

空気の流れ解析

石田則道

法政大学 計算科学研究センター

目に見えない(、見えにくい)現象をコンピュータを用いて可視化することで、新しい情報を取り出し現象を解明する新しい学問が新しい時代を切り開きつつある。その中で計算流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)技術は、熱移動など流体の流れ現象に新たな注目がなされている。そこで、汎用流体解析ソフトウェアを使って空気の流れ解析を試みる。

1. はじめに

コンピュータ支援による解析技術は、近年、工学設計に多大な改革をもたらした。中でも計算流体力学(CFD)は航空宇宙、自動車機器、建築および環境のシミュレーション解析など幅広く適用され、CAE(Computer Aided Engineering)部門の中核をなす。シミュレーション結果として得られるものは格子点座標と、そこでの速度、圧力と渦度などの物理量で、その数字を眺めても流れの様子は分からない。この物理量を速度や圧力分布図に描けばその現象を捉えることができる。これらの数値データを用いて静止画像に、また非定常現象には動画像にして見ることができる。コンピュータ・シミュレーションによって得られた膨大なデータを価値ある情報に表示するコンピュータ・グラフィクス(CG:Computer Graphics)はあらゆる分野で可視化技術の手法として定着する。

2. 解析概要

都市空間で生活する上で、部屋で過ごす割合は少なくない。快適さを追求するときの1つの要因に空気の流れを把握することは重要である。そこで、天井の2つの流入口から空気が入り、壁面にある流出口から出る空気の流れを定常的に解析する。部屋の解析モデル図は図1に、物性値、境界条件を表1、表2に示す。

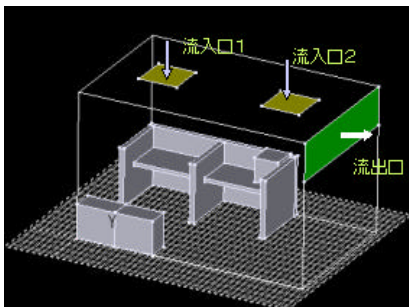


図1. 解析モデルの部屋

表1. 物性値

| 物質 | 物性 | 値 |
|----|------|------------------------|
| 空気 | 密度 | 1.205kg/m ³ |
| | 比熱 | 10006J/kg·K |
| | 熱伝導率 | 0.0263W/mK |
| | 粘性係数 | 1.81e-5Pa·s |

表2. 境界条件

| 位置 | 境界 | 項目 | 値 |
|--------|----|---------|---------|
| 流入口1,2 | 流入 | 速度(m/s) | 0.25m/s |
| | | 乱流強度(%) | 3 |
| | | 渦目盛(cm) | 8 |
| 流出口 | 流出 | 流量配分 | 1 |

3. 流体解析プロセス

数値流体解析は、4つの基本プロセスからなる。第1段階はモデル作成の計画を立てることである。解析領域の全体の寸法や形を決め、モデル部品の物理的な項目の調査などである。第2段階はモデルの形状を作成し、物性値、境界条件を設定し、メッシュを生成する。その際、解析計算に必要な制御情報を設定する。この第1、第2段階をプリ処理とするならば、第3段階は今作成したモデルデータをもとに、流体解析の処理を行う段階である。一般に計算は残差が収束するまで繰り返し行われる。そして、第4段階はポスト処理の解析結果の表示である。結果には様々な成分データがあるので、目的の成分を選択し、現象を理解するのに都合の良い速度ベクトル図や圧力等高線図などを用いて表示する。

3.1 使用ソフトウェア

今回使用したPRO-MODELERはSTAR-LTシステムのプリプロセッサである。STAR-LTシステムは(株)CD-adapco JAPANおよびComputational Dynamics社の製品で、CAE環境向けに設計された熱流体解析用の

CFD ツールである。PRO-MODELER は、3次元 CAD モデリング機能、オートメッシュ機能を備えており、モデル作成、メッシュ生成、解析実行、結果表示までの統合的な処理ができる。解析ソルバは、STAR-CD(非構造格子対応の汎用熱流体解析プログラム)で使用している有限体積法による STAR-MGR(Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions: 任意領域での乱流シミュレーション)である。

