

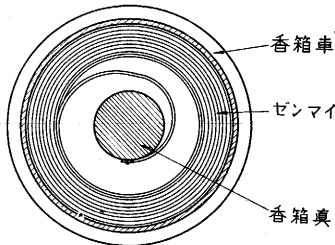
腕時計用動力ゼンマイに要求される諸性質と その材料について

佐藤二郎・池田国男・鎌田伸男

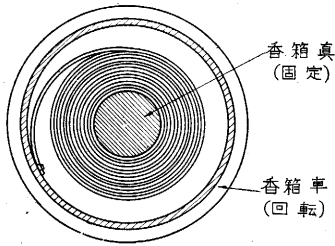
1. ま え が き

われわれが日常使用している腕時計には、動力源として細いリボン状の動力ゼンマイが（以下ゼンマイと称する）用いられているが、それはリウズ（ネジ）を一杯に巻き上げることによって貯えられたエネルギーを数組のピニオン・歯車を介して時を刻む調速系統と時・分を示す指示系統に間断なくなるべくコンスタントなトルクを長時間・長年月にわたって伝達する役務を果している。この弾性エネルギーの根源を微視的にみると第 1, 2 図に見られるように、全巻状態でも完全にほどけた状態でもゼンマイの長手方向に対しては第 4 図のように外周側は引張り内側は圧縮と常に相反する応力が働いている。

香箱車の内径は婦人用、男子用等の型により様ではないが、10φ~6φ位の中に収納され常に強度の変形を受けているので、ゼンマイの表面および側面小キズや発錆は切欠効果の原因になり、直ちに“切れ”を生ずる。したがって以前は市販された腕時計の故障の原因にはゼンマイによるものが多くあった。



第 1 図 完全にほどけた状態



第 2 図 全巻の状態

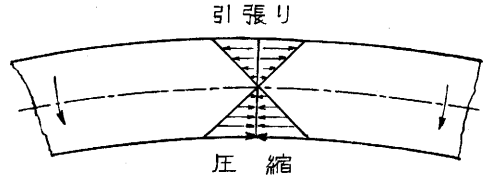
2. ゼンマイに必要な条件

限られた時計体の内部にゼンマイの占める容積は、比較的大きいが、時計全体の外観（特に厚さを薄くする）・性能（特に持続時間の増加）・小型化（婦人用等は極小型となる）等の観点より、当然次の諸条件を具備したものでなければならない。

- (1) 薄くてトルクの高いこと ヤング率と弾性限の高



第 3 図 香箱車より取り出した状態



第 4 図 香箱内の曲げ応力

い材料を用いれば、厚みを薄くしてゼンマイの長さを増すことができるので、香箱車の巻数を増加させ、持続時間を延長することができるのと同時に変動率を小さくすることができる。

なお、時計の精度を良好な状態に保持するためには、調速系のテンプを大きくしなければならぬ。このためにはより以上の回転エネルギーが必要であり、ゼンマイのトルクは高いものが要求される。

(2) 破断しないこと ゼンマイの破断は、時計の機能が完全に停止するので絶対に防止しなければならない。

(3) ヘタリが少ないこと 時計の使用に伴うヘタリは、頻繁にネジを巻かなければならぬのみならず精度を低下させる結果となる。

(4) 変動率が小さいこと 常に定量のトルクを与えることにより、時計の組立調整が容易になり良好な精度を保持することができる。

(5) 持続時間が長いこと

(6) トルク曲線が滑らかで効率がよいこと テンプに与える力にムラがなければ回転角は変わらず時間は正確に保たれる。効率（ゼンマイを巻くときのトルクとほどける時のトルクの割合）がよければゼンマイを薄くすることができる。

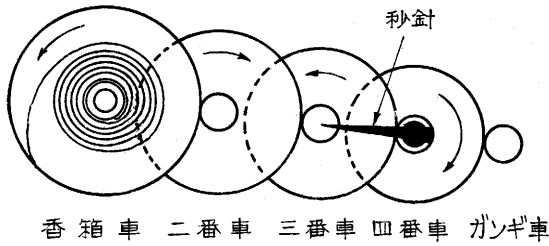
3. ゼンマイの寸法精度

ゼンマイの寸法精度は、時計体の大きさから限定される香箱の大きさと時計体の頭脳ともいうべき調速機の振り角（注 1）を所要のものにする（したがって時刻の進み遅れの歩度を一定にする）回転力から定められる。

