

洋上風力発電における風況解析技術

野澤 剛二郎
(技術研究所)

A Wind Prediction Method for Offshore Wind Energy

by Kojiro Nozawa

Abstract

This paper proposes a method for predicting winds for offshore wind energy production. The method comprises a regional atmospheric mesoscale-model, MM5, coupled with a wave model, WAM. For reasons of economy and practicality, the wind energy resources for offshore wind farms are estimated using RANAL data from the Japan Meteorological Agency instead of actual measurements. In order to estimate with a high degree of accuracy the wind speed at offshore sites using the mesoscale-model, it is necessary to take into account the effects of waves at the lower boundary condition. The wind speed and wind direction estimated by the combined MM5 and the WAM models are compared with actual measurements from Cape Nyudo-zaki.

概要

洋上での風力発電は大規模かつ効率的な発電が可能なことから今後発展していく可能性がある。洋上風力発電を事業化するためには事前の高精度な風況予測が必要であり、洋上での実測により風況予測を行おうとすると大きな費用と期間を必要とする。そこで、本研究では洋上における風況予測を気象庁の客観解析データをベースに高精度に予測する方法を提案している。洋上では地形の影響が少なく気象データとの相関は高いものの、発電を行う海表面近くでは波浪の影響を受けやすい。それと同時に波は風により発達するため、高精度な風況予測を行うためには両者を相互に干渉させる必要がある。本研究では気象モデルMM5と波浪推算モデルWAMをカップリングした解析を行うことで、海表面近くの風況予測精度を向上させることを試みた。

§ 1. はじめに

陸地が狭い我が国で今後増えることが予想される洋上風力発電では、建設、運営コストが陸地と比べると大きく¹⁾、発電事業評価を行ううえで風況予測の精度の重要性が増している。しかし、洋上での風況観測は陸上と比べると大きなコストと手間がかかるため、他の予測手法が期待される。そこで、本論文では洋上での風況解析手法として、気象庁の過去のGPVデータを参照する気象モデルMM5²⁾と波浪推算モデルWAM³⁾の連成解析を行う方法について説明する。また、日本海に面した灯台の観測記録に対して、気象モデルMM5のみの解析とWAMとを連成させた解析結果を比較する。

現在、陸上では建設サイト近傍での一年分の風況観測記録を元にサイトの統計データを算出している。洋上では観測記録の取得が困難であることから、過去一年分あるいは複数年分の気象(GPV)データを参照しながらメソスケールの気象モデルによる解析を行い、建設サイトの時刻歴データを求め、それにより統計デ

ータを算出する方法を考えられる⁴⁾。この手法は陸上でも風況観測を必要としないことや過去の複数年のデータが得られることから活用が期待されるが、建設サイトでの観測を元にした統計データに比べると精度が落ちることが指摘されている⁵⁾。その原因としては気象モデルの格子解像度が不足し、地形の影響が十分に勘案されていないためと考えられる。

それでは洋上における風況解析ならば地形の影響を受けにくいと、気象モデルによる予測で十分な精度を上げられることが予想される。しかし、この場合でもGPVデータの元となる観測記録が洋上では陸上に比べると不足していることのほか、波浪や潮流の影響が気象モデルでは十分に考慮されていないことが予測精度を上げるうえで妨げとなる可能性がある。前者に関しては、洋上風力の建設地点が比較的陸地に近い場合にそれほど問題とならない。一方、後者に関しては、波浪や潮流の影響を気象モデルに取り込むことで問題の解決を図ることが考えられる。海洋循環モデルとカップリングすることで気象予報の精度を向上⁶⁾を図つ

たり、海洋と波浪の両モデルとのカップリングによりサイクロンの再現が行われている⁷⁾。また、波浪推算の分野では波浪のモデルWAMに気象モデルMM5の結果を取り込むことで精度を上げている⁸⁾。同様に波浪や潮流の影響を気象モデルに取り込むことで風況予測の精度向上が期待される。

海面近くの風速に関しては潮流の影響についても無視できるものではないが、本研究では波浪推算モデルと気象モデルをカップリングすることで、波浪の影響を気象モデルに取り込むとともに、風の影響を波浪推算に反映させるモデルを構築する。

