

準正弦波磁場により誘起される非導電性流体と液体金属との界面の運動

蘇 志堅*・岩井 一彦*²・浅井 滋生*²

Interfacial Motion between Nonconductive Fluid and Liquid Metal Caused by a Quasi-sinusoidal Magnetic Field

Zhijian SU, Kazuhiko IWAI and Shigeo ASAI

Synopsis : In many electromagnetic processings of molten metals, the interfacial motion between a molten metal and a slag plays an important role on the productivity and the quality of products. However the behavior of its motion has not been precisely examined yet because of technical difficulties in the direct observation of it. Here, a new experimental method has been developed to observe the interfacial motion between a liquid metal and a non-conductive transparent liquid. In the method, a laser slit beam which was rayed into the interface from the oblique upper side is so projected on a screen as to show the shape of the interface, which is recorded by a high-speed video camera. The interfacial motion caused by the imposition of a quasi-sinusoidal magnetic field is classified by use of the Shielding parameter R_o , such that a periodical oscillation and an irregular motion dominate in the low frequency range ($R_o \ll 1$) and the high frequency range ($R_o \gg 1$), respectively and the periodical oscillation and the irregular motion coexist around the frequency range of $R_o \approx 1$. It is noticed that the increase in viscosity of the liquid imitating a slag acted to suppress the interfacial motion and the wave number appeared larger in the case with the liquid imitating a slag than that in the case without it.

Key words : electromagnetic processing of materials; quasi-sinusoidal magnetic field; interfacial motion; liquid metal motion; surface wave motion; continuous casting; refining; steelmaking.

1. 緒言

連続鋳造、精錬、浮揚融解等の金属材料製造プロセスにおいて、液体金属とスラグの界面運動はプロセスの効率、製品の品質に大きな影響を及ぼす。一方、電磁場は非接触で液体金属の温度、流動および液体金属とスラグの界面運動の制御を可能とするため、その製造プロセスへの適用が数多く行われている。例えば、精錬プロセスにおいて外部から電磁場を印加してスラグと液体金属との界面に振動を付与することにより精錬速度の増加を図る提案がなされている^{1,2)}。また、鋼の連続鋳造では、パウダーと溶湯との界面を安定保持して介在物の巻き込みを回避するために外部から電磁場を印加して溶湯の流動制御を行なう試み³⁾、初期凝固部における溶湯やパウダーの運動を電磁場で制御してオシレーションマークを低減させる研究⁴⁻⁶⁾が見られる。一方、交流電磁場を印加したときの液体金属の表面運動に関する研究も数多く行われてきた⁷⁻¹⁶⁾。Garnierら⁷⁾は、高周波磁場はそれ自身と平行な波数ベクトルを有する攪乱の抑制機能を有し、液体金属の導電性が大きくなると磁場による攪乱の安定効果が増すことを証明した。Fautrelleら⁸⁾は液体金属表面の外乱の減衰は粘性ではなく、主とし

てジュール損失によることを見出した。Takeuchiら⁹⁾はローレンツ力によって浮揚された板状あるいは棒状液体金属の自由表面における攪乱の分散関係式を導出し、臨界波長を計算して、安定な水平連続鋳造条件を導出した。また、自由表面運動の直接観察も行われてきた。Lehnert¹⁰⁾は水銀表面に撒かれた砂の動き、McHaleら¹¹⁾は液体金属表面に投影されたネット状正方格子の変形、Galpinら¹²⁾は交流磁場によって励起された液体金属表面の波動、Hullら¹³⁾は高周波磁場で浮揚された液体金属シートにRayleigh-Taylor不安定性が生成する様子を観察し、液体金属の表面運動について述べている。また、福元ら¹⁴⁾はレーザーリット光を電磁界鋳型内の錫に照射し、液体金属メニスカス形状を求めた。Kageyamaら¹⁵⁾および著者ら¹⁶⁾はレーザ変位計により自由表面における任意の点の運動を定量的に計測し、交流磁場によって誘起される液体金属運動の特性を明らかにした。

上述の研究では液体金属のみが存在する系が研究対象となっており、実プロセスに見られる液体金属上部にスラグが存在する系における界面運動の観察はいまだなされていない。そこで、著者らは液体金属上部に模擬スラグが存在する系の界面運動を観察するために、高速ビデオカメラと

