

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630059

研究課題名(和文) 医用画像に基づくバイオトランスポート解析による鼻腔形成手術アセスメント

研究課題名(英文) Assessment of surgical rhinoplastic intervention using biotransport analysis based on medical images

研究代表者

田中 学 (TANAKA, GAKU)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20292667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：鼻腔は非常に複雑な形状をしており、吸入空気を適切な温度に調整するエアコンディショニング機能などの重要な機能を果たしている。これらの機能に関連して、近年ではCTやMRIなどの医療画像から3次元実形状が再構築され、鼻腔内気流のCFD解析が行われている。従来の解析では鼻腔の複雑形状に応じた境界適合格子及び非構造格子が用いられているため、その格子生成には高度なノウハウ、多大な労力・時間が必要となる。本研究では、3次元画像情報を直交格子(ボクセル)で分割するボクセル格子法に基づく鼻腔のバイオトランスポート解析モデルを構築し、鼻腔形成手術アセスメントシステムとしての有効性について検討した。

研究成果の概要(英文)：The nose plays an important role by warming inspired air. Thus, modeling of air-conditioning in the nasal cavity is important for evaluating nasal functions. Recently, the nasal cavity geometry is reconstructed from in vivo acquired CT or MRI scans of the nasal passages, and computational fluid dynamics (CFD) simulation is carried out. The present research investigates the potential for voxel-based modeling of air-conditioning in the nasal cavity to provide a quantitative evaluation of nasal functions of individual subjects. The effectiveness of voxel-based modeling for the predictive assessment of surgical interventions was discussed.

研究分野：機械工学

キーワード：熱工学 生体熱工学 熱・物質移動

1. 研究開始当初の背景

近年、花粉症等アレルギー性鼻炎患者の内視鏡による鼻腔形成手術が急増している。これまでに、手術前後における鼻腔内気流解析の手術アセスメントへの応用が試みられているが、鼻腔の通気性のみの評価は、医師の診断所見、患者の訴える症状や感覚と一致しないことも多い。鼻腔内気流の流動状態のみならず、生命活動の維持に不可欠な鼻腔の化学物質を検知する嗅覚機能、吸入空気の加温・加湿機能、さらにウイルスや花粉等の異物除去機能等のバイオトランスポートを新たに評価することにより、鼻腔形成手術アセスメントの高度化が期待される。

また、従来の鼻腔内気流解析においては鼻腔の複雑形状に応じた境界適合格子及び非構造格子が用いられているため、その格子生成には高度なノウハウ、多大な労力・時間が必要となる。そのため、医療現場で簡易に実施することが可能であり、かつ解析結果がオペレータ依存となる危険性の少ない新規の解析手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

CTやMRIなどの医療画像情報が直交格子（ボクセル）で表現されていることに着目し、ボクセルを直接計算格子に利用することによる簡易な鼻腔内バイオトランスポート解析手法の提案を行う。ボクセル熱流体解析モデルを構築して鼻腔機能のシミュレーションを行い、バイオトランスポート解析による手術アセスメントの有効性について検討する。

3. 研究の方法

図1に鼻腔ボクセルモデルの構築について概要を示す。解像度 0.488×0.488 mm/pixel、スライス間隔 0.400 mm の CT 画像より、鼻腔流路と顔面形状を抽出した二値化画像を積層し、上部気道を含む頭部の3次元ポリゴンモデルを再構築した。ポリゴンモデルを直方体のバウンディングボックスで取り囲み、その内部を一辺の長さが 0.2 mm の立方体ボクセル格子に分割した。総格子数は約 7300 万である。各ボクセル格子は、格子内の流体・固体領域の体積比率 0.5 を閾値として、流体セルまたは固体セルとして取り扱われ（バイナリボクセル）、流体・固体の境界面は階段状に近似される。ボクセルモデルの構築には、理化学研究所 VCAD システム研究プログラムのプリプロセッサ V-Xgen 1.5 及び V-Xpp 1.5 を使用した。

固体セルについては、気流との熱伝達によって温度が変化する壁面の粘膜層セルと、深部で一定温度を維持する熱源セルを設定した。図2の鼻腔断面図において、白色格子が流体セル、灰色格子が一定温度を維持する熱

