

水面を貫通する低 AR 円柱周り流れの自由表面影響に関する数値的研究

Numerical study of free-surface effect on flow around surface-piercing circular cylinder with low aspect ratio

学籍番号 47-196633 北野 雄資
指導教員 平林 紳一郎 准教授

(令和3年1月27日, 28日発表)

キーワード; 渦, 円筒周りの流れ, 自由表面影響, CFD, 低フルード数, 低アスペクト比

Keyword; Vortex, Flow around circular cylinder, Free-surface effect, CFD, Low Froude number, Low aspect ratio

1. 序論

1.1 浮体式洋上風車と VIM

近年, 新たな再生可能エネルギー源として洋上風力発電が注目されている. 特に, 日本のように遠浅の海洋が少ない地域では, 係留索で固定された洋上の浮体に風車を設置する浮体式洋上風力発電に期待が集まっている. 浮体式は海底に基礎を築く着床式と比べて設置, 運用, 送電などのコストが増大することが課題となっている. これらの諸コストの削減のため浅海域への設置が見込まれているが, これは係留索への負荷を増大させる. また, 運用コストの削減のため係留索の頻繁な交換が難しく, 係留索の高寿命化が必要となる.

浮体式洋上風車は環境中の潮流や海流, 波といった自然外力を受けて様々な挙動を示す. 特に, 浮体が放出する渦によって引き起こされる振動現象に VIM(Vortex-Induced Motion)と呼ばれるものがある. VIMによって係留索にかかる張力が変動し, 弾性疲労による破壊リスクが増大することが懸念されている. このことから, 係留索の高寿命化のために VIMのメカニズムを解明することが求められている.

1.2 VIMに関する先行研究

浮体の VIM 現象を解明するため, 近年様々な研究が行われている. Rosetti et al.[1]は一樣流中のセミサブ型浮体を模したモデルを CFD を用いて解析し, 同一条件下での実験結果との比較を行った. Kim et al.[2]は一樣流中のセミサブ型浮体を模したモデルを CFD を用いて解析し, メッシュ精度や時間刻み精度が計算結果に与える影響について確認した. これらの CFD を用いた先行研究では, 低 Fr における自由表面は free-slip として扱われており, VIM における自由表面の影響が考慮されていない.

Fukuoka et al.[3]は一樣流中の円筒にかかる流体力を測定し, 低 Fr 域($0.1 < Fr < 0.6$)におけるフルード数の変化が流体力に無視できない影響を及ぼすことを示した. Sakata[4]は広範な範囲のフルード数条件で一樣流中の円筒にかかる流体力を測定し, 低 Fr 域($0 < Fr < 0.05$)では造波抵抗とは異なる要因で抗力係数が変動する可能性を示唆した. これらの実験的な先行研究では, 低 Fr 域では自由表面影響が顕著に出ている可能性が示唆されている. しかし, 低 Fr における流体力計測には実験精度の問題から限界があり, 自由表面周りの流場計測も技術的に困難であるという課題がある.

1.3 研究の目的

本研究では, 一樣流中の半没水円筒を想定した数値モデルについて CFD を用いてシミュレーションを行い, その結果として得られた流場情報の解析を行うことで, 流体力における自由表面影響を明らかにすることを目的とする.

2. 研究手法

研究の流れを Fig.1 に示す. Verification と Validation によって計算モデルの妥当性を検証した後, 得られた流場情報をもとに実際の流体现象の解釈を試みる. 流体力の Validation には Sakata[4]のデータを, 自由表面形状の Validation には加藤[5]のデータを用いる.

2.1 計算条件

計算領域を Fig.2 に, 基本ケースの計算諸元を Table 1 に示す.

境界条件は, inlet で一樣流速, 側面で free-slip, 円筒表面で no-slip としている.

2.1 V&V

3 パターンの格子精度と 3 パターンの時間刻み精度を

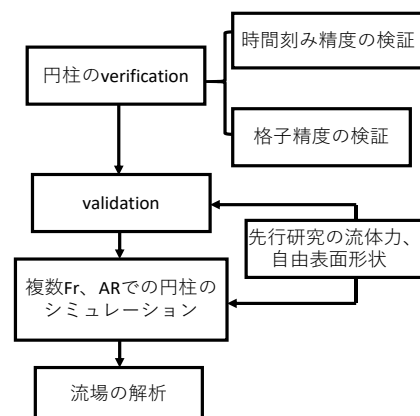


Fig. 1 Procedure of research.

