

東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻

2022 年度

修士論文

ポンツーン周りの渦影響による浮体式洋上風車の

Heave・Roll・Pitch に関する研究

(A Study on Heave, Roll and Pitch motion of floating
offshore wind turbines by vortex effect to pontoons.)

2023 年 1 月提出

指導教員 平林 紳一郎 准教授

平林 紳一郎

内藤悠基

目次

1. 序論	5
1.1. 地球温暖化について	5
1.2. 世界のエネルギー需要増加と再生可能エネルギーへの転換	5
1.3. 洋上風力発電について	7
1.4. OPTIFOLW	7
2. 研究目的と概要	9
2.1. 円柱まわりの流れ	9
2.1.1. 円柱周りの流れとカルマン渦	9
2.1.2. 円柱周りの流れのロックイン現象	10
2.2. 既存研究と問題提起	10
2.3. 研究目的	11
2.4. 研究手法	11
3. 実験手法	13
3.1. 実験目的	13
3.1.1. 実験設備	13
3.2. 実験モデル	13
3.2.1. 固有周期	16
3.2.2. 慣性モーメントと重心位置	18
3.3. 実験条件	19
3.4. 評価指標	25
4. 実験結果	27
4.1. 振幅	27
4.1.1. 最大振幅と標準偏差	27
4.1.2. 柱ごとの最大振幅と標準偏差	32
4.2. 周波数	40
5. 考察	50
5.1. 振幅	50
5.2. 周波数	50

5.3.	ポンツーンの後流の渦干渉と角度影響	58
6.	浮体式洋上風車への影響	59
6.1.	ナセルの加速度と傾斜	59
6.2.	実海域における本研究の適用性	60
7.	結論	63
8.	APPENDIX（実験による重心位置と慣性モーメントの測定）	64
8.1.	ブランコ実験	64
8.1.1.	計測方法と理論	64
8.1.2.	結果	69
8.2.	吊るし上げ実験	72
8.2.1.	計測方法と理論	72
8.2.2.	結果	74
	謝辞	77
	引用文献	78

1. 序論

1.1. 地球温暖化について

近年、世界的に地球温暖化による気温上昇が注目されている。地球温暖化は海面上昇や天候変動による食糧不足、砂漠化などを起こすとされている [1]。気象庁が発表によると、年の平均気温は長期的には 100 年間で 0.73°C の割合で上昇している [2]。その中でも特に 1990 年代から近年にかけての気温上昇が大きい。

地球温暖化の原因は温室効果ガスであり、地球ではその 76%が CO_2 である。IPCC 第 6 次評価報告書によると地球温暖化の支配的原因は人間活動によるものであると報告されている [1]。このような状況から温暖化を防ぐため、 CO_2 排出量の削減が求められている。

1.2. 世界のエネルギー需要増加と再生可能エネルギーへの転換

温室効果ガス、 CO_2 を削減するためには、排出の原因である、石油・石炭・天然ガスによるエネルギーを減少させる必要がある。しかし世界のエネルギー需要は年々上昇を続けている [3]。特にエネルギー消費量は発展途上国において増えており、途上国の経済成長に伴い、今後も増加することが予想される。

次に Figure1-1 にエネルギー源ごとの世界のエネルギー消費量の推移を示す [3]。これを見ると、近年石炭の消費量に上昇の傾向は見られないが、石油・天然ガスの消費量が増えたことにより、石油・石炭・天然ガスの温室効果ガスを排出するエネルギー源の消費量増加が見られる。エネルギー需要が増加する中で、経済発展と温室効果ガス排出量減少を両立するために、省エネルギー、原子力、水力エネルギー、再生可能エネルギーの需要はさらに高まっている。石油・石炭・天然ガスの消費を抑えつつ、エネルギー需要を満たしていくためには原子力、水力エネルギー、再生可能エネルギーの割合を増やしていくことは必須である。しかし、原子力は安全性の問題から反対の声が上がっている国も少なくない。その中で世界的に注目が集まっているのが水力エネルギーと再生可能エネルギーである。

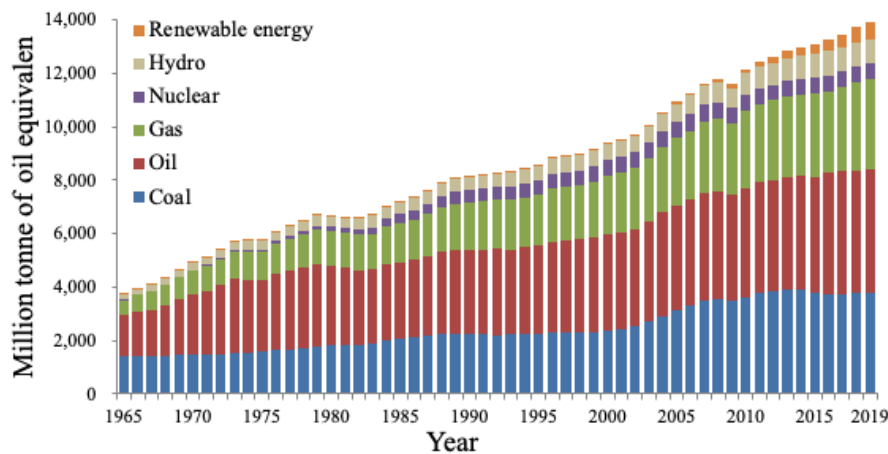


Figure1-1 Global Energy Consumption Trends by Energy Source [3].

再生可能エネルギーは自然の力を使ったクリーンなエネルギーであり、世界的に導入が進んである。現在日本でも用いられているような FIT(固定価格買取制度)や、中国や米国で導入されているような PRS(再生可能エネルギー利用基準)制度など、国を挙げて再生可能エネルギーの普及が取り組まれており、今後ともにその取り組みは続いていくと考えられる。

再生可能エネルギーの中でも特に注目されているのが風力発電と太陽光発電である。投資額で見ても、世界の再生可能エネルギーへの投資は太陽光と風力が大部分を占めており注目されていることがわかる [4]。

また風力、太陽光の発電導入量は年々増加傾向であり、2017 年には原子力の導入量を風力、太陽光共に上回っている [5]。このように投資額、導入量の両方を見ても風力、太陽光ともに今後とも広がりを見せる可能性が高いものである。

特に風力発電は導入コストや発電量の観点から、今後の広がりや技術発展の余地が大きいとされている。風力発電はコスト削減のため、「大型化」、「耐久力上昇」、「形状の見直し」、「メンテナンス簡易化」など課題があり、その解決に向けた技術開発や研究が進められている。しかし日本では山岳地形や国土の狭さ、騒音問題（風力に限る）から風力、太陽光の両方とも、設置場所の選定が困難であり、実際に設置できる適地は限られている。

このような現状から日本や同じような条件を持つヨーロッパ諸国では洋上風力発電に注目が集まっている。日本のように経済水域が広く、海洋技術の基盤が出来上がっている国では洋上風力発電は陸上に代わる風力発電の主流となると考えられている。

1.3. 洋上風力発電について

洋上風力発電には、大きく分けて着床式と浮体式の2種類が存在する。着床式は海底に基礎を固定し設置する方法である。浮体式は基礎を海底に固定せず、海上に浮かぶ構造物に風車を設置する方法である。着床式は、水深が浅い海域が多いヨーロッパなどで既に実用化されている。一方で、日本のような水深が深い海域が多い国では設置可能な場所が限られている。浮体式は水深が深い場合でも係留を長くすることにより設置が可能となるため、着床式に比べて、水深が深くなった時のコストを抑えられる。

着床式はモノパイル式、ジャケット式などに分類される。浮体式もバージ型、セミサブ型、スパー型、TLP(Tension Leg Platform)型に大きく分けられる [6] [7]。各形式の詳しい特徴は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の「浮体式洋上風力発電技術ガイドブック」などに記載されている [6] [8]。

浮体式洋上風力発電の基礎構造は設置海域の水深に影響を受け、50～60m以下の水深であれば着床式が経済的に有利とされる。それ以上の水深では浮体式が有利であるとされている。 [6]

上述の通り、日本では山岳地形や国土の狭さ、騒音問題（風力に限る）から風力、太陽光の両方とも、陸上での設置場所の選定が困難であり、実際に設置できる適地は限られている。そのため洋上風力発電が注目されているが、洋上風力発電にはもちろんメリットとデメリットが存在する [9]。

メリットとしては、海上は陸上より風量が多く発電量が大きくなること、景観・騒音問題のクリア、船輸送による大型風車の運搬、敷設が可能になることが挙げられる。

デメリットとしては、コストの高騰、メンテナンスの難化が挙げられる。特に浮体式洋上風力発電は着床式に比べてもコストが高く、普及への障壁となっている。

1.4. OPTIFLOW

上述の通り、日本では陸地に風車を設置できる場所が限られていること、水深の深い海域が多いことから、浮体式洋上風車が注目されている。しかし浮体式洋上風車はコストの高騰、メンテナンスの難化のようなデメリットがあるため、普及が進んでいない。このコストの高騰、メンテナンスの難化のようなデメリットを解決するため、現在様々な新しい形の浮体式洋上風車が提案・開発されている。本論文ではそのうち「OPTIFLOW」について記述する。

OPTIFLOW はコストの高騰、メンテナンスの難化などの課題解決するために、2014 年にドイツの AeroDyn 社によって提案された SCD-nezzy 8.0MW 風車のコンセプトをベースに設

計されている (Figure1-2) 。OPTIFLOW はコストの高騰、メンテナンスの難化などの課題を解決するため様々な他にはない特徴を有している。

- 2 枚翼：ブレード、ハブ、ピッチシステムの製作、保守コスト、故障率を削減することができる。また、ロータ設置の工期、コストを圧縮できる。
 - ガイワイヤー：タワー頂部と 3 本のアーム端部を 6 本のガイワイヤーで連結することにより、タワー・浮体の荷重低減と軽量化を図っている。
 - タレット係留：一点係留によって、Figure1-3 のように、浮体を受動的に風向に追従させる。通常の風車を持つヨー方向の制御システムを排除し、これらの製作、故障およびメンテナンスコストが削減できる。
 - ダウンウィンドローター：風向追従性の向上
- 特にガイワイヤーと一点係留による風向き追従は他にはない珍しい特徴である [10]。

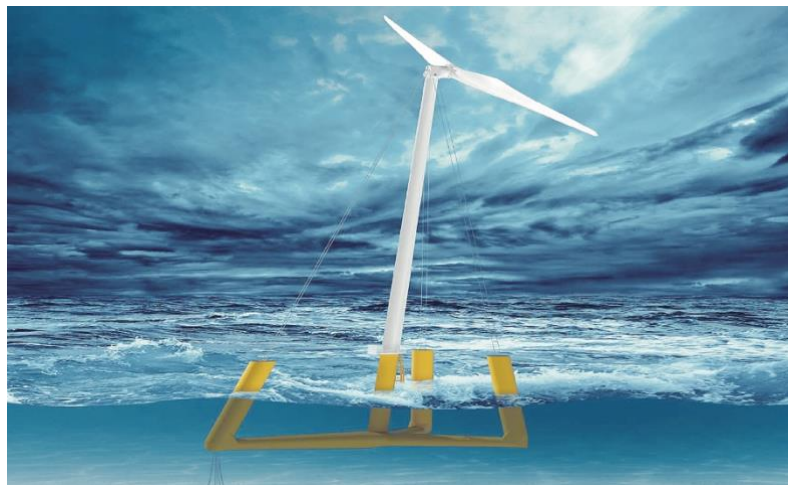


Figure 1-2 Concept of OPTIFLOW [10].

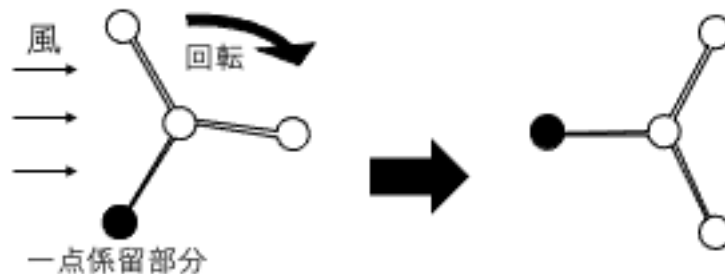


Figure1-3 Yaw motion of OPTIFLOW caused by wind.

2. 研究目的と概要

2.1. 円柱まわりの流れ

2.1.1. 円柱周りの流れとカルマン渦

この章では一様流中の円柱などの構造物まわりの流れについて述べる。

流れの中に置かれた円柱などの鈍い形状の構造物には、境界層の剥離により物体後方に渦ができる。円柱まわりの流れは、(1)式で表される、流速 U 、円柱直径 d 、流体の動粘性係数 ν で定義される Reynolds 数 Re が重要な指標になっている。円柱直径 d 、流体の動粘性係数 ν は物体や流体によって決まるので、構造物の形状と流体の種類がわかっている一様流では、流速 U により流れが変化していく。

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (1)$$

Reynolds 数 Re によって、構造物まわりの流れは変化する。Reynolds 数による流れの変化を Figure2-1 に示す。Reynolds 数が $Re < 5$ の時は、渦はできず左右対称の流れとなる。 $5 < Re < 45$ では、円柱の後方で剥離が起こり、Figure2-1 のような上下対称の渦が発生する。レイノルズ数が $45 < Re < 190$ では、上下2点の剥離点から交互に渦が放出されるようになる。この渦を後流渦と呼び、特に規則正しく形成される2本の渦列はカルマン渦列という。 $190 < Re < 3 \times 10^5$ の範囲では剥離点が前方に移る。この領域では規則正しい渦が観測される。 $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$ の範囲は円柱表面の流れが層流から乱流に切り変わる領域であり、渦が観測しづらくなる。 $3 \times 10^6 < Re$ では完全に乱流となり、剥離点は層流より後方に移動する [11] [12]。

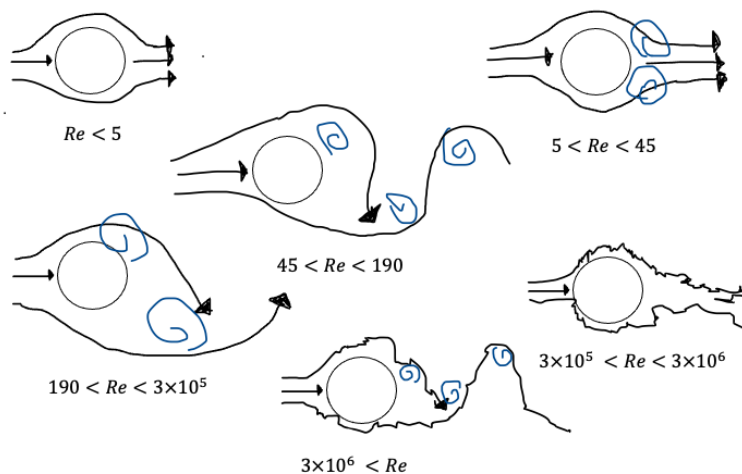


Figure2-1 Flow pattern for a circular cylinder.

後流渦が放出される周波数 f 、物体直径 D 、流速 U から無次元化したパラメーターを Strouhal 数といい、次の式で定義される。レイノルズ数が 3×10^5 以下の時 Strouhal 数は一定でおよそ 0.2 になる。

$$St = \frac{fD}{U} \quad (2)$$

このカルマン渦によって円柱に流れと直行する方向に起振力が与えられ、円柱が振動してしまう。これにより、機械や浮体を振動させ、浮体動揺、疲労破壊の原因となる場合がある。カルマン渦は円柱だけでなく、角柱などの鈍い構造物で発生する。

2.1.2. 円柱周りの流れのロックイン現象

円柱の固有振動数と、円柱交流に放出される渦の周波数が接近しているとき、円柱の振動が励起され、固有振動数に同期した渦が放出される現象が起こる。この現象はロックイン現象(lock-in phenomenon)と呼ばれて、振動が大きくなることが報告されている [12]。

この振動の大きさは換算流速 V_r (Reduced velocity) という指標によって決まる。換算流速は、流速 U 、浮体の固有周波数 f_c 、物体の直径 D を用いて以下の式で表される [13]。

$$V_r = \frac{U}{f_c D} \quad (3)$$

換算流速 V_r が 5～8 付近であり、円柱の固有振動数がカルマン渦の周波数に近い時は、円柱は流れと直行する方向に振動を生じる。この現象はクロスフロー振動と呼ばれる。

また、換算流速 V_r が 2～4 付近であり、円柱の振動数がカルマン渦の周波数の 2 倍で、さらに円柱の構造減衰力が弱い場合には、流れ方向に平行な振動が生じる。この現象はインライン振動と呼ばれる。一般的にはクロスフロー振動はインライン振動より大きく、設計上注意をする必要がある。

2.2. 既存研究と問題提起

洋上風力発電の普及は今後ますます進んでいくと予想される。上述のように日本は、国土に陸上風力発電に適した土地が限られていること、広い水深の深い排他的経済水域を持つことを理由として、浮体式が今後の主流になると思われる。しかし、洋上風力の普及には、コスト削減は依然として大きな課題となっている。

コスト削減のために、現在新しいタイプの浮体式洋上風車が開発・提案されている。上述に挙げた「OPTIFLOW」はその一部である。この「OPTIFLOW」に見られる特徴として

は、水中に長いポンツーンを有していることである。この水中の長いポンツーンは流れにあたることで、渦影響を受けることが懸念される。本研究では、Figure1-2 の図でいう、水面と垂直な柱をカラム、水面と平行な水中の柱をポンツーンと定義する。

物体への渦影響のや、浮体式洋上風車に対する渦影響の研究は過去に Dijk ら [14]、Irani ら [15]、Roddier ら [16]、Gonçalves ら [17]、中村ら [18]などによってなされてきた。

浮体式洋上風車の中でも、橋浦ら [19]、藤原ら [20]はセミサブ型に浮体式洋上風車において、カラムから生み出される渦の影響が、カラムの形状や配置によってどのように変化するかを研究している。また Gonçalves ら [21] [22]や Lee ら [23]によって、水面と垂直方向のカラムにかかる渦励起振動の影響の研究がなされ、渦励起運動によりセミサブ型の浮体モデルに Sway などの水平運動が発生することがわかっている。李ら [24]や Liu ら [25] [26] [27]はカラムにかかる渦励起影響にポンツーンが与える影響の研究を行っている。このように先行研究では、水面と垂直であるカラムが受ける渦影響や、その干渉などに焦点を当てたものはあるが、水面と水平であるポンツーンに対する渦励起運動の研究は報告されていない。

上記のように水面と垂直であるカラムはクロスフロー振動により、Sway などの水平方向に振動が大きくなることが報告されている [21]。このことから水面と水平であるポンツーンに対する渦励起運動は、クロスフロー振動により、Heave や Pitch などの垂直方向の揺れが大きくなることが予想され、今までの研究とは異なる挙動を示す可能性が高い。

2.3. 研究目的

水中に長いポンツーンを有しているセミサブ型浮体式洋上風車が、ポンツーンに対する渦励起運動が起こることが懸念される。

本研究では、長いポンツーンを有しているセミサブ型浮体式洋上風車が、渦励起運動により示す挙動を実験により定量化し、そのメカニズムを考察する。水面と水平であるポンツーンに対する渦励起運動は、クロスフロー振動により、Heave、Roll、Pitch の垂直方向の揺れが大きくなるという予想から、浮体模型を用いた水槽実験により、その流速と浮体の角度を変化させることによりポンツーン周りに発生する渦が、浮体の Heave、Roll、Pitch に与える影響を調べる。

2.4. 研究手法

本研究では実験を通じて、長いポンツーンを有しているセミサブ型浮体式洋上風車が、渦励起運動により示す挙動を、実験を通じて確認していく。1/60 モデルの浮体に対し流れを当てる実験を行い、その流速と浮体の角度を変化させることによりポンツーン周りに発

生する渦が、浮体の Heave、Roll、Pitch に与える影響を調べる。実験は実際に流れを当てるものではなく、浮体を台車で曳航する曳航実験の形式をとった。

実験模型では以下の(4)式で表される Froude 数 Fr を実機条件と一致させる Froude 相似則を用いた。

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{d \cdot g}} \quad (4)$$

U は流速、 d は物体長さ、 g は重力加速度である。

実機モデルの支配的な物理現象は、動揺する浮体の慣性力、そして重力の影響が支配的であると考えられ、Froude 則を用いて模型を製作した。また本実験では、(3)式の換算流速を一致させることで、渦影響による動揺を確認した。

なお、本研究における模型実験の速度条件では Reynolds 数は $10^3 \sim 10^4$ のオーダーで乱流には至っていないが、実機では Reynolds 数が $10^6 \sim 10^7$ のオーダーで乱流となっている。Reynolds 数のオーダーが異なるため、粘性の定量的な影響については考慮できていないが、Froude 則および換算流速に基づく浮体の渦励起運動の基本的特徴は捉えることができると考えられる。

3. 実験手法

3.1. 実験目的

今回の実験では、長いポンツーンを持つセミサブ型の浮体式洋上風車が、流れによる渦影響で、どのような挙動を示すのか確認するためのものである。そのため、製作した模型に様々な角度条件、流速条件で、一様流を当てて、その時の挙動を確認する。またその結果からその動揺が渦励起振動によるものであるかを考察する。

3.1.1. 実験設備

今回の実験は東京大学本郷キャンパス、船型試験水槽で行った。Figure3-1 に船型試験水槽の写真を示す。縦 86m、幅 3.5m、水深 2.4m、延面積 $700m^2$ の大型水槽で、造波装置、曳引車を持つことから、波・潮流の共存する海象条件を再現することができる [28]。



Figure3-1 Experimental tank [28].

また今回の実験では浮体の挙動を確認するために立体モーションキャプチャーQualisys を使い、浮体の動揺を 6 自由度で計測する。6 自由度の回転中心は浮体の重心とする。浮体の重心位置については 3.2 章で後述する。

3.2. 実験モデル

本実験で用いるモデルには、水中に長くポンツーンを有しているという条件が必要であった。現在の東京大学で有している模型には、この条件を満たすものは存在しなかったため、本実験で用いる模型モデルは自身で設計を行った。

今回モデルを作成するにあたり、「OPTIFLOW」の浮体を参考とし、水中に長くポンツーンを有している想定実機を設計し、その $\frac{1}{60}$ スケールの模型を製作した

本実験では、水槽のサイズからモデルのスケールは実機の $\frac{1}{60}$ スケールとした。3D ソフトで設計した実験モデルを Figure3-2、Figure3-3、Figure3-4 に示す。また実際の浮体の写真を Figure3-5 に示す。

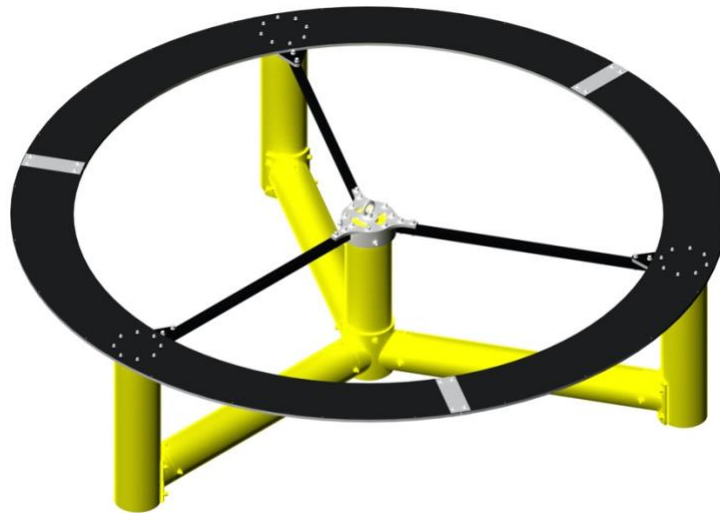


Figure3-2 Experimental model designed using 3D software.

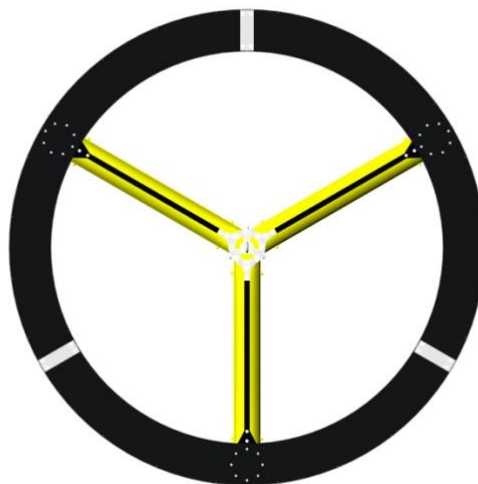


Figure3-3 Top view of experimental model.

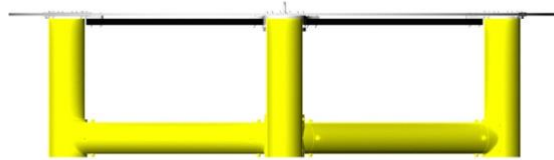


Figure3-4 side view of experimental model.



Figure3-5 Picture of experimental model.

