

単純形状キャビティに流入する固液混合体の流動現象

杉山 明*・大中 逸雄*²

Flow Phenomena of Solid-liquid Mixture in a Rectangular Cavity

Akira SUGIYAMA and Itsuo OHNAKA

Synopsis : The solid-liquid two phase flow influences on the properties of materials such as the semi-solid metals or the particulate-reinforced metal matrix composites. Therefore the flow phenomena of water-polystyrene mixture with high fraction solid in a suddenly enlarged cavity were examined. The mixture in an airtight vessel was ejected vertically into the cavity by increasing the internal pressure of the vessel.

The shape of free surface of the mixture became more stable with increasing fraction solid. The main reason of suppressing the disturbance of the free surface is not the increase of the mean relative viscosity but the increase of fraction solid of the region near the free surface. The concentration of particles decreased at the center of rotary motion in the early stages of filling and at the boundary between the rising particles and the piled-up particles, which existed above filling ingate. It was the inertial force of particles that held the low-concentration region at the center of rotation. The low-concentration region above the ingate is caused by the collision of particles.

Key words : castings ; simulation ; solid-liquid mixture ; relative viscosity ; flow ; free surface ; particle concentration.

1. 緒言

金属材料を製造するうえで混相流(この場合固液混相流)が品質に影響を与える場合が少なくない。例えば、半凝固金属を鑄込むレオキャストイングや、熔融金属中に固体粒子を分散、混入する粒子分散強化複合材料の製造などでは、固体粒子は熔融金属中に均一に分散している必要がある。固体粒子が不均一に分布すると粒子濃度の低下した部分では溶質が濃化し、偏析などの凝固欠陥の原因となりうるためである。複合材料では分散粒子の分布は材料の機械的性質を左右する重要な因子である。また連続鑄造などの通常のプロセスでは等軸晶粒の流動分布はマクロ偏析等に大きく影響する。

したがって、このような鑄造プロセスにおける固相粒子の流動を解明するために、固液混合体の流動に関する研究が必要である。鑄造時の流動現象に関しては水、水銀などの単相液体を用いたモデル実験や、単相液体の流動を数値計算によってシミュレートした研究^{1)~3)}はあるが、固液混合体を用いた研究はあまり例がない。また、固液混合体に関しては見かけ粘度の評価式の算出⁴⁾⁵⁾や半凝固金属の変形⁶⁾などに関する研究が行われている。また、流体中の固体粒子が流体から受ける力⁷⁾⁸⁾、あるいは直管や水平管内の気体中の粒子の挙動^{9)~17)}に関する研究が多く行われている。しかしレオキャストイングや複合材料のように高固相率($g_s > 0.3$)

で粒子が混入し、自由表面が存在する流動に関する研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、研究の第1段階として単純ではあるが2次元流れを仮定でき、急拡大部での自由表面形状の観察が容易で、鑄造等で基本となる、単純矩形形状のキャビティ内における流動現象について調べた。

2. 実験方法

2.1 固液混合体試料

固液混合体は、水に固体粒子を混入して作製した。固体粒子には球形のポリスチレン粒子を用いた(Fig. 1)。粒子はふるいによって分粒し、平均粒子直径が0.5mmの粒子(以下、小粒子と呼ぶ)、および1.5mmの粒子(以下、大粒子と呼ぶ)を用いた。粒子の密度は $(1.03 \pm 0.01) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ であった。水には固体粒子との濡れ性を改善するために少量の界面活性剤(ドライウエル)を添加し、さらに粒子との密度差を小さくするために3.2mass.%の塩化ナトリウムを溶解した。粒子の沈降速度は実験時間に比べて無視できる程度に小さかった。固体粒子は体積率で10, 20, 30, 40, 50%とした。以後これを固相率(g_s)と呼ぶ。モデル実験は凝固を伴わないものとなるため、固液混合体が鑄造内を充填する場合の自由表面形状ならびに流動中の固体粒子の挙動の解明に焦点をしばって解析を行った。

平成6年7月6日受付 平成6年9月2日受理 (Received on July 6, 1994; Accepted on Sep. 2, 1994)

* 大阪大学大学院生 (Graduate Student, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

* 2 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University)

