539. 376:539. 434:539. 389

高温における材料の変形機構*

(II) 引張試験とクリープ試験の関係

平 修二**, 田中吉之助**, 大路清嗣***

A Theory of Plastic Deformation of Metals at High Temperatures

(II) Relationship between the Results of Tension Test
and Those of Creep Testby Shuji TAIRA, Kichinosuke TANAKA,
and Kiyotsugu OHJI

The present paper is concerned with determination of the three characteristic functions involved in the authors' theory on the plastic deformation of metals at high temperatures, being derived from the results of constant strain rate tension tests and constant stress creep tests.

Tests were made with 0.14 percent carbon steel at a temperature of 450°C. The functions determined from the results of tension tests were in good agreement with those from the results of creep tests. Therefore, it is concluded that the results of the tension test are related with those of the creep test through the three characteristic functions in the authors' theory.

1. 緒 言

高温における材料の挙動を解析する方法については、固体状態力学方程式の成立を仮定する方法を始めとして幾つかの方法が発表されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしこれらの方法には、一般に高温変形の最大の特徴の一つである応力や温度の履歴が変形挙動に及ぼす影響についてほとんど考慮が払われていないため、これらの方法を実際問題に適用して解析した結果は実験結果と非常によく合致することもあるが、合わないことも多いという現状である。このため著者は高温における材料の変形理論に応力および温度の履歴の影響を導入することを試み、その一方法を提唱して来た⁽³⁾。この方法は、従来の理論においては材料のすべり性質はひずみの関数として表わされることが多く、このため履歴の影響は無視され履歴が関係する問題は解決できなかったのに対し、すべり性質を表わす量として、新たに内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ なる量を導入し、 $\bar{\sigma}$ の種々の性質を通じて応力や温度の履歴の問題を解決しようとするものである。

さて著者の理論を実際問題に適用し、変形挙動を定

量的に計算するためには、この変形理論に含まれる3種類の関数、すなわちひずみ速度 $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ 、加工硬化率 $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ および回復速度 $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ の形が求まっている必要がある⁽³⁾。本論文はこれらの関数の決定方法について述べたものである。

これらの関数の決定については、これらが高温における変形の解析の基礎になるものであるから、金属物理学的な立場から理論的に、他の物理定数とも関係づけて決定されることが望ましい。しかし現在の状態ではこの方面の基礎研究は十分進んでおらず、これらの関数を純理論的に定めることはきわめて困難である。そこで本論文では、すでに発表されている反応速度論や転位論に基く理論を背景とし、これらを実験的に定めることにする。

本論文では関数形の決定法について、一定ひずみ速度の引張試験結果を用いる方法を中心として述べるが、補足的に一定応力クリープ試験の結果を用いる方法についても述べる。次に実際に軟鋼について、450°C の下で行った一定ひずみ速度の引張試験結果から三つの関数を求め、求まった関数ならびに実験結果について理論的に考察し、またこれらの関数を一定応力クリープ試験結果から求める関数と比較検討する。最後に上のようにして求まった三つの関数を用いて実際に応力-ひずみ曲線や、一定応力クリープ試験における

* 昭和 33 年 4 月 2 日 第 35 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 34 年 4 月 8 日。

** 正員、京都大学工学部。

*** 正員、大阪大学工学部 (大阪市都島区東野田町 9)。

ひずみ速度と時間の関係を計算し、著者の理論によって引張試験とクリープ試験の結果を関係づけることができることを明らかにする。

2. 関数の決定方法

まず簡単に著者の塑性変形理論⁽³⁾について述べる。材料のすべり性質を表わす量として内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ を導入し、任意の時刻のひずみ速度はそのときの $\bar{\sigma}$ の値と負荷応力 σ および温度 T によって

$$d\epsilon/dt = f(\bar{\sigma}, \sigma, T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

