

モールド振動と間欠型交流磁場による湯面挙動のハイブリッド制御

千野 靖正*・岩井 一彦*²・浅井 滋生*²

Hybrid Control of Surface Behavior on Molten Metal by Mold Oscillation and Intermittent Alternating Magnetic Field

Yasumasa CHINO, Kazuhiko IWAI and Shigeo ASAI

Synopsis : In a continuous casting of steel, the surface quality of a slab is strongly influenced by mold oscillation. Recently, a new idea in which the imposition of an intermittent alternating magnetic field was synchronized with the mold oscillation has been proposed for the improvement of surface quality under a concept of "soft contacting solidification". The concept is based on the information that the reduction of the contact pressure between a mold and a melt under the imposition of an alternating magnetic field results in good surface quality. However, the most suitable timing for the imposition of the magnetic field in a mold oscillation cycle still has not been determined. To clarify the behavior of the surface wave motion, which is closely related to the contact pressure between a mold and a melt, we have conducted a model experiment on the free surface motion of a molten gallium excited by the synchronous imposition of the intermittent alternating magnetic field and the simulated mold oscillation. The phase difference between the mold oscillation and the magnetic field has been studied from the viewpoint of the suppression of the surface motion. It has been found that the wave shape excited by the synchronous imposition agrees with the numerical superposition of the two wave shapes excited independently by the magnetic field and the mold oscillation, except for the case where a small surface excitation is observed.

Key words : steelmaking; continuous casting; electromagnetic processing of materials; intermittent alternating magnetic field; soft contacting solidification; surface quality of cast metal; free surface control.

1. 緒言

鋼の連続鋳造プロセスでは、モールドと溶湯との焼き付き防止のためにモールドオシレーションが必須であり、それによりオシレーションと同一周期の表面縞が生成する¹⁾。一方、アルミニウム製造分野では、モールドと非接触で溶湯を凝固させる電磁鋳造²⁾が既に実施されており、平滑表面を有する鋳片の製造が可能となっている。しかし、電磁鋳造は電磁圧と溶湯静圧との釣り合いの上で成立するため、密度が大きく、鋳造速度が大きい溶鋼への適用は困難である。そこで、モールド外部より交流磁場を印加して、溶湯とモールドとの接触圧低減を図る軟接触鋳造法³⁾が提案され、良好な表面性状を有する鋳片の製造の可能性が示された⁴⁻⁸⁾。近年、表面性状の更なる改善、電力消費量の低減を目的として、AM変調磁場の一種である間欠型交流磁場⁹⁾あるいはパルス磁場¹⁰⁾の提案がなされ、磁場印加時期をモールドオシレーションと同期させる試みが新たになされている。しかしながら、この場合、良好な鋳片を得るための適当な磁場同期印加の条件はまだ明確にされていない。

一方、連続鋳造におけるローレンツ力印加は、溶湯面に

おける波動生成やパウダー流入挙動の変化を招く。従って、ローレンツ力印加中の湯面挙動の把握は鋼の軟接触鋳造の適正な操作条件を得るための重要な知見である。ここでは間欠型交流磁場同期印加プロセスの主要パラメータである磁場の間欠周波数およびモールドオシレーションの周波数、さらにそれらの位相差が湯面挙動に与える効果について、溶融ガリウムを用いたモデル実験を行って明らかにする。

2. 実験装置および実験条件

実験装置の概略図をFig. 1に示す。内径46 mm、深さ130 mmの亚克力製円筒容器に溶融ガリウム(約0.8 kg)を充填し、その容器内側面に自由表面から19 mmの深さまで達する厚さ0.3 mmのビニール製振動板を取り付けた。振動板は、亚克力容器の外周に設置した内径56 mmの亚克力製円筒を介して、片振幅4 mmで上下振動するステージに固定し、それによりモールドオシレーションを模擬した上下方向の振動をガリウムに印加した。以後この振動をモールド振動と呼ぶこととする。一方、円筒の周囲に内径80 mmの4ターンコイルを、その上部がガリウム液面

平成11年9月9日受付 平成11年11月22日受理 (Received on Sep. 9, 1999; Accepted on Nov. 22, 1999)

* 名古屋大学大学院生 (Graduate Student, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-8603)

