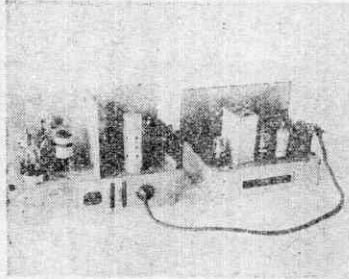
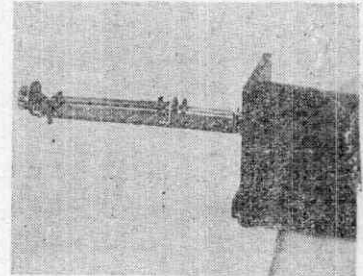


# 金属の内部摩擦とヤング率の測定

—測定装置を中心として—



(左) 換振器 (左) と増幅器



(右) 振動検出部分

大 澤 眞 人  
丸 山 茂

ヤング率の測定は手数がかゝるということになっているが、それは静的に測定した時のことと、振動法で行えばきわめて簡単に、精度良く求められる。また同時に測れる内部摩擦は典型的な構造に敏感な性質である。

## 1. ま え が き

金属のヤング率の測定は静的に荷重をかけて、それに對する伸を測るのが普通であるが、この方法では一般に精度が悪く、伸も割合に大きい。これは普通の材料試験では問題にならないが、特殊な目的にはきわめて伸を小さくする必要にせまられる場合がある。またヤング率が時々刻々變るような場合には、静的方法では測定することはまず不可能である。これに對して動的方法は試料を振動させて試料の固有振動数をはかり、これからヤング率を算出する方法である。これには試料を自由振動させて、これをオシログラムにとり、標準周波数とくらべて固有振動数を知る方法と、可變周波数の強制力を試料に加えて共振周波数を求めるのと2つの方法がある。前者はオシログラムをとるのに手数がかゝり、また精度もあまりよくない。後者は振動振幅を定量的に測る装置さえあれば、その振幅指示計を見ながら強制振動の周波数を變えていくと、容易に共振周波数が求められる。この方法によれば3桁目迄らくに測定できる。また次に述べる内部摩擦測定からの要求で、歪振幅の最大値を、 $10^{-6}$ ~ $10^{-7}$  程度に迄小さくすることができる。

内部摩擦はいわゆる「構造敏感(Structure sensitive)」な性質の代表的なものの一つである。一例をあげると筆者等の実験では、銅単結晶をよく焼鈍したものを引張つて約5%の塑性變形を與えると、内部摩擦は焼鈍値の約100倍にも達する。このような敏感さと、塑性變形に對する轉位理論の實證の可能性のために、最近内部摩擦の測定が重要視されてきたのである。内部摩擦の定義はいろいろあるが、こゝでは

$W$ : 試料の1サイクル當りの振動エネルギー

$\Delta W$ : 1サイクル當りに試料に吸収されるエネルギー

とすると  $\Delta W/W$  となる。これは他の物理量と次の関係がある。

$$\Delta W/W = Q^{-1} = \delta/\pi$$

$Q$ : 試料の共振の鋭さ,  $\delta$ : 自由振動の際の對數減衰率,  $\pi$ : 圓周率

内部摩擦の測定にも縦振動, 横振動, 振り振動の3種があるが、試料に均一に應力の加えられる點では縦振動を使うのが好ましい。試料の熱處理の均一性を考えると、電氣爐の大きさの制限から約10~15cm程度がもつとも扱いやすい。このような長さの試料では使用する振動数は10~30k.c.程度になる。

内部摩擦を測定する場合に注意しなければならないことは

1) 金属では内部摩擦がきわめて小さい。このために測定装置そのものに對するエネルギー損失をできるだけ少なくする必要がある。試料の節點をナイフエッジで支える他は、試料には何物も觸れないようにする。このナイフエッジからの損失でさえも問題になる場合がある。

2) 振動振幅を小にすること。歪振幅が $10^{-5}$ 程度を超えると内部摩擦が振動振幅の増加とともに急激に増大し振幅にほとんど無関係な範囲は $10^{-6}$ 以下であることが報告されている。したがつて振動で内部状態が變化しないではじめの状態の内部摩擦を測るには、歪の最大振幅を $10^{-6}$ 程度にする必要がある。試料の長さを10cmとすると最大 $10^{-5}$ cmの振動振幅を少くとも測定する必要がある。また内部摩擦の大きい試料では共振が鈍になつて振動しがたいから、振幅検出装置の感度をさらに1桁あげておくと都合がよい。結局周波数が10~30k.c.で

