

泥水海中排出時の汚濁拡散に関する基礎的検討

菅原 弘貴¹・片山 裕之²・鵜飼 亮行³・望月 幸司⁴・
竹内 和則⁵・山下 聡⁶

¹正会員 五洋建設株式会社 四国支店 (〒790-0011 愛媛県松山市千舟町4-4-3)

E-mail: Hiroki.Sugahara@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

³正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Akiyuki.Ukai@mail.penta-ocean.co.jp

⁴三井海洋開発株式会社 事業開発部 (〒103-0027 東京都中央区日本橋2-3-10)

E-mail: koji.mochizuki@modec.com

⁵三井海洋開発株式会社 事業開発部 (〒103-0027 東京都中央区日本橋2-3-10)

E-mail: kazunori.takeuchi@modec.com

⁶正会員 北見工業大学 工学部社会環境系 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

E-mail: yamast@mail.kitami-it.ac.jp

表層型メタンハイドレート (MH) の採掘計画では、海水と共に掘削したMHと泥を船上で揚収し、船上のガス化処理設備にてメタンガスのみ回収後、不要な海水と泥を掘削跡窪地へ海中排出することを計画している。この際、周辺環境への濁りの影響の把握や、窪地への効率的な排出方法が重要な課題となる。

本研究では、不要泥水の海中排出時の濁り把握のため、模擬深海泥を用いた泥水投入試験を実施して泥水排出時の沈降特性の把握を行った。その結果、泥水投入初期は密度流的であるが、全体的には移流拡散挙動が支配的であること、濁度の広がりには海底着水後の泥水運動が水平方向に転化し、水槽壁に衝突後の上向き乱れによって広がることがわかった。また3次元流動モデルによる数値解析により投入泥水の挙動を定性的に表現できた。

Key Words : *surface methane hydrate, seabed discharge, pollution diffusion, muddy water discharge experiment*

1. はじめに

日本近海の深海底にはメタンハイドレートが賦存していることが知られており、その掘削や揚収方法について研究開発が実施されている。メタンハイドレートは存在する場所によって大きく2種類に分けられる。一つは水深1000 m程度の海底面下200 m~300 mの砂質堆積層内に砂と混じり合った状態で存在する砂層型メタンハイドレートと、もう一つは水深500 m程度の海底面や比較的浅い深度の海底泥などの中に塊状で存在する表層型メタンハイドレートがあるとされている。国内では、前者は太平洋側の東部南海トラフに、後者は日本海側にその存在が確認されている¹⁾。

表層型メタンハイドレート (MH) の採掘計画では、海水と共に掘削したMHと海底の泥を船上で揚収し、船上のガス化処理設備にてメタンガスのみを回収した後、不要な海水と泥を掘削跡に残る深さ100 m, 直径300 m程

度と想定されている窪地へ海中排出することを計画している²⁾。実際に海中排出するためには、現在検討中の環境影響評価手法などが定まる必要があるものの、事前の調査として、海中排出による周辺環境への影響、特に泥水による濁りの影響範囲の把握は必要である。またMH事業化の観点では、窪地への経済的・効率的な排出方法が重要な課題である。

港湾工事においては土砂投入時の濁り対策についていろいろな研究が実施されており、底開バージからの直接投入時の土砂投入挙動の確認³⁾や、汚濁低減対策としてトレミー管による施工時の検討⁴⁾などがある。また投入土砂挙動の数値解析を検討している事例⁵⁾もある。しかしながら、MH採掘時の土砂投入は投入位置から土砂が着底するまでの距離が大きく異なり、また投入量も港湾工事に比べて大量で、また連続での投入となる。

本研究は、MH採掘時の不要泥水を海中排出した際の濁りを把握するため、模擬深海泥による泥水投入試験を

実施し、投入土砂の沈降特性の基本的特性の把握を行ったものである。

2. 模擬深海泥による攪拌沈降試験

海底に投入された泥水は、高濃度ブルームとして拡散しながら凝集性自由沈降を開始し、次に海底着水による泥水の水平方向の移流拡散を伴う再浮上により海中に浮遊した粒子群が干渉沈降を開始する。沈降した粒子は海底面付近に堆積層を構築した後は自重圧密沈降過程に進行する。MH採掘に伴う排泥水の海中投入時も上記と同様の沈降過程が考えられる。