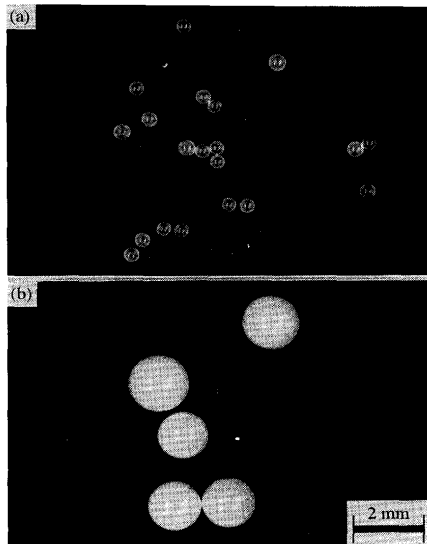


Fig. 1. Shape of particles.
((a)mean diameter: 0.5mm (b)mean diameter: 1.5mm)

ところで、固液混合体は、見かけ上粘度が増加することが知られている。そこで、固液混合体の流動、特に自由表面の挙動を比較するために、固液混合体の見かけ粘度と同程度の粘度を有するグリセリン水溶液¹⁸⁾を用いて同様の実験を行った。見かけ粘度 η_s の推定式としては固体粒子が等径球である場合、

$$\eta_s = \eta_0 \left(1 + 3 \times \frac{1}{1/g_s - 1/0.52} \right) \dots\dots\dots (1)$$

が提案されている¹⁹⁾。 η_0 は液体の粘度、 g_s は固相率である。(1)式は平居ら⁵⁾が示しているように、実験値とよく一致することがわかっている。本研究において使用したポリスチレン粒子はほぼ完全な球形であり、粒径もほぼ一様であるため(1)式を用いて固液混合体の見かけ粘度を計算した。

2・2 実験装置

実験装置はFig. 2に示すように、アクリル製透明鋳型、密閉容器、N₂ガスボンベなどからなる。キャビティは幅70mm、高さ200mm、奥行き20mmであり、試料導入部分の幅は10

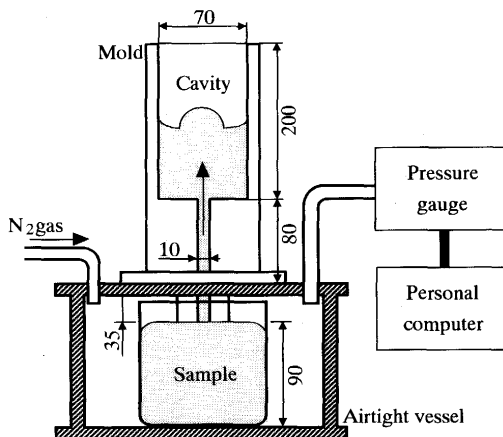


Fig. 2. Schematic of experimental equipment.

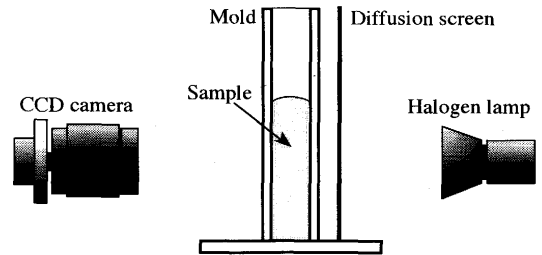


Fig. 3. Schematic of observation equipment.

mmとした。固液混合体は密閉容器内中央部に静置した。完全に密閉された容器内にN₂ガスを導入することによって固液混合体をキャビティ内に押し上げた。固液混合体はキャビティ内に流入する前に十分攪拌した。固液混合体の充填速度はガス流量によって調節した。ゲート部の速度は0.1m/s ~ 1.0m/sとした。

2・3 観察および測定方法

キャビティ内における固液混合体の流動の様子はCCDカラーカメラによって撮影し、ビデオテープに記録した。撮影はFig. 3に示すようにモールドの正面から行い、ハロゲンランプをレンズの反対側に配置し透過光によって流動を観察した。記録した映像から特定の粒子の速度および固液混合体の導入部における断面平均速度を求めた。

