

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01636

研究課題名（和文）深層中層表層の流速を高精度推定する「海流速度鉛直プロファイリングシステム」の創出

研究課題名（英文）Development of a system for vertical profiling of ocean flows in deep, middle, and shallow layers

研究代表者

西 佳樹（Nishi, Yoshiki）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70470052

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：海の流れが鉛直方向の分布を推定するための新しい方法を創るための研究を行った。海の中で縦の方向に伸びる長くて細い構造物を吊り下げ、その振動を計測し、それを基に構造物まわりの流速を推定する手法を構築した。流れにより細長い構造物が振動する現象を実験で再現しその特徴を明らかとした。振動の計測結果を用いて、振動を起こす要因である流れを推定するための理論をつくり、その流れの推定性能を調べ有望な結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海の流れがどちらの向きにどの程度の強さかを知ることは利点がある。第一に海で起きる現象の解明に繋がる。第二に海から資源やエネルギーを獲得する技術を設計する基礎情報となる。これまで、人工衛星により表層の流れを水平面上で広く観測することは可能であった。その反面、表層から深層に全水深にわたる鉛直方向の情報を得る技術は十分ではなかった。本研究で提案する方法により、流れの鉛直方向分布が把握できる様になる。

研究成果の概要（英文）：This study invented a method for estimating how strengths and directions of ocean current are distributed in the vertical direction. A long and slender flexible body is submerged. Being surrounded by the current, the body always vibrates, which can be measured using sensor. A theory was constructed for estimating the current based on the measured vibration. Experiments were carried out to reveal the interaction of the body and current, then numerical calculations were performed to verify the extent to which the theory can estimate the true distribution of current.

研究分野：海洋環境

キーワード：海洋環境 最適推定 流体構造連成

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海の表層から深層にいたるまでの海流速度の分布を知ることは、海で起こる現象を解明するために重要である。また、海は昨今、利用する場所としての性格を急速に強めている。流れや波などの自然エネルギーの供給源として、さらに海底資源(石油・天然ガス・メタンハイドレード・鉱物)の採取場所として、利用する場所としての価値が高まっているためである。海洋を資源やエネルギーの採取場所として工学的に利用するには、海流分布情報が重要な意味をもつ。これまで、流速計、人工衛星を用いて海流に関する多くの知見が得られてきたものの、深さ方向のデータ獲得には改良の余地が残されている。海底資源を採取する目的で洋上から海底に至る長大な構造物(最大で数千メートル)を設置する際には、その構造物が海水から受ける荷重の推定や、流れが引き起こす構造物の振動を抑制するために、流れの深さ方向の情報は設計上欠かせないものである。深さ方向の情報が得られれば、それを人工衛星による水平 2 次元のデータと組み合わせることで、3 次元の流速データセットを構築できる発展性もあると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究は、海の表層から深層にいたるまでの海流速度の鉛直分布を知る新しい手法をつくるために、水中線状構造物の変形・振動現象を利用する手法、「海流速度鉛直プロファイリングシステム」を創出する。そのために、その変形と振動のシミュレーションと計測、およびシミュレーションと計測との融合手法を順次確立する。

### 3. 研究の方法

本研究では、水中線状構造物の変形を記述する構造力学、変形の要因である流体力を記述する流体力学、計測とシミュレーションとから最適推定値を算出する最適推定理論の3つからなる複合的手法を構築した。この手法を3つのパートに分け、各々のパートにおいて課題および目的を次のように設定した。

#### (1)シミュレーションパート:水中線状構造物の流体構造連成解析手法の実装(平成 30 年度)

研究代表者が既に開発した流体構造連成解析手法を、重り付きのつりさげ型構造物へと適用できるように改造した。その後、数値計算を実行し結果を文献値と比較することで検証し、必要に応じて改良した。精度/効率/安定性を兼ね備えた手法を実装した。

#### (2)計測パート:水中線状構造物の変形計測法の開発(平成 31 年度)

流体の中に構造物が設置されている状況では、その構造物に流体から力学的な力が作用し、その結果、振動を呈することが知られている。その振動がどのような力学的機構で発生するかを解明することは流体構造連成力学的に有意義で、また海洋構造物の安全設計づくりに役立つ。本研究では、2つの構造物が近接して設置されている状況を再現する小型模型を用いて実験を実施し、上記の機構解明を試みた。この実験では、回転する棒(図1の )に、下半分を半没水させた剛体円柱(図1の )が縦に取り付けられている。これにより、棒による束縛を受けた2円柱の流体力学的相互作用が振動に与える効果を見出すことを目的とした。

