

# 粒子投入による流体運動の可視化実験と濁りの 拡がり挙動に関する数値シミュレーション

小田 一紀\*・重松 孝昌\*\*

## 1. はじめに

埋立地や海岸構造物の基礎などを経済的かつ合理的に築造することを目的として、底開式バージ船から大量の土砂や捨石などを一度に投入する工法がよく用いられている。そのため、それらの堆積形状を予測するための研究が数多く行われてきた。しかしながら、これらの土砂や捨石の投入に伴う濁りの発生・拡散過程に関する研究は、それが海域環境の保全上重要であるにも拘わらず十分には行われていないのが実情であり (Albert and Donald, 1991)、したがって濁りの拡散防止対策の検討も十分にはなされていないように思われる。これは、水中に投入された粒子群およびそれによって誘起される流体運動の解明が遅れているためであると考えられる。

著者らは既に、土砂などの粒子の運動とその周囲の流体運動を解析することができる固液混相流の数値シミュレーション手法 (DEM-AC 法) を開発し、粒子群の沈降・分散・堆積の一連の過程をほぼ定量的に予測できるに至っている (小田ら, 1992, 1993)。本研究では、これまでほとんど計測されていない粒子群の沈降によって誘起される流体運動を可視化実験の手法を用いて計測し、その結果を数値シミュレーション結果と比較することによってその妥当性を流体運動に着目して検討する。さらに、DEM-AC 法に若干の工夫を加えて、濁りの発生から舞い上がりに至る一連の過程の数値シミュレーションを試み、濁りの発生・拡散に及ぼす流体運動の影響について検討を行う。

## 2. 可視化実験

### 2.1 実験概要

実験は、幅 1 m、高さ 1.1 m、奥行き 0.1 m のアクリル製の水槽を用いて行った。粒子には、直径  $d=3$  mm、比重 3.91 のガラスビーズを用い、図-1 に示すような底扉が水面に位置する幅 5 cm の投入容器から水中に投入した。このとき、底扉の開扉速度は  $90 \text{ deg./s}$  とし、粒子の投入量を  $V=50, 100, 150 \text{ cm}^3$ 、水深  $h=10, 30 \text{ cm}$  と変

えて実験を行った。

ガラスビーズを投入容器から水中に投入する前に、比重がほぼ 1 の浮遊性マイクロカプセル (江藤ら, 1990) を予め水中に混入し、暗条件で水槽の側方からレーザーシートを照射して実験を行った。レーザー光によって輝いたマイクロカプセルの運動を超高速度ビデオカメラ (FASTCAM) (江藤, 1992) を用いてシャッター速度  $1/500 \text{ sec}$  で撮影した。画像解析装置 (柏木研究所製 NEXUS 6510) を用いてマイクロカプセルの運動を  $1/100 \text{ sec}$  間隔で解析することによって粒子群の周囲の流体運動を計測した。マイクロカプセルの運動解析には、竹原ら (1992, 1993) が開発した自動粒子追跡アルゴリズムを用いた。これは、次の手順によるものである。

- 1) 二値化操作を行うことによって、各時刻の画像データからその時刻におけるマイクロカプセルの位置を求める。
- 2) カルマンフィルターにより、時刻  $t$  における画像上に存在するマイクロカプセルの、時刻  $(t+1)$  における画像上での位置を推定する。
- 3) 時刻  $(t+1)$  のマイクロカプセルの推定座標から半径  $r$  以内にある画像上の全マイクロカプセルについて  $\chi^2$  検定を行い、 $\chi^2$  が最小となるマイクロカプセルを仮想対応カプセルとする。
- 4)  $\chi^2$  がある基準値以下であれば同一のマイクロカプセルとみなすが、それ以上であれば対応するものがないものとする。

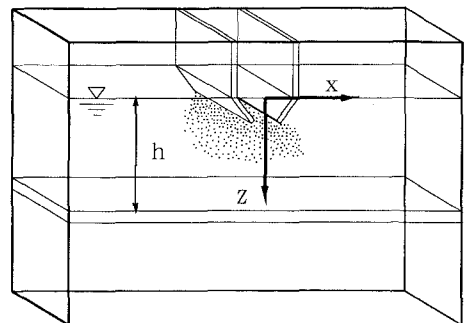


図-1 実験水槽

\* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科  
 \*\* 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

