

土砂直投工における濁りの発生・拡散過程
Diffusion Process of Turbidity in Direct Dumping of Soils

大阪大学工学部 室田 明 Akira Murota
大阪大学工学部 玉井昌宏 Masahiro Tamai
(株)奥村組 町田博紀 Hiroki Machida
鳥取県 浅井 修 Osamu Asai

Recently large-scale projects of land reclamation, such as Kansai International Airport, have been on the rapid increase. Direct dumping of soils with bottom-dump barges enables us to reclaim lands in short time economically. The method of construction, however, includes very serious technological problem to be solved, that is diffusion of turbidity. The purpose of this study is to clarify the diffusion process of turbidity especially by the flow field which falling-behavior of soils induces through hydraulic experiments. The results show that the induced flow plays an important part of initial diffusion of turbidity.

Keywords : turbidity, reclamation, diffusion

1. まえがき

人工島埋立工事等にもなう沿岸海域や港湾域における土砂投棄工事はますます大規模化する傾向にある。濁りの発生による水域環境への影響が懸念されていることから、工事にともなう水質の変化を事前に予測し、予め有効な対策を講じておくことが重要な課題となっている。土砂投下により生じる流れ場は土砂混入水塊の海底面への衝突現象として捉えられるが、それは非定常流であるばかりでなく、土砂の堆積・巻き上げ等の複雑な水理現象が絡み合っている。従来、濁りに関する調査は、現地実験・現地観測¹⁾や数値シミュレーション²⁾等により実施されているものの、実験条件等の違いからそれらの調査結果を一般的に取り扱うことはできない。濁りの発生が避けられない現状では、拡散過程の物理像を的確に把握した上で、適切な予測モデルを考案する必要がある。

濁りの拡散機構は対象とする時間スケールや空間スケールによって異なる。数秒から数分の時間スケールあるいは数百メートル程度の空間スケール内では、投下土砂の落下運動により誘起される流動に支配されると考えられる。それ以上の時間・空間スケールでは潮流などの周囲環境中の流動が支配的となる。シルトプロテクターの設置等、適切な拡散防止対策を模索する基礎資料を得るという工学的目的から、本研究では土砂落下現象により誘起される流れ場により生じる濁りの拡散過程に言及する。底開バージによる土砂直投工をモデル化した二次元水理実験を行い、水平および傾斜した固定床上での濁りの挙動について検討する。誘起流動により形成される濁水塊の挙動の概要を示し、濁質の混入が密度差として貢献することを勘案して、密度流に関する知見に基づいて実験結果について検討する。

2. 実験の概要

現実の投下土砂は連続的な粒度分布を有しており、土粒子は粒径に応じて連続的に沈降する。ここでは投下土砂の大半は投下点直下に堆積し、沈降速度の小さな微細な粒子が濁りとなって拡散することを考える。本実験では表-1に示した2種類の土砂の混合砂を投下することにより、実現象の再現を試みた。ここに、 d_{50} は粒径、 ρ_s は粒子密度、 U_0 は単一粒子の自由沈降速度、 $Re_s (=u_0 \cdot d_{50} / \nu)$ は粒子レイノルズ数

である。水平面上での投下実験は長さ600cm、高さ50cm、奥行き15cmの亚克力製二次元水路を用いた。また、傾斜面上での投下実験は長さ600cm、奥行き30cm、上端部高さ50cm、下端部高さ100cm、底面勾配1:10の2次元

台形水槽を用いた。水平から60°程度にまで任意に勾配を変化させることが可能なように、水槽内に塩化ビニール製の傾斜面を設けた。土砂の投下は底開バージを模倣した投下箱の底部を瞬間的に開口することにより行った。底部の開口幅は5cmである。投下土砂の挙動は投下に要する時間に応じて変化することが予想される。浮力を有する流体を連続的に放出した場合にはブルーム流動が形成されるのに対して、瞬間的に放出した場合にはサーマルが形成されるのと同様である。ここでは、投下土砂が底面に至るまでに要する時間に比べて、投下に要する時間が短い場合、つまり瞬間的な投入を考えるものとする。

