研究論文

単ロール急冷凝固 Al-Si 合金箔の表面状態に 及ぼす Si 量の影響

羽賀 俊雄*・本村 貢**

Effect of Si content on the surface characteristics of aluminum
alloy foil rapidly solidified by single roll method

Toshio HAGA* and Mitsugu MOTOMURA**

Rapidly solidified Al-Si alloy foils with Si content in the range of 0–20 mass% were prepared by single roll method. Continuous and sound Al-Si foils were fabricated with Si content in the range of 0–16 mass%. Dents on the roll contact side surface of foil disappeared when Si content became greater than 4 mass%. Good surface characteristics of 99.99 mass% Al foil was affected by thickness, but in the case of Al-Si alloys it was not affected. There was no effect on the uncontact part in the wetting pattern by Si content. Roughness on the roll contact side surface of the foil depended on the Si content, and Si content greater than 8 mass% made the surface smooth. Contact area between roll and foil increased with increase of Si content within the range of less than 8 mass%.

Keywords: rapid solidification, single roll method, Al-Si alloy, foil, wetting pattern

(Received August 10, 1989)

1. 緒 言

急冷凝固法により熔融金属から直接かつ連続的に箔を作製する代表的な方法には、単ロール法と双ロール法がある。単ロール法は、双ロール法に比べ箔の作製要因制御が容易であり、幅の広い箔の作製が容易であるとされている。しかし、片面冷却であるため、箔とロールの間に空気を巻き込んだり、ロールに接していない面の凹凸が著しいなど、表面の状態は双ロール法と比較し不良であると言われている。単ロール急冷凝固法は、溶湯から直接最終形状に近い広幅箔が作製できるので、省工程となるメリットがある。したがって、二次的加工を最小限にとどめるようにするためには、急冷凝固箔作製の段階において、箔の表面の状態を健全にする必要があると考えられる。

単ロール急冷凝固法の箔の成形に関する研究として、幅160 mmの広幅箔^{1)~3)}および広幅クラッド箔^{4),5)}の成形に関する研究を行い、ノズル形状、ノズルとロールの

位置関係など健全な広幅箔を作製するための条件を調査してきたが、本報においては Si 量、ロール回転数、溶湯噴出圧力の各種因子について検討を行い、この中で特に Si 量に注目し箔の表面状態への影響の調査を行った。

単ロール急冷凝固法により作製した箔の表面の状態は、ロール周速、溶湯噴出圧力、ロール材質⁶⁾、ロール面の状態⁷⁾、溶湯温度、合金元素、雰囲気などに影響されると考えられる。単ロール急冷凝固法により作製した箔の表面状態に関する研究の第一段階⁸⁾として、最も基本的な成形因子であるロール回転数と溶湯噴出圧力が箔の表面の状態、特にロールとの接触面の状態に及ぼす影響について調査を行った。

単ロール急冷凝固法で作製した Al-Si 系合金箔の、急冷組織と Si 量の影響に関する研究は多数みられるが⁹⁾、箔の成形性に及ぼす Si 量の影響に関する研究は少ない。本報においては、Al-Si 系合金箔のロール接触面のウェットングパターン、箔の表面の凹凸の状態、箔とロールの接触面積率、表面あらさなどに及ぼす Si 量の影響

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

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

Table 1 Experimental condition

specimens	99.99 mass% Al, Al-2 mass% Si Al-4 mass% Si, Al-8 mass% Si Al-12 mass% Si, Al-16 mass% Si Al-20 mass% Si
roll speed (rpm)	1500, 2500, 3500
ejection pressure (MPa)	0.05~0.30
molten metal temp. (°C)	liquidus temp. +70
nozzle (mm)	0.5 × 40 (SUS304)
roll (mm)	φ300 × 200 (Cu)
roll surface treatment	#1200 emery paper

について調査を行ったので報告する。

2. 実験方法

本研究に用いた単ロール急凝固装置は、幅160 mmの箔の作製が可能であり、既報¹⁾で用いた装置と同じものである。主な実験条件を Table 1 に示す。ロールは銅製で内部は溜水による冷却が可能である。ロールの回転数は、0~4000 rpm (周速63 m/s) の範囲で無段階に設定することができる。ノズルのロールに対する位置は、ロール直上、ノズルとロールの間隔は、1 mm に設定した。ロール面は、毎回実験直前に#1200のエメリー紙で研磨を行った。実験試料は、99.99 mass% Al および Al-Si 系合金とした。Si 量は、2, 4, 8, 12, 16, 20 mass% とした。実験試料は大気溶解を行い、溶湯はガスボンベよりるつぼ内に導いたちっ素ガスの圧力によりノズルの先端から噴出する。溶湯噴出圧力は、圧力調整器により調整し、るつぼ内の圧力を圧力変換器により実測した。