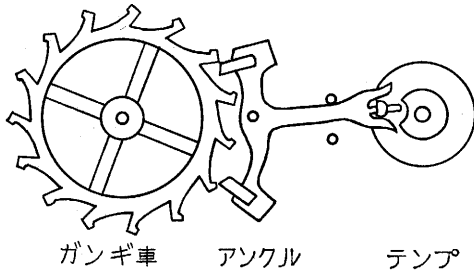
この回転力は普通の時計体では 4 組の輪列で著しく弱められて脱進機に加えられている（第 5, 6 図参照）。

たとえば SEIKO 中三針ユニークの場合香箱車のトルクが 55gr-cm の時、その $\frac{1}{3,900}$ である 0.014gr-cm の

注 1 振り角とはアングル（第 6 図）で、はじかれた天輪が、ヒゲゼンマイの弾力と釣り合うところまで回転するその回転角の大きさを示す。



第5図 時計の輪列



第6図 脱進機

トルクがガンギ車にかかっていることになる(回転数はそれとは逆に香箱車の1回転でガンギ車は3,900回だけ回転することになる)。

このような微小トルクが天輪(第6図)を左右に規則正しく動かして時計の歩度を定めているのであるが、このトルクの変動に預る要素には、ゼンマイによるものを除いても歯車(第5図)の伝達によるものと各部の摩擦および潤滑の不完全によるものなどがある。

輪列系の伝達トルクの変動は歯車の偏心、ピッチの不揃、歯形の不良等に原因しているがこれらの要因は工作精度を上げれば防止できる。しかし時計のように伝達トルクの一定であることが必要な場合には歯形そのものの噛み合せによる伝達トルクの変動が問題になってくる。

たとえば上述の例のSEIKO 中三針の場合、香箱車の歯数が65枚であるから1枚動く間にガンギ車が60回、回転してさらにその1枚1枚の歯が脱進機の歩度に関係しているから、香箱車1枚の歯の噛み合いにおけるトルクの変動が時計の進み遅れに大きく影響することになる。

第7図は歯車の噛み合いの良好な場合と不良の場合の伝達トルクの略図である。これらを総合した最終段階では、トルクの変動による脱進機の振り角の変化が時計の歩度

にどれ程の効果をおよぼすかが問題になるのであって、脱進機に対する設計が改良された場合とか、時間に対する精度があまり要求されない場合には、トルクが少々変動してもよいということになる。

しかし最近のように婦人用腕時計はますます小型化され、男子用腕時計は薄型に進み、かつ時計の精度がますます高く要求されるようになるとゼンマイそれ自体に対する設計が次第に苛酷にならざるを得なくなる。

すなわち小型化されると香箱が小さくなり、したがってゼンマイ全体の大きさも小さくならざるを得なくなる反面、脱進機は精度保持のためできるだけ大きくし、したがって天輪の慣性能率が大きくなるのでゼンマイのトルクは強いものが要求される。このためゼンマイ製造に当たっては種々の困難が伴うが、そのうち最も必要なのは厚みの精度である。

ゼンマイは香箱内壁との摩擦、ゼンマイ相互の接触摩擦を考慮せず、内端、外端の取付歪を無視し、かつ同心円的に巻き締められたりほどけて行くものとする、次式で近似計算できる(ただし塑性変形は無視する)。

$$\text{トルク } T = \frac{Ee^3hnN}{6L} \dots\dots\dots(1)$$

ここに E はゼンマイ材のヤング率 L はゼンマイの長さ e はゼンマイの厚み h はゼンマイの幅 N は有効巻数である。

しかし有効巻数 N はゼンマイの寸法に無関係ではなく

$$N = \frac{1}{e} \left[\sqrt{\frac{Le}{\pi} + r_0^2} + \sqrt{R_0^2 - \frac{Le}{\pi}} - r_0 - R_0 \right] \dots\dots(2)$$

で与えられる(第1図参照)。

ここに r_0 は巻真半径 R_0 は香箱内半径である(上式はゼンマイ各部の摩擦を考慮せず、巻戻し巻戻しが完全に行なわれるとして純幾何学的に取り扱って算出したものである)。

