

体心立方構造を持つ金属の構成則に関する研究

正会員 近畿大学土木工学科 沖中知雄

1. はじめに

阪神・淡路大震災に代表される直下型地震下での構造物の塑性不安定現象を数値解析する際に、不安定変形を表現しうる構成則を用いることが重要である。このような構成則は、降伏関数を基本とする現象学的モデルと金属を構成する単結晶の挙動に着目した結晶塑性論モデルに大別される。その簡便さのため現象学的モデルが広く用いられているのが、単結晶中の変形の局所化等、結晶塑性論モデルが必要とされることも多い。そこで本研究では、Nemat-Nasserにより提案された、体心立方格子を持つ結晶の塑性構成則を発展させるとともに、これをタンタルに適用しその有用性を検討する。

2. 体心立方構造を持つ単結晶金属の構成則

2. 1. 金属の有限変形

速度型を用い、変形速度テンソル D 及び連続体スピン W を以下のように分解する。

$$D = D^* + D^p, \quad W = W^* + W^p \quad (1)$$

ここで D^* , D^p は弾性及び塑性変形速度テンソルであり、 W^* , W^p は各々非塑性スピン及び塑性スピンである。

金属中の塑性変形は主として転移の滑りにより生じる。単結晶中では、転移の伝播する滑り面と滑り方向は通常限定されており、体心立方結晶中では滑り面は $\{110\}$, $\{112\}$, $\{123\}$ 、滑り方向は $\langle 111 \rangle$ の 48 個の滑りシステムを考えるのが一般的である。そのため、塑性変形速度テンソル D^p はそれらの転移の和として

$$D^p = \sum_{\alpha=1}^{48} \dot{\gamma}^{(\alpha)} p^{(\alpha)} \quad (2)$$

と与えられる。ここで $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ 、 $p^{(\alpha)}$ は α 番目

の滑りシステムにおける滑り速度と滑りシステムである。

2. 2. 構成則

体心立方構造を持つ金属中の塑性変形は主としてらせん転移の移動により生じている。結晶中での転移の移動を妨げる要因は、Peirels 障害と呼ばれ結晶構造に起因する短距離で作用する障害と結晶粒界や他の転移といった比較的遠距離から作用する障害の 2 つに大別され、転移が Peirels 障害を乗り越える頻度は

$$w^{(\alpha)} = w_0^{(\alpha)} \exp\left(-\frac{\Delta G^{(\alpha)}}{kT}\right)$$

で与えられる。ここで、 $\Delta G^{(\alpha)}$, k , T はそれぞれ障害の活性化エネルギー、ボルツマン定数、温度である。

通常、転移がある Peirels 障害を乗り越え次の障害まで進む時間は、Peirels 障害を乗り越えるために要する時間より遙かに短い。従って結晶中の転移の平均移動速度は障害間の平均距離 $d^{(\alpha)}$ を用いて、 $\dot{v}^{(\alpha)} = d^{(\alpha)} w^{(\alpha)}$ で与えられる。これにより、滑り速度は、流動性のある転移の密度 $\rho_m^{(\alpha)}$ を用い $\dot{\gamma}^{(\alpha)} = b^{(\alpha)} \rho_m^{(\alpha)} \dot{v}^{(\alpha)}$ と表せる。ここで $b^{(\alpha)} = d^{(\alpha)}$ を仮定している。

活性化エネルギー ΔG は、Kocks 等により提案されたモデルを用いて

$$\Delta G = G_0 \left\{ 1 - \left(\frac{\tau^*(\alpha)}{\tau^{(\alpha)}} \right)^p \right\}^q$$

で与えられる。ここで、 $\tau^*(\alpha) \equiv \tau^{(\alpha)} - \tau_a^{(\alpha)}$ と定義され、 $\tau^{(\alpha)}$ は α 番目の滑りシステム上の転移に外部から働く力で $\tau^{(\alpha)} = \sigma \cdot p^{(\alpha)}$ で与えられる。また、 $\tau_a^{(\alpha)}$ 遠距離の障害から転移に作用する力である。

