

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

大阪工業大学 工学部 機械工学科
教授 羽賀俊雄
(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007007)

キーワード：溶湯圧延，過共晶 Al-Si 合金，低熱膨張材

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-Si 合金の薄板を作製することに有効であると思われる。しかし、過共晶 Al-Si 合金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、従来の溶湯圧延法では溶湯を薄板に凝固することが困難であった。過共晶 Al-Si 合金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過共晶 Al-Si 合金板の作製を試みた。また、低熱膨張材は、冷間では曲げ等の加工を行わないため、圧延さえ可能であればそれ以上の延性は必要としない。より安価にするためリサイクル材をベースにした過共晶 Al-Si 合金板の作製についても検討した。

2. 溶湯圧延機の改善

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図 1 に示すように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¹⁾。この原因は、半凝固状態の流動性にある。亜共晶の Al-Si 合金は半凝固状態において固相率が低い状態から流動性が低くなる。つまり流れ難く変形抵抗は大きくなる。従来型の溶湯圧延機のロールは半凝固状態の合金を圧下しながら凝固することができる。一方、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。半凝固状態における亜共晶合金と過共晶合金の固相率と変形抵抗の関係を図 2 に示す。

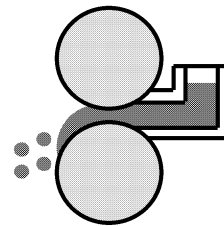


図 1 過共晶 Al-Si 合金板の作製を従来型の溶湯圧延機で試みた場合の模式図。溶湯を凝固することができない。

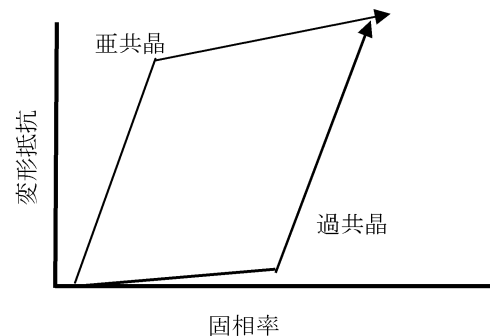


図 2 半凝固状態における固相率と変形抵抗の模式図

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。つまり冷却速度を高める必要がある。または、ロール間隙にいたるまでの時間を長くする必要がある。両者を併用することも有効である。本研究においては、冷却速度の向上と冷却時間を長くする工夫を行った。

溶湯圧延においてはロールが冷却媒体である。冷却速度の向上には、ロール面の温度を下げることで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。前者は、ロール材質の熱伝導率が高いものに変えることで実現可能である。後者は、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。本研究では、熱伝導率が高い銅ロールを使用すると固着が発生しないことを明らかにした。このため離型剤を使用する必要がなくなった。材料がロールと接する距離を凝固距離と呼ぶことにするが、従来型は 100 mm 未満 (70 mm 程度) であるのに対し本研究では 100 mm 以上と長くした。これは、本研究では横型²⁾ではなく異径ロール型³⁾を採用したために可能になった。異径ロール型では、ロール面に直接注湯するため低温铸造が可能になった。横型ではノズル内で溶湯が凝固して詰まる恐れがあるため低温铸造は困難である。より安価な薄板を作製するため従来のロール周速の 3 倍以上を目指した。図 3 に本研究の異径ロール型の模式図を示す。表 1 には従来型の横型の溶湯圧延機と本研究の異径ロール型の比較を示す。

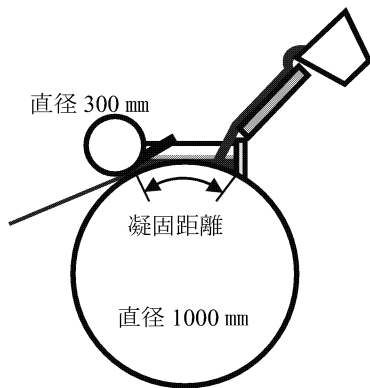


図 3 異径ロール型の模式図

表 1 従来型と異径ロール型の比較

項目	従来型	本研究
型式	横型	異径ロール型
ロール材質	SKD61	銅 (SS400)
離型剤	使用	使用せず
凝固距離	100 mm 未満	100 mm 以上
注湯温度	通常の注湯温度	低温铸造
ロール周速	1 ~ 3 m/min	10 m/min 以上

3. Al-25%Si 過共晶合金板の作製 (銅ロール)

異径ロール型を用いて Al-25%Si 合金板の作製を試みた。ロール材質は銅、ロール周速は 10 m/min、凝固距離は 100 mm とした。この条件において連続的に Al-25%Si 合金の薄板を作製することができた。離型剤は使用しなかったが固着は発生しなかった。固着は熱収縮し難い材料、つまり低熱膨張材の方が激しいが銅ロールの効果で固着は発生しなかった。図 4 に作製した薄板の表面状態