表-2に実験条件を示す。ここに、Hは投下水深（投下箱底部から衝突面までの鉛直高さ）、 q_l は粗粒砂の単位奥行き当りの投下量、 q_s は細粒砂の単位奥行き当りの投下量である。土砂の底面への衝突・堆積の過程の物理機構は全く不明である。従って、濁水塊の初期条件としての投下条件と底面上での挙動を直接的に関連付けることは難しい。そこで、底面衝突時の濁水塊の落下速度 U_0 と面積 A_0 を別途計測し、濁水塊の挙動特性との関係について検討した。また、濁水塊の挙動が底面衝突時の濁水塊の落下速度と濁質混入による密度差により支配されることを勘案して、密度フルード数 $F_{d0} (= U_0 / (\epsilon_0 g A_0^{1/2})^{1/2})$ を実験条件の目安とした。 ϵ_0 は細粒砂投下量 q_s と A_0 から算出した相対密度差である。表中の全ケースに対して水平面上での投下実験を行った。また、傾斜面上での実験は表中の傾斜面の欄の○印を付けたケースのみ行った。濁水塊の挙動はビデオカメラと35mm1眼レフカメラを用いて収録し、解析した。

表-1 供試土砂

	$d_{50}(\text{mm})$	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$U_0(\text{cm/s})$	Re_0
粗粒径砂	3.38	2.65	26.5	895
細粒径砂	0.15	2.65	2.02	3.03

表-2 実験条件

CASE	H(cm)	$q_l(\text{cm}^3)$	$q_s(\text{cm}^3)$	$U_0(\text{cm/s})$	$A_0(\text{cm}^2)$	ϵ	F_{d0}	傾斜面
L10-5	10	20	0.33	50.0	166	1.0033	9.2	○
L10-10			0.67			1.0096	8.5	○
L10-15			1.00			1.0099	5.3	
L10-20			1.33			1.0132	4.6	
L10-25			1.67			1.0164	4.1	○
L10-50			3.33			1.0325	2.9	○
L10-100			6.67			1.0637	2.1	
L20-5	20	20	0.33	54.5	284	1.0019	11.5	○
L20-10			0.67			1.0039	5.1	○
L20-15			1.00			1.0058	4.6	
L20-20			1.33			1.0077	5.7	
L20-25			1.67			1.0096	5.1	○
L20-50			3.33			1.0191	3.6	○
L20-100			6.67			1.0378	2.6	
L30-5	30	30	0.33	46.5	424	1.0013	11.3	○
L30-10			0.67			1.0026	8.0	○
L30-15			1.00			1.0039	6.5	
L30-20			1.33			1.0052	5.6	
L30-25			1.67			1.0065	5.1	○
L30-50			3.33			1.0129	3.6	○
L30-100			6.67			1.0255	2.5	
M10-5	10	10	0.33	47.0	136	1.0040	8.2	○
M10-10			0.67			1.0061	5.6	○
M10-15			0.67			1.0061	5.6	
M10-20			1.33			1.0120	4.7	
M10-25			1.67			1.0160	4.1	○
M10-50			3.33			1.0200	3.7	○
M20-5	20	10	0.33	41.8	252	1.0022	9.2	○
M20-10			0.67			1.0014	8.5	○
M20-20			1.33			1.0065	5.3	
M20-25			1.67			1.0087	4.6	○
M20-50			3.33			1.0106	2.9	○
M30-5			0.33			1.0040	9.2	○
M30-10	30	10	0.67	38.8	384	1.0061	6.5	○
M30-20			1.33			1.0120	5.3	
M30-25			1.67			1.0160	4.6	○
M30-50			3.33			1.0200	2.9	○