§ 2. 洋上における風況解析モデル

2.1 気象モデルMM5による風況解析

本研究ではメソスケールの気象モデルとして米国ペンシルバニア大とNCAR (National Center for Atmospheric Research Boulder, USA)により開発されたMM5を用いる。MM5は鉛直方向の大気の運動方程式を解く非静力学方程式によりメソスケールの大気シミュレーションを行うものである。このようなメソ気象モデルにはARPSやRAMSなどがあるが、世界的な使用頻度や公開されている情報の多さなどの条件からMM5を用いることが有利と考えられる。

MM5は圧縮性流体の方程式を水平方向には等間隔の構造格子、鉛直方向については σ 座標に基づいた非静水力学的な扱いで離散化を行い、時間進行させながらシミュレーションを行っている。以下、MM5の境界条件、特に地表面(海面)の風の境界条件について概説する。

2.1.1 MM5の境界条件

MM5では気象の客観解析データを用いて水平方向の境界条件を与えている⁹⁾。ただし、解析領域内側から境界に向かって徐々に客観解析データに置換するスポンジ境界条件を用いている。また、上空での境界条件として鉛直方向風速がゼロとなるslip境界条件を与えている。一方、地表面に関しては σ 座標系により地形の影響(標高)は考慮されている。標高データとしてUSGS(アメリカ地質調査所)30秒間隔の格子データを始め、2分~1度間隔のデータを用いることができる。ただし、30秒以下の解像度が必要となる場合には国土地理院の標高データなどを用いる必要がある。さらに、地表面の状態によって粗度などの地表境界条件が異なることから、土地利用情報に基づいて、13のカテゴリー(都市、農地、草原、森林等)に分け、それぞれに粗度長などの係数が与えられる。

MM5では4次元同化手法を導入し、観測記録や客観

解析データにシミュレーション結果が漸近するようになっている。このため、日本近傍の解析を行う場合には気象観測の結果が反映されている気象庁の客観解析結果を用いることで、ナッジング(analysis nudging)により高い精度のシミュレーション結果を得られることが期待できる。ナッジング法はシミュレーション結果を客観解析結果に強制的に近づける項を方程式の時間変化に付け加える方法である¹⁰⁾。

大気境界層の地表面での境界条件としてはMM5では様々なモデルが用意されている。本研究ではBlackadarのHigh-resolution model¹¹⁾を用いる。このモデルでは摩擦速度 u_* は以下のように表される。

$$u_* = \max\left(\frac{\kappa V}{\ln(z_a/z_0) - \psi_m}, u_{*0}\right) \quad (1)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 u_{*0} は最小摩擦速度で0.1m/sを与える。 V は再下層における風速 V_a と対流速度 V_d により次式のように与えられる。

$$V = (V_a^2 + V_d^2)^{1/2} \quad (2)$$

φ_m は安定度を表す係数でリチャードソン数によりその値が変わる。 z_0 は粗度長で陸地については前述した土地利用情報に基づいて与えられる。ただし、海上や湖などでは次式のように摩擦速度より計算される。

$$z_0 = 0.032u_*^2/g + z_{0c} \quad (3)$$

ここで z_{0c} は粗度長の最小値を与える。また、地表熱フラックスは次式から計算される。

$$H_s = -C_{pm} \rho_a k u_* T_s \quad (4)$$

ただし、

$$T_s = \frac{\theta_a - \theta_g}{\ln(z_a/z_0) - \varphi_h} \quad (5)$$

z_a は σ 座標の最下層の高さ、 φ_h は安定度を示し、 φ_m と同様にパルクリチャードソン数に基づいて変化する係数である。 θ_a 、 θ_g はそれぞれ σ 座標の最下層と地表面での温位である。このように粗度長は地表の境界条件に大きな影響を与えるパラメータである。このパラメータを洋上で正しく与えることができるかどうか、風況予測において重要となる。

2.2 波浪推算モデルWAMによる波浪解析

ここではいわゆる第3世代波浪推算モデルのWAM(Cycle 4)について説明する。WAMは風から波へのエネルギー輸送と波の周波数間の非線形相互作用によるエネルギー輸送、エネルギーの消散を考慮することのできる第3世代波浪推算モデルであり、風速の時刻歴デ

ータを与えることで、波浪の空間的・時間的発達を予測できる¹²⁾。

WAMではエネルギーソースとして、風から波へのエネルギー輸送項、砕波や海底摩擦などのエネルギー消散項、非線形相互作用によるエネルギー輸送項が考慮されている。ここでは、風況予測に直接関係のある風から波へのエネルギー輸送項について概説する。

