

複雑地形における高精度の風況予測モデルの開発へ向けて*

Development of A High-Precision Model for Wind Atlas Prediction in Complex Terrain

石原 孟** 山口 敦*** 藤野 陽三***
Takeshi ISHIHARA Atsushi YAMAGUCHI Yozu FUJINO

1. 緒論

複雑地形上の流れ場を高精度に予測することは日本における風力エネルギーの利用を考える上で極めて重要である。複雑地形上の流れ場を定量的に評価する手法としては最近コンピュータ技術の進歩により風洞実験の代わりに数値解析モデルを用いるケースが増えている。しかし、複雑地形上の流れ場を解析モデルにより調べる際には数値解法、乱流モデルに伴う不確実性も解析結果に含まれる。また計算格子の間隔によって解析結果が大きく変化する場合もある。そのために解析モデルはどの程度の予測精度があるかについて十分に検証する必要がある。

緩やかな地形の場合は流れ場の近似解法として Jackson & Hunt⁽¹⁾ により提案された線形モデル(以下 JH モデルと呼ぶ)がよく用いられる。現在風力発電量を予測するために広く使われている風況予測モデル WAsP⁽²⁾も JH モデルに基づいて作られたものである。しかし、線形モデルは地形の傾斜角が大きくなると、平均風速の予測精度が著しく低下する。大木ら⁽³⁾の研究によると、JH モデルは山型地形に対して傾斜角 15 度を超えると 50%以上の予測誤差が風下斜面で生じる。日本の山地の殆どは平均傾斜角が 15 度を超す急峻な山地であるため、流れの剥離を再現できる非線形モデルの開発が強く望まれる。

緩やかな地形に比べ、剥離を伴う急峻な地形上の流れ場を数値解析により調べた例^{(4)~(7)}は少ない。曲面をもつ2次元山背後の剥離流を調べた例としては Coelho & Pereira(1992)⁽⁴⁾、Kobayashi ら(1994)⁽⁵⁾の研究が挙げられる。これらの研究によると、標準 $k-\epsilon$ モデルにより予測された平均速度は実験値とほぼ一致したが、風上斜面及び山頂での乱流エネルギーと乱流剪断応力がかかり過大に評価された。単体の2次元山の他に、複合山や3次元山を越える乱流場についても Kim ら(1997)⁽⁶⁾、Utnes & Eidsvik (1996)⁽⁷⁾により調べられ

た。山背後の剥離流については実験データが十分に得られていないため、詳しい検討が行われていない。一方、非線形モデルが実地形における風況予測にも適用されてきた^{(8) (9)}。Maurizi⁽⁹⁾の研究では格子間隔を200m~500mまでに変化させて、格子分解能が平均風速の予測結果に与える影響を調べ、格子サイズによりもたらす予測誤差が約10%であるという結果が得られた。しかし、200mの格子間隔は果たして十分かどうかについては不明である。

そこで、本研究ではまず著者らが最近開発した3次元風況予測プログラム MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain)を用いて、3次元孤立峰を越える乱流場を解析し、急峻な山を越える乱流場を調べるとともに、風洞実験の結果との比較を行うことにより本解析モデルの予測精度を明らかにする。そして、北海道日本海側の地形を代表する積丹半島の北端部を対象に 200m, 50m, 25m の3種類の格子を用いて2次元解析を行い、格子分解能が複雑地形における風況予測精度に与える影響を明らかにする。

2. 風洞実験

3次元風況予測プログラムの予測精度を検証するために、高い精度の実験データが必要となる。しかし、現在風洞実験でよく用いられている X 型熱線風速計は逆流を計測できない上、乱れの強さが 30%を超えると大きな測定誤差が生じる。そのため剥離を伴う急峻な地形周りの乱流場を測定した例が少ない。そこで、本研究では逆流を検出できるスプリットファイバースローブ⁽¹⁰⁾を用い、自然風を模擬した乱流境界層に置かれた3次元モデル山における各速度成分の平均値及びその標準偏差を計測し、数値解析モデルの検証データとした。図1には本研究に使用したモデルの断面形状及び座標系を示す。3次元孤立峰の断面は余弦の2乗の形状になっている。山の高さ H は 40mm, 底面長さ $2L$ は 200mm, 山の最大傾斜角度は 32° である。また山の表面及びそ