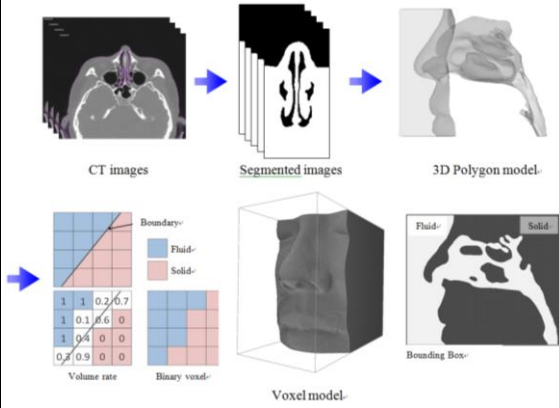


図1 鼻腔ボクセルモデルの構築

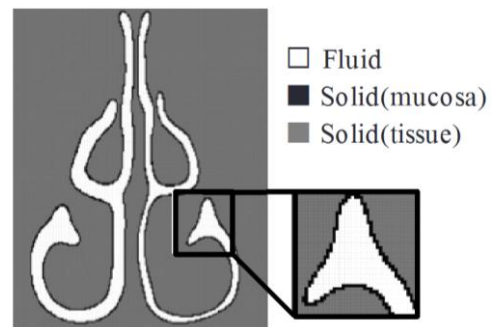


図2 流体、固体（粘膜層、組織）セルの設定

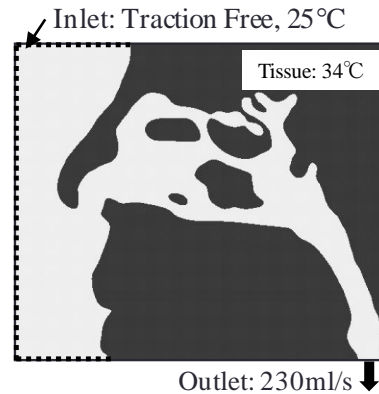


図3 境界条件

源セル、黒色格子が熱源・流体間の熱伝導を考慮するために配置した粘膜層セルを表している。

基礎方程式に連続の式、運動量保存式、エネルギー保存式を用いて、吸気流れの3次元非定常熱流体解析を行った。数値計算には熱流体ソルバーV-Sphere, CBC-1.4.0（理化学研究所 VCAD システム研究プログラム）を使用した。

境界条件として、喉部断面にヒトの生理的呼吸条件を参考にして 230 ml/s の吸気一定流量条件を与えた（図3）。鼻弁部のレイノルズ数は左鼻腔で約 830 、右鼻腔で約 600 であ

る。外部境界にはトラクションフリー条件及び 25 °C の温度一定条件を与えた。後述する Keck ら [1], Lindemann ら [2] の生体内 (in-vivo) における温度測定結果を参考にして、熱源セルには 34 °C の温度一定条件、粘膜層セルには熱抵抗値 0.0050 K/W を与えた。流体セルの初期温度を 25 °C, CFL 数を 0.1 として計算を行った。

4. 研究成果

図 4 及び図 5 に、鼻腔内各断面における気流の温度分布と、断面平均温度の鼻先からの距離に対する変化を示す。図 5 より、本モデルによる計算値は、白丸のプロットで示す Keck ら [1] の in-vivo 測定結果と良く対応していることがわかる。特に鼻腔入口から鼻弁部付近でみられる温度上昇の傾向が良く捉えられており、本モデルにおける粘膜層・組織セル、及び粘膜層熱抵抗値等の設定が妥当であると考えられる。

図 6 に、左右鼻腔を隔てる鼻中隔の壁面温度分布を示す。図より、温度低下の大きな部位は左右鼻腔いずれにおいても鼻腔入口付近の断面積縮小部位 (鼻弁部) の下流領域であり、その温度低下は最大 3 °C 程度であることがわかる。鼻腔内の吸気流れには、鼻弁部でジェットが生じ、下鼻甲介等に衝突する流れのパターンがみられた。従って、ジェットの発生がこの部位の壁面温度低下に影響を及ぼしていると考えられる。

図 7 に、左右鼻中隔の壁面温度 (L, R), 及び平均温度 (average) を、鼻先からの距離に対して示す。白丸のプロットは、Lindemann ら [2] の in-vivo 測定結果である。本モデルによる計算値と in-vivo 測定温度はいずれも鼻先から 20 mm 付近で 30 °C 程度に低下する傾向を示していることから、粘膜層セルを考慮した本モデルによって、鼻腔壁面温度変化の特徴が良く捉えられていると考えられる。

