研究論文

ヘッダを用いる電磁鋳造法によるアルミニウム合金
鋳塊の表面品質の改良*蟻川 伸吾**・細川 佳之**・玉田 拓**
福元 裕彦**・吉川 克之**・浅井 滋生***Surface quality of aluminum ingot fabricated by
electromagnetic casting by use of a header*Shingo NINAGAWA**, Yoshiyuki HOSOKAWA**, Hiromu TAMADA**
Hirohiko FUKUMOTO**, Katsuyuki YOSHIKAWA** and Shigeo ASAI***

In order to improve the surface quality of ingots fabricated by an electromagnetic casting, a header which restrains the growth and the movement of oxide films was set on the side free surface of a molten metal constrained by an electromagnetic force. The shapes and the materials of the header were examined under aluminum alloy castings. It is noticed that an electrically conducting graphite header provided the better surface qualities regarding the roughness and the thickness of oxide films than an electrically insulating refractory header did. The electromagnetic force and the velocity distribution in a molten metal are numerically calculated and the surface qualities obtained in the experiment are discussed in relation with the numerical results. It is found that a contacting pressure between a molten metal and the header is larger in graphite header than that in the refractory one and the molten metal just below the side free surface flows upward in the graphite header and downward in the refractory one.

Keywords: electromagnetic casting, electromagnetic processing of materials, aluminum alloy, surface quality, no scalping

(Received September 6, 1996)

1. 緒 言

国内において広く用いられているアルミニウムのDC鋳造法(以下DC法と呼ぶ)は、鋳塊表層部に逆偏析層等の表面欠陥が存在するため、圧延工程に移る前に鋳塊表面の面削工程を必要としている。一方、電磁鋳造法(Electromagnetic casting: 以下EMC法と呼ぶ)は溶湯と鋳型の接触がなく、水による直接冷却が可能であることから、表面性状に優れた鋳塊を製造することができる。そのため欧米では、多くのアルミニウム製品がEMC法により製造されている。しかしながら、我が国においては、DC法に比べて設備コストが高価であること、また、現存するEMC法による表面品質では若干の面削が不可欠であることから、工業ベースでの生産は行われていない¹⁾。現状のEMC法が面削を必要とする理由は、溶湯の表面酸化皮膜の成長および移動と巻き込みに起因する縦筋状の表面欠陥²⁾が発生するためと言われている。従来、この問題に対しては、(1)金属製の磁場遮蔽

スクリーンを採用して溶湯流動を抑制する³⁾、(2)堰体(skim dam)と呼ばれる耐火物性の枠を溶湯表面に浮かべ酸化皮膜の移動を抑制する⁴⁾などの方法が採られてきた。しかしながら、これらの対策は鋳塊の無面削化に対して必ずしも十分な効果を挙げていない。

本研究では、従来のEMC法とは異なり、凝固直前の溶湯側面部にヘッダを接触させることにより、酸化皮膜の生成と移動を抑制し、磁場遮蔽スクリーンを用いないEMC法を提案するとともに、この方法で試作した鋳塊の表面品質について理論的検討を加えたので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の模式図をFig. 1に示す。従来のEMC法で使用されている磁場遮蔽スクリーンに替わって、ヘッダが溶湯側面部に配されている。電磁コイルは内寸 $300 \times 300 \text{ mm}^2$ 、高さ70 mmの矩形で、75 kW-2.2 kHzの高周波電源により最大12300 A・Tの通電が可能であ

* 軽金属学会第91回秋期大会(平成8年11月)で一部発表。

** (株)神戸製鋼所(神戸市)。Kobe Steel, Ltd. (Kobe-shi, Hyogo)。

*** 名古屋大学工学部(名古屋市)。Faculty of Engineering, Nagoya University (Nagoya-shi, Aichi)。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

る。また、鑄造速度、冷却水量は、それぞれ1.83 mm/s, $7.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ であり、得られる鑄塊の断面サイズは約 $230 \times 230 \text{ mm}^2$ 、長さは約280 mmであった。冷却水ノズルは、渦電流の発生を極力抑制する目的でノズル肉厚をスキンドープ以下とし、かつ各辺ごとに4分割されたステンレス鋼製とした。なお、溶湯の湯面制御はノズル・フロート方式で行った。

