

課題番号 jh170014-NAH

大規模粒子法による大型クルーズ船の浸水解析

橋本博公（神戸大学）

概要

課題代表者らは粒子法とポテンシャル理論を組み合わせた損傷船舶の浸水シミュレーション手法を開発済みであり、本課題では GPU スパコンによる大規模並列計算が実行可能な計算コードへと拡張を行い、壁粒子生成などの前処理の自動化も含めて、複雑な内部区画を有する大型クルーズ船への適用を可能とし、従来は困難であった船内浸水の経時変化の詳細解析を実現することを目的としている。今年度は、浸水シミュレーションのコア部分である陽的 MPS 法の GPGPU コードについて、TSUBAME2.5 から 3.0 へのバージョンアップに応じた各種の設定変更や最適化を図った。そのうえで、船体中央部の船内水密区画を再現した大型クルーズ船の模型実験と同条件にて、4 千万超の粒子を用いた数値シミュレーションを実行し、損傷破孔から船内へと浸水していく様子や浸水過程における船体姿勢の変化について、模型実験との比較を行った。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学学術国際情報センター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

青木尊之（東京工業大学学術国際情報センター）

TSUBAME での大規模計算の技術協力

末吉 誠（九州大学応用力学研究所）

MPS 法の高精度化

長邊七海（神戸大学大学院海事科学研究科）

MPS 法並列 GPU コードの最適化

米田翔太（神戸大学大学院海事科学研究科）

データの解析および可視化

Andi Trimulyono（神戸大学大学院海事科学研究科）

データの解析および可視化

2. 研究の目的と意義

海上に浮かぶ巨大な閉鎖空間といえる船舶において、損傷事故や海水打ち込みによって船内への浸水が生じた場合の安全性向上は重要な課題である。航海計器の発達した現代においても、船舶同士の衝突事故は発生し

続けており、船員の不注意による座礁事故も後を絶たない。国際物流をほぼ一手に担う船舶において、浸水事故による貨物喪失や海洋環境破壊の被害は計り知れず、また、コスタ・コンコルディア号やセウォル号の浸水事故では、避難誘導の遅れにより多数の死者が出たことは記憶に新しい。資源に乏しく貿易を生命線とする我が国は、海上輸送を行う船舶の海難事故、特に浸水事故に対する安全性を向上させていく責務を負っている。

浸水時の船舶の安全性向上を目的とする技術開発の重要性が強く認識されている一方で、従来の検討はその大半が基礎研究レベルに留まり、実用化には必ずしも至っていないのが実態である。この理由としては、想定される様々な損傷シナリオに対して、浸水状況の予測や安全対策の効果の検証が容易でないことが挙げられる。時間に対する変化が緩やかな浸水であれば準静的解析などの従来技術が利用できるが、乗客の人命を脅かす転覆や沈没にまで至り得るような大規模で急速な浸水に対しては、安全対策の検討どころか、船内の浸水状況の経時変化の予測すらままならないのが現状である。

特に、数千人もの乗客が搭乗する大型クルーズ船では、多層のデッキなど内部構造が極

めて複雑であり、このように込み入った船内に適切な計算格子を設けることは容易ではない。うえ、想定される損傷シナリオは多岐に渡り、浸水経路や流量も大きく変化するため、損傷シナリオに応じて空間の離散化や解像度の変更を要する計算手法は不向きである。また、安全性を脅かすような深刻な浸水が発生した場合には浸水に伴って船体姿勢が大きく変化すること、連続浸水の有無や浸水量の正確な推定には質量保存が欠かせないこと、ダウンフラディングや滞留水スロッシングなどの非線形流れ解析が必要であることから、船内への浸水解析において粒子法は有力な解法となる。ただし、複雑な薄板構造の船内区画を再現するためには、膨大な数の粒子が必要となるため、現在までに粒子法を用いて、現実に即した内部区画を有する大型クルーズ船の浸水シミュレーションが実施された例はない。

