

## 数値人体モデルに統合可能な呼吸器系モデルの開発

Development of Respiratory Air Tract Model that can be integrated into Computer Simulated Person

九州大学総合理工学研究院 准教授 伊藤 一秀

### (研究計画ないし研究手法の概略)

多様化する室内環境問題に対応した室内環境設計を達成するため、各種の室内環境要素を入力として人体の生理・心理反応を再現する数値人体モデルの開発が求められている。本研究は室内の熱・空気環境に起因する人体生理反応を高精度に再現する数値人体モデルの開発を行うもので、特に数値人体モデルに組み込み可能な呼吸器系モデルの開発を行う点に主眼がある。

人体の呼吸器系は、肺では静脈血中の二酸化炭素と酸素のガス交換を主たる目的とするが、鼻腔・口腔から気管支までの気道内では、内壁面と呼吸空気の間で熱交換、物質(湿気や各種汚染物質)交換が行われるため、体温調整メカニズムや各種汚染物質による経気道暴露問題を理解する上で重要な要素となる。

鼻腔・口腔から気管支・肺までを再現した呼吸器系モデル(数値気道モデル)の開発と、気道内流れ場、熱・水分移動現象、汚染物質の気道内沈着の解明は、工学の枠組みを超え、医学・公衆衛生学分野に跨がる研究課題であり、数値気道モデルの開発と数値人体モデルへの組み込みは、過去に例の無い独創的な研究課題である。本研究の成果は、これまでの室内環境設計への貢献に留まらず、感染制御問題や経気道を利用した医薬品開発・薬剤搬送システムの開発にも関連する波及効果の大きい課題である。

本研究では汎用的な数値気道モデル(呼吸器系モデル)の開発を目指し、当初の研究計画に従って研究を実施した。以下、成果を個別課題毎に成果を整理して報告する。

### (実験調査によって得られた新しい知見)

#### [1] 実人体のCT(コンピュータ断層撮影)データを基にした数値気道モデル・アクリル製気道モデルの作成

日本人ならびに西洋人のボランティアデータを用いて、実人体のCT画像より、鼻腔・口腔から気管支第四分岐までの呼吸器系幾何形状を抽出し、2種類の数値解析用の気道モデル(Model(A)ならびにModel(B))を作成した。その結果を表1に示す。またModel(A)のSTLデータを用いて3Dプリンタにてアクリル製気道モデルを作成した。その結果も表1中に執権装置と共に示す。

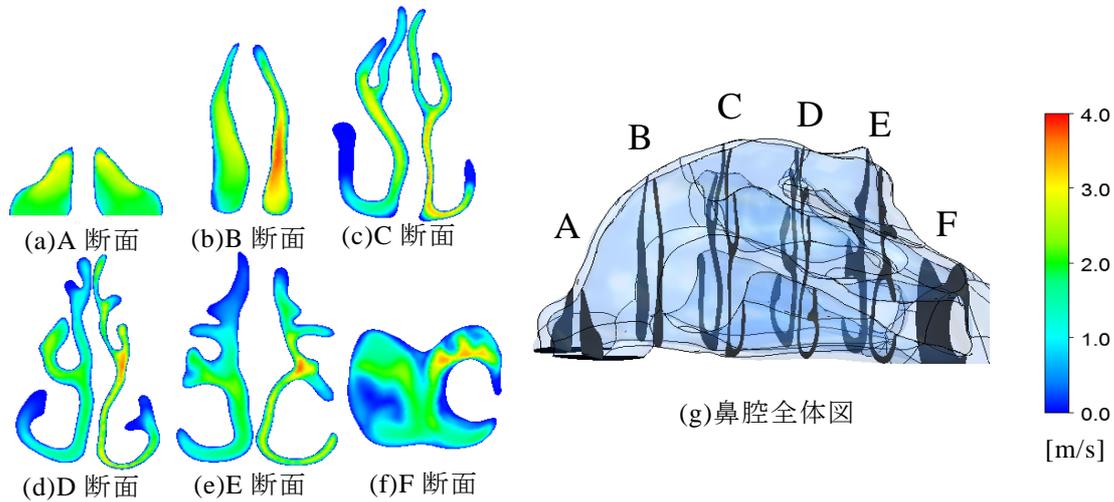
表1 数値気道モデルの概要

	Model(A)	Model(B)
Height(m)	0.34568	0.27381
Surface Area(m <sup>2</sup> )	0.057967	0.044637
Volume(m <sup>3</sup> )	0.00017336	0.00012862
Loading Factor(m)	0.0029908	0.0028814

