

浮体式洋上風力発電システムの 技術開発・安全性評価

石田 茂資*, 中條 俊樹*, 羽田 絢*, 平尾 春華*
谷口 友基*, 國分健太郎*, 井上 俊司*

Technological Development and Safety Assessment for Floating Offshore Wind Turbines

by

Shigesuke ISHIDA, Toshiki CHUJO, Ken HANEDA, Shunka C. HIRAO,
Tomoki TANIGUCHI, Kentaroh KOKUBUN and Shunji INOUE

Abstract

FOWT (floating offshore wind turbines) is one of the most promising ocean renewable energy. For promoting development of FOWT, NMRI conducted various studies in aspects of model experiment and numerical calculation, mainly focusing on the safety. This paper describes some major parts of them. In the second chapter the features of FOWT is introduced, especially the coupling of floater motion and turbine load. In the third chapter numerical calculations are introduced. Blade element momentum theory and the coupling calculation are described. The comparison of calculations in time domain and frequency domain is also mentioned. In the fourth chapter experimental results are introduced. In wind tunnel test the basic properties of wind turbine itself in moving conditions were investigated. In wave tank tests the numerical calculation results are validated and applicability of stability regulation to FOWT was confirmed. Moreover, negative damping phenomenon, caused by blade pitch control, was investigated. In the fifth chapter blade pitch controls for rotor speed keeping and floater motion reduction in wind and waves are mentioned. The effect of the developed algorithm for controlling both of them was confirmed.

* 海洋利用水中技術系

原稿受付 平成28年9月9日

審査日 平成28年10月20日

目 次

1.	はじめに	108
2.	浮体式洋上風力発電システムの概要	108
2.1	全体システムの構成	108
2.2	挙動の特性と解析手法	109
2.3	安全性評価	110
3.	数値計算手法	111
3.1	空力解析	111
3.2	連成解析	112
3.3	不規則過程における最大値の推定	114
4.	模型試験	116
4.1	風洞試験	116
4.1.1	目的および概要	116
4.1.2	風洞試験結果	116
4.2	水槽試験	117
4.2.1	数値計算の精度確認試験	117
4.2.2	復原性検証試験	119
4.2.3	ネガティブダンピングの検証試験	120
5.	ブレードピッチ制御法の検討	121
5.1	ブレードピッチ制御の基本的考え方	121
5.2	水槽試験による検証	122
5.2.1	個別制御	122
5.2.2	ハイブリッド制御	124
6.	まとめ	124
	参考文献	125

1. はじめに

当所は第3期中期計画（平成23年度～平成27年度）において、掲題のテーマで重点研究を実施してきた。事業的な成立性を高め、普及を推進する立場から、主として安全性確保の視点で個別研究課題に取り組んできた。その道は未だ途上にはあるが、現状での成果の中から主要なものを報告する。

具体的には、数値解析および実験の両面からの、構造安全性に係る荷重評価、復原性照査法の検討およびブレードピッチ制御技術開発などへの取り組みである。

2. 浮体式洋上風力発電システムの概要

2.1 全体システムの構成

一般的な浮体式洋上風力発電施設の全体システムを図1に示す。システムは風車およびタワー、浮体、係留系から構成される。当所においては、風車を含めた全体システムの安全性に特に重点を置いている。

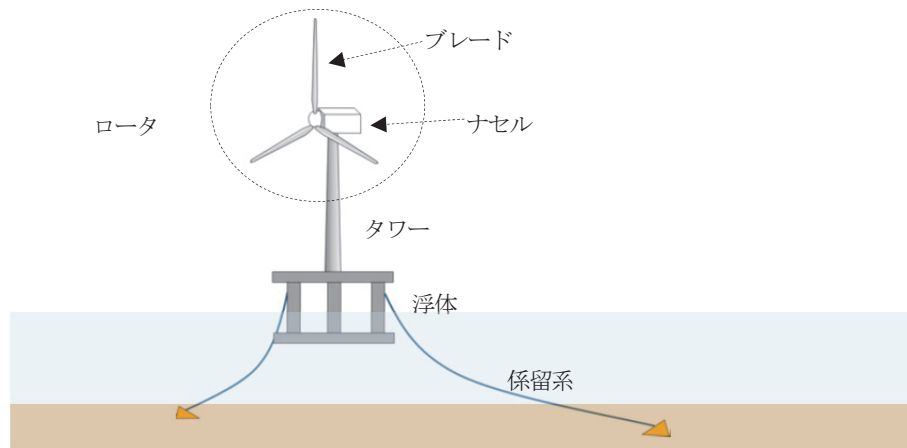


図1 浮体式洋上風力発電施設の全体システム

2.2 挙動の特性と解析手法

浮体式洋上風力発電施設には、風車の発電時・停止時等の状況に応じた風荷重が発生し、また、それに加えて波・潮流等の外力によって浮体動揺が発生する。浮体動揺によって風車への相対風速が変化する他、浮体構造物周りに流体力が発生し、浮体構造物につながる係留系や送電ケーブルからの荷重も発生する。また、風車は、ブレードのピッチ角制御を行うので、それによる荷重変動も考慮に入れる必要がある。

これらの荷重は、連成させた評価が必要である。発電機特性やブレードのピッチ角制御を含めた風車の稼働状態および暴風状態等をモデル化し、風車に働く風荷重、浮体構造物に働く波・流れ等の外力、係留系の影響等を同時に考慮し、一体として評価する必要がある。図2に浮体式洋上風力発電施設に働く外力の概念図を示す。

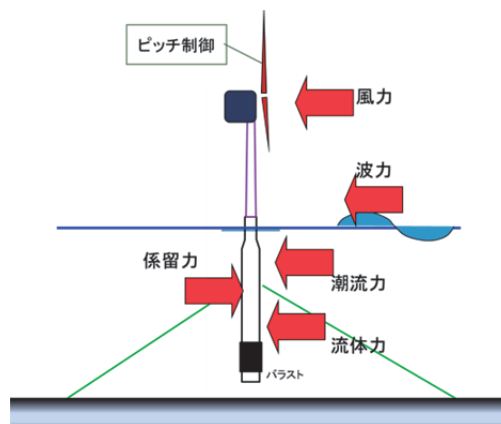


図2 浮体式風力発電に働く外力

風車は発電量安定化のためにブレードピッチ制御を行うため、制御に伴うスラスト荷重の変化も重要な要素となる。特に、制御の与え方によっては、ネガティブダンピングと呼ばれる浮体の応答が増幅される現象が生じることが知られており¹⁾、十分に注意する必要がある。ネガティブダンピングとは、図3に示すように浮体の動揺に伴う相対風速の変化、例えば、浮体が後傾したため相対風速が小さくなったとすると、これに対しブレードピッチ制御を行ったため、浮体の傾斜を増大させるようにスラストが変化する現象である。

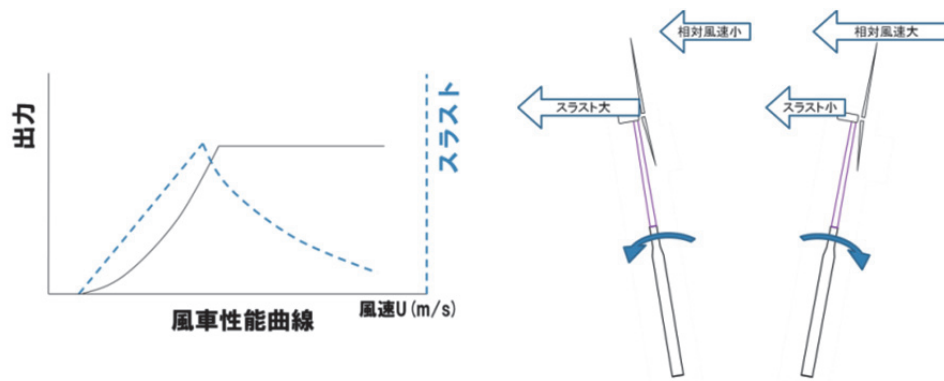


図 3 ネガティブダンピングの発生原理

2.3 安全性評価

浮体式洋上風力発電の安全性評価においては、一般的な海洋構造物と同様に、構造強度や係留安全性、復原性が特に重要と考えられる。

構造強度は、例えば限界状態設計法を用いて評価することができる。限界状態設計法とは、表 1 に示す限界状態に応じて安全性を検討する設計手法である。また限界状態に対する構造設計法として、表 2 に示すように部分安全率法や許容応力法がある。

