セミソリッドスラリーを用いた AZ31B マグネシウム合金薄板の連続 casting

島田 浩和*・城戸 太司*・茂木 徹一**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 58, No. 7 (2008), pp. 295-298

Continuous casting of AZ31B magnesium alloy sheet from semisolid slurry

Hirokazu SHIMADA*, Futoshi KIDO* and Tetsuichi MOTEGI**

Experiments for casting AZ31B magnesium alloy sheets were performed in a semisolid continuous casting process. The semisolid slurry was produced using an inclined cooling plate, and the sheet was continuously cast by a twin roll caster. The casting sheet width was influenced by the roll speed, amount of semisolid slurry fed into the twin rollers, and the nozzle angle of inclination to the lower roll. The widest sheet was obtained at a 21.5 m/min rolling speed, a -5° degree nozzle inclination angle, and $10.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ of slurry. The sheet surface was smooth, and granular grains appeared throughout the sheet.

(Received December 19, 2007 Accepted April 7, 2008)

Keywords: casting, semisolid

1. 緒 言

近年, CO_2 ガス排出削減のために, 自動車や航空機をはじめとした輸送機器は軽量化が求められ, それらの構成材料として比重の小さいマグネシウム合金が注目されている。マグネシウム材料のうち, 現在, 圧延加工で製造される薄板は, まず casting よりスラブを作製して, それに熱間や温間圧延を繰り返すという多くの工程を経るために, 薄板材のコスト高の一因になっている。そのコスト低減をはかるために, 圧延工程を大幅に省略できる連続 casting による薄板の製造が試みられている¹⁾。これはおもに双ロールや単ロールを用いて, 溶湯を直接凝固させる作製方法である。

著者らもすでに傾斜冷却板法により AZ31B マグネシウム合金を用いて, セミソリッドスラリーを作製して, 双ロールによる連続 casting を行い, 厚さ 2 mm および 3 mm, 板幅 100 mm, 長さ 1 m の薄板の作製が可能であること, およびその casting 組織は微細な初晶が薄板全体に分布していることを報告した²⁾。このようなセミソリッドスラリーを casting することは, 完全溶湯よりも低温 casting が可能であること, 凝固速度が大きいことなどのために, 薄板製造時の制御がしやすいこと, さらに casting 組織の初晶が微細粒状化しているために, その後の塑性加工性の向上が期待できると考えられる。

本研究は, 双ロールを用いたセミソリッドスラリーの連続 casting による薄板の作製において, 当実験設備で得られる限度の板厚 2 mm, 板幅 200 mm の長尺薄板を作製して, より実用に近い幅広板材の製造の基礎資料を得ることを目的とした。具体的には, 板幅に及ぼす双ロールへのスラリーの供給量, ロール周速度, およびスラリーがタンディッシュから双ロー

ルに送られるときのタンディッシュの双ロールに対する角度の影響を調査した。

2. 実験方法

Fig. 1 は実験に用いた薄板連続 casting 装置の模式図であり, おもに溶解用電気炉, 傾斜冷却板, タンディッシュ, 双ロールから構成された水平型である。また供試材は市販の AZ31B マグネシウム合金である。これを電気炉内のステンレス鋼るつばに 8 kg 装入し, フラックスで空気を遮断して溶解した。溶湯を所定温度に保持した後, 湯面制御棒を降下させて溶湯面を上昇させて, るつば内に垂直に設置した給湯管を通して傾斜冷却板上に流下させた。この傾斜冷却板上では初晶が晶

Fig. 1 Schematic illustration of equipment used for continuous casting sheet of semisolid slurry.

* 千葉工業大学大学院 (〒 275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)。Graduate School of Chiba Institute of Technology (2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275-0016).

** 千葉工業大学 (習志野市)。Chiba Institute of Technology (Narashino-shi, Chiba).

Table 1 Casting conditions for making semisolid slurry

Casting temperature, $T/^\circ\text{C}$	640
Length of inclination cooling plate, L/mm	150
Angle of inclination cooling plate, $A/^\circ$	60

Table 2 Relation between roll speed and amount of semisolid slurry fed into the twin rolls

Roll speed, $\text{s/m} \cdot \text{min}^{-1}$	27.5	26.0	24.5	23.0
Amount of semisolid slurry, $\text{l}/10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	4.5	5.7	6.8	7.9
		9.0	10.2	

出するとともに溶湯の流動により遊離し²⁾、下方に置いたタンディッシュに流下して、セミソリッドスラリーとなり、タンディッシュ内溶湯圧により双ロールに供給された。なお、セミソリッドスラリーは傾斜冷却板上への casting 温度、傾斜冷却板の長さおよび角度により性状が異なるが、本研究では、Table 1 に示したように、前報³⁾で示した初晶マグネシウムがもっとも微細粒状晶になる条件を採用した。

