

(論文)

# Al-Mg-Si合金板材に生じるリジング挙動の結晶塑性解析

## Crystal Plasticity Analysis of Ridging in Al-Mg-Si Series Sheet Alloy



小西晴之\*<sup>1</sup>(工博)  
Dr. Haruyuki KONISHI



高木康夫\*<sup>1</sup>  
Yasuo TAKAKI



松本克史\*<sup>2</sup>(工博)  
Dr. Katsushi MATSUMOTO



有賀康博\*<sup>2</sup>(工博)  
Dr. Yasuhiro ARUGA

In order to clarify the mechanism of ridging, a crystal plasticity analysis was performed on Al-Mg-Si series alloys, using a finite element program that incorporates rate-dependent crystal plasticity. An SEM/EBSD was used to measure crystallographic orientation distribution on an alloy sheet that showed heavy ridging. The measured orientation distribution was used to predict the surface deformation of the alloy after stretching. The analysis predicts that the sheets will curve significantly out-of-plane after stretching, and the curvatures are considered to characterize the ridging behaviors of the alloys. In the cross section of the alloy, which shows severe ridging, a large area of inhomogeneously distributed Cube and Goss grains was observed. This inhomogeneous distribution is considered to have caused a non-symmetric deformation, making the sheet curve out-of-plane after stretching. As a result, such a distribution of Cube grains and Goss grains is believed to be one factor in the ridging.

まえがき＝環境問題への対応から、自動車の燃費改善、CO<sub>2</sub>排出量削減が急務となっている昨今、その解決策の一つとしてアルミ材を活用した車体軽量化が広く行われている。なかでも6000系Al-Mg-Si合金板材は、優れた成形性と塗装焼付け処理後の高い強度を有し、フードやトランクといった外板部品の軽量化に大きく貢献している。

自動車パネル用の6000系の板材において、成形加工後のパネル表面にリジングマーク（あるいはローピング）と呼ばれる模様が生じる場合があり、アウトパネルの外観品質向上の点から改善が望まれている。これまでの研究から、リジングマークはCube方位などの結晶粒の群が圧延方向に沿って並ぶ組織に起因し、ストレッチ後に圧延方向に平行な凹凸模様として現れることがわかっている。また、Cube方位粒やGoss方位粒などの配置とリジングマークに相関があることが報告されているが<sup>1)~6)</sup>、具体的な変形機構は明確でなかった。

ここでは6000系板材の集合組織や引張変形時のリジングマーク発生を詳細に調べるとともに、それらの集合組織情報に基づき、結晶塑性理論を用いた変形解析を行い、リジングが生じる過程の予測を試みた。それら結果より、どのような集合組織がリジング発生の原因になるのかについて推定した<sup>7)</sup>。

### 1. リジング特性の評価試験

#### 1.1 試験方法

AA6111相当の組成を有する熱間圧延板をリジング特性評価試験に供した。表1に示すように2種類の条件で焼鈍処理を行った後、冷間圧延によって板厚1mmとした。さらに、溶体化焼入れを行ってT4調質の供試材A、Bを得た。これらの供試材を対象に、SEM/EBSD法によ

表1 供試材の加工熱処理条件  
Table 1 Conditions of heat treatment and rolling

Sample	Intermediate annealing	Cold rolling	Solution treatment
A	500°C×10s (salt bath)	t : 1.0mm	550°C×1min (batch type furnace) →Water quench
B	350°C×3h (batch type furnace)		

って圧延方向垂直断面の結晶方位分布を測定した。測定には走査型顕微鏡内に設置したEBSDシステム(株)TSLソリューションズ製OIM (Orientation Imaging Microscopy))を用いた。

つぎに、これら2種の供試材のリジング変形の測定を行った。供試材から幅40mmの短冊形試験片を切出し、圧延直角方向に15%のストレッチ変形を与えた後、表面外観を観察した。さらにリジング変形を定量的に評価するため、引張試験後の試験片表面を触針式輪郭測定機(ミットヨ製CDH-400)で測定した。

#### 1.2 試験結果

供試材A、Bの圧延方向垂直断面における結晶方位分布の測定結果を図1に示す。代表的な理想方位を有する結晶粒の面積率も併せて図1に示した。なお、各理想方位の定義は図中に示すものとし、面積率は理想方位から15°以内に含まれる結晶粒を選んで計算した。

