

# The Effect of Strain Rate History on the Stress-Strain Curve

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-02-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Hojo, Akihiro, Chatani, Akiyoshi メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00053169">https://doi.org/10.24517/00053169</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



# 材料の応力—ひずみ関係におよぼすひずみ速度履歴の影響について

放生 明 廣\* 茶 谷 明 義\*

## The Effect of Strain Rate History on the Stress-Strain Curve

by

Akihiro HOJO and Akiyoshi CHATANI

### Abstract

The effects of strain rate history on the compressive stress-strain curves of mild steel and pure copper were examined. The dynamic compressive tests at the strain rate of about 200~500 1/s and the static ones at  $3.8 \times 10^{-4}$  1/s were done by a dynamic testing device of Hopkinson bar type and an universal testing machine of constant velocity type respectively. Consequently the following were obtained.

For mild steel, the stress in dynamic reloading after static prestraining is higher than that in initial dynamic loading without prestraining. And the stress in static reloading after dynamic prestraining is lower than that in initial static loading. In other words, dynamic loading causes less strain hardening than static loading. For pure copper, reversely, dynamic loading causes more strain hardening than static loading. And also proportional expressions are formed between the static prestrain and the dynamic prestrain for the both materials. As a result, it was found that the stress-strain curves including strain rate history can be formularized by using a parameter whose increment is proportional to strain increment.

### 1. 緒 言

材料の応力—ひずみ関係がひずみ速度依存性を持つことは、従来から多く行われている衝撃圧縮、引張あるいはねじり試験などから明らかにされ、<sup>1~3)</sup>理論的にも転位の運動と結びつけて説明されている。<sup>4)</sup>しかしこれらの実験結果をよく見れば、応力—ひずみ関係にはひずみ速度のみならず、ひずみ速度履歴の影響もわずかではあるが見られる。すなわち、 $\dot{\epsilon}_1$  のひずみ速度下で予ひずみを与えた後ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_2$  に変化させたとき得られる応力—ひずみ曲線は、はじめからひずみ速度を $\dot{\epsilon}_2$  とした場合のそれとは異ったものになる。したがって、ひずみ速度急変試験を行う場合にはひずみ速度履歴の影響を考慮する必要がある。また材料の動的挙動をより明らかにし、ひずみ速度を考慮した応力—ひずみ関係を確立するためにもこの現象を調べる必要がある。しかし、ひずみ速度履歴の影響について詳しく調べた実験は少なく<sup>5)</sup>、定量的にこの現象を明らかにしたものはすくない。<sup>9),10)</sup>

本研究ではひずみ速度履歴の影響を定量的に調べ、ひずみ速度およびひずみ速度履歴依存性を考慮

\* 機械工学第二学科

した材料の応力-ひずみ関係を明らかにすることを目的とした。実験材料は、ひずみ速度依存性の異なる 2 種類の代表的な金属である軟鋼と純銅を用い、試験方法は衝撃試験が最も容易な圧縮試験を採用し、ひずみ速度が  $10^{-4}$  1/s から  $10^2$  1/s オーダでの実験を行った。その結果動的な予ひずみと静的な予ひずみとの間には比例関係が成立つことが明らかとなった。また、加工硬化を表わすパラメータとしてその増分が塑性ひずみ増分に比例する変数を用いれば、ひずみ速度履歴の影響を定量的に表わせることがわかった。

## 2. 実験方法と実験材料

図 1 に衝撃圧縮試験機の概略を示す。これはホプキンソンバー型の試験機であり、バネの力で加速された打撃棒で入力棒を打撃し同棒中に圧縮の応力波を発生させ、入出力棒の間にはさまれた試験片を圧縮する。試験片の公称応力-ひずみ、ひずみ速度-ひずみ曲線は、詳細は省くが<sup>9)</sup>図中のひずみゲージ G 1, G 2 で測定される入出力棒中のひずみ波形を用いてシンクロスコープ上に描かせる。この装置ではひずみ速度が 100 1/s 以上での応力-ひずみ曲線が得られる。静圧縮試験は図 2 に示す治具を用い定変位速度型の試験機（島津オートクラブ IS 10 T）で行う。試験片の公称応力-ひずみ曲線は、図中のロードセル⑤上のひずみゲージ⑥と差動トランス取付金具⑧に取付けた差動トランス型の変位計を用い X-Y レコーダに描かせる。また、ひずみ速度はクロスヘッドスピードを試験片長さで除して求める。なお、以下に示す実験結果では、上述のようにして求めた公称応力、公称ひずみを全て真応力、真ひずみに直して示してある。

