

動作と生理的薬物動態を再現する数値人体モデルの開発と室内空気質制御への応用

九州大学 ○ 劉 城準 *
九州大学 伊藤 一秀 *

室内空気質 熱快適性 数値人体モデル
人体微細運動 計算流体力学(CFD) 室内環境設計

研究の目的

建築物の省エネルギー化は、居住者の快適性と健康性を犠牲にして達成することは許されない。建築物のエネルギー効率の向上に基づき、一次エネルギーの年間収支をゼロにする建築物、いわゆる ZEB の普及が期待されているが、快適かつ健康な室内環境の創出を前提とすれば、環境設計や制御の目的関数となる居住者の快適性や健康性を精緻に予測可能な数値人体モデルの開発は室内環境設計上の大切な要素技術である。本研究では、室内空気質を入力とする健康影響と熱的快適性予測までを総合的に予測・評価可能で、環境設計段階での適用が可能な数値人体モデルの開発を目的とする。人体の幾何形状だけでなく呼吸器系まで詳細に再現することで経気道曝露に伴う体内薬物動態と健康リスク評価を可能にした上で、血流モデルを共有化した皮膚温制御のための人体熱モデルを統合する。更に居住者の微細な動作を再現する数値アルゴリズムを数値人体モデルに統合することで、これまでに無い新しい数値人体モデルの開発を目指す。本研究で開発に取り組む数値人体モデルと計算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)を基にした室内環境シミュレーション手法は、室内空気環境と熱環境を健康の観点で最適化するための要素技術であり、最終的には室内環境設計の高精度化への貢献を目指す。

研究の内容

本研究では、日本人の平均的な幾何形状を再現した代表モデルだけでなく、個人の実人体の幾何形状を詳細に再現可能な 3D スキャン手法を活用し、人体周辺微気候の詳細予測が可能な数値人体モデルを作成した。更に、鼻腔・口腔から咽頭、気管を経由して気管支第 4 分岐までの幾何形状を再現した数値気道モデルを作成し、数値人体モデルと統合させることで、室内環境領域から呼吸器内領域までの連続領域を再現した統合数値人体モデル(Computer Simulated Person, CSP)を開発した。図 1 は本研究で開発した統合数値人体モデルの概要を示す。このモデル化では鼻孔面を介して数値人体モデルと数値気道モデルが連続したメッシュで生成されており、CFD 解析そのものの解析精度を担保することで、流量保存、エネルギー保存等が自動的に満足される

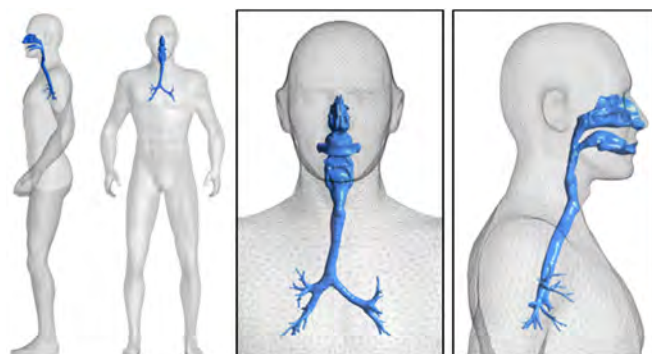


図 1 呼吸器系を統合した数値人体モデルの概要

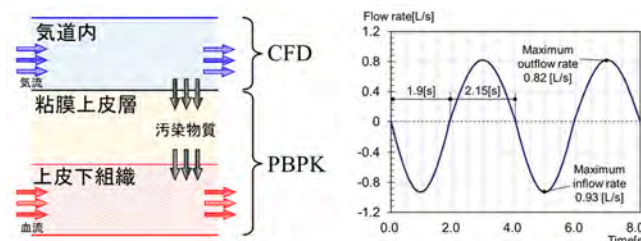


図 2 PBPK-CFD 連成解析および非定常呼吸モデルの概要

人体は周辺環境との熱交換により皮膚表面温度を制御する。非定常かつ不均一な温熱環境下において、高い精度で人体皮膚表面温度分布を予測可能な人体熱モデルの開発は重要な研究課題である。本研究では、非定常熱モデルの基本モデルである Gagge らによる 2-Node モデルに着目し、人体複雑形状を再現した数値人体モデルへの組み込みと、CFD 解析をベースとした対流・放射連成解析、湿度解析との統合手法を確立する。Gagge らによって提案された 2-Node モデルは、人体を Core(体心部)と Skin(皮膚層)の 2 つの部位、すなわち Node に分割し、それぞれを集中容量とした非定常人体熱モデルである。

更に、室内空気質悪化に伴う健康リスクの詳細評価を目的とし、生理的薬物動態解析 (Physiologically Based Pharmacokinetic; PBPK)モデルを数値気道モデルに組み込んだ上、非定常呼吸に伴う経気道曝露リスクの定量評価を可能とする PBPK-CFD 連成解析モデルを構築した。図 2 に PBPK-CFD モデルの概要ならびに非定常呼吸サイクルモデルを示す。本モデルは、気道(Airway)、粘膜上皮

(Epithelium+Mucus), 上皮下組織 (Sub-epithelium)の3層(正確にはCFD解析で1層, PBPKモデルとして2層)で構成されている。

