万年時計の機構解明*

(第2報, 動力部)

羽藤 武宏^{*1}, 鈴木 一義^{*2}, 冨井 洋一^{*3}
吉田 充伸^{*1}, 横田 泰宏^{*1}, 久保田 裕二^{*4}Mechanism of “Man-nen dokei”, a Historic Perpetual Chronometer
(2nd Report, Power Supply)Takehiro HATO^{*5}, Kazuyoshi SUZUKI, Yoichi TOMII,
Mitsunobu YOSHIDA, Yasuhiro YOKOTA and Yuji KUBOTA^{*5} Corporate R & D Center, Toshiba Corporation,
1 Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 212-8582 Japan

The “Man-nen dokei”, which is a historic perpetual chronometer, was made in 1851 by Hisashige Tanaka, who founded the predecessor of Toshiba Corporation. It has six multi-functional clock faces and a celestial globe. It is said that it runs for almost a year with just a single winding. Man-nen dokei was disassembled and restored in a national project. We investigated on the mechanism of Man-nen dokei in cooperation with this project. In this paper, we report on the mechanism of the power supply. As a result, from mechanism constitution of the power supply, we confirmed that maximum continual movable days of Man-nen dokei were approximately 225 days. But from the fusee steps and the double spring composition, it is thought that Hisashige's goal was to make it move for 1 year continually. The spring that generates the huge torque became necessary to make it move for 1 year, but it is assumed that the spring were wound just a little due to strength poverty of the wooden frame. Moreover, we think the composition of one fusee is a reasonable design to obtain necessary torque continuous operation with stability for 1 year, and the reason why Hisashige used composition of two fusees still remains to be unclear.

Key Words: Mechanism, History of Engineering, Precision Instrument, Mechanical Clock, Power Supply, Torque Equalization, Spring, Fusee

1. まえがき

万年時計(正式名称: 万年自鳴鐘)は, 東芝の創業者「からくり儀右衛門」こと田中久重が1851年に製作した機械式時計である(図1)。この時計は, 東洋の自然界に合わせた生活に西洋の技術を融合させ, 複雑な機構により様々な時表示機能を実現したものであり, 和時計の最高傑作と言われている。2005年に愛知県で開催された愛・地球博でも紹介され, 2006年6月に国の重要文化財に指定された。この万年時計は, 高さ約60cm(置台除く), 重さ約38kgあり, 1000点を超える部品で構成されている。天頂部には, 太陽と月の運行を示す「天球儀」を有し, その下の六面体の各面にはそれぞれ機能が異なる6種類の時表示部を有する

(1)-(3)。時表示部の下には, 六本脚の台座があり, その中に時打用の鐘が配置されている。さらに, その下の六角台座(直径約65cm)には, 各面異なった七宝絵図が描かれており, この台座の中に万年時計の動力となるゼンマイが4つ納められている(4)。

ゼンマイから時計表示部や天球儀への動力伝達図を図2に示す。ゼンマイは2つで1組の動力を構成しており, 時方用と打方用の2組の動力を有する。ゼンマイで発生した動力が, 円錐形で描かれているフュージ(均力車)を介して, 時方と打方の一番車にそれぞれ伝わり, そこから各駆動部に動力が伝達され万年時計としての動作を実現している。

万年時計は, ゼンマイを1度巻くと1年連続動作したと言われている。万年時計の広告や文献にもそのような記述が見られる(5)(6)。このスペックを実現するには, 動力部構成がポイントとなる。当時の時計の動力としては, ゼンマイとフュージの構成が一般的に用いられていた。ゼンマイは1500年頃に発明され, フュージ機構は1525年頃に発明された。その後, フランスや