平成11年12月16日受付 平成12年3月26日受理 (Received on Dec. 16, 1999; Accepted on Mar. 26, 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)

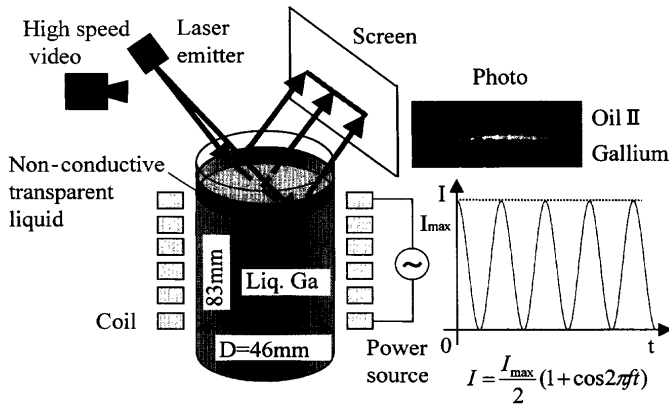


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Physical properties of fluids imitating a slag.

Material	Water	Silicone oil		
		I	II	III
Density: ρ (kg/m ³)	1000	935	968	971
Surface tension: γ (N/m)	0.072	≈ 0.02	≈ 0.02	≈ 0.02
Viscosity: η (Pa·s)	8×10^{-4}	$\approx 1 \times 10^{-2}$	$\approx 1 \times 10^{-1}$	≈ 1

レーザスリット光とを組み合わせた新しい方法を提案するとともに、準正弦波磁場印加によって生じる界面運動に及ぼす磁場の周波数、模擬スラグ物性の影響を明らかにしたので、それについて報告する。

2. 実験装置と実験条件

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。液体ガリウムを高さ 83 mm (0.83 kg に相当) まで満たした内径 46 mm の円筒容器の周りにコイルの上面がガリウムの液面と一致するように、高さ 60 mm の 6 巻コイルを配した。材料プロセスにおける溶融スラグは導電性を有するものの、その電気伝導度 (約 1~10 S/m) は鉄などの金属のそれ (約 10⁶ S/m) と比べて非常に小さいので、電磁場が直接スラグの運動に与える影響は無視できる。そこで、模擬スラグとして、非導電性の純水および粘性が異なる三種類のシリコンオイルを用いた。それぞれの物性値を Table 1 に示す。三種類のシリコンオイルはそれぞれ粘性の増加する順にオイル I, オイル II, オイル III と仮称する。コイル電流は Fig. 1 に示す直流成分と交流成分の和からなる準正弦波電流であり、最大電流は 600 A で一定、周波数は 1~2000 Hz の範囲で変化させた。模擬スラグと液体ガリウムの界面運動の観察方法は以下の通りである。円形のガリウム表面の中心を通るように斜め上部からレーザ光を照射し、スクリーン上に投影された図形を高速ビデオカメラで撮影した。ビデオカメラ

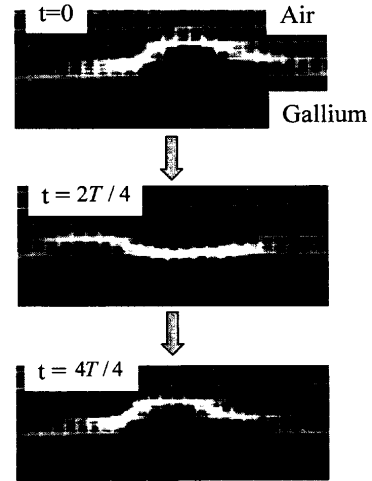


Fig. 2. Projected free surface shapes of a liquid Gallium in a cycle under the imposition of a magnetic field with frequency of 10 Hz.

