



T. Haga

直接圧延とひずみ付加を利用した 半凝固鍛造用素材の開発

羽賀 俊雄*

1. はじめに

セミソリッド加工は、チクソキャスト¹⁾が初めに実用化され、次いでレオキャスト¹⁾が実用化された。現在は、レオキャスト¹⁾が中心になりつつあると思われる。それはレオキャスト¹⁾が以下のような利点を有するためと考えられる。レオキャスト¹⁾は、チクソキャスト¹⁾のように特別な素材の購入を必要としない、チクソキャスト¹⁾と比較して結晶粒や共晶 Si の微細化が期待できる、成形時の固相率を低くすることが容易である、などが挙げられる。一方、チクソキャスト¹⁾にも利点があり、溶解設備が必要ない、リサイクル材に適用できる可能性がある、などである。それぞれのプロセスに一長一短がある。本研究では、縦型高速双ロールキャスター（溶湯直接圧延機）を用いてこれにより作製した薄板を積層して安価なチクソキャスト¹⁾用の素材を作製する方法を検討した。

一枚の板が厚い方が、積層枚数が少なくなり低コスト化が期待できる。また、小物であれば、一枚の板を適当な寸法に切断したものを素材として使用できる可能性がある。そこで 10mm 以上の厚さの板を半凝固注湯により作製することも試みた。半凝固スラリーの作製には傾斜冷却板を使用した。この場合は、異径双ロールキャスターを使用した。

リサイクル材の使用を想定して 1% の Fe を添加したものについても薄板を作製し、Fe を含む金属間化合物の微細化、つまり無害化の可能性について調査した。縦型高速双ロールキャスターでは急冷効果により Fe を含む金属間化合物は微細化する。薄板の T6 処理までは急冷効果があること、つまり延性の改善を確認している。しかし、半熔融温度まで加熱した場合については Fe を含む金属間化合物の形態等については確認をしていない。as-cast 材と 20% のひずみを付加した薄板を半熔融温度まで加熱し、組織観察を行った。

2. プロセスの概要と実験方法

2.1 積層材の作製方

積層材は、双ロールキャスターによりより铸造した薄板から作製した。薄板は溶湯または半凝固スラリーから铸造する²⁾。図 1 に縦型高速双ロールキャスターを示す。積層材は、铸造したままの板と圧延によりひずみを付加³⁾した板から作製した。図 2 に積層方法を示す。薄

板を所定の寸法に切断し、各板を溶接により接合して積層材とした。薄板の作製には、冷却速度と生産性の視点から縦型高速双ロールキャスターを用いた。従来のアルミニウム合金用の双ロールキャスターのロール周速は 5 m/min 以下である。これに対して、本研究の高速双ロールキャスターは、60m/min 以上の高速で薄板の作製が可能である。生産性は従来のアルミニウム用双ロールキャスターの 5 倍以上に達する。従来のアルミニウム合金用双ロールキャスターのロールシェルは鋼製で薄板の固着を防ぐために表面に離型剤を噴霧している。これに対して本研究の双ロールキャスターではシェルを銅で作製しており、離型剤は使用していない。このため従来のアルミニウム合金用双ロールキャスターで作製した薄板より、本研究で作製した薄板の冷却速度は高い。冷却速度が高いことは、初晶の微細球状化には有利である。

半熔融鍛造用の素材として使用できる、つまり半熔融状態において初晶が球状化する積層材の薄板の作製方法として、本研究では、①半凝固铸造、②半凝固铸造とひずみ付加、③低温铸造、④低温铸造とひずみ付加、⑤ひずみ付加の方法を検討した。ひずみは冷間圧延で付加した。素材には、半熔融凝固素材として広く使用されている AC4C 合金を用いた。

