



特集



複雑地形における局所風況の測定と数値予測

Experimental and Numerical Study of Local Wind Field in Complex Terrain

石原 孟¹⁾

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

複雑地形における局所風況を定量的に評価することは構造物の安全性、風力エネルギーの有効利用、大気汚染物の拡散などの工学問題を考える上で重要である。特に我が国においては国土の約8割が山地であり、複雑地形上の局所風況を精度よくかつ効率的に評価する手法の開発が望まれている。複雑地形上の流れ場を定量的に評価する手法としては風洞実験と数値解析があり、それぞれの手法には長所と短所がある。

風洞実験は一般に流体力学の相似則に基づいているため、風洞内に作られた流れ場は実際の風を再現しており、この流れ場を正しく計測できれば、風洞実験から得られた風速データは最も信頼性が高い。しかし、剥離を伴う急峻な地形上の流れ場を精度よく測定することは容易ではない。また地形上の流れ場を風洞内に再現するには地形模型が必要となる。一般に地形模型を製作するには多くの時間と費用がかかる上、再現可能な範囲も風洞の大きさにより制限される。一方、数値解析は風洞実験のような制約を受けることがなく、広い範囲の地形を取り扱うことができる。また数値解析では解析空間内のすべての風速データを一度に得ることができるため、風洞実験に比べて低コストかつ短時間で複雑地形上の局所風況を予測できるメリットがある。しかし、地形上の流れ場を数値解析により調べる際には数値解法や乱流モデルに伴う不確実性が解析結果に含まれる。そのために数値解析により得られた結果はどの程度の予測精度があるか十分に検証する必要がある。

本論文は著者が最近行ってきた研究を例に、複雑地形における局所風況の測定と数値予測の現状とその可能性について紹介する。第2章では逆流の測定できるスプリットファイバークロウによる急峻な地形を越える乱流場に関する風洞実験の結果を説明し、急峻な地形周りの流れ場の平均速度分布とその乱流特性を明らかにすると共に^{1)~4)}、実地形モデルを用いた大型風洞実験結果を紹介する⁵⁾。第3章では著者が最近開発した局所風況予測モデル MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain)を用いて急峻な地形を越える流れ場の性質を明らかにすると共に^{6),7)}、複雑地形上の局所風況を予測する際の注意点を

説明する^{8),9)}。最後に、局地風況予測モデル MASCOT の応用例を紹介し、地形の傾斜勾配が局地風況に与える影響を明らかにすると共に¹⁰⁾、実地形における局所風況予測結果と実測結果とを比較することにより、局地風況予測モデルの精度を明らかにする¹¹⁾。

2. 急峻な地形における局所風況の測定

一般に急な斜面をもつ山背後の流れ場は乱れが大きく、剥離に伴う逆流も生じている。このような場所で通常風洞実験によく用いられている X 型熱線プローブを使用すると、流れ場の測定結果に大きな測定誤差が生じる。例えば、後流域における主流方向の平均速度成分は X 型熱線プローブにより過大に評価され、また主流に直角方向の速度成分の標準偏差が過小に評価される^{1), 2)}。X 型熱線プローブによる測定誤差は剥離域のみならず、複雑地形における流れ場の測定結果にも見られる⁵⁾。急峻な地形周りの流れ場を精度よく測定するために、逆流の測定できるスプリットファイバークロウを用いる必要がある。

2.1 単純地形周りの流れ場の測定

緩やかな地形の場合は流れの剥離を伴わないため、地形の存在が元の乱流境界層に与える影響を微少擾乱として近似的に評価することができる。一方、急峻な地形を越える乱流境界層の場合は、流れが剥離するため、地形後流の流れ場は元の乱流境界層とまったく異なる性質を示す。この場合には流れの非線形性が強いために、流れ場に関する線形的な評価方法が有効でなくなる。急峻な地形を越える流れ場の平均速度分布及びその乱流構造を明らかにするため、乱流境界層に置かれた 2 次元と 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系統的に調べた。

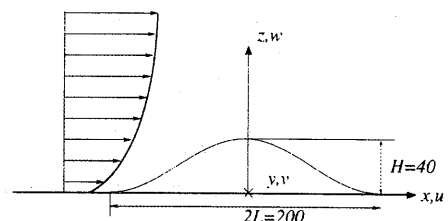


Fig.1 Notations used in this study.

