

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289343

研究課題名(和文)複数本で構成されるライザーシステムのVIVに関する研究

研究課題名(英文)Study on the VIV for Multiple Riser System

研究代表者

藤原 智 (FUJIWARA, Tomo)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70511591

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)：石油・天然ガス開発や海底鉱物資源開発に用いられるライザーシステムのうち、生産効率向上や冗長性確保のために複数本で構成された特に流体力学的に相互干渉が発生するような近接配置が成されたシステムを対象として、実用的な潮流中渦励振挙動の解析手法を検討した。

その結果、流向および円柱間距離をパラメータとして流場中挙動が変化し、幾つかの振動パターンに分類できることを示し、各振動パターンに応じた流体力計測装置を開発し流体力計測試験を行った。さらにスペーサーで拘束された2本管のねじれを再現した試験装置を開発し、渦励振挙動が2本管のねじれ運動を増長する可能性があることを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：The riser system for using oil/gas development or offshore mining development is planning the multiple riser system for improving production efficiency and securing redundancy. We have studied practical method for analyzing vortex excitation behavior in tidal current for a system consisting of multiple pieces and close proximity arrangement where hydro-dynamically mutual interference occurs.

As a result of our research, we showed that the behavior in the current changes with the flow direction and the distance between cylinders. And the behavior can be classified into several vibration patterns. In addition, a fluid force measuring device corresponding to each vibration pattern was developed and a fluid force measurement test was conducted. Furthermore, we developed a test apparatus that reproduces the twist of the two pipe constrained by the spacer. Experimentally showed that the vortex induced vibration behavior may increase the twisting motion of the two tied pipes.

研究分野：海中・海底工学

キーワード：海洋開発 海底鉱物資源 ライザー 水中線状構造物 VIV 水槽試験

1. 研究開始当初の背景

海底鉬物資源は石油・天然ガスなどのエネルギー資源以外の海洋資源として、これまでも注目されてきたが、近年の資源コストの高騰や調達リスク回避の観点から改めて注目されており、我が国でも(独)石油天然ガス・金属鉬物資源機構(JOGMEC)が主導し日本近海にある海底熱水鉬床の採鉬及び集鉬を検討するプロジェクトが進められている¹⁾。

海底鉬物資源を産出するための採鉬方法としては、エアリフト方式、バケット・グラブ方式、スラリー方式等が検討されているが、日産量等の開発条件を満足する手法として鉬物資源を細かく粉碎して、海水と混合したスラリーとして海上まで運搬するスラリー方式が有力と考えられる。スラリー方式を採用した場合、Fig.1 に示すようなライザーシステムの導入が見込まれており²⁾、これら揚鉬ライザーシステムでは、揚鉬管だけでなく浮体上で処理された揚鉬水を海底付近で排水するため、また海底に設置する採鉬機等の機器へ信号・動力を供給するためのアンビリカルケーブル等を含めて複数本で構成されるライザーシステムとなることが予想される。合わせてFig. 1 に示す揚鉬ライザーでは、採鉬機から母船へ向かう往路にはスラリーとして粉碎した鉬石を輸送するため、往路と復路で内部流体の見かけ上の密度が異なることが予想される。

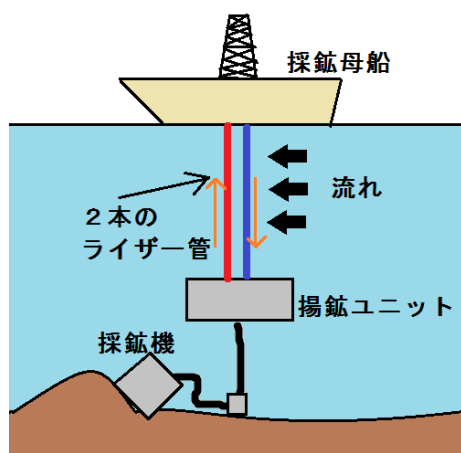


図1 採鉬システム概略図

複数本のライザーを用いることはシステムの冗長性の観点からメリットがあるものの、複数本の近接配置された線状構造物が潮流中に設置されると、単独で設置した場合と比較して、管と管の間を潮流が通ることによって流路が狭くなり流速が早くなる縮流効果や、流体中に物体を配置することにより、物体の後ろ側の流入速度が低下する伴流影響が発生することにより流速が変化する。また、線状構造物近傍の流路の複雑化により流速及び流向が変化する事で潮流中 VIV (Vortex Induced Vibration; 渦励振) 挙動が変化することが予想される。VIV は比較的周波数が高く波長の短いたわみ変形振動となるため、ライザー管の管体、母船と接続す