本研究では模擬排泥水により海中投入状況を再現し、濁水投入沈降試験と濁水攪拌沈降試験の2種類の実験を行い沈降過程の再現を試みた。

(1) 模擬深海底泥の選定

表層型MHを念頭に、日本海側でMH開発を検討している4サイト⁷⁾(隠岐東方, 隠岐西方, 秋田沖)の海底土砂を想定した。模擬深海泥は、上記サイトの日本海深海底泥19試料について、それぞれ10%粒径, 30%粒径, 50%粒径, 60%粒径の平均値を整理し、模擬深海泥の候補として16種類の粘土の粒度を比較した。泥水投入後の沈降過程における高濃度フロッグ形成による沈降特性などには、使用する粘土の化学的特性も影響すると考えられるが、本検討では泥水投入後の初期の沈降状況を確認

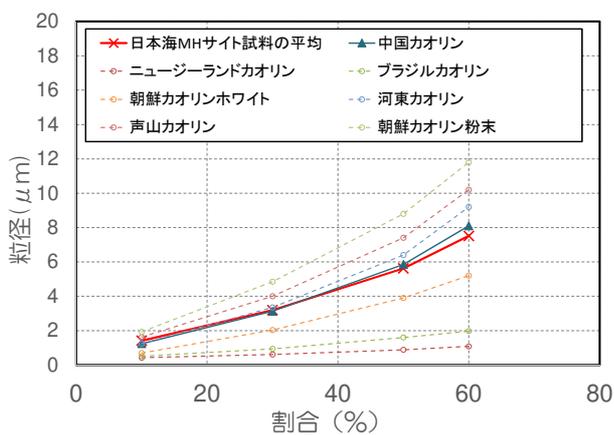


図-1 MHサイト深海底泥との粒度分布比較

表-1 攪拌沈降試験ケース一覧

ケース名	含水比(濃度 SS)	投入量
Case3-1	500% (189,910 mg/L)	500 ml
Case3-2	1000% (98,444 mg/L)	
Case3-3	1500% (66,444 mg/L)	
Case3-4	2000% (50,144 mg/L)	
Case3-5	3000% (33,639 mg/L)	

することになるため、実験中の沈降過程に影響が大きいと考えられる粒度特性が一番近い中国カオリンを採用した(図-1)。なお、図中には比較した16種類の粘土のうち代表的な9種類の粒度分布を示した。

(2) 攪拌沈降試験

攪拌沈降試験では、同規格の500 mlメスシリンダーそれぞれに500%, 1000%, 1500%, 2000%, 3000%に含水比を調整した中国カオリンを各500 mlずつ入れ(表-1)、同時に1分間攪拌後に静置してから界面の沈降状況を24時間観察した。沈降の様子は5分間隔で撮影し、界面の沈降距離と経過時間を読み取った(図-2)。なお時間が経過すると沈降速度が低下してくるため、960分以降は60分間隔の撮影とした。また、沈降後の堆積泥の密

