

オシレーションレス電磁鑄造における基礎パラメーターの評価

周 月明*・佐々 健介*²・浅井 滋生*²

Evaluation of Basic Parameters in a Mold Oscillationless Electromagnetic Casting

Yueming ZHOU, Kensuke SASSA and Shigeo ASAI

Synopsis : The penetration of a mold flux between a mold and a molten metal which is driven by a mechanical mold oscillation is indispensable for a continuous casting of steel. In this paper a new continuous casting process in which the function of mold oscillation is replaced by an electromagnetic force has been proposed. The basic parameters in the new process were evaluated in a model experimental work using a molten gallium and the penetration behavior of a mold flux was visualized by use of a high-speed video camera. The non-contacting distance caused at meniscus by the electromagnetic force and the consumption of the mold flux in a continuous casting of a molten tin were measured. It is found that the non-contacting distance which is formed by imposing an intermittent alternating magnetic field under no mechanical mold oscillation nearly agrees with the minimum stroke length of the mold oscillation which is required for the success of the continuous casting of a molten tin. Surface quality of cast billets was improved by increasing the consumption of the mold flux and by adjusting the intermittent frequency of the magnetic field to the optimum one existing near the intrinsic frequency of a molten pool.

Key words: oscillation mark; continuous casting; mold oscillation; surface quality of cast billets; intermittent alternating magnetic field; soft contacting solidification; electromagnetic processing of materials; steelmaking.

1. 緒言

鋼の連続鑄造における鑄型内潤滑に関してはモールド・フラックスの使用とモールド・オシレーションが不可欠であることが知られている。すなわち、鑄型と凝固シェル間で、局部的に潤滑不良が発生すると、凝固シェルは鑄型との摩擦抵抗によって破断し、ブレイクアウトに至る。従って、鑄型全周にわたったモールド・フラックスの均一流入の確保が重要である。

従来、鑄型-鑄片間へのモールド・フラックスの流入機構についてはさまざまな検討が行われてきた¹⁻⁴⁾。特に、近年このプロセスに電磁場を導入し、モールド外側より電磁気力を印加する軟接触凝固プロセスが提案された⁵⁾。ここでは電磁気力が鑄片-鑄型間へのモールド・フラックスの流入チャンネルの拡大をもたらし、安定鑄造がなされると考えられてきた^{6,7)}。その中で、李ら^{8,9)}は理論解析とモデル実験における観察の両面から間欠型高周波磁場印加によって、モールド・フラックスの流路が拡大できること、竹内ら¹⁰⁾はモールドとの摩擦抵抗が低下することを確認した。それらの結果を踏えて、著者等¹¹⁾はモールド・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により、モールド・フラックスの周期的浸入・排出が確保できることを明らかにした。その結果、モールド・オシレー

ション機能を間欠型高周波磁場印加で代替できると推論した。

本研究では、このモールド・オシレーションレス電磁鑄造における基礎パラメーターを得るために、間欠型高周波磁場印加時のメニスカス挙動の直接観察を行った。また、間欠型高周波磁場を用いて、モールド・オシレーションレスの下で溶融錫の電磁鑄造実験を行い、フラックスの消費量に及ぼす間欠周波数および印加磁束密度の影響について調査した。さらに、間欠型高周波磁場印加の下で、コールド・クルシブルタイプの銅製モールドを用いた錫のオシレーションレス電磁鑄造実験を行い、鑄片の表面性状とフラックス消費量の関連について検討をした。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略図をFig. 1に示す。常温で溶融状態を保つガリウム（密度6120 kg/m³）を満たした容器を内径30 mmのコールド・クルシブルタイプの銅製モールド内に設置した。モールドの外側には4ターンコイルを配し、間欠型高周波磁場を印加した。その時、溶融金属とモールドとの非接触状態を把握するために、長さ30 mm、直径2 mmのガラス製の定規を液面近傍のモールド内側に貼り付け、上部から高速度ビデオでメニスカス挙動を撮影・記録

