

# 室内温熱環境設計フィードバックのための VRを用いたCFD解析結果の3次元可視化

○細川 雅弘\*<sup>1</sup> 福田 知弘\*<sup>2</sup>  
矢吹 信喜\*<sup>3</sup> 道川 隆士\*<sup>4</sup>

キーワード：室内温熱環境 設計フィードバック CFD解析 Virtual Reality 学際的コンピュータ設計

## 1. はじめに

地球温暖化、省エネルギー、生活の質の向上などを背景に、温熱環境の設計は建築物にとってより重要になりつつある。発注者が求める意匠設計を実現し、かつ快適性と省エネルギー性が両立する高性能な建築物が求められている。

一方、近年、設計プロジェクトが大型化しており、設計組織の専門分化および細分化が進んでいる。そのため、利用目的に応じた高性能な建築物を実現するためには、設計関係者が協調的に設計を進めることが重要となる。また発注者と設計者が建物利用方法と温熱環境を同時に検討し、設計の最適化を図ることが必要となる。

また、ソフトウェア、ハードウェアの急速な進歩に伴い、設計・開発を取り巻く環境は近年大きく変わりつつある。各種のコンピュータシミュレータの登場により、設計段階において、設計案の環境シミュレーション (Computational Fluid Dynamics (CFD) など) やビジュアルシミュレーション (Virtual Reality (VR) など) を実施して、完成予想図や物理現象を事前にスタディすることが可能となってきた<sup>1)</sup>。これまで、設計者の経験やプロダクトメーカーの規格値に頼らざるを得なかった設計行為が、客観的で精度の高いものに近づきつつある<sup>2)</sup>。また、計算の高速化はユーザとコンピュータとの双方向化を加速させて、設計した結果をシミュレーションして確認するだけでなく、設計案へのフィードバックをも可能にする。この概念は、いくつかの報告<sup>3)</sup>がされているが限られた対象に留まっており、更なる議論の積み重ねが必要である。

温熱環境の設計において、環境シミュレーションとしてCFD解析を実施することで、建物熱環境の予測・評価を行うことができる。解析結果が可視化されることで、関係者は対象空間の熱的快適性を設計段階から評価することができ、建物性能を共有して検討を行うことを可能にする。

一方、CFD解析を設計実務で活用するためには課題がある。初めの問題は、解析時間が長いことである。一つの条件下での解析結果を得るのに長時間を要するため、時間の限られた設計過程の中で、パラメータを変更しながら繰り返し設計を検討するには至っていない。次に、解析結果の可視化に関する問題である。CFD解析ソフトで解析を行う場合、同ソフトウェア内で可視化を行うが、解析対象の建

築物は形状しか表現されない。また、視点操作面では鳥瞰で全体の傾向を眺める程度であり、アイレベルなど1人称での検討は困難である。そのため、解析を専門としない人が、解析結果の直感的に理解することは難しく、フィードバックに時間を要してしまう。そこで、筆者らの一人<sup>4)</sup>は、市販のCFDとVRをゆるやかに統合させて、CFD解析結果をVRシステムに入力して温熱環境をVR上に表示するシステムを報告した。しかし、CFDソフトウェアからVRソフトウェアヘデータコンバートする際に、CFD解析結果である風速を表す矢印情報や温熱分布を表すカラーマップ情報をベクトル要素として出力できず、VR上で温熱解析結果を操作する際に課題が残った。

そこで本研究では、GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units) を用いた高速なCFD解析を行い、その結果をVRで表示する統合型システムを作成した。また作成したシステムを用いて仮想建築設計の検討を行い、温熱環境の最適化を試みた。GPGPUとは、GPUの超並列プロセッサを用いて数値演算を行うことである。近年、飛躍的に性能が向上し、数値解析への応用が進んでいる。

## 2. システム構成

開発したシステムの処理の流れを図1に示す。解析対象となる建築物をBIM (Building Information Modeling) ソフトウェアで作成した後、メッシュ生成、解析処理、結果の3次元可視化を行う。そして、必要に応じて、パラメータスタディを再度行い、設計フィードバックを実施する。

