

『時計技術の系統化調査』～機械式時計からクォーツ時計へ、更なる高精度を求めて～

1

Systematic Survey on Watch and Clock Technology in Japan From Mechanical Movements to Quartz – the Quest for Precision

青木 茂 Shigeru Aoki

■ 要旨

社会生活の基本となっている時間、日の出から日没を一日とした時代から、いつでもどこでも正確な時刻を手に入れられる時計が発明され、さらに便利で新しい機能を付加したウェアラブル機器へと進化している。

わが国における近代的時計の製造は、ヨーロッパの機械式腕時計を模倣して作るところから始まり、時計の部品を購入して組立てる方法から、国内で加工できる部品は国内製造し、主要部品をヨーロッパから調達して組立てる方法へと移る。模倣だけでは性能、品質の良い時計はできないと国産化への動きが高まり、1956（昭和31）年わが国初めて、独自の設計による機械式腕時計が発売された。狙いは、いかに高精度を出せるか、部品製造、組立・時間調整・修理等をし易くできるかという点であり、更に、多くの人々が購入できる価格を目指した。小型薄型化はもとより、耐振機構、自動巻機構の搭載等品質向上や利便性を考えた機械式腕時計の技術開発活動がスタートした。作りやすい時計、精度の良い時計、品質の良い時計を目指して改良改善を続け、機械式腕時計でスイスに劣らない腕時計を完成するに至った。

日本の機械式腕時計が世界に認められ、生産数量が拡大する中、時計技術者は更なる高精度を可能にする多くの技術に挑戦した。そして、1969年スイスに先駆けて、世界で初めてクォーツ腕時計の開発・発売を実現する。クォーツ時計の持つ高精度、高品質、小型薄型、リーズナブルな価格が市場に受け入れられ、急速にクォーツ化が進み腕時計の主流はクォーツ式になった。同時に日本の電子部品、素材産業の進歩も目覚ましく、クォーツ腕時計の小型薄型化の速度は早まる。また、電子技術との組合せによる多くの高付加価値商品が上市された。

本報告書では、腕時計に的を絞り精度の高い時刻情報を得られる高精度化技術を中心とした技術の系統化について、独自設計の機械式腕時計からクォーツ腕時計、更なる高精度化技術について報告する。また、腕時計が低消費電力であるが故に可能となった小型発電の技術、腕時計の多機能化にも触れる。

第2章では、機械式時計、電子時計であるてんぶ式電子時計、音叉式電子時計、クォーツ時計、およびセシウム原子時計をもとに作られる標準時刻情報の電波を受信し、時刻を修正する電波修正時計の各機構別の構造について述べる。

第3章では、わが国における初めての独自設計による機械式腕時計の誕生と、その設計に盛り込まれた時間精度、品質、部品加工・組立作業性向上の技術について述べる。

第4章では、時間精度を向上させるための、機械式腕時計からクォーツ腕時計に至る過程での、ぜんまいを巻く煩わしさの解消を目指し、ぜんまいエネルギーを一次電池エネルギーに置き換えた、てんぶ式電子腕時計、音叉式電子腕時計について述べる。

第5章では、機械式時計の100倍の精度を実現した世界初のクォーツ腕時計の開発技術、腕時計サイズへの小型化に挑戦した技術活動、およびクォーツ時計ならではの高付加価値商品等多機能化技術について、アナログ式、デジタル式各々について述べる。

第6章では、クォーツ腕時計が出現し、その後の小型薄型化、多機能化への進化を可能にした低消費電力化技術、特に消費電流の大きいステップモーターの改良技術、電子素子の小型化技術、生産加工技術、および長年スイスに頼っていた時計用潤滑油の開発技術について述べる。

第7章では、クォーツ腕時計の省電力化が画期的に進み、微弱電力での時計駆動が可能となった結果、一次電池エネルギーに代わる、腕時計用の特徴ある小型発電技術として実現されてきた、太陽電池、熱発電、手巻き発電、自動巻発電、ぜんまい駆動発電の原理、特徴について述べる。

第8章では、クォーツ腕時計の時間精度の更なる高精度化を目指して、月差レベル、年差レベル、数十年レベルの高精度を可能にする以下の技術について述べる。

- ①時間標準である一般的な32kHz音叉型水晶振動子の周波数温度特性を補正する方式
- ②高周波数帯のATカット水晶振動子を採用する方式
- ③セシウム原子時計の標準時刻情報により時刻補正する方式

第9章では、日本の時計産業の歴史を、「東洋のスイス」を目指し日本独自の時計作りをスタートし、現在に至るまでの現代日本時計産業の推移と、現在（2015年）の概況として纏める。

付表としてクォーツ腕時計用発電技術および高精度化技術、時計に関する公的規格、高精度化・高機能化の製品の流れ、時計メーカー各社製品推移を掲載する。

尚、本報告書における機械式時計、クォーツ時計の時計用語は、一般社団法人日本時計協会「時計用語：Horological vocabulary」2015年版に準ずる。

■ Abstract

Timekeeping is the foundation of life in society, and has been evolving since the era when the time between sunrise and sunset was designated as a day, through the invention of watches and clocks that kept the time accurately anytime and anywhere, toward useful feature-rich wearable devices.

Modern watch manufacturing in Japan began with the copying of mechanical watches from Europe, first by buying and assembling watch components, then by manufacturing components that could be made domestically and assembling them with critical components from Europe. The trend toward domestic production increased because watches with good performance and quality could not be built by copying Western watches, and the first mechanical watch to be designed entirely in this country was released in 1956. The aim was to see what degree of precision could be attained, whether component manufacturing and tasks such as assembly, adjustment and repair could be made easier, and to make it for a price that many people could afford. From that point forward, the technical development of mechanical watches began in earnest; watches were equipped with shock-resistant mechanisms, self-winding mechanisms, and so on, always with miniaturization, quality improvement and convenience in mind. The watch manufacturers continued refining their creations with easy-to-make watches, precise watches, and high-quality watches, until they reached a level of mechanical watch quality that was not inferior to that of the Swiss.

Japanese mechanical watches gained international recognition, and as production increased, Japanese watch engineers attempted to master technologies that would enable even greater precision. Then, in 1969, ahead of the Swiss, Japan succeeded in developing and bringing to market the first quartz watch in the world. As the quartz watch was enthusiastically received by the market on account of its great accuracy, high quality, compact size, and reasonable price, quartz rapidly became the mainstay of the watch industry. At the same time, with the spectacular advancement of the Japanese electronic component and raw material industries, the miniaturization of quartz watches accelerated. Moreover, the incorporation of electronics allowed the commercialization of many products with high added value.

This report will focus on the systematization of high-precision timekeeping technologies for watches, from Japan-designed mechanical watches to quartz watches, and on to even more accurate technologies. We will also touch on the subject of micro power generators and the increase in the functionality of watches afforded by their low power consumption.

Chapter 2 will describe the construction of mechanical watches, electronic balance-wheel watches, electronic tuning-fork watches, quartz watches, and radio-controlled watches that are synchronized with a time standard based on cesium atomic clocks.

Chapter 3 will give an account of the birth of the first mechanical watch to be designed in Japan, and will describe the technologies that were incorporated in the design to enhance accuracy, quality, component processing, and assembly.

Chapter 4 will describe the process of improving accuracy that led from mechanical watches to quartz watches, the attempts to dispense with the trouble of winding them up, and the replacement of the energy of a spring with that of a primary battery in electric watches with balance-wheels or tuning-forks as timekeeping elements.

Chapter 5 will explore the technologies behind the world's first quartz watch – a timepiece one hundred times more accurate than a mechanical watch– and its miniaturization. It also looks at the possibilities that quartz watches offer in terms of multifunctional technology with high added value, and the respective features of analog and digital.

Chapter 6 will describe the low power consumption technologies that were developed after the release of the quartz watch that made miniaturization and a variety of new features possible (with particular regard to the improvements made in stepper motor technology) and will also describe the miniaturization of electronic components, the development of industrial processing technologies, and the end of our long dependency on the Swiss for watch oil.

Chapter 7 will describe the principles and characteristics of solar, thermoelectric, kinetic direct drive, self-winding, and micro spring-drive electricity generation alternatives to primary batteries that became possible due to the revolutionary energy efficiency of quartz watches and movements powered by extremely low

electric currents.

Chapter 8 will describe technologies that promise to supersede the accuracy of quartz watches and achieve extremely high accuracy on the order of seconds per month, per year, and even per decade; namely:

- (1) Methods of compensating for the frequency-temperature characteristics of the standard 32 kHz tuning-fork quartz oscillator.
- (2) Methods of adopting high-frequency band AT-cut quartz oscillators.
- (3) Methods of correcting time with time codes based on cesium atomic clocks.

Chapter 9 will recount the history of the Japanese horological industry that aimed to be the “Switzerland of the East” up to its present state as of 2015.

Attached is an appendix covering technologies for recharging quartz watches and increasing their accuracy, public standards relating to watches, advancements that have been made in terms of accuracy and functionality, and the evolution of the products of the various manufacturers.

The horological terminology for mechanical watches and quartz watches in this report conforms to the 2015 edition of Horological Vocabulary (Japan Clock & Watch Association).

■ Profile

青木 茂 *Shigeru Aoki*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和 47 年 3 月 国立長野工業高等専門学校機械工学科卒業
昭和 47 年 4 月 (株)諏訪精工舎(現セイコーエプソン株式会社)時計設計部入社
腕時計のムーブメント開発および設計に従事
腕時計の組立技術および品質保証に従事
平成 23 年 11 月 セイコーエプソン(株) ウォッチ事業部定年退職
平成 28 年 4 月 国立科学博物館 産業技術史資料情報センター主任調査員

■ Contents

1. はじめに	4
2. 時計の機構別構造	5
3. 国産独自設計の機械式腕時計の誕生	23
4. 電子腕時計の出現	31
5. 世界初クォーツ腕時計の開発と多機能化	35
6. アナログクォーツ腕時計の進化を支えた技術	56
7. クォーツ腕時計用発電技術	65
8. クォーツ腕時計の更なる高精度化	82
9. 日本時計産業の変遷および生産推移について	97
10. むすび・謝辞	103

1 はじめに

時間を計測する道具として、日時計、水、ローソク、油などを用いた「時」を計り、知るための時計が作られた。技術者は常に身近で時間を知ることができる、携帯性の良い腕時計へと進化させる努力を続け、時間精度の向上と日常生活を快適に送ることのできるウェアラブル機器へと発展させた。

1300年頃、重りを動力とする機械時計が誕生し、ぜんまいを動力とする小型時計へと発達する。時計技術の革新は、ガリレオが振り子の等時性原理を発見したことにより、それを時計の振り子に応用する振り子時計の開発によって飛躍的に精度が高まった。更に小さくするため、ひげぜんまいによるてんぷ式調速機が発明されて携帯時計が作られ、その後、脱進機や調速機などの改良改善が加えられ機械式腕時計が発達する。

「東洋のスイス」を目指し、時計産業国として先行するスイスに追いつき、追い越すことを目標に、わが国の近代時計産業はスタートを切ったといえる。第二次大戦後、国内周辺技術の進化とのシナジーも含め、驚異的なスピードで技術開発に取組み、ついには世界

初のクォーツ腕時計を生み出し、世界の時計市場に確たる地位を築くに至った。和時計という昼夜の長さが季節により変化する時間を、ものの見事に表現する日本独自の複雑な機構を、創意工夫により生み出し育ててきた過去も、何らかの精神的背景として成功の歴史に寄与しているようにも感じる。志を持つ技術者たちの結集したチームが、新しい機構、分野に挑戦し、幾多の困難を協力しあって乗り越え、達成する日本人の気質も忘れてはならない。

世界初のクォーツ腕時計は、1964年、東京オリンピックの計時を日本が担当することをきっかけに、技術開発に拍車がかかり、その5年後に誕生した。おりしも、2020年に日本でのオリンピックの開催が決定し、再び時間に関心を持たれ、身近な時計に意識が戻ろうとしている。このようなタイミングで、当該技術開発に携わったものとして、この足跡の記録と分析は大変意義深いことと信じ、技術の系統化という形で本報告書を纏めた。

2 | 時計の機構別構造

時間を正確かつ即座に認識できる道具が時計である。時計の形状は様々であり、時計の大きさで分類すれば、掛時計、置時計、懐中時計、腕時計等¹⁾ 明らかな違いがある。常に、時刻をどこに居ても確認できる究極な形として腕時計が存在している。

時計の基本である時間精度は、時間標準の種類によって精度が決定される。ガリレオの振り子の等時性を応用した機械式時計、ゼンマイのエネルギーではなく電気エネルギーでテン輪を振動させるテンぶ式電子時計、金属音叉の振動を標準にした音叉式電子時計、クォーツの音叉振動を標準にしたクォーツ時計、セシウム原子時計の標準時間を受信し、時刻修正する電波修正時計等、時間標準となる振動体の振動が安定すればするほど精度は向上する。

本章では、機械式時計、テンぶ式電子時計、音叉式電子時計、クォーツ時計の構造と原理について説明する。電波修正時計、衛星電波修正（GPS：Global Positioning System）時計はクォーツ時計がベースになっており、違いの部分について記述する。

2.1 機械式時計の構造

機械式時計は、図 2.1 に示すように、時計を駆動するエネルギーを蓄積する駆動エネルギー部、駆動エネルギーを伝達し時刻表示する輪列・時刻表示部、時計の精度を決定する脱進・調速部、時刻あるいはカレン

ダーを修正する修正部（図示していない）、エネルギーを蓄積するゼンマイを巻き上げる手巻き部、自動巻部（図示していない）より構成されている。

2.1.1 駆動エネルギー部

時計を駆動する駆動エネルギー部は、図 2.2 に示すようにエネルギーを溜め込むゼンマイ、ゼンマイに蓄積されたエネルギーを輪列部に伝達する香箱車（動力源となるゼンマイを収納する車）より構成されている。

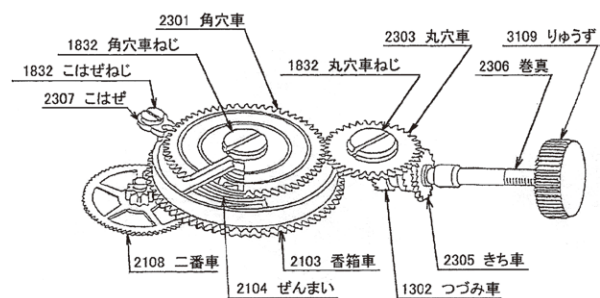


図 2.2 駆動エネルギー部、巻き上げ機構

（出典：JIS B 7010:2013 時計部品 - 名称）

機械式時計の精度は、テンぶ（時計の時間基準になる部材で、一定の周期で往復回転振動しアンクルの動きを制御する部品）の保有エネルギーが大きいほど良くなることが知られている。すなわち、精度の良い時計を作るには、大きなエネルギーを供給するゼンマイが必要である。また、ゼンマイがほどけるにつれてゼ

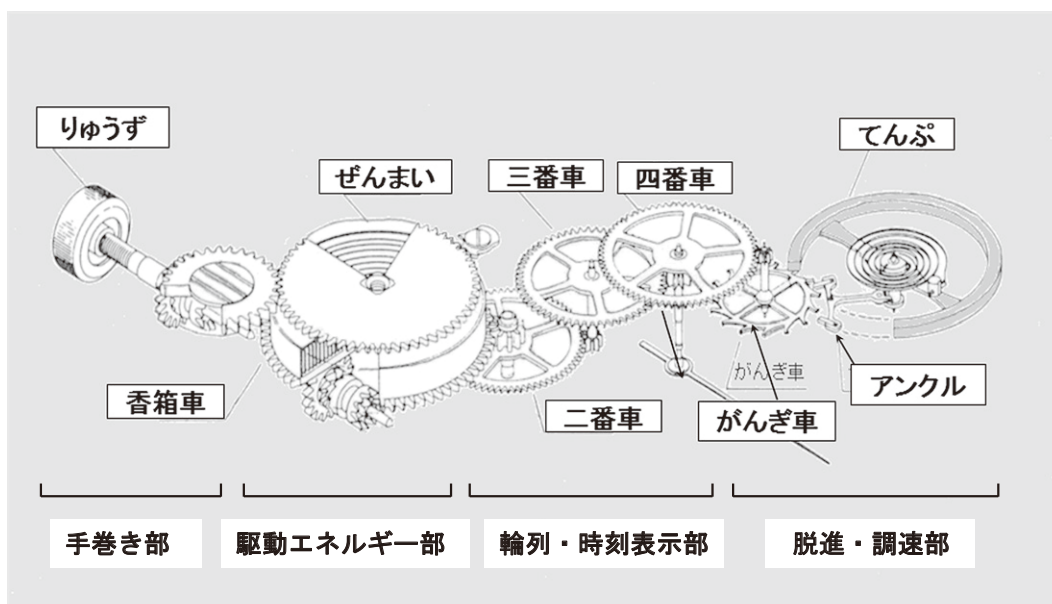


図 2.1 機械式時計の概構造図

んまいトルクが低下する割合（変動率）が小さいこと、長期間にわたって劣化せず安定していることが必要である²⁾。

その制約の中で、香箱車の内容積が時計の精度、持続時間を決定する重要なファクターであり、限られたサイズの中でいかに大きくできるかが設計のポイントである。図 2.3 は、ぜんまいの形状を示しており、香箱車の中に渦巻き状に収められ断面が矩形の薄い金属の弾性材である。ぜんまいを解放すると、S 字形を呈しており巻き締めた時の応力を、どの部分も一定にすることができる。ぜんまいに使われる材料は、駆動に必要なトルクを長時間持続できる材質を選択している。コバルト、ニッケル、クロム、モリブデン等を含有した合金で、高弾性率を持ち、錆びない材料である^{2) 3)}。



図 2.3 ぜんまいの形状

2.1.2 輪列・時刻表示部

図 2.1 に示すとおり輪列部は、歯車段が多くなればエネルギー伝達効率も悪くなりエネルギーロスが発生する。そのため、香箱車に蓄積されたエネルギーを効率よく伝達する歯車構成、歯形形状となっている。

ぜんまいに蓄積されたエネルギーは、香箱車→二番車→三番車→四番車と伝達され、脱進機とてんぷにより正確に刻まれた時間で運針する。

輪列部は、時刻表示部も兼ねており四番車には秒針、二番車には分針、二番車から分岐し伝達された筒車（図示していない）には時計針が取り付けられている。

三針時計においては、秒針が一周 60 秒、分針が一周 60 分、時計針は一周 12 時間で運針するよう増速比が調整され、歯車段が決められている。さらに、時刻の視認性を高めるため、針の大きさや形を工夫している。しかしながら、針を大きくすると駆動するためのトルクも必要になり、大きなぜんまいトルクを必要とするが、機械式の場合、クォーツ時計のステップモーターの駆動トルクに比べ大きなぜんまいトルクであるため、重厚な針を取り付けた時計が可能である。

また、輪列部に使われる歯車の歯形にも特徴がある。時計の歯車モジュールは大変小さく、また機械式時計は増速輪列で増速比が大きいという特徴を持っている。このため、時計用歯形は、一般の歯車がインボ

リュート歯形であるのに対して、すべり率一定の歯形であるサイクロイド歯形が基本となっており、摩擦力、加工性の容易さなどを考慮して修正を加えた円弧歯形を採用している^{2) 4) 5) 6)}。

さらに、伝達効率を上げるため、図 2.4 の通り歯車の支持軸、歯車どうしの接触面を磨き上げている。

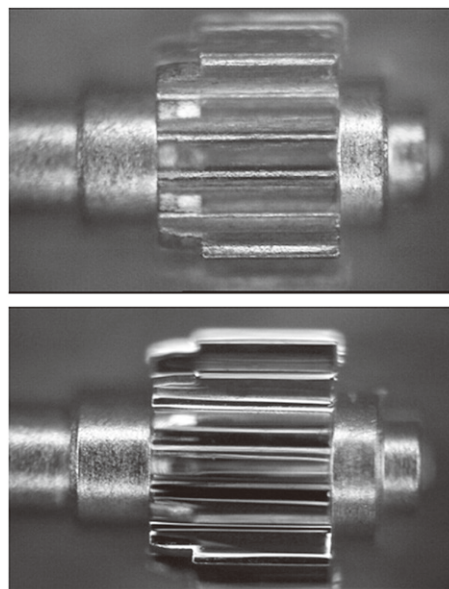
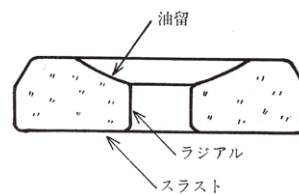


図 2.4 歯磨き効果

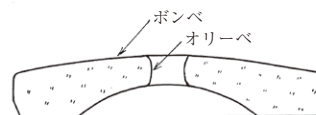
（出典：セイコーエプソン）

歯車の支持部には、穴石（軸受の機能をする部品）として主にルビーが使われているが、ほかにサファイア等も使われている。これらは、容易に摩擦せず、加工後の変形もなく、研磨によって柄との摩擦抵抗が小さく、化学的に安定している。以前は、天然産のものを使っていたが、現在では人造宝石が一般的である。このほかに金属軸受も使われている。

図 2.5 は穴石の種類を示す断面図で、スラスト方向とラジアル方向の位置決めができる穴石およびラジアル方向のみ位置決めする穴石がある。油溜部に時計油



スラスト、ラジアル方向の位置決め



ラジアル方向の位置決め

図 2.5 穴石の種類

を保油して潤滑している。特殊なものに図 2.6 の受石がありスラスト方向の位置決めに用いられ、図 2.5 のラジアル方向の位置決め用の穴石との組合せで使用するのが一般的である²⁾。



スラスト方向の位置決め

図 2.6 受石の種類

2.1.3 脱進・調速部

機械式時計の時間精度は、ガリレオが発見した振り子の等時性を応用している。図 2.7 および図 2.8 に示す通り、振り子の紐をひげぜんまい、重りをてん輪で置き換え、ぜんまいからのエネルギーで振動し精度を維持する振動体である。ひげぜんまいとてん輪を組み立てた完成品をてんぷと呼ぶ。ひげぜんまいの長さを緩急針（ひげぜんまいの有効長を変化させて、時計の時間精度を調整する部品）で調整することにより時間を進めたり遅らせたりする調速機能を有する調速機である。

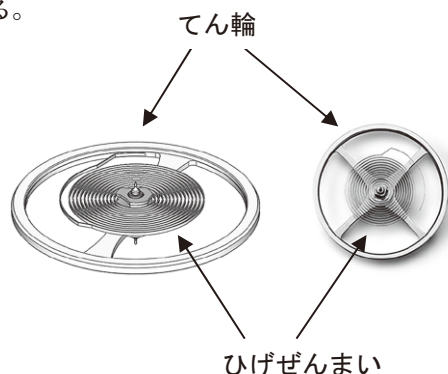


図 2.7 ひげぜんまいとてん輪

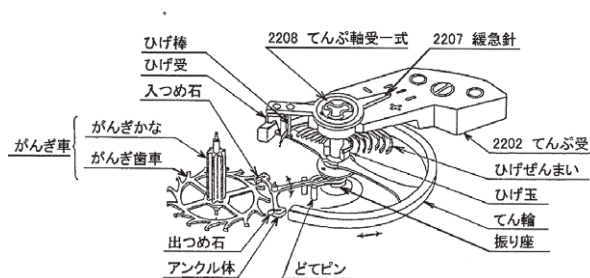


図 2.8 脱進・調速部の構造

(出典：JIS B 7010:2013 時計部品 - 名称)

調速機は摩擦抵抗、空気抵抗等の影響によって失われるエネルギーをぜんまいから常に受ける必要がある。図 2.8 に脱進・調速部の構造を示す。輪列と調速機の間にあり、両者を係合する機構を脱進機と呼びアンクル（がんぎ車とてんぷの間をつなぐ部材で、がんぎ車からの駆動力によっててんぷを往復運動させる部

品。がんぎ車と噛み合う部分には二つのつめ石が固定されている）、がんぎ車（四番車とアンクルの間をつなぐ部材で、四番車からの駆動力によってアンクルを往復運動させる車）、振り座からなっている。脱進機は調速機にエネルギーの補給をし、調速機の一定周期運動を輪列に伝える。また、輪列の一方の回転運動を調速機の往復運動に変換する機能も有する⁸⁾。

時計の基本品質である精度は、脱進・調速部に入るエネルギーの大きさ、およびその変動が大きく影響を与える。振り子の等時性が良いことが基本品質を決定する。てんぷは完全な等時性を有しているとはいえないので、精度の良い時計を得るには、てんぷの保有エネルギーを大きくして、等時性を乱す外乱等の影響を少なくする必要がある。

通常、てん輪は一秒間に 5 回あるいは 6 回の振動をしており、高精度の時計では 10、12 振動のものもある。なお、時計という振動数は、物理における振動数とは異なり 2 振動 = 1Hz で換算されている。

てんぷの保有エネルギー振動数の関係は以下の通りである²⁾。

I：てんぷの慣性能率

θ ：てんぷの回転角

B：てんぷの粘性抵抗係数（てんぷの速度に比例する空気抵抗）

K：ひげぜんまいのバネ定数

R：てんぷの固体抵抗（軸受摩擦）

E：てんぷの保有エネルギー

として、てんぷの自由減衰運動の運動方程式は

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + K\theta \pm R = 0 \quad \dots (1)$$

(1) 式において、てんぷが定常状態で振動しているときは

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + K\theta = 0$$

両辺に $\frac{d\theta}{dt}$ をかけて

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} \cdot \frac{d\theta}{dt} + K\theta \frac{d\theta}{dt} = 0$$

両辺を積分して

$$\frac{1}{2} I \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} K \theta^2 = E \quad \dots (2)$$

(2) 式の左辺第 1 項はてんぷの運動エネルギーであり、第 2 項は位置のエネルギーであって、右辺はその和が一定値 Eであることを表している。

一般には、てんぷの保有エネルギーは (2) におい

て、 $\frac{d\theta}{dt} = 0$ 即ち θ がてんぶの最大振角 A をとったとして

$$E = \frac{1}{2}KA^2 \quad \dots (3)$$

で表します。

(3) 式より、てんぶの保有エネルギーはひげぜんまいのパネ定数 K と、振角が大きいほど大きいといえる。

ここで周期の基本式

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{K}} \quad \dots (4)$$

f : 周波数 (時計の振動数の $\frac{1}{2}$)

(4) 式を用いて、(3) 式を変形すると

$$E = 2\pi^2 f^2 I A^2 \quad \dots (5)$$

(5) 式よりてんぶ慣性および振角が同一である場合、てんぶの保有エネルギーは振動数の 2 乗に比例し、例えば 5 振動と 10 振動では、てんぶの保有エネルギーは 4 倍になる。このように振動数を上げることは時計精度にとっては良い方向である。

次に、てんぶの消費エネルギーと振動数の関係は、 ΔE をてんぶの 1 周期あたりの消費エネルギーとして

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \quad \dots (6)$$

で定義される値を、てんぶの Q 値と呼びてんぶの性能の目安とする。

Q 値は振動体の持つ保有エネルギー (E) と 1 サイクルあたりの損失エネルギー (ΔE) の比で、 Q 値が高い (ΔE が小さい) ほど良い振動体である。

振動数を変えた場合の単位時間あたりの消費エネルギーを考えると、(3) 式を微分して

$$\Delta E = KA \cdot \Delta A \quad \dots (7)$$

(6) 式に、(3) 式および (7) 式を代入すると

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} = \pi \frac{A}{\Delta A} \rightarrow \Delta A = \pi \frac{A}{Q} \quad \dots (8)$$

(7) 式に (4) 式と (8) 式を代入して

$$\Delta E = (2\pi f)^2 I \cdot A \cdot \pi \frac{A}{Q} = 4\pi^3 f^2 I \cdot \frac{A^2}{Q}$$

したがって、単位時間あたりの消費エネルギーはこれを f 倍して

$$\Delta E = 4\pi^3 f^3 I \cdot \frac{A^2}{Q} \quad \dots (9)$$

(9) 式より、てんぶ慣性、振り角および Q 値が同一である場合、単位時間あたりのてんぶの消費エネルギーは振動数の 3 乗に比例する。5 振動が 10 振動になれば、消費エネルギーは 8 倍になる。

このように、振動数を上げるとてんぶの保有エネルギーは増加して外乱等に対して強くなるが、消費エネルギーは保有エネルギーの増加以上に多くなり、ぜんまいの持つ供給できるエネルギーとのバランスを考えた設計が必要になる。

ひげぜんまいは温度特性に優れた外的な衝撃で変形し難い、また磁気に帯磁し難い材料を選択し時間精度を維持している。ひげぜんまいは、コエリンパー等炭素鋼に比べて磁気に強く、温度変化に対して弾性係数の変化が少ない恒弾性材を使用している^{2) 7)}。

精度を維持するため、振動体であるてんぶに、エネルギーを与え続け振動を持続させる必要がある。ぜんまいのエネルギーによって振動体の振動を持続させるとともに、振動体に同期して輪列を作動させる機構を脱進機と呼ぶ。脱進機は、図 2.9 に示すようにアンクルとがんぎ車により構成されており、歯車からもらうトルク (エネルギー) を振動体てんぶに与える機能を持つ。

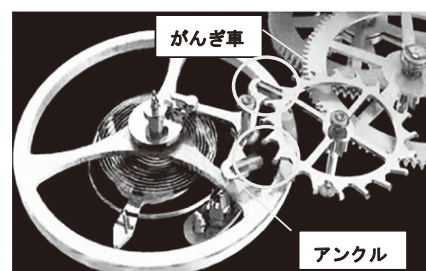


図 2.9 がんぎ車とアンクル

代表的な脱進機を説明する。図 2.10 に示すのは、がんぎ車の先端がゴルフのクラブヘッドに似ていることからクラブツース脱進機と呼ばれ、携帯時計に最も広く用いられている。

てんぶ振り石がアンクルのハコを衝撃し、図 2.9 ○印部のように爪石をがんぎから解除させる。この時、

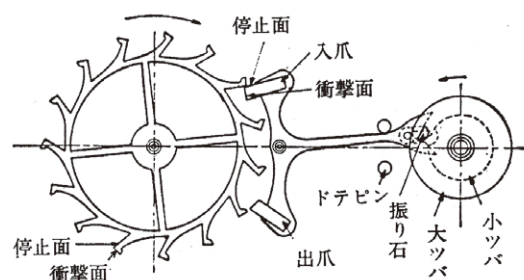


図 2.10 クラブツース脱進機²⁾

がんぎ車はわずかな角度逆転する。解除されるとがんぎは輪列から得るトルクで回転し、アンクルの爪石の衝撃面を衝撃し、アンクルを作動させ、同時にアンクルのハコがてんぷの振り石を衝撃しててんぷにエネルギーを与える。衝撃が終わると、反対側の爪石がガンギ車を停止させる。

図 2.11 はピンレバー脱進機と呼ばれ、目覚時計や置時計に多く用いられている。原理的には、クラブツース脱進機と全く同じ作動をする。クラブツース脱進機に比べて、振り石と爪石が銅製であり摩擦損失が大きい。また、アンクルが大きいために損失エネルギーが大きく、がんぎ車の有効回転角（エネルギーを変換する回転角）が小さいため変換効率が低い。変換効率が低いため伝達する力が大きくアンクルを停止させる力が大きくなり、てんぷがアンクルを解除する力が大きくてんぷの振動を攪乱し精度が悪い^{2) 8)}。

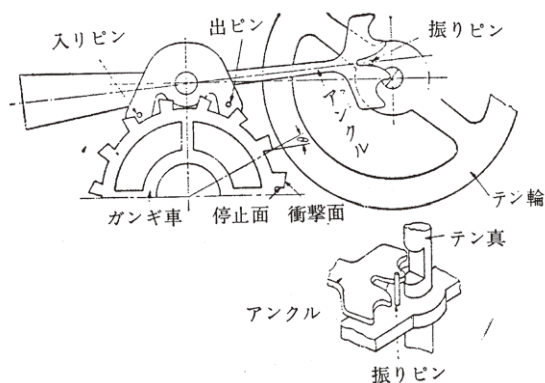


図 2.11 ピンレバー脱進機²⁾

腕時計の軸類のうち、衝撃に最も弱い箇所は最も細い柄を持つてんぷである。時間標準であるてんぷの保持機構は、あらゆる角度からの衝撃のエネルギーを、柄以外の強度のある部分で吸収する耐振装置を備えている。図 2.12 は代表的なてんぷ軸受であり、図 2.5 ラジアル軸受である穴石、図 2.6 スラスト軸受である受石および耐振押さえばねにより構成されている。衝撃の際、てん真の太い部分が軸受の肩に当たるまで移動しエネルギーを吸収する。てんぷの柄が折れないことは勿論のこと、その後の大幅な歩度狂いがないよう工夫されている。

図 2.13 に示す軸受は、組合せ軸受と呼ばれ、図 2.5 に示すスラスト、ラジアル両荷重用軸受の穴石に比べ、保油性を向上させ、スラスト、ラジアル方向とも摩擦損失を少なくしている^{2) 9)}。

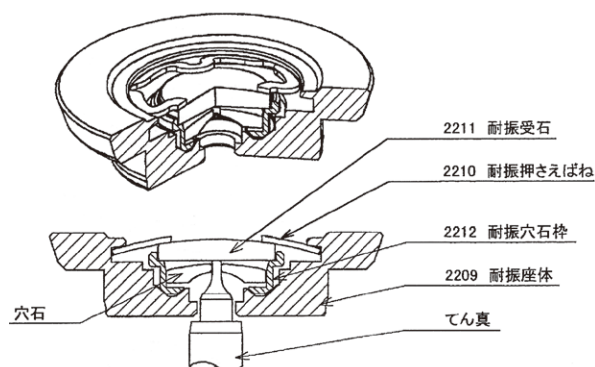


図 2.12 てんぷ軸受構造

(出典：JIS B 7010:2013 時計部品 - 名称)

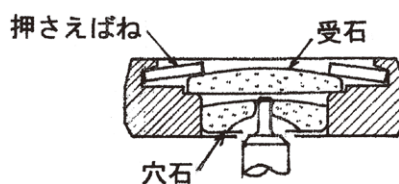


図 2.13 組合せ軸受構造

2.1.4 時刻・カレンダー修正部

時刻の進み遅れを修正したり、カレンダーを合わせる修正部は、図 2.1 および図 2.2 に示す時計の外部に出ているりゅうず、巻真、つづみ車（巻真と連動して巻真からの回転力を伝える車）、針合わせ修正輪列（図示していない）等で構成されている。りゅうずを引き出すことによりつづみ車が移動して修正輪列に噛み合い、りゅうずの左右回転で修正が可能となる。特に、カレンダー修正においては巻真の押し込み、或いは別のプッシュボタン（図示していない）で修正する方式もある。

2.1.5 手巻き、自動巻部

ぜんまいにエネルギーを蓄積させる手巻き機構は、図 2.2 に示すようにりゅうず、巻真、つづみ車、きち車（香箱車のぜんまいを巻き上げるため、巻真を回転軸にしてつづみ車と噛み合う部材で、巻真の回転力を伝える車）等より構成され、りゅうずを回転させることによりぜんまいを巻き上げる。ぜんまいの解ける力をこはぜ（角穴車を一方向にのみ回転するように規制する部品。香箱車のぜんまいの巻戻しを防止する）でロックしている。

自動巻構造は、手巻き部とは全く独立した構成となっており、ヘビーメタル（タングステンを主成分とし比重が約 18g/cm³と大きい合金）で作られた片重りのある回転すいが、人間の腕の動きで回転し小刻みにぜんまいを巻き上げエネルギーを蓄積していく。自動巻

の構造は、各社より様々な機構が開発されて部品点数の削減、巻上げ効率、組立て性向上に寄与している。図2.14は爪レバー方式（第3章3.2で説明する。）の自動巻構造を示している。回転すいをボールベアリングで支持し、ボールベアリングに固定された偏心ピンが回転し、爪レバーを往復運動させ伝え車を回転させる。伝え車の回転は角穴車に減速して伝達され、ぜんまいを巻き上げる。爪レバーの採用により、構造の単純化に伴い、部品点数の削減、組立て性向上に繋がっている²⁾。

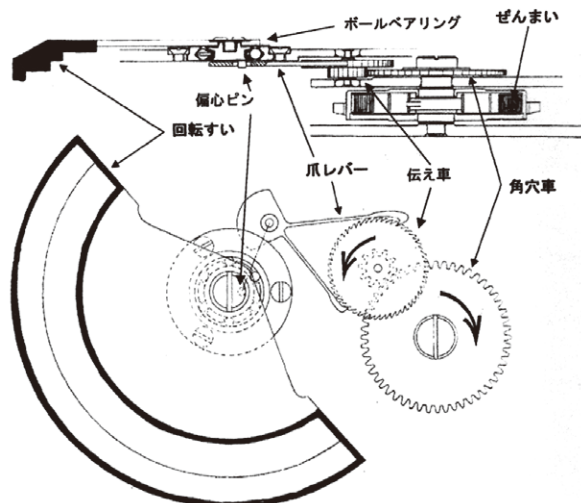


図2.14 爪レバー方式の自動巻構造

回転すいがどんなに小さな腕の動きでも拾うことができれば、ぜんまいには多くのエネルギーが蓄積され時計の持続が維持される。人の日常生活をシミュレーションし、それに伴う時計の動きすなわち回転すいの運動量を把握し、小さな動きでも効率よく巻上げられる構造を採用している¹⁰⁾。

2.2 電子時計の構造¹¹⁾

電気エネルギーを動力源とする時計の呼び方として、電気時計、電池時計、電子時計などがある。電子時計については日本時計国際規格委員会で、1971（昭和46）年に次のように定義している¹²⁾。

「少なくとも源振部（振り子、てんぷ、水晶などが用いられる）を能動素子、すなわち発振、増幅、検波などのエネルギーを発生する半導体または電子管を含む電子回路を用いて制御し、または外部の源振部の振動を能動素子を含む電子回路を用いて受信し、その振動に同期して時計機能を維持するものを電子時計という¹²⁾。」

本報告書では品質面、構造面で優れた電子時計の構造について、てんぷ式電子時計、音叉式電子時計、クォーツ時計の代表例を述べる。

2.2.1 てんぷ式電子時計の構造^{11) 13)}

てんぷ式電子時計の構造は機械式時計と同様、駆動エネルギー部（電池）、時間標準であるてんぷ、てんぷの振動を輪列に伝達する脱進・調速部、指針部および輪列部、時刻あるいはカレンダーを修正する修正部などである。

機械式時計と大きく異なる部分は、駆動エネルギー部と脱進・調速部である。駆動エネルギー部は電子時計では電池を使用するので、エネルギーを蓄積する必要はない。しかし、時計の駆動時間を長くするためには時計の消費するエネルギーを少なくすることが必要である。低消費電力化についてはクォーツ時計の中で述べる。

次に、脱進・調速部である。まず、エネルギーの伝達経路を考えると以下の通りである。

<機械式時計>

香箱車 → 輪列（指針） → がんぎ車
→ アンクル → てんぷ

<てんぷ式時計>

電池 → てんぷ（電子回路含む）
→ アンクル → がんぎ車 → 輪列（指針）

このように、機械式の場合はがんぎ車、アンクルからてんぷにエネルギーを与え、振動させて時間を刻んでいる。てんぷ式電子時計は電池からのエネルギーをてんぷに与え、その往復運動をアンクル、がんぎ車で一方向の回転に変換して指針に伝達している。したがって、機械式時計とは逆の伝達駆動になるので、脱進機に対して逆脱進機と呼ぶ。

本項では図2.15に示すてんぷ駆動部、アンクルががんぎ車逆脱進機について述べる。図に示すように、てん輪は対の永久磁石が磁束を閉じるように取り付けられた上下二枚のてん輪板で構成され、上下のてん輪板の間にはてんぷを駆動するための、駆動コイル、検出コイルが配置されている。

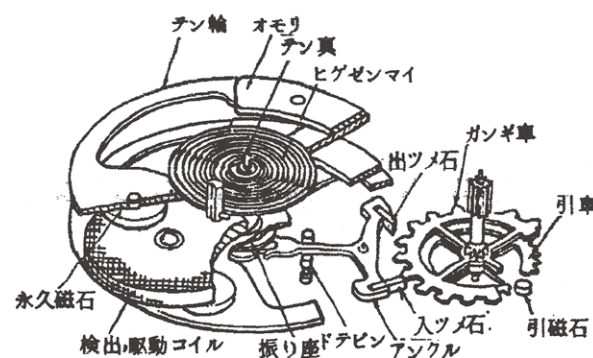


図2.15 てんぷおよび逆脱進機¹⁴⁾

てんぶの駆動部の構成には可動磁石型、可動鉄片型、可動コイル型、アングル駆動型がある。

- (1) 図 2.16 に示すのは、可動磁石型でてんぶが二枚のてん輪板からなり、この上下のてん輪板間に磁束が閉じるように一対から数対の永久磁石を固定し、この磁束を直交するように駆動、検出コイルを固定する。この駆動コイルにてんぶの振動位相に合ったタイミングで電流を流すと、てんぶに駆動力がかかる。このてんぶの振動位相の検出は、検出コイルに生じる誘起電圧で行う。この方式はてんぶに永久磁石を取り付けるため、てんぶの慣性が大きくなり効率を上げて電流を流さなければならない欠点があるが、時計の信頼性はてんぶ式の中で最良である。

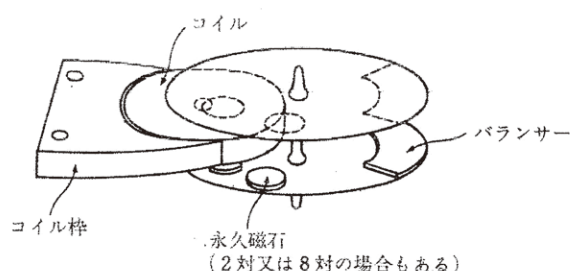


図 2.16 可動磁石型¹¹⁾

- (2) 図 2.17 は可動鉄片型を示しており、磁性体で構成されたてんぶを電磁石で吸引し、てんぶの振動位相を接点で合わせる方式が一般的である。てんぶの慣性は小さくできるので、効率が低い構造であるが消費電流を下げる可以降低ることができる。

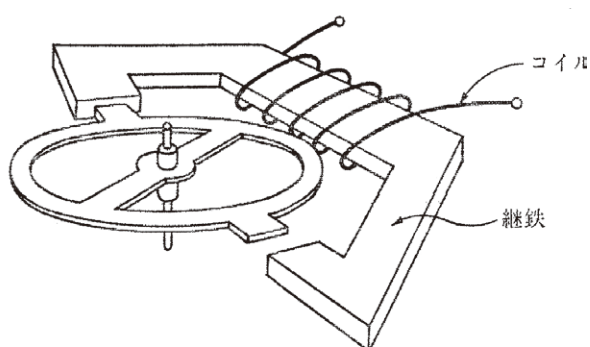


図 2.17 可動鉄片型¹¹⁾

- (3) 図 2.18 は可動コイル型で、コイルを取り付けたてんぶとこのコイルに直交するように磁束を流す永久磁石が固定部材に固定されている。振動するてんぶのコイルからコイル端子を取り出す必要があるため、接点での駆動が一般的である。

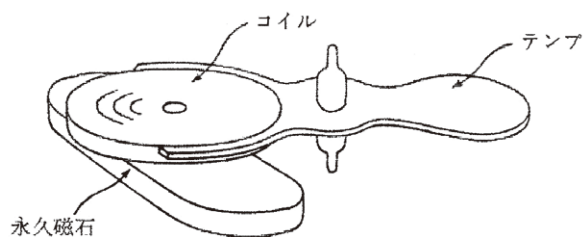


図 2.18 可動コイル型¹¹⁾

- (4) 図 2.19 はアングル駆動型で、機械式時計ではてんぶの振り石をアングルののはこがたたくことによって駆動されるが、この原理をアングルに取り付けた永久磁石と電磁石で電磁的に行わせる駆動方式である。図にあるコイルを構成する継鉄には、駆動コイルと検出コイルが巻かれている。駆動時にアングルののはこに振り石が入っていれば、てんぶは振り上げられる。てんぶの振動位相の検出は、接点を使う方式、アングルの停止解除時の磁束変化を検出コイルによって検出する方式がある。

以上のように、てんぶの駆動方法にはいろいろな構造があるが、コイルを使って電磁石を構成しててんぶの振動位相を検出して、駆動力を与え振動を継続させる動作は同じである。この振動位相を検出する方式が、各構造によって異なる部分である。

てんぶの振動位相を検出する方式には、機械式の接点方式とコイルの誘起電圧を検出する方式がある。接点式は接点部の耐久性、接点部の汚れ等による信頼性に課題を持っている。コイルの誘起電圧を検出する方式は、接点式に比べ耐久性等の問題は無いが、外部の

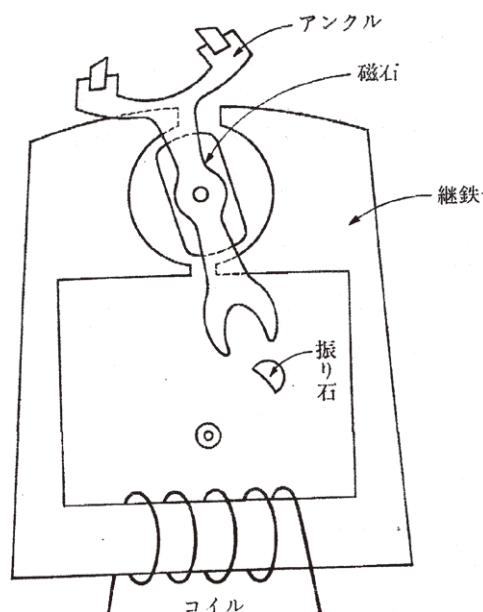


図 2.19 アングル駆動型¹¹⁾

交流磁界による影響を受けやすい。

次に、図 2.15 に示すアンクルとがんぎ車による逆脱進機について説明する。逆脱進機にはアンクル・がんぎ車逆脱進機、ピン（ツメ）送り式逆脱進機、歯車式逆脱進機、磁気脱進機等があるが、本項ではアンクル・がんぎ車逆脱進機について述べる。

図 2.20 はアンクル・がんぎ車逆脱進機を示す作動図である。作動原理は、てんぷ振り石がアンクルのはこを衝撃し、アンクルの一方のつめ石をがんぎ車より解除する。解除されると、他方のつめ石はがんぎ車の歯先の衝撃面にあたり、振り石がアンクルのはこを押し続けている力で、がんぎ車衝撃面を押しがんぎ車を半ピッチ回転させる。てんぷの逆回転時にも同様の作動をしがんぎ車を半ピッチ送る。時刻表示輪列等に負荷が生じた場合には、がんぎ車が逆転しアンクルつめ石とがんぎ車歯先が突っ張らないよう、がんぎ車に逆転止め装置が付いている。逆転防止には引き磁石、機械的なばね等が使われており、図 2.20 では引き磁石と引きピンを使った方法を示してある。

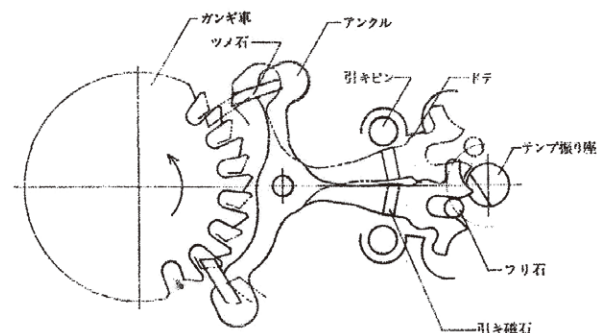


図 2.20 アンクル・がんぎ車逆脱進機¹¹⁾

2.2.2 音叉式電子時計の構造^{11) 13) 15)}

腕時計として音叉式腕時計が発売されたのは、1960（昭和 35）年アメリカのブローバ（Bulova）社のアキュトロン（Accutron）が最初であり、音叉の微小運動を伝える爪レバー、爪車による優れた変換機構を持っている。音叉時計の変換機構は、ブローバ社が開発した爪車方式と音叉置時計に採用されている C.F.Clifford が発明した磁気脱進機方式がある。腕時計用の変換機構には爪車方式が、小型化、効率面で適しており採用されている。

音叉振動子の周波数は、温度変化、姿勢の変化、磁場の影響、電池電圧の変化、音叉のエージングなどによって歩度に変化する。温度変化に対しては、恒弾性材（コエリンパー材など）を適正に熱処理して $\pm 0.1\text{sec/day/deg}$ 以内に入れることができ、てんぷ式の時計に比べ著しく温度による誤差を小さくできる。

音叉式腕時計はてんぷ式腕時計に比べて時間精度が日差 ± 2 秒以内と優れているが、外部からの衝撃に対して音叉、爪車変換器は好ましくない挙動を示す。以下に、音叉振動部、爪車変換器の概要について述べる。

図 2.21 に示すように、音叉、駆動用磁石、駆動検出用コイル、駆動スイッチング回路より構成されている。音叉振動子は、音叉先端部に永久磁石を保持し、音叉振動が漏れない節の部分の時計体の固定部材に固定されている。音叉先端の永久磁石の周囲に駆動、検出コイルが位置し、音叉振動子と同様固定部材に固定されている。この駆動検出コイル、駆動スイッチング回路と電池により制御、駆動する。音叉振動の動きが爪に伝達され、ラチェット車を一方向に回転し指示輪列へ繋がる。

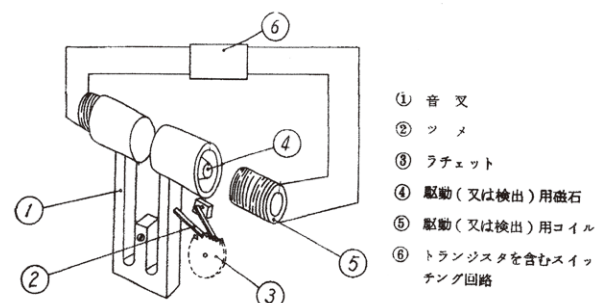


図 2.21 音叉振動部と爪車変換器¹⁶⁾

図 2.22 に爪車方式の変換部分を模式的に示す。爪車、音叉に取り付けられた送り爪レバー、時計体の固定部材に固定された止め爪レバーより構成されている。この爪車方式は送り爪石と止め爪石との位相差の調整および送り爪レバー、止め爪レバーが爪車を押す力の調整が重要となる。図 2.23 に示すように、振動の平衡点（音叉を止めた状態）で爪車のピッチを P として、送り爪石と止め爪石とは互に $P/2$ だけ位相差を持たせることが必要である。

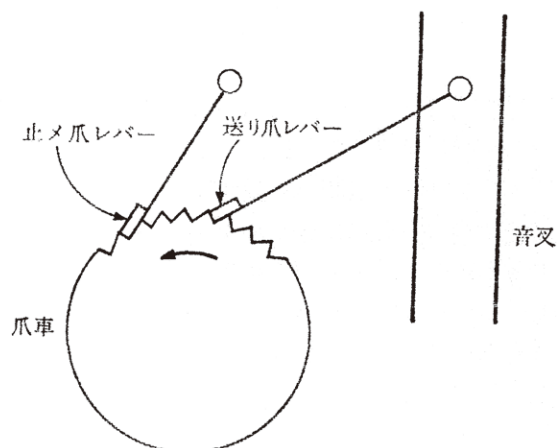


図 2.22 爪車方式の駆動部¹¹⁾

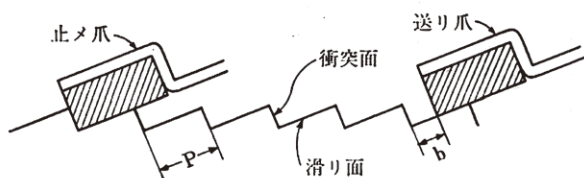


図 2.23 振動の平衡点での爪位置 ¹¹⁾

2.2.3 クォーツ時計の構造

クォーツ時計とは、時間標準に水晶振動子を用いた時計である。機械式時計はてんぷ、音叉式時計は金属音叉の振動をそれぞれ時間標準としている。クォーツ時計を遡れば水晶が持つ圧電現象の発見から始まる。1880 年、有名なキュリー（Curie）兄弟が水晶片に機械的な歪を加えると、電荷が生じることを発見する。その翌年、逆圧電現象（水晶片に電圧を加えると歪が生じる現象）も確認された。

その後 1920 年代前半、水晶による極めて安定度の高い周波数制御が可能であることが発見され、その原理を応用して高安定の周波数標準と時間標準を得る。この原理を使ったクォーツ時計が、1927 年アメリカのベル研究所で開発されたが、駆動用の電子回路も真空管式であり、筆筒サイズの大きさだったと言われている。小型化への道は、トランジスタの発明が大きく影響を与え、今日のクォーツ腕時計への開発が進んでいく。

クォーツ時計は、大きく 3 つの時刻表示方法があり、時刻を針等機械的構造で表示するものをアナログクォーツ時計、液晶等電子的構造で表示するものをデジタルクォーツ時計、アナログクォーツ時計とデジタルクォーツ時計の表示機能を併せ持つものをコンビネーションクォーツ時計と呼ぶ ¹⁾。

図 2.24 は、アナログクォーツ時計の構造を構成要素に分解した図で、大きく電源、電子回路部、機械駆動部に分かれる。ここでは、電源、電子回路部、機械駆動部を構成する電気－機械変換部について説明し、輪列・指針は機械式時計と同様なので説明を省く。

(1) 腕時計用電池

腕時計用電池には、一次電池と太陽電池等で発電した電気を蓄える二次電池があるが、本項では主に一次電池について述べる。

腕時計用の電池に要求される特性は、以下の通りである ¹¹⁾。

- ①単位体積当りのエネルギー密度が大きいこと。
- ②耐漏液性が長期保証できること。
- ③温度特性が、 $-10^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ の範囲で良好なこと。
- ④放電特性が良好なこと。（放電電圧がフラットで、放電時の電圧降下が少ない）
- ⑤保存性に優れていること。
- ⑥帯磁しにくいこと。
- ⑦振動、衝撃に強いこと。
- ⑧接点との接触抵抗が小さいこと。
- ⑨電池の入手が容易なこと。

以上の要求特性の中で、最優先されるのが単位体積当りのエネルギー密度が大きいことである。エネルギー密度が大きくなれば、今までの電池サイズであれば時計を長時間駆動することができ、同じ駆動時間であれば、小さいサイズの電池で可能となり、クォーツ腕時計の薄型・小型化、長時間駆動クォーツ腕時計への展開を可能にする。

腕時計に使われた一次電池は、水銀電池 ¹⁸⁾ ¹⁹⁾ と酸化銀電池が代表的なものである。表 2.1 に水銀電池と酸化

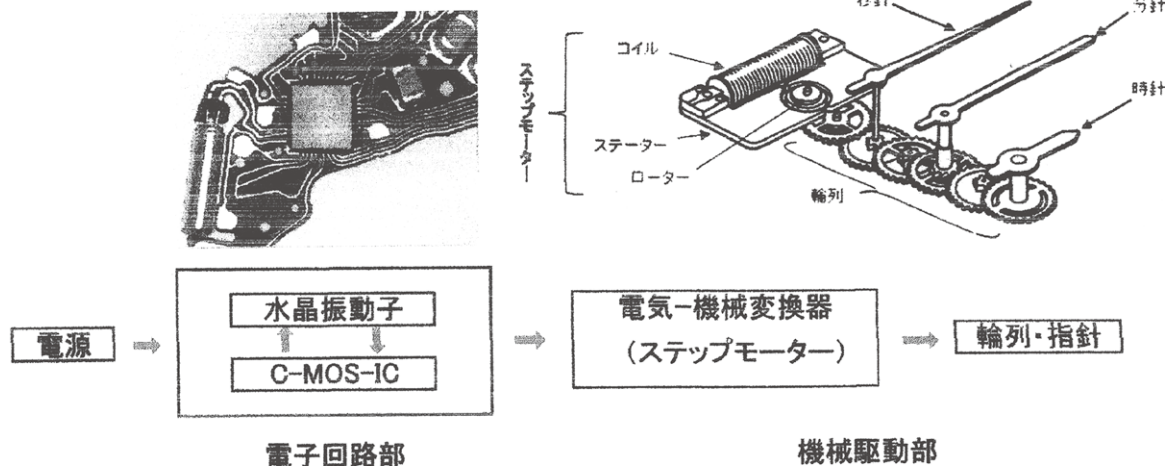


図 2.24 アナログクォーツ時計の構成要素

銀電池の主な特性を比較した。表より酸化銀電池と水銀電池との差は、電圧値の違いだけであるが、クォーツ腕時計の当初は、単位体積当りのエネルギー密度、保存性が高く、自己放電も低い水銀電池が使われていた。その後、有機水銀の有害性、環境への影響が指摘され、無機水銀（有機水銀より毒性は小さい）を使っている水銀電池にもその目は向けられ、酸化銀電池へと切り替わっていく。クォーツ腕時計の薄型・小型化、長電池寿命化の技術開発とともに、酸化銀電池の開発も著しく加速し、単位体積当りのエネルギー密度は飛躍的に改善され、電池サイズの展開も多くなった。

表 2.1 酸化銀電池と水銀電池の性能比較

電池の種類	酸化銀電池		水銀電池	
電解液の種類	NaOH	KOH	NaOH	KOH
容量	大	大	大	大
電圧 (V)	1.55	1.55	1.35	1.35
放電電圧の安定性	◎	◎	◎	◎
高率電流放電安定性	○	◎	○	◎
内部抵抗	中	低	中	低
低温特性	○	◎	○	◎
漏液	○	△	○	△
自己放電	◎	◎	◎	◎

クォーツ腕時計の技術開発は、電池のエネルギー密度の向上と長期信頼性の確保の技術開発とともに大きく前進したと言って過言ではない。

腕時計用電池は、一番小さいサイズで直径 4.8mm 厚み 1.65mm、大きいサイズで直径 11.6mm 厚み 5.4mm であり、その間に何種類かの組合せサイズが存在する。詳細は、電池メーカーのボタン電池（直径が厚みより大きい電池）カタログを参照されたい。

(2) 電子回路部

電子回路部は、水晶振動子、CMOS-IC（Complementary-Metal Oxide Semiconductor：相補型電界効果形トランジスタ¹¹⁾）等が実装された回路ブロックと呼ばれ、クォーツ時計の高い時間精度を維持する重要な要素である。

電子回路部の機能は、大きく水晶振動子を振動させる発振部、水晶振動子の高い振動信号を次の電気－機械変換器に合う低い振動信号に変換する分周部、電気－機械変換器に適した波形を形成し、変換器を駆動する駆動部に分かれる。

水晶振動子は水晶を素材とする機械振動体であるが、水晶固有の物性により他の振動子とは違う電気的性質を持っている。この電気的特性を前述の圧電効果（ピエゾ効果）と呼ぶ。水晶は SiO₂ の化学組成を持ち常温常圧の下ではフッ酸以外の酸にはほとんど溶解し

ない安定した単結晶である。水晶から棒状、薄板状の水晶片を切り出し、適当な電極を配置し交流電界を加えると圧電効果により、これに等しい周波数の応力、ひずみを生じる。電界の周波数が水晶の弾性振動の固有振動数に一致した場合、水晶片は共振して大きな振動になる。水晶振動子はこの現象を利用したもので、電界を加えるための電極、機械的な支持機構を設け、容器に真空封入したものであり、共振周波数が極めて安定しており振動損失が少ない特徴を持っている¹¹⁾。

時計用水晶振動子に要求される特性は以下の通りである。

- ①できる限り小型であること
- ②耐衝撃性に優れていること
- ③周波数温度特性が良いこと
- ④周波数経時変化（加工歪、支持および封入等の条件による）が少ないこと
- ⑤低消費電力であること

すべての条件をクリアする水晶振動子はないので、どの特性を重視するかによって水晶振動子の種類が決定する。

水晶の結晶は三次元の直交座標系を持っており、結晶軸に対する電界のかけ方によりいろいろな振動モード、温度特性が得られる。図 2.25 に示すように、電気軸、機械軸、光軸の三つの座標系として表すことができ、結晶軸の電界成分により伸縮のひずみあるいはすべりのひずみを引き起こすことができる^{20) 21) 22)}。

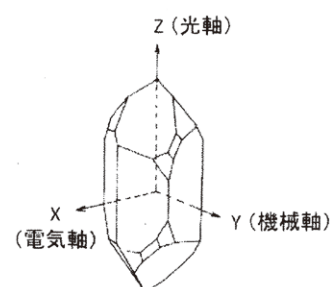


図 2.25 水晶の結晶軸

水晶の切り出し角度によりいろいろな振動モードが得られるが、本項では時計用に使われている代表的な振動モード、+5° X カット音叉型屈曲水晶振動子、AT カット厚みすべり水晶振動子について説明する（表 2.2）。各々の振動モードを模式的に表したのが図 2.26 である。

表 2.2 時計用水晶振動子の代表振動モード比較

水晶カット名	形	振動モード	振動数
+5° X	音叉状	屈曲振動	4k~600kHz
A T	板状、棒状	厚みすべり振動	500k~200MHz

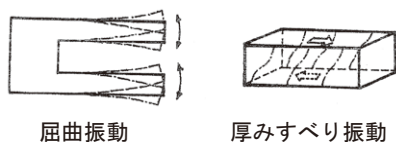


図 2.26 屈曲および厚みすべり振動子の振動モード

図 2.27 に上記 2 種類の水晶振動子のカット方位を示してある。X カット水晶振動子は Y 軸に対して 5° 傾けた角度、AT カット水晶は Z 軸に対して $35^\circ 15'$ の角度で切り出す。