試験片の形状は円柱であり、その寸法は軟鋼（SS34）では直径 6 mm 高さ 11mm，純銅では直径 13mm 高さ 11mm である。これらの試験片はいずれも、市販の丸棒から切出し両端面を研削仕上げした後、軟鋼は 900°C で 1 時間、純銅は 500°C で 1 時間それぞれ真空焼鈍した。これらの材料の機械的性質を表 1 に示す。

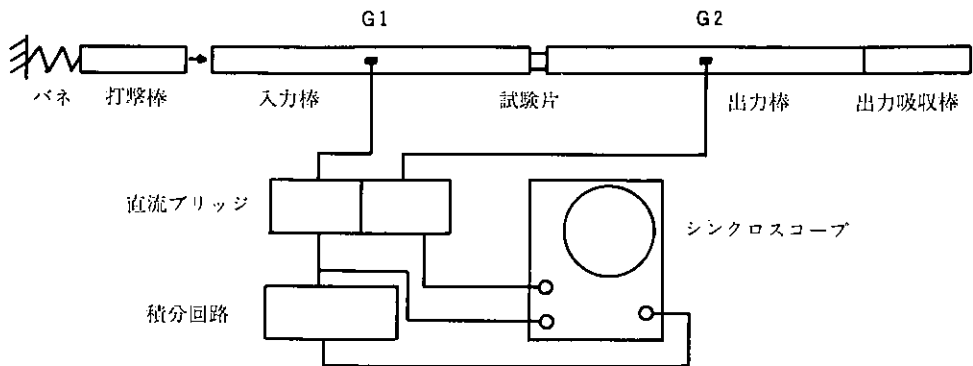
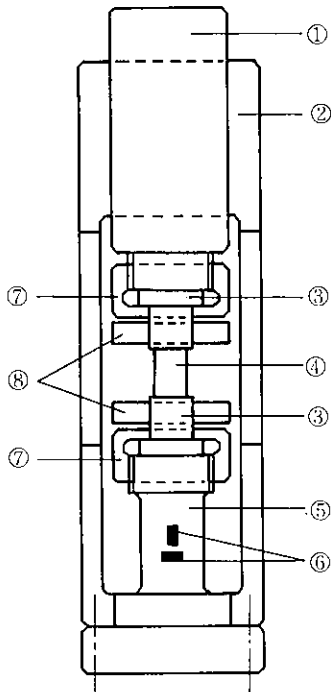


図 1 衝撃圧縮試験機

表 1 機械的性質

	降伏応力 kgf/mm <sup>2</sup>	引張強さ kgf/mm <sup>2</sup>	真破断応力 kgf/mm <sup>2</sup>	断面収縮率 %
軟鋼 (下降伏点)	21.9	38.9	80.0	66
純銅 (0.2%耐力)	4.2	24.0	61.8	75



①ピストン ②外円筒 ③ダイス ④試験片  
⑤ロードセル ⑥ひずみゲージ ⑦ダイス押えナット  
⑧差動トランス取付金具

図2 静圧縮試験用治具

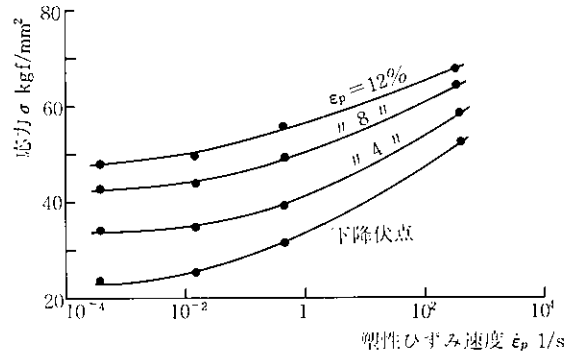


図3 応力-ひずみ速度関係 (軟鋼)