* 原稿受付 2006年9月15日。

*1 正員, (株)東芝研究開発センター(☎212-8582 川崎市幸区小向東芝町1)。

*2 国立科学博物館理工学研究所(☎169-0073 東京都新宿区百人町3-23-1)。

*3 京都大学大学院エネルギー科学研究科(☎606-8317 京都市左京区吉田本町)。

*4 正員, フェロー, (株)東芝研究開発センター。

E-mail: takehiro.hato@toshiba.co.jp

Fig. 1 Man-nen dokei

イギリスなどで時計の動力として用いられ、1600~1800年には懐中時計に用いられた。また、1700年代にはクロノメータが航海で使用され、フュジー機構の技術発展に繋がった⁷⁾。このような背景から、万年時計が製作された1850年頃には、ゼンマイ・フュジー機構の技術は、西洋ではある程度普及していたと考えられる。弓曳童子や須弥山儀など万年時計以前の田中久重の作品を見てもゼンマイ・フュジー構成の動力が用いられている⁸⁾。万年時計でもゼンマイ・フュジー構成が動力として用いられているが、その構成は2ゼンマイ・2フュジーとなっており、このような構成は西洋の機械式時計や久重の他の作品でも見られず、極めて珍しい。

今回、文部科学省研究費補助金特定領域研究「我が国の科学技術黎明期資料の体系化に関する調査研究」(通称:江戸のモノづくり)の一環として、万年時計の分解・調査・復元・複製作業が行われた。これまで、分解調査は何回も行われているが⁹⁾、機構動作を詳細に報告している資料はない。特に長時間駆動を実現するために工夫したと考えられる動力部については、ほとんど記録が残っていない。そこで、本論文では、今回の分解調査で得られたデータなどを参考に万年時計の動力部の構造を解明し、機構について考察を行ったので、その結果を報告する。

Fig. 2 Schema of power transmission

2. 動力部の構成

2-1 機構の構成

万年時計の動力部のCG透視図を図3に、内部機構のCG図を図4に示す。万年時計の一番下に位置する木製六角台座の中に、香箱に納められたゼンマイが4つ配置されている。図4のように2つの香箱をチェーンで接続し、ゼンマイ2つで1つの動力を構成している。図5のゼンマイ部の写真に示すように、1つの動力につき1つのゼンマイの軸がX字型の金属板に固定され、もう一方のゼンマイ軸は、出力軸として上部のフュジー機構に繋がるように長くなっている。香箱は何れも固定されていない。このような構成とすることで、出力軸では、2つのゼンマイの回転数を足し合わせた回転数の出力が得られる。ゼンマイ出力軸は、六脚台座の脚の中を通り、図6に示すフュジー機構部に動力を伝えている。ゼンマイ出力軸には下向きのフュジー(入力側フュジー)が直接取り付けられてあり、上下反対向きのフュジー(出力側フュジー)とチェーンで繋がれ、出力フュジーの歯車を介して、時計動作の駆動源となる一番車まで動力が伝わるようになっている。つまり、ゼンマイ2つの出力が、フュジー2つを介して均力化され、それぞれ時方と打方の動力になっている。ゼンマイは一度解か

Fig. 3 CG perspective view of power supply

Fig. 5 Spring section of the power supply

Fig. 4 Internal mechanism CG image of power supply

Fig. 6 Fusee mechanism section of the power supply

Fig. 7 Fusee

れると一気に動力を解放してしまうため調速機構が必要となるが、時方側の調速は洋時計内の調速機がその役割を果たしている。一方、打方側の調速機構は風切車であるが、動くタイミングは和時計に連動しており、間欠的に動くようになっている。

フュージーは、図7のように螺旋状の形状をしており、この形状により、ゼンマイをどの程度均力化できるか決まる。万年時計のフュージーは、手作りであるため4つの形状が微妙に異なる。フュージーの中心とチェーンをフュージーに止めるために開けられた穴の中心を通る断面における各段の寸法(直径)を表1に示す。

各フュージーの軸は、楕円状の金属板(フュージー受板: Fusee support plate)と台座枠により支持されている。また、図7のように、入力側と出力側フュージーの支持高さは、出力側フュージーの歯車の厚さ分だけずれており、入力側フュージーの下から2〜3段目と出力側フュージーの一番下の段がチェーンで繋がる。フュージー受板は

