研究論文

メルトスピニング法による Al-12 mass%Si 合金板の自由凝固面の成形ロールによる改善

羽賀 俊雄*・本村 貢*・小久保 亘**

Improvement of free solidified surface of melt spun Al-12 mass%Si alloy strips by forming roll

Toshio HAGA*, Mitsugu MOTOMURA* and Wataru KOKUBO**

A forming roll was introduced in a conventional melt spinning process to improve free solidified surface of the strip. Effect of the forming roll was tested at the condition as below. Roll speed ranges from 2 to 12 m/s. Roll gap is 0.2 mm. Slit size is 0.8×20 mm. Ejection gas pressure is 20 kPa. Distance between nozzle and forming roll ranges from 40 to 160 mm. Forming load is 98 N. Specimen is Al-12 mass%Si alloy. Roll speed and nozzle-forming roll distance are the most important factors in this process. Because they affect the solidification on the free solidified surface. The flatness and microstructure of the strip can be made sound by the modified process of this study.

Keywords: melt spinning, strip casting, rapid solidification, single roll method

(Received October 13, 1993)

1. 緒 言

メルトスピニング法¹⁾は、厚さが0.1 mm以下の箔帯の作製に適しており、それより厚くなると自由凝固面の状態は不良になる。また、メルトドラッグ法^{2),3)}は0.5 mm以上、3C法^{4),5)}では1 mm以上の厚さのアルミニウム合金の板の作製は可能であるが、それより薄い板の作製は困難である。厚さが0.1~0.5 mm程度の厚さの板を溶湯から直接作製する方法についての研究報告例は見あたらない。本研究では、メルトスピニング法に自由凝固面を成形するための成形ロールを付加し、これにより自由凝固面上の未凝固層を成形することで、両面が良好で厚さが約0.5 mm以下のアルミニウム合金板の作製を試みた。

2. 自由凝固面の成形

メルトスピニング法では、一般的には Fig. 1(a)に示すように、自由凝固面はノズル直下で凝固が完了する。Fig. 1(b)に示すように溶湯噴出量を増すと、ノズル直下で自由凝固面の凝固は完了せず、ノズルから離れた位置まで自由凝固面は未凝固のままである。(a)と比較すると(b)は厚く自由凝固面は不良である。本研究では Fig. 1(c)に示すように成形ロールを付加し、凝固完了前の自由凝固面を成形することを試みた。自由凝固面上の半凝固層、または半凝固層とその上に存在する薄い溶湯

Fig. 1 Schematic illustration of melt spinning process, and solidification model of molten metal.

- (a) melt spinning
- (b) more amount of melt flow than (a)
- (c) melt spinning with forming roll

の層を成形する。このため低荷重で自由凝固面を成形することが可能になり、板がロールへ強固に固着することなく、表面状態が良好な板がメルトスピニング法によって作製できると考えた。

3. 実験条件

成形ロールによる自由凝固面の成形が可能か否かや、板の表面状態の良否に影響するのは、自由凝固面の凝固状態である。そこで本研究では、成形時の自由凝固面の凝固状態に最も影響を与えと考えられる、ノズルと成形ロールの間の距離（以後ノズル位置と呼ぶ）、ロール周速の2条件について検討を行った。実験装置の概要を

* 早稲田大学理工学部（東京都）。School of Science and Engineering Waseda University (Shinjyuku-ku, Tokyo).

** 早稲田大学大学院（東京都）。Graduate School, Waseda University (Shinjyuku-ku, Tokyo).

Table 1 Experimental Condition

solidification roll	size	$\phi 300 \times 100$ mm
	material	A5052
	speed	2, 4, 6, 8, 10, 12 m/s
forming roll	size	$\phi 100 \times 100$ mm
	material	A5052
	speed	2, 4, 6, 8, 10, 12 m/s
nozzle slit		0.8×20 mm
nozzle-roll gap		2 mm
initial roll-roll gap		0.2 mm
ejection pressure		20 kPa
initial forming load (spring)		98 N
load rate of spring		4.4×10 N/m
nozzle position		40, 80, 120, 160 mm
specimen		Al-12 mass%Si
temperature of molten metal		650°C

Fig. 2 Schematic illustration of the modified process.

