

2液相界面の不安定性に及ぼすローレンツ力の影響

小塚 敏之*・小島 勝紀*²・河原 正泰*

Effect of Lorentz Force on Instability of the Interface between Two Liquid Layers

Toshiyuki KOZUKA, Masanori KOJIMA and Masayasu KAWAHARA

Synopsis : Recently, in the field of refining reactors of steel making processes, new technologies for obtaining high process efficiency are strongly required. Upward Lorentz force due to stationary magnetic field and direct electric current can make rapid mixing between two liquid layers. And it is expected as one of key technologies in developing innovative refining processes. In this process, Lorentz force appears only in the lower liquid by the difference of electrical conductivity, and a part of the lower liquid scatters upward to disperse as small droplets into the upper liquid. This scattering behavior of the lower liquid is important and dominant phenomena to explain the rapid mixing of two liquids.

From the results of experiments using mercury-silicone oil system, it is found that Kelvin-Helmholts instability on the interface causes the first scattering, and successive scattering occur in terms of Rayleigh-Taylor instability. Scattering frequency increases with increasing electric current density. And it also increases the volume of the reservoir even if the lower liquid has suffered the same Lorentz force.

Key words: rapid refining; rapid mixing; electromagnetic processing of materials; Kelvin-Helmholts instability; Rayleigh-Taylor instability; Lorentz force.

1. 緒言

近年、鉄鋼生産の分野では、地球環境問題やエネルギー問題による社会的要請に応え、省エネルギー、リサイクルの推進、高純度鋼や高合金鋼の生産における成分調整技術の高度化などの研究が推進されてきた。その中で精錬工程の効率化においては、溶銑予備処理、二次製錬、あるいはタンディッシュ精錬といった精錬プロセスが提案され、プロセス開発の余地がないようにも思える一方で、従来がない技術を導入することにより精錬限界を超える精錬プロセスの開発が可能であると大きく期待されている¹⁻⁴⁾。

鉄鋼を中心とする金属製精錬プロセスにおける反応過程では、メタルとスラグのような2種類の液体間の界面での反応、すなわち不均一反応に依存するものが多く、反応速度を向上させるために電磁攪拌、ガス攪拌等の操作が行われているが、それらは、界面近傍の物質移動と反応界面積の2つの要素を増加させるプロセスであるものの、前者に負うところが大きい。そこで、反応界面積の増加に着目する2液体の高速混合プロセスが実現できれば、従来の精錬限界を大きく超えるプロセス技術となりうる。本研究はこれまでに提案されていた電磁力を利用する2液体の高速混合プロセス^{5,6)}において混合過程を支配する下層液体の飛散現象について、水銀-シリコンオイル系を用いた実験結果に、界面の不安定性を基にして展開した理論的考察を加えたものである。

この技術は直流磁場が印加できるような細い流路をもつ容器に適用が限定されているが、現在飽和状態にある精錬技術開発の中で、このような新技術の提案は、新時代の鉄鋼、金属工業における重要な鍵を握るものと考えている。

2. 混合プロセスの概略

本研究で提案する混合プロセスは、Fig. 1に示すような流路内にスラグとメタルのような電気伝導度の異なる2つの液相が成層し、そこに直流磁場と直流電流が直接的に印加されていることを想定する。直流電流は流路の長手方向に印加されており、直流磁場はこの流路を横断する方向に印加されている。電流と磁場の相互作用による電磁力であるローレンツ力は(1)式で定義されており、この系においては、それは鉛直上向きに作用し、その大きさは(2)式で与えられる。

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \dots\dots\dots (1)$$

$$F = JB \dots\dots\dots (2)$$

前述のように、本プロセスの適用が比較的細い流路に限定されるもの、最近では超伝導磁石の開発も進み、強磁場を広範囲に印加することも可能であることから、数10cmの幅までは適用範囲と考える。

ローレンツ力により、磁場が印加されている領域内のメタルは上向きの力を受け、磁場が印加されていない領域と

平成15年10月14日受付 平成16年1月7日受理 (Received on Oct. 14, 2003; Accepted on Jan. 7, 2004)

* 熊本大学工学部 (Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami Kumamoto 860-8555)

*² 熊本大学大学院工学研究科 (現: (株)日立超LSI) (Graduate School of Engineering, Kumamoto University, now Hitachi Super LSI Co., Ltd.)

