

# 回転磁界と移動磁界の同時印加による 溶融金属の電磁攪拌

谷口 尚司\*・上野 和之\*<sup>2</sup>・嶋崎 真一\*・大久保 光浩\*<sup>3</sup>・安藤 努\*<sup>4</sup>・笠原 奉文\*<sup>5</sup>

Electromagnetic Stirring of Liquid Metal by Simultaneous Imposition of Rotating and Traveling Magnetic Fields

Shoji TANIGUCHI, Kazuyuki UENO, Shin-ichi SHIMAZAKI, Mitsuhiro OKUBO, Tsutomu ANDO and Hirofumi KASAHARA

**Synopsis :** In order to realize a higher performance of metal materials, further progress in the technology of electromagnetic stirring of liquid metal is needed, because traditional electromagnetic stirrers using rotating magnetic field (RMF) and traveling magnetic field (TMF) have several undesirable characters like severe surface deformation and weak mixing in RMF; violent surface fluctuation in TMF. In the present study, a new electromagnetic stirrer, a double axis electromagnetic stirrer (DAEMS), composed of RMF and TMF is proposed and its performance is investigated using liquid gallium. There are two modes of DAEMS, one is upward imposition of TMF and the other is downward. The former is found to give a much stronger turbulent mixing than RMF under same rotational speed, which seems advantageous to disperse CaO particles into liquid iron in the desulfurization process. The latter is found to achieve a flat and calm free surface under a rotational motion with stronger turbulent mixing than RMF. This character is thought to be advantageous to extend widely the limit of stirring due to deformation and fluctuation of free surface.

**Key words:** electromagnetic stirring; rotating magnetic field; traveling magnetic field; double axis electromagnetic stirring; liquid metal; clean steel; fluid flow.

## 1. 緒言

溶融金属の攪拌は、成分や温度の均一化、精錬反応の促進、非金属介在物の凝集・分離、凝固組織の微細化と凝固偏析の軽減、粒子分散複合材料の製造など、様々な目的に広く利用されている。溶融金属の攪拌にはインペラーなどによる機械攪拌、ガス吹き込み攪拌、電磁攪拌などがある。中でも電磁攪拌は、溶融金属と非接触で攪拌が可能で、攪拌翼の溶損による不純物の混入がないこと、攪拌の形態を広範囲に選択できることなどの優れた特徴がある。そのため、溶解および溶湯保持を目的とした低～高周波誘導炉、合金成分と温度の均一化のための ASEA-SKF 炉、凝固組織や铸件品質改善のための連铸電磁攪拌など、実プロセスに広く用いられている。

電磁攪拌は、溶融金属に交流磁界を印加することにより溶融金属内に誘起される電磁力を利用するもので、印加する磁界の種類によって、固定磁界、回転磁界 (Rotating Magnetic Field, RMF)、移動磁界 (Traveling Magnetic Field, TMF) に分類される。固定磁界は誘導炉などに古くから利用されているが、その主な役割は加熱・溶解にある。これ

に対して、RMF はビレット連続铸造における電磁攪拌<sup>1)</sup>や遠心分離タンディッシュ<sup>2)</sup>に用いられ、TMF はスラブ連続铸造における電磁攪拌<sup>3,4)</sup>、連続铸造铸型内吐出流の加速制御<sup>5,6)</sup>、ASEA-SKF などに用いられている。電磁攪拌はアルミニウム製造の分野でも利用されており、攪拌凝固<sup>7)</sup>やアルミニウムスクラップの迅速溶解<sup>8)</sup>などにおいて重要な役割を演じている。

さて、近年様々な産業分野で、格段に高い清浄性や純度を有する金属材料が求められている。高純度・高純度の要求を満たす材料を製造するためには、溶融金属の極めて強い攪拌を実現することが不可欠となるであろう。このような観点からこれまでの攪拌法について見ると、RMF は遠心力によって液面が大きく変形することや、遠心力が外周部ほど大きくなるために乱流混合が十分に発達しないという問題がある。また、TMF は溶融金属中に乱流を発生するものの、液面が激しく変動してスラグや気泡を巻き込むという問題がある。これらの問題は、一層強力な攪拌を達成するための重大な障害となる。

このような問題を解決するために、本研究では RMF と TMF を重畳させた新しい攪拌法である二軸移動磁界攪拌

平成 17 年 12 月 2 日受付 平成 18 年 2 月 28 日受理 (Received on Dec. 2, 2005; Accepted on Feb. 28, 2006)

- \* 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-6-02 Aoba-yama Aoba-ku Sendai 980-8579)
- \* 2 東北大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tohoku University)
- \* 3 東北大学大学院学生 (現: 日鉱金属 (株)) (Graduate Student, Tohoku University, now Nippon Mining & Metals Co., Ltd.)
- \* 4 東北大学大学院学生 (現: (独) 物質材料研究機構) (Graduate Student, Tohoku University, now National Institute for Materials Science)
- \* 5 (財) 電力中央研究所 柏江研究所 (Central Research Institute of Electric Power Industry)