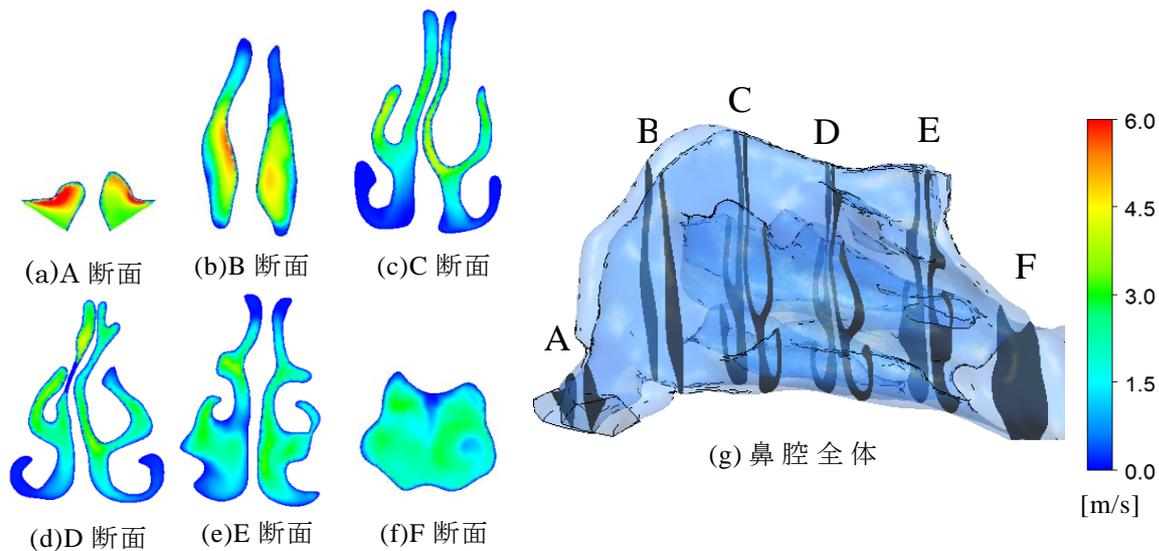


## [2] 数値気道モデルを対象とした流れ場・温度場の数値解析

上記[1]で作成した2種類の数値気道モデルを対象として、内壁面近傍での境界層内部までを詳細に再現した数値解析(CFD解析)を実施することで、気道内詳細流れ場把握の他、気道内の対流熱伝達率データベースを作成した。鼻腔内流れ場解析結果を図1に、気道内対流熱伝達率解析結果を図2に示す。



(1) Airway Model (A)の鼻腔内各断面図におけるスカラ風速分布の解析結果(30L/min)



(2) Airway Model (B)の鼻腔内各断面におけるスカラ風速分布の解析結果(30L/min)

