負荷速度と變形について（第2報）多結晶アルミニウムのクリープ特性に及ぼす負荷速度の影響*

藤 田 廣 志**

Hiroshi Fujita: On the Loading Speed and Deformation (2nd Report). Effect of the Loading Speed (Stress Rate) on the Creep Characteristics in Aluminium Polycrystals. Because of extreme difficulties in catching the starting point of creep, the following method was used in the measurement of transient creep: At first, the stress-strain curve was traced at certain stress rate ($\dot{\sigma}$) by dropping water in the weighing machine until the appointed creep stress (σ) was reached. Then, the water dropping was stopped and the creep curve was traced from this moment. The results obtained were as follows: (1) At room temperature, creep curves were describable with $\varepsilon = at^n$ in a wide range of strain except the initial stage. (2) The initial stage is formulated as $\varepsilon = \alpha \{\log(\alpha_t + 1)\}^s$ approximately. The greater the $\dot{\sigma}$ the wider this initial range. (3) The value of α does not only increase linearly with σ , but also increases considerably with $\dot{\sigma}$, while the value of n chiefly depends upon $\dot{\sigma}$, excepting a small increase with increasing σ . (4) The transient creep is mainly defined by σ and $\dot{\sigma}$ at the beginning of creep, there being no perceptible effect of the history of the specimen. (5) The degree of the development of slip in the transient creep is proportional to the gradient of the creep curve. (6) In the steady-state creep, there is no appreciable effect due to $\dot{\sigma}$.

(Received October 31, 1955)

** 大阪大學工學部

* 1954 並びに 55 年 4 月本會東京大會に發表

I. 緒 言

近年クリープ、特に遷移クリープ (transient creep) の研究は、物質の變形機構に關する理論的研究の重要な分野として注目され、轉位論的考察も種々試みられている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、この遷移クリープの理論的研究の根幹となるクリープ曲線の表示には、從來大別して $\varepsilon = \alpha \{\log (\gamma t + 1)\}^{\beta}$ の型のものと、Andrade の提案した $\varepsilon = \alpha t^n$ の型⁽³⁾の2種のものがあり、前者は低温のクリープに、後者は高温のクリープにそれぞれ對應する⁽²⁾といへ未だ疑問の點が多い。(こゝで ε はクリープ歪、 t は時間、 α, β, γ および S はそれぞれ常數である)。従つて、まず各條件における表示式の妥當性を決定することが要求され、次いで上式の常數の有する意味および性質を明瞭にしなければならない。ところが從來の方法によるクリープ曲線の追跡は、クリープの開始點を決定するのに非常に困難がともなう。従つて、曲線の表示式も必然的に眞實性を失ひ易い。このために、クリープ開始の瞬間を正確につかむことが先決問題である。一方、著者はすでに第1報において負荷速度 ($\dot{\sigma}$) が塑性變形の機構に顯著な影響を及ぼす事を報告した⁽⁴⁾。ところが、從來遷移クリープの温度依存性に關する研究は相當行われているにも拘らず、負荷速度の影響については殆んど皆無の状態である。しかし、上述の如くに負荷速度が塑性變形の機構に顯著な影響を及ぼすのであれば、當然クリープにも相當の影響があると考えねばならない。本研究においては以上二つの點に特に留意して常溫における實驗を行い、かなり満足すべき結果を得た。

結果的には、遷移クリープは $\varepsilon = \alpha t^n$ の法則にかなりよく従うことがたしかめられたが、そしてこの α および n は共にクリープ應力 (σ) のみならず、負荷速度 ($\dot{\sigma}$) にも依存するものであることが判明した。このことは從來の理論からは説明困難なことであり、さらに新しい考え方が必要となる。なお、負荷履歴の定常クリープに及ぼす影響も興味ある問題であり、この點についてもしらべて見た。

II. 試料ならびに實驗方法

試料として Table 1 に示す如き2種の成分のものを用了。試料の處理、寸法ならびに試験方法は第1報⁽⁴⁾におけると全く同様である。

Table 1 Composition of specimens.

