

ネスティング手法による都市の複雑形態を考慮した-風環境シミュレーション
Wind environment simulation for urban complex canyon
with nesting method

浦野 明¹ 森川 泰成¹ 七井 慎一¹ 高橋 一郎²
URANO, Akira Yasushige Morikawa Shinichi Nanai Ichiro Takahashi

ABSTRACT: The purpose of the study is development of thermal environment simulation system for urban planning. The scale of analysis region or resolution of the system varies from 1 m to 1-10 km, and multi-grid system is adapted to perform thermal environment analysis of large scale and small scale. It is developed that nesting method considering effects of sub-grid scale buildings by improving mass concentration model. The part of the grid of large region and low resolution is nested to the grid of small region and high-resolution. The method of the study is used when making grid data as boundary condition and initial condition of the small-scale grid by interpolating of the large-scale grid.

KEYWORDS: numerical analysis, wind environment, environment-symbiotic city, mass consistent model, nesting

1. はじめに

地球環境を保全するという観点から、環境共生都市を実現するための取り組みが近年活発化しており、都市の温熱環境の予測・評価を行うシミュレーション技術が都市計画の施策検討、都市の環境設計に強く求められるようになってきた。本研究は、都市レベルにおける実用的な「風・温熱環境シミュレータ」の開発を目的としている。

都市の温熱環境は都市を構成する様々な地物、建物群、河川、緑地等からなる「系」とその都市自体を囲む気象等のより広域の「系」の複合系である^{1), 2)}。そこで、本研究は1~数10 km程度の広いエリアの温熱環境をマクロに解析できると同時に、このエリア内の任意の小空間の温熱・空気環境も1 m以下の分解能で、詳細に予測・評価しうる解析システムを開発することを目標とした。

2. 開発システムの概要

本研究は以下(2-1~2-3)のシステムにより構成される^{注1)}。

2.1 熱流体解析システム

熱流体解析ソフトウェアは村上等³⁾による差分法を用いたk- ϵ 型2方程式乱流モデルを基本とし、これにコリオリ力、流体体積率、面積開口率の影響を考慮した方程式系を新たに構成した。本システムでは都市全体の風系を支配している数10 km程度の空間から数m程度の建築物周囲の空間を同時に解析・表現するためマルチグリッドシステムを採用した。マルチグリッドシステムにはtwo-way method(たとえばYamada and Bunker (1988) ⁴⁾)とone-way methodがある。本研究では並列処理を利用した迅速な解析を行なうため、one-way methodを採用した^{注2)}。本解析手法の特徴を表-1に整理する。なお、各グリッド間の補間の方式は、面積開口率により建物の影響を考慮した手法を開発・採用した。

2.2 並列処理システム

本解析では領域分割方式を利用する一方で、マルチグリッドにより分割された各解析領域をそれぞれ単独のCPUに受け持たせることとした。本システムの数値解析部分は以下の組み合わせにより並列実行

1 大成建設(株)技術研究所 Taisei Research Institute

2 大成建設(株)エンジニアリング本部 Engineering Dept., Taisei Co. Ltd.

することができる。

- ・単体プログラムの複数同時実行
- ・MPIで並列化した並列プログラムの実行

マルチグリッドにより分割された複数の解析領域を単体プログラムで複数のCPUで並列に実行させることも、一つの解析領域を並列プログラムで複数CPUで実行させることも可能である^{注3)}。

2.3 3次元グラフィック可視化システム

グラフィック可視化プログラムには、Vis 5Dを用いる^{注4)}。本研究では2-1で示した解析コードの出力データをVis5Dで表示可能にする変換ソフトウェアを開発することにより、環境シミュレータにグラフィックシステムを加えた。

3. ネスティング手法

3.1 流体解析とネスティング

広領域・低分解能のグリッドの一部をone-way-methodにより狭領域・高分解能のグリッドにネスティングを行う際には、前者のグリッドを補間して後者のグリッドの側面境界条件および初期条件として用いるグリッドデータを作成する必要がある。補間方法としては、単純な線形補間の他に、Dickerson⁶⁾、Shermann⁷⁾により研究され、鈴木⁸⁾によりプログラムが紹介されているマスコンモデルが知られている。

一方、比較的狭領域・高分解能のグリッドであっても都市空間を対象とした解析では、サブグリッドスケールの建物などが存在することが多い。その場合、建物の影響を側面境界条件を与える際に考慮することが、側面近傍の解析結果の精度向上につながると考えられる。

