

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

MOTION OF DENSE FLUIDS PRODUCED BY INSTANTANEOUS RELEASE OF
HEAVY FLUIDS INTO A STAGNANT WATER

秋山 壽一郎¹・浦 勝²・応 新亜³・中西 弥生⁴
Juichiro AKIYAMA, Masaru URA, Xinya YING 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 dense fluids along the bottom boundary, that produced by instantaneous release of a heavy fluids from water surface into a stagnant water, is investigated experimentally. A series of laboratory experiment is conducted by varying inflow condition. The horizontal motion of dense fluids is found to be distinguished into two flow regimes: the transition and gravity current regime. Main flow characteristics of the motion of dense fluids, including the rates of change of height, length and the front propagation speed and the densimetric Froude number in the transition and gravity current region, are quantified.

Key Words : 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となっている。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。ところが、汚濁防止膜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。その一例として、底面に衝突した濁水塊は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が古土井¹⁾によって指摘されている。

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、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⁾による研究やサーマル理論や数値実験により汚濁の初期拡散を検討しようと試みた玉井ら^{10), 11)}の研究以外には見当たらない

ようである。

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い発生する誘起流動のみならず、底面衝突後の濁水塊の水平流動に関する基礎的な理解が不可欠であると考えられる。なぜなら、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考えられるからである。

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、一般に密度流が生じるような高濃度の固-液混相乱流の力学的特性については未だ良くわかっていないことや対象とする現象が極めて複雑であることなどの理由で、現象の本質を把握することを目的として沈降速度が無視できるような微細土粒子による汚濁拡散を想定した塩水塊の底面衝突前後の特性とその

後の底面に沿う水平流動特性、特に流入条件である初期総有効重力と投下点からある程度離れたところでの塩水塊の流動特性との関係について実験的に明らかにすることを試みた。

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に流入装置を取り付けたものである。ウラニンで着色した初期総浮力 $W_0 (= \epsilon_0 g \Lambda_0)$ の塩水を初期単位幅体積 Λ_0 で水深 h の静水中に瞬間的に投下し、重い乱流サーマルを発生させた。ここに、 ϵ_0 =初期相対密度 $(= (\rho_0 - \rho_s) / \rho_s)$ 、 ρ_0 =投下塩水密度および ρ_s =周囲水密度、 g =重力加速度である。ここで、 ϵ_0 と h はそれぞれ $\epsilon_0=0.2$ 、 $h=0.5$ mの一定値とし、 Λ_0 は10(CASE1)、15(CASE2)、20(CASE3)および25cm²(CASE4)の4通りに変化させた。ただし、問題とする現象は左右対象であるので、その右側だけを解析の対象とした。従って、 Λ_0 と W_0 は全投入量の半分として定義している。

乱流サーマルとその底面衝突後に形成された水平に流動する塩水塊の流動状況をCCDカメラで撮影し、コンピュータ制御が可能なVTRに収録された画像を解析することにより、サーマル落下速度 V と水平流動塩水塊の最先端部の移動速度 U_t およびそれぞれの形状を求めた。流れの再現性は良好であったので、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。

また、 x が小さいところでは画像解析より求めた形状と W_0 がほぼ保存されることを用いて塩水塊の代表密度 ρ を得た。一方、底面に沿って流動する塩水塊では総浮力 W が保存されないので、 x が大きいところでは導電率計を水深方向に3点設置しオイラー

的な計測を行なうことによって塩分濃度を求め、それより塩水塊の代表密度 ρ を得た。その際、塩水塊の先端部の最大層厚が測定点を通過した時点でパルス信号を入力し、最大層厚 H とそこでの塩分濃度と対応付けた。さらに、水平方向の代表密度を調べる目的で、流下方向に3ないし4断面で塩分濃度の計測を行なった。また、データの信頼性を高めるために同一条件下で3回の繰り返し実験を行った。

