

© 1991 ISIJ

論 文

双ロール法におけるロール間電流と鑄造方向
磁場の直接印加による溶融金属パドルの形状
制御河地 政行*・千代谷一幸*²・浅井 滋生*³Shape Control of Molten Metal Puddle by Directly Imposing Electric Field
between Rolls and Magnetic Field in the Casting Direction in Twin Roll
Process

Masayuki KAWACHI, Kazuyuki CHIYOTANI and Shigeo ASAI

Synopsis :

A new process to control the side edge shape of molten metal puddle is proposed in which direct electric field imposed between rolls and direct magnetic field applied in the casting direction induce electromagnetic force in molten metal puddle. The experimental works were carried out to clarify the possibilities of holding molten metal at side edge and of controlling the side edge shape by the electromagnetic force. It was found that the holding height of meniscus can be controlled by the direct electric current as an operating parameter. This method to hold molten metal at side edge is named an electromagnetic dam. And it was noticed that using the shape control function of electromagnetism the saw shape edge on cast sheet, which is attributed to the instability of meniscus, becomes smoother than that obtained by the previously proposed process in which only direct magnetic field was imposed to suppress the saw shape edge. The experimental data verify the mathematical model of the electromagnetic dam which can predict the holding height of meniscus position of molten metal puddle from electric current, magnetic field and casting velocity.

Key words : direct casting; twin roll; shape control of molten metal; electromagnetic processing of materials; electromagnetic force; electromagnetic dam.

1. 緒 言

薄板の直接鑄造プロセスは急冷凝固にともなう材料特性の向上のみならず省工程・省エネルギーの観点から鉄鋼分野においてポスト連鑄プロセスとして注目を集めている¹⁾。しかし本プロセスにおいては、急冷凝固やロール間パドル部における溶融金属の流動等の複雑な現象が同時にかかわってくるため、その開発には多くの問題が残されている²⁾³⁾。その一つとして溶融金属側端部の形状制御が挙げられる。例えば双ロール法においては、ロール間隙に形成される湯溜まり部であるパドルを保持するために耐火物の堰が使用されているが、その耐久性およびロールと耐火物の間隙への湯差し等が安定操業に際し問題となってくる。そこでは取り扱う溶融金属が高温で

あるため、直接接触方式の堰ではロールと耐火物の間隙の詳細な制御は困難を極め、そのことが湯差し等の主要な原因となる。一方、電磁気力等を用いた非接触方式の堰を採用する際には、溶融金属は比重が大きいことから、溶湯静圧がパドルの側端部に強くかかることになる。そのため、側端部における溶湯静圧の保持にあたっては大きな力が必要とされる。したがって、強力な電磁気力を発生せしめる方法の提案および開発が強く望まれている。

湯原ら⁴⁾は直流磁場を印加することによる側端部形状の制御法を提案しているが、溶融金属の速度と磁場の相互作用による誘導電流に基づく電磁気力を利用しているため、大きな電磁気力を期待することは難しい。そのため、湯原らの方法は溶融金属の側端部において曲率が

平成元年9月本会講演大会にて発表 平成2年11月20日受付 (Received Nov. 20, 1990)

* 名古屋大学大学院 (Graduate School, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

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

*³ 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

大きく表面張力に基づく保持力が溶湯ヘッドを支えることができる板厚の薄い場合に有効であると考えられる。一方、溶融金属のリブレット流⁵⁾について直流磁場と直流電流の印加によってその形状制御が可能であることが著者ら⁶⁾によって示されており、そこでは溶融金属の静水圧および慣性力に打ち勝つだけの強力な電磁気力が得られている。また KOLESNICHENKO ら⁷⁾はロール間方向および鑄造方向に溶融金属に直流電流をそしてそれらの垂直方向に直流磁場を印加する二つの方法で低融点溶融金属を用いた静止双ロールでの低温モデル実験を行い、印加電流とロール間に保持される溶融金属の高さの関係をjている。

以上の観点を踏まえて、本研究では非接触による側端部形状制御を達成するために直流磁場と直流電流を直接パドルに印加する方法を採用し、電磁気力によるパドル保持およびパドル形状制御に関する実験および解析を行った。

