

3次元数値モデルによる九大新キャンパスの風況シミュレーション：第2報 建物群まわりの風環境予測

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

杉谷, 賢一郎
九州大学応用力学研究所

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/4784352>

出版情報：九州大学情報基盤センター年報. 3, pp.57-66, 2003-03. 九州大学情報基盤センター
バージョン：
権利関係：

3次元数値モデルによる 九大新キャンパスの風況シミュレーション —第2報 建物群まわりの風環境予測—

Numerical Simulation of Airflow over the New Campus Area of Kyushu University -Part.2 Large-eddy simulation of flow around the buildings-

内田 孝紀[†] 杉谷 賢一郎[†] 大屋 裕二[†]

Takanori UCHIDA, Kenichirou SUGITANI and Yuji OHYA

[†]…九州大学応用力学研究所

[†]…Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

要旨 我々は数百m～数(十)km程度の局所域スケールに的を絞り、風に対する地形効果を高精度に数値予測する局地的風況予測モデル(RIAM-COMPACT)を開発している。前報では一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたRIAM-COMPACTを用いて、九州大学新キャンパス移転地を含む実地形上の風況場解析を行った。特に新キャンパス移転地上とその周辺における風況特性を詳細に調べるため、ネストグリッドシステム(水平分解能 $\Delta x = \Delta y = 25\text{m}$)を導入した。同時に行った風洞実験結果との比較から、計算コードの有効性と計算結果の妥当性が示された。さらに、より現実に近い状況を模擬するため、新キャンパス移転地が乱流境界層に埋没した場合の計算も行った。本報では、デカルト座標系のスタガード格子に基づいたRIAM-COMPACTを用い、移転地内における実際の建物群まわりの風環境予測を行った。特に、南の風および南東の風の場合に風の通り道と予想されるグリーンコリドー付近に注目した。同時に風洞実験を行い、計算結果との比較を行った。数値シミュレーションおよび風洞実験ともに建物群周辺の複雑乱流場が再現され、グリーンコリドー付近の風環境が明らかになった。

Abstract In order to develop an overall efficient and accurate model of simulating an unsteady three-dimensional airflow over complex terrain with characteristic length scales on the order of kilometers, we have been examining the large-eddy simulation (LES) technique using a finite-difference method (FDM). These LES codes are referred to as the RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain), and are based on two grid systems and corresponding variable arrangement: one is an orthogonal staggered grid; the other is a generalized curvilinear collocated grid. In this paper, using the RIAM-COMPACT based on an orthogonal staggered grid, we have performed the calculations of airflow around buildings. This area covers the new campus of Kyushu University. Airflow characteristics, such as the wind speed-up and the separated flow, were successively simulated.

1. 緒言

我々は数百m～数(十)km程度の局所域に的を絞り、風に対する地形効果を高精度に数値予測する局地的風況予測モデル RIAM-COMPACT(Research Institute for

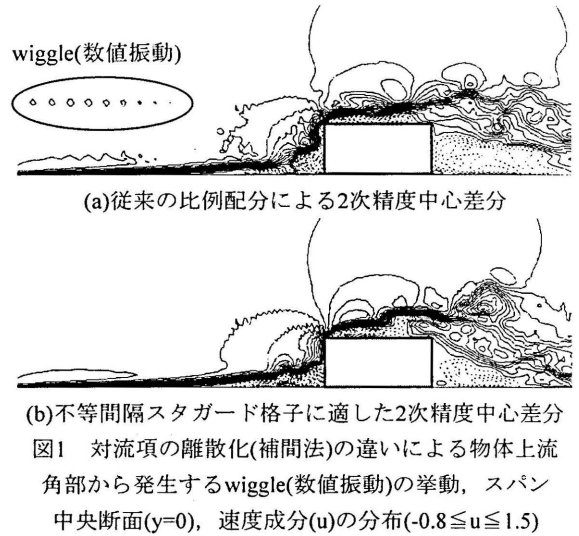
Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)を開発している¹⁾。RIAM-COMPACTはスマゴリンスキーモデル²⁾に基づいたLES(Large-Eddy Simulation)コードである。離散化手法は(有限)差分法であり、座標系と変数配置に関して

は、一般曲線座標系のコロケート格子およびデカルト座標系のスタガード格子を適宜選択することが可能である。既に一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたRIAM-COMPACTを用い、九州大学新キャンパス移転地を含む実地形上の風況場予測を行った¹⁾。平行して風洞実験を行い、計算コードの有効性と計算結果の妥当性を検証した。本研究では、デカルト座標系のスタガード格子に基づいたRIAM-COMPACTにより、新キャンパス移転地内における実際の建物群まわりの風環境予測を行った。また、同時に行った風洞実験の結果も示す。さらに、事前に行った低層構造物まわり流れを対象にした計算コードの検証結果についても報告する。

2. 低層構造物まわり流れを対象にしたRIAM-COMPACTの計算精度の検証

この節では、鉛直方向(z)に一様な流れ U_0 の中に置かれた低層構造物(地上構造物)まわりの流れに関して、大規模DNSとの比較について示す。物体形状は高さがH、幅および奥行きが一边 $B(=2H)$ の正方形断面を有する直方体である。流れ場の支配方程式である連続の式とナビエ-ストークス方程式は、 B および U_0 により無次元化する。計算領域は主流方向(x)に $10B$ 、主流直交方向(y)に $7B$ 、鉛直方向(z)に $4B$ の空間を有し、物体は流入境界面から $3.5B$ 下流のスペン中央に設置する。レイノルズ数 $Re(=U_0B/\nu)=3 \times 10^3$ である。速度の境界条件は以下に示す通りである。流入境界面は一様流入条件 U_0 、側方境界面および上部境界面は滑り条件、地面および物体は粘着条件、流出境界面は U_0 を移流速度とする対流流出条件である。圧力の境界条件については全ての断面においてノイマン条件を課す。

