

間欠型高周波磁場の印加およびモールドオシレーションとの同期印加による連鑄片表面性状の改善

李 廷挙*・佐々 健介*²・浅井 滋生*²

Improvement of Surface Quality of Continuously Cast Metals by Imposing Intermittent High Frequency Magnetic Field and Synchronizing the Field with Mold Oscillation

Tingju LI, Kensuke SASSA and Shigeo ASAI

Synopsis : In order to improve the surface quality of continuously cast steel, two new casting processes are developed. One is the imposition of an intermittent high frequency magnetic field from the outside of a mold and the other is a synchronizing imposition of the intermittent high frequency magnetic field with mold oscillation are developed. To distinguish the characteristics of the processes, the meniscus dynamic behavior was investigated in molten gallium as simulator of molten steel and the meniscus deformation was numerically analyzed. The surface quality was examined in the cast tin used as simulator of steel. The imposition of the high frequency magnetic field reduces the effect of mold oscillation on dynamic pressure in a flux channel between molten metal and a mold and suppresses the deformation on meniscus shape.

The intermittent high frequency magnetic field suppresses the surface wave motion generated by mold oscillation. When the timing of the magnetic field imposition is synchronized with the period including the lowest position in the stroke of mold oscillation, the better surface quality is obtained than that synchronized with the period including the highest position. The amount of electric current required to get the same surface quality decreases in the order of the imposition of continuous high frequency magnetic field, the imposition of intermittent high frequency magnetic field and the synchronizing imposition.

Key words : oscillation mark ; continuous casting ; surface quality of cast metal ; soft contacting solidification ; intermittent high frequency magnetic field ; electromagnetic pressure ; electromagnetic processing of materials ; steelmaking.

1. 緒言

鋼の連続鑄造分野においては鑄片を圧延工程へ直接輸送する直送圧延が指向されているが、これを妨げている要因として鑄片の表面欠陥が挙げられる。この欠陥を取り除くため、モールドの外部より誘導磁場を印加する軟接触凝固の提案がなされ¹⁾、その後、この表面性状改善の機構については多くの研究者によってさまざまな検討が行われてきた²⁻⁷⁾。著者等は磁場印加がもたらす効果として湯面の不規則運動の抑制効果とメニスカスとモールドとの間欠接触による緩冷却効果の2点を挙げている^{7,8)}。すなわち、メニスカス部の溶湯とモールドとの接触状態が鑄片の表面性状に大きな影響を及ぼすと認識している。

本研究では、先に提案した間欠型高周波磁場⁹⁾(以後、間欠磁場と略称する)がメニスカス運動を介して鑄片の表面性状の改善に及ぼす効果を明らかにするために、連続高周波磁場(以後、連続磁場と略称する)印加と間欠磁場印加の下

で溶鋼のモデル系として採用した錫の連続鑄造実験を行い、両者の鑄片の表面性状を比較した。また、モールドオシレーションによるメニスカス形状の変化とその変化に及ぼす磁場印加の影響およびモールドオシレーションと間欠磁場の印加時期を同期させた場合のメニスカス形状の変化を数値解析し、溶融ガリウムを用いたモデル実験により検証した。さらに、同期印加した際のメニスカスの挙動および鑄片の表面性状に及ぼす間欠磁場同期印加の影響を錫のモデル実験によって調べた。

2. 実験方法

間欠磁場印加による湯面形状の経時変化を模式図として Fig. 1 に示す。本実験系では20kHzの高周波磁場の最大 B_{max} および最小 B_{min} の磁束密度が1~1/100sの周期 T_{int} で切り換え可能となっている。この切り換え周波数を間欠印加周波数 $f_{int}=1/T_{int}$ と呼ぶ。また、間欠印加の一周期中 B_{max} を印

平成7年8月3日受付 平成7年11月29日受理 (Received on Aug. 3, 1995; Accepted on Nov. 29, 1995)

* 名古屋大学大学院生 (Graduate Student, Nagoya University)

