

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vo3. (1971) No.4

内部摩擦測定装置

Internal Friction Measuring Apparatus

川村 紘一(Kouichi Kawamura) 今中 拓一(Takuichi Imanaka)

要旨：

内部摩擦の測定は、金属材料の性質を理解するうえで、重要な研究手段である。ここでは、川崎製鉄(株) 計量工場において開発した縦振動型測定装置とねじり振動型測定装置について述べている。縦振動型測定装置は、完全自動式であり、変形中の内部摩擦を測定するというような、動的試験にも、安定した測定が可能である。ねじり振動型測定装置は、広い温度領域での試験や、動的試験が可能である。

Synopsis：

The measurement of internal frictions affords one of the most important means of studying and understanding the true nature of any metals. This article will describe the outline of two types of internal friction measurement apparatuses developed by Kawasaki Steel Corporation, the one being the piezoelectric longitudinal vibration type and the other the torsion pendulum type. The longitudinal vibration type adopts a perfectly synchronized self-oscillation system, capable of conducting stable and reliable measurement in dynamic tests for measuring the rapid changes in the internal friction during plastic deformation. The torsion pendulum type is suited for tests with a wider temperature range and also for dynamic tests.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

内部摩擦測定装置

Internal Friction Measuring Apparatus

川 村 紘 一*
Kouichi Kawamura

今 中 拓 一**
Takuichi Imanaka

Synopsis :

The measurement of internal frictions affords one of the most important means of studying and understanding the true nature of any metals.

This article will describe the outline of two types of internal friction measurement apparatuses developed by Kawasaki Steel Corporation, the one being the piezoelectric longitudinal vibration type and the other the torsion pendulum type.

The longitudinal vibration type adopts a perfectly synchronized self-oscillation system, capable of conducting stable and reliable measurement in dynamic tests for measuring the rapid changes in the internal friction during plastic deformation. The torsion pendulum type is suited for tests with a wider temperature range and also for dynamic tests.

まえがき

内部摩擦の測定は、固体物性の研究分野では重要な手段である。従来からも、特にねじり振動による測定については、その方法が比較的的原理的であることもあって、実験室での手作りの装置によって、たとえば、bcc 金属中に固溶する C, N, O, H の固溶量の定量分析などに応用されるほど一般化されている。半面、他の測定方法については、特に、変形中の急激な内部摩擦の変化を追跡するというような測定技術についてはいまだしの感がある。これは扱う周波数領域が高く、現象変化の早いことや、適当な装置が開発されていないことなどによるものと思われる。当計量器工場も、早くから、これら装置の開発を当社技術研究所と共同でおこない、改造を重ねて、ここに一応

所期目的にかなう装置を製作することができた。特に、縦振動による測定装置は、まだ若干の問題を残しているとはいえ、従来からの要望であった完全自励式に成功し、試料の変形中の測定ができるなど、一応の成果を収めている。

1. 内部摩擦とは

振動体のもつ機械的エネルギーは、空気や支持物体を伝わって外部に逃げるが、もし外部と完全に遮断された振動体があった場合でも、エネルギーの補充をしない限り、その振動は減衰することが知られている。これは機械的エネルギーが物体の内部でいろいろな機構を通じて熱に変換されて、消耗していくためであって、物体内部でのエネルギー消耗という意味で内耗または内部摩擦と呼んでいる。

* 計量器工場開発設計室

** 技術研究所珪素鋼研究室主任研究員工学博士

いま、振動エネルギー E なる物体の1サイクル間のエネルギー減少量を δE とすれば、内部摩擦は、 $\delta E/E$ なる式によって定義される。また内部摩擦のある物体の振動振幅は、一般に時間とともに、指数関数的に減少する。いま、ある振動の原点から数えて、 n 番目の振動振幅を A_n 、最初の振幅を A_0 とすれば、

$$A_n = A_0 \exp(-n\Delta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

が成立する。これより

$$\Delta = -\frac{1}{n} \ln \frac{A_n}{A_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

この式からわかるように、振幅の減り方は、 Δ の大小によって左右されるから Δ は振幅減少の程度をあらわす尺度となる。 Δ は(2)式の形から対数減衰率とよばれている。

ここで、周辺条件を整えることによって、たとえば振動物体を真空中に入れ、空気抵抗を小さくし、また、振動体の節を支えることによって、支持部を伝わって逃げる機械的エネルギーを少なくするなどの考慮を払えば、この減衰は、もっぱら物体の内部摩擦のみによるものと考えてよい。このような場合には、 Δ は内部摩擦の尺度となる。

