

局所的風況予測モデルLAWEPSによる海上風推定

OCEAN SURFACE WIND ESTIMATION
BY USING A LOCAL WIND PREDICTION MODEL LAWEPS

鈴木靖¹・宇都宮好博²・三嶋宣明³・橋本典明⁴・永井紀彦⁵
Yasushi SUZUKI, Yoshihiro UTSUNOMIYA, Nobuaki MISHIMA,
Noriaki HASHIMOTO and Toshihiko NAGAI

¹理博 (財) 日本気象協会首都圏支社 調査業務課 (〒170-6055 豊島区東池袋3-1-1)

²正会員 工修 (財) 日本気象協会首都圏支社 海洋調査課 (〒170-6055 豊島区東池袋3-1-1)

³工修 (財) 日本気象協会首都圏支社 調査業務課 (〒170-6055 豊島区東池袋3-1-1)

⁴正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 海洋水理研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 海象情報研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

A local wind prediction model named LAWEPS (Local Wind Energy Prediction System) is developed. LAWEPS is based on the computer fluid dynamics theory, and its goal is the accurate wind speed estimation with the accuracy of yearly mean wind speed error of 10%. Its validation results show that the wind estimation error is within 5%.

LAWEPS is applied to the ocean surface wind estimation around Tokyo bay and Setana port area. Wind estimation is compared to observed wind data over the ocean. It is concluded that the wind estimation by LAWEPS has enough accuracy for practical use, and LAWEPS will be a powerful tool for wind estimation over the ocean.

Key Words : Ocean surface wind, wind prediction model, CFD theory, LAWEPS

1. はじめに

波浪モデルや波浪変形計算モデルの高精度化と計算機の高速化にともない、波浪推算の技術は急速に発展してきている。波浪モデルに関しては波浪の発達、減衰、非線形エネルギー輸送に係わる物理機構の精密化が図られ、波浪モデルそのものの精度は潮汐予報に匹敵するレベルに達していると言える。波浪の発達、減衰は海上風を外力としているため、波浪推算の精度は波浪モデルそのものの精度よりも、むしろ海上風の精度に左右されると言える。海上風の推定技術は、従来の天気図によるものから、最近では気象モデルを用いて時空間的に細かな分布を計算することが可能となってきた。

気象モデルによる風の計算結果を直接利用するテーマとして、風力発電用風車の最適立地点を調べる手法が注目されている。自然エネルギーを有効活用するために、我が国でも大型のウィンドファームが次第に増えつつあり、風力発電の普及を図るためには風の強いところを的確に探す必要がある。我が国のような複雑地形でも精度のよい風況予測を行うことを目標とし、新エネルギー・産業技術総合

開発機構(NEDO)の4年間にわたる研究開発プロジェクトとして、数値流体力学にもとづく局所的風況予測モデルLAWEPS (Local Area Wind Energy Prediction System) が開発されている^{1,2)}。本モデルはN-S方程式に基づくモデル化がされているため、我が国のような複雑地形でも適用可能で、さらに今後有望となる洋上および海岸部の風力発電適地選定のためにも有効なツールとなることが期待されている。

本稿では、この最新の局所的風況予測モデルLAWEPSの概要を紹介するとともに、東京湾や海岸部での風況予測結果をもとに、海上風推定手法としての適用可能性について議論する。

2. 局所的風況予測モデルLAWEPS

(1) 全体計画概要

LAWEPSは広域の気象場から、崖や樹木周りの細かな流れまでを数値流体力学モデルにもとづき段階的に計算し、最終的には風車候補地点近傍の風の分布を10mメッシュで解像することを目指している³⁾。表-1にはLAWEPSの開発目標を示す。勾配5%以上の

複雑地形に適用可能であることと、年平均風速の誤差が10%以内であることを目標としている。年平均風速の評価は潮岬等の観測データに基づき評価される。

表-1 LAWEPSの開発目標

項目	目標
対象地域	勾配5%以上の地形条件を含むすべての地域で利用可能であること
入力データ	気象データ(GPV等), 地形データ, 風車仕様など
出力データ	各地点の高度別年平均風速・風向, 平均最大風速
精度	年平均風速において, 10%以内の誤差

