

高温度に於ける金屬の粘性

(大正十五年十一月日本鐵鋼協會第二回講演大會講演)

佐々川 清

目 次

緒 論

第一節 高温度に於ける鋼の粘性

歴 史

實 験 装 置

實験操作と得られし曲線の説明

實 験 結 果

結 論

第二節 高温度に於ける鋼及び其の合金の粘性

歴 史(其後の研究)

使 用 合 金

實 験 結 果

緒 論

金屬の機械的性質に對する温度の響影は最近工業上甚だ重要視せらるゝに到りぬ、航空機の高空飛行、潜水艦、凍氷器は金屬の低温度に於ける性質の研究を必要とし、蒸汽罐の進歩、内燃機鼠の發達は益々高温度を用ゐる傾向あり、石炭の低温乾溜、空中窒素の固定、火砲火藥の發達等は高温高壓に耐へる金屬を發見する事に於てのみ改良進歩の道を認め得べく、更に瓦斯「タービン」内燃機關の排氣弁の如き著しく高温度に強き鋼を要求するなり。

金屬の機械的性質の研究方法として最も廣く用ひらるゝは牽引試験なりとす、牽引試験は其の牽引速度の大小により結果成績の著く異なる事は周知の事實なり。今此の牽引速度の極端なる場合を考ふるに、速度最も大なる場合は衝撃による牽引試験にして、速度最も緩なるは荷重の一定なる場合なるべし。高温度に於ける牽引試験に就ては、既に數多の研究結果あれ共、牽引試験速度を變化せる場合の研究は殆んど見ず。

衝撃による牽引試験に就ての、吾人の研究結果は、佛國 Académie des Sciences, Compt rendu Feb. 1926 に發表せり、今茲に序述せんとするは、牽引荷重の一定なる場合なり。

實験は佛國巴里の Conservatoire des Arts et Métiers 内 Guillet 教授の研究室にて行ひしもの、既に 1925 年 11 月佛國 Academie des Sciences にて發表せしものなれ共、今回の鐵鋼協會講演大會を機とし、再び序述する事とせり。

第一節は高温度に於ける鋼の粘性に就て吾人の實験せる結果にして、第二節は吾人の製作せる装置を用ゐて、銅及真鍮の粘性につき、研究せられし結果なり、第二節は同研究室助教授 M. Cournot 氏が最近研究結果を報知し來れるものを譯出せるものにして Revue de Métallurgie 誌上に發表せらるゝ筈なりと聞く。

第一節 高温度に於ける鋼の粘性

歴 史

金属が高温度に於て粘性 (Viscosté) を帯びる事は早くより知られたる事實なれ共(H. Bouasse: Sur les métaux du type visqueux, Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse 1905,)、此の粘性を測定し、之によりて高温度に於ける金属の諸性質の變化の研究及び高温度に適當なる金属合金の發見に使用せるは Chévenard 氏とす。(P. Chévenard: C. R. No. 17. 27 Oct. 1919 p=712 Sur la Viscosité des aciers aux températures élevées)

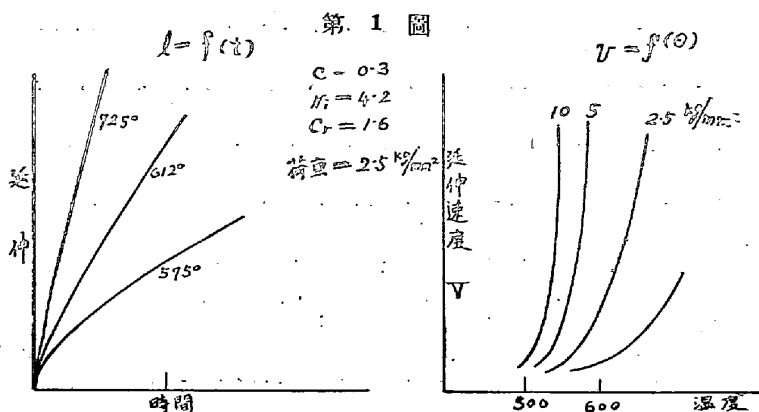
金属を或一定の温度に或荷重の元に置く時、金属は粘性を有し時間の経過に従ひ或速度を以て延伸する事あり、其の延伸の速度は次の式にて表はさる。

$$v = \frac{1}{L_0} \frac{Il_0}{It}$$

L_0 は最初の試料の全長なりとす。

此の v は荷重を加へし最初は變化あるも、遂には時間に拘らず一定になる、即ち或る速度 limit V になる。

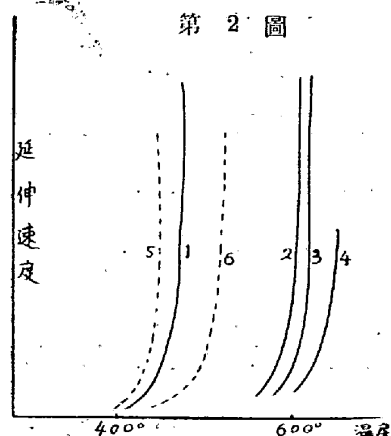
此の速度 V と温度との關係曲線は加へられし荷重及び金属の函数なり、Chévenard 氏は「ニッケル、クロム」鋼を用ひて荷重を代へたる速度と温度の關係曲線(第 1 圖) (C.R. 1919) 及び 10 kg の荷重の元にて、各種の金属を用ひて同じ曲線を求め (C. R. 1922. P=486. Alliage de



Nickel conservant leur rigidité dans un domaine étendu de température.) 普通鋼は 500° 乃至 550 °C にて粘性を有し始められ共、或種の Ni-Cr 合金は 600 乃至 700 °C にならざれば、粘性状態を示さざる事を稱へたり。

第 2 圖にて

- | | | | |
|------------|---------------------|--------|----|
| 1. Ni | 99%Ni | 700 °C | 焼鈍 |
| 2. Ni-Cr | Cr=15% | | |
| 3. " | Cr=22.6% | 900 °C | 焼鈍 |
| 4. Ni-Cr-W | Cr=9% W=5.8% | 900 °C | 焼鈍 |
| 5. 電解鉄 | | 700 °C | 焼鈍 |
| 6. Ni-Cr 鋼 | C=0.3 Ni=4.2 Cr=1.6 | 700 °C | 焼鈍 |



但し氏の實驗に於ては試料として直径甚しく小なる針金を用ひたる爲 (直径は 1/10mm) 試料は均

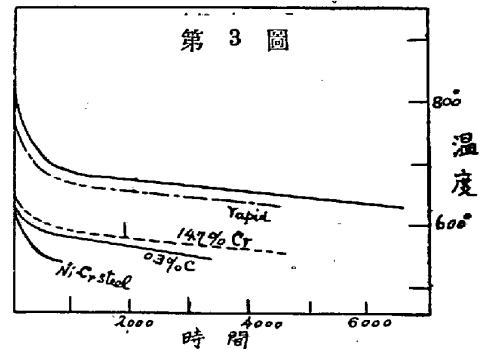
一ならず、又荷重の數値(kg/mm²)は正確ならざるの恨みあり。

H. et F. Le Chatelier 氏は、振り試験を各種の溫度に於て行ひ、高溫度に於ては、1. 歪力を去りし時、直ちに消滅する瞬間的彈性變形 (déformation élastique instantané) 2. 歪力を去りし時の消滅緩漫なる變形(déformation subpermanente) 3. 粘性變形 (déformation visqueuse) 之は一定速度を以て生じ、歪力を去りし後も消滅せず、其の量は溫度の冪函數にして、常溫にては測定し得ざる程度に小なるものなり。(C. R. No. 171 p=695 1920 Sur les propriétés mécaniques des corps plastiques; Importance de la réactivité)

Dickenson 氏は (1922 sept. Iron & Steel Institute) 或一定荷重の元にて牽引試験を行ひ、種々の溫度にて試料が破斷に到る迄の時間を測定し、以て金屬の高溫度に耐ふる程度を比較せり、其の結果は次圖に示すが如し。

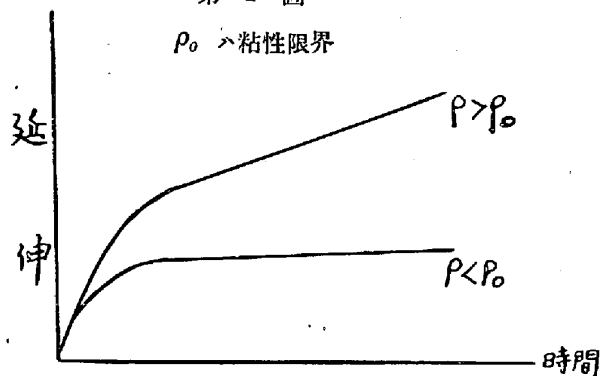
吾人の實驗終了に到らざる内に英國の Lea 氏は吾人の研究と同一の現象を研究發表せり (1924. Dec. The Institution of Mechanical Engineering)

