連続式真空蒸着機におけるアルミニウム蒸発浴面の 電磁気力利用表面清浄化法の研究

伊藤 義文*・神川 進*・加藤 光雄**・平井 悦郎**

(受理1996年5月17日, 掲載決定1997年3月1日)

The Cleanup Effects of the Molten Aluminum Surface by the
Electro-magnetic Force in an Air-To-Air Vacuum Metallizer

Yoshifumi ITO, Susumu KAMIKAWA,
Mitsuo KATO and Etsuro HIRAI

(Mitsubishi Heavy Industries, Hiroshima Works and Hiroshima R & D Center,
4-6-22 Kan-on-shin-machi, Nishi-ku, 733 Hiroshima)

(Received May 17, 1996, Accepted March 1, 1997)

An oblong crucible is heated with a high frequency alternative current of about 1 kHz using an induction heating coil. This frequency is adopted to make it possible to raise the center of the molten aluminum by electromagnetic force to remove the impurities of aluminum oxide or aluminum carbide from the aluminum surface. Thus, the aluminum surface is clean for a long time.

1. 緒 言

プラスチックフィルムにアルミニウム等の金属を真空蒸着した蒸着フィルムは、スナック菓子等の包装材料として広く利用されている。この蒸着フィルムの製造には従来バッチ式巻取真空蒸着機が用いられてきたが、最近では連続式真空蒸着機（Air-To-Air方式）も試用されるようになってきた。

アルミニウムをグラファイト製のつぼ内で溶解させ蒸発させると、アルミニウムの酸化物や炭化物からなるスラッジが生成し蒸発浴面に浮上し、部分的に蒸発面を覆うことで蒸発速度が低下したり、ピンホールの原因となるスプラッシュが発生したりする。

連続式真空蒸着機ではフィルムは連続的に大気から真空槽に供給されるため、バッチ式巻取真空蒸着機のように

に短時間でつぼを清掃、交換する機会がない。このため連続運転の障害要因であるアルミニウム蒸発浴面の汚れを防止し、安定した蒸発を行う工夫が必要である。

本報では、誘導加熱により発生する渦電流と交流磁場との相互作用に基づく電磁気力を利用し、アルミニウム浴面を盛り上がりさせて、浴面に浮遊するスラッジを壁付近に押しやり、るつぼ浴面を清浄に保つ方法について理論的・実験的な検討を行った。

2. 電磁気利用浴面盛り上がりの原理と理論解析

2.1 電磁気利用浴面盛り上がりの原理

導電体を交流磁場の中に置くと、導体には渦電流が誘起される。誘導加熱は渦電流によるジュール熱を利用して、アルミニウムを溶解する方法であるが、この時発生する渦電流と交流磁場との相互作用に基づく電磁気力（ローレンツ力）を利用すると、溶解アルミニウムの液表面形状（メニスカス）を制御することができる。

本報で述べる蒸発るつぼの原理を、アルミニウムの連

* 三菱重工業㈱広島製作所製鉄機械設計部（〒733 広島市西区観音新町4丁目6-22）

** 三菱重工業㈱広島研究所（同上）

続铸造法で用いられている EMC (Electromagnetic Casting) の原理図 (Fig. 1)¹⁾を用いて説明する。コイルに高周波電流 J_0 を流すと、交流磁場 H が発生し、同時に鋳塊表面にはコイル電流とは逆位相の渦電流 J が流れる。この渦電流は磁場との相互作用によってフレミングの左手則に基づく電磁気力 F が働き、溶湯を側面から保持する。このため溶湯内に流れが発生し、メニスカスの中央部が盛り上がる様に凸状に変化する。

なお、このままでは交流磁場内の溶湯は山型の盛り上がり形状が不安定であるため、EMC の場合には磁場遮蔽スクリーンを設けて電磁気分布を制御し、形状を安定化させているが、本報の蒸発るつぼでは磁場遮蔽スクリーンを用いてはいない。

2.2 電磁浸透深さ

真空蒸着の場合、るつぼを取巻くように矩型の誘導加熱コイルを配置し、これに高周波電流を印加して、るつぼ内のアルミニウムに直接電磁気力を作用させる必要がある。この場合、電磁力の浸透深さは(1)式で示される²⁾。

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (1)$$

ここで δ : 導体の電磁浸透深さ (m)

ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

μ : 透磁率 (H/m)

f : 周波数 (Hz)

従って、るつぼ内の熔融アルミニウムに直接電磁力を作用させるためには、周波数を下げて電磁浸透深さを大きくする必要がある。

なお、実際には、るつぼとアルミニウムの2種導体を誘導加熱するため、各々の導体の渦電流密度分布を次節に示す理論を用いて解析し、電磁力の作用を評価する必要がある。Fig. 2 に後述する長尺一体型グラファイトる

Fig. 1 Principle of electromagnetic casting¹⁾.

