

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON MOTION OF DENSE CLOUD IN UNIFORM AMBIENT FLOW

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学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 (同上)

⁴学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

Flow characteristics of conservative two-dimensional dense cloud released instantaneously from water surface into a well-mixed ambient fluid with uniform velocity are investigated experimentally. A series of laboratory experiments is conducted to understand flow mechanism and to obtain flow characteristics of the considering flow. It is found that dense cloud is advected in the horizontal direction at the nearly same speed as uniform flow velocity and is descent in the vertical direction in a similar manner to that in a quiescent fluid, and that the behaviour of dense cloud in a uniform flow is somewhat different from those in a quiescent fluid because weaker recirculating motion is formed as the existence of uniform flow.

Key Words : density current, vertical free thermal, integral model, experiment

1. はじめに

関西国際空港の例に見られるように、近年、水深10~20m程度の沖合いに海上空港、物流ターミナル、発電所などを利用目的とする人工島の造成が計画・施工されるようになって来ている。その際、経済性を考慮して、底開バージによる土砂直投工が通常用いられている。しかし、直投工では多量の土砂が水面付近から投入されるため、微細土粒子による大規模な汚濁が発生し水産資源をはじめとする水性生物に甚大な被害をもたらすことが大きな社会問題となっている。

このような土砂投下問題を対象として、静水中に瞬間的に投下された粒子群の落下挙動特性について調べた研究は数多くある。例えば、玉井ら¹⁾はある与えられた水深で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⁾による単相乱流サーマル理論と実験値との比較検討

を行なうとともに、乱流サーマル理論を発展させることにより、自由沈降的落下挙動と乱流サーマル的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。玉井らの理論モデルはEscudier and Maxworthy³⁾、Balnes and Hopfinger²⁾などによる一連の乱流サーマルに関する研究の延長線上にあるが、乱流サーマル理論を混相流に発展させたところに特徴がある。一方、小田ら⁴⁾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、静水中における粒子群の沈降挙動をパラメトリックに解析することによって、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を加え、粒子群の沈降挙動の解明には周囲流体の運動を考慮する必要性を指摘している。

さて、近年このような土砂投下工事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・堆積現象の水理学的特性を解明する必要があると考えられる。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数少なく、小田ら⁵⁾の研究以外には見当たらない。小田ら⁵⁾は先に開発したDEMAC法を用いて対数則に従う流水の中に投下された粒子群の運動を解析し、周囲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を加え、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拘わらず、粒子群は水平方向にほぼ一定の速度で移動することや堆積形状の予測については流速の影響を十分に考慮する必要があることなどを指摘している。しかし、得られた知見は意義深いものであるが、数値実験による結果であり実験的検証に裏付けられたものではない。

本研究は、土砂投下にとまなう微細土粒子の水質汚染問題を対象として、一様流中での濁水塊の流動・拡散・堆積過程の解明を目標とするものであるが、そのためには、そのような流動特性の解明の基本となる最も単純な流動形態である一様流水中に瞬間的に投下された重たい流体塊の流動・拡散過程について十分に理解しておくことが重要であると著者らは考える。本論文は、このような立場から重い流体塊の流動・拡散過程について実験的に検討を加えるとともに、形状の相似形に基づくサーマル理論が対象とする現象に適用できるかどうかについて検討を加えたものである。

2. 実験装置および方法

図1に示す大型水槽(長さ9.0m、深さ1.22m、幅0.6m)内部に一様流発生装置を取りつけた両面アクリル製の水槽(長さ4.0m、深さ1.0m、幅0.1m)を設置し、一様流速 U の密度 ρ_a の周囲流体中にホッパを模した投下装置からウラン色素で着色した所定の濃度の砂糖を加えた初期密度 ρ_0 の塩水を初期単位幅体積 A_0 で水表面より瞬間的に流入させ、塩水塊を形成させた。このようにして形成された塩水塊の流動状況をVTRカメラを移動させながら水槽側面より撮影を行なった。その際、塩水塊の軌跡をあ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市販の画像解析ソフトを用いて解析することにより、塩水塊重心の水平移動速度 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3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、重心の位置は塩水塊内部の密度を一様と仮定して求めた。

