

氏名	しまさき しんいち 嶋崎 真一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成14年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)金属工学専攻
学位論文題目	水モデル実験による熔融金属中介在物粒子の 流体力学的挙動に関する研究
指導教官	東北大学教授 谷口 尚司
論文審査委員	主査 東北大学教授 谷口 尚司 東北大学教授 八木 順一郎 東北大学教授 溝口 庄三 東北大学助教授 上野 和之

論文内容要旨

1. 緒論

本研究は、金属製造プロセスにおける熔融金属中介在物の挙動に関する基礎研究である。熔融金属中にある介在物粒子は、乱流中における相対速度の減少、壁付着現象、凝集など様々な挙動を示すことが知られている。高度な介在物制御を行うためには、これらの挙動に関する詳細な知見が必要とされるが、熔融金属中にある介在物粒子の挙動に関しては、不明な点が数多く残されているのが現状である。

そこで、本研究ではこのような現状をふまえ、熔融金属中の微小介在物の流体力学的挙動に注目し、水モデル実験による基礎研究を行った。

研究内容は大きく3つに分けられ、それぞれ

- ・ 乱流中への粒子巻き込み挙動(第2、3章)
- ・ 乱流中の粒子相対速度(第4、5章)
- ・ 攪拌槽流動の数値シミュレーション(第6章)

となっている。

2. 乱流中への粒子巻き込み挙動(第2、3章)

溶鋼中における介在物粒子は複雑な挙動を示すことが知られている。特にスラグ界面近傍における粒子の界面への捕捉や再巻き込み、壁近傍における壁付着現象などは、溶鋼中における介在物挙動のシミュレーションのための境界条件として重要である。

本研究では、乱流中への粒子巻き込み挙動を検討するために、機械式攪拌槽を用いて粒

子巻き込み臨界条件の測定（第 2 章）と巻き込みおよび沈降頻度に関する検討（第 3 章）を行った。

2.1. 粒子巻き込み臨界条件の測定

実験には浮上性の粒子と沈降性の粒子の 2 種類を整粒して用いた。浮上性粒子は自由表面からの巻き込み、沈降性粒子は固体壁（槽底）からの巻き込みに相当する。

攪拌状態にある攪拌槽にこれらの粒子を投入し、槽内に巻き込まれた粒子濃度の攪拌数依存性を測定した。粒子濃度の測定には、粒子による散乱光強度をフォトダイオードで測定することによって得ている。

Fig.1 に測定された粒子濃度の攪拌数依存性のグラフを示す。図は沈降性粒子のものであり、攪拌数が小さな時には粒子の大半は槽底に沈降しているが、攪拌数の増大とともに次第にバルクに巻き込まれ、槽内の粒子濃度が大きくなり、最終的に粒子濃度が飽和していることが分かる。ここで、飽和濃度の 1/2 に達したときの攪拌数を臨界攪拌数 n_c と定義し、以下ではこの臨界攪拌数を用いて結果を考察する。

Fig.2 は臨界攪拌数の粒子径依存性のグラフである。沈降性の粒子の場合は、粒子径が大きくなるに従って臨界攪拌数が大きくなっており、大きな粒子ほど巻き込まれにくいといった結果が出ている。一方、浮上性粒子の場合は臨界攪拌数に粒子径依存性がほとんど見られない。測定に使用した浮上性粒子の粒径範囲が広いことを考慮すると、説明を要する結果である。

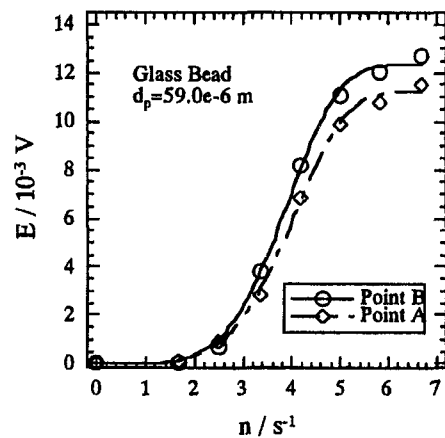


Fig.1 Relation between particle concentration and agitation speed.

