

静水・流水中に瞬間的に投下された 粒子群の流動特性

SWARMS OF PARTICLES FALLING TROUGH STAGNANT AND FLOWING WATERS

秋山 壽一郎¹・浦 勝²・応 新亜³・西森 秀樹⁴

Juichiro AKIYAMA, Masaru URA, Xinya YING and Hideki NISHIMORI

¹正会員 Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

³学生会員 工修 九州工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 (同上)

⁴学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

Motion of swarms of particles falling through a stagnant as well as flowing water are investigated experimentally. A series of laboratory experiments is conducted, changing size as well as amount of dumping particles and the magnitude of ambient flow velocity. Such main flow characteristics of suspension thermal as geometry constants, entrainment functions, main flow characteristics(half-width, mean buoyancy force and falling velocity), and others are examined and several important empirical relationships to adequately describe characteristics of the flows are proposed. In addition, the transitional condition from the suspension thermal-like phase the free settling-like phase is roughly estimated.

Key Words : turbidity, particle, turbulent thermal, experiment

1. はじめに

人工島の建設などを目的とした水域への土砂直投工や廃棄物の投棄では、水表面付近から投下される多量の土砂が引き起こす大規模な汚濁が大きな問題となっている。

このような土砂投下問題を対象として、静水中を落下する粒子群あるいは濁水塊の挙動についてこれまで研究が重ねられ、多くの有益な知見が得られている^{1)~7)}。例えば、玉井ら¹⁾は粒径が大きく投下量が少ない場合には個々の粒子の自由沈降的な落下形態となり、粒径が小さく投下量が多い場合には粒子群として流動する乱流サーマル的な落下形態となることを実験的に明かにした上で、Balnes and Hopfinger²⁾の単相乱流サーマル理論を発展させ、自由沈降の落下挙動と乱流サーマル的な落下挙動を統一的に説明するための固液混相の理論モデルを提案している。小田ら³⁾は粒子・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(DEMAC法)を開発し、投入粒子量などの条件が静水中の粒子群の沈降・分散挙動および堆積形状に及ぼす影響について検討を加え、周囲流体運動の重要性を指摘している。秋山ら⁷⁾は微細粒子よりなる濁

水塊を対象とし、その流動特性を乱流サーマル理論に基づき解明するとともに、抵抗係数や連行係数などについて定量的に明らかにしている。

さて、近年このような土砂投下はますます大型化するとともに、より沖合いの大水深・強潮流下で施工・実施される傾向にあり、様々な流動場における投下土砂の流動・拡散・堆積現象の解明が必要とされている。ところが、周囲流動場が落下粒子群に及ぼす影響について論じた研究は、著者の知る限り極めて少ない^{8),9)}。小田ら³⁾はDEMAC法を用いて対数則に従う流水中に投下された粒子群の運動を解析し、粒子群の沈降速度や拡がり幅が流速によって複雑に変化するにもかかわらず、粒子群は水平方向にほぼ一定の速度で移動することなどを数値実験により明らかにしている。秋山ら⁹⁾は一様流中に投下された塩水塊の挙動について実験的に調べ、塩水塊はほぼ周囲水流速で移流されること、落下速度は静水中とほぼ同様な関係があること、連行速度は静水中よりも小さくなること、などを明らかにしている。

以上のような事実を踏まえ、本研究では、水表面から静水あるいは流水中に瞬間的に投下された粒子群の流動・拡散過程、特に粒子サーマル的な落下形態から自由沈降的な落下形態への遷移点について大

