銅の応力, ひずみ速度および温度の間の構成関係*

若 杉 昇 八^{*1}, 西 雄 一^{*1}
後 藤 善 弘^{*1}, 古 川 俊 雄^{*1}Constitutive Relations between Stress, Strain-Rate
and Temperature of CopperShohachi WAKASUGI, Yuichi NISHI,
Yoshihiro GOTO and Toshio FURUKAWA

Strain-rate and temperature dependence on the flow stress of OFHC copper is discussed. Tensile tests were made ranging in strain-rate from $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ to 1 s^{-1} and temperature from 25°C to 600°C with a cam-plastometer type testing machine built as a trial. Experimental results were compared with a theory proposed previously by the first author for constitutive relationships of elastic/viscoplastic materials. On the temperature and strain-rate range discussed in this paper, it was recognized that three fields of deformation mechanism exist. The proposed equation represented well constitutive relation in individual field and correlation of neighboring fields. Significant variations of final reduction in area and total elongation also were discussed in connection with transition of deformation mechanism.

Key Words: Plasticity, Constitutive Equation, Tensile Properties, OFHC Copper, Deformation Mechanism, Intermediate Temperature Embrittlement

1. 緒 言

著者の一人は熱活性化過程の考えに基づき, 単一機構で塑性変形する材料の応力, ひずみ速度および温度の間の関係を表す構成式を提案⁽¹⁾した。さらに実際にはいくつかの機構によって変形すると考えられる材料の構成関係がひずみ速度, 温度の領域によって異なるとの考えのもとに, 別々の構成式が成立する互いに隣接した二つの変形機構領域の境界および境界付近における構成関係について考察⁽²⁾した。また弾/粘塑性体に対するこれらの構成関係の考えを液体の粘性流動に適用し, その粘度の温度依存性がよく説明されることを示すとともに静水圧依存性をも表す構成式を求めている⁽³⁾。

本報では面心立方系金属の無酸素銅についてひずみ速度が $2.5 \times 10^{-4} \sim 1 \text{ s}^{-1}$, 温度が $25 \sim 600^\circ\text{C}$ の範囲で行った引張試験の結果について, 提案した構成式およびこれに基づく構成関係に関する新しい解釈の妥当性などを検討した結果を報告する。

2. 理 論

提案した理論の概要を述べる。単一の変形機構で変形する材料の構成式は次式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_B + D \ln \left(\frac{1 + \dot{\epsilon}_p / \alpha}{1 - \dot{\epsilon}_p / \beta} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$$\alpha = \beta \exp(-H/RT) \dots\dots\dots (2)$$

σ : 応力, $\dot{\epsilon}_p$: 塑性ひずみ速度, T : 絶対温度, R : ガス定数, H : 活性化エネルギー, σ_B : 背応力, β : 塑性ひずみ速度の最大の極限值, D : 応力の塑性ひずみ速度依存性を表す定数, “ $\cdot$ ” は時間微分を表す。なお σ_B , H , β , D は σ , $\dot{\epsilon}_p$ および T に依存しない定数である。また $\sigma \leq \sigma_B$ では $\dot{\epsilon}_p = 0$ とする。

$\alpha \ll \dot{\epsilon}_p \ll \beta$ では式(1)は

$$\sigma = \sigma_B + D \ln(\dot{\epsilon}_p / \beta) + DH/RT \dots\dots\dots (3)$$

となり, σ , $1/T$, $\ln \dot{\epsilon}_p$ が互いに直線関係となる。また $\dot{\epsilon}_p \ll \alpha$ では $\sigma \approx \sigma_B = \text{一定}$ となる。

実際の材料はいくつかの機構で変形するが, その際に図1のモデルで表されるような機構の組合せで変形すると考える。すなわち変形機構はいくつかのグループに分かれ, グループ内の各機構は等しい非弾性ひずみを受けるとして組合せられて, 共通の固体摩擦(背応