このモデルは1本の円柱センターカラムと、3本の円柱サイドカラム、センターカラムとサイドカラムを結ぶ3本のポンツーン、サイドカラム上部にある円盤から構成されている。ポンツーンは 120° 間隔で均等に配置されていて、左右対称の形となっている。基本的な形は「OPTIFLOW」と同じであるが、「OPTIFLOW」と異なりポンツーンを円柱とした（実際の「OPTIFLOW」は細長い楕円に近い断面）。これは、渦の影響を見やすくするために、渦の発生しやすい円形の断面を選んだためである。また上部の円盤は風車がない分の重心を上げるため、また曳航時の係留点とするために設置した。円盤の形にしたのは、

板を中心から遠ざけることで、慣性モーメントを大きくするためである。模型の黒や黄色で塗ったのは光の反射による、Qualisys の誤認識を防ぐためである。素材にはアクリル用い、模型のカラムとポンツーンの円柱部分は中空となっている。

本モデルの寸法は以下の Table3-1 のようになる。Table3-1 には実験模型の寸法、実験模型を実機スケールに拡大した時の寸法を示す。模型設計では、(4)式で表される Froude 数 Fr を実機条件と一致させる Froude 相似則を用いた。参考とした「OPTIFLOW」の実機スケールの寸法を示す。本実験で使用したモデルは今後の浮体式洋上風車の軽量化を見込み質量を小さく設計している。その分 x 軸周り、 y 軸周りの慣性モーメント I_{xx} 、 I_{yy} は小さくなるが、固有周期は波の周期と重ならないように設計されている。

Table3-1 Dimensions of the model.

	Experimental model	Full scale	OPTIFLOW(reference)
scale	1/60	1/1	1/1
Pontoon diameter $D(m)$	0.10	6	6
Column diameter $d (m)$	0.115	6.90	7.50
Draft(m)	0.25	15.00	14.75
Mass(kg)	27.4	5918	7194
KG(m)	0.318	19.06	12.96
GM $_x$	0.124	7.44	8.20
GM $_y$	0.124	7.44	8.20
I_{xx}	7.43	5.71×10^9	7.09×10^9
I_{yy}	7.43	5.71×10^9	7.09×10^9

Table3-1 の Heave、Roll、Pitch の固有周期、 x 軸・ y 軸・ z 軸周りの慣性モーメント、重心位置の求め方は次の 3.3.1、3.3.2 章に記述する。

3.2.1. 固有周期

固有周期は自由振動試験を行い、6 自由度全て対して求めた。また 3.4 章の実験条件でも記述するが、Figure3-6 のように流れの流入角度は、 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° の 5 つについて行った。角度条件によって 6 自由度の固有周期は全て異なるので、全ての角度条件において固有周期を求めた。しかし、 0° と 60° 、 15° と 45° それぞれのペアについては、流れが逆向きに当たり、6 自由度の正負が逆になるだけなので、6 自由度の固有周期は同じとして、 0° 、 15° 、 30° のみ計測を行った。

自由振動試験では、6自由度それぞれの方向に浮体を手動で傾け、手を離すことで、その後の振動を時系列で測定を行った。（Heaveの固有周期を求めたいときは、浮体をz方向に押し込み、手を離す。）固有周期の求め方はピーク法を用い、Figure3-7のように浮体の振動を時系列データのピークをとり、その間の時間を求め、固有周期とする。手動で傾け、手を離す作業は3回行い、それぞれ5回分のピークをとり、合計15回分の振動の時間を平均することで6自由度の固有周期を求めた。Figure3-7は 0° でのSway方向の固有周期を求めるために、y方向に浮体をずらし、手を離した時の時系列データ。縦軸はy方向の振幅である。

3.4章の実験条件でも記述するが、係留をしている状態で固有周期を求めたため、Surge、Sway、Yawの平面方向でも減衰が存在する。詳しい係留条件は3.4章の実験条件に記述する。

自由振動試験によって求められた、全ても角度条件の6自由度の固有周期をTable3-2、Table3-3、Table3-4、に示す。それぞれの角度条件によって求めたが、角度によって固有周期は大きく変化しなかった。

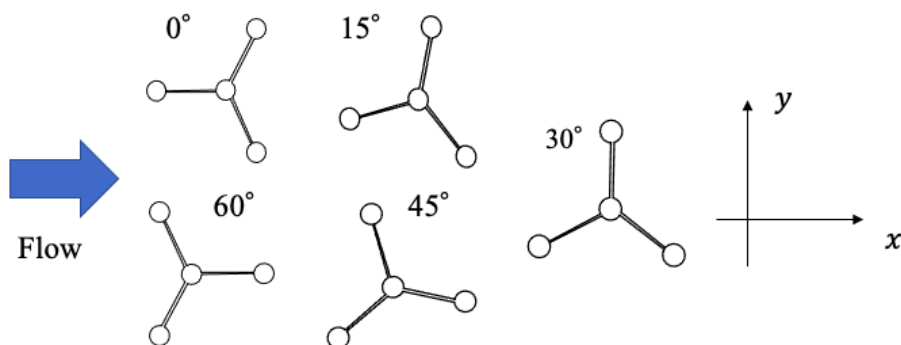


Figure 3-6 Angle condition of experiment.

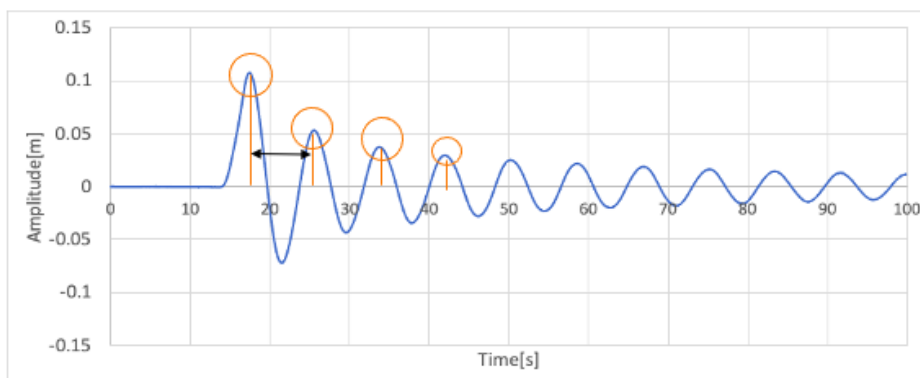


Figure 3-7 Time series data of sway motion in 0-degree condition.

Table3-2 Natural period on 0- and 60-degree conditions.

0,60 degrees	Natural period [s]
Surge	7.91
Sway	8.29
Heave	2.10
Roll	2.71
Pitch	2.73
Yaw	4.68

Table 3-3 Natural period on 15- and 45-degree conditions.

15,45 degrees	Natural period [s]
Surge	7.87
Sway	8.26
Heave	2.11
Roll	2.71
Pitch	2.72
Yaw	4.66

Table 3-4 Natural period on 30-degree condition.

30 degrees	Natural period [s]
Surge	7.85
Sway	8.27
Heave	2.11
Roll	2.71
Pitch	2.72
Yaw	4.67

3.2.2. 慣性モーメントと重心位置

慣性モーメントと重心位置は 3D CAD、手計算、実験での計算の 3 種の方法を使い求めた。

まず、3D CAD の方法では、Rhino 7 [29]を用い、設計に使用した 3D データにそれぞれの材料の密度を入力し、慣性モーメントや重心位置を求める。

次に、手計算では実験模型を簡易的に円柱の集まりとして見ることで、計算を簡素化させ、Excel にて計算を行なった。こちらの値は、簡易的に円柱の集まりとしての計算なので、細かい精度で求めることはできないが、大まか値を知ることができた。また、この値は 3D CAD の方法とほぼ同様の値であった。

最後に実験について、今回実験から慣性モーメントを求めるために、ブランコ実験、吊し上げ実験、などの実験を行った。最終的には吊し上げの実験により、設計値に近い重心位置、慣性モーメントの値は求めることができた。この実験の過程や結果などは今後の研究者のため、Appendix に記入する。実験で求めた重心位置は設計値と誤差は 2.6%以内で、慣性モーメントは設計値と誤差は 2.7%以内である。これは製作誤差と測定誤差を含んでいる。

最終的な結果として求めた、3D CAD、手計算、実験での重心位置と慣性モーメントを以下の Table3-5 に示す。本論文では、模型の重心高さ KG(m)と、 x 軸周り、 y 軸周りの慣性モーメント I_{xx} 、 I_{yy} の値は 3D CAD での値を用いる。また 6 自由度計測の回転中心は 3D CAD から求めた重心を中心としている。

Table3-5 Comparison of KG, I_{xx} , I_{yy} among CAD software, hand calculation, and experiment.

	3D software	Excel	Experiment
KG(m)	0.318	0.309	0.310
$I_{xx} (kg \cdot m^2)$	7.343	7.508	7.420
$I_{yy} (kg \cdot m^2)$	7.343	7.508	7.150

3.3. 実験条件

本実験では、浮体に流れを直接当てる形式ではなく、浮体を曳航台車で曳航することで流れを再現した。Figure3-8 のように流れ方向に x 軸、流れと垂直方向に y 軸を取った。また本紙に垂直な方向に z 軸を取っている。Figure3-8 には x 軸、 y 軸の方向を記入しているが、原点は浮体の重心となっている。

また本実験では係留は Figure3-8 のような方向に 4 点係留を採用している。係留索にはバネを使用していて、水面と並行になるように浮体を係留している。水面と並行になるように浮体を係留することにより、Surge、Sway、Yaw の水平方向の揺れのみを抑え、本実験の観測目的である、Heave、Roll、Pitch に復元力はほとんどかからないようにした。これにより、バネの張力（係留力）に関係なく、本実験では、Heave、Roll、Pitch の揺れを観測することができる。

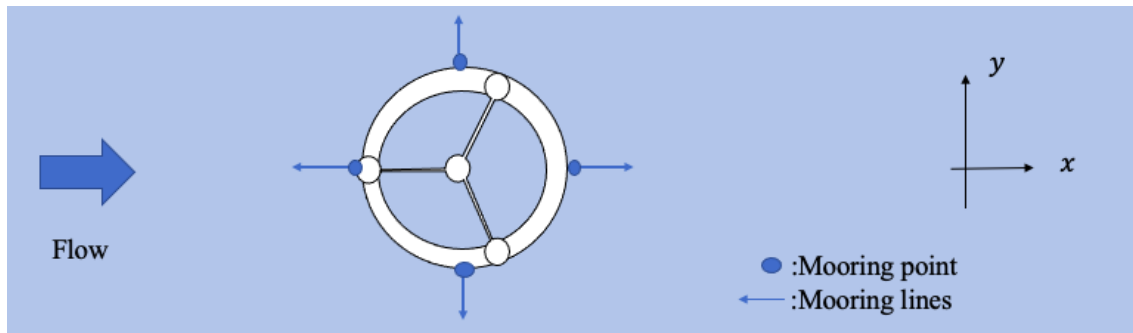


Figure 3-8 Mooring point and axis direction.

本実験では、渦励起運動について調べるため、曳航速度(流速)、浮体角度の 2 つの条件を変化させて実験を行った。実海域では様々な角度や流速の流れが浮体に流入する。実海域で起こる、様々な条件を確認するために、流速は 0.05m/s から 0.40m/s までを 0.01m/s ずつ、また角度条件は Figure3-6 のように 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° について実験を行う計画を立てた。

流速は 0.05m/s から 0.40m/s までを 0.01m/s とした理由としては、換算流速が十分に小さい流速域から、換算流速 V_r が 5~8 付近で振動が大きくなる範囲を超える流速域までの測定を行うためである。流速ごとの換算流速を Table3-6、Table3-7、Table3-8 に示す。換算流速は (3)式で表され、浮体の固有周波数が、Table3-2、Table3-3、Table3-4 のように振動の方向や角度によって異なる。よって換算流速は Heave、Roll、Pitch ごとに異なり、また角度によっても異なる。Table3-6~Table3-8 では換算流速 V_r が 5~8 で、振動が大きくなると予想される流速域はセルを黄色にして区別している。

このように予定としては流速条件 0.05m/s から 0.40m/s までを行いたかったが、実際は Figure3-9 のように流速が速くなると浮体が傾き、揺れも大きくなっていくため、上部のデッキ（円盤）に水面がついてしまい、正確な計測ができなくなってしまった（静止画のため、見づらいが、Figure3-9 の白い丸の部分でデッキが水面と接してしまっている）。この現象から角度条件ごとに、途中で流速を上げることができなくなってしまった。この上部のデッキ（円盤）に水面に浸かってしまう現象が起き、測定を行うことができなかった流速域を Table3-6、Table3-7、Table3-8 にグレー色のセルで示している。Table3-6 の濃いグレー色は換算流速 V_r が 5~8 付近であるが、測定ができなかった流速領域である。 30° での実験領域は 0.40m/s まで、上部のデッキ（円盤）に水面に浸かってしまう現象が起きなかったが、他の角度条件は 0.32m/s までの測定となった。

角度条件を、 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° とした理由としては、本実験で使用する実験模型のポンツーンが 120° 間隔であるので、 0° から 60° の間の角度条件で 360° 全ての角

度から流入する流れを再現できるためである。また 0° と 60° 、 15° と 45° は流れが逆に当たっている条件になるが、逆に流れが当たることにより、後流の流れや渦に変化が起こればと考えたため、 0° と 60° や 15° と 45° を別条件として実験を行った。角度を 15° 間隔で 5 条件に設定したのは、実験の時間を考えての設定である。

Table 3-6 Relationship between velocity and reduced velocity on Heave.

Velocity[m/s]	Heave reduced velocity				
	0°	15°	30°	45°	60°
0.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
0.06	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
0.07	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47
0.08	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
0.09	1.89	1.89	1.90	1.89	1.89
0.1	2.10	2.11	2.11	2.11	2.10
0.11	2.31	2.32	2.32	2.32	2.31
0.12	2.52	2.53	2.53	2.53	2.52
0.13	2.73	2.74	2.74	2.74	2.73
0.14	2.94	2.95	2.95	2.95	2.94
0.15	3.15	3.16	3.16	3.16	3.15
0.16	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37
0.17	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58
0.18	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79
0.19	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
0.2	4.21	4.21	4.21	4.21	4.21
0.21	4.42	4.42	4.42	4.42	4.42
0.22	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63
0.23	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84
0.24	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05
0.25	5.26	5.26	5.27	5.26	5.26
0.26	5.47	5.47	5.48	5.47	5.47
0.27	5.68	5.68	5.69	5.68	5.68
0.28	5.89	5.89	5.90	5.89	5.89
0.29	6.10	6.10	6.11	6.10	6.10
0.3	6.31	6.32	6.32	6.32	6.31
0.31	6.52	6.53	6.53	6.53	6.52
0.32	6.73	6.74	6.74	6.74	6.73
0.33	6.94	6.95	6.95	6.95	6.94
0.34	7.15	7.16	7.16	7.16	7.15
0.35	7.36	7.37	7.37	7.37	7.36
0.36	7.57	7.58	7.58	7.58	7.57
0.37	7.78	7.79	7.79	7.79	7.78
0.38	7.99	8.00	8.00	8.00	7.99
0.39	8.20	8.21	8.21	8.21	8.20
0.4	8.41	8.42	8.42	8.42	8.41

Table 3-7 Relationship between velocity and reduced velocity on Roll.

Velocity[m/s]	Roll reduced velocity				
	0°	15°	30°	45°	60°
0.05	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
0.06	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
0.07	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
0.08	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
0.09	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44
0.1	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
0.11	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98
0.12	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
0.13	3.53	3.52	3.53	3.52	3.53
0.14	3.80	3.79	3.80	3.79	3.80
0.15	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07
0.16	4.34	4.34	4.34	4.34	4.34
0.17	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61
0.18	4.88	4.88	4.88	4.88	4.88
0.19	5.15	5.15	5.15	5.15	5.15
0.2	5.42	5.42	5.42	5.42	5.42
0.21	5.69	5.69	5.69	5.69	5.69
0.22	5.97	5.96	5.97	5.96	5.97
0.23	6.24	6.23	6.24	6.23	6.24
0.24	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51
0.25	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78
0.26	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05
0.27	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32
0.28	7.59	7.59	7.59	7.59	7.59
0.29	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86
0.3	8.14	8.13	8.14	8.13	8.14
0.31	8.41	8.40	8.41	8.40	8.41
0.32	8.68	8.67	8.68	8.67	8.68
0.33	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95
0.34	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22
0.35	9.49	9.49	9.49	9.49	9.49
0.36	9.76	9.76	9.76	9.76	9.76
0.37	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
0.38	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30
0.39	10.58	10.57	10.58	10.57	10.58
0.4	10.85	10.84	10.85	10.84	10.85

Table 3-8 Relationship between velocity and reduced velocity on Pitch.

Velocity[m/s]	Pitch reduced velocity				
	0°	15°	30°	45°	60°
0.05	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
0.06	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
0.07	1.90	1.90	1.91	1.90	1.90
0.08	2.17	2.17	2.18	2.17	2.17
0.09	2.44	2.44	2.45	2.44	2.44
0.1	2.71	2.71	2.72	2.71	2.71
0.11	2.98	2.98	3.00	2.98	2.98
0.12	3.25	3.25	3.27	3.25	3.25
0.13	3.53	3.52	3.54	3.52	3.53
0.14	3.80	3.79	3.81	3.79	3.80
0.15	4.07	4.07	4.09	4.07	4.07
0.16	4.34	4.34	4.36	4.34	4.34
0.17	4.61	4.61	4.63	4.61	4.61
0.18	4.88	4.88	4.90	4.88	4.88
0.19	5.15	5.15	5.18	5.15	5.15
0.2	5.42	5.42	5.45	5.42	5.42
0.21	5.69	5.69	5.72	5.69	5.69
0.22	5.97	5.96	5.99	5.96	5.97
0.23	6.24	6.23	6.27	6.23	6.24
0.24	6.51	6.51	6.54	6.51	6.51
0.25	6.78	6.78	6.81	6.78	6.78
0.26	7.05	7.05	7.08	7.05	7.05
0.27	7.32	7.32	7.36	7.32	7.32
0.28	7.59	7.59	7.63	7.59	7.59
0.29	7.86	7.86	7.90	7.86	7.86
0.3	8.14	8.13	8.17	8.13	8.14
0.31	8.41	8.40	8.45	8.40	8.41
0.32	8.68	8.67	8.72	8.67	8.68
0.33	8.95	8.95	8.99	8.95	8.95
0.34	9.22	9.22	9.26	9.22	9.22
0.35	9.49	9.49	9.54	9.49	9.49
0.36	9.76	9.76	9.81	9.76	9.76
0.37	10.03	10.03	10.08	10.03	10.03
0.38	10.30	10.30	10.35	10.30	10.30
0.39	10.58	10.57	10.62	10.57	10.58
0.4	10.85	10.84	10.90	10.84	10.85



Figure 3-9 A case of the upper deck touching the water surface.

3.4. 評価指標

本実験では浮体の 6 自由度運動を時系列データで測定する。得られたデータから振動を評価するために用いる評価指標として、

- 振動の最大振幅
- 振動振幅の標準偏差
- 振動の周波数（周期）

の 3 つを用いる。

最大振幅と、標準偏差は、振動の大きさを評価するために用いる。振動の大きさを評価するために、最大振幅と、標準偏差の 2 つの指標を用いたのは Figure3-10 のように実験結果には振動の大きさが時間によって変動するものが現れたためである。Figure3-10 は流速 0.31m/s で 15° の条件時の z 方向の振動（Heave）の大きさの時系列データである。横軸は時間（単位：秒）であり、縦軸は振動の大きさをポンツーンの直径で割り、無次元化したものである。振動の大きさが時間によって違うと、最大振幅と、標準偏差のどちらか 1 つだけでは正確な評価ができないことが考えられる。そのため、振動の大きさ評価には最大振幅と、標準偏差の 2 つを用いた。

振動の周波数（周期）は、FFT(高速フーリエ変換)を用いて周波数成分を確認することで、振動がどのような原因から来ているのかを考察していく。

また、Heave などのデータはポンツーンの直径で割り、無次元化する。

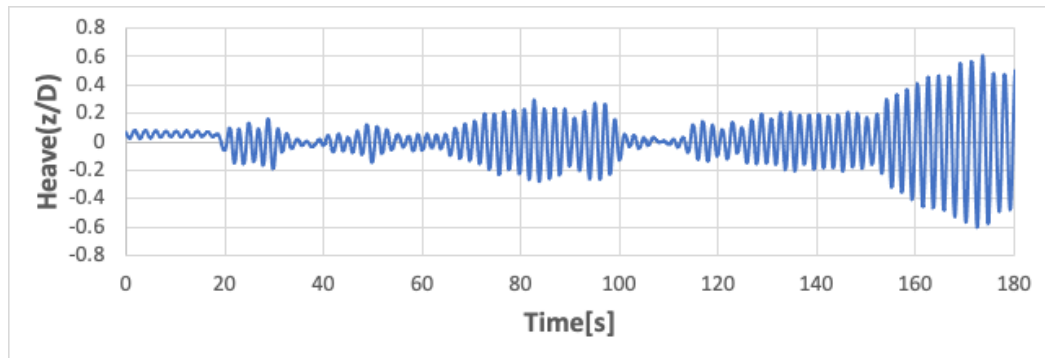


Figure 3-10 Z-direction displacement of time series on 0.31m/s and 15° .

4. 実験結果

この章では 3.4 章の評価指標で、Heave、Roll、Pitch それぞれについて、実験から得られた結果をまとめていく。

4.1. 振幅

4.1.1. 最大振幅と標準偏差

Figure4-1 から Figure4-3 に実験から得られた、Heave、Roll、Pitch それぞれの振動の最大振幅と振動振幅の標準偏差を示す。振動の最大振幅は時系列データの中で振動が最大の点の振幅である。振動振幅の標準偏差 s はデータ数 N の時系列座標データ x_i において、その平均値を \bar{x} とすると、

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$
$$S = \sqrt{2} \times s \quad (5)$$

で表され、今回の指標では、通常の標準偏差 s に $\sqrt{2}$ をかけた標準偏差ベース振幅 S を用いる。

Figure4-1 から Figure4-3 の横軸は Heave、Roll、Pitch それぞれの換算流速であり、縦軸は (a)では最大振幅、(b)では標準偏差ベース振幅である。Heave の振幅データはポンツーン直径 D で割ることにより無次元化している。それぞれの条件での換算流速は前述の Table3-6、Table3-7、Table3-8 に示してある。

ここでの換算流速は(3)式の U に曳航速度、 f_c に浮体のそれぞれの方向・角度での固有周波数、 D にポンツーンの直径を使用している。

Figure4-1 より、Heave の最大振幅は全ての角度において、換算流速 4 付近から急激に上昇し、換算流速 7 付近で最大となることがわかる。30° の条件を見ると、換算流速 7 を超えたあたりで最大振幅が小さくなっていることから、最大振幅は換算流速 7 付近で最大となることがわかる。また 30° の条件では換算流速 7 を超えたあたりで最大振幅が小さくなった後、8 付近でまた上昇する。

標準偏差ベース振幅も同様の傾向を示すことがわかる。

Roll の最大振幅も Figure4-2 のように全ての角度において、換算流速 4 付近から急激に上昇し、換算流速 6~8 で最大となることがわかる。15°、30°、45° においては換算流速 6 付近で極大値を取った後、振幅が小さくなり、換算流速が 8 を超えたあたりでまた上昇する傾向がある。また Roll では Heave の結果と異なり、角度により、振幅に違いが見られる。

特に 0° と 60° は流れが逆向きに流入しているだけであるのに、振幅には大小がはっきりと見られ、 0° では振幅が小さく、 60° では振幅が大きい。

標準偏差ベース振幅はこちらも最大振幅と同様の傾向が見られる。

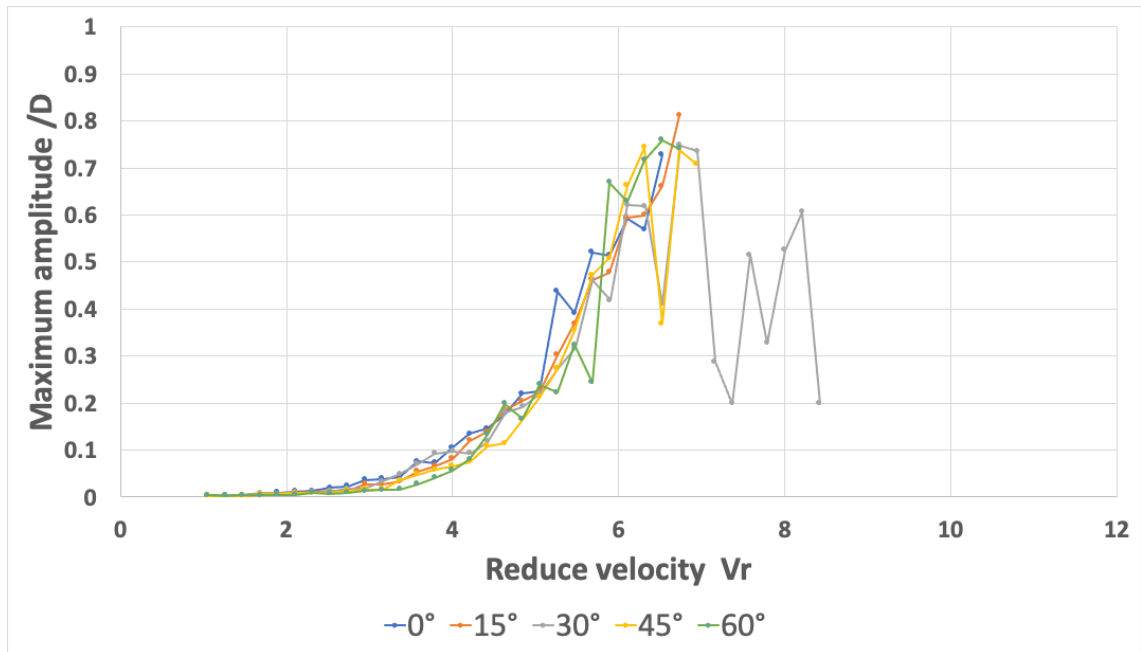
Pitch の最大振幅では角度により、振幅に違いが見られる。 0° 、 15° では、換算流速が 6 付近で振幅が極大値をとり、一度下がるが、また換算流速が 7 を超えたあたりで上昇する。その他の角度でも同様の結果らしきものは見えるがはっきりとした傾向ではない。 60° ではほぼ換算流速が大きくなるにつれて振幅が上昇する傾向が見られた。また Pitch でも角度により、振幅に違いが見られた。特に 0° と 60° 、 15° と 45° は流れを逆にしただけの条件であるにも関わらず、振幅には大小がはっきりと見られた。この大小は Roll と逆の傾向を示し、 0° では振幅が大きく、 60° では振幅が小さい。

