

# 流体力計測に基づく大水深ライザーの時間領域 VIV 応答解析法の開発

正員 鈴木英之\*、木村亮太\*\*、正員 宇都正太郎\*\*\*、正員 林昌奎\*\*\*\*、  
正員 國分健太郎\*\*\*、有馬安則\*\*\*\*\*

Development of Time Domain VIV Response Analysis Method Based on Measured VIV Hydrodynamic Force

by Hideyuki Suzuki, Member Ryota Kimura Shotaro Uto, Member Chang-Kyu Rheem, Member  
Kentaro Kokubun, Member Yasunori Arima

## Summary

A time domain analysis method of Vortex Induced Vibration (VIV) was developed for risers and towing pipes with curvature. Risers are increasingly installed in deepwater and catenary shape is used utilizing increasing relative flexibility. For example, riser designs such as Steel Catenary Riser (SCR), Compliant Vertical Access Riser (CVAR), Lazy Wave Steel Catenary Riser, etc. are investigated and put to practical use. Other application areas of deepwater pipe structures are CO<sub>2</sub> dilution into ocean concerning global warming. Long towed pipe is used in the moving ship concept. Long pipe structure is also used in deepwater mining. VIV is expected for the inclined pipes. Quantitative analysis of VIV behavior is becoming increasingly important to estimate the fatigue damage of the structures. A time domain VIV simulation method was developed. The analysis method is basically a nonlinear FEM (Finite Element Method) of underwater line structure. The VIV hydrodynamic force is calculated at each time step consulting database of VIV hydrodynamic force. VIV hydrodynamic force on a real scale pipe section subjected to harmonic oscillation was measured at high Reynolds number and arranged into a database. A numerical filter which evaluates amplitude, frequency and phase of local response of a riser from the time history of pipe vibration was developed. Using this filter, response parameters of local vibration is evaluated, and consulting the database and amplitude and phase of VIV force is estimated. The evaluated instantaneous VIV force is applied to the riser. From the procedure the time domain response of pipe is calculated. The validity of the method was verified by comparison with small scale and large scale experimental results carried out in the towing tank. The accuracy of the method is discussed.

## 1. 緒言

海洋石油の掘削・生産や深海鉱物資源の開発、また CO<sub>2</sub> の海中・海底下隔離では長大なライザー管が用いられる。開発は大水深に向かっており、メキシコ湾やブラジル沖の海底油田開発においては、掘削では 3000m 級、生産では 2000m 級のライザーが実用化に至っている。また大水深化に伴い鋼製ライザーは相対的に柔軟化することから、カタナリー形状を採用することが可能になり、Fig.1 に示すように SCR(Steel Catenary Riser)、CVAR (Compliant Vertical Access Riser)、Lazy Wave Steel Catenary Riser など、湾曲部を有する多様な形態のライザーが提案され実用化され、ライザーの多様化が進んでいる。[1-3]

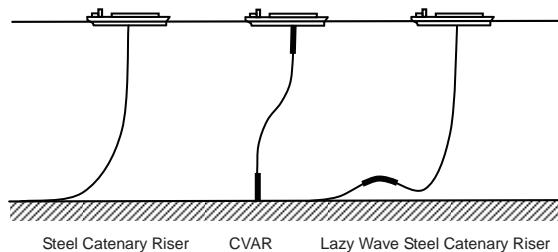


Fig. 1 Deepwater risers with curvature<sup>[1-3]</sup>

長大なライザーの実際の大水深の環境中での挙動を明らかにすることは多くの困難を伴う。大水深で実際に振動を計測することは、周辺の流れ環境の計測も必要であり非常に難しい。一方、水槽実験に関しては、縮尺模型を用いることになるが、相似模型を作ることが困難であることから実験も難しい。流体とライザーの間に複雑な相互干渉を伴うライザー挙動については挙動特性が明らかにされているとは言い難い。一方、ライザーは破損時の環境影響が大きく、大水深ライザーの安全性確保にあたっては、様々な形態のライザーについて、より高い精度でライザー挙動を解析する手法が必要となる。

ライザー挙動解析においては Vortex Induced Vibration (VIV) の応答解析と取扱いが課題になっている。VIV は Fig.2 に示すように、空気や水の流れによって物体の後流に発生する剥離渦に伴い生じる非定常な流体力により、流れと鉛直な方向に物体が振動する現象である。VIV による物体の変位振幅は小さいが、振動数が高いために疲労破壊の原因になると考えられている。



Fig. 2 VIV in uniform flow

ライザーの VIV 挙動解析法については、ライザーを取り巻く流体部分に三次元の CFD を用い、ライザー部分に有限要素法 (FEM) を用いて両者を連成させて解く解析

\* 東京大学大学院 海洋技術環境学専攻  
\*\* 国際石油開発帝石 (株)  
\*\*\* 独) 海上技術安全研究所  
\*\*\*\* 東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター  
\*\*\*\*\* 大日本印刷 (株)

