

CFD による室内温熱・空気環境の統合解析

岩本 静男* 藤本 遼**

Integrated analysis of indoor thermal and air environment by CFD

Shizuo IWAMOTO* Ryo FUJIMOTO**

1. はじめに

これまで岩本・傳法谷研究室では、卒業論文・修士論文も含めて、CFD(数値流体力学)による数値解析により、室内の気流分布、気温分布、表面温度分布を計算して室内温熱環境を評価する研究を続けてきた。近年では CFD 市販ソフトも進化し、室内に居住者を模した人体形状を配置し、体温調整機能をモデル化した人体放熱モデルを組み込んで、より詳細に温熱環境を評価することができるようになってきている。

この際に問題となる湿度について、従来は絶対湿度一定を仮定してきたが、今後は水蒸気の分布も重要となりつつある。また近年のコロナ禍で室内の換気に注目が集まり、炭酸ガス濃度などの空気環境も重要視されつつある。いずれも CFD で予測・評価できる内容であり、本研究ではこれらを盛り込んだ計算により温熱・空気環境の統合解析を目的としている。

2. 研究方法

研究方法は、従来から用いている CFD ソフトウェアの scFLOW と、2022 年度の重点配分で購入した高速の HPC (High Performance Computer: 高性能コンピュータ)による数値解析と、その計算結果を用いた各種評価である。卒業研究や修士研究にも活用できる総合的な解析手法の確立を目指している。

温熱環境の評価では一般的な温冷感指標の PMV に加えて、ドラフトの恐れを評価する DR 指標、有効ドラフト温度 EDT、在室者の皮膚温度から温冷感や快適感を予測するモデルなどが提案されており、本報の検討でも採用している。

一方、空気環境においては水蒸気の分布、炭酸ガス濃度分布、換気性状を評価する規準化居住域濃度などがあり、特に水蒸気分布を用いて居住者の放熱量を的確に予測できる手法があり、それと組み合わせることでさらに詳細な評価も可能となる。

3. JOS-2 モデルを用いた非定常解析¹⁾

3.1. 計算環境および解析対象

本解析は AMD Ryzen Threadripper3 3960X (24Core/3.8GHz) RAM 256GB を使用し、乱流モデルは高 Re 型と低 Re 型の 2 つのモデルを使用する。本検討では高 Re 型では Realizable $k-\epsilon$ モデル、低 Re 型では SST $k-\omega$ モデルを採用した。Realizable $k-\epsilon$ モデルは乱流エネルギー k が負にならないような制限を設けているモデルであるが、

*教授 建築学部建築学科

Professor, Dept. of Architecture and Building Engineering

**助手 建築学部建築学科

Research Associate, Dept. of Architecture and Building Engineering

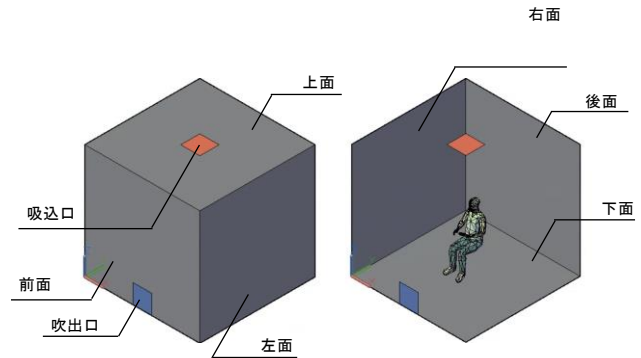


図1 解析対象

表1 空調条件

case	解析モデル	吐出風速 [m/h]	吐出風量 [m ³ /h]	吐出気温 [°C]	吐出湿度 [%]	吸込静圧 [Pa]
Real_16			16.0	48.31		
Real_20	Realizable k-ε	0.1	72.9	20.0	37.06	0
Real_24			24.0	29.26		
SST_16			16.0	48.31		
SST_20	SST k-ω	0.1	72.9	20.0	37.06	0
SST_24			24.0	29.26		

