風力発電サイト立地選定のための局所風況予測モデルの開発

Development of Local Area Wind Energy Prediction Model for Selecting Suitable Site for Windmill

村上周三¹⁾ 持田 灯²⁾ 加藤信介³⁾

Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA, Shinsuke KATO

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うことが極めて重要となる。しかしながら、従来、広く用いられている代表的な風況予測モデルである WASP¹⁾や AVENU²⁾は Jackson-Hunt³⁾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^{4)~6)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モデルの開発を進めている^{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標としており、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

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 model

- 1) 慶応義塾大学理工学部 教授 Professor, Keio University
- 2) 東北大学大学院工学研究科 助教授 Associate Professor, Tohoku University
- 3) 東京大学生産技術研究所 教授 Professor, University of Tokyo

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

2.1 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。

2.2 乱流モデル

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度、水分混合比の輸送方程式も解く。そしてこれらの領域のための closure model としては、後述する Mellor-Yamada の level 2.5 の改良版を用い、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。4次領域では、乱流モデルは5次領域と同様の改良型の $k-\epsilon$ モデルに変更するが、1~3次領域同様に温度の輸送式を解く。浮力効果のモデリングについては、Mellor-Yamada の level 2.5 のモデルを参考に、これに対応する付加項を加えている。5次領域では温度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 ϵ 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。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^{注3)}を仮定して圧力を求め、4次、5次領域では、非静力学モデルを用いている。

2.3 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^{7~9)}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. 解析モデルの概要および結果

3.1 1次~3次領域 (改良型 Mellor-Yamada モデル)

Figure 3 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。これらの領域の解析は、前述のように Mellor-Yamada の level 2.5 の改良版に基づいているが、具体的に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 MOdeling System) を利用している。ただし、従来の ANEMOS では乱流クロージャーモデルとして Mellor-Yamada のレベル 2.5¹⁰⁾が利用されていたが、本解析では、中西¹¹⁾により提案された改良型のレベル 2.5 のモデルを用いている。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。

3.2 4次~5次領域 (改良 $k-\epsilon$ モデル)

Figure 4 は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

Figure 3 Numerical predictions of windfield over Sion Promontory using nesting method
(March 14, 2001, 12:00, at a height of 10m above the ground.)

Figure 4 Factors affecting the flow around a hilly terrain (Nagano et al.)

化、乱流性状の変化も流れの構造に大きな影響を及ぼす¹²⁾²⁵⁾。このよう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-ε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-εモデル¹³⁾¹⁵⁾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¹⁴⁾¹⁷⁾。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、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¹⁸⁾。以下にその概要を示す。

線形型のk-ε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。

$$-\langle u_i' u_j' \rangle = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (1)$$

本稿では $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を示す。(1)式中の

渦動粘性係数 ν_t は、

$$\nu_t = C_\mu k \tau_m \quad (2)$$

と表現される。ここで、 τ_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らの提案する混合タイムスケールの考え方に従って(3)式の様に表す¹⁸⁾。すなわち、通常のk-εモデルで使用される乱れの時間スケール $\tau_\mu \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)$ と平均流の速度勾配による時間スケール τ_s の調和平均から混合タイムスケール τ_m を次式で定義する^{注4)}。

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_\mu} + \frac{C_s}{\tau_s} \right) \quad (3)$$

$$\text{ただし } \tau_\mu = \frac{k}{\varepsilon}, \quad \tau_s = \frac{1}{\sqrt{\Omega^2}}, \quad \Omega^2 = \Omega_\mu \Omega_\nu,$$

$$\Omega_\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right), \quad C_s = 0.4$$

(3)式を書き直すと、以下の様に表現される。

$$\tau_m = \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{2R_\mu}{R_\mu + C_s} \right) \quad (4) \quad R_\mu = \frac{1/\sqrt{\Omega^2}}{k/\varepsilon} \quad (5)$$

(1) Comparison between the new proposed model, AKN and experiment

(2) Comparison between the new proposed model and WAsP

Figure 5 Comparison of mean streamwise velocity around a 2D cliff model (5th Domain)