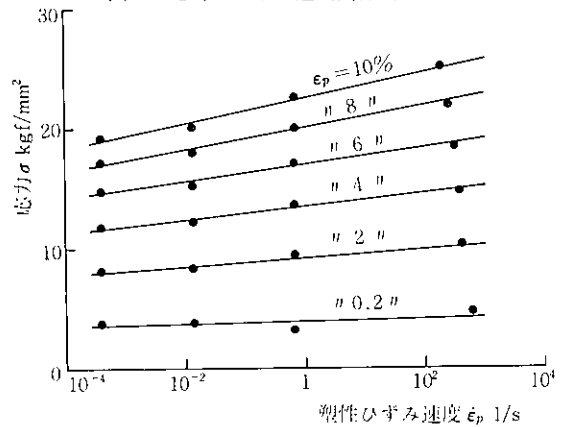


図4 応力-ひずみ速度関係 (純鋼)

図3、4はこれらの材料の強さのひずみ速度依存性を調べた結果である。横軸に塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_p$  を  $\log$  スケールでとり、縦軸に応力  $\sigma$  をとって下降伏点および各塑性ひずみ  $\epsilon_p$  に対する  $\sigma$  と  $\dot{\epsilon}_p$  の関係を示す。これらは  $\dot{\epsilon}_p = \text{一定}$  すなわちひずみ速度履歴の影響がない場合の結果である。ただし、ひずみ速度が100 1/s以上の衝撃試験の結果は、装置の都合上厳密には  $\dot{\epsilon}_p = \text{一定}$  とはならず、軟鋼では約350~400 1/s、純鋼では約200~500 1/sと変化しているが、この程度の変化による影響は無視した。同図を見れば、軟鋼、純鋼ともに  $\dot{\epsilon}_p$  が大きくなると同一の  $\epsilon_p$  に対する  $\sigma$  は大きくなり、応力-ひずみ関係には明らかにひずみ速度依存性が見られる。また、両者を比較すれば、純鋼では  $\sigma$  と  $\log \dot{\epsilon}_p$  の間には直線関係が成立し指数則があてはまることがわかる。一方、軟鋼では高ひずみ速度側で  $\sigma$  の増加がより顕著になっている。このような傾向は従来の他の実験結果とも一致しており、転位の運動が両者では異なることによるものと考えられる。<sup>11) 7)</sup>

### 3. 実験結果

#### 3.1 ひずみ速度が変化するときの応力-ひずみ曲線

図5、6に種々の動的予ひずみ  $\epsilon_{od}$  を与えた後の静的応力-ひずみ曲線および、静的予ひずみ  $\epsilon_{os}$  を与えた後の動的応力-ひずみ曲線を示す。図5は軟鋼の、図6は純鋼の結果であり図中実線が静的応力-ひずみ曲線、破線が動的応力-ひずみ曲線である。ここで、静圧縮時のひずみ速度は予ひずみを与える場合も含めて  $3.8 \times 10^{-4}$  1/s と一定である。動圧縮の場合は前述のように軟鋼では約350~400

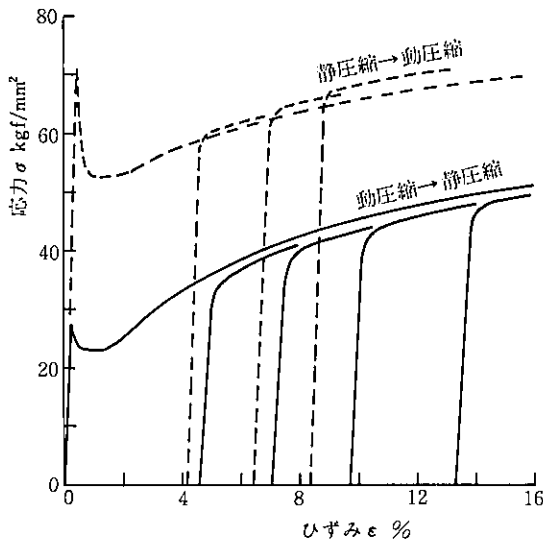


図5 ひずみ速度を変化させたときの  
応力-ひずみ曲線(軟鋼)