2つの円柱の周囲に流れを起こすために、小型の回流水槽を用いた。円柱近傍の流体の挙動を解析するために、流体中に粉末を混入させ、その粉末の動きをレーザー光線によって追跡する手法(Particle Image velocimetry)を採用した。また、棒

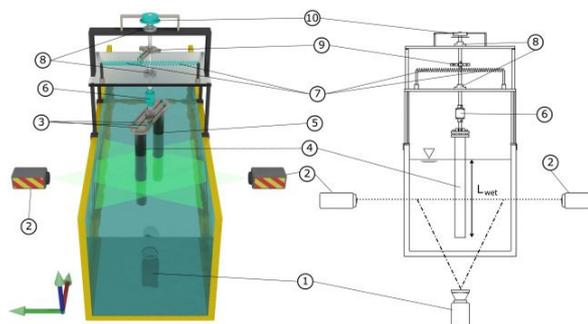


図1.水槽実験装置の模式図

の回転をバネ(図1の )によって支持することで、この力学系を振動系とし、長大な構造物のもつ弾性を模擬した。

棒の回転中心から2つの円柱までの距離は変化させることができるように装置を設計した(図2)。これにより、近接の度合いによる影響を考察した。

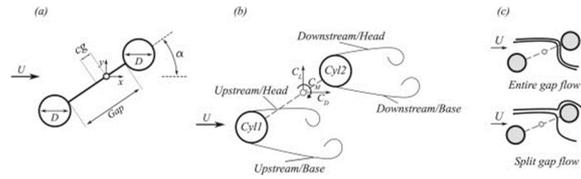


図2.近接する2つの円柱の模式図

(3)融合パート:水中線状構造物の周囲の流れ分布を推定する手法の確立(令和元年度)

最適推定理論を基にして、上記(1)の解析手法と(2)の計測法とを融合させ、本研究の主目的である、流れの推定手法を確立させる。最適推定理論としては、アルゴリズムのシンプルさ・非線形現象への適用性の観点から Unscented カルマンフィルタ(UKF)とスパースモデリングを用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 流体励起振動機構の実験的解明

図3は結果の一例である。この図では流れは右向きである。黒い部分は円柱である。円柱の下側と上側にそれぞれ正と負の渦度が集中している様子が捉えられている。右向きに流れる流体が円柱近傍において渦度を獲得しながら渦が発生している。この効果により揚力が発生する。この揚力は、流れと同じ向きの力(抗力)とともに、回転棒の運動にモーメントとして作用する。これら流体による力と、振動の大きさとの関係を示した。これにより、回転系に組み込まれた近接2円柱が示す振動の特性を明らかとし、また、その振動に関与する渦の力学を提示した。

図4は流速を変化させた場合に、振動の振幅と振動数とがどのように変化するかを調べた結果である。2円柱の距離に依存して顕著な振幅を呈する流速が変わることが示されている。またその状況における振動数は振動系の固有振動数に近い。このことは、この振動を励起する機構は流体が粘性を有することに起因することは共通するものの、その渦と運動する構造物との相関の詳細が、2円柱距離に応じて変化するからと解釈される。

##### (2) 水中構造物周りの流速場推定法の開発

本研究は、前節で示した流体と構造との連成についての知見を基盤として、水中線上構造物のまわりを流れる流体の速度を推定する手法を創り出すことに主眼がある。このことを鑑みて水中線上構造物は、上端が浮体(船舶)に固定され、下端には重りが付加された形状をもつものとした。