のごとく与えられると考える。 $\bar{\sigma}$ はひずみの増加にもなう加工硬化と同時に、時間的な回復の影響をうけて、その値は一般に時々刻々変化する。

すなわち

$$\partial \bar{\sigma} = (\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)' d\epsilon + (\partial \bar{\sigma} / \partial t)' dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。ここに $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ は回復がないときの加工硬化率、 $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ は加工硬化がないときの回復速度で、簡単のため前者は $\bar{\sigma}$ と T 、後者は $\bar{\sigma}, \sigma$ および T の関数と仮定する。このように考えると、任意の瞬間のひずみ ϵ と $\bar{\sigma}$ との関係を定める式として

$$\left. \begin{aligned} d\epsilon &= F(\bar{\sigma}, \sigma, T) d\bar{\sigma} \\ F(\bar{\sigma}, \sigma, T) &\equiv 1 / [(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)' + (\partial \bar{\sigma} / \partial t)' / f(\bar{\sigma}, \sigma, T)] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

を得る。また負荷時間 t と $\bar{\sigma}$ との関係を定める式として次の式が求まる。

$$dt = \frac{F(\bar{\sigma}, \sigma, T)}{f(\bar{\sigma}, \sigma, T)} d\bar{\sigma} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(3) および (4) 式を与えられた試験条件の下で解けば、任意の履歴を有する材料の変形挙動を解析することができる。

以上のことからわかるように、問題の解決のためには、(3) あるいは (4) 式に含まれる $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ 、 $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ および $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ の形を定める必要がある。以下これらの関数を決定する方法について述べる。

2.1 一定ひずみ速度引張試験結果による方法 試験はすべて一定温度下でひずみ速度 $\dot{\epsilon}_i$ ($i=1, 2, \dots$) を一定に保って行われるものとする。したがって

$$f(\bar{\sigma}, \sigma, T) = \dot{\epsilon}_i, \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad \dots\dots\dots (5)$$

さて (3) 式において

$$|(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'| \gg |(\partial \bar{\sigma} / \partial t)' / f(\bar{\sigma}, \sigma, T)| \quad \dots\dots\dots (6)$$

なる関係が成立するときには $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)' / f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ は $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ に比して無視することができ、このときには関数 $F(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ は

$$F(\bar{\sigma}, \sigma, T) \approx 1 / (\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$$

となり

$$\left. \begin{aligned} d\epsilon &= \partial \bar{\sigma} / (\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)' \\ \bar{\epsilon} &= \int_{\bar{\epsilon}_0}^{\bar{\sigma}} d\bar{\sigma} / (\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)', \quad [T: \text{一定}] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで $\bar{\epsilon}_0$ は材料のもつ $\bar{\sigma}$ の初期値である。 $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ は仮定により $\bar{\sigma}$ と T のみの関数であるから、このときにはひずみ速度 $\dot{\epsilon}_i$ の大きさのいかに関係せず、 ϵ が同一なら $\bar{\sigma}$ は同一となる。

(6) 式の成立する条件については

(i) ひずみが十分小さいとき

(ii) ひずみ速度が十分大きいとき

があげられる。これらの性質を用いて各関数を定めることを考えてみる。

(1) $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$: (i) の場合について考えてみると、第 1 図に示すような数種のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_i$ に対する引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を用いて、十分小さいあるひずみ量 ϵ に対応する応力 σ_i を求めることにより

$$f(\bar{\sigma}_i, \sigma_i, T) = \dot{\epsilon}_i, \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。ここに $\bar{\sigma}_i$ は (7) 式で与えられるひずみ ϵ に対応する $\bar{\sigma}$ の値であり、各ひずみ速度の試験に対して共通に同じ値をとるが、値そのものについては今のところ未知である。したがって $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ の形を定めるためには、 $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ 中に含まれる未定定数と上の $\bar{\sigma}_i$ とを未知数とする連立方程式を解けばよいことになる。実際には $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ を適当に仮定し、それに含まれる未定定数の数より 1 以上多い数の実験を行えば、それらの結果から $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ を実験的に定めることができる。

(2) $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$: このようにして $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ が定まると、(5) 式を用いて

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\sigma, T, \dot{\epsilon}_i) \quad \dots\dots\dots (9)$$