2.2.2 風から波へのエネルギー輸送
WAMでは風から波へのエネルギー輸送 S_{in} はJanssenのquasi-linear理論¹³⁾により以下のように表すことができる。

$$S_{in} = \omega \varepsilon \beta \chi^2 \quad (6)$$

ここに E は波浪の方向スペクトル、 ω は角周波数、 ε は大気と海水の密度比、パラメータ β と χ はそれぞれ次式で表される。

$$\beta = \begin{cases} \frac{\beta_m}{\kappa^2} \mu (\ln \mu)^4 & \mu \leq 1 \\ \beta = 0 & \mu > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\chi = \left(\frac{u_*}{c} \right) \cos(\theta - \varphi) \quad (8)$$

ただし、パラメータ μ は次式で表される。

$$\mu = \left(\frac{u_*}{c} \right)^2 \frac{gz_0}{u_*} \exp\left(\frac{\kappa}{u_*}\right) \quad (9)$$

海上風の風速の鉛直分布は対数則を用いて次式のように表される。

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (10)$$

$U(z)$ は高度 z における風速、 u_* は波による抵抗を表す摩擦速度、 κ はカルマン定数、 z_0 は波の粗さを表す粗度長である。一般に海上での z_0 は陸上のそれよりも小さく、それゆえ海上では陸上よりも高い平均風速が得られる。WAMでは粗度長は次式で与えられる。

$$z_0 = \frac{\hat{\alpha} \tau}{g \sqrt{1 - \tau_w / \tau}} \quad (11)$$

τ_w は波による誘発応力で次式により表される。

$$\tau_w = \rho_w \iint \omega B E \cos(\theta - \varphi) df d\theta \quad (12)$$

ρ_w は海水の密度、 ω は角周波数、 B 、 E はそれぞれJanssenのquasi-linear理論で与えられる係数と波浪の方向スペクトルである。また、 θ は波高、 φ は風向で両者のズレについても考慮される。

2.3 MM5 と WAM の連成解析

MM5 では式(1)と(3)により u_* と z_0 を算定することができる。つまり、風速の増加に伴って式(1)と(2)から u_* が大きくなり、さらに式(3)から z_0 が大きくなるという効果があり、風速の影響を波の粗度に反映させることは可能である。ただし、実際の波は海岸からの距離や水深などのほか、波齢や波形勾配の影響を大きく受ける¹⁴⁾。これに対してMM5 では z_0 は風速の関数となっており、他の条件の影響は受けない。そこで本研究ではWAMによる解析で得られた式(11)の z_0 をMM5の海上での z_0 として与える。

一方、WAMに対しては、MM5の風速の鉛直分布から導かれる u_* を式(9)に時々刻々あたえることで、式(6)により風から波へのエネルギー輸送 S_{in} を時空間的に密な風データをもとに予測が可能となる。

両者の連成解析ではMM5の方が解析の時間刻みが小さいことから、WAMで1時間ステップ計算を行うごとに、MM5をそれに相当する時間だけ計算する。よって、データの交換はWAMの1時間ステップごとに行われ、そのステップの間はそれぞれの解析で z_0 、 u_* が時間的に変動しない弱形式の連成解析により計算を行う。ちなみに、ここではWAMの子プロセスとしてMM5を実行し、1時間ステップごとにMM5によって更新された風速データを読み込むとともに、最新の z_0 を出力するようにしている。

2.4 モデル間の座標変換

MM5では中緯度(30度~60度)についてはランベルト正角円錐座標を用いたシミュレーションを行っている⁹⁾。これに対してWAMでは等緯度経度座標が用いられている。このため、両者の間でデータをやりとりするには座標系間の変換並びに補間が必要となる。以下に座標変換公式を示す。

X, Y をランベルト正角円錐座標における格子点を示しているとする。このとき、 $X=0$ 、 $Y=0$ となる点の緯度経度をそれぞれ ψ_0 、 λ_0 とする。任意の緯度経度 ψ 、 λ の格子点座標 X, Y は以下のように表される。

$$\begin{aligned} X &= r \cos \lambda' \\ Y &= r \sin \lambda' + C_2 \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \lambda' &= n(\lambda + C_1) \\ C_2 &= \frac{a}{n} \sin \psi_1 \left(\frac{\tan \psi / 2}{\tan \psi_1 / 2} \right)^n \end{aligned} \quad (14)$$

$$r = \frac{a}{n} \sin \psi_1 \left(\frac{\tan \psi_0 / 2}{\tan \psi_1 / 2} \right)^n$$

