

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420823

研究課題名(和文) 3次元離散渦法を用いた長大弾性管の挙動推定法の確立

研究課題名(英文) Establishment of a Numerical Scheme for Predicting the Dynamics of a Long Flexible Pipe with 3D Vortex Method

研究代表者

千賀 英敬 (Senga, Hidetaka)

大阪大学・工学研究科 ・助教

研究者番号：60432522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：長大弾性管に発生する渦励振も含め、その3次元な挙動を推定するために、流体-構造を連成させた3次元挙動推定手法を確立した。流場の推定には3次元離散渦法を用い、管の変形には有限差分法を用いた。本手法は弱連成であり、3次元離散渦法により得られた流体力を有限差分法の荷重条件とし、有限差分法により得られた変位、速度、加速度を3次元離散渦法における境界条件として方程式を解く。本数値計算手法で用いた3次元離散渦法は、解析対象となる流場内の離散渦数の増加に伴う計算時間の増大が問題となる。本研究では、GPU(Graphics Processing Unit)を用いた並列計算を行い、高速化を行った。

研究成果の概要(英文)：A numerical scheme was established for predicting 3D dynamics of a long flexible pipe including the Vortex Induced Vibration. In this scheme, fluid and structure interaction was considered. The fluid force and the deformation of the pipe were calculated by using a 3D Vortex Method (VM) and Finite Difference Method (FDM) respectively. These two methods were weakly coupled. The fluid forces calculated by using a VM became the input values in the FDM. Then, the deformations, the velocities, and the accelerations were used for the boundary conditions in the VM. The Vortex Method has a feature that the calculation time for one time step becomes longer as the calculation time passes. It is because that the number of the discrete vortices introduced into the flow field increases. In this research, a parallel computing with using GPUs is introduced for the calculation time-saving.

研究分野：海洋工学

キーワード：渦励振 渦法 長大弾性管

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の製造業の継続・発展には欠かせない資源として、レアメタルが挙げられる。中国をはじめとする資源大国は、昨今の経済発展によりレアメタルの自国での保有・消費を開始し、世界的にもレアメタルの需要が拡大している。資源大国が国外への輸出を規制し、国家規模でレアメタルの囲いこみを行った場合、自国に資源を持たない我が国の製造業への影響は多大である。

四方を海に囲まれた我が国は、広大な排他的経済水域を有している。その海底には希少な資源が眠っているとされており、近年、資源量の調査が精力的に行われている。海底資源量の調査およびその技術開発は、現在注目を集めている分野の一つであり、その成功は誰もが望むところである。調査により発見された資源を効率よく開発し、利用することができれば、資源の大半を輸入に頼らざるを得ない我が国にとって多大な利益となる。

海底資源の開発、移送、そして海底の科学掘削には、1本が25[m]程度の管を繋ぎ合わせて長大にした管が用いられている。今後、大水深海域での作業のために、管の長さをより長くする必要が生じる。それに伴い、管の剛性は相対的に低下し、より柔軟な構造物となる。長大弾性管周囲の流れは、波や潮流、管自身の運動などに起因し、時々刻々と変化する。周囲の流れにより、長大弾性管から渦が剥離し、渦励振 (Vortex Induced Vibration) と呼ばれる振動現象が引き起こされる。渦励振は繰返荷重として作用し、長大弾性管の疲労破壊の一因となり得る。激しい渦励振が発生することで、掘削や資源移送作業の中断を余儀なくされる。

従って、渦励振の影響も含めた長大弾性管の3次元挙動の推定は、今後の大水深域での資源開発活動にとって重要な課題である。

### 2. 研究の目的

長大弾性管の挙動に関連する研究は、国内外の研究者によって長年行われてきたが、特に渦励振の推定法は未だ確立されていない。渦励振を含めた長大弾性管の挙動推定法に関しては、流体力の取り扱いに関して下記の3つに大別出来る。

