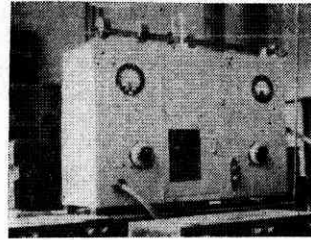


微小歪の測定

— 金屬の塑性歪の測定 —

安 井 勇 夫



測 定 器

長さのディメンション [L] で表わされる微小量の計測のうち、絶対値を必要とする静的測定はとくに慎重を要するといわれている。筆者は金屬の塑性變形の基礎研究を目的として、従來の方法では感度不十分でむずかしかつた 歪の静的測定を行つている。ところが一般に微小 [L] の測定法は多種多様で、これだけで一書をなすほどあるので、ここでは範圍をかぎり主として、筆者が實驗を行つたものについて紹介する。

1. は し が き

微小變位や微小歪を測定する方法としては、従來機械的なもの、或は電氣的なもの等、數多く知られているがこゝでは主として金屬の初期クリープという非常に小さな歪の測定法を中心として、光挺子式の方法その他につき、技術上の經驗等を織りまぜて述べることにする。

一般に金属材料に或る程度以上の荷重をかけると、かけた瞬間に弾性變形をして、次に引續き塑性變形をおこす。これをクリープという。この時荷重は一定であるが材料は時間がたつにしたがい變形する。このような塑性變形は弾性變形に比較して發生機構が複雑で解析が困難であり、また簡単な實驗にかからないため、その基礎理論、實驗に関しあまり研究が行われていない。

これらの實驗や研究をするには、最初はできるだけ複雑なことをさけ、簡単な條件にする必要がある。そこでまず材質として単結晶體を使用し、結晶粒境界の影響のないもので行ふべきである。

金屬單結晶の場合クリープ曲線は第 1 圖(1)のようになり、現在ではこの曲線を二つに分解して(2)、(3)の曲線とし一般のクリープはこの曲線の合成であると考へている。

このクリープ曲線の傾向は Sn, Cd, Al 等の單結晶ではほとんど同様で、(2) 及び (3) の曲線をそれぞれ初期クリープ、及び定常クリープと名づける。

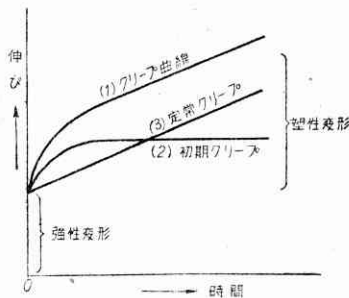
定常クリープは温度や試験片の過去の取扱ひすなわち加工されているかいないか等の状態により、非常に影響をうけ、また小さい荷重ではクリープしないのに對し、初期クリープでは、臨界剪斷應力内の非常に小さな應力でも生じ、しかも温度や過去の取り扱ひ等にはあまり影響をうけないといわれている。初期クリープはこのように特殊な性質を示すので、塑性論の基礎研究には、その測定は重要な意味をもつものである。

2. 歪 測 定 法

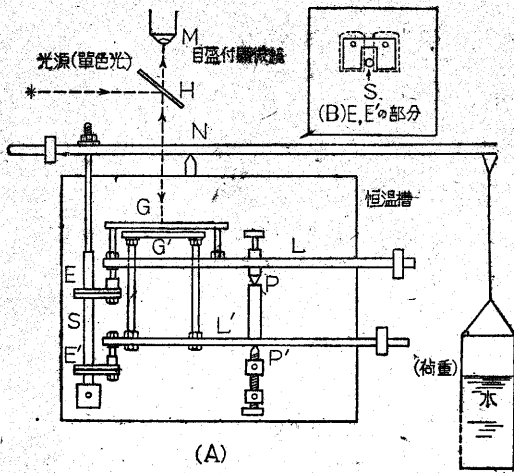
(1) Chalmers の方法

初期クリープの測定は、伸長歪が最小 10^{-7} cm/cm、伸びにして 100\AA 内外の精密測定を必要とし、その測定が困難なために 14 年程前に英國の Chalmers⁽¹⁾ が光の干渉縞を使用して測定して以來、今日迄ほとんど完全な空白で、今年になつてアメリカでも初期クリープの研究⁽²⁾ を行つているということを知った程度である。現在のクリープ理論には、Chalmers の結果が唯一のものとして、もつぱら塑性學者により引用されている状態である。

