

溶湯直接圧延法によるリサイクルアルミニウム合金板の プレス成形性の向上

大阪工業大学 工学部 機械工学科

教授 羽賀俊雄

(平成 16 年度研究開発助成 AF - 2004008)

キーワード：溶湯直接圧延，アルミニウム合金板，リサイクル

1. 緒言

地球環境の保護を目的とし自動車の軽量化による燃費向上が進められている。自動車の軽量化は、車体のアルミニウム合金化が中心である。アルミニウム合金は高価であり、安価なリサイクル材の使用は避けられない。アルミニウム合金製のボディをリサイクルする場合、鋼の締結部品が混入することが懸念される。鋼の部品の混入によりリサイクルアルミニウム合金中の不純物 Fe 量が増加することが予想される。Fe 量が増加すると延性、特に曲げ性が劣化し、ヘム加工が困難になる。ヘム加工が困難であることは、自動車のボディシート材として適切ではない。つまり、リサイクル材は、自動車のボディシート材として使用不可能であることを意味する。不純物 Fe を取り除くことは不可能であり、Fe の影響をできるだけ小さくする、つまり無害化が必要になる。

本研究では、高速・高冷却能の溶湯直接圧延法により AlSiFe 金属間化合物を微細化し、リサイクル材の曲げ性の改善を検討した。

2. 高速溶湯直接圧機

溶湯直接圧延機を試作するに際してロール周速の目標を“ \sim m/分”から“ \sim m/秒”の領域、つまり 60m/min 以上と設定した。試作した高速溶湯直接圧延機の中で 4 型にあたる縦型高速溶湯直接圧延機（以後、高速溶湯直接圧延機と記す）の概要を図 1 に示す。従来の溶湯直接圧延機は横型であるが、高速溶湯直接圧延機では縦型を採用した。この理由は以下のような点である。凝固距離を長くしても板の上下面で表面状態や铸造組織に差が発生し難い。ノズルの構造を簡略化できる。ノズル内で溶湯が凝固して詰まる恐れが少ない。鉄鋼用の溶湯直接圧延機も縦型であるがノズルを装着しておらず、この点で高速溶湯直接圧延機と異なる。

高速溶湯直接圧延機は、ロール、ノズルおよび傾斜冷却板から構成されている。高ロール周速化と固液相線間の温度差が広い合金の铸造を可能にするため、熱伝導率

が高い銅製のロールを用いた。ロールの表面には、薄板の固着防止用の離型剤を噴霧していない。薄板の固着にはロール面温度が影響し、銅製ロールでは鋼製ロールほど表面温度が高くなり、薄板の固着が起こらないことが実験により明らかになったためである。離型剤は溶湯（薄板）とロール間の熱抵抗になり、薄板の冷却速度を低下させるため、使用しない方がよい。銅製ロールを使用しているため、従来のアルミニウム合金用溶湯直接圧延機（以後、従来の溶湯直接圧延機と記す）のように铸造と共に 20%以上の高圧下で熱間圧延を行うことは不可能である。しかし、圧下を全く加えないのではなく、ロールと薄板間の熱伝達を良好にするために、単位幅あたり 0.1~1.0 kN/mm の荷重を加えている。一方のロールは固定し、他のロールにはバネにより荷重を加える。板厚は圧下により調節するのではなく、ロール周速と凝固距離によって調節する。ロール周速を速くする、または、凝固距離を短くすると凝固時間が短くなるので板は薄くなり、逆の操作を行うと凝固時間が長くなるので板は厚くなる。铸造開始時は、ロール間隙を板厚より薄い 0.5~2mm に設定しておく。铸造中は、ロール間隙は板厚まで広がる。所定の速度でロールを回転させた後に注湯を開始する。ロール間隙が狭いためロール間隙から溶湯が漏れたりすることはないので铸造のスタートは大変容易である。ロールはバネにより押されているため板厚の変動に追従し、ブレイクアウトも起こりにくい。

ノズルを用いることで、溶湯ヘッドによりノズル先端の溶湯圧力を高めることができる。従来の溶湯直接圧延機では、ノズル（チップ）先端の圧力は、レベルラインの発生を防ぐため極力低く設定されている。しかし、高速溶湯直接圧延機では、溶湯とロール間の熱伝達を改善するため、溶湯圧力を高くするようにしている。溶湯が漏れるのを防ぐため、ノズルの先端とロールは接触している。ノズル先端の位置で、凝固距離を設定することができる。また、溶湯ヘッドがある値以上であれば、湯面が変動しても溶湯とロールの接触状態（ノズル先端のメ