即ち金屬に或溫度にて一定荷重を加ふる時或荷重以下にては荷重を加へし最初は試料の變形、即ち延伸あれ共、其の量は時間の経過と共に次第に減じ遂には一定となりその以上の變形なし。然れども此の荷重以上にては同一溫度にて變形は常に起り遂に破斷に到る、此の限界を Lea 氏は Creep stress と稱せり。



第 3 圖

抑も單位面積に加はる荷重は試料の最初の切斷面積より計算し得れ共、荷重によりて變形の生ずる場合には變形(牽引試験の場合には延伸)に伴ひ試料の切斷面積は減少し、單位面積に加はる荷重は増大す。即ち一定荷重を加へても事實は計算より大なる荷重を加へし事になり、従つて測定せし限界は實際のものより小となる。



第 4 圖
P₀ > 粘性限界

更に限界以上の荷重を加へしとき、Creep なる現象が起る場合、加へし荷重は一定なるも變形は常に生ずるにより單位面積に對する荷重は次第に増大する事になる。

Dickenson 氏の實驗に於て、氏の實驗結果が小なる荷重を加へても遂に破斷を來すのは此の事實に對する補償裝置の無き事と試料の酸化による、切斷面積の減少とが影響せしものと思考せらる。

吾人は此の Creep stress の起るべき限界(之を粘性限界 limite de viscosité と假稱せり)を切斷面

積の減少による荷重の増加に対する補償装置 (Compensation system) を用ゐて、各種工業上重要な金属に就て、各種温度、各種荷重の元にて測定実験し、以て温度の上昇による粘性限界の變化曲線を決定せんとせり。

実験装置

試料は直径 1.5mm 長さ標點間 100.mm の充分焼鈍せる針金を用ゐたり、斯の如き直径の試料ならば前述せるが如き不便を除き得べく、又実験を行ふに長時間を要せざるなり。

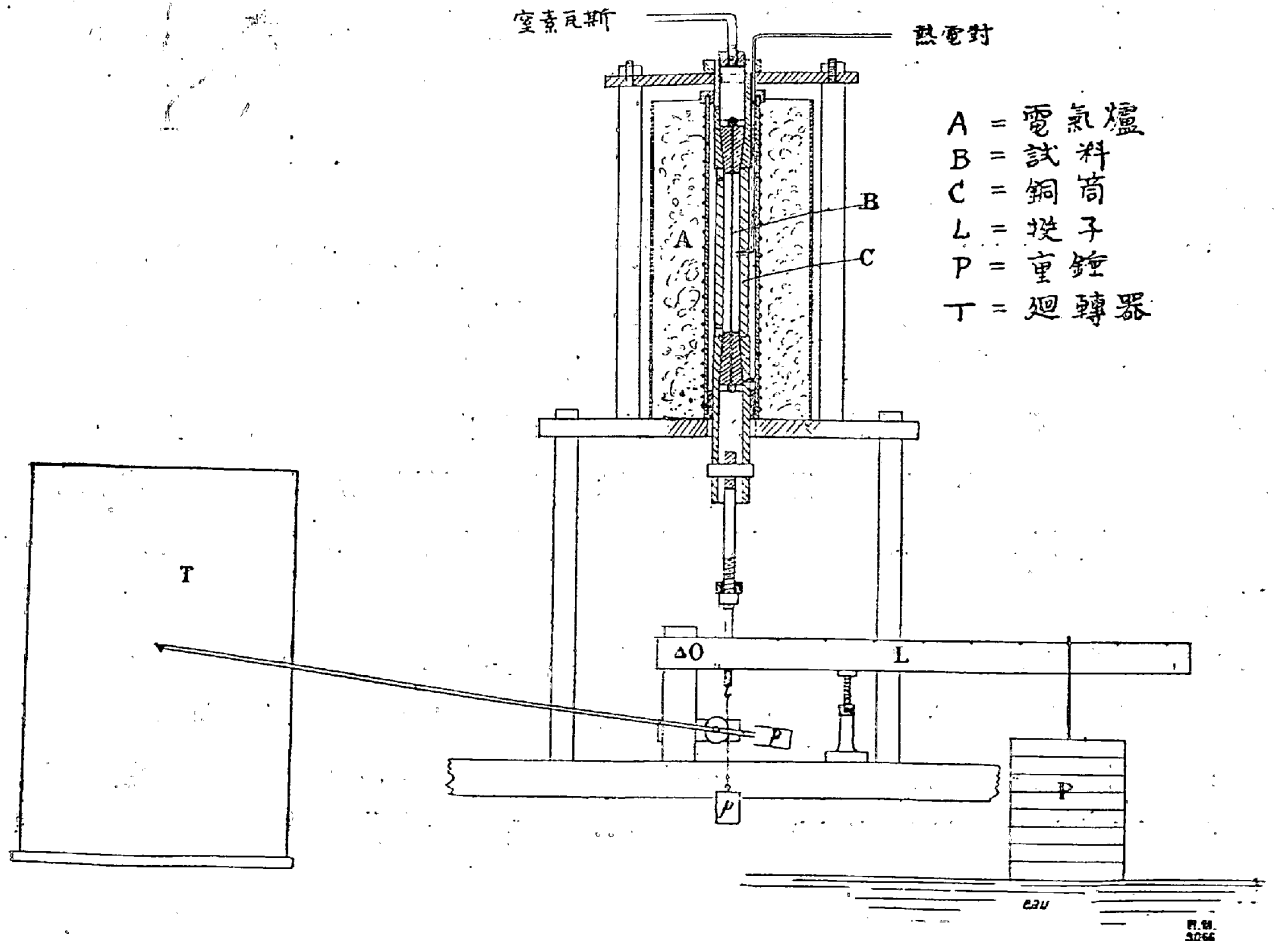
試料は「ニクロム」線を巻ける電気爐中に垂直に置かれ、其の上端は圓錐形の Chuck にて締付けらる。

電気爐の大小「ニクロム」巻線、試料を包被する銅筒等は試料が出来得る限り、均一に熱せらるる様、考案製作せられたり。

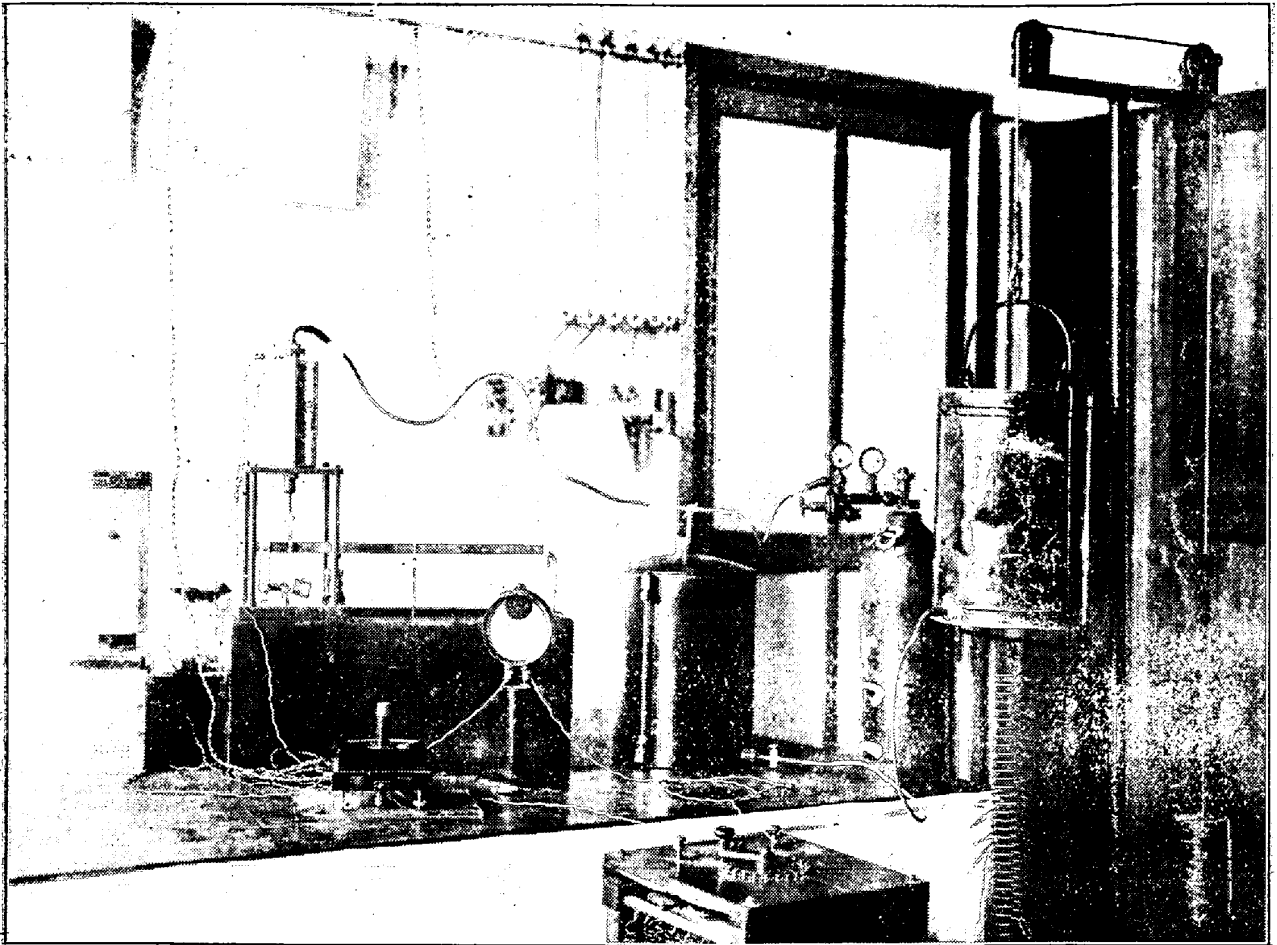
試料の温度は Le Chatelier 式熱電對により測定、試料の酸化を防ぐ爲には窒素瓦斯を爐中に通ぜり。(第 5 及び第 6 圖参照)

