

平成 21 年 5 月 14 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760577

研究課題名 (和文) 流体と構造の連成解析による長大弾性管の疲労寿命推定

研究課題名 (英文) Fatigue analysis of a riser with coupling the fluid and structure effects

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：60432522

研究成果の概要：海底資源の掘削や二酸化炭素の海底貯蔵に使用される長大弾性管には、潮流や浮体の運動に伴う流出渦により、渦励振(Vortex Induced Vibration)と呼ばれる振動現象が発生する。渦励振は繰り返し荷重として作用するため、疲労破壊の主原因となる。渦励振による繰り返し荷重の作用箇所を推定するため、実際の現象として発生しやすい渦励振である長大弾性管の断面が円と“8”字を描く時の流場解析を行った。長大弾性管の運動条件によって、渦が流出しやすい箇所を得ることにより、流出渦の個数のモデル化を行った。これにより、繰り返し荷重の作用する箇所の推定が可能となった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	240,000	2,540,000

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、流体、構造、“8”字運動

1. 研究開始当初の背景

巨大地震発生メカニズムの解明、海底に眠る資源の開発、そして世界で初となるマンタの採取等を目的とした科学掘削を行うために、大深度の掘削が可能であるライザーパイプ(長大弾性管)を用いた掘削技術が必要不可欠である。

平成18年8月より、海洋研究開発機構による世界最大級の掘削能力を持つ地球深部探査船“ちきゅう”を用いた下北半島東方沖

(水深約1,200[m])におけるライザー掘削試験が開始された。このような長大弾性管に関しては、国内では九州大学大楠名誉教授、東京大学鈴木教授、前田名誉教授、日本大学増田教授、また国外では海底石油開発に関連する技術として欧州や米国で、特にその挙動に注目して研究が行われてきた。

“ちきゅう”が数年後の目標としている水深2,500[m]、海底下7,500[m]という未知の深さまで掘削するためには、長大弾性管はより

細長い形状となり、剛性はさらに低下し、より柔軟な構造物となる。従って、安全な掘削作業や疲労破壊による長大弾性管の損失を防ぐためにも、長大弾性管の疲労破壊に関する研究の重要性は非常に高いと考えた。

2. 研究の目的

長大弾性管を取り付けた浮体の動揺や時々刻々変化する潮流により、長大弾性管からは渦が流出する。これらの流出渦は潮流と垂直方向に発生する渦励振(Vortex Induced Vibration)と呼ばれる振動現象を引き起こす。

渦励振の発生は潮流による長大弾性管の変形量の増加を引き起こす。また渦励振は複雑な振動であり、長大弾性管に繰り返し荷重として作用し、疲労破壊の主原因となる。

本研究の目的は、長大弾性管の疲労破壊が発生する箇所を推定するために、渦励振を引き起こす渦の流出位置をモデル化すること、また長大弾性管の複雑な挙動を正確に推定する手法を確立することである。

3. 研究の方法

(1) 現存の挙動推定法の検証

これまでに研究代表者が開発した長大弾性管の挙動推定法では、主運動とそれに垂直方向の運動を別々に解き、長大弾性管の構造面からの3次元連成を流体力のみで考慮していた。現存する他の挙動推定法においても構造的な3次元連成と構造一流体の連成を完全に考慮しているものはない。このような挙動推定法による渦励振の予測結果を検証するため、過去に行った長大弾性管模型を用いた実験結果を再度詳細に解析した。

(2) 実現象として発生しやすい渦励振の検証

流体と構造の連成解析を行うことにより長大弾性管の疲労寿命を推定するためには、疲労破壊の主原因である渦励振のなかでも、特に実現象として発生しやすい運動について正確に把握しておく必要がある。