3.2 要素技術

解析するモデルが決まれば、そのモデルを構成しなければならない。PRO-MODELER を起動し、新規作成に移ると、図2の基本画面を表示する。

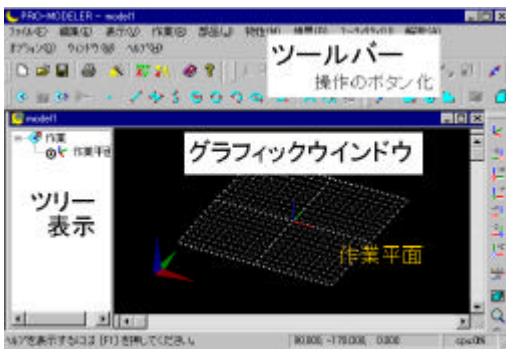


図2. モデル作成の基本画面

画面上部にはさまざまなツール(標準, 編集, 作業, 部品, 境界, 表示)バーが割り当てられ、そのボタンで作られるオブジェクトは、その下のグラフィック・ウインドウに表示され、その構造は右側のツリー窓で表示される。

3.2.1 プリミティブ形状

単線, 矩形面, 直方体など基本的(プリミティブ)な形状がこのシステムのは備わっている。複雑なモデルも単純な部品に分割することで、作業がスムーズになる。このプリミティブなモデル形状は図4のように分類することができる。

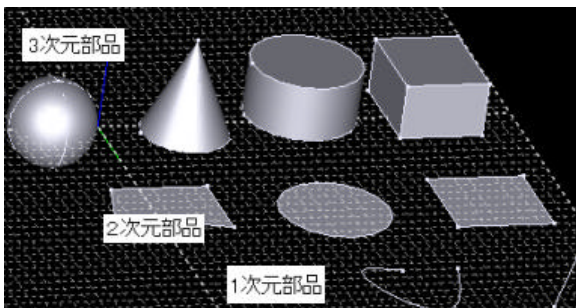


図3. プリミティブ形状

| 分類 | 部品 |
|-------|------------------------|
| 0次元部品 | 点 |
| 1次元部品 | 単線, 連続線, 曲線, 円, 楕円, 円弧 |
| 2次元部品 | 矩形面, 円形面, 多角形面 |
| 3次元部品 | 直方体, 円錐体, 円柱体, 球, 角柱体 |

図4. モデル形状部品

さらに、複数の部品を重ねあわせて3Dオブジェクトも可能である。部品を加工するブーリアン演算には、「和」, 「差」, 「積」の形状がある(図5)

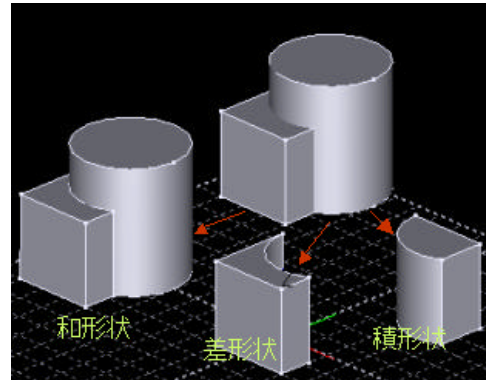


図5. ブーリアン演算

「和形状」は複数の部品の和をとり、「差形状」は1つの部品から1つの部分を削除した形状を指し、部品の選択順序によって形状が変わりうる。「積形状」は複数の部品の積、すなわち、共通部分を作成する。この演算は2次元部品と3次元部品で利用ができる。

3.2.2 丸みと回転

3次元部品の稜線に丸みを付けることをブレンドという。ブレンドは3次元部品の全稜線、面に接している稜線(図6の右)、稜線単体に対しても行うことができる。また、3次元部品(たとえば、直方体)を作成する場合、2次元部品(矩形面)の面を押し出して作ることもできる(押し出し形状)また、2次元の面を回転して、回転形状も作ることができる。このように、モデルを作成するためのいろいろな部品と機能を熟知すれば、相当複雑なモデルも作れる。

