

浮体式洋上風力発電コストに及ぼす風車規模の影響に関する研究*

A Study on the Effect of Turbine Size on Cost of Energy for Floating Offshore Wind Farm

菊地由佳**

Yuka KIKUCHI

難波治之**

Haruyuki NAMBA

石原孟**

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

我が国の周辺海域には水深が深い場所が多いため、浮体式洋上風力発電システムの導入が期待されている。2009年以降、国内外で実証研究が行われ、技術的妥当性が証明された。現在、商用化のために、発電コストの削減が求められている。NREL¹⁾は、着床式洋上風力発電について、風車の大型化に伴い、発電コストが削減するとしている。しかし、浮体式洋上風力発電システムについては、浮体・係留の大型化がコストに与える影響が定量的に評価されていない。

福島浮体式洋上風力発電実証研究²⁾では、2MW、5MW、7MWの浮体式洋上風車が建設されたが、浮体・係留索の拡大則について、十分に整理されていない。浮体の拡大則について、2016年、ノルウェー工科大学(NTNU)のM. Leimeister³⁾は、二乗三乗則と運動学的相似則を基に提案した。しかし、喫水は港湾の水深から、乾舷は最大波高から設計されるため、二乗三乗則の適用は疑問が残る。一方、浮体の傾斜は、P- δ 効果により風車基部の最大転倒モーメントおよび変動転倒モーメントを決定するため、運動学的相似則は重要である。しかし、NTNUは、静的な相似則のみを考慮しており、動的な相似則については論じていない。係留索の拡大則については、研究例が殆どないが、係留に作用する応力の許容応力度比が設計クライテリアとなるため、力学的相似則が重要である。

Myhr⁴⁾らは、エンジニアリングコストモデルを用いて、異なる浮体形式が発電コストに及ぼす影響を評価したが、異なる風車規模が発電コストに及ぼす影響については、まだ研究されていない。また、エンジニアリングコストモデルの適用には、動解析の予測精度が検証されている必要がある。最近、Ishihara & Zhang⁵⁾は、福島浮体式洋上風力発電所で用いられたセミサブ浮体を用いて、浮体動揺と係留力の予測値と水槽実験結果がよく一致することを示した。

そこで、本研究では、まず浮体と係留索の拡大則をそれぞれ運動学的相似則と力学的相似則に従って提案するとともに、提案した拡大則を用いて、既に動解析の精度が検証されている福島浮体式洋上風力発電所の2MW風車搭載セミサブ浮体・係留モデルから、5MW・10MW風車を搭載する浮体・係留モデルを構築する。次に、動解析を実施し、暴風波浪時における浮体動揺と係留力を評価し、浮体の動的動揺と係留の応力を評価する。最後に、構築した浮体・係留モデルの重量を用いて、各風車規模における浮体・係留の設備費を評価する。設置費・維持管理費について、実証研究の実績⁶⁾等を基に評価し、異なる風車規模に対する発電コストへの影響を明らかにする。

2. 風車・浮体・係留の拡大則

本研究では、2MW風車としてBladedのデモ風車モデル、5MW風車としてNREL 5MWモデル、10MW風車としてDTU 10MWモデルを用いた。ただし、福島実証機を参照し、タワー基部の諸元を修正し、ハブ高さはロータ半径より長くなるよう設定している。

表1に各風車の主要な諸元を示す。風車の重量比はロータ半径比の二乗(1:2.48:4.97)に近い値で増加しているが、これは既往研究において風車の軽量化によると説明されている³⁾。また、浮体の設計に重要となる風車の最大転倒モーメント比も、ロータ半径の二乗に近い値で増加している。

表1 各風車の主要諸元の比率

定格出力	2MW	5MW	10MW
ロータ半径	1	1.58	2.23
RNA重量	1	3.31	6.41
タワー重量	1	2.76	5.71
風車重量	1	2.96	5.97
ハブ高さ	1	1.26	1.65
最大スラスト力	1	2.09	4.20
最大転倒モーメント	1	2.52	5.26

*平成30年12月5日 第40回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**会員 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

表 2 風車規模に対する浮体・係留索の拡大則と実現方法

対象	拡大則			実現方法		
	相似則	対象運動と力	パラメータ	NTNU	本研究	
浮体	運動学的相似則	静的	ヒープ方向位置の一致	喫水位置	バラストで調節	バラストで調節
			サージ方向位置の一致	水平位置	係留索角度一定で調節	係留索角度一定で調節 流れがある場合に相似則緩和
			ピッチ方向傾斜の一致	傾斜角	二乗則で中心までの距離の調節と モーメント比一定でサイドカラム 直径の調整	モーメント比一定でサイドカラム 直径と中心までの距離の調節
		動的	ヒープ方向動揺の一致	固有周期	考慮なし	ヒーププレート直径で調節
			サージ方向動揺の一致	固有周期	考慮なし	長周期化対応で相似則緩和
			ピッチ方向動揺の一致	固有周期	考慮なし	バラスト位置で調節（今後実施）
係留索	力学的相似則	張力の応力度比の一定	応力度	考慮なし	係留索の鋼材強度で調節	