研究の成果、新発見

本研究で開発した数値人体モデルを使用し, 単純モデル室内での室内空気質・熱環境解析を実施した。図3は人体周辺の流れ場, 温度場解析結果および人体皮膚表面温度の予測結果を示している。解析対象空間の環境条件として, 置換換気(Displacement ventilation)を想定流入・流出境界の配置と, 298Kの室内温度および50%の相対湿度を採用しているが, 本解析では, 人体熱生理モデル(2-Nodeモデル)と数値人体モデルの連成解析を行っているため, その結果として人体発熱により人体周辺, 特に頭頂部に熱上昇流が確認される。熱快適性評価時の重要な指標となる皮膚表面温度の分布および平均温度は, 快適範囲内の予測結果を示している。

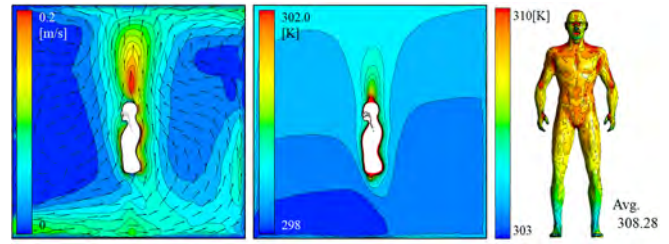


図3 人体周辺流れ場・温度場および人体皮膚温度解析結果

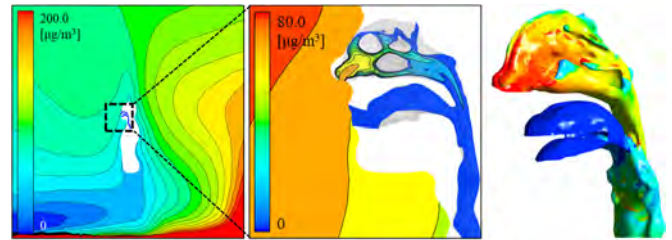


図4 人体周辺および呼吸器内の汚染物質輸送解析結果

図4に数値人体モデルを使用した人体周辺および呼吸器内の汚染物質輸送解析結果を示す。本解析では室内床面からの汚染物質発生を想定しているが, 呼吸域に到達した汚染物質が気道内に一定量が吸入される結果となり, PBPK-CFD連成解析の結果として, 殆どが鼻腔内に吸着している様子が確認できる。

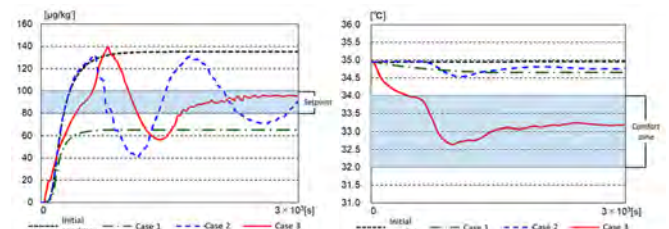


図5 人体周辺および呼吸器内の汚染物質輸送解析結果

数値人体モデルの解析により得られた健康リスクおよび快適性の情報を直接空調・換気制御に取り入れることで, 室内環境要素の不均一性に対応し, 健康・快適性だけでなく, 空調・換気に使用されるエネルギーの最適化まで実現することが可能となる。図5の赤線は数値人体モデルを空調・換気制御のためのセンサとして使用した室内空気質・熱快適性の最適化結果であり, 従来の制御方式と比較し呼吸空気質ならびに人体熱快適性の最適化において最も効果的な制御になっていることが確認できる。

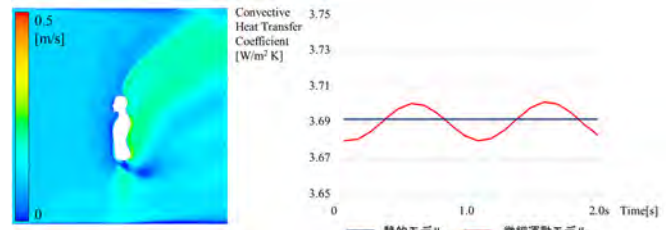


図6 人体微細運動を再現した人体対流熱伝達率解析結果

人体の動作を再現した数値人体モデルの開発の第一段階として, 立位状態にある人体の姿勢制御に伴う人体の微細運動を単純化した上に数値解析上に再現し, 室内流れ場および人体熱快適性における影響を図6のように検討した。その結果, 人体表面の対流熱伝達率に関しても室内気流の主流方向に沿った前後方向の振動に大きく影響され, 対流熱伝達率の時間変動は確認できるものの, 時間平均の結果は殆ど差が無いことが確認できる。今後, 様々な健康状態および年齢条件を想定し, 微細運動時の振幅および周期を変化させたパラメトリック解析を実施し, 人体微細運動の人体周辺微気候への影響について定量的に検討する予定である。

今後の予定

1) 実人体の着衣状態を想定し, 衣服の詳細幾何形状な

らびに衣服を中心とした熱・水分・物質同時移動解析モデルを構築し, 衣服の人体熱快適性への影響を解明する。

2) 本研究で検討した人体微細運動の再現の他, 歩行などの動作の再現とその影響を人体-室内環境の相互作用の観点から検討する。

3) 室内空気質制御の重要な対象物質となる, 二酸化炭素に着目し, 被験者実験および数値人体モデルを使用した数値解析手法により体内からの二酸化炭素発生メカニズムを解明すると共に, 呼吸域濃度分布と吸入濃度の関係について調査する。

謝辞

本研究は, 一般財団法人大成学術財団の助成を受けて実施されました。ここに深く謝意を表します。