

伊勢湾における海況特性を考慮した洋上風力発電 ポテンシャルの検討

大澤輝夫*・小林智尚**・安田孝志***

本研究では、風況・海況シミュレーションにより伊勢湾における洋上風力発電の実現可能性について検討を行った。風況の計算には気象モデル MM5 を使用し、算出された風況をもとに 2 MW 風車を想定した発電量の推定を行った。また海況の計算には海洋モデル POM 及び波浪モデル SWAN を使用し、流速及び波高について検討した。高度 80 m における伊勢湾の年平均風速は 5~7 m/s であり、20 m 以浅の海域での年間発電量は 7,308~24,359 GWh であった。これは原発 1~4 基分のポテンシャルに相当する。伊勢湾内では水深、風況の面から三河湾渥美半島沿岸の条件が最も良く、そこでの海況は欧州の既存の洋上風力発電サイトと比較しても非常に静穏であることが示された。

1. はじめに

今後の沿岸海域利用の大きな可能性のひとつとして洋上風力発電がある。現在欧州では北海、バルト海を中心に 15ヶ所程の海域で洋上風力発電が行われている。今後数十年を見ても洋上風力発電施設の建設計画は目白押しであり、ドイツ政府は 2025 年までに 25,000 MW の洋上風力発電を目標としている（欧州風力エネルギー協会・グリーンピース, 2003）。今後見込まれる洋上風車の大型化・高性能化によるコストダウン及び環境調和社会実現のための機運の向上が、我が国においても近い将来洋上風力発電の追い風となることは想像に難くない。特に周りを海に囲まれた我が国では、着底型風車のみならず深海域にも設置可能な浮体型風車をも含めた洋上風力発電に対する期待が高まっており、その実現のために具体的な取り組みが各方面で始まっている。

本研究は、その具体的な取り組みのひとつとして、大澤ら（2003）により中部日本沿岸の中でも特に風況が良いことが示された伊勢湾（三河湾を含む）において、洋上風力発電の実現可能性を検討したものである。風況・発電量シミュレーションにより伊勢湾の洋上風力発電ポテンシャルを推定すると同時に、海況シミュレーションにより洋上風力発電施設の重要な立地条件となる流速や波高等の海況特性についても検討を行った。

2. 風況シミュレーション

（1）海上の風況推定手法

陸上と異なり、風力発電量の推定のために風況観測を任意の海洋上で行うことは現実的に不可能である。それ故、これまで海上の風況推定には様々な手法が採られてきた。それらを大きく分ければ、1) 現地観測値及び気象庁 GPV に基づくもの、2) 数値シミュレーションによる

もの、3) リモートセンシングによるもの、4) それらを組み合わせたもの、に大別できる。現地観測値を用いた例としては、NOWPHAS（全国港湾海洋波浪情報網）の観測値を用いて沿岸域の風況特性について述べた永井（2002）や陸上風観測値を気象庁 GPV と組み合わせて日本沿岸域の風況を包括的に論じた NEDO（1999）等がある。数値シミュレーションに基づく例としては、風況解析プログラム WASp により日本全国の沿岸域での洋上風力発電の可能性について検討した長井ら（1998）、最近開発された局所的風況予測モデル LAWEPS を海上風推定に応用した鈴木ら（2003）、気象庁 GPV とメソ気象モデル計算値を基に日本近海から伊勢湾までの風況を示した大澤ら（2003）等がある。また近年リモートセンシングの発達により衛星搭載型マイクロ波放射計を用いた風況推定も行われるようになっており、日本近海では Fujii（1999）の例がある。

本研究の対象とする伊勢湾は解像度の低いリモートセンシングが不得手とする沿岸域にあり、また先行研究（Ohsawa ら, 2002）からは、数値シミュレーションの方が陸上観測値の内挿よりも海上風の推定精度が良いことがわかっている。それ故、本研究では先行研究と同じくメソ気象モデル MM5 を用いた数値シミュレーションにより、伊勢湾上の風力ポテンシャルの推定を行った。

