

間隔を維持する 2 本の円柱に作用する
流れ直交方向及び回転方向の VIV 流体力に関する研究
Study on VIV Hydrodynamic Forces in Cross-flow and Rotational direction
on Two Circular Cylinders with Constant Space

学籍番号 47-136662 山本 寛弥
指導教員 尾崎 雅彦 教授

(平成 28 年 2 月 1 日発表)

Keywords: 渦励振, VIV, 2 円柱, 強制加振

Keywords: VIV, Model test, Two cylinders

1. 序論

1.1 研究背景：海底熱水鉱床開発

近年、資源コストの高騰や調達リスク回避の観点から海底鉱物資源開発が注目されている。その採鉱方法の一つとして採鉱機により海底で鉱物資源を細かく粉砕し、海水と混合したスラリーとして海上まで運搬するスラリー方式が有力だと考えられる。この方式を採用する場合、揚鉱管のほか処理済みの揚鉱水を海底付近で排水するための管や、採鉱機等の機器へのアンビリカルケーブル等からなる複数本の線状構造物で構成されるライザーシステムとなることが予想される[1]。Fig.1 にその概要図を示す。

1.2 2 本の円柱に生じる VIV

複数本の近接配置された線状構造物が潮流中に設置されると、単独の場合と比較して流路が複雑化し、渦励振(Vortex Induced Vibration: VIV)の特性が変化することが考えられる。Sumner[2]は①2 本の円柱が同径、②一様流れ、③円柱は無有限長と仮定 という条件に焦点を当て、過去 20 年ほどの 130 以上にわたる研究を Review しており、その中で静止 2 円柱における流体力計測や流れの可視化等の研究をまとめているが、振動状態にある 2 円柱を扱った研究は過去に少ない。

1.3 本研究の目的

本研究では既存の VIV 応答解析手法である「実験による揚力モデル法」を 2 本の円柱の場合に適用することを考え、2 本の円柱の加振試験を行い、得られた流体力をデータベース化し、2 次元平面での 2 円柱の挙動シミュレーション手法を開発することとする。円柱同士は一定間隔ごとに束縛され円柱間距離が固定されたものを想定し、2 本の円柱を一つの物体と見なしてその中点周りに作用する力及びモーメントの解析を中心に行うものとする。

2. 水槽試験

水槽試験は海上技術安全研究所の極浅水域流体力計測用水路(小型 2 次元水槽)で実施した。本水槽は長さ 22m, 幅 0.5m, 深さ 0.7m である。円柱模型は上流側, 下流側ともに同一仕様とし、アルミニウム製で中性浮力となるように調整した。円柱の直径 D_0 は 0.080m, 円柱長さ L は 0.468m である。水深は 0.640m とし、曳航台車上に設置した 1 軸強制動揺装置を介して加振を行う際の円柱模型中心初期位置は水面と水槽底の中間位置に来るように調整した。模型端部による 3 次元流れの影響を避けるため模型の両端にはアルミニウム製の端板を取り付けた。また、2 つの円柱模型の角度及び間隔を調整するフレームと流体力計測円柱の間には、境界層の影響を避けるためにダミーの円柱部分を取り付けている。模型に作用する流体力は内部に組み込んだ左右 2 組の 2 分力計(流れ方向と流れ直交方向)で計測し、計測した流体力に加えて曳航速度、強制動揺装置変位、水温を時系列データとして収録した。検力計の出力は、歪ゲージ式変換器を介してデジタルデータとしてデータロガー

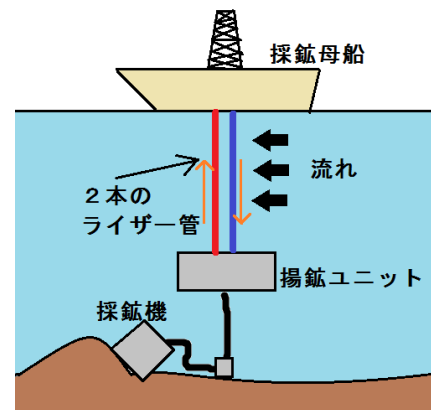


Fig. 1 Concept of proposed riser system.