Table. 1 Computational specification.

Parameters		Values
Diameter	D	0.3 m
Aspect ratio	AR	1.5
velocity	U	0.1433 m/s
Reynolds number	Re	43000
Froude number	Fr	0.15
Free-surface modelling method		VOF
Turbulence Model		IDDES

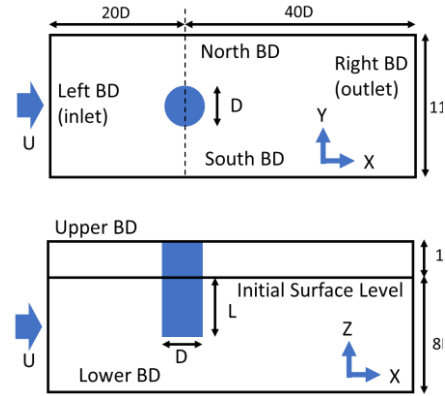


Fig. 2 Computational domain.

用いて V&V を行った. これらの格子幅および時間刻みを Table. 2 に示す.

格子精度については以下の式で定義した y^+ をもとに円柱周りの格子の第一点の長さを決定した.

$$y^+ = \frac{u^t}{\nu} y \quad (1) \quad u^t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2) \quad \tau_w = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3)$$

ここで, u^t は壁面摩擦速度で, τ_w は壁面せん断応力である.

Fig. 3 に異なる格子精度における抗力の時間平均値の計算結果と実験値を示す. また, Fig. 4 に異なる時間刻み精度における抗力の時間平均値の計算結果と実験値を示す.

V&V には Grid Convergence Index (GCI) を用いた. Fig. 3 の Cd_mean の値から格子精度の GCI を求めた. その結果 $GCI=0.0010$ の値を得た. これは, 格子の大きさが無限小のとき抗力係数の推定値が $Cd_mean=0.796 \pm 0.00796$ ($\pm 0.1\%$) の範囲内に収まることを意味する. Sakata[4] の実験によって得られた, 同様の AR, Fr 条件における抗力係数は $Cd_mean=0.784 \pm 0.00975$ である. 格子 M2 における計算結果 $Cd_mean=0.790$ はこの範囲内に収まっている.

格子精度の場合と同様に, 時間刻み精度についても Fig. 4 の Cd_mean の値から GCI を求めた. その結果 $GCI=0.14$ の値を得た. これは, 時間刻みが無限小のとき抗力係数の推定値が $Cd_mean=0.822 \pm 0.11$ ($\pm 14\%$) の範囲内に収まることを意味する. 前述したように Sakata[4] の実験によって得られた抗力係数は $Cd_mean=0.784 \pm 0.00975$ である. 時間刻み T2 における計算結果 $Cd_mean=0.790$ はこの範囲内に収まっている. このことから, 以上のことから, 格子 M2 と時間刻み T2 における誤差は許容できるものであると考えられるため, 本研究では格子 M2 と

Table 2 Space discretization and time discretization.

name	Δx	Δy	Δz
M1	6.67×10^{-4}	7.14×10^{-3}	2.00×10^{-3}
M2	10.0×10^{-4}	7.14×10^{-3}	3.00×10^{-3}
M3	16.5×10^{-4}	7.14×10^{-3}	4.00×10^{-3}
name	Δt		
T1	3.3×10^{-4}		
T2	5.0×10^{-4}		
T3	7.5×10^{-4}		

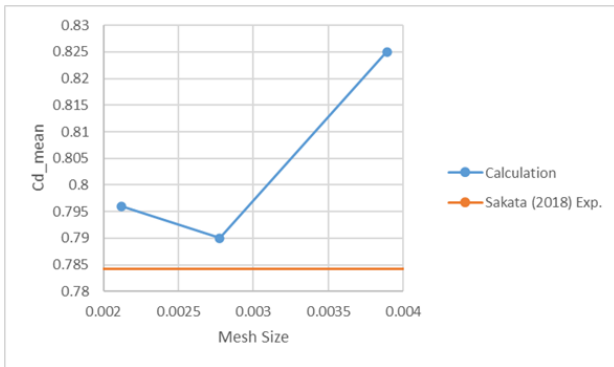


Fig. 3 Cd_mean convergence analysis with mesh size.