図-1に示すように、局所的風況予測モデルの入力データは気象条件として気象庁のGPVデータ、地形条件として国土数値情報等の標高データを用いる。気象庁GPVデータは、気象庁の数値予報モデル(20kmメッシュ)の風・気温・湿度などの要素をまとめたデータで、気象観測値で解析された初期値をもとにした数値モデル計算値であるため、観測値に近いメッシュデータと考えることができる。開発計画では、風洞実験および野外観測も実施し、モデルの評価・検証およびモデル改良点の抽出などに役立てられる。出力データは年平均風速等のメッシュデータである。広域から狭域までの各領域の風況分布図として利用できる他、風車の特性を用いて発電量予測にも用いることができる。

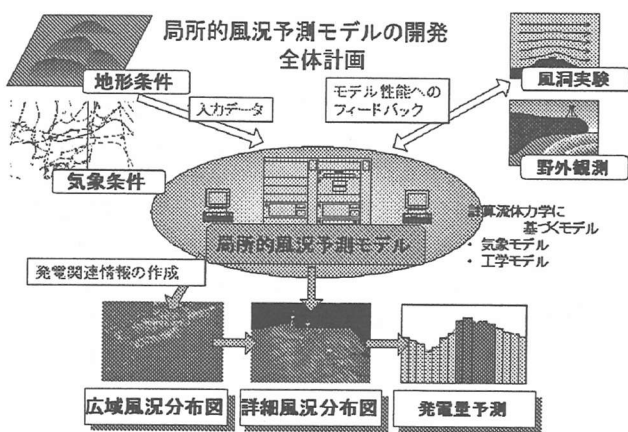


図-1 LAWEPSの入出力データ

(2) 多段階ネスティングモデル

LAWEPSの特徴のひとつに、多段階ネスティングモデルを骨格としていることがあげられる。気象の数値予報分野では大気大循環モデルから領域モデルまでをネスティングして用いる事が多く、また建築・機械系の分野では工学的なk-εモデルをネスティングして流れ場の詳細解析を行うことは一般的である。にもかかわらず多段階ネスティングを大きな特徴とするのは、広域の気象系モデルと狭域の工学系モデルをネスティングして狭域の風の場を広域

の気象場の変化と関連づけて解析するという新しい試みであるからである。

図-2には多段階ネスティングモデルのイメージを示す。1次領域モデルから3次領域モデルまでは局地気象モデルをネスティングし、気象協会が開発されたANEMOSを基本としている。ANEMOSは気象庁GPVを入力として、任意領域の風・気温・湿度・降水等を気象庁GPVよりも時空間的にさらに細かく計算することのできるモデルである。4次領域から5次領域までは建築・機械系で実績豊富なk-εモデルを用いる。乱流モデルとして、構造物周りの乱れ現象を精度良く解析できる高精度乱流モデルを研究開発して組み込んでいることに特長がある。図-2に示されるように、1次から3次領域までは大規模な山岳地形などの効果を反映し、5次領域では風車候補地点近傍の樹木や構造物の影響なども反映される。樹木の影響を一本ずつ考慮するのではなく、樹木モデルとしてバルクに表現できる新たなモデルも研究開発されている。