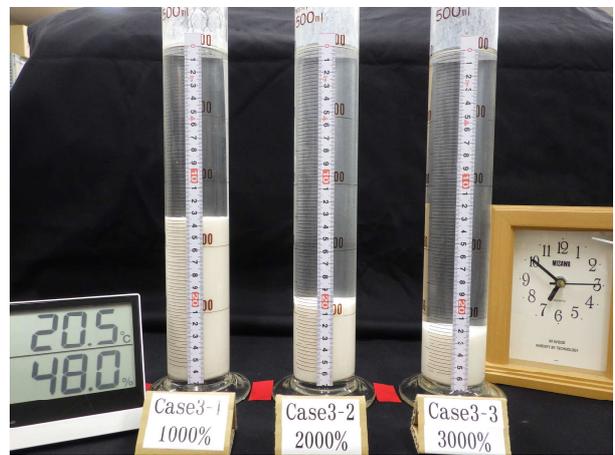


図-2 攪拌沈降試験の一例

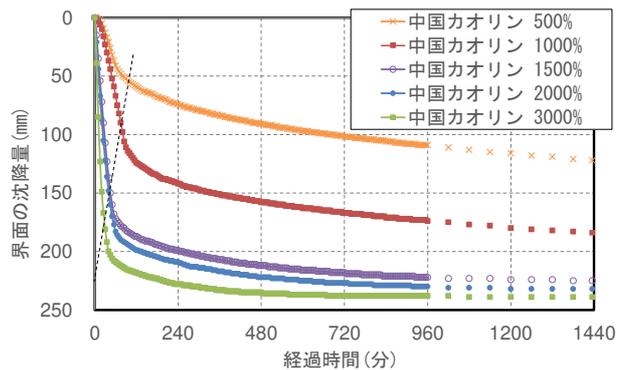


図-3 攪拌沈降試験結果

表-2 堆積泥の含水比

ケース名	24時間経過	168時間経過
Case3-1	257%	—
Case3-2	—	—
Case3-3	211%	—
Case3-4	226%	220%
Case3-5	—	252%

度を確認するため、上澄みを除いた堆積泥部分を採取し含水比の計測も行った。

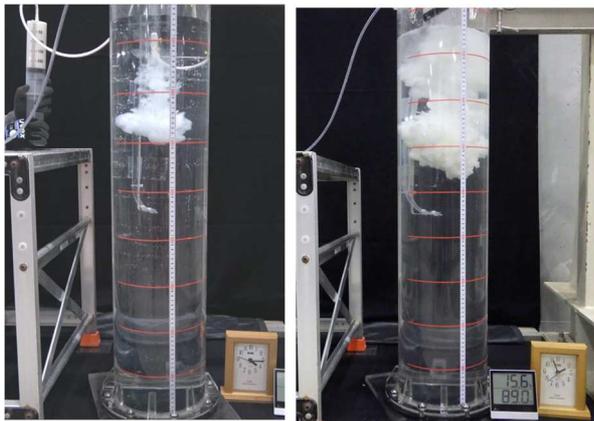
実験結果の界面沈降量と経過時間を整理した(図-3)。含水比が高いほど沈降速度が大きく、初期の急激な界面の沈降(1~4 mm/分)は1~2時間程度で収束し、その後は緩やかに沈降(0.02~0.05 mm/分)する結果となった。またメスシリンダー底に堆積した泥の含水比を、攪拌後24時間と168時間静置した一部の検体で計測したところ200~250%程度まで圧密されていた(表-2)。

3. 模擬深海泥による投入沈降試験

(1) 小規模投入沈降試験

a) 小規模投入沈降試験の概要

次に、泥水の海中排出時の沈降状況を模擬した投入沈降試験を実施した。最初に内径20cm×高さ1mの円筒管



(1)静的投入 (2)一括投入

図-4 小規模投入沈降試験に用いた円筒管と投入状況

表-3 小規模投入沈降試験ケース一覧

ケース名	含水比(濃度 SS)	投入量	投入方法
Case1-1	2000% (50,144 mg/L)	250 ml	静的投入
Case1-2	2000% (50,144 mg/L)		一括投入
Case2-1	1000% (98,444 mg/L)		静的投入
Case2-2	1000% (98,444 mg/L)		一括投入

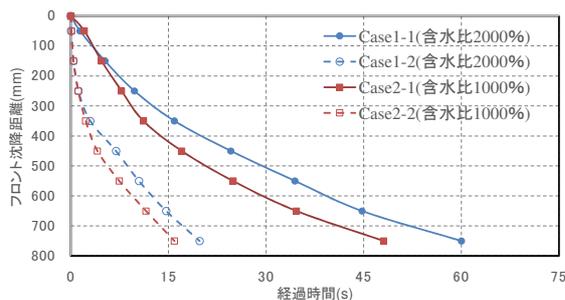


図-5 小規模投入沈降試験の濁水フロント沈降状況

にて、含水比1000%と2000%の泥水250 mlを、自由沈降になるよう静的に投入するケースと、短時間に250mlを投入する一括投入の2ケースを実施した(表-3, 図-4)。

b) 小規模投入沈降試験結果

沈降の様子を撮影した動画からフロント部分の沈降距離と経過時間の関係を読み取り整理した結果(図-5)、静的投入に比べて一括投入の方が初期沈降速度で約5倍、後半の沈降速度が緩和された後も約3倍の速度で沈降していた。また、含水比が低いほど沈降速度が速い傾向が見られた。なお、円筒内壁の影響が大きく水平方向の拡散が再現できないこと、泥水投入により内壁際に生じる上向補償流れが実際の沈降挙動を緩和させている点が課題となった。