作製した箔の表面の状態は、目視および光学顕微鏡により観察した。箔のロール接触面には、空気巻き込みが主な原因とされている溝がみられるが、ロール面におけるこの溝を除いた部分の面積の割合を、箔とロールの接触面積率と定義し、面積率を画像処理装置により求めた。また、表面あらさ計により箔のロール接触面の状態と中心線平均あらさを測定した。中心線平均あらさは、カットオフ値0.8 mm、測定長さ4.8 mm とし、幅方向とロール回転方向のあらさの比較も行った。あらさの測定には中心線平均あらさの測定範囲が、0.01~50 μm の表面あらさ計を用いた。

3. 結果と考察

3.1 目視による観察

箔の作製の可否について調査を行い、本実験条件において99.99 mass% Al および Si 量が16 mass% までの Al-

Fig. 1 Roll contact side surface of foils. Ejection pressure $P=0.05$ MPa.

Si 系合金は、ノズルスリット幅と同幅で連続的な箔の作製が可能であった。しかし、Al-20 mass% Si 合金においては幅方向の割れが入り、ノズルスリット幅の連続的な箔を作製することは困難であった。

Fig. 1 に箔のロール接触面の観察結果を示す。99.99 mass% Al, Al-2 mass% Si 合金では、表面にあばた状の窪みが観察される。個々の窪みの大きさ、その分布状態は、Fig. 1 に示すようにロール回転数の影響はみられず、また実験条件の範囲内で圧力を変化させた場合も、あばた状の窪みには顕著な相違はみられなかった。99.99 mass% Al と Al-2 mass% Si 合金を比較すると、窪みの数は Al-2 mass% Si 合金の方が少なく、その寸法は大きくなっている。Si 量が4 mass% 以上では、ロール回転数、溶湯噴出圧力の影響を受けず、あばた状の窪みはみられなくなる。したがって箔のロール接触面にみられるあばた状の窪みは Si 量の影響が大きく、Si 量が4 mass% 以上になると、ロール接触面の窪みは目視で判断できなくなり、箔のロール接触面の状態は平坦になることが明らかになった。

また、99.99 mass% Al では、箔の厚さが箔のロール接触面の状態に影響を及ぼす。Fig. 2(a)~(d) に示すように99.99 mass% Al では、ロール回転数が1500, 3500 rpm

Fig. 2 Effect of the foil thickness on the roll contact side surface of foils.

(a), (c), (e), (g) ejection pressure $P=0.05$ MPa.
(b), (d), (f), (h) ejection pressure $P=0.17$ MPa.

のいずれの場合においても箔が厚くなるに従いロール接触面は、あばた状の窪みが存在する状態から金属光沢が乏しい部分が網の目状に分布する状態へと変化する。箔が厚い場合のその状態は、箔が薄くあばた状の窪みが存在する状態と比較し、表面の凹凸は激しくなり箔の状態は不良になる。これに対し Al-2 mass%Si 合金では、Fig. 2(e)~(h)に示すように、箔が厚くなくてもロール回転数の影響を受けず、金属光沢の乏しい部分ができたりせず、箔のロール接触面の状態は、箔の厚さの影響を顕著に受けるようなことはみられなかった。これより、アルミニウムに Si を添加することにより流動性が増すので、箔のロール接触面はあばた状の窪みがなくなり、また、箔のロール接触面は厚さの影響を受けなくなると考えられる。

Fig. 3 Wetting pattern on the roll contact side surface of foils. Ejection pressure $P=0.05$ MPa.

3.2 ウェットングパターン

Fig. 3 に光学顕微鏡により観察した箔のロール接触面のウェットングパターンを示す。ウェットングパターンの溝は、Si 量の変化に対して影響されず、ロール回転数が増すに従い、小さくなる傾向がある。また、溶湯噴出圧力が高くなるに従い、溝は小さくなる傾向がみられた。しかし、Si 量により、ウェットングパターンの溝の形状には、顕著な差異はみられない。Si 量は、ロール回転数や溶湯噴出圧力のように溝の形状を変えるほど、ウェットングパターンには影響を与えないと考えられる。

3.3 箔のロール接触面の状態

箔のロール接触面の状態を表面あらさ計を用いて箔の幅方向について求めた。その結果の一例を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a)は、ロール回転数が1500 rpm、(b)は3500 rpm の場合である。ロール回転数によらず、ノッチ（あらさ曲線の谷の部分）の他にうねりが観察される。このうねりは、99.99 mass%Al、Al-2 mass%Si 合金では顕著であるが、Si 量が増加するに従い小さくなり、Si 量が8 mass%になると消滅し、箔の表面は平坦になる。周期的なうねりのピッチと Fig. 1 に示したあばた状の窪みの間隔を比較した結果、うねりの谷はあばた状の窪みに対応していると結論される。

(a) 1500 rpm

(b) 3500 rpm

← Lateral direction

Fig. 4 Typical profile curves of roll contact side surface across the width. Ejection pressure $P=0.05$ MPa.

