

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760784

研究課題名(和文) 外洋設置型柔軟構造体の数値シミュレーションに関する研究

研究課題名(英文) Numerical Simulation of Large Flexible Offshore Structures

研究代表者

末吉 誠 (Sueyoshi, Makoto)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：80380533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円、(間接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は将来の沖合での水産養殖やバイオマス、エネルギー生産などの新しい海洋開発で必要とされる大型の柔軟構造物について、実用的な数値シミュレーション手法を開発することを目的とした。主な内容は大型柔軟構造物のための数値モデルの開発と実用時に必要となる大規模高速計算に関する検討である。開発した数値シミュレーション手法を用いて曲げ剛性を持つケーブルのシミュレーションや、複雑な構造を持つ水産養殖用の大型生簀設備の波浪中挙動についてシミュレーションを行いその有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a practical numerical simulation technique for large scale flexible structures required in future development of fish culture, biomass production and energy generation, is targeted. Main parts are development of numerical model for large scale flexible structures and fast computation method which can treat large and complicated structure. In order to confirm availability of the numerical method, numerical simulations of long cables with the flexural rigidity and motions of fish culture systems which have a complicated geometry in waves are carried out by using developed numerical programs.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：柔軟構造物 数値計算 生簀 ケーブル シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

海洋開発における代表的な構造物である石油・ガスなどの掘削プラットフォームといった鋼製の大規模施設そのものに関しては従来から研究が多く行われているものの、個々の事業規模が現在のところ海底資源開発などに比して相対的に小さい養殖生簀をはじめとする水産・漁業施設に関しては大型化や沖合設置に向けての研究が十分ではなかった。今後の海洋開発においては養殖漁業やバイオマス生産の開発が拡大すると考えられているが、このための施設は従来型の鋼製構造物とは異なり、軽量で柔軟性に富んだ素材で構成される可能性が高い。また従来このような水産養殖設備は内湾などの静かな海域で行われることが大半であり、日本周辺の厳しい海洋環境下では外洋設置の試みはまだ進んでいなかった。しかしながら将来的に捕る漁業から育てる漁業への転換を図り、事業としての大規模化・安定化を行うためには広大で水質汚染や赤潮などの恐れが少ない外洋への進出が求められている。しかしながらこのような施設に見られる索具やブイで構成される柔軟で大規模・複雑な設備に関する沖合設置に向けた工学的な検討や、実用的なシミュレーション手法の開発はいまだ発展途上と考えられた。

2. 研究の目的

本研究課題では当初以下の(1)、(2)を目的とした。

(1) 流れと構造の相互干渉モデルと特殊構造要素の数値モデル開発をはかることとし、従来の係留索に対するランプドマス法などでは取り扱われていなかった部分についてモデル化の検討を行うこととした。

(2) 高速計算により適した数値計算モデルの開発をはかることとし、現代的な計算機システム上で効率的に稼働する高速計算に適合する計算モデルを開発することとした。

3. 研究の方法

(1) 通常の養殖生簀などに用いられる構成素材である繊維ロープなどに関してはすでにランプドマス法が有効なシミュレーション手法であることが明らかになっているため、曲げ剛性や圧縮剛性などを持つ特殊な構造構成要素についての検討を行った。

(2) 現代的な計算機で実用化が進みつつあるマルチコア CPU や GPU を使用する並列計算環境に適合させるため、移植性の比較的高い汎用的な規格であるおもに OpenCL を用いてシミュレーションプログラムの作成を行った。

(3) 複雑かつ大規模な養殖生簀などのシミュレーションを効率的に行うべく、粒子法で用いられるセル分割法の原理を適用した点

間距離計算アルゴリズムを用いて、現実的な大規模生簀係留(図1、図2)に見られるようなブイと索具によって構成される複雑な側張係留に関して接合関係情報などの自動生成を行い、計算を試みた。

