

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03970

研究課題名（和文）医用画像に基づく鼻腔エアコンディショニング機能のポリウムピクセルモデリング

研究課題名（英文）Volume pixel modeling of nasal air conditioning function based on medical images

研究代表者

田中 学（Tanaka, Gaku）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20292667

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：複雑形状を有する鼻腔内の気流および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について、3次元医療画像要素（ポリウムピクセル：ボクセル）を利用したモデリングによる解析手法を提案した。定常および非定常流量条件において流れ場と温度場のシミュレーションを実施し、結果を実験との比較により検証した。本手法が鼻腔の複雑形状に対して高速で安定した格子生成を実現し、鼻腔内の遷移流れや各種機能の解析に有用であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法の優れた並列化効率を活かして、格子を渦の最小スケールまで細分化した直接数値計算（DNS）を実施し、鼻腔内に生じる流れの不安定性を調査した。その結果、鼻腔狭窄部下流に発生するジェットと再循環流の間に形成されるせん断層においてケルビンヘルムホルツ不安定流れが形成されることを確認した。また、乱れのパワースペクトルは比較的低レイノルズ数においても乱流に近い特徴を示すことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This work describes a new approach to simulate the airflow and air-conditioning in the human nasal cavity using voxel-based modeling. Voxel-based simulation of steady and unsteady flow was performed to resolve the flow and temperature fields. The results were verified by comparison with the experiments. It was found that this method enables high-speed and stable grid generation for complicated shapes of the nasal cavity and is useful for analysis of transitional flow and various functions in the nasal cavity.

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

鼻腔は、嗅覚、異物除去、および吸入空気の加温加湿等、生体にとって不可欠な機能を担っている。これらの機能には、極めて複雑緻密な形状の鼻腔流路を通過する気流が、重要な役割を果たしている。最近では、医療画像情報から実形状鼻腔モデルが構築され、鼻腔内気流の CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析が行われている。

従来の鼻腔内気流の CFD 解析では、物体形状に合わせた計算格子に基づく境界適合格子法が広く用いられている。しかしながら、鼻腔の複雑な三次元形状に合わせた境界適合格子の生成は困難であり、多大な労力と時間を要する。特に格子点の配置等には流体力学に関する高度な知識と経験が必要となるため、格子生成が CFD 解析全体の作業時間に占める割合が大きくなっている。外科的処置の予測評価等、CFD 解析を医療現場で活用するためには、複雑形状に対する三次元格子生成の簡易化、自動化が望まれる。

著者らは、内視鏡下鼻腔手術による外科的処置が鼻腔内気流に及ぼす影響を評価する新しい簡易な手法として、医療画像情報の表現単位である 3 次元医療画像要素 (ポリウムピクセル: ボクセル) をそのまま計算格子に利用したボクセル格子法に基づく CFD 解析を提案してきた。これまでに、外科的処置前後の医療画像から鼻腔をボクセル格子でモデル化して、鼻腔内の流れ場および温度場を解析し、従来の境界適合格子法と対照して結果の妥当性および手法の有効性を示している。また、医療画像情報からポリゴンモデルを介さず直接的にボクセルモデルを生成し、モデル形状および流れ場と温度場の解析精度の調査を行った。しかしながら、これらの解析はいずれも定常流量条件で実施されており、鼻腔の嗅覚等の各種機能を評価するために重要な流れの非定常性が考慮されていない。

2. 研究の目的

本研究は、ボクセルをそのまま計算格子に利用して鼻腔のエアコンディショニング機能をモデリングし、急加速を伴う嗅動作を模擬した非定常流量条件におけるボクセルシミュレーションを試みるものである。鼻腔疾患患者に適用可能なシミュレーション方法を確認して、鼻腔の形状と機能の関係についての学術的理解を得るとともに、その簡易性を生かした医療現場で利用可能な診断・治療支援システムを提案する。

