

静水中に瞬間的に投下された濁水塊の底面衝突 後の挙動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MOTION OF TURBIDITY CLOUDS
PRODUCED IN A STAGNANT WATER

秋山 壽一郎¹・浦 勝²・応 新亜³・井手野 創⁴・中西 弥生⁴

Juichiro AKIYAMA, Masaru URA, Xinya YING, Hajime IDENO and Yayoi NAKANISHI

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 turbidity clouds propagating along the bottom boundary, that produced by instantaneous release of turbid water from water surface into a stagnant water, is investigated experimentally. A series of laboratory experiments is conducted by varying inflow condition as well as ambient water depth. The motion of turbidity clouds is found to be distinguished into two flow regions: the transition and gravity current region. The effects of inflow condition and ambient water depth on the motion of the clouds, and the relationships of the flow characteristics before and after impingement are investigated.

Key Words : turbidity, gravity current, turbulent thermal, water pollution, experiment

1. はじめに

海上空港などの建設を目的とした土砂直投工では、微細土粒子を含む多量の土砂が水面付近から投入されるため、大規模な汚濁が発生し水産資源をはじめとする水生生物に甚大な被害をもたらすことが大きな問題である。その際の具体的な汚濁拡散防止対策として、水表面近くの濁質拡散防止と微細粒子の沈降促進のための「懸垂型汚濁防止膜」と底面近くの濁質拡散防止のための「自立型汚濁防止膜」が、単体あるいはそれらの組み合わせとして広く用いられている。汚濁防止膜は濁質拡散防止の効果的な手段であるが、その有効性が必ずしも認められない事例が報告されている。例えば、底面に衝突した濁水塊が底面に沿って流動し、短時間の間に広範囲な汚濁を引き起こす要因となることを指摘した古土井¹⁾の観測結果などはその一例である。

防止膜の展張およびその配置については今のところ経験的に決定されているのが実情であり、その合理的な展張・配置方法の確立が強く望まれている。そのためには、投下土砂の落下挙動とそれに伴う誘起流動のみならず、衝突後、底面に沿って流動する濁水塊の挙動に関する基礎的理解が不可欠である。

なぜならば、潮流やそれによる自立型防止膜の著しい変形がない状況では、自立型防止膜の設置高さより低い層厚の流動層が防止膜を乗り越え流動・拡散するとは考えられず、その設置高さを濁水塊の最大層厚よりも高くすることが汚濁拡散防止のための一つの目安となると推察されるからである。

投下土砂あるいは濁水塊の落下特性については、サーマル理論²⁻⁴⁾や数値シミュレーション⁵⁻⁸⁾を通じてかなりの程度まで明らかにされている。しかしながら、その底面衝突後の挙動については、投棄土砂の分散・堆積を対象とした小川・竹内⁹⁾による半理論的研究、投下量と周囲水水深を変化させ中央粒径が3.38mmと0.15mmの2種類の砂を直投した実験研究とサーマル理論に基づく理論解析より底面衝突後の粒子群の流動特性に関する基礎的な理解と理論予測を行った玉井らの研究¹⁰⁾、混相k-εモデルに基づく数値シミュレーションにより汚濁の初期拡散を定性的に検討しようと試みた玉井ら¹¹⁾の研究、あるいは著者ら¹²⁾によるLESを用いた数値シミュレーションに基づく研究などがある。しかし、投下量や周囲水水深が衝突後の濁水塊の挙動にどのような影響を与えるのかといった基本的な点について十分な

理解が得られているわけではない。

本研究は、そのような立場から、土砂直投により発生する落下濁水塊の流動特性とその底面衝突後の底面に沿う流動層の流動特性との関係について基礎的な知見を得ることを試みたものである。ここでは、微細粒子による汚濁拡散を想定し、流入条件および周囲水水深と濁水塊の底面衝突前後の特性との関係、および衝突後の底面沿って流動する濁水塊の流動特性との関係について実験的に検討を加える。