3. 実験結果と考察

(1) 土砂・水混相流体塊の落下特性

土砂落下により誘起される流動場の特性について若干説明する。その詳細については参考文献3)を参照されたい。写真-1は $d_{50} = 3.38\text{mm}$ の粗粒砂を単位奥行き当りの体積 $q = 20\text{cm}^3$ 投下させたときの底面衝突以前の自由落下過程における土砂粒子群の挙動を撮影したものである。土砂粒子は個々の粒子の沈降挙動ではなく、粒子群全体規模の流動によって運動していることがわかる。粒子群の挙動から左右対称で逆回転を有する2つの循環が存在していることが推察される。図-1は幅と高さの落下にとともなう変化を示している。縦軸は幅と高さ、横軸は粒子群先端の落下距離であり、両軸ともに

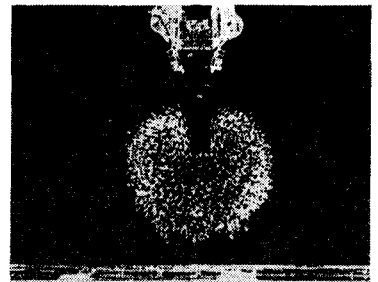


写真-1 土砂粒子群の落下挙動

$q_1^{1/2}$ により無次元化されている。幅と高さはともに概ね線形に増大する傾向を示している。この線形増大傾向は単一粒子の沈降挙動の単純な重ね合わせによって表現することはできない。図-2は粒子群先端部の移動速度の落下にともなう変化を示している。落下速度は初め増大した後に緩やかに減少していることがわかる。これらの定性的傾向は密度差の異なる流体塊を瞬間的に放出した時に形成される乱流サーマルの流動に類似している。図-2中の実線は乱流サーマルの理論曲線を示しているが実測値と良好に一致していることがわかる。この程度の粒径であれば土砂粒子の混入が密度の増大として近似できることを示している。このケースの落下速度の絶対値は40cm/秒程度であるが、膨大な量の土砂を投下する場合には極めて大規模な流動場が形成されるものと推察される。

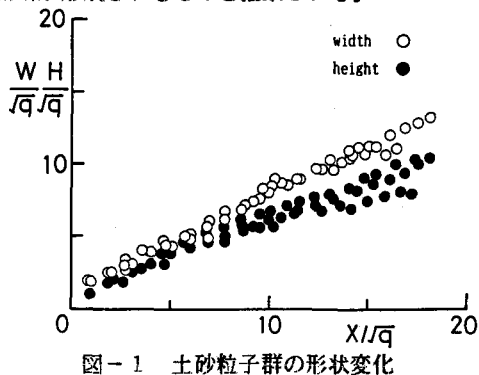


図-1 土砂粒子群の形状変化

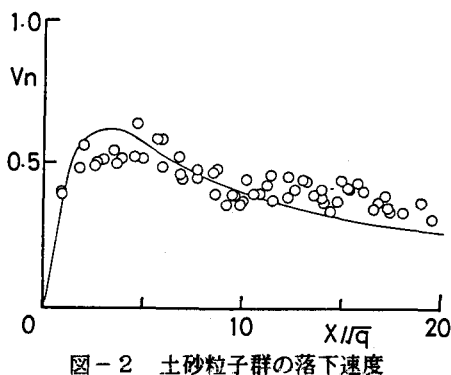
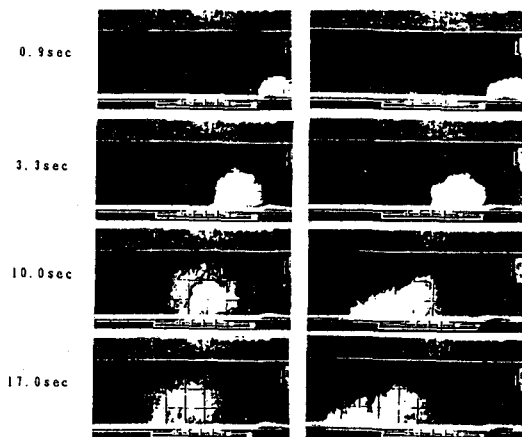