### 2.1 メッシュの作成

業務内でのCFD解析利用の課題として、パラメータ設定作業量の多さが挙げられる。本研究では利用が拡大しているBIMとの連携を見据え、BIMデータを元に半自動的にメッシュを生成する。メッシュの生成にはメッシュ生成ツールであるsnappyHexMesh (Ver.2.2.x) を用いた。メッシュの全体形状の生成には、BIMデータから出力されるSTL (Standard Triangulated Language) 3次元形状データを用いた。CFD解析に必要な建築部材や開口部、空調設定などのパラメータはテキスト形式で手動入力によって与えた。

### 2.2 解析処理

解析コードはCFD解析ライブラリであるOpenFOAM (Ver.2.2.x)を用いた。GPUソルバーは、Simscape社公開の

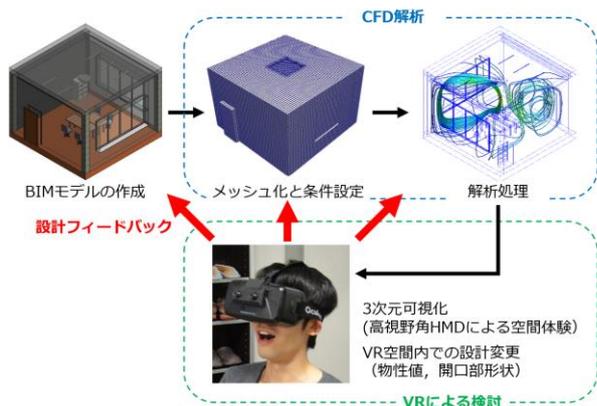


図1 開発したシステム処理フロー

ソースを利用し、単精度での演算とした。

### 2.3 3次元可視化

解析データの3次元可視化のためのデータ抽出と矢印やポリゴンのモデリングには数値データの可視化ソフトウェアである ParaView (Ver.4.3.1)を用いた。

本研究では、熱分布の可視化には色の違いで温度を表現する平断面と立体的な分布の表現が可能な等値面での表現を用いた。気流性状の表現にはベクトル表現を用いた。ParaView で表示した結果は VRML 形式で 3D モデルとして書き出しを行った。

3D モデル化された結果を表示するために、Game Engine である Unity 3D (Ver.5.2)を用いた。Unity 3D には解析結果データと合わせて BIM モデルを入力し、現実感を伴う表現がされた建物モデルで、解析結果の可視化を行う。ユーザはアイレベルでのウォークスルーや鳥瞰視点での俯瞰を対話的操作により移動しながら、解析結果を観察することができる。これにより、意匠、空間機能と温熱環境の連関を把握しながら設計を検討することを可能とする。

VR ディスプレイは、液晶モニターや平面スクリーンに平面投影される方式が主流であるが、立体感が損なわれてしまい臨場感を伴いながら空間の位置関係を把握し、結果を確認するには至っていない。一方、没入型の立体視表現を行うことで設計案からの選択が迅速化すること、スケール感の実感性が増すことが報告されている<sup>7)</sup>。そこで 2D モニタでの表示と併せて、広視野角の没入型ヘッドマウントディスプレイ (HMD) である Oculus Rift Development Kit 2 を用いた立体視による表示を行った。

### 2.4 VR 空間内での設計検討

VR で表現された建物空間内に可視化された解析結果を確認しながら、この仮想空間内で CFD 解析のパラメータとなる建築部材や空調の条件を変更し、即座に解析を行い、結果を再表示することで、設計検討の円滑性の向上を図った。作成したシステムは、VR 内のユーザーインターフェース (UI) (図 2) により、エアコンの室内風量や風向、換



図2 パラメータ変更用 UI

気機器の吸い込み風量を変更できる。また、外壁や開口部の熱貫流の変更も可能である。

UI で変更された設定に応じて CFD 解析のパラメータファイルは自動で更新される。すべての設定変更を終えた後、再度、解析の実行・可視化処理を行い、3D モデルを Unity3D に入力する。入力された 3D モデルを切り替えることでパラメータの変更結果を比較し、設計の検討を行うことができる。

