



論文

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

An assessment of offshore wind energy potential using mesoscale model and geographic information system

山口 敦*¹ 石原 孟*²

Atsushi YAMAGUCHI, Takeshi ISHIHARA

SUMMARY

Offshore wind climate along the coast of Kanto area was investigated by a mesoscale model and wind energy potential considering economical and social criteria was estimated by Geographical Information System (GIS). The prediction accuracy of the annual mean wind speed by the mesoscale model was 4.8%. The estimated wind climate shows that offshore Choshi, the annual mean wind speed is significantly higher than other area. Without considering any economical or social criteria, the total potential along the coast of Kanto area is 287TWh/year, which is almost equal to the annual supply of Tokyo Electric Power Company. If only the bottom mounted foundation is used, the potential varies from 0.21TWh/year to 7.98TWh/year depending on the scenario. On the other hand, when floating foundation is taken into consideration, the potential is 100.59TWh/year even for the most conservative scenario.

key words: offshore wind energy potential, mesoscale model, geographical information system

1. はじめに

日本における風力発電設備容量は2007年1月現在113万kWに達している¹⁾。今後、二酸化炭素排出削減のために更なる風力発電の導入が期待されているが、陸上での適地不足が深刻な問題となっている。特に大電力消費地を持つ東京電力のサービス区域内では陸上の風力資源に限りがあることもあり、この問題が深刻である。世界各国で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²⁾。また、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。日本においても洋上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。

大規模風力発電の可能性を調査するためには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。

Hasager et al.⁴⁾は合成開口レーダー(SAR)の観測データから海面付近の風速を予測し、時間的変動が観測値と一致することを示し、洋上ウィンドファーム内の風車の後流の構造を明らかにした。しかし、ハブ高さの風速の絶対値の予測には課題が残されている。

日本の沿岸域において洋上風力賦存量を推定した例として、長井ら⁵⁾は灯台の観測データと線形風況予測モデルWAsPを用い、日本沿岸において海岸からの距離3km以下の海域における洋上風力賦存量を推定した。永井ら⁶⁾は全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の日本全国28地点の沿岸における観測データを用い、沿岸における風力発電有望地点の検討を行った。これらの研究では沿岸の観測データを基に洋上の風況を推定しているため、風況の推定が可能な海域が沿岸域に

*1 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 助教

Research Associate, Institute of Engineering Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo

*2 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 准教授

Associate Professor, Institute of Engineering Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo

(原稿受理年月日: 2006年10月10日, 採用決定: 2007年2月28日)

限られる。しかし、沿岸域においては漁業権や、自然公園等の規制のため、大規模ウィンドファームを建設することは難しい。また、欧州では景観の問題から大規模ウィンドファームは沿岸から 10km 以上離れた海域に建設するケースが多い。このため、大規模洋上ウィンドファームの検討にあたっては海岸から 3km 以上離れた海域における賦存量も評価する必要がある。

藤井⁷⁾は DMSP 衛星による SSM/I 画像データを用い、海面の波から海表面における風速を推定し、日本の排他的経済水域全体の洋上風力賦存量を推定した。本研究は沖合も含めた日本の洋上全体の風力エネルギー賦存量を初めて定量的に評価した価値の高いものであるが、風況の推定精度に課題が残されている。

Garrad et al.⁸⁾は欧州における大規模洋上風力発電の実用化に先立ち、船舶による波高観測と線形風況予測モデル WAsP⁹⁾を組み合わせるにより洋上の風況を推定し、地理情報システムを用い、ヨーロッパ沿岸域において水深 40m 以下かつ沿岸からの距離が 30km 以下の海域における風力エネルギー賦存量を水深別、沿岸からの距離別に推定した。しかしこの手法による風況の予測精度は検証されておらず不明である。また、漁業権が設定されている海域、自然公園等に指定されている海域あるいは港湾等既に他用途に利用されている海域においてはウィンドファームの建設に対して制限が加えられるため、これらの社会的制約条件を考慮する必要もある。

一方、陸上の風力発電賦存量に関してはメソスケール気象モデルを用いることにより風況マップを作成することが行われている^{10),11)}。しかし、これらの研究では社会的・経済的制約条件を考慮して賦存量を評価することは行っていない。

そこで本研究ではまず、メソスケール気象モデルを用いた洋上風況の推定手法を提案し、観測データを用いて検証を行うとともに関東地方沿岸洋上の風況特性を明らかにする。そして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、洋上風力発電賦存量を定量的に評価する。

2. メソスケール気象モデルによる局地風況の予測と検証

局地風況は総観スケールの気圧配置を駆動力とする一般風が地表面粗度、地形、成層、熱による局所循環の影響を受けて形成される。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、これらの現象を再現することができる。本研究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 RAMS¹²⁾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風況特性を明らかにした。

2. 1 メソスケール気象モデル RAMS の概要

地域気象モデル RAMS は、風速、仮温位、エクスター関数、混合比を従属変数とする質量保存則、運動量保存則、熱力学方程式、水分の保存則を数値的に解き、初期条件、境界条件の下で従属変数の時間変化を求める。 x, y, z 方向の 3 つの速度成分に関する運動方程式は、それぞれ

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + f_v + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} - f_u + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{g\theta_v'}{\theta_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

と表される。式中の記号の定義を Table 2 に示す。また、質量保存則は

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = -\frac{R\pi_0}{c_v \rho_0 \theta_0} \left(\frac{\partial \rho_0 \theta_0 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 w}{\partial z} \right) \quad (4)$$

と表される。RAMS では熱力学方程式の変数として、Tripoli and Cotton¹³⁾によって提案された水の相変化に関わらず保存される物理量である液相・固相の相当温度(ice-liquid potential temperature)を用い、熱力学方程式は

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{rad} \quad (5)$$

と表される。また、水分の保存則は

Table 1 式(1)~(6)に用いられた記号の定義
The notation of the symbols used in equations (1) to (6)