法(Double Axis Electromagnetic Stirring, DAEMS)<sup>9)</sup>を提案し、その基礎的特性を検討することを目的とした。この方法は、RMFによって生じる液面の変形をTMFによって矯正するとともに、RMFでは不十分な乱流生成をTMFによって補うという機能を有する。また、TMFの向きを逆転させれば、液面に大きな窪みが形成されるとともに液内部に激しい混合が生まれるため、固体精錬剤の効率的な混入・分散が可能になると考えられる。なお、RMFとTMFとの同時印加自体は、古くは連続鋳造における電磁攪拌に実用され<sup>10)</sup>、最近では熔融アルミニウムの攪拌鋳造への適用<sup>11)</sup>が研究されている。しかし、本研究のように液面形状の制御の観点からの研究はいまだ行われていない。

## 2. 回転ねじれ磁界の適用

### 2.1 Vivèsの磁気攪拌装置

Vivèsは、永久磁石をらせん状に配列した円筒を、熔融金属を入れた容器の外側で高速回転する方法を提案している<sup>12)</sup>。らせん状に配置された磁石から発生する磁界は、円周方向に回転するのみでなく、軸方向にも移動することになる。その結果、回転の向きによっては遠心力による液面の変形を抑制したり、助長したりすることができる。それと同時に、熔融金属内に上下方向の流動が生じて、回転運動のみの場合よりも熔融金属全体の混合を高めることができる。Vivèsは、このような効果を実際に確認してはいないが、簡便な機構で回転と軸方向の重畳流動を実現しようとするアイデアは優れている。

### 2.2 回転ねじれ磁界による電磁ポンプ

安藤らは、Vivèsの原理を3相交流を用いて装置化している<sup>13-16)</sup>。彼らはFig. 1に示すように、回転磁界コイルをらせん状にねじり、回転方向と軸方向に駆動力をもつ液体金属用の電磁ポンプを開発した。このコイルを2極に配置することによって、円管内の液体金属中を磁界が貫通し、それが回転しながら軸方向に移動するために、円管の全断面で液体金属に軸方向の駆動力を与えられる点が本法の特徴になっている。この電磁ポンプの性能が液体Gaを用いた実験で調査されているが、鉄心を有するアニュラー型の電磁ポンプに比較すると効率は低い。

### 2.3 回転ねじれ磁界による攪拌装置

二軸移動磁界攪拌(DAEMS)について述べる前に、安藤らの回転ねじれ磁界の原理を適用した攪拌方法について述べる。コイルは、素線径1mmのホルマル銅線を12ターン、縦長の六角形に巻いたものを1ピースとし、これを斜め45度にして12ピース並べ、内径65mm、高さ200mmの円筒状に成型した。各コイルピースの重ね方によって、2極および4極の攪拌用コイルを作製した。作製した4極のコイルの概観をFig. 2に示した。

このように作製したコイルをFig. 3に示す環状の冷却用

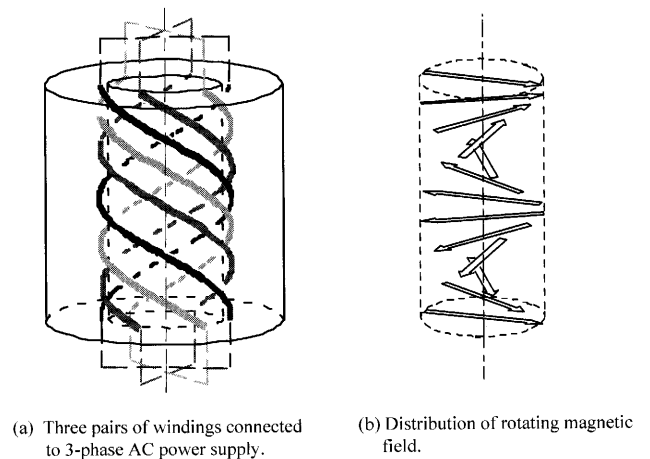


Fig. 1. Rotating twisted magnetic field applied to magnetic pump for molten metal.

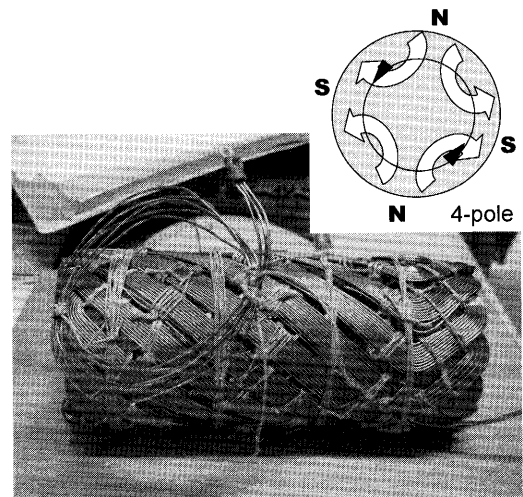


Fig. 2. Helical coil to generate a rotating twisted magnetic field.

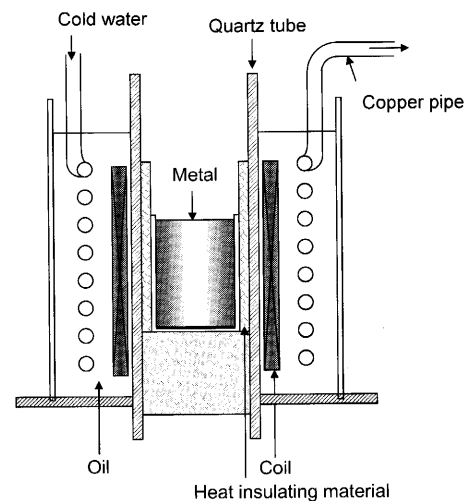


Fig. 3. Experimental apparatus used for liquid metal stirring.