*² 名古屋大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Nagoya University)

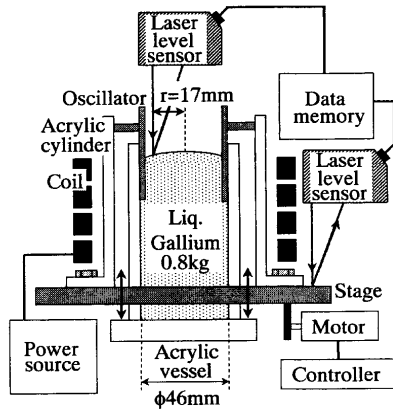


Fig. 1. Schematic view of the experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions for imposition of intermittent alternating magnetic field.

Carrier frequency : f	30kHz
Intermittent frequency : f_i	4, 7, 9Hz
Maximum effective value of magnetic field: B_{max}	0.013T~0.023T
Minimum effective value of magnetic field: B_{min}	0.009T
Time ratio of B_{max} to intermittent period : D	0.5

Table 2. The calculated natural frequencies in the experimental system (Hz).

$m \setminus l$	0	1	2	3	4	5
1	6.43	4.46	5.74	6.73	7.58	8.32
2	8.70	7.59	8.51	9.30	10.0	10.7
3	10.5	9.60	10.4	11.1	11.7	12.3

と同じ高さになるように設置し、30 kHz の搬送波の間欠型交流磁場をモールド振動と同期させ、Table 1 に示す条件で印加した。そして、ガリウム湯面とステージの上下変動を2台のレーザー変位計を用いて同時に計測し、データメモリに記録した。ガリウム湯面の測定に使用したレーザー変位計の分解能は $10 \mu\text{m}$ 、サンプリング周波数は 1 kHz である。なお、鋳片の表面縞は鋳型壁面近傍にて形成されるため、湯面波高の測定はできるだけ壁面近傍にて行われるべきである。しかしながら、壁面近傍では壁面によるレーザー光の乱反射を招く。そこで、本実験では $r=17 \text{ mm}$ を測定位置とした。

円筒容器内の液体に生成する表面波動の固有振動数の式¹¹⁾を以下に示す。

$$f_{lm} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{gk_{lm} \tanh(k_{lm}h)} \dots\dots\dots (1)$$

l, m はそれぞれ方位角方向、半径方向のモードを表し、 k_{lm} ($k_{lm} \equiv \beta_{lm}/R$) は l 次の第 m 種ベッセル関数 $J_l(x)$ の微分が零 ($dJ_l(x)/dx=0$) となる第 m 番目の正根 β_{lm} と容器半径 R の比である。また g は重力加速度を、 h は液深を表す。ここで、本実験系の物性値と操作条件を (1) 式に代入することにより計算される固有振動数を Table 2 に示す。前報¹¹⁾

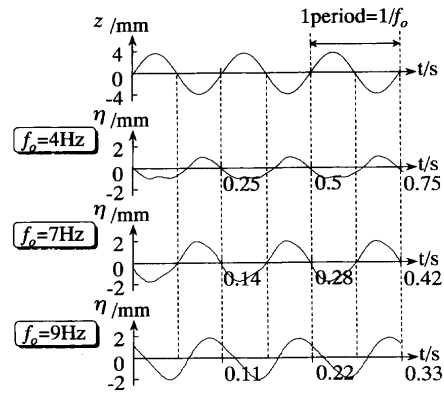


Fig. 2. Surface motions at $r=17 \text{ mm}$ excited by mold oscillation.

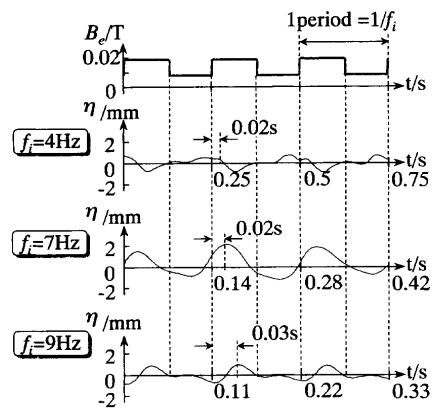


Fig. 3. Surface motions at $r=17 \text{ mm}$ excited by intermittent alternating magnetic fields different in an intermittent frequency.