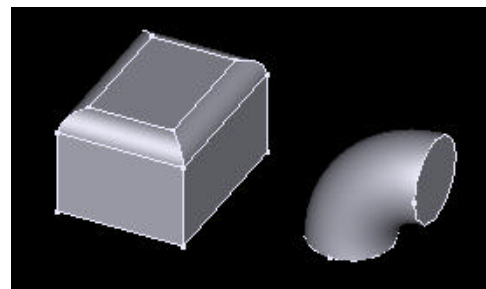


図6. ブレンド(丸み)と回転形状

3.3 境界条件の設定

初期画面から解析領域を設定し、パーティション、机、PCボックス、ストレージなどを部品から構成し、コピー機能、移動機能で解析モデルを作成する。その後、作業平面を使い部屋の天井に流入口、壁面に流出口を作成する。その後に流入口に流入境界条件(図7)、流出口に流出境界条件(図8)を設定する。



図 7. 流入境界条件の設定

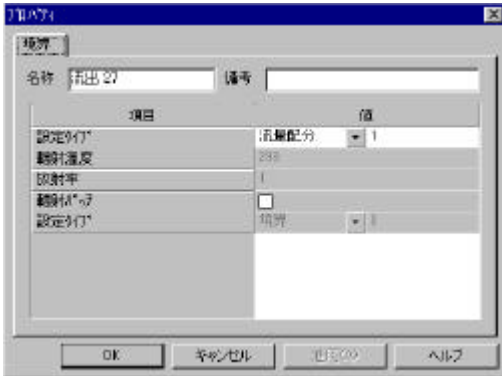


図 8. 流出境界条件の設定

3.4 シミュレーション解析の確認・設定

この過程はシミュレーションウィザードを用いて行う。ウィザードを起動すると「単位の確認と変更」画面になるので、このケースは長さの単位を[cm]に変更し、次の「解析ケースの確認と変更」画面では、乱流スイッチの項を選択、イタレーション数に 200 を設定する(図9)。



図 9. ウィザードでの確認・変更画面

次の「物性の確認と変更」では、今回の物性は固体物性と流体物性の2つで構成されている。物性値の確認画面のビューツリー(図10の左側)で固体物性値をクリックするとその物性が設定している部品(机,PCボックス,ストレージ)が赤色になる(図11)。ちなみに、項目欄の中空にチェックを入れると部品内部にメッシュを生成しないことを意味する。メッシュがない領域は解析計算に反映しないので、物性値を入力しなくてよい。

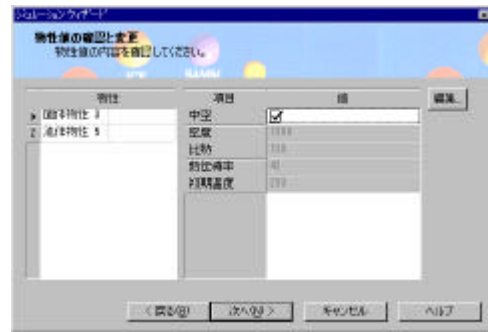


図 10. 物性値の確認画面

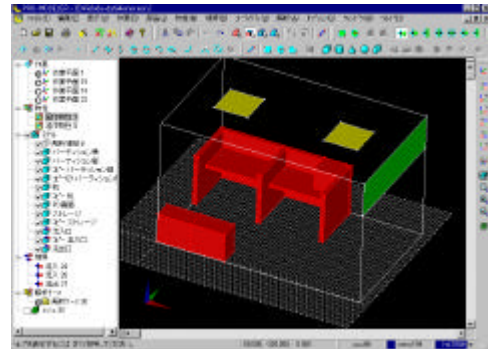


図 11. 固体物性の選択画面

3.4.1 メッシュ生成

メッシュとは微小な閉空間(セル)の集まりを指す。流体が占める空間や固体部品が占める領域など解析計算を行う領域には、メッシュを生成する必要がある。PRO-MODELERでは、ヘキサ(6面体)、テトラ(4面体)、ハイブリッド、直交の4種類のメッシュが自動生成することができる(図12,図13)。ウィザードで「モデルのチェック」画面後、「ツール」を選択し「メッシュ生成」画面で、ヘキサメッシュを生成する。図14はこのモデルのメッシュの陰線(面)表示である。