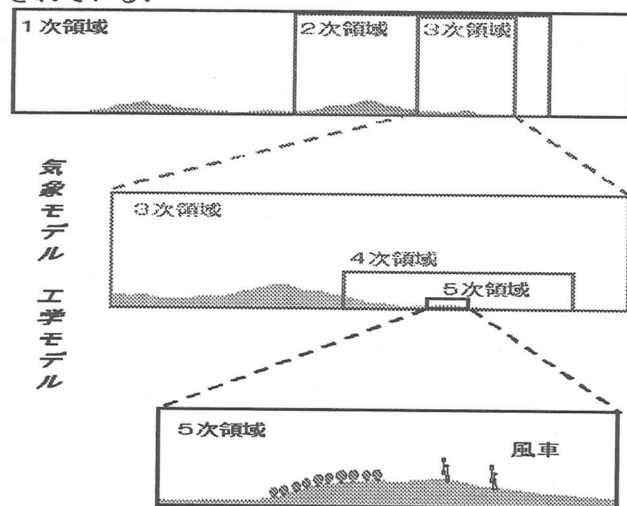


図-2 多段階ネスティングモデルの概念

各計算領域の計算範囲とメッシュサイズを表-2に示す。1次領域は北海道すべてを覆い尽くすような広さの領域で、海陸風などによる局地循環を気象モデルによって再現することが目的である。その計算結果を次の計算領域の境界条件として次々に受け渡すことによって、最終的には5次領域の1km四方内の細かな風の分布を把握することを目指している。

表-2 各段階モデルの計算範囲とメッシュサイズ

領域	計算範囲	メッシュサイズ
1次領域	500km四方	5km
2次領域	100km四方	1km
3次領域	50km四方	500m
4次領域	10km四方	100m
5次領域	1km四方	10m

(3) LAWEPSの精度

研究開発されたLAWEPSを用いて2000年を対象と

した全国風況計算が行われた。計算は1次領域から3次領域まで行われ、計算量削減のために計算対象日は6日毎に限っている。さらに全国5カ所の4次、5次領域計算が行われ、年平均風速に関して当初の開発目標を確認するために現地観測データとの比較検証が行われた。潮岬を対象とした検証結果を表-3に示す。潮岬先端部は海岸部より切り立った70mほどの崖上の観測点であり、潮岬山間部は周囲に山谷が入り組んでいる複雑地形である。LAWEPSの予測値はいずれの観測点に対しても誤差数%以内であり、当初の目標10%は十分クリアしている。潮岬以外の全国3カ所でも同様な検証を行った結果、LAWEPSの誤差は±5%以内であることが確認された。

表-3 LAWEPSの年平均風速検証結果

検証地点	観測値	LAWEPS予測値	誤差
潮岬先端部	5.31m/s	5.51m/s	+3.8%
潮岬山間部	4.31m/s	4.17m/s	-2.6%

3. 海上風推定への適用

LAWEPSは気象モデル計算部分(1次~3次領域)と工学モデル計算部分(4次~5次領域)から構成されている。気象モデル計算部分は局地気象モデルANEMOSを基としており、以下には、ANEMOSによる海上風推定事例として東京湾の事例を紹介する。また、工学モデル計算部分のk-εモデルによる海岸部の海上風計算事例として瀬棚港周辺の事例も紹介する。

(1) 東京湾周辺の通年海上風計算

本調査の詳細は橋本他(2002)⁴⁾に報告されているが、概要を整理しておく。

計算領域は東京湾を中心とする162km×192km四方とし、計算水平メッシュ間隔は2kmとした。鉛直には地形に沿ったZ*座標系を採用し、下層から上層まで20m~400m間隔に21層定義された。計算の差分時間は $\Delta t=20$ 秒であり、計算時間はPentium III 650MHzのLinux PCを用いて24時間分の計算に、約3時間のCPU時間を要した。

計算は1999年の1月から12月までの1年間を対象とし、気象庁RSMモデルのGPVを入力値とした。計算結果は毎時の風向・風速として出力され、さらに連続の式を変分法の拘束条件とするマスコンモデルを用いて最終的に1kmメッシュに内挿され、東京湾内の海上風観測値と比較・検証された。

図-3には京葉シーバースにおける観測値と計算値の時系列を比較した。強風時の計算風速が若干弱めになるが、低気圧や前線通過に伴う強風の出現や、東京湾内の海陸風の変化にともなう風向の変化などを良く再現していることが確認された。ただし、台風などの非常に強い風速の再現は不十分であり、局地気象モデルとしての改善の余地がまだ残されている。

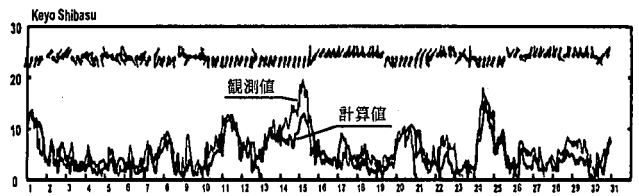


図-3 海上風の風向(矢印)・風速(折線)の計算値と観測値の時系列(1999年9月,京葉シーバース)