こちらも標準偏差ベース振幅は最大振幅とほぼ同様の結果であるが、標準偏差ベース振幅の方が最大振幅の結果よりグラフが滑らかである。これは Figure3-10 のような時間による振動振幅に大小があるため、最大振幅は条件によって値にばらつきが出るが、標準偏差ベース振幅の方が全体の傾向を掴めるためである。

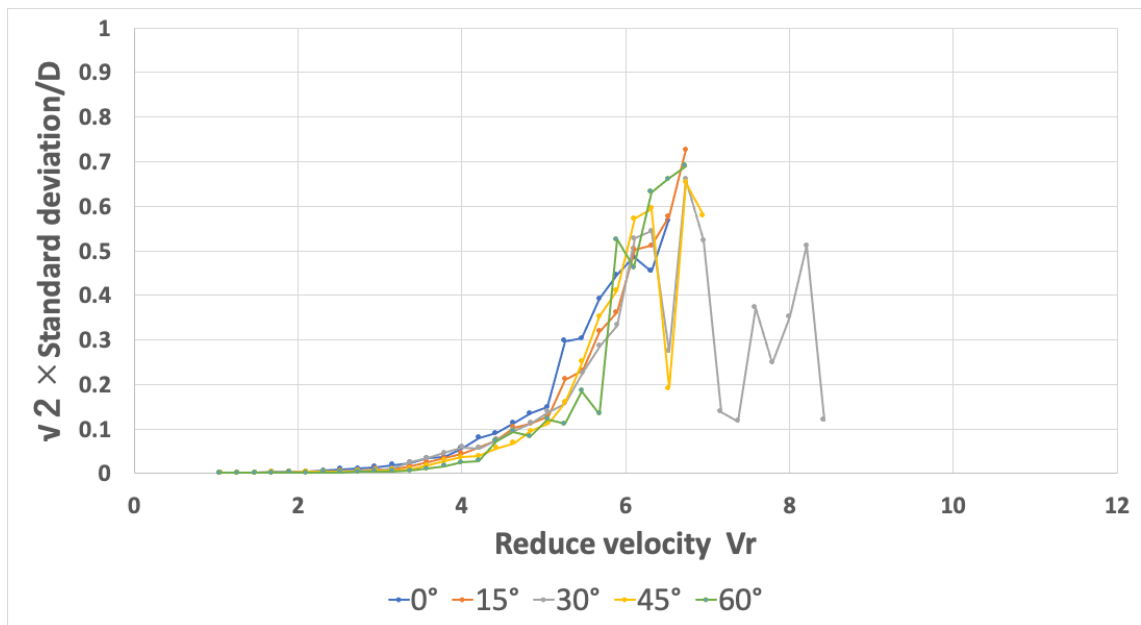
ここでの換算流速は簡易化のため、(3)式の U に曳航速度を使用している。しかし林ら [30] の先行研究によると、斜めから流入する流れについては換算流速の(3)式の U に円柱に直行成分の流れの速度を代入しなくてはならないとある。本実験では各ポンツーン対して流れが斜めに流入しているものがほとんどである。また浮体にあるポンツーン 3 本は同じ流速でも、それぞれ流入角度が異なるため、模型の中でもポンツーンごとに流速が異なる。次の 4.1.2 章では、そのポンツーンごとに異なる、斜め流入を考慮した振幅の考察を行っていく。

また、Figure4-4 に(a)Surge、(b)Sway の振動振幅の標準偏差ベース振幅を示す。横軸を 2 軸で取り、1 軸は流速(m/s)、2 軸は換算流速である。この換算流速は、(3)式の U に曳航速度を使用している。また縦軸は標準偏差に $\sqrt{2}$ をかけた標準偏差ベース振幅をポンツーン直径 D で割り、無次元化したものである。

この結果を見ると、(a)Surge、(b)Sway は大きくないことがわかり、揺れが Heave、Roll、Pitch が支配的に発生しているのがわかる。

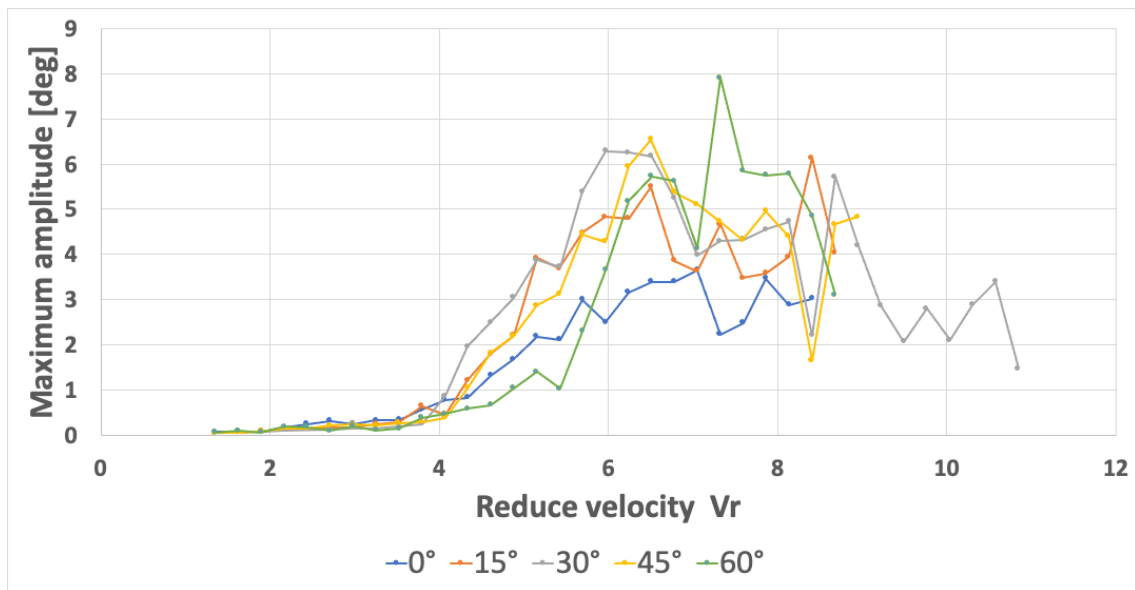


(a)

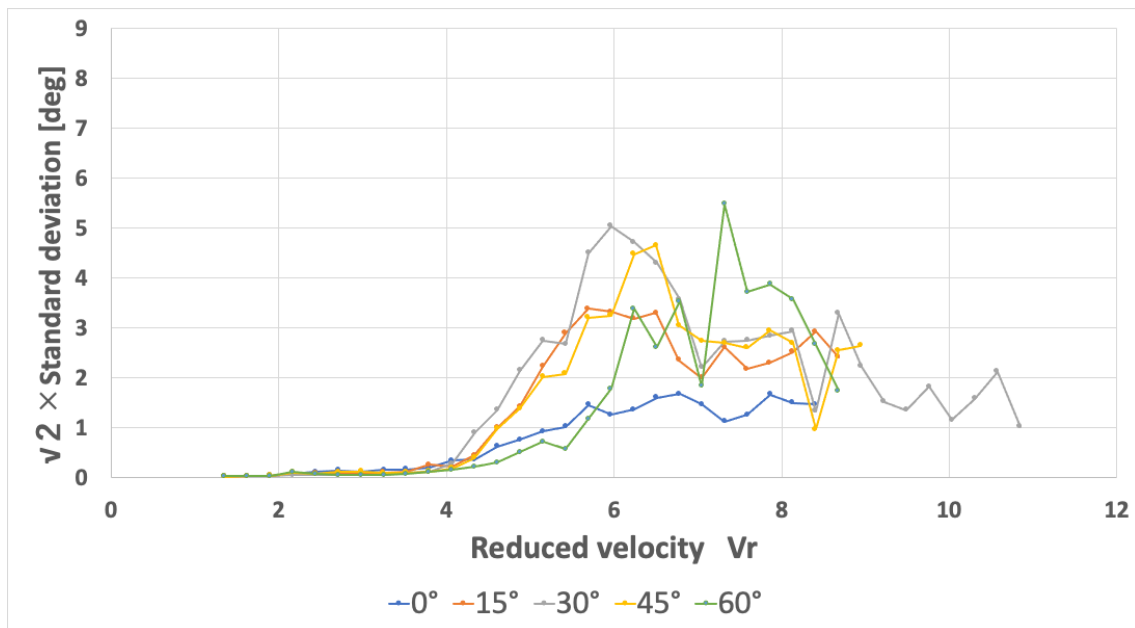


(b)

Figure 4-1 Relationship between Heave amplitude and the reduced velocity,
(a) the maximum amplitude, and (b) amplitude based on the standard deviation.

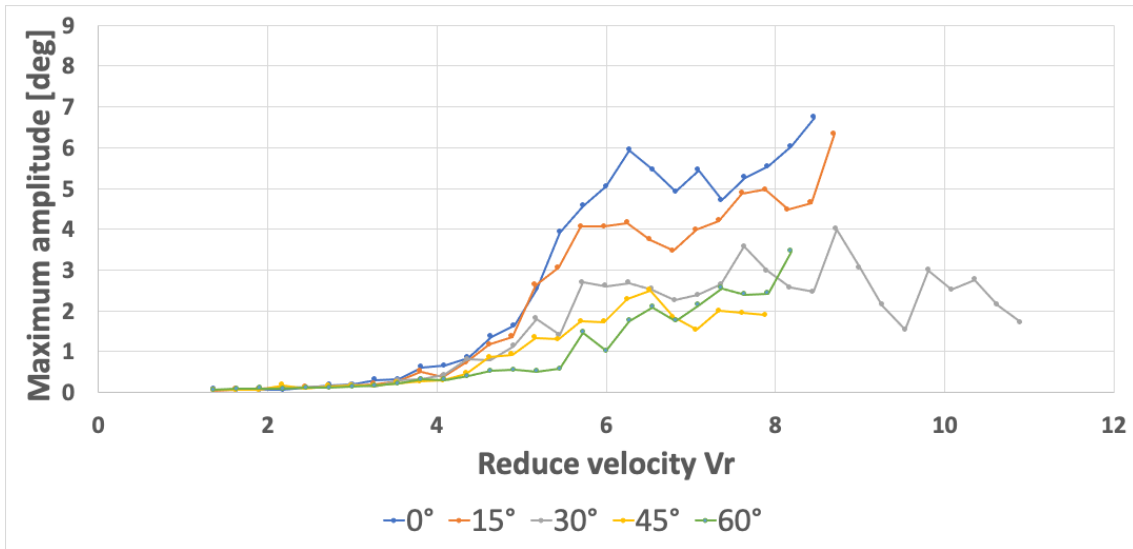


(a)

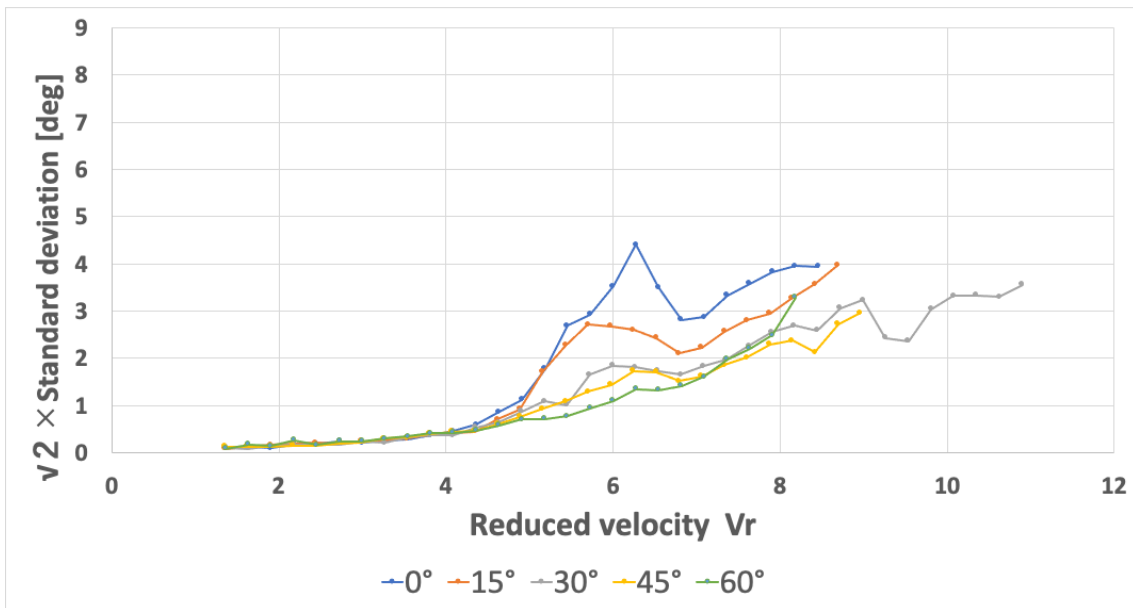


(b)

Figure 4-2 Relationship between Roll amplitude and the reduced velocity,
(a) the maximum amplitude, and (b) amplitude based on the standard deviation.

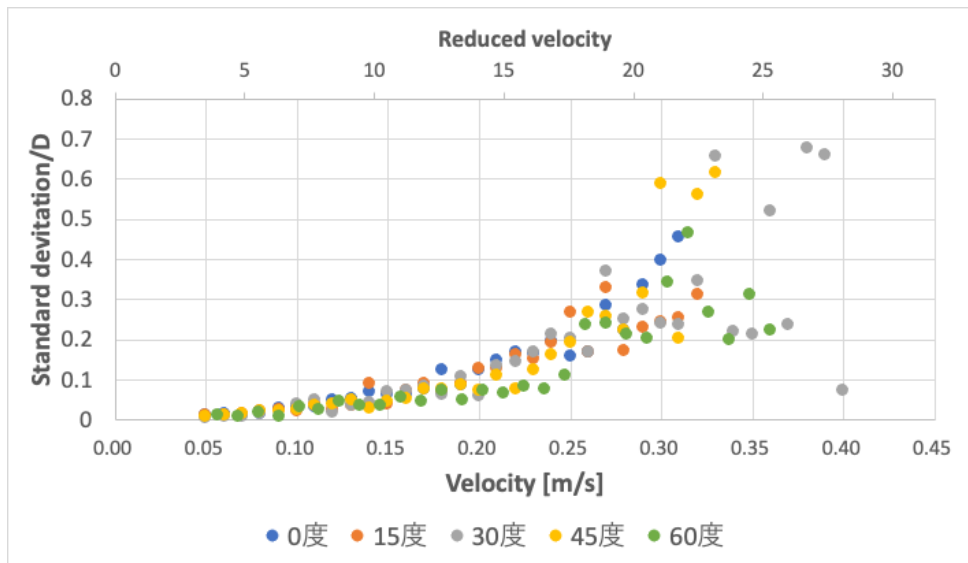


(a)

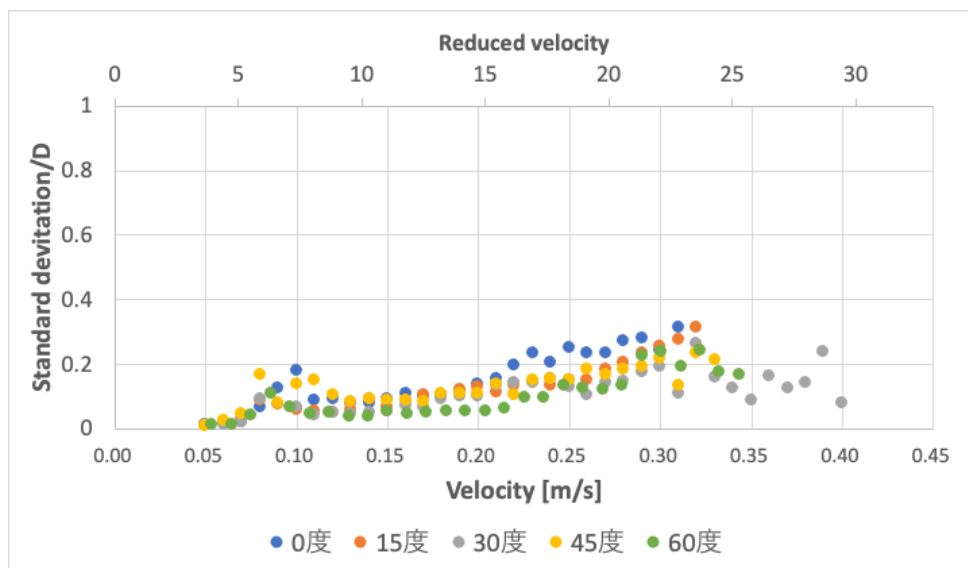


(b)

Figure 4-3 Relationship between Pitch amplitude and the reduced velocity,
(a) the maximum amplitude, and (b) amplitude based on the standard deviation.



(a)



(b)

Figure 4-4 Relationship between standard deviation and velocity on (a)Surge (b)Sway.

4.1.2. 柱ごとの最大振幅と標準偏差

前節でも述べた通り、本実験模型ではポンツーンが3本あり、同じ流速でも、それぞれ流れ流入角度が異なるため、模型の中でもポンツーンごとに換算流速が異なる。そのため、この斜め流入を考慮に入れたポンツーンごとの考察を行わなくてはならない。本節では、ポンツーン番号をつけ、それぞれのポンツーンについて換算流速と振幅の関係を示す。

ポンツーンの区別をつけるため、Figure4-5 のようにポンツーンに番号をふる。それぞれのポンツーンに対しての流れの流入角度を Table4-1 にまとめる。それぞれのポンツーンに対しての換算流速ごとの最大振幅と標準偏差ベース振幅について、Figure4-6～Figure4-10 に示す。これらグラフは横軸を換算流速とし、Figure4-5 で番号付けたそれぞれのポンツーン①・②・③の換算流速が3軸で表されている。ただ0°のポンツーン①と60°のポンツーン②は流れと並行であり、換算流速は常に0なので記載せず、0°と60°のグラフの横軸は残りの2本のポンツーンの2軸となっている。また縦軸は振動の最大振幅と振幅の標準偏差ベース振幅である。Heaveのグラフは今までのグラフと同様に、振幅をポンツーンの直径Dで割り、無次元化している。

0°の条件では、ポンツーン②と③への流入角が同じで、ポンツーン①の換算流速が常に0のため、ポンツーンごとの違いを見ることはできない。

Figure4-6(a)からHeave方向振幅は、0°の角度条件だと換算流速が6付近まで上がり続けている。Figure4-6(b)、Figure4-6(c)に示す通り、RollとPitch方向では換算流速5~6付近で極大値を取っている。その後振幅が少し減少するも、換算流速7付近でまた増加する傾向にある。

15°はポンツーン①・②・③で全ての流れの流入角が異なるため、全てのポンツーンで換算流速が異なる。Figure4-7(a)のようにHeaveで方向振幅は、0°の角度条件だと換算流速が6付近まで上がり続けている。これはポンツーン①では換算流速2付近まで、ポンツーン②では換算流速5付近まで、ポンツーン③では換算流速6付近までとなる。またFigure4-7(b)、Figure4-7(c)に示す通り、RollとPitch方向ではポンツーン③の換算流速5~6付近で極大値を取っている。その後換算流速7付近まで振幅が減少するがまた増加する傾向にある。この2度目の増加の時ポンツーン②は換算流速が5~6付近であることがわかる。

30°はポンツーン①・②で全ての流れの流入角が同じで、ポンツーン③のみが異なる。Figure4-8にあるように、Heave方向の振幅はポンツーン①・②の換算流速が3付近、ポンツーン③の換算流速が6付近で最大値をとり、その後減少の傾向にある。また30°ではRollとPitch方向でもHeaveと同様の振幅の傾向がある。

45°はポンツーン①・②・③で全ての流れの流入角が異なるため、全てのポンツーンで換算流速が異なる。Figure4-9(a)のようにHeaveで方向振幅は、0°の角度条件だと換算流速が6付近まで上がり続けている。これはポンツーン①では換算流速5付近まで、ポンツーン②では換算流速2付近まで、ポンツーン③では換算流速6付近までとなる。ただポンツーン③では換算流速6を超えた領域ではその増加傾向は小さくなる。Figure4-9(b)、Figure4-9(c)に見られるように、RollとPitch方向では2回のピークがある。1つ目は、ポンツーン①

では換算流速 4.5 付近、ポンツーン②では換算流速 1.6 付近まで、ポンツーン③では換算流速 6 付近である。2 つ目は、ポンツーン①では換算流速 6 付近、ポンツーン②では換算流速 2.2 付近まで、ポンツーン③では換算流速 8 付近である。

60° の条件では、ポンツーン①と③への流入角が同じで、ポンツーン②の換算流速が常に 0 のため、ポンツーンごとの違いを見ることはできない。Heave と Pitch では単純増加傾向があり、Heave では換算流速 6 付近まで、Pitch では換算流速 8 付近までその傾向が見られる。Roll では Figure4-10(b)に見られるように、換算流速 6 付近でピークをとる。

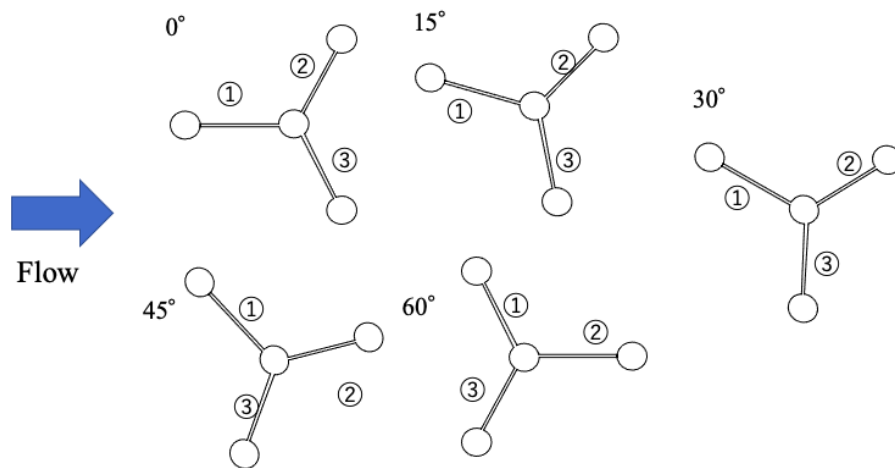
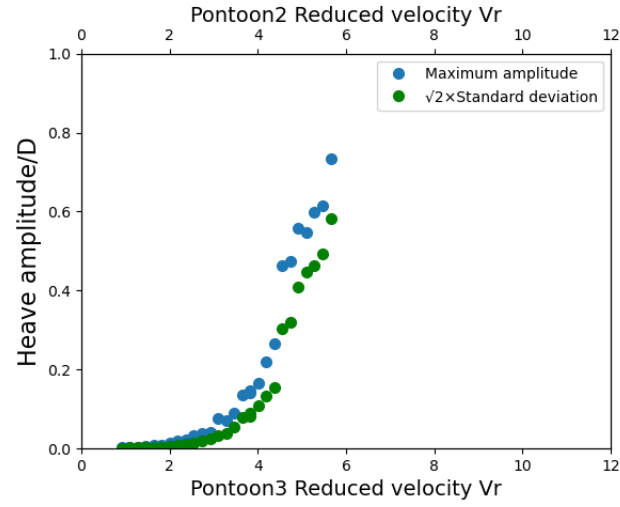


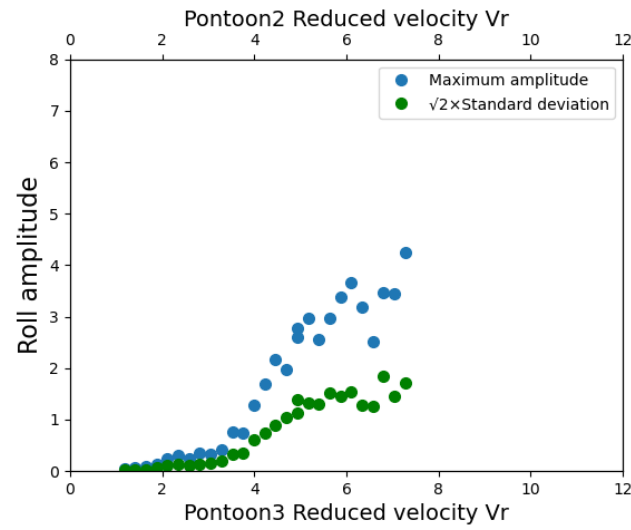
Figure 4-5 Pontoon number.