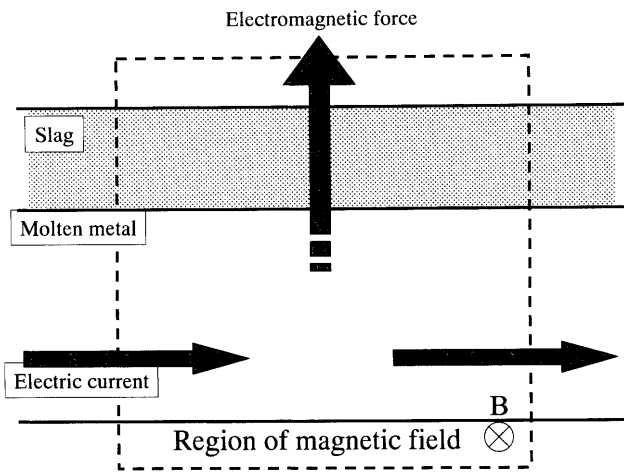


Fig. 1. Schematic view of two liquid layers and the directions of electric current and magnetic field.

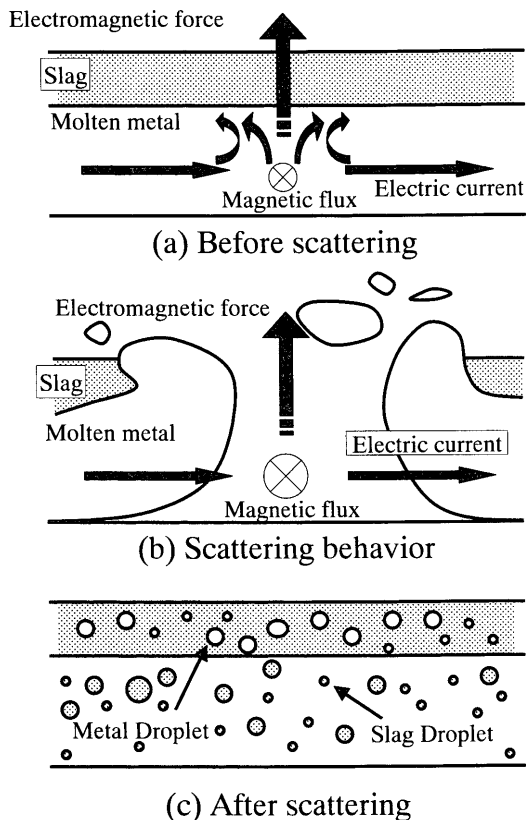


Fig. 2. Schematic drawing of the mixing mechanism between metal and slag.

の力のバランスが崩れることによって、Fig. 2(a)に示すような対流が発生する。ローレンツ力を増加させることにより、対流は激しくなり物質移動は促進され、さらに2液相の界面の不安定性により、Fig. 2(b)に示すような飛散現象が生じ、物質移動は飛躍的に向上する。この飛散現象は連続的に生じ、Fig. 2(c)に示すように、2つの液相が相互に分散するような状態が実現できることになる。2つの液相にはもともと密度差があるので、分散状態を保持することは困難となるが、この領域内のメタルとスラグの密度差は

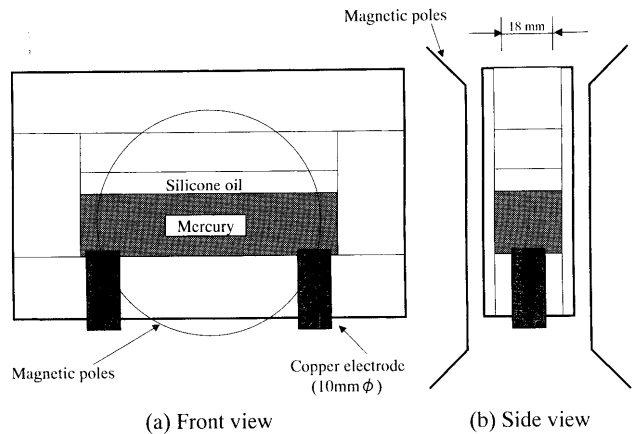


Fig. 3. Schematic view of the reservoir used in the experiments.