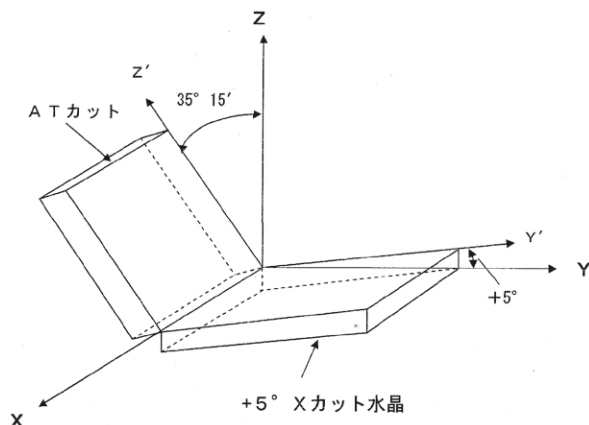


図 2.27 各種水晶振動子のカット方位

$+5^\circ$ X カット水晶振動子の特徴は、低周波数が可能なことであり共振周波数を変えずに小型化が可能である。音叉基部に節点が存在するため、水晶振動子の電極の取り出し、支持固定が大変容易であり強固にできるため、小型で耐衝撃性の優れた水晶振動子を作ることができる。殆どのクォーツ腕時計にはこの振動モードが使われており、振動周波数は $32,768\text{Hz}$ が主流である。この水晶振動子は、図 2.28 に示すような二次の温度特性を持つので、温度の変化により周波数が変動し誤差を生じる。ただし、腕時計の場合、常に腕に着けることにより安定した温度環境が得られるので大きな誤差とはならない。

音叉型水晶振動子の外形加工は、ワイヤーソーでの機械加工によるカット方法とフォトリソグラフィの技術による方法がある。クォーツ時計の初期は、水晶振動子をワイヤーソーでカットして作っていたが、フォトリソグラフィの技術が出現することにより同じ品質の水晶振動子が大量に作られるようになった。従来の方法とフォトリソグラフィの方法の製造工程比較が図 2.29 である。水晶のエッチングにはフッ酸系のエッチング液を用い、水晶振動子の音叉形状を作り出す。

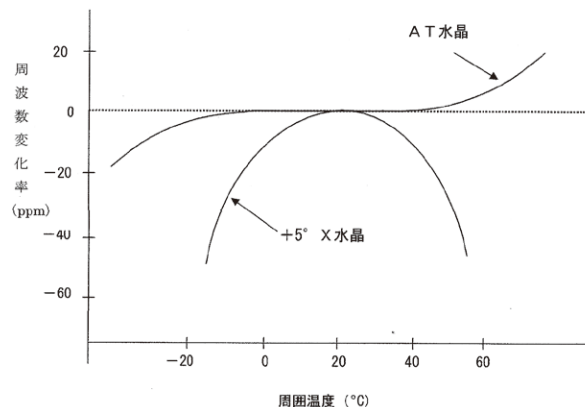


図 2.28 各種水晶振動子の温度特性

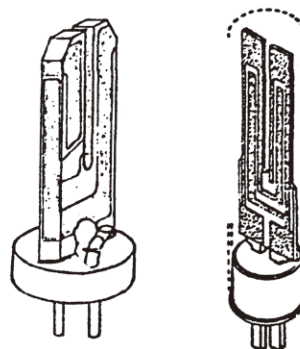
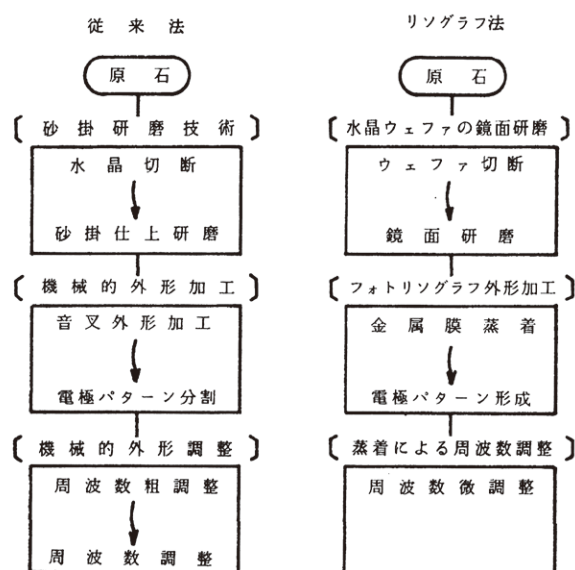


図 2.29 水晶振動子製造工程と振動子例²¹⁾

図 2.30 にフォトリソグラフィによる水晶振動子の完成ウエハー (Wafer) を示す²¹⁾。振動子の外形エッチング後、励振させるための電極膜を形成し、電極端子 (リード端子) に固定する。水晶振動子の周波数調整は、音叉の先端部に金属を蒸着させる、あるいはレーザーで調整用電極を飛ばす方法で行う。周波数調整後、図 2.31 に示す通りケースに真空封入する。時計用の音叉型水晶振動子は円筒型形状が一般的で、そ

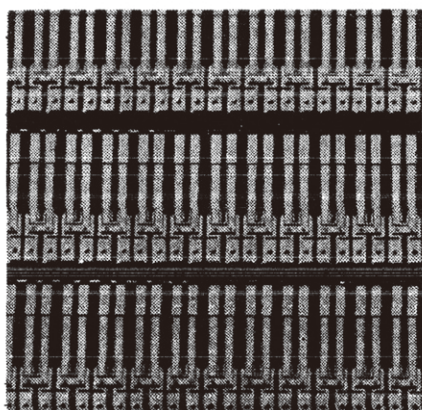


図 2.30 リソグラフによる水晶振動子の完成ウエハー²¹⁾

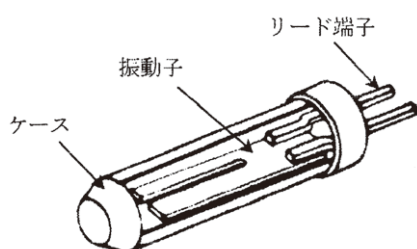


図 2.31 音叉型水晶振動子¹⁷⁾

のサイズは直径 2mm、長さ 6mm が一般的であるが、直径 1.2mm、長さ 4.6mm 等の小型サイズもある。

AT カット水晶振動子は、図 2.27 に示すように Z 軸より $35^{\circ}15'$ 傾いた面に平行に切り出され、Z' 軸面と垂直方向の電界で厚み方向のすべり歪を生じ、厚みすべり振動と呼ばれる振動モードで励振される。時計用の AT カット水晶振動子の周波数は、振動子の大きさ、消費電流等のバランスより 2MHz 帯、4MHz 帯が採用されている。

AT カット水晶振動子の優れている点は、

- ① 周波数温度特性が三次特性を持っているため、時計の携帯温度付近 ($0^{\circ} \sim 40^{\circ}$) で極めて平坦な温度特性が得られる。(図 2.28 参照)
- ② 一般に、周波数が高くなるにしたがって周囲の気体の圧力変化に対し、周波数、Q 値等が影響を受け難くなる。

その反面、以下の課題があり腕時計への展開が難しい。

- ① 高周波数のため、発振および分周回路の消費電力が大きい。
- ② 水晶振動子が大きい。

図 2.32 に、腕時計用 AT カット水晶振動子を容器に封入した状態を示す。

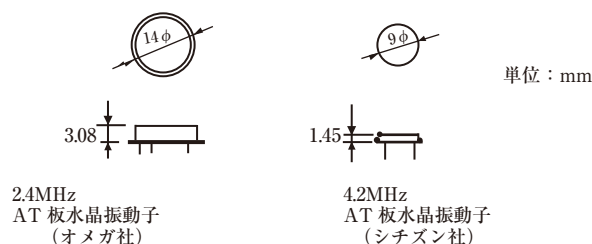


図 2.32 AT カット水晶振動子²⁰⁾

完成した水晶振動子は、発振回路により安定した周波数で発振する発振器となる。この発振器の基準信号を、電気-機械変換部（ステップモーター）を動かす信号まで周波数を通降する回路を分周回路と呼ぶ。分周回路はバイナリーカウンタ（周波数を 1/2 に通降させる回路）で構成されており、発振周波数、例えば 32,768Hz を電気-機械変換部のステップモーターを駆動する一秒に一回の信号に落とすため、バイナリーカウンタ 16 段を要している。バイナリーカウンタの最終段の出力波形をそのまま駆動回路に導くと、ステップモーターには常に大電流が流れ電池寿命は大変短くなる。効率よく低電力で動作させるため、波形整形回路により出力パルスの幅を最適な幅に設定する¹¹⁾。一般的には、10msec. 以下の出力パルス幅に設定している。その分周波形の状態を示すのが図 2.33 である¹⁷⁾。

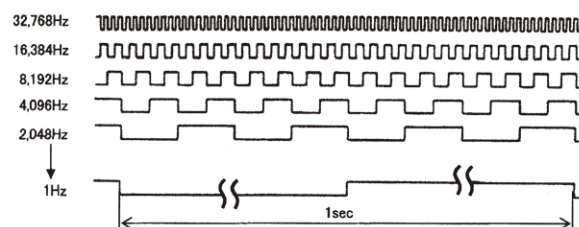


図 2.33 分周波形¹⁷⁾

(3) 電気-機械変換部^{11) 17) 23)}

アナログクォーツ時計の電気-機械変換部は、アナログクォーツ腕時計が 1969 年に商品化されて以来、各種の構造が発案され、現在主流の平面型 2 極ステップモーターに淘汰された。その間、腕時計用に適した小型化、薄型化、低消費電流化と飛躍的な進歩を遂げた。本項では、代表的な平面型 2 極ステップモーターを中心に述べる。

図 2.24 の機械駆動部に示すように、ステップモーターはステーター、コイル、ローターの三部品で構成されている。各々組立工程において各部品が組立てられ、ステップモーターとしての機能を果たす。一般的なモーターの構造は、ステーター、コイル、ロー

ターの各機能部品が組込まれたモーター完成体である。モーター完成体から出ているコイル端子に駆動信号を与えることによりモーターが作動する。このように各機能部品を組立完成したモーターをユニットタイプモーターと呼び、図 2.34 に示す構造である。クォーツ腕時計の初期には、このタイプのモーターを採用した海外メーカーもあった。図に沿って時計用のユニットタイプモーターの構造を簡単に説明する。永久磁石からなる円柱状のローターを取り囲むように空芯に巻かれたコイル、その外周に配置された円筒状の磁性材より構成されている。磁性材にはローターの引き位置を決めるため、対称の位置に2ヶ所穴を開けてある。コイルと引き位置とは回転に方向性を持たせるため、一定角度ずらして配置している。ローターは1回の反発パルスで180°回転する。

一方、現在主流となっている組立工程で組立てる構造をオープンタイプモーターと呼んでいる。オープンタイプモーターの利点は、時計のような小型・薄型化を追求する構造設計において、少ない空間にステーター、コイル、ローターを分散させ、性能確保のための効果的形状を作り出せることにある。この発想により、クォーツ腕時計の小型化、薄型化が可能となり、多くのデザイン展開によりクォーツ腕時計の需要を広げた。

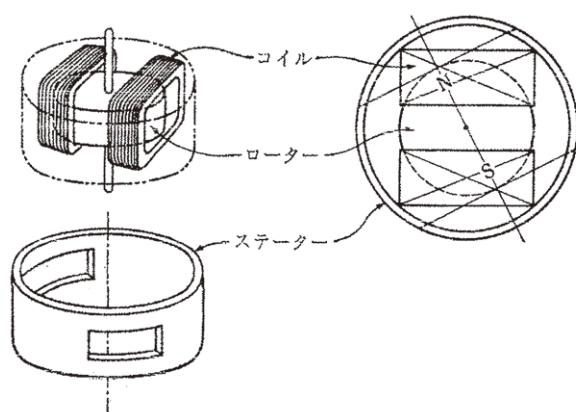
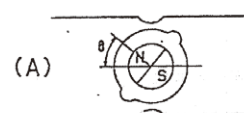


図 2.34 時計用ユニットタイプモーター¹¹⁾

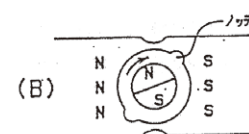
オープンタイプモーターの構造および作動原理について述べる。図 2.24 に示すようにステップモーターは、円筒形の2つの磁極（NおよびS）を持つ永久磁石を保持するローター、高透磁率材よりなるコイルコアに巻線されたコイル、ローターの周囲を囲みコイルで発生する磁束をローターへ導く高透磁率材よりなるステーターで構成されている。ローターを構成するローター磁石の材料は、サマリウムコバルト磁石が主流であり、直径0.8~1.5mm、厚み0.3~0.5mmが一般

的である。コイルには、ポリウレタンで被覆された極細銅線（線径φ12~22μm）が約2000~10000ターン巻かれている。

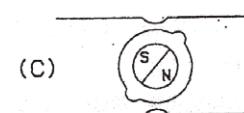
駆動信号によりコイルに電流が流れるとコイルは電磁石となり、ステーターに磁極が発生する。ステーターには、ローターを安定静止状態に保つノッチ部（切り欠き部）（図 2.35 参照）、微小電流でもコイルからの磁束により磁気飽和する極小断面の肉薄部（図 2.36 参照）が設けられている。コイルに微小電流が流れると、肉薄部が磁気飽和により等価的に接続部分がなくなった状態となり、NおよびS極が発生する。肉薄部を切断して磁気抵抗を大きくする形状のステーターもあるが（ステーターが2体に別れたタイプ）、肉薄部を設けることによりステーター穴形状をプレスで精度良く加工できる利点がある。



磁路に対して、ある安定静止位置を保っている。



パルスPwによって正回転。



パルスPwによって180°正回転終了し、
磁路に対して、安定静止位置に静止。

図 2.35 ローター回転モデル²³⁾

図 2.36 に示す複数の曲線は、磁束の流れを表しており、磁石から切り欠き部と直角方向に磁束が流れているのが分かる。この状態がローターの安定静止位置で、ステーターに設けられたノッチの角度によって決まり、静止する力はノッチの大きさによって制御できる。ローターが安定静止位置に留まる力をコギングトルク（cogging torque）と呼び、ステップモーター性能の重要ファクターである。腕時計の携帯には様々な外部からの外乱があり、特に落下衝撃により秒針が、針の慣性モーメントにより針飛びを起こし、時刻狂いを生じることがある。針飛びが発生しないようコギン

グトルクを大きくすると、ローターを駆動する電流を大きくしなければならない。従って、消費電流と針飛びのバランスを考慮したモーター設定をしている。

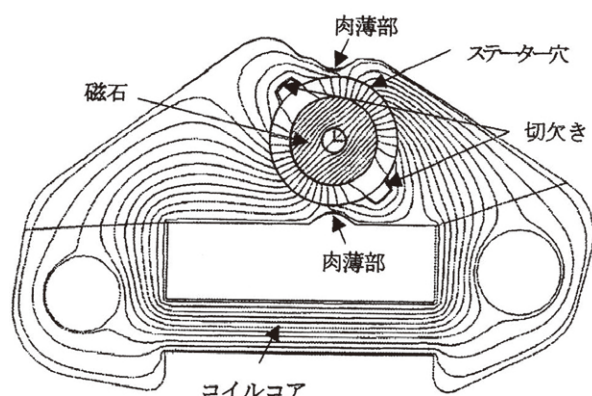


図 2.36 スター穴形状¹⁷⁾

時計用ステップモーターは、磁極の反発作用により回転する方式である。図 2.35 (A) に示すようにローターは磁路に対してある安定静止位置を保っている。図 2.35 (B) でコイルに駆動パルス P_w が印加されステータは励磁され、ローターの磁極と反発しあいローターは正回転（指針が時計回りに進む方向）方向に回転する。ローターが 180° 回転すると図 2.35 (C) のように磁路に対して安定静止位置に静止する。この動作を繰り返すことにより正回転が継続される。図 2.37 に回転が継続する動作を示している。端子①から端子②に流れる電流によって発生する磁極と、端子②から逆に流れる電流による磁極が異なるため、常に反発パルスによる駆動となる。

クォーツ腕時計の 1 秒間の平均消費電流は $1\mu A$ 以下であるが、駆動パルス幅 10msec 以下の時間では、瞬間的に 1mA を超える電流が流れる。時計における

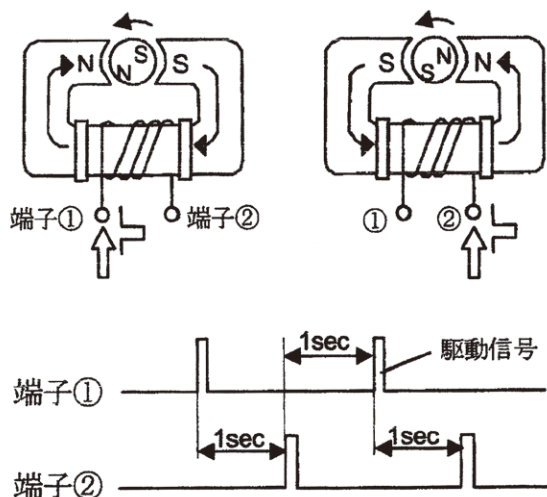


図 2.37 ステップモーターの動作¹⁷⁾

消費電力の大きい要素部分は、水晶振動子の源振を駆動信号まで分周する分周回路と電気-機械変換部のステップモーターの駆動部である。低消費電力化の鍵は、分周回路を含めた電子回路とステップモーターの省エネルギー技術である。

ローターの回転が輪列に伝達され時刻表示される。ローターが 1 回の駆動信号で 180° 回転すると、その回転を秒針が 6° 回転するよう 30 分の 1 に減速し、さらに 60 分の 1 減速して分針、さらに 12 分の 1 減速して時針に伝達する。このように、クォーツ時計は、機械式時計の増速輪列とは逆のローターの回転を減速して指針に伝える減速輪列である。

世界初のクォーツ腕時計は、図 2.38 に示すように白金コバルトの 6 極磁石を使い、1 回の駆動信号でローターを 60° 回転させ、輪列で 10 分の 1 に減速し秒針に伝達する 6 極ステップモーターを採用していた。指示輪列の減速段が少なくなる利点を持っていたが、ローターの安定静止位置の調整の難しさ、ローターの慣性が高いため駆動電流が大きい、ローターコストが高い等欠点があり、その後のステップモーターの主流にはなり得なかった。

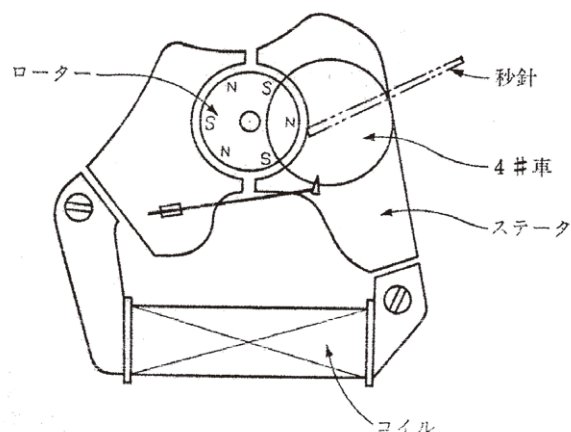


図 2.38 6 極ステップモーター¹¹⁾

2.2.4 電波修正時計^{24) 25)} および衛星電波修正時計の構造

電波修正時計、衛星電波修正時計とは何かを、一般社団法人日本時計協会では次のように定義している¹⁾。

電波修正時計：「標準電波を受信し、自動的に時刻やカレンダー修正を行う機能をもつ時計」

衛星電波修正時計：「GPS 衛星等 GNSS の電波を受信して、自動的に時刻やカレンダーの修正を行う機能をもつ時計」

時計の精度を決定する基本部分は、電波修正時計も衛星電波修正時計も、数 10 万年に 1 秒の精度を持つ

セシウム原子時計をもとに作られる標準時の情報を持つ電波を受信し、時刻或いはカレンダーを修正する機能を有している点は同じである。大きな違いを以下に示す。

- ・電波修正時計は、固定局（福島局：おおかどや山標準電波送信所（周波数 40kHz）、九州局：はがね山標準電波送信所（周波数 60kHz））から発信される長波標準電波を受信し、2つの局により日本全域をカバーしている。1999 年 6 月に福島局が開設され、2001 年 10 月に九州局が運用される。両局の周波数が違うのは、お互いの伝搬範囲の重なり合う地域において、電波が干渉しないよう配慮されたものである。世界で標準電波を出している国は、日本、アメリカ、イギリス、ドイツ、中国であり、日本と同じ周波数を使っている国もあるが、送信するタイムコード（時刻情報の送信フォーマット）などが異なるため、日本仕様の時計では電波修正の機能を果たさない。
- ・衛星電波修正時計は、地球全体をカバーする GPS 衛星から発信された極超短波（周波数：1.5GHz 帯）を利用しており、4つの衛星情報から時刻、緯度、経度、高度が分かるので、時差含めた時刻修正が瞬時に可能である。
- ・電波修正時計の受信時は、標準電波が長波帯でありステップモーターの発生する磁気の影響を受け易いため、針（ステップモーター動作）を停止させる。衛星電波修正時計は、極超短波帯により磁気の影響を受けず針を停止させる必要はない。

標準電波の詳しい情報は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT:National Institute of Information and Communications Technology）のホームページを参照されたい。

尚、電波修正時計の時刻修正方法と付随する2つの技術について簡単に述べる。日本の標準電波（JJY）には、時、分、1月1日からの通算日、年（西暦下2桁）、曜日等がタイムコード情報として乗っている。電波修正時計は、電波ノイズの少ない真夜中に標準電波を受信し、このタイムコードを分析し現在時刻を読み取る。受信を何回か実施することにより不確かな時刻情報をキャンセルし、現在時刻の確度を高めている。

時計の電子回路は、送られた現在時刻と時計内の時刻を比較し時間のずれ量を算出する。その後、ずれている分指針を動かし現在時刻に補正する。アナログクォーツ時計における時刻補正のやり方は、進み、遅れ時間に応じて正転或いは逆転で現在時刻に合わせる。針を駆動させる方法は、時刻補正時間が短くなるよう、

時計メーカー各社のアイデアが盛り込まれている。

通常、電波修正時計は、標準電波を受信できない場合にもクォーツの時間精度で作動しているので分単位のずれを生じるのは稀である。電波修正時計には、毎日自動的に受信を実施する自動受信と、受信できない状況が長く続いた場合や電池交換等時計が停止したときの手動で行う強制受信の2通りがある。

まず、時計の電子回路が持つ内部時刻情報と指針が示す時刻情報について述べる。時計の電子回路の基準と指針の基準位置を合わせることが必要である。合わせた後、時計を作動させることにより、電子回路のカウンターが1秒ずつ刻み、このカウントと同時にステップモーターに駆動パルスが送られ秒針が動作する。時計にはこの積算量が時間としてカウントされ指針により時刻表示される。時計の電子回路は、標準電波から送られた時刻情報により現在時刻を取得し、時計内部の時刻情報と比較することによりずれ量を算出し、ステップモーターを駆動する信号を送る。電子回路と指針の基準位置合わせは、電気回路は電氣的なりセット動作で基準を認識させ、指針は時計の使用者が午前0時0分にステップモーターの早送り駆動で合わせるのが一般的である。これを針位置の基準位置合わせと呼ぶ。

次に、電波修正時計、衛星電波修正時計共通に付随する代表的な2つの技術について述べる。指針を高速で早送りさせるステップモーターの早送り駆動および秒針、分針、時針の針位置を自動で認識する針位置自動修正機能である。

（1）ステップモーターの早送り駆動²³⁾

図 2.39 に示すのは、1秒正回転駆動パルス（左）と早送り正回転パルス（右）の出力波形である。通常、1秒に1回反発パルスが出力され、ローターが180°回転し秒針が1秒動く。前述した電波修正時計の早送りは、図の右側にある1秒間に何パルスか出力し回転させ指針を送る動作である。早送り周波数は数10Hzで、最大で128Hzの高速駆動するステップモーターも商品化されている。

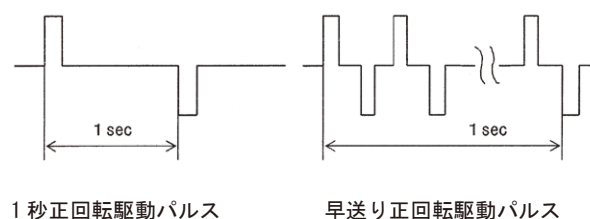


図 2.39 1秒および早送り正回転駆動パルスの比較

図 2.40 に示すように、ローターは駆動パルスの印加で動き出し、パルスが切れた後も安定静止位置付近を振動している。高速早送りになればなるほど、出力パルス間隔が短くなるためローターが振動している状態で駆動パルスが印加される。高速時の出力パルスの間隔は、例えば 64Hz で 15.6msec ($1000\text{msec}/64$)、128Hz で 7.8msec であり、早くなれば、ローターの振幅が大きいときに駆動パルスが印加されるため、ローターの振動に合わせた出力タイミングを設定することが重要である。合わない場合にはローターのミスリ（ローターが回転しない状態をいう）が発生し指示狂いとなる。ローターの駆動パルス印加後の振動状況は、ローターの慣性、コギングトルク、油の粘性等の影響を受ける。ローターの慣性およびコギングトルクは、ステップモーターの基本設計時に決定されるが、油の粘性は、温度特性を持ち、低温になれば粘性が増加するするため、低温状態での十分な確認が必要となる。

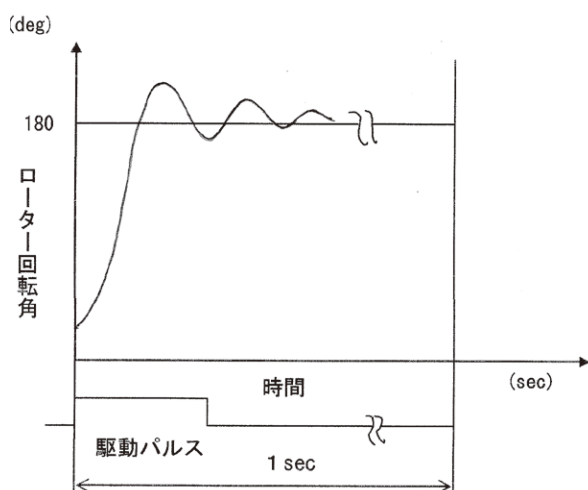


図 2.40 ローターの回転状態

逆回転について述べる。図 2.41 および図 2.42 に示すのは、印加する駆動パルスとローターの逆回転動作を図示したものである。図 2.42 (A) の安定静止位置の状態から、図 2.42 (B) のように Pr1 パルスが印加されると、ローターは反発して正回転（右回転）するが、磁極が変化するノッチ部を超えられず元の安定静止位置に戻ろうとする。図 2.42 (C) Pr2 パルスによって吸引し逆回転させ、図 2.42 (D) でローター挙動のタイミングに合わせ Pr3 の反発パルスで逆回転を継続させる。この一連のパルス発生により 180° の逆回転が終了する。

逆回転の早送りは、正回転と同様に駆動パルスの印加タイミングを早くすることにより可能である。しかし、逆回転は、正回転時に合わせた条件設定のステッ

プモーターを、特殊なパルス発生タイミングで強引に逆回転させている仕様なので、正回転と同じような高速回転は難しい。

ステップモーターの早送りで、時刻修正など針を駆動する修正方式を電子修正と呼ぶ。

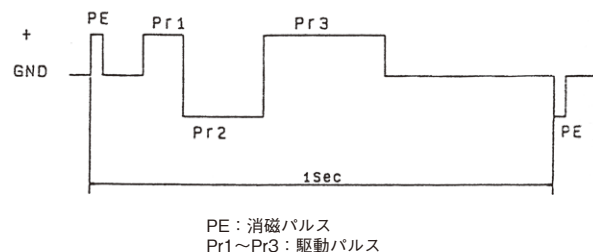


図 2.41 逆回転駆動パルスのタイミング例²³⁾

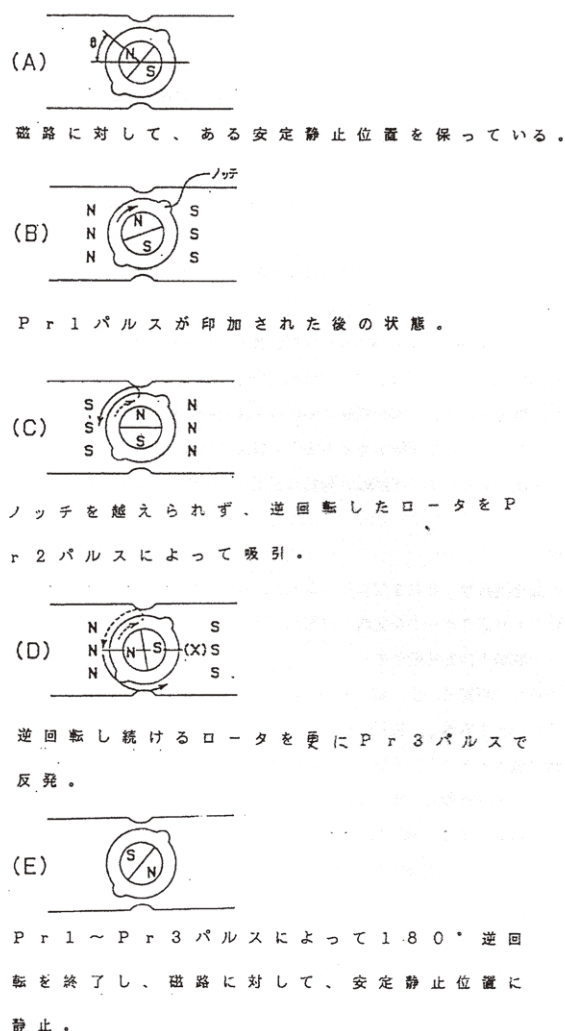


図 2.42 ローター逆回転モデル²³⁾

(2) 針位置自動修正機能

針位置自動修正機能とは、「一定時間ごとに針位置をチェックし衝撃や磁気など外部からの影響で針がずれた場合に自動的に補正して正しい時刻を保持する機能¹⁾」と定義されている。

電波修正時計では、電子回路と指針の基準位置を合わせることが必要であると前述した。例えば、午前0時0分に合わせるため、時計に付いている修正ボタンを押し続ける必要がある。また、時計が外部からの大きな磁界に遭遇してステップモーターが停止、遅れを生じた場合、時計内部の電子回路のカウンター数と指針の指示がずれるため、基準位置を再度合わせなければならない。使用者にとっては大変煩わしい操作であり、ほとんど時刻合わせが必要ない電波修正時計にとっては大きな欠点である。この問題を解決するのが、針位置自動修正機能であり、基準合わせ等使用者に負担を掛けずに電波修正時計を完成させた。

一般的に、電波時計の3針時計は、秒針用モーターと時分針用モーター、或いは分秒針用モーターと時針用モーターの2つを備えている。これは、1つのモーター仕様だと1時間の時刻修正に多くの時間を要すからである。例えば、前者のモーター仕様の場合、64Hzの早送りモーターで1時間の時刻修正したとすると、 $3600 \text{ 秒} (1 \text{ 時間}) / 64 \text{ Hz}$ で56秒を要する。電子修正での最大修正時間は、日付なしの時計で修正分が11時間59分であるので、修正時間は約11分にもなる。このように基準位置を合わせる初期の操作で大きな煩わしさを感じる。2つのモーターに分けることにより、時分針モーターのコギングトルクを上げ、駆動パルスの印加間隔を10秒（10秒運針と呼ぶ）、或いは20秒（20秒運針）にすることができ、基準位置合わせの電子修正時間は、秒針修正で1秒弱、時分針修正で20秒運針の場合、約33秒の短時間で修正が終わる。更に、時分針モーターの駆動パルスの印加間隔を大きくできるので、消費電流の低減にも寄与している。

針位置自動修正機能について説明する²⁶⁾。アナログクォーツ時計は、秒針を取り付ける秒車、分針を取り付ける二番車、時針を取り付ける筒車の3種類の車で時刻表示する。自動で指針の位置を補正し、常に正確な時刻表示を可能にするため、針取付け車を含めた指示輪列の歯車噛み合い位置を合わせる必要がある。

図2.43は、針位置自動修正機能の構造を示している。3種類の指針取付け歯車に直径約0.4～0.5mmの穴を設け、穴の上下にそれぞれLEDとフォトトランジスタを配置し、指針の全てが0時に位置したとき、穴位置が一致するように組立てる。LEDの光がその穴を通過し、その光をフォトトランジスタが検出し針位置を認識する。

高い精度の針位置自動修正機能は、指針を取り付けるかな（歯形を有する金属部材）と検出用の穴を有する歯車との位相を合わせるアSEMBル加工技術、指示

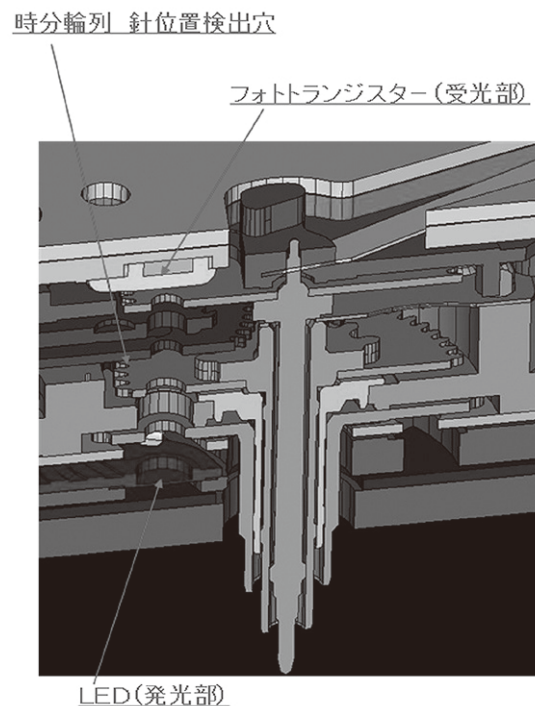


図2.43 針位置自動修正機能の構造

（出典：セイコーエプソン）

輪列を各々位相を決めて組立てる組立技術、基準位置に針を取り付ける針取付け技術が可能にする。

参考・引用文献

- 1) 一般社団法人日本時計協会：「時計用語」2015年版
- 2) 株式会社 諏訪精工舎 監修 安川英昭：「時計学基礎教育 理論編1」昭和49年5月刊
- 3) 佐藤二郎，池田国男，鎌田伸男：「腕時計用動力ゼンマイに要求される諸性質とその材料について」生産研究 11(11) pp.535-539 1959年
- 4) 石原達也：「円弧歯形のトルク伝達について」日本時計学会誌 No.3 pp.6-20 1957年
- 5) 野口順正：「時計用歯車に関する一考案」日本時計学会誌 No.4 pp.7-21 1957年
- 6) 西村源六郎，武藤英一：「時計歯車系の伝達トルク特性に関する研究」日本時計学会誌 No.6 pp.17-34 1958年
- 7) 増本量，齊藤英夫：「時計のひげぜんまい用恒弾性材料（その1）」日本時計学会誌 No.16 pp.30-41 1960年
- 8) 高附辰男：「新講機械時計学入門（4）」マイクロメカトロニクス（日本時計学会誌）Vol.43No.4 pp.70-74 1999年
- 9) 谷口紀男：「時計に用いられる貴石」日本時計学会誌 No.22 pp.41-55 1962年

- 10) 岩沢央, 榎本広男:「自動巻腕時計に対する人間の巻上げ能力」日本時計学会誌 No.38 pp.20-34 1966 年
- 11) 株式会社 諏訪精工舎 監修 安川英昭:「時計学基礎教育 理論編 2」昭和 49 年 5 月刊
- 12) 日本時計国際規格委員会:「電子時計の定義について」日本時計学会誌 No.59 pp.49-50 1971 年
- 13) 川中洋:「電池腕時計」日本時計学会誌 No.41 pp.41-50 1967 年
- 14) 高宗寛暁:「X-8 電子腕時計の回路解析」日本時計学会誌 No.44 pp.1-14 1967 年
- 15) 園部史郎, 岩城宏一:「音叉時計の進歩と将来の展望」日本時計学会誌 No.41 pp.67-73 1967 年
- 16) 吉田裕彦:「音叉時計の現状と将来」日本時計学会誌 No.41 pp.74-81 1967 年
- 17) 長尾昭一:「時計技術解説」クォーツ時計 日本時計学会誌 Vol.56, No.206 pp.40-44 2012 年
〃 : 〃 〃 日本時計学会誌 Vol.56, No.207 pp.75-79 2012 年
〃 : 〃 〃 日本時計学会誌 Vol.57, No.208 pp.43-47 2013 年
- 18) 篠原正男:「時計の電池」日本時計学会誌 No.22 pp.56-59 1962 年
- 19) 神保泰雄 抄訳:「電子時計に用いられる電池 (La Suisse Horlogere et Revue Internationale de l'Horlogerie 1971 年 6 月号より)」日本時計学会誌 No.63 pp.40-46 1972 年
- 20) 吉田裕彦:「時計用振動子の現状と展望」日本時計学会誌 No.83 pp.57-73 1977 年
- 21) 菊山昭:「水晶振動子」日本時計学会誌 No.100 pp.57-68 1982 年
- 22) 川島宏文:「時計用振動子の現状と展望」日本時計学会誌 No.150 pp.95-106 1994 年 9 月
- 23) 池西正孝, 間中三郎:「時計用モータの現状と展望」日本時計学会誌 No.150 pp.107-117 1994 年 9 月
- 24) 岩倉良樹:「長波標準電波時計技術の歴史と動向」に関する分科会報告 マイクロメカトロニクス (日本時計学会誌) Vol.59, No.212 pp.36-39 2015 年
- 25) 国立研究開発法人情報通信研究機構 HP. <http://jjy.nict.go.jp/jjy/trans/index.html> (2016 年 11 月 19 日)
- 26) 宮原史明:「アナログ電波ウォッチの歩み (セイコーエプソン)」マイクロメカトロニクス (日本時計学会誌) Vol.59, No.212 pp.50-53 2015 年

3 | 国産独自設計の機械式腕時計の誕生^{1) 3) 4)}

終戦後、ウォッチの生産を再開するが、機械、設備については、スイスがウォッチ製造の拡散防止のため、時計法によって専用機輸出を禁止し汎用機のみ輸出した。戦時中、時計企業に課せられた兵器生産の主要なものは、時限信管で、大きさは中、大型懐中時計並みであった。さらに工作機械、産業機械は酷使され、新設、増設なく補修も困難であったため、摩耗、老朽化が著しく、ウォッチ生産に復帰しても、腕時計用の必要な部品精度の確保は困難であった。戦前のウォッチの設計、構造は、海外技術、すなわちそのアーキテクチャ、要素、理論の受け継ぎであり、時計理論、生産設備等スイス時計生産から大きく後れを取っていた。昭和20年代の製品は、戦前の継承か、或いは欧米の模倣的なもので技術に独自性があるとは言えなかった。終戦後5年ほどは、スイス法の範囲内で、スイスの製品、機械設備、測定機器、工具、加工法などを調査、研究する時期であった。「東洋のスイス」を目指す声が多く、1946年から48年に日本学術振興会第95小委員会（大越諄委員長（当時東大工学部教授））が設置され、研究成果「時計生産技術の研究」²⁾として発行された。時計理論、機械要素、材料等について専門の研究者が欧米の理論の上に新しい研究を行った。

機械式腕時計の機能面では、18世紀半ばに非常に大きな進歩があった。スイスのニューシャテルに生まれ、フランスで活躍したブレゲ（Abraham-Louis Breguet 1747-1823）は、機構発明の天才であり、自動巻、クロノグラフ（時刻の指示の他に時間の測定もできる時計）、パーペチュアル（永久）カレンダー（うるう年の2月29日を含み、毎月末の日付修正を必要としない機能）、トゥールビヨン（tourbillon watch：脱進機構の全パーツとその中央に调速機（てんぶ）を収めた可動ケージをもつウォッチが ganjikanah、固定された四番車の周りを回転する。ケージは通常、1分間で1回転し、回転しながら垂直姿勢差が最小になるよう調整する。）などがある。ブレゲの複雑機構（コンプリケーション）を凌ぐメーカーは現れていないといわれる。

しかし、ブレゲ以後、クロノグラフのストップウォッチ機構で発進、停止装置に新機構を用いて、その誤差を量的に示したのは、1964年の東京オリンピックに正式計時として認められたセイコーのストップウォッチである。この後、計時は電子方式となり、機械式の正式計時ストップウォッチとしては最後であっ

た。（図3.1 参照）

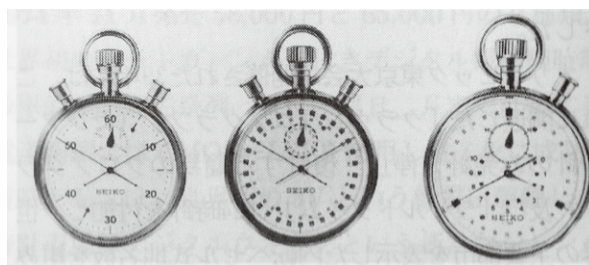


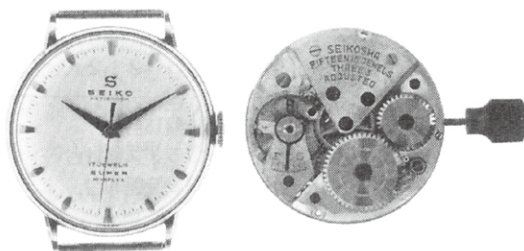
図3.1 89ストップウォッチ1/5, 1/10, 1/100秒（昭和38年）³⁾

機械式腕時計で日本が市場で名を成し、スイス時計産業を事業的に混乱させたのは、自動巻腕時計と腕クロノグラフであった。自動巻腕時計は日本より早くスイスが商品化に成功していたが、クロノグラフとともに機構的にシンプル、高信頼、低価格を実現し、世界市場特に北米マーケットで優位に立ったのは、1960～1970年の日本製品であった。

1946（昭和21）年セイコーは、新10型¹（ムーブメント（動力源、時間標準などの装置からなる時計の機械体）の外径φ23.75mm）腕時計を販売した。中二針（中心に時分針を配置）、小秒針付きの紳士用腕時計であり、昭和20年代前半の主力製品となる。（図3.2 参照）しかし、スイスにおいて腕時計は二針から



昭和21年8月完成した新10型



昭和20年代後半をリードしたスーパー本中三針

図3.2 2針（小秒針付き）、本中3針³⁾

1 型とは、ムーブメントの大きさを表す単位。1型が2.256mmに相当する。（ISO6426-2）

三針の時代に移行しつつあった。1948（昭和 23）年、従来の二針に手を加え「改良中三針（中心に時分秒針を配置）」を商品化する。ところが、時計店、修理屋がこれを見て、二針の時計を購入して三針に改造、セイコー製品として高く売るといった状況が現れ、本格的な中三針腕時計を作る必要に迫られる。

1950（昭和 25）年から販売されたセイコー「スーパー中三針」はこれまでの二針をベースに改良された中三針とは異なり、最初から中三針として設計、製造された本格的な中三針腕時計（本中三針形式と呼ぶ）である。（図 3.2 参照）日本市場も中三針時代に入り、スーパーは好評で生産も伸び、昭和 20 年代後半をリードした製品となった。1950 年には、国産品質比較審査会において「10 型 10 石入中三針」が通産大臣賞を受賞し、1952 年に「10 型 8 石入中三針」が同じく大臣賞を受賞した。各メーカーともこうしたコンクールを契機に、品質面の向上努力を続けた。昭和 20 年代後半にいたって機械設備の強化も図られ、設備能力をフルに発揮する製品の製造が目標となったが、製品的には依然として海外、特にスイス製品の模倣であった。

3.1 国産独自設計の機械式腕時計セイコー「マーベル」^{3) 4)}

この状況を打破するため、昭和 20 年代に築かれた品質実績および順調に生産数量を伸ばすことができた生産技術力の基盤のうえに、第二精工舎諏訪工場（現セイコーエプソン株式会社）は、昭和 30 年代前半をリードする、わが国初めての独自設計のセイコー「マーベル」をスタートさせる。マーベルの誕生の背景について、設計者である中村恒也は、自書「技術は人びとのために－諏訪と時計と私」⁵⁾の中でこう語っている。「昭和二十年代の十年間は、今考えてみると腕時計についての勉強の期間ではなかったかと思う。昭和二十八年ころまでは外国の事情がわからず、技術が入ってこなかったから自分たちで勉強し、我々なりに、技術、技能を高めてきた。そしてその後外国の技術が入ってきて、さらに我々の技能、技術が高まり新しい腕時計を作りだそうという機運が高まってきた。外国の腕時計に関する技術がはじめて入ってきたのは、昭和 29 年に大阪で開催された第一回大阪国際見本市であったと思う。そうした新しい技術の導入によって、これまでの腕時計をかえていくことが必要であった。スーパーも送品を続けながら（マーベルの前機種であるスーパーの送品を続けながら＜筆者追記＞）、設計変更が行われるなど、

部分的に改良が行われていった。しかし、そういったこともすでに飽和点に達し、つまり、それらをすべて集大成し、まとまった新しい時計を作るという段階がきていた。こうした動きの中から誕生したのがマーベルであるということがいえると思う」

技術者たちが、設計変更、部分改良だけでは限界があることを認識し始め、また時計生産設備が充実し、生産能力にも手ごたえが出て、外国とくにスイスの追従から脱却する時が熟したと筆者は考える。市場においては、他社の薄型の製品による競争力低下も危惧され始めた時期でもある。

セイコー「マーベル」（以降マーベルと呼ぶ）は、1956（昭和 31）年の「時の記念日」6 月 10 日に一般公開された。その後、順調に生産され市場に投入される。図 3.3 にマーベルの外観写真を示す。ムーブメントの概仕様は、直径 26.0mm（11・1/2 型）、厚み 4.4mm、5 振動、17 石である。



図 3.3 マーベルの外観³⁾

時計の基本機能である精度を一層高めるために、ムーブメントのサイズを 10 型から 11・1/2 型へ一回り大きくした。当時の流行として紳士用腕時計のムーブメント外径は 10 型が主流であったが、取り付けられるケースの大きさが、ムーブメントサイズ 13 型（直径 29mm）、14 型（直径 31mm）のモデルがほとんどで、さらに大型化する傾向があった。そのため、時計完成品の大きさとして適正な 11・1/2 型を採用した。ムーブメントサイズを大きくすれば精度のうえで問題になる所に重点的な設計ができる。一方製造上では加工精度を高めることが可能である。そのポイントは以下のとおりである。

- ・てんぶを大きくして歩度の安定性が得られる。てんぶを大きくすることにより、てんぶの慣性が増加し外乱に強くなる。
- ・香箱を大きくして高い性能のぜんまいトルクが得られる。
- ・歯車を大きくして歯数を増し、トルク伝達の効率向上、トルクの変動を防ぐ（トルク変動率を小さくす

る)。

- ・輪列受等の受け類の案内距離を大きくして、歯車の上下案内の通り違いを防ぎキシミを少なくする。

このように精度を高めるための大きな利点を持っている。もちろん、むやみに外径が大きくなれば良いかというと、懐中時計に近づき腕に着けるには大きすぎる。部品加工能力と腕時計としての携帯性、デザイン面のバランスを考えると 11・1/2 型は最適なサイズだったと考えられる。

前出の中村恒也は、「THE SEIKO BOOK -時の革新者セイコー腕時計の軌跡-」⁶⁾の中でこう言っている。「(前略) 構造も分かるようになってきたんです。そこで上司に『自分で新しい時計を作りたいのですが』と相談すると、なんと『おまえは思いきってそれをやれ』と言うんです。今思えばその上司は偉かったですね。(後略)」「(前略) 私の心にあったのは“理想の時計とはなんだろう”という思いでした。ところがね、理想の時計なんて簡単なんです。“止まらなくて、時間が合って、デザインがいい”この3つだけ。」中村の時計の理想を追求する強い思いと上司の挑戦させる勇氣と判断力に感銘を受ける。

精度向上の設計ポイントを詳細に述べる。受の案内構造では、以下の点を考慮した。

- ・柄穴（軸受穴）の通り違い（軸受穴の中心軸ずれ）を防ぐため、軸の上下に異なった方向から力が加わることを考慮し、穴の位置を補正した。
- ・てんぶ受は、取り付けの際ねじを締め込むと案内ガタ分ねじの回転方向にずれるため、回転量を見込んで穴位置を決め、ずれを補正した。
- ・案内内部の中心距離を長く取ることで、案内ガタの影響を少なくできるよう考慮した。図 3.4 に示すように、案内穴 A,B,C を持つ受があり、輪列は案内穴の中側に位置する。案内穴 A と案内穴 B の距離を $L1$ 、案内穴 A と案内穴 C の距離を $L2$ 、案内穴 A と輪列との距離を L とし、 $L1 > L > L2$ とした場合、案内位置を A および B にした場合のほうが、受の案内ガタの影響が少ない。この場合、輪列に影響するガタは、案内ガタ $\times L/L1$ によって少なくなる。案内位置を A および C にすると、案内ガタ $\times L/L2$ となり案内ガタより大きくなる。したがって、なるべく案内位置を長く取ることが必要である。

時計歯車は、かなの歯数が少なく（6 枚など）一歯の噛合いが長く、また中心距離の誤差などによって噛合い中の伝達トルク変動が生じやすい。マイクロダイナグラフ（スイス製時計試験機）、輪列トルク試験機（自社製）で試験し、この結果に基づいて歯形を改良

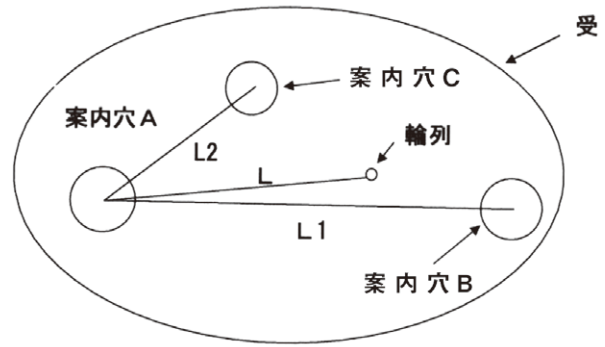


図 3.4 案内方法の説明図

し歯面等の仕上げを改善し、噛合いのトルク変動を最小に抑え効率を上げた。

製造技術面でも、格段に進歩した体制が整いつつあった。一番効果が大きかったのは、プレス加工技術の進歩で、以前は柄穴、受足穴をドリルで穴開けをしたが、精度を出しにくくプレスで抜くことが可能になり精度が大幅に向上した。スーパー時代の 1954 年に前年度比で生産量が倍増し、積極的に設備投資を行ったこと、また、海外出張の機会が増え、最新設備の調査が可能となり、新型工作機械を導入できるようになったことが大きい。

穴抜きプレス加工技術はさらに進歩を続け、この後セイコーエプソンのインクジェットプリンターのヘッド穴抜き加工へ応用展開された。

マーベルの品質は、通産省主催のコンクール中央計量検定所による国産時計比較審査において、上位を独占した。表 3.1 は 1957 年の審査結果であり、セイコー 11 型がマーベルのことで「特別調整時計」「一般製品から抽出した時計」の両部門において第一位となった。また、同年度の米国時計学会日本支部で行なった腕時計コンクールにおいても、マーベルがオメ

表 3.1 国産時計比較審査結果（1957 年結果）

特別調整時計（総数 35 個中 10 位までの成績）

順位	成績	時計名
1	121	○ セイコー 11 型 (5.5 振動)
2	187	○ " (5 振動)
3	213	○ " (")
4	215	○ " (5.5 振動)
5	257	○ " (")
6	274	他社 10 型巻上げ
7	275	"
8	275	○ セイコー 11 型 (5 振動)
9	277	○ " (5.5 振動)
10	281	他社 10 型

(注) セイコー 11 型はマーベル

ガをはじめ外国品を抜いて第一位にランクされた⁴⁾。マーベルは当初、耐震装置のない17石のもの一種類であったが、後に耐震装置付を出すことになる。

3.2 自動巻機械式腕時計セイコー「ジャイロマーベル」^{4) 5)}

自動巻腕時計の誕生は、1920年代になってフランス人が初めて製作し、その後、イギリスの時計技術者ジョン・ハーウッドが大量生産方式で自動巻腕時計をつくることに成功、1924（大正13）年にスイスで特許を取得したときに始まる。1931（昭和6）年スイスのローレックス社が、防水ケースに自動巻ムーブメントを封入し、自動巻防水腕時計を「オイスター・パーペチュアル」と名づけ販売した。これを機に自動巻腕時計が、実用時計として日常生活の必需品となった。

国内でも、セイコー、シチズンより自動巻腕時計（小売り価格、約1万円）が出されるが、昭和30年代前半、紳士用の手巻き腕時計が4,000円代であったので、普及価格まで至っていなかった。セイコー「ジャイロマーベル」（以降ジャイロマーベルと呼ぶ）は、自動巻腕時計の普及を目指し独自の設計がスタートする。

自動巻腕時計の商品化は、海外著名メーカーより10数年以上遅れてのスタートであり、すでに市場に出ているものを参考に設計することになる。市場に出回っている製品調査から、手巻き時計をベースとし、自動巻機構を積み重ねる構造とすることを決定する。各社の自動巻機構の多くは、大変複雑な歯車方式を採用しており、部品点数も多くコスト的にも不利であった。もともとの狙いである普及価格帯への投入を考えると、自動巻構造を如何に安くするかも大きな課題であった。部品点数の少ない単純な構造にすることにより、品質は安定しコストも安くできると考え、レバー式を採用することに決めていた。モデルにした時計は、ドイツのシェフィールド社のものであった。ほぼ試作が終わった段階で、1958（昭和33）年10月自動巻装置に関する特許公告が出されたことが判明し、自動巻構造を大きく見直すことになる。独自の巻き上げ機構として種々のアイデアの中から、爪レバー（社外に対しては、一部品で果たす複合機能と力学的な考慮がされた作動から「マジックレバー」と命名し公表した。本報告書も以降マジックレバーと呼ぶ）による全く新しい独自の巻き上げ機構を完成させた。ジャイロマーベルには、マジックレバーの他に超小型ボールベアリングも初めて採用されている。セイコーの機械式自動巻腕時計を代表するマジックレバー機構と、ムー

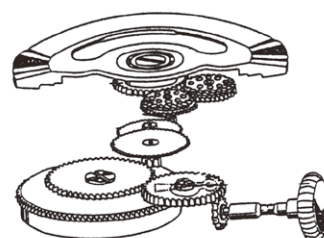
ブメントの薄型化を可能にする超小型ボールベアリングについて詳細を述べる。

(1) マジックレバー^{3) 5) 7)}

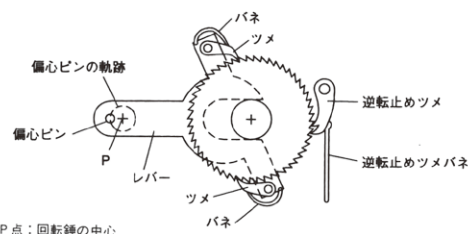
図3.5に示すのは、一番上段にあるのが一般的な歯車を使用した自動巻機構である。片重りの回転錘の回転が、歯車列を介して巻箱車に伝わる。回転錘は、時計回り、反時計回りに回転するので、この機構には、片巻方式或るいは両巻方式の構造が取られる。腕の動きのエネルギーをロスなく伝えるには両巻方式が良いが、構造が複雑になり部品点数も増加する。

次の(1)にあるのが、シェフィールド社の自動巻機構である。レバーに付いている偏心ピンが回転錘とともに、図のP点を中心に回転する。偏心ピンの軌跡に沿ってレバーが、図の左右方向に作動してレバーに付いている爪が、噛合っている車を回転させる。こ

歯車使用による自動巻機構

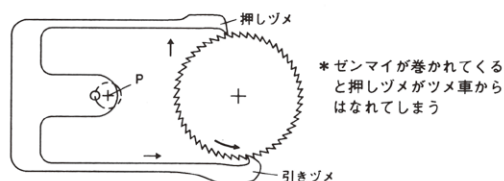


(1) シェフィールド社の自動巻機構



(2) 上記機構からヒントを得て考えたツメレバーの形状

飛躍したシンプル化には成功したが、ゼンマイの巻き上げ後のことには気がつかなかった。



(3) マジックレバー

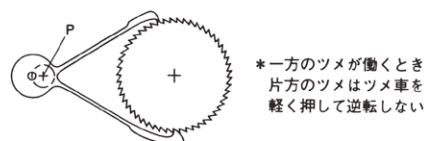


図3.5 マジックレバーの開発過程⁵⁾

の場合、回転錘の回転が左右どちらの回転でも一方向に巻きあげる。ぜんまいの力で逆回転しないよう逆転止めつめが付いている。

(2) は、シェフィールド社の機構からヒントを得て考え出した爪レバーの形状である。大きく発想を変えたのは、つめとばねを一体化し、逆転止め機能も複合化させ、7部品を1部品としたことにある。ぜんまいの巻上げによりトルクが上昇してくると、押し爪が車より逃げってしまう課題も発生した。ばね力を強くすると、逃げは防げるが回転錘の回転ロスに繋がる。ばね力を小さくし座屈方向で逃げを抑えるよう、レバーのばね方向、ばねの座屈、たわみ等考慮し設計に盛り込んだ。

量産化するには、どうしてもプレス抜き加工が必要であった。プレス加工は、何回かの工程に分けて行うことにした。図 3.6 に示すように、プレス機を 3 台並べて、フープ材（リボン状の金属材料）連続加工とした。ばね部は板厚よりばね幅が狭いという難しい加工に挑戦することになる。考え出された加工は、第 2 工程でばねの中抜きをした後、もう一度抜きカスをはめ

込む工程を入れ、ばねの外径抜きでの変形を抑えた。このようにプレス加工、熱処理工程での変形防止策など数々の創意工夫により、マジックレバーの完成にこぎ着けた。完成したマジックレバーが図 3.5 の (3) である。

ジャイロマーベルのムーブメントを分解したものを図 3.7 に示してある。ほぼ中央にあるのがマジックレバーである。マジックレバーは、1958（昭和 33）年に実用新案出願をし 1962 年 6 月に公告された。

(2) 超小型ボールベアリング

ヘビーマタルで構成された回転錘の支持部は、外部からの衝撃を受けると大きな力を支えなければならない。従来の貴石軸受では軸の摩耗、貴石の破損などが発生し対策が必要であった。ジャイロマーベルでは、ボール径 0.7mm の超小型ボールベアリングを使い、衝撃に対しても破損せず回転が非常にスムーズな構造を採用した。（図 3.8 参照）

マジックレバーの加工

- プレス工程は RE-8 を 3 台並べてのフープ材連続加工（第 1 工程～第 3 工程）
- 加工技術上のポイント

- (1) 板厚より狭い幅のバネ部の形状出し
- (2) 鋭角のつめ先端部の形状出しと厚さ方向の直線度
- (3) 熱処理による変形防止

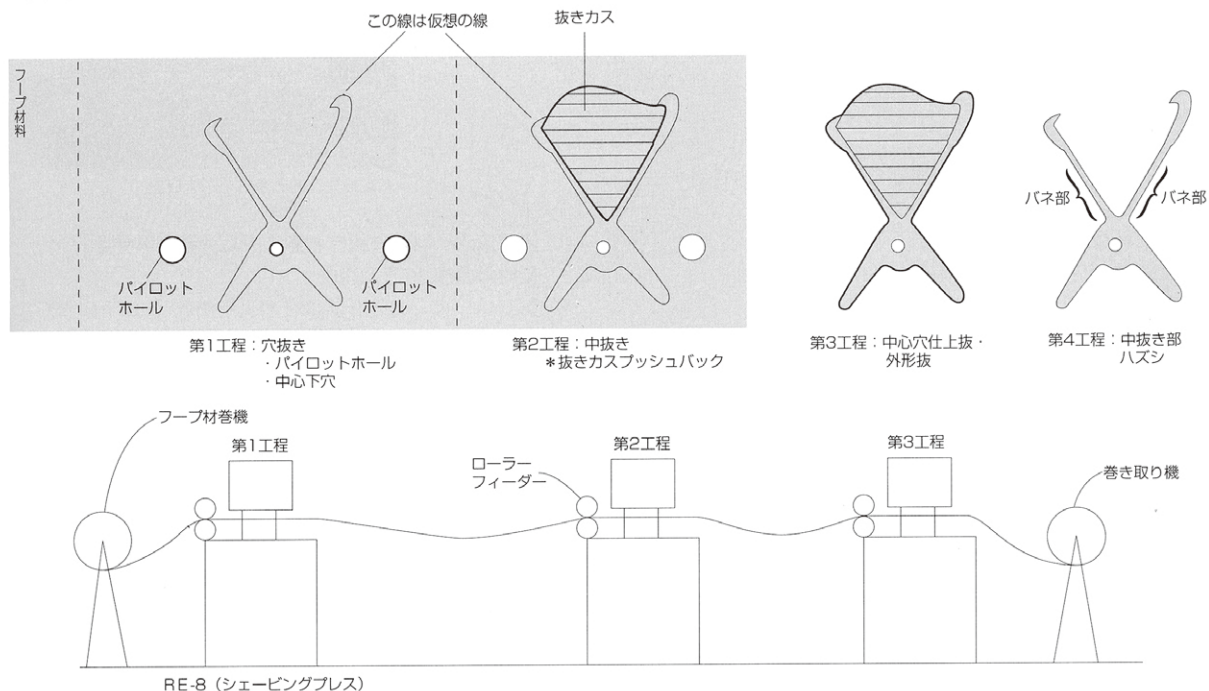
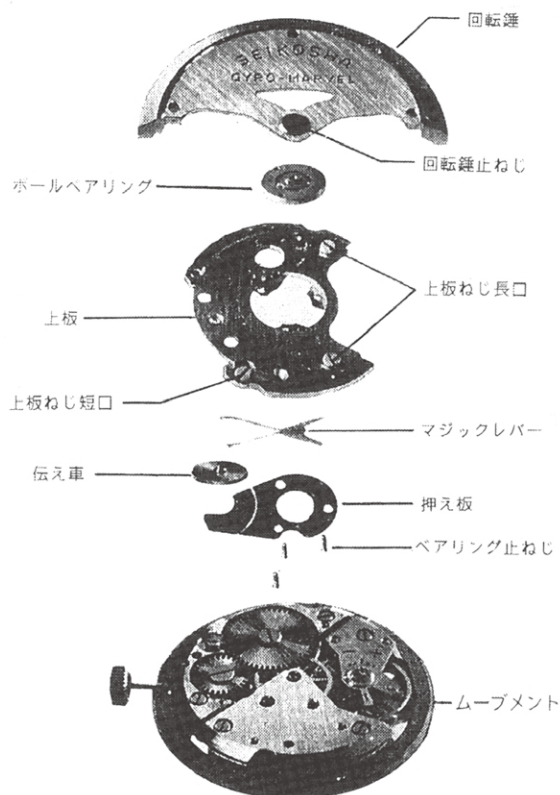