2. パドル保持

2.1 原理

本報で提案する制御原理を Fig. 1 に示す。本図は鑄造方向に垂直な方向から見たロールの正面図を示している。ロールは絶縁体を介して側端の部分 (Part I) に電圧が印加されており、溶融金属がこの部分に侵入した際にはロールを介して溶融金属に紙面垂直方向に直流電流 (J) が印加される。またロール間には鑄造方向に直流磁場 (B) が印加されているため、その相互作用として侵入した溶融金属を押戻す方向に電磁気力 $F (=J \times B)$ が発生する。この電磁気力を用いてパドルの形状を非接触で制御し得る電磁堰をロール側端部に形成せしめる。双ロール法において堰は単に溶融金属がロールからあふれることを防ぐのみならず、ロール間に一定高さのパドルを作ることによって凝固時間の増加および幅方向に均一な凝固層を得るという品質面での重要な役割を果たしていると言える。それを踏まえ、本法では耐火物堰と同様なロール間のパドル状態を電磁気力によって再現し、そのうえで耐火物堰の持つ問題点を克服しようとするものである。

2.2 理論解析

解析に使用した座標系を Fig. 1 に示す。電流はロール間に印加されるので z 成分のみで $J(0, 0, J)$ となる。またロール間隙の上下に磁極をおくことで磁束は y 成分のみで $B(0, B, 0)$ となる。電流と磁場の相互作用による電磁気力は (1) 式で与えられるので、この場合 x 成分のみとなる。

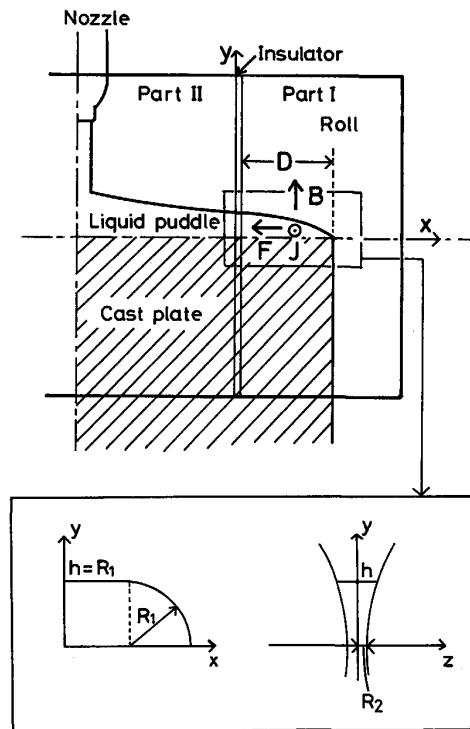


Fig. 1. Schematic view showing the principle of shape control of molten metal puddle (front view of roll).

$$F = J \times B = F(-JB, 0, 0) \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、電磁気力はパドルの幅を狭める方向に作用することを意味する。

通電の行われる Part I 部に侵入した溶融金属の幅を D とすると、ロールのキス部においてパドル側面に作用する力の釣合いの式は (2) 式となる。

$$\int_0^D JB dx - \rho gh - P_k + \sigma/\gamma = 0 \dots\dots (2)$$

(電磁気力) (溶湯静圧力) (動圧力) (表面張力)

定常状態を想定して通電可能な溶融金属の面積を一定値の A と仮定すると (3) 式を得る。

$$IBD/A - \rho gh - P_k + \sigma/\gamma = 0 \dots\dots\dots (3)$$

次に、ロールのキス部においてパドルを形成する曲面の第一曲率および第二曲率の曲率半径を R_1, R_2 とし、 R_1 は xy 平面または R_2 は xz 平面における曲率半径とで定義する。

本解析において電流密度を評価する際には側端部の形状はそれほど大きな影響を及ぼさないことから、解析を簡単化するために矩形形状で近似した。しかし、表面張力を評価する上ではパドル形状の影響が大きいので、ここではパドルの側端部のみを円形で近似し、 R_1 にパドル高さ h を用いると、曲率半径 γ は (4) 式となる。

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{h} + \frac{1}{R_2} \dots\dots\dots (4)$$

また通電部のパドル形状を矩形近似したことから、 $A = hD$ と置くことができるので、(4)式を用いて(3)式を h について整理すると(5)式となる。

$$\rho gh^2 - \{(\sigma/R_2) - P_k\}h - (IB + \sigma) = 0 \quad \cdots \cdots (5)$$