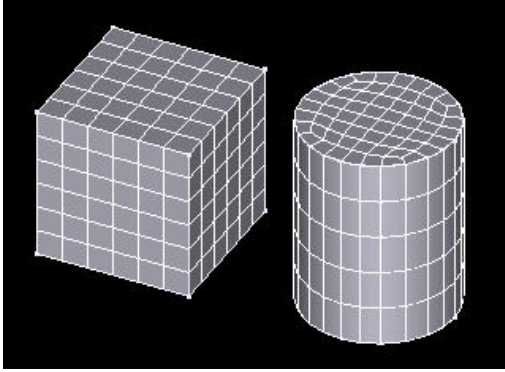


図 12. ヘキサメッシュ

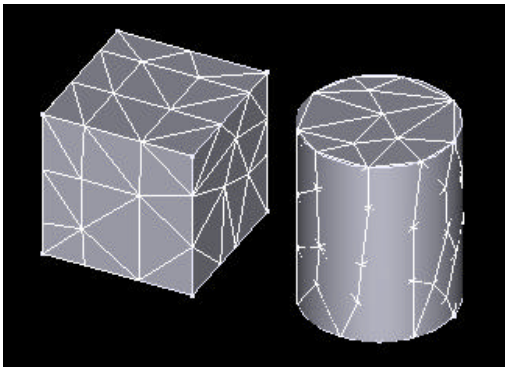


図 13. テトラメッシュ

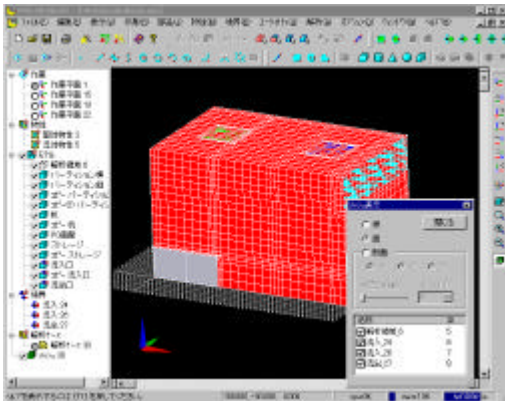


図 14. メッシュの陰線表示

3.4.2 解析計算の実行

ウィザードは解析計算の実行画面に移り、STAR-MGR（熱流体の数値解析ソルバー）が起動し、解析計算がスタートする。図 15 の左側の残差テーブルで、グラフに表示項目をチェックするとグラフィック画面に残差の対数が表示される。解析計算が終われば、次は結果の表示である。

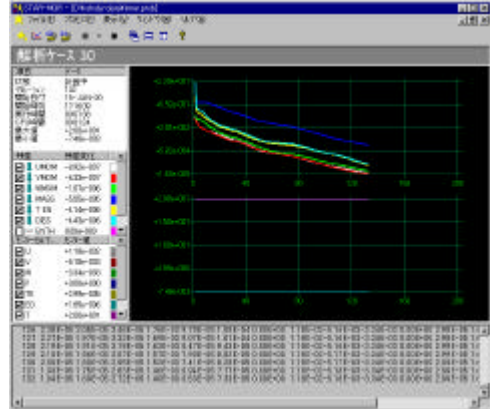


図 15. 解析の計算過程

3.5 解析結果の表示

ウィザードの結果表示画面でいろいろな表示成分を選択することが可能である。図 16 は流速ベクトルを 3D プロットした場合である。流出口からの風の流が確認できる。さらに、断面設定から流入口 1 付近を横切る 2 点をクリックすることで断面表示も可能である。また、断面を移動することで任意の場所を切り出すこともできる。