記号	定義
u	風速の東西成分
v	風速の南北成分
w	風速の鉛直成分
f	コリオリパラメータ
π'	エクスナー関数の摂動項
K_m	渦粘性係数
K_h	渦拡散係数
θ_l	液相・固相の当温位
r_n	凝集体、霰、雹、の混合比
ρ	空気密度
rad	放射パラメタリゼーションに起因するソース項
g	重力加速度
r_t	全混合比
r_v	水蒸気混合比
π	エクスナー関数
θ_s	仮温位

Table 2 RAMS のモデル設定
(The models used in RAMS)

基本方程式	3次元ブシネスク近似非静水圧方程式
水平座標(射影法)	ポーラスステレオグラフ
鉛直座標	σ_s 座標系
水蒸気・降水過程	レベル2(雲まで考慮)
乱流モデル	水平: Smagorinsky Deformation 鉛直: Mellor-Yamada レベル2.5 ¹⁴⁾
大気放射モデル	Chen and Cotton ¹⁷⁾
地表面過程	Leaf-2 モデル ¹⁸⁾

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} = -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial z} \right) \quad (6)$$

と表される。

この他に Table 2 に示すようにサブモデルとして、大気放射モデル、積雲モデル、地表面過程モデル、乱流モデルが組み込まれている。乱流モデルとしては、乱流エネルギーおよび乱流長さスケールは移流方程式を解き、応力方程式に境界層近似を適用する Mellor-Yamada のレベル2.5¹⁴⁾を用いた。また、計算領域として解像度と範囲の異なる2つ以上の格子をネスティングさせ、双方向ネスティング¹⁵⁾により、互いに計算結果を反映させながら、解析を行うことができる。

地表面および海面の境界条件としては Louis¹⁶⁾の手法に基づき各方程式のフラックスを計算する。また側面および上面の境界条件は客観解析値あるいは予報値などのグリッドデータにナッジングすることができる。

2. 2 解析条件

本節では、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た解析を行った。外側のグリッド1では解像度10kmの格子により関東平野と周辺の山岳地域を含む領域を対象とし、大地形が洋上の局所風況に与える影響を考慮した。また、内側のグリッド2は本研究で対象とする関東地方沿岸海域をカバーするよう Fig. 1 に示す銚子沖、相模湾沖、いわき沖の3領域を設定した。また、地形のない洋上が本研究の対象であるため、最小水平分解能は2kmとした。各グリッドの計算領域と格子間隔を Table 3 に示す。銚子沖の水平計算格子点数は東西78×南北86、相模湾沖は東西106×南北54、いわき沖は東西56×南北84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グリッド2では

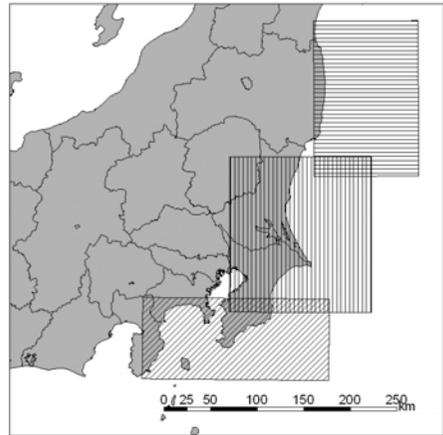


Fig. 1 メソスケール気象モデルの解析領域
(The computational domain of the mesoscale model)

Table 3 計算領域と格子間隔の設定
(The computational domain and the grid interval)

計算領域名	いわき	銚子	相模	
グリッド1	解析領域中心	37° 00' N 140° 30' E	36° 00' N 139° 30' E	35° 40' N 139° 30' E
	水平格子間隔	10km×10km	10km×10km	10km×10km
	水平格子数	55×84	77×53	54×50
	鉛直格子間隔	40m ~ 1000m	40m ~ 1000m	40m ~ 1000m
	鉛直格子数	30	30	30
グリッド2	解析領域中心	37° 20' N 141° 30' E	36° 00' N 140° 45' E	35° 00' N 140° 00' E
	水平格子間隔	2km×2km	2km×2km	2km×2km
	水平格子数	56×84	76×84	100×44
	鉛直格子間隔	20m ~ 1000m	20m ~ 1000m	20m ~ 1000m
	鉛直格子数	34	34	34

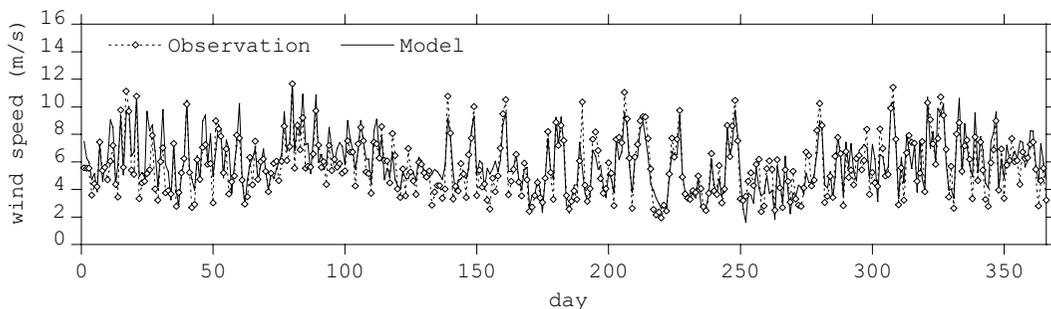


Fig. 2 銚子気象台における2000年1年間の日平均風速
(The day averaged wind speed for the year 2000 at the Choshi Meteorological Station)

