

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04869

研究課題名(和文) 実海域での自由水の複雑挙動と流体・船体構造の非線形強連成シミュレーション手法開発

研究課題名(英文) Development of numerical method for liquid movement inside of tank and strongly coupling with ship motion and structural response at an actual sea condition

研究代表者

大橋 訓英 (Ohashi, Kunihide)

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：10462871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：重合格子手法に基づき複数タンクと主船体を取り扱い、さらにモード法による構造応答までを連成させた、自由水の挙動から主船体の運動及び船体の構造変形と全体荷重及びスロッシング等による局所荷重を全て同時に推定できる手法を構築した。自由水の変動と主船体の運動の位相差により船体運動が変化するとともに、自由水の荷重と波浪荷重が船体運動とともに構造応答に与える影響を明らかにした。また、模型スケールと実船を想定したスケールでの計算結果の比較により、スケール影響についても確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自由水の複雑挙動から構造応答までを詳細な粘性流場と同時に得られる数値計算手法は前例がなく、開発した計算手法により、短時間で各種パラメータの影響調査、相互干渉を含めた挙動の推定が可能になった。開発した手法により自由水の流体運動から構造応答までを一体とした新たな技術開発につながることが期待される。また、高レイノルズ数流れと自由水の流体運動及び構造応答を一貫させた高速な計算手法は、船舶工学にとどまらない波及効果も見出すことができるものである。

研究成果の概要(英文)：The numerical method which can estimate the liquid movement inside of the tanks, the ship motions and structural response of the ship hull at the same time using the overset grids method and the mode function is developed. The phase difference between the motion of the floating body and the free waters affect the motion of the floating body, and the structural response based on the mode function due to the load of the liquid inside of the tanks and incoming waves is revealed. Further more, the scale effect between the model and full scales is shown.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：数値流体力学 スロッシング 流体構造連成 モード法

## 1. 研究開始当初の背景

船舶の主な輸送物である液体を保存するタンク内の流体運動と流体運動に伴う非線形荷重は、タンクを含む構造設計において重要な要素であり、国際試験水槽会議(ITTC)における試験方法のガイドラインも更新が続けられている。タンク内の流体運動は主船体の運動との連成により強い非線形性を有し、タンク内の液位とも関係してスロッシング現象も引き起こす。タンク内の流体運動に関する研究は、主にタンクのみを対象とした場合と主船体との連成を試みた場合に分けられる。主船体とのタンク内の自由水との連成については、境界要素法やタンク内の自由水と主船体の運動方程式を個別に連成させる方法がとられている。いずれの手法においてもタンクの自由水は剛体モデルとして連成させ、流体の粘性の影響は模型試験の結果から導出して運動方程式の中で考慮されている。

一方、数値流体力学(CFD)は計算機の演算性能の向上とともに大きな発展を遂げている。近年は非定常計算による成果が目覚ましく、船舶の分野でも、さらに複雑な問題をシミュレートする方向へ進んでいる。この傾向は船舶関係の数値流体力学の研究者が一堂に集う CFD ワークショップのテストケースによく現れている。2005年に初めて波浪中のディフラクション問題のケースが設定され、2015年では6自由度を含む大波高、斜波さらには波浪中の自由航走状態のケースが設定された。また、実船スケールへの取り組みも始まっており、実船馬力の CFD による直接推定に関する国際ワークショップが開かれるとともに、PIV による実船流場計測の結果も得られており、計算結果と比較できる状況になりつつある。主船体の構造応答に関する研究も進展しており、波浪場において CFD による主船体の表面圧力を介して有限要素法と連成させる手法や、同様に主船体の構造応答のモードにより計算する手法による成果も公表されている。

以上の背景から、本研究ではタンク内の自由水の挙動と主船体の運動を直接計算により完全に連成させ、強非線形の相互干渉の要素抽出とともに、モード法による主船体の構造応答まで連成させ、波浪場での船体の大振幅運動と自由水の挙動及び船体の構造変形と全体荷重及びスロッシング等による局所荷重を全て同時に推定できるシミュレーション手法を開発することとした。

