

間欠型交流磁場中に置かれた液体金属表面の外乱減衰挙動

林 聖哲*・岩井 一彦*²・新井 紀男*・浅井 滋生*²

Damping Behavior of Disturbance on Liquid Metal Surface Submerged in an Intermittent Alternating Magnetic Field

Sung Chul LIM, Kazuhiko IWAI, Norio ARAI and Shigeo ASAI

Synopsis : In several material processes, stability of the free surface of a molten metal is important for producing high quality materials. The imposition of magnetic field on a molten metal was introduced as a efficacious mean controlling the free surface of a molten metal. Several investigators have verified that static and high frequency magnetic fields enable the suppression of the disturbance given on the free surface of a molten metal. However, it is not clear whether an intermittent alternating magnetic field has the suppression function as well as the static and high frequency magnetic fields.

In this work, the possibility of the suppression of the disturbance on free surface through the periodical wave motion excited by the intermittent alternating magnetic field has been explored in an experiment. The surface behavior of the molten gallium disturbed by the impact of a steel ball has been observed under the continuous or the intermittent alternating magnetic field. It has been found that the damping period of the disturbance under the imposition of the intermittent alternating magnetic field is shorter than those under the continuous alternating magnetic field and no magnetic field.

Key words: electromagnetic field; intermittent alternating magnetic field; disturbance; damping period; electromagnetic processing of materials; materials processing.

1. 緒言

溶湯を取扱う製造プロセスでは自由表面の安定保持が必須となる場合が少なくないため、磁場印加は有力な安定保持手段の一つとして注目を集めている。そのため、各種磁場が溶湯の自由表面上の外乱を抑制する機能を有するか否かについて、これまで種々検討がなされてきた。例えば、電磁鍛造では自由表面の安定保持が製品品質に直接影響するため、高周波磁場の波動抑制効果が調べられた¹⁻⁴⁾。一方、静磁場が有する外乱抑制機能⁵⁻¹⁰⁾を利用して、双ロールプロセスにおける溶湯プール表面の波動抑制⁶⁾や鋼の連続鍛造型内湯面の波動抑制¹¹⁾が試みられた。一方、AM変調磁場の一種である間欠型交流磁場を利用した連続鍛造鑄片の表面性状の改善¹²⁾、精錬反応の促進¹³⁾等、新しいプロセスの提案もなされている。また、鋸波型磁場が液体金属の自由表面挙動に及ぼす効果の調査¹⁴⁾等、従来から利用されてきた静磁場や交流磁場とは異なる波形を有する磁場を材料プロセスに適用する試みもなされている。間欠型交流磁場にあつては磁場が直接波動抑制に作用するのみならず、磁場によって誘起される液体運動を介して外乱を抑制することも考えられる。しかしながら、この点については未だ検討がなされていないのが現状である。

本研究では間欠型交流磁場が液体金属中に引き起こす周期的運動を介して、自由表面上の外乱を抑制する機能を有するか否かについて実験的に検討を行ったので報告する。

2. 間欠型交流磁場の波形

間欠型交流磁場はFig. 1(a)に示すように周波数 f の交流磁場振幅が周期 $\tau (=1/f_i)$ (f_i : 間欠周波数)で、 B_{\max} と B_{\min} に変化する波形を有する。振幅の大きな磁場 B_{\max} の占める時間割合をここでは印加時間比 D と呼ぶことにする。したがって、 $D=1$ の時、磁場振幅は常に B_{\max} で、 $D=0$ の時、磁場振幅は常に B_{\min} となる。このような磁場を導電性流体に印加すると大きさは磁束密度の2乗に比例し、周波数は印加磁場の2倍の周波数で変動する電磁体積力が生じる。導電性流体には粘性と慣性が存在するため磁場の周波数 f が十分高ければその運動は体積力の時間変化に追従し得ず、磁場振幅の大きな期間と小さな期間のそれぞれの時間平均力、 F_{\max} と F_{\min} が導電性流体に加わることになる。この際、 F_{\max} と F_{\min} の切り換えの周波数が低ければ導電性流体はこれに追従する。一方、周波数 f を適当に選択することにより発熱速度の制御もできる。すなわち、この間欠型交流磁場により導電性流体内の温度場と速度場の同時制御

平成10年11月16日受付 平成11年3月1日受理 (Received on Nov. 16, 1998; Accepted on Mar. 1, 1999)

* 名古屋大学高温エネルギー変換研究センター (Research Center for Advanced Energy Conversion, 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)

