

# 日本近海における洋上風力発電の実現可能性に関する研究

環境システムコース・地球環境工学分野 26638 緒方龍

## 1. 緒言

風力発電は、地球環境に優しいエネルギー源として欧米を中心にこの 10 年間で飛躍的に進展してきた。特に、ドイツやデンマーク、オランダといった風力先進国では、近い将来国内の総電力需要の 10%程度を風力発電で賄うという計画もある。

日本は世界的に見ると風力発電の導入において後進国であるものの、その導入量はここ数年で急激に増加している。しかし国土面積の狭い日本では陸上における風力発電は頭打ちとなる可能性があり、2010 年までの日本の目標である 3000MW の風力発電の導入のためにはフロンティアを開拓する必要がある。

陸上での風力発電の飽和は欧米でも生じており、西欧諸国を中心に洋上風力発電の開発、建設が盛んに行われている。

洋上風力発電のメリットは、

- ・ 陸上に比べ風況が良い
  - ・ 運搬・敷設時の障害物が少ない
  - ・ 騒音・景観問題などをクリアしやすい
- などがある。対してデメリットには
- ・ 発電コストが陸上に比べ割高となる
  - ・ 漁業補償、航路妨害

などがあげられる。

日本は世界第 6 位の経済水域面積を有する海洋大国であり、近海だけでも膨大な風力エネルギーが賦存することが報告されている<sup>1)</sup>。今後、風力資源を大規模に利用するためには、欧州と同様に洋上への展開を検討する必要がある。

日本近海において大規模な洋上風力発電ファームを建設する場合、陸地からの距離を大きく取ることで漁業補償などの社会条件をクリアでき、そのような海域においては風況も優れている。しかし、同時に水深が深いことが多く、着底式のみでなく浮体式も視野に入れた検討が必要となる。

## 2. 目的および概要

既存の研究により、着底式および浮体式の洋上風力発電システムの実現可能性については検討がなされており<sup>2)</sup>、現実的な発電コストでの開発が可能であるとの結論が出ている。また、浮体式の発電コストの中で大きなウェイトを占めるのが浮体・係留装置であることが分かっている。<sup>3),4)</sup>

また、浮体式には浮体上に 1 基の風車を搭載するモデル(FST)および複数の風車を搭載するモデル(FMT)がある。FMT では風車が近接するために風車間の干渉によって発電量変化が予想されるが、既存の研究ではその効果を評価した例はない。

そこで本研究では浮体式洋上風力発電を中心に想定し、発電コストの支配的要素である浮体・係留装置のコストを詳細に検討すること、および風車間影響を定量化することを第 1 の目的とした。その上で様々な検討項目を発電コストベースで定量的に検証することで浮体式の課題を明らかにし、その解決案として新システムの提案を行うことを第 2 の目的とした。

近接する風車の影響による発電量変化は実験により定量化した。また、FMT において浮体全体でヨー制御<sup>a)</sup>を行うモデル

<sup>a)</sup>ヨー制御：水平軸風車では、風車の向きと風向が一致していないと発電効率が悪くなるため、常に風向を向くように制御されている。このような制御をヨー(yaw)制御という。特に本研究では、風車本体のヨー制御のみでなく、浮体上に近接して設置される風車間の影響を少なくするために、浮体全体でもヨー制御を行うシステムを考えており、その概要は Fig.a のようになる。

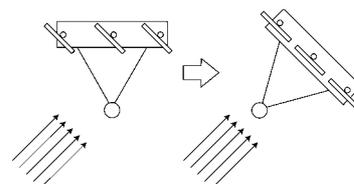


Fig.a 浮体ヨー制御概要図

(FMT-YC)を想定し、浮体ヨー制御の効率を定量的に検討した。Fig. 1~Fig. 3 に想定モデルを示す。

次に様々な検討項目を変数として感度解析を行い浮体式の発電コストに対し支配的な要素を抽出し新システムの提案を行った。

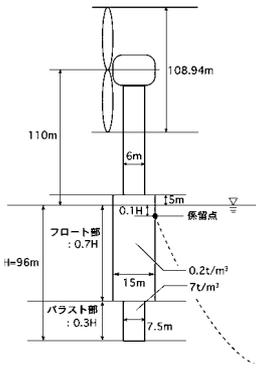


Fig. 1 FST モデル

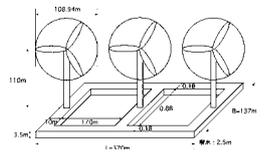


Fig. 2 FMT モデル

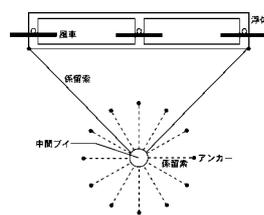


Fig. 3 FMT-YC モデル

### 3. 風車間影響の評価

発電コスト削減には浮体サイズを小さくする必要があるので、浮体上の風車はある程度近接して配置する必要性が生じる。近接する風車の配置、風向によっては風上側の風車によって風下側の風車の発電量が減少する遮蔽効果が生じる。本研究では遮蔽効果を実験により定量的に評価した。