## 2. 研究の目的

本研究では、タンク単体での自由水の計算手法、さらに複数タンクと主船体を連成させる手法を開発し、計算結果の検証とともに詳細な解析から、相互干渉の要素を解明する。構造応答とのカップリングにより全てを同時に連成させ、タンク内の自由水の複雑挙動から船体構造の応答を推定できる計算手法を構築する。独自の重合格子手法と波浪中での6自由度の運動計算に対応した数値計算手法をベースとして、精度を有しつつ短時間で複雑な挙動を推定するのに十分と考えられる数値モデル等を選定し、タンク内の自由水の流体運動から構造応答までの複雑な干渉を推定する新しい数値シミュレーション手法を構築する。

## 3. 研究の方法

本研究内容は大きく分けて、①タンク単体での自由水の流体運動の計算手法開発②主船体と複数タンクの移動格子手法と重合格子手法によるカップリング③タンク内の自由水の流体運動からモード法による主船体の構造応答モデルまで全てを同時に連成させる計算手法の構築である。始めに、タンク単体において自由水の流体運動を推定する手法を開発する。自由表面モデルには界面捕獲に優れたレベルセット法を用い、タンクの加振には加振を格子の移動速度に変換し、移動格子法を適用する。次に、複数タンクと主船体を連成させる計算手法を構築する。複数タンクと主船体の格子生成には格子配置や複雑形状の扱いに優れた重合格子手法を適用する。主船体の運動はタンクを含めて格子変形と移動格子法により保存則を満たした手法で考慮される。タンク内の自由水による荷重を主船体の運動方程式に流体力として考慮することで、各時刻の流場の収束計算のサブイタレーションの際に、自由水の運動と主船体の運動を双方向カップリングする手法を採用する。最後に、主船体の構造応答まで全てを連成させ、自由水の挙動から主船体の運動及び船体の構造変形と全体荷重及びスロッシング等による局所荷重を全て同時に推定できる手法を構築する。主船体の構造応答にはモード法を適用し、時間精度を有する一貫した計算手法を開発する。

## 4. 研究成果

始めに、タンク単体での自由水の流体運動の計算手法開発を行った。検証結果を有する矩形型の LNG タンクを選定し、タンク壁圧力の時刻歴の計測結果との比較や、格子分割数とタンク長さを変更することによるタンク長さとの比と相関を持つ、タンク内液体がタンク内を回転するスローリング現象の発生有無について考察した。タンクの上でタンクの幅が狭くなるチャンファーを有する形状で、タンク長さは0.971m、タンク幅はタンク長さとの比で0.87から1.08の間で変更した。タンク壁圧力の計測位置は静止時水面下上の位置とし、タンクの運動は

横方向運動で、周波数 0.804Hz、片振幅 0.02m で、タンク内液位は高さ方向で 50%の状態である。2種類の格子分割数を使用して、格子分割数の影響も調査した。図1にタンク内壁の圧力の軸歴を示す。静止時には水面上の位置にあるため、衝撃圧を生じる様子が分かる。格子分割数の影響については格子分割数が多い  $G_2$  格子の場合が実験結果に近く、圧力計測位置が水面下になり衝撃圧を生じた後、圧力が低下し、再び上昇する傾向を再現していることを確認した。図2にスローリング現象が発生する場合のタンク長さ方向と幅方向の流体力の時刻歴を示す。幅方向の流体力の変動が時間とともに大きくなり、横揺れ運動開始後 30 秒程度で長さ方向 ( $F_x$ ) と幅方向 ( $F_y$ ) の流体力が同程度になり、両者は約 1/4 周期ずれて、周期的変動を示すことが分かる。