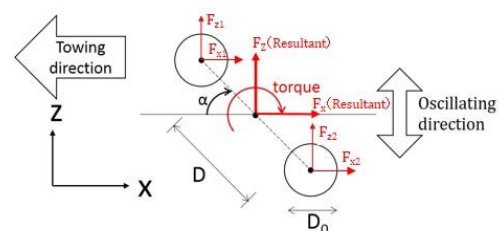


Fig. 2 Schematic of experiment.

にサンプリングレート 100Hz で収録した。模型の曳航速度はロータリーエンコーダにより計測し、円柱の加振振幅 A は強制動揺装置に内蔵されたポテンシオメータで計測した。

試験時の曳航方向と加振方向のほか、円柱間距離 D 、円柱径 D_0 、流向 α 、中点周りに作用する合力及びモーメントなどの座標系及び文字の定義を Fig.2 に示す。

3. 試験条件の設定

円柱が振動する条件は静止円柱の渦剥離が発生する換算流速 V_R 付近と考える。

$$V_R = U / fD_0 \quad (1)$$

すべての Re 数において $5 \leq V_R \leq 9$ の範囲で VIV 運動が最も大きくなるといわれる。そのため本試験では強制動揺装置の加振周波数 f 及び曳航台車の速度 U を上記の範囲をカバーするように設定した。円柱間距離 D は $1D_0$ と $2D_0$ 、2本の円柱の中心を結ぶ線が流れに対してなす角度（以降 流向 α は 0° (直列) から 90° (並列) とした。試験条件の詳細を Table 1 に示す。換算流速の逆数を無次元周波数として扱う。また、本試験における Re 数は $Re=2 \times 10^4$ 付近となる。

4. 試験結果及び考察

4.1 試験時の計測手順

計測では計測開始後に強制動揺装置を起動し、動揺が安定してから無曳航時の計測時間を設けた後、曳航を開始した。Fig.3 に出力例として $U=0.4\text{m/s}$ 、 $A/D_0=0.3$ 、 $f=1.0\text{Hz}$ 、 $D/D_0=1.0$ 、 $\alpha=0^\circ$ の加振振幅、曳航速度、流向直交方向出力及び解析に用いた区間を示す。青の網掛けは曳航開始前、緑の網掛けは曳航開始後の解析区間である。

4.2 解析手法

円柱に働く流体力を無次元化し、流れ方向の抗力係数、流れ直交方向の付加慣性係数及び線形減衰係数を算出した。以下に算出方法を述べる

(1) 抗力係数算出

円柱に働く流れ方向の力の平均値 F_x とし、抗力係数 C_D を(2)式より求めた。

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U^2 L D_0} \quad (2)$$

ρ は水の密度である。

(2) 付加慣性係数及び線形減衰係数算出

円柱に働く流れ直交方向の力の加振周波数と同周波数の成分を調和解析により抽出した。抽出された力は(3)式のように表される。

$$F_z(t) = F_{z0} \cos(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

ここでは加振周波数を ω 、強制動揺装置からの位相差を φ としている。

ここで、(3)式を加法定理により分解することにより(4)式を得る。

$$F_z(t) = F_{z0} \cos \varphi \cos \omega t + F_{z0} \sin \varphi \sin \omega t \quad (4)$$



Fig. 3 Experimental carrier.

Table 1 Test Condition.

Parameter	Range
Towing velocity, U	0.3 and 0.4 m/sec
Oscillation amplitude, A/D_0	0 ~ 1.25
Oscillation frequency, $f D/U$	0.1~0.25
Distance between cylinders, D/D_0	1.0 and 2.0
Flow direction, α	$0^\circ \sim 90^\circ$

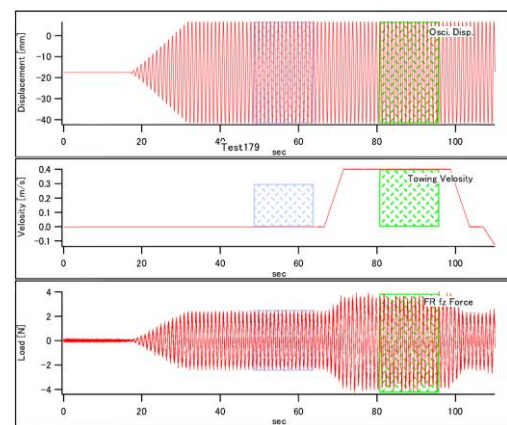


Fig. 4 Example of time history data (A , U , F_z of right front).