実験条件は、表1に示すように静水中では3通りの初期相対密度差 $\epsilon_0(=(\rho_0-\rho_a)/\rho_a)$ に対して、初期総有効重力 $W_0(=\epsilon_0 A_0 g)$ が3通りになるように初期単位幅体積 A_0 を3通りに変化させた。ここに、 g は重力加速度である。一方、流水中では、2通りの ϵ_0 に対

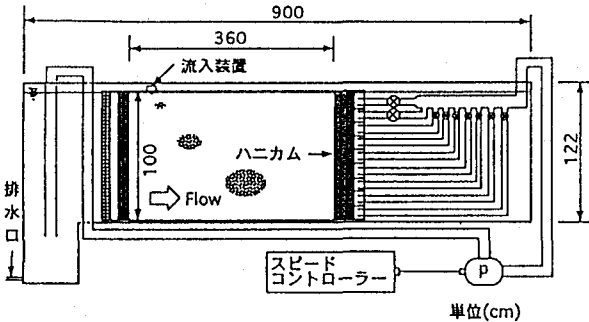


図-1 実験装置

表-1 実験条件

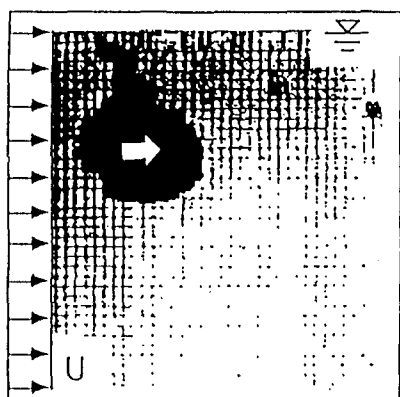
静水中の実験条件				
	ϵ_0	U(cm/s)	$W_0(\text{cm}^3/\text{s}^2)$	$A_0(\text{cm}^2)$
case1	0.26	0	101.92	0.40
case2		0	146.51	0.58
case3		0	191.10	0.75
case4	0.32	0	101.92	0.33
case5		0	148.96	0.48
case6		0	196.00	0.63
case7	0.38	0	102.41	0.28
case8		0	148.96	0.40
case9		0	195.51	0.53
流水中の実験条件				
	ϵ_0	U(cm/s)	$W_0(\text{cm}^3/\text{s}^2)$	$A_0(\text{cm}^2)$
case1	0.26	1.49	101.92	0.40
case2			146.51	0.58
case3			191.10	0.75
case4		4.94	101.92	0.40
case5			146.51	0.58
case6			191.10	0.75
case7		6.45	101.92	0.40
case8			146.51	0.58
case9			191.10	0.75
case10	0.38	1.56	102.41	0.28
case11			148.96	0.40
case12			195.51	0.53
case13		4.97	102.41	0.28
case14			148.96	0.40
case15			195.51	0.53
case16		6.35	102.41	0.28
case17			148.96	0.40
case18	195.51		0.53	

して W_0 が3通りになるように A_0 を3通りに変化させ、一様流速 U を3通りに変化させた。

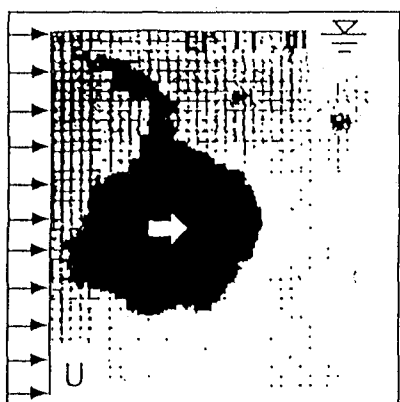
一様流の設定は、まず流量を調節し、各断面での流速差をなくすためにハニカムを設置するとともに、水路下流端に取り付けられた複数のバルブを微調節することによって行なった。また、流下方向に3点、落下方向に4点の計12点を電磁流速計で測定するとともに、アニリンブルー染料を用いて一様流速の確認を行なった。