試料に加はるべき荷重は L なる挺子に掛けられし P なる重錘による、挺子は其の廻轉中心を O に有す、試料の下端は下部 Chuck に銜へ、圖に見るが如き装置を経て Knife edge にて挺子に掛る。

第 5 圖



第 6 圖



此の挺子の或場所に重錘 P を下ぐ。

各實驗の初め連結装置の螺子を廻して、重錘の下面が器に入れし水の表面に接する様調整す。

此の装置により、試料が延伸するに従ひ重錘の水中に沈降し、試料の延伸と同時に起る斷面積の減少による、單位面積の受くる荷重の増加を補償する事を得るなり。

延伸と時間との關係曲線は時計仕掛にて動く柱筒上の紙面に自動的に畫かる、「ペン」先は挺子の一
端にあり、其の回轉中心には小なる滑車あり、試料より連續せる装置に附せる絲にて卷かる、此の挺
子の長さは滑車半徑の 50 倍、従つて装置は 5,000 倍の精密度を有す、此の方法により自動的に $L =$
 $f(t)$ の曲線を畫き得。

此の装置に於て計算の最も重要なる點は、單位面積に受くる荷重の補償方法の決定にあり。

今 s, l を試料の切斷面積及び長さ(cm) s_0, l_0 を試験前の切斷面積及び長さ(cm) n を重
錘を置くべき位置の挺子の倍率 $P \dots$ 重錘の重量(gr) $\sigma, h \dots s, l$ なる試料寸法に對し重
錘の液中に没入せる部分の表面積と高さ $\sigma \dots$ 液體の比重とす

$$\text{牽引張力 grs/cm}^2 \text{ は次の式により與へらる、} F = \frac{n}{s} (p - \delta \sigma h) = \frac{nl}{s_0 l_0} \left[p - \delta \sigma n (l - l_0) \right]$$

但し、 l_0, s_0 に対して吾人は 10 及び 0.01 なる数値を採り、又装置の大きさに對して最も便利なる液体として、水を用ゐたるにより、 $\frac{l-l_0}{l_0} \times 100$ なる式によりて現はさるる延伸率 $A\%$ の函数として

$$F = n(A+100) \left(p - \sigma n \frac{A}{10} \right) \text{ となる}$$

同時に吾人は重錘の表面積 σ が、實驗の便利なる爲に一定にて可なるか否かを研究し、實驗により其の近似値が充分なる事を確證せり。以上の事實より得らるる、次の2式

$$\sigma n = P \frac{10}{A \times 100} \quad F = 100 P n$$

は一實驗より他實驗をなすに張力を變ずる爲には、加ふべき重錘の重量を變ずると同時に、重錘の挺子上の位置を變ずる要あるを示す。

吾人は $P = 500 n$ として選べるにより

$$F = 50,000 n^2 = \frac{P^2}{5}$$

右圖は重錘重量と、其の位置及び實驗試料に加へられし荷重の關係曲線を示す、圖より見るも理論的にも此の曲線は拋物線なり、實際は装置の常數試料の多少の直径の差等により此の曲線は一層複雑なるものとなる。

重錘の切斷面積は計算により平均延伸率に對して、 49 cm^2 を採用せり。

今以上の補償方法を用ゐて 5% 延伸の實驗をなす場合 (之は實驗中起るべき最大値とす) 單位荷重に對する誤差は 0.15% 以下なり、補償装置なき場合は同じ延伸率にて 5% の誤差に達す。

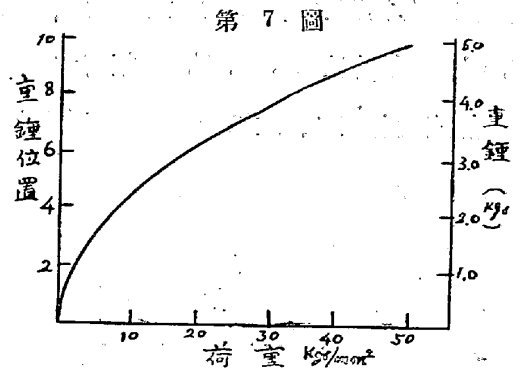
此の計算によりて得たる結果を確證せんが爲、高速度鋼を用ゐて、 450° の温度にて補償装置の有る場合と、無き場合との實驗を試みたり、結果は次の如し。

Compensation 有る場合、 48 kg/mm^2 の荷重に對し粘性による延伸は零なり、即ち此の數値は粘性限界以下又は等しきを示す。

Compensation 無き場合、 3×10^{-4} 耗/時の速度の粘性による延伸あるを見る、之は即ち粘性限界が 45 kgs 附近なる事を示すものなり、此の結果は計算によるものと一致す。

實驗操作と得られし曲線の説明

實驗に際し試料は先づ目的位置に支ふ (試験試料の直径は試料の長さ、重量及び比重を精密に測定し、計算算出せり、蓋し Micrometer に依る事の不精確を恐れたるなり) 先づ挺子の一部を支柱にて支へ挺子上に所要の重錘を掛け、前述せる試料と挺子間の聯結装置にある螺子により、重錘の下端面



が水面に接する様になし同様に又自働記入装置の針を調整す、次に電氣爐に電流を通じ窒素瓦斯を送る、試料は無荷重にて熱せらる、目的温度に達せる時支柱を徐ろに低下して、荷重を試料に加ふ、重錘は試料の加熱によりて生ぜし延伸に相當するだけ、先づ水中に沈下し次に試料に荷重がかかり、其の荷重により、延伸變形を生じ従つて重錘は再び沈下す、此の時より Compensation 装置が働くなり、荷重を加へしより 1 時間半、常に同温度に保熱し、然る後荷重を除き實驗終る。

實驗時間を決定すべく 3 時間以上に互る實驗をも數回試みたるが、試料の直径小なる爲、荷重を加へて 30 分以内には粘性の生ずるによる延伸速度は一定になり、従つて實驗時間は 1 時間半にて充分なるを知れり。

