

地理情報システムを利用した洋上風力賦存量の評価

東京大学 石 原

孟*

1. はじめに

日本における風力発電設備容量は2009年末206万kWに達している。今後、二酸化炭素排出削減のためにさらなる風力発電の導入が期待されているが、陸上での適地不足の問題が顕在化している。現在風力発電の先進国でも同様の問題が顕在化してきており、洋上風力発電によりこの問題を解決することが期待されている。欧州では洋上における大規模ウィンドファームが実際に建設され、運用が開始されているが、日本においても風力資源に乏しい大都市近傍で大規模な洋上風力発電が実用化されれば、日本における風力発電の導入の促進が期待できる。大規模洋上風力発電を行うためには洋上における風力賦存量の評価が重要である。賦存量の正確な評価のためには正確な洋上風況の推定に加え、沿岸からの距離、水深、社会的制約条件等を考慮し、複数のシナリオの下で賦存量を比較し、今後の洋上風力開発に際しての基礎的な資料を提供することが重要である¹⁾。

本稿では関東地方沿岸の洋上を対象に、メソスケール気象モデルを用いて関東沿岸の洋上風況を予測すると共に、地理情報システムを用い、社会的・経済的制約条件を考慮した複数のシナリオに対し、洋上風力賦存量を定量的に評価し、今後の洋上風力発電技術開発および大規模洋上ウィンドファームの計画立案の指針を与える。

2. メソスケール気象モデルによる
洋上風況の予測

本研究では全球モデルの客観解析値を境界条件、初期条件とし、質量保存則、運動量保存則、熱力学方程式、水分の保存則を支配方程式とするメソスケール気象モデルによる解析を行うことにより、関東

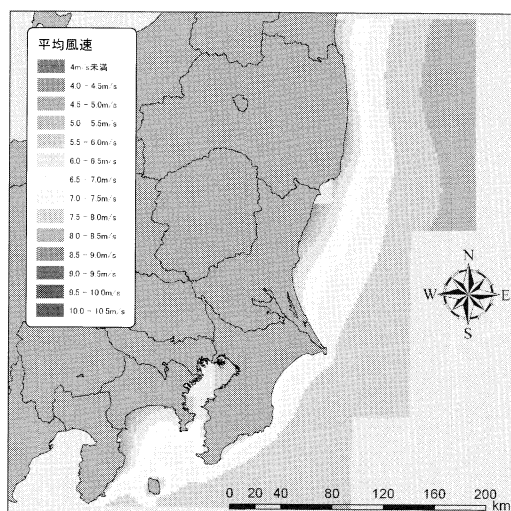


図1 関東沿岸における海面高度70 mにおける年平均風速

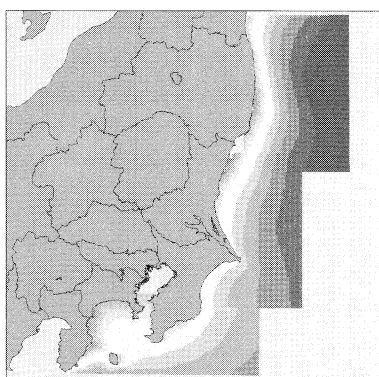
沿岸の洋上風況を求めた。解析ではコロラド州立大学で開発されたメソスケール気象モデル RAMS²⁾を用い、2000年における1年間の解析を行い、関東地方沿岸域における洋上風況の時系列データを求めた。

図1は本研究で得られた年平均風速分布を示したものである。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、風速に大きな違いがある。

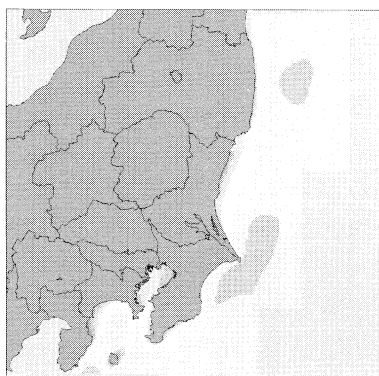
海域によって大きく風況が異なる原因を調べるために、代表的な2つの季節について平均風速の分布を求め、図2に示す。図2(a)には北西風が支配的な2月の結果、図2(b)には南南西風が支配的な6月の結果を示す。

北西の季節風が卓越する2月(図2(a))では沿岸付近での平均風速は低いが、沖に行くにつれ、風速が急激に増大する。特に福島県沖においてこの傾向が顕著である。北西の季節風が日本海から日本列

* いしはら たけし 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
東京工業大学大学院工学研究科 土木工学専攻