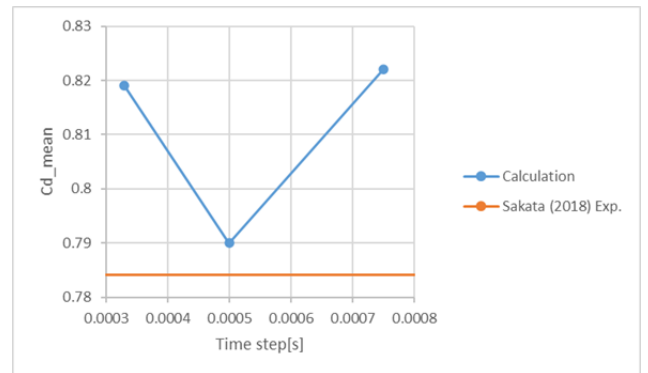


Fig. 4 Cd_mean convergence analysis with time step.

時間刻み T2 を用いて計算を行う。

3. 計算結果

本計算においては、基本ケースから Fr と AR を変化させて 7 ケースの計算を行った。各ケースの計算条件を Table. 3 に示す。

3.1 フルード数影響

AR=1.5 で、各 Fr における抗力係数の時間平均値 Cd_mean を Sakata[4]の実験結果とともにプロットしたものを Fig. 5 に示す。Fig. 5 から、 $0 < Fr < 0.08$ において Cd_mean が低下する現象が数値計算において定性的に再現できていることが分かる。

Fr=0 と Fr=0.15 における XZ 断面(Y/D=0) 上の時間平均無次元流速の流線を Fig. 6 に示す。

また、それぞれの流線に圧力係数と X 方向無次元流速のコンター図を重ね合わせたものも併記する。

Fig. 6 より、いずれの Fr においても円柱端部より recirculation と呼ばれる巻き戻し流と blow up と呼ばれる吹上流が発生していることが確認できる。また、Fr=0 の場合の方が Fr=0.15 の場合よりも円柱後部の低圧力領域が小さいことが分かる。また、recirculation が存在する範囲と低圧力領域の範囲がおおむね一致していることが分かる。そこで、そこで、低圧力領域の範囲を調べるため、recirculation に注目した。recirculation は円柱後部で渦を巻くように発生しており、その中心(recirculation Core)が後流域に存在する。各 Fr において、recirculation Core の座標を XZ 断面

Table. 3 Calculation Condition.

name	AR	Fr	$g[m/s^2]$
Case1	1.5	0.15	3.0436
Case2	1.5	0.2	1.711
Case3	1.5	0.3	0.761
Case4	1.5	0.08	10.695
Case5	1.5	0.15(no free-surface)	no gravity
Case6	0.5	0.15	3.0436
Case7	2.5	0.15	3.0436

