

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15226

研究課題名（和文）非線形スロッシング及びスワリングと波浪中船体運動の連成解析システムの開発

研究課題名（英文）Development of coupling simulation system between nonlinear sloshing/swirling load and ship motion in waves

研究代表者

馬 沖 (MA, CHONG)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30773197

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：粒子法に基づくタンク内流体解析モデルを改良した。スロッシング模型実験データによって改良した数値モデルの予測精度を検証した。さらに、波浪中粒子法モデルと3次元パネル法モデルを用いたタンク内流体力と船体運動との連成解析を行う両方向連成Hybridモデルを開発した。スロッシング荷重とスワリング荷重が船体運動に及ぼす非線形影響を検討した。LNG船模型実験データを用いて、Hybrid数値解析と線形3次元パネル数値解析の予測精度を検証した。Hybrid数値解析と線形3次元パネル数値解析の特徴性を検討し、Hybrid数値解析結果に基づき、スロッシング減衰を与えることにより、線形数値モデルを改良した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LNGの安定供給と輸送効率向上のニーズに応えるためには、LNG船及びタンクの大型化を図る必要がある。本研究の研究成果に基づき、波浪中LNG船に関するタンク内流体応答と船体運動の相互作用を解析する事が可能であり、LNG船の運航安全性の評価に資する。予測精度が高いHybrid数値モデルと計算効率が高い線形モデルの構築により、最悪短期海象でのLNG船の安全性評価及び長期予測最大荷重の設定に活用できる。本研究で開発した数値モデルはFPSOと呼ばれる生産・貯蔵・積出し用の施設を対象とした解析にも結び付く。粒子法によるスロッシングの解析は、陸上石油貯蔵タンク等汎用タンク内流体解析にも有効活用できる。

研究成果の概要（英文）：A numerical model about sloshing in tank is proposed and enhanced based on the particle method. The prediction accuracy of the numerical model is proved by comparing with the sloshing model test. Moreover, the two-way hybrid coupling model based on particle method and linear 3D panel method is developed to simulate the interactive behavior between sloshing load in tank and 6DOF ship motion in waves. The nonlinear influence of sloshing and swirling load on ship motion is discussed. Both hybrid and linear models are validated against the experimental data of the LNG scale ship model test. The characteristic of both hybrid model and linear model is demonstrated. Based on the simulation results of hybrid model, the sloshing decay parameters is obtained, which can be utilized to improve the performance of the linear model.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：両方向連成解析 LNG船 スロッシング スワリング 粒子法 3次元パネル法 数値計算

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

LNG (Liquid Natural Gas)の安定供給と輸送効率の向上のニーズに応えるためには、LNG 船及び LNG タンクの大型化を図る必要がある。一方で、船体及びタンクが大型化すると、船体運動やそれに伴うタンク内流体挙動が従来と異なってくるため、事故や損傷を未然に防ぐためには高精度数値シミュレーションを活用した安全設計が必要になる。近年、タンク内流体解析と船体運動連成モデルを用いた研究が進んでおり、ポテンシャル理論に基づく手法や粒子法及び格子法に基づく CFD 手法とポテンシャル理論と CFD を連成した Hybrid 手法がその代表的な論文として挙げられる。ポテンシャル理論では流体粘性と乱流を考慮できないため、スロッシング固有周期に対する共振挙動の予測精度は不十分であった。CFD で船体運動を計算するためには、船体周りの広い領域で粒子・格子を作る必要があるため、多くの計算時間を要することが課題となっていた。十分な予測精度と計算効率を確保するために、波浪中船体運動をパネル法で、タンク内流体挙動を粒子法でそれぞれ解析して、両者を連成させる両方向 Hybrid 手法はより合理的だと考えられる。しかし、両方向 Hybrid 手法を用いてタンク内スロッシングとスワリング非線形現象を再現できる数値解析はまだ少ないことから、両方向 Hybrid 手法の有効性のさらなる検証が必要であると考えられる。