(a) 2月



(b) 6月

図2 海面高度70 mにおける平均風速の季節変化

島を越える際に風速が減速し、障害物のなくなった太平洋で再び風速が増大するためと考えられる。

主風向が南南西になる6月(図2(b))には沿岸部と沖合いの風速差は小さくなる。上流に相当する南南西は広大な海上であり、障害物が全くないため、このような風速分布が実現されることが考えられる。注目すべきは銚子沖と福島県沖にわずかながら風速の値が極大となる海域がある。これは、6月の洋上においては海水温に比べて気温が高くなるため大気は安定に成層しており、陸上で地形と地表面粗度の影響を受けて減速した風速の運動量を補償するために洋上で運動量が増大したものと考えられる。

図3には海岸線からの距離が0 km, 5 km, 10 km, 20 km, 40 kmに沿った線上の年平均風速を示す。全ての場合に銚子沖で最も年平均風速が高いことがわかる。また、海岸からの距離が近い場合には北側に行くに従い風速は急激に低くなることわかる。また、海岸からの距離が40 km離れている場合には場所によって大きな風速の違いが見られない。これに対し、銚子沖以南では平均風速の大幅な減少は見

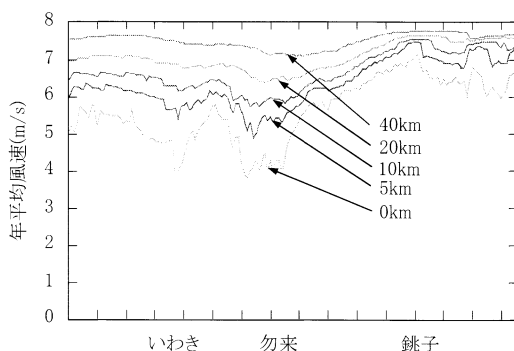


図3 海面高度70 mにおける沿岸からの距離別の年平均風速

られない。最も風速が高い銚子沖に対し、最も風速の低い銚子北70 kmの海域では年平均風速は25%程度低くなっている。

3. 洋上風力賦存量の評価

風力賦存量とは現在の技術で取得可能な年間の最大電力量である。本研究では東京湾を除く関東地方沿岸域の陸地から50 kmまでの範囲(図4)を対象とし、水深別、海岸からの距離別に風力賦存量を求めた。また、海域によっては社会的、経済的な理由により大規模洋上ウインドファームの建設が難しい海域も存在するため、数種類のシナリオを想定し、社会的制約条件および経済的制約条件を考慮した賦存量を推定した。

賦存量の算出には様々な地理データが必要となる。

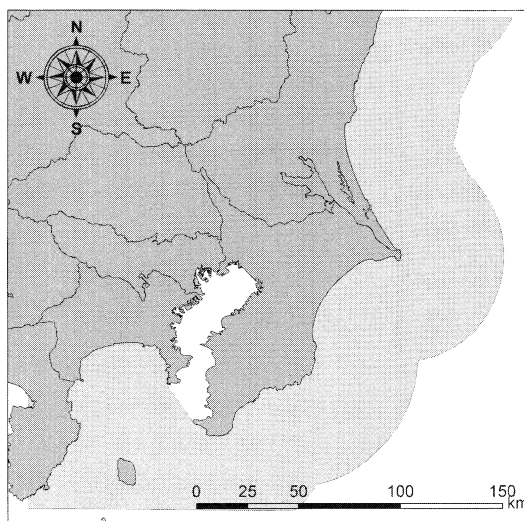


図4 本研究で賦存量を算出した海域

表1 本研究で用いた地理データ一覧

地理データ種別	使用したデータ	データ入手先
水深	日本近海 等深線データ	海洋情報 研究センター
海岸線	国土数値情報	国土交通省
自然公園設定区域	国土数値情報	国土交通省
漁業権設定区域	国土数値情報	国土交通省
漁港エリア	国土数値情報	国土交通省
港湾エリア	国土数値情報	国土交通省

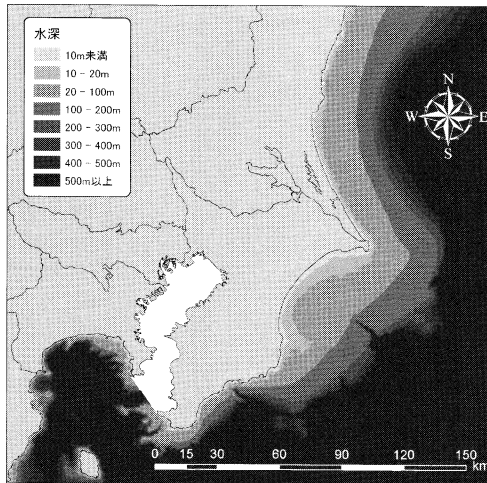


図5 対象領域付近の水深

まず、陸地から50 km の範囲を対象に水深別、海岸線からの距離別に賦存量を算出するため、水深データおよび海岸線データが必要となる。また、社会的・経済的制約条件を考慮するためには自然公園、港湾、漁業権設定海域などの規制に関する地理データが必要となる。表1に本研究で用いた地理データの一覧と入手先を示す。