図1 鼻腔内各断面におけるスカラ風速分布の解析結果

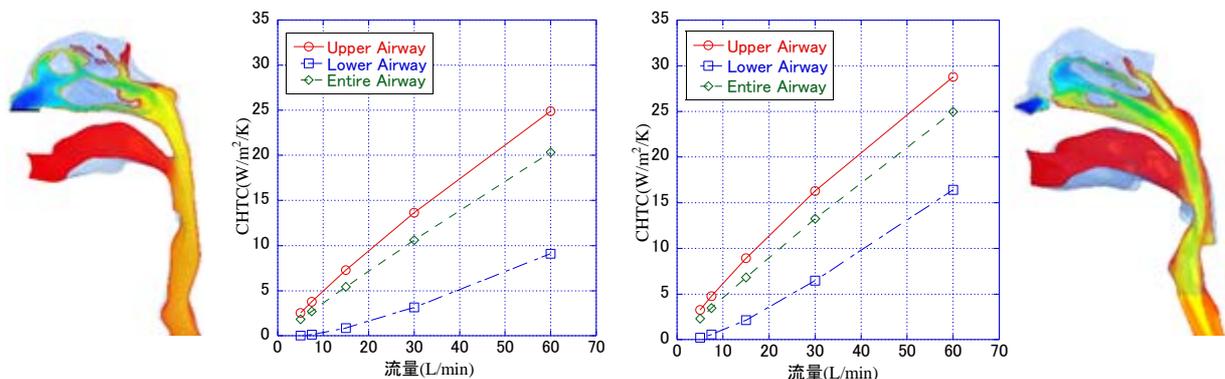


図2 対流熱伝達率解析結果 (左図: Airway Model (A)/右図: Airway Model (B))

### [3] アクリル製気道モデルを用いたPIV (粒子画像速度計測法)による気道内流れ場計測

アクリル製気道モデルを対象として気道内流れ場の高精度計測を実施した。アクリル製気道モデルは複雑な幾何形状であり、PIV(Particle Image Velocimetry: 粒子画像速度計測法)にて気道内の2次元流れ計測を行うためには、照射するレーザーシートの屈折を補正する必要がある。本研究ではアクリルの屈折率( $RI$ )と同一となるよう密度調整したポリタングステン酸ナトリウム水溶液をWorking Fluidとして用い、 $Re$ 数一致を条件としたPIV実験を実施した。この測定は独創性が高く、学術的なインパクトも大きい計測手法である。PIV実験系の概要を図3に、気管位置でのPIVによるスカラ風速分布とCFDによる解析結果を図4に併せて示す。PIVとCFDは十分に良い一致を示した。

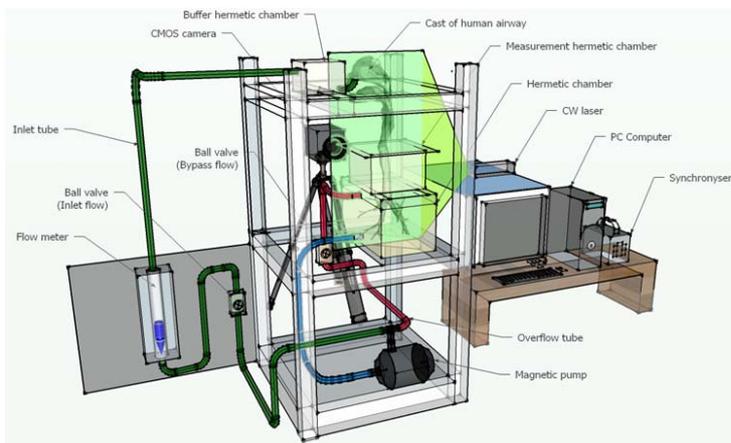


図3 PIV実験系の概要

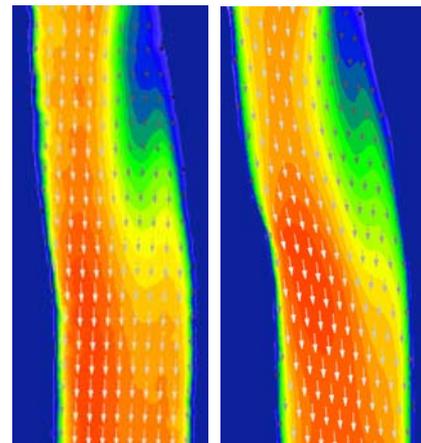


図4 スカラ風速分布 (左図PIV/右図CFD)