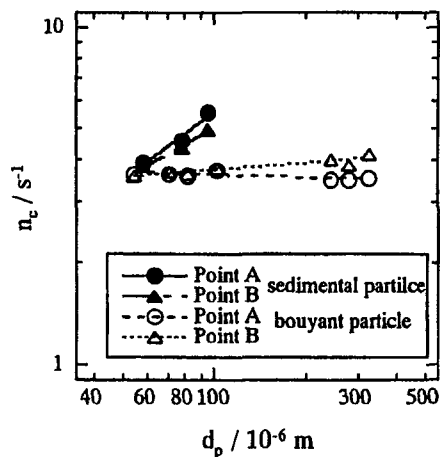


Fig.2 Relation between critical agitation speed and particle diameter.

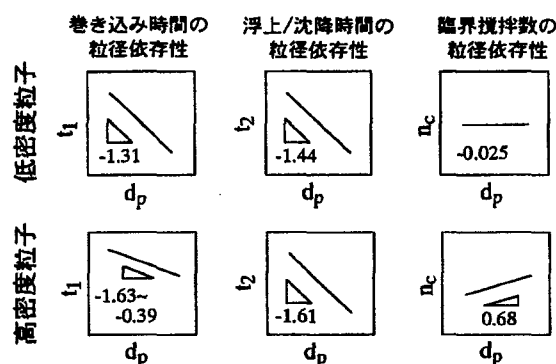
2.2.巻き込みおよび浮上／沈降頻度に関する検討

前節での結果を説明するために、粒子の巻き込み挙動を以下の 2 つの要素に分けて考察した。

- ・粒子の液面または槽底からの巻き込まれやすさ（巻き込み頻度）
- ・粒子の液面または槽底への浮上／沈降しやすさ（浮上／沈降頻度）

定常状態で攪拌されている槽内の粒子濃度は、これら 2 つの要因により決定されている。本研究では、攪拌数を瞬間的に変化させたときの槽内粒子濃度の応答性を測定することにより、これら 2 つの頻度の粒子径依存性を検討した。

測定の結果、高密度粒子の場合は、巻き込み時間の粒子径依存性よりも沈降頻度の粒子径依存性の方が大きいという結果が得られた。そのため、粒子径が大きくなると粒子の槽底への沈降が多くなるため、臨界攪拌数が大きくなるものと考えられる。一方で、低密度粒子の場合、巻き込み時間と浮上時間の粒子径依存性がほぼ同程度の値となった。すなわち、粒子が大きくなるほど巻き込まれやすくなるが、同時に液面に捕捉されやすくなるため、両者が打ち消し合って、結果として臨界攪拌数に粒子径依存性が見られなかったものと考えられる（右図参照）。



さらに巻き込み挙動をビデオカメラによって詳細に観察した結果、バルクへの巻き込みは異相界面近傍に間欠的に発生する縦渦によって起こっており、低密度粒子と高密度粒子ではその縦渦に対する挙動が異なっていることが明らかにされた。

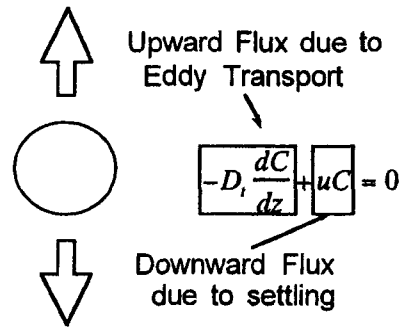
3.乱流中の粒子相対速度（第 4、5 章）

鉄鋼製造プロセスにおける溶鋼流れは一般に乱流であるが、乱流中では粒子の相対終末速度が変化し、静止流体中のものと異なることが報告されている。この現象は乱流渦と粒子の相互作用によるものと考えられるが、その詳細は未だ不明である。現在の介在物除去プロセスは、溶鋼と介在物の密度差を利用した浮上分離が主流であり、粒子の相対浮上速度を把握することは、プロセスの設計・改善のために重要な要素となっている。

そこで本研究では、乱流溶鋼中における介在物粒子の相対速度に着目し、水モデルを用いて実験を行った。

3.1.実験方法

機械攪拌槽に粒子を投入し、所定の攪拌数で攪拌する。攪拌槽内の粒子は乱流によって槽内に分散させられる一方で、重力により沈降する。攪拌槽内の乱流が一定であると仮定すると、定常状態では上向きの粒子濃度流束と下向きの粒子濃度流束が釣り合うために、以下の式が成立する（右図参照）。



$$-D_r \frac{dC}{dz} + uC = 0$$

ここで D_r は乱流拡散係数、 C は粒子濃度、 u は乱流中における粒子の相対速度、 z は鉛直方向の座標である。上式を積分すると、

$$C = C_0 \exp\left(\frac{u}{D_r} z\right)$$

が得られる。すなわち、攪拌槽内の粒子濃度分布 u/D_r と乱流拡散係数 D_r を実験的に求めることによって、乱流中における粒子の相対速度 u を評価することができる。槽内における粒子濃度分布は、槽内に投入した粒子による散乱光強度をフォトダイオードで測定することによって得た。また乱流拡散係数は、攪拌槽内に少量の牛乳を投入して槽内で均一になる時間を測定することによって評価している。

