

# 風力発電サイト立地選定のための 局所風況予測システム LAWEPS の開発

Development of Local Area Wind Energy Prediction System (LAWEPS) for Selecting  
Suitable Site for Windmill

村上 周三\*, 持田 灯\*\*, 加藤 信介\*\*\*

\*慶應義塾大学理工学部 \*\*東北大学大学院工学研究科

\*\*\*東京大学生産技術研究所

Shuzo Murakami, Akashi Mochida and Shinsuke Kato

\* Keio University \*\*Tohoku University \*\*\*IIS, University of Tokyo

E-mail: murakami@sd.keio.ac.jp

## 1 はじめに

近年の環境問題への関心の高まりから、風力エネルギーが注目を集め、各分野で研究が進められている。風力による発電量は風速の 3 乗に比例するので、地形や樹木等により局所的に大きく変化する風速分布を正確に予測し、風車の立地選定を適切に行なうことが極めて重要なとなる。しかしながら、従来、広く用いられてきた代表的な風況予測モデルである WAsP<sup>1)</sup>や AVENU<sup>2)</sup>は Jackson-Hunt<sup>3)</sup>により導入された線形理論に基づいており、平坦な地形、あるいは傾斜角 5 度程度より穏やかな斜面周辺の流れは比較的精度良く予測することができるが、急峻な地形に適用することは困難である<sup>4)-6)</sup>(注 1)。従って、国土の多くの領域が急峻な山岳地形で占められている我が国や地中海沿岸の地域において、風況予測を正しく行なうためには、線形化を施されない原 Navier-Stokes 方程式に基づいた、より精密なモデルが必要とされる。

筆者らは、近年、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究プロジェクトの一環として、急峻な山岳地形にも適用可能な局所的風況予測システム (Local Area Wind Energy Prediction System : LAWEPS) の開発進めている(注 2)。本プロジェクトでは実務への利用が可能な計算負荷で、年平均風速を 10% 以内の誤差で予測可能な数値予測システムの開発を目指しており、1999 年度にはじまり、2002 年度に終了する予定である。本稿では、現在までの本プロジェクトにおける活動と成果について紹介する。

## 2 プロジェクトの概要

### 2.1 予測システムの概要

Figure 1 に本プロジェクトとここで開発される予測システムの概要を示す。研究グループは、注 2 に示すように、気象学、風工学、建築学、機械工学等の各分野の専門家により構成されている。