3. 実験結果

図1に投下塩水塊の流動状況の一例(CASE2)を示す。これより、対象とする流れはサーマル領域、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領域に区分され、各領域には次のような特徴が認められる。サーマル領域では、ほぼ左右対称の循環流より構成される乱流サーマルが激しく周囲流体を連行しながら落下する。遷移領域では、ほぼ左右対称に分離・変形した後、ほぼ半楕円の形状を保ちながら水平運動する。重力密度流領域では、1/4楕円形状を保ちながら密度流として底面に沿って水平流動する。図1において遷移領域では添字 t 、重力密度流領域では添字 g で各領域の特性量を示してある。そこで、流動状況を図2のようにモデル化する。なお、サーマル領域における落下塩水塊の挙動については文献⁴⁾などを通じて十分に明らかにされているので、ここでは衝突前後および遷移領域と重力密度流領域の塩水塊の挙動について検討を加える。図2において、 A は底面衝突直前サーマルの半分の単位幅体積、 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。

投入点において与えられた流入条件から、衝突後

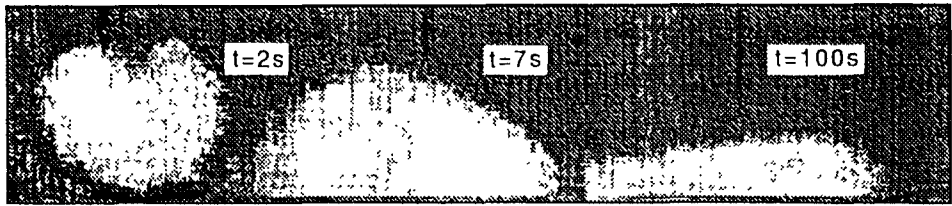


図-1 落下塩水塊の底面衝突後の挙動

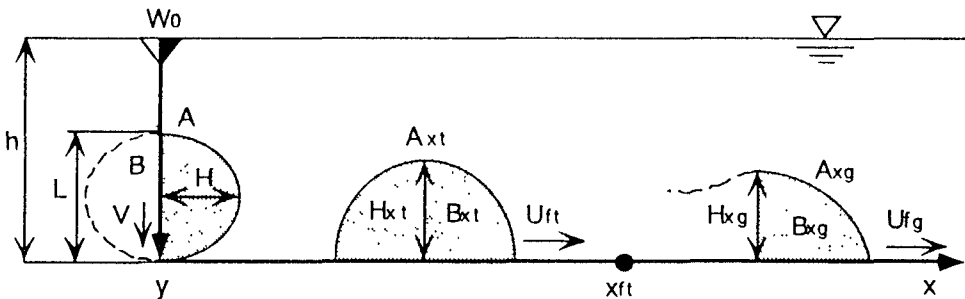


図-2 流れの定義図

に底面に沿って流動する塩水塊の挙動を知るためには、衝突前後の落下塩水塊の流動特性を明らかにする必要がある。そこでまず、底面衝突前後の関係について検討する。

図1で見たように、水表面から投入された濁水塊は底面衝突後、重力密度流として流動拡散する。従って、投入条件である初期総浮力 W_0 と重力密度流との関係が明らかになれば、投入条件から重力密度流の挙動を知ることができると期待される。そこで、 W_0 の瞬間投入によって発生した落下塩水塊の流動特性と底面に沿う重力密度流の流動特性とを関連付けるために、 W_0 に対して衝突直前の落下特性量と重力密度流領域の始まりの点(x_f)における特性量との比較を行ったものが図3と4である。これらより、 U_f は衝突直前の V に比べかなり減少しており、速度比 U_f/V は W_0 に依存せずほぼ一定であり、 $U_f/V \approx 0.68$ で近似できることがわかる。従って、既往の研究で用いられている $U_f/V=1.0$ の関係が正しくないことがわかる。一方、断面面積 A_x は A に比して小さくなっていることがわかる。 A_x/A は W_0 に対してある程度の変化が認められるものの、 $A_x/A \approx 3.98$ でほぼ近似できる。また、衝突前後の塩水塊の高さの比 H_x/L と長さの比 L_x/H については、いずれも W_0 に対して増加する傾向がみられる。また、比 $H_x/L < 1.0$ であることから衝突に伴い高さが約半分から6割程度まで減少すること、比 $L_x/H > 1.0$ であることから長さが3~4倍に増加すること、などがわかる。 W_x/W_0 は W_0 に対してほぼ一定の値を取り、 $W_x/W_0 = 0.14$ で精度良く近似できる。