以上の検討により、 α 番目の滑りシステ

キーワード：結晶塑性論、単結晶、体心立方格子

〒577 東大阪市小若江 3-4-1 TEL 06-721-2332

ムの滑り速度は、

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_r^{(\alpha)} \exp \left[-\frac{G_0^{(\alpha)}}{kT} \right] \times \left\{ 1 - \left(\frac{\tau^{(\alpha)} - \tau_a^{(\alpha)}}{\hat{\tau}^{(\alpha)}} \right)^p \right\}^q \quad (3)$$

とかける。ここで

$$\dot{\gamma}_r^{(\alpha)} = b^{(\alpha)} d^{(\alpha)} \rho_m^{(\alpha)} w_0$$

がもちいられている。

また本研究では、弾性構成式として一般的な

$$\overset{\nabla}{\sigma} = C : \overset{\nabla}{D} = C : (D - D^p) \quad (4)$$

を用いる。ここで、 $\overset{\nabla}{\sigma}$ と C は各々 Cauchy 応力の Jaumann Rate と弾性係数テンソルである。

式(2)、(3)、(4)をもちいて(1)を解くことにより、体心立方単結晶中の応力-歪み関係を得ることができる。

3. タンタル多結晶への適用

前節で導かれた構成則を用い、タンタルの高歪み速度下での等価応力-等価歪み関係の計算を行った。計算に使用した载荷条件は、

$$L = \begin{pmatrix} 5000 & 0 & 0 \\ 0 & -2500 & 0 \\ 0 & 0 & -2500 \end{pmatrix} (s^{-1})$$

である。計算では Taylor モデルを用い、初期の方向が一様に分布した 125 個の結晶が一様に変形すると仮定し多結晶中の応力を計算した。計算に使用した定数は、 $k/G_0^{(\alpha)} = 8.62 \times 10^{-5}$ 、 $\dot{\gamma}_r^{(\alpha)} = 5.46 \times 10^8$ 、 $p = 2/3$ 、 $q = 2$ 、であり、初期温度 300, 400, 500, 600, 800, 1000 の 6 つのケースについて計算を行った。

計算結果を図 1 に示す。図中の実線は、Nemat-Nasser and Isaacs により報告された実験の結果である。計算値と実験値は非常によい一致を示しており、提案された構成則が実際の結晶の高歪み速度下での挙動をよく反映していると言える。

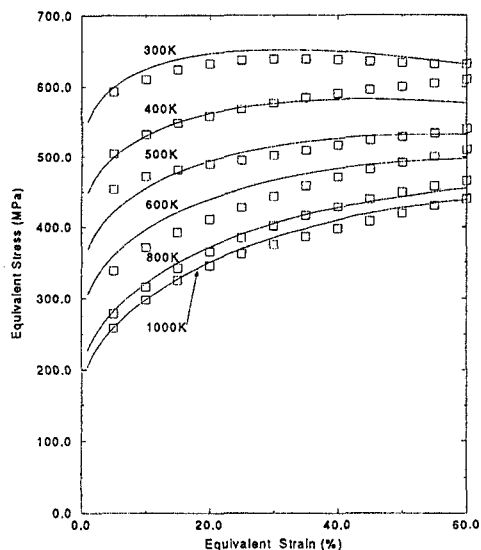


図 1 タンタル多結晶の等価応力-等価歪み関係

参考文献

- 1) Kocks, U.F., Argon, A.S., and Ashby, M.F. (1975) "Thermodynamics and Kinematics of Slip", In Process in Material Science, volume 19, Peramon, Oxford
- 2) Nemat-Nasser, S. (1996) "Plasticity: Inelastic Flow of Heterogeneous Solids at Finite Strains and Rotations", In Proceedings of the ICTAM Kyoto, 25-31, Elsevier Science B.V.
- 3) Nemat-Nasser, S. and Isaacs, J. (1997) "Direct Measurement of Isothermal Flow Stress of Materials at Elevated Temperatures and High Strain Rates with Application to Ta and Ta-W Alloys", Acta Metall. To appear in 1997
- 4) Nemat-Nasser, S. and Okinaka, T. (1996) "A New Computational Approach to Crystal Plasticity: Fcc Single Crystal" Mech. Mater., vol. 24, 43-57
- 5) Ono, K. (1968) "Temperature Dependence of Dislocation Barrier Hardening", J. Appl. Phys., Vol. 39, 1803-1806