4本の金属柱によって支持されているが、そのうち2本の金属柱には、台座から伸びた斜めの板(柱受板: Column support plate)が接続されている。この柱受板は、フュージー受板の回転を防ぐために取り付けられているように見える。また、出力側フュージー軸の上には勾玉形状のカムがついており、レバー形状の部品とで巻量調節機構を形成している。巻き量調節機構は、ゼンマイのネジの巻き過ぎを防止するための機構であり、

Table 1 Fusee size data

Fusee steps	Fusee for diving clock		Fusee for striking chimes		Average [mm]
	Spring side [mm]	Output side [mm]	Spring side [mm]	Output side [mm]	
1	62.3	62.5	60.7	61.0	61.6
2	61.6	52.7	57.0	57.0	57.1
3	45.7	44.9	50.7	49.7	47.8
4	39.1	38.5	44.2	43.4	41.3
5	33.8	33.1	38.1	38.9	36.0
6	29.5	29.3	31.9	31.5	30.6
7	26.3	27.5	29.3	29.1	28.1
8	23.7	25.7	26.9	26.5	25.7
9	22.3	21.0	24.3	24.7	23.1

ゼンマイ・フュージ機構では一般的に用いられている⁷⁾。万年時計では、出力側フュージが約6回転したときにロックがかかるようになっている。万年時計の動作スピードを決める洋時計の一番車の回転速度から計算すると、出力側フュージは37.5日で1回転する。このことから、万年時計の機構的な最大連続稼働日数は、約225日であることがわかる。この連続稼働日数は以前の分解調査で明らかにされているが⁹⁾、今回改めてその理由も含めて確認することができた。これまで言われていた1年連続稼働の日数よりは少ないが、当時の時計の動作日数が長くて10日程度であったので、当時としては驚くべきスペックを実現する機構を製作したことがわかる。

2.2 木枠に作用する力 図6で示した柱受板は、その取り付け方向と形状から、フュージ受板の回転を防ぐ捩れ防止構造であると考えられる。そこで、本節ではフュージ受板及び木枠（六脚台座）の幾何学的関係から、フュージや木枠にどの程度の力が作用するのか計算した結果について報告する。

フュージ受板と木枠の幾何学的な関係を図8に示す。ここで、点Oから入力側フュージの回転中心である点Aまでの長さが88[mm]、点Oから出力側フュージの回転中心である点Bまでの長さが56[mm]、点Oからフュージ受板側の柱受板受点である点Cのx成分（点C_x）の長さが37[mm]、点Oから点Cのy成分（点C_y）の長さが54[mm]である。今、点Oに対して対称な力が作用する場合を考えると、点Aにおいて、フュージ受板を回転させようとする力F_{Ax}は、次式のように表せる。

$$F_{Ax} = \frac{\overline{OB}}{\overline{AB}} F_A = 0.537 F_A$$

この回転力の反力が柱受板に作用するので、木枠に作用する力F_Dは、次式のようになる。

Fig. 8 Geometrical configuration of fusee support plate and wooden frame

(a) Side view

(b) Top view of fusee

Fig. 9 Cross section diagram of power supply

$$F_D = \frac{\overline{OA}}{\overline{OC}} F_{Ax} = 0.722 F_A$$

そして、最終的に求めたい木枠に作用する引張り力F_{Dx}と剪断力F_{Dy}は、次式のように求めることができる。

$$F_{Dx} = \frac{\overline{OC}_y}{\overline{OC}} F_D = 0.596 F_A \quad (1)$$

$$F_{Dy} = \frac{\overline{OC}_x}{\overline{OC}} F_D = 0.408 F_A \quad (2)$$

次にゼンマイの発生トルクから入力側フュージの回転中心に作用する力F_Aを求める。フュージ受板、フュージ、ゼンマイは、図9のような位置関係にあり、ゼンマイにより発生する力F'_Aは、フュージ間に働く引張

