

半没水円筒周りの流れに対する自由表面及び端部の影響

Free-surface and free-end effects on flow around half-submerged circular cylinders

学籍番号 47-176634 坂田 啓悟

指導教員 鈴木 英之 教授

平林 紳一郎 准教授

(平成 31 年 1 月 30, 31 日発表予定)

Keywords: 渦, 円筒周りの流れ, PIV, 流体力, 自由表面影響, 端部影響

Keywords: Vortex, Flow around circular cylinders, PIV, Hydrodynamic force, Free-surface effect, Free-end effect

0. Nomenclature

| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| D | cylinder diameter | L | submerged cylinder length | $AR = \frac{L}{D}$ | aspect ratio |
| U | uniform flow velocity | ν | coefficient of kinetic viscosity | $Re = \frac{UD}{\nu}$ | Reynolds number |
| g | acceleration of gravity | $Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}}$ | Froude number | f | frequency |
| F _x | streamwise force | F _y | transverse force | ρ | water density |
| C _x | dimensionless F _x | C _y | dimensionless F _y | V _x | streamwise velocity |
| V _y | transverse velocity | V _z | vertical velocity | $\omega_x = \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z}$ | streamwise component of vorticity vector |
| $\omega_y = \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}$ | transverse component of vorticity vector | $\omega_z = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}$ | vertical component of vorticity vector | $\omega_m = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}$ | magnitude of vorticity vector |

1. 序論

1.1 浮体式洋上風車と VIM

洋上風力発電は日本の広大な海域を活かせる再生可能エネルギーとして、事業化に向けた研究が進められている。日本のように岸から離れるにしたがって急速に水深が増すような洋上では、係留された浮体に風車を設置する浮体式が期待されている。浮体式洋上風車は風、波、潮流といった自然外力を受けて複雑な挙動を示す。特に強い潮流下においては、浮体から放出される渦によって海洋構造物自身が比較的周期の運動を示し、Vortex-Induced Motion(VIM)と呼ばれる。VIM は、浮体式洋上風車の係留系に張力変動をあたえ寿命低下に繋がるのが懸念されており、VIM を含む浮体の正確な挙動予測法が求められている。VIM は低アスペクト比の構造物に生じる。低アスペクト比であるがゆえに、自由表面と構造物の端部の影響が大きくなると考えられる。一方で自由表面と端部が VIM に与える影響について、そのメカニズムは解明されていない。

1.2 研究目的と手法

本研究では、半没水固定円筒周りの流れに対する自由表面及び端部の影響を明らかにすることを目的とする。円筒周りの流体现象に関する研究は数多くなされてきたが、自由表面を含みかつ低アスペクト比のものを対象とした研究は少なく、自由表面及び端部の影響の詳細はまだ明らかになっていない。この場合流体现象を支配する無次元パラメータは、レイノルズ数(Re)、フルード数(Fr)、アスペクト比(AR)の三つであり、主に端部影響は AR に、自由表面影響は Fr に注目することで話を進める。本研究では、PIV を用いた半没水円筒周りの流場計測(PIV measurement)、及び半没水円筒に作用する流体力の計測(Force measurement)を行った。両者を用いて広範な Fr, AR の領域における流体现象の評価を行った。

2. PIV measurement

2.1 実験概要

半没水円筒周りの流れに対する端部影響を調べるため、複数のアスペクト比(L/D=2.0, 1.0, 0.5, 0.3)における円筒周りの流れを PIV によって計測した。Gonçalves et al. (2015)[1]も同様の条件で二か所の水平断面と一か所の鉛直断面で測定を行っているが、今回は流れの三次元構造を明らかにすべく、Fig. 1 のように多数の鉛直断面(xz-plane)を計測した。なお実験は全てサンパウロ大学 (ブラジル) NDF の回流

水槽で行った。テストセクションの大きさは7500x700x700mmであり、円筒の直径 D は125mm, Re は43000とした。円筒直径に対し、水槽が十分な幅を持つことから、PIV 測定機器の位置を固定し、中心付近で円筒の位置を動かした。一つの円筒に対して、中心から $D/10$ ずつずらし、円筒の端から $D/2$ の位置まで11回、15Hzのサンプリング間隔で345枚の画像を記録した。計測にはカメラを二つ使用することで、 xyz 三方向の速度を記録し、各断面を集めることで三次元流場を再構成した。ただし、各断面は独立に計測されているため、三次元及び xy , yz 平面で評価できるのは平均場である。

