

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010年度～2012年度

課題番号：22560187

研究課題名（和文）ボクセル熱流体シミュレーション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 Voxel-based Thermo-fluid Simulation

研究代表者

田中 学（TANAKA GAKU）

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20292667

研究成果の概要（和文）：鼻中隔湾曲症等の鼻腔疾患に対して行われている外科手術の効果を詳細に評価するツールの開発を目指して、実際に鼻中隔矯正及び鼻甲介切除を施した手術前後の医療用CT、MRI画像から3次元実形状鼻腔モデルを作成し、ボクセル格子法を用いた熱流体シミュレーションにより鼻腔内の流れ場と温度場の解析を行った。これらの結果から、ボクセルシミュレーションによる鼻腔形成手術アセスメントに関してその有用性を確認することができた。

研究成果の概要（英文）：This work describes a new approach to provide detailed quantification of the impact of surgical intervention on bilateral nasal airflow using voxel-based thermo-fluid simulation. CT and MRI scans were used to reconstruct 3D virtual models of both the pre- and post-operative nasal airways, respectively, of a patient who presented with a deviated septum. Voxel-based simulations were applied to enable the characteristics of inspiratory nasal airflow to be compared between the pre- and post-operative models. The results showed that the use of such modeling techniques is applicable to the predictive assessment of surgical interventions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：生体熱工学、熱・物質移動

1. 研究開始当初の背景

鼻腔は呼吸によるガス輸送流路の一部で、上、中、下鼻道、及びそれらを連結する総鼻道などから構成される極めて複雑な3次元形状を特徴とする。鼻腔内の気流は、嗅覚細

胞による嗅覚機能、肺に出入りする空気の温度・湿度の調整、ウイルスや花粉などの異物除去フィルターとして生命活動を維持するために重要な機能と密接に関係している。しかしながら、微細な鼻道形状の複雑性に加え、著しい個体差、また左右鼻腔組織の充血・脱

充血による周期的な形状変化を伴うため、鼻腔内の形状と気流・機能の関係については未だ不明な点が多い。

鼻中隔矯正手術は、左右の鼻腔を隔てる壁（鼻中隔）の湾曲に起因する通気障害によって生じる呼吸障害や嗅覚障害、慢性副鼻腔炎などの症状に対して有効な治療方法である。鼻中隔を構成する軟骨や骨の除去、粘膜等を切除する外科形成手術となるが、鼻腔内の気流の詳細を体内で直接計測することは不可能であるため、手術計画や診断は医師の経験による要素が大きい。鼻腔通気度測定法では圧力損失のみ測定可能であるが、測定結果は患者の訴える症状や感覚との相関に乏しく、新規の手術アセスメントの確立が切望されている。

本研究は、鼻中隔矯正手術における手術前後の CT 画像や MRI 画像を用いて鼻腔の計算モデルを構築し、熱流体力学シミュレーションによる新規の手術アセスメントシステムを提案・構築するものである。鼻腔形状細部に適合した計算格子（境界適合格子、非構造格子）を用いた計算手法の病的鼻腔の診断や手術プランニングへの応用は、鼻腔のような複雑形状では計算メッシュ作成コスト、また計算コストが莫大なものとなり、臨床利用可能な医療診断システムへの応用は困難である。そこで本研究では、複雑な格子生成を作成することなく医療画像データの構成単位である直交格子（ボクセル格子）で離散化するボクセルシミュレーション法を導入し、その簡易性を生かした新規の手術アセスメントシステムを提案・構築する。

2. 研究の目的

ボクセル法による鼻腔内熱流動シミュレータを構築し、手術計画・診断システムとしての有効性について明らかにすることを目的とする。具体的には、ボクセルモデルによる複雑鼻腔形状の近似誤差、境界層の解像度、微少領域の不安定性に関して、適切な形状近似方法、格子サイズを検討し、シミュレーションに応用する。シミュレーション結果の精度・妥当性を、医療 CT 画像から実形状鼻腔モデルを作製して PIV (particle image velocimetry)を用いた流体計測実験を行い検証する。さらにシミュレーション結果と、医師の診断所見、患者の症状・感覚との関係について検討し、手術アセスメントシステムとしての有効性を検証する。