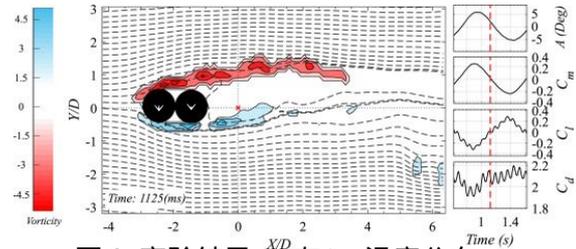


図3.実験結果。(左): 渦度分布、(右): 回転角度、付加質量係数、揚力係数、抵抗係数の時間変化。

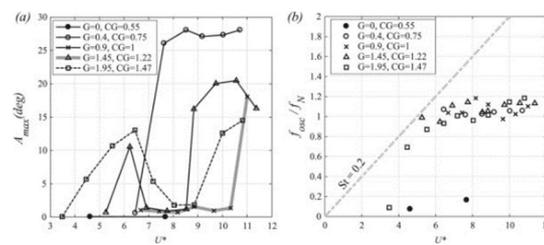


図4.実験結果。(左): 流速(無次元値)と振動振幅(角度)との関係、(右): 流速(無次元値)と振動数との関係。

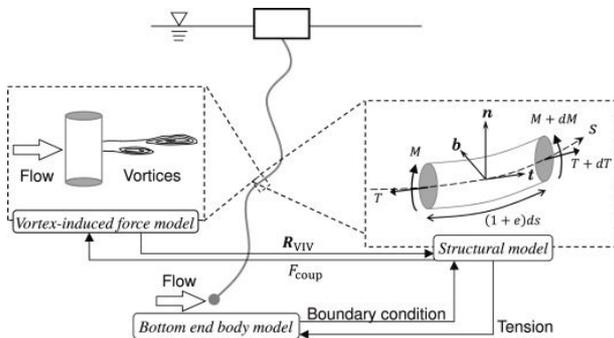


図5.海流速度鉛直プロファイリングシステムの模式図。矢印は、水中線上構造物まわりの流れがおよぼす流体力モデル、構造モデル、下端重りのモデルの関係を表す。

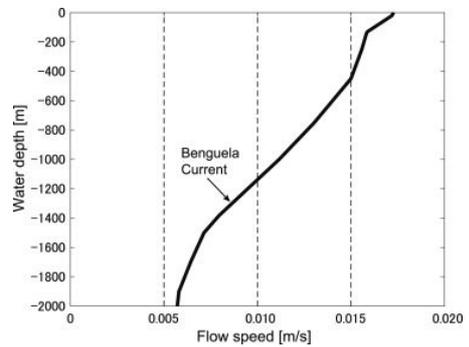


図6.ベンゲラ海流の流速鉛直分布。

この構造物を上端単純支持の弾性梁としてモデル化（数式を用いて現象を近似的に表現すること）し、その外力としての流体力もモデル化した。また、下端重りの運動も力学モデルとして記述し、これら複数のモデル間を理論的に連成させた（図5）。この連成されたモデルを数値的に解くプログラムを実装した。

ベンゲラ海流域（図6）に水中線上構造物を設置することを想定した問題に本プログラムを適用した。

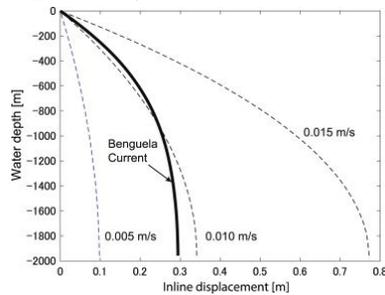


図7.水中線状構造物の変位（流れと同じ方向の成分）。破線：鉛直に一樣な流速分布を与えた場合、実線：ベンゲラ海流の鉛直分布（図6）を与えた場合。

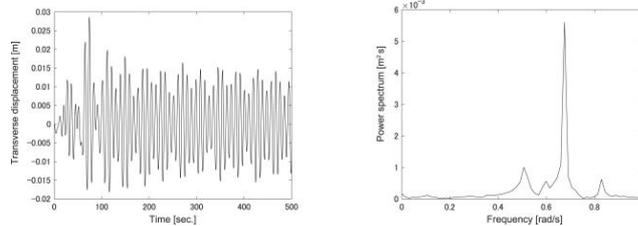


図8.水中線上構造物の一点の変位（流れに垂直な向きの変位）。（左）：時間変化、（右）：時系列の周波数スペクトル。

上述の結果は、構造物の振動のシミュレーションである。次に実施したのは、構造物まわりの流速を推定することである。振動を計測することが可能という仮定の下で、計測から得られた情報から、振動を起こす要因である流れの流速を推定する手法を構築した。