3. 実験結果および考察

3・1 急拡大部における固液混合体の流動現象

平板状キャビティに流入している固液混合体 (平均粒径 1.5mm, 30vol.%) のある瞬間の状態をFig. 4 (a)に示す。ゲート速度は0.6m/sとした。また固液混合体中の着色粒子の軌跡をFig. 4 (b)に示す。更に、固液混合体の流動をFig. 4 (c)に模式的に示す。Fig. 4 (b)における矢印の長さは1/30秒間に着色粒子が移動した距離を示している。急拡大部に流入した固体粒子はほぼ直線的に自由表面まで上昇した。

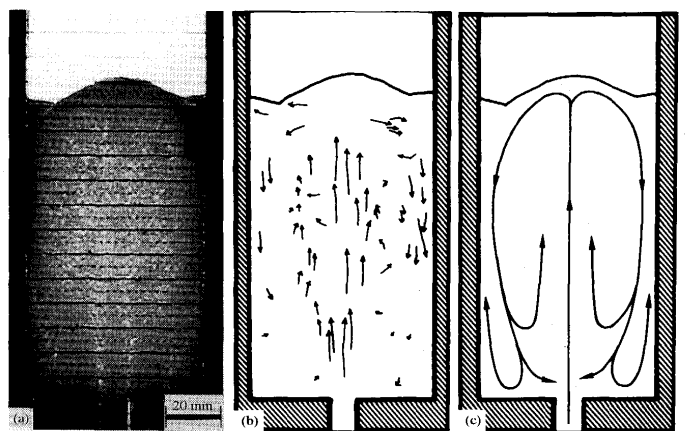


Fig. 4. Flow phenomena of solid-liquid mixture in the rectangular cavity.
(a)actual flow of solid-liquid mixture (fraction solid: 40 vol.%, gate velocity: 0.6m/s)
(b)trace of marked particles after period of time (c)schematic of flow)

自由表面に達した粒子は自由表面に沿って左右に運動方向を変え、左右の鑄壁に沿ってキャビティ下部へと下降した。キャビティ下部には先に流入した粒子の一部が停滞しており、下降してきた粒子は中心方向へ運動方向を変えた。一部の粒子は運動を停止した。中心に向かった粒子はキャビティ中央を勢いよく上昇する流れによって再び上昇し、先の流動を繰り返した。このように平板状キャビティに流入した固液混合体の流動は、導入部から上方に向かって勢いよく直線的に上昇する流れと、その左右で回転運動する流れ、およびキャビティ下部で停滞している部分の3つに分類できる。

3・2 自由表面形状

急拡大部を持つ平板状キャビティ内に鉛直上向きに高速で流入した流体では、自由表面中央部が左右壁面近傍の自由表面を結んだ線より上に大きく突出し、突出した部分が崩れて自由表面を乱す。この場合、空気を巻き込んで気泡欠陥が生じる危険性が高い。

Fig. 5 に固相率を変えた5種類の固液混合体について、自由表面形状の推移を示す。いずれもほぼ同じゲート速度(約0.6m/s)で充填するようにした。自由表面形状は0.1秒毎に観察し、自由表面のもっとも外側のラインをトレースした。ゲート速度を一定として固液混合体がキャビティ内に流入する場合、固相率が増加するにつれて自由表面の乱れが抑制された。

そこで、自由表面中央部が急拡大部へ流入直後に一度だけ突出し、以後突出部が崩れることなく充填が進行する場合に液面が乱れていないと定義する。そして、自由表面が乱れずに充填が可能な限界速度をビデオ撮影した映像データから測定し、粒径および固相率に関して整理した結果をFig. 6 に示す。限界速度は固相率の増加に伴って増加した。

固相率の増加による限界速度の増加の原因としては、2・1で述べた見かけ粘度の増加と表面張力の変化が考えられる。しかし、本混合液体での見かけの表面張力の定義、測定は困難である。例えば、液滴法では液体と固体が分離し

