

磁場印加による液体金属の保持

廣野 靖昌*・佐々 健介*²・浅井 滋生*³

Confinement of Molten Metal Using Magnetic Field

Yasumasa HIRONO, Kensuke SASSA and Shigeo ASAI

Synopsis : In metal processing, confinement of a molten metal without mechanical contact is of great interest. For example, in a galvanizing process a sink roll, which is set in a zinc bath for changing the moving direction of steel strip, causes troubles such as deteriorating the quality of products and productivity. A new galvanizing process by using a high magnetic field which does not equip the sink roll has been proposed, where the steel strip is inserted from an inlet hole opened on the bottom of the zinc bath. Thus the stable confinement of a molten metal at the hole is crucial technical matter. The confinement of a molten metal and controlling of its flow are also essential for a cold crucible, which is indispensable for precision castings of reactive or high melting point metals like titanium and zirconium alloys. So far alternating and traveling magnetic fields have been applied for confinement of a molten metal, where unstable phenomena in hydrodynamic motion inevitably appear, so that the development of a stable confinement of a molten metal has been strongly desired. The simultaneous imposition of D.C. magnetic field and D.C. electric current is a promising method in respect of energy efficiency, however it easily generates unstable phenomena of the molten metal when a large electric current is imposed under a weak magnetic field.

In this paper, a new method of confining a molten metal by applying D.C. magnetic field and D.C. electric current has been proposed. The usefulness of the method, which is promising in industrial applications, has been demonstrated by a model experiment using a molten metal. That is, a molten metal has been more stable confined by using plural pairs of electrodes.

Key words : confinement of a molten metal without mechanical contact; galvanizing process; cold crucible; stable confinement; D.C. magnetic field and D.C. electric current.

1. 緒言

金属の製造分野においては機械的方法によらない無接触での熔融金属保持が求められるプロセスは多い。例えば溶融金属めっきプロセスでは鋼板をめっき浴に浸漬させ、浴中に設けたシンクロールにより鋼板の向きを変えて、めっき浴から垂直上方に鋼板を引き上げる。この際、めっき浴に浸漬されているシンクロールと鋼板との接触不良による疵の発生が問題となる。しかもシンクロールは容易に腐食するため、毎々のメンテナンスやロール交換が必要となり鋼板の品質と生産性の低下の主要因となっている。そのためシンクロールを用いる代わりに溶融金属の入った容器の底部に開口部を設け、そこから鋼板を上方に侵入させてめっきを行う方法が提案されている¹⁾。このめっきプロセスでは底部に開口部が設けられているため、この開口部において溶融金属を安定に保持する必要がある。この方法はめっき浴を少量化して浴組成の迅速な切り替えを可能とする利点も備えている。また、チタンやジルコニウム等の活性金属あるいは高融点金属を磁気圧力により無接触保持す

るコールド・クルーシブルプロセス²⁾では溶融した金属の排出に際し健全な鑄造品を製造するうえから、また出湯流をガス噴霧して均一の粒径粉末を製造するうえからも出湯速度の制御が強く望まれている。

電磁気力による溶融金属の保持や出湯速度の制御には高周波磁場、移動磁場がこれまで使われてきた³⁾。しかし流体力学的不安定現象と交流磁場による電流の誘導現象が複雑に絡み合い溶融金属の安定保持は必ずしも容易ではない。

本研究では、静磁場と直流電流を重畳印加して溶融金属を保持、またはその流量制御を行う方法において、溶融金属の不安定現象及び電流の断続接触に伴うスパークによる電極の消耗等の原因となる電流の一点集中を防ぐうえで有効な方法を新たに考案し、この着想に基づいて低融点の溶融金属を用いたモデル実験を実施し、その有効性を確認したので報告する。高い溶湯圧を保持する際には電流の一点集中を防ぐうえから高磁場で低電流の条件が必須となるが、ここに提案するプロセスでは低磁場で大電流の印加が可能となり、より経済的なプロセス開発に繋がるものと期待できる。

平成17年11月15日受付 平成18年2月9日受理 (Received on Nov. 15, 2005; Accepted on Feb. 9, 2006)

* 名古屋大学大学院生 (Graduate Student, Department of Materials Processing Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-8603)

*² 産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門 (Materials Research Institute for Sustainable Development, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

*³ 名古屋大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Nagoya University)

