

間欠型高周波磁場がもたらす連铸オシレーションの代替機能

周 月明*・佐々 健介*²・浅井 滋生*²

Substitute Function for Mold Oscillation Replaced by Imposition of an Intermittent Alternating Magnetic Field in a Continuous Caster

Yueming ZHOU, Kensuke SASSA and Shigeo ASAI

Synopsis : In order to develop a mold oscillation-less continuous casting process, i.e. to replace the mold oscillation by an intermittent alternating magnetic field in a continuous caster, a model experimental work has been conducted using molten tin and gallium with low melting point, densities of which are as large as molten steel. The behavior of the mold flux penetrating into a flux channel between the molten metal and the mold and the process forming oscillation marks due to the mold oscillation were visualized. It was found that mold flux can penetrate periodically under the imposition of the intermittent alternating magnetic field even if without mold oscillation. The measured penetration depth of the mold flux agrees well with model predictions. Finally, the molten tin was continuously cast in a cold crucible type copper mold under the imposition of an intermittent alternating magnetic field instead of mold oscillation. It is noticed that molten tin can be successfully cast with the imposition of the magnetic field, but can not without it.

Key words : oscillation mark; continuous casting; mold oscillation; intermittent alternating magnetic field; electromagnetic processing of materials.

1. 緒言

鋼の連続铸造法は鉄鋼業における重要なプロセスとして、省エネルギー、高生産性、材質均一化および自動化等をもたらしてきた¹⁾。最近、このプロセスに電磁場を導入し、鑄片の介在物の低減²⁾、表面性状の改善が図られるようになってきている³⁻⁵⁾。鋼の連続铸造においてはモールド・フラックス使用とモールド・オシレーションは不可欠となっている。モールド・フラックスの主要な役割には⁶⁾、(1) 溶鋼表面酸化防止と保温、(2) 鑄型-鑄片間の潤滑(鑄片のモールド壁への焼き付き防止)、(3) 鑄型-鑄片間の抜熱速度抑制、(4) 浮上介在物の吸収等が挙げられている。これらフラックスの役割を円滑に行なわせるためにはフラックスの均一な流入を確保し、潤滑を安定化させる必要がある。その手段として、鑄型を振動させるモールド・オシレーションは鋼の連铸において必須の技術となっている⁷⁾。そして、オシレーションマークの形成理由はモールドと鑄片との間に強制的に流入・流出するフラックスの動圧変化に起因すると考えられている⁸⁾。

いま、モールドと鑄片の界面へのフラックスの浸入が他の何らかの方法により円滑に行うことができるなら、モールド・オシレーションを必要としない(モールド・オシレーションレス)連続铸造が実現可能と考えられる。著者等^{9,10)}はこれまで連続高周波磁場印加あるいは間欠型高周

波磁場印加のモデル実験を通じて、フラックスのメニスカスへの浸入が円滑になることを確かめてきた。ここで言う浸入は一般的に言われる凝固シェルと鑄型壁間の間隙へのフラックス流入とは異なる概念ではあるが、浸入と流入との間には何らかの関係が存在する可能性がある。したがって、これら一連の実験から、フラックス浸入がフラックス流入に結び付くならば、電磁場印加によるオシレーションレス連続铸造法の開発の可能性が予期される。

そこで、本研究では、鋼とほぼ密度の等しい錫を用いる連続铸造のモデル実験系を構築し、フラックス浸入・排出挙動およびオシレーションマーク形成過程の直接観察を行い、常温で溶融状態を保つガリウムを用いてフラックス浸入深さを詳細に調べた。また、理論解析によって、フラックスの浸入深さを算出し、実験結果の理解の一助とした。最後に、得られた知見を基に、間欠型高周波磁場がもたらす連铸オシレーションの代替機能について検討を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 鑄造実験

実験装置の概略図をFig. 1に示す。(a)は直接観察に用いた装置の概略図である。水冷装置を具備した透明シリカモールド(内径30mm)の上に溶湯炉を設置し、浸漬ノズルを介してモールド内へ溶融錫を注湯し、ダミーバーに

平成10年11月2日受付 平成11年2月22日受理 (Received on Nov. 2, 1998; Accepted on Feb. 22, 1999)

