

平成21年 5月19日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760511  
 研究課題名(和文)自動車ボディパネル用アルミニウム合金板の集合組織形成機構とリジング発生機構の解明  
 研究課題名(英文) Elucidation of Texture Formation Mechanism and Ridging Development Mechanism of Aluminum Alloy for the Automotive Body Sheets  
 研究代表者  
 池田 賢一 (IKEDA KEN-ICHI)  
 九州大学・大学院総合理工学研究院・助教  
 研究者番号：20335996

研究成果の概要：地球環境問題を考える上で、自動車の車体軽量化のためにボディパネルにアルミニウム合金を使用することが望まれている。中でも Al-Mg-Si 系合金は、中強度で成形性に優れるという観点からボディパネル材への適用が期待されている材料であるが、成形加工時にリジングと呼ばれる筋状の凹凸が圧延方向に発生するため、アウターボディパネルに用いる際の障害となっている。本研究では、このリジング発生機構を解明するために、Al-Mg-Si 系合金中の結晶方位分布に着目した。その結果、Al-Mg-Si 系合金のリジング発生を抑制するためには、加工熱処理工程中に生成する変形しやすい結晶粒の発生を抑制することが重要であることがわかった。また、熱間圧延温度を低くすることによって、これらの結晶粒の発生を抑えることが有効であることが明らかになった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	330,000	2,530,000

研究分野：材料組織学

科研費の分科・細目：材料工学 材料加工・熱処理

キーワード：集合組織、再結晶、自動車用材料、結晶方位解析、リジング

## 1. 研究開始当初の背景

地球環境問題が深刻化する中、温暖化の防止には CO<sub>2</sub> 排出量の削減が必要である。自動車産業においては、車体の軽量化が燃費向上と CO<sub>2</sub> 排出量削減に直接的な効果を及ぼすため、必要不可欠である。このような観点から、軽量で強度、加工性、耐食性に優れた材料であるアルミニウム合金の自動車用材料への適用が盛んに行われるようになった。特に、

車体の軽量化を行う上では、ボディパネルなどの大面積の板材にアルミニウム合金を適用する必要がある。

ボディパネルにアルミニウム合金を用いる場合、高強度で成形性に優れることが望まれており、塗装焼付けによって高強度化が期待できる Al-Mg-Si 系合金を適用する動きが活発になっている。しかし、Al-Mg-Si 系合金には、成形加工時にリジング (ridging) と呼

ばれる筋状の凹凸が圧延方向に発生することが知られている。したがって、リジグが発生すると製品的美観が著しく損なわれるため、アウターボディパネルに用いる際の障害となる。Al-Mg-Si 系合金の強度特性を生かすためには、リジグの効果的な抑制技術が強く望まれている。

アルミニウム合金で生じるリジグは圧延板の板幅方向(TD)に引張変形を施すことで圧延方向(RD)に顕著に現れることが知られている。リジグの発生には、集合組織の成分が影響を及ぼしていることが考えられるが、リジグ発生機構の詳細は不明な点が多いのが現状である。

Al-Mg-Si 系合金板の集合組織は加工熱処理条件により制御できるので、リジグ発生と密接に関係する集合組織成分である立方体方位粒群や Goss 方位粒群の形成機構を系統的に調査することが可能である。このように集合組織形成とリジグ発生の相関を詳細に解明することができれば、Al-Mg-Si 系合金の自動車ボディパネル材への適用が加速するものと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、自動車ボディパネル用アルミニウム合金板の集合組織形成機構とリジグ発生機構を解明することを目的としている。具体的には下記に示す通りである。

### (1) Al-Mg-Si 系合金板の加工熱処理条件がリジグ発生程度に及ぼす影響

加工熱処理条件を変化させた最終工程の板材について引張試験によるリジグ発生の調査と集合組織成分に着目した解析を行う。

### (2) Al-Mg-Si 系合金板の各加工熱処理工程における集合組織の相違

熱間圧延や焼きなまし等、各加工熱処理工程後の SEM/EBSD 法による結晶方位解析を行い、リジグ発生に関係する集合組織成分がどの工程で生成されるか静的に明らかにする。

### (3) リジグ発生に関係する集合組織成分の発生機構の解明

(2)で得られた結果より、リジグ発生に関係する集合組織成分の生成過程をその場加熱結晶方位解析により動的に明らかにする。

## 3. 研究の方法

試料は、社団法人軽金属学会より供与された Al-Mg-Si 系合金である 6111 アルミニウム合金を用いた。試料の標準組成を表 1 に示す。本研究では、この試料に対して熱間圧延→中間焼きなまし→冷間圧延→溶体化処理の加工熱処理を施した。各加工熱処理の影響を検