2. 研究の目的

LNG 船に関する運航安全性を数値的に把握するため、タンク内非線形スロッシング・スワリング荷重と波浪中船体運動の相互作用を明らかにする。本研究では、タンク内荷重・衝撃圧を高精度で予測できる粒子法の数値解析モデルを構築し、粒子法モデルと 3 次元パネル法モデルを用いたタンク内流体力と船体運動との連成解析を行う両方向連成モデルを開発する。また、本研究において、線形ポテンシャル理論に基づく高速解析手法と、高い精度を持つ Hybrid 手法の開発を行うことにより得られた知見は、LNG 船の設計の高度化に寄与するだけでなく、液体を搭載した浮体の連成応答評価に基づく信頼設計手法の実現に繋がる。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、以下の項目に関する研究を実施する。

粒子法に基づくタンク内流体解析モデルの改良と検証

粒子法で生じる衝撃圧力の非物理的な数値振動を減少させるため、最先端の数値手法を導入し、タンク内荷重と局部衝撃圧力を高精度に予測できる数値モデルを作成する。またタンク模型の強制動揺試験により、作成した数値モデルの妥当性と有用性を確認する。

粒子法と 3 次元パネル法の連成 Hybrid モデルの作成と検証

時間領域で、タンク内流体解析を行う粒子法モデルと船体運動解析を行う 3 次元パネル法モデルを用いた両方向連成 Hybrid モデルを作成する。Hybrid モデルの数値計算により、タンク内スロッシング・スワリングが船体運動に及ぼす影響を検討する。液体タンクを搭載した LNG 船の模型実験データに基づき、Hybrid モデルの数値計算予測精度を検証する。

線形ポテンシャル理論に基づく手法と Hybrid 手法の使用方策の検討

線形ポテンシャル理論に基づく連成モデルの有用性を検討して、適用限界を明確にすることによって本研究で提案する時間領域 Hybrid 手法を適用すべき条件の絞り込みを行い、効率的なタンク設計に資する評価手法を構築する。

4. 研究成果

粒子法に基づくタンク内流体解析モデルの改良と検証 (参考文献 1、2、4)

スロッシング応答の予測精度を改良するため、粒子法の境界条件を改良した。Dummy Particle Condition という境界条件を導入することにより、境界周囲の流体粒子分布と境界に作用する流体圧力の予測精度を向上させることができた。また、曲面境界を実現するため、Smoothed-Boundary Model という手法を提案した。タンク模型の強制動揺試験 (図 1) により、作成した数値モデルの妥当性と有用性を確認した (図 2、3、4)。



図1 模型実験装置

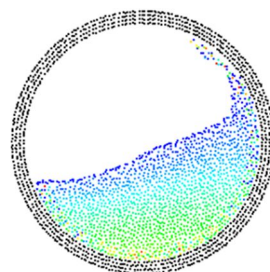


図2 3次元数値解析(中央断面Slice View)

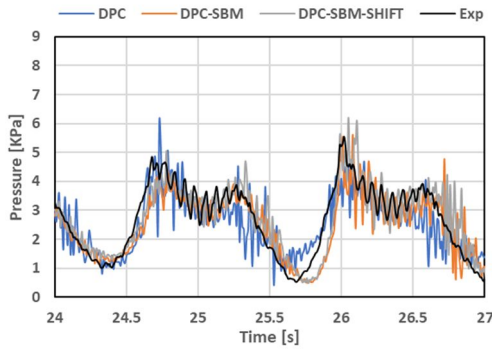


図 3 流体衝撃圧力に関する数値計算の検証

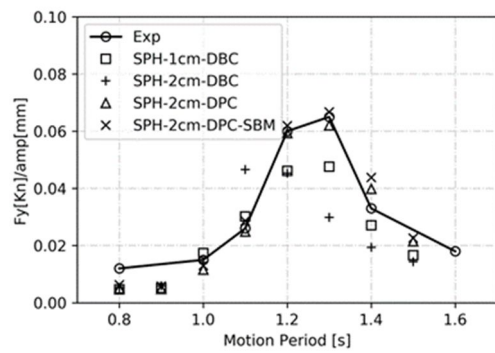


図 4 タンク内流体荷重に関する数値計算の検証

粒子法と 3 次元パネル法の連成 Hybrid モデルの作成と検証 (参考文献 3)
 波浪中船体運動をパネル法で、タンク内流体挙動を粒子法でそれぞれ解析して、両者を連成させる両方向連成解析プログラムを開発した(図 5)。高速大規模並列数値シミュレーションを実現するため、最先端 GPU を活用した並列計算技術を習得し、本研究に活用した。GPU の活用により、従来の CPU 計算と比べて計算効率が大きい向上した。