2.2 実験結果

Fig. 2は $AR=2.0$ での渦度のマグニチュードの等値面を示しており、各方向から見ると、側面からの渦放出及び端部からのアーチ渦が確認できる。他のアスペクト比についても同様の渦放出が確認できた。

Fig.3に示す、側面からの渦が通る $x/D=2.5$, $|y/D|=0.6$ 上の各点の x 方向の流速に対して、FFTによる周波数解析を行った結果が Fig. 4である。 $AR=2.0$ のケースでは fD/U が $0.1\sim 0.2$ の間に強いピークが見られ、これは側面からのカルマン渦を捉えていると考えられる。端部に近づくに従って渦放出が弱まっていることも確認できる。 $AR=1.0$ のケースも同様のことがいえる。一方、 AR が 0.5 を下回るケースではピークが確認できるものの非常に弱く、側面からカルマン渦が放出されているとは結論付けられない。

Fig. 5は様々な AR での円筒直下での x 軸周りの無次元渦度であり、赤色のコンターが trailing vortex を表している。 $AR=0.3$ と小さくなると、trailing vortex は確認されなかった。

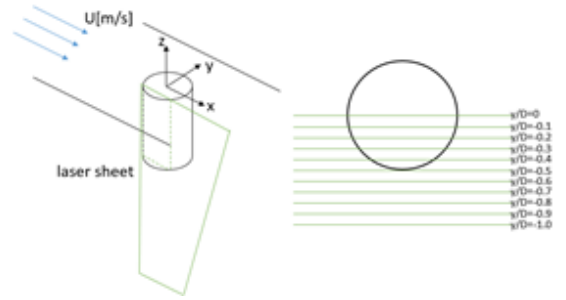


Fig.1 Schematic diagram of horizontal PIV measurement and laser positions.

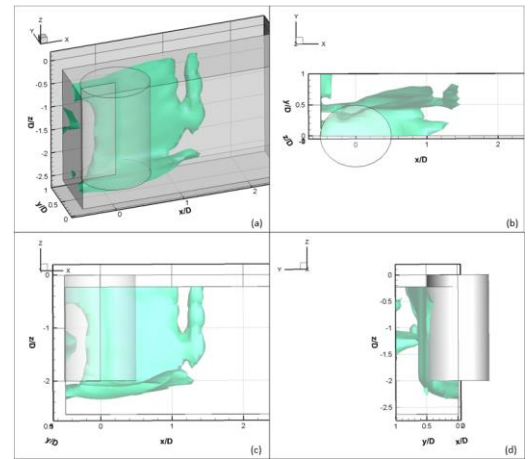


Fig. 2 Iso-surfaces of non-dimensionalized mean magnitude of vorticity vector at 3.5 for $Re=43000$, $L/D=2.0$: (a) 3D (b) top view (c) side view and (d) front view.

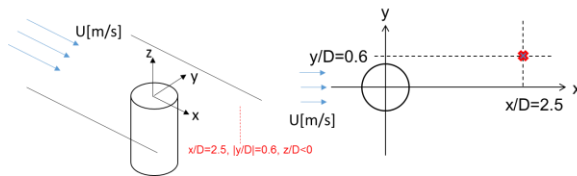


Fig. 3 Points at $x/D=2.5$, $|y/D|=0.6$

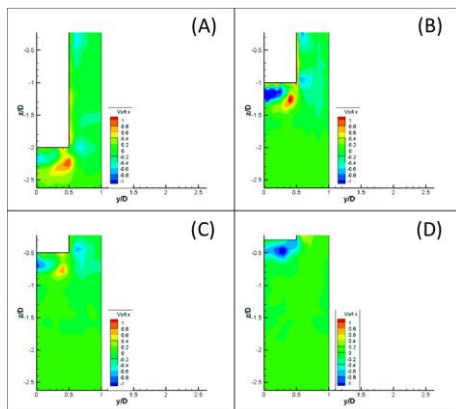


Fig. 5 Contours of mean vertical vorticity $\omega_x D/U$ in the horizontal planes yz ($x/D=0$) at $Re=43000$ for (A) $L/D=2.0$, (B) $L/D=1.0$, (C) $L/D=0.5$ and (D) $L/D=0.3$.

