研究論文

電磁鑄造におけるスクリーンコイルによる
磁場の制御古井 光明*・松枝 恵治*
小島 陽**・松尾 守***Control of magnetic field by screen
coil on electromagnetic castingMitsuaki FURUI*, Keiji MATSUEDA*
Yo KOJIMA** and Mamoru MATSUO***

Screen effect in Electromagnetic Casting (EMC) was continuously controlled over a wide range by replacing usually used metal screen with screen coil. The resistance of external coil with an insertable iron core was connected with condenser resonance circuit to obtain stronger electromagnetic fields. As a result, a maximum density of 0.13 T was obtained by this electromagnetic coil. By using this apparatus, the vertical side of levitated liquid metal is made more straight and the stable, vibrationless free meniscus is obtained. The area of horizontal cross section in the melt is also changed by altering the resistance of external coil, being influenced by number of turns and/or length of iron core insertion. This apparatus will contribute to the development of EMC.

Keywords: electromagnetic casting, screen coil, resistance of external coil, magnetic flux density, meniscus shape

(Received January 21, 1991)

1. 緒 言

近年の材料軽量化に伴ってアルミニウムの需要は増加している。またその用途もさまざまな分野にまでおよび構造材の主流である鉄と共に用いられている。こうした中あらゆるニーズに対応できるより高品質なアルミニウムが不可欠になっている。そこで直接水冷による急冷効果および磁場による攪はん効果のため結晶粒、デンドライト組織が微細で¹⁾、良好な機械的性質を有する²⁾鑄塊が得られる電磁鑄造法 (Electromagnetic Casting 略して EMC) が注目されており、現在、世界中で年間約120万トン (1989年時点)³⁾ものアルミニウム合金がこの EMC 法により鑄造されている。

本研究では一般に EMC で用いられている金属リングスクリーンをコイルに置き換え、スクリーンコイル系の総インピーダンスを可変可能にしてスクリーン効果を制御できるように可変抵抗器として外部コイルを接続した。さらにスクリーン効果を細かく加減するために外部コイルに鉄芯を挿入したときの磁束密度分布およびメニスカス形状について調査した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究で用いた装置の模式図を Fig. 1 に示す。前報⁴⁾と同様な20 kw, 3 kHzの高周波加熱電源に接続された電磁コイルはφ6 mm 銅管製で直径120 mm, 高さ120 mm,

* 長岡技術科学大学大学院 (長岡市)。Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Nagaoka University of Technology (Nagaoka-shi, Niigata).

** 長岡技術科学大学工学部 (長岡市)。Faculty of Engineering, Nagaoka University of Technology (Nagaoka-shi, Niigata).

*** スカイアルミニウム株式会社 (深谷市)。SKY Aluminium Co., Ltd. (Fukaya-shi, Saitama).

① Digital Spectrum Analyzer, ② Digital Thermometer, ③ Thermo Couple, ④ Electromagnetic Coil, ⑤ Crucible, ⑥ Insulator, ⑦ Lifting Table, ⑧ Search Coil, ⑨ Ammeter, ⑩ Screen Coil, ⑪ Molten Metal, ⑫ Oscilloscope, ⑬ Frame, ⑭ Variable Resistance, ⑮ Condenser, ⑯ High Frequency, Induction Heat System,

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

巻数18ターンである。なおコンデンサと共振させることによって電源とのマッチングを行った。99.99%アルミニウムをるつばに入れ電磁コイル中央にセットした後、メニスカス形状や磁場分布に影響を及ぼさない位置に熱電対を浸漬させて、溶湯温度750°C一定を確認しながら電磁コイル電流を0~880 Aの範囲内で変化させた。またスクリーンコイルに流れる誘導電流を可変抵抗器で加減することによって広範囲で連続的なスクリーン効果の制御を試みた。