* 原稿受付 平成元年 10 月 26 日。

*¹ 正員, 福井大学工学部 (〒910 福井市文京 3-9-1)。

力)に接続されている。そして変形条件(領域)に応じて変形応力が最小のグループで変形すると考える。

この考えに従うと領域の境界で構成関係は急に折れ曲がり、特に縦軸に σ 、横軸に $1/T$ または $\ln \dot{\epsilon}_p$ をとると図2(a), (b)のように上に凸の折れ線となり、領域境界は破線のようにになる。さらにそれぞれの領域内ではいくつかの機構が重複して変形するが、各機構が $\dot{\epsilon}_p$ の速度で変形するのに必要な応力 $\sigma'_{(i)}$ ($i=1, 2, \dots, N$)および σ_B の和が外部から作用する応力 σ に等しくなる。

$$\sigma = \sigma_B + \sum_{i=1}^N \sigma'_{(i)} \quad (4)$$

ここで $\sigma'_{(i)}$ は*i*番めの機構に対する式(1)の右辺第2項を表す。これよりそれぞれの領域内での $\sigma-1/T$ 関係あるいは $\sigma-\ln \dot{\epsilon}_p$ 関係は一般に下に凸の折れ線状(厳密には曲線であって急に折れ曲がるのではない)になる。この近似的折れ曲がり点(領域境界)およびその付近における構成関係は図3(a), (b)のようになり、各領域内の構成関係は近似的に式(3)と同形の

$$\sigma = \sigma_B + \bar{D} \ln(\dot{\epsilon}_p / \bar{\beta}) + \bar{D}\bar{H}/RT \quad (5)$$

となる。ここで上線を付した $\bar{D}$, $\bar{H}$, $\bar{\beta}$ は必ずしも単一

図1 変形機構組合せモデル

($\bar{H}_i > \bar{H}_j$, $\bar{D}_i > \bar{D}_j$, $\bar{D}_i \bar{H}_i > \bar{D}_j \bar{H}_j$ の場合)

図2 $\sigma-1/T-\ln \dot{\epsilon}_p$ 関係

($\bar{H}_i > \bar{H}_j$, $\bar{D}_i < \bar{D}_j$, $\bar{D}_i \bar{H}_i < \bar{D}_j \bar{H}_j$ の場合)

図3 $\sigma-1/T-\ln \dot{\epsilon}_p$ 関係

機構のそれではなく、見かけの値であることを示す。以上が理論の概要である。なお文献⁽²⁾では $\sigma = \sigma_B =$ 一定となる領域についても考察されている。

3. 実験

試料は市販の無酸素銅で、これを図4に示す形状に旋削加工後 600°C , 2hの真空焼鈍を施し実験に供した。引張試験は等速度カムを利用した自作の試験機を用いた。試料の加熱には電気炉を用い、試験前の設定温度保持時間は10minである。実験を行ったひずみ速度および温度の範囲はそれぞれ $2.5 \times 10^{-4} \sim 1 \text{ s}^{-1}$, $25 \sim 600^\circ\text{C}$ である。ひずみ、ひずみ速度はそれぞれカム従動体の移動量、移動速度を試験片標点距離(30mm)で除して求めた。塑性ひずみ ϵ_p は実験より得られた公称応力-ひずみ関係の見かけの縦弾性係数を用いて算出した。試料が最大応力を示した後のデータは使用しなかった。また試験中の塑性変形のため試料の温度上昇が最大で10数度程度あったが、これは無視した。

4. 結果および考察

4.1 公称応力-ひずみ関係 図5に温度が25, 300, 600°C における公称応力-ひずみ関係に及ぼす $\dot{\epsilon}_p$ の影響を示す。 $\dot{\epsilon}_p$ の増加に伴い応力は大きくなり、その増加の割合は高温ほど大きくなる。 600°C の場合には応力に振動が現れている。 $\dot{\epsilon}_p$ の破断伸びに対する影響は 600°C のときに明りようにみられるように、一般に $\dot{\epsilon}_p$ の増加に伴い増加する傾向を示した。

図4 試験片形状

図5 応力ひずみ関係に及ぼすひずみ速度の影響

図6に $\dot{\epsilon}_p = 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ における公称応力-ひずみ関係に対する温度の影響を示す。温度の上昇に伴い引張強さは小さくなり、かつそれに対するひずみも小さくなっている。破断伸びは温度の上昇に伴い減少するが、図の結果では 400°C より高温になると再度増大している。

4・2 変形機構領域 図7(a), (b)に例として $\epsilon_p = 6\%$ における $\sigma - \ln \dot{\epsilon}_p$ 関係および $\sigma - 1/T$ 関係を示す。図中の実線は後述のようにして破線(a)(b)によって領域分けされた各領域内の全部のデータを用い、式(5)を完全に満足すると仮定して定められたものであり、個々の T あるいは $\dot{\epsilon}_p$ に対するデータを単に直線で結んだものではないことに注意されたい。なお以下では応力 σ は体積一定と仮定して求めた真応力、 ϵ_p は真ひずみである。また $\sigma - \ln \dot{\epsilon}_p$ 関係の温度が $50, 75^\circ\text{C}$ の場合については図が見にくくなるため実験値が示されていないが、その関係を表す直線からのばらつきは他の温度のそれと同程度である。

