

Title	数値熱流体解析による鼻腔内温度分布に関する研究
Author(s)	阪本, 雅樹
Citation	
Issue Date	2006-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1978
Rights	
Description	Supervisor: 松澤 照男, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

数値熱流体解析による鼻腔内温度分布に関する研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

阪本 雅樹

2006 年 3 月

修 士 論 文

数値熱流体解析による鼻腔内温度分布に関する研究

指導教官 松澤照男 教授

審査委員主査 松澤照男 教授

審査委員 井口寧 助教授

審査委員 党建武 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

410053 阪本 雅樹

提出年月：2006 年 2 月

概 要

近年、医療用画像装置の性能が向上し、出力される画像を処理するコンピュータの性能も急速に進歩したことにより、医療用画像装置から出力された画像に対して画像処理を加えることで3次元形状の再構築が可能になり、実用的な数値流体解析がおこなえるようになった。これに伴い医療分野における数値シミュレーションが盛んにおこなわれている。これは、医療の現場から手術前と手術後のフローパターンの情報をあらかじめ得たいという要望があるからである。

本稿では、研究対象として人間の鼻腔に着目した。鼻腔とは、吸入した空気の温度調節機能、適度な湿り気を与える湿度調整機能、ホコリ・ゴミを取り除く除去機能、空気と共に運ばれた匂いを感じる機能、声をきれいに響かせる清音機能を有している。これらの機能を1つずつ解明することで鼻腔の果たす役割が少しずつ解明されてきた。鼻腔は、様々な温度の外気をヒトに適した温度まで加温・冷却をおこなった後、体内に空気を送っている。呼吸はヒトの生命維持に欠かせないものである。鼻腔内における加温・冷却の機能を解明することで、鼻腔内の温度調節機能の解明が可能となる。

本研究では、両鼻腔を対象とした3次元鼻腔形状の再構築をおこなった。再構築に関しては、連続的に撮影した医療用画像(Computed Tomography(CT))を撮影間隔で積み重ね、2値化、階調値反転をおこない、3次元鼻腔形状の抽出をおこなった。尚、本研究では医療用画像から鼻腔の空気の領域を抽出することで、鼻腔形状とした。抽出をおこなった3次元鼻腔形状に対してマーチングキューブ法で面データの生成をおこない、3次元鼻腔形状を再構築した。そして計算メッシュを生成し、再構築した3次元鼻腔形状を用いて数値熱流体解析をおこなった。流入速度は安静時呼吸を想定した。両鼻腔内において、鼻腔前方で温度上昇、温度下降が大きい結果が得られた。また、中咽頭における平均断面温度が流入温度に対して線形であることを確認した。また鼻腔内温度分布と空気の流れとの関係について検討をおこなった。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	形状再構築	3
2.1	はじめに	3
2.2	鼻腔とは	3
2.3	画像データ	4
2.4	形状再構築	7
第3章	熱解析	11
3.1	基礎方程式	11
3.2	計算条件と境界条件	12
3.3	鼻腔内における空気の流れの計算結果	13
3.4	生活想定内における鼻腔内温度分布	14
3.4.1	同じ流入温度による左鼻腔と右鼻腔の比較	18
3.4.2	複数の断面から見た鼻腔内温度分布	21
3.5	生活想定外における鼻腔内温度分布	47
3.5.1	計算結果	47
第4章	考察	57
4.1	生活想定内における鼻腔内温度分布	57
4.1.1	左鼻腔と右鼻腔	58
4.2	生活想定外における鼻腔内温度分布	58
4.2.1	下鼻甲介切除の場合	58
第5章	結言	59
5.1	形状再構築	59
5.2	鼻腔内温度分布	59
5.3	今後の課題	59

目 次

2.1	鼻腔の構造	4
2.2	医療用画像装置 (CT) から出力された冠状断面画像	6
2.3	医療用画像からの鼻腔領域の抽出	8
2.4	再構築した 3 次元鼻腔形状	9
2.5	鼻腔前方 (左), 鼻腔後方 (右)	10
2.6	鼻腔側面	10
3.1	左鼻腔内における空気の流れ	13
3.2	右鼻腔内における空気の流れ	13
3.3	鼻腔形状と断面位置	14
3.4	左鼻腔内温度分布	15
3.5	右鼻腔内温度分布	17
3.6	流入温度 273.15[K] における左鼻腔内と右鼻腔内の温度分布	18
3.7	流入温度 298.15[K] における左鼻腔内と右鼻腔内の温度分布	19
3.8	流入温度 304.15[K] における左鼻腔内と右鼻腔内の温度分布	20
3.9	流入温度 313.15[K] における左鼻腔内と右鼻腔内の温度分布	21
3.10	流入温度 273.15[K] における鼻腔内断面図	23
3.11	流入温度 278.15[K] における鼻腔内断面図	26
3.12	流入温度 283.15[K] における鼻腔内断面図	29
3.13	流入温度 288.15[K] における鼻腔内断面図	32
3.14	流入温度 293.15[K] における鼻腔内断面図	35
3.15	流入温度 298.15[K] における鼻腔内断面図	38
3.16	流入温度 304.15[K] における鼻腔内断面図	41
3.17	流入温度 308.15[K] における鼻腔内断面図	43
3.18	流入温度 313.15[K] における鼻腔内断面図	46
3.19	流入温度 373.15[K] における流速の違いによる鼻腔内温度分布の比較	49
3.20	流入温度 273.15[K] における流速の違いによる鼻腔内温度分布の比較	52
3.21	下鼻甲介	53
3.22	流入温度 273.15[K] における健康体と下鼻甲介切除の鼻腔内温度分布の比較	56