振動体の持つエネルギーは、その振幅の2乗に比例することから、 $\delta E/E$ と Δ の間には、次の関係式が成立つ

$$\begin{aligned} \delta E/E &= (A_n^2 - A_{n+1}^2) / A_n^2 \\ &= 1 - \exp(-2\Delta) \\ &\approx 2\Delta \quad (\because \Delta \ll 1) \\ \therefore \Delta &= \frac{1}{2} \cdot \delta E/E \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

すなわち、対数減衰率と内部摩擦は比例することがわかる。

2. 縦振動型内部摩擦測定装置

2.1 仕 様

縦振動による内部摩擦の測定は、数kHz～数100kHzの周波数領域での測定に用いられる。実際に製作した装置は下記の点を考慮した。

(1) 試料は一般に振幅依存性を持つため、測定方法はMarxの方法²⁾を採用する。この際、デ

ータ解析に時間を取られるが、これには、最近盛んに使用されるようになってきた、リニア ICタイプのOPアンプなどを用い、高周波整流回路を作り、振幅減衰の包絡線をアナログ記録できるようにする。

(2) 加熱、冷却中または、変形中などの動的な測定の際に、共振周波数が変わることが考えられるので励振方式は、自励方式を採用する。また、他励方式も可能とする。

(3) 空気との摩擦によるエネルギー損失を少なくするため、ロータリーポンプと拡散ポンプによって、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr程度の真空雰囲気を得る。実際に空気中における対数減衰率は、 10^{-4} Torr程度でのそれに比して、約5倍にもなることがある(70kHzでの測定による)。実験的に、これ以下の真空度の有意差は、200kHz程度までは、見られない。

(4) 特に磁性体、強磁性材料の試料を磁界中で測定することは、非常に有意義なデータが得られるので、0～800Oe程度の磁界炉を有する。

このような条件のもとに、本装置は下記仕様を



写真1 自動式縦振動形内部摩擦測定装置による塑性変形中の内部摩擦の測定

標準仕様とした。

- a) 励振電圧範囲 10mV~100V_{rms}
- b) 測定歪率範囲 $\approx 10^{-8}$ ~ 10^{-4}
- c) 周波数範囲 15kHz~200kHz
- d) 測定方法 Marx 法²⁾
- e) 励振方法 自励方式(他励方式も可)
- f) Δ 測定範囲 $10^{-6} < \Delta < 10^{-2}$
- g) 試料形状 丸棒, 3~10mm ϕ
- h) 真空度 $\sim 1.0 \times 10^{-6}$ Torr
- i) 磁界 0~800 Oe(連続可変)
- j) 付属水晶振動子 50kHz, 70kHz, 100kHz

2.2 装置の構成

装置のブロックダイアグラムを図1に示す。励振は同期発振器からの出力を増幅し、複合水晶振動子の励振用振動子に、正弦波電圧を印加することによって行なわれる。この周波数が共振周波数ならば、検出用水晶には励振波形とは90°位相のずれた電圧が現われる。これを位相推移回路、トリガー回路を通して、トリガーパルスを、同期発振器に与える。同期発振器はこのトリガーを受けて、その周波数で発振を持続する。

(1) 同期発振器

同期発振器とは、通常発振としての機能の他に引き込み現象を利用した、同期入力端子を持ち、この端子に加えられたトリガーと180°位相のずれた周波数で発振をおこなうような発振器を言い、実際には、N・F回路ブロック製SY-126を使

用した。

(2) 位相推移回路

任意の周波数入力に対して、これより任意角度ずれた点で、短形波出力パルスを出す回路で、上記装置の場合には、検出波形と同期発振器の同期入力端子への波形との90°の位相ずれを補償するためにこれを用いた。

(3) 高周波整流回路

最近のOPアンプ、リニアICを用い、その帰還回路にダイオード特性を持たせ、高精度の全波整流回路が容易に作られることから採用した。これによって、特に動的な測定中での大幅な電圧変化が、XY記録計上に記録でき、従来のMarxの方法³⁾のように、1回1回メーター指示を読む必要がなくなった。