オイルバス中に浸漬し、石英ガラス製内管の内側に、内径50mm、高さ100mmのプラスチック製円筒容器内に満たした液体Gaを設置した。Ga容器と石英管の隙間には断熱

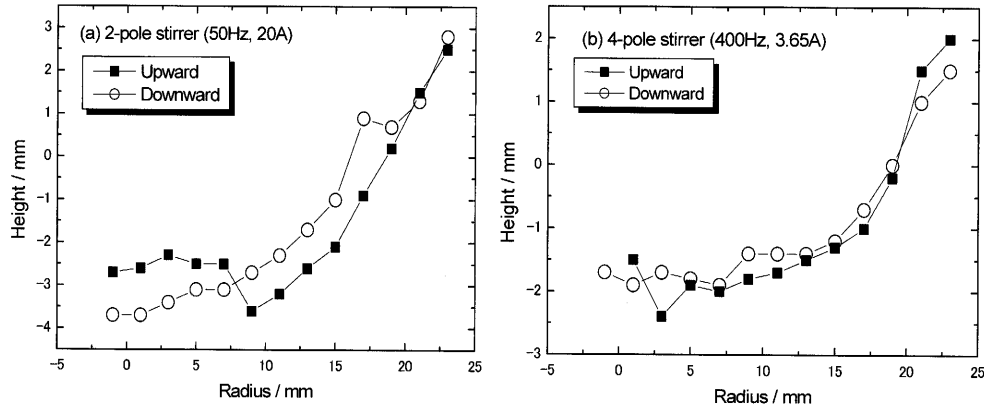


Fig. 4. Free surface shapes of liquid Ga stirred in a rotating twisted magnetic field with upward and downward directions.

材を挿入した。またオイルバス内には銅製の蛇管を浸漬してオイルを水冷し、通電時のコイルの発熱を防いだ。

さて、攪拌用コイルは斜め45度に傾いているため、液体Ga中に浸透する磁界も45度に傾いて移動しているはずである。このとき液体Gaは、磁界の移動に追従して傾斜角45度のらせん状に流れるものと考えられる。また、4極の攪拌コイルでは、電磁力が外周部にみに強く作用するために、遠心力によって盛り上がった外周部の液体Gaを下向きの流れ成分が引き下げるとともに、底面で反転して生じる中心部の上昇流が、窪みの底部を押し上げ、結果として液面が平坦に近づくものと考えられる。

実験では液体Gaの表面形状を電気探針法によって測定した。探針はタングステン製で、これを上下駆動装置に取り付けて降下させ、初めて導通が観測された位置を液面とした。Fig. 4に4極コイルの場合について、印加電流の周波数が50Hzと400Hzのそれぞれの場合に得られた液面形状を、磁界の移動の向きが上向きと下向きの場合について調べた。図より、いずれの周波数においても液面は中心で大きく窪んでおり、磁界の移動の向きによる液面形状の差異は認められなかった。なお、これらの場合の表皮の厚み  $\delta = (2/\mu_0\sigma\omega)^{1/2}$ 、 $\mu_0$ は真空の透磁率、 $\sigma$ は導電率、 $\omega$ は角周波数は、50Hzでは36.3mm、400Hzでは12.8mmである。

この結果は次の理由によって得られたものと考えられる。容器の形状は縦に長く、壁付近の下降流と中心部の上昇流とは相互に干渉合せて減衰する。さらに液面と底面で軸方向の流れは急に向きを変えなければならない。一方、回転方向には流れの向きはどこでも同じで干渉は少なく、急に向きを変えねばならないコーナーも存在しない。このため、磁界は傾斜角45度の方向に移動していても、軸方向の流れは発達せず、回転成分が卓越したものと考えられる。

以上より、回転ねじれ磁界による攪拌は当初の予測どおりには機能しないことが分かった。

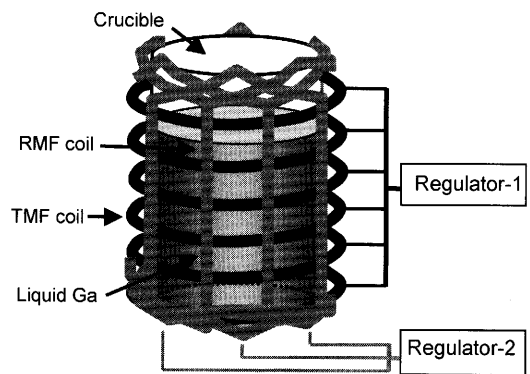


Fig. 5. Schematic of hybrid electromagnetic stirrer.

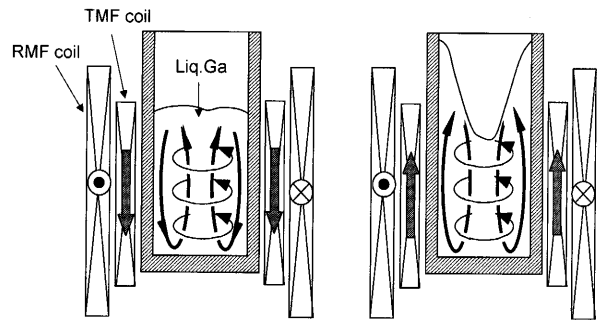


Fig. 6. Two modes of DAEMS: downward TMF for flat and quiet free surface; upward TMF for deformed and violent free surface.