（2）MM5 による計算

風況シミュレーションには、ペンシルベニア州立大学と米国大気研究センターで共同開発されたメソ気象モデル MM5（Dudhia, 1993; Grell ら, 1995）を用いた。水平解像度は 1 km、鉛直層数は地上から 100 hPa まで 20 層である。初期値と境界値には深尾ら（2003）で計算された 3 km 格子の MM5 計算値を用いた。計算条件の詳細を表-1 に示す。この計算条件の下で 2001 年 4 月から 2002 年 3 月までの 1 年間の風況シミュレーションを行った。

図-1 は高度 80 m における年平均風速を示している。外洋で 7 m/s を超える風速は、伊勢湾南部及び三河湾で 6 m/s 台となり、伊勢湾北部・西部で 5 m/s 台となってい

* 正会員 博(理) 神戸大学助教授 海事科学部海洋情報科学講座

** 正会員 博(工) 岐阜大学助教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

*** 正会員 工 博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

Annual Mean Wind Speed

MODEL : MM5 REZ : 1 km
HEIGHT : 80 m UNIT : m/s
PERIOD : APR 2001 - MAR 2002

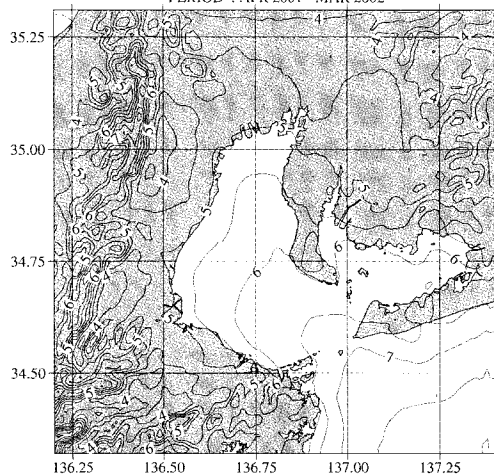


図-1 高度 80 m の年平均風速分布

表-1 計算条件

計算期間	2001 年 4 月 1 日～2002 年 3 月 31 日
初期値・境界値	MM5 3 km 格子計算値よりネストダウン
海面温度	Reynolds SST (1 週間間隔 1°格子)
鉛直格子	20 層 (地表～100 hPa)
水平格子	解像度 1 km, 118×118 格子
雲物理過程	Schultz microphysics scheme
放射過程	Cloud-radiation scheme
大気境界層過程	High-resolution Blackadar PBL scheme
地表面過程	5-layer soil scheme
積雲パラメタリゼーション	なし

る。伊勢湾沿岸及び海上に位置する 5 つの観測点の風速値と比較した結果、本シミュレーションの計算精度は年間のバイアス値が平均風速 $\pm 11\%$ (平均 -2.3%)程度であり、また伊勢湾北部で風速値がやや過小評価気味であることがわかっている。上記の誤差傾向を考慮すれば、図-1 の風況は、局所的風況予測モデル LAWEPS を用いた 500 m 格子の風況マップ (日本気象協会, 2003) と大差ない。

図-2 に日本海洋データセンターの 500 m 格子水深データを基に作成した伊勢湾の海底地形図を示す。欧州の既存の洋上風力発電施設の状況を鑑みて水面下 20 m を着床型洋上風車の設置限界水深と定めると、伊勢湾内の 20 m 以浅の水域面積は 1,289 km^2 (湾全体の 62%) となる。図-1 より伊勢湾全体の風速は 5～7 m/s であるが、この 20 m 以浅の風車設置可能水深内に限れば、年平均風速は 5.8 m/s となる。20 m 以下の浅い海域は伊勢湾の北部・西部及び三河湾に多く広がるが、伊勢湾では年間を通して北西風が卓越するため、前者は陸上の影響をうけて比較的低風速になり、後者は高風速になる傾向が

