## 論文

# Al-Mg-Si合金の集合組織形成に及ぼす圧延と熱処理の影響\*

## 日比野 旭\*\*, 黒崎 友仁\*\*\*

## Effects of Rolling and Heat Treatment on the Texture Formation of an Al-Mg-Si Alloy\*

Akira Hibino \*\* and Tomohito Kurosaki \*\*\*

In this study, the relationship between the drawing formability and the textures of an Al-Mg-Si alloy under various rolling and heat treatment conditions was investigated. The LDR (limiting drawing ratio) value became the highest only when the average r value was high and  $\Delta r$  was low. Randomization of the texture created by reducing the cube orientation density of the recrystallized texture is effective to improve the drawing formability. In order to obtain the randomization of the final texture, it is important to randomize the initial orientation, to maintain proper solid solution and to form fine precipitates (clusters, acicular  $\beta''$ ) in the middle of the process.

Keywords: Al-Mg-Si, texture, ODF, r value, LDR

### 1. 緒 言

近年、輸送機器の軽量化やIT産業の発展に伴って軽 金属への需要が拡大している。アルミニウム6000系合 金は強度と延性のバランス良さ、さらにCu元素添加を 規制することによって耐食性も格段に向上することな どから自動車ボディシート材やIT筐体などに広く使わ れている。これらの用途では、材料の張出し加工、絞 り加工および曲げ加工などの高い成形加工性が求めら れている。材料の成形加工性を向上させるには材料の 集合組織制御あるいは塑性異方性パラメータである r値の制御が重要と考えられる。これまでアルミニウム 合金の集合組織と成形加工性の関係について数多くの 報告<sup>1), 2), 3)</sup>があったが,集合組織の形成メカニズムにつ いては依然として不明な点が多い。そこで本実験では、 工業的に製造した Al-Mg-Si 合金の熱間圧延板を用いて その集合組織形成に及ぼす加工と熱処理の影響を調査 した。

### 2. 実験方法

工業的に製造した Al-0.50mass%Mg-1.00mass%Siを 主成分とした熱間圧延板を供試材とした。その後,熱 間圧延板に対して,実験室で行った2種類の工程での 加工と熱処理を Fig. 1に示す。プロセスAについては 熱間圧延板 (HR)を用いて圧延率69%で冷間圧延 (CR) を行ってから、ソルトバスを用いて823 K,60秒保持後



Fig. 1 Sample manufacturing processes under the conditions of process A and process B.

\* 本稿は,軽金属,68(2018),555-557に掲載。

Research Department V, Research & Development Division, UACJ Corporation \*\*\*\* 株式会社UACJ R&Dセンター 研究企画部 博士(工学) Research Planning Department, Research & Development Division, UACJ Corporation, Ph. D.

This paper is reprinted from Journal of the Japan Institute of Light Metals, 68 (2018), 555-557.

<sup>\*\*</sup> 株式会社UACJ R&Dセンター 第五研究部

に水焼入れを行う溶体化処理(SHT)を実施した。中間 焼鈍(IA)を行わない材料では、12日間常温放置(RT) 後、そのまま圧延率50%で冷間圧延(CR1)を施した。 IAを行った材料では、5日間常温放置後に523 K(IA2) あるいは 623 K(IA3)の熱処理(昇温速度323 K/h,1時 間保持後に放冷)を施した。その後、7日間常温放置し た後に圧延率50%で冷間圧延(CR2,CR3)を行った。 冷間圧延板に対し、ソルトバスを用いて823 K、60秒 保持後に水焼入れを行う最終熱処理(FA)を実施し、 厚さ1.0 mmの最終板(FA1,FA2,FA3)とした。プロ セスBについては、プロセスAと同一の熱間圧延板を 用いてSHT,IAを行わずに、圧延率85%で冷間圧延



Fig. 2 Proof stress of the FA samples under various manufacturing conditions.