2.1 板幅に及ぼすロール周速度とスラリー供給量の影響

双ロールは冷却能の大きい内部を水冷した純銅製で構成され、直径 300mm、幅 250mm である。Table 2 は実験に用いたロール周速度およびスラリー供給量を示したものである。本研究では板幅を広げるためには、板厚が双ロールで制御されているために、スラリー供給量を増やすことで排出される薄板の体積が増えると考えた。そこで、ロール周速度を小さくして、スラリー供給量を多くすることにより板幅に及ぼす影響を調べた。なおタンディッシュ底面は下ロールに対して水平であり、これをタンディッシュ角度 0° とした。また双ロールへのスラリー供給量は湯面制御棒の降下速度で制御した。

2.2 板幅に及ぼすタンディッシュ角度の影響

本研究では、マグネシウム合金スラリーの酸化および燃焼を防止するために、メルトドラッグ法で使用されているクローズドトップ型タンディッシュ⁴⁾⁵⁾を採用した。これは湯溜り部およびノズル部の2つから構成されているために、スラリーがノズルを通過するときに大気との接触を防止することができる利点がある。そこで使用したタンディッシュは、Fig. 2 に示したような形状および寸法でとくに断熱性の優れたけい酸カルシウムボードで作製した。本研究ではノズル内でスラリーが広がることで板幅も広がると考え、タンディッシュの設置角度を変化させた。Fig. 2 (a) に傾斜冷却板から流下したスラリーのタンディッシュ内での流れを示す。Fig. 2 (b) はタンディッシュのノズル部の上部からのスラリーの広がりを模式的に示したものである。図のようにノズル内部の高さが 8mm であるため、タンディッシュの湯溜り部にたまったスラリーの圧力によりノズル内でスラリーが広がると考えた。そこで、双ロールに対するタンディッシュの角度を Fig. 3 に示したように、水平のときを 0° とし、 5° 、 10° 、 15° および -5° にした場合の板幅に及ぼす影響を調べた。

Fig. 2 Flow of slurry in a tundish. (a) is the tundish (side view), and (b) is the nozzle portion (top view). **Fig. 3** Nozzle inclination angles to lower roll. **Fig. 4** Influence of amount of semisolid slurry on width of casting sheet calculated by amount of slurry fed into the twin rolls.

2.3 ロール周速度 26.0 m/min での板幅に及ぼすタンディッシュ角度およびスラリー供給量の影響

前節 2.2 で得られた結果を踏まえて、ロール周速度を 26.0 m/min に固定し、タンディッシュ角度が 5° 、 10° 、 15° のうち、もっとも広幅の薄板が得られた条件を用いて、スラリー供給量を増加させて、板幅に及ぼす影響を調べた。

2.4 設置角度 -5° での板幅に及ぼすロール周速度の影響

2.2 節で得られたタンディッシュ設置角度 -5° において、スラリー供給量が少ないと、薄板が casting できないことが考えられる。そこでスラリー供給量を $10.2 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$ に固定して、ロール周速度を 24.5 m/min、23.0 m/min および 21.5 m/min と次第に小さくして板幅に及ぼす影響を調査した。

3. 結果および考察

3.1 板幅に及ぼすロール周速度およびスラリー供給量の影響

Table 2 の条件のもとについて、スラリー供給量とロール周速度から次の (1) 式から計算により求めた板幅の値を Fig. 4 に示した。

Fig. 5 Influence of amount of semisolid slurry on width of casting sheet. Portions without data indicate conditions which the casting sheet was not obtained.

$$\text{板幅} = (\text{制御棒降下速度} \times (\text{制御棒半径})^2 \times \pi) / (\text{板厚} \times \text{ロール周速度}) \quad (1)$$

この結果から、スラリー供給量を増加させ、ロール周速度を小さくすれば、板幅が増加することができると推定された。

これに対して、Fig. 5 は実験結果を示したものである。Fig. 4 とは異なり、板幅は供給量とは一義的な変化をしないことがわかる。ここで、ロール周速度が 27.5m/min の場合は、スラリー供給量が $9.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ のとき、板幅は大きくならなかった。この理由は、スラリー供給量が多いにもかかわらず、ロール周速度が大きいために、板幅が十分に広がる前にロールにより薄板が排出されたためと考えられる。また、スラリー供給量 $7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ では双ロールに供給されるスラリーの供給量が適切であり、ノズル内および双ロールでスラリーが広がったため板幅が広がったと考えられる。

Fig. 5 に棒グラフのないスラリー供給量では、薄板の連続 casting ができなかった。これは、タンディッシュが双ロールに対して水平に設置されているため、スラリーの速度が一定にならず、またスラリー供給量 $4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ ではスラリーが双ロールに供給される量に対してロール周速度が小さすぎるためにスラリーがロールに接触している時間が長くなり、双ロールからの凝固界面がノズル側に移動するためと考えられる。また、スラリー供給量 $7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ および $9.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ ではロール周速度に対してスラリー供給量が多いため、双ロールから薄板が排出される前に双ロールにスラリーが過剰供給されて詰まってしまったためと考えられる。