図-2 土砂粒子群の落下速度

(2) 水平床上での濁水塊の挙動

写真-2は投下高さ $H=20\text{cm}$ 、粗粒砂量 $q_1=20\text{cm}^2$ での濁りの発生及び拡散の様相を示している。(a)(b)はそれぞれ $q_s=0.67$ と 3.33cm^2 のケースである。現象は投下点直下について対称であるので、投下点から左側半分の現象を示した。底面衝突後、粗粒砂は全て投下点直下付近に堆積し、細粒砂だけが誘起された流動とともに濁水塊を形成し、海底面上を移動する。投下後3.3秒のまでは両ケースにおいて濁水塊の形状や移動速度に大きな差異はない。濁質混入量の小さい(a)においては、濁水塊の高さは一様に増大し、濁水塊の上端部は水表面にまで到達する。 $t=10.0\text{sec}$ では濁水塊内部には時計回りの循環が存在しており、後端部底面付近から周囲水を連行していることがわかる。その後移動速度は急激に減少し、濁質が沈降する。しかし、それと同時に前方部では濁質混入による密度差のために濁水塊形状は崩れ始めている。一方、濁質混入量の大きな(b)においては鉛直方向へはあまり成長せず、 $t=3.3$ 秒以降では濁水塊の高さは概ね一定になっている。 $t=10.0\text{sec}$ では楔形の形状となっているが、後方部には(a)と同様な循環が存在し、周囲水を連行している。 $t=10.0, 17.0$ 秒における両ケースの濁水塊の先端位置を比較すれば、(b)のケースでは移動速度の遅減が小さいことがわかる。

図-3は濁水塊高さの移動にともなう変化を示す。粗粒砂の投下量は $q_1=10\text{cm}^2$ であり、(a)(b)(c)はそれぞれ投下高さ $H=10\text{cm}, 20\text{cm}, 30\text{cm}$ である。縦軸・横軸はそれぞれ高さ Δ と投下点直下からの距離 x であり、両軸ともに濁水塊の初期面積の平方根 $A_0^{1/2}$ により無次元化した。図中の実線は水表面の位



(a) $q_s/q_1=3.3\%$ (b) $q_s/q_1=16.7\%$

写真-2 水平面上での濁水塊の挙動

置を示している。いずれのケースにおいても濁水塊高さは投下点近傍では線形に増大している。その増加率は $d\Delta/dx = 0.5$ 程度であり、細粒砂混入量には無関係である。投下高さの最も小さい (a) では、細粒砂の混入量によってあまり顕著な差異は観られない。(b) において細粒砂量の少ない M20-5、M20-10 のケースでは、濁水塊上端部は水表面にまで到達している。また、細粒砂量が多いほど、初期の線形増大傾向からより早く逸脱し一定の高さへと移行する。(c) では細粒砂混入量による挙動の変化がさらに顕著になっている。これらの実験結果を密度フルード数をパラメーターとして同一の図面上に整理することは現状では難しい。それは濁水塊初期条件の設定方法が曖昧であること、また、目視観測から濁水塊内部の流況は非常に乱れており、その影響も非常に大きいと判断されることなどから予想される。

図-4 は濁水塊の最高到達高さ Δ_m と密度フルード数 F_{d0} との関係を示している。ここでは、濁水塊上端部が水表面にまで到達したケースについては除外した。 Δ_m と F_{d0} は強い正の相関関係を示している。 F_{d0} が小さいほど密度差により鉛直方向の流体運動が抑制されることが予想される。

図-5 に濁水塊の水平方向の拡がり幅 (以後、濁水塊の長さという。) λ の移動に伴う変化を示す。長さは一様に増大する傾向を示しているが、 $2 < x_1/A_0^{1/2} < 5$ 付近で増加勾配が小さくなっている。この領域は図-1 において高さが線形に増大する領域に相当する。高さが一定になる $x_1/A_0^{1/2} > 5$ の領域では、長さは概ね線形に増大する。濁水塊長さは濁質混入量によって顕著に変化しないようだ。濁水塊形状の変化は周囲水の連行による成長と、特に活発な連行がない場合にはスランピング現象などの密度差により生じる流れや濁質の沈降等の影響が複雑に絡み合っているものと考えられる。

