

# 関東沿岸における風況特性と洋上風力賦存量の評価

An Assessment of Offshore Wind Climate and Wind Energy Potential near Kanto Coastal Region

石原 孟\*

Takeshi ISHIHARA

## 1. 結論

今年7月に世界の風力発電設備容量は4053万kWに達し、5600万人の人に電力を供給している。一方、我が国の風力開発は1997年以後急速に拡大し、2003年の設備増加率が46.2%と大きく、風力発電システムの導入も2003年度年末で68万kWに達した。現在日本における風力発電導入量が世界第8位、国内における風力発電産業も形成されつつある。

しかし、風力発電導入量の急速な拡大に伴い、我が国の風力開発における技術課題も顕在化しつつある。風力発電の特徴である出力変動はその普及に伴い、電力系統に与える影響が懸念され、更に風力エネルギーの地域偏在性は風力開発の適地不足問題を引き起こしている。その解決策の一つとして有望視されているのは電力消費量の多い都市域の沖合いにおける洋上風力開発である。風力発電先進国デンマークでは陸上の適地不足から大規模な洋上ウインドファームの開発が進んでおり、昨年ローラン島の沖に世界最大の洋上ウインドファーム(2300kWの風車72基)が建設された。日本における大規模な洋上風力開発を行うためには、各電力会社管内における洋上風力賦存量を明らかにすると共に、技術的、経済的、社会的制約条件を考慮した開発可能量の正確な算定が不可欠である。

日本における洋上風力賦存量に関する研究が幾つか挙げられる。長井ら<sup>1)</sup>は灯台の観測データをもとに線形風況予測モデルWASPを用い、沿岸3kmまでの洋上風力賦存量を予測した。しかし、日本の沿岸海域のほとんどは漁業権が設定されており、大規模なウインドファームの建設が困難であり、沖合いにおける風力賦存量の予測が必要である。藤井ら<sup>2)</sup>はDMSP衛星によるSSM/I画像データを用い、海面の波から海面風速を推定し、洋上風力賦存量を算出した。しかし、洋上に設置する風車のナセルは海面から60m~80mの高さに位置するため、海面風速から推定された洋上風力賦存量に誤差が含まれる可能性がある。また衛星画像の制約から、推定された賦存量の空間的・時間的分解能が低く、推定手法自体の精度も未検証であるという問題が残さ

れている。更に洋上ウインドファームを計画する際には、ウインドファームの設置における技術的、経済的、社会的な制約条件を十分に考慮し、実際に開発可能な風力発電量を推定する必要もある。

Voivontas et al.<sup>3)</sup>は地理情報システムを用い、陸上の風力エネルギー賦存量を理論的に存在する理論賦存量、社会的制約条件による利用可能賦存量、技術的制約条件による技術的賦存量、経済的制約条件による経済的賦存量に分け、意思決定支援システムRES-DSSを構築した。またHilbring and Kreig<sup>4)</sup>は、人口密集地や集落近傍、軍事施設を除き、スウェーデン南部の風力エネルギー賦存量を求めた。しかし、日本近海では考慮すべき経済的、社会的制約条件が欧州と異なるのに加え、日本沿岸の海底地形がヨーロッパの北海沿岸のそれと異なるため、基礎形式など考慮すべき技術的制約条件も異なる。

本研究では電力需要の大きい関東地方の沖合いを対象に、気象シミュレーションにより、関東沿岸の風況特性を解明すると共に、関東沿岸における洋上風力エネルギーの賦存量を明らかにする。そして、洋上ウインドファームの建設における技術的、経済的、社会的制約条件を抽出し、日本近海における洋上風力開発可能量の推定基準を提案する。最後に、気象モデルにより推定した洋上風力賦存量に開発可能な発電量の推定基準を適用することにより、関東沿岸洋上における風力開発可能量を明らかにする。

## 2. 地域気象モデルRAMSの概要

本研究では、洋上風況を算出するために、地域気象モデルRAMS<sup>5)</sup>を使用した。気象モデルRAMSは非静水圧力学方程式を基礎とし、メソスケールの気象現象に支配的な影響を与える放射過程、雲、土壌のモデルが組み込まれている。地表面の境界条件としては、大気の流れと地面の放射吸収量に影響を与える地形、熱と力学的な境界条件を与える土地利用、海水面温度を与える。本研究では、地形としては国土地理院の50mメッシュ数値地図、土地利用としては国