(4) 自励他励切換スイッチ

スイッチを切換えることにより、先の自励方式、他励方法両方法が可能である。

他励方式のときは、同期発振器は通常の発振器として動作する。他励にして測定を行なうと、試料の寸法誤差などによって起こる複振動(共振点が複数個存在する)を、発見するのに有利である。

2.3 試料の形状および装着

試料の形状は丸棒でも角棒でもよいとされているが、通常は形状による寄生振動を防ぐ意味からほとんど丸棒が使用されている。また、試料の固有周波数は水晶のそれとよく一致させる必要がある。すなわち減衰率の小さい試料($\Delta=10^{-5}$ 程度)では、0.5%程度まで一致させる必要があり、大きい試料($\Delta=10^{-3}$ 以上)では2~5%程度まで一致させれば十分である。これは、共振周波数が一致していなければ複合水晶と試料による振動系が複数の共振ピークを持ち、正確な測定ができないためである。

複合水晶振動子と試料の接続には、できるだけ内部摩擦の少ない接着剤を用いることが必要であり、常温用としては beeswax araldite 101⁵⁾、高温用としては RCA ceramic cement⁶⁾、低温用としては zinc phosphate dental cement⁶⁾ などが使用されているが、当社技術研究所では、もつ

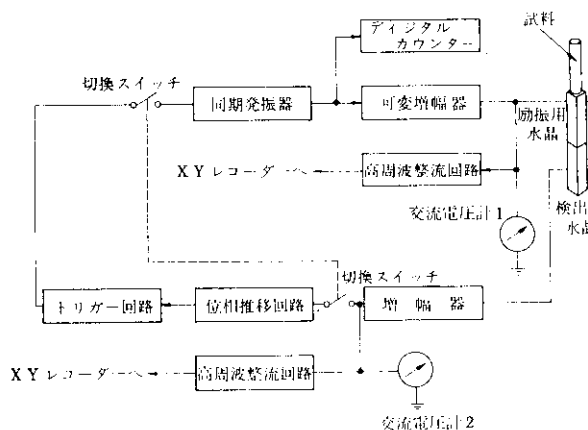


図1 縦振動型内部摩擦測定装置ブロックダイアグラム

ばらアルファシアノアクリレート（商品名：フロンアルファ）を使用しているが、測定に対する支障はないようである。

試料を高温、低温中で測定する場合は、複合水晶振動子と試料を長さ 30~40cm 程度の熔融石英棒で接続し、振動子を熱的に保護して測定できるようにしている。

石英棒の固有振動数は、振動子のその整数分の 1 に正しく合わす必要があるが、石英棒を付加した場合、複合水晶振動子だけの場合の減衰率はほとんど変わらず、約 10^{-6} の order（一般の試料のその 1/10~1/1000 程度）で安定しているため、測定に際しては問題にならない。

2.4 試料の駆動法

一般に試料に縦振動を与える方法としては、水晶の圧電効果を利用している。これは 18.5° X カット（棒軸と Y 軸とが 18.5° をなすもの）の水晶振動子に、周波数の一致した棒状試料を接着し、水晶に正弦波電圧を与えることによって長さ共振（縦振動）を起こさせる。試料に第 1 次共振周波数のものを用いれば与える歪率は $10^{-8} \sim 10^{-4}$ 程度である。

複合水晶振動子は 図 2 のように上・下 1 対のそれぞれ固有周波数のよく一致した（0.1% 以内）水晶を減衰の少ない接着剤で貼り合わせたものであり、一方を励振用に他方を検出用として使用する。

2.5 振動系の支持

複合水晶振動子ならびに、試料をセットし、内部摩擦を測定する場合に、振動系を支える支持部やまわりの空気などによるエネルギー損失をでき

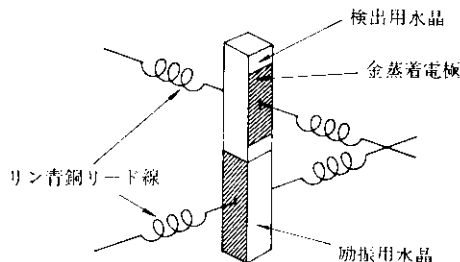


図 2 複合水晶振動子

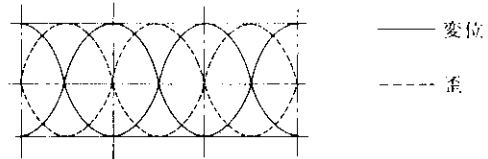
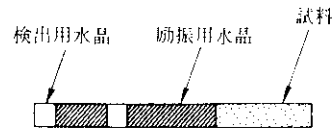