A材は特定の方位への集積が比較的少なく、ランダムに近い方位成分であった。結晶粒は等軸粒に近く、平均粒径は32μmであった。これに対してB材では、CubeやND-Cube、Goss、Sなどの面積率が高かった。結晶組織は圧延直角方向に伸びた伸長粒であり、表面近くにはCube方位の領域が比較的多く分布し、またGoss方位の領域も断面内に偏在していた。

これら2種の材料を圧延直角方向にストレッチした後

\*<sup>1</sup>アルミ・銅事業部門 技術部 \*<sup>2</sup>技術開発本部 材料研究所

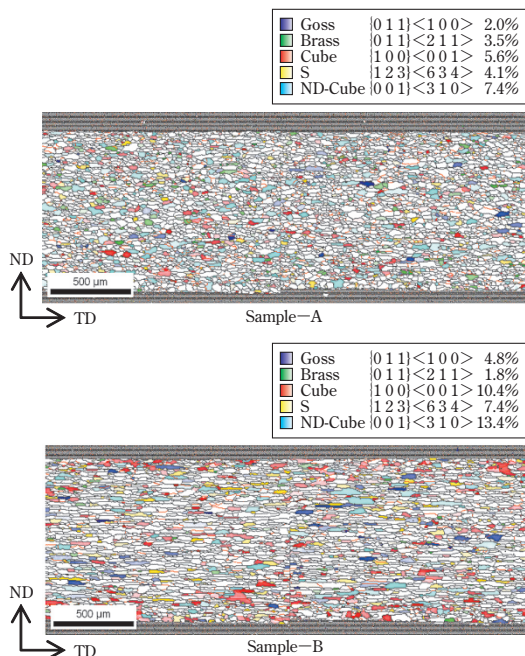


図1 供試材の集合組織測定結果  
Fig. 1 SEM/EBSD maps of tested samples

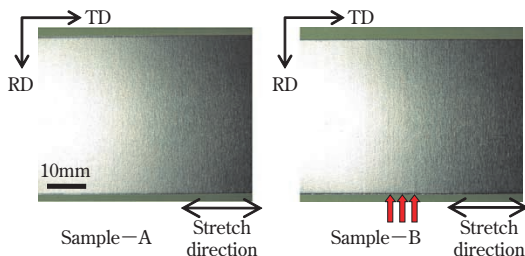


図2 ストレッチ試験後の供試材表面の外観(LT方向15%ストレッチ)  
Fig. 2 Surface appearance after 15% stretch

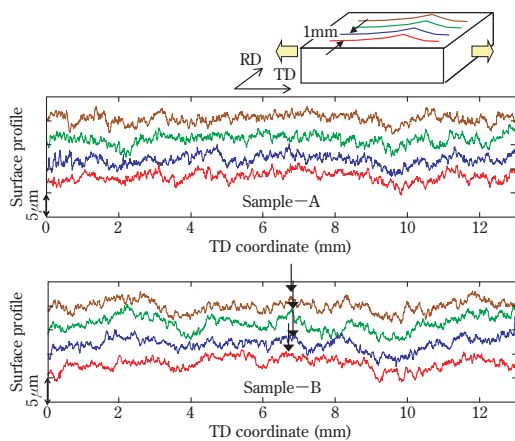


図3 15%ストレッチ後の表面形状の測定結果(各線測定は上下にオフセットして表示)  
Fig. 3 Surface profile of each sample after 15% stretch (Base lines for each profile were shifted upward by 5 μm)

の表面外観を図2に示す。B材の場合には圧延方向に平行に筋状の模様を呈するリジグマークが現れた。これに対してA材では、顕著なリジグマークは現れず良好な表面外観を維持していた。図3に触針式輪郭測定機によるストレッチ後の表面形状の測定結果を示す。ここでは、圧延直角方向への線測定を1mm間隔で4ライン行ったが、B材では周期1.5~2.5mm程度、振幅5μmの凹凸波形が見られるとともに、隣接するライン間でも類似す

る形状が見られた。なお表面の凹凸波形を周波数分析したところ、上記周期の成分の存在が確認された。これらのことから、圧延方向に連続した凹凸模様がリジグマークとして認識されると考えた。A材でも同様の傾向は見られたが、B材より軽微で規則的な表面模様は明瞭には現れなかった。