半凝固スラリーの作製方法としては、電磁攪拌、機械式攪拌、傾斜冷却板があるがこの中で傾斜冷却板⁴⁾が構造的に最もシンプルでありランニングコストも低い。また、双ロールキャスターに取り付けるのも容易である。装着のために双ロールキャスターに特別な改造を施す必要は無い。双ロールキャスターでは連続的に薄板を作製するためには注湯量を適切にコントロールする必要がある。このコントロールが傾斜冷却板では容易である。注湯方法は、傾斜冷却板を組み込まない場合と相違がない。半凝固加工では、成形時の固相率は 50% の場合が多い。ダイカストなどにおいて空気の巻き込みを防ぐには適切な固相率であると考えられる。しかし、ロールキャスト¹⁾の場合は、ロール間隙への材料の供給や凝固によるロールの停止などを考慮すると固相率は 20% 未満が良いと考えられる。本研究では 5% 未満とした。低固相率の半凝固スラリーを作製するのに傾斜冷却板は適当である。固相率は、注湯温度、傾斜冷却板の長さ、傾斜角度で調節可能である。

縦形の高速双ロールキャスターは、従来のアルミニウム合金用双ロールキャスターと比較して、半凝固铸造に適している。それは、ロール間隙において固相率が変化し難しく、素材が詰まりにくいからである。

* 大阪工業大学機械工学科 教授

半凝固鍛造のプロセスの模式図を図3に示す。縦型のチクソフォーミング用プレスを使用した。試料を誘導加熱後に黒鉛型を使用して鍛造を行った。半凝固鍛造の条件を表1に示す。

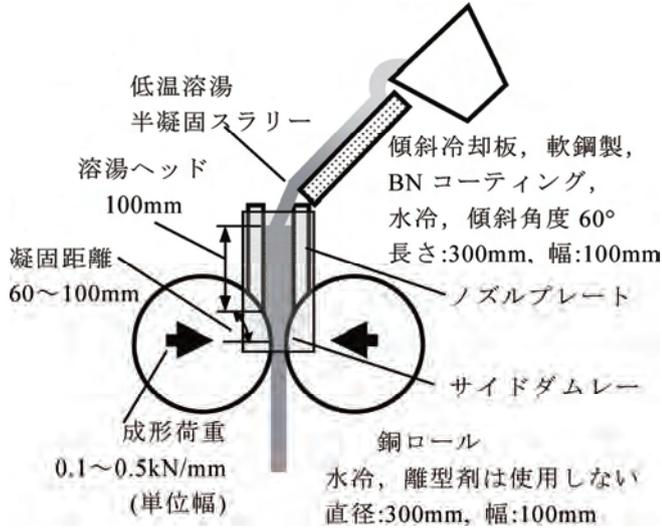


図1 縦型高速双ロールキャスター

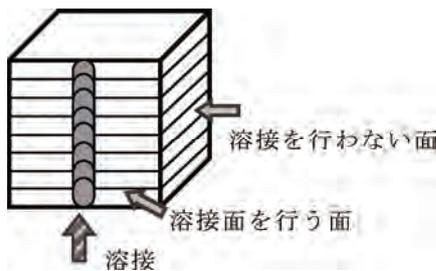


図2 薄板の積層方法

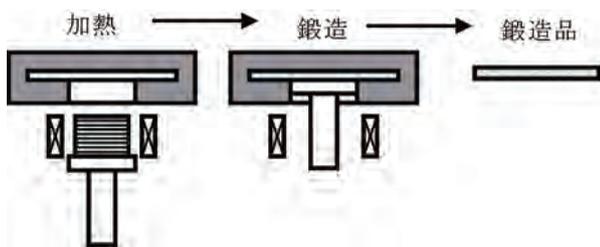


図3 半凝固鍛造プロセス

表1 半凝固成形条件 (AC4C)

積層材寸法	40×40×40mm
成形温度	580℃
成形荷重	100 k N
ラム速度	500mm/s
型	80×70×8mm 材質 黒鉛
加熱方法	高周波加熱