表2 メッシュサイズ

case	オクタントサイズ [mm] / 層数					
	最小	吹出口	吸入口	人体	手	全体
Real_16	0.064	0.032 / 1	0.032 / 1	0.016 / 0	0.0008 / 0	
Real_20						
Real_24						
SST_16						
SST_20	0.064	0.008 / 1	0.008 / 1	0.008 / 0		0.008 / 0
SST_24						

表3 境界層サイズ

case	変化する層数				節点数	表面数	要素数
	吹出口	吸入口	人体	壁面			
Real_16							
Real_20	1.1 / 2	1.1 / 2	1.1 / 2		435,788	736,653	166,968
Real_24							
SST_16							
SST_20	1.1 / 3	1.1 / 3	1.1 / 3	1.1 / 3	15,975,246	26,143,311	5,843,211
SST_24							

表4 無次元距離 y+

Case	粘性底層			遷移層	対数層	合計層数
	0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0			
Real_16	2,496	9,512	16,554	1,005	0	29,567
Real_20	2,938	10,797	15,013	823	0	29,571
Real_24	3,364	11,534	13,989	680	0	29,567
SST_16	1,008,863	34,463	611	0	0	1,063,937
SST_20	1,028,033	35,675	229	0	0	1,063,937
SST_24	1,033,263	30,994	80	0	0	1,063,937

基本的には標準 $k-\epsilon$ モデルと同様である。ここで Realizable $k-\epsilon$ モデルでは乱流消散率 ϵ 、SST $k-\omega$ モデルでは単位エネルギー当たりの乱流消散率 ω の方程式に浮力項がないモデルであり、浮力の扱いが不十分である可能性がある。

解析対象は図1に示す1辺2.7mの立方体室である。3.2.項で述べるが、本件等では高 Re モデルと低 Re モデルのメッシュを異なる大ききで採用していることを留意されたい。

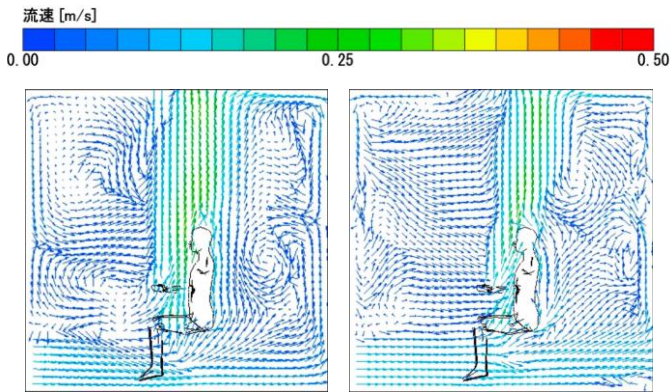
3.2. 解析条件

対象室の壁面境界条件は前後左右上下の壁を断熱境界としている。空調条件を表1に示す。空調条件は吹出気温を4°C刻みで大きくしているが、吹き出す水蒸気量は同じとなるように設定している。

本解析におけるメッシュおよび境界層を表2,3に示すパラメータで設定した結果、無次元距離 $y+$ は表4のようになった。本検討では高 Re モデルにおいて対数層に属する $y+$ がなかったため、これについては小さく刻みすぎたが、SST $k-\omega$ モデルの方は粘性底層にのみ $y+$ が存在するので、よく刻めていることがわかる。

また本解析は最初に流れ場のみの定常解析を行い、後にそれを初期場として与え、流れ場、温度場、拡散場について非定常解析を行

う。非定常計算における時間差分間隔は1sで3600サイクルとした。



(a) Realizable $k-\epsilon$ モデル (b) SST $k-\omega$ モデル

図2 気流分布(24°C吹出)