この h の2次式を解くと(6)式を得る。

$$h = \frac{S + \sqrt{S^2 + 4(IB + \sigma)\rho g}}{2\rho g} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、 $s = (\sigma/R_2) - P_k$ である。なお、 R_2 の値は xz 平面におけるパドル形状によるが、これはロール間隙およびロールと熔融金属の濡れなどによって変化するため正確な見積もりは困難である。また、 P_k の値もパドルに作用するせん断力などによるため同様に見積もりが難しい。そこで、 S は電流値によって変化しない定数であると仮定して、電流値が零の時のパドル高さ h_0 の実測値を用いて(6)式より S の値を逆算した。この S の値を用いることによって(6)式によりパドル高さ h に及ぼす印加電流 I の効果を求めることができる。

2.3 実験

2.3.1 実験方法

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。装置は大きく二つの系に分かれている。一つは給湯系であり、石英管ノズル、ヒーター、熱電対、アルゴンガス供給系およびストッパー上昇とガス供給を制御するシーケンサーから成っている。石英管ノズル内で溶解したスズを、鑄造時にはノズルごとロール間部へと下降させ Fig. 2 の破線

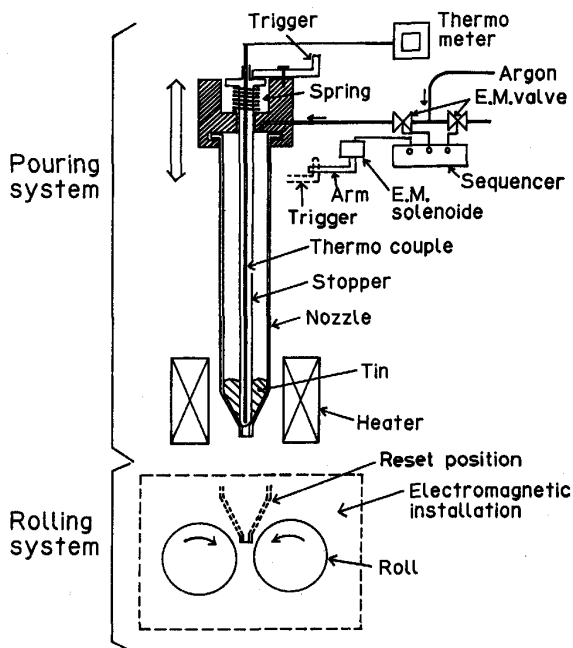


Fig. 2. Experimental apparatus twin roll process.

で示した位置に設置し、所定の温度に達した時点でガス背圧によりノズルより溶湯を噴出・注湯する。他の一つは鑄造系であり、Fig. 3 に示すようにロールおよびロール周辺の電磁機器関係の装置から成る電磁鑄造系となっている。ロールの表面層は軸の部分と絶縁されており、電流印加の際には双ロール鑄造機本体部に漏電しないよう工夫されている。また、ロールは絶縁体を介して I と II の二つの部分に分かれており、I 部には直流電源に接続された電極が接触している。電極の先端はカーボンブラシとし、予備実験からカーボンブラシを介したロールへの通電の方式によって 100 A 程度までは通電可能であることが確認された。その際、カーボンブラシの寸法を大きくしてカーボンブラシとロールの接触面積を大きくすることで接触抵抗を小さくし、スパークなど電氣的な不安定要因を取り除いた。

ロールの側端部には上下方向から磁極を設置し、かつ磁極形状を凸形に加工して、ロール間により深く挿入することによって磁束密度を高める構造とした。その結果、ロールキス部において約 0.13 T 程度の磁束密度が得られた。実験条件を Table 1 に示す。Photo. 1 に電磁鑄

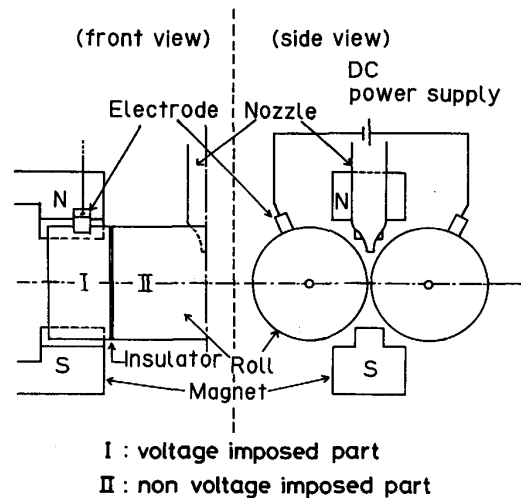


Fig. 3. Schematic view of experimental installation imposing direct magnetic field and direct electric current.