こうした状況を打破すべく、研究課題代表者らは、陽的 MPS 法の GPGPU をコア技術とする損傷船舶の浸水シミュレーション手法を開発した。ただし、大型クルーズ船の複雑な内部構造までを再現するためには、マルチスケール化が容易ではない粒子法では一億超の粒子を必要とするため、GPU スパコンによる大規模並列計算が実行可能な計算コードへと拡張し、実船への適用の実現を目指すことが本研究課題の目的である。さらに、想定される代表的な損傷シナリオに対して浸水シミュレーションを実施することで、従来計算では予測が困難であった船内浸水状況の詳細を明らかにし、今後の安全性向上の検討に資する数値計算法として確立する。

大型クルーズ船の浸水予測について、船体内部構造の詳細までを考慮して粒子法で計算した例は国内外で見当たらず、GPU スパコンを用いた船内浸水の詳細解析、そして模型実験による精度検証が実施されたならば、当該分野の先駆的研究として大きなインパク

トを与えるものとなり、大型クルーズ船の損傷時の安全性向上はもちろんのこと、一般商船の損傷浸水時の安全性向上にも繋がることが期待される。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

課題代表者らが開発した損傷浸水時の船体姿勢の変化を考慮した浸水シミュレーションは、模型実験との比較による精度検証を経て国際的にも高い評価を得ている。ただし、これまでは提案する計算手法の妥当性の検証に重点を置き、内部区画を大幅に単純化したうえで計算を行っていた。これは、空間解像度の部分的変更が困難な粒子法では、複雑な構造を取り扱う際の粒子数が膨大となり、一般的な計算機環境では内部区画までを再現した浸水解析が困難なためである。さらには、現実の浸水シナリオは多岐に渡るため、このような大規模な粒子法計算を多ケース行う必要がある。大型クルーズ船の安全性研究で先行する欧州を凌駕する研究成果を追求するためには、大量の GPU を一度に利用可能な GPU スパコンを活用し、一般の計算機では実施が不可能な現実の船舶に対応した大規模粒子法計算の実行が求められる。

JHPCN の枠組みを用いることで、東京工業大学が保有する GPU スパコン Tsubame の利用が可能となり、さらに、粒子法を用いた船舶の浸水予測・安全性評価に高い実績を有する神戸大学、粒子法アルゴリズムの改良に優れた九州大学、さらに東京工業大学が有する大規模並列計算に関するノウハウを組み合わせることにより、大規模粒子法による大型クルーズ船の浸水シミュレーションを世界に先駆けて実施することが可能となる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要 該当しない

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) TSUBAME3.0 への更新対応

荒天中の船舶の数値流体解析を目的として研究課題代表者らが開発してきた陽的 MPS 法の GPU 並列計算コードについて、初めに TSUBAME2.5 上で実行するための環境設定を行い、過去に実施した問題について同一の計算結果が得られることを確認した。続いて TSUBAME3.0 へのバージョンアップに対応するため、コンパイル方法の変更や、ジョブスクリプトの組み直しを行った。これは CUDA や OpenMPI といったアプリケーション、PGI コンパイラのバージョンが更新されたためであり、適宜プログラムコードの書き換えを行い、コンパイラ自体も安定に動作する intel コンパイラに変更した。

また、コンパイル方法、MPI によるシミュレーション領域分割数、CUDA スレッド設定など各種の変更を行い、TSUBAME3.0 への移行に合わせた最適化によって計算速度の高速化を図った。従来 MPI による計算領域の分割法や GPU カーネルのプログラミングモデル構成では、TSUBAME のバージョンアップに伴うハードウェア構成の更新のために最適なものではなくなったため、二次元スライスグリッドによる領域分割を見直し、新しいハードウェア構成に最適となるように変更したうえで、プログラム全体の GPU カーネル関数の再調整を行った。

以上のような過程を経て、TSUBAME2.5 から 3.0 への更新に伴う対応作業は終了し、大型クルーズ船の浸水シミュレーションに向けた計算実行環境を整えた。

(2) 浸水シミュレーションの前処理

前節の計算実行環境の変更作業と並行して、大型クルーズ船の損傷浸水シミュレーションの実施に向けて、いくつかの事前準備を行った。初めに、対象とする大型クルーズ船の船体表面形状および浸水が想定される内