一様流中に置かれた剛体円柱から渦が f_s [1/sec] で流出する場合、一様流と垂直・平行方向に働く揚力・抗力はそれぞれ f_s 、 $2f_s$ [1/sec] で振動する。このような揚力・抗力の変動周期により、剛体円柱断面が“8”字の軌跡を描くように運動する。実現象として発生しやすいこの“8”字型運動について整理することにより、渦の流出しやすい箇所を検証し、疲労破壊の発生箇所を検討した。

4. 研究成果

(1) 現存の挙動推定法の検証過去の実験結果の再解析

研究代表者らが以前に九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽(L×B×D: 65×5×7 [m])にて 6.5[m]の長大弾性管模型を

用いて行った実験結果と、これまでに開発した長大弾性管の3次元挙動推定プログラムの比較を図1に示す。同図は、静水中にて弾性管模型上端に強制不規則運動(X0)を与えた場合の模型中央部付近(YC)と下端部(YE)での渦励振の時系列である。

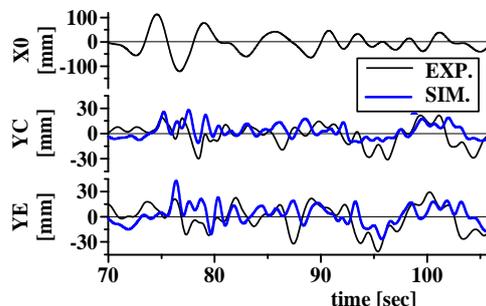


図1 上端不規則運動を行う弾性管模型の中央部付近と下端部での渦励振の時系列

両結果を比較し、挙動推定プログラムは渦励振の振動周期は精度よく推定出来ていることが確認出来る。しかし、構造面の3次元連成が考慮されていないため、渦励振が弾性管模型の主運動(強制不規則運動)の影響を受けて大きな振動振幅となることが再現出来ていないことがわかる。

同じ模型を用いて行った曳航試験の結果を図2に示す。同図は曳航方向と水平な面内(X-Z平面)とそれと直行する面内(Y-Z平面)での模型の運動形状を示している。

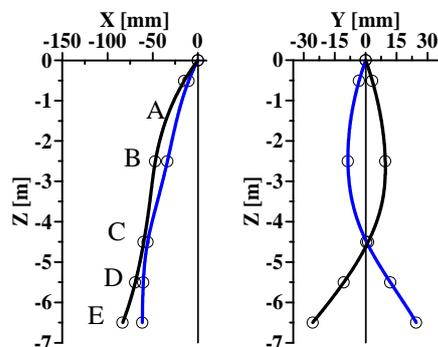


図2 X-Z, Y-Z平面での模型全体の運動形状(曳航速度 0.03[m/s])

図2において、Y-Z平面での運動は渦励振による運動である。渦励振の発生は曳航方向の抗力の増加を引き起こすが、渦励振の振動振幅によってその増加の割合は異なる。図2のY-Z平面の運動に示されるとおり、渦励振の振動振幅は模型の深さ位置によって異なるため、曳航方向の抗力係数に差が生じ、流速に平行なX-Z平面についても図2に示されるとおり模型は振動する。

このように単純な曳航試験のみであっても、渦励振の発生とそれに起因する流体力の影響に基づく主運動と渦励振の連成影響があることが確認出来る。また上端に不規則運

動を与えた場合の構造面からの3次元運動の影響も強く生じていることが確認出来た。

(2) 構造面の3次元連成の考慮

前述の解析結果のとおり、長大弾性管の渦励振も含めた挙動を正確に推定するためには、長大弾性管の構造面での3次元連成を考慮することが重要である。

本研究では長大弾性管の構造面での3次元連成を考慮するための運動方程式として、Nordgren(1974)により導出されたベクトル方程式を用いた。以下にその最終的な運動方程式を示す。

$$-(Br'')'' + \begin{bmatrix} (T - Bk^2)r' \\ H(r' \times r'') \end{bmatrix} + (r' \times m)' + q = \rho \mathcal{E} \quad (1)$$