5) このようにして対応の付いたマイクロカプセルの座標から、マイクロカプセルの検出位置における流体速度が求められる。

2.2 実験結果

写真-1は解析に用いた録画画像の一例を示したものである。また、図-2には、投入粒子量  $V=150 \text{ cm}^3$ 、水深  $h=10 \text{ cm}$  のときの時刻  $t=1.0 \text{ sec}$  後における解析結果を示す。図中には、検出されたマイクロカプセルの位置におけるその速度ベクトルが示されている。同図によれば、投入容器の真下ではマイクロカプセルは約  $20 \text{ cm/sec}$  の速度で下向きに運動しており、 $2 \text{ cm} < x < 10 \text{ cm}$  の範囲にあるマイクロカプセルは  $5\sim 15 \text{ cm/sec}$  の速度で左上方に運動していることがわかる。また、 $x > 10 \text{ cm}$  の範囲にあるマイクロカプセルの移動速度は  $1\sim 2 \text{ cm/sec}$  程度と非常に小さいことがわかる。

図-3は、図-2の実験と同一条件でDEMAC法を用いて得られた計算結果を示したものである。図-2と図-3を比較すると、図-2で検出されたマイクロカプセルの運動の方向や速度は、計算結果と概ね一致していることがわかる。しかし、検出されたマイクロカプセルの数が少なく計測領域全体の実験値を得ることができないため、この結果だけではDEMAC法による計算結果が実験値を十分に再現できているとは明言し難い。他の時刻あるいは他の実験ケースにおいても結果は同様であった。原因として次のようなことが考えられる。

- 1) 流体中に混入するマイクロカプセルの数が少なかったために、ある時刻の画像から流体運動を十分に解析するに足るだけのマイクロカプセルを検出することができなかった。
- 2) 厳密には流体運動が2次元的でないため、厚さ数mmのレーザーシート内から飛び出した粒子は追跡することができない。したがって、長時間にわたって対応付いたマイクロカプセルの数が少なくなり、画像解析の精度が低下する。
- 3) 各時刻における画像からは各マイクロカプセルを検出することができるが、 $1/100 \text{ sec}$  毎の画像解析ではその対応付けが必ずしも正確にできないため解析精度が低下する。

しかしながら、録画したビデオ映像より粒子の投入によって発生する流体運動には次のような傾向があることが見出された。すなわち、

- 1) 粒子群が沈降過程にあるとき、粒子群の側方の流体はかなり速い速度で投入の中心軸方向に連行されているが、粒子群よりも下にある流体はほとんど運動していない。
- 2) 粒子が着底すると、投入の中心軸を対象としてその左右に循環流が発生し、本実験の範囲内では投入する

