アルミニウム合金用高速ロールキャスター

羽賀 俊雄

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 70, No. 6 (2020), 234-243

© 2020 The Japan Institute of Light Metals

High speed roll casters for aluminum alloys

Toshio HAGA

Keywords: single roll caster; twin roll caster; clad strip caster; high speed roll caster

1. 緒 言

双ロールキャスターは、アルミニウム合金やマグネシウム合金に使用する軽金属用のものと鉄鋼用のものに大別されてきた。両プロセスを比較すると軽金属用は低速・高荷重で横型が多く、鉄鋼用は高速・低荷重で縦型が多い。双ロールキャスターは横型と縦型で分類することもあるが、低速・高荷重または、高速・低荷重で分類する方が適当と考えられる。ここでは、アルミニウム合金の板鋳造に使用することを目的に考案した高速・低荷重の双ロールキャスター、自由凝固面の平坦化を試みた単ロールキャスター、およびこれらから発展したクラッド板用双ロールキャスターなどについて示す。

2. 高速双ロールキャスター

2.1 縦型双ロールキャスター

一般的なアルミニウム合金用の双ロールキャスターは、凝固と熱間圧延を同時に行う。熱間圧延には強固な鋼ロールが必要である。したがって、シェルを厚くする必要があり、冷却水路からロール表面までの距離は長くなるのでロールの冷却能を高くすることは困難である。鋼ロールを使用して熱間圧延を行うため、板がロールへ固着するが、これを防ぐために離型剤をロールへ噴霧する。離型剤はロールと溶湯の接触状態を均一にする効果もあるが、一方、熱抵抗にもなる。つまり離型剤は、鋳造速度を低下させる。従来の双ロールキャスターの改善では、鋳造速度の高速化は困難と考えた。そこで単ロール法の一種であるメルトドラッグ法¹⁾、およびメルトドラッグ法にロールを付加したメルトドラッグ双ロール法²⁾から高速双ロールキャスターに関する研究を開始した。銅合金ロールを使用すると離型剤を使用しなくても板がロールに固着しないことがメルトドラッグ法に関する研究より判

明した。また、ロールと溶湯が接する位置の溶湯ヘッド圧を高めるとリップルマークを改善できることが明らかになった¹⁾。鋳造と同時に熱間圧延を行わなければ、冷却能が高い銅合金ロールを使用できるので鋳造速度の高速化が可能になると考えた。考案した高速双ロールキャスターを図1に示す。図1(a), (b)に縦型高速双ロールキャスターの模式図とロールの周辺をそれぞれ示す。鋳造板の搬送のためには横型が良いが、注湯が容易と判断して縦型を採用した。縦型高速双ロールキャスターは、鉄鋼用の縦型双ロールキャスター³⁾と似ているが、フロントダムプレートを装着している点が異なる。フロントダムプレートは、ロールと溶湯が接する位置の溶湯ヘッド圧を高めるために採用した。また、フロントダムプレートは、溶湯面の位置(溶湯ヘッド)が変動しても凝固距離(材料とロールが接触する距離)を一定にすること、つまり板厚を一定にすることにも効果がある。本研究の縦型双ロールキャスターと鉄鋼用の双ロールキャスターでは、フロントダムプレート以外にロール荷重が異なる。鉄鋼用の双ロールキャスターのロール荷重は0.01~0.1kN/mmに対して本提案の縦型高速双ロールキャスターでは0.1~1kN/mmと大きい。しかし、一般的な軽合金用の双ロールキャスターのロール荷重1~20 kN/mmと比較すると小さい。銅と比較して熱伝導率が高い銅合金のロールを使用することで、例えばAC4Cでは120 m/minの高速で板を鋳造できた。銅合金ロールの効果で板の冷却速度も高く、熊井らは板の表面近傍の冷却速度は4000°C/sに達すると報告している⁴⁾。縦型高速双ロールキャスターでは、表1に示す寸法のロールを使用して実験を行った。ロール径が大きいほど厚い板の鋳造が容易であった。ロール幅は、板の鋳造の容易さには影響を及ぼさなかった。

