

複数カラム型浮体の渦励起運動予測モデルを用いたカラム間干渉影響に関する研究

Effect of column interference on vortex induced motion of multi columns floater

学籍番号 47-186647 豊田 洋介

指導教員 平林 紳一郎 准教授

(令和2年1月30日発表)

Keywords: 渦励起運動, 渦励起運動予測モデル, 円柱カラム浮体, 流体力, 円筒間干渉

Keywords: VIM, Prediction model of VIM, Array of cylinders, Hydrodynamic force, column interference

1. 序論

1.1 浮体式洋上風車と VIM

近年新たなエネルギー源として、洋上風力発電の研究開発が行われている。広大な排他的経済水域を保有する日本にとっては多くの発電量が見込める発電方法である。しかし日本には遠浅の海が少なく、海底から係留索で固定する浮体式洋上風車の設置が主に見込まれている。

浮体式洋上風車は係留索のみで固定するという設置方法から、海流・潮流等による振動が起これと考えられ、長期間使用すると係留索の疲労破壊につながる恐れがある。この振動を最小限に抑えることで、事故リスクの軽減と、メンテナンスコストの低減につなげることができる。

この振動は Vortex-Induced Motion (VIM) とよび、この現象の原理を解明することで、振動の抑制方法を探っていく必要がある。

1.2 セミサブ型浮体の VIM に関する先行研究

浮体の VIM 現象の詳細な把握のために、近年さまざまな研究が行われてきた。Alam [1] は一様流中の 2 円筒に働く流体力が円筒間距離に大きく影響されることを確認した。Gopalkrishnan [2] は単一円筒の強制動揺実験により流体力データベースを作成し、VIV のシミュレーションに成功した。椎葉 [3] は複数円筒の強制加振実験により流体力データベースを作成し、VIM のシミュレーションモデルを作成した。また、円筒間距離によって浮体にかかる流体力が変化することを確認した。しかし、データベースの範囲が VIM の安定領域を網羅しておらず、また、円筒間距離の分析が十分にできていないといった課題があった。

1.3 研究の目的

本研究では、セミサブ型浮体の VIM 挙動を時間発展的に計算することで VIM 発生メカニズムを解明することを目的と位置付ける。計算モデルに使用される流体力は強制加振実験により得られるが、先行研究で得られなかった加振振幅及び円筒間距離における流体力の計測を行う。また、VIM 動揺試験と比較を行うことで、VIM 現象のメカニズムについて考察する。

2. VIM 挙動予測プログラム

2.1 VIM 挙動予測プログラムの概要

VIM 挙動プログラムの計算手順を Fig.1 に示す。

計算は次の手順で行われる。

1. 過去の変位履歴から現在の振動状態を推定する(振幅と周波数)。
2. データベースを参照して、振動状態に応じた流体力を求める。
3. 求めた流体力を運動方程式に代入することで、応答を求める。
4. 1~3 を繰り返す。

Cross-flow 方向における浮体の運動方程式は次式で表される。

$$M\ddot{y} = -MC_{add}\ddot{y} - C_{damp}\dot{y} - ky + F_V \sin(\omega_{vortex}t + \theta) \quad (1)$$

ここで、 C_{add} は付加質量係数、 C_{damp} は減衰係数、 F_V は渦による揚力、 k はばね定数、 M は浮体の排水量、 ω_{vortex} は渦放出周波数を示す。計算には 4 次のルンゲ・クッタを用いている。

2.2 振動の推定方法

変位履歴から振動状態(振幅と周波数)を推定する際次の振動推定フィルタを用いた。なお、当振動推定フィルタは手嶋[3]によって考案されたものを踏襲した。

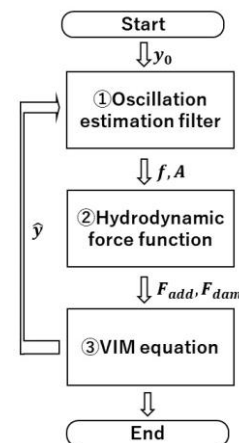


Fig. 1 Flowchart of VIM prediction model.