において最も明確に観測された固有振動数は、方位角方向に 0 次、半径方向に 1 次の $f_{01}=6.4 \text{ Hz}$ であったので、モールド振動の周波数 f_o および磁場の間欠周波数 f_i はこの (0, 1) モードの固有振動数より低い 4 Hz、それにほぼ等しい 7 Hz、それより高い 9 Hz の 3 種類とした。

3. 湯面挙動

3.1 モールド振動と間欠型交流磁場を単独に印加したときの湯面挙動

溶湯にモールド振動のみを印加した時の各周波数における振動板変位 z と、湯面変位 η の時間変化を Fig. 2 にまとめて示す。湯面の振幅は周波数によって異なり、(0, 1) モードの固有振動数以上の値 (7 Hz, 9 Hz) で大きくなっているものの、振動板の上下振動に対する湯面挙動は周波数によらずほぼ同一である。すなわち、振動板の上昇時に $r=17 \text{ mm}$ の湯面は下降し、振動板の下降時には上昇する。

大きい磁場振幅 B_{max} を 0.019 T と設定し、磁場のみを溶湯に印加した時の磁場の実効値 B_e と各間欠周波数における $r=17 \text{ mm}$ における湯面変位の時間変化を Fig. 3 に示す。モールド振動のみを印加した時とは異なり、固有振動数に

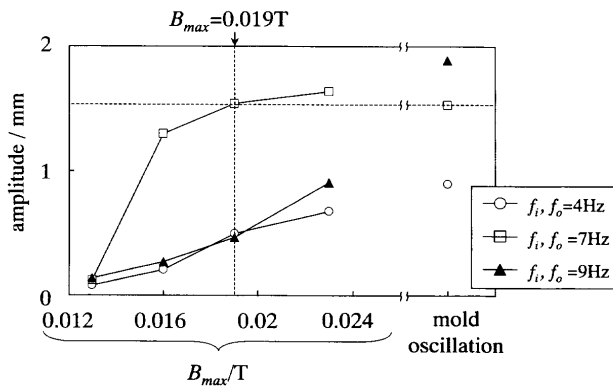


Fig. 4. Comparison of the amplitude of a surface wave at $r=17$ mm excited by the magnetic field in different values and mold oscillation.

近い7Hzにおいて大きな振幅の湯面挙動が観察されたものの、9Hzのときの振幅はあまり大きくない。また、間欠周波数によらず磁場振幅増加後0.02秒後から0.03秒後に湯面変位は下降し始める。さらに、湯面挙動は間欠周波数により異なるため¹²⁾、湯面変位が最大または最小の極値となる時刻は周波数ごとに異なっている。すなわち、4Hzでは磁場振幅が増加する直前に変位は最大となるのに対し、7Hz、9Hzでは B_{max} 印加中に最大となっている。また4Hzでは B_{max} 印加中に、7Hzでは B_{min} 印加中に、9Hzでは B_{max} 印加直後に変位は最小となっている。

次に磁場のみ、あるいはモールド振動のみを溶湯に印加した時の湯面振幅をまとめて Fig. 4 に示す。磁場のみを印加した時の振幅値は磁場強度の増加とともに増加する。また、固有振動数近傍の7Hzにおける振幅は他に比較して大きい。一方、モールド振動のみを印加した場合は4Hz、7Hz、9Hzの順で振幅は大きくなっている。以下に示すモールド振動と磁場の同期印加実験では、7Hzにおいてそれぞれを単独印加した時に湯面振幅がほぼ同値となる磁場強度である $B_{max}=0.019$ T に固定して実験を行った。

3・2 磁場とモールド振動を同期印加した時の湯面挙動

磁場とモールド振動との位相差、すなわちモールド振動に対する磁場の印加時期を Fig. 5 に示す。ここではモールド振動の周波数 f_o と間欠周波数 f_i を同値に設定し ($f_s \equiv f_i = f_o$: 以後 f_s を印加周波数と呼称する)、図に示す4水準の位相差 ($\theta=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) のそれぞれで同期印加した。