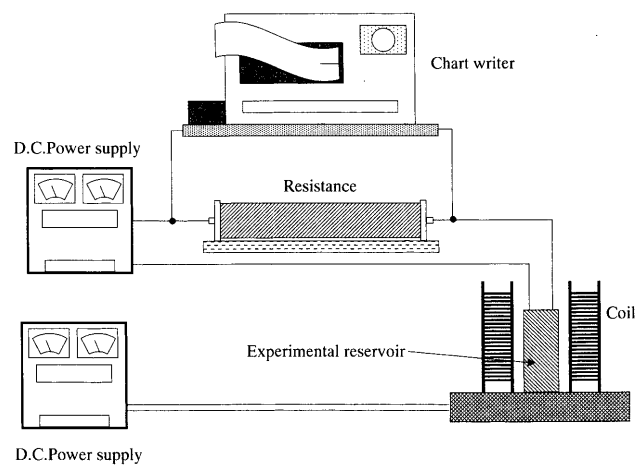


Fig. 4. Total system of the experimental apparatus.

ローレンツ力によってかなり小さくなっており、メタル中のスラグ滴の浮上分離は抑制されると考えられる。スラグ中の金属滴は重力によって沈降し、界面通過のエネルギー障壁によって界面上にある程度蓄積されると考えられる。

3. 実験

本プロセスにおいて支配的な現象である下層液体の飛散現象を明らかにするために以下に示す実験を行った。実験に用いた容器をFig. 3に示す。容器はアクリル製で、幅(内寸)を18mmで一定にし、長さを変えた容器をいくつか用意した。容器下部両端に直流電流を印加するための電極として10mmφの銅棒を装着した。この容器の中に所定量の水銀とシリコンオイルを封入し、水銀層の中心が直流電磁石の磁極の中心となるように容器を固定した。容器の長さは磁極の直径10mmよりも長く、電極が磁場の印加範囲に存在しないように設定した。実験装置の全体図をFig. 4に示す。容器は直流電磁石の磁極間に設置され、容器を横断する方向に直流磁場が印加された。直流電流は大型直流電源から供給し、容器下部の銅電極を介して容器の長手

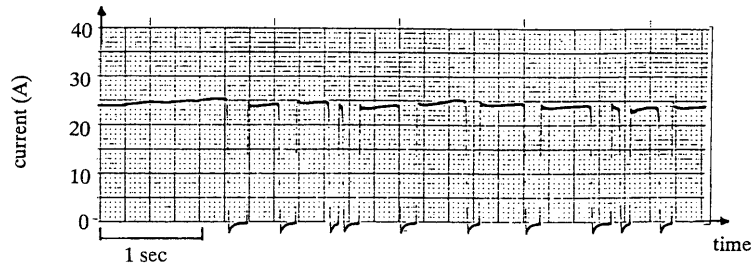


Fig. 5. Typical transition change of electric current.

Table 1. Experimental conditions.

Width of the reservoir (mm)	18			
Length of the reservoir(mm)	114	150	180	
Mercury Height (mm)	5	10		
Silicone Oil Height (mm)	5	10	15	
Electric Current (A)	80	(max)		
Magnetic Flux Density (T)	0.16	0.30	0.46	0.60

方向に印加された。水銀の電気伝導度は十分に大きく、容器中央では電流の向きはほぼ容器の長手方向に一致するものと考えた。この回路に直列に組み込まれた0.1Ωの固定抵抗の両端の電圧を測定することにより印加電流値を求めた。飛散現象は非常に速い現象と考えられるので測定には高速レコーダーを用いた。磁束密度はあらかじめ、磁束密度測定装置により測定した。Fig. 5に高速レコーダーの実際のチャートを示す。横軸が時間、縦軸は電流値を示す。図中の右方向に時間が進行しており、電流が徐々に増加し、ある瞬間に突然ゼロになっていることがわかる。これは電流が飛散により遮断されたことを示しており、この電流値で飛散が開始したことになる。この電流値は飛散現象が生じる最小のローレンツ力を与えると考えられるので、この電流値を臨界電流値、ローレンツ力を臨界ローレンツ力とする。種々の条件において印加磁場に対する臨界電流値を測定した。また、Fig. 5のチャートに示されるように飛散は連続的に生じており、これから飛散頻度についても同様の条件下で測定した。実験条件を Table 1 に示す。