部区画の CAD データから STL ファイルを作成し、課題代表者らが考案した壁粒子の自動生成法^{※1} にもとづいて壁粒子配置データを作成した。水粒子の生成については、指定した水面高さまで計算領域の底面から一様に粒子を生成させる方法を用いた。このようにして作成した壁粒子データおよび水粒子データを用いて損傷破孔が無い状態にて静定計算を十分な時間をかけて行い、計算実行に要する粒子配置と物理量から成る初期データを準備した。

さらに、非損傷船体に作用する流体力を計算するため、ポテンシャル理論にもとづき 2 次元ストリップ断面に対する付加質量、造波減衰係数、復原力を多くの沈下量と横傾斜角の組み合わせについて求め、このデータを計算コード内から読み込むことで、非損傷船体に働く流体力の計算を可能とした。この非損傷部に働く流体力と粒子法で求まる損傷部の流体力を損傷船体全体に働く流体力として船体運動方程式を解き、この結果を移動壁境界として粒子法内で考慮することで、船体姿勢の変化を考慮した船内浸水シミュレーションが可能となる。

本計算手法では、計算領域を非損傷部と損傷部に分割し、異なる手法で流体力計算を行うことになるが、過去の経験にもとづき、両者の境界面での連続性は考慮していない。

(参考文献)

※1 Hashimoto, H. et al., A numerical simulation method for transient behavior of damaged ships associated with flooding, Ocean Eng., 143(1), 282-294, 2017.

(3) 模型実験の概要

数値シミュレーションの精度検証を目的として実施した模型実験の概要について述べる。実験に用いたのは大型クルーズ船の 3.0m 模型船であり、図 1 のように船体中央部に長さ 0.130m、高さ 0.109m の船側破孔を有

している。損傷区画は連続する水密二区画を中央隔壁を除いて一体化したものであり、上部は水平隔壁で閉じている。船内の各デッキはアクリル板を用いて再現している。ただし、アクリル板の自重を支えるために実際の区画には存在しない複数の円筒支柱が備わっている。内部区画を船内後方から見た写真を図 2 に示す。本対象船は最下層の左右非対称性が顕著となっている。実験時のメタセンタ高さは 0.03m、横揺れ固有周期は 2.71 秒と設定した。

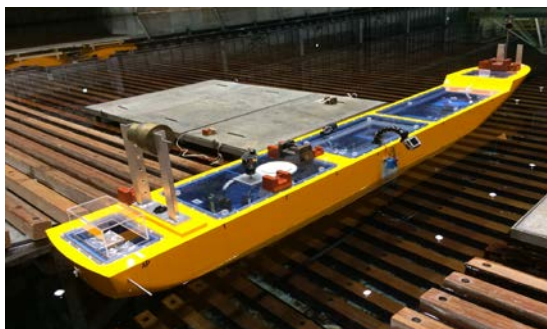


図 1 使用した模型船



図 2 再現した内部区画

損傷船舶の浸水計算の検証には、区画の水密性や気密性について考慮する必要がある。今回の実験では船体内壁とアクリル板の隙間をテープで塞ぐことで気密性を確保した。実際の船舶では通気用パイプなどの存在により完全な気密とはならないが、検討対象としている急速な浸水に対してはパイプ等を介した空気の移動影響は限定的であると考えられるため、水密・気密状態にて実験を実施した。