図 3 振動モード

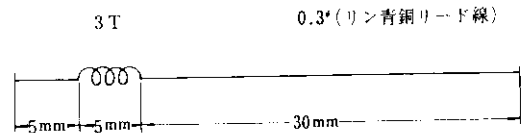


図 4 スプリングリード線

るだけ少なくすることが望まれる。

本装置では支持部からのエネルギー損失を少なくする方法として、図 2 に示すように、各水晶振動子の向き合った 2 面に金蒸着を施し、これを電極として、振動の節となるところにリン青銅のスプリング（図 4 参照）をろう付けして支持する方法を用いた。他にナイフエッジ³⁾ 小球⁴⁾ またはガラス繊維⁵⁾ で支えるなどの例があるが、機械的加工の容易さなどの点で上記の方法を採用した。

空気との摩擦によるエネルギー損失を少なくするためには、仕様の項で述べたように、真空雰囲気中で測定することによって解決した。

2.6 測定方法

測定方法の主なものとしては、自由減衰による方法、Marx の方法²⁾ の 2 つがある。

(1) 自由減衰による方法

1 章に述べたように振動振幅の対数減衰率を測定すれば、内部摩擦を知ることができるが、連続するパルスの中からある特定のパルスだけ取り出し、そのピーク値を正しく読み取るということは、かなり困難なため、次のような方法を取る。

あらかじめ既知の関数比たとえば $E_2/E_1 = e^{-1}$ としておき減衰していく振幅が $E_1 \geq A_0$ となった瞬間から、 $E_2 \geq A_n$ となるまでの振動数 n を数えれば、

$$\begin{aligned} \Delta &= -\frac{1}{n} \ln A_n/A_0 \\ &= -\frac{1}{n} \ln E_2/E_1 \\ &= -\frac{1}{n} \ln(e^{-1}) \\ &= \frac{1}{n} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり容易に Δ を測定することができる。

この方法では

(a) 測定結果がデジタル化されているため事後処理がやり易い

(b) 一般に、数 10kHz 程度で測定するので $\Delta = 10^{-3} \sim 10^{-6}$ 程度の測定をするにも、数秒以内で測定結果がでるので、測定所要時間が短い。

などの特長があるが、対数減衰率が振幅依存性を持つ場合には、上記方法で測定した減衰率は、振幅 $A_0 = E_1$ から $A_n = E_2$ までの減衰率の平均値を表わすような形となり、かならずしも正確な値を示さないという欠点がある。

一般に、水晶振動子および石英棒には、大きな振幅依存性は認められないが、縦振動で測定しようとする試料には、振幅依存性が存在するのが常であり、試料の任意の歪率での測定が不可能となる。

(2) Marx の方法²⁾

この方法は先に述べた複合水晶振動子の励振側電圧と検出側水晶に現われた検出電圧の比から、その系のエネルギー損失を算出しようとするもので、先の対数減衰率を求めて内部摩擦を測定しようとする自由減衰法とは本質的に異なる。その解析は原典にゆだねるとして、その結果のみを挙げれば、いま励振電圧を V_d (V_{rms})、検出電圧を V_g (V_{rms}) とすればその歪率 ϵ_g および系の減衰係数 δt は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \epsilon_g &= 2.27 \times 10^{-8} \times \frac{C_g + C_m}{C_g} \\ &\times \left(\frac{h}{W_g \sin \frac{1}{6} \pi h} \right) \times V_g \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta t &= 9.85 \times 10^9 \times \frac{C_g}{C_g + C_m} \\ &\times \left(\frac{b_g \cdot W_g \cdot \sin \frac{1}{6} \pi h}{l_d \cdot m_t \cdot f_l^2} \right) \times \frac{V_d}{V_g} \quad (6) \end{aligned}$$

ここに

C_g, C_m : 受信用水晶振動子の電極間容量および水晶から測定系を見た容量 (F)

b_g, W_g : 水晶振動子の厚みおよび幅 (cm)

l_d : 励振用水晶振動子の長さ (cm)

f_l : 系の共振周波数 (Hz)

m_t : 系の全質量 (g)

h : 振動の次数 (通常 $h = 1$)

