

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

平成 29 年度

修士論文

ワイヤーでタワーを支持した  
軽量型浮体式洋上風車の弾性応答特性  
に関する研究

2018 年 1 月 26 日提出

指導教員

鈴木英之 教授  
平林紳一郎 准教授

47-156786 江雄

# 目次

1	序論	9
1.1	地球温暖化問題とエネルギー問題	9
1.2	再生可能エネルギーにおける風力発電	11
1.2.1	風力発電が世界における動向	11
1.2.2	日本の地域特徴と洋上風力発電	12
1.3	洋上風力に関する既存研究	14
1.3.1	洋上風力発電のメリット・デメリット	14
1.3.2	洋上風車の種類	15
1.4	風力発電のシステム価格、発電コスト及びコスト構造	16
1.4.1	陸上と洋上風力発電のシステム価格	16
1.4.2	世界における風力発電コスト	17
1.4.3	陸上と洋上風力発電のコスト構造	17
1.5	SCD-Nezzy のコンセプト	18
2	研究目的・研究概要	20
2.1	既存課題	20
2.2	研究目的・ゴール	21
2.3	研究手法の概要	21
3	一般化モデルの設計及び静的計算	22
3.1	一般化モデルの設計	22
3.2	静的計算	24
3.2.1	目的	24
3.2.2	解析モデル	24
3.2.3	計算過程	25
4	NK-UTWind の機能追加	30
4.1	NK-UTWind の概要	30
4.2	ワイヤーパート	32
4.2.1	ワイヤーから浮体への力境界条件の受け渡し	33
4.2.2	浮体からワイヤーへの変位境界条件の受け渡し	36
5	水槽実験	37
5.1	実験目的	37
5.2	実験模型	37
5.2.1	ワイヤーの取り扱い方	37
5.2.2	1/80 の弾性相似模型	41
5.3	実験施設	43

5.3.1	実験場所.....	43
5.3.2	実験の座標システム .....	44
5.4	計測項目 .....	45
5.5	実験条件.....	46
5.5.1	過渡水波.....	46
5.5.2	不規則波 (JONSWAP) .....	47
5.5.3	規則波 .....	48
6	実験データの解析及び NK-UTWind を用いた考察 .....	50
6.1	自由動揺試験.....	50
6.2	動揺の周波数領域応答 .....	52
6.2.1	過渡水波と不規則波実験結果.....	52
6.2.2	過渡水波、規則波実験結果と WAMIT との比較 .....	58
6.2.3	過渡水波、規則波実験結果と NK-UTWind との比較 .....	59
6.3	ワイヤーの張力の周波数領域応答 .....	61
6.3.1	過渡水波と規則波実験結果 .....	61
6.3.2	NK-UTWind と規則波実験結果の比較.....	63
6.3.3	ワイヤーの張力応答に対して NK-UTWind を用いた考察 .....	64
6.3.4	タワーとポンツーンの弾性がワイヤーの張力に与える影響 .....	69
6.4	タワー根元のひずみの周波数応答.....	71
6.4.1	過渡水波と規則波実験結果 .....	71
6.4.2	NK-UTWind による検証.....	73
6.4.3	ワイヤーの効果に関する考察 .....	73
6.5	ポンツーンの根元と中間部のひずみの周波数応答 .....	75
6.5.1	過渡水波と規則波実験結果 .....	75
6.5.2	NK-UTWind による検証.....	77
7	斜めのタワーを有するモデルの特性 .....	80
7.1	概要 .....	80
7.2	斜めのタワーを有するモデルの設計 .....	80
7.2.1	ケース 1 .....	80
7.2.2	ケース 2 .....	83
7.3	動揺の周波数応答 .....	85
7.4	ワイヤーの張力の周波数応答.....	91
7.4.1	3つのケースの規則波中ワイヤーの張力の周波数応答 .....	91
7.4.2	タワーとポンツーンの弾性がワイヤーの張力に与える影響 .....	95
7.5	タワー根元のひずみに関する考察.....	98
7.6	ポンツーン根元と中間部のひずみに関する考察.....	100

7.7	モデル評価 .....	100
8	結論 .....	101
8.1	研究成果.....	101
8.2	今後の研究課題.....	102
9	引用 .....	103



## 図表一覧

Figure 1-1 Year-to-Year Change of Global Carbon Dioxide [1] .....	9
Figure 1-2 Trend of the Global Energy Consumption [2] .....	10
Figure 1-3 Types and Proportions of the Renewable Energy [3] .....	11
Figure 1-4 Present Condition of Wind Power in the World .....	12
Figure 1-5 Prototype Tests in 「Fukushima Future」 Project [6] .....	14
Figure 1-6 Structure Type of Floating Offshore Wind Turbine [7] .....	15
Figure 1-7 System Cost per kW of Global Wind Power [8] .....	16
Figure 1-8 Cost of Wind Power Generation of World and Japan [8] .....	17
Figure 1-9 Details of Wind Power System Price (Onshore and Offshore) [8] .....	18
Figure 1-10 SCD-Nezzy Concept [9] .....	18
Figure 3-1 Common Design Referred to SCD-Nezzy Concept .....	22
Figure 3-2 Three-View Drawing of the Common Model .....	23
Figure 3-3 Simple Analysis Model of Guywire Floating Structure .....	25
Figure 4-1 Calculation Flowchart of NK-UTWind .....	32
Figure 4-2 Calculation Flowchart between Floater Part and Guywire Part .....	33
Figure 4-3 Image of the 2 Coordinate Transformation .....	34
Figure 4-4 Image of the displacements of the 2 Anchor Points .....	36
Figure 5-2 Guywire Settings in Experiment Model .....	37
Figure 5-3 Dimensions of the Cantilever Strain Gauge and Guywire of Experiment .....	38
Figure 5-4 Modeling of the Cantilever Strain Gauge in Prototype Scale .....	39
Figure 5-1 1/80 Elastic Similar Experiment Model of the Designed Common Model .....	41
Figure 5-5 Image of the USP Ocean Basin in the University of Sao Paulo .....	43
Figure 5-6 Coordinate and Mooring System of the Experiment .....	44
Figure 5-7 Mooring and the Anchor Point .....	45
Figure 5-8 Position of the 12 Strain Gauges of the Experiment Model .....	45
Figure 5-9 ADS Data Acquiring System .....	46
Figure 5-10 Power Spectrum of Transient and Irregular Wave .....	48
Figure 6-1 Time Series and FFT Result of Surge Decay Test .....	50
Figure 6-2 Time Series and FFT Result of Heave Decay Test .....	51
Figure 6-3 Time Series and FFT Result of Pitch Decay Test .....	51
Figure 6-4 Frequency Domain Response (Wave Direction 180° ) .....	53
Figure 6-5 Frequency Domain Response (Wave Direction 195° ) .....	53

Figure 6-6 Frequency Domain Response (Wave Direction 210° ).....	54
Figure 6-7 Frequency Domain Response (Wave Direction 225° ).....	54
Figure 6-8 Frequency Domain Response (Wave Direction 240° ).....	55
Figure 6-9 Model Position and Wave Directions .....	55
Figure 6-10 Comparison between Experiment (Transient and Regular Wave) and WAMIT .....	58
Figure 6-11 Comparison between Experiment, WAMIT and NK-UTWind .....	59
Figure 6-12 Equivalence from Rectangle Element to Ellipse Element in NK-UTWind .....	61
Figure 6-13 Position of Guywire and Wave Direction.....	61
Figure 6-14 Experiment Result (Transient and Regular Wave) of Guywire’s Tension .....	62
Figure 6-15 Validation of the Guywire Part in NK-UTWind.....	63
Figure 6-16 Response of Guywire’s Tension and Heave, Pitch Motion.....	64
Figure 6-17 Deformation Mode of Tower and Pontoon .....	66
Figure 6-18 Displacement of Heave and Pitch (Wave Period 6[s], Direction 180°)	67
Figure 6-19 Acceleration of Heave and Displacement of Pitch (Wave Period 19[s], Direction 180°).....	68
Figure 6-20 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon (Direction 0°).....	70
Figure 6-21 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon (Direction 180°).....	70
Figure 6-22 Configuration of the Strain Gauges at Tower’s Bottom .....	71
Figure 6-23 Frequency Domain Response of the Strain at Tower’s Bottom .....	72
Figure 6-24 Comparison of NK-UTWind and Regular Wave Exp. (Direction 180°)	73
Figure 6-25 Strain at the Tower’s Bottom – with Guywire and without Guywire (Direction 0°).....	74
Figure 6-26 Strain at the Tower’s Bottom – with Guywire and without Guywire (Direction 180°).....	75
Figure 6-27 Strain at the Pontoon’s Root and Middle (Direction 180°).....	76
Figure 6-28 Strain at the Pontoon’s Root and Middle (Direction 210° ).....	76
Figure 6-29 Strain at the Pontoon’s Root and Middle (Direction 240° ).....	77
Figure 6-30 Strain at the Pontoon1’s Root (NK-UTWind vs. Exp., Direction 180° ) .....	78
Figure 6-31 Strain at the Pontoon1’s Middle (NK-UTWind vs. Exp., Direction 180° ) .....	78
Figure 6-32 Strain at the Pontoon2’s Root (NK-UTWind vs. Exp., Direction 180° ) .....	79

Figure 7-1 Three-View Drawing of the Designed Case 1 Model .....	81
Figure 7-2 Time Series of Heave Free Motion of Case 1 Model .....	82
Figure 7-3 Time Series of Pitch Free Motion of Case 1 Model .....	82
Figure 7-4 Three-View Drawing of the Designed Case 2 Model .....	83
Figure 7-5 Time Series of Heave Free Motion of Case 2 Model .....	84
Figure 7-6 Time Series of Heave Free Motion of Case 2 Model .....	84
Figure 7-7 Model Position and Wave Directions .....	86
Figure 7-8 Time Series of 6 DoF Motion (Direction $0^\circ$ ) .....	86
Figure 7-9 Time Series of 6 DoF Motion (Direction $30^\circ$ ) .....	87
Figure 7-10 Time Series of 6 DoF Motion (Direction $60^\circ$ ) .....	87
Figure 7-11 Time Series of 6 DoF Motion (Direction $90^\circ$ ) .....	88
Figure 7-12 Time Series of 6 DoF Motion (Direction $120^\circ$ ) .....	88
Figure 7-13 Time Series of 6 DoF Motion (Direction $150^\circ$ ) .....	89
Figure 7-14 Time Series of 6 DoF Motion (Direction $180^\circ$ ) .....	89
Figure 7-15 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models ( $0^\circ$ )	92
Figure 7-16 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models ( $30^\circ$ )	92
.....	92
Figure 7-17 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models ( $60^\circ$ )	92
.....	92
Figure 7-18 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models ( $90^\circ$ )	93
.....	93
Figure 7-19 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models ( $120^\circ$ )	93
.....	93
Figure 7-20 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models ( $150^\circ$ )	93
.....	93
Figure 7-21 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models ( $180^\circ$ )	94
.....	94
Figure 7-22 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon of Case 1 Model (Direction $0^\circ$ ) .....	95
Figure 7-23 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon of Case 1 Model ( $180^\circ$ )	96
.....	96
Figure 7-24 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon of Case 2 Model ( $0^\circ$ )	96
.....	96
Figure 7-25 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon of Case 2 Model ( $180^\circ$ )	96
.....	96
Figure 7-26 Strain at Tower's Bottom of Case 1 – with Guywire and without Guywire	

(0° ) .....	98
Figure 7-27 Strain at Tower's Bottom of Case 1– with Guywire and without Guywire (180° ) .....	98
Figure 7-28 Strain at Tower's Bottom of Case 2– with Guywire and without Guywire (0° ) .....	99
Figure 7-29 Strain at Tower's Bottom of Case 1– with Guywire and without Guywire (180° ) .....	99
Table 1-1 Improvement of Offshore Wind Power in 2014 [5] .....	13
Table 1-2 Merits and Demerits of Offshore Wind Power .....	14
Table 1-3 Classification and Characteristics of Each Floating Structure .....	16
Table 1-4 Comparison of SCD-Nezzy and Fukushima Shinpuu .....	19
Table 3-1 Principal Design of the Floating Model .....	24
Table 3-2 Trend of the Guywire's Tension .....	28
Table 5-3 Principal Design of the Guywire of the Experiment Model .....	38
Table 5-1 Dimensions of the Steel Beams of Exp. Model's Tower and Pontoon .....	42
Table 5-2 Principal Design of Prototype and Experiment Model .....	42
Table 5-4 Transient Wave Condition of the Experiment Model and Prototype .....	46
Table 5-5 Transient Wave Condition of the Experiment Model and Prototype .....	47
Table 5-6 Regular Wave Condition of the Experiment Model and Prototype .....	49
Table 6-1 Comparison of Natural Period between Experiment and NK-UTWind..	51
Table 7-1 Principal Design of the Case 1 Model .....	81
Table 7-2 Principal Design of the Floating Model .....	85

# 1 序論

## 1.1 地球温暖化問題とエネルギー問題

地球温暖化は人類にとって非常に大きな問題である。現在の地球は過去 1400 年で最も暖かくなっている。この地球規模で気温や海水温が上昇し氷河や氷床が縮小する現象、すなわち地球温暖化は、平均的な気温の上昇のみならず、異常高温（熱波）や大雨・干ばつの増加などのさまざまな気候の変化をともなっている。その影響は、早い春の訪れなどによる生物活動の変化や、水資源や農作物への影響など、自然生態系や人間社会にすでに現れている。将来、地球の気温はさらに上昇すると予想され、水、生態系、食糧、沿岸域、健康などでより深刻な影響が生じると考えられている。これら近年の、それから今後数十年から数百年で起こると予想される気候の変化がもたらす様々な自然・社会・経済的影響に対して、世界各国との協力体制を構築し、解決策を見いだしていかなければならない。

地球温暖化は、人間活動に起因するものだと報告され、特に産業革命以降、化石燃料の大量消費によって発生した二酸化炭素などの温室効果ガスの増加が主な原因で、世界全体の温室効果ガス排出量に占めるエネルギー利用に伴う二酸化炭素排出量の割合は約 6 割であり、日本におけるその割合は約 9 割にまで達している。このため地球温暖化問題の解決には、エネルギー利用に伴う二酸化炭素の排出削減が特に重要であり、地球温暖化問題とエネルギー問題は表裏一体の関係にあると言える。温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) の解析による 2015 年の世界の二酸化炭素の平均濃度 (Fig. 1-1) は、前年と比べて 2.3[ppm]増えて 400.0[ppm]となっている。工業化以前 (1750 年頃) の平均的な値とされる 278[ppm]と比べて、44%増加している。([ppm]は体積比で 100 万分の一を表す。)

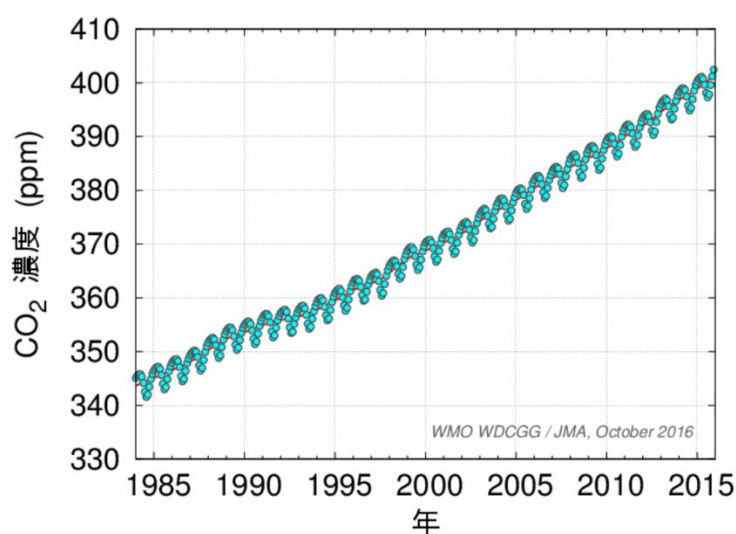


Figure 1-1 Year-to-Year Change of Global Carbon Dioxide [1]

地球温暖化問題化の解決に向けて、世界の主要国は将来の枠組みに関する国際的な議論に積極的に取り組んできた。1997年12月に日本の京都市で開かれた第3回気候変動枠組条約締約国会議で採択された「京都議定書」では、地球温暖化の原因となる、温室効果ガスの一種である二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、メタン（CH<sub>4</sub>）、亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）、ハイドロフルオロカーボン類（HFCs）、パーフルオロカーボン類（PFCs）、六フッ化硫黄（SF<sub>6</sub>）について、先進国における削減率を1990年を基準として各国別に定め、共同で約束期間内に目標値を達成することが定められた。しかし、世界第二位の温室効果ガス排出国であるアメリカが参加していない他、中国やインド等の大排出国が削減義務を負っていないため削減義務を負っている国のエネルギー起源における二酸化炭素排出量は世界全体の3割程度にとどまっていた。その後、2015年12月12日に第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）が開催されたパリにて、気候変動抑制に関する多国間の国際的な協定「パリ協定」が採択された。2016年11月の時点で、192ヶ国と欧州連合（EU）は、パリ協定を締結した。これらの当事者の111ヶ国は、批准または協定に加盟している、特に締約国のうちの111団体が協定を締結しており、特に中国、米国、インドは加盟国全体の約3割の温室効果ガス排出量（42%）を抱えている。しかし、2017年6月1日、アメリカ大統領ドナルド・トランプの発言で米国がパリ協定から離脱した。要するに、今までの歴史から、地球温暖化問題の一つの対策とする「温室効果ガスの排出削減」に対して国際的な合意に達するのは極めて難しいことであることが分かった。

一方、世界のエネルギー動向に関して、Fig. 1-2に示す世界のエネルギー消費量（一次エネルギー）は経済成長とともに増加を続けており、石油換算で1965年の38億[ton]から年平均2.6%で増加し続け、2013年には127億[ton]に達した。

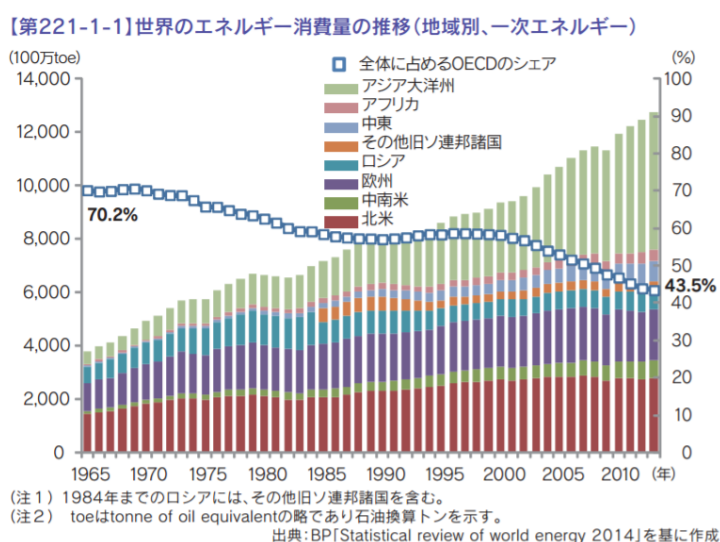


Figure 1-2 Trend of the Global Energy Consumption [2]

これから中長期的にはエネルギー需要の拡大が予想され、さらに地球温暖化問題への対応も求められる状況において、**再生可能エネルギー**に関する研究開発の重要性は今後一層高まるものと考えられる。

## 1.2 再生可能エネルギーにおける風力発電

Fig. 1-3 に示す一般的に再生可能エネルギーには、太陽光発電、太陽熱発電、風力発電、地熱発電、潮力発電、バイオマス・廃棄物発電の5種類がある。再生可能エネルギーの中で最大規模の発電量を誇るのは風力発電で、約半数の48.4%を占めている。2013年の世界全体での風力発電電力は年間63万[GWh]、世界の年間総発電量の2.7%を占めている。風力発電の特徴の一つに海上での発電が可能かというものがあため、洋上風力発電は、世界の広大な海を発電所に変えることができるため、候補地となる面積が広大である。風力発電は、今後、再生可能エネルギーの中で最も伸びる分野だとも言われている。

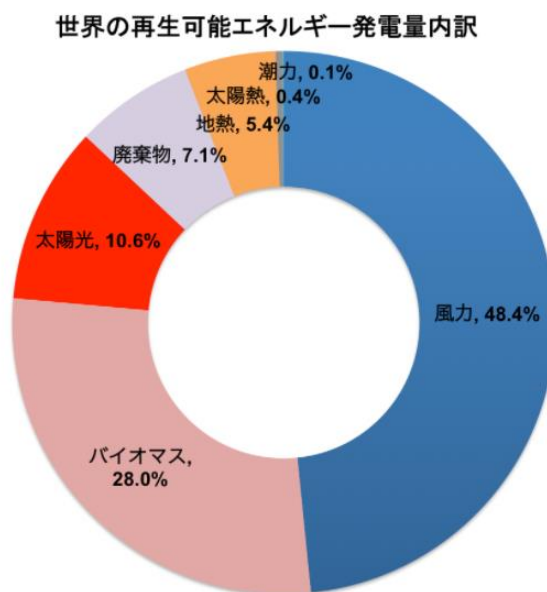


Figure 1-3 Types and Proportions of the Renewable Energy [3]

### 1.2.1 風力発電が世界における動向

Fig. 1-4 に示すように世界の風力発電設備容量は近年急速に増加し 120,000[MW] (2008年) に達している。これは、風力発電は再生可能エネルギーのなかでもコストが低いものであり事業化が比較的容易であるという理由が挙げられる。特に導入の進んでいるドイツやアメリカといった国々においては、政府が風力発電を環境政策・エネルギー政策の中に積極的に位置付けているため電力会社による買い取り義務を設け各種の優遇措置を講

じて導入を進めて来た。

尚、2008 年度においては 1 年間でアメリカに導入された風力発電能力は 8,358[MW] であり、累計 25,170[MW] に達したためアメリカがドイツを抜いて世界第 1 位の風力発電能力を有することになったが、近年の中国の導入量は急増し 2010 年度においてアメリカを抜き、中国が世界第 1 位の風力発電能力を有することになった。

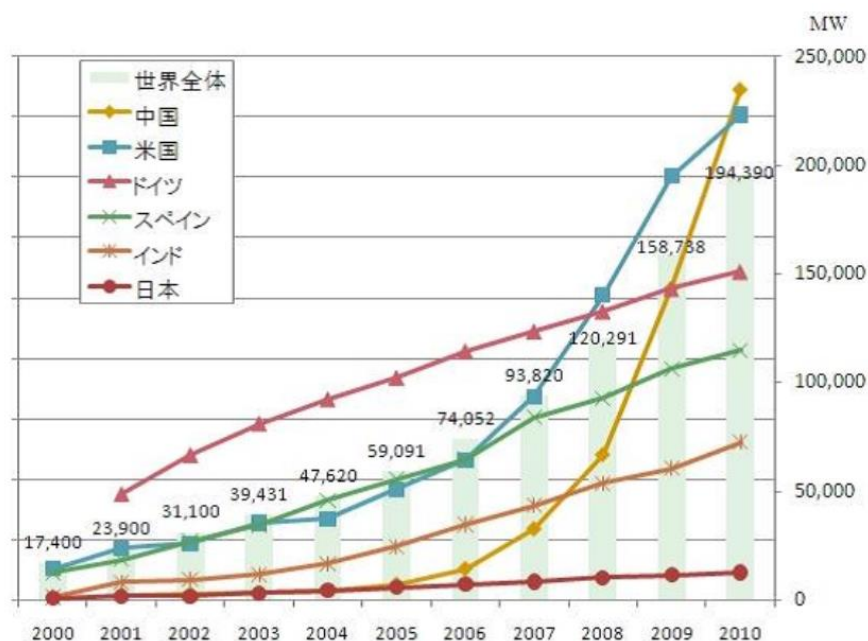


Figure 1-4 Present Condition of Wind Power in the World

### 1.2.2 日本の地域特徴と洋上風力発電

[4]日本の国土の約 70%が山地であり、生産活動や居住などの土地利用が平地に集中している。このため、陸上の風力発電のかなりの部分が丘陵地に立地するなど、風況や設置面積確保の点で大規模に風車を展開するのは容易ではない。一方、洋上に目を向けると日本の海岸線は長く、排他的経済水域も世界第 6 位(約 447 万[km<sup>2</sup>])を有しており、洋上の平均風速は陸上に比べて速く、乱れも小さいなど風況は良好である。技術と経済性の観点から当面開発の対象となる沿岸域に限っても、国の電力供給において、大きな部分を占める潜在能力を持っていることは明らかになっている。これらの利点に加え、日本の造船・海洋構造物などの製造技術は世界トップレベルにあることから、洋上風力発電将来日本の大きな産業に発展するといっても過言ではない。

日本の風力発電の導入実績は、2014 年まで 279 万[kW]であり、世界(3.7 億[kW])第 19 位を占めている。この中で、洋上風力発電の導入実績 5 万[kW]である。Table. 1-1 に示す 2014 年の時点で稼働中の洋上風力発電の 84%、4.4 万[kW](23 基)は護岸近傍に設置され



ている。沖合（実証事業：離岸距離 1[km]以上）に設置されている設備は、着底式 0.44 万 [kW]（2 基）、浮体式 0.4 万 [kW]（2 基）である。沖合に設置された実績がすくないことが分かった。

Table 1-1 Improvement of Offshore Wind Power in 2014 [5]

形式	設置海域		定格出力 (MW)	基数 (基)	発電出力 (万kW)	設置時期 (年月)
着床式	北海道	瀬棚港	0.6	2	0.12	2004.4
	秋田県	秋田港	3.0	1	0.3	2015.2
	山形県	酒田港	2.0	5	1.0	2004.1
	茨城県	鹿島港	2.0	7	1.4	2010.2
	茨城県	鹿島港	2.0	8	1.6	2013.2
	千葉県	銚子沖*	2.4	1	0.24	2013.3
	福岡県	北九州市沖*	2.0	1	0.2	2013.6
浮体式	長崎県	五島市枕島沖*	2.0	1	0.2	2013.10
	福島県	福島県沖*	2.0	1	0.2	2013.11
			計	27	5.26	

\*実証事業(離岸距離1km以上)

実用化に向けては、NEDO による着底式洋上風力に関する実証実験が 2011 年より開始されている。着底式洋上風車を用いた洋上風力発電の事業化もこれと並行して進められている。東日本大震災に起因する福島原子力発電所の事故が発生した以降、浮体式洋上風車についても実証実験が開始されている。コンセプト開発の段階では欧米と肩を並べていた開発もメガワールクラスの実証実験も進む段階でいったんは取り組みが遅れていたが、2011 年から経済産業省、環境省による実証研究が開始されるなど急速に挽回し、現在はトップランナーになっている。Fig. 1-5 に示したのは、「福島未来」と呼ばれる福島で行われる浮体式洋上風車の実証実験である。2011 年から開始している第 1 期実証研究事業として、2[MW]のダウンウィンド型浮体式洋上風力発電設備 1 基と、世界初となる 25[MVA]浮体式洋上サブステーション及び、海底ケーブルを設置された。第 2 期として、5[MW]および 7[MW]の浮体式洋上風力発電設備各 1 基を新設された。

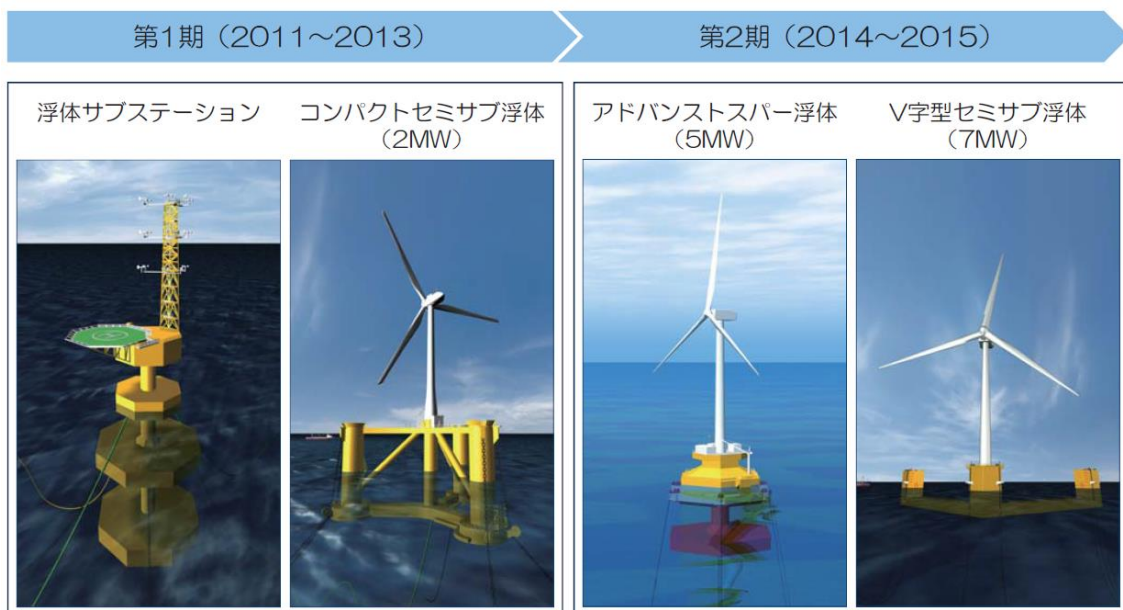


Figure 1-5 Prototype Tests in 「Fukushima Future」 Project [6]

### 1.3 洋上風力に関する既存研究

洋上風力エネルギーの開発に関しては、1990年代に入ってからヨーロッパが世界をリードする形で大型着底式洋上風車の洋上展開が進められてきた。北海が遠浅であることを利用したものであり、最近まで、ほとんどすべての大型着底式洋上風車はヨーロッパの海域のみに設置されていた。一方、日本は岸から離れるに従って急激に水深が増すという地理的特徴があるため、浮体式洋上風車の基礎研究は2000年頃から開始されている。設置するための土地確保のコストがあまりかからないうえに、大規模な基礎工事を必要としないことから経済性の高いシステムを実現できる可能性があると考えられている [4]。

#### 1.3.1 洋上風力発電のメリット・デメリット

これまでの洋上風力発電に関する報告 [7]より、そのメリットおよびデメリットを挙げると以下の Table. 1-2 ようになる。

Table 1-2 Merits and Demerits of Offshore Wind Power

洋上風力発電	
メリット	デメリット
1. 風況の良さ	1. 設備コストが高価
2. 大型風車の運搬・敷設が可能	2. メンテナンスの難化
3. 騒音・景観問題のクリア	3. 初期設計の難化

### 1.3.2 洋上風車の種類

浮体式洋上風力タービンには、様々な浮体構造が可能である。特に係留方法、タンク、安定化装置には様々な選択肢があり、こうした技術は洋上の石油およびガス産業により使用されてきた。Fig. 1-6 に3種類の代表的な浮体支持構造を示す。これらは静的安定度をどのように維持するかにより分類される。円柱浮標（Spar Buoy）は、カテナリー（Catenary）ケーブルあるいは張力ケーブル（Tautline）により係留されるが、この場合の安定度は安定化装置を使用して浮力の中心よりも重心を低くすることにより実現される。張力脚プラットフォーム（TLP：Tension Leg Platform）は、タンク中の余剰な浮力によりもたらされる係留ケーブルの張力を利用して安定度を実現する。セミサブ（Semi-Submersible）方式では、通常カテナリー係留され浮体の復原性により安定度を実現する。

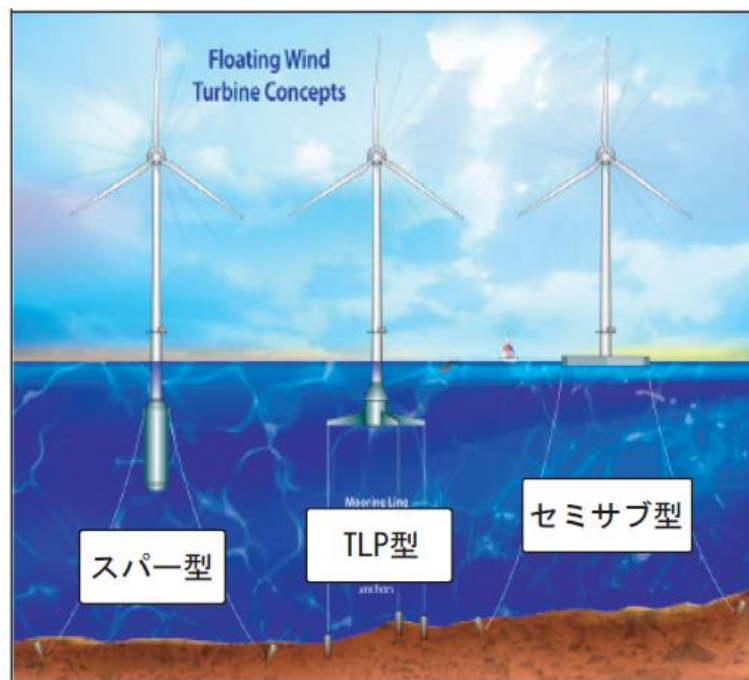


Figure 1-6 Structure Type of Floating Offshore Wind Turbine [7]

これらの浮体支持構造にはそれぞれ動揺特性及び建造費に関して特徴が存在する。

Table. 1-3 にはその一覧を示す。

Table 1-3 Classification and Characteristics of Each Floating Structure

	(A)Spar 型	(B)TLP 型	(C)Semi-Submersible 型
動揺特性	水線面積が小さく耐波性能が高い。比較的波浪状態の荒い沖合でも利用可能	余剰浮力から発生するテンションを利用して係留するため Heave が生じない	水線面積が広く波浪動揺への追従性が大きい。静穏海域での利用に適する
建造費	形状が単純な円筒であるため比較的安価	設置費用が他の浮体形式に比べて高価	形状が単純であるため比較的安価