のシャッタースピードは 1/1000 s, コマ送り速度は 600 frame/s であった。ここで用いた模擬スラグはいずれも透明であるので、光源から照射されたレーザ光は 3 mm の厚みの模擬スラグ内に入射して液体ガリウムとの界面で反射される。従って、スクリーン上の投影図には界面形状が映し出される。電流を印加していない場合の投影図を Fig. 1 の右上部に示した。レーザの照射角度は鉛直に対して約 20 度なので、数 mm 程度の界面の鉛直方向変動に伴う計測位置の水平方向へのずれは 1 mm 程度と推算できる。一方、後述するように波動は容器壁面から中心へ向かって進行するので、照射位置の水平方向変動によって中心付近では波動の進行方向と計測線分とは直交することも有り得る。よって、中心付近での誤差は壁面近傍でのそれに比べて大きくなることも予想されたので、ここでは振幅の定量的評価は行わない。

3. 実験結果と考察

液体金属表面上に模擬スラグが存在しない場合、自由表面中心における運動は容器半径 R と磁場の浸透厚み $\delta (= \sqrt{1/\pi\sigma\mu f})$ との比から計算されるシールドパラメータ $R_\omega (= 2R^2/\delta^2 = 2\pi\sigma\mu f R^2)$ によって整理できることを前報¹⁶⁾ で報告した。すなわち、準正弦波磁場を液体金属に印加すると磁場と同一の周波数および、その 2 倍の周波数を有する振動力と時間変化しない圧縮力が液体金属に作用する。そして、磁場の周波数が低い場合 ($R_\omega \ll 1$) には磁場と同一の周波数の振動力が支配的となり、液体金属には周期的な振動が生じ、磁場の周波数が高い場合 ($R_\omega \gg 1$) には内部流動に起因する不規則運動が生じる。今回の実験結果も前報¹⁶⁾ と同様に低周波領域、高周波領域、両者の中間領域に分類して以下に述べる。なお、今回の実験系においては $R_\omega = 1$ となる周波数は 62 Hz であった。

低周波領域 ($R_m \ll 1$) については液体金属表面は磁場と同一の周波数で振動した。その一例として模擬スラグが存在しない下で、10 Hz ($R_m = 0.16$) の準正弦波磁場を印加した場合の液体金属自由表面の振動の様子を Fig. 2 に示した。中心では大きな振幅、壁近傍では小さな振幅で容器全体に渡る一つの波動が形成された。次に、厚さ 3 mm の模擬スラグを液体金属上部に置いた場合の界面挙動を Fig. 3 に示した。模擬スラグの粘性が水、シリコンオイル I, II, III と増大するにつれて界面形状は平滑となった。

高周波磁場 ($R_m \gg 1$) の場合、電磁圧の不均一分布に起因する流動が生じ、界面形状が時間変化した。その一例として模擬スラグが存在しない場合の結果を Fig. 4 に示した。低周波の場合とは異なり、自由表面形状の変化は不規則であった。また、その変化の度合いは 1000 Hz ($R_m = 16$) のときが最も大きく、この結果は前報の結果¹⁶⁾ と一致していた。模擬スラグを乗せて 1000 Hz の磁場を印加した場合の界面形状変化を Fig. 5 に示した。粘性の小さいシリコンオイル I の界面形状の変化は粘性の大きいシリコンオイル III を用いた場合に比べて大きい。

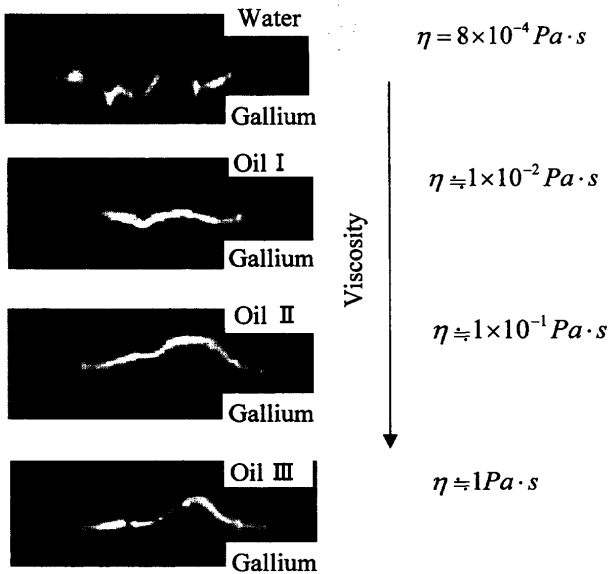


Fig. 3. Projected interface shapes between a liquid Gallium and each fluid with different viscosity under the imposition of a magnetic field with frequency of 10 Hz.