3. 研究の方法

鼻腔モデル

図 1 に、ボクセルモデル生成の概要を示す。鼻腔モデルには、頭部から胸部までの CT 画像情報から生成されたポリゴンモデルを使用した (図 1(a))。モデルは健康男性の CT 横断面画像 (分解能 0.65×0.65 mm、画像間隔 1 mm) から 3D 可視化解析ソフト Amira ver. 5.2 (EFI Visualization Sciences Group) を用いて生成されている。

本研究では、顔面から気管支までを含むポリゴンモデルから、顔面の一部を含む鼻腔流路部分を抽出した (図 1(b))。鼻腔流路は、ネーザルサイクルとよばれる左右交互に数十分から数時間周期で生じる鼻粘膜の腫脹・収縮により、右鼻腔が左鼻腔より流路が狭くなっている。ネーザルサイクルは健康な人の鼻腔で一般的にみられる数 mm オーダーの比較的大きな腫脹・収縮であり、本モデルの左右鼻腔流路の非対称性の度合いは正常範囲内である。

次に、これら鼻腔を取り囲む直方体の領域をバウンディングボックス ($90 \times 71 \times 146$ mm) とし、内部を計算領域とした (図 1(c))。ボクセルモデルは、計算領域全体をコルモゴロフスケールと同オーダーの 0.05 mm 角の立方体のボクセル格子で一樣に分割し、各ボクセル格子にポリゴンモデルの境界面を基準に流体か固体いずれかの媒質情報を付与することにより自動生成した。ポリゴン境界面を含むボクセル格子については、流体の体積占有率 50% を閾値として流体か固体かが決定され、境界面は階段状に近似される。各ボクセル格子には、媒質情報の他、媒質ごとの物性値および基本変数 (流速、圧力) が格納される。鼻腔内の格子数は、約 2 億 5 千万である。

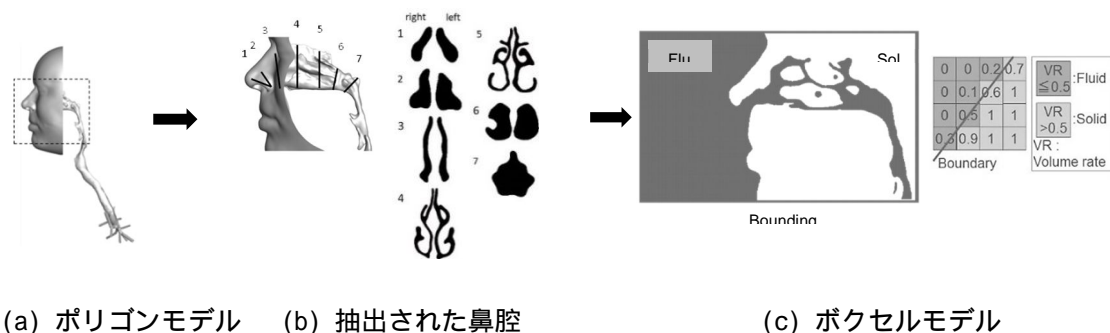


図 1 ボクセルモデル生成の概要。

計算手法

流体解析ソルバーFFV-C (Frontflow / violet Cartesian ver.2.1.5, RIKEN) を用いて、非定常非圧縮流れの解析を行った。基礎式は、連続の式および運動量保存式である。作動流体は空気とした。鼻腔内の最大流速 (約 30 m/s) からマッハ数は 0.1 以下と見積もられるため、圧縮性の影響は無視されている。

境界条件として、定常および急加速を伴う嗅動作を模擬した非定常流量条件を、喉側の気流出口断面に一样に与えた。断面積が最小となる鼻弁部の水力等価直径に基づき定義されるレイノルズ数は、定常流量では右鼻腔で約 590、左鼻腔で約 840、非定常流量では右鼻腔で約 1900、左鼻腔で約 2400 である。鼻腔前方空間のバウンディングボックス境界には、トラクションフリー条件を与えた。顔面および鼻腔内の壁面には、滑りなし条件を与えた。