ニスカス)には影響しない。したがって、ノズルを使用することで、正確な湯面レベル制御が必要でなくなる。ノズルは、各2枚のノズルプレートとサイドダムプレートから構成されている。4枚のプレートは機械的に結合しており、1枚ずつ交換可能である。凝固距離は、ノズルプレートの位置で調節可能である。凝固距離を変える場合、新たにノズルを作製する必要はなく、ノズルプレートの位置を変えればよい。サイドダム方式であるため、板幅はロール幅と等しい。

ノズルプレートは、厚さ3mm程度の鋼板に厚さ2mmの耐熱ペーパーを接着しただけの簡単なものである。同様にサイドダムプレートは、鋼板に耐熱クロスを巻き付けただけの簡単な構造である。ノズルは、熱衝撃による破壊を考慮する必要がなく、ロールと接触したときに先端が破壊したりすることも無く、取り扱いは大変容易である。耐熱ペーパーと耐熱クロスは消耗するため交換するが、鋼板は複数回使用可能である。鋼板であるため、折曲や溶接ができるので形状の選択の自由度が高く、ボルトなどにより機械的に溶湯直接圧延機に取り付けることができる。図2にノズルの周辺部を示す。

ノズル内で溶湯が凝固することを防ぐために、注湯前にノズルを余熱する必要はない。これは、溶湯のノズルを通過する時間が短いこと、およびノズルの熱容量が小さいために溶湯の温度低下が低いためである。

铸造速度の高速化を目的として低温铸造または半凝固铸造を行うため、傾斜冷却板を装着した。傾斜冷却板は、構造が簡単でコンパクトであり、注湯用の樋の変わりに設置して注湯するだけで半凝固铸造が行える。

一般の半凝固加工の固相率は50%程度であるが、高速溶湯直接圧延機の固相率は5%以下を目安とした。固相率が20%以下の場合、半凝固金属は流体の挙動を示すとされている。ノズル内を半凝固金属がスムーズに流れるためには、固相率は20%以下がよい。また、表面クラックを防ぐためにも固相率は高くない方がよい。

球状化した初晶を得る事が目的ではなく、冷却速度を高めることが目的であるため、5%以下の固相率を目安とした。低温铸造の場合は、スーパーヒートは5℃以下を目安とした。Al-SiやAl-Mg-Siなどの合金は半凝固铸造、Al-MgやAl-Mnなどの合金では低温铸造を行った。