2. 実験

2.1 1組の電極を用いた場合

磁場を鉛直方向に電流を溶融金属の流れに対して直交する向きで、水平方向に印加する実験装置図を Fig. 1 に示す。印加電流値は電気回路に並列に、電極と直列に接続された抵抗と電源の電圧によって制御した。金属として溶融ガリウムを用い、これを26 mm 静圧の下で銅製の矩形樋中に流した。この矩形樋は超伝導磁石のボア内で溶融金属流れを観察できるように、その一部に透明なアクリル管に接続されており、Fig. 1 にも示したように電極もこのアクリル管部に設けた。ビデオカメラを用いて1秒間に30フレームで流れの挙動を撮影した。なお磁束密度としては4テスラと2テスラを印加した。

磁束密度4テスラで電圧を2Vから7Vまで1Vずつ変化させた際の溶湯先端の挙動を、ガリウムが銅電極と接触した瞬間を0秒として、その1秒、2秒、5秒、10秒、15秒後の写真としてFig. 2に示す。2Vでは0.70Aの電流が流れたが、この場合ガリウムは保持されず、一方7Vでは2.10Aの電流が流れ、電極部分でガリウムが激しく前後に振動し安定な保持状態を得ることはできなかった。3Vから6Vの間では比較的安定に溶湯を保持することができた。3V、4Vでは溶湯静圧力がローレンツ力よりわずかに勝ったため進行方向にガリウム先端が膨らんだ状態で保持され、

5Vの場合には先端液面形状はほぼ平坦であった。一方、6Vではガリウムが銅電極と接触すると数秒間流れと反対方向に押し戻され、その後安定に保持された。この場合は、ローレンツ力が溶湯静圧力にやや勝ったため、先端が進行方向に凹形状となった。このようにローレンツ力と静圧との大小関係により液面形状が変化した理由としては、ローレンツ力よりも静圧が大きい際には流れの進行方向とは逆の力が加わるように先端形状は凸形状となり、逆に静圧よりもローレンツ力が大きい際には凹形状となり力の釣りが

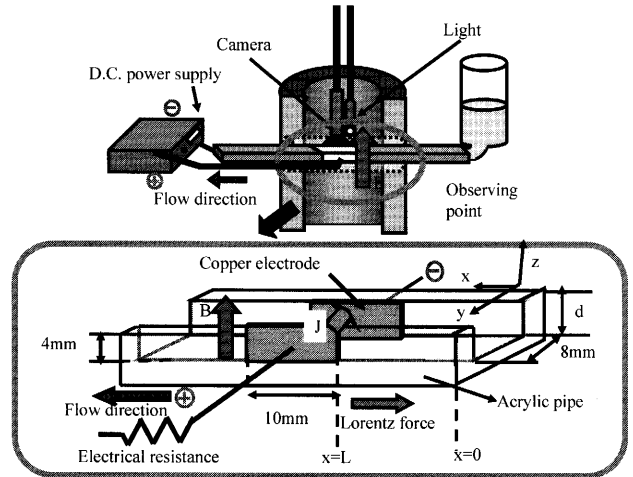


Fig. 1. Schematic view of experimental apparatus with a pair of electrodes.