(2) 中規模投入沈降試験

a) 中規模投入沈降試験の概要

管内壁の影響を受けないように幅2.4 m×奥行2.4 m×深さ1.2 mの中規模水槽(水深1.15 m)を使った中規模投入沈降試験を追加実施した。含水比2000%の泥水を、連続投入を模擬するため無脈動で定量供給が可能なモノポンプを用いて16 Lの泥水を2分間で投入した。なお泥水投入の際に空気が入ってしまうと泥水濃度が変化してしまうため、あらかじめ配管内を海水で満たした状態から電磁弁を開放して投入を行った。投入高さの違いを確認するため、水面下50 mmと550 mmの2種類の高さから

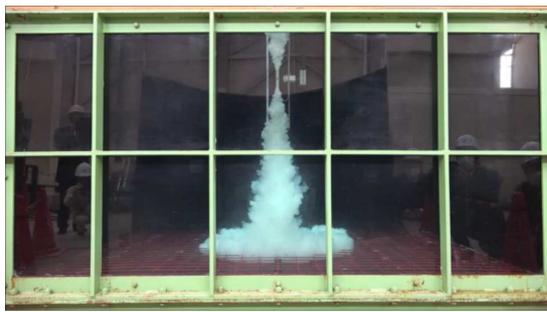


図-6 中規模投入沈降試験に用いた中規模水槽

表-5 中規模投入沈降試験ケース一覧

ケース	含水比	投入場所		投入向き	投入量
		位置	水面下		
Case4-1	2000%	中央	50 mm	下向	16 l/2分
Case4-2			550 mm		
Case4-3		端部	50 mm		
Case4-4			550 mm		
Case4-5		中央	50 mm		

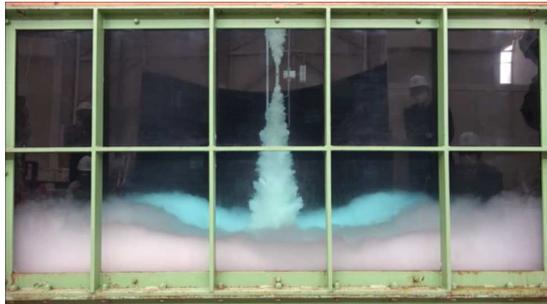
注) 端部は前面壁面から150mmの位置



a) 投入後 20s



b) 投入後 60s

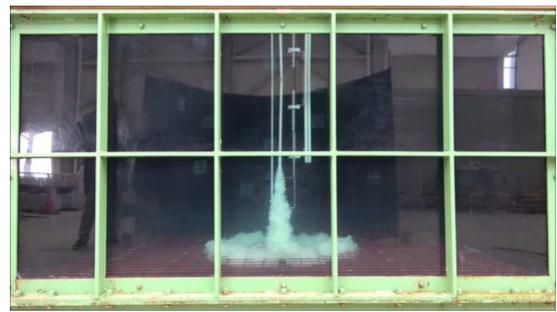


c) 投入後 120s



d) 投入後 180s

図-7 泥水投入状況 (Case4-1: 水槽正面からの画像)



a) 投入後 20s



b) 投入後 60s



c) 投入後 120s



d) 投入後 180s

図-8 泥水投入状況 (Case4-2: 水槽正面からの画像)

の投入を実施した。なお、鉛直方向流速の緩和策として、水面下50 mmのケースで投入角度を45度にしたケースも実施した。

水槽内は泥水拡散状況の視認性を向上させるため黒色塗装を施し、泥水着底後の平面的な広がりを把握するため、水槽底部に泥水移動を妨げないように升目状にした鋼材を設置した。泥水沈降状況をビデオ撮影で確認する他、泥水沈降速度が大きい投入口直下方100 mmと300 mmの2か所で電磁流速計による流速測定を行った。実験水槽内の水は海水と清水の両方を用いた。実施ケース一

