

電磁気力を利用した 溶融金属鉛直自由端面保持に関するモデル実験

古橋 誠治*・浅井 滋生*²

Model Experiment for Confining Vertical Free Surface of Molten Metal by Electromagnetic Force

Seiji FURUHASHI and Shigeo ASAI

Synopsis : In order to make use of the electromagnetic force to confine molten metal at the side edges in a twin roll caster, the model experiment of an electromagnetic dam, where the vertical free surface of molten metal is held without any contact with a solid wall, has been conducted. The electromagnetic dam makes use of the electromagnetic force induced by a static magnetic field and a direct electric current. In order to study the effects of operating variables such as imposed electric current, imposed magnetic field, and the imposing direction of magnetic field on the stability of the free surface of molten metal, a static model experiment with no metal flow has been conducted by use of molten Gallium. The theoretical results derived in the previous paper have been confirmed by experimental ones that the better stability are found in the condition with the less electric current, the stronger magnetic field, and the magnetic field parallel to the direction of a wave vector in this paper. The feasibility study for confining molten steel in the twin roll caster has been theoretically predicted that the horizontal magnetic field is superior to the vertical one.

Key words : strip casting ; twin roll ; steel making ; confinement of molten metal ; electromagnetic processing of materials ; electromagnetic force ; electromagnetic dam.

1. 緒言

ストリップキャスト法とは溶融金属から薄板を直接鋳造するプロセス¹⁾で、特に二つの回転ロール間に溶融金属を保持しつつ、下方に薄鋳片を引き出す上注ぎ双ロール法が注目されている。プロセスの実現のため様々な実験による検討がなされてきたが、鋳片表面品質と連続操業を阻害する問題を装置上に残している²⁾。

特に連続操業化を考えると、上注ぎ双ロール法では二つのロール間に溶融金属を保持する必要があり、耐火物製のサイド堰を用いる方法が現在主流となっている。しかしこの方法ではロールとの直接接触のためサイド堰が摩耗し、あるいはロールの熱歪に起因してロールと堰の間隙より溶湯の漏れが生ずる。また三重点(溶融金属—ロール—耐火物)を形成するため拘束性シェルが発達するなどの問題点が挙げられる。これらの問題に対して、電磁気力のみを用いて溶湯を非接触で保持する電磁堰³⁾やサイド堰型固体壁と電磁気力を併用する併用型電磁堰⁴⁾が提案されている。実機化にあたっては非接触保持による自由表面の安定保持の条件も検討しておく必要がある。

前報⁵⁾において理論的観点から自由表面の安定条件を導出したが、実際に安定化に及ぼす操作因子の効果を実験により確認する必要がある。電磁場下の表面波動の安定性を実験面より検討したのものには Rote ら⁶⁾また McHale ら⁸⁾の研究がある。前者は高周波磁場を用いて、溶融金属を板状に非接触浮揚させる水平式電磁鋳造を想定して自由表面上にガスを流し、波動が生じる臨界のガス流速を磁場印加方向との関係により検討している。また後者は波動の生じる臨界条件を解析と実験により確認した。そしてこれらの研究を Moreau⁹⁾らがまとめている。以上は重力方向に対して垂直つまり水平の界面を対象とした研究である。

本報告では双ロール法に電磁堰を適用する場合を想定し、電磁気力により非接触保持されたロール間隙側端部の鉛直面を低融点金属である溶融ガリウムを用いて再現した。次に、ロールを通過する溶湯流を無視した静止モデル実験により、自由表面の安定性に及ぼす操作因子の影響を調べ、前報⁵⁾で得られた解析の妥当性を検証した。さらに、実操業への電磁堰の適用を想定して溶鋼保持高さの理論的検討を行った。

平成5年8月6日受付 平成6年2月4日受理 (Received on Aug. 6, 1993; Accepted on Feb. 4, 1994)

* 名古屋大学大学院生 (現:住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所) (Graduate Student, Nagoya University, now Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