さて図7の実験結果の全範囲を一組の定数値をもった構成式(5)で表すことはできない。したがって提案構成式が成立する各領域に分けなければならない。その場合理論で述べたように各領域内では構成関係がそれぞれ互いに平行な直線関係で、境界付近での構成関係の組合せは図2, 3の場合のみであることを満足しなければならない。

図7(a)の $\sigma - \ln \dot{\epsilon}_p$ 関係では実験値のばらつきを考慮すると各温度に対するデータはそれぞれ直線関係となりそうである。しかしこの図においては領域の区別、特に領域Ⅰと領域Ⅱの区別を明確には認め難い。一方図7(b)の $\sigma - 1/T$ 関係では各 $\dot{\epsilon}_p$ に対するデータは1本の直線では表せず、少なくとも三つの直線(領域)に分けて考えねばならない。 $\sigma - \ln \dot{\epsilon}_p, \sigma - 1/T$ の両関係はいずれか一方が決まれば他方も決まるという関係で

あり、一方の関係において認められる領域の区別あるいは境界は当然他方の関係にも存在することになる。したがって $\sigma - 1/T$ 関係より本実験の範囲において三つの変形機構領域の存在を考えねばならない。このように考えれば各領域内での $\sigma - \ln \dot{\epsilon}_p, \sigma - 1/T$ 関係はそれぞれ異なる T あるいは $\dot{\epsilon}_p$ に対してすべて互いに平行な直線関係として表されている。このことより定数 $\bar{D}, \bar{H}, \sigma_B - \bar{D} \ln \bar{\beta}$ は一つの領域内では $\sigma, \dot{\epsilon}_p$ および T に依存しない定数となっていることがわかる。なお図3のような下に凸の折れ曲がりの構成関係は明りようには認められなかった。

以上のことより本研究の実験条件の範囲における無酸素銅の応力、温度およびひずみ速度の間の関係は、提案した構成式が成立する三つの領域に分けることによって合理的に説明されると言えよう。このことはある $\dot{\epsilon}_p$ ならびに T を境にして領域すなわち変形機構が変化するとの本理論のような指針が存在しなければ、依存性が緩慢に変化していく実験結果としてしか

(a) $\sigma - \dot{\epsilon}_p$ 関係

(b) $\sigma - 1/T$ 関係

図6 応力ひずみ関係に及ぼす温度の影響

図7

認識されないであろう。特に σ - $\ln \dot{\epsilon}_p$ 関係の 400°C の結果は $\dot{\epsilon}_p$ が約 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ を境にして領域Ⅰと領域Ⅲにまたがっていることになり、実験結果はこのことを明らように示している。

4.3 構成式定数と塑性ひずみの関係 図8～10に各領域の $\bar{D}$, $\bar{H}$ および $\sigma_B - \bar{D} \ln \bar{\beta}$ ($\bar{\beta}$ の単位は s^{-1}) の ϵ_p による変化を示す。本結果からは σ_B と $\bar{\beta}$ は個別に求まらないので、 $\sigma_B - \bar{D} \ln \bar{\beta}$ の値を示した。これらの結果によると $\bar{D}$, $\bar{H}$ は高温の領域ほど大きいこと(図2参照)、領域Ⅰの $\sigma_B - \bar{D} \ln \bar{\beta}$ を除き、 ϵ_p の増大とともに $\bar{D}$, $\bar{H}$ の値および $\sigma_B - \bar{D} \ln \bar{\beta}$ の絶対値が増大すること、特に高温領域Ⅲの $\bar{D}$ と $\sigma_B - \bar{D} \ln \bar{\beta}$ は急激に大きくなることなどが認められる。これらの結果は材料の各種の変形挙動を考察する際に基礎データとして有用であると思われる。

ϵ_p によっても変形機構が遷移することが考えられるが、これらの結果のみからそれを明確には認められない。また境界線③、⑥の現れる温度は ϵ_p によってほとんど変化していなかった。なお後述するように領域

Ⅰ内で材料は中間温度脆性を示すと考えられるが、 $\sigma_B - \bar{D} \ln \bar{\beta}$ が ϵ_p に対してほぼ一定値を示すこと以外には領域Ⅰに特別な傾向は認められない。