## 3. プロトタイプでの検証

### 3.1 仮想建物の設定

開発したシステムの検証を行うために、仮想の建築設計であるプロトタイプシステムを構築し、温熱環境の改善の検討を行った。設計の初期案として作成された BIM モデルを図 3 に示す。BIM モデルの作成には Autodesk Revit 2016 を用いた。

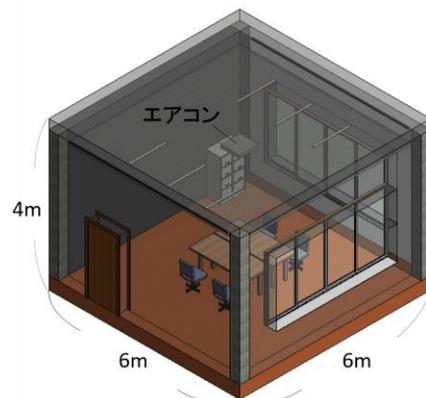


図3 解析対象となる仮想建物モデル

### 3.2 仮想建物設計の解析

#### (1) メッシュ

解析空間のメッシュは 100mm の等間隔立方体メッシュとし、エアコン近傍のみ 25mm 間隔とした。

#### (2) 解析条件

表 1 に解析条件を示す。解析には OpenFOAM を用いた。乱流モデルには標準 k-ε モデルを用いて、定常解析を行った。

表 1 解析条件

解析コード	OpenFOAM
乱流モデル	標準 k-ε モデル
移流項差分スキーム	1次風上法
時間項	定常解析
メッシュ数	114,089

(3) 境界条件

日射による放射熱伝達は考慮せず、外部からの熱伝達のみ考慮した。壁、天井、窓、扉の外気参照温度は35℃とし、各部材の熱還流率に基づいた熱の伝達を計算した。本ケーススタディでは室内での発熱は考慮しない。

エアコンは4方向吹出しの天井カセット型とした。吹出し風速は規定風量値を用いた。また、吹き出し方向は4方向同一角度で設定し、二次元性を仮定して与えた。吹出し温度は4方向で等温とし、吸込み風量は吹出し風量の合計として設定した。エアコンの気流流出入口の境界条件の設定には、形状簡略化のためBOX法<sup>8)</sup>を用いて直方体上にモデル化して設定した。乱流統計量に関しては、乱流強度は10%とし、乱流消散率は $\epsilon = (0.09)^{3/4} \times k^{3/2} / l$  (l: 代表長さ)を用いて求めた。

開口部の熱貫流率は設定を簡易化するため、窓はサッシとガラス部を、扉は金属部とガラス部で熱貫流率の平均を求めて設定した。各境界条件を表2～表4に示す。

表 2 境界条件 (壁, 天井, 床)

	壁	天井	床
熱貫流率 (W/m <sup>2</sup> K)	1.38	1.8	0

表 3 境界条件 (扉, 窓)

	扉	窓
熱貫流率 (W/m <sup>2</sup> K)	2.86	6.5

表 4 境界条件 (エアコン)

	吹出し口	吸込み口
合計流出入風量 (m <sup>3</sup> /min)	23	23
面積 (m <sup>2</sup> )	0.03×4	0.25
流出入風速 (m/s)	3.2	1.5
乱流強度 (%)	10	10
代表スケール (m)	0.05	0.05
吹出し温度 (°C)	10	—
吹出し角度 (°)	60	—

3.3 解析処理

計算の実行と可視化処理に用いたPCは、OS: windows10 64bit, CPU: Core-i7-5930K, GPU: QUADRO-K4200, RAM: 32GBであった。時間刻み幅を0.1に固定して計算を行い、解析の収束には約60分を要した。

3.4 解析結果の可視化

可視化した結果を以下に示す(図4, 図5, 図6)。温度分布の表示では、全体の分布を表示するために平衡面を用いて温度分布を表現した。併せて等値面での表現によって3次元での温度分布を表現した。気流性状の表示にはベクトルの表現を用いた。CFD解析ビューワであるParaviewの画面と比較すると、VRは広視野角を確保できること、温熱環境と室内空間との関係が直感的に理解しやすいことが確認できた。