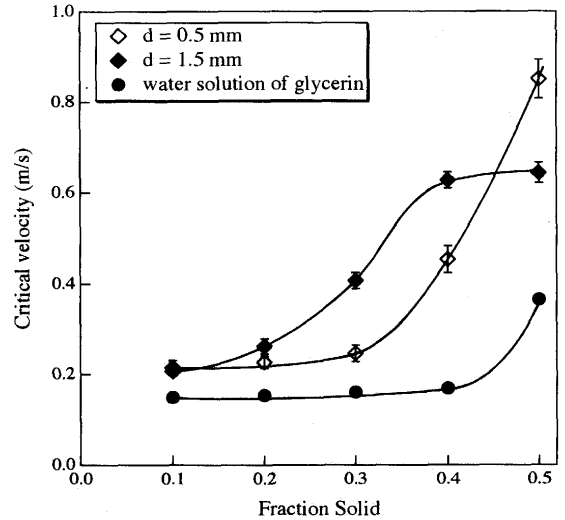


Fig. 6. Relation between fraction solid and critical velocity.

てしまうし、最大泡圧法では液体単体の場合とあまり変わらない。従って本研究では見かけ粘度のみを考慮する。そこで、固液混合体の見かけ粘度とほぼ等しい粘度になるように調整したグリセリン水溶液を用いて同様の実験を行った。しかし、Fig. 6 に示すようにグリセリン水溶液の限界速度は固液混合体に比べ小さくなった。この理由としてはキャビティ内での固体粒子濃度の不均一な分布が考えられる。後述のFig. 8 に示すようにキャビティ下部、および自由表面近傍の透過光が暗くなっていた。画像解析によってこの部分の固相率が初期の平均濃度に比べて数%程度高いことがわかった。キャビティ下部は固体粒子の堆積、自由表面付近は導入部から上昇してきた固体粒子の上向きの慣性によってそれぞれ固体粒子濃度が高くなっていると考えられる。森、乙竹の式(1)によると、固相率50%以上では、固相率が1%増加すると見かけ粘度は2倍となり、1.6%増加すると見かけ粘度は10倍となるのであるから、高粒子濃度部の粘度が非常に高くなっていることもありうると思われる。そこで、単相液体において、粘度を固相率50%の固液混合

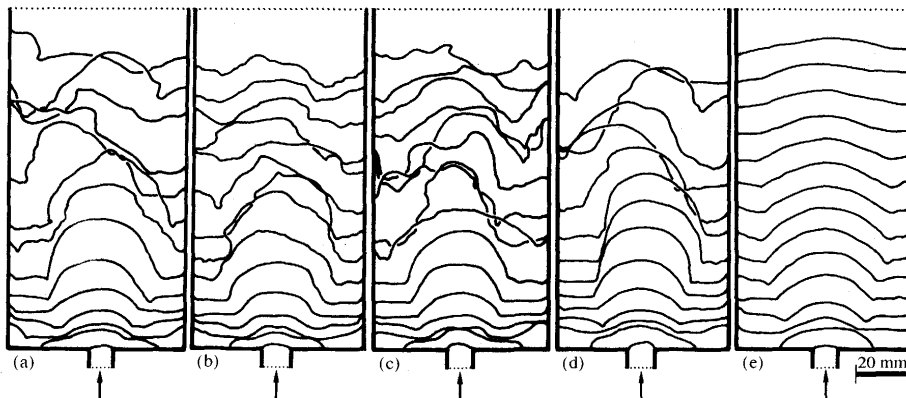


Fig. 5. Sequential change of free surface in the rectangular cavity. (particle diameter: 0.5mm, time step: 0.1s, gate velocity: 0.6m/s, fraction solid: (a)10% (b)20% (c)30% (d)40% (e)50%)

体の見かけ粘度と等しくした場合、2倍程度に増加した場合、および5倍程度に増加した場合の自由表面形状の推移をFig. 7に示す。粘土を固相率50%の固液混合体の5倍程度に増加した場合に自由表面の乱れが抑制され、限界速度が固相率50%の固液混合体の場合とほぼ一致した。以上より、固液混合体の自由表面形状は、計算から求められる平均的な見かけ粘度では評価できないことがわかった。自由表面形状の乱れは自由表面近傍における見かけ粘度が計算から予想されるよりも数倍程度増加し、上昇方向の慣性力が抑制されることによって抑制されると考えられる。