最大 10<sup>-4</sup>cm 程度の振動振幅を測ることが必要になる。

2. 方法

この装置で測定する試料は長さが 10~30cm, 直径 4~7mm なので, 長さが直径の 20 倍以上あるから, この棒中の弾性波の傳播速度(V)は

$$V = \sqrt{E/\rho}$$

E: 試料のヤング率, ρ: 試料の密度  
したがって第 n 次の共振振動数 (f<sub>n</sub>) は

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{E/\rho}$$

1: 試料の長さ

となる。f<sub>n</sub> を求めれば, l と ρ をあらかじめ測定しておくこと, ヤング率が求められる。また同一試料のヤング率の微小変化を測る場合には, ヤング率の変化を ΔE, 共振周波数の変化を Δf とすれば, ρ, n, l は変わらないから

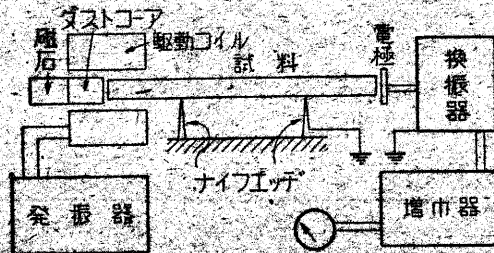
$$\Delta E/E = 2\Delta f/f_n$$

となり, Δf を測れば容易に求められる。この精度は強制力の周波数の安定度と共振の鋭さによつて決定されるが, 普通 4 桁目迄, 共振が鋭くきわめて短時間に測定できるときには 5 桁目迄も測定が可能である。この場合後述のように試料の駆動に渦流を用いるために, これによる試料のわずかな温度上昇があり, 普通の金属材料のヤング率の温度係数が 10<sup>-4</sup>deg 程度であることを念頭において測定を速かにする必要がある。

内部摩擦の測定は強制振動数を變化させてその振幅の變化をとり, いわゆる共振曲線を求めてその半價幅から電氣の共振回路の Q を求めるのと全く同様にして Q を求めて, この逆数 Q<sup>-1</sup> を内部摩擦とする。この測定の精度は ±5% 程度である。

3. 装置

装置全體は第 1 圖のようなものである。棒状試料の一



第1圖 装置全圖

端は半徑方向に磁石で磁場をかけ, 真空管發振器の出力を駆動コイルに流し, これによる渦流を試料に起して, この渦流と磁場の作用で試料を縱方向に振動させる。この磁石のコイル内に入る部分にメストコアを使うと有効である。この方法によると試料に全然ふれることなく振動させることができる。試料は振動の節點をナイフエッジで支える。これからのエネルギー損失が問題になる

場合には細い鋼線で吊り下げておく。試料の他端は試料面と平行に電極をおき, 試料とこの電極との距離が試料の縦振動で變化するので, この間の静電容量が變化する, これを高感度の換振器で電壓として取出し, 真空管増幅器で増幅して, 振動振幅に比例した出力電流を得ることができる。床や机からの振動は數十サイクル程度なので増幅器の 100 サイクル以下はカットしておくこと雑音が減少して安定に作動する。この場合試料と電極との間の静電容量は約 7PF であり, 試料の振動による最大容量變化は 10<sup>-3</sup>PF 程度である。

換振器は蓄電器の静電容量の變化を周波数の變化に變換する部分と周波数の變化を電壓の變化に變換する部分からなつている。今試料の端と電極の對向面積を A, その間隙を d とすれば, 静電容量 C は

$$C = A/4\pi d$$

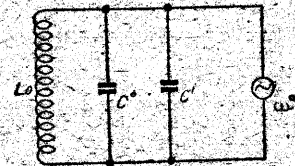
間隙が Δd だけ變化すれば, 静電容量の變化 Δc は

$$\Delta c = -A\Delta d/4\pi d^2$$

で表わされるから微小の振動 Δd を比較的大きな容量の變化にするにはなるべく間隙 d を小にすればよい。次に共振回路中の静電容量の微小變化が共振周波数 f<sub>0</sub> におよぼす周波數偏差 Δf は

$$\Delta f/f_0 = -\Delta C/2C_0$$

で表わされるから發振周波数の高い程また静電容量 C<sub>0</sub> の小さい程周波數の變化は大きい。今第 2 圖のように



第2圖 周波數變調說明圖

振器のタンク回路 [L<sub>0</sub> C<sub>0</sub>] に並列に挿入された蓄電器の容量 c' を考え, その容量が正弦函数的變化をするものとすれば, その容量 c は