この Chalmers の行つた方法は第 2 圖 (A) に示す通りで、全装置は $1/100^\circ\text{C}$ の安定度を持つ恒温槽の中に入れられ、S は錫單結晶の試験片で、第 2 圖 (B) に示すような 2 枚のカミソリの刃の間にはさみ、この 2 組のカミソリの刃 E, E' の間が丁度 30mm で、これ等はレパー L, L' 等を介して圖の G, G' の二枚の光學的平面ガラスと連繫をもつ。この二枚のガラス平面は P, P' を支點として動き楔形間隙を生ずるので平行な干渉縞ができ、間隙の大小により縞が移動する。この縞一つの移動は半波長の歪量の變化を示す。この方法では波長から變位の絶対量が直接求められる點で便利であるが、このような普通の干渉縞で高感度の測定をするには相當な熟練を要する。Chalmers は 5460\AA の單色光を使い、最高感度 3×10^{-7}



第 1 圖 伸びと時間の關係



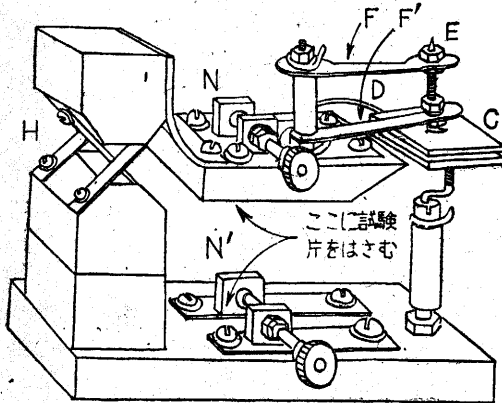
第2圖 Chalmers のクリープ測定装置

cm 迄の伸び量を測定している。

(2) 電気容量式測定法

筆者はかつてコンデンサの電気容量による微小変位の測定⁽³⁾を行つたことがあるので、初期クリープを容量変化により測定しようと考え、容量による歪の検出部分として第3圖に示すものを試作した。

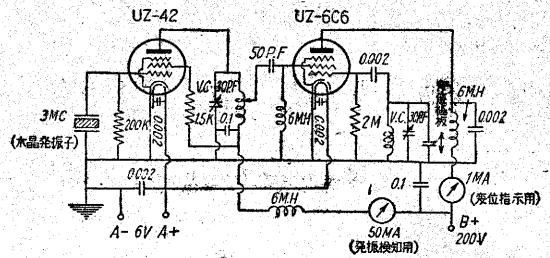
Chalmers の方法にならい、うすい鋼板 N, N' のナイフエッジにて試験片を 50mm の間隔ではさみ、この伸



第3圖 容量型歪計

びを測定するようにした。H 部はガタの全くないジョイント方式として、3 枚の直交バネを使用し、蝶番の役をさせ、ここを支点として極板変位量を二倍に拡大するようにした。C 部極板の大きさは 2cm 平方で、容量測定には第4圖に示す井上回路を使用し、指示の安定度を増すために全装置をデュラルミン製の箱の中に入れシールドしてある。この試作装置で Ni の多結晶體の弾性限内の應力-歪の関係の測定すると感度の點では初期クリープの相対的値の測定は可能であることがわかつた。

しかし容量変化による極板変位測定法では変位の絶対値は直接求められず、極板の移動量そのものを或る基準量と比較、較正しなければならない。例えば弾性率が既知の試験片に應力をかけ、その時のメーターの指示をよ



