

研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
九州大学 総合理工学研究院	教授	伊藤 一秀

研究テーマ

数値人体モデルを統合した建物環境・エネルギーマネジメントシステムの開発

研究報告

1. 研究の背景と目的

地球環境問題・エネルギー問題を背景として、民生部門エネルギー消費の過半を占める建築分野においても徹底した省エネルギー性能の追求が求められている。同時に、省エネルギー化は居住者の健康や快適性といった側面を犠牲にして達成することは社会的に許容されないため、省エネルギー性能追求と、効果的な生活環境の質改善・快適性の維持・向上という相反する課題を両立させる建築環境設計法の確立と実運用時の環境・エネルギーマネジメントシステムに対する社会的需要が世界的に高まっている。室内の健康性と快適性に直接的な影響を与える環境因子の代表は、空気環境と熱環境と云えるが、室内空気環境に関する問題は、開放型燃焼器具の不完全燃焼に起因する高濃度短期暴露の問題から化学物質過敏症に代表される微量の揮発性有機化合物による低濃度長期暴露の問題、カビ・ダニ等の微生物に由来するアレルゲン等が相互に影響し合う複合的な環境問題である。特に近年では、数nmから数百 μm の粒径を有する各種エアロゾル粒子(PM2.5も含む)による空気汚染問題が顕在化しており、呼吸器疾患を始めとする各種のアレルギー症状を誘発する要因物質として対策が求められている。室内空気環境の改善のためには、室内環境中に存在する各種の汚染物質を対象とした正確な濃度分布予測とその予測結果を基にした建物環境マネジメント技術の確立が急務である。また、近年では地球温暖化・ヒートアイランドの影響もあり、特に夏期外気温の上昇が顕著であり、対応して室内空気温度が上昇し、高齢者を中心として熱中症の発症が社会問題化している。室内環境中での熱輸送は接触に伴う熱伝導、室内空気流動による対流熱伝達、電磁波による放射熱伝達に分類されるが、人体からの熱放散メカニズムは自らの代謝による熱生産の他、これら熱の移動メカニズムと周辺室内環境との相互作用の結果として決定する。特に皮膚表面からの熱移動は発汗による潜熱移動の他、対流と放射がほぼ半々であることが知られており、建築により形成される熱環境が人体生理に与える影響を正しく評価するためには、空気温度のモニタリングだけではなく、伝導・放射を含めた総合的な熱環境解析技術の確立が重要である。即ち、建物内外の熱負荷条件を反映した上で、人体周辺の正確な温度分布予測が重要であり、室内環境調整のための建物エネルギーマネジメント技術の確立が急務である。

このような背景のもと、本研究は数値人体モデルを統合した建物環境・エネルギーマネジメントシステムの基礎技術の開発を目指し、(i) 呼吸や発熱、皮膚温制御等の人体生理と人体形状を再現する数値人体モデルを開発した上で、(ii) 計算流体力学CFDによる建物内の不均一環境予測手法と連成解析する数値解析手法を構築し、更に(iii) 建物熱負荷・設備システムシミュレーション技術と統合することで、(iv) 建物環境・エネルギーマネジメントシステムのプロトタイプモデルを開発することを最終目的とする。

本研究では、特に単一空間を単独で制御する空調機(エアコン)を想定して、数値人体モデルによる人体生理出力を最適化するための空調制御法に関して検討を行った。

2. 研究成果および考察

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) 気道モデルを統合した数値人体モデルの開発

本研究では手足や頭部といった人体の詳細幾何形状をモデル化した上で、人体生理メカニズムを数値的に再現するため、鼻腔・口腔から気管支第四分岐までの呼吸器系、さらには皮膚(角質や上皮、真皮)のメカニズムを再現した総合的な数値気道モデルを作成した。呼吸器系部分は実人体のCTデータを基に形状構成した。本研究で作成した数値人体モデルはComputer Simulated Person (CSP)と呼ぶ。概要を図1に示す。