平成12年1月5日受付 平成12年4月3日受理 (Received on Jan 5, 2000; Accepted on Apr. 3, 2000)

* 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)

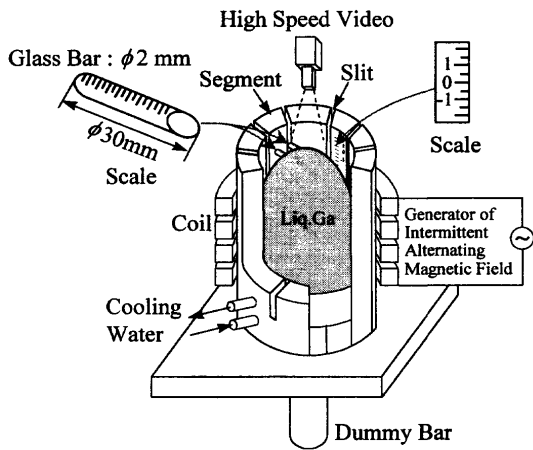


Fig. 1. Schematic view of experimental apparatus.

Table 1. Experimental condition.

molten metal		Sn ($T_m = 543\text{K}, \rho = 7200\text{kg/m}^3$) Ga ($T_m = 304\text{K}, \rho = 6100\text{kg/m}^3$)
mold	graphite mold with slits	for measuring the consumption of mold flux
	copper mold with slits	for continuous casting without mold oscillation
mold flux		silicon oil
casting speed		2.3mm/s
mold oscillation		stroke 6 mm frequency ($f_m = 1\text{Hz}$)
casting time		30s
intermittent high frequency magnetic field		$f = 20\text{kHz}, f_i = 1, 3, 5, 7, 9, 11\text{Hz}$ $B_{\max} = 0.007\text{T} \sim 0.012\text{T}$ $B_{\min} = 0.004\text{T}$ $D = 0.5$

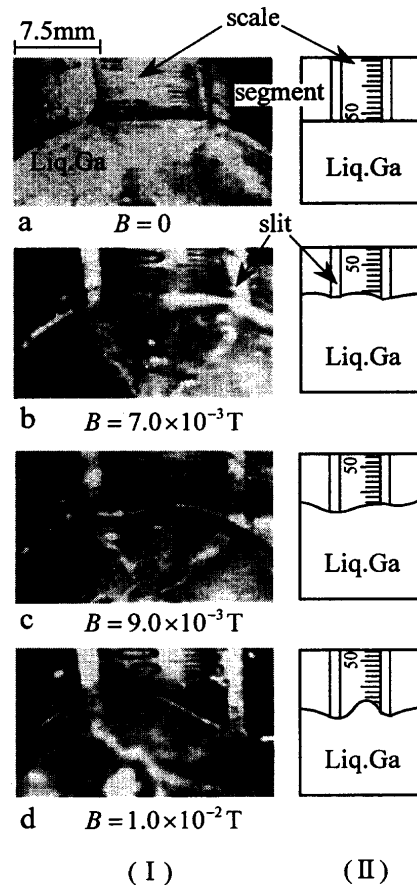
した。間欠型高周波磁場の搬送波周波数は 30 kHz, 間欠周波数は 3 Hz とし, 最大磁束密度 B_{\max} を 0.007 T ~ 0.012 T の間で変化させ, 最小磁束密度 B_{\min} は 0.004 T で一定とした。

溶融錫の電磁鋳造に用いた実験装置は前報¹¹⁾と同じである。まず, 黒鉛モールド上部に設置した炉で錫を融解した後, 浸漬ノズルを通してモールド内へ溶融錫を注湯し, ダミーバーを介して鑄片を下方へ引き抜いた。鑄造開始時に一定量 (約 5 g) のシリコンオイルを溶湯上部に注入し, 鑄造終了時に残存量を吸い取り紙で回収して, 紙の質量変化から連鑄期間中のフラックス消費量を求めた。モールド・オシレーションレス電磁鋳造実験には, コールド・クルシーブルタイプの銅製モールドを用いた。その実験条件を Table 1 に示す。