第4圖 微小歪測定回路

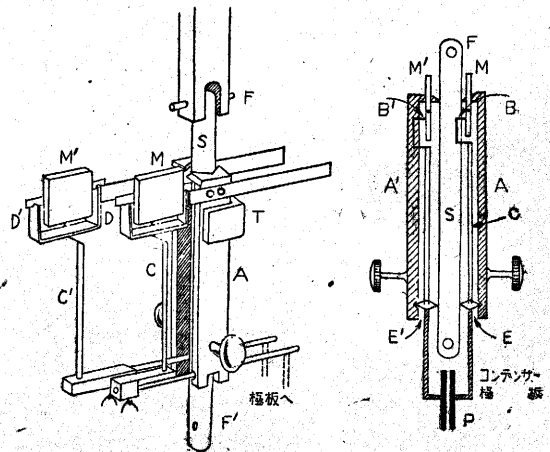
み、また同時に加えた應力と弾性率とから逆に歪を計算して極板の変位量を出せばよみの較正はできるが、これは絶対的のものでなく、もし試験片を取り換えれば極板の最初の位置や附近の漂游容量が變化し、メーターの指示は試験片に固有のものとなり相対的意味はもつが絶対値は求められない。

第3圖の C, D, E, F, F' の部分はこの較正を行うためのもので、上の極板を2枚のごくうすい燐青銅スプリング F, F' で支え、D の板で軽くおさえてある、試験片 S が伸びると極板もともに動き電気容量は減じてメーターはふれる。あらかじめマイクロメーターの微動を 1/50 に落した挺子 (圖には畫かれていない) により、E を僅かづつ押し下げメーターのふれを測定開始の時のふれと一致する迄もどせば、極板の移動量がマイクロメーターの読みから求められる。

しかしこの方法は、挺子微動が不完全であつたことや装置のフレームが僅かながら歪むこと等のため、実際には扱いにくく、不便の點も多い。そこで色々考えた實驗等している中に全く構造原理を異にした方法を、廣島文理大藤原教授の Al 単結晶の弾性率の測定から暗示され上の方法は、副装置としておき、あらためて再出發することとした。

(3) 光換子式測定法

1. 擴大機構；構造は第5圖のように、光挺子とコン



第5圖

デンスラー容量式とを併用したもので、最初光挺子は較正用のつもりであつたが、感度を計算し、或は實驗してみると案外感度よく、コンデンサーの方は光挺子による読みをさらに細かくよむ程度で、副尺的存在となつた。

擴大機構は普通の材料試験に使用するエッキステンソメーターにもう一つレバーを入れ、これで鏡を回轉させる方法で、原理はいたつて簡單である。すなわち丸棒試験片 S の兩側に菱形ナイフエッジ E, E' をはさんで二本の距離棒 A, A' をとめ金盤軽くおさえ、菱形ナイフエッジの先には軸と直角に挺子棒 C, C' をつけ、これで D, D' の V 溝受け上で自由に回轉するナイフエッジ附鏡を B のエッジで押して回轉させる。この鏡の回轉は前後 2 枚逆方向であるので、2 臺の望遠鏡とスケールでふれの差をよみとればよい。一方菱形エッジの軸の反對側には矢張軸と直角に、コンデンサー極板附きの 2 本の棒をとりつけ試験片の伸びは菱形エッジにより擴大されて、極板間の距離を變化させる。この容量測定の場合は前と同じ第 4 圖のものである。