表 1 限界状態

限界状態	各限界状態において想定している事象
終局限界状態	最大荷重負荷による構造部材の降伏や座屈に起因する耐荷重性能損失
	地震または津波による浮体式洋上風力発電施設の崩壊及び漂流
疲労限界状態	繰り返し荷重負荷による構造部材の疲労破壊に起因する耐荷重性能損失

表 2 限界状態に対する一般的な構造設計法の例

設計法	各設計法の概要
部分安全率法	構造物に作用する荷重と構造物（または構造部材、材料）の強度の両者に対して、それぞれがもつ不確実性やばらつき等を考慮するため、それぞれに安全係数を与える設計法。限界状態設計法においては、設定した限界状態に応じた安全率が与えられる。
許容応力法	設計荷重によって生じる部材の最大応力が、使用する材料ごとに定められる許容応力以下であることを照査し、安全性を検討する設計法。

部分安全率法に基づく強度評価の流れを図 4 に示す。荷重ケースには風車の状況に応じた海象気象条件を設定し、解析を実行する。

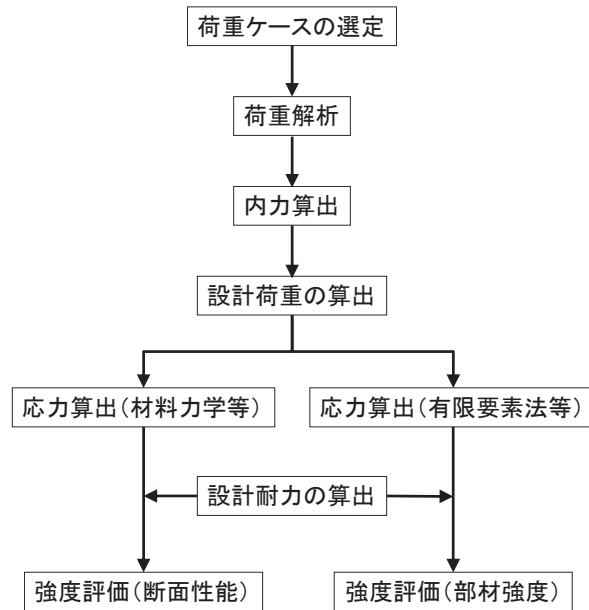


図4 強度評価のフロー

ここで、応力算出や設計耐力の算出（材料力学、有限要素法等）は、従来の手法が基本的には準用可能であるため、連成影響やブレードピッチ制御を考慮した浮体運動解析と荷重解析が重要となる。係留系の安全性評価についても基本的には従来の手法（船級規則等）が準用可能である。

3. 数値計算手法

3.1 空力解析

風車の空力解析は、翼素運動量理論を用いることが多い。翼素運動量理論は、翼素理論と運動量理論を組み合わせたものである。

運動量理論とは、風車ロータ前後の風の運動量変化と、風車に取り出すエネルギーが等しいと仮定してロータの理想的な効率等を求める理論である。図5は運動量理論に用いる風速等のパラメータの概念図である。ここで風車ロータの受風面は作動円盤（actuator disk）と呼ばれる。

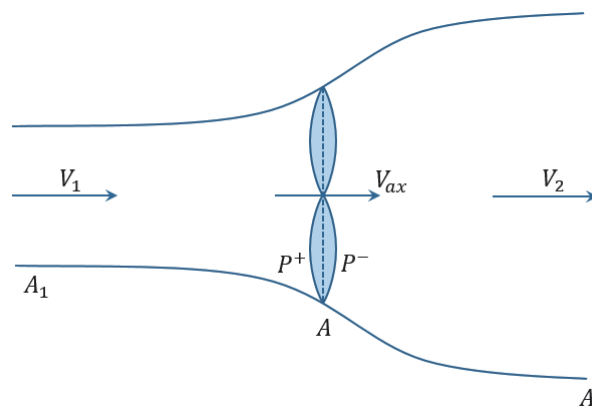


図5 運動量理論における作動円盤に流入する流れのイメージ

質量保存の法則から作動円盤前後の流量の関係が得られる。ロータに対するスラスト T は流出する流れと流入する流れの運動量の変化により与えられ、先の質量保存の関係から変形して求めることができる。また、スラスト T はロータ

面にわたる圧力差の結果として表すこともできる。圧力はベルヌーイの方程式を用いて表現することができ、これらより圧力差に関係する式が得られ、スラストは2種類の式で表される。スラストに関する2種類の式が等値であるので、誘導係数（速度低減率） a を導入することで、スラストを定義できる。

翼素理論は、ブレードを長さ方向に分割し、各2次元微小翼素に作用する力を計算し、これをブレードの長さ方向にわたって積分すること、そしてブレード枚数を掛け合わせて、トルクおよびスラストを求めるのがその手順である。

翼素に作用する風速と力を図6に示す。翼素は、自らの接線速度と流入速度の合成風 W を迎え角 α で受けて空気力 dF を発生する。翼素断面の微小要素に対し、揚力 dL と抗力 dD 、さらにブレード枚数を考慮してスラスト dT とトルク dQ が定義される。

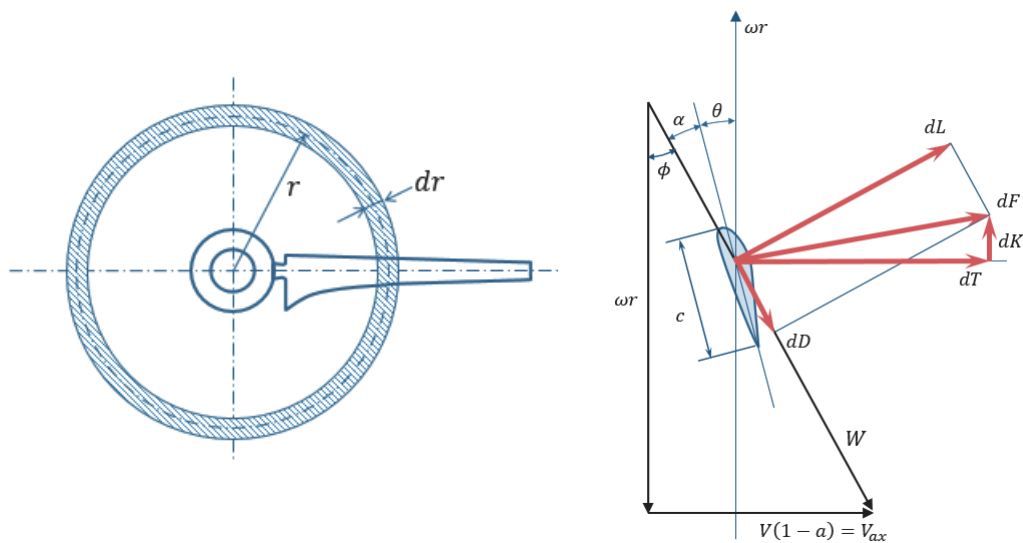
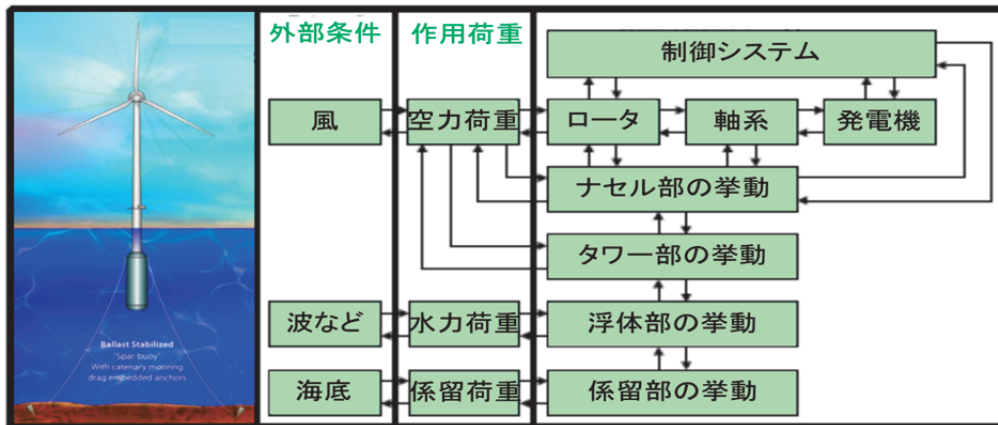


