

都市の大規模大気環境シミュレーション

高田知学¹ 樫山和男²

¹中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 ²中央大学理工学部土木工学科

1. はじめに

都市域において、良好な大気環境を創出するためには、都市再開発や高層ビル建設の計画段階においてビル風などの大気環境の予測・検証を行う必要がある。これらの現象に対する予測・検証の手段として、近年では、計算機性能の向上や数値解析手法の発展から数値シミュレーションによる検討がなされるようになってきた。このような背景の下、著者らは既往の研究において大気環境シミュレーションのための三次元都市モデリング手法^{1,3)}およびシミュレーション手法²⁾の提案を行い、実際の都市域に対する数値シミュレーションを行ってきた。その際、計算結果の評価には、CG 技術を用いて平面ディスプレイ等の平面媒体に物理量を可視化する、いわゆる 2.5 次元表示により視覚的に把握してきた。しかし、従来の可視化手法では大気環境シミュレーションの計算結果を十分に把握することは以下の理由により困難であった。1) 多数の複雑形状構造物により形成される都市域は、3 次元的に複雑な領域である。2) 大気流れは 3 次元性が顕著な問題である。

そこで、本研究では、シミュレーション結果を十分に把握するために、可視化に VR (Virtual Reality) 技術^{5,6)}を用いた都市の大気環境シミュレーションの構築を行った。具体的には、まず、実際の都市の大気空間を CAD/GIS データを用いてメッシュ生成し、安定化有限要素法による大気環境シミュレーションを行い、VR 技術を用いた可視化手法により大気環境を VR 空間において再現するシステムの構築を行った。本システムの妥当性を、西新宿周辺の大気環境シミュレーションに応用し検討した。

2. GIS/CAD データを用いたメッシュ生成

複雑な都市域の正確な三次元モデルを作成するために、本研究では GIS/CAD データを用いたモデリング手法の構築を行った。

モデリング手順としては、まず、GIS データ (標高メッシュデータ、2 次元住宅地図データ) を用いて、地理情報を正確に考慮し、地形のメッシュ生成を行う。次に、構造物表面の形状モデリングを行うが、この際、簡易形状の構造物に対しては、鉛直方向に建物の階数データを用いて押し出した形状を定義し、特徴的な形状を有する構造物に対しては、CAD システムを用いて高精度に形状を定義し、表面メッシュの生成を行う。以上の手法により得られた地形、及び構造物の形状モデルを DXF ファイルに変換し、CAD システムで結合させる。その後、気流解析を行う高さの領域を定義し、3 次元空間に対して四面体メッシュの生成を行う。図.1 に解析対象とする西新宿周辺の写真を、図.2 に本モデリングシステムにより作成した形状モデルを示す。両者の比較より、作成した形状モデルは実際のモデルを忠実に再現していることがわかる。図.3 に作成された表面メッシュを示す。なお、計算に用いたメッシュは総節点数 2,815,973、総要素数 15,113,703 の四面体要素に基づく非構造メッシュである。



図.1 西新宿周辺 (写真)

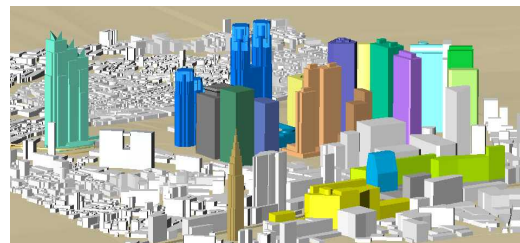


図.2 西新宿周辺 (CAD モデル)

3. 有限要素法による離散化

支配方程式には非圧縮性粘性流れを仮定し、無次元化を施した Navier-Stokes 方程式は(1)、連続式は(2)を用いた。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここで、 u_i 、 p は流速、圧力であり、 $Re (=UL/\nu)$ は Reynolds 数である。但し、 U は代表流速、 L は代表長さ、 ν は動粘性係数である。

支配方程式(1)、(2)に対して、空間の離散化には SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法⁴⁾を、時間の離散化には有限差分法を適用した。

4. 数値解析例

数値解析例として、西新宿周辺における大気環境シミュレーションを行った。解析領域定義図を図.4 に示す。計算条件として、Reynolds 数は 84,000、微小時間増分量は $t = 1.0 \times 10^{-3}$ とし、無次元時間 $t = 30$ まで解析を行った。なお、都庁の建物高さを代表長さ、都庁の高さでの流入風速を代表風速として定義した。

また、本例題では、大規模計算となるため図.5 に示すように解析領域を分割し、領域分割法に基づく並列計算手法を導入し、分散メモリ型並列計算機を用いて並列計算を行った。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、省メモリーで計算を行うことが可能となる。なお、通信ライブラリーには MPI (Message Passing Interface) を使用した。