図5には本研究で使用した水深データを示す。千葉県沖、茨城県沖では比較的水深の浅い海域が多いが、相模湾においては陸から離れるにつれ急激に水深が深くなるのがわかる。図6には漁業権、港湾海域、自然公園を示す。海岸付近ではほとんどの海域に漁業権が設定されていることがわかる。また東京湾内の大部分の海域が港湾となっている。このため、本研究では東京湾内を対象海域から除外した。

賦存量の算出にあたっては、風車および風車の配置を仮定する必要がある。ヨーロッパで既に建設されている大規模洋上ウィンドファームでは2 MW 級の風車が使用されている。そこで、本研究では定格出力が2.4 MW の三菱重工業(株)の MWT-92/2.4³⁾ を仮定し、賦存量を算出した。賦存量は風車間隔にも依

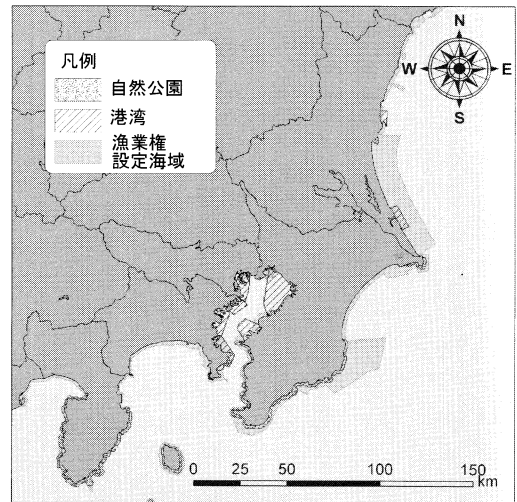


図6 対象領域付近の規制エリア

存する。関東地方沿岸域における主風向は北西、北北東、南南西と季節によって大きく変化するため、本研究では、縦、横方向にともに風車間隔をロータ直径Dの8倍離して設置するとし、賦存量を推定した。なお、風車間隔がロータ直径の8倍であれば風車のウェイク（後流）の影響は小さいと考えられるため、本研究では風車のウェイクは考慮していない。また本研究では地理データおよびメソスケール気象モデルにより求めた風速データを地理情報システム ArcInfo 上で重ね合わせるにより、様々なシナリオの下での賦存量を算出した。対象とした風車のハブ高さが70 m であるため、風速値としてはメソスケール気象モデルの海面高度52 m および75 m における結果から海面高度70 m に線形内挿した値を用いた。賦存量の算出方法の詳細に関しては文献5)を参照されたい。

図7には関東地方沿岸50 km 以内の洋上における賦存量を海岸からの距離・水深別に求めたものを示す。本研究で対象とした海域では合計で286.54 TWh/year の賦存量があることがわかる。これは東京電力(株)の2005年の年間電力販売量288.7 TWh/year⁴⁾ にほぼ等しい。ただし、図7からわかるように賦存量の大部分は水深500 m を越える海域にあり、経済的に利用が難しいと考えられる。また、水深10 m 以下の海域にも年間4.87 TWh の賦存量があるが、そのほとんどは海岸からの距離が10 km 以内の海域に集中しており、漁業権等の社会的制約条件を受ける。これらの経済的・社会的制約条件を考慮した場合の賦存量について以下に詳細に検討する。

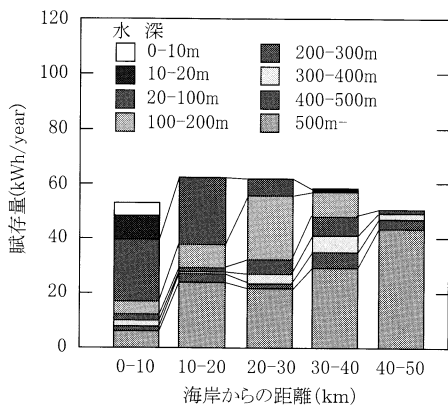


図7 水深・海岸からの距離別の賦存量

4. 社会的・経済的制約条件の影響

まず、建設する海域の水深は採用する基礎形式に大きく関係する。水深が20m以下の海域においては欧州で実用化されている着床式基礎を用いることができるが、20m以上の海域においては浮体型基礎を用いる必要がある。また、浮体型基礎を用いる場合でも水深が500mを越えると経済的な理由から建設が難しくなることが指摘されている。そこで、本研究では着床式基礎を用いる場合を想定し、水深20m以下の海域を対象とするシナリオと、浮体式基礎も採用することを想定し、水深500m以下の海域を対象とするシナリオを検討した。