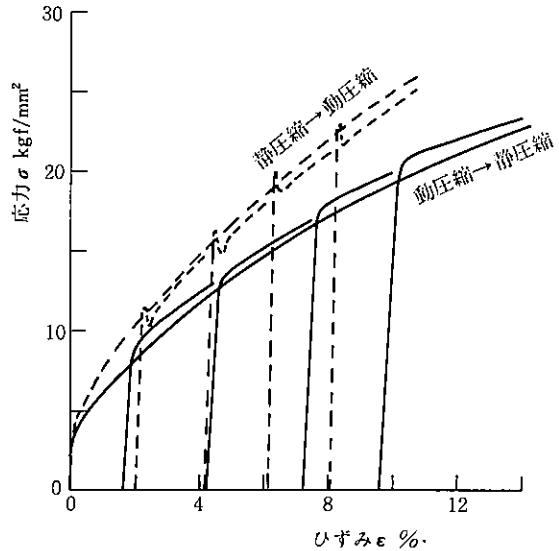


図6 ひずみ速度を変化させたときの  
応力-ひずみ曲線(純銅)

1/s, 純銅では約 200~500 1/s である。また、動的予ひずみは図 1 の打撃棒の長さおよび打撃速度を種々変化させて得たもので、この時のひずみ速度は軟鋼では約 250~400 1/s, 純銅では約 150~350 1/s であった。

軟鋼の結果図 5 を見れば、種々の  $\epsilon_{od}$  を与えた後の静的応力-ひずみ曲線は初めから静的に負荷したものとは一致せず、いずれも応力がやや低くなっている。また、これとは逆に、種々の  $\epsilon_{os}$  を与えた後の動的応力-ひずみ曲線はいずれも初めから動的に負荷した場合よりも高い応力を示す。すなわち、応力-ひずみ曲線にはひずみ速度履歴の影響が見られ、同一のひずみに対する加工硬化は静的に負荷したものの方が動的に負荷した場合よりやや大きい。一方純銅の結果図 6 を見れば、これらの関係は軟鋼の場合とは全く逆になり、動的に負担したものの方が静的に負荷した場合よりも同一のひずみに対する加工硬化はやや大きくなる。このような両者の相違は過去の実験例とも一致し、B.C.C. 形の結晶格子を持つ軟鋼と F.C.C. 形の結晶格子の純銅の変形によって生ずる転位構造やすべり形態の相違に関係するものであろう。<sup>5)</sup>

なお純銅の結果図 6 で、動的に再負荷した場合立上り部にピークが見られる現象は他にもいくつか報告されているが、<sup>8)</sup>次節ではこのようなピークを無視して考察を加えた。

### 3.2 再負荷後の応力-ひずみ曲線の補正

前節で示した動的予ひずみ  $\epsilon_{od}$  を与えた後の静的応力-ひずみ曲線および静的予ひずみ  $\epsilon_{os}$  を与えた後の動的応力-ひずみ曲線を、再負荷後のひずみが 1% の応力値がもとの静的あるいは動的応力-ひずみ曲線のそれと一致するように、ひずみ軸に沿って平行移動させた結果を図 7, 8 に示す。図 7 が軟鋼の結果、図 8 が純銅の結果である。また、平行移動後の応力-ひずみ曲線のひずみ軸上の点(図中⊙印)をそれぞれ  $\epsilon'_{os}$ ,  $\epsilon'_{od}$  とする。

図 7, 8 を見れば、軟鋼および純銅ともに、補正後の応力-ひずみ曲線は応力を一致させた点以後ももとの静的あるいは動的応力-ひずみ曲線とよく一致することがわかる。したがって、動的に予ひずみ  $\epsilon_{od}$  を与えることは静的に予ひずみ  $\epsilon'_{os}$  を与えることと等価であり、また静的に予ひずみ  $\epsilon_{os}$  を与えることは動的に予ひずみ  $\epsilon'_{od}$  を与えることと等価であると考えられることができる。

次に、 $\epsilon_{od}$  と  $\epsilon'_{os}$  および  $\epsilon_{os}$  と  $\epsilon'_{od}$  との関係を種々の予ひずみ量について調べた結果を図 9, 10 に示

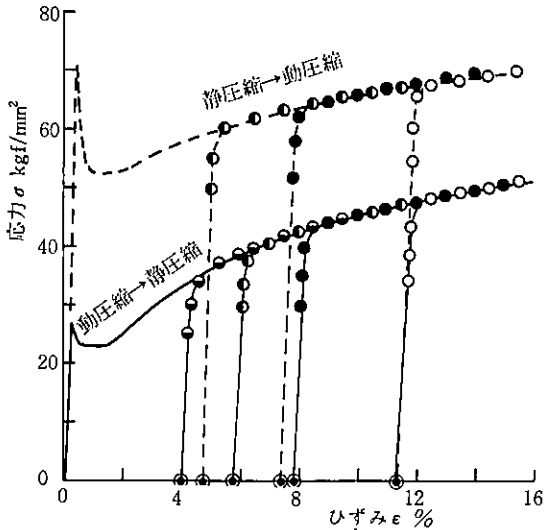


図7 補正後の応力-ひずみ曲線 (軟鋼)