* 2 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

2. 低熔点金属を用いたモデル実験

2.1 実験方法

溶融ガリウム(密度： $6.1 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，表面張力： $7.35 \times 10^{-1} \text{N/m}$ ，電気伝導度： $3.7 \times 10^6 \text{S/m}$)を用いて鉛直に保持された溶融金属表面の安定性を調べた。電場と磁場の印加の方向としては水平方向磁場—鉛直方向電流と，鉛直方向磁場—水平方向電流の2種類の系の実験を行った。実験ではスリット付き容器にガリウムを満たし電磁気力をスリットの外部から内部へ向かう方向に印加して溶融金属が流出しないように非接触保持した。容器およびスリットの寸法と形状をFig. 1 (a)，(b)に示し，それぞれの系の実験装置をFig. 2 (a)，(b)に示す。モーターと連結させたオシレーターによって自由表面に振動を与えた。オシレーターの周期を変化させて定在波をつくり，その後オシレーターを停止させ自由表面変位の減衰挙動をレーザー変位計により測定し記録した。そして半周期ごとの振幅の対数値を時間に対してプロットしその傾きから減衰定数を算出した。溶融金属はスリット部で保持されている限りスリット部の幅と高さより長い波長の波は起こらないと考えることができる。すなわち，溶融金属保持が破れる最大のスリット幅あるいは高さを臨界波長とし，先に導出した理論解析結果との比較・検討を行う。

検討項目は①保持界面に振動を与えた場合の波動の挙動，②印加磁束密度(印加電流密度)およびスリット寸法を変化させた条件での減衰定数の測定，そして③印加磁束密度を一定とし，釣合条件近傍で印加電流値を変化させた場合

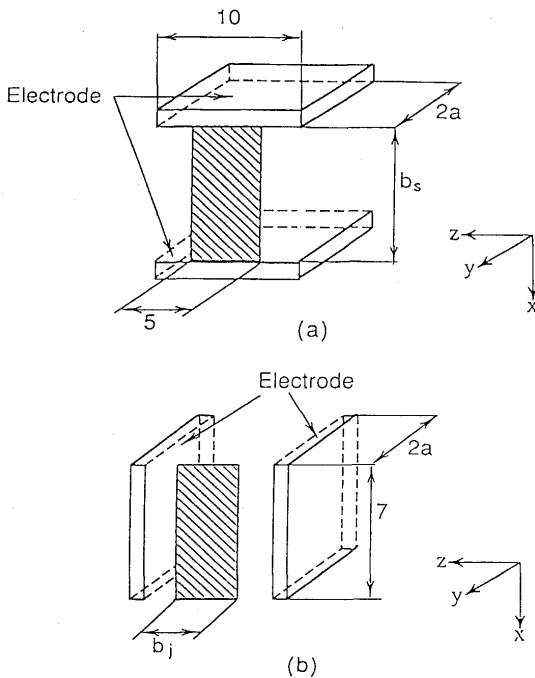


Fig. 1. Configuration and the slit size of the vessel for holding molten metal.
(a)The system when a horizontal magnetic field is applied.
(b)The system when a vertical magnetic field is applied.

