

浮体式風力発電システムに関する基礎的研究

海洋開発研究領域 海洋資源利用研究グループ *矢後 清和、大川 豊

1. ま え が き

地球温暖化など地球規模での環境悪化が懸念される中、政府は新エネルギー利用特別法（RPS法）をこの4月に施行し、風力、太陽光、バイオマスなどの再生可能エネルギーを中心とした発電量を2010年度までに全発電量の1.35%に引き上げる目標を立てている。風力発電は欧州での大規模なウィンドファームの事業化成功などが追い風となり最も実現性の高いエネルギー源の1つと目されている。我が国では2010年度までに300万kWという目標を持っている。しかし、昨今、陸上における適地の限界により自然公園などへの建設を容認しようとする動きもあるなど、目標達成までには紆余曲折が予想される。欧州では数年前から大規模な洋上風力発電施設が急ピッチで進められている。適地の減少という同様の問題が内在していると推測されるが、一方で広大な遠浅海域を有するという地の利があり、着底工法による建設が容易である。現在、風車は最大のもので5MWの開発が進められている。直径は120mにも及ぶ。大型化はスケールメリットによるコスト低減が大きな目的である。この規模になると陸上輸送に困難が生じ、必然的に洋上設置が中心となる。我が国には欧州のように恵まれた遠浅海域は少なく、洋上風力発電は浮体式に頼らざるを得ないと考えられる。浮体式はコスト面で不利という見方もあるが、陸上風力発電のコストの大半は建設費であり、我が国のように山間部設置が多く運搬用道路の建設、送電路の確保などの問題を内在している現状を見れば、浮体式にも検討の余地は十分にあると考えられる。

本研究ではメガフロート技術を核として、より軽量化した、コスト的にも成立性の高い支床浮体を開発し、この上に大型風車を集約搭載するシステムを考え、技術的、経済的成立性につ

いての検討を行う。

2. コンセプトの検討

2.1 循環型エネルギー社会のイメージ

産業革命以来、20世紀は化石燃料を大量消費して文化を築いてきた。しかし、環境問題の顕在化に伴い、21世紀は循環型社会へ移行しようとする動きが世界的に活発化している。その1つは水素を中心にした社会基盤の創生である。図-1は浮体式洋上風力発電で発電した電力で水素を生成し、さらにメタノールなど輸送、貯蔵の容易な、扱いやすい燃料に変換し燃料として活用しようというアイデアである。将来的にはこうした構想を視野にいれるが、本研究では電力製造としての浮体式風力発電に目標を絞り、従来からの陸上へ電力への連系システムも念頭にいった検討を行う。

2.2 設置海域と海象条件

我が国の沿岸海域は昔から漁業などに高度に利用されており、権利関係も確立していることから補償問題も発生しやすく、最近では景観問題による反対運動も発生している。これらの問題などは、沿岸からの距離が離れるに伴って緩和すると考えられるが、逆に海底電力経路の敷設コストが増加

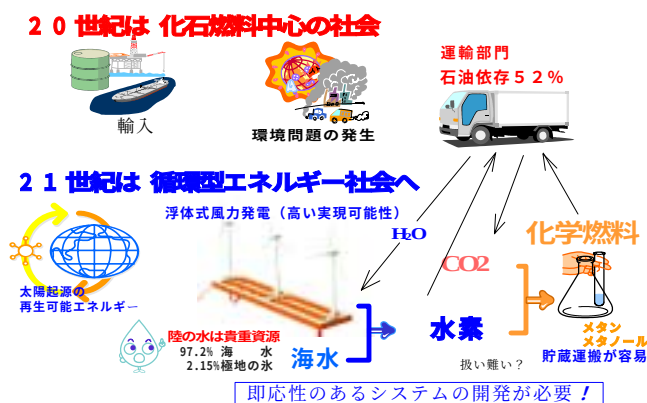


図-1 将来の循環型エネルギー社会の構想例

表－１ 自然海象条件

	異常時	発電時最大
波周期 ($T_{H1/3}$)	13.0sec	7.2sec
波 高 ($H_{1/3}$)	8.6m	3.0m
風 速	50m/s (Max80m/s)	25m/s
流 速	2.0knot	
水 深	50m	