Table 4-1 Angle of each pontoon to the flow.

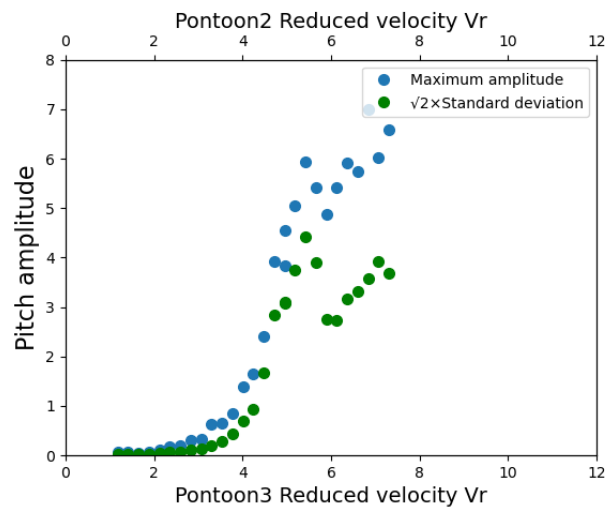
	Pontoon1 (deg)	Pontoon2 (deg)	Pontoon3 (deg)
0°	0	60	60
15°	15	45	75
30°	30	30	90
45°	45	15	75
60°	60	0	60



(a)



(b)



(c)

Figure 4-6 Relationship between motion amplitude and the reduced velocity based on each pontoon in 0-degree Case, (a) Heave, (b), Roll, and (c) Pitch.

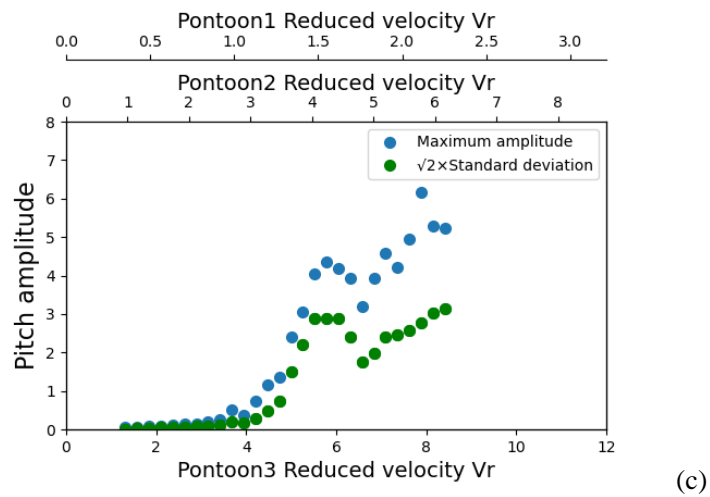
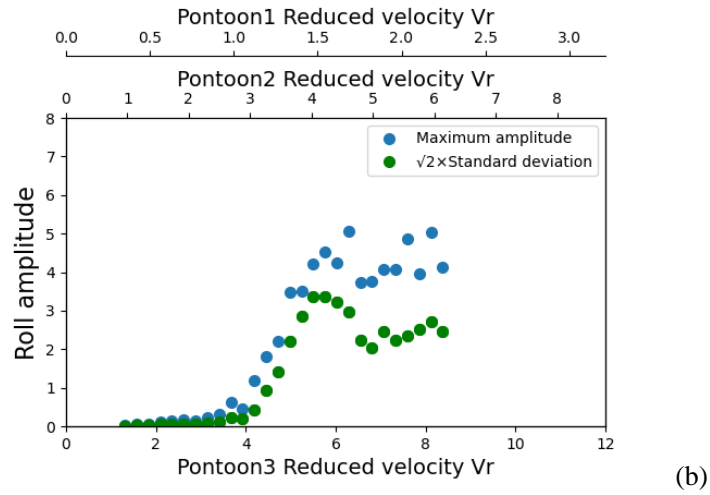
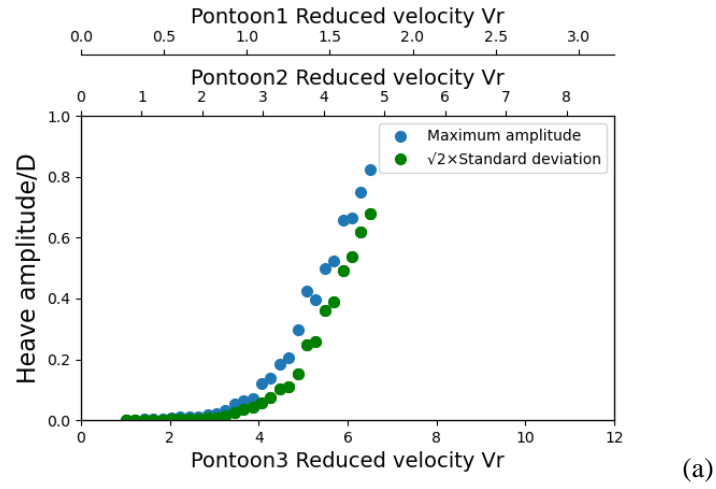


Figure 4-7 Relationship between motion amplitude and the reduced velocity based on each pontoon in 15-degree Case, (a) Heave, (b), Roll, and (c) Pitch.

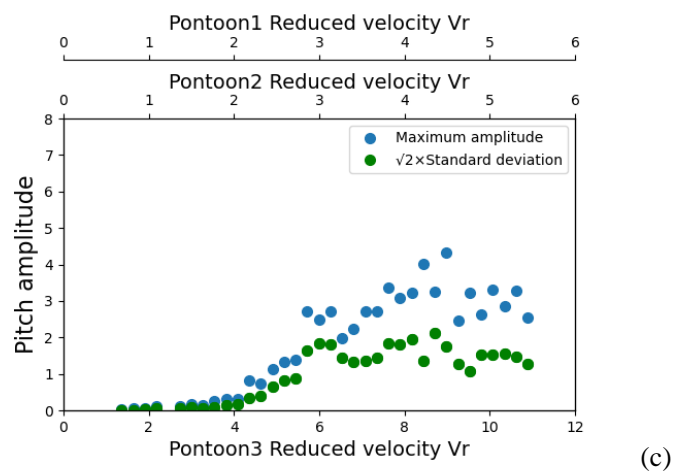
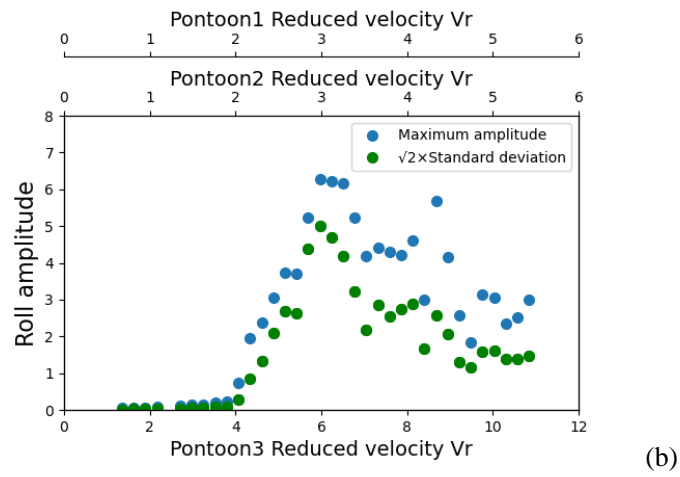
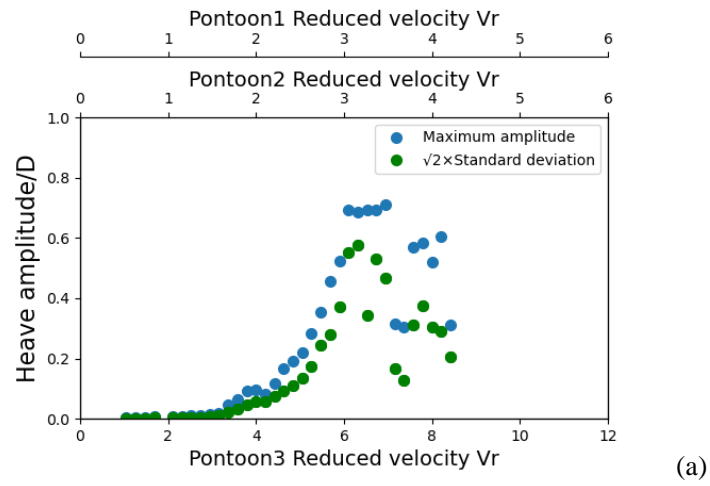


Figure 4-8 Relationship between motion amplitude and the reduced velocity based on each pontoon in 30-degree Case, (a) Heave, (b), Roll, and (c) Pitch.

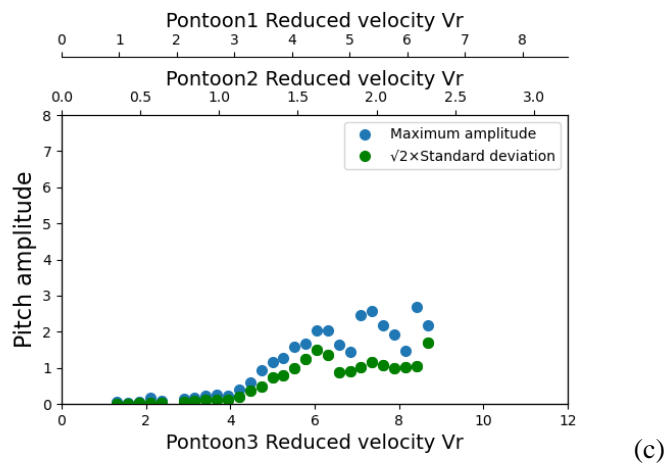
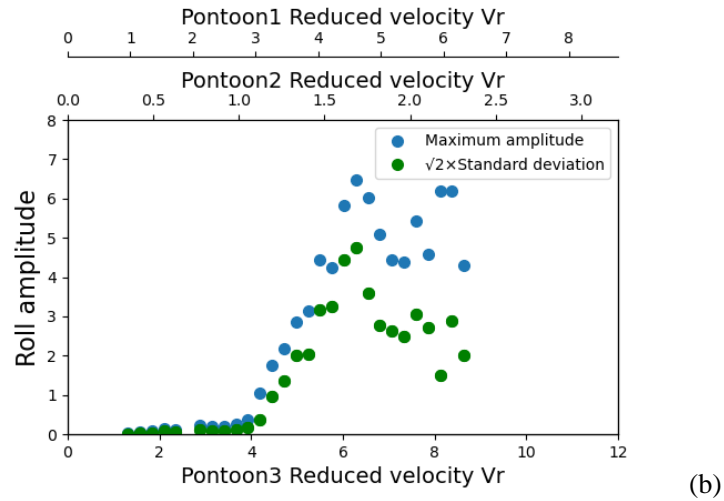
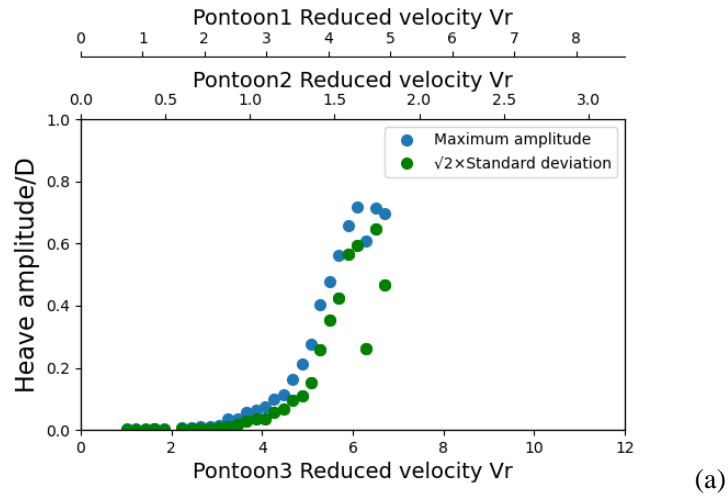


Figure 4-9 Relationship between motion amplitude and the reduced velocity based on each pontoon in 45-degree Case, (a) Heave, (b), Roll, and (c) Pitch.

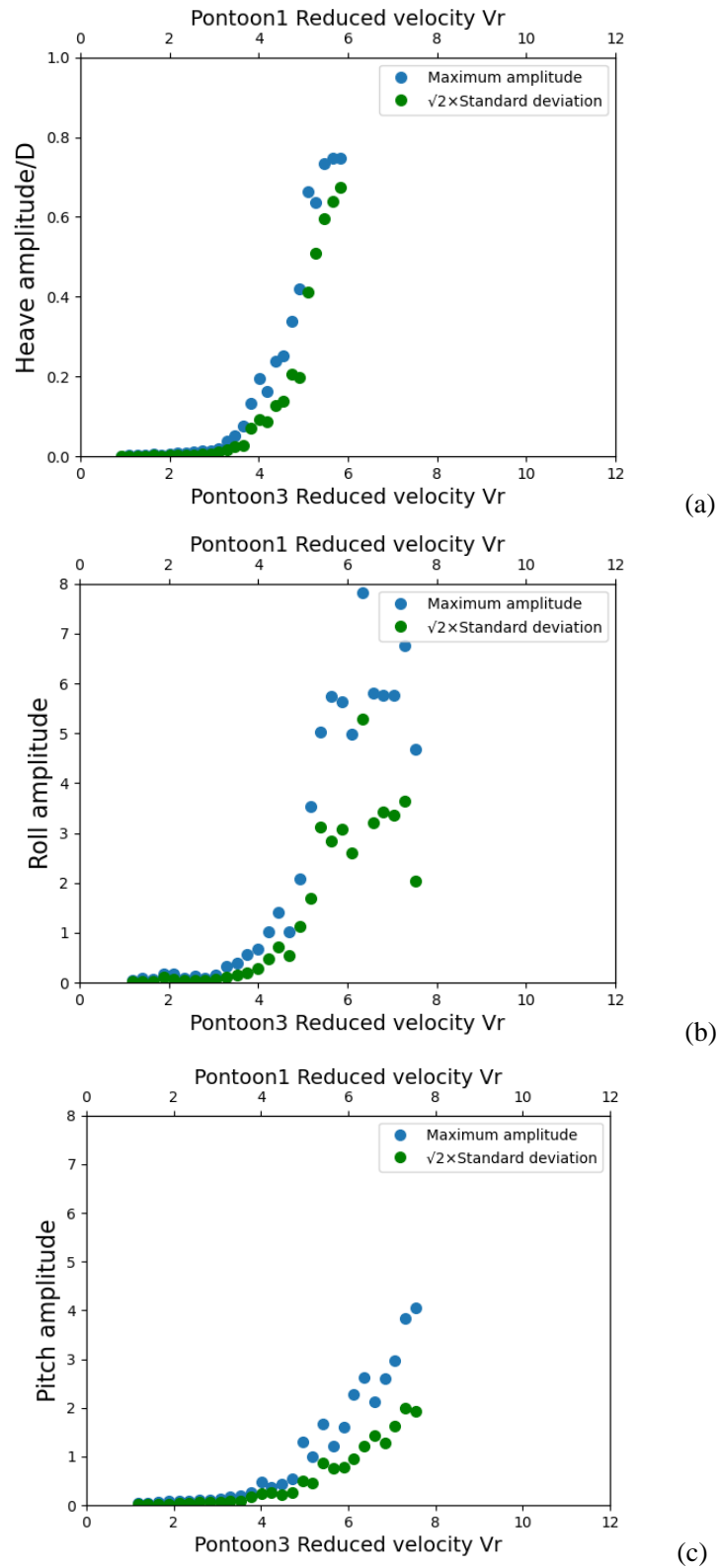


Figure 4-10 Relationship between motion amplitude and the reduced velocity based on each pontoon in 15-degree Case, (a) Heave, (b), Roll, and (c) Pitch.

4.2. 周波数

周波数解析では時系列の実験データを FFT（高速フーリエ変換）の処理を行い、その周波数成分のスペクトルの大きさを確認する。FFT（高速フーリエ変換）では、データ数 N の時系列データを用いた時、 $2^m < N$ 満たす最大の整数 m を求め、 2^m を使用するデータ数とした。また周波数スペクトルの平滑化を行うため、データを 2 分割し 2^{m-1} 個のデータとし、セグメントを 3 つ分けるとこで、オーバーラップ率 50%の解析を行った。

周波数解析は全実験条件で行ったが、本論文はそのうちいくつかを使用し、傾向を考察する。

Figure4-11 は 0° 、 0.07m/s の (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の FFT の結果である。 0.07m/s での換算流速は、Table3-6～Table3-8 より(a)Heave で 1.47、(b)Roll で 1.90、(c)Pitch で 1.90 である。横軸は 2 軸になっていて、第 1 軸に周波数を Roll、Pitch の固有周波数で割ったもの（正確には Pitch の固有周波数）、第 2 軸は周波数を Heave の固有周波数で割ったものである。縦軸は振幅を無次元化した値の 2 乗である、エネルギーを用いている。Figure4-11 の縦軸は、(a)Heave は 10^{-7} 、(b)Roll は 10^{-5} 、(c)Pitch は 10^{-5} のオーダーである。赤色の縦線は Strouhal 数を 0.2 とした時の渦の周波数を表す。Figure4-11 にあるように、換算流速が小さい領域の振動成分は非常に小さく、渦の周波数と固有周期の成分の 2 つが主な振動の周波数となる。Heave と Pitch では渦の周波数の成分が最も支配的であるが、Roll では渦による振動も発生しているが他の原因で発生した固有周期成分の揺れの方が大きいことを示す。このように速度条件が小さい領域の結果は Figure4-11 のような振動成分は非常に小さく、渦の周波数と固有周期の成分の 2 つが主な振動の周波数となり、その大小は条件によって異なるが、実験誤差によってその大小は変化してしまうほど振幅としては小さい。

Figure4-12 は 0° 、 0.17m/s の (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の FFT の結果である。 0.17m/s での換算流速は、Table3-6～Table3-8 より(a)Heave で 3.58、(b)Roll で 4.61、(c)Pitch で 4.61 である。こちらも渦の周波数と固有周期の成分の 2 つが主な振動の周波数であるが(b)Roll、(c)Pitch において渦の周波数と固有周波数が近くなっている。

Figure4-13 は 0° 、 0.27m/s の (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の FFT の結果である。 0.27m/s での換算流速は、Table3-6～Table3-8 より(a)Heave で 5.68、(b)Roll で 7.32、(c)Pitch で 7.32 である。これを見ると、Heave と Roll は固有周波数と同じ周波数の振幅が支配的であり、ロックインに入っていることがわかる。Pitch にも同様に固有周波数の成分も見られ、ロックインが確認できるが、Heave の固有周波数成分も持っている。これにより、Pitch の振動が Heave のロックインの振動と連成していることがわかる。このように(a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch 間で、他の 6 自由度振動のロックインに連成して起こる揺れの成分が他の速度条件でも確認された。

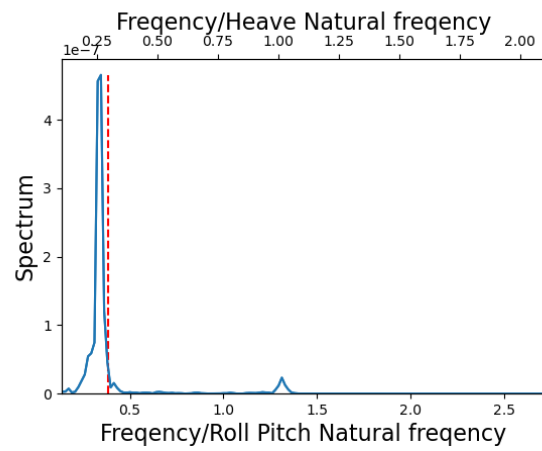
Figure4-14 は 30° 、 0.17m/s の (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の FFT の結果である。 0.17m/s の換算流速は、Table3-6～Table3-8 より (a)Heave で 3.58、(b)Roll で 4.61、(c)Pitch で 4.61 である。これを見ると (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch 全てにおいて、渦の周波数と同様の周波数成分が支配的であり、(b)Roll、(c)Pitch ではロックインが確認できる。

Figure4-15 は 30° 、 0.37m/s の (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の FFT の結果である。 0.37m/s の換算流速は、Table3-6～Table3-8 より (a)Heave で 7.79、(b)Roll で 10.3、(c)Pitch で 10.8 である。これを見ると、(a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch 全てにおいて、Heave の固有周期に近い振動成分が確認できる。これにより、Roll、Pitch の振動が Heave のロックインの振動と連成していることがわかる。

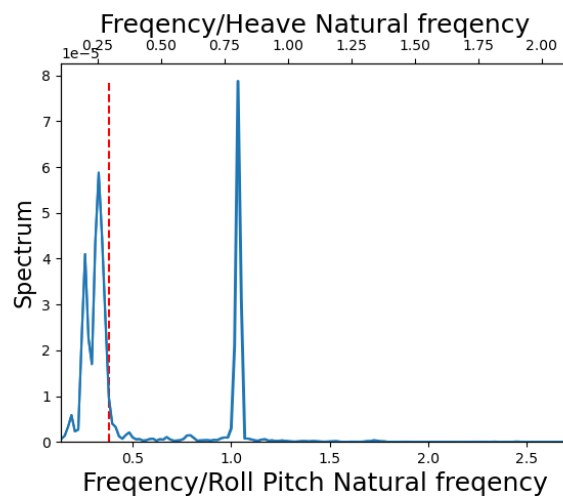
Figure4-16 は 45° 、 0.27m/s の (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の FFT の結果である。 0.27m/s の換算流速は、Table3-6～Table3-8 より (a)Heave で 5.68、(b)Roll で 7.32、(c)Pitch で 7.32 である。これを見ると、Heave は固有周波数と同じ周波数の振幅が支配的であり、ロックインに入っていることがわかる。Roll と Pitch にも同様に固有周波数の成分も見られ、ロックインが確認できるが、Heave の固有周波数成分も持っている。これにより、Roll と Pitch の振動が Heave のロックインの振動と連成していることがわかる。

Figure4-17 は 0° 、 0.07m/s の (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の FFT の結果である。 0.07m/s の換算流速は、Table3-6～Table3-8 より (a)Heave で 1.47、(b)Roll で 1.90、(c)Pitch で 1.90 である。Figure4-17 の縦軸は、(a)Heave は 10^{-7} 、(b)Roll は 10^{-5} 、(c)Pitch は 10^{-5} のオーダーである。これを見ると、傾向は 0° 、 0.07m/s の条件の時とほぼ同じであるが、(c)Pitch で固有周波数成分が大きいことがわかる。このように 60° の条件での Pitch は固有周波数成分が渦の成分より大きいものがほとんどであった。

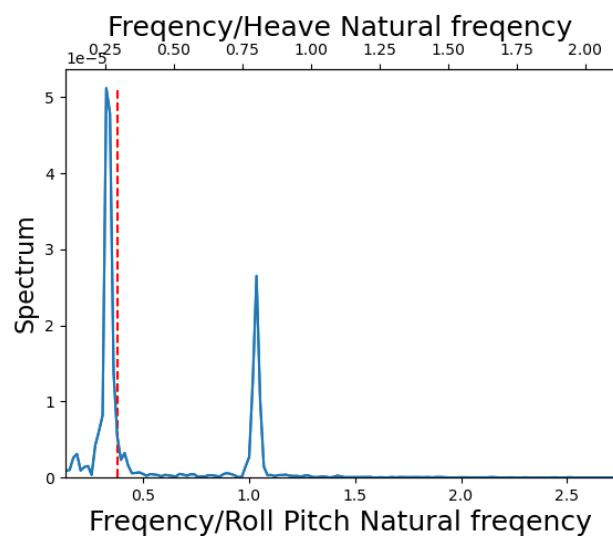
Figure4-18 は 60° 、 0.27m/s の (a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の FFT の結果である。 0.27m/s の換算流速は、Table3-6～Table3-8 より (a)Heave で 5.68、(b)Roll で 7.32、(c)Pitch で 7.32 である。これを見ると、(a)Heave、(b)Roll、(c)Pitch の全ては固有周波数と同じ周波数の振幅が支配的であり、ロックインに入っていることがわかる。



(a)



(b)



(c)

Figure 4-11 Energy spectrum of motion in 0-degree and 0.07 m/s Case, (a) Heave, (b) Roll, and (c) Pitch. The horizontal axis is the frequency normalized by natural frequency of each motion.