本研究で提案する浮体・係留索の拡大則と実現方法について、従来手法と比較し、表 2 にまとめた。制約条件として、乾舷を設計波高から、喫水を港湾水深から、メインカラムの半径を風車タワー基部半径から決定する。浮体の静的な運動学的相似則に従い、浮体・係留索の諸元を決定する。喫水位置が同じとなるように、バラストを調節する。浮体の水平位置が同じとなるように、係留索の角度を一定とする。流れがある場合は、水平位置は同じ場所に保持できないため、相似則を緩和する。ピッチ方向の傾斜角が同じとなるように、すなわち、風車からの最大転倒モーメントと浮体の復元モーメントとの比が同じとなるように、サイドカラム直径と中心までの距離を調節する。

次に、浮体の動的な運動学的相似則に従い、浮体の諸元を決定する。浮体動揺の一致は、次式で表される固有周期の一致によって満足される。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M+A}{K+C}} \quad (1)$$

ここで、 M は浮体重量（慣性モーメント）、 A は付加質量（付加慣性モーメント）、 K は浮力による復元力、 C は係留索による復元力である。ヒープ方向の固有周期について、 M 、 K 、 C は静的な運動において決定されているため、 A を決定するヒーププレートの直径を調整することで一致させた。その結果、波の主要周期帯でヒープ方向動揺は図 2 (b) に示すように一致している。浮体の諸元を決定する際に、サージ方向の固有周期は波の主要周期帯よりも長周期化しているため、波の主要周期帯でサージ方向動揺は図 2 (a) に示すように一致している。一方、ピッチ方向の固有周期は波の主要周期帯に近い場合、波の主要周期帯でピッチ方向動揺は図 2 (c) に示すように完全に一致していない。今後、バラスト位置を調節することにより、ピッチ方向動揺を一致させる予定である。

係留索の力学的相似則に従い、係留索の諸元を決定した。応力度比が一定となるよう、動解析で求めた最大係留力に対して、係留索の鋼材強度を調節した。

表 2 から分かるように、本研究と NTNU との違いは、①浮体の諸元決定に二乗則を適用していないこと、②浮体動揺を一致させること、③係留に力学的相似則を適用したことである。提案した拡大則に基づいて、水

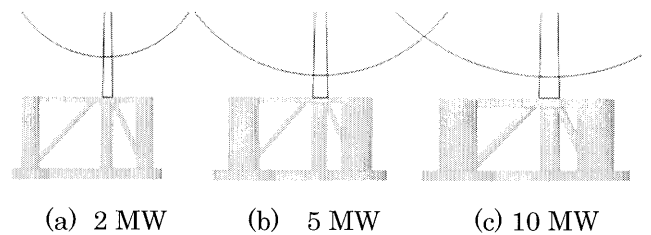


図 1 構築した浮体モデルの正面図

表 3 構築した浮体モデルの諸元

項目	2 MW	5 MW	10MW
喫水 (m)	21.3		
乾舷 (m)	10.7		
メインカラム直径 (m)	5	6	8
サイドカラム直径 (m)	7.5	12	15
サイドカラム間隔 (m)	50.2	50.2	61.5
ヒーププレート直径(m)	14	24	28
浮体空重量 (ton)	2708	3853	6104
排水体積 (m ³)	5930	13084	18719
重心(底面から) (m)	10.7	10.2	14.5
浮心(底面から) (m)	7.13	7.4	7.86
水線二次モーメント(m ⁴)	57.681	156.942	345.716
復元モーメント比	1	3	5.8

表 4 構築した係留モデルの諸元

項目	2 MW	5 MW	10MW
取り付け角度(deg)	40		
長さ (m)	673		
空中重量 (kg/m)	0.382		

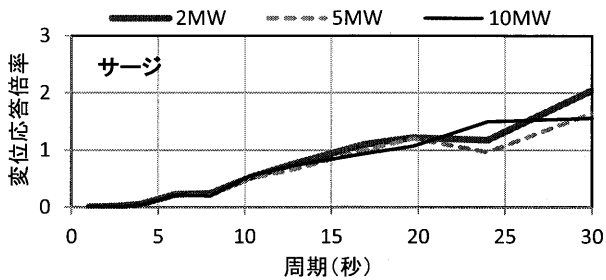
深を 100m として、表 3、表 4 に示すように 2 MW、5 MW、10 MW 風車に対する浮体・係留モデルを構築した。図 1 には構築した浮体モデルの正面図を示す。