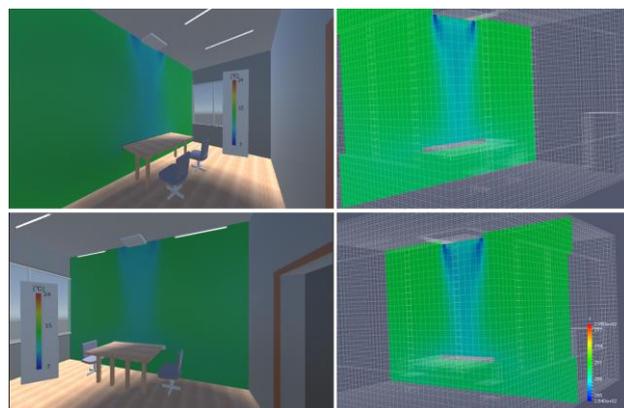


図 4 平衡面による温度の可視化 (左: VR, 右: Paraview)

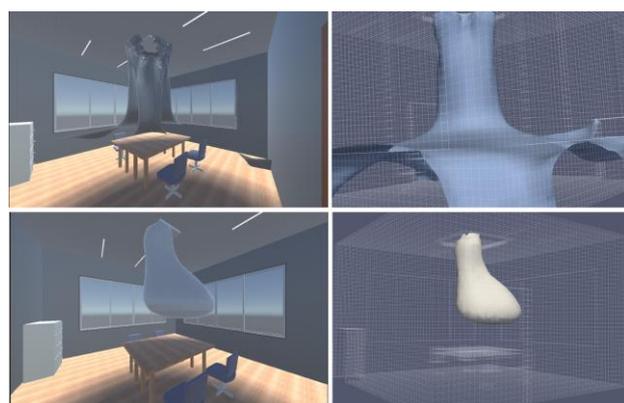


図 5 等値面 (18°C) による温度の可視化 (左: VR, 右: Paraview)

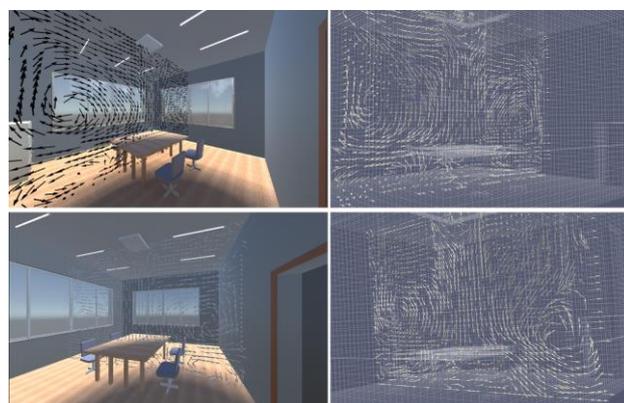


図 6 ベクトルによる気流の可視化 (左: VR, 右: Paraview)

3.5 設計フィードバック: CFDパラメータの変更と比較

VR空間内に表示された可視化データを確認した後、室内熱環境に影響を与えるエアコンの設定と開口部の熱性能を変更し、再度、可視化した結果を表示することで、温熱環境設計の性能を比較検討した。今回のケーススタディでは、エアコンの利用設定として風量と風向を、開口部の熱貫流率として窓の熱貫流率を変更条件として検討した。吹き出し口の風量は27-23-18-14[m<sup>3</sup>/min]（順に、急-強-弱-静モード）、吹き出し角度は天井面からの角度が25-37-49-60[°]（順に、最上-上-下-最下）のそれぞれ4段階から選択可能とした。窓の熱貫流率では、窓の仕様別に想定し、6.5-4.65-3.49[W/(m<sup>2</sup>・K)]（順に、金属サッシ単板-金属サッシ複層-樹脂サッシ複層）<sup>9)</sup>の3段階から選択できる。各項目の選択条件をまとめたものを表5に示す。窓熱貫流率を「金属サッシ単板ガラス」から「樹脂サッシ複層ガラス」に変更した結果を図7に示す。尚、風量は「急」、風向は「最下」で同一とした。