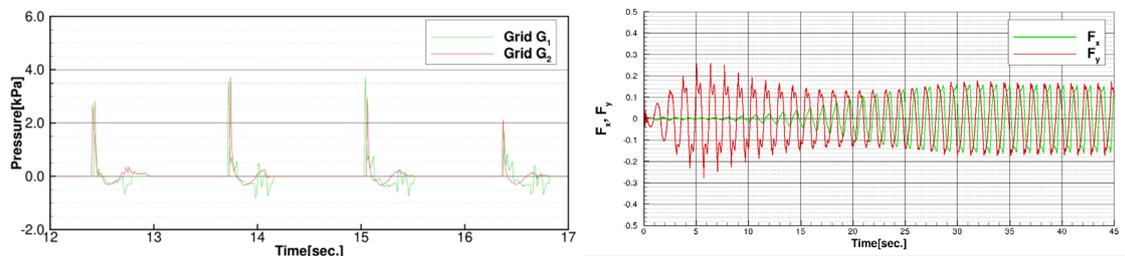


図1 タンク内壁圧力の時刻歴

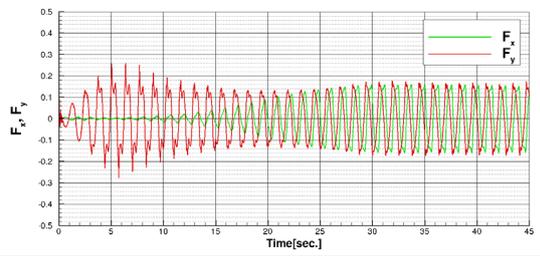


図2 流体力の長さ方向 ( $F_x$ ) と横方向 ( $F_y$ ) の時刻歴

図3にスロッシング状態でのタンク内水面の可視化結果を示す。長さ方向に同一となる2次元的な水面形状で、横揺れ運動の際によく見られる水面形状を有している。図4にスローリングが発生した場合のタンク内水面の可視化結果を示す。スローリングによりタンク内の流体が回転するため、 $F_x$  が最大となる時刻では水面が長さ方向に変形し、タンク後端の壁にぶつかる様子を確認できる。 $F_y$  が最大となる時刻ではタンク側壁の片方で水面が高くなり、もう一方で水面は低くなっている様子を確認できる。可視化から水面が回転する様子を確認し、今回の計算手法においてもスローリング現象を捉えることができたと言える。

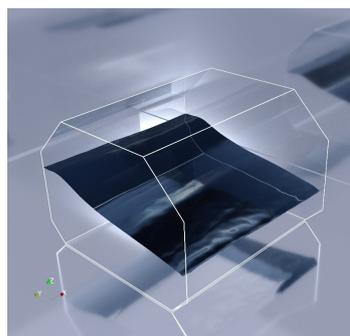
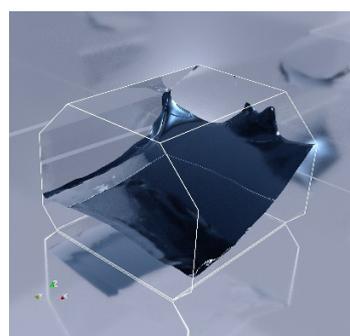


図3 スロッシング状態でのタンク内水面の可視化結果



幅方向流体力最大時



長さ方向流体力最大時

図4 スローリング状態でのタンク内水面の可視化結果

次に、主船体の不規則運動を想定した加振を移動格子法により与えることで、不規則運動中でのスロッシングについて検討を行った。タンク形状は上述のものとし、横方向に不規則加振を与えた。周波数スペクトルには修正型 Pierson-Moskowitz 式を使用し、タンクの運動は各周波数の周波数応答関数から導出される。有義波高 5.76m、平均波周期 9.55 秒の条件のもと、周波数は最小値 0.195 (Hz) から最大値=1.56 (Hz) の間として周波数スペクトルを求める際の最大最小周波数間の分割数についても調査した。図5にタンクの運動の時刻歴の周波数解析の結果を周波数スペクトルにして、周波数応答関数から求められる目標値とともに示す。分割数 200 分割でばらつきが小さくなることから、この分割数を設定した。図6にタンク長さ方向と幅方向の流体力の時刻歴を示す。タンク横方向の流体力は不規則に大きな変動を有するが、長さ方向の流体力は小さく、スローリング現象は発生していない。図7に静止時に水面上にある位置での圧力の時刻歴を示す。規則的なタンク運動と同様に不規則運動においてもスロッシングに伴う衝撃圧を確認でき、大きさは概ね規則運動を与えた場合と同程度である。図8に静止時に水面下にある位置の圧力を示す。衝撃圧は生じていないが、不規則な変動を確認できる。

