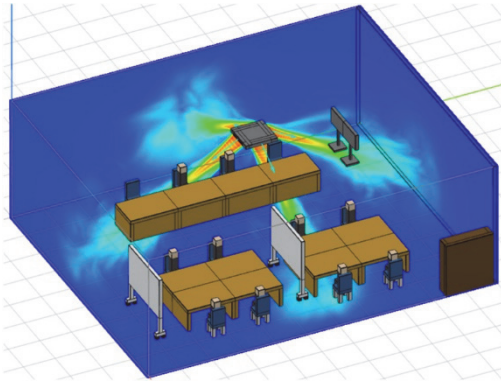


室内外の気流と温度を簡易・高速に計算する GPU クラウドシミュレータ

User-friendly and Fast Thermal Fluid Simulator for Inside and
Outside of Room Working on GPU Cloud Computer



西川 豊治*¹
Toyoharu Nishikawa

吉田 和仁*¹
Kazuto Yoshida

細田 恭平*¹
Kyohei Hosoda

前田 聡*²
Satoshi Maeda

中江 修二*³
Shoeji Nakaye

川嶋 光将*⁴
Terumasa Kawashima

空調の快適性や省エネルギー性は、機器を設置する空間の 3 次元的な流れによって決まる。一方、機種選定や配置設計の実務では一次元的な熱負荷計算が主流であり、気流と温度の 3 次元シミュレーションは、必要な専門性やコスト、時間に阻まれて、現場まで普及していない。そこで三菱重工業株式会社は簡便に利用でき、高速に気流と温度を計算可能な GPU クラウドシミュレータを開発した。初見であっても 20 分程度で一般的なオフィスの会議室をモデル化することができ、シミュレーションを 3 分程度で完了できる。さらに、試験結果と比較することで室内温度を実用的な精度でシミュレーションできることも確認できた。これによって快適な空調環境づくりにシミュレーションを活用できるようになった。

1. はじめに

近年、生活環境や労働環境の向上に加えて省エネが求められる中、生活や労働において快適な空調環境は騒音環境や照明環境と同じく最重要な環境要因である。そのため、可能な限り省エネで快適な空間を実現する室内機配置やショートサーキット^(*)が起こらない室外機配置を望む設備利用者や設備所有者の声はあるものの、空調機器の機種選定や配置設計は建設会社や設計会社が空調機器の仕様や一次元的な熱負荷計算に基づいて行うことが一般的である。

空調環境の気流と温度の 3 次元シミュレーションを行えば、空間の気流と温度の分布の詳細を把握することができるため、室内外の設備の配置を考慮した適切な空調機器の選定や配置設計が可能となる。しかしながら、気流と温度の 3 次元シミュレーションを取り扱う技能を持った人材は少ない上、シミュレーションの実施には手間と時間を要するため、気流と温度の 3 次元シミュレーションを用いて空調機器の選定や配置設計を行う事例は少なく、空調の室内機や室外機の選定や配置設計の方法には改善の余地がある。

そこで三菱重工業株式会社(以下、当社)は、容易にシミュレーションモデルを作成することができ、高速に計算できる気流・温度シミュレータを開発した。本報では、そのシミュレータの概要を紹介するとともに、試験結果との比較によって精度検証を行った結果を示す。

*1 室外機のショートサーキットとは、室外機の吹出し口から出た気流が直接室外機の吸込み口に流入する現象のことであり、これが生じると実質の室外機吸込み流量が減少するため室外機的能力が低下し、室内機の空調能力も低下する(冷房であれば室内が冷えず、暖房であれば室内が暖まらない)。

*1 総合研究所 伝熱研究部

*3 総合研究所 燃焼研究部 博士(工学)

*2 総合研究所 原子力研究推進部

*4 デジタルイノベーション本部 EPI 部

2. シミュレータの概要

2.1 一般的な気流・温度の3次元シミュレータの特徴

一般的な気流・温度の3次元シミュレータ⁽¹⁾の利用手順を図1に示す。気流と温度の3次元シミュレーションは、まずシミュレーションソフトをPCにインストールすることから始まる。インストールマニュアルを読んでからインストーラをダウンロードし、PCにインストールする作業でさえもPCやサーバに関する知識を必要とする。さらに、シミュレーション操作は経験を積んで熟練する必要がある。初心者の場合、どのようにモデル化していいかわからない、メッシュ生成に失敗するがどう修正したらいいかわからない、シミュレーションをどのように設定したらいいかわからない、可視化処理の操作方法がわからない、という問題によく陥る。このように熱流体シミュレータを利用するための準備とその利用は容易ではなく、たとえ空調の設計業務を行う会社であっても気流と温度の3次元シミュレーションソフトを扱うことができる人材は開発部門や研究部門などの一部に限られている。一般に市販されている気流・温度シミュレータの多くは汎用的な問題に対応できるように作られており、高機能であるという長所とともに、実務に利用できる段階に達するには長期間の訓練を要するという短所もある。