2.2 リサイクル材への適用

リサイクル材を想定し⁵⁾, AC4C合金に1%のFeを添加した薄板を铸造し, ひずみを付加したのち, 半熔融状態まで加熱・水冷を行い半熔融状態における組織を観

察した。薄板铸造時にFeを含む金属間化合物を微細に晶出させるためには低温铸造が有効であると考えた。低温铸造したロールキャスト板に冷間圧延でひずみを加えた。

2.3 素材用铸造板の厚化

薄板を積層することは, 生産コストの観点からは適切ではない。そこで10mm以上の厚さの薄板を半凝固ロールキャストにより铸造した。この場合は, 傾斜冷却板を装着した異形双ロールキャスターを使用した。板を厚くするためには, 注湯温度を下げることに铸造時間を長くすることが有効である。注湯温度を下げるためには傾斜冷却板を用いて半凝固注湯を行った。铸造時間を長くするためには, ロール周速を遅くすることと凝固距離を長くすることが有効である。ロール周速は5m/minとした。このようなロール周速においてもロール間隙で試料が詰まりロールが停止するのを防ぐために図4に示す異径双ロールキャスターを使用した。铸造は主に下ロールで行い, 上ロールは板の表面状態の成形を行う。溶湯溜まりを形成するために縦型双ロールキャスターではサイドダムプレートを使用した。異径双ロールキャスターではロールと共に回転するつばを使用した。つばは下ロールに装着した。サイドダムプレートを使用すると板が厚いため摩擦が大きくなり, 板がロールと共に移動できない場合があったため, つばを使用した。

厚さが10mm以上の板は, 熱間鍛造用の素材としても利用可能である。ここでは, 半熔融鍛造と熱間鍛造の素材の共通化を考慮し, A4045合金を使用した。

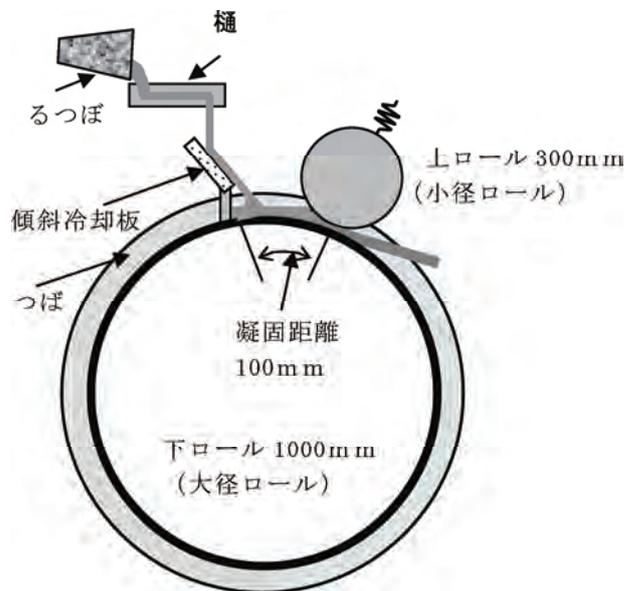


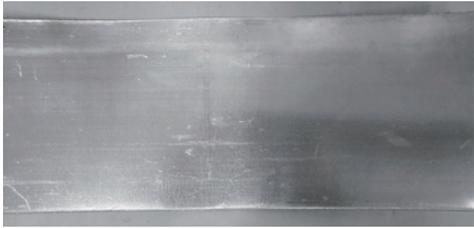
図4 异形双ロールキャスター (板厚10mm以上)

4. 実験結果

4.1 縦型高速ロールキャスター

縦型高速双ロールキャスターにより铸造した薄板を図5に示す。AC4C板は, 一般的な铸造においては铸造性が良いとされている。高速ロールキャストにおいても薄板を作製し易い合金であった。90m/minの高速でもすべての条件で薄板の作製が可能であった。板厚は, 通常の注湯, 低温铸造, 半凝固铸造の順で厚くなった。