- a) 管の代表断面における流体力を2次元CFDで推定
- b) 管の周囲に格子を生成し、管全体に作用する流体力を3次元CFDで推定
- c) 事前に流体力特性データベースを作成し、対象となる運動の流体力を推定

上記 a) の2次元解析については、長大弾性管の長手方向の分割数により、流体力の推定結果に違いが生じる。長大弾性管のように非常に細長い構造物全体に対して、b) のように流場全体を解く手法は、現象を把握するために有効ではあるが、計算時間の面から未だ実用的ではないと考えた。c) については、実現象で生じる長大弾性管の複雑な運動を含め

たデータベースを、モデルレベルの実験で作成することは困難であり、得られる流体力は2次元性を持ってしまう。

本研究では長大弾性管に働く流体力の3次元性を考慮でき、計算時間の面からも現実的な手法である、3次元離散渦法を用いた。3次元離散渦法は計算領域の流場に格子を生成する必要がなく、渦の移流が支配的な流れ場において有用な数値解析法である。近年では船体周りの流場を推定する研究にも利用されている。本研究では、3次元離散渦法により求めた流体力と構造解析とを連成させ、長大弾性管の3次元挙動を推定する手法の確立を目指した。

### 3. 研究の方法

具体的な研究課題は以下の4つである。

- GPUを用いて高速化した3次元離散渦法
- 3次元離散渦法の流場推定精度検証実験
- 流体構造連成を考慮した長大弾性管の3次元挙動推定手法の確立
- 3次元挙動推定手法の精度検証

これら4つの課題を研究期間の3年間で下記のように実施した。

平成26年度は研究課題の達成するため、GPU計算環境を構築し、3次元離散渦の開発を行った。

研究代表者は本研究の開始年度までに、安価なGPUを用いて2次元離散渦法を用いた流場・流体力の推定手法を開発してきた。まずはこの2次元手法を3次元へと拡張した。

解析対象は長大な弾性管であり、3次元流体力のための大規模計算や渦法の特徴である離散渦数の増加に伴う計算時間の増加を解消するための高速化を行う必要があった。そのため、本応募研究費でGPU(NVIDIA TESLA K20)を搭載した計算機を購入した。その計算機とGPU開発環境CUDAを用い、高速化した3次元離散渦法を確立した。

計算の高速化に関して、GPUマシンを用いるだけではなく、ツリー法やFMM(Fast Multipole Method)など、計算法自体の高速化についても検討を行った。

一方で、長大弾性管の挙動推定に関しては、有限差分法を用いた。この挙動推定手法は本研究の開始以前に開発済みであったが、流体力をモリソン式で推定(前項2.研究の目的に示したc)の手法の一つ)していた。図1にこの挙動推定手法の計算例を示す。同図は6mの弾性管モデルを水中に吊り下げ、その上端を円軌道に沿って運動させた時の模型全体の運動の様子を、正面図と上面図で示している。管の弾性により下端側の運動が遅れており、また運動の振幅(円軌道の半径)が小さくなっていることが確認できる。また、前述の通り、流体力はモリソン式で簡易的に推定しており、管から流出する渦による揚力を考慮していないため、管には渦励振は発生しておらず、また渦励振の影響による抗力の増加も考慮できていない。

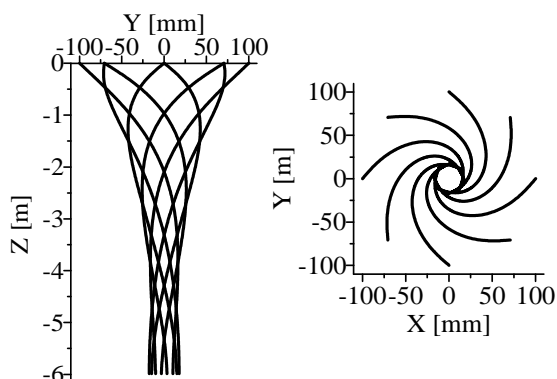


図1 弾性管模型の挙動計算例(有限差分法)