図-6 に濁水塊先端の移動速度の変化を示す。縦軸・横軸は移動速度 u と投下点直下からの距離 x であり、両軸は U_0 および A_0 により無次元化した。 q_0 が大きいほど急速に移動速度が小さくなっている。これは濁水塊の高さが大きくなるほど、より大きな抵抗を受けるためであると考えられる。図中の実線は濁水塊の形状成長についての実験結果と運動量保存則とにより得られる半理論式である。今回の実験結果により濁水塊の水平方向長さは q_0 に無関係にほぼ線形に増大すると仮定する。高さについては、(1) 全領域にわたり

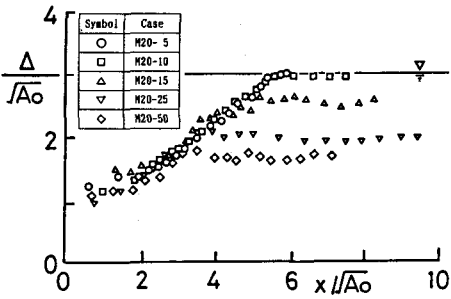
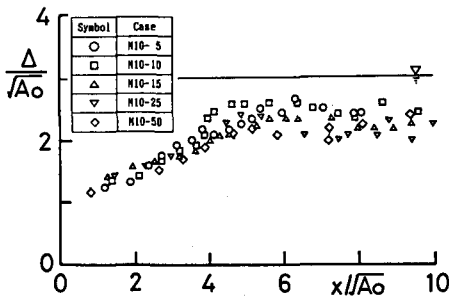


図-3 (a) 濁水塊高さの変化 (水平面上, $H=10\text{cm}$) 図-3 (b) 濁水塊高さの変化 (水平面上, $H=20\text{cm}$)

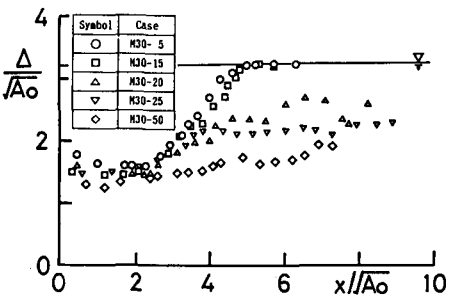


図-3 (c) 濁水塊高さの変化 (水平面上, $H=30\text{cm}$)

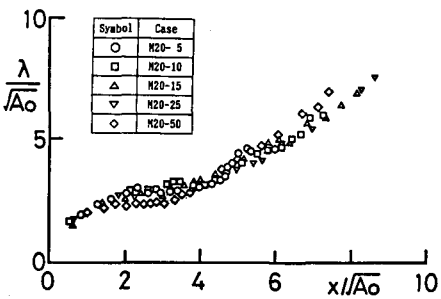


図-4 濁水塊長さの変化 (水平面上)

線形に増大する場合と (2) 初

期から一定高さの場合との 2

つの極端なケースを想定した。

濁水塊の形状が楕円形であり、

その変化を $\Delta(x) = \alpha x + \beta$ 、

$\lambda(x) = \gamma x + \delta$ と仮定する。

さらに、底面の摩擦は小さい

として無視すると、濁水塊の

移動速度は $u = C \{(\alpha x + \beta)$

$(\gamma x + \delta)\}^{-1}$ のようになる。

ここに、 C は定数である。実

験結果に基づいて $\gamma = 0.9, \delta = 0$ とした。さらに、(1) に対しては $\alpha = 0.45, \beta = 0$ 、(2) に対しては