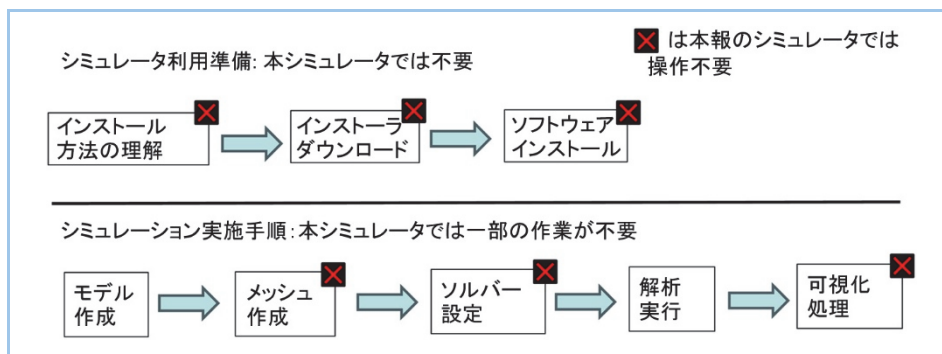


図1 一般的な気流・温度の3次元シミュレータの利用手順

2.2 本報のシミュレータの利用方法

本報で紹介するシミュレータに必要な作業はシミュレーションモデルの作成のみである。本報のシミュレータのGUI(Graphical User Interface)を図2に示す。WEBブラウザでWEBアプリを立ち上げて利用することができるため、インストールの必要はない。空調機器周りの気流と温度の3次元シミュレーションに特化させることで、シミュレーションを行う際に一般に必要な操作を大幅に削減し、利用者が直感的に操作できるようにした。マウス操作で複数の直方体のオブジェクトを配置した後、それらのオブジェクトの属性として直方体の各面に流速や吹出し温度、吸込み圧力などを設定して機器や什器などの設備をモデル化する方法を取り入れることで、利用者がゲーム感覚でシミュレーションモデルを作成できるようにした。空調や什器、ヒト型などのテンプレートモデルを用意しており、オフィスや室外機周りの屋外空間といった利用頻度の高い空間対象はライブラリを用意している(図3)ため、初見の利用者であっても一般的なオフィス空間のモデルを20分程度で作成することができる。メッシュ作成操作、シミュレーションの設定操作、可視化処理操作は必要なく、解析実行ボタン(RUN ボタン)を押すだけで計算が始まり、途中経過の計算結果が表示されつつ、3分程度で最終的な計算結果が自動的に表示される。一般的な気流・温度の3次元シミュレータであれば、たとえ熟練者が集中して取り組んだとしても、シミュレーションを開始するまでのシミュレーションモデル作成やメッシュ作成作業に少なくとも1日は要し、計算にも1時間は要する。本報のシミュレータは極めて簡便で高速だと言える。