表-1 実験条件

CASE	周団水流速 U(cm/s)	中央粒径 d(cm)	粒子の水中 比重s	初期単位幅 体積A ₀ (cm ³)	初期総浮力 W ₀ (cm ³ /s ³)
1-a-1	0	0.0044	1.467	0.48	697
1-a-2				0.97	1394
1-a-3				1.45	2091
1-a-4				1.94	2789
2-a-1	0	0.0140	1.650	0.54	878
2-a-2				1.09	1757
2-b-1	3.22			0.27	439
2-b-2				0.54	878
2-b-3				0.81	1318
2-b-4				1.09	1757
2-c-1	6.22			0.54	878
2-c-2				0.81	1318
2-c-3				1.09	1757
2-d-1	9.19			0.54	878
2-d-2				0.81	1318
2-d-3				1.09	1757
3-a-1	0	0.0270	1.650	0.57	922
3-a-2				1.14	1845
3-b-1	3.05			0.29	461
3-b-2				0.57	922
3-b-3				0.86	1384
3-b-4				1.14	1845
3-c-1	6.11			0.29	461
3-c-2				0.57	922
3-c-3				0.86	1384
3-c-4				1.14	1845
3-d-1	8.88			0.57	922
3-d-2				0.86	1384
3-d-3				1.14	1845

まかな目安を示すとともに落下粒子群の形状係数や連行係数などの定量化を行い、粒子サーマル的落下形態における落下粒子群の最大拡がり幅、平均浮力および落下速度を実験的に明らかにする。

2. 実験装置および方法

静水中の実験では前面アクリル製の水槽(幅1.5m、深さ1.5m、奥行き0.1m)を、流水中の実験では大型水槽(長さ9.0m、深さ1.22m、幅0.6m)の内部に下流端に一様流発生装置を取り付けた前面アクリル製水槽(長さ4.0m、深さ1.0m、奥行き0.1m)を設置したものを用いた。密度 ρ_a の静水中あるいは周囲水流速 U の流水中に流入装置から中央粒径 d 、比重 σ の粒子を初期総浮力 $W_0(=sgA_0)$ で水表面より瞬間的に流入させ、落下粒子群を発生させた。ここに、 A_0 =空隙を除いた粒子の初期単位幅体積、 s =粒子の水中比重($=\sigma-1$)および g =重力加速度である。表1に実験条件を示す。表中で、 $d=0.044\text{mm}$ の粒子はガラスビーズ、その他はふるい分けしたケイ砂である。図1はCASE2-b-4の場合の落下粒子群の流動状況である。このように、静水中はもとより流水中においても落下粒子群の形状はほぼ中心軸に対して左右対称である。従って、 A_0 および W_0 は全投下量の半分として定義してある。

このようにして形成された落下粒子群をレーザースリット光で可視化し粒子群の流動状況をCCDカメラで撮影した。流水中の場合は粒子群の軌跡をあ



図-1 流水中の粒子群の写真 (CASE2-b-4)

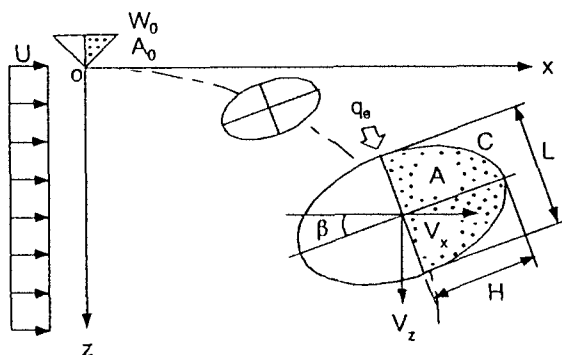


図-2 流水中の粒子群の定義図

らかじめ予備実験で求め、その軌跡に沿ってカメラを移動させた。高性能VTRに収録された画像を解析することにより、落下粒子群の水平移動速度 V_x 、落下速度 V_z および形状を求めた。流れの再現性は比較的良好であったので、同一条件下で5回の繰り返し実験を行ない、データの信頼性を高めた。

なお、流水中の実験では、できる限り一様な流速が得られるように水槽上流端にハニカムを設置し整流するとともに、一様流発生装置の一部である複数のバルブを丁寧に調節した。その際、流下方向および水深方向の各4点の流速を2次元電磁流速計で測定し、周囲水流速を設定した。

3. 実験結果

図1より、粒子群は周囲流体を連行しながら一様流に乗って水平に移動しながら落下していく様子がわかる。また、静水中あるいは流水中を問わず粒子群はほぼ楕円形状の相似形を保ちながら流水中を落下していくこと、および流水中では平均的にほぼ $\beta=10^\circ$ の角度で傾きながら落下していくことが確認できた。そこで、流水中を落下する粒子群を図2のようにモデル化して考える。ここで当然のことながら、静水中では傾き角度 $\beta=0$ および水平移動速度 $V_x=0$ である。