$y(\tau)$ は振動状態を推定する変位履歴を示しており、 $y(\tau)$ に含まれる周波数成分 f_i の振幅を A_i と表す。当シミュレーションではデータベースの範囲が 0.000-0.594 となっているので、 f_i の範囲は 0.00-0.60[Hz]とした。 α は直近の時間を強く評価するための重み付けの係数で、 β は振幅をただしく検出するための係数である。 N は参照する変位履歴の周期数であり、当研究では $N = 3$ とした。

$$a_i = \beta \int_{t-NT_i}^t y(\tau) \sin(2\pi f_i \tau) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau \quad (2)$$

$$b_i = \beta \int_{t-NT_i}^t y(\tau) \cos(2\pi f_i \tau) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau \quad (3)$$

$$\alpha = -\ln\left(\frac{X}{100}\right) \frac{f_i}{N} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\alpha}{1 - e^{-\frac{\alpha N}{f_i}}} \quad (4)$$

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (5)$$

Table 1 Model specifications.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Diameter	D	0.125	m
Flow velocity	U	0.212	m/s
Amplitude	A/D	0.05-1.6	-
Frequency	fD/U	0.06-0.35	-
Aspect ratio	L/D	1.5	-
Column distance	S/D	1.5-5.0	-
Reynolds number	Re	26,250	-

3. 強制加振実験

3.1 実験概要

VIM 発生中に浮体にかかる流体力をデータベース化するために、東京大学の生産技術研究所回流水槽にて強制加振実験を行った。円筒カラム 4 本で構成される浮体モデルを強制動揺装置に固定し、一様流を当てながら cross-flow 方向に強制加振させ、カラムに取り付けた検力計で抗力と揚力を計測した (Fig.2, 3)。実験条件を Table1 に示す。

3.2 流体力係数の取り出し

実験にて得られた揚力を浮体モデルの加速度に比例する力と、速度に比例する力に分解し、次式で定義される付加質量係数と減衰係数を求めた。

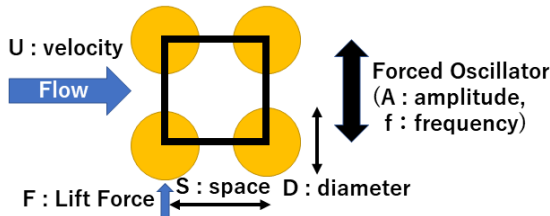


Fig. 2 Top View of four circular cylinders arrangement.

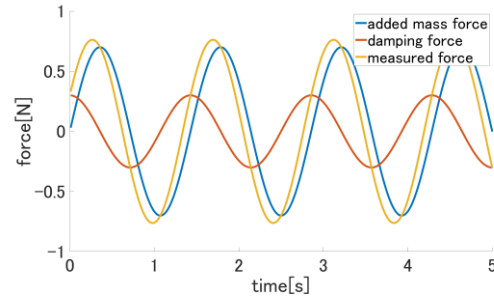


Fig. 3 Decomposition of the hydrodynamic force.

$$C_{add} = \frac{F_{acc}}{\rho \frac{\pi D^2}{4} LA (2\pi f)^2} \quad (2)$$

$$C_{damp} = \frac{F_{vel}}{\frac{1}{2} \rho D L U A (2\pi f)} \quad (3)$$

ここで、 F_{acc} は加速度に比例する力、 F_{vel} は速度に比例する力、 C_{damp} は減衰係数、 C_{add} は付加質量係数である。

3.3 加振振幅に対する減衰係数

また式(3)で求められた無次元減衰係数を Fig.4 に示す。横軸は無次元加振振幅、縦軸は無次元減衰係数で、カラム間距離の異なる 2 ケースをプロットしている。VIM は減衰力が 0 になる領域で安定するが、椎葉[3]の強制加振実験では加振振幅が足りず、0 になる領域を網羅できなかった。両ケースについて