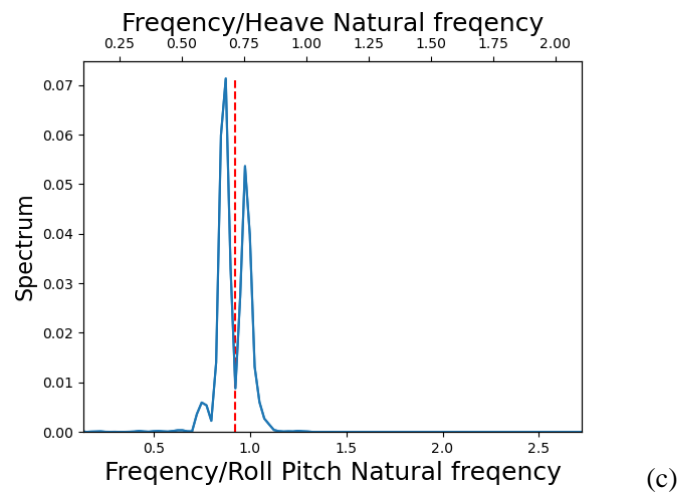
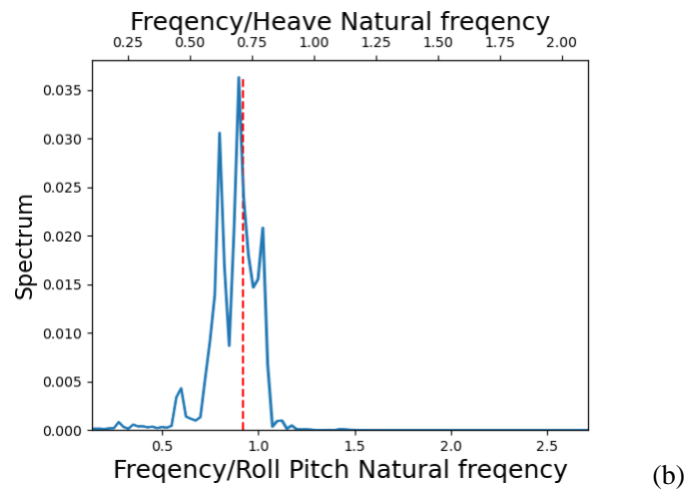
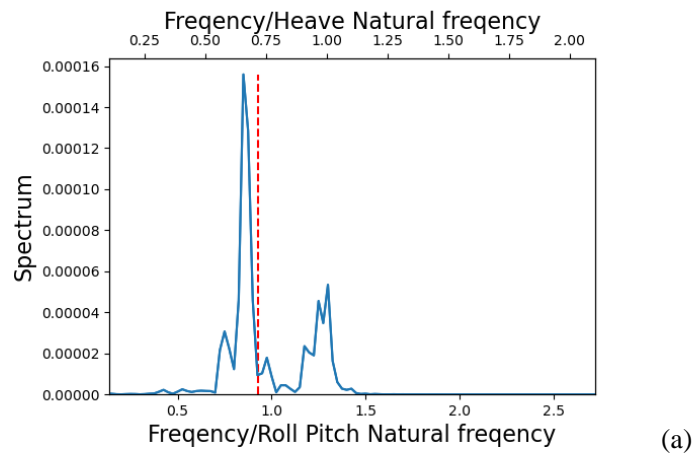


Figure 4-12 Energy spectrum of motion in 0-degree and 0.17 m/s Case, (a) Heave, (b) Roll, and (c) Pitch. The horizontal axis is the frequency normalized by natural frequency of each motion.

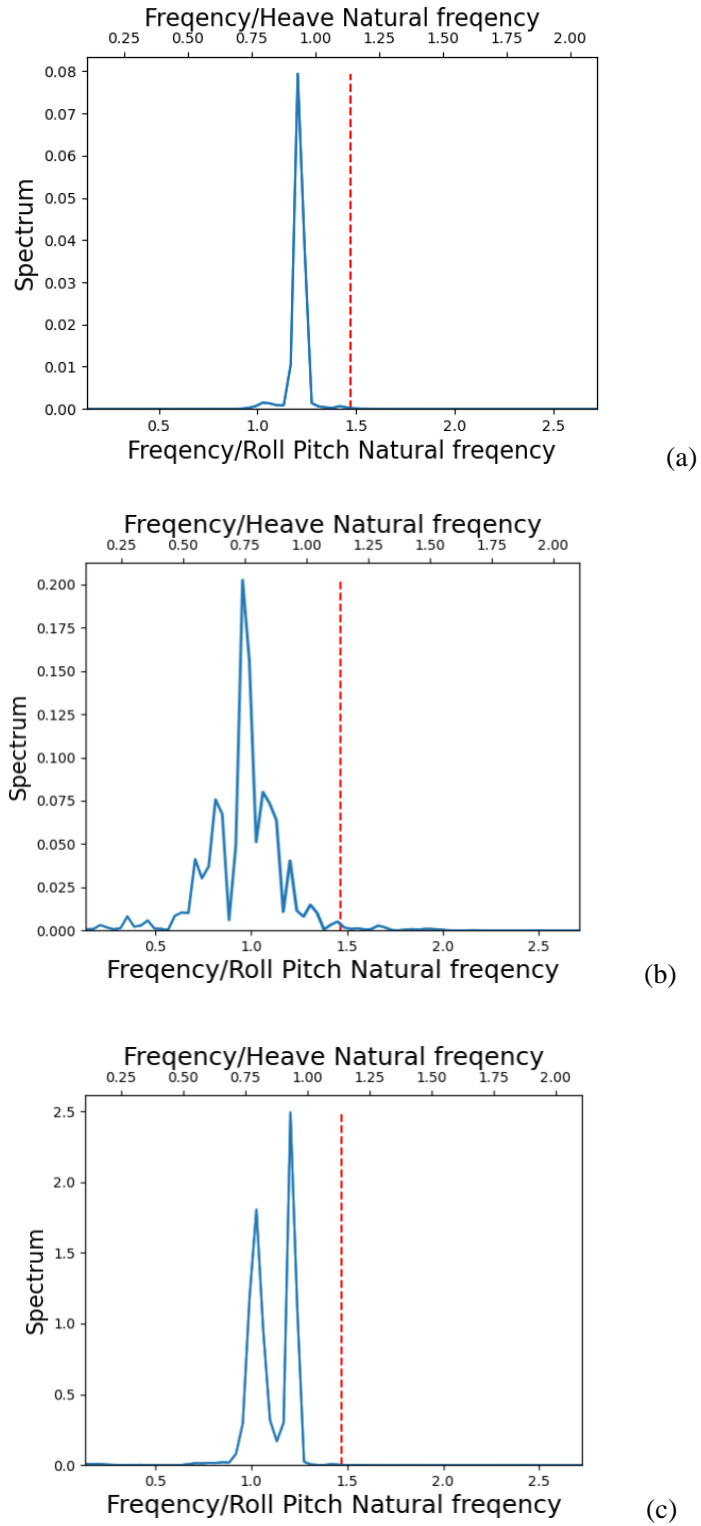


Figure 4-13 Energy spectrum of motion in 0-degree and 0.27 m/s Case, (a) Heave, (b) Roll, and (c) Pitch. The horizontal axis is the frequency normalized by natural frequency of each motion.

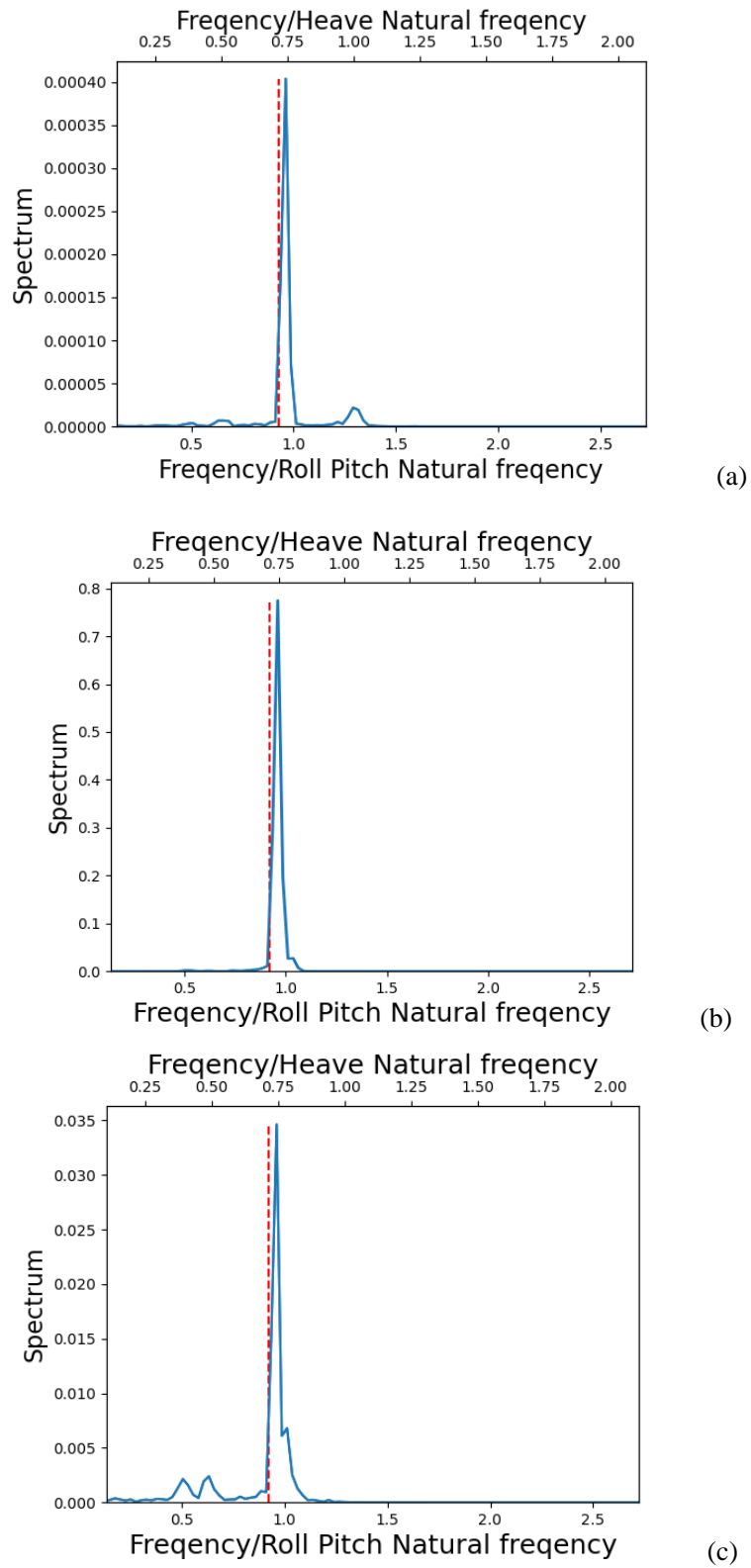


Figure 4-14 Energy spectrum of motion in 30-degree and 0.17 m/s Case, (a) Heave, (b) Roll, and (c) Pitch. The horizontal axis is the frequency normalized by natural frequency of each motion.

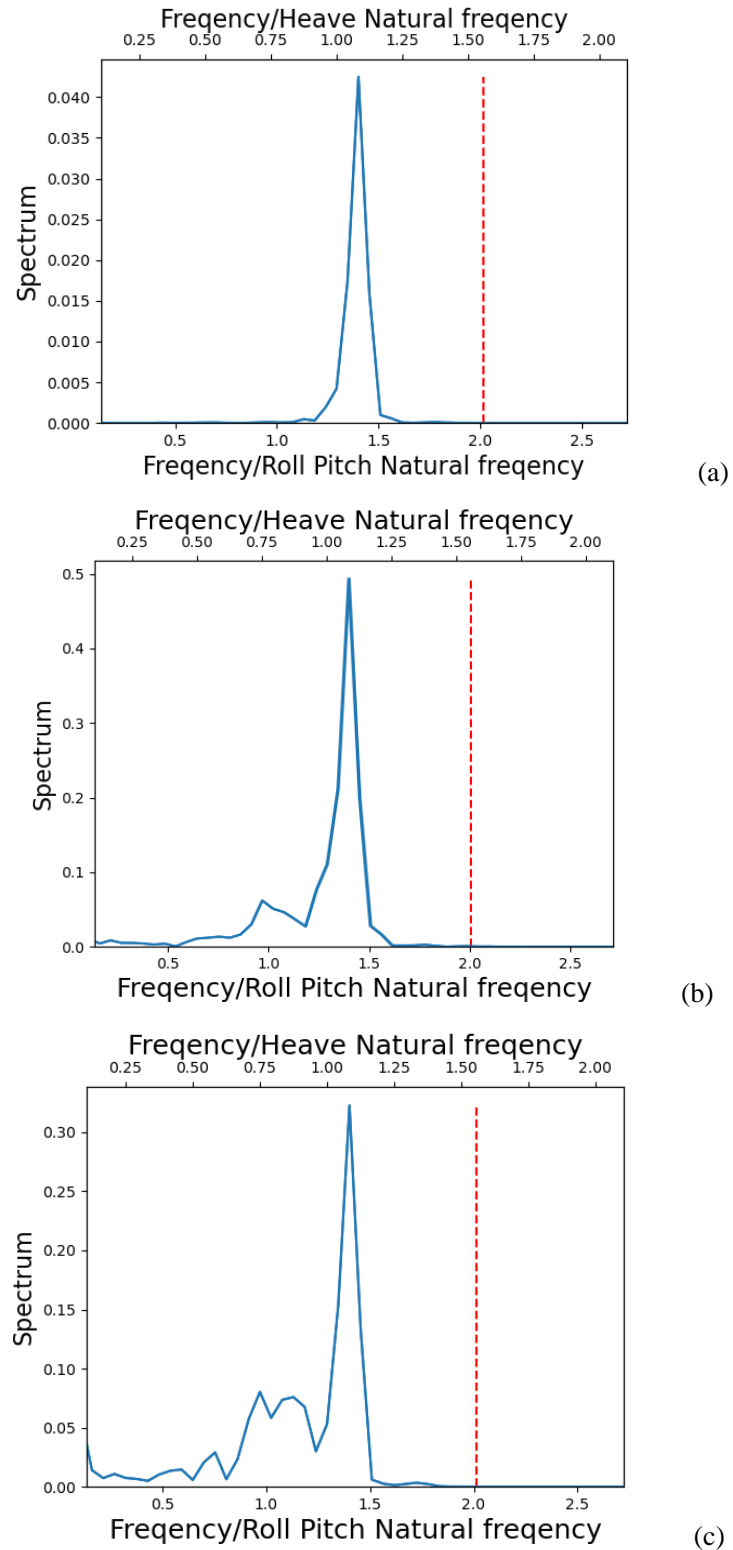


Figure 4-15 Energy spectrum of motion in 30-degree and 0.37 m/s Case, (a) Heave, (b) Roll, and (c) Pitch. The horizontal axis is the frequency normalized by natural frequency of each motion.

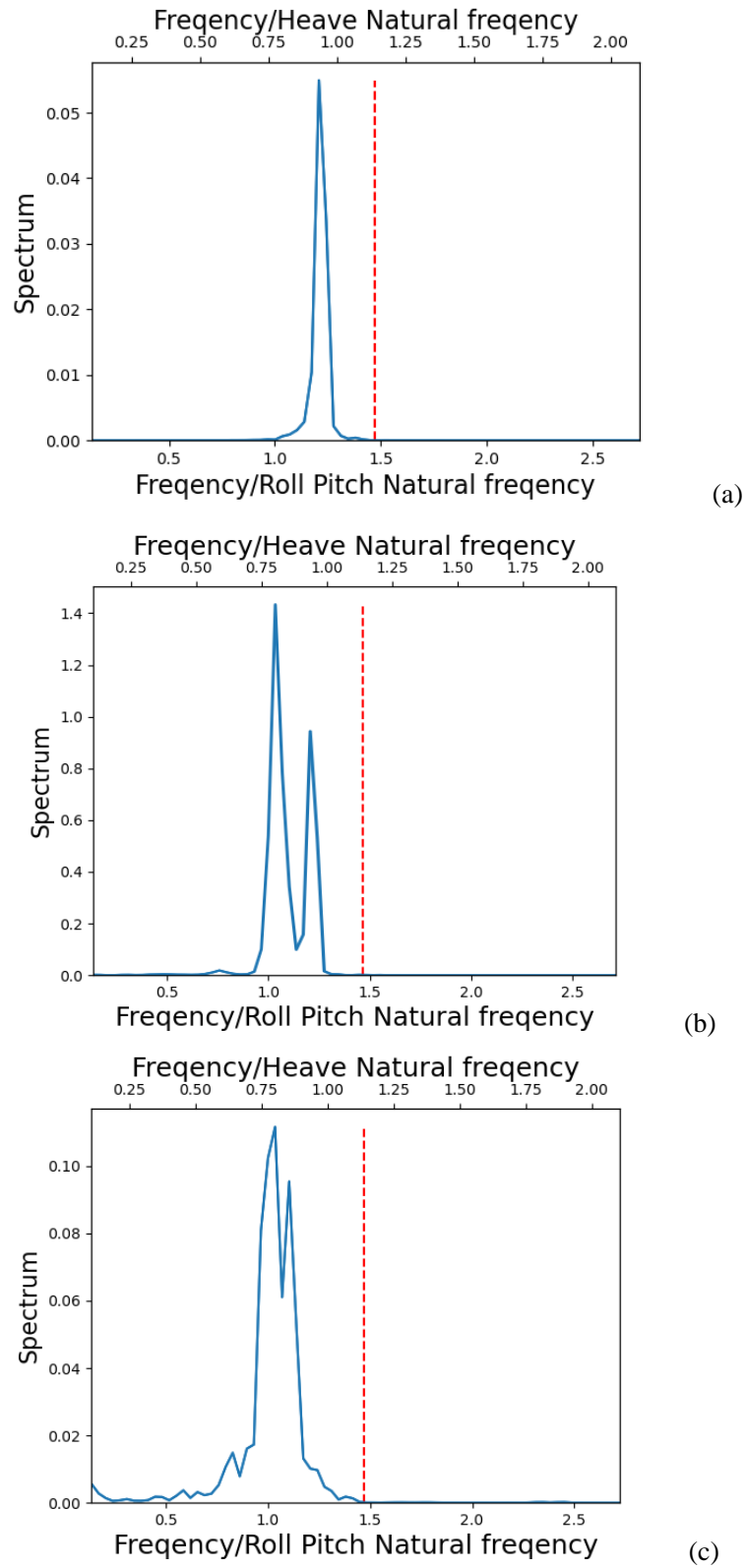


Figure 4-16 Energy spectrum of motion in 45-degree and 0.27 m/s Case, (a) Heave, (b) Roll, and (c) Pitch. The horizontal axis is the frequency normalized by natural frequency of each motion.

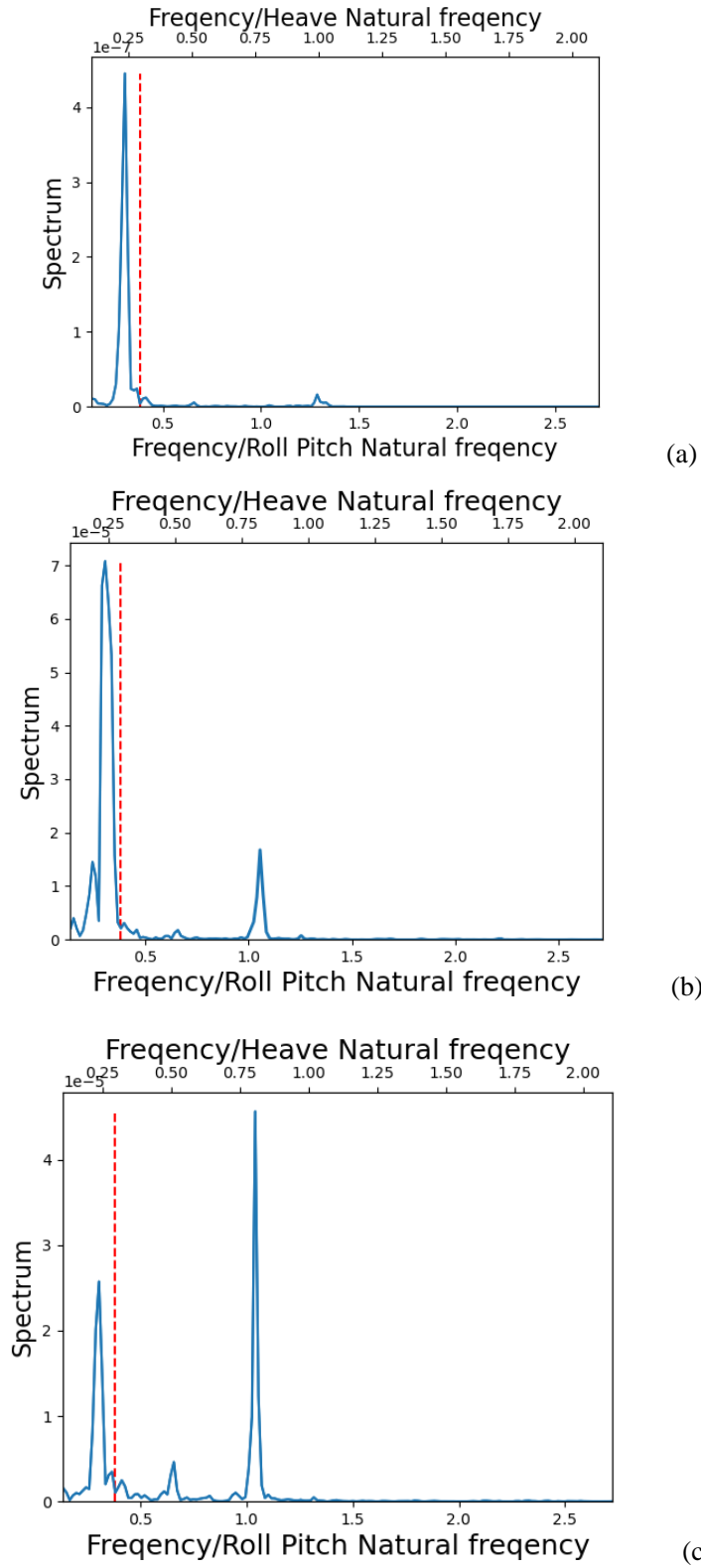


Figure 4-17 Energy spectrum of motion in 60-degree and 0.07 m/s Case, (a) Heave, (b) Roll, and (c) Pitch. The horizontal axis is the frequency normalized by natural frequency of each motion.

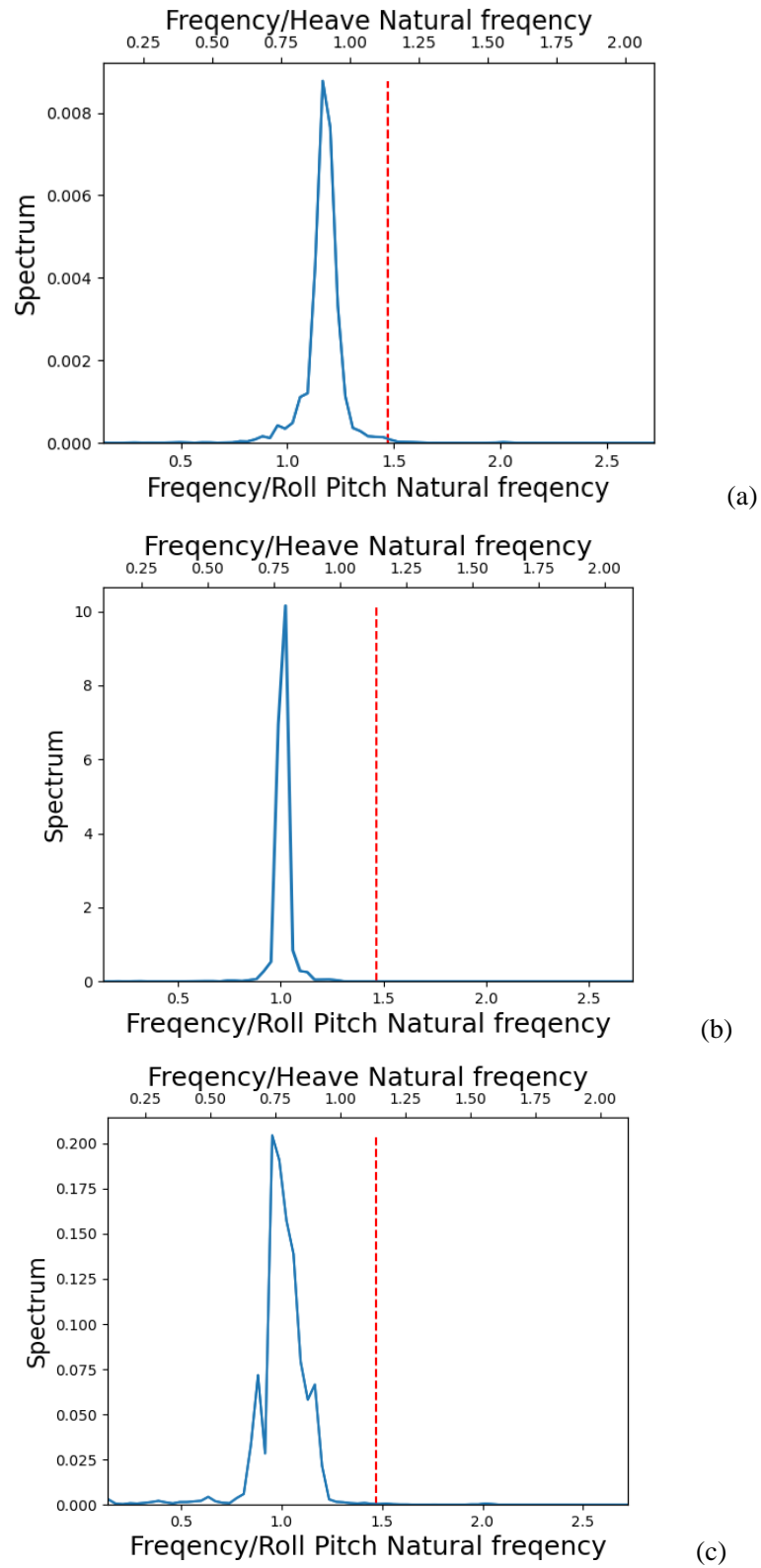


Figure 4-18 Energy spectrum of motion in 60-degree and 0.27 m/s Case, (a) Heave, (b) Roll, and (c) Pitch. The horizontal axis is the frequency normalized by natural frequency of each motion.