従来の横型の双ロールキャスターでは、注湯前からロール間隙は鋳造板の厚さに設定し、注湯を開始する。初期のハン

図1 縦型高速双ロールキャスターと異径双ロールキャスター

表1 縦型高速双ロールキャスターで使用したロールの寸法

ロール直径, R_d (mm)	ロール幅, R_w (mm)
300	50, 100, 200, 600
600	100, 200, 600
1000	100, 200

ター法の様に下方から注湯する場合は溶湯がロール間隙から漏れることは無いと考えられるが、横型ではロール間隙から溶湯が漏れだす場合がある。注湯初期にはロール周速を低速にすることやストップを使用することで対処している。縦型高速双ロールキャスターでは、圧延機のようにロールの位置を固定せず、注湯開始時はロール間隙を0.5~1 mmと狭くし、铸造板がロール間隙を押し開く機構とした。このため注湯初期にロール間隙から溶湯が漏れることは無い。実験室サイズのキャスターでは、ばねを使用して簡易的に溶湯の漏れ対策とロールの荷重制御と位置制御を行っているが、生産機に近いものは油圧によりこれらを行っている。図2に秋葉ダイカスト工業所の生産機に近い縦型高速ロールキャスターを示す。

す。ロールの位置が荷重により移動することは、ロール間隙で試料が詰まりロールが停止することを防ぐことにも効果がある。

ばねを使用した簡易的な溶湯の漏れ対策とロールの荷重制御と位置制御は、後述の双ロールキャスターでも採用した。

2.2 異径双ロールキャスター

高ロール周速の特長を有し、さらに铸造板の搬送の利便性、厚い板を铸造する時の凝固距離の延長の容易さ、サイドダムプレートの面積低減、容易な注湯方法を考慮して考案したのが図1(c)に示す異径双ロールキャスターである^{5),6)}。下のロールの径は上のロールの径より大きく、下のロールの凝固距離は上ロールの凝固距離より長い。したがって、上下のロールで凝固した層の厚さは異なる。凝固距離を設定するために上ロールにはアッパープレート、下ロールにはバックダムプレートを取り付けた。上ロールの位置は下ロールの直上より15°傾いている。これは、注湯開始時と注湯終了時の溶湯量が不十分なときに上ロールと溶湯が接触しやすくし、下ロールの凝固層で上ロールが損傷しないようにしたためである。メルトドラッグ法では、合金によってはノズル内で溶湯

(a) 全景

(b) ロール周辺

図2 生産機に近い装備の実験用縦型高速双ロールキャスター (株式会社秋葉ダイカスト工業所)

が凝固する場合があったので、これに対処するため異径双ロールキャスターではロール面上に注湯した。異径双ロールキャスターは、縦型高速双ロールキャスターと比較すると60 m/minより高速での casting には適していないが、厚い板の casting が可能であり、 casting 板の搬送が容易である。AC4CやAC7Aであれば厚さが8 mm程度の板の casting が可能である。板の厚さが同じであれば、縦型高速双ロールキャスターと異径双ロールキャスターで casting した板の特性に顕著な差異は無かった。異径双ロールキャスターで実験を行ったロール径の寸法を表2に示す。縦型高速双ロールキャスターと異径双ロールキャスターの casting の様子を図3に示す。

2.3 ロール

6022のようにSi量が1%程度の合金においてロール荷重が0.1~0.2 kN/mmと小さい場合は、図4(a)に示すように casting 板の表面に割れが発生する場合があった。割れの発生は溶湯とロールの接触不良箇所における凝固遅れが原因であると考えられる。ロール面に溝を加工すると図4(b), (c)のように casting 板の表面の割れを改善することができた⁷⁾。図5にロール

表2 異径双ロールキャスターで使用したロールの寸法

上ロール直径, Rud (mm)	下ロール径, Rld (mm)	ロール幅, Rw (mm)
250	1000	100
300	1000	100, 400
500	800	400
500	1200	500

