

実海域での振動を想定した水中線状構造物の VIV 挙動解析法の開発 Development of VIV Analysis Method for underwater line structures in the real Ocean

学籍番号 47116639 木村 快輔

指導教員 鈴木 英之 教授 平林紳一郎 講師

(平成 25 年 2 月 日発表予定)

Keywords: ライザー, 渦励振, 高 Re 数, 流れ方向の振動

Keywords: Riser, Vortex Induced Vibration, High Reynolds Number, In-line Vibration

1. 序論

近年、海洋開発は水深 2500 m を超える超大水深で行われる傾向にある。大水深掘削で掘削ライザーや石油天然ガスの生産に用いられるライザー(Fig. 1)には、VIV (Vortex Induced Vibration; Fig. 2) の回避が課題となっている^[2]。VIV 挙動を解析するため、大水深で実際に振動を計測することは、周囲の流れの条件の計測も必要であり困難である。また、水槽実験であっても、相似則を満たす模型を作成することも困難である。そこで、高精度な数値解析法が求められている。VIV 解析手法として、強制加振による揚力モデル法が挙げられる。この解析法では、加振実験で得られた VIV 流体力データベースと構造解析プログラムを組み合わせている。掘削海域では、強海流/潮流によってレイノルズ数 (以下 Re 数) が 100 万以上のオーダーになるため、高 Re 数に対応した流体力データベースの構築が必要である。また、従来型の VIV 解析法は、流れ方向の振動を考慮しておらずまた、単一の振動成分のみの考慮であったため、応力の過小評価になる可能性がある。本研究では、実海域での大水深用ライザーの VIV 挙動予測法を開発することを目的とし、流れ方向を考慮した VIV 挙動予測法の開発を行い、地球深部探査船「ちきゅう」をモデルケースとしたパラメトリックスタディを実施することで計算の精度や課題を確認する。VIV 挙動予測法の開発上、実海域を想定した高 Re 数の流体力データベースの構築および、複数の振動成分を考慮できるようにする。

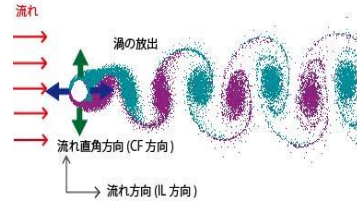
Fig.1 Riser^[1]

Fig.2 VIV

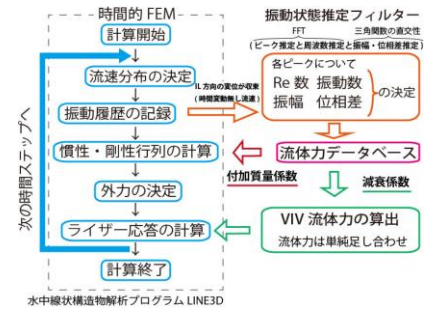


Fig. 3 Flowchart of VIV analysis

2. VIV 挙動解析法

2.1 LINE3D_VIV

本研究では、水中線状構造物 LINE3D^[3]をベースに開発された LINE3D_VIV を流れ方向の VIV を考慮できるように拡張して、ライザーの VIV 挙動予測を行う。LINE3D_VIV は、円柱模型の強制加振試験や 3 次元 CFD によって計測された流体力を用いた周波数領域の流体力データベースと時間領域 FEM を、振動推定フィルターを介して繋ぎ合わせている。解析のフローチャートを Fig.3 に示す。

2.2 流体力データベースの構築

VIV 流体力取得のため、加振試験と 3 次元 CFD は三菱重工業長崎研究所にて実施した。取得する流体力の Re 数を 5×10^5 と 3×10^6 に設定した。 5×10^5 の場合は円柱強制加振試験、 3×10^6 の場合は 3 次元 CFD によって、流体力を取得した。

$$x(t) = A_x \sin(\omega_x t + \theta_x) = A_x \sin\left(\omega_x \left(t + \frac{\theta_y}{\omega_y}\right) + \theta_x - \frac{\omega_x}{\omega_y} \theta_y\right) \quad (1)$$

$$y(t) = A_y \sin(\omega_y t + \theta_y) = A_y \sin\left(\omega_y \left(t + \frac{\theta_y}{\omega_y}\right)\right) \quad (2)$$

$$\text{位相差} \alpha = \theta_x - \frac{\omega_x}{\omega_y} \theta_y \quad (3)$$

式(1)式(2)の x, y は円柱要素の流れ方向および流れと直交方向の変位である。流れ方向周波数 ω_x は、渦が交互に発生することを想定して流れ直交方向周波数 ω_y の 2 倍となるとして加振している。

