

呼吸器系モデルを統合した数値人体モデルによる室内環境シミュレーション

劉, 城準

<https://doi.org/10.15017/1654935>

出版情報：九州大学, 2015, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名：YOO Sung-Jun

論文題名：呼吸器系モデルを統合した数値人体モデルによる室内環境シミュレーション

区 分：甲

論 文 内 容 の 要 旨

室内空間にて人生の過半の時間を過ごすと言われていた現代社会において、建築により形成される室内空間の良否が QOL(Quality of Life)に与える影響は甚大である。室内環境中の滞在が長くなることは、即ち人体が室内空気に長時間暴露されることを意味する。体内摂取物質量比の観点では定常的な呼吸に伴う室内空気成分が支配要素であることを考えると、室内空気質 IAQ (Indoor Air Quality)が人体に与える影響を予測することは在室者の健康リスクを制御する上で非常に重要な課題である。また、都市部におけるヒートアイランド現象や欧米での熱波などの影響で室内環境中の空気温度上昇が懸念されており、熱中症等の発症が社会問題化している。室内の空気・熱環境形成と生体反応は密接な関係があり、健康・快適で且つ生産性の高い室内環境を創造するためには、室内環境要素と人体の相互関係を総合的に予測・評価することが必須である。室内環境設計と空気調和・衛生工学の観点では、正確な室内環境予測と高精度の人体モデルを用いた生体影響予測技術の確立が急務である。

室内環境設計において、熱・空気環境に代表される室内環境の質と人体影響を高い精度で予測することは工学的に重要な課題であるが、特に設計段階において被験者を用いて実験を行うことは費用や時間の観点ではほぼ不可能である。また倫理的な問題より一般的な環境条件を大きく逸脱した環境下での実験は許されないことが多い。この点で、数値人体モデル開発に関する社会的需要が存在する。

室内に形成される空気環境、特に汚染物質濃度場と人体の健康影響予測に関しては、人体周辺に形成される不均一微気候を計算流体力学 CFD にて解析することが前提となるため、複雑な人体形状を再現した数値人体モデルの開発が進められている。最近、計算機能力の飛躍的な向上に伴い、数値人体モデルの室内環境予測への適用事例が増加している。しかしながら、非定常・不均一な汚染物質濃度場と人体暴露濃度の高精度予測、特に呼吸空気質予測に関する研究は途上であり、経気道、経皮等の汚染物質暴露に伴う生体反応を含めた高精度の暴露リスク予測は大きな課題となっている。また、室内に形成される温熱環境と人体の生理量、それに基づく温冷感覚予測に関しては、1960年代から数多くの体温調整モデルが報告されており、非定常・不均一な温熱環境変化に対する人体生理の非定常応答の予測を目指して活発な研究開発が行われているが、例えば、人体の呼吸に伴う顕熱・潜熱移動の厳密なモデル化とその統合までは至っておらず、改善の余地がある。また、室内環境評価に適用するための人体モデルの開発は、実験用サーマルマネキンの開発から CFD 解析用の数値人体モデルまで既に活発に研究が進められているが、汚染物質暴露に伴う健康影響までを総合的に予測評価することができる総合的な人体モデルは未だ存在しない。

このような背景のもと、本研究は室内の熱的快適性予測から健康影響までを総合的かつ詳細に予測・評価可能で、設計段階での適用が可能な数値人体モデル CSP (Computer Simulated Person)の開発を目的としている。

各章の内容を以下に要約する。

第1章では、序論として、CSP 開発に関連した研究背景と本研究の目的を明らかにしている。特に、本研究では CFD(Computational Fluid Dynamics)を用いた室内環境解析技術を基に、①詳細幾何形状を再現した気道モデルと数値人体モデルを統合した CSP 開発、②非定常人体熱モデルと CSP の統合、③室内環境と CSP の連成解析手法開発、④CSP を用いた呼吸空気質解析、⑤生理的薬物動態解析 (Physiologically Based Pharmacokinetic, PBPK)モデルを統合した PBPK-CFD-CSP モデルによる経気道暴露リスク評価、の個別課題に取り組むことを示し、本研究の重要性、必要性、アドバンテージを明確にしている。

第2章では、人体の幾何形状を詳細に再現した数値人体モデル及び呼吸器系の幾何形状を再現した数値気道モデルの作成方法から生体流体力学の基礎を概説している。また呼吸に伴う熱損失を計算するために、非定常呼吸サイクルモデルを提案した上で、代謝量変化による補正法を示している。また、CFD による室内環境解析に関して、具体的には、人体周辺や気道内の流れ場、温度場、湿度場及び汚染物質濃度場解析の基礎となる各種の基礎方程式、乱流モデル、伝熱・放射モデル、またスカラー輸送方程式などの支配方程式に関して解説している。

室内に形成される非定常かつ不均一な熱環境による人体への影響を評価するためには、非定常人体熱モデルによる熱収支計算及び人体皮膚温度の予測が必要とされる。第3章では、非定常人体熱モデルとして、最も基本的な Multi-node 型モデルである Gagge らの 2-Node モデルに着目し、複雑形状を再現した数値人体モデルへの導入手法とその解析結果について報告している。更に高精度型の人体熱モデルである Stolwijk モデルの概要と数値人体モデルへの統合方法を示した上で、室内環境解析と連成解析した結果も示している。

これら既存の人体熱モデルは、呼吸に伴う熱・水分移動を予測するために工学分野で汎用的に使用している円筒を用いた実験結果としての物質移動を簡略に表現する対流熱伝達率・湿気伝達率を用い、気道内での均一性を仮定した上で熱移動量等が計算されている。人体各部位での熱移動計算の精緻さに比べて、呼吸器系の取り扱いが相対的に簡略化されている。人体熱モデルの高精度化のためには各熱輸送要素のモデル精度を向上させると共にパラメータ同定精度も併せて向上させる必要があるため、この問題意識より、第4章では、数値気道モデル内の熱・物質輸送現象を高精度に解析した上で、その結果を直接、人体熱モデルにフィードバックすることで人体熱モデルの呼吸熱損失に関連する予測精度を大幅に改良する手法を提案し、その有効性を数値解析にて検証した結果を報告している。

本研究で使用した完全統合型数値人体モデル(Computer Simulated Person)は、室内空間から鼻腔、口腔を介して気道内まで連続した解析領域を再現しており、その点の上、室内汚染物質発生を想定した解析により室内汚染物質濃度分布及び呼吸により流入された気道内汚染物質濃度分布までを高精度に予測することができる。第5章では、室内での汚染物質発生を仮定した上、CSP を用いた呼吸空気質及び気道内汚染物質暴露濃度予測シミュレーションの概要とモデル室内での感度解析結果に関して報告している。

第6章では、経気道暴露にともなる人体影響を定量的に評価するために、生理的薬物動態モデル PBPK モデルを CSP に組み込んだ高精度の統合連成解析モデル PBPK-CFD-CSP モデルを提案した上で、その詳細を解説している。本章では、ホルムアルデヒド(HCHO)を対象物質として設定し、室内で汚染物質が発生する場合の数値解析結果を一例として報告している。

第7章では、本論文全体で得られた結果を総括し、学術的・工学的な貢献に関して言及すると共に、今後の課題を整理している。