

粒子群の沈降・分散挙動に及ぼす流れの影響に関する数値実験

小田 一紀*・重松 孝昌**・菅 野 寛***

1. はじめに

水中に投入された粒子群の運動を正確に予測するため、粒子・流体間の相互作用を考慮した数値解析が行われるようになってきた。既往の研究の多くは2流体乱流モデルに基づくものであり（たとえば、玉井ら、1994；灘岡ら、1994）、方程式を完結させるために必要な未知定数を含まざるを得ない。また、粒子濃度が高く粒子間の作用力が無視できない現象には適用し難いといった問題点も有しているものもある。それ故、未知定数の検証やモデルそのものの適用性を検討するため、静止流体中に粒子群が投入される場合を対象とした研究しかなく、流れの中に粒子群を投入した場合を対象とした解析的あるいは実験的研究はほとんどない。

著者らは、既に粒子・粒子間および粒子・流体間の相互作用を考慮した数値シミュレーションを開発しており（小田ら、1992）、計算結果と既往の実験結果を比較することによってその妥当性を検証するとともに、静止流体中における粒子群の沈降挙動をパラメトリックに解析し、投入粒子量や投入容器の開扉速度などの投入条件が粒子群の沈降・分散挙動および水底における堆積形状に及ぼす影響について検討している（小田ら、1993）。

本研究では、この数値シミュレーション手法を用いて流れの中に投入された粒子群の運動を解析し、流速が粒子群の沈降・分散挙動および堆積形状に及ぼす影響について検討した。

2. 粒子の運動方程式

本研究では、水中に投入される粒子群の運動を、鉛直2次元問題として解析した。このとき、粒子の運動方程式として次式を用いている。

$$(1+C_M)\rho_p\frac{\pi d^2}{4}\frac{du_p}{dt}=F_j+(\rho_p-\rho_f)g\frac{\pi d^2}{4}-\frac{1}{2}C_D\rho_f d(u_p-u_f)|u_p-u_f| \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 ρ_p , ρ_f : 粒子および流体の密度、 d : 粒子径、 u_p , u_f : 粒子および流体の速度ベクトル、 C_M , C_D : 付加質量係数および抗力係数を表す。また、右辺第1項の F_j は着目粒子と接触するすべての粒子との間に生じる接触力の総和ベクトルを表す。総ての粒子に対して式(1)を適用し、個別要素法を用いてそれぞれの粒子の運動を解析する。また、流体速度 u_f は、粒子の位置情報を、粒子を含む固液混相流体塊の密度増加として捉えて運動方程式を立て、これをMAC法を用いて計算することによって求めている。したがって、流れの中に粒子群が投入されたときに発生する誘起流の運動が、式(1)の右辺第3項の抗力項を介してそれぞれの粒子の運動に影響を及ぼすことになる。計算手法の詳細は、小田ら（1992）を参照されたい。

なお、本手法を用いて得られた静止流体中を沈降する粒子群の沈降速度や沈降過程における拡がり幅、堆積形状に関する計算値は、室田ら（1988）による実験値とよく合致していることを付記しておく。

3. 計算条件

$\rho_p=2.65 \text{ g/cm}^3$, $d=3 \text{ mm}$ の粒子を、幅5cmの容器に体積 $V_0 \text{ cm}^3/\text{cm}$ だけ入れてこの容器の底扉を水面に固定し、これを初期条件とした。容器の底扉を瞬時に開いて、対数則に従う平均流速 U_f の流れの中に粒子を投入した。

$$U_f=u_*\left(6.0+2.5\ln\frac{2h}{d}\right) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度、 h : 水深である。