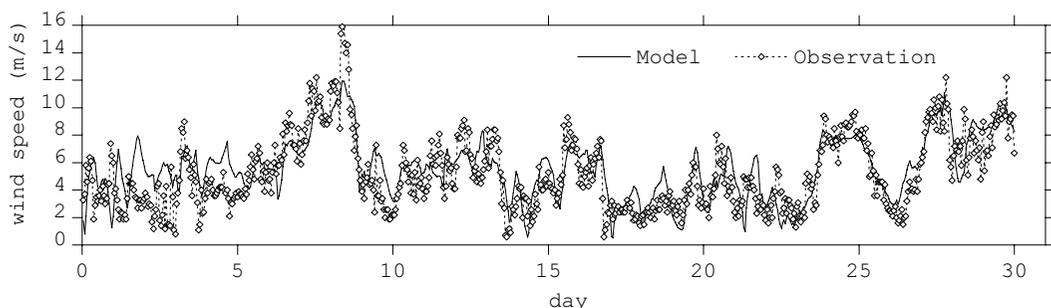


Fig. 3 銚子気象台における2000年6月の毎正時10平均風速
(10minutes averaged wind speed for June, 2000 at the Choshi Meteorological Station)

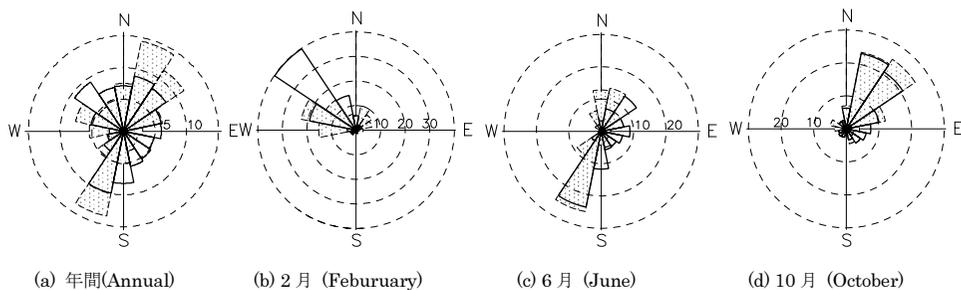


Fig. 4 銚子気象台における2000年の風配図
(The wind rose at the Choshi Meteorological Station for the year 2000)

20mとし、上空では最大1000mの格子間隔を用いた。地上高度200m以下における鉛直方向の変数の定義点は低いところから地上高度9m, 29m, 52m, 75m, 101m, 130m, 160m, 193mとし、地上高度、計算領域の高さは25kmとした。

境界条件・初期条件として、ヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)の客観解析値(Operational atmospheric model daily archive)を用いた。また計算対象期間は、異常年検定において異常がない¹⁹⁾とされている2000年1年とし、日本標準時で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。

2. 3 銚子気象台における風況特性

対象とした領域内の気象官署の中で最も海に近い銚子気象台において観測された風速、風向を用い、本手法を検証するとともに、銚子における風況特性を明らかにする。銚子気象台の周辺は比較的平坦で、地面からの高さ28.2mの観測タワーにおいて風速と風向が観測されている。Fig. 2に銚子気象台での2000年1年間の日平均風速を、Fig. 3に2000年6月の毎正時10分

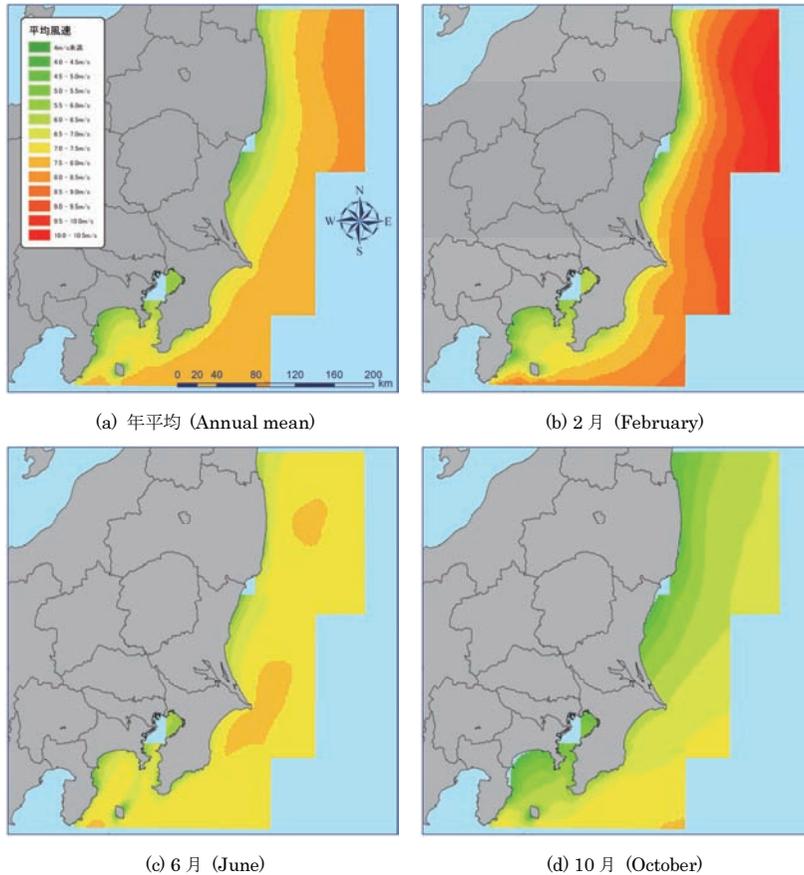


Fig. 5 関東沿岸における海面高度 70m における平均風速
(Mean wind speed along the coast of Kanto Area at 70m above sea level)

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、鎖線が観測データを示す。モデルによる計算は観測された風速をよく再現しており、年平均風速の予測誤差は、4.8%と非常に高い精度を示している。これは、気象台周辺が平坦であり局所地形の影響を受けておらず、2km の水平解像度が十分であるためと考えられる。

