 26 年から 3 年間マニユファクチュール・ラ・ジュール・ベレ SA (スイス、ラ・ショー・ド・フォン市) にて勤務。スイス時計学会会員。

特集

機械式時計の歴史 2 *

ーウォッチ製造の歴史ー

土屋 建治**

1. 緒言

機械式時計の歴史、第2回となる本稿では一般用ウォッチ製造の変遷を中心に解説する。

2. 時計師の誕生と分業化

中世の職人は多能工であり、初期の機械式時計を製作したのは錠前師、鍛冶師、鉄砲師、大砲師、宝飾師などであったが、次第に時計製作を専門とする「時計師」が1つの職能として認知されるようになった。中世ヨーロッパの都市では、商工業に携わる者はギルド（同業組合）の支配下にあり、16世紀半ばから17世紀前半にかけて、鍛冶師ギルドなどから派生する形で時計師ギルドが各地で組織された。ギルドは親方たちの独占的な地位を守るため、時計師の人数を厳しく制限し、過剰供給を防いだが、高まるウォッチへの需要に応えることには常に消極的であった。

技術的には、17世紀後半からウォッチ部品製作用の機械類、道具類が普及し始め、親方の下で修業した経験のない者でもルーチン作業で「ほぼ均一に」部品を製作できるようになりつつあったが、ギルドの制約が強い大陸部の都市では分業化への障壁が高く、ウォッチ製作は次第に衰退した。18世紀以降、ウォッチ製作の中心地はギルドの制約が弱く、分業化を進めることができたイギリス（ロンドン、ランカシャー地方）やスイス（ジュネーヴ、ジュラ地方）へと移っていった。

3. ジュネーヴの分業システム

ジュネーヴはフランスに一時的に併合される18世紀末まで時計師ギルドが健在で、1人の親方が雇える職人と徒弟はそれぞれ1~2人までとされ、部品製作用の機械類の使用に関して「型押し、裁断機、プレス機、ばね用製造機械の禁止」¹⁾が通達されるなど、旧態依然な側面を残していた。それにもかかわらず、ジュネーヴのウォッチ製作が衰退しなかった理由として、ナントの勅令の廃止（1685年）後、高い技能を持つフランス人時計師が多数亡命してきたこと、そして、部分的に分業化が認められ、高まる需要に応じられたことが挙げられる。日当たりのよい上層階の小部屋（キャビネ）を作業場としたことから「キャピノティエ」と呼ばれ、特権的な身

分を享受したジュネーヴ市内の時計師は17世紀末頃から部品のブランク製造を市外の専門業者に任せ、組立や仕上げといった「繊細で実入りの良い」仕事に集中するようになる²⁾。ジュネーヴに組立や仕上げの仕事を残すことでジュネーヴ製という伝統的な価値と量産性を両立していたとも言える。（ロンドンの時計師とランカシャー地方の部品製造業者の関係も似たようなものであった）。ジュネーヴのギルドが恐れたのは、部品供給にとどまらず、市外で組立まで行われた半完成品が市内に流入し、ジュネーヴ製と称して大量に売り捌かれることであり、それを防ぐため「半完成ムーブメントの市内への持込みが発覚した場合は没収、100フロランの罰金を科す」との政令が布告されたという³⁾。

このような分業システムにスイス時計産業の特色となる「エタプリサージュ」の原型を見ることができる。エタプリサージュとは中小規模の時計メーカーがエボーシュ（図1、地板と受のブランク、すなわち歯車類を上下で支持する板部品の粗加工上がり状態）、歯車、てんぶ、文字板、針、側等を専門の工場から購入し、自社の作業場と複数の下請を使い、部品同士の調整、仕上げ、組立を行う分業システムである。部品の手配から完成品出荷までをオーガナイズする時計メーカーは「エタプリスール」と呼ばれ、スイス時計産業の中核をなした。エタプリスールの中には問屋業務に集中し、工程の全てを下請に委託する者も現れた。



図1 エボーシュ（1825-1850頃、フォンテンヌムロン製）

La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon : La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon, Une usine plus que centenaire, 1925. より転載

4. ジュラのエボーシュ工場

18世紀後半から家内工業としてウォッチ製造が地場産業化し、現在でも主要生産地であり続けるのがジュラ地方（現在のスイス、ヌーシャテル州、ジュラ州、ベルン州、ヴォー州にまたがる山間部）である。ジュラは雪深く、農家の手が空く季節が長い。また、都市部よりも賃金水準が低く、分業化を妨げるギルドも存在しない、といった事情を背景に、伝統的な特産品であったレー

* 原稿受付 平成29年10月20日

** シチズン時計株式会社

ス編みの内職がエタブリサージュ、すなわち家内労働を中心とした分業制ウォッチ製作に置き換えられていった。ヌーシャテル地方の時計師の数は 1762 年の 686 人から 1802 年の 3,939 人へと増加している⁴⁾。



図2 ジュラの家内労働（彫金師）

Journal Suisse d'Horlogerie et de Bijouterie : Le livre d'or l'horlogerie, Journal Suisse d'Horlogerie et de Bijouterie, 1927. P.6 より転載。

ジュラのエタブリスールらが頼ったのは低廉価格のエボーシュ類であり、エボーシュ工場の生産性向上によりジュラ製ウォッチの価格競争力は高まった。はじめて大規模なエボーシュ工場の経営に成功したのは実はスイス人ではない。スイスと国境を接するフランス、モンベリヤール地方の小村、ボークール出身のフレデリック・ジャピイ（1749-1812）という実業家である。彼はスイス、ル・ロックルの機械技師、ジャン・ジャック・ジャンネレ・グリの下で働いた後、1771年に故郷に戻り、エボーシュ製造を始めた。1776年、ジャピイはジャンネレ・グリからルイ金貨 600 枚で機械類をすべて買い取り、ボークールの工場に移した。18 世紀末の時点でジャピイ工場の生産数は年 40,000 個、1 個 6.5 フランであったが、1810 年代には年 300,000 個、1 個 1.5~2.0 フランとなり、大幅な増産とコストダウンに成功している⁵⁾。当時、ジャピイが用いた機械類の図版が残されている（図 3）。4 箇所のピンを同時に地板に嵌めるアッセンブリー機、バッチ処理でねじ頭にドライバー溝を刻む機械、歯車のブランクを抜くプレス機などが含まれており、彼が合理化に熱心であったことが分かる。

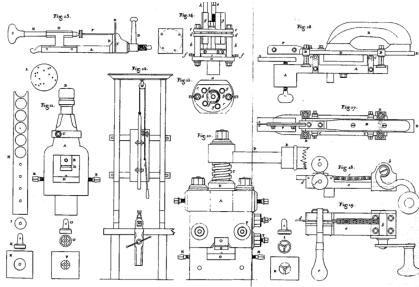


図3 ジャピイが用いた機械類

Laesser Claude : Interchangeabilité : Le rôle et la place de la normalization (dans Catalogue d'exposition, Philadelphia 1876, Le défi américain en horlogerie), Editions Institut l'homme et le temps, 2011. p.284 より転載

ジャピイ製エボーシュのほとんどはスイスのエタブリスール向けであり、毎週水曜に時計師が多く住むラ・ショー・ド・フォンに届けられた。市場で卵や野菜の脇で売られていたということからも、その流入は洪水のごとき様相だったと考えられる。ところで、18 世紀末のフランスは動乱の時代であった。フランスの工場にエボーシュ供給を頼る状況を危惧する声がスイス側から出る中、1793 年にはスイス人の手によるエボーシュ工場が設立された。場所はヌーシャテルとラ・ショー・ド・フンの中間に位置するフォンテンヌムロンという名の牧歌的な高台であった。作業員 120 人の半数は自宅で働き、機械類の動力は 1862 年に蒸気機関が導入されるまで牛や人力で得ていたという。すでに大幅なコストダウンを進めていたジャピイの価格に挑むのは簡単ではなかったが、1825 年には作業員 160 人まで増え、年 60,000 個のエボーシュを出荷するまでになった⁶⁾。1843 年にはジャピイとフォンテンヌムロン両社合わせて年 500,000 万個ものエボーシュを出荷している⁷⁾。この頃からスイスで使用されるほとんどのエボーシュは「カリブル・レピーヌ」（図 4）と呼ばれる薄型様式となった。これはフランスの時計師、ジャン・アントワーヌ・レピーヌ（1720-1814）によって 1770 年代頃から高級品を中心に広まっていたもので、プレゲに代表されるパリの高級時計の作り手が好んで用いたスタイルがエボーシュ工場によって低価格帯に広まった。

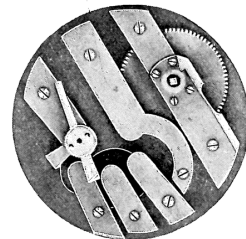


図4 エボーシュ（1850-1870 頃、フォンテンヌムロン製）

La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon : La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon, Une usine plus que centenaire, 1925. より転載

1870 年、時計生産では後発にあたるベルン州の時計労働者人口がヌーシャテル州のそれと同等となり、さらに東のドイツ語圏へも産業は波及した。ジュネーヴやジュウ谷の製品も含め、1870 年頃のスイス製ウォッチの出荷金額は全世界の 2/3 を占めたと言われている⁸⁾。

5. エタブリサージュと「100の手」

ジュラで栄えたエタブリサージュの工程を一例として整理する。エタブリスールは図 5 で示すようなエボーシュを購入する。19 世紀後半のエボーシュにセットされていたのは地板受類、巻上機構、香箱、二、三、四番車、緩急装置等付属部品類である。軸受用の穴石や脱進機、調速機（がんぎ車、アングル、てんぷ、図 6）はセットに含まれず、エタブリスールは専門の工場からこれらを

購入し、完成化までの調整、組立工程を自社の作業場や下請に割り振る。下請の多くは家内労働者であった。

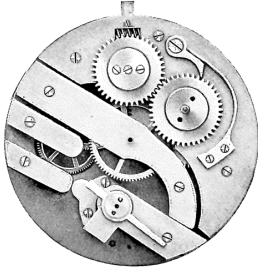


図5 エボーシュ（1876年頃、フォンテンヌムロン製）

La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon : La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon, Une usine plus que centenaire, 1925. より転載。

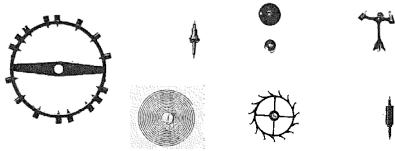


図6 脱進機、調速機一式（てんぷ、がんぎ車、アングル）

Fallet-Scheurer M. : Le travail à domicile dans l'horlogerie suisse et ses industries annexes, 1912. p.8 より転載。

表1 エタブリサージュの工順（一例、20世紀初頭）

工順	工程名	工程内容
0	エボーシュ工場	地板受類製造（粗）、歯車類製造、仮組立後エボーシュ工場出荷
エタブリスール部品集結（エボーシュ、脱進機、調速機等）		
1	脱進機、調速機の調整、位置だし	脱進機、調速機が入る穴の位置だし、穴あけ、穴石嵌込、ほぞ仕上げ、つめ石調整
2	てんぷサブ組立	てんぷ、ひげ合わせ、てんぷ受への組込
3	穴石嵌込	穴石嵌込（二番、三番、四番穴石）
4	文字板、針付	文字板、針の嵌合調整
5	側組立	側組立（装飾仕上げ前）
6	側付	ムーブメント、側の径合わせ、時刻修正機能調整
7	分解	分解、地板受類への通し番号刻印、送品箱詰め
8	修正	面取り、かえり取り等
9	表面処理	地板受類の金めっき、またはニッケルめっき
10	組立	ムーブメント組立、側付
11	検査、ガラス入れ	時間精度実測検査

Fallet-Scheurer M. : Le travail à domicile dans l'horlogerie suisse et ses industries annexes, 1912. p.12-13 の記述を基に筆者作成。

表1 にエタブリサージュの工順の一例を示す。多少時代の開きはあるが、図5で示したようなエボーシュは大体このような工程を通ったものと考えられる。工順0はエボーシュ工場、工順1～11はエタブリスールとその下請で行われ、職人達はばらつきの大きな部品同士を組み合わせて個別に調整し、性能を確保していた。

例えば工順1では、まず脱進機と調速機、すなわちがんぎ車、アングル、てんぷの噛合わせが最適となる3部品間の距離が特別な道具で割り出される。これらの寸法は一樣ではないのでその距離は少しずつ異なる。この道具により割り出された位置がそのまま地板に転写され、それに合わせて穴があけられ、穴石が嵌め込まれた。工順7では個別に調整されたムーブメント部品一式が後工程で混入しないよう、地板受類に通し番号が打たれる。

表からは2回以上分解組立が繰り返されていることが読み取れるが、エタブリサージュの分散性から、各工程内でも複数の下請を行き来していたことは充分想像でき、分解組立の回数は更に多かったはずである。エタブリサージュにおいて「時計は100の手を通る」⁹⁾と表現されたが、それは決して大げさでなかった。

6. 互換システムの先駆者

本稿で述べる互換システムとは、ある標準に従って自動機で互換性のある部品を製造し、最低限の調整作業のみで完成品まで組立てる生産方式を指し、多くの場合、複数の工程が同じ敷地に集約され、部品製造から組立まで一貫して行われる。

互換システムが目指すものはばらつきを生む手作業を極力減らすことであり、無作為に組み合わせられても一定の性能が確保されるように部品が均一に生産される。

クロックも含めた場合、ムーブメント製造において互換システムをはじめて導入した人物はアメリカ人時計師のイーライ・テリー（1772-1852）である。その興味深い物語については研究家、ミュラー・メルキ氏の著述を以下に要約し引用する。

「イーライ・テリーがコネチカット州、プリマスに水力を利用したクロック工場を作ったのは1806年頃であった。当時、独立したばかりのアメリカでは黄銅材は高価であり、彼は歯車や地板受類を木材で安く製造する方法を考案した。1807年、彼は商人のポーター兄弟と3年間で4,000個の木製クロックムーブメントを1個3ドルで製造販売する契約を結んだ。テリーはこの3年という期間を有効に活用し、最初の1年目は量産に取り掛からず、ムーブメントの設計構想と製造機械の開発期間に充てた。彼の目論見は、最初から生産性を考慮して各部品を設計し、ばらつきの許容範囲を設け、効率よく部品を生産し、特別な調整無しで組み立てられるようにすることであった。この試みは成功し、2年目には1,000個、3年目には3,000個のムーブメントをポーター兄弟に納品することができた」¹⁰⁾。

テリーの工場と技術は彼の後継者であるセス・トーマスに引き継がれ、アメリカ製クロックは世界市場を席巻した。

一方、ウォッチムーブメント生産で初めて大規模な互換システムを実現したのは1850年創業のウォルサム（アメリカ、マサチューセッツ州）である。なお、会社名は創業以来何度も変わっているが、本稿では最もよく知られたウォルサムで統一する。（後に出てくるエルジンやイリノイも同様である）。創業者のアロン・ルフキン・デニソンはすでに互換システムを導入していたスプリングフィールド銃器工場を視察し、ウォッチへの応用を思い立ったのであるが、銃器の互換システムを150もの微細な部品から成るウォッチムーブメントにそのまま適用することはできなかった。ドナルド・ホーク氏によると、それでもウォルサムが成功した要因として、下記点が挙げられるという¹³⁾。

- 1) 製造開発：ウォッチ部品専用の自動機械を自社開発したこと。旋盤に用いられるコレットチャックを発明したチャールズ・モズレー、かな（鉄製ピニオン）用歯割盤やねじ用自動旋盤を考案したチャールズ・ヴァンダー・ウォードら多くの製造技師が活躍した。
- 2) 製品開発：「モデルムーブメント」と呼ばれる標準設計の中で石数仕様、てんぷ仕様、緩急針仕様などで価格差をつけ、製品ヴァリエーションと生産性を両立させたこと。
- 3) 検査技術：部品毎に治具化され、常に校正されたダイヤルゲージなどを用いるなど、確実に効率の良い検査システムを開発したこと。
- 4) 設備投資：継続的な設備投資とコストダウンを進め、収益性を上げたこと。



図7 ウォルサム（部品製造区）1907年

Revue International de l'Horlogerie et des branches annexes, 15 novembre 1907 : La Waltham Watch C^o aux Etats-Unis, 1907. p.1192 より転載。

ウォルサムにおけるムーブメント 1 個当たりの人日は1854年に21日であったものが1859年には4日、1883年には2.2日まで下がっている。同社と1864年創業のエルジンを合わせた推定生産数は1872-73年の116,000個から1876-77年の200,000個へと倍増したが

¹²⁾ スイス製ウォッチのアメリカ向け輸出は、1872年の366,000個（1831万フラン）から1876年の65,000個（481万フラン）へと大幅に落ち込んだ¹³⁾。1873年からアメリカは不況期に入っており、スイス製ウォッチの苦戦は景気のせいでもあったが、いずれにせよウォルサム、エルジンに代表されるアメリカンウォッチとの競争が激化しつつあることは明らかであった。

7. フィラデルフィア万国博覧会

1876年、スイス勢にとって厳しい環境の中、アメリカ合衆国独立100周年を祝うフィラデルフィア万国博覧会が開催された。ウォルサムはヴァンダー・ウォード技師が考案したねじ用自動旋盤を実際の生産ラインのようにずらりと並べて見せた。この旋盤は画期的なもので、鉄の棒材が自動供給され、切削、ねじ立て、ドライバー溝入れを全自動で行うカム式自動旋盤であった。万博を視察したスイス代表団から報告を受けたジュラ相互カントン産業組合は事態を重く見、急遽ロンジン工場の製造技師、ジャック・ダヴィドをアメリカに派遣した。彼はウォルサム、エルジン、イリノイといった大手工場を訪問した後、下記のように大西洋の対岸ではウォッチ製造における互換システムが完成しつつあることを関係者に報告した。

「アメリカ時計産業は以下に挙げる基本原理に従っており、欧州におけるそれ（エタブリサージュ・システム）とは根本的に異なるものである。

- 1) 可能な限り機械で製造すること。
- 2) 経済性を追求し、ばらつきを抑えるために手作業を避けること。
- 3) ムーブメント組立を容易にするため、全ての部品の互換性を確保すること。
- 4) 事業継続と宣伝のため、高品質かつ丈夫な製品しか製造しないこと。
- 5) 1つ1つのムーブメントの品質を確保するためには完璧な治具を用いなければならないが、そのためにキャリパー（ムーブメントの型式）や外径のヴァリエーションを増やさないこと。
- 6) 機械生産の優位性を高めるために一度に大量生産すること。
- 7) 外装工場の工程が複雑になることを避け、ムーブメント工場からの独立性を保つため、各メーカーのムーブメント径を揃えること。

最も重要なことは製造用の機械類を作ることであり、それらは最も単純なものから最も複雑なものまで完璧でなければならない。」¹⁴⁾

8. マニファクチュールの誕生

ダヴィドの報告と前後するように19世紀後半からス

イスでも互換システムを採用した「マニユファクチュール工場」の建設が始まった。ジュラ地方の場合、ロンジン工場（ベルン州、サン・ティミエ）、ゼニス工場（ヌーシャテル州、ル・ロックル）がその先駆者であった。

1912年に刊行されたマリウス・ファレ・シュレール著「スイス時計産業における家内労働」から当時のゼニス工場に関する記述を以下に要約し引用する。成長著しいマニユファクチュール工場への期待をよく伝えている。

「近年の時計産業における傾向は全ての工程を一貫工場へ帰属させることであり、集約化と機械化が進められている。分散した作業場から作業場へ仕掛け途中のムーブメントを受け渡すのではなく、時間の無駄、運送費、リスクを廃し、同じ建屋でさまざまな工程が或るときは連携しながら、また或るときは独立して行われる。ゼニス工場は技術的にも商業的にも最もよく組織され、よく機械化されたマニユファクチュールの1つである。工場内で使用される機械類は約1,300台。そのほとんどが自社の工機部で準備されたものだ。全ての部品には互換性があり、(標準に)完全に適合しているので、ムーブメントの組立調整は容易かつ迅速である。従来のエタブリサージュとマニユファクチュール工場を比較し、前者では必要とされた調整作業が後者では機械化、合理化により大幅に省かれ、場合によっては完全に不要となったことに気付かされる。組立工程において、1人目の作業者は従来別々に行われていた巻上機構、日の裏機構、主輪列までの組立を行う。2人目の作業者は振付を担当し、脱進機、調速機を組み込むが、従来のように予めブランク状態で仮組、噛合い調整をしておく必要はなく、最終組立での調整が可能である。3人目の作業者は文字板、針付けと側入れを担当する」¹⁵⁾。