第 8 圖は、半軟鋼を用ゐて實驗温度 400°C にて 5 種の荷重 (21, 22, 23, 24 及び $26\text{kg}/\text{mm}^2$) の元にて得たる 5 個の曲線を示す、今一例として $21\text{kg}/\text{mm}^2$ 荷重の元にて畫かれたる曲線 I を見るに、A 部分は荷重を加ふる事無き間の延伸 (温度上昇による) にして、B 部分は荷重を加へし後の急速なる延伸を示す、最初の急激なる延伸後時間の経過に連れたる變形なし、即ち此の荷重にては未だ粘性限界に達せざるなり、C 部分は荷重を去りし後の收縮を示す、之の量は B より少なり、即ち此の荷重を加へし爲に永久變形を生ぜるを見るなり、 $26\text{kg}/\text{mm}^2$ の荷重の元に畫ける曲線 II を見るに A', B', C', 各部分は A, B, C, に相當するものなるが、荷重を加へし後最初は甚しく時間の経過に従ひ其の加速度を減じ、遂に一定なる速度 (此の場合にては 20×10^{-4} 耗/時) にて變形延伸するを見る、即ち此の場合の荷重は粘性限界以上なるを知り、粘性限界が曲線 I 及び II に相當する荷重の間にある事を知るなり、此の兩荷重の間なる 22, 23, $24\text{kg}/\text{mm}^2$ の荷重の元に畫かしめたる曲線は皆粘性限界を越へ $22\text{kg}/\text{mm}^2$ にては 2×10^{-4} 耗/時 $23\text{kg}/\text{mm}^2$ にては 5×10^{-4} 耗/時 $24\text{kg}/\text{mm}^2$ にては 8×10^{-4} 耗/時の速度にての延伸あるを示す、従つて粘性限界が $21\text{kg}/\text{mm}^2$ 附近にある事を知るなり、延伸速度を縦軸に、荷重を横軸にとりし曲線は、此の曲線が横軸に交る點を求めて再び明かに粘性限界を決定せしむ。(第 11 圖)

實驗に用ゐたる金屬

實驗に用ゐたる金屬は次の如し。

A) 軟鋼:— C=0.04% B) 半軟鋼:— C=0.22% C) 高速度鋼:—C=0.50%

Cr=1.4% W=13.57% D) 「ニクロム」鐵合金:—Ni=63% Cr=14% E) 「シリコ

クロム」鋼:—Si=2.62% Cr=10.29%

前二鋼は Société Métallurgique de La Bonneville 製

次二鋼は Etablissements Jacob Holtzer 製

「シリコクロム」鋼は佛國航空研究所にて排氣弁用鋼として目下研究中のものなり。

試料は豫め實驗に先立ち適當なる焼鈍を施せり。

吾人の實驗せる温度は次表の如し、各温度に於て荷重と變形速度との曲線を決定するに充分なるだ

けの $V=f(t)$ 曲線を畫かしめたり、

軟	鋼	350—400—500—600
半軟	鋼	350—400—500—600—700
高速度	鋼	450—500—600—700—800
「ニクロム」	合金	550—600—700—800—850
「シリコクロム」	鋼	500—550—600—700—800

實驗結果

實驗によりて得たる曲線を總て、本論文中に掲載するは餘りに冗長なるべきにより、之を省き單に數個の實例として 400°C にて行ひし軟鋼の曲線(第 8 圖)同金属の 700°C (第 9 圖)高速度鋼の 600°C (第 10 圖) にて行ひて畫きし曲線を掲ぐ、粘性限界を越へし場合の曲線の傾斜は低温にては、荷重の差に比し極めて少なれ共、高温度にては著く大なり。

低温度に於て粘性限界を精密に知る事は困難なるが、今限界を越へし荷重の元にて得たる曲線の單位時間に於ける傾斜(即ち單位時間に於ける變形量、Chévenard 氏の所謂 limite V なり)を測定し、之と荷重との關係を求むれば或る exponential 曲線を得、此の曲線と横軸(即ち荷重)との交差點が粘性限界を示す、各種金属につき各温度にて得たる、此の曲線を示せば第 11 圖の如し。

此の曲線によりて見るも、明白なるが如く低温度に於ては荷重を加ふるも、粘性の増加少きに反し、高温にては僅の荷重の差が著しく粘性を増加するを知るなり。

各種金属の各温度に於ける粘性限界の數値は次表に示すが如し、之を曲線として示せるは第 12 圖なり、此の曲線にて知る如く粘性限界は或温度にて始まり、温度の上昇により急激なる減少をなし高温にては、其の減少程度稍緩徐になり變態點以上にては殆ど零になる。

		粘 性 限 界 kgs/mm ²								
		350°	400°	450°	500°	550°	600°	700°	800°	850°C
軟	鋼	31	20	—	8	—	4	—	—	—
半軟	鋼	32	21	—	9	—	4	1	—	—
高速度	鋼	—	—	49	30	—	14	7	2	—
「ニクロム」	合金	—	—	—	—	42	32	17	7	3
「シリコクロム」	鋼	—	—	—	60	45	30	8	1	—

然して其の數値は各種鋼によりて異り、炭素鋼にては一般に小にして「ニクロム」合金に於て最も大なり、茲に興味あるは「シリコクロム」鋼が 700°C 迄は、其の數値高速度鋼より大なるも 800°C にては却て減少する事なり、即ち此の鋼に於ては粘性限界の減少速度最も急激なるを見る、温度の低下するに従ひ、粘性限界は大になり、遂に或温度にて消滅しそれ以下の温度にては破斷して粘性なる状態を示さざるなり、常温に於て Creep stress の存在を見ざる事は既に Lea 氏により稱へられたる事實とす。

第 13 圖は普通の牽引試験によりて得たる、破斷界と温度との關係曲線を並び畫けり、此の曲線は

余の實驗せる所にあらず化學的成分又余の實驗に使用せるものと同一ならざれば、又以て比較し得べし。

分析成分次の如し。

	C	Si	Mn	Ni	Cr	W	V	
炭素鋼 (Dupuy)	0.15	0.06	0.46	—	—	—	—	鍛鍊熱處理後
高速度鋼 (Dickenson)	0.62	0.39	0.16	0.16	3.98	17.36	0.66	800°C 鈍
Vickromite (—do—)	0.54	0.33	0.10	64.90	15.50	—	—	

普通高温度に於ける牽引試験結果を見るに、第一章に述べしが如く破断界、温度の関係曲線は、三段よりなるを知る。

即ち温度の上昇に際し最初破断界は殆ど變化なく、(軟鋼の場合は次第に増加し最大限に到る)次に急激に減少、再び其の減少度緩徐となる、此の第二、第三段の現象は粘性限界曲線にも見られ其の程度は更に著し、粘性限界曲線は温度の降下するに従ひ上昇し、遂に破断界曲線と交叉し、それ以下の温度にては存在せざるものゝ如し、且つ其の交叉點は破断界曲線の最高、又は正に低下せんとする温度に相當す、即ち破断界曲線の温度の上昇による低下はこの粘性の現はれし事に影響あるべし。

粘性の起りし後、曲線は温度の上昇するに従ひ、急激なる勢にて低下す、炭素鋼の場合を見るに 350°C にて 32^K の粘性限度は 20°C の上昇にて 28^K に低下するを見る、蒸汽罐の如く過熱の一定壓力を受くるものにては、此の粘性限界を知る事は極めて必要なりと云ふ可し。

高温度に於ける破断界と粘性限界との懸隔は頗る大にして 700°C に於て、炭素鋼は 11^K と 1^K、高速度鋼は 36 と 7^K、「ニクロム」合金は 42^K と 17^K なるを見る、即ち粘性限界は高温度に於ける金属の安全率を知るべき最良の方法の一なりと稱し得べし。

高温度に於て、吾人の實驗に使用せる 5 種の鋼を比較するに低温にては「シリコクロム」鋼最も強く、600°C 附近 (Ammonia 製造作業の如き) には「ニクロム」合金と「シリコクロム」鋼に大差無く、高速度鋼は比較的不良なるも、800°C 附近 (航空發動機用排氣瓣材料の如き) には「ニクロム」合金は最良「シリコクロム」鋼は却て高速度鋼に劣るを見る、炭素鋼は 500°C 以上にては殆ど使用に堪へず。

結 論

1) 金属を或温度以上に熱し荷重を加ふる時、金属に粘性なる現象現はるゝを見る、而して此の粘性限界は適當なる方法により測定する事を得、吾人は補償装置を考案に入れ、充分精確に又迅速に高温度に於ける變形速度、及び各温度に於ける粘性限界を測定し得る装置を製作し、之により粘性限界の存在並に此の限界以上にての變形速度の一定なる事を確證せり。

2) 2 種の炭素鋼、高速度鋼、「ニクロム」合金、「シリコクロム」鋼等の 5 種鋼に就き、各種の高温度に於て一定荷重による變形速度を測定し、粘性限界を定め此の粘性限界と温度との関係曲線を決定せり。

