

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。本研究では、結晶塑性有限要素法を用いて、結晶粒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Mg合金の微視的変形・強度特性に及ぼす影響について解明を試みる。

2. 六方晶金属の解析モデル

2.1 多結晶モデル

六方晶であるマグネシウムのすべり系は12種類(図-1)あり、4種のミラー指数で表記される。本来、結晶粒はランダムな方位を持つが、本研究で解析するモデルは圧延により{0001}面に優先方位を持っており、底面に作用する分解せん断応力が低くなり、結果として底面すべりが抑制されている。EBSDで撮られた画像データを元に、有限要素モデル(図2)を生成し、安定的に応力積分を行うことができる古典的結晶塑性モデル(Peirce, Asaro and Needleman, 1987)を用いて、初期底面すべり強度を、0.5, 1, 10(MPa)と上げていくケーススタディにより、活動するすべり系の変化、変形の進行に伴う分解せん断応力、すべり強度の変遷を調査する。

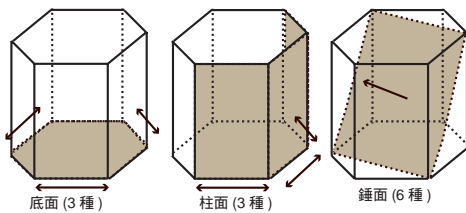


図-1 すべり系

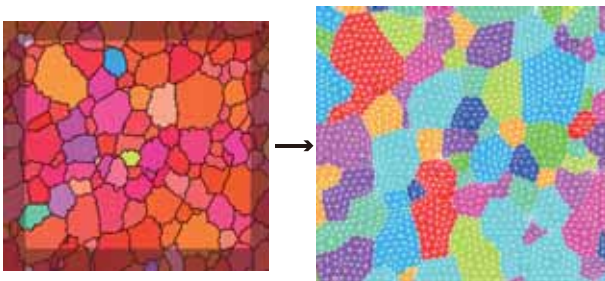


図-2 多結晶構造の計測データと有限要素

2.2 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。 τ を分解せん断応力とすると、各すべり系 α のすべり量 γ とすべり強度 g の発展則は次式で与えられる。

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

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

$$h_{\alpha\beta} = h_0 \sec h^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right| q_{\alpha\beta} \quad (\alpha \neq \beta) \quad (3)$$

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta} h_{\alpha\beta} \left| \dot{\gamma}^{(\beta)} \right| \quad (4)$$

式(1)は、Asaroが用いたすべり速度の指数関数形の近似式であり、 \dot{a} は初期すべり速度、 n^v は速度感応指数であり、添え字の α は各すべり系に対応している。硬化関数の式(2)、(3)に含まれる初期硬化係数 h_0 、初期すべり抵抗力 τ_0 、Stage 1 応力 τ_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、 $\alpha = \beta$ の時、 $h_{\alpha\beta}$ は自己硬化係数、 $\alpha \neq \beta$ の時は潜在硬化係数であり、すべり速度 $\dot{\gamma}$ に対応する式(4)に示されるすべり強度増分率を決定する。

3. 数値解析例

初期すべり強度0.5MPaをケース1、10MPaをケース2として、生成した有限要素モデルを一軸引張により、マクロひずみが10%になるまで負荷する解析を行った。解析結果として、マクロひずみを横軸にとり、底面すべり($\gamma^{(1-3)}$)、柱面すべり($\gamma^{(4-6)}$)、錘面すべり($\gamma^{(7-12)}$)をそれぞれ全すべり量($\gamma^{(1-12)}$)で割った相対的なすべり系の活動を表すグラフを図-3に示す。この結果からケース1、ケース2ともに変形初期では底面すべりが卓越するが、変形が進行するにつれ柱面すべりによる変形量が大きくなるのがわかる。この変化の要因として、図-4より示される柱面強度の変形抵抗がケース1、ケース2ともに初期段階では高く、変形が進行するとほぼ0になるためである。加えて、底面の初期すべり強度が大きいケース2において柱面の相対的なすべり速度が増加することがわかる。これは図-4、図-5より、分解せん断応力と、すべり強度の比 $\tau^{(\alpha)}/g^{(\alpha)}$ がケース1に比べて大きいいため、式(1)よりすべり速度が増加することが考えられる。さらに図-4においてケース1、

ケース 2 間で柱面の強度が高まる要因として、式 (2)、式 (3) より、活動するすべり系の変化により、強度発現機構が潜在硬化から自己硬化に移行したことが考えられる。