3.2 板幅に及ぼすタンディッシュ角度の影響

Fig. 6 はロール周速度を 26.0m/min、スラリー供給量を $6.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ と一定にして、タンディッシュ設置角度を 5°, 10°, 15° と変化させて連続 casting 実験を行った結果を示したものである。なお、0° のデータは 3.1 節の値を引用した。また、設置角度 -5° では、 casting ができなかった。

Fig. 5 の結果から、タンディッシュ角度 10° の場合に 140 mm のもっとも広幅の薄板が得られた。これは双ロールに供給されるスラリーの溶湯圧が適切な大きさであり、ノズル内で広がったスラリーの幅と同様の板幅が得られたためと思われる。これに対して、5° では設置角度が小さすぎて双ロールに供給されるスラリーの溶湯圧が小さく、板幅が広がらず、他方 15° では角度が大きいためにスラリーの溶湯圧が大きすぎて、スラリーがノズル内で広がる前に双ロールに供給され、薄板に casting されたためと思われる。

Fig. 6 Influence of the nozzle inclination angle to the lower roll on width of casting sheet.

Fig. 7 Influence of amount of semisolid slurry on width of casting sheet. Nozzle inclination angle is fixed at 10 degrees.

3.3 タンディッシュ角度 10° での板幅に及ぼすスラリー供給量の影響

3.2 節より得られた結果を踏まえて、もっとも広幅の薄板が得られたタンディッシュ角度である 10° を用いて、スラリー供給量を増加させて板幅への影響を調べた。Fig. 7 はその結果を示したものであるが、スラリー供給量を増加させても板幅を増加することはできなかった。この理由は、スラリー供給量を変化させることで、タンディッシュの湯溜り部にスラリーが溜まり、溶湯圧が上昇し、それによりノズル内でスラリーが広がると考えて実験を行ったが、タンディッシュ角度 10° ではスラリーがノズル内で広がらずにそのまま casting されたためと思われる。したがって、タンディッシュ角度 10° では、板幅 140mm が限界であることがわかった。

3.4 タンディッシュ角度 -5° での板幅に及ぼすロール周速度の影響

Fig. 8 はタンディッシュ角度を -5° に固定して、ロール周速度を変化させた場合の板幅に及ぼす影響を示したものである。これより、ロール周速度が小さい 21.5m/min の場合に本研究では最大の板幅 180mm が得られた。したがって、スラリーがこの角度でもっともノズル内で広がりやすく、かつ一定速度でスラリーがロール間に供給され、スラリーの供給量と双ロールからの薄板の排出量が一致していることがわかる。

Fig. 9 は得られた長さ約 1m の薄板表面の外観の一部である。板幅は長さ方向で測定場所により約 10mm のばらつきがあるが、ほぼ均一な板幅であると見なした。

Fig. 10 はこの連続 casting 薄板のマイクロ組織である。微細な初晶マグネシウムが板全体に均一に分散していることが認め

Fig. 8 Influence of roll speed on width of casting sheet. Nozzle inclination angle to lower roll is fixed at -5 degrees.

Fig. 9 Appearance of 180 mm-wide sheet obtained by inclination angle of -5 degrees, roll speed of 21.5 m/min, and semisolid slurry volume of $10.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$.

られた。また、各 casting 条件で得られたすべての連続 casting 薄板のその表面状態およびマイクロ組織は板幅方向および長手方向にも差異は見られなかった。

得られた初晶マグネシウムの平均結晶粒径は $35 \mu\text{m}$ であった。これは、傾斜冷却板上で生成遊離してタンディッシュに入り、さらに双ロールにおいて casting 凝固されるまでに結晶が成長した大きさにそれほど大きな違いがないことを示している。なお、本研究で得られた異なった板幅に対する板厚の変

Fig. 10 Microstructure of casting sheet presented in Fig. 9.

動はすべて $2.0 \pm 0.3 \text{ mm}$ 以内であった。

4. 結 言

本研究は AZ31B マグネシウム合金の薄板を連続 casting により作製するために、とくに板厚 2 mm、板幅 180 mm の薄板を作製するために、セミソリッドスラリーを双ロールにより casting し、その際のスラリー供給量、ロール周速度およびタンディッシュ角度を変化させて実験を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) スラリー供給量を増加すると板幅が大きくなる。
- (2) タンディッシュ角度を変化させると、板幅が変化する。
- (3) ロール周速度を小さくすると板幅が大きくなる。とくにタンディッシュ角度が -5° では、板幅に大きく影響する。
- (4) スラリー供給量、ロール周速度およびタンディッシュ角度は初晶の寸法形状に影響しない。

参 考 文 献

- 1) 日本マグネシウム協会：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，241.
- 2) 茂木徹一：アルトピア，**3** (2005)，21-22.
- 3) 城戸太司，茂木徹一：日本金属学会誌，**71** (2007)，758-762.
- 4) 羽賀俊雄，石原勝之，片山 剛，西山丈司：軽金属，**48** (1998)，613-617.
- 5) 西田進一，本村 貢：軽金属，**55** (2005)，315-316.