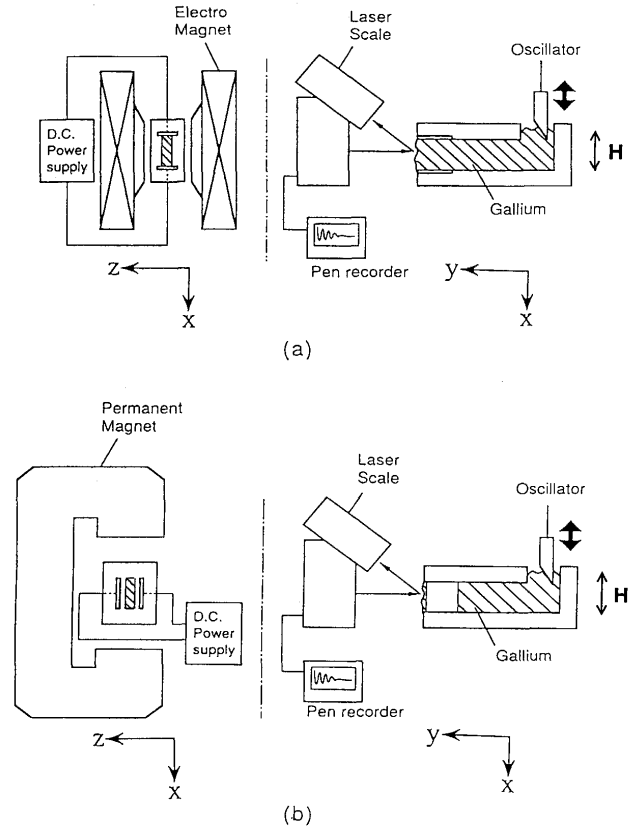


Fig. 2. Schematic view of the experimental apparatus.
(a)The system when a horizontal magnetic field is applied.
(b)The system when a vertical magnetic field is applied.

の波動の挙動の観察，とした。

2.2 実験結果

2.2.1 水平方向磁場系

溶融ガリウムに磁束密度 $B_0 = (0, 0, B_0)$ ，電流密度 $J_0 = (J_0, 0, 0)$ を印加して自由界面をスリット部に作り出した。始めに波動の挙動について述べる。保持された界面は静圧によりスリット部下でせり出し形状となっているため，電流密度の不均一があり上部で大きな電流密度となっていると思われる。この点は理論結果の検証を行う上で差異を生む原因となろう。振動が起こっている場所はこの上部であり界面の下方にはあまり攪乱波は伝わっていないようであった。また上部で発達した波が下部に押しやられることにより下部において溶湯が漏れる傾向にあった。界面における攪乱波は専ら鉛直方向に観察されたが，水平方向にもスリット寸法と同等の長い波長のものが見られた。

次に操作因子の影響を調べ，中立安定点を確認した。理論解析との対応をとるため静止流体での釣合条件 $2aJ_0 \times B_0 = \rho g H$ を満足しているとして，電磁気力の $J_0 \times B_0$ を一定値としてそれぞれ印加磁束密度と印加電流密度を変化させ，それぞれが波動の挙動に及ぼす影響を観察した。ただし，印加磁束密度は電磁石の出力を調整することで変化させた。前報の解析結果から磁場の印加方向に対して波動の伝播方向が垂直の場合に臨界波長が小さい，つまりより不安定で

あると予想されている。よって熔融金属保持部の鉛直方向スリットの高さ (Fig. 1 (a) の b_s) を変化させ、減衰定数の測定から中立安定点を求めた。ここで行うのは安定領域での実験であり、減衰定数が大きければ安定で、零に近づくにつれて不安定領域との境界、つまり中立安定点に近づくものと考えることができる。そのため中立安定点のスリット高さを臨界波長として求めた。

数個の減衰挙動のデータから減衰定数を求め、その範囲と平均値を Fig. 3 に示す。印加磁束密度が増加すると、減衰定数の値が大きくなり安定化効果をもつことがわかる。印加電流密度と印加磁束密度の積は一定に保たれているため印加電流密度の減少は安定化効果をもつことになる。またスリットの高さ b_s を大きくするにつれ減衰定数は減少していく傾向がみられ、 $b_s=0.012\text{m}$ で減衰定数がほぼ横這いとなった。 $b_s=0.015\text{m}$ にしたところでは保持はできるが振動を与えるとすぐに漏れてしまった。すなわち 0.012m 以上の

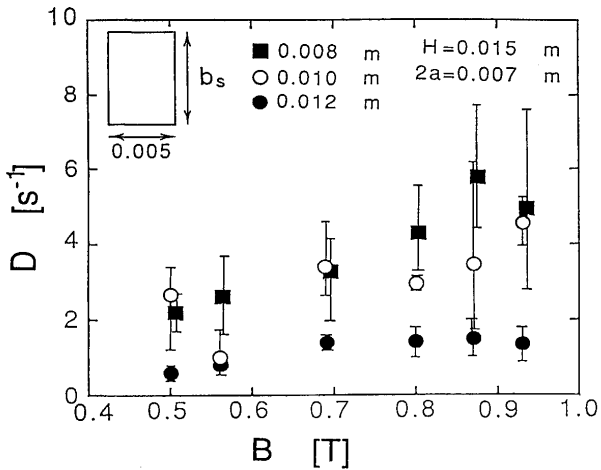


Fig. 3. Effect of imposed magnetic flux density on damping coefficient under the condition of different slit heights in the horizontal magnetic field.