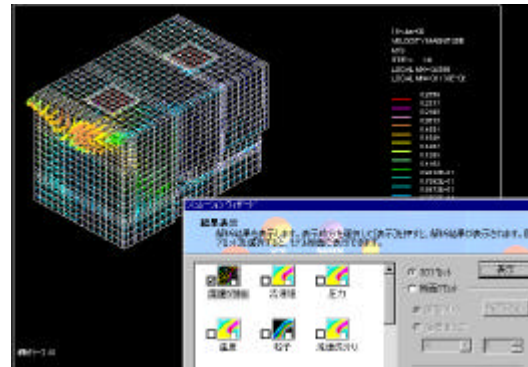


図 16. 流速ベクトルの 3D 表示

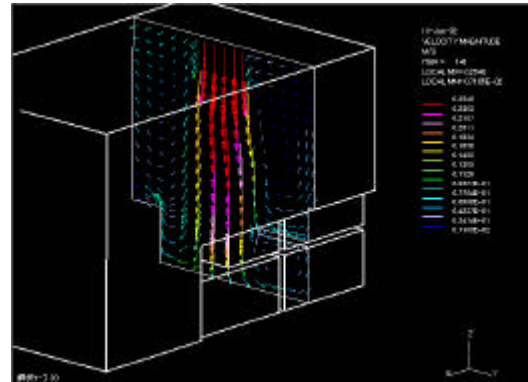


図 17. 流速の断面表示

図 18 は流出口へ移動した場所での流速の等高線図である。ベクトル表示とまた異なってある断面での流速の分布が一目瞭然見渡せる。

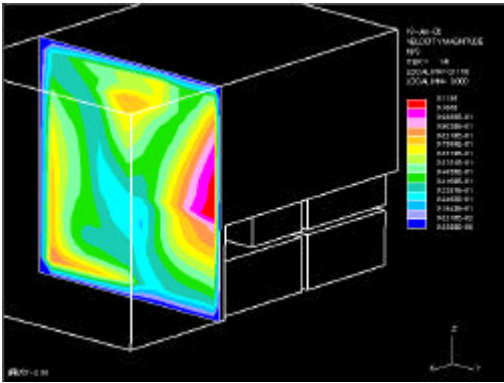


図 18. 流速の等高線図

また、結果表示の「粒子」を選択すると、「パーティクル表示」画面が表示され、任意の 2 節点を選択することで、パーティクルが流れに沿って表示される（図 19）。

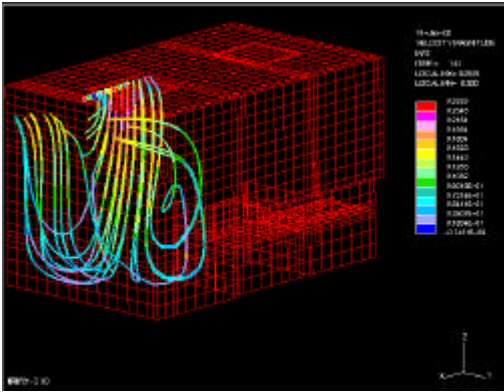


図 19. 2 節点間のパーティクル流れ表示

4. 高層建築周辺の流れ解析

もう少し大きい空間として、高層建築物周辺の空気の流れ解析をこのシステムを用いた場合の処理を考察する。現象としては、この高層建築物に速度 6m/s で横方向から垂直に空気が流れ込む。解析は乱流の定常計算とする。解析形状は図 20、図 21 に示す。表 3 に物性値と境界条件を示す。

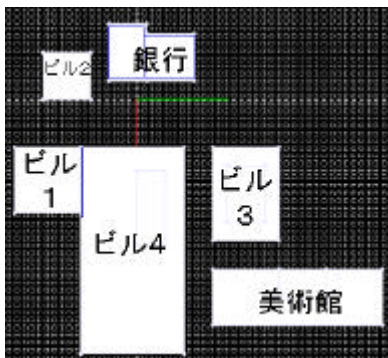


図 20. 高層建築物の平面図

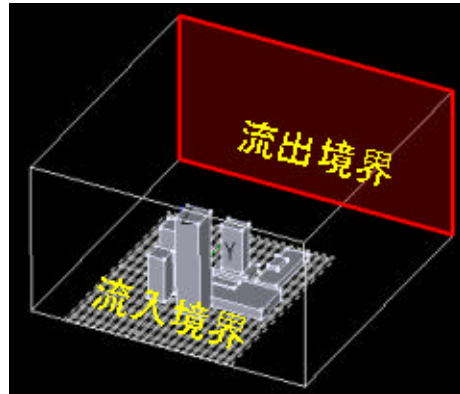


図 21. 3 Dの流体空間

表 3. 物性値と境界条件

| 物質 | 物性 | 値 |
|------|---------|-------------------------|
| 空気 | 密度 | 1.205 kg/m ³ |
| | 粘性係数 | 1.81 e-5 Pa·s |
| 境界 | 項目 | 値 |
| 流入境界 | 速度(m/s) | 6m/s |
| | 乱流強度(%) | 3 |
| | 渦目盛(mm) | 45 |
| 流出境界 | 流量配分 | 1 |