る端部の疲労寿命に大きな影響を及ぼしうる。例えば過去においてブラジル沖に設置されたセミサブ型プラットフォームに取付けられた冷却水揚水のための取水管が母船の動揺もしくはVIVによって1年も経たずにフランジ接続部より下が脱落するといった事例が報告されている。

2. 研究の目的

本研究では、複数本の水中線状構造物のうち、特に流体力学的に相互干渉が発生するような近接配置が成され、互いの相対距離をスペーサー等である程度拘束されたシステムを対象として、実用的な潮流中 VIV 挙動の解析手法を検討した。

3. 研究の方法

研究では主に以下の2つの項目について文献調査や水槽試験および結果検討を行った。

- (1). 複数本の円柱の流場中挙動を把握するとともに単一管の挙動との比較を行うために、複数本円柱を曳航したときの挙動を計測する試験を実施
- (2). 複数本ライザーに対してライザー周りの縮流効果や流路の複雑化の影響を縮尺部分模型を用いて計測し、ライザーの本数、管径及び管同士の間隔をパラメータとした流体力荷重の計測

(1) では図 2 に示すようなスペーサーで相対距離がある程度拘束された状態の2本の管で構成されるライザーシステムのうち、スペーサーとスペーサーとで拘束された部分を模擬した模型を用いた。この模型の特徴として、事前に実施した簡易版の円柱曳航試験において発生が確認された上下端を拘束した2本の円柱の間を回転中心としたねじり方向の運動を再現した。具体的にはスペーサーによる相対位置の拘束を円柱取付部の天秤によって再現し、実機の2本管のねじれによる回転運動をばねによる半拘束で再現した。

実験は(国研)海上・港湾・航空技術研究所内の動揺水槽にて実施した。実験に使用した円柱模型は上流側および下流側ともに同一の仕様とし、ポリカーボネート製の直径0.076m、全長4mのパイプを用いた。下端部の天秤には円柱模型の張力を担保し、且つ曳航時の模型の浮き上がりを抑制するためのおもりを取り付けた。

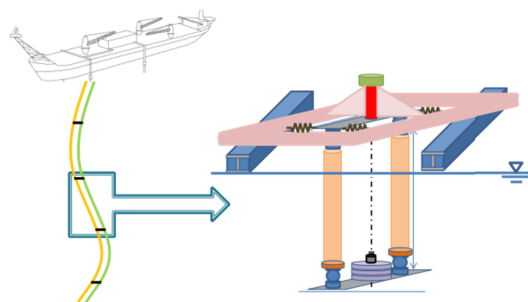


図2 曳航試験に用いた供試模型の模式図

試験条件として、2本の円柱間距離は流体

力学的な干渉影響を検証する上で重要なパラメータとなるため、芯 芯でパイプの2倍の距離（パイプ間にもう1本入る距離）から10倍の距離まで変更した。また、曳航方向に対する流向は、曳航方向に対して直列に2本の円柱が並ぶ0°から2本の円柱が平行に並ぶ90°まで15°刻みで計測を行った。曳航速度は本試験の後に実施する流体力計測試験と条件を揃え、0.10～0.45m/sとした。

計測では2本の円柱模型それぞれの中央付近と下端付近に2軸の防水型加速度計を固定し、曳航時の曳航方向および直交方向の加速度を計測した。加えて上端部のばね拘束した天秤の回転運動を回転中心に設置したポテンシオメータを用いて計測した。なお、曳航速度と水温は同時に計測し、円柱模型の物性値（重量、曲げ剛性等）は事前に計測した。