図 3.6 マジックレバーの加工⁷⁾



ジャイロマーベルムーブメントおよび自動巻機構分解写真

図 3.7 ジャイロマーベル³⁾

ボールベアリングの見取図

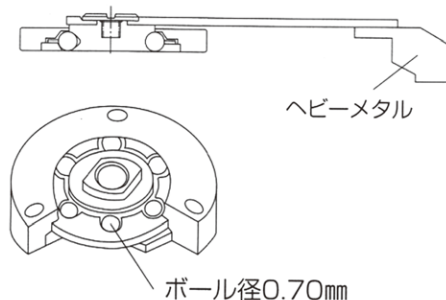


図 3.8 超小型ベアリング⁷⁾

3.3 国産初耐振機能付機械式腕時計シチズン「パラショック」^{8) 9)}

携帯腕時計は、常にいろいろな環境に晒されている。特に、機械式腕時計において外部からの衝撃は、時計精度を保証する調速部に大きな影響を与える。機械式腕時計の精度は、第2章機械式時計の構造で述べたように、ひげぜんまい、てん輪、てん真（てんぷを支える軸）等で構成されるてんぷの振動によって決ま

る。てんぷの支持部てん真は、摩擦負荷を極力減らすため、その柄径を先端部で約0.1mm（人の髪の毛の太さ）以下にし、根本部に向かいテーパ状にしている。てんぷの重量をこの柄で支持するため、日常の携帯の中で、壁にぶついたり、着脱時に床に落下させたり等の衝撃で柄の折れや変形を生じ、時間狂い或るいは止まりが発生する。この対策として、従来の固定式軸受を改良したのが「耐振軸受」である。

1933～1938年頃のスイスでは、すでに多くの耐振装置が発明され腕時計に搭載されていた。日本では、1956（昭和31）年シチズン時計が、独自開発したシチズン「パラショック」（以降パラショックと呼ぶ）を発売する。図3.9にパラショックの外観写真を示す。ムーブメント概仕様は、直径23.3mm（10・1/2型）、厚み4.5mm、5振動、17石、持続時間45時間である。パラショックという名前は、防護するという意味の「Para」と、衝撃を意味する「Shock」を組合わせて付けたといわれる⁹⁾。また、その年の「時の記念日」にヘリコプターから落下させる公開実験を行ない耐振装置の信頼性と技術の裏付けを証明した。



図 3.9 パラショックの外観⁸⁾

(1) パラショックの構造

パラショックの構造と原理および公開実験の様子を詳細に述べる。

時計に衝撃が加わった場合について、固定軸受構造の場合を説明する。図3.10の左側に示すように受石、穴石が固定されているため、てん真に衝撃が加わると、てん真にてんぷ全体の荷重がかかり、てん真の柄部が変形または折れに繋がる。この損傷を防ぐのがパラショック機構の目的である。図の右側は、てんぷ分解図とパラショックの構造を説明したものである。

図3.11に具体的にパラショックの構造を示す。パラショック受石座 (A)、パラショック渦巻きばね (B)、パラショック枠 (C) より構成されており、てん真はパラショック渦巻きばねに固定された穴石に水平方向、パラショック受石座に固定された受石に垂直

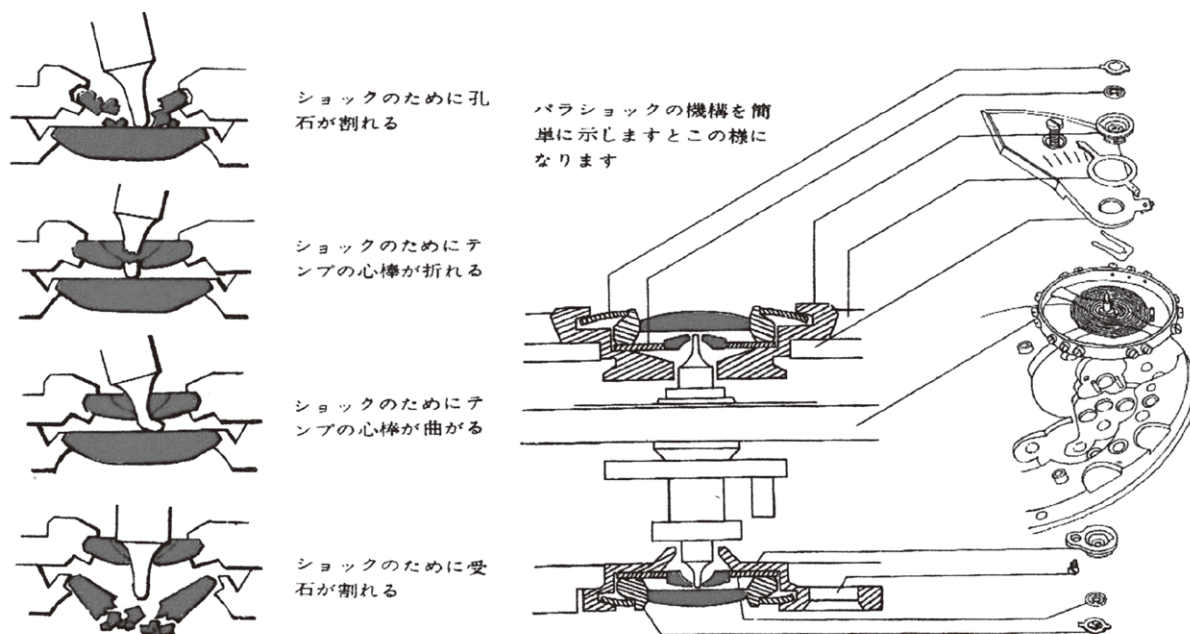


図 3.10 パラショックの構造と効果⁹⁾

方向を支持されている。時計が静置状態では、図に示すようにてん真は中心に位置している。

時計に図の垂直方向の衝撃が加わると、てん真は受石に当たり、受石と一体化されているパラショック受石座のばねがたわみ、力を逃がしててん真には大きな力が加わらない。また、図の水平方向の衝撃が加わった場合、穴石にてん真の柄が当たるが、パラショック渦巻きばねが水平方向にたわみ、力を逃がすことにより柄には大きな衝撃が加わらない。このようにばねがたわむことにより、衝撃を和らげ損傷を防ぐ構造となっている。直径2～3mmのスペースに耐振機構を設け、衝撃吸収のばね部材の複雑加工にも、精密加工技術が役立っている。

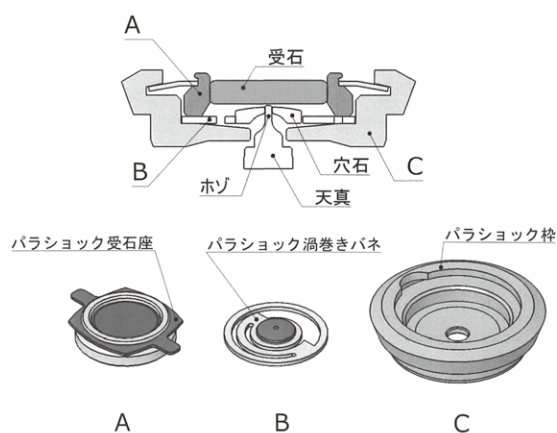


図 3.11 パラショックの構造⁹⁾

パラショックは、次のような特長を持っている。

- ・各方向のショックも完全に吸収し、てん真の柄を保

護する。

- ・衝撃後、穴石、受石が元の位置に戻るときは、ばねの力によるため摩擦負荷もなく、確実に迅速である。
- ・構造が簡単で取り扱いが容易である。
- ・ムーブメントを分解せず、穴石および受石の洗浄注油が可能である。

その後、国内のメーカーでも耐振軸受が採用され、日本製の機械式腕時計の品質がスイスと同等であると認められるようになった。

(2) パラショックの耐衝撃性公開実験の様子

スイス製にしか搭載されていなかった耐振装置を、国内独自の構造を採用して実現したが、その信頼性をいかに理解してもらうか。その手段として、パラショックの耐衝撃性の公開実験を実施した。発売後の1956（昭和31）年6月10日の「時の記念日」、大阪御堂筋において、米国時計学会日本支部の依頼で飛行中のヘリコプターから、パラショック装置の腕時計10個を落下させその性能テストを実施した。（図3.12参照）前年に、スイス製のアンチショックの腕時計3個を30m上空より落下させ成功していた。1957（昭和32）年も同じ条件で行った結果、100%の成功を収め国産腕時計のレベルが世界水準を抜いている事実を証明した。

投下実験の様子は、新聞、テレビ等多くのマスコミに取り上げられた。その後も、京都、神戸、仙台、鹿児島等主要都市で公開実験を行なった。

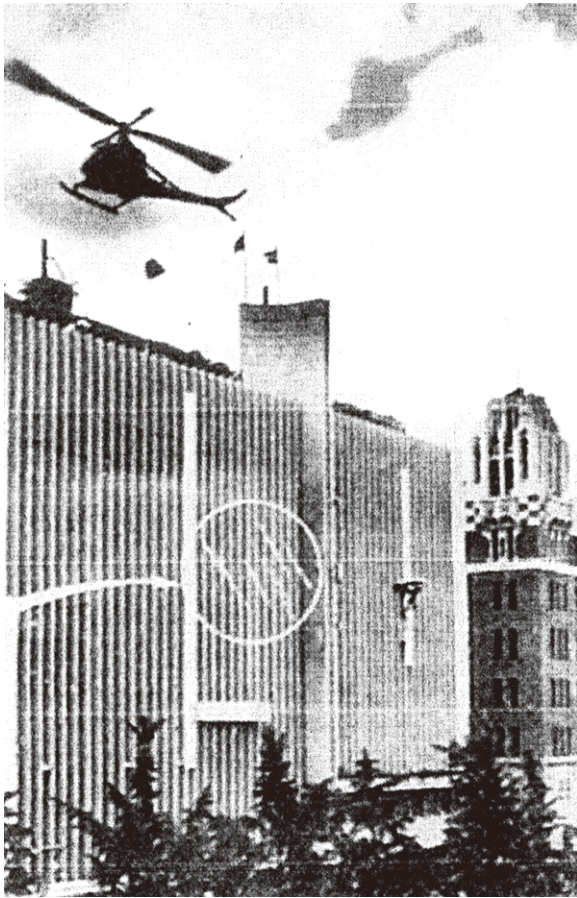


図 3.12 公開実験を報じる写真

(そごう大阪店（御堂筋）1956年6月10日）

(出典：シチズン時計)

参考・引用文献

- 1) 久保田浩司：「時計工業技術開発小史－第二次大戦後におけるウオッチの進歩発展－」マイクロメカトロニクス（日本時計学会誌）Vol.50 No.194 pp.80-95 2006年
- 2) 日本学術振興会編：「時計生産技術の研究」1951年8月30日発行
- 3) 「SEIKO 時計の戦後史」編集委員会：「SEIKO 時計の戦後史」1996年3月28日発行
- 4) セイコーエプソン株式会社：「腕時計の歴史を変えた世界初のクォーツウォッチ」2004年2月発行
- 5) 中村恒也：「技術は人びとのために－諏訪と時計と私－」1996（平成8年）11月3日発行
- 6) グッズプレス編集部特別編集：「THE SEIKO BOOK 時の革新者－セイコー腕時計の軌跡－」pp.58-59 1999年5月1日発行
- 7) セイコーエプソン株式会社：「年表で読むセイコーエプソン [1881～2000年]」2001年2月発行
- 8) シチズン時計株式会社 時計資料室：社史腕時計台帳 011-11A (091-28)
- 9) シチズン時計株式会社：社内資料

4 | 電子腕時計の出現¹⁾

機械式腕時計の基本性能は、自動巻機能、耐震機能、防水機能、カレンダー付等実用時計として、スイスに追いつき追い抜く完成領域に達した。また、精度においても5振動（周波数2.5Hz）から10振動（周波数5Hz）という高振動化により追求した。その結果、機械式腕時計の携帯精度においても、約日差±30秒からクロノメーター級（CICC（国際クロノメーター管理委員会）の管理下にある公的機関によって検定を受け、合格した高精度機械時計に与えられる称号。検定の方法及び合格水準は「ISO3159・時計－てんぷ式腕クロノメーター」で規定している²⁾。）の日差±数秒まで追い込むことが可能となった。しかし、この精度の確保も、ぜんまいおよびひげぜんまいの性能、歯車の伝達効率向上、長期に安定した潤滑剤の開発、精度を作り込む技能等によって可能になったが、部品組立製造コストの負担は大きかった。したがって、高振動の機械式腕時計は、高価格帯商品として存在したが、その精度を一般化するのは難しかった。また、ぜんまいをいっぱい巻き上げた時と、巻がほどけた時とでぜんまいトルクに差があり、これが歩度に影響を与えるという問題もあった。

機械式腕時計の駆動時間にも課題があった。機械式腕時計には、手巻き式と自動巻式があるが、手巻きは毎日一回巻かなければならず、自動巻は常に腕に着けていないと止まってしまう欠点がある。当時の機械式腕時計の持続時間は、約48時間（2日間）であり、現在の週休2日制では金曜日に時計を外しておくと、月曜日には止まってしまうことになる。この時間精度、基本性能の課題を解決する難しさを時計技術者は、はっきりと認識していた。新しい技術により解を求めようとする動きが始まった。

わが国、フランス、アメリカでは、機械式に代わる次世代腕時計の研究が行われていた。その先駆けが、1952年にアメリカ、エルジン社とフランス、リップ社が共同開発したてんぷ調速式電池時計である。これは発表にとどまり、上市されたモデルは、1957年にアメリカ、ハミルトン社が開発、発表した「ハミルトン500」であった。これを契機に各社からこのタイプのでんぷ式電池腕時計が発表されるが、すべて機械式接点方式のため、接触時のスパーク等で摩耗や接点不良を発生し、時間精度に問題が多かった。

国内メーカーのシチズン時計は、この欠点を解決するため、機械式接点を持たないてんぷ式電子腕時計の

開発を目指した。当時、クォーツ時計の原理は知られていたが、腕時計までの小型化には時間がかかると考え、てんぷ式電子時計の実用モデルを作ることを目標とした。

海外ではクォーツとは全く異なる音叉式時計の開発も進んでおり、1960年にアメリカ、ブローバ社が発表した音叉調速式の「アキュトロン」(図4.1参照)があり、シチズンも特許を導入しのちに国産化するが、精度は優れていたが価格の高さと外乱に弱い点が大きな障害であった。



図4.1 ブローバ「アキュトロン」³⁾

4.1 てんぷ式電子腕時計シチズン「エックスエイト X-8」^{1) 4) 5) 6)}

1966年シチズン時計が発売したシチズン「エックスエイト X-8」(以降X-8と呼ぶ)は、海外のてんぷ式電池時計の問題であった機械式接点を廃止し、トランジスタなどで構成された電子回路で制御する電磁駆動機構を搭載していた。これにより耐久性と信頼性が飛躍的に向上し、電池による安定したエネルギー供給、駆動磁石のついた大きな慣性モーメントを持ったてんぷとも相俟って、機械式クロノメーターに匹敵する精度がコンスタントに出せる性能を有していた。

図4.2にX-8の外観写真を示してある。ムーブメントの概仕様は、外径28.0mm(12・1/2型)、厚さ5.5mm、5振動(周波数2.5Hz)、持続時間1年以上である。

図4.3にX-8のしくみの説明図を示す。電池、電子回路、てんぷ調速機、輪列、指針から構成されている。動力源は直径11.6mmの小型酸化銀電池を使い、この電気エネルギーを電子回路に通し、電磁駆動装置によって、可動磁石と一体になったてんぷを動かす。世界で初めて採用した可動磁石型のでんぷは、第2章の電子時計の構造で説明したように、可動磁石型、可動鉄片型、可動コイル型、アンクル駆動型がある中で、最も構造および品質等において信頼性のある構造である。

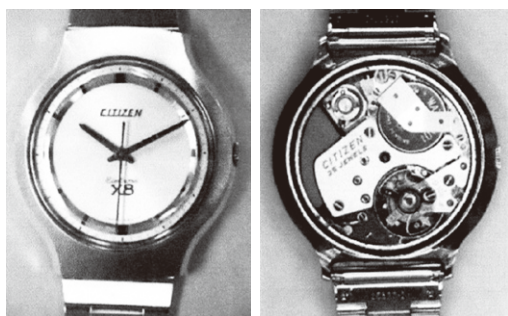


図 4.2 シチズン エックスエイト (X-8)⁵⁾

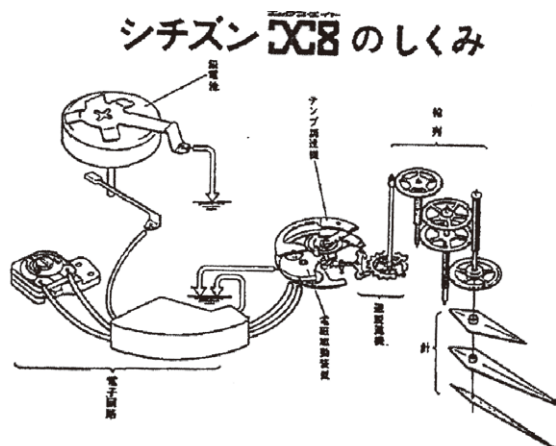


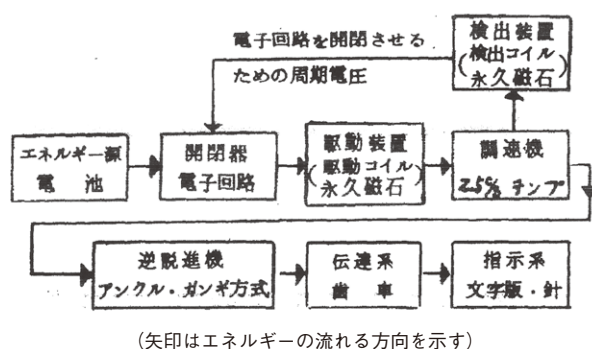
図 4.3 シチズン X-8 のしくみ⁴⁾

可動磁石型の作動原理は、上下二枚の電磁純鉄製のてん輪に固定された永久磁石（白金コバルト合金）により磁路が形成されている。その状態で始動装置を作動（りゅうずを押し込む）させると、発停レバーによりてんぶの蹴り出しが行われる。これは駆動コイルに電流を流しても、てんぶが自起動しないため、外部の力でてんぶを動かす構造である。てんぶが振動を始め、ひげぜんまいで振動するてん輪に付いた駆動磁石が、コイルの位置を通過するときを検出コイルが検出し、その瞬間、検出コイルと一体となった駆動コイルに電流を流すと、コイルから発生した磁場と永久磁石の間に駆動力が発生し（フレミングの法則）、てんぶの振動が持続する。また、てん輪に設けられた重り（黄銅製）によりてん輪のバランスを取りながら振動し、電子回路に設けられた可変抵抗器により、駆動コイルに流れる電流を制御し、てんぶの振幅すなわち振り角を調整することにより、てんぶの振動はさらに安定する。このようにして安定した時間精度が得られる。

てんぶの振動は、逆脱進機構（アンクル・がんぎ車）により機械式時計とは逆の経路を辿り、アンクルからがんぎ車へと一定方向の回転に変えられ、四番車、三番車、二番車の輪列を経て針を駆動する。針を動かす輪列の負荷は小さく、輪列には、アンクルががんぎ車

を駆動する微小時間しか力が作用しないため、機械式に比べ輪列に掛かる力が小さく機構全体の耐久性に優れている。

図 4.4 に X-8 全体のエネルギーの流れを示す。図の矢印の方向は、エネルギーが流れる方向を示しており、電池から供給されるエネルギーは電子回路を介して、駆動装置にある駆動回路とてんぶの永久磁石との相互作用で力を発生し、てんぶ調速機の運動エネルギーとして伝達される。振動するてんぶの運動エネルギーは逆脱進機、歯車を回し針を動かして時刻を示す⁶⁾。



(矢印はエネルギーの流れる方向を示す)

図 4.4 X-8 の構成⁶⁾

信頼性を追求したてんぶ電子腕時計で重要な電子回路は、トランジスタ、コンデンサ、抵抗で構成されているが、当時時計用に適したものはほとんどなかった。国内メーカーのトランジスタにおいては、リーク電流が大きく一般用なら使えても、数マイクロアンペアしか許されない腕時計にあっては許されるものではなかった。コンデンサ、抵抗も時計に使うにはサイズが大きすぎ、サイズダウンすると信頼性が失われる。これらの問題解決が X-8 の商品化には必要条件であった。電子部品の小型化、信頼性を確保し時計用として実用に足るものを、それぞれのメーカーと折衝し、協力しながら試作、テストを繰り返し改良を進めた。

時計に電子化の動きが出始めた当時、一般製品と時計用との要求品質、特にサイズ、消費電流には大きな差があったのは仕方ないことである。電源である小型電池はどうだったのか。X-8 の電池は水銀電池ではなく、EVEREADY SILVER CELL No.301（サイズ 直径 11.6mm、厚み 4.2mm）という銀電池を使用している。銀電池は、水銀電池（1.3V）に比べて電圧が 1.5V と高く、トランジスタなど電子部品を利用するには使い易いほか、次のようないくつかの長所を持っている。

- ・電気容量が大きい：100mAh 以上の容量を持っている。
- ・放電時の電圧が平坦である：内部抵抗が小さく、常に一定の作動電圧を保持する。

- ・耐漏液性、保存性が良い。
- ・微電流の長時間放電に適している。

電池の性能・サイズは、時計の小型薄型化に大きく影響し、電池品質が時計の品質をも左右するほど重要な要素である。これらの特徴から、この後の水晶腕時計などに使用する小型電池は、酸化銀電池が定着していく。当初は、海外メーカーに依存していた酸化銀電池も、国内での開発が進み電池の安定供給が可能になった。

時計産業が持つ精密技術に加え、線径 18 μ m のコイル用銅線材の量産化、白金コバルト磁石、超小型タンタルコンデンサーなど、国内の電子部品メーカーの協力が X-8 を実現し、時計の電子化に大きな力になったことは間違いない。こうした国内メーカーとの開発と協力が、次に続くクォーツ腕時計時代への大きな発展を支えることになる。

4.2 音叉式電子腕時計シチズン「ハイソニック」の誕生^{7) 8) 9) 10)}

シチズン時計は、シチズン「エクスエイト X-8」の販売をスタートし、電子腕時計の利便性を多くの人びとに供給するとともに、X-8 の改良新機種の投入でより良い時計へと進化させた。更に、高精度の電子腕時計の商品化に向かう。

1971 年 10 月音叉式電子腕時計シチズン「ハイソニック」(以降ハイソニックと呼ぶ)の販売を開始する。しかし、この製品は独自に開発したものではなく、アメリカプロバ社との合弁会社「株式会社プロバ・シチズン」により製造されたものである。この商品が販売された約 2 年前、セイコーが金ケースのクォーツ腕時計を 45 万円で販売した。シチズン時計にはクォーツ腕時計が一般化するには、時間がかかると判断し音叉腕時計を市場に出すとともに、高性能腕時計の需要に応えるため国内市場にいち早く打って出て、市場のリーダーシップを取るという経営判断があったに違いない。国内の品質管理、生産技術力を活かした製品を作り上げた。本項では、音叉式腕時計ハイソニックの音叉駆動部の構造と調整技能について述べる。

ハイソニックのムーブメント外観を図 4.5 に示す。ムーブメントの概仕様は、直径 28.5mm、厚み 5.3mm、小型水銀電池(直径 11.6mm、厚み 3.4mm)で 1 年以上、時間精度月差 1 分以内である。てんぶを時間標準とする機械式時計の振動数は 2.5~5Hz (5~10 振動)で、一般品の時間精度は日差 $\pm$ 30 秒程度、調整技能士による時間調整で日差 $\pm$ 10 秒弱が限界であった。てんぶ式電子時計は、振動数 2.5~4Hz (5~8 振動)で日差 $\pm$ 10 秒程度である。これに比して、金属音叉の振動



図 4.5 シチズン「ハイソニック」⁹⁾

数 360Hz で日差 $\pm$ 2 秒という桁違いの精度である。

図 4.6 にハイソニックの仕組みを示してある。電池から供給されたエネルギーは、電子回路に入り音叉を振動させる。音叉の振動は図 4.7 にある送りつめでインデックス車を回転させ、輪列から指針へと伝達される。

音叉は、先端に永久磁石の付いたカップが固定されている、可動磁石型の振動体である。この永久磁石の周辺に電磁石が配置されており振動が継続する。

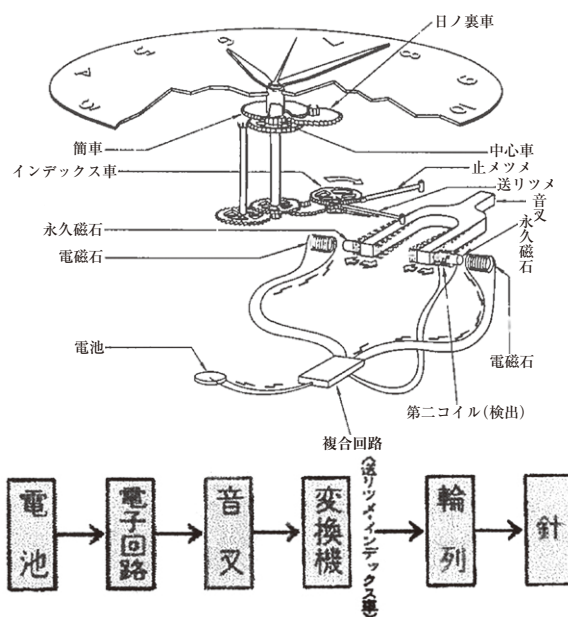


図 4.6 シチズン「ハイソニック」のしくみ⁹⁾

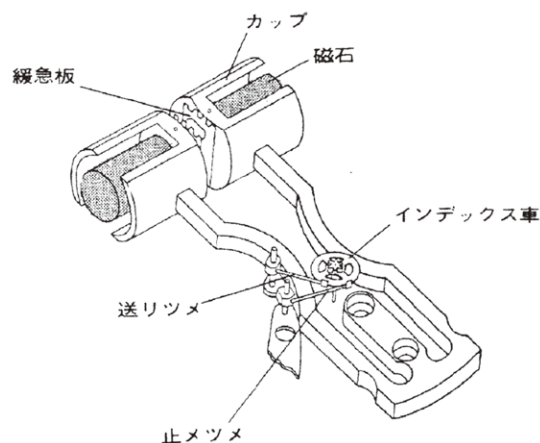


図 4.7 音叉振動子と振動伝達部¹⁰⁾

送りつめ方式の変換機は、図 4.8 に示すように送りつめの往復運動が、インデックス車の歯先に伝達され一方方向に回転し、回転の戻りは止めつめにより規制されている。図 4.9 は、つめの先端形状とインデックス車の歯先形状を示しており、送りつめ、止めつめの先端には $180\mu\text{m} \times 180\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ の貴石が固定されている。インデックス車は板厚み $40\mu\text{m}$ で、歯の形状は深さ約 $10\mu\text{m}$ 、長さ約 $20\mu\text{m}$ の 320 枚の鋸歯状になっている。音叉の取り付けられた永久磁石部の振動の両振幅が $90\mu\text{m}$ 、送り爪部の固定されている部分の振幅が $47\mu\text{m}$ で、この振動が送り爪レバーを介してピッチ $20\mu\text{m}$ の爪車を回転させる。

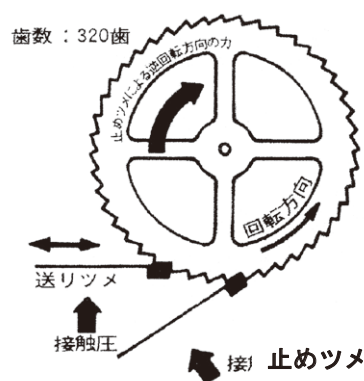


図 4.8 インデックス車とつめ ¹⁰⁾

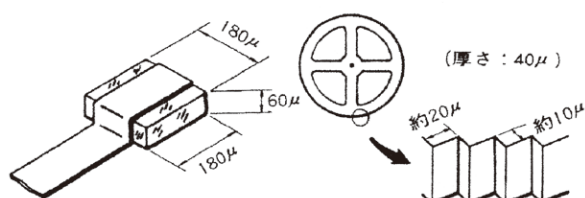


図 4.9 つめ先端とインデックス車歯形状 ¹⁰⁾

作動原理について説明する。図 4.10 に示すように、音叉が止まっている状態では、止めつめは常にインデックス車に逆回転方向の力を作用しているため、インデックス車の歯と隙間なく噛み合っている。送りつめはインデックス車の歯の中央に接するように調整されている。（第 2 章 2.2.2 参照）送りつめ（音叉）の振幅がインデックス車の 1 歯分に相当する場合（図 4.11）、以下の作動をする。

1) 送りつめが右へ半歯分移動し、7 の歯から 8 の歯に落ちる。

2) 送りつめは 8 の歯を 1 歯分左へ進める。

3) その時、止めつめは 1 の歯から 2 の歯に落ちる。

このように、音叉の 1 振動毎にインデックス車は 1 歯送られる。

この正確な作動を保証するには、インデックス車の鋸歯状歯形の加工精度、送りつめ、止めつめの先端への貴石固定技能がなくしてはできなかった。日本の技能の高さを十二分に発揮した製品だと考える。



図 4.10 インデックス車とつめ位置 ¹⁰⁾

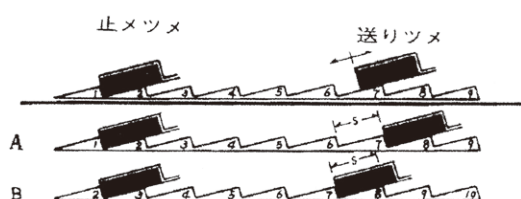


図 4.11 インデックス車の作動原理 ¹⁰⁾

参考・引用文献

- 1) 徳間書店 Good Press：「シチズン X-8（エックスエイト）の全貌」 pp.149-155 1999 年 8 月
- 2) 一般社団法人日本時計協会：「時計用語」 2015 年版
- 3) セイコーエプソン株式会社：「年表で読むセイコーエプソン [1881～2000 年]」 p.35 2001 年 2 月
- 4) シチズン時計株式会社 社内報：「商品研究レポート これが電子腕時計だ！」 pp.7-14
- 5) シチズン時計株式会社 時計資料室：社史腕時計台帳 031-10
- 6) 高宗寛暁：「X-8 電子腕時計の回路解析」日本時計学会誌 No.44 pp.1-14 1967 年
- 7) シチズン時計株式会社：社内報「CITIZEN ALL OVER THE WORLD」 pp.30-31 1970 年 6 月
- 8) シチズン時計株式会社 時計資料室：社史腕時計台帳 041-08
- 9) シチズン時計株式会社：シチズンマーケティングニュース No.25
- 10) シチズン時計株式会社：技術解説書 37 系

5 | 世界初クォーツ腕時計の開発と多機能化^{1) 2)}

クォーツ時計の歴史は、1880年フランスの物理学者ピエール・キュリー（Pierre Curie）とジャック・キュリー（Jacques Curie）兄弟が、水晶などの鉱物に電気をかけると変形する「圧電効果」、翌年、歪をかけると石の表面に電荷が発生する「逆圧電効果」を発見したことに始まる。更に、水晶の「圧電効果」は顕著に反応すること、化学的安定性が高いことが判明する。クォーツ時計の誕生は、時計の時間精度を一気に機械式時計の100倍に向上させた。

1927年アメリカのベル研究所にいたウォーレン・A・マリソン（Warren A. Marrison）が、クォーツ時計の試作品を作った。Xカットの水晶振動子を100kHzで発振させ、真空管を用いた分周回路で1kHzまで落とし、1kHzの同期モーターを回して時刻表示した。しかし、何百本もの真空管を使用したため消費電力と体積（部屋全体ほどの大きさといわれる）は非常に大きく、連続運転によって真空管自体の発熱で真空管が切れやすくなる弱点を持っていた。また、温度変化の影響を小さくするため、水晶振動子を恒温槽に入れたが恒温状態の維持に多くの電力が必要であった。したがって、当時のクォーツ時計は、環境を管理された中で運転され「時間標準器」として使用された。原理的には、クォーツ時計の可能性は証明されたが、家庭用として一般化するには、電力、サイズ、使用環境等時計技術だけではなく多方面に亘る多くの技術開発が必要であり、ウォッチともなれば限りなく高い壁が存在していた。

1950年代に入ると、1953年ブローバ社による音叉式腕時計の特許申請、レオン・アト社からトランジスタを利用した時計の特許申請があり、多くの海外メーカーが電池式ウォッチを市場に出すようになる。このように海外での開発、市販の情報が入ってくる状況になると、国内のメーカーも電池式ウォッチの開発方向を定め、スピードを持って商品化のスタートを切る必要に迫られた。

クォーツ時計においては、クロックメーカーでの開発が先行しており、ウォッチより10年も早い1958年日本で最初の商業用のクォーツ時計を、精工舎²⁾が製造した。これは、中部日本放送局向けの注文品であり、当時の先端技術と技能を駆使して製造にあたった。

²⁾ 現セイコークロック株式会社、セイコープレジジョン株式会社、セイコータイムシステム株式会社等

5.1 国内初商業用クォーツ時計^{2) 3) 4)}

図5.1に示すのが、国内初の商業用クォーツ時計である。トランジスタは開発されてはいたが、低い電圧において分周段階の周波数が崩れて誤作動が生じるなど疑問が多く、素性の分かっている真空管を採用した。水晶振動子の加工にも慎重を期し、熟練加工技能者により数か月かけて制作した。結果、精度は日差換算で0.08秒以内という高精度なクォーツ時計を完成させた。サイズは、真空管、恒温槽等の採用で高さ2m、幅1m、奥行き0.5mと筆筒ほどの大きさであった。納入後、時間精度が設計値に収まらないことが判明し、測定されていたデータの記録を解析した結果、水晶には時間の経過とともに振動数が変化する「経時変化」が生じることが分かった。水晶の特性が完全に解明されていないことから発生した課題であった。以後、水晶振動子の生産工程には「エージング」（水晶振動子に電気を通電し、水晶を枯らすことによって、振動数を安定させる作業）工程を組み入れた。この後、1960年に日差±0.8秒の可搬型のクォーツ時計を開発、翌年市販した。真空管を使用し、サイズは高さ20cm、幅25cm、奥行き50cm、重さ16kgで、研究所、鉄道、船舶などの標準時計として使われた。

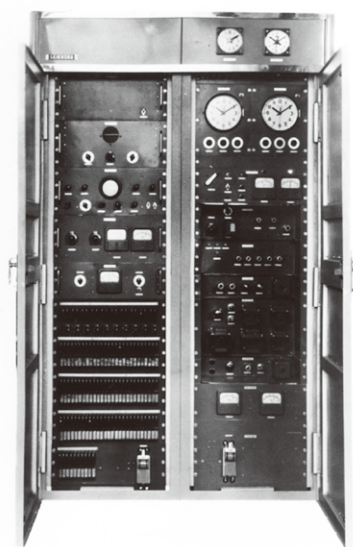


図 5.1 国内初商業用クォーツ時計

（出典：セイコークロック）

5.2 家庭用クォーツ掛時計「スパイラル水晶時計 SPX-961」⁵⁾

1968年セイコーから世界で初めての家庭用クォーツ掛時計「スパイラル水晶時計 SPX-961」（以降SPX-961と呼ぶ）が販売される。時間精度は、日差 ± 1 秒以下、単一乾電池2個で1年以上の持続時間、38,000円の価格であった。図5.2に表裏外観を示してあるが、ムーブメントの構成は振動子、機械体、電子回路等機能毎に配置固定されているところに特徴がある。掛時計の平面スペースを上手く利用し、水晶時計としてはリーズナブルな価格で一般家庭用に作り上げたことも評価したい。開発製造は商業用のクォーツ時計を開発した精工舎で、この製品の技術的な大きな特徴は、現在のクォーツ腕時計用振動子の形状と全く異なる水晶振動子を使用したことにある。

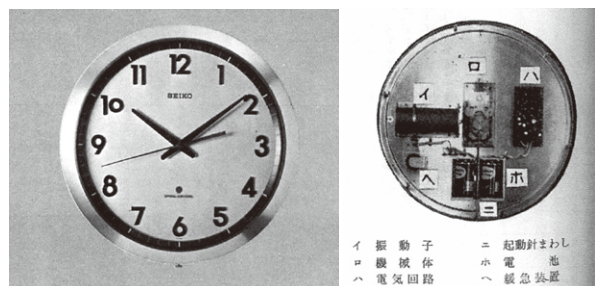


図 5.2 スパイラル水晶時計 SPX-961⁵⁾

図5.3にSPX-961に使用されたスパイラル水晶振動板（上）と水晶振動子の外観（下）、図5.4にスパイラル振動子の断面図を示してある。スパイラル水晶振動板は、外径20mm、厚み0.245mmの円板の中を渦巻き状に打ち抜き、振動片を長くし、その先端に小さな永久磁石を取り付け、コイルによる電磁駆動方式によって156Hzで振動する。外部からの影響を遮断するため、吊ばねで保持し全体を真空に封じてある。この振動モードは、ねじり振動であるため、広い温度範囲（ $-20^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ ）で十分な温度特性が得られる。

SPK-961の分周回路は、水晶振動子の156Hzの信号を、同期モーター（毎秒6.5回転）を駆動するために、19.5Hzすなわち1/8にする分周機能を有する。

クォーツ腕時計の開発の動きはどうであったのか。ブローバ社の音叉腕時計「アキュトロン」が販売された時は世界的に大きな反響があり、今後の電池時計は音叉時計になるともいわれた。国内でクォーツ腕時計の開発が進んだのは、ブローバ社が音叉腕時計の特許を公開しなかったことも要因の一つである。

海外メーカーの電池腕時計の販売、特許申請の情報

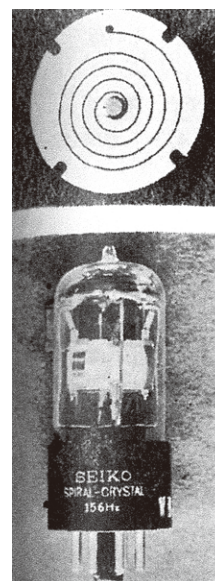


図 5.3 SPX-961 の水晶振動子⁵⁾

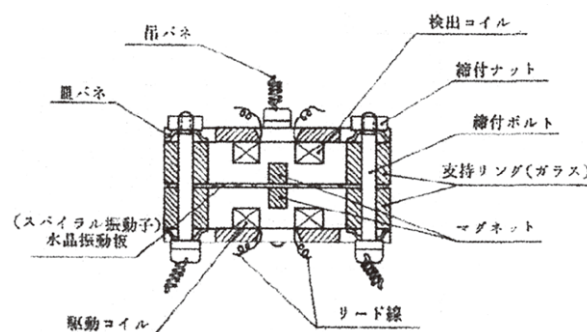


図 5.4 スパイラル水晶振動子断面図⁵⁾

が入る中、セイコーの腕時計製造を担当する諏訪精工舎（現セイコーエプソン株式会社）は、1959年電池腕時計開発の新しいプロジェクトを発足させた。その名称を「59Aプロジェクト」とし、1959年の重要プロジェクトと位置付けスタートする。しかし、プロジェクトメンバーは機械技術者が多く、電気に関する知識が必要な電池時計ともなると何から手を付けて良いか分からなかった。大学教授から電子工学の講義を聞いたり、てんぶ式電池時計、電子デバイス等の勉強から始める。プロジェクトを電子時計の商品化を研究するグループとスイス・ニューシャテル天文台のクロノメーターコンクール用の時計を作るグループに分けた体制で進めた。コンクール用プロジェクトは、クォーツ腕時計などの先を睨んだ研究とし、高精度のマリンクロノメーターの開発を目指した。当時、高精度を保証できる時間標準は、音叉振動子があり腕時計として実用段階にあった。しかし、音叉式時計には、静止状態で日差 ± 2 秒でも外乱で爪が飛び時間がずれる欠点があり、この現象の改善は難しく、腕時計の主流

にはなり得ないと判断した。一方、クォーツ時計も多くの乗り越えなければならない課題を持っており、なかなか開発の方向が定まらなかった。

同時期に、1964年に開催されるオリンピック東京大会の計時をセイコーが担当することに決まる。公式計時はスイスのオメガが独占し、スポーツ界から絶大な信頼があり、セイコーが担当することによる失敗は許されない状況であった。セイコーグループの製造会社三社、精工舎、第二精工舎（現セイコーインスツル株式会社）、諏訪精工舎は、開発分担を次のように決定した。

- ・精工舎：観客用大時計
- ・第二精工舎：ストップウォッチ、水泳用電子計時装置
- ・諏訪精工舎：クリスタルクロノメーター、デジタルストップクロック

クリスタルクロノメーターの担当決定に伴い、プロジェクトはオリンピック計時で必要となる高精度を出せるクォーツ式の開発へと舵を切る。今までのクォーツ時計の大型で、消費電力が大きいという欠点を克服しなければならなかった。目標を乾電池で動き、持ち運び可能な大きさのクォーツ時計とし、クリスタルマリンクロノメーターをターゲットとした。

競技用時計としては、読取りの誤りがなく、見やすい時計であることが求められる。しかも、可搬可能にするため電池駆動が前提となる。水晶振動子には大きな欠点があり、振動子に強い衝撃が加わったり、温度が変化すると振動数が変動し、正確な振動を得られなくなる。多くの難題を解決し開発されたのが、「クリスタルクロノメーターQC-951」である。（図 5.5 参照）



図 5.5 クリスタルクロノメーター⁶⁾

このクリスタルクロノメーターを携えて、1963年度のスイス・ニューシャテル天文台クロノメーターコンクールに参加した。結果は、マリンクロノメーター部門で10、11、12位に入賞した。スイス勢以外で初めての参加にしては、上々の成績であった。第1位から9位まではスイス勢の水晶時計が占め、時代の流れはクォーツ時計に向かっていることを示した。この成績を自信に、改良したQC-951をもってオリンピック東京大会に臨み、大きな成功を収めたことは周知の事実である。

5.3 可搬型セイコー「クリスタルクロノメーター QC-951」^{1) 7) 8) 9)}

可搬型クリスタルクロノメーターQC-951は、平均日差 ± 0.2 秒、単一乾電池2個直列で持続時間1年、外径寸法長さ20cm、幅16cm、高さ7cm、体積1,400cc、総重量3kgと片手で持ち運びできるまで作り込んだ。課題であった水晶振動子の耐衝撃性は、図5.6に示すように棒状水晶振動子（振動数6,300Hz）を、外径20×100mmの真空カプセルの中に吊るした状態で封入し解決した。温度変化に対しては、恒温槽に代わるサーモバリコン（温度補正装置）で対応した。サーモバリコンはバイメタルを使って容量を変化させ、温度が変わっても水晶振動子の周波数が一定になる装置を開発した。図5.7にサーモバリコンの構造図を示す。渦巻き形バイメタルの先端の温度による変位を空気バリコンのローターの回転に変え、ローターとステーターの極板で構成するコンデンサの容量を変化させる。これによって、20℃の温度変化で1日に2秒の狂いが生じる恐れがあったクォーツ時計の問題点を解決し、小型化への道が拓けた。



図 5.6 QC-951 の水晶発振器

（出典：セイコーエプソン）

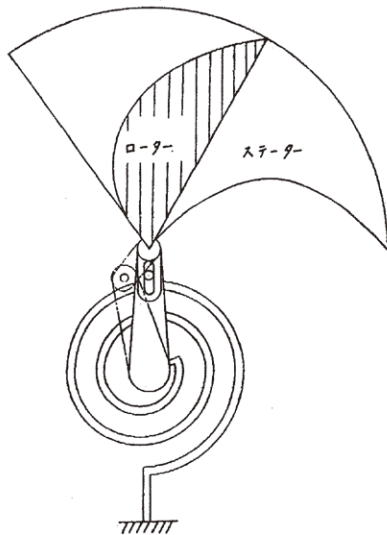


図 5.7 サーマバリコンの原理⁹⁾

図 5.8 に QC-951 の内部構造 (左)、特殊水晶発振器 (中)、小型低電力同期モーター (右) を示す。特殊水晶発振器の左側に位置するのがサーモバリコンである。

その後もスイスニューシャテル天文台クロノメーターコンクールにおいて、スイスメーカーとの小型化、精度競争は熾烈を極め、しだいにクォーツ腕時計サイズへと近づいて行く。諏訪精工舎がコンクール用に開発した経過は次の通りである。

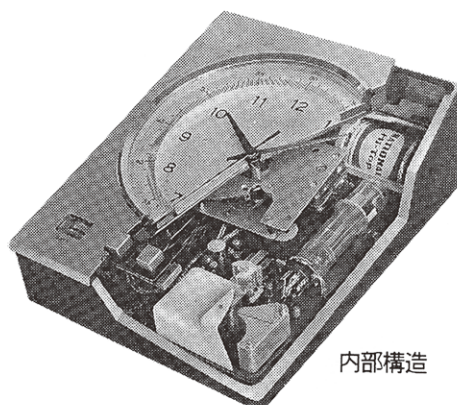
(1) 1964 年度のコンクールには、ボード部門に「ボード型水晶時計 952 型」を出品する。(図 5.9 参照)

サイズは、縦 59mm、横 63mm、奥行き 50mm で体積 200cc、水晶振動子は輪郭滑り 128kHz の振動数であった。QC-951 の同期モーターをアンクル・がんぎ歯車脱進機 の 1 秒ステップ運針に変更して消費電力を抑えた。

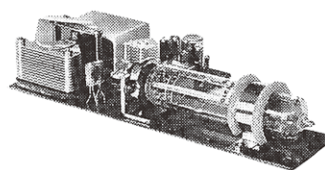
(2) 1965 年度のコンクールに、体積 180cc のクロノ

メーター (953 型) を出品する。(図 5.10 参照)、
(3) 1966 年度、初めて懐中型クォーツ時計を出品する。水晶振動子は音叉型振動子 4,096Hz を採用し、体積が 18cc と大幅に小型化された。(図 5.11 参照)
(4) 1967 年度、最も注目を集めたのが、諏訪精工舎とスイスの CEH (Centre Electronique Horloger S.A (スイス電子時計センター：各時計メーカーからの時計技術の開発依頼による時計研究所)) が同時に出品したクォーツ腕時計のプロトタイプである。諏訪精工舎のプロトタイプは、サイズ 30mm × 23.5mm の角型ムーブメントで厚み 5.3mm、体積 3.7cc、自社開発した長さ 20mm の音叉型超小型水晶振動子 (サーミスタ式温度補正付 8,192Hz) を採用、アンクル・がんぎ歯車脱進機の変換機を使用した。ローター、ステーター、ステーター周りの形状、寸法およびコイルへの印加電圧波形など、あらゆる点で消費電力を削減した。

コンクールの結果は、11 位と 13~15 位に終わり、精度で CEH との差を認めざるを得なかった。しかし、スイス勢が依然棒状の水晶振動子に頼っていることに自信を持つ。何故なら、棒状振動子と音叉型振動子には大きな違いがあった。図 5.12 の上が棒状水晶振動子、下が音叉型水晶振動子の実装例を示す。棒状水晶振動子は、水晶の加工が容易という反面、図のように二つのノード (振動の静止点) を 4 本の支持線で吊るため、Q 値が高くかつ耐衝撃性の良いものを安定生産できない。一方、音叉型は音叉そのものの加工は面倒であるが、所定の寸法精度に加工されると、水晶の振動時に変位しないノード相当部分が広く、振動部に悪影響を与えず強固な固定が可能である。そのため、腕時計にとって重要な耐衝撃性の対策を取りやすい。



内部構造



特殊水晶発振器



小型低電力同期モーター

図 5.8 QC-951 の内部と構成部品⁷⁾

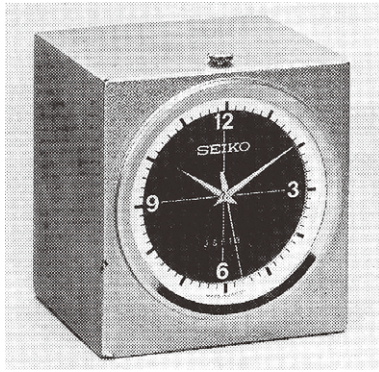


図 5.9 ボード型水晶時計 952 型⁷⁾

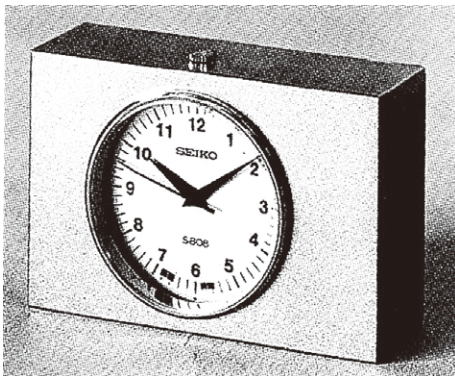


図 5.10 クロノメーター (953 型)⁶⁾

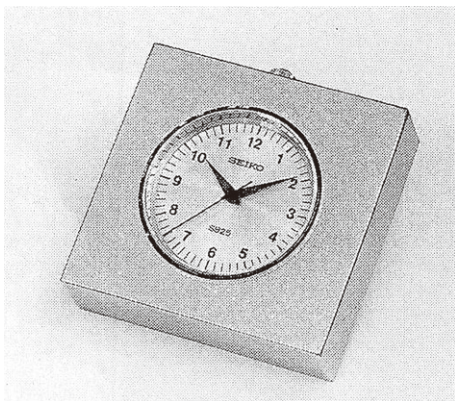
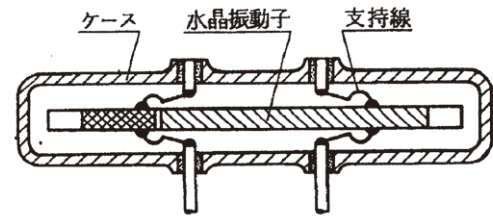
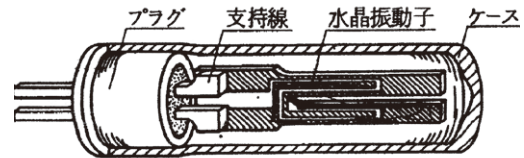


図 5.11 懐中型水晶時計⁶⁾

日本およびスイスが、クォーツ腕時計のプロトタイプを出品したことにより、クォーツ腕時計の実用化が現実に近い。しかし、プロトタイプはコンクールのための物で、制作個数にも限られ長期的な信頼性も必要ない。ところが、実用時計ともなると長期信頼性、耐衝撃性等日常生活に十分耐えなければならない。もちろん、諏訪精工舎の技術者たちにも商品化の目は立ってはいない。スイスのメーカーは、コンクールで発表した CEH のムーブメントを使って、エボーシュが「S800」の機種名で量産化の予定を明らかにしていた。更に、ロンジンが 1968 年 8 月、CEH とは全く



(A) 棒状 (Free-Free Bar) 水晶振動子と実装例



(B) 音叉型水晶振動子 (マイクロ型) と実装例

図 5.12 水晶振動子の形状¹⁰⁾

異なる方式の「ロンジン・ウルトラクォーツ」を発表、18 か月後の発売を予定していたが、時期は早まるとみていた。当時、機械式腕時計のクロノメーター・コンクールにおいても、日本勢の勢いに圧されていたスイス勢が、クォーツ腕時計商品化の一番乗りを狙っていることは明らかであった。

「スイス勢も必死で開発している。絶対に後れを取るな！」の経営トップの指示により、59A プロジェクトで進めていたいくつかの電池時計開発を、クォーツ腕時計の商品化に一本化し経営資源を集中させた。プロトタイプと全く異なる発想による商品化がスタートする。

5.4 世界初クォーツ腕時計セイコー「クォーツアストロン 35SQ」

水晶腕時計の基本的な要素技術は、水晶発振部、電子回路、電気・機械変換部である。これらを如何に小さく、薄く、安定的に動作するように作り込み、腕時計サイズに組み込むかに商品化が掛かっている。「機械設備でも材料でも、外に優れた製品があれば購入し、なければ必要なものはすべて自社で作る」を基本に、商品化をスタートさせる。

(1) 独自の音叉型水晶振動子の開発¹⁾

水晶振動子に求められる条件は、小型、温度特性が良い、低消費電力、高い耐衝撃性等であり、この条件を満足するため、棒状より音叉型が有利であると判断した。腕時計サイズに適した 20mm 以下の小型水晶振動子はなく、水晶振動子の加工を水晶専門メーカーに依頼したが、この時点で市場性の全くない、先の読めない小物には関心を示さず取り合ってくれなかった。

加工方法も分からなかったが、自分たちで作ること

にした。音叉形の型に、研磨剤と振動を加えての加工、砥石で研削する方法等試み、砥石加工により音叉形状を作りクラックを研磨で除去しサンプルを作った。図 5.13 の左側の図は、35SQ の実際の水晶振動子であり、右側は水晶振動子を吊った状態を示す模式図である。

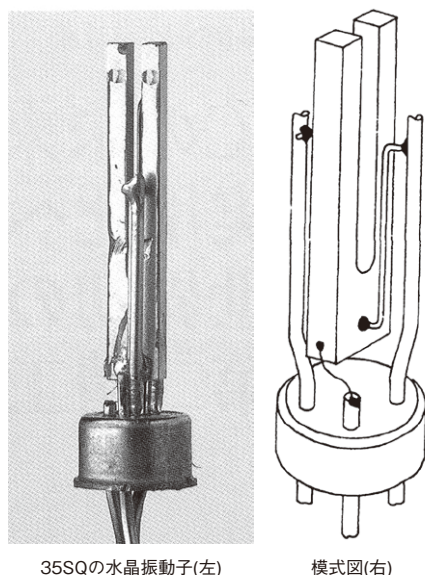


図 5.13 水晶振動子の吊り構造

(出典：セイコーエプソン)

このように、水晶振動子を細いばねで吊るし、真空カプセルに浮かせて封入した。これにより落下試験にも十分耐えた。水晶振動子のサイズは振動数との関係があり、腕時計用に水晶振動子のサイズを小さくすると、振動数が高くなり分周回路の段数が増え、消費電力が多くなる。総合的に判断した結果、コンクール用懐中時計では、4,096Hz であったものを、倍の 8,192Hz とし、発振器サイズは、外径 4.2mm、長さ 19mm の大きさを実現した。温度補正は、QC-951 のサーモバリモンに替え、チタン酸・ジルコン酸系セラミックコンデンサによるサーミスタ式温度補正方式を採用した。

図 5.14 に示すのは、一番左側の水晶振動子が採用されたサイズである。その後、クォーツ腕時計の小型薄型化の開発、商品化に伴って水晶振動子サイズ、性能も大きく進歩を遂げる。

(2) ハイブリッド回路の作成¹⁾

水晶振動子の振動数 8,192Hz をフリップフロップ回路で 1/2 ずつ分周して、1 秒に 1 駆動の信号にするには、13 段の分周回路が必要になる。低消費電力の電子回路を設計するには、処理速度は遅くとも定常状態での消費電力が少ない CMOS（相補型金属酸化膜半導体）IC が適している。

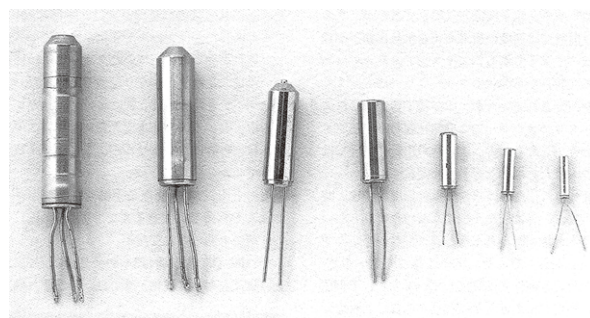


図 5.14 水晶振動子の形状の変遷

(出典：セイコーエプソン)

腕時計用に使える小型のものは市場になく、半導体専業メーカーに依頼しても、実需が伴わない時計用には関心はなかった。「ないものは自前」の方針でも、CMOS-IC は理論的には解明されていても、製造技術はかなり難しい。日程が厳しい中、とりあえず自社技術で間に合わせるしかなく、バイポーラトランジスタによるハイブリッド IC で回路設計をスタートした。ハイブリッド IC とは、セラミック基板上に抵抗、コンデンサの配線を蒸着やスパッタリングで行ない、これにトランジスタを取り付ける。クォーツ腕時計を 1 個作るには、発振回路、駆動回路、その他で裸のトランジスタ、印刷抵抗、コンデンサ等 180 数個が必要であった。これらの素子を厚さ 0.25mm のセラミック基板上にハンダ付けして作り上げた。高い技能を持った組立技能者が、顕微鏡下で根気よく繋ぐ職人芸であった。大変な作業ではあったが、信頼性は低かったのも事実である。

CMOS-IC に関する特許について触れる。諏訪精工舎がクォーツ腕時計の商品化を目指し、スタートを切った 1968 年、ハミルトンが「水晶振動子と CMOS-IC を用いたデジタルおよびアナログクォーツ時計」の特許を取得した。この請求範囲は、水晶振動子と CMOS-IC を使ったすべての時計を包含する広範なもので、逃れようがない。世の中に水晶腕時計はまだなかったが、特許だけは存在していた。ハミルトンとライセンス契約をしない限り、CMOS-IC を使った水晶腕時計は特許侵害になる。ハミルトンとの特許交渉に入るが、幸いなことにハミルトンは特許を取ったものの、クォーツ腕時計を自社で商品化する意思はなく、パテント料を払うことで決着している。

(3) 分散モーターによる 1 秒運針の採用¹⁾

アナログクォーツ腕時計の場合、水晶振動子が発する電気信号を、機械的運動に変換する方法には、①がんぎとてんぷ、②つめ送り、③磁気脱進機、④モー

ターなどがある。クロノメーターでの実績は、QC-951では同期モーターを採用したが、連続運針の同期モーターは消費電力が大きい。952型や腕時計のプロトタイプでは、1秒送りの間欠駆動のアンクル磁気脱進機を採用した。信号毎にアンクルが作動する往復運動のため、耐久性の面でクォーツ腕時計への採用は見送られた。変換機は回転式が望ましい方向ではあったが、消費電力の削減が大きな壁であった。

様々なモーターの実験をしている中で、遊び半分で試みたことが次のステップへと進めた。3枚重ねた2極の白金コバルトの磁石を、60度間隔に広げて駆動パルスを与えたところ回転することを見つける。更に、駆動パルス幅を短くして消費電力を減少できることも分かった。結果的に1秒運針の超小型腕時計用6極モーターが誕生した。

ローターは、白金コバルト（6極）、直径2.8mm 厚み0.5mm、コイルは0.02mmの極細線を約2万回巻き、消費電力7.5mw、耐振性100G以上の性能を持つ超小型モーターになった。1秒に1回、100分の数秒間だけ間欠的に電気を流し、ステップモーターを60度ずつ回転させ針を動かす。電気が流れていない時は、ローターとステーターが引き合ってブレーキの役割を果たす。この構造と1秒運針によって電池寿命は大幅に伸びた。（第2章時計の機構別構造 図2.38 6極ステップモーターを参照）

このモーターをムーブメントの中にどう収めるかが残った。モーターの機能部品で分けられるものは分けて、ムーブメントの隙間に配置することを検討する。白金コバルトのローター、2極ステーターとコイルを分散する形に収めた。磁気抵抗が少なく磁気エネルギーを永久磁石まで導くため、高透磁率材（高ニッケル材）を三層に重ねて使い、渦電流損を低減するなど効率を上げる対策を講じた。ムーブメントの隙間を利用するこの方式は、分散型あるいはオープン型ステップモーターと呼ばれ、今日もアナログクォーツ腕時計の世界標準として使われている。

この1秒運針については、「機械式時計と一目で判別でき小気味よくて良い」とする意見と、「時計の針は滑らかに動くものだ。こんなものは時計じゃない。」という反対意見とがあった。商品化した技術者も、滑らかに動かすことを理想としながらも、新しい技術を導入することの難しさを感じる。開発したリーダーは、ステップ運針は機械式時計にはない「これがクォーツの特徴」と説得した。意見が二分する中、ステップ運針を選択し、特徴を活かした戦略を取った経営トップの判断は間違っていなかった。

1969年12月25日、諏訪精工舎がスイスに先駆けて開発した世界初のセイコー「クォーツアストロン35SQ」（以降アストロンと呼ぶ）が、18K金ケース価格45万円（当時の大衆車の値段ともいわれる）で販売される。（図5.15参照）

ムーブメントの仕様は、以下の通りである。

- ・ムーブメントサイズ：外径30mm 厚み5.3mm
(電池部6.1mm)
- ・水晶振動数：8,192Hz
- ・精度：日差±0.2秒/月差±5秒
- ・電池寿命：1年以上（使用電池：酸化銀電池 直径11.6mm 厚み5.4mm）
- ・秒針を正時に合せる秒規正装置付き