マニユファクチュール工場各社に設置された工機部門が互換システム導入に果たした役割は大きく、特に彼らが用いた金型技術により部品精度は向上し、組立工数の削減につながった。例えば、日本でも「大印タバン」として有名であったタヴァン時計会社（1890年創業、ベルン州、タヴァン）は従業員1,200人を数え、当時スイス最大級のウォッチー一貫生産工場であったが、1920年頃には地板受類の機能穴（穴石やブッシュ等が入る穴）を高い位置精度であけるための「仕上げ抜き（Rectification）」技術を導入している。当時の取材記事によると、この工程の専用機は「1/4 ソンティエム」、すなわち、0.0025mm単位という極めて高い精度で調整されていたという¹⁶⁾。同社はこの技術で生産性を上げ、完成ムーブメント日産4,000個を達成している。

9. エボーシュ工場とエタブリサージュの近代化

マニユファクチュールブランドの多くは、その後スイス時計産業をリードする存在になったが、大量生産で先行していたフォンテンヌムロンをはじめとする各

エボーシュ工場もまた互換システムの導入、そして半完成ムーブメントまでの一貫生産化に成功し、複雑であったエタブリサージュの工程の多くを不要とした。その結果、スイス時計労働者人口における家内労働者の割合は1890年の70%から1905年の37%、1929年の14%と減少した¹⁷⁾。

フォンテンヌムロンの社史によると、1893年に同社社長と技術部長は機械買付けのためシカゴ万国博覧会等に出張し、約20万フランかけて工機部を拡充している。1895年の時点で工機部の機械技師は45名となり、その設備の充実ぶりは同社の自慢の種であったという¹⁸⁾。同じ時期、スイスドイツ語圏でA. シルド、Ad. ミシエルなどのエボーシュ工場が次々と創業し、主要エボーシュ工場の出荷数は1892年の2,500,000個から1908年の5,000,000個へと倍増した¹⁹⁾。

第一次世界大戦期の軍需対応のため設備を増強した各エボーシュ工場は低コストで互換性のあるウォッチ部品を大量生産できるようになり²⁰⁾、大戦を挟み、労働者1人当たりのエボーシュ生産性は1913年の936.2個/年/1人から1920年の1551.2個/年/1人へと7年間で65%もの伸びを示している²¹⁾。1914年にA. シルド工場が「スイス時計業界初、子部品類の互換化」を達成したとされ²²⁾、他の工場もそれに続いた。1927年の業界紙に掲載されたフォンテンヌムロン、Ad. ミシエル、ETA等のほぼすべての主要エボーシュ工場の広告には「Interchangeabilité absolue（完璧なる互換性）」という文言が誇らしげに添えられている。

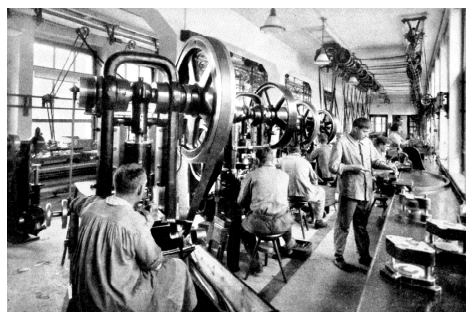


図8 1925年頃のフォンテンヌムロン工場

La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon: La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon, Une usine plus que centenaire, 1925. より転載

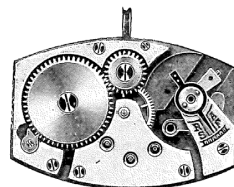


図9 エボーシュ（1924年頃、フォンテンヌムロン製）

La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon: La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon, Une usine plus que centenaire, 1925. より転載

図8に1925年頃のフォンテンヌムロン工場のプレス区の様子を、図9に同じ時期の同工場製腕時計エボーシュの例を示す。すべての穴石はエボーシュ工場内でアッセンブリーされ、後工程での穴位置の調整は不要となったことが分かる。

その後もエボーシュ工場の機械化は進められた。すでに主要エボーシュ工場のほとんどを傘下に収めていたエボーシュSAが1951年に発行した出版物によると、同グループはその年、17,400,000個のエボーシュを出荷する見込みで、その部品製造において9割の工程が半自動化済²³⁾であるとしている。

10. アメリカ製ウォッチの苦闘

20世紀初頭に生産額でスイスに再逆転された²⁴⁾とはいえ、生産個数は堅調に推移していたアメリカ製ウォッチは特に第二次世界大戦中からスイス勢に対し厳しい戦いを強いられることになる。下記にその要因を挙げ、表2にアメリカ製ウォッチ販売量と海外製ウォッチ輸入量の対比を示し、本稿を終わらせたい。戦後、アメリカ製ウォッチの生産数は戦前の水準まで回復したが、戦時中を通じて倍増した需要に応えたのはスイス製がほとんどを占める輸入品であったことが分かる。クォーツショックに至るまで続くスイス腕時計産業の繁栄はこの時点で約束されていたと言える。

- 1) アメリカに拠点を置くムーヴメント工場の軍需シフト、民生用ウォッチの減産。
- 2) スイス製ムーヴメントを使用したアメリカンブランド各社の成長。
- 3) 防水外装、耐震装置、クロノグラフ等の付加機能によるスイスブランド各社の商品力向上。

表2 アメリカ製ウォッチ販売量と海外製ウォッチ輸入量

	アメリカ製 ウォッチ販売数 (石入りのみ)	アメリカのウォッチ輸入量 (完成品、ムーヴメント含む)	
		8～15 石	16～17 石
1939 年	1,819	269	1,222
1940 年	2,226	319	1,583
1941 年	2,656	491	1,866
1942 年	1,845	737	2,260
1943 年	1,588	1,516	3,966
1944 年	1,516	1,249	4,540
1945 年	1,016	1,247	5,763
1946 年	1,772	1,021	6,226
1947 年	2,461	569	5,300

(単位：1,000 個)

Bolli Jean-Jacques : L'aspect horloger des relations commerciales américano-suisse de 1929 à 1950, Editions La Suisse Horlogère, 1956.

Tableau 8, Tableau 13 のデータを基に筆者作成

参考文献

- 1) Babel Antony : La fabrique genevoise, Editions Victor Attinger, 1938. p.38
- 2) Babel Antony : La fabrique genevoise, Editions Victor Attinger, 1938. p.34-35
- 3) Fallet-Scheurer M. : Le travail à domicile dans l'horlogerie suisse et ses industries annexes, 1912. p.193
- 4) Fallet-Scheurer M. : Le travail à domicile dans l'horlogerie suisse et ses industries annexes, 1912. p.198
- 5) Ebauche SA : Les Ebauches, 1951. p.38-40
- 6) La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon : La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon, Une usine plus que centenaire, 1925. p.21
- 7) Fallet-Scheurer M. : Le travail à domicile dans l'horlogerie suisse et ses industries annexes, 1912. p.265
- 8) Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.407
- 9) Fallet-Scheurer M. : Le travail à domicile dans l'horlogerie suisse et ses industries annexes, 1912. p.14
- 10) Mueller-Maerki Fortunat : Eli Terry and the interchangeability of components (dans Catalogue d'exposition, Philadelphia 1876, Le défi américain en horlogerie), Editions Institut l'homme et le temps, 2011. p.141
- 11) Hoke Donald R. : The development of watch manufacturing at the Waltham watch company, 1849-1910 (dans Catalogue d'exposition, Philadelphia 1876, Le défi américain en horlogerie), Editions Institut l'homme et le temps, 2011. p.156-173
- 12) Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.585-586
- 13) Fallet-Scheurer M. : Le travail à domicile dans l'horlogerie suisse et ses industries annexes, 1912. p.257
- 14) Koller Christophe : « De la lime à la machine » L'industrialisation et l'Etat au pays de l'horlogerie, Editions CJE, 2003. p.183-184
- 15) Fallet-Scheurer M. : Le travail à domicile dans l'horlogerie suisse et ses industries annexes, 1912. p.15-17
- 16) Revue internationale de l'horlogerie, 1^{er} Janvier 1923 : Une des plus grandes manufactures d'horlogerie du monde La Tavanmes Watch Co. , 1923. p.22
- 17) Koller Christophe : « De la lime à la machine » L'industrialisation et l'Etat au pays de l'horlogerie, Editions CJE, 2003. p.183
- 18) La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon : La fabrique d'horlogerie de Fontainemelon, Une usine plus que centenaire, 1925. p.29
- 19) Ebauche SA : Les Ebauches, 1951. p.98
- 20) Pasquier Hélène : La « Recherche et développement » en horlogerie, Editions Alphil, 2008. p.137
- 21) Koller Christophe : « De la lime à la machine » L'industrialisation et l'Etat au pays de l'horlogerie, Editions CJE, 2003. p.197
- 22) Ebauche SA : Les Ebauches, 1951. p.191
- 23) Ebauche SA : Les Ebauches, 1951. p.98, p.175
- 24) Landes David S. : L'heure qu'il est les horloges, la mesure du temps et la formation du monde modern, Gallimard, 1987. p.449



土屋 建治

昭和53年東京生まれ。平成12年学習院大学法学部法学科卒業、同年シチズン時計株式会社入社。時計開発部に配属される。平成26年から3年間マニユファクチュール・ラ・ジュール・ベレSA (スイス、ラ・ショー・ド・フォン市) にて勤務。スイス時計学会会員。

特集

機械式腕時計の原理と精度*

早川 和樹** 藤枝 久**

1. 緒 言

腕時計の精度を飛躍的に向上させたクォーツ式腕時計が世に出て 50 年がたった。昨今では電波修正時計や GPS 修正時計など、外部の高精度な時計と同期させることで、時刻修正する機能を持つ時計も存在し、実用上誤差とは無縁といってもよい。

一方、機械式腕時計は精度面・価格面においてもクォーツ式時計のほうが圧倒的に優位であるため一時はその数を減らした。しかしながら、1980 年代後半より、スウォッチグループをはじめとするスイス時計メーカーに牽引される形でラグジュアリー製品として復権を果たした¹⁾。さらに最近では電気に頼らず時を刻む面白さや常に動き続ける健気さから、愛着の持てる製品として、より広く人気を集めるようになっていく。

クォーツ式腕時計の発明によって機械式腕時計の精度開発競争に一旦の終止符が打たれたが、再び機械式腕時計に注目が集まる中で、改めて時計の基本機能としての精度向上に向けた研究が活発化しており、毎年のように新しい機械式腕時計が発表されている。そこで、本稿では機械式腕時計の原理と精度について解説する。

2. 機械式腕時計の原理

機械式腕時計の特徴として、ぜんまいで動く（電池が不要）、秒針が連続運針する（一秒間に複数回動く）というものがある。秒針の動き方については一部例外があるが、基本的な機械式腕時計においては、こうした特徴は一定のリズムでぜんまいが往復運動することで時間を刻み、ぜんまいが解けるエネルギーでぜんまいの往復運動を維持しているという、動作原理に基づいている。こうした機械式腕時計の原理について、輪列、調速機、脱進機とぜんまいを巻き上げる自動巻機構についてより詳しく見ていく。

2.1 輪列

機械式腕時計においては、図 1 に示すような S 字のぜんまいが収められた香箱車（一番車）から、二番車・三番車・四番車・がんぎ車・アンクル・てんぷとつながっている。歯車の連なりを輪列と呼ぶが、香箱からがんぎ車までの輪列を特に表輪列と呼ぶ。これを一列に展開したものを図 2 に示す。二番車から四番車は図 3 に示すような歯数が多く径の大きい“歯車”と、歯数が少なく径の小さい“かな”によって構成されており、常に歯車からかなに回転が伝えられ、巻き上げられたぜんまいがほどけようとする際の香箱車の回転を増速しながら伝えて

いる。機械式時計であれば表輪列の構成はおおむね同じであるが、完成体のサイズやその他の部品の配置条件を満たすため、様々な配置レイアウト²⁾が考案されている。



図 1 ぜんまいと香箱（ふた無し）

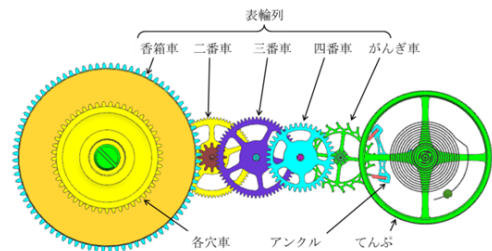


図 2 輪列展開図

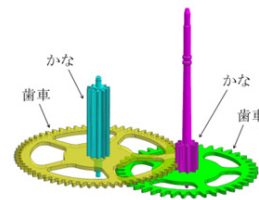


図 3 番車

また、表輪列以外には時刻表示やその修正を行うための裏輪列やぜんまいの巻上に使用される巻上輪列（自動巻に関する輪列を特に自動巻輪列と呼ぶ）、その他カレンダーやクロノグラフなどの付加機能のための輪列が存在する。

* 原稿受付 平成 29 年 10 月 23 日

** セイコーインスツル(株)

2.2 調速機

調速機とは時計の精度をつかさどる部品の総称として使用され、主に図4に示すようなてんぶ（てん真や振り座を備える）とひげぜんまいといった部品で構成される。

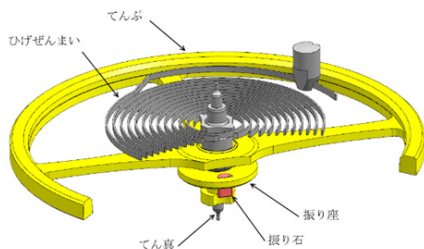


図4 調速機

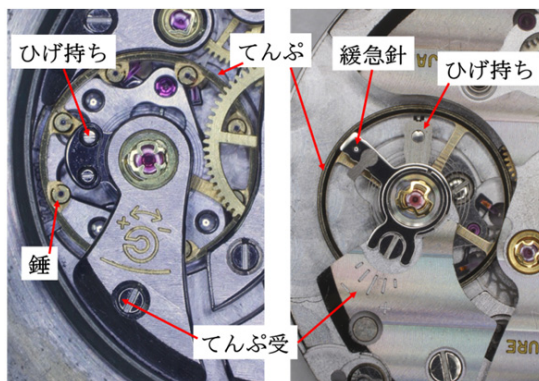


図5 緩急調整機構

1583年にガリレオによって振り子の等時性が発見され、1656年にホイヘンスによって重力を利用した振り子時計が発明された。それ以来、振り子などの振動子の振動周期と振動回数を数えることで時間を測ってきた。1675年にホイヘンスがてんぶとひげぜんまいによる回転振動型の調速機を開発してからは、重力に依存せず、時に刻むことが可能となり、機械式時計は腕時計などの移動・携帯可能な時計として発展してきた。

図4に示す調速機の往復運動に掛かる時間（振動周期） T は次のように計算される。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{12IL}{Ee^3h}} = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2}{f_0}$$

ここで、 I ：てんぶの慣性モーメント、 L ：ひげぜんまいの長さ、 e ：ひげぜんまいの厚さ、 h ：ひげぜんまいの幅、 E ：ひげぜんまいのヤング率、 ω_0 ：角振動数、 f_0 ：振動数である。この振動数について、通常振動工学などでは単位はHz（ヘルツ）を使用し、1秒間に1往復するものを1Hzとするが、機械式時計においては片道を1振動と呼び、1往復を2振動として扱っている。

前式の変数のうち、ひげぜんまいの断面形状（厚さ e 、幅 h ）やヤング率 E は完成品を後から変更させることは困難である。一方で、てん輪の慣性モーメント I や、ひげぜんまいの長さ L については調整が可能である。そこで、振

動周期を調整する際には、慣性モーメント I については図5に示すようなてん輪に取り付けられた錘（図はGyromax そのほかにも“ちらネジ”などがある）を移動させることで調整することができる。また、ひげぜんまいの長さ L については緩急針を移動させることで調整が可能である。緩急針はより微細な調整をするためスワネック緩急針やトリオビス緩急針といった微動緩急機構がついたものもある。

てんぶの性能を表す一つの指標として、振動工学などでも使用される Q 値という無次元量が使われる³⁾。この値はてんぶの振動の減衰しにくさを表しており、高ければ高いほど、精度に対して安定した調速機であると言える。 Q 値は次の式のように表される。

$$Q = \pi \frac{A}{\Delta A} = \frac{\omega_0}{3\mu} = \frac{\sqrt{IK}}{F}$$

なお A ：振り角（てんぶの振動の振幅のこと）、 ΔA ：1周期後の振り角の変化量、 μ ：てん輪の慣性モーメントと空気の粘性抵抗によって決まる値、 K ：ひげぜんまいのバネ定数、 F ：空気の粘性摩擦係数である。この式によれば振り角が大きく、てんぶの慣性モーメントが大きく、振動数が高いものがよいてんぶであると言える。

2.3 脱進機

脱進機は、香箱内で巻き上げられたぜんまいに対して、一気に巻き解けないようにストッパーの役割を果たしつつ、調速機の周期運動をもとに定期的に解除することで輪列を等速で回転させる。その一方で輪列を介して伝わるぜんまいのエネルギーを調速機に伝える役割も担っている。

表1 各種の脱進機⁴⁾

形式	名称
退却式	冠型脱進機
	アングル脱進機
静止式	直進脱進機
	ピンバレット脱進機
	ピンホイール脱進機
	シリンダー脱進機
	二重脱進機
等力式	重力脱進機
	弾性力脱進機
混合式	半直進脱進機
	ローラー脱進機
自由式	ラチェットスレーパー脱進機
	クロノメーター脱進機
	ピンレバー脱進機
	クラブツースレーパー脱進機

機械式時計の進歩とともに脱進機も進歩してきた。その過程において様々な脱進機が考案されてきた。（表1）

こうした脱進機のうち、現在の機械式腕時計においては自由式脱進機、それもクラブツースレーパー脱進機（図6）が主に使われている。その理由としては構造が簡単で製造がしやすく、製造ばらつきにも強いためである。

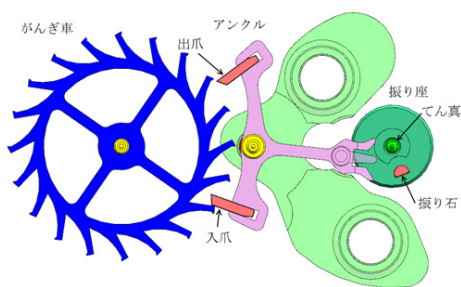


図6 クラブツースレバー脱進機

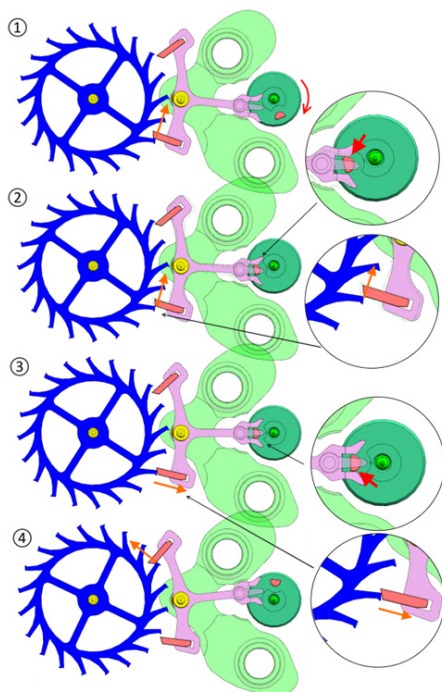


図7 クラブツースレバー脱進機動作概略図

動作の概略図を図7に示す。①はがんぎ車の歯車と入爪がかみ合っており輪列の動きを止めているところである。ここにてんぶに取り付けられた振り石がてん真周りを時計回りに回転しながらアングル箱に入ってきて図中上側側面にぶつかり、その衝撃で停止が解除される。その直後に停止が解除されたがんぎ車はぜんまいのほどける勢いで加速され、入爪の斜面部（衝撃面）を押し滑りながら回転する。これによりアングルは加速しながら回転し、振り石に追いつきアングル箱の図中下側側面と振り石がぶつかりエネルギー伝達を行う（③）。その後④のようにがんぎ歯車は出爪に停止され、一方でてんぶはアングル箱から外れて自由振動を開始する。再びてんぶが戻ってきて、今度は逆向きに同様の動作を出爪に対して行う。クラブツースレバー脱進機はこの動作を繰り返す。なお、この脱進機が自由式と呼ばれるのは、がんぎ歯車の停止から停止までの動作がてんぶの振動中心に対

