

## 掘削ライザーにおける渦振動評価手法の構築と知見の拡充

## Study on Vortex Induced Vibration for Riser System Design



池末 俊一\*<sup>1</sup>  
Shunichi Ikesue

安藤 義人\*<sup>2</sup>  
Yoshito Ando

山本 博行\*<sup>3</sup>  
Hiroyuki Yamamoto

宇佐美 陽生\*<sup>4</sup>  
Akio Usami

鈴木 英之\*<sup>5</sup>  
Hideyuki Suzuki

許 正憲\*<sup>6</sup>  
Masanori Kyo

今後、我が国でも海洋資源の利用・開発が促進され、掘削ライザーの利用ニーズも高まると考えられる。その際の懸念事項としてライザーの渦励振（以下、VIV と称す：Vortex Induced Vibration）が挙げられる。ライザーが用いられる対象領域としては強潮流/海流となる海域も想定されるが、この場合にはレイノルズ数が高い領域となり、これまで VIV 設計で考慮してきた流体力特性とは異なる領域となる。また、従来の研究では主に流れ直交方向の振動に着目した内容が多く、流れ方向の振動の影響については必ずしも体系的な検討がなされていない。本報では、これらの課題に対する当社の取組みについて紹介する。

## 1. はじめに

ライザーは、石油開発や地球の科学調査において海底を試掘するために用いられる掘削ライザーと、海底油田から採取した原油を海面まで持ち上げるために用いられる生産ライザーの二つのグループに大別される。日本国内では地球深部探査船「ちきゅう」に装備された掘削ライザーがよく知られている。掘削ライザー、生産ライザーともに破壊時の経済的損失、環境への影響は非常に大きなものとなるため、海洋工学に関する国際学会では主要テーマの一つとなっている。

ここで、ライザーは非常に細長い構造であるため、局部的な座屈が主要な破壊モードとなる。したがって、これを防止する観点から、常にライザーにテンションが作用する状態となるよう設計することが求められる。

さらに、近年では強潮流/海流下での運用が増加しつつあり、局部座屈回避の注意点に加えて、ライザーから放出される渦によって励起される VIV にも注目が集まっている。長大構造物であるライザーは高次の振動モードまで発生する可能性があり、数 Hz 程度までの周期的な渦放出によりライザーが共振することで、疲労破壊など安全に関わる問題を引き起こす可能性がある。最近ではこの VIV に注目が集まり、Shell（オランダ）・BP（イギリス）・Chevron（アメリカ）・Petrobras（ブラジル）等の国際石油メジャー、DNV（ノルウェー）等の船級協会、大学機関が連携して研究を進めている。当社でも、一般財団法人日本海事協会（NK）、東京大学、(独)海洋研究開発機構との共同研究として、ライザーの VIV 評価技術の構築に取り組んでおり、本報ではその概要について紹介する。

\*1 技術統括本部 長崎研究所 工博

\*2 技術統括本部 長崎研究所

\*3 船舶・海洋事業本部 潜水艦部

\*4 一般財団法人 日本海事協会 資源エネルギー部 主管

\*5 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授 工博

\*6 (独)海洋研究開発機構 地球深部探査センター グループリーダー 工博

## 2. ライザーの VIV 評価技術に対する取り組み

### 2.1 ライザーの VIV 評価技術における課題

VIV の現象は非常に複雑で、科学的にも興味深く、各国で盛んに研究が行われている。ただし、ライザーの VIV 挙動を的確に予測し、設計へ反映する手法については、未だ発展途上の段階にあり、今後のライザーの VIV 予測・設計技術の開発が望まれる。

これまでに開発されてきたライザーにおける VIV 挙動の予測手法は、流体部の取り扱いに着目すると、以下の 3 種類に大別される。

- ① 流体力特性をデータベースでそろえ、そのデータを参照して構造計算
- ② 構造応答に応じて各断面での流体計算を行い、構造計算と連成
- ③ 3次元モデルで、CFD と構造計算を連成