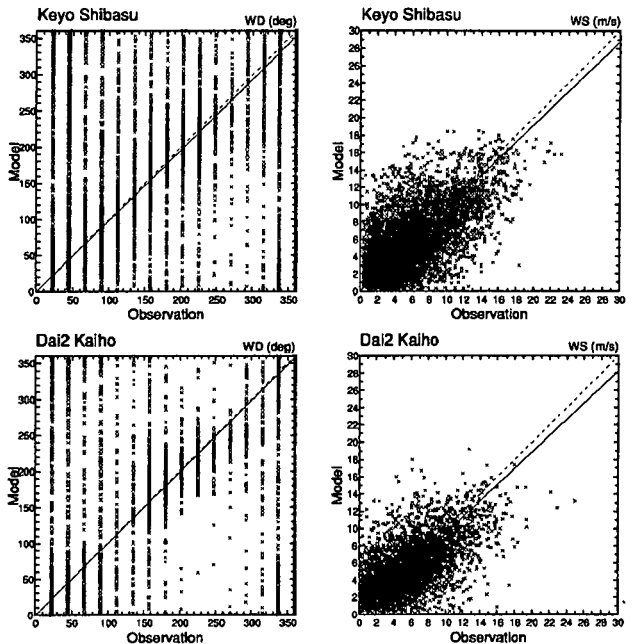


図-4 風向(左図)と風速(右図)の散布図(上段:京葉シーバース,下段:第二海堡)

図-4には京葉シーバースと第二海堡における風向と風速の散布図を示す。風向の観測値は16方位で整理されているため観測値の風向分布が離散的であるが風向の対応関係はよく、回帰式の傾きはほぼ1.0に近い。ただし、風向のRMS誤差は数十度と比較的大きくなっており、これは弱風時の風向推定が難しいことに起因していると考えられる。風速は観測値の高度補正をしていないために回帰式の傾きが1.0からずれるが、風速のRMS誤差は1~2m/s程度である。表-4および表-5には東京灯標、千葉港観測塔とともに風向と風速の精度検証結果を示す。風向のRMS誤差は約60度であり相関係数は0.8~0.9程度である。風向のRMS誤差が大きくなっているのは、風速の弱いときの風向のばらつきが大きいためと考えられる。回帰式の勾配はほとんど1に近く風向のバイアス誤差は小さい。

風速のRMS誤差は約3m/sであり相関係数は0.65弱である。千葉港観測塔と東京灯標は風速計高度が20m以上あり、経験的によく用いられる風速高度分布の1/7乗則によると $(20/10)^{1/7} \sim 1.10$ であり、風速は約1割程度強くなっているものと推定される。この1割の差を考慮しても、千葉港観測塔と東京灯標では風速の計算結果が観測データに比して小さめに

なっていると考えられる。平均的な風速としては、
 通年の常時波浪の推算には実用上十分な精度である
 と評価される。

表-4 風向の検証結果

観測点	相関係数	RMS誤差	回帰式
千葉港	0.872	60.8度	Y=1.00X
東京灯標	0.893	58.2度	Y=1.00X
京葉シーバース	0.889	61.5度	Y=0.98X
第二海堡	0.903	58.2度	Y=0.99X

表-5 風速の検証結果

観測点	相関係数	RMS誤差	回帰式
千葉港	0.622	3.0m/s	Y=0.81X
東京灯標	0.644	3.3m/s	Y=0.77X
京葉シーバース	0.620	2.9m/s	Y=0.96X
第二海堡	0.606	2.9m/s	Y=0.94X

(2) 瀬棚港海岸部の海上風計算

瀬棚港では海岸部の洋上風力発電が計画されてお
 り、防波堤上では1999年7月から2000年6月までの間、
 洋上風速の観測が行われた。これと瀬棚港湾建設事
 業所の陸上風速との関係を調べ、その差を気流計
 算モデルによって説明できるかどうかを調べた。