4.4 絞り・伸び 理論で述べたように領域によって変形機構が異なるとすれば、変形挙動の一種である材料の絞りや伸びの挙動も領域によって異なると考えられる。前報⁽²⁾において理論では σ = 一定になる領域内で鉄鋼材料の青熱脆性が現れると考えられることを示した。銅の場合はいかがであろうか。

図11に絞りと $1/T$ の関係を示す。延性の尺度を絞りとするれば、 $\dot{\epsilon}_p$ が小さいほど延性が減少する、すなわち脆性が強くなることがわかる。図11の結果では絞りが最小となる温度は約 400°C であってこの温度は $\dot{\epsilon}_p$ によってほとんど変化せず、 $\dot{\epsilon}_p$ が大きくなるほど脆性を示す温度範囲がより狭くなるとともに高温側に移動し、ついには脆性が消滅することがわかる。このあたりのいわゆる中間温度脆性の様子は大森らの報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾とほぼ同様であるが、大森らの結果⁽⁵⁾では 600°C になると再び延性が減少する傾向を見せている。

図8 $\bar{D}$ と塑性ひずみの関係

図10 $\sigma_B - \bar{D} \ln \bar{\beta}$ と塑性ひずみの関係

図9 $\bar{H}$ と塑性ひずみの関係

図11 絞りと温度の逆数の関係

図 11 と図 7 (b) を比較すると、温度上昇に伴って絞りが低下し始める温度が領域境界⑨、絞りが 400°C 付近で最小値を示した後再び急激に増大し始める温度が領域境界⑩に対応し、領域⑪では温度上昇に対し絞りが減少傾向を示すとみることができる。しかし詳細にみると両者の境界がよく一致しているとは必ずしも言い難い。この不一致については、図 7 は $\epsilon_p = 6\%$ のいわば変形初期での結果であり、変形の最終結果である絞りにには局部収縮後の挙動が関連するためであろうと著者らは考えている。銅の中間脆性域では、鉄鋼材料に見られる通常とは逆の応力の温度・ひずみ速度依存性 ($1/T$, $\dot{\epsilon}_p \rightarrow$ 大: $\sigma \rightarrow$ 小) のような特異挙動は示さないが、中間温度脆性が複雑な挙動であることは変わりないようである。

一方破断伸びと $1/T$ 関係においても絞りとほぼ同様な傾向が認められた。大森らによれば銅⁽⁴⁾やニッケル⁽⁶⁾の中間温度脆性域のある温度での変形能は、変形速度がある中間速度のときに極大を示している。本報の場合図 12 に示した伸びと $\dot{\epsilon}_p$ の関係では、温度 600°C のとき $\dot{\epsilon}_p$ が $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 付近で極大値となる傾向を示している。図のその条件の実験値は試験機の引張限界を超えたため破断していない。 600°C は中間温度脆性が消滅している温度であり、大森らの報告とは少し異なるようである。

5. 結 言

本報では試料として無酸素銅を用い $25 \sim 600^{\circ}\text{C}$ の温度範囲、 $2.5 \times 10^{-4} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度の範囲について引張試験を行いその結果を著者の一人が提案した構成関係に関する理論に基づき検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 本実験条件の範囲における試料の応力、温度および塑性ひずみ速度の間の構成関係は三つの領域に

図 12 伸びとひずみ速度の関係

分けることによってよく説明される。

(2) 分けられた各領域内では応力、温度の逆数および塑性ひずみ速度の対数がそれぞれ互いに平行な直線関係となり、応力の温度および塑性ひずみ速度依存性は一定である。

(3) 温度上昇に対し絞りが減少傾向を示す領域は(1)で述べた変形機構領域の一つにほぼ対応すると考えられる。

(4) 中間温度脆性が現れる温度範囲はひずみ速度の増大に伴い高温側に移行しかつ狭くなるが、脆性が最大になる温度はほとんど変化しない。

(5) 600°C では $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度において破断伸びが極大を示した。

文 献

- (1) 若杉, 機論, 52-478, A (1986), 1628.
- (2) 若杉, 機論, 52-482, A (1986), 2436.
- (3) 若杉, 機論, 55-515, A (1989), 1566.
- (4) 大森・ほか 2 名, 日本金属学会誌, 32-7 (1968), 686.
- (5) 大森・ほか 2 名, 日本金属学会誌, 34-8 (1970), 791.
- (6) 大森・ほか 2 名, 日本金属学会誌, 47-9 (1983), 775.