\* 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16

Email: ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

土交通省による 100m メッシュ国土数値情報、海水面温度としては全球 1 度グリッドの気候値を用いた。

本研究は洋上を対象とするため、計算領域の最小水平分解能を 2km とした。メソスケールの現象を適切に再現させるため、二重にネスティングさせた格子を用い、双方向に計算結果を反映させながら計算を行った。本研究で用いた計算領域を図 1 に示す。外側のグリッド 1 は関東平野と周辺の山岳地域を含むように領域を設定し、水平解像度を 10km とした。また内側のグリッド 2 は関東地方沿岸部を含むように銚子沖と相模湾沖の二つの領域を設定し、水平解像度を 2km とし、それぞれの領域における詳細な計算を行った。銚子沖の水平格子点数は東西 78 × 南北 86、相模湾沖は東西 106 × 南北 54 である。鉛直方向に関しては、地表面、海表面付近の風速の鉛直プロファイルを正しく再現できるように地表面付近の最小格子間隔を 20m とし、上空では最大 1000m の格子間隔を用い、計算領域の高さは 25km とした。

計算対象期間は、異常年検定に合格した 2000 年 1 年とし、日本標準時の 2000 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までの通年シミュレーションを行った<sup>9)</sup>。雲や降雨の大気気象のモデルとしては、計算時間と精度のバランスを考慮し、雲のみを再現したモデルを用いた。側方境界条件および初期条件としては、ECMWF(ヨーロッパ中期気象予報センター)による全球モデルの客観解析値(気圧面鉛直 14 層のジオポテンシャル高度、温度、相対湿度、水平風速成分)を初期及び境界における同化データとし、連続的に計算に取り込んだ。計算結果は毎正時 10 分平均の風速の各成分を 1 時間間隔で出力した。計算には Athlon 20GHz 20CPU を有する PC クラスタを用いた。銚子沖と相模湾沖の 1 年分の計算に計 600 時間を要した。

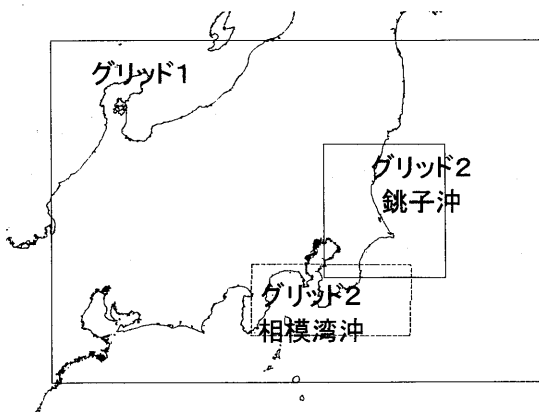


図 1 本研究で用いた計算領域

### 3. 銚子気象台における風況特性

地域気象モデル RAMS による計算精度を評価するために、対象領域内の気象官署の中で最も海に近い銚子気象台で観

測された風速、風向を用いた。銚子気象台の周辺は比較的平坦で、風速と風向が観測されている高さは地面から 28.2m である。図 2 に銚子気象台での 2000 年 1 年間の日平均風速、図 3 に 2000 年 6 月の毎正時 10 分平均風速を示す。実線が、地域気象モデル RAMS による計算結果、点線が観測データを示す。気象モデルによる予測された風速は観測された風速をよく再現し、年平均風速の予測誤差は 4.8% であり、高い精度が示された。なお、1 年間の日平均風速の二乗誤差は 1.17m/s、毎正時 10 分平均風速の二乗誤差は 2.10m/s となっている。すなわち、気象モデルにより平均風速を予測する場合には評価時間が長ければ予測精度が高いことがわかる。