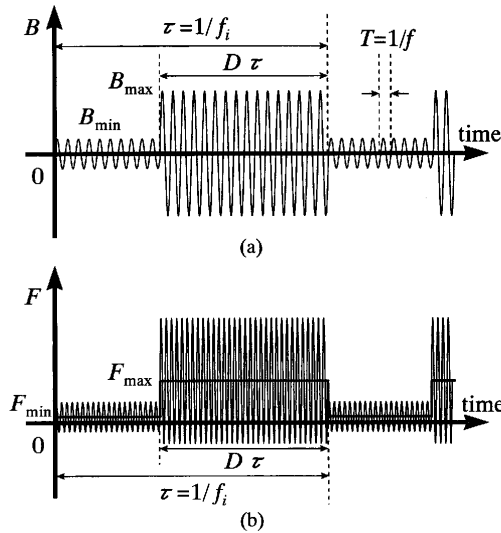


Fig. 1. Wave patterns of intermittent magnetic field (a) and induced electromagnetic force (b).

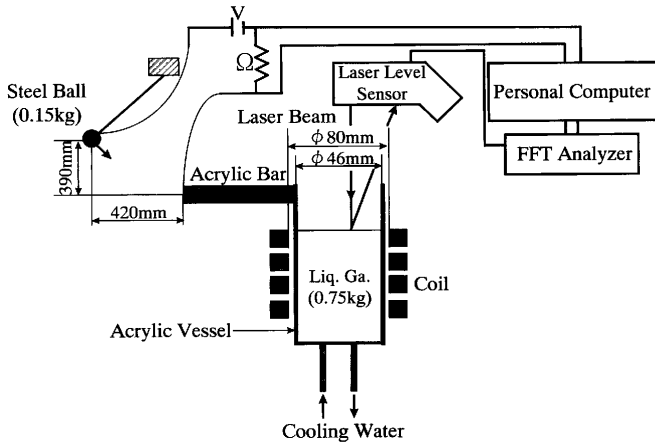


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

が可能となる。

3. 実験

3.1 実験方法

実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。内径 46 mm のアクリル製容器に液体ガリウムを深さ 75 mm (0.75 kg) まで満たして、4 ターンコイルの上面と液体ガリウム自由表面が同一高さになる様に配置した。コイルに周波数 30 kHz の高周波電流を通電してガリウムに連続型交流磁場、あるいは間欠型交流磁場を印加した。連続型交流磁場印加の場合、磁場強度は 0.009 T, 0.011 T, 0.013 T, 0.016 T, 0.023 T と 5 水準で、間欠型交流磁場印加の場合、 B_{min} を 0.009 T にして、 B_{max} を 0.011 T, 0.013 T, 0.016 T の 3 水準で変化させた。なお、印加時間比 D は 0.5 で一定、間欠周波数 f_i は 5 Hz から 9 Hz まで 1 Hz ごとに变化させた。外乱は、質量 0.15 kg の鋼球を一定の高さから落下させ、容器に取り付けたアクリル棒に衝突させることによって、液体ガリウムに加えた。外乱

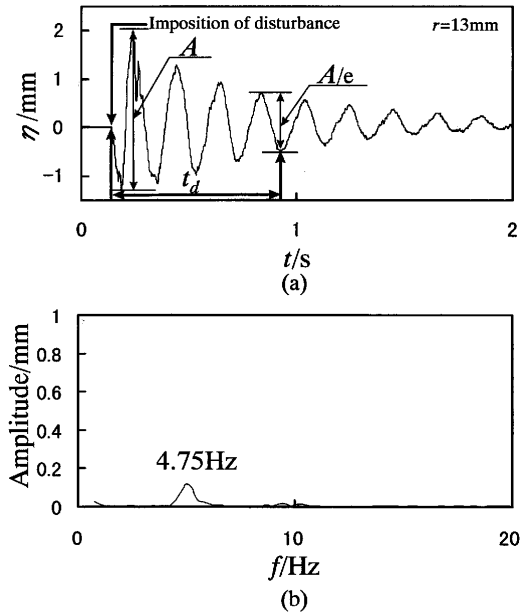


Fig. 3. Surface wave motion disturbed by the impact of a ball under the condition without magnetic field (a) and its spectrum (b).

Table 1. Calculated values of resonance frequency in the experiment.

