

ラージ・エディ・シミュレーションによる実地形上気流の予測

Prediction of Flow Over Real Topography

by Large-Eddy Simulation

中山 昭彦*・岸 修士郎**

Akihiko NAKAYAMA and Shujiro KISHI

*正会員 Ph.D. 神戸大学教授 大学院自然科学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

**学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

Wind field over real topography has been simulated using a Large-Eddy Simulation(LES) technique. The results are compared with physical simulation results obtained in a low-speed wind tunnel. Emphasis has been placed on the effects of the simulation region and the effects of the ground surface roughness. Local wind field over the region of a few kilometers is found to be well predicted by the present numerical simulation, though detailed and precise validation is not possible due to differences between the conditions for the numerical computations and the wind-tunnel measurements.

Key Words: LES, wind field, turbulence, topography,

1. はじめに

近年計算機の飛躍的な高速化, 大容量化, により種々な流れのシミュレーションが可能になって来ている。特に, チャンネル内流れなど基礎的なものについては直接シミュレーションや, 高解像度Large Eddy Simulation(LES)計算が行われている。一方工学的応用で見られる複雑な領域の流れには, 計算負荷の大きくないレイノルズ平均式に乱流モデルを用いたReynolds-Averaged Navier Stokes(RANS)法による計算が行われている¹⁾⁻²⁾。不規則で, 凹凸の多い複雑な地形上気流の解析は必然的に3次元計算になるので, 出来ればモデル依存性の小さいLESシミュレーション法が適している。しかし平坦な地面を対象にした大気境界層のシミュレーション³⁾⁻⁵⁾と異なり, 計算量の問題以外に種々の解決すべき問題がある。なかでも地形形状の表現, 解像, またその影響の導入法, 接近風の模擬などの問題があり, 単にサブグリッド乱流の忠実なモデル化とシミュレーションの問題でない。特に地表境界の表現と境界条件の取り扱いが重要である。

本研究では標準的LES法を複雑な地形上気流の予測計算に応用するため, 地表面境界の扱い方に注目し著

者ら⁶⁾⁻⁷⁾のLES法に改良を施し, 実際の地形上気流を対象としたシミュレーション計算を行った。その有用性, 精度の検証は風洞実験結果と比較する事により行った。

2. 対象地形と数値シミュレーションの目的

本研究で気流シミュレーションを行う対象地域は, 図-1に示してある島根県の隠岐空港とその周辺地域である。ここでは, 比較的大規模な地形改変を伴う空港整備が計画され, それによる地形改造が航空機の飛行, また周辺集落に与える影響を予測する必要があった。実際は現地観測や, 風洞実験などで空港拡張工事の気流特性に与える影響は評価されている。従って, この対象地域の標準的条件での, 気流状況はある程度分かっている。また周囲が海で囲まれているため, 境界条件となる接近風の設定もし易い。そこで, この地域を今回のシミュレーションの対象とした。この地域は図-1に示されてあるように, 海拔100mから200mの山のある島々からなっており, 空港滑走路周辺の気流状況はこれらの地形に大きく影響される。シミュレー

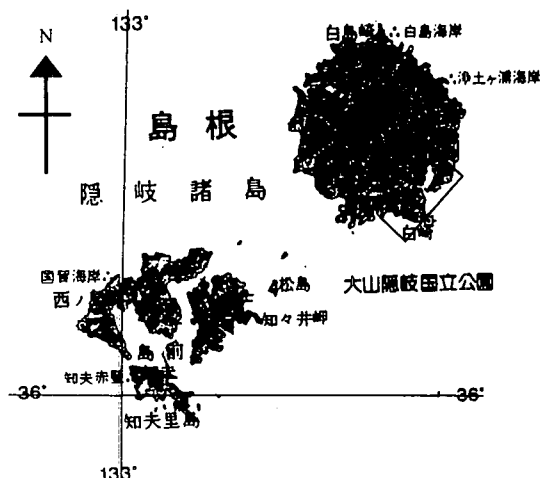


図-1 シミュレーション対象地域

況はこれらの地形に大きく影響される。

シミュレーションは主に地形改変により局所の風向、風速、また乱れの程度にどう影響するかの予測が目的であるので、高精度な計算は要求されていないものの、数値流体計算法の基礎的検証も行う。