## 1.4 風力発電のシステム価格、発電コスト及びコスト構造

### 1.4.1 陸上と洋上風力発電のシステム価格

近年の陸上風力のシステム価格は、世界平均で約 11~26[万円/kW]の水準にある。地域別に見ると、欧州の約 17[万円/kW]や北米の約 16[万円/kW]と比較して、日本は 20~35[万円/kW]と高い水準にある。また、中国のシステム価格は、11[万円/kW]と比較的低い。

洋上風力のシステム価格は、世界平均で約 36~56[万円/kW]と、陸上風力の約 2 倍から 3 倍の水準にある。一般に、洋上風力のシステム価格は、基礎工事や係留コストが約半分を占めており、これは陸からの距離や水深によって異なる。初期に設置された洋上風力のシステムは比較的浅い海に設置されていたものの、2010 年以降には水深が 20[m]を超える海域に設置されるようになってきている。ため、それに伴ってシステム価格が上昇傾向にある。

世界の風力発電のシステム価格は Fig. 1-7 のように表している。

	国・地域	システム価格[万円 /kW]*	出典など
陸上風力	世界	11~26 (1,100~2,600 ドル /kW)	Technology Roadmaps Wind energy (2013, IEA)
	欧州	17 前後 (1,700/kW)	
	北米	16 前後 (1,600 ドル /kW)	
	中国	11 前後 (1,100 ドル /kW 前後)	
	日本	20~35	「コスト等検証委員会報告書」(2011, エネルギー・環境会議 コスト等 検証委員会)
洋上風力	世界	36~56 (3,600~5,600 ドル /kW)	Technology Roadmaps Wind energy (2013, IEA)
	英国	31 前後 (3,100 ドル /kW)	Technology Roadmaps Wind energy (2009, IEA)
	ドイツ オランダ	47 前後 (4,700 ドル /kW)	
	日本	28.3~70	「コスト等検証委員会報告書」(2011, エネルギー・環境会議 コスト等 検証委員会)

Figure 1-7 System Cost per kW of Global Wind Power [8]

### 1.4.2 世界における風力発電コスト

世界の陸上風力の発電コストは、おおむね[10 円/kWh]前後であり、従来型電源に対してコスト競争力を持つ水準にある。風況が良く（稼働率 40%程度）、システム価格が安い場合には、5[円/kWh]前後の発電コストを実現する場合もある。洋上風力のシステム価格は陸上風力の約 2 倍であるが、陸上よりも風況が良く、約 50%程度多い発電量を得られるため、陸上風力とほぼ同水準の発電コスト（約 8~15[円/kWh]程度）が実現可能とされている。なお、この値は水深が 50[m]未満の遠浅海域に広く導入が進んでいる欧州の着底式洋上風力を前提としたものであり、浮体式洋上風車の発電コストが同水準の発電コストを達成可能かは留意が必要である。

日本の風力発電の発電コストについては、国家戦略室のコスト等検証委員会で検討が進められており、陸上風力は好条件が揃った場合で約 10 [円/kWh] と、火力（石炭、LNG）と同程度の発電コストになり得るという試算結果が示されている。洋上風力については、9.4~23.1 [円/kWh] と、陸上風力よりも高めの発電コストになると試算されている。同委員会の報告書では、洋上風力について、送電線の敷設コストが陸上より高価になることが指摘されている。

Fig. 1-8 は世界と日本の風力発電の発電コストを表している。

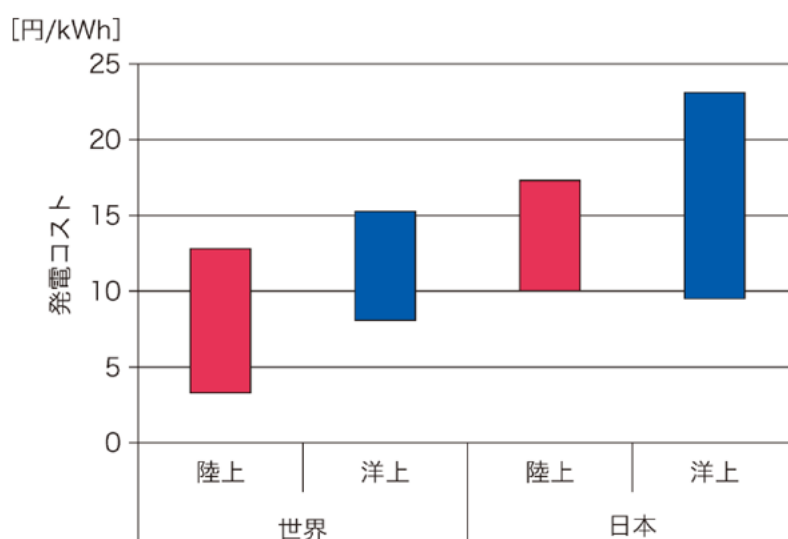


Figure 1-8 Cost of Wind Power Generation of World and Japan [8]

### 1.4.3 陸上と洋上風力発電のコスト構造

陸上風力と洋上風力のシステム価格の内訳例を Fig. 1-9 に示す。なお、ここで紹介する数値は一例であり、プロジェクトごとにコスト構造が異なることに留意が必要である。

陸上風力と洋上風力を比較すると、陸上風力はシステム価格に占める構造体（タービン・



電気設備、基礎など)の比率が約8割を占めており、風力発電機のコスト削減が市場競争力に直結する。一方、洋上風力は、構造体以外の基礎、系統連系や設置に掛かるコストが半分近くを占めており、構造体以外の各構成要素において、コスト削減余地が多く残されている。

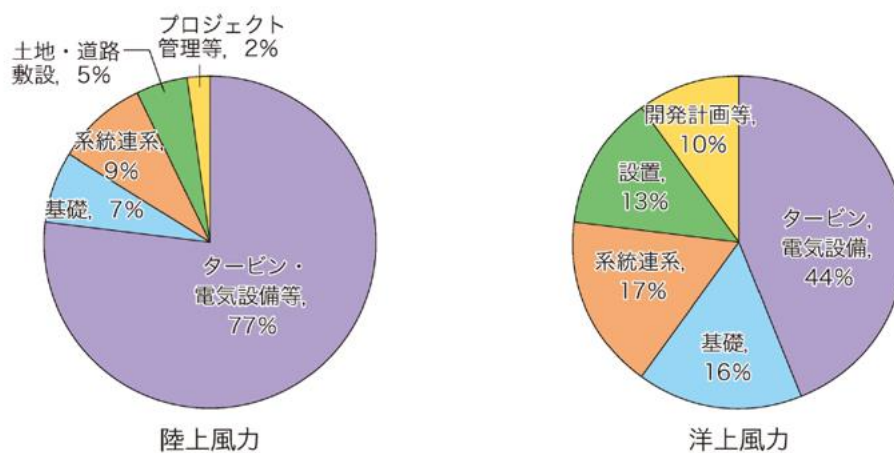


Figure 1-9 Details of Wind Power System Price (Onshore and Offshore) [8]

### 1.5 SCD-Nezzy のコンセプト

2014年にドイツのAerodyn社によってSCD-nezzy 8.0 MWのコンセプトが提案された。Fig. 1-10にはこのコンセプトのイメージを表している。



Figure 1-10 SCD-Nezzy Concept [9]

このコンセプトにはいくつかの特徴がある。

- ① SCD(super compact drive) ——ナセルの軽量化が可能
- ② 一点係留——ナセル部の Yaw 制御が不要
- ③ Y字型浮体、斜めのタワー、タワーを支持したワイヤーの組み合わせ  
——タワーと浮体の軽量化が可能

結果として、全体システムが非常に軽量化になる。

Table. 1-4 には福島新風との比較を表している。

Table 1-4 Comparison of SCD-Nezzy and Fukushima Shinpuu

	7MW ふくしま新風	8MW SCD-NEZZY
<b>Displacement [ton]</b>	18118	5760
<b>Weight to Power Ratio [ton/MW]</b>	2588	720

SCD-Nezzy の場合は、単位 MW あたりの重量はおよそ福島新風の 1/3 となっている。全システムの発電コスト削減は 40% [10]に達することもできると言われる。Aerodyn 社はタービンの開発で有名な会社であり、タービン技術の進歩があつてこそこのようなコンセプトが提案された。この斬新なデザインは、洋上風車の開発者や研究者に啓発をもたらし、洋上風力の普及やエネルギー問題の解決にも寄与するであろう。

## 2 研究目的・研究概要

### 2.1 既存課題

前述のように、陸上と洋上風力の双方においても、日本は世界より発電コストが高い水準にある。さらに、洋上風力において、浮体式のシステム価格は着底式より高い。日本は自国の地域・海域特徴などの制限で、浮体式が今後の主流になるとされている。そのため、日本において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。

浮体式洋上風車のコスト構造を見ると、コスト削減の余地が多く残されており、その一つの解決策は浮体式洋上風車システムを軽量化にすることである。これまでの先行研究で軽量型浮体式洋上風車（以後は軽量型と称す）システムの提案 [11]がいくつかある。

しかし、軽量化は悪い復原性を意味しており、軽量型でない洋上風車と同じ定格出力時のスラスト力を想定する場合に浮体の定常傾斜角が大きくなり、逆に発電の効率が低下する恐れがある。こういった意味で、必ずしも軽量化はコスト削減に寄与することができるとは言えない。ただし、現在の技術だと、ナセル、ローター部分の技術はずっと進歩しつつあり、福島実証研究事業現場の経験から、定常傾斜角（定格出力時の Pitch 角）の許容値は徐々に増加していくトレンド（1° から 10° まで）があるそうである。これらの技術面から支持で、軽量型システムの研究開発は可能となり、今後の傾向にもなると考えられる。

軽量型の場合、直観に見ると、製造に使用された材料の量が少なくなる。タワーを例とすれば、薄肉円筒の壁の厚さは通常より薄くなるため、曲げ剛性はかなり小さくなることが予想される。そのため、軽量型浮体の波浪中の弾性応答が顕著となり、弾性応答の特性を解明するのは非常に重要な課題となっていると思われる。本研究では、研究の対象として SCD-Nezzy のコンセプトに参考して設計された軽量型浮体のモデルの構造には、かつてないワイヤーがあり、その成立性についても厳密に検討する必要がある。むしろワイヤーの成立性はこのコンセプトに関わる最も重要な基本要素だといっても過言ではない。ワイヤーについて過去主に斜張橋の場合に使われ、[12]でケーブル・はりモデルで内部振動を考察したが、構造全体は運動しないため、洋上風車とは違う。ワイヤーが浮体の他の部分（タワー、ポンツーン、係留など）にどのような影響を与えるのか、波浪中にどのような挙動をしているのか、スラック状態が発生するかどうかなどを解明するのは全体システムの成立性にとって非常に重要だと考えられる。



## 2.2 研究目的・ゴール

本研究の目的はワイヤーによりタワーを支持した軽量型浮体式洋上風車というコンセプトの成立性を検証することであるため、低剛性浮体の弾性応答特性を解明する必要がある。ワイヤーが一番重要な要因であるため、まずワイヤーの成立性を確認することが必要である。その次にタワー・ポンツーンの弾性によるワイヤーに与える影響を調べる必要がある。さらに、ワイヤーの支持効果について考察する必要がある。

## 2.3 研究手法の概要

本研究は以下の手順で行う：

- ① SCD-Nezzy に参考してワイヤーでタワーを支持した一般化実機モデルを設計
- ② NK-UTWind でワイヤー解析の機能を追加
- ③ 実機モデルの 1/80 相似模型を作り、水槽実験を行う
- ④ 実験データを解析し、モデルの弾性応答特性とワイヤーの挙動について考察
- ⑤ NK-UTWind を用いて実験結果を再現してより深く検討
- ⑥ 斜めのタワーを有するモデル(2 ケース)を設計し、NK-UTWind を用いて浮体の弾性応答特性とワイヤーの挙動について考察

### 3 一般化モデルの設計及び静的計算

#### 3.1 一般化モデルの設計

本研究ではワイヤーでタワーを支持した軽量型浮体式洋上風車のコンセプトに関するフィジビリティスタディを行うことになる。しかし、SCD-Nezzy のコンセプトに提案されたのは非常に特殊なモデルであるため、一般的な特性を把握するのに不利だと考える。

そこで、SCD-Nezzy のコンセプトから

- ① Y字型浮体基礎：SCD-Nezzy のオリジナル提案には、3つのポンツーンの間  
の挟み角はそれぞれ  $100^\circ$ 、 $130^\circ$ 、 $130^\circ$  であるが、ここでは全部  $120^\circ$  にする。
- ② ワイヤーの取り扱い方：ナセル部分から3つのサイドコラムの底部まで3本の  
ワイヤーが取り付けられる
- ③ 低剛性：全体の質量分布でタワーとポンツーンの曲げ剛性は低くなる

などのいくつかの特徴を抽出して Fig. 3-1 に示す一般化モデル（垂直のタワー）を設計した。Fig. 3-2 にその 3D-View を表している。

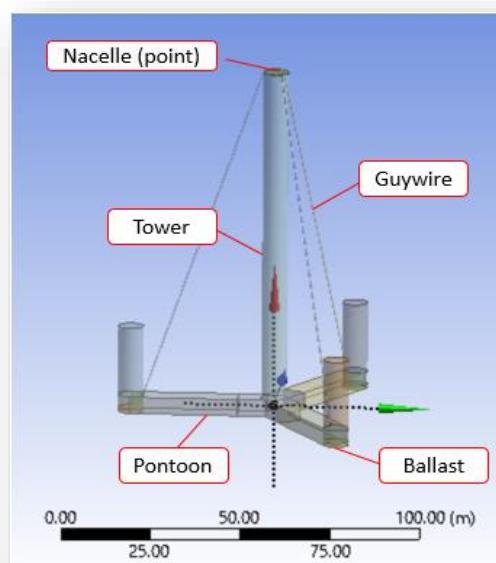


Figure 3-1 Common Design Referred to SCD-Nezzy Concept

このモデルのナセル部分は質点で表している。タワーとポンツーンの曲げ剛性については過小に設計すると模型作りが難しくなるため適当に設定した。第 5 章で実験模型設計を紹介する。

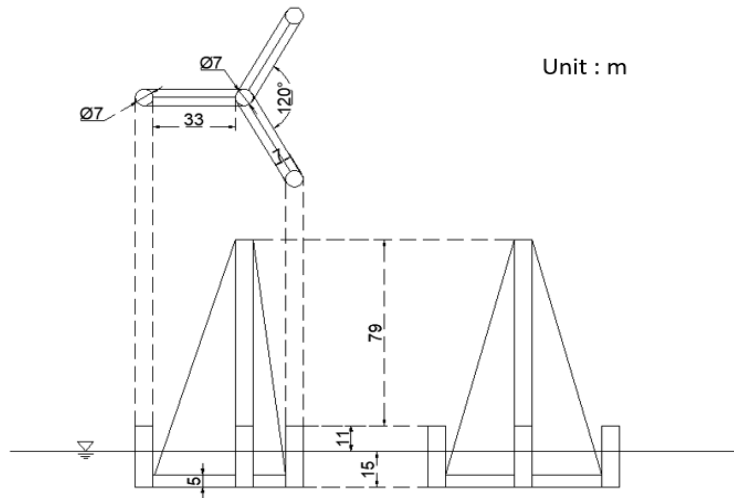


Figure 3-2 Three-View Drawing of the Common Model

設計の基準だと、この一般化モデルの本質はセミサブタイプの浮体であるため各方向運動の固有周期を波浪周期の長周期側に設計することにした。すなわち、共振回避の観点から、浮体の固有周期が満足しなければならない条件は以下の通りである。Heave 方向の固有周期を 20[s]以上に設定するのは困難なので、15[s]を制限とした。

- Heave 方向

$$T_{Heave} = \frac{2\pi}{\omega_{Heave}} = 2\pi \sqrt{\frac{M + M'_{Heave}}{n \times \rho g A}} \geq 15_{sec} \quad (3.1)$$

- Roll & Pitch 方向

$$T_{Roll-Pitch} = \frac{2\pi}{\omega_{Roll-Pitch}} = 2\pi \sqrt{\frac{I + I'_{Roll-Pitch}}{\rho g V GM}} \geq 20_{sec} \quad (3.2)$$

ここで、 $V$  : 排水体積[m<sup>3</sup>]、 $GM$  : メタセンタ高さ[m]、 $n$  : 水面貫通コラム総数[本]、 $A$  : 水面貫通コラム断面積[m<sup>2</sup>]、 $M'_{Heave}$  : Heave 方向付加質量[kg]、 $I'_{Roll-Pitch}$  : Roll、Pitch 方向付加回転慣性[kg・m<sup>2</sup>]、である。

風車を搭載する時の定常傾斜角は、実際に搭載したローターの直径と定格出力時の風速に関わる。本研究の目的は主として浮体部分の弾性応答特性を解明するものなので、設計する際に定常傾斜角の制限条件を考慮しない。

設計された一般化浮体の主要目は Table. 3-1 に表している。

Table 3-1 Principal Design of the Floating Model

Item	Value	Unit
Displacement	5774	ton
KB	4.59	m
BM	16.08	m
KG	8.31	m
GM	12.36	m
Natural Period of Heave	16.6	sec
Natural Period of Roll and Pitch	20.6	sec

上に示した各項目の詳しい計算方法は藤岡 [13]によって詳細に記述されていたため、ここでは重複をしない。

## 3.2 静的計算

### 3.2.1 目的

ワイヤーは、今回で始めて浮体式洋上風車に用いられた。過去の先行研究でワイヤーは斜張橋に使用されたケースが多く、タワーと数本のワイヤーの組み合わせで橋の自重を支持する役割を果たしている。

浮体の場合橋とは違い、運動によりワイヤーの取り付け点に大きな変位が発生して動的影響が重要である。ただし、その前に静的特性を把握する必要もある。本章ではタワー頂部に外力が作用する時のワイヤーの張力変化分、タワー頂部とポンツーン根元の変形を静的計算で求める。

### 3.2.2 解析モデル

ワイヤーでタワーを支持した浮体式洋上風車の静的簡易モデルは Fig. 3-3 のようになっている。赤線が変形形状を示す。

### ワイヤーでタワーを支持した浮体

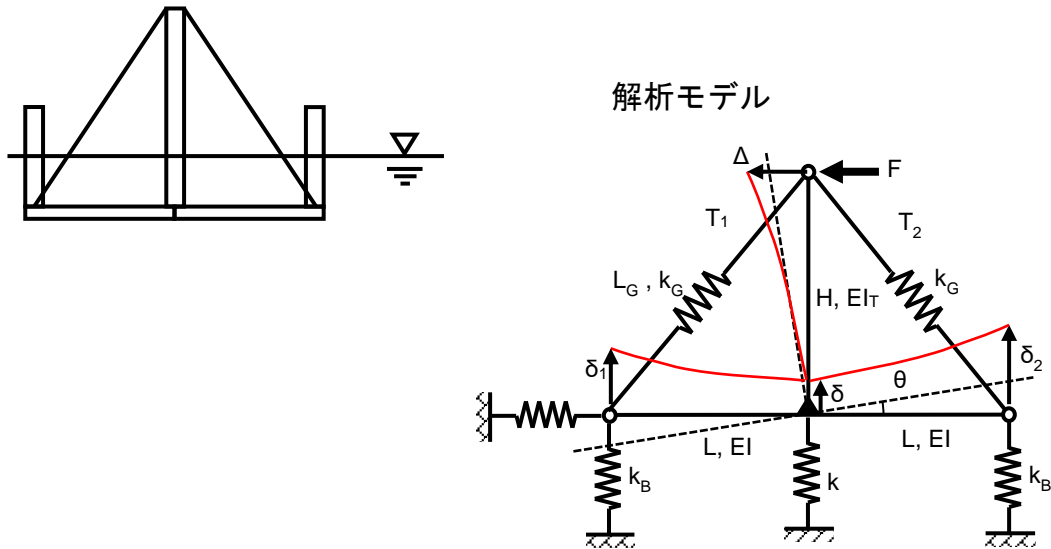


Figure 3-3 Simple Analysis Model of Guywire Floating Structure

ここに、 $F$  は外力、 $H$  はタワー高さ、 $EI_T$  はタワー曲げ剛性、 $\Delta$  はタワー変位、 $L$  はポンツーン長さ、 $EI$  はポンツーン曲げ剛性、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  はコラム変位、 $\delta$  はタワー基部コラム変位、 $k_B$  はコラム浮力ばね、 $k$  はタワー基部コラム浮力ばね、 $k_G$  はワイヤーばね定数、 $L_G$  はワイヤーの長さ、 $T_1$ 、 $T_2$  はワイヤー張力。 $\theta$  はタワー基部および浮体付け根の回転角（剛体回転角）。

#### 3.2.3 計算過程

- 釣り合い状態

この焦点は外力によるシステムの変化なので、初期張力が加わって釣り合っている初期の釣合状態からの変化分について論じる。

- たわみ

梁理論より次式の関係が得られる。

$$\delta_1 - \delta + L\theta = \frac{L^3}{3EI} \left( \frac{H}{L_G} T_1 - k_B \delta_1 \right) \quad (3.3)$$

$$\delta_2 - \delta - L\theta = \frac{L^3}{3EI} \left( \frac{H}{L_G} T_2 - k_B \delta_2 \right) \quad (3.4)$$

$$\Delta - H\theta = \frac{H^3}{3EI_T} \left( \frac{L}{L_G} T_1 - \frac{L}{L_G} T_2 + F \right) \quad (3.5)$$

ここに、 $L_G = \sqrt{L^2 + H^2}$

- ガイワイヤーの張力

$$T_1 = k_G \left\{ -\frac{H}{L_G} (\delta_1 - \delta) - \frac{L}{L_G} \Delta \right\} \quad (3.6)$$

$$T_2 = k_G \left\{ -\frac{H}{L_G} (\delta_2 - \delta) + \frac{L}{L_G} \Delta \right\} \quad (3.7)$$

- 剛体変位

浮力不変の条件、転倒モーメント釣合条件から

$$k_B \delta_1 + k_B \delta_2 + k\delta = 0 \quad (3.8)$$

$$-k_B L \delta_1 + k_B L \delta_2 - FH = 0 \quad (3.9)$$

- 応答特性

式 (3.3) ~ (3.9) において未知数は、 $\Delta$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\theta$  の 7 つである。

(3.3)式と(3.4)式から、

$$\delta_1 + \delta_2 - 2\delta = \frac{L^3}{3EI} \left\{ \frac{H}{L_G} (T_1 + T_2) - k_B (\delta_1 + \delta_2) \right\} \quad (3.10)$$

(3.6)式と(3.7)式から、

$$T_1 + T_2 = k_G \left\{ -\frac{H}{L_G} (\delta_1 + \delta_2 - 2\delta) \right\} \quad (3.11)$$

(3.8)式から、

$$\delta_1 + \delta_2 = -\frac{k}{k_B} \delta \quad (3.12)$$

(3.10)式に(3.12)式、(3.13)式を代入すると、

$$-\left(\frac{k}{k_B} + 2\right) \delta = \frac{L^3}{3EI} \left\{ k_G \left(\frac{H}{L_G}\right)^2 \left(\frac{k}{k_B} + 2\right) + k \right\} \delta \quad (3.13)$$

従って、 $\delta = 0$ 。

(3.11)式と(3.12)式から、

$$\delta_1 + \delta_2 = 0 \quad (3.14)$$

$$T_1 + T_2 = 0 \quad (3.15)$$

(3.9)式から、

$$\delta_1 = -\frac{FH}{2k_B L} \quad (3.16)$$

以上の結果をまとめると、改めて解くべき式は

$$\delta_1 + L\theta = \frac{L^3}{3EI} \left( \frac{H}{L_G} T_1 - k_B \delta_1 \right) \quad (3.3')$$

$$\Delta - H\theta = \frac{H^3}{3EI_T} \left( \frac{2L}{L_G} T_1 + F \right) \quad (3.5')$$

$$T_1 = k_G \left( -\frac{H}{L_G} \delta_1 - \frac{L}{L_G} \Delta \right) \quad (3.6')$$

(3.3')式と(3.5')式からを $L\theta$ 消去して、

$$L\Delta + H\delta_1 = \left( \frac{2H^3 L^2}{3E I L_G} + \frac{H^2}{3E} \right) \frac{L^3}{L_G} \frac{F}{L} - \frac{H^3 L}{3E I} \frac{L}{L_G} \delta_1 \quad (3.17)$$

(3.17)式に(3.16)式を代入すると、

$$\Delta = \left( \frac{2H^3L}{3EI_T L_G} + \frac{H^2L^2}{3EIL_G} \right) T_1 + \left( \frac{H^3}{3EI_T} + \frac{H^2L}{6EI} + \frac{H^2}{2k_B L^2} \right) F \quad (3.18)$$

(3.6')式に(3.16)式と(3.18)式を代入すると、

$$\begin{aligned} T_1 &= k_G \left( -\frac{H}{L_G} \delta_1 - \frac{L}{L_G} \Delta \right) = k_G \left( \frac{H^2}{2k_B L L_G} F - \frac{L}{L_G} \Delta \right) \\ &= \frac{k_G H^2}{2k_B L L_G} F - \frac{k_G L}{L_G} \left( \frac{2H^3L}{3EI_T L_G} + \frac{H^2L^2}{3EIL_G} \right) T_1 - \frac{k_G L}{L_G} \left( \frac{H^3}{3EI_T} + \frac{H^2L}{6EI} + \frac{H^2}{2k_B L^2} \right) F \end{aligned} \quad (3.19)$$

従って、

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\frac{k_G H^2}{2k_B L L_G} F - \frac{k_G L}{L_G} \left( \frac{H^3}{3EI_T} + \frac{H^2L}{6EI} + \frac{H^2}{2k_B L^2} \right) F}{1 + \frac{k_G L}{L_G} \left( \frac{2H^3L}{3EI_T L_G} + \frac{H^2L^2}{3EIL_G} \right)} = -\frac{\frac{L_G}{2L} \left\{ \frac{k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{2H}{3EI_T} + \frac{L}{3EI} \right) \right\} F}{1 + \frac{k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{2H}{3EI_T} + \frac{L}{3EI} \right)} F \\ &= -\frac{\frac{L_G}{2L} \times \frac{H^2 L^2}{L_G^2}}{\frac{1}{\frac{k_G}{3EI_T} 2H + \frac{k_G}{3EI} L} + \frac{H^2 L^2}{L_G^2}} F \end{aligned} \quad (3.20)$$

(3.20)式を考察すると、ガイワイヤーの張力の大きさの傾向がTable. 3-2にまとめられる。

Table 3-2 Trend of the Guywire's Tension

ガイワイヤー張力 $ T_1 $	ガイワイヤーばね定数/タワー曲げ剛性 $\frac{k_G}{EI_T}$	ガイワイヤーばね定数/ポンツーン曲げ剛性 $\frac{k_G}{EI}$
大	大	大
大	小	大
大	大	小
小	小	小

Table. 3-2 から、以下のことが分かった。

- ① タワーとポンツーンを同時に剛的にする → ガイワイヤーの張力変動は小さくなる
- ② タワーとポンツーンを同時に柔的にする → ガイワイヤーの張力変動は大きくなる
- ③ タワーかポンツーンだけを剛的にしても → ガイワイヤーの張力変動は**依然と大きい**  
すなわち、ガイワイヤーの張力変動を抑えるためにタワーとポンツーンの曲げ剛性のバランスは非常に重要である。



(3.18)式から、

$$\begin{aligned}
\Delta &= \left\{ \left( \frac{2H^3L}{3EI_T L_G} + \frac{H^2L^2}{3EIL_G} \right) \frac{-\frac{k_G H^2 L}{L_G} \left( \frac{H}{3EI_T} + \frac{L}{6EI} \right)}{1 + \frac{k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{2H}{3EI_T} + \frac{L}{3EI} \right)} + \left( \frac{H^3}{3EI_T} + \frac{H^2L}{6EI} + \frac{H^2}{2k_B L^2} \right) \right\} F \\
&= \frac{H^2 F}{1 + \frac{k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{2H}{3EI_T} + \frac{L}{3EI} \right)} \left\{ -\frac{2k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{H}{3EI_T} + \frac{L}{6EI} \right) \left( \frac{H}{3EI_T} + \frac{L}{6EI} \right) + \left( \frac{H}{3EI_T} + \frac{L}{6EI} + \frac{1}{2k_B L^2} \right) \left( 1 + \frac{2k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{H}{3EI_T} + \frac{L}{6EI} \right) \right) \right\} \\
&= \frac{H^2 F}{1 + \frac{k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{2H}{3EI_T} + \frac{L}{3EI} \right)} \left\{ \left( \frac{H}{3EI_T} + \frac{L}{6EI} \right) \left( 1 + \frac{k_G H^2}{k_B L_G^2} \right) + \frac{1}{2k_B L^2} \right\} \\
&\text{----- (3.21)}
\end{aligned}$$

(3.3')式から

$$\begin{aligned}
\theta &= \frac{L^2}{3EI} \frac{H}{L_G} T_1 - \left( \frac{L^2 k_B}{3EI} + \frac{1}{L} \right) \delta_1 = \left\{ \frac{1}{3EI} \frac{-\frac{k_G H^2 L^3}{L_G^2} \left( \frac{H}{3EI_T} + \frac{L}{6EI} \right)}{1 + \frac{k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{2H}{3EI_T} + \frac{L}{3EI} \right)} + \left( \frac{L^2 k_B}{3EI} + \frac{1}{L} \right) \frac{1}{2k_B L} \right\} HF \\
&= \left\{ \frac{\frac{L}{6EI}}{1 + \frac{k_G H^2 L^2}{L_G^2} \left( \frac{2H}{3EI_T} + \frac{L}{3EI} \right)} + \frac{1}{2k_B L^2} \right\} HF \\
&\text{(3.22)}
\end{aligned}$$

## 4 NK-UTWind の機能追加

### 4.1 NK-UTWind の概要

NK-UTWind は本研究室によって開発された浮体式洋上風車の風車—浮体—係留連成応答解析プログラムである。プログラムの妥当性はすでに IEA—OC5 プロジェクト（世界中から 20 以上の機関が参加）によって比較検証された。

ここで、NK-UTWind の開発歴史について簡単にまとめて説明する。

#### □ 藤岡(2012)

- NK-UTWind の風車—浮体部分の開発
- 周波数領域の浮体応答解析による NK-UTWind の検証
- ブレードの弾性変形の理論解との比較
- 風車非搭載模型の水槽実験(1/40・5MW モデル)による検証と WAMIT の計算結果との比較
- FAST による検証

#### □ 柴田(2013) [14]

- 風車運動量理論の解析解による検証
- 風車搭載模型の水槽実験による検証(1/50・2MW モデル)

#### □ 菊池(2013) [15]

- ランプドマス法を用いた係留解析プログラムの開発
- 海底傾斜を表現する実験による係留プログラムの検証
- NK-UTWind と係留プログラムの連成

#### □ 石井(2015) [16]

- 多様な係留設計への対応と風車—浮体—係留連成応答解析プログラムの完成
- 不規則波の波力評価と波漂流力の評価精度の向上

#### □ 関谷(2016) [17]

- 自由動揺の精度の向上
- 大変位解析への対応
- ランプドマス法を用いた係留プログラムに摩擦モデルを追加

NK-UTWind において各部分は以下のようにモデル化した。

- 風車と浮体部分—梁
- 係留—
  - ① 線形バネ
  - ② TLP (テンドン)
  - ③ カテナリーチェーン (質量を有する複数のバネ—ランプドマス)

ワイヤーは浮体部分の一部であるため、内力の変動分だけを考える場合に、単純に既存する NK-UTWind プログラムの中でトラス要素 (梁要素の断面二次モーメントを極小にすることで、梁のたわみ振動を抑えることでトラス要素を表現することができる) として表現すればいいと考える。ただし、NK-UTWind においてワイヤーを梁でモデル化にする際にいくつかの問題点があると考えます：

- ① 既存のプログラムでワイヤーの**初期張力**を設定することができない。**強度評価**の立場から初期張力は重要である。確かに計算の後で設定した初期張力を足せばいいが、初期張力が与えられる際にポンツーンが変形して結局ワイヤーが短くなって実際の初期張力は設定した初期張力より小さくなる。この実際の初期張力はポンツーンの曲げ剛性にも関係あるので手計算でほぼ不可能である。そのために実際の初期張力をプログラムにより直接反映できることが求められている。
- ② 既存のプログラムで**要素の軸力**を直接反映することができなく、各自由度の内力という形表現されている。そのために斜めの要素に対して軸力を求めるのは複雑である。軸力をプログラムにより直接反映できることが求められている。

以上の理由で、フィジビリティスタディの段階でワイヤーの実際の初期張力の影響と軸力を直接反映できるように、本研究ではワイヤーを TLP のテンドンのように線形バネ [18] でモデル化にするプログラムを開発し、独立のパートとして NK-UTWind の浮体部分と連成させることにした。

## 4.2 ガイワイヤーパート

NK-UTWind は弱連成応答解析手法を用いて Newmark- $\beta$ 法で運動方程式を解くプログラムである。弱連成応答解析手法においては、全体システムを風車ローターと浮体構造物と係留の3つのパートに分割して計算を行うが、繰り返し計算を行わず独立に解き、力や変位を境界条件として一方的に受け渡しを行う。不安定性を避けるために $\Delta t$ を小さくしなければならない。今回追加されたガイワイヤーパートを含めると全部4つのパートがある。

弱連成応答解析手法計算手順は以下の通りである。

- ① 浮体応答解析1時間ステップ前の翼応答、係留応答、ガイワイヤー応答から各パート(浮体パート以外)が浮体パートとの繋がり節点に生じる外力を境界条件として浮体応答解析を行う。
- ② 各パートの応答解析1時間ステップ前の浮体応答から各パートと繋がり節点における変位を境界条件として各パートの応答解析を行う。
- ③ ステップ①と②を繰り返す。