2.2 鑄造条件

鑄造条件をTable 1に示す。冷却水が鑄塊に当たる位置は、溶湯側面形状が最も平滑となるコイル高さの中心とし⁵⁾、溶湯表面から冷却水の当たる位置までの距離、すなわち電磁気力による溶湯の保持高さを95 mmとした。コイル電流値12300 A・Tは、従来のEMC法で採用されているコイル電流値3500~6000 A・Tより大きな値となっており、そのため溶湯流動の影響が顕著に現れるものと予測された⁶⁾。そこで、ヘッダを使用するに際して、その材質を非導電性の耐火物と導電性の黒鉛の2種類として比較した。すなわち、導電性の黒鉛を用いた場合には、磁場の遮蔽効果によってヘッダ内の溶湯に作用する電磁気力が弱まり、溶湯とヘッダの接触圧が増すとともに、接触状態の安定化および溶湯流動の抑制が期待できる。なお、耐火物の材質は、ホットトップ鑄造でリング材として用いるけい酸カルシウムとした。

2.3 ヘッダ形状

実験に使用したヘッダの断面形状をFig. 2に示す。ヘッダ内面には、溶湯とヘッダの接触距離を長くして酸化皮膜の移動を抑制するとともに、溶湯とヘッダとの接触状態の安定化を図るため、ヘッダ下端部で鑄塊寸法と

Table 1 Casting conditions

Materials	aluminum (JIS3004)
Pouring temperature	983 K
Casting speed	1.83 mm/s
Volume rate of cooling water	$7.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
Coil current	12300 A・T
Frequency of coil current	2.2 kHz
Types of header	① refractory header ② refractory header with dam (thickness 6 mm) ③ refractory header with dam (thickness 11 mm) ④ graphite header with dam (thickness 6 mm)

(a) header without dam (b) header with dam

Fig. 2 Dimensions of headers.

なるように下開きのテーパを設けた。さらに(b)は、酸化皮膜の移動の完全な抑制を目的として堰部(dam)を設けたものである。実験では、Table 1に示したヘッダ①~④を用いて4種類の鑄塊を試作した。なお、比較材として断面サイズ $300 \times 100 \text{ mm}^2$ の鑄塊をDC法にて製造した。

3. 実験結果および考察

3.1 鑄塊表面性状

Fig. 3に、鑄塊の表面性状の一例を示す。耐火物ヘッダを用いた鑄塊表面には、1~2 mm 間隔の顕著な横しわ模様が見られる。一方、黒鉛ヘッダを用いた鑄塊にも薄い横しわが認められるものの、EMC法の特徴⁷⁾である金属光沢をもった美しい表面となっている。さらに、黒鉛ヘッダを用いた場合、従来のEMC法で問題となっている縦筋状の欠陥の発生は皆無であった。

Fig. 4に鑄塊表面粗度の測定結果をDC鑄塊と比較して示す。DC鑄塊は発汗現象により、鑄塊表面に

Fig. 3 Surface aspect of EMC ingots cast by using refractory and graphite headers.

Fig. 4 Effect of shapes and materials of a header on surface roughness of EMC ingots. (①~④ are corresponding to the numbers in Table 1.)

±0.5 mm に及ぶ凹凸が見られるのに対し、EMC 鋳塊では発汗が生じないため比較的平滑な表面が得られている。耐火物ヘッダを用いた場合、横しわに相当する±0.2 mm の凹凸がピッチ 2~4 mm で不規則に発生しており、表面粗度は従来の EMC 法より明らかに劣っている。一方、黒鉛ヘッダを用いた鋳塊では、横しわが著しく改善され、従来の EMC 法と遜色ない表面粗度の鋳塊が得られている。

この横しわの生成原因は、湯面制御不良⁸⁾、電磁気力で保持された溶湯の揺動⁹⁾、溶湯の流速変動等が複雑に

Fig. 5 Comparison of thickness of oxide film on ingot surface among DC and EMC's in the different shape and material of a header. (①~④ are corresponding to the numbers in Table 1.)