して対称で、かつてんぶの自由振動の期間が長いことが理由である。

2.4 自動巻

必ずしもすべての機械式腕時計において備えられているわけではないが、欠かすことのできない特徴として自動巻機構が存在する。

懐中時計以前の機械式時計においては鍵巻といわれ、鍵を差し込み、直接香箱を巻き上げていた。今では普通のこととなった竜頭による手巻きが発明される1820年よりもさかのぼること50年、1770年ごろにペルレによって懐中時計用の自動巻機構が開発された。その後、ブレゲによるペルペチュールに代表される錘や機械体の上下振動を元に巻き上げる機構や、一定の角度のみを振動する錘によって巻き上げるバンパー式機構などが考案された。現在主流となっている全回転式ロータによる自動巻は1931年にロレックス社によって開発された。この方式の優れた点は懐中時計とは異なり、様々な姿勢をとりうる腕時計において、どのような姿勢からも巻き上げが開始されるという点であった。

全回転式ロータの自動巻機構と一口に言ってもロータの運動を香箱車に収められたぜんまいに伝える方式には、いくつもの方法が考案されている。というのも、ぜんまいを巻き上げる方向は一方であるが、ロータは両方向に回転するため、ロータが一方に回転したときのみ巻き上げるようにするか、両方向に回転する運動を一方に整流してから香箱車に伝える必要がある。その機構としては代表的なものに、切換車方式、ラチェット方式、遊動車方式などが挙げられる。それぞれの概略図を図8-1-3に示すとともに作動について解説する。

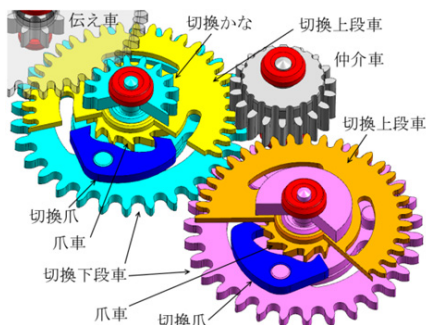


図8-1 切換車方式

切換車方式 切換車は回転を正転では伝達し、逆転では伝達しない、ワンウェイクラッチの一種である。ロータの回転は、仲介車を介して2つの切換上段歯車に伝えられる。仲介車が反時計回転する場合、切換上段歯車とそれに固定された爪車は時計回りに回転する。図右側の爪車は切換爪とロックして切換下段歯車と一体回転する。結局右側の切換下段歯車は反時計回りに回転する。一方図左側の爪車は切換爪を斜面を押しながら逃がすため、切換車の上段と下段は空転する。仲介車が時計回りに回転する場合、切換上段歯車は反時計回りに回転する。今度は先の場合と逆に右側の切換車が空転、左側の

切換車がロックして回転伝達する。このように、左側の切換下段歯車は仲介車の回転方向によらず反時計回りに回転する。この回転は左側の切換下段車に固定された切換かなから伝え車を介して香箱に伝えられる。

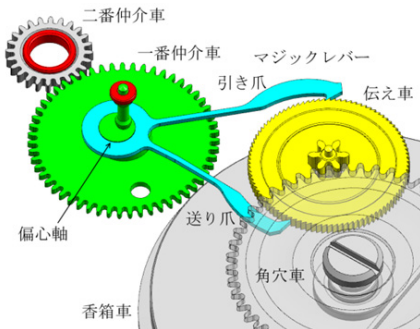


図8-2 ラチェット方式

ラチェット方式 ロータの回転が一番仲介車に伝えられると、爪付きレバー（図8-2はマジックレバー）は偏心軸を介して伝え車に対して近づいたり遠のいたりして往復運動をする。伝え車に近づくときは送りつめで、遠のくときは引きつめで伝え車が反時計回りに回転する。伝え車の歯車はラチェット状となっており、回転とは反対の爪が歯形をすべりながら、1歯ずつ送っていく。

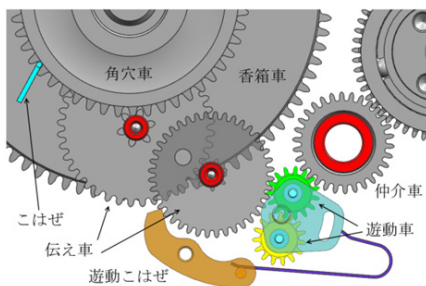


図8-3 遊動車方式

遊動車方式 ロータの回転が仲介車を介して遊動車に伝わる。ロータの回転方向によって遊動車が回転し、ロータが反時計まわりに回転した場合は図8-3のように、時計回りの場合遊動車は時計回りに回転し図中上側の遊動車と伝え車のかみ合いが外れ、下側の遊動車と仲介車がかみ合う。このようにロータの回転方向に応じて回転を伝える車の数が変化することで回転方向を一定にしている。

以上は巻上方式による自動巻機構の分類であるが、このほかにもロータの構造によって分類し、中心支持方式（一般的なロータ支持）、外周支持方式（ペリフェラルロータ、支持点を外周側で行うことで、ロータの重なりが少なく、ムーブメントの視認性に優れる）、偏心ロータ方式（ロータの回転中心を腕時計の機械体の中心から大きくずらすことで、機械体中心部分の部品の重なりを避け、薄型化を行う）などがある。そのほかにも錘の動きによる分類、両巻全回転式（回転角度は自由で、ど

ちらに回転しても巻き上げる）、片巻全回転式（回転角度は自由だが、巻き上げる回転方向は決まっている）、半回転式（回転角度が決まっている）、スライディングウェイト式（前述のプレゲのペルベチェルなど）といったものがある。

3. 精度

3.1 機械式腕時計の精度

時計における精度とは、ある時刻からある時刻までの時間間隔をどれだけ正確に測れるかという尺度として使われることが多い。具体例を挙げると、午前10時から24時間経過した時に、ちょうど午前10時を指し示す時計と、午前10時10分を指し示す時計があった場合には、前者の方が精度のよい時計であるといえる。これはかなり極端な例であって、実際には一日あたり数秒から数十秒程度の遅れ進みが一般的である。

精度を示す指標としては、24時間後の遅れ進みを表す日差が使われる。さらに、機械式時計においては、歩度と呼ばれる、時計の精度を短時間に測定し24時間における遅れ・進みの値に換算したのもよくつかわれる。前述の日差と単位は同じ[sec/day]を使用するが、日差は24時間の間隔をおいた2つの指示する時刻の差であるため、日差は24時間分の歩度の積分値といえる。

これがさらに精度のよいクォーツ時計などにおいては時間間隔を月や年とした、月差や年差という指標も存在する。こちらは歩度と同様にある瞬間の精度を測定し、その値をもとに月または年あたりの遅れ・進みを推定した値となる。

3.2 精度を乱す要因とその指標

機械式腕時計の精度はてんぶの振動周期によって決定される。その周期を乱す要因を次に示す³⁾。

- A) 構造の要因（部品形状や変形形状等）
- B) 脱進機を作動するために消費するエネルギー変動
- C) てんぶに供給されるエネルギーの変動
- D) 重力の影響（姿勢の変化）
- E) 気圧・湿度変化（ケース内の空気粘性抵抗の変化）
- F) 不規則外乱（振動や衝撃など）
- G) 温度変化による部品の伸縮（ひげぜんまいのパネ力・てん輪の慣性モーメントの変化）
- H) 部品の磁化
- I) 経時変化（潤滑油の変質や部品の摩耗、内部ひずみの減少など）

これらの要因に対する腕時計の強さを表現するため、等時性、姿勢差、温度係数や耐磁性能といった指標を用いる。これらの指標とてんぶの周期を乱す要因の関係について簡単に触れる。

3.2.1 等時性

等時性とはてんぶや振り子などの振動系の振動周期が、外乱などにも乱されずに一定であることを意味する言葉であるが、機械式腕時計においては、振り角が変化すると歩度がどのように変化するかを示す言葉として使われている。

このような現象が起きる原因としては、ひげぜんまい

のバネ力がてんぷの回転角に応じてわずかに変化することや(A), 振動を維持するために、振動中にエネルギーの授受を行っていること(B)に起因している。また、香箱に巻締められたぜんまいはほどけるにつれてトルクが下がっていくことから、てんぷに供給されるエネルギーも下がっていき(C), それに伴い振り角も下がっていく。また、気圧や湿度を変化させた場合(E), 空気の粘性抵抗が変化するため振り角に影響を及ぼす。

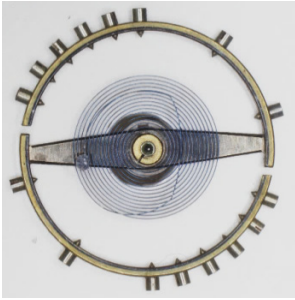


図9 ブレゲひげ付バイメタルてんぷ

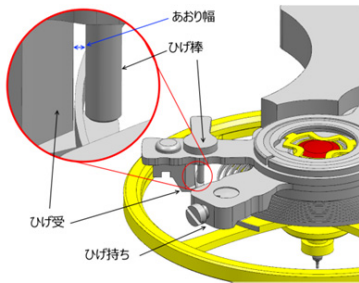


図10 あおり

この等時性を改善するために、図9に示すような巻上ひげを使用することもある。これは、ひげ外端部をフリップスの条件⁹⁾に合うよう形状とした際に、既存のうずまき部（アルキメデス曲線）と干渉するため立体的に巻上げられている。巻上げひげはブレゲによって発明されたため、ブレゲひげとも呼ばれる。巻上ひげは調整に熟練の技術者が必要なことや、生産に手間がかかるため量産に向かないということもあり、高級品に採用される機構である。より一般には図10のような緩急針先端についているひげ受・ひげ棒の隙間（あおり幅）を調整することで等時性を調整する。

以上は振り角変動に対して歩度を安定させる方法であるが、それとは逆に、ぜんまいトルクを一定にすることで振り角を安定させ、歩度の変化をなくすという目的でフュゼー香箱や定力機構と呼ばれる機構も存在する。

3.2.2 姿勢差

腕時計は置時計とは異なりさまざまな姿勢が表れるため、時計内部の部品に加わる重力の方向が変化すること(D)。特に調速機において重力の影響が顕著で、『文字盤が水平姿勢と垂直姿勢において、てん真と軸受の当たり方が変化することによる摩擦力の増減』、『垂直姿勢

において、てんぷのアンバランスにより重心位置が回転中心からずれることによる回転力の発生』、『垂直姿勢において、ひげぜんまいが伸縮する際に非常に微細ながら重心位置が移動することによる影響』などが存在する。

これらの要因に対して、図11に示すようにてんぷの外周部を一部削り取ることでてんぷの重心位置のズレ（片重り）を修正する方法などが行われる。またひげぜんまいの内端部をグロスマンの条件⁹⁾に一致させた内端カーブを有するひげぜんまいも有効である。さらには、こうした姿勢差をキャンセルする機構としてブレゲにより発明されたトゥールビヨンという機構（図12）が存在する。これは、調速脱進機を一つのかごに入れて、一定時間（多くは一分間）に一周回転させることで、姿勢差の影響を平均化させている。

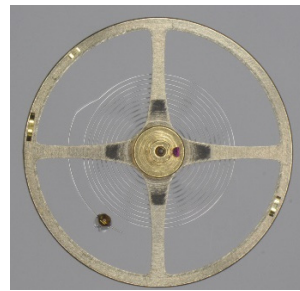


図11 片重り取り済のてんぷ



図12 トゥールビヨン

3.2.3 温度係数

腕時計の歩度は温度の変化にも影響を受ける。これは先ほど等時性の項でも示したような粘性の変化ということもあるが、それ以上にひげぜんまいおよびてん輪の熱膨張/収縮(G)が支配的である。一般の材料においては温度の上昇に伴い材料は膨張し、さらにヤング率は低下する。しかしながら、ひげぜんまいに使用される Elinvar や Nivarox, Co-elinvar といった恒弾性材料においてはある温度範囲においては温度上昇に伴い、ヤング率が上昇する範囲がある。この値とてん輪の熱膨張に伴う変化を打ち消し合うような材料の組み合わせとすることで温度変化による歩度の変化をほぼなくすることができる。

残った歩度の温度依存については、実用上は定められた温度における歩度の変化量を、その温度差で割った値を用いる。この値が0に近いほど温度変化に強いてんぷであるといえる。

また、かつてひげぜんまいに鋼を使用していた時代には、温度上昇に伴うヤング率低下を相殺するため、温度

上昇に伴い慣性モーメントも同様に低下するバイメタル切りてんぷ(図9)を使用し温度補正をしていた。

3.2.4 耐磁性能

身の回りには様々な磁場が存在する。これらには直流磁場と交流磁場が存在するが、機械式腕時計に影響を与えるのは直流磁場である。磁場の強さは距離の2乗に反比例するため、磁場を発生する機器から10cmも距離をおけばほぼ影響はなくなる。しかしながら昨今はスマートフォンをはじめとして磁場を発生する機器は身の回りにあふれており、もはや避けがたい状況である。そこで、腕時計にも耐磁性能が要求され、JISB7024『耐磁携帯時計-種類及び性能』において、磁気ほどの程度近づけても性能を維持できるかの基準を示している。JIS B7024では非耐磁時計で1,600A/m、第一種耐磁時計は4,800A/m、第二種耐磁時計は16,000A/mの磁場にさらされても止まりや指示狂いがなく、残留影響が基準以下であることとしている。

当然ながら、こうした基準を満たしていても想定を超える磁場にさらされるなどして、部品が磁化してしまうと歩度が変わってしまう。そこで飽和磁束密度の高い純鉄などを用いて機械体の周囲を覆って磁気をシールドしたり、さらには非磁性体材料を使い部品を作成することで、磁化しない時計を作成することもある。

等時性、姿勢差、温度係数、耐磁性能については以上の通りであるが、不規則外乱(F)に関しては明確な基準がなく、日常の携帯で生じる振動要因による影響を減らすためには、てんぷの共振周波数つまり振動数を日常生じる振動から遠ざけるのが有効であり、8振動以上の高振動が採用されることが多い。さらに落下などの大きな衝撃に関しては歩度への影響以前に部品の壊れが心配されるため、耐振装置を組み込むことで、てん真などの精細な部品が極力壊れないようにしている。

3.3 精度の規格

ここまで、機械式腕時計における精度やその指標について説明してきた。これらを用いてメーカーにおいて精度調整され出荷される。ここで注意したいのが、先述の通り姿勢やぜんまいの巻き上げ具合によって精度が変化しうるため、ユーザーごとに使用環境や出現姿勢、巻き上げ具合などが異なり、同じ時計であっても携帯時の精度(動的精度)が変化しうるという点である。

そこで、携帯時の出現確立の高い条件(姿勢・温度・ぜんまいの経過時間)について静的精度(静置された状態で測定された精度)を保証することで間接的に動的精度を確保している。この測定条件についてはメーカー各社で異なるが、共通の基準の代表としてクロノメーター検定がある。ISO3159に定義されており、5姿勢(文字板上、文字板下、6時方向上、9時方向上、3時方向上)と3温度(8℃、23℃、38℃)での精度測定を15日間行い、男性用(ムーブメントサイズが20mm以上の物)で平均日差が $-4 \sim +6$ [sec/day]、女性用(20mm以下)で $-5 \sim +8$ [sec/day]となっている必要がある。これをもとに各メーカー検定を行っており、一部メーカーでは12時方向上姿勢や検定日数を増やすなどより厳しい規格を

設けて検定を行っている。なお、クロノメーターを名乗るためにはCICC(クロノメーター検定国際委員会)の定める検定機関で検定を受ける必要がある。

3.4 近年の開発動向

90年代以降、電子デバイスである半導体の製造技術に応用し製作される高い寸法精度の機構デバイス(MEMS)の実用化が進んでいる。機械式腕時計においても2000年代からMEMSによる性能向上が1つのトレンド化し現在も続いている。MEMSの製法は大別してリソグラフィによる型を用い電気蒸着で部品形成するLIGAと、シリコン基板上に回路パターンを掘るRIEに応用しシリコン基板を深掘りし直接部品を形成するDeep RIEの2つがある。

MEMSはその高い寸法精度や形状自由度から、がんぎ車、アングルの性能向上で実用化が進んできた。Deep RIEでは脆く壊れやすいシリコンへの対策も進んだことで、脱進機以外にも非磁性の特性を活かしひげぜんまいに採用することで耐磁性向上を図ったり、持続時間延長や精度向上を図るため軸受とひげぜんまいを一体化させた、従来の機械式腕時計とは一線を画す調速・脱進機構も登場している。

4. 結 言

本稿では、一般的な機械式腕時計を想定して書いたが、紙面の都合上詳細な説明を省略したり、取り上げきれなかった機構などが多く存在する。これらについては、詳しく書かれた参考文献を記載しているので、より深い理解が必要な場合にはそちらを確認していただきたい。また、インターネットの動画サイトなどにもさまざまな時計や機構の動画がアップロードされているので、そちらもあわせて参照すると理解しやすいと思われる。

参考文献

- 1) ビエール=イヴ・ドンゼ、長沢信也(訳)：「機械式時計」という名のラグジュアリー戦略、世界文化社、2014。
- 2) 東谷宗朗：機械式時計入門講座 第五回 輪列機構②、世界の腕時計、第60号、pp.116-119、2002。
- 3) 小牧昭一郎：機械式時計講座、東京大学出版会、2014。
- 4) 高附辰男：講座 新講機械時計学入門(4) 脱進機(1)、マイクロメカトロニクス(日本時計学会誌)、43巻、4号、pp.70-74、1999。
- 5) J. グロスマン、H. グロスマン、青木保(訳・編)：理論時計学、日刊工業新聞社、1958。



早川 和樹

2014年東京工業大学理工学研究科機械物理工学専攻卒業、同年セイコーインスツル(株)入社。Cal.9S68の開発に従事。現在も機械式時計の開発業務に携わる。



藤枝 久

2003年東京理科大学工学部機械工学科卒業、同年セイコーインスツル(株)入社。2006年より機械式腕時計用ムーブメント開発に従事。ジュネーブ時計グランプリ「プティット・エグ्यूエユ」部門受賞)

特集

機械式時計の特殊機構*

木村 怜次** 森 裕一**

1. 緒 言

本稿では機械式時計の様々な機能について、どのような機構によって実現されているか解説を行う。なお、複雑な機構については導入の部分のみを説明し、詳細な説明は参考文献を挙げるようにした。また、時計の機構は長年にわたり各社の改良が繰り返され、機能、機構ともにさまざまなバリエーションが存在するものが多い。本稿では代表的と思われる、古典的なものを中心に解説していきたい。

2. 表示関連

2.1 レトログラード(Retrograde)

レトログラードは指針が円ではなく扇状の軌跡を描き、起点から終点までの動きはゆっくりと、終点から起点へは瞬時に戻る機構である。この指針の動きから、フランス語で「逆行」を意味する“rétrograde”が語源となっている。日付表示、曜表示などに用いられている(図1)。



図1 セイコー プレザージュ Ref. SARD009¹⁾

レトログラード機構は図2に示すような、①カム、②レバー車、③針車、④戻しばねから構成される。カムはかたつむり(snail)の殻のような形状をしているためスネイルカムとも呼ばれる。レバー車の突端がカムの最小半径部分に接している時、針車に取り付けられた指針は扇状の指示範囲の起点を指し示している。時間の経過とともにカムが時計方向へ回転すると、レバー車はその突端がカムの外周をなぞりながら反時計方向へ回転し、指針は起点(S)から終点(E)へと向かって移動する。戻しばねはレバー車の突端が常にカムに接触するよう、回転力を付与している。レバー車の突端がカムの最大半径部分に達した時、指針は扇状の指示範囲の終点を指し

示している(図3)。そこから更にカムが回転すると、レバー車の突端がカムの最小半径部分に落ちることで、指針は瞬時に起点に戻される。

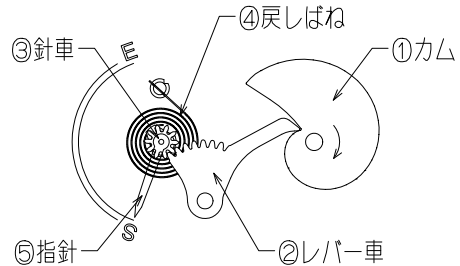


図2 レトログラード機構(起点)

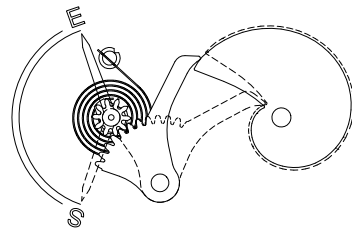


図3 レトログラード機構(終点⇒起点)

2.2 GMT

GMTは異なる時間帯にある2つの地域の時刻を同時に表示する機構である。グリニッジ標準時(Greenwich Mean Time)の略語からその名がついており、時差修正機構とも呼ばれる。