タンク単体での自由水の流体運動の検証ができたことから、タンク内の自由水の流動と浮体の運動を強連成するシミュレーション手法を開発し、検証を行った。重合格子手法によりタンクと箱型浮体、入射波を生成する矩形格子を重合させ、浮体の運動方程式から得られる変位量を移動格子法により考慮した。対象は箱型の浮体とその内部に矩形のタンク 4 個が設置された状態である (図 9)。入射波は横波とし、タンク内の自由水の影響有無を確認できる波長を選定した。

図 10 に箱型浮体近傍の計算格子を示す。重合格子により箱型浮体と内部にタンク 4 個を配置した。

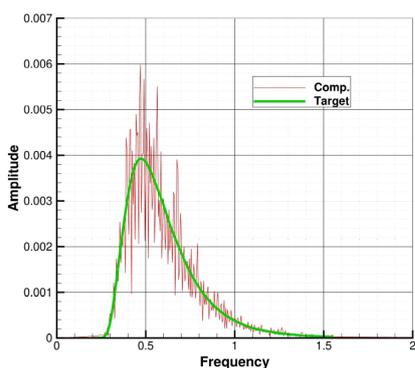


図 5 タンク運動の周波数解析結果

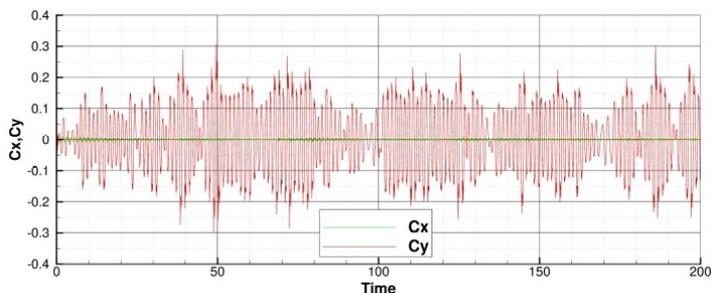


図 6 長さ方向と幅方向の流体力の時刻歴

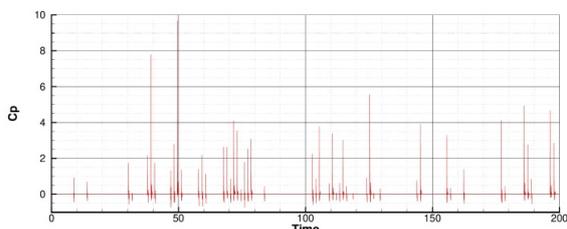


図 7 タンク内壁圧力の時刻歴(静止時水面上位置)