り力 F_A とほぼ等しいと考えられる。ゼンマイの最大巻き角度を Ω 、ゼンマイの解放角を α 、ゼンマイの単位角度当たりのトルクを M_0 とすると、ゼンマイのトルク T_z は、次式のように表せる。

$$T_z = M_0(\Omega - \alpha) \quad (3)$$

これより、力 F'_A は、次式のように求めることができる。

$$F'_A \equiv \frac{T_z}{R} \quad (4)$$

ここで、ゼンマイの巻き数を N として、ゼンマイを N 回巻いた初期状態 ($\alpha=0$) を考えると、式 (4) は次式となる。

$$F'_A \equiv \frac{2\pi M_0}{R_N} N \quad (5)$$

ゼンマイのトルク測定値 (3 節, 図 12 参照) より、

$$M_0 \equiv 1450 [\text{kgfmm}] = 14.2 [\text{Nm}]$$

を用いると、ゼンマイを 1 回巻いたとき ($N=1$)、測定結果より $R=29.3 [\text{mm}]$ であるから、力 F'_A の値は以下のように計算される。

$$F_{A,N=1} \equiv 311 [\text{kgf}] = 3.05 \times 10^3 [\text{N}]$$

この結果を式 (1) 及び (2) に代入すると、引張り力 F_{Dx} と剪断力 F_{Dy} は、以下のように求まる。

$$F_{Dx} \equiv 185 [\text{kgf}] = 1.82 \times 10^3 [\text{N}]$$

$$F_{Dy} \equiv 127 [\text{kgf}] = 1.24 \times 10^3 [\text{N}]$$

ゼンマイを 1 回巻いただけでも、かなり大きな力が木枠に働くことがわかる。木枠の強度は不明であるが、実際の万年時計の木枠などには亀裂が入っており、ゼンマイを巻いたとき大きな力が働いて、発生したものと考えられる。このことから、実際にはゼンマイをたくさん巻くことが出来なかったのではないかと推定できる。

3. ゼンマイ

本章では、動力源であるゼンマイの詳細について、調査した結果を報告する。

3・1 形状と材料 現在、万年時計に装着されているゼンマイは、3 代目であると考えられている。初代のゼンマイは、田中久重が刀匠に依頼して打たせたゼンマイであり、2 代目のゼンマイは、明治 17 年 (1884 年) に二代目田中久重が初代久重門弟の田中精助に依頼して万年時計を分解調査した際、ゼンマイに亀裂が入っていたために交換したものである。3 代目のゼン

マイは、昭和 24 年 (1949 年) に東京科学博物館の朝比奈貞一らにより行われた万年時計の分解調査において、交換されたものである。このときも、ゼンマイに亀裂が入っていたため、同質のものを製作し交換した。ゼンマイが交換されたという記述⁽¹⁰⁾は、この二回以外にはないため、現在 3 代目のゼンマイが万年時計に装着されていると考えられる。3 代目ゼンマイの写真を図 10 に示す。

今回の調査でこの 3 代目ゼンマイの寸法測定及び材料分析を行った。その結果を表 2 に示す。また、表 2 のゼンマイ寸法値から、ゼンマイの有効巻数が約 3.8 [回] 程度であることが求まる⁽⁷⁾。

Fig. 10 Spring (output spring for driving, 3rd generation)

Table 2 Size and material analysis of the spring

Spring Length	3050 [mm]
Spring Width	65 [mm]
Spring Thickness	1.9 [mm]
Barrel Diameter	φ120.5 [mm]
Shaft Diameter	φ27.0 [mm]
Material	7-3 Brass (Cu:73.08%, Zn:26.20%, Sn:0.35%, Pb:0.15%, Fe:0.22%)

Fig. 11 Experimental setup for torque measurement

Fig. 12 Experimental result of spring torque

3・2 トルク特性 次に、3代目ゼンマイのトルクの測定について述べる。トルク測定は図11に示すように、ゼンマイの香箱を固定し、解放した状態からゼンマイ軸を回転させていき、ゼンマイを巻締めていく過程の、各回転数におけるトルクを測定した。トルクの測定結果を図12に示す。今回、香箱の外側に補強して測定実験を行ったが、1mm厚しかない香箱の変形を危惧し、実験は、1.5回転までとした。このため1.5回転以上のトルクは推定値である。前述したように、3代目ゼンマイの有効巻数は約3.8[回]であるので、図12の結果では、3.8回転までのトルクを示してある。