3. 実験結果

3.1 メニスカス部の非接触距離と非接触幅の直接観察

間欠型交流磁場印加下における溶融ガリウムのメニスカス部の写真を Fig. 2 に示す。図中(I-a) の写真は磁場印加なし, すなわち, 静止の液面状態を示す。(I-b, c, d) の写真は, 間欠磁場を印加し, メニスカス部の溶湯とモールドとの非



(I) : Photographs of the meniscus shape taken at the moment with the maximum non-contacting distance by a high speed video (shutter speed : 1/1000s, frame number : 400f/s)
(II) : Sketches for measuring a non-contacting distance

Fig. 2. Direct observations of non-contacting distance caused by imposition of an intermittent magnetic field.

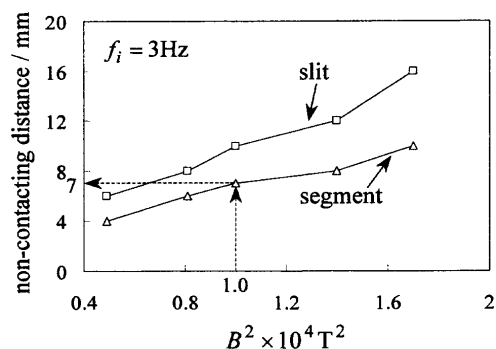


Fig. 3. Effect of magnetic flux density on non-contacting distance at the positions of a slit and a segment.

接触距離が最大となった瞬間を撮ったもので, 磁束密度の変化に伴って非接触距離の変わることがセグメント部に貼り付けたスケールによって読み取れる。写真から写し取ったメニスカス部の模式図を (II) に示した。また, 写真から求めた磁束密度に対する非接触距離の変化を Fig. 3 に示す。非接触距離は印加磁束密度 B の 2 乗に比例していることがわかる。これは溶湯静圧 ρgh と磁気圧 $B^2/2\mu$ が balan

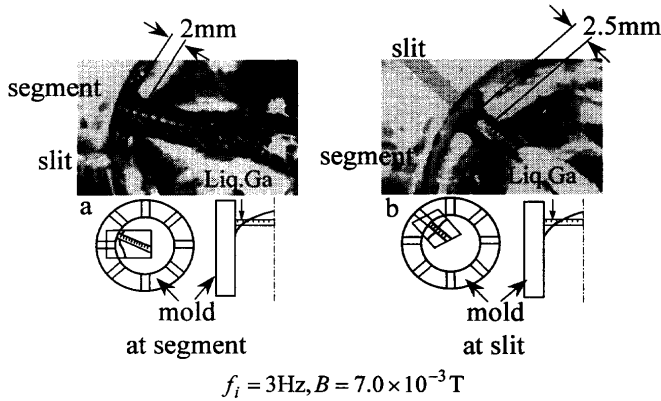


Fig. 4. Direct observations and their sketches of non-contacting width at meniscus under the imposition of an intermittent alternating magnetic field.

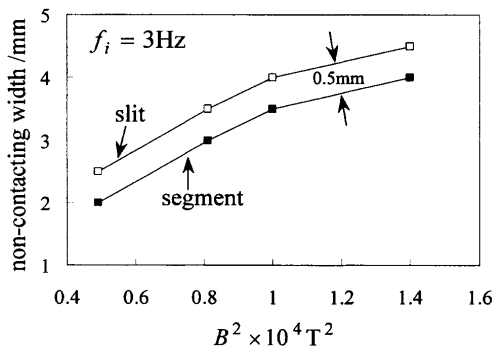


Fig. 5. Effect of magnetic flux density on non-contacting width at the positions of a slit and a segment.