3. 研究の方法

鼻腔形成手術前後の X 線 CT, MRI 画像より 3 次元鼻腔モデルを構築して流れと熱物質輸送のボクセルシミュレーションを実施し、ボクセル法により生じる複雑鼻腔形状の近似誤差に関して、適切な形状近似方法、局

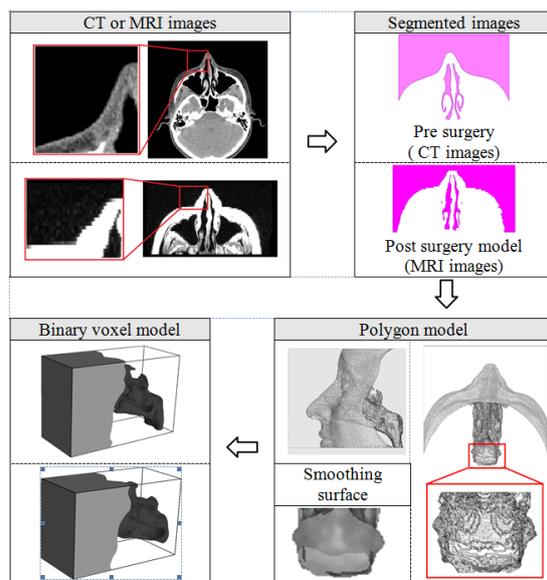


図 1 鼻腔ボクセルモデルの構築

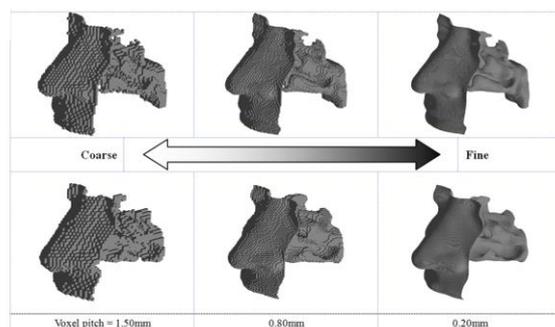


図 2 ボクセルピッチによる鼻腔形状の変化

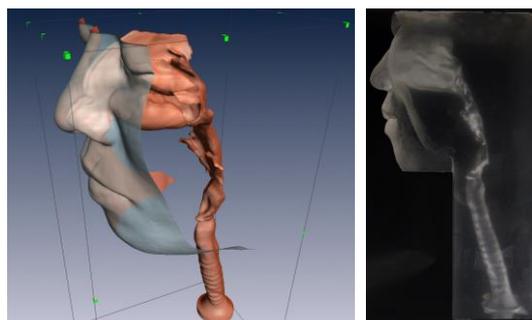


図 3 透明シリコン製鼻腔流路

所的な格子サイズのコントロール方法を検討・開発する。シミュレーション結果は、汎用の境界・非構造格子を用いた計算、また医療画像に基づき作製した鼻腔モデル流路内の流れの可視化実験結果と比較して、その有効性及び妥当性を検証する。

ボクセルシミュレーションには、3 次元非

定常熱流体解析ソルバー 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. 基礎式は連続の式, 運動量保存式, エネルギー保存式であり, 作動流体は空気とした. ヒトの生理的呼吸条件を参考にして, 吸気一定流量・温度条件 (230 ml/s, 25 °C) と壁面一定温度条件 (34 °C) を与えて鼻腔内の流れ場と温度場を解析した. 鼻腔形状の近似, 境界層の解像に対して適切な格子サイズを検討するため, ボクセルピッチを 0.1~1.5 mm まで変化させて計算を行った.