図4のように、4本目の針(24時針)が設けられるのが一般的で、りゅうず操作等により時針と24時針とで時差が設定できるようになっている。



図4 グランドセイコー Ref. SBGM227²⁾

* 原稿受付 平成29年11月1日

** セイコーインスツル(株)

GMT 機構は図5に示すような、①時針車、②時差修正車、③中間車、④24 時針車から構成される。時針車は12時間で一周し、その名の通り時計が取り付けられる。24 時針車は24時間で1周し、24 時針が取り付けられる。時差修正車にはばね部が設けられており、時針車の12分割に歯割りされた歯車と係合することで、2つの車は一体となって回転する。通常の使用状態においては、時針車と一体となって回転する時差修正車から中間車を介して24 時針車に回転を伝達することで、時針と24 時針は同期して動く。時差の修正をする場合、りゅうず操作により時針車を回転させると、時差修正車のばねとの係合が外れ、1 時間刻み 12 ステップで時針のみ単独で進ませたり遅らせたりすることができる。これにより、時針と24 時針とで異なる時間帯の時刻を同時に表示することができる。このほか24 時針の方を1 時間刻み24 ステップで時差修正できるタイプもある。

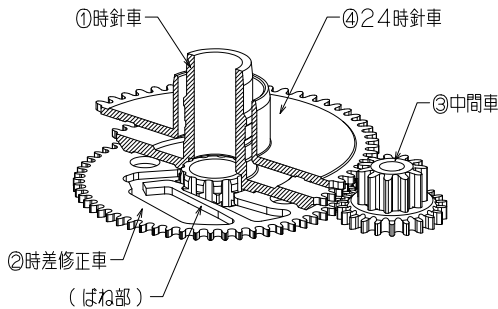


図5 GMT機構

3. カレンダー関連

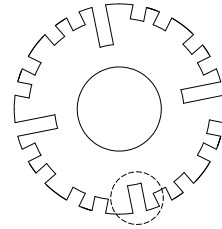
3.1 パーペチュアルカレンダー(Perpetual calendar)

大の月(31日間の月)、小の月(30日間の月)、平年の2月(28日間)、閏年の2月(29日間)を判別して自動で月末から月初への日付変更を行うのがパーペチュアル(永久)カレンダーである。

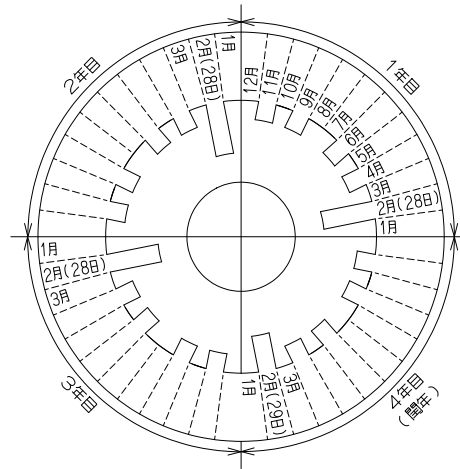
例えばうるう年ではない2018年2月28日の夜には4日分の日付を送って翌朝には3月1日を表示し、うるう年の2020年には2月29日まで表示した上でその日の夜には3日分の日付を送って翌朝には3月1日を自動的に表示する。その機能上、「月(何月か)」および「年(何年か)」が必ず表示される。「年(何年か)」は西暦が使われる場合と「1, 2, 3, 4」の数字の場合がある。「1, 2, 3, 4」の場合は「4」が閏年を表している場合が多く、閏年から考えて現在がどの年かを示している。なお「1, 2, 3, 4」の「4」は、閏年を表す英語 Leap year の「L」になっている場合や、フランス語 année bissextile の「B」となっている場合もある。

複雑な機構のため詳細な説明は省略するが、マンスカム(月カム)と呼ばれる溝深さの異なる車で月末の日送り日数を制御している。マンスカムが4年で1回転するタイプと1年で1回転するタイプがある。マンスカムの溝の深さが月末の日送り量を決めており、4年で1回転

するタイプ(図6)の場合、一番深い溝が平年の2月(28日間)の月末送り量を決めている。機構の詳細は例えば参考文献3)No.104~106、または参考文献4)pp.205~216が参考になる。



(a) マンスカム



(b) マンスカムの役割

図6 マンスカム

3.2 瞬間日送り(Instantaneous mechanism)

通常は2 時間程度かけてゆっくりと日付が変わるのに対し、1 秒以内のごく短い時間で行われる日送りのことを瞬間日送りという。また、概ね90 分~30 分程度で日送りが完了するものをセミ瞬間日送り(Semi-instantaneous mechanism)という。これらの日送り時間短縮により、日送り中、日付の一部しか見えないという状態が解消され、日付の視認性が向上する。

瞬間日送り機構の一例を図7に示す。この機構は①日回し車②カム③レバー④レバーばねで構成される。なお、図では省略しているが実際にはカムに日車(日付が印字されたディスク)を一日分(1 歯分)回すためのつめが付けられている。日回し車には長窓(穴)が設けられ、その長窓にカムから下向きに突き出したカムピンが入っている。レバーはレバーばねによって時計回りに回されるため、カムには常にレバーが押し付けられる。この状態で、日回し車は24 時間で矢印の方向に1 周する。図7の状態から日回し車が回転するとカムピンが長窓に当たり、日回し車とカムは一体となって回転するようになる。さらに日回し車が回るとレバーはカムに押し上

げられ図8の状態になる。図8の状態ではレバーばねが変形することでレバーはカムを強く押した状態となっている。図8の状態から日回し車が少し回るとカムがレバーに押され一瞬で図7の状態になることが想像できるだろう。この一瞬にあわせて、カムが日車を回転させることで、瞬間日送り行っている。ほかの日送り時間を短縮する機構でも基本的には上記のように徐々にバネに力を蓄え、その力を一気に解放する際に日送りしている。

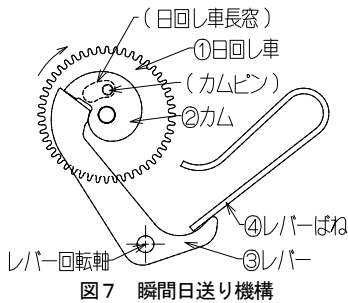


図7 瞬間日送り機構

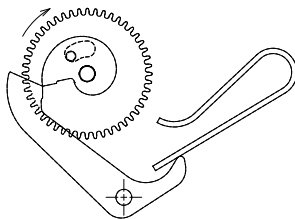


図8 瞬間日送り機構（日送り直前）

3.3 ビッグ（サイズ）デイト

(Big date, Outsize date)

その名の通り、文字が大きい日付表示であり、日付の視認性を向上させる目的で用いられる。通常、日付の文字サイズは時計の外径を31分割した大きさが上限となる。機構としては、一の位と十の位を別々にしたものや1～15と16～31を別々にしたものなど様々である。機構の詳細は例えば参考文献3)No.98が参考になる。



図9 セイコー プルミエ Ref. SCJL001¹⁾

3.4 ムーンフェイズ(Moon phase)

月の満ち欠けを表示させる機構である。フェイズ(Phase)は「位相」「段階」を意味する英語である。月の満ち欠けを基準とした太陰暦に由来する。

月の満ち欠けの平均周期が約29.5日であることから、59枚(29.5×2)の歯がついたディスクを1日に1歯送る機構が一般的である。月の満ち欠け周期の精度をより高めた高精度ムーンフェイズも存在する。図10(c)のようにディスクに満月(円)を2つ配置し、満月の絵柄が特殊な形状に窓が開けられた文字板(図10(b))に隠れていくことで月の満ち欠けが表現される。機構の詳細は例えば参考文献3)No.98や参考文献4)pp.201~202が参考になる。

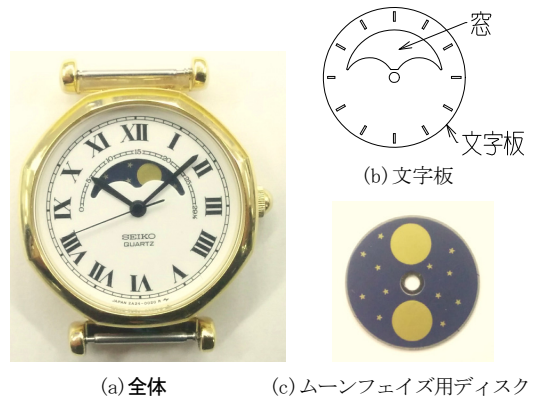


図10 ムーンフェイズ付き時計

4. 計時関連

4.1 クロノグラフ(Chronograph)

ある時刻からある時刻までの時間を計測する(いわゆるストップウォッチ)機能をクロノグラフという。一般的に秒針はオフセンターに配置され、センターにある細い針は秒をカウントするクロノグラフ秒針である。その他にも累積時間を表示するため積算計(30分計や12時間計など)がオフセンターに配置される。



図11 セイコー プレザージュ Ref. SARK013¹⁾

機構は主に作動方法によりコラムホイール式(またはピラーホイール式、以下同様)と作動カム式に、動力分岐(伝達)方法により垂直クラッチ式、キャリングアーム式、スイングピニオン式に分けられる。

作動方法について、コラムホイール式はコラムホイール(またはピラーホイール)と呼ばれる柱の立った歯

車(図11(b))が、ボタン操作により一定方向に一定角度ずつ回転する。このコラムホイールの動き、位置に応じて、複数のレバーが針の動作を制御する。作動カム式は作動カムと呼ばれる板が左右に回転することで、レバーを介して針の動作を制御する。

クロノグラフの針を動かす動力は、通常運針に用いられているぜんまいからてんぷまでの経路から分岐するのが一般的である。動力分岐(伝達)方式の一つである、垂直クラッチは図12のように①歯車②クラッチリング③クラッチばね④クラッチレバー⑤軸で構成される。歯車は軸に対して自由に回転でき、時計の運針に合わせて常に回っている。軸にはクロノグラフ秒針や積算計などの針が付けられる。図12はクロノグラフがONの状態である。この時はクラッチリングがクラッチばねによって歯車に押し付けられる為、摩擦力でクラッチリングは歯車と一体になって回転する。クラッチリングの回転は軸に伝わり軸が回転する。一方、図13はOFFの状態である。この時はクラッチレバーが軸の方向に押し付けられる。これによりクラッチリングが押し上げられ、歯車とクラッチリングが離れることで歯車の回転はクラッチリングに伝わらない。このように垂直クラッチ方式は自動車のクラッチのように面の摩擦力で動力を伝える機構である。

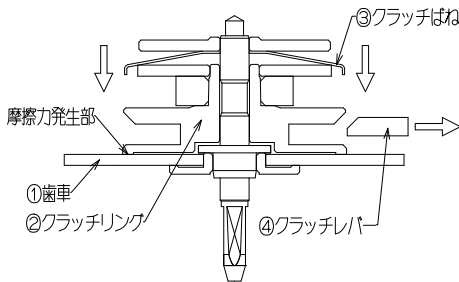


図12 垂直クラッチ ON

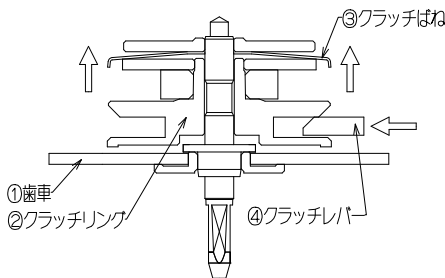


図13 垂直クラッチ OFF

他の方式であるスイングピニオン式は図14のように①歯車A②スイングピニオン③歯車B④発停レバーで構成される。歯車Aは時計の運針に合わせて常に回転する。スイングピニオンには歯車Aおよび歯車Bと噛み合うために上下に歯車が付いている。歯車Bの軸にはク

ロノグラフ秒針が取り付けられる。図14はクロノグラフがOFFの状態である。この状態ではスイングピニオンが傾いており、スイングピニオンと歯車Bは噛み合わない。このため歯車Aの回転は歯車Bには伝達されない。一方、図15はクロノグラフがONの状態である。この状態では発停レバーが歯車Bの方向へ動くことでスイングピニオンと歯車Bが噛み合い、歯車Bが回転する。ちなみにピニオンとは小さな歯車のことで日本語では「かな」という。ピニオンで動力伝達している点もスイングピニオン式の特徴である。

また、キャリングアーム式も歯車を水平方向に動かして歯車の噛み合いをON/OFFする点ではスイングピニオン式と同じだが歯車の上側のみを水平方向に移動させるのではなく、歯車を案内している上下の部品ごと水平方向に移動させることで歯車の噛み合いをON/OFFしている。機構の詳細は例えば参考文献3)No.100~102が参考になる。

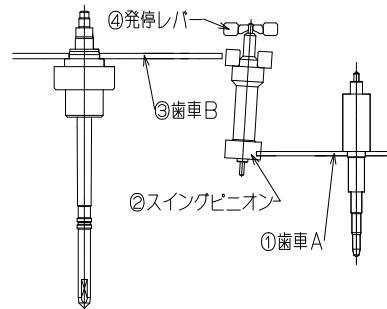


図14 スイングピニオン OFF

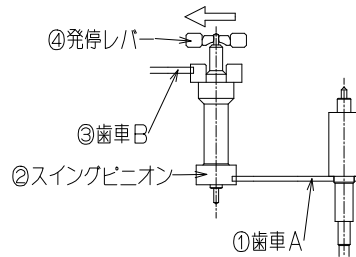


図15 スイングピニオン ON

4.2 スプリットセコンド・クロノグラフ (Split-seconds Chronograph)

フランス語ではラトラパンテ(rattrapante)と呼ばれ、フランス語の rattraper(意味は「追いつく」)に由来する。クロノグラフ秒針が2本あるクロノグラフで、最初にスタートしたときには2本が重なった状態である(図16(a))。スプリットセコンド用のボタンを押すと1本は動き続けたままもう1本のクロノグラフ秒針が止まり(図16(b))、もう一度押すと動き続けているクロノグラフ秒針に一瞬で追いつく(図16(c))。片方をとめた際に1本の秒針が2本に分かれるように見えるため日本語では割剣、英語で split-seconds と言われる。一度クロノグラフ秒針を止めて経過時間を記録できる

ことからラップタイムの計測に便利である。機構は、クロノグラフをリセットした際に針が戻る機構を応用したものが用いられ、2本目のクロノグラフ秒針を制御するため、通常のクロノグラフに上記のコラムホイールが一つ追加される。機構の詳細は例えば参考文献3)No.103,または参考文献4)pp.249~251が参考になる。

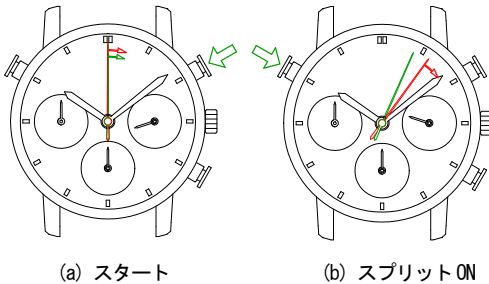


図16 スプリット機能の動作

5. 鳴り物関連

5.1 アラーム (Alarm)

あらかじめ設定しておいた時刻になると、音でそれを知らせる機構がアラーム機構である。



図17 セイコー ペルマチック⁵⁾

アラーム機構は、計時用のぜんまいとは別に、アラーム用のぜんまいを有する。あらかじめ設定した時刻になると、アラーム機構のロックが解除され、アラーム用ぜんまいが収められた香箱車から輪列を介して回転が増速され、アラーム用のがんぎ車に伝わる。がんぎ車の回

転は、脱進機のアンクルと同様の仕組みによりハンマーの往復運動に変換されることで、ハンマーが高速でゴングを叩き、音を鳴らす仕組みである。ハンマーが時計のケース本体や裏蓋から突出したピンを直接叩くことで、大きな音を発生させると共に、振動を着用者の腕に直接伝えるものもある。機構の詳細は例えば参考文献3)No.109や参考文献4)pp.217~218が参考になる。アラーム機構の仕組みはこの後で述べるリピーターの基礎ともなっている。

5.2 リピーター (Repeater)

現在の時刻を視覚ではなく鐘の鳴る回数として聴覚で知る機構がリピーターである。

この機構は、現代ほど街灯などの電気インフラが発展していなかった時代、夜になると時計の時刻を読み取ることができない状況でも、音で時刻を知ることができるように生み出された機構である。リピーターは、音の刻みによる違いで表1に示した通りの区分けがされる。



図18 クレドール ミニッツリピーター Ref. GBLS998⁶⁾

表1 リピーターの種類

	時	分
アワーリピーター	1時間刻み	なし
クォーターリピーター	↑	15分刻み
ファイブミニッツリピーター	↑	5分刻み
ミニッツリピーター	↑	1分刻み

ミニッツリピーターを例に音の鳴り方を説明する。ミニッツリピーターは音を発生させるゴングと、そのゴングを叩くハンマーを2つずつ有する。2つのゴング（ゴングA、ゴングBとする）は音色が異なる。例えば8時53分にリピーターを作動させた場合、まず時間を示すゴングAが「チーン・・・チーン・・・チーン・・・」と8回鳴る。続いて15分刻みを表すためゴングAとゴングBが交互に「チン・ターン・・・チン・ターン・・・チン・ターン」と3回鳴り、最後に1分刻みを表すゴングBが「ターン・・・ターン・・・ターン・・・」と8回鳴る。これで、8時（1時間×8回）、53分（15分×

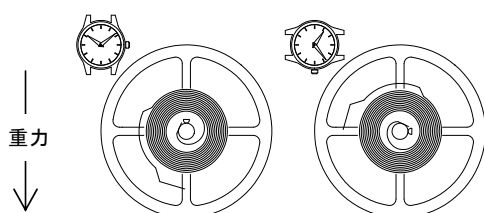
3 回 + 1 分×8 回)であることがわかる。機構の詳細は例えば参考文献 3)No.112~115 や参考文献 4)pp.219~224 が参考になる。

ミニッツリピーターのゴングの動きを、人物や動物などモチーフにした人形の動きと連動させことで視覚的な楽しさを付与したオートマタとよばれる機構もある。

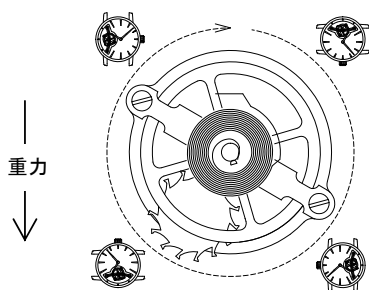
6. その他

6.1 トゥールビヨン(Tourbillon)

機械式時計を構成する部品の中でも計時精度の要であるてんぷは、重力によってひげぜんまいやてん輪のアンバランスの影響を受けるため、重力の方向、つまり時計の姿勢によって計時精度が変化する。⁷⁾トゥールビヨン機構は、てんぷ、アンクル、がんぎ車の収められたキャリッジと呼ばれる籠を一定速度で回転させることで、時計の姿勢による計時精度のばらつきを解消することができる。キャリッジの回転により重力の影響を平均化し、時計の姿勢毎の計時精度の差(姿勢差)を小さくするという仕組みである。⁸⁾



一般機械式時計は、時計の姿勢により計時精度が変化する。



トゥールビヨンは、重力の影響を平均化し、姿勢による計時精度の差を解消する。

図 19 一般機械式時計とトゥールビヨンの違い

トゥールビヨンはキャリッジの回転軸と直行する垂直方向の姿勢差は小さくできるが、水平姿勢との差は解消できない。そこで、キャリッジの回転軸に直行する別の回転軸を追加したジャイロトゥールビヨンと呼ばれる機構も登場している。この機構は、理論上あらゆる姿勢において計時精度は一定になる。構造は非常に複雑なものとなり、商品化を実現している時計メーカーはごくわずかである。機構の詳細は例えば参考文献 4)pp.167

が参考になる。



図 20 クレドール トゥールビヨン GBCC996¹¹⁾

7. 結 言

本稿では、機械式時計の様々な機能について説明した。複雑な機構については参考文献を挙げておいたので参考にさせていただきたい。また、最近はインターネット上にもさまざまな記事、動画がある。もちろんここに挙げた以外にも様々な機構が存在し、各メーカーから発売されている。しかし過去に考案された機構を基本にして改良・ダウンサイズされたものも意外に多い。今後もより小さく薄くしたものや、変わった動きを取り入れた時計が出てくるかと思うが、今回取り上げたような古典的な機構が使われていることも多いのではないだろうか。本稿が時計の機構を理解する上で参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) セイコーウォッチホームページ: <https://www.seiko-watch.co.jp/>
- 2) グランドセイコーホームページ: <https://www.grand-seiko.jp/>
- 3) 中村清尚:「ウォッチムーブメントハンドブック」, 世界の腕時計, ワールドフォトプレス, No.87~118, (2007~2014)
- 4) Charles-Andre Reymondin ほか, The Theory of Horology, Swiss Federation of Technical Colleges, 1999
- 5) セイコーミュージアムホームページ: <http://museum.seiko.co.jp/>
- 6) クレドールホームページ: <http://www.credor.com/>
- 7) 宮里孝典:「時計の話」と学生の反響, マイクロメカトロニクス, Vol. 48, No. 2, pp. 40-53 (2004).
- 8) 本間誠二: 機械式時計【解体新書】歴史をひもとく機構を識る, 大泉書店, 東京, pp. 108-111 (2005)