このベクトル方程式を用いることにより、長大弾性管の主運動とそれに伴う渦励振の各運動を連成させることが可能となる。図3に弾性管模型上端に強制円運動を与えた場合の弾性管模型の運動のシミュレーション結果を示す。このシミュレーションには、流出渦による揚力・抗力を考慮していないため、渦励振は発生していない。弾性管模型の今後、この運動方程式に流出渦による流体力を考慮することにより、構造と流体の両面での3次元連成を考慮した長大弾性管の挙動推定法を確立することが可能となる。

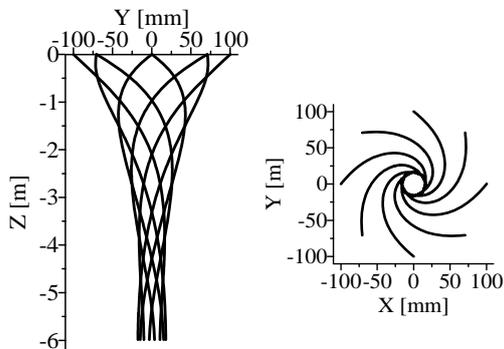


図3 ベクトル方程式による挙動推定結果 (上端円運動:半径 100[mm], 周期 2.0[sec])

(3) 実現象として発生しやすい渦励振

図2に示した実験と同じ曳航実験のX-Z, Y-Z平面における長大弾性管模型の深さ位置C, D, Eにおける振動の円振動数についてのFFT解析結果を図4に示す。

同図4より、曳航方向に水平な面内(X-Z平面)での運動である主運動の円振動数は渦励振の円振動数の2倍であることが確認出来る。従って、弾性管模型の断面は図5に示すとおり、“8”字型の軌跡を描く。この実験結果のように渦励振と主運動の連成により断面が自動的に“8”字を描く運動は発生しやすく重要な現象であることが確認出来た。

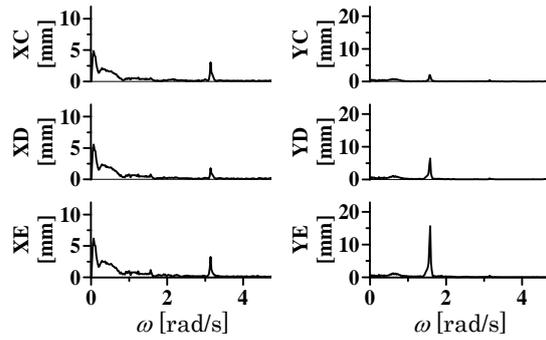


図4 模型の振動の円振動数解析結果

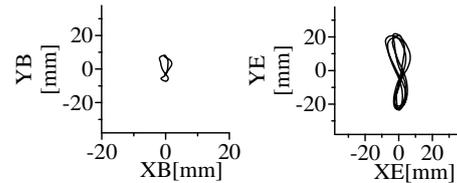


図5 曳航実験での弾性管模型断面の軌跡

(4) 弾性管断面が円と“8”字型の軌跡を描く場合の流場解析

上記のとおり、長大弾性管の断面が“8”字型の軌跡を描く運動は、渦励振と主運動との連成により自動的に発生しやすい。同様に断面が円を描く運動も発生しやすいことが言われている。従って、このような自動的に発生しやすい運動状況下において、長大弾性管にどのような荷重がかかるかを検証することは、長大弾性管の疲労破壊を推定するうえで非常に重要である。

自動的に円、“8”字形運動の前に、本研究ではまず剛体円柱模型を用いた強制動揺試験を大阪府立大学の大型2次元水槽(L×B×D = 12×0.57×1.2 [m])にて行った。この水槽には2軸方向強制動揺装置が設置されており、模型に対して水槽の長手方向と鉛直方向に運動を与えることができる。実験に使用した剛体円柱模型は長さ 55[cm]、直径 5[cm]の亚克力製である。円柱はアルミ製のストラットを用いて、強制動揺装置に取り付け三分力計に固定した。円柱端部の3次元影響を避けるために両端に円形のエンド・プレートを取り付けた。円柱まわりに発生する渦の位置を確認するため、可視化粒子として三菱化学の合成吸着剤(ダイヤイオン HP21)を用いた。図6に実験装置の概念図を示す。