3.2.結果と考察

Fig.3 に攪拌槽内における高密度粒子の粒子濃度分布の測定例を示す。横軸の z は槽底からの高さを表しており、 $z=0\text{cm}$ が槽底、 $z=19\text{cm}$ が水面に相当している。また縦軸の E はフォトダイオードで測定された起電力であり、粒子濃度と比例関係にあることが予備実験により確認されている。図より槽底付近の濃度が高く、 z が大きくなるに従ってほぼ指数関数的に減少していることが分かる。また攪拌数の増加とともに、粒子濃度分布が一様に

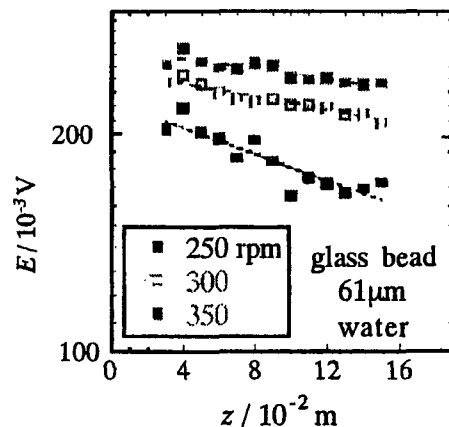


Fig.3 Distribution of particle concentration in vertical direction.

近づいていることが分かる。低密度粒子についても同様な実験を行った結果、低密度粒子の場合は水面付近の濃度が高いといった結果が得られている。

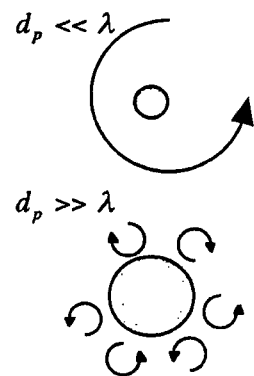
粒子濃度分布と拡散係数より、乱流中における粒子の相対速度を求めたものを Fig.4 に示す。図において $n=0\text{rpm}$ の場合が静止流体中の終末速度に相当する。攪拌数の増加とともに、粒子の相対速度が減少していることが分かる。

これらの結果は抵抗係数の増大分として、以下の無次元相関式にまとめられた (Fig.5 参照)。

$$\frac{C_D - C_{D0}}{C_{D0}} = 0.619 \cdot Re^{-1.38} \cdot \left(\frac{d_p}{\lambda}\right)^{3.47}$$

ここで C_D および C_{D0} はそれぞれ乱流中および静止流体中の抵抗係数である。また Re は粒子レイノルズ数、 d_p/λ は粒子径と最小渦径の比である。

相関式をみると、抵抗係数の増大分は d_p/λ に大きく依存している。粒子径が乱流の最小渦径よりも十分に小さい場合、粒子は渦の中に完全に取り込まれ、粒子の周辺の流れ場は層流に近いものになる。そのため、抵抗係数は層流の場合と比較してそれほど変化しない。一方、粒子径が最小渦径よりも大きい場合は、粒子は周囲を小さな渦で囲まれるため、抵抗係数が著しく増大したものと考えられる (右図参照)。



3.3. 振動流中における粒子相対速度

前節では乱流中の粒子相対速度の減少の原因を渦との相互作用にあると考えた。ここではそのことについて、別の面から考察してみた。

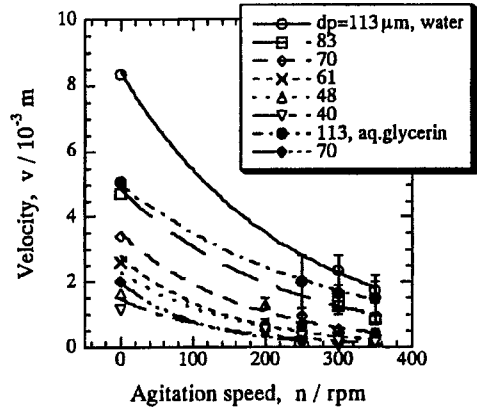


Fig.4 Change in slip velocity of sedimental particle with agitation speed.