3) 此の曲線の比較より各種温度に最も適當なる鋼を定め得。

- 4) 此の曲線により高温度に於ける破断界の急激低下を説明せり。
- 5) 高温度に於ては破断界と粘性限界との差甚しく大なり。粘性限界を測定する事は高温度に於ける金属の安全率を決定する良好なる方法なり。
- 6) 粘性限界の測定は高温度に於て使用すべき金属の良否を見るに適當にして更に此の方法により、高温度に耐ふる金属合金の發見研究をなし得。

第二節 高温度に於ける銅及其の合金の粘性

歴 史 (其の後の研究)

高温度に於て一定荷重を加へし場合の金属の粘性に就ては、既に第一節に詳説せるが、吾人の實驗研究發表後現はれし研究結果を概括するに次の如し。

French et Tucker 氏 (Techuologic papers of the Bureau of standards. No. 296. 1925) は、蒸汽罐用鋼板材 ($C=0.25\%$) にて粘性研究を試み、破断に到る迄の變形に3種の狀態あるを指摘せり。即ち第1荷重を加へし後直ちに起る急激變形、第2速度一定なる變形、第3次第に急速なり、遂に破断に到る變形、これなり、荷重の増大に従ひ第1變形及び第2變形の速度は増し鋼の抵抗が減少す、第3變形は延伸に伴ふ断面收縮により單位荷重が各温度にて定まれる量に達せし時起る、氏は鋼材の破断に到る迄の時間 L と第2次變形の速度 R との間には次の關係ありと云ふ。

$$L = \frac{C}{R^n}$$

C, n は金属及び温度の常數なり、氏の用ゐし装置には補償方法なく又酸化を防ぐ設備も無し。

H. Ingall 氏 (Institute of metals sept., 1925.) は試料を一定速度にして熱し、一定荷重にて試料の切断を來す温度を測定し、破断温度に對する、この速度の影響を研究せり。

Brown 氏 (Institute of Metals sept., 1925) は牽引試験に於て荷重を極めて緩徐に増大せり、(一日に $1.57\text{kg}/\text{mm}^2$) 氏の實驗結果は斯くの如き荷重増加に對しては2時間の試験に於ける抵抗力と同一なることを示せり。

J. Tapsell et J. Bradley (Institute of Metals. March 1926.) は一定荷重の元にて Ni-Cr 70/30 Ni-Cr 80/20 の諸合金の粘性的變形を測定せり、但し氏も破断に至る迄の時間を測定したり。

庄司及び増山氏 (東北帝大研究報告 Oct., 1926) は常温に於て Cd, Pd, Sn, An, Zn, Ag, Al, Cu の粘性を測定せり。

氏は initial plasticity と finale plasticity とのある事を稱へたり後者は吾人の所謂粘性限界以上の粘性的變形速度を有することに相當す、氏は又 Pb, Sn, Cd を $160^\circ, 94^\circ, 126^\circ\text{C}$ 迄に到る各温度にて實驗せり氏も亦補償装置を用ゐる所無かりき。

銅及其の合金に對する實驗 (吾人の装置を用ゐての Cournot 氏ノ實驗結果)

銅及び其の合金は抵抗力鋼よりも小なる爲第一節に述べたる装置を少しく改め且つ實驗誤差を 0.2

%以内に止むる様に爲せり。

實驗に用ゐし合金次の如し。

純 銅

80/20 眞 鋅	Cu = 81.02	Zn = 18.43	Fe = 0.60	Pb = 0.10
67/33 眞 鋅	Cu = 66.93	Zn = 32.00	Fe = 0.53	Pb ナシ
60/40 眞 鋅	Cu = 60.44	Zn = 39.08	Fe = 0.31	Pb ナシ
60/40 眞 鋅(鉛ヲ含ム)	Cu = 60.35	Zn = 37.03	Fe = 1.05	Pb = 1.58
Cupro-Aluminium(90/10)	Cu = 90.63	Al+Fe=9.62		

實驗方法は第一節に述べしと同じく各温度にて種々の荷重を加へて粘性限界を測定せり、銅合金にては實驗温度低きため通常3時間或種のものにつきては24乃至48時間の繼續試験をも試みたり、又實驗には特種の瓦斯を電氣爐に通ずること無かりき。

實 驗 結 果

別表第1第2及び第14, 15, 16圖は實驗の結果を示す。

第14圖は各温度に於ての單位荷重に對する粘性變形速度の變化を示し第15第16圖は温度と粘性限界との關係曲線なり。

第15第16圖は同時に温度と破斷界との關係曲線をも畫けり。

第15圖の温度—破斷界曲線は Bengough 氏 (Institute of metals 1912) の結果にして用ゐられし金屬は Cu = 99.84%; 眞鋅73/30; 裝飾用眞鋅(Cu=59.52 Zn=39.43 Pb=0.74) なりとす。

第16圖の温度—破斷界曲線としては Rosenhain 氏 (Cu-Al Al=9.90%) による曲線を畫けり。

これ等の實驗結果を見るに粘性限界は明かに破斷界曲線より遙に下にあり、例へば 300°C に於ける裝飾用眞鋅にて粘性限界は 3.4kg/mm² なるも破斷界は 25kg/mm² なり純銅の場合には粘性限界曲線は直線的なり、眞鋅のそれを見るに 250°C 以下に於ては 67/33 は 80/20 の成分のものより粘性限界高きも、それ以上の温度にては却つて低し。

60/40 は 80/20 及び 67/33 の成分のものより常に抵抗力低し、

Pb を加ふることは粘性限界を低下す。

更に 300° と 400°C の間の温度以上にては純銅が却つて眞鋅より粘性的に抵抗力大なるは興味ある事實なり、即ち高温に於ては眞鋅の粘性的強度は(粘性限界高きこと)銅含有量多き程大なり。

Cupro-Aluminium は以上の眞鋅合金より遙に強し第16圖を見るに 300°C 附近に於て變態の影響あること明かなり。

別表第1

荷重 - 変形速度表 荷重..... C (grs)
変形速度..... V ($\times 10^{-4}$)

銅				真 鉛 60/40 Pb ナシ													
15°		150°		250°		400°		15°		200°		300°		400°		500°	
C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V
8,720	0.2	5,000	0	4,000	0	1,200	0	34,500	3	12,180	0	4,400	0	700	0	510	2
9,850	0.4	6,000	2	4,680	1.5	1,900	1.5	36,500	5	12,950	2	4,800	2	830	2	600	12
11,120	0.5	6,300	6	5,050	5	2,280	3	37,420	6	13,240	7	5,000	5	1,040	7		
11,700	0.7	6,500	9	5,250	8	2,540	4			14,120	14	5,380	14				
13,460	1.0	7,100	13	5,750	13	3,040	8										
15,580	2.0	8,850	20	7,900	?	3,400	12										

真 鉛 80/20					真 鉛 60/40 Pb アリ												
15°		200°		300°		400°		500°		200°		300°		400°		500°	
C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V
16,850	0	17,900	0	8,980	0	4,200	0	1,640	0	10,100	0	2,970	0	510	2	350	36
19,220	0	18,880	3	9,460	2	4,620	1	2,000	10	11,120	2	3,460	2	660	12		
22,200	0	19,500	7	10,300	12	5,000	5			12,080	7	3,810	9				
24,390	0	20,130	11	10,740	20	5,690	16			12,630	9	4,130	12				
27,300	0			11,850	32	6,420	24			14,250	15	5,320	34				
30,700	0.1																

真 鉛 67/33				Cu-Al 90/10										
200°		300°		400°		500°		560°		600°		700°		
C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	
19,710	0	6,500	0	1,200	0	550	0	21,950	25,000	04,000	03,600	21,900	11,400	2
21,050	3	7,100	2	1,350	1	790	7	23,050	46,100	24,900	153,980	62,500	81,570	20
22,050	6	8,000	10	1,790	8	910	14	24,800	656,900	56,100	84,610	13		
22,655	8	8,750	16	2,060	11	985	20	28,300	1357,960	127,200	18			
		12,750	52	2,500	20	1,045	32			9,700	64			

別表第2

粘 性 限 界 (kg/mm²)

	15°	150°	200°	250°	300°	400°	500°	560°	600°	700°
銅	7.3	5.7	—	7.4	—	1.5	—	—	—	—
真鉛 80/20	30.5	—	18.5	—	9.2	4.5	1.8	—	—	—
" 67/33	—	—	20	—	6.9	1.3	0.7	—	—	—
" 60/40 Pb ナシ	31.5	—	12.5	—	4.7	0.7	0.5	—	—	—
" 60/40 Pb アリ	—	—	10.7	—	3.4	0.5	<0.3	—	—	—
Cu-Al 90/10	—	—	—	20.9	—	5.6	4.7	3.4	1.8	1.4