#### 3.1. 実験方法

遮蔽効果の推定には、水中で穴あきの円板を設置し曳航することによって発生する抗力から推算した。

実験方法は、風車模型(Fig. 4)をアームに取り付け、アームを曳航電車で固定し、Fig. 5、Fig. 6 に示すような状態で曳航電車を走行させ、風車模型にかかる抗力を測定した。実験パラメータを Table 1 に示す。なお、風車直径  $D$  は 10cm であり、風向  $\theta$  は Fig. 6 に示すように風と浮体の相対角度を表す。



Fig. 4 風車模型

Table 1 実験パラメータ

項目	値
模型数	1 ~ 7基
曳航速度	50 ~ 400mm/sec
風車間隔	1.0 ~ 10D
風向	0~90deg

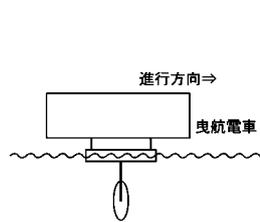


Fig. 5 実験概要側面図

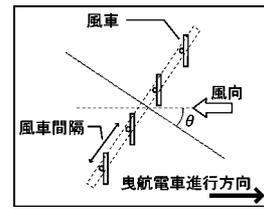


Fig. 6 実験概要平面図

#### 3.2. 実験結果

実験から、遮蔽効果について以下のことが分かった。

- ・ 風上側の風車は風下側の風車の影響を受けない
- ・ 風車間隔が小さい場合、遮蔽効果は風速による影響は小さい
- ・ 遮蔽効果は風車間隔・風向によって決定される
- ・ 3基目以降の風車の遮蔽効果による抗力の低下は同程度である

また実験結果から遮蔽効果のモデル化を行った。モデル式は風車間隔  $d$ ・風向  $\theta$  を変数とし、以下のように定式化した。Fig. 7 は実験結果とモデル式を表したグラフである。点が実験値、実線がモデル式を表す。なお、式中の  $D$  は風車直径である。

$$C_D = 1 - 0.7 \times \frac{2\phi - \sin 2\phi}{\pi} \left( \phi = \arccos \left( \frac{d}{D} \cos \theta \right) \right)$$

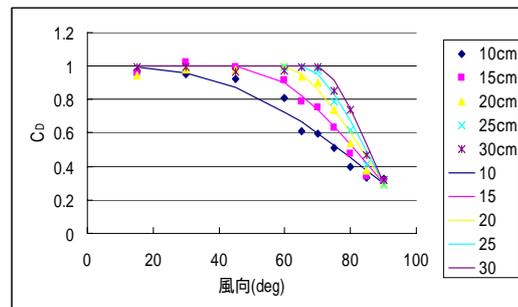


Fig. 7 遮蔽効果

#### 3.3. 遮蔽効果による発電量変化

遮蔽効果によって生じる発電量の変化を平均風速ごとに算出した。Fig. 8 はその推定結果から風向ごとの設備利用率を表したグラフである。なお風車間隔は  $1.5D$  である。平均風速が小さいほど遮蔽効果による発電量減少が大きくなることが分かった。

なお、発電量の算出にはレーレ分布で近似した風速分布と風車の出力特性曲線を用いた。

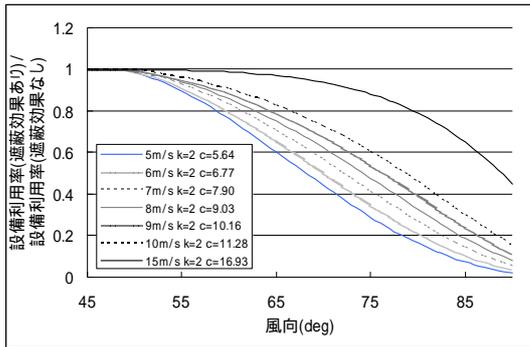


Fig. 8 遮蔽効果による発電量変化

#### 4. 浮体ヨー制御の評価

FMT-YC モデルにおいて、浮体ヨー制御の効率を計算した。実際の風速・風向変動を元に浮体ヨー制御を計算し、風と浮体の相対角度(Fig. 6 における風向 $\theta$ )を表したグラフが Fig. 9 である。なお風車間隔は  $1.5D$  とした。