また本計算では、中立安定状態に限った気流のシミュレーションをLES法を用いて行う事を目的としているので、浮力、コリオリー力の影響は無視する。従って温度分布、水分変化などを重要視した局地気象モデル（例えばHOTMACやCSU-RAMSモデル⁸⁾）と異なり、地形形状と地表面粗度の影響のモデル化に重きを置いている。図-2に風洞実験に用いられた模型、図-3に本シミュレーションで用いられた計算格子による地形の近似が示されてある。

3. 計算法とモデル

ここでは本数値シミュレーションに用いた計算法とモデルをまとめる。LESの基礎式は空間平均を施した連続の式と運動方程式である。本シミュレーションで問題になるのは不規則凹凸のある地表面での境界条件であるのでこの不規則な境界形状も平均されるものとする³⁾。数キロ四方の地域をワークステーションで扱える数十万点から百万点の格子では数10メートル以下の地表の形状は解像出来ない。従って滑面境界で粘性底層まで解像する方法は到底無理である。また大気境界層のシミュレーションで用いられる対数則も100mから200mの山があり、複雑な流況を呈する気流

のシミュレーションには使えない。従って本シミュレーションでは地表近傍では解像できない地表形状の凹凸による影響を運動方程式中に抵抗項として表した

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \tau_{ij} \right) \end{aligned}$$

を用いる。ここで、 $x_1=x$, $x_2=y$ は水平方向の座標、 $x_3=z$ は鉛直上方向の座標、 $\langle u_i \rangle$ はそれぞれ瞬時速度および瞬時圧力の空間平均、 ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数である。また右辺の F_i は地表凹凸による抵抗、 $\tau_{ij} = \langle u_i u_j \rangle - \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle$ はサブグリッド応力である。

サブグリッド応力には渦粘性モデル

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k_G + \nu_G \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)$$

を用いる。ここで ν_G はサブグリッド渦粘性係数、 k_G はサブグリッド乱流エネルギーである。これらにはSmagorinsky モデル

$$\begin{aligned} k_G &= \frac{\nu_G^2}{(C_k \Delta)^2} \\ \nu_G &= (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 D_{ij} D_{ij}} \\ D_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \end{aligned}$$

を用いる。ここで Δ は x , y , z 方向の格子幅の相乗平均 $(\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ である。 F_i は樹木内流れなどのモデルとして提唱された形状抵抗の式⁹⁾⁻¹⁰⁾を応用し、

$$F_i = -C_1 \langle u_i \rangle |\langle u_i \rangle| e^{-C_2 z_g/k}$$

とする。ここで z_g は地表からの鉛直距離、 k は凹凸を表わす粗度高さで、 $C_1 \exp(-C_2 z_g/k)$ は流れ内に分布する抵抗係数になる。本計算では $C_1=0.13$, $C_k=0.94$, また $C_1=0.005$, $C_2=0.01$ とし、粗度高 k は海面でゼロ、地表では一様な10mとした。定数 C_1 , C_2 の値は平坦な粗面上境界層の試し計算より決められた。粗度高さ k は計算格子の解像度に依存するが、本計算格子の地表近傍での解像度にあたる。

表-1 計算ケース

	計算領域		
	A	B	B'
建設前	ケース A1	ケース B1	ケース B'1
建設後	ケース A2		

粗面上境界層の試し計算より決められた。粗度高さ k は地面の状況、計算格子の解像度に依存するが、 $10m$ は本計算格子の地表近傍で分解限度になる。

数値計算法は文献11)の方法とほぼ同じで、直交座標上の食違い格子を用いている。地表面境界条件を設定する位置は実際の地表の平均位置から最も近い格子点としている。従って境界位置の誤差は粗度高さと同程度ということになり、滑面で考えられるような境界不適合による大きな誤差はない⁷⁾。運動方程式中の対流項はUTOPIA 3次風上差分を、その他の空間微分は2次精度中心差分を用いて差分化し、時間的にはAdams-Bashforthの陽的方法で積分している。風上差分による数値粘性については、本計算のように複雑な流