次に、塩水塊の最大高さ H と長さ L 、断面アスペクト比 $F(=H/L)$ および単位幅体積 A 、先端移動速度 U_f および先端部平均浮力 $B(=\epsilon g)$ と流下距離 x_f との関係について検討する。ここで、 ϵ は先端部平均相対密度差である。同様な傾向が他のCASEでも同様に認められたので、ここではCASE4について示す。ただし、落下塩水塊と衝突後の塩水塊との関係を付けるために、いずれの特性量も衝突直前の値($H=18.9\text{cm}$ 、 $L=29.1\text{cm}$ 、 $F=0.65$ 、 $A=209\text{cm}^2$ 、 $V=10.9\text{cm/s}$ 、 $B=9.13\text{cm/s}^2$)で、流下距離 x_f は水深 h で正規化されている($x_f^*=x_f/h$)。

図5より、長さ比 H_x/L は遷移領域で大きく減少するが、重力密度流領域では徐々に減少すること、長さ比 L_x/H は遷移領域では急激に増加するが、重力密度流領域では徐々に減少すること、などが認められる。図6より、断面アスペクト比の比 F_x/F は衝突時の変形のために遷移領域では急激に小さくなるが、重力密度流領域ではほぼ一定値となっていることがわかる。一方、断面面積比 A_x/A は遷移領域で急激に増加するが、重力密度流領域では減少することが認められる。図7よりまず、衝突後の水平移動速度