臨界ローレンツ力の条件を、印加磁束密度と臨界電流密度の関係として Fig. 6~8 に示す。ここで、臨界電流密度は臨界電流値を水銀の断面積で除した値である。図中の実線(双曲線)は重力とローレンツ力が釣り合う条件を、水銀の密度を 13550 kg/m³ として計算した結果を示している。この双曲線との比較により、測定された臨界電流密度と印加磁束密度はほぼ反比例の関係にあることがわかる。すなわち、電流密度と磁束密度の積であるローレンツ力によって飛散開始の条件が支配されており、(2)式が適用できることがわかる。シリコンオイルが存在しない場合には、図に示すように臨界ローレンツ力は重力と同等かそれ以上であるのに対し、シリコンオイルが存在する場合には、重力

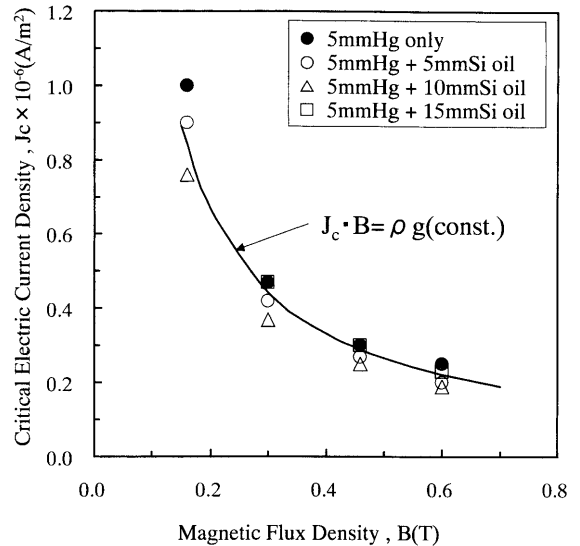


Fig. 6. Critical conditions for scattering of 5 mm height of mercury into various height of silicone oil in the case of 114 mm reservoir length.

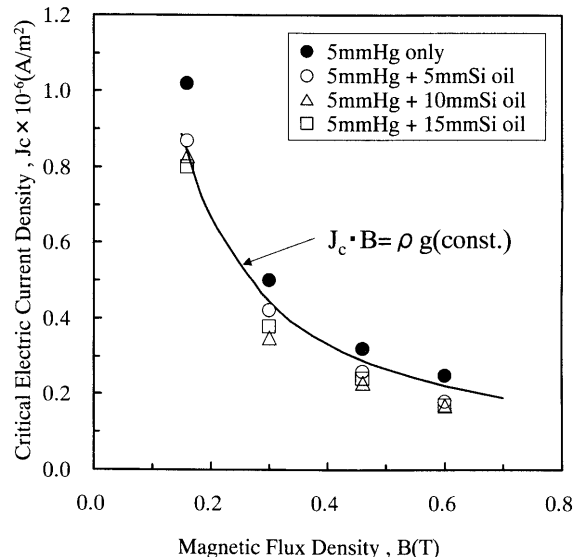


Fig. 7. Critical conditions for scattering of 5 mm height of mercury into various height of silicone oil in the case of 150 mm reservoir length.

よりも小さい値で飛散することも判明した。

本プロセスを実用化する場合、重要な因子となるのは、飛散頻度であり、それは最終的な物質移動速度を決定する

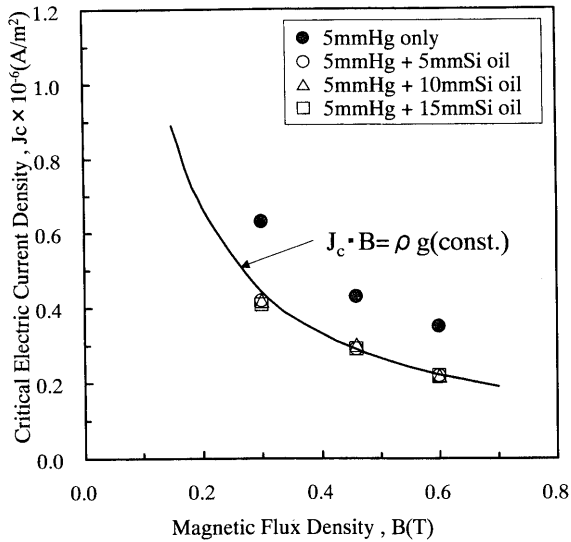


Fig. 8. Critical conditions for scattering of 5 mm height of mercury into various height of silicone oil in the case of 200 mm reservoir length.

