

jh180048-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

本課題は、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について、GPU スパコンを用いたハイブリッド並列計算により、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、最下層への浸水が生じず、気相の影響が小さい条件での模型実験を追加し、昨年度の実験条件も含めて TSUBAME3.0 で複数ノードを使用した船内浸水シミュレーションを実施した。シミュレーションと模型実験で計測された船体過渡応答および船内区画への浸水状況の比較検証を通じて、浸水状況の定量的予測に求められる計算条件や諸要素について検討を行った。その結果、1 億超の粒子を用いることで、浸水初期から平衡状態に至るまでの計算精度が改善されたことから、実用的な計算では気相の考慮は必ずしも必要ではないことが示唆された。

### 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）

「TSUBAME3.0」での大規模計算への協力

末吉 誠（九州大学応用力学研究所）

粒子法計算コードの高速化

長邊七海（神戸大学大学院海事科学研究科）

粒子法計算コードの最適化

大村智之（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、衝突などによる損傷や青波による船内への浸水が生じた場合の安全性確保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影響は計り知れず、コスタ・コンコルディア号やセウォー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情である。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。時間に対する状況変化の少ない軽度な浸水であれば準静的解析などの既存技術を利用できるが、乗客の人命を脅かす大傾斜や転覆にまで至るような大規模で急速な浸水に対しては、安全対策の評価どころか、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、隔壁や多層デッキなど内部構造が極めて複雑であり、このような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、シナリオによって浸水経路や流量が大きく異なるため、損傷条件に応じて

空間の離散化や解像度の変更を要する計算手法は本質的に不向きである。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、連続浸水の発生や浸水量の正確な推定には自由表面の評価が欠かせないことから、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、複雑な船内区画における浸水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大型クルーズ船の内部区画へ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、GPGPU による陽的 MPS 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困難な粒子法では膨大な数の粒子を必要とするため、GPU スパコン上での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。さらに、想定される様々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、従来では予測困難であった船内浸水状況の経時変化を明らかにし、今後の安全性向上の検討に資する数値シミュレーションとして確立することを本研究課題の目的とする。

大型クルーズ船の浸水状況について、船体内部構造の詳細までを考慮した粒子法の計算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

研究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

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、一般的な計算リソース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、最新かつ大量の GPU が搭載された GPU スパコンを活用し、一般の計算機では実施が困難な現実の船舶に即する大規模粒子法シミュレーションが必要となる。

このためには、JHPCN の枠組みを最大限に活用し、粒子法を用いた船舶の浸水予測・安全性評価に実績を有する神戸大学、粒子法アルゴリズムの改良に実績を有する九州大学、大規模並列計算に関する高い技術を持つ東京工業大学が蜜に連携することによってのみ達成が可能であり、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を目指す。

## 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

### (1) TSUBAME3.0 への対応

研究課題代表者らが開発してきた、MPI による複数 GPU を用いた並列計算が可能な陽的 MPS の GPGPU コードについて、東京工業大学が保有する TSUBAME3.0 上で実行するための環境設定を行い、過去と同一の計算結果が得られるかを確認した。さらに、TSUBAME3.0 への移行に伴って、コンパイラ方法、MPI によるシミュレーションの領域分割数、CUDA スレッド設定など、各種の変更を行い、バージョンアップへの対応を行った。

### (2) 模型実験

数値シミュレーションの精度検証のため、大型クルーズ船の模型船を用いた水槽実験を実施した。船体中央部には内部区画が設けられ、アクリル板により船内の各デッキを再現している。実験時のメタセンタ高さは 0.03m、横揺れ固有周期は 2.71

秒であり、浸水前の直立状態から浸水後の完全平衡状態まで、船体運動の計測と船内浸水状況のビデオ撮影を行った。

### (3) 数値シミュレーション

模型実験と同一条件にて、TSUBAME3.0を使用し、粒子数 42M の浸水シミュレーションを実施した。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を比較したところ、非線形な横揺れ挙動を定性的に再現可能であることが確認された。しかしながら、浸水過程や最終平衡状態において十分な精度が得られない結果となり、実験で見られた最下層の空気溜まりの影響が原因として考えられることから、実験結果の定量的な再現のためには気液二相計算の必要性が示唆された。