が得られ、温度一定の下では各 $\dot{\epsilon}_i$ に対して $\bar{\sigma}$ と σ の関係を求めることができ、したがって応力-ひずみ曲線から $\bar{\sigma}$ と ϵ の関係を求めることができる。ここで (ii) の条件が成立するような十分速いひずみ速度での引張試験結果を用いれば、少くともひずみが適当に小さい範囲では $\bar{\sigma}$ と ϵ との関係にほとんど回復が関与しないと考えられるから、(7) 式からわかるように、 $\bar{\sigma}$ を ϵ で微分することにより所要の $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ を求めることができる。

(3) $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$:

第 1 図

(3) 式を変形すれば次の関係式が導かれる。

$$-(\partial \bar{\sigma} / \partial t)' = f(\bar{\sigma}, \sigma, T) [(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)' - \partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon] \\ = \dot{\epsilon}_i [(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)' - \partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon] \quad \cdots \cdots (10)$$

ここで $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ は上のようにしてすでに求まっているから、(9) 式を用いて各 $\dot{\epsilon}_i$ について求められた $\bar{\sigma}$ と ϵ の関係から $\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon$ を求めれば、(10) 式により $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ を決定することができる。

2.2 一定応力クリープ試験結果を用いる方法 高温における材料試験法の中でクリープ試験は最も広く用いられるものの一つである。したがって一定応力クリープ試験結果については正確な資料が豊富に利用できることが多い。このような場合にはこの資料を用いて特性関数を決定することができる。

(1) $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$: 引張試験結果による場合と同様に、十分小さいひずみに対しては回復の影響はほとんどなく、同じひずみに対して同じ $\bar{\sigma}$ が対応するはずである。そこでクリープ試験結果から各応力 σ_i について十分小さいあるひずみ ϵ に対応するひずみ速度 $\dot{\epsilon}_i$ を求めれば、(8) 式により引張試験結果による場合と全く同様の手順により $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ を決定することができる。

しかし軟鋼の一定応力クリープ試験では、負荷と同時にかなり大きな瞬間ひずみが現われるため、十分小さいひずみに対応する σ_i と $\dot{\epsilon}_i$ の組を $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ を定めるに十分なだけ得るには、かなり小さい応力間隔で行われた実験結果を用いねばならない。したがって特にこの目的のために行われた実験結果によるとき以外は、この方法によって $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ を定めることは実際上困難である。このような場合には、たとえば同種材料でかつ変形挙動がきわめてよく似ている他の材料について $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ が求まっているときには、その定数の一部を修正して用いることも一近似法として許されるものと考えられる。ただし一般によく知られているようにクリープは組織敏感性の性質であるから常にこのような方法が用いられるとは限らず、たとえばある材料について得られた $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ 、 $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ および $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ を、類似の材料に対してそのまま適用しても必ずしも正確な挙動の解析ができるとは限らないことに注意する必要がある。

(2) $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$: 前報で詳述したように⁽³⁾、材料に負荷したとき現われる瞬間初期ひずみ ϵ_0 は、その材料の内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ が負荷と同時に負荷前の内部降伏応力 $\bar{\sigma}_0$ から負荷応力 σ に等しい値まで瞬間的に加工硬化する際に生ずるひずみと考えられる。したがってもし ϵ_0 と σ および T の関係がわかっているならば、これは回復がないときの ϵ 、 $\bar{\sigma}$ および T の

間の関係とみなすことができ、したがって ϵ_0 を σ について微分することにより $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ を求めることができる。

$$(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)' = 1 / (\partial \epsilon_0 / \partial \sigma) |_{\sigma=\bar{\sigma}} \quad \cdots \cdots (11)$$

(3) $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$: クリープ試験により $\dot{\epsilon}$ と ϵ の関係を求めることができるが、更に $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ の形がなんらかの方法で求まっているときには、(9) 式を用いて σ と T が一定という条件の下で $\dot{\epsilon}$ と $\bar{\sigma}$ の関係を求め、この両者から $\bar{\sigma}$ と ϵ の関係を得ることができる。したがってこれから ϵ を $\bar{\sigma}$ で微分すれば、負荷応力が一定の場合の $F(\bar{\sigma}, \sigma, T) = \partial \epsilon / \partial \bar{\sigma}$ を求めることができ、また $\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon$ を求めれば $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ はすでに求まっているので、(10) 式から $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ も決定することができる。