$l \backslash m$	0	1	2
1	6.43Hz	4.46Hz	5.74Hz
2	8.70Hz	7.59Hz	8.51Hz

発生の正確な時刻は鋼球とアクリル棒とが衝突した瞬間に形成される電気回路の電圧変化から読取った。外乱発生前後の液体ガリウム表面の波動をレーザ変位計により計測し、データをパソコンに記録し、FFTアナライザによって解析した。計測箇所は容器中心から 13 mm の点で、この点はアクリル棒取り付け位置とは反対側に位置させた。

3.2 実験結果

3.2.1 連続型交流磁場が外乱に与える効果

磁場無しで外乱を加えたときに測定された溶湯表面挙動、およびその周波数解析結果を Fig. 3 に示す。外乱によって発生した溶湯表面の波動の振幅は指数的に減衰振動している。半径 R 、液深 h の液体が重力による表面波動を起こすときの波の固有振動数 f_{lm} は次式で与えられる¹³⁾。

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

ここで β_{lm} は l 次の第 1 種ベッセル関数 J_l の微分が零 ($dJ_l(x)/dx=0$) となる m 番目の正根であり、 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。この式より計算した本実験系の固有振動数を Table 1 に示す。方位角方向 1 次、半径方向 1 次の振動モードは 4.46 Hz であり溶

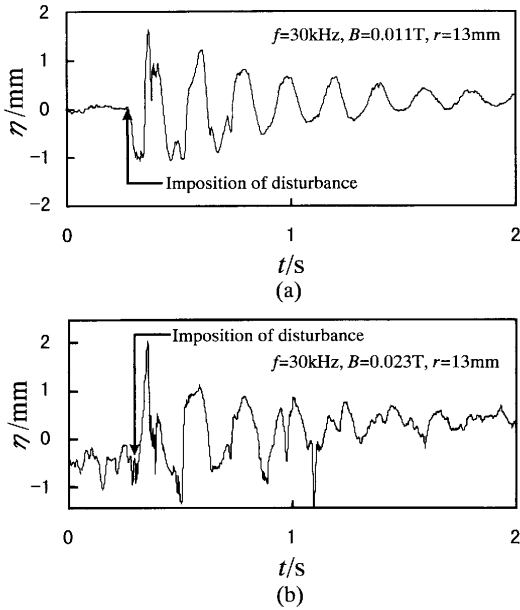


Fig. 4. Damping behavior of the disturbance under the imposition of the continuous alternating magnetic field with $B=0.011$ T (a) and $B=0.023$ T (b).

湯表面挙動の周波数解析結果の4.75 Hzに近い値となっていることから、溶湯はこの(1,1)モードで揺動していたことがわかる。なお、実験値と計算値の差異は固有振動数の計算で表面張力を無視したためと考えられる。

減衰時間 t_d を初期振幅 A が e^{-1} ($=0.37$) の大きさとなるまでの時間と定義して、減衰挙動の評価を行った。なお後述するように減衰が速い場合には振幅が e^{-1} となるまでの時間は振動の約2周期に当たったので、読取り誤差を少なくするために振幅が $e^{-3/2}$ ($=0.22$) となるまでの時間を計測し、その値を2/3倍することにより t_d を算出した。

連続型交流磁場印加下において観測した外乱の減衰挙動を Fig. 4 に示す。いずれの場合も外乱を加える以前から溶湯表面は乱れているが、これは磁場の不均一分布に起因する流動によるものである。磁場強度が0.011 Tから0.016 Tの範囲ではこの乱れに比べて印加した外乱の方が大きいため減衰時間の測定が可能であったが、磁場強度が0.023 Tでは流動に伴う湯面変動が大きく減衰時間の測定が困難であった。連続型交流磁場の強度が減衰時間に与える影響を Fig. 5 に示す。減衰時間は磁場を印加した方が磁場無しに比べて短くなっており、交流磁場が外乱抑制効果を有することがわかる。また、磁場の不均一分布に起因する流動による外乱と磁場による外乱抑制効果の兼ね合いにより、本実験系では磁場による外乱抑制効果が磁場強度増大に伴って大きくならなかったものと思われる。

3.2.2 間欠型交流磁場が外乱に与える効果

Fig. 6 に間欠周波数8 Hz, $B_{\max}=0.011$ T, $B_{\min}=0.009$ Tの間欠型交流磁場を溶湯に印加した時の表面波動挙動 (a), およびその周波数解析結果 (b) を示す。溶湯は間欠周波数8 Hzで周期振動していることがわかる。なお、今回採用し

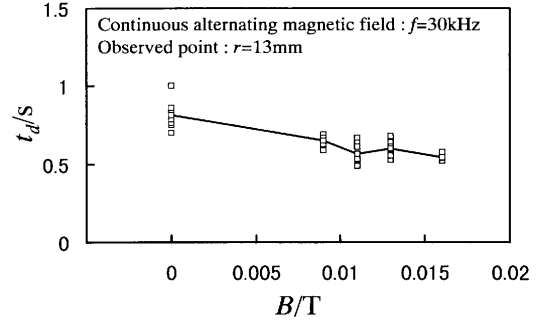


Fig. 5. Effect of intensity of continuous alternating magnetic field on damping period, t_d .