である。ここで $a=6370\text{km}$ 、 $C_1 = -\lambda_0 - \pi/2n$ 、 $n=0.716$ 、

$\psi_1=30$ 、 $\psi_1 = \pi/6$ 、 \dots 、 $\psi = 90 - \phi$ 、 \dots 、 $\psi_0 = 90 - \phi_0$ となる。

また、座標系間のデータの交換を行うたびにデータの補間が必要となる。ここでは、対象とする点を囲む4点から線形補間を用いて内挿を行っている。

§ 3. 2次元解析による連成解析

ここでは風況解析と波浪解析のカップリングを行うことによる効果を計るために2次元の領域を設定し、風波の発達と風速プロファイルの変化を調べる。解析に用いた領域は水平方向に1620km(東経130度から145度に相当)、鉛直方向に5kmとした。ここでは中立強風時を仮定し、2次元領域であることからコリオリ力を無視するため、MM5は用いずに熱の効果を無視した $k-\epsilon$ モデルによる大気境界層シミュレーションを行った。高度10mで約10m/sの風が吹いているものとした。海面では波浪解析より粗度長を与え、対数則に基づいた以下の境界条件を与えている。この条件はMM5で用いるBlackadarのモデルとほぼ同様な効果を海面近くの風速に与えるものである。

このような条件の下では波高は風速の影響を受けるだけではなく、吹送時間および吹送距離が増すとともに次第に成長し波高が増大する。このような波高変化に対しては、ウィルソンによる経験式¹⁵⁾を適用することができる。ウィルソンの経験式では吹送距離 F と高度10mでの風速 U_{10} に基づいて次式のように有義波高 $H_{1/3}$ が与えられる。

$$\frac{gH_{1/3}}{U_{10}^2} = 0.30 \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \quad (15)$$

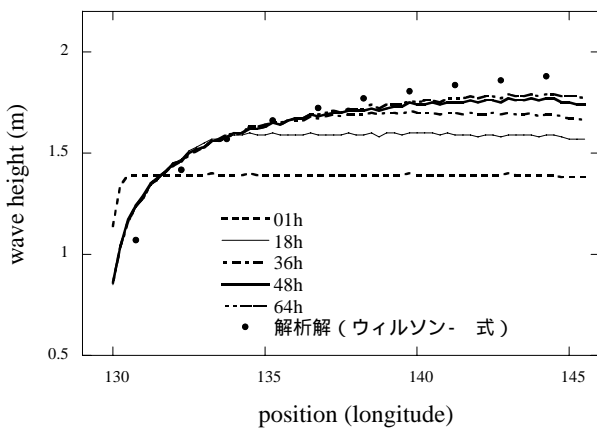


図 - 1 有義波高 $H_{1/3}$ と吹送時間の関係

図 - 1 に経過時間に応じた有義波高の水平方向分布が示されている。時間の経過とともに波高がウィルソ

ンの実験式に近づいていくことが確認できる。一方、波浪とのカップリングを行わない風のみ解析では、粗度長を摩擦速度に基づいて与えているが、波浪との連成解析を行った場合と比べて粗度長を過大評価している(図 - 2)。この結果、風速の鉛直プロファイルは粗度長を過大評価している風のみ解析の方が、海面近くで5%程度過小評価することになっている(図 - 3)。これは、式(3)の対数則に基づく境界条件では、粗度長の影響を海面近くでは強く受けるためである。