の溝の形状を示す。ロール面の溝は、微視的に見ると溶湯とロール面の接触状態を不均一にするが、巨視的に見ると溶湯とロールの接触状態が均一になり、凝固遅れが原因の割れの発生を防ぐことに有効であった。 casting 板の突起の形状から溶湯は溝に充満していないと考えられる。溝付きのロールを使用すると溶湯とロールの接触面積は小さくなるので冷却速度は低下する。したがって casting 板の表面の組織は平坦なロールで casting した板より大きくなった。しかし、内部の組織には差異は無かった。冷却速度の低下により casting 板の表面の柱状晶のチル層が無くなり、チル層の粒界で発生する割れも改善された。

フロントダムプレートとロールの間隙を3 mm程度とし、フロントダムプレートとロールの間に湯だまりを保持する方法も表面の割れの改善に効果があった。溶湯とロールは湯だ

図5 溝付きロールの表面状態と溝の寸法 (a) クロス溝, (b) 平行溝

(a) 縦型高速双ロールキャスター

(b) 縦型高速双ロールキャスター

(c) 異径双ロールキャスター

図3 双ロールキャスターによる板の casting の様子 (a) ロール直径1000 mm, ロール幅100 mm, (b) ロール直径600 mm, ロール幅600 mm, (c) 上ロール: 直径300 mm, 幅400 mm, 下ロール: 直径1000 mm, 幅400 mm

(a)

(b)

(c)

図4 ロール表面が異なるロールで casting した板の表面状態 (a) フラットロール (通常のロール) 使用, (b) 図5(a) のロール使用, (c) 図5(b) のロール使用

まりの中で接触を開始する。そのためヘッド圧は無いのでチル層が発生するほど溶湯とロールの接触状態は良好ではない。フロントダムプレート直下では、フロントダムプレートとロールの間隙が狭いので圧力が高くなり幅方向の接触状態が均一かつ良好になると考えられる。フロントダムプレートを使用しない場合と比較すると、鑄造板の表面状態は良好であった。各プロセスと鑄造板の表面状態を図6に示す。図6(c)がフロントダムプレートの外側に湯だまりを保持する方法である。

縦型高速双ロールキャスターにおいてロール周速60 m/min, ロール荷重0.17kN/mmとし、平坦なロールを使用、溝付きのロールを使用、および湯だまりを保持する方法で板を鑄造した。鑄造板を曲げて表面の割れを比較したものを図7に示す。溝付きのロールを使用、および湯だまりを保持する方法で鑄造した板を曲げた場合は外表面に割れは発生しなかった。

Al-Mg合金やマグネシウム合金は鋼のロールに固着しない。したがって溶湯とロール間の熱抵抗となる離型剤を使用する必要が無い。しかし、銅合金のロールと比較すると冷却能が低いためロール周速は銅合金のロールほど速くすることはできない。また、銅合金のロールと比較すると鋼のロールのロールコーティングは著しい。ここでロールコーティングは、従来の双ロールキャスターや圧延と同様にロールの表面にアルミニウムが薄く固着したものを指す。しかし、鋼ロールは銅合金ロールと比較すると安価である。従来のアルミニウム合金用の双ロールキャスターの鋼ロールは、シェルをコ

アに焼きばめる方式で、シェルの厚さは25~60 mmである。直径が600~1000 mmのロールが周速1 m/min程度で回転するのであれば、鑄造板の板厚分布に対するロールの熱変形は無視できるようなのである。しかし、例えば30 m/minのような高速で鋼ロールを使用すると、冷却が間に合わずロールが樽型に変形することが知られている。従来はシェルの幅方向の中央部が特に円周方向に熱膨張するために樽型に変形すると考えられていた。しかし、幅が狭いロールを幅方向に連結したロールや幅方向の中央部だけを冷却するロールを使用して実験を行った結果、シェルの胴長方向の熱ひずみをロールの両端で拘束するためにシェルが樽型に変形するとの結論に至った。シェルの中に胴長方向の冷却水路を設けコアとの接合方法を工夫することで樽型に変形することを低減することができた。縦型高速双ロールキャスターでは、熱間圧延は行わないので、冷却水路の直径8 mm, 水路間のリブの厚さ10 mm, 表面と水路の間隔は4 mmと狭い鋼ロールを試作し、実験を行った⁸⁾。図8に示すように板厚分布が改善した。

