

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04211

研究課題名(和文) 全水深流れ場を正確に考慮した水中線状構造物の振動予測法の構築と実用化

研究課題名(英文) Development of method for predicting vibrations of underwater slender long structure considering whole vertical profile of current

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) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、海洋資源開発において不可欠な技術要素である水中線状構造物に焦点を当てる。この構造物は海水の流れに常時さらされることで、振動することが知られている。この現象が長期間継続することは破損の可能性を高める。よって、その振動現象を高精度で推定するために、流体構造連成解析法へデータ同化手法を組み込むことを試みた。その数学的手続きを計算機上に実装するとともに、小型の水中構造物模型を製作し水槽実験を実施した。これらのデータを基にデータ同化を実践し手法の改良を重ね、その実用性を高めることができた。

研究成果の概要(英文)：This study addresses underwater long slender structure, which is a crucial part in the technology for resource exploitation from the deep sea floor. It is well known that this kind of structure vibrates because it is usually subject to ocean currents. Prolonged vibrations of the structure tend to increase the probability of collapse of it, which must be accurately predicted for maintaining its safe status. This study made an attempt to combine a simulation method for fluid-structure interaction dynamics with a data assimilation technique. A software for robustly running the data assimilation was implemented, and experiments on the vibration of an underwater slender structure was performed. Using the developed method and measured data, computations for the data assimilation were made repeatedly, and consequently has been refined enough to be able to be used as a practical tool.

研究分野：海洋環境、海洋資源

キーワード：海洋構造物 海洋環境 渦励振 データ同化 水中線状構造物

1. 研究開始当初の背景

本研究は水中線状構造物の振動について、そのモデルと境界条件の両方を最適推定する方法を提案する。

水中線状構造物は海中に設置され、最長で数千mに及び長大な構造物である。海底油田・天然ガスの採取や二酸化炭素の海中貯留のために用いられ最近、その技術向上に対する需要は高まっている。細長い形状をもつ本構造物は柔軟であるため水中で常に振動し、構造部材を劣化させる。このことから、高精度の振動予測が求められており数値シミュレーションは設計手法の要である。これまでアメリカやノルウェー等の主要機関が、水中線状構造物の振動を計算するソフトウェアを開発してきている。本科研費事業の関係者らも、水中線状構造物の流体構造連成解析手法について開発をしてきており、励振流体力モデルの提案や、有限差分法による構造力学モデルの開発などを行ってきた。計算結果を水槽実験の結果と比較し検証を重ね、水槽実験スケールの現象に関しては、精度、計算の素早さの面で勝るとも劣らない計算法を開発してきた。

しかしこれまでに進められてきたすべての計算法開発は道半ばで停滞している。それは、従来の研究開発は「モデル」としての改良は続けてきたが、その一方で、「境界条件」に関する検討を一切行ってこなかったからである。これまでの研究では、構造物まわりの流れ場の鉛直分布はすべて仮定されたものであり、実際の流れ場ではなかった。つまり境界条件は大雑把な近似で済ませるのが従来の通例であった。流れ場は構造物に作用する流体力を決める因子である。よって、この境界条件を現実的に与えてこそ、設計現場のニーズに応え得る計算結果を提供できる。この点が本申請の動機である。

2. 研究の目的

上述した背景およびこれまでの研究成果をもとに、本研究は水中線状構造物の流体構造連成解析手法にデータ同化手法を組み込むことを目的とする。具体的な達成項目は、現実的な全水深にわたる流れ場と同時に、水中線状構造物に発生する振動を正確に予測する計算法を確立することである。これにより、水中線状構造物の振動計算法を実用レベルに引き上げる。そのために研究期間内に以下のことを遂行する。

(1) 流体構造連成解析法へデータ同化手法を組み込む数学的手続きを計算機上に実装し、既知の流れ場や変位場が推定されるかどうかを調べることで同化の性能を検証する。
(2) 小型の水中線状構造物模型を製作し水槽実験を実施し変位計測値を取得する。

(3) データ同化を実践し、その性能を検証し、推定法として完成させる。

3. 研究の方法

前節に記した目的達成のため、流体構造連成解析手法へデータ同化手法を組み込むプログラムをつくり、適用する問題の現実度(複雑さ)を少しずつ高めながら計算を進めた。また、模型を用いた水槽実験を併せて実施した。次に記す作業工程で研究を進めた。
H27年度：プログラム実装、簡易問題への適用(基本性能の確認) 装置の設計・製作
H28年度：文献データの同化計算、変位計測の実施、論文発表
H29年度：計測したデータの同化計算、論文発表、追加計測

4. 研究成果

4.1 水中線状構造物の振動モードに関する理論的検討

「3. 研究の方法」に記したシミュレーションプログラムは、流体構造連成力学の理論に基づいて構築される。この理論は二つの力学の連成であるがゆえの複雑さが内在している。そのため単純な境界条件であってもその解の性質はよく知られていない。よって本研究では最初に、単純な境界条件を用いて解の数学的性質を調べた。後流渦に伴う揚力を記述する流体力学、および梁の運動を記述する構造力学に基づく支配方程式を立てた。この方程式は実際の現象を単純化し数学的表現を可能にすることで立式されている。この単純化が適度な程度かを確かめるために、理論解がどの程度実験による解と一致するかを調べた。

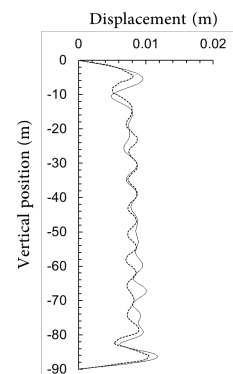


図1：水中に設置した線状構造物の振動変位の鉛直分布。実線：理論による計算値、破線：実験値(Lie and Kaasen, 2006)。

計算値と実験値とを比較した例を図1に示す。振動の腹と節の位置など、計算は実験と概ね一致することが示された。

本研究で扱った振動現象は、流体と構造と連成の結果として発生するものであるから、その振動モードには流体モードと構造モードとがある。この2種類のモードを分けて論じたところに本研究で構築した理論は特色を有している。その結果として判ったことの例を図2に示す。

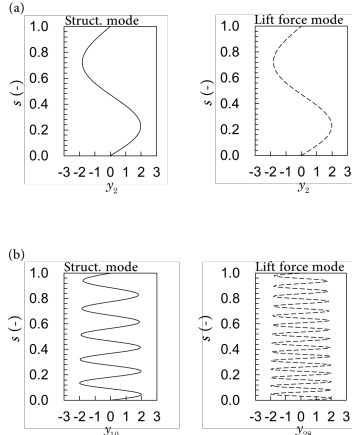


図2：構造モード(左)と流体モード(右)。(a)流れの鉛直分布が一樣な場合、(b)流れに鉛直シアアがある場合。(a)、(b)いずれも無数のモードの中で最も成長率が高いものを図示している。

流れの鉛直分布が一樣な場合は、最も成長が著しい振動モードと流体モードのモード数は一致する。一方、流れが鉛直シアアをもつ(深さによって流速が勾配をもつ)場合、両者が一致しない。最も卓越する構造モードのモード数に比べ、流体モードのモード数は高い(低次構造モードと高次流体モードとの共存)。本研究では、この共存の力学的背景について数学的に精査し、その結果を論文で発表した。

その数学的検討の一例を図3に示す。

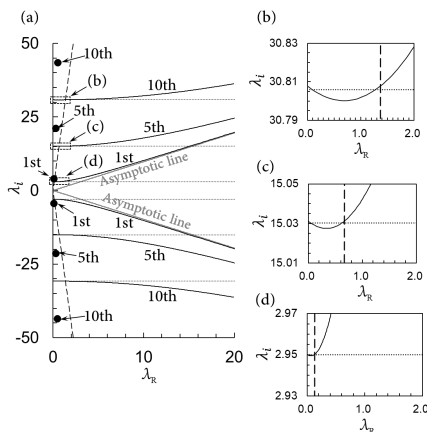


図3：モードの成長率(横軸)とモードの固有振動数(縦軸)との関係。

最も成長著しいモードのみを残し、他は無視するという近似の下では、モードの成長率とモードの固有振動数とは、ある関係性を有する。本研究はこの関係性が双曲線によって図示できることを示した(図3)。

以上の数学ベースの取り組みを通じ、水中線状構造物の振動モードの解の性質についての基礎理論を構築することができた。

4.2 フィルタリング

水中にある振動物体の運動に関する何らかの計測結果を利用して流速を推定するためには、その計測結果と、運動に関する予測結果とを融合させるフィルタリングという手法が有効であろうと考えた。本研究では、渦励振が非線形現象であること、フィルタリングのための多大な計算負荷を要しないことを鑑みて Unscented Kalman Filter (UKF) を実装することを試みた。

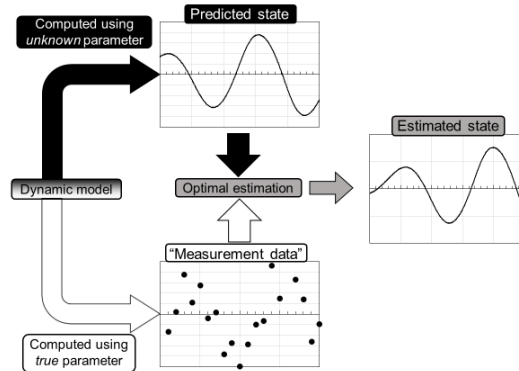


図4：本研究で開発したフィルタリング手法における、「計測値」、予測値、推定値の関係。

フィルタリングでは原則、計測データが必要であるが本研究はフィルタリングを実行するためのプログラム構築を主眼としたので、「真の流速」を表すパラメータを含む振動予測モデルを解くことで、疑似的な計測データを作成した。乱数を用いて見積もった誤差を予測値に加算することで、計測誤差を模倣した。UKF を土台として作成したフィルタリングのアルゴリズムを視覚的に描いた図を図4に示す。

このアルゴリズムを用いて得た振動変位の「計測値」(Observation)と、推定値(Estimation)とを図5に示す。ここで推定値とは、予測値と計測値とを融合させて得た値のことを意味する。フィルタリングが良好に進行する場合はこの図に示されている様に「計測値」と推定値とがよく一致する。

水中物体の振動を計測する方法として本研究では、変位・加速度・流体力を検知するセンサーを用いる方法を想定した。これら3種類のセンサーを単独で用いる場合、2種類を組み合わせる場合、3種類とも用いる場合を考え、それぞれの場合についてフィルタリングの性能を調査した。この結果、判ったことは次の通りである：

- ・変位計のみの計測する場合、フィルタリングが良好に進行しない傾向がある。
- ・2つ以上のセンサーを組み合わせることで良好なフィルタリングを行うことができる。

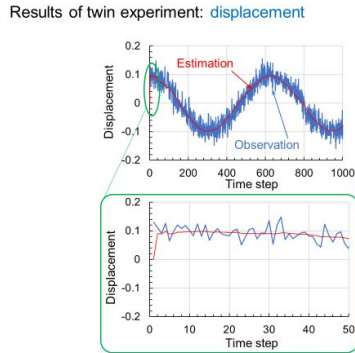


図5：振動変位、「計測値」および予測値の時間変化の一例。

良好なフィルタリングが行われた場合の結果例を図6に示す。流速の推定値が真値に速やかに収束している。

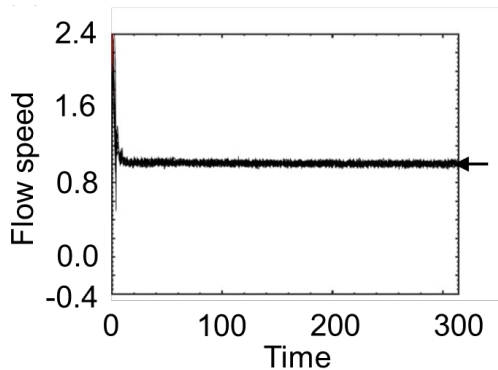


図6：流速推定値の時間変化。グラフ右端の” ”は真値を表す。

4.3 水槽実験による渦励振現象の解明、特に複数モードへの同期に関する詳細な観察

本研究では、水中線状構造物という弾性体としてふるまう物体に起こる渦励振に着目している。従来の研究から渦励振の本質は、渦が後流部において生成される周期（振動数）が、物体のもつ固有周期（固有振動数）に同期することである。弾性体は複数の固有モードおよび固有振動数を有することから、複数個の固有振動数への同期へ起こることを想定したうえで、フィルタリング手法を設計しておくことが重要である。その手法の構築に先立ち、複数モードへの同期を実験で再現し、その振動学的性質について調べることとした。

本研究では、振動系が2つの固有モード・固有振動数をもつように設計された水槽実験装置（図7）を作成し、それを回流水槽に設置した。この装置は、2つの円柱を有し、それぞれがバネで指示されている。下方の円柱は水中に設置され、流れに曝される構造となっている。この円柱が渦励振を起こす。上方の円柱は大気中で振動する。

この2つの円柱の振動変位を、レーザー変位計によって測定した。データロガーを用いて変位計の出力信号を収集し、変位に変換した。そのデータをフーリエ変換することで、振動の変位や位相などを計算した。