図1 大規模な側張り係留の実例

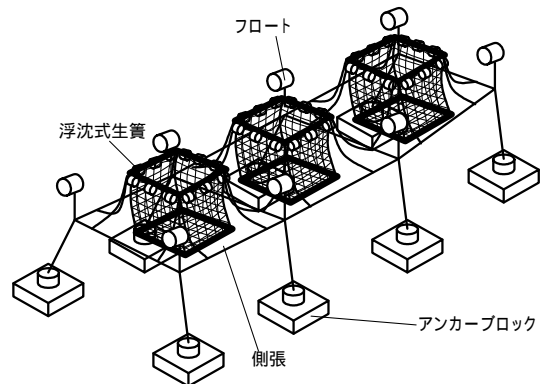
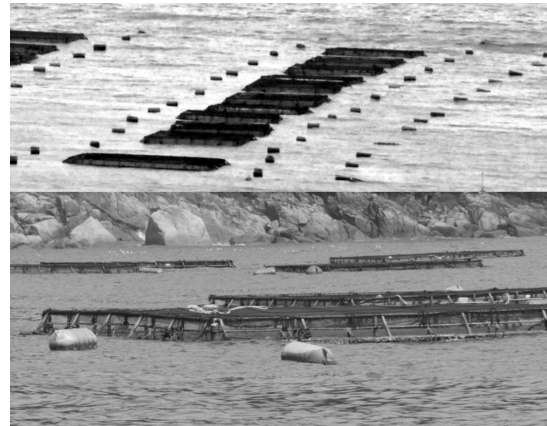


図2 側張り係留の水中部を含めた模式図

4. 研究成果

本研究課題で以下のような成果を得た。

(1) 化学繊維ロープなどと異なり、曲げ剛性や圧縮剛性などを考慮して、通常のランプドマス法に関して拡張を図り、圧縮剛性と曲げ剛性の両方を含むモデルを作成して、数値シミュレーションを実施した。通常の引っ張り時の張力のみを考慮するランプドマス法に単純に圧縮剛性のみを組み入れた場合、実際に線状構造物に圧縮が発生する状況となる状況下では質点として設定するノード位置で折れ曲がりが発生し、不自然なジグザグ変形が発生するが、本研究では曲げ剛性も簡易なモデルではあるが同時に開発し組み込んでいるため、自然な挙動をシミュレーションすることに成功した。図3にランプドマス法とその基本となる運動方程式に関する模式図を示す。本研究で開発するモデルでは曲げ剛性影響の付加と軸方向の圧縮力が張力の負の値になる場合として組み込まれている。これらのモデルが正しく働いていることを示す例として圧縮・曲げ剛性を同時に組み込み、片持ち梁に対して小さな振幅と極端な

大変形の発生する荷重条件を与えて、数値シミュレーションを行った。図4はその先端位置の時系列である。小振幅時の変位量や振動周期は線形理論による解とほぼ一致し、幾何学的非線形影響の出る大振幅振動時は減衰とともに小振幅時の振動周期に近づく自然な計算結果を得た。

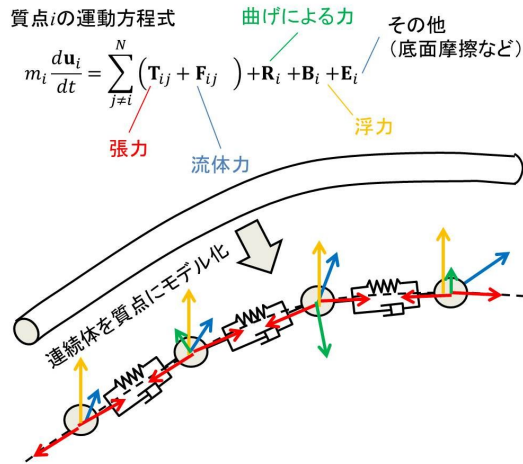


図3 ランプドマス法の運動方程式に関する模式図

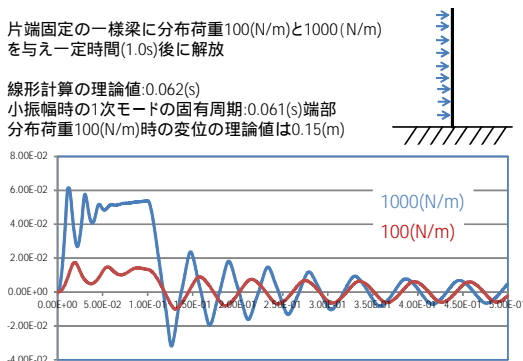


図4 圧縮・曲げ剛性を考慮したランプドマス法による梁の自由振動のシミュレーション例

この計算モデルでは曲げ剛性影響の算出に、三次元的な点間の相対位置ベクトルの変化率から曲率を計算し、それをもとに線上で発生している曲げモーメントを評価して質点に働く力を計算している。これは従来からある点間を結び折れ線の角度に比例するような近似的バネ系を使用するモデルではないため、構成素材の断面形状と材料特性から直接的に評価が可能なモデルとなっている。このため、素材の非線形性やヒステリシス特性の情報を容易に組み込みこむことが可能なモデルとなった。