Sample	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Al (%)
A	0.003	0.006	0.001	99.99
B	0.12	0.21	0.03	99.64

- (1) N. F. Mott and F. R. N. Nabarro, Report on Strength of Solids (London: Phys. Soc.), **1** (1948).
- (2) N. F. Mott, Phil. Mag., **44** (1953), 742.
- (3) E. N. da C. Andrade, Proc. Roy. Soc. A, **94** (1910), 11; **90** (1914), 329; J. Iron Steel Inst., **171** (1952), 217.
- (4) 藤田, 美馬, 本誌, **19** (1955), 490.

クリープの追跡にあつては、クリープ開始の瞬間を出来る限り正確に決定するため、特に次の方法を採用した。まず第1報と全く同様な方法で、試料 A では應力 1.5 kg/mm² まで、B では 3 kg/mm² まで負荷速度を 3000~5g/mm²/min. に變化させて應力-歪曲線を追跡する。次に、上述の應力になつた瞬間に直ちに注水を停止して、その瞬間より 5 sec 間隔でクリープ曲線を 1/100 mm ダイヤル・ゲージを使用して追跡した。

その他の細かい方法については、順次實驗結果の各項で述べることにする。なお實驗はすべて常溫において行ひ、 ε としては便宜上クリープ伸びをもつて代用した。

III. 實驗結果

1. 一定應力下の遷移クリープと負荷速度

試料 A および B を、上述の如くに各々負荷速度の異つたものについて、前者は 1.5 kg/mm²、後者は 3 kg/mm² のクリープ應力下でそれぞれ遷移クリープを追跡して Table 2 の結果を得た。Fig. 1 は試料 B における $\sigma = 3$ kg/mm² のクリープ曲線である。ところで、Fig. 1 の試料のクリープ開始直前までの伸びは Table 1 の如く A が 1,480 mm, B が 1,612 mm, C が 2,017 mm であるが、これらの試料を $\sigma = 3$ kg/mm² で 100 hrs クリープせしめた時の伸びの合計はそれぞれ A が 1,613 mm, B が 1,666 mm, C が 2,049 mm である。すなわち $\dot{\sigma}$ の大なる試料の伸びの合計は小なる時のそれにおよばない。このことは、 $\dot{\sigma}$ の小なる場合のクリープ量が少い、換言すれば α が小さく、 n が大きくなるのは、クリープ開始までに應力がクリープ應力に達する時間に比例したクリープがすでに行われているためである、との單純な推定を否定する。なお本實驗においては Andrade⁽⁵⁾ の提案した定應力装置を使用して各試料のクリープ應力を同一にするように考慮してあるが、伸長にともなう局部的斷面收縮の度合は $\dot{\sigma}$ が小であるほど大となる傾向が多い。ところが同一條件の試料におけるクリープ速度は、クリープ應力とともに増大するのであるから、この點から考えれば $\dot{\sigma}$ の小なる試料のクリープ量はむしろ大とならなければならない。これらのことは Fig. 1 の試料のみならず他の試料についても同様のことがいえる。従つて、これらクリープ曲線に表われた負荷速度の影響は、單にクリープ開始直前までのクリープ量に原因するものではなくて、よりクリープの本質的なものによるといわねばならない。

次に Table 2 および Fig. 1 などより確認された諸點を挙げると次の如きものである。(i) クリープ曲線は、その初期を除いては、試料 A, B ともに相當廣範圍において $\varepsilon = \alpha t^n$ の法則にかなりよく従ふ。そしてこの初期の $\varepsilon = \alpha t^n$ からずれる部分は近似的に $\varepsilon = \alpha \{\log (\gamma t + 1)\}^{\beta}$ で表わされるものであり、その量および期間は負荷速度の小なるほど小となる。但し、この期間は負荷速度が 3000 g/mm²/

- (5) E. N. da C. Andrade and B. Chalmers, Proc. Roy. Soc., **A138** (1932), 348.