(a) 拡張工事前

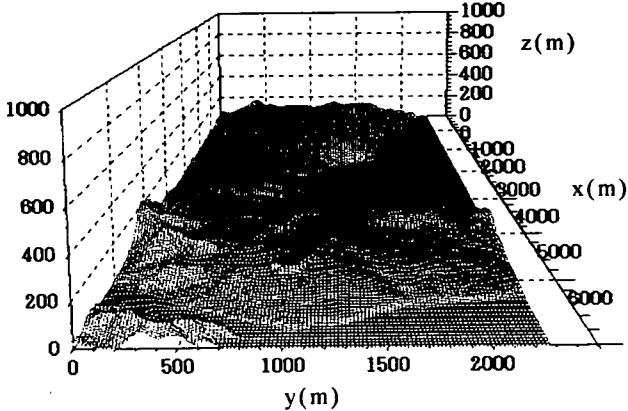


(b) 拡張工事後



図-2 風洞実験模型

(a) 拡張工事前



(b) 拡張工事後

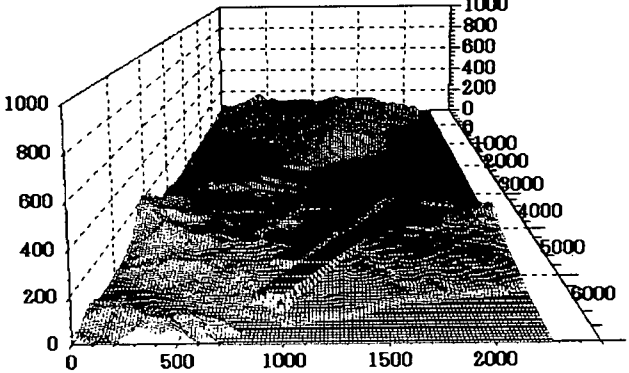


図-3 数値計算モデル

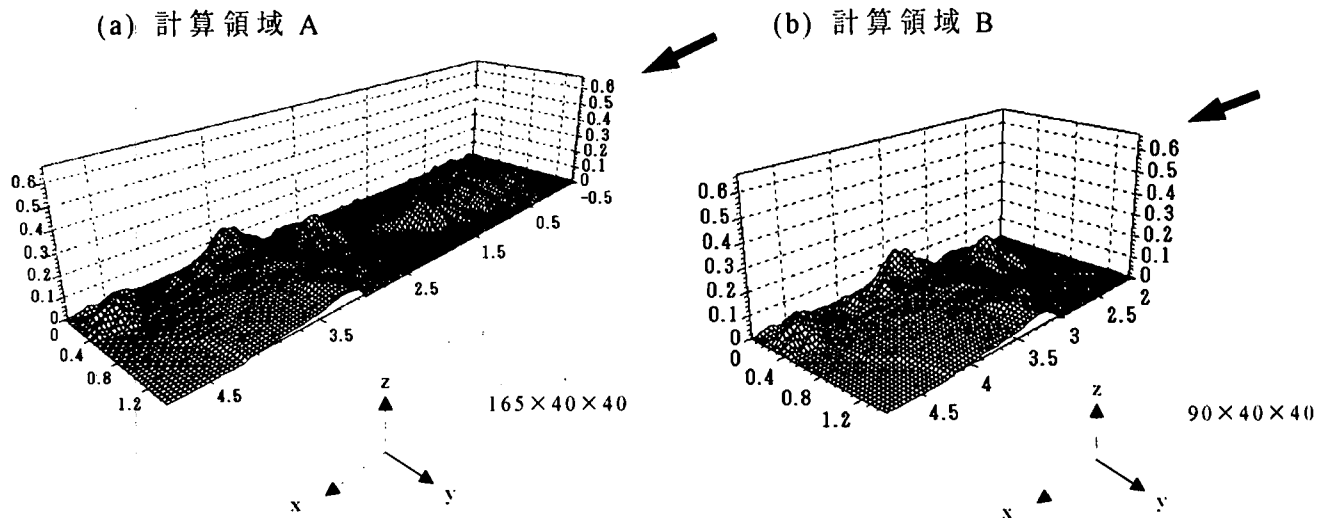
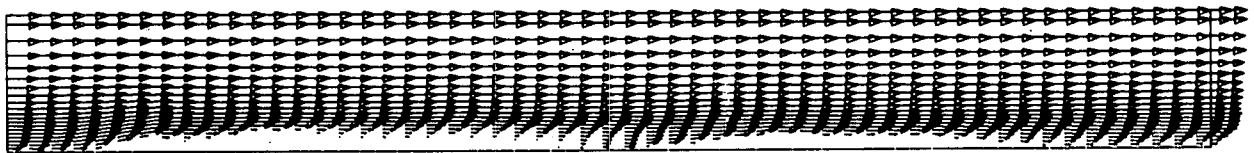