つぼを用いた場合のるつぼと熔融アルミニウム内の渦電流密度分布を解析した結果を示すが、るつぼに流れる渦電流は小さく、るつぼは無視してアルミニウム浴面の盛り上がりの検討ができることを示している。

2.3 アルミニウム浴面盛り上がり理論

浴面の盛り上がり量は、アルミニウムに作用する電磁力と重力の収支で決まる。

Fig. 1 に示す加熱コイルと被加熱導体のモデルにおいて、導体表面から x の距離における磁界の強さ H 、及び渦電流密度 J は式(2)、(3)で表される³⁾。

$$H = H_1 \exp(-x/\delta) \exp(-ix/\delta) \quad (2)$$

$$J = \nabla \times H = -iH_1 \left(-\frac{1+i}{\delta} \right) \exp \left[\frac{-x}{\delta} (1+i) \right] \quad (3)$$

ここに H_1 : 導体表面の磁界の強さ (A/m)

δ : 導体の電流浸透深さ (m)

i : 虚数単位

上記 H, J により導体の単位面積当りに働く電磁力 F の大きさは(4)式で与えられる。

$$|F| = |\mu_0 J \times H| = \frac{\mu_0 H_1^2}{\delta} \exp \left(\frac{-2x}{\delta} \right) \quad (4)$$

ここに μ_0 : 真空中の透磁率 (H/m)

また $x=x_0$ における電磁圧力 $P(x_0)$ は、 F の x 方向成分 F_x を $x=x_0$ から、 $x=d$ (るつぼ中心) まで積分することにより得られる。

$$P(x_0) = \int_{x_0}^d F_x dx = \frac{\mu_0 H_1^2}{\delta} \times \left(-\frac{\delta}{2} \right) \left[\exp \left(-\frac{2d}{\delta} \right) - \exp \left(\frac{-2x_0}{\delta} \right) \right] \quad (5)$$

よって、るつぼ中心における盛り上がり量 h は、重力との収支から次式のようになる。

Fig. 2 Distribution of eddy current density in crucible (Coil current 2000 A).

Table 1 Crucible material

Material	Apparent Density	Specific Resistance	Flexural Strength	Permeability	Shore Hardness
Graphite	1.96 g/cc	1040 $\mu\Omega$ -cm	670 kg/cm ²	0.027 cm ² /sec	63

Fig. 3 Graphite crucible (unit: mm).

$$P(0) = \rho gh$$

$$h = \frac{1}{\rho g} \times \frac{\mu_0 H_1^2}{2} \left[1 - \exp \left(-\frac{2d}{\delta} \right) \right] \quad (6)$$

ここで ρ : 導体の密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

3. 蒸発装置と操作条件

Fig. 3 に現在連続式真空蒸着機で採用している代表的な長尺一体型グラファイトるつぼの形状を示す。又 Table 1 にはその物性を示す。

このるつぼを取り囲む様に誘導加熱コイルが配置され、るつぼ及びアルミニウムを加熱、溶融している。

Fig. 4 にるつぼ廻りの構造を、Table 2 には誘導加熱操作条件を示す。

ここで、誘導加熱コイルに印加する周波数は 1 kHz 以下と従来のものに比べ 1 桁低い値を採用している。これはアルミニウムに電磁力を作用させるためで、るつぼの肉厚 20 mm に対して、それ以上の電磁浸透深さを確保し、アルミニウム浴面を盛り上がらせることを目的としている。

4. 実験結果と考察

4.1 浴面の盛り上がり

(6) 式から盛り上がり量 h は磁束密度 H_1 の 2 乗に比例することから、磁束密度を変化させて盛り上がり量を測定した。盛り上がり量は、るつぼ内のアルミニウムにアルミニウム板を短時間浸漬することによって得られる板上の文様から測定した。その結果、既報³⁾でも報告した通り Fig. 5 に示すように、実験値と計算値はほぼ一致している。

なお、Fig. 6 にアルミニウム浴面の状況を示すが、こ

Table 2 Induction heating condition

Number of Turns	5
Coil Current	440 A
Coil Voltage	600 V
Frequency	900 Hz
Electric Power	186 kVa

Fig. 4 Electromagnetic force acting on aluminum.