Table 2 Relation between the stress rate and the transient creep at the constant creep stress.

Sample	Grain size (no./cm)	Stress rate (g/mm ² /min)	Creep stress (kg/mm ²)	L_0 (mm)	L_1 (mm)	L_{100} (mm)	Creep curves may be expressed by $\epsilon = at^n$	
							α	n
A	4.0	100	15	2.72 ₀	0.302	—	72.6	0.33
"	"	25	"	2.88 ₀	0.245	—	41.3	0.45
"	"	5	"	3.44 ₀	0.174	—	17.5	0.56
"	3.0	100	"	2.78 ₅	0.325	—	70.3	0.39
"	"	25	"	3.08 ₂	0.250	—	41.1	0.44
"	"	5	"	3.54 ₄	0.185	—	30.4	0.57
"	3.0	3000	"	2.34 ₀	0.530	—	360.0	0.10
"	"	100	"	2.82 ₀	0.340	—	95.5	0.37
"	"	5	"	3.50 ₇	0.175	—	21.5	0.54
B	150.0	3000	3.0	1.48 ₀	0.106	0.133	95.2	0.02
"	"	100	"	1.61 ₂	0.027	0.054	16.4	0.12
"	"	10	"	2.01 ₇	0.015	0.032	5.6	0.27
"	120.0	100	"	1.71 ₀	0.030	0.038	14.5	0.08
"	"	10	"	2.11 ₅	0.012	0.028	3.9	0.28
"	18	3000	"	2.80 ₀	0.129	0.149	112.0	0.04
"	"	100	"	3.42 ₂	0.031	0.060	22.6	0.08
"	"	10	"	4.25 ₂	0.016	0.045	6.5	0.22
"	0.3	100	"	5.57 ₀	0.091	0.107	85.1	0.02
"	"	25	"	6.04 ₅	0.033	0.069	9.5	0.30
"	"	10	"	6.53 ₀	0.014	0.026	3.3	0.36

 L_0 =Total elongation of sample at the beginning of creep. L_1 =Creep elongation in 1 hr. L_{100} =Creep elongation in 100 hr. Fig. 1 Relation between the stress rate and the transient creep in Sample B. Creep stress is 3 kg/mm². Grain size is 150/cm each.

min の場合でも高々数分程度である。一方、時間の経過につれてクリープ曲線は次第に上記の指数関係からずれて来るが、その時間は Fig. 1 の如くに負荷速度の小なるほど早い。 (ii) 遷移クリープを $\epsilon = at^n$ で表わした時には、 α および n は Andrade⁽³⁾ のいつた如き一定のものではなく、負荷速度の大きいほど α は大きくなり、これに反して n は小くなる。 (iii) 遷移クリープの期間、すなわちクリープ開始より定常クリープまでの期間は、従来言われて来たものよりも相當長時間である。一例を挙げると、試

料 B において $\sigma = 3 \text{ kg/mm}^2$ のものでは 10 hr 以上にもおよぶ。

2. 遷移クリープと σ 並びに $\dot{\sigma}$

負荷速度の遷移クリープにおよぼす影響については、一應前項において確認されたが、さらにクリープ應力とその負荷速度の影響を系統的に研究する必要がある。このために、主として試料 A を用いて、負荷速度が 100, 25 および 5 g/mm²/min のものについて、それぞれ 0.8, 1.0, 1.25 およ

Fig. 2 Change in α and n as a function of stress rate in sample A. Grain size is 3/cm each.