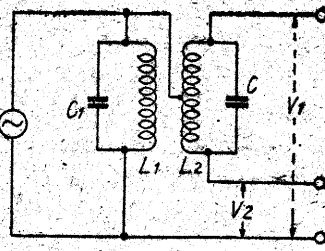
$$c = c' \sin \omega t$$

で表わされるので, 發振周波數は容量 c' の振動の振幅に比例して變化する。すなわち發振周波數 ω<sub>0</sub> が試料の振動振幅により周波數變調されていることになる。今この角周波數の瞬時値を ω(t) とすれば

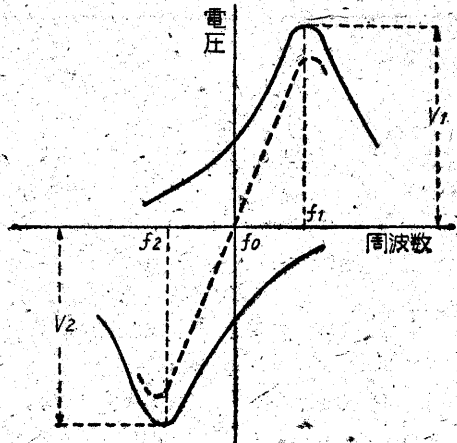
$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_d \cos P_m t$$

でこれは角周波數 ω<sub>0</sub> を中心とし試料の振動の大小による周波數偏差 ω<sub>d</sub> なる振動を以て, P<sub>m</sub> なる角周波數で變化していることで, P<sub>m</sub> は振動の周波數である。すなわちこの ω<sub>d</sub> なる周波數偏差を取出せばよいのであるが, 本装置では Foster Seeley の回路をそのまま使用した。すなわち第 3 圖のように同じ周波數に同調しているタンク回路を誘動結合してその二次側の中性點に一次側を接続し, 一次側に入力電壓を加えると, 二次側の電壓 V<sub>2</sub> の最大値は第 4 圖のように, 同調周波數よりずれ

た点  $f_1, f_2$  に生じる。今整流して電圧の差  $V_1 - V_2$  を取り出すと、點線のように  $V_1, V_2$  の最大点の間では直線的に変化する。そして  $f_0$  の點で

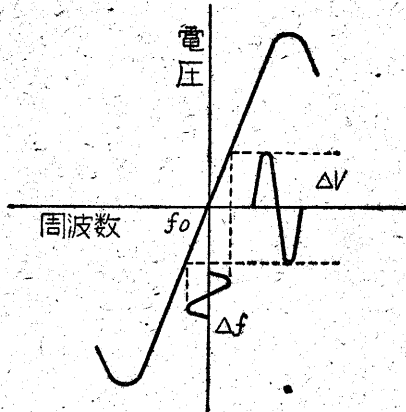


第3圖 周波数選別器説明圖



第4圖 周波数選別器動作特性

は二つの回路  $L_1, L_2$  の兩端に生ずる。電圧はちようど、 $90^\circ$  の位相差をもち、整流電圧は相互に打消し合つて出力電圧は0であるが、周波数の變化を生じた時はバランスが破れて出力端子には發振周波数の變化に比例した交流電圧を生じることが第5圖のようである。この圖で