ここではマスコンモデルを改良することにより、サブグリッドスケールの建物の影響を考慮したネスティング方法を開発した。

ネスティングを行う前後の流体解析は前報その1と同様、表-2に示す基礎方程式に基づく。

ネスティングは、広領域の流体解析結果に対して、一次推定により簡易的な補間を行った後、連続式を満たす修正をする二次推定を行うことにより、狭領域の流体解析の初期・境界条件として用いる流速の3次元データを作成する。

3.2 一次推定値の解析

狭領域の格子点変数の、広領域の格子点変数からの補間による推定を以下の式に基づき行なう：

変数を Ω とすると、

$$\Omega_{i,j,k} = \sum_l W_{i,j,k,l} \Omega_l \quad (6)$$

$$W_{i,j,k} = \frac{1}{r_{i,j,k}} \quad (7)$$

となる。ここで、 W は重み関数、 r は狭領域の格子点A(i,j,k)と広領域の格子点B(l)の距離、 $\Omega_{i,j,k}$ は狭領域の格子点上に補間された変数、

表-1 本システムにおける解析手法の特徴
Characteristics of analysis methods of the system.

- ・流れ場のデータベース化が可能
- ・他のソルバーとの接続が可能
- ・他の流れ場のデータベースとの接続が可能
- ・非同期の並列処理が可能
- ・様々なハードウェアの構成に柔軟に対応できる (SMP,MPP,ネットワーク・クラスタ)
- ・各計算ケースの再計算が容易である (収束性や精度の改善など)
- ・任意の狭領域 (数) で任意の階層の計算が無駄なく実行可能

表-2 基礎方程式
Primitive equations.

連続の式	$\frac{\partial \gamma_i U_i}{\partial x_i} = 0$	…(1)
平均流の運動方程式	$\gamma_i \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial \gamma_j U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \gamma_i \left(P + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ v_i \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \right\} \right\}$ $-2U_j \omega \sin \varphi - g \beta \cdot \Delta T \cdot \delta_{ij} - F_{\tau i}$	…(2)
ただし、	$F_{\tau i} = \frac{1}{2} C_d \gamma_i U_i U_i $ ここで、 C_d は空間(x, y, z)の関数	
乱流エネルギーkの輸送方程式	$\gamma_i \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial \gamma_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \gamma_i \left(\frac{v_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right\} + \gamma_i v_i \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \gamma_i \varepsilon + 2 U_i F_{\tau i}$	…(3)
乱流散逸εの輸送方程式	$\gamma_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \gamma_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \gamma_i \left(\frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \right\} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \gamma_i v_i \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$ $+ C_2 \frac{\varepsilon}{k} \gamma_i G - C_3 \gamma_i \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\varepsilon}{k} 2 U_i F_{\tau i}$	…(4)
温度Tの輸送方程式	$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{v_i}{\sigma_\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right\}$	…(5)
ただし、	$P_k = v_i \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad G = \frac{\Delta \rho_s H_s g}{\rho_s U_b^2} \cdot \frac{v_i}{\sigma_\theta} \cdot \frac{\partial C}{\partial x_i} \delta_{ij}$	

Ω_1 は広領域の格子点上の変数である。

3.3 二次推定値の解析

ベクトル変数 u, v, w については一次推定値の結果を初期値として、連続の式を満足するように修正して二次推定値を算出する。(i, j, k) における一時推定値を u_0, v_0, w_0 とする。Lagrange の未定乗数法により、

$$E(u, v, w, \lambda) = \int_V \left[(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2 + (w - w_0)^2 \right] dx dy dz \quad (8)$$

の $E(u, v, w, \lambda)$ を最小にする u, v, w を求める。ただし λ は Lagrange の未定乗数であり、束縛条件として通常は連続の式

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

を用いている。本研究では (9) 式の代わりに格子内のサブグリッドスケールの格子における各方向の面積開閉率 $\gamma_i, \gamma_j, \gamma_k$ を考慮した、(1) 式を用いた。(1), (8) 式を用いて、二次推定値を求める式として、(10), (11) 式が導かれる；

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_y \frac{\partial \lambda}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \frac{\partial \lambda}{\partial z} \right) + 2 \left[\frac{\partial \gamma_x u_0}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v_0}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w_0}{\partial z} \right] = 0 \quad (10)$$

$$u = u_0 + \frac{1}{2} \frac{\partial \lambda}{\partial x}, v = v_0 + \frac{1}{2} \frac{\partial \lambda}{\partial y}, w = w_0 + \frac{1}{2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (11)$$