なお、本実験では液体ガリウムと振動板が直接接触している条件にて湯面変動の測定を実施した。一方、実プロセスではモールドと溶湯の間に溶融フラックスが存在する。仮に、モールド振動が溶融フラックスを介して溶湯に伝達する時間が、モールド振動一周期に対して無視できない場合、以下の実験結果を実プロセスに適用するに当たり位相差を補正する必要が生ずる。

そこで、溶融フラックスの流れを一次元非定常平行流¹³⁾

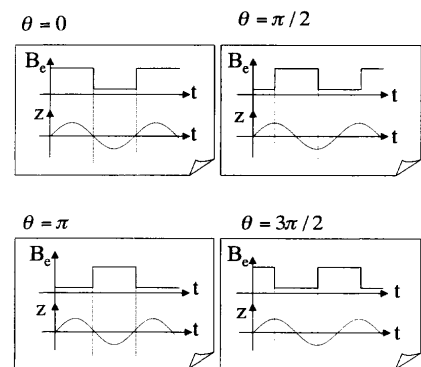


Fig. 5. Phase difference of magnetic field compared with mold oscillation.

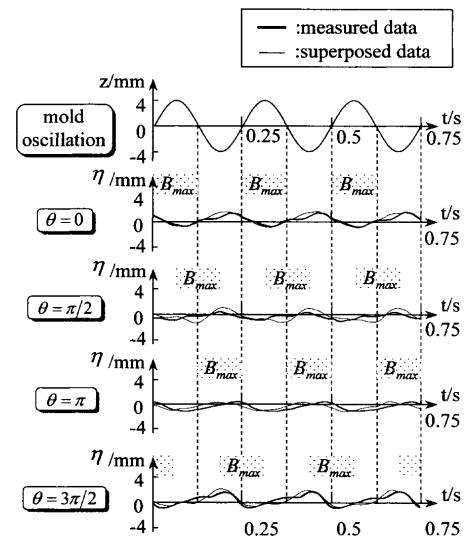


Fig. 6. Measured surface motions excited by the magnetic field and mold oscillation at $f_s=4$ Hz.

とみなし、1.5 Hzのモールド振動が、密度 2500 kg/m^3 の低粘性フラックス ($0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) 内を伝達する時間を推算した。溶融フラックスの厚みは通常約 0.1 mm ¹⁴⁾ とされているが、多めに 0.5 mm と設定しても、その時間は 1.9×10^{-2} 秒となり、モールド振動一周期の約 $1/36$ に過ぎない。すなわち、溶融フラックスの有無に起因する位相差の補正は必要無いたことが確認できる。

以下に各印加周波数ごとの測定結果を示す。

3・2・1 $f_s=4$ Hzにおける湯面挙動

印加周波数 $f_s=4$ Hzにおける振動板の変位と各位相差での湯面挙動を Fig. 6 に示す。最上部のグラフは振動板の変位であり、その下の4つのグラフは同期印加時の湯面変位(太線)と、磁場あるいはモールド振動を単独に印加した時に測定された湯面変位を足し合わせた結果(細線)とを位相差ごとに示している。また、それぞれの上部にあるハッチング領域は B_{max} の磁場が印加された期間を示す。

モールド振動のみを印加した時の湯面変位は振動板変位が最大値をとる時に最小値をとり (Fig. 2)、磁場のみを印加した時の湯面変位は磁場振幅の増加直前に最大値をとる

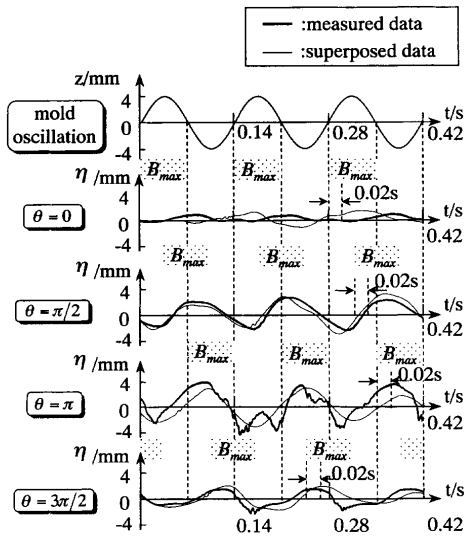


Fig. 7. Measured surface motions excited by the magnetic field and mold oscillation at $f_s = 7$ Hz.