絡み合っていると考えられ、その詳細は現在のところ不明である。黒鉛ヘッダの使用により横しわが解消された理由については、磁場の遮蔽効果が上記の横しわ生成原因を緩和するように作用したためと考える。

3.2 鋳塊表面の酸化皮膜厚み

Fig. 5 に、オージェ電子分光法により測定した鋳塊表面の酸化皮膜厚みを DC 鋳塊と比較して示す。DC 鋳塊に比べ EMC 鋳塊の酸化皮膜は薄く、かつ堰部がないものよりあるもので、また、堰部厚みの大きいもので小さな値となっている。さらに、黒鉛ヘッダを用いた鋳塊の酸化皮膜は 14 nm であり、DC 鋳塊の面削後の酸化皮膜

Fig. 6 Inclusions observed just below ingot surface in the different casting conditions. (①~④) are corresponding to the numbers in Table 1.)

厚み約 8 nm に迫る薄さである。これらの結果は、ヘッダおよび堰部が酸化皮膜の移動を抑制したため、本手法の有効性を示している。特に黒鉛ヘッダを用いた場合は、溶湯の上表面からヘッダ内面への酸化皮膜の移動がほぼ完全に抑制された結果であると考ええる。すなわち、ヘッダと溶湯の離脱位置から溶湯の新生面が現れ、その表面に酸化皮膜が生じるものの、凝固するまでの距離が約 10 mm 程度と短いため、酸化皮膜がほとんど成長することなく鋳塊表面が形成されたと考える。

3.3 鋳塊表層下に存在する介在物

Fig. 6 に鋳塊表層下の凝固組織のミクロ観察結果を示す。耐火物ヘッダを用いたもの (①~③) には、溶湯の表面酸化皮膜を巻込んだと思われる膜状の介在物が表層下のいたる所で認められる。一方、黒鉛ヘッダを用いたもの (④) には、このような膜状介在物の巻込みはまったく認められない。電磁気力が強く作用する溶湯側面部に非導電性の耐火物を配する場合には、溶湯の揺動により介在物が巻込まれたものと考ええる。一方、導電性を有する黒鉛ヘッダを採用した場合には、磁場の遮蔽効果により、ヘッダと溶湯との接触圧が増加するとともに、溶

Fig. 7 Contents of oxide inclusions in EMC ingots cast by using various headers. (①~④) are corresponding to the numbers in Table 1.)

Fig. 8 Comparison of electromagnetic force distribution between uses of refractory and graphite headers.

湯流速が減少して溶湯の安定性が向上するため、表面酸化皮膜の移動と巻込みが抑制されたと考える。これらの原因については、後述の数値解析で、その効果を定量的に評価する。

鋳塊表層下および内部に含まれる酸化物を元素メタノール抽出法により測定した結果を Fig. 7 に示す。各鋳塊とも、1：鋳塊中心部、2：鋳塊表層より内側4 mm、3：鋳塊表層の3点を分析した。鋳塊表層の酸化物量を表す3の値は、鋳塊の表面酸化皮膜と酸化皮膜巻込みによる介在物の両方を含んでいるが、前述の表面酸化皮膜厚み測定 (Fig. 5)、表層下の介在物観察結果 (Fig. 6) と同様に、黒鉛ヘッダを用いた場合、著しく低下している。

一方、鋳塊内部に含まれる酸化物量は、いずれの鋳塊も0.002~0.004 mass%ではほぼ同程度であることから、酸化皮膜は溶湯内部には巻込まれなかったと考えられる。

3.4 数値計算

黒鉛ヘッダを用いた場合の表面品質向上効果の理由を、溶湯とヘッダの接触圧、溶湯流動の二つの観点から定量化することを目的として、2次元の電磁場⁹⁾および流動場の解析を実施した。

3.4.1 電磁気力分布と接触圧

電磁場解析によって得られた電磁気力分布を Fig. 8 に示す。導電性を有する黒鉛ヘッダ内には電磁気力の発生が認められるが、絶縁体である耐火物ヘッダ内には電磁気力の発生は認められない。溶湯に作用する電磁気力の分布には、ヘッダ内側の溶湯に作用する電磁気力が耐火物に比べ黒鉛の方がわずかに小さいこと以外、大きな差は認められない。

Fig. 9 Comparison of surface profile and pressure distribution on the side surface between uses of refractory and graphite headers.

