解 説

アルミニウム合金の電磁铸造法とその铸塊の品質特性について

三田村 康二*・杉崎 英雄*・青山 堯*

Continuous casting of aluminum alloys in electromagnetic field

MITAMURA Koji*, SUGISAKI Hideo* and AOYAMA Takashi*

1. ま え が き

アルミニウムおよびその合金の加工用铸塊の製造には半連続铸造法(Direct-Chill 法, 以下 D. C. 法と略す)が常用されている。この D. C. 法はアルミニウムに関しては, 1930年代に確立され, 以来生産性の向上あるいは铸塊の品質向上を目指して多くの改良が成されてきている。この方法の概略は金属製の水冷铸型(通常はアルミニウムまたは銅が使用される)に溶湯を連続的に注入し, 铸型による1次冷却(間接冷却)と铸型下の冷却水による2次冷却(直接冷却)により铸塊を凝固させ, 铸型下部より連続的に引き出すもので^{1), 2)}, 溶湯は铸型との接触によって物理的に保持される。

一方, 近年ソ連において, このような水冷铸型を用いずに電磁力を利用して溶湯を保持しつつ铸造するプロセス(電磁铸造法, 以下電磁法と略す)が開発された。この技術は今までの D. C. 法とは原理的に全く異なるもので, 溶湯は铸型と接触せず直接水冷されて凝固するため, 得られる铸塊は種々の特徴的な性質をもっている。当社もこの新技術に注目し, 昭和47年に技術導入を行ない, 現在実用規模の試験铸造設備を稼動している。そこでこの機会に, 今まで紹介解説された文献や^{3)~8)}当社でのテスト結果に基づき, 電磁法の概要について述べてみたい。

2. 電磁法の原理

2.1 電磁法の基本原理

金属の溶解保持あるいは移動等に電磁場を応用することは広く知られている^{9)~11)}。例えば, 低周波誘導炉による溶解, 電磁ポンプによる溶湯輸送, るつぽと接触させず金属を浮遊溶解するレビテーション溶解法⁹⁾等がこれに相当する。

通常, 導電体の周囲に交番高周波電流 I_1 が流れるとその回りに磁場 H ができ, 導電体には I_1 と逆位相の渦電流 I_2 が誘導される。この磁場と渦電流の相互作用によりフレミングの左手の法則に従う電磁力 F が生まれる。これが電磁法の基本原理である。これらの関係を概略的に第1図に示す。この基礎理論は金属中に吸収される電磁波に関するもので, 電磁力の大きさは式(1)~(4)のマックスウェルの電磁方程式¹²⁾を与えられた境界条件のもとで解くことによつて得られる。

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{div } \vec{D} = 0 \quad (4)$$

ただし $\vec{H}$: 磁界 $\vec{j}$: 電流密度 $\vec{D}$: 電気変位

第1図 電磁力発生状況

* 三菱化成工業(株)直江津工場(上越市)。Naoetsu Plant, Mitsubishi Chemical Industries Ltd. (Joetsu).

$\vec{B}$: 磁束密度

$\vec{E}$: 電界

この理論に基づき、ソ連で電磁法が開発され、さらに諸外国でも技術導入が成されて現在種々の研究検討が取り進められている。

2.2 電磁鑄型の構造と鑄造法

鑄型概略図を第2図に示す。鑄型はインダクター、スクリーン、ケーシングと呼ばれる3つの部分から構成されている。

インダクターは中空の導電体リング（内部水冷）でこの部分に高周波電流が流れ、溶湯を保持する力（電磁力）を生み出す、言わば電磁法の中心となるものである。この際の周波数は溶湯中に誘起される渦電流の浸透深さに関係し、各種因子を考慮してその値が選定される。ある特許²⁰⁾によれば、ビレットの場合には鑄塊半径と浸透深さの関係が式(5)を満足するように周波数が決められるべきだとされている。

$$\frac{R\sqrt{2}}{dl} \geq 10 \quad (5)$$

ただし R : 鑄塊半径

dl : 渦電流の浸透深さ

このインダクターはD. C. 法の水冷鑄型に相当し、この形状が鑄塊の形状を決定する。そして、鑄塊の断面寸法は電磁力と溶湯静圧の均衡によって決まる。電磁力と溶湯静圧の平衡状態は式(6)で表わすことができる。