および 1.5 kg/mm² のクリープ應力のもとでクリープ曲線を追跡した。Figs. 2 および 3 はその結果である。これらの図から、 α および n は共にクリープ應力および負荷速度の函数であり、次の諸性質を有することが確かめられる。

(i) α は σ の増大と共に直線的に増大する一方、 $\dot{\sigma}$ の増大によつてもまたかなり増大する。

(ii) n は σ の増大に従つて直線的に少く増大するが、その度合は少く、主として $\dot{\sigma}$ によつて決定される。試料 A において

は Fig. 3 で明らかなように、 $\dot{\sigma} = 100 \text{ g/mm}^2/\text{min}$ の場合に n はいずれも Andrade の値と同様な 1/3 近邊の値をとるのに對して、 $\dot{\sigma}$ が小となり例えば $\dot{\sigma} = 5 \text{ g/mm}^2/\text{min}$ の場合にはいずれも 1/2 近邊の値となる。

(iii) 遷移クリープの期間は $\dot{\sigma}$ および σ の大きいほど増加するようであるが、詳細はなお今後の研究に待たねばならない。

以上で重要なことは、 α および n が共に $\dot{\sigma}$ によつて顯著な影響を受けることであり、従来理論からは説明出来

ない現象である。

Fig. 3 Change in α and n as a function of creep stress in Sample A. Grain size is 3/cm each.

Table 3 Effects of stress rate and creep stress on the transient creep in sample A.

Grain size (No./cm)	Condition	Stress rate (g/mm ² /min)	Creep stress (kg/mm ²)	α	n
3.0	S. T.	100	0.8	2.10	0.29
"	"	25	"	12.4	0.36
"	"	5	"	5.4	0.38
"	"	100	1.0	34.1	0.30
"	"	25	"	19.2	0.38
"	"	5	"	5.8	0.53
"	"	100	1.25	51.8	0.31
"	"	25	"	30.4	0.40
"	"	5	"	19.0	0.55
"	"	100	1.5	70.3	0.39
"	"	25	"	41.1	0.44
"	"	5	"	30.4	0.57
5.0	"	①	1.5	79.5	0.34
"	"	②	"	20.3	0.50
4.0	R ₁ •1hr	100	1.5	53.1	0.39
"	R ₂ •1hr	"	"	39.0	0.45
"	R ₃ •1hr	"	"	32.0	0.42
3.0	R ₁ •7days	100	1.7	105.0	0.38
"	R ₂ •"	"	"	79.7	0.40
"	R ₃ •"	"	"	126.2	0.42
5.0	①'	100	1.6	78.1	0.37
"	②'	"	"	123.2	0.32

S. T.: Simply tensioned to the appointed creep stress. ①: Firstly, the sample was tensioned to 0.8 kg/mm² with stress rate 120 g/mm²/min. Secondly, it was tensioned to 1.5 kg/mm² from 0.8 kg/mm² with stress rate 5 g/mm²/min. ②: Firstly, the sample was tensioned to 0.8 kg/mm² with stress rate 5 g/mm²/min. Secondly, it was tensioned to 1.5 kg/mm² from 0.8 kg/mm² with stress rate 120 g/mm²/min. ①': The Sample of ①, which is recovered for 90 days at room temperature, is tensioned to 1.6 kg/mm² again. ②': The Sample of ②, which is recovered for 90 days at room temperature, is tensioned to 1.6 kg/mm² again.

