

温熱環境評価のための人体熱モデルとCFDの連成システム

庄司 祐子 (大阪ガス)

1. はじめに

室内熱環境の快適性評価において、人体が体内で生産した熱量を周囲環境に放散することで熱平衡を保ち、体温調節を行っている点に注目した指標が多く用いられている。また、最近の研究により、被験者実験で計測された温冷感、快適感などの心理反応と皮膚温等の生理反応の間で、高い相関が示唆されている。そこで、温熱環境に対する生理反応から快適性評価を行うべく、人体の生理反応を予測する数値モデルの開発が望まれてきた。

本研究ではこれまでに、熱環境に対する生理反応（皮膚温分布、血流変化、発汗、代謝反応）を、詳細に予測する数値解析ツール、人体熱モデル^[1]を開発してきた。このモデルは3次元形状をもち、非定常、不均一な環境での適用が可能であるが、それに応じた境界条件として人体周りの温熱環境条件（気温、湿度、ふく射温、気流速度）をあらかじめ設定しなければならなかった。この設定された環境条件に対し人体の体温調節反応や環境への放熱量を予測することはできたが、人体からの熱・水分放散により周囲環境がうける影響も含めた人体周囲の温熱環境条件を予測することはできなかった。

そこで人体熱モデルと室内熱環境の流体解析を行うCFD（computational fluid dynamics）を連成させ、人体周りの不均一熱環境やこれに対する人体の生理反応を予測するツール、連成システムを開発した。本報では、連成項目として皮膚からの対流、ふく射熱伝達、水分移動現象をモデル化した連成システムの概要とその効果について述べる。

2. 人体と熱環境の連成システムの開発

人体の生理反応を予測する人体熱モデルと室内

熱環境を予測するCFDを連成させ、相互の熱移動現象を予測する連成システムを開発した。

2.1 人体熱モデル

人体熱モデルは、人体の記述を行う人体組織系と、生理的調節を行う体温調節系からなる^[2]。

2.1.1 人体組織系

人体は15個の円柱部位で近似し、各部位間は動脈、静脈血管によって接続され、血液は全身を循環し熱輸送を行う。また、頭部、首部、胴体上部には、気管支が配置され、呼吸による放熱を行う（Fig. 1）。円柱部位を細分化して形成された3次元組織要素は部位別の組成より、骨、筋肉、脂肪などの組織タイプに配分され、熱物性値が設定される^[3]。このうち人体表面の皮膚要素面では、要素ごとに境界条件を設定することができる。

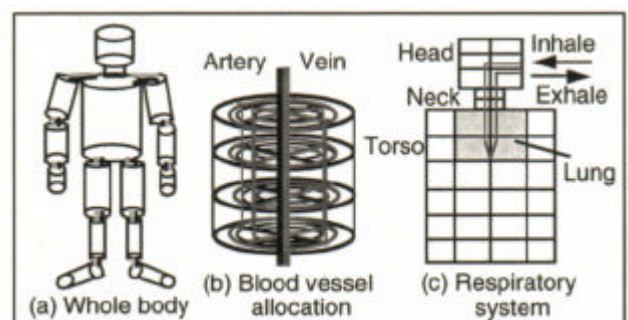


Fig. 1 Human tissue system

2.1.2 体温調節系

体温調節系は体温情報として統合した深部温と平均皮膚温に基づき、皮膚血管反応、発汗、ふるえ代謝などの生理的調節を行うフィードバック系としてモデル化した（Fig. 2）。

皮膚血管反応は、皮膚血管の拡張、収縮により体内から体表面へと流れる皮膚血流量を調節し、体表面からの熱放散に大きな影響を与える。発汗反応は皮膚表面からの水分蒸発による放熱を行い、ふるえ代謝反応は、ふるえによる熱産生で体内の発熱量を増加させる。

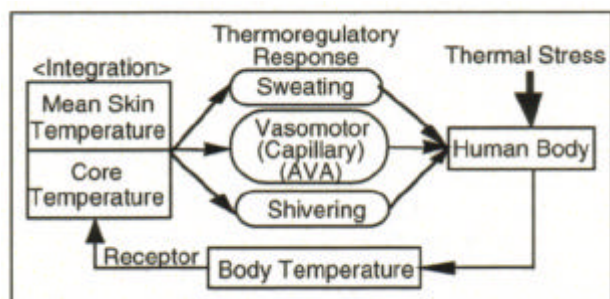


Fig. 2 Thermoregulatory system

2.2 CFD

室内熱環境の数値計算では、対流、ふく射熱伝達、水分移動解析を行い、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。解析対象は人体周りの速度分布は静穏であるような寒冷な室内環境とし、人体は裸体で部屋の中心に立位状態とした。詳細な計算対象の室内条件を Fig. 3 に示す。