まず初めに、本研究で対象とする粒子群の落下形態について明らかにしておく。図3は粒子群の落下速度 V_z と粒子の沈降速度 V_f との比 V_z/V_f と無次元落

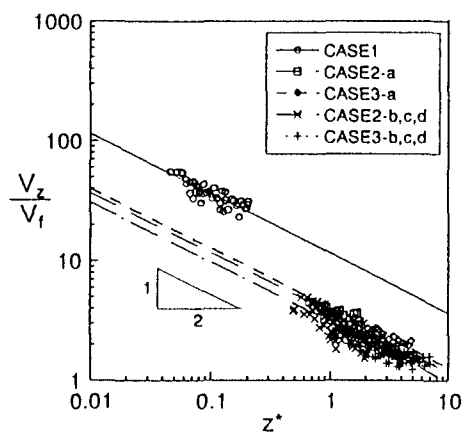


図-3 速度比 V_z/V_f と z^* との関係

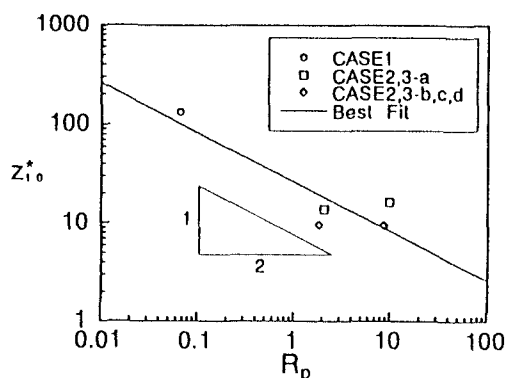


図-4 遷移点の無次元距離 z^*_{10} と R_p との関係

下距離 $z^*(=z/z_0)$ との関係を示したものである。ここに、 z_0 =代表長さスケール $(=W_0^{1/2}\Lambda_0^{1/4})/V_f$ である。 $H\sim z$ 、 $B\sim z^{-2}$ および $V_z\sim z^{-1/2}$ となることがサーマル的な流動形態である条件であるが⁷⁾、図3から明かなように、全てのデータが $V_z/V_f\geq 1.0$ の範囲にあり、 $V_z\sim z^{-1/2}$ の関係に従っていることから、本研究で得られた粒子群の落下特性が粒子サーマル的な落下形態に属していることがわかる。同様に、 $H\sim z$ および $B\sim z^{-2}$ の関係についてもそれらの依存性が確認されたが、ここでは紙面の都合で割愛する。さらに、粒子サーマル的な落下形態では粒子群の落下速度は粒子の沈降速度よりも数倍から数10倍大きいこともわかる。後述するように乱流サーマルの落下速度は落下距離に対して指数的に減少するので、その内部の乱れ強度も急速に減少し、粒子サーマル的な落下形態から自由沈降的な落下形態に移行すると思われる。

さらに、図3より両領域の遷移条件を大まかに算定することができる。つまり、 $V_z/V_f=1.0$ となる値 z^*_{10} を図3より求め、さらにsimilarity collapse法¹⁰⁾を用いて z^*_{10} と粒子Reynolds数 $R_p(=dV_f/\nu)$ との関係を調べると、図4のような関係が得られる。これより、両領域の大まかな遷移条件は式(1)のようになる。ここに、 ν =水の動粘性係数である。