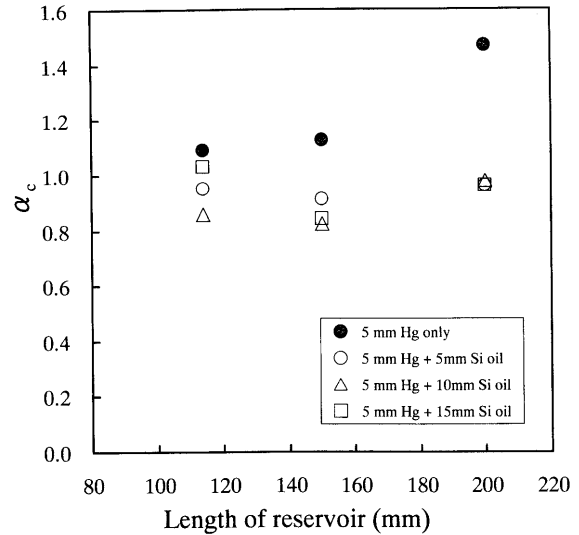


Fig. 10. Instability conditions of 5 mm height of mercury and various height of silicone oil.

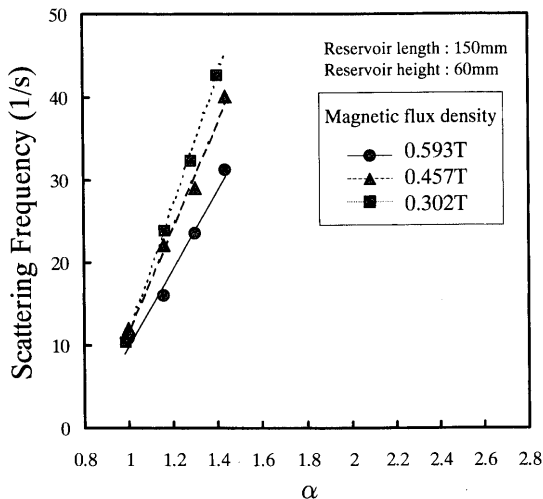


Fig. 9. Effect of magnetic flux density on scattering frequency, (5 mm Hg + 5 mm Si oil).

要因となる。Fig. 9に印加したローレンツ力と飛散頻度の関係を示す。Fig. 5より1秒間に電流が遮断した回数を読みとり飛散頻度とした。横軸の α はローレンツ力を重力で無次元化した量であり、次式で定義される。

$$\alpha = JB/\rho g \dots \dots \dots (3)$$

このグラフは α が1以上、すなわち、重力よりも大きなローレンツ力を作用させた状態での飛散速度の測定結果であり、ローレンツ力の増加により飛散頻度は上昇することがわかる。また、Fig. 9は印加するローレンツ力が同じでも、印加電流が大きい場合に、飛散頻度が大きくなることを示している。飛散開始の臨界条件は電流密度と磁束密度の積で整理できたが、ここではローレンツ力を用いて結果を整理できず、電流密度と磁束密度それぞれの影響が現れている。

4. 考察

本研究で提案する混合プロセスにおいては下層液体の上方への飛散挙動が根本的かつ支配的な現象であり、ここでは、飛散現象を臨界ローレンツ力と飛散頻度の2つに絞って理論的考察を行う。

Fig. 6~8の臨界電流値のプロットを双曲線で近似することにより、臨界ローレンツ力を算出し、それと重力の比を α_c として次式のように定義する。

$$\alpha_c = J_c B / \rho g \dots \dots \dots (4)$$

水銀表面には流動によって乱れが発生しており、それが不安定性と関係すると推察できる。そこで、水銀の高さとシリコンオイルの高さを変えて、 α_c と容器の長さの関係について調べた結果をFig.10, Fig.11に示す。これらのグラフから、飛散現象に対してシリコンオイルの有無が大きく影響していることがわかる。そこで、飛散現象が界面の不安定性に起因するためではないかと考え、以下のように考察する。

2液体が界面を介して成層しているときの界面の安定性は、Chandrasekharのテキスト⁷⁾に詳しくまとめられているが、界面を挟んで2液相が相対的に流速を持っていない場合にはRayleigh-Taylorの不安定性が支配的となり、下層液相と上層液相の界面が不安定になる波数と減衰あるいは増幅定数の関係式は次式で表される。

$$n^2 = gk \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} - \frac{k^2 \gamma}{g(\rho_2 + \rho_1)} \right) \dots \dots \dots (5)$$