* 2 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

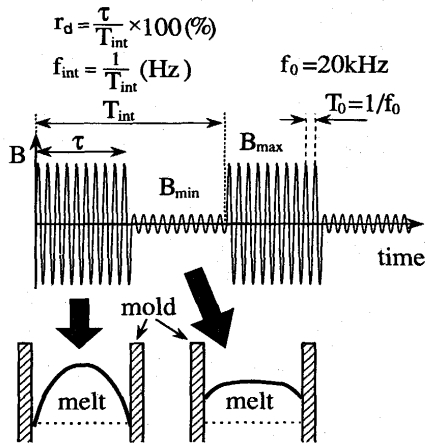


Fig. 1. Wave pattern of intermittent high frequency magnetic field and shape variation of melt.

Table 1. Experimental conditions.

coil	4 turn, height 45mm inner diameter 80mm outer diameter 100mm
mold	inner diameter 30mm outer diameter 62mm
molten metal	Ga (for measurement of meniscus behavior) Sn (for continuous casting)
melt temperature	308K (Ga) 543K (Sn)
casting speed	0 mm/s (for measurement of meniscus behavior) 2.3 mm/s (for continuous casting)
mold oscillation	stroke 6mm frequency(f _{mold}) 1Hz
mold flux	silicon oil

加している割合 r_d も任意に設定することができる。間欠磁場の印加によって、湯面形状はFig. 1に示すように一周期 T_{int} 毎に変化を繰り返すことになる。

実験装置は文献⁹⁾のFig. 1に示したものと同一で、実験条件をTable 1に示す。黒鉛製モールド上面をコイル上面に一致させ、モールドと内径を等しくしたガラスリングをモールド上部に固定し、ビデオ装置と連動したファイバースコープ付き拡大カメラで溶融ガリウムのメニスカスの挙動を連続録画した。またレーザー変位計を用いてモールド上面から3mm下、モールド内壁から3mm内側の点の湯面波動の経時変化を測定した。次に実験装置からガラスリングを取り外して溶融錫の連続鋳造を行った。

以後、本文中では磁束密度 B_{max} に代わり B を用いるが、その値はコイル中に溶湯が存在しないモールドを挿入し、その中心部で測定した値とする。

3. 間欠磁場印加と連続磁場印加の比較

間欠磁場印加と連続磁場印加が鋳片表面性状に及ぼす差

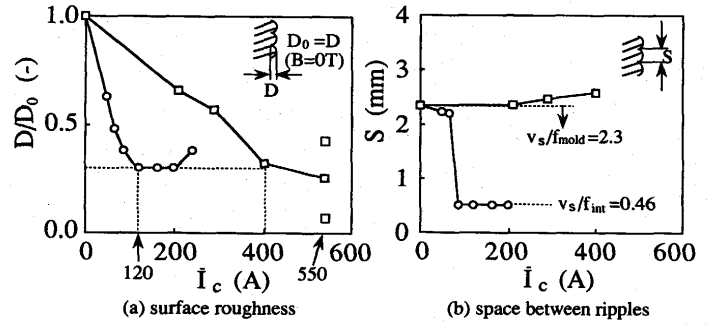


Fig. 2. Effect of electric current on surface quality of tin cast at $f_{mold} = 1\text{Hz}$. \square : continuous magnetic field, \circ : intermittent magnetic field($f_{int} = 5\text{Hz}$)

違を明らかにするため、この二種類の磁場の印加下で溶融錫を連続鋳造した。得られた鋳片の表面粗度と縞の間隔をそれぞれFig. 2 (a), (b)に示す。図の横軸は間欠磁場 B の発生に要するコイル電流の実効値 I_c の平均値 \bar{I}_c で、(1)式で定義される。

$$\bar{I}_c = \frac{1}{T_{int}} \int_0^{\tau} I_c dt = r_d I_c \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\tau (= (r_d/100) * T_{int})$ は間欠磁場印加の一周期 T_{int} 中における磁場 B の印加時間、 I_c は(2)式で定義するコイル電流の実効値である。

$$I_c = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} i^2 dt} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 i は高周波電流、 T_0 は高周波電流の周期である。