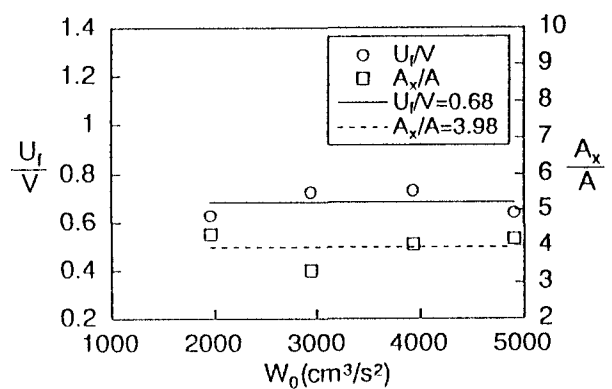


図-3 U_f/V 、 A_x/A と W_0 との関係

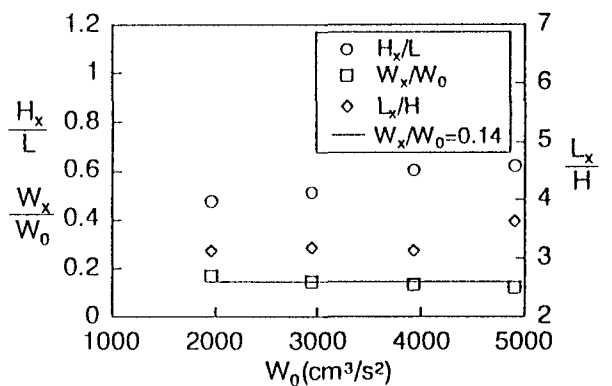


図-4 H_x/L 、 L_x/H 、 W_x/W_0 と W_0 との関係

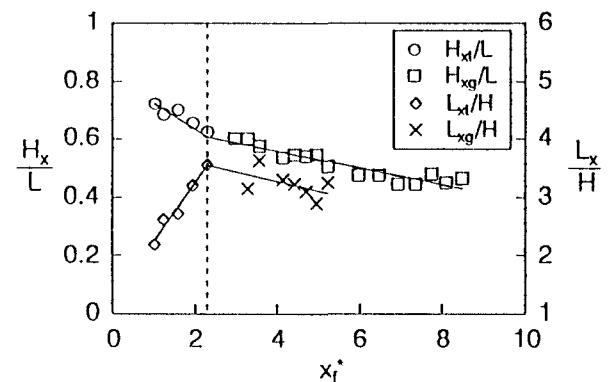


図-5 H_x/L 、 L_x/H と x_f^* との関係

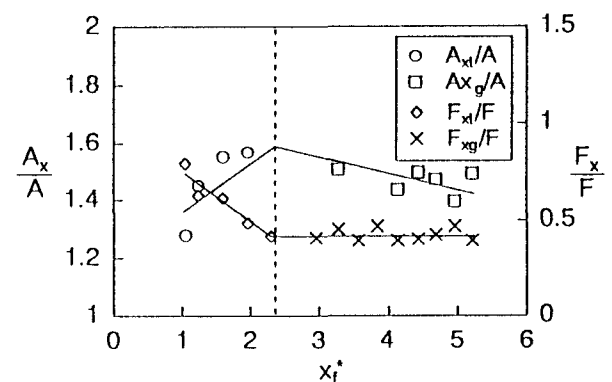


図-6 A_x/A 、 F_x/F と x_f^* との関係

U_f は衝突直前の落下速度 V に比べかなり減少しており、小川・竹内⁹⁾や玉井¹⁰⁾の解析において仮定された $U_f/V=1.0$ の関係があまり正確でないことが確認できる。また、速度比 U_f/V は遷移領域から重力密度流領域へと滑らかに遷移していることもわかる。一方、平均浮力比 B_x/B は遷移領域と重力密度流領域のいずれにおいても減少しており、その割合は遷移領域で大きく重力密度流領域では小さいことが認められる。ただし、 B については衝突後の塩水塊の W は流下に際して保存されないで、画像解析の結果と導電率計より求めた結果を合わせてプロットしてある。これより明らかなように、両結果は遷移点でほぼ一致しており、得られた B_x がかなり正確であることもわかる。図8は衝突後の塩水塊の W の流下方向変化について調べたものである。 W は塩分濃度測定で得られた時系列を塩水塊の最先端が到達した時間から先端部の高さが最大となる時間まで積分して求めた。同図より、衝突後の塩水塊の W は W_0 と比して約1割程度であること、水平運動する塩水塊の W は流下に際して保存されず x_f^* に対して線形的に減少していくこと、などがわかる。図5、6、7および8より、特性量によって程度の違いは認められるものの $x_f^* \approx 2.3$ 付近でその傾向が変化していることがわかる。このような傾向は他のCASEでも同様に認められた。流れの観察結果を考慮すると、この変化は衝突によって変形したサーマルが重力密度流に遷移するためであると解釈される。

以下では、各領域における特性量の無次元変化率と初期総浮力 W_0 との関係について検討する。なお、いずれの特性量も上述した衝突直前の値でそれぞれ無次元化されている。

両領域の無次元遷移点 x_n^* と W_0 との関係について調べたものが図9である。これより、 W_0 の大きさに関わらず $x_n^* \approx 2.19$ のほぼ一定値を取ることがわかる。最大総厚の無次元減衰率 $d(H_x/L)/dx_f^*$ は遷移領域の方が大きく、重力密度領域および遷移領域のいずれにおいても W_0 には依存せずほぼ一定であり、 $d(H_x/L)/dx_f^* \approx -0.07$ と $d(H_{xg}/L)/dx_f^* \approx -0.03$ で近似できる(図10)。また、同様な傾向が断面アスペクト比の無次元減衰率 $d(F_x/F)/dx_f^*$ と W_0 との関係においても認められ、 $d(F_x/F)/dx_f^* \approx -0.25$ と $d(F_{xg}/F)/dx_f^* \approx -0.02$ で精度良く近似できる(図11)。これより、底面衝突時に塩水塊は大きく変形すること、遷移領域では半楕円形状と重力密度流領域では1/4楕円形状の相似形を保ちながら流下していくこと、などがわかる。一方、断面積の無次元変化率 $d(A_x/A)/dx_f^*$ は遷移領域では正であり、 $d(A_x/A)/dx_f^* \approx 0.30$ で近似できる。重力密度流領