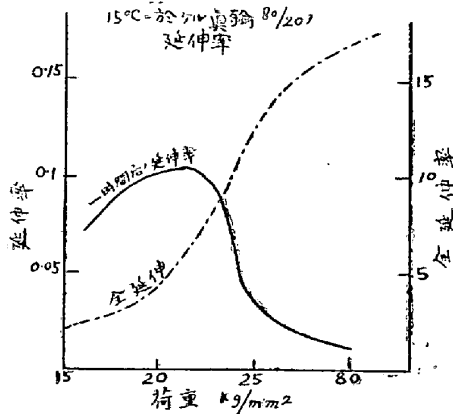
高温度にて安定なるβ固溶体の現出は粘性限界の急激なる低下を伴ふ。

次に低温度及び高温度の實驗を試みたり。

低温度に於ける實驗

純銅 80/20 及び 60/40 の成分の眞鍮につき常温迄の實驗を試みたり、 15°C に於て純銅が一定の變

第 17 圖



形速度を有するに到る時間は可成長く 10~12 時間掛る、

80/20 の眞鍮の場合は 15~20 時間にて漸く一定變形を有するに到れるが $30,700\text{gr}/\text{mm}^2$ の荷重の元にて $0.1 \times 10^{-4}/\text{mm}/\text{時}$ 即ち粘性限界は約 $30.5\text{kg}/\text{mm}^2$ なり。

吾人は又この眞鍮を用ひて粘性限界以内の荷重を加へてより 1 時間後の延伸速度及び其の時の全延伸を測定せり、結果は第 17 圖に示すが如し、實線は其の時の延伸速度、點線は全延伸なり、前者にては Maximum を明かに見得、即ち荷重大なる時は荷重を加へし爲冷間鍛練 (Cold work) が行はれ

其の爲に粘性が減ぜしなり。

60/40 眞鍮にても前者と同様の結果を得たり、 $37,420\text{ grs}$ の荷重のもとに 48 時間に及ぶ實驗を試み變形が直線的になるを見たり。

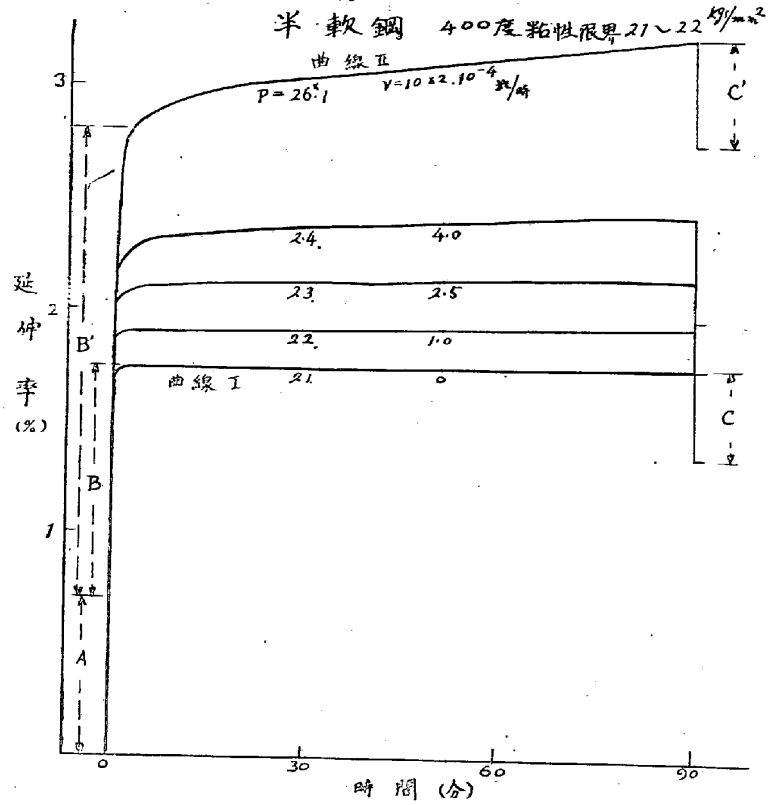
高温度に於ける實驗

高温度に於て粘性限界以上の荷重を加へしに試料は加へし荷重の量によりて異なる時間の後に切斷せられたり、時間—延伸率曲線の形は破斷直前にて少し異り直線的形式を離れ延伸は時々刻々増大し遂に破斷するに到る。第 18 圖は 500°C に於ける Cupro-Aluminium にて行はれたる實驗結果を示す、種々の荷重による破斷の點は圖に示す點線曲線上にあるが如し、この事實は French & Tucker 氏も亦吾人の實驗終了前に認めたり。吾人は又實驗開始より破斷に到る迄の時間を種々の荷重の元に測定せり (第 19, 20 圖) この曲線は明かに双曲線にして漸近線として荷重の軸及び粘性限界に相當する破斷時間の軸に平行なる軸に有するが如し。French 及 Tucker 氏は簡單なる公式を求めしも、吾人の研究結果によれば左程簡單ならざるものゝ如し。

この現象は一般的のものらしく 60/40 眞鍮にては 300°C 以上、67/33 眞鍮にては 400°C 以上、80/20 眞鍮及び Cupro-Aluminium にては 500°C 以上にこの現象を見たり。

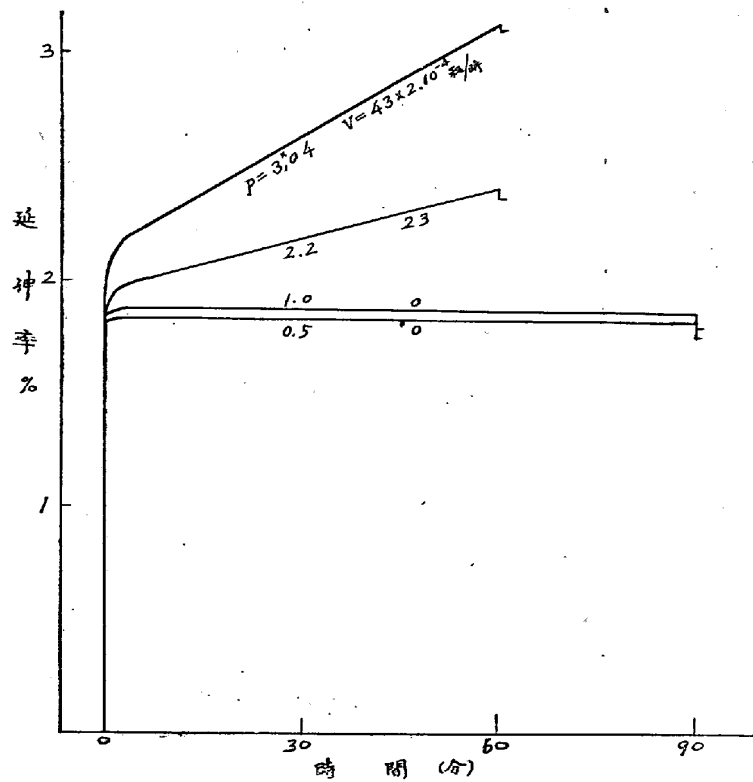
Guillet 氏研究室にては同装置を用ひて更に Aluminium 及び其の輕合金につき實驗研究中なり。