$\alpha = 0, \beta = \text{const.}$ と仮定した。得られた 2 つの半理論式が実験結果の上限と下限を与えていることがわか

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

る。

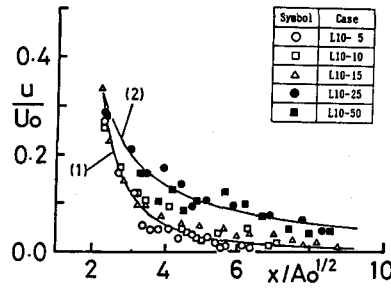


図-5 濁水塊の移動速度 (水平面上)

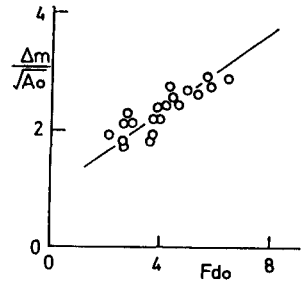


図-6 Fd_0 と Δm の関係

(3) 傾斜面上での濁水塊の挙動

ここでは、下流側に分離した濁水塊の挙動についてのみ検討する。写真-3に $q_L = 10 \text{ cm}^2$ 、 $q_s = 1.8 \text{ cm}^2$ 、勾配 1 : 3 の投下条件での濁水塊の挙動を示す。 $t = 3.0 \text{ sec}$ において、濁水塊は下流方向に尖った楔型の形状を呈している。この形状は写真-2 (b) の水平面上での密度差の大きい場合のそれに類似している。後方部には循環が存在しており、後方底面付近から周囲水を連行している。このことにより、 $t = 5.4 \text{ sec}$ のように濁水塊後方部が急激に成長する。 $t = 7.8 \text{ sec}$ では、先端部が急速に成長しており、2山の構造を有するようになっている。後方部の山は底面衝突前に形成された循環が保持されたのか、あるいは衝突後の横方向への運動量により形成されたものであると考えられる。前方の山は高密度流体が前方に流れ込むことによって成長したものと考えられる。 $t = 10.2 \text{ sec}$ では、後方の山の高さは緩やかに減少し始め、濁水塊の形状は斜面方向に引き伸ばされた台形状へと移行する。また、濁水塊先端部は gravity current の先端部の形状に類似していることがわかる。

次に、図-7に $q_L = 20 \text{ cm}^2$ 、 $H = 20 \text{ cm}$ 、斜面勾配 1:4 の投下条件における濁水塊の高さの流下方向変化を示す。縦軸は高さ Δ 、横軸は流下方向距離 x である。両軸ともに A_0 の平方根により無次元化されている。細粒砂投下量の小さい $q_s = 0.33$ と 0.67 cm^2 のケースにおいては、高さは線形に増大している。増加率 $d\Delta/dx$ は 0.4 程度であり、水平面上での線形増大領域の増加率にほぼ一致している。また、細粒砂投下量が大きくなるにつれて、より早く増加勾配が緩やかになっている。濁水塊は斜面下向きの重力を受けることから、傾斜面上での乱流サーマルの挙動との比較が可能である。既往の実測値⁴⁾によれば、今回と同程度の勾配上で初期速度 0 で密度差を有する流体塊を放出した場合の高さの増加率は 0.1 程度である。濁質混入量の多い 2 つのケースについては $x_1/A_0^{1/2} > 8$ の領域での増加率は傾斜サーマルのそれに近づいていると判断できる。

図-8に濁水塊先端部の移動速度の流下方向変化を示す。投下条件は $q_L = 20 \text{ cm}^2$ 、 $H = 20 \text{ cm}$ 、勾配 1:4 である。移動速度は衝突直前の混相流体塊の落下速度により無次元化した。移動速度は衝突直後に最大となり、その後は単調に減少する。高さが概ね線形に増大する $x/A_0 < 4$ の領域では速度の分布に大きな差異はない。