スすると考えると理解できる。また、スリット部に対応する位置の方がセグメント部に対応する位置のものより大きいことが認められる。

次に、印加磁束密度を変えて静止湯面の高さにおける半径方向位置のモールドと溶湯との非接触幅を測定した。非接触幅の読み取りに用いた代表例を Fig. 4 に、観察エリアの模式図と共に示す。この写真から、 $f_i = 3 \text{ Hz}$ で、 $B = 7.10 \times 10^{-3} \text{ T}$ の場合の非接触幅はセグメント部で 2 mm、スリット部では 2.5 mm と読み取れる。このようにして測定した印加磁束密度と非接触幅の関係を Fig. 5 に示す。セグメント部およびスリット部のいずれにおいても非接触幅は印加磁束密度 B の 2 乗にほぼ比例している。また、非接触幅はスリット部の方がセグメント部より大きく、その差は本実験条件下では 0.5 mm とほぼ一定であった。

3.2 モールド・オシレーションレス電磁铸造時のフラックス消費量

連続铸造で使用されているモールド・フラックスの機能、すなわち、鋳型-凝固シェル間の潤滑を保つには、フラックスの均一流入が不可欠である。ここで、モールド・オシレーションレス電磁铸造における間欠型高周波磁場がフラックス消費量にどのような影響を与えるかを明確にしておく必要がある。まず、溶融錫の铸造実験で間欠型高周

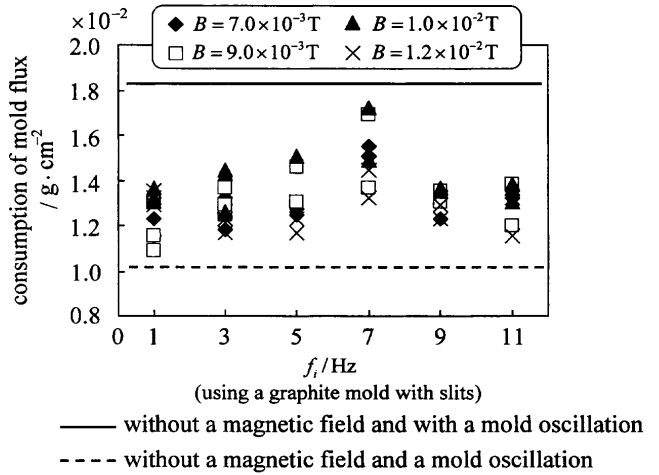


Fig. 6. Effect of intermittent frequencies on the consumption of mold flux.

波磁場印加時のフラックス消費量を測定したので、この消費量に及ぼす間欠周波数の関係を、印加磁束密度をパラメーターに取って Fig. 6 に示す。一方、深さ H 、半径 R の円筒容器内の液体表面に生成する波の共振周波数 f_{lm} は (1) 式で与えられる¹²⁾。

$$f_{lm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g\beta_{lm}}{R} \tanh\left(\frac{H\beta_{lm}}{R}\right)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 β_{lm} は 1 次の第一種ベッセル関数 $J_l(x)$ の微分が $(dJ_l(x)/dx=0)$ となる第 m 番目の根であり、 l, m は波動の方位角方向、半径方向のモードをそれぞれ表す。この式に本実験系の値を代入すると 7.9 Hz となり、先の実験¹¹⁾ によって観察された本実験系の共振周波数の 7 Hz に近い値となった。Fig. 6 を見ると、この共振周波数までは周波数の増大に伴ってフラックス消費量は微増するが、7 Hz を超えると、フラックス消費量は減少している。これはフラックスの浸入深さは印加磁束密度を一定とした場合、間欠周波数が共振周波数と等しくなるまで増加し、それを過ぎると減少するという先の理論解析結果¹¹⁾ と定性的に一致する。次に、間欠周波数が 9 Hz と 11 Hz の場合の結果を Fig. 6 より抜き出し、フラックス消費量と磁束密度の関係を求めて Fig. 7 に示す。9 Hz と 11 Hz では、フラックス消費量は印加磁束密度の大きさに関わりなくほぼ一定量が消費されている。これは間欠周波数が 9 Hz を超えると、鋳型-鋳片壁間へのモールド・フラックス浸入深さが浅くなるためと考えられ、このことは先の理論解析結果¹¹⁾ と一致する。また、Fig. 6, 7 に示すようにフラックス消費量は印加磁場なしで、モールド・オシレーションを行った場合 (実線) とモールド・オシレーションを行わなかった場合 (破線) の中間の値になっている。すなわち、オシレーションレス電磁铸造でのフラックス消費量は磁場を印加せずにモールド・オシレーションを行った (通常の連続铸造に当たる) 場合より