DNSの数値計算法に関して、時間積分法はオイラー陽解法に基づいた部分段階法(F-S法)である。圧力方程式はSOR法により緩和計算して解く。全ての空間項の離散化に2次精度中心差分を用いる。特に対流項については不等間隔スタガード格子に適した補間法(2次精度中心差分)³⁾を適用する。この方法の特徴の一つとして、物体上流角部から発生するwiggle(数値振動)が抑制されることが明らかになった。従来一般に用いられていた比例配分による補間法(2次精度中心差分)³⁾との比較を図1に示す。図1(a)で示すような物体上流へ伝播するwiggleは図1(b)では明らかに抑制されている。格子分割はx, y, z方向に $301 \times 151 \times 151$ 点(約690万点)である。物体近傍と地面付近の流動現象を高精度に予測するため、各方向とも不等間隔($\Delta x=0.017-0.07B$, $\Delta y=0.02-0.16B$, $\Delta z=0.01-0.1B$)に設定した。無次元時間刻みは $\Delta t=5 \times$



10^{-4} である。

RIAM-COMPACT(LES)の数値計算法についてもDNSとほぼ同じ解法に準ずるが、対流項には3次精度風上差分を適用する。但し、それを構成する4次精度中心差分は補間法³⁾に基づき、4階微分の数値拡散項の重みはK-Kスキームタイプ⁴⁾の $\alpha=3$ に対して $\alpha=0.5$ とし、その影響は十分に小さくする。格子分割はx, y, z方向に不等間隔($\Delta x=0.025-0.1B$, $\Delta y=0.03-0.2B$, $\Delta z=0.005-0.2B$)に設定し、全体で $201 \times 101 \times 81$ 点(約160万点)である。無次元時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}$ である。

図2にスペン中央断面($y=0$)における主流方向(x)の速度成分(u or \bar{u})の分布を示す。両者ともに瞬間場(無次元時間 $t=100$)である。図2に対応する地面付近($z=0.1B$)の主流方向(x)の速度成分(u or \bar{u})の分布を図3に示す。図2および図3ともに物体周辺は複雑乱流場を呈しており、定性的な流れパターンは良く一致している。

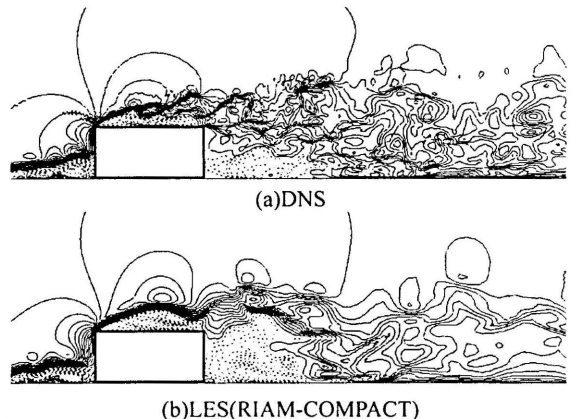
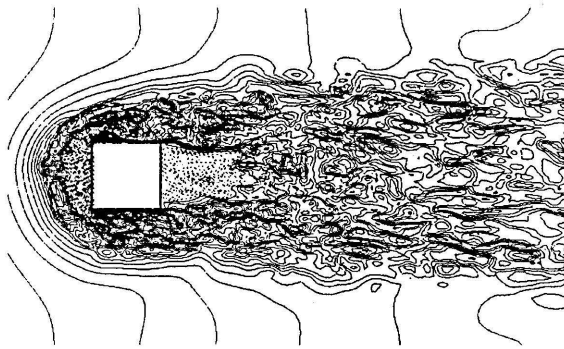
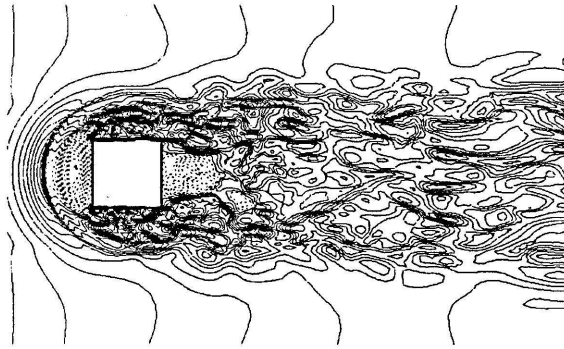


図2 スペン中央断面($y=0$)における主流方向(x)の速度成分(u or \bar{u})の分布($-0.8 \sim 1.5$), 瞬間場($t=100$)

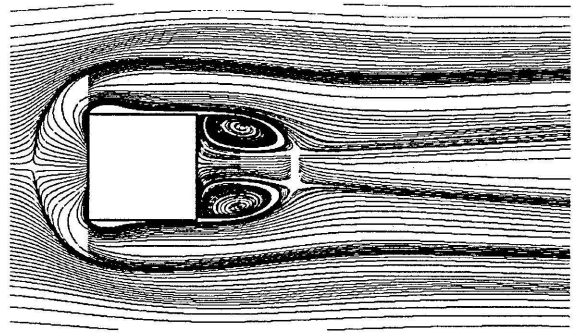


(a)DNS

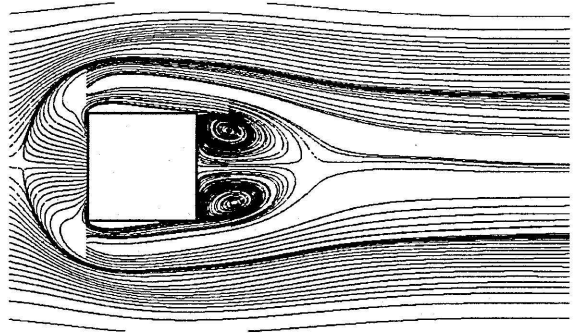


(b)LES(RIAM-COMPACT)

図3 地面付近($z=0.1B$)における主流方向(x)の速度成分(u or \bar{u})の分布($-0.8 \leq u$ or $\bar{u} \leq 1.5$), 瞬間場($t=100$)