模擬スラグが存在しない裸の液体金属に 200 Hz の中周波数領域の磁場 ($R_m = 3.2$) を印加したときの自由表面運動を Fig. 6 に示した。10 Hz の場合と同様に、磁場の周波数と同じ 200 Hz で振動しているものの、波は細かくその数も増加している。また、自由表面形状は 3 秒間の観測期間中にも常に変化していた。このような現象は高周波領域で生じる流動に起因するものであるが、200 Hz の場合の自由表面の変形の度合いは高周波 (1000 Hz) のときに比べて小さい。すなわち、この領域では高周波領域における流動、低周波領域における表面波動のいずれもが観察されたことになる。

次に厚さ 3 mm の模擬スラグを液体金属上に乗せた場合の結果を Fig. 7 に示した。模擬スラグの粘性の増加につれて界面運動が抑制されることは高周波領域で得られた Fig. 5 の結果と同じであった。また、水を模擬スラグとした場合には、磁場と同一周波数を有する微細な波動が界面全体に渡って観察されたが、シリコンオイル I の場合には一点鎖線で示した容器中央部で、シリコンオイル II, III の場合には全領域で観察されなくなった。次に、この微細な波動の伝播形態を Fig. 8 に示した。微細な波動は電磁力の強い壁面近傍で発生し、一点鎖線で示した容器中心に向かって粘性消散しつつ伝播し、やがて消失した。すなわち、電磁場のエネルギーにより壁面近傍で生成した微細な波動は模擬スラグの粘性が高いほど早く消失するため、Fig. 7 の結果となったものと解釈できる。

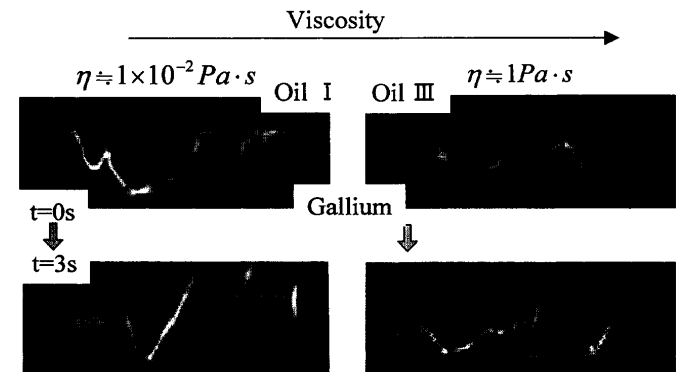


Fig. 5. Effect of viscosity of fluids imitating a slag on interfacial motion under the imposition of a magnetic field with frequency of 1000 Hz.

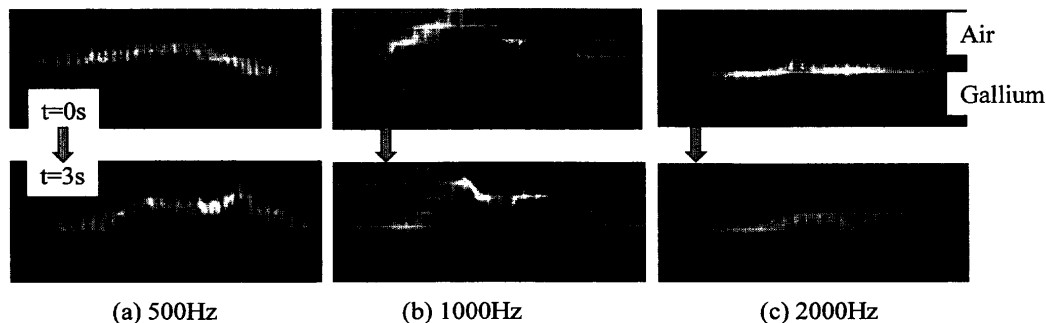


Fig. 4. Projected free surface shapes under the imposition of magnetic fields with different frequency at arbitrary moment ($t=0$ s) and at the 3 seconds later ($t=3$ s).