4. フュージ機構

ゼンマイが発生するトルクは、巻かれた状態から解けるとときに大きく変動する。この変動を均一化するためにフュージ機構が考案された。通常、フュージ機構は断面が放物線に近いフュージと円筒(ゼンマイを納めた香箱の場合が多い)との組み合わせで構成される(図13)⁷⁾。しかし、万年時計では図6や図7のように2個のフュージを上下逆向きにして構成している。本章では、フュージを2個用いた万年時計の動力特性を解析的に推定し、フュージを2個用いた理由について考察する。

4・1 万年時計動力部の特性 図14のようにゼンマイ側にもフュージが取り付けられている場合を考える。今、チェーンがゼンマイ側のフュージの半径 $R(\alpha)$ の位置と出力側フュージの半径 $r(\beta)$ の位置に架かっている時のことを考える。ゼンマイのトルクは、式(3)のように表わせるので、この時の出力軸に伝わるトルク T_{out} は、

$$T_{out} = \frac{r}{R} M_0 (\Omega - \alpha) \quad (6)$$

となる。ここで、チェーンが微量 $R \cdot d\alpha$ だけゼンマイ側のフュージから解放されると、出力側フュージに

Fig. 13 Fusee and spring barrel composition

*Half of the chain thickness is included in radius.

Fig. 14 Fusee composition of Man-nen dokei

同じ長さ $r \cdot d\beta$ が巻かれねばならないので

$$\int_0^\alpha R(\alpha) d\alpha = \int_0^\beta r(\beta) d\beta \quad (7)$$

が成り立つ。

今、ゼンマイの最大巻き数を N 、ゼンマイが最大に巻かれたときからのゼンマイ軸の回転数を n 、出力軸の回転数を m とすると

$$\Omega = 2\pi N, \quad \alpha = 2\pi n, \quad \beta = 2\pi m \quad (8)$$

と表せる。式(8)を式(6)、(7)に用いると次式の関係を得る。

$$T_{out} = 2\pi \frac{r(m)}{R(n)} M_0 (N - n) \quad (9)$$

$$\int_0^n R(n) dn = \int_0^m r(m) dm \quad (10)$$

出力軸のトルク特性を求めるためには、 $R(n)$ と $r(m)$ が式(10)の関係を満たす条件のもとに式(9)を計算すればよい。

数式処理計算ソフトウェアの Mathematica (米 Wolfram Research Inc.の登録商標)を用いて、式(9)、(10)より出力軸の特性を求めた。フュージの形状 $R(n)$ 、 $r(m)$ は、表2の実測値を三次多項式で補完することにより求めた。1年連続稼働させるためにゼンマイ軸を8巻きした場合と現在残されている構成に近い5巻きした場合について計算を行った。その結果を図15に実線と点線で示す。

Fig. 15 Calculated results of spring output torque

4・2 フュジー2個使いについての考察 ここでは、田中久重が万年時計で何故フュジーを2個使ったのかということについて考察する。まず、フュジー機構の通常の構成である円筒とフュジーとの組み合わせで、どのような出力特性が得られるかについて仮想設計を行う。フュジー機構が収められている木枠(六脚台座)内に収まることを設計上の制約条件とした。具体的には、円筒の半径を R_0 、フュジーの最大半径を r_8 として

$$R_0 + r_8 \leq 70 [\text{mm}]$$

を制約条件とした。

出力トルクを一定とするフュジーの半径は次式により求められる⁷⁾。

$$r_m = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \frac{2r_0}{R_0} \frac{m}{N}}} \quad (11)$$