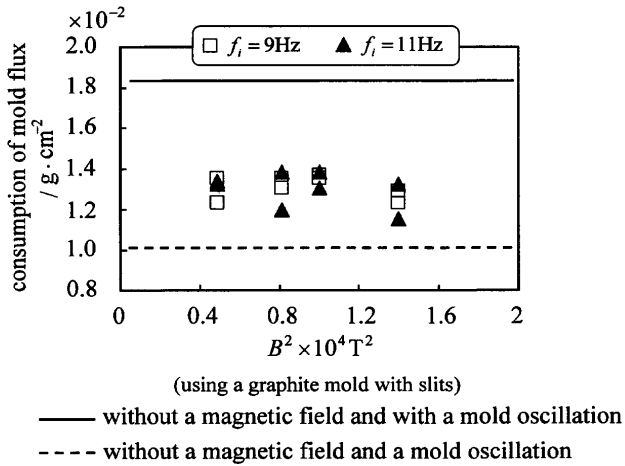


Fig. 7. Effect of magnetic flux density on the consumption of mold flux.

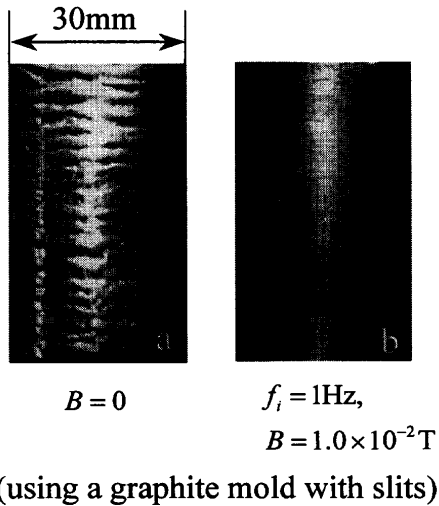


Fig. 8. Surface aspect of cast billets (a) with and (b) without a mold oscillation.

少なくなっている。これについては次節で検討する。

4. 考察

連続鋳造ではモールド・フラックスは潤滑剤として、一定量が消費されてないとブレイクアウトの発生に結びつく危険がある¹³⁾。Fig. 6, 7に示すように本実験条件下でのフラックス消費量は、モールド・オシレーションなしで、間欠交流磁場を印加した場合がモールド・オシレーションを行って、磁場印加無し（通常の連続鋳造）の場合より少ないことがわかった。この原因は磁場印加無しで、モールド・オシレーションを行った場合(Fig. 8-a)、磁場印加で、オシレーションを行わなかった場合(Fig. 8-b)に比べてオシレーションマークの発達著しく、一部のフラックスがオシレーションマークの谷の部分に補足されたためであると推察できる。

オシレーションレス電磁鋳造は磁束密度 $B = 1.0 \times 10^{-2} \text{T}$

Table 2. Summary of basic parameters in a continuous casting under the condition without a mold oscillation.

magnetic field basic parameters	no magnetic field	intermittent alternating magnetic field ($f_i = 3\text{Hz}$)			
		$B = 7.0 \times 10^{-3} \text{T}$	$B = 9.0 \times 10^{-3} \text{T}$	$B = 1.0 \times 10^{-2} \text{T}$	$B = 1.2 \times 10^{-2} \text{T}$
casting stability	unstable	stable	stable	stable	stable
consumption of mold flux $\times 10^2 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.02	1.28	1.29	1.38	1.22
non-contacting distance at slit /mm	0.5	6	8	10	12
non-contacting distance at seg. /mm	0.5	4	6	7	8
non-contacting width at slit /mm	0.5	2.5	3.5	4	4.5
non-contacting width at seg. /mm	0.5	2	3	3.5	4