図.6 はある時刻での解析結果から流線を求め、2.5 次元的に可視化した図である。この図より、ビル後方で大きな渦が生じていることや、ビルが存在することによって大気の流れが変化していることが確認でき、都市域の大気流れの全体的な挙動を把握することができる。しかし、このような 2.5 次元的可視化では、詳細な計算結果の把握は困難なため、VR 技術を用いた 3 次元の可視化を行った。

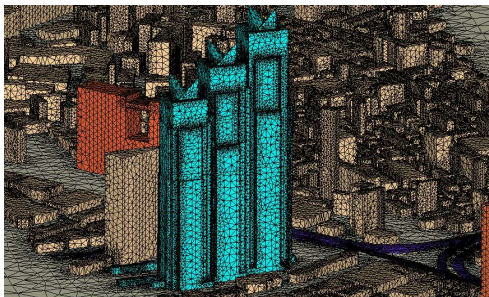


図.3 有限要素分割図

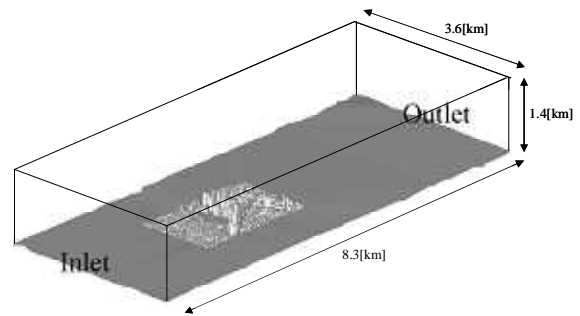


図.4 解析領域

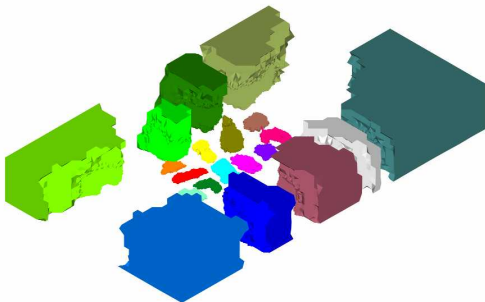


図.5 領域分割図

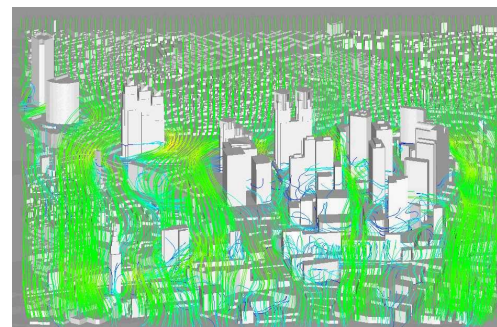


図.6 流線図

5. 没入型 VR システムを用いた解析結果の可視化

5.1. VR システムについて

本研究では3面のスクリーンで構成される没入型 VR システムを採用しており, 図.7 に本研究で使用している VR システム HoloStage(CHRISTIE)の外観を示す. HoloStage のディスプレイシステムは3面の平面スクリーンと3台のプロジェクターで構成されており, それぞれ底面は反射型スクリーン, 正面, 側面のスクリーンは透過型のスクリーンを採用している. 正面, 側面のスクリーンには背面からプロジェクターで投影し, 底面のスクリーンには上方に設置したプロジェクターの光を下方に反射させて投影している. また, 本システムで用いているスクリーンはセミハードスクリーンであるため, スクリーンの湾曲による映像の歪みが生じないという特徴を有している他, スクリーンを黒色を基調としてコントラスト調整しているため, 映像投影した際の黒色の表現が格段に良く, 無限の奥行き感を表現可能であるという特徴を有している.

VR システムを構成しているハードウェアに関して, スペックは図.8 に示す通りであり, MasterPC と4台の SlavePC で構成される PC クラスタシステムを用いている. 4台の SlavePC のうち1台は観察者の視点位置のトラッキング計算を逐次行い, これにより VR 空間において観察者の視点映像の逐次投影を可能とする. 他の3台の SlavePC は各スクリーンに投影する映像描画をそれぞれが担当している. また, 本システムで使用しているプロジェクターには DLP プロジェクターを採用しており, 解像度は 1400×1050, 輝度は約 5000 ルーメンであり, 高精細な映像投影を可能とする. また, VR システムを構築する周辺デバイスとして, モーショントラッキングシステムには, VICON ワイヤレストラッキングシステムを用いている. これは光学式のモーショントラッキングシステムであり, 磁気を使用しないため, 脳波計測器との併用が可能であるという特徴を有している. さらに, 本システムには, 7.1ch の音響システムを搭載しているため, 映像と音とをリンクさせ, 臨場感のある VR 空間を構築することが可能である.