4. 界面振動の波数解析

ここでは、界面張力や粘性などの物性および振動の周波数が波数に及ぼす効果について解析する。水平面で接した密度 ρ_1 と ρ_2 の非圧縮流体が静止状態で無限に広がっている系を解析対象とする。この水平界面上で微小攪乱が生じたときの分散関係式は次式で与えられる¹⁷⁾。

$$- \left\{ gk \left[(\alpha_1 - \alpha_2) + \frac{k^2 \gamma}{g(\rho_1 + \rho_2)} \right] + (2\pi f)^2 \right\} (\alpha_2 q_1 + \alpha_1 q_2 - k) - 4(2\pi f)^2 k \alpha_1 \alpha_2 + 8\pi f k^2 (\alpha_1 v_1 - \alpha_2 v_2) [(\alpha_2 q_1 - \alpha_1 q_2) - k(\alpha_1 - \alpha_2)] + 4k^3 (\alpha_1 v_1 - \alpha_2 v_2)^2 (q_1 - k)(q_2 - k) = 0 \dots (1)$$

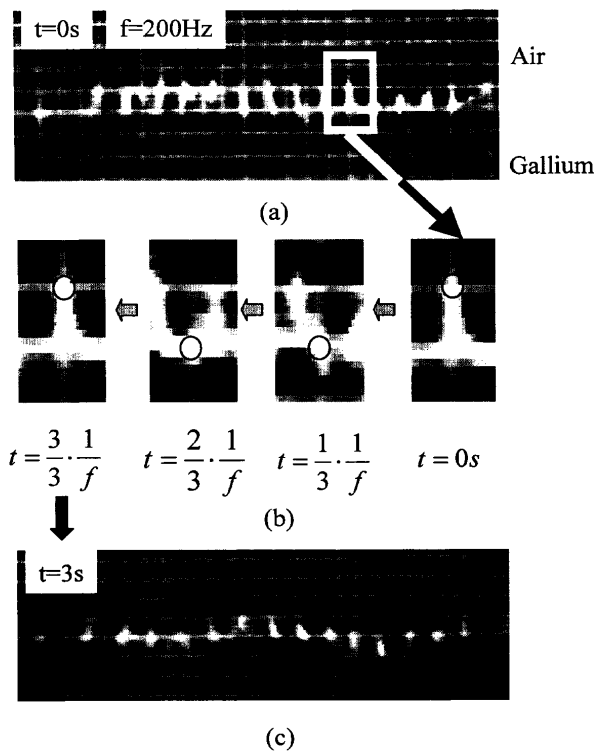


Fig. 6. Projected free surface motion of a liquid Gallium under the imposition of a magnetic field with frequency of 200 Hz.

$$\alpha_1 = \frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_2}, \alpha_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}, q_1 = \sqrt{k^2 + \frac{2\pi}{v_1} f}, q_2 = \sqrt{k^2 + \frac{2\pi}{v_2} f}$$

ここで、 g は重力加速度、 k は波数、 ρ_1, ρ_2 はそれぞれ下部と上部流体の密度、 γ は界面張力、 f は周波数、 $v (= \eta/\rho)$ は動粘性係数、 η は粘性係数である。

粘性が無限に小さい場合、(1)式は次式で近似できる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k \left(g \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2 + \rho_1} + \frac{\gamma}{\rho_2 + \rho_1} k^2 \right)} \dots (2)$$

(2)式より、周波数、界面張力、下部流体の密度 ρ_1 が一定の場合には、 $\partial k / \partial \rho_2$ が常に零より大きくなるので、上部流体の密度 ρ_2 が増加すると波数は増加する。一方、界

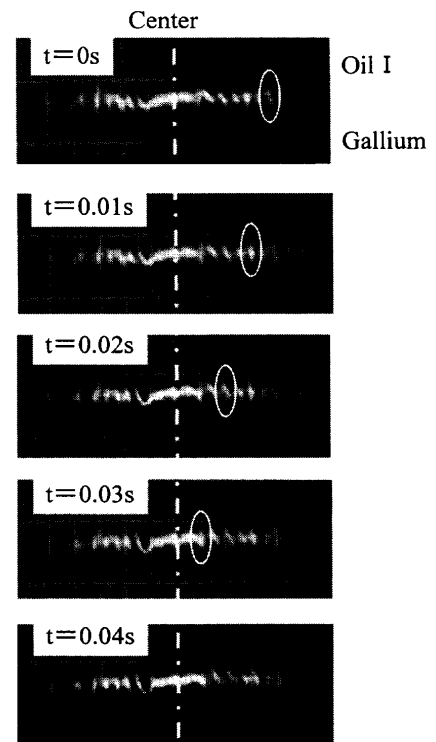


Fig. 8. Propagation of an interfacial wave caused by a magnetic field with frequency of 200 Hz.