模型実験は水産工学研究所の海洋総合実験棟にある角水槽にて実施した。陸上のトータルステーションを用いた目標点の空間座標計測と船内に搭載した光ファイバー式ジャイロによる回転角の計測値を用いることで、船体の 6 自由度運動を高精度に取得することができる。数値シミュレーションとの比較用途には、船体の初期運動に影響を及ぼすことなく損傷破孔を瞬間的に発生させることが望ましく、水密性の代償として摩擦が伴う一般的な機械式のスライド蓋ではなく独自の生ゴム方式を採用した。一様に強く引いた生ゴムをアルミ枠で船体に固定し、遠隔操作が可能なサーボモータに取り付けた鋭利な針で突き刺すことにより、瞬間的な破孔の発生が実現される。図 3 に示すようにビデオ映像の 1 フレーム内でゴムの破裂が実現できている。さらに針刺し後のゴムは一瞬で縮むためその後の浸水に悪影響を及ぼさない。

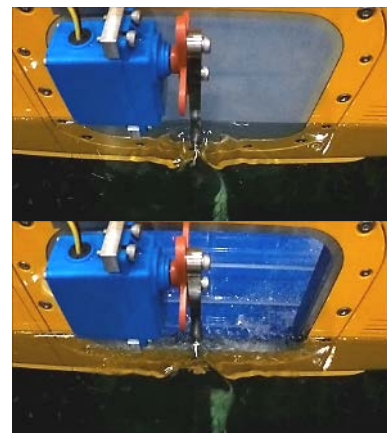


図 3 損傷破孔の発生

浸水中の船体姿勢の時間変化および船内浸水の様子を図 4、5 に示す。破孔を発生させると即時に船内への浸水が開始される。船体はほぼ直立の状態を 4 秒ほど保った後に、損傷破孔側に大きく傾斜を始める。8 秒付近で横揺れ角が最大値の 14.5 度に達したのち、13.2 度の横傾斜角で最終平衡状態に落ち着く結果となった。浸水により船首方向、船首下げ方向、右回頭方向への一方向運動が見られたが、船内が

ほぼ完全に浸水した後に顕在化していることから、浸水中の過渡的な船体運動のシミュレーションの際には、これらの 3 自由度運動は無視しても差し支えないものと推察される。船内の浸水状況を見ると、第二層デッキへの浸水が最も顕著であるが、第一層デッキにも浸水が生じており、この非対称デッキへの浸水が顕著になるにつれて、破孔側への横傾斜モーメントが増大し、大傾斜が生じたものと考えられる。



図 4 浸水中の船体姿勢

($t = 0.0, 0.5, 1.5, 3.0, 6.0, 8.0, 15.0$ 秒)

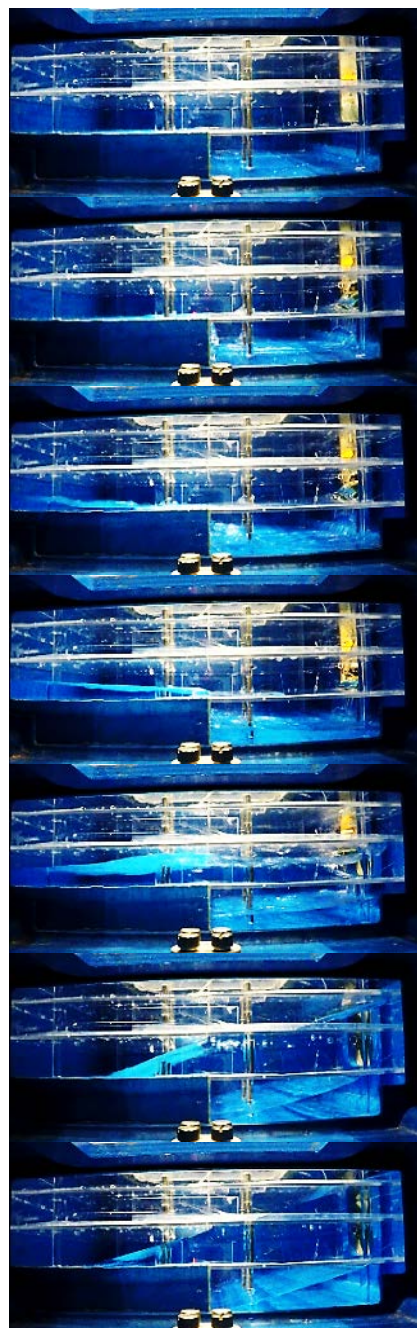


図 5 船内浸水の様子

($t = 0.0, 0.5, 1.5, 3.0, 6.0, 8.0, 15.0$ 秒)

