アルミニウム合金用双ロールキャスト

羽賀 俊雄*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 59, No. 9 (2009), pp. 509-520

Twin roll casters for aluminum alloys

Toshio HAGA*

Keywords: twin roll caster, thin strip, strip casting, continuous casting

1. はじめに

双ロールキャストは、転炉で有名なヘンリー・ベッセマーが発明し、その歴史は150年に及ぶ。1950年代には、日本でも研究が始まった。早稲田大学の松浦佑次名誉教授、同草川隆次名誉教授らにより早稲田大学各務記念鋳物研究所（現在の材料技術研究所）で鉄板や高けい素鋼板などの先駆的な研究が行われた¹⁾。しかし、他の鋳造方法や加工方法と比べるとその発展は遅々としていたと言っても過言ではない。その理由は、克服すべき問題点が多かったためである。双ロールキャストは、おもに鉄鋼とアルミニウムの分野で発展してきたが、両者の双ロールキャストは異なっており、個々に発展してきた。ここでは、アルミニウム用の双ロールキャストについて解説する。

アルミニウム合金では、1954年にJoseph Hunterが下方から注湯する方式の実用機を開発した²⁾。以後今日に至るまで研究開発が続けられている。近年、双ロールキャストは、地球温暖化問題の解決のため、省工程・省エネルギーおよびリサイクルアルミニウム合金の材質の改善から注目されている。双ロールキャストは省工程・省エネルギーの観点からは、最も優れたプロセスの一つと考えられる。それは双ロールキャストが2つの回転するロール間に溶湯を注湯するだけで、一工程で溶湯から薄板を直接鋳造することができるプロセスだからである。従来のDC (Direct Chill) 鋳造から薄板を作製するプロセスでは、高価な熱間圧延機を使用した熱間圧延工程が必要であったが、双ロールキャストを使用したプロセスでは、この熱間圧延の工程を省略できる。このため熱間圧延の設備投資費用の削減やそのランニングコストの削減が期待できるので、双ロールキャストはDC鋳造・熱間圧延のプロセスと比較して薄板を安価に作製することができる。双ロールキャストは、700°C/s程度³⁾の高い冷却速度が得られ、晶出物が微細分散する。このためリサイクル材では不純物として鉄が増加しても、曲げ性の劣化の低減が期待できる。また、アルミニウム合金のマトリックスにSiCの粉末を添加した低熱膨張材やマグネシウム合金などの冷間圧延が困難な材料の

薄板をロールキャストで作製することが試みられている。このように双ロールキャストは、省工程・省エネルギー、材質の改善、難加工材の薄板の作製が可能であるなどの利点を有している。しかし、アルミニウム合金用双ロールキャストは、ロール周速が6m/min以下と遅く、生産性が低いことが問題視されている。生産性の改善により、薄板作製のコストをさらに低減できると考えられ、ロール周速の高速化はアルミニウム合金用の双ロールキャストの課題である。

2. 軽合金用双ロールキャストの変遷

アルミニウム合金用の双ロールキャストでは、HunterとPechineyが世界をリードしてきた。アルミニウム合金用双ロールキャストは、実用化されているものは第1世代、第2世代、第3世代の3つの世代に分けることができると思われる。研究に関しては、第3世代に関することは、ほぼ終了したと思われる。次世代、つまり第4世代の双ロールキャストがどのようなものになるのかは、想像しにくい。

第1世代は、アルミニウム合金用双ロールキャストの創成期である。1954年には倒立縦型（図1(a)）のHunter Standard Caster^{2),4)}が開発された。縦型であることと下方から注湯する点に特徴がある。チップ（溶湯をロール間に注湯するためのノズル）先端の溶湯の圧力が低く注湯の開始が容易であった。しかし、注湯設備と結合したチップの調整およ

図1 アルミニウム合金用各種双ロールキャスト
(a) Hunter 初期, (b) Pechiney, (c) Hunter 現行, (d) 4段 (Davy)

* 大阪工業大学工学部機械工学科 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)。Department of Mechanical Engineering, Osaka Institute of Technology (5-16-1 Omiya, Asahi-ku, Osaka-shi, Osaka 535-8585). E-mail: haga@med.oit.ac.jp

受付日：平成21年3月31日 受理日：平成21年6月2日

び交換に手間がかかる, 注湯初期に板のループを形成するのが容易ではないなどの欠点も存在した。1962年には生産機としては世界初の横型であり Pechiney 3C (図1 (b)) の原型になる Harvey Caster²⁾が開発された。1970年には, Hunter が横型の板の出口側を上方に15度傾けたタイプ (図1 (c)) を開発した^{2),4)}。これにより横型の双ロールキャスタにおける注湯初期の溶湯の漏れ, 铸造板の表面品質が改善された。薄板の引出し, チップやその周辺設備の交換方法も容易になった。このロールのハウジングとチップを15度傾けた方法は, 以後 Hunter の特徴となる。ロール径は500~700mm, 単位幅あたりの荷重は0.4t/mmであった。板幅は1m以下, 板厚は5~10mmであり, 単位幅・単位時間あたりの生産量は1.2t/m/hであった。1個のモータで2個のロールを駆動するシングルドライブ方式にかわり, 1個のロールを1個のモータで駆動するデュアルドライブ方式も採用された。2個のロールの速度を別々に制御することで, 薄板のロールへの固着を防ぐ工夫もされた。