図6 翼素に作用する風速と力

翼素理論による結果と運動量理論による結果とを結びつけるため、相対風速、局所ソリディティを導入する。運動量理論によるスラストの式を翼素理論による式と等値とすることで誘導係数 a などが決まり、ロータ性能を求めることができる。

3.2 連成解析

浮体式洋上風力発電施設の連成一体解析は、発電機特性やブレードのピッチ角制御を含めた風車の稼働状態および暴風状態等をモデル化し、風車に働く風荷重、浮体構造物に働く波・流れ等の外力、係留系の影響等を同時に考慮し、一体として運動方程式を時間領域で解くものである。水中部分には従来の海洋構造物と同様に波浪荷重や潮流荷重が作用する。これらの荷重による応答は、周波数領域においてポテンシャル理論を用いたり、モリソン式を用いたりすることで求められる。図7にその概念図を示す。

図7 連成解析の概念フロー図¹⁾ (NREL 作成資料を改変)

当研究では、構造応答まで含めて解析する手法として、上記の連成解析にマルチ・ボディ・ダイナミクス（以下MBDと記す）を組み込む方法を採用した。MBDとは、構造物を複数の要素物体で構成されるシステムとして表し、各要素物体の運動および相互結合力を解析する手法である（図8）²⁾。

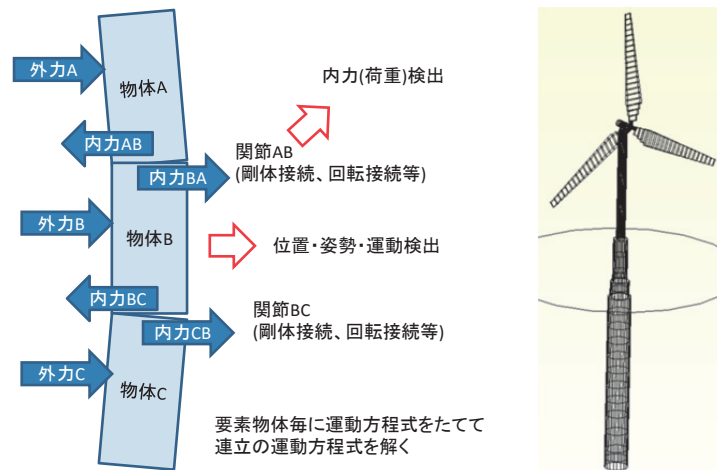


図8 MBDの概念(左図)および検討に用いたモデル(右図)

これにより、浮体構造の内部に発生する曲げモーメント等の内力を解析した。実験結果との比較による解析精度検証は次章で示す。

風力発電の国際標準を策定している IEC (International Electrotechnical Commission) の標準およびそれに準拠した国土交通省による浮体式洋上風力発電施設技術基準では、発電時や待機時等の種々の状態における荷重推定を、ここで述べた様な解析によって行うこととしている。そこで、国際的な比較計算に用いられている NREL/5MW 風車とスパー型浮体（喫水 90m、水線面直径 7.5m）の組合せで試解析を行った結果の例を表3に示す。浮体式洋上風力発電施設の特徴として、必ずしも待機時（暴風時）のみが厳しい条件ではないことが理解できる。

表3 発電時や待機時等の種々の状態における荷重推定の例³⁾

発電状況	平均 風速	乱流 強度	有義 波高	有義 波周期	浮体運動			タワー基部荷重			風車荷重
					サージ	ヒープ	ピッチ	サージ荷重	ヒープ荷重	ピッチ荷重	スラスト
	(m/s)	(%)	(m)	(sec)	(m)	(m)	(deg)	(kN)	(kN)	(kN・m)	(kN)
発電	4	53	1.0	8	48.29	0.23	0.90	639	5,782	46,610	700
	6	37	1.0	8	53.14	0.29	1.45	867	5,804	62,610	873
	8	30	1.0	8	54.37	0.32	2.14	948	5,809	67,810	921
	10	25	1.0	8	55.50	0.32	2.18	1,074	5,819	77,370	1,047
	12	22	1.0	8	54.95	0.36	2.33	1,092	5,828	79,250	1,066
	14	20	1.0	8	54.79	0.32	2.22	1,073	5,823	77,160	1,079
	16	18	1.0	8	53.66	0.30	1.64	1,030	5,825	74,930	1,068
	18	17	1.2	8	52.86	0.30	1.25	982	5,838	72,820	1,064
	20	16	1.5	8	50.88	0.27	1.02	1,172	5,838	85,130	1,156
	22	15	1.8	8	50.09	0.28	1.18	892	5,811	65,180	940
	24	14	2.1	8	49.50	0.27	1.08	960	5,825	71,460	1,057
	4	25	9.0	16	49.07	1.18	1.02	800	5,856	47,280	408
	6	20	9.0	16	52.74	1.19	1.15	1,068	5,868	66,010	624
	8	17	9.0	16	56.34	1.25	1.98	1,345	5,912	87,230	871
	10	15	9.0	16	59.09	1.29	2.13	1,403	5,917	92,860	937
	12	14	9.0	16	59.05	1.31	2.22	1,443	5,908	95,730	1,034
	14	13	9.0	16	57.76	1.28	1.96	1,522	5,907	99,830	1,036
	16	13	9.0	16	56.82	1.27	1.63	1,423	5,896	95,660	1,081
	18	12	9.0	16	55.11	1.24	1.47	1,305	5,887	87,090	993
	20	12	9.0	16	54.23	1.23	1.20	1,281	5,896	85,150	875
	22	12	9.0	16	53.86	1.22	1.35	1,281	5,887	84,710	830
	24	11	9.0	16	52.82	1.21	1.01	1,240	5,878	83,440	846
待機	50	11	9.8	16	49.03	1.19	1.03	941	5,956	61,090	499

3.3 不規則過程における最大値の推定

安全性照査を行うための設計値を得るためには、設計海象における不規則波中での最大荷重を得る必要がある。一般に、線形重ね合わせの仮定の下では、下記に示すスペクトル法で最大期待値を求めることが行われている。

応答のエネルギー密度関数 S 及び分散 σ^2 は式(1)および式(2)で与えられる。

$$S(\omega, \alpha) d\omega d\alpha = [RAO(\omega, \alpha)]^2 \cdot f(\omega, \alpha) d\omega d\alpha \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \iint S(\omega, \alpha) d\omega d\alpha \quad (2)$$

ここで、 $f(\omega, \alpha)$ は外力のスペクトル、 ω は入射外力の角周波数、 α は入射外力の入射角である。

また、浮体応答 x の極値 X が、ある値 x_1 を超える確率 q は、狭帯域定常ランダム過程の場合、レイリー分布を仮定して下記で与えられる。一般に、短期海面における極値の確率として、1/1000 が用いられる。

$$q(X > x_1) = e^{\{-x_1^2/2\sigma^2\}} \quad (3)$$

一方、ブレードピッチ制御下での浮体式洋上風力発電施設は、応答における非線形性が強い部分があるので、時間領域での時刻歴解析が望ましい。両者の解析フローを比較して図 9 に示す。