上式を差分化して緩和法を用いて収束計算を用いることにより、 u, v, w の二次推定値が算出される。

3.4 ネスティングの解析例

本ネスティング手法により解析を行った例を示す。

広領域の解析領域が：50m × 50m × 540m（格子数 142500）、狭領域が 14.5m × 14.5m × 12m（格子数 5808）の場合の解析を行った。図-2が入力データとなる広領域格子の流速分布であり、中央部分の点線で囲まれた部分が、狭領域の範囲である。図-3～6に一次・二次推定の結果を示す。図中に点線で示した 2m × 2m × 6m の範囲に開閉率 0.5 の障害物を設定し、二次推定の解析の際に考慮した。

図-3と図-4を比較すると、一次推定に比べて二次推定では点線の部分の風速が減衰しており、図-5と

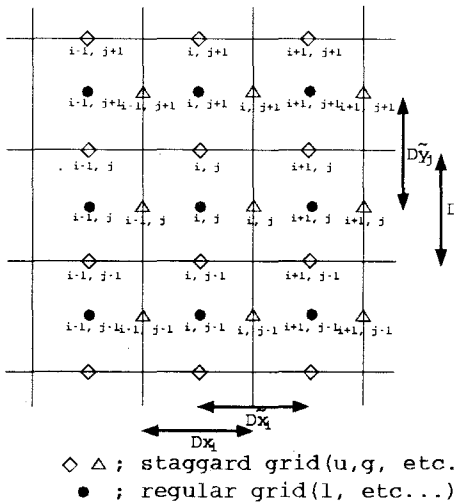


図-1 格子点および格子点定義
Position and definition of grid points.

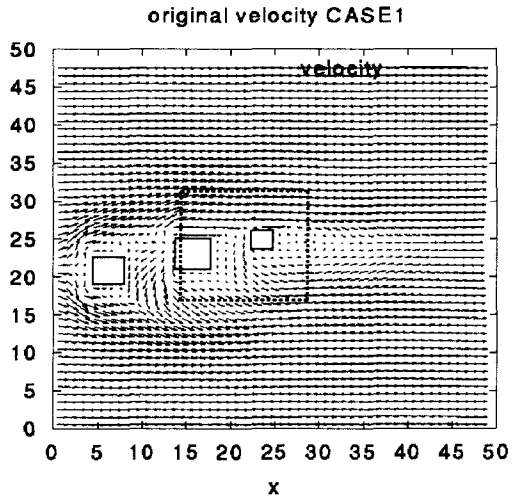


図-2 入力データとした広領域格子の流速分布
Wind velocity distribution of the large region as input data.

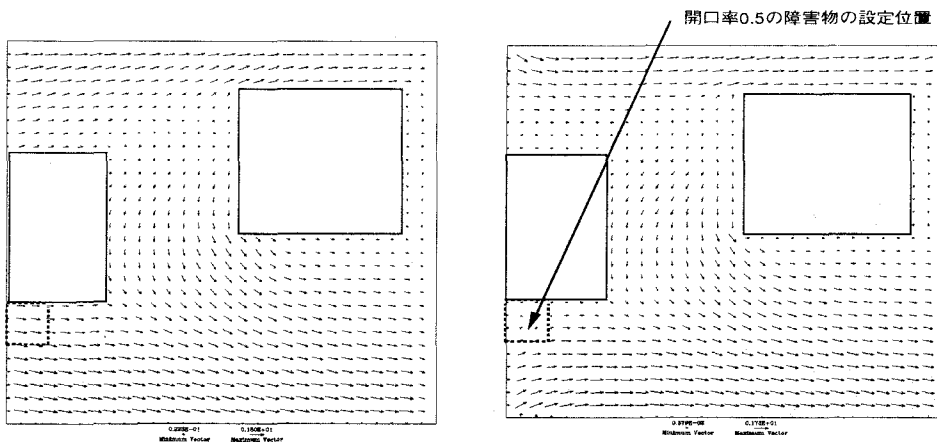


図-3 一次推定による風速の水平分布

Horizontal wind distribution from 1st estimation.

図-4 二次推定による風速の水平分布

Horizontal wind distribution from 2nd estimation.

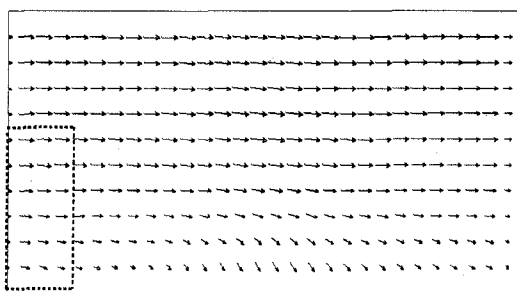


図-5 一次推定による風速の鉛直分布

Vertical wind distribution from 1st estimation.