Fig. 4(a)には銚子気象台における年間の風配図を示す。実線がモデルによる解析結果、影付きの鎖線が観測値を示す。北東、南西の卓越風向がよく再現されており、風速だけでなく風向の再現性も高いことがわかる。銚子において、主風向は季節によって大きく変化する。冬季には季節風の影響を強く受け、北西風から西風が多く観測される(Fig. 4(b))。春の訪れとともに主風向は南へと変化し、Fig. 4(c)に示すように 6 月に最も多く観測される風は南南西の風となる。夏の終わりには北よりの風が観測されるようになり、10 月の主風向は北東

から北北東となる。メソスケールモデルによる計算もこの傾向を捉えており、風配の季節変化も的確に予測できることがわかる。

風力エネルギー賦存量を評価する指標として、(7)式で表される風力エネルギー密度 PD がしばしば用いられる。

$$PD = \frac{1}{2} \overline{\rho u^3} \quad (7)$$

ここで u は風速、 ρ は空気密度である。本研究では空気密度は一定であると仮定し風力エネルギー密度を算出した。銚子気象台における風力エネルギー密度は観測値から求めた場合と、メソスケール気象モデル RAMS から求めた場合にそれぞれ 212W/m^2 、 206W/m^2 であり、風力エネルギー密度の予測誤差は 2.8%であった。このことからメソスケール気象モデル RAMS による風力エネルギー賦存量予測が有用であることが示された。

なお、本手法は洋上においても、海岸からの距離が

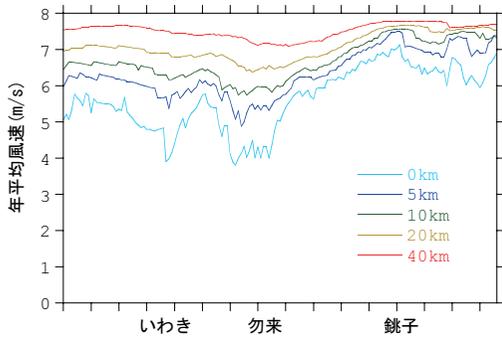


Fig. 6 海面高度 70m における沿岸からの距離別の年平均風速
(The annual mean wind speed for different distance from the coastline at 70m above sea level)

37km の沖合、海上高度 94m の地点における観測データにより検証され、年平均風速の予測誤差が 4.1%であることが示されている²⁰⁾。

2. 4 関東沿岸域における風況特性の空間分布

風況は空間的に一様ではなく、総観スケールの現象の局所性、局所地形・地表面粗度等により空間的に大きく変化する。Fig. 5(a)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。Fig. 6には海岸線からの距離が 0km, 5km, 10km, 20km, 30km, 40km 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が、海岸からの距離が 40km 離れて

いる場合には大きな風速の違いが見られなくなる。これに対し、銚子沖以南では平均風速の大幅な減少は見られない。最も風速が高い銚子沖に対し、最も風速の低い銚子北 70km の海域では年平均風速は 25%程度低くなっている。

このように海域によって大きく風況が異なる原因をもう少し詳しく調べるために、前節で述べた代表的な 3つの季節について平均風速の分布を求めた。Fig. 5(b)~(d)にはそれぞれ北西風が支配的な 2月、南南西風が支配的な 6月、北北東風が支配的な 10月の結果を示す。これら季節の違い、すなわち風向の違いによって関東地方沿岸域の風況の空間分布は大きく異なる。

北西の季節風が卓越する 2月(Fig. 5(b))では沿岸付近での平均風速はさほど高くないが、沖に向うにつれ、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。また、福島県沖では上流の北西方向が越後山脈と奥羽山脈との間の谷に相当し、日本海から太平洋までの風が吹き抜けやすいためと考えられる。一方、茨城以南の関東地方沿岸域においては北西方向に 2000m 級の越後山脈がそびえているため、風速の減速が大きく、福島県沖と比較して風速の回復が遅いと考えられる。

主風向が南南西になる 6月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と考えられる。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、千葉

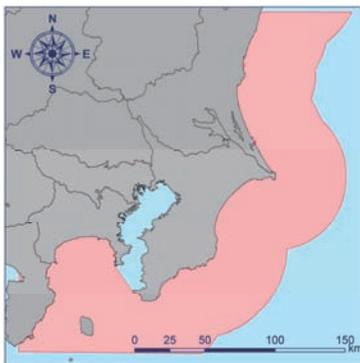


Fig. 7 本研究で賦存量を算出した海域
(The domain where the wind energy potential is estimated)

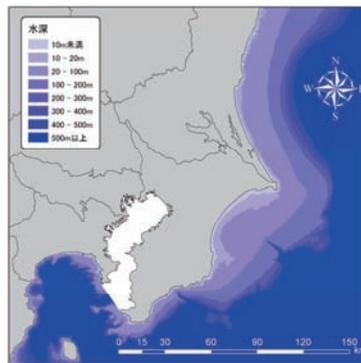


Fig. 8 対象領域付近の水深
(The water depth around the domain)

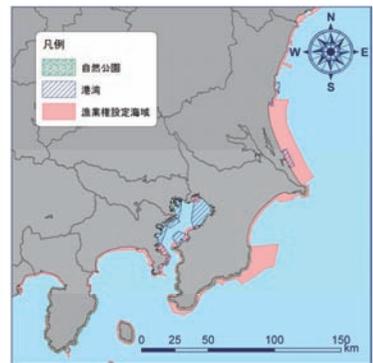


Fig. 9 対象領域付近の規制エリア
(The prohibited area around the domain)

Table 5 賦存量の計算に用いた風車の諸元および風車配置
(The specification of the wind turbine used for the estimation of the wind energy potential)

項目	諸元
ロータ直径	92m
ハブ高	70m
定格出力	2.4MW
制御方法	ピッチ制御
カットイン風速	3m/s
カットアウト風速	25m/s
風車設置間隔	8D×8D