### 3. 二軸移動磁界攪拌装置による液体Gaの電磁攪拌

#### 3.1 二軸移動磁界攪拌の原理とコイルの構成

##### 3.1.1 原理と機能

回転に比して流動抵抗の大きい軸方向の流れを強化するためには、回転方向と軸方向のそれぞれの流れを2種の磁界で個別に駆動することが望ましい。そこで本研究では、RMFと軸方向のTMFを同時印加する二軸移動磁界攪拌法DAEMSを考案した。その構成をFig. 5に、機能をFig. 6に示した。円筒状の液体金属容器の周りに、TMFコイルを

配置し、その外側にRMFコイルを配置した。RMFコイルよりTMFコイルを内側に設置したのは、流動抵抗の大きい軸方向の流れを強くするためである。RMFによる回転運動の遠心力によって液面に形成される窪みは、下向きのTMFによって抑制される。すなわちTMFによって発生する下向きの駆動力が壁近傍に下向きの流れを形成し、それが盛り上がった外周部の液面を下に引き下げる。この下向きの流れは底面に衝突して向きを変え、中心部で上昇流となって液面の窪みの底を押し上げる。結果として液面の変形が緩和される。RMFとTMFは互いに独立に制御できるため、液面の変形の度合いに応じてTMFの電流を調整すれば、液面を平坦に保つことができると考えられる。これに加えて、RMFのみでは不十分な混合作用を、軸方向の運動を加えることによって大きく向上させることができると考えられる。

逆にTMFによって壁面近傍に上昇流を形成させると、液面の窪みが更に深くなるとともに液内部の混合も改善することが期待される。最近、液体金属中に固体粒子を混入させるために、RMFによる旋回流を利用する試みが行われている<sup>17)</sup>。これによれば、旋回流による水銀表面の窪みに置いた各種の固体粒子は、濡れ性、密度、粒径にかかわらず水銀中に混入できると報告されている。しかし、水銀より低密度の固体粒子が、強い遠心力場で水銀中に一様に分散することは考えにくい。本報の二軸移動磁界攪拌を適用すれば、液中に混入した粒子を乱流混合によって分散させ得ると考えられる。このような特徴は、固体精錬粒子を溶鉄に分散して精錬を行う方法にも適用できると考えられ、機械攪拌を用いたKR法に代わる新しい精錬法の開発にも応用可能と思われる。

### 3.1.2 コイルの構成

Fig. 7にRMFコイルおよびTMFコイルの写真を示した。いずれのコイルも素線径1mmのホルマル銅線を用いて作製した。TMFコイルは直径63mmのガラス管に銅線を67巻きしたリング状のコイルピースを6つ並べたもので、全長120mmである。隣接するコイルピース間の電流の位相差は60度であり、3相2極のリニアモーターを構成している。RMFコイルは、細長い六角形のコイルピース（33巻き）を6つ重ね合わせて円筒形に整形後、TMFコイルの外側に設置した。このコイルにより3相2極の回転磁界を発生させた。RMFコイルをTMFコイルの外側に設置したのは、2極の回転磁界は熔融金属を貫通するため、コイル径が比較的大きくても回転駆動力を熔融金属に印加できるためである。これに対してTMFコイルは、強い軸方向駆動力を印加しなければならないため、できるだけ熔融金属に近づける必要があった。それぞれのコイルに流す電流の周波数は、RMFには商用周波数の50Hzを、TMFには、表皮の厚みが液体Ga半径の約1/3になるような周波数である1300Hzを適用した。実験ではこれらの周波数を固定し、

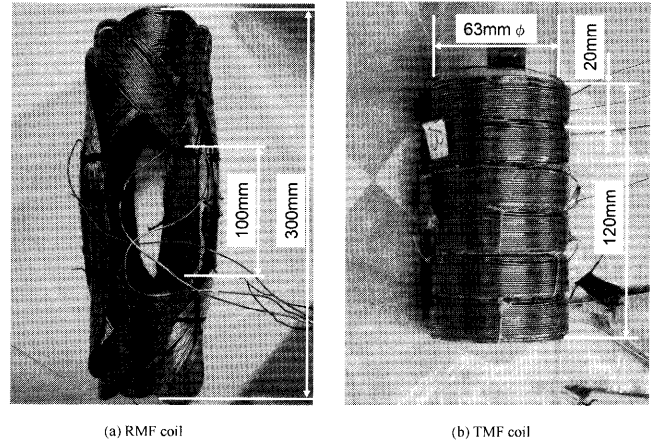


Fig. 7. Rotational and linear stirring coils for double axis electromagnetic stirrer (DAEMS).