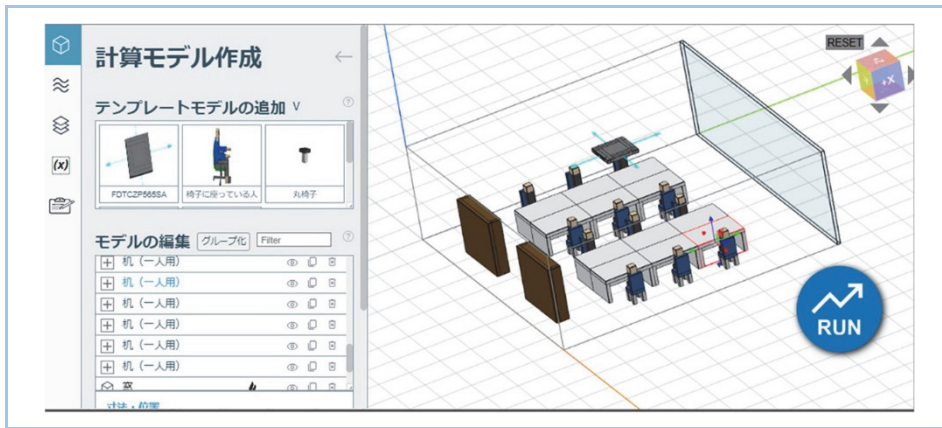


図2 シミュレータの GUI

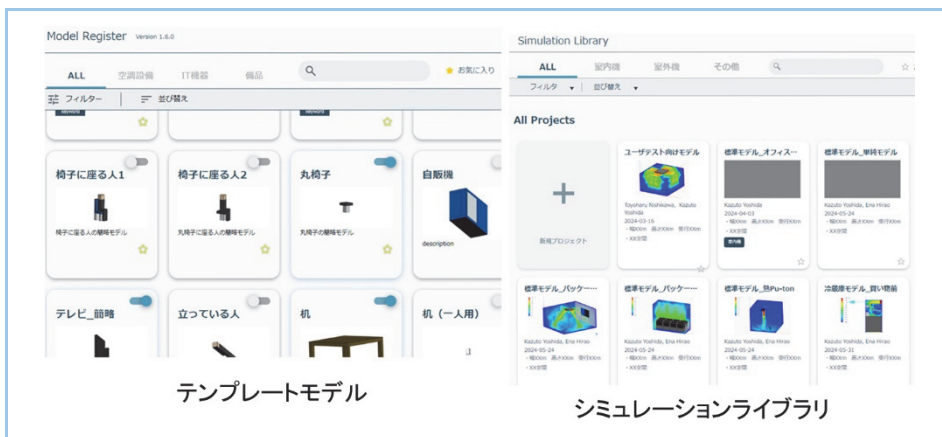


図3 テンプレートモデルとシミュレーションライブラリ

2.3 システムの構成

当社では 2014 年から格子ボルツマン法を用いた流体シミュレーション技術の開発を、2017 年から NECOSYSTEM® という WEB アプリケーションの統合基盤技術の開発を、2021 年から有限体積法による伝熱シミュレーション技術の開発を進めており、本報の気流・温度シミュレータはこれらの各コンポーネント技術を統合することで実現している。

システム全体の構成を図 4 に示す。NECOSYSTEM® 上に構築した WEB アプリケーション群の API (Application Programming Interface) 連携でシミュレータが機能する。GUI で作成されたシミュレーションモデルは HTTPS 通信でクラウドコンピュータの GPU 計算機に送られ、計算結果が逐次処理されてデータベースに保存される。URL で計算結果を他者と共有できる他、コンテナ仮想化技術を用いて気流・温度解析ソルバーが動くようになっているため、利用者の増加に合わせてシステムを強化することも容易である。

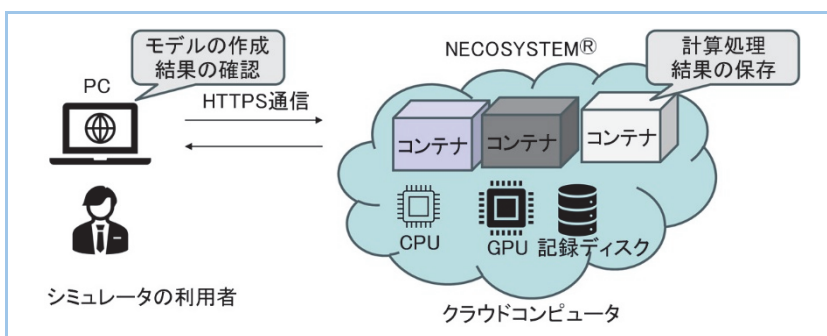


図4 システム構成

2.4 計算実施事例

本報のシミュレータを用いて気流と温度を計算した事例を図5に示す。会議室のシミュレーションでは、三菱重工サーマルシステムズ株式会社(以下、MTH)製の天井埋込カセット型エアコンFDTシリーズを配置してAirFlex[®](*)⁽¹⁾⁽²⁾を作動させることで気流が天井に沿って流れ、会議室に座る会議参加者に気流が直接当たらない流れが再現可能であることを確認できた。また、室外機周りのシミュレーションでは、ショートサーキットを防止する室外機配置において、上方に吹き出された気流からのショートサーキットが生じない気流状況を再現可能であることを確認できた。