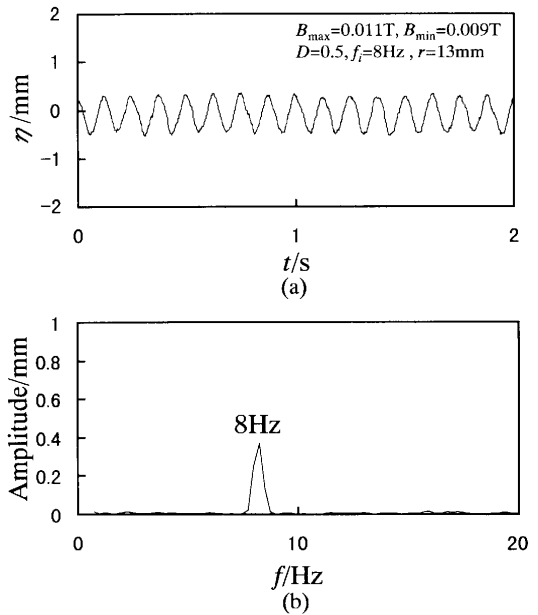


Fig. 6. Surface wave motion excited by an intermittent alternating magnetic field (a) and its spectrum (b).

た実験条件下では溶湯は常に間欠周波数と同一の周波数で振動していた。そのため、磁場印加によって励起される波動は外乱による振動モード (Fig. 3 参照) とは異なることになる。次に、Fig. 6 に示した間欠型交流磁場印加の下で外乱を加えたときの表面挙動 (a), およびその周波数解析結果 (b) を Fig. 7 に示す。外乱発生と同時に運動は乱れるものの、すぐに周期的運動へと回復する。これは、間欠型交流磁場印加による溶湯の周期的運動の振幅が外乱によるものよりも大きいためと思われる。また、その周波数解析結果では外乱による固有振動 (4.75 Hz) と間欠型交流磁場による強制振動 (8 Hz) の両方のピークが見られる。

次に、以下に示す (ア), (イ) の仮定に基づいて、周期運動をする溶湯に加わった外乱の減衰時間 t_d を評価した。

(ア) 外乱による振動周波数は (1, 1) モードの4.75 Hzである。

(イ) 間欠型交流磁場による溶湯の周期的振動周波数は間欠周波数と同一である。

具体的な計算の手続きは以下の通りである。

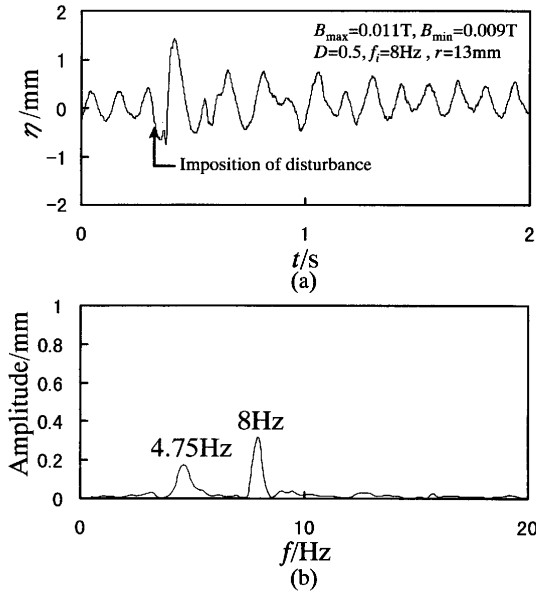


Fig. 7. The surface motion disturbed by the impact of a ball under the imposition of the intermittent alternating magnetic field (a) and its spectrum (b).