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

* 2 名古屋大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-8603)

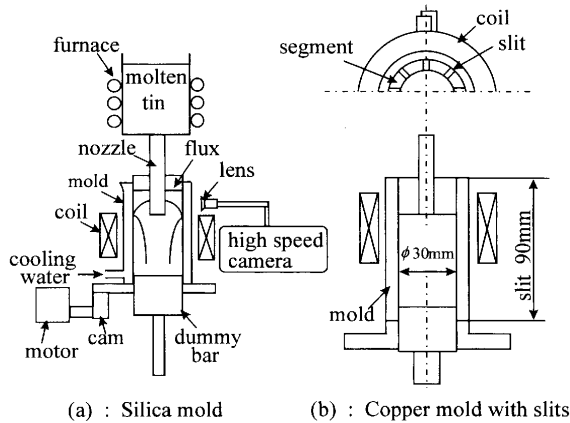


Fig. 1. Experimental apparatus.

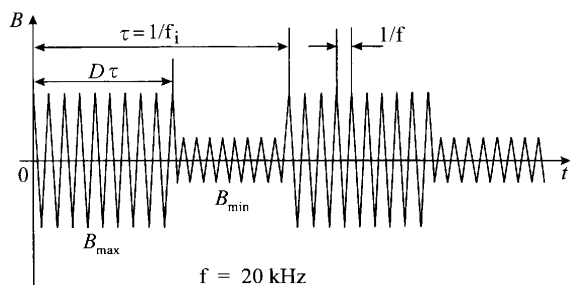


Fig. 2. Wave pattern of intermittent high frequency magnetic field.

よって鋳片を下方へ引き抜いた。注湯と同時にフラックスを添加し、初期凝固界面近傍を高速カメラで撮影して、オシレーションマークの形成過程およびフラックスの浸入・排出挙動を直接観察した。(b)は、モールド・オシレーションレス連続鋳造を試みたコールド・クルーシブル型の銅製モールドの模式図である。シリカモールドを用いる際には、モールド・オシレーションを行なわなくても錫の連続鋳造は可能であった。これはシリカモールド表面の平滑性、熱伝導性に由来すると考えられるが、ここではこの問題には深く立ち入らないことにして、オシレーションレスの連続鋳造を磁場印加の有・無の下で試みた。

2.2 間欠型高周波磁場の波形

間欠型高周波磁場の波形をFig. 2に示す。本実験系での搬送波の周波数は約20 kHzで、間欠周波数 f_i を1~15 Hzの間で変化させた。なお、最大磁束密度 B_{max} $7.0 \times 10^{-3} T \sim 1.5 \times 10^{-2} T$ とし、いずれの場合にも最小磁束密度 B_{min} は $4.0 \times 10^{-3} T$ とした。デュティD(間欠の一周期中の最大磁場印加の割合)は0.5とした。

他の実験条件をまとめてTable 1に示す。

3. 結果および考察

3.1 オシレーションマークの形成過程の直接観察

シリコンオイルにジンクステライトを添加して着色したフラックスを用いてオシレーションマークの形成過程を可

Table 1. Experimental conditions.