モデル作成は、基本座標となる作業平面上に、建物の底辺を作成し、底面を押し出し 3 次元部品を作る。建築物周辺の空間を作成するには、解析領域を作成し、解析領域の各面に境界条件を設定する。その後はウィザードを用いて、単位などの確認、変更、モデルのチェック、メッシュ生成、そして解析計算の実行を行う。

4.1 解析結果の表示

結果表示画面から流速ベクトルを選択し、視点を上辺から眺めた図の一部分を図 22 に示す。その流速の等高線図を図 23 に示す。空気の流れが建築物を回り込んでいる様子がよく分かる。

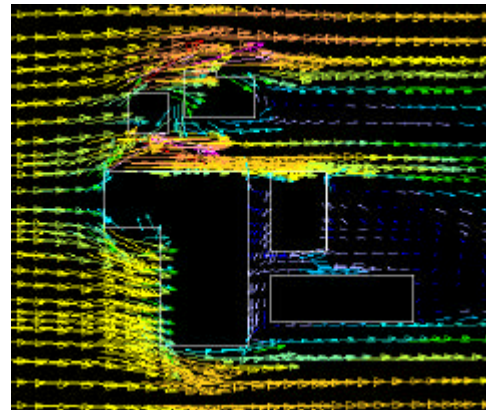


図 22. 上辺からの流速ベクトル図



図 23. 上辺からの流速等高線図

この解析空間の視点を変え、側面から見た図の一部を流速ベクトル図(図 24)、流速等高線図(図 25)を示す。

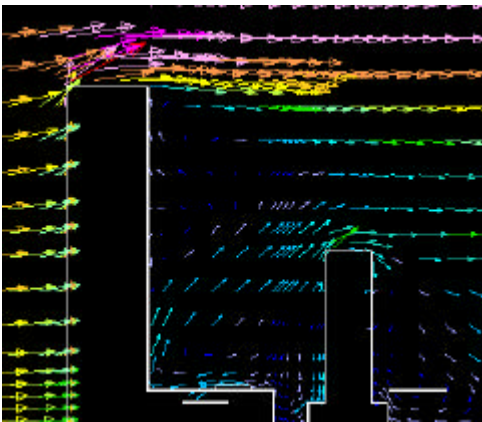


図 24. 側面からの流速ベクトル図

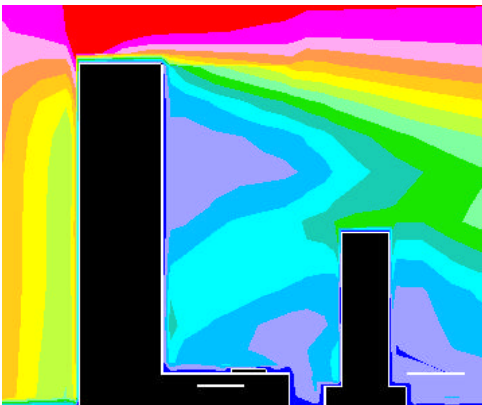


図 25. 側面からの流速等高線図

側面からの景観では、ビルの上層部の空気の流れ、またビル壁面の空気のよどみが直感的に捉えることができる。

5. まとめ

2000 年秋に法政大学計算科学研究センターでは、複雑系の可視化システムとして 3 次元映像システム-Vision Dome-を導入した。Dome へ表示するソフトウェアの 1 つ

に熱流体解析ツール STAR-CD がある。そのプリプロセッサの PRO-MODELER を用いて流れ解析を試みた。PRO-MODELER は形状の作成、メッシュの生成、解析設定が容易で工数の短縮が考えられる。今まで漠然と感じていた空気の流れも、このようなシステムを用いることで、自然現象を可視化することの意義は大きい。

参考文献

- [1]PRO-MODELER, CDAJ 定期講習会, 2001 年 7 月
- [2]STAR-LT2001 Start Up Manual 2001 年
- [3]STAR-LT2001 Methodology 2001 年
- [4]STAR-LT2001 Tutorial Manual Vol.1
- [5] STAR-LT2001 PRO-MODELER 2001 User Guide
- [6]CDAJ news 2001 Autumn Vol.26