¹⁾ 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

助教授 Associate Professor University of Tokyo

Table 1 Aerodynamic parameters in the experiment

Case	δ/H	z_r/H	H/z_0	Re_H	R_*
2ds	9.0	0	4000	1.2×10^4	0.14
2dr	9.0	0.125	133	1.0×10^4	6.4
3ds	9.0	0	4000	1.2×10^4	0.14
3dr	9.0	0.125	133	1.0×10^4	6.4

実験モデルは余弦の 2 乗の断面形状をもつ。本実験に用いた座標系と記号は Fig.1 に示し、 x, y, z 軸はそれぞれ流れ方向、風向直角方向、鉛直方向にとる。 x, y 軸の原点は山の中心軸の位置とし、 z 軸は床面からの高さを表す。山の表面からの高さは第 2 の鉛直軸 z' で表す。Table 1 には各実験ケースの定義及び主な無次元パラメーターを示す^{3),4)}。

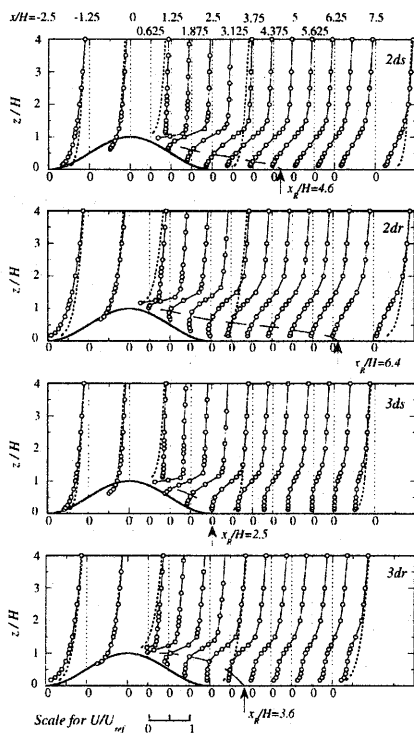


Fig. 2 Vertical profiles of the streamwise velocity components normalized by the reference velocity.

Fig. 2 には中心断面 ($y=0$) における平均速度成分 U の鉛直分布を示す。図中の点線は元の乱流境界層

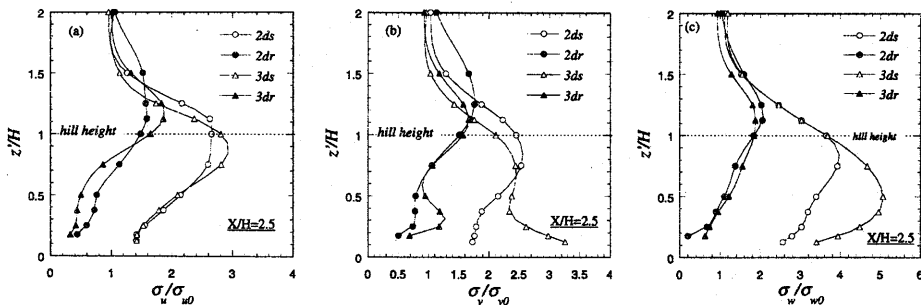


Fig. 3 Variation with height z' of the three normal stress components at the position of $x/H=2.5$ (normalized with corresponding values over the flat floor).

における平均速度の鉛直分布 (山の中心軸位置での測定値) を示している。平均速度成分 U はいずれのケースにおいても山の風上側の麓で減少し、山の頂上で大きく増大する。また山の背後には流れの剥離に伴い、逆流域が形成されている。図中の一点鎖線は流れ方向の速度成分が 0 となる位置を示している。全体的に見ると、2 次元山背後の剥離域が大きく、元の乱流境界層への影響も大きい。地表面粗度が流れ場に与える影響は山背後の剥離域の大きさにはっきりと現れている。粗度の小さい山に比べ、粗度の大きい山を越える流れ場の剥離域が大きくなるのが分かる。