メッシュ作成では、人体近傍は特に細かいメッシュ分割を行った。

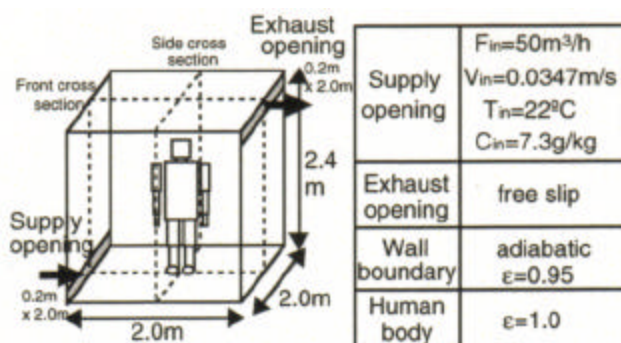


Fig. 3 Flowfield analyzed

2.3 連成方法

人体から周囲環境への熱放散として、皮膚表面からの対流、ふく射、水分蒸発、呼吸気道からの対流、水分蒸発がある。人体熱モデルでは全ての要素が考慮されているが、本報の連成システムではCFDとの連成項目は皮膚表面からの対流、ふく射、水分蒸発のみを対象とした。

CFDは皮膚表面から周囲環境の流体解析を行なう。CFDの境界条件は、人体熱モデルより予測した皮膚表面の皮膚温分布、湿度分布を用い、その

解析結果より人体の各皮膚要素ごとの熱移動量、水分移動量が求まる。そして、人体熱モデルはこれらの熱、水分移動量を、皮膚からの熱放散の境界条件とし、皮膚温分布、湿度分布を予測する。連成システムはこのように人体熱モデルとCFDの間で互いに予測したデータの授受を行なう。

その結果、従来モデルである人体熱モデルのみの計算では、部位ごとに実験式より求めた熱伝達率などを使用して算出していたが、連成システムではCFDにより皮膚要素ごとの熱移動量、水分移動量を流体解析から直接求めることができる。

3.人体と熱環境の連成システムの予測結果

開発した連成システムによる予測結果は、被験者実験結果やCFDと連成をしていない従来の人体熱モデルの予測結果と比較し、連成による効果について調べた。

3.1 周囲環境

連成システムにより予測した周囲環境として、人体を中心にした縦、横断面の温度分布、速度分布、湿度分布を各々Fig. 4、5、6に示す。なお、湿度分布は水分濃度の質量分率で表した。

3.1.1 温度分布

室内温度分布は大半の空間は 22°C から 24°C の範囲であった。特徴的な温度変化は人体周りの温度分布にみられ、特に高温分布をもつのは、頭、肩上部や、大腿の間の領域であり、頭部をこえて天井面に達する温度分布をもった。

3.1.2 速度分布

速度分布では、吹出口から流入した気流速度は人体周りではほぼ減衰し、静穏な状態となった。自然対流により足部からしだいに発生した上昇気流は上半身へと昇るにつれて速度を増していき、最大の流速分布は頭上あたりでみられた。また、人体部位は円柱形の組み合わせによるため、頭部や胴体部などの円柱端面上部では循環流が生じ、胴体下部の円柱端面は足元からの上昇気流を遮り、気流の乱れを生じさせていた。

3.1.3 湿度分布

湿度分布では、人体の皮膚表面から周囲環境へ放散した水分により、人体周りには温度分布と類似な特徴をもつ湿度分布があった。水分は人体周りの上昇気流に運ばれ天井面に達する湿度分布を示した。

本条件では呼吸による水分蒸発量をCFD側に連成項目として受け渡しておらず、よって Fig. 6 では、人体周りの湿度分布は皮膚からの水分移動量のみによる影響を表している。

連成システムが予測した特徴的な人体周りの温度、湿度分布や自然対流により発生した上昇気流分布は従来の実験的研究^{[4][5]}や数値解析^[6]で示された傾向と一致し、連成システムを用いることで、人体が周囲環境に及ぼす影響を詳細に予測することができることを示した。

3.2 生理反応

連成システムで予測した生理反応として、皮膚温度分布と体重減少量を被験者実験結果^[1]、従来のモデル、すなわち人体熱モデルのみの予測結果と比較した。被験者実験結果は $4.0 \times 4.0 \times 2.4\text{m}$ の寸法の環境試験室の中で気温 22°C 、相対湿度 45% の定常条件下で行なった男子大学生 8 人による結果である。裸体条件では下着と短パンツのみを着用した。

3.2.1 皮膚温度分布

皮膚温度計測点の位置を横軸に示した 12 点皮膚温度分布を Fig. 7 に示す。連成システムによる数値計算条件と被験者実験条件では、室内環境条件や換気システムがわずかに異なるが、予測結果は全身の皮膚温度分布において実験結果とほぼ一致し、よって連成システムの生理反応の予測結果は妥当であることを確認した。また、連成システムでは従来の人体熱モデルでは不可能であった、部位間の熱移動を考慮に入れることで、大腿部や下腿部の内側の皮膚温度が外側よりも高温であるという現象を被験者実験結果と同様に予測することができた。

3.2.2 体重減少量

体重減少量において被験者実験結果と従来モデルの予測結果と比較した (Fig. 8)。総量としては、連成システムの予測結果は、実験結果や従来モデルとはほぼ一致したことより、連成システムの水分移動項目の検証となった。