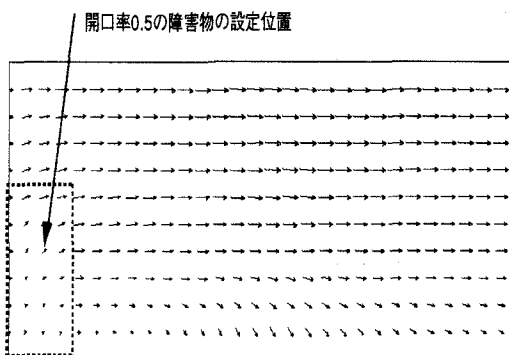


図-6 二次推定による風速の鉛直分布

Vertical wind distribution from 2nd estimation.

図-6でも同様である。以上の結果、本ネスティング手法により、広領域の格子幅では分解できない建物の影響を考慮した境界・入力条件の作成が可能であることが示された。

4. システム全体の運用

4.1 解析系の設定事例

本システムを利用した解析の各グリッドと各グリッド間の連携イメージを図-7に示す。ここでは、マルチグリッドによる解析領域を広領域（グリッド1）から狭領域（グリッド4）まで4階層を設定して解析を行った。最も外側の解析領域は東京都心部を中心とする20km四方である。グリッド1の中に約1.5km四方の領域グリッド2を新宿・墨田・高島平・銀座の4ヶ所設定した。更に銀座を例にとりグリッド3と

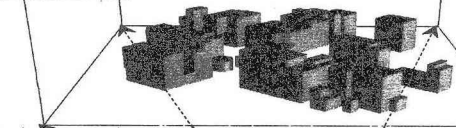
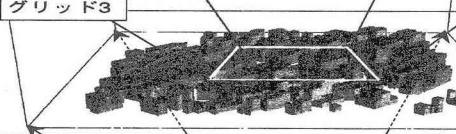
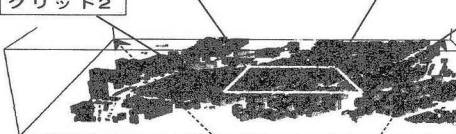
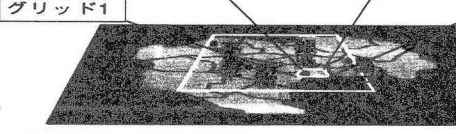
解析エリア（スケール）	解析内容とグリッド間データの連携
グリッド4 	〔100～200m四方のビル周辺解析〕 ・建物周辺詳細解析可 ・境界条件はグリッド3の解析結果
グリッド3 	〔200～500m四方の街区解析〕 ・建物群を詳細再現可 ・境界条件はグリッド2の解析結果 ・グリッド4の対象エリアを指定
グリッド2 	〔1～2km四方の都市部解析〕 ・建物群を再現可 ・境界条件はグリッド1の解析結果 ・グリッド1で指定 複数エリアをパラレル処理 ・グリッド3の対象エリアを指定
グリッド1 	〔10～20km四方の広域解析〕 ・土地利用データ使用 ・卓越風向・風速定義 ・領域分割法によるパラレル処理 ・グリッド2の対象エリアを複数指定

図-7 広域～建物周辺の解析系設定の例
Examples of analysis regions from large scale to buildings scale

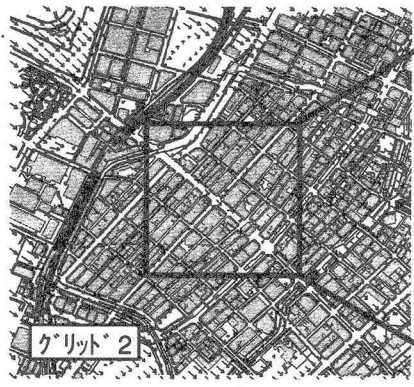


図-8 気流解析結果 銀座（約1.5km四方）
Output of wind analysis. Ginza (app. 1.5km square)