2. 実験

実験装置は長さ7.5m、深さ1.0m、幅0.1mの両面アクリル製の水槽であり、水深 h の静水中に攪拌装置を取付けた流入装置から初期総浮力 $2W_0$ ($=2\varepsilon_0 g A_0$)の濁水を瞬間的に直投することによって落下濁水塊を発生させた。ここに、 A_0 =単位幅当り濁水の投入量、 ε_0 =濁水の相対密度差 ($=(\rho_0 - \rho_a)/\rho_a$)、 ρ_0 =投下濁水密度、 ρ_a =周囲水密度および g =重力加速度である。濁質としてはガラスビーズ(中央粒径 $d=0.0044\text{cm}$ 、粒子の水中比重 $s=1.467$)を用いた。ガラスビーズだけではなく濁水として投入した理由はガラスビーズのみを投下した場合では十分に分散した落下濁水塊を形成することが困難であったためである。なお、粒子だけを直投した場合の W_0 は $W_0=sgA_0$ で与えられる。ここに、 A_0 '=空隙を除いた粒子のみの初期単位幅体積である。実験は投下量を3通り、水深を2通りに変化させ行った。実験条件を表-1に示す。なお、現象は落下濁水塊の中心軸に対して左右対称であるので、その右側だけを解析の対象とした。従って、全投下量の半分が W_0 である。

CASEA-3とCASEB-3の濁水塊の流動状況を図-1に示す。CASEAとCASEBとでは水深が異なるが、いずれの場合も落下中に形成されたほぼ左右対称の循環流より構成される濁水塊が底面衝突前に左右に分離し、濁水塊はその形状を縦長の楕円形状から1/4楕円形状へと変化しながら底面に沿って流動するが、浮遊粒子が沈降堆積するため最終的には濁水塊は消滅する。

実験方法は以下の通りである。落下濁水塊とその底面衝突後の水平流動する濁水塊の流動状況をCCDカメラで撮影し、コンピューター制御が可能なVTRに収録された画像を解析することにより、濁水塊の落下速度 V と水平流動濁水塊の最先端部の移動速度 U 、およびそれぞれの形状を求めた。流れの再現性は必ずしも良好ではなかったもので、同一条件下で繰り返し実験を行い、ほぼ左右対称に分離したと認められるデータを5セット得た。

表-1 実験条件

	水深 $h(\text{cm})$	相対密度差 ε_0	濃度 $c(\%)$	初期単位幅体積 $2A_0(\text{cm}^2)$	初期総浮力 $2W_0(\text{cm}^3/\text{s}^2)$
CASEA-1	50	0.24	16.1	25.0	5800
CASEA-2		0.24	16.3	41.8	9800
CASEA-3		0.29	19.9	48.0	13720
CASEB-1	90	0.24	16.1	25.0	5800
CASEB-2		0.24	16.3	41.8	9800
CASEB-3		0.29	19.9	48.0	13720

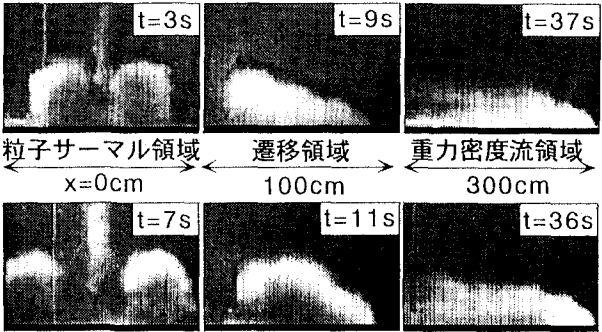


図-1 流動状況図 (上:CASEA、下:CASEB)