法が理想とされているが、現状では膨大な計算量と精度の観点から実用的とは言い難い。そこで計算量を抑えるために、ライザー回りの流れを二次元の層に分割し、各層における流体力を二次元の CFD で解き、FEM を用いたライザーの応答解析法と連成させて解くストリップ法[4]が提案されているが、精度と計算量の観点から次に説明する揚力モデルを利用する手法に比べて利点が少ないと考えられている[5]。

実用に耐えうるライザーの VIV 挙動解析法としては、円柱の強制加振実験に基づくデータから揚力をモデル化する手法が提案されている。揚力モデル法は強制加振実験を行った範囲内しか計算を行うことができないが実用的な解析法であり、MIT[6]が開発した SHEAR7 やノルウェーで開発された VIVANA[7]など実際の設計に用いられている解析法の多くはこの考えに基づいて開発されている。しかしながら実機大ライザーに対応するためには、高レイノルズ数領域の流体力データベースを組み合わせた解析法を開発した。流体力データベースを構築するに当たっては、実機ライザー相当の模型を用い、傾斜角を考慮した大規模な強制加振実験を実施した。さらに、開発した解析法の検証については実際の大水深ライザーの応答計測結果が無いことから、低レイノルズ数域の VIV 流体力データベースを搭載して、小型模型を用いた実験結果と比較することで解析法の機能の検証を行うとともに、実現象の再現性を確認した。さらに、実機大ライザー模型の自由動揺試験結果と比較することにより、限定的ではあるが検証を行った。以下に本研究の流れを示す。

本研究では、ライザーの新しい動向に対応すべく、これまで同様の手法で対応できなかった新しい取組みとして、高レイノルズ数、傾斜角を考慮した実用的な VIV 挙動解析法として、時間領域の非線形有限要素法と、強制加振実験に基づく周波数領域の流体力データベースを組み合わせた解析法を開発した。流体力データベースを構築するに当たっては、実機ライザー相当の模型を用い、傾斜角を考慮した大規模な強制加振実験を実施した。さらに、開発した解析法の検証については実際の大水深ライザーの応答計測結果が無いことから、低レイノルズ数域の VIV 流体力データベースを搭載して、小型模型を用いた実験結果と比較することで解析法の機能の検証を行うとともに、実現象の再現性を確認した。さらに、実機大ライザー模型の自由動揺試験結果と比較することにより、限定的ではあるが検証を行った。以下に本研究の流れを示す。

## 2. VIV 挙動解析法について

本研究では、水中線状構造物解析プログラム LINE3D[8,9]をベースにライザーの VIV 挙動解析法の開発を行った。LINE3D は線状構造物の応答を解くために開発された幾何学的非線形性を考慮した時間領域の三次元有限要素法のプログラムである。流れ場の中で運動する線状構造物の応答を計算する機能を持っているが、VIV による流体力は考慮されていない。そこで LINE3D に改良を加え、実用的に VIV 挙動解析を行える LINE3D\_VIV を開発した。

### 2.1 VIV 解析アルゴリズム

LINE3D\_VIV では、つぎの手順で応答を評価している。計算のフローを Fig.3 に示す。

- ①ライザーの各節点において数値フィルターにより振動振幅、周波数、位相を検出する
- ②振動振幅、周波数をパラメータとする VIV 流体力データベースを参照してライザーの付加質量係数と VIV 流体力（負の減衰力）係数を評価する。
- ③ライザーの振動の位相を考慮して、②で求めた係数から流体力を算定して瞬時値としてライザーに

作用させる。

本解析法に組み入れる VIV 流体力データベースは、比較的短いライザー模型を強制加振しながら曳航して擬似 2 次元流体力を計測し、これをデータベースにするものである。その際に曳航方向とライザー模型の成す角度も実験パラメータとしている。実際の長いライザーに生じる VIV ではライザーの長手方向に隣り合う場所に作用する流体力間に相互干渉が発生する。本解析法では相互干渉は考慮していないので、解析法が精度の良い応答を出すのは、VIV が十分に発達して correlation 長さが十分に長くなり流れが 2 次元的になった状態である。