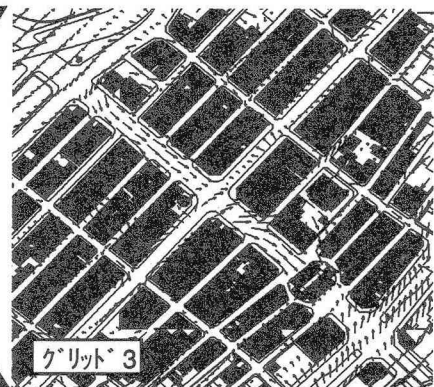


図-9 気流解析結果 銀座（約600m四方）
Output of wind analysis. Ginza (app. 600m square)

して600m四方を、その内部を更にグリッド4として200m四方の領域を設定した。これらのグリッドの大きさや位置は任意に設定可能である。

4.2 解析結果例

冬期の典型的な西高東低型の気圧配置を仮定して、東京の卓越風向である北北西の季節風をグリッド1のレベルで与えて解析を行った。その結果をグリッド2の銀座の境界条件としてグリッド2内を解析し、更にこの結果をグリッド3の境界条件としてグリッド3内を解析した。これらの結果の例を各々図-8, 9に示す。これらの図中に示すベクトルは地上1.5m高さの気流を示したものである。本報では気流結果のみ示したが、温度や濃度計算との連成も可能である。

5. おわりに

本報では都市の複雑形態を考慮して風環境を予測するシミュレーションシステムの概要を示した。今後は本システムが、今後の都市温熱環境を設計・評価してゆくための有効なツールとなるように、追加検討を進めてゆく予定である。

謝辞

本研究は、科学技術振興事業団・計算科学活用型特定研究開発推進事業（短期集中型）「都市温熱環境シミュレータの開発」（研究代表者：森川泰成）の活動の一環として実施したものである。本研究の検討にあたり、村上周三教授（東京大学生産技術研究所）、持田灯助教（東北大学工学部）、富永禎秀助教（新潟工科大学）の貴重なご意見をいただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森川、工藤他：市街地における温熱環境の予測・評価手法の検討-Rapid Prototype技術の適用-、日本建築学会大会学術講演梗概集、p869-872、1997年9月。
- 2) 森川、小野：Rapid Prototyping手法に基づく建築環境解析・設計技術、伝熱WGシンポジウム「最近の建築伝熱シミュレーションと設計ツール」、p.49-54、1998年12月
- 3) 吉田、大岡、村上他：対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑地の効果の分析、日本建築学会計画理論集、No. 529、77-84、2000。
- 4) Yamada, T. and S. Bunker : Development of a nested grid, second-moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT brush creek data simulation, Journal of Applied Meteorology, 27, 572-578, 1988.
- 5) WMPI from the Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal, <http://dsg.dei.uc.pt/wmpi/>
- 6) Dickerson, M.H.: MASCON - A Mass Consistent Atmospheric Flux Model for Regions with Complex Terrain., J. Appl. Meteor., 17, 241-253, 1978
- 7) Sherman, C.A.: A Mass-Consistent Model for Wind Fields over complex Terrain., J. Appl. Meteor., 17, 312-319, 1978. ASCOT
- 8) 鈴木基雄：変分法による風系推定モデル、大気環境シミュレーション、pp202, 白亜書房, 1992.

注1 本システムはWindows-NTベースのパソコン上で稼働させることが可能である。本研究で使用したハードウェアは以下の通りである。

機種：デルコンピュータ製Power Edge 6300
CPU：Intel Pentium III 500 MHz 512 kB cache X4
メモリ：4GB、ディスク：72GB RAID-5、UPS：3kVA
テープ：DDS-3X84-10テープ、OS：Windows NT 4.0 Server

注2 Two-way methodは狭領域の精密な解析結果を広領域に反映できる利点があるものの、広領域と狭領域の解析を同時に行うため狭領域の解析の細かい時間刻みの影響を受け、全体の解析時間が大きくかかる欠点がある。一方one-way methodは、広領域の解析結果をデータベースとして保存することにより、広領域の解析領域の範囲内で狭領域の解析を任意に設定し、複数の領域を同時並行して実行することができる利点がある。

注3 パラレル化については、稼働させるマシンの性能、解析する領域、マルチグリッドの個数によって、最適な高速化の選択ができるように設計を行なっている。並列化は、主に計算の大部分の時間を要する圧力速度同時緩和計算部分に対して行なった。MPIにより並列化を行うことで、実行環境が変更されても容易に移植ができるようにしている。また本システムでは、ポルトガルCoimbra大学のグループが開発、実装したMPIWindows環境で稼働するWMPIを実装している⁵⁾。

注4 Vis 5Dは、米国ウィスコンシン大学で開発され、GNU General Public Licenseにより公開されている。