

複雑地形における風況の測定と予測*

Measurement and Prediction of Wind Field in Complex Terrain

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

1. 緒論

風力発電量は風速の3乗に比例することから、小さな風速の予測誤差が大きな風力発電量の予測誤差につながる。そのため風力発電施設の計画段階においては風力発電機設置位置における正確な風況予測が大変重要である。しかし、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(例えば WAsP⁽¹⁾)は Jackson & Hunt⁽²⁾ により提案された線形モデル(JHモデルと呼ぶ)に基づくものであり、わが国のような急峻な地形における複雑風況を精度よく予測することが困難である。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 $k-\varepsilon$ 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な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が、実験または実測との対応は不明である。

そこで、本研究では、まず実地形をモデル化し、大型風

洞実験を行うことにより、複雑地形における風況データを取得すると共に、複雑地形における流れ場の性質を明らかにする。そして、新しく開発した非線形風況予測モデル MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain)を用いて複雑地形における流れ場を解析し、風洞実験結果と比較することにより、非線形モデルと線形モデルの予測精度を検証すると共に、風速の増減における地形効果を明らかにする。

2. 風洞実験

2.1 風洞実験の概要

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。平成5年には NEDO が積丹半島を対象に風観測を実施した⁽¹⁰⁾。観測地点(図1)は起伏の激しい丘陵地形上に位置し、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、観測値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。観測では NE 風向に風速 2.4m/s を示したのに対して、WAsP では風速5.4m/s を過大に評価した。

本研究では積丹半島の一部(直径8km)を縮尺 2000 の 1 で再現し、直径 4m のターンテーブルに設置した。図1は地形の等高線を示し、A~Gは測定点である。

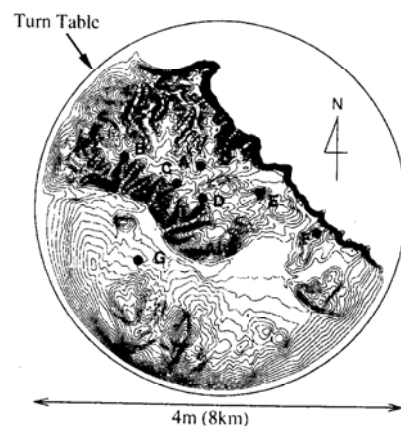


図1 地形の等高線と測定点の配置

* 2001年11月21日~22日「第23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)

実験は東京大学工学部風工学実験室にある全径間風洞(幅 16m, 高さ 1.9m, 長さ 5.8m)を使用した。図 2 には風洞実験の全景を示す。本研究では逆流を検出できるスプリットファイバースプロブ⁽¹¹⁾を用い、自然風を模擬した乱流境界層に置かれた実地形における流れ方向の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。測定は 8 風向とし、測定高さはそれぞれ 10, 20, 40, 70, 100, 150, 200, 300 m(実スケール)とした。なお本実験では、ローパスフィルターのカットオフ周波数は 500Hz に設定し、風速計からの出力は 1.0ms の間隔で A-D 変換を行った。

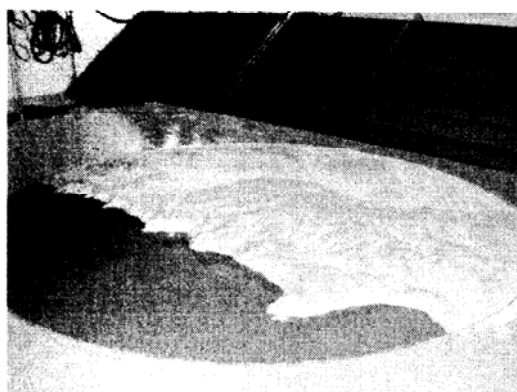


図 2 風洞実験の全景

2.2 風洞実験の結果

A点からG点までの風向別平均風速の測定結果から、7地点を4つのグループに分類した。4つのグループからそれぞれ1つの代表的な地点を選び、風向別平均風速と乱れの鉛直分布は図3と図4に対数軸で示した。風速の鉛直分布がべき則に従う場合には直線となる。

まず、測定点A, Eでは大きな増速と減速がどの風向にも見られず、風速の増加量は最大でも1m/s程度である。また平均風速と乱れ分布の風向による変化は全体的に小さく、局所地形の影響を強く受けていないことが分かる。図 3(a)と図4(a)には A 点での平均風速と乱れの鉛直分布を示す。