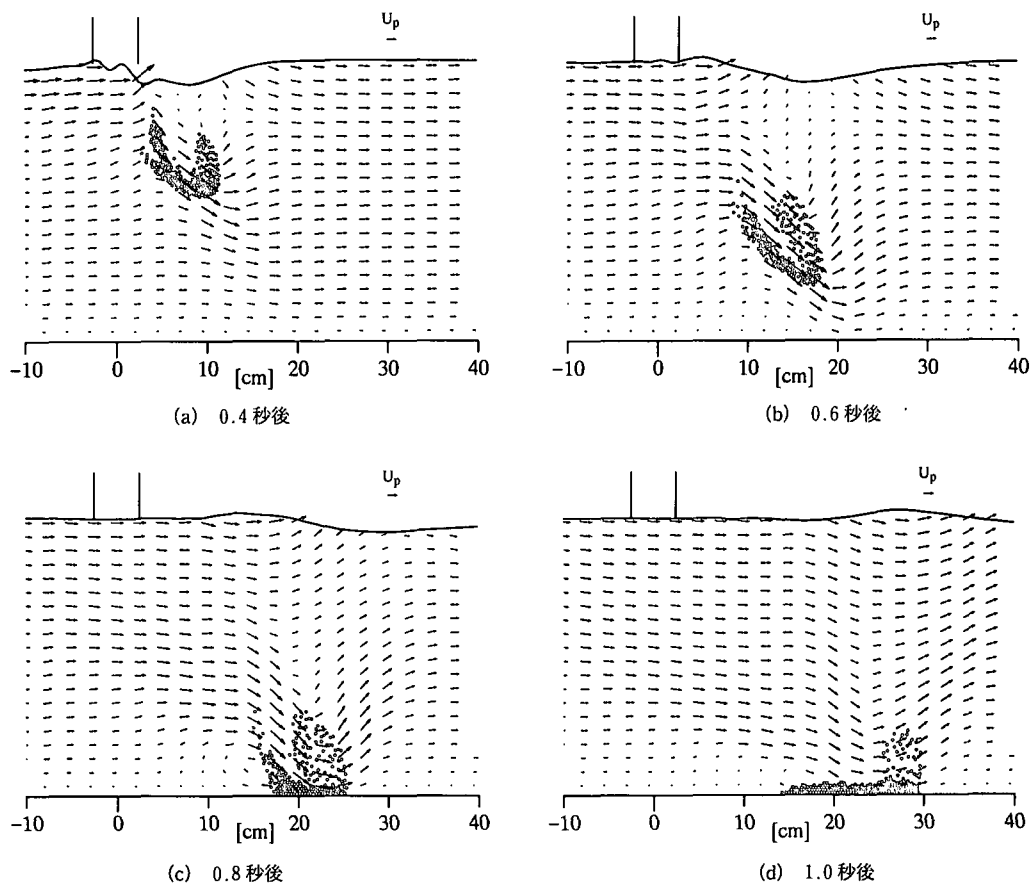
$h=30 \text{ cm}$ と一定にして、流れの平均流速 U_f を $0\sim 4U_b$ ($U_b=\sqrt{(\rho_p/\rho_f-1)gd}$) の範囲で変えて数値実験を行い、粒子群の沈降速度や分散幅・堆積形状に及ぼす流速の影響を検討した。さらに、投入粒子量を変えて計算を行い、粒子量が粒子群の挙動に及ぼす影響についても検討した。

4. 計算結果

4.1 粒子群の沈降挙動

図-1は $V_0=15 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の粒子を平均流速 $U_f=U_b$

* 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
 *** (株) 日水コン

図-1 粒子群の沈降・分散挙動 ($h=30$ cm, $U_f=U_p$)

