



T. Haga

# 溶湯圧延によるリサイクル材からの 低熱膨張 Al 合金板の創生とプレス成形性

羽賀 俊雄\*

## 1. 緒言

LED などに対応した電子基盤の補強材として軽量で低熱膨張の材料が求められている。軽量という点ではアルミニウム合金があてはまるが、銅より熱膨張率が大きく通常のアルミニウム合金は使用することが困難である。アルミニウム合金をマトリックスとした複合材料の一種である Al-SiCp は優れた低熱膨張率と高熱伝導性、耐摩耗性を示すことが知られている。しかし、Al-SiCp は高価であり安価な材料が求められている。一方、Si 量が 25% 以上の過共晶 Al-Si 合金も低熱膨張性や良好な耐摩耗性を示すが、硬くインゴットから圧延により薄板を作製することは困難である。急冷粉末から薄板を作製することも可能であるが、高コストになり実用的ではない。溶湯圧延は溶湯から直接薄板を作製することができるため、過共晶 Al-25%Si 合金（以後 Al-25%Si と記す）の薄板を作製することに有効であると思われる。しかし、Al-25%Si は固液相線間の温度差が広く、かつ半凝固状態の流動性が高いため、従来の溶湯圧延法<sup>1)</sup>では溶湯を薄板に凝固することが困難であった。Al-25%Si の薄板が溶湯圧延により作製することができれば、安価な低熱膨張材の補強材を作製することができる。本研究では、冷却能を改善することで Al-25%Si 板の作製を試みた。より安価な薄板を作製するためにリサイクル材の検討も試みた。Al-Si 合金は共晶 Si が微細化すると延性が向上することが知られている。溶湯圧延板は急冷凝固されているので共晶 Si は微細化している。そこで熱間圧延および冷間圧延を試みた。曲げや張出についても検討を行った。

## 2. 溶湯圧延機や作製条件の検討

過共晶 Al-Si 合金板の作製を従来型の溶湯圧延機で行うと未凝固の溶湯がロール間隙から流れ出し、薄板を作製することが困難である<sup>1)</sup>。この原因は、半凝固状態の流動性にある。過共晶の場合は固相率が高くなるまで流動性は高い。つまり流れ易く変形抵抗は低くロール間隙で半凝固金属を拘束する(挟み込む)ことは困難である。過共晶 Al-Si 合金の薄板を作製するためには、固相率の高い状態まで短時間で抜熱する必要がある。本研究においては、冷却速度の向上でこれに対応した。冷却速度の向上には、溶湯からロールへ熱を伝わり易くすることが必要である。これは、薄板がロール面に固着することを

防ぐためにロール面に噴霧している離型剤の使用を止めることで実現できる。しかし、固着の問題が発生する。Al-25%Si の直接圧延について調査を進める段階で、Al-25%Si はロールに固着し難いことが明らかとなった。そこで本研究では、離型剤は使用しなかった。アルミニウム合金用の溶湯圧延機は通常横型<sup>2)</sup>である。本研究では横型ではなく縦型<sup>3)</sup>を採用した。これは横型と比較して注湯と高速化が容易であるためである。