減衰定数 n が正となる波数の外乱は増幅され、界面は不安定となり、負であれば減衰し界面は安定であるということ

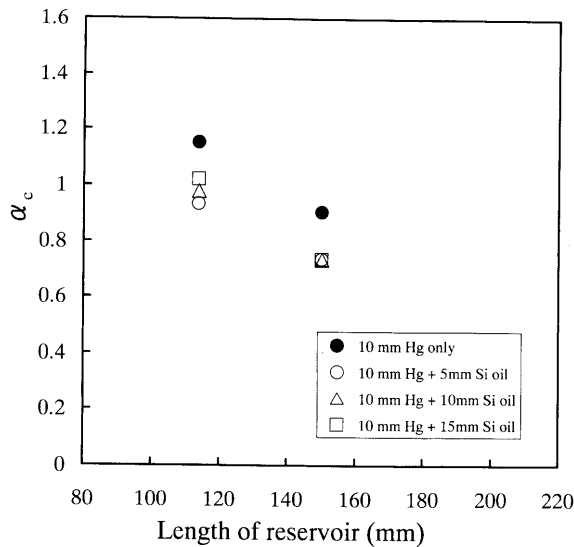


Fig. 11. Instability conditions of 10 mm height of mercury and various height of silicone oil.

を示している。右辺第2項は常に負であり表面張力は界面を常に安定化すると考えることができる。第1項が負の場合、すなわち下層液相の密度が大きければ界面は常に安定となる。上層液相の密度が大きい場合には、表面張力による安定化作用はあるものの、一般的には界面は不安定となる。ここでは、表面張力の項を無視し、さらに(5)式の導出過程において2液体に作用する重力が異なるとすると、界面不安定性の条件は次式のように求められる。

$$\rho_2 g > \rho_1 g' \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 g' は上向きローレンツ力によって減少する見かけの重力加速度であり次式で定義する。

$$g' = g - JB/\rho_1 \dots\dots\dots (7)$$

(6)、(7)式より表面張力を考慮しない場合にローレンツ力によってRayleigh-Taylorの不安定性が現れる条件は次式となる。

$$\alpha_L = 1 - (\rho_2/\rho_1) \dots\dots\dots (8)$$

シリコンオイルの密度は約930 kg/m³であり、この値から(6)式を用いて α_L を計算すると0.93程度となる。表面張力の効果そして容器壁との摩擦効果は界面をより安定にする効果を持つはずであり、Fig.10に示されるような、0.93を下回る α_c の値を説明できない。本プロセスにおいてはローレンツ力が磁極部分のみに印加され、Fig. 2(a)に示すような対流が生じる。そこで、界面に対流が存在する場合の不安定性が支配的になると考えた。Chandrasekhar⁷⁾によって導出されているKelvin-Helmholtsの不安定性にみかけの重力を導入すると次式となる。

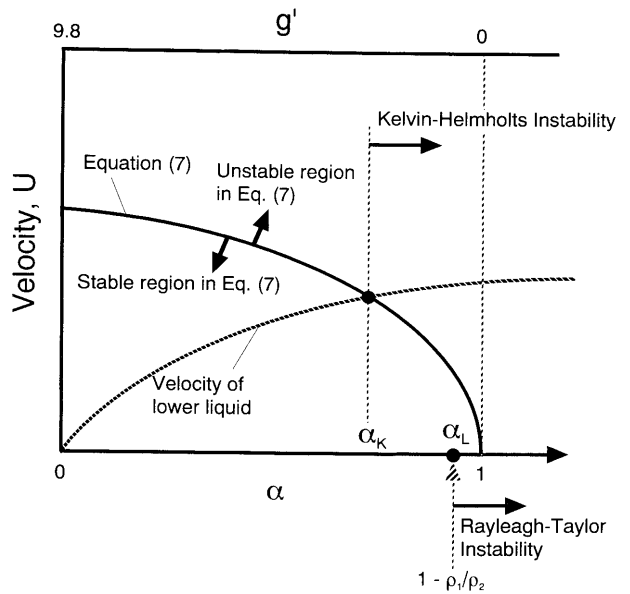


Fig. 12. Schematic drawing indicating both Kelvin-Helmholts Instability and Rayleigh-Taylor Instability.