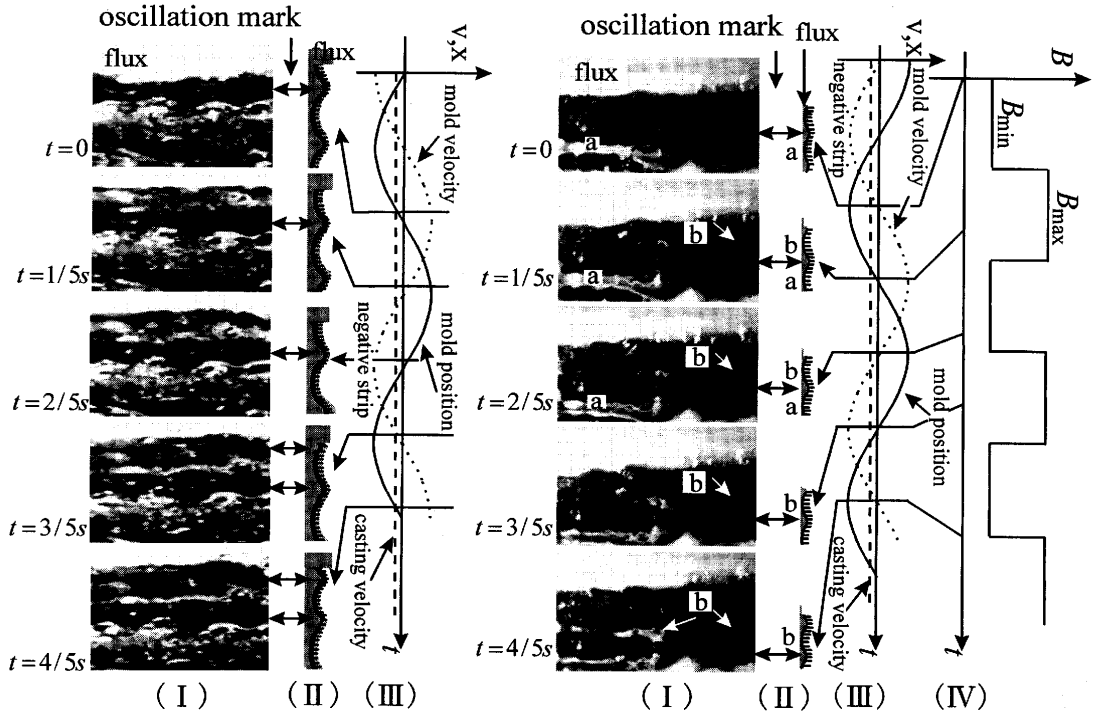
molten metal	Sn (for continuous casting) Ga (for measurement of penetration depth of mold flux)
melt density and melting temperature	Sn: 7200 kg/m^3 , 543K Ga: 6100 kg/m^3 , 304K
mold	silica glass, copper mold with slits
mold flux	silicon oil, zinc stearate
casting speed	2.3mm/sec (for continuous casting) 0 mm/sec (for measurement of penetration depth of mold flux)
mold oscillation	stroke 6 mm frequency ($f_{mold} = 1 \text{ Hz}$)

視化した。磁場を印加しないで、正弦波のモールド・オシレーションのみを行った場合の経時変化をFig. 3(A)に示す。図中の(I)は高速カメラで撮った写真を、その写真から推察した表面状態の模式図を(II)に、モールドの移動位置と速度を(III)に示す。凝固シェルの形成開始点を時間 $t=0$ としているが、鋳片が下方へ移動すると共に、凝固シェルが発達していく様子が認められる。また、ネガティブストリップ期間中の $t=3/5 \text{ s}$ では、新しいオシレーションマークの形成(開始)が見られる。

モールド・オシレーションと共に、 $f_i=3 \text{ Hz}$, $B=7.0 \times 10^{-3} T$, $D=0.5$ の間欠型高周波磁場を印加したときのオシレーションマークの形成過程をFig. 3(B)に示す。写真中のaとbはオシレーションマークの山の部分で、a, bの順に形成されたことを示す。図より、 $t=1/5 \text{ s}$ のオシレーションマークbに注目するとモールドと鋳片が下方へ移動するとき、凝固シェル(b)の生成が見られ、時間と共に完全なオシレーションマークへと発達して行くことがわかる。間欠型高周波磁場印加とモールド・オシレーションを共に実施することにより、オシレーションマーク形成過程(B)はやや不明瞭(Fig. 3(A)に比較して)となっている。磁場を印加しない場合に得られた鋳片と磁場を印加した場合に得られた鋳片の表面写真をそれぞれFig. 4(a), (b)に示す。磁場を印加しない場合のオシレーションマーク深さ平均 $2.68 \times 10^{-2} \text{ mm}$ であったが、磁場を印加した場合には $9.20 \times 10^{-3} \text{ mm}$ となり、顕著な改善が見られた。