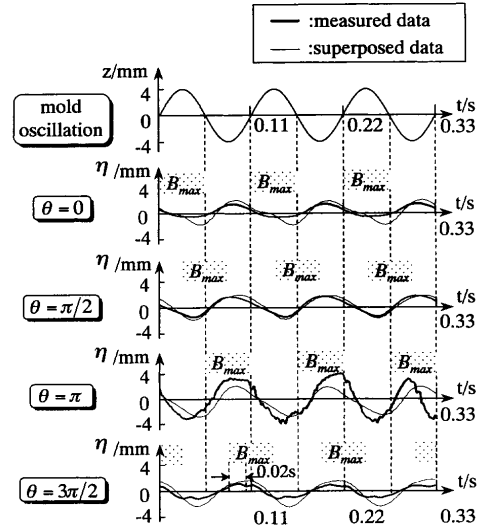


Fig. 8. Measured surface motions excited by the magnetic field and mold oscillation at $f_s = 9$ Hz.

(Fig. 3) ことから、位相差が $\theta=0, 3\pi/2$ の時には相乗効果によって大きな振幅となり、逆に $\theta=\pi/2, \pi$ において振幅は小さくなる。

足し合わせの結果と測定結果を比較すると、 $\theta=\pi$ において2つの波形に時間的なずれが存在するものの、両者は比較的よく一致している。

3.2.2 $f_s = 7$ Hz における湯面挙動

印加周波数 $f_s = 7$ Hz での結果を Fig. 7 に示す。本周波数は (0, 1) モードの固有振動数近傍なので、大きな湯面振幅となった。また、位相差が湯面挙動に及ぼす効果も顕著に表れている。磁場のみを印加した時、湯面変位が最大値をとるのは磁場振幅の増加から約0.02秒後 (Fig. 3)、すなわち B_{max} 印加期間のおよそ中間である。また、モールド振動を印加した時の湯面変位は振動板変位が最小値をとる時に最大値をとる (Fig. 2)。よって、位相差 $\theta=\pi$ では双方の相乗効果により振幅は増大するとともに、湯面は不安定な振動を呈する。位相差 $\theta=3\pi/2$ のときには湯面変位が最大となる時刻は位相差 $\theta=\pi$ に比べて遅れるが、これは磁場による湯面上昇の効果が遅れるためである。また、それにより相乗効果は弱まり振幅は小さくなっている。逆に位相差 $\theta=\pi/2$ のときは、磁場による湯面上昇の効果がモールド振動のそれに対して早くなるので湯面変位が最大となる時刻は $\theta=\pi$ に比べて早くなる。一方、 $\theta=0$ では $\theta=\pi$ に対して位相が π ずれるため、双方の効果が相殺され、振幅は著しく減少する。

振幅値が小さくなる $\theta=0$ での結果を除き、足し合わせの結果は同期印加時の湯面挙動を概略表していると言える。

3.2.3 $f_s = 9$ Hz における湯面挙動

印加周波数を $f_s = 9$ Hz とした時の結果を Fig. 8 に示す。本周波数において、磁場のみを溶湯に印加した時の湯面変

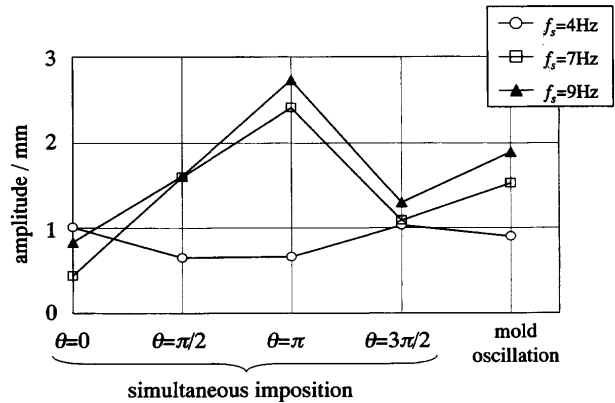


Fig. 9. Effect of phase difference on amplitude of surface waves.