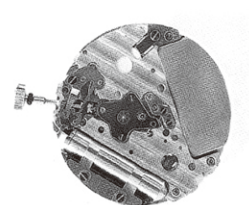
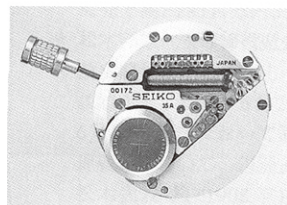
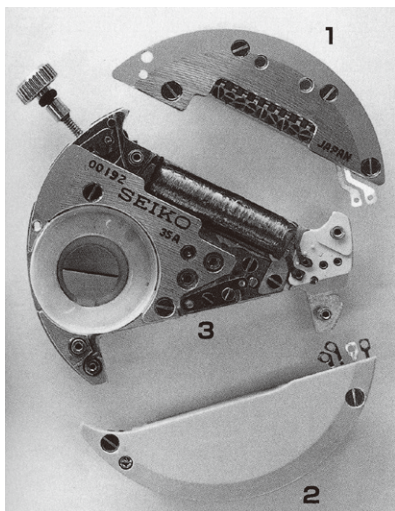


図5.15 セイコー「クォーツアストロン35SQ」⁶⁾

図5.16は、アストロンの機能ブロック毎の写真である。1が水晶振動子、発振回路ブロック、2がICユニット、分周回路ブロック、3がステップモーター、輪列ブロックである。

1970年4月に開かれたスイスのバーゼルフェア（スイス・バーゼルにて、毎年3月、4月頃の一週間かけて行われる世界最大の宝飾と時計の見本市）において、CEH社のβ-21（ラドー、ブローバ、ユニバーサルなどのブランドメーカー）、オメガ社など数社が、アナログクォーツ腕時計を出展したことから、前年12月に発売できたことで世界的にアピールでき、懸念の推進が実った⁷⁾。

後日、59Aプロジェクト・リーダーであった中村恒



1 水晶振動子・発振回路
2 IC ニュート、分周回路
3 ステップモーター、輪列部

図 5.16 アストロンの機能ブロック⁶⁾

也は、こう語っている。「コンクールを通して分かったスイスと当社との大きな違いは、スイスが分散型なのに対し、こちらは一貫メーカーであること。当社は、必要なら自社のマネジメントの範囲内でどんどん手を打てる。ところがスイスでは、そうはいかない。といって C.E.H. のような研究所は、ある程度まで作ったら、“あとは民間で”という形。しかし、コンクールと一般商品では、技術的な問題はまったく違います。コンクール用なら 45 日間の検査が終われば止まってもいいし、ショックも関係ないんですからね」⁸⁾

クォーツ腕時計の基本となる、以下のステップモーターの分散配置等の基本構成に関する特許、水晶発振器に関する特許等多数を出願し、世界的な範囲で権利化している。

- ・発明の名称：水晶腕時計（基本構成に関する）
出願日：1969 年 6 月 24 日
公告番号：特公昭 48-18872
- ・発明の名称：水晶腕時計（水晶発振器に関する）
出願日：1969 年 10 月 3 日
公告番号：特公昭 49-31146 など

これにより、諏訪精工舎の許諾なしには、1 秒 1 運針のステップモーターを使った水晶腕時計は、どこも作れなくなった。諏訪精工舎は、1 社独占では技術は広まらないと考え、これらの特許を原則公開する方針で臨んだ。これらの特許を使わない限り、品質面で太刀打ちできないことを認め、エポーシュなどスイス勢も特許料支払いに応じた。この結果、35SQ 以来の分散配置型モーター、1 秒運針、音叉型水晶振動子は、水

晶腕時計の世界標準として定着した。

2004 年 11 月 25 日にセイコー「クォーツアストロン 35SQ」は、IEEE (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS) マイルストーンを受賞した。当時、日本では過去に 3 回受賞しており、「八木アンテナ」、「富士山レーダー」、「東海道新幹線（弾丸列車）」に次ぐ、4 回目の受賞である¹¹⁾。

クォーツ腕時計の量産化にあたっては、電子回路部が大きな障害となった。コストを考慮して、いかに量産タイプの電子回路に変えていくかが最大の課題で、低電力の CMOS-IC での分周回路構成が必要不可欠であった。そのような状況の中、アメリカのシリコンバレーのインターシル社から CMOS-IC を使った時計用分周回路の提案を受け、1969 年 1 月、諏訪精工舎、第二精工舎は共同で開発委託契約を結ぶ。

翌年、初めての CMOS-IC が届いたが、提示した仕様に対して、品質、性能にばらつきが多く歩留まりが悪かった。また、IC 表面の安定した酸化膜の作り方が解決されてなく、非常に静電気に弱く、ちょっとした静電気で壊れてしまう状況であった。第二精工舎では、品質、性能において選別した CMOS-IC に静電気対策を取り、1970 年 12 月クォーツ腕時計で初めて CMOS-IC を搭載したクォーツ 36SQC (図 5.17 参照) を発売した。

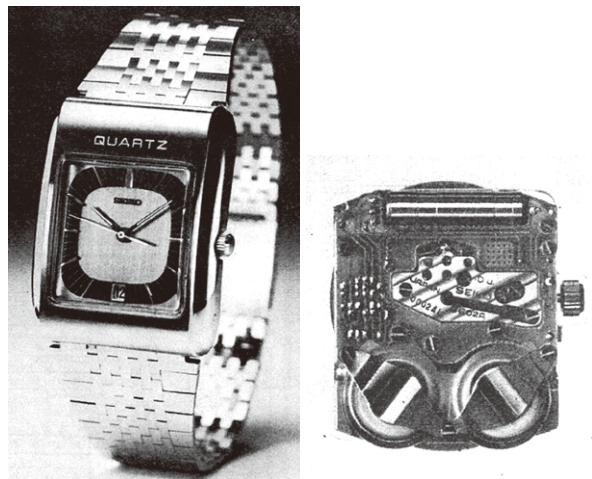


図 5.17 セイコー クォーツ 36SQC¹²⁾

5.5 セイコー「クォーツ 36SQC」^{12) 13)}

初めて分周回路部に C-MOS IC を使用したクォーツ 36SQC は、アストロンと比較していくつかの技術的相違点がある。

- (1) 水晶振動子の振動数を 8,192Hz から 16,384Hz へ上げている。水晶振動子の振動数が高ければ高いほど精度は向上する。しかし、高くなると分周段数が多くなり、分周回路の消費電流が増えることになるが、分周回路に CMOS-IC を採用することにより、低電力化が図られている。

36SQC の構成図を、図 5.18 に示す。回路構成は、発振回路、分周回路、パルス発生回路、増幅回路であるが、CMOS-IC (1.8mm × 1.9mm 厚さ 0.13mm に約 270 個の素子が構成されている) が使われているのは消費電流の大きい分周回路のみである。その他は、ハイブリッド IC となっている。

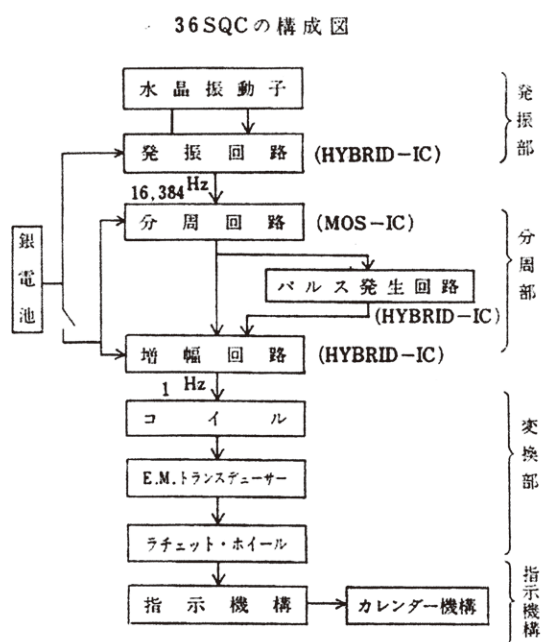
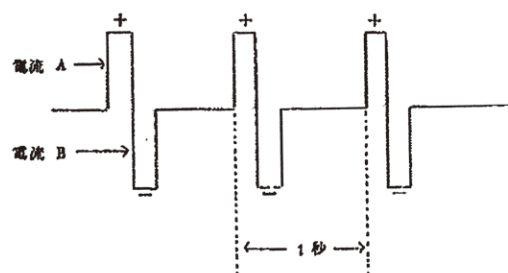


図 5.18 36SQC の構成図¹²⁾

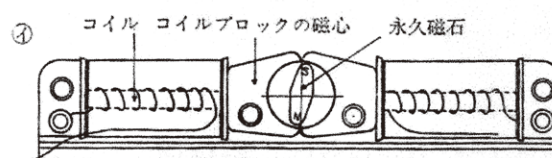
- (2) アストロンでは、白金コバルトの 6 極磁石のローターを使い 1 秒に 1 回 60 度の回転運動で針を送ったが、36SQC は 2 極磁石のローターを使用し、独特のエレクトロ・メカニカル トランスジューサー (ELECTRO-MECHANICAL TRANSDUCER) と呼ぶ、往復運動の変換機により針を送る。

図 5.19 に作動を示す。電流が流れていないとき、トランスジューサーの永久磁石は図①の位置にある。電流 A が流れると、コイルブロックの磁心に図②のように N 極と S 極が発生し、永久磁石は左方へ一定の角度回転する。次に電流 B が流れ、コイルブロックの磁心には前と逆の位置に N 極と S 極が生じ、永久磁石は図③のように右方へ反転する。永久磁石と一体の駆動体が作動し、図②の動作で 1/2 ピッチ、図③の動作で 1/2 ピッチ、合計して

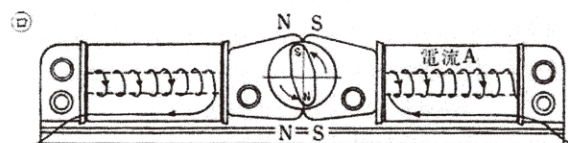
1 秒間に 1 ピッチずつラチェット・ホイールを動かす。ラチェット・ホイールの歯数は 60 枚で、1 秒に 1 歯送り 1 分間で 1 回転する。



電流が流れていない時、トランスデューサーの永久磁石は①図の位置にあります。



ここへ電流 A が流れると、コイルブロックの磁心に図②のような N 極と S 極が発生し、永久磁石は左方へ一定の角度だけ回転します。



つぎに電流 B が流れ、コイルブロックの磁心には前とは逆の位置に N 極と S 極が生じ、永久磁石は③図のように右方へ反転します。

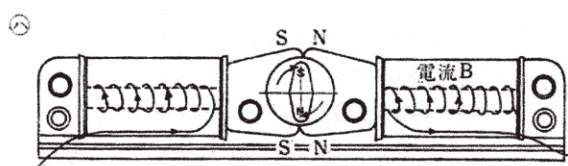


図 5.19 36SQC の駆動方式メカニカル・エレクトロニクス・トランスジューサー¹²⁾

- (3) 小型銀電池 2 個使用して、電池寿命 3 年を実現した。

クォーツ 36SQC のムーブメント仕様は、以下の通りである。

ムーブメントサイズ : 25 × 28mm 厚み 5.45mm
(電池部 6.75mm)

水晶振動子 振動数 : 16,384Hz

時間精度 : 日差 ± 0.2 秒 / 月差 ± 5 秒

電池寿命 : 3 年 (小型酸化銀電池 2 個)

1973年8月には、シチズン時計もクォーツ腕時計の販売を開始した。この後、国内各社はクォーツ腕時計の量産化に向けて、電子回路部の低消費電力化が大きな課題と考え、CMOS-ICの自社製造を目指し、IC開発、製造のための実験用製造設備、更には小規模生産用の本格的半導体製造設備の導入に向けてスタートする。

その後、国内時計メーカーは、電子部品とりわけCMOS-IC、小型酸化銀電池の進歩とともに、クォーツ腕時計の小型化、薄型化競争へ突入する。アナログクォーツ腕時計は、カレンダー機能、クロノグラフ機能等機械式腕時計と同様な付加機能を装備した腕時計が市場に出回る。機械式腕時計は、大きな針を回せるトルクを持っており、付加機能を付けるには有利であるが、トルクの小さいクォーツ式ではいろいろなアイデアと工夫で製品化に繋げた。また、逆にクォーツだから可能となる製品も、多く市場に送り出された。

アナログクォーツ腕時計の基本機能を追求した、セイコーエプソンが開発した機械式腕時計を超え、実用時計を極めたクォーツ腕時計、およびシチズン時計が開発したクォーツ腕時計の限界を極めた超極小クォーツ腕時計を紹介する。

5.6 最高峰クォーツ腕時計セイコー「グランドセイコー Cal.9F」

セイコーは、1960年代に国産機械式腕時計の最高峰であるGS（グランドセイコー）を生み出したが、国内にも多くの崇拜者を持つスイス製腕時計に対抗するための戦略商品でもあった。しかし、クォーツ腕時計の出現によって、機械式腕時計の時間精度を競うことは事実上無意味になり、徐々に、機械式腕時計のGSは影が薄くなり消えていく運命にあった。クォーツが圧倒的優位な中、1980年代の半ば世界的な時計ブームが興り、機械式腕時計が再び脚光を浴びることになる。この動きによって、しばらく沈滞していたスイス時計も息を吹き返した。日本の時計産業は、クォーツの市場では圧倒的なシェアを誇るものの機械式高級腕時計の分野では、スイスに一步も二歩も後れを取っていた⁸⁾。

このような状況において、“GSの復活”の声がセイコー内外から湧き上がって来るのも当然だった。セイコーエプソンは、1988年クォーツムーブメントを搭載した第2世代のGSを誕生させるが、クォーツが故の技術的課題があり、機械式腕時計のGSに比べるとひ弱さを感じた。それは、クォーツ式と機械式では、時計の顔である針を動かすトルクが大きく異なり、ク

ォーツ式では針を大きく重厚感のあるデザインにできなかったからである。1993年、初めてのクォーツ式GSを大幅に改善した「グランドセイコー Cal.9F」（以降、Cal.9Fと呼ぶ）が発売される。初期のGSを強く意識し、設計の根本から見直したクォーツ腕時計GSを完成させた。図5.20にグランドセイコーの歴代の初回モデルを示す。機械式腕時計GS（上）、クォーツ腕時計GS（1988年発売）（中）、クォーツ腕時計GS（1993年発売）（下）のモデル比較を示す。



機械式腕時計GS



クォーツ腕時計GS(1988年発売)



クォーツ腕時計GS(1993年発売)

図 5.20 グランドセイコー歴代モデル

(出典：セイコーウォッチ)

Cal.9Fの狙いは、セイコーの最高峰であるGSを、クォーツで復活させることにあった。企画、デザイン、ムーブメント設計の担当メンバーは、機械式腕時計GSのモデルから勉強し直す。その結果、導かれた設計のポイントは以下の通りである。

- ・機械式と同じように大きな針を回せること。
- ・クォーツ式の秒針のふらつきをなくし、文字板の秒目盛りに乗ること。
- ・耐久性を上げるため、保油性を確保し輪列部の防塵対策を施すこと。

(1) ツインパルス駆動モーターの採用

一般的なクォーツ腕時計は1秒に1回、駆動パルスを100分の数msec流しモーターを回転させる。実用時計の場合の出力トルクは、分針が取付けられる2番車換算で約3g-cmが得られる。機械式腕時計の1/2～1/3のトルクである。

9Fでは、1秒に2回の駆動パルスを印加し、2番車換算トルクで倍以上の値を引き出した。更に、ステップモーターのコギングトルクを上げ、落下衝撃時の秒針アンバランスによる針飛びをなくした。針の動きもクォーツ腕時計の特徴である1秒の小気味よい動きを犠牲にしないよう、駆動パルスの印加タイミングを調整しながら決定した。

(2) バックラッシュ・オートブレーキング・ホイールの採用

図5.21に示すように、指示精度を上げるため歯車機構の適度な隙間（バックラッシュ）を一定の方向に詰める機構を搭載している。図の一番右がひげぜんまい（機械式腕時計に用いられるてんぶのひげぜんまいと同様のもの）を内蔵する制動車（60番）で、ひげぜんまいの広がろうとする力が、2番車→3番車→4番車と伝わり、秒針の付いた4番車のふらつきを除去する。この構造により常に正確に6°ずつ秒針は回転する。

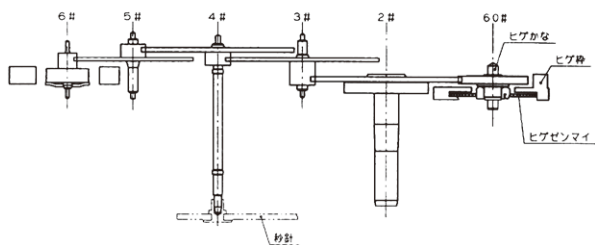


図5.21 バックラッシュオートブレーキングホイール機構
(出典：セイコーエプソン)

(3) ローターの上下柄部に組合せ軸受を採用

図5.22に示すように、ステップモーターのローター上下柄部に組合せ軸受を採用し、保油性を確保するとともに、ゴミの侵入を防ぎ、長期信頼性を保証する。

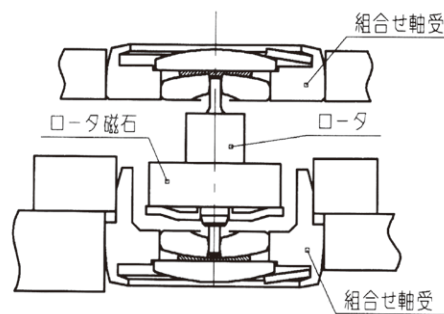


図5.22 ローターの保油性確保
(出典：セイコーエプソン)

Cal.9Fのムーブメント仕様は、以下の通りである。
(図5.23 参照)

ムーブメントサイズ	直径 29.0mm × 26.0mm (サイドカット) 厚み 3.1mm
水晶振動子 振動数	: 32,768Hz
時間精度	: 年差 ± 10 秒
電池寿命	: 3 年 (小型酸化銀電池 直径 9.5mm 厚み 2.1mm)



図5.23 Cal.9Fのムーブメント外観
(出典：セイコーエプソン)

5.7 世界最小ムーブメント搭載シチズン「ミーム・オブ・シチズン Cal.G720」^{14) 15)}

シチズン時計の時計開発者の飽くなく挑戦、“どこまで小さくできるのか”その限界を極めた製品、シチズン「ミーム・オブ・シチズン (MIM of CITIZEN) Cal.G720」(以降、G720と呼ぶ)は2002年8月市場デビューした。(図5.24 参照) ウォッチ・デザインの自由度を高め、デザイン制約を限りなく“ゼロ”に近付ける理想のムーブメント開発で、今までに無い新しい時計デザインの創出へ繋げる。G720の開発目標として、シチズン時計内部では世界最小より、超極小ムーブメントと言うに値するサイズを定めた。



図 5.24 シチズン「ミーム・オブ・シチズン Cal.G720」
(出典：シチズン時計)

G720 の企画は、1980 年 11 月に販売した当時世界最小ムーブメント Cal.1500 の商品開発の思想を引き継いでいる。Cal.1500 の企画意図は“より小さい、より美しい時計作り”、目指すは世界一であった。その開発ステップは従来とは異なる方法をとった。通常の時計の商品開発のように、技術対応可能なエレメントを寄せ集めてムーブメントスペックを作り上げるのではなく、最小の平面サイズ 5.0mm × 5.0mm（現在のボタン型電池の最小サイズφ 4.8mm とほぼ同じ矩形）を達成するために、どんなエレメント開発が必要か明確化することでスタートした。1980 年代前半、薄型小型の製品が各社から出される中、Cal.1500 のムーブメントサイズ（直径 9.5mm、7mm × 9mm（サイドカット）厚み 2.05mm）は十分な競争力を持っており、これを更に小型化する他社の動きはなかった。理由は超小型を追求する技術的な難しさだけでなく、デザイン上も適当に小型化されていれば充分という見方があったと思われる。

G720 は「自分たちが身に着けたい時計」、女性が自分らしさを表現できて、しかも楽しく、幸せになれる時計。また、今までにない形の追求も「奇抜さ」でなく、シンプルな美しさを持ちながら、新鮮なスタイリングのウォッチとなった。

(1) 超極小ムーブメント実現のための技術ポイント¹⁶⁾

- ・ステップモーターの動作安定化のため、高容量コンデンサ（10μF）を使用し、超小型、高性能モーターを開発した。
- ・1 分運針による輪列スペースの大幅な縮小と超小型時計における時刻の読み取り易さを実現した。また、超精密加工技術により、輪列部品の極小化を図った。
- ・時刻修正を針合せ機構スペースを必要とするりゅう

ず方式から、隠しプッシュボタン電磁修正方式に割り切り、省スペース構造の実現と外部操作の突出部の廃止によるデザイン性向上を図った。

- ・各機能部品の複合化により、スペースの有効活用（機能部品の固定用スペースの廃止）と部品点数の削減を図った。
- ・電圧書込み式歩度調整の超小型 IC の開発により省スペース実装を実現した。
- ・電池メーカーの協力により、最小電池（SR410SW）を開発し薄型化を図った。

(2) G720 と Cal.1500 とのムーブメントスペック比較（() 内が Cal.1500）（図 5.25、図 5.26）

ムーブメントサイズ：	直径 7.0mm 5.0mm × 6.0mm 厚み 2.5mm (直径 9.0mm 7.0mm × 9.0mm 厚み 2.05mm)
運針間隔	：1 分運針（30 秒運針）
時間精度	：月差 ± 20 秒（月差 ± 15 秒）
使用電池	：SR410SW（直径 4.8mm 厚み 1.0mm）（SR610SW（直径 6.8mm 厚み 1.0mm））
電池寿命	：約 2 年（約 1.5 年）

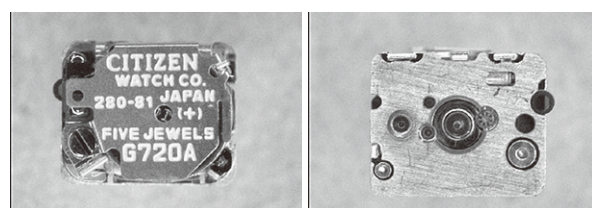


図 5.25 Cal.G720 ムーブメント（表）、（裏）
(出典：シチズン時計)

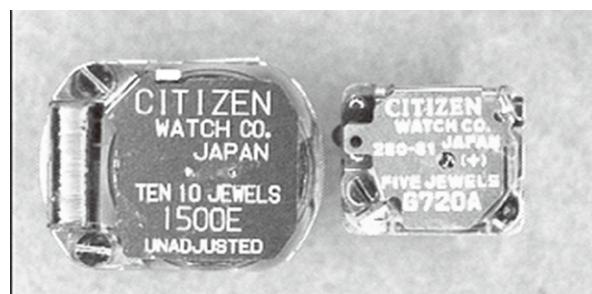


図 5.26 Cal.1500（左）と Cal.G720（右）
(出典：シチズン時計)

商品開発者の思いを、今までにない発想とともに超精密加工技術が達成に導き、Cal.1500 に比べ、面積で -50%、容積で -39% と世界一の超極小ムーブメントを

完成した。図 5.27 に示すのは、G720 と 1 円玉を比較したものであるが、如何に小さいかが分かる。

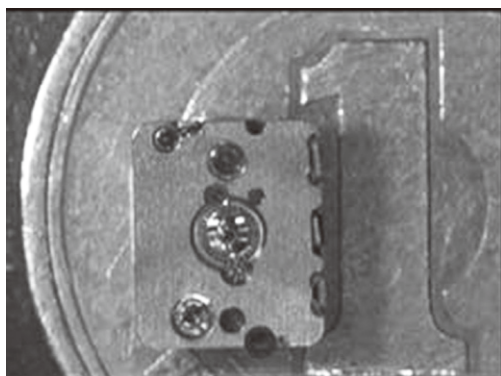


図 5.27 Cal.G720 と 1 円玉比較

(出典：シチズン時計)

2002 年 12 月、図 5.24 の左側のモデル（ワールドタイム 5 個時計）は、株式会社ワールドプレス社主催「ウォッチオブザイヤー2002」の、機能やデザイン等個性的なモデルに送られる“ユニークウォッチ部門”金賞を受賞¹⁷⁾し、2007 年世界最小ムーブメントとして、ギネスレコードに認定された。

5.8 日常生活を楽しく快適にするクロック

クォーツ化、電子化は、クロックの製品にも大きな影響を与えた。日常生活で時を知るとともに楽しさも味わえる時計、今までの時計では満足できない部分を補ってくれる時計等、クロックならではの商品を紹介する。クロックでの楽しさと言えば“からくり時計”が思い浮かぶが、本格からくり時計は高価格帯に属することが多い。電子化により、ちょっとした工夫でリーズナブルな価格で楽しく、快適にするクロックが多く生まれた。リズム時計工業より販売されたクロックを紹介する。

(1) リニアムーブメントでミラクル時計「クレヴィス」¹⁸⁾ (図 5.28 参照)

1987 年に、駆動方法が分からない不思議さを追求した時計を普及価格で販売する。従来、ミラクル時計は一品仕立てで、一部のマニア向けであったが、リニアムーブメントの使用によりデザイン展開が広がり、一般向けの商品を実現した。

「新しい生活感覚のあるデザイン時計の展開」を企画目標にスタートする。ムーブメント形状は、四角、円形ではなく、リニア形状で他機種との部品共通化を前提で設計を進めるが、設計の難易度は高くならざるを得なかった。図 5.29 にリニアムーブメントを示す。

ちょっとした工夫で楽しい不思議なクロックを完成できた背景には、クォーツ化等の電子技術が大きく影響していると考えられる。

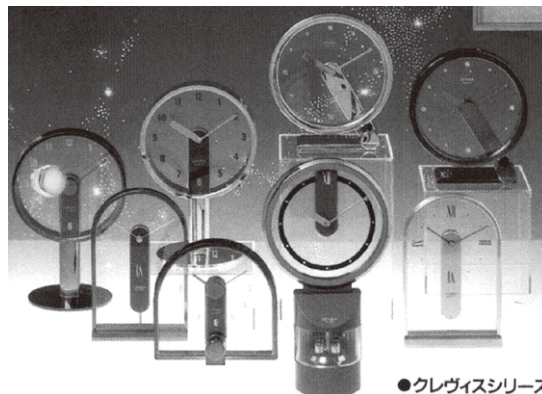


図 5.28 ミラクル時計「クレヴィス」¹⁸⁾

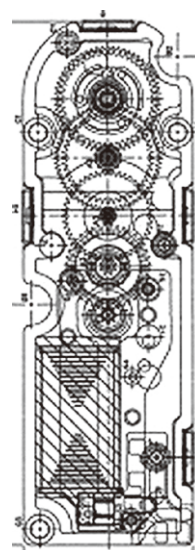


図 5.29 リニアムーブメント¹⁸⁾

(2) 夜眠る報時時計「フレグランス」、夜眠る秒針の電波時計「パルウエーブ」¹⁹⁾

(2)-1 夜眠る報時時計「フレグランス」

時刻を視覚ではなく、報時によって確認できる時計ができ、ながら仕事ができるようになり生活が便利になった。従来、夜間の報時停止は IC による固定時刻（例えば、23 時から翌日 5 時まで停止）の方法であった。しかし、ユーザーの生活（活動）状況により、「明るいのに報時しない、暗いのに報時する」という不都合を生じる場合があった。この「フレグランス」では、明暗センサーにより報時の作動、停止を自動で行う機能を搭載した。

(2)-2 夜眠る秒針の電波時計「パルウエーブ」

クォーツ時計の 1 秒ステップ音は、深夜の静寂中では気になるユーザーもいる。「パルウエーブ」は、

静かな夜を実現するため、周囲が暗くなると自動的に秒針を停止し、秒針のステップ音がしない「スリープステップ」機能を搭載した。

尚、この機能の付加により、秒針停止による省エネルギー化約20%ダウン、ステップモーターの作動ノイズを抑えることにより、電波受信時の感度アップを実現し使い勝手を向上した。

5.9 世界初6桁表示液晶デジタルクォーツ時計セイコー「クォーツ06LC」^{1) 7) 20)}

図5.30に示すように、時刻表示にはアナログ方式（針表示）、デジタル方式（数字表示）の2通りがある。高精度な水晶振動子の振動を、分周回路により1秒に1回の信号に変換し、電気機械変換器であるステップモーターを用いて針で時刻を表示するアナログ式と、LED（Light Emitting Diode：発光ダイオード）、LCD（Liquid Crystal Display：液晶ディスプレイ）で時刻表示するデジタル式である。LEDは、自発光であるので暗い場所では良く見えるが、消費電力が大きいためウオッチでの常時表示が不可能で、ボタンプッシュでの表示が必要になる。一方LCDは、受光型なのでバックライトを必要とするが、低消費電力、高耐久性で多機能表示に適している。したがって、実用性においてLCDが優れているため、デジタルクォーツ時計の主流はLCD表示へとになっていった。

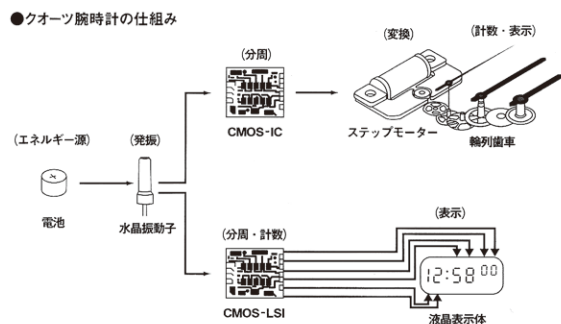


図 5.30 クォーツ時計の仕組み

（出典：セイコーエプソン）

LCDのデジタル表示が主流となるに伴い、各種製品の表示に液晶ディスプレイが使われるようになる。

1973年10月、第二精工舎と諏訪精工舎が共同開発して、前年12月に発表したプロトタイプをベースとした、世界初の液晶表示のクォーツ時計セイコー「クォーツ06LC」（以降06LCと呼ぶ）が販売された。電気機械変換器を持たない全電子化ウオッチである。図5.31に06LCの外観（右）とプロトタイプ（左）を示す。



（プロトタイプ）

図 5.31 セイコークォーツ06LC⁶⁾

06LCは、時間を正確に読み取れるデジタルの特徴を生かすため、秒の桁まで表示する世界初の6桁表示を採用した。液晶の種類は、TNFEM（Twisted Nematic Field Effect Mode：ねじれ電界効果）型と呼ばれ、腕時計用表示体の中でも、もっとも利点が多いとされている。腕時計表示体としては、平均使用電力が約1.5μW、表示電圧3～6Vと、発光ダイオードや他の液晶表示方式（DSM：Dynamic Scattering Mode）に比べて桁違いに低い。尚、液晶表示の詳細については、国立科学博物館産業技術史資料情報センターの技術系統化調査報告「液晶ディスプレイ発展の系統化調査」を参照いただきたい。

簡単に構造について説明する。図5.32に示すように、LCD素子は、2枚の透明電極を設けたガラス板の間に液晶を保持・シールし、必要に応じ電圧を与える。封止したガラスのセルを液晶パネルと呼ぶ。液晶パネルの両側に偏光板を置き、光の透過、不透過によりセグメント表示する。構造は比較的簡単ではあるが、透明電極の作成や液晶分子が90度ねじれながら並ぶためには、電極の表面に配向が必要で、ある種の被膜を付けラビング等で段を付ける。

< F.E方式構造断面図 >

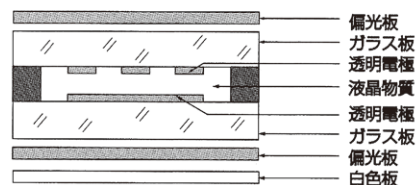


図 5.32 FE方式構造断面図⁶⁾

図5.33に7セグメントによる数字表示を示してある。日の字型した7つのセグメントに分割された電極があって、その組合せによって数字を表示する。ICの中の分配回路は、秒、分、時の信号を数字を表すために、先のセグメントに順序良く信号を送る。液晶表示

の駆動回路は、液晶の寿命を長持ちさせるほか、低電力を図るため、32Hzの交流駆動信号を出す。図 5.34 に液晶パネル透明電極パターンの一例を示す。電極は、(a) 上透明電極（セグメント用）と (b) 下透明電極（共通電極）で構成されており、上下の電極パターンの組合せ部分 (c) で表示される。



図 5.33 7 セグメントによる数字表示²⁰⁾

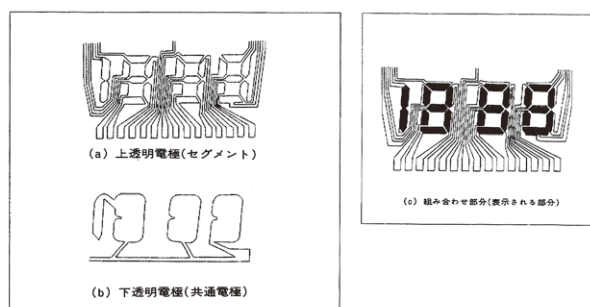


図 5.34 液晶パネル透明電極パターンの一例⁷⁾

06LC に使われた液晶表示体の TNFEM 型液晶は、ホフマン・ロッシェ (Hoffman La Roche) 社との特許契約に基づく自社製造である。水晶振動子の振動数は、32,768Hz とこれまでの振動数の倍にした。以後、この振動数が水晶腕時計の標準となって世界中に広がっていった。

06LC のムーブメント仕様は次の通りである。

ムーブメントサイズ : 29.2 × 26mm 厚み 8.3mm
 時間精度 : 月差 ± 10 秒
 電池寿命 : 2 年 (小型銀電池 1 個)
 ケースに初めて純チタン材を使用

液晶表示は、時刻情報以外にもいろいろな情報を数字データ表示できるため、多機能化ウォッチの進化には必要不可欠の技術となり、現在もデジタルクォーツ腕時計の代表的な表示方法である。

5.10 デジタルクォーツ腕時計の多機能化

デジタルクォーツ腕時計の出現により、全電子腕時計への夢と期待が大きくなった。全電子時計の大きな利点は、作動部品がないため機械式腕時計、アナログクォーツ腕時計のような耐久性や保油性に関する配慮は必要ないことである。時計の機能、例えば時刻機能、カレンダー機能等いろいろな機能をすべて

CMOS-IC の中に入れ込むことが可能となる。多くの機能を入れ込むと、必然的に CMOS-IC のサイズは大きくなるが、半導体プロセスの進歩とともに小さくなる。1970 年代後半から 1980 年代は、CMOS-IC の集積化にともない、腕時計の多機能化は進んだ。基本機能であるカレンダーにおいて、機械式のカレンダー装置では、偶数月の月末修正が必ず必要であったが、デジタルクォーツ腕時計では自動的にカレンダーが修正され、うるう年でも 2 月の月末修正を自動で行なうことが可能になった。クロノグラフ (時刻の指示の他に時間の計測もできる時計)、タイマー機能は、機械式の機構で構成すると構造的にも、コスト面でも負荷の大きい付加機能であるが、デジタル表示機能に置き換えると簡単に実用化できる。第 8 章で温度センサーを IC に作り込み、水晶振動子の温度特性を補正し、時間精度を年差レベルまで引き上げる技術について述べるが、高集積化した低電力の CMOS-IC を使い、時計内外部の情報を分析、処理し時計の付加価値を上げるという考え方をベースに、各種センサーによる環境情報 (温度、圧力、気圧、加速度、磁気 etc) を計測する腕時計も市場に現れる。腕時計用センサーは、低電力でなければ使えないが、時計用に適した小型、低電力センサーの完成によって、多くの小型家電製品への応用も図られている。デジタル表示は、時刻の視認性が高いため、幅広くスポーツ分野へ展開し、ランニング時にも携帯可能なように、エンジニアリングプラスチックによる軽い外装の時計、激しい動きにも耐える耐衝撃腕時計等高付加価値の製品がある。

デジタルクォーツ腕時計は、時計の基本機能である時間精度の追求より、デジタルしかできない、デジタルだからリーズナブルな価格でできる分野、すなわち高付加価値、多機能商品の開発へと向かった。本項では、デジタルクォーツ腕時計の高付加価値・多機能化技術を中心に述べる。

5.10.1 世界初の完全自動カレンダー付コンピュータ ウォッチ「カシオトロン」²¹⁾

1974 年カシオ計算機が、世界初の完全自動カレンダー付デジタル腕時計「カシオトロン」を発売した。(図 5.35 参照) 70 年代半ば、アナログ腕時計全盛の時にマイナーなデジタル腕時計をリリースするカシオのポリシーとは、卓上電卓で先んじたという自負と、新しい技術を用いることで生活を変革することにあった。カシオトロンは、電卓で蓄積した技術を生かし時計開発を手掛けた第 1 号の製品である。図 5.36 に、発売時の広告を示したが、コンピュータ・ウォッチと

謳っているところに、当時として画期的な商品であることを感じる。



図 5.35 カシオ「カシオトロン」
(出典：カシオ計算機)



図 5.36 カシオトロン発売時の広告
(出典：カシオ計算機)

「カシオトロン」は、アナログではできない計算をデジタルならできるという着想から生まれた。画期的な完全自動カレンダーを内蔵し、「大の月」「小の月」「うるう年における2月」を自動で判別し、月末修正を自動で行なう機能を有している。数字表示は4桁を採用し、常時、時、分、10秒カウント（秒フラッシュ）の3つの表示をする。日付ボタンを押すと、月、日、曜日が表示される。基本性能の時間精度も月差±5秒を保証し、他社デジタル腕時計の半値で市場投入された。これを機に、低価格製品を次々に投入し、デジタル腕時計のシェアを急激に伸ばしていった。

5.10.2 カシオ 超軽量 10 気圧 (100m) 防水ウオッチ W-100²²⁾

1980年8月、カシオ計算機は実用機能を追求し、日常生活に必要な防水機能を、さらに強化した防水

型高機能腕時計カシオ「超軽量 10 気圧防水ウオッチ W-100」を発売した。(図 5.37 参照) 大きな特徴は、高強度、耐熱性、耐薬品性に優れたエンジニアリングプラスチックを採用し軽量化、デザイン性の自由度、低価格、大量生産を可能にしたことである。初めてのプラスチックケースでの 10 気圧防水機能を確保するため、生産技術面で多くの創意工夫があった。

裏蓋構造には、防水性能の安定したスクリュー裏蓋を採用し、射出成形におけるスクリューねじ部の金型からの離型方式の技術を確立した。また、ガラスの圧入構造において、ガラス抜け力を向上するため、ケース内面のアンダーカット成形を実現した。10 気圧中でのボタン動作試験においても、試験機がなく手作業で繰り返し試験を実施した。現在は、試験方法、ノウハウを盛り込んだ試験機で行なっている。

プラスチック外装の防水性に関する設計ノウハウや試験方法は、その後の携帯電話やデジタルカメラ等の開発に活かされている。



図 5.37 カシオ「硬質樹脂製 10 気圧防水 W-100」
(出典：カシオ計算機)

5.10.3 カシオ 耐衝撃デジタルクォーツ腕時計「カシオ ヘビーデューティスポーツ DW-5000C」²³⁾

カシオ計算機が、1983年4月に発売した耐衝撃デジタルクォーツ腕時計「カシオ ヘビーデューティスポーツ DW-5000C」は、今や全世界で多くの人に知られている「G-SHOCK」の第1号である。(図 5.38 参照) 時計は精密機械、落とせば狂う、壊れると思われていた当時、アナログ、デジタル腕時計で「耐衝撃腕時計」と謳って販売されているものはなかった。技術者は、“壊れない腕時計”そんなエポックメイキングな製品を作りたいかった。



図 5.38 カシオ「G-SHOCK DW-5000C」

(出典：カシオ計算機)

開発者の伊部菊雄が次のように語った。「高校の入学祝で買ってもらった時計を落としてバラバラに壊した実体験から、少々乱暴に扱っても、キズをつけても、かえって味になるような、シンプルで丈夫な時計を作ってみよう²⁴⁾。」ケースの擦れ、傷が、勲章のような気持ちを抱かせてくれる言葉である。

構造をいかに完成させるか。デジタルクォーツ腕時計において保護すべき部位は、ムーブメント部（電池、液晶パネル、電子部品が集まったデジタル時計の心臓部）とガラス部である。ムーブメントを衝撃から守る構造確立の実験が始まる。ムーブメントの周辺を緩衝材、例えば、ゴム、ウレタン樹脂で保護し、ビルの3階の高さからの落下実験を繰り返して確認作業を行なった。しかし、ムーブメントの周囲を緩衝材で保護して5段階衝撃吸収構造を考え出したものの、ある程度までは耐えるが10m落下には耐えられなかった。

更に構造開発の必要に迫られ、悩んで公園でボールとボール遊びをする女の子を眺めていたとき、ボールの中に時計の心臓部が浮いている光景が浮かんだ。心臓部を浮かせた状態に近づける構造を見つけ出し、「5段階衝撃吸収構造+点接触の心臓部浮遊構造」を確立した。図 5.39 は、G-SHOCK の5段階衝撃吸収構造の分解図、図 5.40 は、5段階衝撃吸収構造および点接触の心臓部（電子部品のパッケージ）浮遊構造の断面図を示す。あらゆる衝撃に対し、いかに保護しているかがよく分かる。それまでの研究、実験から得られたノウハウを活かして、時計の外装面を、弾性ゴム素材を主材料にした保護パーツで覆う構造の実用新案登録を行なった。

心臓部をガードする5段階衝撃吸収構造

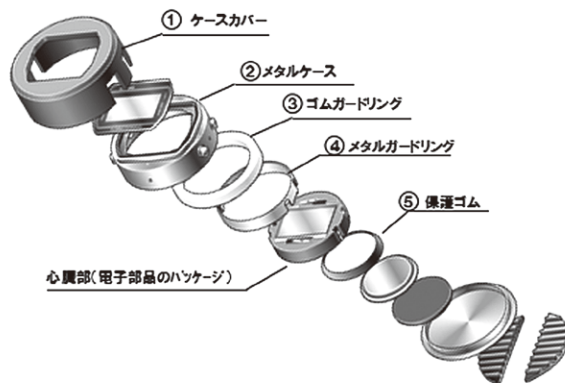
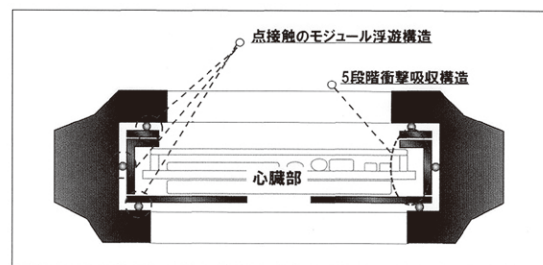


図 5.39 G-SHOCK 耐衝撃構造分解図

(出典：カシオ計算機)



『5段階衝撃吸収構造+点接触の心臓部浮遊構造』のG-SHOCK

図 5.40 G-SHOCK 5段階衝撃吸収構造+点接触の心臓部浮遊構造

(出典：カシオ計算機)

G-SHOCK のネーミングは、重力 (GRAVITY) の G と衝撃 (SHOCK) から造られた名称である。新しい発想と技術により商品化し市場投入された G-SHOCK であったが、薄くて軽い時計を求める日本市場では、芳しい成績を取められなかった。一方、アメリカではアウトドアファンを中心に、G-SHOCK の持つ実用性が評価され、徐々にシェアを伸ばしていった。契機となったのは、カシオがアメリカで行っていた G-SHOCK の CM だった。アイスホッケーの選手が、思いっきり G-SHOCK をショットしても壊れないという内容のものだったが、これが誇大広告か否かが話題となり、テレビ番組で実際に検証実験を行なったところ、全く壊れることなく動き続けた。これにより、全米で高い信頼を勝ち取った。その後、アメリカで空前のヒット商品となり、逆輸入される形で日本上陸すると、たちまち若者たちを虜にした。これは、G-SHOCK が誕生してから 8 年後の 1991 年のことである。

5.10.4 カシオ 気圧・高度・方位・温度が計測できる「カシオ トリプルセンサー ATC-1100」^{(25) (26) (27)}

1994年2月、カシオ計算機より圧力、方位、温度の3種類のセンサーを内蔵したアウトドア用腕時計「カシオ トリプルセンサー ATC-1100」が発売された。(図5.41 参照) それまでに、さまざまな用途に合わせて温度、圧力、磁気、光、加速度などのセンサーを用いて、必要とされる環境情報を提供する腕時計があったが、単独の環境情報を持つもので多くても2種類の仕様であった。「ATC-1100」は、一台で3種類のセンサーを搭載し、複数の環境情報を知るために開発された。温度、圧力、磁気センサーの概要と計測内容について述べる。



図 5.41 カシオ「トリプルセンサー ATC-1100」

(出典：カシオ計算機)

(1) 温度センサー部

温度センサーとしてサーミスタを使用している。サーミスタはマンガン、コバルト、ニッケルを主体とする金属酸化物を原料とし、焼結されたファインセラミックス半導体の感熱素子である。温度の変化に対して抵抗値が変化し、その抵抗値により温度を算出する。サーミスタのチップは、耐熱性および経年変化を考慮し、ガラスコーティングされている。

内蔵されたサーミスタにより、刻々と変化する温度を計測し、5分毎に表示する。

温度計測機能は以下の通りである。

- ・計測範囲：-10.0℃～60.0℃、表示範囲：-10.0℃～60.0℃
- ・表示単位：0.1℃
- ・常時温度計測（5分毎に表示）、温度調節機能
- ・センサー精度：計測精度 ±2℃以内（精度温度保証範囲 -10℃～60℃）

(2) 圧力センサー部

圧力センサーとしてピエゾ抵抗効果を利用した拡散型の半導体圧力センサーを使用している。半導体圧力センサーは、シリコン単結晶の表面にピエゾ抵抗が形成されており、裏面からエッチングによりシリコン基板自体を薄くしてダイヤフラムになっている。圧力を受けると、ダイヤフラムがたわみピエゾ抵抗に応力が加わる。この応力に比例してピエゾ抵抗の抵抗率が変化する。半導体圧力センサーは、ピエゾ抵抗でブリッジを構成し、定電流を印加することで圧力に比例した出力電圧を得る。

圧力センサーにより気圧計測ができ、自動的に2時間間隔で過去26時間分の気圧グラフを表示する。この気圧グラフで気圧が上昇傾向なら天気は回復に向かっており、逆に気圧が下降傾向にあれば悪天候に向かっていているというように、天気傾向を予測することができる。また、高度計測も可能で高度が高くなると圧力が低くなる関係から、圧力センサーで測定した気圧から高度を算出する。

気圧計測機能は以下の通りである。

- ・計測範囲：610～1100hpa、表示範囲：610～1100hpa
- ・表示単位：1hpa
- ・常時気圧計測、気圧調整機能
- ・センサー精度：表5.1による。

表 5.1 圧力センサーの精度

	高 度 計	気 圧 計
温度一定のとき	±(高度差×5% +30m)max	±(気圧差×5% +3hPa)max
温度変化による影響	10℃につき±100m	10℃につき±10hPa
備 考	国際標準大気を基準	

(3) 磁気センサー部

磁気センサーは、一般的に①フラックスゲート、②ホール素子、③MR (Magnetoresistance: 磁気抵抗) 素子の3種類が使われるが、ATC-1100にはMR素子が用いられている。磁気抵抗素子とは、固体の電気抵抗が磁界によって変化する現象を持つ素子で、化合物半導体であるInSb (アンチモン化インジウム) が使われる。可搬型の電子コンパスの多くが①を使用しているが、センサー自体の小型化が困難、交流駆動のため回路が必要になる等問題がある。②③は直流駆動が可能で素子も小型であるが、地磁気レベルの微弱磁界を検出するには磁気収束器が必要で、温度特性も悪いという欠点があった。カシオ計算機は、MR素子にバイアス磁界発生用コイルを組合わせた小型、低消費電流の磁気センサーを開発し、製品化に結び付けた。な

お、バイアス磁界発生用コイルの原理、効果についての詳細は、日本時計学会誌 No.149「MR 素子を用いた電子方位計ウオッチの開発」(1994 年)を参照いただきたい。

方位計測機能は以下の通りである。

- ・ 16 方位計測、方角計測範囲：0°～359°、方位補正機能付き
- ・ メモリー5 本（計測月日、時刻、進行方位、方角）
- ・ センサー精度：計測精度 $\pm 10^\circ$ 以内（精度保証温度範囲 10℃～40℃）
16 方位表示で $\pm 1/16$ 方位以内、方位グラフでは ± 2 目盛以内

5.11 新表示素子を用いたデジタルクォーツ腕時計

デジタル表示は、多機能情報を伝達する表示として最適な表示方法であるが、液晶表示にも弱点がある。それは、視線を液晶面に対して真正面からずらしていくと液晶表示が見にくくなる視野角依存性を持っていることである。時計メーカー各社は、そのような欠点をなくす新しい表示方法の模索を始める。表示品質向上のためいろいろな表示方式が開発され、セイコーは、ECD (Electrochromic Display)、EPD (Electrophoretic Display：電気泳動ディスプレイ) などを使った独創的なクォーツ腕時計を販売する。

5.11.1 世界初セイコー「E.C.D デジタルクォーツ F623」²⁸⁾ 29)

どの角度からも見える特徴を持つ ECD 表示の時計を、第二精工舎が 1980 年にセイコー「E.C.D デジタルクォーツ F623」(以降 F623 と呼ぶ)として開発し、セイコーより販売された。(図 5.42 参照)



図 5.42 ECD デジタルクォーツ F623²⁸⁾

EC (エレクトロクロミック) は、電気・化学変化によって生じる物質(酸化タンゲステン)の着色、脱色現象である。受光型の表示のため、周囲が明るいほど表示が良く見える。F623 の表示は、白地に青の鮮明な表示であり、LCD とは異なり、どの角度からでも見え、見栄えが非常に優れている。従来から ECD は知られていたが、応答が遅い、寿命が短い、駆動が難しいなど多くの課題があり実用化が遅れた。この課題を、EC 現象を生じる物質の膜形成と駆動方法に新しい技術を開発し実用化に結び付けた。

ECD の表示は、発色するまでの時間は 10msec 程度と短い、消去時間は 0.1 秒程度と比較的長い。メモリー効果があるので、1 回発色させれば、電圧を加えなくても 24 時間以上消えない利点を持つ。

F623 のムーブメント仕様は、次の通りである。

ムーブメントサイズ：外	径 27mm (24 × 24.3mm)
	厚み 3.59mm
時間精度	：月差 ± 15 秒
電池寿命	：約 2 年

5.11.2 世界初 EPD ウォッチ「SEIKO SPECTRUM」、 「SEIKO SPIRIT SMART S771」

書き換え可能な表示体として、電気泳動ディスプレイ技術を腕時計に応用し、従来にないデジタル腕時計を目指した。EPD は、表示保持性を有しており、非常に小さなバッテリーであっても長時間の表示閲覧と書き換えが可能になる。この EPD を用いた世界初の商品は、書き換え可能な電子ブックとして 2004 年にソニーより市場投入された。セイコーエプソン株式会社が開発し、セイコーが販売した液晶表示と同様の 7 セグメント表示とアクティブマトリックス表示の EPD ウォッチについて述べる。

(1) セイコー「SEIKO SPECTRUM」³⁰⁾

2006 年 1 月、セイコーが EPD を搭載した「SEIKO SPECTRUM」(以降 SPECTRUM と呼ぶ)を世界に先駆けて発売した。EPD の高コントラストならびに表示部の可撓性などの特徴を生かし、今までにないブレスレット型のウォッチを実現した。図 5.43 に SPECTRUM の外観(左)、外装ケースを含む断面図(右)、図 5.44 にその表示用ディスプレイの外観を示してある。SPECTRUM は、ブレスレットを考慮しており表示部を湾曲させて、腕にフィットするようなデザインとなっている。ディスプレイも、ケースに組込むときに表示部に歪が加わらないよう、湾曲させて製造している。

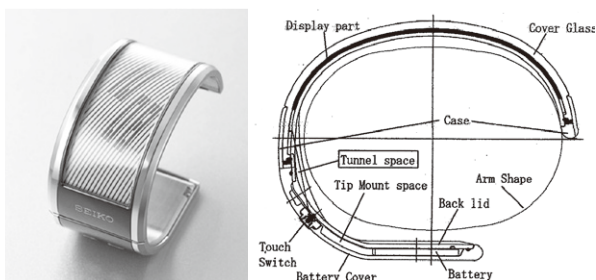


図 5.43 SEIKO SPECTRUM³⁰⁾

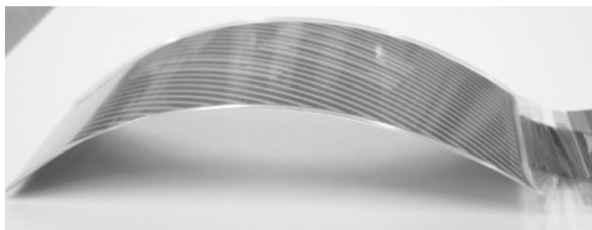


図 5.44 ディスプレイの外観³⁰⁾

表示材料には、E Ink Corporation 製のマイクロカプセル型電気泳動材料を用いている。図 5.45 は、EPD 表示体の断面図を示してある。図を基に簡単に動作の説明をする。マイクロカプセル型 EPD は、溶媒中に分散させた白黒二種類の顔料粒子を封入した、直径数十 μm 程度のマイクロカプセルを透明基板と駆動基板に挟み込んだ構造である。マイクロカプセル内部には、それぞれ極性が異なる白黒の顔料粒子（白はマイナス、黒はプラス）が溶媒とともに封入されており、表示面側に形成された ITO（Indium Tin Oxide）などの透明共通電極と、裏面側に形成されたセグメント電極の間に電位差を発生させることにより、白黒粒子を上下に移動させ表示動作を行なう。

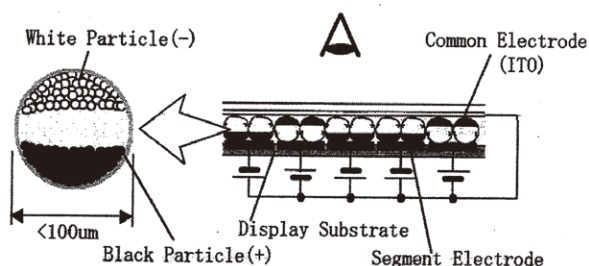


図 5.45 EPD 表示体の断面図³⁰⁾

例えば、表示面側である共通電極にプラス、セグメント電極にマイナスの電位差を与えた場合、マイナスに帯電された白粒子が表示面側に移動し、表示面側に集まった白色粒子の色を認識できる。EPD の表示保持性は、上下電極への電圧印加をなくした場合にも、白黒粒子がその場に留まり表示を継続するため、省電力での表示が可能である。特に、静止画を表示中は、

一定期間電力供給が不要である。表示動作そのものに関しても、EPD ならではの新しい表現を試みた。毎分の時刻が切り替わるたびに、アニメーション表現を取り入れ、表示動作に付加価値を加えた。

白黒粒子の顔料を直接視認するため白黒の品質が高く、印刷物を見るような高コントラストの表示が可能である。液晶表示に比較して、特に白色を高品位に表現でき、視野角依存性がないため、どの角度からも視認性が良い。ただし、EPD は完全反射型のディスプレイのため、バックライトの使用が不可能である。

(2) セイコー「SEIKO SPIRIT SMART S771」³¹⁾

EPD に高精細な TFT（Thin Film Transistor）基板を組合わせ、2010 年にアクティブマトリックス EPD ウォッチ（Cal.S770）、翌年派生機種（Cal.S771、図 5.46）を商品化した。アクティブマトリックス方式になることにより、図 5.47 に示すように、表示内容に自由度が広がり、いろいろな表現が可能になった。時刻表示においても、7 セグメントの表示より変形させた楽しい数字表現ができ、時刻表示のデザイン展開が大きく広がった。



図 5.46 SEIKO SPIRIT SMART (Cal.S771)³¹⁾



図 5.47 EPD での表示例

参考・引用文献

- 1) セイコーエプソン株式会社：「腕時計の歴史を変えた世界初のクォーツウォッチ」2004年2月発行
- 2) 株式会社ワールドフォトプレス：「世界の腕時計 QUARTZ クォーツウォッチの開発秘話 - 基本原理の考案から商品化まで」No.45 pp.116-119 2000年6月20日
- 3) 精工舎 社内報：「せいこう」p.4 1959年12月号
- 4) 株式会社服部時計店：「SEIKO NEWS 精工舎水晶時計の紹介」pp.10-11 1960年1月号
- 5) 精工舎 社内報：「せいこう」新製品技術解説「日差±1秒以内の高精度」1968年6月号
- 6) セイコーエプソン株式会社：「年表で読むセイコーエプソン [1881～2000年]」p.47, 64, 65 2001年2月発行
- 7) 「SEIKO 時計の戦後史」編集委員会：「SEIKO 時計の戦後史」pp.149-162 1996年3月28日発行
- 8) グッズプレス編集部特別編集：「THE SEIKO BOOK 時の革新者－セイコー腕時計の軌跡－」pp.88-99 1999年5月1日発行
- 9) 相沢進：「セイコークリスタルクロノメーターについて」日本時計学会誌 No.30 pp.1-10 1964年6月
- 10) 小口昭：「水晶腕時計の現状と展望」日本時計学会誌 No.83 pp.4-16 1977年12月
- 11) 久保田浩司：「セイコークォーツ「アストロン」IEEE マイルストーン受賞」マイクロメカトロニクス Vol.49 No.192 pp.61-62 2005年6月
- 12) 株式会社第二精工舎 社内報：水晶発振式電子腕時計「SEIKO QUARTZ 36SQC」No.179 pp.10-19 1970年11月号
- 13) 株式会社服部時計店：「SEIKO NEWS」水晶発振式電子腕時計 SEIKO クォーツ 36SQC 発売 1970年10月
- 14) リクルート：週刊就職情報「“浮気”の仕事が“本気”になってしまった」pp.82-85
- 15) シチズン時計株式会社：シチズンライフ「商品・技術が語るものづくりのこころ」2002年10号
- 16) シチズン時計株式会社：G72 広報資料
- 17) シチズン時計株式会社 時計資料館：社史腕時計台帳 No.02-16「G720-05A」
- 18) リズム時計工業株式会社：社内資料「リニアムーブメント商品展開」
- 19) リズム時計工業株式会社：内部資料
- 20) 諏訪精工舎：「液晶表示式水晶時計 セイコークォーツ 06LC」日本時計学会誌 No.72 pp.70-76 1974年12月
- 21) カシオ計算機株式会社：「カシオトロン」報道関係者向け新製品説明資料 1974年10月7日
- 22) カシオ計算機株式会社：「超軽量 10 気圧 (100m) 防水ウォッチ」報道関係者向け新製品説明資料 1980年7月31日
- 23) カシオ計算機株式会社：「カシオ ヘビーデューティスポーツ」報道関係者向け新製品説明資料 1983年4月7日
- 24) カシオ計算機株式会社：内部資料
- 25) カシオ計算機株式会社：「気圧 / 高度・方位・温度が計測できる 3 種類のセンサーを内蔵した腕時計」報道関係者向け新製品説明資料 1994年1月17日
- 26) 奥蘭祥彦, 中鉢治幸：「トリプルセンサウォッチの開発」日本時計学会誌 No.163 1997年12月
- 27) 中鉢治幸, 奥蘭祥彦, 小野治夫：「MR 素子を用いた電子方位計ウォッチの開発」日本時計学会誌 No.149 1994年6月
- 28) 株式会社第二精工舎 社内報：SEIKO JOURNAL ECD デジタルを世界で初めて実用化 1980年3月
- 29) 株式会社第二精工舎：新製品説明書「E.C.D デジタルクォーツ F623」1981年10月
- 30) 石井潤一郎, 上林葉月, 小須田司：「電気泳動ディスプレイ搭載プレスレットウォッチの開発」マイクロメカトロニクス Vol.52, No.198 pp.36-44 2008年6月
- 31) 村山哲朗, 小越剛, 関重彰：「アクティブマトリクス EPD ウォッチの開発」マイクロメカトロニクス Vol.57, No.208 pp.26-32 2013年6月

6 | アナログクォーツ腕時計の進化を支えた技術

クォーツ「アストロン」が市場にデビューしてから、急速にクォーツ化が進んだ。クォーツ腕時計の進化は、小さく、薄く、精度よくという時計本来の性能を追求することから始まった。特に、小型、薄型化は、CMOS-ICの普及、小型酸化銀電池の性能向上とともに進んだ。時計の小型、薄型化と並行して、時計の基本性能である高精度化への技術開発もスタートする。

クォーツ腕時計は、アナログクォーツの主要構成部である、ステップモーターの改良による低消費電力化、水晶振動子の小型化、小型酸化銀電池の高エネルギー密度化、エンジニアリングプラスチックによる部品の軽量化と複雑部品の製造など加工技術を含めて大きく変化している。

6.1 ステップモーターの低消費電力化技術

クォーツ腕時計の当初は、電池寿命1年を可能にするレベルであったが、以下に述べる技術開発により、電池寿命2~3年、或いは5年を可能にした。

クォーツ腕時計の普及に当たって、男持ちから女持ちサイズまで可能にするためには、小さな電池でも最低1年或いは2年動かすことが必要である。小型ステップモーターに要求されることは以下の通りである。

- ・モーターの安定性を確保し、消費電力を下げること。
 - ・小型化しても効率が良いこと。
 - ・調整工程をなくし安定したモーターであること。
- (クォーツアストロン 35SQ のステップモーターは、白金コバルト磁石の6極ローター、ステーターにはステーターとローターの平面隙間(ギャップ)を調整し、ローターのコギングトルク調整を行う調整機構を設けて、ローターの挙動を安定させ、出力トルク、消費電流を規格に追い込んだ。この調整作業は、技能と時間を要する重要な工程であった。)

6.1.1 ステップモーターの改良

小型化、効率を高めるためには、構成している部品の加工精度を上げることが必要になる。例えば、ローターの外径が小さくなり加工の公差が同じであれば、公差の影響は大きくなる。したがって、ローター、ステーターの加工精度が出るような加工方法、工程を開発することが重要となる。