Table 1. Experimental conditions.

Cast metal	Sn
Mass	40 g
Width of cast sheet	40 mm
D (distance between insulator and puddle side edge)	20 mm
Roll rotating rate	60 rpm
Roll materials	Plain steel and stainless steel
Roll size	70 ϕ $\times$ 70 W mm
Roll gap	0.10 mm
Imposed electric current	0~100 A
Imposed magnetii flux density	0.13 T

造系の外観を示す。

また、パドル高さを測定するために、Fig. 4 に示すようにロールの側端部からロール軸方向に向かって高速ビデオカメラで注湯時のパドル部の動的挙動を随時撮影

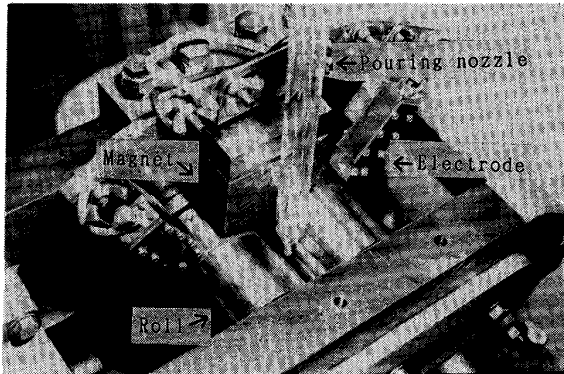


Photo. 1. Electromagnetic casting system.

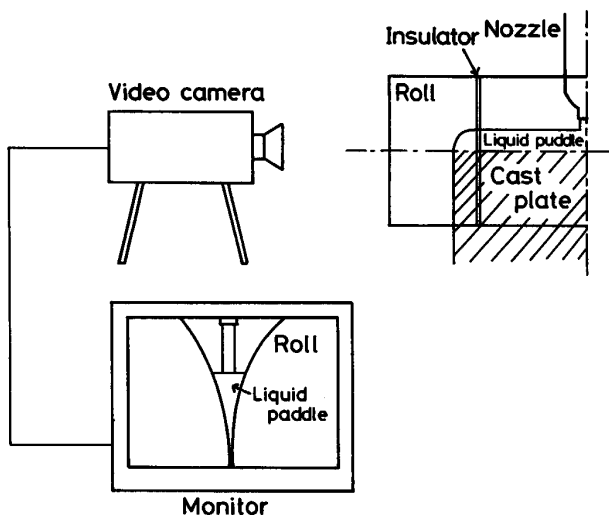
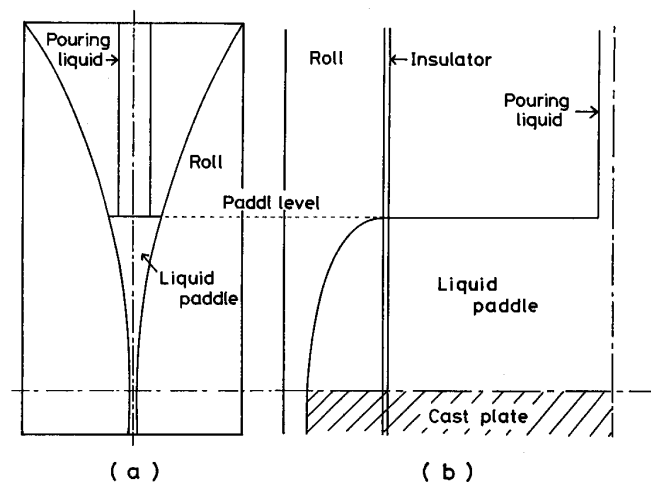


Fig. 4. Procedure to record the behaviour of molten metal puddle.