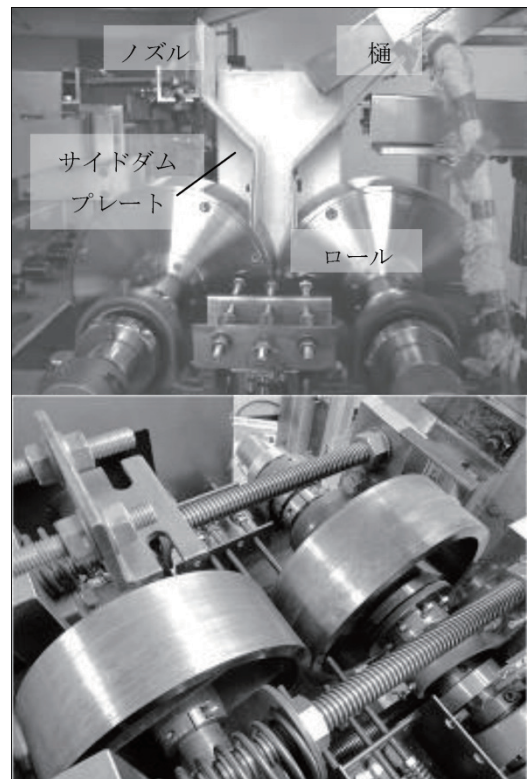


図1 縦型溶湯圧延機

## 3. Al-25%Si 板の作製

縦型を用いて Al-25%Si 合金板の作製を試みた。ロール材質は軟鋼、ロールの寸法は直径 300 mm、幅 100 mm、ロール周速は 20m/min と 40m/min、荷重は 3.5 t と 7 t とした。ロール周速が 40m/min の場合、荷重が 3.5 t ではワニ口割れが発生した。荷重を 7 t に増すことでワニ口割れを防ぐことができた。他の合金、たとえば亜共晶の Al-Si 系合金である AC4C や 4045 は 1.5t の荷重でもワニ口割れは発生しなかった。3003 や 5182 など Al-Mn 系や Al-Mg 系合金も 1.5t の荷重でワニ口割れは発生しなかった。ワニ口割れの原因としては、ロール間隙で板厚の

\*大阪工業大学工学部機械工学科 教授

中央部まで凝固していないことが原因と考えられる。Al-25%Si は、半凝固状態において固相線近傍まで流動性が高く各々のロール上の凝固層が接合できず、また圧下により板がロールの接線方向に出ず、結果としてワニ口割れが発生したと考えられる。荷重が 7t のときは、半凝固状態の部分のうち流動性が高いものが上部に押し出され、ロール間隙では両ロール面上の凝固層が接合されたのでワニ口割れが発生しなかったと考えられる。ロール周速が 20m/min の場合は、荷重が 3.5t の場合でもワニ口割れは発生しなかった。ロール周速の低下にともないロール間隙を通過する時間が長くなったため固相率が増加し、ワニ口割れを防ぐことができたと考えられる。

Al-25%Si は固く耐摩耗性に富んでいるため、ロールの摩耗は他のアルミニウム合金と比較すると非常に激しいことが推測される。本研究の溶湯圧延機の単位幅当たりの荷重は 70 kg/mm であり、従来の横型のアルミニウム合金用の溶湯圧延機の単位幅荷重の 400 kg/mm 以上と比較する大変小さく、ロールの摩耗を抑えることができる。従来のアルミニウム合金用の溶湯圧延機のロール周速は 5m/min 以下である。本研究の 20m/min 以上のロール周速は従来の溶湯圧延機と比較すると格段に高速である。

図 2 に溶湯圧延直後の様子を示す。100 mm 幅の Al-25% Si 合金板が連続的に作製できた。



図 2 溶湯圧延直後の Al-25%Si 板

図 3 に Al-25%Si 溶湯圧延板の表面状態を示す。窪み状の表面欠陥が存在していた。このような窪み状の表面欠陥は他の合金では発生せず、Al-25%Si を鋼ロールを使用して溶湯圧延した時に発生する特有な欠陥である。銅ロールを使用した時は発生しなかったため、窪み状の表面欠陥には、板内部の凝固状態が影響すると考えられる。板幅方向で凝固遅れの位置に発生すると考えられる。図 4 には Al-25%Si-4%Mg の表面状態を示す。Mg の添加は板のロールへの固着防止を目的として行っていた。Mg を 4% 以上添加すると窪み状の欠陥を改善することがで

きた。Al-25%Si と他のアルミニウム合金では溶湯圧延時の偏析帯のつき方が異なっていた。Mg を添加することで偏析帯の状態が他のアルミニウム合金のような網目状になったことで窪み状の欠陥の発生を防ぐことができたと考えられる。

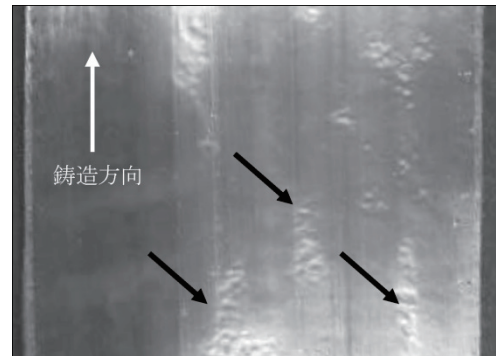


図 3 Al-25%Si 溶湯圧延板と表面欠陥。矢印は窪み状の表面欠陥を示す。



図 4 Al-25%-4%Mg 溶湯圧延板の表面状態

図 5 (a)に Al-25%Si 溶湯圧延板の断面の状態を示す。冷却速度が低くなる中央部において初晶 Si は粗大化している。図 5 (b)は板厚中央部の初晶 Si である。サイズは 0.2 mm 以下であり、金型鑄造材と比較すると微細である。図 5 (c)に共晶 Si を示す。急冷効果のためサイズは 2 μm 以下と微細で粒状を呈している。