従来の溶湯直接圧延機と高速溶湯直接圧延機の比較を表1に示した。

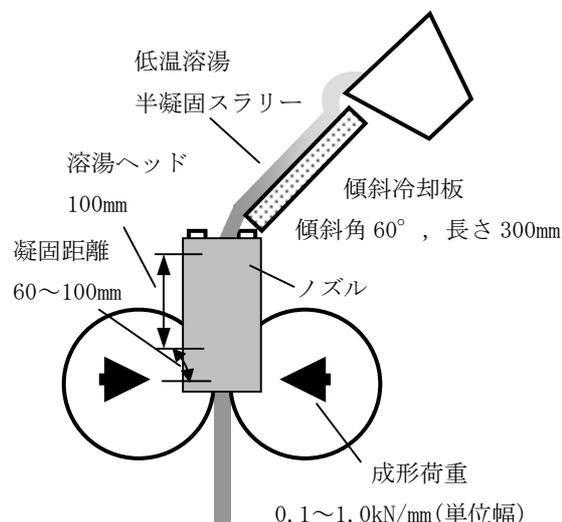


図1 縦型高速溶湯直接圧延機の概略図

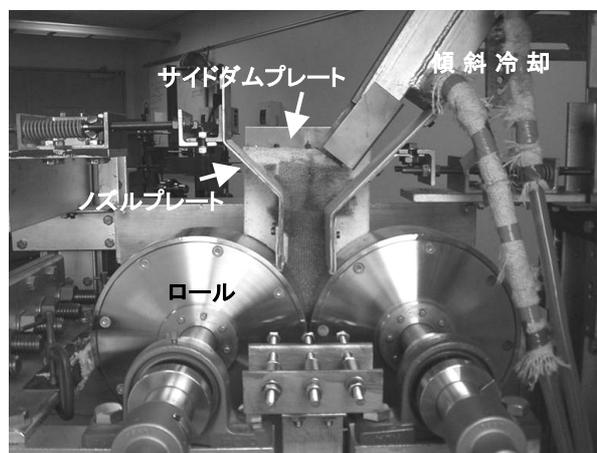


図2 ロールとノズルの周辺部

表1 溶湯直接圧延機の比較

比較項目	従来の溶湯直接圧延機	縦型高速溶湯直接圧延機
型式	横型	縦型
ロール材質	鋼	銅
離型剤	使用する	使用しない
成形荷重	1~10 kN/mm(単位幅)	0.1~1.0 kN/mm(単位幅)
ロールスピード	1~15 m/min	60~150 m/min
注湯温度	一般的な温度で铸造	低温铸造, 半凝固铸造
薄板の厚さ	4~7 mm	2~3.5 mm

3. A6063 および AC4C リサイクル材への適用

A6063 と AC4C に不純物を想定して Fe を添加して薄板を鋳造した。基礎的な研究であるため、実際のリサイクルで想定されるより多量の Fe を添加した条件においても板を鋳造した。Fe を 4% まで添加したが、Fe の添加はロールキャスト性には影響を及ぼさず、連続的に薄板を鋳造することができた。Fe を添加することにより板表面の金属光沢は乏しくなる傾向がみられたが、表面欠陥は発生しなかった。Fe 添加量が増すにしたがい、板は薄くなる傾向を示した。融点が高くなることと、よりマッシー状態になることが原因であると考えられる。Fe を添加したものでは中央部の粒状組織がデンドライト組織に変わった。これが Fe の添加の影響であるか、鋳造条件が不適切あるためか今後調査する予定である。Fe の添加量が 1% 以上では、板厚方向の中央部に Fe を含む金属間化合物が晶出していた。この金属間化合物は針状であるが、粗大なものは観察されなかった。急冷効果により金属間化合物は微細に晶出したと考えられる。表面近傍では、中央部に見られたような金属間化合物の晶出物は無かった。これは、表面近傍の方が内部より冷却速度が高いためと考えられる。Fe を 4% 添加した場合も 0.5mm まで冷間圧延を行うことができた。Fe を添加した場合も鋳造板に見られた板厚方向の不均一な組織は改善され、ほぼ均一な組織になった。板厚方向の中央部に晶出した金属間化合物は、冷間圧延により分断されたようである。急冷効果と塑性加工により金属間化合物を微細化できる可能性がある。従来の溶湯直接圧延機で鋳造した Fe を 2% 添加した AC4C の薄板の断面は、板厚方向の中央部に Fe を含む金属間化合物が連続的に晶出していた。この板に均質化処理の後に冷間圧延を行ったが、板の中央部で罅割れを起こし、圧延は不可能であった。高速溶湯直接圧延機で鋳造した薄板は、Fe を 4% 添加した場合でも罅割れを起こさずに冷間圧延を行うことができた。これは、金属間化合物が微細であり、また金属間化合物は板厚中央部のバンド状の部分に分散して存在したためであると考えられる。リサイクル材に対しても従来の溶湯直接圧延機と比較して高速溶湯直接圧延機が有利であること示す結果であると考えられる。

Fe を添加した AC4C の T6 材の引張試験の結果は、Fe の添加量が 0.75% までは、伸びは低下せず AC4C とほぼ同じ値を示した。添加量が 0.75% を超えると Fe の増加に従い伸びは徐々に低下した。引張強さと耐力は、Fe 添加量が 0.75% を超えると徐々に増すが、伸びの低下ほど変化の割合は大きくなかった。通常の鋳造では Fe 量が 0.5% 以下においても Fe の増加と共に伸びと引張強さが

低下することが報告されている。Fe の添加量が 0.75% 程度まで伸びが低下しなかったことは、リサイクル材に対する高速溶湯直接圧延の有効性を示していると考えられる。Fe を添加した AC4C の 180° 曲試験では、T4 処理の場合は、Fe の添加量が 0.5% までは外表面にクラックが発生しなかった。引張試験の結果と合わせて判断する、AC4C においては Fe 添加量が 0.5% までは、高速溶湯直接圧延機を使用することで延性の低下を防ぐことができそうである。Fe を 2% 以上添加すると破断してしまった。同様の 180° 曲試験を A6063 に Fe 添加した場合にも行ったが、Si 量が少ないため Fe を 4% 添加した場合でも T4 処理材では外表面にクラックは発生しなかった。