した。そして、注湯開始よりやや時間を経て定常になった時点でのモニター画像を解析することによりパドル高さの測定を行った。

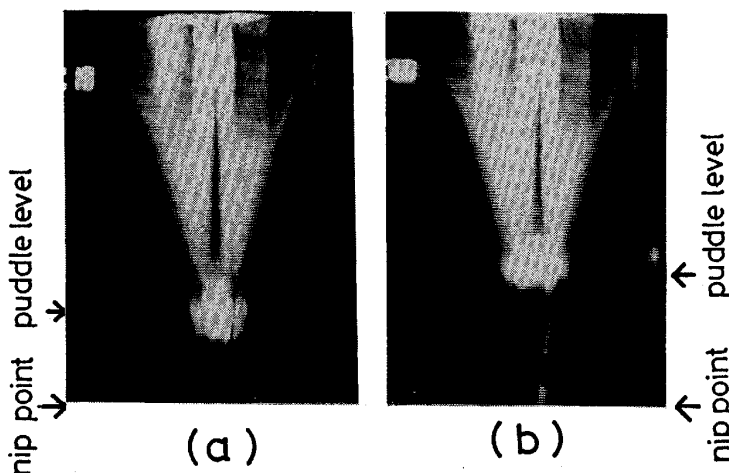
2・3・2 実験結果および考察

Photo. 2 に高速ビデオカメラにより撮影されたパドルの側面写真を示す。写真において光の加減で注入流にできた陰が下方で白く光っている部分がパドル上面の位置に相当する (Fig. 5 に写真のパドル位置に対応する側面図および正面図を模式的に示す)。Photo. 2 (a) に電流を印加しない時の、Photo. 2 (b) に電流を印加した時のパドルの側面写真を示す。両者の比較より電流を印加することでパドル高さが上昇しており電磁堰の効果は明らかである。Fig. 6 にパドル高さに及ぼす印加電流の効果を示す。図より電流値が増加するにしたがってパドル高さが上昇することが分かる。この結果は電磁気力による非接触の堰いわゆる電磁堰が実現可能であることを示している。図中の実線は式(6)の計算結果であり実験



(a) Side view (b) Front view

Fig. 5. Schematic views of molten metal puddle.



(a) Without electromagnetic force

(b) With electromagnetic force

Photo. 2. Side views of molten metal puddle.

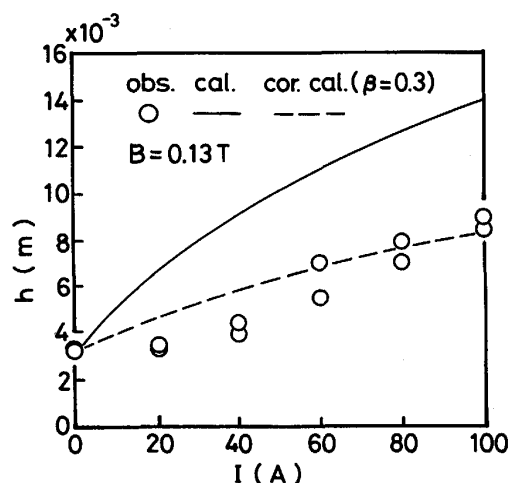


Fig. 6. Effects of direct electric current on the height of molten metal puddle.

結果の傾向を良く示している。なお、理論値と実験値との間に差異が生ずる原因としては、高さ方向にパドル側端部の曲率が小さくなるため、ロールキス部のみの力の釣合いから導出された(6)式ではパドル高さを過大評価してしまうことが考えられる。つまり、(6)式で計算したパドル高さでは、ロールキス部に比べ曲率が小さく力の釣合いがとれていない位置が生じるため、実際には計算値に比べ実測値が小さくなってしまふわけである。他の原因としては、今回の解析では磁束密度および電流の分布を一定として取り扱っていることが考えられる。計算値と実測値の差を補正するため、制御にあたり最も重要と考えられる電流値に対してアジャスタブルパラメータである補正電流係数 β を(6)式に導入すると(7)式を得る。

$$h = \frac{S + \sqrt{S^2 + 4(\beta IB + \sigma)\rho g}}{2\rho g} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$\beta=0.3$ とした場合の(7)式の計算結果を Fig. 6 に破線で示した。

次に、 $\beta=0.3$ として(7)式に基づき電流密度 J と磁束密度 B を変化させた場合のパドル高さを Fig. 7 に示す。電流値が零の場合においてもパドル高さが零とならないのは表面張力の効果であることが(7)式より容易に理解できる。すなわち板厚が薄く (R_2 が小さい) 表面張力の効果が大きい場合には、電磁気力の印加がなくとも非接触である程度のパドル高さを保持できることになる。逆に板厚が厚い場合 (R_2 が大きい) には表面張力による保持力は期待できないので、電磁気力による方法が有効となる。