(1) ローターの改良¹⁾

一般的にステップモーターは、動作上多極の方が有利であるといわれるが、ウォッチ用の小型モーターは、非常に小さいため2極の着磁のし易さ、また、異方性の強力な永久磁石が使えるメリットを活かしている。一方、2極のデメリットとして、1ステップ当り180°回転することになり、ステップ周期を短くした場合ローター自身の慣性モーメントによって回転が乱れやすい。

ローターの半径： r 厚さ： t 磁石の密度： ρ
円柱の慣性モーメント： I とすると、 $I = \pi \rho t r^4 / 2$ となり、ローター厚みおよび密度に比例し、ローターの径の4乗に比例する。したがって、ローターは厚みより径をできる限り小さく抑える形状が良い。ローターの加工性、磁石の磁束量を考え、磁石の最大エネルギー積 $B \cdot H_{max}$ が大きい、強力な異方性の希土類磁石(サマリウム・コバルト系)を使いローター体積を小さくしている。使われている磁石の最大エネルギー積 $B \cdot H_{max}$ は、当初は約10MGOe程度であったが、27~30MGOe ぐらいまで上がって来ている。

(2) 2極ステップモーターのステーターの改良¹⁾

2極ステップモーターの改良は、調整工程を廃止しモーター性能をより安定させるための技術開発である。アストロン 35SQ のステップモーターで説明したように、ステーターとローターの平面隙間を調整し最適な条件に設定することが、モーター性能を確保する重要項目である。2極ステップモーターでも同様に、駆動信号により常に決まった方向に回転するように、ローターの静止位置を決定する必要がある。当初は、ステーターの固定位置を、ローターの静止位置とコギングトルクを調整しながら決めていた。ステーターの加工は、プレス抜きで行うが、機械加工には加工ばらつきが必ず発生する。ステーターの加工公差のばらつきの影響を最小限にし、調整工程を廃止するため、調整タイプステーター、無調整2体ステーター、ノッチ式1体ステーターと多くの無調整化と安定化に向けた技術開発を行なった。無調整化に向けたステーターの安定化技術を中心に述べる。

①調整タイプのステーター¹⁾

図6.1に示すのは、ステーターの位置をステーター調整用偏心ピンでずらす方式の図である。ステーターの内円をローターの軸と同心円の状態にしておく、

ローターの静止位置は定まらずコイルからステーターに磁束を流しても、ローターの回転方向は定まらない。従って、何らかの方法でローターの磁極の向きを、コイルから供給される磁束の方向とわずかにずらせてローターの回転方向を決める必要がある。

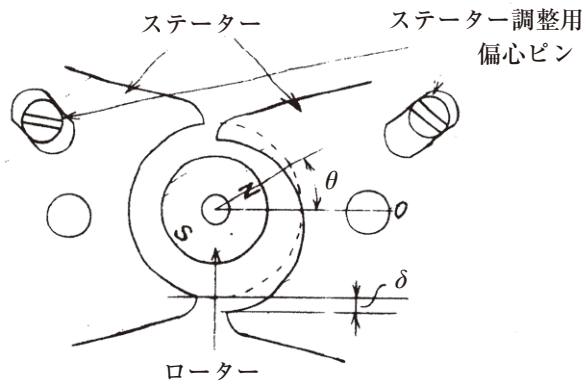


図 6.1 ステーターずらし方式¹⁾

ずらす方法としては、機械的または磁氣的にずらす方法があるが、磁氣的にずらす方法が一般的である。図では、右側のステーターをステーター調整用偏心ピンで、ローター軸と同心円から少しずらせて（図 6.1 では、角度 θ 分）磁氣的なアンバランスを生じさせ、ローターの回転方向を決めている。図 6.2 は、ローターを回転させた時の磁気ポテンシャルエネルギー E の変化を、ステーターのずらし量 $\delta = 0 \sim 6$ ($\times 1/100\text{mm}$) について磁場解析で求めたグラフである。 δ を大きくしていくとローターの静止位置（磁気ポテンシャルカーブの極小点）が少しずつ移動するとともに、磁気エネルギー差 ΔE （磁気ポテンシャルカーブの極小点と極大点の差、コギングトルクとも呼ぶ）が大きくなる。ウオッチ用モーターとしては、このエネルギー差 ΔE を一定の量に調整することが最も重要なポイントである。

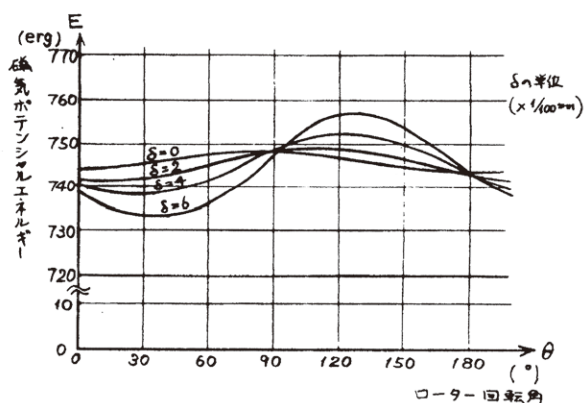


図 6.2 ローター回転角と磁気ポテンシャルエネルギー¹⁾

②無調整 2 体ステーター

図 6.3 に示すのは、無調整を可能にした 2 体ステーターの構造を示す。加工工程について説明すると、2 体ステーターはステーター体とステーター下座の 2 体で構成されている。ステーター体は、図の極細部○部が繋がった状態でプレス加工される。ローターが入る中心穴は、シェービング加工され全剪断の面状態に仕上がっている。極細部には、調整タイプステーターで述べたように、ローターの静止位置が決まるように、ローター入り部内周に段差 δ を設けてある。ステーター下座は、ステンレス材で作られておりステーターと溶接によって接合されている。溶接後、刃の幅 0.2mm のカッターで極細部を切断し、高透磁率材のステーターを左右に分断する。この加工時に極細部に変形等が発生しないよう、また穴の真円度を規格に入れるよう配慮している。切断後、高透磁率材の熱処理を行ない透磁率、飽和磁束密度等モーター性能に必要な規格値に入れ込む。

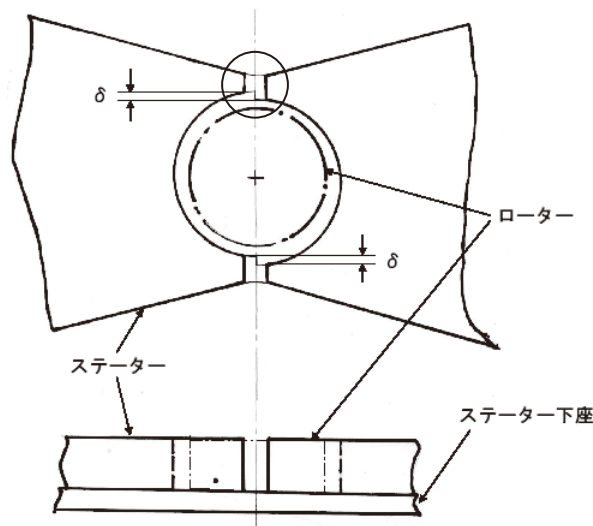


図 6.3 無調整 2 体ステーター

作り込みが出来ればムーブメントへの組込みによって、調整なしに必要なモーター性能を得られることになるが、極細部の段差 δ 、ステーター中心穴の偏心量等基準寸法の決定には、サンプルによるモーター試験が必要である。試験サンプルは、段差 δ の水準、偏心量的水準を作成し、各々の組合せ試験を繰り返す。

③ノッチ式および 1 体ステーター¹⁾

①で説明したステーターずらし式では、ステーターのわずかな形状ばらつきによって、磁気エネルギー差 ΔE に変動を来たした。図 6.4 は、ステーター形状のばらつきによる影響を極力抑え、加工能力、公差も配慮できるノッチ式のステーターを示す。ローター軸に

関して点対称に凹部（ノッチ）を設け、ローターの回転方向決めを行なう方式である。図 6.5 のグラフは、ステーターずらし式の δ 量およびノッチ深さ d の変化と磁気エネルギー差 ΔE の関係を示している。

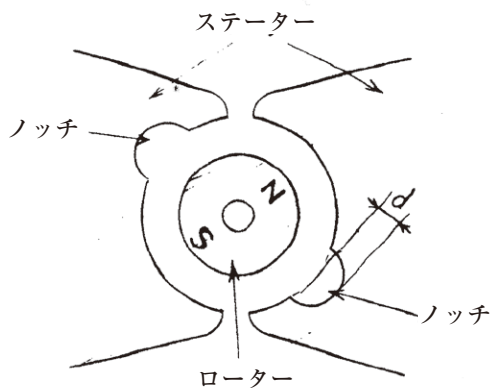


図 6.4 ノッチ式ステーター¹⁾

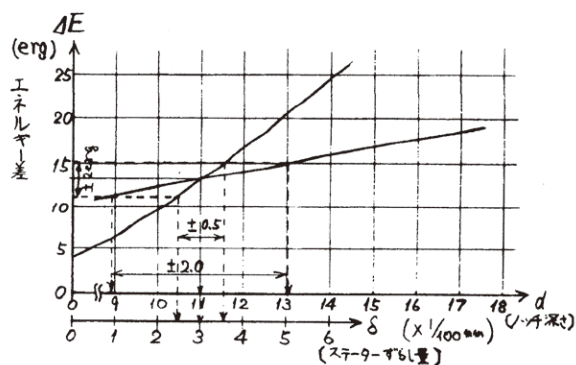


図 6.5 ステーターずらし量 δ およびノッチ深さ d と磁気エネルギー差 ΔE ¹⁾

例えば、ウォッチ用モーターとして所定の性能を満足する ΔE (図では 13erg) から $\pm 2\text{erg}$ の範囲に収める必要がある。ステーターずらし式の場合、グラフの点線で示すように $\pm 2\text{erg}$ に対して、ずらし量 δ の許容範囲はわずかに ± 0.5 ($\times 1/100\text{mm}$) となる。このような厳しい公差での加工・調整は非常に難しい。

一方、ノッチ式の場合、ノッチ深さ d の許容範囲は ± 2 ($\times 1/100\text{mm}$) と比較的広く、ステーター加工時ノッチ深さ d をこの加工公差範囲に抑えることは容易である。このように、プレス加工能力に合った、モーター性能に必要な磁気エネルギー差 ΔE の安定したステーター形状を決定した。しかし、ローター磁石とステーターの中心穴の偏心の影響も無視できず、偏心量が大きいと 1 ステップ毎モーター性能に変化が発生する。無調整化の実現のためには、以下のことが要求される。

- ・ステーター中心穴とローター軸の偏心を抑える。
- ・ステーターの中心穴の形状精度が良いこと。
- ・簡単に組立でき、所定の性能が得られること。

この要求を解決するため、図 6.6 に示すような、左右繋がった 1 体ステーターを開発した。ローターの回転は、左右のステーター間に大きな磁気抵抗部分を作り、ステーター中心穴内に多くの漏洩磁束が流れることによる。2 体ステーターは、漏洩磁束を迅速に効率よく発生させるのが狙いである。したがって、1 体ステーターが必要とする条件は、2 体ステーターと同様に動作するために、ステーターの左右繋がっている部分の断面積を極力小さくし磁気抵抗を上げ、しかもある程度の機械的強度を持っていることが必要である。この 1 体ステーターでの磁束の流れを解析すると、コイルからの磁束が微少のとき、最小幅部分（左右ステーターの繋がっている部分）でも通常に磁束が通過し磁気飽和は起こらない。しかし、磁束が多くなり最小幅部分の磁束密度が、ステーター材料の飽和磁束密度を超え、磁気飽和状態になると 2 体の場合と同様ステーター中心穴部に多くの漏洩磁束を生じ、ローターに回転力を与える。

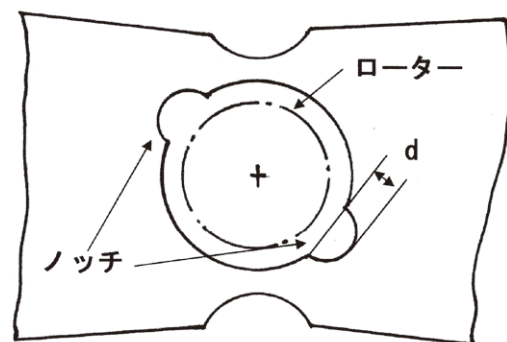


図 6.6 1 体ステーター

このことはコイルのインダクタンスにも現われる。図 6.7 は、2 体ステーターおよび 1 体ステーターのコイルに電流を流した時の電流の時間的变化を示したものである。2 体ステーターの場合あるインダクタンス L に対し、1 体ステーターは最初のある時間 T_s だけ電流変化が小さい。最初のインダクタンス L_1 は大きく、その後ほぼ 2 体ステーターのインダクタンス L と同じぐらいのインダクタンス L_2 になっている。1 体ステーターでは、コイルに電流を流すとき、ステーターへの供給磁束が増えていく過程でインダクタンスが変化する。前述のように、1 体ステーターの最小幅部分での磁気飽和によって、透磁率が空気に近くなり磁気回路抵抗が増加し 2 体ステーターと同じ状態に

なったためである。

最小幅部分が飽和するまでの時間 T_s に流れるコイル電流は、ローターの回転に何ら寄与しないので、この時間はできる限り短い方がモーター性能上有利であるが、開発したモーターでは $T_s=500\mu\text{sec}$ 以下と短く、消費されるエネルギーは極めて小さい。

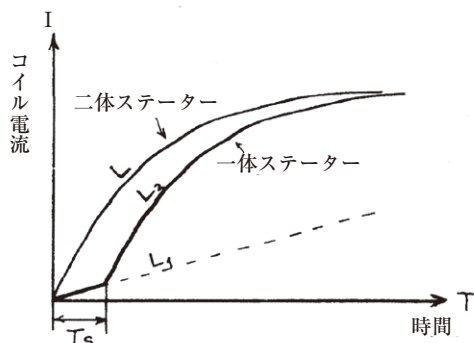


図 6.7 2 体ステーター、1 体ステーターのコイルに流れる電流の変化¹⁾

6.1.2 ステップモーターの駆動方式の改良

この無調整化に向けて開発した 1 体ステーターは、多くの機種に搭載されクォーツ腕時計の普及に多に貢献した。その後、生産技術の向上に伴いステーター寸法公差も追い込めるようになり、アナログクォーツ腕時計用ステップモーターの改良は、更なる低消費電力化へと加速する。第二精工舎は、1978 年ステップモーターの駆動に制御機能を盛り込む画期的な駆動方式を取り入れ、従来の約半減の低消費電力化を図った製品、Cal.59 系を市場投入する。その駆動方式の特徴である、適応制御システムの概要、ローターの回転検出の原理、適応制御システムによる低消費電力の効果について述べる。尚、詳細については、日本時計学会誌 No.92 (1980 年 3 月)「ウォッチ用ステップモーターにおける適応制御の研究」を参照願いたい。

(1) 適応制御駆動システムの概要²⁾

適応制御を実行するために、駆動パルスとして通常駆動パルス P_1 と補正駆動パルス P_2 を用意する。通常駆動パルス P_1 は、1 秒毎にステップモーターを駆動するためのパルスであり、このパルス幅は自動的に変化する。補正駆動パルス P_2 は、通常駆動パルス P_1 でローターが回転できなかったときのみ出力され、時計仕様の最大出力トルクを決定するパルスである。通常駆動パルスの P_1 の出力トルクは、輪列部の摩擦負荷など微小トルクで十分である。

この P_1 と P_2 の駆動タイミングを図 6.8 に示す。このタイミングで分かるように、 P_1 でローターが回転

しなかった場合には、破線で示す P_2 が同じ方向より出力され回転が終了する。図にある IT および DT の詳細は、後述するが次の通りである。

IT ; Idling Time は P_1 印加後検出動作が行われるまでの時間

DT ; Detecting Time はローターの回転検出を行う時間

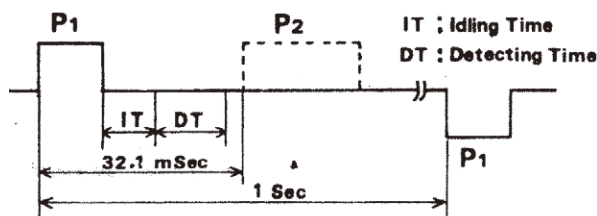


図 6.8 駆動タイミング²⁾

更に、適応制御システムには 2 つのルールによってステップモーターを駆動し、低消費電力を達成している。

ルール 1 : あるパルス幅 (P_1) でステップモーターを駆動した直後、ローターが回転したかどうか検出する。このとき検出回路が、非回転と判断した場合には、直ちに時計仕様の最悪条件のときでも回転しうる出力の出るパルス幅 (P_2) で再度駆動し、次の 1 秒後のパルス幅を少し長目に設定する。

ルール 2 : N 秒毎 (例えば 60 秒) に通常パルス P_1 を強制的に短くする。

ルール 1 とルール 2 により通常パルス P_1 が変化する様子を図 6.9 に示す。このフローチャートの流れを説明する。

ここで、

$$P_0=2.4\text{msec} \quad \Delta P=0.24\text{msec} \quad P_2=6.8\text{msec} \\ n=0,1,\dots,6 \quad N=0,1,\dots,60 \quad \text{とする。}$$

初期設定で $n=0$ 、 $N=0$ とし、通常パルス P_1 のパルス幅を計算する。 $P_1=P_0+n \cdot \Delta P$ により $P_1=P_0=2.4\text{msec}$ となり、 $P_1=2.4\text{msec}$ の駆動パルスでステップモーターを駆動する。ここで、ローターが非回転だったとするとルール 1 により、 $P_2=6.8\text{msec}$ のパルスが再度印加され、ローターは回転する。このとき $n=1$ とする。次にルール 2 により $N=1$ がセットされる。

1 秒後の通常駆動パルスは $P_1=P_0+1 \times \Delta P=2.7\text{msec}$ となる。2.7msec で回転したとすると、ルール 1 による変化はなく、ルール 2 で $N=2$ とする。N は 60 にはなっていないので、 n および N とも変化しない。この流れを 60 回繰り返すと、ルール 2 により $N=0$ となり n の値は 1 だけ減ずる。この次の P_1 パルスは

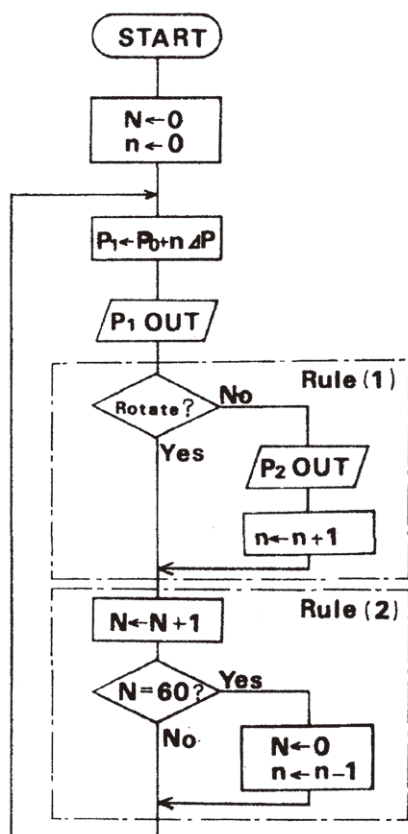


図 6.9 制御フローチャート²⁾

0.24msec 短くなる。この動作により、ステップモーターに対する機械負荷が大きくなると自動的に通常駆動パルス P_1 は長くなり、機械負荷が小さくなると自動的に通常駆動パルス P_1 は短くなる。

この方式では、60 回回転が繰り返された場合、通常駆動パルス P_1 を ΔP_1 段ずつ短くする適応制御であるが、回転している場合、設定された 1 番短い駆動パルス P_0 に即減ずる制御もある。

(2) ローターの回転検出の原理

図 6.10 は、ローターとステーターの位置関係を示す。図 (A) はローターが静止している状態であり、ローターの磁極は、ステーターのノッチに対し約 90° の位置に静止する。通常駆動パルス P_1 で駆動するとステーターは、図 (B) に示すように磁化し、ローターの各磁極と反発し合いローターは反時計方向に回転する。通常駆動パルス P_1 の印加後は、ローターの運動によりコイルに起電力が発生する。

このとき、検出回路がコイルの両端を短絡し、ローターに制動力が働くよう構成される。ローターに制動力が働く場合は次の通りである。

- ・回転のとき：図 (C) に示す点 X_1 から X_1' まで磁極が通過する区間

- ・非回転のとき：図 (D) に示す X_2 から X_2' まで磁極が通過する区間

回転のときローターの磁極は X_1 から X_1' の間に最も大きな誘起電圧を発生する場所であるステーターの両極間（可飽和部）を通過しないので、コイルの両端を短絡してもあまり制動力が掛からない。そのため X_1' 後のローター振動の振幅は大きく誘起電圧も大きい。

非回転でのローター磁極は、 X_2 から X_2' の間に最も誘起電圧の大きくなるステーターの可飽和部を通過するので誘起電圧が大きく、ローターに大きな制動力が加わる。そのため X 後のローター振動の振幅は小さく、すぐ安定点に静止する。このようにローターが回転した場合と、非回転の場合では検出時間（DT）での誘起電圧が異なることを利用して、ローターの回転検出が可能となる。尚、非回転での大きな誘起電圧を検出しないようアイドルリングタイム（IT）を設けている。

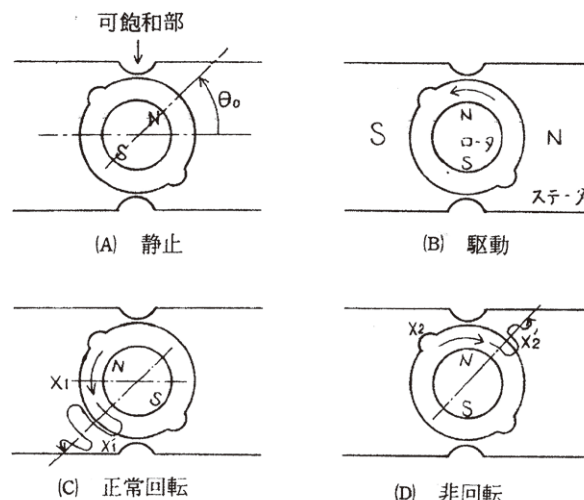


図 6.10 ローターとステーターの位置関係²⁾

(3) 適応制御システムによる低消費電力化の効果

表 6.1 に、3 針 Day/Date 仕様の時計を 1 日分、86,400 ステップ駆動したときの通常駆動パルス P_1 のパルス幅発生状況を示す。

この時計の平均消費電流は、それぞれの P_1 パルス幅での消費電流にそのパルスの発生確率（P）を掛けて、総和をとった値 $0.781\mu\text{A}$ に、補正駆動パルス P_2 の消費電流にその発生確率を掛けた値を加えた $0.813\mu\text{A}$ となる。この時計の最大出力トルクは、補正駆動パルス P_2 の出力トルク $4.2\text{g}\cdot\text{cm}$ であり、従来の固定パルス方式で分針トルク $T_2^{\#}=4.2\text{g}\cdot\text{cm}$ を得るには、常に通常パルス幅 6.8msec 、平均消費電流 $1.9\mu\text{A}$ を必要とした。したがって、適応制御システムの駆動方式を用いることにより、消費電流を半分以下に減少した。

表 6.1 3 針 Day/Date 仕様の 1 日分のパルス幅発生²⁾

パルス幅 (m Sec)	出力トルク T_z^* (g·cm)	消費電流 i (μA)	出現回数 N (回)	確率 p $N/86400$	$i \times p$ (μA)
2.4	0	—	0	0.	0.
2.7	0	0.75	1,380	0.016	0.012
2.9	0.3	0.78	80,212	0.928	0.724
3.2	0.7	0.82	4,778	0.055	0.045
3.4	1.2	0.85	30	0.0003	0.0003
3.7	1.4	0.88	0	0.	0.
3.9	1.7	0.93	0	0.	0.
P_1 計	—	—	86,400	1.000	0.781
P_2	6.8	4.2	1,440	0.017	0.032
総合消費電流					0.813

このシステムを初めて搭載した Cal.59 のムーブメント仕様は以下の通りである。

ムーブメントサイズ：

直径 22.5mm (3 時 -9 時 20.0mm)

厚み 1.98mm (電池部 2.22mm)

時間精度：月差 ± 15 秒以内

使用電池サイズ：直径 7.9mm 厚み 2.0mm

電池寿命：約 2 年

更に低消費電力化を図るためには、ローターの静止トルク（コギングトルク）を小さくし、ローター駆動時の反発力を小さくしなければならない。ローターのコギングトルクをさらに小さくすると、量産時の部品の加工精度、材料特性によるコギングトルクのばらつきにより、モーター性能が影響を受け易くなる。このようにコギングトルクを小さくしたモーターをできるだけ安定させる駆動パルスの開発を進める³⁾。その効果について、従来の固定パルス駆動で説明する。

図 6.11 は、従来の固定パルス（パルス幅 7.3msec）で駆動した、実線（コギングトルクが大きい）；磁気ポテンシャルエネルギー差 $\Delta E = 3.5 \times 10^{-7}$ (Joul)、破線（コギングトルクが小さい）； $\Delta E = 2.3 \times 10^{-7}$ (Joul) のローターの挙動をシミュレートした図である。図 (a) の実線では、 $t = 35\text{msec}$ でローターは 180° 回転した位置に落ち着く。しかし、破線では $t = 6\text{msec}$ でローターは 180° 以上回転しているにもかかわらず、 $t = 35\text{msec}$ ではパルス入力前の位置に戻ろうとしている。図の (b) は、モーターの駆動電流波形である。同じ駆動パルス幅でも磁気ポテンシャルエネルギー差が変わると、駆動後のローターの安定位置が異なる。

図 6.12 に示すのは、新しい駆動パルスで P_w の後に間欠的（チョップ式）パルスを付加した例であり、 $P_w = 7.3\text{msec}$ 、 $P_{rt} = 0.49\text{msec}$ 、 $P_{ro} = 0.49\text{msec}$ の仕様である。

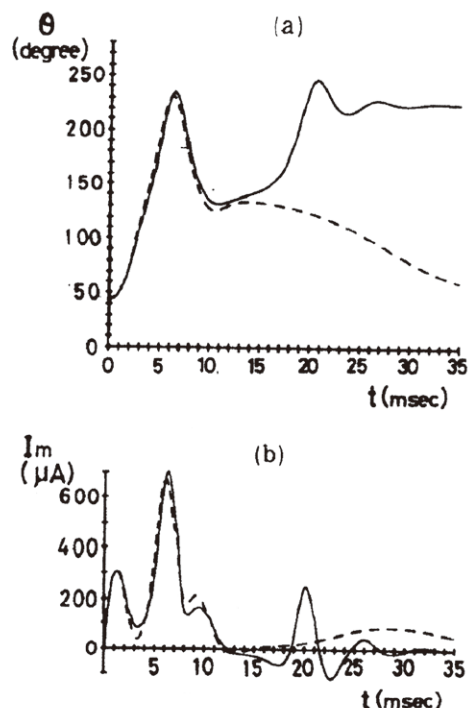


図 6.11 磁気ポテンシャルエネルギーの違いによるローターの挙動³⁾

図 6.13 は、図 6.11 の破線と同じ磁気ポテンシャルエネルギー差のステップモーターを、新駆動パルスで駆動した場合のローターの挙動を示す。図 6.11 (a) 破線の場合、モーター駆動パルス P_w が切れた後、モーター駆動電流が急激に小さくなり、ローター慣性による回転力（逆回転方向）が磁気ポテンシャルエネルギー差に勝り、ローターは初期位置に戻る。図 6.13 の場合は、パルス P_w が切れた後にチョップ式パルスが印加され、かつコイルのインダクタンスによってモーター駆動電流は平滑化されている。このときの磁気ポテンシャルエネルギー差は大きく、ローターの慣性による回転力では磁気ポテンシャルエネルギーの最大点を越えられない。また、この間にローターの回転角速度が急激に小さくなり、ローターの慣性による回転力も小さくなるので、その後の後戻り現象も起こらない。

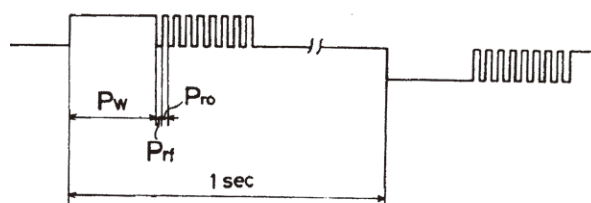


図 6.12 新駆動パルス³⁾

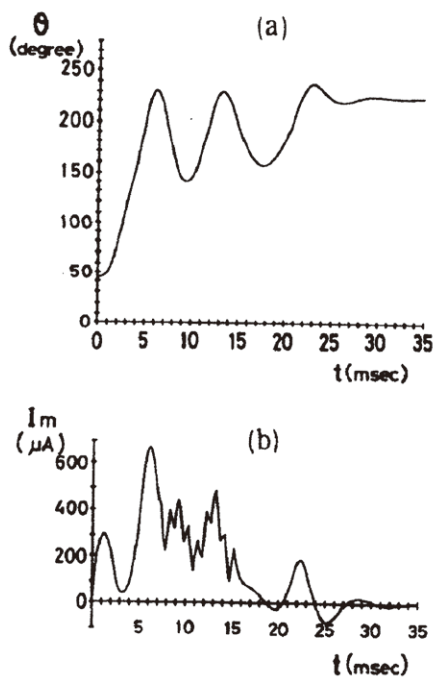


図 6.13 新駆動パルスによるローターの挙動³⁾

ローターの回転安定性に影響を与える要因として、ローター磁気ポテンシャルエネルギー差（コギングトルク）、ローターの慣性モーメント、ダンピング抵抗（油の粘性等）、負荷トルク、駆動電圧等がある。新駆動パルスでは、これらの要因の変化に対して従来の駆動パルスより優れた動作安定性が得られる。

前述した適応制御システムのモーターは、通常時の駆動パルスを小さくして消費電流を下げるため、コギングトルクを固定パルスより小さく設定する必要がある、新駆動パルスの効果は非常に大きい。

図 6.14 に示すのは、前述の適応制御システムに新駆動パルスを搭載した P_1 と P_2 パルスのタイミング図である。図に示すように、適応制御システムのステップモーターの最大出力トルクを発生させる駆動パルス P_2 の後に、チョップ式のパルスを付加したものである。

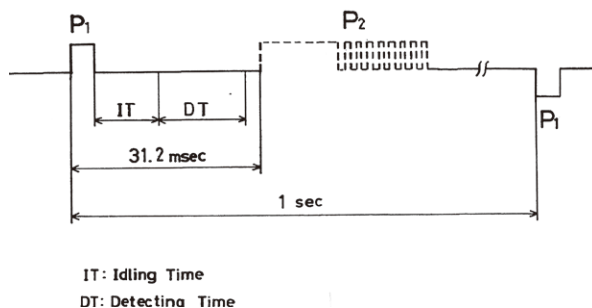


図 6.14 適応制御システムへの新駆動パルス搭載³⁾

低消費電力化に向けた、ステップモーターの駆動方式の考え方である“通常時最小限の駆動力で動かし、大きな駆動が必要な時（カレンダー送り、外乱による衝撃時）大きな駆動エネルギーを与える”技術の導入は、時計メーカー各社が採用している。

6.2 生産技術による小型化、高機能化技術

クォーツ腕時計の中で、最も消費電力が大きいステップモーターの低消費電力化について述べたが、小型薄型化を可能にするためには、電池、水晶振動子の小型化、生産技術面での加工精度、品質向上等も大きく影響する。

(1) 小型酸化銀電池の高エネルギー密度化

電池の性能向上は、電池メーカーとの共同開発であり、クォーツ腕時計の小型、薄型化は、電池メーカーの協力があるからこそ可能であった。電池の小型薄型化は、要求サイズの中にいかに電極剤を詰め込み、必要な電気容量の確保、耐漏液特性、放電特性等を犠牲にせず作ることができるかどうかである。また、同じ電池サイズにおいても、より多くの容量を確保できるよう、電極剤の選択、電極剤の増量化等と同時に、設計上の電池構造の見直し、電池の封口部の構造開発等を進めた。試作サンプルによる品質評価を十分行った上で、新機種に搭載する。電池に関する大きな問題は、時計への組み込み後に電解液の漏液が発生し、時計部品が破損し時計機能を失うことである。したがって、試作サンプルでの品質評価は、電池メーカーの品質評価に加え、時計メーカー各社においても必要な評価を行ない、十分な品質を確保したうえで採用した。

(2) 水晶振動子の小型化

「クォーツアストロン 35SQ」の項で述べたように、クォーツ腕時計の小型、薄型化にともなって、フォトリソグラフィによる加工方法の確立により、水晶振動子の音叉サイズもより小型化され、大量に製造できるようになった。クォーツ腕時計の水晶振動子は、音叉型形状で振動数は腕時計に適した 32,768Hz が世界的標準となった。

(3) 生産技術の革新

アナログクォーツ腕時計の小型、薄型化が進み、いろいろな付加機能を搭載できるようになった背景には、時計部品の加工技術が関わっている。ステーターのプレス加工技術におけるシェービング抜き、ロー

ター磁石の高密度エネルギー磁石の焼結加工、極細銅線の高速巻き等部品加工面での革新によって、モーターの高効率化を実現した。更に、エンジニアリングプラスチックの採用により、プレス加工では製造が難しい部品形状や部品の複合化が可能となり、時計の新しい構造に挑戦できるようになった。

(4) 国内初腕時計用潤滑油 AO (エーオー) オイルの開発^{4) 5)}

機械式腕時計の時代から、時計用油はスイス製が使われてきた。例えば、クォーツ腕時計へ使われる油は、機能毎に適した3種類の油種を用いる。特に、ステップモーターのローターの油種が不適切だとモーター性能を十分発揮することが難しい。更に、数年での経時劣化と部品腐食による寿命があった。この課題を解決し、クォーツ腕時計の長期信頼性およびステップモーターの温度特性およびモーター性能低下を防ぎ、作業効率向上のための時計専用油の開発が急がれた。2002年シチズン時計は、国内初の腕時計用潤滑油 AO オイルを開発、販売する。

時計の用途も多様化し、腕時計ムーブメントの低温に対する使用温度範囲の拡大が要求されている。時計性能は、潤滑油の粘度特性に依存していることから、温度に対して優れた粘度特性を持つ潤滑油が待ち望まれる。これまで、腕時計には3種類 (MV; 基本となる潤滑油、LV; 低粘度の潤滑油、HV; 高粘度の潤滑油) を使用し、低温環境下では駆動力の小さいローター部には低粘度の LV を使った。高温で油流れが発生し機能に影響を与える部分には、粘度の高い HV を使用することで対応してきた。新潤滑油 AO オイルは、粘度の温度依存性を抑制することで低温特性の向上と3油種の統合を目的とした。

潤滑油は基油と添加剤からなっており、基油に依存する性能としては、潤滑性、低温特性、高温特性、蒸発性があげられる。腕時計の使用温度範囲の -20～80℃を考慮して、蒸発率が低く、低温流動性および安定性に優れたエステル系のポリオールエステルおよび、エンジニアリングプラスチックにも使用できる PAO (ポリアルファオレフィン) を選択した。

図 6.15 は、従来の3油種と開発油 AO の粘度の温度特性を示す。開発油 AO は低温度で LV 油より低粘度で、高温で (使用温度範囲内) で HV 油よりも粘度が低く、3油種の統合の可能性を示している。

①時計性能評価

図 6.16 に従来油と開発油 AO の室温から -30℃での

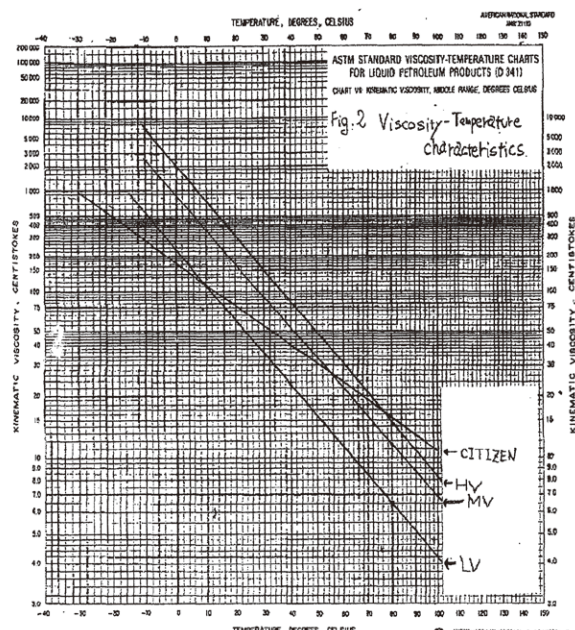


図 6.15 従来の3油種との粘土比較⁴⁾

消費電流の変化を示す。従来油は -20℃以下での消費電流の増加が激しいのに対して、開発油 AO の消費電流はほぼ一定の値を示す。図 6.17 に従来油と開発油 AO の動作開始電圧と -30℃～80℃の範囲での変化を示す。開発油 AO は、全温度範囲において低電圧 1V 以下の電圧で動作する。

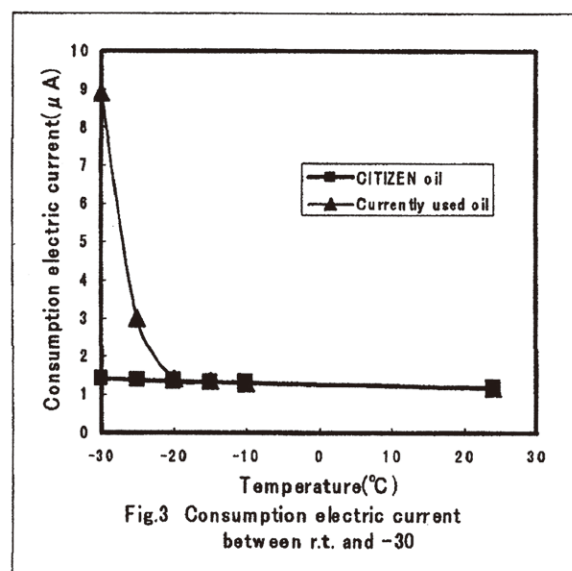


図 6.16 温度－消費電流⁴⁾

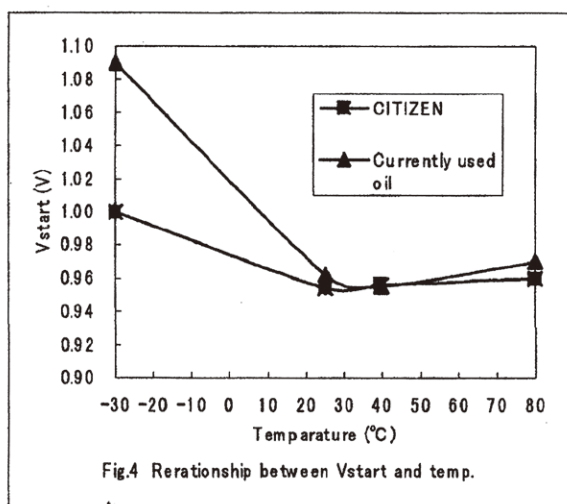


図 6.17 温度－動作開始電圧⁴⁾

②輪列耐久評価

20 年間分の輪列部分の加速試験を実施した結果を、図 6.18 に消費電流、図 6.19 に動作開始電圧の推移として示す。20 年間の範囲において、両特性ともほぼ初期値から変化がない。

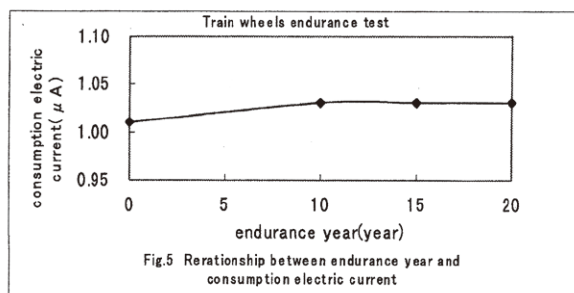


図 6.18 輪列耐久年数－消費電流⁴⁾

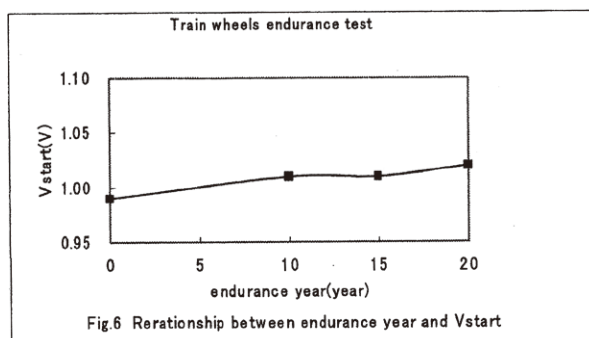


図 6.19 輪列耐久年数－動作開始電圧⁴⁾

このように、温度特性に優れ、部品腐食と経時劣化がしにくい時計油により、広範囲の温度環境においても長期に時計性能を維持することを実現し、油種の削減による作業効率およびアフターサービス性を向上させた。

この腕時計用潤滑油 AO は、セイコーインスツル、セイコーエプソン、オリエント時計 3 社も評価に加わり、国産時計メーカーの標準油となった。また、以下の賞を受賞した。

2003 年度 第 2 回モノづくり部品大賞（日刊工業新聞創刊 90 周年特別賞）

2007 年度 第 7 回グリーン・サステイナブル ケミストリー賞 環境大臣賞

参考・引用文献

- 1) 福島康博：「超小型モータの開発」日本時計学会誌 No.76 pp.23-29 1976 年 3 月
- 2) 上田洵，志田政春：「ウォッチ用ステップモータにおける適応制御の研究」日本時計学会誌 No.92 pp.1-13 1980 年 3 月
- 3) 大多和脩二，上田洵，志田政春：「ステップモータの安定駆動方式」日本時計学会誌 No.101 pp.25-34 1982 年 6 月
- 4) 赤尾祐司：「時計用潤滑油の開発」マイクロメカトロニクス（日本時計学会誌）Vol.45No.1 pp.27-33 2001 年 3 月
- 5) 赤尾祐司：「時計駆動部品の潤滑と信頼性」月刊トライボロジー pp.57-61 2003 年 4 月

7 クォーツ腕時計用発電技術

クォーツ腕時計の出現によって、時間精度も機械式腕時計の100倍と格段に向上した。駆動エネルギー源に小型ボタン型電池を使うことにより、手巻き機械式腕時計のように毎日ぜんまいを巻く煩わしさから解放され、高い時間精度を維持して最低1年間動き続けることの利便性を享受できるようになった。しかし、1年或いは数年に1回の電池交換を必要とし、電池寿命予告機能が付いていても、時計を使おうと取り出した時に止まっている場合もあった。電池交換を自分でできれば、直ちに交換し使うことが可能であるが、腕時計の場合には防水性、防塵性の面よりお店での電池交換が必須である。このように、クォーツ腕時計は高い時間精度と、突然来る電池寿命により使いたいときに使えない不便さを合わせ持っている。機械式自動巻腕時計は腕に着けていれば動き続け止まらない。止まっている状態でも、使用者が時計を振って動かすことができる利点は大きい。クォーツ腕時計も、止まった時にお店で電池交換せず、使用者が駆動エネルギーを作り出し溜め込める技術の要望が強まった。

国内情勢も1973年の「第一次オイルショック」、1979年の「第二次オイルショック」騒動や1974年の「サンシャイン計画」のスタート等、省資源、省エネルギー意識が高まる。クォーツ腕時計の多くは、酸化銀電池或いはリチウム電池を搭載しているが、電池交換の煩わしさからの解放、環境への配慮などの理由から、数々の発電方式が考え出された。腕時計におけるエネルギー生成手段を以下に示す¹⁾。

- (1) 化学／電気エネルギー変換・・・一次電池①酸化銀電池②リチウム電池
- (2) 光／電気エネルギー変換・・・太陽電池（蓄積手段：二次電池）
- (3) 熱／電気エネルギー変換・・・熱電効果（蓄積手段：二次電池）
- (4) 運動／電気エネルギー変換・・・機械エネルギー①手巻き②自動巻（蓄積手段：二次電池）
- (5) 運動／機械エネルギー変換・・・機械エネルギー①手巻き②自動巻（蓄積手段：ぜんまい）

クォーツ腕時計の低電力化が進んだこともあり、あまり大きなエネルギーの創出を必要とせず、腕時計サイズの中で発電の可能性があることも開発への弾みがつく要因となった。

1970年代後半から80年代にかけ、各社よりクォーツ腕時計用発電装置を搭載した種々の製品が市場投入

される。本項では、太陽電池式、手巻き発電式、自動巻発電式、熱発電式、ぜんまい駆動式クォーツ腕時計の技術を紹介する。

7.1 世界初太陽電池アナログクォーツ腕時計シチズンクォーツ「クリストロン ソーラーセル」^{2) 3)}

アナログ時計のムーブメントが機械式からクォーツへと、技術転換され始めた頃、シチズン時計はソーラーセルを使って「電池交換不要の腕時計を作ることを」を目指した。販売からも「世界初のアナログ式光発電時計に挑みたい」との提案、要望があった。当時、腕時計用の小型二次電池（繰り返し充放電が可能な化学反応を利用した電源用部品）がなく可能性は低かった。その後、銀電池なら一次電池でも充電可能という情報を手掛かりに開発がスタートする。現在では、一般的な太陽電池と二次電池の組合せであるが、一次電池である銀電池を使って太陽電池時計を作ることは大きな挑戦であった。

1974年2月、シチズン時計は、太陽電池腕時計のプロトタイプを発表した。発表後、各国の時計メーカーから太陽電池腕時計の発表、発売があったが、全てデジタル式のものでありアナログ式の技術的難しさを物語っている。プロトタイプ発表から2年半後、1976年世界初のアナログ式太陽電池腕時計シチズンクォーツ「クリストロン ソーラーセル」（以降、クリストロン ソーラーセルと呼ぶ）（図7.1参照）を発売した。



図7.1 シチズンクォーツ「クリストロン ソーラーセル Cal.8629」
（出典：シチズン時計）

(1) 太陽電池腕時計の原理⁴⁾

太陽電池腕時計の原理を図7.2に示す。時計に照射された太陽エネルギーが太陽電池により電気エネルギーに変換され、ここで発生した電気エネルギーは制御回路を通して、二次電池へ充電され二次電池から

ムーブメントに常に平均化した電気エネルギーが供給され時計を駆動する。

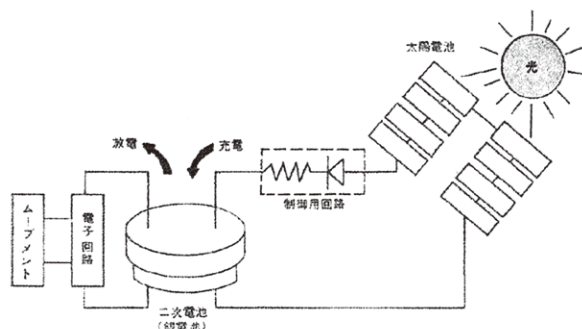


図 7.2 太陽電池腕時計の構成⁴⁾

クリストロンソーラーセルの太陽電池は、1個当たり 0.5V 程度の起電力のため、時計の駆動に必要な電圧に上げるため 8 個のソーラーセルを直列に繋いでいた。

制御回路は以下の働きをしている。

- ①太陽光が照射しない時に二次電池から太陽電池の方に逆に電流が流れることを防止する。
- ②あまり強い光で、一度に大電流が流れることによる二次電池の損傷を防ぐ。

(2) 二次電池に銀電池を使う挑戦³⁾

当時の銀電池の品質レベルは低く、漏液性が悪く 1 週間ぐらいで漏液が始まるような状況であった。実用になったのは、唯一、先に紹介したシチズン「エックスエイト X-8」に搭載した銀電池であった。これを使つての実験がスタートする。銀電池を使った場合の問題は、充電時の水素ガスの発生で、水素ガスの発生は充電をしている証明であるが、電池の膨らみと液漏れを引き起こす。これを抑えながら充電する回路条件を見つけ出し、水素ガスの発生をコントロールした。

太陽電池により多くの電気エネルギーを作っても、主電源が満タンになってしまえば、電気を捨てなければならず、せっかく作ったエネルギーを無駄にしていた。エネルギーを溜め込む時計の主電源の開発が進み、ゴールドキャパシター二次電池へと変わり、エネルギー変換や充電効率は大きく向上した。

(3) 太陽電池^{4) 5)}

プロトタイプの開発スタートは、1971 年頃シャープ(株)の Si 単結晶太陽電池を用いての充放電実験である。その結果、腕時計への太陽電池搭載の可能性を見出し、試作へと動き出す。この試作した太陽電池腕時計は、1974 年 6 月の朝日新聞に「太陽電池が高いの

でまだ市販されないが日本で初めての太陽電池付腕時計」と紹介された。これが、今日のシチズン時計「エコ・ドライブ」の原型である。図 7.3 にプロトタイプの外観を示す。ソーラーセルは 6 段の構造である。クリストロンソーラーセルの仕様⁶⁾は以下の通りである。

ムーブメントサイズ：直径 26.4mm 厚み 5.17mm

時間精度：月差 ± 15 秒

持続時間：5 年

(最初の 2 年間は全く光を当てなくても動き続ける)

太陽電池仕様

波長：7000 Å ~ 9000 Å の光に最高感度を示す。(太陽光だけでなく室内光でも充電可能)

充電能力：1 日約 10 分の太陽光照射で、時計を 1 日駆動できる。



図 7.3 プロトタイプ⁵⁾

無尽蔵にある太陽のエネルギーを電気エネルギーに変換する太陽電池であるが、太陽電池が持つ独特の色に対していろいろな意見があった。腕時計のように身に着ける装飾品と太陽電池の色は合わないと、太陽電池の素地をそのまま時計表面にデザインすることは主流にはなり得なかった。そこで太陽電池を腕時計に搭載するための技術活動が始まる。

①太陽電池表面を隠す方法

太陽電池は直接太陽光に当たることにより、より多くのエネルギーを取り込み電気エネルギーを発生させることが可能である。しかし、隠すことにより変換効率は低下し期待する電気エネルギーを作り出せない。作り出せるエネルギーが少なければ、時計自体の低電力化を更に実施するとともに、電池に蓄積できる効率および容量の向上に向けた二次電池の開発、太陽電池の変換効率向上をメーカーと強力に推進した。

時計メーカーは、太陽光などの光を透過する材料(プラスチック材料等)を用いて文字板を作成し、装飾品として相応しい文字板の外観開発に邁進する。プ

ラスチックの表面処理、文字板厚み、材料色調等透過率と外観バランスの取り組みである。

②太陽電池の配置⁵⁾

太陽電池の配置を工夫する製品も登場した。シチズン時計が、2001年フレキシブルソーラーセルを採用した「エコ・ドライブ エクリッセ」を販売する。ソーラーセルをフィルム状に形成し、風防ガラスの下の本体内側面（文字板外周部）にリング状に配置しており、文字板の材質に制限をなくし従来の金属文字板等の使用を可能にした。（図7.4 参照）

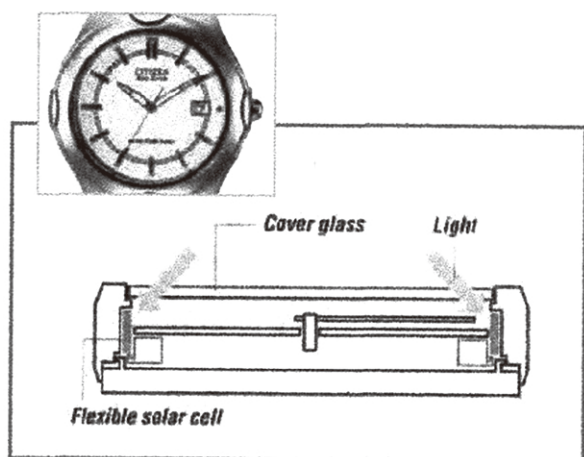


図7.4 リングソーラー「エコ・ドライブ エクリッセ」⁵⁾

シチズン時計は、2000年のバーゼルフェアで太陽電池そのもののイメージを変える、最先端技術の結晶「世界初透明ソーラーセル」を搭載した新製品を発表し、10月、シチズン「エコ・ドライブ ビトロ」(以降、ビトロと呼ぶ)を発売した。（図7.5 参照）



図7.5 シチズン「エコ・ドライブ ビトロ」

（出典：シチズン時計）

7.2 世界初透明ソーラーセル搭載シチズン「エコ・ドライブ ビトロ」⁷⁾

太陽電池腕時計の課題である、文字板の見栄えを解消すべく開発したソーラーセルは、全く太陽電池と気づかせない技術である。シチズン時計の技術研究所の三好幸三は、「開発の最初の動機は、実はシチズン商事の人に、透明な太陽電池はできないですか？と、唐突に言われたのがキッカケなんです⁷⁾」と語る。社内展示会での透明ソーラーセルの発表と、ソーラー腕時計で普通の文字板を使いたいという要望が出始めた時期と重なり商品開発がスタートする。

図7.6に、従来の文字板の裏側に搭載された構造と、透明ソーラーセルを搭載した「ビトロ」の構造を示す。従来型では、光を効率よく吸収するために文字板に様々な工夫が施された。

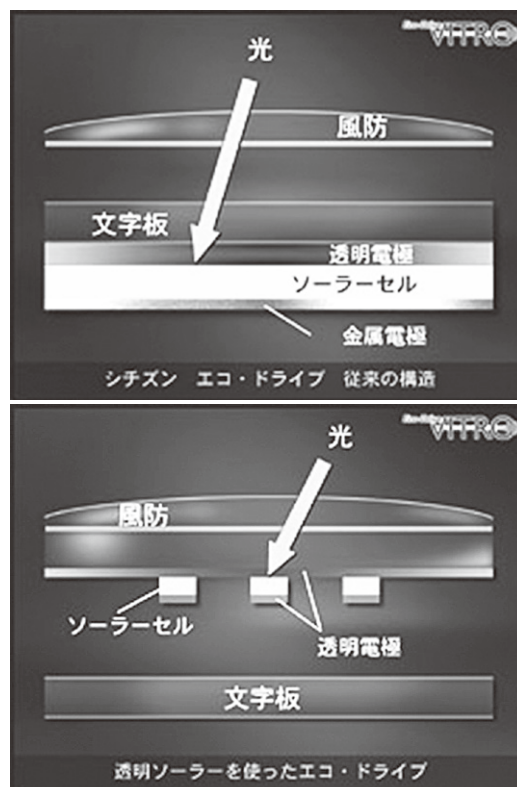


図7.6 ソーラーセルの配置 従来（上） 透明ソーラーセル（下）⁸⁾

(1) 透明ソーラーセルの原理⁷⁾

透明ソーラーセルの作成には、大きく2つの方法、セルのパターンを微細化する方法およびセルを極力薄くする方法が考案された。薄くする方法は、アモルファスシリコンの屈折率が高いため、いくら薄くしても黄色い色が付いてしまい満足のいく透明度が得られなかった。したがって、セルの微細パターンの方が

採用される。ガラス基板上にITO（酸化インジウム錫）の透明薄膜、アモルファス・シリコン、ITOの順番でセルが構成される。一般的には100 μ m以下の間隔で線が並んでいる場合、肉眼でその存在を確認することが困難になる。また、10 μ m以下の点も同じく目視は難しい。ガラス基板上に形成されたセルを半導体技術を駆使した「反応性イオンエッチング」により、忠実にパターンを再現させることで、セルの幅6 μ m、間隔が94 μ mの透明ソーラーセルが完成した。図7.7に透明ソーラーセルを示してある。1つのユニットに275本のセルが配置されている。

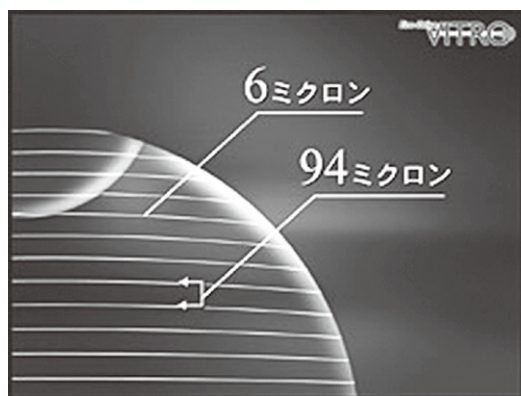


図 7.7 透明ソーラーセル⁸⁾

(2) 透明ソーラーセルの効果

透明ソーラーセルの効果は、太陽電池の素地が時計の表面に出ないため、文字板の材質、仕上げに制限を加えずに自由なデザインを可能にした。更に、線によるパターン化を実現したことで、通常の太陽電池セルのように一方向の光だけでなく、文字板に反射した光、セルのサイドからの光も電気に変えることが可能になった。

ビトロのムーブメント仕様⁹⁾は以下の通り。

ムーブメントサイズ : 14.9 (12-6H) × 12.5 (3-9H)
mm 厚み 2.5mm
持続時間(フル充電時) : 約 5 か月
仕様電池 : リチウム二次電池 (φ 6.8mm
厚み 2.1mm)

7.3 世界初手巻き発電クォーツ腕時計「セイコー インパクト Cal.8T」^{10) 11)}

手巻き発電クォーツ腕時計は、腕時計のムーブメントに小型の発電機構を内蔵し、使用者がリゅうずを使って時計にエネルギーを与えるクォーツ腕時計である。1986年、電池式腕時計にはなかった人間と時計のコミュニケーション、接点を回復する狙いを持ち世界初の手巻き発電機構搭載「セイコー インパクト

Cal.8T」をセイコー電子工業（現セイコーインスツル株式会社）が開発し、セイコーより販売された。

図7.8に示すように、大ぶりのリゅうずと文字板の6時位置に設けられた発光ダイオードの表示がデザインの特徴である。リゅうずはこの時計のコンセプトの一つ、人と時計の接点に当たる所で、回転のしやすさを考え直径を大きくしてある。発光ダイオードは電源に用いられているコンデンサの充電完了を知らせることで、人と時計の接点となっている。



図 7.8 セイコー インパクト
(出典：セイコーウオッチ)

図7.9にムーブメントの展開図を示す。発電機本体は図7.10に示すように、一対の発電用コイルとヨークと2極の永久磁石からなる発電ローターで構成されている。巻真の回転力はきち車と発電用輪列を介して発電用ローターに伝達される。発電用輪列はきち車も含め5段の伝え車で構成され、巻真1回転に対し発電用ローターは300回転する増速輪列になっている。

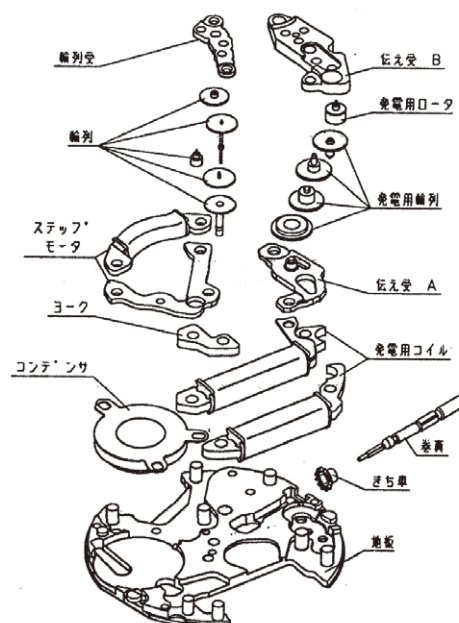


図 7.9 ムーブメント展開図¹⁰⁾

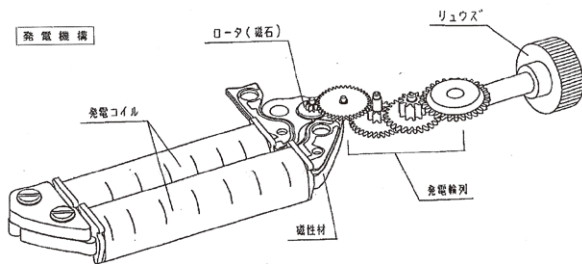


図 7.10 Cal.8T の発電機 11)

(1) 作動原理 10)

図 7.11 は Cal.8T の作動原理を示すブロック図である。太い矢印はエネルギーの流れ、細い矢印は制御の流れを示す。リウズに加えられた回転力は、発電用輪列を介して発電機へ伝えられ交流電力に変換される。交流電力は、整流回路により全波整流されコンデンサを充電し、このコンデンサを電源とし IC およびステップモーターを駆動する。

IC はコンデンサの電圧検出を行ない、充電が進みコンデンサの電圧が所定の電圧に達したことを検出した場合、過充電防止回路を作動させる。これにより余剰電力は発光ダイオードを通して放出され、発光ダイオードの点灯により充電完了を知らせる。また、IC はコンデンサの電圧に応じてモーターの駆動パルス仕様を制御し、低消費電力で安定した駆動を達成している。

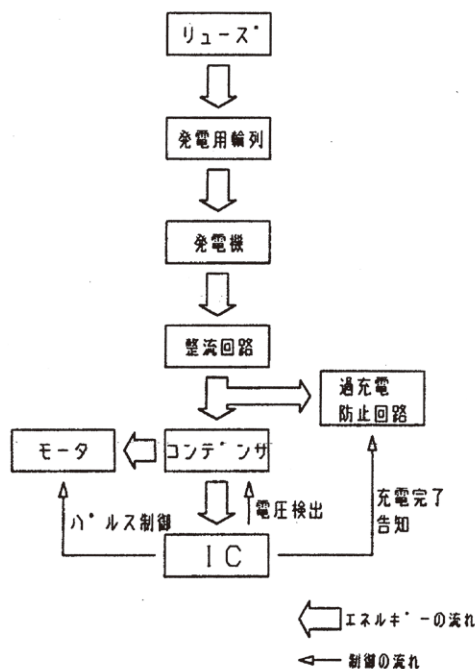


図 7.11 ブロック図 10)