遮蔽効果が顕著になる相対角度は風車間隔  $1.5D$  では、Fig. 7 より約  $50\text{deg}$  以上であり、浮体ヨー制御により相対角度は数 deg に抑えられるため、遮蔽効果による発電量減少を大きく削減できることが分かった。

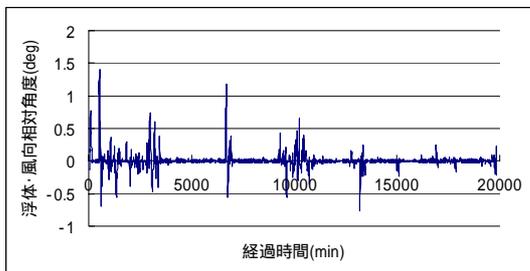


Fig. 9 浮体ヨー制御計算結果

#### 5. 発電コストの評価

以上の検討を元に秋田港沖(離岸距離  $20\text{km}$ 、水深  $200\text{m}$ 、平均風速  $8\text{ m/s}$ )にファーム総定格出力  $120\text{MW}$  の洋上ウィンドファームを想定し発電コストの試算を行った。以下はその結果である。

##### 5.1. イニシャルコスト

各モデルのイニシャルコストとその内訳を Fig. 10 に示す。イニシャルコストで支配的なものは浮体建造費であることが確認できた。

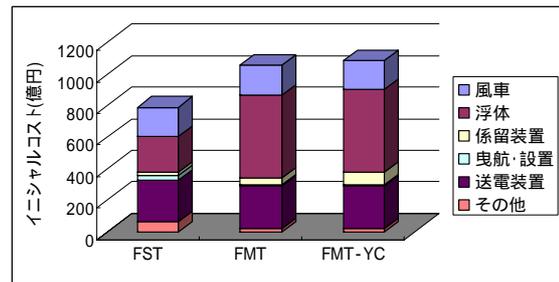


Fig. 10 イニシャルコスト試算結果

##### 5.2. 発電コストの感度解析

様々な項目を変数とし感度解析を行った。それらの結果から代表的なものを Fig. 11 ~ Fig. 13 に示す。

タワー高さ、風車搭載数、風車出力、喫水は発電コストへの寄与が大きい。これは浮体サイズに関わるパラメータであり、浮体建造費の削減による効果である。

風車間隔による寄与は小さいが、これは浮体建造費の削減と遮蔽効果の増大による発電量減少が相殺するため、特に遮蔽効果の大きい FMT では寄与が小さかった。

海域条件では、水深による寄与では水深  $50\text{m}$  を越すと着底式よりも浮体式のほうが経済的であることが分かった。

また、図中にはないが離岸距離による寄与は大きい。これは送電コストが離岸距離の関数として増大するためである。

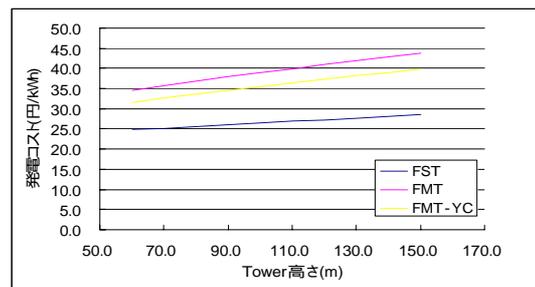


Fig. 11 タワー高さによる感度解析結果

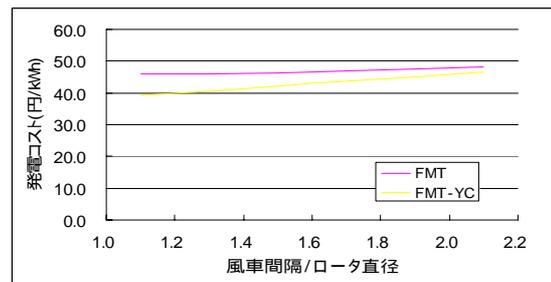


Fig. 12 風車間隔による感度解析結果

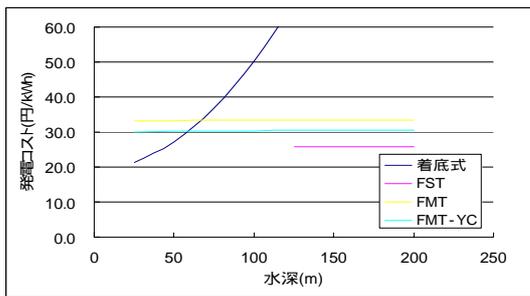


Fig. 13 水深による感度解析結果

### 5.3. 発電コストまとめ

浮体式の発電コストは20～50円/kWh程度であり、石油火力発電の9円/kWhには遠く及ばず、現在の一般的な風力発電の買電価格である11.50/kWhにも及ばないため、より抜本的なコスト削減策が必要である。