を印加して初めて可能となったが、その時のセグメント部での非接触距離を Fig. 3 から読み取ると約 7mm となる。一方、磁気圧と静圧との関係は(2)式で表される⁵⁾。

$$P_m = \frac{B^2}{2\mu} = \rho gh \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ : 溶融金属の密度、 h : 非接触距離である。

非接触状態が磁気圧と静圧とのバランスの下に形成されるとすれば、同一の磁場を印加しているため、ガリウムと錫とが同じ静圧を示すことになる。したがって、 $\rho_{\text{Sn}}gh_{\text{Sn}} = \rho_{\text{Ga}}gh_{\text{Ga}}$ の関係が成立するので、Fig. 3 で求めた 7mm の値を錫の値に換算すると、 $h_{\text{Sn}} = 5.6 \text{mm}$ となる。一方、連続鋳造を安定して行うための必須条件は安定な初期凝固シユルの生成と潤滑剤としてのフラックスの流入確保である。本実験系でこの条件を満足させるにはオシレーションのストローク長として最低 6mm が必要であった⁹⁾。一方、本実験でオシレーションレス電磁鋳造するためには非接触距離をオシレーションのストローク長にほぼ等しい 5.9mm 以上とする必要があることがわかった。この事実は鋼の連続鋳造に不可欠なオシレーションによるフラックスの流入を電磁力で代替する際には同じフラックス流入条件を確保することが必要であることを物語っている。

種々の条件で、コールド・クルシーブルタイプの銅製モールドを用いたオシレーションレス電磁鋳造の可否と間欠周波数を 3Hz と一定にし、メニスカス部における非接触距離と非接触幅およびフラックス消費量をまとめて Table 2 に示す。この表よりオシレーションレス電磁鋳造はフラックスの添加によりいづれも鋳造可能であったことがわかる。一方、磁場印加なしでは表面は非常に粗いものの、鋳造可能であった理由はスリット部を通してフラックスの供給がなされたためと考えられる。オシレーションレス電磁鋳造で印加磁束密度を $1.0 \times 10^{-2} \text{T}$ と一定にし、間欠周波数を変えて得られた鑄片の表面性状の写真を Fig. 9 に示す。間欠周波数が 1Hz の場合、Fig. 9-a に見られるように間欠周波数に対応する周期的表面縞模様が観察され、間欠周波数を 3Hz と 5Hz としたとき、Fig. 9-b, c に見るように

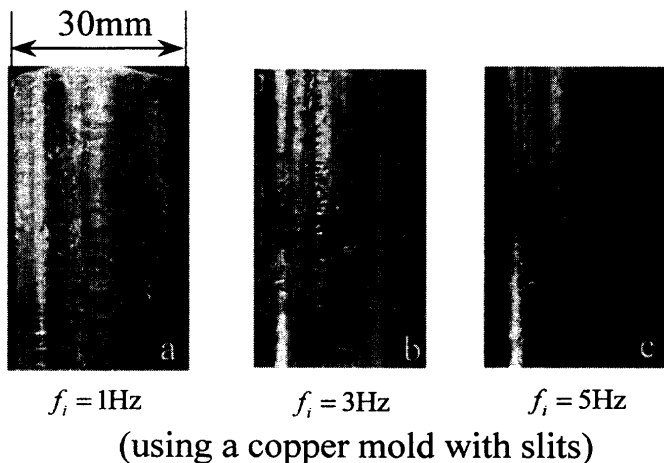


Fig. 9. Surface aspect of cast billets produced under the condition without mold oscillation and with intermittent magnetic fields ($B=1.0 \times 10^{-2}$ T) of frequency 1, 3 and 5 Hz.