$$\rho gh = KI_1^2 \quad (6)$$

ただし ρ : 金属密度

g : 重力加速度

h : 溶湯高さ（第3図参照）

k : 装置の幾何学的寸法と金属の導電率と電流の周波数を考慮に入れた係数

I_1 : インダクター電流

つまり、電磁力はインダクター電流の2乗に比例し、溶湯静圧は当然ながらその溶湯の高さに比例する。よって、電磁法では所定の断面寸法が得られるよう、インダクター電流、メタルレベルを厳密に設定しなければならない。（なお、D. C. 法による鑄塊の断面寸法は、水冷

鑄型の寸法によつて自ら決定される。）通常はインダクター断面の中心線すなわち最も磁界強度の高い位置と鑄塊外周部の固液界面の位置とを一致させるような鑄造条件が最も安定した鑄造を可能にされている。なぜなら、このインダクターの中心線付近が最も磁界分布が均一であるからである。また、インダクター中心線より下部では発生する電磁力より溶湯静圧の方が勝るため、この部分は凝固殻を形成させることによって溶湯を保持する必要がある。

スクリーンは非磁性金属から作られ、横断面においてその厚さが上方に向かって増大しており、磁場を鑄型内で局部的に遮蔽し、鑄塊の所定寸法が得られるようにする目的をもつ。スクリーンを設置しない場合の鑄型内での垂直方向（鑄造方向）の電磁力と溶湯静圧の関係を第3図に示す。溶湯静圧は上方へいくに従い、式(6)によりその高さに比例して減少していく。一方、電磁力は上方へいくに従い直線関係からずれるため、上方では電磁力が溶湯静圧より大きくなり、溶湯の形状が不安定になりやすい。このため上方に向かってその厚さが増大するスクリーンを設置してこの電磁力の垂直方向の分布を直線に近づけ、安定した鑄塊寸法を得ることができる。言い換えれば、このスクリーンの存在が安定鑄造を確立させたと言えよう。また、鑄塊に供給される冷却水はスクリーンの内壁に沿って流出する。よって、スクリーン位置は最適な磁界遮蔽と最適な冷却水供給位置を満足するものでなければならない。

ケーシングは非導電物質から成り鑄型の外枠となるもので、その内部は冷却水のヘッダーとして使用される。このように所定の鑄塊を得るためには、インダクターの高周波電流による磁界と溶湯内に誘起される渦電流の相互作用、スクリーンによる磁界の局部遮蔽、冷却水による凝固殻の形成の3つの因子を最適に組み合わせる必要がある。

鑄型構造については現在まで各種の改良が成されている^{13)~21)}。2, 3の具体例を第4図に示す。(a)はスクリーンの内側に導電性の高い金属から成るリングを同軸配置

第2図 電磁鑄型概略図

第3図 鑄型内での電磁圧（力）と溶湯静圧の関係

し、鑄造温度の低下に伴う強い溶湯の動きに起因する鑄塊表面欠陥の発生を防止して寸法精度の向上を計るものである¹³⁾。この他、寸法精度向上を目的とするものでは、溶湯のレベル変動を検知し、インダクター電流に作用する電気信号に変更することによって、一定の寸法値を与えるものがある¹⁹⁾。電磁法では、レベル変動に伴って鑄塊寸法が変化するのでレベル管理が重要である。(b)は²¹⁾鑄塊への冷却水供給口をスクリーン内壁とは別に設け、その冷却水を鑄塊に直角に当て、さらにその当たる位置を変化可能としたもので、電磁界の最適分布と冷却

水の最適供給位置を同時に確保することが困難な場合に有効である。(c)は¹⁵⁾インダクターとの偶発の接触の可能性を除去した安全面の考慮、および鑄型製造の単純化、コンパクト化を目的とし、インダクター、スクリーンはケーシングの内部に含まれる形となっている。安全面に関しては、鑄塊形状が大きくインダクター長さが長くなるものについてインダクターを2分割し、個々のインダクターへの付加電圧を降下させるものも見られる¹⁴⁾。(d)は¹⁸⁾インダクター形状に関連するもので、給電部では磁界が不均一に成りやすいため、その形状を局部的に変更して鑄塊周囲にわたり均一な磁界を発生させるようにしている。