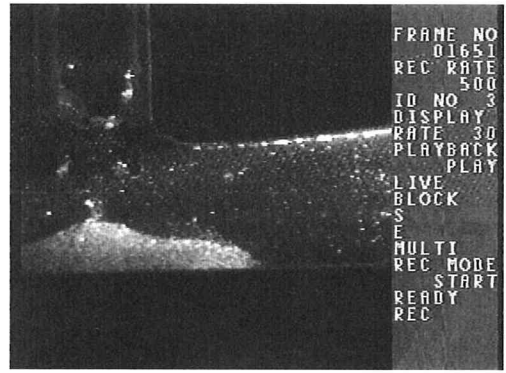


写真-1 画像解析に用いた映像

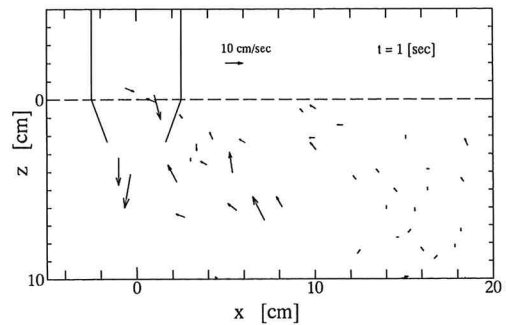


図-2 画像解析結果

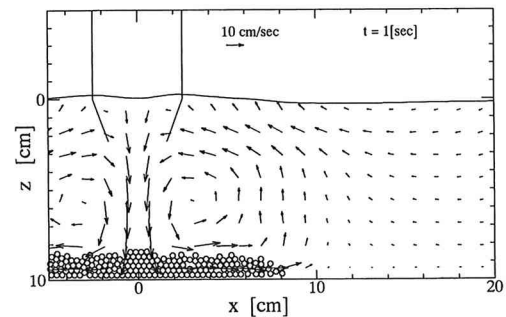


図-3 DEMAC法による計算結果

粒子量が多くなるほどその速度は大きくなり、またその規模も大きくなる。

- 3) 着底した粒子群の側端部からは、規模は小さいが流速の速い渦流の放出が見られた。粒子の投入量が多くなるほど、また、水深が深くなるほどこの渦流は速くなり、さらに水平方向に広く拡がる傾向がある。

以上のことから、著者らが開発したDEMAC法による計算結果では、着底粒子群の側端部からの渦流の放出は再現できていないが、循環流を含めた沈降粒子群の周囲の流体運動は概ね再現できていることが確認された。

### 3. 濁りの発生・舞上がり過程の数値シミュレーション

#### 3.1 粒子附着マーカー法

土砂や捨石などの投入時に発生する濁りの主成分は、 $74\ \mu\text{m}$ 以下の非常に微細な粒子であるとされている。この微細粒子の運動は、舞上がり過程においては粒子群の運動に誘起される流体運動の影響が支配的であると考えられる。

ここでは次のような手順で粒子群の投入に伴う濁りの発生、舞上がり過程のシミュレーションを試みた。まず DEMAC 法によって粒子および流体の運動を計算する前に個々の粒子の表面にマーカーを  $N$  個づつ附着させて

おく。計算を開始した後に、粒子が水中に入ると、その粒子に附着していたマーカーの  $N/10$  個が粒子から離脱し、その後は各マーカー位置における各時刻の流体速度で移動するものとする。さらに粒子が  $ih/10\ \text{cm}$  ( $i=1, 2, \dots, 9$ ) 沈降する毎に  $N/10$  個づつのマーカーが粒子から離脱するものとし、同様な計算によって各マーカーの新しい位置を決定する。このような計算手法を、以下、“粒子附着マーカー法”と呼ぶことにする。

#### 3.2 計算結果

図-4 は水深  $h=10\ \text{cm}$ 、投入粒子量  $V=15\ \text{cm}^3/\text{cm}$  (粒子数  $n=212$ ,  $N=40$ ) の場合の粒子附着マーカー法による計算結果を示したものである。図中の白丸は粒子を、黒点は附着マーカー (濁り) を表している。本手法によ