また、底面に沿って水平流動する濁水塊の総浮力 W の保存状況あるいは粒子の堆積状況を調べる目的で、濁水塊が通過した瞬間に所定の断面に設置された仕切りゲートをすばやく降ろし、仕切りゲートを隔てて左右に底面に堆積した粒子を丁寧に採集し、その乾燥重量を求めることで浮遊粒子量 W_s と堆積量 W_d を算定した。その際、同一条件下で繰り返し実験を行い、落下濁水塊がほぼ左右対称となった場合のみ仕切りゲートを用いた実験を実施した。ただし、見掛け上はほぼ左右対称であっても必ずしも濁水塊の全投下量 $2W_0$ が左右均等に分離されるわけではないので、落下濁水塊の中心軸から右側の堆積量が W_0 の95%以上のものを良好なデータとして採用した。対象とする流れは一過性の現象であるので、仕切りゲートの設置位置を流下方向に移動させ、流下方向の W_s と W_d の分布形状をそれぞれ3セット得た。

3. 実験結果

図-1から明らかなように、濁水塊の落下挙動はほぼ左右対称の循環流より構成される濁水塊が周囲流体を連行しながら粒子サーマル的に落下する。底面衝突後は左右に分離した濁水塊が縦長の楕円形からほぼ1/4楕円形状に変形しながら水平流動する。さらに、投下点からある程度離れたところでは濁水塊はほぼ1/4楕円形状を保ちながら密度流として水平流動するが、浮遊粒子の沈降堆積にともない最終

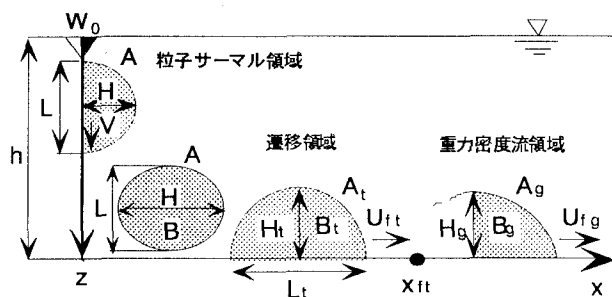


図-2 流れの定義図

的に消滅する。このような一連の濁水塊の挙動は、本研究より粒径が大きな粒子を用いた玉井ら¹⁰⁾の実験結果とほぼ同様であり、また、粒子の沈降堆積による消滅プロセスを除けば、基本的に直投塩水塊の挙動とも同じである¹³⁾。

このような観測結果に基づき、直投濁水塊の流動状況を粒子サーマル領域、サーマルから重力密度流への遷移領域および重力密度流領域の3領域に区分し、濁水塊の主要な流動特性量を図-2のように定義する。なお、図-2において、Aは底面衝突直前の左右に分離した状態の濁水塊の単位幅体積、L、HおよびBはそれぞれその状態における最大高さ、最大広がり幅および平均浮力である。また、図中の x_{ft} は遷移領域から重力密度流領域への遷移点である。なお、サーマル領域における濁水塊の落下挙動については参考文献¹⁴⁾を通じて明らかにされているので、ここでは底面衝突前後および衝突後の濁水塊の挙動について検討を加える。

まず、底面衝突後の濁水塊の単位幅体積A、最大高さH、長さL、断面アスペクト比 $F(=H/L)$ 、先端移動速度 U_f および平均浮力 $B(=\varepsilon g)$ と流下距離 x_f との関係について検討する。投下粒子の粒径が一定の実験条件下では、底面衝突後の濁水塊の流動特性は投入条件(A_0, W_0)と周囲水水深 h に支配されると考えられる。従って、 F と U_f を除くいずれの特性量も A_0 あるいは h で無次元化されている。ただし、 B については両者の組合わせで無次元化されている。図中の⑨などにダッシュ付きで示したものが h を考慮して無次元化した特性量である。サーマル理論⁴⁾によれば、 H と L は落下距離 z に線形的に増加するので、底面衝突直前のAは h の2乗に比例すると考えられる。同様な理由で B は z の-2乗に比例するので h と W_0 を用いれば、代表的な平均浮力のスケールとしては W_0/h^2 が得られる。図-3から明らかなように、遷移領域では h に対する明瞭な依存性が認められるものの、重力密度流領域では A_0 に対する依存性の方が明らかに強いことがわかる。この理由は、重力密度流領域における濁水塊の幾何学的形状は濁質の総量、つまり W_0 に規定されるためであると考えられる。ただし、 B については明らかに W_0/h^2 に依存してい