この圧縮や曲げ剛性が無視できない長大線状構造物に関する問題の応用例として電力ケーブルとそのジョイントに関する沈設計算を試みた。この問題では曲げ剛性や圧縮の寄与発生が予想される剛性の非常に高いジョイント部やベンドリストラクター部といった強い非線形性を持つ部位に関して

一貫したアルゴリズムでの数値計算に成功した。図4にジョイントの沈設計算に関する計算例のスナップショットの一例を示す。この例ではジョイント落下に伴うケーブルの複雑な挙動計算が実施されている。また図5にその際の曲率半径変化を示す。ベンドリストラクター部に課した一定以下の曲率半径時に急激に曲げ剛性が上昇する非線形な特性設定の反映された結果となっていることが確認されている。これらの結果より従来の伝統的なランプドマス法に比較的単純な拡張を施すだけで、曲げ剛性影響のある素材の取り扱いが可能になることを示した。



図5 電力ケーブルジョイントの沈設計算のスナップショットの一例

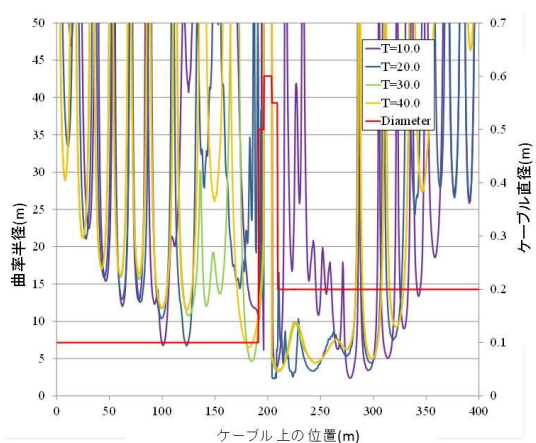


図6 電力ケーブルジョイントの沈設における曲率半径変化

(2) 計算の高速化についてはランプドマス

法をもっとも簡明な陽解法で運動方程式の時間発展部分を解くこととして新たに OpenCL による並列プログラム実装に関する試みがなされた。OpenCL は GPGPU やコプロセッサに対して明示的にメモリ転送などを指定できるプログラミング上の規格であり、計算部分自体は従来と同様の C 言語などのプログラミング言語で記述を行うことが可能なため、汎用性や異なるハードウェアに対する移植性が高く特定のハードウェアメーカーへの依存が少ないため、今後の発展などを期待して選択された。上述の曲げ剛性や圧縮などを含むラプドマス法による計算モデルの実装が行われ、線状構造物に関してはノート PC 搭載程度の GPU を使用しても通常の CPU による演算より約 2 倍程度高速に計算が可能なが確認されたが、複雑な網状構造物の場合は低速な GPU では CPU に対して十分な高速化効果が現時点では得られていない。これは近年の CPU 自体のマルチコア化などによる性能向上と網状構造物の持つ不規則なデータ構造が GPU からのメモリアクセスにおいて不利に働いたものと推定される。このことより今回の開発において OpenCL の採用により、移植性が非常に高いシミュレーションプログラムとなったため、問題に応じて適切な計算機システムを利用した上で、さらなる最適化を進めることができれば将来的には実用問題に使用可能な高速なシミュレーションプログラムになるであろう。

GPU: AMD RadeonHD6630M
CPU: Intel Core i7 2.7GHz Dual core

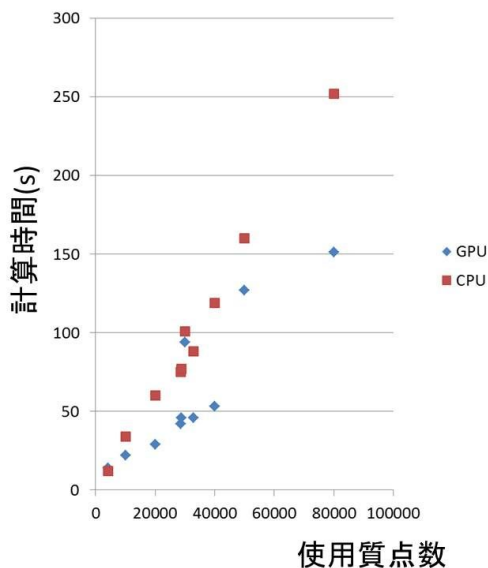


図7 線状構造物のシミュレーション時における GPU と CPU の計算時間比較

またプログラム開発上、比較的新しい規格のために倍精度実数の取り扱いなどにハードウェア・ソフトウェア上の制約が存在する場合があるため、本研究で取り扱うような時間発展的に運動方程式を解く場合、数値シミュレーションプログラムの作成時には精度管理が重要であり、予期せぬ障害となる場合があった。このため現時点では極めて小さい値を累積して計算を行う場合など数値シミュレーションプログラムの開発時には従来以上の慎重なプログラミングが必要であることが判明した。