図中の \square 印は連続磁場を印加したもので、 \circ 印は間欠磁場を印加したものである。いずれの場合においてもコイル電流 \bar{I}_c の増大に伴ない表面粗度は減少する。なお、 \bar{I}_c が200Aを越えると、間欠磁場印加の場合には鋳片の表面性状の悪化が生じた。連続磁場印加の場合 $\bar{I}_c = 550\text{A}$ 印加すると表面性状が改善する部分と悪化する部分が混在するようになったため、図にはそれらを合わせて示した。また、破線で示すように同一表面性状の鋳片を得るのに要する \bar{I}_c の値は間欠磁場印加によって400Aから120Aと大幅に低減できた。縞の間隔は連続磁場印加の場合には、モールドオシレーションの周波数に対応した $S = v_s / f_{mold}$ の値2.3mmとなっているが、間欠磁場印加では、 \bar{I}_c が85A~200Aの範囲内において間欠印加周波数に対応する $S = v_s / f_{int}$ の値0.46mmとなっている。

連続磁場と間欠磁場の印加下における溶融ガリウムのメニスカス運動(メニスカス界面位置の変動)の測定結果をFig. 3に示す。縦軸の0点はモールドオシレーションを加えない場合の湯面位置を表わす。(a)は磁場を印加しない場合のもので、モールドオシレーションに伴う周期的なスパイク(\square 印で示す)が見られる。(b)は連続磁場を印加した場合のもので、磁気圧力によって波動の振幅が少し減少するもの

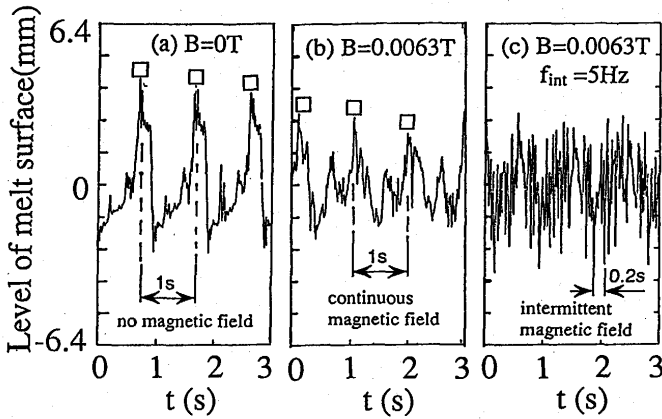


Fig. 3. Meniscus behavior under (a) no magnetic field, (b) continuous magnetic field and (c) intermittent magnetic field at $f_{mold}=1\text{Hz}$.

の、モールドオシレーションによるスパイクがはっきりと観察できる。(c)は5 Hzの間欠磁場を印加したもので、モールドオシレーションに伴うスパイクと間欠磁場によって生じるスパイクが混在し、両者の区別が難しくなっている。これにより、Fig. 2の(b)に示した連続磁場印加の場合には、铸片の表面にモールドオシレーションに対応する縞が生じ、間欠磁場印加の場合には、それが見られない理由はメニスカス運動の違いによるものと理解できる。

4. メニスカス形状の数値解析と直接観察

前節において間欠磁場印加は連続磁場印加より省エネルギー効果が著しいことがわかった。そこで本節では、竹内ら¹⁰⁾によって導出されたフラックス流路内の動圧の計算式を用いて、モールドオシレーションに伴うメニスカス形状の変化を調べた。具体的には、磁場分布とメニスカス形状を試行錯誤計算¹¹⁾で求める有限要素法で書かれたプログラムにフラックス流路内の動圧を導入する方法を採用した。

溶湯の流れを考慮しない場合、モールドオシレーションに伴うフラックス流路内の動圧 P_{mf} は次のように求められている¹⁰⁾。

$$P_{mf}(z) = \left\{ \rho_f g l_f + \frac{6\mu_f l_f (v_m - v_s)}{h(z) h_i} \right\} \frac{h_i - h(z)}{h_i - h_f} + P_i - \frac{h_i^2 - h(z)^2}{h_i^2 - h_f^2} \left\{ \left(\frac{h_f}{h(z)} \right)^2 (\rho_f g l_f + P_i - P_f) + \left(\frac{6\mu_f l_f}{h(z)^2} \right) \left(\frac{h_f}{h_i} \right) (v_m - v_s) \right\} \dots (3)$$