(2)で行った水槽試験も(国研)海上・港湾・航空技術研究所内の極浅水域流体力計測用水路（小型2次元水槽）で実施した。本水槽は長さ22m、幅0.5m、深さ0.7mである。円柱模型と検力計取付部を図3に示す。実験に使用した円柱模型は上流側および下流側ともに同一の仕様とし、アルミニウム製で中性浮力になるように調整している。水深は0.640mとし、曳航台車上に設置した1軸強制動揺装置を介して加振を行う際の初期位置が円柱模型の中心位置が水面と水槽底に中間位置に来るように調整した。なお、模型端部による3次元流れの影響を避けるため模型の両端にはアルミニウム製の端板を取り付けた。また、2つの円柱模型の角度および間隔を調整するフレームと流体力計測円柱の間には境界層の影響を避けるためにスリーブを取り付けた。模型に作用する流体力は模型内部に組み込んだ左右2組の2分力計（加振方向と曳航方向）で計測し、計測した流体力は曳航速度、強制動揺装置の変位および水温と共に時系列データとして収録した。



図3 計測円柱（前後2本）

円柱の振動問題を検討する上で、円柱が振動する条件は静止円柱の渦剥離が発生する換算流速 V_R （(1)式）付近と考えて良い。

$$V_R = U / fD_0 \quad (1)$$

$3 \leq V_R \leq 16$ の範囲内において渦剥離が発生し、特にすべての Re 数において VIV 運動は $5 \leq V_R \leq 9$ の範囲で最も大きくなるといわれている³⁾。そのため本試験では強制動揺装置の加振周波数 f および曳航台車の速度を $5 \leq V_R \leq 9$ をカバーするように設定した。

また、2本の円柱間距離と流向は円柱後方に発生する伴流影響や管同士の近接影響を検討する上で重要なパラメータと成り得るが、これらを幅広くカバーした場合、計測点数が膨大な数となることを見込まれたため、本試験では円柱間距離 D は 1D と 2D、2本の流向は 0°（直列配置）～90°（並列配置）とした。流向方向に対して直交方向の加振試験条件の詳細を表1に示し、回転方向加振試験の条件を表2に示す。

表1 試験条件（直交方向加振）

パラメータ	単位	範囲
曳航速度	m/sec	0.30 と 0.40m/sec
加振振幅	m	0.1～1.25D、固定
加振周波数	Hz	0.5～1.25Hz
円柱間距離	m	1.0 と 2.0
流向	deg	0°～90°

表2 試験条件（回転方向加振）

パラメータ	単位	範囲
曳航速度	m/sec	0.40m/sec
加振振幅	deg	0°～30°
加振周波数	Hz	0.5～1.25Hz
円柱間距離	m	2.0
流向	deg	0°と15°

計測結果の解析では円柱に働く流体力を無次元化し、流れ方向の抗力係数、流れ直交方向の付加慣性係数及び線形減衰係数を算出した。以下に算出方法を述べる

抗力係数算出

円柱に働く流れ方向の力の平均値を F_x とし、抗力係数 C_D を(2)式より求めた。 ρ は水の密度である。

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U^2 L D_0} \quad (2)$$

付加慣性係数及び線形減衰係数算出

円柱に働く流れ直交方向の力の加振周波数と同周波数の成分を調和解析により抽出した。抽出された力は(3)式のように表される。

$$F_z(t) = F_{z0} \cos(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

ここでは加振周波数を ω 、強制動揺装置からの位相差を φ としている。

ここで、(3)式を加法定理により分解することにより(4)式を得る。

$$F_z(t) = F_{z0} \cos \varphi \cos \omega t + F_{z0} \sin \varphi \sin \omega t \quad (4)$$