次に、測定点B, C, Dでは大きな増速が多くの風向に見られ、風速の増加量が2m/sにも達した。また平均風速の風向による変化も大きく、風向によって平均風速の鉛直分布はべき則から大きく外れる地点もある。この3つの地点の S 風向から W 風向にかけて複雑に入り組んだ地形が広がり、谷に沿う風による大きな増速が見られる。図 3(b)と図4(b)には B 点での平均風速と乱

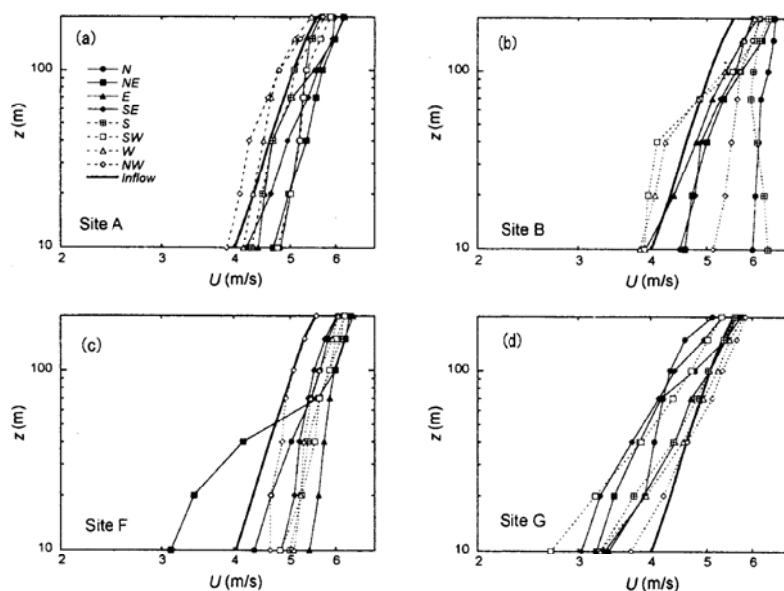


図3 風向別風速の鉛直分布

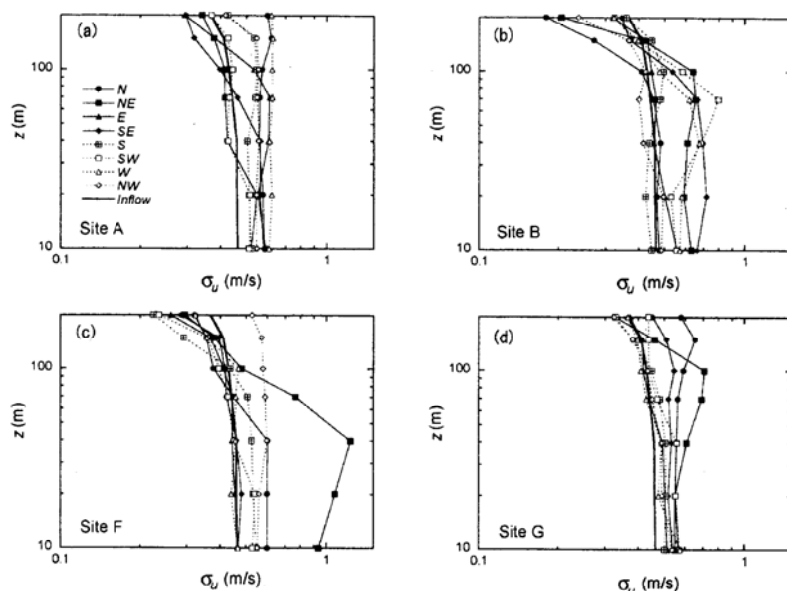


図4 風向別乱れの鉛直分布

れの鉛直分布を示す。全体的には平均風速分布のべき指数は小さく、S 風向においては平均風速分布のべき指数が負になっている。

一方、測定点Fでは海岸沿いに急峻な崖があるため、海からの風向(NE)では大きな風速の減少と急な乱れの増加が見られる。この風速の減少は風観測の結果とよく一致している。図 3(c)と図4(c)には F 点での平均風速と乱れの鉛直分布を示す。

最後に、測定点Gでは山に囲まれた窪地にあるため、前方に山がある風向では風速の減少が見られ、風車の設置地点を検討する際にはこのような窪地に特に注意を有する。風速の鉛直分布は全体的にべき則に従うが、べき指数の値は大きい。図 3(d)と図 4(d)には G 点での平均風速と乱れの鉛直分布を示す。

3. 数値予測

3.1 基礎方程式と数値解法

本研究で用いた基礎方程式は (1)-(4) 式に示す。これらの式を数値的に解くことにより、3つの平均風速成分 u_i 、圧力 p 、乱流エネルギー k と消散率 ϵ が得られる。

