

10 大型浮体を用いた風力発電について

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. はじめに

気候変動が地球的規模の環境に大きな影響をおよぼすことから、地球温暖化の原因とされる温室効果ガスの排出量の削減が世界規模で叫ばれている。1997年の京都議定書では6種類の温室効果ガスについて先進国が削減する数値目標と達成期間が合意され、我が国は2008～2012年の期間中に1990年度比6%の温室効果ガス削減を達成する事が目標になっている。

このためには石油などの化石燃料の消費量を減らす必要があるが、エネルギー供給量と経済とは密接な相関があるため、安易なエネルギー消費量の削減は出来ず、非化石燃料の比率を増やすなどの対策が求められている。現状で1次エネルギーの約13%を占める原子力発電への依存量を増やす計画があり2010年には約17%に引き上げる目標が立てられている。しかし、安全性への不安感、廃棄物処理の問題などにより計画地域の反対運動なども根強く新規建設は容易ではない。一方、自然エネルギーへの期待が高まっている。特に、風力発電は欧州、米国で大規模事業化に成功した実績があることから近年高い関心が寄せられている。欧州では、風車の大型化に伴って陸上から海上へと移行しつつある。大型風車輸送建設の容易さ、風況の良さなどが、その大きな理由である。

我が国の風力発電の導入状況は2000年末で世界の設備容量の約1%程度でしかない。我が国では山間部への設置が多く、設置の困難さなどから建設コストが高くなることも阻害の原因になっている。しかし、四方を海に囲まれた我が国では海上における風力エネルギーの賦存量は陸上の約14倍以上と試算されている¹⁾。沿岸数kmにおける推定結果である。陸上の風力エネルギーの賦損量は1次エネルギーの3.5%程度と推定され

ていることから、海上への展開が実現すれば少なくとも現在の原子力発電を優に凌ぐ供給量を確保できることになる。

以上のことから、我が国沿岸に洋上展開できる基盤技術を早急に確立する必要がある。しかしながら、我が国沿岸は海底傾斜が大きく急激に水深の増す海域が多いため、賦存量を十分活用するためには浮体式の基礎構造を開発し展開する必要がある。

本研究では、経済性を考慮して、低コストの大型浮体上に大型風車を高密度に設置した浮体式風力発電システムを提案し、技術的成立性と発電コストについて検討を行う。

2. コンセプト

2.1 想定海域と設計条件

我が国沿岸海域は、着底基礎に適した水深数mという極浅水の遠浅が続くような海域は少ない。また、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、最近では海浜地区への風力発電設置に関係して景観問題による反対運動なども発生しており無視できない問題になっている。

洋上風力発電の設置コストは、水深20m以浅では着底基礎工法が、20m以深では浮体式が有利となる。また、漁業権の問題、景観問題などは、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大することになる。よって、これらのバランスを考慮して設置海域を決める必要があるが、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²⁾などを参考にして、設計条件を表-1のように仮定することにする。

2.2 風力発電装置および支床浮体

沖合に設置する浮体式といえども経済的に成立する事は必須の条件である。このためには、大型風車の集約化、浮体建造費の低減をはかる必要がある。図 - 1 および表 - 2 に提案する浮体式風力発電システムの概要を示す。1.6MW風車5基を約300m長の格子構造大型浮体上に集約搭載したシステムである。

風車は垂直軸直線翼型を採用した。陸上で多くの普及している水平軸型風車はタワー上部に50ton前後の発電装置が搭載されているため動揺に対する構造強度が問題となる。また、相互干渉による効率低下を避けるため、風車設置間隔を風車直径の3～4倍とる必要があるとされ、集約搭載がしづらい。垂直軸直線翼型は、こうした問題が起きにくく、風向変動に対する制御がいらないといったメリットがある。

支床浮体は、既存造船所の多くで一体建造出来る、全長300m×全幅60m程度の浮体を1ユニットとし、これらを複数展開することを考えることにした。BOX ガーダを格子状に配した構造を有している。動揺性能は半潜水式浮体に近い特性を持ち、ガーダ形状、質量分布等を適切に選ぶことにより最適化が可能である。また、使用鋼材量

が少なく、構造も単純であることからコスト面で従来の浮体に比べてはるかに有利である。

表 - 1 設計条件

項 目	暴風時	発電時最大
有義波周期	13.0sec	7.2sec
有義波高	8.6m	3.0m
風 速	50m/s(Max80m/s)	25m/s
潮 流 速	2.0knot	
水 深	50m	

表 - 2 提案構造物の主要諸元

全体	全長 275.0m × 幅 30.0m × 全高 107.0m × 喫水 1.5m(1部 2.5m) (重量 11727ton × 重心高 5.7m)
浮体	長さ 247.0m × 幅 30.0m × 型深さ 7.0m × 喫水 2.5m × 排水容積 11727.5m ³ (鋼材重量 3323ton × ハースト重量 7519ton × 水線面積 6210 m ²)
風車	高さ 100m × 直径 35m × 翼高 35m × 段数 2 段積 × 浮体上重量 885ton(発電機除) (タワー 500ton × 翼 160ton × 支持構造 225ton × 発電機 275ton : 5 基分)