覧を表-5に、実験設備を図-6に示した。

b) 中規模投入沈降試験結果

実験結果のうち、清水によるCase4-1とCase4-2の沈降状況(水槽正面画像)を図-7と図-8に示した。なお、海水と清水による泥水沈降状況を確認するため、ガラス面から150mmの位置で投入したケースの沈降流速を比較した(図-9)。撮影画像から、投入口鉛直下向100 mm間隔に泥水フロント到着時間を読み取り沈降速度を算出したが、水槽中心投入軸の泥水フロント沈降速度に顕著な違いが見られなかったため、清水による試験結果を整理するこ

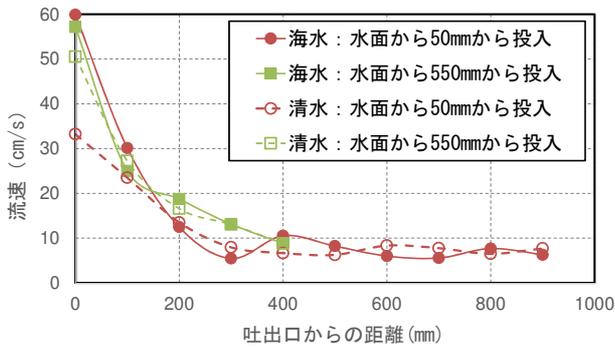
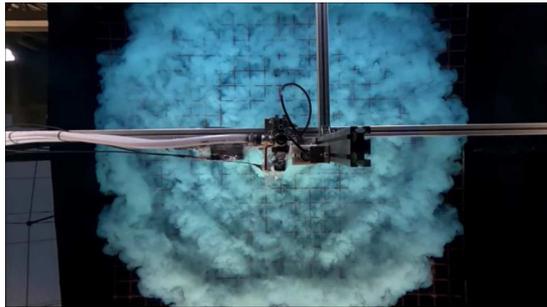
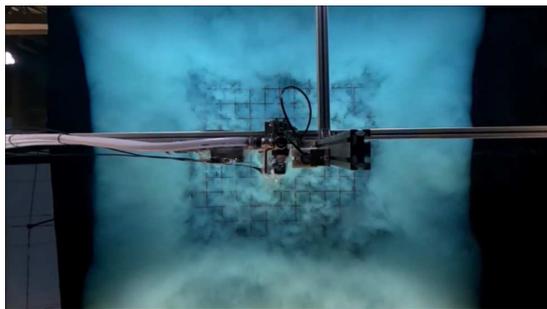


図-9 水槽中心の泥水フロント沈降速度



a) 投入後 60s



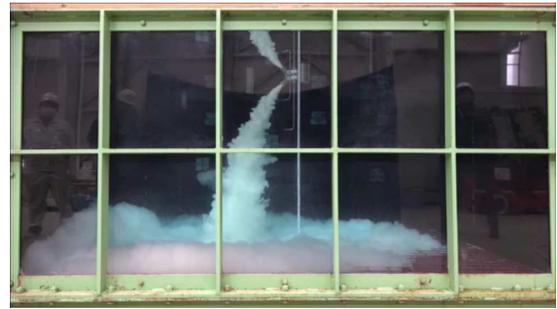
b) 投入後 120s

図-10 泥水投入状況 (Case1: 水槽上面からの画像)

とした。また泥水の沈降速度は、投入口付近ではポンプによる投入初期流速の影響が見られるが、一定距離沈降すると初期投入流速は減衰し沈降速度10 cm/s程度に収束する傾向が見られた。

Case4-1と4-2の泥水沈降状況を見ると、投入高さが異なるがどちらのCaseも投入初期は密度流的な挙動を示すものの、すぐに移流拡散が支配的な沈降の様子が見られた。また投入高さに関わらず、吐出口から水槽底方向の拡散程度や底面到着後の水平方向への泥水フロント部が底面摩擦により多少盛り上がりながら円状に広がる定性的な挙動などは同様であった。ただし、低い位置からの投入のCase4-2の方が水平方向の泥水フロント部が薄く、また壁面到達後の泥水の上向き拡散の挙動も、投入高さが低いCase4-2の方が泥水の巻き上がりが低減されていた。

