研究論文

単ロール急冷凝固法による Al-Si 合金箔のロールへの
巻き付き長さに及ぼす作製因子の影響

羽賀 俊雄*・本村 貢*

Effect of formation factor on the roll-sticking distance of
Al-Si alloy foil in single roll rapid solidification method

Toshio HAGA* and Mitsugu MOTOMURA*

Factors which affect the sticking distance of Al-12 mass%Si foil to the roll was investigated in this study. 4 kinds of roll (copper, brass, S45C, SUS304) were used. The roll speed was 1500 rpm (24 m/s) and 3500 rpm (55 m/s). The nozzle which had a 0.5×20 mm rectangular slit was used to eject molten metal. The sticking distance of Al-12 mass%Si alloy foil increases with roll temperature, which depends on the thermal conductivity of roll material. Wetting condition between the molten metal and the roll doesn't affect the sticking distance. The sticking distance is unrelated to the contacting area ratio between the foil and the roll, the roughness of roll and the temperature of molten metal.

Keywords: Al-Si alloy, melt spinning, sticking, single roll method, foil

(Received August 24, 1993)

1. 緒 言

単ロール急冷凝固法（メルトスピニング法）では、箔は凝固直後はロールへ巻き付いたままであり、ある温度まで冷却された後、ロールから剥離する。もし箔がロールへ一周以上巻き付いてしまうと、箔の連続的な作製が不可能なばかりではなく、ロール面上に箔が幾層にも厚く巻き付き、ノズルを破損する恐れがある。箔の連続的な作製と巻取りの観点から、単ロール急冷凝固法による急冷凝固箔の成形技術を確認するためには、箔のロールへの巻き付き長さに影響を与える因子について明らかにすることが必要である。単ロール急冷凝固法における箔の巻き付き長さに関する研究例は少なく、H. H. Liebermann¹⁾の研究報告があるにすぎない。従来の研究では、ロール材質が箔の巻き付き長さに及ぼす影響がぬれ性の相違によるものか、熱伝導率（ロール面温度に影響する）の相違によるものか明らかにされておらず、また箔の巻き付き長さや箔のロール接触面の状態との相関関係についても調査されていない。一方、アルミニウム合金箔の巻き付き長さに関する研究報告例は見られな

い。

本研究では、アルミニウム合金箔のロールへの巻き付き長さやロール材質、ロール面あらし、ロール面温度、溶湯温度との関係について調査を行い、従来の研究において明らかにされていない上述の点を明確にし、箔のロールへの巻き付き長さを支配する因子について考察した。

2. 実験方法

実験に用いた単ロール急冷凝固装置の主な仕様について記す。詳細については、既報²⁾に示した。ロール寸法は直径300 mm、幅100 mmとした。ロール材質は、銅、黄銅（YBsC2）、S45C、SUS304の4種類を用いた。これらのロールに厚さ20 μ mのCrめっきを施したロールも実験に用いた。ロール材質を変えるとロールの熱伝導率および溶湯とロールのぬれ性が変化する。そこでぬれ性と熱伝導率のどちらの影響なのか明らかにするために、ぬれ性を同一条件とし熱伝導率のみを変えることを想定し、Crめっきを施したロールを用いた。ロールの研磨は毎回実験直前に行った。めっきを施していない場合

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

Fig. 1 Roughness of the roll surface.

は、#1200のエメリー紙で行い、めっきを施した場合はバフで研磨を行った。ロール材質によりロール面あらしが異なるのでロール面の中心線平均あらしを測定し Fig. 1 に示した。また、各ロール材質の熱伝導率³⁾を以下に示す。銅：399 W/m·K (20°C)，黄銅：112 W/m·K (20°C)，S45C：W/m·K (0°C)，SUS304：W/m·K (0°C)，Cr：67 W/m·K (20°C) である。ロール材質の影響に関する実験以外は銅ロールを用いた。

ロール面温度の影響に関する実験では、ロールを加熱したときにロール表面に生成した酸化物を迅速に除去するために#240のエメリー紙を用いた。ロール面温度を変化させた実験では、ロール面温度を20, 50, 100, 150, 200°Cの5条件とし、これ以外の実験では20°Cに設定した。ロール面温度を50°C以上に設定する場合は、ロール全体を箱型の電気炉内で加熱した。

溶湯噴出温度は、溶湯温度に関する実験の場合は液相線上20, 70, 170°Cの3条件、これ以外の実験の場合は液相線上70°Cとした。

ノズルは、スリットノズルを用いた。スリットの間隔は、0.5 mm、幅は20 mmとした。ノズルの位置はロール直上とし、ノズルとロールの間隔は1 mmとした。実験試料は、Al-12 mass%Si 合金を用いた。