を示す。リップルマーク (铸造方向に垂直な縞表の模様、激しい場合は表面欠陥になる) は発生しなかった。これは過共晶 Al-Si 合金の半凝固状態の流動性が高いことが原因の一つであると考えられる。

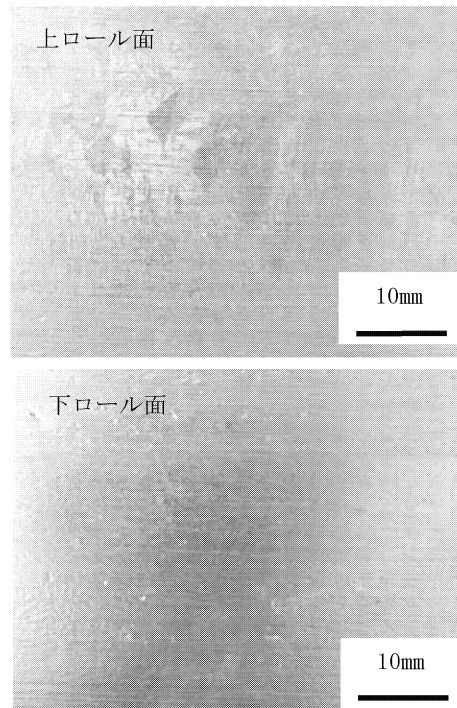


図 4 Al-25%Si 合金の溶湯圧延ま材の表面状態

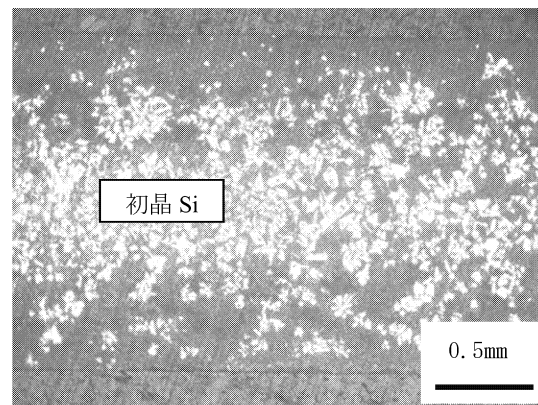


図 5 Al-25%Si 合金の溶湯圧延ま材の断面組織

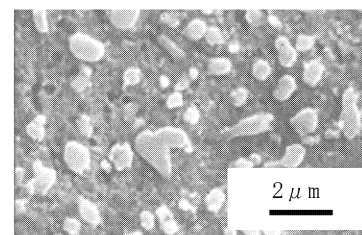


図 6 Al-25%Si 合金の溶湯圧延ま材の共晶 Si

図 5 に Al-25%Si 合金の溶湯圧延ま材の断面組織を

示す。初晶 Si は、0.2mm 未満である。また、板厚中央部の初晶 Si は表面近傍と比べて大きい。これは冷却速度が、表面近傍より内部の方が遅いためである。図 6 には共晶 Si を示す。共晶 Si は急冷効果のため粒状で微細であった。比較のために図 7 と図 8 に金型鑄造材の初晶 Si と共晶 Si を示した。異径ロール型で作製した板のほうが初晶 Si と共晶 Si のどちらも微細であった。