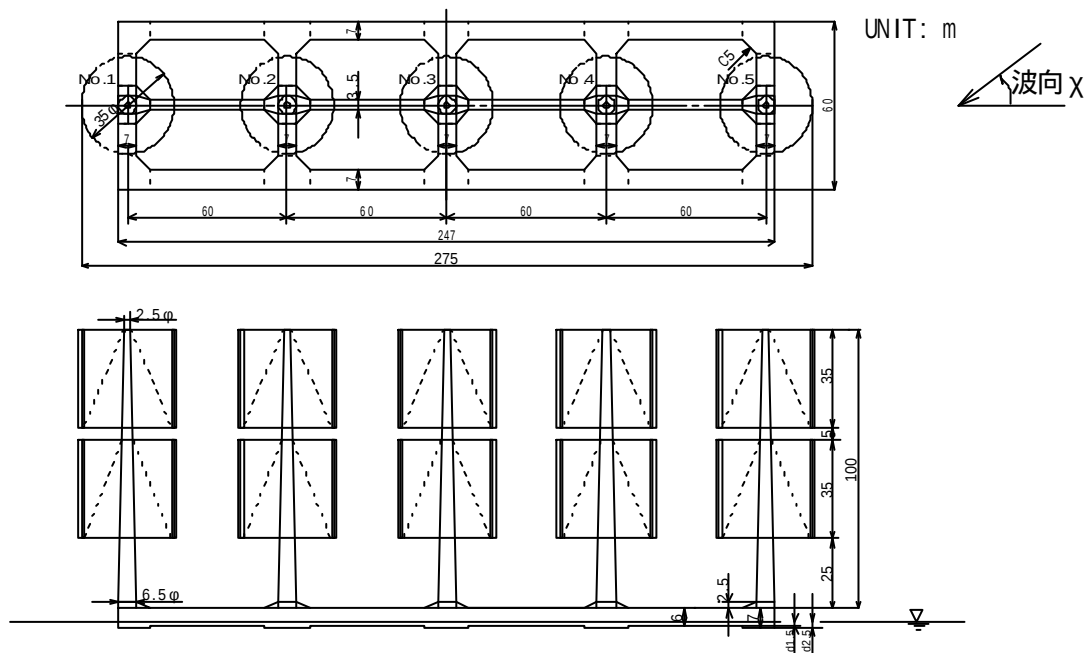


図 - 1 提案構造物の概要

3．技術的検討

3．1 定常外力の推定

定常外力を設計条件に基づいて推算した結果を表 - 3 に示す。風車は暴風時には翼を風向に立てて静止させ荷重を減じるため、発電時最大風速の荷重が最大値となった。風速鉛直分布は考慮している。浮体については、ガーダー構造が多列となるため、遮蔽影響を考慮し2，3列目に位置するガーダーの風抗力、流れ抗力は1列目の0．5倍として算定している。波漂流力は固定時の波透過係数から簡易的手法により求めた値である。

3．2 静的傾斜量および波浪動揺量の推定

定常荷重に対する静的傾斜角の推定結果を表 - 4 に示す。静的傾斜に対しては風による転倒モーメントが支配的となるため、風荷重のみ考慮している。この結果から、最大傾斜角は約0．3°であり発電効率などへの影響はほぼ皆無と言える。

波浪動揺量は、流体力をポテンシャル理論により算定し、これを有限要素モデルにした浮体構造に作用させ周波数応答関数を計算した。風車は一樣鉛直梁と見なし、慣性質量および慣性率のみ考慮し空力特性の影響は無視した。求めた応答関数を用い線形重ね合わせ法により不規則波中の期待値を求めた。波スペクトルはB - M型を用いた。結果を表 - 5 に示す。

発電時の最大動揺角は2．98°となった。3°以内であれば発電性能への影響は少ないとされていることから、この条件を満たしている。結果は省略したが、縦波中では弾性挙動が大きく、横波中ではほぼ剛体運動となり横揺れが大きくなっている。

3．3 係留に関する検討

係留は鉄鎖によるカテナリー係留を採用する。

水深の5倍の鎖長をとり、定常外力に対抗し、有義波高相当の長周期運動が生じると仮定した時の係留システム諸元を表 - 6 に示す。120mm鉄鎖10本を必要とする結果となった。一般に、水深が50m程度の浅海域でのカテナリー係留は係留角度がきつくなり難しいとされているが、このケースでも比較的重厚なシステムを必要とすることがわかる。

表 - 3 定常外力推定結果

項 目		推定値
風荷重	風 車	2510 kN
	浮体上部	1526 kN
潮 流 力		562 kN
波浪漂流力		676 kN
定常外力合計		5274 kN