図 7.12 は、コンデンサ電圧と運針状態の関係を示す。縦軸にコンデンサの端子電圧を、横軸に時間をとってある。時間軸の充電時は拡大して表している。

コンデンサの電圧が 0V から充電を開始し、電圧が V_s を超えるまで運針は停止状態である。この電圧 V_s は、IC の発振開始電圧とモーターの最小駆動電圧とによって決まる。電圧 $V_s \sim V_3$ の間は、2 秒運針を行ない、 V_3 を超えた段階で通常運針となる。これを充電量目安表示機能と呼び、通常運針に移行した段階で充電を止めても、1 日以上、30 数時間は運針を持続する。さらに充電を続け V_F を超えると、発光ダイオードが点灯し、充電完了を伝える。

通常運針になれば、電圧が V_1 を切るまで通常運針が続く、さらに放電が続く電圧 V_s までの間は 2 秒運針となる。この 2 秒運針はエネルギー切れ予告を示す。発光ダイオード点灯から運針停止までの持続時間は、約 75 時間を達成している。

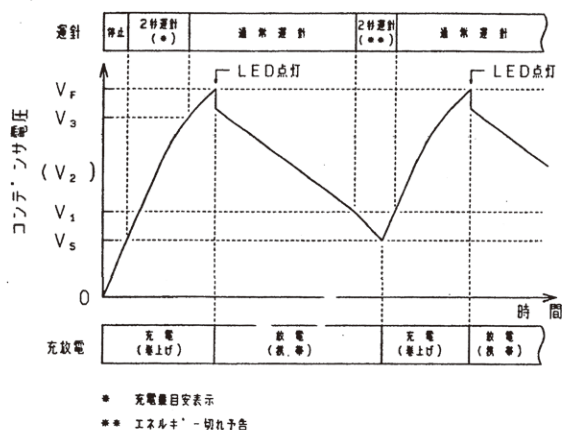


図 7.12 コンデンサ電圧と運針状態 10)

(2) 小型発電機の開発

小型発電機の開発ポイントは以下の通りである。

- ① 発電用ロータ磁石に高エネルギー密度の磁石を使い、磁束の絶対量を大きくし効率を上げる。
- ② 発電用コイルを 1 対のコイルブロックに構成し、省スペースの空間を有効に活用し、発電に必要な巻数を確保した。
- ③ できる限り太い径のコイル線を用い、さらに整列巻きとすることでコイルのインピーダンスの低減を図った。
- ④ 発電用輪列の増速比を 300 倍とし、発電用ローターの回転速度を高め発電機本体の小型化と、充電時の使用者の個人差を吸収するように設定した。

発電機の開発目標を、充電時間 3 分間を可能にする充電電流を確保し、周波数に対する充電電流の変化を小さくし、充電時間の個人差を吸収できることと定めた。

リウズの回転数と開放実効電圧を図 7.13 に示す。

縦軸は、発生する電圧は交流なので実効値にしてあり、横軸はローターの回転周波数（即ち、発生する交流電圧の周波数）で、これに対応するりゅうずの回転数も表示している。発電実験において、周波数のピークは3.5kHz、開放電圧15Vぐらいまで発生し、コンデンサを充電するに十分な電圧が得られた。

更に、充電時の負荷すなわちコイルのインピーダンス、整流回路のダイオード、コンデンサの内部抵抗を考慮したローターの回転数（周波数）と充電電流の関係を調べる。図7.14にコンデンサ0V時の充電電流特性を示してある。充電電流は周波数の増大に伴い飽和していく傾向があり、これは開放電圧の増分よりもインピーダンスの増分が大きいことによる。充電電流が大きければ、より早く充電することができるので、飽和特性はこの点では不利であるが、周波数に対し充電電流の変化が小さければ、充電時間の個人差を吸収できる利点がある。

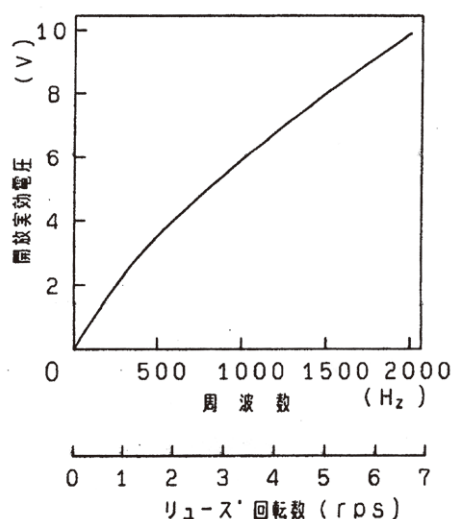


図 7.13 開放電圧特性¹⁰⁾

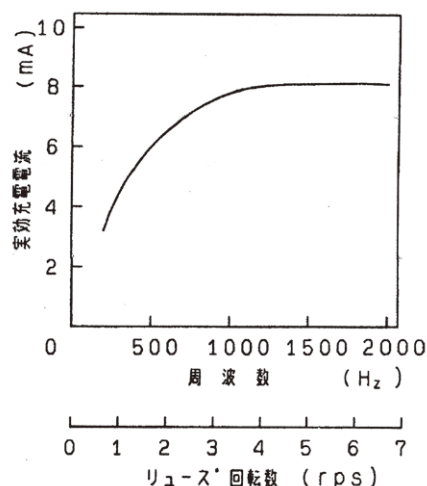


図 7.14 充電電流特性（コンデンサ 0V）¹⁰⁾

(3) 低消費電力で広い電源電圧範囲に対応するステップモーターの開発

モーター駆動電圧範囲は、コンデンサの電圧から0.9V～3Vまでを想定した。モーターの駆動方式は、低消費電力を目的とした前述の適応制御システムを採用する。一般にモーターは、電圧の上昇に伴い出力トルクも上がっていくが、あまり高電圧になると駆動できなくなる。

図7.15に示すように、電源電圧範囲を適当に区分し、それぞれ分割された電圧範囲に適したパルス仕様を選定する。電圧 V_s から V_F までを3つの電圧点で4分割し、 V_F から V_3 まではこの電圧範囲に最も適した適応制御のパルス仕様Aでモーターを駆動する。以下電圧に応じて、パルス仕様B、パルス仕様Cと設定する。 V_1 から V_s までは電圧が低いので出力トルクを確保するため、固定パルスにより駆動する。各電圧範囲に適した4種類のパルス仕様を設定することにより、変動するコンデンサ電圧に対して、安定駆動できるステップモーターを可能にした。

電圧区分	パルス仕様
V_F	適応制御駆動 仕様A
V_3	適応制御駆動 仕様B
V_2	適応制御駆動 仕様C
V_1	固定パルス駆動（2秒遅針）
V_s	

図 7.15 電圧とパルス仕様¹⁰⁾

Cal8Tのムーブメント仕様は以下の通りである。

ムーブメントサイズ : 直径26mm × 25mm 厚み3.4mm
 時間精度 : 月差 ± 15秒
 二次電源 : キャパシタ（直径9.5mm 厚み2.1mm）
 持続時間 : 75時間

7.4 世界初自動巻発電クォーツ腕時計「SEIKO KINETIC（キネティック）Cal.7M」^{12) 13)}

クォーツ腕時計の電池交換の煩わしさを無くしたい。機械式自動巻腕時計のように腕に着けていれば止まらず、しかも機械式腕時計の100倍の高精度を常に

身に付けていられる。こんな理想的な腕時計を目指して自動巻発電クォーツ腕時計が開発された。セイコーエプソンの技術者は、世界初のクォーツ腕時計「アストロン」を発売後、「発電することで電池を不要にする」というアイデアを持っていた。1971年には、自動巻発電関連の最初の特許を出願している。

当時は、発電量と消費電力の差に大きな開きがあり、プロジェクトとして開発をスタートするが何回か頓挫している。一般的に発電機で効率よく発電するためには、ある一定のレベルの運動エネルギーが続くことが条件である。腕時計の小さな回転錘の不規則な動きで、発電できる電気量はごくわずかである。

1980年代前半、新しい開発プロジェクトがスタートする。とりあえず、紳士用腕時計を改造して、腕時計サイズで発電実験したが、取り出せた電流は、当時のクォーツ腕時計の消費電流などを考慮すると10分の1であった。まず、回転錘の動きと発電量の関係を詳細に調査することから始めた。目標値の10分の1までの発電量を作り出せたが、クォーツ腕時計の消費電力を前提に製品化すると、回転錘をもっと大きく重くする必要があり、電池式のクォーツ腕時計に比べるとはるかに重く厚い腕時計になる。小型発電機の開発だけでは限界を迎える。しかし、1980年代に入るとクォーツ腕時計のステップモーターの低電力化技術も大きく前進し、可能性の兆しが見え始めた。

図7.16に示すのは、セイコーエプソンが進めた低電力化の推移であるが、世界初のクォーツ腕時計の開発から約20年間でクォーツムーブメントの消費電流は、30分の1に低減されている。

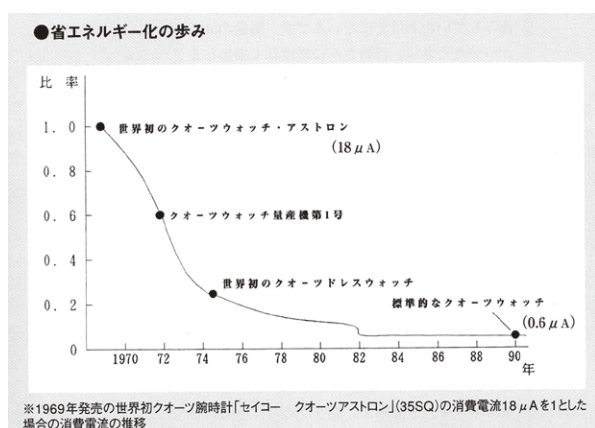


図 7.16 省エネルギー化の歩み
(出典：セイコーエプソン)

このような技術の流れの中で、技術者の夢である自動巻発電腕時計の開発は進められた。実現のために、更なるムーブメント全体の低消費電力、発電・蓄電機

構の改善に取り組んだ。

自動巻発電腕時計は以下に上げる4つの目的を達成するために開発された。

- ①機械式自動巻腕時計のように人間の運動エネルギーを時計の駆動エネルギー源として利用し、かつクォーツ腕時計としての精度を得ること。
- ②ソーラー腕時計のように、日照条件や携帯状態に影響されないこと。
- ③電池調達の不便な地域でも使用できるクォーツ腕時計であること。
- ④電池廃却を不要としたクリーンエネルギーなクォーツ腕時計であること。

1986年10月の欧州時計学会で「自動巻発電クォーツ腕時計」の技術発表を行なう。キネティック技術はスイスで予想外の大きな反響があり、特に、日照時間の少ない北ヨーロッパでは、ソーラー腕時計より優れたシステムだと評価された。

1988年1月、「AGS」(Automatic Generating System)の名前で世界初の自動巻発電クォーツ腕時計Cal.7Mが、ドイツ・インフォルゲンタ見本市で発表、発売された。(図7.17参照)次いで、4月に国内で「オートクォーツ」の名称で発売され、後に、国内外とも名称を「KINETIC」に統一した。図7.18には紳士用(左)、ほぼ1円玉と同サイズの婦人用(中)のムーブメントで、クロノグラフ付き(右)の外観を示す。



図 7.17 SEIKO KINETIC (キネティック)
(出典：セイコーウォッチ)

自動巻発電クォーツ腕時計の特徴、および電子回路を含めた駆動方式について述べる。

(1) 自動巻発電クォーツ腕時計の作動について

図7.19、図7.20に自動巻発電・蓄電機構を分解した図と機能説明を示す。

- ①腕の動きで、機械式自動巻腕時計と同様の回転錘(タンゲステン合金製)が回転する。
- ②回転を歯車列によって約100倍に増速して、サマリ



図 7.18 左から紳士用、婦人用、クロノグラフ付

(出典：セイコーウォッチ・セイコーエプソン)

ウムコバルト磁石製の発電用ローターを超高速で回転させる。

- ③それにより、発電用コイルに電磁誘導作用で交流電圧が発生し電流が流れる。
- ④発電された電流は、制御回路の整流回路で整流され、二次電源であるキャパシタ（コンデンサ）に充電される。
- ⑤この充電された電気エネルギーにより時計用回路が駆動される。

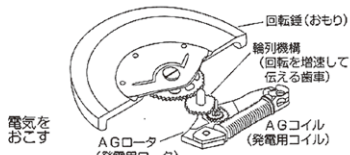


図 7.19 KINETIC のシステム

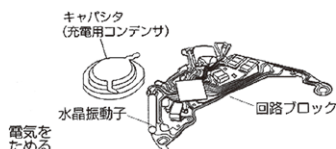
(出典：セイコーエプソン)

●AGSのしくみ

- 1.腕の動きで、回転錘（おもり）が回転する
- 2.回転を、歯車によって約 100 倍に増速して、発電用モータを超高速で回転させる
- 3.それにより、電気が発生する



- 4.発電した電気をキャパシタ（コンデンサ）に充電する



- 5.キャパシタから電気が供給されて、クォーツウォッチを動かす

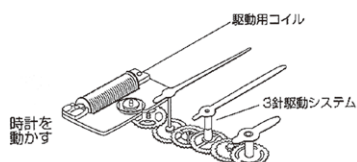


図 7.20 AGS のしくみ ¹³⁾

(2) 発電の原理 ¹⁴⁾

図 7.21 は回転錘が 1 回転したときの発電電流波形を示す。これはローターの回転により発生した交番電流を半波整流して得られた電流波形である。個々の電流波形はローターの半回転で発生する電流波形であり回転錘の回転に応じて図に示すように変化する。ローター半回転の電荷量 qn は、電流波形の時間積分である。

$$qn = \int_0^{t_n} i dt \quad (C) \quad \dots (1)$$

i : 発電電流 (A)

t_n : 発電時間 (s)

ここで電流波形の数を M とすると、回転錘が 1 回転することによって発電される電荷量 Q は、式 (2) で表すことができる。

$$Q = \sum^M qn = \sum^M \int_0^{t_n} i dt \quad (C) \quad \dots (2)$$

したがって、発電量を決定する大きな要因は、発電電流 i と発電時間 t_n であることが分かる。

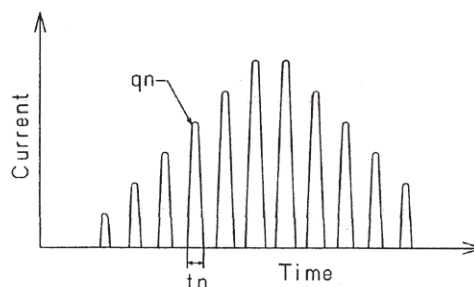


図 7.21 発電電流波形 ¹⁴⁾

回転錘を用いた超小型自動巻発電機の理論解析を行った結果、発電量を決定する発電電流 i と発電時間 t_n は、図 7.22 に示す閉ループを流れて決定される。

i : 発電電流 (A)

T_b : 電磁ブレーキ ($N \cdot m$)

T_r : 発電に有効なトルク ($N \cdot m$)

ω : ローターの回転角速度 (rad/s)

t_n : 発電時間 (s)

発電に有効なトルク T_r によってローターがある回転角速度 ω で回転すると、この回転角速度 ω に応じて発電時間 t_n と発電電流 i が決まり、この発電電流 i によってローターに電磁ブレーキ T_b がかかり、電磁ブレーキ T_b によって発電に有効なトルク T_r が決定される。

尚、発電電流、電磁ブレーキ、発電に有効なトルク、発電時間の詳細は、日本時計学会誌 No. 120 「ウオッチ用自動発電機構の開発」を参照願いたい。

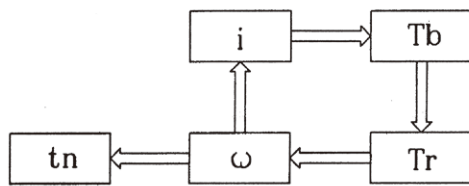


図 7.22 発電のメカニズム¹⁴⁾

(3) 多段昇圧回路による駆動システム¹⁵⁾

二次電源にキャパシタを使うため、クォーツ腕時計を駆動する際に、図 7.23 に示すような広い電源電圧変化を想定しなければならない。一方、一次電池の場合には電圧変動を考慮する必要がない。キャパシタ電圧は充電状態にあると上昇していき、放電状態にあると下降する。図のキャパシタ電圧遷移は模擬的に示したもので、実際には、その放電状態により 0V から V_{DC} (キャパシタの直流耐圧) までの種々の値を取る。

図に示すように一次電池と同様な持続時間と、発電回路、モーター駆動回路を駆動電源電圧の各値において確実に動作し、クォーツ腕時計としての基本性能を確保するとともに、「止まっている状態からでも振ればすぐ動く時計」「放置しておいても長い期間動き続ける時計」を可能にするための開発は以下の通りである。

- ・ 回路の低電圧側作動領域の拡大
- ・ 電圧変動に対する回路の動作安定化

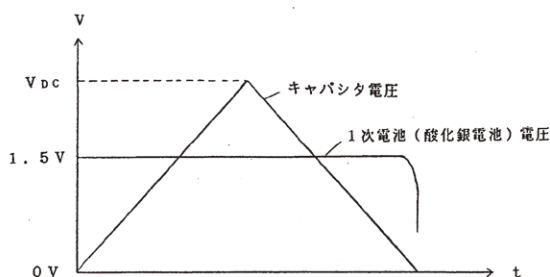


図 7.23 キャパシタ電圧と一次電池電圧¹⁵⁾

以下に開発のポイントを述べる。

①概略システム

図 7.24 は、回路システムの基本構成図と電力の流れを水力の流れに置き換えた仮想システム図である。キャパシタ電圧が低く時計の駆動可能電圧に至らない時は、昇圧回路によりキャパシタ電圧を高電圧に変換して時計を駆動する。電圧変換された電力は補助コンデンサに蓄積される。したがって、時計の駆動は補助コンデンサによって行う。キャパシタの静電容量は 0.33F と高容量のものを扱い、補助コンデンサは 15 μ F を用いた。

仮想システム図で説明すると、キャパシタと補助コンデンサを容量の極端に異なる水槽に置き換えている。すなわち、大水槽には発電機より水が供給されて水量が増えても、水槽が大きいのでなかなか水位（電圧）が上がらない。そこでポンプによって小水槽に水を汲みだして小水槽の水力で時計を駆動する。小水槽はわずかの水量でも高水位が得られ、時計駆動可能となる。また、ポンプにより常時、水を供給されているので水量不足も問題とならない。

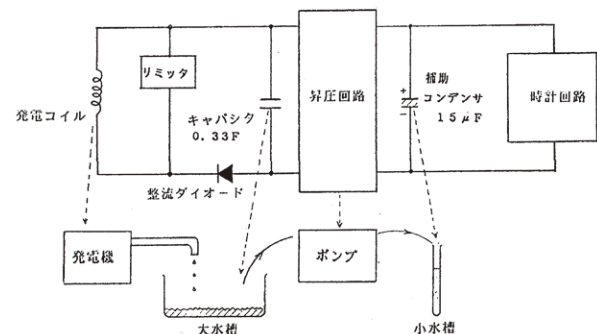


図 7.24 概略回路システム図¹⁵⁾

②回路の低電圧側作動領域の拡大

キャパシタ電圧を 4 段階に昇圧する多段昇圧回路により低電圧側の作動領域を拡大した。多段昇圧の概念、回路構成を説明する。

②-1 多段昇圧の概念

図 7.25 に多段昇圧の概念図を示す。

V_{SC} : キャパシタ電圧

V_{SS} : 昇圧電圧

V_{ON} : 昇圧開始電圧

V_{down} : 昇圧倍率切換電圧 (高倍率→低倍率)

V_{up} : 昇圧倍率切換電圧 (低倍率→高倍率)

V_{LIMIT} : リミッター作動電圧

キャパシタ電圧 V_{SC} は、時計が振られて充電されている時は上昇し、時計が放置されていて放電状態にあるときは下降していく。この状態を充電期間、放電期

V_{SC} : キャパシタ電圧
 V_{SS} : 昇圧電圧
 V_{on} : 昇圧開始電圧
 V_{down} : 昇圧倍率切換電圧 (高倍率→低倍率)
 V_{up} : " (低倍率→高倍率)

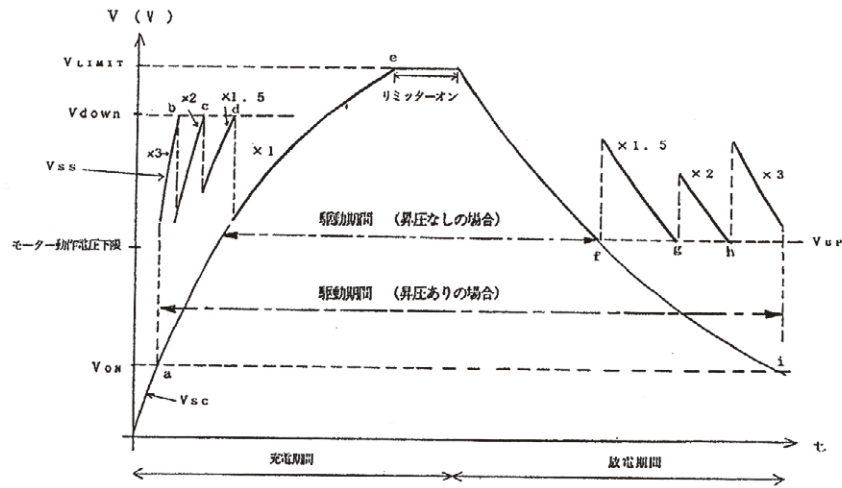


図 7.25 多段昇圧概念図¹⁵⁾

間として模擬的に示してある。昇圧電圧 V_{SS} は、キャパシタ電圧 V_{SC} に昇圧倍率を掛け合わせた電圧で、時計は昇圧電圧 V_{SS} によって駆動される。

図にあるように、昇圧倍率はキャパシタ電圧 V_{SC} が低い状態から 3 倍、2 倍、1.5 倍、1 倍の 4 段階となっている。

②-2 多段昇圧方式

昇圧方式としては、コンデンサ切換によるチャージポンプ方式を採用している。この方式は低電力用ではあるが変換効率が高く回路規模も小さい。図 7.26 にコンデンサ切換方法を示す等価回路図である。キャパシタを含めて 4 個のコンデンサにより構成されている。昇圧動作は所定の昇圧クロック f により、各コンデンサの接続状態をトランジスタで切換えることにより行なう。1 倍昇圧以外は昇圧クロック f の切換周波数で状態 a と状態 b を交互に繰り返すことにより昇

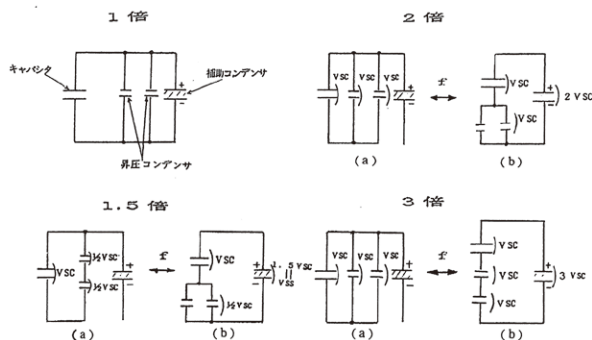


図 7.26 コンデンサ切換方法¹⁵⁾

圧される。

例えば、1.5 倍昇圧 ($V_{SS}=1.5V_{SC}$) を説明する。

状態 a・・・キャパシタ電圧が V_{SC} の時、昇圧コンデンサにはそれぞれ $1/2V_{SC}$ が充電される。

状態 b・・・キャパシタ電圧 V_{SC} と昇圧コンデンサ $1/2V_{SC}$ の和が補助コンデンサに充電される。

②-3 即スタート回路

すべての回路系を駆動している電源は補助コンデンサであり昇圧電圧 V_{SS} であるが、これから昇圧動作を開始しようとする時点では、まだ補助コンデンサ電圧 V_{SS} は高くなっていない。したがって、発振回路は発振しておらず、昇圧クロックを供給できないため昇圧動作に移行できない。この問題点を解決する回路が即スタート回路である。昇圧回路とは別手段で補助コンデンサ電圧 V_{SS} を高めるのが目的である。図 7.27 に即スタート回路を示す。動作原理は、キャパシタに直列に挿入した即スタート用直列抵抗に発生する電圧降下を利用している。発電電流 i がキャパシタに流れ込んだ時に限って、補助コンデンサ電圧 V_{SS} は、 $V_{SS}=i$

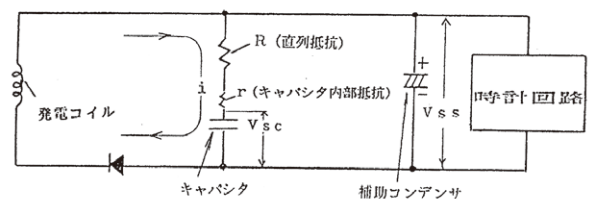


図 7.27 即スタート回路¹⁵⁾

$(R + r) + V_{SC}$ となる。すなわち、即スタート回路動作中は、時計を振ると補助コンデンサ電圧 V_{SS} は高くなる。このように、多段昇圧回路、即スタート回路を採用することにより、時計が止まっている状態から動き出すまでの時間を短縮でき、時計の動作期間を大幅に伸ばすことが可能である。

Cal.7M のムーブメント仕様は以下の通りである。

ムーブメントサイズ：直径 27.6mm 厚み 4.5mm
 時間精度：月差 ± 15 秒
 二次電源：キャパシタ
 (直径 9.5mm 厚み 2.1mm)
 持続時間：75 時間 (フル充電から)

この腕時計サイズの小型発電機構技術は、「小型発電装置 (内容：発電機構造)」特公平 H7-056517、「電子時計 (内容：昇圧駆動システム)」特公平 H7-052230 等多くの特許となり、1996 年、「自動巻発電クォーツウオッチの開発」により、第 42 回大河内記念技術賞を受賞する。

7.5 熱発電クォーツ腕時計「SEIKO THERMIC (サーミック) Cal.6C」¹⁶⁾

電氣的に異なる二種類の導体 (または半導体) の熱電効果として「電気→熱：ペルチェ効果」「熱→電気：ゼーベック効果」があり、電気エネルギーを熱に変換するペルチェ効果を応用した小型冷蔵庫やコンピューターの CPU 冷却用として実用化されている。人の身体から発生している熱エネルギーは、100% 電気エネルギーに変換できたとすると、60W の電球を点灯できる能力を持つといわれる。この数 % を利用できればの思いで、セイコーインスツルの技術者は、人の腕から放出される熱エネルギーに着目し、腕の体温と外気温との温度差で発電し、その電気エネルギーを二次電池に蓄えながら時計を動かすウオッチの開発に挑戦した。

熱電変換の基本的な原理は、1821 年に T.J.Seebeck が発見したゼーベック効果であり、最も利用されているのが、宇宙開発分野である。1977 年に打ち上げられたボイジャー 1 号に、この原理を応用した熱発電機が搭載された。その後、地球環境問題がクローズアップされるに従い、新しい発電方式として注目され、廃熱利用等様々な分野で研究開発が進められた。

腕時計においては、大きな起電力は必要としないものの、腕時計として成立するサイズにする必要があり、熱発電素子の大幅な小型化と高度な微細加工技術が要求される。1998 年 12 月、セイコーインスツルが開発し、セイコーより「SEIKO THERMIC (サーミッ

ク) Cal.6C」(以降、サーミックと呼ぶ) が発売された。熱の放出をイメージさせるダイナミックかつ先進的なスタイルを創った。(図 7.28 参照)



図 7.28 SEIKO THERMIC (サーミック)
 (出典：セイコーウオッチ)

(1) 熱 - 電気変換原理¹⁷⁾

ゼーベック効果を用い、p 型と n 型の接合体による熱電半導体エレメントを 52 対、104 本使用して 1 モジュールとし、このモジュール 10 個をパッケージ化して 1 ユニットとした。1 ユニットの熱電半導体エレメント数は 1040 本である。熱電半導体エレメントの材料は、常温付近で比較的性能の良い BiTe (ビスマス-テルル) 系焼結材の半導体を用いる。この材料のゼーベック係数は p 型 n 型とも約 200 μ V/K である。よって、1 ユニットの起電圧は約 0.2V/K となる。

(2) 熱発電モジュールとユニット¹⁷⁾

図 7.29 に熱発電モジュールの簡略図 (左) と熱発電モジュール (右) を示す。p 型 n 型とも熱発電半導体エレメントのサイズは、縦横 80 μ m、高さ 600 μ m である。シリコン基板上に熱発電半導体エレメントを p 型と n 型を交互に直列接続するよう配線し、接続している。熱発電モジュールのサイズは上側の基板が 1.7mm $\times$ 2.14mm、下側が 2.36mm $\times$ 2.14mm、総高さ 1.27mm である。下側の基板には他のモジュールとの接続用パッドを設けている。

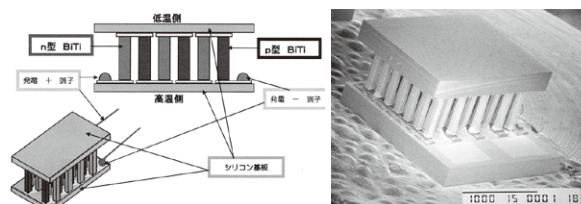


図 7.29 熱発電モジュール
 (出典：セイコーインスツル)

図 7.30 に熱発電ユニットを示す。ユニットのサイズは、縦横 15.2mm × 10.0mm、高さ 2.7mm である。上下の板は加工性と熱伝導性を考慮してBs材を用い、枠の材料は熱が伝わり難く、かつ丈夫なプラスチック材を用いた。

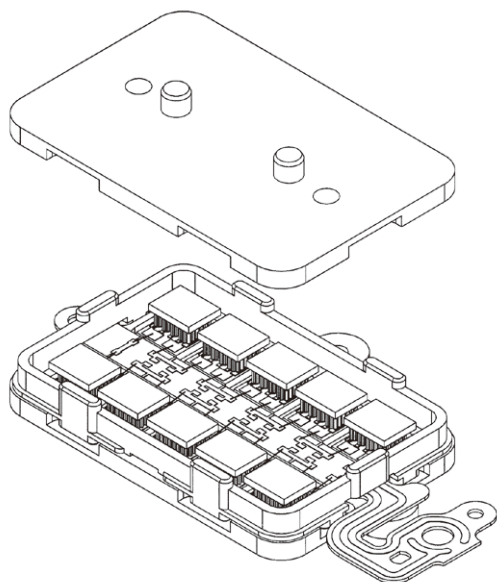


図 7.30 熱発電ユニット
(出典：セイコーインスツル)

図 7.31 に熱伝導のイメージ図を示す。腕からの体温は腕時計の裏蓋を介し熱発電モジュールに伝わり、熱伝導板を通して時計外部の外気へと放熱される。体温が必ず熱発電モジュールを通過するよう断熱材で遮断している。

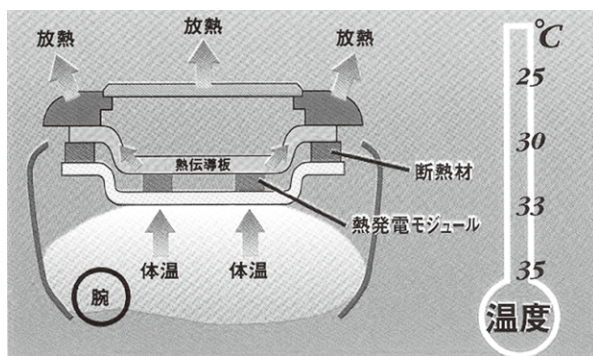


図 7.31 熱伝導のイメージ図¹⁶⁾

(3) 昇圧回路¹⁷⁾

携帯時に熱発電ユニットは、0.2V から 0.3V 程度の起電力を発生する。この発電電力を時計駆動および二次電池へ充電するために昇圧が必要となる。昇圧回路はスイッチドキャパシタ昇圧回路を 4 回路直列接続した構成である。これにより 16 倍の昇圧電圧が得られ、昇圧回路への入力電圧が 0.1V 以上あれば二次電池へ

の充電が可能である。二次電源はチタン系リチウム二次電池 (1.5V) を使用している。

図 7.32 にスイッチドキャパシタ昇圧回路の 1 段分を示す。図中 A と B に逆相のパルスをクロックとして入力する。A 入力のトランジスタが OFF のとき、B 入力のトランジスタが ON となり、C1 が充電される。次に、A 入力のトランジスタが ON のとき B 入力のトランジスタは OFF となり、C1 + IN (約 2 倍) の電圧が C2 へ充電され OUT 出力となる。この昇圧回路を 4 列直列に配置して、1,2,4,8,16 倍の昇圧を行なう。昇圧倍数は入力電力の大きさにより最適倍率となるように制御回路で制御する。昇圧回路の昇圧効率、熱発電ユニットの出力電圧が 0.2V から 0.3V のときに最大になるように設定している。

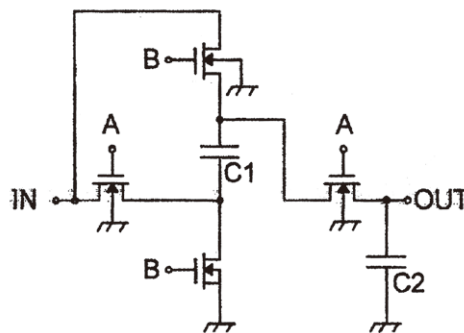


図 7.32 スイッチドキャパシタ昇圧回路 (1 段分)¹⁷⁾

(4) 発電量¹⁷⁾

図 7.33 に熱発電式ウォッチで得られる起電力の時間的推移の一例を示す。熱発電式ウォッチを室温と同温度にした後、腕に装着して約 1 時間の発電電圧を記録した。熱発電ユニットの発電電圧は無負荷状態での測定値である。携帯直後はケースが温まっていないので起電力が大きい、装着してから時間が経つと熱平衡状態になり、ほぼ一定の起電圧となる。

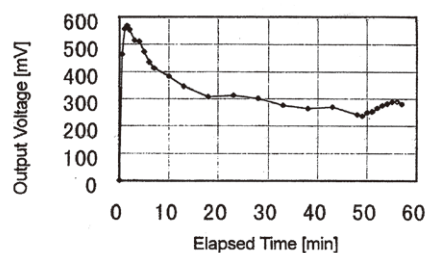


図 7.33 起電力の時間的推移¹⁷⁾

7.6 世界初ぜんまい駆動クォーツ腕時計「SEIKO SPRING DRIVE (スプリングドライブ) Cal.7R」¹⁸⁾¹⁹⁾

機械式時計技術と電子時計技術、そして日本の匠の技が創り上げた、世界初の「SEIKO SPRING DRIVE (スプリングドライブ) Cal.7R」(以降、スプリングドライブと呼ぶ)をセイコーエプソン(株)が開発し、セイコー(株)が1998年スイスバーゼル・フェアで発表、1999年12月発売した。(図7.34参照)



図 7.34 SEIKO SPRING DRIVE (スプリングドライブ)
(出典：セイコーウオッチ)

スプリングドライブの大まかな仕組みは、機械式時計と同じぜんまいの力でローターを回転させ、その回転運動を電気エネルギーに変換、その電気エネルギーで水晶振動子を駆動しローターの回転速度を調速する。この発想は、1977年セイコーエプソン(株)の赤羽好和によって生まれた。赤羽は、「機械式腕時計の時間精度をもっと高めたい」「長く愛着を持って使って欲しい、なおかつ精度も良い」の思いがあり、精度の高い標準器で補正してやれば、機械式腕時計の精度を飛躍的に高められるとの考えから、1978年「クォーツの標準器で機械式腕時計を補正する“クォーツロック”」の基本特許を出願する。

開発のスタートは、図7.35に示すように機械式ムーブメントのてんぶ周りを、永久磁石を取り付けた回転体とバウムクーヘン型のコイルに改良して、動作および制御の確認から始めた。図の端子部が、コイルの両端を短絡させることによりブレーキをかけ、回転速度を制御する接点である。速度制御を含めた基本的な機構の可能性は見えたが、永久磁石での発電電力と水晶振動子を駆動させ制御する電子回路を動かす電力とに大きな差がありすぎ頓挫する。発電量を多くするには、ローターの回転速度を大きくすれば良いが、大きくすると時計の持続時間が短くなる。発電のエネルギー効率、ICの消費電力の大幅な改善が必要不可欠であった。

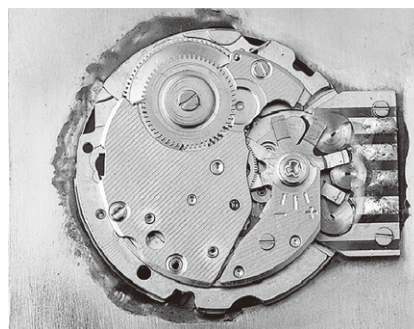


図 7.35 実験用ムーブメント
(出典：セイコーエプソン)

1997年最終の開発プロジェクトがスタートする。これは、1988年に発売したキネティックによってウオッチの低消費電力化が大幅に進み、“クォーツロック”式ウオッチの実用化への目途が見えたことと、スイスでも同様の研究をやっているとの情報が入ったことによる。1997年秋のスイス時計学会で、スプリングドライブの制御方式の原理についての技術発表を行なった。同時に、スイス時計の研究開発機関であるAsulab社から「クォーツ式ムーブメントの精度を持つ自動巻き機械式ムーブメント」(SALTO)の研究発表がされた。原理は全くスプリングドライブそのものであったが、試作機およびテスト結果より、発電機は厚く消費電力もまだ桁違いに多いことを知って関係者は安心した。ローターの回転速度制御の方法、発電機の改良、ICの低消費電力化等の解決により、1998年スイスバーゼル・フェアでの発表にこぎ着けた。

スプリングドライブの原理、ローターの速度制御方法、機械損失低減等について述べる。

(1) スプリングドライブの原理

図7.36に示すように、坂道を自転車で下ることを

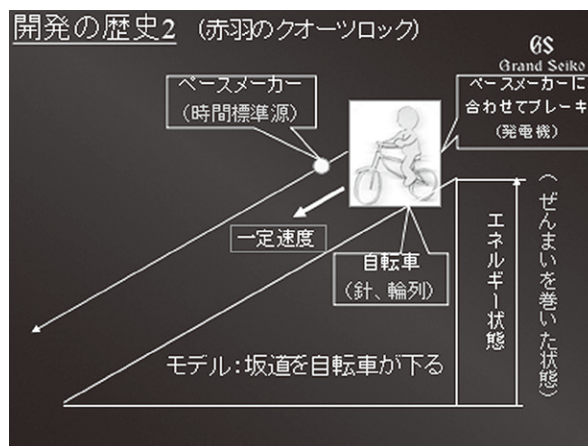


図 7.36 クォーツロックの考え方

(出典：セイコーエプソン)

想定する。坂道の勾配がぜんまいを巻いたときのエネルギー、自転車を時刻表示の針および輪列、ペースメーカーを時間標準源とする。坂の上より自転車で下り始めるが、ブレーキを掛けないと速度は速くなる。そこで、ペースメーカーに合せブレーキングをして、速度を調整すると一定速度で下ることが可能である。

通常の機械式時計は、巻かれたぜんまいの解ける力を輪列に伝え、脱進機がその力を一定の速度に制御することで運針が安定する。スプリングドライブも同様に、ぜんまいの解ける力が輪列に伝わり、その力が制御され運針が一定に保たれる。ただし、力を制御する構成が機械式時計と異なっている。機械式時計でいう、脱進機（がんぎ車、アンクル、てんぷ）が図 7.37 のトライシンクロレギュレーター³（ローター、コイル、IC、水晶振動子）に置き換わっている。

トライシンクロレギュレーターの働きについて詳細に説明する。

- ①ぜんまいの解ける力をエネルギーとしてローターが回転し、コイルに電流が流れ、IC と水晶振動子を動かす。（ソーラーやキネティックは二次電池を使用しているため、二次電池に電気が溜まるまで作動しないが、スプリングドライブは二次電池を使用していないので、ぜんまいを少し巻くだけで動き出す。
- ②IC が水晶振動子の正確な信号とローターの回転速度を比較する。（水晶振動子の 32,768Hz を 12 回分周すると正確な 8Hz が割り出せる。その高い時間標準源で補正するため高精度が可能となる。）
- ③水晶振動子の正確な信号にしたがって磁力でブレーキを掛けたり外しながら、ローターの回転速度を調整する。

この一連の動作を行なう機構を発電调速機と呼ぶ。

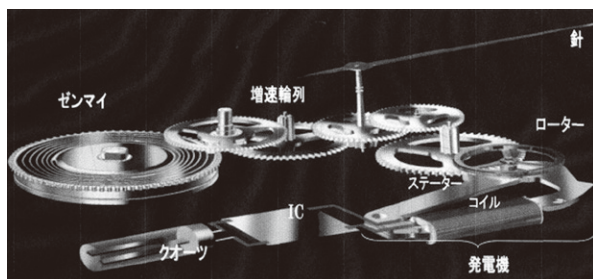


図 7.37 トライシンクロレギュレーター

（出典：セイコーエプソン）

3 TRI:3つの ①機械的な力（ぜんまい：動力源） ②磁力（発電機：ブレーキ） ③電気信号（クォーツ：基準信号）の同期した調整器を、TRI SYNCHRO REGULATOR と命名した。

（2）発電调速機の構成

図 7.38、図 7.39 に示すように、2 個のコイルブロックと、磁石を備えたローターとで構成される。コイルブロックの小型化で磁気損失を低減し、ローターの回転検出を考慮して左右対称の 2 体構造を採用した。ローターは 2 極の円柱形磁石を有し、ステーターを介してコイルに磁束を鎖交させる。また、ローターは携帯中の外乱に対し、回転が安定するように慣性円板を備えている。ぜんまいからのトルクでローターが回転すると、2 個直列に接続されたコイル端子から誘起電圧が発生する。この誘起電圧は整流回路を経て IC に電力を供給する。

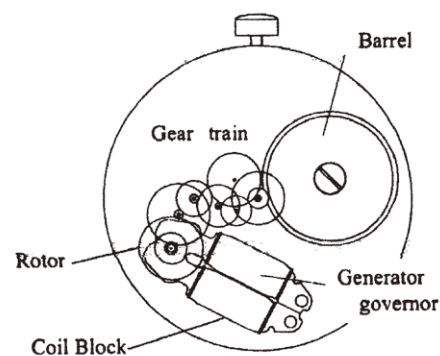


図 7.38 スプリングドライブ ムーブメント図¹⁹⁾

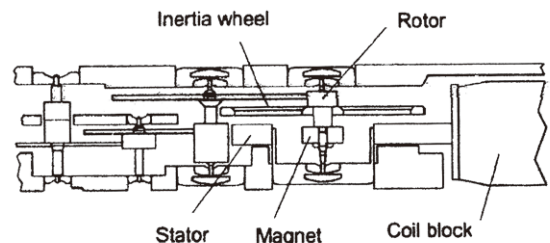


図 7.39 発電调速機の断面図¹⁹⁾

（3）速度制御の概要

ぜんまいの解ける力は増速輪列を介して発電调速機のローターに伝えられる。ぜんまい特性や輪列の増速比は、制御を行なわない状態ではローターの回転数が設定速度 8Hz より速く回転するように設定してある。時刻表示の針は輪列に固定されているため、輪列の回転とともに回転する。

発電调速機はぜんまいから伝わる機械エネルギーを電気エネルギーに変換し、発電した電力で制御回路を駆動する。制御回路は発電调速機のローターの速度を 1 回転ごと検出する。水晶振動子が発生する信号を基準に、輪列の速度が設定速度の 8Hz になるように発電调速機のローターにブレーキを掛ける。ブレーキはコイルを短絡することで生じる電磁ブレーキである。

このようにして発電调速機のローターの回転が設定速度になるように制御される。増速輪列に取り付けられた秒針は 1rpm で回転し、正確な時刻を表示する。

(4) 発電调速機の技術ポイント

発電调速機のローターの回転数は、設定回転数 8Hz より速くなるように設定されている。したがって、调速機能は、常にローターにブレーキをかけ減速させる動作である。ブレーキを掛ける调速制御に伴う大きな課題が以下の 2 点である。

①ぜんまいのトルクが大きい領域では、ローターに伝わるトルクが大きくなり、ローター回転も速くなるためブレーキ時間が長くなる。ローターにブレーキを掛ける（コイルの両端を短絡させる）と、誘起電圧が発生しないため発電しない。ブレーキ制御期間中の発電量の低下を抑え、制御回路の駆動に必要な電力を確保する開発が必要である。

②速度制御のために発電コイルの誘起電圧からローターの回転検出をし、コイルの両端を短絡させブレーキ制御をすると、原理的にブレーキをかけている間は誘起電圧が発生しないため、ローターの回転検出ができない。ブレーキ制御期間中のローターの回転検出方法の開発が必要である。

(4)-1 ブレーキ制御期間中の発電量を確保する方法

この方式は、チョッピング制御のブレーキ印加により発電電圧の低下を防ぎ、かつブレーキ印加期間を長くすることによって、高い発電電圧が得られるブレーキ制御である。図 7.40 にチョッピング制御のブレーキ信号波形を示す。図の破線期間内（デューティ比表示部）がブレーキ期間である。例として、チョッピング周期が 256Hz で、ブレーキデューティが 80%（強いブレーキ）のときと、ブレーキデューティが 30%（弱いブレーキ）のブレーキ信号波形を示す。

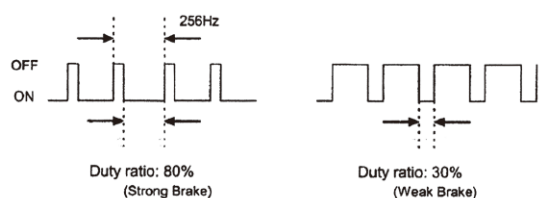


図 7.40 ブレーキ制御信号¹⁹⁾

図 7.41 は、発電電圧（充電用コンデンサの充電電圧）とブレーキデューティ比の測定データである。図において、チョッピングの周波数が大きい領域では、発電機に印加されるブレーキデューティ比が大きくなるにつれ、発電電圧が上昇する。これは、発電コイルの両端を OFF（すなわちブレーキ解除）する瞬間、

コイルに流れる電流は、ブレーキデューティ比が大きくなるほど大きくなるため、大きい誘起電圧が得られる。ただし、ブレーキデューティ比が 90% を超えると、この電流は飽和し発電電圧も大きくなる。実験結果から、最も高い発電電圧を得るには、70%～90% のブレーキデューティ比であることがわかった。

したがって、チョッピングの周波数を一定にして、大きなブレーキ量が必要な場合は、ブレーキデューティ比を大きくし、小さなブレーキ量の場合にはブレーキデューティ比を小さくする方法で発電量を確保した。

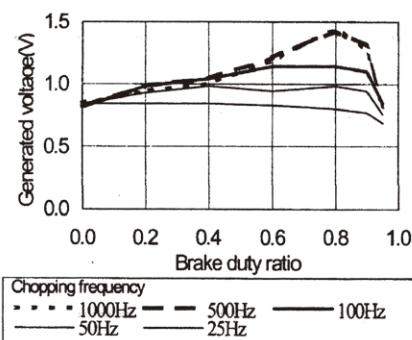


図 7.41 発電電圧とブレーキデューティの関係¹⁹⁾

(4)-2 ブレーキ制御期間中のローターの回転検出方法

発電波形は、図 7.42 の上段の波形のように正弦波の発電波形に、チョッピング制御による誘起電圧を重畳させた波形である。前項のブレーキ期間中での発電量を確保するチョッピング制御を利用することで回転検出を可能にした。チョッピングによるブレーキ制御では、ブレーキ期間を長くすることはブレーキデューティ（短絡期間）を大きくすることで、必ずチョッピング周期毎に誘起電圧が発生する。長期にわたる波形の欠落期間がないことを利用し、回転波形（図 7.42 の下段の波形）を検出するタイミングを誘起電圧発生時とし、このタイミングで発電電圧と基準電圧の比較を行なう。図では、3 回連続して検出したときに始めて下段のようなパルスを作成する検出アルゴリズムとし

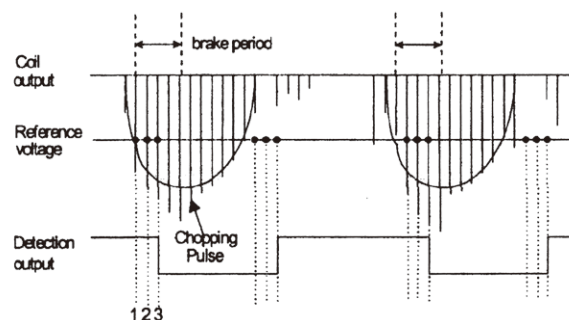


図 7.42 ローター回転検出タイミングチャート¹⁹⁾

た。尚、技術の詳細については、マイクロメカトロニクス Vol.44 No.1「ゼンマイ駆動高精度ウオッチの発電・调速制御システムの開発」を参照いただきたい。

(5) スプリングドライブを支える生産技術

ぜんまいのエネルギーを出来るだけ効率良く伝達し、発電機の発電効率を高くすることにより持続時間を延ばす生産技術を紹介する。

(5)-1 伝達車の歯車面および柄部の磨き技術

香箱車から発電機のローターまで歯車列により増速させ発電を行なうが、ぜんまいエネルギーをロスなくローターに伝達し、発電量に置き換えることが必要である。第2章 2.1.2 で述べたように、歯車段が多くなれば噛合い効率は低下し伝達エネルギーも少なくなる。図 2.4 に示すように、各々の歯車の噛合い部および柄部を磨きあげ、噛合い効率と耐久性を向上している。

(5)-2 発電用コイルの整列巻技術

発電量を多くするため、細線を多く巻く必要がある。ランダムに巻き線を行なうと、図 7.43 の従来コイルの写真のように、コイル線の間に隙間が生じて巻密度が非常に粗くなりコイル抵抗が高くなってしまふ。写真の新しいコイルのように、巻き線を整列させて行なうことにより同じ巻き数なら抵抗を小さくでき、同じ抵抗なら巻き数を多くすることができる。

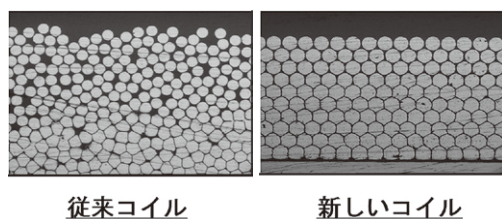
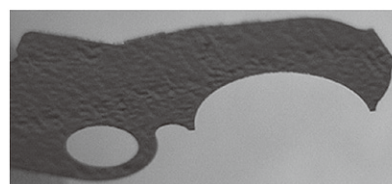


図 7.43 コイル整列巻

(出典：セイコーエブソン)

(5)-3 発電用ステーター用アモルファス材のプレス抜き技術

ステーター材として磁性材料の中で最も損失の少ないアモルファスの磁性材料を採用した。この材料の加工上の特徴は、硬くて脆く薄い板厚 (25 μ m) の素材のためプレス抜きが大変難しいことである。このアモルファスコアを積層して発電用ステーターを完成させた。図 7.44 の写真 (上) がアモルファスコアの単体で、写真 (中) に積層した発電用ステーターの完成品を示す。写真 (下) は積層した発電ローター入り部の断面を示す拡大写真である。



単体



積層後

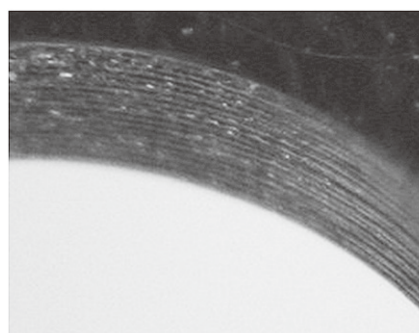


図 7.44 発電用アモルファスステーター

(出典：セイコーエブソン)

(6) スプリングドライブの特徴

スプリングドライブは、ぜんまいの力から伝わるエネルギーで駆動され、クォーツの標準信号で制御される腕時計で画期的な特徴を持つ。

- ①機械式腕時計と同じぜんまいの力で駆動するため、大きくしっかりした表示針を用いることができる。更に、クォーツ腕時計の1秒ステップ運針ではなく、完全なスイープ（連続）運針であり、時の流れを表現できる。
- ②時間標準は水晶振動子であるため、月差 ± 15 秒以内とクォーツ腕時計と同等の高い時間精度を実現できる。
- ③エネルギー源はぜんまいであるため、一次電池や二次電池等を必要としない、地球環境に配慮した製品である。

Cal.7R 以降、スプリングドライブは進化を続け、持続の長時間化、クロノグラフ付き等高付加価値製品の展開を図っている。

スプリングドライブ Cal.7R のムーブメント仕様
ムーブメントサイズ：直径 29.0mm 厚み 3.5mm

時間精度 : 平均月差 ± 15 秒
(平均日差 ± 1 秒相当)
持続時間 : 約 48 時間
駆動方式 : ゼンマイ

参考・引用文献

- 1) 春日政雄:「腕時計にみるマイクロエネルギー技術の最前線」マイクロメカトロニクス (日本時計学会誌) Vol.44No.4 pp.1-6 2000 年 12 月
- 2) シチズン時計株式会社: REAL SCALE Vol.16 04
- 3) シチズン時計株式会社:「受け継がれるシチズンのモノづくり精神」Hours Vol.36 pp.10-13
- 4) シチズン時計株式会社:シチズンライフ「製品の話 シチズンクォーツ ソーラーセル」pp.18-19 1976 年 11 月
- 5) シチズン時計技術研究所:40 年史「ソーラー」pp.94-95 「ビトロ」pp.180-183
- 6) シチズン時計株式会社 時計資料室:社史腕時計台帳 051-02
- 7) シチズン商事株式会社:LAPITA SELECTION「ミクロの世界のチャレンジャー」pp.73-75
- 8) シチズン時計株式会社:社内資料
- 9) シチズン時計株式会社 時計資料館:社史腕時計台帳 No.00-22
- 10) 猿渡朋澄, 池田仁志, 野尻和夫:「発電機付腕時計」日本時計学会誌 No.120 pp.17-27 1987 年 3 月
- 11) 国際時計通信社:国際時計通信 Vol.27,No.320 〈セイコークォーツ Cal.8T23〉 pp.430-435 1986 年 12 月 15 日
- 12) グッズプレス編集部特別編集:「THE SEIKO BOOK 時の革新者ーセイコー腕時計の軌跡ー」pp.103-109 1999 年 5 月 1 日発行
- 13) セイコーエプソン株式会社:「年表で読むセイコーエプソン [1881~2000 年]」2001 年 2 月発行
- 14) 長尾昭一, 安川尚昭, 吉野雅士:「ウオッチ用自動発電機構の開発」日本時計学会誌 No.120 pp.40-48 1987 年 3 月
- 15) 早川求, 矢部宏, 吉野雅士:「自動巻発電ウオッチ用駆動回路の開発」日本時計学会 No.126 pp.28-40 1988 年 9 月
- 16) セイコー株式会社, セイコーインスツルメンツ株式会社:広報資料 1998 年 11 月 16 日
- 17) 金坂俊哉, 小棚木進, 中林靖, 間峠彰弘:「熱発電ウオッチの開発」マイクロメカトロニクス Vol.43,No.3 pp.29-36 1999 年 9 月
- 18) 株式会社ワールドプレス社:世界の腕時計 No.58-61 より「7R88 に見る独創性」
- 19) 小池邦夫, 茂木正俊:「ゼンマイ駆動高精度ウオッチの発電・調速制御システムの開発」マイクロメカトロニクス Vol.44No.1 pp.15-24 2000 年 3 月

8 クォーツ腕時計の更なる高精度化¹⁾

機械式腕時計の時間精度より、100 倍高精度のクォーツ腕時計を開発した後、1970 年代に入り時計メーカー各社は、クォーツ腕時計のより高精度化を求める技術開発をスタートする。

クォーツ腕時計の時間精度は、月差レベルが一般的であるが、この精度を年差レベル、或いは数十年レベルまで高める技術をシチズン時計、セイコーインスツル、セイコーエプソンが開発し製品化に繋げた。クォーツ時計に使われている音叉型水晶振動子の周波数温度特性は、第 2 章図 2.28 に示すように、20℃ 近辺を頂点にした上に凸の二次カーブを有する。携帯時の時計に加わる温度環境は、+ 5℃ ~ + 35℃ ぐらいであるので、20℃ に対して低温側および高温側では歩度が遅れ側にシフトする傾向を持つ。

クォーツ腕時計の高精度化には種々の方式が考えられ、多くの製品が市場に投入された。クォーツ腕時計の更なる高精度化技術には、クォーツ腕時計の中で完結する方式（スタンドアローン方式）、セシウム原子時計の標準時をもとに作られる時刻情報を受信する方式がある。

8.1 腕時計の中で完結した（スタンドアローン方式）高精度化する技術

クォーツ腕時計の中で完結する方式には、大きく分けて周波数温度特性が 3 次特性を持つ（時計の携帯温度範囲でフラットな周波数温度特性を持つ）高周波数帯の水晶振動子を使う方法、32kHz の音叉型水晶振動子の周波数温度特性をフラットに補正する方法がある。

(1) 水晶振動子の持つ周波数温度特性カーブが、フラットに近い振動モードの高周波水晶振動子を使用する方式

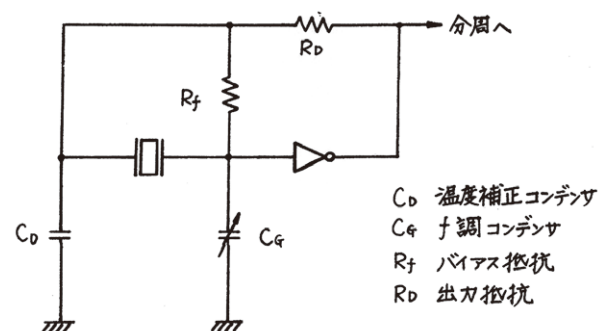
第 2 章図 2.28 に示すような周波数温度特性が三次特性となる、厚みすべり振動の振動モードを持つ AT カット水晶振動子を用いることにより、携帯温度近辺の温度特性がフラットになり携帯時の時間精度が格段に向上する。また、音叉型水晶振動子のカット角を変えて、ねじり屈曲振動という 2 つの振動モード（ツイーンモード）により、同じように周波数温度特性が三次特性の水晶振動子も使われている。これらの振動モードの周波数は、通常の屈曲振動の音叉型水晶振動子より高周波振動数であるため、消費電力面では不利な点がある。しかし、AT カット水晶振動子では、年差 ±

数秒の高精度を実現している。

(2) 音叉型水晶振動子の周波数二次温度特性カーブをできる限りフラットに補正する方式

(2)-1 音叉型水晶振動子の周波数特性は、上に凸の二次温度特性カーブを持っている。この特性を強誘電材料よりなる温度補正コンデンサ（主としてチタン酸バリウム（ BaTiO_3 ）を主成分とした強誘電セラミックス）を組合わせて、平坦な温度周波数特性を得る方法²⁾

原理について概略を述べる。図 8.1 にコンデンサによる温度補正を行なった回路の例を示す。通常インバータのドレイン側に温度補正コンデンサ、ゲート側に周波数調整用の可変コンデンサを接続して使用する。図 8.2 に、温度補正による水晶振動子の温度補正の原理を示す。水晶振動子は図の左下に示す周波数－温度特性を持ち、回路に直列に接続したコンデンサの容量に対して、図の右下に示す周波数－容量特性を持つ。温度 t_0 のとき、 c_0 の容量を接続すると、 f_0 の周波数で振動する。温度が t_1 になるとすると、 c_0 の容量のままでは f_1 の周波数で振動するが、このとき容量を c_1 にすると最初の f_0 を保つことができる。したがって、このとき図の右上に示される容量－温度特性を持つコンデンサを接続し、水晶振動子の頂点温度と、コンデンサのキュリー点とを一致させ、水晶振動子の周波数変化率（ Δf ）とコンデンサの容量変化率（ Δc ）との間に相関を持たせることにより、温度補正が可能である。



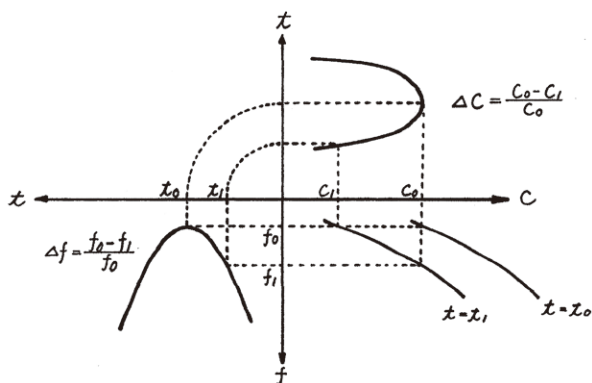


図 8.2 水晶振動子の温度補正の原理²⁾

本方式による時間精度は月差±5秒程度であるが、水晶振動子と温度補正コンデンサを選択することにより、日差±0.07秒（月差換算で±2秒）以内も可能である。

(2)-2 頂点温度の異なる音叉型水晶振動子を2本使用して、同じ発振回路または別の発振回路で発振させ、その合成した周波数温度特性を利用する方法

①同じ発振回路で2本の水晶振動子を並列に接続して振動源に使う方法³⁾

1978年、セイコーインスツルで開発した「Cal.92 ツインクオーツ」の技術紹介をする。概要について述べるが、詳細については、時計学会誌 No.91「並列接続2本水晶による腕時計の開発」を参照いただきたい。周波数が補償される温度範囲は、2本の水晶振動子の頂点温度（以下 T_p と略す）の間の温度である。32kHzの低周波では高温側の T_p に限界があることが知られているが、実験結果によって高温側 T_p は50℃近辺が限界であることが分かった。腕時計の携帯時の温度を考えれば、高温側水晶振動子の T_p が50℃以下でも良好な周波数温度補償特性が得られることが理論的に解析できた。その結果を図8.3に示す。Tが-10℃と+50℃との組合せで得られた周波数温度補償特性である。5℃～35℃での誤差は±0.1ppm以内である。