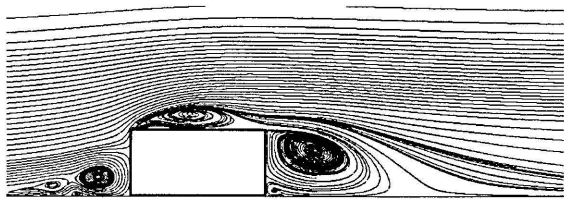
(a)DNS



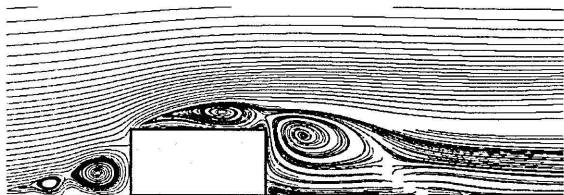
(b)LES(RIAM-COMPACT)

図5 時間平均場($t=100 \sim 200$)に対して描いた流線図, 地面付近($z=0.1B$)

時間平均場(無次元時間 $t=100 \sim 200$)に対して描いた流線図に関して、スパン中央断面($y=0$)の様子を図4に示す。地面付近($z=0.1B$)の様子を図5に示す。両者の中で屋根面上における渦中心の位置や物体背後に形成され



(a)DNS



(b)LES(RIAM-COMPACT)

図4 時間平均場($t=100 \sim 200$)に対して描いた流線図, スパン中央断面($y=0$)

た循環領域の大きさなどに若干の差異は見られるが、全体的な傾向はよく一致している。ここで、同じ計算格子を使用し、LESのSGSモデルをダイナミックスマゴリンスキーモデル⁵⁾に、対流項の離散化をDNSと同じ2次精度中心差分に変更した結果を図6に示す。これに伴い、DNSとの対応はさらに向上する結果を得た。しかし、後述するような複雑配置された建物群を対象にした高レイノルズ数の乱流数値シミュレーションでは、計算安定性のための数値粘性の導入は避けられない。そこで、本研究で示すように、LESでは数値拡散項の重みを十分に小さくした風上差分を併用する方法が有効である。

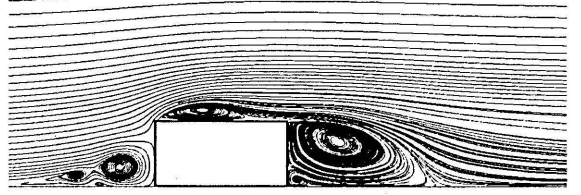


図6 LESのSGSモデルをダイナミックスマゴリンスキーモデルに、対流項の離散化をDNSと同じ2次精度中心差分に変更した結果、時間平均場($t=100 \sim 200$)に対して描いた流線図, スパン中央断面($y=0$)

3. 九州大学新キャンパス移転地内 における建物群まわりの風環境予測

この節では、九州大学新キャンパス移転地内における実際の建物群まわりの風環境予測の結果について示す。図7に示すように、移転地は福岡市西区の元岡・桑原地区(糸島半島中央東寄り)に位置し、周辺地勢の特徴として西側に火山(244m)、南西に可也山(365m)が位置している。



図7 九州大学新キャンパス移転地の位置

新キャンパスの全体図を図8に示す。本研究で対象にした領域の拡大図(図8に黒線で示す領域)を図9に示す。特に南の風、あるいは南東の風が吹いた場合において、風の通り道と予想されるグリーンコリドー(図9に表示)付近に注目し、数値シミュレーションと風洞実験を行った。本研究における数値シミュレーションと風洞実験の実施内容を表1に示す。数値シミュレーションについては平地のみを対象とした。風洞実験については地盤変化のある場合(図13参照)と、それに樹木を模擬したマップピンを添付した場合(図14参照)も行った。平地



図8 九州大学新キャンパスの全体図

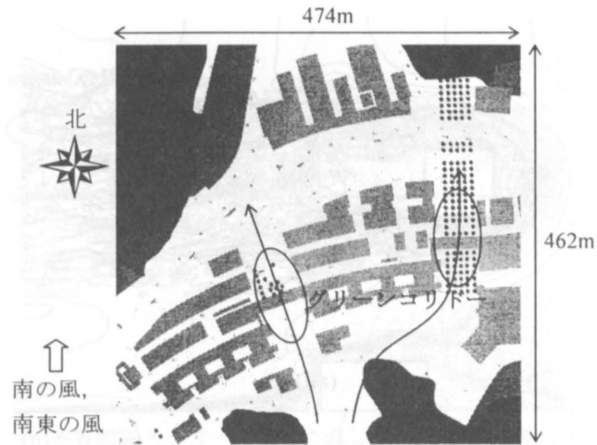


図9 本研究における対象領域と実際の建物群の配置、
図8に黒線で示す領域の拡大図

| | ケース1 | | ケース2 | | ケース3 |
|----------|------|-----|------|-----|------|
| | 南風 | 南東風 | 南風 | 南東風 | 南風 |
| 風洞 実験 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 数値 実験 | ○ | ○ | × | × | × |