流れの剥離は平均速度場のみならず、境界層中の乱流構造にも大きな影響を与える。その結果、山の背後の乱流境界層は元の乱流境界層とまったく異なる性質をもつ複雑乱流場となっている。

Fig3 は山の風下麓における3つの変動風速成分の標準偏差の鉛直分布を示し、山が設置されていない時の値により無次元化されている。いずれのケースにおいても流れ方向の変動速度はほぼ山の高さでピークをもつ。これらのピークは流れの剥離によって作られ、その位置は最大速度勾配の発生位置にほぼ対応している。一方、鉛直方向の変動速度成分は 2 次元と 3 次元山が異なる。特に地表面粗度の小さい 3 次元山のケース (3ds) ではピークの高さが $0.5h$ にまでさがっている。2 次元と 3 次元山の違いが最も顕著に見られたのはスパン方向の変動速度成分である。山の高さに見られたピークが下流側に行くにつれ弱くなり、代わりに壁面近傍にもう一つのピークが現れている。このピークは 2 次元山の後流に全く見られない。また σ_v のピーク値は地表面粗度の小さいケース (3ds) では大きく、地表面粗度の大きいケース (3dr) ではかなり小さくなる。3 次元山の後流域での乱流特性は、山の背面での剥離流の影響を受ける以外に、壁面近傍の層において山を回り込む流れの影響も受けている。壁面近傍で σ_v のピークの出現は山を回り込む流れの構造に深く関係している^{1),2)}。

2.2 実地形上の流れ場の測定

単純地形と異なり、実地形上の局所風況は流れの相互作用により、一層複雑になる。このような実地形上の

局所風況を精度よく予測するため、まず実地形における複雑流れの性質を明らかにする必要がある。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。観測地点 (Fig.4) 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 風向で年平均風速 2.4m/s を示したのに対して、従来の線形風況予測モデル WAsP では風速 5.4m/s と過大に評価している。

本研究では積丹半島の一部 (直径 8km) を縮尺 2000 分の 1 で再現し、直径 4m のターンテーブルに設置した。Fig. 4 には地形の等高線を示し、A~G は測定点であり、観測地点に対応している。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。Fig.5 には風洞実験の全景を示す。

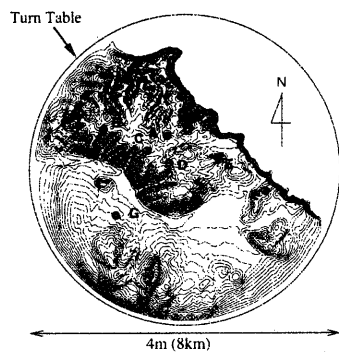


Fig.4 The locations of each observation sites

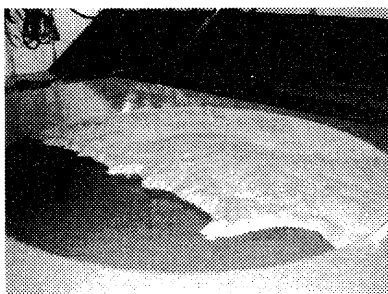


Fig.5 The terrain model used in this study.

測定は逆流を検出できるスプリットファイバークロブ²⁾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, 300m (実スケール) とした。

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できることが分かった。例えば、測定点Aでは大きな増速と減速がどの風向に

も見られず、局所地形の影響を強く受けていないことが分かる (Fig6(a))。一方、測定点 B, C, D では平均風速の風向による変化も大きい。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 (Fig6(b))。更に測定点 E, F では F 点が急峻な崖に近いので、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 (Fig.6(c))。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る (Fig.6(d))⁵⁾。

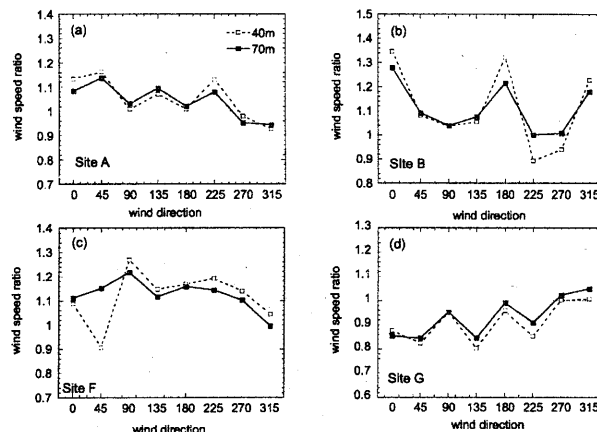


Fig. 6 Variation of speed-up ratio with the wind directions at the several locations.