図-4 計算領域と計算格子

(a) 鉛直断面の流速ベクトル(計算ケース A1)



(b) 地上 10m での流速ベクトル(計算ケース A1)

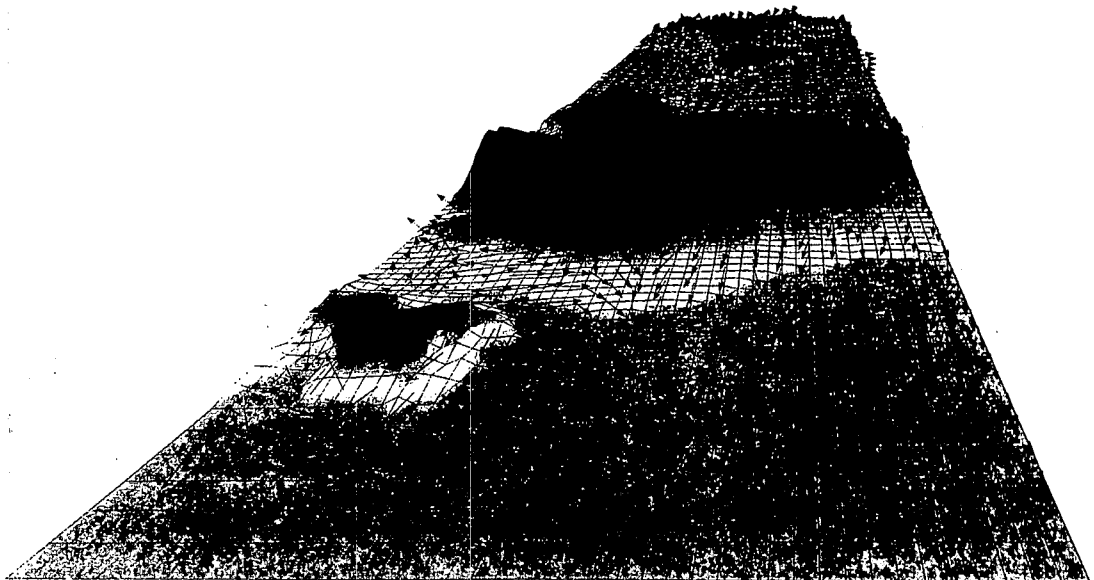


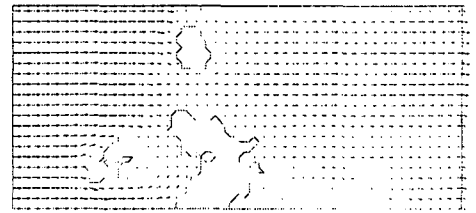
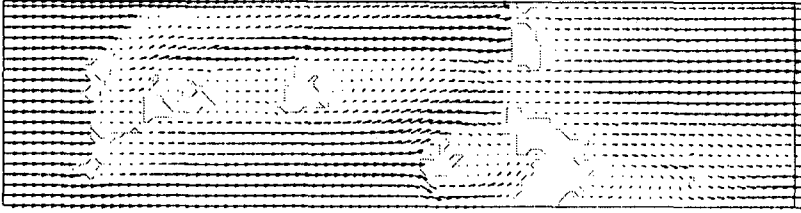
図-5 瞬時シミュレーション結果の一例

