

任意に配置された低アスペクト比2円筒に作用する
一様流中流体力に関する研究

A study on hydrodynamic force model for two low-aspect-ratio columns located
arbitrarily in uniform flow

学籍番号 47-196643 松下 凜太郎
指導教員 平林 紳一郎 准教授

(令和4年1月31日発表)

Keyword : 渦励起運動, 円柱カラム浮体, 流体力, 円筒間干渉, 任意円筒配置

Keyword : VIM, Low-aspect-ratio, Hydrodynamic Force, Array of Cylinders, Column Interference

1. 序論

1.1 浮体式洋上風車とVIM

近年様々な再生可能エネルギー開発が進む中で、日本では浮体式洋上風車に注目が集まっている。日本の広大な経済水域を有効利用できるエネルギー源であり、遠浅の海が少ない日本では海底に係留索のみを固定させる浮体式洋上風車は相性が良く、既に実証実験も行われ始めている。

浮体式洋上風力発電をプラットフォームとして使用する場合に課題となるのが長期間の運用による設備の疲労である。海底に係留索のみを固定するという設置方法を取るため、特に海流・潮流による振動性疲労は避けられない。しかし、この振動をある程度抑制できればリスク軽減とメンテナンスコスト削減に繋がる。

そして、係留索などの外力を復元力に持ち、それに伴う揚力方向への左右の渦放出による圧力変動で構造物が振動する現象をVIM(Vortex-Induced Motion)と呼ぶ。浮体式洋上風車は海中部では複数円筒群とみなせるため、この現象の原理を解明し、予測することで適切な振動抑制方法の提案に繋がると考えられる。

1.2 複数円筒に関する先行研究と研究目的

Zhou and Alam [1]は高AR(Aspect ratio)の2円筒を極座標上の様々な位置で固定し、得られた流体力から特徴的な流体現象を導いていた。豊田 [2]は低ARの正方形配置4円筒を用いて水流と直交方向になる強制加振実験を行い、得られた係数を用いてVIMの安定領域をシミュレーションにより再現していた。Goncalves [3]は4円筒または4角柱からなる浮体に様々な流速の一様流を当てて、VIMを模擬し換算流速とVIMの振幅の関係性を調べた。今井 [4]は高ARの固定された2円筒の流体力から固定された複数円筒の流体力の推定を試みる流体力モデルを構築し、補正込みでこれを可能としている。このように多くの固定・振動実験やカラムの状態に関する推定が行われている。一方で、いずれも浮体形状や拘束条件が限定的であるという課題がある。Table 1.1にはそれぞれが扱った条件をまとめた。

そこで本研究では、様々な配置で振動する低ARの2円筒に関して流体力のデータベースを作成し、さらに振動する2円筒の流体力を推定するモデルを作成することを目的とする。

Table 1.1 Comparison with previous studies

	Column	AR	Oscillation/fixed	Angle
Zhou and Alam [1]	2	6.12	Fixed	All
Toyoda [2]	4	1.5	Forced oscillation	Limited
Goncalves [3]	4	1.5	Free oscillation	Limited
Imai [4]	4	6.12	Fixed	All
This study	2	1.5	Forced oscillation	All

2. 強制加振実験

2.1 実験概要

VIMが発生するような低AR円筒浮体にかかる流体力データベースを得るために、東京大学の生産技術研究所回流水槽にてFig. 2.1に示すように円筒模型の強制加振実験を行った。円筒模型最大4本で構成される浮体モデルを強制加振装置に固定し、一様流を当てながらcross-flow方向に強制加振させ、円筒に取り付けた検力計で各主成分を計測した。また加振中の変位はレーザー距離計で計測をした。各実験条件はTable 2.1に示した。

Table 2.1 Experimental conditions

U [m/s]	0.21
D [m]	0.125
H/D	1.5
Re	26250
Fr	0.12
$P^* = P/D$	2.0 – 5.0
$A^* = A/D$	0.1 – 1.0
$f^* = fD/U$	0.06 – 0.20
θ [degree]	0, 7.5, ..., 180

