

# 結晶塑性FEMによるMg合金の変形・強度発現機構の解明

東北大学工学部 学生員 石田 智広  
 東北大学大学院 学生員 渋谷 慎兵  
 東北大学大学院 正 員 京谷 孝史  
 東北大学大学院 正 員 寺田 賢二郎  
 東北大学大学院 正 員 加藤 準治

## 1. はじめに

近年、軽量性と資源の豊富さから鉄に替わる構造用材料としてマグネシウム合金が着目されており、その物性に関して様々な研究が行われている。マグネシウムにおける微視的変形機構は、底面、柱面、錘面(図-1)の転位すべりと双晶変形である。結晶構造に起因する最密面は底面であることから、室温に近い温度で底面すべりの臨界分解せん断応力(CRSS)が他のすべり系と比べ極めて低い。そのため底面に平行な方向には容易に結晶すべりが生じるが、非底面の方向には変形しにくいという異方性を持ち、加工性が悪い。そのため、底面以外のすべり系を活動させることで変形異方性・成形性の改善、ひいては強度の向上を意図して、他元素を添加して底面のCRSSを増加させるなどの工夫がなされているが、そのメカニズムに関する議論は少ない。そこで本研究では、結晶塑性有限要素法<sup>1)2)3)</sup>を用いて、結晶スケールでのすべりの進行過程と分解せん断応力の時間発展の関係を解明するとともに、添加元素による初期底面すべり強度の増加がマグネシウム合金の微視的及び巨視的変形・強度特性に及ぼす影響について解明を試みる。

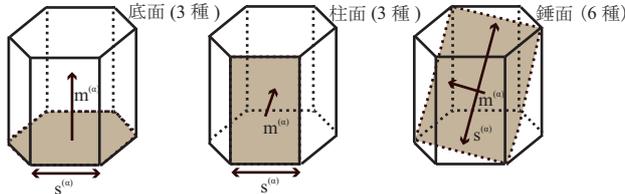


図-1 マグネシウムのすべり系

## 2. 六方晶金属の解析モデル

### 2.1 結晶塑性モデル

金属の塑性変形に際する変形抵抗は、ひずみ硬化(加工硬化)で特徴づけることができる。本研究ではAsaroらが用いた以下の指数関数形を採用する。

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\alpha} \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^{n^v} \text{sign} \left( \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right) \quad (1)$$

$$h_{\alpha\alpha} = h_0 \sec h^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right|, \quad h_{\alpha\beta} = q_{\alpha\beta} h_{\alpha\alpha} \quad (\alpha \neq \beta) \quad (2)$$

ここで、 $\tau^\alpha$  はすべり系  $\alpha$  の分解せん断応力、 $g^\alpha$  はすべり抵抗であり、その発展則は次式で与えられる。

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta} h_{\alpha\beta} \left| \dot{\gamma}^{(\beta)} \right| \quad (3)$$

ここで、 $\dot{\alpha}$  は初期すべり速度、 $n^v$  は速度感応指数でいずれも材料パラメータである。硬化関数の式(2)に含まれる初

期硬化係数  $h_0$ 、初期すべり抵抗  $\tau_0$ 、Stage 1 応力  $\tau_s$ 、潜在硬化比  $q_{\alpha\beta}$  は各すべり系に対応するパラメータであり、 $h_{\alpha\beta}$  は  $\alpha = \beta$  の際、自己硬化係数、 $\alpha \neq \beta$  の際は潜在硬化係数であり、すべり速度  $\dot{\gamma}$  に対応する式(3)に示されるすべり強度増分率を決定する。

### 2.2 硬化特性

本研究では、この加工硬化を自己硬化と潜在硬化の2つに分け、変形に対する抵抗としている。自己硬化とは、各すべり系の自己すべり変形量に応じて、すべり抵抗(強度)が高まる特性であり、潜在硬化とは、 $\alpha \neq \beta$  の際、他のすべり系の変形の影響ですべり抵抗が高まる特性である。この硬化特性の役割を理解するために、式(2)~(3)を時間微分して得られる自己硬化と潜在硬化の特徴を整理しておく。まず、潜在硬化がないと仮定したとき、蓄積すべり量の増加に伴うすべり抵抗の時間発展の様子を図-2(a)に示す。この図より採用したパラメータでは、底面はすべり量にかかわらず一定の傾きですべり抵抗が増加するが、蓄積すべり量  $\gamma = 0.06$  前後から柱面はすべり抵抗が増加せず、0.1 前後で錘面も同様にすべり抵抗の増加が止まることがわかる。この現象は、ミクロスケールでのすべり変形に対する抵抗の消失を意味する。