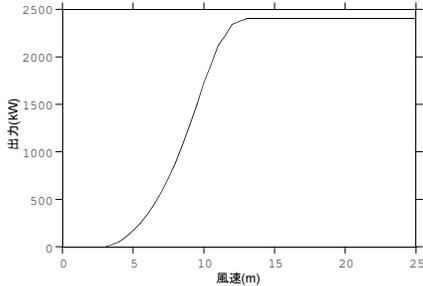


Fig. 10 賦存量の計算に用いた 2.4MW 風車のパワーカーブ
(The power curve of the 2.4MW wind turbine used for the estimation of wind energy potential)

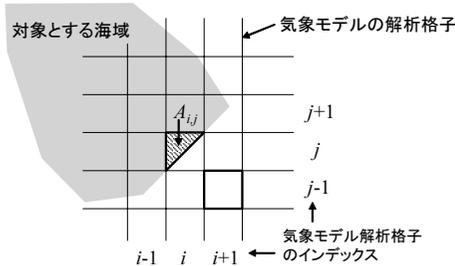


Fig. 11 地理データとメソスケールモデルの解析結果の重ね合わせ
(Overlying of the geographical data and the results of the mesoscale model)

県北東部および茨城県南東部の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風が洋上に回り込み、洋上で風速が増大したものと考えられる。

10月には北北西風が主風向となる。この海域では北北西風時には陸地とほぼ平行に風が吹き、沿岸部と沖の間の風速差は小さくなる。

3. 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

風力エネルギー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

Table 4 本研究で用いた地理データ一覧
(The list of the geographical data used in this study)

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

東地方沿岸域の陸地から 50km までの範囲(Fig. 7)を対象とし、水深別、海岸からの距離別に風力エネルギー賦存量を求めた。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ィンドファームの建設が現実的でな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。

3. 1 使用した地理データ

賦存量の算出には様々な地理データが必要となる。まず、陸地から 50km 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、水深データ及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。Table 4 に本研究で用いた地理データの一覧と入手先を示す。Fig. 8 に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。Fig. 9 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。

3. 2 風車および風車配置

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 2MW 級の風車を使用されている。そこで、本研究では定格出力が 2.4MW の三菱重工業の MWT-92/2.4²¹⁾を仮定し、賦存量を算出した。MWT-92/2.4 の仕様及びパワーカーブ $P(V)$ を Table 5 および Fig. 10 に示す。

賦存量は風車間隔にも依存する。前章で示したように、関東地方沿岸域における主風向は北西、北北東、

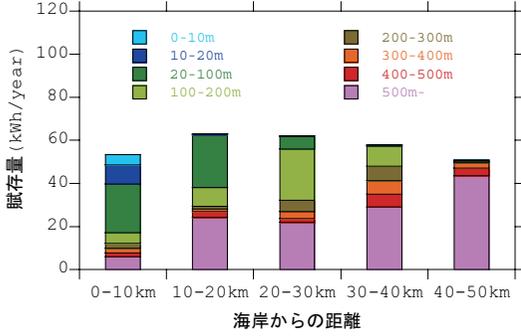


Fig. 12 水深・海岸からの距離別の賦存量
(Wind energy potential considering the water depth and the distance from the coastline)

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エイク(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エイクは考慮していない。

3. 3 賦存量の算出方法

本研究では前節で述べた地理データ及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 70m 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 52m および 75m における結果から海面高度 70m に線形内挿した値を用いた。

Fig. 11 にメソスケール気象モデルの結果と地理データの重ね合わせの概念を示す。メソスケール気象モデルの解析結果は東西南北各 2km の正方形の領域内における 10 分平均値の空間平均値である。各領域は南北方向と東西方向のインデックスによって番号が付けられている。Fig. 11 に示すように東西方向のインデックスを記号 i 、南北方向のインデックスを記号 j によって表すこととする。賦存量の算出にあたってはこの 2km 四方の領域内で 10 分平均風速が一樣であると仮定した。インデックス i, j を持つ領域内に設置された風車 1 基が 1 年間に発電する電力量 $AEP_{i,j}$ は

$$AEP_{i,j} = \sum_{t=1}^T P(V_n^{i,j,t}) \quad (8)$$

と表される。ここで、 $P(V)$ は Fig. 10 に示す風車のパ

Table 6 水深・海岸からの距離別の賦存量(TWh/year)
(Wind energy potential considering the water depth and the distance from the coastline)

		海岸からの距離(km)					計
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	
水深(m)	0-10	4.77	0.00	0.05	0.05	0.00	4.87
	10-20	9.00	0.44	0.05	0.03	0.00	9.51
	20-100	22.49	24.55	5.92	0.42	0.00	53.38
	100-200	4.96	8.56	23.73	9.29	0.26	46.81
	200-300	2.23	1.24	5.28	6.60	0.82	16.18
	300-400	2.16	1.27	3.30	6.38	2.51	15.62
	400-500	1.75	2.61	1.69	5.89	3.58	15.53
	500-	5.95	24.26	21.89	29.05	43.50	124.65
計		53.31	62.93	61.92	57.70	50.68	286.54

ワーカンプ、 T は 1 年間に含まれる毎正時のデータ数であり、本研究では閏年の 2000 年を対象としたため、 $T=8784$ となる。また、 $V_n^{i,j,t}$ はメソスケール気象モデルの結果から密度の影響を考慮して得られる毎正時の正規化風速であり、添え字 t は時刻の、 i および j は解析領域のインデックスをそれぞれ示す。毎正時の正規化風速 $V_n^{i,j,t}$ は IEC-61400-12²²⁾ に従い、(9)式によって求める。

$$V_n^{i,j,t} = V_{10min}^{i,j,t} \left(\frac{\rho_{10min}^{i,j,t}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (9)$$