## 2. リジグ変形挙動の結晶塑性解析

### 2.1 解析方法

ひずみ速度依存型の結晶塑性理論<sup>8)</sup>に基づき、前記材料のストレッチ変形の有限要素解析を行った。以下に結晶塑性理論の定式化について述べる。

結晶のすべり面に生じる結晶学的なすべり変形を考える。流れ則として、すべり系 $\alpha$ のすべり速度 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ と分解せん断応力 $\tau^{(\alpha)}$ の間に次のような粘性形の関係式を仮定する。

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{a} \left( \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right) \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^{1/m-1} \dots \dots \dots (1)$$

ここで $\dot{a}$ はひずみ速度の基準量、 $m$ はひずみ速度感受性指数、 $g^{(\alpha)}$ は $\alpha$ すべり系の降伏応力相当量である。上式のすべり速度より塑性ひずみ速度を求め、応力速度とひずみ速度の関係式に代入することで速度型の構成式が得られる。

加工硬化特性はすべり系について規定し、硬化係数 $h_{\alpha\beta}$ を用い、すべり系 $\alpha$ と $\beta$ 間の相互作用を考えた次のような形を用いた。

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta=1}^n h_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{(\beta)}| \dots \dots \dots (2)$$

ただし $n$ はすべり系の総数である。ここでは、各すべり系のすべり量の総和に応じて等しく加工硬化する等方硬化を仮定し、硬化特性の具体形として次式を用いた。

$$h_{\alpha\beta} = H(\gamma) = \frac{d\tau(\gamma)}{d\gamma} \dots \dots \dots (3)$$

$$\gamma = \sum_{\alpha=1}^n |\gamma^{(\alpha)}| \dots \dots \dots (4)$$

$$\tau(\gamma) = \tau_0 + (\tau_s - \tau_0) \tanh\left(\frac{H_0\gamma}{\tau_s - \tau_0}\right) \dots \dots \dots (5)$$

$\tau_0$ ,  $\tau_s$ ,  $H_0$ は硬化特性を表す特性値である。以上のような構成式を増分型の有限要素解析プログラム<sup>9)</sup>に組込んで変形解析を行った。

すべり系としてはfcc結晶の12すべりを考えた。材料特性値としてアルミ相当の弾性係数を用いたほか、(5)式中の諸量に $\tau_0=47.5$ (MPa),  $\tau_s=107.8$ (MPa),  $H_0=168.8$ (MPa)の値を用い、A材の特性を模擬した。

実際の解析モデル作成においては、図1の結晶方位の測定結果から $3,000 \times 1,000 \mu\text{m}$ の矩形部分を選んで解析領域とし、その間の結晶方位を $170 \times 70$ 分割の有限要素に割振り、多結晶モデルとした。この領域を平面ひずみ条件下で圧延直角方向に引張変形する場合を解析した。

### 2.2 解析結果

A, B両材の矩形領域を5%ストレッチした後の変形図を図4(a), (b)に示す。なおこれらの図では、各断

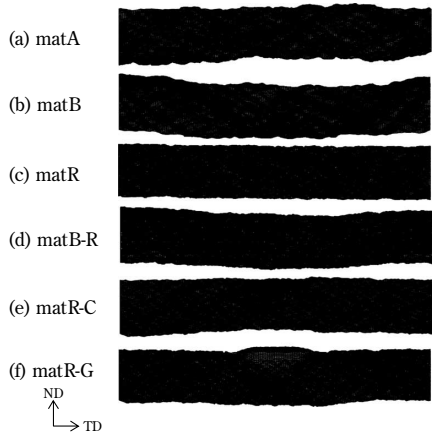


図4 5%ストレッチ後の変形図(板厚方向の変位を10倍に拡大して表示)

Fig. 4 Deformed section shape predicted by crystal plasticity analysis of each material (After 5% stretch, out of plane displacement was enlarged 10 times)