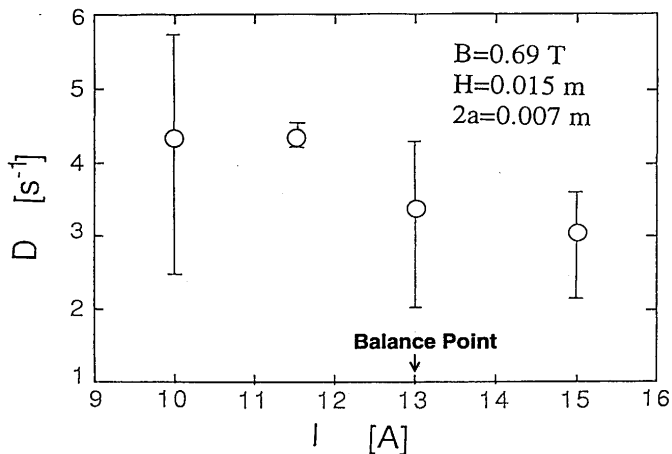


Fig. 4. Effect of imposed electric current on damping coefficient in the horizontal magnetic field.

波は乱れが増幅し存在できないため、この実験系での臨界波長は約 0.012m であると推定した。

次に、印加磁束密度は一定として釣合条件近傍で印加電流値を変化させた。実験結果を Fig. 4 に示す。印加電流値が大きくなるにつれ、つまり電磁気力が大きくなると減衰定数が小さくなっていく傾向がみられ不安定となることがわかる。これは保持高さ $H=0.015\text{m}$ を維持する以上の電磁気力が印加されることにより保持界面が内部に押し込まれ、結果的に保持高さが増加したため不安定性が増したものと推測される。

2.2.2 鉛直方向磁場系

熔融ガリウムに磁束密度 $B_0=(B_0, 0, 0)$ 、電流密度 $J_0=(0, 0, -J_0)$ を印加して自由界面をスリット部に作り出した。界面における攪乱波は専ら鉛直方向に観察されたが、水平方向にもスリット寸法と同等の長い波長のものが見られた。

次に、操作因子の影響と中立安定点の確認を行った。釣合条件 $2aJ_0 \times B_0 = \rho g H$ を満足させる電磁気力 $J_0 \times B_0$ を一定値としてそれぞれ印加磁束密度と印加電流密度を変化させ減衰定数を測定した。ただし、印加磁束密度は永久磁石の磁極間距離を調整することで変化させた。この系の場合、鉛直方向磁場に対して垂直関係にある水平方向の波動が不安定であると考えられ、熔融金属保持部のスリットの幅 b_j を変化させた系で安定性の評価を行った結果を Fig. 5 に示す。鉛直方向磁場の結果は水平方向磁場のもの (Fig. 3) とほぼ同様な傾向を示している。さらにこの場合も $b_j=0.015\text{m}$ にした場合、保持は可能であるが振動を与えることにより熔融ガリウムが漏れてしまった。したがって、臨界波長は 0.012m であると推察できる。

次に、印加磁束密度を一定として釣合条件近傍で印加電流値を変化させた結果を Fig. 6 に示す。印加電流値が大きくなるにつれ、つまり電磁気力が大きくなると減衰定数が小

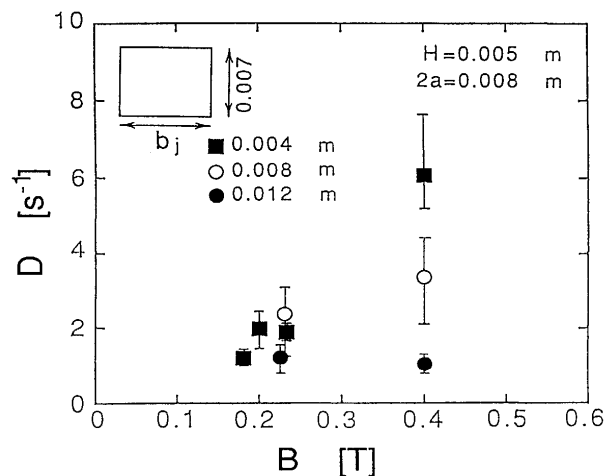


Fig. 5. Effect of imposed magnetic flux density on damping coefficient under the condition of different slit widths in the vertical magnetic field.