3. 実験結果

図2の(a)、(b)は、case11 ($U=1.56 \text{ cm/s}$ 、 $\epsilon_0=$



(a) $t=6s$



(b) $t=14s$

図-2 流況(case11)

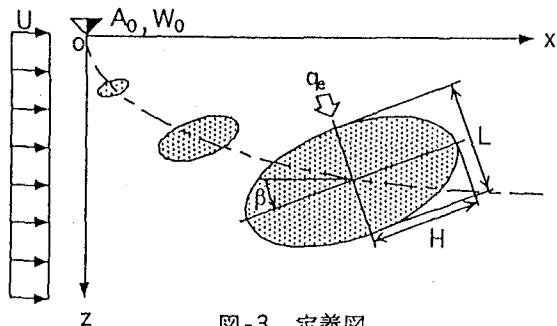


図-3 定義図

0.38、 $W_0=148.96\text{cm}^3/\text{s}^2$)の流況を示したものである。これより、塩水塊が周囲流体を活発に連行しつつ、傾き角度 β のやや左下がりで発達していく様子がわかる。そこで、一様流中を落下する2次元塩水塊を図3のようにモデル化して考える。

以下に実験結果について検討を加える。ただし、得られた各特性量は初期相対密度差 ϵ_0 には傾向的に依存せず、塩水塊の軌跡を除く各特性量は一様流速 U にも傾向的に依存しないことが認められたので、以下では各特性量と初期総有効重力 W_0 との関係について考察する。

(1) 落下塩水塊の無次元形状、傾き角度 β および軌跡

塩水塊の無次元形状の一例と傾き角度 β を図4、

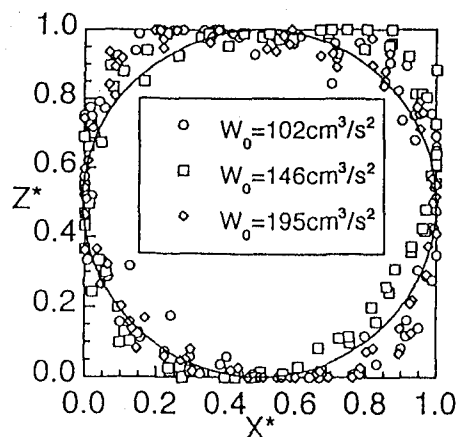


図-4 塩水塊の無次元形状

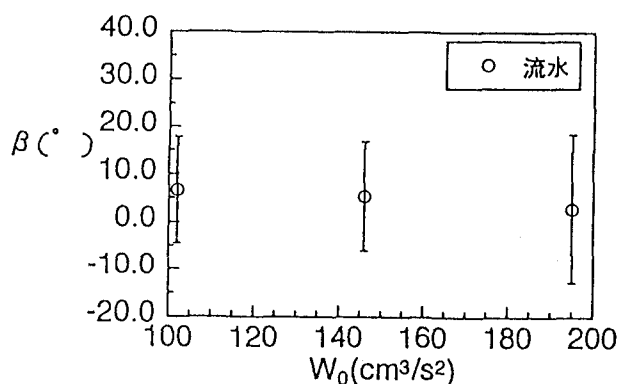


図-5 塩水塊の傾き角度 β

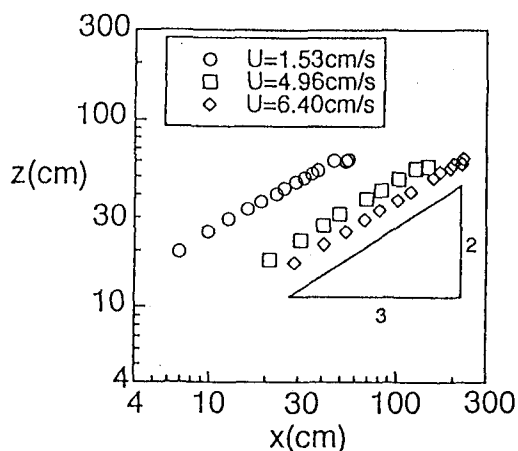


図-6 塩水塊の重心の軌跡

5にそれぞれ示す。図4では、形状を幅方向に H 、長さ方向に L で正規化して表示してある。両図より、塩水塊はほぼ楕円形状の相似形を保ちながら W_0 に傾向的に依存せず流水中を発達していくが、その際、平均的にほぼ 6° の角度で傾きながら落下していくものの傾き角度は大きく変動することがわかる。