第8番 延伸時間関係曲線

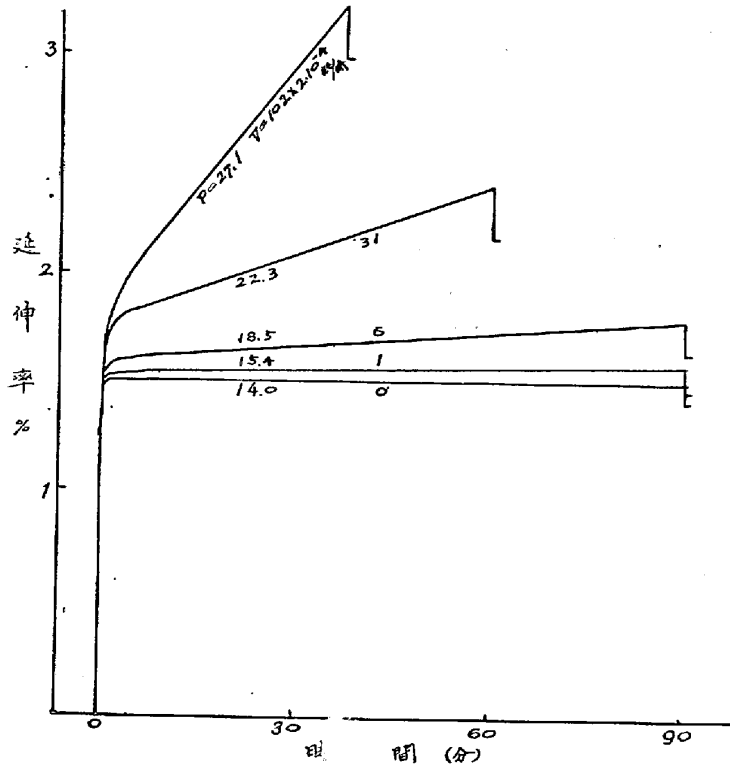


第9圖 延伸、時間關係曲線

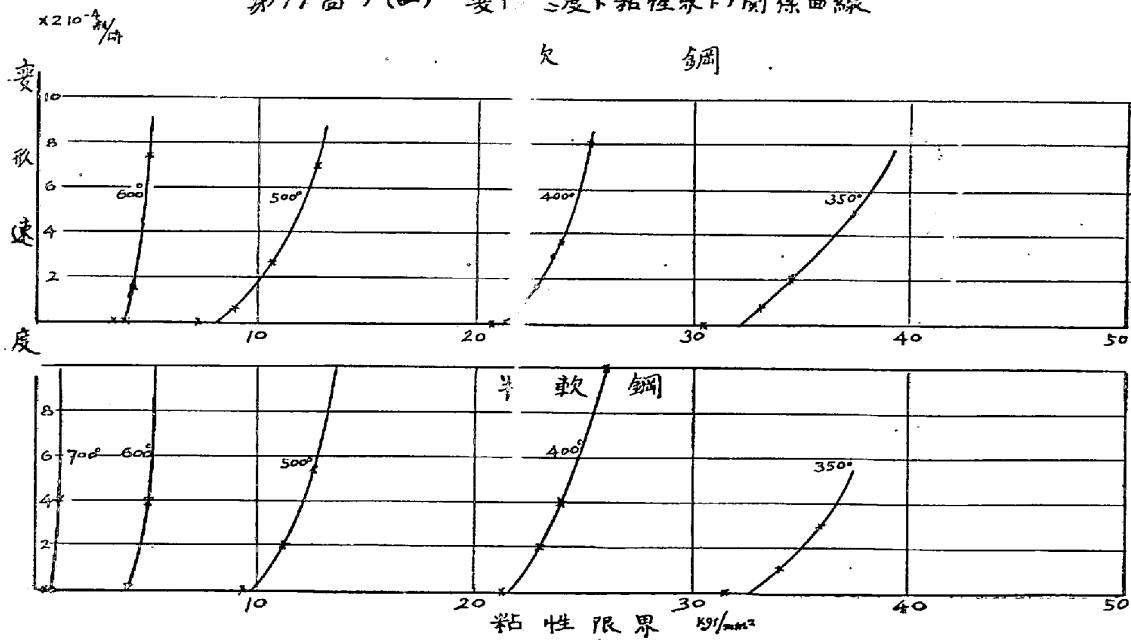
半軟鋼 700度粘性限界は $1.0 \sim 1.5 \text{ kg/mm}^2$



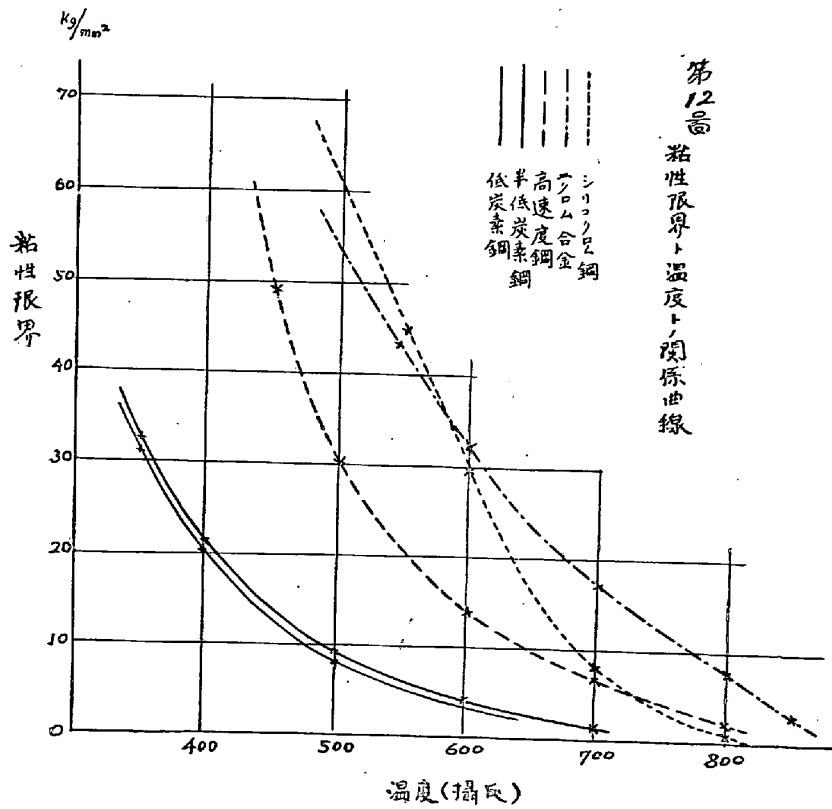
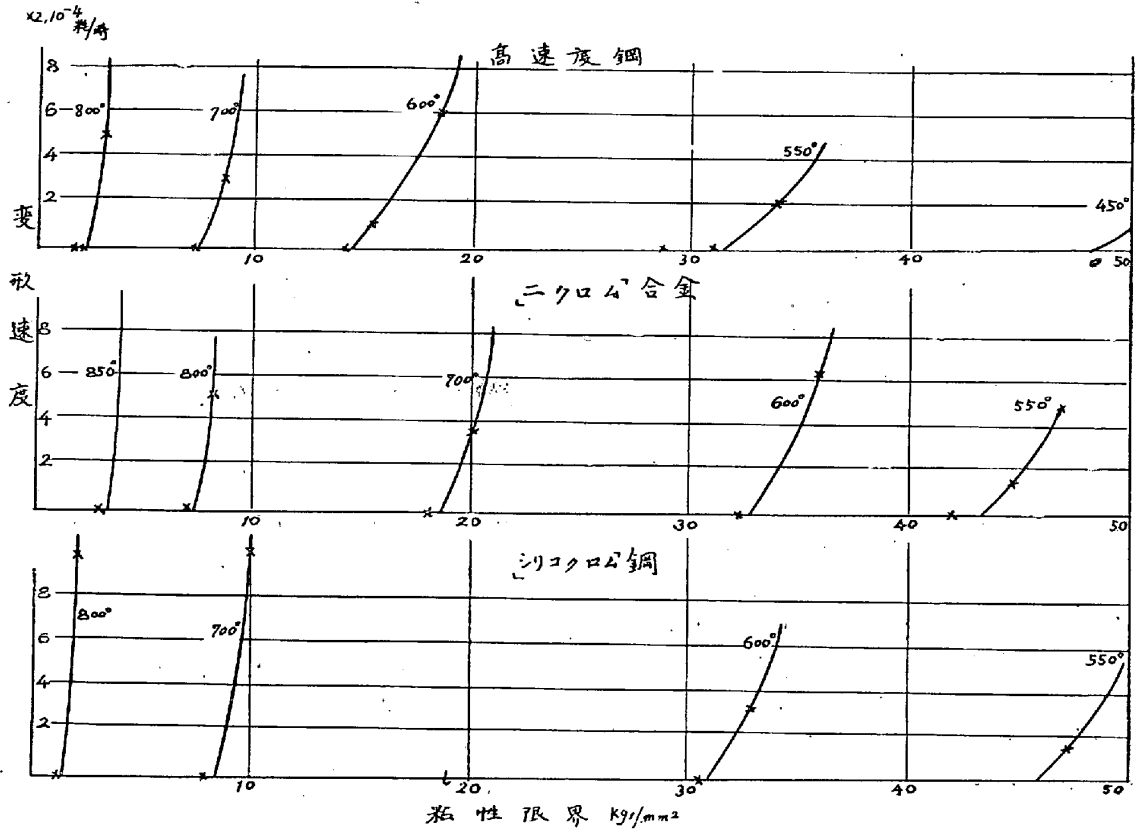
第10圖 延伸、時間關係曲線
 高速度鋼 600度 粘性限界は15kg/mm²