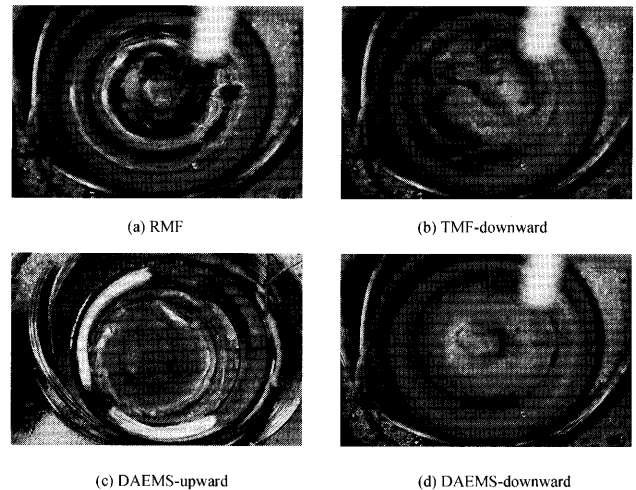


Fig. 8. Observation of free surface of liquid gallium for various stirring conditions.

それぞれのコイルに印加する電流を変化させて、液体Gaの液面形状、回転速度、液面変動、内部流速を測定した。なお電流制御には、RMFでは3相の電圧調整器を、TMFでは50~2000Hzの3相インバータを用いた。

### 3.2 液体Ga自由表面の形状

Fig. 8に液体Gaの液面形状の写真を示す。(a)はRMF単独印加による回転攪拌の結果であるが、液体Gaの中心が大きく窪んでいるのが観察できる。(b)はTMF単独印加で、その移動方向を下向きにした場合である。この場合には、液面が周期的に大きく変動するのが観察された。(c)はDAEMSでTMFの移動方向を上向きにした場合である。この場合には、液面の窪みがTMFの同時印加によって更に深く形成されている。最後に(d)はDAEMSでTMFの移動方向を下向きにした場合である。中心付近に小さな窪みが残っているものの、液面の形状は(a)のRMF単独印加の場合よりも平坦になっている。なお、後にも述べるが、(a)、(c)、(d)の場合には、いずれも液面が回転していることが確認された。

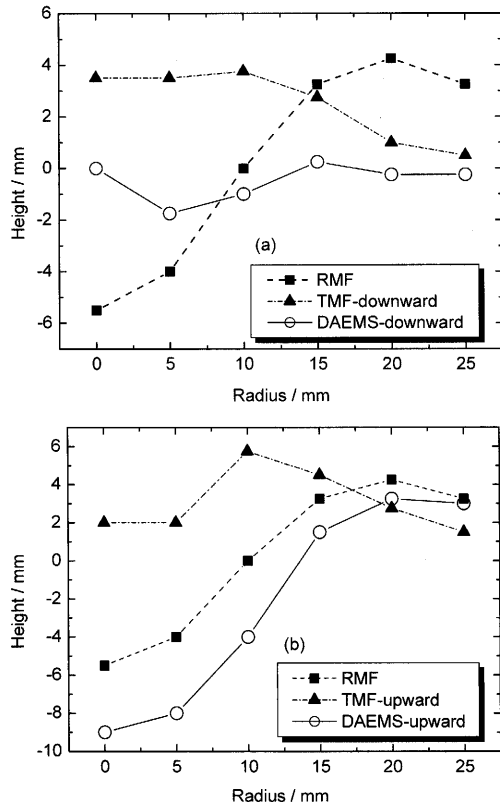


Fig. 9. Free surface profiles of liquid gallium for various stirring conditions.

Fig. 9にDAEMFによる液面形状をRMFおよびTMF単独印加の場合と比較したものを示す。なお、図に示した液面形状は、上方から下ろした探針が液面に初めて接触したときの高さを示したものであり、液面変動が大きいときはその位置は高く記録される。まずFig. 9(a)はTMFを下向きにした場合であるが、RMFによって液面に生成した約10 mmの高低差が、2 mm以内に抑制されており、液面はほぼ平坦になっていることが分かる。次にFig. 9(b)はTMFを上向きにした場合であるが、RMFでの高低差の10 mmが約12 mmに増加している。以上のように、当初期待した液面形状の制御がDAEMFによって可能になることが示された。

### 3.3 液体Gaの回転速度

液体Gaの回転速度は、直径30 mmの2枚羽根の回転翼を液面から深さ30 mmの中心部に浸漬し、その回転数をフォトダイオードで検知する方法によって測定した。測定は20秒間行い、その平均値を求めた。

Fig.10にRMFの電流を変化させた場合の、RMFとDAEMSとの回転速度の比較を示した。DAEMSについては、TMFの電流を12 A一定に保ち、RMFの電流を変化させている。またDAEMSにおけるTMFの移動方向が上向きと下向きのそれぞれの場合を比較している。図より、RMF単独の場合には電流の増加にほぼ比例して回転数が増加している。これに対してDAEMSの上向き印加では、

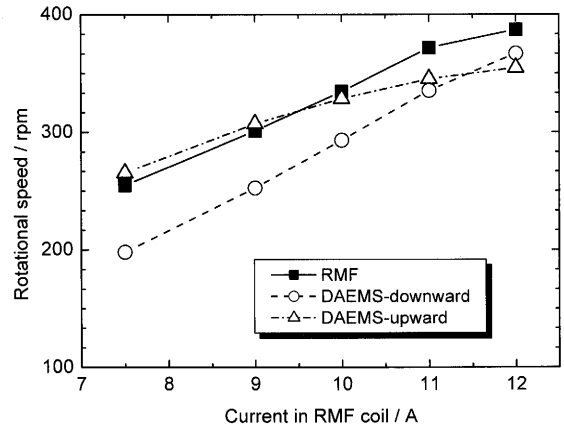


Fig. 10. Rotational speed of liquid gallium as a function of current in a rotational stirring coil under a constant current in a linear stirring coil (12 A, 1300 Hz).