第5圖 周波数選別器動作特性

もわかるように中心周波数  $f_0$  における  $V_1 - V_2$  特性の傾度は選別特性に大なる関係があり、この傾度を  $S_0$  とすれば

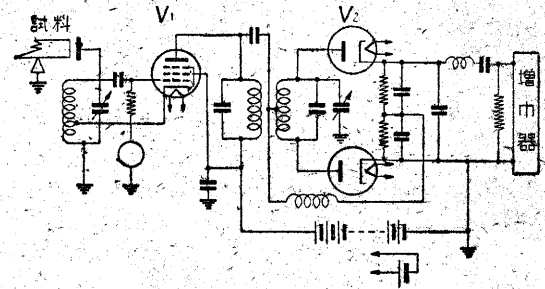
$$S_0 = 2 \cdot Q_1 / f_0 \cdot g_m \cdot e_g / G_1 \cdot \sqrt{mn^2 / \eta} / (1 + \eta^2) \sqrt{1 + \frac{1}{2} mn \eta^2}$$

$$\eta \text{ 最良値} = (\sqrt{1 + 2mn} - 1)^{1/2} / mn^{1/2}$$

で表わされ、 $Q_1, Q_2$  は一次二次コイルのよさを表わす  $Q$  で  $G$  はロス・コンダクタンス (Loss Conductance),  $m = L_2 / L_1, n = Q_2 / Q_1, \eta = L_1 / L_2$  の結合度である。すなわ

ち入力電圧・真空管の相互コンダクタンス、發振周波数およびコイルの  $Q$  結合度に關係するが、實際コイルの  $Q$  は二次側の  $Q$  が一次側の  $Q$  より高目の方がよく、結合度は  $\eta=1$  すなわち臨界點附近が最良であつた。また結合特性が全く對稱でない場合には振幅變調の影響が出力側に出てくるから極力對稱にする必要がある。

以上の原理にもとづいて試作した微小容量の檢出回路の結線を第6圖に示す。高周波發振器の周波数は約5メガ・サイクルを用い、普通のハトラー回路の陽極側に同調



第6圖 換振器回路圖

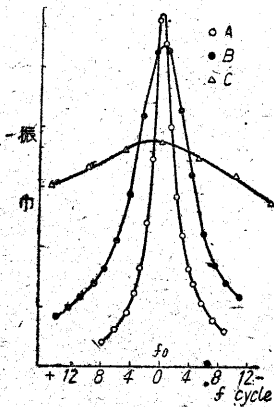
回路を復合して、ヒステリシス現象の影響を小にし、直接 Foster-Seeley の選別回路に結合して出力交流電壓を増幅し出力を測つた。測定が短時間できるために、高周波發振器の周波数の安定度は特に案ずるほどのこともなかつたが、特に安定度を要求する場合には、周波数の變動する原因である、電源電壓の變化・機械的振動・部分品の反り、汚損等の對策として、安定抵抗管によるヒーター電流の安定化、定電壓放電管による陽極電壓の安定化を計り、材料の選擇、部分品の工作等に充分注意し、コイルは良質パラフィンで固め、バリコンはステアタイト系の塞付空氣蓄電器を完全シールドして温度および湿度の影響を小にし、また真空管バリコン・シャーシ等はゴム臺で支持する等細心の注意をほらう必要がある。

選別回路の真空管は時性の等しい 6H6 を使用し、コイルはできるだけ  $Q$  を高くするために、40mm のステアタイト製ボビンに 6.6mm 程度のリツ線巻を巻き、發振器部分との遮蔽を完全にした、なを一次側のインダクタンスの大體2倍程度のインダクタンスを有するコイルを二次側に使用し、各コイルの間隔は 12~13mm とした。また對地容量などの關係で完全な對補性は困難なので二次コイルに最大容量 10PF 程度の可變空氣蓄電器を挿入して對補性の補償を行つた。換振部分の感度は約、150V/PF、至振幅  $10^{-7}$  で出力電壓は約 0.3V である。この方法では試料端と電極を完全に平行にすること、間隔を正確に定めることができないために、振幅の絕對値は求められないが、相對値を求めるにはきわめて有効で測定に不自由を感じることはほとんどない。

試料を驅動する發振器は周波数のきわめて安定なものでなければ使用にたえない。このためには電源は蓄電池

を使用する必要がある。ヤング率の絶対値を精度よく測定するためには常に標準周波数で校正する必要がある。しかし短時間のヤング率の相対値の變化を求めらばこの必要はない。

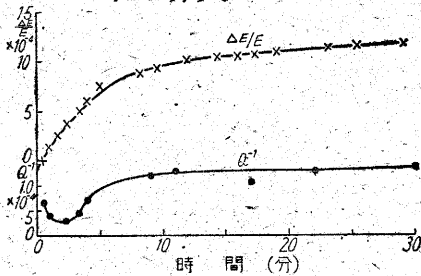
強磁性試料を磁場内で測定するときには、驅動部分の磁石は取除き、各部分を小さくまとめて全體を磁化コイルの中に入れて測定する。