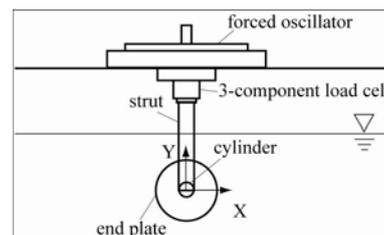


図6 強制動揺実験の概念図と座標系

剛体円柱の強制運動として単振動、円運動、“8”字型運動を行った。各強制動揺運動条件は以下の関数である。

単振動 : $X = A_0 \sin(2\pi t/T)$ (1)

円運動 : $X = -r_0 \cos(2\pi t/T_0)$ (2)

$Y = -r_0 \sin(2\pi t/T_0)$

8字型 : $X = A_1 \sin(2\pi t/T_0)$ (3)

$Y = A_1/2 \sin(4\pi t/T_0)$

ここで、 A_0 は単振動の振動振幅、 r_0 は円運動の半径、 A_1 は水平方向の運動振幅、 T_0 は各運動の周期、 t は時間である。表1に運動条件を示す。

表1 円柱の強制運動条件

A_0 [mm]	T_0 [sec]	Kc number
5 ~ 100 (5 刻み)	10	0.63 ~ 12.75 (0.63 刻み)
r_0 [mm]	T_0 [sec]	Kc number
5 ~ 30 (10 刻み)	5	0.63 ~ 3.77 (0.63 刻み)
A_1 [mm]	T_0 [sec]	Kc number
10 ~ 60 (10 刻み)	10	1.78 ~ 10.66 (1.78 刻み)

本研究では、表1に示すとおり剛体円柱の各運動条件をそれぞれ Keulegan-Carpenter 数 ($Kc=U_m T/D$, U_m : 振動流速の振幅、 T : 振動周期、 D : 代表長さ)を用いて整理した。上記(1)~(3)の剛体円柱の強制動揺運動条件から運動速度を求め、単振動については振動速度の振幅、円運動については運動速度(一定値)、そして8字運動については運動速度の最大値を U_m とし、本研究では Kc 数を以下のとおり定義した。

単振動 : $Kc = 2\pi A_0/D$ (4)

円運動 : $Kc = 2\pi r/D$ (5)

8字型 : $Kc = 2\sqrt{2}\pi r_0/D$ (6)

本研究で行った表1に示す運動条件によっては、分力計で計測された剛体円柱に働く抗力及びそれに垂直方向に働く流出渦による揚力は非常に小さいものであり、運動振幅が小さい条件での流場を詳細に解析することは困難であった。そこで、本研究では CFD による流場解析も合わせて行った。

CFD の精度は今回行った強制動揺実験の中で、運動振幅の大きい強制単振動の実験結果との比較を行い検証した。強制動揺条件は $A_0 = 100$ [mm]、 $T_0 = 10$ [sec]であり、 $Kc=12.75$ である。剛体円柱に働く抗力(Fd)・揚力(Fl)の時系列について、実験と CFD の両結果をそれぞれ図7と図8に示す。同図より、抗力・揚力ともにその周期と大きさが推定できていることが確認できる。

この2次元 CFD を用いて、運動条件を変化させ、強制円運動と“8”字型運動を行う剛体円柱まわりの流場を解析した。

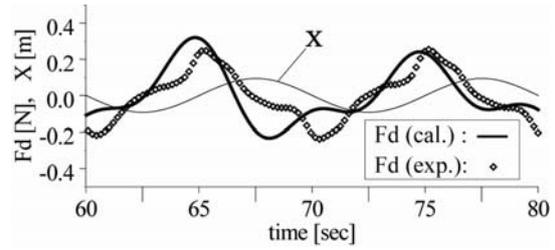


図7 円柱に働く抗力の時系列(単振動)