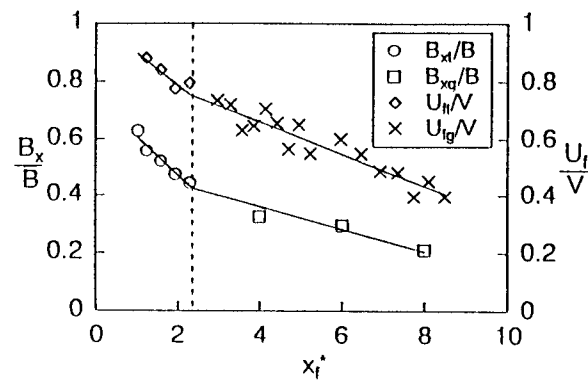


図-7 B_x/B 、 U_f/V と x_f^* との関係

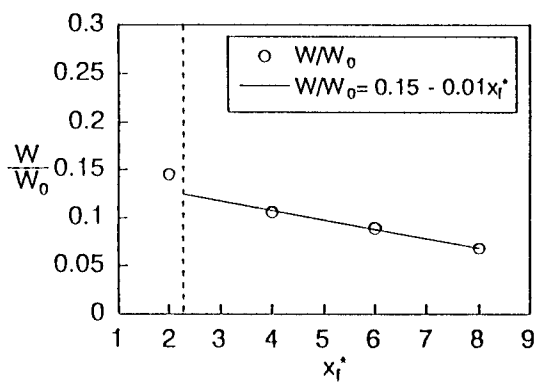


図-8 W/W_0 と x_f^* との関係

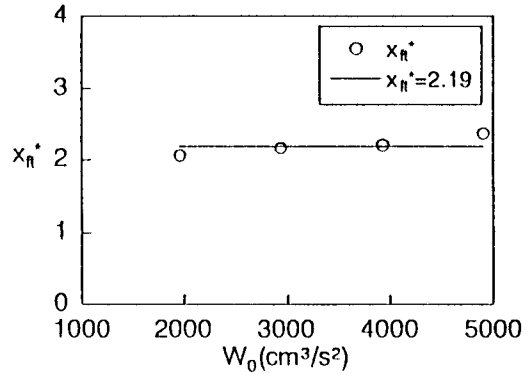


図-9 x_n^* と W_0 との関係

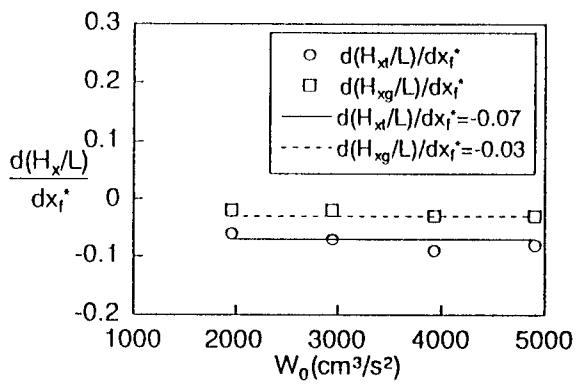


図-10 $d(H_x/L)/dx_f^*$ と W_0 との関係

域では変化率が負であり、 $d(A_{xg}/A)/dx_i^* \approx -0.15$ で近似できる(図12)。これより、遷移領域では断面面積が急激に増加することがわかる。先端移動速度の無次元減衰率 $d(U_i/V)/dx_i^*$ はいずれの領域でも負であるが、その絶対値は重力密度流領域の方が大きい。また、重力密度領域および遷移領域のいずれにおいても W_0 の変化に依存せずほぼ一定値を取り、 $d(U_{ri}/V)/dx_i^* \approx -0.12$ と $d(U_{ig}/V)/dx_i^* \approx -0.05$ でほぼ近似できる(図13)。平均浮力 B は図14に示すような流動層の最大高さ前後の相対密度差分布を積分し、それを最大高さ H で除することによって平均浮力 $B(=\bar{\epsilon}g)$ を算定した。ただし、同図では4測定断面の結果を同時にプロットされている。また、 ϵ^* は断面平均相対密度差 $\bar{\epsilon}$ で正規化された ϵ である。これより相対密度差分布は流下方向にほぼ相似であることがわかる。平均浮力の無次元減衰率 $d(B_x/B)/dx_i^*$ は遷移領域と重力密度領域のいずれにおいても W_0 には傾向的に依存せずほぼ一定であり、それぞれ $d(B_{xi}/B)/dx_i^* \approx -0.16$ と $d(B_{xg}/B)/dx_i^* \approx -0.04$ で良好に近似できる(図15)。総浮力の無次元変化率 $d(W_{xg}/W_0)/dx_i^*$ は W_0 に無関係に、ほぼ一定で $d(W_{xg}/W_0)/dx_i^* = 0.0$ で精度良く近似できることがわかる(図16)。