3.2 フラックスの浸入、排出挙動の観察

溶湯金属として錫を用い、モールド・オシレーションを加えない状態で、間欠型高周波磁場 $f_i=3 \text{ Hz}$, $B=1.0 \times 10^{-2} T$, $D=0.5$ を印加したときのフラックス(シリコンオイル)のメニスカスの凹への浸入・排出挙動を直接観察した。その結果をFig. 5に示す。 $t=0$ は B_{min} の状況下であるが、Fig. 5(a)に矢印で示すように少量のフラックスの浸入が見られた。 $t=0.05 \text{ s}$ では、磁場強さ B_{max} が印加された直後であり、 $t=0$ の写真と比較して溶湯が盛り上がり、フラックスの浸入速度が増加した。 $t=0.15 \text{ s}$ では、引き続き磁場強さ B_{max} が加わった状態で、フラックスの浸入速度は最大となった。次に、 $t=0.20 \text{ s}$ で、 B_{max} が切れると、フ



(A) : $B = 0$ (B) : $f_i = 3\text{Hz}, B = 7.0 \times 10^{-3}\text{T}, D = 0.5$

- (I) : surface aspects of oscillation marks taken by high speed camera (shutter speed : 1/500s , frame numbers :400f/s)
- (II) : estimated views of oscillation mark forming during the continuous casting
- (III) : the change of mold position and mold velocity
- (IV) : pattern of intermittent alternating magnetic field

Fig. 3. Direct observation of the process forming oscillation marks in the continuous casting mold with oscillation.

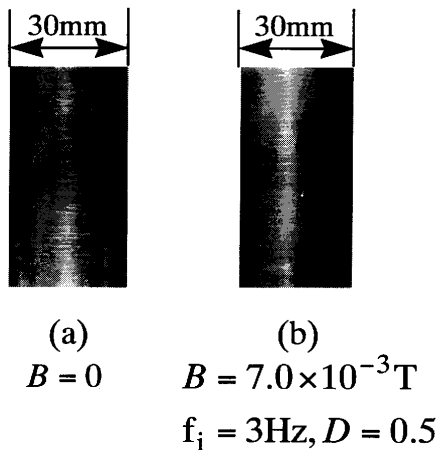


Fig. 4. Surface aspect of cast billets with mold oscillation (a) without and (b) with magnetic field.

ラックスは瞬間的にチャンネルから排出された。以上の観察から、間欠型高周波磁場の印加によって、モールド・フラックスを周期的に浸入・排出させ得ることがわかった。

3・3 フラックスの浸入深さ

3・3・1 理論解析

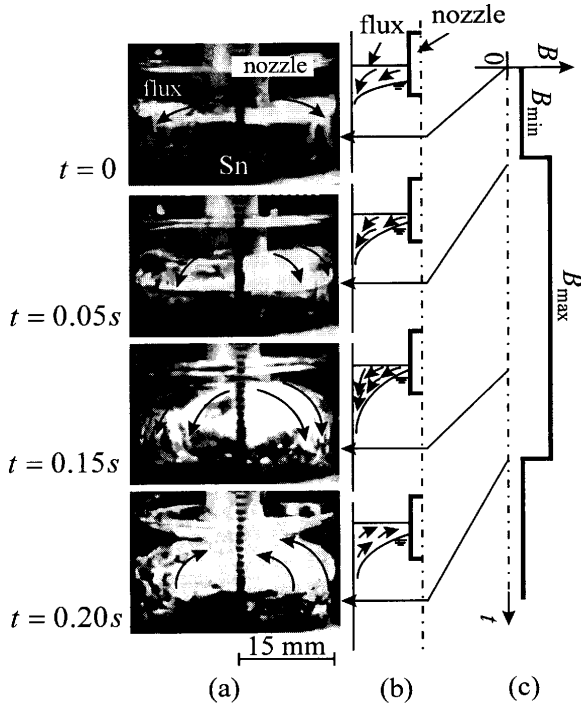
間欠型高周波磁場印加によって生ずる溶湯の運動を Fig. 6(a) に示す。それを Fig. 6(b) に示す模式図のようにモデル化した。湯面形状を円錐形（高さ h 、斜面長さ l で周期運動する）と仮定する。周期的に変化する外力によって生ずる強制振動の方程式は (1) 式となる¹¹⁾。