このように複雑地形上の局地風況は場所や風向によって大きく変化し、数地点での観測データから地域内の詳細な風況分布を定量的に評価することが困難である。従って、橋梁や架空送電線などのような長い構造物を設計する際に必要な広い範囲にわたる平均風速と乱れの空間分布を風洞実験により求める場合、多大な労力と費用がかかる。これまでに建設された構造物の数の膨大さとその分布の広さを考えると、広域風況データを風洞実験により求めることは殆ど不可能である。それに対して、数値解析では解析空間内のすべての風速データを一度に得ることができるため、広域風況の詳細データを得るには適していると思われる。以下の章では局所風況の数値予測の現状について説明し、複雑地形における局所風況の数値予測の精度とその応用例を紹介する。

3. 急峻な地形における局所風況の数値予測

緩やかな地形に比べ、急峻な地形上の局所風況は剥離を伴うため、数値解析により精度よく求めることが難しい。それに加え、実地形の場合には解析領域の取り方、格子分解能、境界条件の設定等の不明確な点が多い。これまで実地形に関する数値解析例が少ない。

そこで、本研究では任意地形上の流れ場を解析でき

る局地風況予測モデル MASCOT を開発した。このプログラムは非直交コロケート格子と一般曲線座標に基づく有限体積法を採用した。数値解法は Patankar により提案された SIMPLE 法に準じている。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。このプログラムを用いて3次元孤立峰を越える乱流場を解析し、急峻な山を越える流れ場の特性を詳しく調べるとともに、風洞実験結果との比較により本局地風況予測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解析を行い、解析領域や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調べると共に、従来の風況予測モデルの問題点を明らかにする。

3.1 単純地形周りの流れ場の数値予測

構造物に作用する風荷重は平均風速2~3乗に比例するため、平均風速の予測精度は極めて重要である。Fig.7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、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を正確に再現し、また山を回り込む流れの収束により形成された上昇流も正確に再現されていることが分かる。標準 $k-\epsilon$ モデルが剥離域での平均流速成分 U を若干過大に評価している。これは乱流エネルギーの過大評価によるものである。

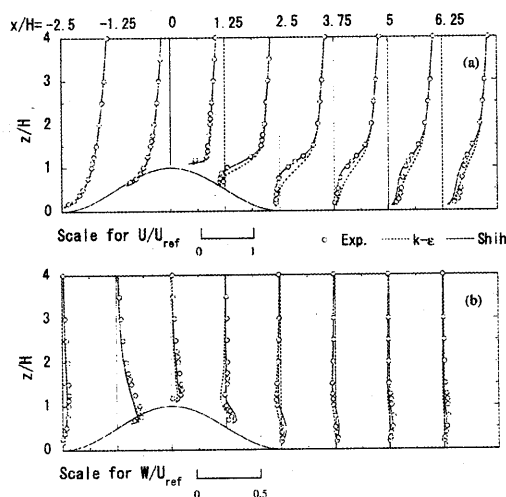


Fig. 7 Vertical profiles of mean velocities in the central plane of the 3D hill.

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、Fig.8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の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2次元の剥離域に比べ、3次元の剥離域に開いた流線パターンを形成する原因となっている^{6),7)}。

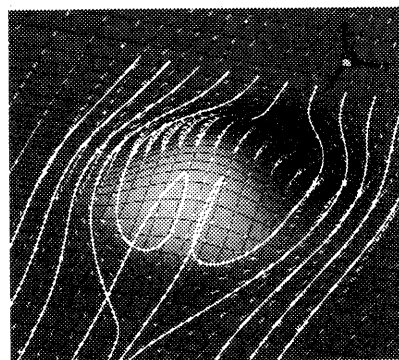


Fig. 8 Streamlines over the 3D hill.