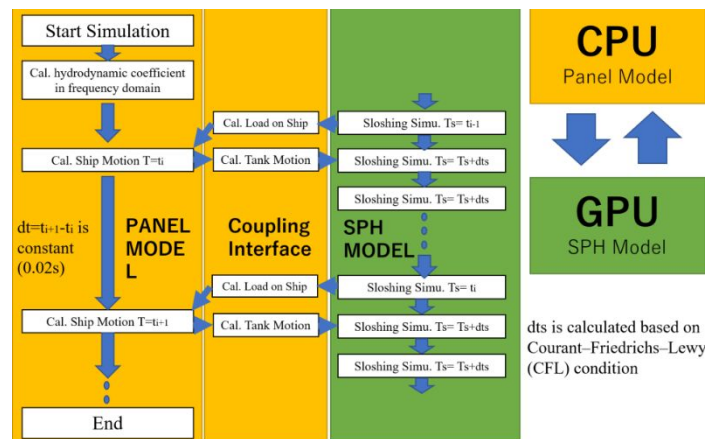


図 5 タンク内流体応答と船体運動の Hybrid 連成計算手順

簡易的な LNG 船数値モデル(図 6)を作成してタンク内スロッシング・スワリングを再現し、タンク内流体荷重が波浪中船体運動に及ぼす非線形影響を検討した(図 7、8)。

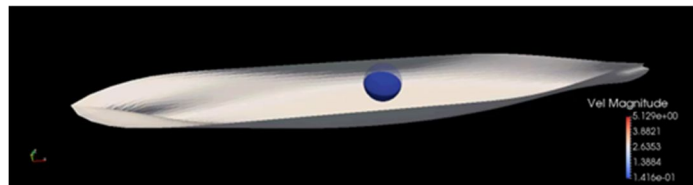


図 6 簡易化した LNG 船数値モデル

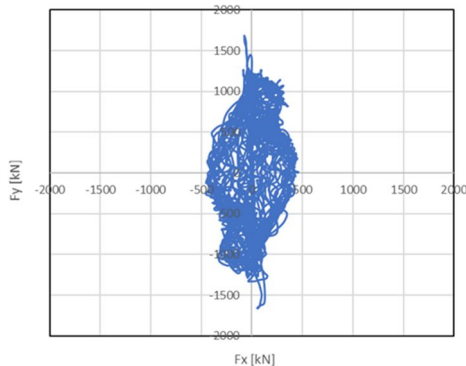


図 7 スワリングが生じる際のタンク内流体荷重

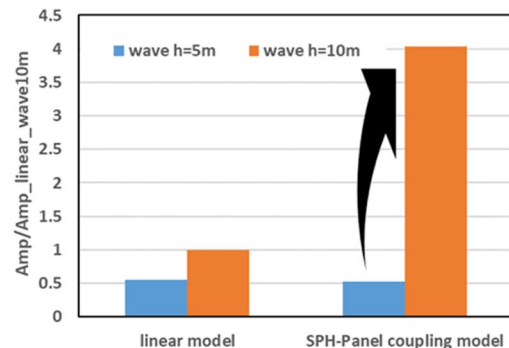


図 8 スワリング荷重の非線形影響(Pitch)

LNG 船模型実験データ（参考文献 5）に基づき、Hybrid 数値解析モデルを作成した（図 9、10）。模型実験データとの比較により、Hybrid 数値シミュレーションの予測精度を検証した。図 11 は遭遇波周期がスロッシング固有周期付近になる時の、Sway と Roll についての比較結果を示している。