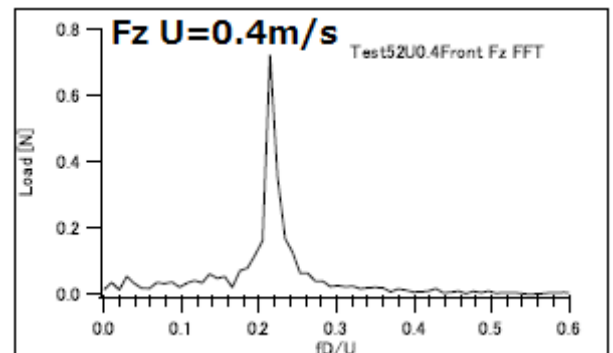


Fig. 5 Results for single cylinder without forced oscillation, Amplitude spectrum of lift force.

第1項は加振の加速度と同位相であり、揚力方向の見かけ質量力（慣性力と付加慣性力の和）に相当し、第2項は速度と同位相であり、揚力方向の線形減衰力に相当する。これにより各円柱に働く付加慣性力、線形減衰力の無次元化係数 C_{La} , C_{Ld} を(5),(6)式のように定義する。 M は円柱質量であり、付加慣性係数の分子第2項は慣性力である。

$$C_{La} = \frac{F_{Z0} \cos \varphi - MA(2\pi f)^2}{\frac{1}{4} \rho \pi D_0^2 LA(2\pi f)^2} \quad (5)$$

$$C_{Ld} = \frac{F_{Z0} \sin \varphi}{\rho DLU A(2\pi f)} \quad (6)$$

また2本の円柱を1つの物体と見なし、その中点に作用する力及び中点まわりのモーメントについても流体力係数を算出した。詳細な数式はここでは割愛する。

4.3 解析結果

4.3.1 単管試験

2本の円柱での流体力計測を実施する前に、本試験の妥当性を検証するために単管での計測も実施した。Fig.5に示した曳航速度 $U=0.4\text{m/s}$ としたときの無加振曳航時の揚力振幅スペクトルは、換算周波数 $fD/U=2.0$ 付近にピークが生じており、同 Re 数下における一般的な渦放出周波数 $St=0.2$ 付近と一致していることが確認できる。また、Fig.6には付加慣性係数及び線形減衰係数の等高線プロットを示した。同様の実験を行った Gopalkrishnan[3]と比較したところ、大きな差異はないことが確認できた。

4.3.2 CF 加振試験

Fig.7に試験結果の例として $U=0.4\text{m/s}$, $D0/D=2,3$ 流向 $\alpha=0^\circ$ の2ケースのグラフを示す。CF方向強制加振による流体力計測試験の結果、上流側と下流側の円柱はそれぞれで単円柱における結果と異なる流体力係数の特性が得られた。また、これらの結果は先行研究及び本研究における無加振曳航時の解析結果から予想される励振周波数帯とは異なる結果が出ているケースもいくつか存在し、特に直列状態における上流側円柱は渦放出が抑制されると考えられている無加振曳航状態に対して、加振試験の結果は単円柱よりも換算周波数及び無次元振幅ともに広い範囲で起振力が生じた。また、全体として流向が並列に近くなるほど、双方の円柱で励振が起こる周波数域が高い方向に移動していく傾向が見られた。2本の円柱を1体と見なした場合、CF方向には単円柱に比べ広い無次元振幅及び周波数域で起振力が発生した。また、この起振力は円柱間距離を開くと低減された。また、CF振動におけるROT方向起振力は円柱の位置関係が直列に近い場合に大きな絶対値を持つことが分かった。Fig.8に例として $U=0.4\text{m/s}$, $D0/D=2$ 流向 $\alpha=0^\circ$ のグラフを示す。