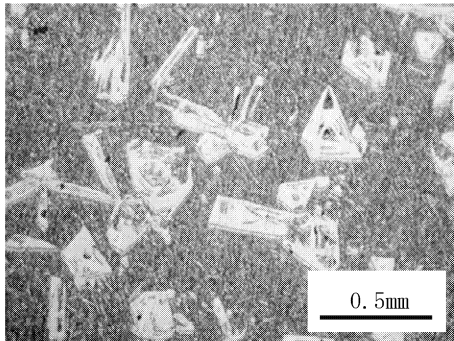


図 7 金型鑄造材の初晶 Si

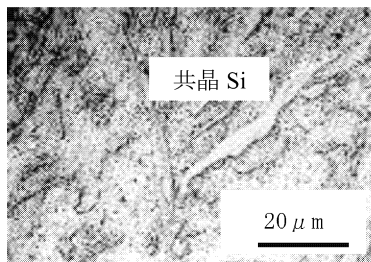


図 8 金型鑄造材の共晶 Si

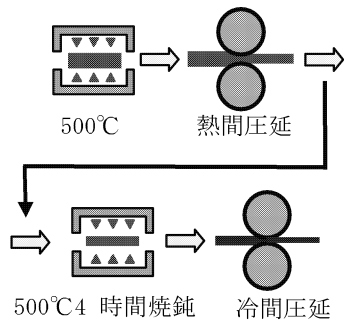


図 9 熱間圧延と冷間圧延の

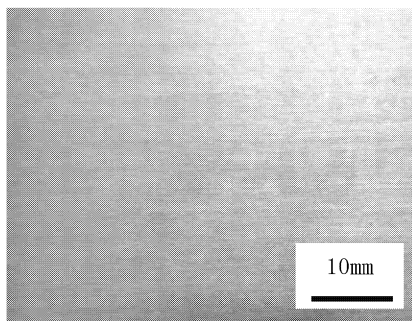


図 10 図 9 の処理後の薄板の表面状態

異径ロール型で作製した厚さ約 2mm の板と金型鑄造材を 2mm に加工した板を、図 9 に示す工程により冷間圧延を試みた。金型鑄造で作製した板は冷間圧延で割れたが、異径ロール型で作製した板は冷間圧延が可能であった。図 10 に冷間圧延後の薄板の表面状態を示す。図 4 の溶湯圧延まま材と比較すると表面状態が改善されているのが解る。焼鈍と冷間圧延を繰り返すことで厚さ 1mm の薄板を作製することができた。これは、共晶 Si が微細に粒状化した効果と考えられる。

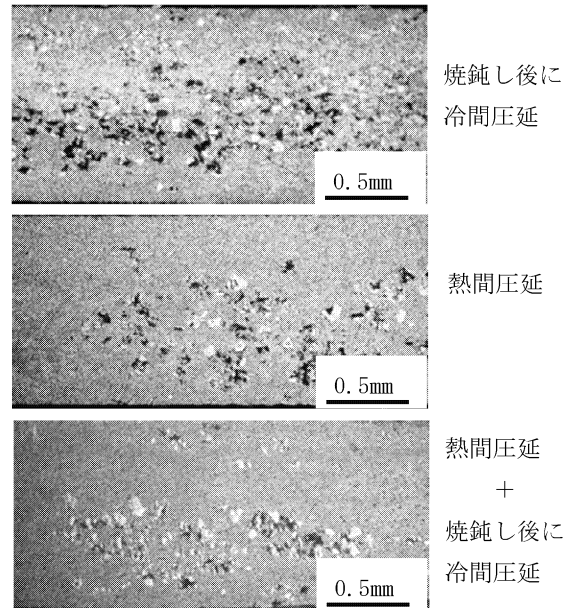


図 11 圧延後の薄板断面の空隙（空隙は黒い部分）

図 11 に示すように圧延後の断面には、空隙が発生した。空隙は初晶 Si の近傍に存在した。圧延により初晶 Si が 2 つ以上に破壊された場合や初晶 Si の周りのマトリックスが伸びることにより空隙が発生したと思われる。Si 量が 20% までは空隙は観察されなかったことから、Si 量の増加とともに硬くなり延性が低下したことが直接の原因と考えられる。冷間圧延より熱間圧延のほうが空隙は少ない。これは熱間圧延の法が延性が高いためが原意と考えられる。熱間圧延後に焼鈍しと冷間圧延を行うと空隙の数は減少した。熱間圧延の温度と圧下量を調節することで空隙の発生は改善されることが考えられる。

圧延回数が増すに従い初晶 Si のサイズは小さくなった。これは初晶 Si が破碎されたためと考えられる。

4. Al-25%Si 過共晶合金板の作製（軟鋼ロール）

銅ロールを使用することで過共晶 Al-25%Si 合金の薄板を作製することは可能であった。しかし、銅ロール高価であり、硬い過共晶 Al-25%Si 合金板を溶湯圧延する

ためには、耐摩耗性が不足していると考えられる。より安価な薄板を作製するためには、安価なロールを使用する必要がある。幸いにも過共晶 Al-25%Si 合金は溶湯圧延時に板厚中央部に巣が発生することは無く、巣を圧下により潰す必要がないので通常の溶湯圧延と比較すると 50 分の 1 以下の荷重しか必要としない。そこで SKD61 のような熱間用の工具鋼ではなく軟鋼の SS400 でロールを作製した。SS400 の熱伝導率は SKD61 より大きく、急冷凝固には都合がよい。低荷重で溶湯圧延が可能であるため図 12 に示すようにロールのシェルの厚さを 60mm から 6mm に薄くした。このためロールの冷却能は向上する。SS400 のロールで問題になるのは薄板のロールへの固着である。離型剤を使用することは、熱伝達の低下を招くので避ける必要がある。Mg を添加するとロールコーティングが発生し、これが離型剤の役割をして薄板の固着を防ぐ。そこで 4% の Mg を添加した。