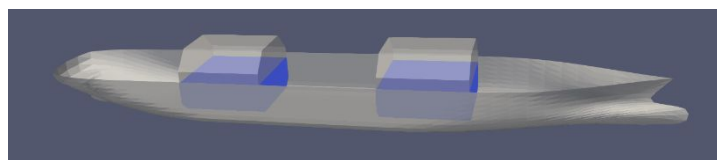


図 9 LNG 船 Hybrid 数値解析モデル

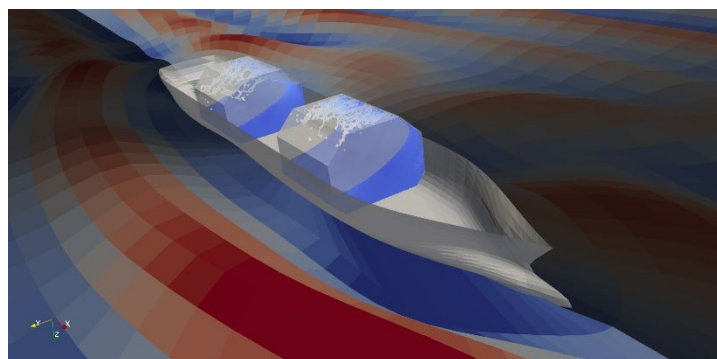


図 10 Hybrid 数値解析に基づいた波浪中 LNG 船の数値解析（横波）

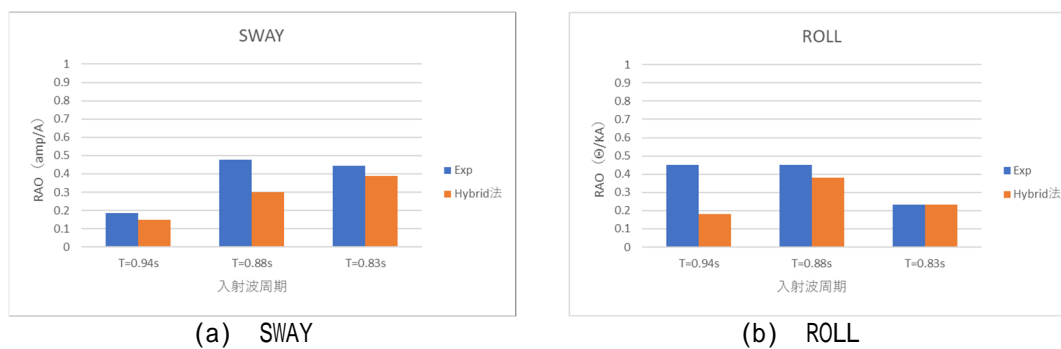


図 11 Hybrid 数値解析と実験データの比較結果（横波）

線形ポテンシャル理論に基づく手法と Hybrid 手法の使用方策の検討（論文作成中）
 線形解析と Hybrid 解析方法の特徴性を検討するため、線形ポテンシャル理論に基づく LNG 模型船の数値モデルを作成した（図 12）。スロッシング固有周期以外は、線形解析法を用いて短時間で計算可能であり予測精度も十分高いが、一方で、LNG 船の事故や船体構造損傷を未然に防ぐためには、スロッシング固有周期付近での最大荷重と、スロッシングが船体運動に及ぼす影響を明らかにする必要がある、線形解析の予測精度は不十分であった（図 13、14）。本研究で提案した Hybrid 法を利用することにより、予測精度を向上させることができた。また、Hybrid 法の解析結果から得た流体減衰係数を線形解析に与えることにより、線形解析の予測を改善できた（図 14）。