(4) 数値シミュレーション

前節で述べた模型実験と船体の重量、重心位置、慣性モーメント、喫水、破孔寸法などを同一としたうえで、TSUBAME3.0 にて 4 千万超の粒子を用いた浸水シミュレーションを実施した。今回の計算に用いたパラメータを表 1 に示す。TSUBAME3.0 への移行対応に時間を要したこともあり、使用したパラメータの検証や最適化については未実施となってい

る。数値水槽は図 6 に示したとおりであり、水槽長さは水密隔壁の等倍とし、水槽幅は船幅の 5 倍、水槽深さは喫水の 3 倍とした。

表 1 計算条件

Particle distance (m)	0.003
Total number of particles	42,422,568
Time step (s)	0.0001795
Mach number	0.5
Kinetic viscosity (N s/m ²)	1.0E-6
Courant number	0.3
Number of processes	24
Number of threads per block	256

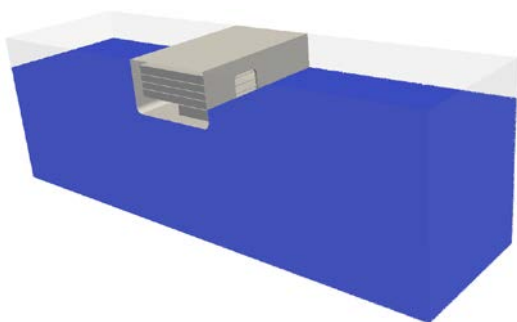


図 6 数値水槽

損傷浸水時の安全性評価に最も重要な横揺れ運動について、模型実験と数値計算の時系列比較を図 7 に示す。また、図 5 に対応した浸水状況のスナップショットを図 8、9 に示す。

横揺れの時系列を見ると、模型実験では一旦破孔側に傾斜した後、反対舷に約 2 度まで戻り、そこから急激に破孔側に傾斜が発達していく様子が分かる。その一方、数値計算では浸水開始直後に破孔側に傾斜し、一旦横揺れ角が小さくなる傾向は実験と同じであるが、その大きさは異なっており、破孔側に大きく傾斜していく速度も実験に比べて緩やかである。また、最終平衡状態においても定常傾斜角に差が生じる結果となった。時刻 15 秒における実験結果と計算結果を比較すると、気密性を確保した模型実験では最下層に

顕著な空気閉じ込みが見られるのに対して、気相を解かない粒子法の計算では最下層が完全に水で満たされていることが確認できる。模型実験のビデオ映像を見る限り、最終平衡状態において損傷破孔は第三層まで完全に水没しており、第二層および第三層でも滞留した空気の影響があるものと想像される。また、実験では破孔から最下層へと浸水する際に経路が狭いため空気の排出が阻害されている様子も確認されており、実験結果の定量的な再現に向けては、空気影響の別途の考慮や気液二相流解析が必要^{*2} であることが確認された。なお、図 7 の模型実験の時系列に見られる大傾斜後の振動も、区画内に閉じ込められ圧縮された空気の影響と考えられる。