最初に、剛体円柱まわりの流速推定（図9）という実際よりも単純化させた現象を取り上げた。これは構築した推定手法の性能を試験するためである。

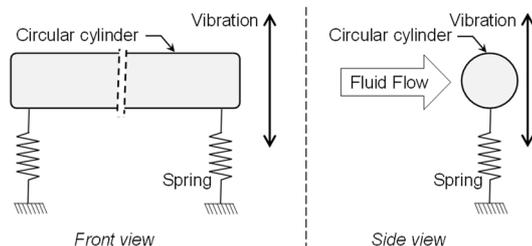


図9.バネに支持された剛体円柱の模式図。この円柱は流れの中に置かれ、流れに直角な方向に振動する、という力学系である。

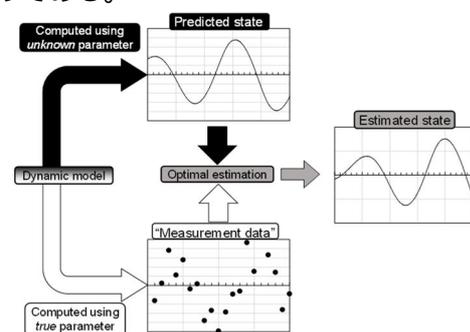


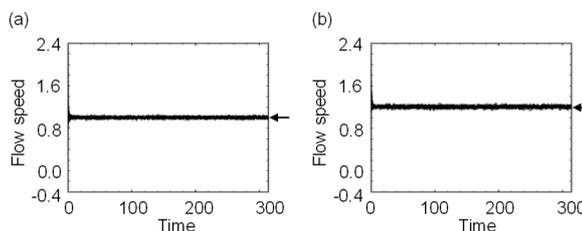
図10.推定手法のアルゴリズムの模式図。未知数（流速）の予測計算（黒矢印）と、計測から得られるデータの処理（白矢印）との結果を統合し（灰色矢印）、未知数の最適な推定値を獲得する。

本研究では最初に、Unscented Kalman Filter (UKF) を実装した。流体励起振動は非線形

性を有するため、カルマンフィルターの発展形態のひとつで非線形系に適用可能な本手法の適用を試みた。

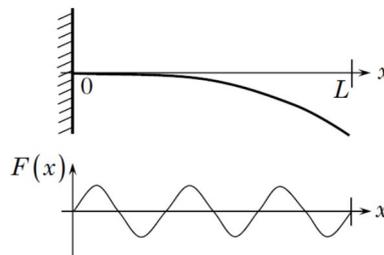
図 1 1 は推定結果の一例である。推定計算開始後直ちに真値に収束した。本問題に対しては、実装した手法が良好な推定機能を発現することが示された。

図 1 1 .剛体円柱まわりの流速を推定した結果。推定値の時間変化（黒線）、流速の真値（ $\bullet$ ）。



次に、剛体ではなく、弾性を有する梁まわりの流速を推定することを試みた。この梁に、図 5 に示した構造と同様に、一端は支持され、他端は自由に動くという境界条件を課した。この梁に外力が作用することで梁が変形する。この梁の運動を加速度計、ひずみゲージ（物体のひずみを検知する計測装置）、変位計のいずれか、あるいはこれらの組み合わせで計測

図 1 2 .(上)梁モデルの模式図。左端の変位は固定されている、右端は自由端である。(下)梁に作用する外力の分布。



した場合は想定した。

この問題に対しては、上述の UKF とは異なる手法を構築して用いた。直交関数のひとつであるチェビシェフ多項式で展開する形で外力を表現し、この展開係数を推定するアルゴリズムを考えた。ここで構築した手法は、推定誤差を評価基準がカルマンフィルター系列のものとは異なっている。カルマンフィルター系の手法では誤差評価に滑らかな関数をつかうのに対し、本研究で採用した手法では滑らかではない関数（直線の折れ曲がり）を用いた。誤差を評価する関数が滑らかでなくすることで、計測情報が少なくても真値に辿り着きやすいようにとの配慮から来ており、スパースモデリング（進展著しい推定手法）という計算技術からアイデアを借りた。