ここで、 l_f はフラックス流路の長さ、 v_m はモールドオシレーションの速度、 v_s は铸片の引き抜き速度、 h_i 、 h_f はそれぞれフラックス流路の入側、出側の幅、 P_i 、 P_f はそれぞれフラックス流路の入側、出側の圧力である。(3)式を用い、 $l_f = 7 \times 10^{-3}$ 文献¹⁰⁾を参考にして $h_i = 0.35\text{mm}$ 、 $h_f = 0.05\text{mm}$ と

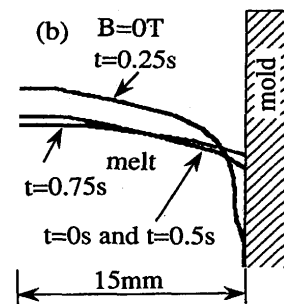
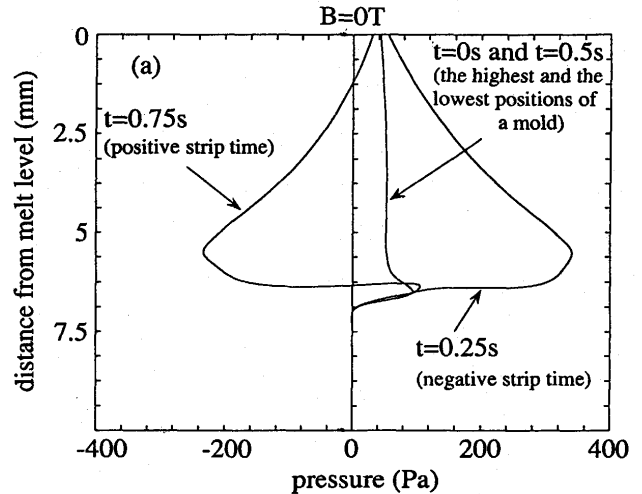


Fig. 4. Predicted pressure profiles in a flux channel (a) and variation of the meniscus shapes (b) without magnetic field at $f_{mold}=1\text{Hz}$.

し、錫の铸造条件から $P_i = 32\text{Pa}$ 、 $P_f = 88\text{Pa}$ 、 $l_f = 1\text{mm}$ とし、物性値 $\mu_f = 3.4 \times 10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $\rho_f = 0.82 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ を(3)式に代入して錫の連铸におけるフラックス流路の動圧を計算した。その一例をFig. 4(a)に示す。モールドオシレーションのネガティブストリップ期間の $t = 0.25\text{s}$ ではフラックス流路内の圧力は正值をとり、モールドの最高位置 ($t = 0\text{s}$)と最低位置 ($t = 0.5\text{s}$)での値より大きい。一方、ポジティブストリップ期間の $t = 0.75\text{s}$ では圧力は大部分の位置で負値となる。

各時刻におけるメニスカス形状は表面張力圧 P_h 、静圧 $\rho g z$ およびフラックスの動圧 P_{mf} の釣合によって求めることができる。

$$P_h + P_{mf} = \rho g z \dots (4)$$

ここで、 P_h は(5)式で表す表面張力に伴う圧力である。

$$P_h = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \dots (5)$$

なお、 γ は表面張力、 R_1 、 R_2 はメニスカスの主曲率半径である。溶融錫の表面張力を $\gamma = 0.56\text{N} \times 10^{-3}/\text{mm}$ として求めたモールドオシレーションに伴う溶融錫のメニスカス形状の経時変化をFig. 4(b)に示す。モールド降下速度の増大に伴い、フラックス流路内の圧力が増大し、メニスカスは溶