ただし上式は検出用水晶振動子の電極が、その全長の $1/6$ の時の式である。

Marx の方法では

(a) 測定時の振幅を一定に保っているの、振幅依存性のある試料でも問題なく測定できる

(b) 低歪から高歪まで非常に広範囲な測定ができるなどの特長があるが V_d, V_g などを高周波用の真空管電圧計で読み、上記(5)、(6)式を用いてデータ解析されるため解析に時間がかかるといふ欠点がある。しかし、測定する系について、いったん定数を算出しておけば、後これを使用できるので、それほど困難をとまらうわけではない。したがって本装置では Marx の方法を採用した。

2.7 系の励振方法

複合水晶振動子に正弦波電圧を与えて、縦振動を行なわせるわけであるが、この系の励振方法には他励方式と自励方式がある。

他励方式とは複合水晶振動子の励振側振動子に振動系とは電氣的に独立の発振器から電圧をかけ、発振周波数を手動で可変しながら、その系の共振周波数を求め、その周波数で励振を行なわせる方式である。したがってこの方式では安定した発振器を必要とし、測定中に周波数の変わるような、特に動的な測定の場合には適さない。

それに対して自励方式は、複合水晶振動子、試料などからなる機械的振動系を電気回路の一部として、包含するような、発振系を構成する回路構成とし、この回路の発振周波数は、自らその機械的振動系の周波数と一致するような方式であり、

したがって、電気回路的には、多少の困難を伴うが、共振周波数などが変化するような動的な測定¹⁾などの場合にも、安定した測定ができることなどの特長がある。本装置では自励、他励いずれの方式によっても測定可能である。

2.8 本装置に対する考察

通常の静的測定はもちろん、引張試験中などの動的な測定¹⁾が可能となり、一応所期の目的を達したと思われるが、まだ問題点もある。その一つは、今の方式では励振電圧一定とはなるが、歪率一定、すなわち、検出電圧一定の測定はできない。しかし実際の測定では試料に加える歪率を一定とし、周辺条件を変化させたときの内部摩擦の変化を観察することの方がより物理的に意味がある。したがって、実際の測定にあわせるためには、歪率(検出電圧)を設定し、これを一定とするように励振電圧を変化させ、これを高周波整流回路を通してアナログ記録計で記録し、内部摩擦の変化を直視できるように改善する必要がある。

もう一つは、今の方式では周波数記録は、デジタルカウンタで計数しているため、0.1Hzまでの変化を読むには、10sec 必要とし、特に動的測定での早い変化の時は、間に合わないことがある。したがって、この周波数変化もアナログ記録できるよう現在、改造をおこなっている。

3. ねじり振動型内部摩擦測定装置

3.1 装置の仕様および概略構成

ねじり振動型内部摩擦測定は、0.1~10Hzの周波数領域での測定に用いられ、線材、板材などにねじり歪を与え、自由放置したときの振幅の減衰状況から、その系の内部摩擦を測定しようとするものであり、先に述べた縦振動型内部摩擦測定装置の自由減衰法に相当する方法が一般的である。

試料の上端を固定し、下端に慣性体を付属した非常に原理的な装置は、Kê-typeと呼ばれ、形状による補正を必要とするため、形状の単純な線材などの試料の静的測定に用いられている。また、一般に逆吊り法と呼ばれる Collette-type²⁾は、

形状による補正を必要としないため、板材試料などの測定も可能である。実際に、製作した装置は下記の測定を目標とした。

- (1) 板材の測定ができること
- (2) 広い温度範囲での測定ができること
- (3) 試料装着のまま加工できること
- (4) 磁界中(0~800 Oe)での測定ができること

と
このため、測定方法は Collette-type²⁾を採用した。

装置の標準仕様を以下に示す。

- | | |
|------------------|------------------------------|
| a) 測定歪率測定 | $10^{-5} \sim 10^{-2}$ |
| b) 周波数範囲 | 0.1~10Hz |
| c) 測定方法 | 自由減衰法 |
| d) 励振方法 | 直流電磁石法 |
| e) Δ 測定範囲 | $10^{-5} < \Delta < 10^{-3}$ |
| f) 磁界 | 0~800 Oe (連続可変) |
| g) 真空度 | 1.0×10^{-5} Torr |
| h) 加熱炉 | 室温~1000°C (任意設定) |