$$z^*_{10}=26R_p^{-0.5} \quad (1)$$

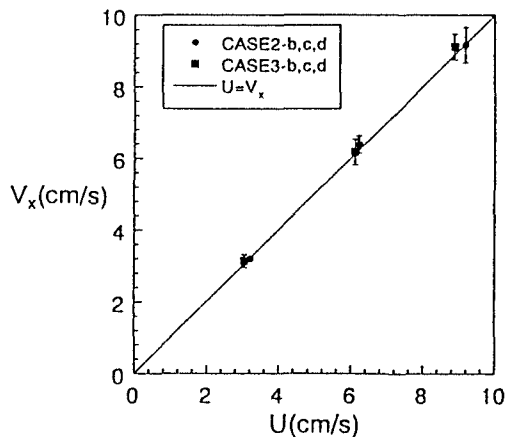


図-5 水平移動速度 V_x と周囲水流速 U との関係

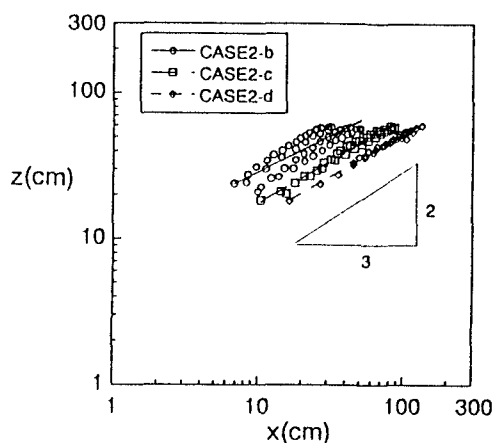


図-6 落下粒子群の軌跡

以下では、静水中および流水中における粒子サーマルの主要な流動特性量について検討を加える。

(1) 水平移動速度 V_x ならびに軌跡

粒子群の水平移動速度 V_x と周囲水流速 U との関係を図5に示す。これより、 V_x と U との値がほぼ完全に一致しており、粒子群は流入条件および周囲水流速 U の大きさに依存せず、ほぼ周囲水流速 U で移流されることがわかる。また、同様な傾向は小田ら⁸⁾の数値シミュレーションでも報告されている。

図6は落下粒子群の軌跡の一例を示したものである。これより軌跡はいずれの U においても z が $x^{2/3}$ にほぼ比例することがわかる。この理由は、後述するように静水・流水中ともに $V_z=z/t\sim z^{-1/2}$ なる関係を有することから $t\sim z^{3/2}$ となり、水平移動速度 V_x は $V_x=x/t$ =一定なる関係を有することから $x\sim t$ となる。これより、 $z\sim x^{2/3}$ なる関係が成立すると思われる。

(2) 断面アスペクト比 F および断面面積比 S_1 と初期総浮力 W_0 との関係

サーマル的な落下形態では、その流動特性は W_0 の絶対量によって規定される⁷⁾。そこで、断面アスペクト比 $F(=H/L)$ と断面面積比 $S_1(=A/HL)$ と W_0 との関係について調べたものが図7と8である。これ