本研究では、鼻腔内バイオトランスポートを解析するための粘膜層セルを用いたボクセルモデルを構築した。ボクセルモデルによる鼻腔内気流と鼻中隔の温度分布の計算結果は従来の in-vivo 測定結果と良く対応することから、本モデルの妥当性を検証することが出来た。

参考文献

- [1] Humidity and temperature profile in the nasal cavity, T. Keck, R. Leiacker, A. Heinrich, S. Kuhnemann, G. Rettinger, *Rhinology*, Vol. 38, pp. 167-171, 2000.
 [2] Nasal mucosal temperature during respiration, J. Lindemann, R. Leiacker, G. Rettinger, T. Keck, *Clin. Otolaryngol.*, Vol. 27, pp. 135-139, 2002.

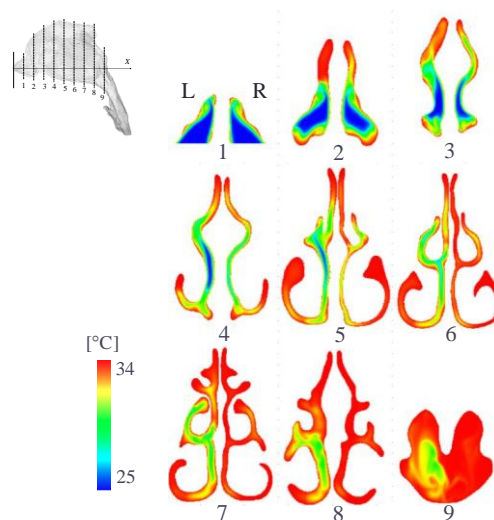


図 4 各断面内の気流温度分布

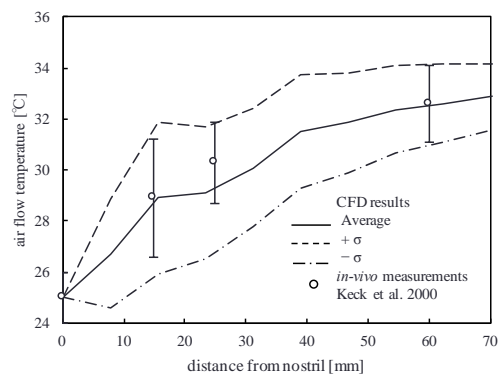


図 5 気流温度と鼻先からの距離との関係

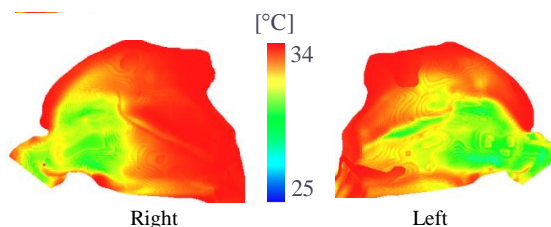


図 6 左右鼻中隔の壁面温度分布

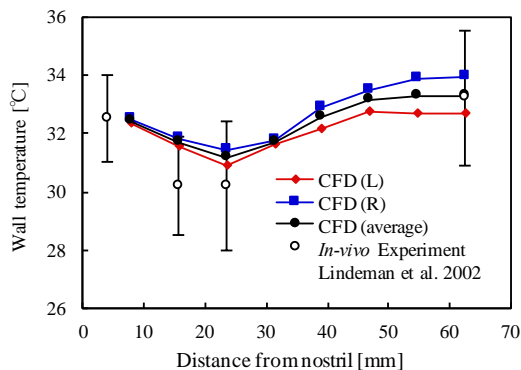


図 7 鼻中隔温度と鼻先からの距離との関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- (1) Voxel-Based Simulation of Air-Conditioning in the Human Nasal Cavity, S. Kimura, Y. Kimura, T. Sakamoto, G. Tanaka, T. Sera, H. Yokota, K. Ono, Proceedings of the 4th International Forum on Heat Transfer, 6 pages, 2016.11, 査読有
- (2) Effect of Inflow Boundary Condition on Nasal Transitional Flow, S. Shimizu, T. Sakamoto, S. Kimura, G. Tanaka, T. Sera, H. Yokota, K. Ono, Proceedings of the 2016 Summer Biomechanics, Bioengineering and Biotransport Conference, 2 pages, 2016.6, 査読有
- (3) 鼻腔内熱流動ボクセル解析における横断面医療画像二次元補間の有効性, 磯部光基, 木村祐介, 木村真也, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 田中学, 生体医工学, Vol. 53, No. 3, pp. 160-167, 2015.10, 査読有
- (4) Visualization of Particle Deposition in Human Nasal Cavities, H. Sakai, Y. Watanabe, T. Sera, H. Yokota, G. Tanaka, Journal of Visualization, Vol. 18, No. 2, pp. 349-357, 2015.5, 査読有
- (5) Voxel-Based Simulation of Air-Conditioning in the Human Nasal Cavity, G. Tanaka, F. Araki, S. Shimizu, T. Sera, H. Yokota, K. Ono, Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC15-9119, 11 pages, 2014.8, 査読有

[学会発表] (計 13 件)

- (1) 嗅動作時の鼻腔内流れ可視化計測, 大家健司, 清水崇文, 世良俊博, 横田秀夫, 田中学, 日本機械学会第 29 回バイオエンジニアリング講演会, 2017.1.19, 愛知県産業労働センター ウィンクあいち
- (2) 木村祐介, 木村真也, 田中学, 世良俊博, 小野謙二, 嗅動作時における鼻腔内流れのボクセルシミュレーション, 生体医工学シンポジウム, 2016.9.18, 旭川市大雪クリスタルホール国際会議場