2.1.1 電磁コイル

電源の発振器に用いられている並列共振回路を Fig. 2(a)に示す。またこの等価回路は Fig. 2(b)のように表される。そしてベクトル図は Fig. 2(c)となる。共振状態はこの回路で I と E が同相となったときであり、並列回路の合成インピーダンスは Z のリアクタンス成分が0の状態である。Fig. 2(b)の合成インピーダンス Z は Eq. (1)⁵⁾で表される。

$$Z = \left\{ \frac{1}{r + i\omega L} - \frac{1}{\frac{1}{i\omega C}} \right\}^{-1} = \frac{(r/\omega^2 C^2)}{r^2 + \{\omega L - (1/\omega C)\}^2} - \frac{r^2/\omega C + (L/C)\{\omega L - (1/\omega C)\}}{r^2 + \{\omega L - (1/\omega C)\}^2} = R - iX \quad (1)$$

共振周波数 f_0 は Eq. (1)で $X=0$ の条件から求められる。

Fig. 2 Parallel resonance circuit of power supply.

Fig. 3 Schematic diagram of resistance of external coil.

$$\frac{r^2}{\omega C} + \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0 \quad (2)$$

Eq. (2)を ω について解くと共に $\omega = 2\pi f$ の関係を用いると Eq. (3)となる。

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{L^2}} \quad (3)$$

通常の並列共振回路では $1/LC \gg r^2/L^2$ と見なせるので Eq. (3)は Eq. (4)⁶⁾となる。

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

Eq. (4)の近似は Eq. (2)で $r^2/\omega C = 0$ と仮定した場合に相当する。したがって共振状態では $\omega L = 1/\omega C$ であり共振状態のインピーダンス Z_0 は Eq. (5)となる。

$$Z_0 = \frac{r/\omega^2 C^2}{r^2 + \{\omega L - (1/\omega C)\}^2} \approx \frac{1}{r\omega^2 C^2} = \frac{L}{rC} \quad (5)$$

よって共振電流 I_0 は Eq. (6)で与えられる。

$$I_0 = \frac{E}{Z_0} = \frac{E}{(L/rC)} = \frac{ErC}{L} \quad (6)$$

効率の良い強力な電磁場を得るために電源と電磁コイ

Fig. 4 Vector diagram of screen coil system.

ルを共振させた。コンデンサのキャパシタンス C は電源の出力トランス 2 次側コイルに用いられている最大値 $160 \mu\text{F}$ 、共振周波数 f_0 を 3 kHz とし、これを Eq. (4) に代入して電磁コイルインダクタンス L を算出した。次にこの L を Eq. (7)⁷⁾ に代入して巻数 n を決定した。なおコイル半径 r は 60 mm としコイル高さ h は銅管径に巻数 n を乗じたものとした。

$$L = K\pi\mu r^2 n^2 / h \quad (\mu\text{H}) \quad (7)$$

ここで K : 係数 $= 0.75$, μ : 透磁率 $= 15.79 \times 10^{-6} (\text{H/m})$ である。Table 1 に作製した 3 種の電磁コイルの仕様を示す。なお No. 1 および No. 2 は前報⁴⁾において使用したつば型誘導炉内電磁コイル No. 0 の改良型である。

2.1.2 外部抵抗

Fig. 3 に外部コイル抵抗器の模式図を示す。電磁コイルとつばの間隙にスクリーンコイルを挿入しケーブルによって外部コイルと連結する。この外部コイルは巻数を切り換えることが可能で、さらに内部に鉄芯を連続的に挿入することでスクリーン系の総インダクタンスを広範囲にわたり調節できるようになっている。

なお電磁コイル電流を $I_E = I_{E0}e^{j\omega t}$ としスクリーンコイル電流を $I_S = I_{S0}e^{j\omega t}$ とすれば、 I_E と I_S の関係は Eq. (8)⁸⁾ で与えられる。

$$I_S = [-j\omega M_{ES} / (R_{S,t} + j\omega L_{S,t})] I_E \quad (\text{A}) \quad (8)$$