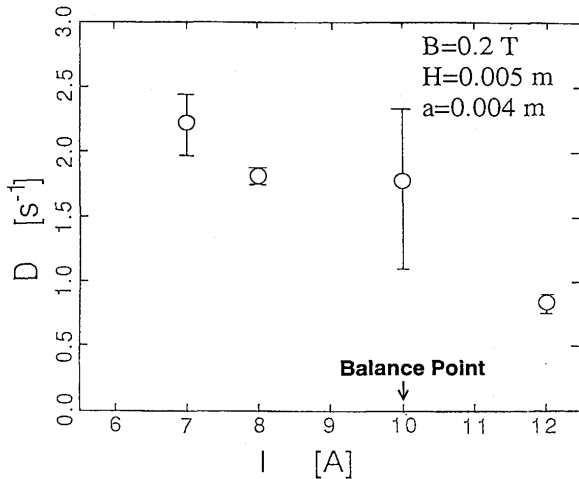


Fig. 6. Effect of imposed electric current on damping coefficient in the vertical magnetic field.

さくなっていく傾向がみられ不安定となることがわかる。これは水平方向磁場の場合と同様に結果的に保持高さが増加し不安定性が増したためと推測される。

3. 考察

3.1 解析結果と実験結果の比較

水平方向磁場と鉛直方向磁場で得られた結果から両者の違いについて考察する。減衰定数の大きさをFig. 3とFig. 5で比較すると両者の横軸の値は異なっており直接比較することはできないためFig. 3に示した結果を外挿して比較すると鉛直方向磁場(Fig. 5)の方が減衰定数が大きく、より安定であることがわかる。この原因として、この系において生じる波動は重力の影響により鉛直方向波動が主となるため、鉛直方向磁場の場合においては波動伝播方向と磁場印加方向が平行となり、前報⁶⁾で示した様により大きな安定化効果が得られたものと推察できる。ただし、水平方向磁場系でも実験において波動が抑制された理由は印加された磁場が均一ではなくわずかに勾配をもっていたため¹⁰⁾、または境界の影響による水平方向波動の存在によるものと考えられる。

この実験結果を前報⁶⁾で展開した理論解析によって検証する。ガリウムの物性値を用い、融体は静止状態にあるため分散関係式中で $U_0 = 0$ とおき対流項を落とす。またそれに伴って誘導電流も消失する。したがって、水平方向磁場と鉛直方向磁場では磁場と波動の位置関係が異なるのみで同じ結果となる。ここでは、水平方向磁場における磁場の方向と波動の伝播方向が直交する場合と平行する場合の結果を印加電流密度を変化させてFig. 7 (a), (b)に示す。縦軸に複素角振動数 s の虚数部の負値 ($-s_i$) をとり波数 k を横軸に採って両者の関係を示した。 s_i の値が現れる波数の値が臨界波数 k_c であり、臨界波長 λ_c との関係は $\lambda_c = 2\pi/k_c$ となる。Fig. 7 (a), (b)の結果から印加電流密度が減少す