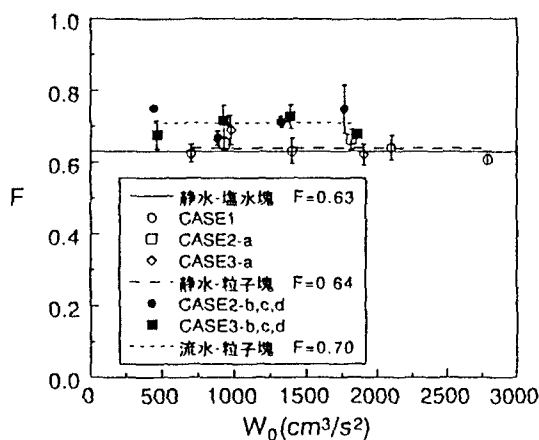


図-7 断面アスペクト比 F と W_0 との関係

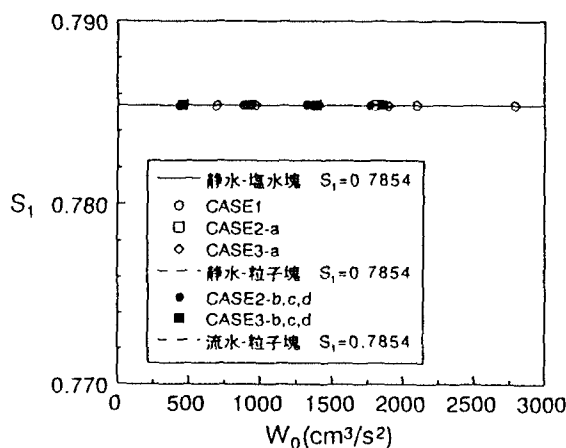


図-8 断面面積比 S_1 と W_0 との関係

より、静水中の落下粒子群の F は落下塩水塊の値とほぼ同じであるが、流水中では F がやや大きな値となっていること、流水中では形状の変動が相対的に大きいこと、などがわかる。図7より、静水中と流水中の粒子群の F はそれぞれ $F=0.64$ と 0.70 で近似できる。一方、図8より S_1 は流水中と静水中で違いは認められず、 W_0 にも傾向的に依存せずその値は $S_1=0.7854$ で近似される。この値は楕円形状の S_1 値である $\pi/4$ (≈ 0.785)にほぼ等しい。ここで、 F および S_1 は W_0 に対してほぼ一定値であるので、 W_0 が次元を持つことは本質的に重要ではない。

(3) 連行係数 E_d と初期総浮力 W_0 との関係

連行係数 $E_d(=q_e/CV_z)$ と W_0 との関係を示したものが図9である。ここに、 q_e =単位時間当たり連行量、 C =粒子群の周囲長である。これより、静水中では E_d は W_0 に対しては傾向的には依存しないこと、粒子粒径に依存し粒径が小さなCASE1では落下塩水塊の値に近く粒径が大きなCASE3では連行係数がかなり小さくなること、などがわかる。一方、流水中では静水中と同様に粒子粒径に対する依存性が認められるとともに、 W_0 に対しては増加する傾向があること、周囲水流速の影響を受けて粒径が小さく W_0 が大きな場合には E_d が静水中の落下塩水塊より

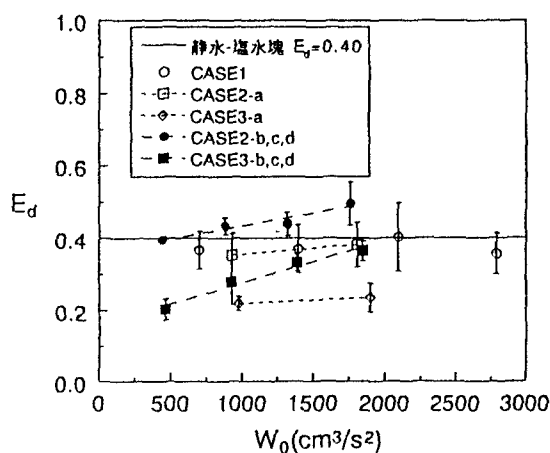


図-9 連行係数 E_d と W_0 との関係

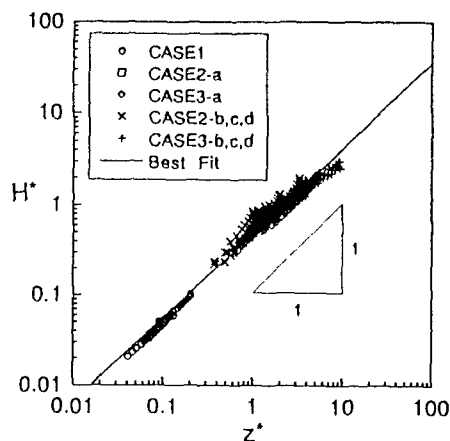


図-10 H^* と z^* との関係

も大きくなること、などがわかる。まず、粒径に対する依存性について考察する。図3で見たように、いずれのCASEにおいても粒子サーマル的な落下形態にあるが、その程度はCASEによって異なり、大きな粒径の場合ではより自由沈降的な落下形態に近く、そのため周囲流体の連行も弱いと考えられる。また、流水中の場合の W_0 に対する依存性であるが、 W_0 が大きな場合はより粒子サーマル的な落下形態に近く、逆に小さな場合は自由沈降的な落下形態に近いことや周囲水の乱流拡散の影響もあるため、みかけ上の連行係数の増加が認められるようである。ここで、静水中の E_d は W_0 に依存せずほぼ一定値を取るの、 W_0 が次元を持つことは本質的に重要ではない。しかし、流水中では E_d は W_0 に依存する結果となっており、この点、今後の検討が必要であると考えられる。