ここで $V_{10min}^{i,j,t}$ 、 $\rho_{10min}^{i,j,t}$ はそれぞれメソスケール気象モデルにより求めた毎正時 10 分平均風速、空気密度であり、 ρ_0 は気温 288.15K、気圧 101.325kPa の標準大気の空気密度である。また、空気密度 $\rho_{10min}^{i,j,t}$ は 10 分平均気圧 P_{10min} 、気温 T_{10min} を用いて(10)式により求めた。

$$\rho_{10min} = \frac{P_{10min}}{R \cdot T_{10min}} \quad (10)$$

ただし、 R は気体定数(287.05J/(kg×K))である。

インデックス ij を持つ領域に含まれ、かつ賦存量を求める対象とする海域に含まれる海域の面積を $A_{i,j}$ とする(Fig. 11)と、この海域内に設置することのできる風車の基数 $N_{i,j}$ は

$$N_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{8D \times 8D} \quad (11)$$

となり、対象海域全体における賦存量 AEP_{total} は

$$AEP_{total} = \sum_{i,j} (N_{i,j} \times AEP_{i,j}) \quad (12)$$

となる。本研究では各種の地理データを GIS により重ね合わせるにより面積 $A_{i,j}$ を計算し、メソスケ

ル気象モデルの結果と合わせるにより(12)式により各対象海域別の賦存量を推定した。

3. 4 水深・海岸線からの距離別の賦存量

以上の方法を用いて、関東地方沿岸 50km 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。Fig. 12 と Table 6 にその結果を示す。本研究で対象とした海域では合計で 286.54TWh/year の賦存量があることがわかる。これは東京電力の 2005 年の年間電力販売量 288.7TWh/year²³⁾にほぼ等しい。ただし、Fig. 12 からわかるように賦存量の大部分は水深 500m 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 10m 以下の海域にも年間 4.87TWh の賦存量があるが、そのほとんどは海岸からの距離が 10km 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次節で詳細に検討する。

3. 5 社会的・経済的制約条件を考慮した賦存量

前節で算出した風力エネルギー賦存量のうち、いくつかのシナリオについて社会的・経済的条件を考慮した賦存量を算定した。

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底型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、本研究では着底型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、浮体式基礎を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 Fig. 9 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

Table 7 社会的・経済的制約条件を考慮したシナリオ別賦存量
(Wind energy potential for each scenario considering the social and economical criteria)

シナリオ	基礎形式	社会的制約	設備利用率	利用可能面積 (km ²)	風車基数 (基)	設備容量 (万 kW)	賦存量 (TWh/year)	賦存量比率 ^{*3} (%)
B0-25	着底	考慮しない	25%以上	901	1,663	399	11.51	3.99
B0-30	着底	考慮しない	30%以上	590	1,088	261	7.98	2.76
B0-35	着底	考慮しない	35%以上	125	232	56	1.84	0.64
B1-25	着底	※1	25%以上	354	654	157	4.71	1.63
B1-30	着底	※1	30%以上	292	540	130	3.98	1.38
B1-35	着底	※1	35%以上	79	146	35	1.16	0.40
B2-25	着底	※2	25%以上	15	27	6	0.21	0.07
B2-30	着底	※2	30%以上	15	27	6	0.21	0.07
B2-35	着底	※2	35%以上	15	27	6	0.21	0.07
F0-25	着底/浮体	考慮しない	25%以上	10,481	19,345	4,643	150.42	52.10
F0-30	着底/浮体	考慮しない	30%以上	8,977	16,573	3,978	133.42	46.21
F0-35	着底/浮体	考慮しない	35%以上	5,983	11,044	2,651	93.53	32.40
F1-25	着底/浮体	※1	25%以上	8,837	16,314	3,915	129.14	44.73
F1-30	着底/浮体	※1	30%以上	7,906	14,594	3,503	118.55	41.06
F1-35	着底/浮体	※1	35%以上	5,598	10,334	2,480	87.76	30.40
F2-25	着底/浮体	※2	25%以上	7,234	13,355	3,205	107.56	37.26
F2-30	着底/浮体	※2	30%以上	6,622	12,225	2,934	100.59	34.84
F2-35	着底/浮体	※2	35%以上	5,106	9,427	2,262	80.40	27.85