討するために、異なる熱間圧延終了温度 (272°C、299°Cおよび 354°C) で熱間圧延を施し、中間焼きなましの有無を変化させ、冷間圧延と溶体化処理を施した合計 6 種類の薄板を試料として用いた。各試料を熱間圧延終了温度と中間焼きなましの有無により、272°C材、272°C-PA 材、299°C材、299°C-PA 材、354°C材および 354°C-PA 材とした。各試料の加工熱処理工程の詳細を表 2 に示す。また、集合組織の形成過程を検討するために、加工熱処理工程後の試料の解析も行った。これらの試料については、熱間圧延材を HR 材、熱間圧延→中間焼きなまし材を HR-IA 材、熱間圧延→中間焼きなまし→冷間圧延材を HR-IA-CR 材、および熱間圧延→冷間圧延材を HR-CR 材とした。

表 1 Al-Mg-Si 系合金の標準組成

Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Al
0.50-1.00	0.60-1.10	0.50-0.90	< 0.40	0.10-0.45	Balance

表 2 各試料の加工熱処理工程

Sample Al-Mg-Si alloy	Homogenized heating 550°C-8hr	Hot rolling t: 46 → 5mm	Annealing 410°C-2.5hr	Cold rolling t: 5 → 1mm	Solutionized heating 535°C-10min
272°C-PA	○	272°C	○	○	○
272°C			×		
299°C-PA		299°C	○		
299°C			×		
354°C-PA		354°C	○		
354°C			×		

表 2 に示す試料においては、リジグ程度の評価を行うために、TD 方向に引張試験を行い、その表面をレーザー顕微鏡による粗さ測定を行った。また、リジグ程度と密接に関係のある集合組織成分との関係を明らかにするために、各試料において SEM/EBSD 法による結晶方位分布測定を行った。

## 4. 研究成果

### (1) リジグ程度の定量的評価

各溶体化処理後の試料の引張試験を行った結果、いずれの熱間圧延終了温度試料においても、ほぼ同等の挙動を示しており、引張変形挙動には大差がないことがわかった。しかし、破断後の各試験片表面を観察したところ、中間焼きなましを施した 272°C-PA 材、299°C-PA 材および 354°C-PA 材において RD に沿った筋状のコントラストが確認することができた。この筋状に形成された領域は、リジグであると考えられる。そこで、上記の破断試験と同様に 6 種類の試料をひずみ 1.5%となるところで引張試験を中断し、表面の凹凸を RD および TD に沿ってレーザー顕微鏡を用いて測定し、表面粗さ Ra を求めた。これらの解析結果から RD 断面と TD 断面の

Ra の差を各試料で求め、比較した図を図 1 に示す。あわせて、各試料の平均結晶粒径を示す。いずれの試料も平均結晶粒径は 30~40 $\mu\text{m}$  であり、大きな違いは見られないが、RD 断面と TD 断面の Ra の差が PA 材で大きくなることが明らかになった。また、熱間圧延終了温度が高くなるほどその値は大きくなることが確認できた。以上の結果より、加工熱処理工程中に中間焼きなましが行われるほど、また熱間圧延終了温度が高くなるほど、リジングが顕著に発生することが明らかになった。また、平均結晶粒径はリジング程度には影響を及ぼさないことが分かり、加工熱処理工程で形成される集合組織の影響が強いことが示唆された。