水平方向に移流した泥水フロント部が壁面に衝突した後については、今回のケースでは投入量や投入時間が少ないこともあり上向きの巻き上がりが少なかったが、壁面衝



a) 投入後 60s



b) 投入後 180s

図-11 泥水投入状況 (Case4-5: 正面からの画像)

突後の反射泥水 (図-10(b)) が水槽中央部で同じ位相で集中し、結果としてこのタイミングで泥水高さが一番高くなった (図-7(d))。なお、今回の実験では泥水投入量が少なく2回目の壁面からの反射波が衝突する位相では既に沈降が進行し泥水高さは1回目より小さくなっていたが、この泥水の内部波としての挙動が共振する懸念もある。今後、泥水の連続投入を模擬したケースの検討も必要であると考えられる。

泥水着底時の衝突流速が緩和されると同じ投入高さでも濁りの広がりが低減すると想定し、水面から50 mmの投入ケースで斜め45度下向きに投入したCase4-5も参考までに実施した (図-11)。投入角度の影響は沈降途中で低減し、着底後の濁りの拡散の様子は大きくは変わらなかった。なお、泥水着底位置が水槽中央からずれたことで、壁面からの反射による巻き上がりの位置がCase4-1と異なっていた。

c) 中規模投入沈降試験結果の考察

中規模投入試験では、投入初期の挙動は港湾工事における土砂投入に類似していると考えられるが、港湾工事で見られるバッチ処理のような影響が限定的な事象²³⁾とは異なり、泥水が連続的に投入されることで海中の濁りが広範囲にわたり⁴⁾、また汚濁が連続的に追加されるため濁りがなかなか減衰しない様子が見られた。また港湾工事の投入土砂に比べMHサイトの底質は細粒分の比率が多い⁷⁾と考えられ、投入土砂着底時の原地盤からの再浮上の機動力も異なると考えられる。また浅水域では温度躍層などの界面効果で投入土砂による濁りの再浮上が抑えられるが⁸⁾、数千メートルの深海では躍層などの

界面効果は少ないと考えられる。これらのことより、本実験結果は既往の港湾工事の土砂投入とか異なる点が多いと思われる。

4. 流動モデルによる数値解析

(1) 数値解析の概要

中規模投入沈降試験では投入泥水の基本的な挙動を把握したが、流速や濃度の定量的な把握までできなかったため、泥水投入初期状況の定性的な再現および現地規模における現象理解を目標に数値解析による検討を行った。数値解析は、 σ 座標を有する3次元流動解析モデルであるPOM(Princeton Ocean Model)に濁りの移流拡散を追加して数値解析を実施した。本検討では深海下を想定し、外力場として波浪や海流は考慮せず、泥水投入により生じる乱れのみを再現することとした。また解析は現地における泥水挙動を定性的に把握するために、泥水投入後の沈降過程を2次元的な現象として扱い、密度フルード数の相似条件を合せた現地条件（水深150 m×幅300 m×奥行40 m、泥水投入流量1.2 m³/s、泥水濃度47 g/L）における解析を実施した。なお、中規模泥水投入試験と同様に、泥水投入初期の挙動を確認するため投入から3600 sまでの解析とし、泥水の沈降速度は中規模泥水投入試験を参考に5 cm/sと設定した。また最下層メッシュでは着底した泥水の堆積を模擬し、堆積泥の含水比を攪拌試験結果から200%と設定し堆積量を算定し、堆積した土量を最下層メッシュの泥水から低減させる処理とした。また現地のMH掘削後の窪地を想定し端部は壁境界とし、泥水投入位置は水面から50 mと100 mの位置からの2ケースについて実施した。解析条件を表-6に整理した。

(2) 数値解析結果

数値解析結果の泥水濃度、流速ベクトルを両ケースについて示した（図-12）。なお泥水濃度は1~1000 mg/Lの範囲を対数分布で表示している。前述した通り、実験とは水深や泥水投入量が異なるとともに、濃度と流速の検証データが取得できていないため実験結果との定量的比較は難しいが、定性的には投入後の高濃度泥水の密度流的な沈降の様子、泥水着底後の水平方向への運動量の転化、泥水先端プルームの盛り上がりなどの投入濁度の挙動を再現できていると考えられる。また投入高さが低いケースの方が濁水の拡散範囲が低減しており、投入位置を底面に近づけた方が濁りの再浮上を抑えられる現象を数値解析でも再現できることが示された。また解析では、実験では顕著に見られなかった、低濃度ではあるが初期沈降過程の水平方向の拡散が見られる。泥水を連続的に長時間投入した場合の拡散挙動と併せて、今後の検討課題と考えている。