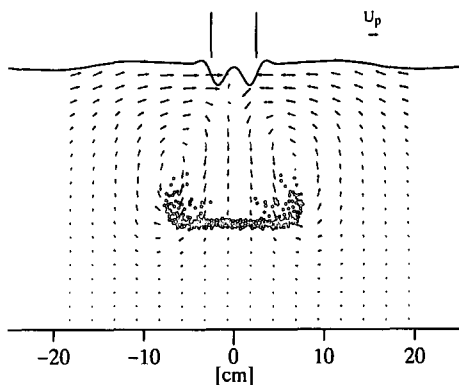
の流れの中に投入した場合の粒子群の沈降・分散挙動の計算結果を示したものである。粒子群が静止流体中に投入された場合には、投入の中心軸を対称軸として左右にほぼ対称な循環流が形成され、図-2に示すようにこれによって粒子群も左右対称に分散しながら沈降する(図-2参照)が、流れ場中に投入された場合にはこのような対をなす循環流は形成されない。

図-1(a)によれば、流体は粒子群の上部に回り込むように流れ、0.6秒後には粒子群の近傍で水平および鉛直成分ともかなり大きな値を有することがわかる(同図(b))。この誘起流によって粒子群の沈降が促進されると推察できる。

図-1(c)に示すように、さらに粒子群が沈降して水底に近づくとき、粒子群の下流側にある粒子は、水平方向にも鉛直方向にも広く分散するようになることがわかる。この広く分散した部分の粒子の沈降速度は比較的遅く、他の粒子よりも遅れて沈降することになる。したがって、他の粒子が着底してもこれらの粒子はまだ沈降過程にあるため、水平方向に卓越した流体力を受けて水底近傍で下流へと流され、これらの粒子の挙動が水底における堆

積形状に大きな影響を及ぼしていることがわかる(同図(d))。

このように、静止流体中に粒子群を投入した場合と流れの中に粒子群を投入した場合とでは発生する誘起流の特性が異なるため、粒子群の沈降・分散挙動、さらには水底における堆積形状も異なることが予想される。

図-2 粒子群の沈降・分散挙動 ($h=30$ cm, $U_f=0$)

4.2 粒子群の沈降速度

図-3は、流速 U_f を変えて数値実験を行ったときの粒子群の沈降速度 W の計算結果を示したものである。同図によれば、 U_f が $0, 0.5U_p, 1.0U_p$ と速くなるにつれて粒子群の沈降速度が増加し、さらに流速が速くなって $U_f = 2.0U_p, 3.0U_p, 4.0U_p$ と変化すると逆に粒子群の沈降速度が減少する傾向が見られることがわかる。これは、粒子群の投入によって発生する誘起流の特性や規模が流れの速度によって変化することを示している。したがって、静止流体中における粒子群の挙動を解析した後にその結果を流下方向へ平行移動させるといった解析手法（例えば、小田ら、1989）では、流れの中を沈降する粒子群の挙動を正確に把握することができないことがわかる。

4.3 粒子群の拡がり幅

図-4は、沈降過程における粒子群の拡がり幅 B に関する計算結果を示したものである。 $0 \leq U_f \leq 1.0U_p$ の条件下では、沈降に伴って粒子群の拡がり幅はほぼ線形的に増加するが、 U_f の増加とともにその拡がり速度は小さくなることわかる。