計算領域 A

計算領域 B

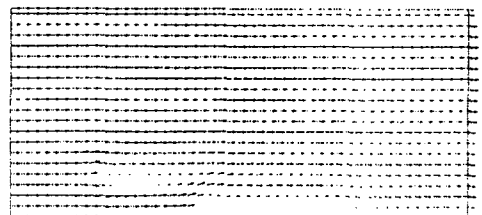
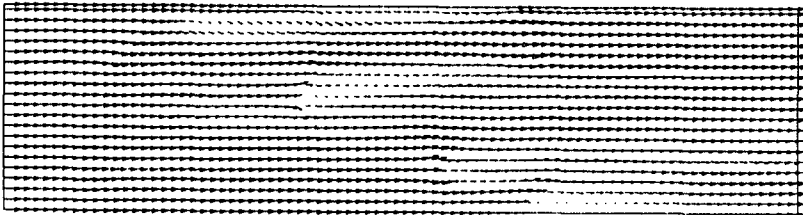
(a) 平均流速分布, ケース A1, $z'=10\text{m}$

(a') 平均流速分布, ケース B1, $z'=10\text{m}$



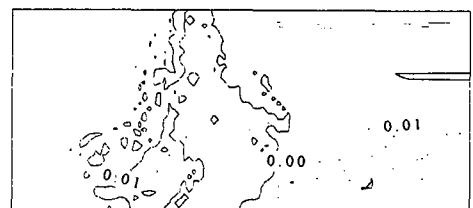
(b) 平均流速分布, ケース A1, $z'=100\text{m}$

(b') 平均流速分布, ケース B1, $z'=100\text{m}$



(c) 乱れ強度, ケース A1, $z'=10\text{m}$

(c') 乱れ強度, ケース B1, $z'=10\text{m}$



(d) 乱れ強度, ケース A1, $z'=100\text{m}$

(d') 乱れ強度, ケース B1, $z'=100\text{m}$

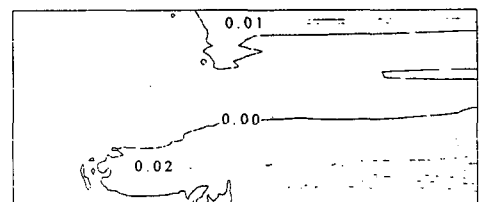
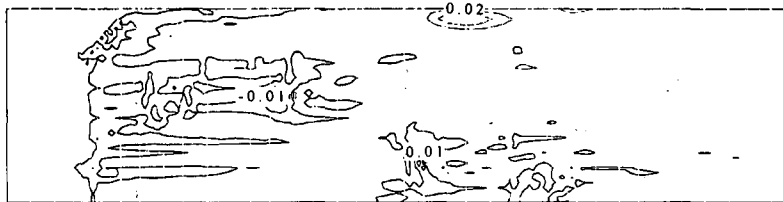