$$(U_1 - U_2)^2 > \frac{2}{\delta_1 \delta_2} \sqrt{\frac{\gamma g' (\delta_1 - \delta_2)^2}{\rho_1 + \rho_2}} \dots\dots\dots (9)$$

$$\delta_1 = \frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_2}, \quad \delta_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$

(9)式は、流体の粘性を無視して導出されているので、下層液相と上層液相に界面を挟んで流速の差が存在することを仮定しているが、実在の流体でも、非常に薄い境界層を界面に含めれば、流速の差を考えることができる。本実験ではFig. 2(a)に示すように下層の水銀層は対流によってある程度の流速を有している。上層のシリコンオイルが静止しているとすれば(9)式の左辺は界面近傍での下層液相の流速となる。(9)式は、下層液相の方が重くRayleigh-Taylorの不安定性の観点からは安定状態でも、流速等の条件によってはKelvin-Helmholtsの不安定性が生じることを意味している。ここで評価した2つの不安定性をまとめた模式図をFig.12に示す。横軸はローレンツ力を無次元化した α であり、縦軸は下層液相の界面付近の流速 U とする。上側の横軸に(7)式で計算される見かけの重力加速度を併せて示す。ローレンツ力と重力が等しいときに g' は零となり、ローレンツ力が印加されない場合には9.8となる。

Rayleigh-Taylorの不安定性は α の値が(8)式より大きいときに現れる。一方、Kelvin-Helmholtsの不安定性は流速に依存し、安定領域と不安定領域の境界は図に示すように、 α の増加に伴って流速が減少する曲線で表される。下層液相の実際の流速は図に示すようにローレンツ力に伴い増加すると考えられ、図に示す α_K より大きな値で不安定性が現れる。トレーサーによる実測によれば流速は20 mm/s程度であり、これから計算された α は0.75程度となりFig.10

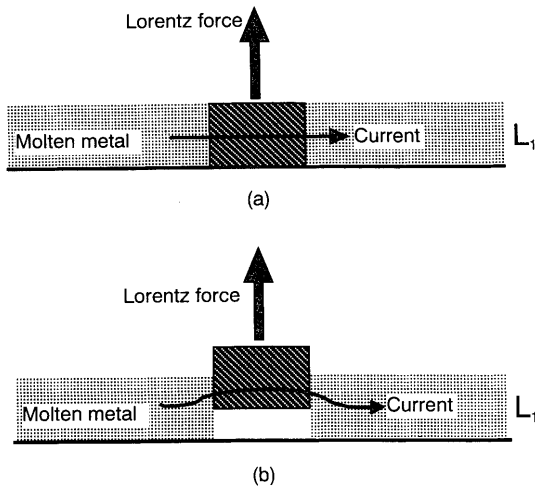


Fig. 13. Schematic drawing of scattering phenomena.

やFig.11の結果とほぼ一致する。シリコンオイルが存在しない場合には、(8)式が1程度の値になるのに対し、(9)式の右辺は非常に大きな値となり、Kelvin-Helmholtsの不安定性よりもRayleigh-Taylorの不安定性が支配的になると考えられる。実験結果においてもシリコンオイルが存在しない場合には α_c は1を越えており、Rayleigh-Taylorの不安定性によって飛散現象が生じていることがわかる。しかしFig.10とFig.11の結果は流動の影響だけでは完全に説明できない。実際には、流体の粘性、表面張力や容器壁との摩擦により、 α の値が大きくなることを考慮すれば、この理論的考察は実験結果をよく説明していることがわかる。水銀の深さが5mmの場合には、壁の拘束力が大きく、容器が長くなるにつれて α_c は大きくなっているが、10mmの場合には壁の摩擦よりも、流れによる液表面の乱れによる効果が大きくなり、長い容器の方が α_c が小さくなると考えられる。

次に飛散頻度についての考察を行う。Fig.13に飛散現象を模式的に示す。(a)の斜線で示した部分が単独にローレンツ力 F を受けて、上方にスライドしてゆくモデルを考える。それが液高 L_1 の距離を動くまでを飛散に要する時間とする。その時間とスライド距離との関係は運動方程式から求めることにより、飛散頻度は次式のように表現できる。

$$1/f_c \propto \sqrt{L_1/F} \dots \dots \dots (10)$$

飛散される部分は上方にスライドするに従い、Fig.13(b)に示すように残りの部分との接触面積が小さくなり、電流密度は増加する。その結果、(10)式の F が大きくなり、飛散頻度は増加する。これは、ローレンツ力は同じでも、電流密度の大きい方が頻度が上昇するというFig.9の結果を説明する。また、飛散現象が連続的に生じていることから、容器内の空間に飛散した熔融金属滴が定常的に存在し、熔融金属の高さ L_1 は小さくなると考えることができる。こ