リサイクル材の使用を想定して Al-25%Si に Fe を添加した試料の溶湯圧延を試みた。アルミニウム合金のリサイクル材は不純物としての Fe 量が増すことが知られている。ダイカスト材などには 1% 程度の Fe が含まれている。ダイカスト材などをさらにリサイクルした場合を想定して Fe が 4% まで増加した場合を検討した。Al-25%Si の Fe 量は 0.3% である。Fe が 4% まで増加しても Al-25%Si と同様に溶湯圧延が可能であった。図 6 に Al-25%Si-4%Fe の溶湯圧延板の断面組織を示す。Fe 量が増したため粗大な針状の Al-Si-Fe 系の金属間化合物が多数存在している。Fe 量が 2% 程度までであれば、粗大で針状の Al-Si-Fe 系の金属間化合物は存在しなかった。

#### 4. 熱間圧延と冷間圧延

Al-25%Si 溶湯圧延板の熱間圧延板の表面状態を図 7 (a)に示す。厚さ 2 mm の溶湯圧延板を 500℃ で熱間圧延した。熱間圧延後の板厚は 1.6 mm である。表面やエッジに割れは発生しなかった。500℃ では 3 パスの熱間圧延で厚

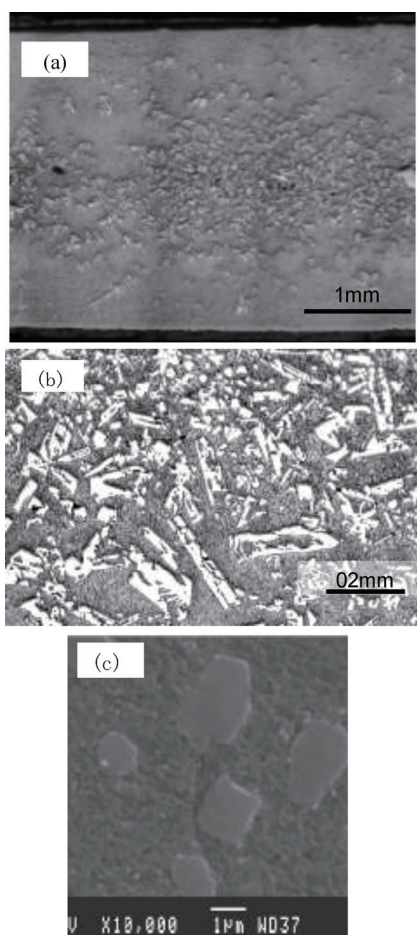


図5 Al-25%Si 溶湯圧延板の断面の状態。(a)板の断面、(b)中央部の拡大。白色の部分は初晶 Si。(c)共晶部の拡大。共晶 Si。

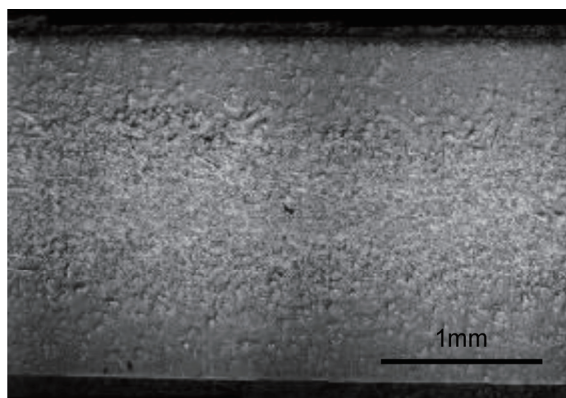


図6 Al-25%Si-4%Fe 溶湯圧延板の断面組織

さ1mmまで薄くすることができた。550℃では2パスで厚さ2mmの板を1mmにすることができた。熱間であれば、圧延は特に問題は無いようである。

図7(b)は厚さ2mmの溶湯圧延板1パスの熱間圧延後に冷間圧延3パスで板厚を1mmまで薄くした板の表面状態である。1パスの圧下量を減らせば冷間圧延も可能であった。Al-25%Siは固く脆く圧延は困難であった。しかし、溶湯圧延による急冷凝固で共晶 Si を微細化することで圧延に耐えうるだけの延性が得られたと考えられる。