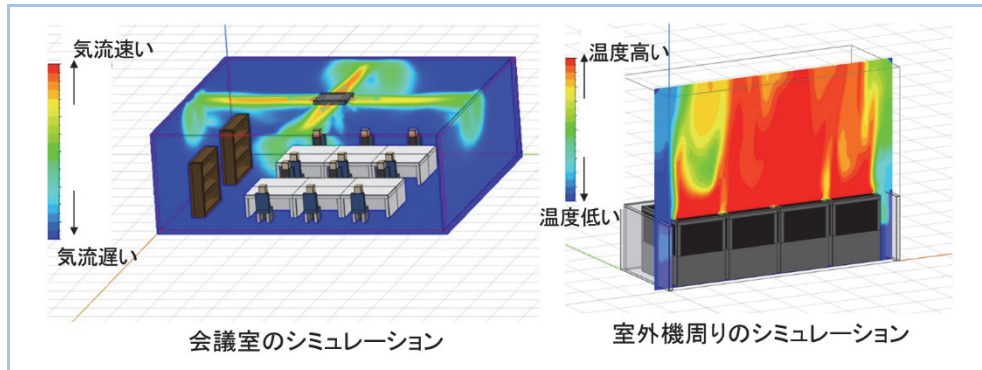


図5 実施例

*2 AirFlex とは、MTH が開発した”気流が直接体にあたって不快感を覚える現象”を回避させる装置である

3. 気流と温度の解析手法

格子ボルツマン法による気流解析と有限体積法による温度解析を組み合わせる手法を開発した。計算を安定化かつ高速化する様々な工夫を組み込み、計算資源として GPU を用いることで極めて安定で高速なシミュレータを実現した。オフィスの会議室規模の空間サイズであれば3分程度でシミュレーション可能である。

3.1 気流解析手法(格子ボルツマン法)

格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, LBM)とは流体の支配方程式である Navier-Stokes 方程式を直接解くのではなく、流体を有限個の速度をもつ仮想粒子の分布で表し、その時間発展を粒子の並進(streaming)と粒子同士の衝突(collision)で逐次計算する手法である。当社が開発してきた格子ボルツマン法^{(3), (4)}は表1の特徴と利点を持つ。

表1 本報の流体解析手法の特徴と利点

特徴	利点
D3Q27 速度モデル+Interpolated Bounced Back	曲面も高精度に扱える
平衡壁モデル	粗い格子でも、壁面の抵抗を再現
Volume Penalization 法	圧損体の表現 外力付与による流体駆動
マルチブロック格子(Building Cube 法)	必要な場所のみ格子を細分化
人工音速	計算の高速化
GPU を用いた計算	安価に高速な計算が可能

3.2 温度解析手法(有限体積法)

格子ボルツマン法で求めた流速に対して有限体積法で熱流体方程式を解くことで空間の温度分布を求める。計算を高速に安定して行うために、疑似定常法を用いる、空間中の流速に応じてクーラン数を決定しかつ計算ステップの進展に応じてクーラン数を大きくする、GPU を用いて代数的マルチグリッド法で連立一次方程式の解を求める、といった工夫を取り入れている。

4. 精度検証

ルームエアコンによる室内空調を対象とした解析事例について紹介する。当社は空調環境の試験を行うための環境試験設備を保有している。恒温室の中にワンルームの部屋が設置されている二重構造になっている。ワンルームの部屋の中にMTH製のビバーエアコンSRK4023S2を設置し、暖房運転を行った場合を対象に解析を実施した。

図6に解析対象の部屋を示す。ワンルームの部屋の中には熱電対温度センサーを等間隔に設置し、空間の温度分布を計測した。解析結果を図7に示す。解析結果の温度と試験結果を比較すると、空間の50%を誤差 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ で、空間の80%を誤差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ で予測できており、本報の解析手法が実用的な精度で室内の空調空間を予測できることを確認できた。