※1: 漁業権設定海域・自然公園・港湾海域を除外

※2: 業権設定海域・自然公園・港湾海域・海岸から 10km 未満の海域を除外

※3: 賦存量の東京電力の 2005 年年間販売量(288.7TWh/year)に対する比率

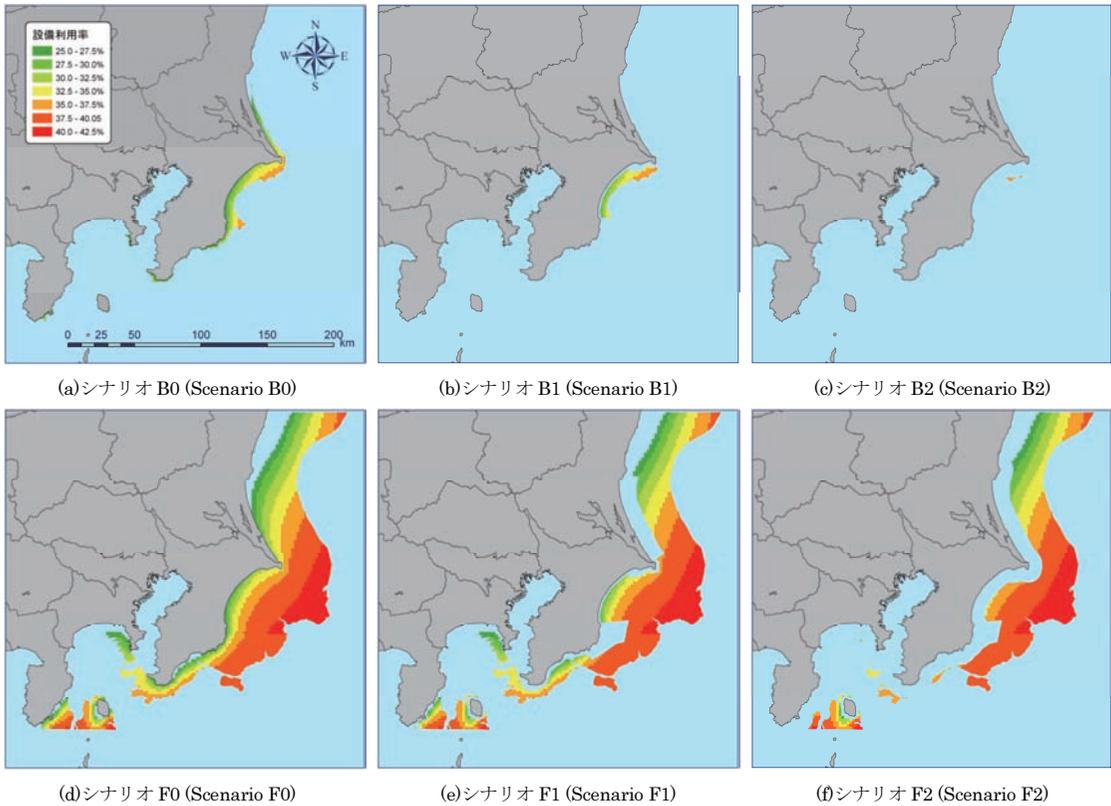


Fig. 13 各シナリオに対する設備利用率別の洋上風力賦存量の分布
(Spatial distribution of wind energy potential for each scenario)

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、(13)式で定義される。

$$CF = \frac{E_d(\text{kWh/year})}{P_{\text{rate}}(\text{kW}) \times T(\text{h/year})} \quad (13)$$

ここで、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8784(hour/year)である。陸上では一般に設備利用率が20%を越えることが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。Table 7に検討したシナリオをまとめ、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Table 7に、利用可能海域をFig. 13に示す。

まず、着底型基礎のみを利用するとした場合、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, Fig. 13(a))、590km²の海域に1088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7.98TWh/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, Fig. 13(b))には利用可能な海域の面積は292km²に減少し、賦存量は3.98TWh/yearとなる。さらに景観を考慮し沿岸10kmまでの全海域においてウィンドファームの建設を制限する(シナリオB2-30, Fig. 13(c))と、利用可能な海域の面積は15km²となり、建設可能な風車基数は27基となる。このときの賦存量は0.21TWh/yearであり、東京電力の2005年の年間電力

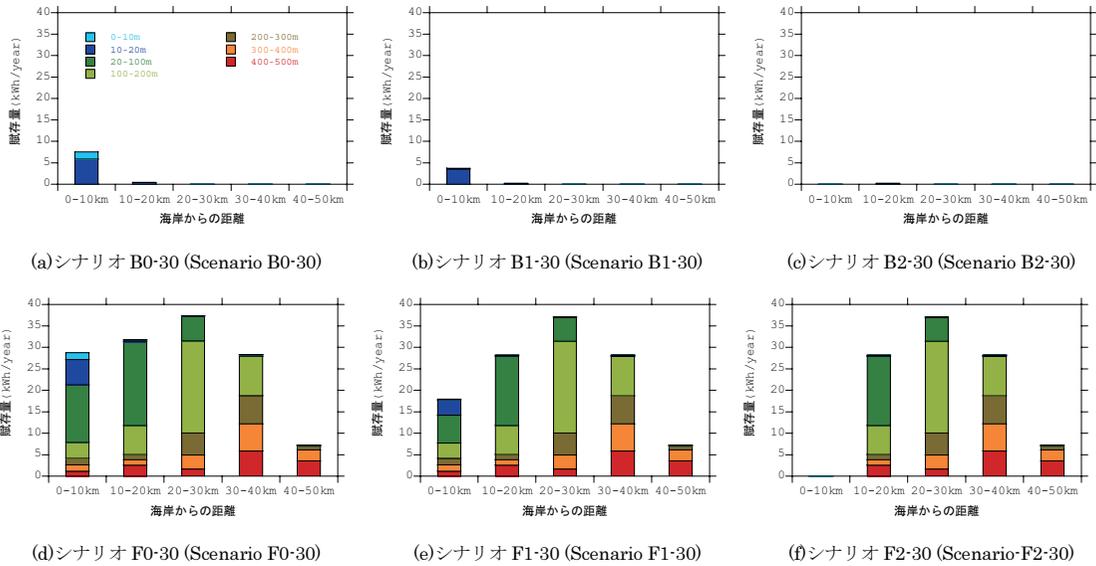


Fig. 14 設備利用率30%以上とした各シナリオに対する水深、海岸からの距離別賦存量
(The wind energy potential for each scenario with the minimum capability factor of 30 percent considering the water depth and the distance from the coastline)

販売量のわずか 0.07%にすぎない。これは着底型基礎が利用可能な水深 20m 以下の海域が、ほとんど沿岸 10km 以内に位置しているためである。Fig. 14(a), (b), (c)には設備利用率 30%以上となる各シナリオにおける海岸からの距離、水深別の賦存量を示すが、海岸からの距離が 10km 以上で水深が 20m 以下の海域はほとんどないことがわかる。

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、最も厳しい社会的制約条件を課した場合(シナリオ F2-30, Fig. 13(f))でも 6,622km²の海域に 12,225 基の風車が建設可能であり、その場合の設備容量は 2,934 万 kW に達する。また、賦存量は 100.59TWh/year であり、2005 年の東京電力の年間電力販売量の 35%に相当する。Fig. 13(f)から着底式基礎を用いた場合に比べ、利用可能な海域が沖合いにまで広く分布していることがわかる。社会的制約条件を全く考慮しない場合(シナリオ F0-30, Fig. 13(d))には利用可能な海域の面積は 8,977km²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 133.42TWh/year で東京電力の 2005 年の年間電力販売量の 46%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, Fig. 13(e))には利用可能海域の面積および設置可能な風車基数はそれぞれ

7,906km²、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%に相当する 118.55TWh/year となる。