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_r^2 x = F \cos \omega_i t \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 γ : 減衰係数、 ω_r : 系の固有振動数、 ω_i : 間欠型高周波磁場の間欠の角周波数、 F は間欠型高周波磁場印加により生ずる外力項の振幅で、(2) 式で表される。

$$F = \frac{p_m S_p}{V(\rho_m - \rho_f)} = \frac{3B_{z0}^2 l}{2\mu R h(\rho_m - \rho_f)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 P_m : 磁気圧 ($= B_{z0}^2 / 2\mu$)、 V : 盛り上がり高さを h とする円錐形に仮定した溶湯の体積 ($= \frac{1}{3} \pi R^2 h$)、 S_p : 力が作用する面積 ($= \pi R l$)、 R : モールドの半径、 ρ_m, ρ_f : 溶湯とフラッ



$f_i = 3\text{Hz}, B = 1.0 \times 10^{-2} \text{T}, D = 0.5$
 (a) : photographs of the meniscus shapes under the imposition of an intermittent alternating magnetic field, taken by a high speed camera (shutter speed : 1/500s, frame numbers : 400f/s)
 (b) : image of mold flux behavior during the continuous casting
 (c) : pattern of intermittent alternating magnetic field

Fig. 5. Direct observation of penetration behavior of mold flux at meniscus with the intermittent alternating magnetic field instead of mold oscillation.

クスの密度である。なお、間欠型高周波磁場を印加した場合、溶湯錐はフラックス中に没しているとするとフラックスによる浮力が働き、溶湯錐の質量が下がる。これが(2)式で $(\rho_m - \rho_f)$ の項が現れた理由である。

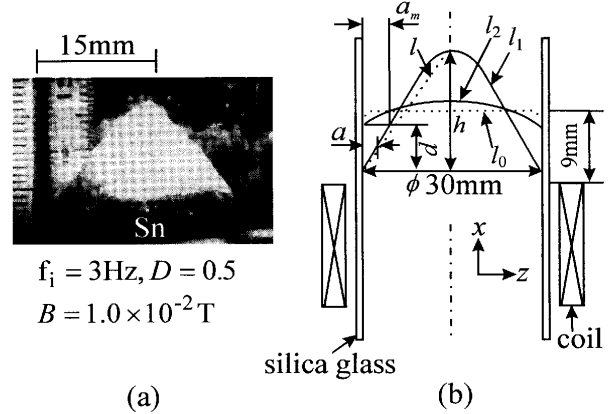
(1) 式の解は(3)式で表される。

$$x = a \cos(\omega_i t + \varphi) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 φ は溶湯運動と外力との位相差である。 a は溶湯運動の平均振幅で、(4)式で表される。

$$a = \frac{F}{\sqrt{(\omega_r^2 - \omega_i^2)^2 + 4\gamma^2 \omega_i^2}} = \frac{3B_{z0}^2 l}{2\mu R h (\rho_m - \rho_f) \sqrt{(\omega_r^2 - \omega_i^2)^2 + 4\gamma^2 \omega_i^2}} \dots\dots\dots (4)$$

一方、フラックス浸入深さ d の範囲において溶湯運動の平均振幅を a 、最大振幅を a_m とするとメニスカス形状を直線で近似すれば $a_m \approx 2a$ となる。また、間欠周波数 f_i が変わっても円錐形の斜面長さ l と高さ h の比は一定 ($l/h = k_1$) とし、



$f_i = 3\text{Hz}, D = 0.5$
 $B = 1.0 \times 10^{-2} \text{T}$
 (a) (b)
 d : penetration depth of mold flux
 l_0 : melt level without magnetic field
 l_1 : highest melt level
 l_2 : lowest melt level

Fig. 6. The observed view (a) and model (b) of metal motion caused by intermittent alternating magnetic field.

d が a_m に比例する ($d/a_m = k_2$) と仮定すると、 d は(5)式で表される。

$$d = k_2 a_m \approx \frac{3k_1 k_2 B_{z0}^2}{\mu R (\rho_m - \rho_f) \sqrt{(\omega_r^2 - \omega_i^2)^2 + 4\gamma^2 \omega_i^2}} \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式より、フラックス浸入深さ d は印加磁束密度を一定とした場合、間欠周波数 f_i ($\omega_i = 2\pi f_i$) が固有振動数 f_r ($\omega_r = 2\pi f_r$) と等しくなるまでは増加し、それを過ぎると減少することがわかる。また、間欠周波数 f_i を一定とした場合、 d は印加磁束密度 B_{z0} の2乗で増加することが予想できる。