Figure 6 Comparison of mean streamwise velocity around a 2D hill model (5th Domain)

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

$$\nu_t = C_\mu f_\mu k \tau_v \quad (6)$$

$$\tau_v = (k/\varepsilon) \left[2R_\mu / (R_\mu + C_s) + (45/R_\mu^{3/4}) \exp[-(R_\mu/100)^{3/4}] \right] \quad (7)$$

$$\text{ここで、} R_\mu = k^2 / \nu \varepsilon \quad (8)$$

また、(3)式で定義されるタイムスケール τ_m と区別するために、本稿では(7)式で表現されるタイムスケールを τ_v 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、Krogstar²⁰⁾、Zhang ら²¹⁾によるモデルを参考に、(6)式中の壁面影響関数 f_μ と ε の輸送方程式中の散逸項に含まれる関数 f_ε を次式で定義する¹⁸⁾。

$$f_\mu = 1 - \exp[-(z^*/22)^2] + H_1 \quad (9)$$

$$H_1 = \begin{cases} h^* \neq 0 \text{ の場合: } H_1 = \exp\{[z^*/(0.15h^*)]^2\} [1 + \exp(-35/h^*)] \\ h^* = 0 \text{ の場合: } H_1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$f_\varepsilon = \{1.0 - 0.3 \exp[-(R_\mu/6.5)^2]\} \times \{1 - \exp[-(z^*/3.1)^2]\} + H_2 \quad (11)$$

$$H_2 = \begin{cases} h^* \neq 0 \text{ の場合: } H_2 = \sqrt{h^*/15} [\exp(-5.0z^*/h^*)] \\ h^* = 0 \text{ の場合: } H_2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

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

Figure 5 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²²⁾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の結果は非常によく実験と一致している。

Figure 6 は 2 次元山越え気流を対象とした比較である。ここでは、石原らの行った風洞実験¹²⁾と本プロジェクトにおける開発モデル^{注5)}および Durbin 型 $k-\varepsilon$ モデルの比較を示している。Durbin 型 $k-\varepsilon$ モデル²³⁾は、建物周辺気流に適用した場合、他の多くの改良 $k-\varepsilon$ モデルに比べて高精度の予測が可能であることが、筆者らにより確認されている²⁴⁾。しかし、山越え気流に適用すると、後方循環流域における乱流拡散が過小となり、結果として後方再付着距離が極めて過大に評価さ

Table 1 Effects of surface roughness on separating point and reattachment length¹²⁾

Surface Condition	Xs/H (Separation)	Xr/H (Recirculation)
Smooth	1.1	4.6
Rough	0.6	6.4

Table 2 Models for incorporating aerodynamic effects of tree canopy²⁷⁾

F_i	$\eta C_\beta a \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2}$	(13)
F_k	$\langle u_i \rangle F_i$	(14)
F_ε	$\frac{\varepsilon}{k} \cdot C_{pe} F_k$	(15)

ただし、 C_β : 抗力係数、 a : 葉面積密度、 η : 樹木占有率、 C_{pe} : 2.0

(1) Computational domain (3000 m × 1800 m × 200 m)

2) Vertical profiles of normalized mean streamwise velocity above tree

Figure 7 Comparison of vertical velocity profiles above tree canopy (Higashine, Yamagata)

れる¹⁶⁾¹⁷⁾。これに対して、本プロジェクトで開発したモデルを用いると著しい精度の改善がもたらされる。

3.3 樹木 Canopy のモデリング

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。石原らは樹木に相当するラフネスのある場合とない場合の山越え気流の性状の差異に関して詳細な実験を行っている¹²⁾。Table 1 にその結果を示す。樹木のない山に比べて、表面が樹木に覆われた山の場合、剥離点が風上へ移動し、この影響で後方再付着点が後方へ移動する。筆者らはそのメカニズムについて LES により検討を加えている²⁵⁾。

このような、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²⁶⁾²⁷⁾。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 2 に示す樹木の効果を表す項を付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付加項 $-F_i$ 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 の輸送方程式の付加項 F_k によって与え、それに伴う粘性消散率 ε