5. 考察

5.1. 振幅

4.1.1 節の Figure4-1 から Figure4-3 の結果により、振幅は Heave、Roll、Pitch 全ての角度において、換算流速4付近から急激に上昇し、換算流速7付近で極大値となることがわかる。このような傾向は渦が原因の振動以外で起こらないものである。よってこれらの振動は渦励起運動が支配的な運動であると考察できる。

また Roll と Pitch に見られた角度による振幅の違いであるが、Figure5-1 のように 0° や 60° 、 15° や 45° の流れが逆向きに当たっているものにはっきり見られた。これはポンツーン後流にできる渦の干渉に違いがあると考察できる。後流の渦干渉についての詳しい考察は 5.3 章で述べる。 0° の Roll や、 60° の Pitch は渦干渉により、渦励起運動の影響が小さく、振幅が大きくなると推測される。そのため、 0° の Roll や、 60° の Pitch は他の運動に比べて、換算流速 7 付近で振幅の最大値（極大値）をとる傾向がはっきりしないと考える。

また最大振幅は Roll、Pitch においてほぼ全ての角度において、換算流速 4 付近から急激に上昇し、換算流速 7 手前で極大値を取り、一度減少してから換算流速 8 付近また上昇するという結果が得られていた。Figure4-7 などを見るとその理由が考察できる。Figure4-7 では、まずポンツーン③の換算流速が 6 付近になった時、1 度目の極大値を迎え、その後、ポンツーン②の換算流速が 6 付近になった際に 2 度目の極大値を迎える。これはポンツーン毎に渦励起運動が起こり、ロックインに入ったポンツーンの振幅が浮体全体で支配的になることを示している。

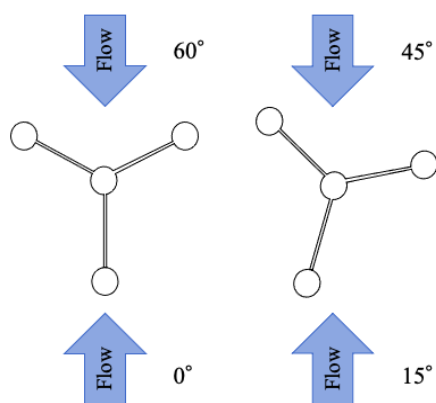


Figure 5-1 Difference in flow at different angles.

5.2. 周波数

4.2 章より、全ての角度条件において渦の周波数と同様の振動成分が確認できる。これにより、実験で観測した振動は渦励起運動によって引き起こされたものであると考えられる。だが、 60° の Pitch の条件のように、渦の成分があるが、固有周期成分に比べて小さくなるものもあり、角度条件によって渦励起運動の影響度は変わってくると考えられる。また Heave、Roll、Pitch 間で、他の 6 自由度振動のロックインに連成して起こる揺れも確認できた。この渦の周波数成分、固有周波数成分、他の 6 自由度振動のロックイン成分のどれが支配的であるか、傾向を知るために、Figure5-2~Figure5-6 のグラフを用いて考察を行った。このグラフは角度条件毎に、換算流速と振動周波数の関係をまとめたものとなる。各速度条件での Heave、Roll、Pitch の振動を FFT にかけて、その結果で最もスペクトルが大きい周波数成分の周波数をプロットしていった。例えば 0° 、 0.07 m/s の条件では、Figure4-11 より、Heave と Pitch では渦の周波数、Roll では固有周波数の周波数の成分のスペクトルが最大であるため、それぞれ Heave と Pitch では渦の周波数、Roll では固有周波数がプロットされる。横軸には換算流速を 2 軸で用いた。Roll と Pitch の周波数がほぼ同じなことから、横軸の第 1 軸を Roll と Pitch の換算流速(正確には Pitch の固有周波数を用いた換算流速)、第 2 軸を Heave の換算流速としている。縦軸は各速度条件での Heave、Roll、Pitch の振動を FFT にかけて、その結果で最もスペクトルが大きい周波数成分の周波数を、Heave、Roll、Pitch それぞれの固有周波数で割ったものと、各速度条件での Heave、Roll、Pitch の振動を FFT にかけて、その結果で最もスペクトルが大きい周波数成分の周波数をそのまま使用したものの 2 つがある。Figure5-2~Figure5-6 の(a)では、各速度条件での Heave、Roll、Pitch の振動を FFT にかけて、その結果で最もスペクトルが大きい周波数成分の周波数を、Heave、Roll、Pitch それぞれの固有周波数で割ったものが縦軸となっている。Figure5-2~Figure5-6 の(b)では各速度条件での Heave、Roll、Pitch の振動を FFT にかけて、その結果で最もスペクトルが大きい周波数成分の周波数をそのまま縦軸として使用したものである。このように各角度条件で縦軸の違うグラフを 2 つ示している。

0° の周波数解析の結果を Figure5-2 に示す。Heave、Roll、Pitch 全てにおいて、Roll、Pitch の換算流速が 5 付近まで周波数が換算流速に比例して大きくなっている。これは Strouhal 数を 0.2 とした時の(2)式の渦の周波数とほぼ一致する結果となる。Roll の結果の換算流速が小さい範囲に部分的に値が飛んでいるような場所がある。この部分では渦による振動成分が発生しているが、非常に小さく、固有周波数成分より小さい。Figure5-2 の(a)を見ると、Roll、Pitch の換算流速が 6 付近では、増加傾向がなくなり、Pitch の周波数成分を Pitch の固有周波数で割った成分が 1 に漸近しているのがわかる。これは Pitch 成分の揺れがロックイン現象に入ったことを表している。次に Heave の換算流速が 5~6 付近では、Heave の周波数成分を Heave の固有周波数で割った成分が 1 に漸近しているのがわかる。これは Heave

成分の揺れがロックイン現象に入ったことを表している。更には Figure5-2 の(b)に示すように Heave と Pitch の最もスペクトルが大きい周波数成分の周波数はほぼ一致していることがわかる。

Figure5-3 より 15° も 0° の結果とほぼ同様のことが言える。 0° との違いは Heave と Pitch だけでなく、Roll も含めた全てで連成が起こっている傾向があることである。Roll、Pitch の換算流速が 4 付近まで周波数が換算流速に比例して大きくなっている。Roll、Pitch の換算流速が 4~6 付近では、増加傾向がなくなり、Roll、Pitch の周波数成分を Pitch の固有周波数で割った成分が 1 に漸近しているのがわかる。これは Roll、Pitch 成分の揺れがロックイン現象に入ったことを表している。次に Heave の換算流速が 6 付近では、Heave の周波数成分を Heave の固有周波数で割った成分が 1 に漸近しているのがわかる。これは Heave 成分の揺れがロックイン現象に入ったことを表している。

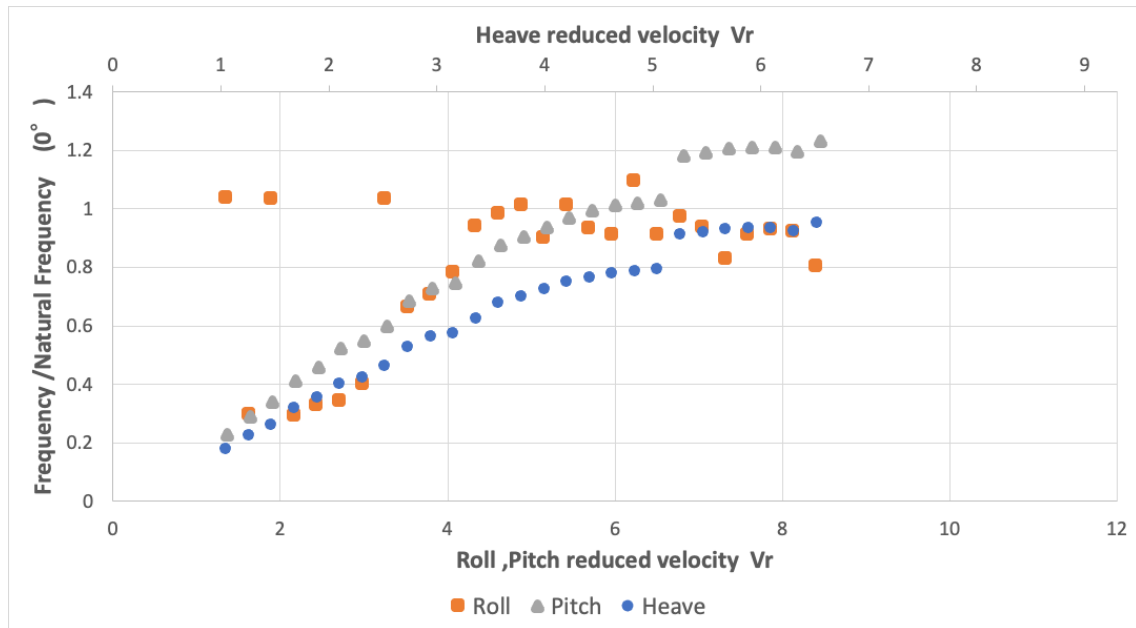
Figure5-4 と Figure5-5 より、 30° 、 45° も同様の傾向を示すことがわかる。

しかし Figure5-6 が示すように 60° は他の角度条件とやや異なる傾向を示す。Heave、Roll はそれぞれの換算流速が 4 より大きい範囲でロックインに入っている。しかし Pitch は換算流速に依らず、常に固有周波数の成分での振動が一番大きくなっている。また Figure4-3 の結果から 60° の角度条件での Pitch の振動は他の角度条件に比べ大きくないことがわかっていた。これらの結果から 60° の角度条件での Pitch の振動は渦影響が小さいことがわかる。

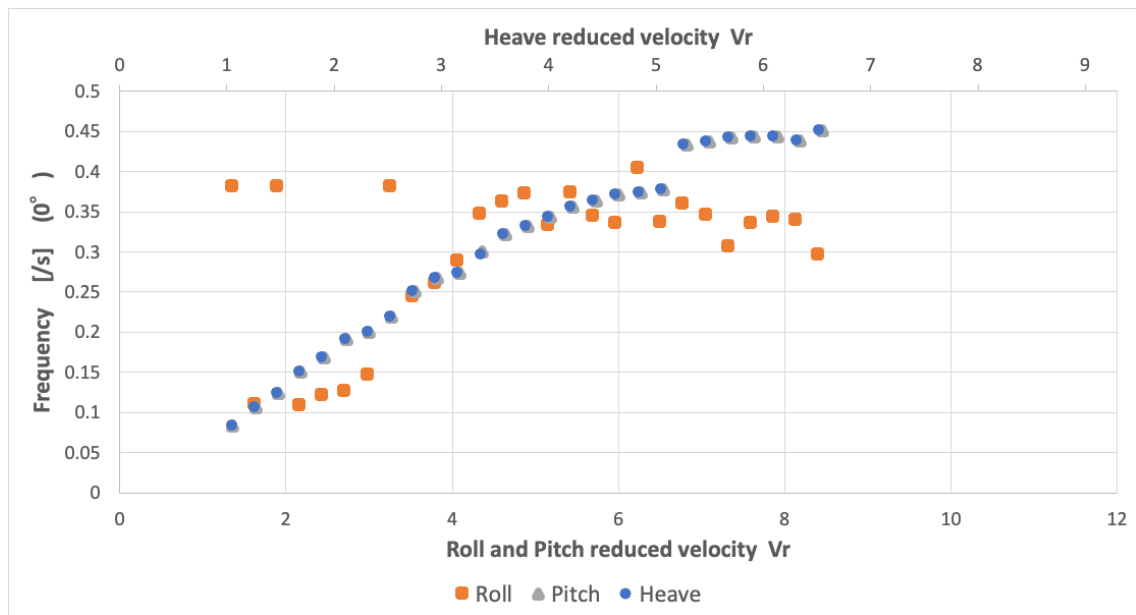
これら全ての結果から、振動の換算流速が小さい範囲では、周波数が渦の周期と一致していることがわかる。また Heave、Roll、Pitch の換算流速が 5~8 の範囲で、振動の周波数が固有周波数と同じになるロックインの現象が確認できる。このことから周波数解析からも、Heave、Roll、Pitch 全てにおいて渦励起運動が支配的であると考えられる。

ただ 60° の Pitch など、振幅でも見られた渦励起運動の影響が大きい条件では、固有周波数成分が常に支配的であることがある。しかし 4.2 章で示したように、固有周波数成分が最大であるが、渦励起運動の振動成分は存在する。

周波数解析からは Heave、Roll、Pitch の周波数がそれぞれロックインに入っている振動の周波数と連成するという現象が確認できた。この結果から垂直運動である Heave、Roll、Pitch は互いにロックインによって影響しあっていることがわかった。



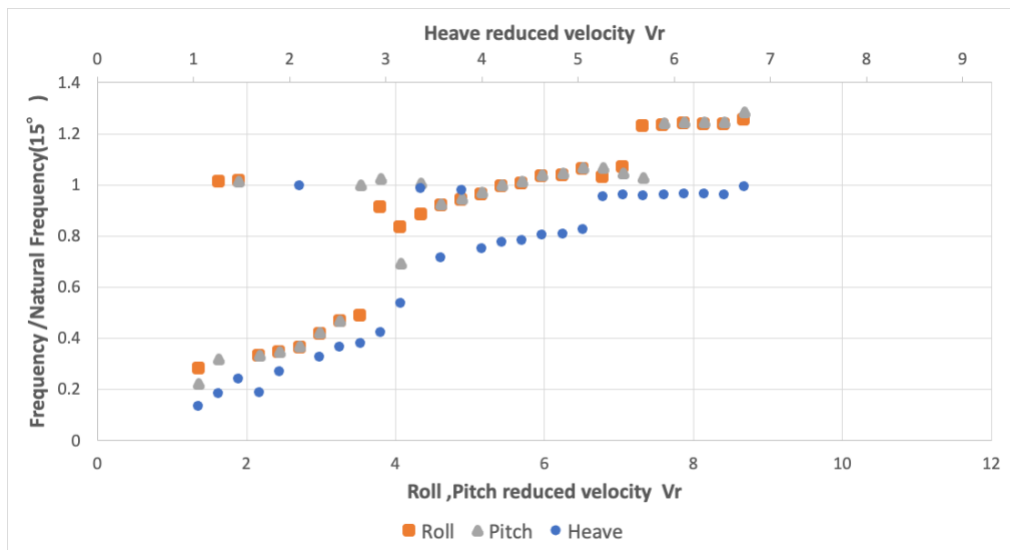
(a)



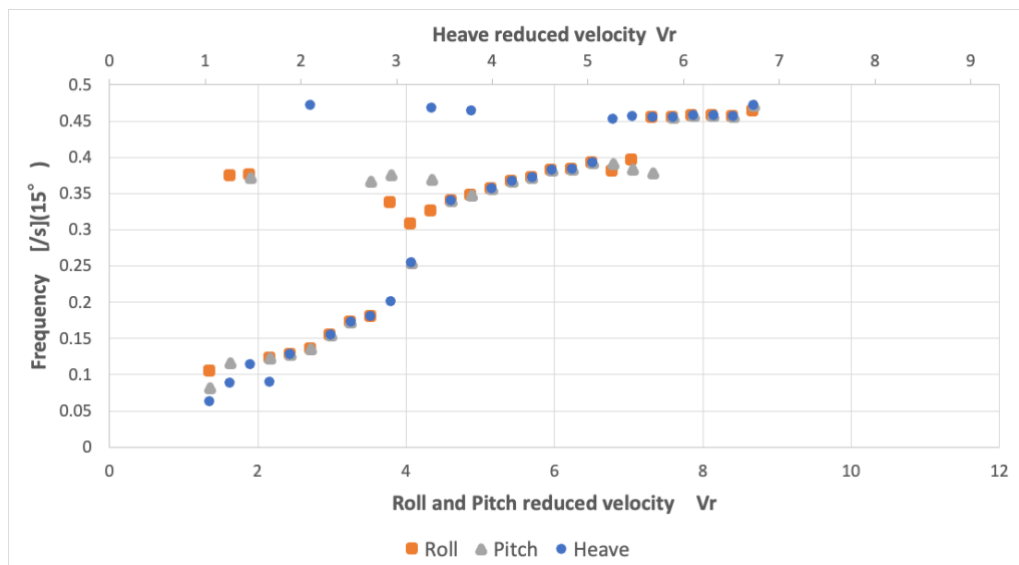
(b)

Figure 5-2 Relationship between reduced velocity and (a)frequency/natural frequency

(b) frequency on 0° .

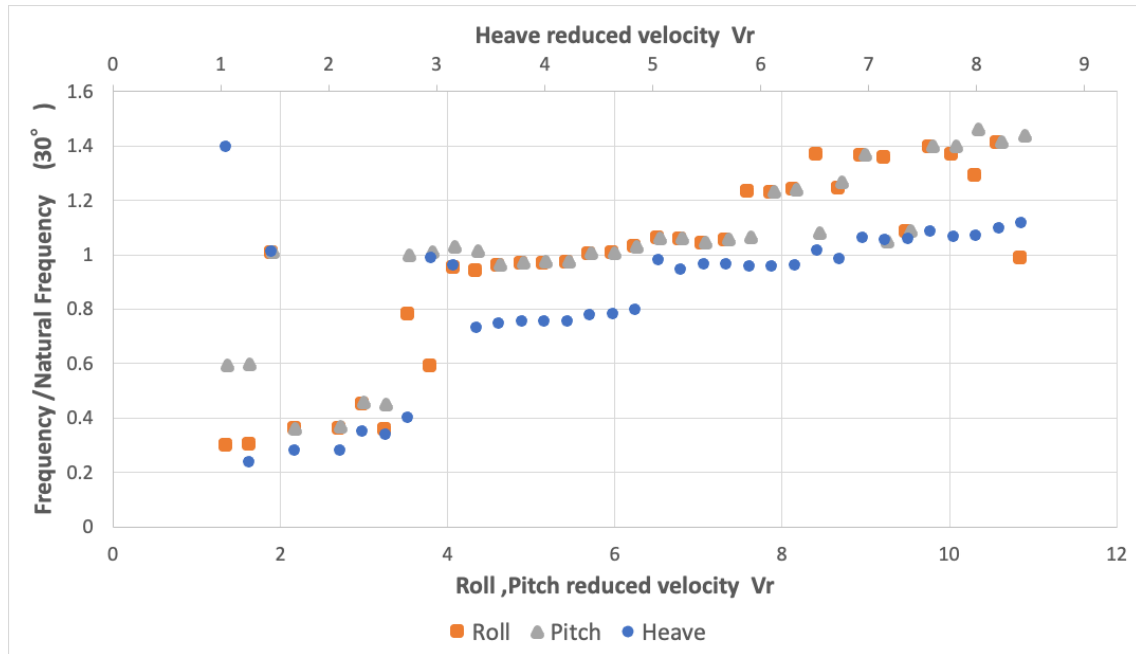


(a)

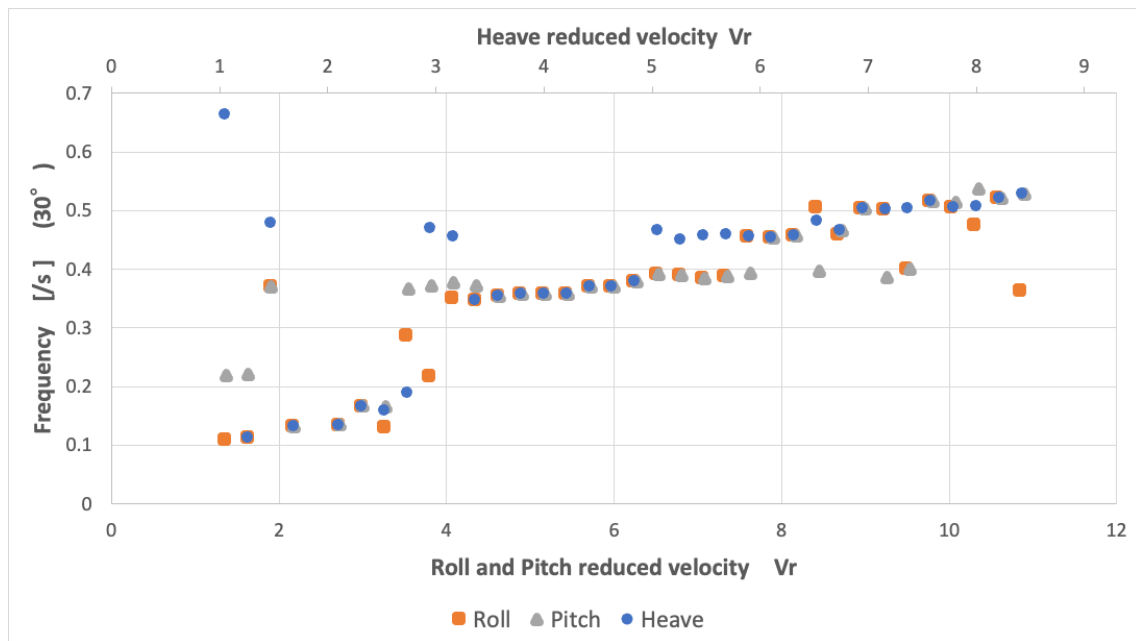


(b)

Figure 5-3 Relationship between reduced velocity and (a)frequency/natural frequency (b) frequency on 15° .

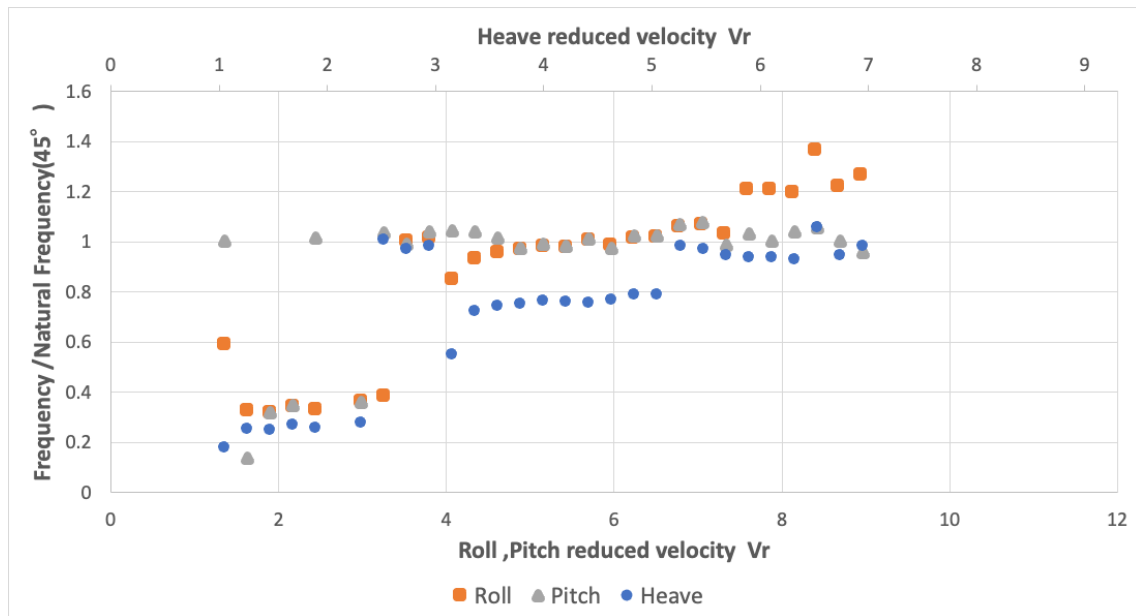


(a)

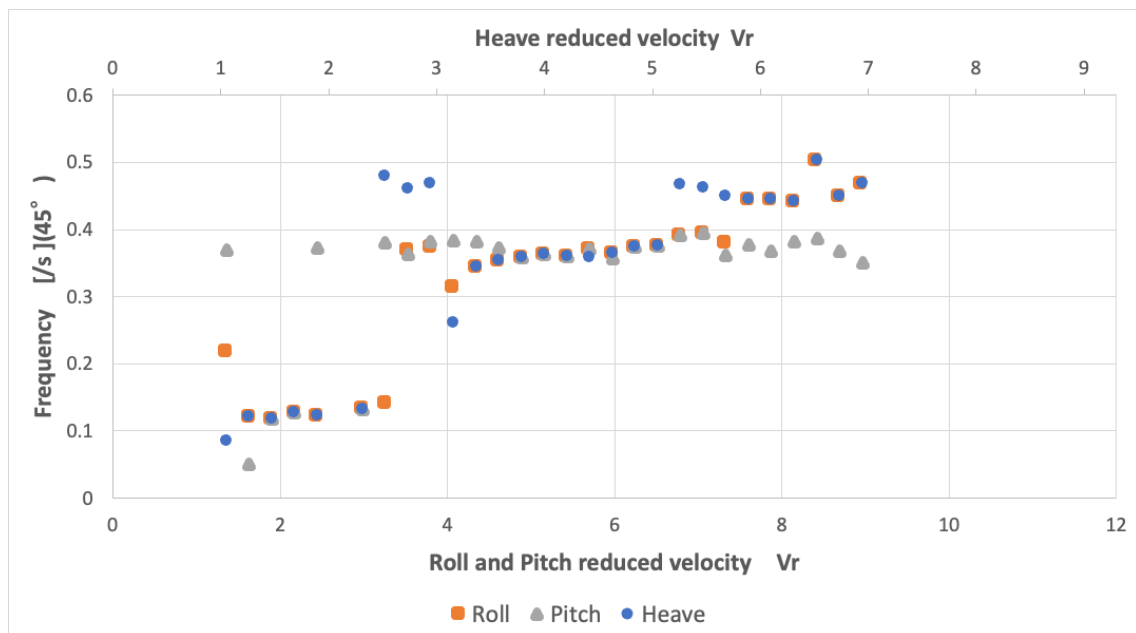


(b)

Figure 5-4 Relationship between reduced velocity and (a)frequency/natural frequency (b) frequency on 30° .