第 1 項は加振の加速度と同位相であり、揚力方向の見かけ質量力（慣性力と付加慣性力の和）に相当し、第 2 項は速度と同位相であり、揚力方向の線形減衰力に相当する。これにより各円柱に働く付加慣性力、線形減衰力の無次元化係数 C_{La} 、 C_{Ld} を (5)、(6) 式のように定義する。 M は円柱質量であり、付加慣性係数の分子第 2 項は慣性力である。

$$C_{La} = \frac{F_{Z0} \cos \varphi - MA(2\pi f)^2}{\frac{1}{4} \rho \pi D_0^2 LA(2\pi f)^2} \quad (5)$$

$$C_{Ld} = \frac{F_{Z0} \sin \varphi}{\rho DLUA(2\pi f)} \quad (6)$$

また 2 本の円柱を 1 つの物体と見なし、その中点に作用する力及び中点まわりのモーメントについても流体力係数を算出した。中点に作用する力は 2 本の円柱に作用する力の合力として求め、合力に関しては同様の方法で無次元化を行った。モーメントに関しては (7) 式、(8) 式のように無次元化を行った。 F_x' 、 F_z' はそれぞれ上流側円柱にかかる流体力と下流側円柱にかかる流体力の差分であり、位相差の下付き文字はその方向成分に対する位相差を表す。

$$C_{La} = \frac{F_z' \cos \varphi_z \cos \alpha - F_x' \cos \varphi_x \sin \alpha}{\frac{1}{2} \rho \pi D_0^2 LA(2\pi f)^2} \quad (7)$$

$$C_{Ld} = \frac{F_z' \sin \varphi_z \cos \alpha - F_x' \sin \varphi_x \sin \alpha}{2\rho DLUA(2\pi f)} \quad (8)$$

4. 研究成果

(1) 複数本円柱を曳航したときの挙動を計測する試験では大きくまとめて以下の 2 点について知見が得られた。また、これらの知見が (2) で実施した流体力荷重の計測試験へと発展した。

円柱模型の振動

2 本の円柱模型の曳航時の振動を上方および水中カメラによる撮影と加速度計の位相解析から下記の 5 パターンに分類し、解析した。

- a. 流向方向に同位相、直交方向に同位相
- b. 流向方向に同位相、直交方向に逆位相
- c. 流向方向に逆位相、直交方向に同位相
- d. 流向方向に逆位相、直交方向に逆位相
- e. a に近いが下端が振り子運動

このうち、e. を除いて曳航方向の振動が直交方向の振動の倍周期で振動する渦励振と同じ傾向を示している。曳航速度と流向をパラメータとした解析結果を図 4 に、曳航速度と円柱間距離をパラメータとした解析結果を図 5 にそれぞれ示す。流向をパラメータとして評価すると、前方に配置した円柱の後流影響が発生する流向 0° から 60° においてパターン d. の互い違いに 8 の字運動を描きなが

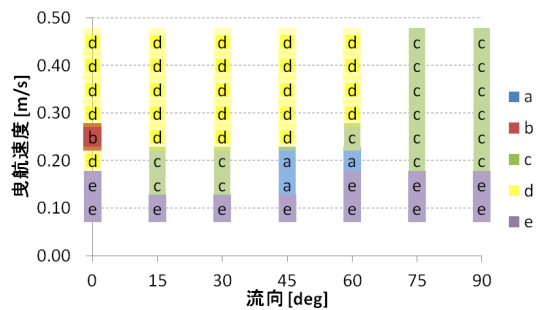


図 4 流向による振動モード変化 (円柱間距離 = 3D)

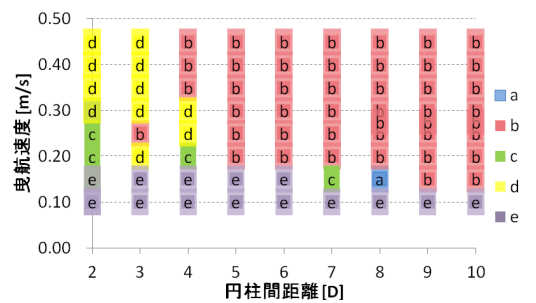


図 5 円柱間距離による振動モード変化 (流向 = 0°)