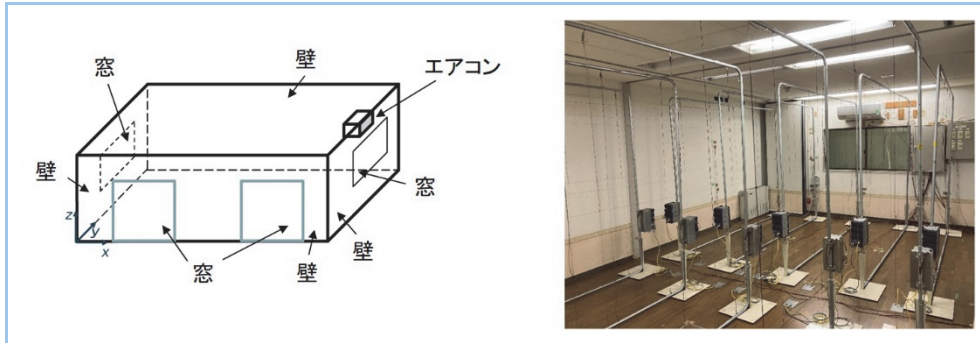


図6 ルームエアコンの解析対象

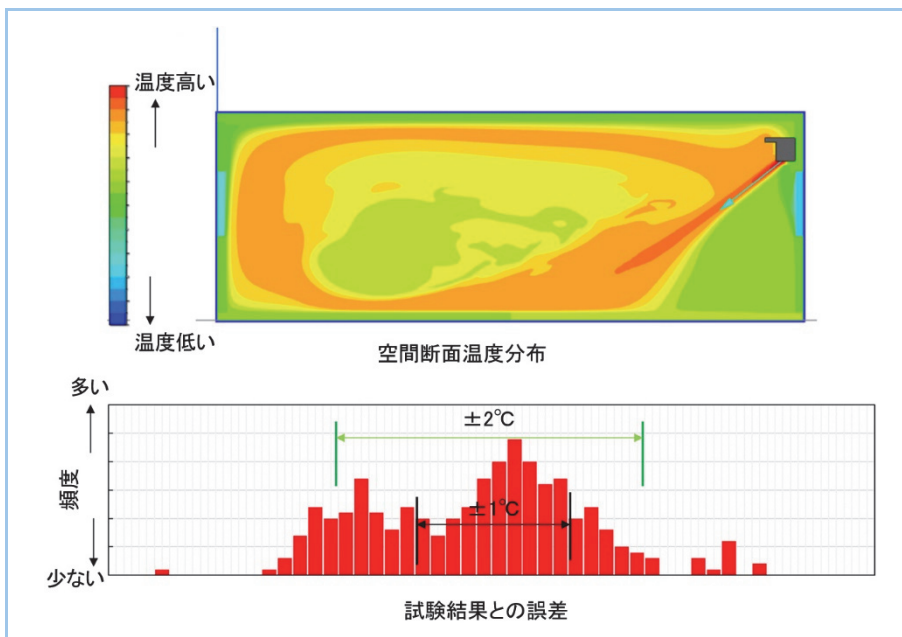


図7 ルームエアコンの解析結果

5. まとめ

近年、生活環境や労働環境の向上に加えて省エネが求められる中、快適な空調環境の実現は快適な照明環境や騒音環境の実現と同じく重要な課題である。しかしながら、これまで空調環境の3次元熱流体解析による気流と温度の3次元シミュレーションの実施には手間と時間を要していたため、空調機器の機種選定や配置設計は機器の仕様や一次元的な熱負荷計算を元に行っていることが多く、未だ改善の余地がある。

そこで当社は、WEBアプリ共通基盤であるNECOSYSTEM[®]上に、室内外の気流と温度を計算するGPUクラウドシミュレータを構築した。今まで開発してきた流体及び伝熱の3次元解析技術とWEBアプリの技術を融合し、空調機器周辺の環境解析に特化することによって、ゲーム感覚で使

えるほどの簡便さと高速な計算性能を実現した。また、当社の環境試験設備で取得した温度計測と比較することにより、実用的な精度を有していることを確認できた。これによって空調機器や設備の空間配置を考慮して快適な空調環境づくりをシミュレーションできるようになった。

今後は、お客様とコミュニケーションをとりながら最適な空調機の機種やその配置を提案できるように、さらに簡便にシミュレーションモデルを作成する技術と高速なシミュレーションを可能とする技術の開発を進める。また、本技術を活用してお客様によりよい空調機の機種選定や機器配置を提案する機会を増やし、お客様の省エネで快適な空調環境づくりに貢献していく。

“NECOSYSTEM®”は日本における三菱重工業株式会社の登録商標です。

“AirFlex®”は日本における三菱重工サーマルシステムズ株式会社の登録商標です。

参考文献

- (1) 特開 2003-216660
- (2) 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 営業部営業管理課, 業界初 AirFlex パネル搭載室内機 FDT をラインアップ 超高効率店舗パッケージエアコン ExceedHyper シリーズ, 三菱重工技報 Vol.54 No.2 (2017) 冷熱特集
- (3) 三菱重工業株式会社, Press Information, 2021-04-15, 冷房の風向設定により快適性が異なることを脳科学的に証明 三菱重工サーマルシステムズと九州大学の共同研究で, <https://www.mhi.com/jp/news/21041502.html>
- (4) Nishimura, S., et al. Implicit Large-Eddy Simulation of rotating and non-rotating machinery with Cumulant Lattice Boltzmann method aiming for industrial applications, AIAA Aviation 2019 Forum. 2019.
- (5) 西村 信祐ほか, 高精度空力騒音解析ツールの開発と製品静粛設計への適用, 三菱重工技報 Vol.57 No.1 (2020) 新製品・新技術特集