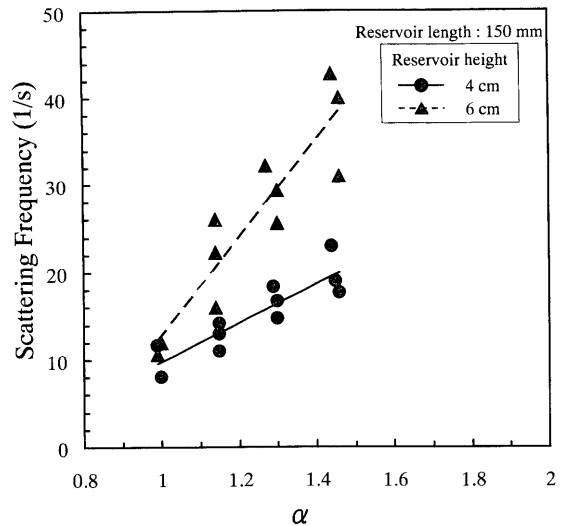


Fig. 14. Effect of reservoir height on scattering frequency, (5 mm Hg+5 mm Si oil).

のモデルの正当性を評価するためにFig.14に飛散条件を同一にし、容器の高さのみを変化させた結果を示す。容積の大きい方が飛散頻度が大きくなっており、飛散挙動が簡単なモデルで表現できることがわかる。

以上の結果を総合して、飛散挙動を次のように説明する。ローレンツ力を印加することにより、下層液体に対流が生じ、Kelvin-Helmholtsの不安定性によって、界面が乱れ、ある臨界値で飛散が開始する。飛散が開始すると、下層液体の深さが浅くなり、電流密度が増加する。この条件ではRayleigh-Taylorの不安定性も現れ、界面はさらに不安定となって飛散現象が連続的に進行すると考えることができる。

5. 結言

鉛直上向きのローレンツ力により見かけの重力を軽減させ、上方に飛散させて2液層を混合する過程で重要となる、飛散挙動を明らかにする実験と理論的考察を行い、以下の知見を得た。

(1) 2つの液相が成層する場合、Kelvin-Helmholtsの不安定性によって、界面が乱れ、飛散が生じる。その後はRayleigh-Taylorの不安定性も併せて生じ、飛散現象が繰り返される。

(2) 飛散頻度は(10)式で記述され、ローレンツ力が同一であっても、電流密度が大きい方が飛散頻度は大きくなる。

記号

- B, B : 印加する磁束密度 (T)
- F, F : ローレンツ力 (N)
- f_c : 飛散頻度 (1/s)
- g : 重力加速度 (m/s^2)

- g' : みかけの重力加速度 (m/s^2)
 J, J : 印加する電流密度 (A/m^2)
 J_c : 飛散が開始する臨界電流密度 (A/m^2)
 k : 2液相界面に現れる不安定波動の波数 (m)
 L : 液相の高さ (m)
 n : 増幅あるいは減衰定数 ($1/s$)
 α : 無次元化したローレンツ力 (-)
 α_c : 無次元化した臨界ローレンツ力 (-)
 α_K : Kelvin-Helmholtsの不安定性が現れる α 値 (-)
 α_L : Rayleigh-Taylorの不安定性が現れる α 値 (-)
 γ : 2液相界面の界面張力 (N/m)
 ρ : 液相の密度 (kg/m^3)
 添字
 1 : 下層液相における値
 2 : 上層液相における値

文 献

- 1) K.Morita and N.Sano: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 804.
- 2) H.Katayama and H.Kajioka: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 810.
- 3) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, K.Marukawa and S.Hara: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 584.
- 4) K.Marukawa, S.Hara and M.Sano: *ISIJ Int.*, **41** (2001), S36.
- 5) 小塚敏之, 河原正泰: 電磁力を利用した材料プロセッシングの新展開, 日本鉄鋼協会, 東京, (1999), 62.
- 6) T.Kozuka: *Denki Seiko*, **74** (2003), 21.
- 7) S.Chandrasekhar: *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Dover, New York, (1961), 428.