Fig. 2 に、主な実験装置の仕様と実験条件を Table 1 に示す。ノズルと成形ロール (Fig. 2 の小径ロール) の間の距離は、凝固ロール (Fig. 2 の大径ロール) に対する成形ロールの位置は固定 (水平から 30°) し、ノズルの位置を変えて調節した。板がロールへ固着するのを防ぐため、圧延機のように凝固ロールと成形ロールの間隔を固定せず、成形ロールにばねを取り付け、板厚によりロール間隔が変動するようにした。実験開始時のロール間隔は 0.2 mm、成形ロールのばね荷重は 2 つのロールの軸間方向で 98 N になるように設定した。ばね定数 4.4×10^3 N/m のばねを 2 個 (2 個の軸受に 1 個ずつ) 使用した。本研究では、圧延を行うことは目的としておらず、また板のロールへの固着を防ぐため荷重は 98 N と大変小さく設定した。メルトスピニング法では、冷却速度を考慮しロール材質は熱伝導性がよい銅が多い。凝固速度が速すぎると、成形ロールの位置で自由凝固面の凝固が完了し、成形が不可能になる。そこで当初は S45C 製ロ

Fig. 3 Relation between roll gap and strip thickness cast by single roll (melt spinning) process.

Fig. 4 Cross section of strips cast by single roll process and modified process.

ールを用いたが、板の固着が激しく起こるため、熱伝導率が S45C より大きいアルミニウム合金 (A5052) をロール材質として採用した。ロール面は実験直前に #1200 のエメリー紙で研磨した。厚さが 0.5 mm 以下の板の作製を目標としているため、成形ロールと凝固ロールの間隔は 0.2 mm とした。最高ロール周速の 12 m/s のとき板厚を 0.2 mm 以上にする必要がある。これを考慮して溶湯噴出圧力を 20 kPa とした。Fig. 3 に成形ロールなし (メルトスピニング法) で作製した板の平均厚さとロール周速の関係を示す。

4. 結果と考察

4.1 板の自由凝固面の成形

成形ロールの有無の両条件で作製した板の断面形状を Fig. 4 に、断面の板厚分布を Fig. 5 に示す。Fig. 5 の成形ロールを用いて作製した板の厚さ分布は、成形前の板幅に対応する部分 (幅広がりした部分は除外) の板厚分布を示した。条件によっては、自由凝固面の成形後の板は幅広がりを起こすが、幅広がりした部分は板から破断したり冷却状態が不良なため本研究では幅広がりした部分については示さない。成形ロールなしの場合は自由凝固面は平坦ではなく、中央部が盛り上がった凸型形状をしており、その傾向はロール周速が低いほど著しい。ロ

Fig. 5 Thickness distribution of the cross section of the strip.

S.R.; single roll process, F.R.; process with forming roll (modified process)

ロール周速が高くなるに従い板は薄くなる。ロール周速 2 m/s の条件では、成形前板厚は未凝固層も含め 2 mm 以上あるが、成形後板厚は 0.4 mm 以下で幅広がりを起こしている。ロール周速が高くなり成形前の板が薄くなるほど成形後の板も薄くなる。成形ロールなしと成形ロールありの条件で作製した板の厚さを比較することにより、成形前の板厚や未凝固層の厚さを推測することができる。成形ロールを用いることにより、自由凝固面は平坦になり厚さ分布は板幅方向で均一に改善されることが明らかになった。

本研究において特徴的な板を Fig. 6 に示した。(a)か

ら(d)になるに従い成形時の自由凝固面上の未凝固量は少なくなる。(a)のようにロール周速が低い場合は幅広がり著しいが、(a)から(b), (c)へとロール周速が高くなるに従い幅広がりは少なくなり、板の幅はノズルのスリット幅に近づいている。ロール周速が低い場合は Fig. 4 から明らかなように成形前の板はロール間隔と比較して厚く、自由凝固面上の未凝固量が多い。この未凝固部分が成形時に幅方向に流れ、幅広がりを起こしたと考えられる。(a), (b)のように成形ロール面上には板の中央から両端に向い、溶湯が成形ロールにより流されたと考えられる痕跡が存在する場合がある。(c)の成形ロール面は金属光沢に富んでおり(a), (b)のように溶湯が流れた痕跡は存在せず、成形前の自由凝固面は半凝固状態であったと考えられる。(d)では成形時に凝固が終了している部分が存在し、未凝固部分のみが成形され、成形ロール面は平坦にならない。