2.4 ばり

双ロールキャスターにおいてサイドダムプレートを使用すると鑄造板の両端に板に垂直方向にばりが発生する（以後縦ばりと示す）。縦ばりは、サイドダムプレートを破壊する場合もあるほか、コイルに巻く場合や冷間圧延では害をなす。鉄鋼用の縦型双ロールキャスターもサイドダムプレートを使用するが本研究の縦型高速双ロールキャスターの方がロール荷重は大きいので縦ばりは著しいと考えられる。アルミニウム合金と縦ばりの寸法の間隔を図9に示す。Si量が多く半凝固

図6 鑄造板の表面状態に対するフロントダムプレートの有無、および湯だまりの影響

図7 折り曲げた鑄造板の外表面の割れに対するロール溝と湯だまりの影響

図8 ロールの板厚分布に対するロールの構造の影響（銅ロール）
(a) コア-シェルタイプ, (b) シェルに軸方向の冷却水路があるタイプ

図9 アルミニウム合金とばりの厚さ

状態の流動性が高いほどばりは著しい。縦ばりは、ロール間隙近傍で半凝固状態の部分が左右に押し出されて形成されると考えられる。サイドダムプレートの溶湯と接する面に貼り付けた断熱シートのすり減り状態、サイドダムの下端位置およびサイドダムプレートに加工した穴からの半凝固状態のアルミニウム合金の噴出状態からばりの発生位置を調査した。半凝固状態のアルミニウム合金がロール軸方向に押し出される量はロール間隙が狭くなるほど多くなるわけではなく、図10に示すばりが発生を開始する位置で最も多く、ロール間隙が狭くなるに従い少なくなった⁹⁾。この結果を基に縦ばりを横ばり（ロール軸方向のばり）に変える方法を調査した。サイドダムに図11に示すようなロールの円弧に沿って加工した厚さ10 mmの板（以後ばりチェンジャーと呼ぶ）を取り付けることで縦ばりを横ばりに変えることができた¹⁰⁾。ばりチェンジャーの下端がばりの発生開始位置よりロール間隙に近いと図11に示すように縦ばりを横ばりに変えることに有効であった。

3. 鋳造用合金への適用

縦型高速ロールキャスターで鋳造したAC3A板は冷間圧延が可能であった。1 mmまで冷間圧延後に焼きなましを行い、深絞り試験を行った。AC3AのSi量は11.24%, Fe量は0.44%

図10 鋳造途中でロールを停止して材料を凝固させたロール間隙周辺の様子

図11 ばりチェンジャーの模式図とばりチェンジャーにより成形した横ばり

であったが、限界絞り比は1.9に達した¹¹⁾。これは、急冷凝固により共晶SiやAlFeSi系の金属間化合物が微細粒状化したためであると推測できる。Magsimal-59を模してAC7Aに2%

のSi添加したものをロールキャストした。1 mmまで冷間圧延可能であり、焼きなましの後に深絞りを行った。限界絞り比は2.0であった。AC3AとAC7Aに2%のSiを添加したものを深絞りした結果を図12に示す。これらは高速双ロールキャスターで急冷凝固することにより casting用アルミニウム合金を塑性加工である板成形に使用できる、つまり casting用合金で castingと塑性加工の合金を統一できる可能性を示す結果であると考えられる。高速双ロールキャスターで castingしたAC7A板や5182板を深絞りすると縞や割れが発生する場合があった(図19(a))。しかし、Siを2%添加すると縞や割れが発生しなかった。AC3AのFe量が0.44%であり板成形用のアルミニウム合金である6022と比較するとFe量は0.3%程度多い。AC3Aにさらに0.2%のFeを添加しても限界絞り比は1.9あり、0.6%のFeを添加しても限界絞り比は1.7であった。この結果はリサイクル時の不純物としてのFeの増加に対して板成形性の低下が少ないことを示していると考えられる。これらを総合すると、高速ロールキャストした casting用アルミニウム合金は、 castingと塑性加工に使用できるユニアロイの性質、さらに不純物の無害化の可能性を示すと考えられる。