箔の厚さは35~45 μmとした。この厚さの箔を作製するため溶湯噴出用窒素ガスの圧力は、0.01~0.3 MPaの範囲で調節した。ロール回転数は、1500 rpm (周速24 m/s)，3500 rpm (周速55 m/s) の2条件とした。

箔のロールへの巻き付き長さは、ビデオカメラで観察し、8分の1回転刻みで巻き付き長さを評価した。実験中に箔の巻き付き長さは変化するが、最長の長さを巻き付き長さとした。たとえば、8分の3回転より長く8分の4回転以下の巻き付き長さであれば、巻き付き長さは8分の4回転と図示 (Fig. 2, Fig. 7, Fig. 8) した。作製した箔の表面状態は、マクロ的には目視により観察し、

Fig. 2 Effect of the roll material on the sticking distance of the foil to the roll.

ミクロ的には光学顕微鏡により観察した。箔のロール接触面には、主に空気巻き込みが原因で形成される溝⁴⁾が存在する。箔のロール接触面においてこの溝を除いた部分の全面積に対する割合を箔とロールの接触面積率と定義し、これを画像処理装置を用いて求めた。また、表面あらし計により中心線平均あらしを測定した。中心線平均あらしは、カットオフ値0.8 mm，測定長さ4.8 mmとした。あらしの測定には中心線平均あらしの測定範囲が、0.01~50 μmの表面あらし計を用いた。

3. 実験結果と検討

3.1 ロール材質と巻き付き長さ

Fig. 2 に各材質のロールと箔のロールへの巻き付き長さの関係を示す。箔のロールへの巻き付き長さは、ロール材質により異なった。巻き付き長さをロール回転数が1500 rpmの場合で比較すると、銅、黄銅、S45C、SUS304の順で長くなる。3500 rpmでは1500 rpmより巻き付き長さは長くなるが、長さの順番は1500 rpmと変わらないと考えられる。また、Fig. 1 に示したロール面のあらしと箔のロールへの巻き付き長さには、相関関係は存在しない。ロール材質により箔の巻き付き長さが異なる原因の一つとして、溶湯とロールとのぬれ性が考えられる。ぬれ性の影響を明確にするために、箔のロール接触面の状態を調査した。以下の結果では、SUS304ロールでは、箔がロールに一周以上巻き付き、箔の採取が不可能であったので結果を示していない。

箔のロール接触面のマクロ的な観察結果を Fig. 3 に示す。ロール回転数が異なると、箔のロール接触面の状態は異なる。しかし、同一回転数で比較すると、ロール材質は箔のロール接触面の状態に著しい影響を及ぼしていない。さらに詳細に調査するために、光学顕微鏡により箔のロール接触面をミクロ的に観察した。箔のロール

Fig. 3 Roll material and roll contacting surface of the foil. Arrow shows rotating direction.

Fig. 4 Roll material and wetting pattern on the roll contacting surface of the foil. Arrow shows rotating direction.

接触面のウェットニングパターン^{5),6)}を **Fig. 4** に示す。ロール回転数が1500 rpm の場合は3500 rpm の場合と比較し、ロール回転方向に大きくさび型の溝が存在する。しかし、同じロール周速で比較すると、ロール材質により溝の形状や大きさ、分布状態には多少の差異は存在するが、ロール材質はウェットニングパターンの状態に大きな影響を与えていない。

箔のロール接触面の状態を定量的に把握するために、箔とロールの接触面積率および箔のロール接触面の中心線平均あらさを求めた。箔とロールの接触面積率を **Fig. 5** に、中心線平均あらさを **Fig. 6** に示した。箔とロールの接触面積率は、**Fig. 4** において箔のロール接触面における溝を除いた部分の面積の全面積に対する割合とした。**Fig. 5** よりロール材質は接触面積率には大きな影響は及ぼしておらず、ロール回転数が同一であれば接触面積率は、ほぼ一定の値になっている。ロール材質により箔の巻き付き長さが異なるのは、箔とロールの接触面積が原因ではないと考えられる。ロール材質により箔のロール接触面の凹凸が変わり、これが箔とロールの機械的結合力に影響していることも考えられる。箔のロール接触面の凹凸を調査するため中心線平均あらさを測定した。**Fig. 6** より箔のロール接触面の中心線平均あらさには、1500, 3500 rpm のどちらのロール回転数の場合も、ロール材質により顕著な差異は見られない。したがって箔とロールの機械的な結合力には、差異はないと考

Fig. 5 Roll material and contact area between roll and foil.