電流が小さいところではRMFと差はないが、電流が大きいところでRMFよりも5%ほど回転速度が小さくなっている。一方、DAEMSの下向き印加では電流が小さいところで回転速度がRMFの場合より20%程度小さいが、電流が大きくなるとRMFの場合の回転速度に近づいている。これよりDAEMSにおいても液体Gaの回転運動が維持されることが明らかになった。

### 3.4 液体Ga液面の変動

液面変動の測定にはレーザー変位計を用い、サンプリング周波数20 Hzで測定し、5秒間の平均値を求めた。

Fig.11に(a) RMF単独の場合、(b) TMF（下向き）単独の場合、(c) DAEMS（下向き）のそれぞれについて、液面変動の測定結果を示した。(a)の場合には、他の場合に比べて変動は小さく、前述のようにRMFによる回転運動が剛体回転的であることを裏付けている。(b)の場合には変動は非常に強く、また短周期と長周期の変動が重畳しているように見える。これは、乱流に基づく短周期の変動に液面の波動運動が重なったためと思われる。(c)のDAEMSの場合には、変動の程度は(a)と(b)のほぼ中間で、(b)で見られた長周期の変動が見られないのが特徴である。

### 3.5 液体Ga内部の流速

流速測定には、予め液体Gaで校正したVivèsプローブを用いた。このプローブは、永久磁石による磁場の中を横切る導電体に誘起される起電力を電極で検知するものである。本実験環境では50 Hzと1300 Hzの交流磁場が重畳するため、測定される電圧信号を40 Hzのローパスフィルターに通した。サンプリング周波数は1 kHzとし、20秒間のデータを採取して平均速度および変動速度を求めた。

Fig.12(a)~(d)に各種条件の流速測定結果を示した。いずれも測定位置は液体Gaの高さの中心で半径20 mmの位置である。まずFig.12(a)は、RMFの場合について、円周方向流速の時間変化を示したものであるが、円周方向に $0.29 \text{ ms}^{-1}$ の平均流速が現れており、変動流速と平均流速

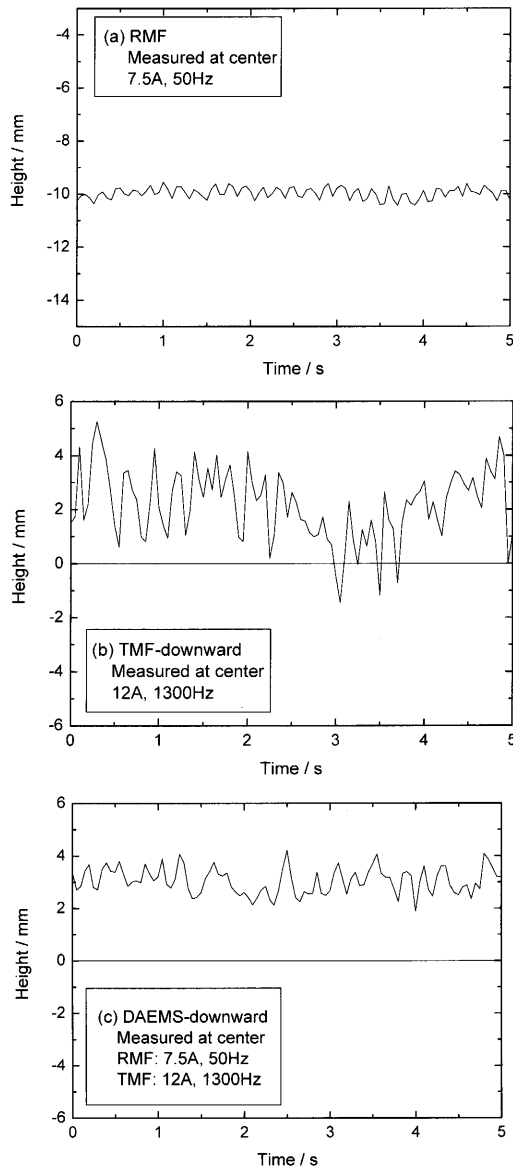


Fig. 11. Free surface fluctuation for various stirring conditions.

の比である乱流強度は3.8%であった。この乱流強度は後述する他の条件と比較すると著しく小さく、RMFによる回転攪拌では乱流の発達を抑えられることがわかる。これは、次の理由によると思われる。回転の駆動力は外周部ほど大きいため、遠心力も外周部ほど大きくなる。そのため、遠心力の小さい内周部の流体は外周部の流体と入れ替わることができず、乱流が発達できない。この現象はSpitzerらによって連続 casting の RMF の研究において指摘されている<sup>18)</sup>。

Fig.12(b)はTMFを下向きに加えた場合の軸方向流速の測定結果である。平均流速は $-0.257\text{ m s}^{-1}$  (下向き)、乱流強度は42%であった。これより、RMFと比べてTMFでは乱流の程度は極めて強く混合作用も大きいことが分かった。流速の測定結果には乱流変動によると考えられる短周期の変動と長周期の変動が重畳して現れている。長周期の変動