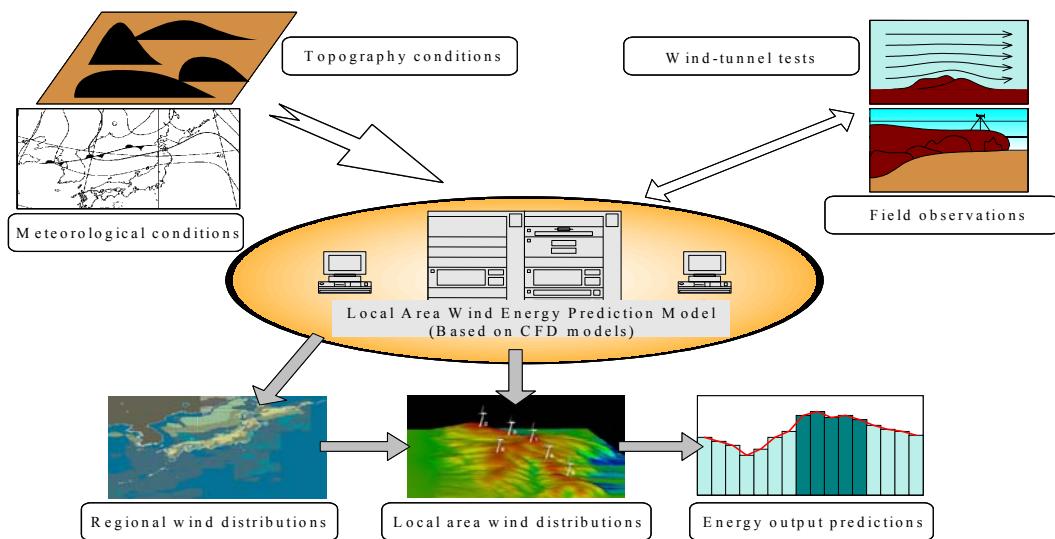


Figure 1 Development of the local area wind prediction system

## 2.2 5段階の解析領域

本研究では、Figure 2に示すような5段階の解析領域を考えている。最も大きい1次領域(1st Domain)は水平距離500kmスケールの領域であり、気象庁予報結果の格子点値(GPV: Grid Point Values)を初期値・境界値とする解析を行う。そして5段階のNesting Grid Systemにより、1~5次の領域を接続した解析を行う。ここで、1次~3次領域では、気象分野の乱流モデルを用い、一番内側の5次領域(水平距離:1kmスケール、水平格子間隔:約10m)では、工学分野のモデルを利用する。3次領域と5次領域の中間に設けられた4次領域は、気象分野のモデルと工学分野のモデルを接続するために設けられた領域である。

## 2.3 乱流モデル

### (1) 1次~3次領域のモデル

1次~3次領域を対象としたモデルでは、運動量の輸送方程式の他に温位、水分混合比の輸

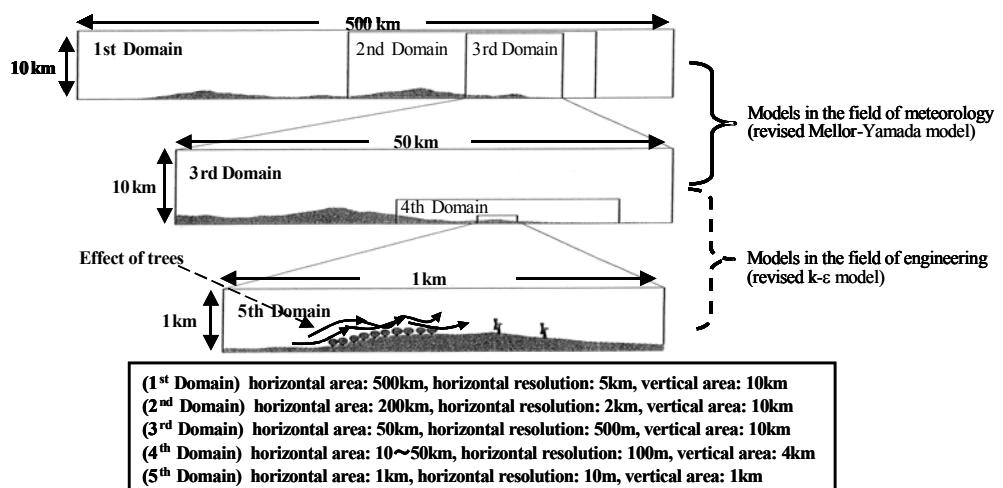


Figure 2 5 computational domains for multi-step wind simulation system

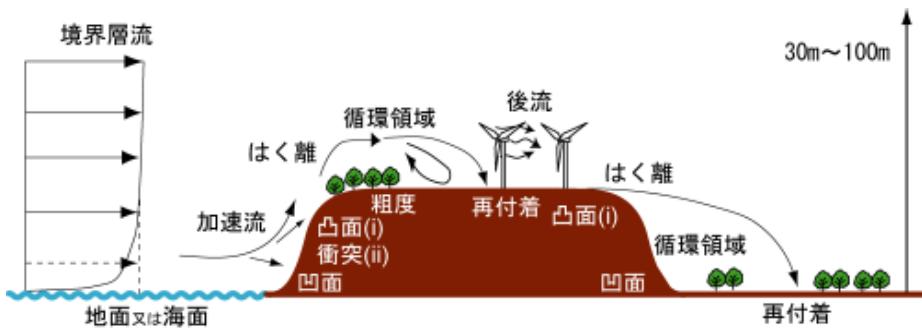


Figure 3 Factors affecting the flow around a hilly terrain (Nagano et al.)

送方程式も解く。そしてこれらの領域のための closure model としては、中西により提案された Mellor-Yamada の level 2.5 の改良版<sup>7)8)</sup>を用い(注 3)、乱流エネルギーの輸送方程式を解き、乱れの長さスケールは代数式より与える。また、1 次～3 次領域では、計算時間を短縮するために、静力学平衡を仮定して圧力を求め(注 4)、4 次、5 次領域では、非静力学モデルを用いている。