Fig. 6 Roll material and roughness of the roll contacting surface of the foil.

えられる。これらの結果より、ロール材質は箔の巻き付き長さに影響するが、溶湯または箔とロールの接触状態、つまりぬれ性が原因ではないと考えられる。異種材質のロールにおいて、ロール面の状態をより均一な条件に近くしてぬれ性の影響を排除し、熱伝導率の影響を明確にするためにCrめっきを施したロールを用いた。**Fig. 1** に示すように、めっきを施すことでロール面のあらさもほぼ等しくなっている。Crめっきを施した各ロールにおける箔の巻き付き長さを **Fig. 7** に示す。Crめっきを施すことにより、ロール面の状態や溶湯とロール面のぬれ性は等しくなると考えられる。1500 rpm の場合は、Crめっきを施したロールも巻き付き長さの順序は、Crめっきを施さない場合と同様であった。3500 rpm の場合は、銅ロール以外では箔はロールへ一周以上巻き付いてしまい、巻き付き長さを比較することはできない。しかし、Crめっきを施していない場合とCrめっきを施した場合の結果より考察すると、箔の巻き付き長さはCrめっきの有無によらず、ロール材質の熱伝

Fig. 7 Roll with Cr plating and sticking distance of the foil to the roll.

Fig. 8 Effect of the roll temperature on the sticking distance of the foil to the roll (Copper roll).

導率が低くなるほど長くなると考えられる。したがって、箔のロールへの巻き付き長さには、溶湯とロールとのぬれ性より、ロール材質の熱伝導率の影響の方が支配的であると考えられる。熱伝導率はロール面温度に影響し、熱伝導率が低いほど箔の作製中のロール面の温度は上昇すると考えられる。ロールの材質と箔の巻き付き長さの関係より、ロール面温度が高くなるほど、箔は長くロールへ巻き付くと推測した。そこでロール面温度と箔の巻き付き長さの関係を調査した。

3.2 ロール面温度と箔のロールへの巻き付き長さ

Fig. 8 に銅ロールを用いた場合のロール面温度に対する箔のロールへの巻き付き長さを示す。ロール面温度が高くなるに従い巻き付き長さは長くなる。また、ロール回転数が高い方が巻き付き長さは長い。ロール回転数が1500 rpm の場合はロール面温度が150°C 以上、3500 rpm の場合はロール面温度が100°C 以上になると箔はロールへ一周以上巻き付き、連続的な箔の作製が不可能になる。このようにロール面温度が高くなるに従い、箔の

Fig. 9 Roll temperature and roll contacting surface of the foil. Arrow shows rotating direction (Copper roll).

Fig. 10 Roll temperature and wetting pattern on the roll contacting surface of the foil. Arrow shows rotating direction (Copper roll).

ロールへの巻き付き長さは、長くなることが判明した。

ロール面温度が高くなるほど箔はロールへ長く巻き付くが、この原因を明確にするため箔とロールの接触面積率や、箔の表面あらさなど箔の表面状態と巻き付き長さの相関関係について調査した。箔のロール接触面の目視によるマクロ的な観察結果を Fig. 9 に示す。ただし、箔がロールへ一周以上巻き付かず、箔の採取が可能なロール面温度の条件について示した。ロール面温度が変わっても箔の表面状態には顕著な相違は見られない。同じ箔のロール接触面のウェットングパターンを Fig. 10 に示す。ロール回転数が同一であればロール面温度を変えてもウェットングパターンの溝の形状や分布状態には、顕著な差異は観察されない。また、箔とロールの接触面積率を求め、Fig. 11 に示したが、ロール面温度が高く箔が長く巻き付く場合でも、接触面積率には顕著な相違は見られなかった。したがって、ロール面温度とウェットングパターンの状態、箔とロールの接触面積との間には、特別な相関関係はないと考えられる。Fig. 12 に箔のロール接触面の中心線平均あらさを示した。同一の実験試料で同じロール回転数の場合で比較すると、

Fig. 11 Roll temperature and contact area between roll and foil (Copper roll).