2.2 解析手法

計測データは sampling time が 10 ms であり、それぞれ時間、検力計各主成分、レーザー変位計の値が 50 周期分含まれている。そこから前半 3 周期後半 2 周期をカットし 45 周期分を解析に用いた。模型全体の回転角 α に応じて座標変換を行い、流れ方向を基準とした絶対座標系における x 方向と y 方向の力を算出した。さらに絶対座標系における y 方向には加振に伴い、円筒および各種留め具の重量が慣性力となって計上されているためこれを取り除いた。Fig. 2.2 に各パラメータの詳細をまとめた。

以上の手続きをして得られた抗力と揚力の平均を用いて平均抗力 \bar{F}_D 、平均揚力 \bar{F}_L とし、それぞれ式(1)より平均抗力係数 C_D 、平均揚力係数 C_L を導いた。変動力はノイズを除去するため無次元周波数 0.5 までの RMS を変動抗力 F'_D 、変動揚力 F'_L と定め式(1)より変動抗力係数 C'_D 、変動揚力係数 C'_L を導いた。さらに揚力のうち加振による加速度に比例する付加質量力 F_{add} と、速度に比例する減衰力 F_{damp} を取り出し、式(2)より付加質量係数 C_{add} 、式(3)より減衰係数 C_{damp} を算出した。

$$C_D, C_L, C'_D, C'_L = \frac{\bar{F}_D, \bar{F}_L, F'_D, F'_L}{\frac{1}{2}\rho DHU^2} \quad (1)$$

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

$$C_{damp} = \frac{F_{damp}}{\frac{1}{2}\rho DHUA \times (2\pi f)} \quad (3)$$

3. 流体力データベース

解析結果のうち平均抗力係数 C_D の代表例をコンター図で示す。後述するモデル化による値と区別するため、図中では $C_{Dmeasured}$ と表記する。

Fig. 3.1 (a) は $f^* = 0.00, A^* = 0.0$ の値である。特に θ が小さい領域では tandem 配置の下流側に位置するため C_D は非常に小さくなっている。高 AR の場合と比較して、値の分布は類似しているが大きさが半分程度となっていた。低 AR の円筒では円筒下端からの渦の巻き上げが起これ、高 AR 円筒と比べると後流域が円筒高さ方向に対して狭くなる。その結果として抗力としては小さくなっているためであると考えられる。