Fig. 4 の通り、流体力データベースは、Re 数、流れ方向と流れ直交方向の無次元振幅、無次元周波数、位相差(式(3))の 5 つのパラメータで構成されており、補間順によって差異が発生しないように Re 数以外のパラメータを線形補間することで、任意のパラメータ状態の流体力を算定する。Re 数が 5×10^5 から 1×10^6 の間では 5×10^5 の流体力を用い、 1×10^6 から 3×10^6 の間では 5×10^5 と 3×10^6 の流体力を線形補間したものを用いる。

2.3 振動推定フィルター

Fig.5 のような振動推定フィルターを用いて、過去データから現時刻の振動パラメータを推定する。本研究では、ライザー上部と下部で発生した振動が、異なる周波数として各節点の振動に寄与するとして、代表的な 2 つの振動成分を検出する。まず、時系列データを分割し、それぞれを FFT し、パワースペクトルを平均化する。そこから、最大値・次最大値のピークを推定し、それぞれの周波数の差分の領域を最大値・次最大値の周波数の周りで設けることで、ピークの周波数幅を算定する。次に、同様の時系列データを通常の FFT 後、ピークの幅内でそれぞれ最大値を推定し、最大値周辺でパワースペクトルに重み付けをすることで、各ピークの代表周波数とする。振幅と位相は、三角関数の直交性を利用し、求められた代表周波数の 1 周期分のデータから推定を行う。

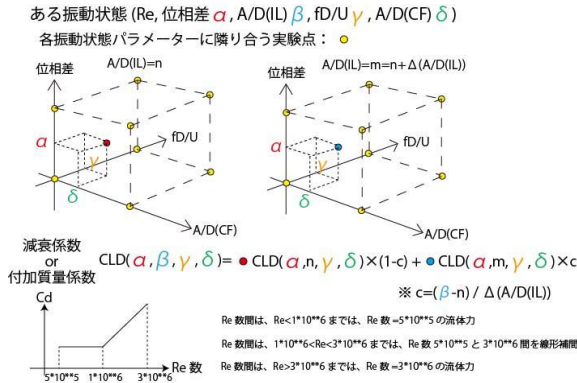


Fig. 4 Database

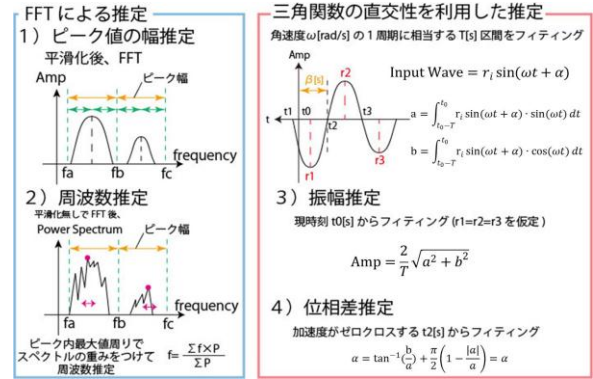


Fig. 5 Vibration Presumption Filter

2.4 流体力の評価

求められた 2 つの振動成分のパラメータから流体力データベースを用いて、流体力係数を求める。VIV による流体力は式(4)(5)(6)のように線形足しあわせで求める。ここで、 ρ_{fluid} : 流体密度、 D_g : 外径、 U_n : 流速、 l : 部材長さ、 A : 振幅、 f : 周波数、 α : 位相、 dt : 時間刻み、 C : 減衰係数である。

$$F_{p1} = -\frac{1}{2} \cdot C_{p1} \cdot \rho_{fluid} \cdot D_g \cdot U_n \cdot l \cdot A_{p1} \cdot 2\pi f_{p1} \cdot \cos(\alpha_{p1}) \quad (4)$$