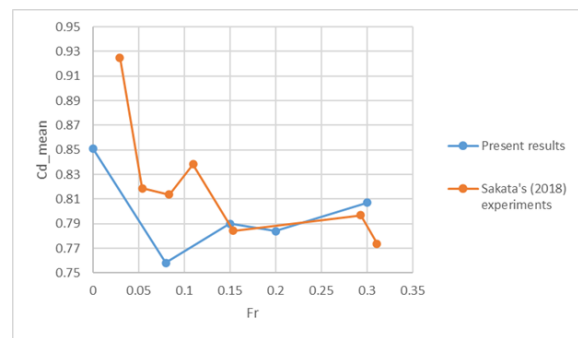


Fig. 5 Cd_mean as Function of Froude number for AR=1.5

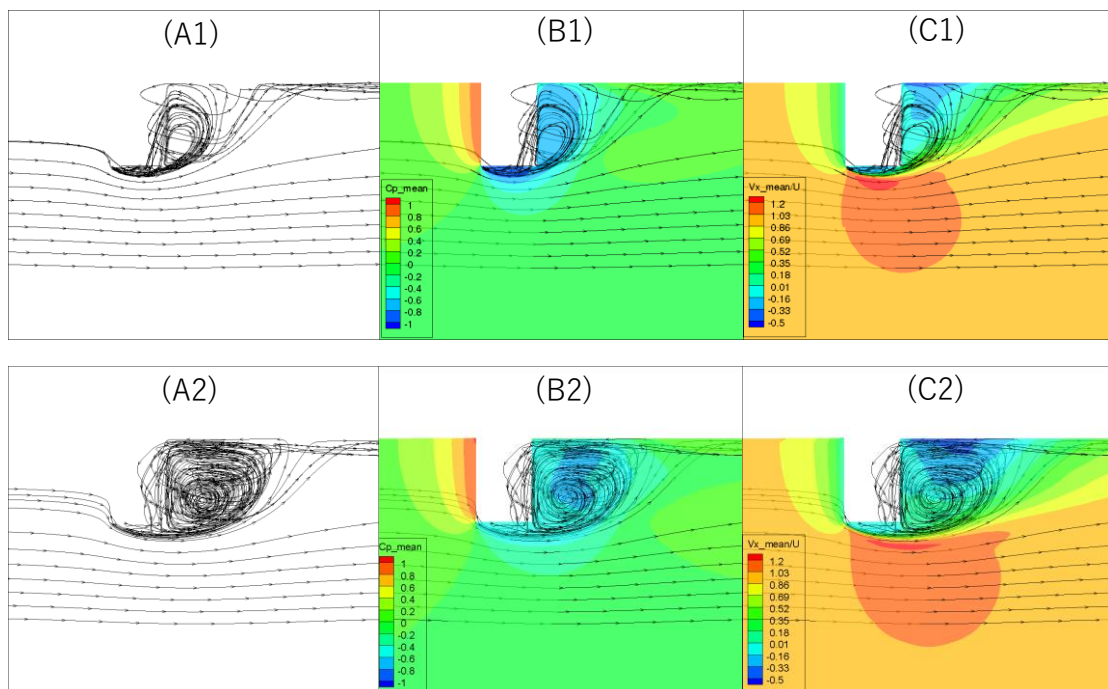


Fig. 6 Streamlines on XZ Plane (Y/D=0) for AR=1.5:
(A1)Fr=0,(A2)Fr=0.15,(B1)Fr=0,(B2)Fr=0.15, (C1)Fr=0,(C2)Fr=0.15

($Y/D=0$) 上にプロットしたものを Fig. 7 に示す。ここで、図中の四角形は円柱断面を表している。Fig. 7 から分かるように、recirculation Core は $Fr=0$ のとき最も円柱に近く、 $Fr=0.08$ のとき最も円柱から遠い。また、 Fr が 0.08 から増大するにしたがって recirculation Core は円柱に近づく。これは、円柱後流域が $Fr=0$ のとき最も小さく、 $Fr=0.08$ のとき最も大きいことを示していることから、Fig. 5. に示された $0 < Fr < 0.08$ における抗力の減少は円柱後流域の拡大に起因していることが推測できる。

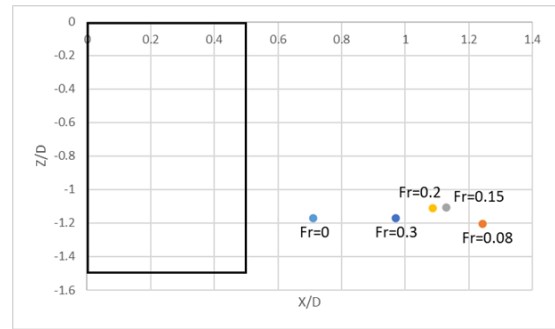


Fig. 7 Positions of Recirculation Core on XZ Plane ($Y/D=0$)

$Fr=0$ と $Fr=0.15$ における円柱周りの X 方向無次元渦度の等値面 $\omega_x^* = \pm 2.4$ と $\omega_x^* = \pm 1.2$ を Fig. 8 に示す。Fig. 8 から、いずれの Fr においても円柱端部より trailing vortex が発生していることが分かる。また、 $Fr=0.15$ の場合は $Fr=0$ よりも弱い trailing vortex が発生していることが確認できる。また、trailing vortex の持ち上がる角度が $Fr=0.15$ の場合の方が緩やかであることが確認できる。