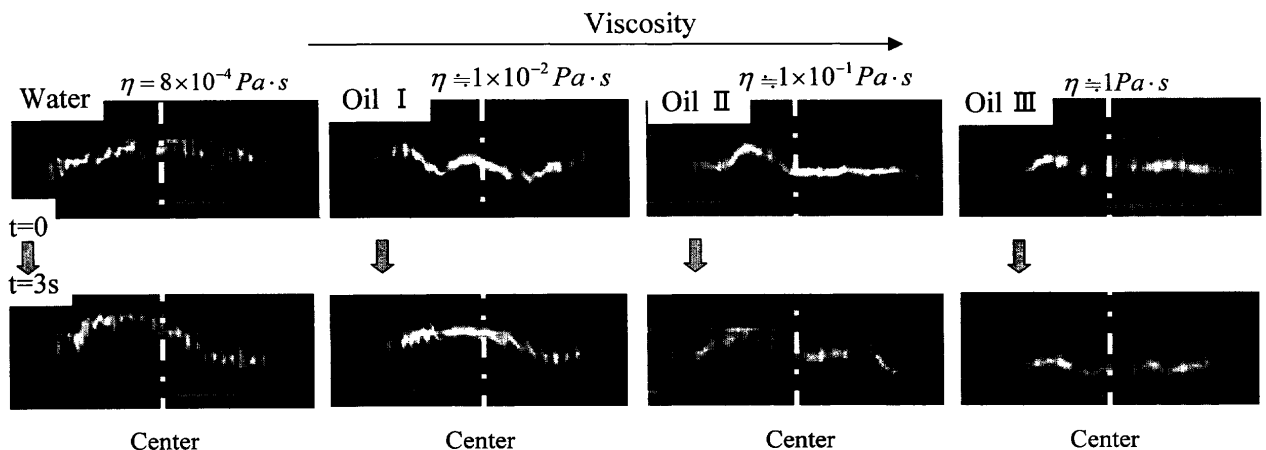


Fig. 7. Effect of viscosity of fluids imitating a slag on interfacial motion under the imposition of a magnetic field with frequency of 200 Hz.

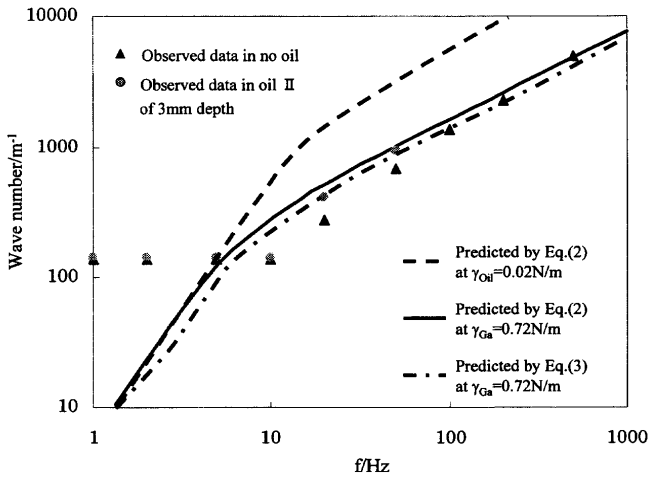


Fig. 9. Calculated and observed wave numbers with respect to frequency.

面張力の増加に伴い波数は減少する。

上部流体の密度が下部流体のそれに比べて無視しうる場合、(3)式は次式で近似できる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k \left(g + \frac{\gamma}{\rho_1} k^2 \right)} \dots\dots\dots (3)$$

模擬スラグがシリコンオイルIIの場合について粘性を考慮した分散関係式((1)式)と粘性を無視した分散関係式((2)式)から波数と周波数の関係を求めた。但し、シリコンオイルIIと液体ガリウムとの界面張力の値は不明であったので、シリコンオイルIIの表面張力(γ_{oil}=0.02 N/m)と液体ガリウムの表面張力(γ_{Ga}=0.72 N/m)のそれぞれを界面張力の値として計算した。粘性項の有無に関わらず、(1)式と(2)式はほぼ同一の結果となったことから、今回の実験においては、波数に及ぼす粘性の効果は無視できるものと推論した。また、模擬スラグが存在しない場合については(3)式を用いて波数と周波数の関係を計算した。各周波数において観察された波数と(2)、(3)式からの計算値とを併せてFig. 9に示した。周波数が10Hz以下において観測された波数は一定となったが、これは容器サイズ以上の波長の波は存在し得ないためである。模擬スラグが存在する場合、界面張力としてガリウムの表面張力の値を採用した計算結果の方が、シリコンオイルの表面張力の値を採用した計算結果より実験結果に近いものとなっている。すなわち、今回の実験系においては、模擬スラグとガリウムとの界面張力はガリウムの表面張力に近い値であったことが推測できる。また、実験においても計算においても、周波数が10 Hz以上において、模擬スラグがある場合の波数はない場合より多い。