A6063 に Fe を 2% 添加した場合の組織は、断熱材の鋳型で鋳造した場合は、長さ 100 μ m 以上の針状の Fe を含む金属間化合物が晶出した。しかし、高速溶湯直接圧延機で鋳造した薄板には、このような粗大な金属間化合物は確認できなかった。また、Fe を添加したことで初晶が微細化した。A6063 と A6063 に Fe を添加場合の T6 材の引張試験では、Fe を 0.35% 添加した場合は、機械的性質は劣化せず A6063 より引張強さと伸びが向上した。結晶粒の微細化と金属間化合物が微細分散したことが原因で機械的性質が向上したと推測される。高速溶湯直接圧延機を使用した場合、リサイクル材の機械的性質の低下防ぐだけでなく、逆に向上できる可能性があることが明らかになった。Fe を 1% 添加した場合は時効効果が得られず、T6 処理後も引張強さと耐力が向上しなかった。Si が金属間化合物に含まれたため、 Mg_2Si として析出すべき Si が不足したため時効効果が得られなかったと考えられる。AC4C の場合は Si が十分に存在したため、時効効果が得られた。

Fe を添加することにより金属光沢は乏しくなる傾向がみられたが、表面欠陥は発生しなかった。板厚に対して Fe 添加量の影響し、Fe 添加量が増すにしたがい、板は薄くなる傾向を示した。融点が高くなることと、よりマッシー状態になることが原因であると考えられる。

Fe を添加したものでは中央部の粒状組織がデンドライト組織に変わった。これが Fe の添加の影響であるか、鋳造条件が不適切あるためか今後調査する予定である。Fe の添加量が 1% 以上では、板厚方向の中央部に Fe を含む金属間化合物が晶出していた。この金属間化合物は針状であるが、粗大なものは観察されなかった。急冷効果により金属間化合物は微細に晶出したと考えられる。表面近傍では、中央部に見られたような金属間化合物の晶出物は無かった。これは、表面近傍の方が内部より冷却速度が高いためと考えられる。均質化処理、0.5mm まで

の冷間圧延後に T6 処理を行った薄板の断面組織も調査した。Fe を 4% 添加した場合も 0.5mm まで冷間圧延を行うことができた。Fe を添加した場合も鋳造板に見られた板厚方向の不均一な組織は改善され、ほぼ均一な組織になった。板厚方向の中央部に晶出した金属間化合物は、冷間圧延により分断されたようである。急冷効果と塑性加工により金属間化合物を微細化できる可能性がある。従来の直接圧延機で鋳造した Fe を 2% 添加した AC4C の薄板の断面組織は、板厚方向の中央部に Fe を含む金属間化合物が連続的に晶出していた。この板に均質化処理の後に冷間圧延を行ったが、板の中央部で鱗口割れを起こし、圧延は不可能であった。高速溶湯直接圧延機で鋳造した薄板は、Fe を 4% 添加した場合でも鱗口割れを起こさずに冷間圧延を行うことができた。これは、金属間化合物が微細であり、また金属間化合物は板厚中央部のバンド状の部分に分散して存在したためであると考えられる。リサイクル材に対しても従来の溶湯直接圧延機と比較して高速溶湯直接圧延機が有利であること示す結果であると考えられる。

Fe を添加した AC4C の T6 材の引張試験では、Fe の添加量が 0.75% までは、伸びは低下せず AC4C とほぼ同じ値を示した。添加量が 0.75% を超えると Fe の増加に従い伸びは徐々に低下した。引張強さと耐力は、Fe 添加量が 0.75% を超えると徐々に増すが、伸びの低下ほど変化の割合は大きくなかった。通常の鋳造では Fe 量が 0.5% 以下においても Fe の増加と共に伸びと引張強さが低下することが報告されている⁵⁾。Fe の添加量が 0.75% 程度まで伸びが低下しなかったことは、リサイクル材に対する高速ロールキャストの有効性を示していると考えられる。Fe を添加した AC4C の 180° 曲試験を行った。T4 処理の場合は、Fe の添加量が 0.5% までは外表面にクラックが発生しなかった。引張試験の結果と合わせて判断する、AC4C においては Fe 添加量が 0.5% までは、高速溶湯直接圧延機を使用することで延性の低下を防ぐことができそうである。Fe を 2% 以上添加すると破断してしまった。同様の 180° 曲試験を A6063 に Fe 添加した場合にも行ったが、Si 量が少ないため Fe を 4% 添加した場合でも T4 処理材では外表面にクラックは発生しなかった。