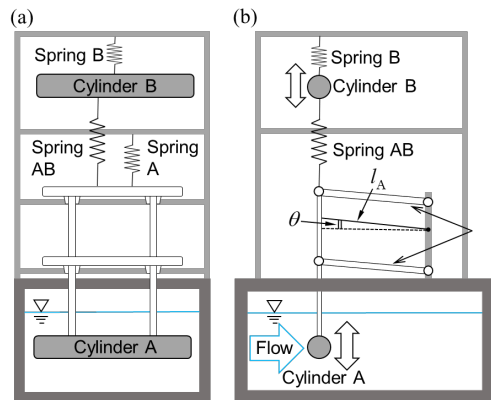


図7：2円柱を有する水槽実験装置の模式図。下方円柱を”Cylinder A”、上方円柱を”Cylinder B”として示している。

結果例を図8に示す。

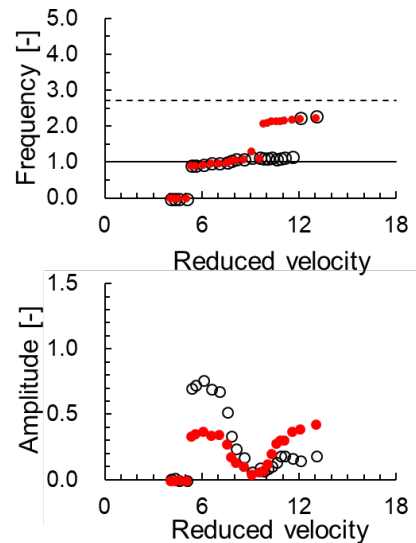


図8：流速（無次元値、横軸）に対する振動数（無次元値、上図縦軸）と振幅（無次元値、下図縦軸）。プロット（黒線）は円柱A、プロット（赤色）が円柱Bの結果である。

渦励振が発生する度合いは流速によって、敏感に変化することが知られている。本実験でもその性質が認められた。図8上図は円柱AとBの振動数である。流速の無次元値が5.8を超えると振動数が無次元値で1.0付近となり、この状態が流速の無次元値が10.0前後になるまで維持された。この流速範囲においては、振幅は0.7程度の最大値を取り、そのとき流速の無次元値は6.0~7.0であり流速がこの範囲を超えると振幅は次第に減少した。流速の無次元値が10.0のとき振幅はほぼ0.0になった。

流速の無次元値が10.0を超えると、両円

柱の振動数が2.0前後に上昇した。それとともに振幅が増加に転じた。

以上の結果は、流速の無次元値が6.0前後で1次固有モードへの同期が起き、また流速の無次元値が12.0前後で2次固有モードへの同期が起きたことを示している。ここで示した結果等から、複数の固有モードへの同期が起きる条件を知ることができた。

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6件)

[1] Y. Nishi, Y. Ueno, T. Miyamoto, Energy harvesting using wake-induced vibration: experiment in circulating water channel, Journal of Ocean and Wind Energy, 2015, 2(4), 231-238.

[2] H. Arionfard, Y. Nishi, Experimental investigation of a drag assisted vortex-induced vibration energy converter, Journal of Fluids and Structures, 68, 48-57.

[3] Nishi Y., K. Fukuda, W. Shinohara Experimental energy harvesting from fluid flow by using two vibrating masses. Journal of Sound and Vibration, 394, 321-332.

[4] Nishi Y., K. Saitoh, Vortex-induced vibration of two elastically connected bodies: experimental verification of lock-in to multiple eigenmodes. Journal of Fluid Science and Technology, 12(2), JFST0017.

[5] Nishi Y., Motoyoshi M., Ueda T., Growth and coexistence of structural and lift force modes in vortex-induced vibration of a flexible riser. Journal of Marine Science and Technology, doi.org/10.1007/s00773-017-0519-x

[6] Arionfard H., Nishi Y., Flow-induced vibrations of two mechanically coupled pivoted circular cylinders: characteristics of vibration Journal of Fluids and Structures, accepted.

[学会発表](計5件)

[1] 西 佳樹, 上野 雄太, 宮本 拓真, Energy harvesting using wake-induced vibration: experiment in a circulating water channel Proceedings of the 25th International Offshore and Polar Engineering (Kona, Hawaii, USA), 2015/06/2

[2] 西 佳樹, 大水深ライザー管の流体構造連成解析について, 第23回日本船舶海洋工学会海洋工学・海洋環境合同研究会 日本船舶海洋工学会 2015/12

[3] 西 佳樹, 篠原 航, 森屋 嘉裕, Determination of damping ratio distribution along riser pipe using optimal feedback gain, Proceedings of the 26th International Offshore and Polar Engineering (Rhodes, Greece,) 2016/06/26

[4] H. Arionfard, Y. Nishi, ADDED MASS MOMENT OF INERTIA OF A ROTATIONALLY OSCILLATING SURFACE-PIERCING CIRCULAR CYLINDER IN STILL WATER, Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference TFEC9-1268 (日本, 沖縄) 2017/10/28

[5] K. Fukuda, H. Arionfard, Y. Nishi, Experimental investigation of a flow-induced vibration energy converter with two mechanically coupled pivoted cylinders, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 25号 2017/11

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等
<http://www.med.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 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