位は B_{max} 印加中に最大値をとる (Fig. 3)。またモールド振動のみを印加した場合は振動板変位が最小値をとる時に湯面変位は最大値をとる (Fig. 2)。この両者の結果はほぼ 7 Hz のそれと一致して、モールド振動と磁場の同期印加時も 7 Hz での結果と似た傾向が表れた。すなわち、 $\theta=0$ では双方の効果が相殺されることにより湯面振幅は減少する一方、 $\theta=\pi$ では相乗効果により振幅は増大し、波動は不安定なものとなる。

足し合わせの結果と測定結果を比較すると、すべての位相差で、足し合わせの結果は概略同期印加時の湯面挙動を表していると言える。

3.3 考察

3.3.1 位相差の変化に伴う振幅値の変化

各周波数においてモールド振動を単独に印加した時、あるいはモールド振動と磁場を同期印加した時の湯面振幅を読みとり、Fig. 9 に示した。モールド振動のみを印加した時の湯面振幅を基準とした時、7 Hz および 9 Hz では $\theta=\pi$ にて湯面振幅は増大し、 $\theta=0$ にて減少する。また、4 Hz

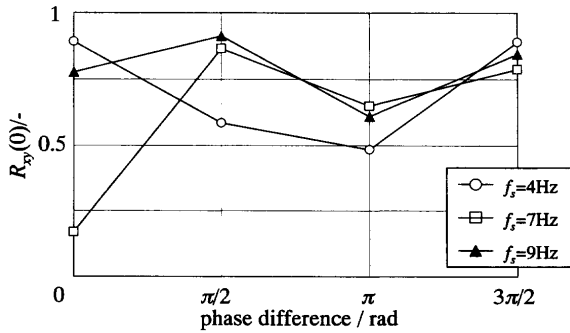


Fig. 10. Cross correlation coefficients evaluated under the different phase differences.

では $\theta=0$ および $3\pi/2$ で増大し、 $\theta=\pi/2$ および π で減少する。これらは前述の通り、モールド振動と磁場の相乗効果あるいは相殺効果に起因している。

3.3.2 足し合わせの効果の定量的考察

同期印加時の湯面挙動と各外力を単独印加した時の湯面挙動を足し合わせた結果が一致する場合、各外力を単独印加した時の湯面挙動を調査するだけで同期印加時の湯面挙動を予測することが可能となる。ここでは、一致、不一致の定量的評価として相互相関係数¹⁵⁾を導入する。同期印加時の湯面変位を $x(t)$ 、各外力印加時の湯面形状を足し合わせた波形を $y(t)$ とおいた時、相互相関係数 $R_{xy}(\delta)$ は (2) 式で表される。

$$R_{xy}(\delta) = \frac{\overline{x(t)y(t+\delta)}}{\sqrt{\overline{x(t)^2}}\sqrt{\overline{y(t)^2}}} = C_{xy}(\delta) / \sqrt{C_x(0)C_y(0)} \dots (2)$$

ただし、

$$C_{xy}(\delta) = \overline{x(t)y(t+\delta)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t+\delta) dt$$

$$C_x(0) = \overline{x(t)x(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t) dt$$

$$C_y(0) = \overline{y(t)y(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(t)y(t) dt$$

である。

ここで δ は隔たり時間を表す。 $R_{xy}(\delta)=1$ では、 $x(t)$ と $y(t)$ には δ の位相差が存在するものの、双方が同一の波形であることを表わし、 $R_{xy}(\delta)$ がすべての隔たり時間 δ において 0 となる時、 $R_{xy}(\delta)=0$ では、双方の波形の相関性が皆無であることを意味する。ここではモールド振動あるいは磁場を単独印加した時の湯面形状を足し合わせた結果と、同期印加時に測定された湯面形状が一致するか否かを判断することを目的としているため、双方の波形の位相差は考慮せず、隔たり時間 δ を 0 と固定して評価を行った。その結果を Fig.10 に示す。ここで、 $x(t)$ と $y(t)$ との間に相関性があると判断するための目安を $|R_{xy}(0)| > 0.5$ とすると、4Hzに

おける $\theta=\pi$ 、7Hzにおける $\theta=0$ を除く条件では足し合わせにより湯面挙動の推定がある程度可能であることがわかる。

4Hzでの $\theta=\pi$ および 7Hzでの $\theta=0$ はモールド振動と磁場の効果が相殺する条件 (Fig. 6, Fig. 7) に相当する。以上より、モールド振動と磁場の効果が相殺する領域において相関値は低くなる傾向があると予測できる。