図.7 没入型 VR システム HoloStage



<スペック>
マシン:
Hp xw9300 Workstation
CPU :
Dual Core AMD Opteron(tm)
2.4GHz (MasterPC)+2.4GHz × 4
メモリ:
8GB (MasterPC)+8GB × 4
グラフィックスカード:
Nvidia Quadro FX4500 × 2

図.8 PC クラスタシステム概要

5.2. 可視化ソフトウェアについて

本研究では, VR 環境への映像投影を実現するための可視化ソフトウェアとして, 主に AVS/EXPRESS MPE, VR4MAX, FusionVR を用いている. 運用方法としては図.9 に示す通りであり, VR 空間における数値シミュレーションの計算結果の可視化には AVS/EXPRESS MPE を, CAD・CG データの可視化には VR4MAX を用いている. さらに, これらのアプリケーションの長所を融合するアプリケーションとして FusionVR を用いている. FusionVR は複数の OpenGL により描画されたグラフィックスを合成し, VR 空間への映像投影を可能とするソフトウェアであり, これにより, フォトリアルな空間にシミュレーション結果を合成することができる.

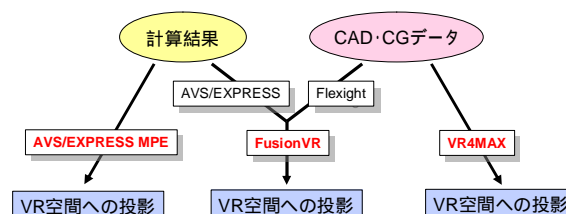


図.9 データと可視化ソフトウェアの対応関係

5.3 VR空間における大気流れの可視化

図.10, 図.11 は西新宿周辺大気環境シミュレーションの計算結果に対して流線をVR空間において可視化し, 観察者がVR空間内を行動している様子を示している. なお, 可視化ソフトウェアにはAVS/EXPRESS MPEを用いた.

図.11 より, 高層ビル後方に, 複雑なビル風による渦が形成されていることが図.6 同様確認できるが, 2.5次元表示による可視化では渦の3次元的な構造を十分に把握することは困難である. 一方, 没入型VRシステムにより可視化することで, 高品質な奥行き感のある立体視映像を体験すること, さらに視点追従計算により, 観察者の意図する視点からの映像を体験できることが可能となり, 構造物の空間的な位置関係を把握しながら大気の流れの3次元的な挙動を正確かつ, 直感的に把握することが可能となる.

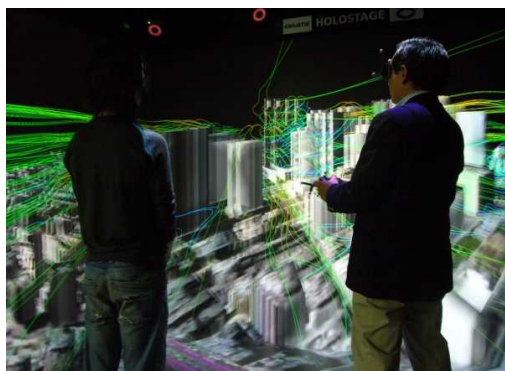


図.10 VR空間において都市域全体を把握している様子



図.11 VR空間において,ビル後方の渦の3次元な挙動を把握している様子

6. おわりに

本研究では,可視化にVR技術を用いた大気環境シミュレーション手法の構築を行い,その有効性の検討を行った. 数値解析例を通じて,VR技術を用いた可視化を行うことで,構造物の空間的な位置関係と流れの変化の様子を3次元的に正確に把握することが可能となった.

今後は,本研究で運用しているHoloStageに搭載されている7.1chの音響システムを用いて,大気流れに伴い発生する大気騒音と映像をリンクさせた臨場感のあるVR空間の構築に展開したいと考えている.

参考文献

- 1) 浜田秀敬, 桜井紘己, 高瀬慎介, 榎山和男, 谷口健男: CAD/GISを用いた自動要素生成法による三次元都市モデリング, 日本計算工学会論文集, Vol.8, pp845-848, 2003.
- 2) K. Kashiya, H. Hamada, and T. Taniguchi: Large scale finite element simulation and modeling for environmental flow using GIS/CAD, Proc. 6th World Congress on Computational Mechanics, pp.72-82, 2004
- 3) K.Kashiya, T. Shimizu, T.Kurhashi and H. Hamada: Parallel finite element simulation for orographic wind flow and rainfall using GIS data, Int. J. Numer. Methods in Fluids, Vol.47, pp.575-589, 2005
- 4) T.E.Tezduyar: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, Advance in applied Mech., 28, pp1-44, 1991.
- 5) 舘暲: バーチャルリアリティの基礎, 培風館, 2000.
- 6) 小木哲朗: 没入型ディスプレイの特性と応用の展開, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.1, No.4, pp.43-49, 1999.