異径双ロールキャスターで castingしたAC4CH合金板を冷間圧延した時の圧下率に対する casting方向と幅方向の引張試験の結果を図13に示す¹¹⁾。異なる厚さの casting板を冷間圧延し、試験片の厚さを1 mmとした。圧下率が80%以上になると casting方向と幅方向の差異、特に伸びの差異は小さくなった。また、AC4C casting板を1 mmまで冷間圧延し、焼きなまし材とT4材に曲げ試験を行った結果を図14に示す。 casting板の厚さが3.0 mmの場合は両条件において外面に割れが発生したが、 casting板の厚さが7.6 mmの場合は両条件において割れは発生しなかった。これらの結果は、 casting板に対する鍛錬効果の必要性を示していると考えられる。

4. 難加工材

アルミニウム合金の中にSiCの粉末を添加した複合材料は硬く、板を作製するためには熱間圧延を繰り返す必要がある、多くの工程を必要とする。双ロールキャスターでは薄板を一工程で castingできるので、熱間圧延の回数を削減することができる。縦型高速双ロールキャスターを使用してAl-SiC_p複合材のロールキャストを試みた¹²⁾。図15(a)に示すようにAl-20vol%SiC_pの casting板はコイルに巻くことができた。これはマトリックスであるAl-Si合金の共晶Siが微細粒状化したために、延性が改善されたためと考えられる。図15(b)には、Al-30vol%SiC_p casting板の断面を示す。SiC粒子が凝集せずに分散している様子がわかる。Al-SiC_p複合材やMg合金などの薄板の作製の場合のように熱間圧延を繰り返すことが必要な材料には、高速ロールキャスターは有効である。渡利らは横型の高速双ロールキャスターでMg-12%Al-1%Mn合金板の castingと熱間圧延に成功している¹³⁾。

5. スクレイパーを装着した単ロールキャスター

5182のようなMgが3%以上含まれているAl-Mg合金では従来の双ロールキャスターにより castingした板には中心線偏析が発生することが知られている。縦型高速双ロールキャスターや異径双ロールキャスターで castingした板にも中心線偏析が発生する。単ロールキャスターの一種であるメルトドラッグ法

図12 深絞り試験の結果 (a) 板厚: 1.0 mm, LDR: 1.9, (b) 板厚: 0.7 mm, LDR: 2.0

図13 AC4CHの casting方向と板幅方向の引張試験の結果に対する冷間圧延の圧下率の影響
異なる厚さの casting板を1 mmの厚さに冷間圧延した

で castingした板には中心線偏析は発生しないが、自由凝固面は平坦ではなく凹凸がある。また、メルトドラッグ法は単ロールキャスターのため、双ロールキャスターのように casting板はロールに押し付けられない。このため冷却が不十分であり、5182やAC7Aでは casting板は破断してしまい連続的に板を castingすることができなかった。自由凝固面の平坦化、および板(凝固層)をロールに押し付けて冷却させることを目的としてスクレイパーを考案した¹⁴⁾。スクレイパーを装着した単

図14 180度曲げ行った時の外面の割れに対する铸造板の厚さの影響
铸造板を1.0 mmまで冷間圧延し、焼きなまし、またはT4後に180°曲げ

図15 Al-SiC_p 铸造板のコイルと铸造板の断面 (a) Al-20vol%SiC_p 铸造板のコイル、コイル径460 mm,
(b) Al-30vol%SiC_p 铸造板の断面、粒はSiC粒子