重力密度流領域の流動特性は、水平面上の有限な

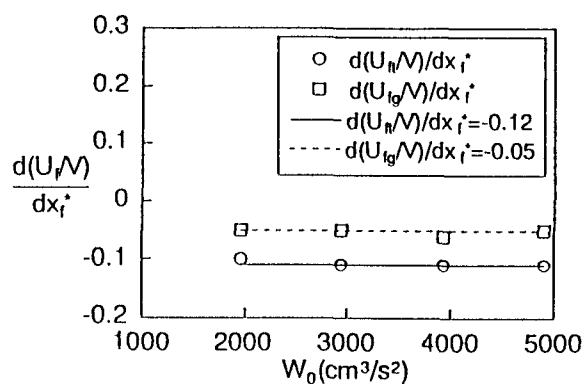


図-13 $d(U_i/V)/dx_i^*$ と W_0 との関係

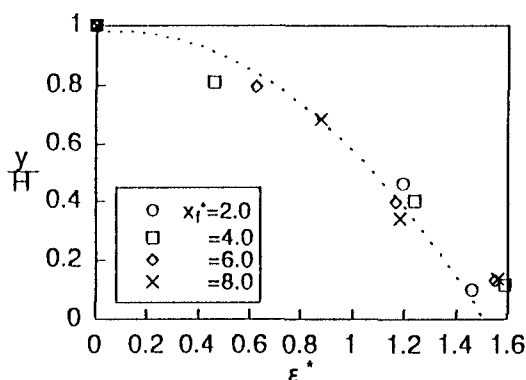


図-14 相対密度差分布

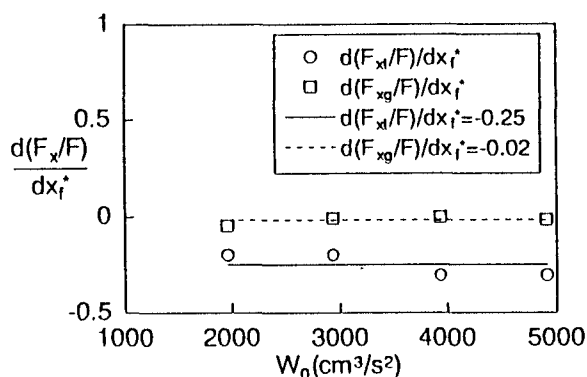


図-11 $d(F_x/F)/dx_i^*$ と W_0 との関係

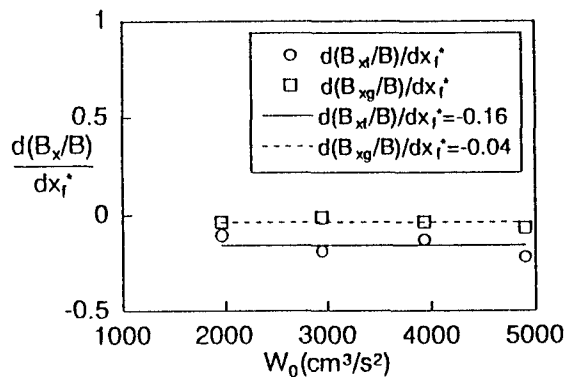


図-15 $d(B_x/B)/dx_i^*$ と W_0 との関係

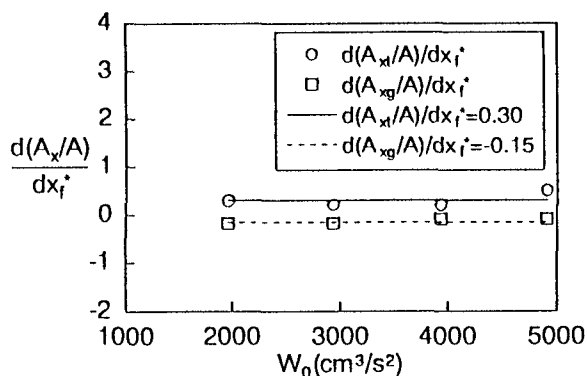


図-12 $d(A_x/A)/dx_i^*$ と W_0 との関係

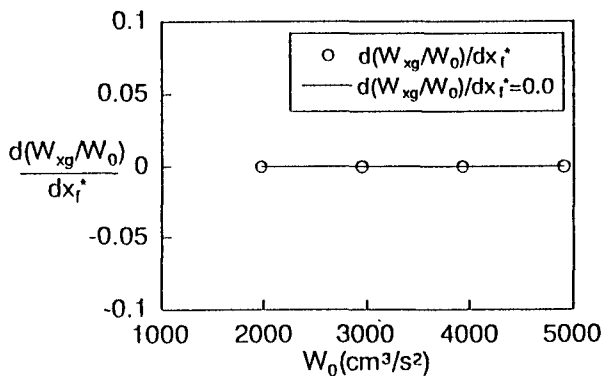


図-16 $d(W_{xg}/W_0)/dx_i^*$ と W_0 との関係

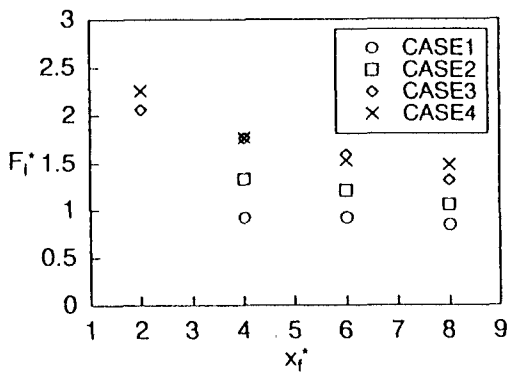


図-17 F_i/F_{i*} と x_i^* との関係

重い流体を瞬間的に解放することによって生じる通常の重力密度流^{12),13)}と同様な特性を持つと期待される。Benjamin¹²⁾は非粘性流体の重力密度流の先端部特性量に基く内部Froude数 F_i が $\sqrt{2}$ となることを理論的に示している。Huppert&Simpson¹³⁾は彼等とその他の実験データに基き、全水深 h と重力密度流の層厚 H との比 H/h によって内部Froude数が変化し、 $H/h \leq 0.075$ で $F_{i*}=1.19$ 、 $H/h=0.075 \sim 1.0$ で $F_{i*}=0.5(H/h)^{-1/2}$ となることを示している。ここで、 F_i は $U_i/\sqrt{gH}$ で定義される内部Froude数であり、 F_{i*} はHuppert & Simpson¹³⁾によって経験的に得られた全水深 h の流体中を進行する重力密度流の内部Froude数である。そこで、 F_i と x_i^* との関係を調べたものが図17である。ただし、図中の F_i^* はHuppert&Simpson¹³⁾の経験式と比較するために、 F_i を F_{i*} で正規化したものである。同図より、初期総浮力 W_0 が大きいほど F_i^* が大きく、 x_i^* が増加するにつれて F_i^* が1.0に漸近していくこと、初期総浮力 W_0 が最も小さいCASE1では x_i^* に依存せず F_i^* はほぼ1.0であること、などがわかる。これより、ある与えられた水深では W_0 が大きいほど通常の重力密度流へ移行する距離が大きくなることや衝突の影響が十分に無くなったところでの塩水塊は重力密度流として流動することが理解できる。