### (2) 4 次領域のモデル

4 次領域では、次に述べる 5 次領域で使用する改良型の  $k-\varepsilon$  モデルに対して、さらに Mellor-Yamada の level 2.5 のモデル相当の浮力効果のモデリングを組み込んだモデルを使用している。この領域では、1 次～3 次領域と同様に、温位、水分混合比の輸送方程式を連成させて解くが、次に示す 5 次領域では温位の輸送方程式は解かず、浮力の効果は運動方程式の浮力項、 $k$  及び  $\varepsilon$  の輸送方程式の浮力生産項の値を 4 次領域の値から補間し、外力項として与える。

### (3) 5 次領域のモデル

Figure 3 は 5 次領域の山越え気流の予測で考慮すべき種々の要素を示したものである。山越え気流には流線の曲がりや主流方向の圧力勾配、また山陵付近における剥離、後方での再付着等、性状の異なる様々な流れが混在し極めて複雑である。さらに、樹木の有無による速度変化、乱流性状の変化も流れの構造に大きな影響を及ぼす<sup>9)</sup>。この様な流れに対して最も信頼性の高い予測が可能なのは LES であると考えられるが、計算負荷を考えると、年平均風速の予測にこれを利用することは、現段階では現実的ではない。本研究では実用性の観点から改良型の  $k-\varepsilon$  モデルの使用を前提として、地形まわりの流れの高精度予測を可能とする新たなモデルの開発を進めている。

本プロジェクトでは、当初、非線形型の  $k-\varepsilon$  モデル<sup>10)–12)</sup>の利用を考え、高精度の予測が可能であることを確認している<sup>11)–14)</sup>。しかし、計算負荷を考えると、実用に供するには問題が多いと判断し、名工大の長野教授のグループを中心に、比較的少ない計算負荷で高精度の予測を可能とする線形モデルを開発する方向で研究を進めてきた<sup>15)–18)</sup>。注 5)にその概要を示す。

Figure 4 に崖地形を対象とした本研究で開発したモデルと WAsP の予測結果および Moss, Baker の風洞実験結果<sup>22)</sup>の比較を示す。WAsP の結果は、風上コーナ部の剥離流を全く再現しておらず、このため後方の風速分布も大きく実験と異なる。これに対して、本プロジェクトで開発したモデル<sup>15)16)</sup>の結果は非常によく実験と一致している。

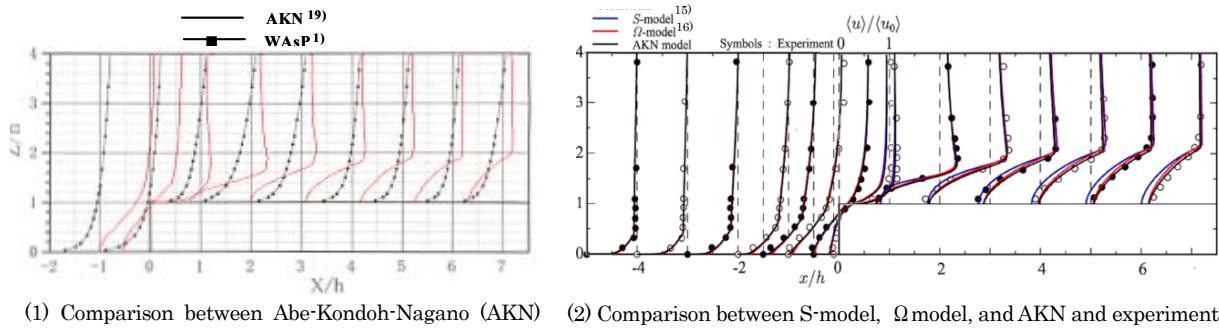


Figure 4 Comparison of mean streamwise velocity around a 2D cliff model

(5th Domain, Nagano at al.)

Table 1 Models for incorporating aerodynamic effects of tree canopy<sup>25)</sup>

$F_i$	$\eta C_f a \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2}$	(1)
$F_k$	$\langle u_i \rangle F_i$	(2)
$F_\varepsilon$	$\frac{\varepsilon}{k} \cdot C_{p\varepsilon} F_k$	(3)

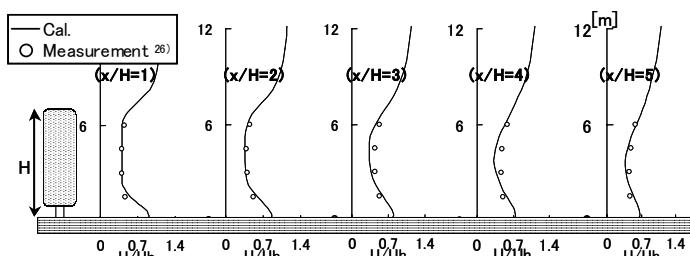
ただし、 $C_f$ : 抗力係数、 $a$ : 葉面積密度, $\eta$ : 樹木占有率、 $C_{p\varepsilon}$ : 1.8