計算モデルはLAWEPSの4次モデルに相当するk- ϵ
 モデルである。計算領域は瀬棚港を中心とする約
 5km四方の領域で、計算格子間隔は50mとした。観
 測値の統計によって得られた卓越風向WNWで海上
 20m高度の風速5m/sとなる風を境界条件として与え
 た。図-5には風向と風速の分布図を示す。海上から
 吹いてきた風が陸上の地形によって変化する様子が
 計算されている。

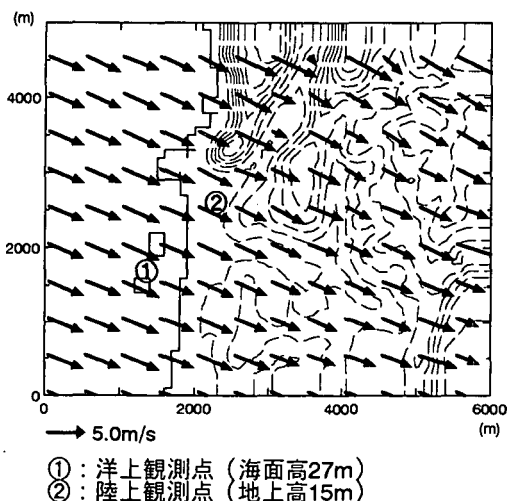


図-5 瀬棚港周辺の風向・風速分布図

表-6には風速の比較結果をとりまとめた。観測で
 は洋上と陸上の風速比が1.36であるのに対して、計
 算によると風速比は1.23と若干小さめである。k- ϵ
 モデル内では陸上の摩擦抵抗を表すために粗度パラ

メータが設定されており、今回の計算では計算領域
 全体を草地と仮定したパラメータ設定がされている。
 市街地や森林では粗度は大きめとなることが知られ
 ており、その場合、陸上の計算風速はさらに小さく
 なるものと考えられ、より観測値の風速比に近づく
 ことが期待される。

表-6 気流計算モデルと観測結果による風速比の比較
 入力：風速5.0m/s（高度20m），風向WNW

観測点	計算値	計算による 風速比	観測による 風速比
洋上観測点 高度27m	5.25m/s	1.23	1.36
陸上観測点 高度15m	4.26m/s		

4. おわりに

局所的風況予測モデルLAWEPSは年平均風速の推
 定精度が±5%程度であることが確認されている。
 このモデルを用いれば、①風況観測は不要、②全国
 で適用可能（勾配の急な複雑地形でも可）、③大気
 安定度の変化による風速変化を考慮、などの特長を
 有するほか、東京湾や瀬棚港での適用事例による海
 上風推定への可能性を検討した。その結果、東京湾
 での通年計算結果によると、計算では極端な強風は
 計算されにくく、弱風時の風向誤差が大きいもの、
 年平均風速では十分な精度を有するため常時波浪推
 算用の入力風として十分使えることが分かった。ま
 た、瀬棚港における計算では洋上と陸上の風速の違
 いを計算によって再現することができ、粗度パラ
 メータの適切な設定によって気流計算モデルは海上
 風の推定モデルとして十分利用できる可能性のある
 ことが示された。

謝辞：局所的風況予測モデルの開発は新エネル
 ギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の研究開発プ
 ロジェクトとして実施された成果です。また、観測
 データの使用に際し、京葉シーバース（株）、東京
 都、千葉県、瀬棚町および瀬棚港湾建設事業所にご
 配慮いただきました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 鈴木靖, 林宏典, 佐々木律子: 海岸部の風力発電適地
 選定のための局所的風況予測モデル, 日本海洋学会,
 2002.
- 2) 鈴木靖, 佐々木律子, 林宏典: 局所的風況予測モデル
 LAWEPS, 日本気象学会, 2002.
- 3) Hayashi, H. and Y. Suzuki et al.: A new wind energy
 prediction model based on the CFD theory, World Wind
 Energy Conf., Berlin (2002).
- 4) 橋本典明, 杉本彰, 川口浩二, 宇都宮好博: 局地気象
 モデルと第三世代波浪モデルの内湾波浪推算への適用,
 第49回海岸工学講演会, 2002.