### [4] 数値気道モデル統合型Computer Simulated Personの作成

申請者が開発している人体幾何形状を詳細に再現した数値人体モデルVirtual Manikinの鼻孔面・口腔・唇面と幾何形状、メッシュデザインを完全に同一とした数値気道モデルVirtual Airwayの流入境界面を作成した上で、両者を連続したメッシュにて統合し、数値気道モデルVirtual Airwayを内包した数値人体モデルVirtual Manikin、すなわち数値気道モデル統合型Computer Simulated Personを作成した。作成したComputer Simulated Personを図5に示す。

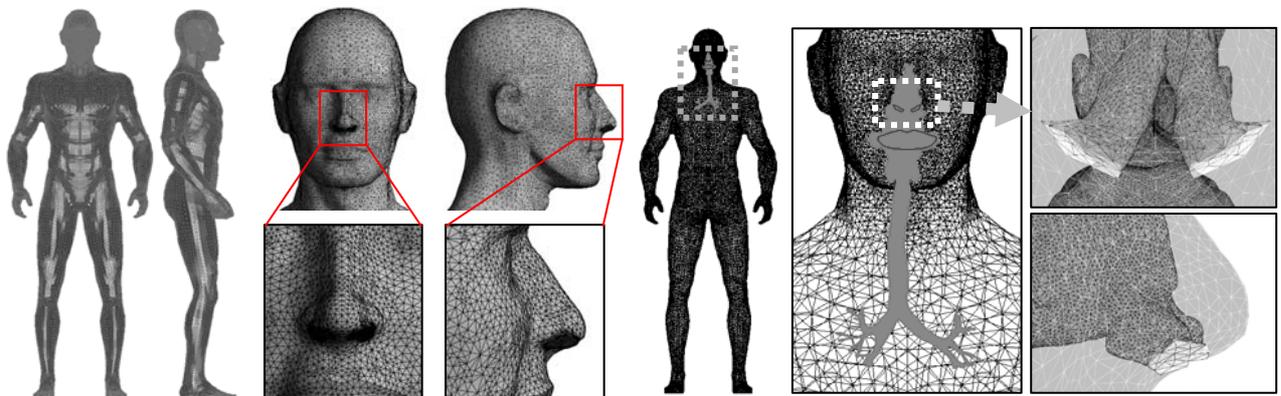


図5 人体表面幾何形状を再現したVirtual Manikinと数値気道モデル統合型Computer Simulated Person

### [5] 気道モデルを統合したComputer Simulated Personと人体熱モデルの統合

数値気道モデル内の熱・湿気移動解析を行うことで、皮膚温制御を目的とした人体熱(生理)モデルの予測精度改善に寄与することが可能であり、また、気道内の汚染物質濃度場を解析

することで、高精度に経気道暴露濃度の情報を提供することも可能となる。

本研究では、気道内流れ場と熱・湿気移動解析を連成して解析した上で、気道内での対流熱伝達量・湿気熱伝達量を人体熱モデル(2Nodeモデル)にフィードバックすることで、数値人体モデルの皮膚表面温度制御アルゴリズムの高精度化を達成する解析手法を確立した。図6には人体モデルに非定常呼吸サイクルモデルを適用し、室内側呼吸域周辺流れ場を解析した結果を示す。また図7には人体熱モデル(2Nodeモデル)を用いて人体皮膚表面での各生理量を予測した結果を示す。