Figure 5 Vertical profiles of normalized mean streamwise velocity

#### (4) 樹木 Canopy のモデル

樹木の有無による地表面ラフネスの相違は山岳まわりの流れに極めて大きな影響を及ぼす<sup>9)</sup>。樹木の流体力学的効果を正確に再現するために、本プロジェクトでは樹木 Canopy モデルの開発も行っている<sup>23)-25)</sup>。Canopy モデルは、改良  $k-\varepsilon$  モデルを基礎として、その方程式系に Table 1 に示す樹木の効果を表す項を附加するという形式となっている。具体的には、樹木による風速低減効果の影響を平均流の輸送方程式に附加項  $-F_i$  を付け加えることによって表わし、樹木による乱れの増加の影響を  $k$  の輸送方程式の附加項  $F_k$  によって与え、それに伴う粘性消散率  $\varepsilon$  の増加を  $\varepsilon$  の輸送方程式に附加項  $F_\varepsilon$  を付け加えることにより表す。このモデルを用いて、島根県出雲平野に見られる築地松と呼ばれる防風林を対象とする解析を行い、黒谷等による実測<sup>26)27)</sup>と比較した結果を Figure 5 に示す(注 7)。解析結果は非常によく実測結果を再現している。

## 2.4 検証用データ

本プロジェクトでは、数値モデルの開発と同時に、丘陵地形、山岳地形、崖地形を対象とする詳細な風洞実験<sup>28)-31)</sup>や潮岬を対象とする野外実測も行い、モデル検証のためのデータの取得も進めている。

## 3 解析結果

### 3.1 1次～3次領域（改良型 Mellor-Yamada モデル）

Figure 6 に1次～3次領域の計算によって得られた潮岬周辺の風況の予測結果を示す。1

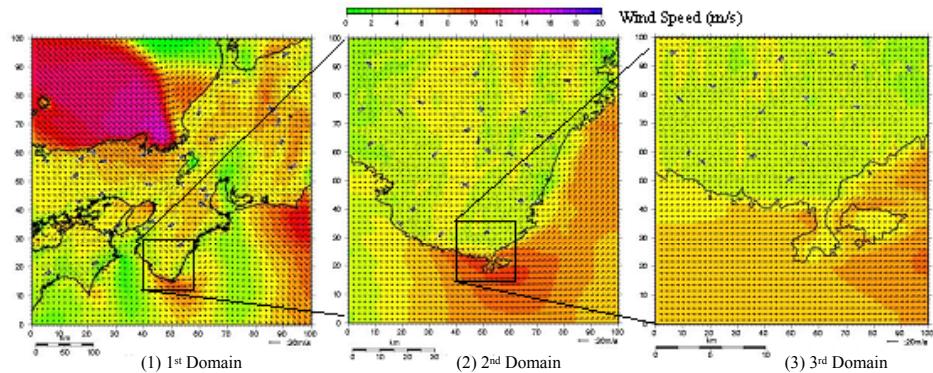


Figure 6 Numerical predictions of windfield over Shionomisaki Peninsula using nesting method (March 14, 2001, 12:00, at a height of 10m above the ground.)