の増加を ε の輸送方程式に付加項 F_ε を付け加えることにより表す。Table 2 にそれぞれの付加項を示す。

このモデルを用いて、山形県東根市の果樹園地帯 (Figure 7(1)) の上空風を解析し、松島の行った観測結果²⁸⁾と比較した^{注6)}。測定点の周囲には、東側に約 2km、西に約 1km、北に約 0.8km、南に約 1km の範囲で樹高 5m 程度のリンゴやサクランボの果樹園が広がっている。ここでは、東風の時の風速分布に関する解析結果と観測結果を比較している。また、参考のために、図中には z_0 型の対数則^{注7)}に基づく wall function ($z_0=0.5m$) を利用した結果も示している。

Figure 7(2)では、野外観測における最も高い測定点である 16m の平均風速 $\langle u_{16} \rangle$ で基準化した風速鉛直分布を比較しているが、本プロジェクトで開発した Canopy モデルの結果は良く実測結果を再現している。これに対して、 z_0 型の wall function を用いた結果はその分布を性状が大きく異なっている。WASP や AVENU では、Canopy モデルではなく z_0 型の wall function が採用されており、この面からも既往のモデルの限界が指摘される。

3.4 観測データとの比較

以上の成果を用いて、現在観測を行っている潮岬周

(1) Situation around measuring site

(2) Vertical profile of mean streamwise velocity

Figure 8 Comparison of vertical velocity profiles above Siono Promontory, Wakayama (Sep. 2, 2000, 15:00)

辺(Figure 8(1))の風況予測を行い、観測値と比較した結果を Figure 8(2)に示す。ここでは2000年9月2日を対象として1次～5次までのNesting計算を実行している。Figure 8(2)は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 2のCanopyモデルを組み込んでいる^{注8)}。Figure 8(2)に計算結果を示す。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、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いる。プロジェクトは後1年で終了するが、風工学分野におけるこれまでの研究の蓄積を活かした実用性の高い高精度の予測システムの完成を目指し、研究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^{注2)}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³⁾では、大気境界層を内層(inner layer)と外層(outer layer)に分ける(Figure 9)。

Figure 9 Flow regimes for turbulent flow over a hill³⁾

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 と内層の厚さであると考えられる。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 δ 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、起伏のある地表面の上の流れは、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则认为。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、慶応大学)、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)、信江豊(NEDO)、斉藤隆雄(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)、白井健(E&E ソリューションズ)、加藤秀樹(E&E ソリューションズ)、林宏典(日本気象協会)、植松孝彦(日本気象協会)、鈴木靖(日本気象協会)、鈴木晋之丞(日本気象協会)、佐々木律子(日本気象協会)

注 3) 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 4) 本稿で示した解析例では Ω から τ_s を与えているが、以下に示すように至速度テンソル S_{ij} から τ_s を与えるモデルについても精度の検討を行っている。

$$\tau_s = \frac{1}{\sqrt{S^2}} \quad S^2 = S_{ij} S_{ji} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)$$

さらに、 S と Ω を組み合わせて τ_s を与えるモデルも考案し、 Ω 単独や S 単独から τ_s を与えるモデルに比べて、予測精度が改善されることを確認している。

注 5) 本解析では地表面境界条件として log law 型の wall function を用い、高 Re 領域のみを対象としているので、(6)~(11)式の低 Re 効果を組み込んだモデルではなく、(1)~(5)式を利用している。

注 6) 本解析では既往の研究を参考に²⁹⁾³¹⁾、 $C_\mu=0.2$ 、 $\alpha=0.83$ とした。また、現地の状況を考えて、 $\eta=0.4$ とした。 C_{p_i} については単独樹木モデル周辺の気流分布を対象として筆者らにより最適化された値(2.0)を用いた²⁷⁾。