図8は室内での汚染物質濃度分布解析結果と連成して解析した数値気道モデル内の汚染物質濃度分布の非定常履歴を示す。

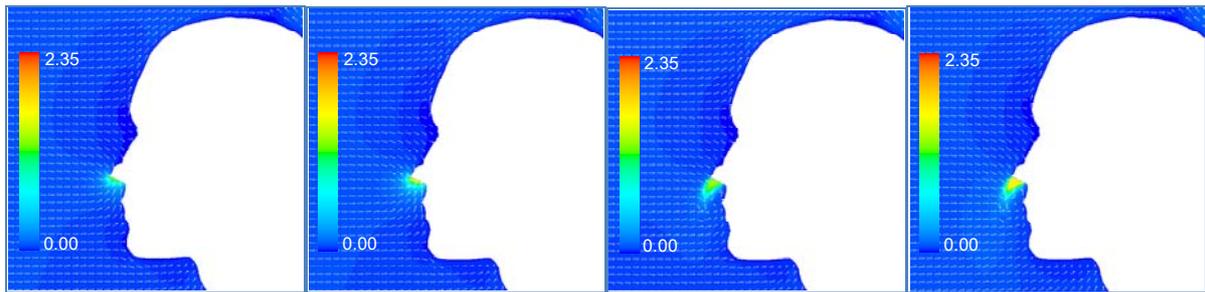
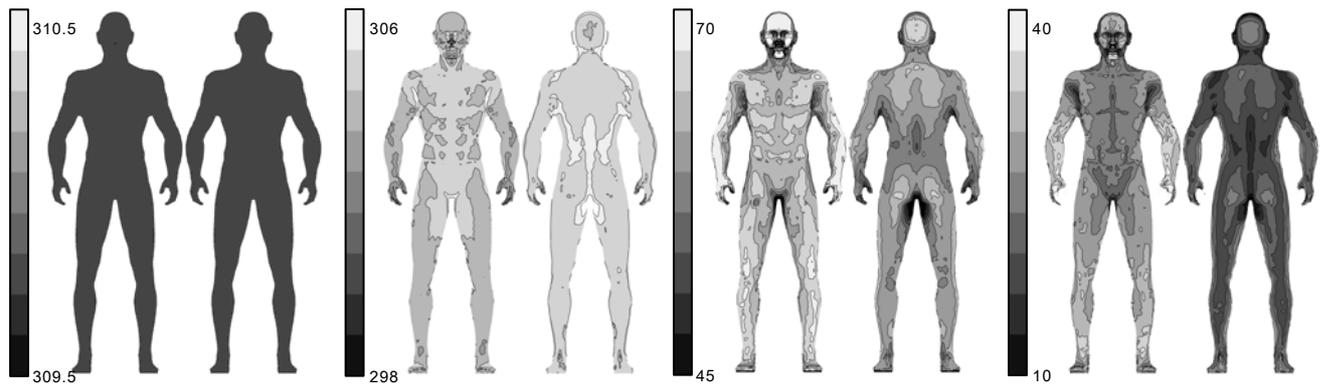


図6 室内側呼吸域周辺流れ場の解析結果



(1) Core temperature [K] (2) Skin surface temperature [K] (3) Sensible heat flux[W/m<sup>2</sup>] (4) Latent heat flux[W/m<sup>2</sup>]