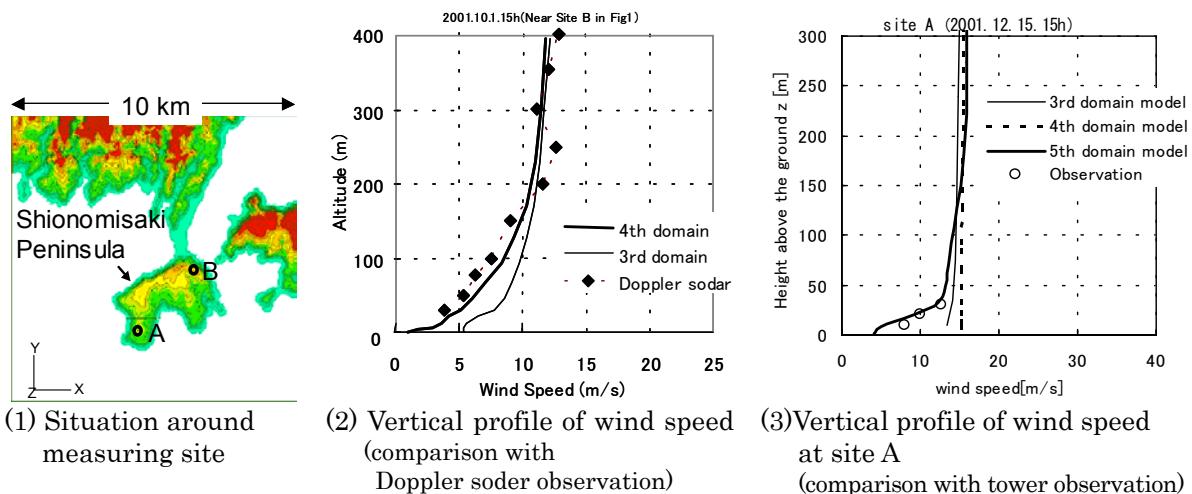


Figure 7 Comparison of vertical velocity profiles above Shionomisaki Peninsula, Wakayama

次～3次の解析モデルは、日本気象協会によって開発された局地気象モデル(ANEMOS: Area-oriented Numerical simulation and Environmental assessment M0deling System)に中西の提案する改良型のMellor-Yamadaのlevel 2.5のモデル<sup>8)</sup>を組み込む形で開発されたものである。

### 3.2 4次～5次領域(改良 $k-\epsilon$ モデル)

以上の成果を用いて、現在観測を行っている潮岬周辺(Figure 7(1))の風況予測を行い、観測値と比較した結果をFigure 7(2), Figure 7(3)に示す。ここでは2001年11月15日15時と、2001年12月15日15時を対象として1次～5次までのNesting計算を実行している。Figure 7(2)(3)は、各々、11月15日および12月15日の15時の風速分布を比較したものである。4次領域、5次領域の解析ではTable 1のCanopyモデルを組み込んでいる。4次領域、5次領域のモデルを接続することによって、予測値がより観測値に近づき、非常によく一致している。

## 4まとめ

本稿では、我が国のような急峻な山岳地形の多い国土において適切な風車の立地選定を行うための局所風況予測モデルの開発をめざして、現在進行中のNEDOの研究プロジェクトの概要を紹介した。本プロジェクトでは年平均風速を10%以内の誤差で予測することを目標とし、広領域のための気象モデルの開発、山岳周辺のミクロスケールのための工学モデルの開発を並行して進めるとともに、5段階Nestingでこれらを接続する手法についても検討を加えている。同時に、風洞実験、野外実測により検証用のデータを採取し、モデルの精度検討も進めてきた。プロジェクトは本年度で終了するが、実用性の高い高精度の予測システムの完成を目指し、インターフェース部の改良等の最終的な作業を進めているところである。その最終成果については、別の機会に詳しく報告したいと考えている。

### 謝辞

本稿は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から委託された離島用風力発電システム等技術開発の中の局所的風況予測モデルの開発の活動について、長野靖尚教授（名工大）、中西幹郎助教授（防衛大）、大塚清敏博士（大林組）をはじめとするプロジェクト研究メンバー各位<sup>注2)</sup>の研究成果を筆者らの責任でまとめたものである。本稿作成に際してご協力頂いたメンバー各位に謝意を表する。

### [注]

注1) Jackson-Huntの線形理論<sup>3)</sup>では、大気境界層を内層（inner layer）と外層（outer layer）に分ける（Figure 8）。