(4) 無次元最大幅 H^* 、無次元平均浮力 B^* 、無次元落下速度 V^* と無次元落下距離 z^* との関係

粒子群の無次元最大幅 H^* 、無次元平均浮力 B^* 、無次元落下速度 V^* をそれぞれ $H^*=H/z_0$ 、 $B^*=B/B_0$ 、 $V^*=V_z/V_0$ のように定義する。

ここに、 $V_0=(sgW_0)^{1/4}$ および $B_0=V_0^2 z_0^{-1}$ である。図10、11、12は H^* 、 B^* 、 V^* と z^* との関係を示し

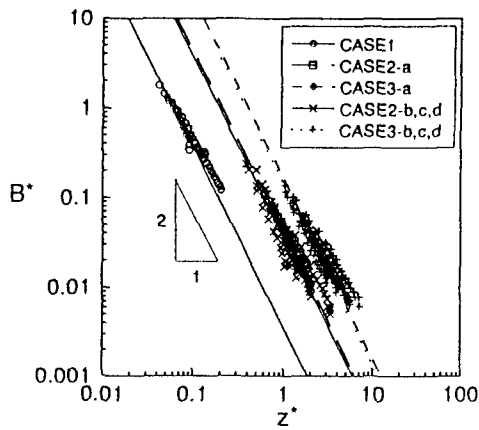


図-11 B^* と z^* との関係

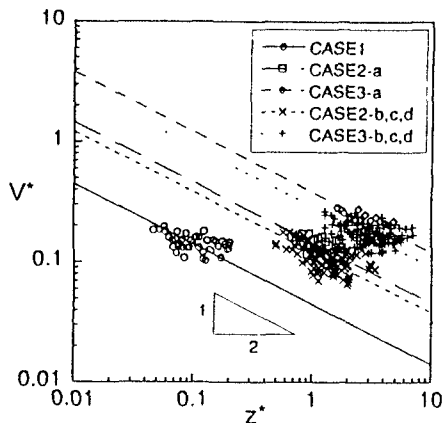


図-12 V^* と z^* との関係

たものである。これらより、 H^* は z^* のみの関数として表現できるが、 B^* と V^* については明らかに他のパラメータが関与していることが認められる。そこで、粒子Reynolds数 $R_p (=V_p d/\nu)$ と無次元周囲水流速 $U^* (=U/V_p)$ を導入し、粒子群の平均浮力 B と落下速度 V_p を表わす無次元パラメータがそれぞれ次のように表わせると仮定する。

$$B^* \cdot (R_p)^{m_1} \cdot (U^*)^{n_1} \quad (2) ; V^* \cdot (R_p)^{m_2} \cdot (U^*)^{n_2} \quad (3)$$

図13と14はsimilarity collapse¹⁰⁾法を用いて m と n について調べたものであるが、今回行った全ての実験結果を良好に表現できる値として、 $m_1 = -3/4$ および $n_1 = 0$ 並びに $m_2 = -2/5$ および $n_2 = -1/4$ が得られた。これより、粒子群の平均浮力と落下速度は R_p に強く依存するが、 U^* に対する依存性は相対的に弱いことがわかる。そこで、 $B^* \cdot (R_p)^{-3/4}$ 並びに $V^* \cdot (R_p)^{-2/5}$ と z^* 、 $V^* \cdot (R_p)^{-2/5}$ と $z^* \cdot (U^*)^{1/4}$ の関係を示したものが、それぞれ図15、16および17である。これらの無次元パラメータは、投下条件や周囲水流速の違う落下粒子群の挙動を統一的に表現することができる。ただし、静水中では $U=0$ なのでその場合のデータは当然ながら図17中にはプロットされていない。いずれにせよ、これらのパラメータ