することも考慮せねばならない。ここでは沿岸から6～10km、水深約50mの海域を対象海域として検討を進める。この水深に相当する海域の観測結果から設計条件を表1のように設定する。

2.3 浮体式風力発電ユニット

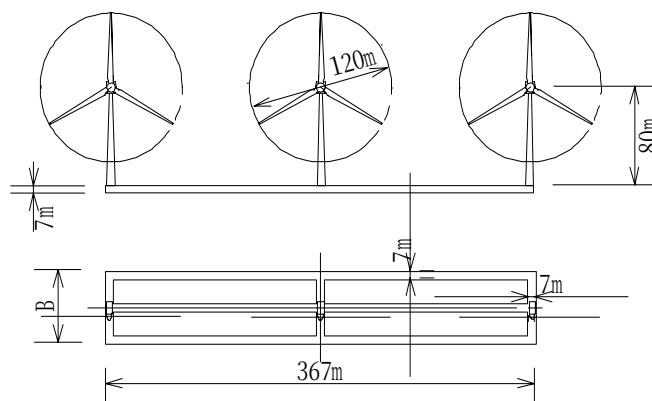
既存のドックで浮体から風車搭載まで一体建造して設置海域まで曳航設置できるユニットを考える。提案する浮体式風力発電システムの概要および主要目をFig. 1、Table 2に示す。

(1) 風力発電装置

風車は現在複数のメーカーで開発中の5MWクラス機を考える。5MW風車は開発中のため詳細な仕様は明らかにされておらず、表－2の値は推定値である。この風車を複数するわけであるが、風車間隔は相互干渉による効率低下を避けるため風流入方向に直径の7～10倍、その直角方向に3倍以上とるのが望ましいとされている。しかし、経済性を考えればできるだけ集約搭載したい。調べた限りでは、風車間隔による効率低下を明確に示した資料が見あたらない。類似のコンセプトを調べると1.3倍程度のものもあり²⁾、ここでは約1.5倍×3基搭載とした。

(2) 支床浮体

支床浮体としてメガフロート技術に期待する声も多い。実際、過去に箱形メガフロートを利用して風力発電や太陽光発電を自給電力とした多目的浮体構想が検討された例がある⁴⁾。多目的利用としてのメガフロートには利点が多い。しかし、電力生産に限り外洋設置を前提にすると経済的な疑問が残る。本研究では、メガフロートの鋼材使用量を減らした形のBOXガーダ格子状配置構造を考えた。単純構造であるため、建造が容易であり、コストも安いと推定される。また、流力的に



図－１ 浮体式風力発電システムの概要

表－２ 提案システムの主要目

形式	水平軸風車3基搭載 Box ガーダ型	
浮体	長さ	367m
	幅	40～70m
	型深	7m
	喫水	1.5m
	排水容積	12,200～1,3100m ³
風車	定格出力	5MW
	直径	120m
	回転軸高さ	80m
	重量	タワー含 550ton
		タワー除 300ton

セミサブに近い特性を持つため、外洋に適した設計の可能性も高いと考えられる。

(3) 係 留

水深50m付近の海域は比較的係留が難しいとされる。カテナリー係留では自重の効果が十分に発揮されないため比較的大口径の鎖を必要とする。ドルフィン係留は水深10m程度の海域には適するが、50mでは設置費が増大する。このように、水深50m規模の海域では経済性まで考えると、最適な係留法を見いだすのは容易ではない。本研究では、従来からの鉄鎖によるカテナリー係留を用いる。紙面の都合で結果は掲載できないが比較的重厚なシステムが必要な事がわかった。

3 技術的検討

3.1 実機の風荷重

5MWクラスの風車の風荷重として、既存の風車の荷重データの基づいた推定値が参考文献¹⁾に

示されている。この値を設計荷重として用いる。
表－３にその荷重値を示す。表中、異常時平均風速時の荷重が、より風速の低い発電時より小さい値を示している。これは、許容設計値を超える風速以上では回転を停止しブレードを最小抵抗となるよう風流入方向に平行に固定(Feathering)するためである。