本装置の概略構成を図 5 に、測定ブロックダイアグラムを図 6 に示す。測定部は上部ガラス

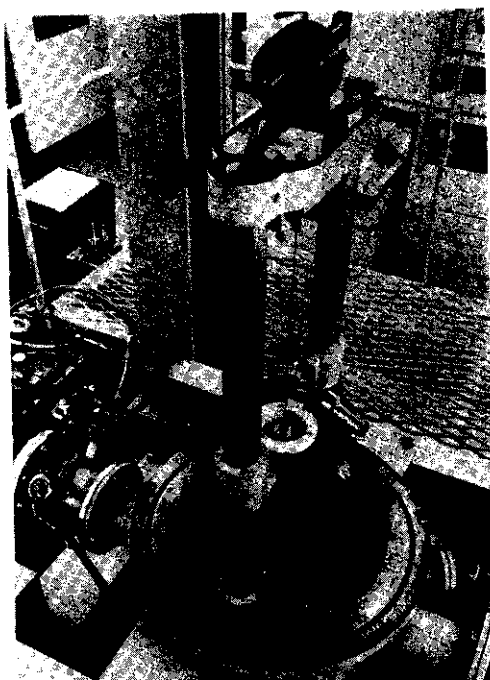
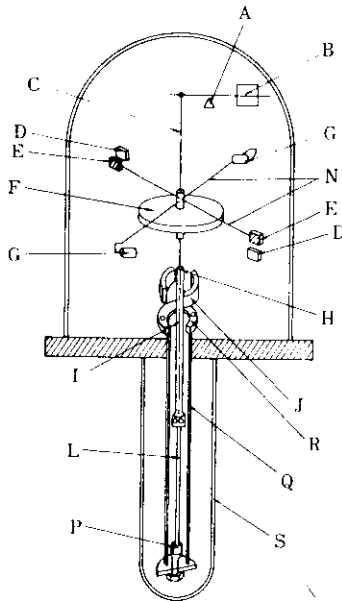


写真 2 ねじり振動型 (Collette型) 内部摩擦測定装置の逆吊り振子部分



- | | |
|--------------------|---------------|
| A. 支点 | I. タミー・ロッド |
| B. カウンター・バランス・ウェイト | J. クランプチャック |
| C. 上部ねじり吊線 | L. 試料 |
| D. 磁石 | N. アーム |
| E. 軟鉄片 | P. 下部ベース |
| F. 慣性円板 | Q. コネクション・ロッド |
| G. 差動変圧器 | R. ワーク・リング |
| H. 下部吊線 | S. 透明石英管 |

図 5 構成図

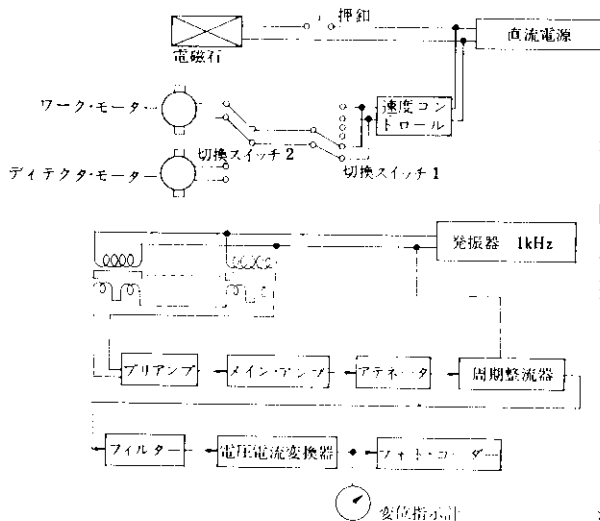


図 6 ブロック・ダイアグラム

鐘 (700mmφ) の中に収め、試料は下部透明石英管 (約 70mmφ) の中に収められている。下部石英管部分はそのまま加熱炉用または冷却炉の中にそう入できる。

3.2 励振方法

振動系の吊線慣性体試料を結ぶ直線に直角に取り付けられた腕ドライブ・アームの両端に軟鉄片 (E) を付け、直流電磁石 (D) を作用させることによって、初期ねじり変位を与え、この励磁を切ることによって、系の固有振動周波数によるねじり振動をおこなわせるものとする。

3.3 ねじり変位検出方法

ドライブ・アームと直角に配置された腕 (ディテクタ・アーム) の両端に取り付けられた軟鉄心とその外部に非接触におかれた差動変圧器 (G) により系の変位量を検出する。