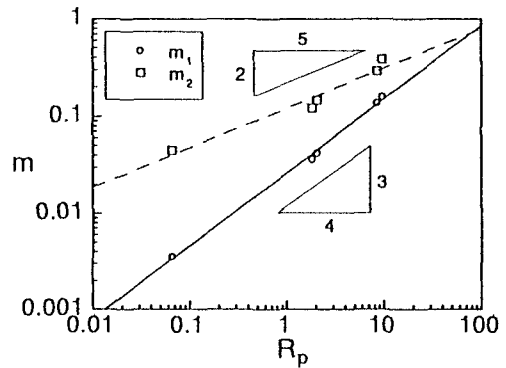


図-13 m_1 と m_2 の値

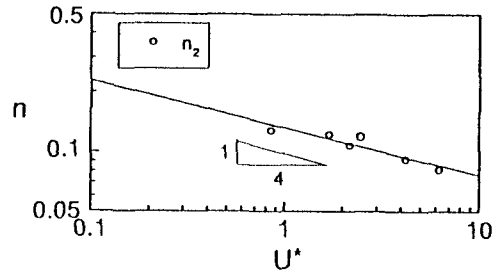


図-14 n_2 の図

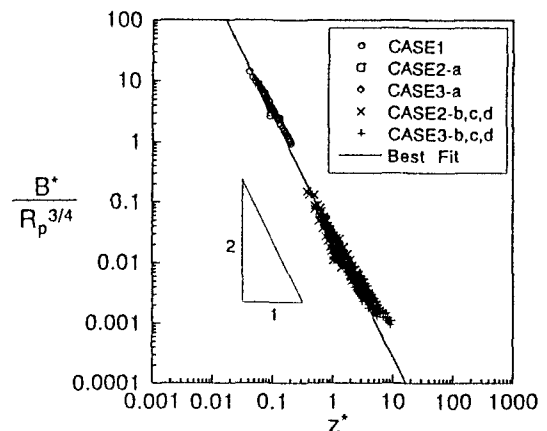


図-15 $B^* \cdot (R_p)^{-3/4}$ と z^* との関係

中には粒子の沈降速度などの粒子の性質が含まれている。無次元落下速度 V^* が粒子の性質の影響を受けることは当然にしても、無次元平均浮力 B^* がその影響を受けることは次のように説明できる。つまり、粒子サーマル的な落下形態では、落下粒子群の初期総浮力 W_0 は保存されるが、断面積 A は周囲水の連行によって増加する。この性質は保存性のサーマルと同じである。しかし、粒子サーマル的な落下形態における連行係数は図9で見たように粒子粒径や初期総浮力 W_0 の影響を強く受ける。このようなことが理由と考えられる。

以上をまとめると、 H^* は z^* に線形的に依存すること、 B^* は粒子の沈降速度を強く受けるが周囲水流速の影響はなく、 z^* の-2乗に比例すること、 V^* は粒子の沈降速度を強く受けるとともに若干の周囲水流速の影響が認められ、 z^* の-1/2乗に比例すること、などがわかった。 H^* 、 B^* および V^* と z^* との