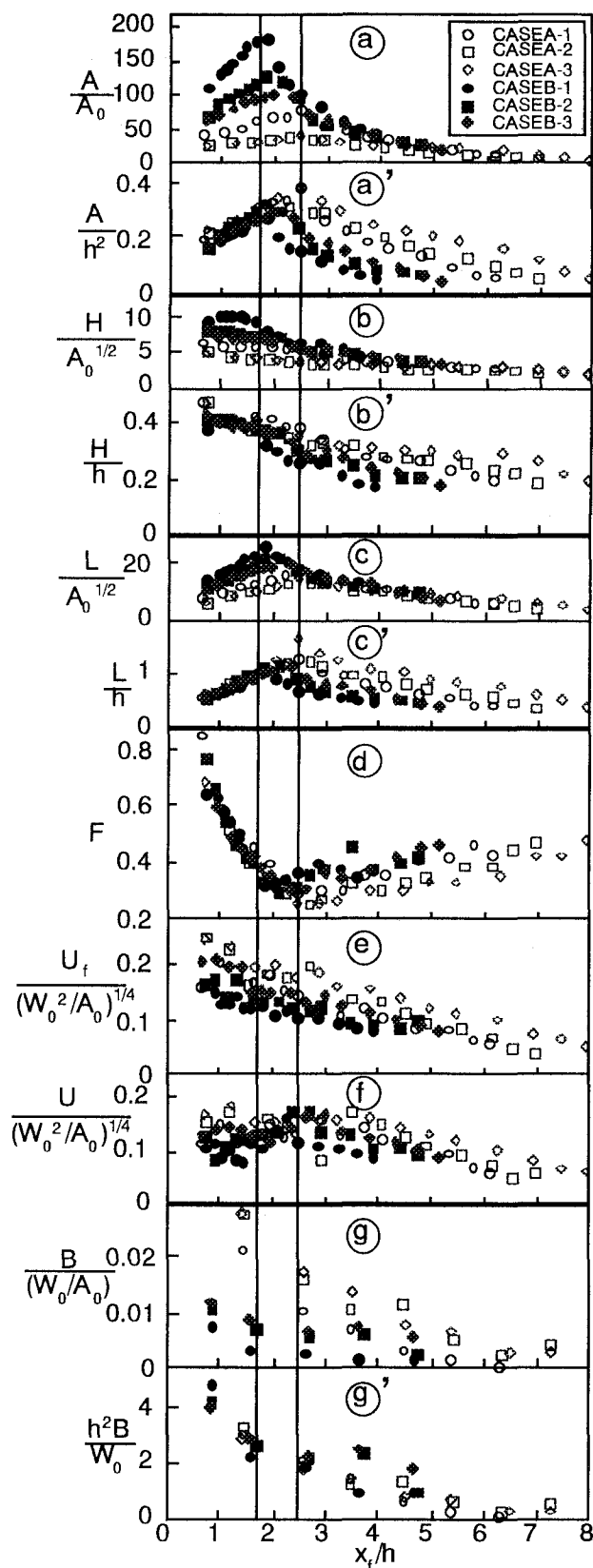


図-3 流動特性量と無次元流下距離 x_f/h との関係

(a: 無次元断面面積, b: 無次元最大高さ, c: 無次元長さ, d: 断面アスペクト比, e: 無次元先端移動速度, f: 無次元重心移動速度, g: 無次元平均浮力)