表－３ ５MW 風車の風荷重¹⁾

状態		風速	水平荷重
発電時	定格風速時	14m/s	112.2ton
	発電最大時	25m/s	122.4ton
異常時	平均風速	50m/s	79.7ton
	最大風速	80m/s	204.1ton

３．２ 風洞模型試験

(１) 試験の概要

浮体式では、風、流れ等による静的傾斜や波浪による動揺の影響を明らかにする必要がある。これらの風車に対する影響を明らかにする目的で当所の変動風水洞（風洞高さ 2 m×幅 3 m×長さ 15 m：最大風速 30 m/s）を用いて風洞試験を行った。試験は静的傾斜試験および動揺試験である。静的試験は気流に対する風車正対角が発電効率に及ぼす影響を調べる目的で行った。動揺試験は、風車基部を縦揺れさせ、風車の動的空力特性を調べる。動揺計算において風車の付加質量力、減衰力を把握するのが目的である

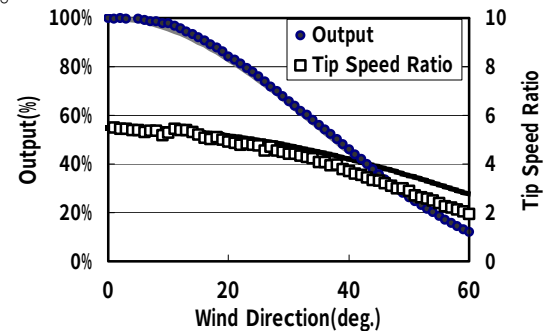
５MWクラス風車の縮尺 1／100 模型を供試模型とした。主要目を表－４に示す。

表－４ 風車模型の主要目

(縮尺 1/100)		模型	(実機相当)
形 式		３翼水平軸型	
定格出力		—	５MW
周 速 比		4.0	4.0
ブレード	直径	1.2m	120m
	翼断面	NACA63 ₃ -418	
タワー	高さ	1m	100m
	直径	0.04m	(4m)
重量	ブレード+ロータ	0.143kg	143ton
	ナセル	0.256kg	256ton
	タワー	0.915kg	915ton

(２) 試験結果

図－２に風向に対する発電出力および周速比の変化を示す。図中、実線は風向を α として、 $\cos^3 \alpha$ のカーブを表している。出力はほぼこのカーブに沿った変化をすることがわかる。この結果から 10°程度までは効率低下を無視できることがわかる。

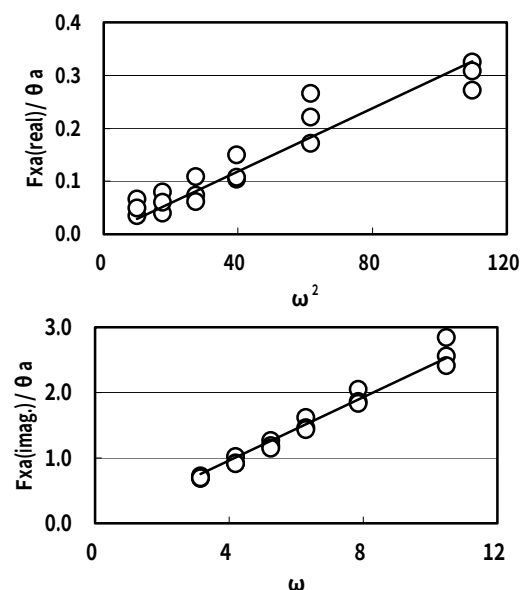


図－２ 風向に対する風車性能の変化

図－３は動揺時の風荷重変動分である。実数部と虚数部に分けて示す。厳密には周波数依存性があると考えられるが、実部は動揺円周波数 ω の自乗に、虚部は ω に比例するとすれば、図中に示す様に直線でほぼ近似でき、変動荷重成分を以下の式で表せる。この結果から、付加質量力は小さく、減衰力に相当する力が大きいことがわかる。

$$F_{x_a} \text{ 実部 (kg)} = 0.00297 \times \theta_a \text{ (rad.)} \times \omega^2$$

$$F_{x_a} \text{ 虚部 (kg)} = 0.24162 \times \theta_a \text{ (rad.)} \times \omega$$