Bathymetry

UNIT : m

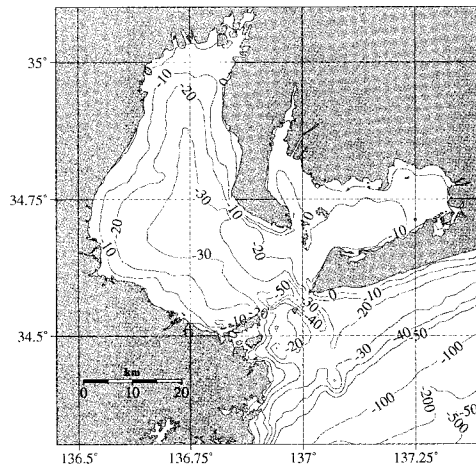


図-2 伊勢湾の海底地形。単位はメートル

ある。それ故、風況の良い三河湾内の風車設置可能水域だけに限定して考えれば、そこでの年平均風速は 6 m/s を上回る。

3. 発電量シミュレーション

伊勢湾内での洋上風力発電ポテンシャルを調べるために、まず伊勢湾の海底地形と設置可能な風車数について検討する。本研究で検討に用いた風車は、デンマーク・Vestas 社製 V 80-2.0 MW 機である。この風車の定格出力は 2 MW、ブレード直径は 80 m であり、現在用いられている洋上風車としては平均的な仕様である。ハブ高度については任意性があるが、ここでは 80 m と設定した。風車の配置間隔はブレード直径を D として、 $10 D \times 10 D$ と $10 D \times 3 D$ の 2 ケースについて検討した。表-2 にこの 2 ケースに対して算出された風車密度、設置可能機数、設備容量を示す。風車密度は 1 km^2 あたりの風車機数を表し、設置可能機数は伊勢湾内の 20 m 以浅の面積に風車密度をかけることにより、また設備容量は設置可能機数に 2 MW をかけることにより算出した。風車を $10 D \times 10 D$ で配置した場合、設置可能機数は 2,014 機、 $10 D \times 3 D$ の場合は 6,714 機となった。

次に MM5 の風速計算値と V 80-2.0 MW 機のパワー

表-2 2 MW 風車による伊勢湾上の年間発電量シミュレーション

設置水深	20 m 以浅	
風車配置	10 D×10 D	10 D×3 D
風車密度	1.6 (機/ km^2)	5.2 (機/ km^2)
設置可能機数	2,014 (機)	6,714 (機)
設備容量	4,028 (MW)	13,428 (MW)
年間発電量	7,308 (GWh)	24,359 (GWh)
世帯数換算	217 (万軒)	725 (万軒)

Annual Amount of Wind Power Generation

GENERATOR : Vestas V80 2.0MW VCS

PERIOD : APR 2001 - MAR 2002 UNIT : MWh

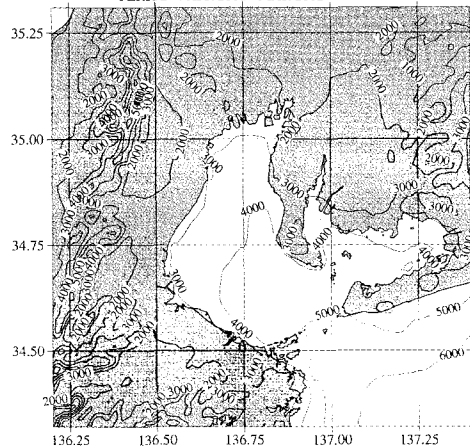


図-3 2 MW 風車1機あたりの年間発電量

Annual Mean Current

MODEL : POM REZ : 1km

DEPTH : 2m UNIT : m/s

PERIOD : 1 APR 2001 - 31 MAR 2002

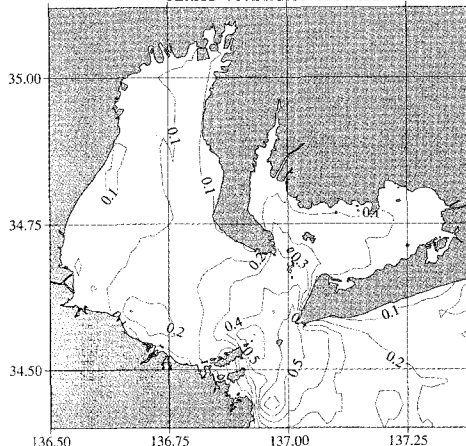


図-4 年平均流速 (水面下2 m)