1.8mm から 3mm 程度の範囲の板厚であった。溶湯から作製した板と半凝固スラリーから作製した板の表面状態には差異は見られなかった。



(a) 鋳造板 (as-cast 板) の表面状態



(b) 鋳造板 (as-cast 板) のコイル

図 5 縦型高速双ロールキャスターで鋳造した AC4C 板の一例

図 5 のロールキャスト AC4C 板の一例に示すように、鋳造したままの状態の板をコイル状にすることが可能であり、板幅は一定であった。表面には積層時に害を及ぼすと考えられる表面欠陥は存在しなかった。ロールキャストしたままの状態の板に対して、冷間圧延によりひずみを付加した板を半凝固状態まで加熱して初晶の状態を調査した。AC4C には Si が 6 mass% 以上含まれているが、鋳造したままの状態で冷間圧延が可能であった。本研究のロールキャスト板は、冷却速度が高く結晶粒が微細化したため、延性が得られたと考えられる。図 6 にロールキャスト板の共晶 Si を示す。共晶 Si は $2\mu\text{m}$ 以下と大変微細であり、かつ粒状かしていた。これが延性の向上に大きく影響していると考えられる。

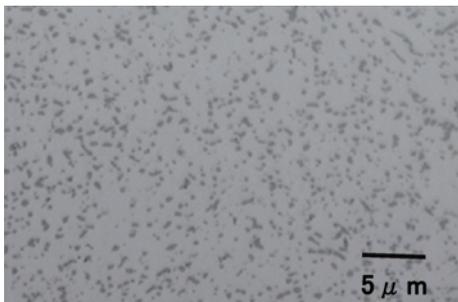


図 6 ロールキャスト AC4C 板の共晶 Si

図 7 に薄板から作製した積層材を示す。形状は 1 辺が 40mm の立方体であり、2 面を溶接することで各板を結

合した。

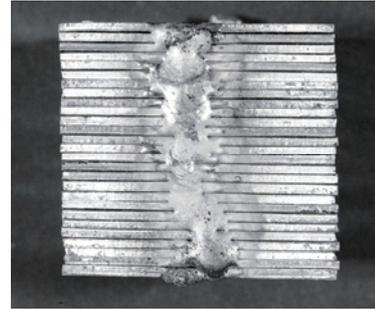


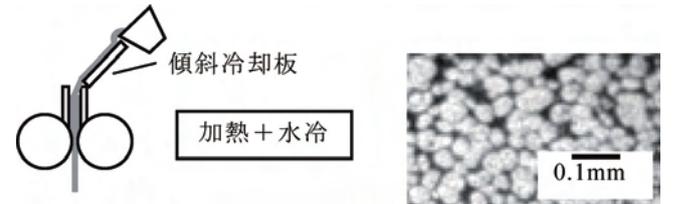
図 7 薄板から作製した積層材。1 辺が 40mm の立方体



(a) スーパーヒート 50°C で鋳造



(b) スーパーヒート 50°C で鋳造した板に冷間圧延



(c) 半凝固鋳造



(d) 半凝固鋳造した板に冷間圧延

図 8 薄板の作製方法と半凝固状態の組織

各方法で作製した薄板を半凝固状態に加熱して水冷し、半凝固状態における組織を調査した。薄板の組織と半凝固状態まで加熱後に水冷した場合の組織を図 8 に示す。スーパーヒートが 50°C の通常の注湯で作製した薄板は、図 8 (a) に示すように半凝固状態まで加熱しても初晶は球状化しなかった。しかし、冷間圧延でひずみを付加すると図 8 (b) に示すように初晶は球状化した。低温鋳造と半凝固鋳造で作製した薄板は、図 8 (c) に示すように半凝固状態で初晶が球状化した。また、低温鋳造と半凝固鋳造で作製した薄板にさらにひずみを付加しても、図 8 (d) に示すように初晶が小さくなるまたは球状化の度合いが増すなどの効果は見られなかった。ひずみを付加すると球状化する温度が若干高くなる現象が見られた。通常の注湯で作製した薄板と半凝固鋳造で作製した薄板の両方