Fig. 3.1 (b) は $f^* = 0.14, A^* = 0.5$ の値である。加振されることで全体的に抗力が増加している。また加振によって、 θ

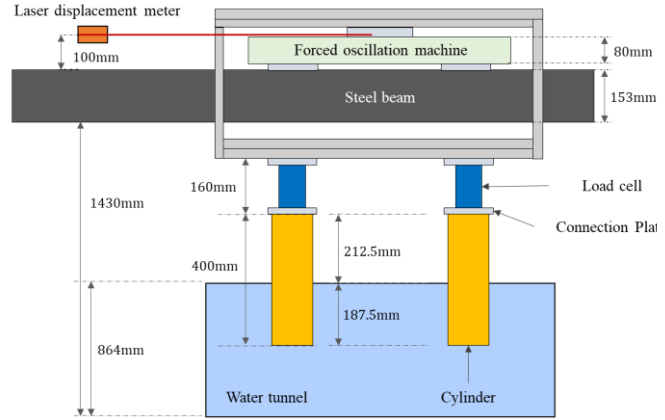


Fig. 2.1 Floating diagram

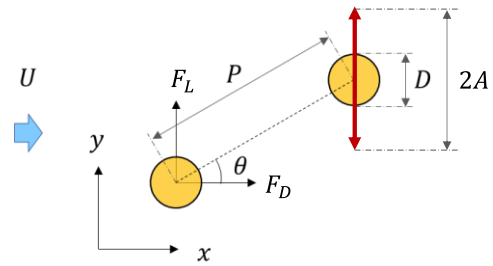


Fig. 2.2 Schematic diagram

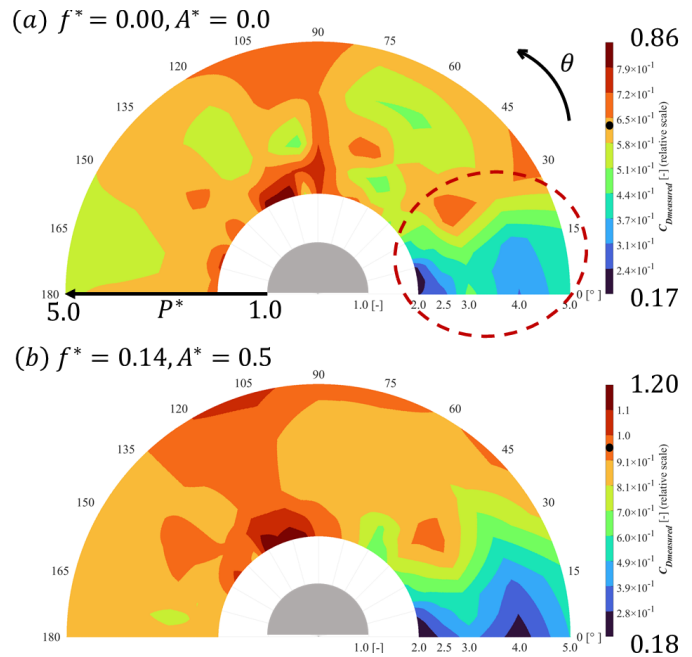


Fig. 3.1 $C_{Dmeasured}$ contour diagram

が小さい領域を除いて C_D のばらつきが小さくなっていることが分かる。

加振状態であっても、 θ が小さい領域では C_D が相対的に小さい値を示している。また A^* が増えることで円筒の代表面積に対する後流域の幅が広がっており、結果として C_D も大きくなっていると考えられる。

4. 流体力モデル

4.1 モデルの概要

一様流中に存在する複数円筒にかかる流体力係数を互いに独立な複数の変数からなる関数で再現する流体力モデルを構築する。対象となる無次元係数は平均抗力係数 C_D 、平均揚力係数 C_L 、変動抗力係数 C_D' 、変動揚力係数 C_L' の4つである。本研究で行われた円筒加振実験で得られたデータベースを基にモデル化を行う。実験では、カラム数 N 、カラム中心間距離比 P^* 、一様流に対する円筒間角度 θ 、無次元加振振動数 f^* 、無次元加振振幅 A^* が変数であり、2円筒間の干渉のみを考慮して、 $N = 2$ の条件下でモデル化を行った。 $N = 2$ に限定するのは、複数円筒間の流体干渉としては2円筒間のものが最も基本的であり、変数ごとの変化傾向もわかりやすくなるためである。

4.2 モデルの基本式

流体力係数は流体力そのものを無次元化したものであり加法が成り立つ。則ち流体力係数のうち無加振状態の値を引いた値は加振によって生じた流体力であるといえる。ここで4つの変数のうち A^* に注目する。無加振時と比べて、加振方向の移動距離は $2A^*$ であり、また加振によって追加で発生する後流域の幅は約 $2A^*$ である。そこで「加振によって生じる流体力係数の変動値は A^* に比例する」と仮定して、 A^* に対する傾きを $a_0(\theta, P^*, f^*)$ 、切片を $b_0(\theta, P^*)$ とした(Fig. 4.1)。 A^* とは異なり、 θ, P^*, f^* については非線形現象が多く流体力係数との明確な物理的関係を解釈することが難しい。そこで、簡単のため、 θ, P^*, f^* をそれぞれ変数に持つ独立した関数の積で表現できるとしてモデルを定義した。流体力係数を C_{all} と置くと、基本式は式(4)のようになる。

4.3 各変数の関数形

$\hat{a}_1 a_1(\theta), \hat{a}_2 a_2(P^*), \hat{a}_3 a_3(f^*), \hat{b}_1 b_1(\theta), \hat{b}_2 b_2(P^*)$ の関数形は、各変数の境界条件および定義域内での値の変化の仕方に注意して、物理的に即したものとなるように定めた(Fig. 4.2)。式(5)にモデルに用いた関数形を表記する。

4.4 モデルの結果

本モデルでは線形性の低い箇所については補正を行っておらず、精度が下がってしまう。線形モデルではなく、よりフィッティング性の高い近似関数を用いれば精度も上げることは可能であるが、その分より複