* 2000 年 11 月 17 日「第 22 回風力エネルギー利用シンポジウム」において講演、原稿受付

** 会員, ***非会員, 東京大学・工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

の風洞床に毛足の長さ 5mm の人工芝を設置し、樹木で覆われている地表面状態を模擬した。モデルは測定部入り口より風下方向 4.6m の所に設置された。風洞風速 U_{ref} は 5.9m/s に設定し、縮尺率 1000 分の 1 の大気乱流境界層を作成した。再現された大気境界層の高さは 0.36m (山の高さの 9 倍)、また地表面付近での流れの状態を表す粗度レイノルズ数 ($u_* z_0/\nu$) は 6.4 である。臨界粗度レイノルズ数 (2.3)⁽¹¹⁾ を超えていることから、今回の実験はレイノルズ数に依存しないことが分かる。風洞実験結果の詳細は文献 12 を参照されたい。

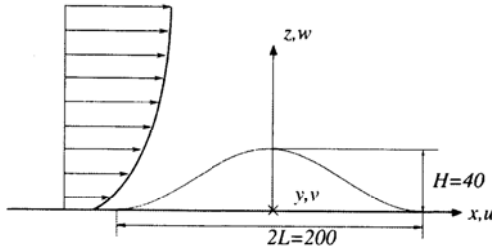


図 1 3次元孤立峰の断面形状と座標系

3. 風況予測モデル

3.1 支配方程式と乱流モデル

本研究で用いた支配方程式は (1)・(4) 式に示す。これらの式から、3つの平均風速成分 u_i 、圧力 p 、乱流エネルギー k とその消散率 ϵ が得られる。

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_j \epsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ & - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 ρ は空気密度、 μ は層流粘性係数、 μ_t は乱流粘性係数である。剥離を伴う流れ場を高精度に解析にはレイノルズ応力の近似方法が重要である。本研究では Shih et al (1995)⁽¹³⁾ により提案された非線形標準 $k-\epsilon$ を用いる。

$$\begin{aligned} \overline{u_i' u_j'} = & \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2 C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} S_{ij} \\ & + 2 C_2 \frac{k^3}{\epsilon^2} (-S_{ik} \Omega_{kj} + \Omega_{ik} S_{kj}) \end{aligned} \quad (5)$$

Shih のモデルは標準 $k-\epsilon$ モデルに比べ優れている点が幾つかある。一つは流れの実現性 (Realizability) の条件が満たされている。すなわち、ノーマルストレスが正であることと、速度のクロス相関は 1 を超えてはなら

ないことである。標準 $k-\epsilon$ モデル中のモデル係数 C_μ を一定であるのに対して、Shih のモデルでは C_μ が流れ場の関数となっているために、負のノーマルストレスの予測が発生しない。もう一つは (5) 式の右辺に第 3 項を加えたことにより、レイノルズ応力の非等方性の再現を可能にした。 C_μ と C_2 に関する詳しい記述は文献 13 を参照されたい。

3.2 数値解法と解析格子

任意地形上の流れ場を解析できるように、本研究では非直交コロケート格子を採用した。解析は一般曲線座標に基づく有限体積法を用いて行った。数値解法は Patankar により提案された SIMPLE 法に準じる。また数値的な振動を防ぐために、Rhie & Chow により提案された圧力加重補間法を用い、圧力と速度との結合を強化した。対流項の差分近似については速度に対して QUICK、乱流特性量である k 、 ϵ に対して一次風上差分、また対流項以外の項については 2 次中心差分を使用した。

図 2 には計算格子の一例を示す。山を越える流れ場の解像度を上げるために、山頂近傍に格子を集めた。解析領域は $60H \times 22.5H \times 30H$ である。入り口では平均速度 U と乱流エネルギー k の分布は山を設置しない時の風洞実験の結果を用いた。乱流エネルギーの散逸率 ϵ は乱流エネルギーと乱流の長さスケールから算出した。流出境界では平均流速と乱流量に勾配 0 の条件を与えた。側面境界についても同様な条件を与えた。圧力についてはすべての境界面において勾配 0 の条件を適用した。