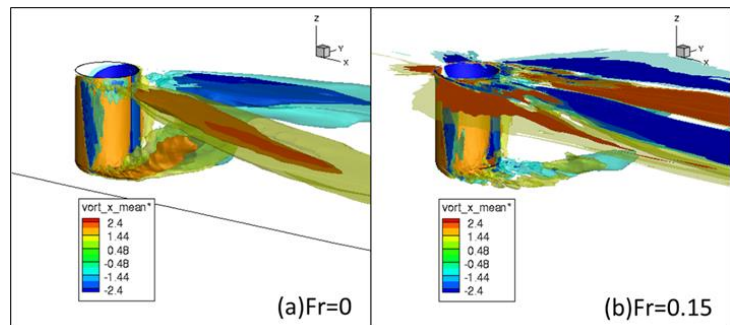


Fig. 8 Iso-surface at $\omega_x^* = \pm 2.4$ and $\omega_x^* = \pm 1.2$: (a) $Fr=0$, (b) $Fr=0.15$

Fig. 5 に示される $Fr=0$ の場合とそれ以外の Fr での recirculation の様相の違いは、Fig. 8 から、端部の trailing vortex の違いに起因すると考えられる。 $Fr=0$ では発生した trailing vortex が急峻に持ち上がり、それに伴って円柱後部の低圧力領域が小さくなるため recirculation も円柱側に引き付けられる。

3.2 アスペクト比影響

$AR=0.5$ と $AR=1.5$ における円柱周りの X 方向無次元渦度の等値面 $\omega_x^* = \pm 2.4$ と $\omega_x^* = \pm 1.2$ を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 から、いずれの AR においても trailing vortex が確認できる。しかし、 $AR=0.5$ の場合では発生した trailing vortex がすぐに自由表面に到達し、近傍の渦と干渉していることが確認できる。

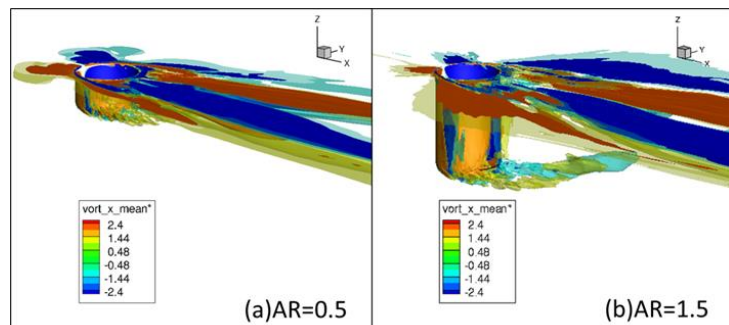


Fig. 9 Iso-surface at $\omega_x^* = \pm 2.4$ and $\omega_x^* = \pm 1.2$: (a) $AR=0.5$, (b) $AR=1.5$

4. 結論

本研究では自由表面の影響を調べるため、 Fr と AR を変化させたシミュレーションを行った。計算結果から、自由表面の有無によって端部付近の流体現象が影響を受けることが確認された。

参考文献

- [1] G. Rosetti, R. Gonçalves, A. Fajarra et al, "CFD CALCULATIONS OF THE VORTEX-INDUCED MOTIONS OF A CIRCULAR-COLUMN SEMI-SUBMERSIBLE". In Proceedings of OMAE2016, June 19-24, Busan, South Korea.
- [2] S. Kim, D. Spornjak, S. Holmes et al, "VORTEX-INDUCED MOTION OF FLOATING STRUCTURES: CFD SENSITIVITY CONSIDERATIONS OF TURBULENCE MODEL AND MESH REFINEMENT". In Proceedings of OMAE2015, May 31-June 5, St. John's, Newfoundland, Canada.
- [3] H. Fukuoka, S. Hirabayashi, H. Suzuki, "The effects of free surface and end cell on flow around a finite circular cylinder with low aspect ratio". J. Marine Science and Technology. 21(2016)145-153.
- [4] K. Sakata, "Free surface and free end effects on flow around half submerged circular cylinders". The University of Tokyo(2018)Master's thesis.
- [5] 加藤 究, "半没水円筒周りの自由表面形状の計測手法の開発", 東京大学(2020)卒業論文.