このような電磁鑄型を使用した鑄造法自体はD. C.法と特に差異はない。まず、鑄型内所定位置にボトムがセットされインダクターに高周波電流が流される。冷却水はケーシング内部のヘッダーよりスクリーン内壁に沿って流れ、スタート時にはボトムに当たっている。次に、トラフ、ディストリビューターを通過して溶湯がボトム上にフィードされる。鑄型内にはフロートがあり、溶湯流量を調節し、鑄型内での溶湯レベルを一定に保つ。溶湯レベルが所定の高さに達したらボトム降下を開始される。この降下に従い、冷却水が直接鑄塊に供給され鑄塊を冷却凝固し、連続的に鑄造が実施されることになる。

電磁力によって溶湯を保持造形する電磁法の他に、最近、日本特許では^{22), 23)}溶湯の表面張力あるいはガス、圧空を利用することによって鑄型と非接触のD. C.法が見られるので、合わせて紹介しておく。第5図に表面張力を利用した鑄造法を示す²²⁾。この方法によれば、溶湯上部では溶湯静圧を溶湯の表面張力にて均衡させ、下部では冷却水による凝固殻を形成して溶湯を保持するもので、溶湯と鑄型間の距離は1 mm 弱としている。また、第6図に示すガス、圧空方式はこの表面張力の代わりにガスまたは圧空を溶湯表面に吹き付けることにより溶湯を保持しつつ鑄造するものである²³⁾。いずれにせよ、2つの方法とも電磁法と同様鑄塊表皮部の品質向上を目的としている。

1: インダクター 2: スクリーン
3: ケーシング 4: 冷却水

第4図 改良電磁鑄型の例

第5図 表面張力を利用した溶湯—鑄型非接触鑄造法

第6図 ガス、圧空を利用した溶湯—鑄型非接触鑄造法

3. 電磁法と D. C. 法

電磁法は D. C. 法に対してどのような点が特徴的であろうか？ 第7図に電磁鑄型、D. C. 鑄型での冷却状態、凝固形態の相異を示す⁶⁾。D. C. 鑄型での冷却ゾーンを次の4つに分けることができる。つまり、ゾーン1は溶湯の表面張力で保持される空冷部分であり、ゾーン2では水冷鑄型と接触して薄い凝固殻が形成される。しかし、ゾーン3では鑄塊の凝固による熱的収縮のため、凝固殻は鑄型を離れエアーギャップを生成し、再度空冷となり鑄塊冷却速度が著しく低下する。引き続き、ゾーン4では鑄塊への直接水冷により凝固が進行する。ここで、ゾーン2、3とはカイザー社の²⁴⁾報告による鑄型冷却長さと同じであり、ゾーン4は直接水冷の効果が及ぶ

1. 空冷部
2. 鑄型との接触による1次冷却部
3. 空冷部 (エアーギャップ生成部)
4. 直接水冷による2次冷却部

第7図 D C鑄型および電磁鑄型による冷却状態の相異

距離つまりスプレー冷却距離と同一である。D. C. 法ではこのような工程を経て凝固が完了するため、鑄塊表皮部ではその鑄型様式からくる不可避の欠陥、例えば、焼付、発汗、逆偏析が発生する。

焼付とは、衆知のように、溶湯と固体金属鑄型との接触による物理的な摩擦あるいは癒着により生じた鑄造方向に平行なスジ状の欠陥である。この焼付には鑄型内壁の整備の良否が大きな影響を及ぼすことが経験的に知られており、現状では鑄造前の鑄型内壁整備や内壁への潤滑剤の塗付により、可能な限り焼付の発生を防止している。