3. 一定ひずみ速度引張試験結果

試験機として、5 t 松村式多能試験機に加熱炉を取付けたものを用いた。この試験機の荷重負荷用自動ハンドル部にプーリを取付け、これに可変速モータおよび 40:1 の減速比を有する 3 台の減速機を適当に組合わせることにより、試験機つかみ部分の移動速度をそれぞれ所要の速度に保って実験を行った。本研究で行った引張試験のひずみ速度は第 1 表に示す 5 種類である*。

試験片材料は 0.14% の炭素含有量の軟鋼で、その化学成分は第 2 表のとおりである⁽⁴⁾。試験片は、著者らがクリープ試験において従来使ってきたものと同一のもので⁽⁵⁾、直径 6 mm、標点距離 50 mm の丸棒試験片に機械仕上した後、900°C で 1 時間真空中で加熱され、後炉中冷却されている。第 3 表は熱処理後の材料

第 1 表 一定ひずみ速度引張試験

記 号	A	B	C	D	E
$\dot{\epsilon} \text{ \% / mn}$	8.79	8.37×10^{-1}	7.15×10^{-2}	8.86×10^{-3}	9.10×10^{-4}

第 2 表 試験片材料化学成分 %

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.29	0.41	0.010	0.029

第 3 表 試験片材料の常温における機械的性質

降伏点 σ_s kg/mm ²	引張強さ σ_B kg/mm ²	破断伸び φ %	絞り ϕ %
24.9	39.1	37.4	72.8

* 実験中常に試験片標点間の変形を測定し、これより試験片のひずみ速度が一定になるようモータの回転数を調整している。ひずみ速度の変動は、試験開始後のごく短時間の間を除き、最大 10% 程度、通常は 5% 以下である。したがってひずみ速度の変動が応力-ひずみ曲線に及ぼす影響は、応力のひずみ速度に対する依存度から考えて、せいぜい 1% の程度と考えられる。

の常温における機械的性質を示したものである⁽⁴⁾。

試験はいずれも温度 450°C の下で行われている。

第 2 図は得られた応力-ひずみ曲線で、ひずみ速度の値によって応力-ひずみの関係がかなり大きく変化し、ひずみ速度が速いほど曲線が上にでている。

4. 一定ひずみ速度引張試験結果による関数の決定

すでに述べたように、関数形を決定するに際しては、決定された関数がなんらかの理論的背景をもち、それらの形に対して物理的な意味づけが可能であることが望ましい。そこで本論文ではこれらの決定に際して、すでに発表されている理論式を骨子として、実験結果と合致しない点に対してはこれに適当な補正を加えた式を用いることにする。

なお本研究では実験はすべて温度 450°C の下で行われているので、関数の温度依存性を決定することはできず、一応、温度の影響は考慮外とする。ただ $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ については仮定した理論式に一部 T の影響が分離されているので、便宜上 $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ のごとく記す。

4.1 $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ の決定 $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ として広く用いられている式に

$$D \exp[-q(\bar{\sigma} - \sigma)^p / RT]$$

がある⁽⁶⁾。ここに D , q および p は定数、また R は気体定数である。この式の導出については、反応速度論や転位論に基礎をもつものであるが、この形のままで

第 2 図

は負荷応力が 0 のときでもある有限のひずみ速度が存在することになり、また応力を負荷した瞬間に $(\bar{\sigma} - \sigma)$ の値が負または 0 となった場合には著者の変形理論の仮定⁽³⁾に従えばひずみ速度は無限大とならねばならないが、この式ではある有限の値をとるなど不都合な点もある。したがってここではこれらの点について上の関数形を修正した次の式を用いることにする*。

$$f(\bar{\sigma}, \sigma, T) = \frac{D\sigma^m}{\bar{\sigma} - \sigma} \exp\left[-\frac{q}{RT} (\bar{\sigma} - \sigma)^2\right] \dots\dots\dots (12)$$