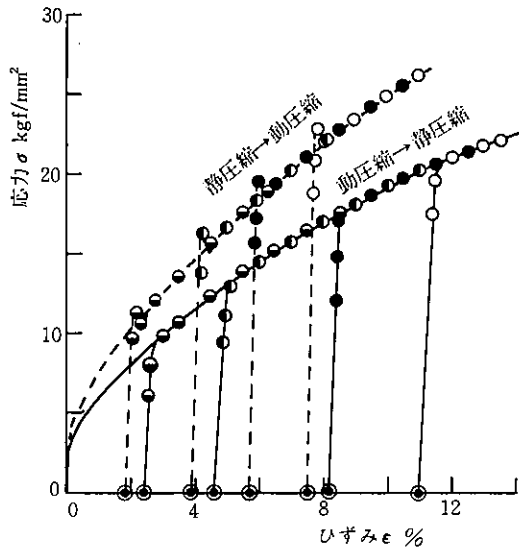


図8 補正後の応力-ひずみ曲線 (純銅)

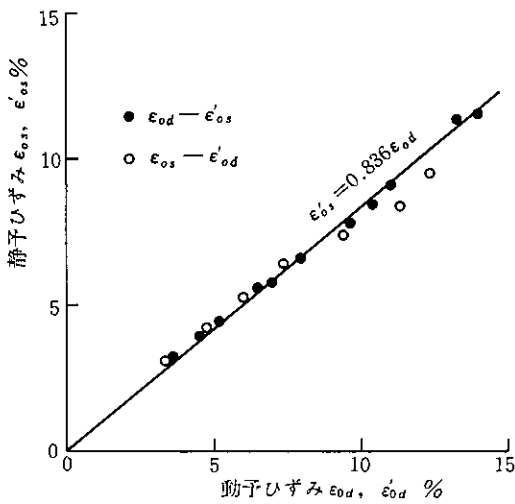


図9 静予ひずみと動予ひずみの関係 (軟鋼)

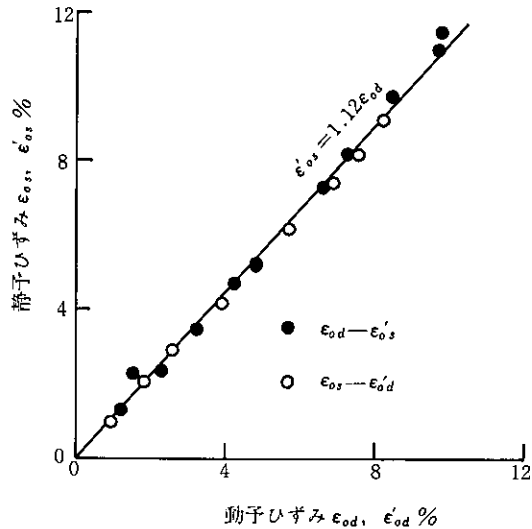


図10 静予ひずみと動予ひずみの関係 (純銅)

す。同図は横軸に $\epsilon_{0d}$  および  $\epsilon'_{0d}$ 、縦軸に、 $\epsilon_{0s}$  および  $\epsilon'_{0s}$  をそれぞれとってあり、図中●が  $\epsilon_{0d}-\epsilon'_{0s}$  ○が  $\epsilon_{0s}-\epsilon'_{0d}$  関係を示す。同図を見れば、 $\epsilon_{0d}-\epsilon'_{0s}$  および  $\epsilon_{0s}-\epsilon'_{0d}$  関係は軟鋼純銅ともに同一の直線上にのることがわかる。図中の実線はこれらの実験点から求めた直線であり、軟鋼では  $\epsilon'_{0s}=0.836 \epsilon_{0d}$  ( $\epsilon'_{0d}=\epsilon_{0s}/0.836$ )、純銅では  $\epsilon'_{0s}=1.12 \epsilon_{0d}$  ( $\epsilon'_{0d}=\epsilon_{0s}/1.12$ ) となる。