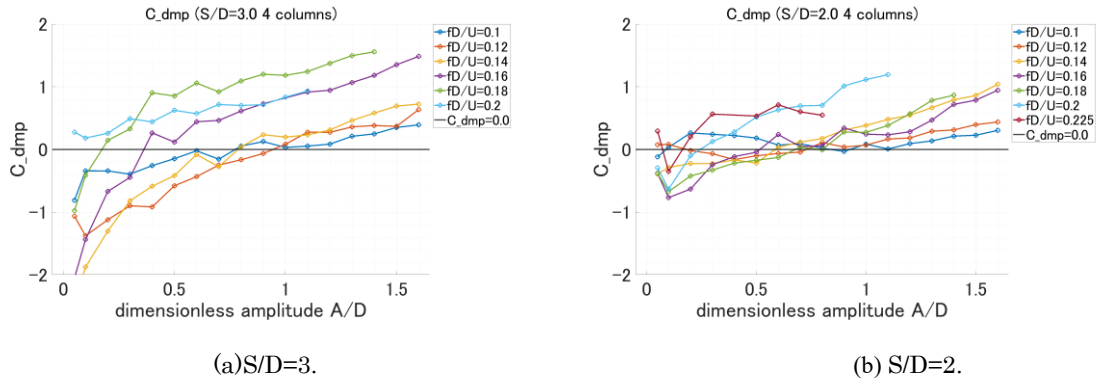


Fig.4 Damping coefficient for 4 cylinders

て、ある周波数については低加振振幅にて減衰係数が負の値をとり、振幅が増すにつれて増加しある振幅にて減衰係数が正の値になっている。よって、本実験における強制加振実験で得られた流体力データベースにより、VIM が安定して発生する振動領域が網羅できたことが分かる。