図6は塩水塊の重心の軌跡を示したものである。当然のことながら塩水塊の軌跡については一様流速 U の影響が見られるが、いずれの U においても z が

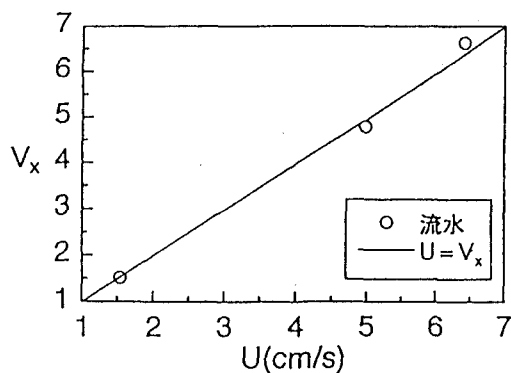


図-7 V_x と U との関係

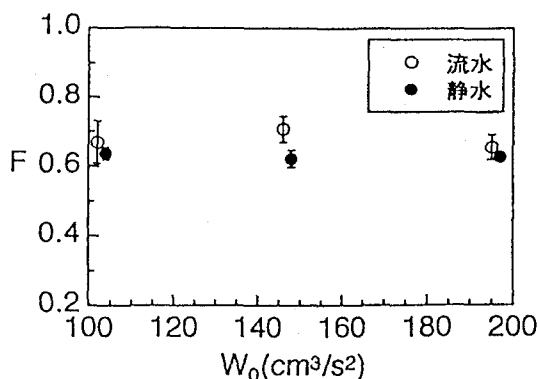


図-9 F と W_0 との関係

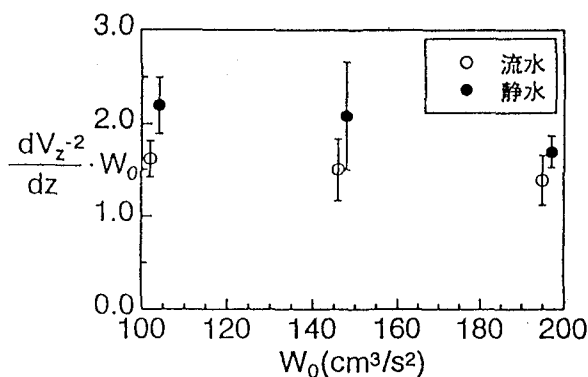


図-8 $(dV_z^{-2}/dz) \cdot W_0$ と W_0 との関係

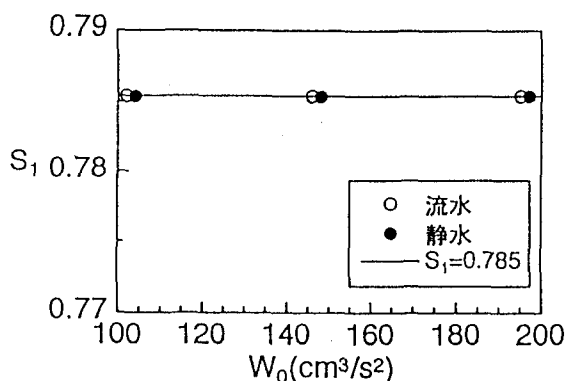


図-10 S_1 と W_0 との関係

$x^{2/3}$ に比例することがわかる。この理由は、後述するように、静水中では落下速度 V_z は $V_z = z/t \sim z^{-1/2}$ なる関係を有することから $t \sim z^{3/2}$ となるが、水平移動速度 V_x は $V_x = x/t = \text{一定}$ 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からであると考えられる。

(2) 重心の水平移動速度 V_x および落下速度 V_z

重心の水平移動速度 V_x と一様流速 U との関係を図7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、塩水塊は流入条件に依存せず、ほぼ周囲流体の一様流速 U で移流されることがわかる。また、このような傾向は小田ら⁹⁾の数値計算でも報告されている。