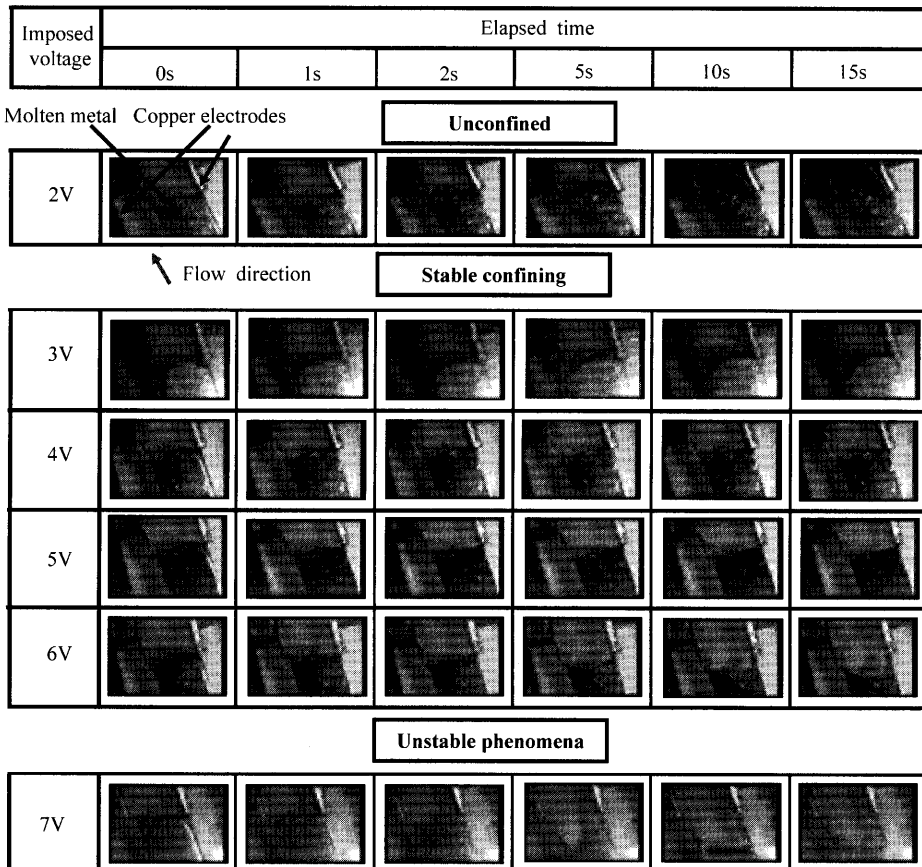


Fig. 2. Molten metal behavior observed in a channel with a pair of electrodes under 4 T.

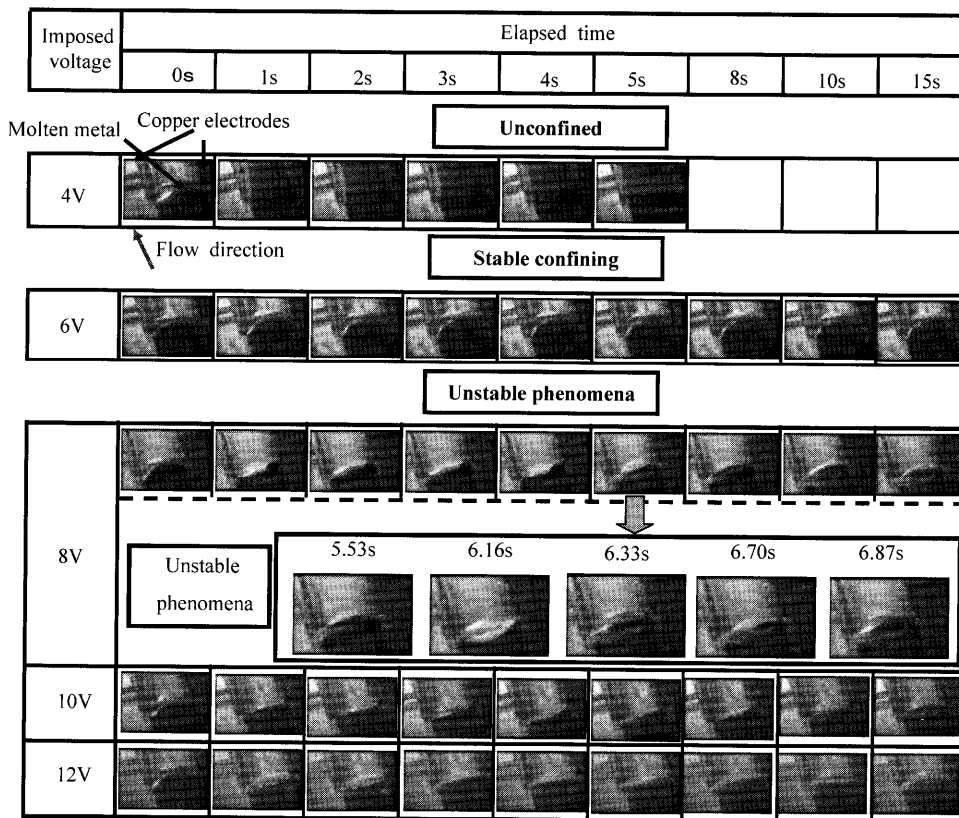


Fig. 3. Molten metal behavior observed in a channel with a pair of electrodes under 2 T.