第2世代では, ロールの大型化により铸造できる合金種の拡大, 铸造板の幅広化が行われた。1975年には Hunter では SuperCaster, Pechiney では Jumbo3Cが開発された^{2),4)}。ロール径は900~1200mm, 板幅は2mまで铸造可能になった。単位幅荷重も第1世代の0.4t/mmから第2世代では1.22t/mmに増大した。生産量は1.2t/m/hから1.8t/m/hに増加した。1980年代半ばには Al-Mg 系の合金板も铸造できるようになった。板厚は, 5~10mmであり, これより薄い板の铸造は困難であった。第1世代と第2世代の双ロールキャスタで铸造した板の典型的な欠陥は, 板の内部では中心線偏析, 板の表面ではリップルマークであった。これらの欠陥については後で示す。第2世代の Super Caster では, 板を5.7mmより薄くするとロール周速を速くすることができるので若干ではあるが

生産性が向上し, リップルマークも改善されることが明らかになった⁵⁾。これは第3世代の双ロールキャスタで取入れられた板の薄化による高速化のヒントになったと思われる。

第3世代の特徴は, 生産性の向上を目的とした铸造板の薄化によるロール周速 (铸造速度) の高速化, つまり Thinline/High-speed である。板厚が5mmより薄くなると生産量が向上し始め, 3mmより薄くなるとそれが顕著になるとされている。1990年半ばに Hunter では Speed Caster^{2),4)~13)}が開発された。厚さ2mm以下の板の铸造が可能になりロール周速も10m/min以上が可能になった。単位幅荷重は1.4t/mm, 生産量は3.9t/m/hまで向上した。同じく1990年代半ばには Hunter の Super Caster Plus^{2),4),7),8)}や Pechiney の Jumbo3CM^{2),14)~16)}が箔用に開発され, ロール径は1220mm, 双ロールキャスタの耐荷重は3,400t, 単位幅荷重は2.0t/mmに達した。铸造板の薄化により, 後工程の3回の冷間圧延を2回に減らすことが可能になった⁹⁾。

Davyでは4-Hi (4段, 図1 (d)) の Fastcast^{4),17),18)}が開発された。ワークロール (铸造ロール) のベンディングによって板厚分布を制御することが可能であった。バックアップロールを駆動する方式を採用したため, 铸造ロールの水冷が容易であった。また, 铸造ロールは他のキャスタより小径でありシェルの厚さが薄くてもトルクに耐えられるとされている。バックアップロールと铸造ロールが摩擦するため, 铸造ロールのロールコーティングが剥離し, 板の表面状態を害するといったこの方法に特有な欠点もあるとされている。

Hunter の SpeedCaster と Pechiney の Jumbo3CM のライン構成を図2^{5),14)}に示す。どちらもキャスタ以後の後工程に相違は見られない。第1, 2世代のロールキャスタや Fastcast では下工程でエッジトリムの装置がないようである^{17),18)}。表1に各世代のキャスタの比較を示す。

(a) Hunter Speed Caster のライン構成

(b) Pechiney Jumbo 3CM のライン構成

図2 双ロールキャスタのライン構成例^{5),14)}

表1 アルミニウム合金用キャストの変遷と比較

	年 代	板幅 (m)	板厚 (mm)	ロール径 (mm)	荷重 (t/mm)	生産性 (t/m/h)
第一世代	1950 年～	～1	5～10	500～700	0.4	1.2
第二世代	1975 年～	～2	5～10	900～1200	1.22	1.8
第三世代	1992 年～	～2.2	2 以下	～1220	2.0	3.9

図3 ロール周速，チップの位置，板厚とロール間隙の凝固層の関係

3. 板の薄化と生産性の向上

双ロールキャストの重要な改善点の一つに生産性の向上がある。1990年代に入り、生産性の向上が精力的に検討されるようになった。板厚を薄くしロール周速を高める方法である。ロール周速，チップ先端の位置，板厚とロール間隙の溶湯の凝固層の関係の模式図を図3に示す。高速になるに従い凝固時間が短くなるので板は薄くなり，板の温度も上昇する。高速になるに従いチップ先端から上下の凝固層が接触するまでの距離BCは長くなり，逆に圧下する距離ACは短くなる。ACにおける薄板とロール間の熱伝達量は，BCの凝固した層とロール間の熱伝達量より大きい。ロール周速が過度に速くなると薄板が十分に冷却されず，連続的な薄板の作製が困難な場合もある。これを解決するためにロール間隙に溶湯を供給するチップ先端からロール間隔が最も狭くなる位置までの距離AB（セットバック長）を長くし，ロール間隙を狭くする。これは，ロールが薄板を圧下する距離ACを，ロール周速の高速化に伴い長くすることが目的である。AC間では薄板は圧下されるため，板とロール間の接触状態は良好であり，冷却ゾーンが長くなる。ACを長くするためには圧下量を大きくすることが必要である。圧下量の増大に伴い板は薄くなるので冷却は容易になる。ACを長くすることおよび圧下量を増して板を薄くすることで，高ロール周速でも板を十分に冷却することができる。また，ロール周速の高速化に伴い圧下量を大きくすることは，中心線偏析の改善にも有効である。