図 1 3 は結果例である。左図はチェビシェフ多項式展開の係数の瞬間値である。ある特定の次数のチェビシェフ多項式の係数のみがゼロでなく、それ以外の大部分のものはゼロのままである（スパース性）。これは、外力分布が極めて高い波数の成分を持たない限り、有限数の展開で十分に分布を近似可能であることを示している。中央図は外力の分布である。真値がもつ波動の形の分布をほぼ完全に再現している。右図は梁の或る一点における外力の時間変化を表している。推定値は真値にほぼ完全に重なっており、推定が良好に行われた

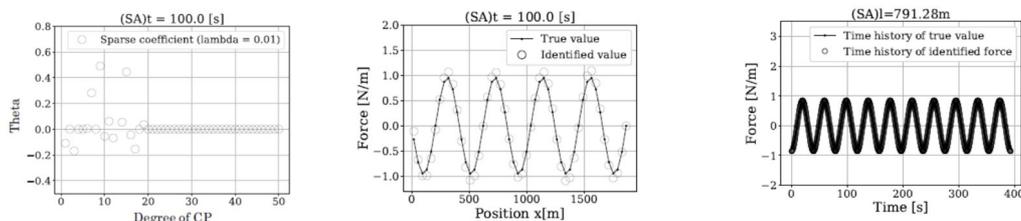


図 1 3 .弾性梁に作用する外力推定の結果。(左): チェビシェフ多項式展開の係数（瞬間値）、(中央): 外力分布の瞬間値（ $\circ$ : 推定値、実線: 真値）、(右): 梁の或る点における外力の時間変化（ $\circ$ : 推定値、実線: 真値）

ことを示している。

以上の結果から、当初目的とした水中線上構造物まわりの流速を推定する手法の構築は概ね達成できたと判断する。計測機器の耐水性を考慮に入れた検討を行うことで、より現実に近い条件でプロファイリング性能を検証することが次の作業課題である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8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 Arionfard H., Nishi Y.	4. 巻 134
2. 論文標題 Experimental investigation on the performance of a double-cylinder flow-induced vibration (FIV) energy converter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Renewable Energy	6. 最初と最後の頁 267 - 275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.renene.2018.11.022	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 Nishi Y., Taniguchi E., Niikura L., Shibata E.	4. 巻 2019-08-28
2. 論文標題 Semi-Lagrangian numerical simulation method for tides in coastal regions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-019-00672-x	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 Itoh D., Nishi Y.	4. 巻 7
2. 論文標題 Linear analysis of the static and dynamic responses of the underwater axially moving cables to bucket loads	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jmse7090301	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 Ueda T., Nishi Y.	4. 巻 195
2. 論文標題 Numerical model for the fluid-structure interaction mechanics of a suspended flexible body	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 106723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2019.106723	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 Nishi Y., Toyoda Y., and Moriya Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Nonlinear filtering for estimating flow speed around a vibrating rigid circular cylinder	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Offshore and Polar Engineering	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 Arionfard H., Nishi Y.	4. 巻 134
2. 論文標題 Experimental investigation on the performance of a double-cylinder flow-induced vibration (FIV) energy converter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Renewable Energy	6. 最初と最後の頁 267--275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.renene.2018.11.022	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 Arionfard H., Nishi Y.	4. 巻 27
2. 論文標題 Flow-induced vibrations of two mechanically coupled pivoted circular cylinders: Vorticity dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluids and Structures	6. 最初と最後の頁 505--519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jfluidstructs.2018.07.016	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 Arionfard H., Nishi Y.	4. 巻 80
2. 論文標題 Flow-induced vibrations of two mechanically coupled pivoted circular cylinders: characteristics of vibration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluids and Structures	6. 最初と最後の頁 165--178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-017-0519-x	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 Nishi Y., Motoyoshi M., Ueda T.	4. 巻 23
2. 論文標題 Growth and coexistence of structural and lift force modes in vortex-induced vibration of a flexible riser	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Technology	6. 最初と最後の頁 899--914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00773-017-0519-x	査読の有無 無
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 0件)

1. 発表者名 Sina Mohammadi, Yoshiki Nishi
2. 発表標題 Optimal Design of Marine Current Turbine for Low Speed Flow
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 平成30年度秋季講演会
4. 発表年 2018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
---------	---------