以上のように動的予ひずみ  $\epsilon_{0d}$  を与えた後の静的応力-ひずみ曲線および静的予ひずみ  $\epsilon_{0s}$  を与えた後の動的応力ひずみ曲線が、 $\epsilon'_{0s}$  あるいは  $\epsilon'_{0d}$  を用いて補正すれば、もとの静的および動的応力-ひずみ曲線に一致すること、しかも  $\epsilon_{0d}-\epsilon'_{0s}$ 、 $\epsilon_{0s}-\epsilon'_{0d}$  関係が同一の直線上にのることから、ひずみ速度

履歴を考慮した応力-ひずみ曲線が次のように表わせる。

4. ひずみ速度履歴を考慮した応力-ひずみ曲線の表式

一般にひずみ速度依存性を考慮した応力-ひずみ曲線は次式で表わされる。

$$\sigma = H(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p) \tag{1}$$

ここで、 $H$  の具体的な形は図 3, 4 などから実験的に決められる。式 (1) では加工硬化の影響は塑性ひずみ  $\epsilon_p$  で表わされ、このままでは本実験で示したようなひずみ速度履歴の影響を表わすことはできない。

前章の実験結果では静的予ひずみと動的予ひずみとの間には比例関係が成立する。そこで、 $\epsilon_p$  のかわりにその増分が塑性ひずみ増分に比例するパラメータ  $\alpha$  を用いて式 (1) を次のように表わす。

$$\sigma = H(\alpha, \dot{\epsilon}_p) \tag{2}$$

$$d\alpha = K(\dot{\epsilon}_p) d\epsilon_p \tag{3}$$

ここで  $K(\dot{\epsilon}_p)$  は塑性ひずみ速度のみの関数であり、厳密には  $\dot{\epsilon}_p = 0$  での実験を行い  $K(0) = 1$  として  $H$  および  $K$  の関数形を決めればよい。しかし  $\dot{\epsilon}_p = 0$  での実験は実際には不可能なので、実用上は  $\dot{\epsilon}_p = 10^{-5} \sim 10^{-4}$  1/s 程度の静的な場合を  $K(\dot{\epsilon}_p) = 1$  としてこれらを決めればよいであろう。

図 11 は軟鋼について  $K(3.8 \times 10^{-4}$  1/s) = 1,  $K(350$  1/s) = 0.836 とし、 $\epsilon_p = 4.5\%$  まで  $\dot{\epsilon}_p = 350$  1/s で動圧縮した後  $\dot{\epsilon}_p = 3.8 \times 10^{-4}$  1/s で  $\epsilon_p = 10\%$  まで静圧縮し、さらに動圧縮したときの応力-ひずみ曲線の計算値と実験値を比較したものである。すなわち、図中細線で示す  $\dot{\epsilon}_p = 350$  1/s および

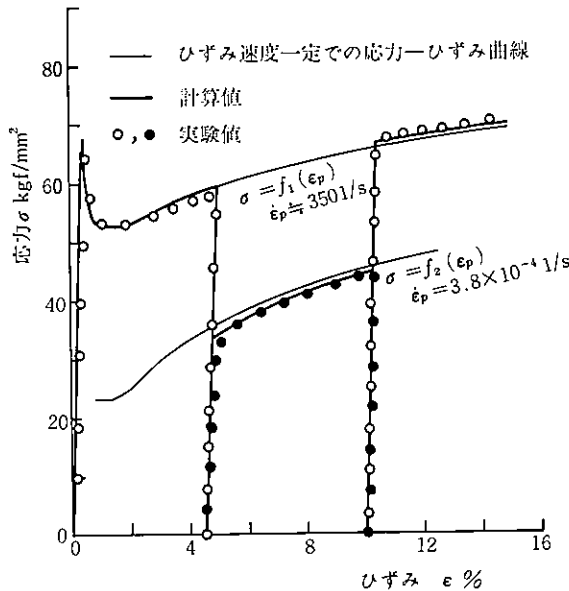


図11 ひずみ速度が変化するときの応力-ひずみ曲線の計算例(軟鋼)  
( $\epsilon = 4.5\%$ まで動圧縮した後 $\epsilon = 10\%$ まで静圧縮、その後再び動圧縮)