前々節で述べた方法に基き、第 2 図に示した引張試験の結果から $\epsilon = 1.0\%$ における応力 σ_i を求め (8) 式により (12) 式に含まれる定数を決定すれば次の式が得られる。

$$f(\bar{\sigma}, \sigma, T) = \frac{1.42 \times 10^{-5}}{\bar{\sigma} - \sigma} \sigma^{5.0} \times \exp\left[-\frac{8.53 \times 10^2 (\bar{\sigma} - \sigma)^2}{RT}\right] \dots\dots\dots (13)$$

ただし $\bar{\sigma}$ および σ は kg/mm^2 , ϵ は %, t は mn, また T は °K を単位として用い、 R は $1.987 \text{ cal/mol}^\circ\text{K}$ の値⁽⁷⁾ をとるものとする (以下においても同様)。(13) 式を用い、(9) 式に従って第 2 図の σ と ϵ の関係を $\bar{\sigma}$ と ϵ の関係に直したのが第 3 図に示されている。

4.2 $(\partial\bar{\sigma}/\partial\epsilon)'$ および $(\partial\bar{\sigma}/\partial t)'$ の決定 ひずみの小さい範囲でひずみ速度の十分大きい場合には、すでに述べたように、 $\bar{\sigma}$ と ϵ の関係において回復の影響はきわめて小さいものと考えられるから、ここではひずみ速度の最も大きい第 1 表 A の場合 ($\dot{\epsilon} = 8.79 \text{ \% / mn}$) の $\epsilon = 5\%$ ($\log \epsilon = 0.7$, ただし ϵ は % で表わす) 程度内の結果から $\bar{\sigma}$ と ϵ の関係を求める。第 4 図は第 1 表の各ひずみ速度についての試験における $\log \bar{\sigma}$ と $\log \epsilon$ の関係を示したもので、A の場合には上のひずみの範囲ではほぼ直線関係が保たれており

$$\epsilon = 7.16 \times 10^{-6} \cdot \bar{\sigma}^{1.0} \dots\dots\dots (14)$$

が得られる。第 3 図および第 4 図の一点鎖線は (14) 式による計算結果を示したもので、ひずみが 5 % 程度内での A についての ϵ と $\bar{\sigma}$ の関係をよく表わしている。なおひずみが更に大きくなった場合やひずみ速度の小さい場合の結果が、この一点鎖線からはずれるの

* (12) 式のほか

$$f(\bar{\sigma}, \sigma, T) = \frac{2D_1}{\bar{\sigma} - \sigma} \exp\left(-\frac{q_1}{RT} \bar{\sigma}\right) \sinh \frac{q_1}{RT} \sigma$$

および

$$f(\bar{\sigma}, \sigma, T) = \frac{D_2 \sigma^{m_2}}{\bar{\sigma} - \sigma} \exp\left[-\frac{q_2(\bar{\sigma} - \sigma)}{RT}\right]$$

についても実験的に検討したが、(12) 式の方がすぐれているので本論文では (12) 式を用いる場合について論ずることにする。

第 3 図

第 4 図

は主として回復の影響が著しくなることによるものと考えられる。

(14) 式より $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ を $\bar{\sigma}$ の関数として求めると
 $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)' = 3.49 \times 10^4 \cdot \bar{\sigma}^{-3.0} \dots \dots \dots (15)$

となる。

次に第3図の各曲線からその微係数 $\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon$ を求め、これと(15)式とを用い(10)式によって $|(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'|$ を求めた結果が第5図に、横軸に $\bar{\sigma}$ をとって示されている。回復速度はひずみ速度が大きいほど大きいという結果になっている。さて本研究では各引張試験のひずみ速度は、第1表に示すように、公比約10の等比級数的な値がとられている。一方図において各試験から求められた $\log |(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'|$ と $\bar{\sigma}$ の関係はひずみ速度の順にほぼ等間隔に並んでいるので、 $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ は第1

第 5 図

第 6 図

第 7 図

表のひずみ速度の範囲で $\dot{\epsilon}^k$ に比例するものと考えられる。更に $\dot{\epsilon}=0$ においても拡散などの過程により $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ はある値をもつものと考えられるので、 $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ の形としては次のような式が考えられる。

$$(\partial \bar{\sigma} / \partial t)' = -\{1 + (c_2 \dot{\epsilon})^k\} \cdot r(\bar{\sigma}) \dots \dots \dots (16)$$