表5 変更可能条件

項目	選択条件
風量	急-強-弱-静
風向	最上-上-下-最下
窓熱貫流率	金属サッシ単板ガラス-金属サッシ複層ガラス-樹脂サッシ複層ガラス

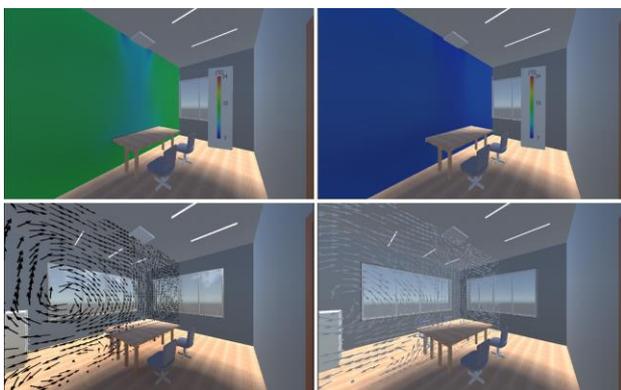


図7 窓熱貫流率を変更した場合のVR比較検討  
(左：金属サッシ単板ガラス，右：樹脂サッシ複層ガラス)

#### 4. まとめ

本研究では、意匠設計と温熱環境設計の相互フィードバックを可能とするために、GPGPUにより高速化されたCFD解析を行い、立体視VRにより結果の可視化を行うシステムを開発した。CFD解析による環境シミュレーションとVRによるビジュアルシミュレーションを同時に行うことで、意匠と熱環境を同時に検討するための設計環境を構築した。検証を通じて、開発したシステムは、VR空間内でCFDパラメータの変更と解析結果の評価を繰り返すことを可能としており、設計の温熱環境性能を比較しながら検討可能であることを確認した。

今後の課題として、ツール間の連携にマニュアル動作が

多く、解析と結果の観察の即時性に課題を残した。またVR空間内で可視化の条件を変更ができないため、操作の対話性に欠ける。ツール間の連携を自動化し解析と結果の可視化をより即時的に行うこと、VR空間内で可視化方法を調整することを試みる必要がある。

#### [参考文献]

- 1) Altatabai, J., Yan, W.: 2015, A User Interface for Parametric Architectural Design Reviews, Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA2015), 65-74.
- 2) 金丸優太, 白石靖幸, 塚見史郎: 2015, オフィスにおける放射空調システムに関する研究-床及び天井放射空調システムの天井高に関するケーススタディー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1237-1238.
- 3) 軽部達也, 前真之, 高瀬幸造, 盧炫佑, 井上隆: 2015, 空気式太陽熱集熱システムにおける蓄熱部位での吸放熱量に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 483-484.
- 4) Chung, D. H. J. and Malone-Lee, L. C.: 2010, Computational fluid dynamics for efficient urban design, Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2010), 357-366.
- 5) Kaijima, S., Bouffanais, R. and Willcox, K.: 2013, Computational Fluid Dynamics for Architectural Design, Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA2013), 169-178.
- 6) Fukuda, T., Mori, K. and Imaizumi, J.: 2015, Integration of CFD, VR, AR and BIM for Design Feedback in a Design Process - An Experimental Study, Proceedings of the 33rd eCAADe Conference - Volume 1, 16-18 September 2015, 665-672.
- 7) 大野尚則, 藤井勝敏, 大石佳知: 2008, 住宅における実寸大立体視の有効性評価, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, 第6号
- 8) Nielsen, P.V.: 2004, Computational fluid dynamics and room air movement, Indoor Air 2004, 14 (Suppl 7), 134-143.
- 9) (財)建築環境・省エネルギー機構: 2002, 住宅の省エネルギー基準の解説[第2版]

- \*1 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 博士前期課程
- \*2 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 准教授 博士(工学)
- \*3 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 教授 Ph.D.
- \*4 大阪大学 環境イノベーションデザインセンター 特任助教 博士(工学)