## 5. 今年度の研究成果の詳細

### 5.1 模型実験

昨年度の研究により、最下層の非対称デッキへの浸水が生じる場合には、区画内に閉じ込められた空気溜まりが船体姿勢に影響を及ぼす可能性が確認されたが、気液二相の粒子法シミュレーションは膨大な計算時間を要するため、水面付近に位置し、区画内に閉じ込められる空気が少ないと予想される第二層以上のデッキへの浸水のみを許した模型実験を新たに実施した。模型船および内部の浸水可能区画の写真を図 1-2 に示す。また、実験時の浸水状況の時間変化を図 3 に示す。今回は左右非対称の最下層デッキへの浸水がないため、浸水中の最大傾斜角は 6 度にとどまった。また、初期挙動には昨年度と大きな差はないが、その後の傾斜方向に正負の差が生じる結果となった。



図 1 浸水実験に使用した模型船

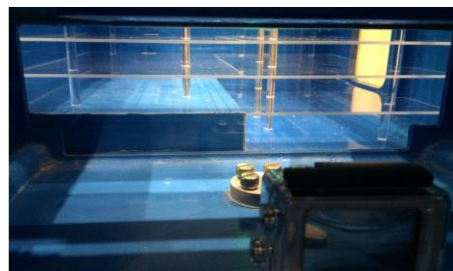


図 2 船体中央部の内部区画

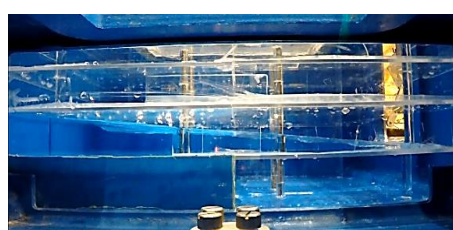




図 3 船内の浸水状況の様子

( $t = 0.0, 0.5, 1.5, 3.0, 6.0, 8.0, 15.0 \text{ sec}$ )

次節以降では、模型実験と船体重量、重心位置、慣性モーメント、喫水、破孔などを同一としたうえで、TSUBAME3.0 を使用した浸水シミュレーションを実施する。

### 5.2 大規模粒子法

粒子法の計算コストは、GPU 単体の利用でも大いに改善が可能だが、本研究では、MPI 通信を用いた複数デバイスによるマルチ GPU 並列プロセス計算を行うことで、1 億超の粒子数における計算を可能としている。MPI によるプロセス並列は、複数の CPU プロセッサを用いることで、複数のタスクを同時に実行することを可能としており、今回使用したプログラムでは、オープンソースライブラリである OpenMPI を並列処理に使用することで計算領域を分割し、それぞれの分割領域における演算を CPU プロセッサに割り当てて処理することで、計算負荷の分散を図った。また、プログラムにおけるメインストリーム、および領域分割の各種処理、分割領域同士の情報通信（コミュニケータ）の箇所は、ホスト側で逐次処理を行い、分割領域内での粒子法による流体解析では、最も計算コストの高い時間発展部分の全てをデバイス側の演算によって処理を行う。

浸水計算に用いる陽的 MPS のパラメータ設定を表 1 に示す。前年度と同様の総粒子数が 42M の計算に加えて、当初の目標であった 100M 超の粒子を用いた浸水計算を実施した。この計算に使用したノードは 4 つであり、16 プロセス 16GPU による並列計算となる。今回、1 つの粒子が持つ変数は、位置、速度、加速度、圧力などの物理量から、粒子のタイプや ID など 20 近くに及び、さらにソート用にその 2 倍のデバイスメモリを予め確保している

ため、1 粒子につき、100B 以上のメモリを占有してしまう。さらに、カーネル関数内で、別の変数を宣言することもあるので、余裕を持ったメモリを確保した上で計算しなければならない。なお、TSUBAME3.0 上でも 4 ノード以上を使用しなければ、このメモリ不足を解消することが不可能であった。このように、現状では GPU スパコンを用いることによつてのみ、大規模粒子法シミュレーションを実行することが可能であり、船内の浸水状況や船体姿勢の時間変化予測に必要な粒子数について議論することができる。なお、24 時間の計算時間で 20 秒間のシミュレーションが可能であった。