4. まとめ

- (1) 重い乱流サーマルは、底面衝突の際に浮力を失うとともに、流動特性も大きく変化する。
- (2) 重い乱流サーマルの底面衝突後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。
- (3) 各領域の特性量の流下方向変化率は遷移領域と重力密度流領域のいずれの領域においても W_0 に対してほぼ一定値を取る。

(4) 重力密度流領域における流動層の先端移動速度は水深と流動層の比によって異なり、水平面上の重力密度流について得られたHuppert&Simpson¹³⁾の経験式で記述できる。などの結論が本研究によって得られた。

今後は、周囲水深の変化が落下塩水塊の底面衝突後の挙動に与える影響について検討するとともに、落下粒子群の底面衝突後の挙動についても研究していきたいと考えている。

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. & 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DEM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. & Nakanishi, Y.: Large eddy simulation of heavy turbulent thermal, *Submitted to Annual J. of Hydraulic Engineering*, vol.43, 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) Benjamin, T.B.: Gravity currents and related phenomena, *J. of Fluid Mechanics*, vol.31, pp.209-248, 1968。
- 13) Huppert, H.E. & Simpson, J.E.: The slumping of gravity current, *J. of Fluid Mechanics*, vol.99, pp.785-799, 1980。

(1998. 9. 30 受付)