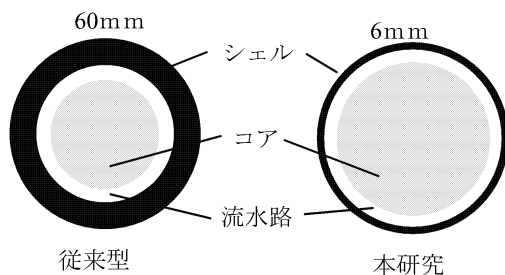


図 12 溶湯圧延ロールの模式図

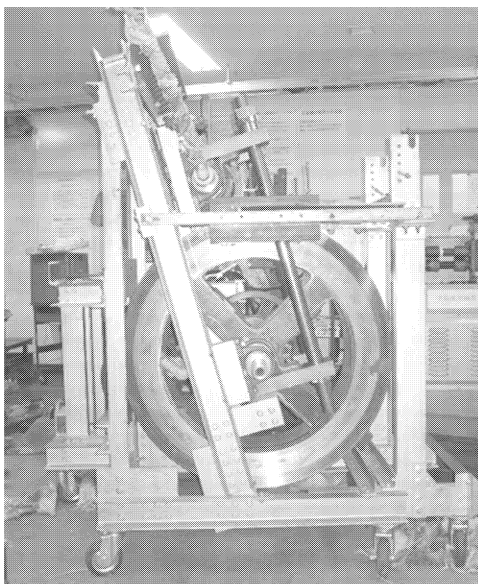


図 13 SS400 ロールを装着した異径ロール型

図 13 に SS400 ロールを装着した異径ロール型溶湯圧延機を示す。これは学内で試作したものである。上ロール径 300mm、下ロール径は 1000mm である。

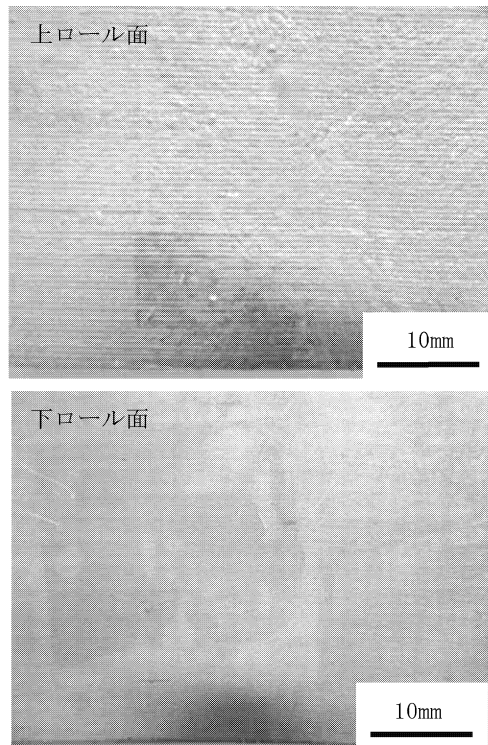


図 14 図 13 に示す異径ロール型の溶湯圧延機で作製した Al-25%Si-4%Mg 合金の溶湯圧延ま材の表面状態。上ロール面に存在する平行線は溝付きロールを使用したためである。

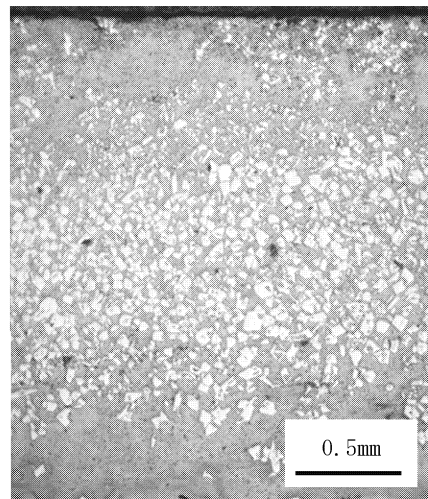


図 15 図 13 に示す異径ロール型の溶湯圧延機で作製した Al-25%Si-4%Mg 合金の溶湯圧延ま材の断面組織

図 13 に示す異径ロール型の溶湯圧延機で作製した Al-25%Si-4%Mg 合金の溶湯圧延を行い、連続的に薄板を作製することができた。凝固距離は銅ロールが 100mm に対して SS400 ロールでは 200mm に延長した。これは、ロールの冷却速度の低下を凝固距離で補うためである。薄板のロールへの固着は発生しなかった。図 14 に溶湯圧