なお高速ビデオカメラによる録画面面の観察から、注湯時には次のようなパドル挙動が観察された。

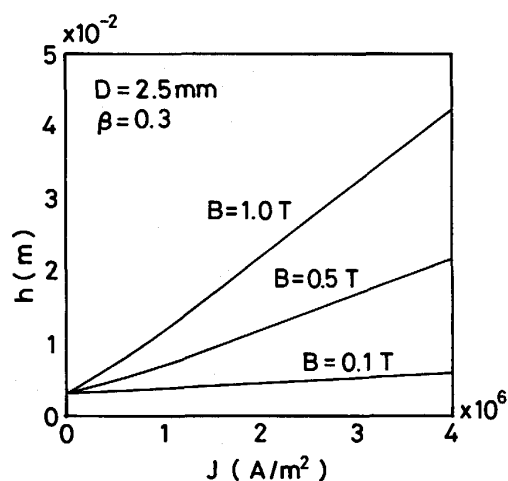


Fig. 7. Effects of direct electric current density on the height of molten metal puddle.

(1) 注湯開始時には溶融金属とロール間に一時的にスパークが観察される。これは、注湯初期に溶融金属がロール間で押し広げられた際に、絶縁部を越えて電圧印加部に達し、その瞬間に生じたものである。また、実験終了後にロールの状態を見ると部分的に溶融損傷している箇所が見られた。これは、スパークが発生した際に生じたものと考えられる。

(2) スパークが観察された後にパドル高さが上昇し、一定の高さで一時的に安定する。これは電圧印加部に溶融金属が侵入し、パドル保持の機構が働きパドル高さの上昇が起こったものと考えられる。

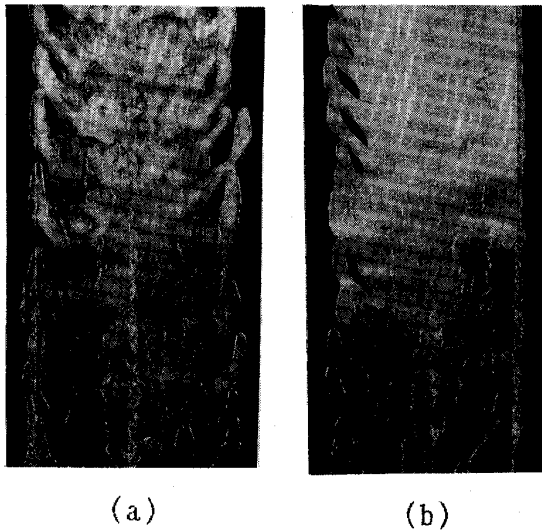
(3) その後、パドル高さが振動する現象が起こった。これは、本法では通電部の幅が広がると電磁気力の作用する面積は増加するが、その分電流密度が減少するため通電面積の増大が電磁気力の増大につながらないことから注入流に起因するパドルの振動が抑制されないためと考えられる。このことは(3)式において通電部面積 A を $A=hD$ と置くと電磁気力項からパドルの幅 D が消去され、電磁気力がパドルの幅に依存しなくなることから理論的に推察される。

KOLESNICHENKO ら⁷⁾ は静止双ロール装置を用いてパドル保持高さと印加電流値の間の関係を求めているが、本研究では新たに実際の回転型双ロール装置を用いて、電磁堰の効果を確認するとともに、動的な挙動についても上記のような知見を得ることができた。

3. パドル形状制御

3.1 原理

以上述べてきた電磁堰につながるものとして、製品の側端部に発生する波形形状の制御が考えられる。Photo.



(a) Without electromagnetic force
(b) Electromagnetic force was imposed on right side, not left one
Photo. 3. Views of edge shape of the cast sheets.

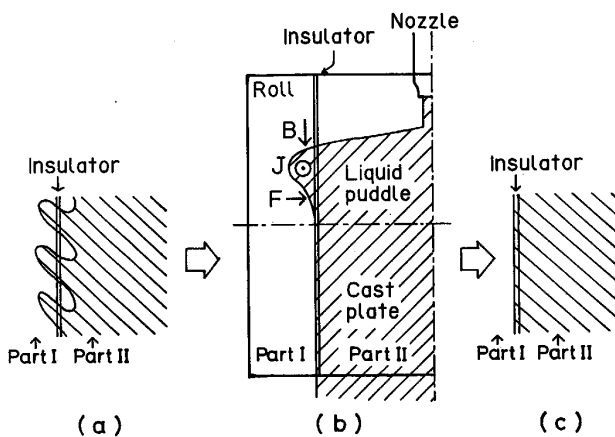


Fig. 8. Control principle of saw edge shape of molten metal puddle (front view of roll).