る。

本研究の目的からすると重力密度流領域の方が遷移領域より重要であるので、以下では、 A_0 に対する依存性について検討を加える。また、流下距離 x_f は水深 h で無次元化されている。図-3aより、無次元断面面積 A/A_0 は流下方向にまず増加し、その後徐々に減少する傾向が全てのCASEで認められるが、その値と増加量は投下量 W_0 が小さいほど大きく、周囲水水深 h が大きいほど大きい。また、投下量がCASE 1、2、3で大きく変化しているにもかかわらず、 W_0 と h の影響を強く受けることがわかる。また、観測結果より、この増加から減少に点ずる位置は遷移領域から重力密度流領域への遷移点(x_{ft})とほぼ一致していることが認められた。なお、遷移点の位置はCASEAで $x_{ft}/h \approx 2.40$ 、CASEBで $x_{ft}/h \approx 1.90$ で近似できる。図-3bより、無次元最大高さ $H/A_0^{1/2}$ は全てのCASEにおいて流下方向に減少する傾向が認められるが、その値は W_0 が小さいほど大きく、 h が大きいほど大きい。また、CASEAでは x_{ft} を境に著しく傾向が変化することはないが、CASEBではそのような傾向が伺われる。図-3cより、無次元長さ $L/A_0^{1/2}$ は流下方向にまず増加し、その後徐々に減少する傾向が全てのCASEで認められ、その増加量は W_0 が小さいほど大きく、 h が大きいほど大きい。また、 W_0 の変化にもかかわらず、 x_{ft} の値は W_0 にさほど依存しないが、水深の影響を強く受ける。このような傾向と遷移点の位置は A/A_0 とほぼ同様である。さらに図-3dより、断面アスペクト比 F は流下方向にまず大きく減少し、その後徐々に増加する傾向が全てのCASEで認められ、その傾向は h にはやや依存しているが W_0 にはほとんど依存していないことがわかる。加えて、 F が減少から増加へと転じる位置は A/A_0 と $L/A_0^{1/2}$ の場合とよく一致している。無次元先端移動速度 $U_f/(W_0^2/A_0)^{1/4}$ は図-3eより、 x_{ft} の前後で傾向の違いが若干見られるものの、全てのCASEにおいて流下方向に緩やかに減少する傾向が認められ、その値は W_0 にあまり依存せず、 h が小さい方が大きい。図-3fの重心移動速度では見られない h に対する依存性が先端移動速度でやや強く認められる理由としては、濁水塊内外の圧力差によるスランピングが水深の小さなCASEAでより強いためであると考えられる。また、当然のことながら、重心移動速度よりも先端移動速度の方がスランピングの影響が大きいことから、図-3eと図-3fとに見られる x_f/h に対する傾向の違いも説明される。図-3gより、無次元平均浮力 $B/(W_0/A_0)$ は W_0 と h のいずれに対しても依存し、平均浮力 B についてはややばらつきは認められるものの、遷移領域および重力密度流領域ともにパラメータ $h^2 B/W_0$ で良く表現でき、流下方向に減少する傾向

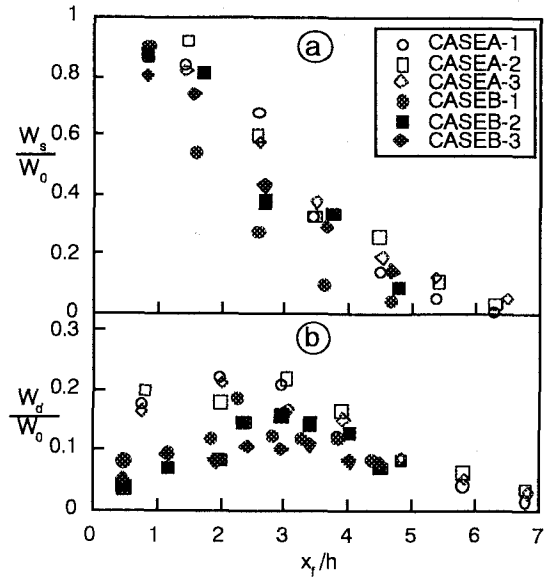


図-4 濁水塊の浮遊粒子量 W_s および堆積量 W_d と無次元流下距離 x_f/h との関係(a: W_s 、b: W_d)