Fig. 9 に電磁場解析により求めた溶湯形状および溶湯とヘッダの接触圧を合わせて示す。グラフ左側が溶湯形状を示しており、縦軸の原点はコイル高さの中心である。溶湯の側面部の形状はほとんど差がなく平滑面が得られているものの、溶湯の上表面のメニスカス部で耐火物と黒鉛の違いが現れている。黒鉛の場合、溶湯に作用する電磁気力が小さくなるため、メニスカスの落込み量が少ない。

一方、右側の図は溶湯の側面に働く電磁気圧と溶湯の静水圧を表しており、ヘッダより下方の溶湯側面上では、電磁気圧と静水圧が等しく、溶湯が非接触で保持されていることを示している¹⁰⁾。ヘッダ内面では、静水圧と電磁気圧の差が溶湯とヘッダの接触圧を表し、接触

Fig. 10 Comparison of velocity distributions in molten aluminum between uses of refractory and graphite headers. (①~④) are corresponding to the numbers in Table 1.)

庄の高さ方向にわたる積分値を耐火物と黒鉛のヘッダで比較すると、1.3倍程度黒鉛ヘッダの方が大きくなっていた。この差が酸化皮膜の移動に対する抑制効果を生じせしめたものと考えられる。

3.4.2 溶湯流速分布

電磁場解析で得られた電磁気力分布を用いて汎用の流動解析ソフトで計算した流速分布を Fig. 10 に示す。ここでは、注湯流と引抜きによる影響を無視するとともに、溶湯上表面、溶湯側面部の自由表面形状に関する計算は行わず、凝固殻、ヘッダおよび大気により囲まれた溶湯部を固定領域として計算した。堰部なしの耐火物ヘッダの場合、凝固殻直上の溶湯の下降流速は約0.95 m/sにも達しているが、堰部を設けることで0.76 m/sへと低下した。堰部の厚み6 mmと11 mmでは下降流速に大きな差は認められない。

一方、黒鉛ヘッダの場合、下降流速はもっとも遅い0.68 m/sとなっており、凝固殻の直上で流速0.54 m/sの上向きの反転流が見られた。黒鉛ヘッダを用いた場合、溶湯の下降流速の低下と反転流の存在が溶湯表面の酸化皮膜移動の抑制に有効に作用し、表面品質の改善がなされたと考えられる。

4. 結 言

鋳塊の表面品質向上と無面削化を目的として電磁鋳造実験と数値計算を実施し、以下の結果を得た。

(1) ヘッダ材質として非導電性の耐火物を用いた場合、鋳塊の酸化皮膜厚みはDC鋳塊に比べて薄くすることができるが、溶湯の表面酸化皮膜の巻き込みが生じ鋳塊表面に横しわ模様が発生する。

(2) 導電性を有する黒鉛ヘッダを用いた場合、介在物の巻き込みがなく、薄い酸化皮膜(14 nm)を有する優れた表面品質の鋳塊が製造可能である。

(3) 電磁場と流動場の連成解析を行い、黒鉛ヘッダの場合、耐火物ヘッダに比べて接触圧が約1.3倍大きくなり、溶湯の下降流速が減少するとともに、凝固殻直上で上向きの反転流が生じることを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 小島 陽, 古井光明: 軽金属, 43 (1993), 335.
- 2) K. Buxmann: SCIENCE AND ENGINEERING OF LIGHT METALS, JILM, Tokyo (1991), 1015.
- 3) B. Q. Li, J. W. Evans and D. P. Cook: METALLURGICAL TRANSACTION B, 22, (1991), 121.
- 4) N. Hayashi, K. Nagae and M. Nagayama: Light Metals, (1995), 1049.
- 5) S. Ninagawa: International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994), 307.
- 6) 浅井滋生: 電磁気力を利用したマテリアルプロセッシング, 日本鉄鋼協会, (1989), 63.
- 7) 三田村康二, 杉崎英雄, 青山 堯: 軽金属, 26 (1976), 203.
- 8) 林 典史, 長江光司, 永山 克: 材料とプロセス, 5 (1992), 985.
- 9) 古井光明, 笠原 隆, 小島 陽, 松尾 守: 軽金属, 42 (1992), 395.
- 10) 吉田政博: 鉄と鋼, 73 (1987), 2.