

Integrated multi-scale method to predict cross-ventilation effects on inhalation exposure risk through NWP?CFD and network modeling

アリシア マリア ムルガ アキノ

<https://hdl.handle.net/2324/1959154>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (工学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :

Name : Alicia Maria Murga Aquino

Title : Integrated multi-scale method to predict cross-ventilation effects on inhalation exposure risk through NWP-CFD and network modeling

(数値気候モデルと計算流体力学・ネットワークモデルを統合したマルチスケールモデルによる自然換気効果と経気道曝露リスクの評価)

Category : 甲

論文内容の要旨

Thesis Summary

PM2.5 に代表される粒子状物質が呼吸を介して体内吸収される経気道曝露の問題は、非常に深刻な健康影響が懸念されており、正確な予測技術と効果的な対策技術の開発が求められている。粒子状汚染物質は地球スケールでの輸送メカニズムを含む越境汚染物質であると共に、ディーゼル車や室内ガスストーブ等の局所的発生源も含む複合的な空気汚染物質である。この複合空気汚染は、全球気候スケール(数千 km・数百 km～数十 km)から都市・建築スケール(～数 m)、更には人体スケールから人体細胞スケール(～ μm)に及ぶ広範囲かつ複雑な環境汚染物質輸送の結果である。これらの広範囲な環境スケールは空気をキャリアとして連続しているため、精緻な健康影響予測のためには、多重階層となる全環境スケールを連続して統合・解析する俯瞰的な数値解析モデルが必要である。また、居住者が一日の過半をオフィスや自宅といった建築空間で過ごすことを鑑みれば、経気道曝露問題を議論する際に主に室内環境中での曝露を想定することに一定の合理性がある。この点では、多段階の環境要素を取り扱う中でも換気に伴う外気の室内導入の問題を精緻に予測評価するモデルの開発が必要となる。加えて、人体周辺にも不均一な流れ場、汚染物質濃度場が形成されるため、人体が呼吸する汚染物質濃度の正確な予測のためには、人体幾何形状に加えて各種の生理メカニズムを再現した上で、周辺環境との相互作用を合理的にモデル化する必要もある。

このような背景のもと、本研究は、全球スケールから人体呼吸器系の粘膜上皮細胞スケールまでの非常に広範囲な環境スケールを対象として、空気汚染物質輸送を連続して解析する数値解析手法の開発を目指す。特に全球スケールから建築都市環境スケールを、風環境・汚染物質輸送の解析を担う数値気象モデル(Numerical Weather Prediction: NWP)で解析し、引き続いて、建物周辺スケールから人体スケールまでの工学的な流体现象を計算流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)にて解析するダウンスケーリング解析手法を確立すると共に、経気道曝露の高精度予測に主眼を置いて、室内環境スケールの解析に、気道モデルを再現した数値人体モデルの統合を行うことで、高精度の経気道曝露シミュレーションモデルを構築するものである。

本論文は6章より構成されている。

第1章では、全球スケールから人体スケールまでの多重環境スケールを統合した数値解析モデルを構築するため、数値解析手法に関する広範囲な文献調査を行った結果を整理している。特に、本研究で着目する室内外の境界面となる建築物の開口部(窓面)を介した空気流動ならびにスカラ輸送の予測モデル、経気道曝露予測のための数値人体モデル開発、数値気道モデル開発に関して既往研究を整理している。

第2章では、全球スケールから都市スケールを対象とした汎用的な領域気象解析モデルである WRF (The Weather Research and Forecasting), 都市建築スケールから人体スケールまでの工学的な環境スケールを対象とした解析手法である CFD に関して、その基礎を整理している。CFD 解析は十分な解像度で使用すれば非常

に有益な情報を得ることがかろうであるものの、計算負荷が非常に大きい点が欠点である。そのため、計算負荷軽減のために、ネットワークモデルを用いた解析の可能性ならびにその概要についても整理している。

第3章では、全球スケールから都市スケールまでの解析に WRF を用い、それ以下の工学的な環境スケールの解析に CFD を適用する場合の力学的ダウンスケーリング手法、連成解析手法に関して整理している。計算負荷の軽減のため、一方向の連成解析 (One-Way Coupling) の可能性と予測精度についても議論している。加えて、気道暴露のリスク評価の際に、呼吸空気質と気道内濃度分布、さらには気道内の粘膜上皮濃度までを連続して解析するための数値人体モデルの開発に関する動向を整理した上で、本研究で使用した数値人体モデル(Computer Simulated Person: CSP)の概要を説明している。

第4章では、エルサルバドルに実在する工場空間を対象として、NWP-CFD のダウンスケーリング解析を実施した結果を報告している。特に、全球スケールから人体スケールまで連続した解析を行う際には、環境スケールと汚染物質輸送の時間スケールに大きな齟齬が生じるため、建物壁面で風圧係数を算出し、その値を用いた建物内解析を行う Quasi-coupling を適用することで、物理モデルとしての破綻を防ぐ方法を提案し、その可能性を検討した結果を整理している。また、室内環境解析に数値人体モデルを適用し、室内の空間平均濃度と経気道暴露濃度が大きく異なることを定量的に評価した結果を報告している。

第5章では、建物スケール以下の非定常流れ場・濃度場解析として、室内 CFD 解析に代えてフローネットワークモデルを連成する方法とフローネットワークを用いた場合の室内濃度予測精度に関して議論した結果を整理している。フローネットワークモデルを用いた解析では空間解像度に非常に制約があるものの、長期の時間スケールでの非定常解析が可能とする利点を定量的に明らかにしている。

最後に、第6章では、本論文で得られた結果を総括し、今後の課題を交えて整理している。