

CAD/GIS/VR 技術を用いた都市域における大気環境流れの大規模計算システム

中央大学大学院	学生会員	石坂 俊輔
中央大学大学院	学生会員	山崎 輔
中央大学	正会員	櫻山 和男

1. はじめに

近年，都市域においてヒートアイランド現象やビル風等，大気環境に関する問題が顕著になっている．これらの現象のメカニズムの解明には，数値シミュレーションが広く用いられるようになってきている．

本報告では，都市域の大気環境流れを，高精度かつ迅速に行うための前処理・後処理を含めた計算システムを提案するものである．前処理としては，CAD/GIS を用いて地形や建物形状を高精度に再現した格子生成手法を，後処理では3次元解析結果を正確に把握するためのVR技術を用いた可視化手法の開発を行った．また，メインプロセスである計算には安定化有限要素法を用いた領域分割に基づく並列計算手法を用いた．

本システムの有効性を検討するために，日本橋周辺の大気環境流れに適用した．

2. 数値解析手法

(1) 基礎方程式

基礎方程式には，非圧縮性粘性流体を仮定した Navier-Stokes 方程式を用いる．空間フィルタリング処理を施した運動方程式，連続式はそれぞれ式 (1), (2) で表される．運動方程式；

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

連続式；

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

ここで， \bar{u}_i ， \bar{p} はそれぞれ空間フィルタリングを施した流速，圧力であり， Re は Reynolds 数を表している．また， τ_{ij} は SGS(Sub Grid Scale) 応力を表す．格子で捉えきれない SGS の乱れによる GS(Grid Scale) の流れ場への影響は， τ_{ij} を通じて GS の運動方程式に組み込まれる．

(2) Smagorinsky モデル

Smagorinsky モデルは，SGS 応力 τ_{ij} に対するモデル化の中で最も代表的なものである．乱流エネルギーの収支において生産項と散逸項が釣り合うという局所平衡状態を仮定すると，SGS 応力は以下のようにモデル化される．

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\nu_{SGS} = (Cs\Delta)^2 (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (6)$$

$$\Delta = V_e^{1/3} \quad (7)$$

ここで， ν_{SGS} は Sub Grid Scale の渦粘性係数， Δ はフィルター幅， Cs は Smagorinsky 定数である．また \bar{S}_{ij} は GS の変形速度テンソルであり， V_e は四面体要素の体積である．

(3) 離散化手法

基礎方程式，式 (1), (2) に対して SUPG/PSPG 法²⁾ に基づく安定化有限要素法を用いて空間方向の離散化を行う．時間方向の離散化には，Crank-Nicolson 法により離散化を行い，連立1次方程式の解法には Element-by-Element Bi-CGSTAB2 法を用いた．

3. 大規模システム

本システムの概要を，日本橋周辺の大気環境流れへの適用例を通じて示す．

(1) 前処理 (プロセス)

前処理としては，形状モデリングとそれを用いたメッシュ生成に大別される．形状モデリングには，地形及びビル等については二次元及び三次元 GIS データによりモデル化し，それらのデータに考慮されていない高架橋などの複雑な構造物については CAD システムを用いてモデル化した．それにより得られた形状モデルを図-1 に示す．この形状モデルを用いて，表面メッシュを作成したものを図-2 に示す．そして，この表面メッシュデータを用いて，解析領域内部に四面体要素に基づく有限要素メッシュを，Delauney 法により作成する．このメッシュの四面体要素数は 3,556,310

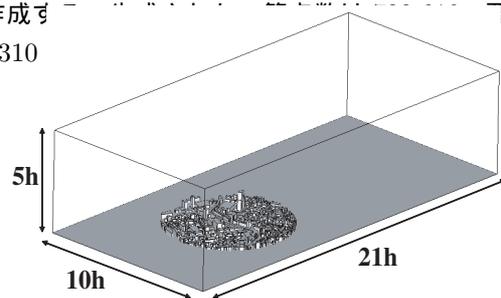


図-1 日本橋周辺の領域図

(2) 計算 (メインプロセス)

大規模計算を省メモリーかつ高速に解析するために，領域分割に基づく並列計算手法を適用した．領域分割法に基づく方法を導入することにより，各プロセッサは割り当てられた領域のデータのみを記憶するので，省メモリーに計算を行うことが可能になる．図-3 に 16 分割の領域分割

KeyWords : 有限要素法，並列計算，MPI

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 E-mail: ishizaka@civil.chuo-u.ac.jp