発汗は、エアーギャップの生成による鑄塊冷却速度の低下のために表皮凝固殻が再加熱され、粒界の低融点化合物が融解して鑄塊表面に浸出し、一見汗のようになったものである。凝固温度範囲が広く固相線温度が低い合金系では、この再溶融がさらに顕著で、表面が激しい凹凸となることがしばしばある。一方、1100程度の比較的低濃度の材質であれば、軽度の周期的発汗として現われることが知られている^{11), 25)}。これについては、最近では小菅、水上の研究が²⁶⁾あり、ゾーン3において低融点化合物の溶融により凝固殻は容易に外側に變形し、再び鑄型に接触して急冷され収縮するという現象を繰り返すことにより周期的発汗が観察されるとしている。

逆偏析はアルミニウム合金の D. C. 鑄塊では一般的に見られ、衆知のように、表皮部で溶質濃度が高くなる^{27), 28)}。これは、いうまでもなく上述の発汗現象と相関関係をもっている。さらに第8図で説明する表皮部のズンプ形状にも影響を受けるものと思われる。

一方、電磁鑄型を使用した場合には、第7図(b)から明らかなように冷却ゾーン2、3がないため鑄型との接触、エアーギャップの生成による欠陥を完全に排除できる。

では、このように冷却条件が異なる2つの鑄造法での鑄塊表皮部のズンプ形状に着目してみよう。第8図にその模式図を示す。D. C. 法では鑄型壁による1次冷却、冷却水による2次冷却、その間に存在するエアーギャップにより表皮部ズンプは急勾配となる。この形状は鑄造速度等の因子にも影響を受ける。電磁法では冷却水による直接水冷のための、表皮部ズンプはD. C. 法に比しフラットとなることが予想される。Altenpohl^{29), 30)}によれば鑄塊の凝固速度は界面進行速度としてとらえることができ、この速度は組織等に密接に関係するとしている。第8図に従い、ズンプ各位置での凝固速度を考えてみよう。例えばビレットの場合には、そのズンプ先端で凝固速度は鑄造速度と同一となり、A点では $V = V_c \sin \alpha$ となる。ここで、 V は凝固速度、 V_c は鑄造速度、 α はズンプの角度である。また、スラブの場合には、点

(a) D. C. 法によるズンプ形状 (b) 電磁法によるズンプ形状

V_c : 鋳造速度 V : 凝固速度 α : ズンプ角度

第8図 D. C. 法電磁法によるズンプ形状の相異

対称ではないのでさらに複雑になるが、傾向としては変わりはない。このような表皮部ズンプの勾配からすれば表皮部での凝固速度はD. C. 法で遅く、電磁法で速いと言える。この表皮部での凝固速度の差は品質に大きな影響を及ぼすことは明らかであり、鋳塊表皮部品質改善に対し電磁法は有効な手段と考えられる。

4. 品質特性³¹⁾

現在まで、電磁設備を使用して種々の材質、鋳塊サイズのスラブ、ビレットを鋳造した結果、D. C. 法で鋳造可能なものはすべて可能との見通しを得ている。そこで、この章では当社におけるテスト結果に基づき、電磁品、D. C. 品比較の形で鋳塊の品質特性について説明する。なお、テストに供した鋳塊の化学組成は第1表に示すとおりである。

4.1 外観

写真1に1050スラブ(400×1,320)の外観写真を示す。D. C. 品は前章で述べたとおり特有の周期的発汗が発生しているが、電磁品は滑らかな外観を呈している。また、写真2, 3に2014, 7075ビレット(500φ)の外観を示す。D. C. 品2014には激しい発汗を生じ、7075では焼付が見られる。しかし、電磁品は極めて滑らかな外観であり、溶質濃度の高い合金系では電磁品、D. C. 品の差が顕著である。通常、D. C. 法ではその材質、主に凝固温度範囲に応じた特有の外観が観察されるが、電磁法で

は材質が異なっても外観にほとんど差異がないことがわかる。この鋳塊外観が良好なことは電磁法の特徴の1つといえる。

4.2 マクロ組織

アルミニウム鋳塊に現われるマクロ組織は、表皮より内部に向かって、チル晶、柱状晶、粒状晶(粒度が異常に大きい粗大晶を含む)の順となり、この他、特有の羽毛状晶が見られる場合もある^{32), 33)}。一般に、陽極酸化処理性のきびしい品質に対しては、内部組織は均一微細な粒状晶が良く、羽毛状晶、粗大晶は好ましくないと言われている。写真4にマクロ組織の代表例として1050スラブ(400×1320)の横断面組織を示す。電磁品、D. C. 品とも羽毛状晶、粗大晶の発生は見られず、全体的には均一な組織と見ることができる。しかし、表皮部に着目すると写真5のごとく、D. C. 品にはチル晶と呼ばれる微