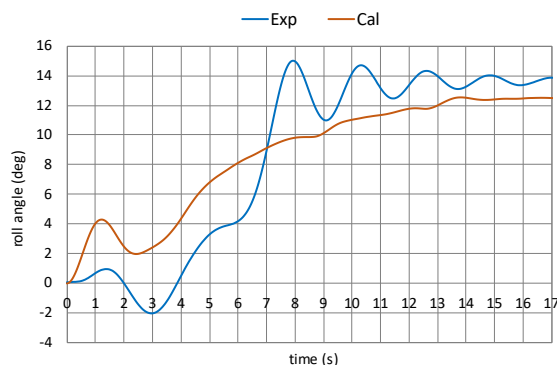
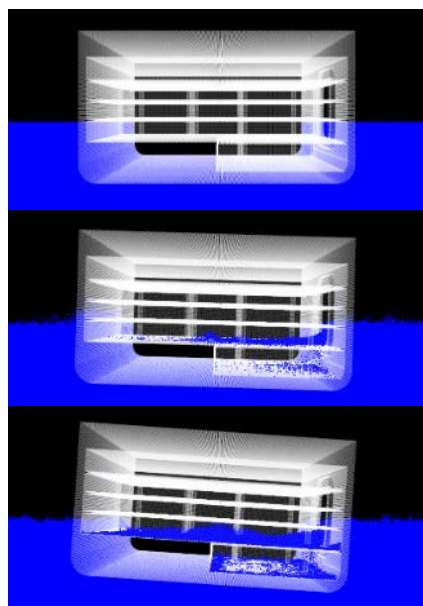


図 7 横揺れ運動の時系列比較



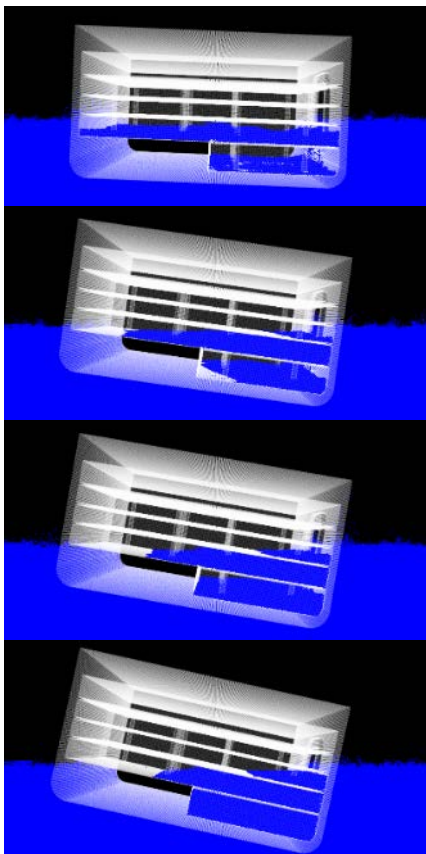


図 8 船内浸水の計算結果（正面視点）
($t = 0.0, 0.5, 1.5, 3.0, 6.0, 8.0, 15.0$ 秒)

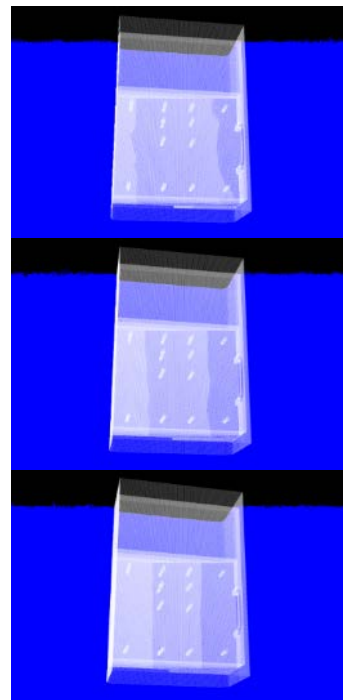
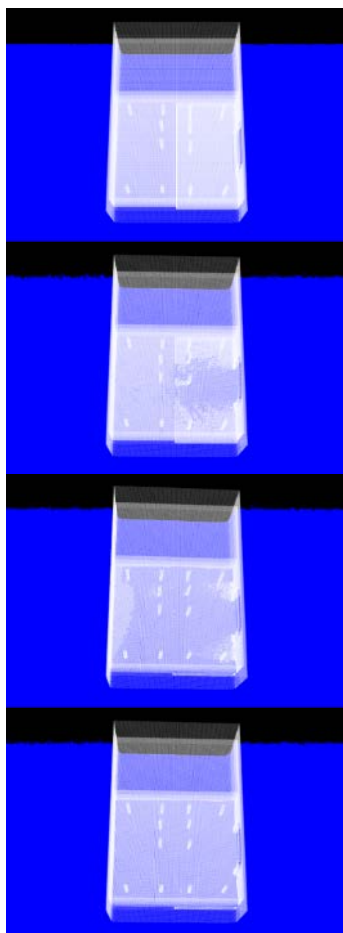