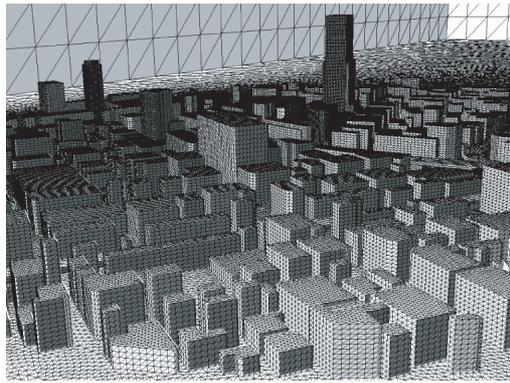


図-2 日本橋周辺の表面メッシュ

図を示す．なお，並列化には，移植性の高い MPI (Message Passing Interface) を用いた．また，並列計算機には，京都大学学術情報メディアセンター⁴⁾ の HX600 クラスタ (Thin SMP クラスタ) を使用した．(表-1 参照) 図-4 に 8 コアを基準としたスピードアップのグラフを示す．512 コアを使用した場合においては，8 コアを用いた場合と比較して 44 倍のスピードアップを確認することができた．また，ノード数が増えるに従って，計算スピードはほぼ比例して向上することが確認できる．

表-1 計算システム概要

ノード数	416
コア数	6656
理論ピーク演算性能	61.2TFlops
総メモリ容量	13TB
総ノード間通信性能	3.3TB/s
OS	RedHat Enterprise Linux AS V4
プロセッサ	AMD64(x86-64)
タイプ	Quad Core AMD Opteron

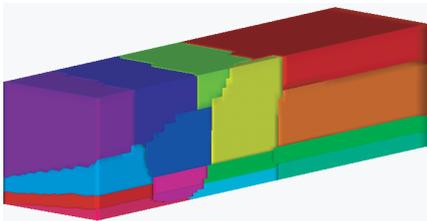


図-3 領域分割図(例:16分割)

$$\text{スピードアップ} = \frac{\text{基準ノード使用時の実行時間}}{N \text{ ノード使用時の実行時間}}$$

(3) 後処理 (ポストプロセス)

三次元結果の可視化には，市販の可視化ソフトウェアの利用が可能であるが，市販のものは対話的な可視化が困難である．また，近年の VR (バーチャルリアリティ) 技術の

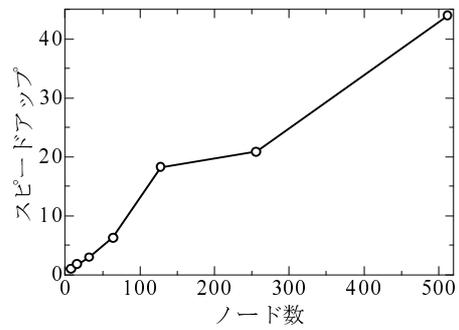


図-4 スピードアップ

進歩により，没入型可視化装置の普及が著しい．このような状況から，本研究では没入型可視化装置において対話的に可視化を行うシステムを構築した．システムの開発には，OpenGL および CAVE ライブラリを用いた．図-5 に，没入型可視化装置内で観測者が対話的に可視化を行っている様子を示す．

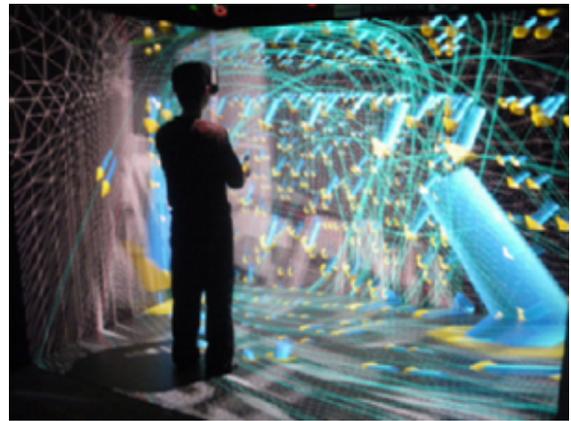


図-5 ベクトル場の可視化

4. おわりに

本報告では，都市域の大気環境流れを，高精度かつ迅速に行うための CAD/GIS/VR 技術を用いた計算システムの提案を行った．本システムにより，都市域における大気環境流れの大規模計算を高品質に行うことが期待できる．

今後は，実験及び実測データとの定量的な比較を行う予定である．

謝辞

本研究の一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した．

参考文献

- 1) J.Smagorinsky : General Circulation experiments with the primitive equations . the basic experiment, Monthly Weather Review , 91, pp.99-164, 1963.
- 2) T.E.Tezduyar : Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations , Advance in Applied Mechanics , 28 , pp.1-44 , 1991.
- 3) 櫻山和男, 西村直志, 牛島省: 並列計算法入門, 日本計算工学会編
- 4) スーパーコンピュータシステム, 京都大学学術情報メディアセンター : <http://web.kudpc.kyoto-u.ac.jp/hpc/>