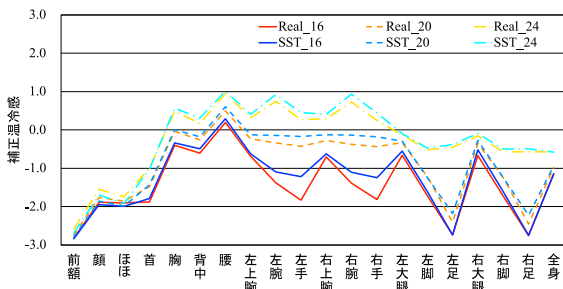


図4 補正温冷感

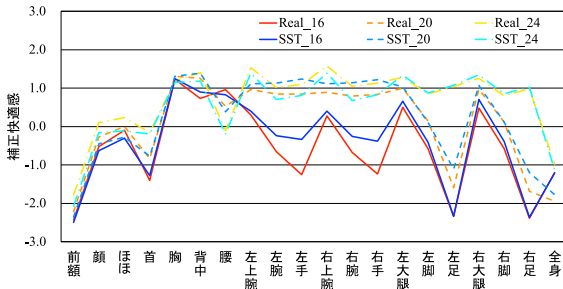


図5 補正快適感

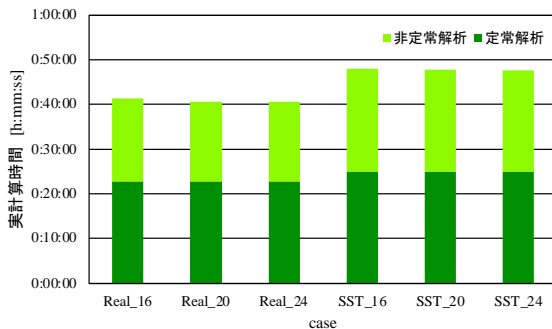


図6 実計算時間

3.3. 評価方法

3.3.1. JOS-2 モデル

JOS-2 モデルは田辺ら²⁾によって開発された人体放熱モデルであり、人体を17部位に分割し、各部位の熱平衡式から体温を計算する物理モデルである。本解析では20代男性、体脂肪率20%、座位、事務作業(1.2met)を想定している。着衣はスーツ(厚手)を使用する。

3.3.2. Zhang モデル

Zhang モデルは Zhang³⁾によって開発された温冷感・快適感の評価

指標であり、人体モデルから出力される部位別皮膚温を用いて温冷



(a) Realizable $k-\epsilon$ モデル (b) SST $k-\omega$ モデル

図3 温度分布(24°C吹出)

感と快適感を算出する。本検討では非定常解析で出力された最終サイクルの部位別皮膚温を定常計算用の Zhang モデルに入力する。ここで JOS-2 は人体を17部位に分割していることに対し、Zhang モデルは19部位に分割しているため、本検討では Zhang モデルにおける前額、顔、頬の温度に JOS-2 モデルにおける頭部の温度をそれぞれ入力する。また Zhang モデルは実験に基づいた皮膚温度をセットポイントとして使用しているが、本検討ではこれを JOS-2 モデルのセットポイントに変更する。本来の Zhang モデルは-4 から+4 までの9段階評価であるが、本検討では建築環境工学の分野でしばしば用いられる PMV に合わせるため、評価値を7段階評価に補正した。

3.4. 解析結果

気流分布を図2、温度分布を図3に示す。これによると、2つの乱流モデルの違いは小さいことがわかる。これは図4、5に示す補正温冷感および補正快適感からもわかるように、乱流モデルによる温冷感および快適感の違いはなく、極端に異なる部位は手のみとなっている。これは表2から Realizable $k-\epsilon$ モデルと SST $k-\omega$ モデルにおける手のメッシュサイズが異なることが影響していると考えられる。また本解析における実計算時間は図6のようにになっている。1時間(1s×3600)の非定常計算に対して実計算時間が1時間を切っているため、大規模空間においても十分に適用できると考えられる。

4. まとめ

立方体室における JOS-2 モデルによる非定常解析は十分に再現されている。そのため今後は JOS-2 モデルを大規模講義室に複数体導入することや、解析手法や乱流モデルについても検討していきたい。

また今回購入できた HPC は今後も活用できるほか、卒業研究、修士研究にも使用できるため使用頻度は極めて高い。

【参考文献】

- [1]藤本ら, CFD 解析における複数の人体放熱モデルの検討(第1報)人体形状の比較・検討, 人間生活・環境系シンポジウム講演梗概集(2022).
- [2]徐莉ら, 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ(その22): 体温調節モデル JOS の開発-AVAを含む血管系の考慮, 日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集, 361-362(2022.6).
- [3]Hui Zhang, Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments, a doctoral thesis, University of California, Berkeley(2003).