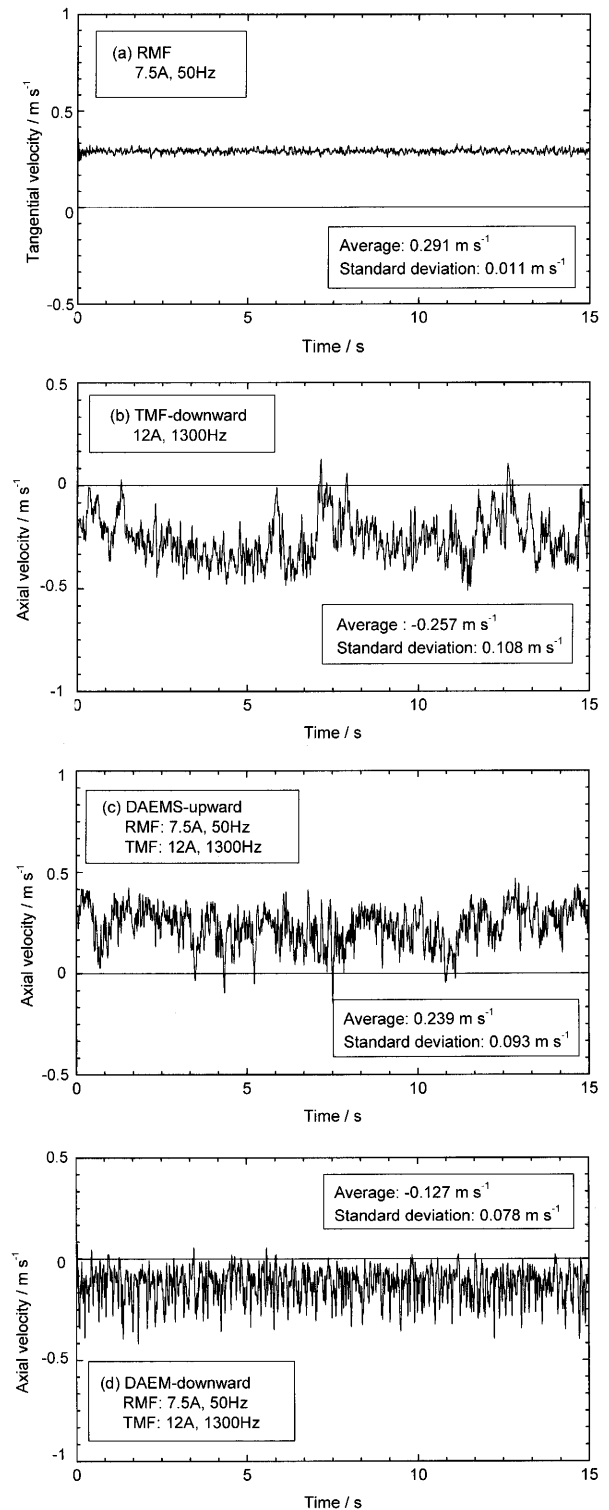


Fig. 12. Liquid velocities measured by the Vivès probe.

は、壁面近傍の下降流と中心部の上昇流との間の干渉によって生じたものと思われる、これがFig.11(b)の激しい液面変動につながったものと考えられる。このような装置規模の変動は、電磁攪拌の限界となるもので、強力な攪拌機能が求められる次世代攪拌装置において克服されるべきものであると考えられる。

Fig.12(c), (d)はDAEMSの結果であり、(c)がTMFの上向

Table 1. Flow characteristics of various stirring modes.

Mode	Free surface		Rotation	Turbulence
	Shape	Fluctuation		
RMF	Concave	Weak	Strong	Weak
TMF	Irregular	Strong	---	Strong
DAEMS	Up	Concave	Strong	---
	Down	Flat	Medium	Strong

き印加, (d)が下向き印加に対応する。流速成分はいずれも軸方向である。(c)の場合には平均流速は $0.239 \text{ m s}^{-1}$ , 乱流強度は39%であり, Fig.12(b)のTMF単独印加の場合と同程度であった。また流速波形を見ると, TMF単独印加の場合に見られた長周期の変動は顕著ではなくなっている。これよりDAEMSの上向き印加においては, RMFの回転運動を保持したまま, TMFの単独印加と同程度の乱流混合を実現できることが分かった。つぎにDAEMSを下向きに印加した(d)の場合には, 平均流速は $-0.127 \text{ m s}^{-1}$ , 乱流強度は61%であり, TMF単独印加と比べて乱流強度は増加しているが, 平均流速は約半分減じている。Fig. 12で見られたように, この条件では回転速度も若干減少していることも合わせて, DAEMSの下向き印加における流動現象については更なる研究が必要である。

以上の知見をまとめるとTable 1のようになる。

#### 4. 二軸移動磁界攪拌装置の応用

最後に, 本研究でその特性を調査したDAEMSの応用について考えてみよう。DAEMSの上向き印加の場合には, RMFの場合に見られる液面の變形がさらに大きく現れるが, RMFの弱い乱流混合はTMFに匹敵する強い乱流混合に置き換わる。このような特性は, スクラップの迅速溶解や, 固体精錬粒子の分散による精錬促進などに望ましく, その利用の可能性が今後検討されるべきである。DAEMSの下向き印加の場合には, RMFの場合に見られる液面の變形と弱い乱流混合が改善され, 強い攪拌状態においても液面が平坦で変動の小さい条件を得ることができる。このような特性は, 著しく強力な電磁攪拌を印加する場合に望ましい特性であり, 従来の電磁攪拌の限界であった液面の變形と変動を抑制しながら, 原理的には限界のない強攪拌を印加できる次世代の電磁攪拌装置につながる技術になり得る。このように強力な電磁攪拌は, 精錬反応の促進, 介在物凝集の促進, 凝固組織微細化と偏析防止などの技術に直結する。例えば介在物凝集については, 溶鋼の攪拌強化によって乱流エネルギー消散速度を増加させれば, 乱流凝集速度が速まり, 短時間で微小介在物を巨大介在物に肥大化させることができる。このとき, 液面の変動が少なければ, 肥大化した介在物を液面またはその上のフラックスに