ここに $r(\bar{\sigma})$ は $\bar{\sigma}$ の関数である。第5図の結果から定数 c_2 および k の値を求めると、 c_2 は 10^7 程度、また k は 0.85 という値を得る。この値を用いて $r(\bar{\sigma})$ を求めると第6図のようになり、ひずみ速度の大きさに関せずほぼ一つの関係で表わされることがわかる。なお横軸に ϵ をとって表わせば第7図のようになり、 ϵ の大きい部分で各曲線がほぼ一致する傾向を示すことから、厳密には r は ϵ にも関係する量であると考えられる。ここではすでに仮定したように $\bar{\sigma}$ の関

数として定めると

$$(\partial \bar{\sigma} / \partial t)' = - \{1 + (10^7 \bar{\epsilon})^{0.85}\} \times 10^{-6.01-0.004 \bar{\sigma}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

が得られる。第 6 図の一点鎖線で示した直線は上のようにして定めた r と $\bar{\sigma}$ の関係を示したものである。

4.3 考察 $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ の形の選定についてはすでに述べたので、ここでは主として $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ および $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ について考えてみる。

引張試験から定められたこれら関数は、一定応力クリープ試験結果から定められた関数と一致しなければならない。まずこの点について検討してみよう。

同一材料について得られた一定応力クリープ試験結果^{(4)*}によれば、

$$\epsilon_0 = 3.13 \times 10^{-6} \sigma^{4.41} \quad \dots\dots\dots (18)$$

であるから、(11) 式によって次式が得られる。

$$(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)' = 7.24 \times 10^4 \bar{\sigma}^{-3.41} \quad \dots\dots\dots (19)$$

これは (15) 式とかなりよく一致した式となっている。若干の相違は、(18) 式がクリープ曲線を表わす式として

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta t^n + \kappa t \quad \dots\dots\dots (20)$$

の成立を仮定して実験値から ϵ_0 の値を外そうしたために生じたものと考えられる⁽⁸⁾。第 4 図の二点鎖線は、(18) 式で $\epsilon_0 = \epsilon$, $\sigma = \bar{\sigma}$ とおいて計算した結果を示したものである。

$(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ については、(10) および (16) 式によって、 $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ には (15) 式を用いてクリープ試験結果から r を計算すると第 6 図および第 7 図の白丸のようになり、一定ひずみ速度の引張試験結果から定めた値とよく一致している。傍記の数字は一定応力クリープ試験の応力値を示したものである。

以上のように一定応力クリープ試験結果から求めた値は一定ひずみ速度の引張試験結果から求めた値とよく一致することから、両試験結果の関係は、これらの特性関数を通じて、著者の変形理論により説明することができるものと考えられる。

本研究で求めた $(\partial \bar{\sigma} / \partial \epsilon)'$ は $\bar{\sigma}$ のべき関数で表わされているが、このような形をとることについては理論的ならびに実験的報告がある⁽⁹⁾。

$(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ は本実験によれば著しくひずみ速度の影響を受ける。これについては次のように説明することができる。すなわち回復模型としてすべり面からの集積転位の消失を考えると、転位の消失は原子空孔の拡散などによる転位のすべり面からの上昇運動などを媒介として起るものと考えられるから、これらの過程で

大きな役割をはたすと考えられる原子空孔や転位の段 (jog) の密度が大きければそれだけ拡散や上昇運動の速度も大となり、したがって回復速度の絶対値も大きくなるものと考えられる。空孔や段の密度はそれらの生成速度が大きくなれば大きくなると考えられ、生成速度は当然ひずみ速度が大きいくほど大きいと考えられるので、結局ひずみ速度が大きくなれば回復速度の絶対値も大きくなることになる。