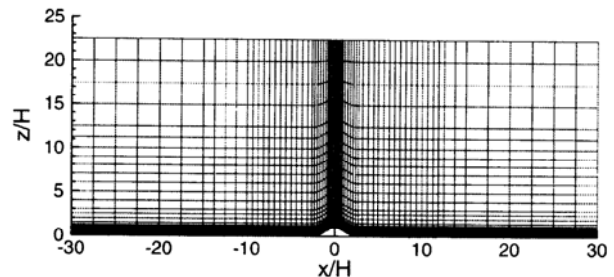


図 2 解析に用いた格子

4. 予測結果

4.1 3次元孤立峰

図 2 には 3次元孤立峰の中心断面における平均速度成分 U 、 W の鉛直分布を示す。全体的に見ると、Shih の非線形 $k-\epsilon$ モデルによる解析結果は実験値によく一致し、山背後の剥離域での流速分布も正確に再現している。一方、標準 $k-\epsilon$ モデルの解析結果は剥離域での平均流速成分 U を過大に評価し、また山を回り込む流

れの収束により形成された上昇流を正確に再現していないことが分かる。標準 $k-\varepsilon$ モデルが剥離域での平均流速成分 U を過大に評価する理由は乱流エネルギーの過大評価によるものと考えられる。

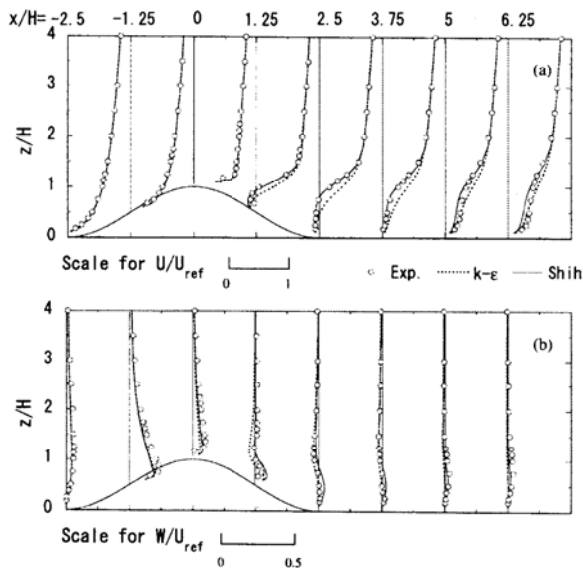


図3 3次元山の中心断面における平均速度成分 U , W の鉛直分布

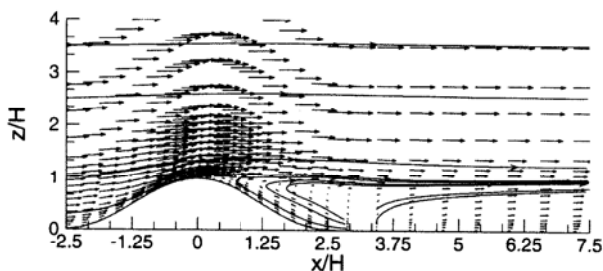


図4 3次元山の中心断面 ($y/H=0$) における平均速度ベクトルと流線

図4には3次元山の中心断面における平均速度のベクトルと流線(Shih のモデルによる)を示す。2次元山と同様に、山の登り斜面では流れの上昇が見られ、山の頂点を越えると流れの剥離が見られる。剥離するまでに2次元山と3次元山を越える流れ場のパターンには大きな差が見られないが、剥離した後の流れのパターンは2次元山と3次元山とは全く異なる。2次元の剥離域には閉じた流線が形成される⁽¹⁴⁾に対して、3次元の剥離域には開いた流線が形成される。2次元剥離の場合は流れが連続式を満たすために循環流を形成しなければならない。一方、3次元剥離の場合はスパン方向の流れが存在するために、循環流がなくても流れの連続式を満たすことができる。

3次元孤立峰周りの流れ場の構造を理解するために、3次元流線を作成し、図5に示した。山背後に回り込んだ流線は山の風下斜面に生じた上昇流にのって山頂まで持ち上げられた後に下流方向に流れていく。山背後に回り込む流れの存在は3次元の剥離域に開いた流線