硬化関数の式 (2)(3) において、本研究で用いた各パラメータは、各結晶粒の蓄積すべり量 γ が 0.1 程度になると、柱面の硬化関数 $h_{\alpha\beta}$ が 0 に近くなり、柱面強度が増加しなくなる。これは前述した変形に対する抵抗の消失であり、ミクロスケールで変形が起こりやすくなることを意味する。底面の初期すべり強度を増加させたことにより、変形初期段階から底面すべり、柱面すべり双方が活動するが、蓄積すべり量 γ のうち底面すべりが卓越し、自己硬化に対する潜在硬化の割合が大きい結晶粒は、柱面すべりに対する強度が相対的に低いために (図 - 6: 底面強度 10MPa, 柱面すべり強度)、局所的に柱面すべりが卓越し、柱面を降伏させ、局所化をさらに促進させることが結果として得られた。変形最終段階の底面すべり、柱面すべり、全すべり量のコンター図を図-7, 図-8, 図-9 に示す。これにより、初期底面すべり強度の増加により変化する、変形量の関係が示される。

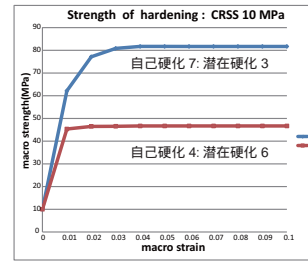


図- 6 潜在硬化, 自己硬化

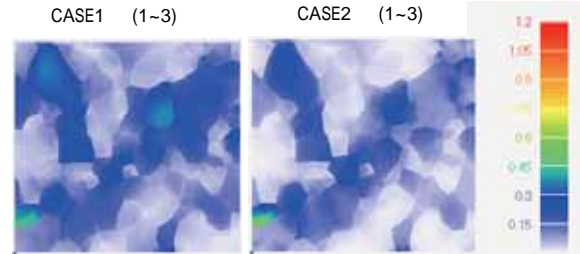


図- 7 変形図: 底面すべり

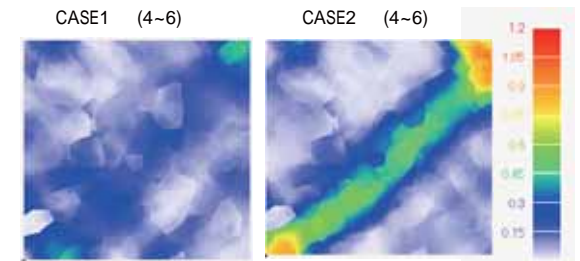


図- 8 変形図: 柱面すべり

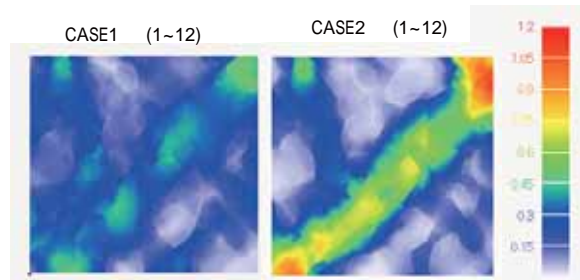


図- 9 変形図: 全すべり量

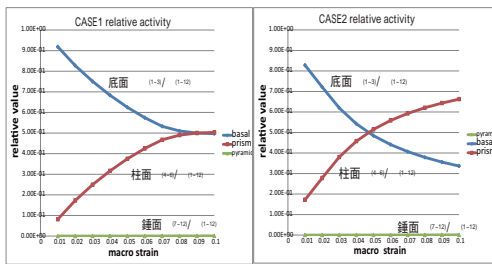


図- 3 相対すべり量

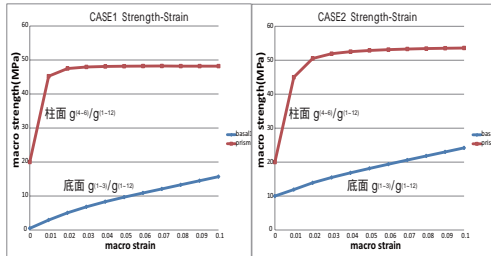


図- 4 強度 ひずみ曲線

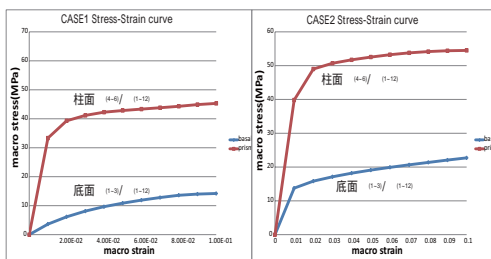


図- 5 応力 ひずみ曲線

4. 結論

本研究で用いた各パラメータでは、底面の初期すべり強度の大小により、変形を局所化させる要因が変化するという結果が得られた。今後の課題として、底面初期すべり強度の大小がマクロな材料としての影響にどのような影響を及ぼすのかを調査していく。

参考文献

- 1) 渋谷陽二: 塑性の物理. 森北出版 2011
- 2) 森永正彦, 古原忠, 戸田裕之: 金属材料の加工と組織. 共立出版, 2010
- 3) 京谷孝史: よくわかる連続体力学ノート. 非線形 CAE 協会, 2008
- 4) 社団法人土木学会: 計算力学の常識. 応用力学委員会計算力学小委員会, 2008
- 5) 寺田賢二郎, 櫻山和男, 竹内則夫: 計算力学 有限要素法の基礎. 森北出版, 2008