合いを保つものと考えられる。

次に磁束密度を2テスラに変えて、4Vから12Vまで2Vずつの刻みで電圧を変化をさせガリウムが銅電極と接触した瞬間を0秒として、1秒、2秒、3秒、4秒、5秒、8秒、10秒、15秒後の写真をFig. 3に示す。4Vでは1.17Aの電流が流れたが、ガリウムは保持されなかった。6Vでは安定に保持することができたが、8Vと10Vでは安定に保持できる時もあったものの、溶融金属先端に細い振動現象が見られた。また12Vでは保持はされるものの、溶融金属が電極に接触後、常に細い振動現象が見られ、安定に保持されることは無かった。この振動現象が特に顕著に現れたのは8Vの時で、その様子を5.53秒後から1.34秒間にわたり、より細かい時間間隔で示す。このような現象は4テスラの磁場を印加した際には見られなかったものである。この原因としては、2テスラの場合では4テスラの場合よりも磁気粘性の低下による流動の制動効果が弱いため、より大きい電流を印加しなければならず、そのため溶融金属と電極との断続（オン・オフ）接触の現象が生じたためと考える。

以上の観察結果を磁束密度と電圧の組み合わせでまとめ、安定保持できた場合を○印、できなかった場合を×印としてTable 1に示した。なお、網掛けの部分は安定保持が期待できる領域を示す。

これら一連の実験結果から1組の電極で安定保持を図るには、磁束密度と電圧を狭い範囲で適切に選ぶ必要がある

Table 1. Experimental results in the case with a pair of electrodes.

	2V	3V	4V	5V	6V	7V
2T				×	○	×
4T	×	○	○	○	○	×

○ : Stable confining × : Unconfined
 ■ : Expected area for stable confining

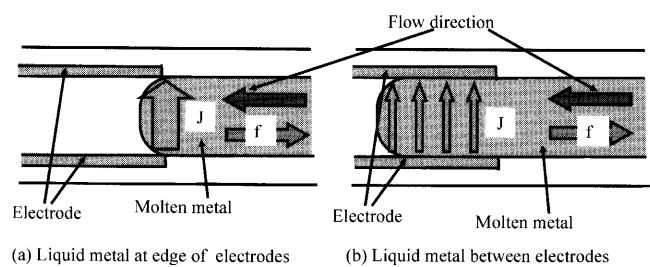


Fig. 4. Schematic view showing flow direction, electric current (J) and electromagnetic force (f) in molten metal in a channel with a single pair of electrodes.

ことがわかる。溶融金属の保持形態としてはFig. 4(a)の模式図に示す様に電極の先端を起点として保持される形態と、Fig. 4(b)に示す様に電極中で保持される形態が考えられる。しかし実験では電極の川上方向の端を起点とした保持形態である(a)の形態しか認められず、電極中で溶融金属が保持される(b)の形態となることは無かった。これは

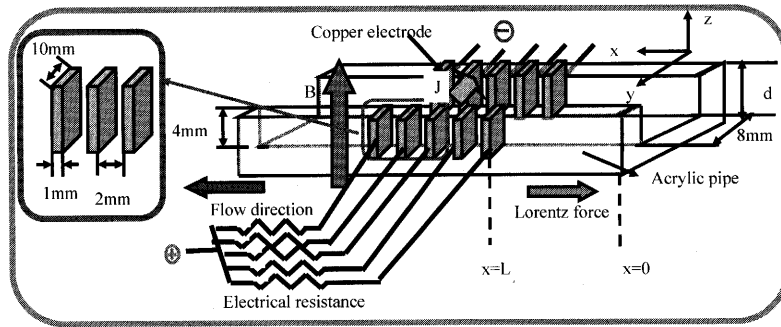


Fig. 5. Schematic view of experimental apparatus with five pairs of electrodes.