$$F_{p2} = -\frac{1}{2} \cdot C_{p2} \cdot \rho_{fluid} \cdot D_g \cdot U_n \cdot l \cdot A_{p2} \cdot 2\pi f_{p2} \cdot \cos(\alpha_{p2}) \quad (5)$$

$$F = F_{p1} + F_{p2} \quad (6)$$

Fig. 6 のように、線形足しあわせによる流体力と 2 振動成分で加振した際の 3 次元 CFD 計算結果との時系列を比較すると、傾向の一致が見られた。

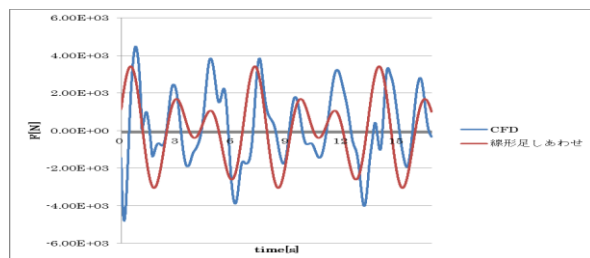


Fig. 6 Comparison between
CFD calculation and linear addition

3. 一様円柱の VIV 挙動解析

3.1 旧型フィルターとの比較 (1 振動成分のみの考慮)

流速 0.675[m/s]の一様流中で管径 1.0[m]の一様円柱の VIV 挙動解析を行った。比較対象として、有馬^[4]が開発した旧型のフィルターとの計算結果を用いる。Fig. 7(a) に変位の軌跡を示す。また、Fig. 7(b) Fig. 7(c)に変位の時系列を示す。ここで、赤線が本研究で開発したフィルターでの計算結果、緑線が旧フィルターでの計算結果である。新型フィルターでは、計算の安定時間が短い、流れ方向の振動と流れ直交方向振動が複合した時の 8 字の振動状態を捉えることが可能であると考えられる。

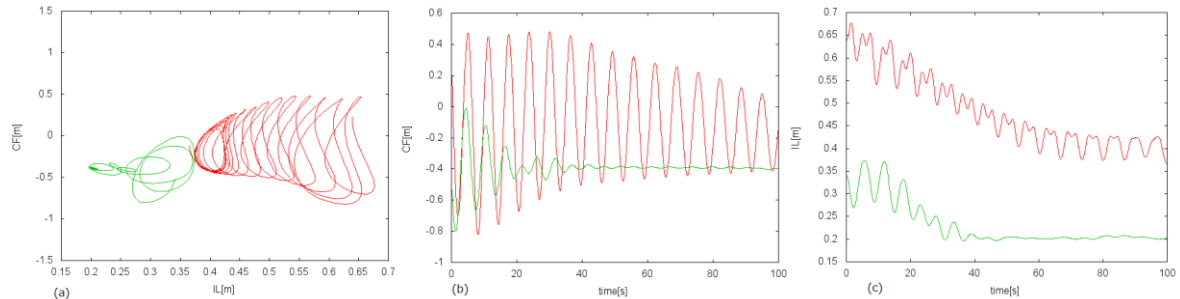


Fig. 7 (a)Locus, (b)Displacement in CF, (c)Displacement in IL (Green:Existing Filter, Red:New Filter)

3.2 複数成分を考慮した場合

LINE3D_VIV で、1 振動のみと 2 振動考慮した場合を比較した。管径 1.0 m で上方流速は 4.05 m/s, 下方流速を 0.675 m/s で与えた。Fig. 8(a)に変位の軌跡を示す。また、Fig. 8(b), Fig. 8(c)に各方向の変位の時系列データを示す。ここで、赤線が 1 振動成分のみを考慮した場合、緑を 2 振動考慮した場合である。2 つの振動成分は、振動の不安定性を及ぼすが、振動の変位に大きく寄与する。