静水中における塩水塊の落下速度 V_z は落下距離 z に対して $z^{-1/2}$ なる関係があることが理論的・実験的にわかっているが⁹⁾、流水中の塩水塊の落下速度 V_z についてもややばらつきは認められるものの、 $V_z \sim z^{-1/2}$ なる関係がほぼ成立することが確認された。そこで、流水中の V_z^{-2} の無次元変化率 $(dV_z^{-2}/dz) \cdot W_0$ と W_0 との関係を調べ、静水中のものと比較検討したものが図8である。以下の静水中と流水中の比較の図では、 W_0 をややずらしてプロットしてある。

同図より、 V_z の変化率は流水中の方が大きく、流水中の方が早く落下することがわかる。これは、小田ら⁹⁾の数値解析でも報告されているように流水中では循環流の発達が妨げられることが理由であると考えられる。また、流水中と静水中のいずれも W_0 が増加すると V_z^{-2} の変化率が減少することより、 V_z の変化率は W_0 が大きいほど大きくなることがわかる。これは、 W_0 が大きいほど連行が急激に行なわれるためであると考えられる。

(3) 断面アスペクト比 F および断面面積比 S_1 と初期総有効重力 W_0 との関係

式(1)と(2)でそれぞれ定義される断面アスペクト比 F および断面面積比 S_1 と W_0 との関係を図9と10にそれぞれ示す。これより、流水中に比べ静水中の場合の F がやや小さい値となっていることから、静水中ではやや丸まった形状を取ることや流水中では形状がかなり変動することなどがわかる。図9より、流水中の F は式(3)で近似できる。

S_1 は流水中と静水中で違いはなく、 W_0 にも傾向的に依存しないことが認められる。また、その値は式(4)で近似され、楕円形状の S_1 値である $\pi/4 (= 0.785)$ にほぼ等しい。

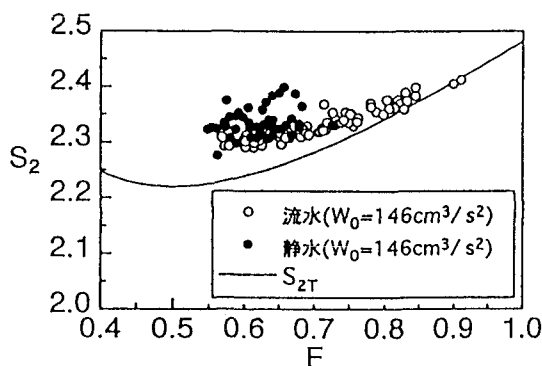


図-11 S_2 と F との関係

$$F = \frac{H}{L} \quad (1) ; \quad S_1 = \frac{A}{HL} \quad (2)$$

$$F = 0.677 \pm 0.027 \quad (3) ; \quad S_1 = 0.785 \quad (4)$$

(4) 周囲長に関する形状係数 S_2 と断面アスペクト比 F との関係

式(5)で定義される塩水塊の幾何学的平均長さ $\sqrt{HL}$ と周囲長 C との比である S_2 と F との関係の一例($W_0=146\text{cm}^3/\text{s}^2$)を図11に示す。なお、図中の曲線は式(6)で与えられる楕円形状の場合の S_{2T} を表示したものである。これより、流水中では円形に近い形状から楕円形状までの幅広い形を取り得ることや F が小さいところで $S_2 > S_{2T}$ であり、大きいところで S_2 が S_{2T} に近くなることが認められる。これは高密度の重い流体を瞬間的に投下すると、塩水塊は投下直後では、縦長の楕円形状となるが落下とともに徐々に発達変形し円形状に近づいていくためである。また、塩水塊がある程度発達した状態では一般的に $S_2 > S_{2T}$ となる傾向が認められる。

$$S_2 = \frac{C}{\sqrt{HL}} \quad (5)$$

$$S_{2T} = \frac{\pi}{2^{3/2}} \cdot \frac{\sqrt{4F^2 + 1}}{\sqrt{F}} \quad (6)$$