4.3.2 ROT 加振試験

ROT方向強制加振試験による結果では、今回計測

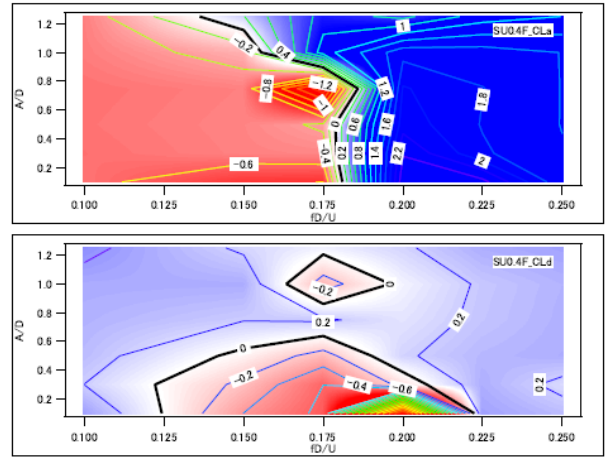


Fig. 6 Contours of the lift coefficient, top: in phase with acceleration, bottom: in phase with velocity.

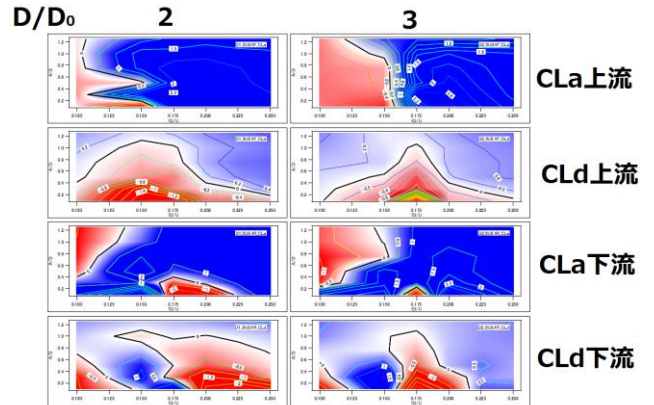


Fig. 7 Contours of the lift coefficient, CLa: in phase with acceleration, CLd: in phase with velocity, $U=0.4\text{m/s}$, $\alpha=0^\circ$.

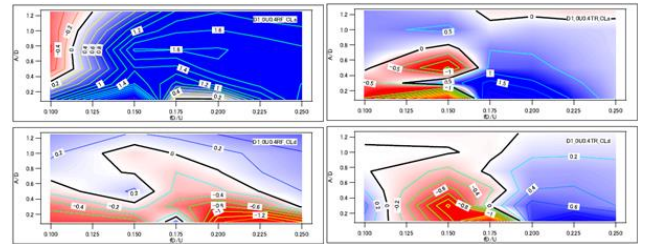


Fig. 8 Contours of the Fluid force coefficient (resultant lift force and torque), top: in phase with acceleration, bottom: in phase with velocity, left: upstream right: downstream $D/D0=2$, $U=0.4\text{m/s}$, $\alpha=0^\circ$.

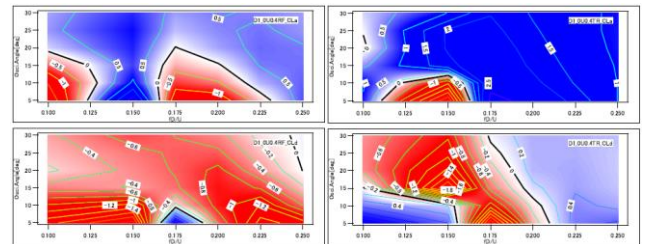


Fig. 9 Contours of the Fluid force coefficient at rotational oscillation, top: in phase with acceleration, bottom: in phase with velocity, left: upstream right: downstream $D/D0=2$, $U=0.4\text{m/s}$, $\alpha=0^\circ$.