2. 感度；これ等數個の挺子の組合せにより測定せられ得る試験片の最小伸びは次の通りである。

各部の長さを第 6 圖のように表わす。今試験片が λ だけ伸び、菱形ナイフエッジが θ だけ回轉したとすれば

$$\lambda = d\theta.$$

これによる鏡の回轉角を Θ とすれば、

$$\Theta = c\theta/b.$$

スケールの讀みの移動距離 x は光線の回轉角が鏡の回轉角の 2 倍であるから、

第 6 圖 變位擴大の關係圖

$$x = a \tan(2c\lambda/bd).$$

普通の測定では θ は小さいから、

$$\lambda = (bd/2ac)x.$$

現在使用中の装置では

$$a: 10^3\text{mm}, b: 1.5\text{mm}, c: 45\text{mm}, d: 4.5\text{mm}$$

スケールの最小のよみすなわち $x=0.1\text{mm}$ として、これ等を上式に代入し λ を計算すれば、

$$\lambda = 7.5 \times 10^{-2}\text{mm} = 75\mu.$$

したがつて容量を使わなくともこの程度の伸び迄の測定は可能である。この値は焼鈍した Ni 棒による實測値と、ヤング率からの計算値と比較しチェックしてある。さらに P の極板を使つて容量法を併用すれば、 x の最小よみ 0.1mm の 2~5 分の 1 程度迄よむことができる。

普通金屬の線膨脹係數は $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ の程度であり、これがそのままきいてくれば 10^{-7} の測定等思いもよらぬが、幸い上の方法では試験片の傍の距離棒も温度により變形するので、兩金屬の膨脹係數の差だけが問題となる。この場合試験片が銅で距離棒が銅であるから膨脹係數の差は、約 $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ となる。したがつて少くとも 0.1°C の温度變動内で測定を行ふべきで、これ以上の變動に対しては後で温度補正を必要とする。

筆者は恒温槽により $1/10^{\circ}\text{C} \sim 1/20^{\circ}\text{C}$ の變動範圍で測定を行つている。もつともこの温度の問題も、距離棒を試験片と同材質の銅等で作りさえすれば、解決されることである。

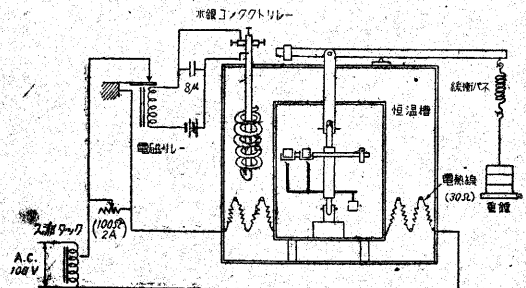
3. 測定上の注意；このような高感度測定では實際上扱上いろいろな技術的問題が生ずる。

まず装置に對する振動であるが、振動の障害は光挺子の鏡を揺らして指示がよみとれないということもあるがもつと主なことは、垂錘が振動を受け荷重の量が振動的に變化し、定荷重であるべきクリープの測定が不可能となるからである。したがつて外部振動は極力さけるべきで、現在の所装置そのものにつける手頃な除震法はないようである。

また試験片をセットする時、距離棒の締付けを軽くすること、ナイフエッジの各部に軽い油をつけることにより讀みの再現性が非常によくする。

この歪みは恒温槽の中に入れ、試験片の下部を槽の底部にとめ、上部の挺子を介して試験片に引張荷重をかける。試験片そのものに直接荷重する方法や、下挺子式では荷重を完全に零にすることがむずかしいので、初期クリープの測定には不適當である。

金屬單結晶のように軟かい材料では、試験片固定用のチャックにも問題があり、初めは材料試験機式のものや電氣錐式のもの等を作り使用していたが、チャックの軸試験片の軸、恒温槽への固着點の 3 つを完全に一直線上におくことが容易でなく、結局試験片に軸と直角に孔をあけピンをさしてとめることとした。上の 3 點が一直線上にないと、試験片に曲ゲモーメントがかかり、構造敏感度である初期クリープでは僅かの加工も嫌うので、正しい結果を得ることができない。