また、浮体式の発電コストを大きく左右する項目は浮体建造費および離岸距離であることが分かった。離岸距離は社会条件などの制約で変更が難しいが、浮体建造費には改善の余地がある。浮体形状を決める設計条件のうち、最も支配的なものは浮体傾斜量であり、浮体傾斜を小さくする浮体形状を考案することでコスト削減を実現できる可能性がある。浮体傾斜を抑える手法として水線面積を増やしメタセンタ高さを高く取る手法(ex.バージ型)と、重心高さを低く取る手法(ex. SPAR型)があるが、双方の手法とも排水量が増加するため浮体建造費が高くなる。排水量増加はバージ型の方が大きく、SPAR型の方が発電コスト削減には有効であることが分かった。

### 6. 新システムの提案

感度解析結果から水深50m以下では着底式が有利であり、水深100m以上ではFSTによる発電が有望であることが分かった。また、水深50～100mでは、着底式と浮体式の組み合わせによる浮体ヨー制御を行うシステム(Fig. 14)や、浮体式と着底式の間期的存在として Articulated Towerを用いたシステム(Fig. 15)などによって発電コストを改善できる。Fig. 16に発電コストの試算結果を示す。

今回提案したモデルではジョイント部の強度などに検討の余地が残るものの、試算

結果によれば課題であった水深50～100mでの発電コストに改善効果が見られた。

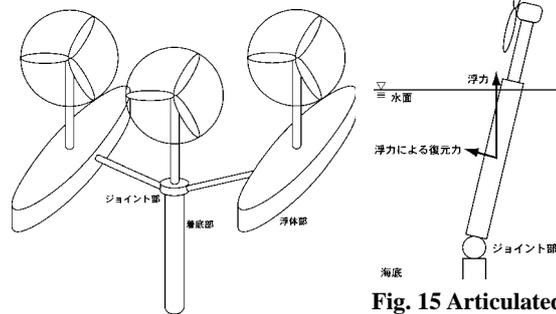


Fig. 14 浮体・着底複合モデル Fig. 15 Articulated Tower モデル

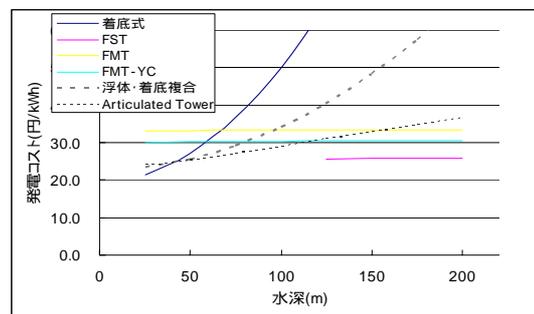


Fig. 16 提案システムの水深別発電コスト試算結果

### 7. 結論

既存の研究では詳細に取り上げられなかった風車間の遮蔽効果、浮体ヨー制御の発電量への影響について定量的に評価することが出来た。また、発電コストに対する主要な要素を抽出することが出来た。

また、新システムとして浮体・着底複合モデルや Articulated Tower モデルを提案し、発電コスト改善効果を確認できた。しかし既存の火力発電や陸上における風力発電の発電コストには及ばず、今後さらなるコスト改善が必要である。

- 1) NEDO：日本における洋上風力発電の導入可能性調査，NEDO，1998
- 2) 緒方龍ら：Floating Wind Farmの試計画，第16回海洋工学シンポジウム論文集，2001
- 3) JMF、JOIA：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，2002
- 4) 小杉晃：日本近海における沖合風力発電の実現可能性に関する研究，東京大学新領域創成科学研究科修士論文，2002