$3.8 \times 10^{-4}$  1/s での応力-ひずみ曲線を、それぞれ  $\sigma=f_1(\epsilon_p)$ ,  $\sigma=f_2(\epsilon_p)$  とすれば、式(2), (3) は次のようになる。

$$\sigma=H(\alpha, \dot{\epsilon}_p) = \begin{cases} f_1(\alpha/0.836) & \dot{\epsilon}_p \doteq 350 \text{ 1/s} \\ f_2(\alpha) & \dot{\epsilon}_p = 3.8 \times 10^{-4} \text{ 1/s} \end{cases} \quad (4)$$

$$d\alpha=K(\dot{\epsilon}_p) d\epsilon_p = \begin{cases} 0.836 d\epsilon_p & \dot{\epsilon}_p \doteq 350 \text{ 1/s} \\ d\epsilon_p & \dot{\epsilon}_p = 3.8 \times 10^{-4} \text{ 1/s} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)より動的に  $\epsilon_p=4.5\%$  まで圧縮したときの  $\alpha$  の最終値は  $0.045 \times 0.836=0.03762$  となり、その後  $\epsilon_p=10\%$  まで静圧縮したときの  $\alpha$  の最終値は  $0.03762+0.055=0.09262$  となる。したがってこのときの  $\sigma$  と  $\epsilon_p$  との関係は式(4), (5)より

$$\begin{aligned} 0 \leq \epsilon_p \leq 0.045 \text{ では} \\ \sigma &= f_1(\alpha/0.836) = f_1(\epsilon_p) \\ 0.045 \leq \epsilon_p \leq 0.1 \text{ では} \\ \sigma &= f_2(0.03762 + \epsilon_p - 0.045) = f_2(\epsilon_p - 0.00738) \\ 0.1 \leq \epsilon_p \text{ では} \\ \sigma &= f_1\left(\frac{0.09262}{0.836} + \epsilon_p - 0.1\right) = f_1(\epsilon_p + 0.0108) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。図中実線が計算結果、○および●が、実験結果である。ただし、式(6)は  $\epsilon_p$  軸に沿っての平行移動を表わしているのので、実線は図中の細線をそれぞれ平行移動させて求めた。

再負荷直後および除荷直後の相違を無視すれば、塑性変形域の広範囲にわたって、実験値と計算値は良く一致している。

## 5. 結 言

軟鋼および純銅焼なまし材についてひずみ速度が約  $10^{-4} \sim 500$  1/s での圧縮試験を行い、応力-ひずみ曲線におよぼすひずみ速度履歴の影響について調べた。その結果次のことが明らかになった。

- (1) 軟鋼では、動的予ひずみを与えた後の静的応力-ひずみ曲線はもとの静的応力-ひずみ曲線よりも低い応力値を示す。逆に静的予ひずみを与えた後の動的応力-ひずみ曲線はもとの動的応力-ひずみ曲線よりも高い応力値を示す。
- (2) 純銅の場合上述の関係は全く逆になる。
- (3) 軟鋼、純銅ともに静的予ひずみと動的予ひずみとの間には比例関係が成立する。
- (4) ひずみ速度履歴を考慮した応力-ひずみ曲線は、その増分が塑性ひずみ増分に比例するパラメータを用いた式(2), (3)で表わすことができる。

## 参 考 文 献

- 1) Lindholm, U.S., J. Mech. Phys. Solids, 12 (1964), 317.
- 2) 放生・茶谷, 金沢大学工学部紀要, 7-2 (1973-9), 137.
- 3) Nicholas, T., Exp. Mech., 11-8 (1971-8), 370.
- 4) Johnston, W.G. & Gilman, J.J., J. Appl. Phys., 30 (1959), 129.
- 5) 中村, 日本機械学会衝撃破損研究分科会成果報告書 I (1966-4), 256.
- 6) Lindholm, U.S. & Yeakley, L.M., Exp. Mech., 8-1 (1968-1), 1.
- 7) 谷村・井垣, 材料, 29-317 (1980-2), 137.
- 8) Harding, J., Acta Metallurgica, 19 (1971-11), 1177.
- 9) 白樫・白井, 精密機械, 37-5 (1971-5), 338.
- 10) Klepaczko, J., J. Mech. Phys. Solids, 16 (1968), 255.

(昭和55年6月26日受理)