ここで M_{ES} は電磁コイルとスクリーンコイル間の相互インダクタンスで、 $R_{S,t}$ と $L_{S,t}$ はそれぞれスクリーンコイル系の総抵抗および総インダクタンスである。Eq. (8) より $R_{S,t} \ll \omega L_{S,t}$ であれば I_S と I_E は逆位相となり $L_{S,t}$ の調節によって電磁コイル内磁束密度の広範囲な制御が可能となる。

同様に鉄芯を挿入した状態では Fig. 4 のベクトル図が示すように $L_{S,t}$ が $\mu L_{S,t}$ (μ は鉄芯の透磁率)、 $R_{S,t}$ が $R_{S,t}$ (鉄芯のヒステリシス損失 + 渦電流損失) となるた

Fig. 5 Characteristics of electromagnetic coil.

Fig. 6 Comparison between brass ring screen and screen coil.

め、鉄芯の磁気特性と電気抵抗率ならびに挿入量によって電磁コイルが発生する磁束 ϕ_E とスクリーンコイルが発生する反作用磁束 ϕ_S の関係を連続的に可変できる。

なお実験は外部コイル巻数 15, $L_{S,t} = 2.5 \sim 15 \mu\text{H}$ 、鉄芯挿入量 $0 \sim 180 \text{ mm}$ の条件で行った。

Table 1 Specification of electromagnetic coil

	tube diameter ϕ (mm)	coil diameter Dc (mm)	coil height h (mm)	winding number n	inductance L_E (μH)	capacitance C (μH)
No. 0	16	260	160	10	24.56	160
No. 1	10	150	220	20	38.93	76
No. 2	6	120	120	18	25.06	162

Fig. 7 Influence of screen coil diameter d on screen effect.

2.2 測定方法

磁束密度、メニスカス形状の測定は前報⁴⁾に準ずる。磁束密度は溶湯保持に大きく関与する楕円振動の z 方向のみを測定した。またメニスカス形状は接触子によってトレースした。

なお電磁コイルやスクリーンコイルには高周波大電流が流れていると予想されたため、大電流用電流変成器をデジタル・スペクトラム・アナライザ (FFT) に接続して電流測定を行った。またFFTを周波数モードに変換することで周波数の検出も可能となった。

3. 結果および考察

3.1 電磁コイル特性

前報⁴⁾で用いたるつば型誘導炉内電磁コイル No. 0 よりさらに強い電磁場を得るために巻数2倍の No. 1 コイルを作製した。しかし単位長さ当たりの巻数が少ないためリアクタンスが低く、その結果として発生する電磁場の大きな増加は認められなかった。そこでコンデンサのキャパシタンス C からコイル巻数 n を決定し電源能力のロスが少ない No. 2 コイルを作製した。

Fig. 5 に電磁コイル特性を示す。図中の No. 0 は前報⁴⁾で用いたるつば型電磁コイルである。導体内の最大電磁場の強さ H_m を理論的に求めるために Eq. (9)⁹⁾ を用いた。

$$H_m = I_E \cdot n(3a+b) / 4\pi(a+b)^2 \quad (A/m) \quad (9)$$

ここで、 I_E : 電磁コイル電流、 a : 電磁コイル内半径、 b : 電磁コイル外径である。コイル高さ中央での実測値の比較から No. 0 より No. 1 は12%、No. 2 は34% 磁束密度

Fig. 8 Influence of winding number of screen coil n on screen effect.