- (3) 鼻腔内遷移流れの可視化計測, 齋藤誠, 大家健司, 世良俊博, 横田秀夫, 田中学, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.9.12, 九州大学 伊都キャンパス
- (4) 鼻腔内遷移流れに及ぼす流入速度分布の影響, 坂本隆, 清水駿, 木村真也, 田中学, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.9.12, 九州大学 伊都キャンパス
- (5) Direct Numerical Simulation of Nasal Airflow, S. Shimizu, T. Sakamoto, S. Kimura,

G. Tanaka, T. Sera, H. Yokota, K. Ono, 28th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, 2016.5.10, 神戸国際会議場

- (6) 鼻腔内遷移流れの数値シミュレーション, 清水駿, 木村真也, 田中学, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 日本機械学会第 28 回バイオエンジニアリング講演会, 2016.1.9, 東京工業大学 大岡山キャンパス
- (7) 鼻腔内遷移流れの数値シミュレーション, 清水駿, 木村真也, 田中学, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015.9.15, 北海道大学 札幌キャンパス
- (8) 医療画像に基づくボクセルモデルを用いた鼻腔内熱流体シミュレーション, 磯部光基, 木村祐介, 木村真也, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 田中学, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015.6.3, 福岡国際会議場
- (9) 磯部光基, 木村祐介, 木村真也, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 田中学, 医療画像から直接構築されたボクセルモデルを用いた鼻腔内熱流体シミュレーション, 日本機械学会第 27 回バイオエンジニアリング講演会, 2015.1.9, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター
- (10) 折茂佳名人, 林夢愛子, 世良俊博, 横田秀夫, 田中学, 鼻腔内遷移流れの可視化, 日本機械学会第 27 回バイオエンジニアリング講演会, 2015.1.10, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター
- (11) 磯部光基, 木村祐介, 木村真也, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 田中学, 医療画像から直接構築されたボクセルモデルを用いた鼻腔内熱流動解析, 生体医工学シンポジウム, 2014.9.26, 東京農工大学 小金井キャンパス
- (12) Visualization of Transitional Flow in Nasal Cavities, G. Tanaka, T. Nishizawa, Y. Yokoyama, T. Sera, H. Yokota, D.J. Taylor, D.J. Doorly, R.C. Schroter, 7th World Congress of Biomechanics, 2014.7.10, John B. Hynes Veterans Memorial Convention Center, Boston, USA
- (13) Voxel-Based Modeling of Air-Conditioning in Nasal Cavities, F. Araki, S. Shimizu, S. Kimura, G. Tanaka, T. Sera, H. Yokota, K. Ono, 7th World Congress of Biomechanics, 2014.7.10, John B. Hynes Veterans Memorial Convention Center, Boston, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 学 (TANAKA GAKU)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20292667