図16 スクレイパーを装着した単ロールキャスター

ロールキャスターの模式図を図16に示す。単ロールキャスターであるが30~60 m/minのロール周速で板を铸造できる。スクレイパーは回転支持の板であり、スクレイパー荷重（スクレイパーが板をロールに押し付ける荷重）は0.2 N/mm程度と小さい。スクレイパーで成形直後の板の表面は半凝固状態であった。スクレイパー荷重が小さいため、Al-Mg合金やマグネシウム合金においてもロール接触面には割れが発生しにくい。0.2 N/mm程度のスクレイパー荷重でも铸造板の冷却は向上し、5182やAC7A、さらにMg量が10%のAC7Bの板を連続的に铸造することができた。しかし、AC7Aに2%のSiを加

えた合金は、延性に対する冷却速度の影響が大きく、スクレイパーを装着した単ロールキャスターではスクレイパー成形面の冷却が不十分で Mg_2Si が粗大化し、良好な延性を得られなかった。また、铸造板の両端にばりが発生しないこともスクレイパーを装着した単ロールキャスターの特長である。5182板の厚さ分布を図17に、板の断面を図18に示す。縦型高速双ロールキャスターで铸造した板に深絞りを行うと図19(a)に示すように縞や割れが発生する場合がある。しかし、スクレイパーを装着した単ロール法で铸造した板では図19(b), (c)に示すように縞や割れは発生しなかった。铸造板のロール接触面とスクレイパー成形面の差異は、冷間圧延後は、目視では確認できなかった。深絞り試験のカップの肩部の荒れは、絞り比が1.8程度までは差異はないが2.0になると焼きなまし条件によってはスクレイパー成形面の方が粗くなる場合があった。

6. クラッド板

縦型高速双ロールキャスターの複数使用、および縦型高速双ロールキャスター、または異径双ロールキャスターにスクレイパーを装着することでクラッド板の铸造が可能である¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。代表的なクラッド板铸造用双ロールキャスターを図20に示す。図20(a)では、3層のクラッド材を铸造するこ

図17 スクレイパーを装着した単ロールキャスターを使用してロール周速40 m/minで铸造した5182板の厚さ分布

図18 スクレイパーを装着した単ロールキャスターで製造した5182板の断面組織 (a) 鋳造板, (b) 1 mm まで冷間圧延した後 380℃ で 1.8 ks の焼きなまし

図19 5182板の深絞り試験の結果 鋳造板を 1 mm まで冷間圧延, 焼きなましを行った後に深絞り, パンチ径 32 mm (a) 縦型双ロールキャスターで鋳造, (b) スクレイパーを装着した単ロールキャスターで鋳造, スクレイパー成形面が外側, (c) スクレイパーを装着した単ロールキャスターで鋳造, ロール接触面が外側

図20 代表的なクラッド板鋳造用双ロールキャスター (a) 縦型タンデム双ロールキャスター, (b) スクレイパーを装着した異径双ロールキャスター

とができるが, 縦型高速双ロールキャスターを3台使用し, 5層のクラッド板を鋳造することも可能であった。また, 表材Aと表材Bは異なるアルミニウム合金を使用することもできる。芯材の表層が半凝固状態になるまで加熱されることによって芯材と表材は接合すると考えられる。表材の凝固潜熱が小さい合金の場合は, 図20(a) では接合しない場合がある。図20(a) では, 表材の液相線温度と注湯温度が芯材の固相線温度より低い場合でも接合する場合もあるが, 表材の液相線温度が芯材の固相線温度より高く, 注湯温度が芯材の液相線温度より高い場合でも接合しない場合がある。図20(a)の方法では, 接合の可否に対する表材の凝固潜熱の影響は大きい。これに対し図20(b)のスクレイパーを使用する場合は, スクレイパー近傍の母材の表面は, 高固相率の半凝固状態で