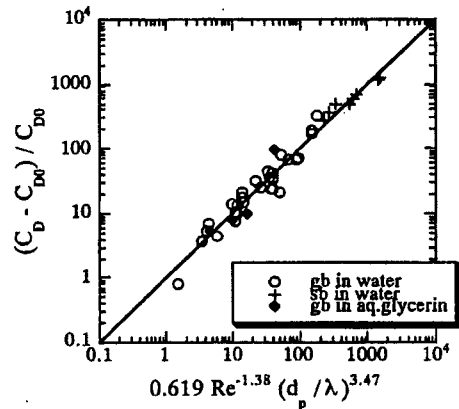


Fig.5 Dimensionless Correlation.

乱流は様々なサイズの渦の集合であると考えることができる。粒子はこれらの渦の影響を受けながら運動しているが、乱流中における渦を直接取り扱うのは困難である。そこで渦を正弦波振動として単純化して考え、その振動流が粒子相対速度に及ぼす影響について実験および計算を行った。

長方形のセル容器に動粘度を調整した液を満たし、セル容器を取り付けた振動台をカムによって強制的に振動させた。セル内に粒子を投入し、高速度カメラで粒子運動を観察することにより、振動流中における粒子挙動を測定した。粒子挙動の計算には、履歴項を考慮した BBOT 方程式を用いている。

Fig.6 は、平均の相対速度の粒子径依存性である。縦軸は振動流中における相対速度を静止流体中のもので規格化したものである。粒子径を小さくするに従って、相対速度が次第に小さくなっていることが分かる。また、実測値と計算値が良く一致しており、履歴項を考慮した BBOT 式によって、振動流中の粒子運動が良く表されていることが分かる。他にも振動の周波数依存性、流体の動粘度依存性などについて検討を行ったが、いずれの条件においても、相対速度の減少が見られた。

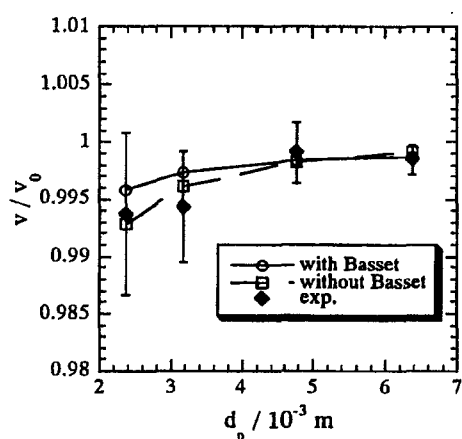


Fig.6 Relation between slip velocity and particle diameter.

しかし、ここで観察された相対速度の減少は、高々数パーセントであり、乱流攪拌槽内の測定で得られたような大きな速度の減少は見られなかった。すなわち、乱流中における粒子速度の減少は、単に乱流を振動流と仮定したモデルでは表すことができないことが明らかにされた。

4. 攪拌槽流動の数値シミュレーション (第6章)

溶鋼中の介在物を効率的に除去するためには、溶鋼の流動状態を把握しておく必要がある。しかし、実プロセスにおいてこれらを直接測定することは困難であるために、数学的なモデルを用いた数値計算によるシミュレーションが用いられており、現在ではこれらの数値シミュレーションは、プロセスの設計や予測のためには必要不可欠な手段となっている。

本研究では数値計算により攪拌槽内流動の数値シミュレーションを行い、本論文で得られた結果と比較・検討してみることを目的とした研究を行った。

数値シミュレーションにおいては、乱流モデルとして標準型の k-εモデル、攪拌槽の計算モデルとして MRF (Multiple Reference Frame) モデルを用いた。また、計算の妥当性を確認するために、攪拌所用動力を用いた乱流エネルギー消散速度の測定と、LDV (レーザードップラー流速計) を用いた流速測定を行い、計算結果と比較検討した。

Fig.7 に乱流エネルギー消散速度の計算値と測定値を比較したものを示す。図より、両者が非常に良く一致していることが分かる。LDV による流速測定の結果も比較的良く一致しており、計算によって攪拌槽内の流れを再現できることが確認された。