MM5では温度など他の要因も含まれるため、定量的な意味を持たないが、同様な影響を与えることが考えられる。

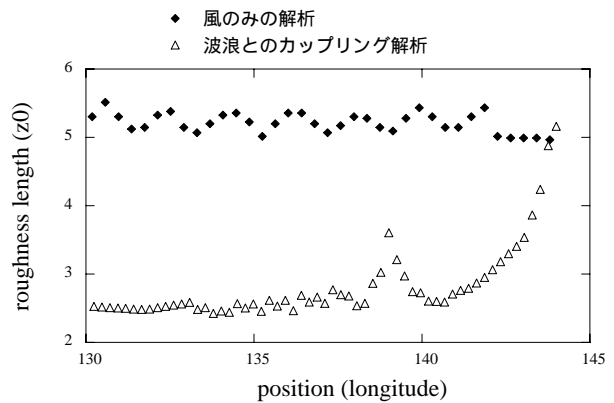


図 - 2 吹送距離と粗度長の関係

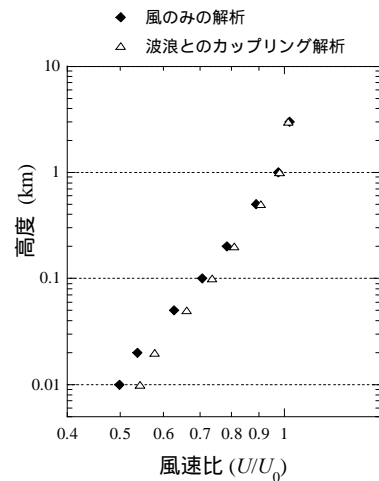


図 - 3 風速の鉛直プロファイル

§ 3. 連成解析による実測値との比較

ここでは秋田県入道崎をターゲットに風況予測を行い、連成解析の効果を調べた。入道崎は男鹿半島の突端にあり、南を除く東西北が日本海に開けている。入道崎の突端には灯台があり、そこで得られた風速、風向のデータが公開されており¹⁶⁾、そのデータとの比較

を行う。

解析領域は日本海がほぼ入るように東経 125 度～145 度、北緯 30 度～45 度の範囲に定めた。解析は三段階のネスティングにより入道崎近傍に格子を集中させている(図 - 4)。最外の格子で約 27km、最内で 3km の格子間隔としている。時刻み幅は 30 秒としている。一方、WAM では MM5 よりも若干狭い領域(東経 130 度～145 度、北緯 30 度～45 度)で、格子解像度 0.25 度として解析を行っている。WAM の格子解像度は MM5 の最外格子と概ねあっている。また、計算時間間隔は 1 時間としている。

解析期間は 2002 年 12 月 1 日から 16 日の 15 日間である。この期間は北西の風が卓越し、定常的に 5～15m/sec の強い風が吹いている(図 - 6)。このため、陸上の地形の影響は受けにくく、風は海上の波浪の影響を主に受ける。図 - 5 は WAM により求められた波高の分布を示している。海岸線からの距離や水深の影響を受けていることが確認できる。

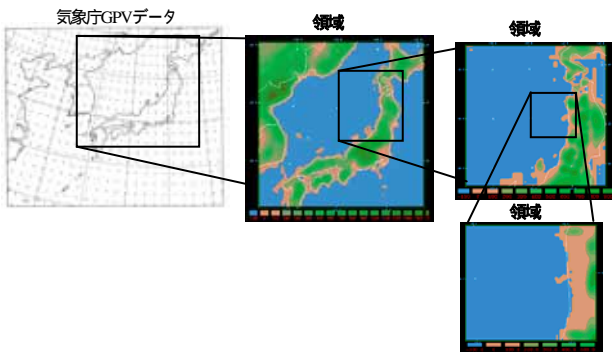


図 - 4 ネスティングによる解析領域

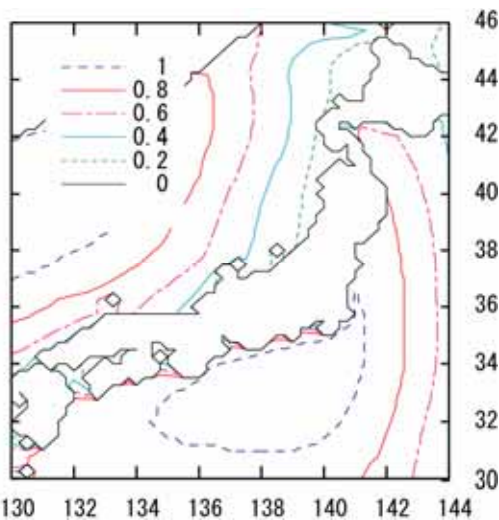


図 - 5 カップリング解析による $H_{1/3}$ 分布

入道崎における風速と風向を連成解析と非連成解析で比較したものが図 - 6、7 である。連成解析を行うことで風速が実測値に近づいたことが確認できる。平均風速で比べると実測で 8.3m/sec から 9.4m/sec に増加しており、実測結果と比較すると誤差が約 20% から 10% に改善されている。ただし、ここでは局所地形の影響は考慮していないが、海よりの風が卓越することから、その影響は少ないと考えられる。