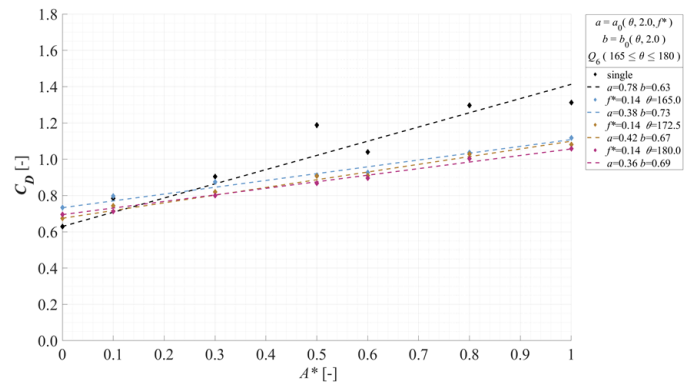


Fig. 4.1 $C_{Dmeasured}, a_0, b_0$ value

$$C_{all} \cong a_0(\theta, P^*, f^*)A^* + b_0(\theta, P^*)$$

$$a(\theta, P^*, f^*) = \hat{a}_1 a_1(\theta) \times \hat{a}_2 a_2(P^*) \times \hat{a}_3 a_3(f^*)$$

$$b(\theta, P^*) = \hat{b}_1 b_1(\theta) \times \hat{b}_2 b_2(P^*) \quad (4)$$

$$a_1(\theta) = p_{1m}\theta + q_{1m}$$

$$a_2(P^*) = 1 - p_{2m}e^{-q_{2m}P^*}$$

$$a_3(f^*) = 1 - e^{-q_{3m}f^*}$$

$$b_1(\theta) = p_{4m}\theta^2 + q_{4m}\theta + r_{4m}$$

$$b_2(P^*) = 1 - p_{5m}e^{-q_{5m}P^*}$$

$$\hat{a}_1 \hat{a}_2 \hat{a}_3 = \frac{1}{a_2(P_c^*) a_3(f_c^*)}$$

$$\hat{b}_1 \hat{b}_2 = \frac{1}{b_2(P_c^*)} \quad (5)$$

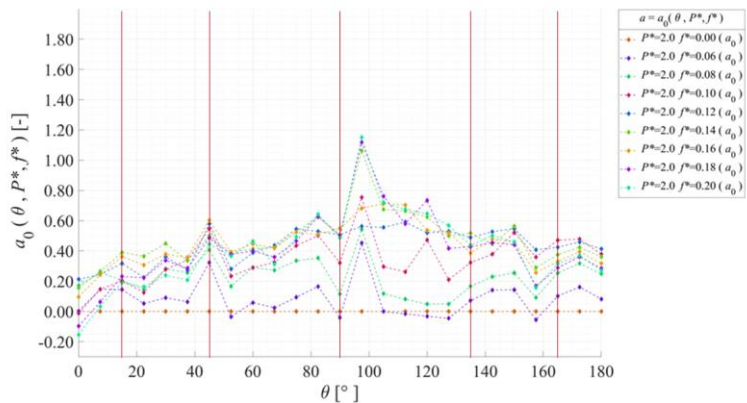


Fig. 4.2 a_0 value about C_D in θ -axis

雑な関数形，場合分け，係数の管理が必要となる．本モデルでは簡易な形式で流体力を再現することに重きを置いており，これ以上煩雑なモデル化を行うことは趣旨から外れるため，式(5)によるモデル化結果を C_D モデルとして定め， C_{Dmodel} と置いた．

θ, P^* に関するコンター図を用いて代表的な加振条件 $f^* = 0.14, A^* = 0.5$ の(a)モデル値 C_{Dmodel} ，(b)差分値 $C_{Dmodel} - C_{Dmeasured}$ ，(c)誤差 $|C_{Dmodel} - C_{Dmeasured}|/|C_{Dmeasured}|$ を Fig. 4.3 に示す．モデル値は元の値との分布の違いを比較する定性的評価，差分値および誤差は元の値との数値の違いを比較する定量的評価を主に示すこととなる．誤差はわかりやすさのため，100%以上の誤差は全て100%とみなして表記した． $C_{Dmeasured}$ である Fig. 3.1 (b)と比べ，概ね近い分布となっているが低いピークに若干のずれがある．これは P^* に関して $a_2(P^*)$ が単調増加すると仮定しており，元の値のように一度極大値を迎えるような分布を再現できないためである．またそのため，差分値は $0 \leq \theta \leq 15, 3.0 < P^*$ にピークが見られる．誤差についても同様の箇所に100%以上とみられるピークが存在するが，他の領域では10~20%となっている．