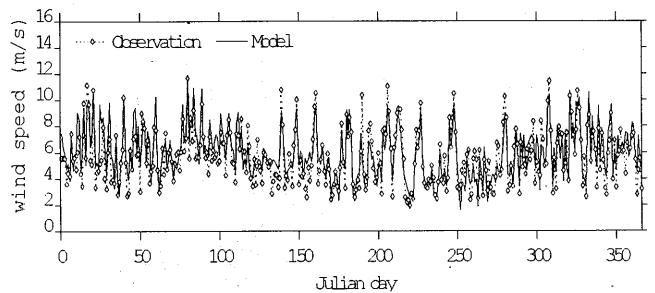


図 2 銚子気象台における 2000 年 1 年間の日平均風速の変化

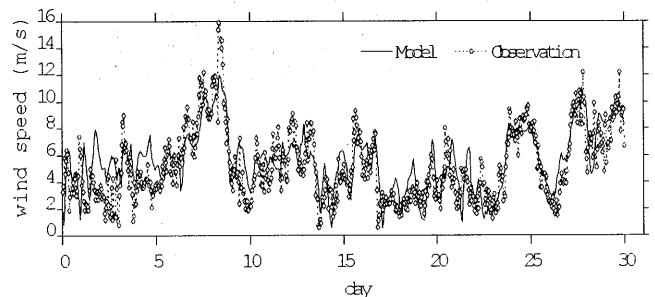


図 3 銚子気象台における 6 月の毎正時の 10 分平均風速の変化

図 4(a)には銚子気象台における年間風況図を示す。実線が気象モデルによる解析結果、影付きの鎖線が観測値を示す。風速だけでなく、卓越風向もよく再現されていることがわかる。銚子においては、主風向は季節によって大きく変化する。図 4(b)には、銚子気象台における 6 月、図 4(c)には 10 月の風況図をそれぞれ示す。6 月の主風向は南南西であるのに対して、10 月の主風向は北北東から北東となっている。気象モデルによる解析結果は、この風配の変化を的確に予測していることがわかる。

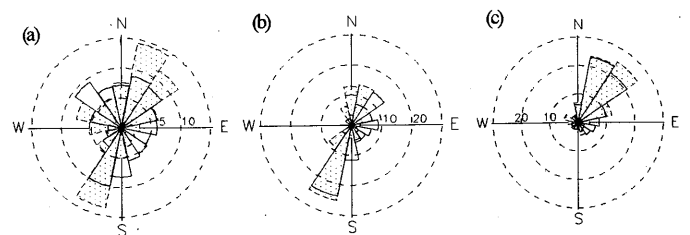


図 4 銚子気象台における風況図 (a)年間、(b)6月、(c)10月

関東地方の太平洋側の洋上風況特性を確かめるために、現在沖合 40km 地点の海上において海面から 90m 高さに風向・風速計を設置し風観測を実施しており、卓越風向の季節による変化や高い風速と設備利用率の存在が検証されつつある。

#### 4. 関東沿岸の風況特性と洋上風力賦存量の評価

図 5 には銚子沖高さ 60m での年平均風速分布を示す。全体的に沿岸に近い場所ほど平均風速が弱く、陸から遠ざかるにつれて風速が増大していることがわかる。また、沿岸からの距離が同じでも場所によって、風速が大きく異なる。

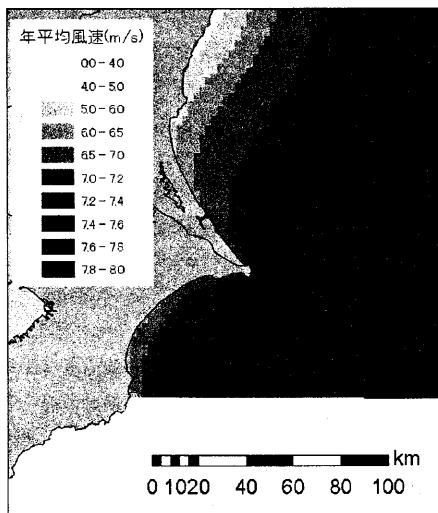


図5 銚子沖の年平均風速分布

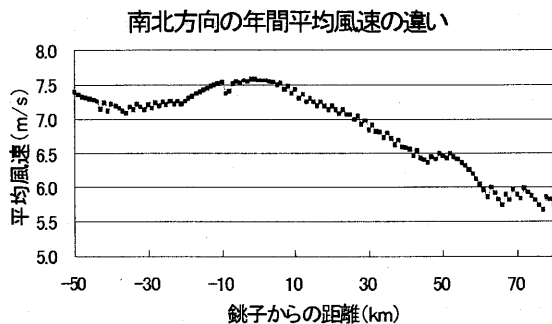


図6 沖合い 10km 地点における南北方向の風速変化

図 6 には海岸から 10km 離れた場所での年平均風速の南北方向の変化を示し、銚子沖 10km の地点を基準に北側を正とした。銚子沖での年平均風速が最も高く、北側に行くに従い風速は急激に低くなるのに対して、銚子沖以南では平均風速の減少が少ない。最も風速が高い銚子沖に対して、最も風速の低い銚子北 70km の海域では年平均風速は 25%程度低く、発電量に換算すると約半分になる。これは、この海域における主風向の一つである南から南南西の風の時に銚子以南の海域では南側には陸地がないため、風速があまり