図8に図7(b)の冷間圧延板の断面組織を示す。圧延に

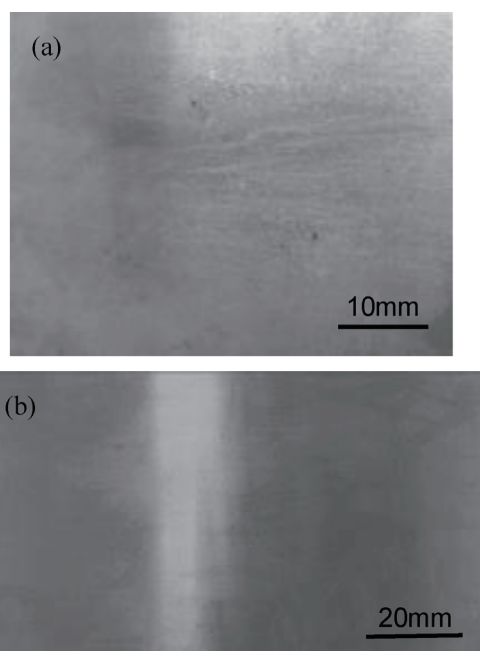


図7 Al-25%Si 溶湯圧延板の熱間圧延および冷間圧延後の表面状態。(a)熱間圧延板、(b)冷間圧延板

よって初晶 Si は破壊されて寸法は0.1mm以下に小さくなり、形状も複雑なものから矩形に変わった。

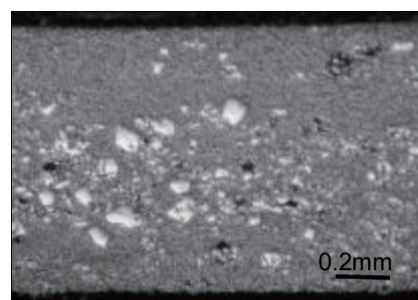


図8 Al-25%Si 溶湯圧延板の冷間圧延後の断面組織

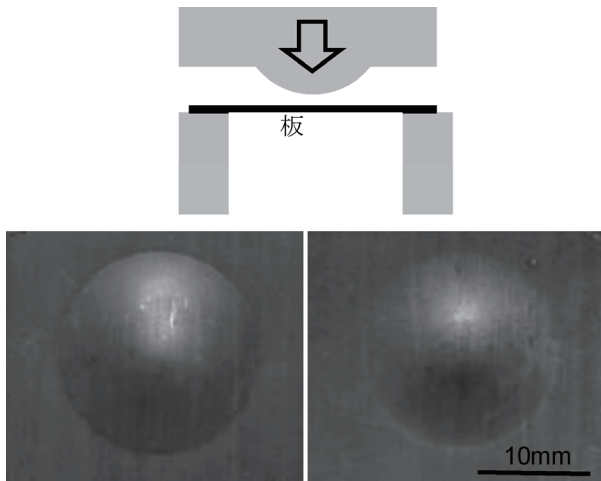
リサイクル材の使用を想定して Fe を添加した場合でも Fe 量が2%までは、エッジ割れ等を起こさずに熱間圧延で0.5mm厚の板まで作製することができた。急冷効果により Al-Si-Fe 系の金属間化合物が微細に晶出したため、延性が損なわれなかったと考えられる。

## 5. 張出し成形

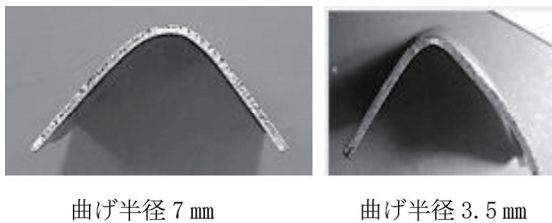
図9に示すような簡易な方法で厚さ1mmの圧延板に熱間で張出し成形を試みた。上下の金型と板の両方を加熱した。成形温度が500℃以上であれば、図9に示すように高さが2mmの突起の成形が可能であった。成形方法を工夫することで成形量を増すことも可能であると思われる。Al-25%Si板の作製およびその成形に関する報告例は他に無いと思われる。

## 6. V曲げ

張出成形が可能であった500℃で1mm厚の板にV曲げ



凸側 凹側  
**図 9** Al-25%Si 板の張出し成形. 板厚 1 mm, 成形温度 500°C, 突起高さ 2 mm.