○：実施，×：実施なし

ケース1：平地地に建物群を設置した場合

ケース2：実地形に建物群を設置した場合

ケース3：実地形に建物群を設置した場合、
樹木を模擬したマップピンを添付した場合

表1 本研究における数値シミュレーションと
風洞実験の実施内容

地に建物群を設置した場合について、それを南側から撮影した様子を図10に示す。特に図中の黒線部分は図11に示すように開空間となっており、移転地の南北を

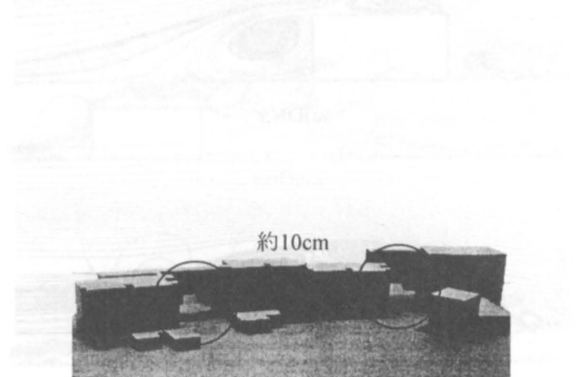


図10 平地地に建物群を設置した場合、
南側から撮影した様子、1/500のスケール

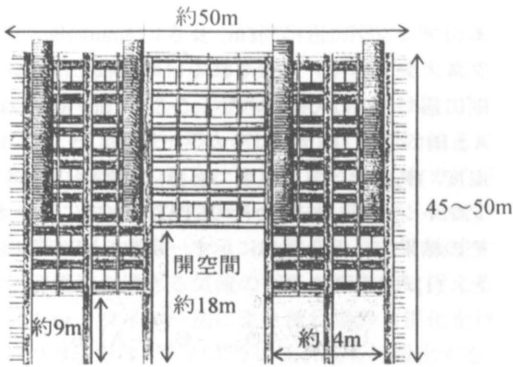


図11 建物形状のイメージ図，図10に示す黒線部分

つなぐ役目を担っている。平坦地に建物群を配置した場合について，模型の全体図を図12に示す。実地形に建物群を配置した場合の様子を図13に示す。実地形の地盤変化は階段状に近似されている。実地形に建物群を配置した場合について，樹木を模擬したマップピンを添付した様子を図14に示す。この際，マップピンの配置は図15に示すイメージ図を参考にした。

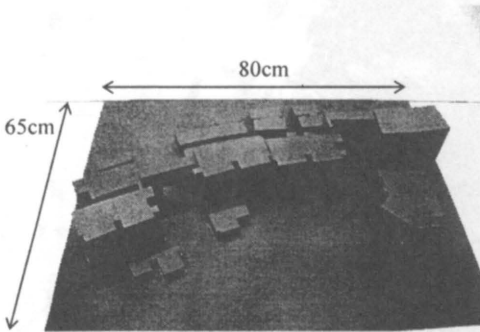


図12 平坦地に建物群を配置した場合の全体図，南側から撮影，1/500のスケール

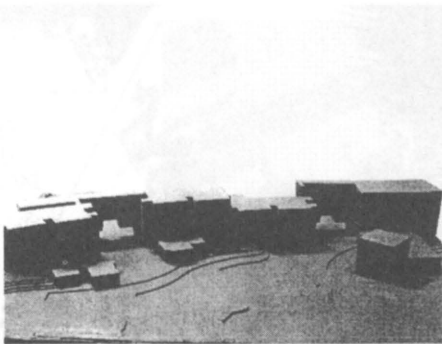


図13 実地形に建物群を配置した場合，地盤変化は階段状に近似，南側から撮影，1/500のスケール

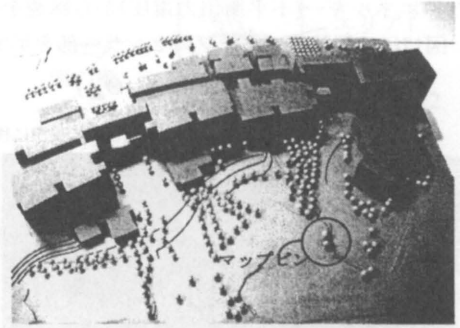


図14 樹木を模擬したマップピンを添付した様子，実地形に建物群を配置した場合，南側から撮影，1/500のスケール

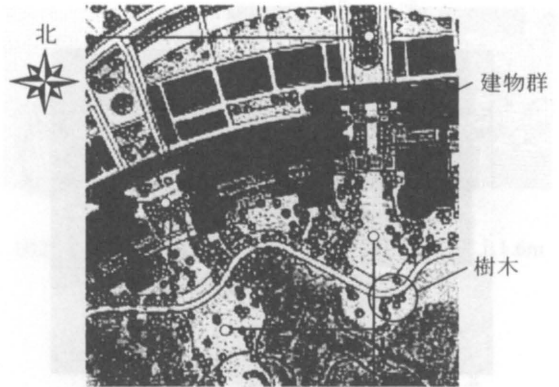


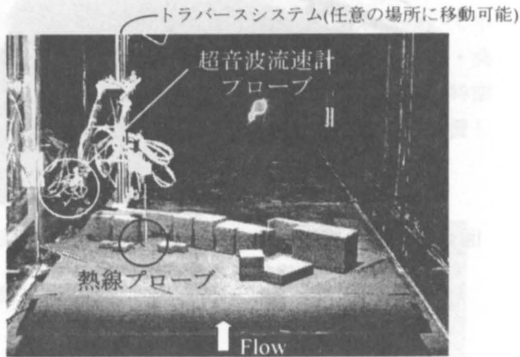
図15 樹木配置のイメージ図

風洞実験は，九州大学応用力学研究所の温度成層風洞⁶⁾を用いて行った。但し，気流の安定度は中立状態とする。この風洞は開放型の吸い込み式で長さ13.5m×幅1.5m×高さ1.2mの測定胴を有する。風速範囲は0.5～2.0m/sであり，主流風速を1.0m/sに設定した際の主流方向の乱れ強さの分布は0.4%程度である。模型への近寄り流れとして一様流入条件を課すため，以下に示す二つの工夫を施した。一つは，風洞の上流側床面に高さ11.5cmの台座を置き，この上に建物群模型を設置した。これは風洞床面に発達する地面境界層の影響を受けないようにするためである。もう一つは，先端に僅かな傾斜を付けた10cmのアルミ板を模型前縁から設置し，そこからの流れの剥離を抑制した。図16に風洞上流から見た気流計測の様子を示す。

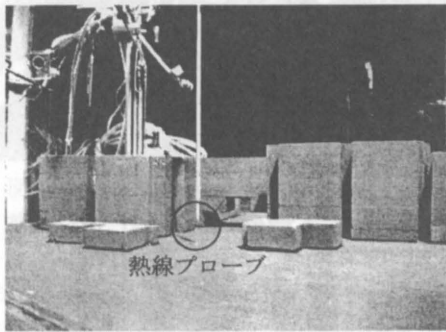
気流計測はI型熱線プローブ(ダンテック5SP11)と熱線流速計(ダンテック56C01CTAユニット，56C17ブリッジ)を使用した。この熱線プローブは定温度型であり，測定原理は以下に示す通りである。流体中の加熱された熱線を一辺にもつブリッジ回路を組み，風により奪

われた熱エネルギー(不平衡出力電圧)から風速を検出する。図17にI型熱線プローブのセンサー部を示す。2

$$E^2 = (A + B \cdot U^{0.5}) \cdot (\Theta_{\text{wire}} - \Theta_{\text{air}}) \quad (1)$$