延ま材の表面状態を、また図 15 には断面組織を示す。表面の金属光沢は銅ロールを使用したときと比較して鈍かった。これは Mg の酸化のためと考えられる。また、初晶 Si と共晶 Si は銅ロールの場合と比較すると若干大きい。これは銅ロールと比較して SS400 ロールの冷却速度が低いためである。溶湯圧延ま材は、Mg を添加することによって硬くもろくなった。この原因の一つには Mg_2Si の析出が考えられる。

図 9 に示す工程により溶湯圧延ま材は冷間圧延を行うことができた。Mg の添加による硬度の上昇と SS400 ロールによる冷却能の低下の影響は、圧延を不可能にするほどではなかった。

低コスト化と延性の低下防止を目的として Mg 量を 1%まで減らして薄板の作製を試みたが、固着は発生しなかった。固着の防止には、1%程度の Mg の添加で十分であると考えられる。

リサイクルにおいては、Fe 量の増加が考えられる。自動車のリサイクルでは、1 回のリサイクルで 0.2%の Fe が増加するとされている。3 回のリサイクルを想定して 0.6%の Fe を添加したが、溶湯圧延性には問題はなかった。また、冷間圧延も可能であった。Fe の添加は耐熱温度の上昇には有効である。通常アルミニウム合金のリサイクル材はダイカストに使用されているが、ダイカスト材と同レベルのリサイクル材に Si を添加した合金に対して溶湯圧延を用いれば、安価な低熱膨張材の薄板を作製できると考えられる。

5. 縦型溶湯圧延

高速化によりさらなる低コスト化を目指して縦型⁴⁾の溶湯圧延機を用いて実験を開始した(図 16)。縦型を使用することの利点は溶湯ヘッド圧により、溶湯とロール間の熱伝達を改善できる点にある。溶湯ヘッド圧を利用するために、図 17 に示すようにノズルを装着した。溶湯ヘッドは 100mm、凝固距離は 100mmとした。ロール直径は 300mm、ロール幅は 100mmである。

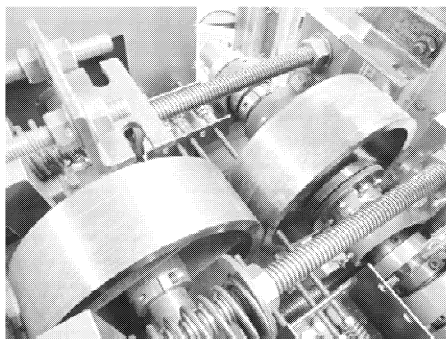


図 16 縦型の溶湯圧延機のロール周辺部

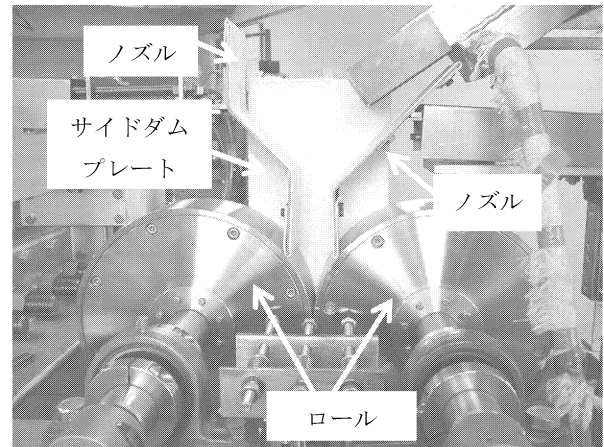


図 17 縦型の溶湯圧延機に取付けたノズル

2009 年度より縦型の溶湯圧延機を用いた実験を開始したが、30m/min 程度の高速で薄板が作製できる可能性を示すデータが得られている。

6. まとめ

リサイクルアルミニウム合金をベースにして過共晶 Al-Si 合金の低熱膨張材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。従来の溶湯圧延機では薄板の作製が困難であった合金の薄板の作製を可能にしたばかりではなく、3~5 倍以上の生産速度を達成した。薄板作製法の開発に時間を費やし、プレス成形性の調査に到達できなかったが、半凝固状態における延性の高さは明らかなので、プレス成形には半凝固ホットスタンピングが適していると考えられる。

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] 乾, 羽賀, 阪口, 熊井, 渡利: 鑄造工学 79 (2007) 537.
- [4] 阪口, 羽賀, 乾, 熊井, 渡利: 鑄造工学 79 (2007) 523.