

Multi-Scale Numerical Assessments of Breathing Zone Formation and Inhalation Exposure

イスラム モハメド サイド アボエルハムド

<https://hdl.handle.net/2324/7396279>

出版情報 : Kyushu University, 2025, 博士 (工学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名	ISLAM MOHAMED SAYED ABOUELHAMD			
論 文 名	Multi-Scale Numerical Assessments of Breathing Zone Formation and Inhalation Exposure (呼吸域形成と経気道曝露の定量予測に向けた数値解析技術の開発)			
論文調査委員	主査	九州大学	教授	伊藤一秀
	副査	九州大学	教授	池谷直樹
	副査	九州大学	准教授	道端拓朗

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

公衆衛生の観点で、様々な環境シナリオにおけるヒトの経気道曝露メカニズムの定量理解は非常に重要な課題である。本論文では、数値流体力学（CFD）と生理学的薬物動態（PBPK）モデリング技術を用いて、マルチスケールでの包括的な数値解析を実施することで、半屋外環境スケールにおける混雑シナリオにおける呼吸域（BZ）形成メカニズムを定量評価すると共に、呼吸域から鼻孔を介した鼻腔内嗅覚組織（細胞組織スケール）への臭気物質輸送確率、電子煙草使用に伴う一次・二次曝露量と健康影響評価を行っている。

まず、人体全体形状に加えて呼吸器系形状までを再現した CFD 解析用の数値人体モデルを作成し、半屋外環境条件のもとで流入風向を基準風速を段階的に変化させた場合の呼吸域(BZ)を網羅的に解析し、データベース化している。これまでの呼吸域評価では定常呼吸を想定していたことから、そのサイズを過大評価していたが、非定常呼吸サイクルを再現することで、1 回呼吸時に吸入する空気を正確に評価することが可能となり、既往研究と比較して非常に精度が高く、実用的な呼吸域(BZ)を可視化し、さらにその形成メカニズムまでを丁寧に議論している。

この数値解析フレームワークを有効に利用し、数値人体モデルに人体熱モデルを統合して生理発熱を再現した上で、半屋外環境条件として温度条件も加味した解析も実施しており、人体皮膚表面温度と周辺空気温度の温度差が呼吸域(BZ)形成に支配的な影響を与えることを示している。また、BZ 解析と同時に、混雑シナリオにおける各人体モデルの皮膚表面对流熱伝達率、風圧係数の分布も丁寧に解析しており、風速風向条件と空気温度条件別にそれらの関係に関して定量的な検討を加えている。

続いて、半屋外環境解析に適用した数値人体モデルの皮膚表面境界条件ならびに気道内粘膜上皮細胞組織の界面境界条件として独自にモデルパラメータ同定した生理的薬物動態(PBPK)モデルを統合し、様々なガス状汚染物質の経気道曝露、経皮曝露の定量予測を可能とする数値解析手法を確立している。この PBPK モデル統合型の数値人体モデルを用い、室内環境中の臭気輸送に関する一連の数値解析を実施し、特に主観評価による臭気強度評価メカニズムを説明可能な補完データを提供している。具体的には、鼻腔嗅覚領域に対する化学物質輸送効率、吸着フラックスの時間変化を化学物質別に示すことで被験者実験による臭気強度評価は、嗅粘液層における化学物質吸着量、粘膜組織の平衡濃度の変化と一定の相関があることを明らかにしている。これまでの臭気判定は主に被験者実験に依存し、その補完手法としてセンサー開発が進められてきたが、第 3 の手法として、数

値人体モデルを用いた数値実験法の可能性を大きく拓く研究成果と云える。

さらに、PBPK モデル統合型の数値人体モデルを室内での電子煙草使用時の一次、二次曝露シミュレーションにも適用し、E-liquid 中の主要化学物質 35 種類を同定して、全ての PBPK モデルパラメータを独自に同定した上で、電子煙草使用時の Puff モデルを実装することで、吸入時の経気道曝露量(1 次曝露)、呼出時の経気道曝露量と室内空気中への呼出量(2 次曝露)を計算し、データベース化した。室内環境規制を行う上で、電子煙草使用時の呼出空気中化学物質濃度のデータベースは非常に重要であり、Regulatory Science の成果としても非常に価値がある。

以上要するに、本論文は、生体流体解析モデルと生理的薬物動態モデルを統合した数値人体モデルを開発した上で半屋外条件を想定した環境シミュレーションに統合することで、高密度居住条件での呼吸域形成メカニズム、電子煙草使用時の一次・二次曝露量を 35 種類の化学物質毎に整理した研究成果を報告するものであり、建築環境工学分野の進展に寄与するところが大きく、価値ある業績であると認める。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認められる。