流体可視化実験は, 透明シリコン製実形状鼻腔流路を 3次元プリンタを用いて作製して行った. 流路内部の流動を可視化するため, 作動流体には, シリコンと屈折率の等しい体積濃度 50%のグリセリン水溶液を使用した. 吸気一定流量の流れをポンプで発生させ, 鼻腔前方の断面積が最小となる鼻弁に

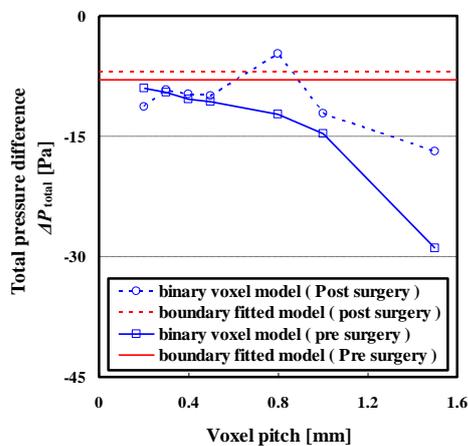


図4 格子解像度と圧力損失の関係

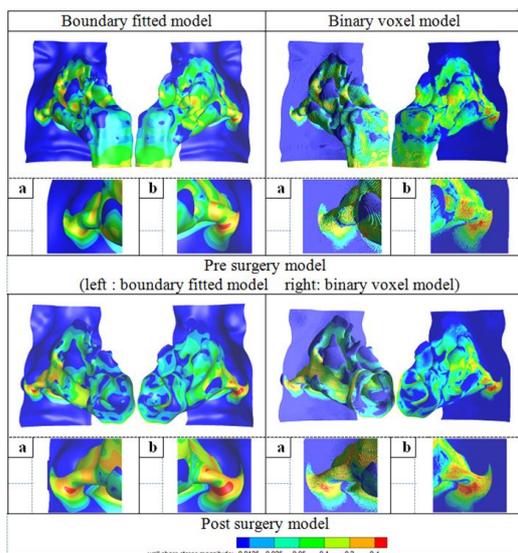


図5 鼻腔壁せん断応力の分布

において生理的呼吸条件の $Re = 760$ となるよう流量を調節した. リンジポンプにより染料を鼻腔入口から流路内に注入し, 流路側面よりビデオカメラで撮影した.

4. 研究成果

ボクセル法による鼻腔壁面の形状と境界層の解像度が流れ場と温度場に及ぼす影響を考察した. ボクセル法による解析結果と従来の境界適合格子と非構造格子による解析結果を比較した結果, ボクセルモデルの格子解像度をピッチ 0.20 mm 程度まで細かくすることにより, 境界適合格子モデルと同等な

圧力損失, 流れ場, 及び壁せん断応力の分布が得られることがわかった. また吸気流れの鼻腔出口における空気温度についても, ボクセルモデルの格子解像度をピッチ 0.20 mm 程度まで細かくすることにより, 従来法の結

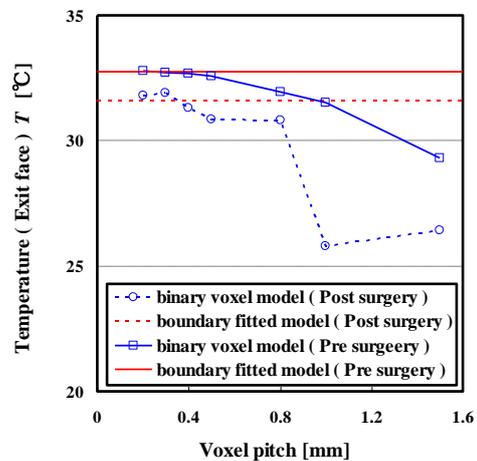


図6 格子解像度と鼻腔出口温度の関係

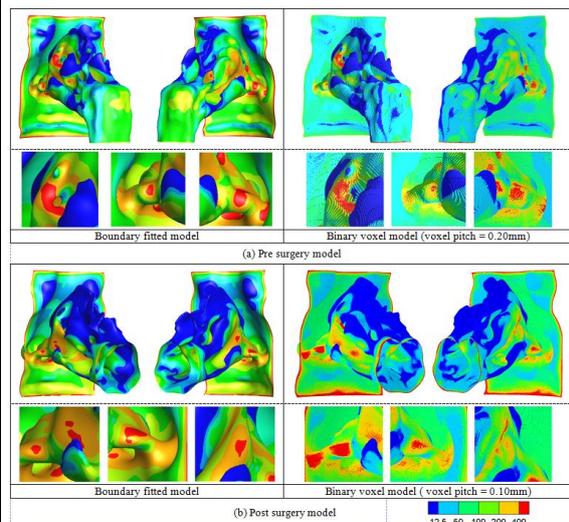
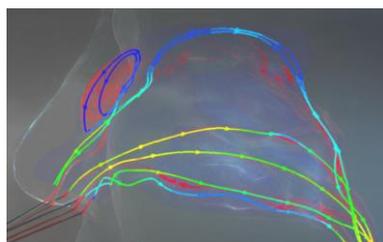