図－３ 動揺時の風荷重

4. 動揺量の推定

動揺量は、周波数応答関数を推定し線形重ね合わせ法により期待値を求める手法により評価する。周波数応答関数は任意平面形状メガフロートの弾性応答計算プログラム³⁾により計算した。この時、風車抗力係数=0.8とし等価減衰力の形で変動風荷重を加えた。波スペクトルとしてB-M型を用いた。結果を表-5に示す。値は1/3期待値であり、Heaveは両振幅、Roll、Pitchは片振幅に相当する量で表している。計算は浮体幅を40～60m変化させたが、発電時の許容角を10°とすれば全てこれを満たしている。しかし、浮体幅が大きくなるに従い動揺角は減少する。

表-5 動揺量の推定結果

幅	異常時 H1/3=8.6m T=13sec			発電時(最大) H1/3=3.0m T=7.2sec		
	Heave m	Roll deg	Pitch deg	Heave m	Roll deg	Pitch deg
40m	3.24	7.37	1.83	0.95	2.43	1.11
50m	3.25	6.37	1.84	0.96	1.96	1.11
60m	3.27	4.68	1.84	0.96	1.62	1.11
70m	3.29	4.39	1.85	0.97	1.37	1.10

5. 経済性に関する検討

提案したコンセプトについて発電コストの算定を試みる。計算には、参考文献⁵⁾に示した単価を用いる。これは普及量産時を想定したものである。

浮体幅を40～70mまで変化させた時、鋼材使用量は4,797～5,170ton、排水量12,160～13,100tonとなる。建造費合計は35.7億円～36.7億円となるが、平均の36.2億円を総建設費とする。

次に発電量を算定する。総発電量は設備利用率に左右される。陸上では25%～30%程度であるが、海上であることを考慮して40%とする。定額法償却率を使い、20年償却、金利3%、維持費3%（対総建設費）と仮定して算定する。

単年度費用 $36.2 \text{ 億円} \times (1/20 + 0.03) = 2.90 \text{ 億円}$
維持費 $36.2 \text{ 億円} \times 0.03 = 1.086 \text{ 億円}$

発電量 $15 \text{ MW} \times 24 \text{ h/日} \times 365 \text{ 日/年} \times 0.4$
 $= 52,560 \text{ MW} \cdot \text{h}$
年間総費用/発電量 $= 3.986 \text{ 億円} \div 52,560 \text{ MW} \cdot \text{h}$
 $= 7.58 \text{ 円/kW} \cdot \text{h}$

上記には送電設備費が含まれていない。陸上送電費用を約15%²⁾他とすると、 $7.58 \times 1.15 \text{ 円/kW} \cdot \text{h} = 8.72 \text{ 円/kW} \cdot \text{h}$ となる。また、設備利用率を30%としても約11.6円/kW・となり、石油火力、水力発電並みの発電コストの達成が可能と考えられる。

6. まとめ

本研究では、BOX ガーダ型浮体上に5MW風車3基を搭載した浮体式風力発電システムを提案し、成立性について検討した。その結果、技術的、経済的な成立性が高いことが確認された。特に、高い経済性を示せたことは、今後の普及に繋がる結果として期待できる。

風向に追従できる係留手法あるいは浮体形式の開発、風車重心低減技術などが研究課題として残ると考える。

参考文献

- 1) (社)日本機械工業連合会、(社)日本海洋開発産業協会：平成13年度 海洋資源・エネルギーを複合的に活用する沖合洋上風力発電等システムの開発調査研究報告書：平成14年3月
- 2) (社)日本機械工業連合会、(社)日本海洋開発産業協会：平成14年度 浮遊式風力発電基地の自然エネルギーの最適輸送技術に関する調査研究報告書：平成15年3月
- 3) 矢後清和：超大型浮体式構造物の弾性挙動における平面形状などの影響：第15回海洋工学シンポジウム：平成12年1月：日本造船学会
- 4) 緒方輝久他：メガフロートのライフライン自給自立システム：第16回海洋工学シンポジウム：平成13年7月：日本造船学会
- 5) 大川豊、矢後清和：浮体式風力発電のコンセプトの一例：第24回風力エネルギー利用シンポジウム：平成14年11月：日本風力エネルギー協会、日本科学技術振興財団