構造物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。Fig.9には3次元山の中心断面における乱流エネルギーの鉛直分布を示す。乱流モデルによる予測結果は実験結果をほぼ再現している。また標準 $k-\epsilon$ モデルによる乱流エネルギーの過大評価は Shih の非線形 $k-\epsilon$ モデルにより大きく改善されている。これは非線形 $k-\epsilon$ 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。

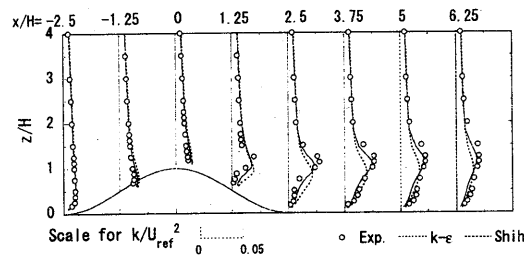


Fig. 9 Vertical profiles of mean velocities in the central plane of the 3D hill.

このように本研究で開発した局地風況予測モデルは平均風速のみならず、乱れも精度よく予測できることが分かる。またこれらの解析結果により風洞実験から得られにくい3次元後流の空間構造を明らかにすることができる。

3.2 実地形上の流れ場の数値予測

先に述べたように、実地形上の局地風況を数値解析により求める場合は解析領域の取り方、格子分解能、境界条件の設定等の不明確な点が多い。例えば、C地点を対象に、流れ方向の地形のみを考慮した2次元計算(ケース1)、風直角方向に2kmまでの地形を考慮した狭い3次元計算(ケース2)と、Fig.10に示すような地形全体を考慮した広い3次元計算(ケース3)を行った場合には地形全体を考慮した広い3次元計算結果が実験値によく一致するのに対して、2次元と狭

い 3 次元計算では高さ 40m での平均風速が1割以上過大に評価されていることが分かった(Fig.11(a))⁸⁾。

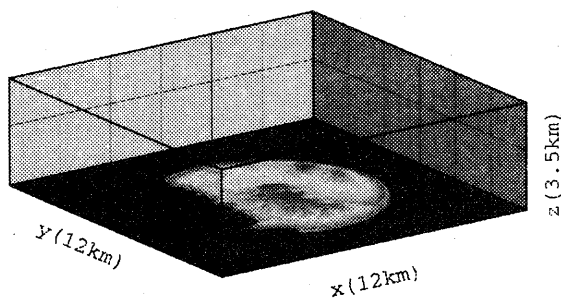


Fig.10 Computational domain used in this study

一方、格子分解能については Fig.11(b) に示すように、50mと 25m の格子を用いる場合には高さ50m以上の領域における風速の増加とそれ以下の高さでの風速の急激な減少が再現されるが、格子間隔 100mのケースでは実験に比べ、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。これは格子間隔 100mでは、元の地形形状が解像できず、流れの剥離が発生しなくなることによる⁸⁾。更に実地形から一部分を取り出して解析を行う場合は境界条件の設定が重要である。境界の処理方法によって、解析領域内の平均風速が過大または過小に評価されることが分かっている。これについては文献9を参照されたい。

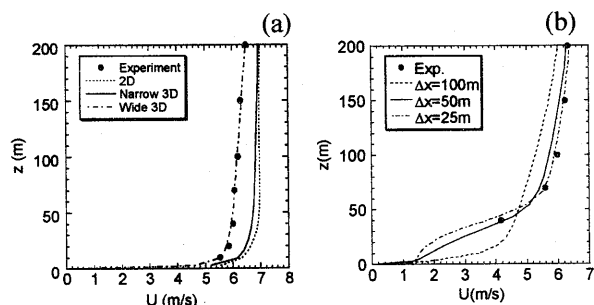


Fig.11 Dependence of mean velocity profile on the computational domain and grid size.