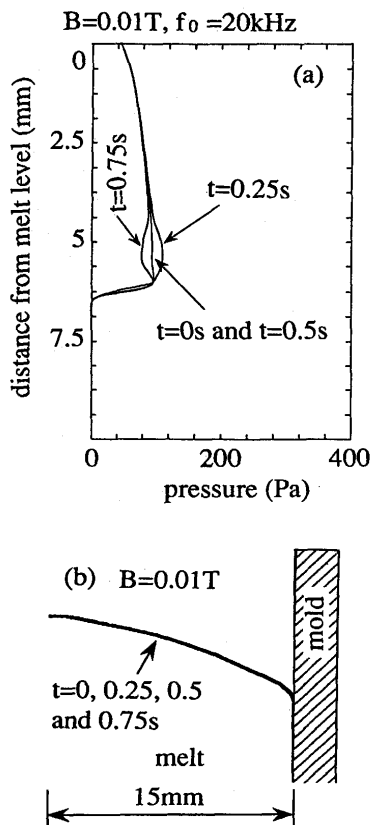


Fig. 5. Predicted pressure profiles in a flux channel (a) and the meniscus shapes (b) with magnetic field at $f_{mold}=1\text{Hz}$.

湯側に押され、 $t=0.25\text{s}$ で降下速度は最大となるため、動圧も最大となってメニスカス形状は最も大きく変化する。

次に、高周波磁場を印加した場合のフラックス流路内の動圧と溶融錫のメニスカス形状を求める。この場合、表面張力圧、静圧、フラックス流路内の動圧および磁気圧力 P_{em} の釣合によってメニスカス形状が決まる。

$$P_{em} + P_{mf} + P_n = \rho g z \dots\dots\dots (6)$$

0.01Tの連続磁場を印加した場合のフラックス流路内の圧力分布とメニスカス形状の計算結果をそれぞれFig. 5 (a), (b)に示す。連続磁場の印加によってフラックス流路が拡大されるため(計算では $h_i=8.8\text{mm}$, $h_f=0.05\text{mm}$ となった)、動圧に及ぼすモールド位置の影響は小さくなり、ポジティブストリップ期間中でも動圧は負値をとらない。そのため、モールドオシレーションの一周期間にわたるメニスカス形状変化は小さく(b)図ではほぼ同一形状となっている。

モールドオシレーションに伴い変化する溶融ガリウムのメニスカス形状をファイバースコープ付き拡大カメラを用いて側面から撮影し、Fig. 6 (a)に示した。磁場を印加しないときには(図のI, II)、モールドが上昇するときメニスカスの形状は平面状(図のI)となり、下降するとき放物形(図のII)となっている。一方、磁場を印加する場合には(図のIII, IV)、その形状は放物形を保ち、ほとんど変化しない。

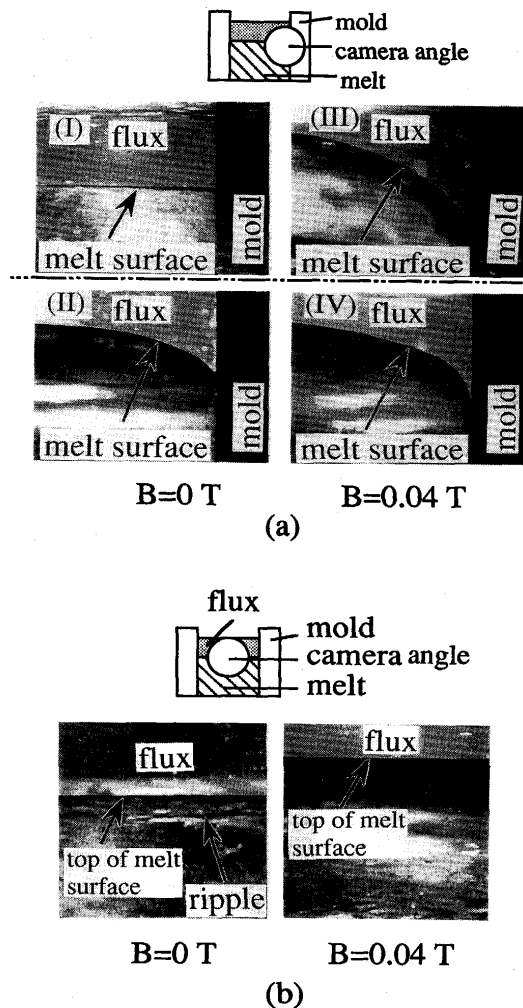


Fig. 6. The meniscus shapes of molten gallium (a) and the contacting state of melt and a mold (b) during mold oscillation with and without magnetic field.