曲げ半径 7 mm 曲げ半径 3.5 mm  
**図 10** Al-25%Si 溶湯圧延板の V 曲げ. 板厚 1 mm, 成形温度 500°C.

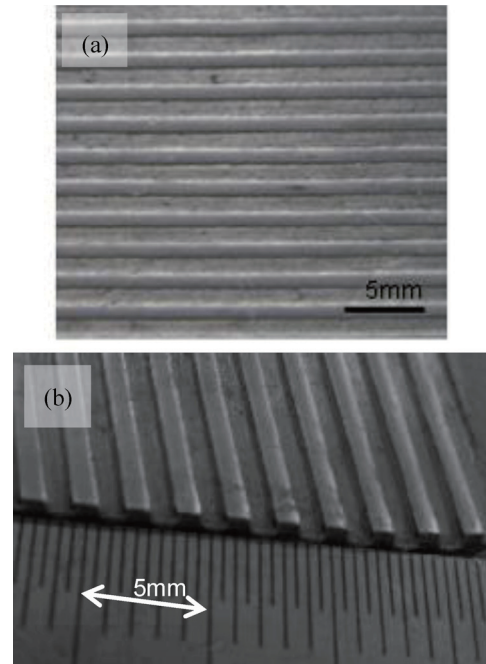
を行った. 板のみを加熱し, 上型と下型は加熱しなかった. **図 10** に V 曲げの結果を示す. 曲げ半径 3.5 mm までの V 曲げを行うことができた. 熱間であれば Al-25%Si 板も曲げ加工ができる可能性を示すことができた.

## 7. 溝付きロールを用いた突起の成形

熱間圧延により板の表面に突起を成形することを試みた. これは, Al-25%Si を電子基板の補強材として使用する場合は表面積 (放熱面積) の増大に役立つ. また, Al-25%Si が軽量で耐摩耗性が優れていることを利用して階段の滑り止めなどに使用する場合の突起の成形を想定している. 550°C で溶湯圧延板を溝付きロールで 1 パス圧延したときの表面と断面を **図 11** に示す. ロールの溝の断面形状は矩形である. 板の表面に突起が成形できたことが明らかである.

## 8. まとめ

過共晶 Al-25%Si 合金の薄板を作製できる溶湯圧延機を考案し, その有効性を明らかにした. 従来の溶湯圧延



**図 11** 溝付きロールによる Al-25%Si 溶湯圧延板への突起の成形. (a)突起を成形した面, (b)突起の断面

機では薄板の作製が困難であった Al-25%Si の薄板の作製を可能にしたばかりではなく, 従来のアルミニウム用溶湯圧延機の 3 ~ 5 倍以上の生産速度を達成しうる可能性があることを示した.

リサイクル材の使用を想定し, 不純物として Fe を添加した材料の溶湯圧延と熱間圧延の影響を調査した. Fe 量が 2% までは顕著な影響が無いことを明らかにした.

溶湯圧延により作製した Al-25%Si 板は熱間張出し, 熱間 V 曲げ, 熱間圧延による突起の成形が可能であることを示した.

以上の結果を総合すると, 溶湯圧延により作製した Al-25%Si 板は, 簡単な形状であればホットスタンピングなどの熱間成形が可能であると考えられる.

## 謝辞

本研究の一部は(財)天田金属加工機械技術振興財団研究助成によるものであることを記し, 感謝の意を表します.

## 参考文献

- [1] 齊藤, 辻: 塑性と加工 37(1996)283.
- [2] 江崎, 渡辺, 上田, 宇都, 渋江: 軽金属 56 (2006), 266.
- [3] たとえば, 羽賀: 塑性と加工 47(2006), 1161.