ただし、体重減少量をなす水分蒸発量の 2 つの要因のうち、皮膚からの水分移動量は連成項目として考慮しているが、気管支からの呼吸による水分蒸発量はまだ考慮していない。

4. おわりに

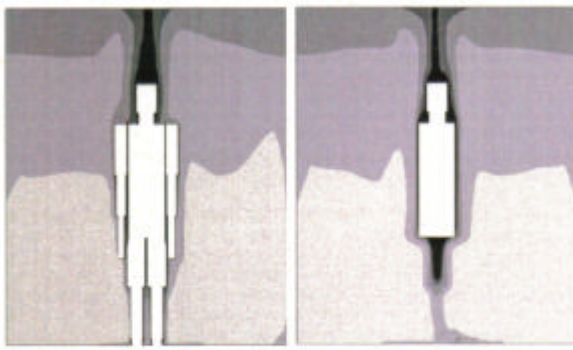
人体と熱環境の連成システムは、人体の生理反応を予測する人体着衣熱モデルと室内空間の流体解

析を行う CFD を、皮膚表面での対流、ふく射、水分移動を相互の境界条件として連成させることで開発した。これより、人体が環境へ放出する熱量や水分量による影響を CFD による流体解析で考慮した結果の室温分布、湿度分布を予測することができるようになった。また、人体の生理反応の予測においても、流体解析から直接求めた詳細な皮膚からの放熱量を境界条件としてもちいることで、部位特性や不均一性をうけた予測が可能となった。

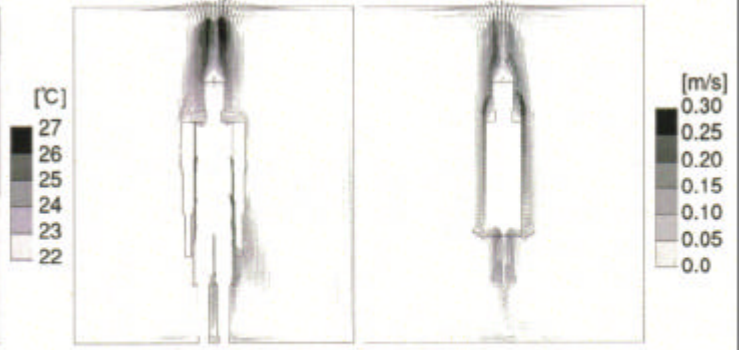
開発した連成システムは、均一環境で人体と環境との熱平衡が保たれた生理的中立での快適性だけではなく、様々な不均一環境における人体の部位特性の考慮や非定常環境で熱平衡が保たれていない場合に感じる快適性の評価にも活用できるものと考ええる。

文献

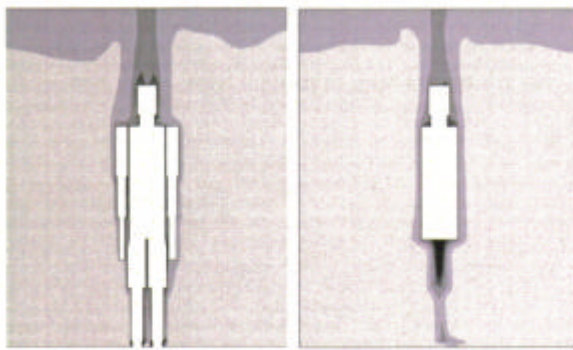
- [1] 庄司・他 3 名、機論(B)、63-613(1997)、183.
- [2] Smith, C.E., Ph.D. diss., Kansas State University, (1991).
- [3] Gordon, R. G., Ph.D. diss., University of California at Santa Barbara, (1974)
- [4] 李・他 2 名、日本建築学会計画系論文報告集、第 416 号(1990.10), p.25.
- [5] H. Honma・他 1 名、ASHRAE Trans., Vol. 94, Part1 (1988), p.104.
- [6] 曾・他 2 名、生産研究, 第 50 巻 1 号 (1998), p.78.



(a) Front cross section (b) Side cross section
Fig. 4 Air temperature distribution



(a) Front cross section (b) Side cross section
Fig. 5 Air velocity distribution



(a) Front cross section (b) Side cross section
Fig. 6 Moisture distribution

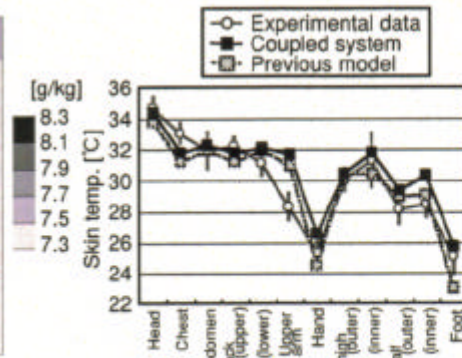


Fig. 7 Skin temperature distribution of 12 points

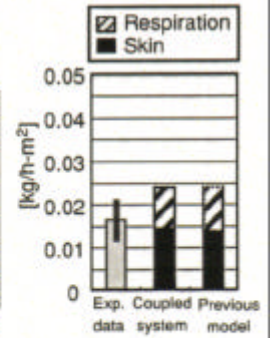


Fig. 8 Weight loss rate