が増加していることがわかる。一方、Eq. (9)による計算値と実測値を比較すると、No. 0 および No. 1 では15%程度実測値が低い値を示している。この低下の原因として No. 0 は電磁コイルをセメントで厚く覆ったため磁束の流れが妨げられたものと推測される。また No. 1 については単位長さ当たりの巻数が少ないことやコイルの巻きむらが挙げられる。これに対して No. 2 は最大磁束密度0.13 T で計算値との差が2%となっている。

以上のことから No. 2 は磁場のロスが少なく電源とマッチングした最適のコイルであることがわかる。そこで以下の実験においては No. 2 電磁コイルを適用した。

3.2 スクリーンコイル特性

スクリーンコイルの目的は可変抵抗器を接続して磁場を連続的に制御することで、溶湯側面部を垂直に保持できるように磁場を減衰させて溶湯静水圧とバランスするような電磁圧分布を作ることである¹⁰⁾。そこでインピーダンス固定の黄銅リングスクリーンとの比較を行い、さらに遮蔽効果に及ぼすスクリーンコイル寸法形状の影響を調査した。

Fig. 6 にスクリーンコイル、黄銅リングスクリーンおよびスクリーン無挿入状態 (W/O Screen) の比較を示す。スクリーンコイルは黄銅リングスクリーン形状に準じた内径 $d=100$ mm、高さ $h=60$ mm、管径 $\phi=6$ mm、巻数 $n=5$ とした。ほぼ等しい電気伝導率を有する両者は同様な遮蔽傾向を示した。このことはスクリーンコイルにおいて巻数増加による起磁力向上とインダクタンス増分によるスクリーンコイル電流低下が反作用磁場発生に同程度影響したためだと考えられる。可変抵抗器を接続することによるスクリーン効果の制御など装置として

Fig. 9 Comparison of water resistance with carbon rod resistance and resistance of external coil.

の汎用性を考慮してスクリーンコイルの適用を決定した。

Fig. 7 は遮蔽効果に及ぼすスクリーンコイル内径 d の影響を示す。いずれのスクリーンコイルにおいてもコイル内はほぼ同様な磁場分布を示す。またコイル内壁付近で磁束密度が最小になっており、 $d=100\text{ mm}$ ではスクリーン無挿入時 (W/O Screen) に比べて約95%の減衰がみられたことから、スクリーンコイルを溶湯側面に接近させることで大きな遮蔽効果が得られることがわかる。

Fig. 8 はスクリーンコイル巻数 n の影響を示す。5ターンおよび10ターンでは両者ともほぼ同程度の遮蔽を示し巻数による影響は見られなかった。このことは5ターンから10ターンへの巻数増加による反作用磁場の増加分と、スクリーンコイル回路のインピーダンス増加による反作用磁場の減少分がバランスしたものと考えられる。巻数増加に伴って反作用磁場を大きくするためには、ス

クリーンコイルに直列にコンデンサを接続して共振状態 ($\omega L - 1/\omega C = 0$) となるよう調整し、スクリーンコイル電流を流れやすくすることが必要である。

3.3 可変抵抗器特性

スクリーンコイルには高周波大電流が誘導されるため、これを制御するには特殊な可変抵抗器が必要である。そこで3種類の抵抗について検討を行った。その比較を Fig. 9 に示す。液体 (水、硫酸銅水溶液) 抵抗は液体自体の抵抗値が大きすぎるため中間領域での可変が困難である。また水溶液濃度の違いによる大きさ影響は見られなかった。また炭素棒抵抗は炭素棒の抵抗が微小であるため、長さを大きくとり断面積を小さくすれば最大値から40%程度の範囲内で制御は可能であるが、制御精度の問題や装置の大型化のため実用的ではない。これに対して外部コイル抵抗は小規模でしかも制御範囲は最大値から80%程度と良好な結果を示したため、以下の実験においては外部コイル抵抗器を選択した。

鉄芯無挿入時において外部コイル巻数を変化させたときのスクリーンコイル電流と磁束密度を Fig. 10(a) および Fig. 10(b) に示す。前者より巻数増加に伴って電流値が減少しているのがわかる。このことは巻数が増加するにつれてスクリーンコイル系の総インダクタンスが増加し、その結果としてスクリーンコイル電流が流れにくくなっていると推測される。また後者より磁束密度はスクリーン無挿入状態から短絡の範囲内で可変でき、電磁コイル上端付近で大きな遮蔽効果を示している。また電磁コイル中央付近においてスクリーン無挿入時よりも磁束密度が大きく出ていることは、溶湯の立上げには都合が良く大変興味深い傾向である。

外部コイル巻数15でコイル内部に $\phi 80\text{ mm}$ 鉄芯 [抵

(a)

(b)

Fig. 10 Variation of screen coil current and magnetic flux density without iron core.