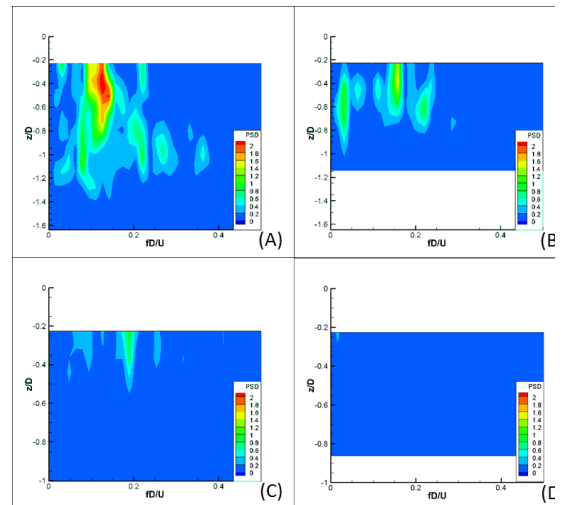


Fig. 4 PSD of the non-dimensionalized streamwise velocity as a function of fD/U at $x/D=2.5$, $|y/D|=0.6$, (A) $L/D=2.0$, (B) $L/D=1.0$, (C) $L/D=0.5$, (D) $L/D=0.3$

3. Force measurement

3.1 実験概要

レイノルズ数(Re), フルード数(Fr), アスペクト比(AR)それぞれの影響を調べるために, 9種類の異なる直径(7cm, 12.5cm, 13cm, 20cm, 25cm, 30cm, 40cm, 60cm)の模型を用意し, 曳航水槽で流体力の測定を行った. Reを一定にし, 流速Uを小さく, 径Dを大きくすることでFrを0(CFDで言う free-slipの状態)に近づけることができる. また回流水槽において, 水面に板を被せることで自由表面影響を排除し(CFDで言う no-slipの状態), 板を被せない場合と比較を行った. Frの値は実海域を考慮し, 最大でも0.742までになるようにしている. なお実験は全て東京大学本郷キャンパスの実験施設で行った. 実験条件をTable 1, Table 2に示す. 回流水槽では, Table 1のD=0.07m, 0.13mのケースで, AR=0.5, 1.0, 1.5, 2.0の4通りについて測定した.

3.2 データ処理

得られた抗力, 揚力の時系列データ F_x 及び F_y を式(1)のように無次元化し, 無次元周波数 fD/U が0~0.5の範囲で切り出し, 平均値と標準偏差(RMS)を算出した. また, パワースペクトル密度 PSD は, データのトレンドを除くべくハミング窓を時系列データにかけて算出し, U/D をかけることで無次元化した.

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho L D U^2}, C_y = \frac{2F_y}{\rho L D U^2} \quad (1)$$

$$C_{x_mean} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_{x,i}, C_{y_mean} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_{y,i} \quad (2)$$

$$C_{x_rms} = \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (C_{x,i} - C_{x_mean})^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$C_{y_rms} = \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (C_{y,i} - C_{y_mean})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

3.3 実験結果

(1) Fr 影響 (Re fixed cases)

Fig. 6 と Fig. 7 はそれぞれ各 AR における抗力係数の平均値 C_{x_mean} と揚力係数の変動成分 C_{y_rms} を示している. Fr が 0 付近から 0.74 まで増加すると側面渦が消失し, 揚力係数の変動成分は低下する. 回流水槽の実験でも同様の傾向が見られたものの, Fr=0.293 と no-slip 条件では結果に大きな差は見られなかった. Fr が大きく, AR が小さくなるにしたがって, 自由表面自体の動きが影響するようになる. これは周波数解析によって明らかにされた. Fig. 8 に例を示す. $0.05 < Fr < 0.5$ の範囲内では自由表面の流体力への影響はあまり変わらない. Fr が 0.74 まで増加すると抗力係数の著しい増加が見られた.

(2) Re 影響 (Fr fixed cases)

極超臨界域のレイノルズ数($Re > 3.8 \times 10^5$)においては, 一般に二次元円筒では, 抗力係数の急激な落ち込みとストローハル数 $St = fD/U$ の増加が見られる. これらは AR が 1.5 以上では確認できたものの, AR が 1 以下では確認できなかった. 側面領域が小さくなり, 端部影響が大きくなることで剥離点の遷移が起きないことが考えられる. $AR \geq 1.5$ かつ臨界域以上の Re では, Re の増加とともに抗力, 揚力係数の変動成分は増加傾向にある. AR が大きくなることで, 二次元円筒と同様の剥離点の推移や St の増加が考えられる.