最後に、従来風況予測によく使われている線形モデルの問題点を明らかにするため、非線形モデル MASCOT と線形モデル WAsP による予測結果の比較を行った。Fig. 12 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、50m 高さ以下において平均風速を過大に評価していることが分かる。従って、日本のような地形が急峻な場合には線形モデルを適用する際に注意を有する。

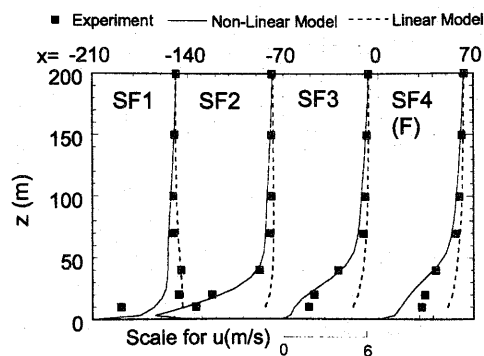


Fig. 12 Comparison of measured velocity profiles and predicted those obtained by MASCOT and WAsP.

4. 局地風況予測モデルの応用例

最後に、局地風況予測モデル MASCOT の応用例を紹介する。まず地形の傾斜勾配が局地風況に与える影響を明らかにする¹⁰⁾。そして、実際地形を対象に局所風況の数値予測結果と実測結果とを比較し、局地風況予測モデルの有用性を示す¹¹⁾。

4.1 地形の傾斜勾配が局地風況に与える影響

第3章にも述べたように、地形を越える流れ場は地形の急峻の度合い、すなわち、地形の傾斜勾配に大きく依存する。これまでに、剥離を含む急峻な山を解析した例が少なく、傾斜角度を系統的に変化させて解析した例も少ない。そこで、本研究では、山の傾斜角の変化が流れ場に与える影響を詳しく調べるために、山の平均傾斜角(=tan⁻¹(H/2L)) 2.9 度、5.7 度、11.3 度、21.8 度、38.7 度の5つのケースについての解析を行った。

Fig.13 には代表的な3つのケース(5.7 度、11.3 度、21.8 度)における流れの流線を示す。平均傾斜角 5.7 度(L/H=5)のケースでは流れが剥離せず、山を越える流れの流線はほぼ対称となっている。平均傾斜角が 11.3 度(L/H=2.5)になると、山背後に弱い剥離流が形成される。この剥離流は壁面近傍にしか見られない。更に傾斜角が 21.8 度(L/H=1.25)になると、山の背後に大きな循環流が形成される。この場合、山背後の流れ場は接近流と全く異なる。

山を越える風速の増速率を正しく評価することは構造物に作用する風荷重を予測する上で重要である。Fig.14 に山頂での増速率(S=U(z)/U₀(z))の傾斜角による変化を示す。山頂での増速率は山の傾斜角と共に単調に増大せず、平均傾斜角 11.3 度の時に最大となる。Fig.13 から分かるように傾斜角が 11.3 度を越えると、流れの剥離が顕著となり、山の背後に止水域ができ、見かけ上地形の形が変化してしまう。その結果、地表面近傍の風速の増大が抑えられていることが分かる。

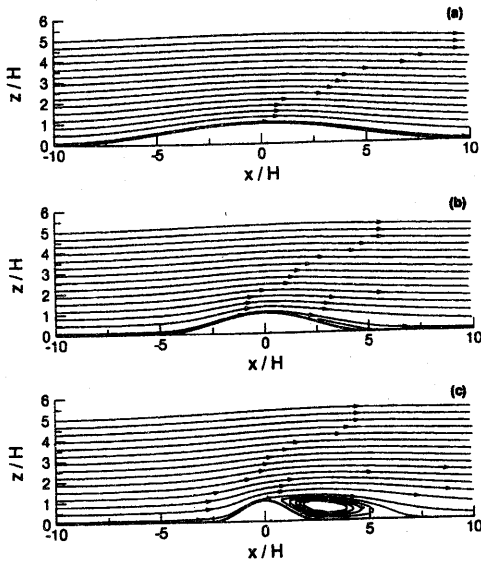


Fig.13 Streamlines over several two-dimensional ridges.

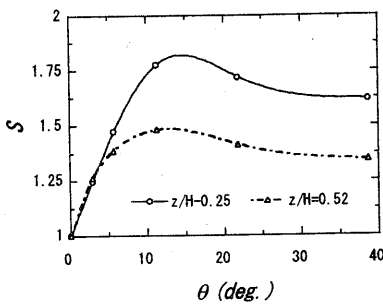


Fig.14 Variation of speed-up ratio with slope of terrain.