第 7 圖

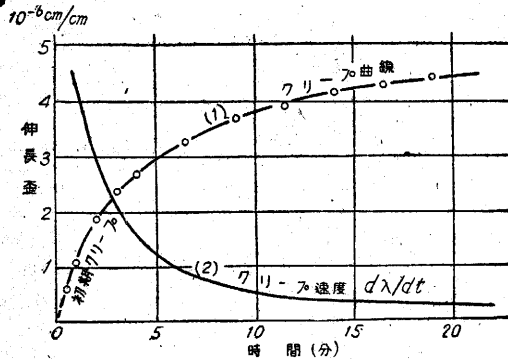
恒温槽(第7圖)は2重壁とし、この間に電熱線を張り、また水銀コンタクト式リレーを入れてある。このリレーはあまり電流を流さないで、電磁リレーをこの回路に入れ、スライダックで人為的に調節された電源の断続を後者で行い、恒温としている。

3. 測定の一例

最後に本装置で測定せられた一例を示す。

銅単結晶の試験片の大きさは、直径約6.3mm、長さ約10cmの丸棒で、この中間部5cmの間の伸長歪を荷重のもとで測定する。銅の単結晶は當所の神前照君が熔融移動法で作つたものである。

第8圖(1)の曲線は荷重280 gm/mm²の時の弾性變形の部を除いた至時間曲線で初期クリープの傾向を表わ



第8圖 クリープ曲線の一例
280 gm mm² の荷重による銅単結晶の至一時間曲線

す。この曲線は従來の Sn, Al 等において得られたものと異り、定常クリープの直線部分が判然とは表われていない。すなわち長時間測定しても歪速度が一定とならずいわゆる加工硬化の傾向を示す。このことは(1)の曲線の速度曲線(2)を畫いて見ると徐々に減少し零に近づくことからわかる。いわゆる理想的初期クリープ速度は、弾性變形から塑性變形に移行する瞬間の速度で、これは實測できないので、(1)の曲線の時間零における勾配か、(2)の速度曲線の縦軸との交点を求めなければならぬ。

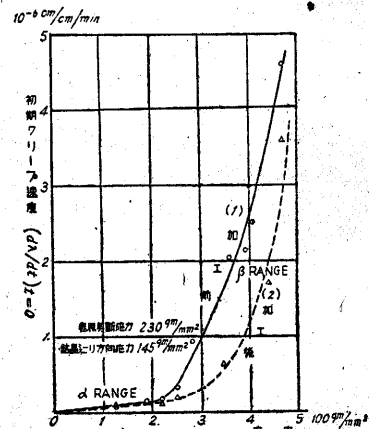
これについて従來行われてきた方法にならない、速度曲線(2)のはじめの方が、次式、

$$d\lambda/dt = N_0 e^{-at}$$

にはほぼあてはまるものと考え、これの對數をとれば

$$\log(d\lambda/dt) = \log N_0 - at'$$

したがつて對數目盛で曲線(2)を畫けば略直線となるので、これより t=0 の點を求めれば初期クリープ速度が得られる。同一の試験片で荷重をいろいろに變えた場合の速度と荷重の關係を求めると、第9圖(1)のような曲線となる。矢印の部すなわち曲線の屈曲部は臨剪界斷應



第9圖 銅単結晶の初期クリープ速度と荷重の關係

力に相當し、230 gm mm² で試験片の結晶方向を考慮して向き方向の應力に直すと 145 gm/mm² となる。

(2)の曲線は(1)の測定後すなわち約 470 gm/mm² の應力にて加工後測定したもので、加工硬化の影響が表われている。

参考文献

- (1) B. Chalmers: Proc. Roy. Soc. L. 427 (1936)
- (2) Phys. Rev. mar. (1950)
- (3) 谷, 安井: 應用物運 318 (1938)
- (4) 藤原武夫: 物理學講演集 (4) 145

“生産研究” 第2巻第8號(8月號)

正誤表

頁	段	行	種別	正	誤
23	左	10	本文	第2圖	第3圖
"	"	13	"	1次軸	2次軸
"	"	14	"	2次軸	3次軸
32	右	22	"	(D)	(B)
"	"	下5	"	しかも	しかし
33	左	13	"	$q_1 \leq Ub\delta/2$	$q_2 \leq Ub\delta/2$
35	右		第2圖	(不要)	