Fig. 3 Elongation of the FA samples under various manufacturing conditions.



Fig. 4 r values of the FA samples under various manufacturing conditions.

(CR4)を施した。その後、ソルトバスを用いて823 K のFAを行い、厚さ1.0 mmの最終板(FA4)とした。

上記プロセスの各段階においてサンプルを採取し, 引張試験,光学顕微鏡観察,導電率測定,X線回折試験, TEM観察,円筒絞り(パンチ径 φ 50 mm)成形試験を 行った。最終板における引張試験と導電率測定用サン プルは,いずれもFA後に常温で7日間放置したものを 使用した。

#### 実験結果と考察

#### 3.1 最終板の機械的性質

Fig. 2に最終板の0.2%耐力を示す。三方向平均の引 張耐力が最も高いのはFA2, 最も低いのはFA4であっ た。これはプロセスAと比較してプロセスBにSHTが なかったため、材料中の固溶量が少なかったと考えら れる。これら強度の違いは後述3.4節の導電率結果とも 対応する。また、FA4について0°方向の強度が高く、 強度異方性が若干あった。Fig.3に最終板の引張伸びを 示す。各材料の平均伸びはほぼ32%で同等であったが、 FA4だけは45°方向の伸びが高く。伸び異方性が若干あ った。Fig. 4に最終板のr値を示す。すべての材料は45° 方向のr値が0°と90°方向に比べて低かった。また、平 均r値が最も高く,異方性の指標である∆rが最も低い のはFA1, FA2であった。FA3は平均r値が高く, Δr も高かった。FA4の平均r値が最も低く、しかもΔrの 値も高かった。これら強度,伸びの異方性およびr値の 差異は集合組織に起因するものが大きいと考えられる。

#### 3.2 最終板の絞り成形性

**Fig. 5**に限界絞り比LDR (limiting drawing ratio)の 結果を示す。平均r値が高く, Δrが低いFA2のLDR が最も高かった。平均r値が高く, Δrも高いFA3の



manufacturing conditions.

LDRが中間レベルで、平均r値と $\Delta$ rが共に低いFA4の LDRは最も低かった。すなわち、絞り成形性指標の LDRは材料の平均r値、 $\Delta$ r両者との相関が認められた。

#### 3.3 最終板の結晶粒組織

切断法で計測したFA1, FA2, FA3, FA4の結晶粒 径はそれぞれ27.8 μm, 28.6 μm, 40.5 μm, 28.3 μmで あった。いずれにしてもこのような結晶粒径の違いは Fig. 2とFig. 3の機械的性質, Fig. 4のr値およびFig. 5 のLDRの値に及ぼす影響が小さいと思われる。

#### 3.4 プロセス各段階の導電率

Fig. 6に導電率の結果を示す。HRの段階では,導電 率が高く,固溶量が少ない状態であった。SHT後,12 日常温放置後RTの段階では,導電率が低く,SHTに よる固溶量が増加した。そしてIA時の析出に伴って IA2,IA3の導電率が上昇し,固溶量が低下した。また, 冷間圧延の段階では,CR1とCR2は冷間圧延で導電率 の低下が認められたが,CR3において冷間圧延による 導電率の変化が殆どなかった。固溶と析出状態により 冷間圧延で導入される転位組織の違いがあったと示唆 された。FAの段階では,高温熱処理により導電率の急 激な低下が起き,固溶量が増加した。その中でFA4の 導電率がFA1,FA2,FA3と比較して若干高く,その 固溶量が若干少なかったためと考えられる。これは Fig2のFA4の強度にも対応する。

#### 3.5 プロセス各段階の集合組織

**Fig. 7**にプロセス各段階の  $\phi$  2=0°の方位分布関数 (ODF: orientation distribution function) を示す。いず れの材料においてもCube方位が主方位であるが, RT, IA2, IA3のCube方位密度がHRより大幅に低下した。 さらにFA後のFA1とFA2のCube方位密度がランダ

60 Electric conductivity / %IACS 55 50 45 40 IA2FA2IA3 CR2 FA3 RT CRI CR3 CR4 FA1 HK

Fig. 6 Electric conductivity of the samples in each stage for process A and B.