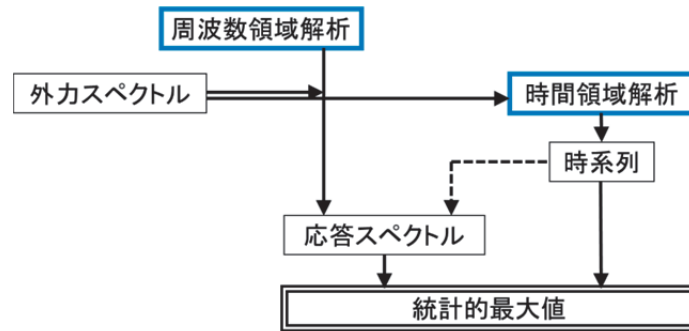
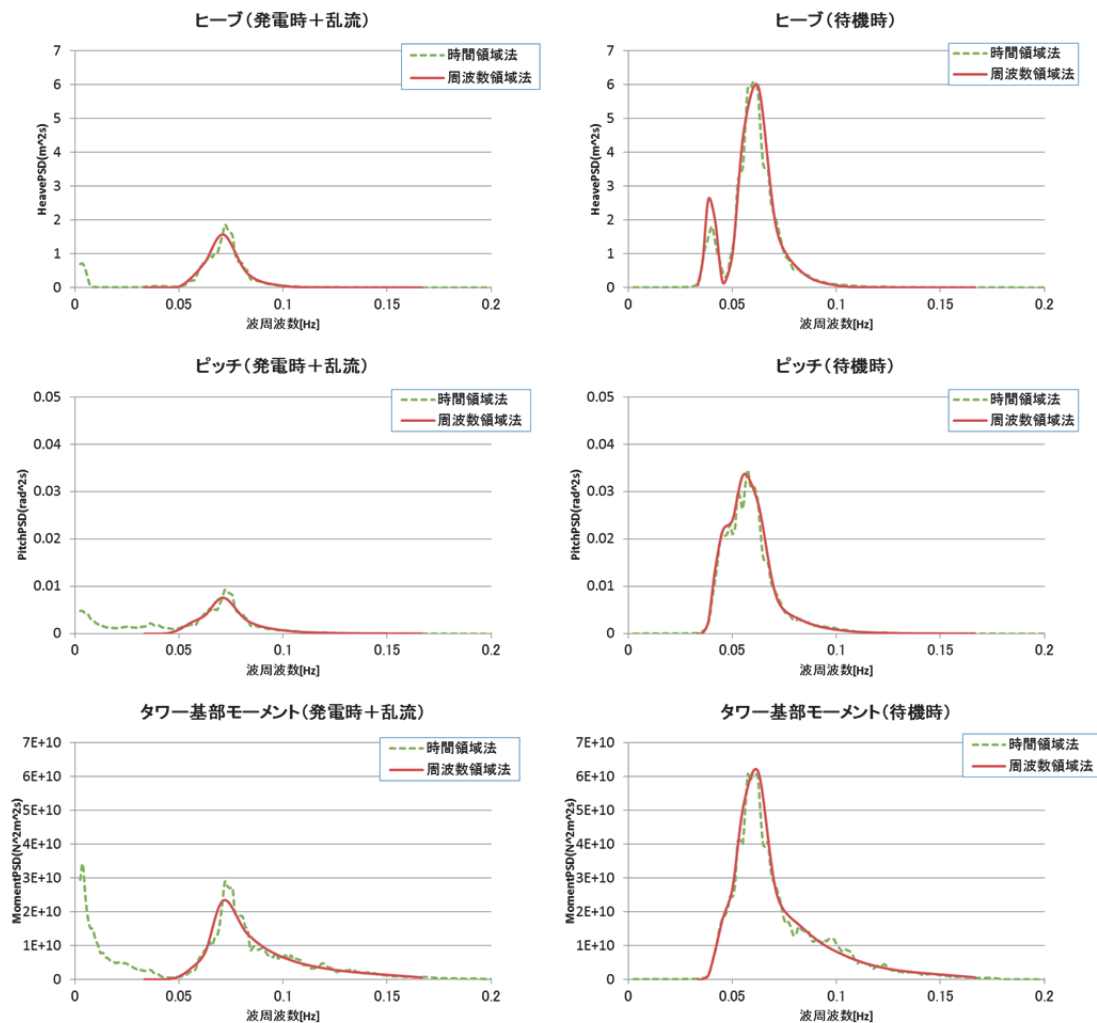


図9 不規則過程における最大値の推定法の比較

上記の考え方の適用範囲を確認するため、NREL5MW 風車¹⁾を搭載したスパー型浮体を対象に試計算を行った⁴⁾⁵⁾。係留は4条のカテナリー係留とした。風車の状態と風条件を変えて短期予測を行い、時系列計算による不規則波中の応答より求めたパワースペクトル密度を比較した。そのうちヒープ運動およびタワー基部の曲げモーメントについての比較結果を図10に示す。

発電時には非線形性が強いので周波数領域の計算結果と時系列計算結果に差が見られるが、待機時には差が小さい。従って、条件によっては周波数領域の計算も有効である。

図10 不規則波中における短期予測結果⁴⁾（左列：発電時乱流風，右図：待機時）

4. 模型試験

4.1 風洞試験

4.1.1 目的および概要

発電時に風車に発生するスラスト荷重は浮体を傾斜させる原因の一つであるが、これによる傾斜モーメントは荒天待機時における傾斜モーメントと同程度となる可能性がある。そのため、浮体式洋上風力発電施設の復原性検討の際には、従来の海洋構造物と同様に荒天時の傾斜モーメントに加え、発電時の傾斜モーメントの把握も重要となる。そこで、大傾斜時の復原性等の検討に資するため、風洞試験を実施し、発電時における傾斜時のスラスト特性、傾斜モーメント特性を把握した。

風車模型は当所にて開発したもので、実機と同様のブレードピッチ角制御機構を搭載している。図 11 に一般的な 5MW 風車を想定した縮尺 1/75 の試験の外観を示す。



図 11 風洞試験の様子

4.1.2 風洞試験結果

風洞試験結果の例を図 12 と図 13 に示す。図 12 は長さ 0.6m のブレードを用いて、一定風速 ($U=3.9[m/s]$) においてブレードピッチ角を変化させた際の風車特性である。空力特性の数値計算には当所で改良した風車の空力弾性シミュレーションコード FAST (ver.7) ⁶⁾を用いたが、良好な一致を得ることができている。

図 13 は長さ 0.8m のブレードを用いた場合の傾斜試験結果であり、傾斜角とタワー基部に働く転倒モーメント、傾斜角と回転数の関係について、それぞれ傾斜角度の余弦の 2 乗と余弦で近似することができた。

図 14 に発電時と待機時の基部モーメントの比較を示す。この結果でも両者はほぼ同程度の値となっており、さらに風車の大型化に伴って発電時の荷重が増えると考えられるので、場合によっては両者の関係は逆転しうると考えられる。