カーブを用いて伊勢湾上の年間発電量の推定を行った。

図-3は格子毎に風車を1機設置した場合に得られる年間発電量を示したものである。年平均風速6 m/sがおおよそ4,000 MWhの年間発電量に相当していることがわかる。この1機あたりの発電量と風車密度の積をとって水深20 m以下の格子の発電量をすべて積算することにより、伊勢湾の洋上風力発電ポテンシャルを推定することができる。算出された年間発電量とその一般家庭軒数換算値を表-2中に示す。10 D×10 Dの配置では年間7,308 GWh、10 D×3 Dの配置では年間24,359 GWhの発電量が得られることがわかる。この値を一般家庭軒数に換算する(一般家庭は、夫婦と子供2人の4人家族で構成され、年間3,360 kWhの電力を使用するものと仮定)と、10 D×10 Dの配置では約217万軒分、10 D×3 Dの配置では同725万軒分に相当することがわかる。愛知県、三重県の両県の総世帯数が340万軒程度であり、その3分の2程度が沿岸地域にあるとしても、伊勢湾上の洋上風力発電量はそれら全世帯の年間使用電力をまかない得る、或いはその数倍のポテンシャルを持っていることがわかる。また標準的な原発1基の年間発電量を6,000 GWhとすれば、伊勢湾上の洋上風力発電ポテンシャルは原発1～4基分に相当することになる。

4. 海況シミュレーション

(1) 流速場

伊勢湾大気海洋結合モデル(水谷ら, 2003)を用いて2001年4月から2002年3月までの一年間の海水流動シミュレーションを行った。同モデルはメソ気象モデルMM5と海洋モデルPOMを結合し、海面境界における運動量・熱・水フラックスを10分毎に交換できるように

Maximum Current

MODEL : POM REZ : 1km

DEPTH : 2m UNIT : m/s

PERIOD : 1 APR 2001 - 31 MAR 2002

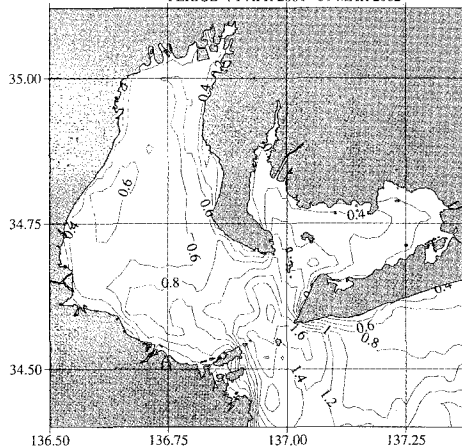


図-5 年最大流速 (水面下2 m)

したものである。これにより高解像な気象場を海洋モデルへの入力値として利用できるというメリットがある。本シミュレーションでの計算手法及びモデル設定は基本的に水谷ら(2003)と同様である。

図-4に、計算により求められた水面下2mの年平均流速を示す。流速は伊勢湾の形状から予想されるように、志摩半島と渥美半島に挟まれた湾口付近で最も大きく、0.5 m/s程度の流速となる。海水流動の駆動力は基本的に潮汐であるため、湾口付近以外の平均流速は小さく、大部分の海域で0.2 m/s以下となっている。