溶融金属が電極先端に接触すると同時に、印加されている電圧で決まる最大電流がその点に集中し、以後溶融金属と電極との接触面積が増しても全体の電流値には変化が生じないためである。そのため溶湯静圧が高く、大きな電流印加が必要な場合には一点に電流が集中することになる。その結果、溶融金属の不安定性を招いて、電流の断続接触現象に伴うスパークが生じ、電極を傷つけることになる。一方、均一に印加された磁場の下で(b)に示すように溶融金属が電極間を流れる形態では電流は電極全体に分散して流れるもの、溶融金属に印加される全電流値は変わらないためローレンツ力の積分値は(a)の場合と変わらない。すなわち、(a)の形状で溶湯が保持できなければローレンツ力が溶湯静圧と釣り合わず、溶湯保持はできないことになる。また、溶融金属の流れにローレンツ力を加えてこれを静止させる際には慣性力が溶融金属進行方向に働く。そのためローレンツ力と溶湯静圧との平衡が崩れ、溶融金属先端が電極間を通過する場合も認められた。このような場合にも流れに逆らう方向に印加された電磁気力によって慣性力が消滅すると、一端溶湯は上流方向に再び押し戻され、上流側の電極先端で停止した。

2・2 複数の電極を用いた場合

次に電極を5組に分割した装置の模式図をFig. 5に示す。電気抵抗は各電極に直列に、全体の電気回路に対して並列に組み込んだ。仮に3組目の電極間で溶湯が保持できたとした場合の電極間の保持状態を模式図としてFig. 6に示す。溶湯保持に必要なローレンツ力の総和が F_{total} であるとすると、印加された磁場の下で F_{total} のローレンツ力を発生させるのに必要な電流 I_{total} が決まる。3組の各分割電極対に対してそれぞれの電流値が I_1, I_2, I_3 とすると $I_{total}=I_1+I_2+I_3$ となるように I_{total} を分割して通電したとすれば、各分割電極対でそれぞれ F_1, F_2, F_3 のローレンツ力が生じて、ローレンツ力の総和 $F_{total}(=F_1+F_2+F_3)$ を得る。このように、電極を複数箇に分割することにより、必要なローレンツ力を分割でき、一組の電極対での電流量を減らすことが可能となる。1組目の電極対で印加される電流量が十分であるとき電極対が1組の場合と同じ現象となった。しかしながら電極対の数を増やした場合には、最終的

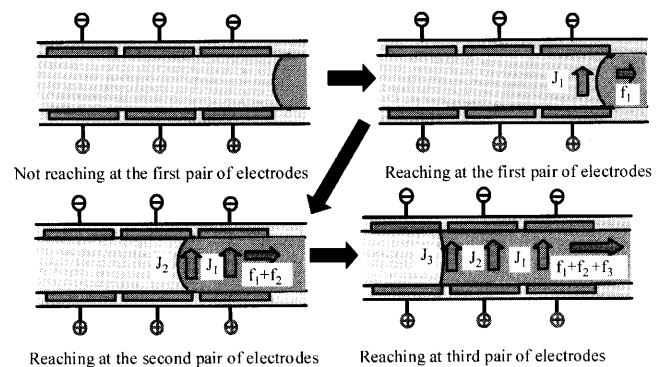


Fig. 6. Schematic view showing electric current (J) and electromagnetic force (f) in a molten metal in a channel with three pairs of electrodes.

に保持に必要な電流の総量が得られる電極対の位置まで溶融金属は流れる。すなわち、電流を分散して印加することで安定に保持できることになる。

次に磁束密度を4, 2, 1, 0.5テスラとし、印加電圧を変化させた実験を行った。4テスラの磁束密度の下、1V, 2V, 3V, 4V, 5V, 6Vの電圧を5組の電極に印加した際に、溶湯が1枚目、2枚目と1枚ずつ電極対に触れていく様子と、保持後、5秒、10秒、20秒経過した時の様子をFig. 7に示す。1Vの電圧を印加した時は3枚目の電極で合計1.20Aの電流が流れたところで、2Vの電圧を印加した時は2枚目の電極で合計1.22Aが印加されたところで、3Vの電圧を印加した時は1枚目の電極で1.03Aの電流が流れたところで、4Vの電圧を印加した時には1枚目の電極で1.33Aの電流が流れたところでそれぞれ保持された。また5Vの電圧を印加した場合には1枚目の電極に1.69Aの電流が流れたところで、6Vの電圧を印加した場合には1枚目の電極で1.85Aの電流が流れたところで、安定に保持できる時もあったものの、溶融金属の細い振動現象が見られた。

磁束密度が2テスラの下、1V, 2V, 4V, 5V, 6V, 7Vの電圧を印加した。1Vの電圧を印加した時には保持することができず、2Vの電圧を印加した際には4枚目で電流が合計2.69A流れたところで安定に保持された。また4Vの電圧を印加した際には3枚目で合計3.35Aの電流が印加されたところで、5Vの電圧を印加した場合には2枚目で合計