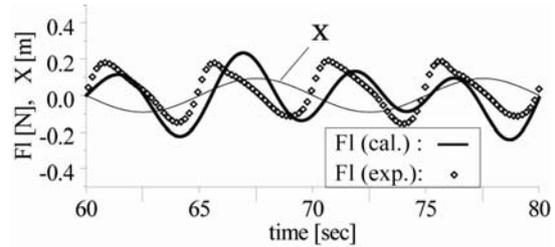


図8 円柱に働く揚力の時系列(単振動)

本研究において、円運動時における Kc 数は(5)式のとおり $Kc=2\pi r_0/D$ である。円運動については CFD により $Kc=30$ 程度まで計算を行った。図9に剛体円柱に働く抗力・揚力の正負方向の定義を示す。また図10に $Kc = 3.8, 8.8, 15.1$ ($r_0=30, 70, 120$ [mm])における CFD による剛体円柱まわりの渦度の計算結果を示す。円運動の周期は 4.0[sec]であり、剛体円柱の位置は図9における(a)の位置である。

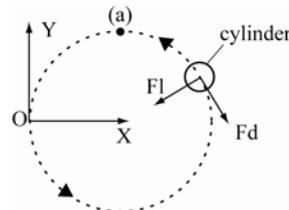


図9 円柱に働く抗力・揚力の定義(円運動)

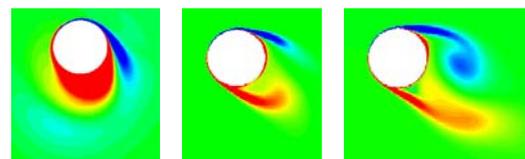


図10 円柱まわりの渦度比較(円運動)

図10に対応する円運動の条件下において、円柱に働く抗力・揚力の計算結果をそれぞれ図11と図12に示す。円運動の周期は前述のおとりの 4.0 [sec]であり、11~12 週目の抗力・揚力を示している。time = 40, 44 [sec]の時、剛体円柱は図10における O の位置にある。

円運動の周期が一定であるため、 Kc 数が増加するにつれて剛体円柱の移動速度が増加し、抗力・揚力ともに増加していること、抗力・揚力ともに振動が発生していることが両図よりわかる。また図12より、強制動揺運

動を行う剛体円柱に働く揚力は常に運動の中心側を向いていることがわかる。従って、今回の実験のような強制動揺運動ではなく、主運動である円運動と渦励振との連成による自励振動を行う場合、円柱の断面は複雑な軌跡を描くことが推測される。今後、CFD や長大弾性管模型を用いた上端円運動の強制動揺実験を行い、円運動と渦励振との連成により弾性管の断面がどのような軌跡を描くかを検証する必要がある。

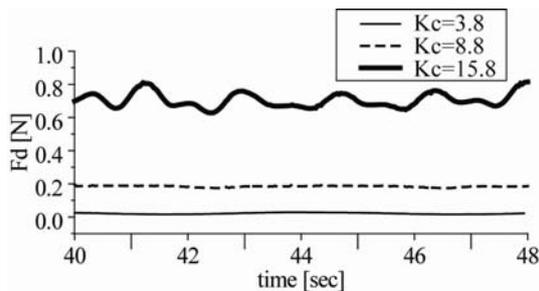


図 11 円柱に働く抗力の時系列 (円運動)

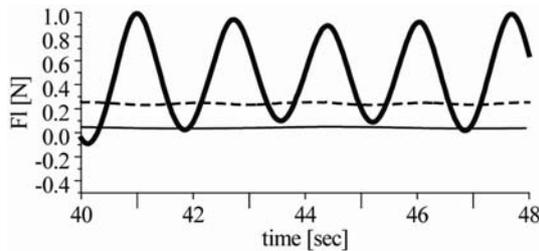


図 12 円柱に働く揚力の時系列 (円運動)