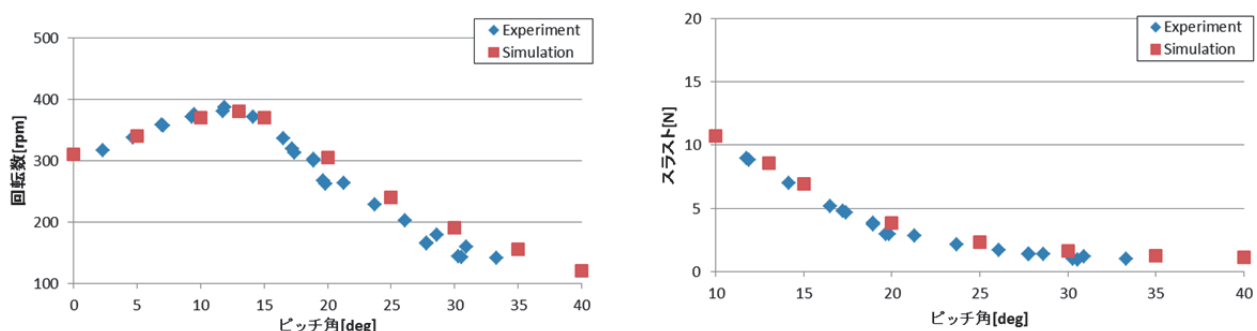


図 12 風洞試験結果（ロータ特性）⁷⁾

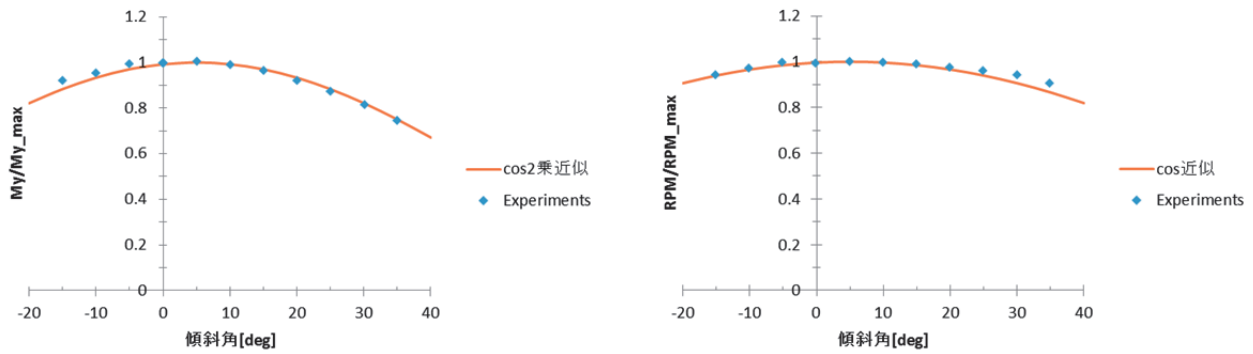


図 13 風洞試験結果（傾斜角との関係）⁸⁾（左図：基部傾斜モーメント 右図：回転数）

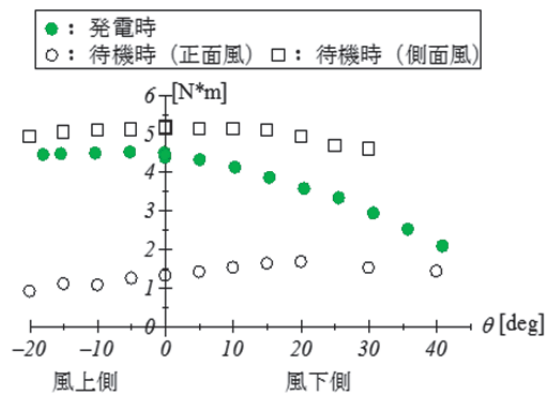


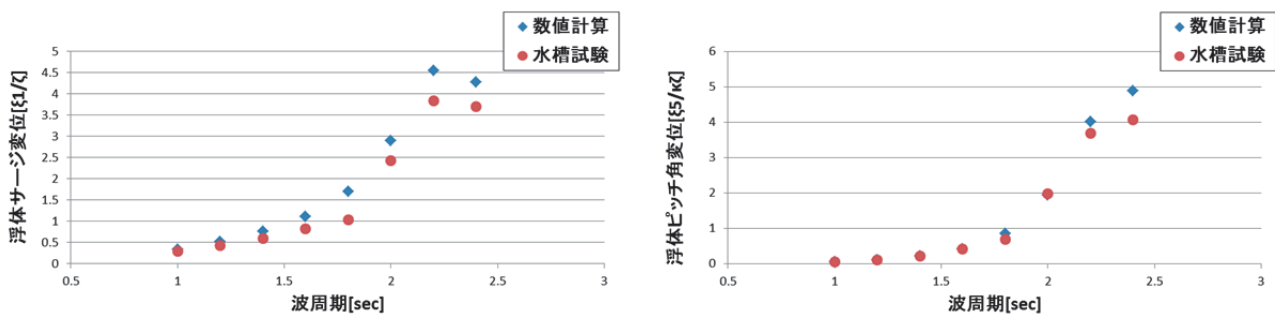
図 14 風洞試験結果（タワー基部傾斜モーメント）⁹⁾

4.2 水槽試験

4.2.1 数値計算の精度確認試験

供試模型は、2MW 機を搭載するスパー型 FOWT の 1/50 模型である。

まず、浮体運動および風車スラストの計測結果を、前述の数値解析結果と併せて図 15 に示す。数値計算結果は水槽試験結果と良好な一致を得ることができており、模型を十分な精度で再現していることが分かる。



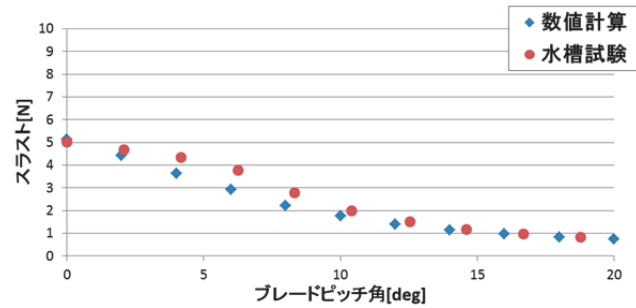


図 15 スパー型浮体式風力発電施設の水槽試験結果³⁾

浮体運動や風車のスラスト等の計測の他に、図 16 に示す通り浮体から風車タワーの中心に通したアルミニウム製のバックボーンに歪ゲージを貼付して荷重分布の取得を目的とした水槽試験も実施した^{2),10)}。