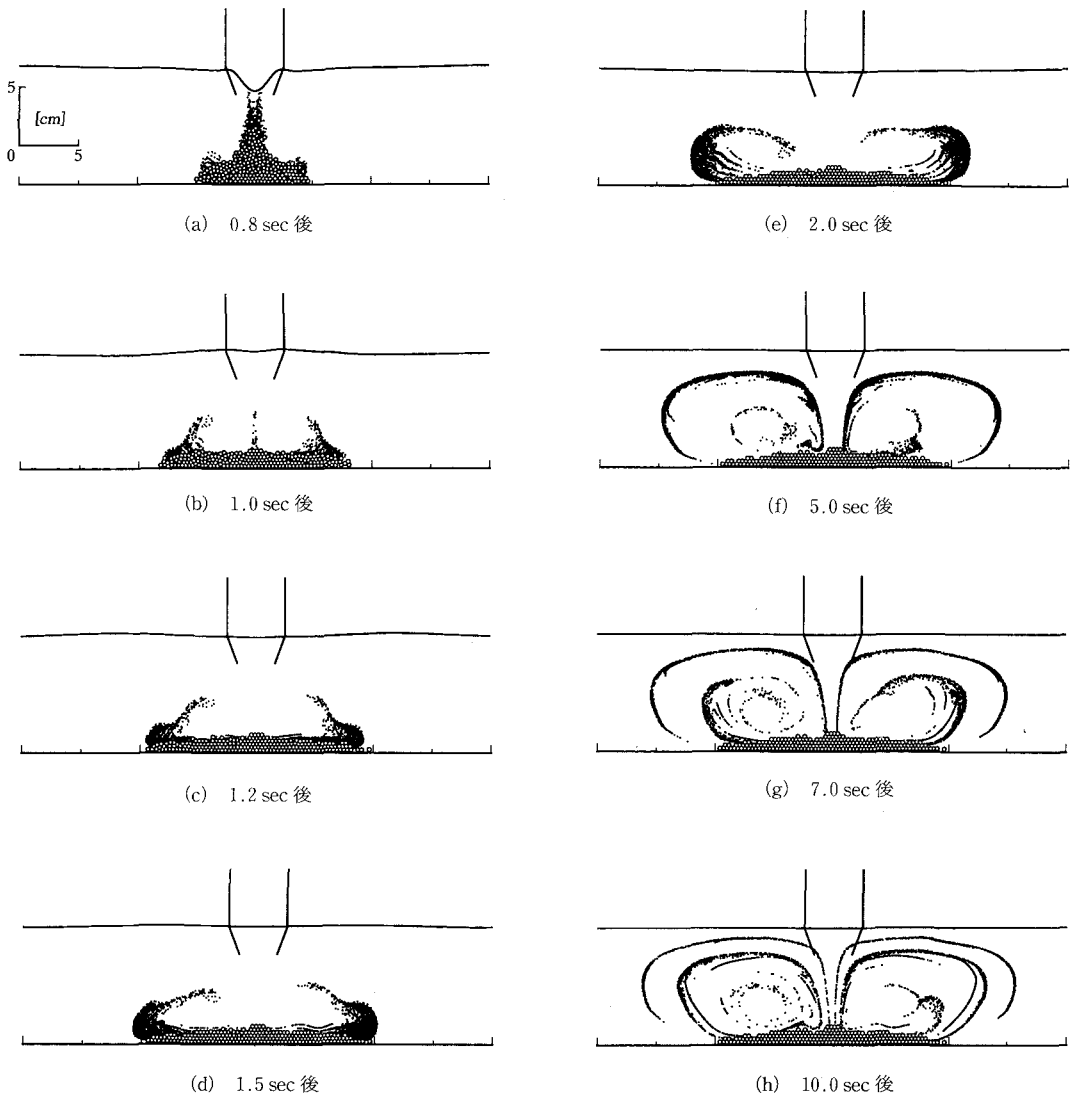
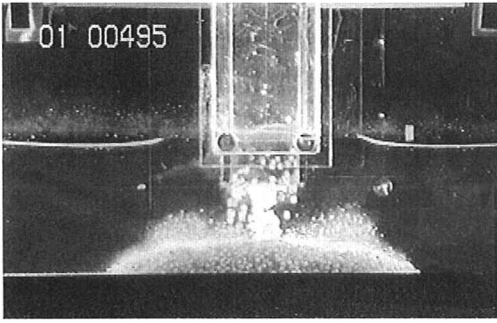
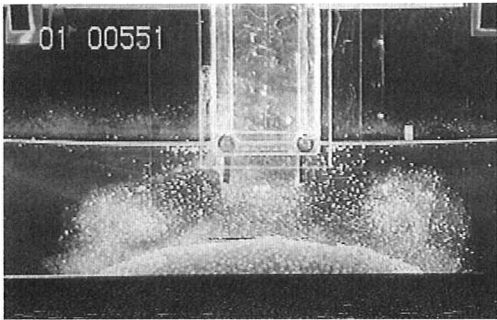