各計算ステップにおける時間刻みを 8.0×10^{-7} s として計算を行った。CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 数は 0.4 である。計算には、汎用ワークステーション (RC Server Calm III 2000, Real Computing, inc.) および理化学研究所スーパーコンピュータ「京」(課題番号: hp180260) が用いられた。

4. 研究成果

図 2 に、定常流量条件におけるボクセルシミュレーションで得られた流脈 (赤線) と、同鼻腔モデルを用いた染料注入による可視化実験結果 (黒線) との比較を示す。シミュレーションでは左鼻腔の中鼻甲介下流上方で流れの不安定が確認され、振動流の発生により鼻前庭から嗅覚裂への流れがかく拌されていることが確認された。この傾向は実験結果と良く一致しており、本シミュレーションで鼻腔内の不安定流れの特徴が忠実に再現されていることが確認できた。

図 3 に、定常流量条件における左右鼻腔を隔てる隔壁温度分布のシミュレーション結果と *in-vivo* 測定結果^[1] との比較を示す。シミュレーションと *in-vivo* 測定温度はいずれも鼻先から 20 mm 付近で 30 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ことが確認できた。

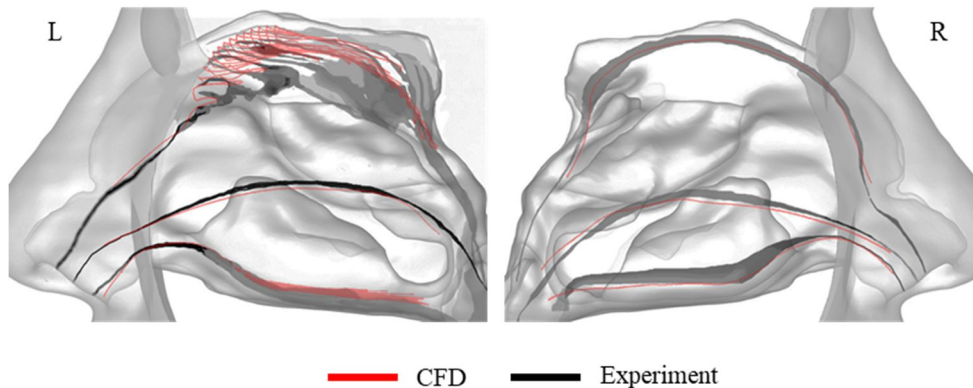


図 2 ボクセルシミュレーションと染料注入可視化実験の流脈線の比較。

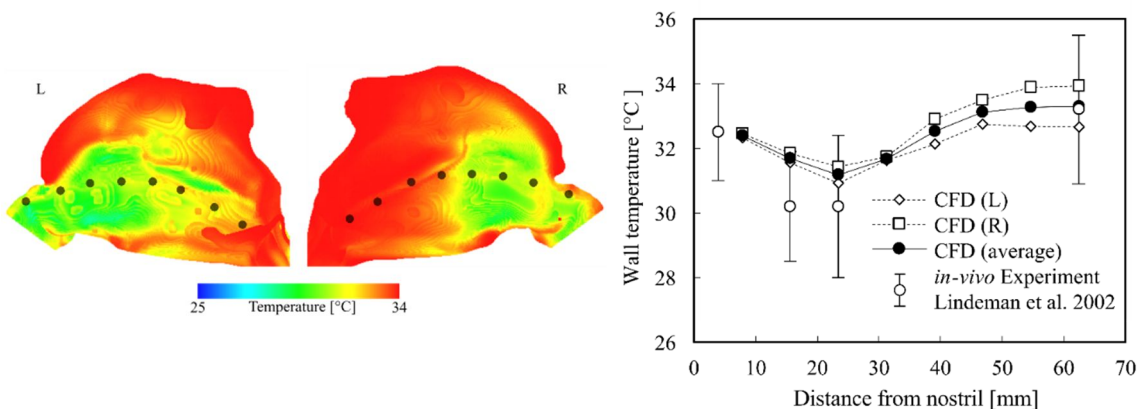


図 3 ボクセルシミュレーションと *in-vivo* 測定^[1] の隔壁温度分布の比較。

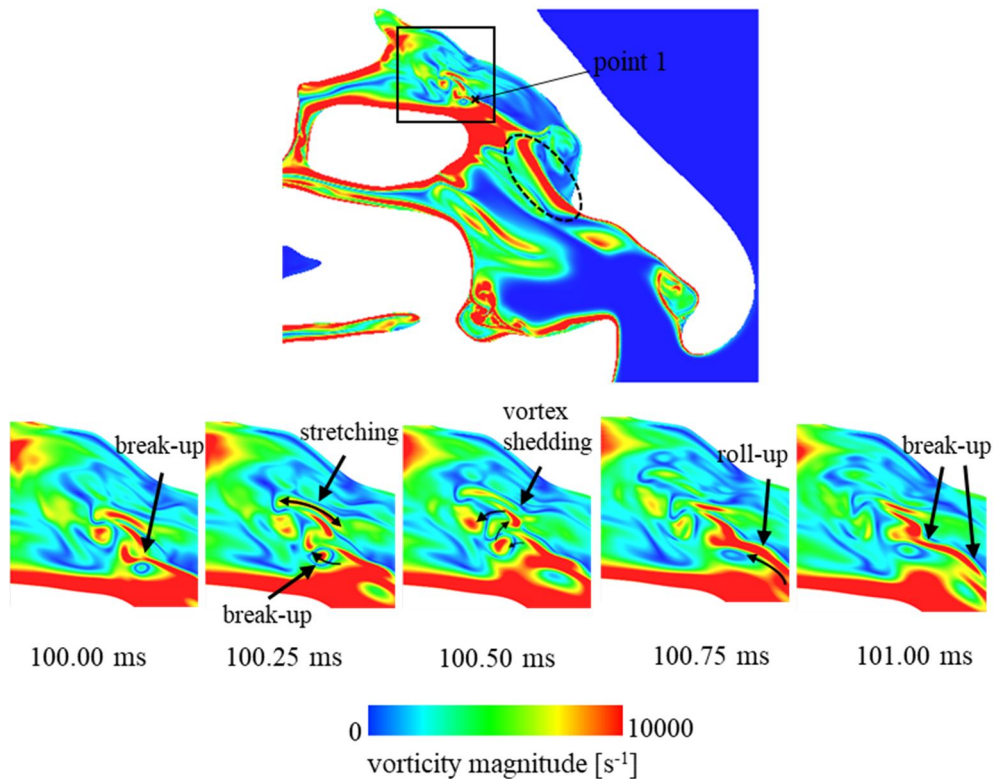


図 4 嗅動作を模擬した非定常流量条件における鼻腔矢状断面内の渦度分布と時系列変化。

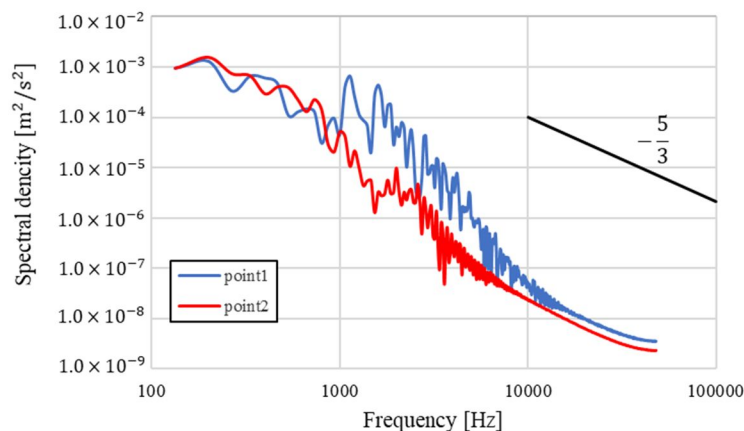


図 5 乱れのパワースペクトル．Point 1 と 2 はそれぞれ鼻腔の上部と下部の地点．

図 4 に、嗅動作を模擬した非定常流量条件における鼻腔矢状断面内の渦度分布とその時系列変化を示す。鼻腔狭窄部下流ではジェットや再循環流の発生等、鼻腔内の特徴的な流れの構造が良く再現されており、破線で囲まれた領域には高速ジェットと低速再循環流の間に形成されたせん断層が確認される。下段の四角枠内の時系列変化では、せん断層においてケルビンヘルムホルツ不安定流れが形成され、下流において渦の形成（巻き上げ）、伸張、崩壊を繰り返す渦放出の過程が確認された。また、乱れのパワースペクトルは比較的低レイノルズ数においても乱流に近い特徴を示すことが確認された。（図 5）。