(a) D. C. 品

(b) 電磁品 (×1/2)

写真1 1050スラブ外観

第1表 供試材化学組成

(wt %)

材質	化学組成 鋳塊サイズ(mm)	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
1050	400×1320 スラブ	0.01 ~0.02	0.11 ~0.12	0.28 ~0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	≤99.5
2014	500φ ビレット	4.5 ~4.6	0.72 ~0.79	0.24 ~0.26	0.82 ~0.85	0.64 ~0.67	0.00	0.00	0.02 ~0.03	R
7075	500φ ビレット	1.5	0.08 ~0.09	0.25 ~0.26	0.09	2.5 ~2.6	5.7 ~6.1	0.21 ~0.22	0.05 ~0.06	R

(a) D. C. 品

(b) 電磁品 (×1/13)

写真 2 2014 ビレット (500φ) 外観

(a) D. C. 品

(b) 電磁品 (×1/13)

写真 3 7075 ビレット (500φ) 外観

細等軸晶領域に続いた粗い柱状晶領域が見られる。これもエヤーギャップの発生による冷却速度の極度の低下に起因するもので、D. C. 法では程度の差こそあれ不可避の組織である。一方、電磁品はこのような領域はなく表皮部から均一で細かな組織となつている。

4.3 ミクロ組織

写真 6 に 1050 スラブ、2014、7075 ビレット 各材質表皮部のミクロ組織を示す。なお、中央部では電磁品、D. C. 品の両者に差が認められないので省略した。合金系の 2014、7075 ビレットについて、D. C. 品では粗大晶出物が晶出しているのに対し、電磁品ではそのような晶出物は観察されない。また、電磁品はすべての材質においてセルサイズも細かく、D. C. 品との凝固速度の相異が見られる。

4.4 逆偏析

第 9 図に 1050 スラブの表皮部より 20 mm までの横断面方向における Si, Fe の偏析状況を示す。D. C. 品では表皮より約 1 mm 程度各溶質濃度が高い逆偏析層が見られるが、電磁品はこの逆偏析量および範囲が減少している。第 10 図は 2014 ビレットの Cu の偏析状況を示す。Cu は偏析しやすい成分として知られていて、D. C. 品では表皮より約 3 mm にわたり不均一領域が存在する。電磁品はこの場合にも良好で、ほぼ均一な分布となつてい

る。

4.5 機械的性質

第 11 図に 2014 ビレット径方向の機械的性質（引張強さ、耐力、伸び、シャルピー衝撃値）の分布を示す。試験片は鋳造方向に平行に切り出し、その形状は、引張試験については JIS 4 号、シャルピー衝撃試験については JIS 3 号を採用した。なお、供試材は第 2 表の 7075 ビレットも含め 350 C × 4 hr の応力除去のための焼鈍を実施している。ミクロ組織あるいは偏析状況に対応して、表皮部では特に伸び、衝撃値の靱性が改善されていることがわかる。第 2 表に示す 7075 ビレットの表皮部、中央部のテスト結果でも同様な傾向が見られ、表皮部ではやはり靱性が向上している。しかし、中央部においては、両材質共電磁品、D. C. 品で大きな有意差は見られない。

以上のように、電磁品は D. C. 品に比し、表皮部の品質が良好であることが明確となつた。通常、D. C. 品を使用した後続加工（圧延、押出、鍛造等）では、D. C. 品特有の表皮部影響を最終製品まで持ちきたさないため、面削が実施されることが多い。しかしながら、電磁品はその特徴的とも言うべき表皮部の品質のため、後続加工に際し、面削不要、加工性向上等を実現する可能性をもっている。

(a) D. C. 品

(a) D. C. 品

(b) 電磁品 (×1/10)

(b) 電磁品 (×1)

写真4 1050スラブ (400×1320) マクロ組織

写真5 1050スラブマクロ組織

1050スラブ

2014ビレット

7075ビレット

D
C
品 電
磁
品

(×100)