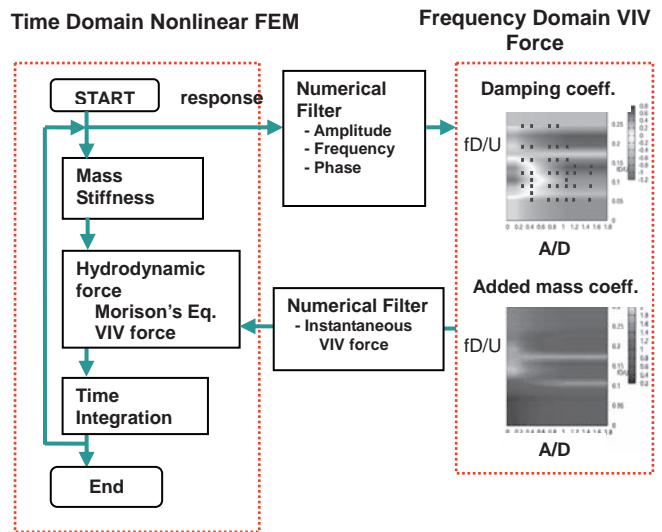


Fig.3 Flowchart of VIV analysis

### 2.2 数値フィルター

FEM で計算しているライザーの時々刻々の応答から、ライザー上の各節点の応答振幅、周波数、位相を検出するために、数値フィルターを開発した。[10]フィルターは基本的には、各節点の過去から現在までの振動履歴  $x(t)$  から正弦関数の直交性を利用して振幅、周波数、位相を検出するものである。最新の振動状態がより推定結果に反映されるように重み付けを行っている。フィルターの式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{振幅: } A_i &= \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \\
 \text{位相: } \phi_i &= \arctan\left(\frac{b_i}{a_i}\right) + \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{|a_i|}{a_i}\right) \\
 a_i &= k \int_{t-NT}^t x(\tau) \sin\left(\frac{2\pi}{T}\tau\right) e^{a\tau} d\tau \\
 b_i &= k \int_{t-NT}^t x(\tau) \cos\left(\frac{2\pi}{T}\tau\right) e^{a\tau} d\tau \\
 \text{重み: } k &= \frac{2\alpha \left\{ \alpha^2 + \left(\frac{4\pi}{T}\right)^2 \right\}}{\left\{ \left(\frac{4\pi}{T}\right)^2 - \alpha^2 \right\} (1 - e^{-aNT})} \quad (1)
 \end{aligned}$$

フィルターでは振動の変位履歴から周波数を変えて推定振幅  $A_i$  を計算し、 $A_i$  を最大とする周波数を代表周波数と

して決定する。さらにそのときの位相  $\phi_i$  を求める。

### 2.3 VIV 流体力データベース

流体力データベースは、流体力実験によって得た計測データから、次の手順で構築している。まず流体力実験において、レイノルズ数、周期、振幅、傾斜角をパラメータとして、流れに直交する揚力を計測する。次に、Fig.4 のように揚力の変動成分を、ライザー模型の振動と同位相の成分と、 $90^\circ$  位相の異なる成分にわけた。またそれぞれの力成分から、以下の式によって付加質量係数と減衰係数を算出した。このデータベースは振動と同じ周期の流体力成分をデータベース化したものであるため、振動が十分に成長して、ある一定の周期の振動が支配的になっている状態を再現するのに適している。

$$\text{減衰係数: } \frac{F_{90^\circ}}{\frac{1}{2}\rho D L U A (2\pi f)^2} \quad (2)$$

$$\text{付加質量係数: } \frac{F_{\text{同位相}} - M A (2\pi f)^2}{\rho \frac{\pi D^2}{4} L A (2\pi f)^2}$$

ここに、 $\rho$  は流体密度、 $D$  はライザー模型の直径、 $L$  は計測部長さ、 $U$  は曳航速度、 $A$  は加振振幅である。算出した2つの流体力係数を、図5のように無次元振動数  $fD/U$  に関して補間・外挿した。

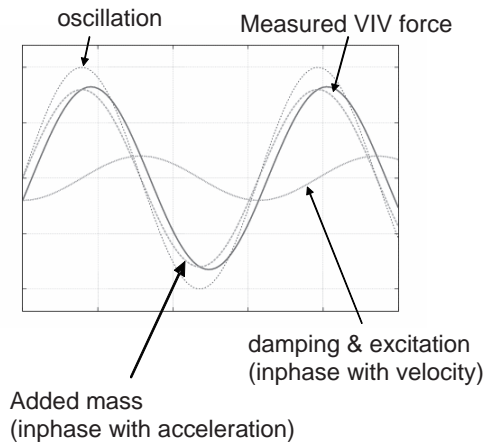


Fig.4 Calculation of hydrodynamic force

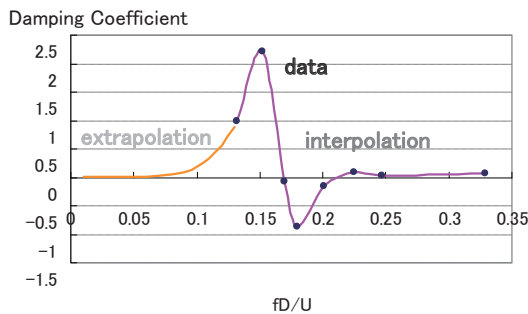


Fig.5 Interpolation and extrapolation of non-dimensional hydrodynamic force coefficient.