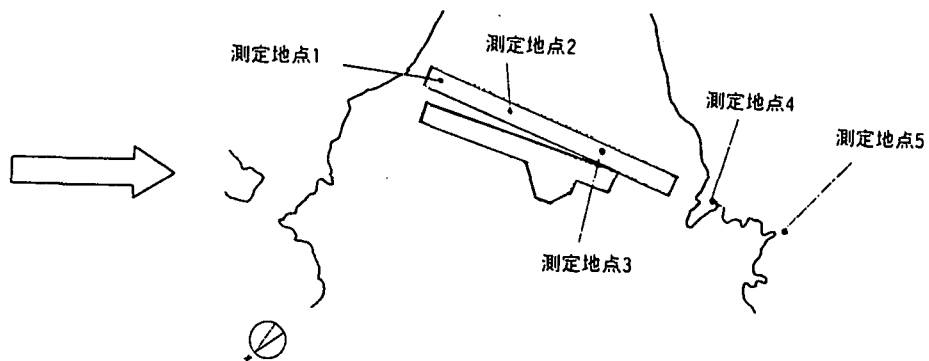
図-6 シミュレーション結果

れ場での安定計算に必要な要素で、サブグリッド応力はそれを補うものとする。圧力はHSMAC法による反復法で解いている。流入境界では流速の鉛直分布は境界層のべき乗則に従うとし、下流端では、放射条件を与えている。

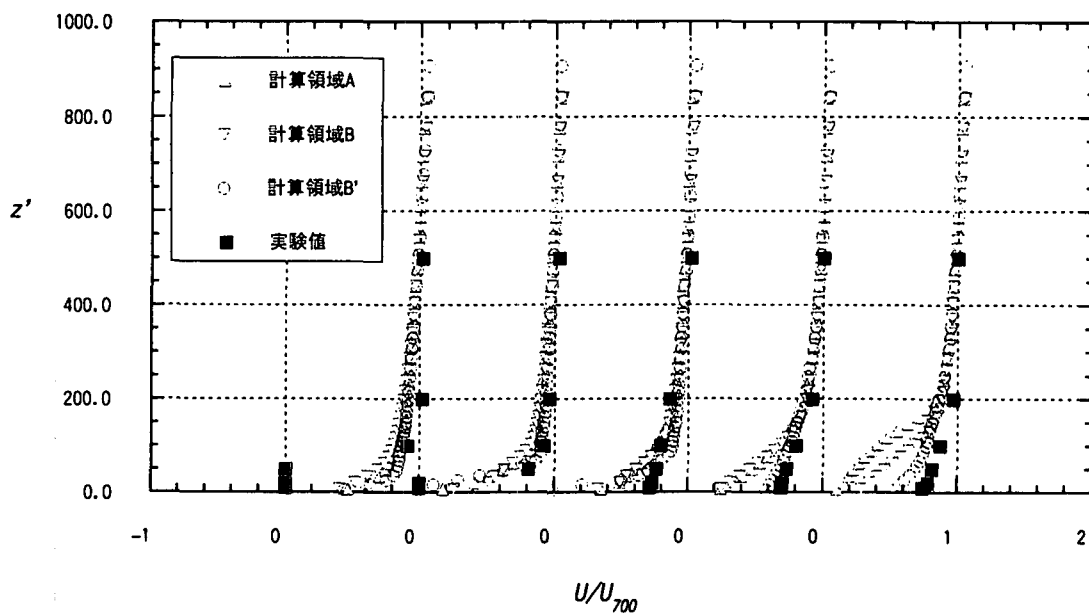
4. 計算ケース

前述したようにシミュレーション計算の目的は滑走路付近の気流変化の予想であるが、計算領域は北東の風向を想定し滑走路を含む幅 2.5km 長さ 8km （計算領域A）、または同じ幅 2.5km であるが風上 3km を省いた長さ 5km （計算領域B）の領域である。計算領域Bでは計