一方、(1) 式で $F=0$ と置くと、減衰振動の運動方程式の解は(6)式となる¹²⁾。

$$x = A_0 e^{-\gamma t} \cos \left(\omega_r \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma}{\omega_r} \right)^2} t + \varphi \right) \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式は振幅 A_0 が時間とともに $e^{-\gamma t}$ で振動しながら減衰することを表す。従って、1周期ごとの振幅を A_0, A_1, A_2, \dots とすると、 $A_0 = A, A_1 = Ae^{-\gamma T}, A_2 = Ae^{-2\gamma T}, \dots$ であるから、

$$\frac{A_0}{A_1} = \frac{A_1}{A_2} = \dots = e^{\gamma T} = \text{一定} \dots\dots\dots (7)$$

となる。実測した表面波動の減衰挙動より A_i ($i=0, 1, 2, \dots$) と減衰周期 T を求め、(7) 式に代入して、 γ の値を求めた。その一例を Fig. 7 に示す。また、高速度カメラを用いて、Fig. 6 のモデルに基づいて、定数 $k_1 (=l/h)$ と $k_2 (=d/a_m)$ を実測し、

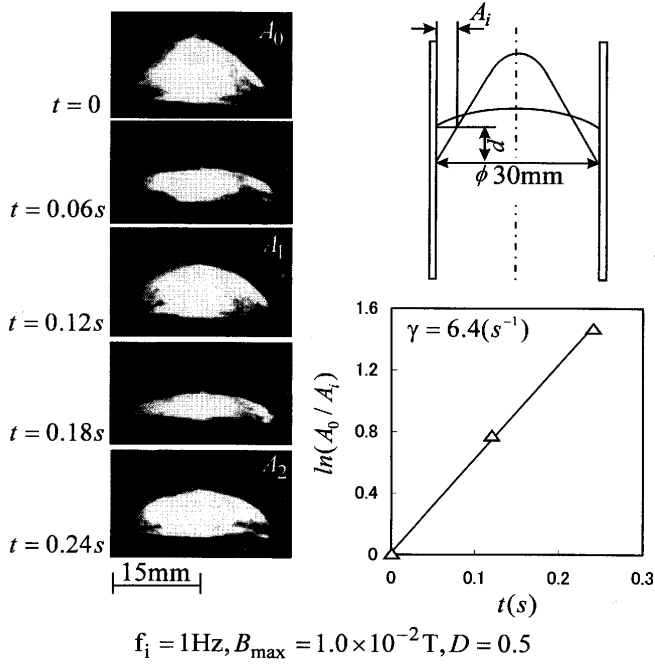
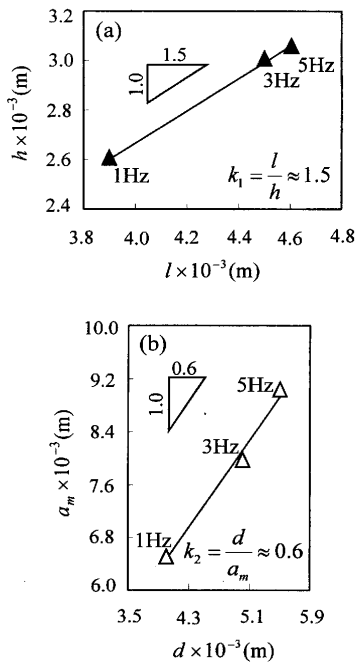


Fig. 7. Direct observation of damping oscillation behavior of meniscus.



$B_{\text{max}} = 1.0 \times 10^{-2}\text{T}, D = 0.5$

Fig. 8. Relationships between (a) l and h and (b) d and a_m .