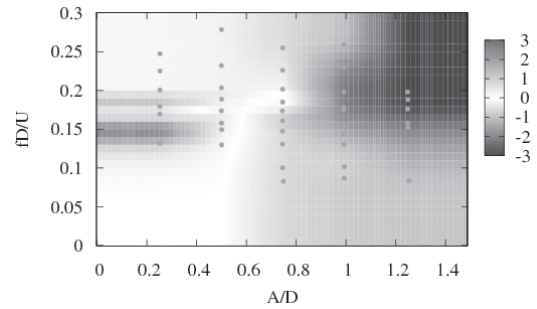


Fig.6 Contour of damping force coefficient (Re=8000)

ここでは、データ点に関してスプライン補間し、実現象に沿うよう外挿を行った。次に無次元振幅ごとに補間を行い、Fig.6 のコンター図を作成した。

最後にレイノルズ数・傾斜角に関して補間を行うことで、加振振幅と加振周波数をパラメータとする流体力データベースを構築した。

### 2.4 高レイノルズ数流体力データベース

適用範囲が広い高レイノルズ数データベースを新たに構築するため海上技術安全研究所中水槽において、流体力実験が行われた。ライザー模型は曳航方向に対して  $0, 15, 30, 45\text{deg}$  の傾斜角が考慮されている。[11] 本実験でカバーするレイノルズ数範囲は  $30$  万~ $50$  万（補足を入れると  $15$  万~ $60$  万）である。有馬が構築したデータベース[10]のレイノルズ数範囲は、 $30$  万~ $40$  万であった。Fig.8 において両者のレイノルズ数範囲を比較する。ここで赤の領域が本研究でカバーしたレイノルズ数範囲である。Fig.8 を見ると、有馬が構築したデータベース[10]と比べて本実験ではより高いレイノルズ数領域をカバーされていることがわかる。



Fig.7 Forced oscillation experiment of pipe element

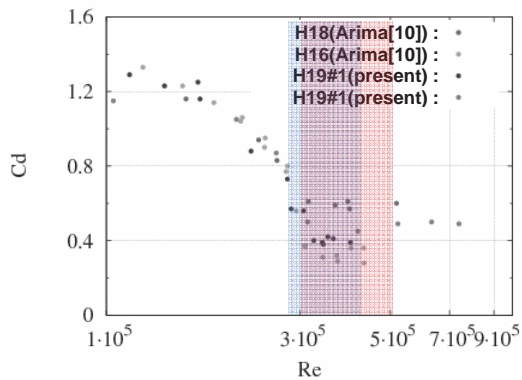


Fig.8 Drag force coefficient an Re range covered by this research

3. プログラム機能の検証

LINE3D\_VIV の基本機能を検証するため、低レイノルズ数における SCR 模擬試験[11]との比較計算を行った。SCR 模擬試験のレイノルズ数は 1000~10000 程度で、高レイノルズ数データベースでは対応できない。よって海上技術安全研究所で小型模型を用いて実施した流体力計測実験から、低レイノルズ数のデータベース[12]を新たに構築して用いた。

3.1 SCR 模型実験

SCR 模擬試験は、東京大学生産研究所で実施されたものである。[11]一様流中において上端に張力をかけた小型ライザー模型の VIV 挙動を計測したものである。実験パラメータは上端張力、流速、傾斜角、方位角である。また模型の材質は比重 2.17 のテフロンで、外径 12.7mm、内径 10.7mm、長さは 1440、9500mm の二種類である。Fig.9 に実験システム概要を示す。

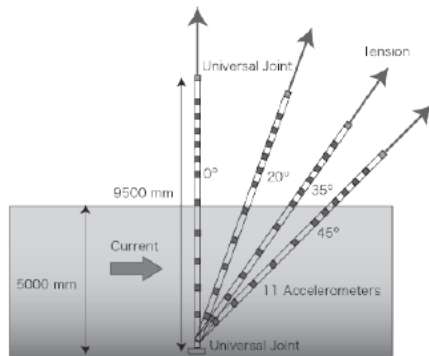


Fig.9 Experimental setup of VIV experiment of SCR (9500mm long model case)

3.2 1440mmSCR 模型試験との比較計算

1440mmSCR 模型試験との比較計算を行うにあたり、次のモデル化を行った。まず上端座標は傾斜角の有無に関わらず、模型軸方向のみの変位を自由とし、下端は座標固定、回転自由とした。また水面上の要素は VIV 流体力を受けないように設定した。計算モデルの節点数は 14、時間刻みは 0.01sec である。また減衰係数だけでなく、振動周波数に影響を及ぼす付加質量係数についてもデータベースを利用した。Fig.10、Fig.11 に換算流速 Vr (固有振