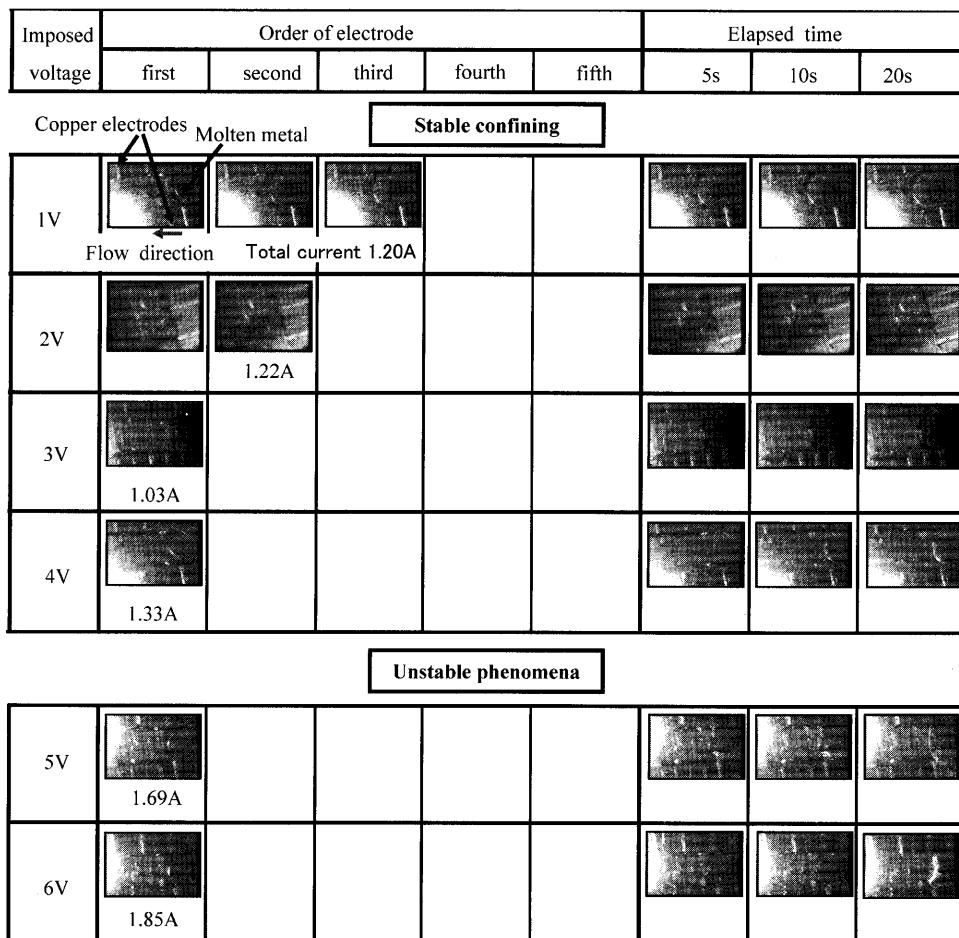


Fig. 7. Molten metal behavior observed in a channel with five pairs of electrodes under 4 T.

2.72 Aの電流が印加されたところで、6Vでは2枚目で3.12 Aの電流で、それぞれ安定に保持することができた。7Vでは保持はされるものの、溶融金属が電極に接触後、常に細い振動現象が見られ、安定に保持されることは無かった。

磁束密度が1テスラの下、4V, 6V, 8V, 10V, 12Vの電圧を電極に印加した。4Vでは保持することができず、6Vの電圧を印加した場合には4枚目で合計6.32 Aの電流が流れたところで、8Vでは3枚目で合計6.39 Aの電流が流れたところで、10Vでは2枚目で合計5.39 Aの電流が流れたところで安定に保持することができた。12Vでは保持はされるものの、溶融金属が電極に接触後、常に細い振動現象が見られ、安定に保持されることは無かった。

また、磁束密度を0.5テスラとし、10V, 12V, 14Vの電圧を印加した際に、溶湯先端が各電極対に接触していく様子と保持後の5秒、10秒、20秒経過した時の様子をFig. 8に示した。10Vの電圧では合計で13.8 Aの電流が流れたが保持できず、12Vの電圧を印加したときは5枚目で合計15.7 Aの電流が、14Vの電圧では3枚目の電極対の設置が非対称となっていたため溶融金属先端形状が傾いた状態となったが、3枚目で合計11.2 Aの電流が流れたところで安定に保持された。