ノッチの幅、深さについては、ロール回転数が同一であれば、Si量により顕著な相違はみられず、ロール回転数が増すに従い、ノッチは小さくなる。このことからノッチは、Fig. 3のウェットングパターンの溝に対応しているものと考えられる。

以上の結果より、箔のロール接触面は、Siを8 mass%以上添加することにより、うねりがなくなり平坦になることが明らかになった。

3.4 ロール接触面における中心線平均あらさの測定

箔のロール接触面において中心線平均あらさを箔の幅方向について求め、それをFig. 5に示す。Si量が8 mass%程度までは、Si量が増加するに従い、あらさは急激に減少していく。これは、Fig. 4に示すようにSi量が増加してもノッチの大きさや数には大きな影響はみられないが、表面のうねりはSi量が増加するに従い、小さくなっていることと対応していると考えられる。Si量が8 mass%以上では、ロール回転数が一定であるなら、Si量が増加しても、あらさはほぼ一定になる。一方、ロール回転数が増すとあらさは小さくなっている。これは、Fig. 3のウェットングパターンの溝が、

Fig. 5 Effect of Si content on the roughness of roll contact side surface. Ejection pressure $P=0.05$ MPa.

Fig. 6 Effect of Si content on the roughness of roll contact side surface. Roll speed is 3500 rpm. Ejection pressure $P=0.05$ MPa.

ロール回転数が増すにつれて小さくなっていることと対応していると考えられる。

Fig. 6は、ロール回転数を3500 rpm一定とし、ロール回転方向と幅方向のあらさを比較したものである。傾向はFig. 5と同様に幅方向、回転方向ともSi量が8 mass%までは、Si量が増加するとあらさは小さくなり8 mass%以上においては、測定方向が同一であるならSi量が増加してもあらさはほぼ一定となるが、幅方向のあらさは回転方向のそれより相対的に大きい。

3.5 箔とロール面の接触面積率

箔のロール接触面には、Fig. 3に示したように、空気

Fig. 7 Effect of Si content on the contact area on the roll contact side surface. Ejection pressure $P=0.05$ MPa.

の巻き込みが主な原因と考えられている溝が存在する。

Fig. 7に接触面積率を示す。Si量が8 mass%までは、Si量が増加するに従い接触面積率は大きくなり、8 mass%以上の範囲においては、Si量が増加しても接触面積率は、ほぼ一定の値になる。接触面積率の値のこの傾向は、先に示したFig. 5のあらさとSi量の関係を示したものと逆であり、あらさが小さくなるほど接触面積率は大きくなる。Si量を一定として比較すると、ロール回転数が増すにつれて接触面積率も大きくなっていることがわかる。また、Si量、ロール回転数を一定とした場合は、溶湯噴出圧力が高いほど箔とロールの接触面積率は大きくなる傾向がみられた。すなわち、Si量、ロール回転数、溶湯噴出圧力の値を高くすることにより、ウェットニングパターンの溝は減少し、急冷凝固箔のロール接触面の状態は良好になる。

3.6 箔の非ロール接触面の状態

光学顕微鏡により、箔の非ロール接触面の状態を観察した結果をFig. 8に示す。99.99 mass% AlとAl-Si系合金では、非ロール接触面の状態は異なっている。Al-Si系合金の非ロール接触面には、Fig. 8に示すように無数の凹凸がみられるが、この凹凸の大きさ、分布の状態にはSi量、ロール回転数、溶湯噴出圧力により顕著な相違はみられなかった。これに対し、99.99 mass% Alでは、Al-Si系合金のような凹凸はみられず平坦で、ロール回転数と溶湯噴出圧力の影響はみられなかった。また、箔の非ロール接触面の状態は、箔のロール接触面のウェットニングパターンのようなロール回転方向、幅方向での方向性はみられない。これはロール接触面の場合溶湯がロール面に直接接触し、さらにロール回転方向に

← Rotating direction

40μm

Fig. 8 Roll uncontact side surface of foils. Ejection pressure $P=0.05$ MPa.