(5) 層厚変化率 dH/dz および平均浮力 B の無次元変化率 $(dB^{-1/2}/dz)^2 \cdot W_0$ と初期総有効重力 W_0 との関係

層厚変化率 dH/dz と W_0 との関係を図12に示す。これより、 $W_0=146\text{cm}^3/\text{s}^2$ においてはややばらつきが認められるが、静水中と流水中のいずれも W_0 の増加とともに dH/dz が減少する傾向が認められる。これは、 W_0 が大きいと縦長の楕円形状となり十分に発達しないままに着底してしまうためである。実際の直投工では、通常、経済性の立場から濁水塊が十分に発達するような深い水深で土砂の投下が行なわれることはない。従って、実際問題では投下後

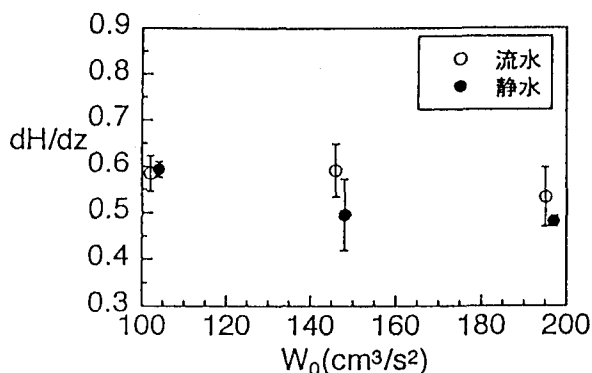


図-12 dH/dz と W_0 との関係

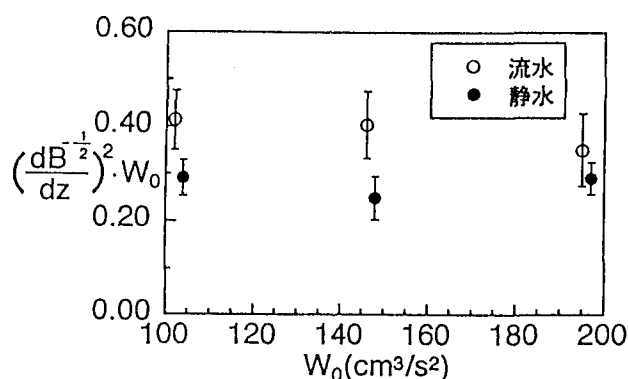


図-13 $(dB^{-1/2}/dz)^2 \cdot W_0$ と W_0 との関係

の塩水塊の挙動は初期総有効重力 W_0 によって大きく支配されると思われる。

初期総有効重力 W_0 が保存されることより平均浮力 B を式(7)より算出することができ、流水中と静水中のいずれも落下距離 z に対して $B \sim z^{-2}$ なる依存性があることが認められた。そこで、塩水塊の $B^{-1/2}$ の無次元変化率 $(dB^{-1/2}/dz)^2 \cdot W_0$ と W_0 との関係を示したものが図13である。これより、 B の変化率は流水中の方が小さく、周囲流体の連行による希釈作用がより小さいことがわかる。また、流水中と静水中のいずれも W_0 が増加すると、 $dB^{-1/2}/dz$ は減少する傾向が認められるが、これは V_z の変化率でも述べたように W_0 が大きいほど連行が急激に行なわれるためであると考えられる。

$$B = \frac{W_0}{A} \quad (7)$$

(6) 連行係数 E_d と初期総有効重力 W_0 との関係

ある瞬間の連行係数 E_d は、連行量 q_d をある瞬間の塩水塊の断面積 A の変化率 $\Delta A/\Delta t$ より算出するとともにその時の周囲長 C および落下速度 V_z を用いて式(8)より求められる。 E_d の頻度分布の一例を図14に示す。さらに、 E_d 値の集合平均をとることに