②については、Yiannis Constantinides<sup>(1)</sup>が 2D-CFD と FEM を連成した手法を検討している。また、③については、C. Le Cunff<sup>(2)</sup>が 3D-CFD と FEM(モード法)を連成した手法を検討している。これらの手法は、ライザー周りの流場とライザーの構造応答を直接的に考慮する手法として、現象を詳細に把握する上では非常に重要な試みであるが、流体部の計算負荷が高いため設計に適した手法ではない。一方で、①はデータベース作成に時間がかかるものの、流速、流速分布、ライザー管の径(剛性)等に関するパラメトリックスタディを短時間で行うことが可能となるため設計に適した手法である。例えば、野澤<sup>(3)</sup>は①の手法をベースとして LINE-3D\_VIV というオリジナルコードを発表している。この手法で用いられるデータベースは、水槽実験から得られた結果を基に構築することができる。しかし、データベースの構築においては以下の課題がある。

- (1) 強潮流/海流域における高レイノルズ数を想定した条件では、大型模型と高速な曳引設備が必要となり、流体力を取得できる設備は世界的にも限定される。特にレイノルズ数が数百万となる領域では、水槽実験自体が非現実的となる。
- (2) VIV の現象は一般的に流れに対して直交する方向の振動を取り扱うが、それだけでなく、流れ方向の振動が流体力に影響を与える可能性があり、これを考慮した流体力の知見は未だ希少である。

そこで本研究では、水槽実験に加えて CFD による流体力評価を援用することで、強潮流/海流域を想定した高レイノルズ数領域を対象とし、かつ流れ方向の振動の影響を考慮した流体力データベースの構築に取り組んだ。

### 2.2 本研究で対象とした流体力データベースの取得条件

本研究で対象とした条件を以下に述べる。図1に円柱周囲に発生する渦のイメージを示すが、円柱周囲に渦が周期的に発生することにより、流れ方向及び流れ直交方向に周期的な変動流体力が発生する。ライザーの渦励振はこの周期的な変動流体力によって誘起されるため、円柱の振動状態と変動流体力の関係を把握することが重要となる。

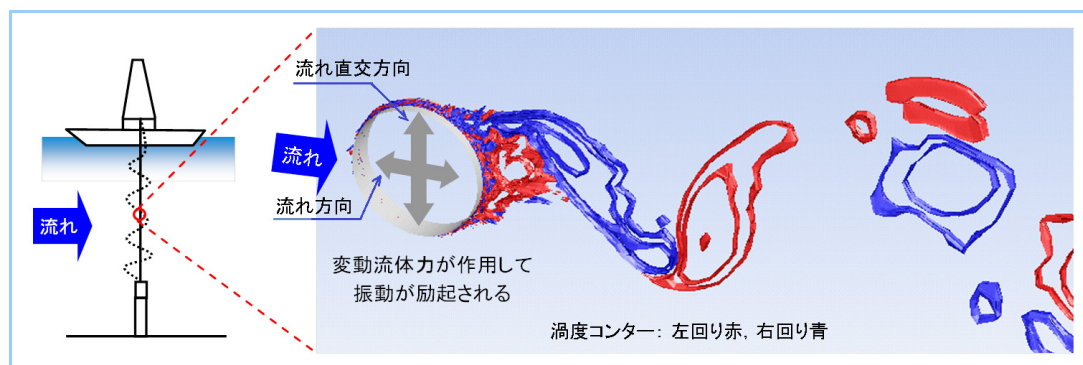


図1 円柱周囲に生じる渦のイメージ (高レイノルズ数条件における CFD 事例)

ここで、「ちきゅう」の事例を元に、流体力データベースの取得条件を考える。ライザーの外径は浮力材を含めると 1.2m 程度となる。想定される強海流の条件を 0.5m/s(深水域)~3.0m/s(表層域)とすると、レイノルズ数は 60~360 万程度となる。