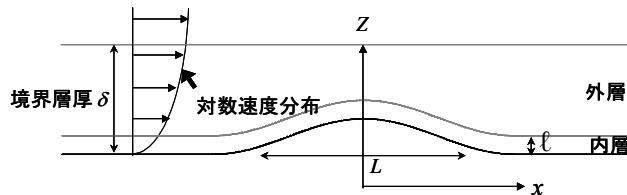


Figure 8 Flow regimes for turbulent flow over a hill<sup>3)</sup>

ここで、内層とは境界層下部の地表に近い薄い層であり、地表付近の流れの変化により生じる Reynolds 応力が支配的な影響を及ぼす。代表的長さスケールは粗度長  $z_0$  と内層の厚さ  $\delta$  であると考える。外層は内層上部の境界層の中で、地形による流れの変化が生じる高さまでの範囲の層である。厚さは丘陵の水平スケール  $L$  程度であり、境界層厚さ  $\delta$  よりも大きい場合も小さい場合もある。Jackson-Huntの理論では、この層では Reynolds 応力の影響は無視し得ると考え、代表的長さスケールは  $L$  および  $z_0$  であるとする。この理論では、起伏のある地表面上の流れは、無限遠の上流側における風速の鉛直分布を起伏に合わせて平行移動させたものに、起伏による加速・減速が摂動として付加されると考える。そして、外層では Reynolds 応力の効果を考慮せず、線形化されたポテンシャル流の方程式を解く。そして内層の地表面付近の風速の摂動は、ポテンシャル理論で求められた圧力分布と内層内の Reynolds 応力項および線形化された移流項のバランスにより決定される。このような理論に基づく解析手法が急峻な地形周辺の流れ、特に剥離を伴う流れの予測に適用困難であることは明らかであると考えられる。

注2) 本プロジェクトの研究メンバーは以下の通り。

村上周三(研究代表、慶應大学)、長野靖尚(名工大)、加藤信介(東大生研)、持田灯(東北大)、中西幹郎(防衛大)、加藤和彦(NEDO)、野口善弘(NEDO)、斎藤隆雄(大林組)、片岡浩人(大林組)、大塚清敏(大林組)、布施木徹(ビートラボ)、中尾徹(E&E ソリューションズ)、臼井健(E&E ソリューションズ)、加藤秀樹(E&E ソリューションズ)、植松孝彦(日本気象協会)、鈴木靖(日本気象協会)、林宏典(日本気象協会)、玉井孝昭(日本気象協会)、佐々木律子(日本気象協会)

注3) この改良モデルでは、Mellor-Yamadaのモデルに対して、乱れの長さスケールの評価式および経験定数の改良が加えられている<sup>8)</sup>。

注4) 別途、非静力学モデルも用意しているが、計算負荷が増加する割りに精度向上がめざましくないので、当面は静力学モデルを用いる。

注5) 線形型の  $k-\epsilon$  モデルでは、レイノルズストレス  $\langle u_i' u_j' \rangle$  は次式で表現される。

$$-\langle u'_i u'_j \rangle = \nu_t \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

本稿では $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を示す。(4)式中の渦動粘性係数 $\nu_t$ は、

$$\nu_t = C_\mu k \tau_m \quad (5)$$

と表現される。ここで、 $\tau_m$ は乱流を特徴づける時間スケールであるが、本研究ではこれを長野・服部らの提案する混合タイムスケールの考え方方に従って(6)式の様に表す<sup>15)16)</sup>。すなわち、通常の $k-\varepsilon$ モデルで使用される乱れの時間スケール $\tau_\mu$  $(\frac{k}{\varepsilon})$ と平均流の速度勾配による時間スケール $\tau_s$ の調和平均から混合タイムスケール $\tau_m$ を次式で定義する<sup>16)</sup>。

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\tau_\mu} + \frac{C_s}{\tau_s} \right) \quad (6)$$

$$\text{ただし、 } \tau_\mu = \frac{k}{\varepsilon}, C_s = 0.4$$

(6)式を書き直すと、以下の様に表現される。

$$\tau_m = \frac{k}{\varepsilon} \left( \frac{2 R_\mu}{R_\mu + C_s} \right) \quad (7) \quad R_\mu = \frac{\tau_{sw}}{\tau_\mu} \quad (8)$$

$\tau_s$ の評価に関しては、長野・服部らは(9)式、(10)式等のモデルを提案している(注6)。

$$S \text{ モデル } ^{15)} : \quad \tau_s = \frac{1}{\sqrt{S^2}} \quad (9) \quad \Omega \text{ モデル } ^{16)} : \quad \tau_s = \frac{1}{\sqrt{\Omega^2}} \quad (10)$$

$$\text{ただし、 } S^2 = S_{ij} S_{ij} \quad \Omega^2 = \Omega_y \Omega_y \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right),$$

