九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Flow visualization through particle image velocimetry and computational fluid dynamics in realistic model of rhesus monkey's upper airway

金, 智雄

https://hdl.handle.net/2324/1937186

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

（様式３）Form 3

Name　：　KIM Ji-Woong

Title：Flow visualization through particle image velocimetry and computational fluid dynamics in realistic model of rhesus monkey's upper airway

（PIV ならびに CFD を用いたアカゲザル上気道モデル内の流れ場の可視化）

Category　：　甲

論　文　内　容　の　要　旨
Thesis Summary

近年，*in vivo* や *in vitro* といった実験手法に加え，*in silico* の可能性に大きな期待が集まっている．「シリコン内で」を意味する *in silico* 手法は，数理モデルを基礎としたコンピュータ上での数値実験であり，非常に大きな自由度，例えば境界条件を変化させた多数のパラメトリックスタディが倫理的制約に配慮せずに実施できることなどが大きな魅力となっている．生活時間の過半を過ごす室内環境中での経気道暴露問題に着目すれば，この経気道暴露問題の本質的理解のために流体工学的な研究蓄積が求められている．この場合，実人体を用いた被験者実験(*in vivo*)には制約があるため，動物実験を実施してその結果を人間に外挿するか，模擬的な呼吸器系モデルを作成して実験室実験(*in vitro*)を行うことになる．実験の第一段階としてラット等の小型齧歯類や小形哺乳類であるイヌやサルを対象とした動物実験を行うことが一般的であるが,そのインパクトを人体スケールへ換算する必要がある．経気道暴露問題を実験動物とヒトで定量比較するためには，両者の鼻腔内流れ場，微粒子輸送現象，気道内沈着分布等の差違を定量的に把握することが本質的に重要な課題となる．

このような背景のもと，本研究ではサルの呼吸気系，特に上気道に着目し，経気道暴露問題とヒトへの外挿問題に本質的な基礎情報を提供する流れ場性状に関して検討を行う．本研究は，アカゲザルのコンピュータ断層撮影法(CT)による生体データを用いて，可視化計測を可能とする透明素材の上気道モデル(*in vitro* model)を作成した点，複雑幾何形状の上気道内流れ場を屈折率(RI)調整した Working Fluid を用いる手法で高精度の計測に成功したこと，実験用の *in vitro* モデルを完全に一致した CT データにて数値解析モデル(*in silico* model)を作成し，流れ場予測精度の検証を実施したこと，が特徴的な点であり，これらを 5 章構成にて整理している．

第 1 章では，本研究の背景，目的を簡潔に整理して述べると共に，気道モデルを用いた経気道暴露研究の動向，数値解析モデルの発展，可視化計測手法に関しても整理している．

第 2 章では，流れ場の可視化計測手法である粒子画像流速測定法（PIV：Particle Image Velocimetry)に関してその概要を整理して報告している．PIV はレーザーによる可視化と高速度カメラを用いた流れ場計測法であり，流動場に混入させた流体に追従するトレーサ粒子に光を照射し，その散乱光をカメラにて撮影することで画像として捉えた上で，計算機処理を経て速度ベクトルを二次元あるいは三次元的に計測する手法である．既に十分に実用化された技術であるものの，本研究で対象とする複雑幾何形状の気道内流れ場計測を行うためには独自の技術開発が求められる．本章では，アカゲザルの CT データを用いた上気道幾何形状の抽出方法，透明シリコン製の上気道モデル作成方法に関して独自の方法を提案した上で，NaI 溶液を用いた屈折率調整方法を提案することで，複雑な鼻腔・口腔内の流れ場を PIV 計測する方法に関して説明している．

第 3 章では，実験に対応した数値解析の概要に関して説明している．特にシリコン製上気道モデルと同一の幾何形状データを用いた CFD 解析用の数値上気道モデル作成方法，CFD 解析への適用方法，数値解析精度を担保するための Quality Control の手法に関して解説している．特に予測精度に与える影響が甚大なメッシュ分割に関しては，4 種類以上のメッシュデザインを採用してメッシュ依存性検討を実施して，最適な数値解析モデルの提案に至っている．また，*in silico* モデルを対象とした解析の基礎となる流体の数値シミュレーション手法に関して概説しており，特に閉鎖空間内の流れ場予測を行う際に使用する低 Re 型 k-ε モデルの概要に関して解説を行っている．

第 4 章では， PIV 計測結果と数値解析結果を比較することで，低 Re 型 k-ε モデルを用いた上気道モデル内流れ場解析精度に関して，定量的な検討を加えている．口腔内の平均流れ場予測ならびに流れが合流する咽頭部での予測精度に一定の問題があるものの，流れ場のレイノルズ数(Re 数)依存性や鼻腔内流れは，比較的精度良く再現可能であることを確認している．

第 5 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．