また、 $S/D=3.0$ と $S/D=2.0$ とで、同じ振動状態でも減衰係数の値が異なっている。円筒間距離と流体力係数について次の節で考察する。

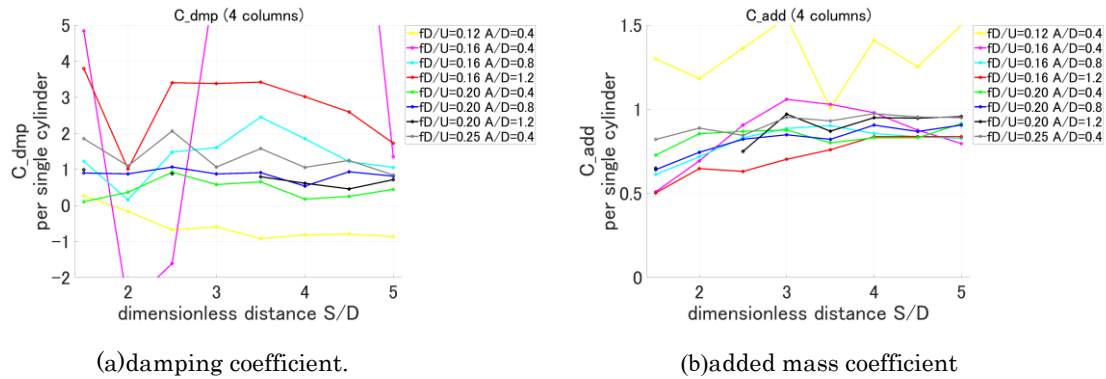


Fig.5 damping and added mass coefficient for 4 cylinders

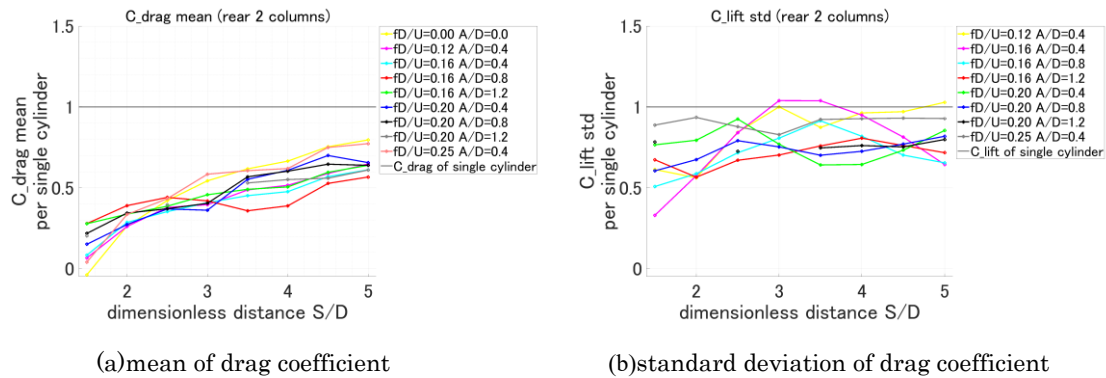


Fig.6 Drag coefficient mean and standard deviation for rear cylinder

3.4 カラム間距離に対する流体力係数

カラム間距離と、後方円筒にかかる流体力係数の関係を Fig.5,6 に示した。縦軸は無次元カラム間距離、縦軸は無次元流体力係数を、単一円筒時の無次元流体係数に対する割合で表している。表している流体力はそれぞれ、抗力の平均値と揚力の標準偏差である。付加質量係数は単一円筒時に比べて小さな値をとり、円筒間距離を広げるにつれて単一円筒時の付加質量係数に近づく傾向がみられる。後方円筒にかかる抗力平均の値は単一円筒にかかる抗力平均の値に比べて小さな値を取り、円筒間距離が広がるにつれて単一円筒にかかる抗力平均の値に近くなる。

4. VIM 動揺試験との比較

4.1 VIM 動揺試験

VIM 挙動予測プログラムの検証を行うため、Gonçalves ら[4]が行った 4 本カラムからなる浮体の VIM 動揺試験の最大変位の比較を行った。

4.2 計算パラメータの設定

計算に用いるパラメータを Table2 に示す。付加質量係数と減衰係数は計測データ間を線形補間で内挿した。

4.3 計算結果

VIM 挙動予測モデルで計算された各カラム間距離における最大 VIM 振幅比と Gonçalves ら[4]の実験結果を Fig.7 に示す。横軸の Reduced velocity(V_r)は式(4)の通り算出する。

$$V_r = \frac{U}{f_n D} \quad (4)$$

Fig.7 から分かるように、 $S/D=3.0$ の時シミュレーション結果は実験結果とほぼした。

5. 結論

本研究では、強制加振曳航実験によりさまざまな振動状態における流体力を評価し、異なるカラム間距離に対するカラム間干渉が流体力に与える影響を示した。この実験では円筒間距離を変えることによって各種流体力係数の値が変化することを確認し、その原因を考察した。先行研究では得られなかった振動領域における流体力も計測することで、VIM の安定領域を網羅したデータベースを作成した。得られたデータベースを用いて、より信頼度の高い複数カラム型浮体の VIM 挙動予測モデルを開発した。また、シミュレーションで静止状態から振動が励起されなかった換算流速でも、初期条件(振幅, 周波数)を変えることによって振動が励起されるケースを確認した。これは、擾乱によって VIM が発生する実現象を再現することができたといえる。シミュレーション結果を自由振動実験の結果と比較したところ近い値の振幅が得られたので、精度の高いモデルを開発することに成功したと言える。

参考文献

- [1] Alam, M.M., Moriya, M., Takai, K., Sakamoto, H., 2003. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *Journal of Wind*
- [2] Gopalkrishnan, R (1993) "Vortex-Induced Forces on Oscillating Bluff Cylinders," D.Sc. Thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, Cambridge, USA.
- [3] 手島智博: "流体構造数値解析による曳航パイプの VIV に関する研究", 東京大学修士論文, 2005
- [4] 椎葉星哉: "複数カラム型浮体の渦励起運動予測モデル開発に関する研究", 東京大学修士論文, 2018
- [5] Gonçalves, R., & Nicole H., et al. (2018). FIM - flow-induced motions of four-column platforms

Table 2 Model specifications of VIM experiment[4].

Parameter	Symbol	Value	Unit
Diameter	D	0.25	m
Towing speed	U	0.3	m/s
Spring constant	k	84-930	N/m
Aspect ratio	L/D	1.5	-
Column distance	S/D	4.0	-
Reynolds number	Re	10,000- 150,000	-

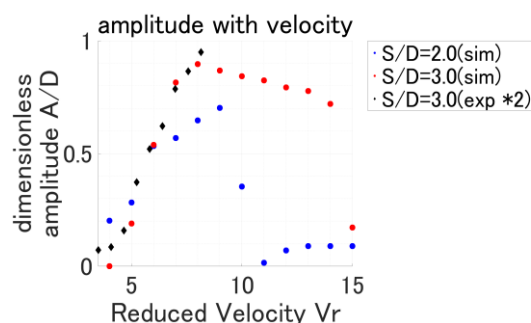


Fig.7 damping and added mass coefficient for 4 cylinders