次に、大規模ウィンドファームを建設する際には漁業権、自然公園等の規制により、開発可能な海域は限られる。そこで、本研究では図6に示す自然公園、港湾区域、漁業権設定水域を開発対象から除外するシナリオと、除外しないシナリオについて検討した。さらに、欧州の大陸部では海岸に近い海域における大規模洋上ウィンドファームの建設は景観上の観点から制限されている。そこで自然公園、港湾区域、漁業権設定海域に加え、海岸からの距離が10km以内の海域を開発対象から除外するシナリオも検討した。

最後にウィンドファームの経済性について検討した。ウィンドファームの経済性を評価する指標として設備利用率 CF がしばしば用いられる。設備利用率は、実際の年間発電量を定格で発電し続けた場合に得られる発電量で割ったものであり、次式で定義される。

$$CF = \frac{E_A (\text{kWh/year})}{P_{\text{rate}} (\text{kW}) \times T (\text{h/year})}$$

ここで、 E_A は発電機1基あたりの年間発電量、 P_{rate} は発電機の定格出力、 T は1年間の時間数で、本研究では閏年の2000年を対象としているため8,784 (hour/year)である。陸上では一般に設備利用率が20%を超えることでウィンドファームが経済的に成立する条件であると言われているが、洋上では建設およびメンテナンス費用が陸上に比べて高くなることが予想されるため、経済的に成立するための設備利用率はもう少し大きな値になると考えられる。このため本研究では設備利用率が25%、30%、35%以上となる海域を対象とするシナリオを検討した。

以上3条件の組み合わせで計18通りのシナリオを検討した⁵⁾。各シナリオに対する設置可能な海域の面積、風車の基数、設置可能な海域全てに風車を設置した場合の設備容量、年間賦存量および東京電力の2005年電力販売量に対する賦存量の割合を求め、利用可能海域の例を図8に示す。

まず、着床式基礎のみを利用とした場合、賦存量は沿岸部の利用の可否、すなわち社会的制約条件に大きく影響される。例えば設備利用率を30%以上とした場合に、社会的制約条件を全く考慮しなければ (シナリオB0-30, 図8(a)), 590 km²の海域に1,088基の風車が設置可能である。このとき設備容量は261万kWであり、東京電力の2005年の年間電力販売量の2.76%に相当する7.98 TWh/yearの賦存量が見込まれる。これに対し、漁業権、自然公園、港湾地域を除外した場合 (シナリオB1-30, 図8(b)) には利用可能な海域の面積と設置可能風車基数はそれぞれ292 km²と540基に減少し、賦存量も約半分の3.98 TWh/yearとなる。

一方、浮体式基礎が利用可能であれば、賦存量は劇的に増大する。同じく設備利用率を30%以上とした場合、社会的制約条件を全く考慮しない場合 (シナリオF0-30, 図8(c)) には利用可能な海域の面積は8,977 km²であり、16,573基の風車により3,978万kWの設備容量が導入可能となる。またこの場合の賦存量は133.42 TWh/yearで東京電力の2005年の年間電力販売量の46.02%に相当する。漁業権・自然公園・港湾域を除いた場合 (シナリオF1-30, 図8(d)) には利用可能な海域の面積および設置可能な風車基数はそれぞれ7,906 km²、14,594基となり、賦存量は2005年の東京電力の年間販売量の41.06%に相当する118.55 TWh/yearとなる。着床式基礎のみを利用する場合に比べ、浮体式基礎も採用する場合には社会的制約条件による影響が小さいことが分かる。