次に年間最大流速分布を図-5に示す。これは計算期間の1年間において各格子での流速の最大値を示したものである。流速分布は図-4に示した年平均流速と同様

に、湾口付近で最も大きく湾奥に向かって徐々に小さくなるような分布を示す。湾口での最大値は 1.6 m/s であり、伊勢湾北部・西部や三河湾内の大部分で 0.6 m/s 以下となる。図-2の海底地形図と図-4、図-5の流速分布を比較すると、水深と流速には良い相関があり、浅い海域ほど流速が遅くなっている。この傾向は浅海域に設置される洋上風車には都合が良い。

(2) 波浪場

流速場と同様に、数点しかない観測値から湾内の面的な波浪場を推測することは不可能であるため、数値シミュレーションによる推測を行った。ここでは、小林ら (2003a) が伊勢湾内の常時波浪の追算において有用性を示した波浪推算モデル SWAN (Booij ら, 1999) を用い

て、他のシミュレーションと同様に 2001 年 4 月～2002 年 3 月までの年間計算を行った。計算手法及びモデル設定は基本的に小林ら (2003a) と同様である。

図-6 に年最大有義波高の分布を示す。湾口を通じて外洋からの影響を受けやすい伊勢湾南部の西岸一帯で波高が 3 m/s を越え、伊勢湾内では最も大きな値となっている。今回の計算では外洋境界において外からのうねりを考慮していないため、この辺りの波高は実際にはもう少し高い可能性がある。水深 20 m 以下の海域が広がる伊勢湾北部・西部及び三河湾の大部分では、波高は $1.5 \sim 2.5 \text{ m/s}$ となっている。

次に既往最大波の参考値として伊勢湾台風時の波高について検討する。ここでは、小林ら (2003b) が行った伊勢湾台風時の波浪場計算値について考察する。図-7 は伊勢湾台風時の最大有義波高分布を示したものである。外洋で 20 m を超える波高は、地形の急激な変化に伴い湾口沖合で急速に低下している。湾内での波高は、伊勢湾では最大で 6 m 台、三河湾では最大で $4 \sim 5 \text{ m}$ となっている。上記と同様に伊勢湾台風時の最大有義波高を求めた柴木ら (1995) の計算値と比べると、湾口沖合での急速な波高低下や湾口から内湾に向けて伸びる高波浪域の存在、三河湾内の低波浪等、目立った特長は似ている。ただし、SWAN を用いた結果 (図-7) の方が全体的に高い値を示しており、伊勢湾内では $1 \sim 2 \text{ m}$ 程度の違いが見られる。

5. 考 察

将来的に洋上風力発電施設の建設・計画は、より良い風況を求めてより沖合へ、そしてより海況の厳しい海域へと向うと予測される。現在世界最大の設備容量 (160 MW) を誇る Horns Rev はデンマークでは初めて北海沿岸に作られた洋上風力発電施設であり、ユトランド半島の沖 $14 \sim 20 \text{ km}$ の海上に位置している。吹走距離の長い北海上を渡る西風が卓越するため、バルト海側に比べて海況は厳しい。施設を管理する Elsam 社によれば、Horns Rev での平均流速は約 0.5 m/s (悪天候時には最大 0.8 m/s)、平均波高は $1 \sim 1.5 \text{ m}$ 、年最大波高は 6 m を超える。4 章で計算された伊勢湾の海況は、伊勢湾台風時を除けば、これらの値に比べていずれも小さな値を示しており、洋上風力発電施設の建設・維持管理という面では大きな問題はないものと考えられる。特に、風況が良くしかも外洋からの波浪が直接入りにくい三河湾は、既往最大波と考えられる伊勢湾台風時の波高でも高々 $4 \sim 5 \text{ m}$ 程度であるため、年最大波高が 6 m を超える Horns Rev に比べれば、海況は非常に静穏であると言える。つまり、その分の建設コスト削減が十分に期待できる。