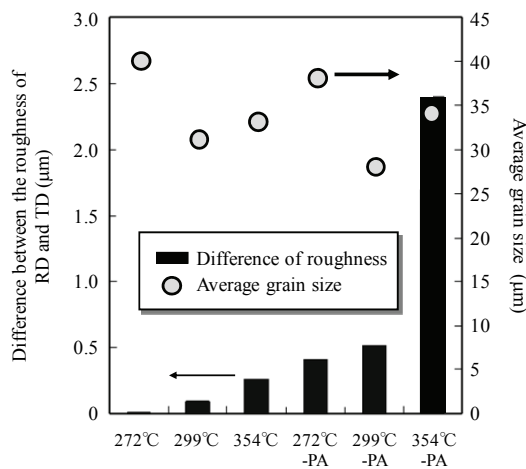


図 1 各試料の TD1.5%変形材表面の RD 断面と TD 断面の Ra の差と平均結晶粒径

## (2) リジング発生と集合組織成分の関係

TD 引張試験の結果より、354°C-PA 材で顕著にリジングが発生することが明らかになった。そこで、最も顕著に発生した 354°C-PA 材とリジングの発生がほとんど起きない 272°C材についてその集合組織成分の分布状態を SEM/EBSD 法による結晶方位解析により求めた。ここで、注目した集合組織成分は、Cube:  $\{100\}\langle 001\rangle$ 、Brass:  $\{011\}\langle 211\rangle$ 、Copper:  $\{112\}\langle 111\rangle$ 、S:  $\{123\}\langle 634\rangle$  および Goss:  $\{110\}\langle 001\rangle$  の 5 種類である。両試料の TD1.5% 変形材の表面の結晶方位分布を測定した。図 2 に測定面法線方向の結晶方位分布を示す。両試料とも強い集合組織は形成していないことがわかる。また、図 3 に図 2 の中でも最も存在頻度が高かった立方体方位 (Cube 方位) 粒の分布状態を示す。354°C-PA 材に着目すると RD に沿った Cube 方位のバンド状の分布が存在することが明らかになった。両試料の最近接にある立方体方位粒間の距離と頻度を求めた結果、リジングが顕著に確認された 354°C-PA 材は、最近接にある立方体方位粒の距離が短く、より密集していることが

示された。さらに、この Cube 方位バンドとリジングの関係を明らかにするために、TD1.5%変形させた 354°C-PA 材において凹凸が現れた部分の結晶方位解析を行った結果、立方体方位粒のバンド領域と凹凸部が対応していることが確認できた。また、Taylor 因子の低い領域が立方体方位粒の領域に対応していたことから、塑性変形が起こりやすい立方体方位粒のバンド領域において凹凸が生じたと考えられる。これらの結果をまとめて図 4 に示す。