(a)全体図



(b)拡大図

図16 風洞上流から見た気流計測の様子、平坦地に建物群を配置した場合、南東の風

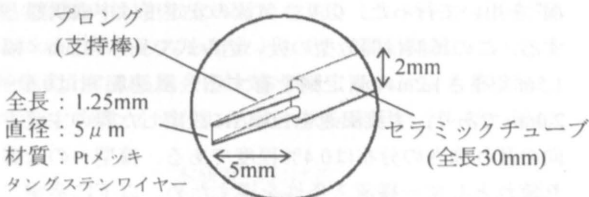
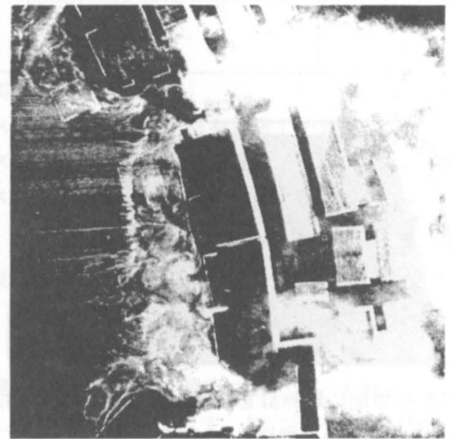


図17 I型熱線プローブのセンサー部

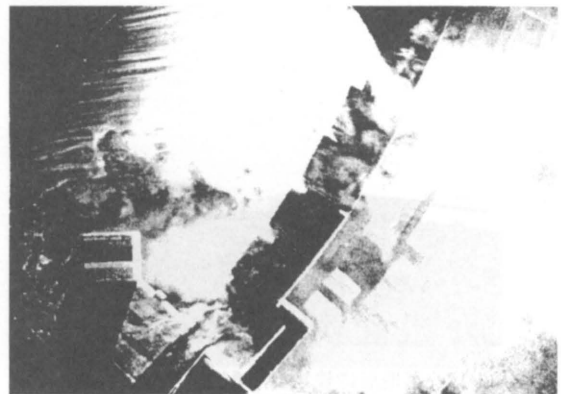
本のブロングに直径 $5\mu\text{m}$ 、長さ 1.25mm のPtメッキタングステンワイヤーが張られている。較正はキングの法則に基づき、(1)式を用いた⁷⁾。ここで、 $E(\text{V})$ は出力電圧、 A と B は定数、 $U(\text{m/s})$ はスカラー風速、 $\Theta_{\text{wire}}(\text{C})$ は熱線温度、 $\Theta_{\text{air}}(\text{C})$ は気流温度である。定数 A と B はstattソフトジャパン株式会社のSTATISTICAにより求めた。その結果の一例を図18に示す。定数 A と B が算出されると、(1)式を変形して、

$$U = \left\{ \left[E^2 / (\Theta_{\text{wire}} - \Theta_{\text{air}}) - A \right] / B \right\}^2 \quad (2)$$

から取得した電圧値 $E(\text{V})$ をスカラー風速 $U(\text{m/s})$ に変換することができる。電圧値の時系列データはオフセット電圧(シフト電圧)、アンプ(ゲイン)、カットオフ周波数 200Hz のローパスフィルターの処理を行い、A/D変換ボードを介してサンプリング周波数 500Hz でパーソナルコンピュータに取り込む。データ収集のソフトにはカノープス株式会社のDSS for Windowsを用いた。本研究では、電圧値 $E(\text{V})$ の平均値からスカラー平均風速 $U(\text{m/s})$ のみを求めた。各測定点におけるデータ数は



(a)南の風の場合



(b)南東の風の場合

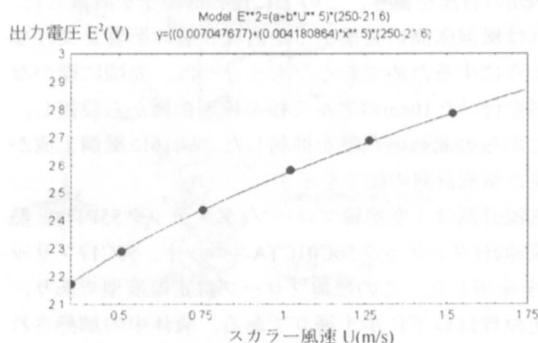


図18 STATISTICAにより求めた較正曲線

図19 スモークワイヤー法による地面近傍の可視化

30,000個で60sのサンプリング時間(平均時間)である。一様流入風速は $U=1.4\text{m/s}$ である。模型の最大高さ $h=10.8\text{cm}$ に基づいたレイノルズ数 $Re(=Uh/\nu)$ は約 10^4 である。なお、気流のモニターや熱線プローブの校正に必要な風速の基準値の測定には、超音波流速計(カイジョーDA-600, TR-90AX型プローブ)を使用した。気流計測結果は数値シミュレーションの結果と併せて後述する。建物群模型を過ぎる気流の様子を視覚的に捉えるため、スモークワイヤー法により流れ場の可視化を行った。この方法では以下のように流れ場を可視化する。模型のすぐ上流で高さを変えて数本のワイヤー(直径 0.3mm のニクロム線)を平行に配線する。これに流動パラフィンとアルミ粉を混ぜたものを塗り、ワイヤーに通電して加熱し、気化した煙で流れ場を可視化する。照明装置としてスリットを付けた 1kW のプロジェクター(理科学マスター製)を風洞の横に3~4台設置し、これからの水平光で模型の地面近傍を可視化した。スチールカメラによる撮影は標準レンズを用い、絞りは 1.2 とし、シャッタースピード(露出時間)は $1/125\text{s}$ とした。風速は 1.0m/s で、気流計測より若干遅くした。その結果を