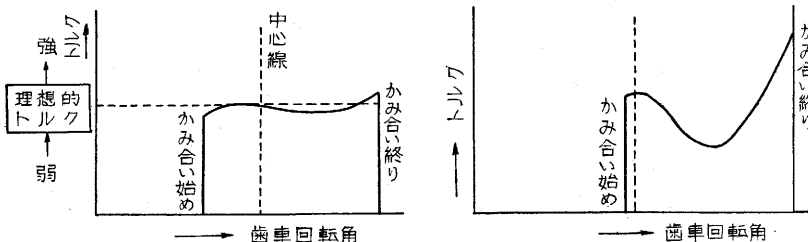
(1)式を見れば明らかのようにゼンマイのトルクはその厚みの3乗に比例して増減するから単に厚みを加減すればよさそうだが、厚さは(2)式で有効巻数(時計体の持続時間)にも関係してくるので簡単に定めるわけには行かない。ゼンマイの厚み精度の必要な1例として下に實際例を示してこの詳細を検討してみよう。

A型ゼンマイ規格

長さ; 35,000±100
(単位 1/100 ミリ)
幅 ; 130^{+0.5}_{-2.0}
(単位 1/100 ミリ)

トルク
Tmax ; 100gr-cm以下
T24* ; 68gr-cm 以上
有効巻数; 6.0 巻以上

となっている。



(i) かみ合い良好な場合

(ii) かみ合い不良の場合

第7図

この規格を満足させるために各種厚みのゼンマイを作ってみると第 1 表のようになる。

第 1 表 A 型ゼンマイの厚みとトルクの関係

厚み(1/100ミリ)	Tmax (gr-cm)	T24 (gr-cm)	巻数
11.9	90.6	68.0	6.16
12.0	92.9	69.8	6.14
12.1	95.3	71.7	6.07
12.2	97.6	73.2	6.00
規格	<100.0	>68.0	>6.0

すなわち厚み 11.9 の場合は T24 で規格にふれて危険であるし、厚み 12.2 の場合は巻数の規格に触れて危険である。このように考えると 12.0 と 12.1 の 2μ の範囲のみ安全という極めてきついことになる。一方現在仙台精密材料研究所で使用している単頭の 4 段超硬圧延機の精度は第 2 表に示す例のとおりである。

第 2 表 4 段冷間圧延機による厚み分布

厚み (1/100ミリ)	度数 (%)
11.9	11.9
12.0	50.6
12.1	37.0
12.2	0.4

すなわち 4μ の範囲ではあるがほとんど 3μ の間に収まっているといっても過言ではない。しかし厚み 11.9 と 12.2 は切り落して生産流れの中に入っているのであって、この部分の材料損失は相当に手痛い。2μ の圧延精度を問題にするのはこの理由からである。

最後にゼンマイ板厚変動におよぼす圧延の要素に若干ふれてみたい。一般的な要因としては (1) 圧延速度の変化、(2) 圧延張力の変化、(3) ロール温度の変化、(4) 素材の機械的性質の変化、(5) ロールの偏心、(6) 圧延潤滑油の変化、(7) 材料加工歴、等々あげられるがこの中でも (7) の材料加工歴に重点をおいている。その意味で圧延加工に先立つ冷間線引は多段逆張力伸線機を用い、線径約 2φ に対して 5μ 近くの精度で仕上げている。

このことは S-Flex のような加工硬化性合金の材料に対しては材質的均一性をはかることにもなるのである。

ロールの真円度が 0.5μ 以下で熱平衡の保たれた安定した圧延状態では板厚変動 ±1μ はほとんど張力の調節で行なわれている。

なおロール作業は荒、中、仕上、の各圧延に分け、摂氏 22 度付近の恒温室で行なわれていることを付記する。

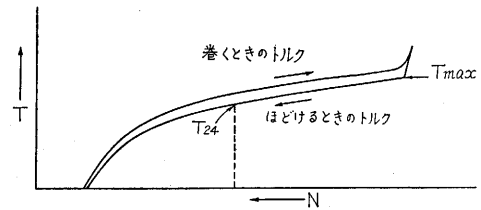
4. ゼンマイの性能

(1) トルク 表題とも密接な関係が生じてくるので、ゼンマイに必要な用語を二、三説明する。

ゼンマイのトルクは材質が一定であれば、幅と厚み、長さ等により決定することができるが、同一幅、厚みでも長さが、長すぎたり、短かすぎたりすると、ゼンマイを一ぱい巻きあげたときから、完全にほどけるまでの香

