



Computational Fluid Dynamics Study of Airflow and Particle Deposition in Diseased Nasal Airway

著者	Vizy Nazira Binti Riazuddin
発行年	2018-03-23
その他のタイトル	疾患鼻気道における空気流と粒子堆積の計算流体力学的研究
学位授与番号	17104甲生工第315号
URL	http://hdl.handle.net/10228/00006783

氏名・（本籍）	Vizy Nazira Binti Riazuddin（マレーシア）		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	生工博甲第315号		
学位授与の日付	平成30年3月23日		
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	Computational Fluid Dynamics Study of Airflow and Particle Deposition in Diseased Nasal Airway（疾患鼻気道における空気流と粒子堆積の計算流体力学的研究）		
論文審査委員会	委員長	教授	山田 宏
		〃	石黒 博
		〃	宮崎 康次
		〃	工藤 奨
		〃	Mohd Khairol Anuar bin Mohd Ariffin
		〃	玉川雅章

学位論文内容の要旨

鼻腔および咽頭からなる上気道は、人の呼吸器系の最も重要な構成要素の1つであり、吸入した空気を加温して加湿することにより、最初に肺を保護する。また、汚染された浮遊粒子、細菌および病原体からの吸入空気を濾過する重要な役割を持っている。しかしながら、これらの上気道の生理的機能の能力は、気道を通る空気流の流体力学特性に大きく依存する。したがって、上気道の空気流の性質を理解することは、鼻の生理学を決定する上で、また鼻に関連する様々の異常の診断する上で、非常に重要である。鼻腔の複雑な解剖学的構造は、鼻閉塞疾患の理解に重大な障害であることがわかっている。また、鼻吸入は、大気汚染のための身体への主要な経路である。したがって、吸入した有毒粒子を濾過する上気道の機能は重要であると考えられている。上気道における全粒子濾過効率を求めると誘導病変部の正確な位置を決定することは、上気道損傷に関与する重要な要因を理解するための第一歩となる。この上気道の呼吸パターンの生理学を理解するためには、気道特性と上気道を通じた吸入粒子の輸送と堆積の理解が不可欠である。

一方、計算流体力学（CFD）は、その非侵襲性のために、個々の患者の上気道を通る局所的な呼吸流特性と同様、鼻形態学的変化に対する外科的介入の影響や鼻吸入手法を評価できるものとして利用されている。

本研究においては、健常者、慢性鼻閉塞および閉塞性睡眠時無呼吸(OSA)と診断された被験者のコンピュータ断層(CT)画像から3次元病変上部気道モデルを作成し、慢性疾患の鼻気道と閉塞性睡眠時無呼吸および疾患上気道での狭窄した咽頭を流れる空気流と、吸入された汚染物質の輸送と堆積の数値シミュレーションを行った。まず、様々な呼吸速度（7.5～40 l/min）での空気流の詳細な流れパターンおよび特性を評価した。次に、1～40 μ mの粒径を有する微小粒子の粒子輸送および堆積のシミュレーションも行った。

第1章では、研究目的を検討し、本研究の目的の概要を述べた。

第2章では、研究の背景について詳細に検討し、人の上気道の解剖学的および生理

学的機能について紹介し、続いてこの研究に関連する過去の研究を概説した。

第3章では、CT スキャンデータから3次元の疾患上気道の現実モデルを構築し、開発するための方法を示した。

第4章では、上気道計算モデルにおける空気流および粒子の輸送と堆積のCFDシミュレーションを実行するために使用される数値計算方法を示した。

第5章では、鼻腔形成術、特に、下鼻甲片切除および耳鼻咽腔部分切除が、実質的に鼻容積を増加させ、流れのはく離に影響をおよぼし、鼻道の圧力を低下させることや流動抵抗を減少させることがわかった。この計算された気道抵抗の結果から、手術後には同じ流量を肺に呼吸させるための圧力が少なく済み、呼吸が大きく改善されることがわかった。しかしながら、微小粒子の鼻吸入については、手術後のモデルでは全粒子の濾過効率が約50%低下した。したがって、手術後には、より多くの粒子が鼻腔路を通過して下気道に流れ込んでしまい、呼吸アレルギー歴を有する患者に悪影響を及ぼすことが予想された。

第6章では、上気道の形状は、空気流パターンおよび微小粒子の沈着率に有意に影響を及ぼすことがわかった。まず、後鼻孔からOSA領域までの圧力降下は、鼻道を通る圧力降下よりも大きいこと、すなわち、OSAの逆流挙動に及ぼす影響が大きいことがわかった。また、局所的な微粒子の堆積分布のCFDの結果から、大きな微粒子を濾過するのに上気道が重要な役割を果たすことが示された。さらに、微粒子径が増加するにつれて、粒子堆積の最大となる位置が上気道の前方部分に移動することがわかった。したがって、得られた局所的な微粒子堆積分布により、呼吸器病変の可能性が最も高い位置を特定することができることを示した。

第7章では、外科処置によって鼻気道の閉塞が解消され、吸入プロセス中の上気道を通る空気流の分布が改善することがわかった。気道抵抗の減少と咽頭領域で見られる負圧の減少により、OSA患者の呼吸の質が改善し、吸気中の咽頭損傷のリスクも低減することがわかった。また、鼻吸入については、吸入速度および微粒子直径が増加するにつれて、微粒子の総堆積効率が増加した。特定の領域における微粒子の総堆積効率および粒子堆積率は、上気道の形状によって大きく変化することがわかった。手術後には上気道の形状が変化するため、手術前の形状と比較して、局所的な粒子堆積の高い場所（ホットスポット）が異なる位置に発生することを示した。

第8章では、実験と数値解析から得られた結果の間の比較によって、数値計算(CFD)および実験から得られた圧力降下間の差が約3.3%で、有意に小さいことがわかった。したがって、数値シミュレーションの精度の高さが示され、本研究で使用された数値解析手法が、鼻気道の生理や外科処置のための様々な形態学的形状検討のためのパラメトリックな研究を行うために使用できることを示した。

第9章では、本論で得られた主要なまとめを示し、今後の課題についても述べた。

学位論文審査の結果の要旨

本論文は、疾患鼻気道における空気流と粒子堆積のCFDによる研究であり、慢性鼻閉塞や閉塞性睡眠時無呼吸の疾患をもつ患者と健常者のCT画像から3次元上部気道モデルを作成し、慢性疾患の鼻気道や狭窄した咽頭を流れる空気流と吸入された汚染物質の輸送と堆積のCFDシミュレーションを行い、(1)鼻腔形成術による流動抵抗の減少、(2)上気道形状の空気流パターンおよび微小粒子の沈着率への影響の大きさ、(3)鼻腔形成術による鼻気道の閉塞解消と、吸入プロセスで上気道を通る空気流の分布改善、について明らかにしている。本論文で提案された方法は、鼻腔形成術での手術計画や術後予測などのCFDの医療への貢献が期待できる。

また、公聴会においても、多数の出席者があり、種々の質問がなされたが、いずれも

著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上により、論文審査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。