本提案手法では、医療画像情報から鼻腔形状をボクセル格子の媒質情報によりモデル化して、格子生成の簡易化および自動化を図った。また、本手法の優れた並列化効率を活かして、格子を渦の最小スケールまで細分化したシミュレーションを実施し、鼻腔内に生じる流れの不安定性を調査した。定常および嗅動作を模擬した非定常流量条件において流れ場と温度場のシミュレーションを実施し、本手法が鼻腔の複雑形状に対して高速で安定した格子生成を実現し、鼻腔内の遷移流れや各種機能の解析に有用であることを明らかにした。

参考文献

- [1] Nasal mucosal temperature during respiration, J. Lindemann, R. Leiacker, G. Rettinger, T. Keck, Clin. Otolaryngol., 27, 135-139, 2002.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 木村 真也、木村 祐介、世良 俊博、小野 謙二、田中 学	4. 巻 56
2. 論文標題 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	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生体医工学	6. 最初と最後の頁 37~43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11239/jsmbe.56.37	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Shinya, Sakamoto Takashi, Sera Toshihiro, Yokota Hideo, Ono Kenji, Doorly Denis J., Schroter Robert C., Tanaka Gaku	4. 巻 22(3)
2. 論文標題 Voxel-based modeling of airflow in the human nasal cavity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 331-339
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/10255842.2018.1555584	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kimura Shinya, Miura Shuta, Sera Toshihiro, Yokota Hideo, Ono Kenji, Doorly Denis J., Schroter Robert C., Tanaka Gaku	4. 巻 -