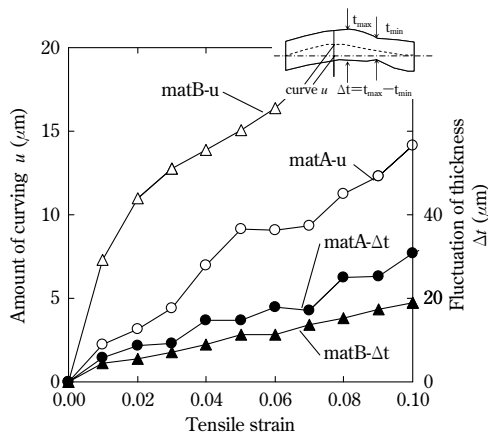


図5 解析結果: 湾曲量, 板厚偏差量とひずみ量の関係

Fig. 5 Relationship between curving, fluctuation of thickness and tensile strain

面変形の特徴を見るために面外方向の変形のみを10倍に拡大し, 断面を黒塗りの領域として表示している。両材とも, ストレッチ後には表面凹凸や板厚の偏差, 湾曲などが見られたが, B材が弓形に湾曲する変形がより顕著であった。図5に, 両材の板厚中心軸の湾曲量, 板厚偏差量およびストレッチ量の関係を示す。なお板厚偏差量は最大板厚と最小板厚の差として定義した。板厚偏差量はA材がB材をやや上回っており, 上記リジニングマークの良否との相関は小さいと考えられた。一方で湾曲量は, A材に比較してB材が顕著に大きな値を示した。これらより, 前述した両材のリジニング挙動の差は, 圧延直角方向へのストレッチ時に生じる湾曲変形挙動が主原因と推測した。

### 2.3 湾曲変形の原因を探る変形解析結果

上記解析結果より, 供試材A, Bのリジニング挙動の違いは湾曲変形の程度によるとの推測を行った。そこでさらに, このような湾曲変形が具体的にどのようなメカニズムによるのかを調べるため, 表2に示す仮想的な条件で解析を行った。

ここで, matRはEuler空間内 ( $\phi_1, \Phi, \phi_2$ ) 内でODFが一樣となるように各方位粒  $i$  の体積分率  $V^{(i)}/V$  を次式で求め<sup>10)</sup>, かつ領域内にランダムに配した仮想的なランダム方位組織である。

$$\frac{V^{(i)}}{V} = \int_{\phi_1}^{\phi_1+d\phi_1} \int_{\Phi}^{\Phi+d\Phi} \int_{\phi_2}^{\phi_2+d\phi_2} \frac{\sin\Phi}{8\pi^2} d\phi_1 d\Phi d\phi_2 \dots \dots \dots (6)$$

一方, matR-CおよびmatR-Gは, このランダム組織中の中心軸からずれた位置にそれぞれCube, Gossの矩形領域を配した組織である。またmatB-Rは, 材料Bと各方位成分の面積率は同一で結晶の並びのみをランダム化した組織である。

各場合の5%ストレッチ後の変形図を図4(c)~(f)に, また板厚中心軸の形状を図6に示す。ランダム組織のmat-Rでは湾曲や顕著な板厚の偏差がほとんど見られず, 領域内で均一な変形が生じた。結晶粒の配置のみをランダム化したmatB-Rでは, matBに比べて湾曲変形が減少したうえに板厚偏差も低減したが, 下に凸な湾曲傾向は依然見られた。一方, ランダム方位中にCube方位を配したmatR-Cでは上に凸な湾曲が, またGoss方位を配したmatR-Gでは下に凸な湾曲が起こる傾向が見られた。また図4(e), (f)より, matR-CのCubeを配した部分は板厚が薄く, matR-GのGossを配した部分は板厚が厚くなる傾向が見られた。

そこで, 種々の代表的な結晶方位の単結晶を対象に, 平面ひずみ下で圧延直角方向に引張変形させた場合の応力-ひずみ関係を結晶塑性解析で求めた(図7)。塑性流動応力は, 他の方位に比べてCube方位が低いこと, およびGoss方位が高いことなどがわかる。

ここで, B材で見られた湾曲変形が生じるメカニズムについて考察する。図4(e), (f)に見られるように, 断面内にCubeやGossの粒の群が偏在すると湾曲が生じた。この原因として, 図7に見られるように平面ひずみ下の引張変形に対し, Cube方位の粒は周辺より降伏応力が低く, Goss方位の粒は降伏応力が高いため, 断面内での引張応力の分布のバランスがずれることが考えられた。この場合の湾曲変形のメカニズムを模式的に図8に示す。

表2 解析条件の一覧

Table 2 Conditions of deformation analysis

CASE	Crystal orientation
matA	Sample-A
matB	Sample-B
matR	Ideal random orientation material
matB-R	Arrangement of grains of mat-B was randomized
matR-C	Cube area is added into matR
matR-G	Goss area is added into matR