表 1 陽的 MPS の計算パラメータ

Particle distance (m)	0.003 0.0018
Total number of particles	42,555,718 108,390,636
Time step (s)	0.0001795 0.00008073
Kinetic viscosity ( $\text{N s/m}^2$ )	1.0E-6
Mach number	0.2
Courant number	0.2

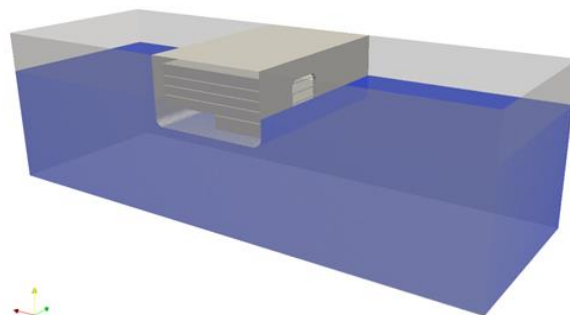


図 4 MPS の計算領域

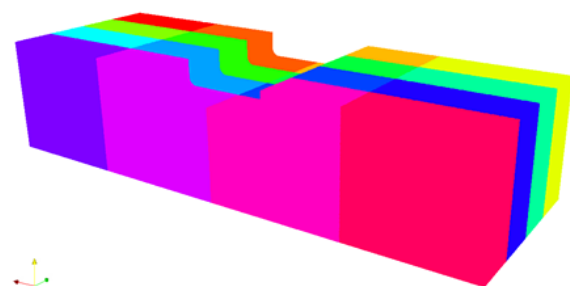


図 5 MPI による計算領域分割

船内区画を含む損傷部の浸水計算に用いる計算領域を図 4 に示す。水深は船の喫水の 2.5 倍、幅は船幅の 4 倍とした。MPI による計算領域分割を図 5 に示す。色分けされている箇所が、それぞれ別の並列プロセスの管轄に置かれた領域である。この場合、CPU コア 16 個を使用することで、初期粒子配置を 16 分割している。また、本研究のマルチ GPU 処理は、1 つの分割領域毎に、1 GPU を割り振ることで演算が行われている。

船内への大規模な浸水を扱う場合、プロセス並列計算用に計算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。そのため、シミュレーションでは、X、Z 方向に 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、全ての分割領域において、粒子保持数が最大の領域と、最小の領域の粒子数の差が 5% 以上になった場合にスライスグリッドの再生成が行われ、分割領域における粒子数の均一化処理を実施する。また、このスライスグリッドの最適化は、各領域内の粒子数と全ての粒子の座標位置、この 2 つの数値にのみ依存して行っている。

### 5.3 マルチ GPU によるスケーリング効果

本研究では、TSUBAME3.0 上でのマルチ GPU の使用による計算時間の大幅な短縮を目指している。MPI や OpenMP 計算においても、使用するプロセッサを増やすことで、計算の高速化が可能であることが広く知られているが、GPU におけるそれは顕著であり、使用ノード数を変更することで、どの程度のスケーリングが可能であるか、流体の静定計算を、粒子数 1M による小規模計算 (S) と、粒子 100M による大規模計算 (L) で検証を行った。

静定計算を行う場合は、動的な計算を実行する場合と異なり、長時間の解析を行っても、タイムステップあたりの計算時間が安定しているため、各条件で 5 秒間のシミュレーションを実行し、「5 秒間の粒子法シミュレーションを実行する場合の 1 つの粒子に割いた計算時間コスト  $T$ 」を単純な計算式 (1) で求める。また、問題の単純化のために、スライスグリッドによる領域分割は X 方向にのみ