を行った $D/D_0=2$, $\alpha=0^\circ, 15^\circ$ の2ケースにおいては線形減衰が負になる領域が計測した範囲内では捉えきれなかったが、計測により周波数・振幅ともに単円柱に比べて広い範囲で起振力が生じることが分かった。また、振幅の上昇とともに起振力の生じる周波数域が移動する現象が見られた。Fig.9 に例として $U=0.4\text{m/s}$, $D_0/D=2$ 流向 $\alpha=0^\circ$ のグラフを示す。

5. 応答解析プログラム

計測試験により得られた流体力を用い 2 次元な 2 円柱の挙動の特性をシミュレートしたところ、以下の知見が得られた。①ROT 方向振動の周波数及び振幅は線形減衰係数が起振方向から減衰方向へ符号が変わる付近で一定の振幅を保った定常状態となるケースが多かった。②それに対して CF 方向振動では定常状態となっても振幅が一定にならず、うなりのような振動状態を示した。③CF 方向振動の定常状態は線形減衰係数の符号が変わる領域から離れた場所でも生じた。上記と合わせて ROT 方向振動による CF 方向成分の流体力の影響が強いためだと考えられる。④CF と ROT 振動が逆位相の状態で計算を開始しても近い定常状態になることが確認できた。Fig.10 に応答解析結果の一例を示す。

6. 結 言

2 本の円柱において CF 方向及び ROT 方向の強制加振試験を行い、得られた流体力から付加慣性係数及び線形減衰係数を算出した結果、2 本の円柱の位置関係に応じて両者それぞれに単円柱の場合とは異なる特性が現れた。また全体として円柱単体の場合よりも励振が生じやすく、特にねじれ方向の励振は大きな角度にまで及ぶ可能性があることが示された。

また、得られた流体力係数を用いて 2 次元的な応答解析を行ったところ、CF 方向の振動が ROT 方向の振動による影響を強く受ける可能性が示された。

7. 今後の課題

1. 本研究では流体力係数が CF 方向振動と ROT 方向振動の位相差の影響を受けないと仮定したが、in-line 方向を考慮した VIV の研究などに見られるよう、位相差によっても VIV 特性が変化する可能性があるため、その影響を考慮した計測試験等を行い仮定の妥当性を検証する必要がある。
2. 本研究では応答解析プログラムは円柱断面の 2 次元的な応答のみを扱ったが、実際のライザー管のような線状構造物の設計評価を行う場合、複数の周波数成分を同時に有する振動が生じるため、それに応じたプログラムの開発及び特性の解析が必要である。
3. 応答解析プログラムの妥当性を検証するために、自由振動試験等の比較対象となるデータの計測が必要である。

参考文献

- [1] (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 HP: JOGMEC の取り組み状況 / 海底熱水鉱床
- [2] D.Sumner, Two circular cylinders in cross-flow:A review, Journal of Fluids and Structures 26(2010)849-899.
- [3] Gopalkrishnan, Ramnarayan, Vortex-induced forces on oscillating bluff cylinders, Massachusetts Institute of Technology (1993) 63-100

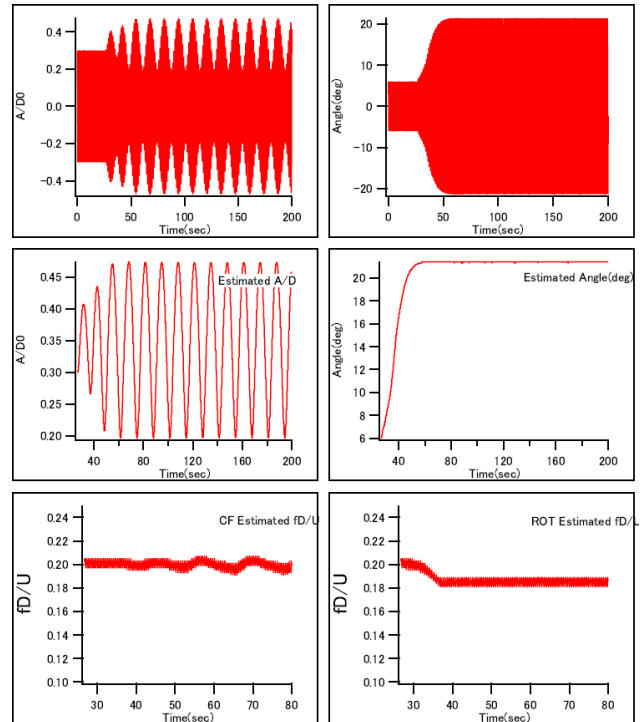


Fig. 10 Results of response analysis.