の写真からも浴面が山形に盛り上がっている状況が観察できる。また、本手法を用いない場合には、浴面全面にスラッジが浮遊しているのに対し、本手法を用いるとスラッジが山を滑り落ち、るつぼ壁に押しやられるため、盛り上がり浴面が清浄化される事も観察される。

4.2 蒸発面の清浄化操作

蒸発面を肉眼で観察すると、浴面に浮遊するスラッジの状況は次のように変化する。

- ① 運転初期：原料のアルミニウムインゴットを溶融すると、酸化アルミニウムからなるスラッジがるつぼ全面に浮遊する。この状態で誘導加熱電力を過剰に投入すると、浴面の盛り上がりが大きくなり、アルミニウムが激しく内部循環して、浮遊しているスラッジがるつぼの壁に押しやられた状態になる (Fig. 7)。

Fig. 5 Swelling height of vaporizing surface.

Fig. 6 Free surface shape of molten aluminum.

Fig. 7 Sludge behavior on free surface.

- ② 付着操作：この状態でしばらく保持しておく、スラッジがるつぼ壁に付着した状態になるので徐々に正規の電力に戻し、蒸着操作を行う。
- ③ 蒸着中：急激な電力変動がない場合では、スラッジは壁側に押しやられ、浴面は比較的清浄な状態を維持する。但し急激なパワー変動があると、スラッジが再浮遊するため、付着操作を繰り返し浴面の汚れを清浄化する必要がある。
- ④ 停止後：スラッジは Fig. 8 に示すように壁面にひさし状態で付着しているため、蒸着停止後は電力を切り、約800℃まで冷却した後、るつぼを真空槽から取り出して壁面の付着物を取る。その際、残留するアルミニウムも除去してるつぼ内を清掃する。

Fig. 8 Sludge adhesion on inner wall of crucible.

Fig. 9 Experimental results of long run operation.

4.3 連続運転性

Fig. 9 に長時間運転時のフィルム走行速度、圧力およびアルミニウム膜厚の経時変化を示す。使用した基材は PET 12 μm のフィルムで、光学的膜厚測定法により蒸着膜厚を決定した。この結果から、約20時間の長時間連続運転でも、膜厚は450 Å にほぼ一定で保持できていることが明らかとなった。又るつぼには10 mm 程度のひさし状のスラッジが付着しており、この付着物を除去する事で再使用が可能である。

5. 結 論

連続式真空蒸着機では、フィルムは連続的に大気から真空槽に供給されるため、バッチ式巻取真空蒸着機のように短時間でるつぼを清掃・交換する機会がない。このため連続運転の阻害要因であるアルミニウム浴表面の汚れを防止し、安定した蒸発を行う工夫が必要である。

るつぼの廻りには誘導加熱コイルが配置され、このコイルに高周波を印加して、この時に発生する渦電流のジ

ジュール熱を利用してアルミニウムを加熱しているが、同時に周波数を従来より下げ、電磁浸透深さを大きくすると直接アルミニウムに電磁力が作用し、溶融アルミニウムの浴面を盛り上がらせることが可能である。

この原理を実際のるつぽに適用すると、アルミニウム浴面を 5～10 mm 盛り上がらせる事ができ、酸化アルミニウムや炭化アルミニウム等のスラッジをるつぽの壁に押しやり、浴面を常に清浄な状態に保持することができる。この効果により連続式真空蒸着機は約 1 日間の連続

操業ができる様になり、従来のバッチ式巻取真空蒸着に比べ、大幅に稼働率の向上が図れる。

〔文 献〕

- 1) 吉田政博：住友軽金属技報 28, No. 3 (1987) 30
- 2) 日本真空技術(株)：真空ハンドブック改訂版Ⅲ (1989) p. 153
- 3) 加藤光雄，鶴崎一也，他：三菱重工技報 30, No. 2 (1993) 157