HunterのSpeedCasterの板厚と生産量の関係を図4⁸⁾に示す。板厚が薄くなるに従い鋳造速度が増すため生産量も増す。板厚が3mm以下になると生産量の増加が著しい。1100板の鋳造を例にとってSuperCasterとSpeedCasterのロール周速，板厚，生産量の比較を表2⁸⁾に示す。SpeedCasterはSuperCasterに対して鋳造速度は約8倍，板厚は約4分の1になり生産量は約2倍になっている。これは単純に考えれば，2台のSuperCasterを1台のSpeedCasterで置き換えることができることを意味する。年間20,000tの箔を生産する場合のSpeedCasterとSuperCasterの設備費の比較を表3⁹⁾に示す。SpeedCasterを使用した場合はSuperCasterより生産性が高いため，双ロールキャストを1台にすることができる。

図4 板厚と生産量の関係⁸⁾表2 Super Caster と Speed Caster の比較（1100を鋳造する場合）⁸⁾

比較項目	Speed Caster	Super Caster
鋳造速度 (m/min)	14	1.7
板厚 (mm)	1.3	5.6
生産量 (t/m, width/h)	2.9	1.5
引張強さ (MPa)	118	118
耐力 (MPa)	90	83

SpeedCasterの鋳造板は薄くなるため，薄板を中間箔圧延機で圧延することができるので冷間圧延機を必要としなくなる。設備費はSpeedCasterを使用するとSuperCasterの約73%に減らすことができる。

SuperCasterとSpeedCasterでは，図5⁵⁾に示すように鋳造板の組織の違いも著しい。SuperCasterで鋳造した5.6mmの板では中心線偏析が顕著であるが，SpeedCasterで鋳造した1.3mmの板では板厚中央部も高圧下による組織の変形が著しく，偏析が改善されている。SpeedCasterの鋳造板の板厚方向の中央部とその両側では組織が異なっている。サンプル形状が図3に示すように深くなっているため半凝固状態の時間が長くなり，圧下前は板厚の中央部では粒状に近い組織になっていると推測される。しかし，SuperCasterとSpeedCasterでは冷間圧延と焼なまし後の組織には差異はなく，機械的性質もほぼ等しかったと報告されている。

SpeedCasterにより1.8, 3, 5mmの厚さの1050板を鋳造し，組織や機械的性質に対する板厚の影響が調査された。表4¹⁰⁾と表5¹⁰⁾に1050のas-cast板と冷間圧延・焼なまし後の薄板の機械的性質を示す。as-cast板では薄い方が耐力や引張強さの値が大きく伸びが小さい。これは圧下量が大きいため，加工硬化量も大きいことが原因と考えられる。板が薄い方が

表3 SuperCaster と SpeedCaster の設備費の比較 (年間 20,000 トン生産する場合)⁹⁾

SpeedCaster		SuperCaster	
設備	数	設備	数
50t 溶解炉	1	32t 溶解炉	2
25t 保持炉	1	16t 保持炉	2
脱ガス, フィルタ	1	脱ガス, フィルタ	2
1650 mm 幅 SpeedCaster	1	1650 mm 幅 SuperCaster	2
冷間圧延機	0	400 ・ 965 mm 2500 Hp 冷間圧延機	1
60t コイル焼なまし炉	4	60t コイル焼なまし炉	4
300 ・ 900 mm, 1500 m/min 中間箔圧延機	1	280 ・ 850 mm, 1500 m/min 中間箔圧延機	1
280 ・ 900 mm, 1500 m/min 仕上箔圧延機	1	280 ・ 850 mm, 1500 m/min 仕上箔圧延機	1
フォイルセパレータ	2	フォイルセパレータ	2
フォイルスリッタ	1	フォイルスリッタ	1
20t 箔焼なまし炉	6	20t 箔焼なまし炉	6
装置価格	合計 41,000,000 ドル	装置価格	合計 56,000,000 ドル

図5 1100 板の铸造組織⁵⁾ (a) SuperCaster, 板厚 5.6mm, (b) SpeedCaster, 板厚 1.3mm表4 1050 as-cast 板の機械的性質に対する板厚の影響¹⁰⁾

板厚 (mm)	測定方向	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	r 値
5	0°	77	94	37	0.50
	45°	76	89	36	0.90
	90°	77	92	35	0.55
3	0°	83	101	33	0.41
	45°	78	93	31	1.35
	90°	81	102	35	0.55
1.8	0°	93	106	25	0.42
	45°	91	100	24	1.14
	90°	94	108	21	0.54