この挙動計算法の中で、流体力を推定する箇所に3次元離散渦法を用いるため、またCUDAの環境下で計算が可能となるように、挙動推定法の計算コードの変更を行った。

平成27年度は研究課題の達成するため、小型回流水槽にて剛体円柱を用いた模型実験を行った。回流水槽内に固定した剛体円柱まわりの流場を2次元のPIV(Particle Image Velocimetry)システムで可視化し、流れを解析した。また剛体円柱に働く流体力も計測する実験を実施した。そして、模型断面取り付けたマーカーをトラッキングすることで、模型の運動を計測した。このPIVシステムを用いた実験手法は、これまでの研究代表者の研究成果により確立してきた。PIVによる流場計測を精度よく行うために、実験は暗室内に入る小型の回流水槽(LxBxD=1.0x0.3x0.3[m])で実験を行った。そのため、剛体円柱模型の大きさは制限され、模型に働く流体力も小さくなる。本応募研究費で実験に適した解像度の3分力計を購入した。図2にこの実験のセットアップを示す。

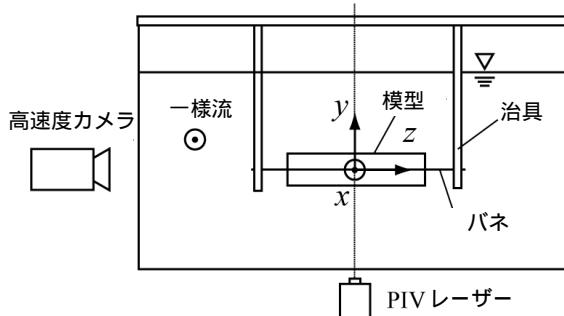


図2 剛体円柱模型を用いた実験

この実験では流体力の3次元性に注目しているため、剛体円柱の両端にエンドプレートを取り付けず、流れの巻き込みによる3次元影響を含めて実験を行った。流れの巻き込みによる影響を比較・検討するための、エンドプレートを付けた場合の実験も行った。

上記実験の解析結果と前年度に開発した3次元離散渦法による流体力の推定精度を検証した。3次元離散渦法による流場解析においてもエンドプレートの有無による比較を行い、必要に応じて3次元離散渦法の改良と精度向上を目指した。

研究課題の達成するためには、既に開発済みの有限差分法による長大弾性管の3次元挙動推定法と3次元離散渦法を連成させ、解く必要がある。流体-構造の連成解析には、強連成と弱連成がある。開発を目指す手法は、アルゴリズムが簡単で計算効率の高い、弱連成を用いた。3次元離散渦法により得られた流体力を有限差分法の荷重条件とし、また有限差分法により得られた変位、速度、加速度を3次元離散渦法における境界条件としてそれぞれ方程式を解き、逐次流れ場と構造応答を解析した。

前述の通り、流体力の推定には3次元離散渦法による3次元の流体力を用いた。長大弾性管から流出する渦は、管自身の運動に大きく影響を受ける。3次元の流体力を精度よく推定するためには、解析対象である長大弾性管の実運動に即したパネル分割が必要であると考えた。長大弾性管の各運動モードにおける“節”と“腹”近傍における流場が重要である。本研究では、この点について着目して3次元離散渦法におけるパネル分割を行い、精度向上を図った。

研究課題の達成するために、研究代表者がこれまでに行った6.5[m]の弾性管模型を用いた強制動揺実験の結果や、その他、国内外の研究者の実験結果、数値計算結果を用いた。

#### 4. 研究成果

長大弾性管の渦励振も含めた3次元的な挙動を推定するために、本研究では長大弾性管に作用する流体力を3次元離散渦法にて算出し、3次元的な挙動を有限差分法にて推定し、両者を弱連成させて解いた。

まず、3次元離散渦法の精度検証のために行った、固定した剛体円柱周りの流れの推定結果と実験結果との比較を図3に示す。両図とも流れの方向は左から右である。両結果とも、模型の長手方向に関する流れのため、模型から剥離した渦は模型と平行ではなく斜めになっていることがわかる。