図21 クラッド板の断面 (a) 縦型タンデム双ロールキャスターで鋳造したアルミニウム合金の3層クラッド板, (b) スクレイパーを装着した異径双ロールキャスターで鋳造したマグネシウム合金の2層クラッド板

あるため, 接合に対して表材の凝固潜熱の影響を受けにくい。スクレイパーを使用する場合は酸化雰囲気中で鋳造を行っても母材の表面が酸化雰囲気に触れることは無い。例えばマグネシウム合金のように酸化しやすい合金であってもクラッド板を鋳造することができる。アルミニウム合金およびマグネシウム合金のクラッド板の断面を図21に示す。図21(a)は図20(a)の方法により鋳造した芯材が3003, 表材が4045の3層クラッド板の断面とSiの線分析の結果である。芯材と表材の接合界面は明瞭であり, 表材の4045のSiは芯材の3003の内部まで拡散していないことがわかる。図21(b)は図20(b)の方法により鋳造した母材がAM60, 表材がMg-12%Al-1%Znの2層クラッド板である。酸化しやすいマグネシウム合金であっても大気中でクラッド板の鋳造が可能であった。Mg-12%Al-1%ZnのようにAl量が多く硬いマグネシウム合金であっても, 双ロールキャスターを使用すると1工程で容易にクラッド板を鋳造することができた¹⁷⁾。

母材が1070, 表材がAl-40%Sn-1%Cuの2層クラッド板を, スクレイパーを装着した異径双ロールキャスターで鋳造している様子を図22に示す。表材の液相線温度は610℃, 固相線温度は228℃と大変低い。表材の液相線温度は母材の固相線温度よりも低い。表材はロール間隙でクラッド板に成形されるが未凝固であり, 搬送後にクラッド板の温度が低下し凝固は完了すると考えられる。鋳造材と冷間圧延後のクラッド板の引張せん断試験後の試験片を図23に示す。接合界面では剥離せず強固に接合していることがわかる。また, 冷間圧延後のクラッド板の接合界面近傍におけるSnの線分析の結果を図24に示す。Al-40%Sn-1%Cuの温度が固相線まで低下するまでに10分程度かかったが, Snが1070に拡散しなかった。

図22 母材が1070、表材がAl-40%Sn-1%Cuのクラッド板の铸造

図23 引張せん断試験後の試験片

7. 複 合 材

メルトドラッグ法に下方メルトドラッグ法を付加した双ロールキャスターを使用してステンレス製の針金や金網を板の中に挿入した複合材板を铸造する方法を検討した^{18), 19)}。プロセスの概要と金網を挿入した铸造板の断面を図25に示す。針金や金網の搬送・挿入装置を必要とせず、铸造板が針金や金網を引き込み、容易に長繊維の複合材板を作製できた。針金または、金網を挿入した引張試験の結果、挿入した金網の針金が铸造方向に対して斜めの場合、図26に示すように伸びが向上した。金網の挿入により局部収縮が低減されたためであると考えられる。

8. インライン圧延

高速双ロールキャスターで铸造したAC7A板のインライン圧延を試みた²⁰⁾。AC7A板の内部の温度は、熱電対を挿入し

図24 厚さ2mmまで冷間圧延した1070とAl-40%Sn-1%Cuのクラッド板の接合界面近傍のSnの線分析

図25 金網を挿入した板を铸造するための双ロールキャスターと金網を挿入した板の断面

図26 铸造板、金網を挿入した铸造板、針金を挿入した铸造板の引張試験の結果

図27 縦型高速双ロールキャスターで铸造した6022板とインライン熱間圧延をした6022板の断面 (a) ロールキャスト板, (b) インライン熱間圧延板

た温度測定より400℃以上であると推測している。板の内部の温度に関しては現在もデータを蓄積中である。AC7Aであれば熱間または半凝固状態でインライン圧延が可能である。インライン圧延板の深絞りでは、図19(a)に示したような縞や割れが低減したのでインライン圧延は中心線偏析や表面割れの改善に効果があると考えられる。高速双ロールキャスターで铸造した6022板には厚さ方向の中央部に図27(a)に示すように割れが発生する場合がある。冷間圧延では割れは圧着できなかったがインライン熱間圧延では図27(b)に示すように割れを圧着することができた。実操業では、高価な熱間圧延機の生産能力を活かすためには、双ロールキャスターの生産性を高くする、つまりロール周速を高速にする必要がある。高速ロールキャスターは従来の双ロールキャスターよりインライン圧延に適していると考えられる。