表5 冷間圧延・焼なまし後の 1050 板の機械的性質に対する as-cast 板の厚さの影響¹⁰⁾

板厚 (mm)	測定方向	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	r 値
5	0°	36	75	38	0.73
	45°	36	77	39	0.36
	90°	34	74	40	0.73
1.8	0°	38	72	37	0.74
	45°	36	77	39	0.41
	90°	34	72	34	0.70

結晶や析出物は微細であるが冷間圧延・焼なまし後の薄板の機械的性質には差異はなかったと報告されている。

4. 鋳造ロール

ロール径の影響に関しては、直径が 660mm と 1100mm のロールを用いて 3003 合金の厚さ 6mm の薄板を鋳造して機械的性質を比較した例がある。組織には差異は見られなかった。厚さ 56 μ m まで冷間圧延して機械的性質が調査されているが、表 6¹⁹⁾ に示すように差異は小さかった。圧下時の薄板内部の半凝固領域の変形と流動を考えるとロール径は大きい方がよいという考えもある。生産性に対しては、ロール径は影響を与えないという報告がある。ロール径が小さい方が高圧下における特有の欠陥であるバックリングが発生しにくい。図 6¹⁷⁾ に示すようにロール径が小さい方が、同じ圧下率に対して荷重が小さくなるので、高圧下に対してはロール径が小さいほうが有利と考えることもできる。

ロール材質に関する検討も行われている。鋼に代わり銅合金を用いた例が報告されている²⁰⁾。銅合金のロールの成分を表 7²⁰⁾ に示す。鋼ロールと銅合金ロールの生産性の比較を表

図 6 荷重に対するロール径の影響¹⁷⁾

表 6 厚さ 6mm の as-cast 板を 56 μ m まで冷間圧延したときの機械的性質に対する鋳造ロール径の影響¹⁹⁾

ロール直径	方向	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (MPa)
1100mm	0°	141	135	22
	90°	143	136	20
660mm	0°	148	130	21
	90°	144	136	20

8²⁰⁾ に示す。鋼より熱伝導率が高い銅合金のロールを用いると生産量は約 2 倍になっている。これはロールの冷却能が向上したためにロール周速を高速化できたことが原因と考えられる。生産量に対する各種ロールで鋳造した板の温度を図 7²⁰⁾ に示す。鋳造板の温度は、鋼ロールを用いた場合は 300°C 以上であるが、銅合金ロールを用いた場合は 300°C 未満に冷却される。鋳造板の温度が鋳造速度の上限を決定すると仮定し、図 7 の銅合金ロールの鋳造板のグラフを延長して鋼ロールの鋳造板の温度と同じになるときの生産量を単純に銅合金ロールの限界生産速度と判断すると、銅合金ロールは鋼ロールの 3 倍以上の限界生産速度を有すると考えられる。図 8²⁰⁾ は銅合金 B の生産量とトルクの関係を示している。生産量が増すほど、つまりロール周速が増すほど凝固厚さが減少し、また圧下時の板の温度は高くなり変形抵抗が低下するためトルクは減少している。表 9²⁰⁾ は、ロールのシェル（厚さ 50mm の外皮）が 1mm 摩耗するまでの生産量を示す。銅合

図 7 鋳造板の温度と生産量に対するロール材質の影響²⁰⁾

表 8 生産性に対するロール材質の影響（合金 A, B, C は表 7 に対応）²⁰⁾

ロールに使用した合金	生産量 (t/h/m)		
	1200	8011 合金	8079 合金
銅合金 A	2.64		
銅合金 B	2.68	2.45	2.68
銅合金 C	3.17		
鋼 CMY/V	1.36	1.15	1.18
鋼 MO22	1.28	1.06	1.12

表 7 銅ロールの成分²⁰⁾

(%)

合金	Be	Co	Cr	Mg	Ni	Si	Zr	others	Cu
A	0.4 0.7	2.4 2.7						<0.8	Bal.
B	0.15			0.05	1.0		0.31		Bal.
C			0.43			0.69		0.06	Bal.

図8 生産量とトルクの関係 (合金B)²⁰⁾表9 ロールが1mm 摩耗するまでの生産量²⁰⁾

ロール材質	生産量 (t)
銅合金 A	58
銅合金 B	60
鋼 CMY/V	120
鋼 MO22	200

金ロールは鋼ロールの30%から50%程度しか生産できなかったとされている。銅合金のロールは熱疲労によりロール寿命は短くなり、銅合金のロールの使用は経済的な利点はないとされている。しかし、銅合金ロールを用いた場合は casting plate の温度は鋼ロールより低いため casting plate の変形抵抗は増し、銅合金のロールは厳しい条件で疲労寿命の試験を行ったことになる。casting plate の温度を同一にして鋼ロールと銅合金ロールの寿命を比較すれば、その差は表9²⁰⁾より小さくなると思われる。いずれにせよ、熱伝導率が高い材質をロールに使用することは、 casting speed の高速化には有利であると考えられる。