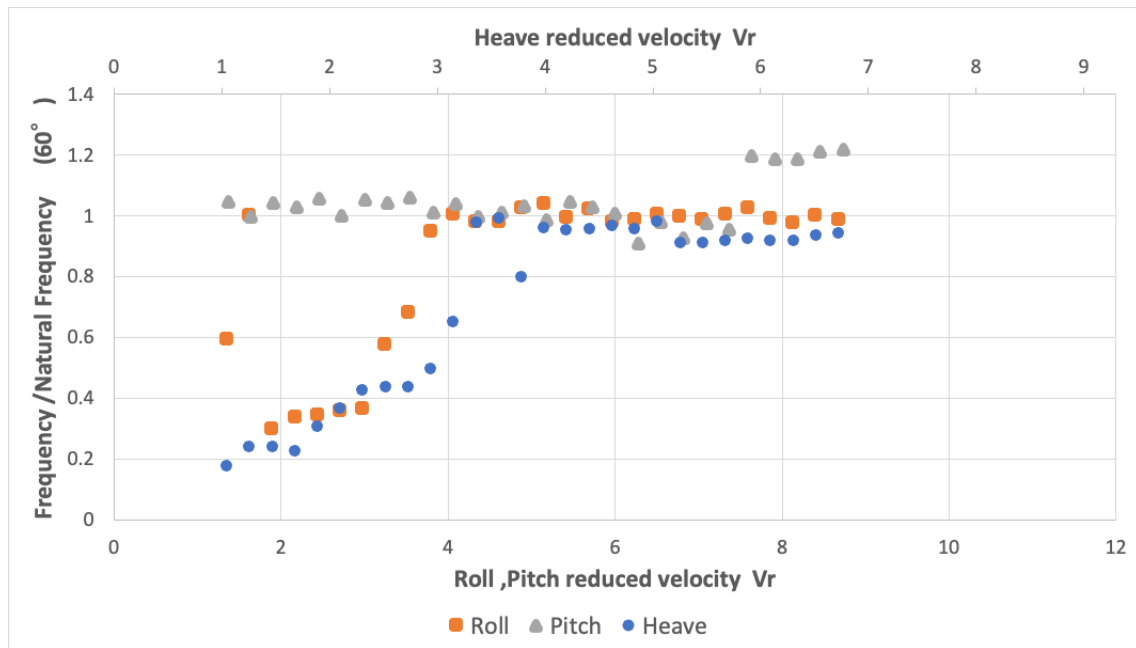


(a)

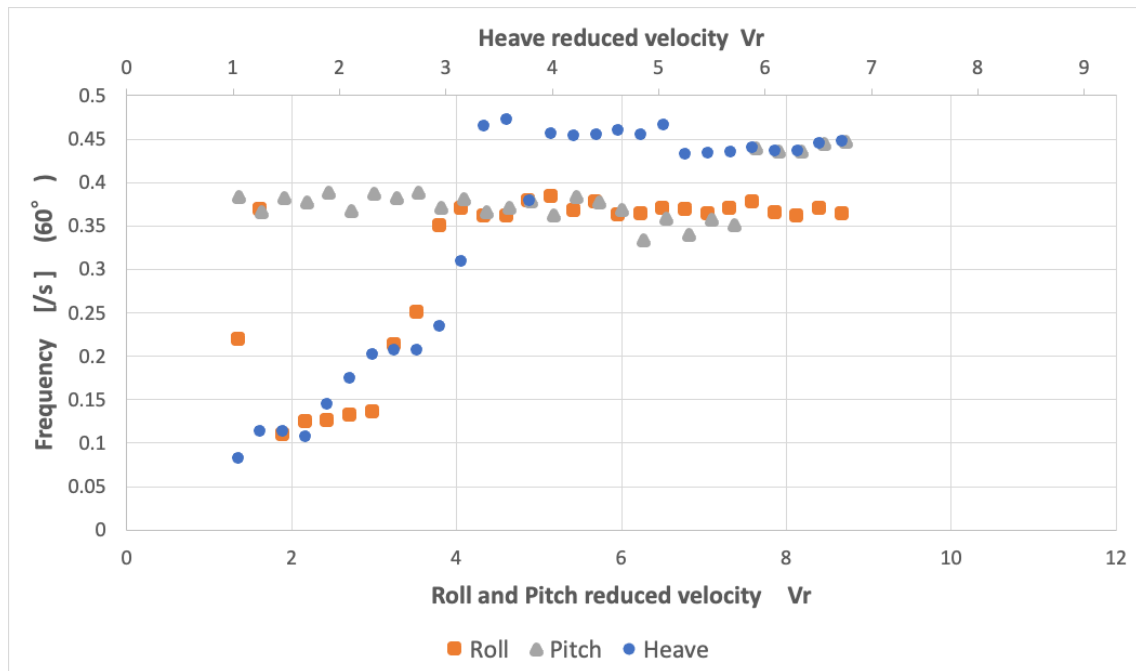


(b)

Figure 5-5 Relationship between reduced velocity and (a)frequency/natural frequency (b) frequency on 45° .



(a)



(b)

Figure 5-6 Relationship between reduced velocity and (a)frequency/natural frequency (b) frequency on 60° .

5.3. ポンツーンの後流の渦干渉と角度影響

Roll と Pitch に見られた角度による振幅の違いであるが、これはポンツーン後流にできる渦の干渉に違いがあると考察できる。 0° や 60° 、 15° や 45° は流れを逆から当てただけの対称系であり、違いができるとすればポンツーン後流の渦影響以外に考えられない。 0° では Figure4-5 の②と③のポンツーンに主に流れは当たる。 60° Figure4-5 の①と③のポンツーンに主に流れは当たる。そのポンツーンに当たった流れは Figure5-7 のように変化する。 0° では、ポンツーンに流入した流れがお互いに近づく方向に進行する。これにより、ポンツーンによってできた渦は互いに可干渉で、同期しやすくなる可能性がある。同期した結果、垂直方向の同じ向きに力が両方のポンツーン作用し、Pitch 運動が起こると考察できる。一方 60° では、ポンツーンに流入した流れがお互いに遠ざかる方向に進行する。これにより、ポンツーンによってできた渦が互いに可干渉でなく、同期しにくい。その結果垂直方向の力の位相がずれ、Roll 運動が起こると考察できる。この考察は T. Zhou [24]の研究などに見られる、ライザー管後流における渦干渉と振動現象の関連に関連している。現段階ではこの考察は仮説であり、検証のためには実験的あるいは数値的な手法により浮体周りの流れ構造の全体像の把握を行うことが不可欠である。この流れ構造の把握は今後の課題とする。

また Figure3-10 などに見られる、振動の大小も渦の干渉によるものではないかと考察できる。豊田ら [31]の研究によると、渦の干渉により、減衰力が 0 となる振幅領域がいくつか存在する場合がある。この影響により、時間により、振動が複数の振幅域で変化したのではないかと考えられる。

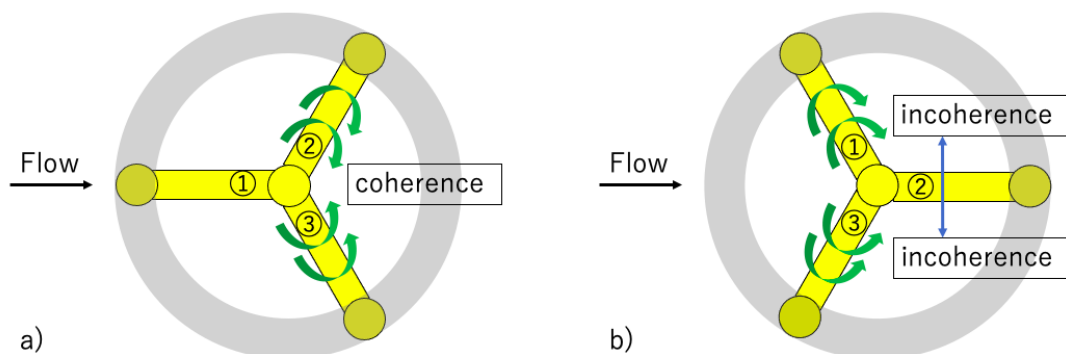


Figure 5-7 wake of the pontoon (a) 0° (b) 60° .

6. 浮体式洋上風車への影響

この章では実際にこの浮体に風車を取り付けた場合揺れにより、どのような影響が起きるのかを考察していく。

6.1. ナセルの加速度と傾斜

揺れの傾斜角度に関して Roll、Pitch の結果（Figure4-2、Figure4-3）から本実験範囲での Roll、Pitch の最大振幅は 7～8° となることがわかった。鈴木 [32]によると、浮体式洋上風力発電の傾きは最大傾斜を 5° 以下にする必要がある。本実験模型の最大振幅はこれを超えてしまっているため、設計上、振幅を小さくする工夫を施さなくてはならない。

またナセルの加速度についても検討を行う。ナセルの加速度の求め方は以下のようになっている。まず、ナセルの位置は模型スケールで浮体重心より、1.508m 上にあるものとし、センターカラムから垂直上の位置にあると仮定している。この 1.508m は実際の OPTIFLOW の重心値からナセル高さまでの距離を模型スケールに直したものである。ナセル位置を 3 次元(x, y, z)の空間固定座標で求めるため、6 自由度を用い、以下のように座標変換を行なった。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.508 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Surge \\ Sway \\ Heave \end{bmatrix} \quad (6)$$

Roll を $\theta[rad]$ 、Pitch を $\phi[rad]$ 、Yaw を $\psi[rad]$ としている。また $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$ は座標変換後のナセルの空間座標系での位置である。

また、得たれた座標にはノイズが含まれているため、そのまま加速度を求めても、正確に加速度を計算することができなかった。この問題を解決するために、一度時系列データを FFT（高速フーリエ変換）し、周波数領域で、1.6[1/s]以上の高い周波数をカットした。ローパスフィルターのボーダーを 1.6 以上とした理由としては、本実験での、各速度条件での渦の放出周波数と、各固有周期を見たところ 30° の 0.4m/s の速度条件に時に放出される 0.8[1/s]の渦周波数成分が最も大きいものであり、その 2 倍が 1.6[1/s]であったためである。ローパスフィルターをかけノイズ成分のなくなったデータを時系列データに戻し、加速度を求めた。

ナセルの加速度を Figure6-1 に表す。横軸は実験モデルの曳航速度、縦軸は最大の加速度となっている。加速度は相似則により、実機スケールと同じである。Figure6-1 によると、いくつかの角度、流速条件で最大加速度が $1.6 \frac{m}{s^2}$ 程度となることが想定できる。風車のナセル加速度の許容範囲は風車固有のものであり、風車の設計により決まる。D'andrea や

Sclavounos らによると一例として風車運用時の最大許容加速度は、 2.8 m/s^2 ($0.3g$) 程度とされている [33] [34, 35]。本実験の値はこの値を超えないが、風や波といった他の海象条件もあることから注意が必要であると考ええる。

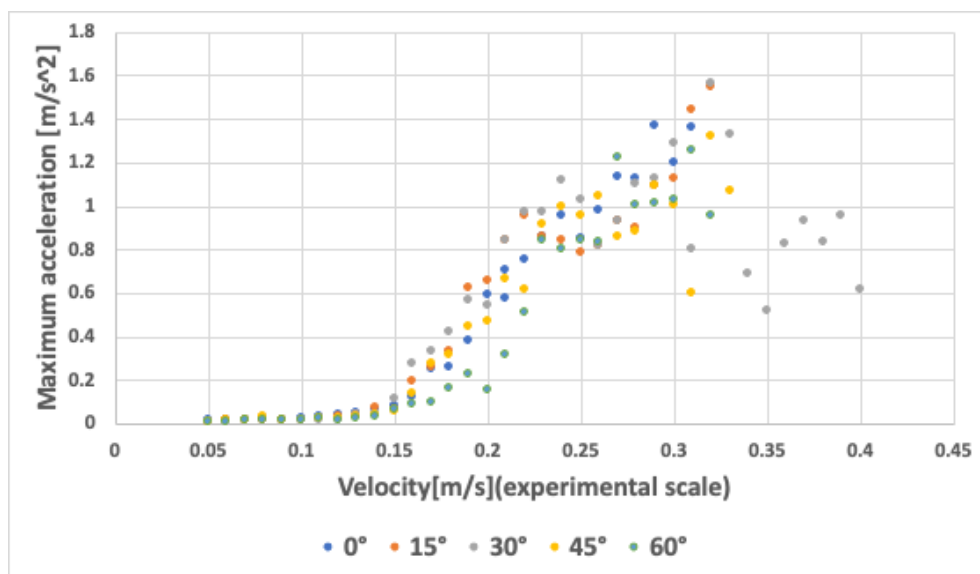


Figure 6-1 nacelle acceleration.

以上のことより、傾斜、ナセル加速度共に浮体式洋上風車が運用に支障きたす可能性がある揺れが観測されることが本実験により示された。

6.2. 実海域における本研究の適用性

2.2.1 章では、(3)式で表される換算流速 V_r が5～8 付近であり、円柱の固有振動数がカルマン渦の周波数に近い時は、円柱は流れと垂直方向に振動を生じることについて述べた。そのロックイン現象が浮体に与える影響についてが、今回の研究のテーマであるが、この章では実際の海域で、換算流速 V_r が5～8 付近になる場合があり得るのかを検証し、実海域での本研究の有用性について検討する。

条件としては「OPTIFLOW」と同様の浮体が、浮体式洋上風力発電の実証実験が行われた福島沖に存在した場合を考える。浮体式洋上風力発電の実証実験時、福島沖で観測された最大流速は 0.83 m/s である [36]。この流速と、「OPTIFLOW」の各 Heave、Roll、Pitch の周波数、ポンツーンの直径を物体直径の D とし、(3)式に代入すると、Heave、Roll、Pitch の換算流速 V_r は Table6-1 の「回頭なし」のようになる [7]。このように単純に流速のみを計算した場合では、福島沖では、換算流速 V_r が5～8 付近になることは考えづらい。しかし、換算流速 V_r が5～8 付近に近づく場合として、ポンツーンの直径が小さい場合、流速の大き

い海域である場合、「OPTIFLOW」のような一点係留による回頭運動がある場合が考えられる。

ポンツーンの直径は浮体の設計によるが、今後「OPTIFLOW」よりポンツーン直径が小さい浮体式洋上風車が実用される場合は十分に考えられる。

また、流速についても、今回福島沖で観測された最大流速の条件を用いているので、他の海域に浮体式洋上風車を設置した場合、この条件以上の流速を計測する可能性は十分に考えられる。

また換算流速 V_r が 5~8 付近に近づく場合として、「OPTIFLOW」のような一点係留による回頭運動がある場合が考えられる。1.4.2 章で「OPTIFLOW」が風により一点係留点を中心に、風向きに回転運動することについて述べた。これを回頭運動と呼ぶが、この回頭運動により、相対的に流速が増加することが考えられる。Figure6-2 のように海上では風向きと潮流の向きが異なる場合が考えられる。この場合風による回頭により、潮流の向きと逆向きに動くため、相対的に浮体式洋上風車に流入する流速は増大する。Table6-1 には「回頭なし」の場合と「回頭あり」の場合の Heave、Roll、Pitch の換算流速 V_r をそれぞれ示す。回頭速度は「OPTIFLOW」の実証実験でも用いた 90 度を 90 秒で回頭する条件を用いる [37]。また、回頭運動による流速は回転中心からの距離によって変化してしまうが、今回は簡易化のため、回転中心から遠いポンツーンの中心を回転中心からの距離としている。この条件を用いると、「回頭あり」での条件が Table6-1 の黄色のセルに示されるように、換算流速 V_r が 5 を超える領域に達することがわかる。

このよう理由から、今後の浮体式洋上風車の発展や新たな形状の開発に伴い、ポンツーンに対する流れの換算流速 V_r は 5 を超え、ロックイン現象が起こる可能性があることから、本研究は実際に起こり得る現象を扱った実用性のある研究だと考えられる。

Table 6-1 Difference in reduced velocity with and without turning motion.

	Without turning motion	With turning motion
Heave reduced velocity V_r	2.7	6.1
Roll reduced velocity V_r	3.0	7.0
Pitch reduced velocity V_r	3.0	6.9

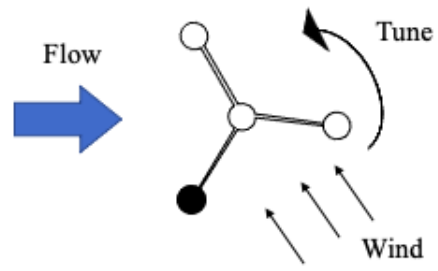


Figure6-2 Misalignment case of wind and flow directions.

7. 結論

本研究では、長いポンツーンを有したセミサブ浮体式洋上風車に対して、**Heave**、**Roll**、**Pitch** の各運動が励起されることが明らかとなった。また振幅の解析や周波数解析の結果、この運動はポンツーンからの渦によって励起されることがわかった。

特に振幅では、換算流速が 5～8 で振動が励起されることが、ポンツーンごとに流れの流入角度が異なる場合、各ポンツーンに対する換算流速が 5～6 の付近で振動が励起され、段階的に振幅が大きくなる流速域が確認された。

また、周波数領域では、振動の周波数と渦の放出周波数が等しいことがわかった。また、**Heave**、**Roll**、**Pitch** の各運動が連成することも確認された。この連成により、段階的なロッキングが発生した。

更には角度条件について、一見対称に思われる 0° と 60° の条件では、**Roll**、**Pitch** の振動傾向が逆に発現する結果を得た。これは、ポンツーン後流同士の干渉効果を考慮することで説明できると考えられる。

最後に実際の浮体式洋上風車においてナセルの加速度と、傾斜を指標に考えたところ、特に傾斜において、風車を運用するには危険な揺れを持つ可能性があることがわかった。また回頭などを考慮すると本研究で観測した、渦励起運動は実海域において起こり得る現象であることもわかった。

8. Appendix（実験による重心位置と慣性モーメントの測定）

3.2.2 章にあるように、重心位置と慣性モーメントは 3D ソフト、手計算、実験での計算の 3 種の方法を使い求めた。その中で実験による、重心位置と慣性モーメントを求めるやり方は誤差が大きく、うまくいかなかった。この章では後学のためにも、本研究の過程で行なった、重心位置と慣性モーメントを求める実験のフローについて記述する。

8.1. ブランコ実験

本ブランコ実験は、塩原の論文 [7] [38]を参考にしている。

8.1.1. 計測方法と理論

Figure8-1 のようなブランコ模型、慣性モーメント重心位置を求めたい模型、移動ウェイトを用意し、

G_0 : ブランコの重心位置

G_M : 模型の重心位置

G_W : ウェイトの重心位置

W_0 : ブランコの重量

W_M : 模型の重量

W_W : ウェイトの重量

とする。移動ウェイト W_W はブランコの重量 W_0 に対し、十分小さいものとする。これは移動ウェイトの移動により、全体の重心位置が大きく変わってしまわないようにするためである。また、ブランコの重量 W_0 は模型の重量 W_M に対し、大きすぎないようにする。これはブランコを振動させた際に模型の慣性モーメントを正確に取り出し、測定するためである。ブランコの重心位置 G_0 はでは、ブランコの真ん中のようにになっているが、実際はブランコの構造による。今回の実験ではブランコは Figure8-2 のように、ブランコを吊るす柱も金属製のものをを用いたので、重心位置は正確にはブランコの真ん中ではない。

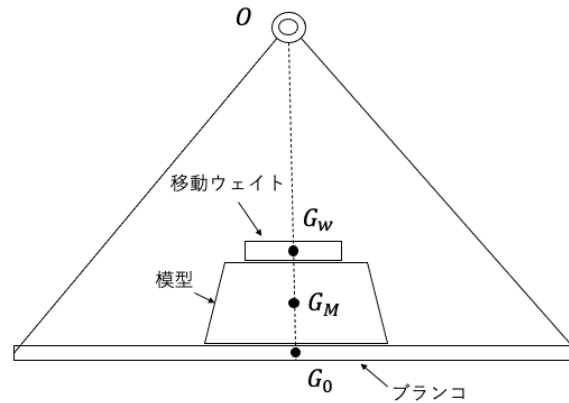


Figure 8-1 Swing model.



Figure 8-2 Swing model's picture.

(1) ステップ 1

こちらのステップはブランコの重心がわかっているのであれば必要はない。本実験では、ブランコの重心は設計からわかっていたが、実験的に求めてはいなかったのでステップ 1 を行なった。

移動ウェイトを Figure8-3 のようにブランコの中心から距離 d だけずらす。その時のブランコの傾きを θ とする。この θ は十分に小さいものとする。この時モーメントの釣り合いより、以下の式が成り立つ。

$$W_0 \cdot OG_0 \sin \theta = W_W d \cos \theta \quad (8-1)$$

W_0 、 W_W は重量を測定すれば確認でき、 d 、 θ は計測可能である。これにより、模型の重心位置が求まる。

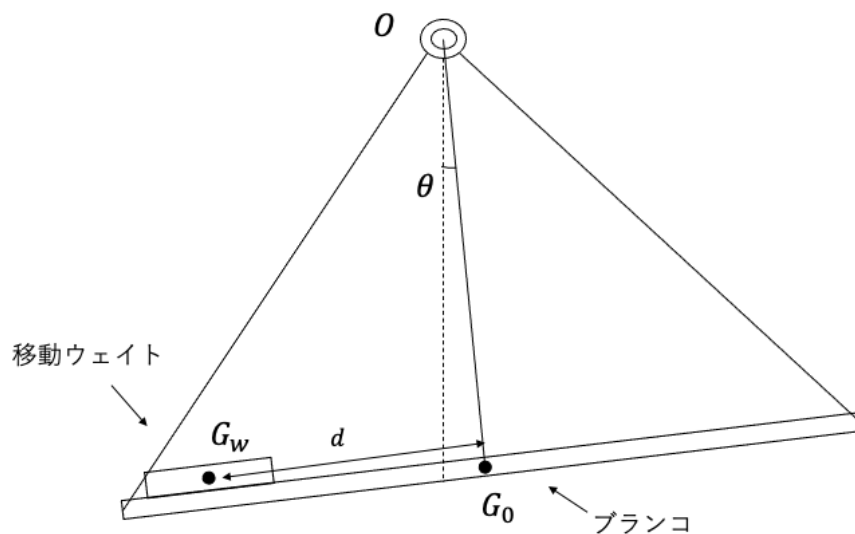


Figure 8-3 Measurement of Center of Gravity and Moment of Inertia(Step 1).