第 5 図において、各試験について $|(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'|$ が $\bar{\sigma}$ の小さい部分で定常値と考えられる値よりも小さいことや、また第 6 図および第 7 図で $\bar{\sigma}$ または ϵ の小さい部分で引張試験とクリープ試験とにより曲線の傾向が幾分異なることは、空孔や段の密度が各ひずみ速度に対する定常値に達するまでに幾分の時間おくれがあるということから説明することができる。更に第 7 図において ϵ の大きいところですべての曲線がほぼ一致するのは、一定応力クリープ試験においてはひずみの増加とともに定常クリープの影響が著しくなり、ひずみ速度の変化が少くなるため、一定応力クリープ試験と一定ひずみ速度引張試験の本質的な相違が少くなること、および各試験についてはひずみの増加とともに時間おくれなどの影響が小さくなり、空孔などの密度がほぼ定常と考えられる値に達していることによると考えられる。なお第 7 図でひずみが増すとともに曲線がやや減少の傾向を示すのは、ひずみの増加により結晶の格子のみだれが著しくなり、ひずみ速度以外の因子の影響が大きくなったためと考えられる。

回復に対するこの考え方を押し進めれば、段階的な応力変動を与えた場合には、当然変動前の空孔や段の密度が応力変動により直ちに変動後のひずみ速度に対応する値に変化するのではなく、時間おくれをともない、ある過渡的な状態をへて変動後のひずみ速度に対応する値へと変化するものと考えられ、回復速度にもある時間おくれをとまうものと考えられるが、これらの点については別の機会に譲ることにする。

最後に $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ について、本研究では理論式の応力依存性に対する補正係数として σ^n を用いた。本変形理論と考え方はやや異なるが、純アルミニウムおよびアルミニウム合金 (希薄固溶体) の高温における変動応力試験の結果から、H. Laks, C. D. Wiseman, O. D. Sherby および J. E. Dorn はひずみ速度の応力依存性を表わす関数として、応力の小さいところでは σ^n , 応力の大きいところでは $e^{B\sigma}$ (n および B : 定数) を得ている⁽¹⁰⁾ ことは定性的に本研究の結果と一致しており、興味深いところである。

* 公称応力ではなく真応力一定のクリープ試験結果。応力変動量は最大 0.1~0.2%程度

5. 一定応力クリープ試験と一定ひずみ

速度引張試験

5.1 一定応力クリープ試験 一定ひずみ速度引張試験結果から定められた特性関数, すなわち (13), (15) および (17) 式を用いて, 温度 450°C における一定応力下の $F(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ と $\bar{\sigma}$ の関係を計算したのが

第 8 図

第 9 図

* 図中 $\bar{\sigma}_s$ は前報⁽³⁾でも述べたように, 各負荷応力に対して定常クリープが現われるときの $\bar{\sigma}$ の値である。

第 8 図である*. 前報⁽³⁾で定性的に推定した曲線と類似の曲線となっている。

第 9 図は上に求めた $F(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ と (13) 式を用いて (3) および (4) 式から求めた ϵ と $\bar{\sigma}$ および t と $\bar{\sigma}$ の関係を示したもので一点鎖線がその計算値である。黒丸および実線は一定応力クリープ試験結果⁽⁴⁾から求めた実験値である。計算値は実験値とよく一致している。

第 10 図は以上の結果を用いて計算したひずみ速度と時間の関係を実験結果⁽⁴⁾と比較したもので, 一点鎖線が計算結果である。計算から求めた曲線の傾きは実験結果と比較してやや急となっているが, 両者はかなりよく一致している。

以上のことから一定ひずみ速度の引張試験結果から定めた関数を用いて, 一定応力クリープ試験結果をかなりよく表わすことができることがわかり, 著者の理論により両者が関連づけられることがわかる。

5.2 一定ひずみ速度引張試験 (13), (15) および (17) 式を用いて, 関数を定めたのとは逆に, 前報の方法⁽³⁾に従って, 第 1 表に示した 5 種類のひずみ速度に対して計算した応力-ひずみ曲線が第 11 図にそれぞれ一点鎖線で示されている。当然のことながらよく実験結果と一致している。

なお図には (20) 式の成立を仮定して固体状態力学方程式により**, 同一材料に対する一定応力クリープ

第 10 図

** (20) 式およびそれを微分した式

$$\dot{\epsilon} = n\beta t^{n-1} + \kappa$$

から t を消去すれば

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta \left(\frac{\dot{\epsilon} - \kappa}{n\beta} \right)^{n/(n-1)} + \kappa \left(\frac{\dot{\epsilon} - \kappa}{n\beta} \right)^{1/(n-1)}$$