浮体式基礎を利用し、設備利用率が 30%以上となる各シナリオについて水深・海岸からの距離別の賦存量を示したのが Fig. 14(d), (e), (f)である。最も厳しい社会的制約条件を課したシナリオ F2-30 では、水深 20m~200m、海岸からの距離 10km~30km の間に東京電力の年間電力販売量の 14%に相当する年間 39.32TWh の賦存量が存在しているため、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を立案するのが妥当であると考えられる。

4. 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風力エネルギー賦存量を算出し、以下の結論を得た。

1. メソスケール気象モデルは風況を精度よく予測することが可能である。銚子気象台における観測データを用いて検証した結果、年平均風速の予測誤差は 4.8%、風力エネルギー密度の予測誤差は 2.8%であった。
2. 関東地方沿岸域では季節により主風向及び風速

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。北北西の風が卓越する秋季には全体的に平均風速が低い。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。

3. 海岸からの距離 50km までの全海域を対象とした場合に、風力エネルギー賦存量は年間 287TWh となり、2005 年の東京電力の年間電力販売量とほぼ等しい。
4. 着底型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 7.98TWh/year に達するが、漁業権・景観等の社会的制約条件を考慮した最も厳しいシナリオでは賦存量は 0.21TWh/year に減少する。
5. 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、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 100.59TWh/year に達する。また、この場合、水深 20~200m、海岸からの距離 10~30km 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 39.32TWh/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。

謝辞: 本研究は平成 16~17 年度において文部科学省科研費補助金(課題番号 16360223, 研究代表者石原孟)を受けた。また、地域気象モデル RAMS の利用に際しては、九州大学応用力学研究所の鶴野伊津志教授に指導を頂き、同モデルを用いた解析に際しては東京大学大学院工学系研究科修士課程(研究当時)の佐々木康平氏に協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Operating wind power capacity, *Wind Power Monthly*, Vol. 23, No. 1, p. 66, 2007.
- 2) G. Gaudiosi: Offshore wind energy in the world context, *Proc. World Renewable Energy Conference*, pp. 899-904, 1996.

- 3) European Wind Energy Association and Greenpeace: *Wind force 12*, 2004.
- 4) C. B. Hasager, R. J. Barthelmie, M. B. Christiansen, M. Nielsen and S. C. Pryor: Quantifying offshore wind resources from satellite wind maps: study area the North Sea, *Scientific Proceedings of European Wind Energy Conference*, pp. 29-32, 2004.
- 5) 長井浩, 牛山泉: 日本沿岸のオフショア風力発電の可能性, 2000年太陽/風力エネルギー講演論文集, pp. 219-221, 2000.
- 6) 永井紀彦, 勝海務, 岡島伸行, 隅田耕二, 久高将信: NOWPHASデータより推定した洋上沿岸域での風力発電の可能性, 海洋開発論文集, Vol. 17, pp. 19-24, 2001.
- 7) 藤井朋樹: An estimation of the potential of offshore wind power in Japan by satellite data, 1999年太陽/風力エネルギー講演論文集, pp. 447-450, 1999.
- 8) 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.
- 9) N. G. Mortensen, I. Troen, L. Landberg and E. L. Petersen: Wind atlas analysis and application program (WAsP), Risø National Laboratory, Denmark, 1993.
- 10) Hayashi, H., Uematsu, T., Suzuki, Y., Suzuki, S., Sasaki, R., Murakami, S., Nagano, Y., Kato, S., Mochida, A., Nakanishi, M., Kato, K., Saito, T., Kataoka, H., Otsuka, K., Nakao, T., Usui, K. and Kato, H.: A new wind energy prediction model based on the CFD theory, *Proc. World Wind Energy Conference (CD-ROM)*, 2002.
- 11) 谷川亮一, 早崎宣之, 高木哲郎, 福田寿, 志垣大介, 露木和彦: 「風力発電機位置決定方法及び風力発電量予測手法」に基づく風況評価, 第24回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 119-122, 2002.
- 12) R. A. Pielke, W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Trempack, 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.
- 13) J. Tripoli and W. R. Cotton.: The use of ice-liquid water potential temperature as a thermodynamic variable in deep atmospheric models, *Monthly Weather*

- Review*, Vol. 109, pp. 1094 - 1102, 1981.
- 14) Mellor, G. L. and Yamada, T.: A Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 31, pp. 1791-1806, 1974.
 - 15) Clark, T. L. and Farley, R.D.: Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic interactive grid nesting: A possible mechanism for gustiness, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 41, pp. 329-350, 1984.
 - 16) J. F. Louis: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary Layer Meteorol.*, Vol. 17, pp. 187-202, 1979.
 - 17) C. Chen and W. R. Cotton: The sensitivity of a simulated extratropical mesoscale convective system to long wave radiation and ice-phase microphysics., *J. Atmos. Sci.*, Vol. 45, pp. 3897-3910, 1987.
 - 18) T. J. Lee: The impact of vegetation on the atmospheric boundary layer and convective storms, *Atmospheric Paper* No. 509, Dept. Atmos. Sci., Colorado State Univ. Fort Collins, CO., 1992.
 - 19) 林宏典, 佐々木律子, 鈴木靖: 局所風況予測システムプロトタイプの精度, 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.
 - 20) H. Sukegawa, T. Ishihara, A. Yamaguchi and Y. Fukumoto: An assessment of offshore wind energy potential using mesoscale model, *Proc. European Wind Energy Conference (CD-ROM)*, Athenes, 2006.
 - 21) 勝呂幸男: 三菱風車の大型化の歴史と2400kW風車の開発, *風力エネルギー*, Vol. 30, No. 1, pp. 14-18, 2006.
 - 22) IEC 61400-12, Wind turbine generator systems - Part 12: Wind turbine power performance testing, 1998.
 - 23) 東京電力株式会社広報部: 数表で見る東京電力平成18年度, 2006.