差動変圧器は系の中心に対して対称に 2 組設け、両方の出力を加え合わせることによって感度を上げると同時に、両方の差動変圧器に対して、非対称な振動、すなわち、系の横ゆれなどによる影響を相殺する。従来光とミラーによる方法や、系の中心にコイルをおき、まわりに静磁界を設けて、そのコイルからの電磁誘導による測定法などがいずれも周囲振動の影響を受け易いのに対して、この方法では、ノイズ除去率は、約 -40db 程度とかなり良好な結果を得ている。

ねじり振動の周波数は 0.1~10Hz であるため、差動変圧器に加える励磁電圧は、商用周波数を用いることは、応答性の点から無理であるので、図 6 に示すように、約 1kHz の発振器および、増幅器の出力を 2 組の差動変圧器の一次巻線に並列に加えた。2 次側巻線には、励磁電圧周波数 (≒ 1kHz) をキャリアとしてねじり振幅に比例した変調電圧波形が得られる。

3.4 試料の変形

試料を装着したまま変形し、その直後から測定をおこなえるようにするため、下記のような方法を採用した。すなわち、図 5 において、クランプチャック (J) を閉じタミーロッド (I) を固

する。ここで下部ベース (P) と 3 本のコネクションロッド (Q) で結合されているワークリン (R) を真空用モーターで回すことによって試にねじり変形を与える。

3.5 測定方法

自由減衰法による測定方法を用いた。この場合、振幅依存性は、チャート上に記録した減衰曲線から、求めることができるので、測定誤差とはならない。

3.6 真空雰囲気

先の縦振動の場合と異なり、周波数が非常に低いので、あまり空気による摩擦の影響は受けないようである (実験的には、約 1 Hz の実測定で、大気中と 10^{-2} Torr 程度の真空中とでは、10% 程度の差異が認められた) が、高温中での測定を日票とするので試料の酸化防止の意味からも、ロータリーポンプおよび、拡散ポンプによって、 10^{-5} Torr 程度の真空雰囲気を得ている。

3.7 加熱炉

加熱炉は、中央部加熱巻線と上下部補助巻線とに分かれ、設定に対する制御を中央部加熱巻線で、上部と中央部、下部と中央部の各々の温度偏差を上下の補助巻線で制御する。いわゆるマスタースレーブ方式を採用した。

3.8 本装置に対する考察

一応上記仕様を満足させる、測定はできるが、測定方法には電磁オンロを使用したアナログ記録

による自由減衰法を用いているが、これは (1) 振幅依存性がないと仮定しての測定法である点と (2) 周波数が 0.1~10 Hz と非常に低いため高精度の測定をするには、かなりの長時間を要する。このことは、時間的ロスばかりでなく、温度制御の点からも、決して有利な条件とは言えない。したがって現在では内部摩擦の定義の原点に立ち帰り振動エネルギー E なる物体の 1 サイクル間に失われるエネルギー δE の E に対する比 $\delta E/E$ を測定することによって 2, 3 サイクルの間に測定できるよう改造中である。

4. 結 び

以上、主に縦振動型内部摩擦測定装置と Collette-type ねじり振動型内部摩擦測定装置について述べた。各装置の考察の項で述べたように、一応所期の性能を満たすものを作ることはできた。しかし、実際に使ってみて、いろいろ不都合な点、無駄な点が指摘され、今後の改造点とされた。特に測定精度の向上はもとより、省力化の意味からも、測定時間の短縮、データ解析の簡素化が問題となる。また、このような装置が単に実験室、研究室での使用にとどまらず、もっと一般化し、ラインへ直結した測定をおこなうようになれば、なおさら、省力化と操作の易さが求められるので今後とも、これらのことに注意しより良い装置を開発していきたいと思っている。

終りに、これら装置の開発に際し、多大のご協力をいただいた技術研究所木下、志賀、佐野研究員に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 今中、佐野、藤元： 本誌，3(1971)4, 1
- 2) J. Marx : Rev. Sci. Instr., 7(1951), 222
- 3) S. Siegel et al : Phys. Rev., 50(1936), 1158
- 4) R. K. Cock et al : Phys. Rev., 105(1957), 1174
- 5) J. O. Kessler : Phys. Rev., 109(1957), 646
- 6) M. E. Fine et al : Phys. Rev., 105(1957), 121
- 7) G. Collette : Compt. Rend., 246(1958), 2756