木村 怜次

2011 年熊本大学自然科学研究科機械システム工学専攻卒業。同年セイコーインスツル(株)入社。機械式女持ちムーブメントの生産設計及び開発などに従事。



森 裕一

2008 年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理学専攻卒業。同年セイコーインスツル(株)入社。機械式ムーブメントの開発に従事。

特集

現代の機械式時計*

木村 南*

1. 緒 言

水晶時計が市場に普及した 1980 年代以降、スイス時計業界はトゥールビヨン、ミニッツリピーター、永久カレンダーなどの高額複雑機械式時計を市場に投入した。バブル期に富裕層向けに輸入機械式時計が増加し、これ以降国産品よりも販売金額が上回った。スイス時計メーカは機械式時計への先端材料技術・加工技術の導入を進め半導体製造技術を応用したシリコン製ひげぜんまいなどを開発した。そしてスイスジュラ渓谷にある腕時計製造工場の見学も観光資源化した。国産機械式時計は 90 年代中ごろからオリエント時計が ORIENT STAR シリーズをラインナップし、90 年代後半からグランドセイコーに機械式時計が再投入された。さらにセイコーエプソンはぜんまいを動力とする発電機構による水晶時計を開発した。SII は雫石時計工房を作り機械式時計の設計、生産、組立、調整、時計技能士の育成を総合的に取組んでいる。シチズン時計はスイス機械式時計メーカを買収し傘下に取り入れた。

本稿では現代の機械式時計についてスイスと日本の設計・生産技術・組立調整技術・ブランド戦略について比較検討を行う。

2. 最近の機械式時計の話題

1970 年代～2020 年代(予測)の機械式時計の話題について表 1 に示した。1970 年代に日本は水晶時計の開発量産化で腕時計の生産量世界一位となり、スイスは水晶時計は安価なスウォッチに集約し、機械式時計メーカは手作り、ブランドステータスを上げるために映画とコラボレーションした。1980 年代のバブル期にはスイス高級時計ブランドの輸入が増加し、男性向け情報誌が腕時計を積極的に取り上げ、時計専門雑誌が創刊された。さらに日本メーカが中国に生産移管し、国産機械式時計は国内市場から淘汰され、発展途上国への輸出が続いた。

スイス製高級機械式時計が販売が好調なことからオリエント時計は ORIENT Star を復刻版として国内販売に再投入した。その後輸出モデルが逆輸入されることから SEIKO は Grand Seiko シリーズに機械式時計を投入した。スイスは機械式時計に最新の半導体加工技術、CAD/CAM/CAE を導入した。さらにひげぜんまいをリソグ

ラフ技術でシリコンで作製し実用化した。日本でも UV-LIGA プロセスでアンクルとがんぎ車を生産開始した。3) 中国では日本からの生産移管で当初は切削時計外装の委託加工からムーブメントの生産移管、コピー商品の拡大の問題があったが、トゥールビヨンも生産開始した。

表 1 機械式時計の話題

年代	スイス	日本	中国
1970	メーカ集約	国内向け縮小	日本メーカ進出
1980	高級機械式時計ブランド	輸出に特化	コピー商品生産
1990	コーアキシャル脱進機の検討 独立時計師 トゥールビヨン	機械式時計復刻版 CFRP 文字板 時計雑誌創刊	日本から生産移管 コピー商品の拡大
2000	シリコン製ひげぜんまい・アンクル・がんぎ車 コーアキシャル脱進機 組立搬送システム 工房見学	60 時間巻き UV-LIGA プロセスでがんぎ車・アンクル製造 機械式置時計・からくり時計 機械式腕時計工房 組立技能士育成	スイス時計ブーム
2010	CFRP 外装 高額時計ブーム	高額機械式腕時計の復活	安価トゥールビヨン
2020	AI ロボットによる自動組み立て	IOT 化	高級ブランド買収

3 精密・微細加工の進展と機械式時計生産技術の関係

腕時計に水晶時計が登場した 1969 年ごろに半導体製造技術が進化し、電卓からパーソナルコンピュータ(以下 PC と略す)が出現した。図 1 ムーアの法則²⁾として知られている PC 用 MPU のトランジスタ集積度と開発年度の関係³⁾を示した。2015 年に IBM 社は線幅 7nm での LSI チップの試作に成功したことが報告されている⁴⁾。半導体トランジスタの集積度が増加するにつれて MEMS 加速度センサなどの生産のためにリソグラフ技術が普及し、微細加工のコストが大幅に低下した。その結果後述するようにスイスでは Si 基板を素材とし半導体リソグラフ技術でひげぜんまい、アンクル、がんぎ車を開発し 2006 年から Breguet が実用化している。またスイス時計業界としては 1970 年代から CAD 設計に取り組み 1990 年には機械式時計の設計に CAD が使われていた。著者が 1991 年に PIAGET 社を見学した際にムーブメント設計はすべ

* 原稿受付 平成 29 年 11 月 23 日

** 玉川大学

て CAD 化されていた. 一方国内でクロノグラフ設計に CAD を用いた報告は山中らによって本誌 Vol. 42-No. 3(1998) されている¹⁾.

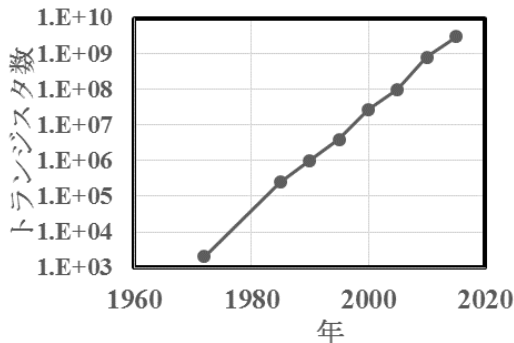


図1 PC用MPUトランジスタ数/チップの増加傾向(Intel 社資料²⁾から作成)

3 脱進機

3.1 クラブツース型脱進機

機械式時計の輪列を図1に示した. ぜんまいに蓄えられたエネルギーを香箱の回転運動から2番車, 3番車, 4番車, がんぎ車, 脱進機(アンクル, てんぶ・ひげぜんまい)に伝えられる. 脱進機が香箱の回転を一定振動数で制御することから调速機構の役割をしている. ぜんまいは40時間程度のパワーリザーブしかなかったが, Grand Seiko のスプリングドライブ 9R01 では8日間巻き(パワーリザーブ 196 時間)が実現されている. 図2には一般的なクラブツース型脱進機を示した.

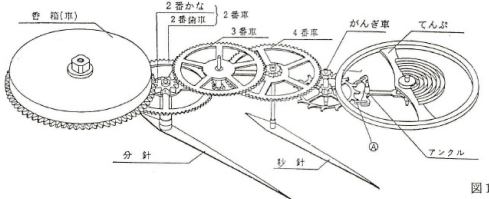


図2 輪列機構⁵⁾

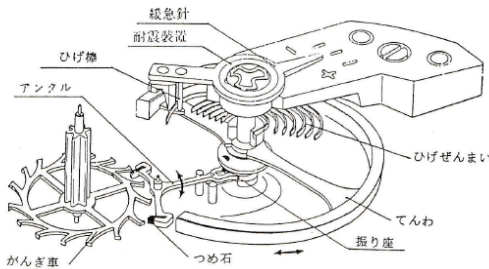


図3 クラブツース型脱進機⁵⁾

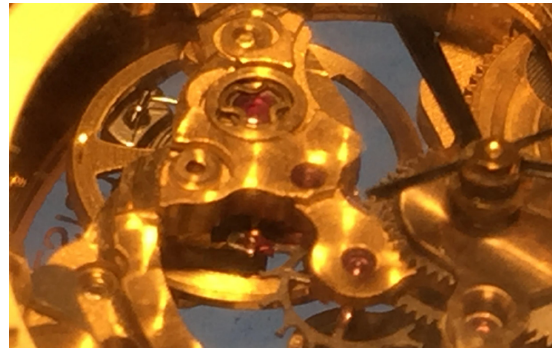


図4 スケルトンムーブメントオリエント時計 48320

3.2 コーアキシャル脱進機

1974 年に Dr.George Daniels が発明したコーアキシャル脱進機の構造を図5に示した. がんぎ車が2枚重なりアンクルの爪が3つあり同時に一つの爪とがんぎ車が常に接触することで潤滑性に優れているとされたが, 実用化については ROLEX, OMEGA が検討した結果 OMEGA から市販された.

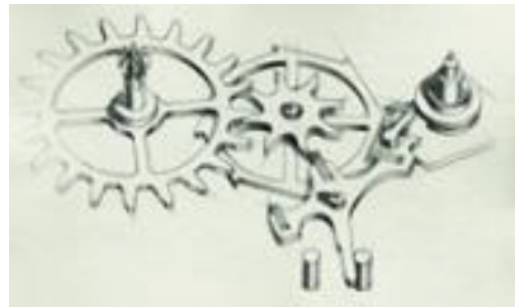


図5 コーアキシャル脱進機⁶⁾

4. 微細加工技術の利用

4.1 シリコン製ひげぜんまい・アンクル・がんぎ車

ブレゲ社において MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)と呼ばれるシリコン半導体製造のリソグラフ技術によりひげぜんまい, がんぎ車, アンクルの開発が2006年からはじまり, 2017年10月現在では28の量産モデルに採用されている. 同様に OMEGA では Co-Axial 脱進機とシリコン製ひげぜんまいを組み合わせている. シリコン製ひげぜんまいは塑性変形しないので Co 合金のぜんまいのようにひげぜんまいの癖付け作業がとかなの取り付けができない. しかしリソグラフ技術の向上で非常に高精度に加工できるようになり, 結果として天輪へのひげぜんまいの取り付けが容易になった. もちろんシリコンが硬脆材なので取り扱いに気を付ける必要がある. またシリコンは非磁性なので機械式耐磁性時計として有用なひげぜんまいとなった. 図6に Co-Axial 脱進機⁷⁾を示す. 表2に単結晶シリコンと SII 製スプリング材料の SPRON100 の物性値を比較した. シリコン

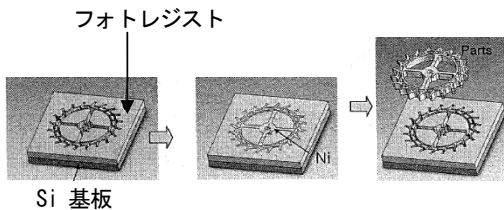
は SPRON 材に比べて線膨張率が 1/5 と極めて低いまたシリコンは密度が SPRON 材の 1/3 以下で縦弾性係数は 10%程度低い。結果としてシリコンは SPRON 材に比べて縦弾性係数が 3 倍になる。したがってシリコンひげぜんまいを使った Co-Axial 脱進機では日差 1~2 秒となると言われている⁷⁾。姿勢差の影響を相殺するための複雑なトゥールビヨンよりもシリコン製ひげぜんまいの時間精度向上が有用であると考え、トゥールビヨンを発明した Breguet 社がシリコン製ひげぜんまいを採用し始めていることがその証左といえる。

表 2 ぜんまい材料の物性値

材料	引張強さ	縦弾性係数 E	密度 ρ	線膨張率 α
/単位	MPa	GPa	kg/m ³	10 ⁻⁶ /K
シリコン	1780~3960	185	2330	2.6
SPRON100	~2156	206~216	8450	12.5

4.2 UV-LIGA プロセスによるがんぎ車・アンクル

SII グループでは MEMS 技術のひとつである UV-LIGA プロセスを用いて部品製造を行った。図 6 に示すようにフォトレジストをシリコン基板に塗布し UV(紫外線)をがんぎ車の寸法形状に照射して露光処理をする。露光部を除去後エッチング処理してがんぎ車形状の溝をシリコン基板に刻む、その後残ったフォトレジストを除去する。この工程を 2 回繰り返して図 6(a)のシリコン製がんぎ車型とする。このシリコン型に Ni を電鍍し、機械加工で仕上げる。図 8 に UV-LIGA プロセスで作製したアンクルとがんぎ車を示す。アンクル、がんぎ車には肉抜き部を設け軽量化している。Ni 電鍍アンクル、がんぎ車の密度 8000 kg/m³ で前節 4.1 のシリコン製アンクル、がんぎ車の密度 2330 kg/m³ は 1/3 以下であることからシリコンよりも Ni 電鍍の方が時間精度向上については限定的と考えられる。図 9 に機械加工したがんぎ車と UV-LIGA プロセスで電鍍したがんぎ車の外観比較を示した⁸⁾。電鍍用の Si 型の側面が平坦に仕上げられ結果としてがんぎ車、アンクルの側面の仕上がりが良好であった⁸⁾。さらに等時性について比較を図 9 に示した。UV-LIGA プロセスの方が時間精度は高かった。



(a) キャビティ形成 (b) 電鍍+機械加工 (c) 離型

図 6 UV-LIGA 工程説明図⁸⁾



図 7 UV-LIGA プロセスで作製されたがんぎ車とアンクル グランドセイコー 9S ムーブメント⁸⁾

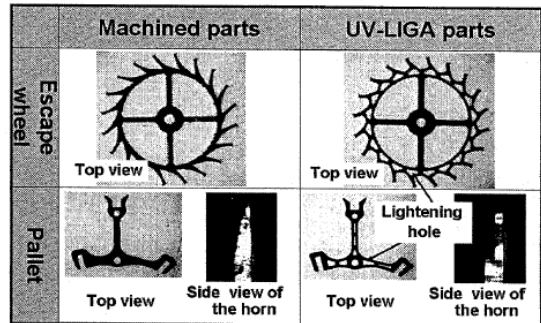


図 8 機械加工したがんぎ車と UV-LIGA プロセスで電鍍したがんぎ車の外観比較⁸⁾

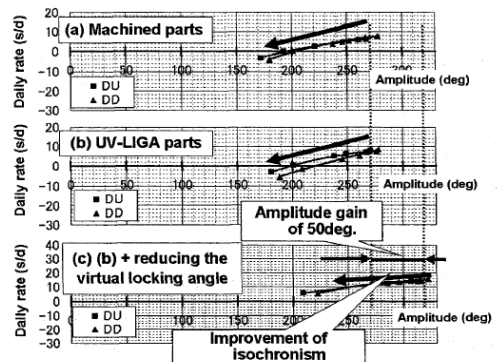


図 9 機械加工したがんぎ車と UV-LIGA プロセスで作製したがんぎ車の等時性比較⁸⁾

5 デジタル生産技術

5.1 工場見学

スイス観光局ではジュラ溪谷で時計工房の見学ツアーを観光の目玉としている。各工房の見学ツアーでは伝統的な完全手組み工程の他にムーブメントの搬送をロボット化している。CORUM 社の見学では iPad により見学者に対してフランス語、ドイツ語、イタリア語、中国語、英語に対応した説明をしている。このような見学ツアーについては AFP の時計専門サイト Watches Press で閲覧できる。

5.2 CAD/CAM/CAE の利用

スイスではCAD利用が先行していたがSIIでは1982年からCADを取り入れたが1994年からU-Graphを用いて機械式時計の設計に取り入れて1998年に図9に示すCal. 6S74系の開発を行った¹⁾。ばね部品の構造解析例を図10に示した。また構造解析値と実験値との比較を表3に示した。乖離率は-10%~25%ほど解析値が高めであった。

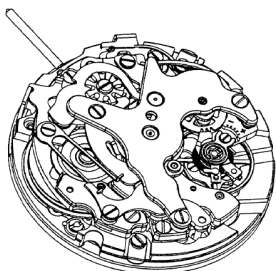


図9 Cal. 6S74系¹⁾

Simulation: FEM
Reference: SI (SI) Model
New: SI (SI) Model
Date: 1.000000-01
User: (User)

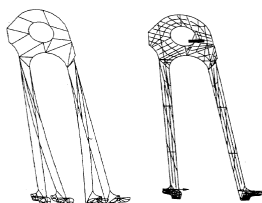


図10 ばね部品の構造解析例¹⁾

表3 ばね部品の解析値と実験値の比較

解析値と実験値の比較(ばね力)

部品名称	解析値	実験値	乖離率
A	415g	460g	-9.8%
B	296g	245g	20.8%
C	30g	25g	20.0%
D	10g	8g	25.0%

6. 組立調整技術

6.1 時計組み立て技能の伝承

機械式時計組み立てについてSIIでは岩手県雫石町に雫石時計工房を設立し、ベテラン組立技能士から直接学ぶ企業内時計学校を設立している。その様子がNHKテレビで放映された⁹⁾。がんぎかなのあがき調整作業の様子が図11のように示されていた。一度でも機械式時計の分解組立作業の経験者であれば実体顕微鏡でのあがき調整0.01~0.03mmについて理解可能と思われる。あがき調整では「受け」にドライバの先で凹みをつけて塑性流動した圧痕の盛り上がり高さにより、かな(ピニオン)と地板と受けの間隙を調整する作業である。このようなクリアランス調整方法は腕時計(一枚地板構造)の

みで行われている技法である。顕微鏡の拡大画像で歯車の厚さ(例えば0.15mm)を基準としてクリアランス(あがき)を調整する方法で他には見られない。

松尾によれば最近の人工知能ロボットの著しい発展は画像の機械学習によるものであり、以前のロボットでは困難であった隙間ばめの場合でも画像を見ながら人工知能ロボットはピンを穴に挿入することが容易に行えることを示した¹⁰⁾。

将来的には人工知能ロボットによる仮組みから最終調整も可能になると考えられる。

また図12はCal. 6Sのひげぜんまいの振れ取り作業の様子を示している。金属製ひげぜんまいではピンセットで振れ取り作業を行うが、前述のシリコン製ひげぜんまいではシリコンが塑性変形しないので、半導体製造プロセスで極めて高精度のエッチング加工が可能になった。分解修理における画像のストックが将来の人工知能によるIoT実現の役に立つと考えられる。

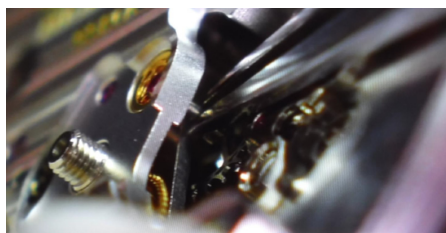


図11 6S がんぎかなのあがき調整(2017/8/31NHK テレビ朝イチより)⁹⁾

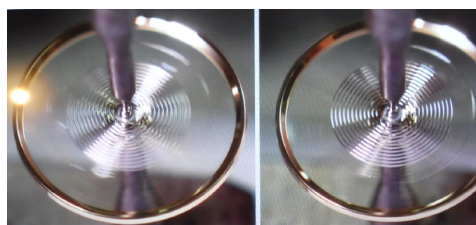


図12 6S ひげぜんまい調整前:左側 調整後:右側(2017/8/31NHK テレビ朝イチより)⁹⁾

7. 結 言

本稿では現代の機械式時計についてスイス製と国産品を比較した。スイス時計産業界は計時精度を求めるのではなく、機械式時計への先端材料技術・加工技術の導入を進めブランド力の向上を進めた。磁気の影響を受けない半導体製造技術を応用したシリコン製ひげぜんまい・がんぎ車・アンクルを開発した。

脱進機構、先端技術の導入においてスイス時計産業界は日本よりも一歩先へ進んでいるように見える。日本は機械式時計の利益率が高いことや定期点検によるサービスへの期待が高く新素材、新機構の導入には消極的に見える。ベテラン時計技能士でなければ成しえない機械式時計の分解組立を人工知能ロボットが行うことが

できればその応用範囲は非常に広がると考えられる。
時計産業界への期待は大きい。

付録

機械式時計についての web サイトの一覧を表 4 にまとめた。

表 4 機械式時計メーカーの web サイト一覧

No.	サイト名	Web アドレス
1	Breguet	https://www.breguet.com/jp
2	FRANCK MULLER	http://www.franckmuller-japan.com/
3	Grand Seiko	https://www.grand-seiko.jp/
4	IWC	https://www.iwc.com/ja/
5	OMEGA	https://www.omegawatches.jp/ja/
6	ORIENT Star	http://www.orient-watch.jp/orientstar/
7	PATEK PHILIPPE	https://www.patek.com/ja/
8	RICHARD MILLE	http://www.richardmille.jp/
9	ROLEX	https://www.rolex.com/ja
10	TAG Heuer	https://www.tagheuer.com/ja
11	ULYSSE NARDIN	https://www.ulysses-nardin.com/jp
12	VACHERON CONSTANTIN	http://www.vacheron-constantin.com/jp/home.html
13	ZENITH	http://www.zenith-watches.com/jp_jp/
14	スイス時計協会	http://www.fhs.jp/jpn/fhhistory.html
15	Watches Press	http://www.afpbb.com/watchespress

参考文献

- 1) 山中直晃, 木村俊規, 滝沢勝由, 斎藤隆:3 次元 CAD によるメカクロノグラフの開発設計, マイクロメカトロニクス, Vol.42, No.3, p73-81, (1998).
- 2) Gordon Moore, Electronics Vol.38, No.8, April, 19, 1965
- 3) Intel 社ニュースリリース: マイクロプロセッサを支えるインテルのテクノロジー, <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/innovation/processor.html>
- 4) IBM ニュースリリース: IBM Research Alliance Produces Industry's First 7nm Node Test Chips, <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/47301.wss>
- 5) 高附辰男: 脱進機(1), マイクロメカトロニクス, Vol.43, No.4, p70-74, 2000
- 6) セイコーミュージアム: <http://museum.seiko.co.jp>

knowledge/type/escapement_03/index.html

7) <https://monochrome-watches.com/a-technical-perspective-the-evolution-of-the-escapement-and-recent-innovations/>

8) 新輪隆, 重城幸一郎, 岸松雄, 保科宏行, 菊地聖土, 堀切和幸, UV-LIGA 技術の機械時計への応用, マイクロメカトロニクス, vol.53, No.201, pp.18-23, 2009.