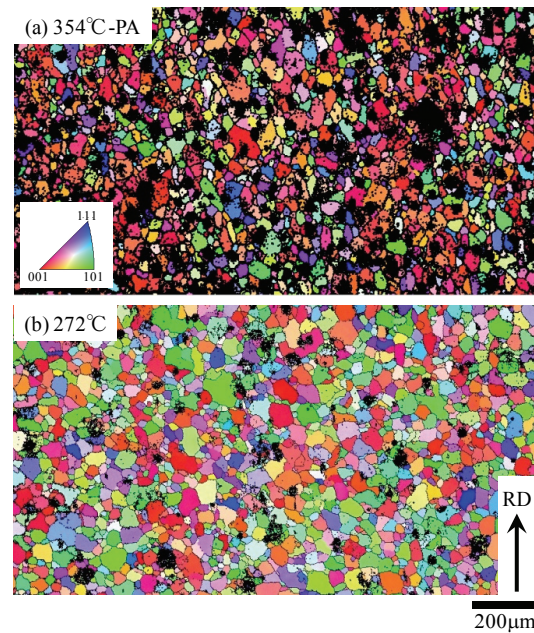


図 2 354°C-PA 材と 272°C材の TD1.5%変形材における ND 面の結晶方位分布

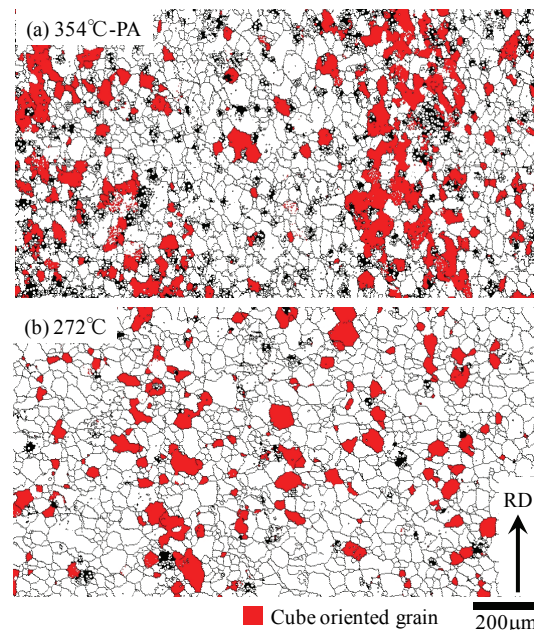


図 3 354°C-PA 材と 272°C材の TD1.5%変形材における Cube 方位領域分布

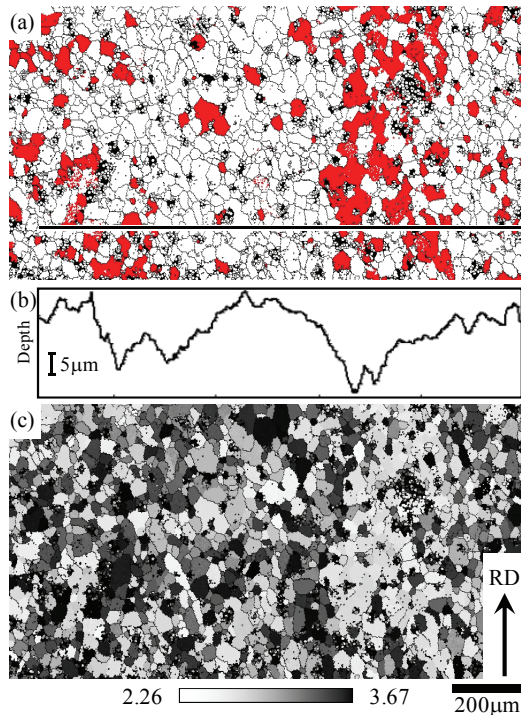


図4 354°C-PA材のTD1.5%変形材における (a)Cube方位領域分布、(b)断面プロファイルおよび(c)Taylor因子分布図

以上の結果より、リジングの発生には、再結晶組織中の立方体方位粒の分布状態が強く影響していることがわかった。立方体方位粒の分布状態は、熱間圧延終了温度、中間焼きなましの有無が影響するため、加工熱処理条件を最適化することで、リジングが発生しない材料に制御できることが示唆された。

### (3) 加工熱処理工程と立方体方位領域形成の関係

上記で得られた結果より、リジングの発生には、集合組織成分の中でもCube方位の分布状態が強く影響を及ぼすことが明らかになった。そこで本研究では、Cube方位領域が加工熱処理工程の中で、どの段階で形成されるのかを詳細に把握するために、熱間圧延終了温度が354°CのHR材、HR-IA材、HR-IA-CR材およびHR-CR材のND面に対して結晶方位解析を行い、Cube方位の分布状態に着目した。その結果、熱間圧延終了後(HR材)には、すでにCube方位粒は存在しているが、バンド状分布は示していないことがわかった。HR-CR材では、立方体方位粒の圧延方向に沿った分布はわずかであることがわかった。これは、熱間圧延終了後におけるCube方位粒の分布がランダムであったことによるものと考えられる。

熱間圧延終了後にランダムに分布したCube方位粒に及ぼす中間焼きなましの影響を調べるため、HR-IA材におけるCube方位

粒の分布を解析した結果、Cube方位粒が圧延方向に沿って分布していた。すなわち、中間焼きなましによって、熱間圧延後にランダムに分布していた立方体方位粒が再結晶粒として圧延方向に成長することが示唆された。さらに、これらのCube方位粒が冷間圧延時においてどのように変化するかを調べるため、HR-IA-CR材におけるCube方位粒の分布状態を調べた。その結果、立方体方位粒が圧延方向に沿って分布している領域が、中間焼きなまし後も形成していることがわかった。したがって、立方体方位粒の圧延方向に沿った分布は、冷間圧延後も残存することがわかった。最終的には、この立方体方位粒の分布が溶体化処理による一次再結晶によってさらに成長し、圧延方向に沿った分布になり得ると考えられる。これらのことより、熱間圧延後の中間焼きなましによって、リジングの要因である圧延方向に沿った立方体方位粒の分布が形成されると考えられる。

最後に、HR材に中間焼きなましを施すことを模擬するために、SEM用の加熱ステージを用いてその場加熱SEM/EBSD解析に供した。365°Cで等温保持した時間のスナップショットを図5に並べた。図5より、Cube方位粒は他方位の圧延組織を蚕食し、優先的に圧延方向に成長することが明らかになった。しかし別の領域では、Cube方位粒が他方位粒に蚕食される場合もあり、その要因については、さらに検討する必要がある。

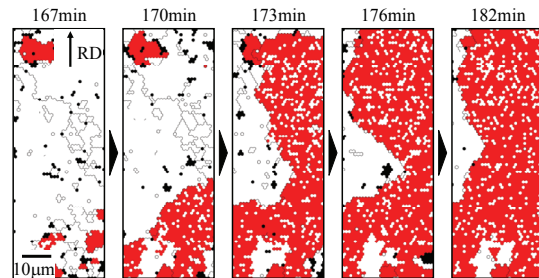


図5 HR材(熱間圧延終了温度354°C)の365°C等温保持におけるCube方位粒の成長過程の様子

### (4) まとめ

Al-Mg-Si系合金である6111アルミニウム合金のリジングの発生と内部の集合組織の関係を明らかにするために、熱間圧延終了温度と中間焼きなましの有無による両者の関係を調査した。また、各加工熱処理条件において、Cube方位粒群がどのように形成されるのかを詳細に調査し、以下のことが明らかになった。