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

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

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

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

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。乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ を用いた。

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⁽¹²⁾。入り口での境界条件としては平均速度 U と乱流エネルギー k の分布は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。なお、本研究ではすべての解析結果を実スケールで示す。

3.2 解析結果

まず計算領域の大きさが解析結果に与える影響を調べる。ここで、流れ方向の地形のみを考慮した 2 次元計算 (C 点を対象に)、風直角方向に 2km までの地形を考慮した狭い 3 次元計算と地形模型全体を考慮した広い 3 次元計算の 3 つのケースについて解析を行った。図 5 には広い 3 次元解析に用いた計算領域を示す。

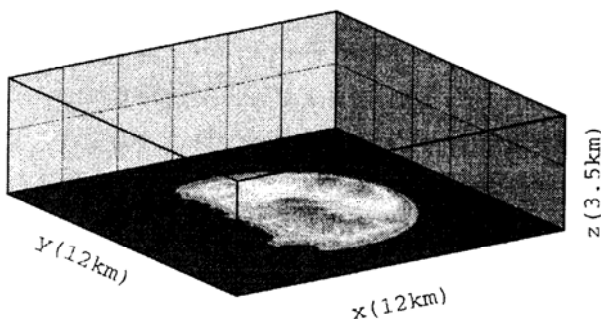


図 5 本解析に用いた計算領域

図 6 には C 点での平均風速の解析結果を示す。図中の点線、実線、鎖線はそれぞれ 2 次元計算、狭い 3 次元計算と広い 3 次元計算の結果を表す。実験に比

べ、2 次元と狭い 3 次元計算は高さ 40m での平均風速を 1 割以上過大に評価していることが分かる。それに対して広い 3 次元解析から得られた計算結果は実験値とよく一致する。これは地形を回り込む流れが 2 次元と狭い 3 次元計算で再現されていないことによるものであり、実地形における風況予測を行う際には解析領域を十分に大きく取る必要があることが分かる。

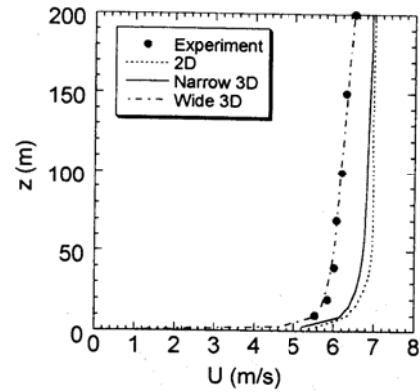


図 6 C 地点での平均風速の鉛直分布

次に、格子間隔の影響を明らかにするために、100m、50m、25m の 3 種類の格子を用いて解析を行った。図 7 には F 点における平均風速の鉛直分布を示す。図中の点線、実線、鎖線はそれぞれ 100m、50m、25m 間隔の格子を使用した時の結果を表す。格子間隔 50m と 25m のケースでは高さ 50m 以上の領域における風速の増加が再現され、またそれ以下の高さでの風速の急激な減少も見られた。この傾向は風洞実験の結果とよく一致する。一方、格子間隔 100m のケースではこの傾向が再現されておらず、実験に比べ、高さ 50m 以上の領域では平均風速が過小に評価され、またそれ以下の高さでは平均風速が過大に評価されていることが分かる。

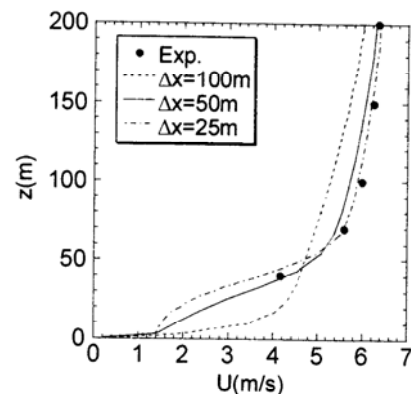


図 7 F 地点における平均風速の鉛直分布

図 8 には F 点における鉛直断面内の平均風速ベクトル (NE 風向) を示す。F 点の北東には急な崖があり、そこで流れの剥離が生じていることが予想される。格子間隔 50m と 25m のケースでは崖の前縁部に明確な剥離