限界速度に対する粒子直径の影響をみると(Fig. 6)、固相率が40%以下では小粒子で作成した固液混合体に対し大粒子で作成した固液混合体の限界速度が高い。ところが、固相率が50%になると大粒子で作成した固液混合体に比べ小粒子で作成した固液混合体の限界速度が高くなった。固体粒子が均一に分散している状態では見かけ粘度は粒子直径に依存しない¹⁹⁾。したがって、粒子直径による相違が生じるのは固体粒子濃度の不均一な分布が原因であると思われる。

大粒子は小粒子に比べて質量が大きいので慣性力が大きい。粒子に働く慣性力によって自由表面近傍への充填が行われ粒子濃度が増加すると考えられるので、大粒子の場合の高濃度部における固体粒子濃度の増加の割合は小粒子に比べて大きいと思われる。小粒子が大粒子に比べ比較的均一に分布している様子も観察されている。つまり、同じ固相率でも大粒子では自由表面近傍の粒子濃度が高く、粘度が大きいため限界速度が小粒子に比べて高くなると考えられる。固相率40%以上で大粒子の限界速度が増加しなくなる原因としては、高濃度部における粒子濃度がほぼ限界に達したことが考えられる。すなわち固相率を50%としても、高濃度部における粒子濃度があまり増加しないために限界速度が増加しないと考えられる。小粒子の場合は固相

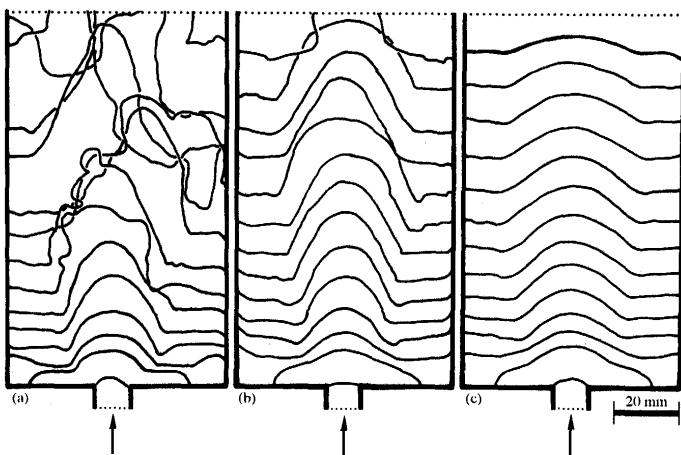


Fig. 7. Sequential change of free surface of water solution of glycerin. (time step 0.2s, gate velocity : 0.6m/s, viscosity : (a)4.4 (b)8.8 (c)22.10⁻² Pa·s)

率50%で高濃度部における粒子濃度が限界に達すると思われる。固相率50%の場合に大粒子と小粒子の限界速度が逆転する原因としては充填限界固相率の違いが考えられる。本研究で使用した粒子の最密充填固相率は、大粒子が60.3%、小粒子が62.8%であった。流動中に自由表面近傍で固体粒子が最密充填固相率まで充填されることはないと考えられるが、自由表面近傍に充填されうる限界の固相率は、この結果から大粒子に比べて小粒子の方が高いと思われる。先に述べたように固相率50%以上では固相率が数%増加するだけで見かけ粘度が十数倍になる。従って、自由表面近傍における粒子濃度が50%以上となる固相率40%以上の固液混合体では小粒子の方が自由表面近傍における見かけ粘度が増加し、限界速度が大きくなったと考えられる。

3.3 固体粒子濃度の不均一性

次に、急拡大部へ流入する固液混合体の固体粒子濃度に注目した(Fig. 8)。撮影は透過光で行っているため、粒子濃度の低下した部分が他に比べ明るく観察される。固液混合体は固体粒子が均一に分散した状態でキャビティ内を充填するのではなく、粒子濃度の低い部分が存在した。低濃度部は、固液混合体が急拡大部へ流入した初期において自由表面とキャビティの下の壁、および左右の壁の間で回転運動を起こす場合に、回転の中心部に生じた(Fig. 8(a), (c))。回転の中心部は同じ場所に停滞せず、キャビティ内への充填の進行に伴って上方へ移動した。回転の中心における粒子速度の低下も観察できた。

