

# 建築熱環境シミュレーションとCFDの連成解析に関する研究

山本, 竜大

<http://hdl.handle.net/2324/2236009>

---

出版情報：九州大学, 2018, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：



氏 名 : 山 本 竜 大

論 文 名 : 建築熱環境シミュレーションと CFD の連成解析に関する研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年の建築は、建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律の施行により、室内熱環境の改善や暖冷房負荷の低減を目的として、建築設計段階において数値シミュレーションにより定量的に熱環境を評価すること、いわゆる環境設計が推奨されている。建築熱環境シミュレーション技術は、建築伝熱理論の進展、計算機能力の向上、並列計算技術の開発などにより急速に進歩しており、熱負荷計算に基づく省エネルギー計画のみならず、過大な計算負荷のため従来は困難であった局所分布予測による居住環境評価など、詳細なシミュレーション結果に基づく建築設計へのフィードバックが図られつつある。

建築熱環境に関する数値シミュレーションは、建築空間を居室等でゾーン分割し、各ゾーンを均一な1質点系と仮定して、各ゾーンのエネルギー収支から温湿度や暖冷房負荷を解くマクロモデル（エネルギーシミュレーション、以下ESと称する）と、空間を小さなメッシュで分割し、有限体積法等による流体解析により全メッシュの温湿度や気流速などの空間分布を解くマイクロモデル（流体シミュレーション、以下CFDと称する）に大別される。ESは外界気象のみを入力条件として、熱伝導・熱対流・熱放射・移流に関する伝熱現象を連立した長期間の非定常計算が可能であるが、ゾーン分割した同一空間内における熱環境分布は予測できない。一方、CFDは空間の温湿度分布を計算できる反面、空気拡散現象の解析に限定されるため、入力条件として境界面の温湿度等を設定する必要があり、一般には何らかの境界条件の仮定に基づいた任意時刻における定常計算に制約される。ESとCFDはそれぞれに優位な特徴があり補完関係にあるものの、これまでは煩雑な計算のため両者を連成したシミュレーションは実用化されていない。そこで、本研究ではESとCFDの詳細な連成方法に関する基礎理論の構築と計算プログラムの開発を行うとともに、実用化に供する非定常解析のための簡易計算方法を提案した。さらに、空調エネルギー消費量の予測精度の向上を目指したESとCFDと空調機器モデルの連成計算、ならびに3次元熱伝導が生じる外皮形状に対応した連成計算方法について検討した。

本論文は6章より構成される。第1章では、研究背景、研究目的、論文構成について述べるとともに、論文で使用する用語の定義などを示した。

第2章では、Dynamic Couplingを使用したESとCFDの連成方法に関する基礎理論について示し、双方の計算に共通な変数（自由変数と媒介変数）の適切な設定条件を提示した。Dynamic Couplingとは、計算ステップ毎に自由変数について収束計算を行い、ESとCFDの計算誤差をなくす方法である。ここでは、自由変数に境界面の示強変数（温度）あるいは流束（熱流）、媒介変数に熱拡散係数（対流熱伝達率）を設定し、温度あるいは熱流を収束判定条件として、収束過程で対流熱伝達率を推定する方法を提案した。例えば、温度を自由変数とする場合は、ESで計算された表面温度をCFDの境界条件として入

力し、次に CFD で算出される対流熱伝達率を ES の境界条件として再計算する。この過程を繰り返すことで表面温度が収束し ES と CFD の計算誤差がなくなる。ES において対流熱伝達率は計算結果に大きく影響するパラメータであるが、自然対流など気流速が推定される条件を除いて経験則に基づく慣用値が使用されるため、CFD による理論値は ES の計算精度の向上に繋がる。ただし、CFD は使用する乱流モデル（大小の渦の生成・消滅に係わる流れの乱れを非定常的な渦運動として時間平均的に表現する数学モデル）の影響が大きい。また、CFD による対流熱伝達率は、熱流を表面温度と主流空気の温度差で除して求められるため、主流空気の温度（壁面から主流空気までの距離）を決定する必要がある。主流空気とは壁面摩擦の影響を受ける最遠（遷移層と乱流層の境界）の空気であり、その距離は摩擦速度および動粘性係数と関係があるため無次元数（一般に無次元距離  $y_+$  と称する）で表現される。本章では、実大の試験住宅を使用した床暖房実験と比較することで CFD による対流熱伝達率の計算に適する条件（低レイノルズ型  $k-\epsilon$  モデルを使用して  $y_+=100$  と設定）を導いた。また、Dynamic Coupling を適用した ES と CFD の連成プログラムを開発し、計算値は実験値をよく捕捉することを明らかにした。さらに、Dynamic Coupling における収束計算を省いて、CFD で算出される対流熱伝達率を ES の次ステップ（あるいはそれ以降の任意ステップ）の境界条件とすることで計算負荷を軽減する Static Coupling についても示した。