行い、Z 方向の領域分割は行わず、使用デバイスを増やす毎に X 方向の領域分割数を増やしていく方法をとった。この条件のもとで負荷テストを行い、その結果をグラフ化したものが図 6 に示す。S は粒子数 1, 303, 503, L は粒子数 108, 390, 636 を用いて解析を行った結果である。なお、L において、使用ノード数が 4 未満の場合には、デバイスメモリの不足で結果を得ることが出来なかった。

$$T = T_1/N \tag{1}$$

$T_1$ : 5 秒のシミュレーション実行にかかった実時間、 $N$ : 総粒子数

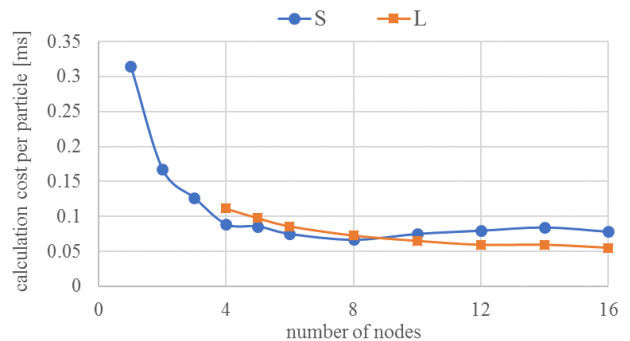


図 6 使用ノード数と計算コストの関係

S の結果より、スケーリングの効果が顕著であるのは、使用ノード数が少ない、つまりデバイスを増やした場合の相対的な増加率が大きい場合であることが伺える。ノード数 4 の場合にはノード数 1 の場合に比べて 3.5 倍程度の高速化が達成されており、この範囲においては、概ね比例的な計算コストの低減が確認された。しかし、スケーリングの効果が見られるのは 8 ノードまでであり、それ以上になると、計算コストが逆に増える結果となった。

一方、L の場合には、ノード数が少ない場合のデータが欠落しているために議論が難しいが、ノード数を 4 から 16 まで増やした場合でも、スケーリング効果は少しずつ弱まるものの確実な計算コスト低減の効果が見られる。具体的には、ノード数 4→8 では約 1.5 倍、ノード数 8→12 では 1.2 倍、ノード数 12→16 では 1.1 倍の計算の高速化が可

能であった。

以上の 1M と 100M の粒子法シミュレーションによる検討では、粒子数が増大するほど、GPU スケーリングの効果が大きくなっており、今後の更なる大規模計算に期待が持てる結果となった。

#### 5.4 模型実験との比較

はじめに、前年度に実施した最下層デッキへの浸水を許した場合について、模型実験と数値シミュレーションの横揺れと上下揺れの時系列比較を図 7-8 に示す。ここで、図 7 は初期粒子間距離を 0.03mm、図 8 は初期粒子間距離を 0.018mm とした場合の結果である。

初期粒子間距離が 0.03mm の場合は、実験で観測された横揺れの過渡応答の傾向を再現しているものの、途中の変化量や最終平衡角などは十分な精度であるとは言いがたい。さらに、上下揺れでは実験よりも平衡状態となるのがかなり遅く、沈下量を過大に評価する結果となっている。これに対して、初期粒子間距離が 0.018mm の場合は、3 秒付近の揺り戻しが顕著となり、その後の平衡状態へと向かう過程や最終的な平衡角も一致度が改善されている。上下揺れにおいても、平衡状態となるタイミングが実験とほぼ同じであり、100M 超の粒子を用いることで、実験結果の実用的精度での再現が可能になったと言える。

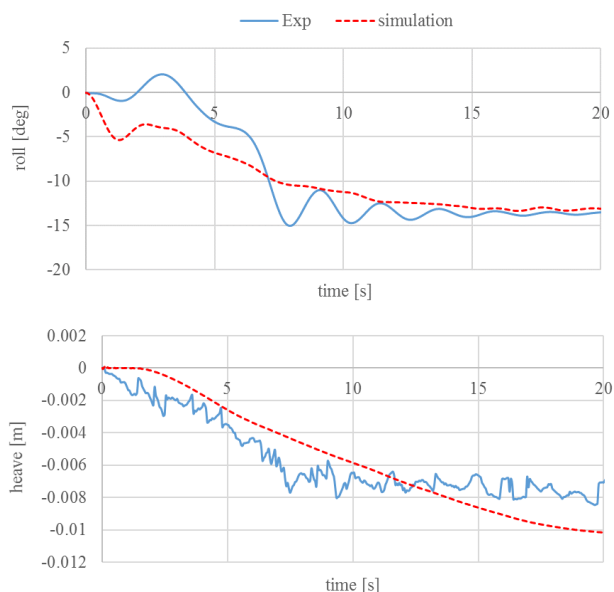


図 7 横揺れ，上下揺れの時系列比較  
( $l_0=0.03\text{mm}$ )