また、導入部の直上付近において、先に流入し速度が遅くなっている固液混合体と導入部から流入してくる速度の速い固液混合体との境界部分に固体粒子濃度の低い部分が生じた(Fig. 8(b), (d))。この低濃度部は2本の直線状であり、直線の間隔は導入部の幅にほぼ等しかった。直線状の低濃度部はキャビティ内全域にわたって存在するのではなく、ある程度の高さまでしか存在しなかった。いずれの場合においても小粒子の場合の低濃度部は大粒子の場合に比べて不明瞭であった。

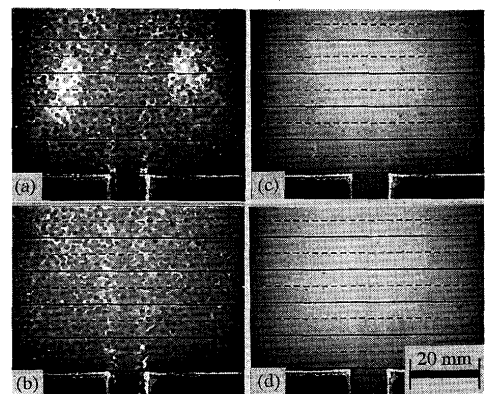


Fig. 8. Distribution of particles. ((a)(b)particle diameter : 1.5mm, (c)(d)particle diameter : 0.5mm fraction solid : 30%, gate velocity : 0.2m/s)

低濃度部の発生に及ぼす粒子直径，固相率，流入速度の影響を Table 1, Table 2 に整理した。固相率が10%の場合，粒子直径，固相率，流入速度によらず低濃度部は観察できなかった。直線状低濃度部は，固相率が20%以上の固液混合体において粒子直径，流入速度によらず発生した。回転運動中心部の低濃度部は，固相率20%では流入速度が遅い (~0.3m/s) 大粒子の固液混合体の場合に生じた。固相率30%以上では流入速度が遅い場合，粒子直径によらず発生した。固相率40%の大粒子の固液混合体では，流入速度がある程度速い場合 (~0.6m/s) でも発生した。固相率が50%では粒子直径によらず，流入速度がある程度速い場合でも発生した。

このように回転運動の中心には，固相率が30%以上で，ある程度流入速度の遅い場合により明瞭な低濃度部が発生した。これは前節で説明した自由表面の乱れと関係があると思われる。自由表面が乱れない条件では固液混合体がキャビティ内で回転するが，自由表面が乱れるような条件では明瞭な回転は発生せず低濃度部は生じなかった。

回転中心部の低濃度部の発生は，実験に用いた固体粒子の密度が液体に比べてわずかに大きいため粒子にかかった遠心力が原因であるとも考えられる。そこで，液体の密度を変え，固体粒子に比べて液体の密度を大きくした固液混合体を作成し同様の実験を行った。しかし，液体の密度を大きくしても中心部分は粒子濃度が低く，低濃度部は回転による遠心力で発生するのではないことが確認できた。

低濃度部が発生する様子を更に詳しく考察するために，固液混合体が急拡大部に達した直後から低濃度部の発生までを連続的に観察した結果を Fig. 9 に示す。回転中心の低濃度部は固液混合体が急拡大部に流入した直後に発生していることがわかる。導入部から流入してくる粒子は，上向きに慣性力を持つため，導入部から急拡大部へ流入するときにキャビティの下壁に沿って垂横向きに曲がること

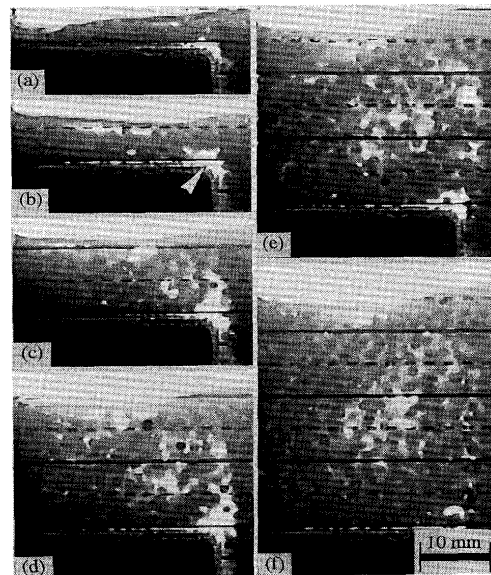


Fig. 9. Occurrence of the low-concentration region at the center of rotation. ((a)0.2s (b)0.4s (c)0.6s (d)0.8s (e)1.0s (f)1.2s has passed. particle diameter: 1.5mm, fraction solid: 30%, gate velocity: 0.2m/s)