ロール面温度の違いにより箔の巻き付き長さに長短の差が生じるときでも、箔のロール接触面のあらしに顕著な違いは見られなかった。したがって、ロール面温度が高い場合に特に単位面積あたりの接触面積が大きいことや、箔の表面の凹凸が変化し機械的な固着力が増加したとは考えられない。これらの結果より、ロール面温度が高くなるに従い、箔のロールへの巻き付き長さが長くなるのは、ロール材質に関する実験結果と同様に、箔とロールとの接触面積、機械的な結合の状態が変化したことが原因ではないと考えられる。また、ロール面温度に関する実験の結果より、ロール材質が箔のロールへの巻き付き長さに影響するが、この主な原因は、熱伝導率の相違によるロール面温度の上昇の相違であると結論づけられると考えられる。

箔とロールの固着のメカニズムは明らかではないが、箔がロールから剝離するのは、箔の温度が低下し収縮するときの力が、箔とロールの固着力より大きくなるためと考えられる⁷⁾。ロール面温度が高いほど箔の巻き付き長さが長くなる原因としては、箔の収縮力が固着力より大きくなるまで箔の温度が低下するまでの時間が長くなるためと考えられる。また、ロール周速が高くなるほど箔が長く巻き付くのは、剝離温度まで箔の温度が低下する間に、ロール周速が高いほどロールの回転が進むためと考えられる。

3.3 溶湯温度と箔のロールへの巻き付き長さ

箔の作製中に溶湯を凝固させることでロール面温度は上昇する。したがって溶湯温度が高いほどロール面温度は上昇し、箔はロールに長く巻き付くことが予測された。しかし、液相線 $20\sim 170^{\circ}\text{C}$ の範囲では、溶湯温度は箔の巻き付き長さに影響を与えなかった。これは溶湯温度を液相線 $20\sim 170^{\circ}\text{C}$ の範囲で変えてもロールが吸収する熱量の変動は小さく、厚さが高々 $100\mu\text{m}$ に満た

Fig. 12 Roll temperature and roughness of the roll contacting surface of the foil (Copper roll).

ない箔を作製する場合、溶湯温度の変化分のロール面温度の上昇への寄与分は微々たるものと考えられる。

4. 箔の巻き付き長さを考慮したロール材質の選択

銅ロールのように熱伝導率が高いロールにおいても、ロール面に厚さが高々 $20\mu\text{m}$ 程度の熱伝導率が銅より低いCrめっきを施しただけで、箔のロールへの巻き付き長さは長くなる。これは、ロール表面近傍の温度が上昇したためと考えられる。単ロール急冷凝固法では、巻き付き長さを考慮し、ロール表面の温度上昇が低く抑えられる熱伝導率が高いロール材質やめっきの選択が必要である。単ロール急冷凝固法のロール材質としては熱伝導率が高い材質、たとえば本研究の中では銅が適していると考えられる。

5. 結 言

単ロール急冷凝固法においてアルミニウム合金箔のロールへの巻き付き長さに影響する因子について調査を行い以下の結論を得た。

(1) 箔のロールへの巻き付き長さにはロール面温度が最も影響し、ロール面温度が高くなるほど、箔のロールへの巻き付き長さは長くなる。

(2) 箔のロールへの巻き付き長さには、ロール材質の熱伝導率が影響し、ロールの熱伝導率が低くなるほど巻き付き長さは長くなる。また、ロール表面に施すCrめっきの厚さが $20\mu\text{m}$ 程度であっても、箔の巻き付き長さには影響する。ロールに箔が巻き付かず連続した箔を作製するためには、銅のような熱伝導率の高い材質をロール材質に選択する必要がある。

(3) ロール面温度が上昇すると箔のロールへの巻き付き長さが長くなるが、ロール面温度が変わっても箔のロ

ール接触面のマクロ的な状態 (目視による観察結果) およびミクロ的な状態 (光学顕微鏡による観察結果), 箔とロールの接触面積率, 箔のロール接触面のあらさは変化しない。

おわりに実験に協力してくれた本学学生の福本勲君, 伊藤史君, 有我正彦君, 久保田雅之君に, また実験試料をご供試いただいた(株)日軽技研に感謝いたします。本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団助成金によることを記し感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) H. H. Liebeamann: Metall. Trans. B, **15B** (1984), 155.
- 2) 本村 貢, 羽賀俊雄: 軽金属, **38** (1988), 528.
- 3) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門, 丸善, (1985).
- 4) M. Matuura, K. Suzuki, M. Kikuchi and M. Yagi: Japan J. Appl. Phys., **19** (1980), 1781.
- 5) 羽賀俊雄, 本村 貢: 軽金属, **40** (1990), 265.
- 6) S. C. Huang and H. C. Fiedler: Melt. Trans. A, **12A** (1981), 1107.
- 7) R. E. Maringer: Mater. Sci. and Eng., **98** (1988), 13.