がある。

以上を総括すると、底面衝突後の濁水塊の挙動は、遷移領域および重力密度流領域の2領域に区分され、程度の違いは認められるものの各領域の流動特性は異なった傾向を持つ。底面衝突直後から重力密度流領域のある点(本研究では、 $x_f/h \approx 4.0$)までの濁水塊の挙動は投下条件と周囲水水深に支配され、その影響は特性量によって大きく異なるが、 x_f/h がそれ以上大きい重力密度流領域では後者の影響をほとんど受けない。一方、遷移領域は前者の影響を強く受けることなどがわかる。

次に、水平流動する濁水塊の浮遊粒子量 W_s と堆積量 W_d の分布形状を示したものがそれぞれ図-4aと4bである。なお、図中の値はいずれも3セットのデータの平均値をプロットしたものであるが、繰り返し実験による値の若干のばらつきは認められたものの、 W_s と W_d に関する全てのデータの標準偏差はそれぞれ0.025と0.027程度であり、平均値を求める上で支障のない程度のばらつきであった。図-4aより、 W_s は W_0 と h のいずれに対しても強い依存性を持たず、流下方向に一律に減少する。一方、 W_d は W_0 に対する傾向的な依存性は認められないものの、その分布形状は h に強く依存している。CASEAに比してCASEBでは、投下点近くの堆積量が少なく、またそこでの堆積量の増加率が大きい。このような分布形状の違いは、落下濁水塊の挙動に起因すると考えられる。つまり、CASEBに比してCASEAでは水深が小さいため、発達した乱流サーマルが形成されず、乱れが弱いため投下点近くで粒子の沈降堆積が生じるが、水深が大きなCASEBでは図-1からも明らかなように、落下濁水塊は底面

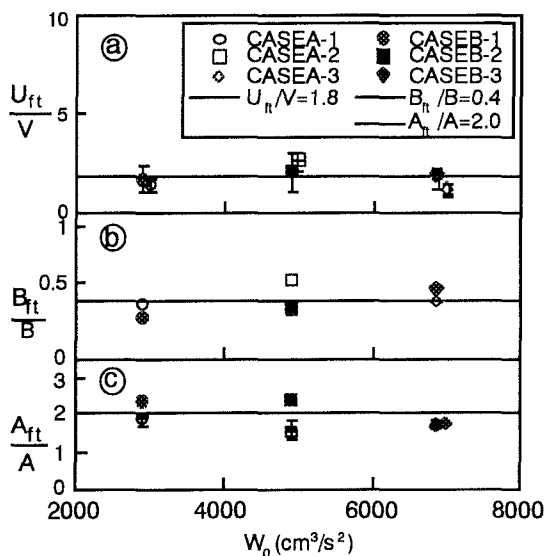


図-5 衝突前後の流動特性量の関係(a:速度比、b:平均浮力比、c:断面面積比)

衝突以前に左右の濁水塊が分離する。その結果、濁水塊が投下点からやや離れた位置で底面に衝突し、そのような状態で粒子の沈降堆積が起こるためであると考えられる。

次に、底面衝突前後の流動特性量について検討する。投入点において与えられた流入条件から、衝突後に底面に沿って流動する濁水塊の挙動を知るためには、底面衝突前後の濁水塊の流動特性を明らかにする必要がある。そこで、衝突直前の落下特性量と遷移点 x_f における重力密度流領域の特性量との関係について調べたものが図-5である。図中の記号は各 W_0 に対して5データの平均値であり、各記号に付加した矢印は標準偏差を示す。図-5aより、 x_f における濁水塊の先端移動速度 U_{ft} は衝突直前の落下速度 V に比べかなり増加している。図-3eで見たように U_{ft} が流下方向に単調に減少することを勘案すると、小川・竹内⁹⁾や玉井ら¹⁰⁾の理論解析で仮定された衝突前後の速度比 $U_{ft}/V=1.0$ なる関係は必ずしも妥当でないことが確認できる。また、ばらつきは認められるものの、速度比 U_{ft}/V は W_0 や h に傾向的に強く依存することはなく、ほぼ一定値(=1.80)を取るようである。図-5bは、 x_f における濁水塊の平均浮力 B_{ft} と衝突直前の落下濁水塊の B との関係について調べたものである。浮力比 B_{ft}/B は W_0 が増加するとわずかながら増加する傾向が存在するようであるが、データのばらつきを考慮すると W_0 への傾向性は無いと考えるのが妥当であろう。つまり、浮力比 B_{ft}/B は W_0 や h に傾向的に強く依存することはなく、ほぼ一定値(=0.40)を取るようである。なお、 B_{ft} は仕切りゲートを用いて得られた濁水塊の総浮力 W_g を画像解析より求められた濁水塊の断面積 A で除することによって算定している。図-5cは、断面面積比