減速しないのに対して、銚子北側の海域では、南南西に陸地があり、海面より高い粗度の存在により風速が顕著に減少すると考えられる。

次に、気象モデルの計算結果から求められた風況データを用い、関東沿岸洋上における賦存量を求めた。関東地方 1 都 6 県の沿岸 50km までの海域を対象とし、風車はハブ高さ 70m、ロータ直径 80m の 2MW 風車を想定し、風車の配置間隔はロータ直径の 8 倍(8D×8D)とした。このとき対象海域には 49,405 基の風車が設置可能である。図 7 には求められた 1km<sup>2</sup>あたりの年間発電量を示す。この場合には対象海域の年間総発電量が 277TWh であり、これは東京電力の年間供給電力 295TWh の 94%に相当する。また風況のよい海域では設備利用率が 35%に達していることが分かる。

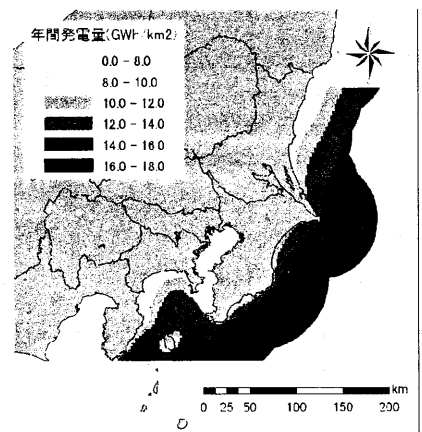


図7 関東沿岸海域における 1km<sup>2</sup>あたりの年間発電量

#### 5. 地理情報システムによる開発可能量の算定

洋上にウィンドファームを建設する際にはいろいろな制約条件を受け、実際建設可能な海域が限られている。図 7 に示されている賦存量から実際に開発可能な発電量を評価するためには、技術的、経済的、社会的な立地制約条件を考え、建設不可能な海域を除外する必要がある。本研究ではまず日本近海において洋上ウィンドファームを建設する際の立地制約条件を整理し、日本近海における洋上風力発電開発可能量を算定する際に除外すべき海域の決定方法を提案する。

立地制約条件は、技術的、経済的、社会的制約条件の 3 種類に分類できる。本研究では技術的制約条件としては水深を考慮した。現在欧州で実用化されている着底型基礎構造を用いた場合に風車が設置可能な水深は 0~20m である。一方、現在実用化に向け開発が進められている浮体式基礎構造は設置水深が 20~500m を目標としている<sup>7)</sup>。そこで本研究ではこれら二つの水深域での開発可能量をそれぞれ評価した。次に経済的制約条件としては海底送電ケーブルの最

大延長を 40km とした。これは海底ケーブルの延長が 40km を超えると経済的な交流高圧送電が不可能となるためである。また維持管理の作業性の点からも 40km 以上の海域を除外することが望まれるため、経済的制約条件として、沿岸から 40km 以上離れた海域を除外した。さらに社会的制約条件としては、自然公園区域、漁業権設定区域、航行区域等の既利用区域を除外した。自然公園区域や航行区域では風車の建設は難しく、また漁業権設定区域についても、漁業補償によるコスト変動リスクや交渉による事業遅延リスクを考慮すると、これらの海域を除外した。

なお、等深線及び海岸線データは、海洋情報研究センターより購入した「日本全域海岸線データ」と「日本近海等深線データ」を使用した。他のデータは全て国土交通省より入手した国土数値情報を用いた。

以上のような立地制約条件を考慮すると、関東地方沿岸海域の開発可能量は、現在実用化されている着底型基礎構造を用いる場合、すなわち水深 20m 以下の海域のみにウィンドファームを建設する場合には 0.4TWh/year となり、全体賦存量のわずか 0.1%しか開発できない。これは日本では海底の地形が急峻なため、着底型基礎構造に適した水深 20m 以下の海域は沿岸のごく近傍に限られ、またこのような海域のほとんどは漁業権が設定されており、ウィンドファームの建設が不可能であるためである。より深い水深の海域に建設可能な浮体式基礎構造を用いる場合、開発可能量は 9.4TWh/year となり、2001 年度東京電力の総供給電力の 32%に相当する。図 8 に浮体式基礎構造を用いる場合の発電可能量マップを等深線と併せて示す。このように、従来風が弱いと言われている関東地方は洋上に目を向ければ、35%という高い設備利用率に代表されるように、関東地域における洋上風力開発に大きな可能性を秘めていることが分かる<sup>8)</sup>。