A6063 に Fe を 2% 添加した場合、断熱材の鋳型で鋳造した場合は、長さ 100 μm 以上の針状の Fe を含む金属間化合物が晶出した。しかし、高速溶湯直接圧延機で鋳造した薄板には、このような粗大な金属間化合物は確認できなかった。また、Fe を添加したことで初晶が微細化した。A6063 と A6063 に Fe を添加場合の T6 材の引張試験

では、Fe を 0.35% 添加した場合は、機械的性質は劣化せず A6063 より引張強さと伸びが向上した。結晶粒の微細化と金属間化合物が微細分散したことが原因で機械的性質が向上したと推測される。高速溶湯直接圧延機を使用した場合、リサイクル材の機械的性質の低下防だけでなく、逆に向上できる可能性があることが明らかになった。Fe を 1% 添加した場合は時効効果が得られず、T6 処理後も引張強さと耐力が向上しなかった。Si が金属間化合物に含まれたため、Mg₂Si として析出すべき Si が不足したため時効効果が得られなかったと考えられる。AC4C の場合は Si が十分に存在したため、時効効果が得られた。

4. 自動車用ボディーシート材への適用

自動車用ボディーシート材として広く使用されている A6016 のリサイクル材についても、高速溶湯直接圧延による延性の向上を調査した。Fe 量は、0.18, 0.5, 0.75, 1.0mass% とした。オリジナルの A6016 の Fe 量は 0.18mass% であり、リサイクルを想定してこれに Fe を添加して上記の Fe 量とした。図 3 に鋳造まま材の表面状態を示す。全て薄板に鋳造することができた。Fe 量が増加したことが原因と思われる表面欠陥は発生しなかった。また、連続性は Fe 量が増加するに従い、改善された。

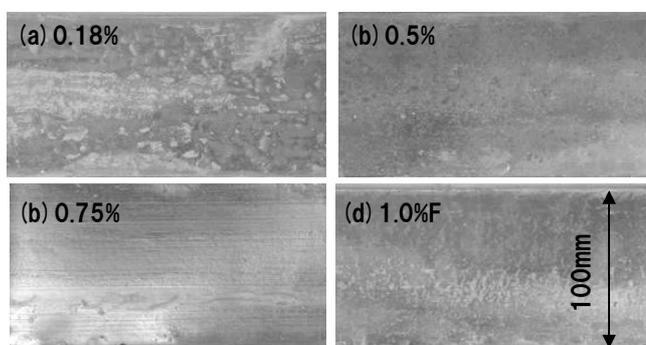


図 3 A6016 および Fe を添加した A6016 板の表面状態

図 4 に Fe 量が 0.18% と 1.0% の鋳造まま材の断面組織の光学顕微鏡による観察結果を示す。中央部は粒状化しておりその両側（ロール接触面側）がデンドライト組織であることは、AC4C や A6016 と同様である。

図 5 に 180° 曲げ試験の後の表面状態を示す。1 mm まで冷間圧延後に T4 処理を行った。Fe 量が 0.18% から 1.0% まで増加した場合も表面にクラックは発生しなかった。