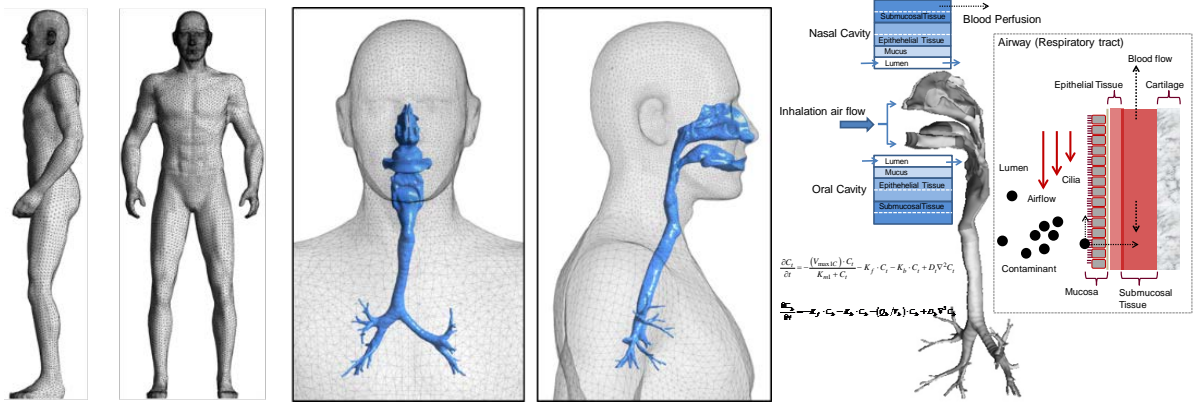


図1 気道モデルを組み込んだ数値人体モデル

図2 気道モデルとPBPKモデルの統合

(2) 経気道暴露予測モデル・人体熱モデルの組み込み

呼吸により気道内に輸送された汚染物質による人体暴露(経気道暴露)による人体影響を数値的にかつ定量的に予測するためには、呼吸器内の詳細な流体シミュレーションに加えて、気道粘膜上皮に沈着した汚染物質の人体内の生理的薬物動態をモデル化する必要がある。本研究では、気道モデル内の空気と粘膜上皮界面の境界条件としてPartition Coefficientを導入した上で、粘膜上皮から人体内の輸送モデルとしてphysiologically-based pharmacokinetic (PBPK)モデルを統合した。また、経皮暴露も再現するため、皮膚界面境界条件として同様のPBPKモデルを統合した。また、人体と周辺環境との熱交換に伴う皮膚表面温度制御メカニズムを再現するため、Stolwijk thermal regulation model (STRM)を皮膚界面境界条件として統合した。生理的薬物動態モデルを統合した数値人体モデルの概要を図2に示す。

(3) 室内空気・熱環境予測のための計算流体力学 CFD と数値人体モデルの統合 (CSP-CFD)

室内環境設計上は、居住者(人体)が快適で健康な環境を最小限のエネルギーコストで再現する、もしくは調整することが必須となる。人体周辺には非常に不均一性の強い流れ場、温度場、汚染物質濃度場が形成されるため、計算流体力学CFDによる環境解析と数値人体モデルを統合する必要がある。本研究では、汎用の熱流体解析コードに数値人体モデルCSPを統合することで、CSP-CFD連成解析手法を確立した。予備解析として実施した単純閉鎖空間内に人体モデルを設置し、床面にそって外気取り入れ口を設置した置換換気型の換気(0.5回/h)のみを行った場合の室内流れ場、温度場、汚染物質濃度場の解析例を図3に纏めて示す。図3に示す条件では、室内に設置した空調機(エアコン)は運転していない。人体はStolwijk thermal regulation modelによって生理発熱が再現されているため、人体上部に熱上昇流が確認できる。また、床面からホルムアルデヒドが一定速度で放散する条件を与えているため、室内にホルムアルデヒドの不均一な濃度分布が確認できる。

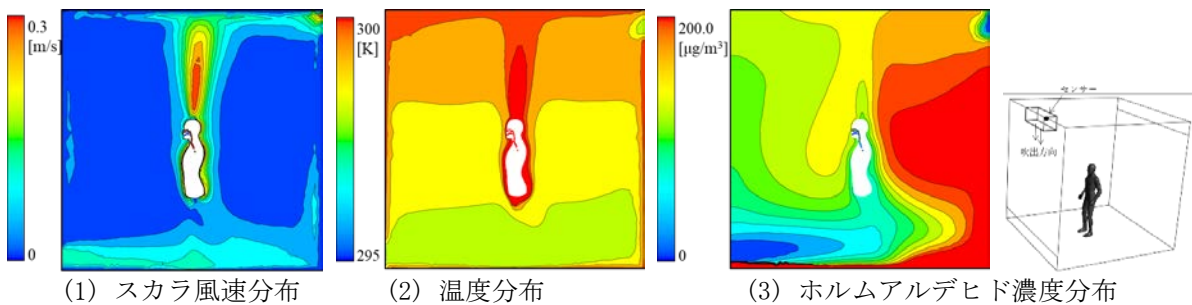


図3 置換換気のみを実施した場合の人体周辺流れ場、温度場、濃度場の解析結果

(4) 空調制御の目的関数として数値人体モデルを用いた CSP-CFD 連成解析(CSP-CFD-HVAC)