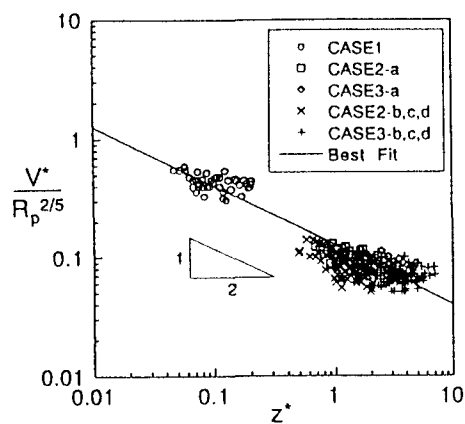


図-16 $V^* \cdot (R_p)^{-2/5}$ と z^* との関係

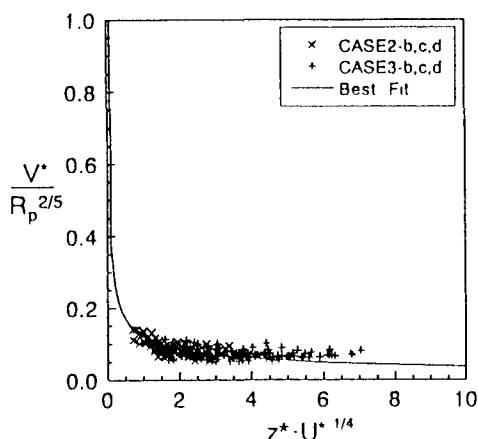


図-17 $V^* \cdot (R_p)^{-2/5}$ と $z^* \cdot (U^*)^{1/4}$ との関係

関係はそれぞれ次のように与えられる

$$H^* = 0.48z^* \quad (4)$$

$$B^* = 0.03R_p^{3/4} z^{*-2} \quad (5)$$

$$V^* = 0.13R_p^{2/5} z^{*-1/2} \quad (\text{静水中}) \quad (6a)$$

$$= 0.13R_p^{2/5} U^{*1/4} z^{*-1/2} \quad (\text{流水中}) \quad (6b)$$

4. まとめ

本研究によって以下のような結論が得られた。

(1) 流水中の落下粒子群はやや左右非対称ではば楕円形状の相似形であり、形状と傾き角度を変動させながら流水中を落下する。

(2) 流水中の落下粒子群はほぼ周囲水流速 U で移流され、落下速度 V_z については投下粒子の性質や周囲水流速の影響がみられるものの静水中の保存性サーマルと同様に $V_z \sim z^{-1/2}$ なる関係がほぼ成立する。その結果、流水中の落下粒子群の軌跡は $z \sim x^{2/3}$ なる関係を持つ。

(3) 静水中での連行係数は投下量にはほとんど依存せず、粒子粒径が大きくなると保存性サーマルの連行係数よりも小さくなる。また、流水中では粒径が小さいほどあるいは投下量が大きいくほど連行係数

は増加する。この流水中の落下粒子群の投下量に対する依存性については今後の課題である。

(4) 落下粒子群の主要な特性量である、無次元最大幅 H^* 、平均浮力 B^* 、落下速度 V^* はそれぞれ無次元落下距離 z^* の1乗、-2乗、-1/2乗に比例する。さらに、落下粒子群の最大幅 H は全投下量 (W_0)、粒子の性質 (V_f など) および周囲水流速 U の影響は受けないが、平均浮力 B は全投下量と粒子の性質の影響を受け、落下速度 V_z はこれら全ての影響を受ける。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費、(代表者：秋山壽一郎、課題番号08455232) の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 玉井昌宏・村岡浩爾・室田明：固体粒子群の落下挙動と誘起流動に関する研究、土木学会論文集、No.509、II-30、pp.143-154、1995。
- 2) Baines, W. D & Hopfinger, E. J. : Thermals with large density difference, *Atmospheric Environment*, Vol. 18, No. 6, pp.1051-1057, 1984.
- 3) 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸・井上雅夫：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、1992。
- 4) 堀江毅：MAC 法による直投土砂の初期拡散に関する数値解析、運輸省港湾技術研究所技術資料、No. 471、pp.1-34、1983。
- 5) Buhler, J. & Papantoniou, D.A. : Swarms of coarse particles falling through a fluid, *Proc. of the Int'l Symposium on Environmental Hydraulics*, Vol.1, pp.135-140, 1991.
- 6) Li, C.W. : Convection of particle thermals, *J. Hydraulic Research*, Vol.35, No.3, pp.363-376, 1997.
- 7) 秋山壽一郎・浦勝・応新亜・今宮盛雄・陶山正：静水中に瞬間的に投下された重たい流体塊の流動特性に関する研究、水工学論文集、第42巻、pp.529-534、1998。
- 8) 小田一紀・重松孝昌・菅野寛：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、海岸工学論文集、第42巻、pp.1271-1275、1995。
- 9) 秋山壽一郎・浦勝・応新亜・西森秀樹：流水中に瞬間的に投下された重い流体塊の流動・拡散現象に関する実験的研究、水工学論文集、第42巻、pp.1165-1170、1998。
- 10) Akiyama, J. & Fukushima, Y. : Entrainment of non-cohesive bed sediment into suspension, *Proc. 3rd Int. Sym. River Sedimentation*, Mississippi, USA, pp.804-813, 1986.

(1998. 9. 30 受付)