表-6 数値解析条件一覧

解析領域	幅300 m×奥行40 m×高さ150 m	
解析格子	幅5 m×奥行5 m×高さ5 m	
解析時間	3600 s ($\Delta t = 0.01$ s)	
泥水条件	泥水投入量	1.2 m ³ /s
	投入濃度	47 g/L
投入高さ	Case-A：水面100 mから投入	
	Case-B：水深50 mから投入	

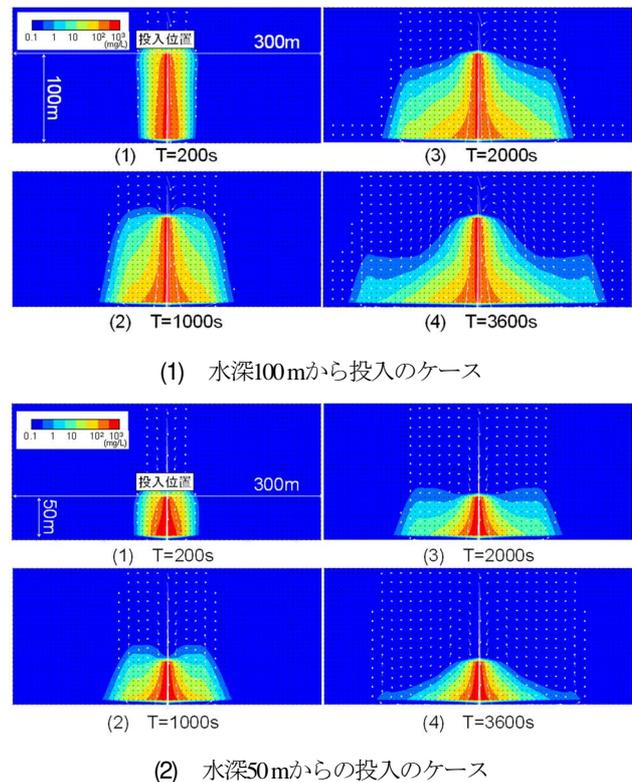


図-12 数値解析による泥水濃度分布と流速ベクトル図

5. おわりに

MH掘削後の不要泥水の海中排出を模擬した攪拌沈降試験および投入沈降試験を行った。その結果、投入初期は密度流的であるが、全般的には移流拡散挙動が支配的であること、濁度の広がり、海底到着後の泥水運動が水平方向に転化し、水槽壁に衝突後の上向き乱れによって広がることがわかった。また流動モデルによる数値解析により投入初期の泥水挙動を定性的に表現できた。

今後は、連続的な泥水投入を行った場合の検討を、水槽実験および数値解析により進めていく予定である。

NOTES

- 注1) 経済産業省：海底エネルギー・鉱物資源開発計画，2019.
- 注2) (一社)日本埋立浚渫協会：港湾工事環境保全技術

マニュアル Doctor of the Sea (改訂第3版), 2015.