ロールの水冷は、図9(a)²¹⁾に示す方法が一般的である。図9(a)では流水路はコアに加工してあるが、シェルに加工した例²²⁾もある。シェルに流水路を加工した方が、冷却効率はよいとされている。また、ロール面の温度分布を均一にするため、5分ごとに冷却水が流れる方向を変えるなどの工夫がされている。図9(b)²¹⁾はロール軸方向に冷却水が流れるが、流れる方向が交互に逆方向になっているため図9(a)の方法よりロール面の温度分布は均一になるとされている。

casting 中のロールのサーマルクラウンを冷却により制御している例もある^{4),7)}。Davy の Fastcast では、圧延機のようにロールベンディングで図10¹⁷⁾に示すように板厚分布を制御することができる。

5. チップ

双ロールキャストでは、ロール間隙に溶湯を供給する部分はチップ^{11),23),24)}と呼ばれている。チップとその周辺の模式図を図11^{11),24)}に示す。チップの材質は1980年代にアスベストから SiO_2 と Al_2O_3 を主成分とするセラミックスファイバに

図9 ロールの水冷方法²¹⁾

(a) 4段ロールキャスト (Davy Fastcast) のロールベンディングの方法

(b) 板厚分布に対するロールベンディングの影響

図10 Davy Fastcast のロールベンディングと板厚分布¹⁷⁾

替わった。チップが操業中に变形せず、また表面に割れや剥離が起こらないためにはチップの材質に剛性、断熱性、耐熱性が必要とされ、これらについて調査した例がある^{13),23)}。ロール幅方向で溶湯の流速や温度が一定であることや連続使

(a) チップとヘッドボックスの模式図

(b) 溶湯の清浄効果を考慮した溶湯の供給

図 11 チップとヘッドボックスの模式図^{11),24)}

(a) バッフルの形状の解析例

(b) 実機のチップとバッフル

図 12 チップ内のバッフル^{24),25)}

用に耐えられることが、チップには要求される。チップ内の溶湯の流れについては、図 12^{24),25)} に示すバッフル (baffle) と呼ばれるコマによる整流効果について解析もされている。チップの両サイドのダムの位置を制御することで板幅を铸造中に変えることも行われている²⁶⁾。

液面の測定はレーザ変位計で $\pm 0.4\text{mm}$ 以内の精度で測定され、ヘッドボックス内の液面位置は $\pm 1\sim 2\text{mm}$ で制御されている^{11),13),18)}。システムの例を図 13¹⁸⁾ に示す。液面位置やチップとロールの間隙は、図 14¹¹⁾ に示すようにチップ先端の溶湯のメニスカスの形状に影響し、铸造板の表面の偏析の原因になると考えられている。

図 13 液面位置の測定と制御システムの模式図¹³⁾ 図 14 溶湯のメニスカスに対するロールとチップの間隙の影響¹¹⁾ (a) 間隙が広すぎてメニスカスは不安定, (b) 間隙は狭くメニスカスの形状は適切

6. 内部欠陥

板厚が同じ場合はロール周速が速いほど偏析は著しい。偏析がない板を铸造するためには、ロール周速が速くなるほど板厚を薄くする必要がある¹²⁾。双ロールキャストで铸造した板の内部の偏析は、荷重の影響を強く受け荷重が高くなるに従いバンド組織、変形偏析、チャンネル偏析、分散偏析、偏析がない状態へと移行する^{12),26),28),29)}。板内部の偏析に対する荷重と板厚の影響を図 15²⁸⁾ に示す。ロールキャスト板の内部欠陥としては中心線偏析が知られているが、通常中心線偏析はチャンネル偏析を指す。チャンネル偏析の状態を図 16^{30),31)} に示す。図 16 にはチャンネル偏析に対するロール周速とセットバック長の影響も示されている。ロール周速は遅くセットバック長が短い場合、つまり圧下量が大きくなる条件においてチャンネル偏析は軽減されるようである。

7. 表面欠陥

リップルマークはレベルラインとも呼ばれ双ロールキャストで铸造した板の表面欠陥として知られている^{13),27),32)}。リップルマークの例を図 17³²⁾ に示す。チップ先端のメニスカスの変動し、凝固層と干渉することでリップルマークが発生するとされている^{27),33)}。図 18³²⁾ にリップルマークの発生のメカニズムを示す。ロール周速、チップとロールの間隙、ロー

ル面に対するチップの角度などメニスカスの形状に影響を与える条件を適切に制御することでリップルマークの発生を防ぐことができるようである。

表面の偏析はブリード^{28),29)}と呼ばれている。ブリードは、**図 19**^{28),29)}に示すようにロールと半凝固状態の材料の間で

図 15 偏析に対する荷重と板厚の影響²⁸⁾

きた隙間に液相が染み出すことにより形成される。小さいものでは長さ 0.05 mm で深さが 0.01 mm, 大きいものでは長さ 1.5 mm で深さ 0.1 mm 程度とされている。荷重の大小により 2 種類に分けられている。荷重が小さい場合はブリードの中に初晶が晶出するが、荷重が大きい場合は共晶組織になる傾向がある。ブリードの発生とロール荷重の関係を**図 20**³³⁾に示す。ロール荷重が大きいほど、つまり圧下量が多いほどブリードは発生しにくいようである。