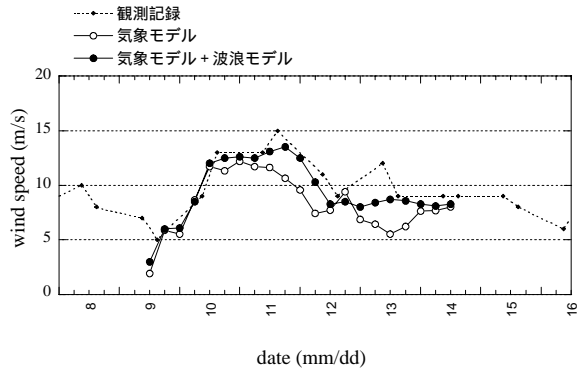


図 - 6 入道崎における風速の時刻歴

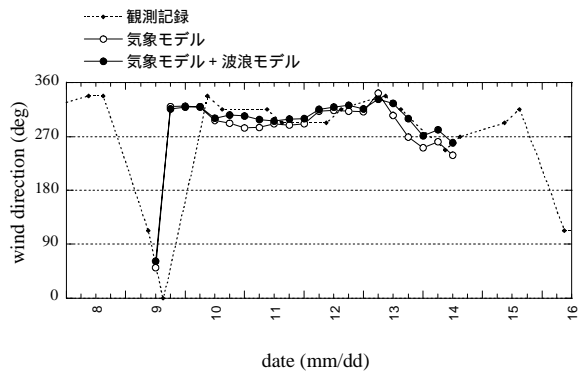


図 - 7 入道崎における風向の時刻歴

§ 4. おわりに

本研究では洋上風力発電の風況解析手法として気象モデル MM5 と波浪推算モデル WAM の連成解析を行う方法を提案した。また、当手法を用いて日本海に面した海岸の実測値との比較により連成解析を行うことで解が約 10% 改善されることを確認した。

<参考文献>

- 1) Greenpeace Germany, "ZukunftWindkraft:DieEnergie aus dem Meer, Technische Moeglichkeiten und oekologische Rahmenbedingungen", Hamburg Oct.2000
- 2) MM5, <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>.
- 3) Gunther, H. *et al.*, "The Wamodel Cycle 4 (revised version)", Deutsches Klima Rechen Zentrum, Technical Report No.4, pp.101, 1992.
- 4) 山口敦、佐々木庸平、石原孟、藤野陽三、"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 その1 気象シミュレーションによる風況精査"、日本風工学会誌、第99号、pp.115、2004.
- 5) 石原孟、山口敦、鶴野伊津志、藤野陽三、"新しい風況精査手法の提案と実測による検証 その1 力学・統計的局所化手法"、日本風工学会誌、第95号、pp.53、2003.
- 6) Steenburgh, W. J., Schultz, D. M. and Colle, B. A., "The Structure and Evolution of Gap Outflow over the Gulf of Tehuantepec, Mexico", American Meteorological Society, vol.126, pp.2673, 1998.
- 7) Chen, S. S., Wei Zhao, J. E. Tenerelli and M. A. Donelan, "Atmosphere-Wave-Ocean Coupling in Tropical Cyclones", Preprints, 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, pp.599-600. 2002.
- 8) 橋本典明、杉本 彰、川口浩二、宇都宮好博、"局地気象モデルと第三代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用"、海岸工学論文集、vol.49, pp.201-205, 2002.
- 9) Grell, G, Dudhia, J. and Stauffer, D. : "A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)", NCAR Technical Notes, 1, NCAR/TN-398+STR, 1995.
- 10) 気象庁予報部、"数値予報の基礎知識—数値予報の実際—"、気象業務支援センター、pp.38, 1995.
- 11) Blackadar, A. K., "High resolution models of the planetary boundary layer", Advances in Environmental Science and Engineering, 1, Pfaffin and Ziegler, Eds., Breach Publisher Group, Newark, pp. 50-85, 1979.
- 12) 土木学会・海岸工学委員会・研究現況レビュー小委員会、"新しい波浪算定法とこれからの海域施設の設計法"、土木学会、pp.33, 2001.
- 13) Janssen, P. A. E. M., "Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting", J. of Physical Oceanography, vol.21, pp.1631, 1991.
- 14) Lange, B., Larsen, S. E., Hojstrup, J. and Barthelmie, R., "Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment", Geophysical Research Abstracts, Vol. 6, 03975, 2004
- 15) 磯崎一郎、鈴木靖、"波浪と解析の予報"、東海大学出版会、pp.110, 1999.
- 16) 気象庁舞鶴海洋気象台、"海上気象概報"、585号、pp.4, 2002.