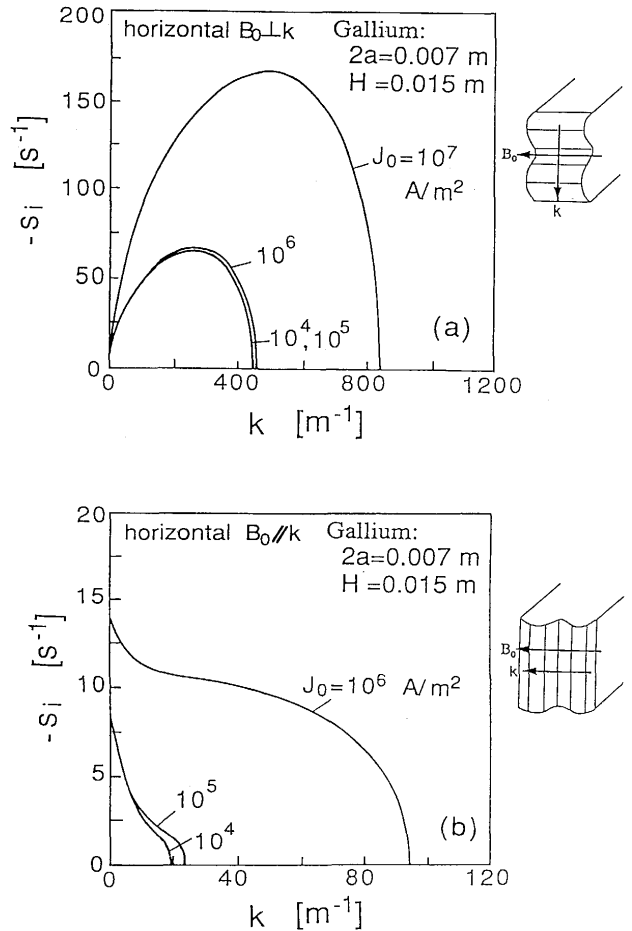


Fig. 7. The relations between the imaginary part of angular frequency and the wave number vector when (a) perpendicular to the horizontal magnetic field and (b) parallel to the horizontal magnetic field.

る(釣合条件から電磁気力は一定のため印加磁束密度が増加すると、臨界波数は減少し、臨界波長は大きくなりより安定な状態へと移行することがわかる。なお、虚数部の大きさ(縦軸の目盛り)および臨界波長は両図でかなり異なっており、波数ベクトルに対して平行に印加された磁場は直交方向に印加される磁場より安定化効果が大きいことがわかる。この理論解析結果は前述のように実験結果(Fig. 3, Fig. 5)に呼応するものである。

Table 1に本実験条件で理論的に算出した臨界波長と実験で得られたものを比較して示す。水平と鉛直のどちらの磁場方向においても磁場印加方向に対して波動伝播方向が直交の場合がより不安定となり易いことがわかる。波数ベクトルと磁場方向が直交する臨界波長のより短い(より不安定な)場合について、その理論値と今回得られた実験値を比較する。水平方向磁場の場合0.015mと0.012m、鉛直方向磁場の場合0.028mと0.012mとなり両者ともかなり良い一致を示していることがわかる。なお、静止系における解析では分散関係式において磁場印加方向による違いは存在しないが、本実験系では保持高さがそれぞれの実験系で異

Table 1. The comparison between theoretical and experimental values of a critical wave length.

		Horizontal magnetic field	Vertical magnetic field
k⊥B	Theoretical value (m)	0.015	0.028
	Experimental value (m)	0.012	0.012
k//B	Theoretical value (m)	0.26	0.30
	Experimental value (m)	—	—

なっていたため、臨界波長が異なって算出されている。

3・2 次元解析に基づいた安定因子の考察

前報⁶⁾で展開した解析から得られた分散関係式に基づいて操作因子が安定化に及ぼす効果を考察する。鉛直方向磁場を解析対象とした分散関係式である(1)式を $k \equiv \gamma$ の関係(前報⁶⁾の式(39)参照)と式(2), (3), (4)で定義される無次元変数(*を付けた変数)を用いて無次元化すると式(5)を得る。

$$\rho(s+k_x U_0)^2 k = (J_0 B_0 + \mu_0 J_0^2 a) \left(\frac{k-\gamma}{k+\gamma} k_x^2 - k_z^2 \right) + \frac{2\mu_0 J_0^2 k_x^2 \gamma}{(k+\gamma)^2} - \frac{2\mu_0 J_0^2 k_x^2}{k+\gamma} + T_s k^4 \quad (1)$$

$$\gamma^* = a\gamma, \quad k^* = ak, \quad s^* = sa/U_0 \quad (2), (3), (4)$$

$$(s^* + k_x^*)^2 k^* = -\frac{1}{2} \beta_1 k_z^{*2} - \beta_2 \left(k_z^{*2} + \frac{1}{2} \frac{k_x^{*2}}{k^*} \right) + \beta_3 k^{*4} \quad (5)$$