(2) ステップ 2

このステップ 2 において、模型の重心位置を求める。

今度は Figure8-4 のように模型を乗せた状態で、移動ウェイトをブランコを中心から距離 d だけずらし、ブランコと模型の合計の重心を G_{M0} とする。この時のブランコの傾きを θ' とする。この θ' は十分に小さいものとする。この時モーメントの釣り合いより、以下の式が成り立つ。

$$(W_0 + W_M) \cdot OG_{M0} \sin \theta' = W_W d \cos \theta' \quad (8-2)$$

これにより、 OG_{M0} を求めることができる。更に、 OG_{M0} は

$$OG_{M0} = \frac{W_0 \cdot OG_0 + W_M \cdot OG_M}{W_0 + W_M} \quad (8-3)$$

で表されるので、計測値と(8-2)、(8-3)式より模型の重心位置 OG_M を求めることができる。

この過程により、模型の重心を求めることができる。

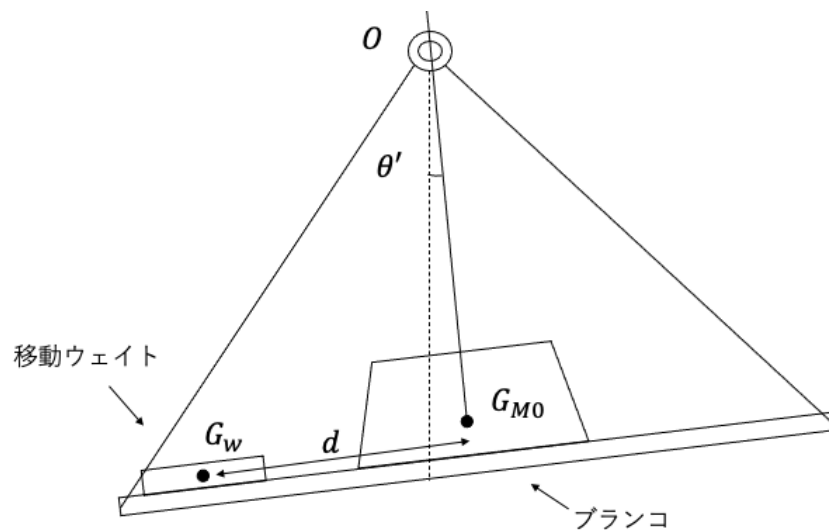


Figure 8-4 Measurement of Center of Gravity and Moment of Inertia. (Step 2)

(3) ステップ 3

このステップでは模型の慣性モーメントを求める前段階としてブランコ単体の回転中心周りの慣性モーメントを計測する。Figure8-5 のようにブランコ単体を揺らし、周期を測定する。

模型を載せない状態でのブランコの回転中心周りの慣性モーメントを I_0 とすると、ブランコ自体の周期 T_0 は回転の運動方程式

$$I_0 \ddot{\theta} - W_0 O G_0 \theta = 0 \quad (8-4)$$

を解いて、

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{W_0 O G_0}} \quad (8-5)$$

となり、 W_0 、 h_0 は計測可能、 T_b は実験により求めるので

$$I_0 = W_b O G_0 \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 \quad (8-6)$$

となり、ブランコ単体での回転中心周りの慣性モーメントを求めることができる。

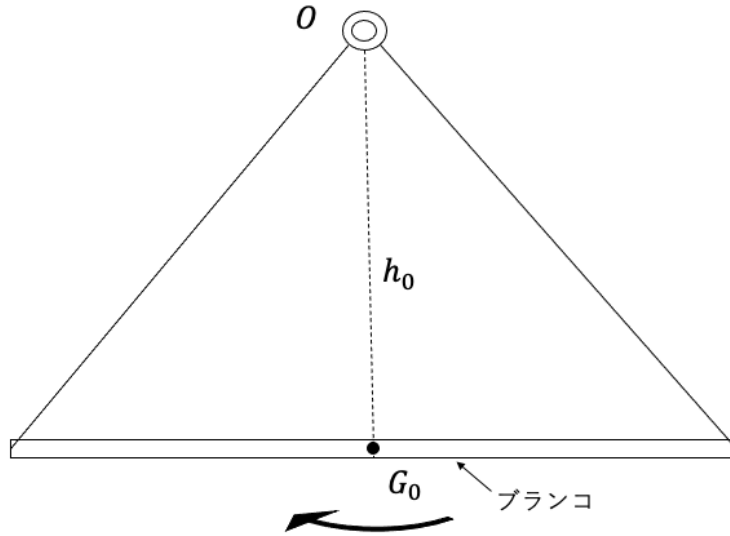


Figure 8-5 Measurement of Center of Gravity and Moment of Inertia. (Step 3)

(4) ステップ 4

このステップでは Figure8-6 のように模型を乗せたブランコを揺らし、周期を測定することで模型の慣性モーメントを求める。

模型の重心周りの慣性モーメントを I_M とすると、模型のブランコの回転中心回りの慣性モーメント I'_M は平衡軸の定理より、

$$I'_M = I_M + M_M OG_M^2 \quad (8-7)$$

ただし、 M_M は模型の質量とする。 OG_M はすでにステップ 2 で求めている。次に回転中心回りの模型とブランコ合計の慣性モーメント I_{M0} は、回転中心周りのブランコの慣性モーメント I_0 と回転中心周りの模型の慣性モーメント I'_M の合計で表されるので、(8-7)式を使い以下のように表せる。

$$I_{M0} = I_0 + I'_M = I_0 + I_M + M_M OG_M^2 \quad (8-8)$$

また模型を乗せたブランコを揺らした時の周期 T_{M0} は、回転の運動方程式

$$I_{M0} \ddot{\theta} - (W_0 + W_M) OG_{M0} \theta = 0 \quad (8-9)$$

を解き、

$$T_{M0} = 2\pi \sqrt{\frac{I_{M0}}{(W_0 + W_M) OG_{M0}}} \quad (8-10)$$

$$I_{M0} = (W_0 + W_M) OG_{M0} \left(\frac{T_{M0}}{2\pi} \right)^2 \quad (8-11)$$

このように I_{M0} はブランコの周期 T_{M0} と模型とブランコの重量、重心位置により求めることができる。

模型の慣性モーメント I_M は(8-7)、(8-8)、(8-11)式より

$$\begin{aligned} I_M &= I_{M0} - I_0 - M_M h_M^2 \\ &= (W_0 + W_M) O G_{M0} \left(\frac{T_{M0}}{2\pi} \right)^2 - W_b O G_0 \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 - M_M h_M^2 \end{aligned} \quad (8-12)$$

で計算できる。

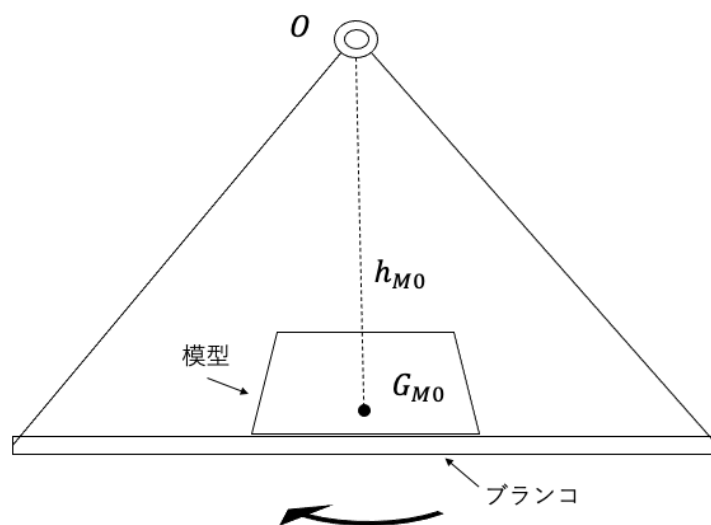


Figure 8-6 Measurement of Center of Gravity and Moment of Inertia. (Step 4)

8.1.2. 結果

(1) ステップ 1

本実験では、ブランコは Figure8-2 のようなモデルを用い、ブランコの傾斜 θ は加速度計を用いて測定した。ブランコは軽量化のため Figure8-7 のような細長いものとし、模型のセンターカラムを写真の円形の場所に乗せることで安定させる。質量 M_0 は $7.24kg$ である。

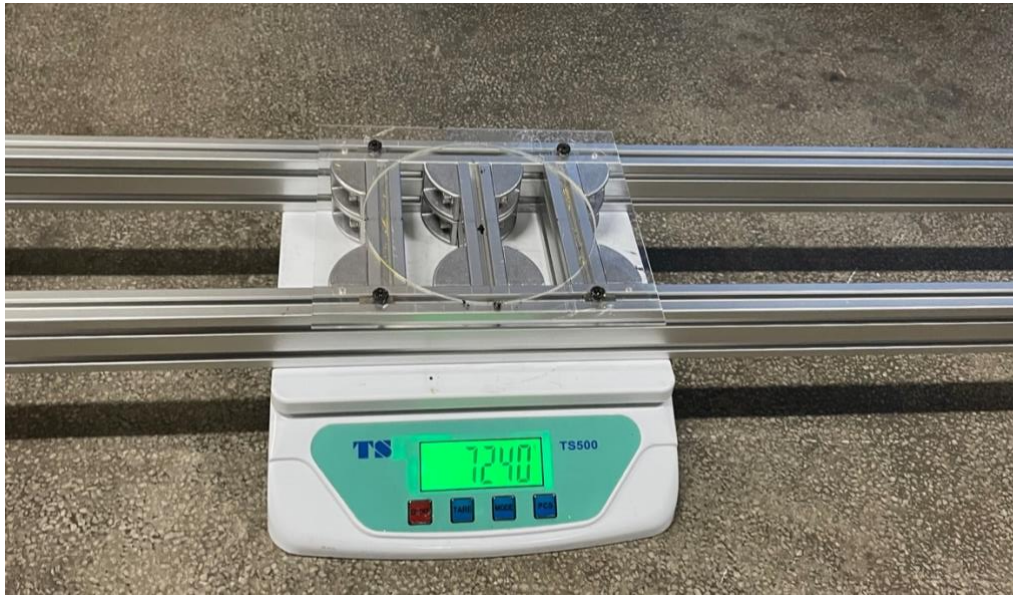


Figure 8-7 Swing model's picture.

ブランコの幅が狭かったため、移動ウェイトとブランコの中心から距離 d は $0.07m$ で固定とした。移動ウェイトの重量は $0.5kg$ 、 $1.0kg$ 、 $2.0kg$ のもので実験を行い、その正確性を確かめた。結果は以下の Table8-1 に示す。

Table 8-1 swing center of gravity

Moving weight mass(kg)	0.5	1.0	2.0
Inclination angle (deg)	0.26	0.49	0.87
$OG_0(m)$	1.05	1.14	1.27

このように結果にばらつきが見られた。この結果を実際に設計時点での重心と比べてみると、設計時は $OG_0 = 0.793m$ であるため、大きく異なることがわかる。確認のため、原始的ではあるが、Figure8-8 のように尖った構造物の上にブランコを置き、バランスを保てる点を探したところ、設計時の $OG_0 = 0.793m$ が正確な値であることがわかった。

このように実験結果と正しい値に差が出た理由としては、測定された角度の精度が考えられる。本実験では、角度の計測に加速度計を使用したけど、加速度計だと、今回のような非常に小さい角度が結果として出る場合は正しい計測ができない場合がある。これにより、角度の正しい結果が出てこなかったため、結果にずれが生じていると考えられる。細かい角度まで測ることのできる機器がすぐに用意できず、この実験に時間と予算をかけるのは本質ではないため、ブランコの傾斜により重心を求める実験は中止となった。



Figure 8-8 swing center of gravity.

(2) ステップ 2

ステップ 1 と同様の理由で測定が正確に行えなかったため、中断し、吊るし上げ実験を行った。こちらの実験の概要と結果は 8.2 章に後述する。

(3) ステップ 3+ステップ 4

ブランコの重心と模型の重心は、設計値のものをを用い、ブランコを揺らし周期を測定する実験を行なった。ブランコの重心と模型の重心・重量が既知であれば、模型の慣性モーメントを求めるためにはブランコを揺らした時の周期が分かれば良い。本実験ではブランコの周期測定として、ブランコが 30 回振動する時間を 3 回測定し、その平均値をとることで、測定の誤差を少なくした。結果は以下の Table8-2 に示す。Table8-2 には、ブランコだけの周期、慣性モーメント、模型を乗せた時のブランコの周期、模型重心まわりの慣性モーメントを示している。慣性モーメントは x 軸回りのものと y 軸周りのものを両方求めた。この結果は、設計時に 3D ソフトで計算した、 $I_{xx}=I_{yy}=7.43 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ と大きく異なる。

実験値が設計値と異なる理由としては、ブランコの強度不足から、ブランコを揺らす際、ブランコの柱が振動してしまっていること、ブランコが細く模型を乗せるスペースが小さいため、ブランコの揺れとは別に模型が、ブランコ上で振動してしまうことなどが挙げられる。

Table 8-2 swing experiment.

Period of swing only (s)	2.03
Moment of inertia of swing ($kg \cdot m^2$)	5.89
Period of swing and experimental model in Roll (s)	2.16
Moment of inertia of model $I_{xx}(kg \cdot m^2)$	9.32
Period of swing and experimental model in Pitch (s)	2.18
Moment of inertia of model $I_{yy}(kg \cdot m^2)$	9.90

このような注意点から、次回同様の実験を行う方には、

- 傾斜を正確に計測できるものを用意しておくこと。
- ブランコ上で模型をしっかりと固定できるようなブランコの設計とすること

を薦める。しかしブランコ上で模型をしっかりと固定できるようなブランコの設計を行うと、ブランコの重量が重くなり、結果に影響が出てしまう場合がある。このブランコの重量と模型の重量のバランスが結果に与える影響も、十分に検証してからブランコは設計しなくてはならない。

8.2. 吊るし上げ実験

模型の重心と慣性モーメントを求めるためのブランコ実験がうまくいかなかったため、模型を吊るし上げ、その重量を測ることで重心を求める方法を用いた。

8.2.1. 計測方法と理論

Figure8-9 のように、模型を一点で吊し上げる。模型が浮かすことができたなら、重量計と一点のみを接地させる。吊し上げ点から模型の重心位置の水平距離を l 、吊し上げ点から重量計との接地点までの水平距離を L とする。模型の重量を W_M 、重量計が示す重量を W_W とすると、吊し上げ点中心のモーメントの釣り合いより、

$$W_M \cdot l = W_W \cdot L \quad (8-13)$$

となり、吊し上げ点から模型の重心位置の水平距離 l を求めることで模型の重心位置を測定する。

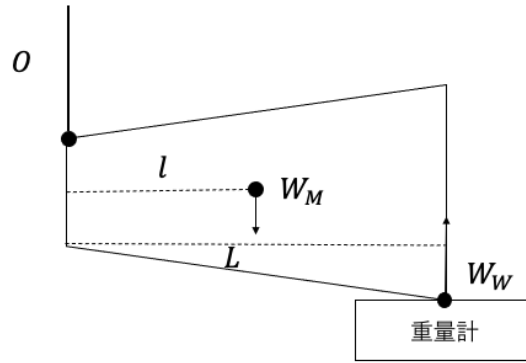


Figure 8-9 Measurement of Center of Gravity.

続いて、慣性モーメントの測定であるが、Figure8-10 のように模型を吊るし、揺らすことでその周期 T_M を求めていく方法をとる。回転中心を O 、模型の重心位置を G_M とする。回転中心周りの慣性モーメント I'_M は回転の方程式

$$I'_M \ddot{\theta} - W_M O G_M \theta = 0 \quad (8-14)$$

を解いて、

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{I'_M}{W_M O G_M}} \quad (8-15)$$

$$I'_M = W_M O G_M \left(\frac{T_M}{2\pi} \right)^2 \quad (8-16)$$

となる。また平行軸の定理より、模型の重心回り慣性モーメント I_M は

$$\begin{aligned} I'_M &= I_M + M_M O G_M^2 \\ I_M &= I'_M - M_M O G_M^2 \end{aligned} \quad (8-17)$$

と求めることができる。

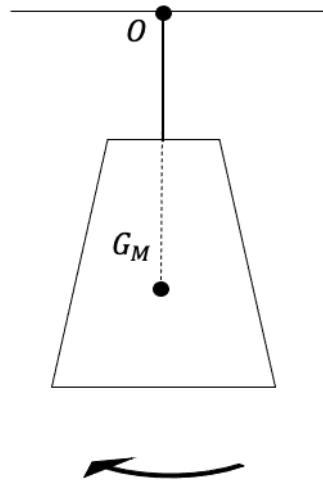


Figure 8-10 Measurement of Moment of Inertia.

8.2.2. 結果

本実験では、[Figure8-11](#) 吊し上げ点から重量計との接地点までの水平距離を $L = 0.314m$ とした。重量計 [Figure8-12](#) のようになり、 $W_W = 10.87 \times 9.81 \text{ kg} \cdot m/s^2$ となった。この結果よって重心位置は $KG=0.310m$ となり、3D ソフトでの計算時と近い結果となった。



Figure 8-11 Experiment of measurement of Center of Gravity.



Figure 8-12 Experiment of measurement of Center of Gravity(2).

慣性モーメントの計測は Figure8-13 のように模型にフックボルトをつけ、吊るしあげた。このフックボルトとアルミパイプとの接地面を中心に模型を振動させる。この実験により求められた重心周りの慣性モーメントは Table8-3 のようになる。ブランコ実験より精度は良く、3D ソフトでの設計と大きな違いは見られなかった。

しかし、この方法はフックボルトとアルミパイプの摩擦や、振動の方向が綺麗に Roll、Pitch の方向でないことなどの問題点があり、正確な値であるとは言えない。



Figure 8-13 Experiment of measurement of Moment of Inertia.

Table 8-3 Experimental result of Moment of Inertia.

$I_{xx} (kg \cdot m^2)$	7.420
$I_{yy} (kg \cdot m^2)$	7.150

謝辞

本論文の執筆にあたり、大変多くの方々にお世話になりました。

指導教員の平林紳一郎准教授には最後まで親身に、アドバイスやサポートいただきました。研究室ミーティングやそれ以外の場面でも、研究内容についてのアドバイスや必要な基礎知識をわかるまでご説明いただいたおかげで、研究を前に進めることができました。また PBL の課外活動や、昭島での実験、船舶海洋工学会のポスター発表など、多くの経験を積ませていただきました。平林准教授のサポートがあったからこそ研究活動や論文執筆に打ち込むことができました。修士の 2 年間の間でしたが、平林研究室でよかったと心より感じております。本当にありがとうございました。

また共に実験をしてくださった

I would like to thank Dr. Rodolfo Gonçalves. You have helped me with experiments, assisted me, and advised me on my research. Thank you very much for your help with the conditions and design of the experiment. You were friendly and chatted with me during the experiment, which made the experiment enjoyable.

本郷の船型試験水槽で実験を行うにあたり技術職員の加藤孝義様には大変お世話になりました。急な日程調整や、ブランコ実験の要望に応えてくださり、心より感謝申し上げます。加藤さんの協力がなければ、曳航実験もブランコ実験も成功していませんでした。この場を借りて御礼申し上げます。

OSPL の合同ミーティングでお世話になった、鈴木英之教授、宝谷英貴助教授、芳村康男名誉教授にもこの場を借りて御礼申し上げます。的確なアドバイスをくださり誠にありがとうございます。様々な学問分野を横断して幅広い知識をお持ちの皆様にはいつも尊敬の念を抱いておりました。本当にありがとうございました。

NEDO の高岡繭子様にも大変お世話になりました。研究テーマを決めるきっかけとなった昭島での実験では、連日蒸し暑い中でしたが、大学院に入ったばかりで何もわからない私をサポートしてくださりありがとうございます。高岡さんのおかげで実験が楽しいものになりました。

研究室の学生の皆様にも大変お世話になりました。

先輩の大久保さん、松下さん、山田さん、同期の何君、後輩の羽田君、二宮君、横畑君、また鈴木研究室の南雲君、樋口君には大変お世話になりました。おかげで楽しい研究室生活を送ることができました。

引用文献

- [1] JCCCA, “IPCC 第 6 次評価報告書,” [オンライン]. Available: <https://www.jccca.org/global-warming/trend-world/ipcc6-wg1>.
- [2] 国土交通省 気象庁, “世界の年平均気温,” 気象庁, 28 3 2022. [オンライン]. Available: https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html. [アクセス日: 3 9 2022].
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁, “エネルギー需要概要,” [オンライン]. Available: <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/2-2-1.html>. [アクセス日: 4 9 2022].
- [4] SOLAR JOURNAL, BloombergNEF, 29 7 2019. [オンライン]. Available: <https://solarjournal.jp/sj-market/29720/>. [アクセス日: 5 9 2022].
- [5] Energy Democracy, “脱炭素化に向けて続く世界の自然エネルギー市場の成長 – 2021 年も過去最大,” 25 2 2022. [オンライン]. Available: <https://www.energy-democracy.jp/3748>. [アクセス日: 5 9 2022].
- [6] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “浮体式洋上風力発電技術ガイドブック,” 3 2018. [オンライン]. Available: <https://www.nedo.go.jp/content/100891410.pdf>. [アクセス日: 12 1 2023].
- [7] 塩原 大樹, “ワイヤーでタワーを支持した一点係留型浮体式洋上風車の応答特性に関する研究,” 2020.
- [8] 石原 孟, “着床式洋上風力発電技術の現状と課題,” Journal of JWEA, 2010.
- [9] 株式会社南条製作所, “洋上風力発電のメリット・デメリットとは? 陸上風力発電との違いを詳しく解説,” 株式会社南条製作所, 8 9 2022. [オンライン]. Available: <https://www.nanjyo.co.jp/pickup/blog-offshore-wind-power-demerit/>. [アクセス日: 12 1 2023].
- [10] 株式会社グローバル, “次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 (OPTIFLOW),” 株式会社グローバル, [オンライン]. Available: <https://global.co.jp/works/optiflow/>. [アクセス日: 12 1 2023].
- [11] 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,” 2018.
- [12] 日本機械学会, “流体力学,” 著: 流体力学(JSME テキストシリーズ), p. 119.
- [13] 中村 晶, “円柱状構造物の流体励起振動,” [オンライン]. Available: http://www.inss.co.jp/wp-content/uploads/2017/03/2000_7J201_215.pdf. [アクセス日: 13 1 2023].
- [14] R. v. Dijk, “Model Test Experience on Vortex-Induced Vibrations of Truss Spars,” 2003.
- [15] M. Irani, “Improved Strake Design for Vortex Induced Motions of Spar Platforms,” 2005.
- [16] D. Roddier, “Influence of the Reynolds Number on Spar Vortex Induced Motions (VIM): Multiple Scale Model Test Comparisons,” 2009.
- [17] R. T. Goncalves, “Experimental Comparisons to Assure the Similarity Between VIM (Vortex-Induced Motion) and VIV (Vortex-Induced Vibration) Phenomena,” 2017.
- [18] 中 晶, “円柱状構造物の流体励起振動,” 原子力安全システム研究所 技術システム研究所.

- [19] 橋. 穰, “渦励起運動に対する浮体形状およびカラム配置の影響,” *日本船舶海洋工学会論文集* 第22号, p. 76, 12 2015.
- [20] T. Fujiwara, “VIM Time-domain Simulation on a Semi-submersible Floater Using Wake Oscillator Model,” 2017.
- [21] Rodolfo T. Gonçalves, “Experimental Flow-Induced Motions of a FOWT Semi- Submersible Type (OC4 Phase II Floater),” *Transactions of the ASME*, 2021.
- [22] R. T. Gonçalves, “FIM - Flow-Induced Motion of Three-Column Platforms,” 2020.
- [23] S.-K. Lee, “CFD Study of Deep Draft SemiSubmersible VIM,” 2014.
- [24] 李 智淵, “セミサブ型浮体の VIM におけるポンツーン影響に関する数値的研究,” 2021.
- [25] M. Liu, “Experimental study on vortex-induced motions of a semi-submersible with square columns and pontoons at different draft conditions and current incidences,” 2016.
- [26] M. Liu, “Experimental and numerical studies of the pontoon effect on vortex-induced motions of deep-draft semi-submersibles,” 2017.
- [27] M. Liu, “Numerical Analysis of Pontoon Effect on Flow-Induced Forces of the Deep Draft Semisubmersible in a Cross-Flow,” 2015.
- [28] 東京大学工学部船舶工業科船型試験水槽, “東大水槽 40 周年資料,” 11 1977. [オンライン]. Available: <https://zousen-shiryokan.jasnaoe.or.jp/wp/wp-content/uploads/funeisan/01/0103T03-01.pdf>. [アクセス日: 1 2023].
- [29] Robert McNeel & Associates, “Rhino7,” Robert McNeel & Associates, [オンライン]. Available: <https://www.rhino3d.com/jp/>. [アクセス日: 14 1 2023].
- [30] 林昌奎, “傾斜を有する水中線状構造物の VIV 応答,” *日本船舶海洋工学会論文集*, 第 9, pp. 97-105, 6 2009.
- [31] 豊. 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,” 2020.
- [32] 鈴木 英之, “浮体式洋上風力発電,” *日本マリンエンジニアリング学会誌*, 第 44, 第 1, pp. 51-57, 2009.
- [33] J. J. M. V. D' andrea, “Study of the Motions and Nacelle Accelerations of the Windcrete Floating Offshore Wind Turbine According to the IEC 64100-3 Procedure,” *Escola Tècnica Superior d' Enginyeria Industrial de Barcelona*, 2022.
- [34] P. Sclavounos, “Floating Offshore Wind Turbines: Responses in a Seastate Pareto Optimal Designs and Economic Assessment,” *Massachusetts Institute of Technology*, 2007.
- [35] R. T. Gonçalves, “FIM - Flow-Induced Motion of Three-Column Platforms,” *International Journal of Offshore and Polar Engineering* (ISSN 1053-5381).
- [36] 石原孟, “福島沖における通常流況と極値流速の予測に関する研究,” 2016.
- [37] J-GLOBAL, “一点係留された新形式浮体式洋上風車' Optiflow' の風追従性に関する研究,” J-GLOBAL, 2020. [オンライン]. Available: https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=202002216006065138. [アクセス日: 14 1 2023].
- [38] 社団法人日本造船学会海洋工学委員会性能部会, 実践 浮体の流体力学後編一実験と解析, 成山堂書店, 2003.

- [39] 浮体式洋上風力発電推進懇談会, “日本の浮体式洋上風力発電に対する期待と展望,” 浮体式洋上風力発電推進懇談会, 9 2021. [オンライン]. Available: https://www.toda.co.jp/assets/pdf/fowvs_j.pdf. [アクセス日: 1 2023].
- [40] 新エネルギー財団 永尾 徹, “新エネルギー財団 永尾 徹,” 新エネルギー財団, [オンライン]. Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwea/39/2/39_230/_pdf. [アクセス日: 12 1 2023].
- [41] T. Zhou, “n the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes,” *Journal of Fluids and Structures*, 第 卷 27 , pp. 903-917 , 2011.