動数と代表長さで無次元化した速度)で整理した振動振幅と振動周波数の実験と計算の比較結果を示す。

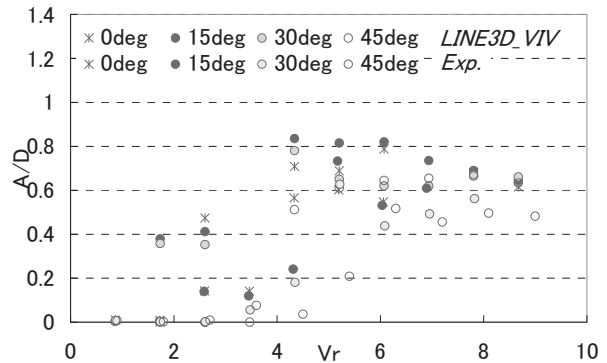


Fig.10 Non-dimensional vibration amplitude as a function of reduced velocity

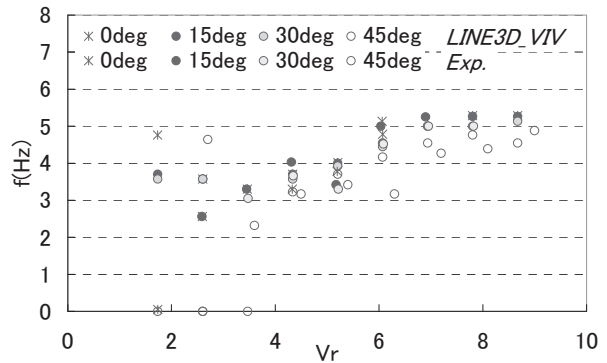


Fig.11 Vibration frequency as a function of reduced velocity

Fig.10、Fig.11 を見ると、振動振幅については Vr が 5 以上の領域で計算の方が実験より大きいものの一致度は良い。一方 5 以下の領域では計算に比べ実験の値がかなり小さく一致度が悪くなっている。これは、この計算方法が、VIV が十分に成長しパイプ長さ方向に渦放出の位相が揃っている状態を再現することを目的としており、渦放出の位相がパイプ長さ方向にばらばらになっている場合の再現が悪いことによる。傾斜角の効果については、30deg 以上の大角度になると振幅が減少する傾向は再現できている。また振動数に関しては、計算結果と試験結果で近い値を取り、さらに 45deg 以上の大角度になると振動数が減少する傾向も再現できている。これらの結果から、本比較計算では妥当な計算結果を得ることができたと考えられる。

3.3 9500mmSCR 模擬試験との比較計算

モデル化の手法は 1440mmSCR 模擬試験と全く同じである。高次モードに対応するため節点数は 81、時間刻み 0.01sec である。またここで付加質量係数は計算安定のため、Lock-in 時の 2.5 に固定している。

まず上端張力 2kgf、傾斜角 0deg、流速 0.09m/s の時の SCR 模擬試験結果との全体形状比較結果を Fig.12 に示す。

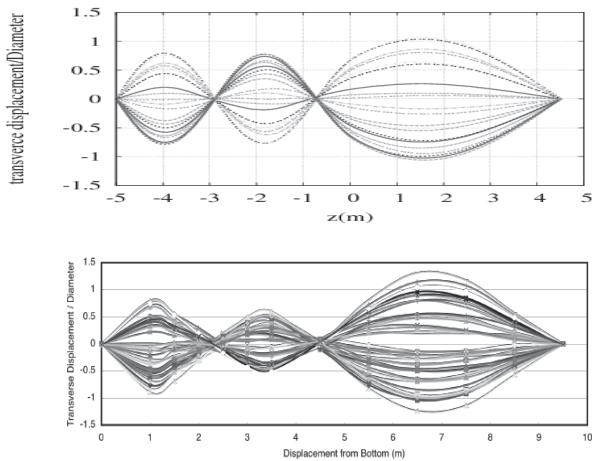


Fig.12 Comparison of shapes of riser experimental model under VIV response(upper:calculation, lower:experiment)

Fig.12 を見ると、計算と実験で同じ 3 次の振動モードであり、無次元振幅も近い値をとっていることがわかる。また、計算・実験共に図右側の振幅が大きいのは水面上に出ているからであり、計算で再現することができた。

次に傾斜角を考慮した全計算ケースに関して、流速と無次元振幅  $A/D$  の関係、流速と振動数の関係を Fig.13、Fig.14 に示す。

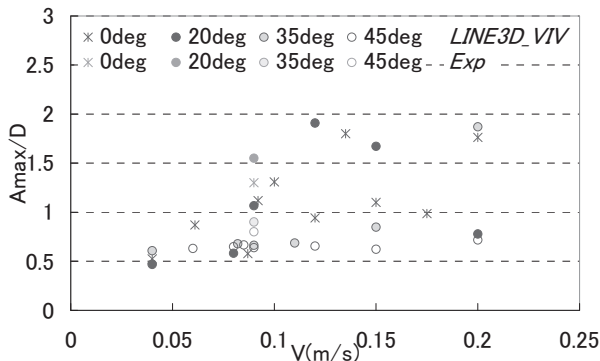


Fig.13 Non-dimensional vibration amplitude  $A/D$  as a function of flow velocity