ここで、単振動を行う剛体円柱に働く揚力の振動数と単振動の周期 (振動数) との関係は Kc 数を用いて整理すると理解が容易である。CFD を用いて Kc 数を変化させた計算結果から、剛体円柱に働く揚力の振動数 (f_L) と円運動の振動数 (f_C) との比を Kc 数により整理したものを図 13 に示す。

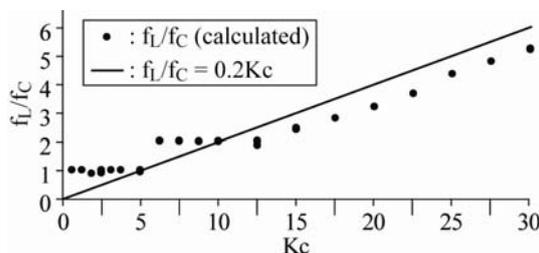


図 13 揚力の振動数 (f_L) と円運動の振動数 (f_C) との比

図 12 で用いた揚力の周波数 f_L は最も支配的であった値である。また同図中の直線は、一様流速 (U) 中に置かれた直径 (D) の円柱からの渦流出周波数 f_S との関係から得られる Strouhal 数 ($S=f_S D/U$) を一般的な値として知られている 0.2 として計算したものである。

強制円運動においても、一定の Kc 数 ($Kc \leq 12.6$) まではロックイン現象が発生していることが確認できる。しかし、単振動の場合と異なるのは、それより大きい Kc 数の場合、周波数の比 (f_L/f_C) と Kc 数が比例関係となることである。これは、 Kc 数が大きくなると剛体円柱が直線運動を行っている状態に近づくためであると考えられる。

以上のように Kc 数を変化させて行った CFD による流場解析結果から、強制円運動を行う剛体円柱について、以下の Kc 数の範囲で 3 つに分類することが可能であると考えられる。

- $Kc \leq 5$: 円運動の中心側に、円運動と同回転方向の渦が存在し、外側の渦は非常に小さい。
- $5 \leq Kc \leq 12.6$: 円運動の中心側に、円運動と同回転方向の渦が存在し、外側の渦は発達して剥離する。
- $12.6 < Kc$: 円柱の後方にカルマン渦が発生する。

上記の Kc 数の範囲で区分することにより、流出渦のモデル化が容易となる。それに伴い、浮体による強制動揺によって長大弾性管の断面が円を描く運動を行っている場合、長大弾性管に働く繰返し荷重の箇所が推定可能となる。

次に、“8”字型運動について示す。“8”字型強制動揺運動における Kc 数は、本研究では(6)式に示すとおり $Kc=2\pi\sqrt{2} r_0/D$ である。実際の渦励振により自励的に発生する円柱の“8”字型運動の振幅は、最大でも円柱の直径と同程度 ($Kc=10$ 程度) であるが、強制“8”字型運動を行う円柱から流出する渦の傾向を調べるため、CFD を用いて $Kc=50$ 程度まで計算を行った。“8”字型強制動揺運動における揚力・抗力の正負方向の定義は図 14 に示す通りである。

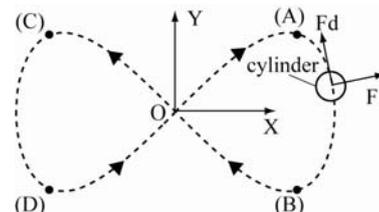


図 14 円柱に働く抗力・揚力の定義 (8 字型)

CFD による計算結果から、 $Kc < 28.4$ においては、運動の振幅が小さいため、円柱は流出渦に再度突入し、渦の流出は安定せずに抗力・揚力は複雑に変動した。

また振動振幅 Kc 数 ≤ 39 ($r_0 \leq 220$ [mm]) の範囲で、安定して流出する渦は 8 個であった。渦は円柱の加速度が変化する点で剥離しやすく、“8”字型運動では円柱断面が描く軌跡の中で加速度が大きく変化する点は図 14 に示す(A)~(D)の 4 点ある。また、(B)~(C)と