表 - 4 定常風荷重による静的傾斜

状態	水平風荷重 kN	転倒モーメント kN・m	静的傾斜角 deg.
暴風時	2,245	116,780	0.242
発電時最大	2,510	144,030	0.299

表 - 5 不規則波中における動揺量

波向 X	暴風時 H1/3=8.6m T=13sec			発電時最大 H1/3=3.0m T=7.2sec		
	上下揺 m	横揺 deg	縦揺 deg	上下揺 m	横揺 deg	縦揺 deg
0°	7.86	0.00	2.87	1.50	0.00	0.60
15°	7.90	0.44	2.86	1.41	0.17	0.57
30°	8.04	0.91	2.78	1.27	0.31	0.53
45°	8.18	1.54	2.58	1.23	0.47	0.50
60°	8.08	2.74	2.13	1.33	0.56	0.50
75°	7.47	4.92	1.27	1.37	1.23	0.36
90°	6.87	6.70	0.00	1.33	2.98	0.00

1/1000 最大期待値

上下揺：両振幅、横揺、縦揺：片振幅

表 - 6 係留システム諸元

項 目		諸元
係留チェーン	呼び径	120 mm
	長さ	250.0 m/本
	本数	10 本
	単位重量	3.09 kN/m
	初期張力	251.9 kN/本
	耐力荷重	4854.4 kN/本
シンカー	重量	980.0 kN/個
	個数	10 個

4. 経済性の検討

我が国における既存の陸上発電方式の発電コストは8～11円/kWh程度である。従って、洋上風力発電といえどもこのコストに対抗できるだけの経済性を有する必要がある。提案構造物の発電コストを試算してみる事にする。まず、風力発電装置であるが、表-7に示すように現状では欧州と比較して大きな差がある。しかし、今後普及促進が図られ量産効果が現れれば欧州並みのコストは実現できる筈である。欧州のコストを基準にし、基礎土木費を浮体建造費に含まれるとして除外し12.3万円/kWと考えることとする。

浮体建設費も将来の量産効果を見込んで表-8に示す基準に従って行う。風力発電装置を含めた総建造費は約23億円となる。

この結果から発電コストを試算すると次のようになる。定額法償却率を使い、20年償却、金利3%、設備利用率40%、維持費3%（対総建造費）と仮定する。

単年度費用 23億円×(1/20+0.03)=1.84億円

維持費 23億円×0.03=0.69億円

発電量 8MW×24h/日×365日/年×0.4
=280,320MW・h

年間総費用/発電量=2.53億円÷280,320MW
=9.025円/kW・h

この結果は既存発電方式に匹敵するコストが実現できる可能性があることを示している。得られた電力は陸上への送電以外に水素などへの変換貯蔵も考えられたため、ここでは送電設備費用を含めていない。陸上送電費用は全体の15%程度と見込まれ⁴⁾、この費用を含めても既存の水力発電並の11円/kW・h程度を達成できる。

5. おわりに

本研究の一部は、(社)日本海洋開発産業協会・浮遊式洋上風力発電委員会における調査研究⁵⁾の一環として実施された。関係された方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 牛山泉（足利工業大学）：風力発電の現状と展望：第24回海洋工学パネル（21世紀のエネ

表-7 風力発電装置の内外価格差の比較例³⁾

[600kW機]	日 本		欧州(デンマーク)	
(単位)	万円	%	万円	%
総 額	14,400		8,400	
単価/kW	24～27		14～17	
風車本体	5,500	38%	5,340	63%
設置費合計	8,900	62%	3,060	37%
(内訳)				
輸送	1,150	8%	252	3%
受変電	1,150	8%	420	5%
組立据付	1,150	8%	504	6%
基礎土木 [*])	1,730	12%	1,008	12%
配線	1,000	7%	336	4%
試運転	432	3%	84	1%
エンジニアリング [*]	1,870	13%	504	6%
電力負担金	432	3%		
浮体式の総額 [*])	1,2670		7,392	
浮体式の単価/kW [*])	21.1		12.3	

* 浮体式では基礎土木費は浮体建造費に含まれる

表-8 支床浮体等建設費の算定基準

設計費：3000万円/一式
 浮体建造費：20万円/鋼材重量 ton
 防食費：150万円/ton×鋼材重量の3%
 艀装関係費：64万円/ton×排水量の1%
 モーリング機器：3千万円/一式
 係留鎖：40万円/ton
 コンクリートシカ：2.5万円/ton
 曳航設置費：6000万円/一式

ルギー戦略): 日本海洋工学会

- 2) 沿岸開発技術センター：沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書
- 3) 岡澤公夫：内外風力発電の現状と課題：第23回風力エネルギー利用シンポジウム：平成13年11月：日本風力エネルギー協会、日本科学技術振興財団
- 4) K.C.Tong: Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm: J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn 74-76 (1998)
- 5) 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洋上風力発電等システムの開発 調査研究報告書