5. 結言

液体金属上部に模擬スラグが存在する系の界面運動の観

察手法として、高速ビデオカメラとレーザスリット光を組み合わせた方法を提案し、準正弦波磁場を印加した場合の界面運動に及ぼす磁場の周波数、模擬スラグの粘性の影響を明らかにした。以下に得られた主要な結果を示す。

(1) 界面は低周波領域 ($R_\omega \ll 1$) においては周期振動するものの、高周波領域 ($R_\omega \gg 1$) では内部循環流に起因する不規則運動をする。その中間周波数領域 ($R_\omega \approx 1$) では両者が共存する。

(2) 模擬スラグの粘性は周期振動と不規則流れの両運動を抑制し、界面の安定化をもたらす。

(3) 周期振動の波長が容器より十分小さい条件下では、模擬スラグの存在により波数は増加する。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金(番号:11750640)および(財)金属系材料研究開発センターの支援の下で行われたことを記し、謝意を表します。

記号

- f : 周波数 (Hz)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- I : 電流 (A)
- I_{max} : 最大電流 (A)
- k : 波数 (m⁻¹)
- q₁, q₂ : 定数 (m⁻¹)
- R : 半径 (m)
- R_ω : シールディングパラメーター (-)
- t : 時間 (s)
- T : 振動の周期 (s)
- α₁, α₂ : 定数 (-)
- γ : 表面張力 (N/m)
- δ : 磁場浸透厚み (m)
- η : 粘性係数 (Pa·s)
- μ : 液体金属の透磁率 (H/m)
- ν₁, ν₂ : 流体の動粘性係数 (m²·s⁻¹)
- ρ, ρ₁, ρ₂ : 流体の密度 (kg/m³)
- σ : 液体金属の電気伝導度 (S/m)

文献

- 1) F.Debray, Y.Fautrelle, M.Burty and J.M.Galpin: Proc. of Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials (EPM '94), ISIJ, Tokyo, (1994), 29.
- 2) S.Oshima, H.Kado-oka, H.Haraikawa and R.Yamane: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **57** (1991), 3091.
- 3) T.Ishii, S.S.Sazhin and M.Makhlouf: *Ironmaking Steelmaking*, **23** (1996), 267.
- 4) I.Sumii, K.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 447.
- 5) M.Tani, T.To, E.Takeuchi and K.Washima: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 829.
- 6) Y.Zhou, K.Sassa and S.Asai: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 134.
- 7) M.Garnier and R.Moreau: *J. Fluid Mech.*, **127** (1983), 365.
- 8) Y.Fautrelle and A.D.Sneyd: *J. Fluid Mech.*, **375** (1998), 65.
- 9) S.Takeuchi, J.Etay and M.Garnier: *ISIJ Int.*, **29** (1989), 1006.
- 10) B.Lehnert: *Proc. R. Soc. (London) A*, **233** (1955), 299.
- 11) E.J.McHale and J.R.Melcher: *J. Fluid Mech.*, **114** (1982), 27.
- 12) J.M.Galpin and Y.Fautrelle: *J. Fluid Mech.*, **239** (1992), 383.
- 13) J.R.Hull, T.Wiencek and D.M.Rote: *Phys. Fluid A*, **1** (1989), 1069.
- 14) H.Fukumoto, Y.Hosokawa, K.Ayada and M.Morishita: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **42** (1992), 11.
- 15) R.Kageyama and J.W.Evans: *Metall. Mater. Trans. B*, **30B** (1999), 331.
- 16) Z.Su, K.Iwai and S.Asai: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 1224.
- 17) S.Chandrasekhar: *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford University Press, London, (1961), 443.