図 6 には断面組織を示す。断面状態からも 180° 曲げによりクラックが発生していないことは明らかである。

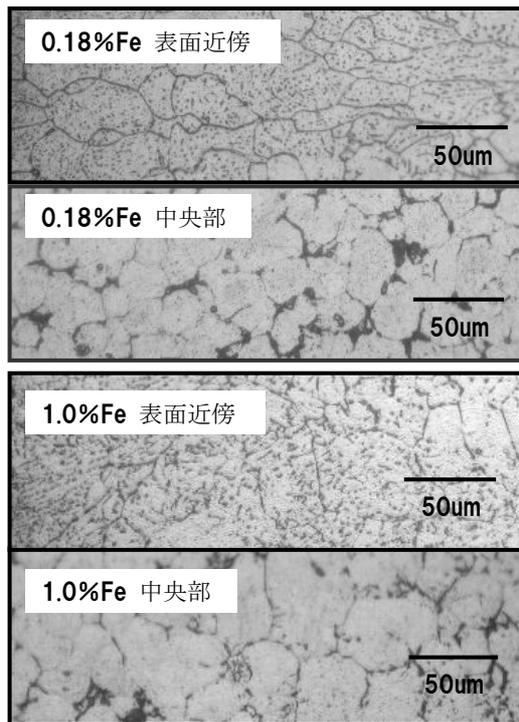


図4 A6016 および Fe を添加した A6016 板の断面組織

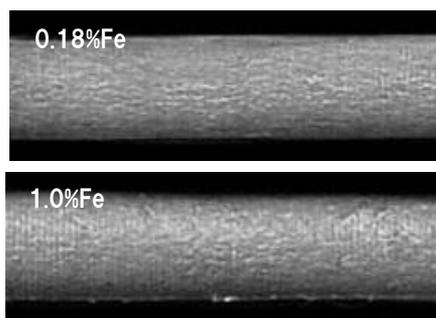


図4 A6016 および Fe を添加した A6016 板の 180° 曲げ後の表面状態. 1mm まで冷間圧延後 T4 処理.

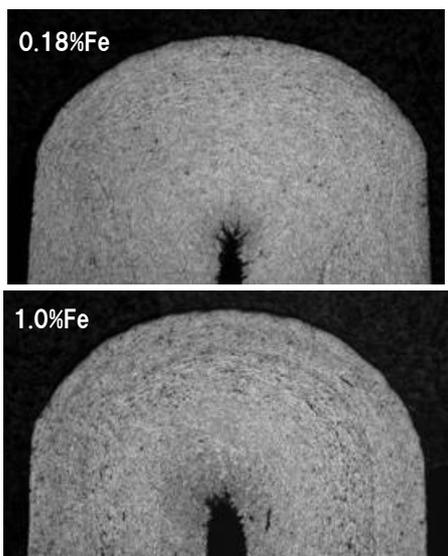


図5 A6016 および Fe を添加した A6016 板の 180° 曲げ後の断面組織. 1mm まで冷間圧延後 T4 処理.

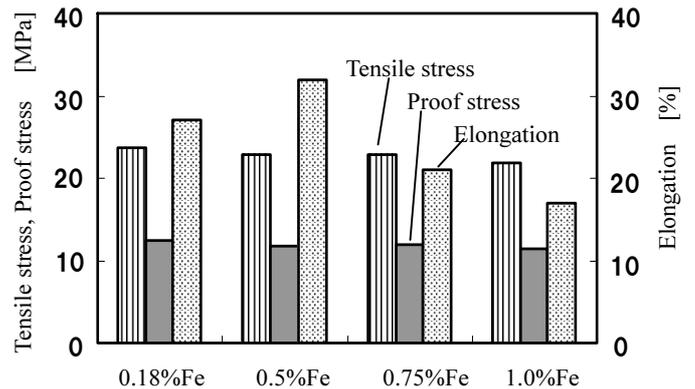


図6 A6016 および Fe を添加した A6016 板の引張試験. 1mm まで冷間圧延後 T4 処理.

リサイクル材を自動車のボディーシート材と使用する場合に最も問題となる、ヘム加工時に発生するクラックを防ぐことができる可能性があることが明らかになった。また、铸造まま材では板厚方向の組織は不均一であったが、冷間圧延と T4 処理により不均一は緩和された。また、粗大な AISiFe 系の金属間化合物の晶出は見られなかった。これは、高冷却速度の結果と思われる。

図6に引張試験の結果を示す。Fe量の増加は引張強さと0.2%耐力に影響を与えていないようである。伸びはFe量が0.75%までは20%以上の値を示した。また、Fe量が0.5%のときは0.18%より大きな伸びの値を示した。Fe量が増加による結晶粒の微細化などが影響していると考えられる。

5. まとめ

縦型高速溶湯直接圧延機によりリサイクルアルミニウム合金の曲げ性の改善を検討した。自動車用ボディーシート材として使用されている A6016 においては、Fe 量が 1mass% の場合においても 180° 曲げが可能で合った。これは AISiFe 系の金属間化合物が、縦型高速溶湯直接圧延機の急冷効果により微細に晶出したためと考えられる。

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] T. Haga, J.Mater.Process.Technol.,133(2003)103-107.
- [2] T. Haga, J.Mater.Process.Technol.,143(2003)895-900.
- [3] T. Haga, J.Mater.Process.Technol.,153(2004)42-47.