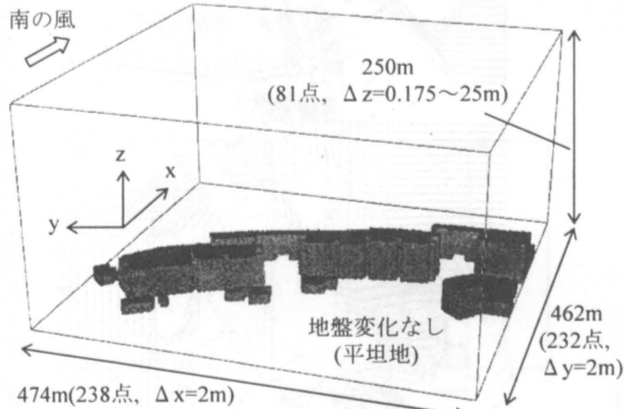


図20 計算領域の鳥瞰図, 南の風の場合

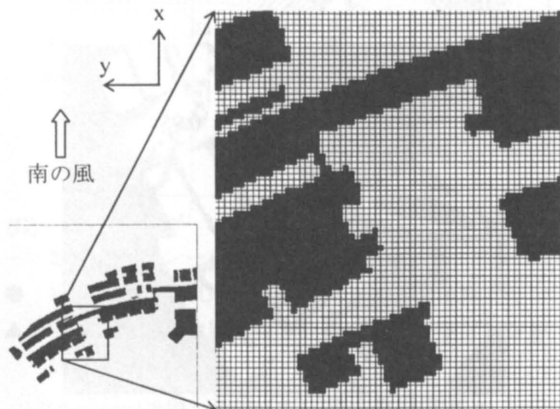
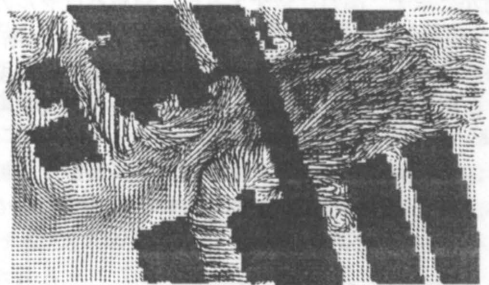
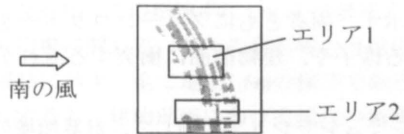
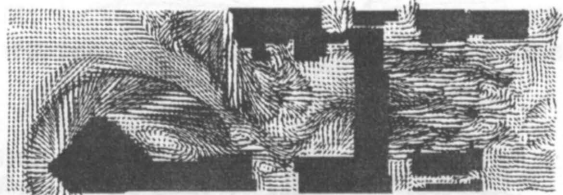


図21 セルの集合体で矩形近似された建物群の様子

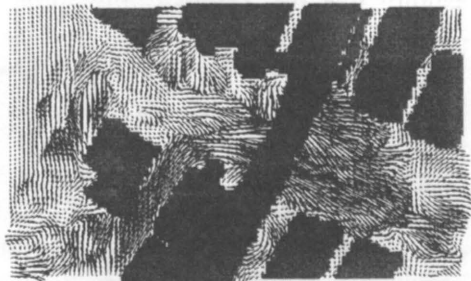


(a)エリア1

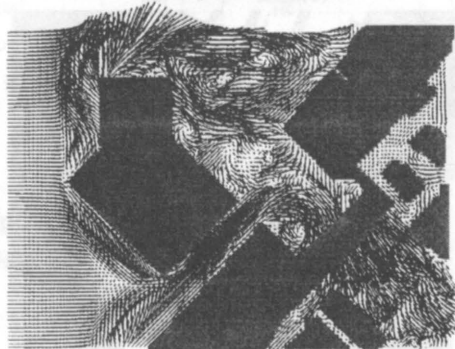


(b)エリア2

図22 南の風, 速度ベクトル図, 瞬間場, 地上1.6m



(a)エリア1



(b)エリア2

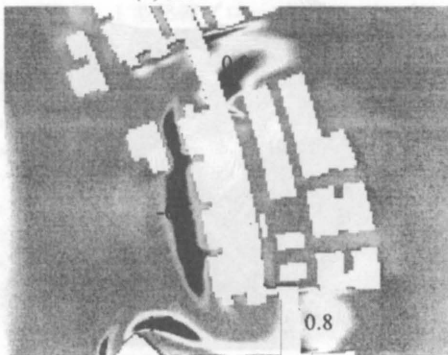
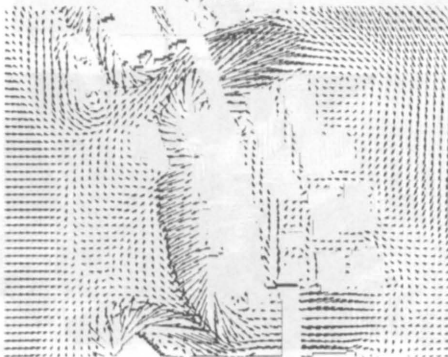
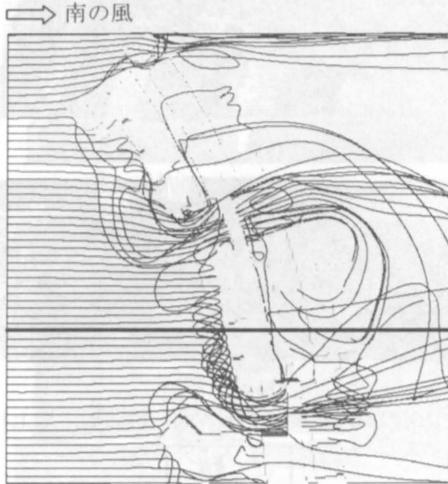
図23 南東の風, 速度ベクトル図, 瞬間場, 地上1.6m

図19に示す、両者ともにグリーンコリドーを風が吹き抜ける様子や、建物前面に衝突する流れが観察された。

数値シミュレーションに関して、計算領域の鳥瞰図を図20に示す。図21に示すように、建物群はセルの集合体で矩形状に近似した。この際、水平方向(x-y断面)の分解能は全領域において2mとし、高解像度に再現した。格子点数は約450万点である。高さの代表スケール

hは計算領域中における最大屋根面高さ約50mとした。これと流入境界面におけるhでの一様流入風速Uで定義したレイノルズ数は風洞実験と同じ 10^4 である。計算は九州大学応用力学研究所のスーパーコンピュータ(富士通VPP5000)の1PE(メモリ1.5GB)を用いて行った。無次元時間100($\Delta t=2 \times 10^{-3}$, 50,000ステップ)の計算は約13hであった。