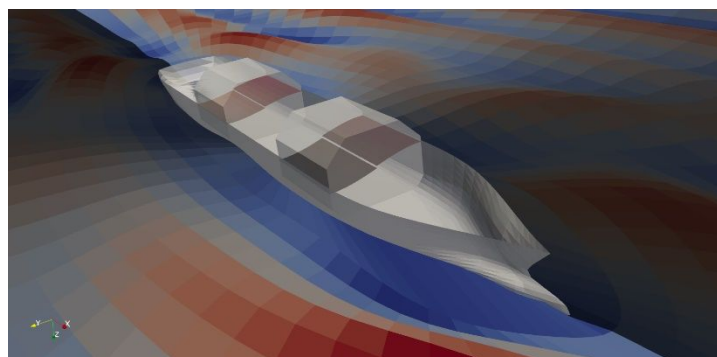


図 12 線形ポテンシャル理論に基づいた波浪中 LNG 船の数値解析（横波）

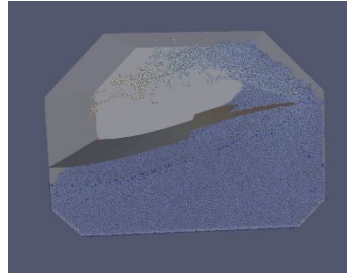
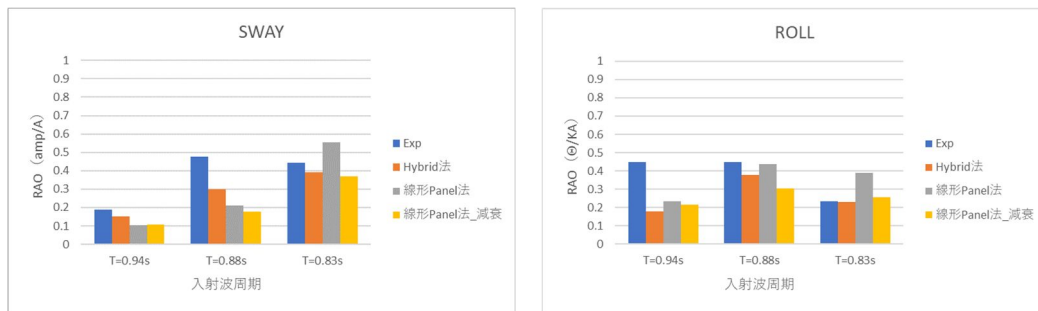


図 13 粒子法及び線形ポテンシャルを用いたタンク内スロッシング応答の予測（横波）



(a) SWAY (b) ROLL
図 14 Hybrid 数値解析、線形数値解析と実験データの比較結果（横波）

< 参考文献 >

1. Ma, C., Ando, T. and Oka, M.(2020).“Numerical Simulation for Sloshing Behavior of Moss-type LNG Tank Based on an Improved SPH Model”, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 30, pp149-160.
2. Ma, C. and Oka, M.(2020).“Numerical Investigation on Sloshing Pressure for Moss-Type LNG Tank based on Different SPH Models”, Proceedings of The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference.
3. Ma, C. and Oka, M.(2019).“Numerical Coupling Model Based on SPH and Panel Method to Solve the Sloshing Effect on Ship Motion in Wave Condition”, Proceedings of The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference.
4. Ma, C.(2021).“Improvement of Boundary Condition for Sloshing Simulation in Spherical Tank”, The 5th DualSPHysics Users Workshop.
5. Arai, M., Karuka, GM. And Ando, H.(2017).“Sloshing and Swirling in Membrane LNG Tanks and Their Coupling Effects with Ship Motion”, Proceedings of International Conference on Design, Construction and Operation of LNG/LPG Ships, Glasgow, UK.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ma Chong, Ando Takahiro, Oka Masayoshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Numerical Simulation for Sloshing Behavior of Moss-type LNG Tank Based on an Improved SPH Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Offshore and Polar Engineering	6. 最初と最後の頁 149 ~ 160
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17736/ijope.2020.ak36	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chong Ma, Masayoshi Oka	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Investigation on Sloshing Pressure for Moss-Type LNG Tank based on Different SPH Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The30th International Ocean and Polar Engineering Conference, Virtual, October 2020.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chong Ma, Masayoshi Oka	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Coupling Model Based on SPH and Panel Method to Solve the Sloshing Effect on Ship Motion in Wave Condition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA	6. 最初と最後の頁 3342-3348
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Chong Ma
2. 発表標題 Improvement of Boundary Condition for Sloshing Simulation in Spherical Tank
3. 学会等名 The 5th DualSPHysics Users Workshop（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------