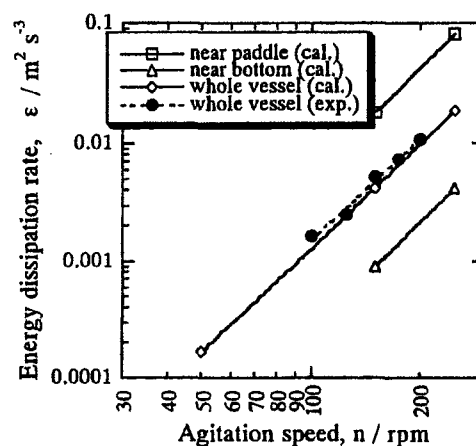


Fig.7 Relation between energy dissipation rate and agitation speed.

5. 結論

本研究は、金属製造プロセスにおける熔融金属中在物の挙動、その中でも特に乱流中への異相界面からの粒子巻き込み現象と、乱流中における粒子相対速度についての基礎研究である。基礎研究によってこれらの現象を一つ一つ明らかにしていき、モデルに組み込んでいくことで、より現実的な介在物予測モデルを構築することができるものと考えられる。

審査結果の要旨

金属材料の欠陥には種々あるが、中でも介在物起因の欠陥は製品に致命的な障害を与えるものが多く、その低減のためのプロセス改善が求められている。しかし、近年の介在物に対する要求レベルは極めて高く、材料によっては $5\mu\text{m}$ 程度の介在物でも問題となるケースも見られる。これまで介在物問題への対策は、プロセスの対症療法的改善によって行われてきたが、厳しい要求レベルに応えるためには、溶融金属中における介在物挙動の本質的理解に基づいた改善策の実施が不可欠になっている。本論文は、溶融金属中介在物の 2、3 の流体力学的挙動に着目し、水モデル実験によってその挙動を解明することを目的にしたもので、全編 7 章と補遺からなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では流動状態が明確にされている乱流攪拌槽内の粒子巻き込み現象に着目し、水より低密度の中空ガラス粒子および水より高密度のガラス粒子の 2 種について、液面あるいは槽底から液本体への粒子巻き込みの臨界条件を明らかにした。すなわち、液本体に巻き込まれた粒子量が 50% となる攪拌数を臨界攪拌数とし、これに対する粒子径の影響を調べた結果、低密度粒子と高密度粒子とで異なる粒子径依存性があることを見出した。

第 3 章では乱流攪拌槽における粒子巻き込み頻度と浮上頻度とを攪拌数突変法により個別に調べ、両者の釣り合いから前章の臨界攪拌数の粒子径依存性について検討した。その結果、液自由表面および槽底近傍に生成する縦渦が粒子巻き込みを支配していることを明らかにした。

第 4 章では乱流攪拌槽内における粒子の相対浮上速度および沈降速度を測定した。すなわち、槽内における粒子の軸方向濃度分布の測定結果に、重力場で粒子に作用する浮力または沈降力と乱流拡散力との巨視的釣り合いの式を当てはめ、別に求めた槽内平均の乱流拡散係数を用いて粒子相対速度を算出し、その結果を抵抗係数、粒子レイノルズ数、粒子径と最小渦径の比からなる実験式にまとめた。

第 5 章では、前章で見出された乱流による粒子相対速度の減速効果を説明するために、上下に振動する容器内の粒子相対速度を測定した。その結果、粒子相対速度は振動によって減少するが、減少の割合はわずかで前章の大きな減速傾向を説明できないことがわかった。これより、乱流中の粒子相対速度の減速効果は、主に粒子より小さなサイズの渦による付加的抗力によるものであることを明らかにした。

第 6 章では、乱流攪拌槽内の流動に関する数値シミュレーションを行い、槽内の微視的流動状態を明らかにした。また、トルク計によって測定したエネルギー消散速度とシミュレーションによるエネルギー消散速度の平均値が良く一致することを確認した。

第 7 章は総括である。

補遺では、乱流攪拌槽内における粒子の相対速度の PIV 測定を行い、乱流中における粒子の微視的挙動に関する興味ある結果を得ている。

以上要するに、本論文は溶融金属中介在物粒子の流体力学的挙動の内、自由表面および固体壁からの巻き込み現象および乱流中における粒子相対速度の流れとの関連において解明したものであり、溶融金属中介在物の除去に必要な基礎的知見を示しており、高潔浄材料の製造プロセスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。