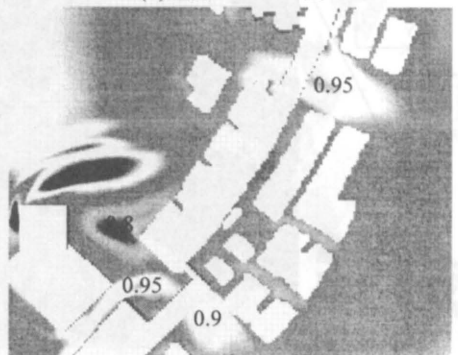
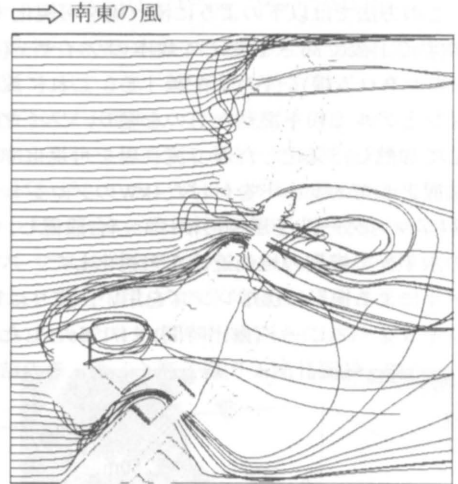
図22および図23に南の風および南東の風の場合につ



(c)一様流入風速Uに対する増速率(主流方向(x)成分)

図24 南の風の場合、時間平均場、地上1.6m

図26に示す鉛直断面



(c)一様流入風速Uに対する増速率(主流方向(x)成分)

図25 南東の風の場合、時間平均場、地上1.6m

いて、地上1.6mの速度ベクトル図(瞬間場)を示す。それぞれの場合において、アニメーションを作成して流れ場を観察すると非定常な複雑乱流場を呈していることが分かった。特に図に示すようにグリーンコリドー付近に注目すると、局所的に流れが加速している様子が

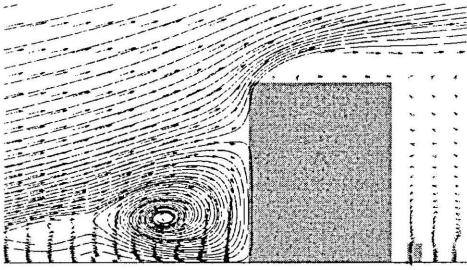
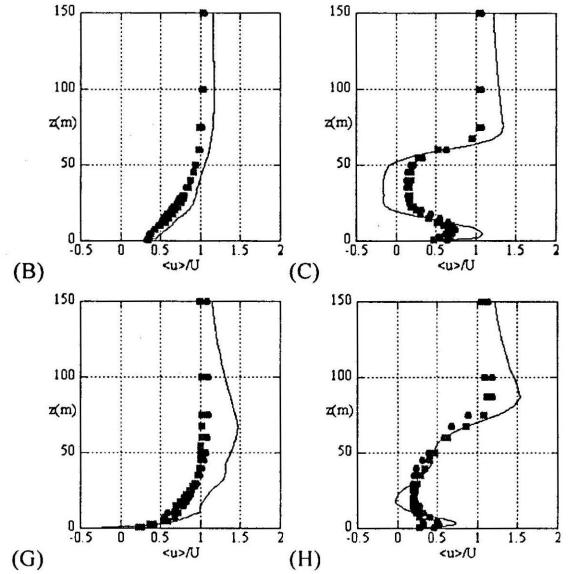
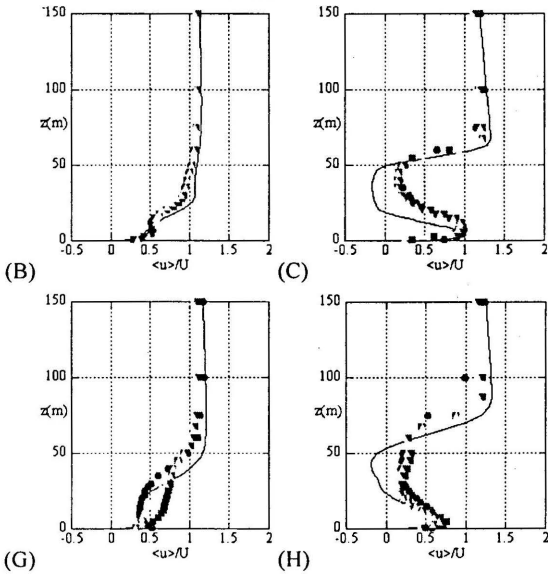
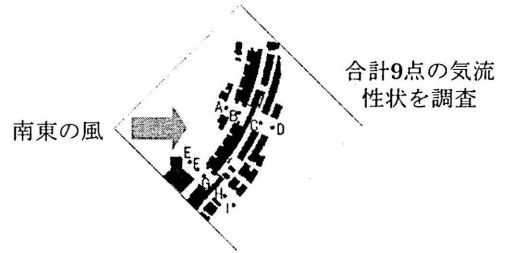
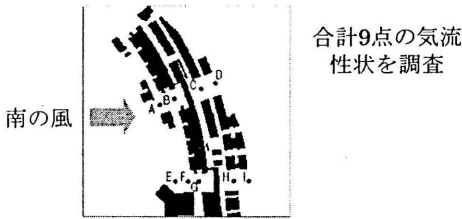


図26 鉛直断面内の流れパターン、速度ベクトル図と流線図、南の風の場合、時間平均場、
図24(a)に黒線で示す断面

明らかになった。この増速率については後述する。

時間平均場に関して、種々の流れ場の可視化を図24および図25に示す。全て地上1.6mの様子である。流線図に注目すると、建物前面における流れの衝突やグリーンコリドーを吹き抜ける流れパターンが明確に観察される。一様流入風速 U に対する増速率に注目する。グリーンコリドー付近では、一様流入風速 U を越えるような増速は出現していない。一方、上流側に位置する建物に関しては、その角部周辺において、一様流入風速 U を越える増速域が明確に観察される。流体力学的な観点からは、この部分の角部を出来る限り取り、丸みをつけることでかなりの減速効果が期待できるものと予想される。