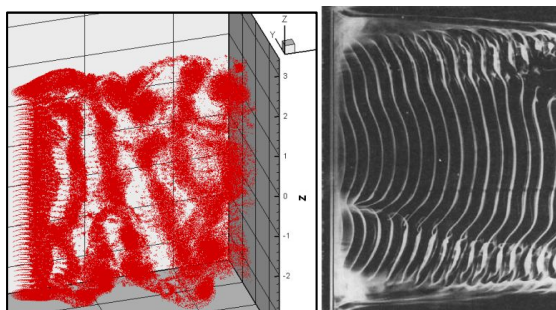


図3 固定円柱周りの流場推定(3次元離散渦法、左)とWilliamsonによる実験結果(右)との比較 Williamson, C. H. K. (1989) “Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers”, Journal of Fluids Mechanics, Vol. 206, pp.579-627

同条件下での模型に働く流体力（抗力係数・揚力係数）の推定結果の時系列を図4に示す。同図より、抗力・揚力係数ともに振動しており、抗力係数の振動周期は揚力係数の倍であることがわかる。2次元の数値計算であれば、計算時間の増加とともに抗力・揚力係数の振動振幅・周期は一定値となるが、本数値計算手法は3次元の離散渦法であり、両係数は一定の振動周期・振幅にはなっていない。これらより、本数値計算手法は一般的な固定円柱に関する実験結果や3次元CFDの数値計算結果と同じ推定結果をもたらすことが確認できる。

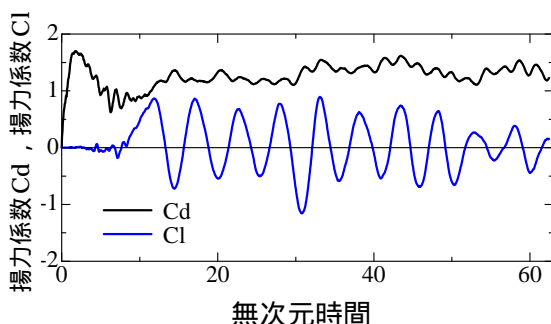


図4 一様流速下に固定された円柱に対する抗力・揚力係数の時系列

次に、本数値計算手法を用いた、一様流速下の弾性管まわりの流場の側面図を図5に、また管に働く流体力の各係数を図6に示す。この計算例は管の両端における管を回り込むような流れ込みがわかるような、短い管（縦横比:10）の結果である。図5において、一様流の方向は左から右であり、模型の下端側が下流に流されていることがわかる。また渦要素の水平方向位置が深さ方向で異なっており、縦横比が10の管であっても3次元性が表れていることが確認できる。これは、管のある断面での流体力を管の長手方向に積分するだけでは正確な流体力を見積もることは出来ず、剥離する渦の位相、つまり長手方向での流体力の位相を考慮する必要があることを示している。

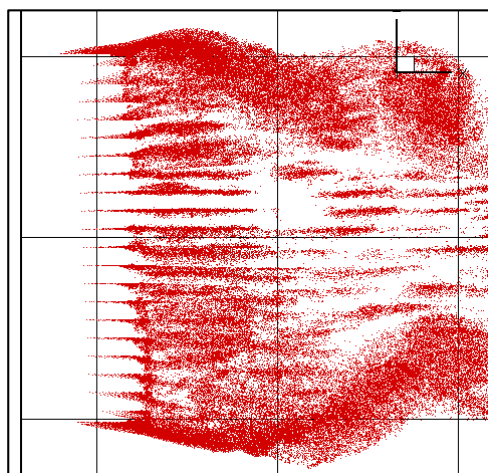


図5 弾性管周りの流場(3次元離散渦法)