図8.4に回路構成を示す。2本並列接続による周波数温度補償方法は、従来の時計用回路をそのまま採用できるため、従来1本の水晶振動子にもう1本の水晶振動子を追加するだけで、高精度化を実現できる効果がある。また、並列接続のため水晶振動子のインピーダンスは、1本に比べて小さく水晶振動子を駆動するパワーは小さくできる。腕時計における周波数を温度補償する温度範囲は、5℃～35℃の間のため低温側 T_p を T_{PL} 、高温側 T_p を T_{PH} とすると、 $(T_{PL} + T_{PH}) / 2$ は

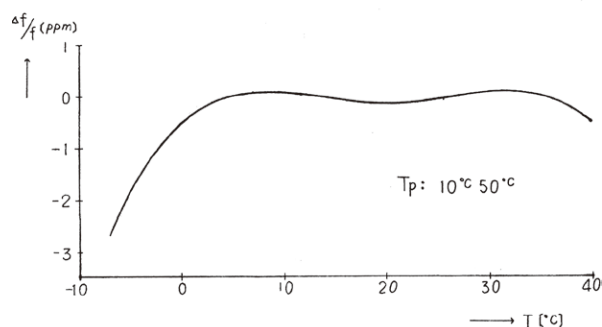


図 8.3 2本水晶による周波数温度補償特性（計算値）³⁾

20℃付近になるようにTPの組合せを選択するのが良い。本方式での時間精度は、年差±10秒以内が可能である。

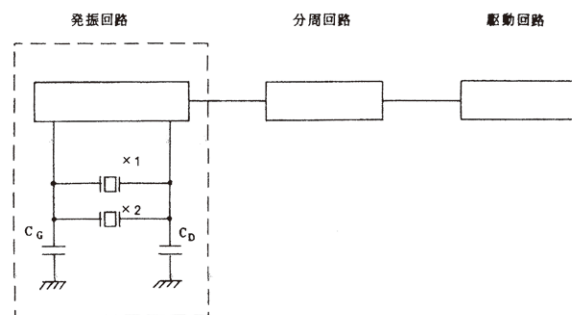


図 8.4 ツインクオーツ Cal.92 の回路構成³⁾

②水晶発振器2個による精度論理補正回路方式⁴⁾

1978年、セイコーエプソンで開発した「ツインクオーツ Cal.99」の技術紹介をする。図8.5にツインクオーツの外観を示す。6時位置にあるマークは、クオーツが2本使われていることを表している。



図 8.5 ツインクオーツ Cal.99

（出典：セイコーウォッチ）

従来の音叉型水晶振動子を2個使用して温度補償することによって高精度腕時計を可能にした。音叉型水晶振動子は、温度の2次関数に近似される周波数温度

特性を持つ。また、2次項の係数は比較的一定の値を持っていることも知られている。本項の精度向上技術は、この基本的な性能を論理的に利用するものである。

図 8.6 に温度補正の原理図を示す。頂点温度の異なる 2 つの水晶発振器の周波数差（周波数 A および B）を考えると温度の 1 次関数に近似される（図の $C=|B-A|$ ）。音叉型水晶発振器の周波数温度特性は、上に凸の曲線を持ち頂点からの低温側および高温側の温度に対して、マイナスの周波数誤差を与える。2 つの発振器の周波数差の 2 乗の関数を求めると、周波数差が 0 となる温度からの低温側および高温側の温度に対し正の周波数を与える（図の $D=K(B-A)^2$ ）。周波数差 0 となる温度と被補償信号の頂点温度を一致させ、2 乗した上で適当な係数を乗じ加算することにより、平坦な温度特性を得るのが基本原理である（図の $F=A+K(B-A)^2$ ）。水晶振動子 A および B の周波数の差を利用して、温度センサーの役目をさせる。

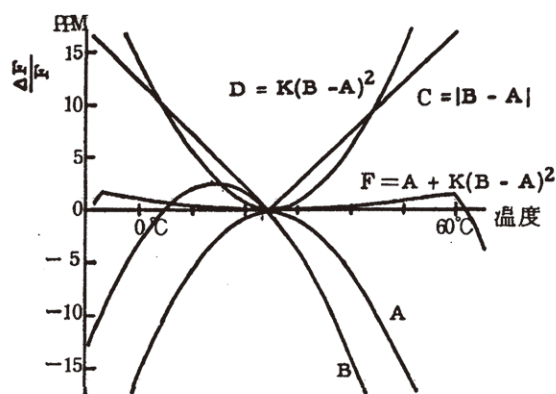


図 8.6 温度補正原理図⁴⁾

作動原理の概要を説明する。2 本の水晶振動子は、あらかじめ設定されたある一定の温度（図 8.6 では、水晶振動子 A と B の交点温度）では、振動数に差がないが、その点から温度が変動すると、その温度差に応じて振動数に差が出るように選定する。すなわち、2 本の振動子の振動数の差を、ある特定の温度からの温度変動に読み替えることができる。基準になる振動子の温度特性は分かっている（前もって測定する必要がある）ので、演算処理により歩度の補正を加えることができる。

図 8.7 に補正回路のブロック図を示す。図において、従来の時計部分は破線より上の部分で構成される。破線より下が補正回路であり、最も特徴ある部分の 1 つが、デジタル的に 2 つの主および副の発振器の周波数差（ビート）信号を取り出す回路である。また、ビート周波数の補正信号の割り込み時間はタイマーによ

て制御される。タイマーの時間が長ければ補正が大きく、短ければ補正が小さいことになる。尚、本補正方式の理論の詳細は、日本時計学会誌「ツインクォーツによる高精度腕時計の開発」を参照いただきたい。

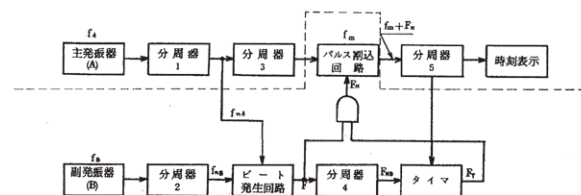


図 8.7 ブロック図⁴⁾

本補正方式での、時間精度における誤差要因として考えられるものは以下の通りである。

・温度変化

2 つの水晶発振器熱容量差、熱浴環境の差により温度追従性が異なる場合誤差を生じるので、時計回路設計において、その均一化に配慮が必要である。

・タイマー

タイマー周期は、回路構造を簡単にするため対応する補償誤差が考えられる。主、副いずれの水晶振動子の温度変化でも通常環境温度では、 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ のオーダーの誤差である。

・2 次温度係数の差および 3 次項の影響

2 次温度係数に差がある場合、ビート周波数の温度に関する一次依存性が崩れ、誤差を生じる。また、周波数温度特性の 2 次係数の近似が本補正のベースになっているが、3 次項の影響でもこの関数性に影響を与える。これらの誤差は実際の振動子の温度特性に依存するが、2 次係数のバラつきは比較的小さく、3 次項の影響もそれ自体 10^{-10} のオーダーであり、実際上の影響は小さい。

実測に使用した水晶振動子のディメンジョンを以下に示す。

振動子サイズ：X カットタイプ

4.70mm × 1.14mm × 0.1mm

Q 値 : 12 万 Typ

CI 値 : 20kΩ Typ

Tp : 25°C（水晶振動子 B は 12°C）

2 次温度係数 : 2.9×10^{-3} 秒 / 日 / 度²

図 8.8 に実測の温度特性データの例を示す。

32kHz 音叉型水晶振動子を 2 本使用した (2)-2 の補正方式は、2 本の水晶振動子の周波数の温度特性を許用範囲内で合わせる必要があり、その組合せの量産製造工程での作り込みが難しい課題がある。

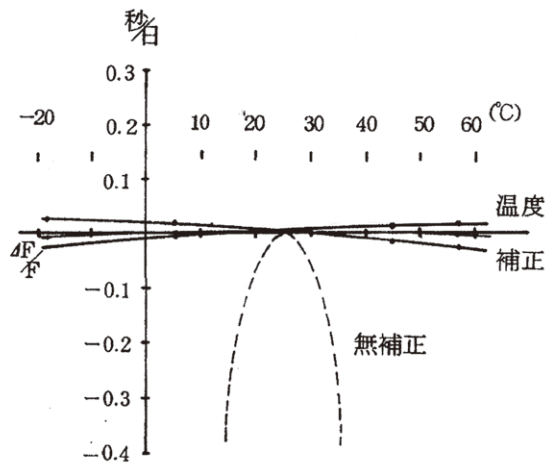


図 8.8 温度特性（実測値）⁴⁾

(2)-3 時間標準である水晶振動子の環境温度（水晶振動子が組込まれた電子回路部の温度）を測定し、その温度の水晶振動子の周波数を、歩度±0秒に近付くように補正する方法

腕時計の内部の温度計測は、温度センサーを腕時計内部に組込む方法で、温度センサーとして音叉型水晶振動子、サーミスタ、或いはIC内部の温度センサー（IC内に設計されたトランジスタのダイオードPN接合の温度特性を利用する、或いはCR発振の半導体抵抗の温度特性を利用する）を使用する。水晶振動子の周波数温度特性を前もって測定する必要があるが、正確な温度補正が可能となる。

次項以降で、スタンドアローン方式について、代表的なATカット水晶振動子搭載クォーツ腕時計とIC温度補正機能搭載クォーツ腕時計について紹介する。

8.1.1 ATカット水晶振動子搭載年差クォーツ腕時計「シチズン クリストロン・メガ Cal.8650」^{6) 7) 8)}

クォーツ腕時計が初めて発売されてから6年を経て、1975年12月、シチズン時計より世界一の精度を持つ「シチズン クリストロン・メガ Cal.8650」（図8.9 参照）が発売された。時計の精度は機械式で日差レベル、クォーツ時計で月差レベル、このメガでは年差±3秒以内という驚異的な精度である。クリストロン・メガに搭載されているATカット水晶振動子は、発振周波数4.2MHz、厚みすべり振動モードである。高周波数の振動子を使った腕時計では、スイスのオメガ社の「MEGAQUARTZ (2.4MHz)」、Smiths社の「Quasar Quartz (1.5MHz)」があり、さらに高い周波数を採用し高精度を実現した。

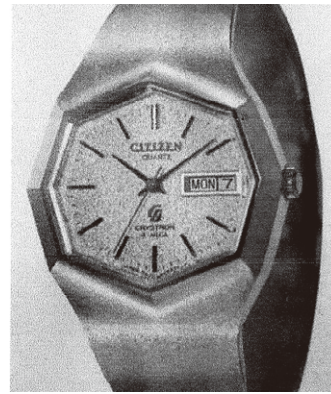


図 8.9 シチズン クリストロン・メガ

（出典：シチズン時計）

シチズン クリストロン・メガのしくみの概要を、図8.10のブロック図に示す。図において、SOS-C/MOS-LSIおよび高周波水晶振動子を用いていることを除けば、全てアナログクォーツ腕時計の構成と共通である。

時計用の小型高周波数4.2MHzの厚みすべり振動モードの振動子の開発、周波数の増加に伴う消費電流増の低減技術、高精度を作り込む測定技術について述べる。

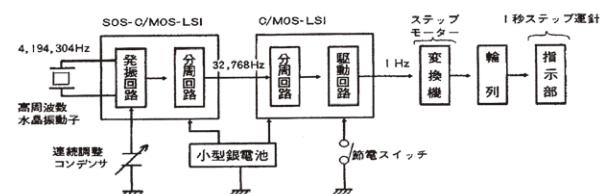


図 8.10 シチズン クリストロン・メガのしくみ⁵⁾

(1) 高周波超高精度腕時計用ATカット水晶振動子の開発

ATカット水晶振動子は、ATカット水晶の上下の面に電極を取り付けて厚み方向に電界を加えると、厚みと垂直な方向にすべりを生じる振動モードを持つ。このときの周波数 f は以下のように表される。

$$f = K/t \cdot \dots (1)$$

ただし、 K は周波数定数、 t は厚みである。

例えば、 f が4.2MHzの場合、厚み t は約0.4mmとなる。ATカット水晶振動子に厚みすべり振動を起こさせると、音叉型の屈曲振動子よりはるかに良好な周波数温度特性が得られる。

(1)-1 小型サイズでの温度特性を確保するポイント

腕時計用の場合、輪郭寸法は大きくできず、せいぜい6mm程度である。厚み寸法を t を小さくすると、(1)式より周波数 f が高くなり消費電力が増え

るので、厚みは0.4mm以下にはできない。辺比は $6\text{mm}/0.4\text{mm}=15$ が限度である。平面形状を円形の端部に行くほど厚みを小さくするコンベックス型にすることにより、振動を中央部に閉じ込め、純粹の厚みすべり振動に近い振動をさせ、周波数温度特性を確保した。

辺比が15程度の小さいものは、当時、世の中には存在せず、具体的な形状設計に際しては有限要素法での振動モードの追跡、確認実験により最適形状を求めた。また、サブミクロンの加工技術を開発し、水晶振動子の形状精度を向上した。

(1)-2 AT カット水晶振動子の支持方法

コンベックス型の円形 AT カット水晶振動子の周辺部はほとんど振動しないので、図 8.11 に示すように、テフロン等で一体的に形成され、温度特性に悪影響を与えることなく、押さえばね部に挟み込まれ支持リングで固定される。電極と気密端子のリードシステムは金線で接続される。

図 8.12 は、4.2MHz AT カット水晶振動子②と一般的な 32kHz 音叉型水晶振動子①の外観を示す。

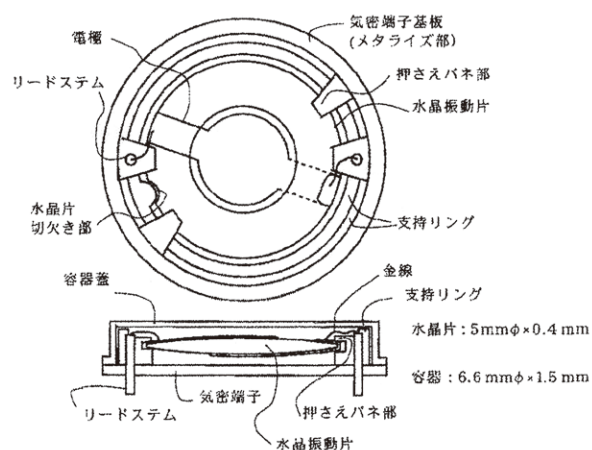


図 8.11 腕時計用 AT 水晶振動子 (4.2MHz) ⁶⁾

(2) SOS-C/MOS-LSI の採用による低消費電力の実現

第5章のクォーツ腕時計で紹介したように、CMOS-IC により低消費電力化および省スペースが実現できた。最初使われた CMOS-IC は分周回路だけであったが、その後、電子回路全体を CMOS で高集積化した LSI (Large Scale Integrated Circuit) が開発された。クォーツ腕時計で一般的に使われている音叉型水晶振動子は、周波数 32kHz でありこの程度の周波数であれば、CMOS-LSI で足りていたが、クリストロン・メガのように高周波数のクォーツ腕時計になると、CMOS-LSI を使用して発振分周を行なうために

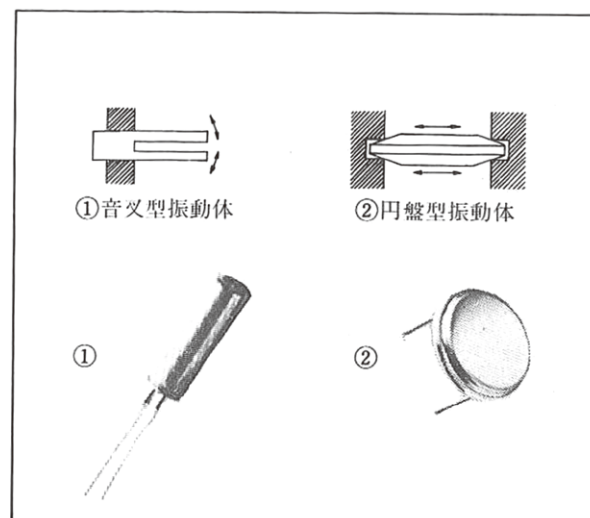


図 8.12 クリストロン・メガの水晶振動子② ⁷⁾

は、さらに電圧を上げるか、消費電流を増やすことになる。大容量の電池が必要となり腕時計として成り立たない。

新しいプロセス技術である SOS-CMOS-LSI (Silicon on Sapphire Complementary Metal Oxide Semiconductor-Large Scale Integrated Circuit) の採用、および通常のフリップフロップ分周回路ではなくダイナミック分周回路により、大幅な低電力化 (20~30%の低減) を達成した。SOS は、絶縁体であるサファイア単結晶の基板上に、シリコン単結晶の薄膜を成長させ MOS 構造を作り込んである。サファイアを用いることにより、通常の CMOS に比べて不要な寄生トランジスタの影響や寄生容量が少なく、構成する素子間の距離を短くでき、集積密度を高められる。以下に SOS-CMOS-LSI の特徴を述べる。

- ①集積度が、従来の CMOS-IC の 3 倍程度に高まる。
- ② IC の集積度が上がり小型化によりコストダウンが図れる。
- ③ 4MHz 以上の高周波数での高速性が図れる。
- ④寄生容量が小さく、特に高周波領域での低消費電力化が図れる。

(3) 年差±3秒を保証する高度な調整技術

クリストロン・メガは年差±3秒、これを日差に換算すると、約±0.008秒となる。普通のクォーツ腕時計では無視できる範囲の誤差も問題となり、これを調整するための高い調整技術や制御技術が必要となる。したがって、電池交換以外はすべてメーカーでの調整となっている。時間調整は、一定温度の恒温槽中に静置した超高精度の水晶発振器と直結した測定器を使用し、毎日の時計の指示値の測定は JJY の信号 (当時の

郵政省電波研究所より発射している標準時刻信号)と
比較して、1/1000 秒単位まで読み取って検査する⁸⁾。

シチズン クリストロン・メガのムーブメント仕様⁵⁾
は以下の通りである。

ムーブメントサイズ : 直径 26.4mm 厚み 5.17mm
水晶振動子 : AT カット厚みすべり水晶振動子
水晶周波数 : 4,194,304Hz
時間精度 : 年差± 3 秒
電池寿命 : 約 1 年
仕様電池 : 小型酸化銀電池
(直径 11.6mm 厚み 5.6mm)

当時、外装、バンド等 18 金ムク仕様の限定販売で
450 万円であった。

8.1.2 世界初 IC 内温度補正機能搭載クォーツ腕時計 「シチズン エクシード Cal.1930」^{10) 11)}

高周波数帯の水晶振動子を使わず 32kHz の音叉型
水晶振動子での高精度化を紹介したが、量産工程での
水晶振動子の周波数温度特性の組合せ、水晶振動子と
コンデンサとの組合せが必要であり、量産上の課題で
あった。

時間標準である水晶振動子の環境温度を直接測定
し、その温度での周波数に対して補正する方法につ
いて述べる。温度測定には、温度センサーとしてサー
ミスタ等別素子を回路実装するのが一般的であるが、小
型化、薄型化を追求する腕時計では温度センサーその
ものを、CMOS-IC 内に作り込み温度計測し、音叉型
水晶振動子の持つ上に凸の 2 次の周波数温度特性を補
正する方法を開発した。シチズン時計は、1981 年世
界で初めて IC 内温度補正機能付のクォーツ腕時計を
発売した。

(1) ムーブメントの構成について⁹⁾

図 8.13 にムーブメントの構成をブロック図で示す。
主要機能の概要について説明する。

①温度補償機能

周囲温度に対応した補正信号を作成し、発振回路に
フィードバックさせることで温度変化に対して周波数
変化を抑える。

②FT 回路

周波数を粗調整する機能で、その後トリマーコンデ
ンサで微調整する。

③調整型定電圧回路

最適動作電流を発振回路に供給するため、定電圧回

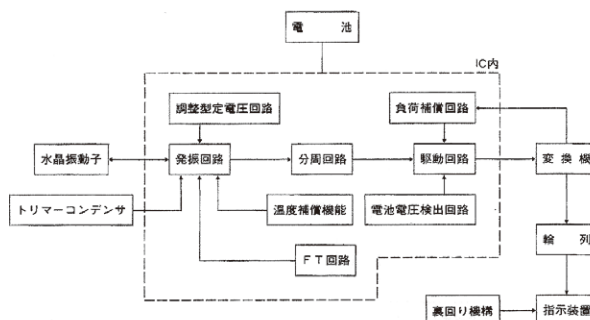


図 8.13 ムーブメント構成図⁹⁾

路の動作電圧を外部端子により設定する。

(2) 温度補償機能について⁹⁾

図 8.14 は音叉型水晶振動子の温度特性を示す。時
計の歩度は、水晶振動子の温度特性を考慮して次の式
で表される。

$$T = -a (tz - t\theta)^2$$

ここで T: 歩度 a: 水晶振動子の二次温度係
数 tz: ゼロ温度係数を示す温度 tθ: 周囲温度
この式は、歩度が周囲温度と水晶振動子周波数温度特
性の頂点温度の差の 2 乗に比例することを示す。頂点
温度から遠ざかるほど急激に歩度が遅れ側になる。
例えば、頂点温度 24℃ 周囲温度 0℃ a を 0.035ppm
としたとき、

$T = -0.035 (24 - 0)^2 \text{ppm} = -20.16 \text{ppm}$ これを日差に
換算すると、-1.74 秒 / 日に相当する。二次温度係数
a の値は、水晶振動子の製造によって決められる値で
あるが、0℃ に 1 日放置されると 1 日に 2 秒近く遅れ
ることとなる。

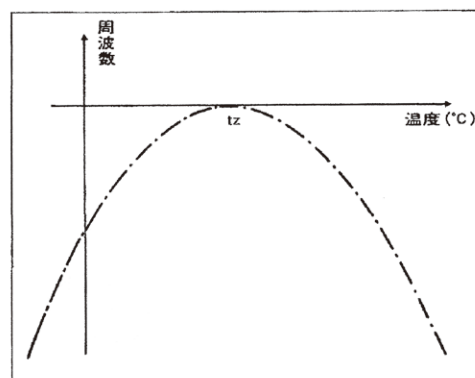


図 8.14 水晶振動子の温度特性⁹⁾

図 8.15 にコンデンサ容量と水晶振動子の周波数の
関係を示す。コンデンサ容量が大きくなるほど周波数
が小さくなる。(歩度は遅れる) 例えば、コンデンサ
を 2 つ用意して上手く切り替えることができれば、周

波数をコントロールできる。 C_1 の容量を持つコンデンサと C_2 の容量を持つコンデンサに接続する時間によって、最大 P の分だけ周波数変化がある。

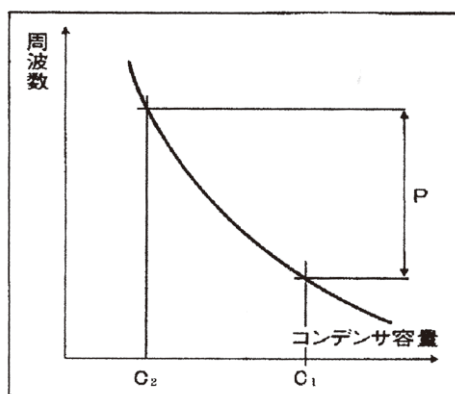


図 8.15 コンデンサ容量と周波数⁹⁾

(3) 温度補償システムについて⁹⁾

CMOS-IC 内の MOS トランジスタおよび抵抗によって温度センサーを構成している。一般的に、IC の特性は温度および電圧により変化するが、これは電圧を一定にすると温度のみにより特性が変わることを意味する。これを利用して温度センサーを設けている。

図 8.16 は、温度補償機能の概要を表している。

- ①はコンデンサを接続させたときの周波数温度特性を示す。
- ②はコンデンサを切断させたときの周波数温度特性を示す。(コンデンサが無い分だけ進みになる。)
- ③は温度センサーの勾配を示し、温度によって補正信号数を変える。
- ④は温度センサーで得られた情報をカウンターで計測し、各温度に見合った補正信号を作る。
- ⑤は④の各温度に見合った信号を 2 乗回路に通したもので、水晶振動子のもつ温度特性と全く逆の形のカーブが描かれる。
- ⑥は⑤で得られたカーブを実際の水晶振動子のカーブに合成した図で、温度①～温度②の間では平坦な周波数になり、また①～②の範囲外でも温度補償機能がないものに比べ有利に働く。

(4) IC 内蔵検出温度の感度について⁹⁾

温度センサーは $-5^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ の間を約 500 に分割した細かい区間ごとに補正信号を作っている。したがって、感度は $55/500=0.11^{\circ}\text{C}$ 、つまり 0.11°C の温度変化があると補正信号が出る。IC 内温度補償機能を持った時計では、 0.11°C の温度変化を感知して常に誤差が少なくなるように精度を維持する。

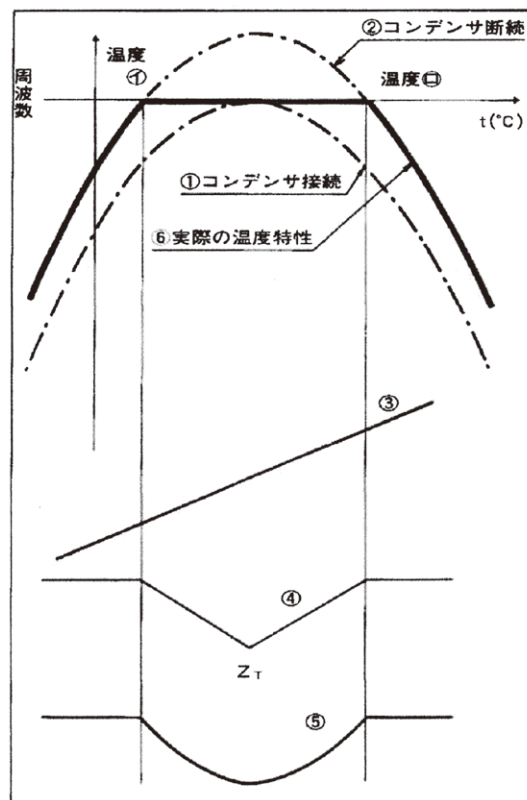


図 8.16 温度補償機能の具体化⁹⁾

(5) 温度補償システムの効果¹⁰⁾

図 8.17 に実際に 2 次温度係数を有する水晶振動子の温度補償を行なったときの周波数特性を示す。若干低温もしくは高温側で過補償ぎみとなるが、 $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 内では $\pm 1\text{ppm}$ の範囲に入る高精度の補償が行われている。無補償の水晶振動子の周波数温度特性は、 20°C を基点とすると、 0°C もしくは 40°C で約 -16ppm 、 -20°C もしくは 60°C では約 -64ppm まで変化する。したがって、 $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 範囲内での $\pm 1\text{ppm}$ の値は、非常に高精度であることが分かる。

シチズン エクシード Cal.193 のムーブメント仕様¹¹⁾ は以下の通りである。

ムーブメントサイズ	直径 26.0 × 20.8 × 23.7mm 厚み 1.95mm
水晶振動子	音叉型水晶振動子 (32,768Hz)
時間精度	年差 ± 10 秒
電池寿命	2 年
使用電池	小型酸化銀電池 (直径 9.5mm 厚み 1.6mm)

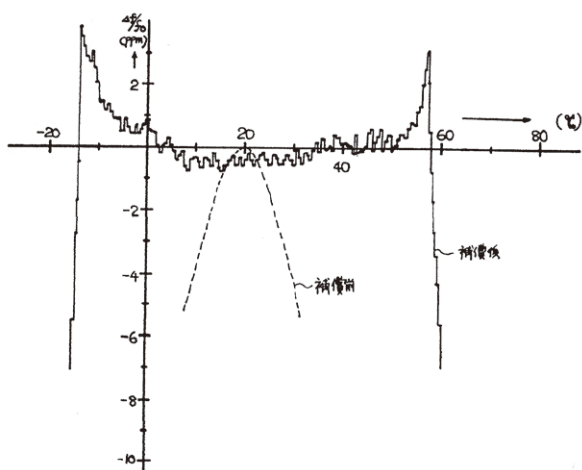


図 8.17 水晶温度補償周波数特性¹⁰⁾

8.2 セシウム原子時計の標準時をもとに作られる時刻情報を受信し時刻表示する技術

腕時計の中で完結した方式によってクォーツ腕時計の精度が、月差レベルから年差数秒という高精度を可能にした。時計の高精度化は更に開発が進み、数十万年に1秒の誤差といわれるセシウム原子時計の標準時をもとに作られる時刻情報を受信して、時刻表示する時計が開発される。常に時刻が高精度で合う機能と太陽電池による発電機能を合わせ持つことにより、時刻、日付合わせ、数年に一度の電池交換等、時計を扱う煩わしさから解放したウェアラブル機器へと進化した。セシウム原子時計の時刻情報を受信する方法として2通りの方式がある。

- (1) 全国各地に立てられた電波塔より送信される、国家基準の時計装置であるセシウム原子時計の時刻情報を持つ標準電波（長波帯）を受信して時刻、カレンダー等を表示する電波修正方式。
- (2) 約2万 Km 上空を周回する衛星からの時刻情報の信号を受信して正確な時刻、カレンダー等を表示する衛星電波修正方式。1基の衛星からの電波（極超短波）を受信し時刻表示する機能と4基以上の衛星からの電波で、GPS モジュールによって時刻および位置（緯度、経緯、高度）を認識して、その地域の時刻（時差）を表示する機能がある。

電波修正時計においては、通常の電子時計に比べて電波を受信する受信用アンテナのスペースが増加する。受信感度を考えるとできる限り大きなアンテナを設けたい。また、受信時の消費電力等も大きくなり必然的に大きいサイズの時計から開発が進んだ。国内においては、腕時計の電波修正時計よりかなり早く、セ

イコックロックから1963年クロックの電波時計が発売され、腕時計では1993年シチズン時計より世界初の多局受信型アナログ電波修正時計が発売された。海外では、1991年ドイツ ユンハンス社よりドイツ国内仕様のデジタル式電波修正時計が発売された。

衛星電波修正時計は、1999年カシオ計算機よりGPS機能を内蔵したデジタル式ウォッチ「プロトレック サテライトナビ」が発売され、2011年シチズン時計より太陽電池駆動のアナログ式「エコ・ドライブ サテライトウエーブ」、2012年セイコーエプソンの太陽電池駆動のアナログ式GPSソーラーウォッチが、「セイコーアストロン」の名称でセイコーより発売された。いずれも機能に特徴があり、世界初の商品として上市されている。

8.2.1 セイコー電波時計^{12) 13) 14)}

クロックの電波時計の開発は、当初はトランジスタ振子時計と合わせて進められた。その後てんぷ式電子時計と組み合わせ、取り扱い易さ、デザイン性も格段に上がった。（図8.18参照）

原理の概略は、通常はてんぷ式トランジスタクロックとして動いているが、NHKから発信されるラジオの時報音を受信し、時計本体に伝え、時刻を修正するしくみである。電波修正時計では、時報情報を確実に選別する必要があり、不正確な時刻情報を拾うと正確な時刻表示は不可能である。当時、ラジオの時報は、民間放送においては時報の方式が統一されていなかったため、NHKの時報を利用するのが一般的であった。また、サービスエリアが全国をカバーしていることも、有利な条件であった。NHK第1放送の周波数は、現在531kHz～1,584kHzとなっており、当時も現在より周波数範囲は限られているが、全国の地域により異なる周波数を使用していたので、クロック完成品では周波数535kHz～1,605kHzの範囲で調整可能になっている。

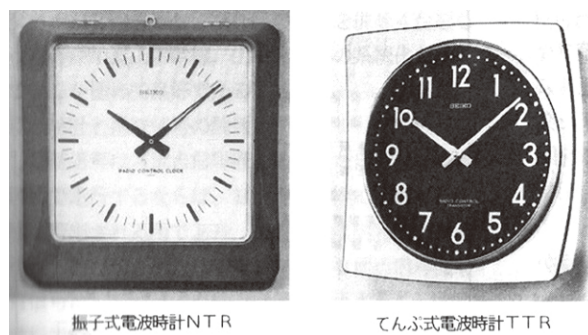


図 8.18 セイコー電波時計¹²⁾

図 8.19 にセイコー電波時計の構造を示す。特定の時間（7時の約1分30秒前）になると④接点機構によって⑥、⑦、⑧の電源⑤が入り、放送を受信する。正時に時報音（NHK880Hz）を検出し、⑧修正機構駆動回路に電流が流れ、修正機構が働く。このとき、⑩時刻表示に進み遅れがある場合は、輪列を回して正時に修正する。修正が終わり一定時間（約1分30秒）経つと受信機の電源が切れる。12時間後に再び同じ動作を繰り返す。分針の位置の修正は、分針軸に固定されたハートカムを規正レバーが押し、分針が正時の位置になるように分針軸を回転させて行なう。

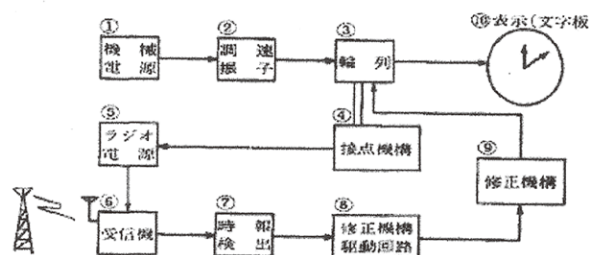


図 8.19 セイコー電波時計構造図¹³⁾

市場からの信頼度は高く、時計店や学校、家庭などの標準時計として愛用された。昭和45年6月「放送文化」という月刊誌に電波時計の興味深い記事が載っている。「NHKの時報を巧みに利用したおもしろい掛け時計がある。[中略]これは正確な時計を作る努力を放棄して、局の時報に頼る他力本願スタイルだが、まさに時計づくりの鮮やかな水平思考、しかも、コスト当たりの正確さは世界最高であろう」

セイコー電波時計の仕様は以下の通りである。

- ・表示方法：2針時計（時分針のみ）
- ・持続時間：1年

時計駆動用（単一乾電池 1個） ラジオ駆動用（単三乾電池 4個）

ラジオ電波受信による消費電力増に加え、スペース面において腕時計では多くの開発項目があり、商品化は容易ではないが、クロックサイズになると可能性は高まる。また、駆動用の電池交換もユーザーが簡単にできることから商品として成立し、高精度と信頼性を獲得できた良い開発事例である。

8.2.2 世界初多局受信型アナログ電波修正時計「シチズン電波修正時計 Cal.7400」^{15) 16) 18) 19)}

シチズン時計は、1975年に年差±3秒という高精度の腕時計を商品化していたが、何時かは修正しなければならぬと考え、電波受信を利用して狂わない時

計を作りたいとの思いから、1980年代後半、電波時計の開発に着手した。電波としては、AM/FM等いろいろ考えられたが、FMは周波数ごとにカバーする範囲が限定されており、時刻情報が入っていないため実現には、放送局との連携、莫大なアンテナ建設費負担等単独での自己開発は難しいと判断し、AMラジオ放送の時報を受信して修正する方法を検討した。試作品は1989年～90年頃完成したが、各国の時報を調査すると、日本のような時報を出しているのは日本以外で東南アジアの一部しかなく、ワールドワイドな商品として成り立たないため企画は保留となる。

1990年6月、長波（AM）の標準時刻電波についての情報を入手し、各国の長波（AM）標準時刻電波の情報を収集すると、日本、ドイツ、イギリス、スイス、アメリカ等で標準時刻電波が出ていることが分かった。長波標準電波は、国家の標準周波数を供給するために存在し、標準時刻電波とは、この標準電波に1コード/秒のスロータイムコード（時・分・秒・やカレンダー情報）を振幅変調したものである。ドイツ（DCF77:77.5kHz）、イギリス（MSF:60kHz）、スイス（HBG:75kHz）、アメリカ（WWVB:60kHz）、日本（JG2AS:40kHz、実験局）などがある。1991年5月頃から具体的な商品化に向けてスタートした年は、日本の実験局が本局化へ向け予算取りが検討され出した時期でもあった。開発の成果が、1992年4月のスイス パーゼルフェアで発表された。海外では1991年（シチズン電波修正時計の2年前）に、ドイツのユンハンス社よりデジタル式の電波修正時計が市場投入されていた。

1993年1月、シチズン時計より、世界初の多局受信型アナログ電波修正時計 Cal.7400が発売された。（図 8.20 参照）時計の中央に受信アンテナがある独特のデザインである。Cal.7400は、時、分、秒、24時間、カレンダー、受信の有無識別などの情報を7つの針で表示するアナログ多針タイプである。

外観および仕様の概要は、図 8.21 において大きく3つの表示に分けられる。

①モード表示（7時位置の表示針）

- ・8時位置のボタンを押すと、モード切り換えができる。
- ・モード針・・・1周6ステップで6モード表示

②時刻表示（3時位置の表示針）

- ・同軸で、24時、時、分、秒の時刻表示を行なう。
- ・24時、時、分表示と秒表示の2つのモーターを使用する。



図 8.20 アナログ電波修正時計「シチズン電波修正時計 Cal.7400」

(出典：シチズン時計)

③機能表示（10 時位置の表示針）

- ・通常はサマータイムのセット状態を表示する。
- ・10 時位置のボタンを押している間、カレンダー表示する。
- ・2 時位置のボタンを押している間、受信結果を表示する。

前回の受信タイミングで受信成功の場合：

機能針（日針）が"ON" を表示する。

前回の受信タイミングで受信失敗の場合：

機能針（日針）が"OFF" を表示する。

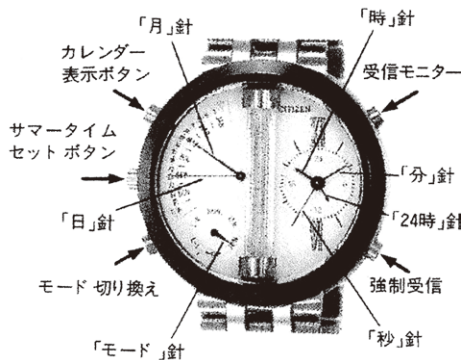


図 8.21 電波時計の表示の見方¹⁷⁾

シチズン電波修正時計の差別化の開発ポイントは以下の通りである。

- ・防水時計とする。ドイツ ユンハンス社製は、皮バンドにアンテナが組込まれており防水性は難しい。
- ・アンテナは、時計本体のヘッドの中に組込む。
- ・時計メーカーらしい電波時計を作る。
- ・時計本来のアナログ式電波修正時計とする。難しい技術開発に挑戦する。

・外装は金属にこだわる。

・ワールドワイドな時計仕様とする。(世界の複数地域で使えるもの)

他社にない多局仕様とする。日本（茨城県三和町）、ドイツ（マインフリンゲン）、イギリス（ラグビー）、アメリカを検討地域とする。後にアメリカ（時差が大陸内で4つあり、世界標準時1つのみでは時差を識別できないため）を外した。図 8.22 に受信地域を示す。開発当時、日本の時刻標準電波は、茨城県三和町にある名崎送信所（当時、郵政省通信総合研究所の実験局）から1キロワットで送信されていたが、半径約500km 内で全国をカバーできていなかった。1999 年6 月から福島局で運用が始まると同時に、電波の出力が50kw へと強化され、受信範囲も約1,200km と広がった。さらに、2001 年10 月、新たに九州局からも電波が送信されるようになり、日本全国で電波の受信ができるようになった。

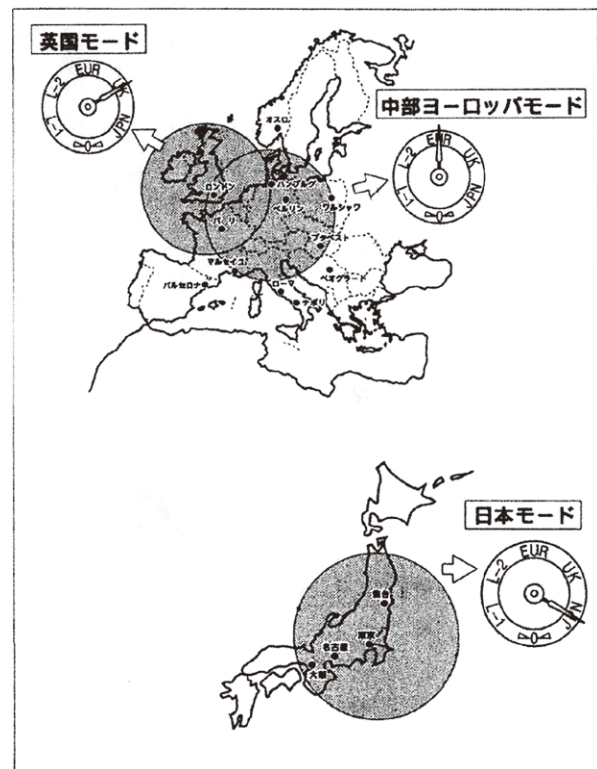


図 8.22 受信地域¹⁷⁾

開発ポイントを達成するための、技術テーマは以下の通りである。

- ・アナログモーターのノイズ対策、アンテナの小型化、各 부품の受信影響を軽減したノイズシールドと部品レイアウト。
- ・外装部品の金属化でアンテナが受信し難くなるため、外装のベゼルのみセラミックスの採用。
- ・受信し易いようアンテナを文字板中央に配置するこ

とによるセパレート表示方法。(4 モーター構成等)
 ・できる限り厚みを抑えるため、風防ガラスのアンテナ逃げ部の特殊加工を実施する。(図 8.23 参照) 従来の風防製作会社では出来ず、レンズメーカーに依頼する。

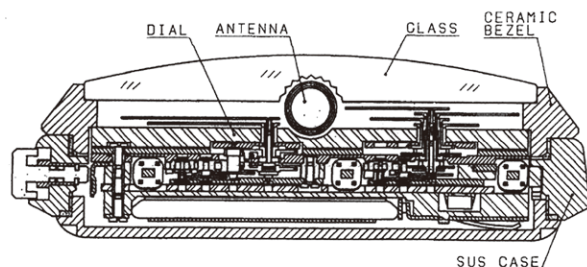


図 8.23 電波時計の断面図¹⁸⁾

アンテナを時計ケースに内蔵するための主要技術である、小型アンテナの開発、受信感度に関する時計ケース構造、ムーブメントのノイズ対策について述べる。

(1) 小型アンテナの開発

長波を受信するための小型アンテナは、軟磁性体を磁心にして銅線を巻いたバーアンテナを使用する。アンテナ感度を高めるには、できる限り大きくする必要がある。しかし、ウォッチという限られたスペースでは難しい課題である。

Cal.7400 では、長さ 30mm 径 3mm のマンガン・亜鉛フェライトコアに 480 ターンの巻線で構成し、長さ 30mm 径 4mm という超小型のバーアンテナを実現し、ムーブメントのレイアウト設計においても、金属部品等から極力遠くになるよう配置し、時計ケース内に内蔵した。また、多局選択であるため、モード選択スイッチを同調容量の切り換えスイッチを兼ね、同調容量の選択を行なう。

(2) 受信感度に関する時計ケース構造

図 8.23 に示すように、電波の入口であるアンテナの両端を金属で遮蔽しないよう、断面的にアンテナの高さの部分にはセラミックベゼルを採用し、金属ケース部はアンテナの磁心の下面までとする。金属のケース胴が可能となり、高級感のある時計となった。

(3) ムーブメントのノイズ対策

アンテナを時計ケース内に入れたことにより、アンテナとムーブメントが近づきムーブメントから発生するノイズが、受信に影響を与える。最大のノイズは、

ステップモーターの漏洩磁束であり、その影響を排除するため、アンテナとムーブメントの間をシールド板で遮蔽する。

結果、中央ヨーロッパモード（ドイツ）、イギリスモードでは電界強度が 55μdBV/m、日本モードでは電界強度が 50μdBV/m でも受信できるようにした。図 8.24 の長波電波の距離と電界強度の関係より、中央ヨーロッパモード、イギリスモードでは約 800km、日本モードでは約 500km の地点でも受信できることが分かる。

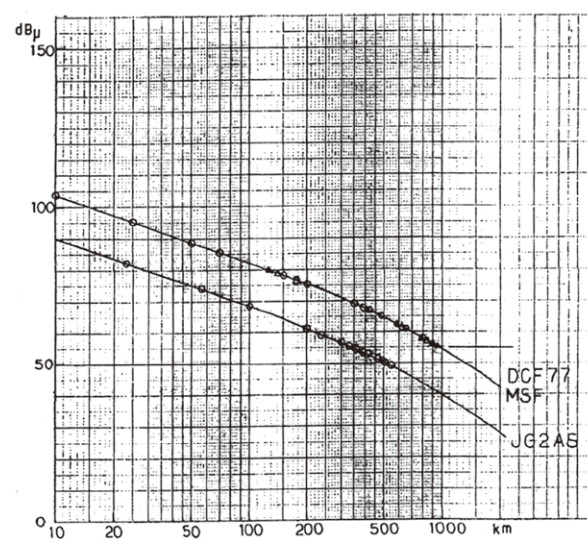


図 8.24 長波電波の距離と電界強度の関係¹⁹⁾

Cal.7400 の特徴とムーブメント仕様は以下の通りである。

①特徴

- ・モード切り換えにより、日本、中央ヨーロッパ、イギリスの電波も受信できる。
- ・通常時刻の他に任意のローカルタイムを 2 つ設定でき、合計 5 つの地域の時刻を持っている。
- ・電池交換時などには、針位置記憶機能によって針を停止して、その針位置情報を不揮発性メモリーに記憶させる。電池交換後、不揮発性メモリーから針位置を読み出し運針を開始し、受信可能地域では電波を受信すれば標準時刻が設定できる。この機能により、ユーザーは基準位置に針を合わせる必要がなくなり、操作フリーの腕時計が完成した。

②ムーブメント仕様

- ・ムーブメントサイズ：直径 35mm 厚み 5.4mm
- ・自動受信機能
 - ：偶数日 午前 2 時
 - 奇数日 午前 4 時
 (電波が反射する電離層が、昼より夜中の方が高くなり、反射波が遠くまで届

く。)

- ・時間精度 : 受信時 セシウム原子時計精度 月差 $\pm 10^{-9}$ 秒以内
非受信時 月差 ± 15 秒以内
- ・電池寿命 : 約2年
(自動受信1回/日、強制受信1回/週)
- ・使用電池 : リチウム電池
(直径20.0mm 厚み1.6mm)

1999年6月実験局から本局運用に、また電波出力が大きくなるのを機に、国内各社より電波修正時計が市場に出回るようになる。その後、ステップモーター、電子回路等の低電力化により、電波修正時計も太陽電池と二次電池を組合わせた太陽電池電波修正時計へと移る。電波修正での時刻合わせ不要、数年での電池交換不要など操作フリーの腕時計として完成度を高めた。シチズン時計も電波時計をエコドライブ化へと開発を進めた。シチズン電波修正時計の開発経緯を示す²⁰⁾。

- ・1994年、アンテナを9時側のブラケースに収納して外部アンテナのデザインとする。(Cal.8410)
- ・1996年、アンテナの配置は、CAL.8410と同じ、光発電エコドライブ電波時計を商品化する。(Cal.9410 図8.25 参照)
- ・2001年、デザインを一般のクォーツ腕時計に近付ける、アンテナ内蔵型電波時計(セラミックケース)を商品化する。アンテナを時計内に収納する場合、アンテナサイズを従来の1/2にする必要があり、受信性能低下が避けられないが、アンテナ性能、受信ICの改善により対応した。(Cal.A410 図8.26 参照)
- ・2003年、世界初フルメタル電波時計の商品化により、一般のエコドライブ腕時計(太陽電池腕時計)に近づき、多いに市場に受け入れられた。アンテナを金属ケース内に収納する場合、受信性能が従来の1/10まで低下するが、アンテナ性能、受信IC、外装の改善により受信性能を確保した。(Cal.H410 図8.27 参照)

8.2.3 世界初GPS内蔵ウォッチ プロトレック“サテライトナビ”²¹⁾

1999年カシオ計算機より、GPS機能を内蔵したデジタル式アウトドアウォッチ、プロトレック“サテライトナビ”が発売された。(図8.28 参照) アウトドアシーンにおいて、GPS機能による現在の緯度・経

度の計測が可能で、自分のいる場所や目的地までの距離と方角を手軽に確認できる。また、デジタル表示により、目的地の緯度・経度を設定することで、現在地



図 8.25 Cal. 9410²⁰⁾



図 8.26 Cal.A410²⁰⁾



図 8.27 Cal.H410²⁰⁾



図 8.28 プロトレック“サテライトナビ”
(出典：カシオ計算機)

から見た方角と距離をグラフィックに表示する。

GPS 計測時間の短縮を図るため、衛星から配信される軌道データ（アルマナックデータ）を EEPROM に記憶させ、このデータとあらかじめ登録したエリア、時間をもとに、現在上空にある衛星の位置を想定して計測を行う方式である。電源は一次電池を採用している。

8.2.4 世界初シチズン太陽電池アナログ式衛星電波修正腕時計「エコ・ドライブ サテライトウエーブ Cal.H990」^{22) 23)}

2011 年シチズン時計より、世界どのような場所においても、正確な時刻、カレンダー情報を受信し、正しい時刻を表示できる世界初太陽電池アナログ式衛星電波修正腕時計「エコ・ドライブ サテライトウエーブ」が発売された。地球から約 2 万 km 離れた宇宙空間で周回する人工衛星から時刻情報を受信して正しい時刻を表示する。長波帯の電波修正時計は、日本、中国、アメリカ、イギリス、中央ヨーロッパ地域のエリアでの受信に対して、人工衛星を用いることで全世界で受信が可能となる。図 8.29 にモデルを示すが、デザイナーの思いは「人工衛星と繋がる時計であることから、宇宙という言葉が浮かび、太陽や光、地球と衛星の関係などをデザインに落とし込む」ことであった。大変斬新なデザインである。



図 8.29 エコ・ドライブ サテライトウエーブ
(出典：シチズン時計)

①サテライトウエーブの特徴

時刻・カレンダー情報のみを受信するため、見えている人工衛星は 1 基あれば受信でき、受信時間は大変短く時刻表示も素早く処理できる特徴がある。

②受信の操作方法

手動受信の場合：4 時位置のプッシュボタンを 2 秒間押し続ける。→秒針が受信中を指し、受信を始める。→受信が完

了すると、秒針が現在時刻を表示する。

環境受信の場合：72 時間以上、人工衛星からの受信操作をしていない場合に腕時計が自動で受信を行なう。（環境受信は、時間帯や発電・充電状態など様々な条件を満たした場合のみ行なう。）

その後、GPS システムを利用した全世界のタイムゾーンに対応した製品も開発、発売している。

8.2.5 世界初アナログ式 GPS ソーラーウォッチ「セイコーアストロン」^{24) 25)}

セイコーエプソンは 1969 年世界初クォーツ腕時計「アストロン」を開発し、機械式の 100 倍の精度を得た。腕時計の高精度化は、世界の限られたエリアではあるが、電波修正時計の出現により更に進んだ。2012 年に世界初アナログ式 GPS ソーラーウォッチがセイコーより発売され、限られたエリアではなく、世界で初めて地球上のあらゆる場所で、いつでもすばやくユーザーの位置情報を特定して、その位置の正確な現在時刻を得ることが可能となった。（図 8.30 参照）



図 8.30 GPS ソーラーウォッチ＜セイコーアストロン＞
(出典：セイコーウォッチ)

GPS を使った測位システムとの融合で、世界全 39 のタイムゾーンのどこに居るのかを判断して、その場所の正確な時刻を表示する方式である。独自開発の GPS モジュールが、4 基以上の GPS 衛星からの電波によって緯度・経度・高度情報を特定し、ユーザーの現在地を特定する。この方式は約 2 万 km 上空からの微弱な衛星信号を受信する必要がある、標準電波を受信する電波修正時計の約 1000 倍の電力を必要とする。GPS モジュールはいずれのメーカーも時計用の低消費電力化の要望にはとても対応できなかったため、結果的には、セイコーエプソンの開発部門において開発されることになった。

また、一般的な GPS 機器に使用されるパッチアンテナは、ウォッチの金属外装と干渉して十分な感度を得られないという大きな課題であった。本項では、その大きな課題に対する解決技術について述べる。

(1) 低消費電力について

低消費電力化については、効率的な受信システムの構築、デバイスの低消費電力化の2点より進めた。

①効率的な受信システム

本ウォッチでは、ユーザーがタイムゾーンの修正を必要とする場合と、時刻だけの修正でよい場合に分けて受信モードを選択するシステムを採用している。

- ・ユーザーがタイムゾーンを跨ぐ移動をした場合、ユーザーのボタン操作で通常の GPS 機器と同様に、4 基以上の衛星の軌道情報を取得し測位演算する。ユーザーのいる位置と正確な時刻を算出し、それに応じたタイムゾーンを内部メモリから読み出し、その場所に適したローカルタイムに修正する。(受信環境の良い場所で、最短 30 秒程度の時間が必要である。)
- ・タイムゾーンを跨ぐ移動がない日常生活では、ユーザーが特定な操作をしなくても、ウォッチが受信可能な環境か判断して、受信可能であれば自動で時刻だけを受信する。(時刻情報だけの取得なので、最短で 6 秒程度の短時間である。)

このように、ユーザーの生活にあった受信モードを選択することにより、受信時間を大幅に短縮しエネルギー収支に貢献している。

②デバイスの低消費電力化

デバイスの消費電力においては、特に GPS モジュールと電源制御 IC の消費電力が大きい。

- ・GPS モジュールは、デジタル処理を徹底的に見直し、時刻取得に特化した専用の制御方式を取り入れ、大幅な低消費電力化を実現した。当時の低消費電力の GPS モジュールに対して約 1/5 の消費電力となっている。
- ・電源制御 IC は、GPS ソーラーウォッチ用に開発した小型リチウム二次電池に合わせた充放電制御方法、電圧制御方法を開発し、二次電池の安全性の確保とともに制御の効率化を図り、従来の電源制御 IC の 1/10 の低消費電力化を実現した。

(2) 受信感度向上と高品位外装の実現

GPS ソーラーウォッチのアンテナ部の構造は、図 8.31 に示すように、文字板の上に文字板を囲むようなリング形状でアンテナを配置している。アンテナは誘

電率の高いリング状の基材に無電解めっきでアンテナパターンを形成し、外周のフックでムーブメントに固定する構造である。



図 8.31 リングアンテナ部²⁵⁾

この構造による利点は以下の通りである。

- ・通常 GPS 機器に用いられるパッチアンテナの場合、金属外装の干渉を抑えるため外装から離し外装が大きくなる。また、パッチアンテナを文字板上に配置できないため、ムーブメント内部に入れ込む必要があり、ステップモーターや電子部品からの発生ノイズによって受信感度が劣化する課題がある。このリングアンテナ構造により、課題が解決できムーブメントのレイアウトも自由にできるようになる。
- ・ソーラーパネルも受信に影響を与えるため、アンテナを文字板より下に配置する場合は、アンテナの上に位置するソーラーパネルにアンテナ部の切り欠きが必要になるが、リングアンテナによってソーラーパネルを文字板全体に配置でき、発電量の確保に貢献する。

GPS ソーラーウォッチ<セイコーアストロン>の受信性能であるが、図 8.32 に示すように空が十分見える場所 (Open Sky) でのフィールド試験結果は、時刻取得は最短で 6 秒、平均 10 秒程度の受信時間では



図 8.32 Open Sky の例²⁵⁾

は100%の取得結果であった。タイムゾーン取得は最短で30秒でほぼ100%の結果となった。

一方、図8.33に示すようなビル街 (Urban Canyon) における受信でも、時刻取得は平均9秒程度の受信時間でほぼ100%、タイムゾーン取得は約80%と高い受信性能を確保している。



図 8.33 Urban Canyon の例 ²⁵⁾

参考・引用文献

- 1) 政木広幸：「年差時計の技術動向と展望」マイクロメカトロニクス Vol.53No.200 pp.74-83 2009年6月
- 2) 山田邦晴：「水晶時計の温度補正について」日本時計学会誌 No.78 pp.64-71 1976年9月
- 3) 野中啓：「並列接続2本水晶による腕時計の開発」日本時計学会誌 No.91 pp.2-13 1979年12月
- 4) 赤羽好和, 小河徳門：「ツインクォーツによる高精度腕時計の開発」日本時計学会誌 No.89 pp.1-19 1979年6月
- 5) シチズン時計株式会社：技術解説書「シチズン〈クォーツ〉クリストロン・メガ8650」p.3
- 6) シチズン時計株式会社：「シチズン技術研究所40年史 腕時計用水晶振動子の開発」pp.54-55
- 7) シチズン時計株式会社：社内報「クリストロンーMEGA」pp.20-21
- 8) 国際時計通信社：「クリストロンーMEGA Cal. 8650A - f4.2MHzのシチズン〈クォーツ〉-」p.413
- 9) シチズン時計株式会社：技術解説書「Cal.193」
- 10) 関根光雄：「高精度周波数温度補償システム」日本時計学会誌 No.106 pp.1-10 1983年9月
- 11) シチズン時計株式会社 時計資料室：社史台帳 053-08
- 12) 「SEIKO 時計の戦後史」編集委員会：「SEIKO 時計の戦後史」pp.188-189 1996年3月28日発行
- 13) 精工舎 社内報：「せいこう 新製品紹介」p.37 1963年7月
- 14) 精工舎：クロック技術解説書「セイコー電波時計」pp.TTR1-20
- 15) シチズン時計株式会社：Cal.7400 電波修正時計開発物語メモ (長谷川忠史) 2002年6月25日
- 16) シチズン時計株式会社：「シチズンライフ 電波時計・新発売」pp.10-11 1993年4月
- 17) シチズン時計株式会社：シチズンライフ 時間精度のあくなき追求」p.8 1993年9月
- 18) 梅本隼雄, 昼田俊雄, 八宗岡正, 五十嵐清貴, 青木昭雄：「長波電波ウォッチの開発」日本時計学会誌 No.146 pp.51-63 1993年9月
- 19) 八宗岡正, 藤田憲二, 中村文雄：「長波電波ウォッチの受信システム」日本時計学会誌 No.146 pp.64-72 1993年9月
- 20) 八宗岡正：「シチズン電波時計の歩み」マイクロメカトロニクス Vol.59 No.212 pp.46-49 2015年6月
- 21) カシオ計算機株式会社：NEWS RELEASE「世界初 GPS 機能を内蔵したアウトドアウォッチ」1999年1月
- 22) シチズン時計株式会社：社内報 Hours「サテライト」Vol.20 2012年1月6日
- 23) シチズン時計株式会社 HP. (<http://citizen.jp/news/2011/20110615.html>)：製品と技術
- 24) セイコーウォッチ株式会社：広報資料 2012年3月
- 25) 本田克行, 柳澤利昭：「GPS ソーラーウォッチの開発」マイクロメカトロニクス Vol.58, No.210 pp.1-6 2014年6月

9 | 日本時計産業の変遷および生産推移について

人の一日の生活を振り返ると、常に時間と密接に繋がりが時間と共に行動している。その基準となる時間を、身近な存在にさせたのが時計である。いつの世にも、時間標準は異なるが時間を計測する道具は存在した。人々は、その道具をウェアラブル機器へと進化させ、時間精度と携帯性の向上を限りなく求め続け、エレクトロニクス製品の中でも小型薄型・省電力機器（軽薄短小）の先頭を走るクォーツ腕時計に辿りついた。高級ブランドの機械式腕時計分野は、スイスメーカーのブランド力が強く国内メーカーは苦戦を強いられている。「時計はスイス」という言葉があるように、日本の時計作りは海外の模倣から始まり、先人の努力によって精度・品質ともに追いつき今日に至った。現在、世界をリードする魅力的な商品を、数々生み出している日本の時計産業について述べる。

9.1 日本時計産業の変遷¹⁾

日本時計産業の歴史を、「東洋のスイス」を目指し日本独自の時計作りをスタートさせ、現在に至る現代日本時計産業とそれ以前の概況について述べる。

9.1.1 現代日本時計産業の幕開けまで

日本における時計産業の歴史は、16世紀中期のキリスト教の伝来とともに始まったといわれる。宣教師に時計、オルガン、天文機械等の制作法を教わった。

江戸時代に入り、外国から輸入された機械時計を参考に時計が多く作られるようになる。江戸時代の時計作りに大きな影響を与えたのが鎖国である。鎖国時代、欧米で用いていた「定時法」ではなく、「不定時法（日出と日没を境に昼と夜に分け、それぞれ6等分する）」を採用しており、日本独特の和時計を生み出している。夏と冬では昼と夜の長さが異なるため、それに対応した複雑な機構を作り出した。

1872（明治5）年に太陰暦から太陽暦に変わるとともに、時刻の表し方も「不定時法」から「定時法」へと変わった。和時計の終焉を迎え、欧米からの時計生産技術の導入が積極的に図られた。

1875（明治8）年に東京麻布の金元社で、柱時計（ボンボン時計と呼ばれた）を作り出す。その後、木曽川の木材集散地であり、木工職人、小物鍛冶職人が多く居た名古屋地方で発達した。図9.1にクロックの側塗装工場の様子を示す。



図 9.1 クロックの側塗装工場¹⁾

1894（明治27）年に大阪時計製造が、米国企業より機械設備を導入し米国人技師のもと、アンクル脱進機の懐中時計を製造したのが、工場生産の始まりとされている。明治後期の時計工場数は、20を数え、全国の生産数（置掛時計）は年間約380万個であったといわれている。日本の時計産業は、手工業型であるが日本人の器用さにより技術力が向上し、後の発展の牽引力となった。