(×200)

(×200)

写真6 DC casting, および電磁 casting の1050スラブ, 2014ビレット, 7075ビレットのミクロ組織

第2表 7075—500φピレット機械的性質

機械的性質	電 磁 品		D. C. 品	
	表 皮 部	中 央 部	表 皮 部	中 央 部
引張強さ (kg/mm ²)	21.5	11.8	21.2	15.9
0.2%耐力 (kg/mm ²)	9.0	8.7	9.4	8.9
伸 び (%)	12.3	2.8	7.8	3.2
シャルピー衝撃値 (kg-m/cm ²)	0.62	0.18	0.35	0.16

第9図 1050スラブ (400×1320) 表皮部での Si, Fe の偏析

第11図 2014ピレット (500φ) における径方向の機械的性質の分布

第10図 2014ピレット (500φ) 表皮部での Cu の偏析

5. おわりに

電磁法は昔より溶湯の保持、移動等に利用されてきた電磁場の理論を基礎に、アルミニウムおよびその合金の

加工用鋳塊製造法の1つとして開発されたものである。

この方法は今までのD. C. 法とは異なり、溶湯は鋳型と接触せず直接水冷されるため、D. C. 法では不可避の鋳型との接触、エアーギャップの生成に起因する欠陥を原理的に排除しうるプロセスであり、得られる鋳塊は表皮部において優れた品質をもつ。よって、後続加工に際し、面削不要あるいは加工性の向上が期待される。

参 考 文 献

- 1) 例えば D. Altenpohl: Aluminium und Aluminium-Legierungen, Springer-Verlag (1965), 117.
- 2) 梶山, 梅田: 軽金属, **19**(1969), 316.
- 3) Z. H. Getselv: J. Metal, **23** (1971), 38.
- 4) 萩原: Al. ある, (1973), 25,
- 5) P. P. Hochalov et alii: Sci. J. Non-Ferrous Metal, **11** (1970), 60.
- 6) G. A. Balakhontsev et alii: Sci. J. Non-Ferrous Metal, **11** (1970), 62.

- 7) T. R. Prichett: *Light Metal Age*, **31** (1973), 9.
- 8) V. A. Livanov, et alii: *Light Metal Age*, **32** (1974), 9.
- 9) エリ. ア. ヴェルテ: 溶融金属の電磁鑄込と電磁処理, 日ソ通信社, (1968), 4, 122.
- 10) ア. デ. アキメンコ, et alii: 回転磁場内の連続鑄造, 日ソ通信社, (1973), 4.
- 11) J. G. Eady et alii: *Foundry Trade J.* **9** (1972), 603.
- 12) 例えば, 中村仁: 高周波加熱, 恒星社厚生閣, (1970), 121.
- 13) 日本特許: 特公, 昭46-37267.
- 14) 日本特許: 特開, 昭48-59028.
- 15) 日本特許: 特開, 昭48-65118.
- 16) 日本特許: 特公, 昭49-24771.
- 17) 日本特許: 特公, 昭49-26173.
- 18) 日本特許: 特公, 昭49-24772.
- 19) 日本特許: 特公, 昭49-37493.
- 20) 日本特許: 特公, 昭50-27807.
- 21) 日本特許: 特公, 昭50-29696.
- 22) 日本特許: 特開, 昭50-80923.
- 23) 日本特許: 特開, 昭50-84423.
- 24) 米国特許: 3612151,
- 25) 清水: 軽金属, **20**(1970), 577.
- 26) 小菅, 水上: 軽金属, **25**(1975), 207.
- 27) 中谷: 軽金属, **20**(1970), 199.
- 28) 潮田, 吉村, 増山: 軽金属, **5**(1956-3), 9.
- 29) D. Altenpohl: *Z. Metallkde.*, **60** (1969), 576.
- 30) D. Altenpohl, (村上訳): 軽金属, **19** (1969), 451.
- 31) 三田村, 杉崎, 青山: 第49回軽金属学会秋期大会, (1975).
- 32) 雄谷: 軽金属, **17** (1967), 298.
- 33) 中尾: 軽金属, **18** (1968), 408.