9. 結 言

高冷却能の高速ロールキャスターは、DC铸造の代替プロセスではなく、その特徴を生かした使用方法を検討すべきであると考えられる。例えば高冷却速度を活かし、铸造用合金をベースにした合金によるユニアロイ化やリサイクル材の無害化である。インライン圧延は、ロールキャスター単体では

不可能な欠陥や材質の改善に有用であると考えられる。

また、クラッド材铸造用の双ロールキャスターは、クラッド板の作製が不可能とされていた材料のクラッド板を可能にする。従来から使用されている素材がクラッド板という形で新たな価値を有することも期待される。

参 考 文 献

- 1) 羽賀俊雄, 石原勝之, 片山 剛, 西山丈司: 軽金属, **48** (1998), 613~617.
- 2) T.Haga: J. Mater. Process. Technol., **111** (2001), 64-68.
- 3) 松下敏郎, 中山勝巳, 深瀬久彦, 長田史郎: IHI技法, **48** (2008), 77-84.
- 4) K.Suzuki, S.Kumai, Y.Saito, A.Sato and T.Haga: Mater. Trans., **45** (2004), 403-406.
- 5) T.Haga and K.Takahashi: Mater. Sci. Forum, **449-452** (2004), 145-148.
- 6) T.Haga, M.Ikawa, H.Watari, K.Suzuki and S.Kumai: J. Mater. Process. Technol., **172** (2006), 271-276.
- 7) T.Haga, K.Hirooka, H.Watari and S.Kumai: Archives Mater. Sci. Eng. **30** (2008), 117-120.
- 8) T.Haga, AIP Conference Proceedings, **1769** (2016), 030003.
- 9) T.Haga, T.Yamashiki, H.Watari and S.Nahida: Key Eng.Mater., **831** (2020), 40-45.
- 10) 羽賀俊雄: 軽金属学会第138回春期大会講演概要, (2020), 253-254.
- 11) 羽賀俊雄, 坂田裕崇, 惣田裕司: 軽金属学会第137回秋期講演大会概要, (2019), 229-230.
- 12) 日下田雅男, 須田直人, 松崎邦男, 羽賀俊雄: 铸造工学, **88** (2016), 730-734.
- 13) H.Watari, Y.Nishio, M.Suzuki, T.Haga, K.Davey and N.Koga: , Mater. Sci. Forum, **654-656** (2010), 1440-1443.
- 14) T.Haga, K.Akitsu, T.Yamabayashi, S.Kumai, H.Watari, Key Eng. Mater., **443** (2010), 122-127.
- 15) T.Haga, R.Nakamura, S.Kumai and H.Watari: J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., **62** (2013), 36-44.
- 16) T.Haga, H.Tsuge, T.Ishihara, S.Kumai and H.Watari: Key Eng. Mater., 611-612 (2014) 623-628.
- 17) T.Haga, K.Okamura, S.Nishida, H.Watari and K.Matsuzaki: Mater. Sci. Forum, **879** (2017), 671-676.
- 18) T.Haga, K.Takahashi, S.Kumai and H.Watari: Adv. Mat. Res. **264-265** (2011), 1899-1904.
- 19) T.Haga, K.Takahashi, S.Kumai and H.Watari: Adv. Mat. Res. **337** (2011), 556-559.
- 20) T.Haga, S.Hanada, S.Kumai and H.Watari: Mater. Sci. Forum, **654-656** (2010), 795-798.