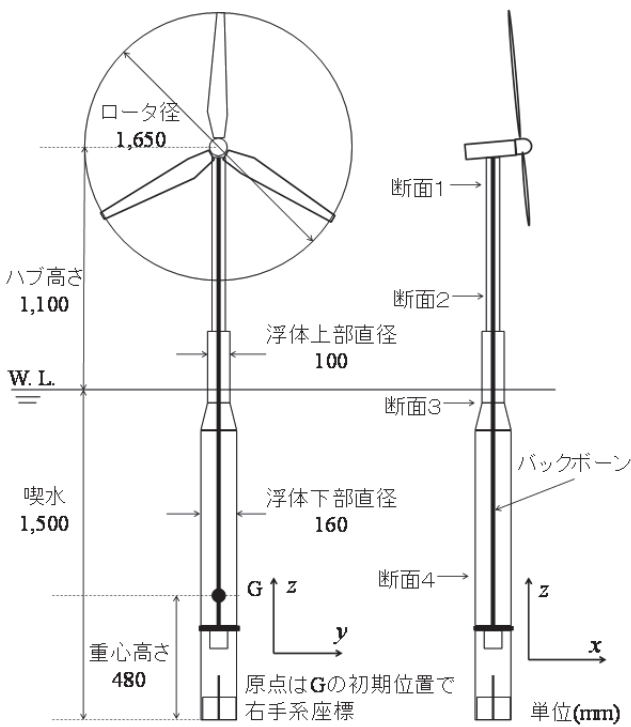


図 16 バックボーン模型外観²⁾

y軸回りの曲げモーメント分布を図 17 に示す。MBD による数値計算結果は、実験結果を概ね推定できている。

また、試験としては損傷時を想定して1コラムへの浸水を再現した条件も実施したが、特に注意すべき現象は生じていない。

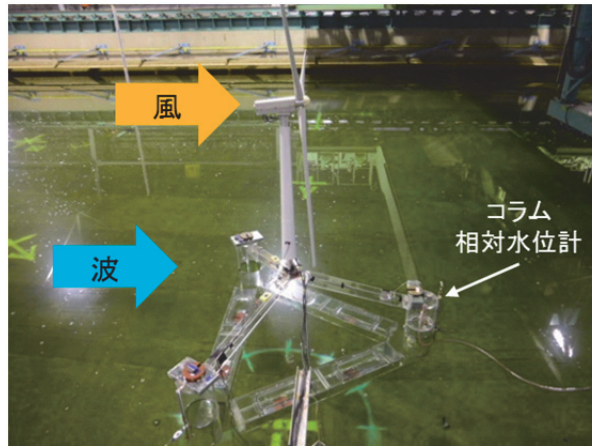


図 19 復原性検討試験の様子

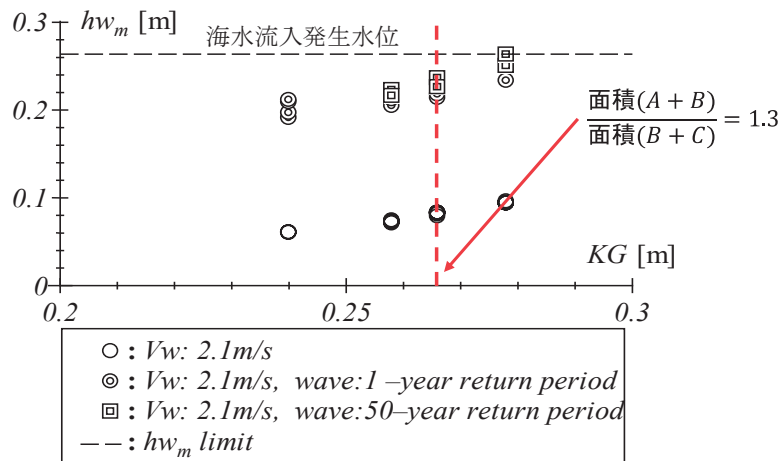
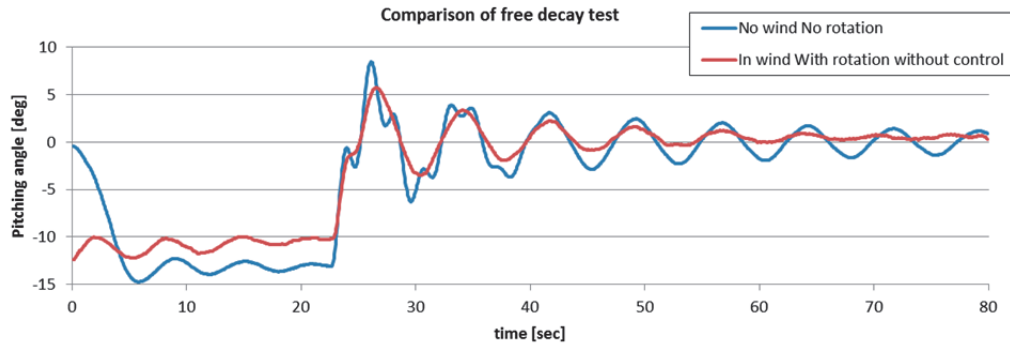


図 20 複合環境外力下における復原性検証試験結果⁹⁾

4.2.3 ネガティブダンピングの検証試験

2.2 節で触れたネガティブダンピングの検討を行う実験を行った^{12)~14)}。

一般に風車の発電時における空力荷重が大きいことは4.1 節で述べたとおりであるが、これは洋上での動揺に対する減衰としても風車の空力特性が大きな影響を持つことを示唆している。そこで、まず浮体動揺に対する風車の空力減衰の影響を自由動揺試験で調査した。結果を図 21 に示すが、本図における風の有無による動揺量の差を風車の空力減衰の効果と考えて良い。無風状態に比べて発電中には動揺が速やかに小さくなっており、空力減衰の大きな効果が分かる。

図 21 自由動揺試験（風車の空力減衰の影響）¹⁴⁾

もし、ブレードピッチ制御を行い、無風状態に比べ、逆に発電状態において浮体動揺が止まり難い状況が出れば、これがネガティブダンピングと考えられる。そこで、通常の陸上風車で行われている制御方法を単純化して風車の回転数を一定化させる様に制御を行い、制御ゲインを変化させて減衰係数を求めた。結果を表 4 に示す。この事例では無風状態での減衰係数 0.24 よりも低い値が発生しており、ここで言うネガティブダンピングが発生し得ることを確認した。

表 4 自由動揺試験の結果その 1¹⁴⁾

Target of Control	U [m/s]	Controlling Gain		Natural period [sec]	Damping factor
NA (図 21 の青線)	0	NA	NA	7.51	0.24
NA (図 21 の赤線)	2	NA	NA	7.39	0.54
Rotor speed keeping	2	Kpr [s]	Kdr [s ²]		
		0.0	0.15	7.62	0.29
		0.05	0.15	7.59	0.19
		0.1	0.15	7.89	0.23

なお、ここに記載した模型試験の経験を踏まえ、浮体式洋上風力発電施設の水槽実験技術としてとりまとめを行っている^{15),16)}。

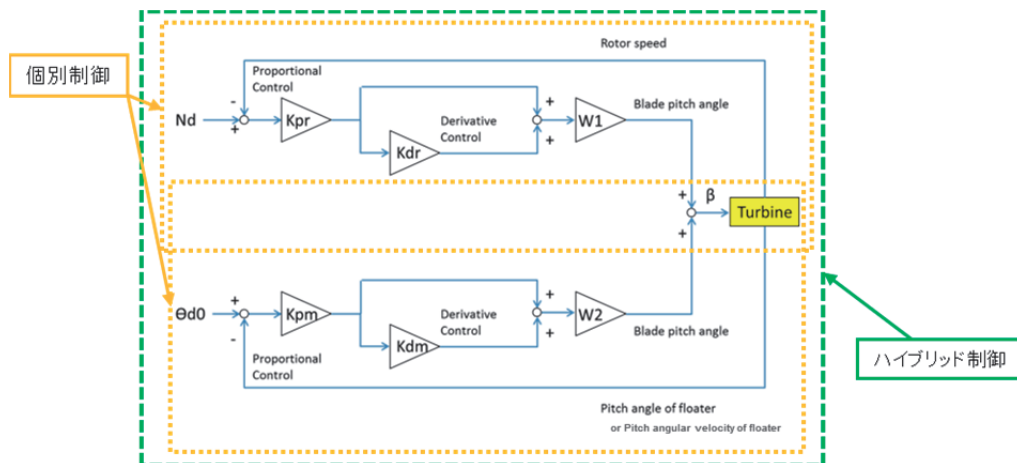
5. ブレードピッチ制御法の検討

5.1 ブレードピッチ制御の基本的考え方

前節で確認したネガティブダンピングを回避しつつ回転数の変動を抑える制御アルゴリズム開発を目的として、基礎検討を行った^{14),17)~19)}。

本検討では、古典制御の一種である PI 制御を用い、ロータ回転数の安定化と浮体動揺の抑制の 2 つの目的に対して制御プログラムを作成し、その効果を確認した上で、2 つを組み合わせることでロータ回転数の安定化と浮体動揺の抑制の両立を目指した。

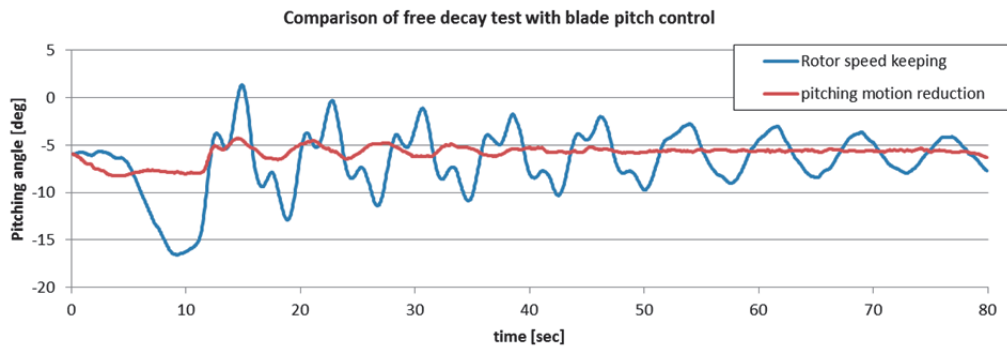
図 22 に制御のアルゴリズムを示す。このアルゴリズムは、ロータ回転数と浮体のピッチ角度を入力信号とし、風あり・平水中のロータ回転数と浮体のピッチ角度を目標値とする 2 個のブロックを、重み関数を掛け合わせて組み合わせたものである。制御出力はブレードピッチ角である。