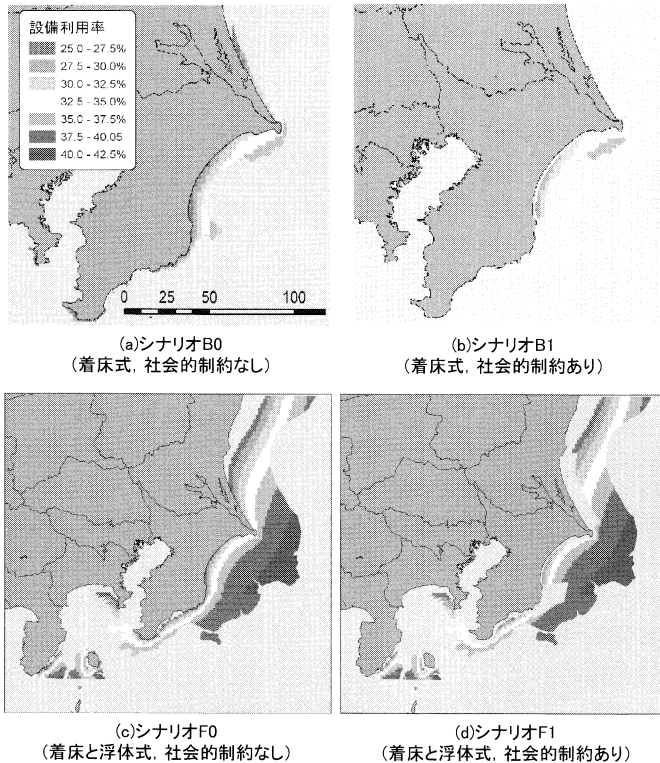


図8 各シナリオに対する洋上風力賦存量の分布

さらに景観を考慮した最も厳しい社会的制約条件を課したシナリオでも賦存量は100.59 TWh/yearに達する。この場合、水深20~200 m、海岸からの距離10~30 kmまでの海域に、東京電力の年間電力販売量の14%に相当する39.32 TWh/yearの賦存量が存在するため、この海域を対象として今後の技術開発および詳細な計画の立案を行うのが妥当であると考えられる。

5. ま と め

本研究ではメソスケール気象モデルにより関東地方沿岸の洋上風況を予測し、地理情報システムにより社会的、経済的制約条件を考慮した洋上風力エネルギー賦存量を算出した。以下のことが明らかにされた。

まず、関東地方沿岸域では季節により主風向および風速の空間分布が大きく変化する。北西の風が卓越する冬季には陸から離れるにつれ、風速が急激に増大する。南南西の風が卓越する初夏には陸からの距離に風速は大きく依存せず、銚子沖、福島沖に風速の極大域が存在する。この結果、風況は海域によ

って大きく異なり、銚子沖においては他の海域に比べ、平均風速が高くなることが分かった。

次に、海岸からの距離50 kmまでの全海域を対象とした場合に、風力賦存量は年間287 TWhとなり、2005年の東京電力の年間電力販売量とほぼ等しいことが分かった。しかし、着床式基礎のみが利用可能である場合、沿岸海域の利用の可否が賦存量に大きく影響する。設備利用率30%以上となる海域を対象とした場合、全ての海域が利用可能なシナリオでは賦存量は7.98 TWh/yearに達するが、漁業権等の社会的制約条件を考慮したシナリオでは賦存量は約半分の3.98 TWh/yearに減少する。一方、浮体式基礎を含めた場合、賦存量は大きく増大し、設備利用率が30%以上となる海域を対象とした場合、景観を考慮した最も厳しい社会的制約条件を課したシナリオでも風力賦存量は100.59 TWh/yearに達することが分かった。

このように、地理情報システムは、さまざまなシナリオにおける風力賦存量を検討できると共に、今後どのような技術開発を行うべきか、またどのような海域に大規模洋上ウインドファームを計画すべきかを検討するための指針を与えることができ、大変有用なツールと言える。

参考文献

- 1) A.D. Garrad, B.M. Adams, H. Matthies, M. Scherweit and T. Siebers: An assessment of the offshore wind potential in the EC, Proc. 15th British Wind Energy Conference, pp. 401-406, 1993.
- 2) R.A. Pielke, W.R. Cotton, R.L. Walko, C.J. Tremback, W.A. Lyons, L.D. Grasso, M.E. Nicholls, M.D. Moran, D.A. Welsey, T.J. Lee and J.H. Copeland: A Comprehensive meteorological modeling system-RAMS, Meteorol. Atmos. Phys., Vol. 49, pp. 69-91, 1992.
- 3) 勝呂幸男: 三菱風車の大型化の歴史と2400 kW 風車の開発, 風力エネルギー, Vol. 30, No. 1, pp. 14-18, 2006.
- 4) 東京電力㈱広報部: 数表で見る東京電力 平成18年度, 2006.
- 5) 山口 敦, 石原 孟: メソスケールモデルと地理情報システムを利用した関東地方沿岸域における洋上風力エネルギー賦存量の評価, 日本風工学会論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 63-75, 2007.