注 7) 地表面の摩擦速度 $\langle u_* \rangle$ を(16)式、 ε 方程式中の地表面第 1 セルの ε (ε_p) を(17)式、 k 方程式中の地表面第 1 セルの ε ($\bar{\varepsilon}$) を(18)式により与えた。また本解析では $z_0=0.5m$ とした

$$\frac{\langle u_i \rangle_p}{\langle u_* \rangle} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{(1/2) h_p}{z_0} \quad (16) \quad \varepsilon_p = \frac{c_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa (1/2) h_p} \quad (17)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{c_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa h_p} \ln \frac{h_p}{z_0} \quad (18)$$

但し、 $C_\mu=0.09$ 、 $\kappa=0.4$ 、

$\langle u_i \rangle_p$: 地表面第一セルの接線方向速度の時間平均値

h_p : 地表面第 1 セルの z 方向の幅

ε_p : 地表面第 1 セルの ε

$\bar{\varepsilon}$: 地表面第 1 セルにおける ε の空間平均値

注 8) 高さ 5m の樹木で一様に覆われてると仮定し、Canopy モデルに含まれる樹木に関するパラメータはそれぞれ、 $\alpha=1.0$ 、 $C_\mu=0.2$ 、 $\eta=0.6$ とした。

References

- 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, June 1989., pp.19-22.
- 3) P.S. Jackson, J.C.R. Hunt, Turbulent wind flow over a low hill, Quart. J. Roy. Met. Soc. 101, 1975, pp.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, pp.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, pp.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, 2000.4, vol.83, pp.175-188.
- 7) 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, 2001.9, pp.755-756
- 8) 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
- 9) 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, 2001.9, pp.759-760
- 10) G.L. Mellor, T. Yamada, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem, Rev. Geophys. Space Phys., vol. 20, No. 4, 1982, pp.851-875.
- 11) M. Nakanishi, Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on Large-Eddy Simulation data, Boundary Layer Meteorol. 99, 2001, pp.349-378.
- 12) 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, pp.61-66
- 13) T.H. Shih, J. Zhu, J.L. Lumley, A realizable Reynolds stress naraigebraic equation model, NASA TM-105993, 1993.
- 14) 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 回数値流体シンポジウム論文集, 2000, pp.1-3,

- 15) 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., pp.473-478
- 16) Y.F. Lun, A. Mochida, S. Murakami, H. Yoshino, T. Shirasawa, Numerical simulation of flow over topographic features by revised $k-\epsilon$ models, Fifth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE V), Kyoto, October, 2001, pp.21-24
- 17) 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, p.89
- 18) 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
- 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, pp.139-151
- 20) P. Krogstad, Int. AIAA J., 29, 1991, pp. 888-894
- 21) H. Zhang, M. Faghri, F. White, Int. J. Fluid Engng., 118, 1996, pp.255-259
- 22) W.D. Moss, S. Baker, Re-circulating flows associated with two-dimensional steps, Aeronaut. Quarterly, Aug. 1980, 151-172
- 23) P.A. Durbin, Technical Note: On the $k-\epsilon$ stagnation point anomaly, Int. J. Heat and Fluid Flow, 17, 1996, pp.89-90.
- 24) 富永禎秀, 持田灯, 村上周三, 大岡龍三, 佐脇哲史, 各種改良 $k-\epsilon$ モデルによる高層建物周辺気流の CFD 解析, 第16回 風工学シンポジウム論文集, 2000, pp.155-160
- 25) 李春鉉, 持田灯, 村上周三, 加藤信介, 飯塚悟, LES による地形まわりの局所風況の予測(その1): 2次元山越え気流を対象とした地表面粗度の影響の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000, pp.699-700
- 26) 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, pp.329-332
- 27) 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, pp.929-930
- 28) 松島大, 条植された果樹園における地表面粗度の風向依存性, 農業工学関連4学会2002年度合同大会講演要旨
- 29) 近藤純正, 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版, 2001, p.45
- 30) Kondo, J., Watanabe, T., Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface over a multilayer energy budget model, Journal of the Atmospheric Sciences, vol.49, No.23, 1992, pp.2183-2199
- 31) Wilson, N. R., Shaw, R. H., A higher order closure model for canopy flow, Journal of Applied Meteorology, vol. 16, 1977, pp.1197-1205