$t = 3.0 \text{ sec}$

$t = 5.4 \text{ sec}$

$t = 7.8 \text{ sec}$

$t = 10.2 \text{ sec}$

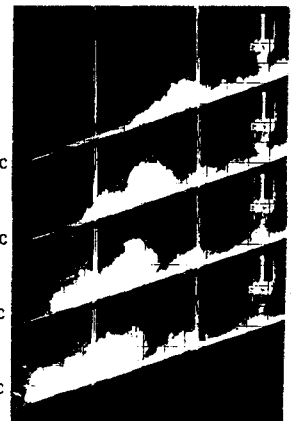


写真-3 傾斜面上の濁水塊の挙動

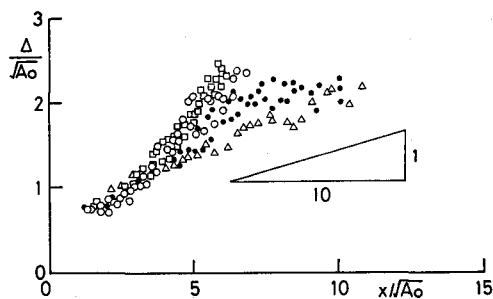


図-7 濁水塊の高さの変化（傾斜面上）

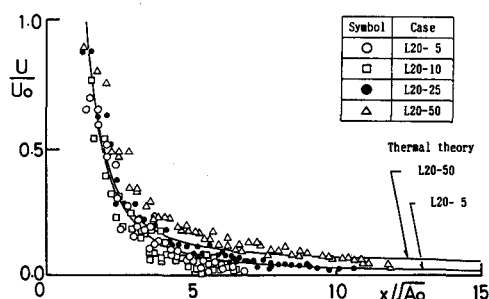


図-8 濁水塊の移動速度（傾斜面上）

つまり、この領域では濁水塊の挙動に対して細粒砂はあまり影響を及ぼしていないようだ。 $x/\Delta_0 < 8$ の領域においては、 q_s が大きくなるほど速度の減衰が小さくなり、密度差の違いの影響が顕著に現れている。図中の実線は $q_s = 0.33$ と 3.33 cm^2 のケースに対して乱流サーマル理論を適用して得られた理論曲線である。落下速度が急激に減少する領域では初期運動量が卓越し、移動速度の減少とともに密度差の影響が顕著になるという実験結果の傾向を再現していると判断できる。十分な定量的な一致が得られないのは、理論において、連行係数を一定としていることや総浮力（ここでは重力）が保存されると仮定していることによると考えられる。

4. まとめ

本研究では大規模埋立工事に伴う海域の濁りが問題となっていることに鑑み、底開バージによる土砂直投工により生じる濁りの拡散過程について水理実験により検討した。実験結果をまとめると以下のようである。

- (1) 投下土砂の落下により誘起される流動は乱流サーマル流動に類似している。この誘起流動が濁質とともに濁水塊を形成し、濁水塊の初期拡散に重要な役割を果たすと考えられる。
- (2) 水平面上では濁質混入による密度差は濁水塊の鉛直方向への成長を抑制する。その反面、抵抗が小さくなるために移動速度の減衰が抑制される。濁水塊の移動は運動量保存の概念を用いて概ね表示されることがわかった。
- (3) 傾斜面上では、濁水塊は初期運動量の支配する挙動から密度差の支配する乱流サーマル的な挙動へと移行すると考えられる。その挙動は乱流サーマル理論により再現できる。

最後に、本研究の遂行に際して大阪大学大学院生松井俊二君の協力を得た。また、本研究の一部は平成元年度文部省科学研究費補助金奨励研究A（代表者・玉井昌宏）の補助を受けた。記して謝意を表する。

（参考文献） 1)堀口・古土井・堀江：海上工事による濁りの分布特性と数値シミュレーション、第32回海岸工学講演会論文集、1985。 2)堀江：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報告、No.471、1983。 3)室田・中辻・玉井・町田：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、1988。 4)Beghin・Hopfinger・Britter：Gravitational Convection from Instantaneous Sources on Inclined Boundaries, J.Fluid Mech., Vol.107, 1981。