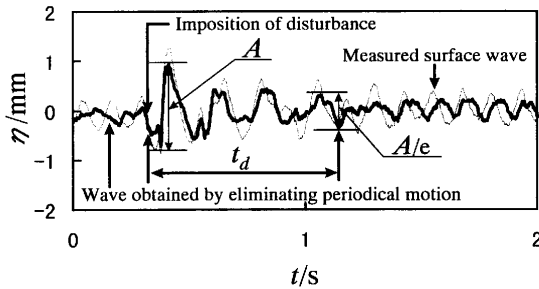


Fig. 8. The measured surface wave (thin solid line) excited by an intermittent alternating magnetic field and the wave (thick solid line) obtained by eliminating the periodical motion from the thin solid line.

(1) 測定された波形 $\eta = \eta(t)$ を (2) 式に示すように周波数解析する。

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \dots\dots\dots (2)$$

(2) (1) の結果を用いて固有振動数である 4.75 Hz を除いた第 1 ピークと第 2 ピーク、すなわち、周期的振動の周波数 f_j と f_k の振幅 A_j と A_k を読取る。

(3) 測定された波形 η から周期的振動成分 η_j と η_k を取除く。

$$\eta' = \eta - \eta_j - \eta_k \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_j = A_j \cdot \cos(2\pi f_j t + \theta_j), \quad \eta_k = A_k \cdot \cos(2\pi f_k t + \theta_k) \dots\dots\dots (4)$$

(4) 得られた波形から連続型交流磁場印加の場合と同様にして減衰時間を読取る。

この方法で行ったデータ処理前後の波形を Fig. 8 に示

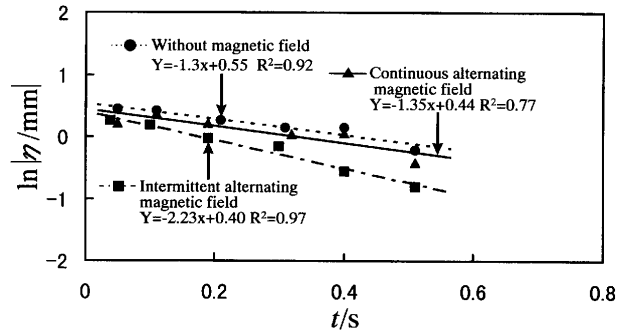


Fig. 9. The comparison of the damping behavior among the cases without magnetic field, with continuous alternating magnetic field at $B=0.011$ T and with intermittent alternating magnetic field at $f_i=5$ Hz, $B_{max}=0.011$ T.

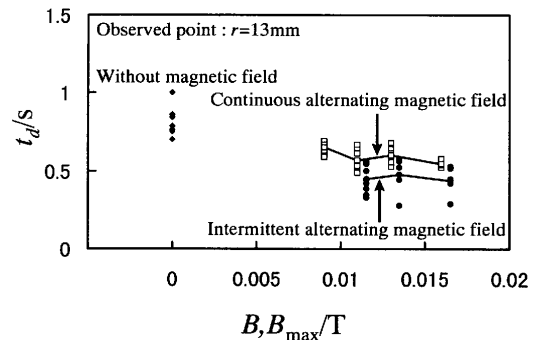


Fig. 10. The comparison of the damping period among the cases without magnetic field, with continuous alternating magnetic field and with intermittent alternating magnetic field at $f_i=5$ Hz, $D=0.5$.

す。図中の細線は測定波形を、太線はデータ処理後の波形を表わす。多少のノイズは存在するものの、この方法で間欠型交流磁場による周期運動が除去できることがわかる。

この方法を用いて処理した間欠型交流磁場印加 ($B_{max}=0.011$ T, $B_{min}=0.009$ T, $f_i=5$ Hz) 時のデータおよび磁場無印加、連続型交流磁場印加 ($B=0.011$ T) 時の表面波動測定データから極大値、極小値を読取り、その差を時間に対してプロットしたものとその最小 2 乗近似直線を併せて Fig. 9 に示す。いずれの場合も極大値と極小値の差は片対数グラフ上でほぼ直線であり、外乱は指数関数的に減衰していたことがわかる。また、間欠型交流磁場印加のデータ処理方法は外乱のみを取出しており、測定誤差はさほど大きくないと推定できる。

このデータ処理方法を用いて評価した間欠型交流磁場の減衰時間を連続型交流磁場、あるいは磁場を加えないときのそれと併せて Fig. 10 に示す。なお、間欠型交流磁場の間欠周波数は 5 Hz である。間欠型交流磁場印加時の減衰時間は連続型交流磁場のそれに比べて短くなっている。すなわち、間欠型交流磁場は連続型交流磁場と比べてより強い外乱抑制機能を有することがわかる。また、間欠型交流磁場の強度による減衰時間の変化はあまり大きくない。