(D)~(A)の間では、円柱はほぼ安定した速度で直線運動を行い、1組の渦が流出していた。従って、この Kc 数の範囲内において“8”字型運動1周期では8個の渦が流出することになる。

$Kc=35.5$ の場合について、揚力の振動数(f_L)と円運動の振動数(f_8)との比を、“8”字型運動の周期を変化させて最大速度 U_m により整理したものを図15に示す。

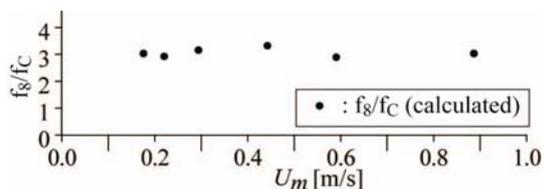


図13 揚力の振動数(f_L)と8字型運動の振動数(f_8)との比

運動振幅が小さい場合は渦自体も小さく、(A)~(B), (C)~(D)間において円柱まわりに形成される2個の渦のうち、1個は流出せずに円柱まわりにとどまる。従って、 $Kc \leq 39.1$ の範囲において、図14に示されるとおり円柱から流出する渦の個数が8個であっても、揚力の振動は運動1周期に対して3回であった。

また“8”字型運動では、円運動の場合と異なり、ある程度大きな Kc 数になるまで円柱から流出する渦の個数に変化が見られないことがわかった。

Kc 数は物体と流体の相対移動距離を表した値であり、“8”字型運動においても本研究では同様の定義である。 Kc 数の増加にともなう“8”字型運動全体の軌跡は大きくなるが、渦が流出しやすい区間は(A)~(D)の4点によって区切られているため、この4つの区間は円運動の場合ほど Kc 数の増加に比例して大きくなるわけではない。従って、円運動とは異なり、ある程度の Kc 数までは一定の渦の個数しか流出しないと考えられる。

$39.1 < Kc \leq 46.2$ の範囲では(B)~(C), (D)~(A)間で円柱から流出する渦が1個ずつ増えて全体で10個となった。また $46.2 < Kc \leq 53.3$ の範囲では4つの区間でそれぞれ流出する渦がさらに1個ずつ増え、全体で14個の渦が円柱から流出した。このように8の字運動においても流出する渦の個数は Kc 数によって変化した。

本研究により、強制“8”字型運動においても、 Kc 数の範囲で区分することで流出渦のモデル化が容易となることがわかった。これにより、長大弾性管の疲労破壊の主原因である渦励振のなかでも、特に自励的に発生しやすい振動を引き起こす渦の流出位置を推定可能となった。そして、長大弾性管のある箇所において、繰り返し荷重が働く箇所を推定

することが可能となった。

今後の展望としては、本研究で得られた Kc 数に基づく流出渦モデルを構造面の3次元連成を考慮可能な運動方程式と組み合わせ、長大弾性管全体の挙動を推定し、長大弾性管全体のどの箇所に疲労破壊が生じるのかを推定する必要がある。

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2件)

- ① 千賀英敬、鈴木博義、宮川智行、“8”字型運動を行う剛体円柱まわりの流場解析、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第8号、2009、査読無
- ② 千賀英敬、鈴木博義、小寺山亘、3次元連成を考慮した長大弾性管の渦励振推定法、第20回海洋工学シンポジウム、CD-ROM、OES-101、2008、査読無

[学会発表] (計2件)

- ① 千賀英敬、“8”字型運動を行う剛体円柱まわりの流場解析、日本船舶海洋工学会春季講演会、2009年5月、神戸市産業振興センター
- ② 千賀英敬、3次元連成を考慮した長大弾性管の渦励振推定法、第20回海洋工学シンポジウム、2008年3月、日本大学理工学部駿河台キャンパス

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：60432522

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者