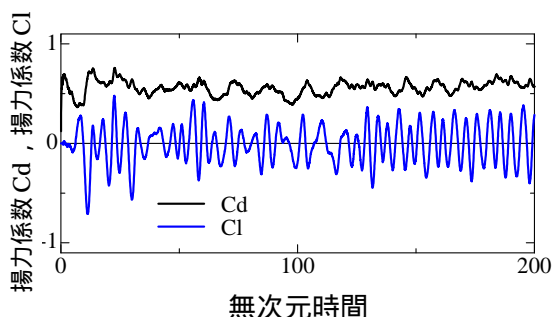


図6 弾性管に働く流体力係数の時系列

図4と図6を比較すると、管が弾性運動する場合の方が抗力・揚力係数ともに小さくなっていることがわかる。これは管に働く流体力が管の弾性運動で消費されるためである。

上記の通り、3次元離散渦法にて流体力を推定し、管の3次元挙動推定には有限差分法を用い、両者を連成させて解く手法を確立した。

本計算手法に用いた離散渦法は、計算時間の進行とともに流場内に導入された離散渦数が増加するため、それに伴う計算負荷を軽減する必要がある。本研究では代表的な計算負荷の低減手法であるツリー法を用いた。また本応募研究費で購入した並列計算用のGPU計算機を用いることで、CPUを用いた計算機よりも高速にはなったが、並列化の処理に改善の余地がある。

長大弾性管の挙動推定手法が確立できたため、本計算手法の有効な利用方法を検討した。渦励振を軽減するための付加物に関する研究は古くからされており、フェアリング、リボン、ヘリカルストレーキ等、様々な形状が考案されてきた。これらの付加物は実機においても利用されている。本数値計算手法で用いた離散渦法は、解析対象となる流場に計算格子を設ける必要が無いため、比較的容易に管の断面形状を変更することが可能である。さらに、本数値計算手法を用いれば、どの位置に付加物を取り付ければ、渦励振を効果的に軽減し、管の3次元挙動を抑えることが可能かを推定できる。

比較検証用データ取得のため、一般的なフェアリングやヘリカルストレーキ以外に、図7に示すような渦励振軽減のための付加物模型の断面形状を検討した。模型は大阪大学創造工学センター所有の3Dプリンタにて製作し、前述の小型回流水槽にて渦励振の軽減性能の検証実験を行った。

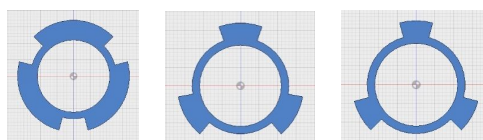


図7 渦励振を軽減するための付加物模型の断面形状

計測項目は、付加物周りの流場、付加物に働く流体力およびバネ支持された付加物の運動（付加物断面の軌跡）の3項目である。この追加実験により、各種の断面形状をした渦励振軽減用の付加物について、軽減性能や各種流体力係数を得ることができた。しかしながら、本数値計算手法との比較は十分ではなく、今後継続して実施する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

Masashi, Hidetaka Senga, Experimental Study on Effects of Helical Strake on Vortex-Induced Vibration, Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, 査読有, Vol. 3, 2016, pp.1145-1152.

Hidetaka Senga, Numerical Scheme for Predicting Vortex Induced Vibration of Slender Structures using Vortex Method, Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Violent Flows 2016, 査読無, Vol1, 2016, CD-ROM.

Hidetaka Senga, Carl Martin Larsen, Experimental Investigation of Cylinders with Helical Strakes, Conference Proceedings of 2015 Annual Spring Meeting, 査読無, CD-ROM.

〔学会発表〕(計 3件)

Masashi, Hidetaka Senga, Experimental Study on Effects of Helical Strake on Vortex-Induced Vibration, Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, 2016, Rhodes, Greece, June 26 - July 1.

Hidetaka Senga, Numerical Scheme for Predicting Vortex Induced Vibration of Slender Structures using Vortex Method, Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Violent Flows 2016, I-site Namba, Osaka, March 9 - 11.

Hidetaka Senga, Carl Martin Larsen, Experimental Investigation of Cylinders with Helical Strakes, 2015 Annual Spring Meeting, Kobe International Conference Center, Hyogo, May 25 - 26.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

千賀 英敬 (SENGA, Hidetaka)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：6 0 4 3 2 5 2 2