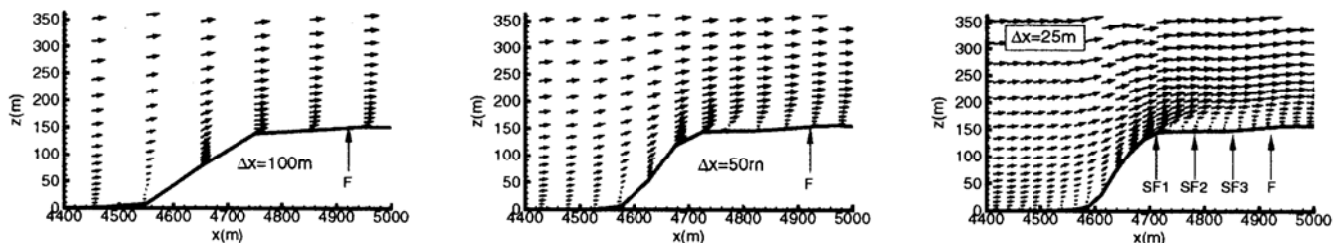


図8 F点における鉛直断面内の平均風速ベクトル (NE 風向)

域が見られたのに対して、格子間隔 100m のケースでは流れの剥離を捉えていないことが分かる。

最後に、線形モデルの問題点を明らかにするため、非線形モデルと線形モデルの詳細比較を行った。図 9 には F 点付近の平均風速の鉛直分布を示す。崖に近い場所では剥離による減速が大きく、下流に行くに従って減速の範囲が高くなる現象が非線形モデルによって再現された。それに対して、線形モデルは、すべての高さにおいて平均風速を過大に評価していることが分かる。

図10には NE 風向における非線形モデルと線形モデルの予測結果と実験結果との比較を示す。線形モデルでは殆どの地点において平均風速を過大に評価している。平均風速の予測誤差は 40m と 70m の高さではそれぞれ 19.3% と 13.3% である。それに対して、非線形モデルでは平均風速の予測値には偏りがない。また平均風速の予測誤差は 40m と 70m の高さではそれぞれ 9.6% と 6.4% になっていることが分かった。

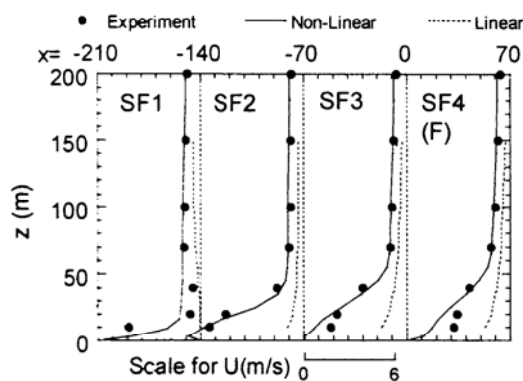


図9 F点付近の平均風速の鉛直分布 (NE 風向)

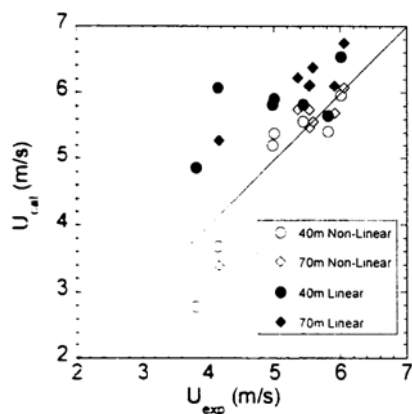


図10 非線形モデルと線形モデルの比較 (NE 風向)

4. まとめ

本研究では大型風洞実験により実地形における平均風速及び乱れの鉛直分布を測定すると共に、非線形風況予測モデルを用いて複雑地形における流れ場を解析し、以下の結論を得た。

(1) 本研究で対象とした複雑地形における風況は概ね 4 種類に分類できることが分かった。また地形の3次元性による風速の増速効果及び急峻な崖での剥離による風速の減速効果を明らかにした。

(2) 複雑地形上の流れ場を精度よく評価するには風直角方向に幅の広い 3 次元計算を行う必要がある。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。

(3) 3次元性を有する複雑地形上の流れ場や剥離を伴う急峻な崖付近での流れ場は非線形モデルにより再現できた。また予測誤差は線形モデルより低く、10 % 以下となっていることが分かった。

文 献

- (1) N.G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen And E.L. Petersen, Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP), Riso National Laboratory, Denmark, 1993.
- (2) P. S. Jackson and J. C. R. Hunt, Quart. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 101, 1975.
- (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, 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) 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).
- (11) T. Ishihara, K. Hibi, and S. Oikawa, J. Wind Eng and Ind. Aero., Vol. 83, 1999.
- (12) 石原孟, 日比一喜, 日本風工学会論文集, No.83. 2000.