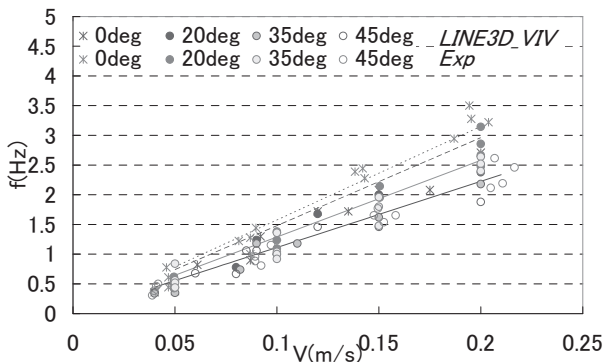


Fig.14 Vibration frequency  $f$ (Hz) as a function of flow velocity

振幅・振動数共に、計算と実験で全体的に良い一致が得られている。また 45deg の大角度になると振幅・振動数が小さくなる傾向も再現できた。特に振動数の比較に関して良い結果が得られた。4.2 の結果を踏まえると、低レイノルズ数において LINE3D\_VIV の基本機能は検証できたと考えられる。

VIV という現象は流体と構造が連成する非常に複雑な流弾性現象で、未だ完全に理解されているとは言えない。実験を主とした VIV 現象に関する研究も数多く行われており、興味深い現象も多々観察されている。本研究では、9500mmSCR 模擬試験に関する計算を通して、計算モデルから VIV 現象の考察を行った。

上端張力 2kgf、傾斜角 0deg の時の流速に対する振動モードの関係を調べたものを Fig.15 に示す。

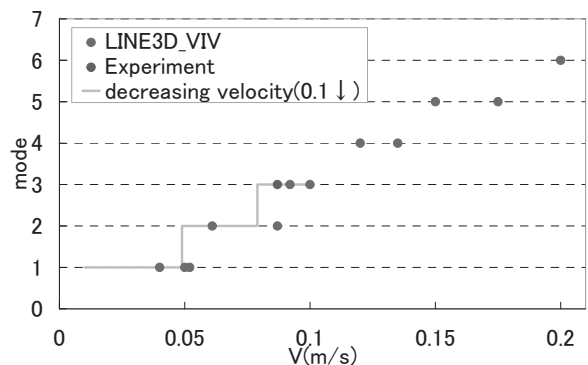


Fig.15 Relation of vibration mode and flow velocity (top tension 2kgf, 0deg.)

Fig.15 を見ると、流速に対して階段状に振動モードが遷移していることがわかる。また時間領域のプログラムの利点を生かして、0.1m/s から徐々に減速する計算を行った結果を、一緒に図示した。一樣流速に比べてモードが遷移する流速が低流速側にずれ込んでいることがわかる。これは VIV の特徴である Lock-in 現象によるものと理解できる。

#### 4. 高レイノルズ数でのプログラム検証

##### 4.1 自由動揺試験との比較計算

高レイノルズ数データベースでの LINE3D\_VIV の計算精度を検証するため、海上技術安全研究所で行われた実機大ライザー模型の曳航自由動揺試験結果[11]との比較計算を行った。Fig.16 に示すように自由動揺試験ではバネ支持された没水円柱を曳航し VIV 挙動の計測を行っている。

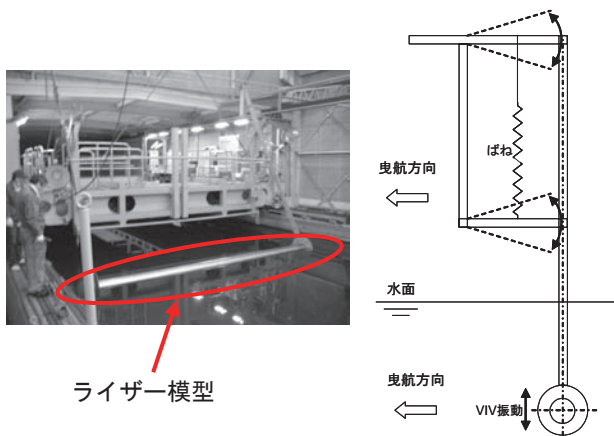


Fig.16 Free vibration experiment of towed real scale pipe

計算では、実験のリンク機構を一自由度のバネ質点系へモデル化した上で計算を行った。実験系の固有振動数は0.4Hzである。パイプ模型は単純な剛体なので節点数13、時間刻み0.1secとし、換算流速  $Vr=2\sim 17$  の範囲で試験結果と計算結果の比較を行った。各計算ケースに関する換算流速に対する無次元振幅  $A/D$ 、振動周波数  $f$  のグラフを Fig.17、Fig.18 に示す。