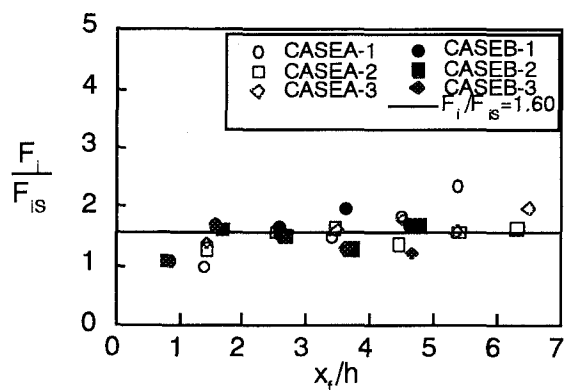


図-6 F_i/F_{is} と x_f/h との関係

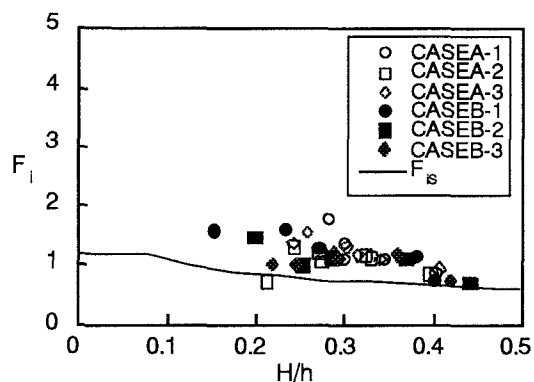


図-7 F_i と H/h との関係

A_{ft}/A について調べたものであるが、これも W_0 や h に傾向的に強く依存することはなく、ほぼ一定値(=2.0)を取るようである。

最後に、重力密度流領域の濁水塊の内部Froude数 F_i について検討を加える。重力密度流領域の濁水塊の挙動は、水平面上の有限な重い流体を瞬間的に解放することによって生じる通常重力密度流と類似した特性を持つと期待される。Huppert & Simpson¹⁵⁾は多くの塩水重力密度流の実験データに基き、塩水重力密度流の内部Froude数 F_{is} が周囲水深 h と流動層厚 H との比である相対層厚 H/h によって変化し、次式でその関係を与えている。ここで、 F_i と F_{is} のいずれもは $U_{ft}/(B_g H)^{1/2}$ で定義される内部Froude数である。

$$F_{is} = 1.19 \quad \text{for } H/h \leq 0.075 \quad (1)$$

$$F_{is} = 0.5(H/h)^{-1/3} \quad \text{for } H/h = 0.075 \sim 1.0 \quad (2)$$

図-6は重力密度流領域における濁水塊の内部Froude数と塩水重力密度流との比 F_i/F_{is} の流下方向変化について調べたものである。同図より、図-3で見たのと同様に遷移点 x_f で F_i の傾向が変化していること、 W_0 や h に傾向的に強く依存することはないこと、投下量の少ないCASEA-1では浮遊粒子量の沈降堆積のため x_f/h が大きくなると F_i が急増するこ