とも中心部と表面近傍では組織は異なり、板厚方向で組織は均一ではなかった。通常の注湯で作製した薄板の表面近傍は小さく短い柱状組織であるのに対し中心部は等軸組織に近かった。半凝固鑄造で作製した薄板の表面近傍は、通常の注湯で作製した薄板より細かな柱状組織でその中に球状組織が点在した。また、内部は微細な球状組織であった。低温鑄造で作製した薄板の組織は、半凝固鑄造で作製した薄板の組織に似ていた。半凝固状態まで加熱したとき、通常の注湯で作製した薄板の初晶は球状化しなかった。しかし、他の条件で作製した薄板の初晶は球状化し、チクソキャスト用の素材として使用できる可能性があることが明らかになった。鑄造したままの状態の板の組織は板厚方向で均一ではない。しかし、半凝固状態まで加熱したときは、板厚方向でほとんど均一な組織になった。

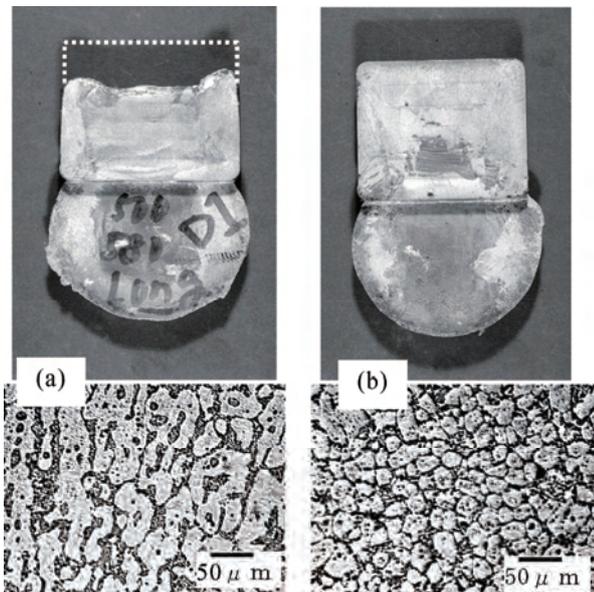


図9 半凝固鍛造の状態に対する半凝固状態における初晶の形態の影響

半凝固状態まで加熱したときに初晶が球状化しなかった板、つまり通常の注湯で鑄造した板で作製した積層材をチクソキャストした場合は、図9(a)に示すように材料は型に充満しなかった。これは初晶が球状化していないため、良好な流動性が得られなかったためと考えられる。これに対し、図8で半凝固状態において初晶が球状化する条件の板で作製した積層材をチクソキャストした場合は、図9(b)に示すように材料は型に充満した。この結果より、薄板から作製した積層材はチクソキャスト用の素材として使用可能であると判断できる。

低温鑄造と半凝固鑄造で作製した板は、ひずみを付加しなくても初晶は球状化した。これらの方法で板を作製すれば、圧延工程が必要ではなく通常の注湯で作製した板からチクソキャスト用素材の積層材を作製するより低コストになる。実際の生産においてスーパーヒートを5°C程度に保持して溶湯をハンドリングするのは容易ではない。傾斜冷却板を使用すれば、低温鑄造の場合であればスーパーヒートは30°C程度まで高くできる。操

作とコストの点から判断すると、傾斜冷却板を使用して低温鑄造した板で積層材を作製するのが適当である。

表2に半凝固鑄造板で作製した積層材をチクソキャストしたものの機械的性質を示す。電磁攪拌で作製した連鑄棒の素材とほぼ同等の機械的性質を示した。

表2 半凝固成形材の機械的性質 (T6)

引張り強さ	0.2% 耐力	伸び
315 MPa	253 MPa	8%

4.2 リサイクル材を想定してFeを添加した場合

リサイクルを想定して1%のFeをAC4Cに添加して薄板の鑄造を試みた。Feを添加しても薄板の連続的な鑄造は可能であった。ロールキャスト板の断面組織を図10に示す。板の表面近傍は板厚中央部より冷却速度が高く組織は微細であった。図11にロールキャスト板の中央部の共晶組織と金型鑄造材の共晶部の組織を示す。金型鑄造材では、Feを含む金属間化合物が針状に晶出していた。しかし、ロールキャスト板ではこのような針状の金属間化合物は観察されなかった。Feを含む金属間化合物は、急冷効果により微細に分散して晶出したものと推測される。