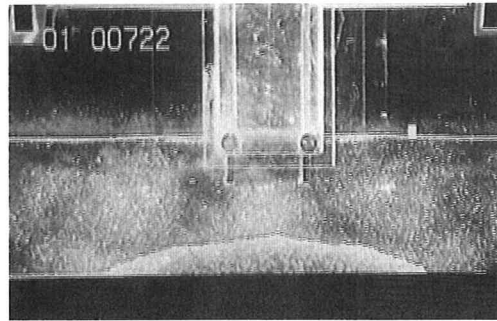
図-4 粒子附着マーカー法による濁りの発生・拡散過程の計算結果



(a) 1.0 sec 後



(b) 2.0 sec 後



(c) 5.0 sec 後

写真-2 実験結果

れば、粒子の投入開始後0.8 sec 経過したときには粒子とマーカーが一体となって沈降している。全粒子が着底しその端部の粒子が水平方向に転がり運動をしている1.0 sec 後には、粒子群の側端部からマーカーが舞上がり初めている(同図(b))。その後、時間の経過とともに着底粒子群の側端から大量のマーカーが雲状に現れ(同図(c), (d)), 2.0 sec 後にはマーカーは斜め上方に押し上げられるように舞上がっていることがわかる。さらに時間が経過すると、大きな循環流の影響を受けて鉛直方向にも水平方向にもマーカーの分布領域が広がっていくことがわかる(図-4(f)~(h))。

ガラスビーズに水溶性合成樹脂塗料を吹き付けて十分

乾燥させた後に水中に投入すると、ガラスビーズの表面に付着していた塗料の一部が剥がれて水中を浮遊するようになるが、写真-2はこのようにして得られた合成樹脂塗料の拡がりを撮影したものである。図-4に示される粒子付着マーカー法による濁りの発生・拡散過程の計算は、ガラスビーズから剥がれた合成樹脂塗料の分散過程の定性的な特徴をよく再現していることがわかる。

図-5は、マーカーの水平分散幅の経時変化の計算結果を示したものである。同図によれば、 $t=0.6$  sec まではマーカーはほとんど分散してしないが、その後 $t=2$  sec までに急激に分散幅が広くなり、その後はゆっくりと増加する傾向を示している。また、分散幅は投入量が多いほど広くなることわかる。これは、投入量が多くなるほど循環流が大きくなるためである。

図-6はマーカーの分散高さの経時変化の計算結果を示したものである。 $t=0.6\sim 0.8$  sec 付近に見られるピークは、沈降粒子に付着したまま水底方向に移動するマーカーと既に粒子から離脱して粒子群よりも遅れて沈降するマーカーが混在することによって見られる現象である(図-4(a)参照)。図-6より、いずれの投入量の場合も時間とともにマーカーの分散高さは高くなり、その高さは投入量が多くなるほど高くなることわかる。