NK-UTWind の計算フローは Fig. 4-1 に表している。

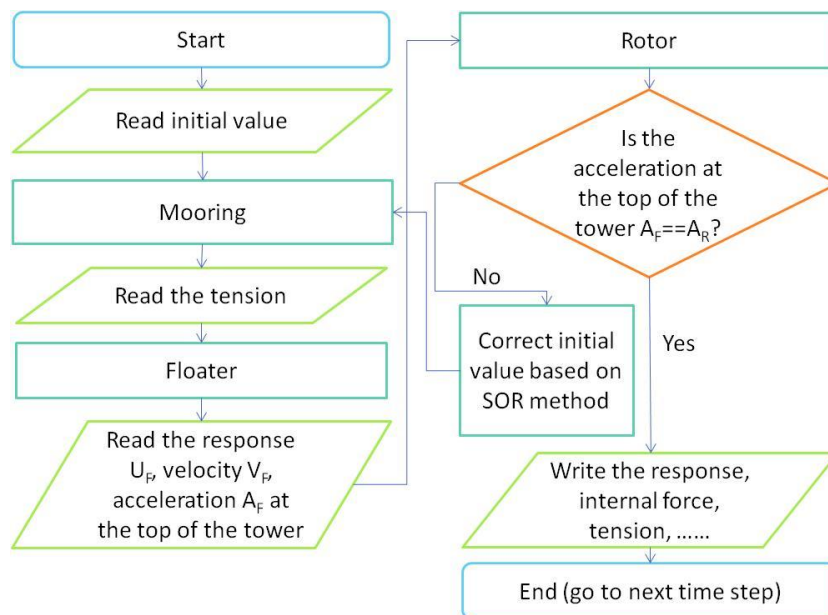


Figure 4-1 Calculation Flowchart of NK-UTWind

そして、浮体とガイワイヤー部分の境界条件の受け渡しは Fig. 4-2 に示す。

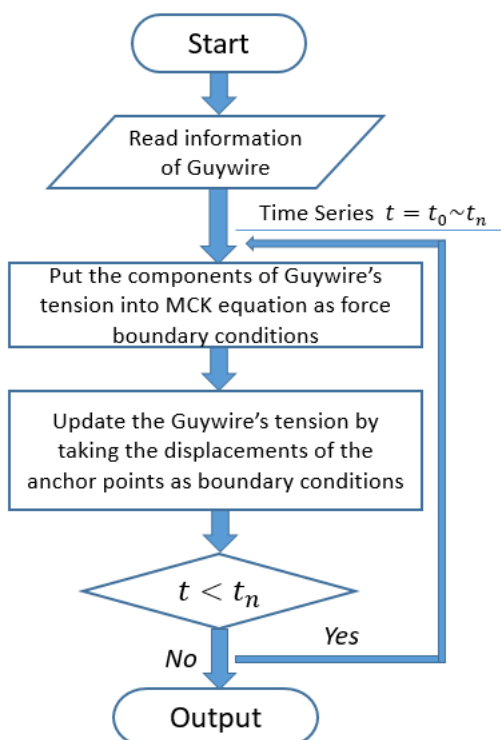


Figure 4-2 Calculation Flowchart between Floater Part and Guywire Part

#### 4.2.1 ガイワイヤーから浮体への力境界条件の受け渡し

ガイワイヤーの張力を空間固定座標系と運動後の要素座標系との間で変換する際に 2 個の変換マトリクスが必要であり [19]、それは Fig. 4-3 のように示す。座標変換の順番についてここで説明する。

普通の順番：

- ① 空間固定座標系→静的初期位置
- ② 静的初期位置→運動後の新しい位置。

しかし、NK-UTWind の計算結果はすべて空間固定座標系で表されているので、普通の順番のステップ②に必要な変換マトリクスを求めることができない。そのため、今回の順番は以下の通りである：

- ① 空間固定座標系から運動の影響による座標変換を行う
- ② 静的初期位置の影響による座標変換を行う

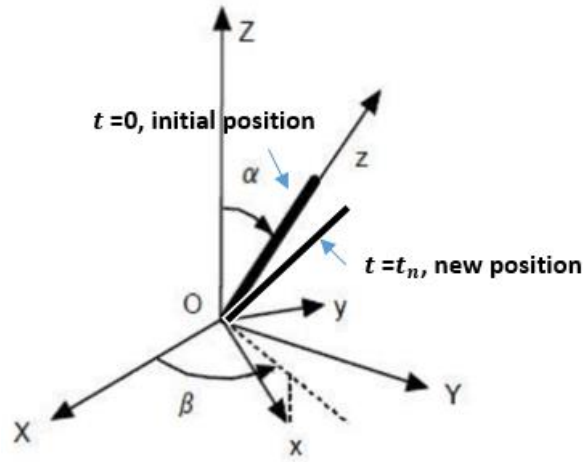


Figure 4-3 Image of the 2 Coordinate Transformation

- 運動による座標変換

NK-UTWind は微小角度の仮定下で数値計算を行うために、座標変換に必要なオイラー角を各時間ステップの Roll、Pitch、Yaw 方向の変位角で近似すればよいと考える。運動の影響による変換マトリクス  $\mathbf{A}$  は

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & s_\phi \\ 0 & -s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & -s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\psi & s_\psi & 0 \\ -s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ -c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta c_\psi & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi c_\theta \\ s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi & -s_\phi c_\psi + c_\phi s_\theta s_\psi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \quad (4.1) \\
 &\approx \begin{bmatrix} 1 & \psi^{(1)} & -\theta^{(1)} \\ -\psi^{(1)} & 1 & \phi^{(1)} \\ \theta^{(1)} & -\phi^{(1)} & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ここで、 $c$  : Cosine、 $s$  : Sine、 $\Psi$  : Yaw 回転角、 $\theta$  : Pitch 回転角、 $\Phi$  : Roll 回転角、NK-UTWind の空間固定座標系から見る回転角である。1 次成分を取ると、最後の形式となっている。

ここに2つのポイントに注意する必要がある：

- ① ガイワイヤーの2つの繋がり節点は両方に変位が生じるため、この Roll、Pitch、Yaw 角は2つの節点の相対角である。
- ② この順番はまず Yaw、次に Pitch、最後 Roll である。微小角度の場合、順番の影響は非常小さいため問題ないとする。

● 静的初期位置による座標変換

ガイワイヤーは斜めの要素であるため、節点の情報から方向余弦を用いて空間座標系から静的初期位置までの変換マトリクス  $B$  を求めることができる。

$$B = \begin{bmatrix} T_{xX} & T_{xY} & T_{xZ} \\ T_{yX} & T_{yY} & T_{yZ} \\ T_{zX} & T_{zY} & T_{zZ} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

ここで、 $x \cdot y \cdot z$  が要素座標系、 $X \cdot Y \cdot Z$  が空間固定座標系を表し以下のように設定する。

- $T_{xX} \cdot T_{xY} \cdot T_{xZ}$  : 空間固定座標系の  $X \cdot Y \cdot Z$  軸の方向ベクトルが要素座標系の  $x$  軸への写像
- $T_{yX} \cdot T_{yY} \cdot T_{yZ}$  : 空間固定座標系の  $X \cdot Y \cdot Z$  軸の方向ベクトルが要素座標系の  $y$  軸への写像
- $T_{zX} \cdot T_{zY} \cdot T_{zZ}$  : 空間固定座標系の  $X \cdot Y \cdot Z$  軸の方向ベクトルが要素座標系の  $z$  軸への写像

このマトリクス  $B$  は、全体質量と剛性マトリクスを求める時も用いられる。微小角度の場合に、時間ステップ毎に全体質量と剛性マトリクスを更新する必要がない。

- 空間固定座標系における運動方程式

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (4.3)$$

- 全体質量マトリクス

$$M = B^T \tilde{M} B \quad (4.4)$$

- 全体剛性マトリクス

$$K = B^T \tilde{K} B$$

ここで、 $M$ 、 $C$ 、 $K$  : 空間固定座標系の質量、減衰、剛性マトリクス

$\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 $u$ 、 $F$  : 空間固定座標系の加速度、速度、変位、外力ベクトル

$\tilde{M}$ 、 $\tilde{K}$  : 要素座標系の質量、剛性マトリクス

以上で、 $\tilde{\mathbf{F}}$ は運動後の要素座標系の外力ベクトルで、空間固定座標系から運動後の要素座標系までの変換は以下のようにになっている。

$$\tilde{\mathbf{F}} = \mathbf{B}\mathbf{A}\mathbf{F} \quad (4.5)$$

すなわち、

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}^T\mathbf{B}^T\tilde{\mathbf{F}} \quad (4.6)$$

#### 4.2.2 浮体からワイヤーへの変位境界条件の受け渡し

前述のようにワイヤーが係留とは違い、浮体が運動するときに、二つの繋がり節点ともに変位が生じる。Fig. 4-4 にそのイメージを表している。

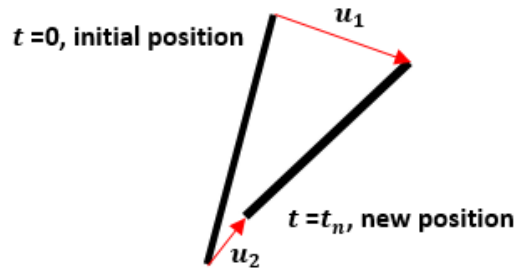


Figure 4-4 Image of the displacements of the 2 Anchor Points

$\mathbf{u}_1$ を節点1の変位、 $\mathbf{u}_2$ を節点2の変位とし、ワイヤーの伸長量 $\Delta L$ は次の通りである。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta L \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{A}(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2) \quad (4.7)$$

ワイヤーの伸長量が分かった上で、ワイヤーの張力を更新する。

$$T_{new} = T_{old} + \frac{EA}{L} \times \Delta L \quad (4.8)$$

時間ステップ毎にこれらのような繰り返しを行い、ワイヤーパートと浮体パートと互いに境界条件を受け渡し、NK-UTWind で数値計算が進んでいる。



## 5 水槽実験

### 5.1 実験目的

ワイヤーでタワーを支持した軽量低剛性浮体の波浪中弾性応答特性を把握するために、水槽で規則波・不規則波試験を行った。ここで実験の概要、実験条件、実験の結果について報告する。

### 5.2 実験模型

#### 5.2.1 ガイワイヤーの取り扱い方

本実験模型では 3 本の鋼製のワイヤーで実機モデルのワイヤーを表現することにした。1 本当たりの 2 つ取り付け点はそれぞれポンツーンの根元とタワーのトップにある。タワートップの取り扱い方は Fig. 5-2 のようになっている。

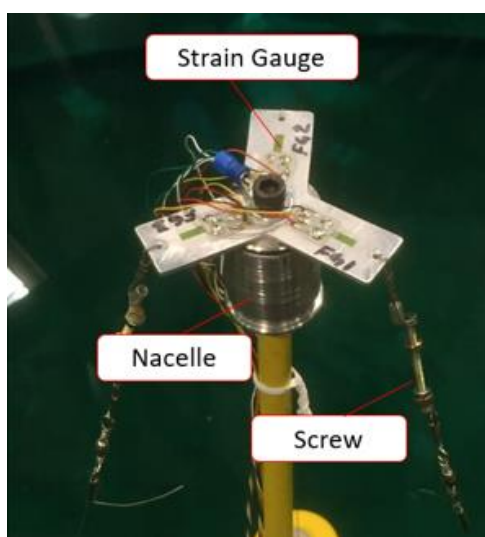


Figure 5-1 Guywire Settings in Experiment Model

ここで、片持ち梁型張力計でワイヤーの張力変動を計測する。ワイヤーは長いねじと繋がっており、ねじを調整することでカリブレーションを行う。実験に用いたワイヤーの主要目は Table. 5-3 のように表している。

Table 5-1 Principal Design of the Guywire of the Experiment Model

Item	Model
Material	Steel
Young's Modulus	2E11
Tensile Strength [MPa]	400
Diameter [mm]	1
Sectional Area [mm <sup>2</sup> ]	0.785
Max Tension [kg]	10
Pretension [g]	390

注意しなければならないのは、実験に用いたワイヤーは非常に硬いことである。それに、片持ち梁型ひずみ計（鋼製）のメカニズムからワイヤーのバネ係数を評価する時にひずみ計の弾性も考慮して等価バネ係数を計算しなければならない。これは、NK-UTWindでワイヤーを再現するのに重要だと考える。

実験模型のひずみ計とワイヤーの詳細な寸法は Fig. 5-3 のように示す。

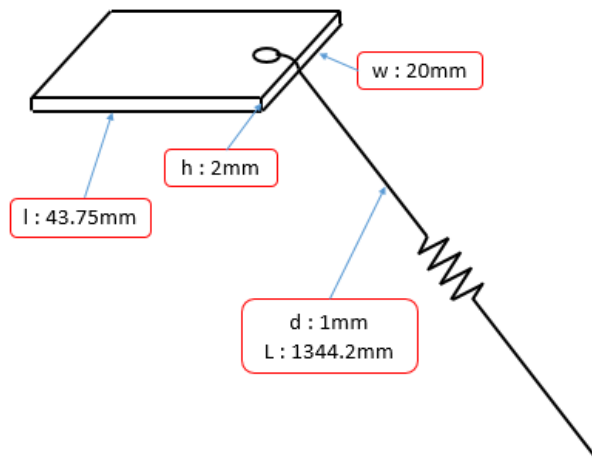


Figure 5-2 Dimensions of the Cantilever Strain Gauge and Guywire of Experiment

- 全体の等価バネ係数の評価方法（模型スケール）
- ひずみ計梁の軸バネ係数

$$k_a = \frac{EA}{l} = \frac{2E11 \times 20 \times 2 \times 10^{-3}}{43.75} = 1.83E8 \text{ N/m} \quad (5.1)$$

- ひずみ計梁の曲げバネ係数

$$k_b = \frac{3EI}{l^3} = \frac{3 \times 2E11 \times \frac{20 \times 2^3}{12} \times 10^{-3}}{43.75^3} = 9.55E4 \text{ N/m} \quad (5.2)$$

- ガイワイヤーのバネ係数

$$k_g = \frac{EA}{L} = \frac{2E11 \times \frac{\pi \times 1^2}{4} \times 10^{-3}}{1344.2} = 1.17E5 \text{ N/m} \quad (5.3)$$

計算からひずみ計の軸剛性は非常に大きいため、水平方向の変形を考えずに垂直方向の変形だけを考えて良いと考えた上で、Fig. 5-4 のようにモデル化（浮体の寸法も含まれる）できる。この寸法は実機モデルの浮体寸法で、角度の計算や模型から実機の換算はこの値を用いれば良いと考える。

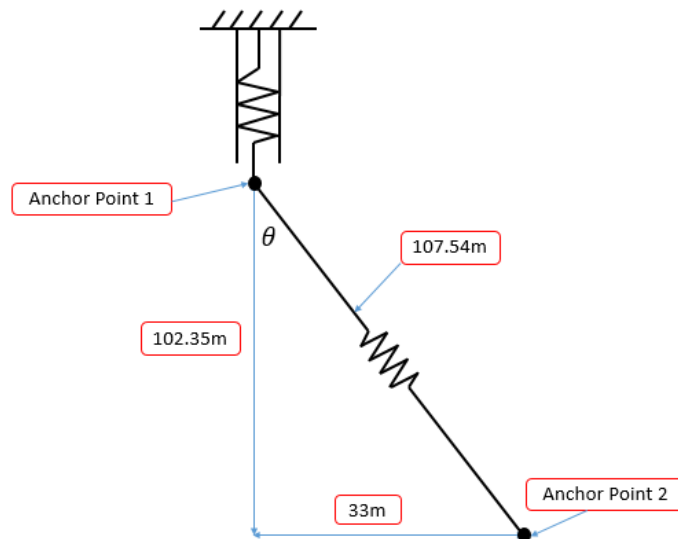


Figure 5-3 Modeling of the Cantilever Strain Gauge in Prototype Scale

ガイワイヤーのバネ係数を水平方向と垂直方向に分解してひずみ計のバネ係数と合成すると、全体の等価バネ係数は以下のようにになっていた。

- ガイワイヤーの水平方向のバネ係数

$$k_{horizontal} = k_g \times \sin\theta = 1.17E5 \times \frac{33}{107.54} = 3.59E4 \text{ N/m} \quad (5.4)$$

- ガイワイヤーの垂直方向のバネ係数

$$k_{vertical} = \frac{k_b \times k_g \cos\theta}{k_b + k_g \cos\theta} = \frac{9.55E4 \times 1.17E5 \times \frac{102.35}{107.54}}{9.55E4 + 1.17E5 \times \frac{102.35}{107.54}} = 5.14E4 \text{ N/m} \quad (5.5)$$

- 全体の等価バネ係数

$$k_{total} = \sqrt{k_{horizontal}^2 + k_{vertical}^2} = 6.27E4 \text{ N/m} \quad (5.6)$$

Froude の相似則に従って実機モデルに換算して実機のガイワイヤーのバネ係数は

$$k_{proto} = k_{total} \times 80^2 = 4.01E8 \text{ N/m} \quad (5.7)$$

実機のガイワイヤーの寸法も Froude の相似則に従うと仮定すれば、その直径  $d = 0.08 \text{ m}$ 、断面積  $A = \pi \times 0.04^2 = 0.005 \text{ m}^2$  となるため、実機のワイヤーのヤング率は

$$E_{proto} = \frac{k_{proto} \times L}{A} = 8.58E12 \text{ Pa} \quad (5.8)$$

すなわち、実験模型に用いられたガイワイヤーはフルードの相似則に従って実機モデルに換算するとそのヤング率は  $8.58E12$  (およそ  $2E11$  の 43 倍) となる。このように大きなヤング率を有する材料は現実に存在しないため、動力相似を保とうとするのであれば、幾何相似を保つことはできない。実験模型に动力的に相似する実機のガイワイヤーを設計しようとするれば、たとえ鋼製だとし、その半径は  $0.5[\text{m}]$  くらいともなる。このような太さを有している長さが  $100[\text{m}]$  くらいのガイワイヤーであれば、たわみ振動の問題は無論、自重もかなり大きな問題となっている。こういった意味で、今回の実験模型のガイワイヤー設計は失敗である(材料面からこれは仕方ないことである)とも言える。本当は、より柔軟なガイワイヤーをもちいるべきである。ただし、特性の解明にはたとえ硬いガイワイヤーだとしてもバネとして働くため大した問題はないと考える。NK-UTWind で実験を再現するためにそのままの値で  $E_{proto}$  を設定すべきだが、それほど大きな剛性だと小さな変形でも巨大な力が生じ、時々力のバランスが崩れるため計算が発散してしまう。そのため、NK-UTWind でガイワイヤーの幾何相似を保った上で、ヤング率を  $6E11$  に設定することにした。

前述の内容をまとめると、結論は以下の通りである。

- ① 実験模型のガイワイヤーは非常に硬いもの(今後の実験で注意)で、実機に実現できないが、数値計算に使う。

- ② NK-UTWind で数値計算を行う際に発散を防ぐためにワイヤーのヤング率を6E11 に設定した。実験模型から換算した値と結構差があるため、張力応答が小さくなる。これについて後の章で説明する。
- ③ 実機のワイヤーを設計する際により柔軟なものを用いるべきである。さらに、ワイヤーの自重とたわみ振動についても考える必要がある。これは今後の課題とする。

### 5.2.2 1/80 の弾性相似模型

第3章で設計された一般化実機モデルの1/80の弾性相似模型である。Fig. 5-1には、それぞれ設計された一般化実機モデルと実験模型を示している。



Figure 5-4 1/80 Elastic Similar Experiment Model of the Designed Common Model

この実験模型は分割模型であり、タワーとポンツーンは鋼製梁ビームで表現する。実際の実現性を加味して模型を作る際にできるだけ細い鋼製梁ビームで柔軟に低剛性のタワーとポンツーンを表現することにした。梁ビームの寸法は Table. 5-1 のように示す。

Table 5-2 Dimensions of the Steel Beams of Exp. Model's Tower and Pontoon

Item	Dimension	Variable	Unit
Tower	13.75 × 1312.5	$\phi d \times L$	mm
Pontoon	500 × 13.75 × 9.375	$L \times w \times h$	mm

三つのサイドコラムとポンツーンの鋼ビームの周りはウレタン製の浮力体で波力を受ける。中央コラムは中空であり、バラストを入れることで喫水と重心を調整できる。タワー部について、波力を受けないことやワイヤーの取り付けの便宜で鋼製のビームの周りにウレタン製の浮力体が付けられていない。中央コラムの上と各サイドコラムのトップに合わせて 8 個のターゲットが設置されている。波試験における計測点は模型の重心である。Table. 5-2 に実機モデルと実験模型の主要目を示す。

Table 5-3 Principal Design of Prototype and Experiment Model

Item	Prototype	Exp. Model(1/80)	Unit
Displacement	5774	11.25	ton/kg
KB	4.59	57.48	m/mm
BM	16.08	201.46	m/mm
KG	8.31	104.64	m/mm
GM	12.36	154.30	m/mm
Natural Period of Heave	16.6	1.86	sec
Natural Period of Roll and Pitch	20.6	2.28	sec
Flexural Rigidity of Pontoon	2.707E11	8.26E1	Pa·m <sup>4</sup>
Flexural Rigidity of Tower	5.031E11	1.54E2	Pa·m <sup>4</sup>

ここでは第 3 章で設計された一般化モデルの主要目をもう一回示した。実は、この主要目はすでに最終バージョンである。初期設計に実際の製造にとってはかなり難しい部分があるため、実験模型に合わせるように初期設計からいろいろ変わったところがある。タワーとポンツーンの曲げ剛性は実験模型から換算したもので、かなり低剛性で設計目標が達成したことが分かる。この最終バージョンの値を入力データとして NK-UTWind にインプットして数値計算を行う。

## 5.3 実験施設

### 5.3.1 実験場所

実験はブラジルサンパウロ大学(USP)の Numerical Test Tank(TPN)の Ocean Basin で実施した。Fig. 5-5 において水槽の様子と設備などを示す。

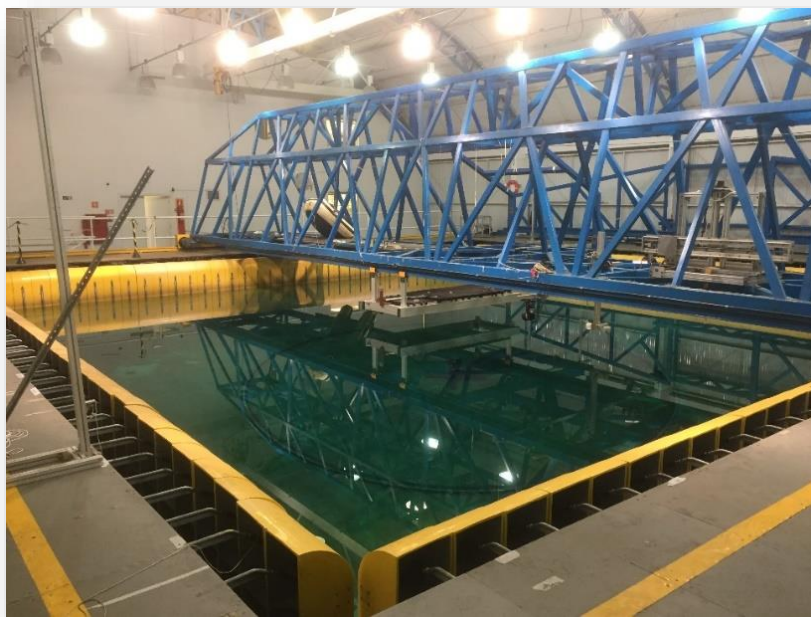


Figure 5-5 Image of the USP Ocean Basin in the University of Sao Paulo

水槽の情報は以下の通りである。

- ① 水槽の使用期間：2010～
- ② 寸法：長さ 14m × 幅 14m × 深さ 4m
- ③ 造波機：四つの方向にあり、厳しい海象条件を再現でき
- ④ 消波効果：90%～98%に達するため、曳航水槽よりかなり長い時間の試験(20[min]～)を行うことが可能
- ⑤ 造波の周波数範囲：0.5[Hz]～1.5[Hz]

### 5.3.2 実験の座標システム

Fig. 5-6 において、水槽の俯瞰概念図、座標システム、係留システムを示す。

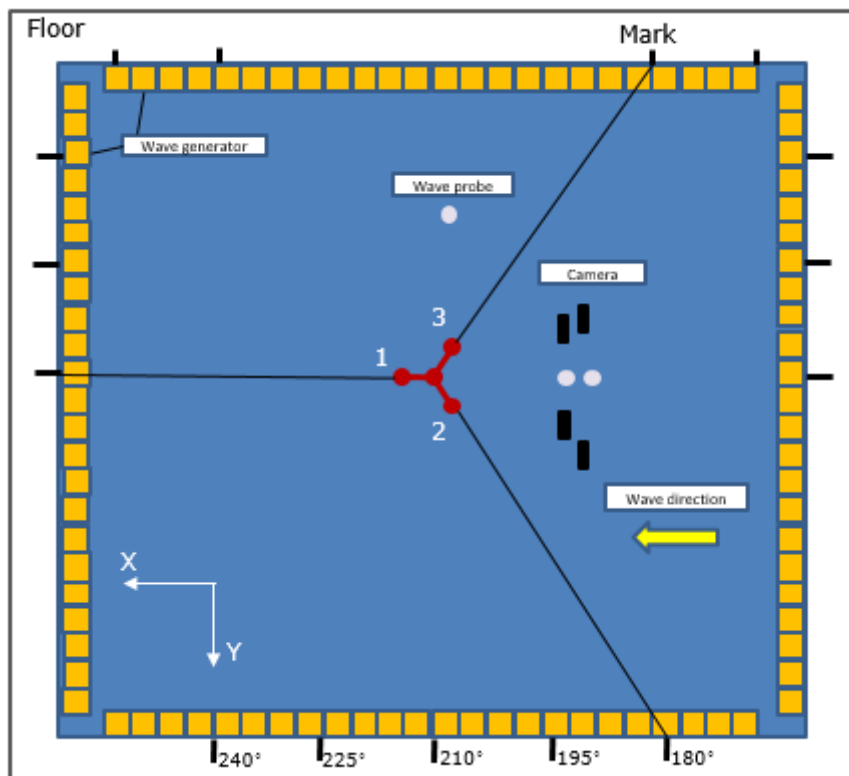


Figure 5-6 Coordinate and Mooring System of the Experiment

実験の座標システムは Fig. 5-6 の左下のようにになっている。合計でカメラが 4 器あり、波高計が 4 器 (Fig. 5-6 には 3 器だけは見られる。もう 1 器は模型の中央コラムのところであり、試験を行う前に波のキャリブレーションをする際に設置されていた。これからの解析に使われた波の時系列データはすべてこの波高計によって取られた。) あり、実際に設置された位置は Fig. 5-6 に示す通りである。浮体のサイドコラムの付近に 1、2、3 の番号がつけられ、それぞれ該当する側のコラム、ポンツーン、ワイヤーの番号を表しており、実験データの解析に多く使われている。水槽周りの白い部分は地面で、水槽中の黄色の正方形は造波機である。波はいつも右側から入射する。地面には合計 15 個のマークが設置されており、同時に 3 つの係留のアンカー点を変えることで相対的に波の入射角を変えることができる。そのため、波の入射角には合計  $180^\circ$ 、 $195^\circ$ 、 $210^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $240^\circ$  の 5 ケースがある。

係留は浮体の各コラムから地面のマークまでの黒い線で表している。本実験で用いられた係留のばね定数は  $2.2[\text{N/m}]$  であり、非常に緩やかな係留であることが分かった。



係留の様子とアンカー点の取り付け方は Fig. 5-7 のようになっている。

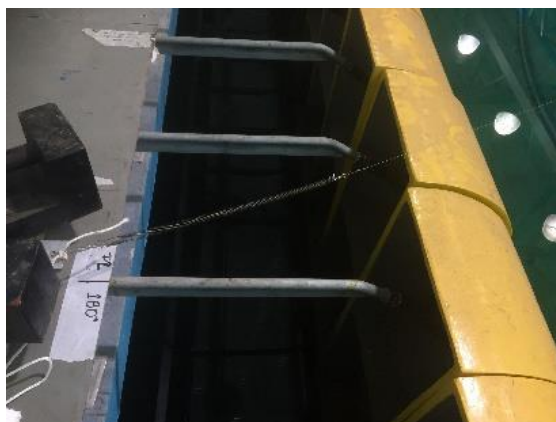


Figure 5-7 Mooring and the Anchor Point

#### 5.4 計測項目

本実験の計測項目は以下の通りである。ひずみ計の位置は Fig. 5-8 に示す。

- ① 規則波、不規則波、過渡水波中の模型の6自由度の動揺（ターゲット8個）
- ② ガイワイヤーの張力変動（ひずみゲージ3カ所）
- ③ タワー根元のひずみ（ひずみゲージ3カ所）
- ④ ポンツーンの根元と中部のひずみ（ひずみゲージ6カ所）
- ⑤ 波高（波高計4器）

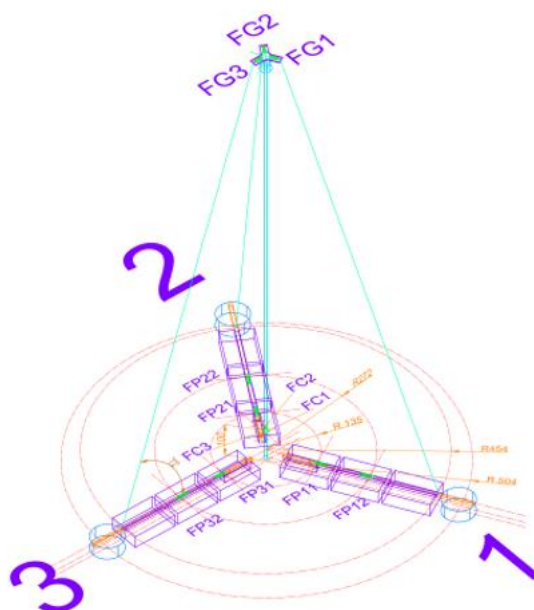


Figure 5-8 Position of the 12 Strain Gauges of the Experiment Model

Fig. 5-9 においては実験データの処理装置を示す。

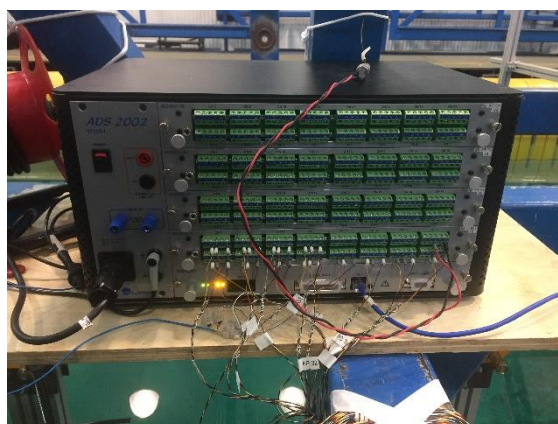


Figure 5-9 ADS Data Acquiring System

## 5.5 実験条件

本実験では合わせて由動揺試験、過渡水波試験、規則波試験、不規則波試験の4種類を実施した。

### 5.5.1 過渡水波

過渡水波（波高は一定で、周期は徐々に増加していく一連の波）試験は1ケース実施された。実機スケールの波周期範囲は6.6[s]~17.9[s]であり、実機スケールの波高2.74mである。Table. 5-4には模型と実機の過渡水波の実験条件を示した。

Table 5-4 Transient Wave Condition of the Experiment Model and Prototype

Transient Wave						
Prototype scale			Model scale (1:80)			
Tmin[s]	Tmax[s]	H[m]	Tmin[s]	Tmax[s]	H[m]	Duration[s]
6.6	17.9	2.74	0.74	2.00	0.034	220
Common Parameters						
Stmin[%]		Stmax[%]		Lmin[m]		Lmax[m]
0.55		4.00		0.86		6.25

ここに、Tmin：一連の波の最小周期、Tmax：最大周期、H：波高、Duration：実験の実施時間、Stmin：最小波傾斜、Stmax：最大波傾斜、Lmin：最小波長、Lmax：最大波長

### 5.5.2 不規則波 (JONSWAP)

不規則波実験条件は JONSWAP スペクトルによって 3 ケースを設定する。

- JONSWAP スペクトルの公式

$$S_j(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \gamma^r \quad (5.9)$$

各パラメータの意味は結構複雑で、また専門の資料に詳しく掲載されているため、ここで説明はしない。

各ケースの有義波高と有義波周期は以下の通りである。

- Case 1:                                      有義波高：2.5[m]                      有義波周期：9.0[s]
- Case 2 (ストーム状態)： 有義波高：9.8[m]                      有義波周期：13.5[s]
- Case 3:                                      有義波高：4.0[m]                      有義波周期：16.1[s]

Table. 5-5 には模型と実機の不規則波の実験条件を示す。

Table 5-5 Transient Wave Condition of the Experiment Model and Prototype

Irregular Wave (JONSWAP)							
Case	Prototype scale				Model scale (1:80)		
	Hs [m]	Tp [s]	$\gamma$	AvSt [%]	Hs [m]	Tp [s]	Duration [s]
1	2.5	9.0	3.3	2.00	0.032	1.006	1207
2	9.8	13.5	3.3	3.44	0.123	1.509	1207
3	4.0	16.1	3.3	1.00	0.051	1.800	1207

ここに、Hs：有義波高、Tp：有義波周期、 $\gamma$ ：式(5.9)に示す JONSWAP のパラメータ、AvSt：平均波傾斜、Duration：実験の実施時間