一般に、このレイノルズ数領域では円柱のストローハル数(渦発生周波数×円柱直径/流速)が 0.2~0.5 程度の値となり、これまで各国で研究されてきたレイノルズ数 30 万以下の領域(ストローハル数 0.2 程度)とは、流体力特性が異なるものと考えられる。また、実際の振動では、流れ直交方向の振動だけでなく、流れ方向の振動が発生していると考えられる。それによって円柱周囲に生ずる渦の性状が変化し、渦励振の際の流体力特性に影響を与える。

したがって本研究では、流れ直交方向に加えて流れ方向の振動も考慮し、レイノルズ数 50 万と 300 万における高レイノルズ数領域を流体力データベースの取得条件として選定した。

### 2.3 流体力データベースの構築

本研究では、レイノルズ数 50 万の条件について、当社水槽実験による流体力の取得を行い、実験の困難なレイノルズ数 300 万の条件については CFD による流体力の取得を行った。また、水槽実験及び CFD においては、一様流場における円柱要素を流れ方向及び流れ直交方向に次式のように加振し、流体力波形を取得した。

$$x = A_x \sin(4\pi f_y \cdot t + \gamma) \quad (1)$$

$$y = A_y \sin(2\pi f_y \cdot t) \quad (2)$$

ここに、 $x, y$  は円柱要素の流れ方向及び流れ直交方向の変位、 $A_x, A_y$  は各々の加振振幅であり、 $\gamma$  はそれらの加振位相差である。加振周波数については、渦が交互に発生することで流れ方向の流体力変動が流れ直交方向の 2 倍となるため、流れ直交方向の周波数  $f_y$  に対して流れ方向の周波数が  $2f_y$  となるような加振を行っている。本研究で製作した水槽実験装置の概要を図2に示すが、実験では円柱模型を曳引することで相対的な流場を形成した。また、鉛直・水平方向の 2 方向加振が可能な加振装置を製作し、円柱に作用する流体力波形を取得した。CFD については、強制加振時の流場の一例を図3に示す。一様流場中の円柱要素を 2 方向に加振する手法を開発し、円柱に作用する流体力波形を取得している。

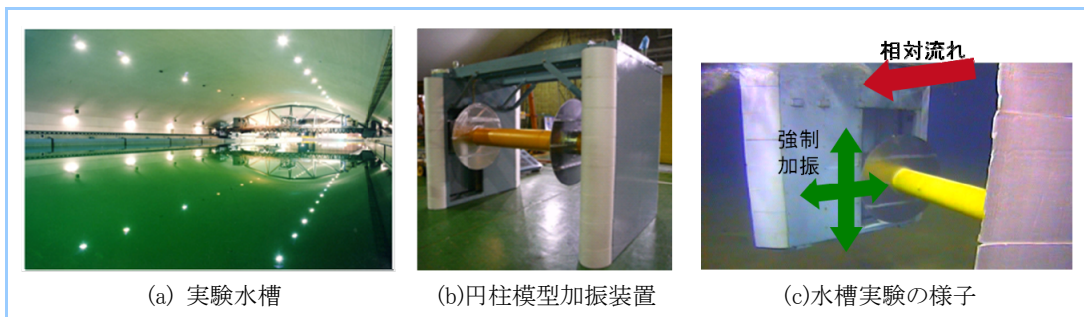


図2 水槽実験装置の概要

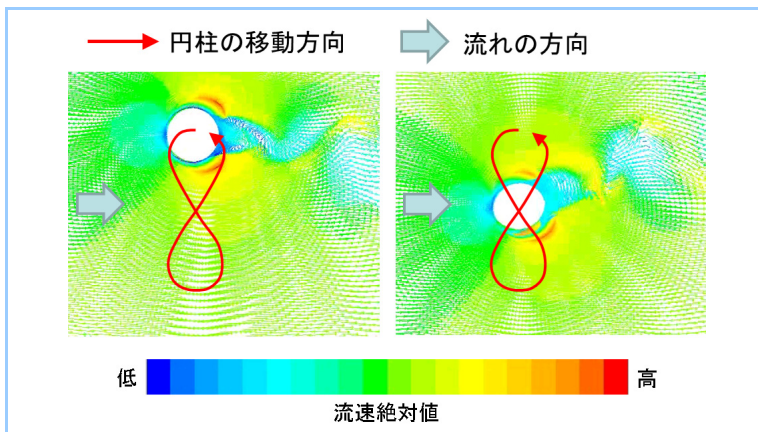


図3 CFDの事例(流速ベクトル図)