3(a)に示すように、双ロール法において薄板を鑄造する際にその側端にパドル表面の不安定現象に起因する波形形状が現れることがある⁴⁾。これを抑制するためにはFig. 8に示すように波形部の幅の中央に絶縁体が位置するようにすれば (Fig. 8(a))、電流が印加される部分にのみ電磁気力が働くことになり (Fig. 8(b))、電流が印加されていない部分の波形部を埋めて側端部を平坦に制御することが可能となる (Fig. 8(c))、本法では制御の可否はもっぱら制御速度に依存するものと考えられる。すなわち、鑄造速度を増大させる場合には制御速度を大きくする必要から、電磁気力は増大させねばならない。本法では側端の不安定部のみに電流を印加し、これにより高い電流密度が得られ、結果として強い電磁気力を作用させることができる。また、本制御法は一定の薄

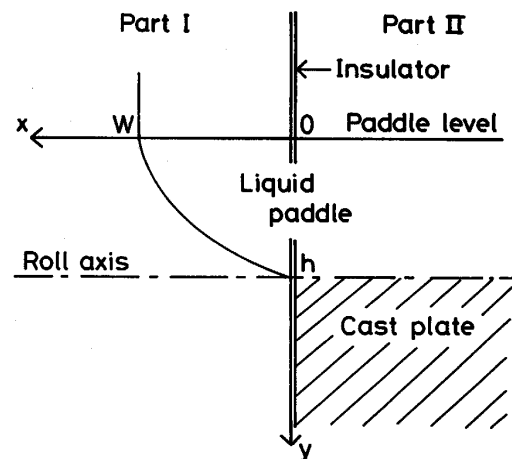


Fig. 9. Schematic view showing the coordinate for calculation (front view of roll).

膜流の幅を正確に制御する際にも適用できよう。

3.2 理論解析

制御にあたり必要とされる操作因子を評価するために解析を行う。絶縁体からはみでた部分の流体素子に作用する力は主に電磁気力であると考え、この仮定のもとに絶縁体部から通電部にはみ出た溶融金属が電磁気力によって制御される様子を Fig. 9 のように模式化する。パドルの側端部における流体素子を考え、その運動方程式として(8)式および初期条件として(9)、(10)式を導入しパドル形状を決定する。なお、解析にあたり使用した座標系を Fig. 9 に示す。

$$\rho d^2x/dt^2 = -JB = -IB/A \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{I.C. at } t=0 \quad x=W \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{at } t=0 \quad dx/dt=0 \dots\dots\dots (10)$$

ここで、本系が定常状態にありパドル形状は一定であると仮定すると(8)式において通電面積 A は定数とおける。(8)式を初期条件(9)、(10)式に基づいて解くと(11)式が得られる。

$$x = -\{BI/(2\rho A)\}t^2 + W \dots\dots\dots (11)$$

パドル側端部の溶融金属は y 方向にロール周速度 U で運動していると近似すると $y=Ut$ の関係が得られる。これを用いて(11)式を変数変換すると(12)式が得られる。

$$x = -\{BI/(2\rho AU^2)\}y^2 + W \dots\dots\dots (12)$$

流体素子がロールキス部の位置に達するまでに $x=0$ の位置まで側端部が移動すれば完全にパドル形状は絶縁体の位置に制御されることとなる。(12)式に $y=h_0$, $x=0$ を代入すると(13)式が得られる。

$$0 = -\{BI/(2\rho AU^2)\}h_0^2 + W \dots\dots\dots (13)$$

この際、通電面積 A は(12)式を用いて(14)式のように

示される.

$$A = \int_0^{h_0} x \, dy$$

$$= -\{BIh_0^3 / (6\rho AU^2)\} + h_0 W \dots\dots\dots (14)$$

(14)式を A について整理すると(15)式を得る.

$$A = \frac{3\rho h_0 U^2 W + \sqrt{(3\rho h_0 U^2 W)^2 - 6\rho B h_0^3 I U^2}}{6\rho U^2}$$

..... (15)

(15)式を(13)式に代入して I について整理すると(16)式が得られる.

$$I = 4\rho U^2 W^2 / (3B h_0) \dots\dots\dots (16)$$

(16)式はパドル側端部の溶融金属を絶縁体部の位置まで移動するために必要な電流値を示す. また, (16)式により側端部の波形形状の制御変数が明らかとなる.