過渡水波と不規則波のパワースペクトルは Fig. 5-10 のように示し、図例の TRA02、IRR01、IRR02、IRR02、はそれぞれ前述の過渡水波、不規則波のケース 1、2、3 である。ストーム状態のエネルギーが非常に大きいため示していない。不規則波の場合、有義波周期のところにピークが出てき、有義波周期に離れるとエネルギーが急激に小さくなる。過渡水波の場合、ある波周期範囲でエネルギーの分布は穏やかである。WHI01 というのは、White Noise のパワースペクトルで、過渡水波よりさらに平穏なエネルギーを有していることが分かる。

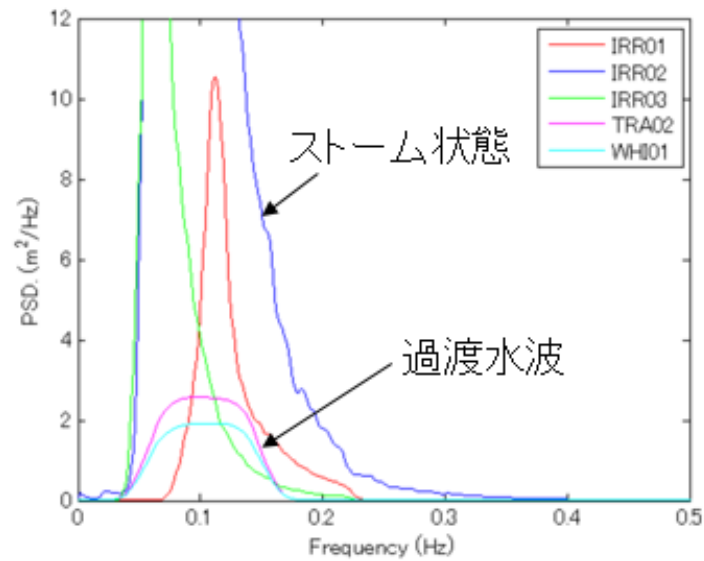


Figure 5-10 Power Spectrum of Transient and Irregular Wave

### 5.5.3 規則波

規則波実験条件は合計 18 ケースを設定する。

- (波高影響実験)6 ケース:Heave 方向の減衰を調べるために、波周期を一定(16.35[s]—Heave 方向の固有周期)とし、波高(0.5[m]~6.0[m])だけを変えて実施した試験である。
- (周波数応答実験)12 ケース:波高を一定(1.5[m])とし、波周期(6.0 s ~17.0 s)だけを変えて周波数応答 RAO を描くために実施した試験である。

Table. 5-6 には模型と実機の規則波の実験条件を示す。

Table 5-6 Regular Wave Condition of the Experiment Model and Prototype

Regular Wave	Prototype scale			Model scale (1:80)		
	T (s)	H (m)	Steepness (%)	T (s)	f (Hz)	H (mm)
1	16.35	0.5	0.1	1.83	0.547	6.3
2	16.35	1.0	0.2	1.83	0.547	12.5
3	16.35	2.0	0.5	1.83	0.547	25.0
4	16.35	4.0	1.0	1.83	0.547	50.0
5	16.35	5.0	1.2	1.83	0.547	62.5
6	16.35	6.0	1.4	1.83	0.547	75.0
7	6.00	3.0	5.3	0.67	1.491	37.5
8	7.00	3.0	3.9	0.78	1.278	37.5
9	8.00	3.0	3.0	0.89	1.118	37.5
10	9.00	3.0	2.4	1.01	0.994	37.5
11	10.00	3.0	1.9	1.12	0.894	37.5
12	11.00	3.0	1.6	1.23	0.813	37.5
13	12.00	3.0	1.3	1.34	0.745	37.5
14	13.00	3.0	1.1	1.45	0.688	37.5
15	14.00	3.0	1.0	1.57	0.639	37.5
16	15.00	3.0	0.9	1.68	0.596	37.5
17	16.00	3.0	0.8	1.79	0.559	37.5
18	17.00	3.0	0.7	1.90	0.526	37.5

## 6 実験データの解析及びNK-UTWindを用いた考察

本章では、まず実験で得られたデータを解析しながらNK-UTWindでの数値計算結果と比較し、追加された新しい機能（ワイヤーパート）の妥当性を検証する。その次に実験の解析結果に現れた物理現象についてNK-UTWindを用いていろいろ数値計算を行って調べる。

### 6.1 自由動揺試験

#### ● 計測解析方法

##### ● Surge

浮体が静平衡状態から計測を開始する。その後、浮体係留バネを強制的に伸縮させることにより動揺させた。時系列データから比較的運動が落ち着いてきたところから一部のデータを選出してMatlabでFFT解析を行う。(MatlabはExcelとは違い、FFT解析のデータには制限がない)

##### ● Heave・Pitch

浮体が静平衡状態から計測を開始する。その後、浮体コラム上部を強制的に押し沈めることによりことによりそれぞれの動揺を発生させた。解析方法はHeaveの場合と同じである。

#### ● 時系列及びFFT解析結果

Fig. 6-1～Fig. 6-3に自由動揺試験における各運動の計測時系列及びそのFFT解析結果を示す。

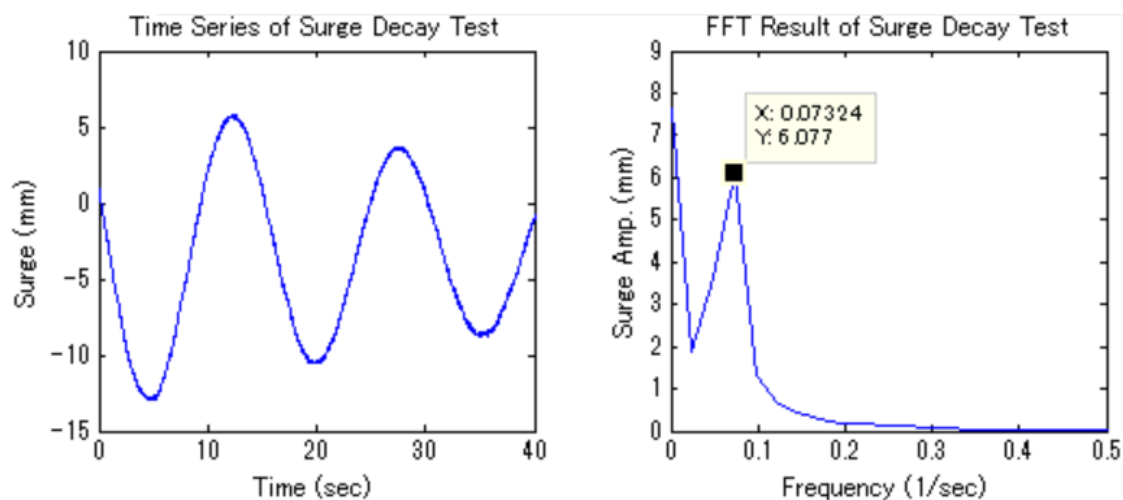


Figure 6-1 Time Series and FFT Result of Surge Decay Test

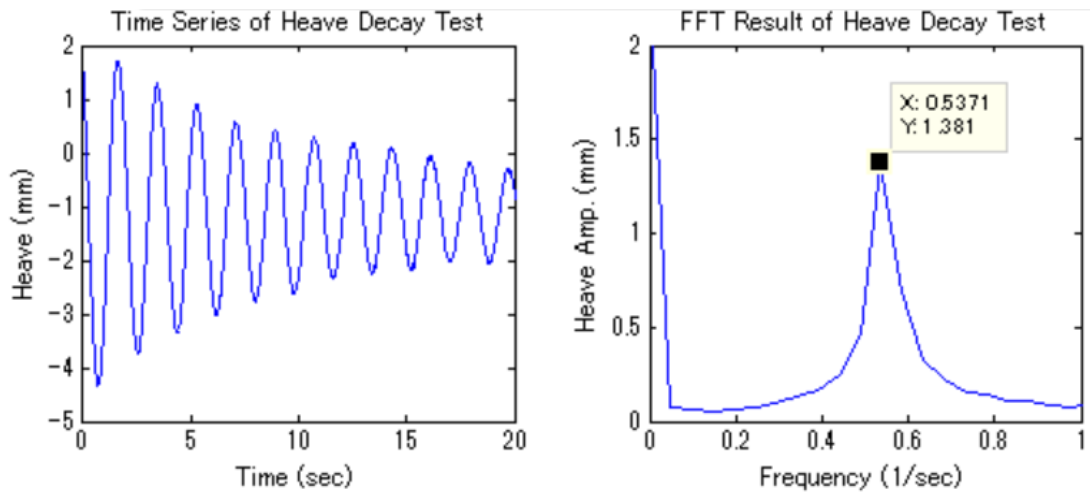


Figure 6-2 Time Series and FFT Result of Heave Decay Test

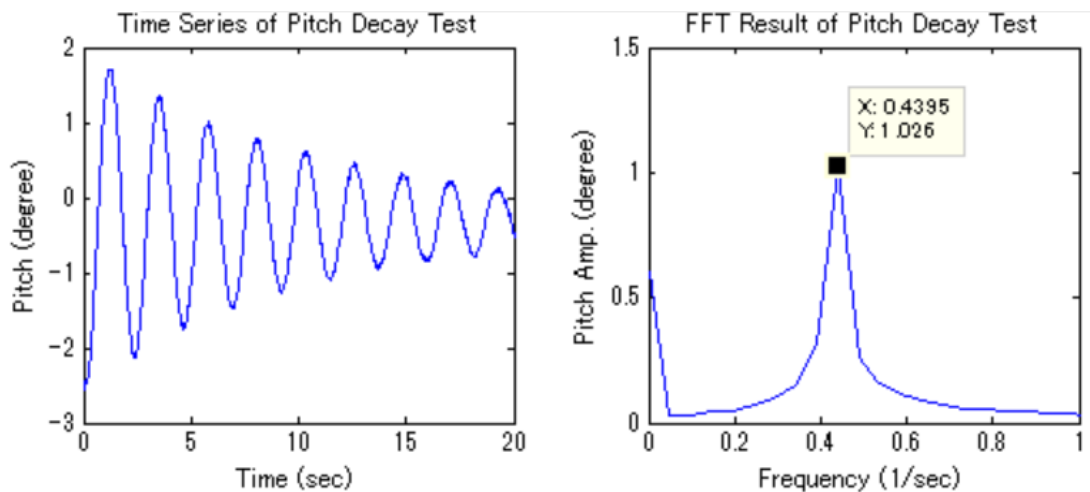


Figure 6-3 Time Series and FFT Result of Pitch Decay Test

- 実験とNK-UTWindとの比較

NK-UTWindでの計算結果を Table. 6-1 にまとめて示す。

Table 6-1 Comparison of Natural Period between Experiment and NK-UTWind

Item	Exp. FFT Result	Prototype	NK-UTWind	Error (%)	Unit
Surge	13.65	122.1	127	4	Sec
Heave	1.86	16.4	16.6	1.2	Sec
Pitch	2.28	20.4	20.6	1	Sec

Table. 6-1 より、実験模型が対応する実機モデルの固有周期（計測値）は NK-UTWind の結果（設計値）と良好に一致していることが確認した。Sway、Roll、Yaw 方向の計測は行っていなかった。今回の模型が対応する実機モデルは Heave > 15[s]、Pitch > 20[s] になるため、第 3 章に述べた共振回避の設計条件を満たした。

## 6.2 動揺の周波数領域応答

### 6.2.1 過渡水波と不規則波実験結果

#### ● 計測解析方法

前述のように過渡水波と不規則波条件をかけて計測する。実験水槽の消波効果がよいため、前述のように各条件の実験時間はかなり長い。過渡水波はおよそ 4[*min*]で、不規則波はおよそ 20[*min*]である。実験のデータ量は結構多いが、全時系列データを選出して Matlab で解析を行う。

#### ● 過渡水波と不規則波の周波数応答の求め方

- 波時系列の自己相関関数

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \right\} \quad (6.1)$$

- 波時系列と浮体動揺応答時系列の相互相関関数

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \right\} \quad (6.2)$$

- 周波数応答関数

$$H(\omega) = \frac{R_{xy}(\omega)}{R_{xx}(\omega)} \quad (6.3)$$

詳細に言えば、Matlab の中で、pwelch() と cpsd() という関数があり、それぞれにより  $R_{xx}(\omega)$  と  $R_{xy}(\omega)$  を求めることができる。そして  $H(\omega)$  の絶対値  $|H(\omega)|$  を取って周波数領域でプロットしたら次のような結果が出てきた。



● 計算条件と結果

Fig. 6-4～Fig. 6-8 にはそれぞれ過渡水波 (TRA02)、不規則波 (IRR01、IRR02、IRR03) の 180°、195°、210°、225°、240° の周波数応答を示す。

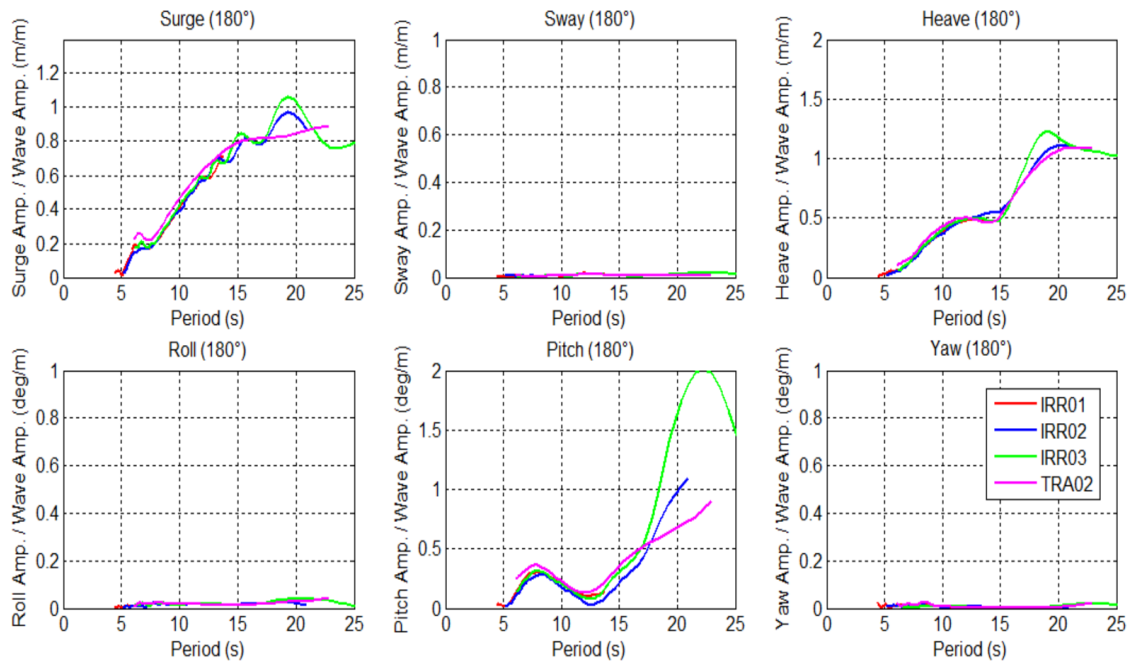


Figure 6-4 Frequency Domain Response (Wave Direction 180° )

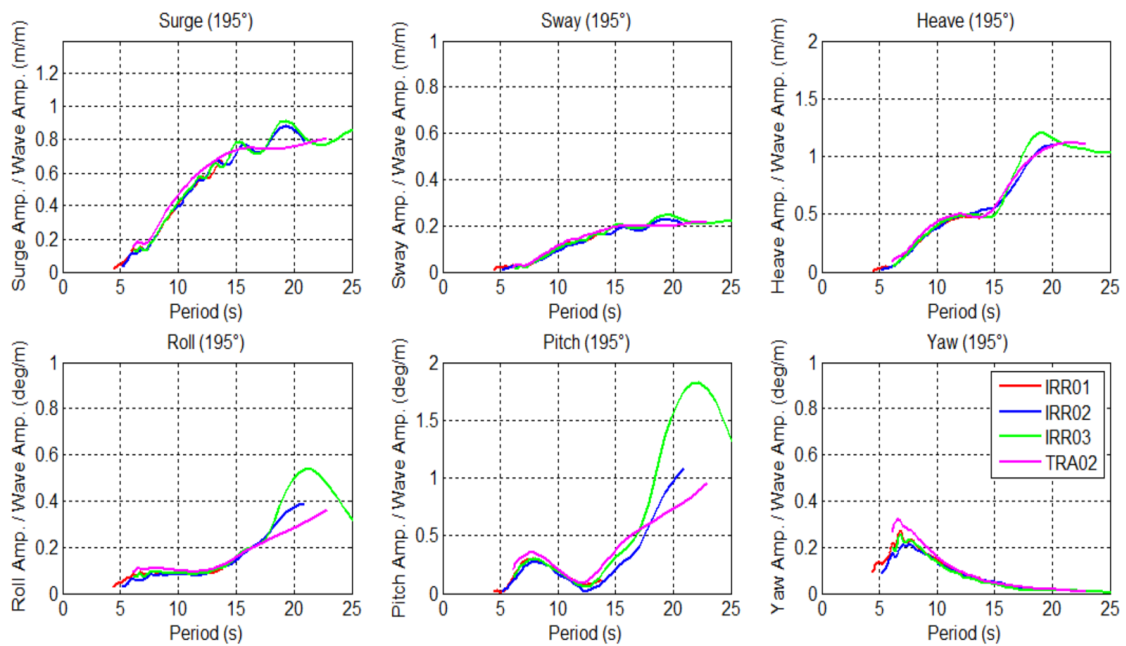


Figure 6-5 Frequency Domain Response (Wave Direction 195° )

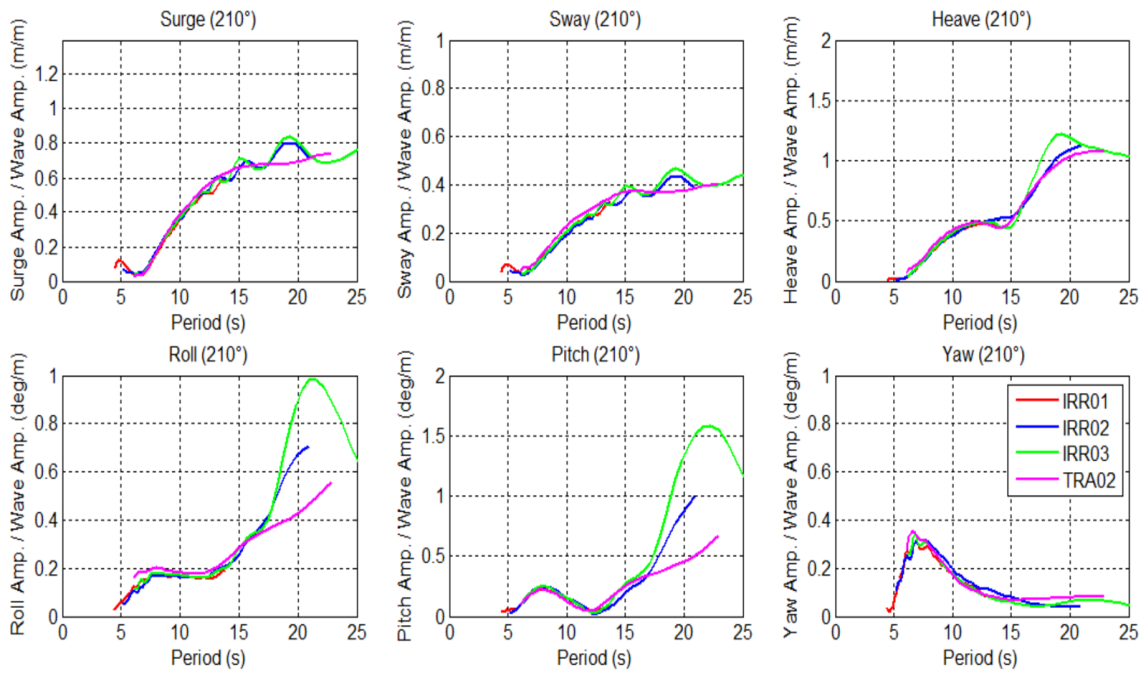


Figure 6-6 Frequency Domain Response (Wave Direction 210° )

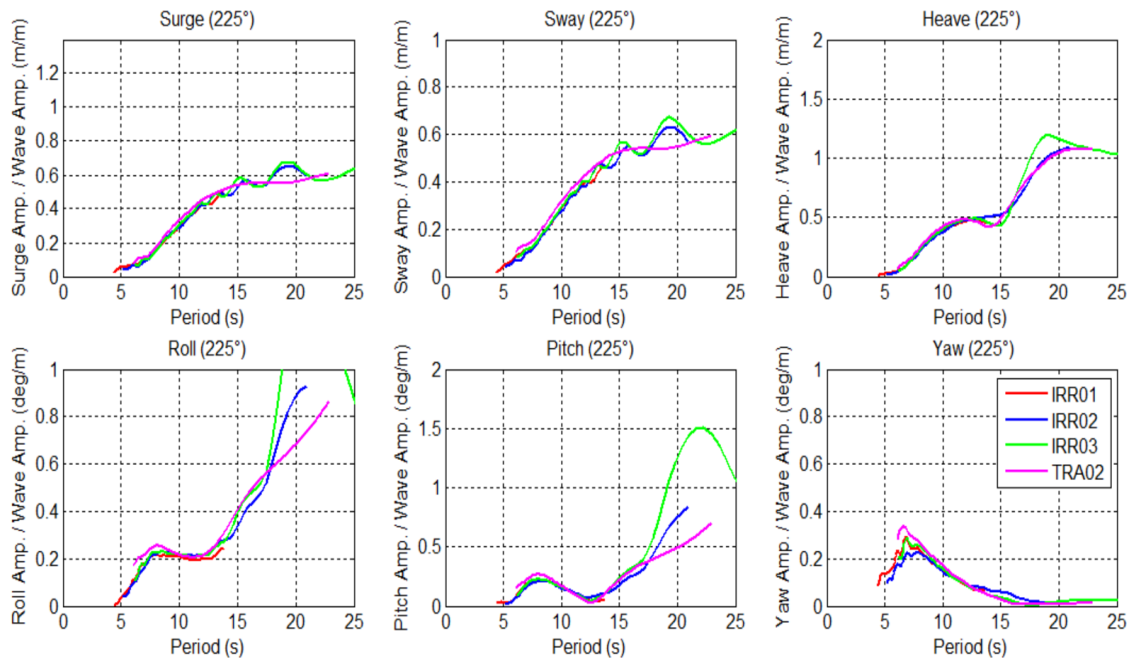


Figure 6-7 Frequency Domain Response (Wave Direction 225° )

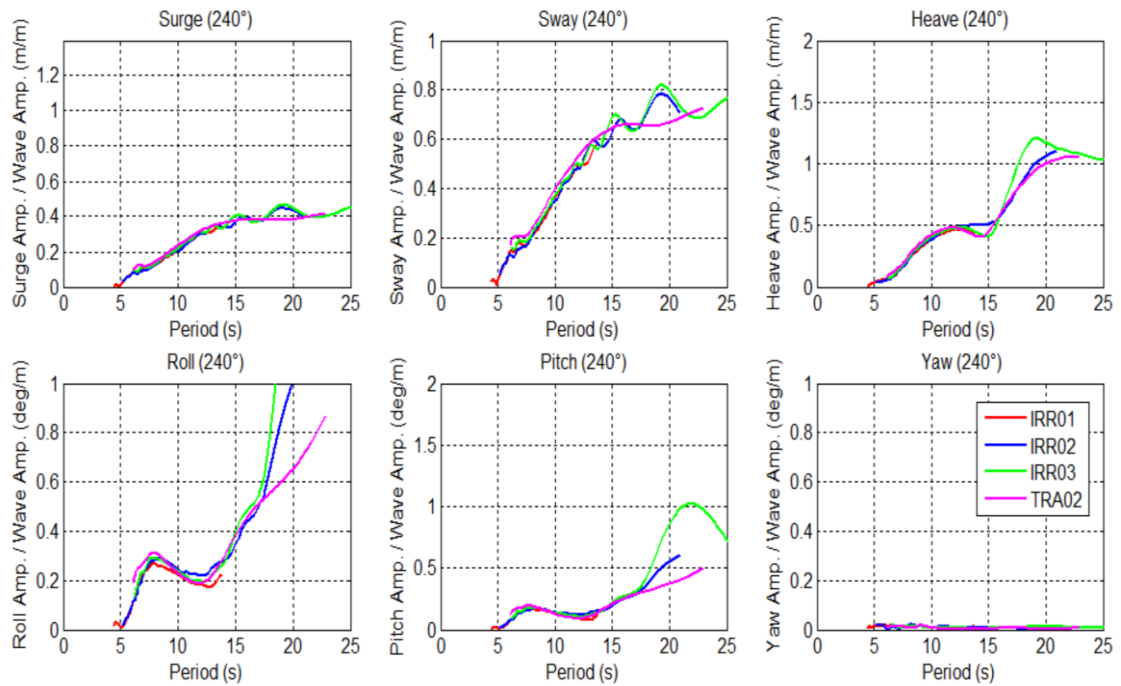


Figure 6-8 Frequency Domain Response (Wave Direction 240° )

● 考察

各波条件の周波数領域応答の曲線の長さが違うことは不規則波、過渡水波のパワースペクトルが示したように各波条件がエネルギーを持っている有効な周波数範囲がそれぞれ限られているわけである。有効範囲以外の周波数領域で波のエネルギーが小さすぎて正しい応答が出てこないため、Matlab で解析を行う時にそれらのデータが捨てられた。

考察をする前に、まず波方向と浮体の関係を Fig. 6-9 のように示す。

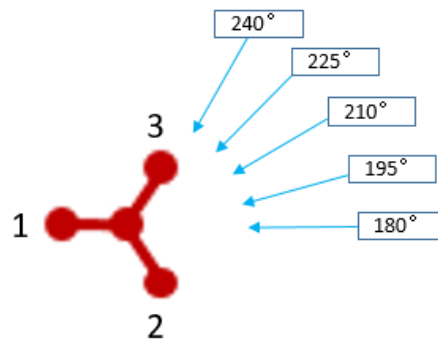


Figure 6-9 Model Position and Wave Directions

- **Surge**

実験に用いられた係留が非常に緩いもので、自由動揺試験により Surge 方向の固有周期は 122[s]である。Fig. 6-4～Fig. 6-8 に Surge 応答のピークが現れていない。

実験の計測点は重心であるため、周期 20s (Pitch の固有周期) の近傍に Pitch と連成効果が見られない。

波周期の増加につれて Surge 方向の応答が徐々に増加して長周期領域で 1 に近づく。180° の応答を基準として、他の波方向の Surge 応答は 180° の応答を変化した角度の余弦値に乗じたものであることが分かった。

- **Sway**

Sway 方向の固有周期は計測していなかった。

波周期の増加につれて Sway 方向の応答も徐々に増加して Surge 方向の応答と同じ傾向を示した。Sway の各波方向の応答は Surge 方向の 180° の応答を基準として、変化した角度の正弦値に乗じたものであることが分かった。

- **Heave**

自由動揺試験による Heave 方向の固有周期は 16.35[s]である。Fig. 6-4～Fig. 6-8 に波周期 16.35[s]の近傍に Heave のピークが現れないことは、FFT の解像度 (曲線の円滑を確保するために、FFT の解像度を適当な値に設定した。長周期領域のデータ点が少なく、16.35[s]のところデータ点がないことはある) が原因だと考える。

全体として、セミサブ型浮体の特徴的な Heave 応答が示された。波周期 15[s]の近傍に波無し点が生じたが、Footing が存在しないため、波力の相殺効果はそれほど高くない。長周期領域で応答は徐々に 1 に近づき、これは長周期波の波長は長くて浮体は波の上に乗っているわけである。

各波方向において Heave 方向の応答が変わらない。

- **Roll**

Roll 方向の固有周期は計測していなかった。ただし、本実験で設計されたモデルは三角対称なので、Roll と Pitch 方向における各コラムの水線面の断面二次モーメントは同じであるため、固有周期も同じであると考えられる。そこで、Fig. 6-4～Fig. 6-8 に波周期 20[s]の近傍に Roll 応答のピークが出てきた。

全体として、Pitch 方向の応答との傾向が同じで、セミサブ型浮体の特徴的な Roll 応答を示した。波周期 12[s]の近傍に波無し点、波周期 8[s]の近傍に波力の適合点が現れた。波無し点のところの応答は Pitch 方向より大きいのは、波方向と 3 つのサイドコラムの位置との

関係が原因だと考える。より短周期範囲でまた複数の波無し点と適合点が存在すると考えるが、Fig から見られない。

波方向による応答の違いは Surge 方向と同じように解釈できる。

- **Pitch**

自由動揺試験により Pitch 方向の固有周期は 20.4[s] である。

全体としてセミサブ型浮体の特徴的な Pitch 応答が示された。波長と浮体寸法との関係によって、波力で生じるモーメントが相殺したり、適合したり、複数の波無し点と適合点（短周期領域は Fig から見られない）が現れた。波無し点の応答は Roll とは違い、ほぼ 0 になっていた。

他の波方向の Pitch 応答は 180° の応答を基準として、変化した角度の余弦値に乗じたものであることが分かる。5[s]~17[s]の周期領域で各波条件の応答がほぼ同じであるが、Pitch 固有周期の近傍に応答が違っている。

- **Yaw**

Yaw 方向の固有周期は計測していなかった。

波方向 (180°、240°) の場合に浮体が対称的であるため Yaw 方向に応答がでてこない。波方向 (195°、210°、225°) の場合に浮体が波にたいして不対称的であるため Yaw 方向に応答が出てき、波周期 6[s]~7[s]の近傍にピークが現れた。この時の波長は浮体の寸法とほぼ同じで、各コラムにおける波力の相対的位相が大きいため大きな回転モーメントが生じた。逆に、波長が非常に長い時に、各コラムにおける相対的位相が小さく、または波長が非常に短い時に、波のエネルギーが小さいため、Yaw 方向の応答が小さい。

- **各波条件の応答の比較**

- ① 5s~17s の波周期領域で、応答曲線はほぼ同じである
- ② 17s~の波周期領域で、応答曲線には違いが出てきた。これは、各波条件の有義波周期とエネルギー分布が違うことに起因していると考えられる。

- **設計された模型と実機について**

想定したストーム状態（有義波高 9.8[m]、有義波周期 13.5[s]）において、Heave 方向の振幅はおよそ 2.5[m]で、Pitch 方向の振幅はおよそ 1° で、応答が小さいことが分かった。これは、軽量型の場合にコラムの直径が小さくて水線面面積が小さく、波力を受けにくいからである。設計された模型と実機は波浪中においてかなり安定的である。

## 6.2.2 過渡水波、規則波実験結果と WAMIT との比較

### ● 計測解析方法

過渡水波は前述と同じである。規則波実験の場合はケース 7~18 をかけて計測する。規則波実験で得られた各ケースのデータについて、時系列が安定した後の区間でその最大値と最小値を読み取り、平均値（振幅）を求める。その次にまとめたデータを各ケースの波周期に対応してプロットする。

### ● 計算条件と結果

Fig. 6-10 において、波方向  $180^\circ$ 、 $210^\circ$ 、 $240^\circ$  の過渡水波（破線）と規則波（ケース 7~18—○、▽、+）実験の結果及び WAMIT（実線）の計算結果をまとめて示した。

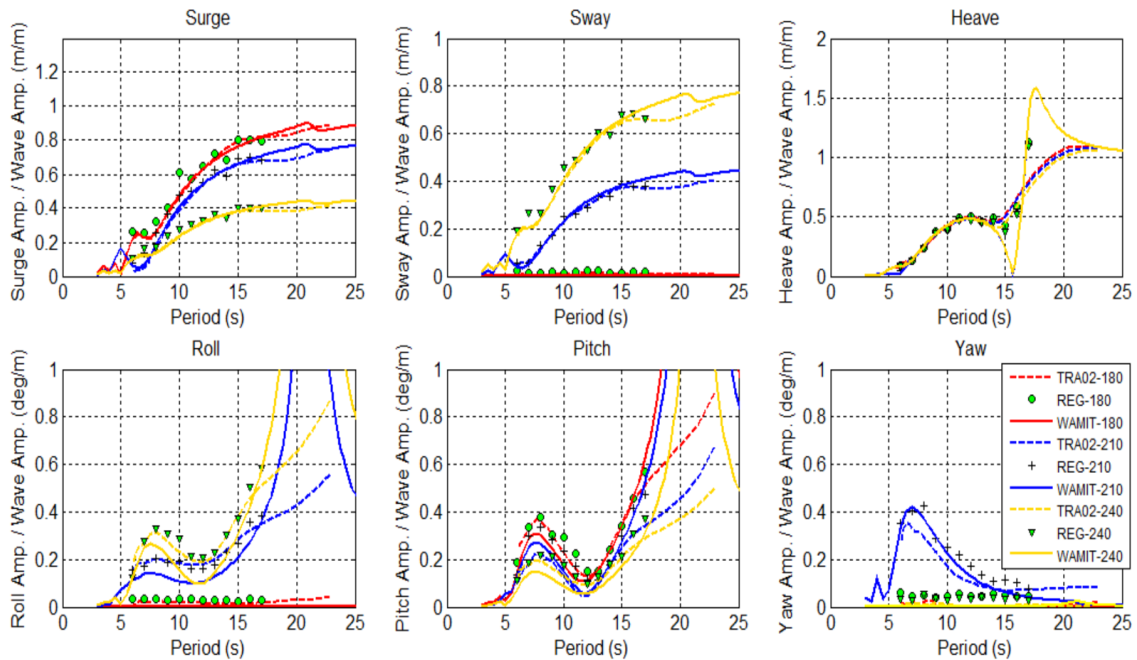


Figure 6-10 Comparison between Experiment (Transient and Regular Wave) and WAMIT

### ● 考察

Fig. 6-10 から、前述した波方向の影響が明白に見られる。全体として、実験と WAMIT の結果は良好に一致していることが分かる。WAMIT の計算においては浮体の粘性抵抗が考慮されていないため、Heave と Pitch の固有周期近傍の応答は非常に大きい。Heave と Pitch 方向の応答はそれぞれポンツーンとタワーに関わるため、ガイワイヤーの張力の考察のところにも参考する。