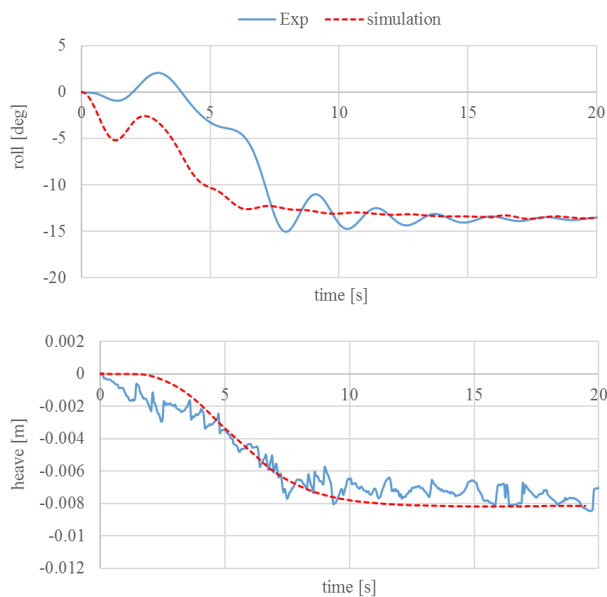
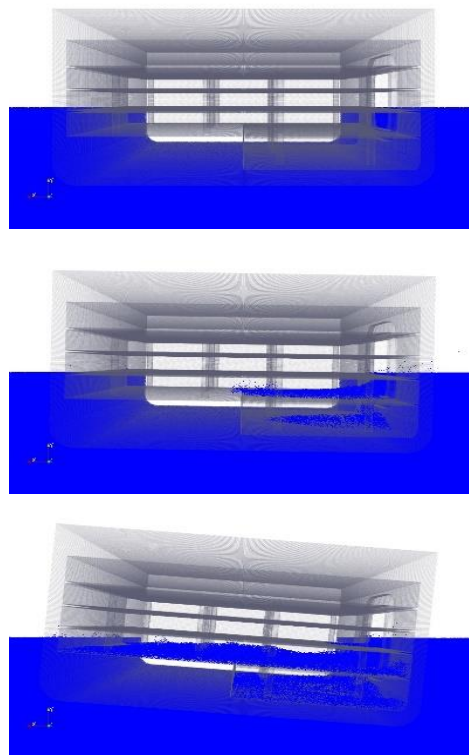


図 8 横揺れ，上下揺れの時系列比較  
( $l_0=0.018\text{mm}$ )

この初期粒子間距離 0.018mm の計算結果について、区画内部の浸水状況のシミュレーション結果を図 9 に示す。これと比較すべき実験映像については、ページ数の都合により、前年度報告書を参照願いたい。