8. 難加工材への利用

Duralcan に代表されるアルミニウム合金マトリックスに SiC の粉末を添加した複合材料は、耐摩耗性や低熱膨張性に優れている。しかし、この複合材は硬く脆いため、塑性加工により薄板を作製するには非常に多くの熱間圧延の工程を必要とした。双ロールキャストにより平均粒径 10 μm の SiC_p を 20 vol% まで添加した薄板の作製が試みられている^{34),35)}。SiC_p の添加は casting が困難になるほど双ロールキャスト性に影響を与えないようである。また、表面欠陥も発生しなかったと報告されている。マトリックスには Al-Si-Mg 系の casting 用合金が使用されているため、板の casting が可能であったと思われる。SiC_p は 10 vol% より 20 vol% の方が板厚方向で均一に分布し

図 16 チャンネル偏析の模式図とチャンネル偏析に対するロール周速とセットバック長の影響^{30),31)}
V : ロール周速, SB : セットバック長, 左 : 断面, 右 : 中心部水平面

図 17 リップルマークの例³²⁾ (a) as-cast 板, (b) 冷間圧延板

た³⁵⁾。ロールキャスト材は冷却速度が高いためマトリックスの共晶 Si が微細化するので、SiC_p を添加した複合材でもインゴット材と比較すると延性が向上した。

9. 急冷効果による材質の改善

双ロールキャストの急冷効果により材質の改善が期待できる。ロールキャスト材の引裂靱性は、真空ダイカスト材と比較して大きく向上した。ロールキャスト材と真空ダイカスト

材の単位き裂成長エネルギー UE_p を比較するとロールキャスト材では3倍に増加した。これは急冷効果により共晶の形態がラメラ状から球状もしくはロッド状に変化したためとされている³⁶⁾。

AC4C は典型的な鋳造用合金であるが、冷間圧延後 T4 処理した板は、冷間でカップ成形が可能であった。AC4C 合金の深絞りカップを図 21 に示す。板の縁のへム加工を行わなければ、ロールキャストした AC4C 合金板もプレス成形に使用することも可能であると思われる。

自動車のボディシート材などのリサイクルでは、ボルトなどの混入により Fe 量が増し、Al-Si-Fe 系の金属間化合物による延性の劣化が予測される。双ロールキャストの冷却速度により Al-Si-Fe 系の金属間化合物を微細化して、延性、特に曲げ性を改善することが試みられている³⁷⁾。図 22 に示すようにロールキャスト材では急冷効果により Al-Si-Fe 系金属間

図 18 リップルマークの発生メカニズム³²⁾

図 19 ブリードの発生メカニズム^{28),29)}

図 20 ブリードの発生に対する荷重と板厚の影響³³⁾

図 21 AC4C 合金板の深絞り

(a) A6063 ロールキャスト板

(b) A6063+2%Fe ロールキャスト板

(c) A6063+2%Fe 断熱材鋳型

図 22 Fe を 2% 追加した 6063 合金の組織

図 23 双ロールキャストによるクラッド材の作製 (a) クラッド材作製用双ロールキャスト, (b) 接合界面近傍のクラッド材断面, (c) 接合界面近傍の線分析

化合物が微細化している。結晶粒径も $100\mu\text{m}$ 以下であり結晶粒も微細化している。6016 合金のロールキャスト材は、Fe 量は $0.45\text{mass}\%$ 程度まで曲げ性は著しく劣化しないようである。また、ロールキャストした 6061 合金および $0.2\text{mass}\%\text{Fe}$ を添加した 6061 合金も 6022 合金と同等の曲げ性を有した³⁸⁾。

10. マグネシウム合金

マグネシウム合金は冷間では変形能が低いため、スラブから薄板を作製する場合は熱間圧延を繰返し行う必要がある。このためマグネシウム合金の薄板は高価である。溶湯から直接薄板を作製することができれば、省工程・省エネルギーの効果はアルミニウム合金より大きい。1982 年に Hunter はマグネシウム合金板の鋳造を行っている^{2),39),40)}。チップにはマグネシウムの溶湯の反応を防ぐため、特別なコーティングが施された。AZ31 のような比較的軟質のマグネシウム合金だけではなく、AZ91 のような硬質のマグネシウム合金の板の鋳造も行われた²⁾。オーストラリアの CSIRO⁴¹⁾、ドイツの MgF⁴²⁾、韓国の POSCO、中国の Yiggunng グループ、日本では三菱アルミニウム⁴³⁾、権田金属⁴⁴⁾ などがマグネシウムの双ロールキャストの研究や薄板の試作を行っている。権田金属以外は、第 1 世代または第 2 世代の双ロールキャストを使用していると思われる。鋳造速度は 5m/min 以下で板厚は $2\sim 6\text{mm}$ である。権田金属は独自の方法で $10\sim 40\text{m/min}$ の高速で AZ61 合金板の鋳造に成功している。マグネシウム合金の双ロールキャストにおいて中心線偏析やリップマークはアルミニウム合金と同様に発生する。マグネシウム合金は冷間・温間における変形能が低いため、板表面に割れが発生しやすい。ロールキャスト板のカップ試験も行われ AM60, AZ61, AZ91 合金のいずれにおいても LDR (限界絞り比) が 2 以上の実用的な深絞り性が得られた⁴⁵⁾。