モールドが最高位置に達した時点でのメニスカス部分とモールドとの接触状態を正面から撮影しFig. 6 (b)に示した。磁場を印加しない場合、接触部にはしわ模様(ripple)が見られるが、磁場を印加する場合には、それが見られない。これらの観察結果は上述の解析で示したように、磁場の印加によってフラックス流路が拡大し、モールドとの摩擦抵抗が減じたことによるものと解釈できる。

5. モールドオシレーションと磁場の同期印加

モールドオシレーションの1サイクルにおけるモールド位置をモールドが最高位置に到達する瞬間を0rad.($=2\pi$ rad.)としてFig. 7に示す。1サイクル中に次の2期間(AとB)を選び、それぞれの期間にのみ磁場を印加し、モールドオシレーションと磁場の印加の同期を試みた。期間Aはモールドが最高位置(0 rad.)を含む($3\pi/2$)rad.から($2\pi/9$)rad.の期間、期間Bはモールドが最低位置(π rad.)を含む($\pi/2$)rad.から($7\pi/6$)rad.である。錫の連铸実験から求めた先節の計

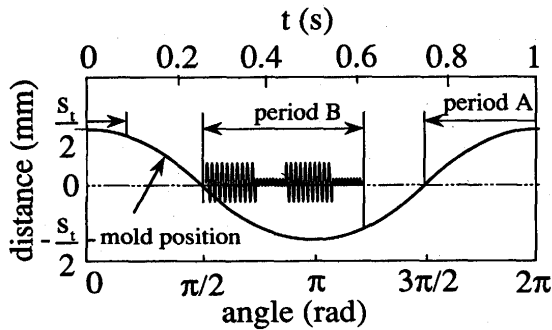
算条件と磁場印加条件 ($f_{int}=5\text{Hz}$, $r_d=100\%$) に基づいてメニスカス形状の経時変化を計算し, Fig. 8 に示す。この計算結果を見る限り, 期間Bに磁場印加を行った場合の方がメニスカス形状の変形量は小さくなっている。

$B=0.0097\text{T}$, $f_{int}=5\text{Hz}$, $r_d=30\%$ の条件の下, 先に定めた期間AとBで磁場を同期印加した場合の溶融ガリウムのメニスカス部の湯面変動をFig. 9 に示す。両面の左側には磁場を印加せず, モールドオシレーションのみによる湯面変動を□印で示した。期間Aに磁場を印加した場合には, 磁場を印加しない場合と比較してメニスカス波動の振幅が増大している。一方, 期間Bのものは磁場の印加によりメニスカス波動の最高位置が抑制されている。この結果から, 期間Bの場合には, 印加磁場がモールドオシレーションに伴うメニ

スカスの運動を抑制するものと推察できる。

$B=0.0097\text{T}$, $f_{int}=5\text{Hz}$, $r_d=30\%$ の条件で鑄造した錫鑄片の外観写真をFig.10に示す。期間Aを選択した場合, 鑄片表面にオシレーションマークの縞が比較的明瞭に見えるが, 期間Bを選択した場合には, オシレーションマークは不鮮明になり, 不規則な細かい縞のみが認められる。

種々の磁場印加方法で鑄造した鑄片の表面粗度と印加電流の関係をFig.11に示す。■印は磁場を印加しないもので, 一連の実験で得られた鑄片の表面粗度の基準値, □は磁場を連続印加したもの, △は間欠印加したもの, ●は期間Aで同期印加したもの, ○は期間Bで同期印加したものを表わす。破線で示したレベルの表面性状を得るのに要する平均の印加電流は連続印加(400A), 間欠印加(120A), 期間Bの同期印加(40A)の順に大幅に減少することがわかる。



6. 結言

溶鋼のモデル系として溶融ガリウムを用いてメニスカス挙動に及ぼす連続磁場印加, 間欠磁場印加およびモールド運動との同期印加の影響を調べた。また, 磁気圧力を考慮したフラックス流路内の圧力分布の計算式を磁気圧力からメニスカス形状を算出するプログラムに組み込み, 磁場印加がもたらすメニスカス形状の変化を算出した。さらに, 種々の磁場印加方法が鑄片の表面性状改善に及ぼす効果を明らかにするため, 溶鋼のモデル系として溶融錫を用いた

Fig. 7. The change of mold position and the periods A and B where intermittent magnetic field is imposed in a cycle of mold oscillation.