2. 論文標題 Voxel-based simulation of flow and temperature in the human nasal cavity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/10255842.2020.1836166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shinya Kimura, Takashi Sakamoto, Toshihiro Sera, Kenji Ono, Gaku Tanaka, Denis J. Doorly, Robert C. Schroter
2. 発表標題 Comparative study of grid generation methods for the simulation of nasal airflow during a sniff
3. 学会等名 8th World Congress of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鼻腔内エアコンディショニングのボクセルシミュレーション
2. 発表標題 木村 真也, 三浦 秀太, 世良 俊博, 横田 秀夫, 小野謙二, 田中 学
3. 学会等名 2018年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嗅動作時鼻腔内気流シミュレーションにおける計算格子法の比較研究
2. 発表標題 三浦秀太, 木村真也, 世良俊博, 小野謙二, 田中 学
3. 学会等名 日本機械学会第29回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 清水崇文, 平井康幸, 木村真也, 世良俊博, 横田秀夫, 小野謙二, 田中 学
3. 学会等名 日本機械学会第31回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦秀太, 吉岡慧一郎, 木村真也, 世良俊博, 小野謙二, 田中 学
2. 発表標題 嗅動作時における鼻腔内遷移流れの直接数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会第32回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉岡慧一郎, 三浦秀太, 木村真也, 世良俊博, 小野謙二, 田中 学
2. 発表標題 嗅動作時における鼻腔内遷移流れの直接数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会第31回バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	世良 俊博 (Sera Toshihiro) (40373526)	九州大学・大学院工学研究院・准教授 (17102)	
研究協力者	小野 謙二 (Ono Kenji) (90334333)	九州大学・情報基盤研究開発センター・教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
英国	Imperial College London		