9) NHK あさイチ JAPA-NAVI 雫石町・盛岡市 2017 年 8 月 31 日 8:29 分放映より

10) 松尾豊: 人工知能の未来と機械分野の可能性, 日本機械学会 No.17-116 第 41 回イブニングセミナー, 2017



木村 南

1979 年早稲田大学大学院工学修士, 1990 年長岡技術科学大学大学院博士課程修了(工学博士), 1979 年オリエント時計(株)入社。外装技術課長・商品企画部長・企画部長, 2002 年東京工業高等専門学校機械工学科教授, 2017 年東京工業高等専門学校名誉教授, 現在玉川大学工学部エンジニアリングデザイン学科非常勤講師。所属学会: 日本時計学会, 日本塑性加工学会, 日本機械学会, 日本材料学会, 自動車技術会, 日本デザイン学会, 軽金属学会

見学会報告

専門学校 ヒコ・みづのジュエリーカレッジ

重城 幸一郎

セイコーインスツル株式会社

見学先： 学校法人 水野学園

ヒコ・みづのジュエリーカレッジ 東京校

〒150-0041 東京都渋谷区神南 1-4-22 他

日 時： 2017 年 6 月 29 日（木） 13：30～16：00



図1 青山校舎外観

スケジュール：

13:30~14:00 : 学校法人 水野学園の紹介（本校舎）

14:00~15:00 : ジュエリー、バッグ、シューズ、自転車の各コース見学（青山校舎）

15:00~16:00 : ウォッチコースの紹介と見学見学（神南校舎）

参加者数 : 25 名

本年も日本時計学会見学会が上記の要領で開催された。

見学会では、まず、本校舎にて、学校法人 水野学園の各専門学校、コースについての紹介を受けた。

水野学園は、1966 年にヒコ・みづの宝石デザイン学校として設立され、今年 50 周年を迎える長い歴史を持つ専門学校。ジュエリーから始まった水野学園だが、その後、時計、靴、バッグ、自転車（東京サイクルデザイン専門学校）、和食・すし（東京すし和食調理専門学校）とその領域を広げていった。一見関係が無いように見えるそれぞれの専門学校だが、日本初のジュエリー教育に分野をしばった専修学校として認可、シューメーカーでは革靴だけではない教育、世界的にも珍しい自転車教育の専門学校立ち上げなど、他の専門学校とは一線を画すという方針のもと、統一されているとの説明がされた。



図2 学校紹介



図3 授業風景
(ジュエリーコース)

学校紹介後、青山校舎において、ジュエリー、バッグ、シューズ、自転車の各コース見学を行った。



図4 授業風景
(左：シューズコース、中央：バッグコース、右：自電車)

続いて、神南校舎へ移動し、ウォッチコースの見学を行った
ウォッチコースは、水野学園ではジュエリーに次ぐ歴史を持ち、
設立後 20 年という歴史を誇っている。その間に 1,100 人を超す
卒業生を時計業界へ排出し、約 9 割が修理に関連する仕事に就い
ているとのことであった。

また、コースとしては、2 年制、3 年制、そして、3 年制が終
了し希望者が参加出来る研修生の 3 つがあり、2 年制ではクオー
ツ時計、自動巻時計を学び、3 年制ではそれに加えて機械式クロ
ノグラフ、部品加工を学ぶ。さらに、研修生は、自らがテーマを
決め、設計～部品製作～組立を通じて、コンプリート完成までを
行う。

さらに、授業内容としては、アフターサービスに必要なスキル
である時計技術、マーケティング等を含む外装知識、ピンセット
等の工具、部品を加工する金属加工、そして、時計理論の 4 つが
大きな柱となっている。

今回の見学を通じて、時計組立、指輪製作、自転車フレーム溶
接、靴の皮革接着、バッグ作成など大きさや内容こそ違うが、学
生達が一心不乱に作業している風景を見せて頂き、若者のモノづ
くりに対する姿に感動を覚えたメンバーが多かった。そして、見
学会後の質疑応答では、多数の質問があり、非常に盛況のうちに
見学会が無事終了した。

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



図5 授業風景
(ウォッチコース)

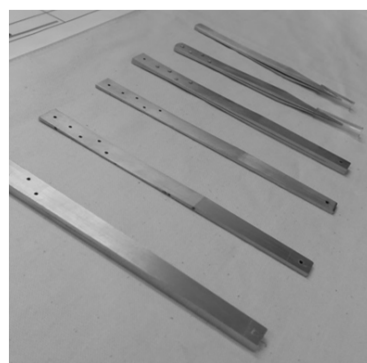


図6 金属加工
ピンセットの自作



図7 研修生

解説

「時計技術解説」クォーツ時計

— X. 発電機能付き時計 (2.自動巻き発電) —

長尾 昭一 *

1. はじめに

前号のソーラー発電に続き、今回は別の発電方式である自動巻き発電について説明します。ソーラー発電のエネルギー源は太陽光でしたが、自動巻き発電のエネルギー源は携帯者自身の腕の動きになります。自動巻き発電の機構を搭載したクォーツ腕時計（以下、自動巻き発電クォーツ）は、1988年に発売され現在に至っています。メカ時計の自動巻きと同じように、回転錘という重りが腕の動きで揺れ、その動きを使って発電し二次電源へ充電します。ソーラー発電は半導体技術を用いたソーラーセルで光を電気に変換しますが、自動巻き発電は、磁石とコイルの電磁誘導によって腕の動きを電気に変換しています。

2. 自動巻き発電の概要

Fig.1 が自動巻き発電クォーツのムーブメント例になります。コイルが二つありますが、左側がステップモーター用で右側が発電用になります。わかりやすく発電機のメカ部分のみ取り出しシステム図にしたものが Fig.2 になります。メカ時計と同じ回転錘があり、回転錘の回転は輪列機構によって発電ローターへ伝えられます。発電ローターには、Fig.3 のように N/S 一对の磁極を持つ磁石があり、その磁束は発電ステーターを經由して発電コイルへ導かれます

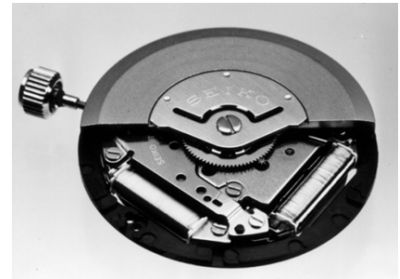


Fig.1 ムーブメント

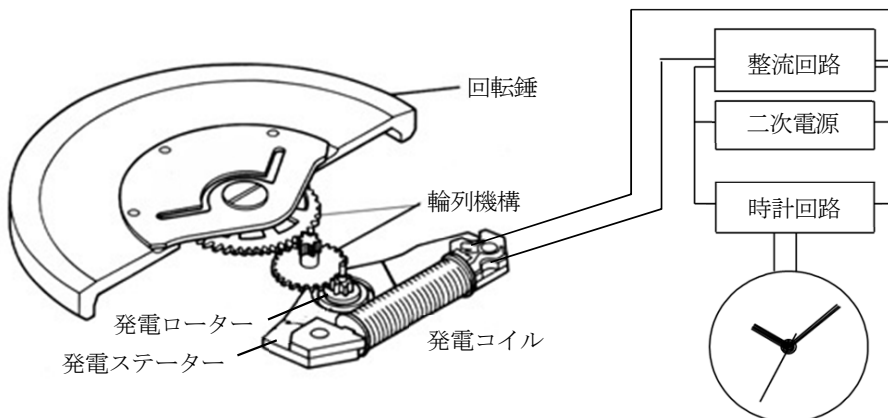


Fig.2 自動巻き発電クォーツのシステム

* セイコーエプソン(株)

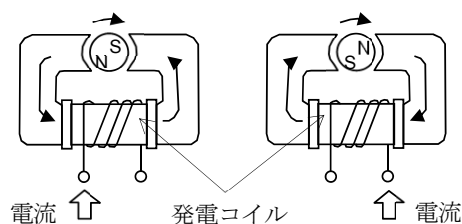


Fig.3 発電動作

発電ローターが回るたびにコイルを通過する磁束の量と方向が変わるので、電磁誘導によって発電コイルには交流電流が流れます。これを整流回路で直流電流に変換して二次電源へ充電し、その電力で時計回路を動かします。この先はクォーツ時計と同様で、ステップモーターを駆動し、ローターの回転を輪列で伝達して時刻を指針で表示します。

尚、Fig.3 は発電ローターが右回転する図ですが、左回転でもコイルを通過する磁束変化は同様に起きるので、ローターは左右どちらに回転しても問題ありません。つまり、回転錘がどちらの方向に回転しても発電できることになります。

3. 技術背景

1969年に登場したクォーツ腕時計は、メカ時計より圧倒的に精度が良いという特徴の他に、何もしゃ放っておいても、電池によって年単位で動き続けるという特徴があります。これは、手巻きや自動巻きでぜんまいを巻き上げないと止まってしまうメカ時計に対して、使い勝手の良い長所ではありますが、自身ではできない電池交換が必要になるという短所も持ち合わせています。これを改良すべくクォーツ腕時計登場直後の1970年代前半には、充電に関する多くの特許が出願されており、その中に自動巻き発電の基本原理も含まれています。それ以外にも、ソーラー発電、手巻き発電、温度差発電など様々な充電手段が考案されています。

しかし、クォーツ腕時計の黎明期であるこの時期には、自動巻き発電に必要な技術環境が整っておらず、実現することはできませんでした。それを顕著に示す二つの事項が以下となります。

一つ目が消費電力です。

Fig.4 はクォーツ腕時計の消費電力の推移を示したのですが、最初の製品は $30\mu\text{W}$ の電力が必要でした。その後の開発で、時計回路とステップモーターの省電力化が飛躍的に進み、1980年代に入ると消費電力は $1\mu\text{W}$ まで減少しました。時計の駆動に必要な発電量は、消費電力との収支バランスで決まりますが、

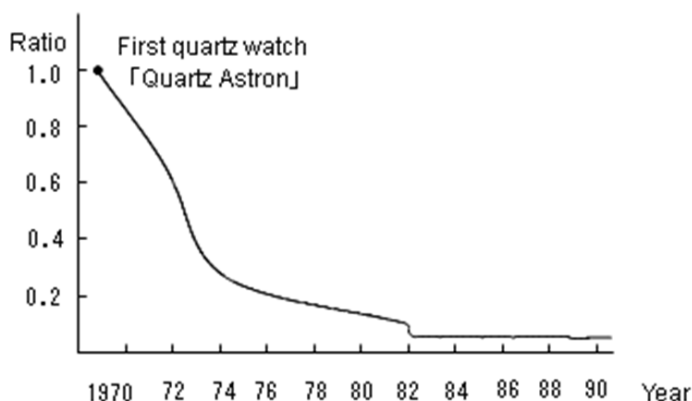


Fig.4 消費電力の推移

1970年代の消費電力では収支の見通しが立ちませんでした。消費電力の低減が進んだ1980年代中ごろになって、やっと発電電力と消費電力の収支バランスがとれるようになり、自動巻き発電クォーツが登場するわけです。

二つ目は二次電源です。繰り返しの充放電特性に優れる二次電源が登場するのは、1980年代に入ってからになります。1970年代にソーラー時計が登場していますが、ここでは酸化銀電池を二次電源として使用しています。酸化銀電池に充電すると水素ガスが発生し、電池の膨張や漏液を引き起こすので、ガス発生のない充電条件を見つけ、それを回路で制御して充電していましたが、満足いく充放電特性ではありませんでした。1980年代になるとコイン形の電気二重層コンデンサが登場します。電気二重層とは異なった二層（例えば固体と液体）が接触すると、その境界面にプラスとマイナスの電荷が極めて短い距離を隔てて向かい合って存在するものを言い、そこに電圧を加えると電気を蓄えることができます。充放電したとき電池のような化学反応を伴わないので、数万回の充放電に対しても安定した特性が得られます。この電気二重層コンデンサが登場したことで、自動巻き発電クォーツの商品化が可能になったと言えます。

しかし使用にあたっては、技術的な課題もありました。Fig.5は電源電圧の変化を示した模式図ですが、これまでクォーツで使用してきた酸化銀電池は、電池容量が無くなるまで一定の電圧で推移します。これに対して電気二重層コンデンサは、普通のコンデンサと同じように容量変化とともに電源電圧が変化するという特性を持っているので、これを主電源として用いるには技術的な工夫が必要でした。これについては、次項の技術内容で説明します。

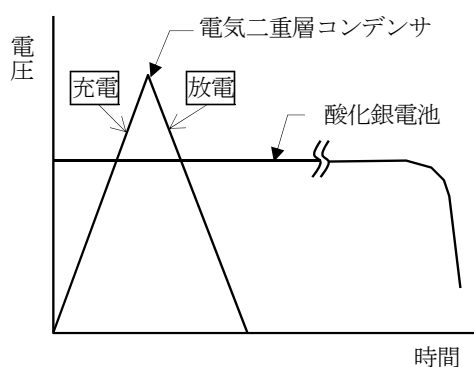


Fig.5 電源電圧の変化

また、技術とは少し異なりますが、ビジネスの方向性も関係したと考えられます。1970年代は軽薄短小、高精度化、コストダウンを目指し商品開発が行われましたが、これらの技術も1980年代に入る頃には、消費電力と同じようにほぼ完成域に達してきます。すると、時刻表示だけの時計では商品の差別化が難しくなり、付加機能付きの商品開発が盛んになります。さらに、1980年代は地球環境への関心が世界的に高まっていく時代であり、電池を廃棄しないクリーンエネルギー商品が注目されるようになります。自動巻き発電クォーツは、このような時代背景も関係して商品化されてきたと考えられます。

4. 技術内容

4. 1 増速型発電機

Fig.2 で、回転錘の回転は輪列機構で発電ローターに伝達されると説明しましたが、この輪列機構は回転錘 1 回転で発電ローターが約 100 回転するような、増速輪列になっています。

Fig.6 は発電機の断面図ですが、増速輪列は回転錘と同軸で回転する回転錘車と、伝え車、発電ローターで構成されます。その効果は、発電機の小型化と、誘導起電力が得やすいことにあります。

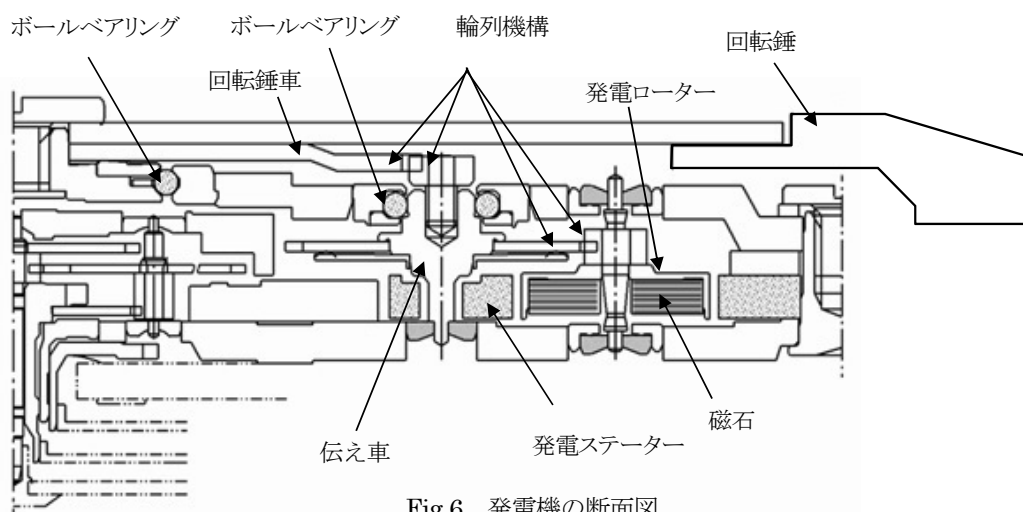


Fig.6 発電機の断面図

二次電源へ充電するには、発電コイルに誘導起電力を発生させる必要がありますが、誘導起電力は次の式(1)で表されます。

$$e = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad \cdots \cdots (1)$$

e : 誘導起電力
 N : コイルの巻き数
 $d\phi$: 磁束の変化量
 dt : 磁束の変化時間

増速輪列によって、発電ローターは回転錘の約 100 倍の速度で回転するので、磁束の変化時間 dt が小さくなり誘導起電力 e が上昇します。磁束の変化量 $d\phi$ は、発電ローターに取り付けられた磁石の磁力、つまり発電コイルへ流れる磁束量になります。磁束が通る磁路は、磁気飽和しないように磁束量に見合った磁路の太さが必要になります。具体的には発電コイルと発電ステーターの平断面形状ですが、これは時計のレイアウトで制約されるので、磁束量の極端な増加は難しいと考えられます。小型発電機で誘導起電力を得るには、磁束量 $d\phi$ ではなく、増速輪列によって磁束の変化時間 dt を小さくする手段が適していると考えられます。

4. 2 発電の原理

回転錘が回ったとき、どのように発電されるかを Fig.7 の半波整流回路で説明します。発電ローターが回転すると、発電コイルを通過する磁束の方向が変わるので、発電コイルには交流の電流が流れます。ダイオードによって一方の電流がカットされ、直流の電流が二次電源に充電されます。Fig.8 は回転錘が上から自重で回転したときに、この回路に流れる電流イメージを表しています。

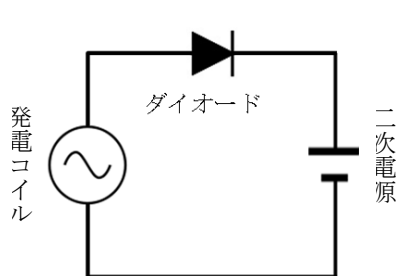


Fig.7 整流回路

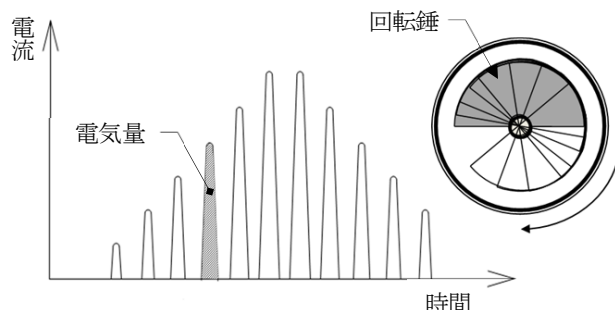


Fig.8 発電電流

一つの電流波形は発電ローター1回転で発生し、そこで流れる電気量は波形の面積(図中塗り潰し)になります。回転錘の回転は、止まった状態から徐々に速度を上げ、ピークを越えると速度が落ちます。この速度変化は前記式(1)の dt の変化になるので、誘導起電力および発電電流も変化し、全体の波形が山形形状になります。個々の波形の電気量を合計すると、回転錘が自重で回転したときの発電量になります。また、このように電流が流れて二次電源を充電するには、発電コイルに発生する誘導起電力の電圧が二次電源電圧より高い必要があり、かつ、この電位差が大きいほどたくさんの電流が流れます。そのため、発電コイルに発生する電圧が同じであっても、二次電源電圧によって流れる電流が変化し、二次電源電圧が低いときは電気量が多く、高くなるほど電気量が少なくなっていきます。