3. 各浮体の動解析

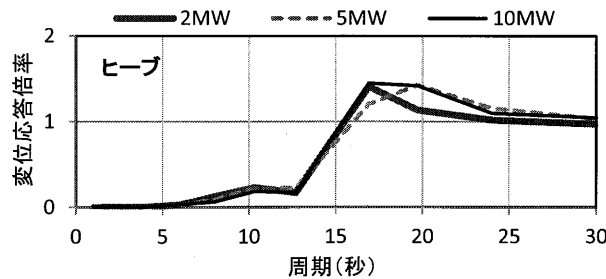
2 節で構築した風車-浮体-係留索モデルを用いて、動解析を実施し、浮体動揺の一致および係留の応力度比の一致について評価した。動解析には、FAST v8.10 を用い、係留力の評価にはカタナリ理論を用いた。流体力は、ポテンシャル理論を用いて評価するとともに、非線形抗力は Ishihara & Zhang⁶⁾ の水槽実験による値を用いた。まず、固有周期および規則波(波高 3m) に対する周波数応答関数の予測値を表 5 および図 2 に示す。固有周期について、ヒープ方向にほぼ一定であ

表 5 各浮体の固有周期 (sec)

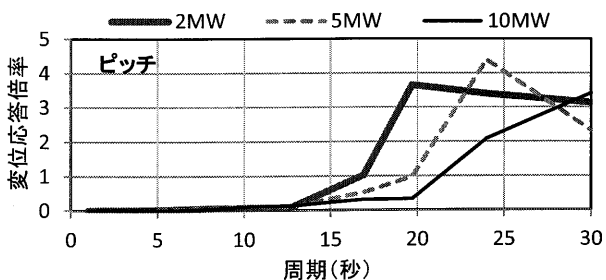
方向	2MW	5MW	10MW
サージ	53.5	77.1	94.5
ヒープ	15.5	17.8	17.1
ピッチ	20.0	22.8	26.3



(a) サージ方向



(b) ヒープ方向



(c) ピッチ方向

図 2 各浮体の周波数応答関数

り、サージ・ピッチ方向に長周期化している。周波数応答関数について、サージ方向は固有周期の長周期化により、波の主要周期帯 10 秒前後において動揺特性が一致している。ピッチ方向は、固有周期が波の主要周期帯に近い場合、動揺は完全に一致していないが、今後、バラスト位置の調節によって浮体動揺を一致させる予定である。

暴風波浪時における DLC6.1 の解析を実施した。IEC 61400-3-2 において、暴風波浪時には、風、波、潮流を考慮する必要がある。そこで、福島沖の環境条件⁷⁾より、50 年再現期待風速 50 m/s、乱流強度 0.11、ウィンドシア 0.11、風向偏差 0 度、乱流モデル Kaimal の気象条件、有義波高 11.7 m、ピーク波周期 14.76 sec、波スペクトル Pierson-Moskowitz、流速 1.44 m/s の潮流条件を用いた。表 6 に予測した浮体動揺と係留力を示す。潮流により、サージ方向の浮体動揺が風車規模に伴い増加している。

係留力の最大値は、2MW で 2,006kN に対し、5MW、10MW では、それぞれ 1.1 倍、1.7 倍に増加している。そこで、10MW 風車用浮体について係留索の鋼材強度を増加させることにより、応力度比を一致させた。

係留索について、係留索の疲労評価も行った。風速階級ごとの風と波高と波周期の発生頻度は福島県沖の気象・海象条件とし、潮流について月間最大値の 12 か月平均値に相当する 1.0m/s を変動なしで作用させた。係留の長さに沿った疲労損傷度の計算結果を図 3 に示す。疲労損傷度は、各風車規模に対してほぼ同じ値となることがわかり、拡大則によって疲労に問題が生じないことが確認された。

表 6 DLC6.1 における浮体動揺と係留力

項目		2 MW	5 MW	10 MW
動揺 (m, deg)	サージ	11.3	12.3	16.9
	ヒープ	3.7	3.0	3.1
	ピッチ	6.3	3.6	4.4
係留力 (kN)	最大値	2,006	2,250	3,429
	平均値	1,250	1,350	1,710
	標準偏差	185	191	274

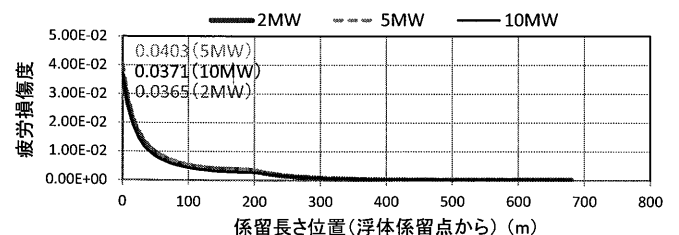


図 3 係留索の疲労損傷度

4. 風車規模と発電コストとの関係

構築したモデルを用いて、風車・浮体・係留索の設備費を評価した。エンジニアリングモデルによるコスト評価において、設備費は、設備の重量 W にトン当たり単価 C を乗じることにより評価される。設備の重量について、構築したモデルの重量を基に、近似式を提案した。各設備の重量と近似式を図 4 に示す。