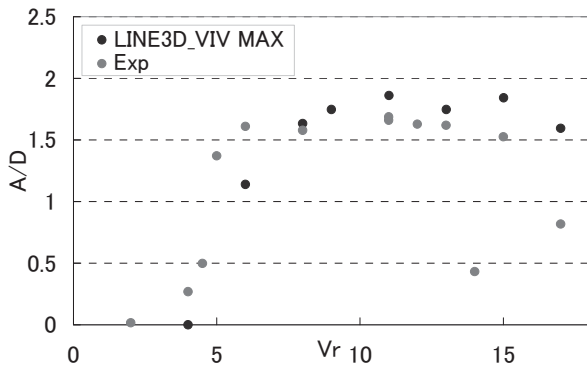


Fig.17 Non-dimensional maximum vibration amplitude  $A/D$  as a function of reduced velocity  $Vr$

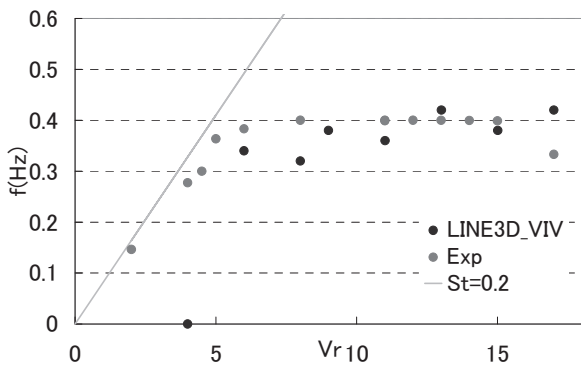


Fig.18 Vibration frequency  $f$ (Hz) as a function of reduced velocity  $Vr$

Fig.17では、計算結果では振幅に時間変動があったため、最大振幅を示している。また Fig.18 に示す直線は次式で

定義するストローハル数  $St=0.2$  の直線である。

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (3)$$

ここに、 $f_s$ :渦放出周波数、 $D$ :代表長さ、 $U$ :代表速度である。Fig.17、Fig.18を見ると、振幅・振動数ともに計算と実験で良い一致を得ていることがわかる。また Fig.18 の実験結果を見ると、流速が大きくなるにつれて渦の放出周期である  $St=0.2$  の直線からはずれ、一定の振動数に落ち着いている。このように渦放出周期が物体の固有周期に引っ張られ、パイプ長さ方向に渦放出の位相が揃う Lock-in 現象も計算により再現ができています。解析法で用いている VIV 流体力データベースは、振動と同じ周期の流体力成分をデータベース化したものであるため、ある一定周期の振動が支配的になっている状態を再現するのに適している。従って、換算流速4付近では振動の周期も系の固有振動数を外れ、応答も小さくなっており、振動周期が流体力の支配的な振動数ではなくなっているため、振幅が0となったと解釈できる。

### 4.2 実機 SCR 対応計算

LINE3D\_VIV が実ライザーの計算も可能であることを示すため、実機 SCR(Steel Catenary Riser)を想定した計算を行った。[11]計算の対象としたSCRの概念図を Fig.19 に示す。対象海域はメキシコ湾(水深2500m)とし、計算対象とする流れを表層流速2.5m/sの Loop Current(深くなるにつれて減速する)とした。Loop Currentは Gulf Streamの一部がメキシコ湾に流れ込む際に形成される渦である。高次モードが予想されるため、節点数を169、時間刻み0.01secとした。

表層流速2.5m/sの Loop Current についての計算結果を Fig.20 に示す。

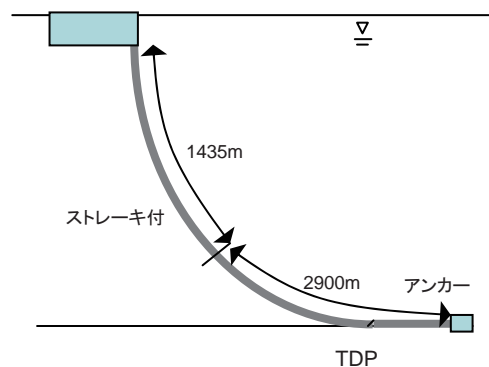


Fig.19 Schematic diagram of calculation model of SCR

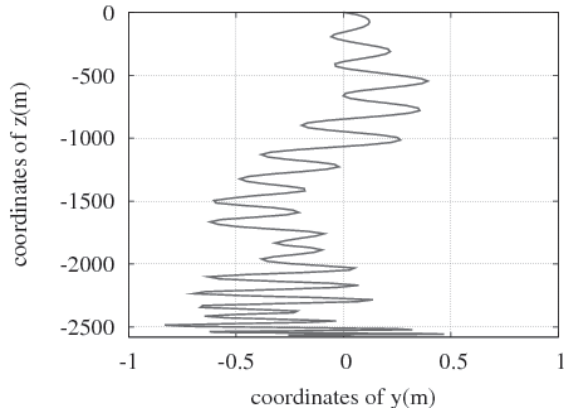


Fig.20 Instantaneous riser deformation by VIV

対象とした Loop Current は、表層付近では 2.5m/s も流速があったが、Fig.20 のように安定して良い計算結果を得ることができた。下端付近が潰れて見えるのは、海底近くにあるライザーが大きく傾斜しているものを水平方向から投影して表示しているためである。VIV 振動に加えて、揺らぎのような長周期の振動が発生した。これは上端から下端までの振動が複雑になり生じたものと考えられ、実際の現象でも起こり得るものと思われる。