11. クラッド材, 複合材

双ロールキャストを用いてクラッド材や長繊維を挿入した複合材を作製することが試みられている。高荷重で圧下することなく 2 層の凝固相を接合することが可能であった。接合界面近傍の線分析を図 23 に示す。Al-12mass%Si の Si は 1050 へ拡散しておらず、接合界面も明瞭であった。ロールキャストにより針金や金網を内部に挿入した長繊維複合材を一工程で作製することも可能であった。プロセスと金網を挿入したロールキャスト板の断面を図 24 に示す。ロー

図 24 金網・針金を挿入したロールキャスト板の作製 (a) 金網・針金を挿入した複合材作製用双ロールキャスト, (b) 挿入部近傍の模式図, (c) 挿入したステンレス金網, (d) 金網を挿入したロールキャスト板の断面, (e) 挿入した針金近傍の線分析

ルキャスト時に金網を連続的に板の内部へ挿入することが可能であった。針金が交差する部分においてもマトリックスと金網の間には隙間は発生しなかった。マトリックスと金網の組合せ、および鋳造条件が適切であるとマトリックスと金網は図に示すように反応を起こさなかった。図 24 で示す方法で作製した複合材料の板において、金網の針金が引張方向に対して 45 度傾いている場合は局部収縮が緩和され、伸びが改善された (図 25)。

12. 双ロールキャストの稼動状況など

図 26²⁾ と図 27²⁾ は、薄板作製プロセスの生産量に対する設備投資費用およびランニングコストの関係を示す。双ロールキャストは、ベルトキャストまたはブロックキャストと同等、DC 鋳造と比較すると安価である。新たに工場を建てるのであれば、図 27 と図 28 より DC 鋳造・熱間圧延からなる薄板の製造設備を導入するより双ロールキャストを導入した方が、メリットが大きいことは明らかである。

図 28²⁾ と図 29²⁾ は双ロールキャストとベルトキャストの

図 25 図 24 の金網を挿入したロールキャスト板の引張試験

図 26 各生産プロセスの生産量と設備費用の関係²⁾ 図 27 各生産プロセスの生産量と生産コストの関係²⁾

稼働台数の推移, およびアルミニウム製品の生産量をキャストのメーカー別に示している。Hunter 製, Pechiney 製および中国製の双ロールキャストだけで台数および生産量ともに全体の 90% 以上を占めている。注目すべき点は中国製の双ロールキャストの台数が Pechiney 製より多いことである。図 30⁴⁶⁾ は中国の双ロールキャストによる薄板の生産の様子である。図 31²⁾ は地域別の双ロールキャストによる生産量を示す。中国における生産量は北米に次ぐ生産量で全世界の 25% に達

図 28 各種キャスト台数の推移²⁾ 図 29 各種キャストの生産量の推移²⁾ 図 30 中国における双ロールキャストによる生産の様子⁴⁶⁾

①北米, ②南米, ③ EU・ロシア, ④アフリカ, ⑤インド, ⑥中国, ⑦東南アジア・オーストラリア

図 31 地域別双ロールキャストによる生産量²⁾

する。中国における双ロールキャストの生産台数や稼働台数、双ロールキャストによる箔や薄板などの生産量は今後さらに増加することが予測される。

13. おわりに

日本はアルミニウム合金用の双ロールキャストの導入数は、欧米やアジアの諸国に比べて格段に少ない。これは、双ロールキャストが品質と生産性の面で DC 鋳造に劣っているためである。品質の向上と生産性の向上では、生産性の向上の方が解決することは容易であると思われる。熱間圧延による鍛錬効果と同等の効果を熱処理と圧下率の低い冷間圧延で得ることは、非常に困難であると思われる。DC 鋳造と同じ合金種で同等の品質の製品を双ロールキャストで鋳造することを目指すことが、双ロールキャストの目標設定として妥当であるか、また、それが不可能な場合に双ロールキャストを否定するかは慎重に検討する必要がある。

双ロールキャストの使用目的は単に低コスト化だけではない。リサイクル材に含まれる不純物の無害化や難加工材の薄板の作製など双ロールキャストの特徴、特に急冷効果と薄板を溶湯から直接鋳造することができる省工程の利点を生かした使用方法を模索すべきであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 例えば, 塩沢正一・草川隆次・松浦佑次: 塑性と加工, **2**-11 (1961), 801-808.
- 2) S. Hamer, C. Romanowski and B. Taraglio: Light Met. Age, Vol. **60**, 9-10 (2002), 6-17.
- 3) 三木 功, 小菅張弓, 長浜勝介: 軽金属, **25** (1975), 1.
- 4) Alum. Int. Today, Vol. **14** (2002), 39-40.
- 5) B. Traglio and C. Romanowski: Light Met. 1995 (1995), 1165-1182.
- 6) A. I. Nussbaum: Light Met. Age, **55** (1997), 34-38.
- 7) Alum. Int. Today, Vol. **13** (2001), 26-28.
- 8) R. Beals, B. Carey, B. Taraglio and C. Romanowski: Alum. Cast Technol., (1997), 351-362.
- 9) B. Carey, R. Beals and C. Romanowski: Melt Spin Strip Cast Slab Cast,