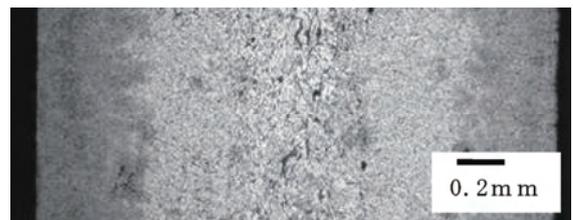


図10 Feを1%添加したAC4C合金のロールキャスト板の断面組織

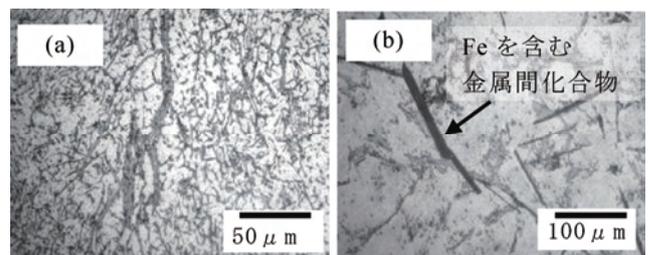


図11 Feを1%添加したAC4C合金のロールキャスト板と金型鑄造材の共晶組織。
(a)ロールキャスト板、(b)金型鑄造材。

Feを1%添加したAC4C合金のロールキャスト板とこの板に冷間圧延により20%ひずみを加えた薄板を580°Cの半凝固状態まで加熱後に水冷して半凝固状態の組織を観察した。図12にこれらの組織を示す。ロールキャスト板を半凝固状態まで加熱した場合は、図12(a)に示すように共晶Siは微細ではあるが針状であった。図11(b)に示すような粗大な針状のFeを含む金属間化合物は観察されなかった。ひずみを付加したものは、図11(b)に示すように共晶Siは微細で粒状であった。粗大で針状のFeを含む金属間化合物は観察されなかった。これらの結果より、ロールキャスト板から作製した半凝固鍛造用の素

材は、リサイクル材に含まれる Fe の影響を無害化できる可能性がある。現在、積層材をロールキャストで直接作製する技術を検討している。リサイクル材の半凝固鍛造については継続して研究を行う予定である。

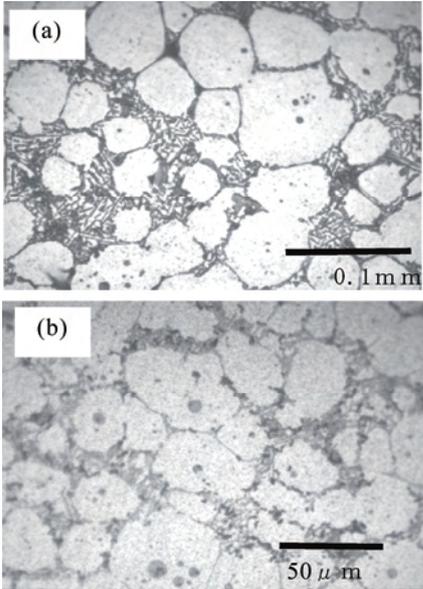


図 12 Fe を 1% 添加した AC4C 合金のロールキャスト板と 20% ひずみを加えた板の 580°C の半凝固状態における組織。(a)ロールキャスト板、(b)ロールキャスト板にひずみを加えた場合

4.3 異形双ロールキャストによる厚板の製造

図 4 に示す異形双ロールキャストにより厚さが約 18mm の A4045 の板を製造することができた。AC4C 合金においても同様の厚さの板の製造は可能であると考えられる。図 13 に製造した板の表面と断面を示す。異形双ロールキャストで半凝固製造を行い、厚さ 18mm の板を 5 m/min の速度で作製することができた。