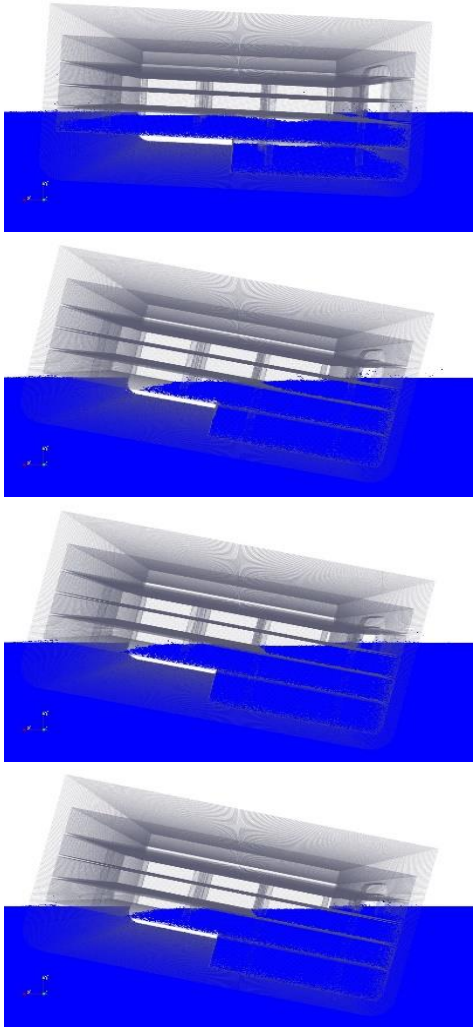


図 9 船内浸水の計算結果

( $t = 0.0, 0.5, 1.5, 3.0, 6.0, 8.0, 15.0 \text{ sec}$ )

次に、今年度に追加した第二層以上のデッキのみへと浸水する条件について、シミュレーション結果と実験結果の横揺れ運動の比較を図 10-11 に示す。初期粒子間距離が  $0.03\text{mm}$  の場合は、浸水直後から最終平衡状態に至るまで、常に損傷破孔側に船体が傾いており、実験で観測された破孔とは反対側への定傾斜を説明するには至らなかった。これに対して、初期粒子間距離が  $0.018\text{mm}$  の場合には、傾斜方向を正しく評価することができており、細かな変動までは十分には捕らえられていないものの、平均的には実験結果を再現する結果となっている。このように使用する粒子数で大きな差が生じたのは、水が広く薄く流れ込む初期段階において、粒子数が少ない場合には圧力評価が不十分であり、浮力に明らかな左右差がない今回の

ような状況では、浸水初期のわずかな誤差が大きな差に繋がるためと考えられる。

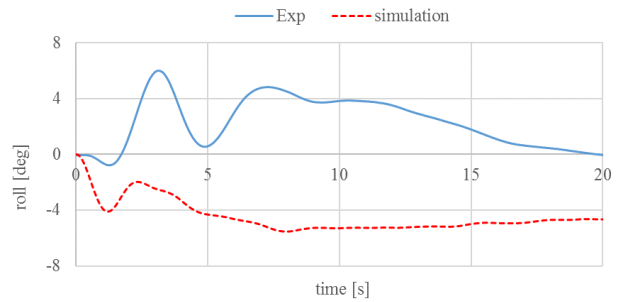


図 10 横揺れの時系列比較 (最下層浸水なし) ( $l_0=0.03\text{mm}$ )

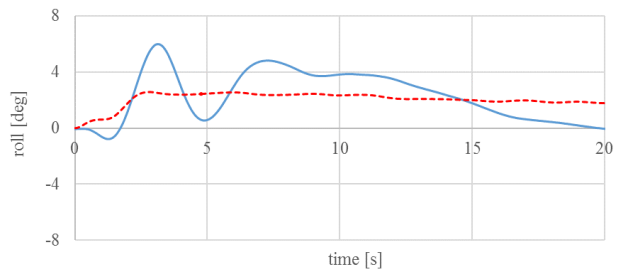
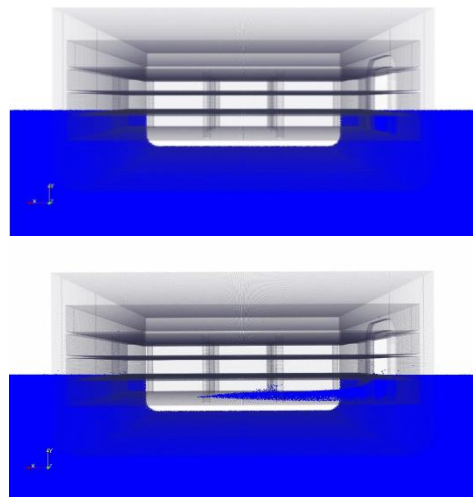


図 11 横揺れの時系列比較 (最下層浸水なし) ( $l_0=0.018\text{mm}$ )

初期粒子間距離  $0.018\text{mm}$  の計算結果について、区画内部の浸水状況のシミュレーション結果を図 12 に示す。これと比較すべき実験映像は図 3 に示してある。破孔が常に空中に露出しており、空気溜まりが起きにくい状況であるため、シミュレーションと実験は似たような結果となっている。