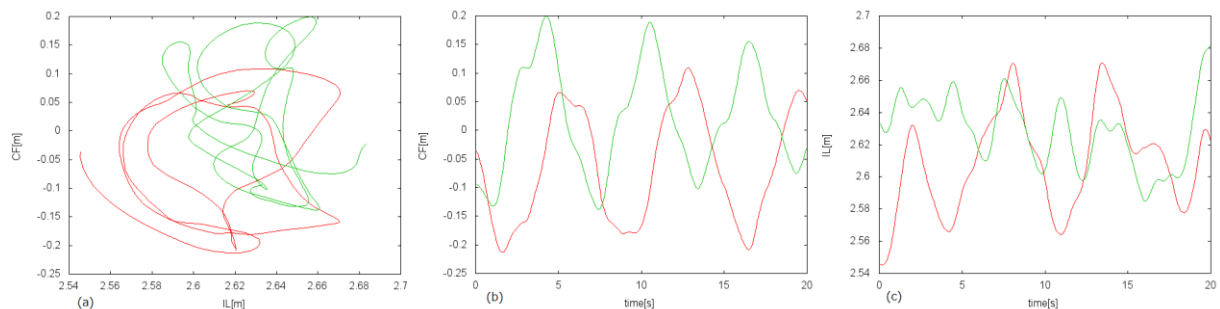


Fig. 8(a)Locus, (b) Displacement in CF, (c)Displacement in IL (Green:2 elements, Red:1 element)

4. 下北沖掘削でのライザーのパラメトリックスタディ

4.1 ライザーモデル

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が青森県下北半島八戸沖での掘削時のライザーの応答と応答計算結果を比較する。Fig.9 にライザーモデルの概要について示す。流速モデルは、「ちきゅう」の ADCP によって観測された流速データを時間平均し、Fig.10 のような流速分布の流速を与える。また、ライザーに搭載された加速度計・角速度計から加速度から変位を推定する。

ライザー水中重量 = 3927.4948[kN]

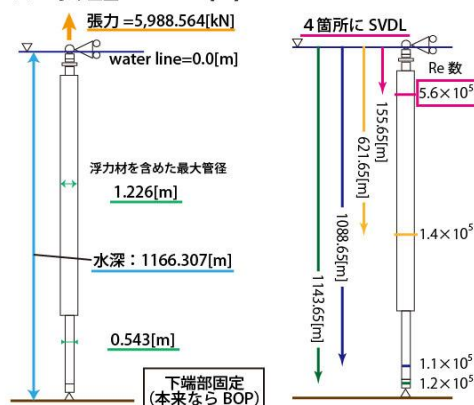


Fig. 9 Riser model of Shimokita

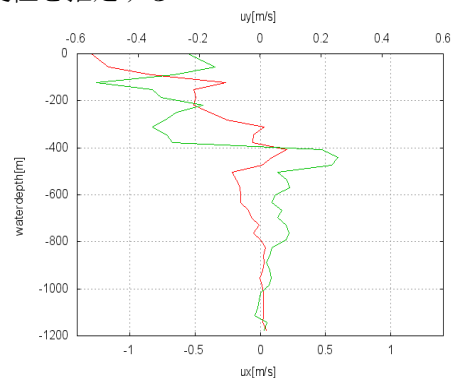


Fig. 10 Flow of Shimokita

(Red:Flow of X axis, Green:Flow of Y axis)

4.2 変位比較結果

Fig.11 と Fig. 12 に水深-155.65 m の実測値の X 軸方向の変位と Y 軸方向の変位に実測値と計算結果との比較を示す。実測値は、VIV と予想される無次元周波数 0.05 から 0.3 の範囲内の周波数で振動しているが、非常に小さな振幅である。下北掘削時は、VIV 振動が起きていない(パーソナルコミュニケーション)ため、波等による振動であると考えられる。一方、計算結果は、長周期振動が見られ、振幅も小さい。よって、LINE3D_VIV は、VIV が発生しない場合も再現できる。