が得られる。ここで $\epsilon_0, \beta, \kappa$ および n は σ の関数として与えられているから, 上式で $\dot{\epsilon}$ を与えれば応力-ひずみ曲線が計算できる。

第 11 図

試験結果から定めた n , ϵ_0 , β および κ の式⁽⁴⁾を用いて計算した応力-ひずみ曲線が破線で、ひずみ速度の記号 A, B, …… には括弧をつけて示されている。図からわかるように、この計算法によれば、応力-ひずみ曲線は、ひずみ速度の最も大きい A およびそれに続く B の場合の曲線が互にはほぼ一致し、更にひずみ速度が小さくなれば曲線の間隔は急激に大きくなり、ひずみ速度が小さいほど曲線が下に現われるという変化を示している。これに対し実験結果はひずみ速度の減少とともにほぼ等間隔で変化しており、結局 A と E については計算値は実験値と一応一致するという結果になっているが、中間のひずみ速度に対しては計算値と実験値は一致せず、両者は全く異なった傾向を示している。このことから考えて、応力履歴が互に異なるクリープ試験と引張試験の関係を求める場合には固体状態力学

方程式ではなく、応力履歴の影響を考慮した著者の理論を用いなければならないことがわかる。

6. 結 論

以上の結果から軟鋼について温度 450°C の下で次のことが結論できる。

(1) 著者の変形理論に含まれる三つの特性関数を実験的に決定する方法の一つとして、一定ひずみ速度引張試験結果を用いる方法はきわめて有効である。

(2) 一定応力クリープ試験結果から求めた関数は一定ひずみ速度引張試験結果から定めた関数とよく一致する。

(3) 本研究で求めた関数形については理論的に説明することができる。

(4) 著者の変形機構により一定ひずみ速度引張試験結果と一定応力クリープ試験結果を定量的に関係づけることができる。この考えは更に一般的な変形挙動の解析にも適用できるものと考えられる。

文 献

- (1) A. H. Cottrell, *Dislocations and Plastic Flow in Crystals* (1953), 199, Oxford Press.
- (2) たとえば W. N. Findley & G. Khosla, *J. Appl. Phys.*, **26**(1955), 69; J. E. Dorn & L. A. Shepard, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, No. 165 (1954), 3; O. D. Sherby, T. A. Trozera, & J. E. Dorn, *Proc. ASTM*, **56** (1956), 789.
- (3) 西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **24**, 143 (昭 33-7), 452.
- (4) 平, 田中, 大路, 春本, 機械学会論文集, **25**, 151 (昭 34-3), 155.
- (5) たとえば西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **21**, 111 (昭 30-11), 791; **24**, 143 (昭 33-7), 441 など.
- (6) 文献 (1), p. 129, 199.
- (7) 機械工学便覧 (昭 26), I-63.
- (8) 西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **24**, 143 (昭 33-7), 441.
- (9) 文献 (1), p. 151.
- (10) H. Laks, C. D. Wiseman, O. D. Sherby, & J. E. Dorn, *J. Appl. Mech.*, **24** (1957), 207, 他に文献 (2) の Dorn らの論文にも報告されている。

より高い温度による気体浸炭

ミンスク自動車工場では鋼鉄製部品の高熱気体浸炭をソ連ではじめて実用化した。この技術は中央工場附属研究所の技術者と白ロシア科学アカデミー物理・工學研究所員の協力によって完成された。

これまで同工場では鋼鉄製部品の表面硬化は、930° から 950° の熱で高炉で行われていた。このような温度では、1.9 mm の深さまで浸炭するのに 24 時間かかる。研究所では気体浸炭の温度を上昇させる一連

の研究を行い、高炉内のガスの温度を 1000° まで上昇したところでは、金属はより浸炭されやすくなり、1.9 mm まで浸炭するのに 12 時間で済むという結果を得た。この新技術が定着すると高炉の生産性は約 2 倍となり、年間 50 万ルーブルの節約となる。

(Промышленно-экономическая газета.
11 сентября, 1959)

(日本科学技術情報センター提供)