ここで、 r_0 は実際のフュジーと同じ12.3[mm]とする。また、出力軸の回転数 m の最大値は1年連続稼動を想定して $m_{\max}=8$ とする。

仮想設計を行うに当たり、木枠に大きな力が作用しないようにゼンマイ軸の巻き数 N を極力小さくすることを考える。しかし、 N を小さくすると式(11)右辺の分母から R_0 を大きくする必要があり、制約条件を満たさなくなるため、ここでは $N=6$ として仮想設計を進める。この場合、出力軸が8回転したときにゼンマイが全て解放されるとすると、式(11)右辺の分母がゼロとなる条件より

$$R_0 = 32.8 [\text{mm}]$$

を得る。したがって、制約条件より r_8 を37.2[mm]まで大きくすることができる。

式(11)より r_k ($k=1,2,\dots,7$) を求めると以下のようになる。

$$\begin{aligned} r_1 &= 13.1 [\text{mm}] \\ r_2 &= 14.2 [\text{mm}] \\ r_3 &= 15.6 [\text{mm}] \\ r_4 &= 17.4 [\text{mm}] \\ r_5 &= 20.1 [\text{mm}] \\ r_6 &= 24.6 [\text{mm}] \\ r_7 &= 34.8 [\text{mm}] \end{aligned}$$

このフュジーの形状を三次多項式で補完し、出力軸のトルク特性を計算すると図15の一点鎖線のようになる。図15が示すように、フュジー機構の通常の構成であるフュジー1個使いの方が、不必要に大きな力を木枠に作用させずに均一な出力トルクを得られ、万年時計の動力系としては適していることがわかる。したがって、田中久重が、フュジーを2個使ったフュジー機構を用いた理由は不明である。

5. まとめ

本論文では、万年時計の動力部の機構解明及び考察を行った。動力部の機構構成から、現存の万年時計の最大連続可動日数が約225日であることがわかったが、フュジーの段数やゼンマイの二連化による駆動時間長期化の工夫などから、久重は1年連続可動を目標にしていたと考えられる。1年連続可動できる動力部を目指した結果、巨大なトルクを発生するゼンマイが必要となったが、木枠の強度不足により、実際にはゼンマイを僅かしか巻くことができなかったと推定される。また、1年連続動作に必要なトルクを安定して得るには、フュジー1個の構成の方が合理的な設計が可能であり、久重が何故フュジー2個の構成としたのかは不明である。

謝辞

本研究を行うにあたり、セイコープレジジョン株式会社およびサンコースプリング株式会社にご協力をいただきました。ここに深謝の意を表します。

文 献

- (1) Y. Kubota, Mechanism of "Man-nen dokei," *Toshiba Review*, Vol. 6, No. 7 (2005), pp. 116-119.
- (2) M. Yoshida et al., Mechanism of the Man-nen dokei Part 1: Wadokei, *Proceedings of JSME Mechanical Engineering Congress*, Vol. 5 (2005-9), pp. 51-52.
- (3) Y. Yokota et al., Mechanism of the Man-nen dokei Part 2: Celestial globe, *Proceedings of JSME Mechanical Engineering Congress*, Vol. 5 (2005-9), pp. 53-54.
- (4) T. Hato et al., Mechanism of the Man-nen dokei Part 3: Power supply, *Proceedings of JSME Mechanical Engineering Congress*, Vol. 5 (2005-9), pp. 55-56.
- (5) H. Tanaka, *Man-nen dokei design drawings*, owned by National Science Museum.

- (6) 3rd Hisashige Tanaka, *Configuration of the Man-nen dokei*, (1957).
 - (7) T. Aoki, *Horology*, Maruzen Co., (1938).
 - (8) K. Suzuki, "Mechanism Arts" ~Japanese Automata "KARAKURI," *Journal of Japan Society for Design Engineering*, Vol. 31, No. 2 (1996), pp. 41-47.
 - (9) T. Asahina and S. Oda, "Myriad-Year Clock" Made by G.H. Tanaka 100 Years Ago in Japan, *Bulletin of the National Science Museum(Tokyo)*, Vol. 1, No. 2 (1954).
 - (10) 3rd Hisashige Tanaka, *History of the Man-nen dokei*, (1960).
-