本研究では、実験及び CFD にて得られた流体力波形を正弦波フィッティングして、各加振方向の流体力振幅  $F_{0x}$ ,  $F_{0y}$  及び加振変位に対する位相  $\phi_x$ ,  $\phi_y$  を求めた。この結果を用いて、**図4**に示すように、流体力を加振加速度比例成分と加振速度比例成分に分離し、付加質量係数、減衰係数を算出してデータベース化した。

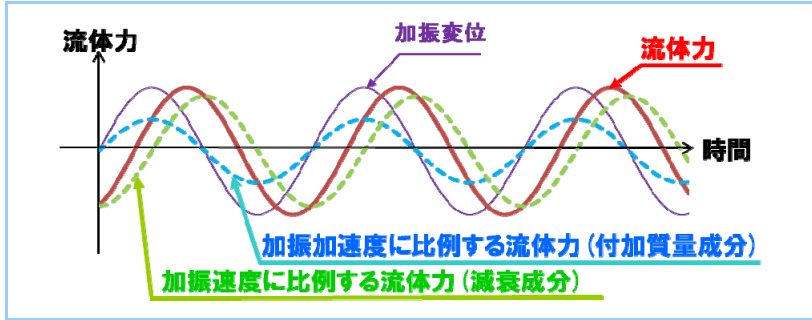


図4 流体力波形のイメージ

参考として、流れ直交方向の付加質量係数、減衰係数の算出式を以下に示す。

$$\langle \text{付加質量係数} \rangle = \frac{F_{0y} \cos \phi_y}{\rho \frac{\pi}{4} D^2 L A_y (2\pi f_y)^2} \quad \langle \text{減衰係数} \rangle = \frac{F_{0y} \sin \phi_y}{\frac{1}{2} \rho D L U A_y (2\pi f_y)} \quad (3)$$

ここに、 $\rho$ は流体密度、 $U$ は流速、 $D$ ,  $L$ は円柱径及び円柱長さである。

#### 2.4 本研究で得られた流体力特性に関する知見

本研究では従来着目されていた流れ直交方向の振動だけでなく、流れ方向の振動を考慮した流体力データベースを取得している。以下に、得られた流体力特性の事例を紹介する。

**図5**に流れ方向の振動の有無による流体力特性の違いを示す。流れ方向の振動が無い場合に比べて、流れ方向の振動を考慮する場合には起振力となる領域(赤色～黄色の領域)が拡大している。この特性は、流れ方向の振動によって流れ直交方向の振動が増幅される可能性を示すものといえる。