Fig. 8に示した。溶湯の高さ h と最大振幅 a_m はそれぞれ l と d の増加に対して直線的に増加し、 $k_1 = 1.5$ と $k_2 = 0.6$ とほぼ一定となった。さらに、実験条件 ($\omega_r = 2\pi \times 7\text{Hz}$, $R = 0.015\text{m}$), ガリウムの物性値 ($\mu = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$, $\rho_m = 6100\text{kg/m}^3$) とフラックスの密度 ($\rho_f = 968\text{kg/m}^3$) および Fig. 7 から求めた減衰定数 $\gamma = 6.5(\text{s}^{-1})$ の数値を (5) 式に代入して得られる d の計算値と間欠周波数 f_i およびフラックスの浸入深さ

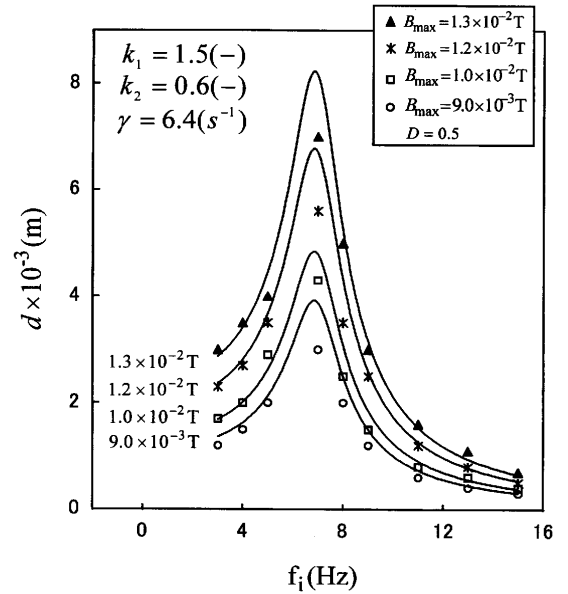


Fig. 9. Effect of intermittent frequency on penetration depth of mold flux.

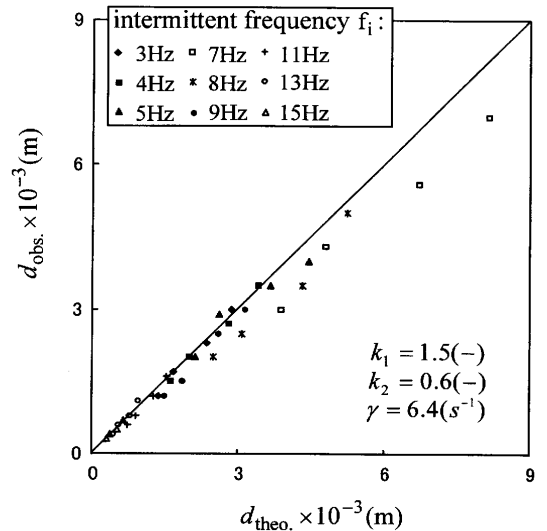
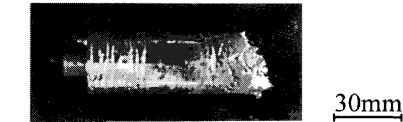


Fig. 10. Comparison between theoretical and observed values of penetration depth of mold flux.

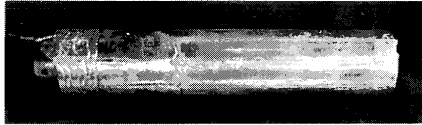
の測定結果を印加磁場強さ B_{max} をパラメーターにして Fig. 9 に示す。この図より、実験値と計算値はほぼ一致し、 $f_i = 7\text{Hz}$ で浸入深さが最大となることがわかる。次に、計算から求めたフラックスの浸入深さ d と種々の実験条件下での実測値との比較を Fig. 10 に示した。これより、実測値と計算値は良い一致をしていることがわかる。

4. モールド・オシレーションを行わない連続鋳造

コールド・クルシーブルタイプの銅製モールドを用いて、メタルとして溶融錫、フラックスとしてジंकステライトを用いて連続鋳造を行い。得られた鋳片の外観写真を



(a): without magnetic field



(b): with intermittent magnetic field

$$f_i = 1\text{Hz}, B = 1.0 \times 10^{-2}\text{T}, D = 0.5$$

Fig. 11. Surface aspect of cast billets under the condition without mold oscillation in the continuous caster.