- (1995), 29-41.
- 10) M. Duendar, O. Keles and B. Dogan: Light Met. 2004 (2004), 723-737.
- 11) S. Hamer, D. Smith, C. Romanowski, G. Yildizbayrak and B. Taraglio: Light Met. 1999 (1999), 931-937.
- 12) S. Etran, M. Dundar, Y. Birol, K. Sarioglu, E. Ozden, S. Akkurt, G. Yildizbayrak, S. Hamer and C. Romanowski: Light Met. 2000 (2000), 667-672.
- 13) M. Cortes: Light Met. 1995 (1995), 1161-1164.
- 14) A. I. Nussbaum: Light Met. Age, **55** (1997), 34-39.
- 15) P. Y. Menet, R. Cayol and J. Moriceau: Light Met. 1997 (1997), 753-756.
- 16) M. Cortes: Alum. Cast House Technol., (1995), 379-386.
- 17) P. M. Thomas, P. G. Grocock and J. M. Bouzendorffer: Metal Plant Technol. Int, **20** (1997), 44-52.
- 18) Alum. Today, **19** (1997), 13.
- 19) M. Duendar, A. S. Akkurt and K. Sarioglu: Light Met. 2003 (2003), 719-724.
- 20) J. M. Chateau and P. H. Solignac: Light Met. 1989 (1989), 667-672.
- 21) B. Frischknecht and K. P. Miwald: Light Met. 1988 (1988), 365-372.
- 22) Bruno Prezzzsis 社のカタログより
- 23) J. Canon and D. Smith: Light Met. 2000 (2000), 629-633.
- 24) K. Sarioglu, G. Yildizbayrak and M. Dundar: Light Met., Vol. 2000 (2000), 663-666.
- 25) http://www.fatahunter.com/_new_08/continuous_casting_optiflow_casthouse1.htm
- 26) D. Smith, O. Keles and N. Dogan: Light Met. 2004 (2004), 719-722.
- 27) O. Daaland, A. B. Espedal, M. L. Nedreberg and I. Alvestad: Light Met. 1997 (1997), 745-752.
- 28) S. A. Lockyer, M. Yun and J. D. Hunt: Mater. Charact., **37** (1996), 301-310.
- 29) M. Yun, S. A. Lockyer and J. D. Hunt: Mater. Sci. Eng., **70** (2000), 550-558.
- 30) 江崎宏樹, 渡辺良夫, 箕田 正, 宇都秀之, 渋江和久: 軽金属学会第 107 回秋期大会講演概要, (2004), 37.
- 31) 江崎宏樹, 箕田 正, 上田 薫, 渡辺良夫: 軽金属学会第 108 回春期大会講演概要, (2005), 57.
- 32) 江崎宏樹, 渡辺良夫, 上田 薫, 宇都秀之, 渋江和久: 軽金属, **56** (2006), 266.
- 33) M. Yun, J. D. Hunt and S. A. Lockyer: Int. J. Met. Res., **13** (2001), 255-261.
- 34) P. Griffiths, D. V. Edmonds and J. D. Hunt: Process Prop. Appl. Met. Ceram. Mater., **1** (1992), 207-212.
- 35) P. A. Karnezis, G. Durant, B. Cantor, E. J. Palmiere: Mater. Sci. Technol., **11** (1995), 741-751.
- 36) 熊井真次, 小林 慶, 朱 洪, 鈴木健太, 羽賀俊雄: 軽金属, **55** (2005), 500-506.
- 37) 阪口 洋, 羽賀俊雄, 乾 秀喜, 熊井真次, 渡利久規: 鋳造工学, **79** (2007), 523-528.
- 38) 乾 秀喜, 羽賀俊雄, 阪口 洋, 熊井真次, 渡利久規: 鋳造工学, **79** (2007), 537-544.
- 39) R. E. Brown: Light Met. Age, **60** (2002), 80-83.
- 40) Light Met. Age, **60** (2002), 101.
- 41) Mater. World, **11** (2003), 29-30.
- 42) E. Bernhard: Light Met. Age., **63** (2005), 14-19.
- 43) Y. Nakaura, A. Watanabe and K. Ohori: Mater. Trans. JST, **47** (2006), 1743-1749.
- 44) 権田源太郎, 権田善夫, 津崎二三雄: アルトピア, **35** (2005), 9-15.
- 45) 古閑伸裕, ラッチャニーパイサーン, 石原直剛, 渡利久規, 羽賀俊雄: 軽金属, **57** (2007), 141-145.
- 46) ある, **420** (2002), 18-24.