前章で示した ES と CFD の連成計算は、Static Coupling でも ES と比較すると遥かに計算負荷が大きいため、汎用的パソコンでは実用性に欠ける。そこで、第 3 章では Static Coupling をさらに簡略化し、CFD の機能を ES に簡易的に付加する熱分配法を提案した。まず、温度を設定値として ES で計算する全館の暖房負荷を熱源（空調機）からの供給熱量と仮定し、次に CFD により熱源から各ゾーンへの投入熱量を計算して、供給熱量に対する投入熱量の比率を各ゾーンへの熱量拡散係数と定義した。空調条件下における強制対流場など、流れ場が大きく変化しない条件では、供給熱量と投入熱量には線形性が成り立つため、熱量拡散係数を定値と仮定できる。つまり、熱分配法とは、最初に代表的な流れ場の熱量拡散係数を導いておき、ES で計算される時刻毎の空調負荷に熱量拡散係数を乗じることで各ゾーンへの投入熱量を算出し、投入熱量を ES の入力条件として再計算することでゾーン間の温度分布を予測する方法（ES と CFD の簡易連成法）である。本章では、吹抜け空間を有する実大の試験住宅を使用して暖房実験を行い、実験結果と計算結果を比較することで、熱分配法が十分な予測精度を有することを検証した。

第 4 章では、Dynamic Coupling による ES と CFD の連成計算に空調機器モデル（ヒートポンプエアコン）を組み込み、機器効率等の挙動を再現することでエネルギー消費量の予測精度を改善した。空調機器モデルは、逆カルノーサイクルを用いて冷媒の蒸発・凝縮温度を推定する物理モデルで、空調機の吸込み空気温湿度および熱負荷を入力条件として、吹出し空気温湿度や消費電力量を出力する。ES は熱・水分の一樣拡散を仮定して各ゾーンの体積平均温湿度（バルク温湿度）を計算するため、吸込み空気温湿度の正確な予測は困難であるが、ES と CFD の連成計算により吸込み口の局所空気温湿度を推定できれば空調機器特性およびエネルギー消費量の予測精度の向上が期待できる。なお、ES による冷房潜熱負荷は設定湿度の維持に要する除湿量から計算されるが、実現象では冷媒温度の変化にともない除湿量も変化するため、室内湿度は成り行きで決まる。本章では、冷房時のエネルギー消費量および居室環境について実験と計算の結果を比較することにより、ES と CFD と空調機器モデルの連成による高い計算精度を示した。

第 5 章では、3 次元熱伝導が生じる外皮形状の建築を対象とする場合の ES と CFD の連成計算方法に

について検討した。一般に、ES は矩形建築を対象とすることが多いため、熱伝導は 1 次元非定常を想定するが、曲面等の外皮形状の場合は 2 次元あるいは 3 次元の計算が必要となる。本章では、円錐台形状の盛り土建築を対象として、外皮を 8 方位に分割し、地盤については 2 次元熱伝導計算を導入した。それぞれの方位における内部境界温度の計算値を ES の入力条件とし、さらに CFD と連成することで近似的に 3 次元の熱・気流拡散を予測した。本章では、曲面外皮形状を有する建築への適用を目指して、ES と CFD の連成計算に 2 次元伝熱計算プログラムを補填する拡張計算の方法を提案し、実験結果を再現することで計算方法の妥当性について明らかにした。

第 6 章では、各章で得られた知見を要約して総括とし、今後の課題について整理した。