さらに、 $U_f \geq 1.0U_p$ では、 z/d が 20 よりも大きくなる

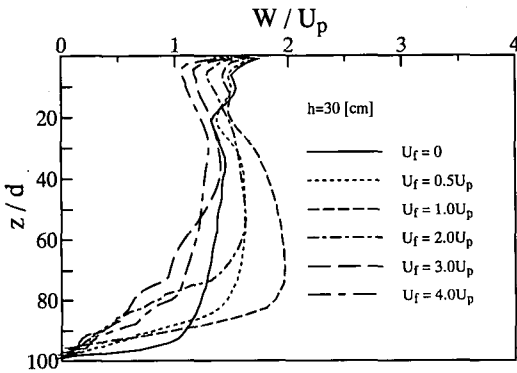


図-3 粒子群の沈降速度

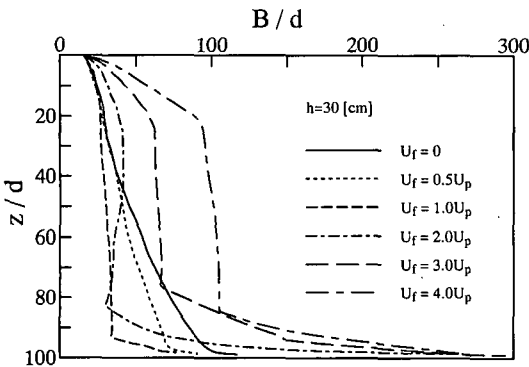


図-4 粒子群の拡がり幅

と粒子群の拡がり幅はほぼ一定値を保ちながら水底付近まで沈降するが、このときの拡がり幅は流速 U_f が大きくなるほど大きな値を有する傾向が見られる。また、水底近傍では急激に拡がり幅が増加しているが、これは誘起流によって粒子群の鉛直方向の分散が大きくなることによって、着底時に比較的遅れて沈降してきた粒子が下流方向に大きく流されるためである。

図-3と図-4を併せて見れば、粒子群の拡がり幅が小さいほどその沈降速度が速くなっていることがわかる。これは、粒子群の拡がり幅が小さいほど群としての特性を強くもって沈降していることを示しており、流体の速度によって粒子群の沈降・分散特性が変化することを示唆している。

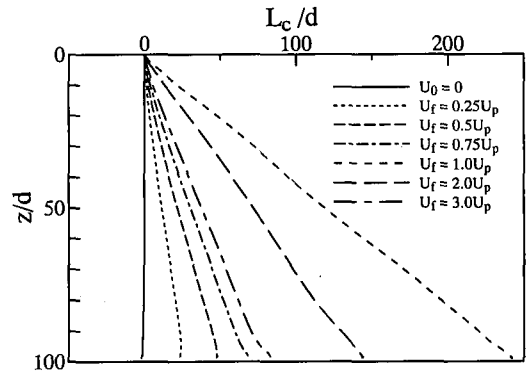


図-5 粒子群の重心位置の水平移動距離
($V_0 = 15 \text{ cm}^3/\text{cm}$)

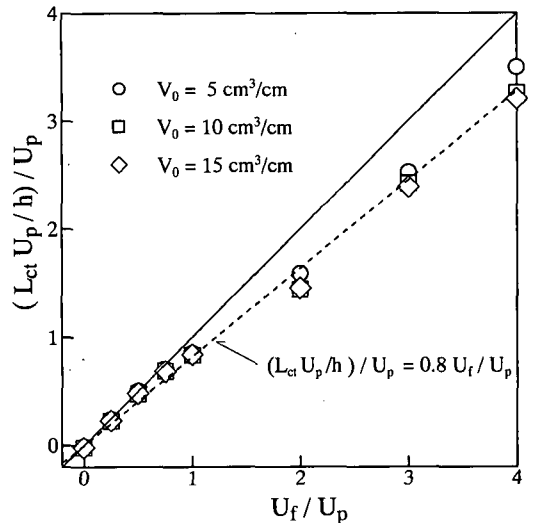


図-6 着底後の粒子群の重心位置

4.4 粒子群の水平移動速度

投入の中心軸から流れの中を沈降する粒子群の重心位置までの水平距離 (L_c) が粒子群の沈降に伴ってどのように変化するかを示したものが図-5である。いずれの計算条件においても、 L_c は粒子群の沈降とともに線形的に増加しており、その増加の割合は流速 U_f の増加とともに大きくなっている。すなわち、前述のように粒子群の沈降速度や拡がり速度は誘起流の影響を受けて沈降とともに大きく変化するが、粒子群の重心位置は流れの方