図 9 船内浸水の計算結果（上面視点）
($t = 0.0, 0.5, 1.5, 3.0, 6.0, 8.0, 15.0$ 秒)



船内への浸水など流動が大きい問題では、プロセス並列用に領域分割を行う際に固定領域ではなく、流れに応じて粒子数が均一となるように動的な分割を行うことが望ましい。本計算では、2 次元スライスグリッドを用いた動的分割を行っており、図 10、11 はいくつかの時刻における領域分割の結果である。図 10 を見ると船幅方向のスライス面が破孔側へと移動しており、船内への浸水に応じて動的分割が正しく実行されている様子が確認できる。ただし、図 11 で明らかのように、今回は損傷区画に対して外部領域を十分に大きくとっているため、全体としてはスライス面の移動は僅かなものに留まっている。

(参考文献)

※2 Hashimoto, H. et al., Investigation of ship flooding situations by MPS and SPH methods compared to dedicated experiments, Proc. 9th Int. SPHERIC workshop, 395-402, 2014.

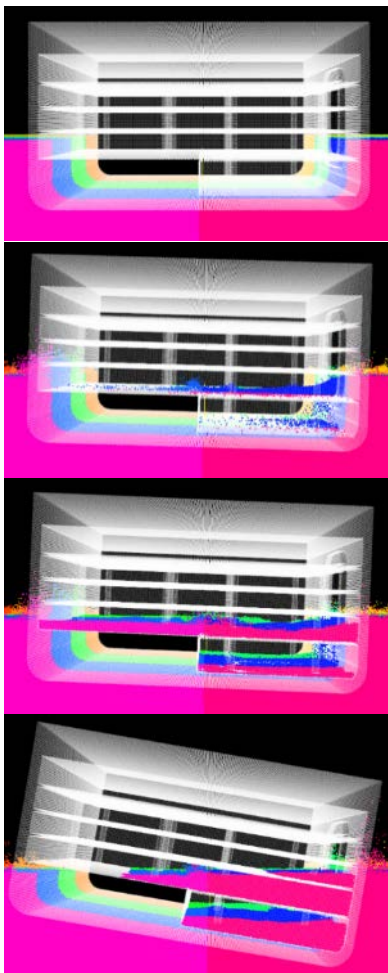


図 10 2次元スライスグリッド法による動的分割
(正面視点) (t=0.0, 0.5, 3.0, 8.0 秒)

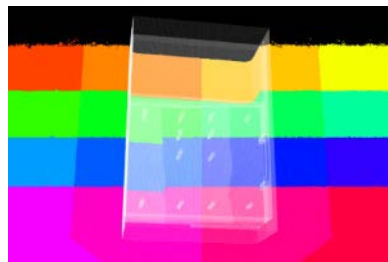


図 11 2次元スライスグリッド法による動的分割
(上面視点) (t=0.0, 0.5, 3.0, 8.0 秒)

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

TSUBAME2.5 から 3.0 への更新に伴う対応作業に多くの時間を費やしたため、浸水シミュレーションの定量的な精度検証やパラメータ最適化については当初の計画を達成できたとはいえ難い。ただし、数値計算の精度検証に必要な模型実験データは揃っており、当面の目標である一億超の粒子を用いた浸水シミュレーションについては、次年度早々に実施できる見込みである。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

なし

(2) 国際会議プロシーディングス

なし

(3) 国際会議発表

なし

(4) 国内会議発表

Trimulyono, A., Hashimoto, H., Osabe, N., Matsuda, A., Sasa, K., Taniguchi, Y., Kawamura, K., “Large-scale Particle Simulation of Sloshing in a LNG Tank”, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.26, May 2018, Osaka. (accepted for publication)

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし