

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289317

研究課題名(和文) 損傷船舶の先進的安全性評価に資する数値シミュレーション手法の構築

研究課題名(英文) Development of numerical simulation methods contributing to advanced safety assessment of damaged ships

研究代表者

橋本 博公 (Hashimoto, Hirotsada)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30397731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：粒子法を用いた船体損傷部に働く流体力推定とポテンシャル理論を用いた船体非損傷部に働く流体力推定を組み合わせた損傷浸水時の船体動揺シミュレーション手法について、スケーラビリティに優れた陽的MPS法を採用し、GPUクラスタ上での大規模計算が実行可能な計算コードへと拡張を行った。これにより、浸水解析に求められる十分な数の流体粒子を使用することが可能となり、複雑な内部区画を有する自動車運搬船について、浸水中の過渡的運動や浸水状況の経時変化の定量的な予測が達成された。CADデータからの壁粒子自動生成など前処理でも大きな進展があり、大型クルーズ船への適用においても新たな問題は生じないことが確認された。

研究成果の概要(英文)：Regarding a numerical simulation method for the prediction of ship motions in damaged condition, which combines the estimation of hydrodynamic forces by a particle method for the damaged part and a potential theory for the intact part, an explicit MPS method which has good scalability was adopted and it was extended to a simulation code which can execute large-scale simulation on GPU clusters. This advancement makes it possible to use a sufficient number of fluid particles required for flooding analysis, so quantitative prediction of transient behavior of a Pure Car Carrier during flooding and of complicated flooding in the car compartment was realized. A significant progress was also made in the pre-processing that automatic generation of wall particles from CAD data was achieved. It was also confirmed that something new problems do not arise in the application to a large cruise ship.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：損傷時復原性 浸水シミュレーション 粒子法 GPGPU 大型クルーズ船 自動車運搬船 模型実験 計
算領域分割法

1. 研究開始当初の背景

海に浮かぶ巨大な閉鎖空間といえる船舶において、損傷浸水時の安全性確保は極めて重要な課題である。近年、欧州では旅客フェリーの転覆事故が相次いだことから、損傷船舶の機能要件化の検討や安全性評価手法の構築を目指して、巨額の予算を投入したプロジェクトが継続して実施されており、2009年には国際条約である SOLAS90 が改正されるに至った。今後も更なる厳格化や機能要件化が見込まれており、損傷船舶の安全性を評価するための数値計算手法が不可欠となっているが、現象自体の複雑さもあって、これまでに標準的手法が十分に確立されたとは言えない状況である。

一方、我が国は世界有数の海運国、造船国であるにも関わらず、損傷船舶の安全性研究に関して欧州に遅れをとっているのが現状である。損傷時復原性基準の計算を行うソフトウェアも利用可能であるが、煩雑な計算の取り扱いが可能な半面、ブラックボックス化する傾向にある。

損傷の発生箇所やその程度が損傷時の安全性に及ぼす影響を設計者や運航者が理解し、安全な船舶の設計・運航へとフィードバックさせるためにも、損傷船舶の定量的な安全性評価に資する数値シミュレーション手法の開発が強く求められている。

2. 研究の目的

客船やフェリーなどで極めて重要となる損傷時の安全性確保のために、損傷破口からの浸水を伴う損傷船舶の船体動揺予測、最終平衡状態に至るまでの浸水時間の推定に加えて、浸水後の耐波性能までを統一的に取り扱うことが可能な数値シミュレーション手法を開発する。また、浸水可能な船内区画を再現した大型模型船を用いた実験的検証により、開発した数値計算手法の妥当性や予測精度を十分に検証することで、損傷船舶の先進的安全性評価を実現するための数値シミュレーション手法として確立する。

これにより、造船・海運分野における我が国の国際競争力を向上させ、損傷船舶の安全性研究分野における欧州主導の現状を打破する。

3. 研究の方法

損傷破孔からの船内浸水という複雑な流れを取り扱うために、メッシュフリー法である粒子法をコア技術とした数値シミュレーション手法を構築する。従来は半陰的 MPS (Moving Particle Simulation) 法を用いていたが、スケラビリティに優れる陽解法型の MPS 法を新たに採用し、GPGPU (General Purpose computing on GPU) 技術の導入によりシミュレーションの高速化と大規模化を図る。

GPU で加速された粒子法にもとづく損傷区画内部への浸水計算とストリップ法による

船体周りのポテンシャル流場計算を組み合わせることにより、平水中および波浪中にて損傷船舶に働く流体力を推可能とすることで、損傷船舶の船体運動シミュレーションを可能とする。

さらに、浸水可能な船内区画を再現した大型客船の模型を用いて、浸水時の挙動、浸水時間、浸水後の波浪中船体動揺の計測を行い、開発した計算手法の精度検証を通じて、損傷浸水船舶の定量的な安全性評価に資する数値シミュレーション手法として確立する。

4. 研究成果

はじめに、2次元損傷区画模型を用いて強制横揺れ試験を実施し、MPS 法と SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法によるシミュレーション結果との比較を行った。その結果、両粒子法は破口からの流出入を伴う複雑な流体挙動、区画内外部に働く流体力の高精度な推定が可能であった。また、区画内部に閉じ込められた空気の影響が無視できないため、SPH 法では気液二相流計算、MPS 法ではボイルの法則にもとづく圧縮空気の簡便な取り扱いを提案し、図1のように前者は定量的な予測精度が得られるが計算負荷が高いこと、後者は計算負荷の増大がなく実用的な予測精度が得られることを確認した。

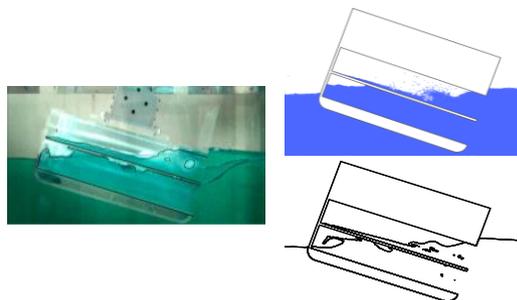


図1 模型実験、MPS 法 (右上)、SPH 法 (右下) の比較

次に、実際の自動車運搬船の車両搭載区画を模したアクリル製の水密区画模型を製作し、内部に浸水させた状態にて強制横揺れ試験を行った。車両移動用のランプを介してデッキ間の滞留水移動が生じるような複雑な流れに対しても、MPS 法は安定した計算が可能であり、流体挙動や流体力についても実用的な予測精度を与える結果となった。車両区画形状を単純化した 2次元計算も行ったが、流体力の計算精度が著しく低下しており、3次元計算の必要性が認識された。また、滞留水挙動に関して区画内部の空気が少なからず影響を及ぼすことを確認した。

ここまでの検討では半陰的 MPS 法を用いていたが、圧力のポアソン方程式の反復解法の計算負荷が高いため、弱圧縮性を仮定した陽的 MPS 法への置き換えを行った。陽的 MPS 法は半陰的 MPS 法に比べて自由表面付近の圧力推定精度が低下する傾向にあるが、計算負荷

の低減およびポアソン方程式の求解時の計算破綻を回避できることが判明した。

この陽的 MPS 法を用いて区画内への浸水影響を含む損傷部に働く流体力を推定し、残りの非損傷部に働く流体力をポテンシャル理論にもとづくストリップ法により求めて、両者の和を船全体に作用する流体力として船体運動方程式を時間領域で解く損傷船舶の浸水時動揺シミュレーションコードを構築した。なお、陽的 MPS 法は CPU ではなく GPU 上で実行が可能な GPGPU コードへと書き換えた。

この計算コードの精度検証を行うため、水密車両区画を再現した自動車運搬船を対象に区画内部への 3 次元浸水が生じる損傷条件での模型実験を行った。200 万粒子を用いた数値シミュレーションと模型実験結果の比較により、これまで予測が困難であった浸水時の過渡的な船体動揺や浸水状況を定性的に再現可能であることが示された。その一方で、デッキ上に広がる薄い滞留水影響など、予測精度の更なる向上のためには粒子数が不足することが認識された。

大量の CUDA コアを有する GPU であっても単一では使用可能な粒子数に限りがあるため、GPU クラスタ上での並列計算が実行可能な大規模計算向けの GPGPU コードへと拡張することで、浸水解析に十分な空間解像度を有すると思われる 2700 万粒子を用いた数値シミュレーションを行った。模型実験結果との比較によって、図 2-4 に示すように浸水中の過渡的な船体運動や船内浸水の経時変化など、損傷時の安全性評価に資する予測精度を有することが確認された。

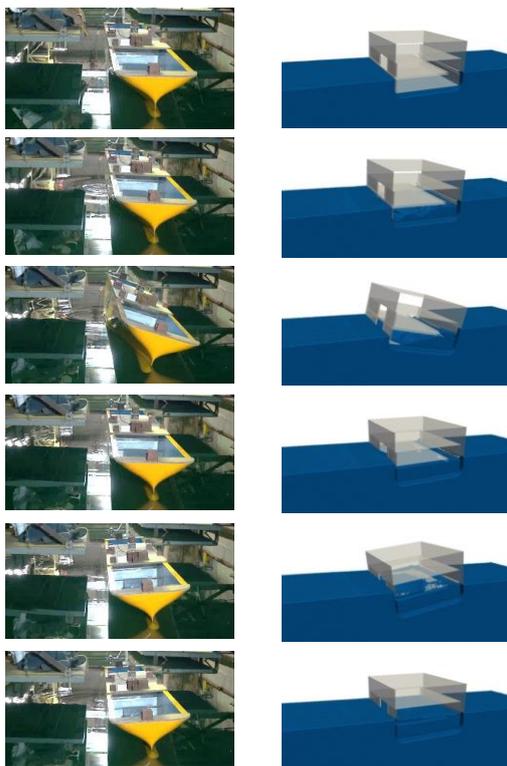


図 2 浸水時の船体挙動の比較

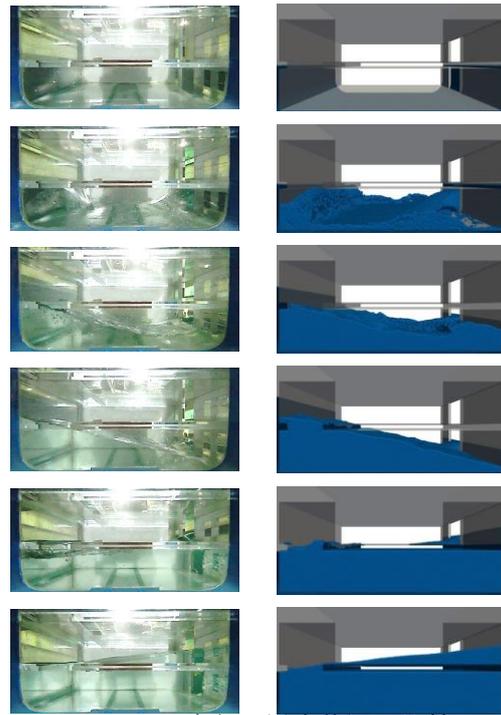


図 3 区画内部の浸水状況の比較

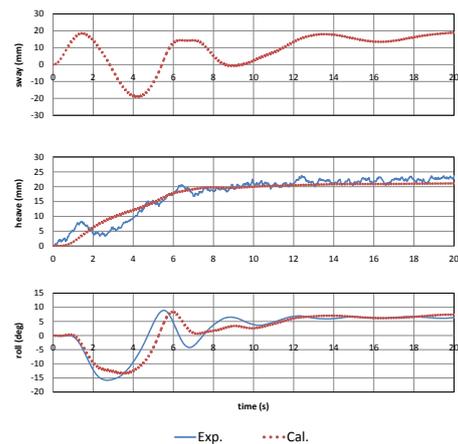


図 4 船体過渡運動の時系列での比較

さらに、舷側や船底に破孔が生じた場合の車両区画の強制動揺試験とシミュレーションの比較を行った結果、デッキ間の滞留水移動に加えて舷側や船底の破孔から流出入が生じるような複雑な状況下においても、図 5 のように損傷区画全体に働く流体力を定量的に推定可能であった。

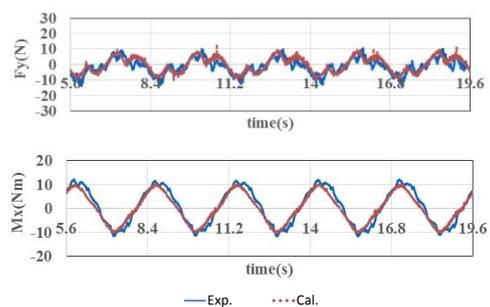


図 5 強制動揺時の流体力の比較

開発した数値シミュレーションの更なる検証のため、多数の乗客が搭乗し、損傷浸水時の影響が大きい大型クルーズを対象に、損傷時復原性の確保が厳しくなる船首部と船体中央部の水密区画への浸水模型実験を実施した。図6に使用した模型船を示す。遠隔で損傷破孔を発生させられる実験システムを用意し、浸水の経時変化、6自由度船体過渡運動および最終的な平衡姿勢などの計測を行った。さらに、損傷浸水後の横波中動揺特性についても模型実験を実施した結果、大規模な浸水が生じても復原性上の問題は生じないが、波浪中では条件によって倍周期の非線形横揺れが発生することを確認した。

実験に使用したクルーズ船の船内区画は複雑であるが、鏡面壁境界条件の導入による壁粒子生成の自動化法を開発することで、複雑な船体形状と内部区画を有する大型クルーズ船であっても、CAD データを用いて計算に必要な粒子の自動生成が可能であり、船内区画への浸水シミュレーションにおいて新たな問題は生じないことを確認した。