きず，一度自由表面まで上昇し左右に広がる。そのため，充填初期の段階では Fig. 9 (b) の矢印で示した部分に固体粒子の存在しない液相領域が生じる。充填が進行するにつれて低濃度領域を中心とし固液混合体が回転する様子が観察される。固液混合体が回転する場合，粒子には接線方向に慣性が働くので回転の中心には粒子は集まらない。つまり固液混合体の回転中心に発生する低濃度部は，液体の回転による遠心力によって生じるのではなく，固体粒子の慣性によって生じ，急拡大部への流入直後に発生することがわかった。小粒子の場合，粒子に働く慣性力が小さいために大粒子に比べて比較的均一に分布し，低濃度部が不明瞭になると考えられる。

直線状低濃度部の発生は異なる速度を持つ粒子間の衝突が原因であると考えられる。そこで導入部付近の固液混合体の流動において粒子の挙動に注目し1/60秒毎の粒子の位置をトレースした (Fig.10)。粒子Aは図の左方向から動いてきた粒子であり，停滞している固液混合体の中であるために初期段階ではほとんど動きはなかった。やがてキャビティ中央の速い流れの中の粒子B (あるいはその奥の粒子) とY点で衝突した。Y点において衝突された粒子Aは運動方向を変え粒子Bとほぼ同じ方向に動いているので，反発を受けている様子がわかる。その後，粒子Aには左方向から右方向へ向かって流動している固液混合体からの作用があり，運動方向を変え，再び上向きに運動するようになった。次に，Z点において粒子Cと衝突した。粒子Cは導入部からまっすぐ上向きに流動してきた速度の速い粒子である。Z点において粒子Aは運動方向と速度を変え，やはり反発を受けている様子がわかる。

このように固液混合体の流動に際し固体粒子の停滞して

Table 1. Occurrence condition of the low-concentration region at the boundary layer above filling gate.

Fraction solid(%)		10	20	30	40	50
Gate velocity	High	×	○	○	○	○
	Low	×	○	○	○	○

○ low-concentration region has occurred
 × low-concentration region has not occurred

Table 2. Occurrence condition of the low-concentration region at the center of rotation.

Fraction solid(%)		10	20	30	40	50
Gate velocity	High	×	×	×	△	○
	Low	×	△	○	○	○

○ low-concentration region has occurred
 △ low-concentration region has occurred (big particle only)
 × low-concentration region has not occurred

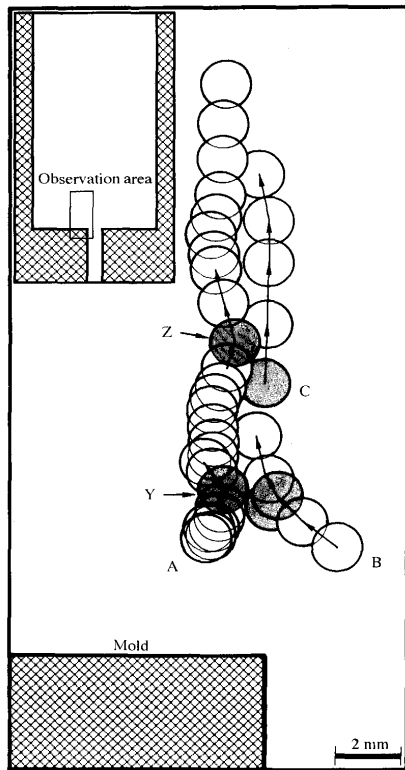


Fig. 10. Collision of particles.
(particle diameter: 1.5mm, time step:
0.017s, fraction solid: 30%)

いる部分と上昇している部分の境界において粒子間の接触が起こり、速度の遅い粒子は運動方向を変化させていることがわかった。つまり、直線状低濃度部は粒子間の衝突によって生じると考えられる。