(5)式中の $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ はそれぞれ以下のように定義される無次元数である。

$$\beta_1 = \frac{\rho g H}{\rho U_0^2} = \frac{1}{Fr} = (\text{重力}/\text{慣性力}) \quad (6)$$

$$\beta_2 = \frac{\mu_0 J_0^2 a^2}{\rho U_0^2} = \left(\frac{\mu_0 J_0 a / \sqrt{\rho \mu_0}}{U_0} \right)^2 = \left(\frac{U_A}{U_0} \right)^2 = \left(\frac{\text{Alfven速度}}{\text{铸造速度}} \right)^2 \quad (7)$$

$$\beta_3 = \frac{T_s/a}{\rho U_0^2} = \frac{1}{We} = (\text{表面張力}/\text{慣性力}) \quad (8)$$

ただし釣合条件(前報⁶⁾の式(43))を考慮しない場合には、式(6)の β_1 は式(9)とする。

$$\beta_1 = \frac{2J_0 B_0 a}{\rho U_0^2} = \frac{1}{N} = (\text{電磁気力}/\text{慣性力}) \quad (9)$$

ここで Fr, N, We はフルード数, スチュアート数, ウェーバー数を表す。スチュアート数は本来誘導電流により生ずる電磁気力と慣性力の比として定義されるものであるが、本系においては印加電流により生じる電磁気力が圧倒的に大きいためこの電磁気力を用いて定義する修正スチュアート数とした。安定条件は s^* が実数となることであるから、式(5)の右辺が正値を取るように働くのが安定要因、

負値を取るように働くのが不安定要因である。この考えに基づくと溶湯静圧(保持高さ)やAlfven速度(印加電流値)が大きい条件や、印加する電磁気力が大きくなる条件が不安定を招くことになる。逆に安定要因は溶湯静圧を小さく、表面張力を大きく、また印加磁束密度を大きくすることである。印加磁束密度を大きくすると、釣合条件(前報⁶⁾の式(43))から印加電流密度が小さくなり β_2 の定義式の J_0 を小さくできるため安定化することになる。

4. 実操業への指針

本章では鋼を対象として安定に保持できるパドル高さを前報⁶⁾で誘導した理論式を用いて算出し、Fig. 8に示した。なお、計算に当たっては釣合条件(前報⁶⁾式(9), 式(43)参照)が満足されるように、磁束密度の値は電流密度と溶融金属の移動速度に応じて変化させた。印加電流密度が増大すると許容パドル高さは低くなるのが分かる。また実操業において効果的な磁場印加方向は、大きい保持高さが見られる水平方向磁場であることが分かる。ロールキス部のロール内に磁石を内蔵させることによりロール間に強力な水平方向磁場を作ることは可能である。さらに自由表面高さを減少させ得る併用型電磁堰⁹⁾を採用する場合にはこの水平方向磁場により、より安定な保持が可能となろう。

このように水平方向磁場系の結果が鉛直方向磁場系のそれより勝る結果を与える理由は誘導電流によるものである。なお、誘導電流の効果を実験により確認することが必要であるが、今回はできなかった。また、本解析においては無限自由表面を考えており、溶融金属とロールとの接触や、自由表面下部に存在することになる凝固部の存在による端部効果、およびプール内の流動効果が考慮されていない。