ロール周速とノズル位置に対する自由凝固面の成形が可能か否かと、幅広がり有無を Fig. 7 に示す。ロール周速が高くなるに従い成形可能なノズルとロールの間の距離は小さくなる。これは、Fig. 4 に示すようにロール周速が高くなるに従い、板は薄く未凝固量が少なくなり、凝固が完了する位置がノズルに近くなるためである。ロール周速が高くなるほど、ノズル位置が離れるほど成形時の自由凝固面上の未凝固量が少なくなるので、幅広がり小さくなる。

4.2 板の表面状態

成形ロールなしおよび成形ロールありの条件で作製し

Fig. 6 Appearances of strips cast by the modified process.

(a) $V=2$ m/s, $N=40$ mm, (b) $V=6$ m/s, $N=40$ mm, (c) $V=12$ m/s, $N=40$ mm, (d) $V=12$ m/s, $N=80$ mm
F.R.S.; forming roll side surface, S.R.S.; solidification roll side surface
 V ; roll speed, N ; nozzle position. Arrow shows rotating direction.

Fig. 7 Diagram showing formability of free solidified surface and broadening of width.

● F: possible, W: broadening, ○ F: possible, W: nobroaden. × F: impossible, W: no broadening, F: forming on free solidifying surface, W: width of strip

た板の表面状態を **Fig. 8** に示す。成形ロールありの場合は、**Fig. 7** において各ロール周速で自由凝固面の成形が可能であったノズル位置が40 mmで作製した板である。幅広がりを起こしたものは、成形面の板幅に対応する部分を示した。

成形ロールなしの条件では、自由凝固面は凹凸が激しい。成形ロールありの条件では、成形ロール面は平坦に成形されている。成形ロール面の溶湯が流れた痕跡はロール周速により異なり、ロール周速が低いほど溶湯がロール回転と逆方向から、幅方向に流れたような痕跡になる。成形ロール面には、目視では他に顕著な差異は確認

されない。

成形ロールなしの条件では、ロール周速が6 m/s以下とそれより高い条件では板の凝固ロール面の状態は異なる。6 m/s以下では板の凝固ロール面には、金属光沢に富んだ部分と金属光沢が乏しい部分が存在する。金属光沢に富んだ部分はくぼんでおり、ロールとの接触状態は金属光沢に乏しい部分と比較し、不良であると考えられる。成形ロールを用いることにより、くぼみ（金属光沢に富んだ部分）が比較的浅い部分は圧下によりつぶれ平坦になり、くぼみの面積は小さくなる。しかし、くぼみの部分が完全なくなるわけではない。これは圧下力がおおよそ98 Nと大変小さいためと考えられる。ロール周速が8 m/s以上では、6 m/s以下と比較し小さく、深いくぼみが存在する。成形ロールからの圧下により、このようなくぼみも減少している。

さらに詳細に、成形ロールの板の表面状態に対する効果を調査するため、板の表面を光学顕微鏡により観察した。観察した結果を **Fig. 9** に示す。成形ロールなしの条件で作製した凝固ロール面には、ロールと接していないと考えられる溝が存在する。成形ロールありの条件では、凝固ロール面の溝は小さくなっている。これは、成形ロールと凝固ロール間で、軽く圧下を受けるためであると考えられる。成形ロール面は、成形ロールありの凝固ロール面と比較して溝は小さい。凝固ロール面は凝固後に圧下を受けるが、成形ロール面は凝固時に圧下を受けるため、凝固時の溶湯の成形ロール面での圧力は凝固ロール面が成形される場合より高くなる。したがって成

Fig. 8 Appearances of strips cast by single roll (melt spinning) and modified process.

F.S.S.; free solidified surface, S.R.S.; solidification roll side surface, F.R.S.; forming roll side surface. Arrow shows rotating direction.

Fig. 9 Appearances of strip surfaces observed by a higher magnification.

F.S.S.; free solidified surface, S.R.S.; solidification roll side surface, F.R.S.; forming roll side surface. Arrow shows rotating direction.