第11圖 (一) 変位と粘性界との關係曲線

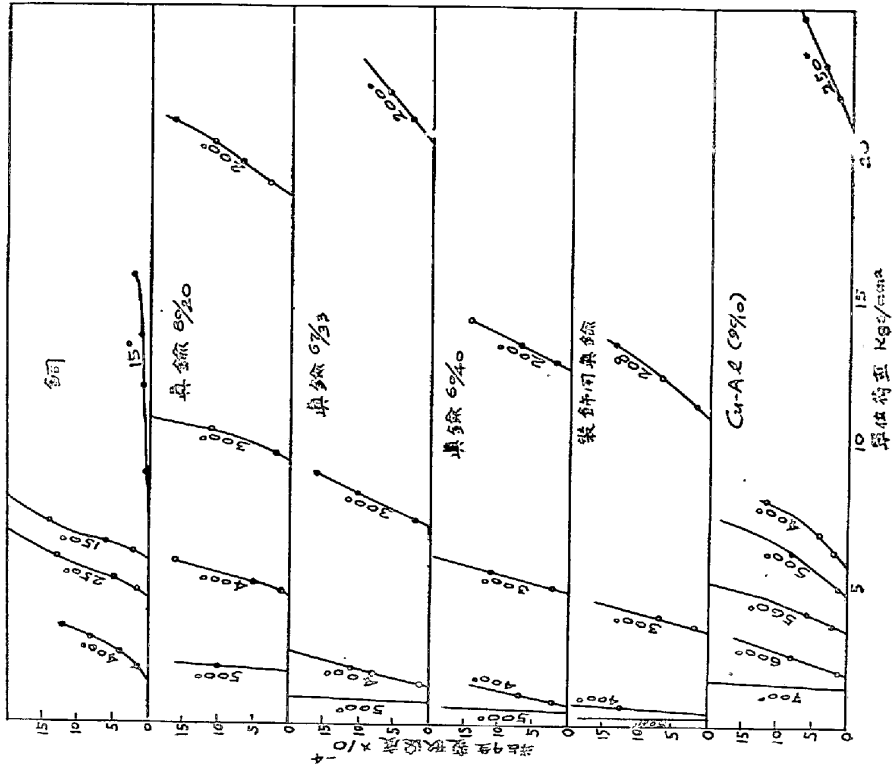


第 11 圖 (二) 変形速度と粘性限界との関係曲線

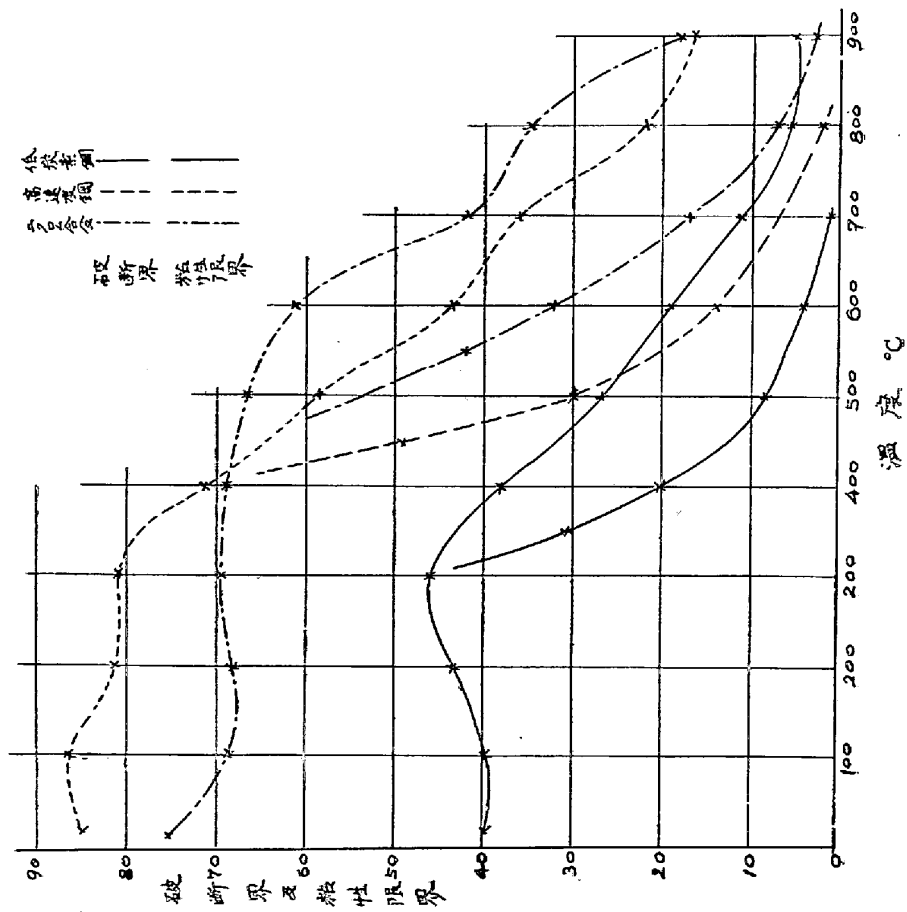


第 12 圖 粘性限界と温度との関係曲線

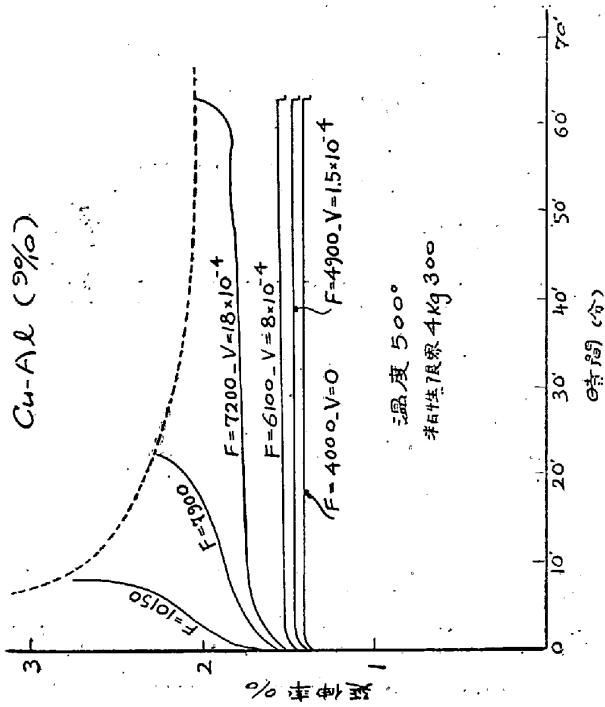
第14圖 單位荷重、相對粘結速度、變化



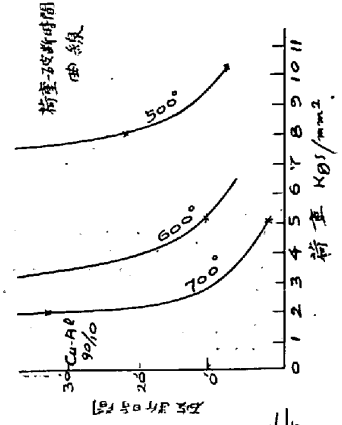
第13圖 破斷界及粘結限、溫度關係曲線



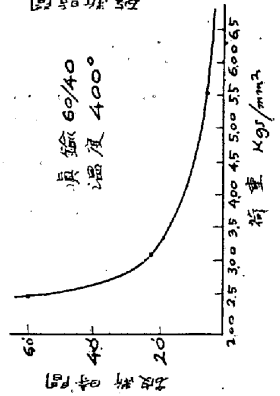
第18番 Cu-Al 500°C 延伸-時間曲線



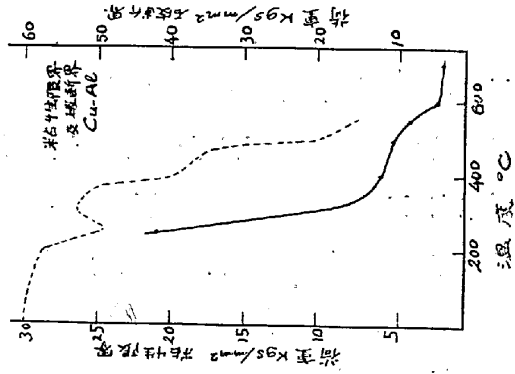
第20番 Cu-Al 9% 500°C 600, 700°C 延伸-時間曲線



第19番 Pb+真鍮 6% 400°C 延伸-時間曲線



第16番 Cu-Al (9%) 粘性-温度-破断界限曲線



第15番 粘性-温度-破断界限曲線