### 6.2.3 過渡水波、規則波実験結果と NK-UTWind との比較

#### ● 目的

実験現象に関する考察は NK-UTWind による数値計算で行う。NK-UTWind の妥当性はこれまでの先行研究によって検証されたことが多いが、本研究ではワイヤー解析の新しい機能が追加されたため、再検証することにした。

#### ● 計測解析方法

過渡水波と規則波の実験データに対する計測解析方法は前述と同じである。NK-UTWind においてまず設計されたモデルの情報をインプットし、その次に規則波条件をかけて計算を行う。実験は造波機の周波数範囲制限で 6~17[s] の 12 ケースしか計測できないが、NK-UTWind で 6~22[s] の合わせて 17 ケースを計算した。計算で得られたケース時系列データに対する処理方法は規則波実験の場合と同じである。ただし、最後にプロットしたのは一連の点ではなく、点を繋がる円滑な曲線である。

#### ● 計算条件と結果

Fig. 6-11 において 180° の過渡水波、規則波、WAMIT、NK-UTWind の結果をまとめて示した。

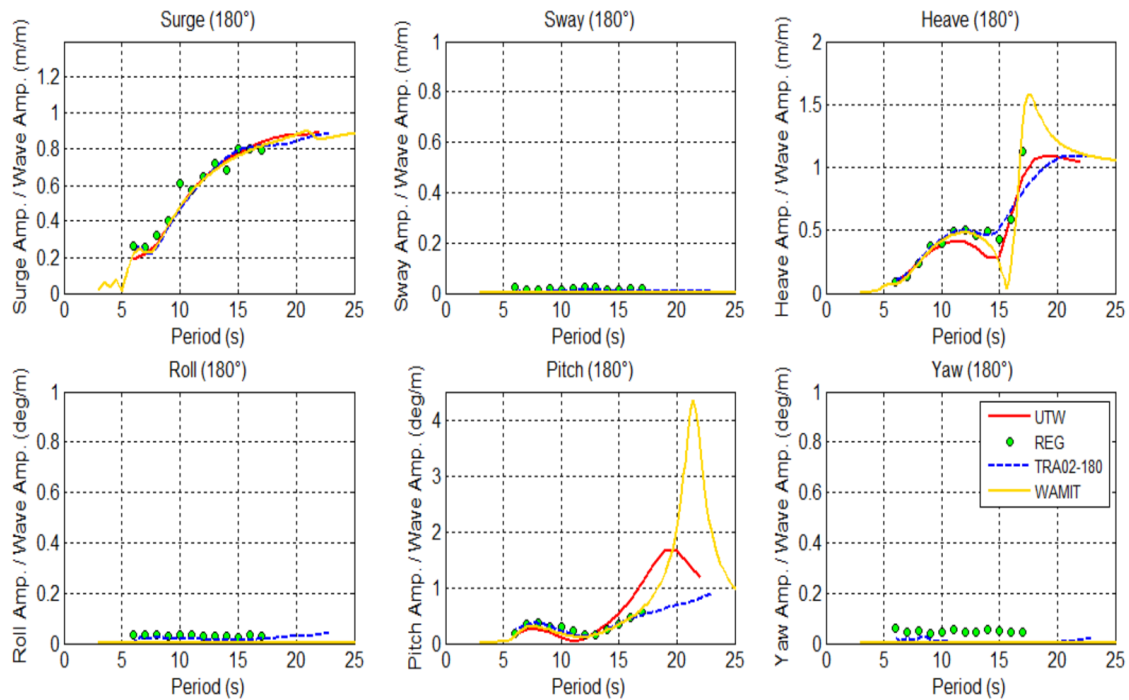


Figure 6-11 Comparison between Experiment, WAMIT and NK-UTWind

## ● 考察

全体として、NK-UTWind の結果は実験と WAMIT と良好に一致していることが分かる。NK-UTWind でレーレイ減衰が考慮されるため、Heave や Pitch の固有周期近傍の応答は WAMIT より小さい。さらに計算の安定性を確保するために、レーレイ減衰の係数を調整することがあるのでその際にピークの値も変わる。

NK-UTWind での計算点は実験の計測点と同じで重心であるため、波周期 20[s] の近傍に Surge 方向の応答には Pitch との連成効果が出てこなかった。厳密に言うと、付加質量を考慮したら浮体の実際の回転中心は重心ではなく慣性中心である。ただし、重心と慣性中心との間の距離は小さいため、Pitch の連成効果が小さくて無視できる。

NK-UTWind における Pitch 方向の固有周期は実験模型が対応する実機モデルの Pitch 方向の固有周期とは (WAMIT の結果とも) 少しずれている。それは、以下の 2 つの原因があると考えられる：

- ① NK-UTWind における付加質量係数と抗力係数は設計者自ら設定するので、実際の係数と差がある。
- ② NK-UTWind で楕円要素しか表現できない。しかし、今回の実験模型のポンツーン部分の断面は矩形であるため、NK-UTWind で断面積が等しく、矩形断面の長辺と短辺の比と楕円断面の長径と短径の比が等しくなるような楕円要素によって等価化 (Fig. 6-12) することが必要である。断面二次モーメントについては矩形断面で計算した結果を用いて入力ファイルの中で設定する。付加質量係数・抗力係数についても、矩形断面のものを元に、抗力係数は  $\frac{\sqrt{\pi}}{2}$ 、付加質量係数は  $\frac{\pi}{4}$  を掛けて補正する。

これらは理論による等価化で、値 (実際の状況では周波数によって付加質量係数は変化する) が一定となるため、現実と差が出ると考える。



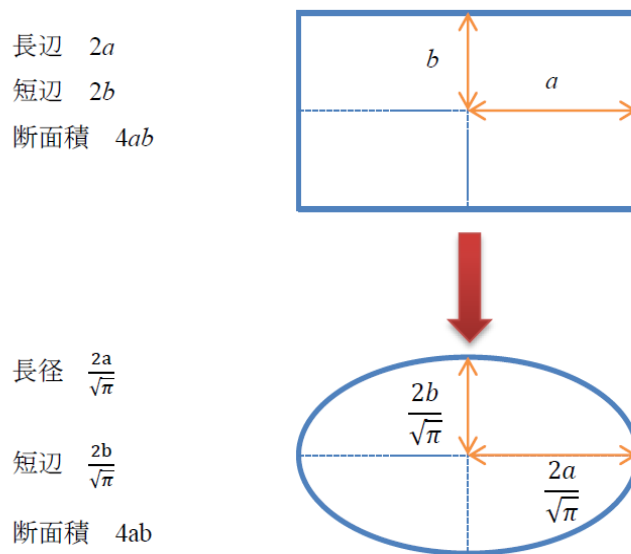


Figure 6-12 Equivalence from Rectangle Element to Ellipse Element in NK-UTWind

### 6.3 ガイワイヤーの張力の周波数領域応答

#### 6.3.1 過渡水波と規則波実験結果

- 計測解析方法

過渡水波と規則波条件の 7~18 ケースをかけた時におけるガイワイヤーの張力データに対する計測解析方法は動揺の場合と同じである。

- 計算条件と結果

実験では波方向  $180^\circ$ 、 $210^\circ$ 、 $240^\circ$  の 3 つのケースのみで計測を行った。波方向とガイワイヤーの番号は Fig. 6-13 のように示し、黄色の直線はガイワイヤーを表している。

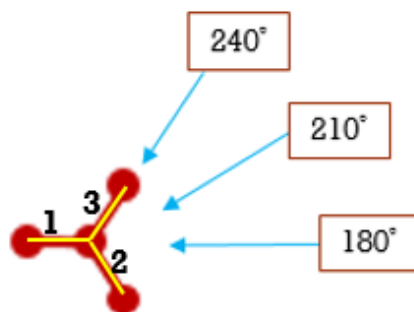


Figure 6-13 Position of Guywire and Wave Direction

Fig. 6-14 において過渡水波と規則波実験のガイワイヤーの張力変動の周波数領域応答をまとめて示した。

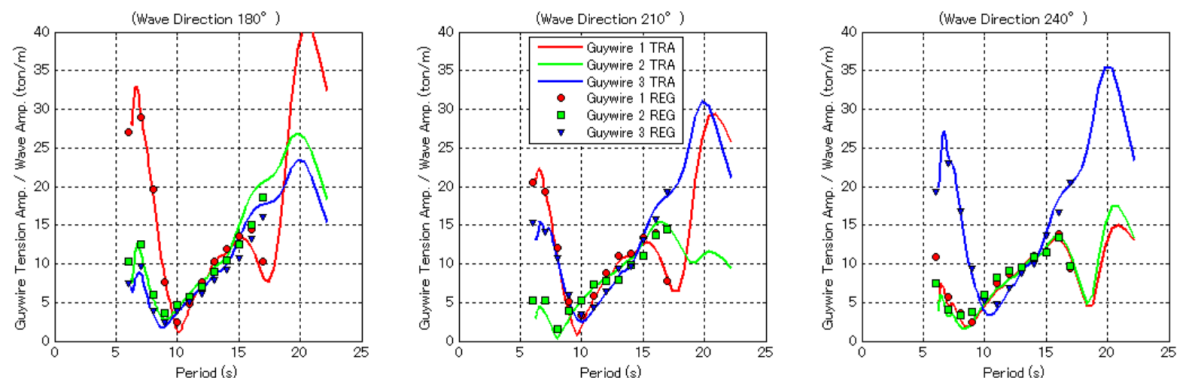


Figure 6-14 Experiment Result (Transient and Regular Wave) of Guywire's Tension

ここに赤線はガイワイヤー1、緑線はガイワイヤー2、青線はガイワイヤー3の結果である。線の色に対応する○、□、▽点は各ガイワイヤーの規則波の試験結果である。

ガイワイヤーの挙動の特性を解明する際にまず Fig. 6-13 から観測した現象をまとめ、その次に数値計算を行うことで詳しい考察を行って現象の発生原因を解明する。

## ● 現象

- ① 波方向 180°、240° において、浮体は対称的なのでそれぞれガイワイヤー2、3 (180°)、ガイワイヤー1、2 (240°) の応答は同じとなっていた。ただし、180° と 240° の応答を比較すると、180° の応答が少々大きいことが分かる。すなわち、波方向の影響が出てきた。210° の応答は中間的特徴を示していた。
- ② 波方向 180° の場合、波周期 7[s] と 20[s] の近傍に2つのピークが現れ、その間の応答が小さい。特にガイワイヤー1について、波周期 7[s] の応答は相当大きく、20[s] の応答とほぼ同じレベルになる。波方向 240° の場合も同じ傾向を示していた。
- ③ 波周期 9~10[s] の近傍に各ガイワイヤーの応答に極小点が現れた。ただし、波上側におけるガイワイヤーの応答の極小値は波下側のほうと比べれば少々ずれていることが分かる。
- ④ 波周期 17~19[s] のところに時々曲線が下がることもある。3つの Fig を比較すると (時に波方向 210° の応答から)、ガイワイヤーの位置は波下側になればなるほ

ど下がる程度が大きいことが分かる。

- ⑤ ここに示してないが、実験結果の時系列を観察する時に、全実験条件（特にストーム状態）において各ワイヤーにスラック状態が発生しなく、それに大きな余裕を持っていることは確認した。

### 6.3.2 NK-UTWind と規則波実験結果の比較

#### ● 目的

前述の現象を考察する前に、まず NK-UTWind で追加されたワイヤーパートの新しい計算機能の妥当性を検証する必要がある。

#### ● 検証結果

Fig. 6-15 において波方向 240° の規則波実験結果と NK-UTWind の計算結果を求めて示した。

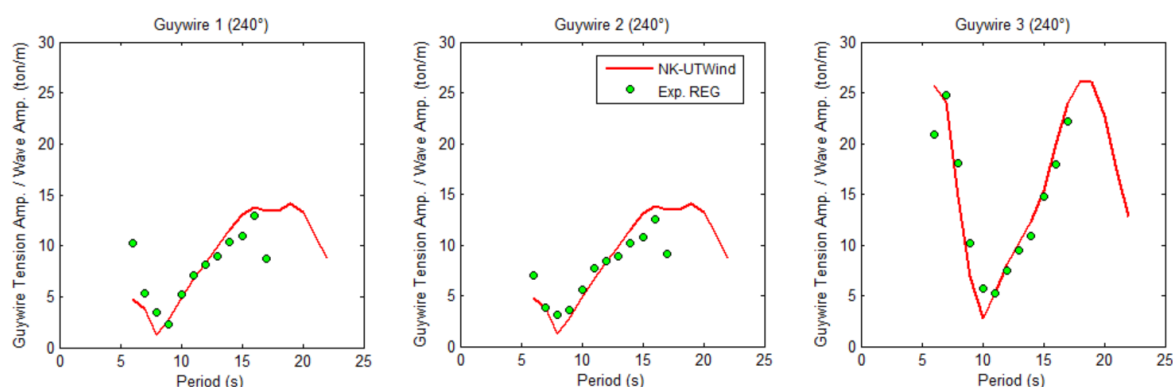


Figure 6-15 Validation of the Guywire Part in NK-UTWind

Fig から NK-UTWind と規則波実験の結果は良好に一致していることがわかり、新しい機能の妥当性が確認した。ただし、ここで注意しなければならない点が2つある。

- ① 実験模型について説明した時に述べたように、今回の実験模型で用いられたワイヤーの等価モデルはフルードの相似則に従って実機スケールに換算するとそのヤング率は  $8.58E12$  [Pa] にも達する。このヤング率をワイヤーの入力ファイルで設定しようとするが、値が過大であるためたとえ非常に小さな変形だとしても巨大な張力変動が生じ、力のバランスが崩れて NK-UTWind での計算が発散してしまう。そのため、NK-UTWind で発散しない範囲でできるだけ大きなヤング率を設定することにした。この計算で設定されたワイヤーのヤング率は  $6E11$  である。  $1.6E13$  と比べてか

なり大きな差があるが、ばね定数と伸長量の関係は反比例であるため、本当の値との誤差はそれほど大きくないと考える。

- ② NK-UTWind の結果においても、波下側にあるワイヤーの張力応答が波周期 17[s]の近傍に少々下がることが見られる。ただし、下がる程度は実験より結構小さい。

### 6.3.3 ガイワイヤーの張力応答に対してNK-UTWind を用いた考察

ここで、照合するために波方向 180° の場合のワイヤーの張力の周波数応答と Heave、Pitch 方向の動揺の周波数応答（赤い実線と破線は波方向 180° の結果）をまとめて Fig. 6-16 に示した。

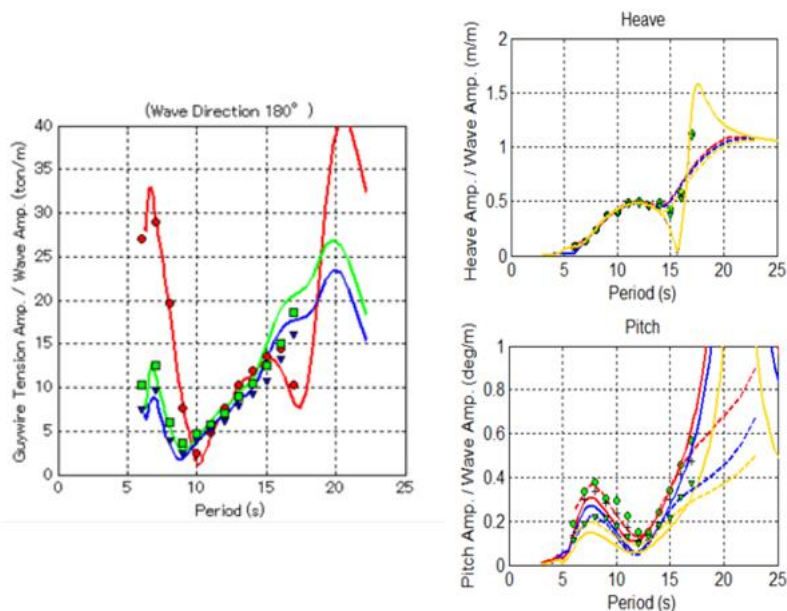


Figure 6-16 Response of Guywire's Tension and Heave, Pitch Motion

Fig. 6-16 に示した Heave と Pitch 方向動揺の応答と照合すると、定性的にワイヤーの張力応答はほぼ全波周期領域で Pitch 運動に支配されることが分かった。ただし、Pitch の波無し点と極小点より短周期側にちょっとずれていることが見られる。これは、Heave 運動による影響が入っていると考える。

Pitch 運動、Heave 運動は、共振周期を境に波力と運動の位相が逆転するため、Heave 運動（固有周期 17[s]くらい）と波面上昇の関係、Pitch 運動（固有周期 21 [s]くらい）と波傾斜の関係は以下のようにになっている。

- Heave
  - ① 波周期<17[s] : Heave 運動は波面上昇と逆位相
  - ② 波周期>17[s] : Heave 運動は波面上昇と同位相
  
- Pitch
  - ① 波周期<21 [s] : Pitch 運動は波傾斜と逆位相
  - ② 波周期>21 [s] : Pitch 運動は波傾斜と同位相

弾性体の場合、Pitch 運動と Heave 運動はタワーとポンツーンの変形に影響を与えるため、本質的に言うとワイヤーの張力応答はタワーとポンツーンの変形の組み合わせによるものである。

タワーとポンツーンの変形については以下のようにまとめる。

- タワーの変形に寄与する力
  - ① Pitch 運動による慣性力 (Pitch 加速度と逆位相、Pitch 変位と同位相)
  - ② Pitch 運動による浮体傾斜、タワー自身の重力
  
- ポンツーンの変形に寄与する力
  - ① 波力 (波力による剛体運動以外に変形に与える影響は複雑であるため、プラスアルファとして必要な時に説明に入れる)
  - ② Pitch 運動による浮体傾斜のため生じた変動浮力
  - ③ Heave 方向の相対水位による変動浮力
  - ④ Heave 運動による慣性力 (Heave 加速度と逆位相、Heave 変位と同位相)

次に2次元でタワーとポンツーンの主要な変形モードについて説明する。Fig. 6-17 にそのイメージと説明を表している。波は右から入射すると仮定する。



Figure 6-17 Deformation Mode of Tower and Pontoon

● 考察

波傾斜と Pitch 運動の位相関係、波面上昇と Heave 運動の位相関係、そして Pitch 運動のタワーとポンツーンに与える影響、Heave 運動のポンツーンに与える影響はワイヤーの張力変動の本質なので、その説明は不可欠だと考える。しかし、波傾斜や波面上昇と浮体の相対関係を可視化するのは難しいため、そこから始めると考察は複雑になる。ここでタワーとポンツーンの変形モードという角度から NK-UTWind で得られた Pitch、Heave 方向

の変位、加速度などに基づいて考察を行う。

- 波周期 6[s]における応答は大きい原因

この波周期で、Pitch による影響だと、浮体の傾斜が小さく、慣性力が支配的であると考えられる。その上に、Heave による慣性力の影響を加わる。NK-UTWind で得られた Pitch 、Heave 方向の加速度の応答を Fig. 6-18 に示す。

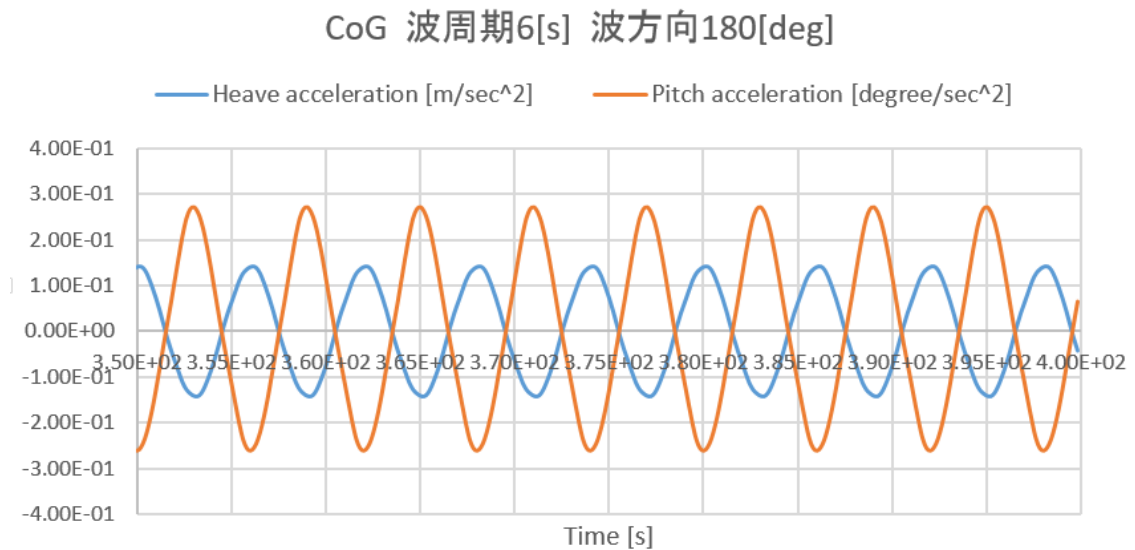


Figure 6-18 Displacement of Heave and Pitch (Wave Period 6[s], Direction 180° )

Fig. 6-18 からわかるように、Pitch 、Heave 方向の加速度の位相差は  $\pi$  である。前述した運動モードに参考すると、Heave 加速度が正、Pitch 加速度が負の場合はモード②と③の足し算となっている。注意しなければならないのは、上の Fig から、Pitch 加速度は Heave 加速度より大きいため、Pitch の慣性力は支配的である。それに、Pitch の慣性力による変形のうち、タワーの長さは 105[m]、ポンツーンの 33[m]の三倍にもなるため、タワーの変形は支配的であることが分かる（タワーとポンツーンの変形によるワイヤーの変形を知るために精密な計算が必要でここでは計算していないが、2次元の場合はタワーの変形によるものは圧倒的であると考えられる；3次元の場合はワイヤーの空間配置によりタワーの変形はあまりワイヤーの変形に寄与しない時もある）。そのため、モード③の場合、まずタワーの変形はポンツーンの右端の変形より大きく、左端の変形より小さいため、右側のワイヤーは縮んでおり、左側のワイヤーは伸びている。その上でモード②と足し算すると、ポンツーンの右端の変形は少々大きくなり、右側のワイヤーがまた伸びるため、結局その長さはそれほど変化しない。一方、モード③のポンツーンの左端がモード②と足し算すると左のワイヤーはより伸びており、張力変動は大きくなる。同様に Heave 加速度が負、Pitch 加速度が正の場合はモード①と④の足し算となっている。結論として、波下

側のワイヤーの張力変動は大きく、波上側のワイヤーの張力変動は小さいという結果となっている。もう一つの原因は波周期 6[s]の時に波長と浮体の寸法と同じくらいことによるポンツーンのスギングとホギングである。ただし、それは**相対水位**と関係あり、**須山**により詳しく考察したことがあるが、ここで主に慣性力と浮体傾斜に焦点を当てるため、それに関する説明はしない

- 波周期 19[s] における応答は大きい原因

この波周期で、Pitch による影響だと、慣性力が小さく、浮体の傾斜が支配的であると考えられる。その上に、Heave による慣性力の影響を加わる。NK-UTWind で得られた Pitch 方向の変位、Heave 方向の加速度の応答を Fig. 6-19 に示す。

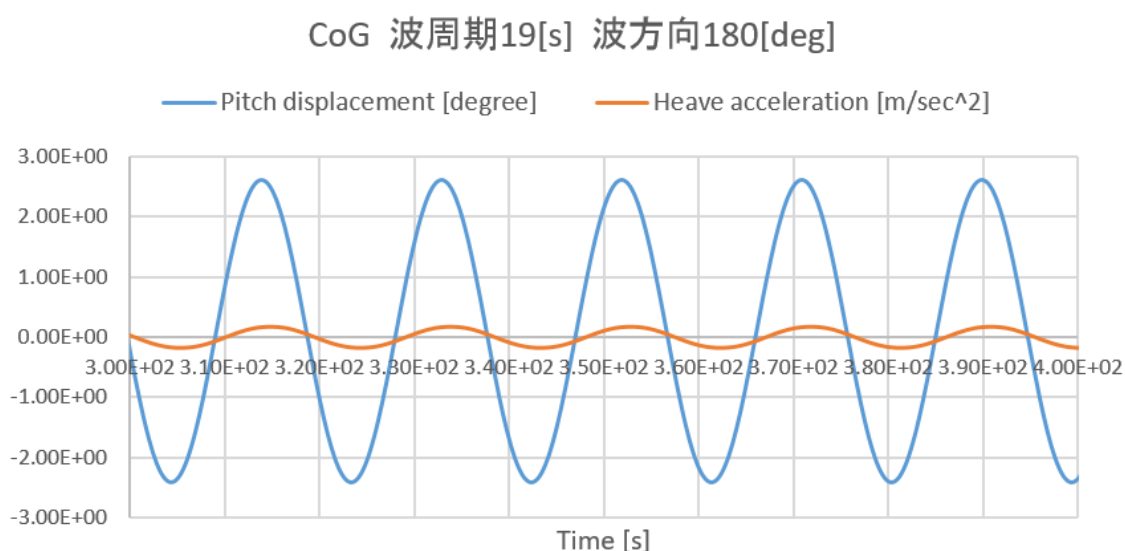


Figure 6-19 Acceleration of Heave and Displacement of Pitch (Wave Period 19[s], Direction 180°)

Fig. 6-19 からわかるように、Pitch 方向の変位と Heave 方向の加速度の位相差は 0 である。前述した運動モードに参考すると、Heave 加速度が正、Pitch 変位が正の場合はモード②と⑤の足し算となっている。注意しなければならないのは、この場合に Pitch 方向の変位はかなり大きいためポンツーンにとっては変動浮力による変形は支配的である。そのため、モード⑤の場合、左のワイヤーは伸びており、右のワイヤーは縮んでおり、両方とも長さが大きく変化してワイヤーの張力変動は大きい。その上でモード②と足し算すると、右のワイヤーは少々縮んで、右のワイヤーは少々伸びる。同様に Heave 加速度が負、Pitch 加速度が負の場合はモード①と⑥の足し算となっている。結論として、波下側のワイヤーとも波上側のワイヤーの張力変動とも張力変動は大きい、波下側の方はより大きいという結果となっている。



- 波周期 6~19[s]の間における応答は小さい原因

この間で、Pitch による影響だと、慣性力と浮体傾斜の割合は相当である。その上に、Heave による慣性力の影響を加えれば、3つの変形モードの足し算となると考える。例えば、モードの②③⑤の足し算やモード①④⑥の足し算などにおいて、ポンツーンの変形には相殺する部分は多く、また Pitch 方向の変位も加速度もそれほど大きくないためタワーの変形は小さい。これらの組み合わせにより波周期 6~19[s]の間の応答は小さくなる。

- 極小点は波周期 9~10[s]の近傍に現れた原因

波周期 12[s]の近傍は Pitch 方向の波無し点で純粋 Heave 状態となっているが、ポンツーンが変形するため応答は極小ではない。そのため、波周期 12[s]のちょっとそば(9~10[s])にタワーが変形し、ポンツーンの変形との組み合わせでワイヤーの変形が極小になり、応答に極小点が現れる。

#### 6.3.4 タワーとポンツーンの弾性がワイヤーの張力に与える影響

##### ● 目的

軽量型浮体は排水量の制限で建設の時に各部分の材料量は少なくなる。例えば、実際の浮体式洋上風車の場合一般的にタワーの部分は中空の鋼製薄肉円筒である。重量が決められ、かつ長さが確保されなければならない場合は、機能を失わないことを前提として円筒を細くしたり、薄肉円筒の厚さを小さくしたりすることしかできない。そのため、タワーの剛性が低くなり、弾性応答が顕著になる。タワーやポンツーンの弾性はワイヤーに大きく関わるため、その影響は大きさを調べる必要がある。これは、実際建造の時にどの部分を補強することは一番効果的なのかという、実機の経済性やワイヤーの疲労評価に関わる重要な課題である。

##### ● 計算条件と結果

ここで、実験模型が対応する実機モデルの曲げ剛性に基づいてタワーとポンツーンの曲げ剛性を変えることで以下の3ケースについて数値計算を行って簡単に考察をした。

- ① タワーとポンツーンは両方弾性体
- ② タワーは弾性体、ポンツーンは剛体
- ③ タワーは剛体、ポンツーンは弾性体

Fig. 6-20 と Fig. 6-21 においてそれぞれ波方向  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  の結果を示した。

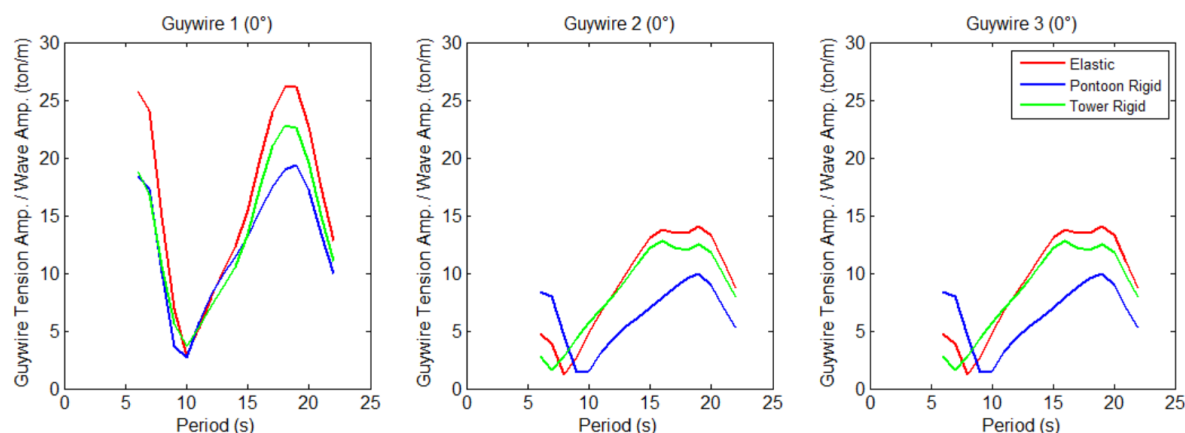


Figure 6-20 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon (Direction  $0^\circ$ )

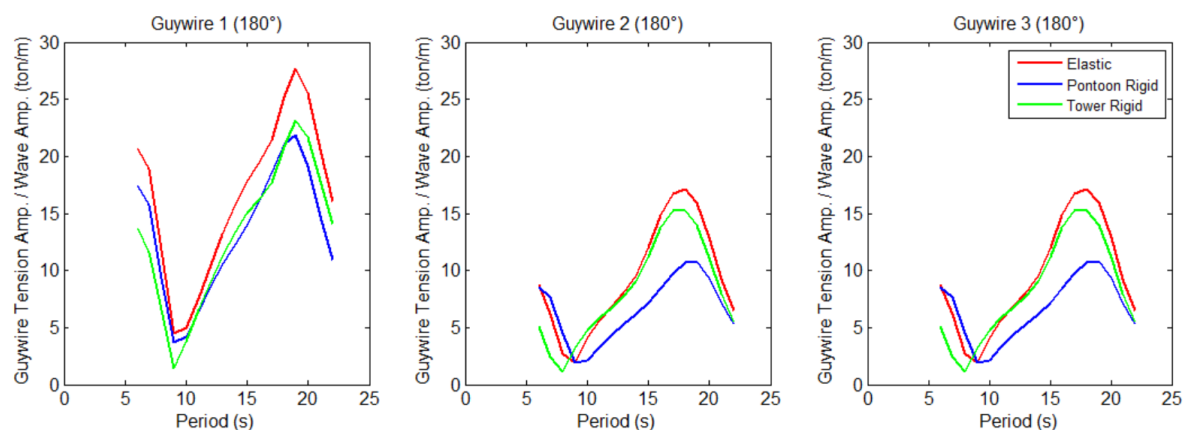


Figure 6-21 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon (Direction  $180^\circ$ )

● 考察

• 波方向  $0^\circ$

波に対して浮体が対称的であるためガイワイヤー2と3の応答は同じである。各ケースの極小点の位置はちょっとずれているが、極小点を境に現象が変わる。極小点の左側においてタワーの変形による影響が大きく、タワーを剛体にする事で弾性体の場合よりガイワイヤーの張力応答は小さくなる。ガイワイヤー2と3についてポンツーンを剛体にした後で逆にガイワイヤーの張力応答は大きくなることはタワーとポンツーンの変形モードの位相から解釈できる。極小点右側においてポンツーンの変形による影響が大きく、ポンツーンを剛体にする事でガイワイヤーの張力応答は小さくなる。値から見ると、各ガイワイヤーに対

して、タワー変形による影響はワイヤーの配置により変わる（例えばワイヤー2と3にとって長周期領域でタワー変形はワイヤーに与える影響は小さい）；ポンツーン変形による影響はワイヤーの配置とはあまり関係ない。

- **波方向 180°**

波方向 0° の場合と同じように解釈できるが、比べれば応答が違う。すなわち波方向の影響が出てきたことが分かる。

- **結論**

波方向によって応答の大きさは変わるかもしれないが、傾向として短周期領域でタワーの変形による影響は大きい、長周期領域でポンツーンの変形による影響は大きいことが分かる。また、二次元の場合タワーは圧倒的に影響があるが、三次元実機の場合はワイヤーの配置や波方向によりタワーの影響が変わる。