実際の使用で最も影響を受けるのが、人の動きになります。時計を着けた腕の動きが、速くて大きい人、遅くて小さい人では、発電コイルに発生する電圧が全く異なります。例えば二次電源の電圧が $1.5V$ のとき、前者は回転錘が速く動くので $1.5V$ 以上の電圧が発生して充電できるが、後者は $1.5V$ に満たず全く充電できないような現象が起こります。これに対応するには、前記式(1)のコイル巻き数 N で調整する必要があります。巻き数 N を増やすことで、同じ腕の動きでも高い電圧が発生し充電できるようになりますが、これには課題が伴います。同じ体積の発電コイルで巻き数 N を増やすには、細く長いコイル線を巻く必要があり、発電コイルの抵抗値は高くなります。つまり充電はできるものの、1回の動きで流せる電流は減少することになります。製品化の場合には、コイルに発生する電圧と電流の兼ね合いが重要になります。Fig.9 は、実際の製品を使いエンコーダ

で回転錘がどんな動きをするか実験したもので、デスクワークにおける回転錘の回転角、回転速度、発生頻度を表しています。発電機の特性によって動きは変わると考えられるので、あくまでも一例ではありますが、90度以下の回転角で、360度/秒以下の速度による動きが大多数を占めています。この製品の回転錘は、ゆっくりと小さな角度で回転する運動を、繰り返して起こしていることになるので、この動きを想定して発電機を作り込む必要があります。

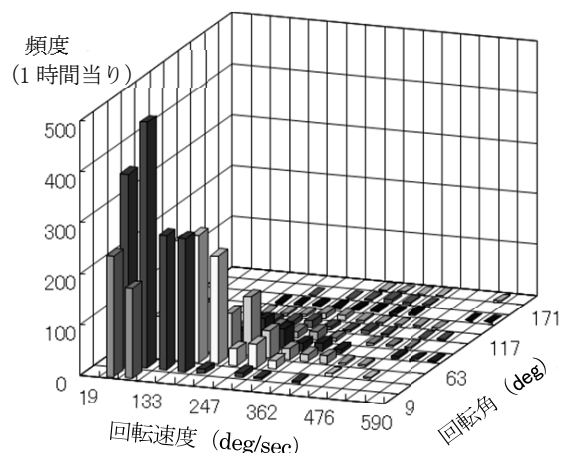


Fig.9 携帯中の回転錘動作

4. 3 多段昇圧回路

それまでクォーツウォッチに使われてきた酸化銀電池（公称 1.55V）は、容量が無くなるまではほぼ一定の電圧で推移しましたが、電気二重層コンデンサは Fig.5 のように、容量に伴い電圧が変化する特性を持っています。そのため、容量を無駄なく使うには幅広い電圧範囲で、時計回路とステップモーターを駆動する必要が生じました。当時、安定動作させるには、少なくとも 1.2V 以上の電圧を必要としたので、電気二重層コンデンサの電圧がそれ以下のときは、昇圧という電圧を高くする動作で 1.2V 以上の電圧を作り、その電圧で電子回路とステップモーターを駆動しています。その構成を Fig.10 の概略回路システム図で説明します。下段は説明用に水の流れて表したものです。

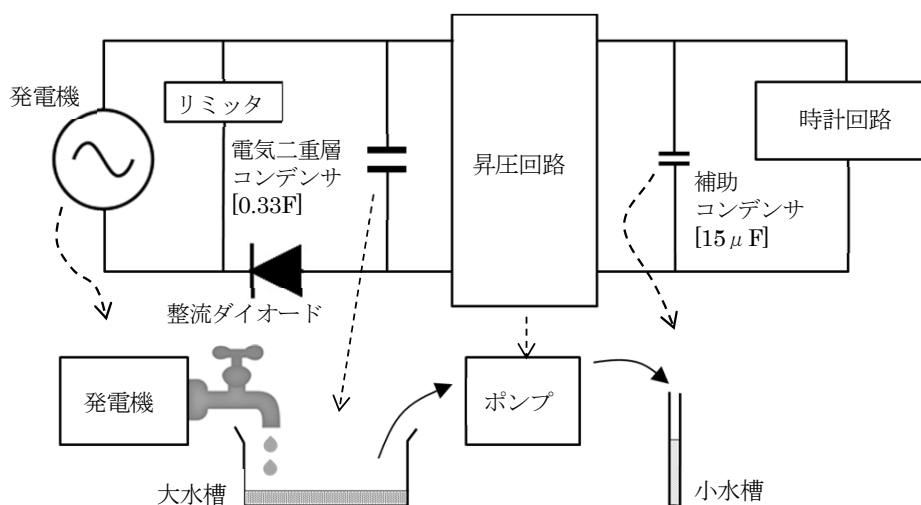


Fig.10 概略回路システム図

水の流れでは、静電容量 0.33F の電気二重層コンデンサを大水槽、静電容量 $15\mu\text{F}$ の補助コンデンサを小水槽とし、それぞれの水位は電圧に相当します。発電によって、大水槽へ水が溜まっていきますが器が大きいため水位、つまり電圧がなかなか上昇していきません。そこでポンプを使って小水槽へ水をくみ上げると、器が小さいのですぐに水位、つまり補助コンデンサの電圧が上昇し、時計回路およびステップモーターを駆動できるようになります。このポンプの役目をするのが昇圧回路となります。

昇圧はコンデンサの切り替えによるチャージポンプ方式を用いています。

一例として電気二重層コンデンサの電圧を 2 倍と 3 倍に昇圧する方法を Fig.11 で説明します。

昇圧には A, B, C, の 3 種類のコンデンサが使われていて、A が二次電源の電気二重層コンデンサ、B が補助コンデンサ、C が昇圧用のコンデンサになります。C の静電容量は補助コンデンサよりさらに小さく、 $0.1\mu\text{F}$ 程度です。これらの接続を MOS-IC で制御し (a) と (b) または (c) の状態を高速で切り替えることで、昇圧が行われます。

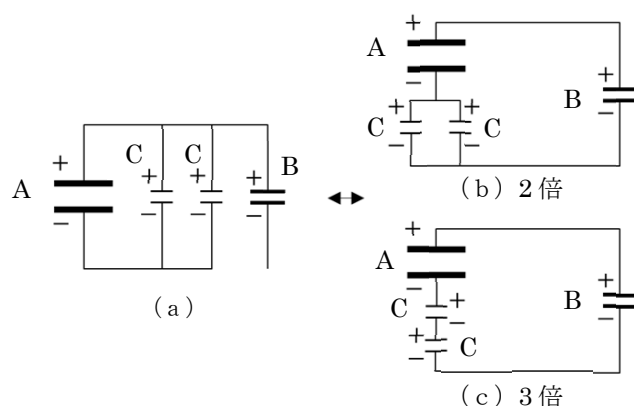


Fig.11 コンデンサ切り替えによる昇圧

(a) では A と並列に C が接続される

ので、C の電圧は A と同じになります。この状態から (b) の接続にすると A+C の電圧が B に加わり、(c) にすると A+C+C の電圧が加わるようになります。実際の駆動では、昇圧無し (1 倍)、1.5 倍、2 倍、3 倍の 4 状態を電気二重層コンデンサの電圧で切り替えています。

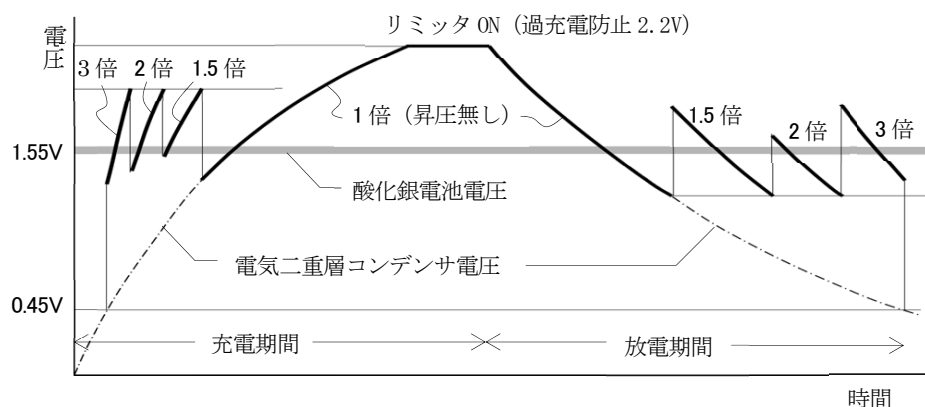


Fig.12 多段昇圧概念図

Fig.12 は電気二重層コンデンサの電圧推移と、昇圧後の補助コンデンサ電圧の関係を表したものです。酸化銀電池は同じ電圧のまま推移しますが、電気二重層コンデンサは充電と放電によって電圧が変化するので、昇圧が無ければ容量の半分は捨ててしまうことになります。最大で3倍の昇圧を行うことで、電気二重層コンデンサの電圧が0.45V以上の範囲で時計駆動が可能になります。この最大の効果は、起動時間の短縮と言えます。時計が止まったまま放置しておくと、回路のリーク電流や自己放電などによって、電気二重層コンデンサの電圧は徐々に0Vへ近づいていきます。これを起動するには、時計を左右に振るなどして回路が動作できる電圧まで、電気二重層コンデンサを充電する必要があります。起動電圧が低くなるほど起動に必要な充電量が減るので、止まった時計を早く動かすことができます。

5. 技術の変遷

前段の技術内容は、主に自動巻き発電の初期段階のものですが、その後の変遷についていくつか説明します。まず二次電源についてですが、電気二重層コンデンサであったものが、現在はリチウムイオン二次電池になっています。この二次電池は1990年代に入ってから登場し、大容量でありながら繰り返しの充放電特性に優れたものです。電源サイズは同じですが、フル充電からの持続時間は初期約3日だったものが、約6か月へと飛躍的に延長できる容量を持っています。また、電圧の変化具合が電気二重層コンデンサとは全く異なり、ほぼ一定の電圧で推移し容量末期で急落する、酸化銀電池に近いような挙動を示します。使い方によっては、多段昇圧という制御をしなくても駆動できるようになったと考えられます。

次は整流方式についてです。初期はFig.7のように、外付けのダイオード素子1個による半波整流方式を採用していましたが、ダイオードの特性による整流ロスが生じていました。それは、ダイオードは順方向電圧という0.5V前後の電圧が加わらないと、電流を流すことができないという特性に起因するものです。前述では発電コイルに発生する電圧が、二次電源電圧以上でないと充電できないと説明しましたが、実際には二次電源電圧に順方向電圧を上乗せした電圧が必要になります。これは、腕の動きが速く大きい人への影響は小さいものの、遅く小さい人には大きな性能差として現れました。現在は、順方向電圧に相当する電圧ロスがほとんど発生しない、ICプロセスで作ったトランジスタによる全波整流方式を採用しているので、発電効率は30%以上向上しており、腕の動きが遅く小さい人でも十分に充電できる性能が得られています。

最後は付加機能について簡単に触れておきます。自動巻き発電に関する基本部分はこれまでの説明になりますが、商品性の観点から製品別に付加された機構がいくつかあります。一つ目は充電量の残量計で、二次電源の電圧を計測してあとどのくらい持続可能かを、秒針の早送り量で表示するものです。これとは別の方式で、専用の指針によって表示するものもあります。ここでは、電圧変

動の少ないリチウムイオン二次電池の容量を、電圧とは別の方式で計測しています。それは、二次電源に流れる電流量を測定しそれを積算したものから、モーターなどで消費した電流量を減算して持続時間を割り出し表示する方式で、電圧変動の少ない二次電源でもより正確な残量表示を可能にしています。二つ目はパワーセーブという概念の機構になります。これは、腕に付けないときはモーターによる運針は行わず回路のみの駆動とし、腕に付けるときにモーターを早送りして正規の時刻に復帰させるというものです。腕に付けない期間が長い場合にはその間の消費電力量が 1/5 以下になるので、充電量の減少を抑える効果が得られます。腕に付けているかないかの判断は、発電コイルに電流が流れるか否かでっており、実際の製品では 3 日間電流が流れなければ、腕に付けていないと判断し運針をストップさせます。反対に電流が流れれば腕に付けたと判断し、正規の時刻になるまでモーターを早送りさせます。三つ目は自動巻き発電に手巻き発電を付加した機構です。これは 30 秒間の手巻きで 3 時間相当の充電ができるもので、メカ的なクラッチ機構によって自動巻き用の発電機を手巻き用と兼用しています。手巻き専用の発電機を搭載する方法も考えられましたが、兼用することで省スペース化が図られています。

6. おわりに

腕の動きでぜんまいを巻き上げる自動巻きは、腕時計でしか成立しないとユニークな機構であり、メカ時計を代表する機構の一つであると言えます。これをクォーツ時計に応用した自動巻き発電への動きは、ごく自然な発想であったと思います。発電式クォーツの歩みを顧みると、新しい二次電源の登場によって製品の性能や特徴が大きく変化する瞬間があります。これはこれから起こり得ることなので、今後さらに改良を進め、クォーツ腕時計にふさわしい代表的なエネルギー供給手段への飛躍を期待しています。

(参考文献)

- 1) 山田岳秀, 藤森基行, 植田知雄, 桜井照夫, “No-Battery” アナログクォーツウォッチの開発, 日本時計学会誌 No. 114 (1985)
- 2) 座談会報告, 電気二重層コンデンサ, 日本時計学会誌 No. 123 (1987)
- 3) 長尾昭一, 安川尚昭, 吉野雅士, ウォッチ用自動発電機構の開発, 日本時計学会誌 No. 120 (1987)
- 4) 早川求, 矢部宏, 吉野雅士, 自動巻発電ウォッチ用駆動回路の開発, 日本時計学会誌 No. 126 (1988)
- 5) 原辰男, 小型 AGS (自動巻発電ウォッチ) の開発, 日本時計学会誌 No. 157 (1996)
- 6) 橋本泰治, 高橋理, 永坂栄一, 自動巻発電時計における携帯中の回転錘の運動, マイクロメカトロニクス Vol. 42, No. 2 (1998)
- 7) 藤沢照彦, 小島博之, 新 KINETIC システム Auto Relay の開発, マイクロメカトロニクス Vol. 44, No. 1 (2000)
- 8) 小池信宏, KINETIC の技術動向と展望, マイクロメカトロニクス Vol. 53, No. 200 (2009)
- 9) 青木茂, 時計技術の系統化調査 共同研究編 10 ～機械式時計からクォーツ時計へ、更なる高精度を求めて～, 国立科学博物館, 北九州産業技術保存継承センター, (2017 年)

製品紹介

Connected エンジン搭載の “G-STEEL”

大型のディスク針を採用したアナログクロノグラフ

カシオ計算機株式会社



G-SHOCK 「G-STEEL」シリーズ GST-B100-1A

カシオ計算機は、耐衝撃ウォッチ “G-SHOCK” より、異素材を組み合わせたベゼルが特徴の “G-STEEL” シリーズの新製品として、大型のディスク針を採用したシリーズ初のアナログクロノグラフ『GST-B100』（3モデル）を9月15日に発売しました。

『GST-B100』は、“G-STEEL”シリーズとして初となるアナログ表示によるクロノグラフを採用しました。9時位置に配置したディスク針は、ジェット機エンジンの重厚なブレードをモチーフにデザイン。針が回転することで、ストップウォッチの経過時間やアラームの ON/OFF 表示、バッテリーレベルなどを色の変化により分かりやすく表現します。

今回、スマートフォンを介してタイムサーバーに接続する「Connected エンジン」を搭載しており、世界中どこでも正確な時刻を取得できるとともに、サマータイムやタイムゾーンの情報を自動で更新することが可能です。また、“G-STEEL”シリーズの特徴である、異素材を用いた二層のベゼルにより衝撃を吸収するレイヤーガード構造を刷新。パーツの配置を組み替え、樹脂の緩衝パーツをケースに内装させることで薄型化を実現し、時計としての普遍的な価値である時刻精度だけでなく装着性も高めました。

『GST-B100X』には、軽量かつ高剛性が特長のカーボン素材をベゼルに採用しています。最先端素材である東レ株式会社の炭素繊維「TORAYCA®」と、同社独自の「NANOALLOY®」技術により強度を向上させた樹脂を組み合わせた素材を用いることで、耐衝撃性に優れ、見た目にも美しく力強いベゼルを作り上げました。風防には傷に強く視認性にも優れたサファイアガラスを採用し、強さと美しさを両立しています。

製品名	ベルト素材	ベゼル素材	メーカー希望小売価格
GST-B100-1A	樹脂	ステンレススチール	50,000 円＋税
GST-B100D-1A	ステンレススチール	ステンレススチール	55,000 円＋税
GST-B100X-1A	樹脂	カーボン	85,000 円＋税



GST-B100-1A

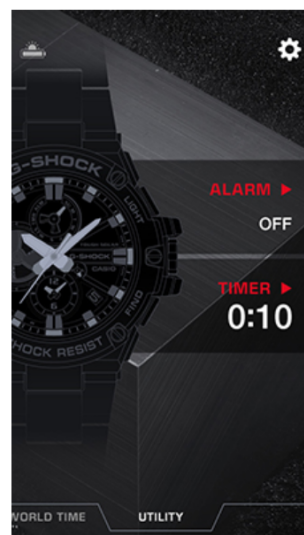
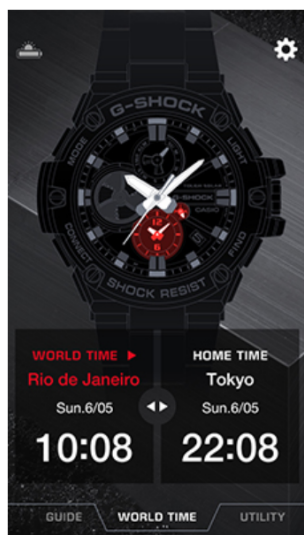


GST-B100D-1A



GST-B100X-1A

アプリ画面



GST-B100 の主な仕様

構造		耐衝撃構造
防水性能		20 気圧防水
通信仕様	通信規格	Bluetooth® Low Energy※
	通信距離	～2m（環境により変化）
ストップウォッチ		1 秒計測、24 時間計、スプリット
タイマー		セット単位：1 分、最大セット：24 時間、1 秒単位で計測
アラーム		時刻アラーム 1 本
その他の機能		モバイルリンク機能（自動時刻修正（サマータイム自動切替機能）、約 300 都市のワールドタイム設定機能、ホームタイムとワールドタイムの時刻入替、時刻アラーム設定、操作音 ON/OFF 切替機能）、デュアルタイム（ホームタイムとの時刻入替機能）、日付・曜日表示、フルオートカレンダー、LED ライト（スーパーイルミネーター、残照機能）、バッテリーインジケーター
使用電源		タフソーラー（ソーラー充電システム）
連続駆動時間		パワーセービング状態※ で約 24 ヶ月 ※暗所で一定時間が経過すると運針を止めて節電します。
大きさ		58.1×53.8×14.1 mm
質量		GST-B100, GST-B100X：約 101g GST-B100D：約 185g

※Bluetooth® のワードマークおよびロゴは、Bluetooth SIG, Inc. が所有する登録商標であり、カシオ計算機(株)はこれらのマークをライセンスに基づいて使用しています。

製品紹介

CITIZEN

BETTER STARTS NOW

『エコ・ドライブ Bluetooth』

シチズン時計株式会社

**2016年に発売し完売した限定モデルのデザインを継承する新作
ケーブルによる充電を必要としない光発電エコ・ドライブ^{※1}を搭載
2017年7月7日発売**

シチズン時計株式会社（本社：東京都西東京市/代表取締役社長：戸倉敏夫）は、スマートフォンとリンクする光発電エコ・ドライブ搭載のアナログ腕時計「エコ・ドライブ Bluetooth」の新作2モデル【¥75,000+税】を2017年7月7日に発売いたします。
※価格、発売日ともに予定です。



「エコ・ドライブ Bluetooth」
BZ1020-22L
¥75,000+税
2017年7月7日発売

2016年に発売した限定モデルは、カットガラスを用いた先鋭的なデザインと使い勝手の良さから、発売後約2ヵ月で完売しました。そのデザインと機能を継承した、新しいカラーバリエーションをBASELWORLD2017で発表。好評だったアナログとテクノロジーが融合したデザインを踏襲しつつ、新モデルではBluetooth®機能があることをイメージさせる色としてブルーを選びました。2017年7月7日に発売いたします。