3. 遷移クリープと履歴

この項では、後刻報告する予定の負荷途中で $\dot{\sigma}$ を變化せしめた試料、および引張試験後に常温回復せしめた試料の常温クリープについて述べる。前者は試料 A を用いて負荷途中で 0.8 kg/mm² の應力を境として、 $\dot{\sigma}$ をそれぞれ ① 120 より 5, ② 5 より 120 g/mm²/min に變化せしめて、各々 1.5 kg/mm² の應力まで引張試験を行つたものを、そのまま $\sigma=1.5$ kg/mm² でクリープせしめたものである。また後者は、第 1 報の如くに試料 A を $\sigma=1.5$ kg/mm² まで種々の $\dot{\sigma}$ で引張試験を行つた後、常温にそれぞれ 1 hr, 1 ケ月および 3 ケ月間放置したものを、さらに $\dot{\sigma}=100$ g/mm²/min で 1.6 および 1.7 kg/mm² の應力まで再び引張試験を行い、その各々の應力下で遷移クリープを測定したものである。これらの結果は Table 3 に總括して示してある。これより遷移クリープの特性としてさらに次のことがいえる。すなわち、遷移クリープはその履歴に影響されることが少なく、クリープ直前の σ および $\dot{\sigma}$ によつて大體一義的に決定される。但し、クリープ前に支えた應力がクリープ應力より大なる場合は、加工による降伏應力の増大から遷移クリープの量は著しく小となり、その差の大なるにつれて遂には消滅するに到る。

4. 遷移クリープとじり線

じりは遷移クリープの重要な因子であり、連續的に顯微鏡下で観測することによつて、じり帯の發達の度合はクリープ曲線の勾配によく對應して、クリープ初期の變形に特に重要であることが認められた。Fig 4 はこの一例を示したものであるが、その發達の過程は通常の引張試験中のそ

Photo.1 Development of slips in transient creep in sample A.

(a) Start of creep (b) 5 min
(c) 15 min (d) 30 min

れに較べて緩慢である。

5. 定常クリープと負荷速度

Table 4 に示す如くに、定常クリープは結晶粒度の小さなほど同一クリープ應力下のクリープ速度は小となるが、負荷速度の影響による差異は測定誤差範囲にあつて明らかではなかつた。但しこの點に關してはさらに精度のよい實

Table 4 Relation between the stress rate and the steady-state creep in Sample B.

Grain size (No./cm)	Stress rate (g/mm ² /min)	Creep stress (kg/mm ²)	Creep rate ×10 ⁻⁵ (mm/hr)
200	3000	3.0	12
"	100	"	11
"	10	"	12
140	3000	3.0	16
"	100	"	17
"	10	"	14
2	3000	3.0	18
"	100	"	20
"	10	"	24

驗が必要と思われる。

IV. 總 括

上述の結果を總括すると次のようになる。

- (1) クリープの新しい試験法を試みた。
- (2) アルミニウムの常温におけるクリープ曲線は、如何

なる σ および $\dot{\sigma}$ の下においても、その初期を除いては相當廣範圍で $\varepsilon = \alpha t^n$ の法則にかなりよく従う。

(3) その初期の $\varepsilon = \alpha t^n$ よりずれる部分は、近似的に $\varepsilon = \alpha \{\log(\gamma t + 1)\}^s$ で表わされ、その量および期間は $\dot{\sigma}$ の小なるほど小である。

(4) 遷移クリープを $\varepsilon = \alpha t^n$ で表わした時の α および n は σ のみならず $\dot{\sigma}$ の函數でもある。すなわち α は σ の増大と共に直線的に増大する一方、 $\dot{\sigma}$ の増大によつてもまた増大する。しかし、 n は σ の増大によつても少しく増大はするが、主として $\dot{\sigma}$ によつて決定される。Andrade が提案した $n=1/3$ の値は、高純アルミニウムの $\dot{\sigma}$ の大なる場合に對應する。

(5) クリープ前に與えた應力がクリープ應力よりも大なる場合を除いては、遷移クリープはその履歴に影響されることは少なく、クリープ開始直前の σ および $\dot{\sigma}$ によつて大體一義的に決定される。

(6) 迂りは遷移クリープの重要な因子であり、その發達の度合はクリープ曲線の勾配によく對應する。

以上の理論的考察は紙面の都合上次報において行う。

なお、本研究は美馬教授の研究室において行つたものであり、多大な御支援を賜つた美馬教授に對し、また實驗の一部を助力願つた平井正美君並びに試料を御提供下さつた大阪アルミニウム製作所に對して衷心より謝意を表させて戴きます。