Area of Cube or Goss

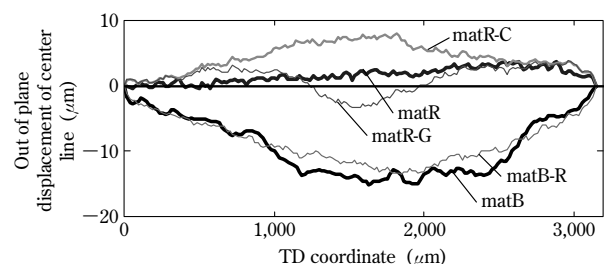


図6 5%ストレッチ後の板厚中心軸の形状

Fig. 6 Predicted out of plane displacement of center line of the area

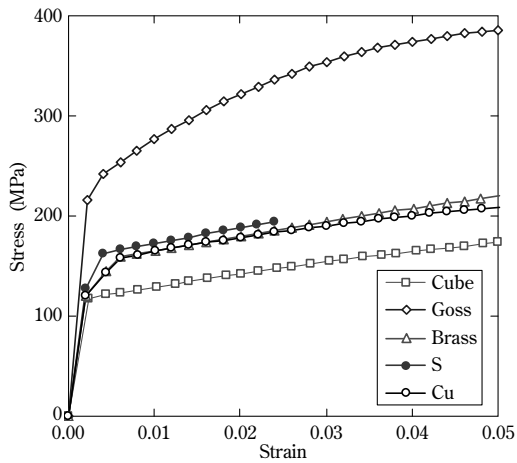


図7 種々の方位の単結晶のTD方向平面ひずみ引張時の応力-ひずみ曲線

Fig. 7 Stress-strain relation of single crystal of various crystal orientation in transverse direction stretching

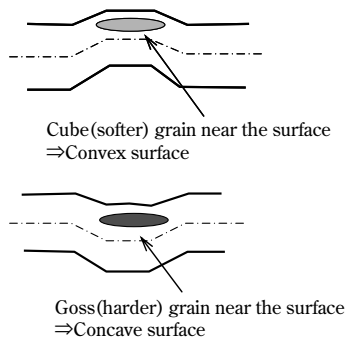


図8 断面内にCube, Goss方位粒の群がある場合の変形挙動の模式図  
Fig. 8 Schematics of material deformation including Cube or Goss regions

B材の湾曲変形がA材に比べて顕著となった要因に関しても、B材では断面内にCube粒やGoss粒が偏在していたことが一因として考えられた。なお、B材の結晶粒の配置をランダム化した場合にも湾曲が残るとの解析結果となった。同材に含まれる結晶方位分布自体にも非対称変形を生じさせる原因があると考えられたが、これは今後の課題としたい。

むすび=6000系板材のリジングマークがどのように生じるかを探るため、種々の供試材を対象にリジング変形特性の調査や集合組織測定を行うとともに、結晶塑性理論による変形解析を行った。その結果、リジングマークは圧延直角方向へのストレッチ時に生じる板の湾曲変形によって特徴づけられると考えられた。またこのような湾曲変形が生じたのは、断面内に存在するGossやCubeなどの粒の偏在により断面内の応力分布が不均一になることが一因と推定した。しかしながら、変形機構のメカニズムにはなお未解明な部分があると思われ、引き続き課題としたい。

6000系板材を自動車パネルに適用するにあたっては、プレス成形後の外観は、強度や成形性などと同様にきわめて重要な品質項目となる。その意味において当社は、素材メーカーとしての立場からも素材特性の改善に努め、外観に優れた高品質の自動車車体の実現に貢献したいと考えている。

最後に、結晶塑性解析について多大なご指導をいただいた大阪大学北川浩名誉教授および中谷彰宏教授に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) A. J. Beaudoin et al. Metall. Mater. Trans. A. 29A, 1998, p.2323-2332.
- 2) H. Jin et al. Material Science and Technology, 2005, 21-4, p.419-428.
- 3) H. Jin et al. Material Science and Engineering, 2005, 403, p.112-119.
- 4) D. Raabe et al. Acta Mater. 2003, 51, p.1539-1560.
- 5) 池田賢一ほか. 軽金属学会第110回講演概要集. 2006, p.207.
- 6) 高木康夫ほか. 軽金属学会第116回講演概要集. 2009, p.127.
- 7) H. Konishi et al. Proceeding ICAA12, 2010, p.1449-1454.
- 8) D. Peirce, et al. Acta Met. 1983, 31-12, p.1951.
- 9) H. Kitagawa et al. Proceeding ICES95, 1995, p.2093-2098.
- 10) H. J. Bunge. Texture Analysis in Materials Science, Butterworths, 1982.