## 6.4 タワー根元のひずみの周波数応答

### 6.4.1 過渡水波と規則波実験結果

- **計測解析方法**

過渡水波と規則波条件の 7~18 ケースをかけた時のタワー根元のひずみデータに対する計測解析方法は動揺の場合と同じである。

- **計算条件と結果**

実験では波方向 180°、210°、240° の 3 つのケースのみで計測を行った。タワー根元におけるひずみゲージの位置、番号及び波方向は Fig. 6-22 の俯瞰図に示している。

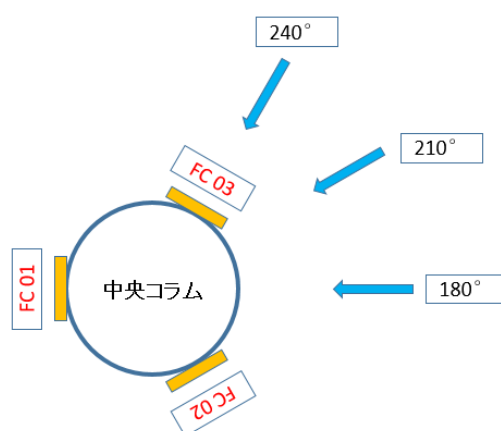


Figure 6-22 Configuration of the Strain Gauges at Tower's Bottom

タワーの周りは曲面であるため、ひずみゲージは完全に貼っていない可能性がある。そのため、実験で得られたひずみの結果は正しい傾向を示しているが、その値は本当の値より少々小さくなるかもしれない。

Fig. 6-23 において過渡水波と規則波実験のタワー根元のひずみの周波数領域応答をまとめて示した。

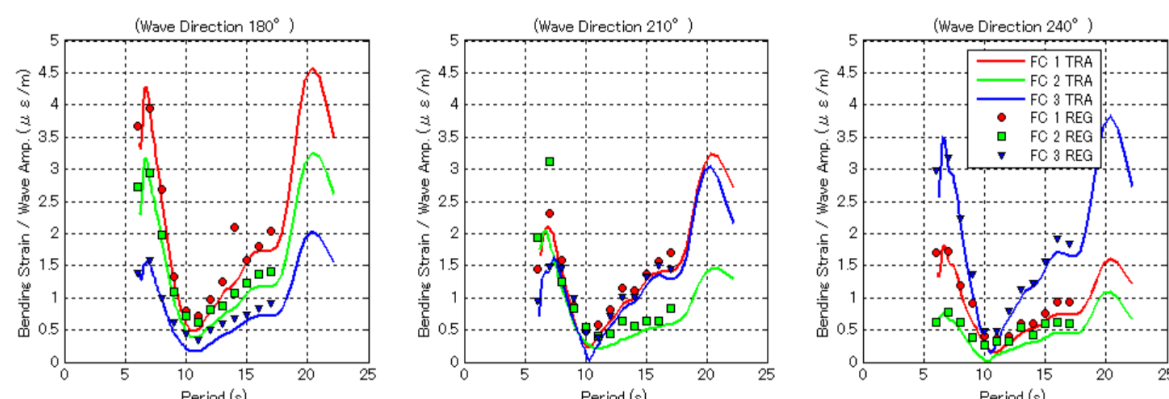


Figure 6-23 Frequency Domain Response of the Strain at Tower's Bottom

### ● 考察

Fig. 6-23 に示した波方向 180° と 240° において FC02 と FC03 の応答が違うというのは実際のひずみゲージの位置は予想位置と少々ずれていることが原因だと考えている。さらに上の応答からひずみゲージの実際の位置を推定することができる。

Pitch 方向の動揺の応答曲線と照合すると、ほぼ全領域でタワーの変形は Pitch 運動に支配的されることが分かる。6[s]近傍のピークは主に Pitch 方向の慣性力によるもので、20[s]近傍のピークは主に Pitch 固有周期付近における大きな浮体傾斜によるものである。

波方向 180° における FC02、FC03 の応答はワイヤー2、3 の応答と照合すると、同じような傾向を示しているが、ひずみの場合 7[s]近傍の応答は 17[s]近傍の応答より大きく、ワイヤーの張力応答の場合 17[s]のほうが大きい。すなわち、ワイヤーの張力応答はタワーとポンツーンの変形の共同作用の結果であることが確認した。前述した弾性影響を調べる際に示したように、17[s]近傍にポンツーンは浮体傾斜により変形が大きい。

## 6.4.2 NK-UTWind による検証

### ● 目的

NK-UTWind は従来の解析プログラム (WAMIT など) と比べて、内力評価が可能となる点は特徴である。ただし、NK-UTWind を用いた先行研究の中で、浮体構造の内力を考察するケースは極めて少ない。前にすでにワイヤーの張力変動を検証したが、ワイヤー部分のメカニズムは浮体構造の部材と区別があるため、部材の内力の妥当性を検証する必要がある。

### ● 結果

Fig. 6-24 において波方向 180° の場合の FC01 の規則波実験結果と NK-UTWind の計算結果をまとめて示した。

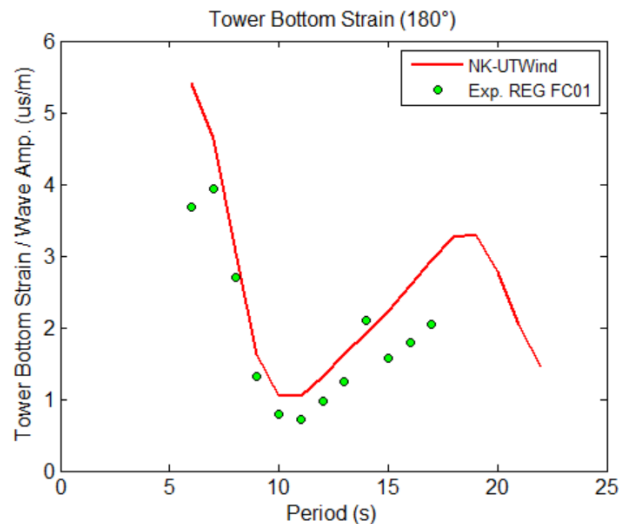


Figure 6-24 Comparison of NK-UTWind and Regular Wave Exp. (Direction 180°)

Fig. 6-24 から NK-UTWind 内力計算の妥当性が確認した。実験結果の値が少々小さいというのは、前述したひずみゲージが完全に貼っていない可能性があることは原因だと考える。

## 6.4.3 ワイヤーの支持効果に関する考察

### ● 目的

研究目的のところに述べたように、ワイヤーでタワーを支持した浮体式洋上風車に関する研究は現在フィジビリティスタディ段階に立っている。ワイヤーの成立性については実験中の観察からストーム状態においてもスラック状態が発生しないことが確認し

た。その次にワイヤーがタワーを支持する効果はどのくらいであるかを考察する必要があると考える。これは経済性と実現性に関わる重要な項目である。静的計算のところに理論計算により、タワートップがスラスト力を受ける時にワイヤーはタワーの変形を抑える機能を持っていることが分かるが、ここで NK-UTWind で動的運動の時にワイヤーがタワーの変形を抑える効果について調べる。

● NK-UTWind におけるひずみの求め方

実験の場合は 3 つのひずみゲージが設置されたが、NK-UTWind の場合は梁要素であるためそういった設置ができなく、内力のみが得られる。この内力は浮体の 6 自由度における成分という形で表され、Roll と Pitch 方向の曲げモーメントの波方向と垂直する方向における成分を求めて合成すると最大の内力とひずみを得られる。例えば、波方向 180° の場合にこういった方法により求めたのは FC01 が計測したひずみである。FC02、FC03 が計測したひずみも同じ方法で求められるが、FC01 より小さいため求める必要がないと考える。波方向 240° (NK-UTWind においては 0° ) の場合にも、FC03 が計測したひずみが一番大きいいため、NK-UTWind の計算結果からその方向のひずみだけを求めることにする。

● 計算条件と結果

NK-UTWind において波方向 0° (実験の 240° )、180° (実験の 180° ) の時にワイヤーあり・なしの 2 種類の浮体について計算を行った。Fig. 6-25、Fig. 6-26 においてそれぞれその結果を示した。

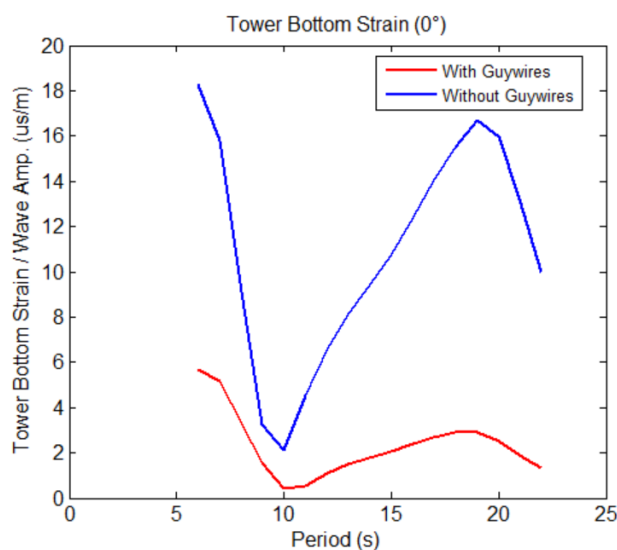


Figure 6-25 Strain at the Tower's Bottom – with Guywire and without Guywire (Direction 0°)

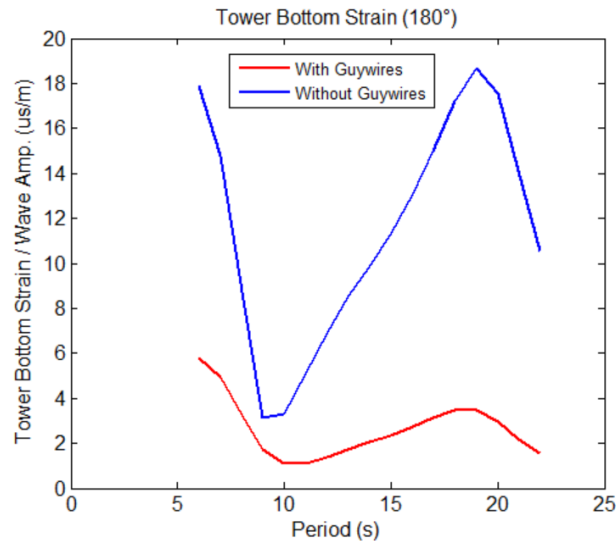


Figure 6-26 Strain at the Tower's Bottom – with Guywire and without Guywire (Direction 180°)

## ● 考察

Fig から、波方向 0° と 180° の場合と同じ傾向を示していることが分かる。10[s]以下の短周期領域でガイワイヤーの支持により、タワー根元のひずみの変化分は最大 70%程度削減された。10[s]以上の長周期領域で最大 80%程度削減された。すなわちタワーがかなり細く作られ、浮体の軽量化は可能になる。ガイワイヤーの張力応答の曲線から、短周期領域で 6[s]の近傍に応答が一番大きく、30[ton/m]程度となっており、長周期領域で 20[s]の近傍に応答が一番大きく、40[ton/m]程度となっている。想定したストーム状態は有義波周期が 13.5[s]、有義波高が 9.8[m]におけるガイワイヤーの変動張力は 150[ton]程度となっている。この値以上でガイワイヤーの初期張力を設定すれば（例えば 200[ton]）、スラック状態を避けることができる。実海域の海象条件を考慮してガイワイヤーの設置コスト、とタワーの軽量化により削減されるコストを考察して、ガイワイヤーでタワーを支持した浮体式洋上風車の経済性を評価することができる。

## 6.5 ポンツーンの根元と中間部のひずみの周波数応答

### 6.5.1 過渡水波と規則波実験結果

過渡水波と規則波条件の 7~18 ケースをかけた時のタワー根元のひずみデータに対する計測解析方法は動揺の場合と同じである。実験では波方向 180°、210°、240° の 3 つのケースのみで計測を行った。Fig. 6-27~Fig. 6-29 においてそれぞれその結果を示した。ポ

ンツーン根元におけるひずみゲージの番号は $FP_{i1}$  ( $i = 1, 2, 3$ )で、ポンツーン中間部におけるひずみゲージの番号は $FP_{i2}$  ( $i = 1, 2, 3$ )である。 $i$  が代表した番号はそれぞれ各ワイヤーとサイドコラムの番号に対応する。

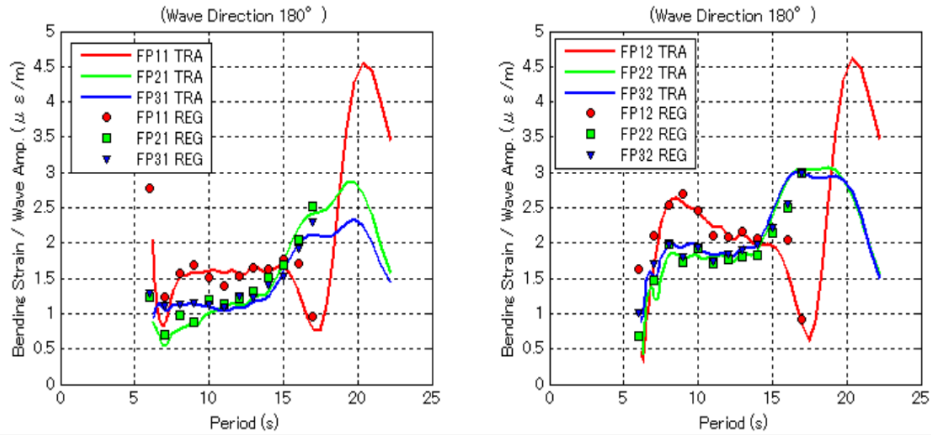


Figure 6-27 Strain at the Pontoon's Root and Middle (Direction 180°)

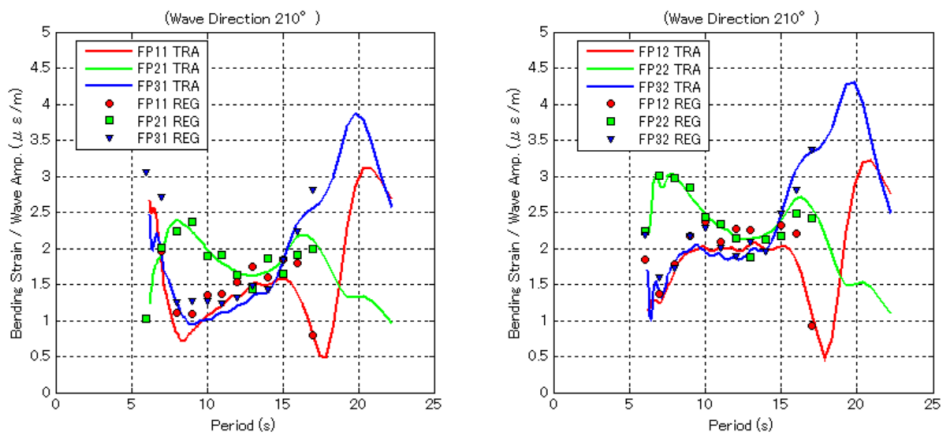


Figure 6-28 Strain at the Pontoon's Root and Middle (Direction 210°)



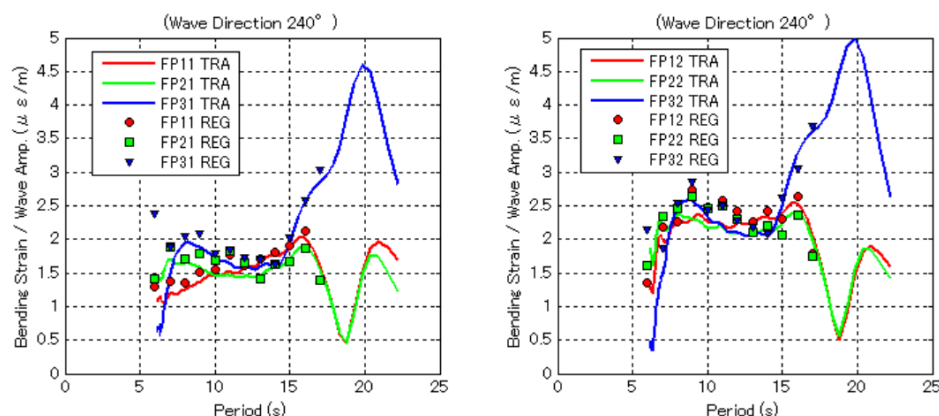


Figure 6-29 Strain at the Pontoon's Root and Middle (Direction 240° )

● 考察

ポンツーンのひずみ曲線の形はワイヤーの張力変動とタワー根元のひずみと違っており、波周期 6[s]~15[s]の範囲でほぼ横ばい状態で大きな変動がない。6[s]から Heave 方向の慣性力は段々小さくなり、サイドコラムのところの変動浮力は Pitch 運動の波無し点を境にまず減少し、それから段々増加する。ただし、この範囲内 Pitch の応答は小さくて浮体がそれほど傾斜していないため変動浮力の値が小さい。この 2 つの作用でこの範囲内でポンツーンのひずみは横ばい状態となっている。波周期は Pitch 方向の固有周期に近づくと、浮体はかなり傾斜しており、サイドコラムのところの変動浮力は大きく増加してポンツーンのひずみの応答にはピークが出てきた。

6.5.2 NK-UTWind による検証

● 目的

前章でタワー根元のひずみについて NK-UTWind の妥当性を検証したが、念のためここで考察をする前にポンツーンのひずみについても一回検証を行う。

● 結果

Fig. 6-30~Fig. 6-32 においてそれぞれ波方向 180° の場合のポンツーン 1 の根元、ポンツーン 1 の中間部、ポンツーン 2 の根元のひずみについて NK-UTWind の数値計算結果と規則波実験の結果をまとめて示した。

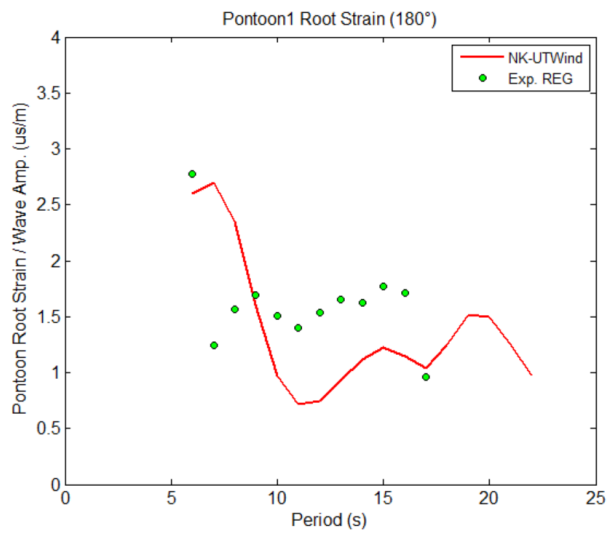


Figure 6-30 Strain at the Pontoon1's Root (NK-UTWind vs. Exp., Direction 180° )

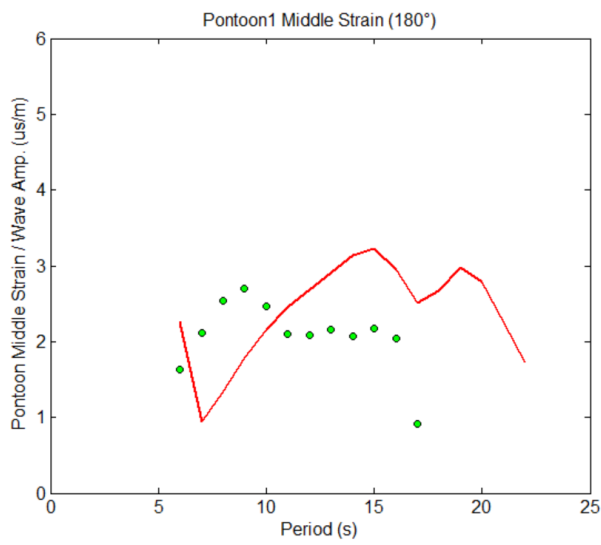


Figure 6-31 Strain at the Pontoon1's Middle (NK-UTWind vs. Exp., Direction 180° )

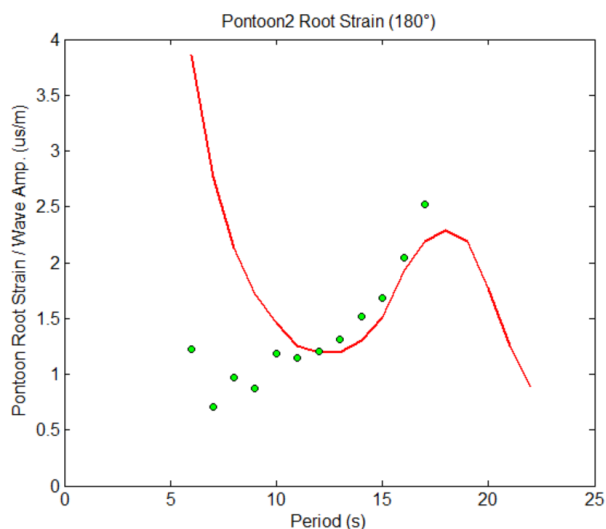


Figure 6-32 Strain at the Pontoon2's Root (NK-UTWind vs. Exp., Direction 180° )

● 考察

結果から言うと、規則波実験の結果と NK-UTWind の結果は値の桁が同じくらいであるが、傾向が一致していない。

実験模型のタワー根元とポンツーンの接合部の接合方法によってポンツーン根元の曲げ剛性は非常に大きくなる恐れがある。しかし、前の考察また浮体の運動モードに関する説明から見ると、物理現象から実験の結果には問題がないはずである。

NK-UTWindで接合部の曲げ剛性を正確に再現することができなかったかもしれないが、そうであれば、タワーのひずみとワイヤーの張力変動にも影響を与えるはずである。しかし、タワーのひずみとワイヤーの張力変動の応答の結果は実験とかなり一致している。といったことで、物理現象から実験の結果が正しいはず、力のバランスからNK-UTWindの結果が正しいはずで、判断することは結構難しい。そのため、ここにおいて、ポンツーンの挙動について詳しい考察を行わない。今後、NK-UTWind におけるポンツーンの内力を検証する必要がある。

## 7 斜めのタワーを有するモデルの特性

### 7.1 概要

本研究では、実験の便宜にまず一般化モデルを設計して考察を行い、基本的な特性を解明した。しかし、最初の SCD-Nezzy のコンセプトに示した実機モデルは結構複雑で、斜めのタワーを有している。なぜかという、それは、ワイヤーが付けられるため、タワーが斜めではないとブレードがワイヤーを切る可能性があるわけである。すなわち、一般化モデルは実は実現できないものであることが分かる。そして、搭載した風車のローターの大きさやタワーの高さなどを考慮してタワーの傾斜角を決める必要がある。

SCD-Nezzy に提案されたのは 8[MW] の実機で、ローターの直径は 168[m] となる。さらに、ワイヤーが存在していることの制限で、Yaw 制御も削除しかない。結局、係留の形式として、一点係留という形の可能性のみが残っている。このコンセプトでは全体システムがかなり軽量化になれるが、各部分の連成性も非常に強く、結局設計の時に考慮しなければならないことが多くて難しくなる。そして設計した後でも実用に向けてまた詳細な考察が必要だと考えている。

本章では、一般化モデルを基準として斜めのタワーを有する 2 ケースの浮体モデルを設計した。この 2 ケースのモデルこそ現実的な意味があると考えられる。まずは、設計の流れについて説明し、その次に各ケースが各波条件における動揺、ワイヤーの張力、タワー根元のひずみやポンツーンの根元と中間部のひずみなどを NK-UTWind で数値計算を行って結果を考察する。最後にこの 2 つの設計の優劣性について評価する。

### 7.2 斜めのタワーを有するモデルの設計

#### 7.2.1 ケース 1

ケース 1 はタワーのみが傾斜しており、他のサイドコラムが垂直であるモデルである。具体的な設計は一般化モデルを基準にし、寸法が全部同じで、単純にタワーの傾斜角だけを  $80^\circ$  にさせたものである。

Fig. 7-1 において設計されたケース 1 モデルの Three-View Drawing を示している。

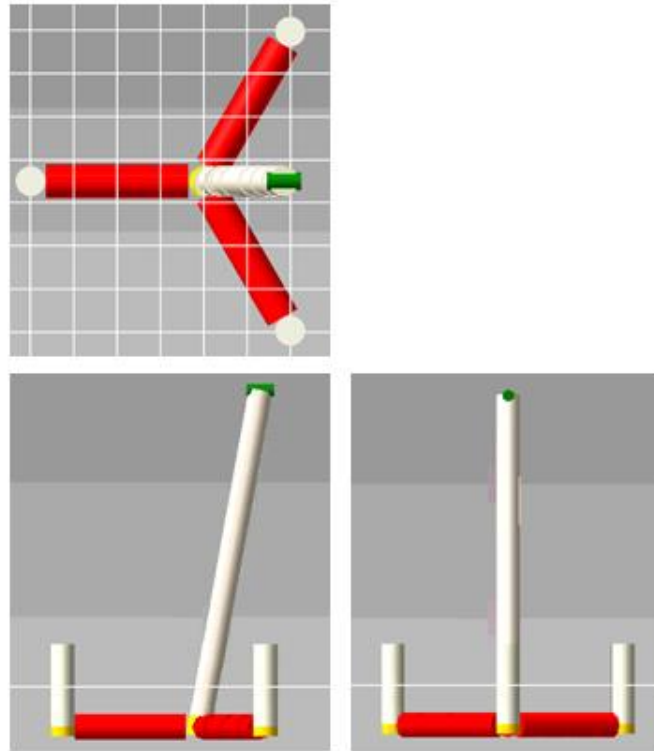


Figure 7-1 Three-View Drawing of the Designed Case 1 Model

上の Fig に示したポンツーンは円柱であるが、これはソフトウェアのディスプレイ制限が原因である。実際の数値モデルにおいてはポンツーンの断面が一般化モデルと同じように矩形断面から等価化された楕円断面である。モデルの主要目は Table. 7-1 の通りである。

Table 7-1 Principal Design of the Case 1 Model

Item	Value	Unit
Displacement	5784	ton
KB	4.59	m
BM	16.05	m
KG	8.32	m
GM	12.33	m
Natural Period of Heave	15.2	sec
Natural Period of Roll and Pitch	19.2	sec

Heave と Pitch の固有周期は理論計算からではなく、NK-UTWind で自由動揺計算により得られた値である。Fig. 7-2 と Fig. 7-3 にその時系列を示している。

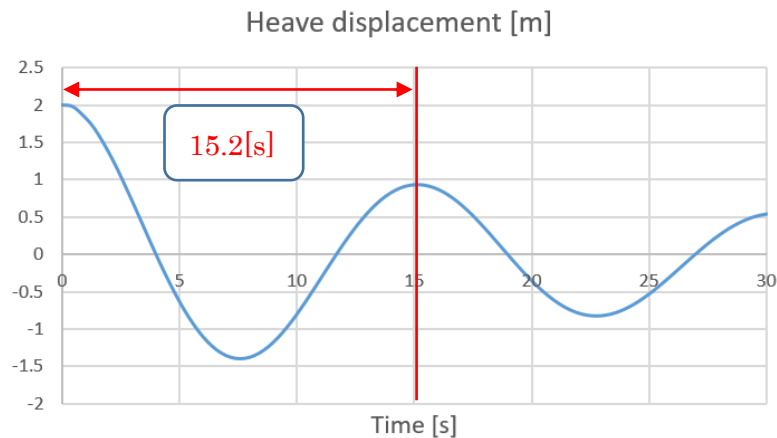


Figure 7-2 Time Series of Heave Free Motion of Case 1 Model

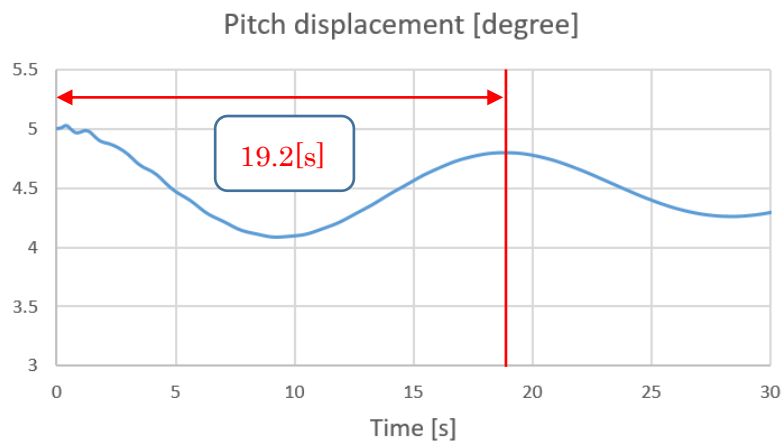


Figure 7-3 Time Series of Pitch Free Motion of Case 1 Model

一般化モデルの主要目 (Table. 3-1) と比べると、以下のことが分かる。

- ① タワーの高さを変えず、傾斜させただけため、実はタワーの長さは少々長くなり、浮体全体の重量は 10[ton]程度増えた。
- ② 浮心の座標は (0.13, 0, -10.41) [m]で、Z 座標はほとんど変わらず、X 座標は正になる (傾斜方向は X 正軸)。
- ③ 重心の座標は (1.15, 0, -6.68) [m]で、Z 座標は少々大きくなり、X 座標は正になる (値は浮心のほうより大きい)。そのため、このモデルは静水状態において実は浮体が少々傾斜している。しかし、便宜のために、一般化モデルから各部材の密度を変えることは全くない。

- ④ 中央コラムの水線面は楕円断面となるため、水線面断面 2 次モーメントは少々大きくなり、BM は大きくなる。G と M の位置変化により、GM は少々小さくなった。

### 7.2.2 ケース 2

ケース 2 はタワーともサイドコラムとも斜めになっているモデルである。ケース 1 の上でさらに 3 つのサイドコラムをタワーのトップのアンカー点に指させるように傾斜させた設計である。ケース 1 と比べてシステムはよりコンパクト化になり、特にガイワイヤーの立場から見ると良いデザインだと考える。その理由は

- ① ガイワイヤーの長さが短くなり、たわみ振動（本研究で触っていないが）が改善できる
- ② ガイワイヤーは全部空中にあるため、長い期間に海水に晒されることによる腐食疲労を防ぐことができる

Fig. 7-4 において設計されたケース 2 モデルの Three-View Drawing を示している。

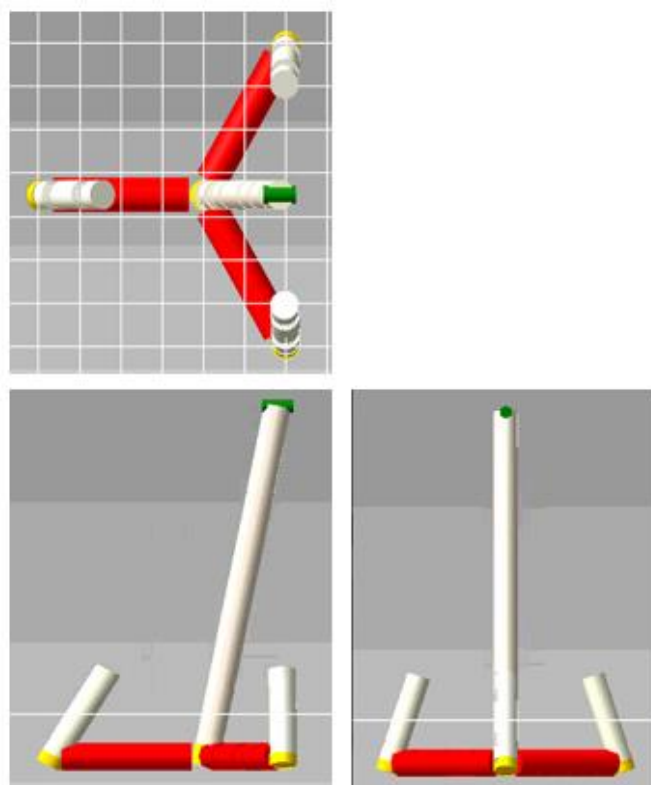


Figure 7-4 Three-View Drawing of the Designed Case 2 Model

Heave と Pitch の固有周期は NK-UTWind で自由動揺計算により得られた結果を Fig. 7-5 と Fig. 7-6 に示す。

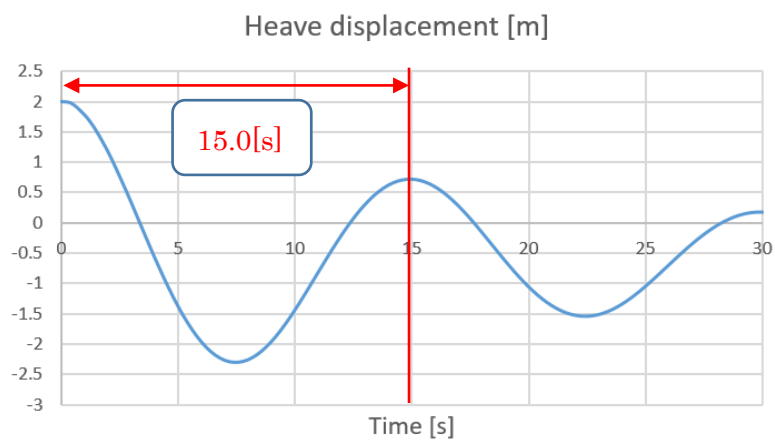


Figure 7-5 Time Series of Heave Free Motion of Case 2 Model

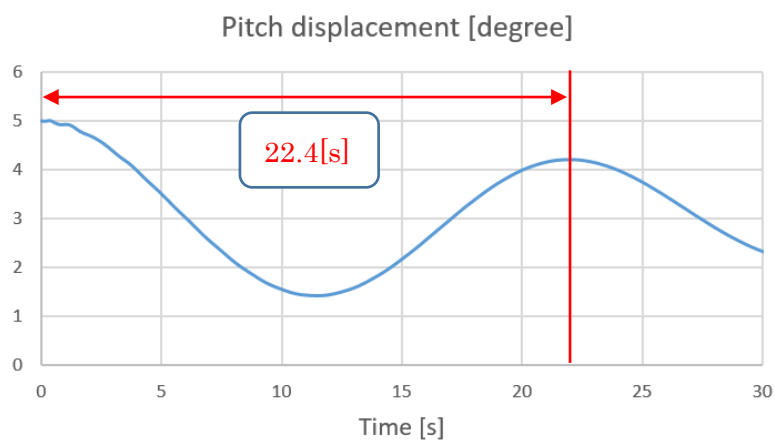


Figure 7-6 Time Series of Heave Free Motion of Case 2 Model



モデルの主要目は Table. 7-2 の通りである。

Table 7-2 Principal Design of the Floating Model

Item	Value	Unit
Displacement	6024	ton
KB	4.67	m
BM	11.53	m
KG	8.09	m
GM	8.10	m
Natural Period of Heave	15.0	sec
Natural Period of Roll and Pitch	22.4	sec