向にほぼ一定速度で移動していることがわかる。

投入中心軸から水底に堆積した粒子群の重心位置までの水平距離を L_{cl} とし、粒子群が水深 h を沈降するのに要する時間を h/U_p と表すことにすれば、粒子群の重心の水平方向の移動速度は $L_{cl}U_p/h$ と表すことができる。この粒子群の重心の水平移動速度と流速 U_f との関係を示したものが図-6である。図中の点線は数値実験の結果を最小自乗法によって原点を通る直線で近似した結果を示している。図-6によれば、 $U_f/U_p < 1$ の範囲では重心の水平移動速度は流体速度 U_f とほぼ一致し、 $U_f/U_p \geq 1$ になると U_f よりもやや遅い速度 (およそ $0.8U_f$) で移動していることがわかる。また、投入粒子量が $V_0=5, 10, 15 \text{ cm}^3/\text{cm}$ と変化しても粒子群の重心の水平移動速度に大きな差は見られない。

4.5 堆積形状

図-7は水底における粒子群の堆積形状を表したもので、縦軸 H は水底からの堆積高さを表している $U_f=0$ の場合にはほぼ対称な台形型を呈しているが (図-7(a))、 $U_f=0.5U_p, 1.0U_p$ と流速が速くなるにつれて堆積高さは高く、堆積幅が狭くなるとともに x 軸の負の側 (上流側) がわずかではあるが高くなる傾向が見られる。さらに、流速が速くなると上流側で高くなり下流側に向かうにつれて緩やかに低くなるような非対称な堆積形状を示すようになる。このような非対称性は、小田ら (1989) が流れの中に投入した捨石粒子群の堆積形状を測定した際にも観察されている。

ある分布のその平均値回りの非対称性を表す無次元統計量として歪度 (skewness) がある。これは、その値が正ならば分布形状のなだらかな裾が x の正の方向に延びていることを、負ならば裾が x の負の方向に伸びていることを意味するものである。また、分布形状が正規分布と比較して急峻であるか否かを測る尺度として尖度

表-1 歪み度および尖度

(a) $V_0=5\text{cm}^3/\text{cm}$

U_f/U_p	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
Skew	0.01	0.07	0.12	0.74	2.69	1.10
Kurt	-1.29	-1.41	-1.20	-0.34	7.74	0.23

(b) $V_0=10\text{cm}^3/\text{cm}$

U_f/U_p	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
Skew	-0.02	0.01	0.09	2.22	1.49	0.92
Kurt	-1.27	-1.26	-1.14	8.59	1.96	-0.09

(c) $V_0=15\text{cm}^3/\text{cm}$

U_f/U_p	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
Skew	0.00	0.05	0.07	2.66	1.29	1.10
Kurt	-1.18	-1.23	-1.11	10.6	0.84	0.24