① 熱間圧延終了温度や中間焼きなましの有無による引張変形挙動に大差はないが、試料表面のRDに沿った筋状の凹凸が形成されることを確認した。

② 熱間圧延終了温度が高いほど、併せて中間焼きなましを施すほど、筋状の凹凸の高低差が大きくなることが明らかになった。すなわち、リジニングの発生が顕著になることが示された。

③ リジニングの発生と集合組織成分の関係を調査した結果、各集合組織成分の存在頻度が同じであっても、その集積度合いが異なることがリジニング発生に大きく寄与すること、特に Cube 方位粒群が RD に沿って形成されていることが原因になっていることが明らかになった。

④ Cube 方位粒は TD 引張に対して Taylor 因子が低く、塑性変形が起りやすいことから、リジニングの発生に大いに寄与することが確認された。

⑤ Cube 方位粒は熱間圧延材にすでにランダムに分布しているが、中間焼きなましにより RD に沿って集積していくことが明らかになった。これらの集積を抑えることでリジニングの発生を低減することが可能であることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 池田賢一、高田尚記、波多聰、中島英治、『その場加熱 SEM/EBSD 法による純アルミニウム箔の再結晶挙動の解析』、九州大学中央分析センター報告、No. 26, pp. 8-14, 2008、査読なし
- ② 池田賢一、高田尚記、宮田幸昌、波多聰、中島英治、『その場加熱 EBSD 法による純アルミニウム箔の再結晶過程の解析』、九州大学超高压電顕室研究報告、No. 32, pp. 74-75, 2008、査読なし
- ③ 池田賢一、中島英治、『Al-Mg-Si 系合金のリジニング発生と集合組織の関係』、社団法人軽金属学会研究部会報告書『中強度アルミニウム合金の材料物性』、No. 51, pp. 16-22, 2008、査読なし
- ④ K. Ikeda, T. Yoshihara, N. Takata, H. Nakashima, "Relation between Ridging and Texture Components in Al-Mg-Si Alloy", Mater. Sci. Forum, Vol. 558-559, pp. 71-76, 2008, 査読あり

[学会発表] (計8件)

- ① 池田賢一、宮田幸昌、波多聰、中島英治、『6111 アルミニウム合金の集合組織形成とリジニング発生の関係』軽金属学会第 114 回春期大会、2008 年 5 月 11 日、愛媛大学
- ② 池田賢一、中島英治、『Al-Mg-Si 系合金

のリジニング発生と集合組織の関係』軽金属学会技術懇談会『中強度アルミニウム合金の材料物性』、2008 年 5 月 9 日、愛媛県民文化会館

- ③ 池田賢一、宮田幸昌、波多聰、中島英治、『Al-Mg-Si 系合金の立方体方位粒形成過程』日本金属学会 2008 年第 142 回春期大会、2008 年 3 月 28 日、武蔵工業大学
- ④ 宮田幸昌、吉原隆浩、高田尚記、池田賢一、波多聰、中島英治、『6000 系アルミニウム合金における立方体方位粒形成過程のその場 EBSD 観察』第 49 回日本顕微鏡学会九州支部学術講演会、2007 年 12 月 1 日、九州大学
- ⑤ 宮田幸昌、吉原隆浩、高田尚記、池田賢一、波多聰、中島英治、『6000 系アルミニウム合金の立方体方位粒形成過程』軽金属学会第 113 回秋期大会、2007 年 11 月 10 日、千葉大学
- ⑥ 池田賢一、宮田幸昌、吉原隆浩、高田尚記、中島英治、『Al-Mg-Si 系合金の集合組織形成とリジニング発生の関係』日本金属学会・軽金属学会第 2 回結晶方位と組織の制御研究会、2007 年 9 月 21 日、岐阜大学
- ⑦ K. Ikeda, T. Yoshihara, N. Takata, H. Nakashima, "Relation between Ridging and Texture Components in Al-Mg-Si Alloy", The 3rd International Conference on Recrystallization and Grain Growth (ReX & GG III), 2007.06.15, Korea
- ⑧ 宮田幸昌、吉原隆浩、高田尚記、池田賢一、中島英治、『6000 系アルミニウム合金における立方体方位粒形成に及ぼす加工熱処理の影響』軽金属学会第 112 回春期大会、2007 年 5 月 12 日

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

池田 賢一 (IKEDA KEN-ICHI)  
九州大学・大学院総合理工学研究院・助教  
研究者番号：20335996

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

( )

研究者番号：