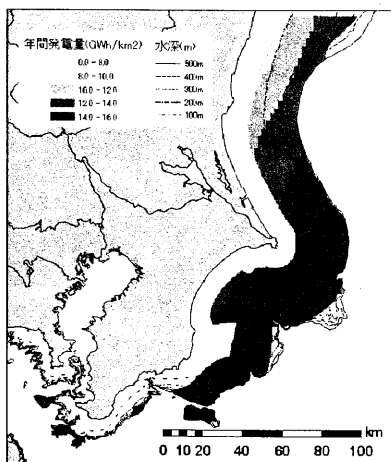


図 8 浮体式基礎構造を用いる場合の発電可能量

図 9 には、水深別の発電可能量を示す。水深 20~200m での発電可能量が大きく、浮体式基礎構造の開発は日本における洋上風力開発にとって不可欠であることが分かる。また図 8 からわかるように、水深が 200m を超えると急激に海が深くなり、水深 500m に達するまでの海域の面積が小さいため、浮体式基礎構造の技術開発は水深 20m~200m の海域を目標とすればよいことが分かる。

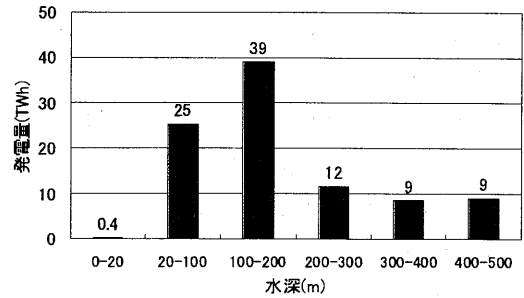


図 9 全ての制約条件を考慮した後の水深別発電可能量

浮体式基礎構造に関する研究開発はすでにいくつかの研究機関で行われ、複数台の風車を搭載するセミサブ浮体構造や単体の風車を搭載するスパーブイ型浮体構造が提案される。更にスパーブイ型浮体構造とセミサブ浮体構造の長所をあわせ持った複合構造を採用した浮体構造形式も提案され、実用化に向けた浮体式洋上風力発電システムの研究開発が始められつつある<sup>9)</sup>。

## 6. まとめ

本研究では、関東地方沿岸域を対象に、メソスケール気象モデルを用いた水平解像度 2km のシミュレーションを行い、関東地方沿岸域の風況及び洋上風力賦存量を明らかにした。また地理情報システムを利用し、技術的、経済的、社会的制約条件を考慮した関東地方沿岸域の風力開発可能量を評価した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 気象シミュレーションにより、洋上における年平均風速を評価でき、予測誤差は 4.8% である。
- 2) 関東地方沿岸域における洋上風況は場所によって大きく変化し、沿岸からの距離が一定であっても銚子沖以南に比べ、銚子沖より北側では北に行くにつれ年平均風速が大きく減少する。
- 3) 関東地方沿岸 50 km までの海域における洋上風力賦存量は東京電力の供給電力の 94% に達し、風況のよい海域では設備利用率が 35% に達していることが分かった。
- 4) 地理情報システム GIS を用いることにより、洋上ウィンドファームの建設における技術的、経済的、社会的制約条件を抽出し、関東地方沿岸海における洋上風力開発可能量を評価した。

- 5) 技術的, 経済的, 社会的制約条件を考慮し, 浮体式基礎構造を用いる場合の開発可能量は 94TWh/year となり, 2001 年度東京電力の総供給電力の 32%に相当することが分かった.

## 文 献

- 1). 長井浩, 牛山泉, 2000 年太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.219-221, 2000.
- 2) 藤井朋樹, 1999 年太陽/風力エネルギー講演論文集, pp. 447-450, 1999.
- 3) D. Voivontas, D. Assimacopoulos and A. Mourelatos, *Renewable Energy*, Vol 13, No.3, pp.333-344, 1998.
- 4) Bengt Hilling and Roland Krieg, *Renewable Energy*, Vol 13, No. 4, pp.471-479, 1998.
- 5) R. A. Pielke et al., *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 49, pp. 69-91, 1992.
- 6) 林宏典, 佐々木律子, 鈴木靖, シンポジウム:風力発電タービンの最適立地探査法概要集, pp.79-82, 2002.
- 7) 金鋼正矢, *海洋開発ニュース*, Vol. 30, No. 5, pp. 28-33, 2002.
- 8) 石原孟, 山口敦, 佐々木庸平, 藤野陽三: 地域気象モデルと地理情報システムを利用した洋上風力賦存量の評価, 第 26 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 287-290, 2004.
- 9) 石原孟: 我が国の風力開発における技術課題と将来展望, *電力土木*, No. 314, pp. 3-9, 2004.