9.1.2 現代日本時計産業の概況

戦後、日本時計産業は「東洋のスイス」をめざしスタートするが、第二次世界大戦の傷跡は大きく、戦災による設備能力の喪失は、ウォッチで60%、クロックで30%に及び、残った機械類も軍需生産に酷使され甚だしい性能低下を来していた。このような状況の下でも、豊富な労働力、残された機械、僅かに保有していた資材を利用して生産に乗り出した。その後も、資材の入手難および材質の低下、電力供給の悪化、労働問題など、他産業と共通の課題を抱えていた。

しかし、戦時中の時計不足を満たすための需要は内外ともに多く、作れば売れる状況であり、生産は年々増加の一途を辿り、一時は、企業数50社近くに、工場数約70、従業員数約1万人を数えたといわれている。この好況は、戦中の供給不足が生んだ一時的現象であり、機械設備の老朽化、海外技術導入の途絶など課題が露呈し始めて、質的には戦前より劣っていた。（図9.2参照）



図 9.2 昭和 20 年代の工場の様子¹⁾

1948 (昭和 23) 年商工省が実施した第 1 回の品質比較審査会 (時計コンクール) の結果では、止まりの故障が極めて多く、ウォッチで 34%、クロックで 28.7% の比率を示しており、翌年 1949 (昭和 24) 年第 2 回においても、それぞれ 21.6%、14.9% と向上したものの、全般的にはまだ戦前の水準には及ばなかった。

1950 (昭和 25) 年初め、通産省が手動機 200 台、半自動機 300 台の自動化を含む、「時計工業合理化目標及び進捗状況」を発表したが、中小企業の多い国内時計業界にとって、一私企業の力での設備資金の調達、極めて困難であり、合理化目標の達成は遠かった。しかしながら、輸入制限および保護関税による国内市場の確保とともに、1947 (昭和 22) 年 8 月以来の貿易再開後は、為替安によって主に東南アジア市場に輸出し、国内の旺盛な需要にも支えられて生産を伸ばさせることができたが、品質を買われたとは思われぬ状態であった。

この後、国内市場においては、ドッジ・プラン「緊縮健全財政政策」および時計の高い物品税 (時計には戦時から 1947 (昭和 22) 年 3 月まで 60%、以後 1948 年 7 月末まで 50%、その後 30% の物品税) により、国内景気の冷え込み、国民の購買力の減退が起こった。更に、1949 (昭和 24) 年 4 月、時計の 2 本建てレート (懐中・目覚 430 円、腕・置・掛 410 円) が、360 円の円高単一レートに変更された。また、当時時計輸出の 70% がポンド地域向けであったが、1949 (昭和 24) 年 9 月のポンド切下げ実施などにより、輸出が大きな影響を受けた。このような状況により、国内需要の停滞を輸出により回復しようとする時計産業は、甚大な打撃を被ることになる。

日本の時計産業が本格的に立ち直りを見せたのは、

1950 (昭和 25) 年 7 月に勃発した朝鮮動乱に負うところが大きい。偶々、高度な精密機械をスイスより輸入することができ、従来の老朽化した機械に替わり、最新の精密機械によって高品質の時計が生産できるようになった。朝鮮動乱による日本経済の急激な立ち直りに伴い国内需要は活発化し、1954 年には、戦前の最高生産高を上回る 560 万個を記録した。また、質的にも、本格的な部品の互換性をもつ段階に近づいて、精度でスイスの時計を追う兆しを見せ始めた。当時は、外国時計に対する輸入制限と高率の関税障壁に国内市場は守られていたが、朝鮮動乱以来、激増した密輸時計と米軍兵士が持込む中古時計が氾濫、横行し、時計の正式輸入が認可された 1952 (昭和 27) 年以降も安価な密輸時計で市場は混乱し、国産時計の売行きにも多大な影響を及ぼした。

第二次世界大戦は、日本の時計産業に計り知れない技術的後進性をもたらした。戦中の 5 年間、時計生産技術の進歩が阻止され、中立国スイスとの間に大きな開きを生じた。例えば、次のような点は日本の水準を遥かに抜いていた。

- ・自動巻ウォッチの完成
- ・防塵、防水装置の実用化
- ・磁気不感性ぜんまいの開発
- ・耐震装置の一般化

これに対し日本は、1949 (昭和 24) 年に紳士用中三針形式を採用し始め、1952 (昭和 27) 年にはカレンダー付時計、1955 (昭和 30) 年には自動巻時計、そして 1956 (昭和 31) 年に耐震装置付きの時計を発表する。当初、輸入の合金ヒゲぜんまいを使っていたが、やがて国産化に成功して部品精度、部品の仕上がりでもスイス製品の水準に迫っていた。しかし、1957 年頃までは正規輸入あるいは密輸入でのスイス時計が、依然として品質と流行をリードし、性能、デザイン、コスト等あらゆる面で優っていた時期でもあった。

昭和 30 年代、日本時計産業界は技術の遅れを取り戻すことが急務となり、各種施策が以下のように実施されている。1956 (昭和 31) 年、中小クロック企業の時計生産技術の改善発達を目的にした「(財) 日本時計生産技術開放研究所」の設立、1957 (昭和 32) 年、企業近代化のための「企業合理化促進法」、1959 (昭和 34) 年の「機械工業振興臨時措置法」の業種指定である。

民間側においても、品質の一層の向上を目標に、脱進機、调速機、歯形、真類 (金属よりなる棒状の部品)、軸受の研究分析、材料、部品、工具類の研究開発が産学共同で進められた。生産の合理化を図るため、高性

能の自動加工機、測定器、工作機械等を導入した。

数年の間に、工場設備は全く一新され、生産効率、加工精度も著しく向上したと同時に、ベルトコンベアシステムによる流れ作業が可能となった。また、品質管理をはじめ各種管理技術を生産工程に導入し、作業の標準化、工程管理の充実が図られ近代的な量産体制が確立された。(図 9.3 参照)



図 9.3 流れ作業、コンベアシステム作業の様子¹⁾

昭和 30 年代後半に入り、品質は海外品と遜色のないほど向上し、機能、デザインなど変化に富んだ製品が多くなり、1959 (昭和 34) 年以降の一般景気の上昇による内需拡大に伴って、生産は急伸長を遂げた。特に 1955 (昭和 30) 年から 1964 (昭和 39) 年の 10 年間の伸びは、ウオッチが 5.9 倍、クロックが 3.2 倍と著しかった。(図 9.4 参照)

国内需要が急拡大したのは、国産品の品質向上とともにその評価が高まったことと、以下のことが考えられる。

- ・戦後の空白期間により膨大な潜在需要が生じたこと
- ・所得水準の上昇に伴って、需要層が低年齢層にいたるまで拡大したこと
- ・時計に対する意識が、貴重品、奢侈品 (しゃしひん) から生活必需品、流行商品、装飾品へと移行したこと

この後、普及の頭打ち、内需の伸びの鈍化の見込みから、成長力維持のためには輸出拡大の方策を講じる必要に迫られ、1959 (昭和 34) 年頃より海外市場に対する本格的な調査が始まる。1963 (昭和 38) 年、軽機械の他の 7 業種と共同の軽機械センターが開設され、輸出振興、市場調査の面で期待された。

この頃になると、日本の時計は、品質面で国際水準

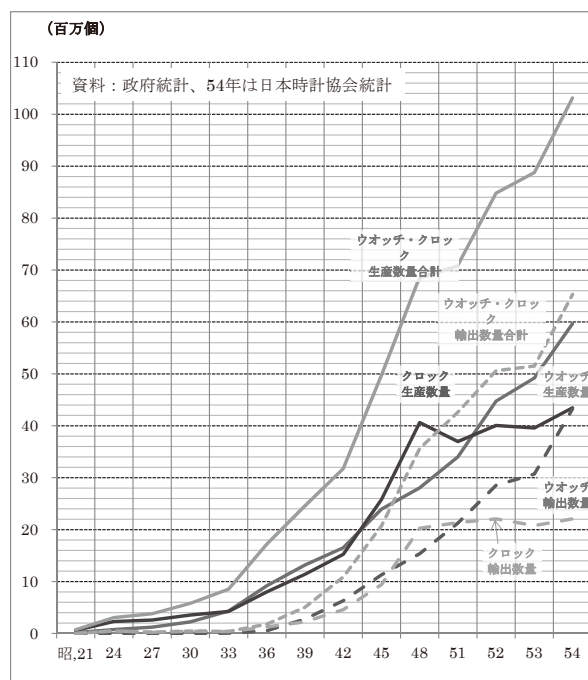


図 9.4 戦後の時計生産、輸出推移¹⁾

に達しており、コストダウンにより価格も安く、十分な国際競争力も備えていたが、日本品に対する信頼性、ブランドイメージの低さなどが、輸出促進の阻害要因となっており、各センターは、各地の情報収集、現地マスコミを媒体とした広範な宣伝活動などを展開した。

1964 (昭和 39) 年のオリンピック東京大会で、競技計測システムに国産時計が初めて採用され、その正確で統一されたシステムが一躍注目を集める一方、スイスでの時計コンクールにおいて、国産ウオッチが上位を独占するなど、日本の時計技術の高さが広く世界に認識されるとともに、ブランド知名度も一挙に上がり、以降の飛躍的な輸出拡大に繋がる。図 9.4 に示すように、1955 (昭和 30) 年代、旺盛な内需に支えられた生産の伸びは、1965 (昭和 40) 年代以降になると、急速な輸出拡大が大きく伸びに寄与している。日本の代表的輸出産業の一つとして発展を続け、国内の不景気に遭遇し内需不振となっても、輸出でカバーし得る体制を確立した。この結果、1963 (昭和 38) 年の輸出比率 23% から 1970 年に 31%、1974 年には 42% に上昇した。特に、ブランドが強化されたウオッチの伸びは著しく、1974 年の輸出比率は 56% に達し、スイスに次ぐ生産、輸出国となった。

日本における電子化への動きは、クロックにおいては 1955 年代から始まっていたが、ウオッチでは 1965 年代に入りスタートする。1966 (昭和 41) 年、動力源をぜんまいの代わりに電池に置き換えたウオッチが出現する。自動巻が主流であった当時、ぜんまいを巻

く必要のない電池式ウォッチは、新機軸なものではあったが、精度上の貢献は少なかった。

1970（昭和45）年、機械技術と電子技術の融合を目指す、金属音叉を調速機とする電子音叉式ウォッチが現れる。音叉式ウォッチは、日差を一躍2〜3秒程度に縮め、時間精度の向上に一役果たしたものの、クォーツ腕時計の出現によって世界的な趨勢にまでは発展しなかった。

一方、クロック類には1962年頃より採用され、その高精度が認められていた水晶振動子をウォッチに利用することが試みられていた。スペース上制約があるウォッチの中に、如何に入れ込み携帯可能な小型なものにするか研究が進められた。

1967（昭和42）年、クォーツ腕時計の試作モデルが、日本とスイスにおいて同時に完成する。そして、1969（昭和44）年水晶式アナログタイプのウォッチが、世界で最初に日本によって商品化された。時計本来の特性である高精度化を追求し、日差0.3秒前後という機械式時計の100倍近い精度を有するウォッチとして市場に出された。この商品化を可能にした電子技術の応用は、日本のみならず世界の時計産業に大きな変革をもたらした。電子技術の導入は、企業に生産体制の変革を促すと同時に生産性を著しく向上させ、さらには画期的製品をも生み出すことになる。1973（昭和48）年、機械部分を全く持たない全電子ウォッチ、すなわち液晶デジタルウォッチを、日本が世界に先駆けて商品化する。（図9.5参照）



図9.5 世界初のクォーツ腕時計
（出典：セイコーウォッチ）

時計の電子化への進展は、普及の飽和状態にあった市場に新たな需要を喚起すると同時に、従来以上に量産工程を可能にし、他業種からの参入もあり、日本では新たにウォッチで2社、クロックで4社が時計産業に加わった。各構成部品の性能は急向上し、量産化によってコストダウンも急速に進み、機械式の価格帯ま

で低減したため、国の内外における価格競争は一段と激しい方向に進む。

1968（昭和43）年頃より始まった国内企業の海外進出は、生産の海外移転による効果のみならず、投資先からの逆輸入、投資先への資本財、半製品輸出などの効果を通じて、国内産業構造の変化を推進した。労働集約型産業である時計工業は、豊富な労働力と低賃金を求めて、韓国、台湾、香港、シンガポール、フィリピン等に第二の生産拠点を求めると同時に、これら発展途上国の経済発展にも貢献した。

技術面のイノベーションの進行と共に、生産、輸出とも順調に推移し、1979（昭和54）年の生産は、ウォッチ5,970万個、クロック4,350万個、総生産は1億個を超え、名実共に世界第一の時計生産国に成長した。競争相手国であるスイスが、クォーツ腕時計の将来予測を誤ったための電子化への対応の立遅れ、スイスフランの高騰などにより、低迷・後退を余儀なくされているのに反し、日本は、価格競争力の強み、クォーツ式の技術での先行から、着実に国際的なシェアを伸ばしていった。図9.6に示すように、その後の主流となるクォーツの生産比率を年毎高めており、1978（昭和53）年40%、1979年57%となっている。図9.7

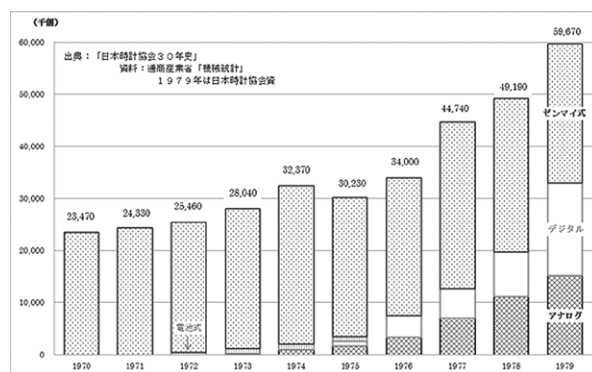


図9.6 1970年代の日本のウォッチ生産
（電子化への推移）¹⁾

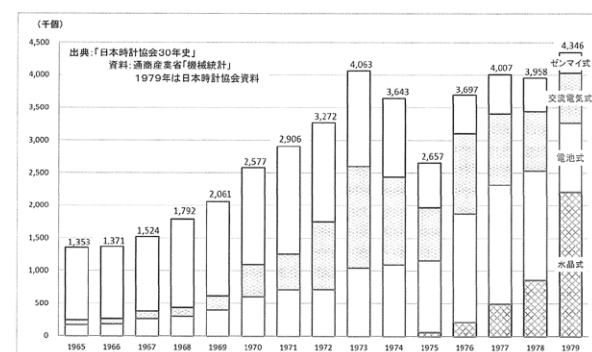


図9.7 1970年代の日本のクロック生産
（電子化への推移）¹⁾

に示すのは、クロックの電子化による機種の変遷の状況であるが、ウォッチと同様、機械式、交流式が落ち込み、水晶式がその一部を占める電池式が急速に伸びている。クォーツ式は、1979年においてクロック全生産の50%に達した。

時計の電子化への変化は、流通面にも大きな変革をもたらした。機械式時計時代は、保守的な流通秩序が維持され時計専門店中心であったものが、電子化と共に、スーパー、ディスカウントストア等大型流通店、その他電器店など他業界販売に中心が移り、小型の時計専門店等に多大な影響を与えた。

国内時計メーカー各社は、時計の時間精度、信頼性、携帯性等の向上、追求に様々な知恵を結集してきた。太陽電池発電、自動巻発電、熱発電、ぜんまい駆動発電等エネルギーを作り出し、利用する知恵で地球資源の保護、各種センサーによる計測機能付き時計、金属アレルギー対応等の消費者保護に力点を置いた商品作りを進めた。時計は、更なる高機能化、高時間精度化、通信機能、健康分野への応用、太陽電池発電電波修正時計、太陽電池発電衛星電波修正時計等多様化、高度化されたウェアラブル機器へと進化を続けている。

9.2 日本の時計生産推移について²⁾

現在の日本市場は、太陽電池発電式電波修正時計、高価格帯腕時計、高級機械式腕時計等高付加価値商品が売り上げを伸ばしている。一般社団法人日本時計協会の推定では、2015年の国内市場規模でウォッチが金額で9,002億円、数量で3,690万個、クロックが金額で554億円、数量で2,880万個としている。ここ数年、海外観光旅行者、特に中国人観光客の購入が増加し売り上げへの影響は大きい。

本項では、日本の時計生産推移の概況とともに、世界の生産数における日本の生産比率について述べる。

9.2.1 日本の時計生産推移について

日本の時計生産推移を出荷の推移よりみると、図9.8にウォッチの完成品、ムーブメント・シャブロン（ムーブメントの構成部品の完全なセット）の総出荷の推移のグラフを示す。尚、2007年と2008年の不連続は、2008年より国内出荷価格の算出基準を変更したため、前年までの金額との比較はできない。

表9.1より、2009年はリーマンショックの影響で落ち込み、2010年はその反動もあり2008年の数量をカバーしている。しかし、アナログクォーツの生産数量は2010年から減少しており、逆にデジタルクォー

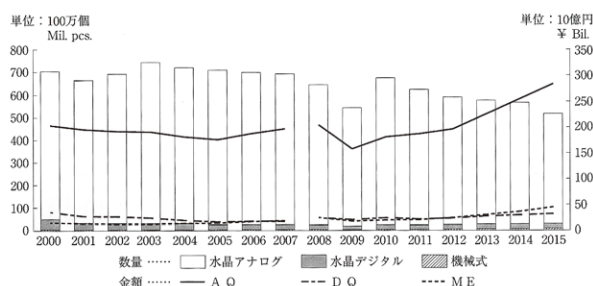


図 9.8 ウォッチ（完成品＋ムーブ・シャブロン）の総出荷の推移（2000～2015年）²⁾

ツおよび機械式は微増の傾向にある。総合計として、2009年54,290万個、2015年51,615万個とアナログクォーツの減少分が影響している。金額面では、2009年から上昇傾向にあり、特に2012年からの上昇率は12～15%と非常に高くなっている。数量の減少と金額の上昇傾向を考えると、時計完成品の単価アップ、付加価値の高い商品へ移行していると判断できる。

表 9.1 ウォッチ（完成品＋ムーブ・シャブロン）の総出荷の推移（2000～2015年）

年	アナログクォーツ	デジタルクォーツ	機械式	合計
2008	数量 621,622 金額 204,948	数量 18,637 金額 24,600	数量 4,973 金額 24,815	数量 645,232 金額 254,363
2009	数量 523,697 金額 158,122	数量 15,503 金額 20,806	数量 3,702 金額 17,954	数量 542,902 金額 196,882
2010	数量 648,825 金額 181,283	数量 19,551 金額 24,420	数量 4,727 金額 19,947	数量 673,103 金額 225,650
2011	数量 600,576 金額 187,431	数量 18,345 金額 21,994	数量 5,093 金額 20,741	数量 624,014 金額 230,166
2012	数量 564,891 金額 196,435	数量 19,002 金額 23,667	数量 5,867 金額 24,537	数量 589,760 金額 244,639
2013	数量 548,691 金額 225,784	数量 19,277 金額 27,498	数量 7,342 金額 30,269	数量 575,310 金額 283,551
2014	数量 538,036 金額 254,885	数量 19,167 金額 29,580	数量 7,961 金額 36,298	数量 565,164 金額 320,763
2015	数量 487,736 金額 284,312	数量 19,380 金額 31,909	数量 9,037 金額 45,015	数量 516,153 金額 361,236

単位：数量 1,000個 金額 100万円
(日本の時計産業統計より抜粋)

図9.9は、クロックの完成品、ムーブメントの総出荷の推移のグラフを示す。ウォッチと同様、2008年より国内出荷価格の算出基準を変更したため、前年までの金額との比較はできない。表9.2に数値を示すが、置目覚・掛の数量は微減傾向にあるが、金額面では大きな変動はしていない。

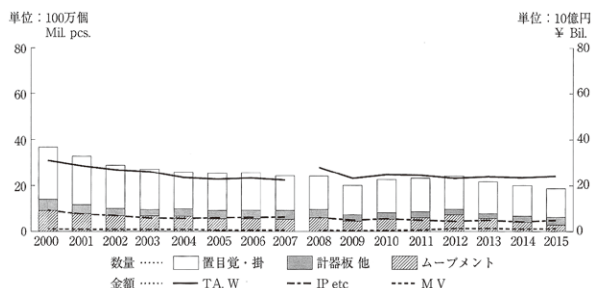


図 9.9 クロック（完成品＋ムーブメント）の総出荷の推移（2000～2015年）²⁾

表 9.2 クロック（完成品＋ムーブメント）の総出荷の推移
（2000～2015 年）

年	目録・掛	計器板他	ムーブメント	合計
2008	数量	14,574	3,685	5,794
	金額	28,021	6,022	34,662
2009	数量	12,995	2,632	4,403
	金額	23,200	4,915	28,556
2010	数量	14,447	2,881	5,239
	金額	24,774	5,486	30,798
2011	数量	14,624	2,654	5,883
	金額	24,561	4,902	30,189
2012	数量	14,436	2,519	7,113
	金額	23,238	4,415	28,953
2013	数量	13,927	2,144	5,595
	金額	23,908	4,872	21,666
2014	数量	13,460	2,622	3,908
	金額	23,497	4,177	19,990
2015	数量	12,595	3,275	2,805
	金額	24,069	4,850	1,318

単位：数量 1,000個 金額 100万円
（日本の時計産業統計より抜粋）

9.2.2 世界のウォッチ生産数量（推定値）の推移 （2011 年～2015 年）

図 9.10 は、一般社団法人日本時計協会の推計によるウォッチ世界生産数の推移を示す。2011 年からの推移であるが、約年間 14 億個が生産されている。内訳は、アナログクォーツが約 79%、デジタルクォーツが約 19%、機械式が約 2% の割合である。

2015 年の数量において、世界の生産量と日本の生産量を比較する。ウォッチの世界の生産数量は約 14.6 億個、日本の生産数量が約 5.2 億個であり、35.6% の生産比率となっている。アナログクォーツと比較すると、世界生産数量は約 11.9 億個、日本の生産数量は約 4.9 億個であり、約 41% の生産比率である。日本の生産数量は、世界において大きな占有率を有している。

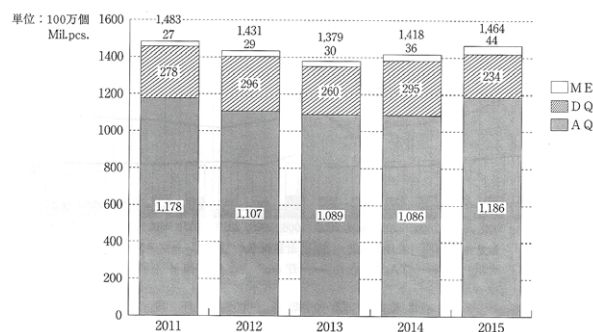


図 9.10 世界のウォッチ生産数量（推定値）の推移²⁾

図 9.11 は、同じく世界のクロック生産数量の推移を示している。日本の生産数量と同じく、2011 年に 6.97 億個であった生産数が、2015 年 5.79 億個と年々減少している。2015 年において、日本のクロックの生産数量が約 0.19 億個、世界に占める割合は 3.3% にすぎない。クロックの生産は、日本ではなく海外での製造が主体になっている。

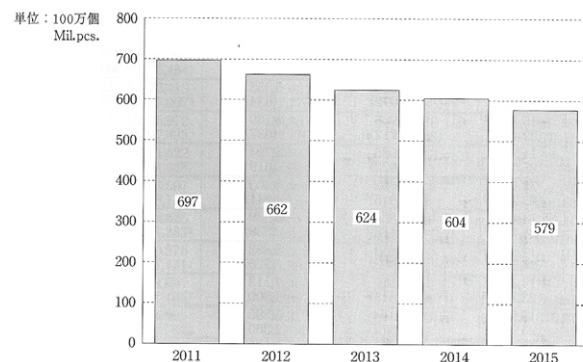


図 9.11 世界のクロック生産数量（推定値）の推移²⁾

引用・参考文献

- 1) 一般社団法人日本時計協会 HP. (<http://www.jcwa.or.jp>) 「時」と「時計」のエトセトラ（日本の時計産業概史）（2016 年 11 月 19 日）
- 2) 一般社団法人日本時計協会：「日本の時計産業統計－2015－」 2016 年 4 月

10 | むすび・謝辞

日本は「東洋のスイス」を目指し、自らの手で時計産業を作り上げ、機械式に比べて格段に優れた時間精度を手に入れて今日に至っている。日本の時計産業は成熟産業といわれて久しいが、今なお新しい機能、高精度の時計が開発され人々の生活を快適に便利にしている。国内市場の時計売り上げ規模は、約 9000 億円（2015 年）ともいわれている。もっとも 2015 年は円高の影響もあり、海外旅行者特に中国人旅行者による大量の時計購入の影響があり、今後は落ち着いてくるであろうと予測する。売り上げの内訳をみると、スイス高級ブランドの機械式腕時計が大半を占める。国内市場はこのような高級品、高価格帯分野と低価格帯分野の大きく 2 つの商品分野に分かれている。

1969 年世界初のクォーツ腕時計の実用化に伴い、日本の時計産業は電子化へ凄まじい勢いで進んだ。クォーツ腕時計こそ小型薄型・省電力機器（軽薄短小）の先頭を走るウェアラブル機器であり、世界に誇れる省電力技術の塊である。反面、機械式腕時計の地位を確立していたスイスは、クォーツで日本に先を越され消費者の嗜好がクォーツに向くに伴い、スイス時計産業が壊滅的なダメージを受けたことは事実である。その後、スイスの有名ブランドはこの状況を打破するため、スイス時計宝飾展であるバーゼル・フェアにおいて、新製品を発表することではなくスイス時計ブランドの歴史、付加価値を前面に出した紹介を何年も続ける。世界において、スイス機械式腕時計の歴史、ブランド力は、誰もが認める存在であり価値を持っている。このような努力の結果、スイス高級ブランドの機械式腕時計は往年の輝きを取り戻し、現在でも確固たる地位を築いているのである。

日本の時計産業の歴史を振り返ると、人々に品質が良い壊れない時計をリーズナブルな価格で提供し、日常生活の質を高めることが目的であった。結果、実用時計として品質の良い頑丈な付加価値を持った時計として世界に認知されて来た。したがって、スイス時計ブランドと同じ土俵で勝負することは、得策ではないことは明らかであった。クォーツ時計をベースに、スイス時計産業にはできない高付加価値商品を開発し、世界の先頭を突っ走ることを目指した。幸い日本の時計産業は、クォーツ腕時計の進化に並行して電子部品メーカーの開発技術も目覚ましく進歩し、素材、部品メーカーとのコラボレーションにより、新しい機能の開発も進み世界をリードする製品を多く上市してい

る。液晶デジタルクォーツの開発と腕時計の低消費電力技術により、多くの家電製品にそのデジタル表示技術が応用されている。例えば、カメラの年月日等の写し込み機能は代表的な事例である。もちろん、スイスにおいてもクォーツ腕時計の開発も進んでおり、機械式腕時計の耐久性向上、精度向上の技術も開発し製品に盛り込んできている。

本報告書では、飽くなき精度向上をベースとした時計技術に焦点を絞ったが、時計は機能面の他に装飾性、ステータス性等いろいろな面を持っており、その方面における技術の深堀も必要と考えるが、これは他日のこととしたい。また、本報告書では完成品を中心とした技術紹介に終わった憾みがあり、忸怩たらざるを得ない。時計技術の系統化であるからには、加工技術、電子回路実装技術などの掘り下げも必要であり、系統化開始当初はこの辺りについてもカバーする予定であったが、時間の制約上果たし得なかった。とはいえ、機械式時計、てんぷ式電子時計、音叉式電子時計、クォーツ時計、電波修正時計など、直径 30mm の小さな腕時計の中に、高精度を追い求める技術者のアイデアと技術が凝縮された日本の時計技術の神髄については、読者に伝え得たのではないかと、いささかの自負をもつものである。尚、完成品の技術紹介においては、紙面の都合上数をかなり絞った点はご容赦願いたい。

今回、本報告書を纏めるに当たり、一般社団法人日本時計学会の「日本時計学会誌（現、マイクロメカトロニクス）」に、基礎技術から新しい技術までしっかり記録されており大変参考になった。今後とも、新しい世界に誇れる時計技術を、日本の時計技術としてしっかり記録に残していくことを切に願うものである。

これからも日本時計メーカーが、新しい商品分野へ挑戦し続け、世界をリードする製品、技術を出し続けることが、スイスブランドに立ち向かっていく方策であると信じる。スイスが目指す機械式時計のブランド指向と異なり、日本の技術開発の特徴を生かした道を進むことが、機能品質に優れ、長く安心して使用できる時計として、日本ブランドの伝統を築き、付加価値を作り上げて行くことに繋がると確信する。最後に、若い技術者にとって、本報告書が新しい製品開発、技術への挑戦意欲を後押しできれば幸いである。

謝辞

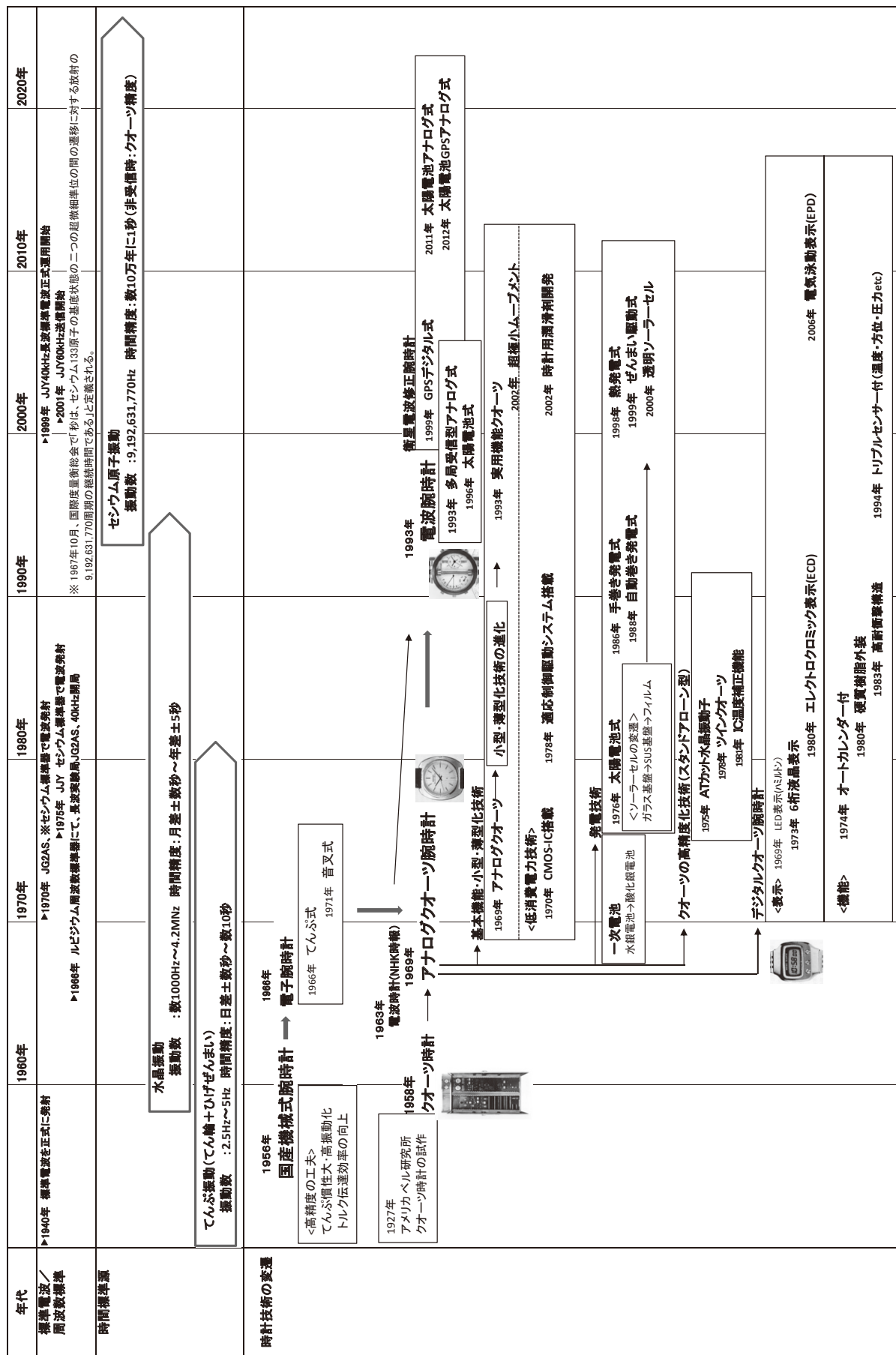
本報告書を纏めるにあたり、下記の諸氏をはじめ多くの方々からご指導、ご教示をいただき、またお忙しい中、インタビューや貴重な資料を提供いただいたことに、この場を借りて深く感謝申し上げます。

(敬称略、順不同)

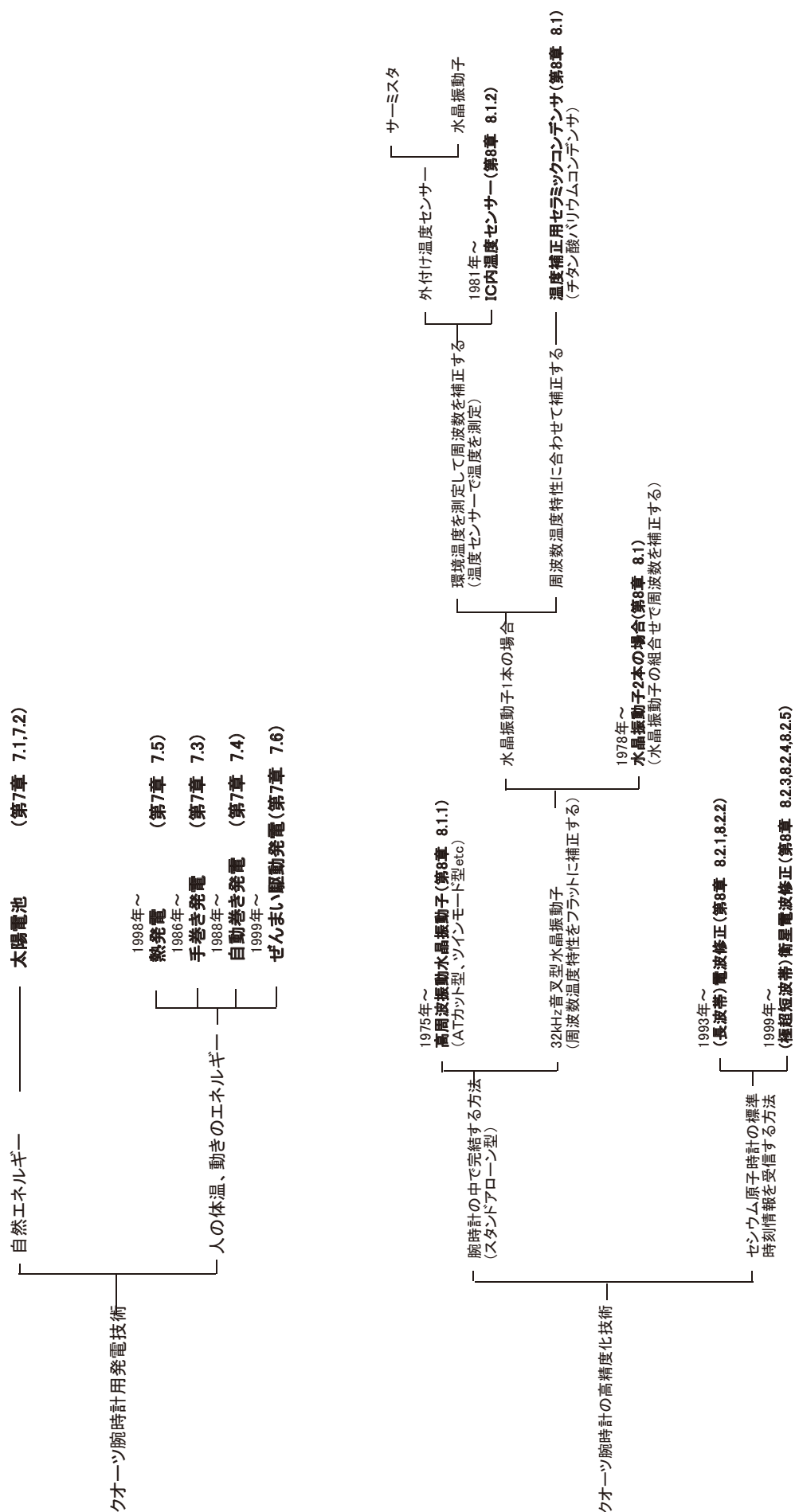
一般社団法人日本時計協会	山本 尚、鈴木順一、 佐藤孝雄
オリエント時計株式会社	守屋克美
カシオ計算機株式会社	日原 久、奥山正良
樫尾俊雄発明記念館	小林毅彦
シチズン時計株式会社	中川喜之、藤井浩司、 和泉 輝

シチズンビジネスエキスパート株式会社	坂巻靖之
セイコーインスツル株式会社	重城幸一郎、 藤原佳弥子
セイコーエプソン株式会社	今井博一、小池邦夫、 長尾昭一、小池信宏、 伊藤美貴子
セイコークロック株式会社	佐々木淳、齊藤輝明
セイコーミュージアム	渡邊 淳、宮寄美柊子
リコーエレメックスエーティー株式会社	田中 浩
リズム時計工業株式会社	喜多村 勇
元リズム時計工業株式会社	宮城 茂

時計技術の系統図



クォーツ腕時計計用発電技術および高精度化技術



付表. 2 時計に関する公的規格¹⁾

時計に関する公的規格（日本 JIS 規格、国際規格 ISO の対照表）について下記に示す。詳細は各規格を参照されたい。

2014 年 10 月 31 日現在

JIS 番号	JIS 規格 名称	ISO 番号	ISO 規格 名称
JIS B 7001	時計－試験方法	対応 ISO 規格なし	但し、脚注参照※
JIS B 7010	時計部品名称	ISO 3831「廃止」	時計部品の分類とコードシステム及び名称
JIS B 7021	一般用防水携帯時計の種類及び防水性能	ISO 22810	防水ウォッチ
JIS B 7023	潜水用携帯時計－種類及び性能	ISO 6425	ダイバーズウォッチ
JIS B 7024	耐磁携帯時計－種類及び性能	ISO 764	耐磁ウォッチ
JIS B 7025	時計－精度表示	ISO 10553	水晶ウォッチの精度の評価方法
JIS B 7026	時計－電池寿命の表示	ISO 12819	電池駆動ウォッチの電池寿命の評価方法
JIS B 7009	時計のムーブメントの大きさの表し方	ISO 3764	ムーブメントの－種類、寸法及び名称
JIS B 7022	腕時計ケースのバンド取付部寸法	ISO 3765	腕時計－バンド取付部寸法
		ISO 14856	腕時計－非ばね棒タイプの取付寸法
		ISO 1112	機能石及び非機能石
		ISO 1413	耐衝撃ウォッチ
		ISO 3157	夜光時計－仕様
		ISO 3158	測定姿勢の記号
		ISO 3159	てんぷ式腕クロノメーター
		ISO 3160-1	ウォッチケース－金合金被膜
		ISO 3160-2	ウォッチケース－金合金被膜－第 2 部: 金相、厚さ、耐食性及び密着性試験方法
		ISO 23160 (ISO 3610-3)	時計のケース及び附属品－摩耗、擦傷、及び衝撃に対する耐性試験
		ISO 4168	放射性発光塗料の試験実施条件
		ISO 6426-1	時計用語－第 1 部: 技術・科学定義
		ISO 6426-2	時計用語－第 2 部: 技術・商業定義
		ISO 9701	ウォッチ－時針、分針、秒針の取付け直径
		ISO 10552	りゅうずと防水パッキン－設計及び寸法
		ISO 13074	アナログクォーツクロック－ムーブメントの針かん合寸法
		ISO 14368-1	無機及びサファイアガラス－第 1 部: 寸法及び公差
		ISO 14368-2	無機及びサファイアガラス－第 2 部: 接着又はガasket によるケースへの組立
		ISO 14368-3	無機及びサファイアガラス－第 3 部: 品質基準及び試験方法
		ISO 16253	ウォッチケース－気相被膜
		ISO 17514	蓄光塗料－試験方法及び要求事項

※関連規格

- ・ISO 764:Horology-Antimagnetic watches
- ・ISO 1413:Horology-Shock-resistant watches
- ・ISO 3158:Timekeeping instruments-Symbolization of control positions
- ・ISO 3159:Timekeeping instruments-Wrist-chronometers with spring balance oscillator
- ・ISO 310-2:Watchcases and accessories-Goldalloycoverings-part2:
Determination of fineness,thickness ,corrosion resistance and adhesion
- ・ISO 6425:Divers' watches

参考・引用文献

- 1) 一般社団法人日本時計協会 HP. (<http://www.jcwa.or.jp>) 時計に関する知識 (2016 年 11 月 19 日)

付表. 3

高精度化・高機能化の製品の流れ

時計種類・技術	時間標準	1960年	1970年	1980年	1990年	2000年	2010年
高精度化	↑					衛星電波修正腕時計 1989年 世界初デジタル式GPS搭載ウオッチ 1996年 太陽電池電波修正腕時計 1983年 世界初多機能型アナログ電波修正腕時計	世界初アナログ式太陽電池電波修正腕時計 2011年 世界初GPS内蔵デジタル 衛星電波修正腕時計(シチズン時計) 2012年 世界初アナログ式GPS太陽電池 衛星電波修正腕時計(セイコーエプソン)
			水晶時計 1975年 ATカット水晶振動子搭載腕時計 1976年 世界初太陽電池クォーツ腕時計 1969年 世界初アナログクォーツ腕時計 1981年 世界初の温度補正機能搭載クォーツ腕時計 1973年 世界初デジタルクォーツ腕時計	高精度水晶時計 1975年 ATカット水晶振動子搭載腕時計 1976年 世界初太陽電池クォーツ腕時計 1969年 世界初アナログクォーツ腕時計 1981年 世界初の温度補正機能搭載クォーツ腕時計 1973年 世界初デジタルクォーツ腕時計	電波修正時計 1983年 世界初多機能型アナログ電波修正腕時計		
			音叉式 1971年 音叉式電子腕時計 1968年 てんぶ式電子腕時計				
機械式時計		機械式時計 1958年 独自の国産機械式腕時計					
		てんぶ振動 日差: 数秒 1956年 国産独自の機械式腕時計(セイコーエプソン: 当時、第二精工舎諏訪工場) 1956年 耐振装置搭載機械式腕時計(シチズン時計) 1959年 爪レバー式自動巻腕時計(セイコーエプソン)					
		てんぶ式電子時計 日差: 数秒~数10秒 音叉振動 日差: 数秒	1966年 国産初てんぶ式電子腕時計(シチズン時計) 1971年 国産初音叉式電子腕時計(シチズン時計)				
基本機能技術 小型・薄型技術		水晶振動 日差: 数10秒 小型・薄型技術 日差: 数秒~年差	1958年 国産初商業用クォーツ時計(セイコーロジック) 1963年 世界初卓上型クォーツ時計(セイコーエプソン) 1968年 世界初家庭用クォーツ時計(セイコーロジック) 1969年 世界初アナログクォーツ腕時計(セイコーエプソン) 1970年 CMOS-IC搭載クォーツ腕時計(セイコーエプソン) 1978年 世界初補正バルス方式モーター制御搭載クォーツ腕時計(セイコーエプソン) 1980年 最高峰クォーツ腕時計「グランドセイコー」 2002年 国内初腕時計用潤滑剤(シチズン時計) 2002年 世界最小ムーブメント搭載腕時計				
多機能化技術							
水晶式時計							
発電技術							
高精度化技術							
電波修正時計 GPS時計	セシウム原子振動 + 水晶振動(非受信) 数十年に1秒						

付表. 4

時計メーカー

	1950	1960	1970	1980
				▶1975年 高精度クォーツ腕時計(年差クラス) 高精度水晶腕時計 (月差～年差) ▶1976年 世界初太陽電池水晶腕時計 太陽電池水晶腕時計 (月差) ▶1971年 国産音叉式腕時計 音叉式腕時計 ▶1966年 てんぶ式電池腕時計 てんぶ式電池腕時計
		▶1956年 独自設計の国産機械式腕時計 機械式腕時計 (日差)		
オリエント時計		1958 国産初高耐磁性機械式腕時計(ハラエモン/耐磁腕時計) 1964 最多石(100石)機械式腕時計(クランツ/J100) 1965 20年間の日付け、曜日表示機械式腕時計(万年カレンダー) 1965 100気圧防水機能付機械式腕時計(キングダイバー/100) 1967 世界一薄型自動巻機械式腕時計 厚み3.9mm 1967 文字版の多色化した機械式腕時計(カドムス)		1976 世界初接触スイッチ搭載LED表示デジタルクォーツ腕時計
カシオ計算機				1974 世界初オートカレンダー付デジタルクォーツ腕時計(カシオロ) 1982 温度計測機能 1980 硬質樹脂ケース採用デジタル 1983 前衛的デジタル
シチズン時計	1949 国産初本中三針機械式腕時計(CITIZEN ニュートラス) 1952 国産初日、曜、月付カレンダー機械式腕時計(C系手巻きカレンダー CITIZEN カシ) 1956 国産初耐震装置搭載機械式腕時計(910(S)系ハラジョウ)	1958 国産初アラーム機構付機械式腕時計(9800系アラーム) 1959 国産初完全防水手巻き中三針機械式腕時計(920(X28)系ハ 1960 国産初視覚障害者向け機械式腕時計(9120系手巻き二針シンハイ) 1965 国産初カスミガラス、世界最薄の日曜付機械式腕時計(5240系カスミサマ)	1966 国産初シンモータ方式採用本格電子式腕時計(0800系バックスイート(X-8) 1970 世界初純Tケース採用電子式腕時計(0802系バックスイート(X-8) コストロ 1970 世界初ICを採用した電子式婦人用腕時計(5800系IC-12) 1971 国産初音叉式電子腕時計(3700系ハイソニック) 1972 世界初秒鳴車装置付電子式腕時計(7801系コストロスベッセル) 1970 婦人用として世界初の日曜付自動巻中三針婦人用機械式腕時計(6600系コストロスターV2 1978 世界初ムーブ厚み1mm以下二針クォーツ	1975 世界初ATカット水晶振動子採用年差±3秒クォーツ腕時計(1 1981 世界初IC温度補正 1982 多機能センサー付 1982 世界初電子温 1977 国産初計算機能付デジタルクォーツ腕時計(909 1978 国産初デジタル、アナログ表示コンビネーション 1980 国産初アナログ主体のコンビネ 1984 世
セイコーインスツル	1942 セイコー経線機(艦船用精密時計)	1955 国産初自動巻機械式腕時計(セイコーオートマチック) 1958 自社設計機械式腕時計(54系セイコーロズ) 1959 国産最小、腕型前進機能搭載婦人用機械式腕時計(15系レディーズセイコー ダイアフィックスで保油性) 1960 世界最薄中三針機械式腕時計(60系セイコーゴールドフザン) 1963 世界初四捨五入式計停止機構ストップウォッチ(89系東京五輪向け) 1963 国産初婦人用中三針機械式腕時計(21系セイコーマッシュレー) 1964 スニッデル天文台クロノメーターコンクール参加時計(965系、052系) 1967 世界初婦人用機械式腕時計(19系10振動) 1968 国内唯一天文台クロノメーター規格合格機械式腕時計(45系) 1964 国産初ソーラー発電式電気時計(セイコー光電時計) 1966 世界初丸棒振動子搭載電気時計(セイコー音叉時計)	1970 世界初CMOS-IC搭載クォーツ腕時計(36系クォーツSQC) 1974 世界初2極ステップモータ搭載クォーツ腕時計(08系クォーツQTW/08QZ 1978 世界初逆転駆動モータ搭載クォーツ 1978 世界初ソーラー二層液晶パネル採用 1978 世界初補正ハルス方式モータ制御搭載ク 1983 世界初	1980 世界初バックマトリクス表示デジ 1980 世界初LEDのRGB表示 1981 世界初心電位式心 1982 国産初音声合 1984 世
セイコーエプソン		1956 自社設計機械式腕時計(55系マーベル) 1959 バレバース式自動巻腕時計(55系ジャイロマーベル) 1960 国内初スイスクロノメーター規格クォーツ機械式腕時計(3180ブランドセイコー) 1963 世界初日付、曜日一体意採用機械式腕時計(6606スカープマチック) 1964 国産初クロノグラフ付機械式腕時計(5719系) 1965 国産初機械式ダイバーズウォッチ(6217系) 1969 世界初垂直クォーツコイルネール機構採用自動巻クロノグラフ(6139系スピードマスター) 1969 国産初高精度自動巻機械式腕時計(6185系10振動日差2秒) 1963 世界初卓上型クォーツ時計(QC-951)	1969 世界初クォーツ腕時計(35SQ系ASTRON) 1972 女持ちの小型化(03SQ系) 1974 小型薄型普及版クォーツ腕時計(41系) 1978 極薄型クォーツ腕時計(ムーブ厚0.9mm 3 1984 超 1973 世界初6桁表示液晶デジタルクォーツ腕時計(06LC系LC VFA) 1975 世界初多機能デジタルクォーツ腕時計(0634系デジタル多機能 1975 世界初チタン外装飽和潜水ダイバーズ腕時計(600mプロフェッ 1979 世界初A/D複合表示腕時計(1 1982 世界初テレビ付 1983 世界初	
リコーエレメックスエーティー		1960 世界一薄型手巻き機械式腕時計 厚み3.5mm(531系カバネット/500)	1971 腕時計サイズで発信周波数32768Hz採用したクォーツ腕時計(550系リコー)	19
セイコークロック		1958 国産初商業用水晶時計(月差±0.08秒) 1963 NHK時報を基準とする電波時計	1968 世界初家庭用クォーツ掛け時計(クォーツ掛け時計) 1976 世界初クォーツ目覚まし時計(クォーツ目覚まし)	
リズム時計工業			1973 業界初割れ目のない木目年輪置き時計(年輪時計)	

各社製品推移

2015年12月

[illegible]

時計技術 産業技術史資料 所在確認

番号	名称	製作年	製作者	資料種類	資料現状	所在地	選定理由
1	国産独自設計の機械式腕時計 セイコー「マーベル」	1956年	第二精工舎 諏訪工場	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	海外の模倣から精度の良い作り易い時計を目指して、わが国初めて技術者 独自のアイデアを設計に盛り込んだ機械式腕時計で品質に対する評価は大 変高く、通産省主催のコンクールで上位を独占した。海外に国産時計の品 質の高さを示した。
2	国産初耐振機能付機械式腕時 計「シチズン「パラショック」	1956年	シチズン時計 株式会社	量産品	展示	シチズン時計株式会社 シチズンミュージアム (東京都西東京市田無)	独自設計の耐振装置を開発し、ヘリコプターからの投下による耐衝撃性の 公開実験を行い、パラショック構造を持つ時計の優秀さを実証した。
3	国内初商業用クォーツ時計	1958年	精工舎	原寸大画像	展示	セイコーミュージアム 東京都墨田区東向島)	当時、まだ不安定であったトランジスタではなく真空管を用いた国内初の クォーツ時計である。
4	国産初「電式電子腕時計」シ チズン「エックスエイト X- 8」	1966年	シチズン時計 株式会社	量産品	展示	シチズン時計株式会社 シチズンミュージアム (東京都西東京市田無)	国内初の本格電子腕時計で、トランジスタ駆動による可動磁石型でんぷ調 速式の逆脱進機構を採用し、機械式自動巻腕時計が主流の時代に1年間動き 続けることの反響は大きかった。
5	世界初クォーツ腕時計「セイ コー「クォーツ アストロン 35SQ」	1969年	セイコーエプ ソン株式会社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	時計先進国のスイスに先駆けた世界初のクォーツ腕時計であり、自社開発 の小型水晶振動子、1秒間欠進針のオープンタイプ型ステップモーターの開 発、機能部品の分散配置等、この後のクォーツ腕時計の基本を作りあげ世 界標準となる。
6	世界初CMOS-IC搭載クォーツ腕 時計「セイコー「クォーツ 36SQ」	1970年	セイコーイン スツル株式会 社	量産品	展示	セイコーミュージアム 東京都墨田区東向島)	世界で初めて低消費電力化駆動のCMOS-ICを搭載することにより、大幅に電 池寿命を延ばすことが可能となった。クォーツ腕時計の小型薄型化には、 CMOS-ICは不可欠な電子デバイスとなる。
7	世界初液晶デジタルクォーツ 腕時計「セイコー「クォーツ 06LC」	1973年	セイコーエプ ソン株式会社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	液晶表示による世界初の時・分・秒の6桁表示を実現したデジタルクォーツ 腕時計である。この後、6桁表示のデジタル腕時計が世界的な標準となる。
8	ATカット水晶振動子搭載年差 クォーツ腕時計「シチズンク リストロン・メガ Cal. 8650」	1975年	シチズン時計 株式会社	量産品	展示	シチズン時計株式会社 シチズンミュージアム (東京都西東京市田無)	4MHzのATカット水晶振動子を搭載して、世界初の年差±3秒以内を実現した クォーツ腕時計である。スタンダードアローン方式のクォーツ腕時計では最高 精度を誇る。
9	世界初太陽電池アナログク ォーツ腕時計「シチズンク ォーツ「クリストロンソー ラーセル」	1976年	シチズン時計 株式会社	量産品	展示	シチズン時計株式会社 シチズンミュージアム (東京都西東京市田無)	世界初の太陽電池アナログクォーツ腕時計で、単結晶シリコン太陽電池を8 枚使用して、一次電池である銀電池に充電するという大きな挑戦を行い商 品化した。その後、キャパシタ→二次電池へと進み太陽電池腕時計の発展 を遂げ、現在のシチズン「エコ・ドライブ」へと繋がる。
10	世界初適応制御駆動システ ム搭載のアナログクォーツ腕時 計	1978年	セイコーイン スツル株式会 社	量産品	保存	セイコーインスツル株式会社 (千葉県千葉市美浜区中瀬)	アナログクォーツ腕時計の小型薄型化を支えた大きな技術である。ステッ プモーターの消費電力を大幅に削減し、長電池寿命・超小型計等多くの付 加価値商品を可能にしたアナログクォーツ腕時計の基本技術である。
11	カシオ超軽量10気圧(100m)防 水ウォッチ W-100	1980年	カシオ計算機 株式会社	写真	展示	梶尾俊雄発明記念館 (東京都世田谷区成城)	日常生活に必要な防水機能、軽量化、デザイン展開を可能にする10気圧防 水ウォッチである。スポーツ用分野への展開を可能にした硬質樹脂ケース ウォッチのマーケットを拡大し、ブラスタックの筐体利用が他業界の製品 にも波及する。
12	世界初セイコー「E.C.D デジ タルクォーツP623」	1980年	セイコーイン スツル株式会 社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーインスツル株式会社にも 保存されている	ECNディスプレイの応答性、寿命等を改良し、世界で初めて腕時計の実用化 に成功する。白地に青の鮮明な表示であり、視野角がなく見栄えに優れて いる。
13	世界初IC内温度補正機能搭載 クォーツ腕時計「シチズン クシード Cal. 1930」	1981年	シチズン時計 株式会社	量産品	展示	シチズン時計株式会社 シチズンミュージアム (東京都西東京市田無)	世界初のIC内温度補正機能により、クォーツ腕時計の標準である32kHz音叉 型水晶振動子の周波数温度特性をフラットに補正し、幅広い温度範囲で安 定した時間精度を確保する。32kHz音叉型水晶振動子を用いた年差技術の基 本である。

14	カシオ耐衝撃デジタルクォーツ腕時計「カシオヘビードューテイ」(G-SHOCK) 5000C	1983年	カシオ計算機株式会社	量産品	展示	梶尾俊雄発明記念館 (東京都世田谷区成城)	初めて耐衝撃腕時計を謳って販売されたデジタルクォーツ腕時計で、ISO国際規格の「ショックレス・リストウオッチ」の規格を上回る実力を誇る。衝撃、振動等、様々な悪条件下で安心して使用できる。「G-SHOCK」の商品名が、一つのブランドを形成したとも言える世界的な商品である。
15	世界初手巻き発電クォーツ腕時計「セイコーインパクト Cal. 8T」	1986年	セイコーインスツル株式会社	量産品	保存	セイコーインスツル株式会社 (千葉県千葉市美浜区中瀬)	世界初の手巻き発電機構を持ち、使用者がゆりうずを使って時計にエネルギーを与えるクォーツ腕時計である。何時、何処でもゆりうずにより発電することができ、電池供給の不便な地域においても安心して使用できる。
16	世界初自動巻発電クォーツ腕時計「SEIKO KINETIC (キネティック) Cal. 7M」	1988年	セイコーエプソン株式会社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	世界初の自動巻発電クォーツ腕時計で、機械式自動巻腕時計のように人間の運動エネルギーで発電し時計が駆動され、機械式時計の100倍の時間精度を確保できる腕に着けてさえいれば、常に発電され駆動エネルギーが蓄積され続ける機構である。
17	世界初多局長波受信型アナログ電波修正時計「シチズン電波修正時計Cal. 7400」	1993年	シチズン時計株式会社	量産品	展示	シチズン時計株式会社 (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	世界初の多局長波受信型アナログ電波修正時計で、日本・イギリス・ドイツ(中部ヨーロッパ)の世界の3地域をカバーできる。時計本来のアナログ時計に拘り、時計の美しさを考慮した電波修正時計である。この後の開発の中で、太陽電池との組合せにより使用者の煩わしさを無くし、操作フリーのソーラー電波修正時計へと進化する。
18	最高峰クォーツ腕時計「セイコー「グランドセイコー Cal. 9F」	1993年	セイコーエプソン株式会社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	小さく薄くのクォーツ腕時計が主流の中、機械式腕時計でしか出来なかった”大きく見やすいしつかりした針”を可能にしたクォーツ腕時計である。クォーツ腕時計がデザインで機械式腕時計に追いつき、時間精度で追い越したクォーツ腕時計である。
19	国内初熱発電クォーツ腕時計「SEIKO THERMIC (サーミック) Cal. 6C」	1998年	セイコーインスツル株式会社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 保存されている	国内初のゼーベック効果を利用し、人間の体温と外気の温度差によって発電し時計を動かすクォーツ腕時計である。
20	世界初GPS内蔵ウオッチ「プロトレック」サテライトナビ	1999年	カシオ計算機株式会社	量産品	展示	梶尾俊雄発明記念館 (東京都世田谷区成城)	世界初のGPS機能の内蔵し、現在の緯度・経度の計測が可能で、自分のいる場所や目的地までの距離と方向を即座に取得できる。
21	世界初ぜんまい駆動クォーツ腕時計「SEIKO SPRING DRIVE (スプリングドライブ) Cal. 7R」	1999年	セイコーエプソン株式会社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	世界初のぜんまいの動力で駆動する機械式時計と高精度のクォーツ時計を融合したぜんまい駆動のクォーツ腕時計である。クォーツ時計が一次電池あるいは二次電池の電気エネルギーで駆動されるのとは異なり、ぜんまいという機械式エネルギーを電気エネルギーに変換し、時計を駆動する画期的な機構を持つクォーツ腕時計である。
22	世界初透明ソーラーセル搭載シチズン「エコ・ドライブ ビトロ」	2000年	シチズン時計株式会社	量産品	展示	シチズン時計株式会社 (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	世界初の透明ソーラーセルにより発電し時計を駆動する。太陽電池を使用して、いかに時計の美しさを表現するかを実現したクォーツ腕時計である。
23	世界最小ムーブメント搭載シチズン「ミーム・オブ・シチズン Cal. 6720」	2002年	シチズン時計株式会社	量産品	展示	シチズン時計株式会社 (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	機械式腕時計をサイズで凌駕した世界最小ムーブメントを搭載したクォーツ腕時計である。極小サイズを利用した多くのデザイン展開も可能であり、クォーツだからできた時計である。
24	世界初EPDウオッチ「セイコー「SEIKO SPECTRUM」	2006年	セイコーエプソン株式会社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	世界初の電気泳動ディスプレイを持ち、高いコントラストで広い視野角を有するデジタルクォーツ腕時計である。表示部分を曲げられる自由さにより、デザインの自由度を広げ近未来的なフォルムを実現した。
25	世界初アナログ式GPSソーラーウオッチ「セイコーアストロ」	2012年	セイコーエプソン株式会社	量産品	展示	セイコーミュージアム (東京都墨田区東向島) セイコーエプソン株式会社にも 展示あり(長野県諏訪市大和)	世界初のアナログ式GPSソーラーウオッチで、4機以上のGPS衛星からの信号を受信して、世界中どこにいても場所の時刻を知ることができる。数千万年に1秒という高精度を持ち、操作フリーを可能にした腕時計である。

時計技術の系統化調査 正誤表

ページ	段落	行	技術の系統化調査報告 共同研究編第10集 2017年3月 (誤)	全文PDF版 2017年8月 (正)
7	左	4	のが一般的である ^{2) 7)} 。	のが一般的である ²⁾ 。
35	右	7～9	水晶振動子は高精度を出せるATカット4.8MHzを製作して、摂氏60度の恒温槽に入れ安定した振動を得た。	削除
35	右	21	振動数をを安定させる	振動数を安定させる
42	右	6	「富士レーダー」	「富士山レーダー」
48	左	8	世界初液晶デジタルクオーツ腕時計	世界初6桁表示液晶デジタルクオーツ腕時計
82	左	11	第2章図2.27に示すよう	第2章図2.28に示すよう
82	左	33		
88	左	27	+50℃の間に約500に	+50℃の間に約500に
94	左	6	電源は一時電池を	電源は一次電池を
103	左	18	ウェアブル機器	ウェアラブル機器
112	3	選定理由	ATカット水晶振動子を恒温槽に入れ振動を安定させ、	削除