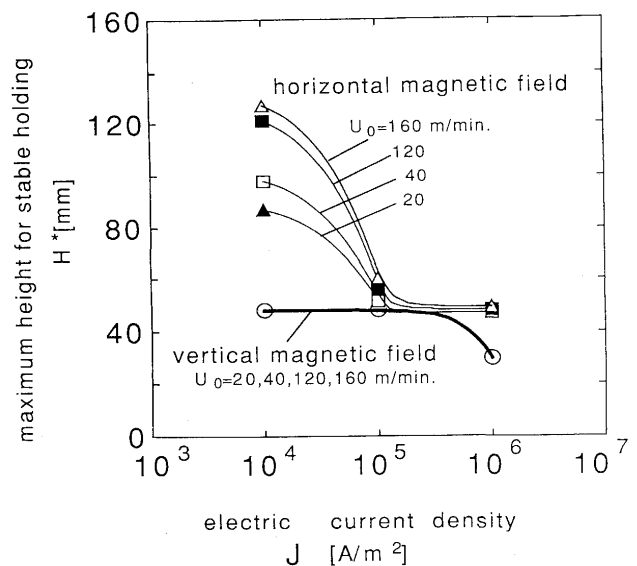


Fig. 8. Effect of the imposed electric current density on the acceptable maximum height for a stable holding in a twin roll caster.

さらに鉛直界面における液膜の波動は速い速度で下方に流れるにつれ非線形性が大きくなる¹¹⁾ことも確認されており、厳密にはこれらの非線形効果も考慮する必要がある。

5. 結言

電磁気力による溶融金属の鉛直自由端面の安定保持を目的として、低融点金属を用いたモデル実験を行った。その結果を以下に示す。

1) 静止流体における鉛直自由端面保持部に及ぼす操作因子の影響をモデル実験により確認し、安定性に及ぼす直流磁場の非等方的効果を確認した。

2) 電磁気力により保持された自由表面の臨界波長を測定し、前報⁶⁾での安定性解析の結果との比較・検討を行い、その妥当性を確認した。

3) 磁場と電流の印加による鉛直自由端面保持に関係する無次元数の導出を行い、安定方向に寄与する操作変数を明らかにした。

4) 実操業において安定保持が可能な溶鋼の最大保持高さを算出し、実機において効果的な磁場印加方向は水平方向磁場であることを理論解析を用いて推論した。

記号

a : 電流印加領域の1/2長さ [m]

B_0, B_z : 印加磁束密度 [T]

b_s : 水平方向磁場でのスリット高さ [m]

b_z : 鉛直方向磁場でのスリット幅 [m]

D : 減衰定数 [s^{-1}]

g : 重力加速度 [m/s^2]

H : 保持高さ, パドル高さ [m]

H^* : 安定保持可能な最大保持 (パドル) 高さ [m]

J_0, J_z : 印加電流密度 [A/m^2]

k, k_c, k_x, k_z : 波数ベクトル, 臨界波数
 x, z 方向の波数 [m^{-1}]

s, s_r, s_i : 角振動数 [s^{-1}]

T_s : 表面張力 [N/m]

U_0 : 溶融金属の移動速度 [m/s]

γ : 定数 (前報⁶⁾の(38)式で定義される) [m^{-1}]

λ, λ_c : 波長, 臨界波長 ($=2\pi/k_c$) [m]

μ_0 : 真空中の透磁率 [H/m]

ρ : 密度 [kg/m^3]

文 献

- 1) 草川隆次: 鉄と鋼, **71** (1985), A200
- 2) 川上公成: 鉄と鋼, **72** (1986), p.2153
- 3) 河地政行, 千代谷一幸, 浅井滋生: 鉄と鋼, **77** (1991), p.1434
- 4) 河地政行, 浅井滋生: 鉄と鋼, **78** (1992), p.455
- 5) 河地政行, 浅井滋生: 鉄と鋼, **78** (1992), p.1531
- 6) 古橋誠治, 浅井滋生: 鉄と鋼, **80** (1994), p.371
- 7) D. M. Rote, J. R. Hull and T. Wincek: Proc. of Int. Symp. on Casting of Near Net Shape Products, (1988), p.363
- 8) E. J. McHale and J. R. Melcher: J. Fluid Mech., **114** (1982), p.27
- 9) R. Moreau: Magnetohydrodynamics, (1990), p.269 [Kluwer Academic Publishers]
- 10) 小塚敏之, 浅井滋生, 鞭 巖: 鉄と鋼, **75** (1989), p.470
- 11) R. Yang and B. D. Wood: CJChE., **69** (1991), p.723