複数の電極対を用いた時も電圧が大きくなって過大な電流が流れた時には、1組の電極対で保持される形態となり、1組の電極を用いた場合の実験結果と同様に電流の断続接触による不安定現象が見られた。各同一磁場条件でも印加電圧を変化させた場合と同じ溶湯静圧保持に要した電流量の総和が異なったが、その理由としては(1)各電極近傍に印加されていた磁場の値が少しずつ異なっていたためと(2)印加された電磁気力の不均一分布に起因して流動が生じ、その動圧分を抑制するために余分のエネルギーを消費したためと考えられる。

磁束密度と電圧を変えた上記の実験結果をまとめてTable 2に示した。実験により安定に保持できた場合を○印で、安定に保持できなかった部分を×印で示した。なお、網掛けの部分は安定保持が期待できる領域を示す。Table 1の結果と比較すると、4テスラの磁場を印加した場合のみ5Vと6Vで不安定現象が生じることもあり、保持できる電圧幅が小さくなった。これは5組の電極を設置した際に、電極とアクリル容器壁面との間に凹凸ができていたことにより不安定現象を招いたためで、これは装置作製上の問題であり、この点を除くと電極を分割する方法を採用することにより、より広い電圧と磁場の領域で安定に保持することができた。

Imposed voltage	Order of electrode					Elapsed time		
	first	second	third	fourth	fifth	5s	10s	20s
10V	Copper electrodes Molten metal							
	Flow direction ←				Total current(A) 13.8			
12V					Total current(A) 15.7			
14V					Total current(A) 11.2			

Fig. 8. Molten metal behavior observed in a channel with five pairs of electrodes under 0.5 T.

Table 2. Experimental result in the case with five pairs of electrodes.

	0V	1V	2V	3V	4V	5V	6V	7V	8V	9V	10V	11V	12V	13V	14V
0.5T											×		○		○
1T					×		○		○		○		×		
2T		×	○	○	○	○	○	×							
4T	×	○	○	○	○	△	△								

○: Stable confining △: Almost stable confining ×: Unconfined
 ■: Expected area for stable confining

溶湯静圧が高く、大きなローレンツ力が必要となる場合にも電極の数を増やすことにより、各分割電極対に対しては分割された分の電流を通電すればよいことになる。したがって、複数箇の電極を採用することにより、1組の電極対に大電流を通電する必要はなくなり、電流の一点集中を避けることができ、より安定的に溶融金属を保持できることが確認できた。また、複数電極の採用により同一静圧の保持に際し、磁束密度を小さくして電流値を大きくすることが可能となる。このことは、高い磁束密度を印加する場合と比較して安価な溶湯保持装置の設計が可能なることを示唆しており、実用上有利なプロセスが実現できることになる。さらに、溶融金属の川上方向に位置する電極対には大きな電流を、川下の電極対には小さな電流を印加するなど、電極対毎に接続した抵抗を制御すれば、溶融金属の流れに対してより細かな流量制御が可能となる。

3. 考察

解析の際に用いる座標軸を Fig. 1 と Fig. 5 に示した。x 方向を流れ方向、y 方向を流路の幅方向、z 方向を流路の高さ方向とする。この系では x 方向に溶湯静圧 P とローレン

ツ力 $f_x = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ が作用する⁴⁾。そのため流れ場の空間に各辺の長さ $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ の微小体積要素をとると、x 方向の力の釣り合い条件は (1) 式となる。

$$(P_x - P_{x+\Delta x})\Delta y\Delta z + (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_x \Delta x\Delta y\Delta z = 0 \dots \dots \dots (1)$$