Fig.11に示した。(a)は磁場印加をせず、モールド・オシレーションも行わないで铸造したもので、铸型と凝固シェルの中で局部的に潤滑不良が生じ、凝固シェルは铸型との摩擦抵抗によって破断した。一方、(b)はモールド・オシレーションは行わないが、 $f_i=1\text{Hz}$ 、 $B=1.0 \times 10^{-2}\text{T}$ 、 $D=0.5$ の間欠型高周波磁場を印加したもので破断することなく連続铸造できた。このモデル実験系に関する限り、間欠型高周波磁場の印加はモールド・オシレーションの機能を代替したことになる。

5. 結言

(1) 磁場の印加を行わないで、オシレーションを行った場合について、錫のオシレーションマーク形成過程を直接観察した。

(2) モールド・オシレーションと間欠型高周波磁場印加を共に行った場合、磁場を印加しないものに比較して、錫のオシレーションマークは軽微となることを可視化実験によって確認した。

(3) 液体ガリウムを用いたモデル系において、モールド・オシレーションに代わり間欠型高周波磁場を印加することで、メニスカス凹部へのモールド・フラックス（シリコンオイル）の周期的浸入・排出が確保できた。

(4) メタルとして溶融錫、フラックスとしてジンクステライトを用いたモデル実験系ではモールド・オシレーションの機能を間欠型高周波磁場印加で代替することができた。

(5) フラックス浸入深さを推算する数学的モデルを展

開し、モデルの妥当性をモデル実験(ガリウムとシリコンオイル系)によって確認した。

記号

a	: 間欠型高周波磁場印加時の溶湯運動の平均振幅値 (m)
a_m	: 間欠型高周波磁場印加時の溶湯運動の最大振幅値 (m)
A_i	: 減衰振動の振幅 ($i=0, 1, 2, \dots$) (m)
B	: 磁束密度 (T)
B_{z0}	: 軸方向に作用する磁場の実効値 (T)
B_{\max}, B_{\min}	: 間欠型高周波磁場の最大、最小磁束密度 (T)
D	: 間欠型高周波磁場の一周期中 B_{\max} を印加している割合 (-)
d	: フラックス浸入深さ (m)
f	: 高周波磁場の周波数 (Hz)
f_i	: 間欠磁場印加周波数 (Hz)
f_{mold}	: 铸型振動の周波数 (Hz)
F	: 単位質量当たりの力 (N/kg)
h	: 溶湯の高さ (m)
k_1, k_2	: 定数 (-)
l	: 溶湯の斜面長さ (m)
l_0	: 無磁場の場合の湯面位置 (-)
l_1	: 間欠型磁場印加下のメニスカスの最高位置 (-)
l_2	: 間欠型磁場印加下のメニスカスの最低位置 (-)
p_m	: 磁気圧力 (Pa)
R	: モールドの半径 (m)
S_p	: 磁気圧力が作用する面積 (m^2)
t	: 時間 (s)
T	: 減衰振動周期 (s)
V	: 溶湯柱の体積 (m^3)
v	: モールド・オシレーション速度 (m/s)
x	: 軸方向距離 (m)
z	: 半径方向距離 (m)
ω_i	: 間欠型高周波磁場の間欠の角周波数 (rad/s)
ω_r	: 固有振動の角周波数 (rad/s)
γ	: 減衰係数 (s^{-1})
ρ_m, ρ_f	: 溶湯とフラックスの密度 (kg/m^3)
τ	: 間欠型高周波磁場印加の周期 (s)
ϕ	: 位相差 (rad)

文献

- 1) Y.Ito: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 1667.
- 2) Y.Takanaka, K.Sassa, K.Iwai and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 1120.
- 3) I.Sumii, K.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 109.
- 4) T.Li, K.Sassa and S.Asai: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 410.
- 5) Y.-W.Cho, Y.-J.Oh, S.-H.Chung and J.-D.Shim: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 723.
- 6) わが国における鋼の連続铸造技術史、育成委員会連続铸造技術史分科会編、日本鉄鋼協会、東京、(1996)、564.
- 7) 渡部忠男：鋼の連続铸造法（第2版）、住友金属工業（株）総合技術研究所編、大阪、(1996)、488.
- 8) E.Takeuchi and J.K.Brimacombe: *Metall. Trans. B*, **15B** (1984), 493.
- 9) K.Sassa, T.Li and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 1075.
- 10) T.Li, K.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 197.
- 11) 長岡洋介：振動と波、裳華房、東京、(1992)、35.
- 12) 林 静男：基礎教養物理学、朝倉書店、東京、(1980)、88.