ら接近したり離れたりする振動をとるが、流向 75° と 90° では同位相の 8 の字運動となる。また、円柱間距離をパラメータとして評価すると、円柱間距離が近い 2D と 3D では管同士の間隔がある接近したり離れたりする挙動をとるが、円柱間距離が離れると同位相の運動となる等の特徴が見られた。

回転運動

2 本の円柱を吊り下げた天秤の回転運動の計測結果を図 6 に示す。計測結果にはばねによる半拘束に加えて比較のために回転運動を固定したケースと円柱間にスペーサーを追加して円柱の振動を制限したケースを加えた。なお、回転振幅は設定した流向から左右に振れた角度の片振幅とした。

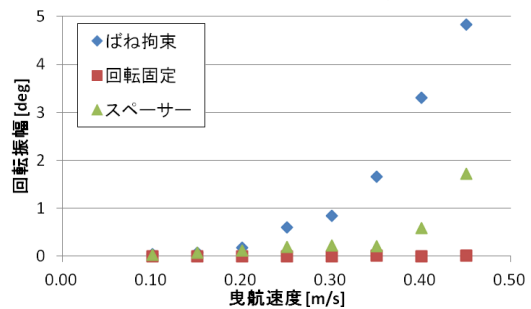


図 6 回転振幅と拘束条件 (流向 = 0° 、円柱間距離 = 3D)

この結果より、上端の回転がばね拘束場合と比較してスペーサーを追加して円柱の振動を抑制すると回転運動も抑制される可能性があることを示した。

(2) 流体力荷重の計測試験では曳航方向に対して直交方向強制加振による流体力計測試験の結果、上流側と下流側の円柱はそれぞ

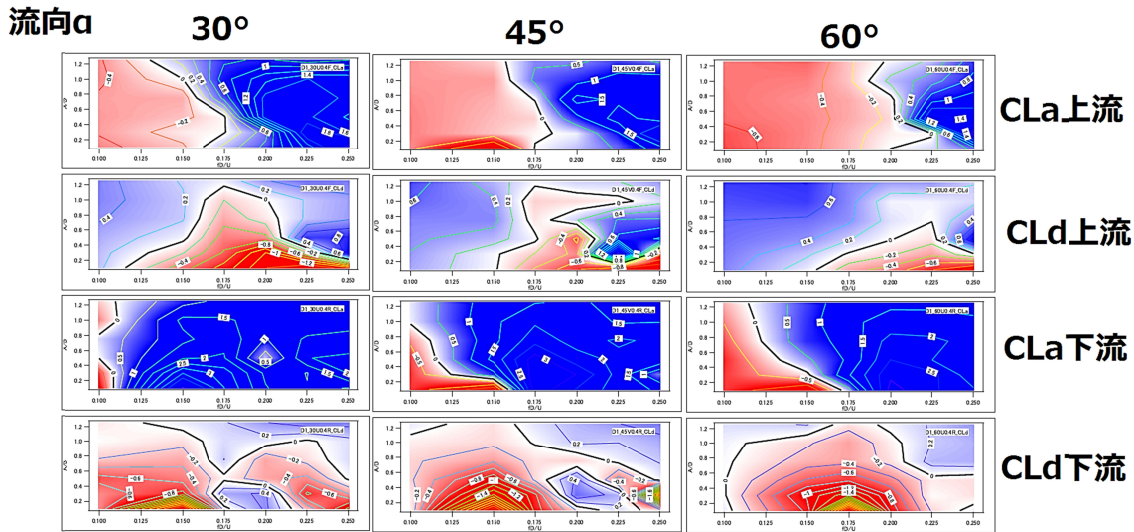


図7 流向を変化させた時の付加慣性係数と線形減衰係数($D/D_0=2, U=0.4\text{m/s}$)

れで単円柱における結果と異なる流体力係数の特性が得られた。また、これらの結果は先行研究及び本研究における無加振曳航時の解析結果から予想される励振周波数帯とは異なる結果が出ているケースもいくつか存在し、特に直列状態における上流側円柱は渦放出が抑制されると考えられている無加振曳航状態に対して、加振試験の結果は単円柱よりも換算周波数及び無次元振幅ともに広い範囲で起振力が生じた。また、全体として流向が並列に近くなるほど、双方の円柱で励振が起こる周波数域が高い方向に移動していく傾向が見られた。その結果の一部を図7に示す。