形ロール面が最も平坦になると考えられる。

4.3 板の断面組織

成形ロールの有無，ロール周速と断面組織の関係を**Fig. 10**に示す。成形ロールなしの条件では，ロール周速が2 m/sと低い場合は，凝固ロール面近傍はデンドライト組織であるが，他の大部分は針状組織である。ロール周速が高くなるに従い，デンドライト組織の領域は広くなり，ロール周速が10 m/s以上では全体がデンドライト組織になる。低ロール周速の場合に針状組織が形成される原因は，完全に凝固する前に板がロールから剥離を起こすためであると考えられる。ロール周速が高くなるに従い板の厚さは薄くなり，また板の巻き付き長さも長くなる。ロール周速が10 m/s以上になると凝固完了後に板はロールから剥離するため，全体がデンドライト組織になると考えられる。

成形ロールを用いることで板の断面組織は以下のように変わる。ロール周速2 m/s程度の低ロール周速で大部分が針状組織の場合は，内部が針状組織でロール接触面がデンドライト組織か，またはロール接触面がデンドライトで，内部がロール接触面と比較してやや粗大なデンドライトになる。凝固ロール面側と成形ロール面側で，組織の状態に顕著な差異は存在しない。ロール周速が6 m/s程度で，断面の約半分がデンドライトで他が針状組織の場合は，凝固ロール面と成形ロール面はデンドライト組織で，内部はロール接触面近傍よりやや粗大なデンドライト組織となる。断面全体がデンドライト組織の場合は，組織の状態には成形ロールの有無により差異は見られない。成形ロールを用いることで，針状組織をデンドライト組織に改善することができた。成形ロールを付

Fig. 10 Effect of forming roll on the microstructure of the strip.

加したことで成形ロールによる冷却効果のほかに，ロール間で板を拘束するために，板から凝固ロールへの熱伝達状態も良好になると考えられる。

Fig. 11に，成形ロールを用い自由凝固面の改善が可能な条件におけるノズル位置，ロール周速と断面組織の状態の関係を示す。ロール周速が2, 4 m/sでは，ノズル位置が40 mmの場合は内部までデンドライト（▲プロット）になるが，80 mm以上では内部は針状組織（○プロット）である。ノズル位置が40 mmの場合は，自由凝固面の成形時には，内部の凝固が完了しておらず，成形ロールと凝固ロールからの冷却により，内部はデンドライト組織になったと考えられる。ノズル位置が80 mm以上では，自由凝固面の成形時に針状組織は存在していたと考えられる。ロール周速が6, 8 m/sの場合も自由凝固面の成形時には，成形後に板の内部になる部分の凝固が完了していないために，成形ロールと凝固ロールからの冷却により急冷凝固し，内部はデンドライト組織になったと考えられる。ロール周速が10, 12 m/sの場合は，自由凝固面の成形時には凝固はほぼ完了して組織はデンドライトであり，自由凝固面には半凝固状態，または薄い溶湯の層が存在する状態であったと考えられる。

5. 結 言

メルトスピニング法において自由凝固面上の半凝固層

Fig. 11 Diagram showing microstructure of the strip.

または半凝固層とその上の薄い溶湯の層を、ロールにより低荷重で成形することで自由凝固面の改善を試み、以下の結論を得た。

(1) 板の自由凝固面上の未凝固層を、成形ロールを用いて約98 Nの低荷重で、圧延せずに成形することが可能であった。低荷重であるため板がロールへ固着するこ

とはなかった。

(2) 板は成形ロールにより軽圧下を受けるため、凝固ロール面の状態も改善される。また、凝固ロール面より成形ロール面の方が状態は良好である。

(3) 成形ロールを付加することで、板は成形ロール面からも冷却されるため、成形ロールなし(単ロール)の条件では針状組織であった領域が小さくなったりデンドライトに変わり、断面組織も改善される。

(4) ロール周速および成形ロールとノズルの間の距離により、成形時の自由凝固面の凝固状態を操作することができる。

おわりに実験試料をご供試いただいた㈱日軽技研に感謝します。

参 考 文 献

- 1) たとえば、羽賀俊雄，本村 貢：軽金属，**43** (1993)，427.
- 2) 羽賀俊雄，本村 貢：軽金属投稿中.
- 3) たとえば，S. J. Savage and F. H. Froes: J. Metals, (1984), 20.
- 4) たとえば，X. Yang, J. D. Hunt and D. V. Edmonds: Proc. of The 3rd Int. Conf. on ALUMINIUM ALLOYS, (1992), 146.
- 5) 松尾 守：軽金属，**39** (1989)，524.