4. 結言

鋼の軟接触鋳造時の湯面挙動に与えるモールドオシレーションと間欠型交流磁場の印加周波数およびそれらの位相差の効果をモデル実験により調査し、以下の知見を得た。

(1) 磁場とモールド振動の位相差を変化させることにより、各効果が相乗する条件、および、相殺する条件を作り出すことができ、それにより湯面振幅を制御することが可能である。特に、印加周波数が固有振動数より低い時は、位相差を $\pi/2$ および π に、固有振動数以上では位相差を 0 と設定すると、磁場とモールド振動の効果が相殺し、湯面振幅を抑制することができる。

(2) 磁場とモールド振動の効果が相殺して湯面の振幅値が小さくなる場合を除けば、湯面挙動は足し合わせ則に従う。

本研究の一部は、(財)金属系材料研究開発センターが通商産業省の補助金を受けて実施している「エネルギー使用合理化金属製造プロセス開発」からの研究費補助金および、文部省科学研究費補助金 (課題番号: 07305059) で行ったことを記し、謝意を表します。

記号

- B_0 : 磁場振幅の実効値 (T)
- B_{max} : 磁場振幅が大きい時の実効値 (T)
- B_{min} : 磁場振幅が小さい時の実効値 (T)
- C_{xy} : $x(t), y(t)$ に関する相互相関関数 (m^2)
- C_x : $x(t)$ に関する自己相関関数 (m^2)
- C_y : $y(t)$ に関する自己相関関数 (m^2)
- D : B_{max} の印加時間比 (—)
- f : 交流磁場の周波数 (Hz)
- f_i : 間欠周波数 (Hz)
- f_{im} : 固有振動数 (Hz)
- f_o : モールド振動の周波数 (Hz)
- f_s : 同期印加の周波数 (Hz)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- k_{im} : 波数 ($1/m$)
- h : 液深 (m)
- J_l : l 次の第 1 種ベッセル関数
- R : 容器の半径 (m)
- R_{xy} : $x(t), y(t)$ に関する相互相関係数 (—)
- r : 円筒座標系の半径方向距離 (m)
- T : 湯面波動の周期 (s)
- t : 時間 (s)
- x : 同期印加時の湯面変位 (m)
- y : 足し合わせの結果により作られる湯面変位 (m)
- z : 振動板の変位 (m)
- β_{im} : $dJ_l(x)/dx=0$ の第 m 番目の正根 (—)
- δ : 隔たり時間 (s)

η : 湯面変位 (m)
 θ : 振動板の変位と間欠型交流磁場の実効値の波形の位相差 (rad)

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) E.Takeuchi and J.K.Brimacombe: *Metall. Trans. B*, **16B** (1985), 605.
- 2) M.Yoshida: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 403.
- 3) 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), 51.
- 4) I.Miyoshino, E.Takeuchi, H.Yano, J.Sakane, T.Saeki and H.Kajioka: *ISIJ Int.*, **29** (1989), 1040.
- 5) H.Nakata, M.Kokita, M.Morishita, K.Ayata and K.Ebina: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 711.
- 6) M.Yoshida, S.Furuhashi, Y.Okuda, T.Tanaka and T.Watabe: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 901.
- 7) S.Nishioka, M.Komatsu, T.Osako, M.Nakada, K.Mori and T.Sato: Proc. of Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials (EPM '94), ISIJ, Tokyo, (1994), 203.
- 8) K.Sassa, T.Li and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 1075.
- 9) T.Li, K.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 197.
- 10) M.Tani, T.Toh, E.Takeuchi and K.Wajima: Int. Cong. EPM '97, vol. 1, CFE, Paris, (1997), 527.
- 11) Y.Chino, Y.Toyama, K.Iwai and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 1047.
- 12) 岩井一彦, 千野靖正, 浅井滋生: 電磁力を利用した材料プロセスの新展開, 日本鉄鋼協会高温プロセス部会電磁ノーベル・プロセッシング研究会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1999), 91.
- 13) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, 東京, (1992), 224.
- 14) H.Nakato and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 33.
- 15) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 東京, (1977), 25.