Maximum Significant Wave Height

MODEL : SWAN REZ : 1.8km
UNIT : m
PERIOD : APR 2001 - MAR 2002

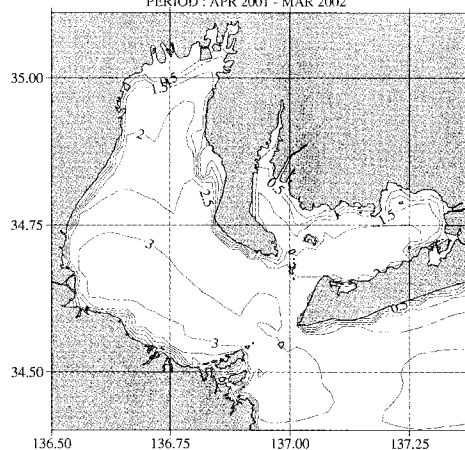


図-6 年最大有義波高分布

Maximum Significant Wave Height

MODEL : SWAN REZ : 1km
UNIT : m
PERIOD : 26 - 27 SEP 1959

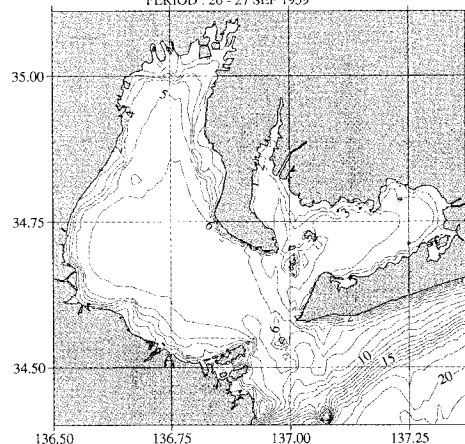


図-7 伊勢湾台風時の最大有義波高分布

年平均風速が高度 80 m で 5~7 m/s という伊勢湾の風況は、中部日本沿岸の浅海域の中ではかなり良い方に属する(大澤ら, 2003)。しかしながら、北海やバルト海沿岸と比べると決して良い風況であるとは言えない。Kühn ら (1999) は北海やバルト海上にある 14 地点の洋上風力発電施設やその候補地におけるハブ高度での年平均風速値を示しているが、それらの値はおおよそ 7~9 m/s 程度であり、いずれも伊勢湾での最大値を上回るものである。一般に陸上では高度 10 m で 5~5.5 m/s の年平均風速が採算性の目安と言われる(欧州風力エネルギー協会・グリーンピース, 2003) が、伊勢湾上の風況はこの目安をやや上回る程度の値である。従って伊勢湾において洋上風力発電が実現するためには、風車コスト・建設コストが現在の陸上風力発電施設のコストと同程度にまで下がるのが必須の条件となる。

6. おわりに

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

1. 2MW 風車を水深 20 m 以浅の海域に敷き詰めた場合の年間発電量は最大で 24,359 GWh となり、伊勢湾上の洋上風力発電は最大で原発 4 基と同程度のポテンシャルを有することが示された。
2. 高度 80 m での年平均風速は伊勢湾全体で 5~7 m/s であった。欧州の既存の洋上風力発電が 7~9 m/s 程度の年平均風速の条件下で行われていることを考慮すると、現状では採算ベースにのる風況ではない。
3. 伊勢湾内では、水深、風況、海況の面から三河湾渥美半島沿岸の条件が最も良い。欧州の既存の洋上風力発電サイトと比べて海況が静穏であることから、その分の建設コスト削減は十分に期待できる。

本研究では風況、海況といった視点から伊勢湾の洋上風力発電の実現可能性について議論し、今後の風車及び建設コストの低下次第では大きな可能性があることを示してきた。しかし現実的には、重要港湾や主要航路、国立・国定公園、沿岸漁業水域、そして渡り鳥の中継地などを抱える伊勢湾において、洋上風力発電を実現させる前に越えるべき社会的ハードルは高い。自然エネルギーを基盤エネルギーとして持続的成長を目指す環境調和型社会の実現に向けて、洋上風力発電を含めた沿岸海域の有効な利用法について、あらゆる立場から十分に検討を行っていく必要があるものと考えている。