C_D のモデル化に関して，抗力の物理的側面を再現しつつ，誤差が概ね10~20%に留まっていることから，モデルとして機能する可能性を示せた． P^* に関する関数を定める際に適切な極値を持つように設定するとよりモデルの性能が挙げられると考えられる．

5. 結論

本研究では，円筒中心間距離，一様流に対する円筒間角度，無次元加振振動数，無次元加振振幅を可変パラメータとする低 AR 円筒の加振実験装置を作成し，回流水槽にて加振実験を行い，低 AR 2円筒の流体力データベースを作成した．本データベースは，VIM が発生しやすい低 AR の構造物に関する新たな知見として役立つことができる．またデータベースを用いて上記のパラメータを自由に設定可能な低 AR 2円筒流体力モデルの構築を行った．本紙では平均抗力係数の結果のみを記載したが，流体力モデルでは平均抗力係数，変動抗力係数，変動揚力係数は再現性の高い結果が得られたため，実験や数値シミュレーションと比べ，簡便かつ短時間での流体力推定が見込めることとなった．一方で平均揚力係数のモデル化は再現性が低い結果となった．またモデルを実用化の上では付加質量力と減衰力のモデル化も今後は必要となると考えられる．

6. 参考文献

- [1] Yu Zhou, Md. Mahbub Alam, 2016, "Wake of two interacting circular cylinders: A review," International Journal of Heat and Fluid Flow, 62, 510-537.
- [2] 豊田洋介, 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, 東京大学修士論文, 2020.
- [3] Goncalves, Hannes, et al, 2020, FIM - flow-induced motions of four-column platforms, Applied Ocean Research 95 102019.
- [4] 今井陽, 複数円柱で構成される浮体に作用する流体力モデルの構築, 東京大学卒業論文, 2021.

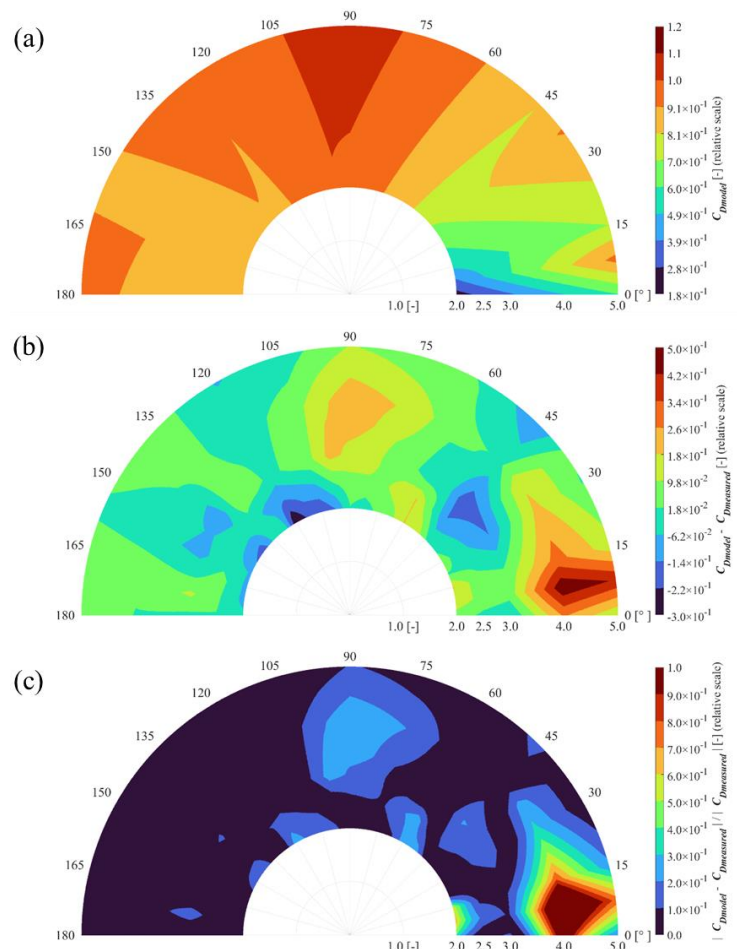


Fig. 4.3 C_{Dmodel} contour diagram