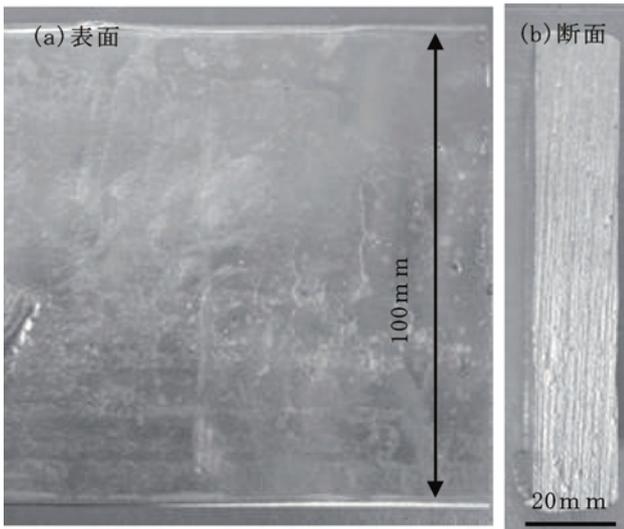


図 13 A4045 合金板の表面と断面

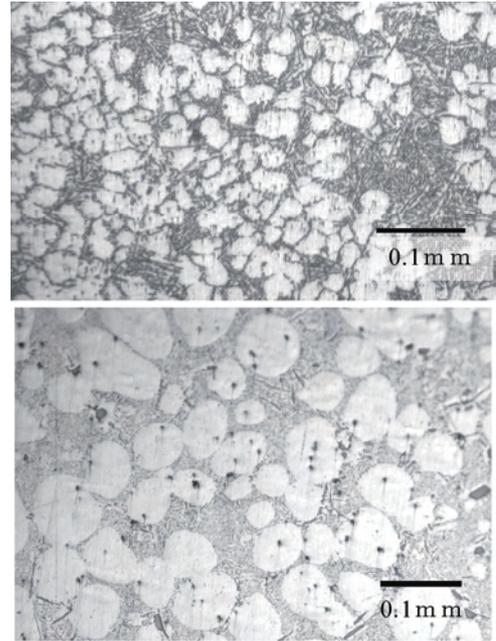


図 14 A4045 合金のロールキャスト板と半凝固状態の組織。(a)as-cast 材、(b)半凝固状態

図 14 に A4045 合金のロールキャスト板(as-cast 材)と半凝固状態まで加熱後に水冷した場合の組織を示す。傾斜冷却板を使用して半凝固注湯を行ったため、ロールキャスト板の初晶は粒状化していた。初晶は、粗大化した半凝固状態においても粒状化していた。異径双ロールキャストにより製造した厚さが 18mm の板は、そのままの状態でも半凝固鍛造用の素材として使用できる可能性があると考えられる。今後、さらに厚い板の製造条件を探索する必要がある。

5. 結言

ひずみを加えたロールキャスト板から作製した積層材をチクソキャスト用の素材として使用することを検討した。その結果、積層材は、チクソキャストのとき良好な流動性を有し、積層材が半凝固鍛造用の素材として使用できる可能性を示した。

Fe を 1% 加えた場合でもロールキャスト板の半凝固状態の組織には針状の金属間化合物は観察されなかった。つまり、リサイクル材に含まれる Fe を無害化した半凝固鍛造用素材を作製できる可能性を示すことができた。

異径双ロールキャストにより半凝固製造した厚さが 18mm 程度の板は、そのままの状態でも半凝固鍛造用の素材として使用できる可能性を有すること示した。

参考文献

- 1) たとえば岡野忍：塑性と加工,41-479 (2000),1162.
- 2) 羽賀俊雄：塑性と加工,41-479 (2000),1231.
- 3) 羽賀俊雄：塑性と加工,41-479 (2000),1226.
- 4) 劉馳・青山俊三・坂本勝美・茂木徹一：第 175 回組成加工シンポジウム,(1997),17.
- 5) 伊藤隆文, 手塚裕康, 里達雄：軽金 117 回春期講演概要, (2009), 267.