謝辞: 本研究の発電量シミュレーションには岐阜大学大学院工学研究科の嶋田進氏、風況・海況シミュレーションには同研究科の橋本篤氏、村上智一氏、深尾一仁氏、座波慎一郎氏、伊藤秀文氏、樋口喬志氏にそれぞれ協力頂いた。また本研究は科学研究費補助金若手研究(B)14750426、および株式会社シーテック風力発電部の

南正安氏および大西昭夫氏との共同研究に関連する成果であることを付記し、ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 欧州風力エネルギー協会・グリーンピース (2003): Wind Force 12 (日本語訳) -2020 年までに世界電力の 12% を風力発電でまかなうための青写真, グリーンピース・ジャパン, 56 p.
- 大澤輝夫・嶋田 進・深尾一仁・橋本 篤・安田孝志 (2003): 伊勢湾における洋上風力発電の可能性に関する検討 その 1: 広域風況マップから見た伊勢湾の位置づけ, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会講演論文集, pp. 99-102.
- 小林智尚・樋口喬志・大澤輝夫・安田孝志 (2003a): 波浪推算モデルによる中部国際空港人工島の波浪場への影響評価, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 196-200.
- 小林智尚・座波慎一郎・安田孝志 (2003b): 波浪推算モデル SWAN による伊勢湾台風時波浪の再現, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 181-185.
- 柴本秀之・渡辺 晃・磯部雅彦・三原正裕 (1995): 浅海波浪推算モデルとその応用に関する研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 341-345.
- 鈴木 靖・宇都宮好博・三嶋宣明・橋本典明・永井紀彦 (2003): 局所的風況予測モデル LAWEPS による海上風推定, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp. 49-52.
- 長井 浩・牛山 泉・上野康男 (1998): 日本におけるオフショア風力発電の可能性, 風力エネルギー, Vol. 22, pp. 34-37.
- 永井紀彦 (2002): 風力エネルギー活用観の観点から見た沿岸域洋上風の特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1034, p. 34.
- 日本気象協会 (2003): 離島用風力発電システム等技術開発「局所的風況予測モデルの開発」, NEDO 技術情報データベース, 229 p.
- 深尾一仁・大澤輝夫・嶋田 進・安田孝志 (2003): メソ気象モデル MM5 を用いた局地気象場のデータベース化とその精度検証, 第 11 回地球環境シンポジウム論文集, 土木学会地球環境委員会, pp. 111-116.
- 水谷英明・大澤輝夫・村上智一・小林智尚・安田孝志・藤原建紀 (2003): 伊勢湾大気海洋結合モデルの構築とその精度検証, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 431-435.
- Booij, N. R., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen (1999): A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. C4, pp. 7649-7666.
- Dudhia, J. (1993): A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon Wea. Rev.*, Vol. 121, pp. 1493-1513.
- Fujii, T. (1999): An Estimation of the Potential of Offshore Wind Power in Japan by Satellite Data; *Proceedings of the Japan Solar Energy Society/Japan Wind Energy Association Joint Conference*, pp. 447-450.
- Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer (1995): A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), *Tech. Note TN-398+1A*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125 p.
- Kühn, M., W. A. A. M. Bierbooms, G. J. W. van Bussel, T. T. Cockerill, R. Harrison, M. C. Ferguson, B. Göransson, L. A. Harland, J. H. Vugts, R. Wiecherink (1999): Towards a mature offshore wind energy technology—Guidelines from the Opti-OWECS Project, *Wind Energy*, Vol. 2, pp. 25-58.
- NEDO (1999): 日本における洋上風力発電の導入可能性調査, 平成 10 年度調査報告書, NEDO-NP-9801, 119 p.
- Ohsawa, T., K. Fukao and T. Yasuda (2002): Highly accurate simulation of the surface wind field over Ise Bay, *Coastal Environment* 2002, WIT press, pp. 279-288.