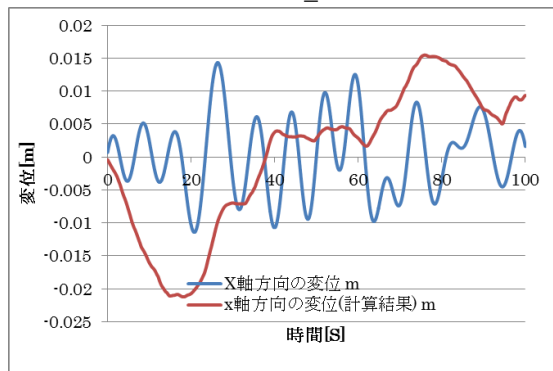


Fig. 11 Displacement of X direction

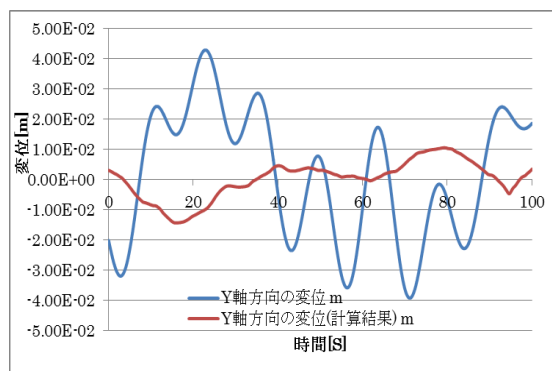


Fig. 12 Displacement of Y direction

5. 南海トラフでのライザー曳航時のパラメトリックスタディ

5.1 南海ライザーモデル

JAMSTEC が南海トラフにてライザーを曳航中に VIV が発生したライザーの応答と応答計算結果を比較する。Fig.13 にライザーモデルの概要について示す。Fig.14 のような流速分布の流速を与える。

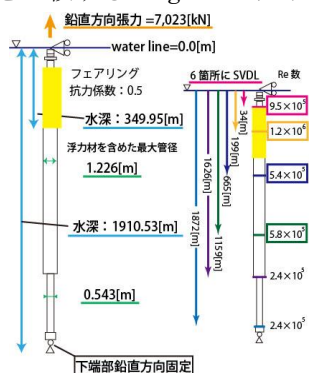


Fig. 13 Riser model

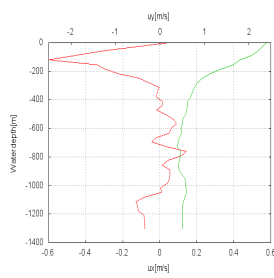


Fig. 14 Flow model

(Red:Flow of X axis,

Green:Flow of Y axis)

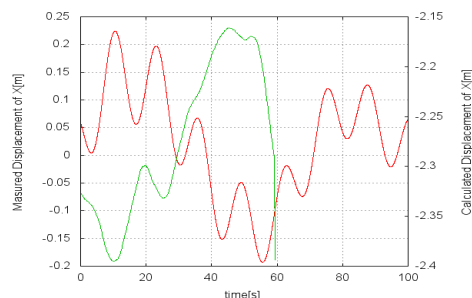


Fig. 15 Displacement of X at -1159 m

(Green;Calculated result, Red; Measured value)

5.2 比較結果

Fig. 15 に実測値での VIV の応答が最も激しく出た水深-1159 m の X 軸方向の変位を示す。赤線が実測値、緑線が計算結果である。比較的計算の安定する 30 s までは、周期・振幅に傾向の一致が見られた。解析法の問題点として、流速が早い場合、流れ方向の振動や流れ直角方向の振動が増加することによる抗力係数の増加によって、振動は不安定になりやすく、計算安定時間が短いことが挙げられる。

6. 結論

本研究を通じて、流れ直交方向成分に加えて、流れ方向成分を考慮した VIV 挙動予測法の開発を行った。また、実海域を想定した高 Re 数域でのデータベースを構築し、「ちきゅう」のライザーの VIV 挙動予測を行った。既存研究では、1 成分のみの考慮であった振動成分を 2 成分考慮できるように改良し、より複雑な現象を捉えられるようにした。「ちきゅう」の実測データとの比較では、VIV 挙動が激しい水深では、計算値と実測値は、周期・振幅に関して傾向の一致が見ることができた。しかしながら、実用化に向けては、計算の不安定性などの課題が挙げられる。

参考文献

- [1]独立行政法人海洋研究開発機構 JAMSTEC ホームページ: <http://www.jamstec.go.jp/j/>
- [2] 田村兼吉: 日本マリンエンジニア学会誌 Vol.40(2005) No.2
- [3]鈴木英之,吉田宏一郎:”水中線状構造物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
- [4]有馬安則:修士論文, 東京大学 (2007 年)