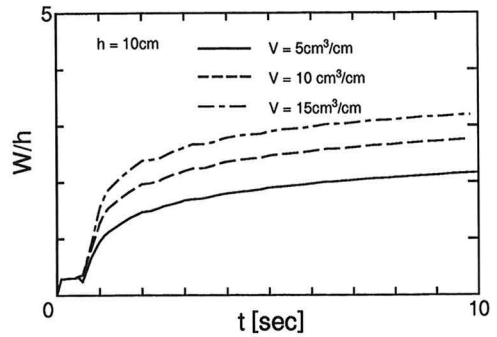


図-5 マーカーの分散幅の経時変化

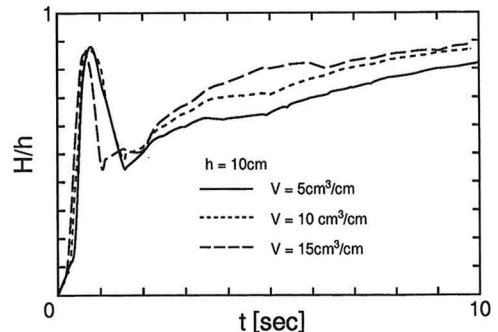


図-6 マーカーの分散高さの経時変化

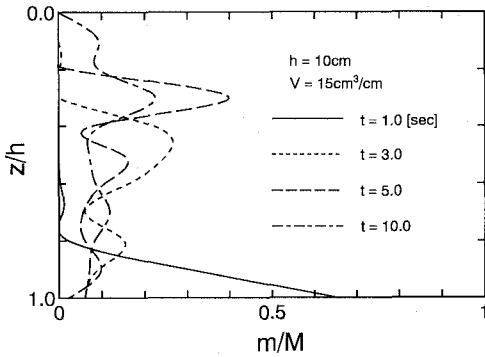


図-7 マーカーの鉛直分布

図-7は  $V=15\text{ cm}^3/\text{cm}$  の場合の、粒子附着マーカー法によるマーカーの鉛直分布の経時変化を示したものである(ただし、 $m$ はマーカー数、 $M$ は全マーカー数 $=nN$ )。図-6を見れば、 $t=1\text{ sec}$ にはマーカーは分散して  $H/h=0.5$  の高さを有しているが、図-7によれば、同時刻におけるマーカーの大部分は  $0.8 < z/h < 1.0$  の範囲に存在することがわかる。その後、時間の経過とともにマーカーは水面に向かって上昇し、 $t=5.0\text{ sec}$ では40%程度ものマーカーが  $z/h=0.3$  付近に存在するようになることがわかる。さらに、時間が経過して  $t=10\text{ sec}$ になるとピーク値が小さくなり、水深方向のマーカー数の分布は徐々に均質化していくことがわかる。

#### 4. 結 論

本研究は、マイクロカプセルと超高速ビデオカメラを用いることによって流体運動を可視化し、粒子群の沈降によって誘起される流体運動の概要を明らかにするとともに、濁りの発生から舞上がりに至る一連の過程の数値シミュレーションを試みた。本研究で得られた知見を要約すると、以下のとおりである。

1) 可視化実験を行うことによって、沈降粒子群に誘起される流体運動の定性的な傾向を明らかにすることはできたが、それを定量的に評価するには至らなかった。定性的な傾向は、既に開発済みの筆者らの固液混相流数

値シミュレーション手法 (DEMAC 法) による計算結果と一致しており、本シミュレーション手法の妥当性を確認することができた。

2) 粒子附着マーカー法による濁りの発生・舞上がり過程の計算結果と実験結果を比較することによって、粒子附着マーカー法は濁りの発生・舞上りの一連の過程について、その定性的な傾向を十分に計算できることができたことがわかった。これによって、投入土砂などによって発生する濁りの拡散過程の予測やその拡散防止対策に関する今後の研究に有益な情報が得られると考えられる。

今後は、粒子群の周囲の流体運動を定量的に把握することができるよう、実験およびその解析方法について改善をはかりたい。

**謝辞:**最後に、本研究中の可視化実験を行うにあたって、計測装置をはじめ計測および解析に近畿大学の江藤先生および竹原先生に多大な御助力・御助言を戴いた。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 江藤剛治・竹原幸生 (1990): 多数のトレーサー粒子の自動追跡のための新しいアルゴリズムの開発, 水工学論文集, 第34巻, pp. 689-694.
- 江藤剛治 (1992): 4500枚/秒の高速ビデオカメラ, テレビジョン学会誌, Vol. 46, No. 5, pp. 37-38.
- 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸・井上雅夫 (1992): 改良型DEMAC法による粒子群の沈降・分散挙動の解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 971-975.
- 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸 (1993): DEMAC法による沈降粒子群の分散・堆積挙動のパラメトリック解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 971-975.
- 竹原幸生・江藤剛治 (1992): 自動粒子追跡アルゴリズム, 可視化情報, Vol. 12, Suppl. No. 1, pp. 215-218.
- 竹原幸生・江藤剛治・道奥康治・島崎正則 (1993): 自動粒子追跡アルゴリズムの改良と適用例, 可視化情報, Vol. 13, Suppl. No. 2, pp. 115-118.
- Albert Y. Kuo, and Donald F. Hayes (1991): Model For Turbidity Plume Induced by Bucket Dredge, Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, Vol. 117, No. 6, Nov./Dec., pp. 610-623.