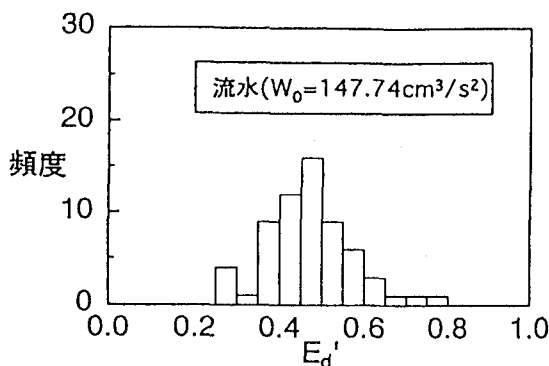


図-14 E_d' の頻度分布

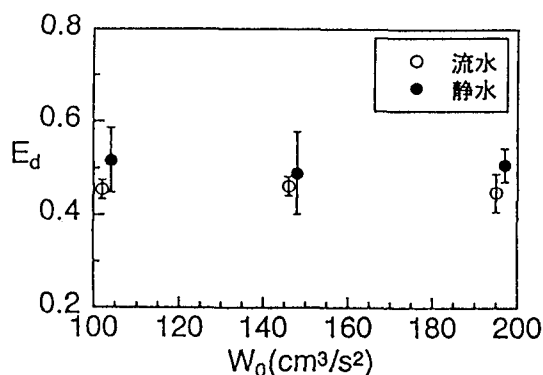


図-15 E_d と W_0 との関係

より平均的な E_d を算定することができる。このようにして得られた E_d と W_0 との関係を示したものが図15である。これより、流水中の塩水塊の連行係数 E_d は W_0 に対しては傾向的には依存せず、式(9)で近似できることがわかる。また、静水中では $E_d = 0.505$ であるので、静水中に比べ流水中の方が10%程度小さい値を取る。これは流水中では循環流が静水中のように発達しないため、連行量が減少したためであると考えられる。

$$E_d = \frac{q_e}{CV_z} \quad (8) \quad ; \quad E_d = 0.455 \pm 0.007 \quad (9)$$

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) 流水中の塩水塊は左右非対称でほぼ楕円形状の相似形であるが、形状と傾き角度を大きく変動させながら流水中を落下する。
- (2) 流水中の塩水塊はほぼ一様流速 $U(=V_x)$ で移流され、落下速度 V_z については静水中と同様に $V_z \sim z^{-1/2}$ なる関係がほぼ成立する。その結果、塩水塊の軌跡には $z \sim x^{2/3}$ なる関係が成立する。
- (3) 流水中の塩水塊では循環流の発達が妨げられるため、静水中に比べ連行が弱くなり塩水塊の断面積の増加率が小さくなる。従って、平均浮力 B の減少率も小さくなる。また、同様の理由でその落下速度も静水中より大きくなる。
- (4) 塩水塊では静水中と流水中いずれも平均浮力 B と落下速度 V_z は初期総有効重力 W_0 に強く依存する。また、 W_0 が大きいほど連行量が増加するため、 B の減少率と V_z の変化率は大きくなる。
- (5) 流水中の塩水塊の連行係数 E_d は、循環流が静水中のように発達しないため、静水中よりも10%ほど小さい値となる。

最後に、流水中の濁水塊の挙動予測への相似形状

に基づく理論モデルの適用性についてであるが、断面アスペクト比や傾き角度などが変動しながら落下することが本現象の大きな特徴であるが、形状が相似形であることや水平移動速度、落下速度、軌跡、連行係数などの特性量がかんりの精度で定量化できることなどから、かたまりとして捉えた平均的な流動特性の予測についてはそのようなモデルの適用が可能であると思われる。

今後は、流水中の塩水塊の相似形状に基づく理論モデルの構築や乱流モデルを用いた数値解析などを行ない、理論的な側面から検討を加えていく予定である。

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, Number 6, 1984.
- 3) Escudler, M.P. & Maxworthy, T.: On the motion of turbulent thermals, *J. Fluid Mech*, Vol. 61, part 3, pp. 541-552, 1973.
- 4) 小田一紀、重松孝昌、大西伸幸、井上雅夫：改良型DEMARC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.
- 5) 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.
- 6) 例えば、秋山壽一郎、浦 勝、応晋亜、今宮盛雄、陶山正治：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、1998.

(1997. 9. 30 受付)