4. 結言

レオキャストリング、粒子分散強化複合材料などのように固液共存状態の材料を鋳込む場合を想定し、水系固液混合体の流動現象に関する研究を行った。本研究によって以下の結果が得られた。

- 1) 固液混合体を鉛直に立てたキャビティ内に流入させた場合、固液混合体の見かけ粘度と同じ平均粘度の単相液体に比べて自由表面が乱れにくい。
- 2) 自由表面が乱れないまま充填ができる限界の速度は、固相率が増加するほど高い。また、固体粒子の直径による影響を調べた結果、固相率が40%以下では直径が1.5mmの粒子、固相率が50%になると直径が0.5mmの粒子の限界速度が高い。
- 3) 固相率の増加に伴う限界速度の増加は、固液混合体の見かけ粘度と等しい粘度に調整したグリセリン水溶液で

行った実験では再現できない。限界速度の増加は、単なる平均的な見かけ粘度の増加ではなく、部分的な粘度の極端な増加によると考えられる。

4) 固液混合体の流動中に粒子濃度の低い部分が生じる。粒子低濃度部は、充填初期において自由表面とキャビティの左右の壁および下壁の間で固液混合体が回転運動を起こすような場合の中心部分、および導入部近傍において、先に流入した固液混合体と後から流入する速度の速い固液混合体との境界部分に、直線状に発生する。

5) 回転中心に生じた低濃度部は急拡大部への流入直後に生じ、固体粒子にかかる慣性力によって維持されると考えられる。また、直線状の低濃度部は速度の速い粒子と遅い粒子の衝突によって生じると考えられる。

以上のように固液混合体の流動は単相液体の流動に比べて大きく異なることがわかった。固液混合体の流動をシミュレートし、現象を予測するためには、粘度などといった物性値を等しくした単相液体とみなして取り扱うには限界があり、固体粒子の影響を考慮した実験や数値計算が必要である。

文 献

- 1) 大政光史, 大中逸雄: 鋳物, **63** (1991), p.817
- 2) A.A.Amsden and F.H.Harlow: Los Alamos Scientific Lab. Report LA-4370, (1970)
- 3) B.D.Nichols, C.W.Hirt and R.S.Hotchkiss: Los Alamos Scientific Lab. Report LA-8355, (1980)
- 4) Norbert L.Ackermann and Hung Tao Shen: AIChE Journal, **25** (1979), p.327
- 5) 平居正純, 竹林克浩, 吉川雄司, 山口隆二: 鉄と鋼, **78** (1992), p.902
- 6) V.Laxmanan and M.C.Flemings: Metallurgical Transactions AIIA, (1980), p.1927
- 7) P.G.Saffman: J.Fluid Mech., **22** (1965), p.385
- 8) C.J.Lin, K.J.Lee and N.F.Sather: J.Fluid Mech., **43** (1970), p.35
- 9) 森川敬信, 辻 裕: 日本機械学会論文集 (第2部), **43** (1977), p.4158
- 10) 森川敬信, 辻 裕, 深尾吉照, 森安勝幸, 沖野晃三: 日本機械学会論文集 (B編), **45** (1979), p.1632
- 11) 辻 裕, 森川敬信, 高橋誠一, 上地哲男, 潮海弘資: 日本機械学会論文集 (B編), **47** (1981), p.801
- 12) 辻 裕, 森川敬信, 大嶋孝夫: 日本機械学会論文集 (B編), **49** (1983), p.1850
- 13) 辻 裕, 森川敬信, 田中敏嗣, 中務直行, 中谷光徳: 日本機械学会論文集 (B編), **53** (1987), p.1240
- 14) 沈 能耀, 辻 裕, 森川敬信: 日本機械学会論文集 (B編), **53** (1987), p.2785
- 15) 沈 能耀, 辻 裕, 森川敬信: 日本機械学会論文集 (B編), **54** (1988), p.3424
- 16) 沈 能耀, 辻 裕, 森川敬信: 日本機械学会論文集 (B編), **55** (1989), p.2293
- 17) 田中敏嗣, 門野啓一郎, 辻 裕: 日本機械学会論文集 (B編), **55** (1990), p.2293
- 18) 油脂化学便覧: 日本油化学協会
- 19) 森 芳郎, 乙竹 直: 化学工学, **20** (1956), p.488