さらに、Abe-Kondo-Nagano (AKN) モデル<sup>19)</sup>における地表付近の低 Re 効果のモーデリングを組み込み、最終的には、

$$\nu_t = C_\mu f_\mu k \tau_\nu \quad (11)$$

$$\tau_\nu = (k/\varepsilon) \left[ 2R_\mu / (R_\mu + C_s) + (45/R_\nu^{3/4}) \exp[-(R_\nu/100)^{3/4}] \right] \quad (12)$$

$$\text{ここで、 } R_\nu = k^2 / \nu \varepsilon \quad (13)$$

ここで、(6)式で定義されるタイムスケール $\tau_m$ と区別するために、本稿では(11)式で表現されるタイムスケールを $\tau_\nu$ と記す。

さらに、地表面粗度の影響をモデルに組み込むため、Krogstar<sup>20)</sup>、Zhang ら<sup>21)</sup>によるモデルを参考に、(11)式中の壁面影響関数 $f_\mu$ と $\varepsilon$ の輸送方程式中の散逸項に含まれる関数 $f_\varepsilon$ を次式で定義する<sup>15)</sup>。

$$f_\mu = 1 - \exp[-(z^*/22)^2] + H_1 \quad (14)$$

$$H_1 = \begin{cases} h^+ \neq 0 \text{ の場合} : H_1 = \exp\{[z^*/(0.15h^+)]^2\} [1 + \exp(-35/h^+)] \\ h^+ = 0 \text{ の場合} : H_1 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$f_\varepsilon = \{1.0 - 0.3 \exp[-(R_\nu/6.5)^2]\} \times \{1 - \exp[-(z^*/3.1)^2]\} + H_2 \quad (16)$$

$$H_2 = \begin{cases} h^+ \neq 0 \text{ の場合} : H_2 = \sqrt{h^+/15} [\exp(-5.0z^*/h^+)] \\ h^+ = 0 \text{ の場合} : H_2 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

ここで、 $h$  : 地表面粗度の高さ,  $h^+ = h \langle u^* \rangle / \nu$ ,  $z^* = z u_\varepsilon / \nu$ ,  $u_\varepsilon = (\nu \varepsilon)^{1/4}$

注6) 本稿で示した解析例では $S$ および $\Omega$ 単独から $\tau_s$ を与えていたが、本プロジェクトでは $S$ と $\Omega$ を組み合わせて $\tau_s$ を与えるモデルも考案し、予測精度が改善されることを確認している。

注7) 本解析では $C_f=0.8$ とした。葉面積密度 $a$ は、文献27に従い $a=1.17$ とした。 $C_{p_i}$ については筆者らにより最適化された値(1.8)を用いた。

## 参考文献

- 1) S. Sandström, "WASP-a comparison between model simulations and measurements", Wind Energy Report WE 94:2, Dept. of Meteorology, Uppsala University, (1994)
- 2) P. B. S. Lissaman, D. R. Foster, J. H. Rumbaugh, C. Boulder, "Technical description of AVENU", Proc. Annual Meeting of ASES, Denver, Colorado, (1989), 19-22
- 3) P. S. Jackson, J. C. R. Hunt, "Turbulent wind flow over a low hill", Quart. J. Roy. Met. Soc. 101, (1975), 929-955
- 4) J. L. Walmsley, P. A. Taylor, "Boundary-layer flow over topography", Impact of the Askervein study, Boundary-Layer Meteorol. Vol. 78, 1996, 291-320
- 5) 大木祥光, 河井宏充, 藤波潔, "風に及ぼす地形の影響に関する研究", 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1998), 119-120