箱の回る回数が増え持続時間が変わってくる。厚みが大きい場合にはトルクは大きくなるが、種々不都合を起こす。

(2) トルク曲線 トルク測定器により記録測定された曲線よりゼンマイに必要な性能の大半以上を知ることができる。ゼンマイを巻き始め、一杯に巻き上げた直後 Tmax から香箱車が回転を開始したとすれば時間の経過とともにトルクは低下し遂には零となる。



第 8 図

T…トルク、Tmax…ゼンマイのほどけ初めのトルク
T24…24時間目のトルク N…巻数(香箱車の回転数)

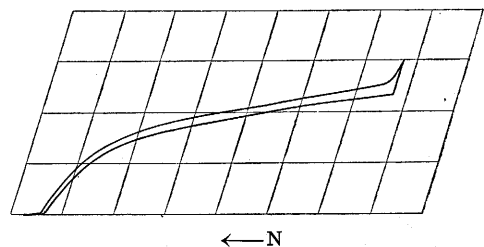
Tmax が規格値より高過ぎるとテンプの回転角は過大となり正常な周期を示さず、時には時計停止の原因となる。一方 T24 が規格値より低いとテンプの回転角は過小となり歩度に遅速を生ずる。

したがって腕時計の場合 Tmax と T24 の値は厳格な規定が設定されている。また Tmax と T24 の差はなるべく小さいことが望ましい。その割合は

$$\text{変動率} = \frac{T_{\text{max}} - T_{24}}{T_{\text{max}}} \times 100\%$$

で示され変動率と称している。

この変動率を小さくするためにはゼンマイの長さをできるだけ長くして Tmax と T24 のトルク差を縮める必要がある。長さを増加させることは巻数が増加するので変動率は小さくなるが、香箱内の容積によって制限を受けるので、おのずから限界が生じてくる。男子用の腕時計では香箱が約 6 回転し、1 回転が 7 時間に設計されているから持続時間は 7 時間 × 6 回 = 42 時間となり約 2 日間時計が運転されることになる。

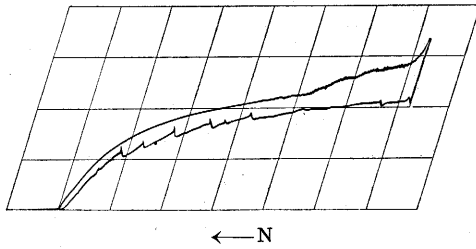


第 9 図 良好なトルク曲線

第 10 図は曲線の乱れを示しているが、ゼンマイの表面仕上不良等により摩擦を生じ滑らかなトルクを示さない。

(3) ヘタリ 製造直後のゼンマイのトルクは十分規格値に達しているが、時計に組み込まれ長期間の使用

* 巻いてから 24 時間経過したときのトルク。



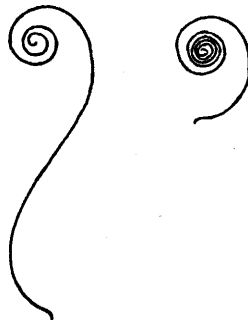
第10図 トルクムラを生じた曲線

により、次第にヘタリを生じてトルクが低下してくる(炭素鋼ゼンマイの場合は特にはなはだしい)。トルク低下に伴って時計に起こる現象は時間の進み、または遅れとなって表われる。

(4) 破断 最近まで良質の高炭素鋼板や特殊鋼板を焼入、焼戻し着色してゼンマイを製造していた。青色のテンパーカラーの薄被膜によって金属肌を直接外気にふれないようにしていたが、湿度の高い梅雨期等には防錆対策を施して製造しても時々発錆により破断するものが多かった。このような状態であるから市販された時計も発錆により破断するものも

使用前 1カ年使用後

かなりあった。幸い発錆を免がれたものも早いものは2~3ヶ月長くて2~3年位で疲労破断するものもあり、市販された時計の故障原因中破断によるものが相当量あった。

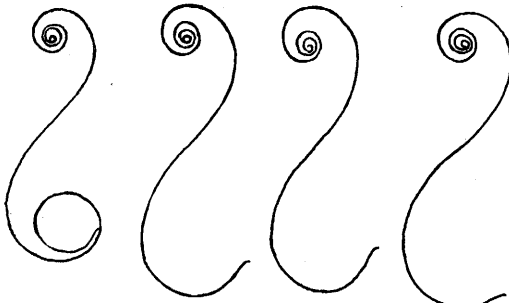


第11図 鋼ゼンマイ

5. S-Flex 材料および加工等の特殊性

前述の諸条件を満足さ

使用前 6ヵ月使用後 1カ年使用後 2カ年使用後



第12図 S-Flex

せるためには従来の高炭素鋼、あるいは特殊鋼を熱処理した材料ではあらゆる点において一応限界点に達しているのでその対策として、コバルト系不銹合金をもって替えることによりほぼ完全に要求を充たすことが可能となった。