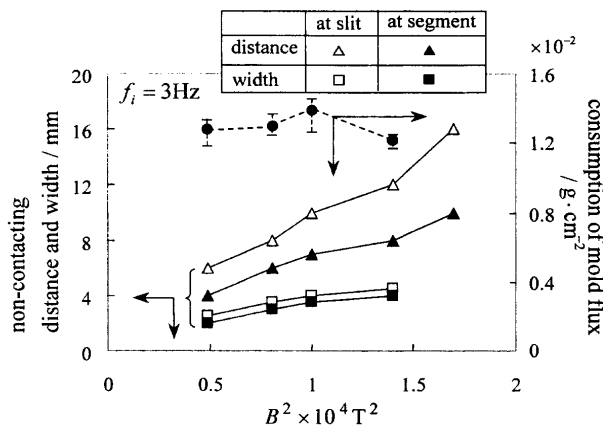


Fig. 10. Effects of magnetic flux density on non-contacting distance and width at the positions of a slit and a segment and on consumption of mold flux.

鑄片の表面性状は改善された。一方、軟接触凝固における溶融金属とモールドとの非接触距離と幅はFig.10に示すように印加磁束密度の増大に伴い増加するが、フラックス消費量は $B=1.0 \times 10^{-2}$ Tで最大値を取る。これは B の増加に伴いモールドと溶湯との非接触幅および距離は増加するが、溶湯ヘッドの高さも増加するためモールドと溶湯との接触圧が増大して、フラックスのモールド-溶湯間への浸入が抑制されたものと考えられる。オシレーションレスの下で得られた鑄片の表面粗度に及ぼすフラックス消費量および印加周波数の影響をFig.11に示す。図を見ると7Hzまでは間欠周波数の増大に伴い、フラックス消費量は増加し、表面性状も改善されている。一方、表面性状は鑄片の部位によって異なっていたため、縦線でこのばらつきを示した。本実験の結果では間欠周波数5Hzの時、フラックス消費量が確保でき、表面性状のばらつきが最小となった。また、間欠周波数9Hzと11Hzでは5Hzの場合に比較してフラックス消費量が大幅に減少し、表面性状もやや悪化した。表面性状の改善とそのばらつきの抑制およびフラックス消費

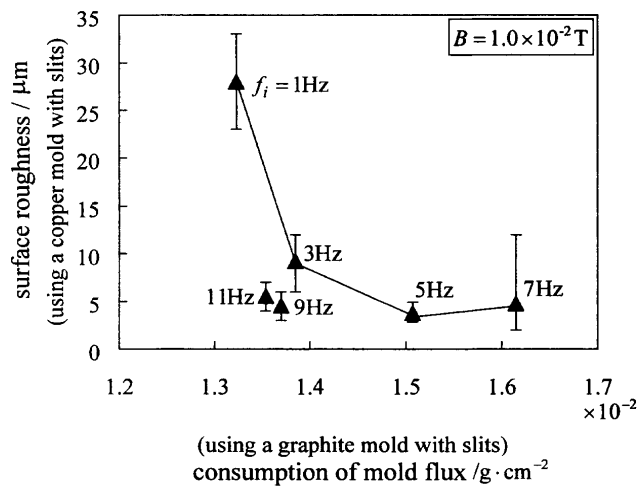


Fig. 11. Relations between surface roughness of cast billets and the mass of mold flux consumed under the condition without mold oscillation and with intermittent magnetic field of different intermittent frequency.