と、CASEA-1を除く他のCASEでは $x_f/h \approx 1.9 \sim 4.0$ で $F_i/F_{is} \approx 1.60$ のほぼ一定値を取ることを、などがわかる。特に、最後の点は重要で、 $x_f/h \approx 1.9 \sim 4.0$ の範囲では活発に粒子を浮遊させながら重力密度流的に流動することが流れの観測結果で認められており、そのような状態では内部Froude数が流下方向に一定に保たれるものと考えられる。図-7は F_i と相対層厚 H/h との関係について調べたものである。これより、全体的な傾向としては F_i は F_{is} より約1.60倍程度大きく、水平面上の塩水重力密度流と同様に H/h が大きくなると減少する傾向があることが認められる。ただし、なぜ $F_i/F_{is} \approx 1.60$ なる値を取るのかについては、直投濁水塊によって発生した重力密度流的な濁水塊と通常の濁水重力密度流との流動特性の違いを明らかにする必要がある、今後の重要な課題である。

4. まとめ

- (1) 底面衝突後の水平流動する濁水塊の挙動は遷移領域および重力密度流領域の2領域に区分され、程度の違いは認められるものの各領域の流動特性は異なった傾向を持つ。
- (2) 底面衝突直後から重力密度流領域の $x_f/h \approx 4.0$ までの濁水塊の挙動は投下条件と周囲水水深に支配され、遷移領域では水深、重力密度流領域では初期総浮力に依存する。ただし、その影響は特性量によって異なる。また、 $x_f/h > 4.0$ では両者の影響をほとんど受けない。
- (3) 衝突直前の落下特性量と重力密度流領域の始まりの点における特性量との関係は投下条件と周囲水水深のいずれに対しても強く依存しない。
- (4) 重力密度流領域における濁水塊の内部Froude数は粒子の沈降堆積に伴い変化するが、活発に粒子を浮遊させながら進行する濁水塊の内部Froude数は流下に際してほぼ一定に保たれる。

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、基盤研究B(2)、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) 古土井光昭: 港湾工事における濁りの挙動に関する研究, 大阪大学学位論文, 1989.
- 2) 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.
- 3) Buhler, J. and 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.

- 4) 秋山壽一郎・浦 勝・応 新亜・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, pp.529-534, 1998.
- 5) 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.
- 6) Li, C.W.: Convection of particle thermals, *J. of Hydraulic Research*, Vol.35, No.3, pp.363-376, 1997.
- 7) 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.
- 8) Ying, X., Akiyama, J., Ura, M. and Nakanishi, Y.: Large eddy simulation of heavy turbulent thermal, *Annual J. of Hydraulic Engineering*, Vol.43, pp.899-904, 1999.
- 9) 小川元・竹内益雄: 土捨船による投棄土砂の分散, 土木学会論文集, 第161号, pp.39-49, 1969.
- 10) 玉井昌宏・村岡浩爾・室田明・町田博紀: 土砂直投工における濁りの初期拡散過程に関する研究, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.77-86, 1995.
- 11) 玉井昌宏・村岡浩爾: 土砂直投工により発生する濁りの挙動特性に関する数値解析, 水工学論文集, 第42巻, pp.541-546, 1998.
- 12) Ying, X., Akiyama, J. and Ura, M.: Motion of dense fluid released into quiescent water with finite depth, 土木学会論文集(in press).
- 13) 秋山壽一郎・浦 勝・応 新亜・中西弥生: 静水中に瞬間的に投下された重い流体塊の底面衝突後の挙動, 水工学論文集, 第43巻, pp.1115-1120, 1999.
- 14) 秋山壽一郎・浦 勝・応 新亜・西森秀樹: 静水・流水中に瞬間的に投下された粒子群の流動特性, 水工学論文集, 第43巻, pp.905-910, 1999.
- 15) Huppert, H.E. and Simpson, J.E.: The slumping of gravity current, *J. of Fluid Mechanics*, Vol.99, pp.785-799, 1980.

(1999. 9. 30 受付)