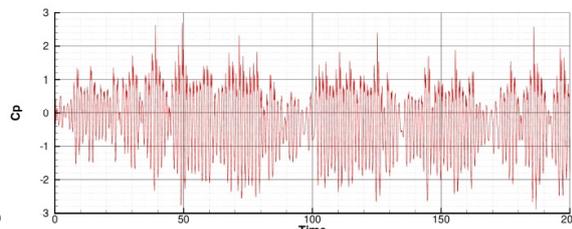


図 8 タンク内壁圧力の時刻歴

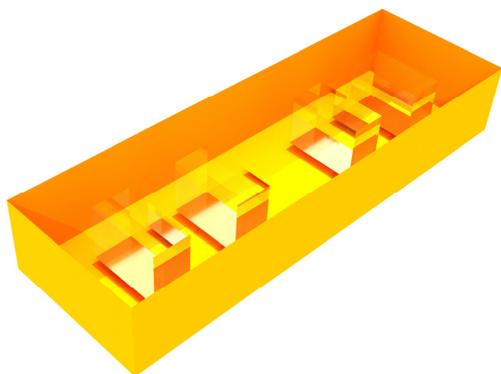


図 9 浮体とタンクの配置

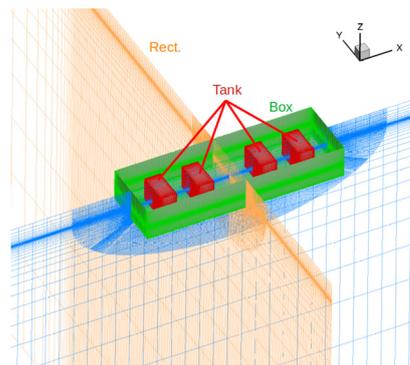
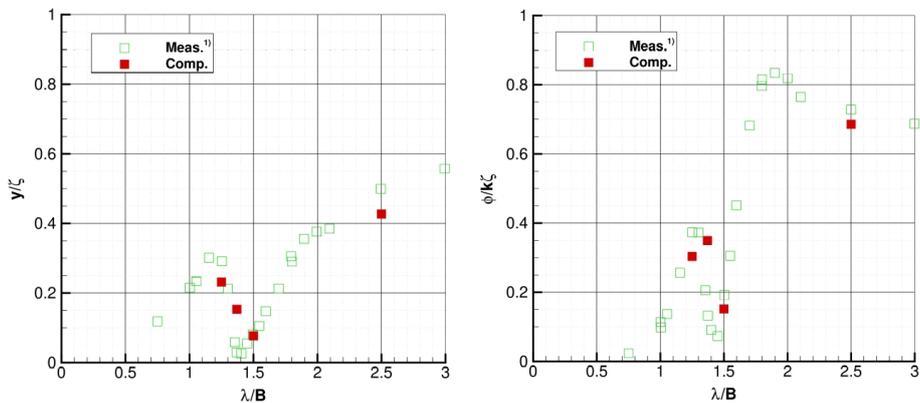


図 10 重合格子による浮体とタンクの再現

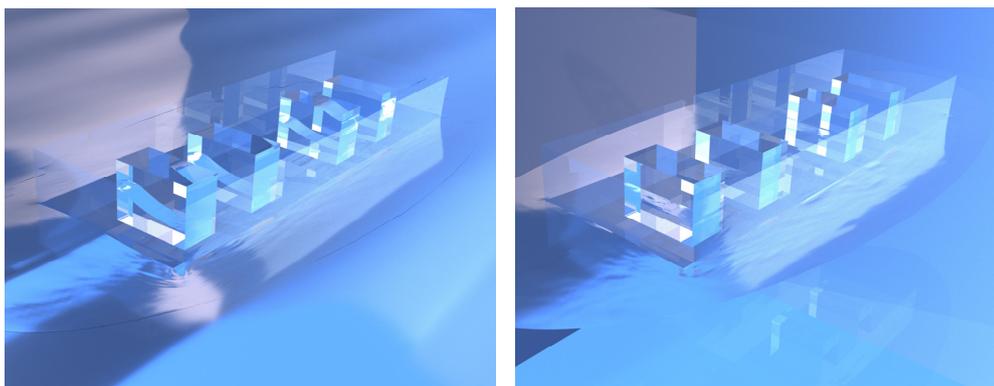
図 11 に入射波の波長幅比を変更した場合の浮体運動の応答関数を示す。波長幅比 1.3 程度まで横方向とロール運動の振幅が大きくなった後、波長幅比 1.5 付近で両運動の振幅が小さくなり、波長幅比 1.5 より上では運動の振幅も大きくなる傾向を確認できる。計算結果は波長幅比 1.4 付近で計測結果より振幅が大きく差が見られるが、概ね再現していると言える。図 12 に浮体周りの自由表面とタンク内水面の可視化結果を示す。波長幅比 1.5 付近ではタンク内水面が大きく変動し、浮体のロール運動との位相差から、浮体運動の振幅が小さくなったことが推察される。波長幅比 2.5 では、ほぼタンク内の自由水に変化がなく、浮体とタンクは大きく運動するものの、タンク内の自由水は静止状態に近いままでとどまる様子を確認した。自由水と浮体の連成計算では計算負荷が高くなることから、重合格子に対応する、分散メモリ型手法と共有メモリ型手法を組み合わせたハイブリッド並列計算手法も並行して開発した。領域分割によるオーバーラップ領域と重合格子のドナーセルとレセプターセルの優先順位を設定することで物理量の過剰な重ねあわせを回避する分割手法を導入して、入射波がある中での並列計算手法の有効性も確認した。