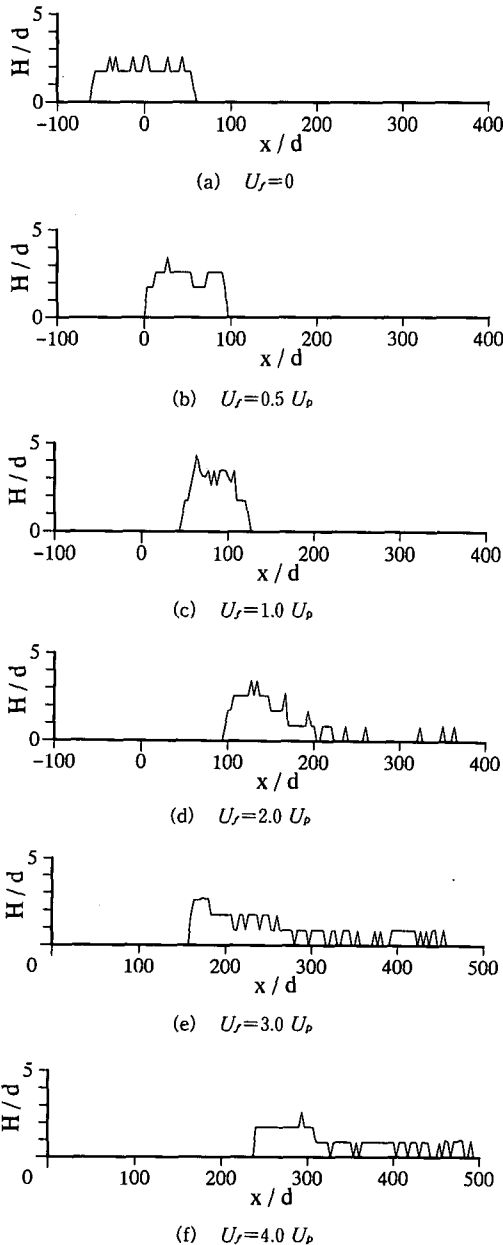


図-7 堆積形状 ($V_0=15 \text{ cm}^3/\text{cm}$)

(kurtosis)がある。尖度が負ならば緩尖、正ならば急尖な分布形状を表す。表-1にこれらの統計量を求めた結果を示す。図-7と表-1を見比べると、投入粒子量が $V_0=15 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の場合には、歪度、尖度ともに $U_f=2.0 U_b$ の時に最も大きな値を示しており、この場合 ($V_0=15 \text{ cm}^3/\text{cm}$) には $U_f=2.0 U_b$ の時に最も非対称性が強くかつ急尖な堆積形状をしていると言い表すことができる。表-1(b), (c)には投入粒子量が $V_0=5, 10 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の場合のこれらの統計量の結果を示したが、これより、 $V_0=5 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の場合には $U_f=3.0 U_b$ のときに、また、 $V_0=10 \text{ cm}^3/\text{cm}$ の場合には $U_f=2.0 U_b$ のときに、最も非対称性が強く急尖な堆積形状を呈することがわかる。

これらの統計量はあくまでも分布形状の定性的な指標でしかあり得ない。従来のこの種の研究手法では歪度や尖度のような統計量を求めることが困難だったので、ほとんど用いられていない。本手法によればこれらの統計量を容易に計算することができるので、計算ケースを増してこれらの値と分布形状の定量的な対応付けができれば、他の統計量と組み合わせて用いることによって、堆積形状を的確に表現することができるのではないかと考えられる。

5. 結 論

本研究では、既に開発済みの数値計算手法を用いて、流れの中を沈降する粒子群の分散挙動および堆積形状を求め、流速がこれらに及ぼす影響について検討した。得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 粒子の運動に伴って発生する誘起流の特性は流れの速度によって変化し、その結果、粒子群の沈降速度や拡がり幅も流速によって大きく変化することがわかった。

(2) 粒子群の沈降速度や拡がり幅が流速に複雑に変化するにも拘わらず、粒子群は水平方向にはほぼ一定の速度で移動する。水底における粒子群の重心位置は流速 U_f 、水深 h 、代表沈降速度 $\sqrt{\rho_b/\rho_f-1}gd$ の関数として表すことができることがわかった。

(3) 堆積形状は、流れが速くなるにつれて非対称形を示すようになる。したがって、堆積形状の予測には流速の影響を十分考慮することが不可欠である。

参 考 文 献

- 小田一紀・樋口俊光・岩田 潔 (1989): 捨て石粒子群の多点投入時および流れの中の堆積形状に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 814-818.
- 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40巻, pp. 951-955.
- 玉井昌宏・村岡浩爾 (1994): 粒子沈降により生じる乱流場と振動格子乱流の相互作用に関する解析, 水工学論文集, 第38巻, pp. 571-576.
- 灘岡和夫・八木 宏・二瓶泰雄 (1994): 高濃度固液混相流に関する LES 乱流モデルの開発, 水工学論文集, 第38巻, pp. 577-584.
- 室田 明・中辻啓二・玉井昌宏・町田博紀 (1988): 海域での土砂投下における密度流現象, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 777-781.