鋼ゼンマイは微少なさびが切欠効果の原因になり破断

するが多かったが、コバルト、ニッケル、クローム等の多元合金により発錆による前者の欠点を充足するとともに高弾性率のゼンマイを製造することができた。鋼の着色されたゼンマイに対してコバルト系不銹合金ゼンマイは金属光沢をそのまま、あらわしているのので“白ゼンマイ”またはS-Flexと称している。この白ゼンマイを鋼ゼンマイと比較すれば次の諸点が特に優れている。

(1) ヤング率および弾性限が高い ヤング率(E)が高い場合は、(1)式のようにトルクの増加に寄与し、厚みが同一であっても、高いトルクが得られることになり、トルクが同一の場合は薄くできるから、長くすることが可能となり持続時間が延長され、変動率は小さくなるので、時計全体の精度を向上させることができる。

(2) 抗張力が高い 各種バネ鋼は従来抗張力、硬度等によって品位等級がつけられていた。しかしその値は直接スプリング特性を指示しないが、他の機械的物性的性質にくらべ簡単に測定できるので目安として測定値を用いている。

(3) 切欠効果に対しては極めて鈍感である ゼンマイが香箱車内にセットされれば常に第4図のように応力を受けているのでゼンマイの表面および側面の小キズは切欠効果により直ちに破断を生ずるが短時間に測定される巻しめ巻戻しの破断試験には良好な成績を納めている。

第3表 表面キズと破断までの寿命 S-Flex 男子用 (10本のX)

キズの種類	良品	平キズ	耳キズ	耳キズ
面積 $\times 10^{-2} \text{mm}^2$	(キズなし)	29 \times 17	18 \times 6	37 \times 29
連続巻しめ、巻戻しによる破断までの回数	1176	1122	1055	1012

(4) 疲労限が高い 高い疲労限は長年の使用によってもゼンマイのトルクが、ヘタらず高い状態で保持される。実際の時計にゼンマイを入れ第二精工舎で鋼製、S-Flex、外国製の三者各5ケについて行なった長期実用試験の結果を第13図に示す。鋼製は5ヶ月で約20%減少しているのに対して、S-Flex 輸入品は3ヶ月で7~8%、いずれも同程度で優秀な成績である。

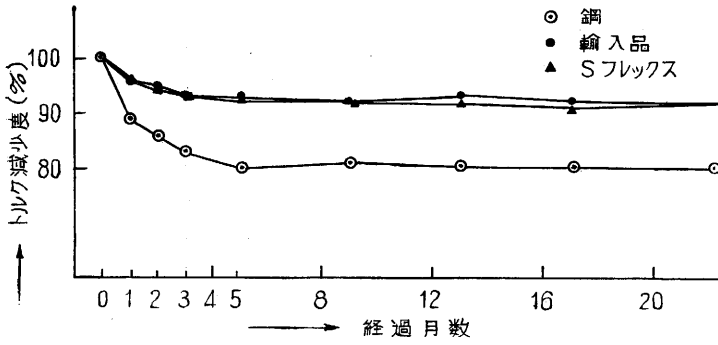
(5) クリーブに対する抵抗力が高い ゼンマイの破断は発錆以外は疲労による場合が多いが、早巻しめ早戻し(サイクルタイム約10秒)の疲労試験機により疲労破断試験を行なった1例を示す。

(6) 耐触性が優れている 鋼ゼンマイは十分注意して

第4表

区分	種別	破断回数	平均	潤滑油
鋼製	1	393	401	クロナックス
	2	409		
S-Flex	1	1120	1098	"
	2	1042		
輸入品	1	1163	1081	"
	2	1032		