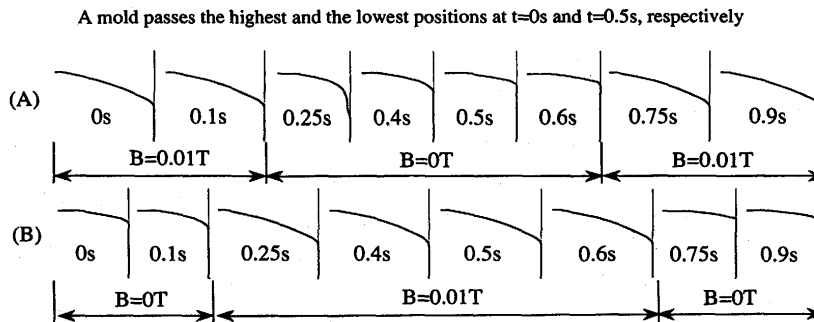


Fig. 8. Calculated meniscus shapes in a cycle of mold oscillation with magnetic field in the periods (A) and (B).

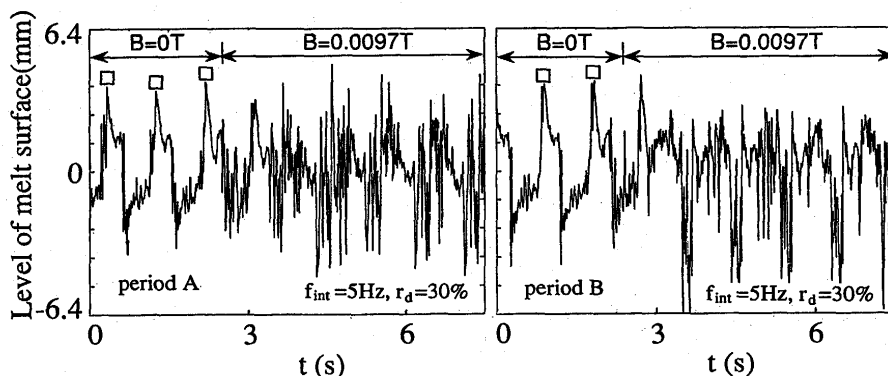


Fig. 9. Appearances of meniscus motion in the period A and the period B.

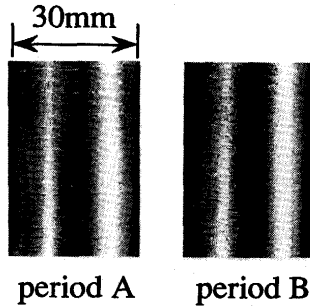


Fig. 10. Surface aspect of cast billets with synchronizing a magnetic field imposition with the period A or B under the conditions of $r_d=30\%$, $B=0.0097T$, $f_{int}=5Hz$.

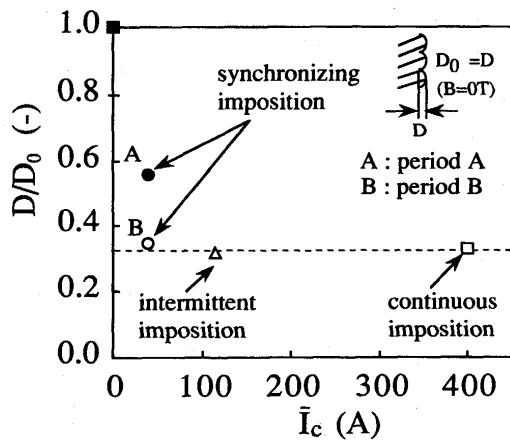


Fig. 11. Comparison of surface roughness of cast tin in different modes of imposing magnetic field.