量を総合的に考えると、共振周波数よりやや低い間欠周波数（本モデル系では5Hzに相当する）を選択することが望ましいと考えられる。モールド・オシレーションなしでも間欠型高周波磁場の印加によって鑄型内潤滑が確保でき、表面性状改善が期待できることが示された。このモデル実験の結果は新しい電磁鑄造プロセスであるモールド・オシレーションレス電磁鑄造 (Mold Oscillationless Electromagnetic Casting: MOLEMC) の可能性を示唆するものである。

5. 結言

間欠型高周波磁場印加による軟接触凝固において、スリット部とセグメント部のメニスカス挙動の直接観察を行うとともに、錫を用いたオシレーションレス電磁鑄造におけるフラックス消費量と表面性状の関係を明らかにした。得られた主要な知見は次のとおりである。

- (1) 間欠型高周波磁場印加によって、モールド・オシレーションの機能が代替できた時の非接触距離は、モールド・オシレーションのみによって連続鑄造を可能とするオシレーションの最小ストローク長とほぼ一致した。
- (2) 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、錫の電磁鑄造が可能であった。本プロセスをモールド・オシレーションレス電磁鑄造 (MOLEMC) と命名した。
- (3) モールド・オシレーションレス電磁鑄造では溶湯プールの固有振動数までは間欠周波数の増大に伴いフラックス消費量が增大した。鑄片の部位による表面性状のばらつき、およびフラックス消費量を考慮すると、最適な間欠周波数は固有振動数に近いところ（本実験では5Hzであった）にあった。

本研究の遂行にあたり金属系材料研究開発センター (JRCM)より支援を頂きました。ここに厚く感謝を申し上げます。

記号

B	: 磁束密度 (T)
B_{\max}	: 間欠型高周波磁場の最大磁束密度 (T)
B_{\min}	: 間欠型高周波磁場の最小磁束密度 (T)
D	: B_{\max} の印加時間比 (-)
f	: 間欠型高周波磁場の搬送波の周波数 (Hz)
f_{im}	: 共振周波数 (Hz)
f_i	: 間欠型高周波磁場の間欠周波数 (Hz)
f_m	: 鋳型振動の周波数 (Hz)
g	: 重力加速度 (m/s^2)
h	: 間欠型磁場印加下のメニスカス部の非接触距離 (m)
H	: 液体の深さ (m)
J_l	: 次の第一種ベッセル関数
k_{im}	: 波の数 (1/m)
R	: モールドの半径 (m)
γ	: 表面張力 (N/m)
P_m	: 磁気圧力 (Pa)
β_{im}	: $dJ_l(x)/dx=0$ の第 m 番目の正根 (-)
T_m	: 金属の融点 (K)
ρ_{Sn}	: 錫の密度 (kg/m^3)
ρ_{Ga}	: ガリウムの密度 (kg/m^3)
μ	: 透磁率 (H/m)

添え字

l	: 方位角方向のモード
m	: 半径方向のモード

文献

- 1) H.Mizukami, K.Kawakami, T.Kitagawa, M.Suzuki, S.Uchida and Y.Komatsu: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 1862.
- 2) T.Kitagawa, H.Mizukami, T.Kawawa and Ishikuro: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), S704.
- 3) E.Anzai, T.Ando, T.Sigezumi, M.Ikeda and T.Nakano: *Seitetsu Kenkyu*, **324** (1987), 30.
- 4) K.Tsutsumi, H.Murakami, S.Nishioka, M.Tada, M.Nakada and M.Komatsu: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 617.
- 5) 浅井滋生: 第129・130回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1989), 65.
- 6) I.Miyoshino, E.Takeuchi, H.Yano, J.Sakane, T.Saeki and H.Kajioka: *ISIJ Int.*, **29** (1989), 1040.
- 7) K.Wajima, K.Fujisaki, K.Sawada, K.Toth and E.Takeuchi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 214.
- 8) T.Li, S.Nagaya, K.Sassa and S.Asai: *Metall. Trans. B*, **26B** (1995), 353.
- 9) T.Li, K.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 197.
- 10) E.Takeuchi, K.Toth, M.Hojo, H.Takeuchi, H.Kawai and S.Matsumura: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1125.
- 11) Y.Zhou, S.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 460.
- 12) Y.Chino, Y.Toyama, K.Iwai and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 1047.
- 13) H.Funanokawa, T.Wada and T.Mori: *CAMP-ISIJ*, **1** (1988), 140.