(a) 測定地点



(b) 拡張工事前



(c) 拡張工事後

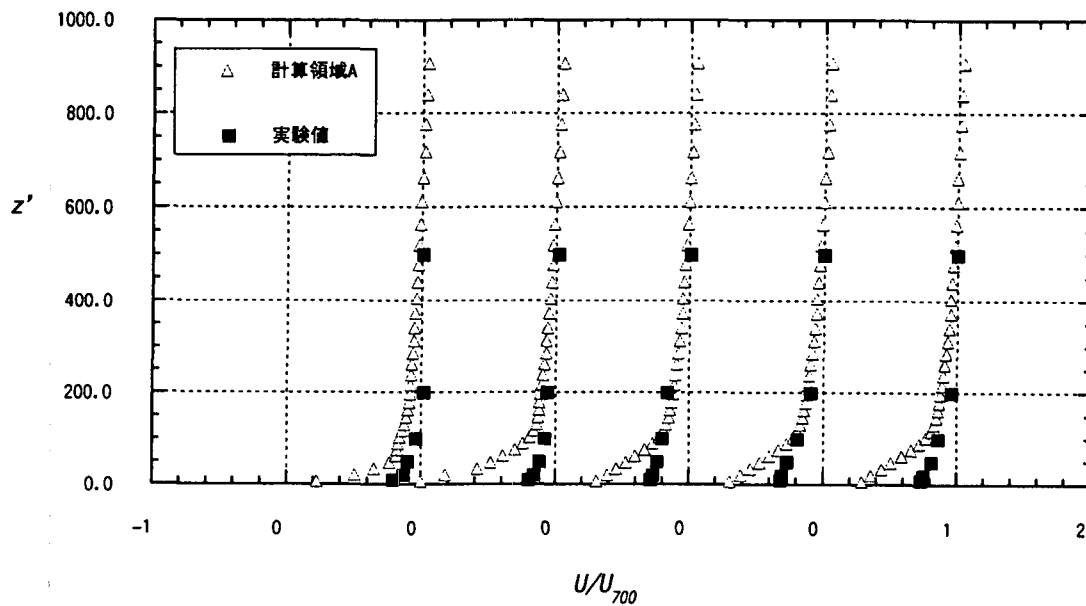


図-7 風洞実験との比較

算領域Aと同じ格子解像度ではかなり格子数が少なく
て済む。格子点を減らさなければ鉛直方向分解能を数
メートルにまで縮められるので、格子点100×50×50の
密な格子（計算領域B'と呼ぶ）でも計算を行った。風
洞実験では計算領域Aの部分の模型を用い建設予定地
とその周辺での風速測定を行っている。長さを8kmの
領域では流入端は島の端にあたり、接近風が海上から
来るので風上条件が設定し易い。計算を空港周辺の建
設前、建設後の地形に対する計算格子は図-3に示して
ある。建設後は新しい長い滑走路が従来のものと並ん
で建設される。これにより、山が削られ、滑走路に当
る部分に盛土がされている。

内陸地でのシミュレーション⁷⁾では風上側にどの程
度の計算領域をとる必要があるかが、問題になる。今
回は比較のため、長さを3kmに短縮したものについて
も計算した。これらの計算領域は図-4に示されてあ
る。計算ケースは表-1に示してある。計算条件は、風
洞実験の条件に合わせ、上空に10m/s程度、風力3程
度の北東の風がある時を想定している。1000mの上空
では水平一様流と仮定し、横境界は風洞実験の条件に
合わせ滑り面と仮定している。上流端での接近風は
1/6乗則を仮定し、海拔 $z=700\text{m}$ の点で実験値と合うよ
うにとってある。

5. 計算結果と考察

計算は領域を完全に流れさる Flow-through time,
 T_f の2倍の計算を行った後平均を始め、やはり T_f の2
倍の時間での平均をとった。

図-5に瞬時計算結果の一例としてケースA1の計算
結果を示す。領域中央鉛直断面での風速ベクトルおよ
び等圧線と、地上10mでの風速ベクトルの分布であ
る。後者の図より、全体的な山の影響、海上での風況
が良く分かる。

図-6に滑走路から鉛直上方向33m、115mの水平面内
での平均風速ベクトルおよび乱れ強度の計算ケースA
およびケースB双方の結果を示してある。計算領域の
影響は平均風速、乱れとも殆ど見られない。ただケー
スBの平均風速結果では、上流端で少し影響が見られ
る。

計算結果は、一般に平坦な海上では滑らかな様な
流れになっているのに対し、島の高地で、山の影響を
受け風向風速とも大きく変化している。乱れ強度は山
の風下側で大きくなっている。しかし、滑走路面から
100mの上空ではこれらの影響はかなり小さくなって