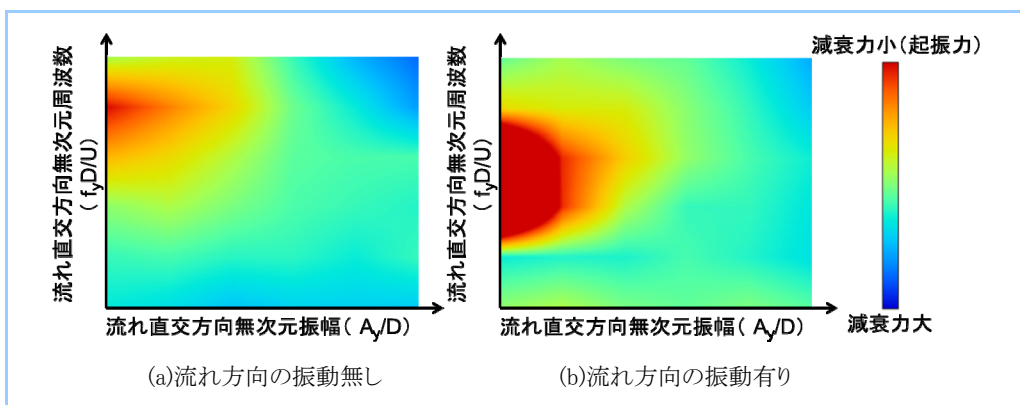


図5 流れ直交方向の流体力特性(流れ方向の振動の影響)

加振位相差による影響を**図6**に示す。加振位相差によって、流れ直交方向の流体力特性の分布が変化しており、**図6**のケースでは加振位相差によって減衰力大となる領域(青色～水色の領域)が拡大している。したがって、実際の現象においては、VIV の増幅しやすい位相差とそうでない位相差が存在する可能性を示すものといえる。

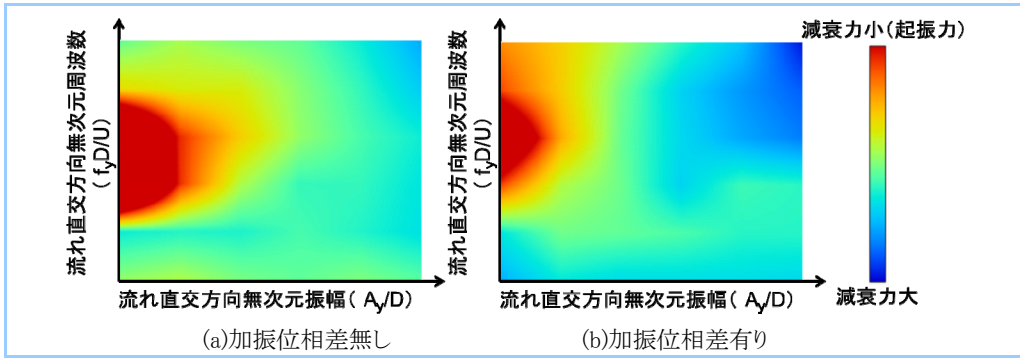


図6 流れ直交方向の流体力特性(流れ方向と流れ直交方向の加振位相差の影響)

流れ方向の振動振幅が減衰力に与える影響を図7に示す。流れ方向の振動振幅が大きくなると、流れ直交方向の減衰力が大となる領域(青色～水色の領域)が拡大するという結果が得られている。したがって、流れ方向の振動振幅がある程度発達すると、流れ直交方向の振動が抑制される領域が存在する可能性を示すものといえる。

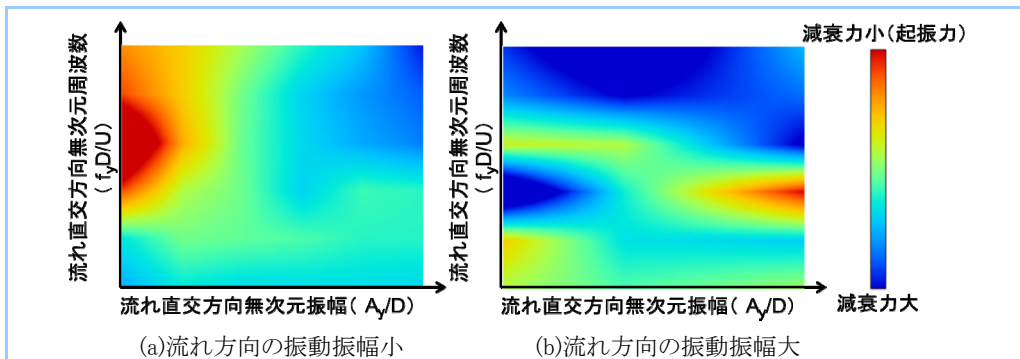


図7 流れ直交方向の流体力特性(流れ方向の振動振幅の影響)