図 22 制御アルゴリズム¹⁴⁾

5.2 水槽試験による検証

5.2.1 個別制御

上記の複合的アルゴリズムの中で、回転数の安定化を目指す制御は陸上でも実績のあるものであるが、当研究としてはまず浮体動揺の抑制がブレードピッチ制御で達成できることを確認することとした。このための自由動揺試験の結果を図 23 と表 5 に示す。図 23 では、回転数の安定化を目指す制御と浮体動揺の抑制を目指す制御を比較して示しているが浮体動揺の抑制効果が明らかに確認できる。表 5 ではいくつかの制御ゲインの例において減衰係数を算出しているが、空力減衰を飛躍的に増大させ得ることが分かる。

図 23 自由動揺試験（浮体動揺の抑制制御の効果）¹⁴⁾表 5 自由動揺試験の結果その 2¹⁴⁾

Target of Control	U [m/s]	Controlling Gain		Natural period [sec]	Damping factor
NA (参考)	0	NA	NA	7.51	0.24
NA (参考)	2	NA	NA	7.39	0.54
Motion reduction	2	Kp [-]	Kd [s]		
		0.0	0.007	7.00	0.88
		0.004	0.007	6.58	0.35
		0.007	0.007	6.68	0.75

規則波中における試験結果の一例として、比例制御ゲインと微分制御ゲインをそれぞれ変えた際に、浮体のピッチング運動の振幅とロータ回転数の変動振幅がどのように変化したかを図24に示す。横軸に規則波の波周期を示し、縦軸に浮体のピッチ運動の振幅と回転数変動の振幅を示している。記号は比例ゲインのパターンを示している。ロータ回転数抑制を目的とした制御を加えると、浮体のピッチ運動が大きくなること、浮体運動抑制を目的とした制御を加えると、浮体運動は抑制されるがロータ回転数の変動は増加する、相反関係にあることが確認された。

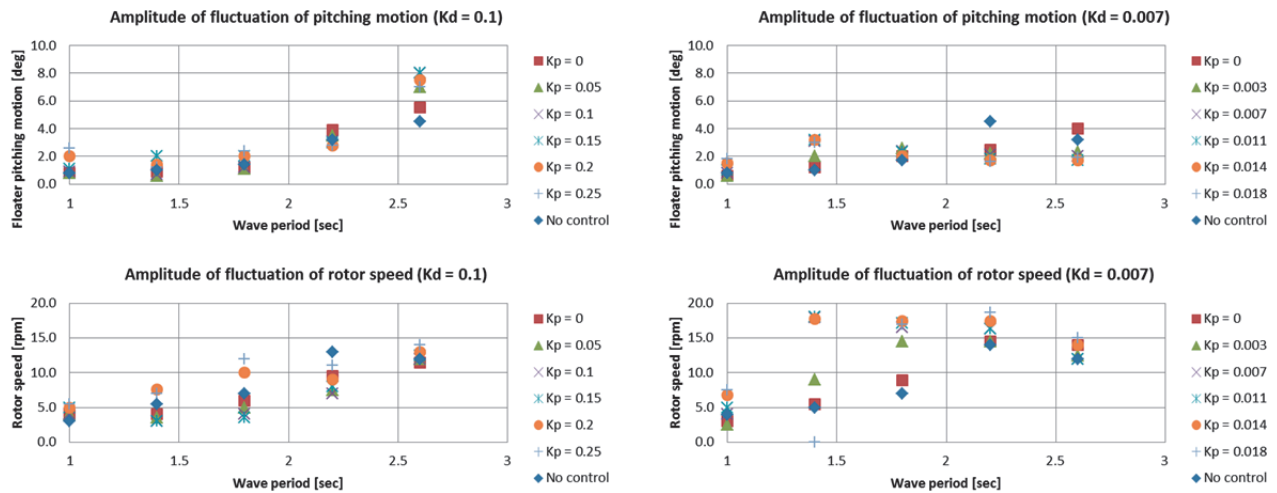


図24 規則波試験における制御の影響¹⁴⁾（左列：ロータ回転数変動抑制制御，右列：浮体運動抑制制御）

不規則波中試験におけるブレードピッチ制御の効果を図25に示す。入力された不規則波は JONSWAP スペクトル（有義波高：0.06[m]，有義波周期：1.93[sec]， $\gamma = 3.3$ ）に従い，風速は2[m/sec]である。ロータ回転数変動の抑制，浮体運動の抑制というそれぞれの目的に応じて制御の効果が発揮できていることが分かる。

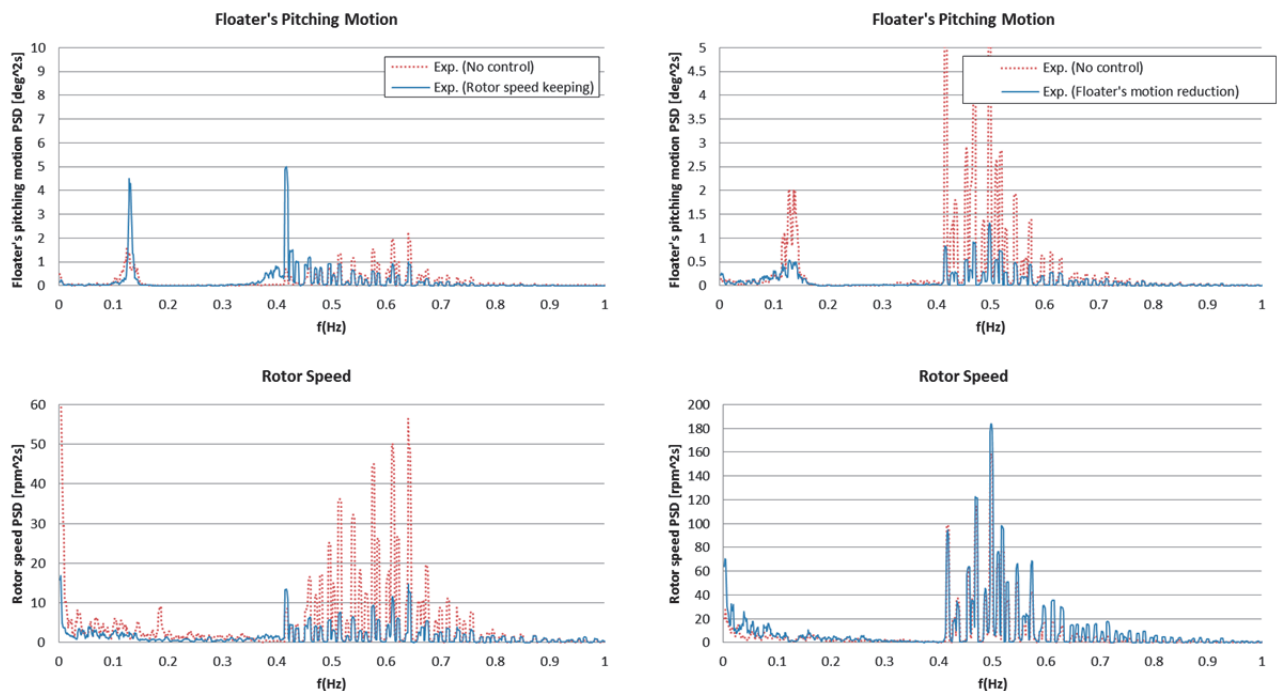


図25 不規則波中におけるブレードピッチ制御の影響¹⁴⁾
（左列：ロータ回転数変動抑制制御，右列：浮体運動抑制制御）

ロータ回転数抑制を目的とした制御を加えると、0.13[Hz]付近の浮体ピッチ運動が励起されていることが見て取れる。これは浮体ピッチ運動の固有周期と一致しており、ネガティブダンピングにより励起されたと推定される。また、0.4[Hz]付近におけるピークは不規則波のピーク周期である。一方、浮体運動抑制を目的とした制御を加えると、浮体運動は大きく抑制されるが、ロータ回転数の変動は増加しており、規則波中試験と同じ傾向を示した。