REFERENCES

- 1) 三井海洋開発株式会社：表層型メタンハイドレート, https://www.modec.com/jp/business/newbiz/methane_hydrate.html, Accessed on: May. 22th 2023. [MODEC, Surface Methane Hydrate, https://www.modec.com/jp/business/newbiz/methane_hydrate.html, Accessed on: May. 22th 2023.]
- 2) 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. [Tamai, M., Muraoka, K., Murota, A. and Machida, H.: Study on Initial Stage of Diffusion Process of Turbidity in Direct Dumping of Soil, Proceedings of the JSCE, No.515/II-31, pp.77-86, 1995.]
- 3) 蔣勤, 国栖広志, 渡辺晃：土砂投入に伴う汚濁の拡散過程に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, Vol.44, pp.1031-1035, 1997. [Jiang, Q., Kunisu, A. and Watanabe, A.: Numerical Simulation of Settling-dispersion Processes of Dredged Material Disposed from Barges, Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, pp. 1031-1035, 1997.]
- 4) 黒川幸彦, 戸村豪治, 泉国彦, 河村俊治：土砂投下時の汚濁拡散抑制に関する水槽実験, 三井住友建設技術研究所報告, Vol.4, pp.83-88, 2006. [Kurokawa, Y., Komura, G., Izumi, K. and Kawamura, S.: Water Tank Tests of Turbidity Diffusion Control with Soil Dumping, Reports of Technical Research Institute of Sumitomo Mitsui Construction Co.Ltd., Vol.4, pp.83-88, 2006.]
- 5) 武田将英, 松澤圭祐, 佐々木淳, 津田宗男, 松田信彦：成層水域における下層への土砂投入に伴う濁りの拡散特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.946-950, 2010. [Takeda, M., Matuzawa, K., Sasaki, J., Tuda, M. and Matsuda, N.: Characteristics of Turbidity Dispersion due to Disposal of Dredged Sediments into the Bottom of Stratified Water Column, JJSCE, Ser.B2, Coastal engineering, Vol.66, No.1, pp.946-950, 2010.]
- 6) 五十里洋行, 後藤仁志, 小林祐司, 小西晃大：土運船による投下土砂の堆積形状予測に対する高精度固液混相型粒子法の適用性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_43-I_48, 2018. [Ikari, H., Gotoh, H., Kobayashi, Y. and Konishi, K.: Applicability of Enhanced ISPH Method with Fluid-Soil Interaction Model for Prediction of Deposition of Dumping Sand from Split Hopper Barge, JJSCE, Ser.B2, Coastal engineering, Vol.74, No.2, pp.I_43-I_48, 2018.]
- 7) 三浦竜司, 山下聡, 南尚嗣, 八久保晶弘, 坂上寛敏, 松本良, 庄子仁, 高橋信夫, Jin Young K, Obzhirov Ana-toly, Oleg Khlystov：大水深海底・湖底地盤から採取した堆積土の土質特性, 第48回地盤工学研究発表会講演集, pp.495-496, 2013. [Miura, R., Yamashita, S., Minami, H., Hachikubo, A., Sakagami, H., Takahashi, N., Shoji, H., Matsumoto, R., Jin, Y.K., Obzhirov, A. and Khlystov, O.: Soil Properties of Deep Lake and Sea Bottom Sediments, Proceedings of the 48th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp.495-496, 2013.]
- 8) 内藤了二, 井上徹教, 中村由行, 浦瀬太郎, 久野賢二：三河湾窪地の埋め戻し土砂投入時における濁りの拡散特性と密度成層の効果, 海岸工学論文集, Vol.55, pp.1251-1255, 2008. [Ryoji, N., Tetsunori, I., Yoshiyuki, N., Taro, U. and Kenji, K.: Dispersion Characteristics of Turbidity during Placing Dredged Sediments into Borrow Pits in Mikawa Bay, Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, pp. 1251-1255, 2008.]

(Received March 16, 2023)

(Accepted July 20, 2023)

FUNDAMENTAL STUDY ON POLLUTION DIFFUSION DURING SEABED DISCHARGE OF MUDDY WATER

Hiroki SUGAHARA, Hiroyuki KATAYAMA, Akiyuki UKAI, Koji MOCHIZUKI, Kazunori TAKEUCHI and Satoshi YAMASHITA

In the surface methane hydrate (MH) mining project, MH and mud drilled together with seawater will be pumped on board a ship, and only methane gas will be recovered in a gasification facility on board the ship. In this process, understanding the impact of turbidity on the surrounding environment and efficient discharge methods into the depression are important issues.

In this study, in order to understand the turbidity of unwanted mud when it is discharged to the seafloor, we conducted a mud injection test using simulated deep-sea mud to understand the sedimentation characteristics of the mud when it is discharged. As a result, it was found that although the initial stage of the mud discharge is density flow-like, advection-diffusion behavior is dominant, and that the turbidity spreading is caused by the horizontal movement of the mud after it hits the seafloor and the upward turbulence after it strikes the tank wall. Numerical analysis using a three-dimensional flow model was used to qualitatively describe the behavior of the dumping mud.