第 7 圖  
銅單結晶の共振曲線  
處理  $f_0$   $Q^{-1}$   
A 燒鈍 21.7k.c.  $1.1 \times 10^{-3}$   
B 伸び 0.5% 21.7 3.1 "  
C // 1.3% 22.2 21.1 "

4. 測定

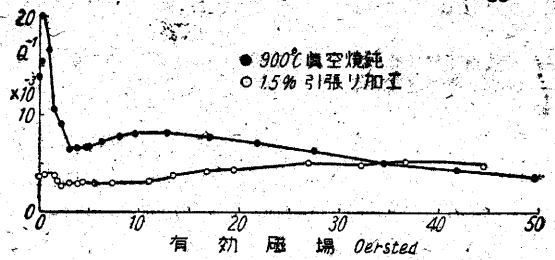
純銅單結晶の共振曲線を第 7 圖に示す。A は 1000°C 眞空中でよく燒鈍したものである、B は A をアムスラー試験機で引張り約 0.5%、C は B をさらに引張り、1.3% の塑性變形を與えたものである。第 8 圖は低炭素鋼 (C: 約 0.1%) を交流消磁した直後のヤング率と内部摩擦の時間的變化である。交流消磁によつて試料内に渦流が流れ温度が上昇するが、消磁後次第に室温迄降下してゆくにヤング率が上昇する。



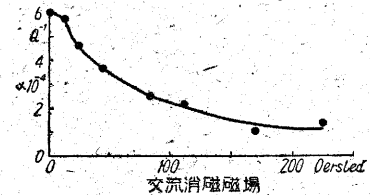
第 8 圖  
軟鋼を交流し消磁した後のヤング率と内部摩擦の時間的變化

強磁性體は磁化すると内部摩擦は變化する。その一例を第 9 圖に示す。純ニッケルを眞空爐でよく燒鈍すると弱磁場の山が顯著に出てくる。この山はわずかの加工でほとんど消失する。交流消磁によつても磁場に対する内部摩擦の定性的な形は變化しないが、値は小さくなる。交流消磁の最高磁場による内部摩擦の變化を第 10 圖に示す。これは消磁後約 10 分の値であるが、約 2 日経つと大略もとの値にもどる。

鐵では表面のよごれとりわけ銹があると内部摩擦はは

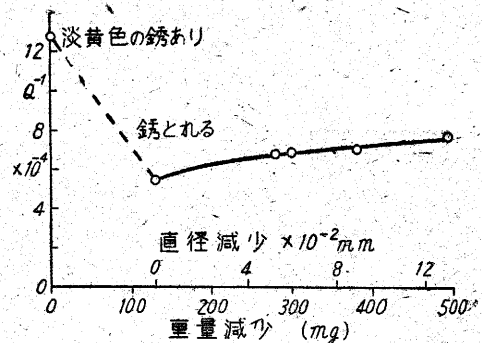


第 9 圖  
純ニッケルの内部摩擦と有効磁場



第 10 圖  
純鐵熱消磁材を交流消磁したときの最大交流磁場と内部摩擦

なはだしく増加する。第 11 圖は純鐵引拔材の表面がやゝ黄色に變色したものを稀鹽酸につけて銹を洗い落したときの内部摩擦の減少を示す。さらに表面を溶すと外側



第 11 圖  
純鐵引拔材の表面にわずかに銹のあるものを稀鹽酸につけた後の内部摩擦の變化  
の強烈に加工された部分がなくなつて内部摩擦はわずかながら増加する。強磁性體では加工すると燒鈍値よりも減少する。非強磁性體では逆に加工により内部摩擦は増加する。

試料の最大歪振幅を  $10^{-7}$  にしても振幅によつて内部摩擦は少し變化する。この變化量は試料の材料や状態でいろいろ變るが、それ等の間にはいろいろの關係が見出されているが、これ等の詳細については稿を改めて述べることにする。

溶鑛爐によらざる製鐵法

ロバート・デユラー著 淺井一彦譯  
A 5. 170 頁 定價 300 圓 千 25 圓  
—誠支堂新光社發行—