パターンを形成される理由である。

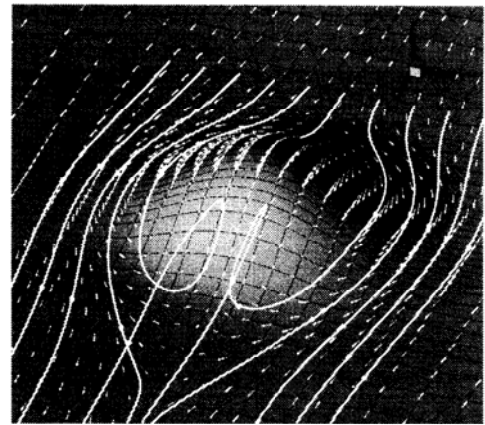


図5 3次元孤立峰における流線

風車の耐風安全性と耐久性を考える際に、変動風速の予測精度も重要である。急峻な3次元山を越える流れ場の乱流特性を過去に数値解析により調べた例が少なく、乱流モデルによる変動風速の予測精度について不明な点が多く残されている。図6には3次元山の中心断面 ($y/H=0$) における乱流エネルギーの鉛直分布を示す。Shih の非線形 $k-\varepsilon$ モデルによる予測結果は標準 $k-\varepsilon$ モデルより実験値に近い。特に標準 $k-\varepsilon$ モデルによる乱流エネルギーの過大評価は Shih のモデルにより大きく改善されている。Shih の非線形 $k-\varepsilon$ モデルによる乱流エネルギーの予測精度の向上は山の風上斜面及び山頂付近にも見られた。これは非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いることにより、レイノルズ応力の非等方性の予測精度が改善されたことによるものと考えられる。

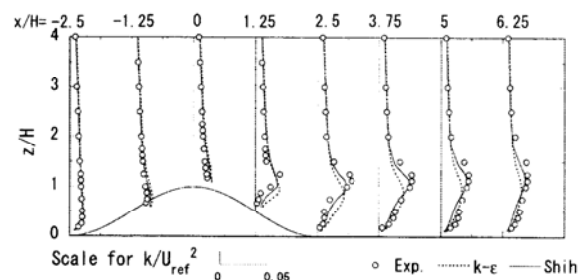


図6 3次元山の中心断面 ($y/H=0$) における乱流エネルギーの鉛直分布

4.2 実地形

本研究では実地形として積丹半島北端の急崖地を対象とした。この地区の北側が日本海、東側が石狩湾に面している。図7には積丹地区の鳥瞰図を示す。図中の6本の実線は平成5度に NEDO が実施した風況観測地点を表す⁽¹⁵⁾。海側の観測点は A, E, F, 陸側の観測点は B, C, D と定義されている。観測地点は標高 200m 前後のなだらかな丘陵地帯を中心に 6 箇所にあるが、その周囲は起伏度が激しい複雑地形となっている。特に

F 地点のすぐ北東側には海に向かって急激に落ち込む崖が存在し、観測地点はこの方位においては崖で吹き上げられた風の乱れと剥離の影響を強く受けていると思われる。このため、観測値は低い風速 2.4m/s を示したのに対して、WasP は風速 5.4m/s を予測した。

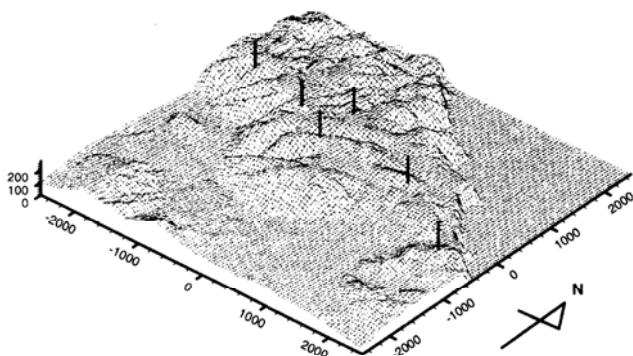


図 7 積丹地区の鳥瞰図

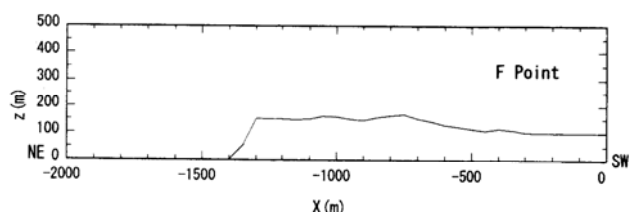


図 8 F 観測地点における鉛直断面図

そこで、本研究ではまず F 地点を対象にシミュレーションを行う。図8には F 観測地点における断面図を示し、最大傾斜角度は 63° である。解析風向は北東とし、上空風速は 5.9m/s に設定した。また格子間隔の影響を明らかにするために、今回の解析では2次元と仮定して行った。図9には 200m, 50m, 25m 間隔の格子を使用した時の平均風速のベクトルと流線を示す。格子間隔200mのケースでは流れが剥離しないのに対して、格子間隔50m以下のケースでは崖の前縁部に明確な剥離域が見られた。この剥離により、F 観測地点における平均風速が大きく低下している。反対に格子間隔200mのケースの場合には流れが増速している。