ム方位の約5倍, FA3のCube方位密度がランダム方位 の約10倍であった。FA4はそのCube方位密度がラン ダムの約24倍と高かった。FA1, FA2, FA3グループ とFA4との方位密度に関する差異はRT, IA2, IA3グ ループとHRのCube方位密度と対応することから初期 方位の影響があると示唆された。すなわち,最終板の 絞り成形性を高めるには初期集合組織のランダム化が 有効と考えられる。しかし,FA1,FA2,FA3に対応 するRT,IA2,IA3の初期集合組織はほぼ同等にも関 わらず,FA1とFA2のCube方位集積はFA3より明ら かに弱く,よりランダム化が進んでいる。このことか ら最終板の集合組織形成において初期集合組織以外に 析出,固溶等の要因も考えられる。

#### 3.6 析出物の観察

Fig. 8にTEM 観察の結果を示す。RTは0.1~0.2 µm 程度の粒状のような析出物が観察された。自然時効に 生じたクラスタは非常に微細なためTEMレベルの分 解能では観察ができなかったと考えられる4).5)。また、 IA2は523 K中間焼鈍時の析出により微細な針状析出 物, β"と思われるもの<sup>5)</sup>が観察された。IA3は623 K中 間焼鈍時の析出により比較的粗大な析出物が形成され た。Fig. 6の導電率変化, Fig. 7の集合組織と合わせて 考えると、比較的高い固溶状態とクラスタの組織、中 くらいの固溶状態と微細なβ″析出物の組織はその後の 冷間圧延と高温焼鈍によりランダム集合組織の形成に 寄与する。一方、低固溶状態と比較的粗大な析出物の 組織はその後の冷間圧延と高温焼鈍によりCube方位が 形成されやすい。なぜこのような傾向が示されるかに ついて、これ以上の考察は本実験のデータが不十分で、 今後の課題としたい。



**Fig. 7** ODF analysis result at  $\phi_2 = 0^\circ$  for the samples in various stages and the maximum orientation density. Contour levels: 3, 6, 9, ..., 30



Fig. 8 TEM structures after SHT and IA for the process A.

## 4. 結 言

本研究は工業的に製造したAl-Mg-Si合金の熱間圧延 板を用いてラボで加工と熱処理を加えて集合組織を調 査した結果,以下の結論を得た。

- (1) 合金の平均r値が高く,異方性指標のΔrが低い ときに絞り成形性の指標とされるLDRの値が最 も高い。
- (2) 再結晶集合組織の代表方位であるCube方位密度 を抑え、集合組織のランダム化を実現すること は絞り成形性の向上に有効である。
- (3) 最終板集合組織のランダム化を得るには、初期 結晶方位のランダム化、製造プロセスの中間に おける適切な固溶状態の維持と微細な析出物(ク ラスタ、針状β")形成が重要である。

#### 参考文献

- 1) 竹田博貴, 日比野旭, 高田健: 軽金属, 60 (2010), 231-236.
- 2) 竹田博貴, 日比野旭, 高田健: 軽金属, 62 (2012), 60-66.
- 長谷川啓史,中西英貴,浅野峰生:軽金属, 66 (2016), 602-608.
- 4) 高田健,高橋淳,佐賀誠,潮田浩作,日比野旭,菊池正夫:
  日本金属学会誌, 76 (2012), 677-683.
- 5) 澤裕也, 一谷幸司, 日比野旭: 軽金属, 65 (2015), 229-233.



日比野 旭 (Akira Hibino) (株) UACJ R&Dセンター 第五開発部



黒崎 友仁 (Tomohito Kurosaki) (株)UACJ R&Dセンター 研究企画部 博士(工学)