以上は、今回得られた成果のうちのごく一部であるが、本研究ではこのような流体力データを体系的に取得し、データベース化している。

### 2.5 取得した流体力データベースの活用

本研究で取得した流体力データベースについては、鈴木ら<sup>(3)</sup>が開発した VIV 解析コード LINE-3D\_VIV への組込を行い、流れ方向と流れ直交方向の連成を考慮した高レイノルズ数領域対応の VIV 評価手法として整備している。図8にその概要を示すが、この評価手法の活用によって、ライザーの VIV 評価をより高精度に実施し、ライザーの強潮流/海流域への展開に資するとともに、ライザーの安全性向上に貢献していきたいと考えている。

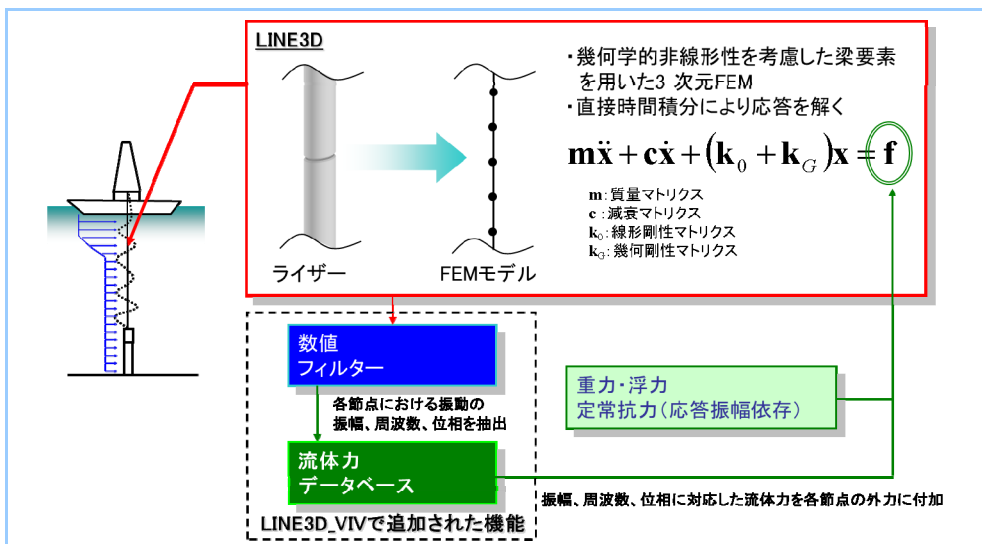


図8 LINE3D\_VIVによるライザーのVIV評価の概要

### 3. まとめ

本研究では、ライザーに関する従来研究では取り扱われていなかった強潮流/海流域を想定した 50~300 万という極めて高いレイノルズ数領域を対象として、流れ方向と流れ直交方向の連成振動を考慮した流体力データベースを取得した。今回得られた流体力データからは、流れ方向の振動の影響等に関する新規の応答特性を把握し、ライザーの VIV 特性に対する知見を拡充することができた。

今後は、本研究成果をライザーの安全性向上のための技術開発に活用して、我が国の海洋開発の発展に貢献したいと考えている。

本研究は「業界要望による共同研究」スキームにより一般財団法人日本海事協会の支援を受けるとともに、同協会、東京大学及び(独)海洋研究開発機構との共同研究として実施した。

### 参考文献

- (1) Yiannis Constantinides, Owen H. Oakley, Jr., Numerical prediction of VIV and comparison with field experiments, OMAE2008, June 15-20, 2008, Estoril, Portugal.
- (2) C. Le Cunff, F. Biolley, E. Fontaine, S. Étienne and M.L. Facchinetti., Vortex-Induced Vibrations of Risers:Theoretical, Numerical and Experimental Investigation, Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 1, pp. 59-69
- (3) 野澤俊樹, 鈴木英之, 太田 真:大水深ライザーの VIV 挙動予測と抑制のための研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第8号, 2009, pp.85-88.