5. まとめ

本研究では、3次元孤立峰及び実地形を越える流れ場を3次元風況予測プログラム MASCOT により解析し、以下のような結論が得られた。

- (1) 本研究により開発された3次元風況予測プログラムは剥離に伴う急峻な地形を越える流れ場を高い精度で予測できることが分かった。乱流モデルによる違いは剥離域に顕著に見られた。標準 $k-\varepsilon$ モデルに比べ、Shih の非線形 $k-\varepsilon$ モデルによる平均速度と変動風速の予測結果は実験値によく一致する。
- (2) 日本における急峻な地形上の風況を高精度に予

測するには流れの剥離を再現できる非線形モデルが必要であり、また格子間隔を50m以下に設定する必要があることがわかった。

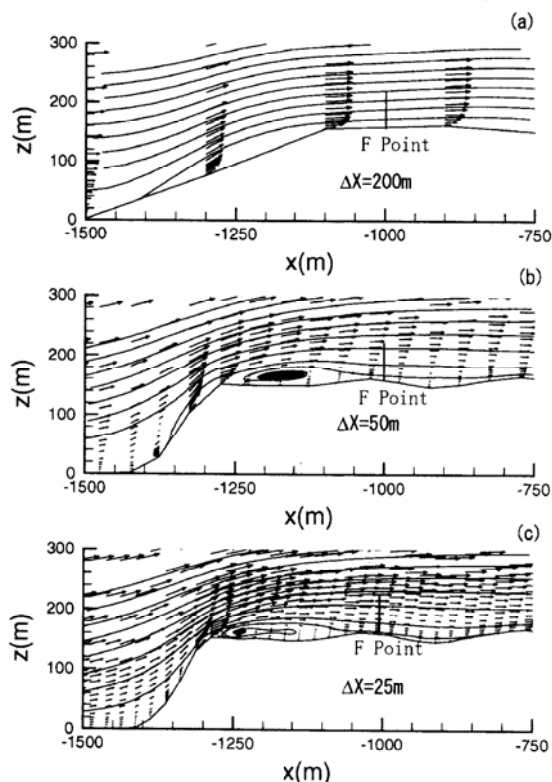


図 9 平均風速のベクトル図

文 献

- (1) P. S. Jackson and J. C. R. Hunt, Quart. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 101, 1975.
- (2) N.G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen And E.L. Petersen, Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1993.
- (3) 大木祥光, 河井宏允, 藤波潔, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.
- (4) P.J. Coelho and J.C.F. Pereira, Int. J. Num. Methods Fluids, Vol. 14, 1992.
- (5) Kobayashi, M.H. Pereira, J.C.F. and Siqueira, M.B.B., J. Wind Eng. and Ind. Aero., Vol.53, 1994.
- (6) H.J. Kim, C.M. Lee, H.C. Lim, and N.H. Kyong, J. Wind Eng. and Ind. Aero., Vol.66, 1997.
- (7) T. Utne and K. J. Eidsvik, Boundary-Layer Meteorol., Vol.79, 1996.
- (8) 清水幸丸, 前田太佳夫, 他, 風力エネルギー, Vol.19, 1994.
- (9) A. Maurizi, J.M.L.M. Palma and F.A. Castro, J. Wind Eng. and Ind. Aero., Vol.74-76, 1997.
- (10) IT. shihara, K. Hibi, and S. J. Oikawa, Wind Eng and Ind. Aero., Vol. 83, 1999.
- (11) 石原孟, 日比一喜, 日本風工学会論文集, No.73, 1997.
- (12) 石原孟, 日比一喜, 第 15 回風工学シンポジウム, 1998.
- (13) T. H. Shih, J. Zhu, and J.L. Lumley, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol.125, 1995.
- (14) 石原孟, 日比一喜, 日本風工学会論文集, No.83, 2000.
- (15) 平成9年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書, 風力発電新技術開発可能性調査 (風況予測手法に関する調査)。