図7 人体熱モデル(2Nodeモデル)を統合したComputer Simulated Personの解析結果

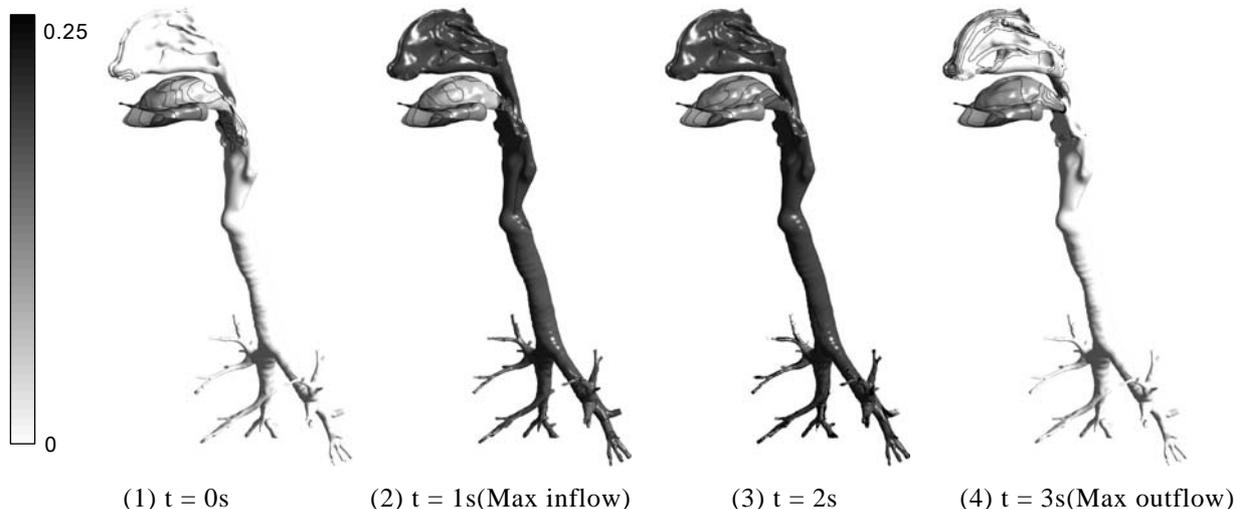


図8 経気道暴露濃度シミュレーション結果 (気道内表面の汚染物質濃度分布)

## [6] まとめ

血管内の血流予測や脳動脈瘤の解析といった生物学と流体力学の境界領域に着目した生体流体力学分野の研究が注目を集めており、非常に競争の激しい研究分野の一つとなっている。本申請課題はこの生体流体力学分野の研究課題に分類されるが、国内で人体の呼吸器系を対象とした流体现象に着目した研究を行っているのは申請者らのグループのみである。

建築分野では数値人体モデルを用いた室内環境予測に関する研究に充実した蓄積があり、この数値人体モデルに統合可能となるよう数値気道モデルを開発することで、生体流体力学分野のみの成果に留まらず、室内環境設計に応用可能な成果となるよう綿密に研究計画を立案し、研究を実施した。

これらの成果は、国際会議プロシーディングスとして5報の論文として報告すると共に、審査付き論文3報(1報は査読中)として発表している。

### ( 発表論文 )

- [1] Toshiki Matsuo, Sung-Jun Yoo, Nguyen Lu Phuong, Kazuhide Ito : Development of Computer Simulated Person with Numerical Airway model, Part 1 Analysis of Breathing Contaminant Concentration and Respiratory Exposure : **Indoor Air 2014**, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, Paper ID: HP0532
- [2] Sung-Jun Yoo, Toshiki Matsuo, Nguyen Lu Phuong, Kazuhide Ito : Development of Computer Simulated Person with Numerical Airway model, Part 2 Improved Thermo-Regulation Model with Heat and Moisture Transfer Detail Analysis in Respiratory Tract : **Indoor Air 2014**, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, Paper ID: HP0541
- [3] Masato Yamashita, Nguyen Lu Phuong, Kota Hirase, Kazuhide Ito : Numerical Simulation of Airflow, Heat and Particle Transfer in Human Respiratory System : **Indoor Air 2014**, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, Paper ID: HP0534
- [4] Kota Hirase, Nguyen Lu Phuong, Shin-ichiro Aramaki, Kazuhide Ito : Visualization of Air Flow Pattern in Human Respiratory Tract by Particle Image Velocimetry : **Indoor Air 2014**, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, Paper ID: HP0533
- [5] Yosuke Kadota, Toshiki Matsuo, Sung-Jun Yoo, Nguyen Lu Phuong, Kazuhide Ito : Development of Computer Simulated Person with Numerical Airway model, Part 3 Breathing Air Quality Prediction by Improved Unsteady Breathing Flow Model: **Indoor Air 2014**, The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, Paper ID: HP0732
- [6] Nguyen Lu Phuong, 平瀬公太, 荒巻森一朗, 伊藤一秀 : アクリル製詳細モデルを用いた気道内流れ場のPIV計測とCFD解析結果の精度検証 : 空気調和衛生工学会論文集, No.207, 2014.06, pp1-7
- [7] Sung-Jun Yoo, 伊藤一秀 : 数値気道モデル内の対流熱伝達解析による人体熱モデルの改良気道モデルを統合した数値人体モデルの開発 第1報, 日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No. 709, 2015.03, pp229-238
- [8] Sung-Jun Yoo, 伊藤一秀 : 完全統合型数値人体モデルの概要と経気道暴露濃度解析 気道モデルを統合した数値人体モデルの開発 第2報, 日本建築学会環境系論文集, [審査中](#)