3.3 実験

3.3.1 実験方法

実験装置および注湯方法はパドルの保持において述べたものと同じである. ただし本法では予備実験によりパドルの側端部がどの位置にくるかを事前に測定しておく, 波形部の中央が絶縁体の位置にくるように注湯位置の調節を行ったのちに鑄造を開始した. なお波形形状の制御に際しては, 片側の側端部のみに磁極および電極を設置し電磁気力を印加し, 他の側端部には何も施さない状態にして鑄造を行った. そのため両側端部の形状を比較することで電磁気力印加の効果を明確にできる. 実験条件は Table 1 に示すものと同じである.

3.3.2 実験結果および考察

Photo. 3 (b) に実験結果を示す. 右端は電磁気力を印加した側で左端は電磁気力を印加していない側である. 明らかに左端は波形形状を示しているのに対し電磁気力を印加した右端は極めて滑らかな形状になっている. このことから電磁気力により側端部の波形形状に制御を精度良く行うことが可能であることがわかる.

実験の際には, 溶融金属の注湯開始後に断続的にスパークが生じる状態であった. これは, 本制御法においては側端部の波形形状部の中心位置に絶縁物を設置していることにより, 溶融金属が断続的に電圧印加部に侵入することがその原因と考えられる.

本制御法では, 絶縁体の位置を正確に調節することにより波形形状の部分にのみ電磁気力を作用させることができるために, 側端形状をかなり平坦なものできるところにその特徴がある. 制御に際しては, 印加した電磁気力の大きさにより制御速度に制限があるため, 波形の周期および振幅を把握した上で波形を消去するにたる電磁

気力を印加することが必要である.

今回の実験条件下で測定されたパドル高さ (h_0) および振幅 (W) は, $h_0 = 3 \text{ mm}$, $W = 2.5 \text{ mm}$ であり, これらの値を用いて(16)式より計算される電流値は $I = 8 \text{ A}$ となる. 実際の制御に必要な電流値は $I = 20 \text{ A}$ 程度と計算値を上回った. これは先の解析において流体素子に対する抵抗力を零として取り扱ったためと考えられる. また, 本解析では波形形状にともなう流体の運動を考慮していないことも, 理論値と実測値との間に差異が生ずる原因と考えられる. この解析はやや定量性には欠けるものの, 本法による操業において考慮されるべき制御変数(ロール周速度, 磁束密度, 絶縁体から側端部までの幅)が制御にあたり必要とされる電流値に対して定性的にどのような影響を及ぼすかを把握するという目的に対しては許される範囲の近似であろう.

4. 結 言

双ロール法においてロール間パドル部に電場と磁場を直接印加し, 電磁気力により溶融金属パドルの側端部形状制御を行う新しいプロセスを提案し, その効果を確認するための実験および理論解析を行った. 得られた結果は次のとおりである.

1) 電磁気力によりパドルの高さが上昇することを確認し, 直流電流を操作因子として電磁堰によるパドルの保持が可能であることを明らかにした.

2) 薄板側端部に見られる波形形状を電磁気力により抑制可能であることを明らかにした.

記 号

A : パドルの通電部の断面積 (m^2)
 B, B : 磁束密度 (T)
 D : 絶縁部と溶融金属パドル側端部の距離 (m)
 F, F : 電磁体積力 (N/m^3)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 h : パドル高さ (m)
 I : 電流 (A)
 J, J : 電流密度 (A/m^2)
 P_k : 動圧力 (N/m^2)
 R_1, R_2 : 曲率半径 (m)
 t : 時間 (s)
 U : ロール周速度 (m/s)
 W : 波形形状の振幅 (m)
 β : 補正電流係数 (-)
 σ : 表面張力 (N/m)
 γ : 曲率半径 (m)
 ρ : 溶融金属の密度 (kg/m^3)

文 献

- 1) 川上公成: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 2153
- 2) 草川隆次: 鉄と鋼, 71 (1985), A200
- 3) T. KUSAKAWA: Trans. Iron Steel Inst., Jpn., 26 (1986),

B123

- 4) 湯原 温, 小塚敏之, 浅井滋生, 軋 廠: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 389
- 5) S. G. BANKOFF: *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **14** (1971), p. 2143
- 6) 河地政行, 古橋誠治, 浅井滋生: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 85
- 7) A. F. KOLESNICHENKO, B. A. YUSHCHENKO and V. I. ZALOZNY: *Proc. The Sixth International Iron and Steel Congress, Japan*, **4** (1990), p. 446