2本の円柱を1体と見なした場合、直交方向には単円柱に比べ広い無次元振幅及び周波数域で起振力が発生した。また、この起振力は円柱間距離を開くと低減された。また、曳航方向と直行する振動における回転方向起振力は円柱の位置関係が直列に近い場合に大きな絶対値を持つことが分かった。

回転方向強制加振試験による結果では、今回計測を行った $D/D_0=2, \theta=0^\circ, 15^\circ$ の2ケースにおいては線形減衰が負になる領域が計測した範囲内では捉えきれなかったが、計測により周波数・振幅ともに単円柱に比べて広い範囲で起振力が生じることが分かった。また、振幅の上昇とともに起振力の生じる周波数域が移動する現象が見られた。その結果の一部を図8に示す。

<引用文献>

JOGMEC HP「海底熱水鉱床開発計画第1期最終報告書」の取りまとめ
http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_10_000021.html
 JOGMEC HP 資源ライブラリ
http://www.jogmec.go.jp/library/contents9_02.html
 DET NORSKE VERITAS : Recommended Practice DNV-RP-C205, April 2007, pp.94.

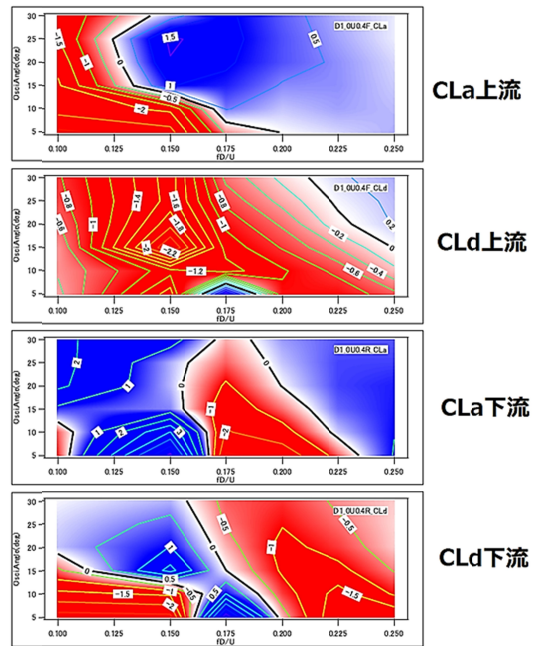


図8 回転方向加振試験における2円柱個別の付加慣性係数と線形減衰係数(初期流向 $\theta=0^\circ$)

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)

〔学会発表〕(計2件)

藤原 智、山本 寛弥、尾崎 雅彦、2本の円柱に作用するVIV流体力の計測試験、日本船舶海洋工学会平成27年度春季講演会講演論文集、査読無、2015
山本 寛弥、藤原 智、尾崎 雅彦、間隔を維持する2本の円柱に作用する流れ直交方向及び回転方向のVIV流体力の計測、日本船舶海洋工学会平成27年度秋季講演会講演論文集、査読無、2015

〔その他〕

藤原 智、金田 成雄、正信 聡太郎、
笹川 広紀、近接配置した鉛直大口径管の
流力弾性現象の研究、海上技術安全研究所
第 17 回研究発表会、査読無、2017

6 . 研究組織

(1)研究代表者

藤原 智 (FUJIWARA, Tomo)
国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術
研究所・その他の部局等・研究員
研究者番号： 7 0 5 1 1 5 9 1

(2)研究分担者

高橋 一比古 (TAKAHASHI, Ichihiko)
国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術
研究所・その他の部局等・研究員
研究者番号： 3 0 4 2 5 7 4 8

尾崎 雅彦 (OZAKI, Masahiko)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
教授
研究者番号： 3 0 5 2 9 7 0 6

(4)研究協力者

山本 寛弥 (YAMAMOTO, Hiroya)