鑄造実験を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) 磁場の印加はフラックス流路を拡大するため、モールドオシレーションの一周期にわたるメニスカス形状の変化を抑制する。

(2) 間欠磁場印加はモールドオシレーションが引き起こす表面波動をより効果的に抑制する。

(3) 間欠磁場をモールドオシレーションの最低位置を含む期間に同期印加した場合に、表面性状の優れた鑄片が得られた。

(4) 同一の表面性状を得るに要する平均の印加電流は連続印加、間欠印加、同期印加の順に大幅に低減できる。

本研究の一部は日本鉄鋼協会の鉄鋼研究振興資金および

文部省科学研究費補助金(課題番号:045551627)で行ったことを記し、謝意を表します。また、新日本製鐵(株)プロセス技術研究所の竹内栄一氏と藤健彦氏から有益なご助言を頂きました。ここに、併せてお礼申し上げます。

記号

- B : コイル中に空のモールドを挿入し、その中心で測定した磁束密度(T)
- B_{max}, B_{min} : 間欠磁場の一周期中における磁束密度の最大値と最小値(T)
- f_o : 高周波磁場の周波数(Hz)
- f_{int} : 間欠磁場印加周波数(Hz)
- f_{mold} : モールドオシレーションの周波数(Hz)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h_i, h_f : フラックス流路の入側, 出側の幅 (mm)
- i : 高周波電流の瞬時値(A)
- I_c : コイル電流の実効値(A)
- \bar{I}_c : コイル電流の実効値の平均値(A)
- l_f : フラックス流路の長さ (mm)
- P_i, P_f : フラックス流路の入側, 出側の圧力 (Pa)
- P_{em} : 磁気圧力 (Pa)
- P_h : 表面張力による圧力 (Pa)
- P_{mf} : フラックスの動圧 (Pa)
- r_d : 間欠磁場印加の一周期 T_{int} 中 B_{max} を印加している割合 (%)
- R_1, R_2 : メニスカスの主曲率半径 (mm)
- t : 時間 (s)
- T_o : 高周波磁場の周期 (s)
- T_{int} : 間欠磁場印加の周期 (s)
- τ : 間欠磁場印加の一周期 T_{int} 中 B_{max} を印加している時間 (s)
- v_m : モールドオシレーションの速度 (mm/s)
- v_s : 鑄片の引き抜き速度 (mm/s)
- z : 縦方向の距離 (mm)
- γ : 表面張力 (N/mm)
- μ_f : フラックスの粘度 ($Pa \cdot s$)
- ρ_f, ρ : フラックス, 錫の密度 (kg/m^3)

文献

- 1) 浅井滋生: 第129・130回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1989), 51.
- 2) 驚見郁宏, 佐々健介, 浅井滋生: 鉄と鋼, 78 (1992), 447.
- 3) 田中 努, 安元邦夫: 材料とプロセス, 5 (1992), 983.
- 4) 大迫隆志, 中田正之, 小松政美: 材料とプロセス, 5 (1992), 984.
- 5) 瀬々昌文, 原田 寛, 藤 健彦, 竹内栄一, 谷 雅弘: 材料とプロセス, 5 (1992), 1229.
- 6) 森下雅史, 中田 等, 綾田研三, 小山伸二, 池永 智, 近藤哲也: 材料とプロセス, 5 (1992), 200.
- 7) 佐々健介, 李 廷学, 浅井滋生: 鉄と鋼, 79 (1993), 1075.
- 8) 李 廷学, 佐々健介, 浅井滋生: 鉄と鋼, 79 (1993), 1260.
- 9) T.Li, S.Nagaya, K.Sassa and S.Asai: Metall. Trans., 26B (1995), 353.
- 10) E.Takeuchi and J.K.Brimacombe: Metall. Trans., 15B (1984), 493.
- 11) 河瀬順洋, 村井由宏, 林 典史: 電子情報通信学会論文誌D-2, (1989), 271.