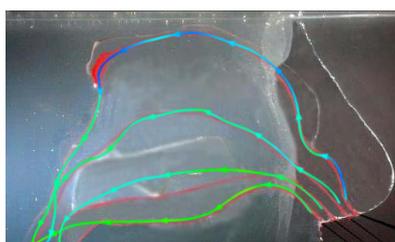
図7 鼻腔壁熱流束の分布

果を精度良く再現することが可能であることがわかった。壁面における熱流束の分布についても妥当な結果が得られることから、鼻腔の加温機能を適切に評価できる精度を有していることがわかった。

可視化実験では、鼻腔内の鼻前庭部に渦や再循環領域の発生を伴う特徴ある流れのパターンが観測され、またこのような流れの基本的なパターンはボクセルシミュレーションでよく再現されていることが確認された。可視化実験では、鼻腔上部の嗅覚部や下部の鼻甲介付近において流れの不安定性、非定常性や乱れが生じることもわかった。



a) 左鼻腔



b) 右鼻腔

図8 ボクセルシミュレーション結果と可視化実験結果の比較

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 6 件)

(1) PIV Measurement of Transitional Airflow in the Human Nasal Cavities, Y. Yokoyama, Y. Watanabe, G. Tanaka, T. Sera, H. Yokota, *Proceedings of the 12th Asian Symposium on Visualization*, 2013.5. (4 pages)

(2) Visualization of Particle Deposition in the Human Nasal Cavities, Y. Watanabe, H. Sakai, G. Tanaka, T. Sera, H. Yokota, *Proceedings of the 12th Asian Symposium on Visualization*, 2013.5. (4 pages)

(3) Voxel-based Simulation of Air-Conditioning in the Human Nasal Cavity, G. Tanaka, K. Ohta, F. Araki, T. Sera, H. Yokota, K. Ono, S. Takagi, *Proceedings of the 3rd International Forum on Heat Transfer, IFHT2012-097*, 2012.11. (2 pages)

(4) Voxel-based Simulation of Airflow in the Human Nasal Cavities, G. Tanaka, S. Kimura, T. Sera, N. Kakusho, H. Yokota, K. Ono, S. Takagi, *Proceedings of the 8th KSME-JSME Thermal and fluids engineering conference, GSF22-004*, 2012.3. (4 pages)

(5) Visualization and Measurement of Airflow in the Human Nasal Cavities, T. Nishizawa, Y. Watanabe, Y. Takimoto, G. Tanaka, T. Sera, H. Yokota, *Proceedings of the 8th KSME-JSME Thermal and fluids engineering conference, GSF22-003*, 2012.3. (4 pages)

(6) PIV Measurements of Airflow in the Human Nasal Cavities, T. Nishizawa, R. Takano, Y. Watanabe, G. Tanaka, *Proceedings of the 11th Asian Symposium on Visualization, ASV11-po-07*, 2011.6. (3 pages)

[学会発表] (計 12 件)

(1) Voxel-based Simulation of Airflow in the Nasal Airways, G. Tanaka, S. Kimura, T. Sera, N. Kakusho, H. Yokota, K. Ono, S. Takagi, *Bioengineering II*, p. 94, 2011.9.

(2) Assessment of Surgical Rhinoplastic Intervention using Computational Fluid Dynamics, G. Tanaka, E. Blenke, D. J. Taylor, D. J. Doorly, R. C. Schroter, *6th World Congress on Biomechanics*, Abstracts p. 370, 2010.8.

(3) Voxel-based simulation of airflow in the nasal cavities, S. Kimura, G. Tanaka, T. Sera, N. Kakusho, H. Yokota, K. Ono, S. Takagi, *6th World Congress of Biomechanics Abstracts*, p. 372, 2010.8.

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・准教授

研究者番号：20292667