次に、 B_{max} を 0.011 T, B_{min} を 0.009 T として減衰時間の間

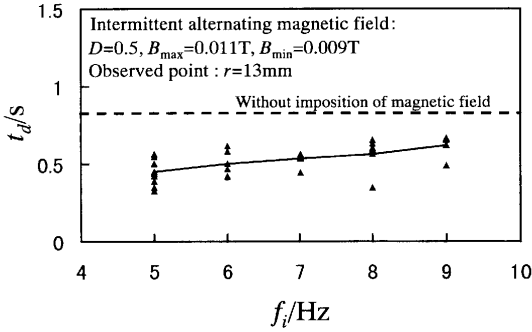


Fig. 11. Damping period under the imposition of the intermittent alternating magnetic field with different intermittent frequency.

欠周波数依存性を調べた結果を Fig.11 に示す。間欠周波数による減衰時間の差はあまり大きくないが、いずれも外乱抑制効果があり、今回の実験条件下では間欠周波数が 5Hz における減衰時間が最小となっている。間欠型交流磁場による外乱抑制の機構は流体運動に関連すると思われるが、現在のところ詳細は不明であり、今後の検討が必要である。

4. 結言

連続型交流磁場と間欠型交流磁場が流体運動を介して外乱抑制の機能を有するか否かについて実験的検討を行い、次の知見を得た。

(1) 連続型交流磁場と間欠型交流磁場はいずれも外乱抑制機能を有し、その機能は間欠型交流磁場においてより強く現われる。

(2) 今回の実験条件下では、外乱抑制に及ぼす間欠型交流磁場の強度と間欠周波数の依存性は小さい。

記号

- A : 初期振幅 (m)
- A_p, A_k : 周期的振動の振幅 (m)
- B : 磁束密度 (T)

- B_{max} : 間欠型交流磁場の最大磁束密度 (T)
- B_{min} : 間欠型交流磁場の最小磁束密度 (T)
- D : 間欠周期に占める B_{max} 印加割合 (—)
- F : 電磁体積力 (N/m^3)
- F_{max} : B_{max} 印加下における電磁体積力の時間平均値 (N/m^3)
- F_{min} : B_{min} 印加下における電磁体積力の時間平均値 (N/m^3)
- f : 交流磁場の周波数 (Hz)
- f_i : 間欠型交流磁場の間欠周波数 (Hz)
- f_p, f_k : スペクトル上の第 1 ピークと第 2 ピークの周波数 (Hz)
- f_{lm} : 固有振動数 (Hz)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h : 溶湯の深さ (m)
- J_l : l 次の第 1 種ベッセル関数
- R : 容器の半径 (m)
- r : 波高観測点 (m)
- T : 交流磁場の周期 (s)
- t : 時間 (s)
- t_d : 減衰時間 (s)
- β_{lm} : $dJ_l(x)/dx=0$ の第 m 番目の正根 (—)
- η : 波高の変位 (m)
- η_p, η_k : スペクトル上の第 1 ピークと第 2 ピークの波高 (m)
- τ : 間欠型交流磁場の振幅変化の周期 (s)
- θ_p, θ_k : 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.J.Mchale and J.R.Melcher: *J. Fluid Mech.*, **114** (1982), 27.
- 2) K.Iwai, M.Suda and S.Asai: Proc. of Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, ISIJ, Tokyo, (1994), 127.
- 3) J.W.Evans, D.Prasso, D.Gupta and R.Kageyama: Proc. of Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, ISIJ, Tokyo, (1994), 160.
- 4) M.Garnier and R.Moreau: *J. Fluid Mech.*, **127** (1983), 365.
- 5) S.Chandrasekhar: Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability, Oxford University Press, London, (1961), 457.
- 6) S.Furuhashi and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 371.
- 7) S.Furuhashi and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 377.
- 8) T.Kozuka, M.Kinosita, I.Muchi and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1696.
- 9) T.Kozuka, I.Muchi and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 2278.
- 10) T.Kozuka, I.Muchi and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **75** (1989), 470.
- 11) M.Hayashida, T.Ono, H.Ono and K.Tsutsumi: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), S686.
- 12) T.Li, K.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 197.
- 13) Y.Chino, Y.Toyama, K.Iwai and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 1047.
- 14) Z.Su, K.Iwai and S.Asai: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 132.