製造加工を行なっても取扱い中に生じた微細な発錆により破断したり、特に湿度や汗等による発錆のため破断し

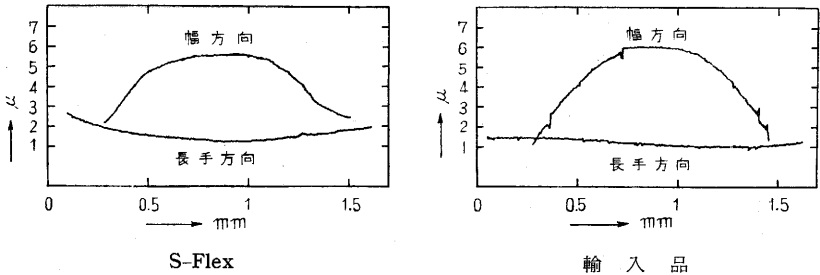


第13図 ヘタリ試験結果

たことは前述のとおりであるが、S-Flex はなんら特別の対策処置を行なうことなく加工しても全然錆を生じないので発錆による不良品や破断は皆無である。

また強酸・強アルカリ等の温浴に長時間浸漬しても耐触性に富んでおり美しい光沢は少しも失われない。

S-Flexは高純度のコバルト・ニッケル・クロームその他の原料を真空溶解炉によって溶解を行なう。大気中で溶解を行なうと溶融金属中の含有ガスや微量な不純物等のために、熱間、冷間の加工性を阻害し材質を劣化させる上に、溶解インゴットごとに材質のムラを生じ、完全な管理状態で製造できないので、真空溶解法を採用している。加工工程中特異な点は不錆系の多元合金であるため他のいかなる多元合金よりも熱間、冷間加工とも困難を極めているので、狭範囲の管理限界を設定し加工を行なっている。特に高弾性率の材料の材質を得るために冷間線引と冷間圧延と熱処理を組合



第14図 ゼンマイの表面粗さ (大きな曲がりとは測定時の試片の彎曲である)

わせ繰返し加工を行なっているが、冷間線引においては市中のいかなる機械を使用しても伸線することができなかったが、東大鈴木弘博博士の指導、設計された逆張力式5頭連続伸線機によって加工が可能となった。製品仕上り寸法精度については前述のようにゼンマイの性能を大きく左右するので、インゴット、同一ロット内の材料を均一加工し加工歴を一様にするために、各作業とも最新式の自動制御機構を装備した機械を採用して厳重な品質管理のもとに生産が行なわれている。冷間圧延された材料の表面は第14図のように輸入品よりはるかに優秀であり、したがって香箱車内にセットされた場合にゼンマイの表面は摩擦が少ないのでトルク曲線の乱れはない。冷間加工中熱処理はすべて真空熱処理炉で処理されるので、熱管理、真空管理とも重要な管理項目として取り扱っている。

6. むすび

ゼンマイ材料の塑性加工、機械加工に伴う治工具の損

耗、製作寸法もすべて1μ以下がゼンマイ性能の良否を決定する重要な因子となっているために、整備にもまた細心の注意と関心を払っている。(1959.9.11)

(49 ページよりつづく)

曲線を圧延と引張法により求め、両曲線がほぼ同様の傾向を示すことを明らかにした。

2. 圧延条件を変えて圧延した板について、引張および硬度試験を行ない、0.1% C、0.9% C 鋼においては実験を行なった圧延条件範囲では、1パス圧下率、前・後

むすび

以上の実験を終わり測定要素あるいは圧延条件に不備な点もあったが、一応初期の目的を満足したと思っている。圧延機の調整に与えられた時間のほとんど大部分をさいたため時間的余裕がなく、本文は実験結果を紹介するにとどまったが、本実験結果をもとにした理論的解析は今後の機会にゆずりたい。

本圧延機はその性能上、また機構上わが国においてまったく最初の試みであって、この圧延機が数カ月という

方張力、圧延速度は圧延後の板の引張強さ、硬度に影響をおよぼさないことを明らかにした。

3. 0.1% C 鋼について1mm→0.091mmまで、圧延条件を一定にして圧延し、圧延後の板の表面粗さを測定した結果、板の表面の凹凸は±0.5μの範囲内であった。

きわめて短期間で予期以上の性能をうることができたのは第二精工舎を初め関係各社の熱意ある協力によるものであり、深く感謝する。

なお本圧延機は実験結果を採り入れて一部改造の上すでに実際の生産に稼動中であり、本圧延機によるいわゆる“さびない”時計用動力ゼンマイが、続々生産されつつあることを付記しておく。(1959.9.25)