その他の計算ケースにおいても、妥当と考えられる計算結果を得ることができ、LINE3D\_VIV が高レイノルズ数で傾斜角を有する実機の計算が十分可能であることを示せた。

## 5. 結論

本研究では、SCR など傾斜部分を有する高レイノルズ数域にあるライザーの VIV 応答を計算する実用的な解析法 (LINE3D\_VIV) の開発を行った。計算法は、時間領域の非線形有限要素法と、強制加振実験に基づく周波数領域の VIV 流体力のデータベースを組み合わせた解析法である。解析プログラムは数値フィルターにより振動振幅、周波数、位相を検出し、振動振幅と周波数をパラメータとする VIV 流体力データベースを参照してライザーの付加質量係数と VIV 流体力 (負の減衰力) 係数を求め、係数から流体力を算定して瞬時値としてライザーに作用させることにより時間領域で応答を計算するものである。

1) 小型 SCR 模型の応答を低レイノルズ数の VIV 流体力データベースを組み込んで VIV 応答を計算し、計算と実験を比較して良好な一致を見た。開発した解析法が良好に機能することが確認された。

2) 実機大ライザー模型の一自由度の自由動揺試験結果と計算結果を比較して良好な一致を得た。

3) 実機 SCR の VIV 応答計算を実施し、実機の計算に十分対応できることを示した。

## 謝辞

本研究は、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構による平成 18 年度提案公募事業「大水深海洋石油生産システム

のライザー挙動予測技術及び数値水槽の開発」の一環として行われた。関係各位のご協力に深く感謝する。

## 参考文献

- [1] Charles-Alexandre Zimmermann, David Petruska, Arun S. Duggal :“Effective Riser Solutions for a Deepwater FPSO”, Proc. of 21th Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2002-28376 , 2002.
- [2] Carl R. Brinkmann and Kevin T. Whooley :” Design Study of a Deepwater Compliant Vertical Access Riser for the Gulf of Mexico”, Proc. of 21th Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2002-28470, Oslo, 2002.
- [3] Kozo Ishida, Kazuhisa Otomo, Hiroaki Hirayama, Norihiko Okamoto, Makoto Nishigaki and Masahiko Ozaki :” CVAR-FPSO and Workover System in Deepwater”, Proc. of 20th Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2001-PIPE5010, Brazil, 2001.
- [4] 手島智博、鈴木英之、佐藤徹:”CFD 流体力チャートに基づく曳航パイプの時間発展的 VIV 応答解析”, マリンエンジニアリング学会会誌, 第 4 1 巻 2 号 (2 0 0 6 年 3 月号) , pp. 152-157.
- [5] J.R.Chaplin etc”Blind predictions of laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a tension riser” Journal of Fluids and Structures, 2005
- [6] J.K.Vandiver, “A Universal Reduced Damping Parameter for Prediction of Vortex-Induced Vibration”, OMAE2002, OMAE2002-28292, 2002.
- [7] C.M.Larsen, K.Vikestad, R.Yttermvik and E.Passano, ”Empirical Model for Analysis of Vortex Induced Vibrations –Theoretical Background and Case Studies”, OMAE2001, OMAE2001/OFT-1203, 2001.
- [8] 鈴木英之,吉田宏一郎 :”水中線状構造の挙動解析法とその評価について”, 日本造船学会論文集, 第 168 号, 1990, pp.379-387
- [9] H.Suzuki and K.Yoshida, "Three Dimensional Nonlinear Dynamic Analysis Method of Underwater Line Structure and its Validation", Transaction of the ASME, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.114, No.3, 1992, pp.139-145.
- [10] 有馬安則: ” CO2 海洋隔離用放流管の流体力実験に基づく VIV 時間領域解析法”, 東京大学修士論文, 2006
- [11] S.Kato, S.Uto, S.Masanobu, H.Suzuki, H.Hirayama and K.Mochida :”Riser Motion Estimation of Oil Production System for Ultra Deep Water”, 5th Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations (BBVIV-5), 2007, pp.63-65.
- [12] 國分健太郎、星野邦弘、西佳樹、宇都正太郎 : 斜め

円柱の強制加振実験による VIV 流体力計測、日本船舶  
海洋工学会講演会論文集, 5E号, pp.95-96, 2007年

---