4.2 竜飛ウインドパークの年平均風速の予測

最後に、局地風況予測モデルを用いて実際の複雑地形を対象に解析を行い、実測データと比較することにより、風況予測モデルの実用可能性を示す。本研究では青森県の竜飛岬を解析の対象とした。そこには東北電力(株)の集合型風力発電基地「竜飛ウインドパーク」があり、10機の風車が設置されている。10機の風車のナセル上に風車型風向風速計が設置されており、風速・風向の10分平均値が観測されている。本研究では1997年の観測データを検証データとして用いた。Fig. 15には年平均風速の予測結果を示す。この図から分かるように、1号機と6~10号機では線形と非線形モデルによる予測値が観測値とよく一致している。一方、2~5号機では線形モデルが年平均風速を過大に評価している。2~5号機では山頂のやや低い場所に位置するため、主風向Wに対して上流側の地形の影響を受け、風速が減少している。しかし、従来の線形モデルではこのような風速の減少を再現できない。10機平均では線形モデルWASPの予測誤差が14.2%であるのに対して、非線形モデルMASCOTは4.9%となる。非線形モデルにより予測精度は格段に向上され、これにより風車の最適配置などが可能になる。

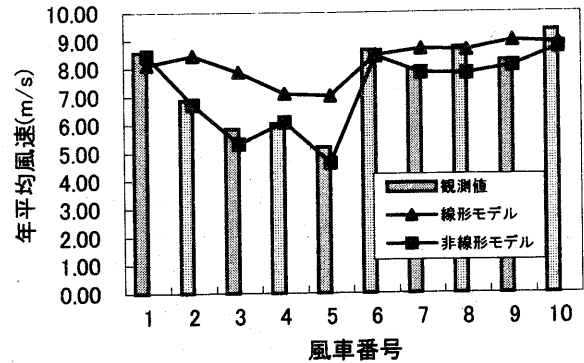


Fig. 15 Comparison of measured annual mean wind speed and predicted those obtained by MASCOT and WASP.

5. まとめ

本論文では複雑地形における局所風況の測定と数値予測の現状とその可能性について著者が最近行ってきた研究を例にして紹介し、複雑地形を越える流れ場の平均速度分布とその乱流構造を解明したと共に、数値解析によりこのような複雑流れの予測可能性と予測精度を風洞実験及び実測データにより明らかにした。局地風況予測モデルの応用例から分かるように、数値解析からは複雑地形における多くの流れ現象を解明でき、また実際の複雑地形における局所風況を精度よく予測することができる。第1章にも述べたように、我が国においては国土の約8割が山地であり、複雑地形上の局所風況の数値予測は耐風工学のみならず、風力エネルギーの有効利用、大気環境評価などの工学問題を考える上で今後ますます重要であろう。

参考文献

- 1) 石原孟, 日比一喜, 日本風工学会論文集, No.73, pp.3-14, 1997.
- 2) T. Ishihara, K. Hibi and S. Oikawa, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.83 pp.95-107, 1999.
- 3) 石原孟, 日比一喜, 第15回風工学シンポジウム, pp.61-66, 1998.
- 4) T. Ishihara, Y. Fujino, K. Hibi, J. of Wind Engineering, No.89, pp.573-576, 2001.
- 5) A.Yamaguchi, T. Ishihara, Y. Fujino, J. of Wind Eng. Indus. Aerodyn., 2002 (Accepted).
- 6) 石原孟, 日比一喜, 日本風工学会論文集, No.83, pp.175-188, 2000.
- 7) T. Ishihara, K. Hibi, J. of Wind and Structures, Vol.5, No.2-4, pp.317-328, 2002.
- 8) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 第23回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, pp.188-191, 2001.
- 9) 山口敦, 石原孟, 藤野陽三: 複雑地形における局所風況の数値予測, その1 境界処理, 第57回土木学会年次学術講演会梗概集, 2002 (投稿中).
- 10) 石原孟, 日比一喜, 第16回風工学シンポジウム論文集, pp. 37-41, 2000.
- 11) 堀籠健, 石原孟, 藤野陽三. 複雑地形における局所風況の数値予測, その2 実測による検証, 第57回土木学会年次学術講演会梗概集, 2002 (投稿中).