Fig. 11 Distribution of magnetic flux density with iron core.

Fig. 12 Meniscus shape for variation of screen effect by resistance of external coil.

抗率: $\rho = 9.8 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$ を挿入したときの磁束密度を Fig. 11 に示す。鉄芯挿入量が増加するにつれて遮蔽効果は減少しスクリーン無挿入状態に近づいている。この現象は鉄芯の挿入によって外部コイルの透磁率が増加して磁束が通過しやすくなり、スクリーンコイル系の総インダクタンスが増加することによってスクリーンコイル電流が減少したためだと考えられる。Fig. 10(b) と Fig. 11 から、外部コイルの巻数変換と鉄芯挿入量の調整によってスクリーン無挿入状態から短絡の範囲内における磁束密度の円滑な制御が可能であることがわかる。

外部コイル抵抗によってスクリーン効果に変化させたときのメニスカス形状を Fig. 12 に示す。スクリーン効果が大きいほど最大メニスカス高さは減少し、メニスカ

Fig. 13 Relation between winding number of external coil and meniscus shape.

スは山形から矩形に移行した。また溶湯側面の垂直部は確保され揺れない安定した形状となった。これらのことから本研究で用いた電磁コイル装置にノズル、フロート、底台などの連铸設備を付加させることで EMC への発展が期待される。

Fig. 13 は外部コイル巻数とメニスカス形状の関係を示す。溶湯の凝固は冷却ジャケットによる一様水冷とした。外部コイル巻数の増加に伴いメニスカス高さは増加し水平断面積は減少している。

4. 結 言

本研究では基礎的な電磁コイル装置の作製とその特性およびスクリーンコイルと可変抵抗器を用いたときの磁場遮蔽効果について調査・検討し以下の結果を得た。

- (1) 電磁コイルは電源と共振させることによって計算値とはほぼ等しい最大磁束密度 0.13 T が得られた。
- (2) スクリーンコイルは金属リングスクリーンとほぼ同程度の遮蔽効果を示した。また装置としての汎用性等を考慮するとスクリーンコイルの方が有利であると思われる。

- (3) 外部コイル抵抗器の使用によってスクリーン効果の連続的な制御が可能である。また外部コイル巻数増加に伴いアルミニウム溶湯の側面垂直部は確保されつつ溶湯水平断面積が減少した。

参 考 文 献

- 1) 長江光司, 林 典史, 吉田政博: 軽金属学会第75回大会講演概要, (1988), 119.
- 2) 三田村康二, 杉崎英雄, 青山 堯: 軽金属, **26** (1976), 213.
- 3) S. Charles Serve: Light Metal Age, **48-4** (1990), 14.
- 4) 古井光明, 松枝恵治, 小島 陽, 松尾 守: 軽金属, **41** (1991), 12.
- 5) 浅井滋生: 電磁気力を利用したマテリアルプロセ

- シング, 日本鉄鋼協会, (1989), 60.
- 6) 鍛治幸悦, 岡田新之助: 電気回路(1), コロナ社, (1982), 206.
- 7) 小澤保知: 電磁気学, 朝倉書店, (1974), 126.
- 8) 谷口尚司, 菊池 淳, 清水博文: 材料とプロセス, 3 (1990), 917.
- 9) 石川静一: 電気磁気学演習, 学献社, (1979), 265.
- 10) 吉田政博: 住友軽金属技報, 28, (1987), 142.