次に、柱面すべりを例にとり、自己硬化に対する相対的な潜在硬化の割合を考慮したすべり抵抗の時間発展を図-2(b)に示す。このように、潜在硬化が相対的に多いほど降伏強度が低くなる現象は、潜在硬化が自己硬化関数と潜在硬化比の積で表されるためである。加えて、柱面の変形抵抗の消失は全蓄積すべり量  $\gamma$  が 0.06 程度で生じるため、本研究における硬化パラメータの設定では、柱面すべりの自己硬化に対する底面すべりの潜在硬化の割合が多い結晶粒ほど柱面のすべり抵抗は小さくなる。

なお、本研究に用いた潜在硬化のパラメータは、マグネシウムの単結晶を用いたチャンネルダイ圧縮試験とのフィッティングシミュレーションの結果であり、1968年にKelly and Hosfordにより発表されたものである。

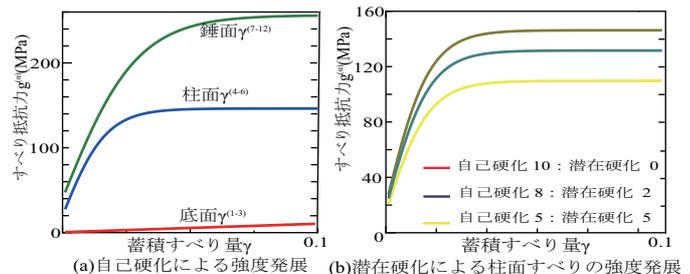


図-2 各すべり系の硬化特性

キーワード：結晶塑性有限要素法，六方晶金属，変形抵抗

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, TEL 022-795-7425, FAX 022-795-7423

### 3. マグネシウム合金の数値解析例

#### 3.1 解析モデルと条件

IPF で撮られた画像データと、これを元に生成した、本研究で用いる有限要素モデルを図-3 に示す。また、変形の起こりやすさを見る指標として、各結晶粒の結晶方位の差による、分解せん断応力の大きさを定める値であるシュミット因子を図-4 に示す。このシュミット因子が高いほど、すべり系にかかる分解せん断応力が大きくなり、変形が生じやすい。このモデルに対して図-3 に示すような一軸引張により変位を与え、結晶塑性有限要素法を用いてマクロひずみが 10%になるまで負荷する解析を行う。具体的には、初期底面 CRSS を 0.5-10 MPa まで変化させる解析をそれぞれケース 1、ケース 2 とし、CRSS の増加が微視的および巨視的変形・強度特性に及ぼす影響について調査する。

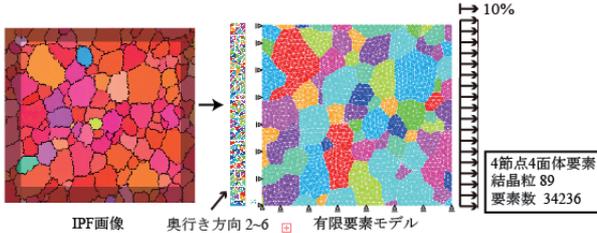


図-3 IPF 画像と有限要素モデル

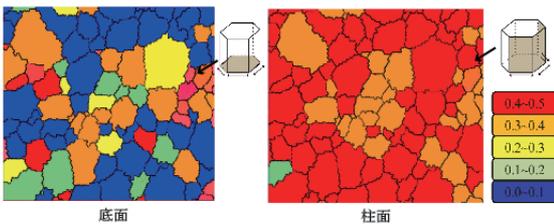


図-4 底面と柱面のシュミット因子

#### 3.2 解析結果

ケース 1 とケース 2 の全蓄積すべり量である、相当塑性ひずみのマクロひずみ 10%時におけるコンター図を図-5 に示す。この図から、初期底面 CRSS が高くなるほど、すべりが起こる結晶粒と起こらない結晶粒がはっきり分かれ、変形が局所化する傾向が見られる。このときの両ケースで見られる斜め約 45° に変形が進行する傾向は、実際の微細粒組織に対する実験でも観察されており、局所的な破壊原因となるせん断帯形成の特徴をとらえていると言える。