一般化モデルの主要目 (Table. 7-2) またはケース 1 (Table. 7-1) と比べると、ケース 2 の場合はかなり変わる項目がある。そのまとめは以下の通りである。

- ① タワーと各サイドコラムの高さが変わらず、傾斜になるだけため、その長さは長くなり、浮体全体の重量は 250[ton]程度増えた。
- ② 浮心の座標は (0.22, 0, -10.34) [m]で、Z 座標は少々大きくなり、X 座標は正になる (傾斜方向は X 正軸)。
- ③ 重心の座標は (0.779, 0, -6.91) [m]で、タワーとサイドコラムの重量は両方とも大きくなるため、結果として Z 座標は小さくなった。X 座標は正になる (値は浮心のほうより大きい)。この場合のモデルは静水状態においても浮体が少々傾斜している。同じように、便宜のために、一般化モデルから各部材の密度を変えることは全くない。
- ④ この場合に各サイドコラムは中央に向けて傾斜するので俯瞰すると浮体の水線面は結構コンパクトになる。そのため、水線面断面 2 次モーメントはかなり小さくなり、BM は 5[m]程度も下がる。G と M の位置変化により、結局 GM は 4.3[m]くらい小さくなった。これは、浮体の復原性や固有周期に大きな影響を及ぼした。

### 7.3 動揺の周波数応答

前述した設計の主要目などから、一般化モデル、斜めのタワーを有するモデルケース 1、ケース 2 の間にある違いについて把握する。ここにおいて、NK-UTWind で規則波中の各ケースの動揺の周波数応答を求めて比較した。

● 計算条件と結果

ケース1、ケース2の場合、浮体の三角対称が失ったので、ここにおいて波方向をパラメータとして $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $180^\circ$  合わせて7ケースの数値計算を行った。まず Fig. 7-7 に波方向と浮体の関係を示す。その次に Fig. 7-8~Fig. 7-14 において計算結果を示した。

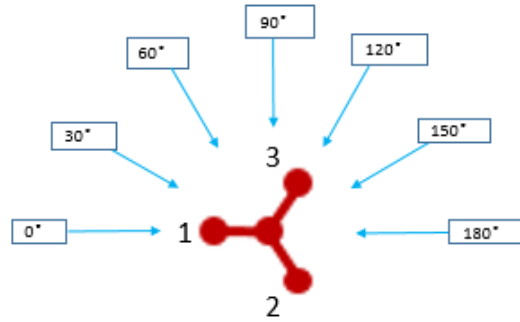


Figure 7-7 Model Position and Wave Directions

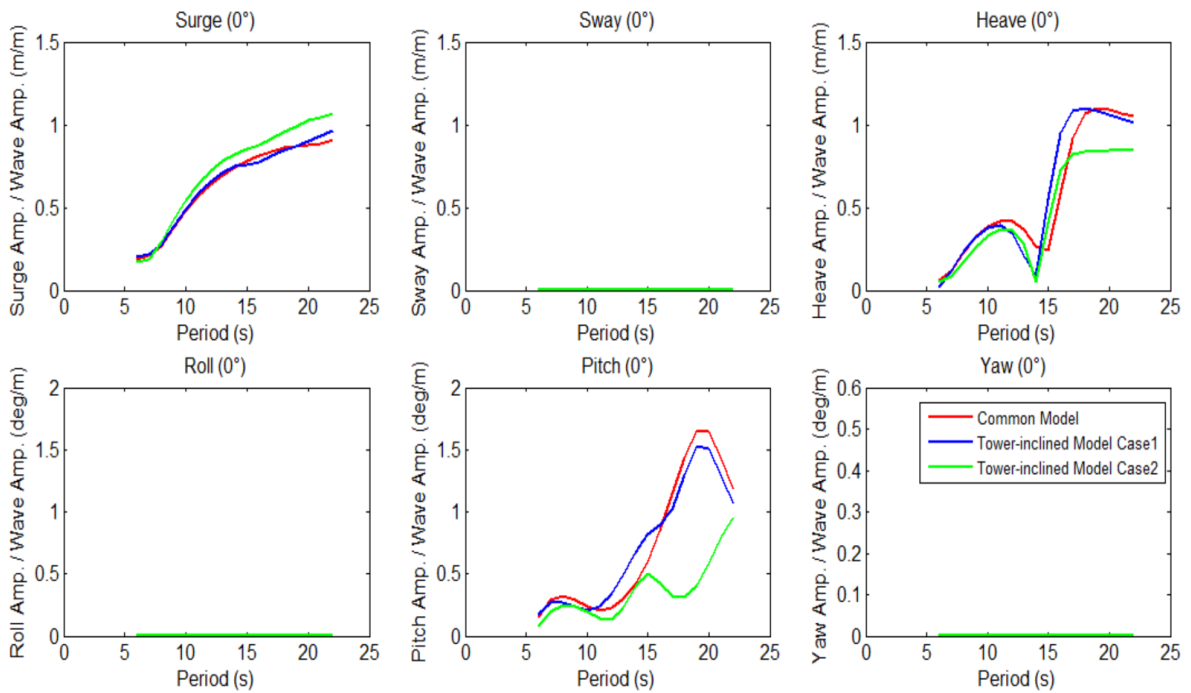


Figure 7-8 Time Series of 6 DoF Motion (Direction  $0^\circ$  )

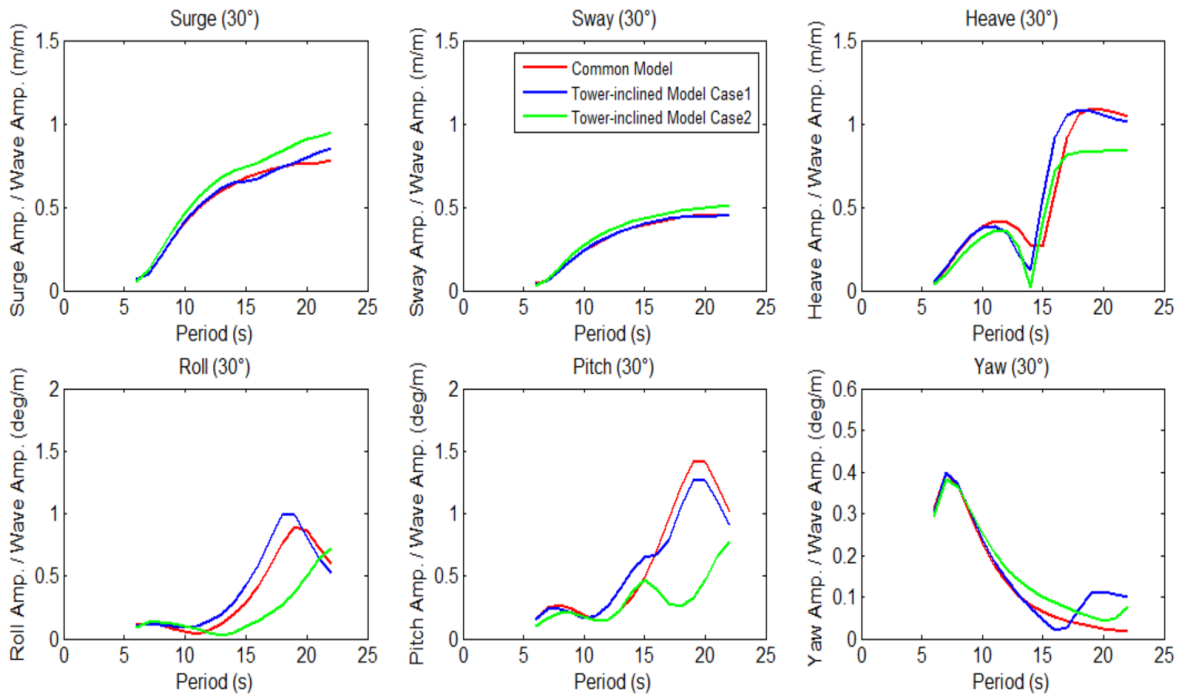


Figure 7-9 Time Series of 6 DoF Motion (Direction 30° )

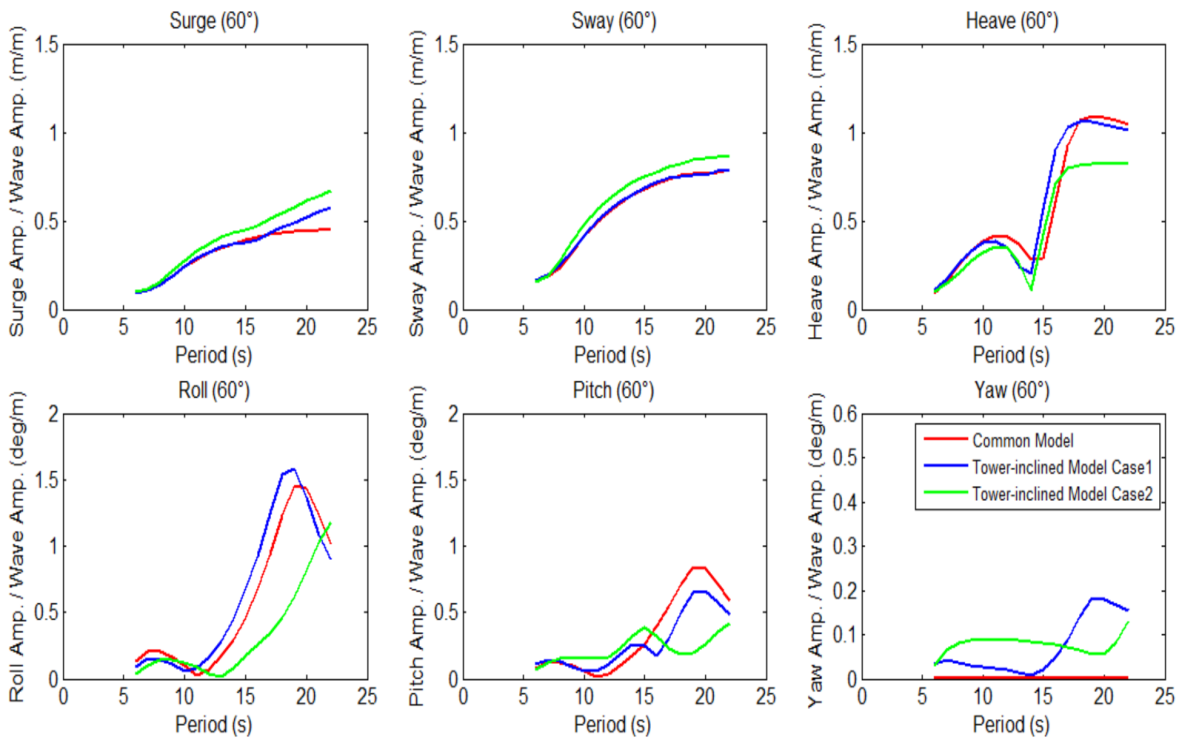


Figure 7-10 Time Series of 6 DoF Motion (Direction 60° )

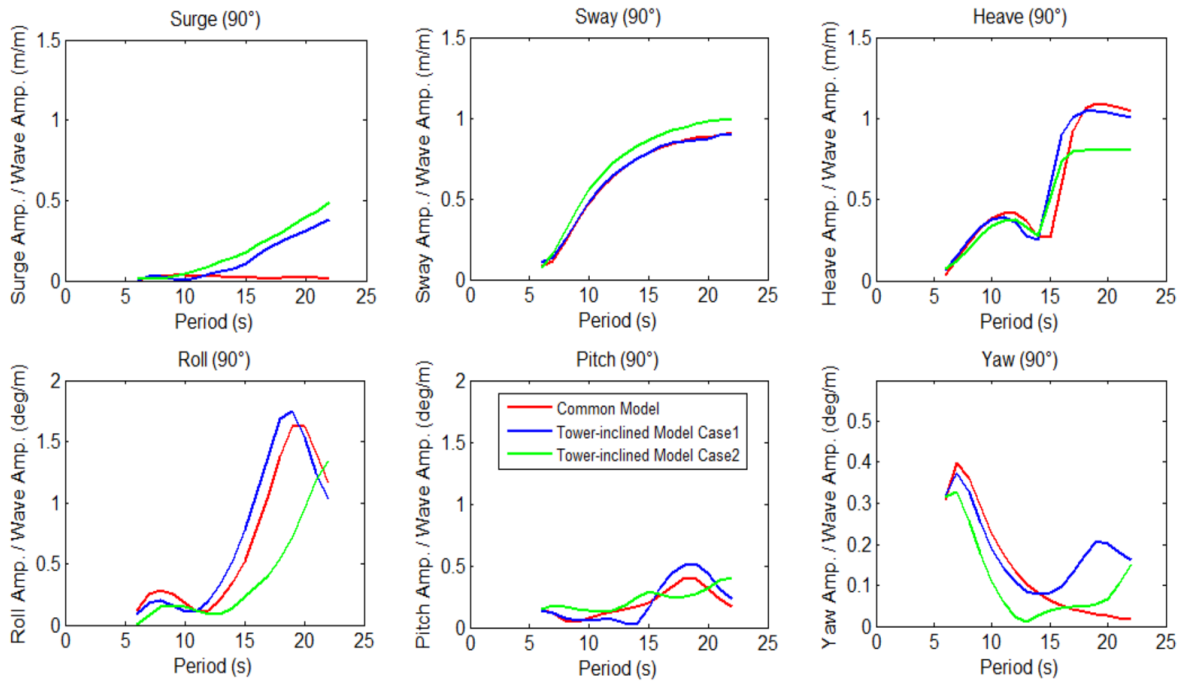


Figure 7-11 Time Series of 6 DoF Motion (Direction 90° )

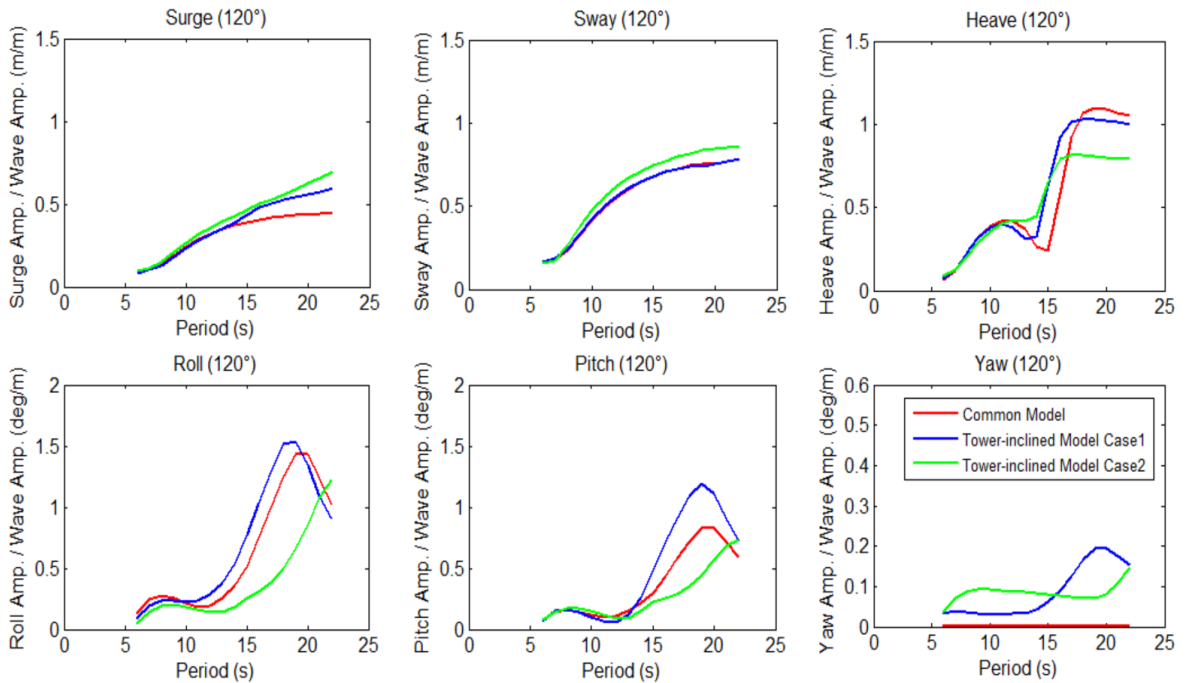


Figure 7-12 Time Series of 6 DoF Motion (Direction 120° )

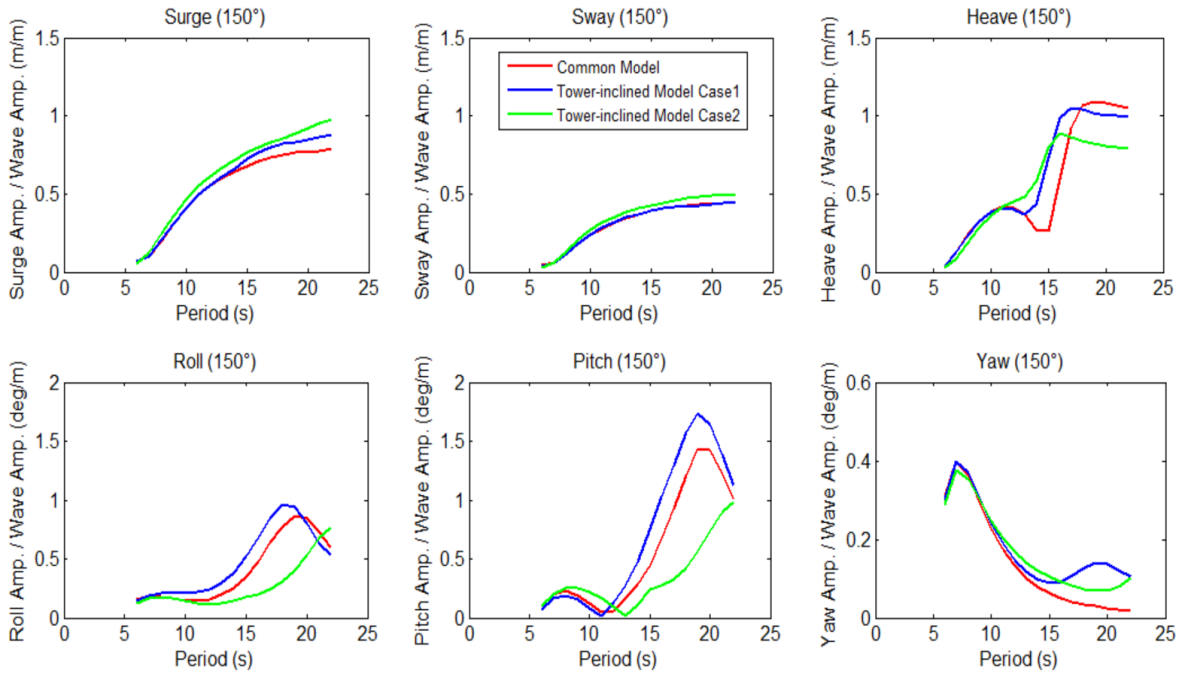


Figure 7-13 Time Series of 6 DoF Motion (Direction 150° )

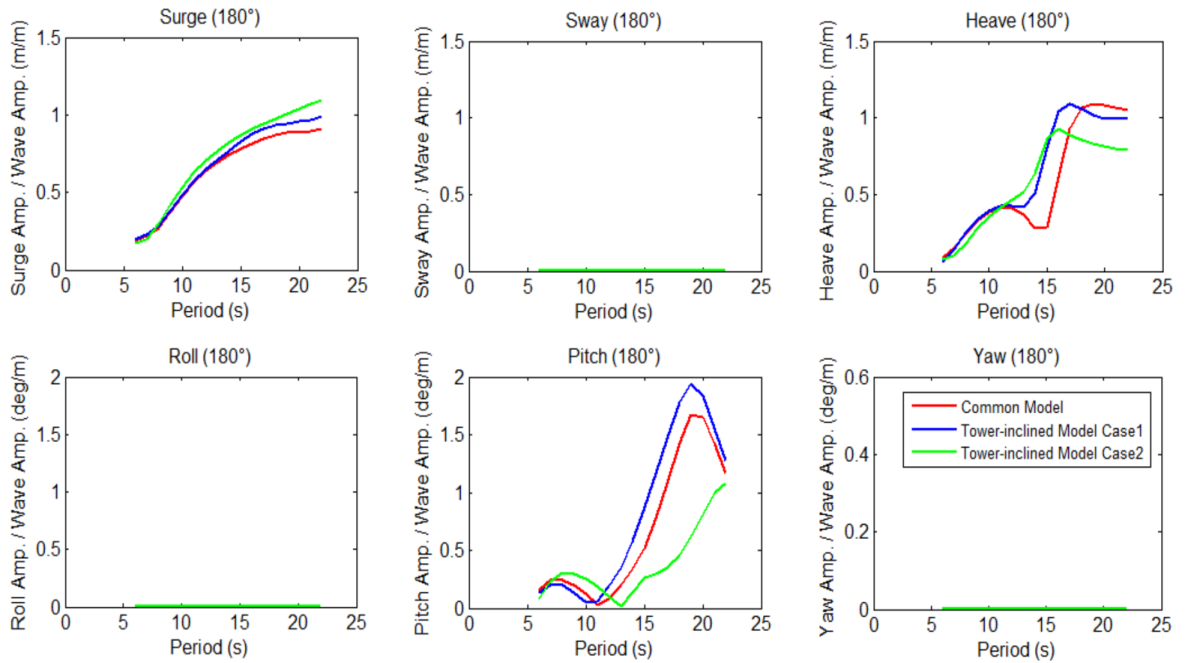


Figure 7-14 Time Series of 6 DoF Motion (Direction 180° )

- 考察

- Surge

全波方向において、3つのケースは Surge 方向にピークが現れない。Surge 方向に自由動揺計算をしていないが、同じばね係数を有する係留が用いられたため、Surge 方向の固有周期は3つとも 100[s]以上であると推定する。

3つのケースの計測点は同じ節点であるが、一般化モデルの場合は重心で、ケース1の場合は重心とちょっとずれており、ケース2の場合は重心とかなり距離がある。

全波方向において、波周期 20[s]の近傍にケース1とケース2の応答は一般化モデルのほうより大きくなる。これは、斜めの要素の前後の波力差による結果（波方向 90°の結果からこれが分かる）だと考える。さらに、ケース2の場合は Pitch 方向との連成効果も少し出てきたと考える

- Sway

Sway 方向の固有周期は計測していなかった。

全波方向において、ケース1と一般化モデルの応答曲線はほぼ重ね合わせている。これは、前後の波力差がないからである。ケース2の応答が一般化モデルのほうより大きいことは斜め要素の前後の波力差と Roll 方向の連成効果に起因していると考えられる。

- Heave

自由動揺計算によりケース1の Heave 方向の固有周期は、ケース2の Heave 方向の固有周期はである。両方ともは一般化モデルより小さいである。それは第三章の (3.1) 式から分かる。斜めの要素で Heave 方向の付加質量は少々大きくなるが、水線面が楕円断面で一般化モデルより大きくなる。両方とも増えるが、その結果として固有周期が小さくなる。

NK-UTWindで用いられたレーレイ減衰のため、固有周期の近傍にピークが出ていない。

ケース2の応答が小さいことは、斜めの要素が多くて、要素上下の波力が相殺することが原因だと考える。

- Roll

Roll 方向の固有周期は計測していなかった。ただし、Fig からケース1の固有周期は一般化モデルのほうより少々小さい。ケース2の固有周期は一般化モデルのほうより結構大きくなる。第三章の (3.2) 式から分かるように、ケース1の場合は回転慣性、GM、排水量にそれぞれ変化量があるが、値は小さい。ケース2の場合は排水量が増加したが、GMはかなり減少したため、固有周期が大きくなる。（回転慣性を判断するのは難しい）

応答について、波方向 30°、60°、90°、120°、150° の場合、ケース1 > 一般化モデル

ル；ケース2<一般化モデル、これはケース2のピークはまだより長周期側にあるからである。

- **Pitch**

自由動揺計算によりケース1のPitch方向の固有周期はで、ケース2のPitch方向の固有周期はである。原因はRollの場合と同じである。

応答について、波方向0°、30°、60°の場合はケース1<一般化モデル；波方向30°、60°、90°、120°、150°の場合はケース1>一般化モデル、これは斜めの要素の前後波力差によると考える。ケース2の場合はRollと同じように解釈できる。

- **Yaw**

Yaw方向の固有周期は計測していなかった。

波方向30°、60°、90°、120°、150°の場合は浮体が波に対して非対称的であるためYaw方向に応答が出てきた。波周期7[s]と20[s]の近傍にピークが現れた。7[s]の時に波長は浮体の寸法とほぼ同じで、各コラムにおける波力の相対的位相が大きいため大きな回転モーメントが生じた。20[s]の時に斜めの要素の影響が現れた。ケース2はケース1が波長周期側に伸ばされたような感じとなっている。

## 7.4 ガイワイヤーの張力の周波数応答

### 7.4.1 3つのケースの規則波中ガイワイヤーの張力の周波数応答

ここで、一般化モデル、斜めのタワーを有するモデルケース1、ケース2のガイワイヤーの張力変動の周波数応答をNK-UTWind求めて比較を行った。

- **計算条件と結果**

波方向をパラメータとして0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°合わせて7ケースの数値計算を行った。Fig. 7-15～Fig. 7-21においてその計算結果を示した。

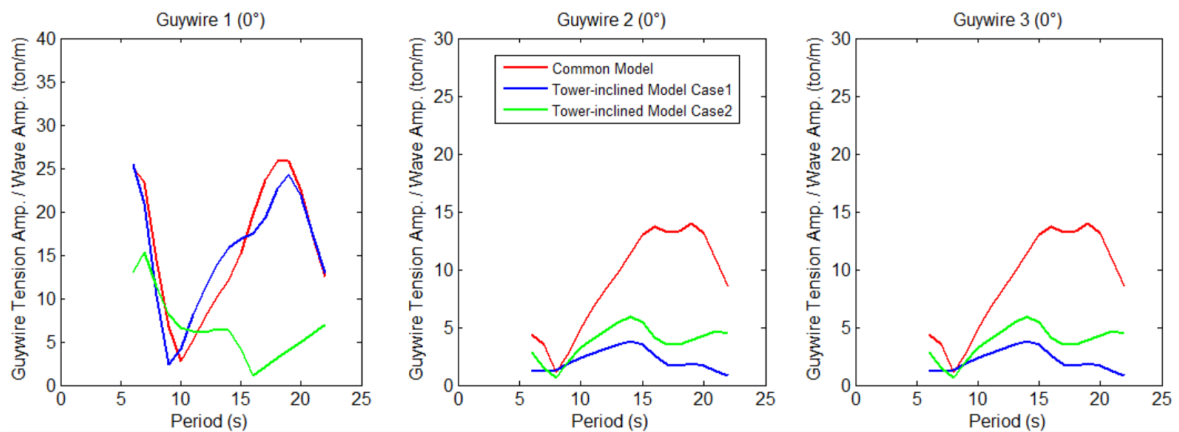


Figure 7-15 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models (0° )

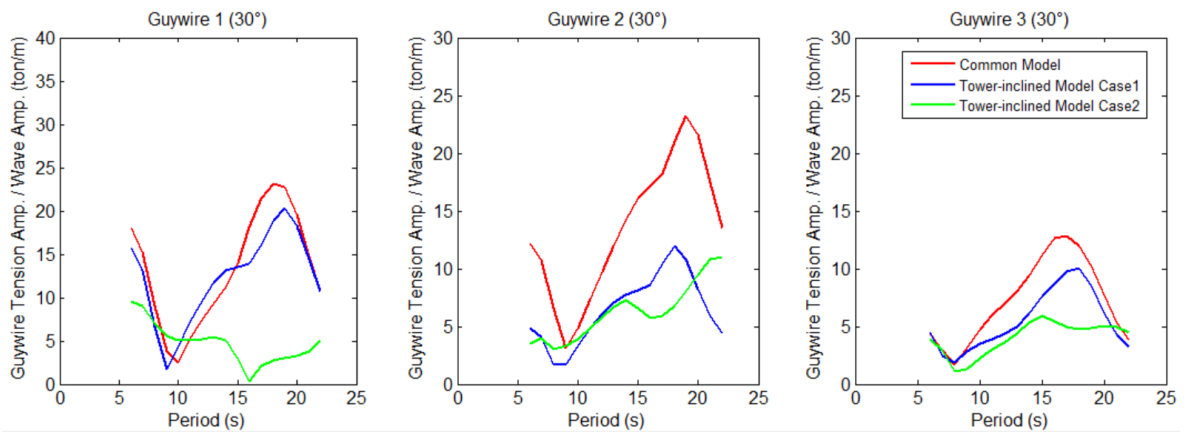


Figure 7-16 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models (30° )

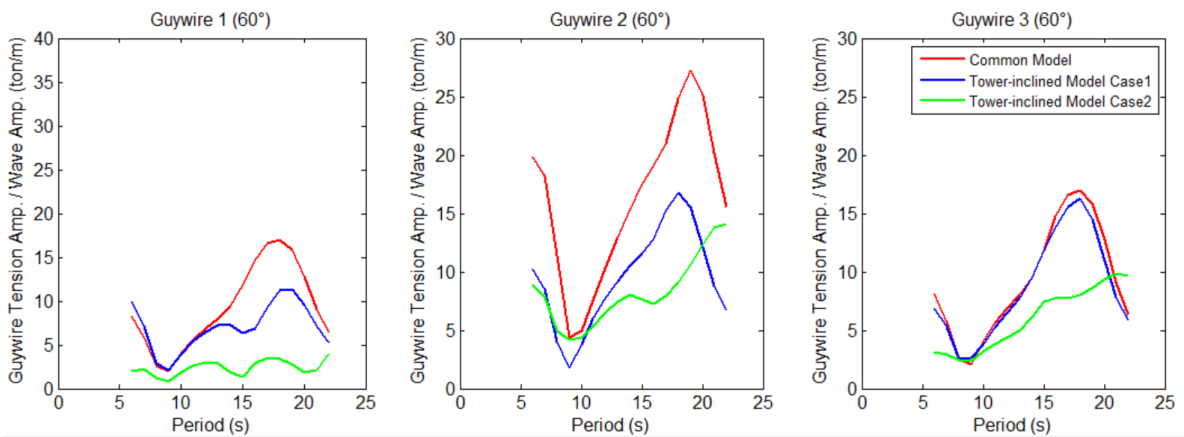


Figure 7-17 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models (60° )



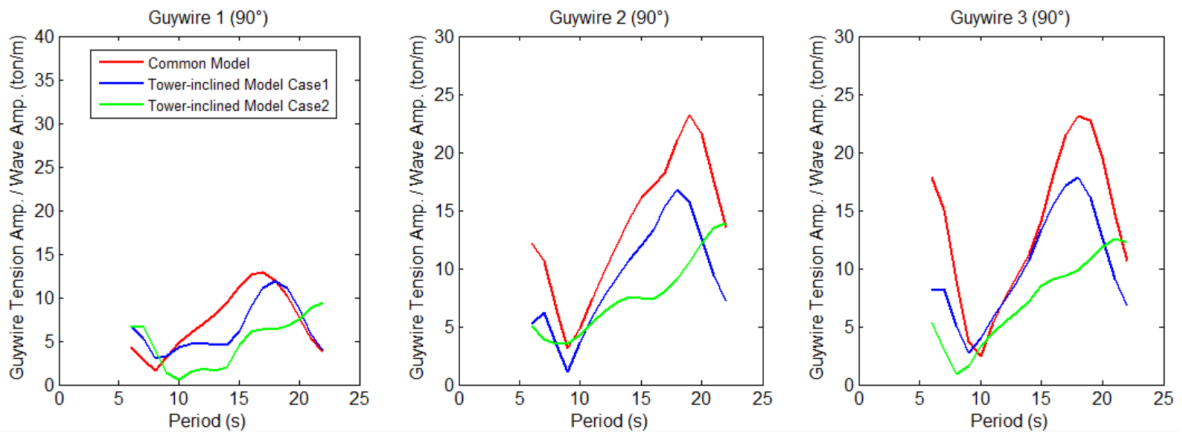


Figure 7-18 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models (90° )