CSP-CFD連成解析を用いた環境最適化への展開として、単純室内に空調機(エアコン)が設置されたケースにて、人体呼吸空気質と皮膚温度の最適化を目指して空調制御するCSP-CFD-HVAC連成解析のアルゴリズムを作成し、解析を実施した。ここでは、制御アルゴリズムとして、呼吸空気質(人体モデルの気道内ホルムアルデヒドを80~100[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]の範囲に制御)と皮膚表面温度(T_{sk} =32~34[$^{\circ}\text{C}$]の範囲に制御)を目的関数として両者が制御範囲に入るよう、単純P制御を採用した結果を図4に示す。ここでは、空気質制御のために換気量が調整され、皮膚表面温度(熱的快適性)制御のためにエアコンへの投入熱量が調整されている。

図3に示した置換換気のための条件と比べ、空調機(エアコン)の運転に伴い、室内が完全混合場に近づき、温度分布ならびにホルムアルデヒド濃度分布が均一化している。

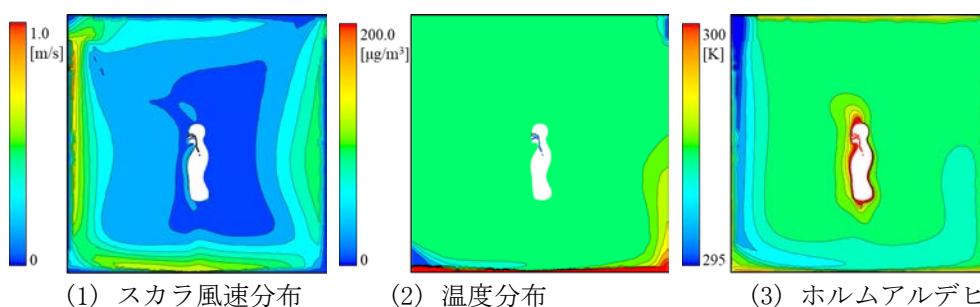


図4 置換換気に加えて空調機(エアコン)を運転した場合の人体周辺流れ場、温度場、濃度場の解析結果(人体モデルの呼吸空気質と皮膚表面温度をセンサしてエアコンをフィードバック制御)

3. 将来展望

本研究では経気道暴露評価のための呼吸器系モデルと皮膚温度制御のための人体熱モデルを統合した数値人体モデルCSPを作成し、計算流体力学CFDとの統合、さらには空調制御への適用に関して基礎的な検討を行った。今回は空気質制御のための換気系と皮膚温制御のための空調系を別に設定し、個別に単純P制御することで定常解を得たが、この方法では常に収束解を得ることが出来ないため、制御アルゴリズムの高精度化が必要である。この点に関しては、室内空気環境ならびに温熱環境に対する人体モデルの寄与を事前に予測して修正量を加えるフィードフォワード制御を加味した高次制御を検討中である。また、CFD解析は一般に計算負荷が大きく、非常に時間がかかることがネックであるが、本研究で開発したCSPは気道と人体幾何形状の再現で1000万メッシュ以上を要しており、非常に計算負荷が大きい。前節で示したCSP-CFD-HVAC連成解析においても、定常解を得るために4コア並列計算で1ヶ月の計算時間を要した。これでは実用上は全く役に立たないため、計算アルゴリズムの最適化に伴う計算速度の向上、さらには簡易型の数値人体モデルの開発が非常に重要な課題と認識している。

4. 研究発表

国際会議での関連成果の発表 1 件

- 1) Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito: Quantitative risk assessment of transient inhalation exposure using PBPK-CFD hybrid model with computer simulated person, COBEE 2018, Melbourne, Australia, pp417-419

国際会議への関連成果の投稿予定 1 件

- 2) Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito: Multi-stage optimization of local environmental quality by comprehensive computer simulated person as sensor for air conditioning control, 20th International Conference on Healthy Buildings, London, UK, November 19-20, 2018