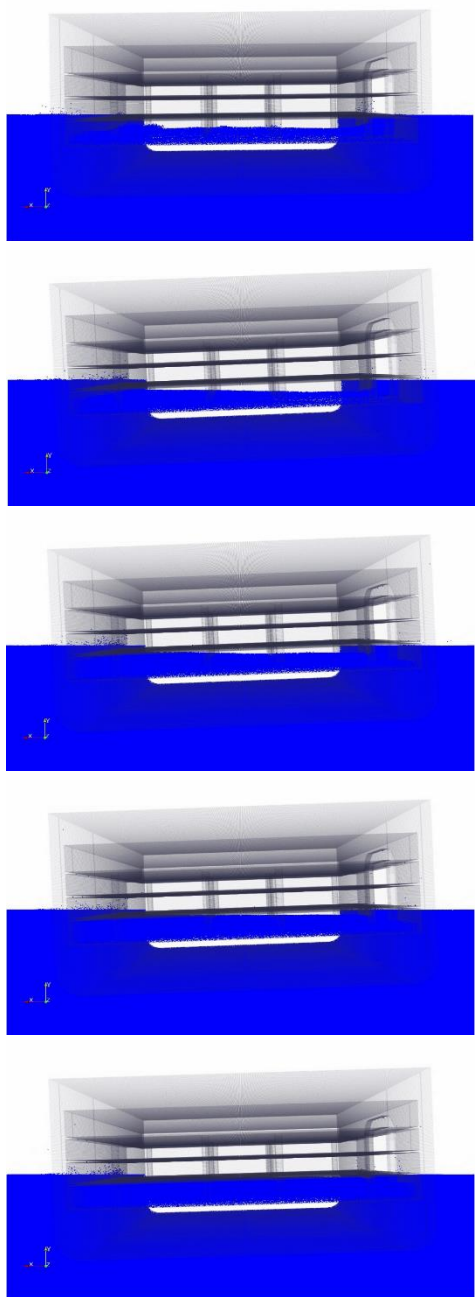


図 12 船内浸水の計算結果（最下層浸水なし）  
 (t = 0.0, 0.5, 1.5, 3.0, 6.0, 8.0, 15.0 sec)

なお、本計算では 2 次元動的スライスグリッドによる各分割領域の粒子数の均等化を行っているが、浸水可能な区画に対して外部領域が十分に大きい場合、領域の動的分割は計算時間短縮にほとんど寄与することはなかった。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度は、空気溜まりの影響を抑えることを目的として新たな条件での模型実験を追加し、昨年

度の最下層への浸水が発生する条件とともに、40M および 100M 超の粒子を用いた浸水シミュレーションを TSUBAME3.0 により実行した。そのうえで、横揺れ・上下揺れの時系列および船内浸水状況について、模型実験と数値シミュレーションの比較を行った。その結果、単一ノードによる 40M の粒子を用いたシミュレーションでは、損傷破孔と反対側への定傾斜という実験結果を再現することができなかったが、4 ノードによる 100M の粒子を用いたシミュレーションでは傾斜方向を正しく評価することができた。この結果は、水が薄く広がる浸水初期の圧力を正しく計算するための粒子数の確保が重要であることを意味している。さらに、最下層デッキへの浸水が生じる場合には、区画内部に滞留した空気の影響を無視できないことが昨年度に示唆されていたが、計算に用いる粒子数を十分に増やすことによって、実用的な計算に求められる予測精度は概ね達成が可能であり、気相の運動を解く必要は必ずしもないことが確認された。また、今回の 100M 超の大規模粒子法シミュレーションにおいては、16 ノードまでの着実なスケールアップ効果が確認できたことから、今後の更なる大規模計算に期待が持てる結果となった。

以上の研究成果を踏まえて、今後は、模型実験とは異なる損傷シナリオに対して、多ケースシミュレーションを実行していくことが望まれる。

## 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

長邊七海, 大規模粒子法による大型クルーズ船の浸水解析, 日本船舶海洋工学会関西支部学生研究発表会 2018, 2018 年 12 月 8 日, 大阪産業創造館

### (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし