

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760666

研究課題名 (和文) 長大弾性管まわりの3次元流場の可視化と3次元流出渦モデルの確立

研究課題名 (英文) Three Dimensional Flow Visualization and Development of the Shedding Vortex Model around a Long Flexible Pipe

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

研究成果の概要 (和文)：小型回流水槽内にバネ支持した円柱に一樣流速を与え、円柱の運動計測と PIV による流場解析実験を行った。円柱まわりの流出渦のモデル化と円柱に発生する渦励振を推定するため、バネ・ダンパーを用いて円柱の運動をモデル化して数値計算を行った。両者を比較し、ストローハル数や円柱の運動振幅など、妥当な結果値を得た。これらを踏まえ、可視化用のレーザーを同一円柱の異なる2断面に照射し、渦の3次元性を計測する実験を行った。3次元性は見られたが、計測精度が不十分であり、計測手法の改良が必要である。

研究成果の概要 (英文)：It has much difficulty estimating the time histories of the vortex induced vibration of the long flexible pipe. In order to overcome its difficulty, three dimensional effects of the pipe and vortex should be taken in account. In this research, the motion of a cylinder, which was supported by the spring and exposed in the circular tunnel, and the flow field around it were measured and analyzed. A numerical scheme in which the motion of the cylinder was modeled with using the spring and the dumper was developed. The comparisons of the experimental and numerical results showed the efficiency of this numerical scheme in calculating the Strouhal number and the amplitude of the motion of the cylinder. Then, the three-dimensionality of the vortex was measured by irradiating different two cross sectional area of the cylinder. The results showed that the experimental set-up must be improved even though the three-dimensionality was observed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

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：長大弾性管、渦励振、PIV

1. 研究開始当初の背景

近年、船舶や車などの燃料費は高騰し、鉱物資源の価格も上昇している。これに伴

い、船舶の燃料費を削減するための技術開発が注目を集めている。それらの技術は、大気中への温室効果ガスの放出を減らすこ

とで環境への負荷も低減させるため、非常に重要な研究対象である。

上記の技術開発と並行して、現在も海底に眠る油田や豊富なレアメタルなどの海底資源を有効に開発・利用していくことは重要である。そのためにも、大深度の海底における掘削も可能な長大弾性管(ライザーパイプ)を用いた掘削技術の確立が重要であり、長大弾性管の複雑な挙動を正確に推定する手法が必要不可欠である。

実海域において、長大弾性管のまわりの流れは潮流や波などで時々刻々と変化する。これらの流れにより、長大弾性管から流出する渦は、渦励振(Vortex Induced Vibration)と呼ばれる複雑な振動現象を引き起こす。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、渦励振の推定法は未だ確立されていない。

その理由の一つに、長大弾性管が非常に長く弾性的な特性を持つため、長大弾性管から流出する渦が強い3次元性を持つことがあげられる。流出渦をモデル化し、長大弾性管にはたらく流体力の推定が行われてきたが、これらは2次元の流体力であり、3次元に拡張する必要がある。また、長大弾性管全体の流場をCFDを用いて解き、3次元の流体力を推定することも考えられるが、長大弾性管は長さが2,000m程度にもおよぶ細長体であり、未だ現実的ではないと考える。国内では長大弾性管まわりの3次元流場の可視化は行われておらず、本研究では長大弾性管まわりの流場の可視化実験を行い、3次元的な渦の流出状態を詳細に解析し、流出渦モデルの確立を考えた。

2. 研究の目的

長大弾性管が一樣流速にさらされた場合、長大弾性管は自身の断面が“8”字型の軌跡を描く運動を行う。この“8”字型運動が発生する理由は、長大弾性管から後流方向に渦が1つ流出すると、管は初期位置から流れに対して鉛直方向で、渦が生成された側に動き出し、渦が管から流出した後は初期位置付近に戻る。従って、流れに平行な方向には2回の抗力変動が生じることになる。このように発生メカニズムは単純な運動であるが、“8”字型運動は実海域でも発生しやすいため、海外では多くの研究者が注目している現象である。

本研究では長大弾性管の複雑な運動の中で、上記のような実現象として発生しやすい運動時の流場をPIV(Particle Image Velocimetry)を用いて可視化を行う。そして、渦の流出状態を詳細に解析することにより、流出渦のモデル化を行う。

基本的な渦の流出状態を正確に把握するため、剛体円柱を用いた単純な2次元の流

場解析と2次元の流出渦のモデル化を行う。その後、弾性管模型を用いた流場の可視化実験を行い、3次元の流場解析を行う。

3. 研究の方法

長大弾性管の3次元的な運動を推定するためには、3次元の流場を再現する必要がある。本研究ではまず、渦励振が発生している円柱まわりの2次元流場の解析を行う。

小型回流水槽内に3次元影響を抑制するためのエンドプレートを取り付けた剛体円柱模型を異なる方法で弾性支持し、一樣流を与える。円柱に発生する渦励振の振幅や周期の計測と同時に、流場をPIVによって可視化し、解析する。

上記の実験では、1回の実験で円柱の運動振幅と流場解析による渦の流出状況を把握することが出来るため、渦と円柱の運動の関係を詳細に見ることが可能である。また、この円柱は長大弾性管の全長の一部と考えることが可能であり、実際に発生しやすい管の断面が“8”字型の軌跡を描く運動を再現することが出来る。

実験と並行して、円柱まわりの流場の再現と発生する渦励振を推定するため、バネ・ダンパーを用いて円柱の運動をモデル化し、数値計算を行う。実験結果と数値計算結果を比較し、その精度確認を行う。

さらに、円柱から流出した渦の3次元性を計測するための実験を行う。上述の実験方法にて、可視化用のレーザーを異なる2断面に照射し、円柱後方に生成され、剥離する渦の3次元性を計測する実験を行い、流出渦モデルの確立を目指す。

4. 研究成果

(1) 円柱の運動計測・流場可視化実験方法

実験は大阪大学の小型回流水槽にて行った。回流水槽は各長さが $L \times B \times D = 1.0 \times 0.3 \times 0.3$ [m]の亚克力製観測部を持ち、発生可能な最大流速は1.0 [m/s]である。両端を固定又はバネで支持した亚克力製の円柱を回流水槽内に設置し、一樣流を与えた。円柱の直径は0.03[m]である。一樣流と並行にx軸をとり、流れる方向を+x、鉛直上向きに+y軸をとった(Fig.1)。

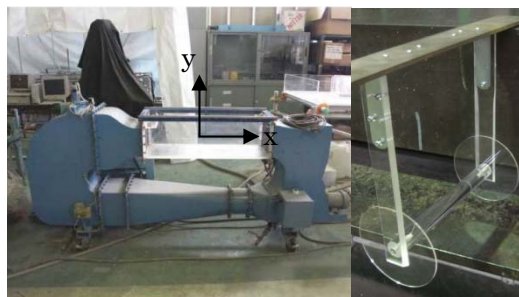


Fig. 1 Circular tank (left) and cylinder (right).

可視化用レーザーを観測部の下方から照射し、円柱後流の流場の2次元断面における粒子を可視化し、観測部側面から高速カメラによる撮影を行った。一方で、円柱の運動を解析するために、円柱の断面には運動解析用にマーカーを貼り付け、実験計測後に円柱の運動の軌跡を求めた。

円柱模型の支持方法は円柱の運動を(a)固定、(b)一様流に対して直角方向(y方向)のみ可能、(c)一様流と並行方向(x方向)のみ可能、(d)x, y両方向に可能の4種類とした。円柱模型に与える一様流は、0.068~0.41 [m/s]とし、レイノルズ数は約1,500~10,000である。

(2) 数値計算法の概略

2次元のCFDを用いて一様流中での円柱の運動解析とまわりの流場解析を行った。支配方程式は、以下の連続の式とレイノルズ平均を施したN-S方程式である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} \right)$$

ここで、x, y方向の速度をそれぞれ u, v 、圧力を p 、レイノルズ応力をそれぞれ $\overline{u'u'}, \overline{u'v'}, \overline{v'v'}$ とする。

離散化法として、時間微分には Euler 陰解法、空間微分には9点の有限解析法を用いた。また、速度-圧力結合法として PISO タイプの一段解法を、乱流モデルには Baldwin-Lomax モデルを用いた。円柱まわりの計算格子数は半径方向を121点、円周方向を183点とした。半径方向の格子間隔は円柱表面付近で密であり、最小格子間隔は 1.5×10^{-5} [m] である。境界条件として、円柱表面での速度 u, v は円柱の運動速度とし、遠方境界では $u=U, v=0$ とした。

本研究では、円柱の両端をバネで支持することにより xy 平面内での運動を可能とした。この円柱の運動のモデル化を、バネとダンパーを用いて行った (Fig. 8)。

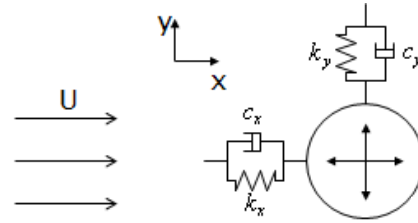


Fig. 2 Model of the cylinder.

x 方向、y 方向それぞれにおいてバネ系の運動方程式を解くことで、円柱模型の2次元平面内での運動をモデル化した。バネ・ダンパーの各定数 (k_x, k_y, c_x, c_y) は、実験で使用した円柱とバネを用いて、静水中における自由減衰振動実験により決定した。

(3) 実験結果と数値計算結果の比較

① 円柱の運動の軌跡

支持条件④の場合で実験結果と数値計算結果を比較し、円柱の運動について妥当性を検証する。一様流速 U を 0.23 [m/s] とした場合の円柱の運動の軌跡を Fig. 3 に示す。同図をみると、両結果の一致は良いことがわかる。数値計算結果の振幅が実験結果より若干小さくなった原因としては、数値計算に使用した自由減衰振動実験により決定した減衰定数が、実際の減衰係数よりも大きく見積もっていた可能性がある。

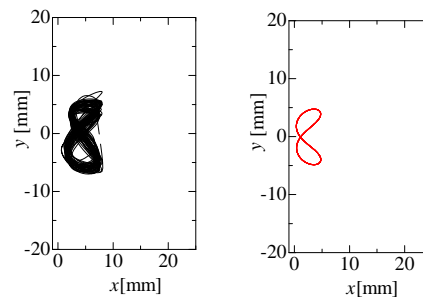


Fig. 3 Trajectories of the cylinder. (left: experiment, right: numerical result)

② 流出渦の位置

渦位置について、数値計算結果を実験結果と比較し、その妥当性を検証した。支持条件が(d)で、一様流速 U が 0.29 [m/s] の場合を Fig. 4, 5 に示す。同図に示されるように、両結果の円柱付近での渦位置はよく一致しているが、円柱から離れた位置の渦位置には誤差がみられる。これは、計算格子の設定が円柱から離れるにつれて疎になっているからだと考えられる。円柱遠方でも円柱表面のように格子を密に設定していれば遠方でも渦位置が実験結果に近づくと考えられるが、その場合の計算時間は長くなる。

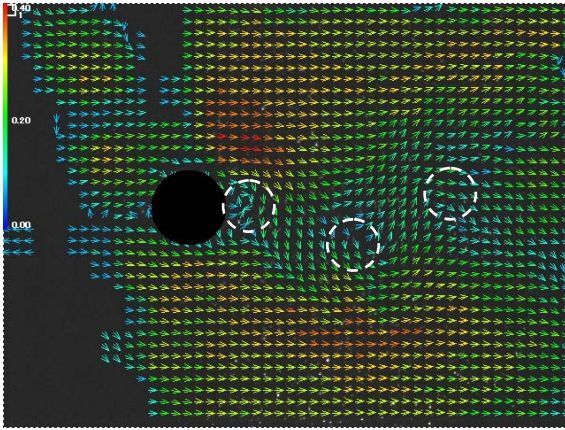


Fig. 4 Flow field around the cylinder. (experimental result)

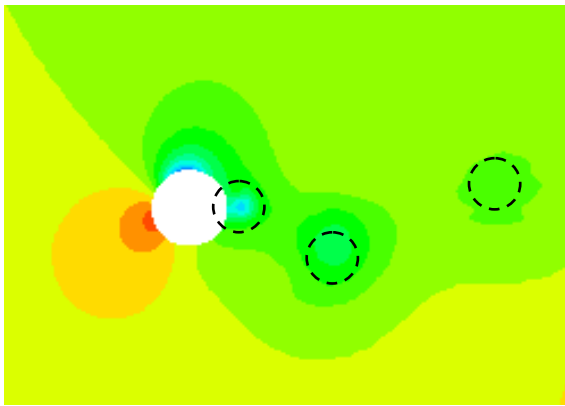


Fig. 5 Flow field around the cylinder. (numerical result)

③ Strouhal 数

実験結果を解析して得られた Strouhal 数(St)を Fig. 6 に示す。支持条件(a)と(c)は流速の増加に伴い St も大きくなっている。支持条件(b)と(d)は流速の増加に伴い、 St は小さくなっている。これらの結果は円柱が振動することで、その振動に合わせて渦が放出されているためである。支持条件(c)は周期的な振動がみられないため支持条件(a)に近い値になったと考えられる。

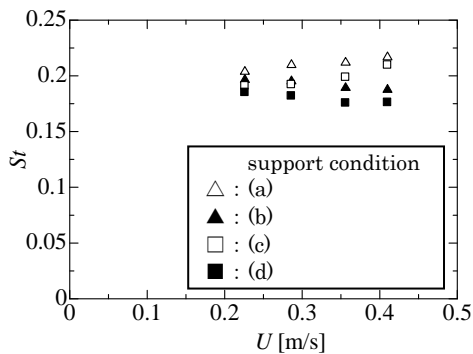


Fig. 6 Strouhal numbers in each experimental condition.