（3）極めて複雑な柔軟構造物に対するラプドマス法の適用例として、側張り係留に複数の浮沈式生簀を取り付けた状態を模してデータ生成を行い、生簀の沈下状態、浮上状態について数値計算を行った。ラプドマス法による生簀本体単体に関する計算例はすでに存在するが、今回複数個（10基）の生簀を取り付けた状態を模して大型の側張りと類似の状況について設定を行った。図8にその計算例のスナップショットを示す。生簀の沈下により揺れが明らかに小さくなることが示されており、将来的に外洋で大型の水産養殖設備を構築する際はこのような沈下式の設備の設計とすることが単なる動揺性能面のみならず最終的に安全性・経済性実現の観点からも重要であることを示している。

（3）極めて複雑な柔軟構造物に対するラプドマス法の適用例として、側張り係留に複数の浮沈式生簀を取り付けた状態を模してデータ生成を行い、生簀の沈下状態、浮上状態について数値計算を行った。ラプドマス法による生簀本体単体に関する計算例はすでに存在するが、今回複数個（10基）の生簀を取り付けた状態を模して大型の側張りと類似の状況について設定を行った。図8にその計算例のスナップショットを示す。生簀の沈下により揺れが明らかに小さくなることが示されており、将来的に外洋で大型の水産養殖設備を構築する際はこのような沈下式の設備の設計とすることが単なる動揺性能面のみならず最終的に安全性・経済性実現の観点からも重要であることを示している。

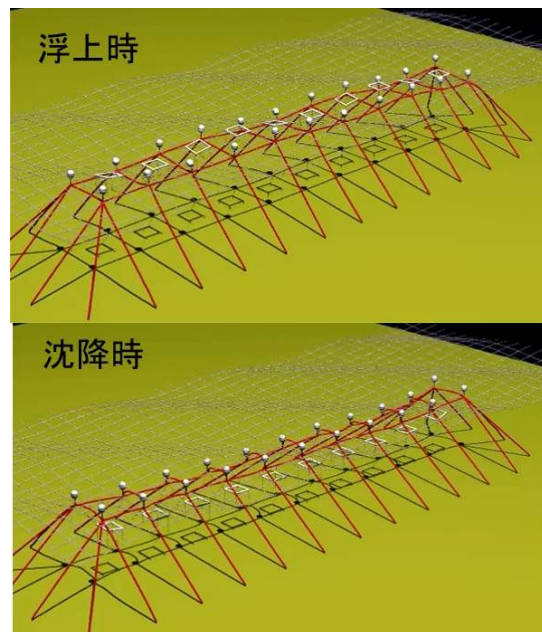


図8 側張り式生簀の波浪中計算例（波高6mを設定）

計算例はこれでも実物に対して極めて単純化しているが、実物の生簀係留はさらに複雑な索具の取り回しを行っている。このような大型で複雑な幾何学構造を持ったモデルを正しく計算のために作成するには計算機による自動生成が有効であり、この計算例では粒子法によるセル分割法のアルゴリズムを利用して点間距離を高速計算し、自動的に距離と点に設定されたフラグを利用して接続関係判定を行っている。この方式ではラプドマス法で計算上設定する質点の座標、線径、部材質量などの情報を入力するだけで自動

的に複雑な接続関係リストを構築することに成功しており、将来的な大規模生簀やバイオマスファームなどの設計を行う際に有効に利用できるものと期待される。

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 1件)

末吉誠、電力ケーブルの海中での過渡的挙動に関する数値計算、日本船舶海洋工学会講演論文集、査読なし、第18号、2014年、pp559-562、

〔学会発表〕(計 2件)

末吉誠、電力ケーブルの海中での過渡的挙動に関する数値計算、平成26年日本船舶海洋工学会春季講演会、2014年5月27日、仙台国際センター

末吉誠、沖合設置型養殖生簀実現に向けた実験と数値計算による研究、日本船舶海洋工学会 海洋工学研究会・海洋環境研究会合同研究会、2013年04月04日、大阪大学工学部 S1 棟

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

末吉 誠 (SUEYOSHI, Makoto)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：80380533