(3) AR 影響

Table 1 Re fixed cases (Re=43000)

| D[m] | Fr | AR |
|-------|--------|------------------------------------|
| 0.07 | 0.742 | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 |
| 0.1 | 0.434 | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0-14.0 |
| 0.125 | 0.311 | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 |
| 0.13 | 0.293 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |
| 0.2 | 0.154 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |
| 0.25 | 0.11 | 0.5, 1.0, 1.5 |
| 0.3 | 0.0836 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 |
| 0.4 | 0.0543 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 |
| 0.6 | 0.0296 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |

Table 2 Fr fixed cases (Fr=0.311)

| D[m] | Re | AR |
|------|--------|--------------------------|
| 0.13 | 45606 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |
| 0.2 | 87026 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |
| 0.3 | 159877 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |
| 0.4 | 246147 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |
| 0.6 | 452200 | 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |

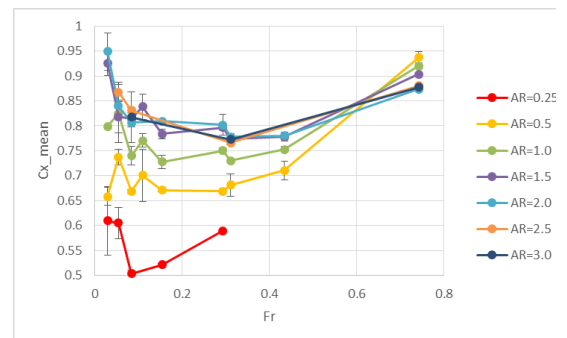


Fig. 6 Mean drag coefficient as a function of Froude number for each aspect ratio

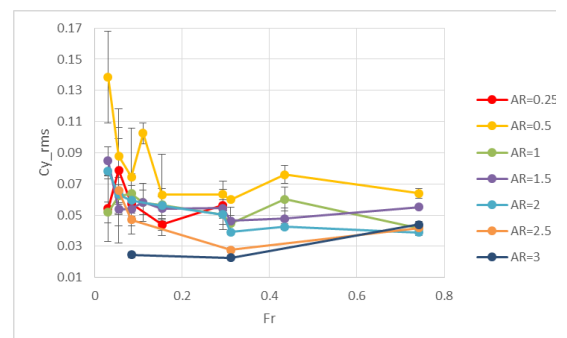


Fig. 7 RMS of lift coefficient as a function of Froude number for each aspect ratio

Table 1 における $D=0.1\text{m}$ の条件で AR を $0.5\sim 14$ まで動かすことによって、 AR 影響を取り出すことを試みた。Fig. 10 は AR に対する C_{y_rms} である。Benitz et al. (2016)[2] は $Re=2900, Fr=0.65$ では $AR\leq 3$ でスペクトルはエネルギーを持たない (C_{y_rms} がほぼ 0) と述べているが、 Fr の違いが影響していると考えられる。 $AR=0.5$ から AR が増加するに伴い、 C_{y_rms} が減少後、再び増加に転じる。低アスペクト比においては、端部からの渦の影響が強く、 AR が大きくなるに従い、 AR に占める割合が小さくなる。また徐々に二次元円筒に近づくことで側面から $St=0.2$ のカルマン渦が放出されるようになり、 C_{y_rms} が増加する。これは、今回のアスペクト比の範囲で端部からの渦が力の変動成分に一定値 C (力を $\frac{\rho L D U^2}{2}$ で割った値) だけ寄与し、二次元円筒が寄与する値を K , AR が a のときから $St=0.2$ のカルマン渦が放出されるようになると仮定すれば、

$$C_{y_rms} = \sqrt{\left(\frac{C}{AR}\right)^2 + \left\{\frac{K}{AR} \cdot (AR - a)\right\}^2} \quad (4)$$