エコ・ドライブ Bluetooth はアナログ時計としての美しさを保ちながら、スマートフォンとつながることで、腕時計がより便利になる機能を搭載しています。公式アプリをインストールすることで、腕時計がスマートフォンとリンクし、自動時刻修正はもちろん、世界316都市への時刻修正が可能です。また、着信やメール受信、主要SNSのメッセージも「針の動き」や「音」、「振動」で知らせることができます。そして本製品の最大の特長は、太陽光や部屋のわずかな光で充電し、時計を動かす光発電エコ・ドライブであることです。一度フル充電すれば最大約4年可動（パワーセーブ作動^{※2}時）するので、定期的な電池交換やケーブルによる日々の充電から人々を解放します。

●機能紹介ムービー URL <https://www.youtube.com/watch?v=ZEuzF2hqfhE>

*本ムービーは「エコ・ドライブ Bluetooth」の主な機能を説明することを目的としております。また、動画内で使用している製品は本リリースのモデルとは異なります。

【主な特長】

■ Bluetooth®機能搭載。アプリケーションも自社開発



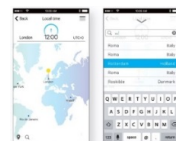
シチズンは Bluetooth®によって時計の利便性を向上させるアプリケーションソフトも自社開発しました。スマートフォンに「エコ・ドライブ Bluetooth」専用公式アプリをインストールすることで、腕時計がスマートフォンとリンクします。自動時刻修正や着信通知など、腕時計がより便利になる機能を搭載しています。

*本アプリは iOS（9.3 以上）、Android（5.1 以上）に対応しています。

1. 世界 316 都市に「簡単時刻修正」

公式アプリをスマートフォンにインストールし、Bluetooth®を使って腕時計と同期させることで、腕時計がスマートフォンから時刻情報を受信し、表示します。

自動時刻受信による時刻修正はもちろん、世界 316 都市の時刻に設定が可能です。



2. 電話やメール、LINE など主要 SNS の着信を「針の動き」「音」「振動」で知らせる

選択した人からの電話だけを通知する「フィルタリング機能」つき。

通知したいアプリは自由に選択可能です。



3. スマートフォンサーチ

スマートフォンを見失った際に、Bluetooth®の接続範囲内にあれば時計からの操作でスマートフォンを鳴らすことができます。

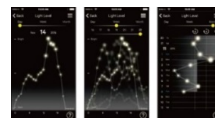
4. スマートフォンで簡単設定「アラーム」

アプリから直感的な操作で腕時計のアラームを設定可能。曜日ごとに ON/OFF の設定ができます。



5. 光による発電量が見える「ライトレベル インディケーター」

文字板に差し込む光を感知し、光による発電量を、日、週、月ごとにグラフで表示。腕時計の発電量をひとめで把握できます。

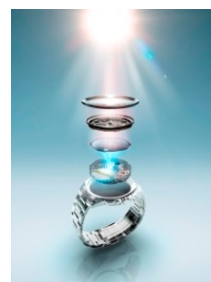


■ ケーブルによる充電が不要「光発電エコ・ドライブ」

「エコ・ドライブ Bluetooth」は、光さえあれば充電可能。定期的な電池交換はもちろん、ケーブルによる充電をする必要もありません。

エコ・ドライブとは、シチズン独自の光発電技術で、1976 年に世界初のアナログ式光発電時計を発売してから 40 年の間、たゆまぬ改良を重ねて来ました。太陽光や室内のわずかな光を電気エネルギーに変換し腕時計を動かし、余った電気は二次電池に蓄えます。一度フル充電すれば、最大約 4 年の可動が可能となります。（パワーセーブ作動時）また、充電完了後 1 度も充電しないで時計が停止するまでの時間は下記が目安となります。

- ・スマートフォンを使用した場合 約 9 ヶ月
- ・スマートフォンを使用しない場合 約 1 年 6 ヶ月



【商品仕様】



ブランド名 / 商品名	「エコ・ドライブ Bluetooth」	
商品番号	BZ1020-22E	BZ1020-22L
発売時期	2017年7月7日	
希望小売価格	75,000 円+税	
ケース/バンド	ステンレス/ウレタン	
ガラス	サファイアガラス（無反射コーティング）	
文字板色	ブラック	ブルー
サイズ	ケース径 48.0mm / 厚み 15.5mm（設計値）	
主な機能	■ Cal : W770 / 月差±15 秒 / 光発電エコ・ドライブ / フル充電時約 4 年可動（パワーセーブ作動時） / Bluetooth®（自動時刻受信、電話着信通知、スマートフォン探索機能、メール・SNS 各種通知、切断通知） / パワーセーブ機能 / パーベチュアルカレンダー / クロノグラフ機能（1/1 秒、60 分計） / アラーム機能 / ライトレベル インディケーター※3 / 充電量表示機能※4 ■ 10 気圧防水	

※1 エコ・ドライブ：定期的な電池交換不要の光発電時計で、シチズンの機能ブランドです。時計で初めて「エコマーク商品」に認定されました。

※2 パワーセーブ機能：暗闇で光発電が停止すると、自動的に針を止めて節電状態となる機能。光が当たり発電が開始すると自動的に現在時刻まで戻ります。

※3 ライトレベルインディケーター：シチズンの基幹技術である光発電エコ・ドライブならではの発電量を表示する機能で、Cal : W770 では、文字板に差し込む光を感知し、光による発電量を、日、週、月ごとにグラフで、リンクしたスマートフォン画面に表示。腕時計の発電量を把握できます。

※4 充電量表示機能：エコ・ドライブに使われている二次電池の充電量レベルをインディケーターで目安として表示する機能です。

＜シチズン時計とは＞

シチズン時計は、部品から完成時計まで自社一貫製造するマニファクチュールであり、世界 130 ヶ国以上でビジネスを展開しています。1918 年の創業以来、「Better Starts Now」「どんな時であろうと『今』をスタートだと考えて行動する限り、私たちは絶えず何かをより良くしていけるのだ」という信念のもと、世界に先駆けて開発した光発電技術「エコ・ドライブ」や最先端の衛星電波時計など、常に時計の可能性を考え、開発を重ねてきました。シチズン時計は、これからも時計の未来を切りひらいていきます。

- Bluetooth は、Bluetooth SIG, Inc. の登録商標です。 ● Android は、Google Inc. の登録商標です。
- iOS は、Cisco System, Inc. の米国およびその他の国における商標または登録商標であり、ライセンスに基づき使用されています。
- Apple および Apple ロゴは米国その他の国で登録された Apple Inc. の商標です。App Store は Apple Inc. のサービスマークです。
- Google Play および Google Play ロゴは、Google Inc. の商標です。 ● LINE は、LINE 株式会社の商標または登録商標です。
- エコ・ドライブ、およびライトレベルインディケーターはシチズン時計株式会社の登録商標または商標です。

★本リリースの内容は発表日時点の情報です。商品のデザイン及び価格、発売日、スペックなどは、変更になる場合があります。

一般社団法人 日本時計学会 平成 29 年 (2017 年) 4 月度 理事会議事録

－ 2017 年度 第 3 回理事会 －

(記録：小池 邦夫 2017 年 4 月 21 日)

1. 開催日時：平成 29 年 (2017 年) 4 月 21 日 (金) 15:00-16:10

2. 場所：中央大学理工学部 後楽園キャンパス 新 2 号館 2735 号室

3. 出席者：

＜理事＞ 大隅, 梅田, 大谷, 木村, 中島, 増田, 吉澤, 小池 (以上 8 名)

＜監事＞ 山本, 吉村 (以上 2 名) 理事総数 14 名の過半数につき理事会成立

＜運営委員＞ 小水内, 重城, 寺嶋, 常葉, 藤田, 横山 (以上 6 名)

4. 審議事項

(1) 平成 29 年 (2017 年) 2 月度 第 1 回, 第 2 回理事会議事録の確認

(2) 出版編集関係 (増田理事, 寺嶋編集委員長より説明)

・マイクロメカトロニクス 2017 年 6 月号 (Vol.61, No.216) の入稿および校閲状況等について.

(3) J-STAGE での閲覧記事について (寺嶋編集委員長より説明)

・NII から J-STAGE への移行に伴う閲覧対象記事について.

(4) 編集委員会・企画委員会検討課題について (寺嶋編集委員長より説明)

・マイクロメカトロニクス誌の特集について.

(5) 学術講演会について (大隅代表理事より説明)

・2017 年度マイクロメカトロニクス学術講演会の講演募集について.

(6) 青木賞について (大谷理事より説明)

(7) 春季研究会報告 (速報) (藤田運営委員より報告, 幹事会社：リズム時計工業)

(8) 2017 年度見学会について (重城運営委員より説明, 幹事会社：セイコーインスツル)

(9) 新入会員の承認

(10) 次回理事会開催日

・2017 年 6 月 29 日 (木) 17:00~18:00 中央大学理工学部 後楽園キャンパス

5. 報告事項

(1) 会員数状況 (2017 年 4 月 21 日承認後)

・正会員 165 名 (±0), 学生会員 4 名 (±0), 賛助会員 17 社 (±0) (84 口 (±0))

(2) その他 (事務局からの報告事項他)

・学会事務所移転の件 (小池業務執行理事より説明)

- ・「時計技術の系統化調査」報告書の紹介（山本監事（日本時計協会 専務理事）より説明）

以上

一般社団法人 日本時計学会平成 29 年（2017 年）6 月度 理事会議事録

－ 2017 年度 第 4 回理事会 －

（記録：小池 邦夫 2017 年 6 月 29 日）

1. 開催日時：平成 29 年（2017 年） 6 月 29 日（木）17:00-18:10
2. 場所：中央大学理工学部 後楽園キャンパス 新 2 号館 2735 号室
3. 出席者：
 - ＜理事＞ 大隅，木原，今村，大谷，木村，佐々木，滝澤，中島，増田，吉澤，小池（以上 11 名）
 - ＜監事＞ 山本，吉村（以上 2 名） 理事総数 14 名の過半数につき理事会成立
 - ＜運営委員＞ 小水内，重城，寺嶋，常葉，藤田，古川，横山（以上 7 名）

4. 審議事項

- （1）平成 29 年（2017 年）4 月度 第 3 回理事会議事録の確認
- （2）出版編集関係（寺嶋編集委員長，増田理事より説明）
 - ・マイクロメカトロニクス 2017 年 6 月号（Vol.61, No.216）発行の連絡.
 - ・マイクロメカトロニクス 2017 年 12 月号（Vol.61, No.217）の入稿および校閲状況等について.
- （3）J-STAGE での閲覧記事について（寺嶋編集委員長より説明）
 - ・NII から J-STAGE への移行に伴う閲覧対象記事について.
- （4）企画委員会より（吉澤企画委員長より説明）
 - ・2017 年度マイクロメカトロニクス学術講演会における講演発表のお願い.
 - ・特別講演，製品展示セッション，技術交流会について.
- （5）春季研究会報告（藤田運営委員より報告，幹事会社：リズム時計工業）
- （6）2017 年度見学会報告（速報）（重城運営委員より報告，幹事会社：セイコーインスツル）
- （7）青木賞について（大谷理事より説明）
 - ・第 51 回青木賞選考の経緯について説明があり青木賞表彰論文を決定した.
- （8）新入会員の承認
- （9）次回理事会
 - ・2017 年 9 月 21 日（木）16:00～17:00 中央大学理工学部 後楽園キャンパス

5. 報告事項

(1) 会員数状況 (2017 年 6 月 29 日承認後)

・正会員 165 名 (±0) , 学生会員 4 名 (±0), 賛助会員 17 社 (±0) (84 口 (±0))

(2) その他 (事務局からの報告事項他)

・学会事務所移転の報告 (小池業務執行理事より報告)

以上

一般社団法人 日本時計学会 平成 29 年 (2017 年) 9 月度 理事会議事録

－ 2017 年度 第 5 回理事会 －

(記録 : 小池 邦夫 2017 年 9 月 21 日)

1. 開催日時 : 平成 29 年 (2017 年) 9 月 21 日 (木) 16:00-17:00

2. 場所 : 中央大学理工学部 後楽園キャンパス 新 2 号館 2735 号室

3. 出席者 :

<理事> 大隅, 木原, 今村, 大谷, 木村, 滝澤, 中島, 檜林, 増田, 吉澤, 小池 (以上 11 名)

<監事> 山本, 吉村 (以上 2 名) 理事総数 14 名の過半数につき理事会成立

<運営委員> 重城, 寺嶋, 土肥, 藤田, 古川, 横山 (以上 6 名)

4. 審議事項

(1) 平成 29 年 (2017 年) 6 月度 第 4 回理事会議事録の確認

(2) 出版編集関係 (寺嶋編集委員長, 増田理事より説明)

- ・マイクロメカトロニクス 2017 年 12 月号 (Vol.61, No.217)の入稿および校閲状況等について.
- ・12 月号の特集記事について.

(3) 秋季研究会について (古川運営委員より説明, 幹事会社 : セイコーエプソン)

(4) 学術講演会実施報告 (土肥運営委員 (事業委員会) より報告)

- ・2017 年度マイクロメカトロニクス学術講演会の実施報告.

(5) 2017 年度見学会報告 (重城運営委員より報告, 幹事会社 : セイコーインスツル)

(6) 新入会員の承認

(7) 次回理事会

- ・2017 年 11 月 24 日 (金) 16:00~17:00 中央大学理工学部 後楽園キャンパス

5. 報告事項

(1) 会員数状況 (2017 年 9 月 21 日承認後)

・正会員 163 名 (-2) , 学生会員 4 名(±0), 賛助会員 17 社 (±0) (84 口 (±0))

(2) その他 (事務局からの報告事項他)

以上

第51回 青木賞表彰委員会報告

第51回青木賞選考は、マイクロメカトロニクス平成27年度 Vol.59, No.212-No.213 及び平成28年度 Vol.60, No.214-215 に掲載された研究論文2編、技術報告9編、合計11編に対して行なわれた。選考は、選考委員による一次審査と表彰委員による二次審査との二段階で行なわれた。

選考に先立ち、選考委員9名、表彰委員5名の選出を行なった。

一次審査は、各選考委員がそれぞれ与えられた5編の論文を査読し評価した。その評価を集計、数値化し、合計点数の高い4編について、二次審査を行なう表彰委員会へ推薦した。

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

これら4編の論文を表彰委員が査読し、その評価を一次審査と同様に集計、数値化した。この結果を基に表彰委員会にて議論した結果、最高点の評価を得た下記の論文を第51回青木賞表彰論文として推薦することに決定した。この結果を後日開催された日本時計学会理事会で報告し、下記の論文が第51回青木賞表彰論文に決定した。



写真 上:授賞の様子
下:受賞者挨拶

第51回青木賞表彰論文:低周波振動切削技術「LFV」の開発, マイクロメカトロニクス, Vol.60, No.215, pp.2-6(2016)

執筆者: 北風 絢子*, 野口 賢次*, 村松 正博*, 加藤 聖子*, 三宮 一彦**, 中谷 尊一**

所属: *シチズンホールディングス株式会社, **シチズンマシナリー株式会社

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, Dの4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、総合評価でも最高得点を表彰委員から得た。

第51回青木賞の受賞式は、2017年9月15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, 幹事 今村, 古川)

2017年度 マイクロメカトロニクス学術講演会

主 催 : 一般社団法人 日本時計学会

協 賛 : 一般社団法人 エレクトロニクス実装学会, 公益社団法人 応用物理学会,
公益社団法人 計測自動制御学会, 公益社団法人 精密工学会, 一般社団法人 電気学会,
一般社団法人 電子情報通信学会, 公益社団法人 日本磁気学会, 一般社団法人 日本機械学会,
一般社団法人 日本ロボット学会, 公益社団法人 日本設計工学会

期 日 : 2017年9月15日(金)

会 場 : 中央大学理工学部校舎5号館 5134、5135、5136、5234号室 (後樂園キャンパス)
〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

交 通 : 東京メトロ丸の内線・南北線「後樂園」駅下車徒歩3分,
都営三田線・大江戸線「春日」駅下車徒歩5分,
JR中央線(総武線直通各駅停車)「水道橋」駅下車徒歩12分

参加費 : 正会員 4,000円 非会員(一般聴講者) 6,000円 学生会員 2,000円 (いずれも予稿集代含む)
技術交流会(学術講演会参加者は無料)

- ・会員は個人会員に限ります。協賛学会員は正会員価格です。
- ・一般聴講者の方も、非会員価格で参加可能です。

マイクロメカトロニクス講演会 プログラム

学術講演会(5134号室)

第1セッション(9:45~10:45) 司会 増田純夫(認定NPO法人富士山測候所を活用する会)

- 9:45-10:05 CFRP製スプリングの簡易成形技術
玉川大学 ○木村 南
 - 10:05-10:25 通信制限を考慮したマルチエージェントシステムにおける平均合意制御
東海大学 ○木村 裕紀, 奥山 淳
 - 10:25-10:45 UV-LIGAプロセスにより作製したニッケル材の高面圧下における耐摩耗特性の改善
セイコーインスツル/東京理科大学 ○田邊 幸子,
東京理科大学 佐々木 信也
- 10:45-11:00 休 憩

第2セッション(11:00~12:00) 司会 滝澤 勝由(セイコーインスツル)

- 11:00-11:20 EU REACH規制対応 6価クロム除去剤の開発
シチズン時計 ○赤尾 祐司
- 11:20-11:40 歩数計測機能を搭載した電子時計の開発
カシオ計算機 ○堀 覇優和, 三宅 毅, 山崎 晋
- 11:40-12:00 サファイア風防の両面無反射コーティング技術
セイコーエプソン ○鈴木 克己

12:00-13:20 休 憩
13:20-13:30 青木賞授賞式

第3セッション(13:30～14:50) 司会 木村 南(玉川大学)

7. 13:30-13:50 デブスゲージへの流体解析応用事例
シチズン時計 ○塚田 浩之, 川田 祥子
8. 13:50-14:10 Bluetooth®搭載アウトドアウォッチの開発
セイコーインスツル ○清水 洋, 井橋 朋寛, 野村 隆幸
9. 14:10-14:30 GPS と脈拍センサーを用いた VO₂max 推定技術
セイコーエプソン 笹原 英生, ○黒田 真朗, 前澤 秀和,
東北大学大学院 崔 宇飛, 永富 良一
10. 14:30-14:50 Bluetooth®搭載 GPS ハイブリッド電波ソーラーアナログ時計の開発
カシオ計算機 ○黒羽 晃洋, 松尾 光昭, 尾下 佑樹, 川口 洋平,
横尾 一将, 内林 沙衣

14:50-15:00 休 憩

製品展示セッション (5 1 3 6 号室, 15:00～16:00)

- A-1. カシオ計算機 (株)
A-2. シチズン時計 (株)
A-3. セイコークロック (株)
A-4. セイコーエプソン (株)
A-5. セイコーインスツル (株)

16:00-16:15 休 憩

特別講演 (5 2 3 4 号室, 16:15-17:15)

「装飾時計の制作技法 (エングレーバーが引き出す時計の魅力)」

講師 K CRAFTWORK JAPAN 金川 恵治氏

技術交流会

17:30-19:30 理工学部 5 号館地下 1 階

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ます。会誌発行が年2回のため適切な時期に講演の会告ができず、これまでは小範囲の方だけにお知らせして募集してまいりました。今後は常時講演募集を致しますので、研究発表を希望される方は下記へお申込みまたはお問い合わせください。

〒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 : 03-3817-1824 Fax : 03-3817-1820 E-mail : dohi@mech.chuo-u.ac.jp

編集後記

学会誌マイクロメカトロニクスでは本号より特集記事を掲載することといたしました。本号の特集は機械式時計です。通勤電車や会議の席などで、誰かが機械式とわかる腕時計をしているのを見かけることがあります。そのような時、この人は自分の持ち物にこだわりを持っているのだと感じます。また、その腕時計も大切に扱われているのではないかと想像するのです。身の回りの多くのものが電子化され、インターネットにつながるような時代となっても機械式時計の魅力が色あせることは無いでしょう。

さて、日本時計学会では学会誌のみならず、研究会、見学会、学術講演会をさらに魅力的なものにするため、様々な企画を検討して参ります。会員の皆様からの論文のご寄稿ならびに講演会でのご発表など、学会活動へのご参加を心よりお待ちしております。

(寺嶋一彦 記)