(1) 式から $\Delta y\Delta z$ を消去した上で、水平樋の入口 $x=0$ で、 $P_x = \rho gh$ 、溶湯先端 $x=L$ で $P_x = 0$ として、(1) 式を x 方向に積分し、y 方向の電流 I_y 、z 方向の磁束密度を B_z とすると (2) 式を得る。

$$\rho gh + (J_y B_z)L = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、この系に印加される電流の合計値を I とすると $I_y = J_y L d$ の関係があるので、(2) 式は (3) 式となる。

$$\rho gh d = (J_y B_z) \dots \dots \dots (3)$$

(3) の左辺の項はすべて実験条件から決まる定数で、これを k と置くと、(3) 式は (4) 式となる。

$$I_y = k/B_z \dots \dots \dots (4)$$

すなわち、溶融金属を保持するために必要な電流値は $1/B_z$ に比例することになる。実験条件である樋の高さ $d = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、保持されているガリウムの液面高さ $h = 26 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、溶融ガリウムの密度 $\rho = 6090 \text{ kg/m}^3$ から (4) 式の $k = 6.21 [\text{AT}]$ を求め、電流値 I と印加磁束密度 B の逆数 $1/B$ の関係を Fig. 9 に示した。同図には電極対が 1 組及び 5 組の場合の実験で溶湯保持ができた場合の電流値と印加磁束密度の関係も示した。この図から電極対が 1 組及び 5 組の場合共に保持に必要な電流の総量はほぼ等しく、理論式が実験結果に合致していることが分かる。なお、磁場が弱くなるにつれて実験値が理論値よりも大きく現れる傾向がみられる。この理由は次のように考えられる。例えば、1 つの電極対で保持できない場合、溶湯は次の電極に接触することになるが、磁場が弱い場合には各々の電極に流れる電

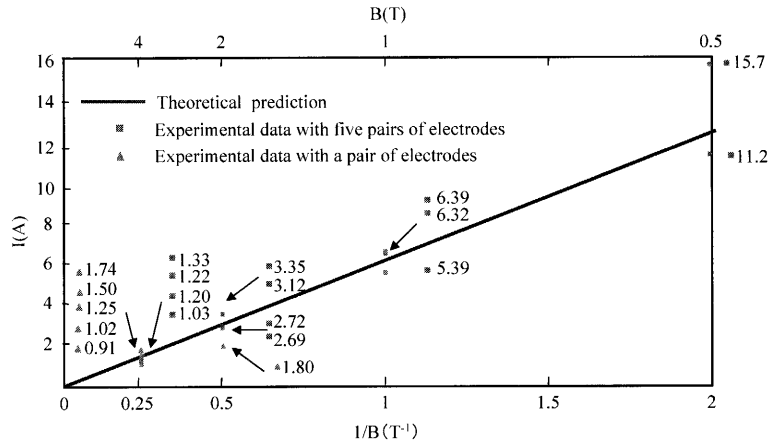


Fig. 9. Comparison between experimental results and theoretical prediction in the relation of I and $1/B$.

流は大きく設定されているため、溶湯が保持される電極が一つ増すことによる電流の増分は低磁場印加の場合ほど大きい。そのため低磁場側で実測された電流値は理論値より大きくなったものと推論している。

4. 結言

電極を複数箇に分割し、各電極対に直列に抵抗を入れ、電極対を並列に配置することにより、溶融金属を安定に保持することが可能との着想に基づいて、ガリウムを用いたモデル実験を実施した。その結果、本着想が溶融金属の電磁保持に有効であることを確認した。電極を複数箇に分割することにより小さな磁束密度の下で大電流を印加する溶融金属保持装置が可能となる。このことは高密度の磁場を印加する場合と比較してより安価な溶融金属の保持及び流量制御の装置が実現できる可能性を示している。

記号

- B : 磁束密度 [T]
- d : 樋の幅 [m]
- g : 重力加速度 [m/s^2]
- h : 溶融金属の液面高さ [m]
- I : 電流 [A]
- L : 樋の長さ [m]
- J : 電流密度 [A/m]
- P : 溶湯静圧 [N/m^2]
- ρ : 溶融金属の密度 [kg/m^3]

文献

- 1) Y.Zhou, H.Wen and X.Ma: Research on EMD and ENES in Shanghai Baosteel, The 1st Asia EPM Workshop, 2004, Japan, Tokyo, (2004), 58.
- 2) 浅井滋生：入門材料電磁プロセッシング，内田老鶴圃，東京，(2000)，60.
- 3) H.Behrens, R.Brisberger and R.Juerge: Electromagnetic Sealing of Zinc Melt at the CVGL Process, Modeling for Electromagnetic Processing, Hannover, (2003), 35.
- 4) 谷口尚司，八木順一郎：材料工学者のための移動現象論，東北大学出版会，仙台，(2001)，57.