のように表現できる。これを図示したのが Fig. 10 である。なお、この式は端部からの渦と側面からの渦の放出周波数が異なることを前提に作られている。FFT の結果を見るに、 AR が 10 以上の領域であれば、明確に分離できる。 AR が小さくなるにつれ、側面からのカルマン渦の放出周波数が減少し、互いの周波数領域が近づくため、その境界は曖昧になるものの、実際の RMS のおおよその振舞いが簡単なモデル式で記述された。一方、PIV の実験結果から AR が 1 や 2 では St が 0.2 より小さな値を持つカルマン渦が放出されると述べたが、Fig.10 の結果を見る限り、0.2 より St の小さなカルマン渦よりも端部からの渦による影響の方が大きいといえる。低アスペクト比の半没水円筒において、Fig. 7 にも見られるように、 AR が 0.5 のとき抗力、揚力係数の変動成分は極大となる。PIV では AR が 0.3 で trailing vortex が確認できなかったように、 AR が 0.5 を下回ると自由表面の影響で渦放出が抑えられるからだと思われる。

4. 結論

本研究では、PIV による流場計測と流体现象を支配する無次元数に注目した流体力評価によって、半没水円筒周りの流れに対する自由表面と端部の影響を明らかにした。今回新たに明らかにした主なこととして以下のことが挙げられる。

- $AR=0.3, 0.5, 1.0, 2.0$ の半没水円筒周りの三次元流場構造。
- AR が渦構造、抗力に与える影響 (端部影響)
- 境界条件の違いが渦構造、抗力に与える影響 (自由表面影響)
- Re, Fr, AR が流体力に与える影響とそれらのパラメータの干渉影響

free-slip に近づくことによる抗力の増加については今後さらなる検討が必要である。

参考文献

- [1]GONÇALVES, R. T., FRANZINI, G. F., ROSETTI, G. F., MENEGHINI, J. R. & FUJARRA, A. L. C. Flow around circular cylinders with very low aspect ratio. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 54, pp. 122-141, 2015.
- [2]BENITZ, M.A., CARLSON, D. W., SEYED-AGHAZADEH, B., MODARRES-SADEGHI, Y., LACKNER, M. A., SCHMIDT, D. P. "CFD simulations and experimental measurements of flow past free-surface piercing, finite length cylinders with varying aspect ratios". *Computers & Fluids*, Vol. 136, p. 247-259, 2016.

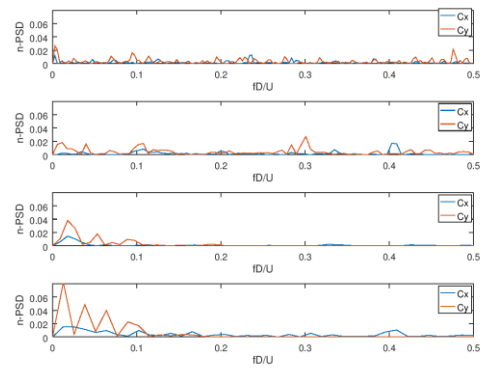


Fig.8 Non-dimensionalized PSD for $AR=0.5$
(a) $Fr=0.742$, (b) $Fr=0.434$, (c) $Fr=0.311$,
(d) $Fr=0.0296$

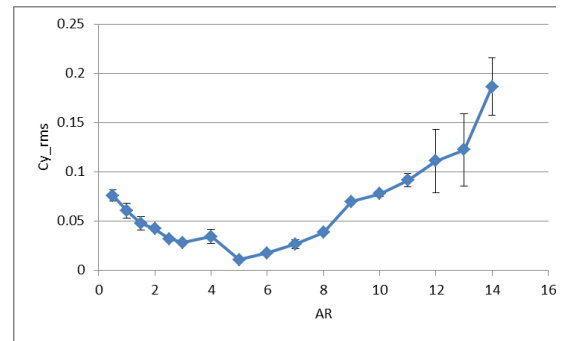


Fig. 9 RMS of lift coefficient as a function of aspect ratio

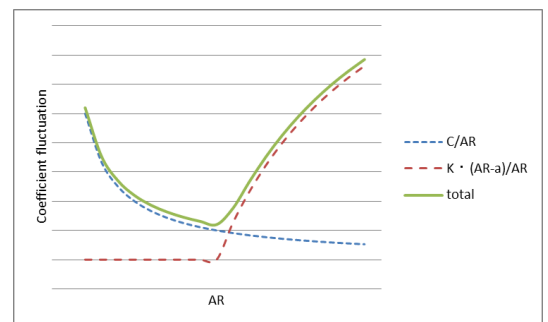


Fig. 10 Example of coefficient fluctuation model as a function of aspect ratio