吸収させることができる。また, 介在物を凝集させた後にRMFに切り替えれば, 介在物を回転中心に迅速に集めて更に巨大な集合体として容易に除去することができるであろう。

#### 5. 結言

本研究では, これまでの電磁攪拌の主流であった回転磁界(RMF)および移動磁界(TMf)による攪拌の欠点を補い, かつ新たな機能を生み出すことを目的として, これらを重畳した回転ねじれ磁界および二軸移動磁界による液体Gaの攪拌実験を行った。実験では主に液面の変形と攪拌に注目した測定を行った。その結果, 以下の結論を得た。

(1) 回転ねじれ磁界による攪拌では回転運動が卓越するために, 液面形状の変化が認められなかった。

(2) RMFの単独印加では, 遠心力によって液面に窪みが生じ, 液面の変動および液本体の乱流変動はいずれも極めて小さいレベルに止まった。一方, TMFの単独印加では, 著しい液面変動と激しい乱流変動が生じた。

(3) DAEMSにおけるTMFを上向きに印加すると, 液体Gaの回転速度はRMFの単独印加の場合と同程度であったが, 液面の窪み深さと変動がRMFの単独印加の場合より大きくなり液本体の乱流変動も著しく増大した。

(4) DAEMSにおけるTMFを下向きに印加すると, RMFの単独印加で見られた液面の窪みが緩和され, 液本体の乱流変動は増大する一方, 液面変動はTMFの単独印加よりも緩和された。

(5) DAEMSの特性の有効な利用法として, スクラップの迅速溶解や, 粒子の混入による複合強化, 固体精錬剤粒子の分散による精錬促進, 精錬反応の促進, 介在物凝集の促進, 凝固組織微細化と偏析防止などが挙げられた。

本研究は平成15, 16年度の日本鉄鋼協会戦略的研究課題からの支援の下に行われたものである。ここに深甚なる謝意を表す。

#### 文 献

- 1) A.A.Tzavaras and H.D.Brody: *J. Met.*, **36** (1984), No. 3, 31.
- 2) Y.Miki, H.Shibata, N.Bessho, Y.Kishimoto, K.Sorimachi and T.Hirota: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 239.
- 3) E.Takeuchi, H.Fujii, H.Tanno, J.Maruno, I.Takao, K.Furugaki and H.Kitamura: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 1615.
- 4) Y.Tozaki, T.Watanabe, M.Toyoda, J.Yosiyama and S.Kobayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), S228.
- 5) J.Kubota, N.Kubo, M.Suzuki, T.Ishii, R.Nishimachi and N.Aramaki: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 271.
- 6) N.Kubo, T.Ishii, J.Kubota and T.Ikegawa: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 556.
- 7) C.Vivès: *Metall. Trans. B*, **23B** (1992), 189.
- 8) Y.Ikeda: *Fuji Jihō*, **68** (1995), 242.
- 9) S.Taniguchi, K.Maitake, M.Okubo, T.Ando and K.Ueno: Proc. 4th Int. Conf. Electromagnetic Processing of Materials, EPM2003, 2003, Lyon, France, (2003), 339.
- 10) C.C.Alexion, S.B.Kuznetsov, R.D.Nathenson and R.M.Slepian: Conf. Rec. IEEE IAS Annual Meeting (Ind. Appl. Soc.) 20, (1985), 122.

- 11) A.Cramer, S.Eckert, Ch.Heinzelmann, C.Zhang and G.Gerbeth: Proc. 4th Int. Conf. Electromagnetic Processing of Materials, EPM2003, Lyon, France, (2003), 359.
- 12) C.Vivès: Proc. 1st Int. Symp. Electromagnetic Processing of Materials, EPM' 94, Nagoya, Japan, (1994), 223.
- 13) K.Ueno, T.Ando, S.Taniguchi and T.Takagi: Proc. 3rd Int. Symp. Electromagnetic Processing of Materials, EPM2000, Nagoya, Japan, (2000), 491.
- 14) T.Ando, K.Ueno, S.Taniguchi and T.Takagi: *IEEE Trans. Mag.*, **38** (2002), 1789.
- 15) T.Ando, K.Ueno, S.Taniguchi and T.Takagi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 849.
- 16) T.Ando, K.Ueno, S.Taniguchi and T.Takagi: *IEEE Trans. Mag.*, **40** (2004), 1849.
- 17) Y.Gelfgat, M.Skopis and J.Grabis: Proc. 15th Riga and 6th PAMIR Conf. Fundamental and Applied MHD, Vol. 2, Riga, (2005), 19.
- 18) K.H.Spitzer, M.Dubke and K.Schwerdtfeger: *Metall. Trans. B*, **17B** (1986), 119.