いる。

図-7に滑走路付近の測定点での鉛直風速分布を示
す。計算領域Aの結果および短縮領域Bの結果の建設
前と建設後の風速分布の計算値と実験値を比較してい
る。結果は海拔700mの点での平均風速 U_{700} で無次
元化されている。これらの計測点はいずれも滑走路上
あるいはすぐ風下で、計算結果は殆どの場合過小評価
となっている。これは計算では地表の粗度は一様で
10mにとったため滑らかな滑走路面では粗度による抵
抗が過剰になっているためと考えられる。実際粗度を
押さえた計算では実験に近くなることが確かめられた
が、こういった局所の粗度の影響を本格的に導入する
には粗度を位置の関数にする必要がある。建設前の測
定点5での計算結果で特に大きく減速しているのは、
拡張工事で取り除かれた滑走路横の小さい盛り上がり
の影響が計算結果にでたためと考えられる。全体的に
密な格子の計算領域B'の結果が実験値に最も近くなっ
ている。また建設による地表近傍の風速がわずかに増
加している傾向は計算で再現していると見て良い。

実地形を対象とした本計算では、定量的に詳しい検
証は無理であるが、ベンチマーク的計算例で、抵抗モ
デルの関数形、モデル係数の最適化などを行えば信頼
性あるシミュレーション法となり得る。また粗度高さ
を正確な位置の関数にしたり、浮力、コリオリー力の
効果なども導入する事によりより一般的条件でのシ
ミュレーションも可能になる。

6. 結論

本研究では標準的LES法を複雑な地形上気流の予測
計算に応用するため、地表面境界の影響として抵抗モ
デルを導入し複雑で険しい地形の影響を取り入れた。
特に地表の状況を運動方程式に取り入れる事により、
海面と樹木の茂る陸地の粗度の影響を考慮した。実際
の地形上気流を対象としたシミュレーション計算を行
い、詳細な気流状況が予測出来た。地形改変の影響も
定性的ながら捉えている。今後モデル関数、モデル係
数の最適化などにより更に信頼性ある手法にすること
が可能で、応用に活用できると期待される。

参考文献

- 1) 岡島厚, 葛見俊之, 木綿隆弘: 山越え風の数値解
析および実験的研究, 応用力学論文集, Vol.1,
pp.625-632, 1998.

- 2) 石原孟：急峻な山を越える乱流場の数値解析，日本風工学会誌第79号，pp.167-168, 1999.
- 3) Sullivan, P.P., McWilliams, J.C. and Meong, C.H.: A Subgrid-Scale Model for Large-Eddy Simulation of Planetary Boundary-Layer Flows, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.71, pp.247-276, 1994.
- 4) Mason, P.J. and Thomson, D.J. :Large-eddy simulation of the neutral-static stability planetary boundary layer, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol.113, pp.413-443, 1987.
- 5) Mason, P.J. :Large-eddy simulation: A critical review of the technique, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol.120, pp.1-26, 1994.
- 6) 中山昭彦・福知正高・野田博：複雑地形上の風環境の解析，第1回環境流体シンポジウム講演論文集，pp.347-348, 1996.
- 7) Nakayama, A. and Noda, H.:Physical and Numerical Modeling of Turbulent Flow Over Complex Topography, *Proc. 11th Symp. on Turbulent Shear Flows*, pp.19.19.1-19.19.6, 1997.
- 8) Tremback, C.J.:Numerical Simulation of a Mesoscale Convective Complex:Model Development and Numerical Results. Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Colorado USA.
- 9) Wilson, N.R. and Shaw, R.H.: A Higher Order Model for Canopy Flow, *J. Appl. Meteorol.* Vol. 16, 1197-1205, 1977.
- 10) Yamada, T. :A Numerical Model Study of Turbulent Airflow in and Above a Forest Canopy, *J. Met. Soc. Japan*, Vol.60, pp.439-454, 1982.
- 11) 中山昭彦・宮下康一・前田和裕：地形上気流解析におけるRANSモデルとLESシミュレーションの比較，水工学論文集，第44巻，pp.43-48, 2000.
(2000年4月21日受付)