実験と数値計算により得られた St を比較する。Fig. 7 と Fig. 8 にそれぞれ支持条件(c)と(d)について、得られた St を示す。Fig. 5 において、両結果を比較すると、流速の増加に伴うストローハル数の変化は良い一致を示していることがわかる。Fig. 8 においては、流速が大きい場合には実験結果と計算結果で少し差がみられる。この差はバネ定数の影響であると考えられる。今回実験で使用した円柱模型の支持方法では、バネの可動域の制限によりバネ定数が円柱の運動によって変化してしまう。一方で、計算ではバネ定数を一定としている。そのため、Fig. 8 にみられるような差が生じたと考えられる。

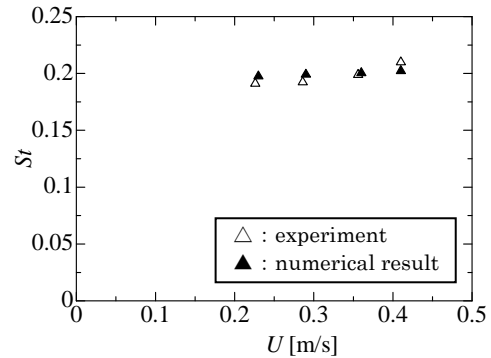


Fig. 7 Comparisons of the St . (support condition (c))

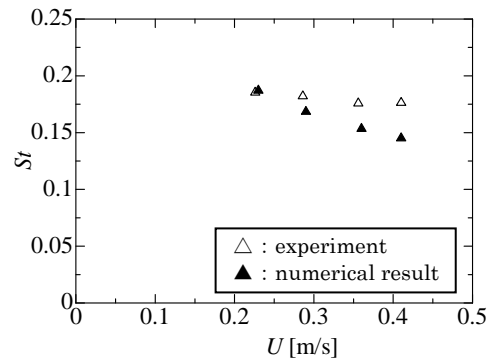


Fig. 8 Comparisons of the St . (support condition (d))

(4) 異なる2断面の流場計測実験

上記の小型回流水槽内にて、弾性支持された円柱の運動計測とそのまわりの2次元流場の PIV による可視化実験の手法を踏まえ、円柱両端のエンドプレートを外し、可視化用のレーザーを異なる2断面に照射し、円柱後方に生成され、剥離する渦の3次元性を計測する実験を行った。

実験中に、渦の3次元性は見られたものの、高速度カメラによる異なる2断面の計測精度が不十分であり、計測手法の改良が必要であった。

(5) まとめ

長大弾性管の弾性的な運動を模擬するため、一様流中にて円柱をバネ支持し、円柱の運動とその後流の流場について計測実験を行った。この実験では、円柱の両端にエンドプレートを取り付け、渦の3次元性を抑制した。実験結果の解析を行い、実現象の渦励振として発生しやすい、管の断面の軌跡が“8”字型を描く現象が確認できた。

円柱の運動をバネ・ダンパー系でモデル化し、実験と同様の条件で渦励振による円柱の運動とその後方の流場の2次元の数値計算手法を開発した。実験に使用した円柱模型とバネ支持部材を用い、静水中での自由振動実験を行い、数値計算で使用するためのバネ・ダンパーの各定数を求めた。

実験に使用した実験結果と数値計算結果を比較し、本数値計算手法は流速が小さい場合の円柱の運動を精度よく推定可能であることが示された。数値計算により求めた St 数や渦位置は、実験値と比較して妥当性のある値が得られた。

長大弾性管のような最長体について、そのまわりの3次元流場全てを CFD を用いて解くことは、計算時間の面から非常に困難である。従って、本研究で開発した2次元の数値計算手法を3次に拡張するために、渦の3次元性を検証する実験を行った。

同実験装置を用い、円柱の両端に取り付けていたエンドプレートを外し、可視化用のレーザーを異なる2断面に照射し、円柱後方に生成され、剥離する渦の3次元性を計測する実験を行った。実験中に、渦の3次元性は見られたものの、高速度カメラによる計測精度が不十分であり、改良が必要である。渦の3次元性とその影響がどの程度かを検証することで、本数値計算手法を3次元に拡張することが可能である。

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)

1. 山本祐樹、千賀英敬、鈴木博義、“一様流中における円柱の運動及び流場解析”、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第10号、pp. 145-148、(2010)

[学会発表] (計2件)

1. 山本祐樹、千賀英敬、鈴木博義、“Motion and Flow Field Analysis of Circular Cylinder in Uniform Flow” Techno-Ocean 2010 poster session, (2010, 10, 14)
2. 山本祐樹、千賀英敬、鈴木博義、“一様流中における円柱の運動及び流場解析”、日本船舶海洋工学会講演会、(2010, 6, 8)

6. 研究組織

(1) 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