引き伸ばされる作用を受けながら凝固するのに対し、非ロール接触面は自由凝固面であるため、加工条件による直接の影響を受ける度合いが小さいためと考えられる。

3.7 Si量と箔の良好部の厚さ

単ロール急冷凝固法で作製したアルミニウム合金箔の表面状態は、厚さにより状態が異なり、箔厚が薄い状態から厚くなるに従い①薄く無数の穴が空いている不良な状態(A)、②穴もなく、非ロール接触面に筋状の盛り上がりもなく良好な状態(B)、③厚く非ロール接触面に筋状の盛り上がりがあり不良な状態(C)、のように分類できる。Fig. 9(a)は、ロール回転数が1500 rpm、(b)は3500 rpmの場合の(A)、(B)、(C)の各状態と箔の厚さとSi量の関係を示したものである。このうち、良好な状態の箔厚の範囲(B)は、Si量が増加するに従い、減少していくと共に薄くなっていることがわかる。したがって、Si量が増加するに従い、表面状態が良好で厚い箔は作製できなくなる。もしロール回転数を変えずに(B)の範囲の上限を上昇(箔が厚くなる)、または、下限を降下(箔が薄くなる)させる手段の一つとして、ノズルのスリット間隔を変える方法がある。また、1500 rpmと3500 rpmの結果を比較すると、Si量が増加するに従い、(B)の範囲はロール回転数が1500 rpmのときの方が広がっており、作製できる箔厚の自由度は高くなる。

Fig. 9 Relation between Si content and foil thickness for quality of foils. A—thin and porous, B—excellent, C—thick and inferior in roll uncontact side surface.

4. 結 言

単ロール急冷凝固法における箔の表面の状態に関する研究として、Al-Si 系合金の Si 量が、箔の表面の状態に及ぼす影響について調査を行い、以下の結論を得た。

(1) 単ロール急冷凝固法により 99.99 mass% Al, Si 量が 2, 4, 12, 16, 20 mass% の Al-Si 系合金のうち 99.99 mass% Al と Si 量が 16 mass% 以下の Al-Si 系合金は、ノズルスリット幅の連続的な箔を作製することができた。

(2) Si 量が 4 mass% 以上になると箔のロール接触面の状態は、あばた状の窪みがなくなり平坦になる。このあばた状の窪みの有無には、ロール回転数と溶湯噴出圧力は影響しない。

(3) 99.99 mass% Al 箔のロール接触面の状態は、箔が厚くなると、金属光沢の乏しい部分が網の目状に分布し凹凸が激しくなり、表面状態は不良になる。しかし、Si を添加することにより、箔の厚さによる上述のような変化はみられなくなる。

(4) 箔のロール接触面のウェットングパターン溝の形状には、Si 量はロール回転数や溶湯噴出圧力のようにより大きな影響は与えない。

(5) 表面にみられるあらさのうねりは、Si 量が 8 mass% 以上になると小さくなるが、ノッチの形状は影響を受けない。

(6) 箔の中心線平均あらさは、Si 量が 8 mass% までは、Si 量が増加すると小さくなるが、8 mass% 以上で、ほぼ一定になる。

(7) 中心線平均あらさの値は、各 Si 量において測定方向が幅方向の場合よりロール回転方向の場合の方が相

対的に小さい。

(8) Si 量が 8 mass% までは、箔とロールの接触面積率は Si の増加と共に増大するが、それ以上になるとほぼ一定になる。

(9) 光学顕微鏡により観察した箔の非ロール接触面の状態は、99.99 mass% Al では平坦であるが、Al-Si 系合金では凹凸となり異なるが、Al-Si 系合金では Si 量に影響されずほとんど変わらない。

(10) Si 量が増加すると、得られる健全な箔の厚さは薄くなり、その厚さの許容範囲は狭くなる。

終わりに実験に協力してくれた本学学生の福本勲君、伊藤史君に、また実験試料を御供試いただいた東洋アルミニウム㈱に感謝します。また、本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団研究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) 本村 貢, 羽賀俊雄: 軽金属, **38** (1988), 528.
- 2) 本村 貢, 羽賀俊雄: 軽金属, **38** (1988), 534.
- 3) 本村 貢, 羽賀俊雄: 軽金属, **39** (1989), 190.
- 4) 本村 貢, 羽賀俊雄: 軽金属, **38** (1988), 196.
- 5) 本村 貢, 羽賀俊雄: 軽金属, **39** (1989), 423.
- 6) Kunimasa Takeshita and Paul Hideo Shingu: The Japan Inst. Metal, **6** (1986), 454.
- 7) S. C. Huang and H. C. Fiedler: Met. Trans., **12A** (1981) 1107.
- 8) 羽賀俊雄, 本村 貢: 軽金属, 投稿中.
- 9) たとえば, 小林紘次郎, 汲川雅一, 新宮秀夫: 日本金属学会誌, **49** (1985), 59.
- 10) M. Matuura, K. Suzuki, M. Kikuchi and M. Yagi: Japan J. Appl. Phys., **19** (1980), 1781.