- 6) 石原孟, 日比一喜, “急峻な山を越える乱流場の数値予測”, 日本風工学会誌, vol. 83, (2000), 175–188.
- 7) G. L. Mellor, T. Yamada, “Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem”, Rev. Geophys. Space Phys., vol. 20, No. 4, (1982), 851–875
- 8) M. Nakanishi, “Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on Large-Eddy Simulation data”, Boundary Layer Meteorol. 99, (2001), 349–378
- 9) 孟岩, 日比一喜, “急峻な山を越える乱流境界層に関する実験的研究”, 第 15 回風工学シンポジウム論文集, (1998), 61–66
- 10) T. H. Shih, J. Zhu, J. L. Lumley, “A realizable Reynolds stress naralgebraic equation model”, NASA TM-105993, (1993).
- 11) 入門知子, 平松崇嘉, 服部博文, 長野靖尚, “流線の曲がりの影響を受ける乱流場に関する研究”, 第 14 回数値流体力学シンポジウム論文集, (2000), 1–3
- 12) T. Irikado, H. Hattori, Y. Nagano, “Prediction of turbulent flow over a curved hill”, Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, vol. 2, Oct. (2000), 473–478
- 13) Y. F. Lun, A. Mochida, S. Murakami, H. Yoshino, T. Shirasawa, “Numerical simulation of flow over topographic features by revised k- $\epsilon$  models”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 91/1-2 (2002), 231–245
- 14) Y. F. Lun, A. Mochida, H. Yoshino S. Murakami, “CFD Prediction of Flow over A Blunt Body By Revised k- $\epsilon$  Model”, 第 15 回 数値流体力学シンポジウム講演要旨集, (2001), 89
- 15) 長野靖尚, 服部博文, 入門知子, “乱流モデルによる複雑地形上の風況予測”, Proceeding of the TED-Conf., JSME, (2001)
- 16) 宮澤純, 佐藤博, 服部博文, 長野靖尚, “乱流モデルによる衝突はく離・再付着を伴う流れの予測”, 第 15 回 数値流体力学シンポジウム, (2001), C08-2
- 17) 稲垣賢一郎, 服部博文, 長野靖尚, “乱流モデルによる粗面乱流伝熱の予測”, 第 39 回日本伝熱シンポジウム 講演論文集, Vol. 3, (2002), 613–614
- 18) 服部博文, 稲垣賢一郎, 長野靖尚, “局所地形周りの風況を解析するための乱流モデル”, 第 16 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2002), B13-4
- 19) K. Abe, T. Kondoh, Y. Nagano, “A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows – I. Flow field calculations”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 1, (1994), 139–151
- 20) P. Krogstad, Int. AIAA J., 29, (1991), 888–894
- 21) H. Zhang, M. Faghri, F. White, Int. J. Fluid Engng., 118, (1996), 255–259
- 22) W. D. Moss, S. Baker, “Re-circulating flows associated with two-dimensional steps”, Aeronaut. Quarterly, Aug. (1980), 151–172
- 23) 加藤敦子, 持田灯, 吉野博, 村上周三, 大岡龍三, 吉田伸治, “CFDに基づく都市・建築環境解析における Grid Scale より小さい気流障害物のモデル化—既往の研究の Review—”, 日本建築学会東北支部研究報告会, (2000), 329–332
- 24) 加藤敦子, 持田灯, 吉野博, 村上周三, “植生 Canopy モデルを組み込んだ k- $\epsilon$  モデルによる単独樹木周辺の風速分布の予測”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2001), 929–930
- 25) 加藤敦子, 持田灯, 吉野博, 村上周三, “樹木 Canopy 内外の気流分布の数値予測”, 日本流体力学会誌「ながれ」21 卷別冊, 日本流体力学会年会 2002 講演論文集, (2002), 336–337
- 26) 黒谷靖雄, 清田誠良, 小林定教, “出雲地方の築地松が有する防風効果 その 2”, 建築学会大会学術講演梗概集(D-2), (2001), 745–746
- 27) 鈴木淳一, 吉田伸治, 大岡龍三, 黒谷靖雄, “CFD 解析による出雲地方の築地松が有する防風効果の検討”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-1), (2002), 871–872
- 28) 大津朋博, 加藤信介, 村上周三, 高橋岳生, M. F. Yassin, “風力発電用風車建設最適地検討用の局所風況予測モデルに関する風洞模型実験(その 2): 二次元丘陵模型周囲の各種乱流統計量の測定”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, (2001), 755–756
- 29) M. F. Yassin, S. Kato, S. Murakami, R. Ooka, T. Takahashi, T. Ohtsu, “Wind Tunnel Study on Prediction Method of Wind Characteristics over Local Topography for Suitable Site of Wind Power Station (Part 3): Turbulence Characteristics of Flow over Two-Dimensional Step Model”, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ, Environmental Engineering I Sep. 2001, pp. 757–758
- 30) 高橋岳生, 加藤信介, 村上周三, 大津朋博, M. F. Yassin, “風力発電用風車建設最適地検討用の局所風況予測モデルに関する風洞模型実験(その 4): 大気安定度の違いによる Step 状地形周りの流れの変化”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, (2001), 759–760
- 31) T. Takahashi, T. Ohtsu, M. F. Yassin, S. Kato, “Turbulence characteristics of wind over a hill with a rough surface”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, (2002), 1697–1706