図24(a)に示す実線を含む鉛直断面内の時間平均場に関して、速度ベクトル図と流線図を図26に示す。高層建物の前面で流れが衝突し、渦領域(standing vortex)が形



—: 数値シミュレーション
●: 風洞実験, 平坦地, ■: 風洞実験, 実地形
▲: 風洞実験, 実地形, 樹木を模擬したマップピンを添付した場合

—: 数値シミュレーション
●: 風洞実験, 平坦地, ■: 風洞実験, 実地形

図27 気流の鉛直プロファイルの比較、主流方向(x)成分、南の風

図28 気流の鉛直プロファイルの比較、主流方向(x)成分、南東の風

成されている。但し、この渦領域内の速度はそれほど大きなものではない。一方、高層建物を越える流れも明確に観察される。ここでは、剥離せん断層の局所的な増速が生じており、これを有効に利用すれば、高層建物屋上での風力発電も可能になると期待できる。数値シミュレーションと風洞実験において、主流方向(x)の気流の鉛直プロファイルの比較を図27および図28に示す。ここでは紙面の都合上、グリーンコリドー付近の図中のB, C, G, H点のみの結果を示す。風洞実験においてはI型熱線プローブを使用しているため、逆流域は十分に再現されてはいない。しかしながら、数値シミュレーションと風洞実験の定性的な挙動は良好な一致が得られた。地上付近に注目すると、先に述べたようにグリーンコリドーを吹き抜ける流れは一樣流入風速Uを越えることは無いことが示された。

4. 結論

デカルト座標系のスタガード格子に基づいたRIAM-COMPACTを用い、九州大学新キャンパス移転地内における実際の建物群まわりの風環境予測を行った。特に、南の風および南東の風の場合に風の通り道と予想されるグリーンコリドー付近に注目した。同時に風洞実験を行い、計算結果との比較を行った。数値シミュレーションおよび風洞実験ともに建物群周辺の複雑乱流場が再現され、グリーンコリドー付近の風環境が明らかになった。

謝辞

数値シミュレーションにおける屋根面データの作成に関しては、九州大学人間環境学府の院生、瀧口浩義君に協力頂いた。風洞実験用の建物群模型の作成に関しては、同じく人間環境学府の院生、斉藤里枝さんに協力頂いた。風洞実験に関しては、九州大学工学府航空宇宙工学部門の院生、岡田臣右君と宮崎康伸君に協力頂いた。最後に、新キャンパス計画推進室の坂井猛先生と森牧人先生に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 内田、大屋、九州大学情報基盤センター年報、第2号、pp.99, 2002
- (2) Deardorff, J. W., J. Fluid Mech., Vol.41, pp.453, 1970
- (3) 梶島、養賢堂、1999
- (4) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K., Fluid Dyn. Res., Vol.1, pp.145, 1986
- (5) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. & Cobat, W. H., Phys. Fluids, A 3, pp.1760, 1991
- (6) 大屋他13名、九州大学応用力学研究所所報、第75号、pp.147, 1993
- (7) 大屋、渡辺、杉谷、第14回風工学シンポジウム論文集、pp.79, 1996

Appendix: 地上構造物まわり流れに対する流入気流の乱れの影響について

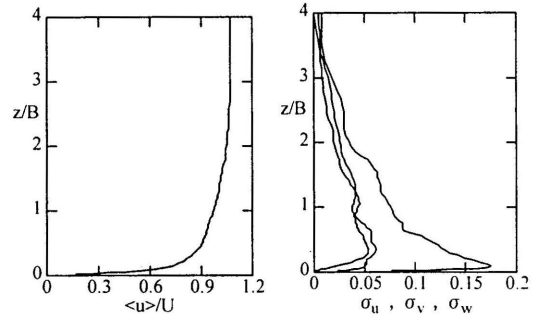
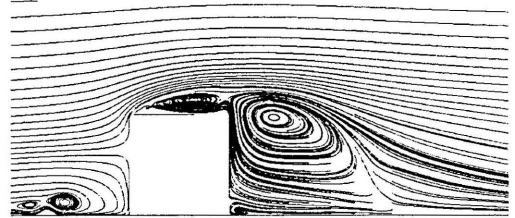
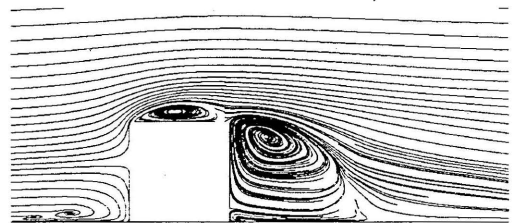


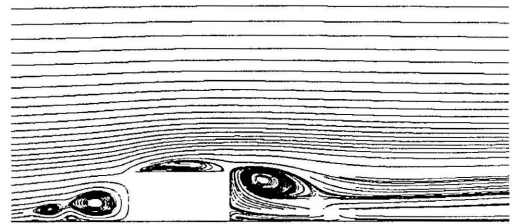
図29 ドライバ部で作成された乱流境界層特性、評価位置は-5Bのスパン中央断面($y=0$), $Re=3000$



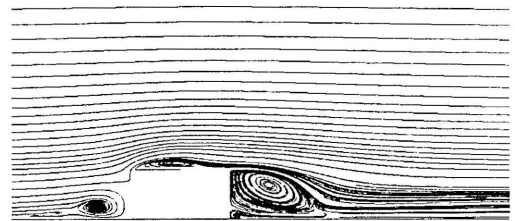
(a)層流境界層, $111 \times 101 \times 71$ 点



(b)乱流境界層, $231 \times 101 \times 71$ 点



(c)層流境界層, $111 \times 101 \times 71$ 点



(d)乱流境界層, $231 \times 101 \times 71$ 点

図30 時間平均場($t=100 \sim 200$)に対して描いた流線図。スパン中央断面($y=0$), DNS, 同じ流入気流プロファイル