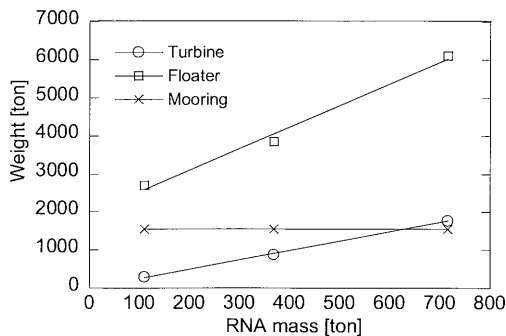


図 4 風車規模における風車、浮体、係留索の重量

鋼材単価は、NEDO 実証研究⁹⁾の報告書等を用いて評価した。係留索のグレードごとの鋼材の単価について、本研究では、鋼板の降伏強度の倍率 σ_y と鋼材価格の倍率 C との関係式を公表値から次式のように評価し、10MW 風車の係留の鋼材価格は、2MW 風車の係留の 1.14 倍と評価した。

$$C_{mooring} = 0.2\sigma_y + 0.8 \quad (2)$$

定格出力合計 100MW のウィンドファームを想定し、各風車規模について、施工費と維持管理費を評価した。1 基あたりの施工費は実証研究の報告書を用いて評価した。本研究では、風車規模が施工費に与える影響は評価していない。開発設計費とライザーケーブル費は定数として実証研究の値を参照した。維持管理費は、実証研究を参考に、時間領域モンテカルロシミュレーション⁹⁾を用いて評価した。表 7 に、本研究で評価したコストを示す。5 MW・10 MW 風車用浮体の初期費用は、2 MW 風車用浮体に対して各々 45 %、57 % の削減となった。

表 7 各風車規模に対するコスト評価 (万円/kW)

項目	2MW×50 基	5MW×20 基	10MW×10 基
開発設計費	1	1	1
風車	15	15	15
浮体	28	16	13
係留	21	8	6
ケーブル	8	8	8
施工費	36	14	7
初期費	112	62	48
維持管理費	2.8	1.8	1.4

5. まとめ

本研究では、浮体式洋上風力発電コストに対する風車規模の影響を評価し、以下の結論を得た。

1. 浮体の拡大則と実現方法は浮体の運動学的相似則に従うことを提案した。暴風波浪時における動解析を実施し、動的な浮体動揺の一致を評価した。波の主要周期帯においては、ヒープとサージ方向動揺は概ね一致したが、ピッチ方向動揺は今後さらに改善する必要があることが分かった。
2. 係留索の拡大則と実現方法は係留の力学的相似則に従うことを提案した。暴風波浪時における動解析を実施し、係留索の張力が増大したが、係留索の強度を増加することにより、許容応力度比一定を満足できることを示した。
3. 構築した浮体・係留モデルの重量と実証研究の実績を用いて、エンジニアリングモデルによって評価した初期費用は 5 MW・10 MW 風車において、2 MW 風車の 45 %、57 % の削減となった。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究の一部として行われた。関係者の皆様に謝意を表す。

参考文献

- 1) W. Musial and B. Ram, "Large-Scale Offshore Wind Power in the United States: Assessment of Opportunities and Barriers", Technical Report NREL/TP-500-40745, 2010.
- 2) 経済産業省福島洋上風力コンソーシアムホームページ、<http://www.fukushima-forward.jp/>、2018 年 11 月
- 3) M. Leimeister, Rational upscaling and modelling of a semi-submersible floating offshore wind turbine, Master of Science Thesis, NTNU 763391, TU Delft 143525, 2016.
- 4) A. Myhr, C Bjerkseter, A Agotnes, T A Nygaard, Levelized cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective, Renewable energy 66, pp.714-728, 2014.
- 5) T. Ishihara and S. Zhang, Prediction of dynamic response of semi-submersible floating offshore wind turbine using augmented Morison's equation with frequency dependent hydrodynamic coefficients, Renewable Energy, Vol.131, pp.1186-1207, 2019. (Available online 14 August 2018)
- 6) NEDO、平成 26 年度～平成 27 年度成果報告書 風力発電等技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 (セミサブ型)、2017
- 7) T Ishihara, K Shimada, A Imakita, "METOCEAN DESIGN CONDITION FOR "FUKUSHIMA FORWARD" PROJECT", Grand Renewable Energy 2014, 2014.
- 8) 菊地由佳、石原孟、時間領域モンテカルロシミュレーションを利用した洋上風力発電所利用可能率の評価、第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム、2017.