横方向運動の応答関数

ロール運動の応答関数

図 11 浮体の応答関数の比較



波長幅比 1.5

波長幅比 2.5

図 12 浮体周りの自由表面及びタンク内水面の可視化結果

最後に、タンク内の自由水の流体運動からモード法による構造応答モデルまでを同時に連成させる計算手法を構築した。状態は先の条件と同じで波長幅比 0.486 とした。構造応答の条件では、重量分布は浮力に等しいとするとともに、剛性と構造減衰係数を与えた。

表 1 構造応答有無での応答関数

条件	横運動の応答関数	ロール運動の応答関数
模型スケール(構造応答なし)	0.077	0.152
模型スケール(構造応答あり)	0.083	0.155
実船スケール(構造応答あり)	0.084	0.153

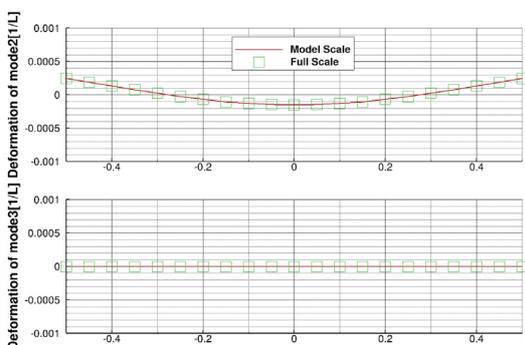


図 13 モード法による構造応答

表 1 に構造応答有無とともに模型スケールと実船スケールでの、横運動とロール運動の応答関数の比較を示す。横運動の応答関数に若干の差が見られるが、構造応答有無、模型及び実船でのスケール影響は、このケースでは、ほとんど見られないことが分かる。

最後に図 13 にモード法に基づく構造応答を示す。上段に 2 次のモード、下段に 3 次のモードの船首(-0.5)から船尾(0.5)の間の変位を示す。2 次のモードが支配的で模型スケールと実船スケールで差異が見られないことが分かる。今回のケースでは箱型の浮体で横波をうける条件から、

船長方向の構造応答への影響が小さいことも考えられ、今後、より実際の船に近い形状等での検討が必要であるが、所期の目標である、タンク内の自由水の流体運動から構造応答までを連成させ、同時に推定できる数値シミュレーション手法を構築することができたと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大橋訓英
2. 発表標題 不規則運動下での LNG タンクのスロッシング計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大橋訓英
2. 発表標題 タンク内流動と浮体運動の強連成シミュレーション
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kunihide Ohashi
2. 発表標題 Numerical Simulation of Sloshing in LNG Tank Including Irregular Tank Motion Using Moving Grid Technique
3. 学会等名 WCCM & ECCOMAS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大橋訓英他
2. 発表標題 船舶の総合性能評価にむけたCFD技術開発
3. 学会等名 海上技術安全研究所 令和2年度研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kunihide Ohashi
2. 発表標題 Development of the numerical method for simulation of ship motions in regular waves with changing wave direction
3. 学会等名 ICCM 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大橋訓英
2. 発表標題 移動格子手法による LNG タンクのスロッシング計算
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019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