5.2.2 ハイブリッド制御

これら2種類の制御を組み合わせた制御アルゴリズム（ハイブリッド制御）も試行した。図26にロータ回転数と浮体のピッチ運動の平均値と標準偏差を示す。ハイブリッド制御では、回転数変動は浮体運動抑制を目的とした制御よりも小さく、浮体運動はロータ回転数抑制を目的とした制御よりも小さいという、2種類の制御の特性が現れていることが分かる。浮体式風力発電に最適なブレードピッチ制御アルゴリズムは完成されていないが、一つの方向性を示すことができていると思われる。

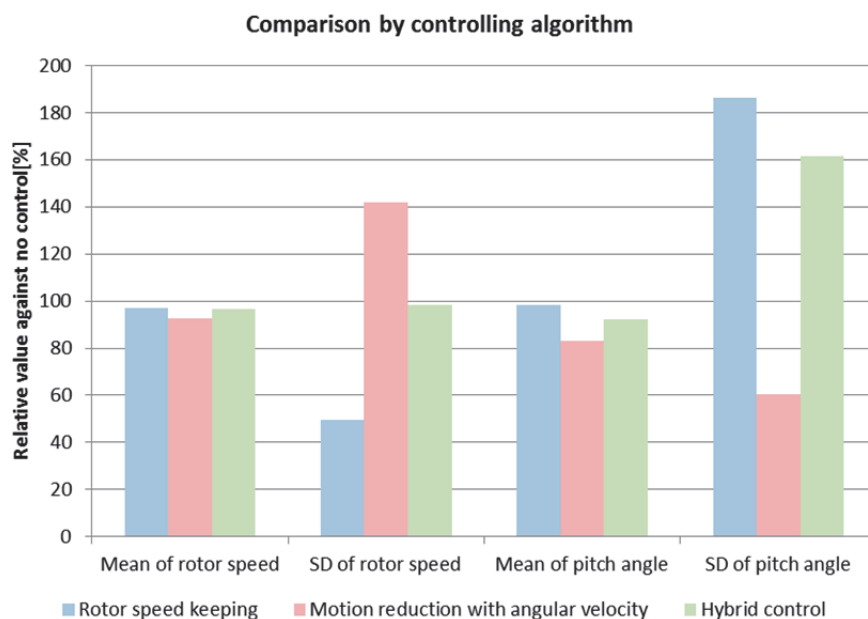


図 26 各制御における制御対象の平均値および標準偏差の相対評価¹⁴⁾

6. まとめ

ここで紹介した研究は、国土交通省「浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン」の作成、IECでの国際標準の作成、および環境省や資源エネルギー庁の実証事業と並行して行われた。当所はこれらのプロジェクトに関わりながら、重点研究課題「浮体式洋上風力発電システムの技術開発・安全性評価に関する研究」においてその基礎となる研究を推進し、必要な知見は各プロジェクトに反映してきた。

各プロジェクトが一定の成果を上げつつある現時点で、浮体という視点からの基礎技術を概観したのが本報告であるが、これら以外にも取り組んでいる、あるいは取り組むべき課題は多い。当所は、引き続き浮体式洋上風力発電施設の技術的課題解決のために、広範な研究開発を展開していく予定である。

参考文献

- 1) J. M. Jonkman : Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, Technical Report NREL/TP-500-41958 (2007).
- 2) Yosuke Anai, Chutatsu Hirao, Kohei Shimoizato, Ryosuke matsui, Shigesuke Ishida and Shunji Inoue : Experimental Study on Distribution of Internal Forces in Supporting Structure of Floating Offshore Wind Turbine, Proc. Grand Renewable Energy 2014 (2014).
- 3) 中條俊樹 : 浮体式洋上風力発電施設の挙動評価技術, 平成26年度(第14回)海上技術安全研究所研究発表会講演集 (2014). pp.206-pp.215.
- 4) 羽田絢, 井上俊司 : 浮体式洋上風力発電施設の荷重解析における周波数領域法の適用性について, 第24回海洋工学シンポジウム論文集 (2014).
- 5) Shunji Inoue : Applicability of Frequency Domain Analysis for Load Analysis of FOWT, IEA Wind, Topical Expert Meeting #76 on Floating Offshore Wind Plants (2014).
- 6) NREL(National Renewable Energy Laboratory) : FAST, <https://nwtc.nrel.gov/FAST>.
- 7) 羽田絢, 南佳成, 中條俊樹 : 浮体式洋上風力発電の数値シミュレーション技術, 平成24年度(第12回)海上技術安全研究所研究発表会講演集, PS-19 (2012). pp.35-pp.36.
- 8) 国土交通省海事局 : 浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン (2014).
- 9) 谷口友基, 國分健太郎, 二村正, 石田茂資 : 浮体式洋上風力発電施設の復原性に係る諸問題について, 平成25年度(第13回)海上技術安全研究所研究発表会講演集 (2013). pp.169-pp.176.
- 10) Shunka C. Hirao, Yosuke Anai, Shigesuke Ishida and Shunji Inoue : Study on Stress-Monitoring Method in Supporting Structure of Floating Offshore Wind Turbine, Proc. ISOPE2015, (2015).
- 11) Tomoki Taniguchi and Kentaroh Kokubun : An Experimental Study on Stability of a Semi-Submersible Hull Type Floating Offshore Wind Turbines, Proc. International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy (2013).
- 12) 南佳成, 中條俊樹, 二村正, 井上俊司 : 浮体式洋上風力発電におけるネガティブ・ダンピングに関する実験的研究, 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集 (2012)
- 13) 中條俊樹, 羽田絢, 二村正 : ロータ回転が洋上風力発電浮体の減衰へ与える影響について, 第35回風力エネルギー利用シンポジウム研究発表論文集 (2013). pp.494-pp.497.
- 14) Toshiki Chujo, Ken Haneda, Tadashi Nimura and Shunji Inoue : Experimental Study on the Negative Damping in the Dynamic Responses of Blade-pitch-controlled Floating Offshore Wind Turbine, Proc. Grand Renewable Energy 2014 (2014).
- 15) 石田茂資, 井上俊司, 中條俊樹, 松井亮介, 今村博, 太田真, 神田雅光, 村井基彦, 吉田尚史 : 浮体式洋上風力発電施設の水槽実験技術, 第25回海洋工学シンポジウム論文集 (2015).
- 16) 日本船舶海洋工学会浮体式洋上風力特別検討委員会水槽実験技術WG 平成26年度報告書
- 17) 中條俊樹, 南佳成, 二村正, 井上俊司 : 浮体式洋上風力発電のブレード・ピッチ制御の効果に関する実験的検討, 第34回風力エネルギーシンポジウム研究発表論文集 (2012). pp.179-pp.182.
- 18) Toshiki Chujo, Yoshimasa Minami, Tadashi Nimura, Shigesuke ISHIDA and Shunji Inoue : Experimental study for spar type floating offshore turbine with blade pitch angle control, Proc. OMAE2013 (2013).
- 19) Toshiki Chujo, Ken Haneda, Shigesuke ISHIDA and Tadashi Nimura : Experimental Study for Floating Offshore Wind Turbine with Blade Pitch Control, Proc. International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy (2013).
- 20) Kentaroh Kokubun, Shigesuke Ishida, Tadashi Nimura, Toshiki Chujo, Shigeo Yoshida and Tomoaki Utsunomiya : Model Experiment of a Spar Type Offshore Wind Turbine in Storm Condition, Proc. OMAE2012 (2012).
- 21) Ken Haneda, Toshiki Chujo and Yoshimasa Minami : Study of Motion of Floating Offshore Wind Turbine with Several Types of Floaters, Proc. International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy (2013).
- 22) 羽田絢, 中條俊樹 : 浮体式洋上風力発電の風水洞実験に基づく線形力学モデルの検討, 第25回海洋工学シンポジウム論文集 (2015).
- 23) 羽田絢, 國分健太郎, 山田雅貴, 大塚敏之 : 浮体式洋上風力発電のブレードピッチ制御に関する H_{∞} 制御適用の基

礎検討, 第36回風力エネルギー利用シンポジウム (2014). pp.313-pp.316.