また、この時の底面すべりと柱面すべりのコンター図を図-6 に示し、それらを全蓄積すべり量で除した相対的なすべり系の活動の時間発展の様子を図-7 に示す。図-6 中の底面すべりは図-4 にある底面のシュミット因子が高い結晶粒とすべり変形が生じる結晶粒が一致しているが、柱面すべりはシュミット因子とすべり変形との相関がみられず、底面すべりが生じた結晶粒に集中して柱面のすべり変形が生じている。これは、底面すべりの生じた結晶粒では、柱面すべり系が潜在硬化の影響を強く受け、すべり抵抗力が低いまま降伏すること、そして柱面すべり系のシュミット因子は結晶粒間で差異がないため(図-4)、すべり抵抗力が低い結晶粒が選択的に変形することが原因として考えられる。せん断帯の発生原因として、結晶方位によるシュ

ミット因子の差異があまりない柱面がより活動することにより(図-7)、マクロ的な変形挙動として最も効率的な方向に結晶すべりが生じ、せん断帯を形成すると考えられる。

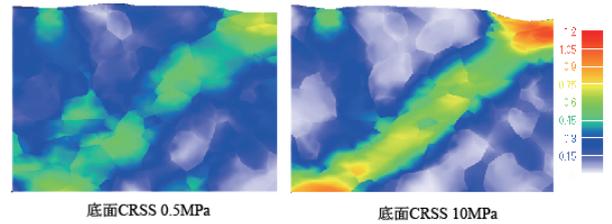


図-5 相当塑性ひずみ(全すべり量  $\gamma$ )

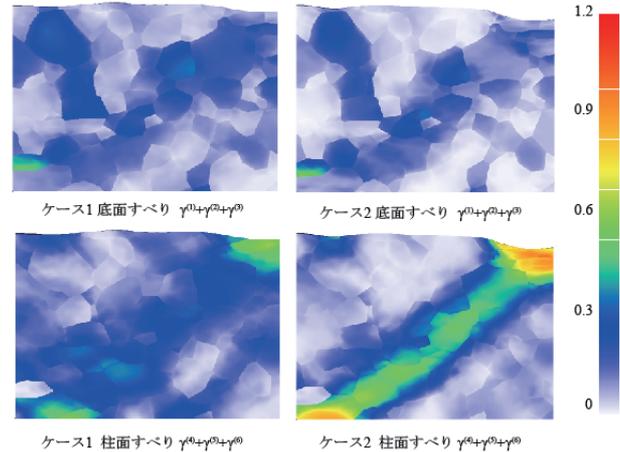


図-6 各すべり系のすべり量

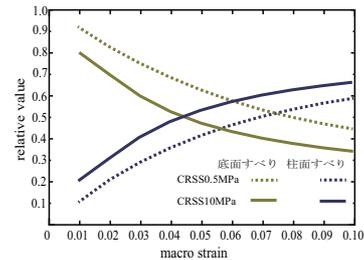


図-7 相対すべり量

### 4. 結論

本研究では、マグネシウム合金の多結晶モデルに対して結晶塑性 FEM 解析を行うことで、初期底面強度の増加が柱面すべり変形を促進させることを明らかにし、柱面すべりによる変形の局所化とそれに伴うせん断帯形成のメカニズムを解明することができた。

### 5. 謝辞

本研究成果(の一部)は、トヨタ自動車の先端技術共同研究プログラムの一環として行ったものです。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Bishop J., Hill R.: A theory of the plastic distortion of a polycrystalline aggregate under combined stresses, *Phil. Mag.*, Vol.42, pp.414-427, 1951.
- 2) Asaro R.J.: Crystal Plasticity, *J.Appl. Mech.*, Vol.50, pp.921-934, 1983
- 3) Peirce D., Asaro R.J., Needleman A.: An analysis of nonuniform and localized deformation in ductile single crystals, *Acta. metall.*, Vol.30, pp1087-1119, 1982.