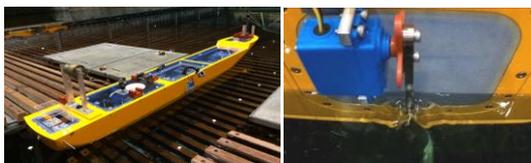


図6 大型クルーズ船の模型実験

本研究課題を通じて、粒子法による浸水影響評価をコア技術とする損傷船舶の浸水時挙動予測法を構築し、GPU クラスタ上での実行を可能とすることで、実際の船舶に対しても適用が可能な数値シミュレーション手法として確立された。粒子法を用いた浸水シミュレーションは少なからず研究事例があるが、相互に大きく影響を及ぼしあう船体運動との連成を解き、模型実験との精度検証までを行った意義は大きい。実問題に適用する際に問題となる計算負荷についても解決されつつあり、構築したシミュレーション手法を用いて大型クルーズ船の浸水解析を進めることで、今後の損傷船舶の安全性評価研究を牽引することが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① 河村昂軌, 橋本博公, 小野寺直幸, 谷口裕樹: 損傷浸水した車両区画の強制動揺シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 24, pp. 553-558, 2017, 査読無
- ② 橋本博公, 松田秋彦, 河村昂軌, 寺田大介: 大型クルーズ船の損傷浸水時の復原性に関する模型実験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 23, pp. 473-477, 2016,

査読無

- ③ Matsuda, A., Hashimoto, H., Kawamura, K., Terada, D.: An Experimental System for Measurement of Dynamics of Damaged Ships, Proceedings of the Techno-Ocean 2016, CD-ROMのため頁数記載無し, Kobe, 2016, 査読有
10.1109/Techno-Ocean.2016.7890720
- ④ 橋本博公, 末吉誠, 河村昂軌, 宗末尚大: 粒子法を用いた複雑形状に対する数値流体解析に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 22, pp. 231-234, 2016, 査読無
- ⑤ 河村昂軌, 橋本博公, 小野寺直幸: GPUを用いた MPS コードの強非線形自由表面流れへの適用, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 22, pp. 225-230, 2016, 査読無
- ⑥ Hashimoto, H., Kawamura, K., Sueyoshi, M., Munesue, T.: Numerical simulation method for dynamic stability assessment of damaged ships, Proceedings of the 3rd International Conference on Violent Flows, CD-ROMのため頁数記載無し, Osaka, 2016, 査読有
- ⑦ Hashimoto, H., Kawamura, K., Sueyoshi, M., Munesue, T.: Comparison of Semi-implicit and Explicit MPS Methods as Flow Solvers for a Flooded Compartment, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 21, pp. 87-91, 2015, 査読無
- ⑧ Hashimoto, H., Kawamura, K., Sueyoshi, M.: Numerical Simulation of Ship Transient Behavior Coupled with Water Flooding, Proceedings of the 25th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 1251-1258, Kona, 2015, 査読有
- ⑨ Hashimoto, H., Grenier, N., Le Touzé, D., Sueyoshi, M.: Investigation of ship flooding situations by MPS and SPH methods compared to dedicated experiments, Proceedings of the 9th International SPHERIC workshop, pp. 395-402, Paris, 2014, 査読有
- ⑩ Hashimoto, H., Kawakami, N., Sueyoshi, M., Le Touzé, D.: Forced Roll Simulation of a Flooded Compartment of PCTC using MPS Method, Conference Proceedings of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 18, pp. 223-226, 2014, 査読無
- ⑪ Hashimoto, H., Le Touzé, D.: Coupled MPS-FEM Model for Violent Flows-Structures Interaction, Proceedings of the 29th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, pp. 69-72, Osaka, 2014, 査読無

⑫ Kawakami, N., Sueyoshi, M., Oger, G.,
Le Touzé, D., Hashimoto, H.:
Capability of MPS for Flooding into a
Damaged Compartment, Conference
Proceedings of the Japan Society of
Naval Architects and Ocean Engineers,
17, pp.5-8, 2013, 査読無

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 博公 (HASHIOMOTO, Hirotsada)
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授
研究者番号：30397731

(2) 研究分担者

末吉 誠 (SUEYOSHI, Makoto)
九州大学・応用力学研究所・助教
研究者番号：80380533

河村 昂軌 (KAWAMURA, Kouki)
海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安
全研究所・研究員
研究者番号：80757724

松田 秋彦 (MATSUDA, Akihiko)
水産研究・教育機構・水産工学研究所・グ
ループ長
研究者番号：10344334

梅田 直哉 (UMEDA, Naoya)

大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20314370

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

寺田 大介 (TERADA, Daisuke)
水産研究・教育機構・水産工学研究所・主
任研究員 (研究当時)

谷口 裕樹 (TANIGUCHI, Yuuki)
神戸大学・大学院海事科学研究科・学術研
究員 (研究当時)

川上 渚 (KAWAKAMI, Nagisa)
大阪大学・大学院工学研究科・博士前期課
程学生 (研究当時)

宗末 尚大 (MUNESUE, Takahiro)
神戸大学・大学院海事科学研究科・博士前
期課程学生 (研究当時)