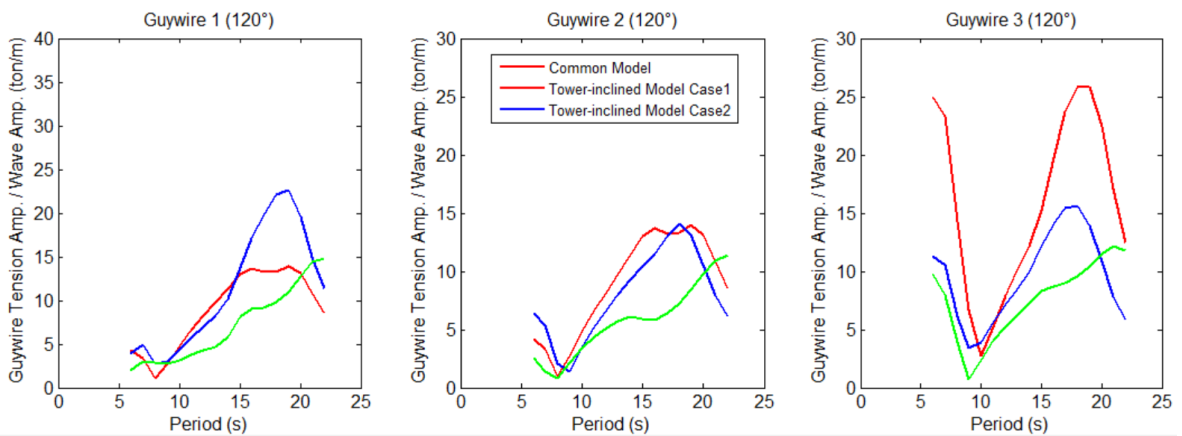


Figure 7-19 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models (120° )

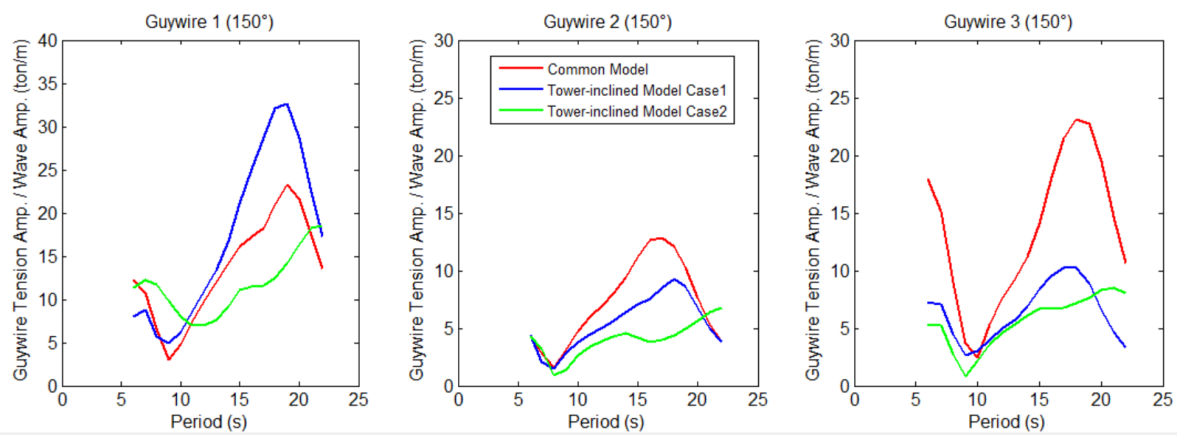


Figure 7-20 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models (150° )

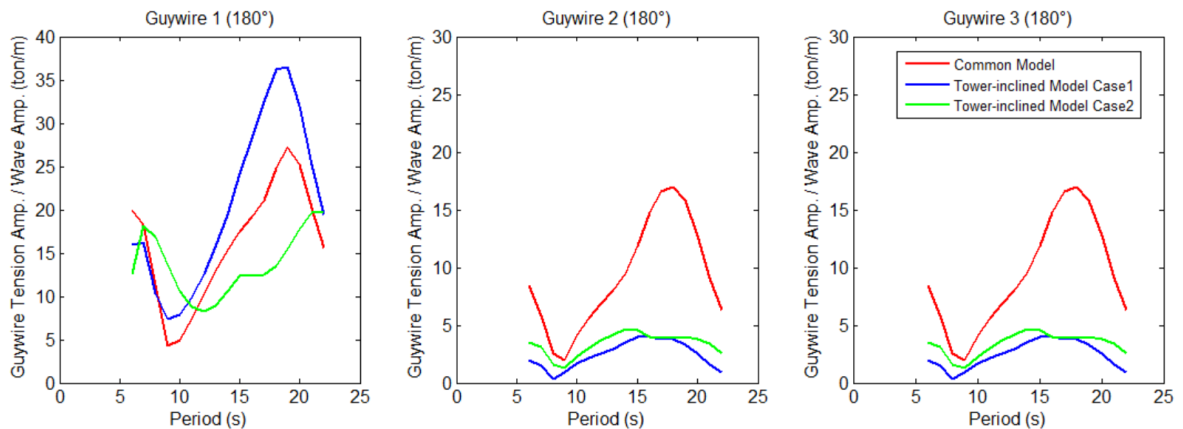


Figure 7-21 Frequency Domain Response of Guywire's Tension of 3 Models (180° )

## ● 考察

全体としてケース 1 とケース 2 のガイワイヤーの張力応答は一般化モデルと同じように全領域で Pitch 運動に支配されている。そして極小点の位置が Pitch の波無し点からずれているのは Heave 運動の影響が入っているからである。すなわち、短波周期領域 (6[s]近傍) で Pitch 運動と Heave 運動による慣性力でタワーとポンツーンが変形してガイワイヤーに大きな張力変動が現れた；長波周期領域 (18[s]近傍) で Pitch による浮体傾斜の時にけるタワーの自重とサイドコラムの変動浮力によってタワーとポンツーンが変形してガイワイヤーに大きな張力変動が現れた。

### ● ケース 1 と一般化モデルの比較

ケース 1 の場合にはモデルの三角対称が崩れた。波方向によって、各ガイワイヤーの応答はケース 1 のほうが大きくなったり、一般化モデルのほうが大きくなったりしている。ケース 1 の場合の応答は、小さい時には 5[ton/m]になることがあり、大きい時には 40[ton/m]にも達することがある。すなわち、張力変動の範囲は大きい。逆に、一般化モデルの場合、全波方向において張力変動の範囲は 15~30[ton/m]で、相対的に平穏である。こういった意味でガイワイヤーから見ると一般化モデルの性能のほうが良いと考える。

### ● ケース 2 と一般化モデルの比較

ケース 2 の場合にはモデルの三角対称も崩れたが、設計のところに述べたように、全体システムは非常にコンパクトになる。一般化モデルと比べて、GM は 12[m]程度から 8[m]程度に下がって、Roll、Pitch 方向の固有周期も長周期側にかなり移っている。Fig~Fig に示した全波方向におけるケース 2 の各ガイワイヤーの変動張力応答は結構小さく、変動範囲は 0~20[ton/m]が、それはピークがまだ出てこないことが原因である。Pitch 固有周期

近傍の応答はどのくらいかまだ分からない。そのため、具体的な海象条件における波がエネルギーを持つ周波数範囲を考慮してこの設計の優劣性を評価しなければならない。ここの計算で考慮された波周期 5[s]~20[s]においてケース 2 の性能は非常に良いともいえる。船の場合、横揺れや縦揺れの固有周期が長くなると、スタッフの居心地が悪くなるが、浮体式洋上風車の場合にはメンテナンス以外に人を乗せことはあまりないため、そういった懸念はないであろう。

#### 7.4.2 タワーとポンツーンの弾性がガイワイヤーの張力に与える影響

6.3.3 節と同じように、ここにおいてタワーとポンツーンの弾性がケース 1 とケース 2 のガイワイヤーの張力に与える影響について調べる。

#### ● 計算条件と結果

変更する前にケース 1 とケース 2 のタワーとポンツーンの曲げ剛性は一般化モデルと同じである。その次にそれぞれタワーとポンツーンの曲げ剛性を変えることで以下の 3 ケースについて数値計算を行って簡単に考察をした。

- ④ タワーとポンツーンは両方弾性体
- ⑤ タワーは弾性体、ポンツーンは剛体
- ⑥ タワーは剛体、ポンツーンは弾性体

Fig. 7-22~Fig. 7-25 においてそれぞれケース 1 (波方向  $0^\circ$  )、ケース 1 (波方向  $180^\circ$  )、ケース 2 (波方向  $0^\circ$  )、ケース 2 (波方向  $180^\circ$  ) の結果を示す。

#### ● ケース 1

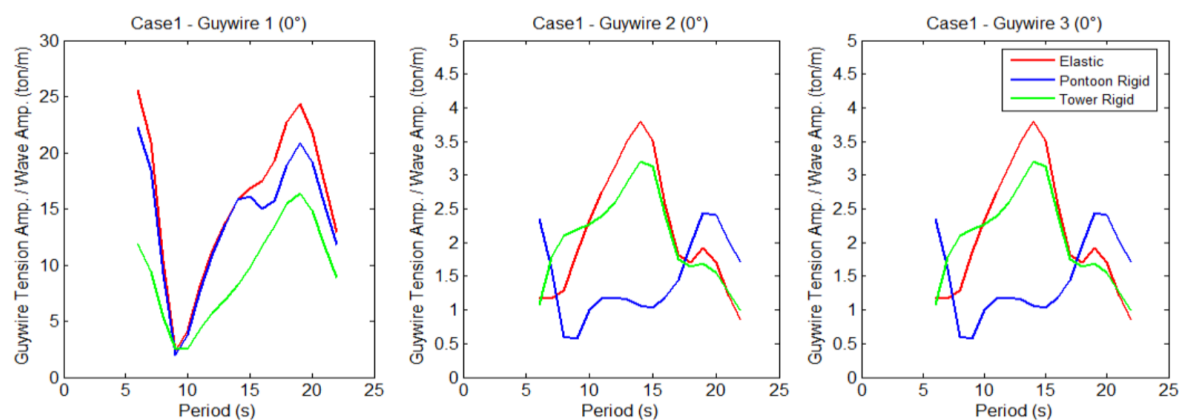


Figure 7-22 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon of Case 1 Model (Direction  $0^\circ$  )

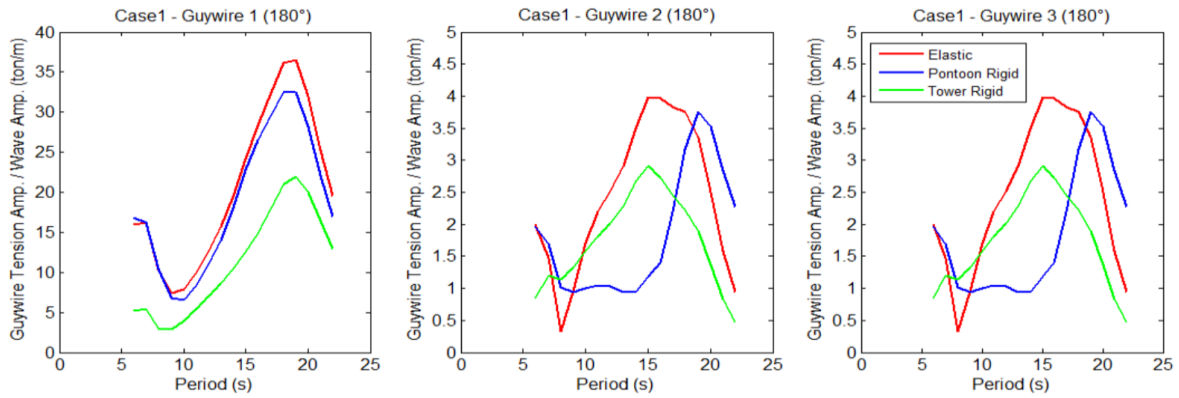


Figure 7-23 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon of Case 1 Model (180° )

• ケース 2

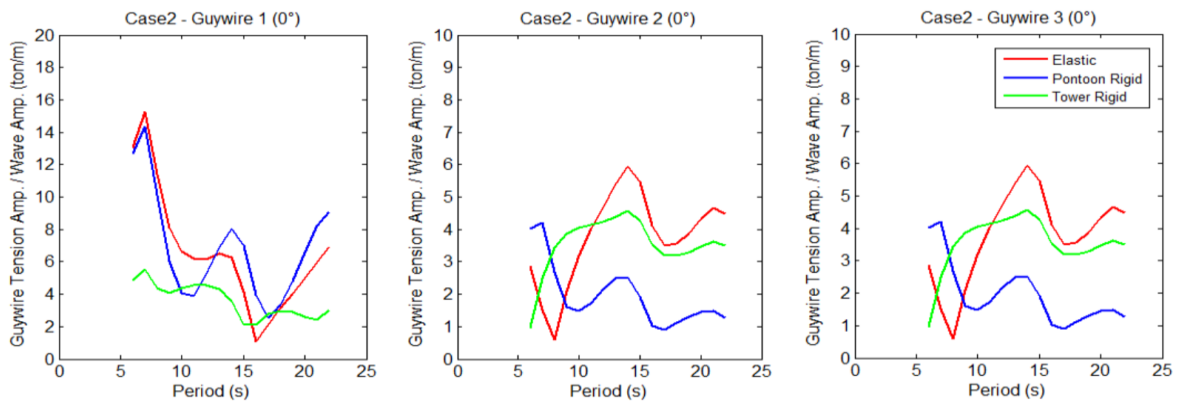


Figure 7-24 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon of Case 2 Model (0° )

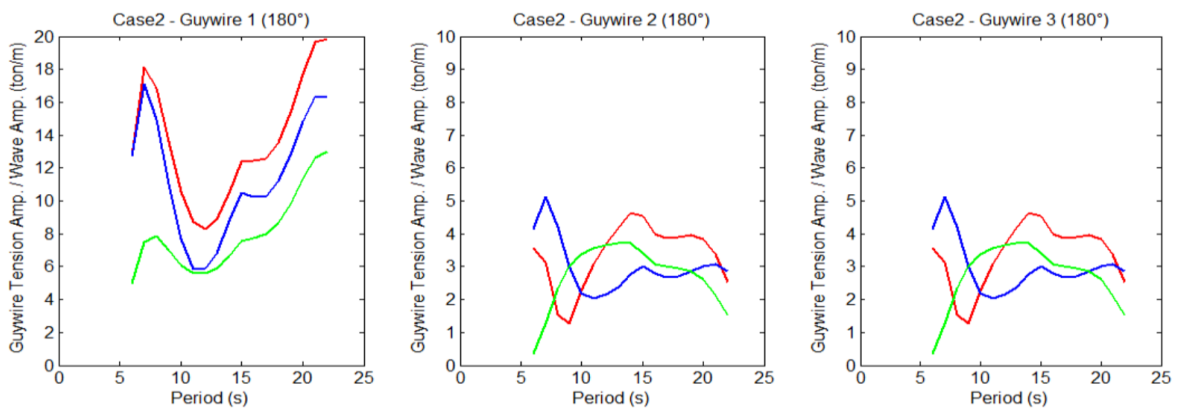


Figure 7-25 Influence of the Elasticity of Tower and Pontoon of Case 2 Model (180° )

## ● 考察

ワイヤー1は波方向と平行し、ワイヤー2と3は波方向に対して対称的である。

### ● ケース1

波方向 $0^\circ$ の時にワイヤー1は波上側、ワイヤー2と3は波下側にある。ワイヤー1の場合、全領域でタワーの弾性影響が大きいことが分かる。これは2次元で運動モードを説明する時の結論と一致している。ただし、ワイヤー2と3の場合、タワーの弾性影響が小さく、ポンツーンの影響が非常に大きく見えたが、このFigは縦軸を細かくするもので、値を比べるとワイヤー1と同じくらいのポンツーンの影響が出てきたことが分かる。すなわち、長波周期領域で浮体傾斜によるサイドコラムの変動浮力からポンツーンの変形に与える影響はワイヤー1、2、3にとって全部同じ程度である。ワイヤー2と3の場合、タワーの弾性影響が非常に小さい原因は、ワイヤーと波方向の相対位置である。ケース1の場合、前に示した設計のThree-View Drawingを見ると、ワイヤー2と3は波方向 $0^\circ$ 、 $180^\circ$ とほぼ垂直となっていることが分かる。この時、たとえタワーが波方向に大きく変形してもワイヤー2と3の長さもあまり変わらない。ここで他の波方向の結果は示していないが、この状況は波方向によって変わると予想する。

波方向 $180^\circ$ の時にワイヤー1は波下側、ワイヤー2と3は波上側にある。特性は $0^\circ$ の場合と同じように解釈できる。

### ● ケース2

ケース2の場合、曲線の形状は複雑になるがケース1と同じように解釈できる。

### ● 注意点

タワーやポンツーンを剛体にする時のワイヤーの張力変動応答は逆に弾性体の場合より上回ることがあり、これはタワーの変形とポンツーンの変形の位相によることだと考える。

### ● 結論

結論だと、ワイヤーの張力変動にとってタワーの弾性影響が支配的であるが、波方向とワイヤーの相対位置によってその影響が非常に小さくなる可能性がある。逆に、どのような波方向においてもポンツーンの影響がワイヤーに与える影響が同じ程度である。実際に補強する時に、やはりタワーを補強することが一番重要だと考える。

## 7.5 ガイワイヤーの支持効果に関する考察

6.3.4 に示した結果から、一般化モデルにとって、ガイワイヤーが非常に効果的にタワーを支持していることが分かった。ここで同じ考察方法でケース 1 とケース 2 のガイワイヤーの支持効果について調べる。Fig. 7-26～Fig. 7-29 においてそれぞれケース 1 (波方向  $0^\circ$  )、ケース 1 (波方向  $180^\circ$  )、ケース 2 (波方向  $0^\circ$  )、ケース 2 (波方向  $180^\circ$  ) のガイワイヤーあり・なしの場合のタワー根元ひずみの変化分の結果を示していた。

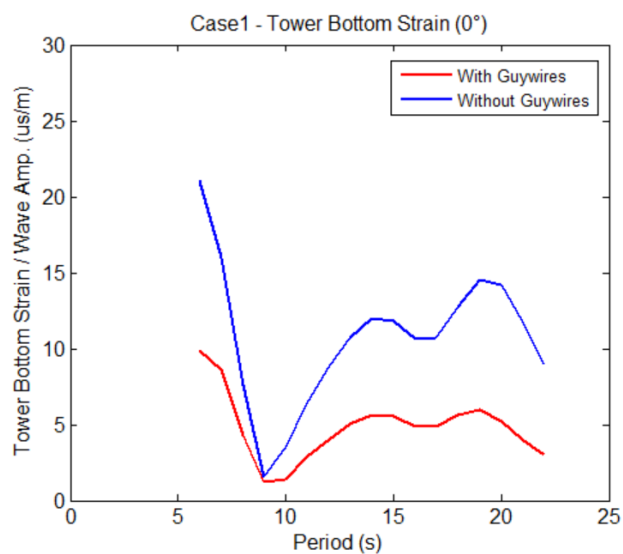


Figure 7-26 Strain at Tower's Bottom of Case 1 – with Guywire and without Guywire ( $0^\circ$  )

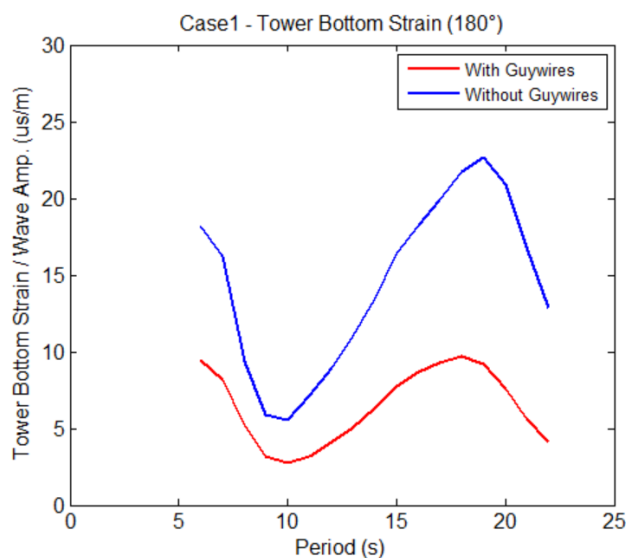


Figure 7-27 Strain at Tower's Bottom of Case 1– with Guywire and without Guywire ( $180^\circ$  )

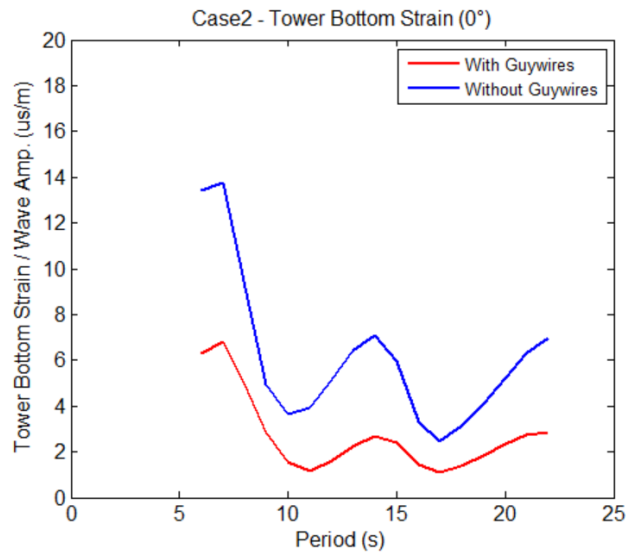


Figure 7-28 Strain at Tower's Bottom of Case 2- with Guywire and without Guywire (0° )

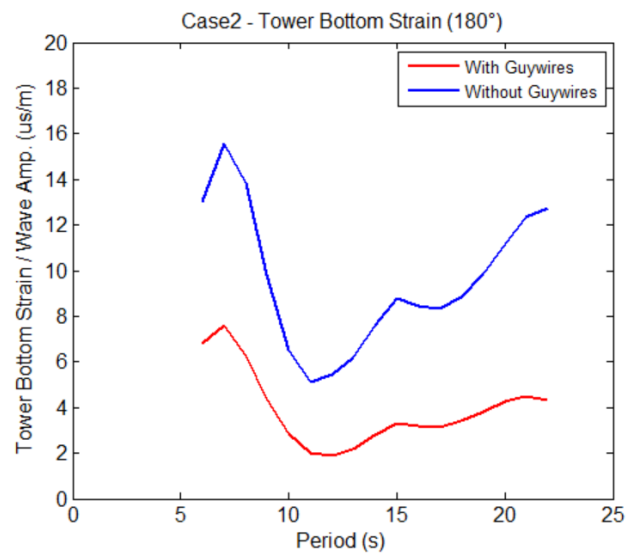


Figure 7-29 Strain at Tower's Bottom of Case 1- with Guywire and without Guywire (180° )

● 考察

Figs からケース 1 の場合、波方向 0° と 180° においてガイワイヤーの支持によりタワー根元のひずみの変化分は最大 50%程度削減された。ケース 2 の場合、波方向 0° と 180° においてガイワイヤーの支持によりタワー根元のひずみの変化分は最大 60%程度削減された。一般化モデルの 60%~80%と比べればそれほど効果的ではないことが分かる。これは、ガイワイヤーの配置に起因していると考えられる。

## 7.6 ポンツーン根元と中間部のひずみに関する考察

一般化モデルのところに述べたように力のバランスから NK-UTWind におけるワイヤの張力に関する結果とタワー根元のひずみに関する結果の妥当性が確認した上で、ポンツーンに関する結果も信頼できるはずと考えるが、実験結果と一致していない。これは、実験モデルの不備によるものか、それとも数値計算の問題であるのかまだ判断できないため、ここでは考察を行わない。今後再実験することで検証する必要があると考える。

## 7.7 モデル評価

前述した分析から、ケース 1 は一般化モデルより悪い挙動を示していたが、実機製造の時に相対的に容易であると考えられる。ケース 2 は固有周期面から波の高エネルギー領域を避けることができ挙動の立場または前述したワイヤの立場からかなり良い設計だと言えるが、斜めの要素が多くて角度の精度や接合部の処理は結構難しくなる恐れがある。そのため、実用化に向けてまた経済性などを詳しく考察する必要がある。



## 8 結論

### 8.1 研究成果

#### ● 実施項目

##### ● ガイワイヤー解析機能の追加

初期張力を設定することができるガイワイヤー解析機能を NK-UTWind に追加した。その次に実験結果から機能の妥当性が確認した。

##### ● 浮体モデルの設計

実験のために一般化モデルモデルを設計し、実現性のために斜めのタワーを有する浮体モデルを 2 ケース設計した。考察を行った後に浮体の優劣性について評価をした。

##### ● 実験

実験において波浪中模型の安定性を確認した。現場の観察により、各海象条件においてガイワイヤーにはスラック状態が発生しないことを確認した。

##### ● ガイワイヤーの挙動の解明

実験結果に基づいて各波周期領域で浮体の運動モードとガイワイヤーの挙動との関係を分析し、張力変動の原因を明らかにし、ほぼ全領域で Pitch 運動に支配されていることが分かった。最後に設計された一般化モデル、ケース 1、ケース 2 に対してタワーとポンツーンの剛性を調整することで弾性体の影響について調べた。結果としてガイワイヤーの挙動にとってはタワーの弾性が主の原因であるが、その影響は波方向との相対関係によって変わる；ポンツーンの影響が副の原因であるが、その影響は波方向とはあまり関係ないことが分かった。

##### ● タワーの弾性応答の解明

実験と数値計算と比較を行い、NK-UTWind におけるタワー部分の内力計算の妥当性を確認した。その次に NK-UTWind を用いて 3 つのケースの浮体モデルに対してガイワイヤーがタワーを支持する効果を確認した。タワーが軽量化または細小化になることができる。

#### ● 結論

本研究では、①コンセプトの成立性を調べる際にまずガイワイヤーの成立性に焦点を当てることにした。実験中の観察より全実験条件でスラック状態が発生しないことが確認した。解析によりガイワイヤーの挙動を明らかにし、適切な初期張力を設定すればストーム状態においても危険なく、ガイワイヤーの成立性を確認した。②弾性影響を調べる際にタワーの変形による影響が大きい波方向とガイワイヤーの配置と関係あり、ポンツーンの変形による影響が小さいガイワイヤーの配置とはあまり関係ないことが分かった。③ガイワイヤーの支持効果を調べる際に、タワー根元のひずみは浮体の形状によってガイワイヤーありの場合のはなしの場合より 50%~80%も下がることもあり、非常に効果的であることが分かった。そのため、タワーは非常に細く製造することができ、軽量化も可能になった。④浮体の成立性については、解析により、軽量型浮体は波浪中で安定していることが確認した。

斜めのタワーを有する場合に対称性が崩れたが浮体の構造により逆に良い応答を示したこともある。すなわち、浮体の成立性も確認した。

## 8.2 今後の研究課題

### ① ガイワイヤーを有する浮体と係留の連成影響

本研究では係留の影響を小さくするために、非常に緩い係留索を用い、さらに係留点とアンカー点の高さは同じで、垂直方向の係留力が生じない。しかし、実機の場合はカテナリー係留が用いられ、係留力によりポンツーンの変形状態が変わり、ガイワイヤーの張力変動にも影響を与えると予想する。特にケース 2 の場合、長周期領域で Surge 動揺の応答は大きくなるため、係留からの影響はさらに大きい。

### ② 低剛性浮体の振動モードと風車ローターの連成影響

本研究では示していないが、一般化モデルの変形モードを考察する際にその振動モードを求める試みがあり、そこで第一振動モードの周波数は 0.5[Hz]、第二振動モードの周波数は 0.8[Hz]である。これは波の高エネルギー領域を避けることができるが、風車部分の振動と共振する危険がある。

### ③ ガイワイヤーの疲労評価

ガイワイヤーによりタワー根元の曲げモーメントが減少してタワーが軽量化、スレンダーになれるが、逆にその圧力をガイワイヤーは負っている。ガイワイヤーが機能を失うと、タワーが折れる可能性があり、全体システムも崩れた。またガイワイヤーの交換もかなり難しいと思われるため、稼働年数以内でガイワイヤーの機能が失わないことが求められる。こういった意味で、ガイワイヤーに対する疲労評価は非常に重要な位置にある。さらに、ケース 1 の場合、ガイワイヤーの一部は海水に入っており、腐食疲労を評価する必要がある。

### ④ ガイワイヤーのたわみ振動

本研究ではガイワイヤーを質量のないバネでモデル化したが、実際の場合、ガイワイヤーは一定の重量を持ちながらかなり長いためのたわみ振動は問題になると考える。

### ⑤ 軽量型浮体に対する実際環境中の経済性評価

タワーの軽量化によるコスト削減できるが、ガイワイヤーの設置に費用がある。全体システムの価格は最後にどのようになるのかを、実際の海象条件に参考して最適化を考慮する必要がある。

## 9 引用

- [1] 気象庁, 温室効果ガス世界資料センター (WDCGG), “二酸化炭素濃度の経年変化,” 10 2017. [联机]. Available: [http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2\\_trend.html](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html). [访问日期: 5 10 2017].
- [2] 経済産業省 資源エネルギー庁, “平成 27 年年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2016) PDF 版,” 5 2016. [联机]. Available: <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/>. [访问日期: 5 10 2017].
- [3] IEA, “世界の風力発電導入量とビジネス環境 ~2015 年の概況~, ” 6 5 2016. [联机]. Available: <https://sustainablejapan.jp/2016/05/06/wind-power-market/11154>. [访问日期: 5 10 2016].
- [4] 鈴木英之, “浮体式洋上風力発電の開発動向と将来展望,” 『浮体式洋上風力発電システム』特集号, pp. 363-368, 2016.
- [5] 海津信廣, “洋上風力発電の現状と今後の展望,” 風力発電のブレークスルーを目指して, 2015.
- [6] 福島洋上風力コンソーシアム, “浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業 PDF 版,” [联机]. Available: <http://www.fukushima-forward.jp/pdf/pamphlet.pdf>.
- [7] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “NEDO 海外レポート,” 2008.
- [8] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 2 版, 2016.
- [9] Aerodyn 会社, “aerodyn\_engineering\_Breaking\_News\_01\_2015,” 1 2015. [联机]. Available: [http://www.aerodyn-engineering.com/fileadmin/Download/aerodyn\\_engineering\\_Breaking\\_News\\_01\\_2015.pdf](http://www.aerodyn-engineering.com/fileadmin/Download/aerodyn_engineering_Breaking_News_01_2015.pdf). [访问日期: 5 10 2017].
- [10] David Weston, “Update: Aerodyn to launch floating platform,” 23 9 2014. [联机]. Available: <https://www.windpoweroffshore.com/article/1311918/update-aerodyn-launch-floating-platform>. [访问日期: 5 10 2017].
- [11] 石原孟ら, “浮体式洋上風力発電に関する研究その 2 軽量セミサブ型浮体の開発,” 第 28 回風力エネルギー利用シンポジウム, 11 2006.
- [12] 藤野陽三, “ケーブル・はりモデルを用いた斜張橋の内部共振に関する実験と解析,” 1991.
- [13] 藤岡弘幸, “浮体式洋上風車の風車-浮体連成応答解析法の開発及び連成応答特性に関する研究,” 2012.
- [14] 柴田創, “浮体式洋上風車の風車浮体連成挙動に関する研究,” 2013.

]

[15 菊池紘樹, “浮体式洋上風車の係留システムの安全性評価,” 2013.

]

[16 石井希実子, “浅海域における浮体式洋上風車のための風車-浮体-係留系連成応答解析  
] プログラムの開発及び波漂流力評価の高精度化,” 2015.

[17 関谷哲, “係留破断時の浮体式洋上風車の大変位挙動に関する研究,” 2016.

]

[18 尾崎雅彦, “緊張係留作業台の動的応答特性,” 1982.

]

[19 G. R. S. A. e. al., Applied Topics in Marine Hydrodynamics, 2016.

]

## 謝辞

本論文の執筆にあたり、大変多くの方にお世話になりました。厚く御礼申し上げます。

指導教員の鈴木英之先生には、常に親切かつ丁寧にご指摘いただき、ありとあらゆる分野についての博学多才さに敬意の念を抱いておりました。「基礎勉強を重視すること、他人ではなく問題に対して自分なりの考えを持つこと」などの先生からのご指導は今でも覚えており、研究のみならず、自分のこれからの人生にとっても貴重な助言だと考えております。

平林紳一郎先生には研究についての多くの指摘をいただきました。また研究に進捗がなく迷った時にごアドバイスいただきありがとうございました。

副指導教員の尾崎雅彦先生には、修士研究全般についてご助言いただき、本研究をより良いものにすることができました。

本研究室の特任研究員である Rodolfo 先生にはブラジルにいた時に生活や研究などに様々なお世話になり、たくさん貴重な経験と記憶ができて一緒に充実した 6 週間を過ごしました。実験を実施した際には USP の Pedro 先生から実験に関わる多くの場面で助けていただき、解析に関する知識もたくさん教えていただきました。

本研究室の秘書である小田野由香様、石渡真理子様には研究生活のサポートをしていただきました。各種手続きを中心に大変お世話になりました。

本研究室先輩の須山さんには日常の生活からバスケットボールで一緒に汗を流す等、様々な面でお世話になりました。中村さんには研究室に配属された日からいつも情熱的に助けていただき、しばしば研究を討論したり、人生経験を交流したり、一緒にジムに行ったりとお世話になりました。特に就職で悩んでいた際に多くの助言をいただきありがとうございました。小坂さんと宮田さんにも研究生活において様々な方面で助けていただきました。

M2 の椎葉君、有山君、堀口君、木下さんとは共に修士研究を進めながら、互いに刺激しモチベーションを高めたり、息抜きで雑談したり楽しい時間を過ごしました。

現 M1 の徐君、牧村君、高瀬君、坂田君にもしばしば交流したり、ご飯を誘われたりとお世話になりました。皆さんのこれからの活躍を期待しています。

最後に、私の海外留学を支援してくださり、いつも後ろで経済的な面・精神的な面で支えて励ましてくださった両親に心より感謝申し上げます。

日本に来てからすでに 3 年半で、これまで学んだことと経験を生かしてこれからの人生で様々なことに挑戦したいと思います。再び、助けてくださった方に誠にありがとうございました。