表 目 次

2.1	撮影時の画像情報	4
3.1	計算条件 (生活想定内時)	12
3.2	境界条件 (生活想定内時)	12
3.3	計算条件 (生活想定外時)	47
3.4	境界条件 (生活想定外時)	47

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年, Computed Tomography(CT) や Magnetic Resonance Imaging(MRI) といった医療用画像装置の発展はめざましいものがあり, また計算機の性能も向上したことで, これらの医療用画像装置から出力される画像に対して画像処理を加えることで, 実用的な数値流体解析がおこなえる3次元形状の再構築が可能となってきた. これにより, 医療用画像から形状を再構築することでリアリスティックな臓器形状が得られるようになり, この形状を用いてシミュレーションをおこなうことで, 生体内の流れ場に関して精密なパターンが得られるようになってきた. これらの技術の進歩に伴い, 医療分野におけるシミュレーションが盛んにおこなわれている. 医療の現場から手術前と手術後のフローパターンの情報をあらかじめ得たいという要望があること, 生体機能の解明の研究の必要性が高まっているからである. 生体流れに関しては, 血管, 肝臓など様々な臓器においてシミュレーションがおこなわれている.

本稿では, ヒトが生命を維持するために不可欠である呼吸機能に, 重要な役割を果たしている鼻腔に着目した. 鼻腔とは, 複雑形状をした臓器であり, 吸入した空気の温度調整(加温・冷却)機能, 適度な湿り気を与える湿度調整機能, ホコリ・ゴミを取り除く除去機能, 空気と共に運ばれた匂いを感じる嗅覚機能, 声をきれいに響かせる清音機能, 下気道に対する保護機能を有している. 本研究では, 鼻腔のこれらの機能の中の温度調整機能に着目し, 温度調整機能を数値熱流体を用いて解析し検討をおこなう. 呼吸は, ヒトが生きていくために不可欠の機能であり, これを支える鼻腔内での空気の温度調節機能を解明することは有用である.

数値流体解析による鼻腔内流れの解析では, 中山ら [1] によってリアリスティックな形状を用いた鼻腔内の流れ解析がおこなわれている. また, 熱解析に関してはNaftali ら [2] によって研究がおこなわれているが, 解析対象となった形状がリアリスティックな形状ではなく単純形状で再現したモデルであるため, 本論文の目的から不十分と考えた.

1.2 研究の目的

本研究では, 医療用画像装置から出力される医療用画像を用いて, リアリスティック3次元鼻腔形状の再構築をおこない, 再構築した形状を用いて鼻腔内における熱解析をおこない, 鼻腔内の温度分布について検討をおこなった.

1.3 本論文の構成

本論文は以下の 5 章から構成されている.

第 1 章では序論として, 研究の背景, 研究の目的, 本論文の構成について述べる..

第 2 章では形状再構築として, まずはじめに鼻腔の概要について述べ, 医療用画像の撮影条件を示し, 医療用画像からの鼻腔領域の抽出方法と, 3 次元鼻腔形状の再構築方法について述べる. この手順について述べる.

第 3 章では熱解析として, まずはじめに数値熱流体解析をおこなうための基礎方程式, 計算条件, 境界条件を示し, 再構築した 3 次元鼻腔形状を用いて熱解析をおこなった計算結果について述べる. 様々な断面からみた計算結果について述べる.

第 4 章では考察として, 本研究でおこなった計算結果についての考察を述べる.

第 5 章では結言として, 本研究でおこなったことをまとめ, 今後の展開を述べる.

第2章 形状再構築

2.1 はじめに

医療用画像装置から出力された医療用画像から3次元形状を再構築するには、医療用画像を奥行きに撮影間隔で積み重ねていくことで再構築をおこなう。

複数枚の医療用画像から3次元形状を再構築する研究は現在まで多くおこなわれている。3次元構成をおこなうソフトウェアも存在する。医療用画像をソフトウェアに読み込むことで、血管のみの抽出が自動でおこなうことができる機能が備わっているソフトウェアも存在する。これらの技術は医療現場において、疾病検査のために開発されてきた。また、これらの技術を用いた生体流れに関するシミュレーションの報告もおこなわれている[3]。しかし、全ての臓器が同様の方法で抽出できるわけではない。ソフトウェアを用いての自動抽出がおこなえない場合は、手動で医療用画像から抽出をおこなう必要がある。

本章では、まず鼻腔の概要について説明をおこない、医療用画像から鼻腔領域の抽出をおこなう方法と3次元鼻腔形状の再構築の方法について述べる。

2.2 鼻腔とは

ヒトの鼻は、外鼻、鼻腔、副鼻腔の3つの部位から構成されている。外鼻とは、日常的に用いられている「はな」と呼ばれる部分で、顔の表面に突き出ている部分のことをいう。鼻腔とは、鼻の入り口からのどに続く間の空間で、鼻中隔で左右に区切られ外側の壁から鼻甲介と呼ばれる粘膜に被われた骨が出ていて、その隙間が空気の通り道となっている。そして頭蓋骨の中にはたくさんの空洞があり、鼻の周囲に集まっているものを副鼻腔という。副鼻腔は上顎洞、篩骨洞、前頭洞、蝶形骨洞の4つに分かれ脳や眼と隣接し、また各洞は鼻腔と連絡している。

鼻腔は空気を温めて肺へ送る作用があり、上鼻甲介・中鼻甲介・下鼻甲介で気流の流れを調節して鼻咽頭部へと送っているために、各甲介は厚くできていて血管や腺に富んでいる。血管は温度によって収縮・膨張がおこなわれている。

鼻腔の構造を図2.1に示した[4]。また本稿では、外鼻孔とは図2.1内の番号4の示す部分の断面のことをいう。

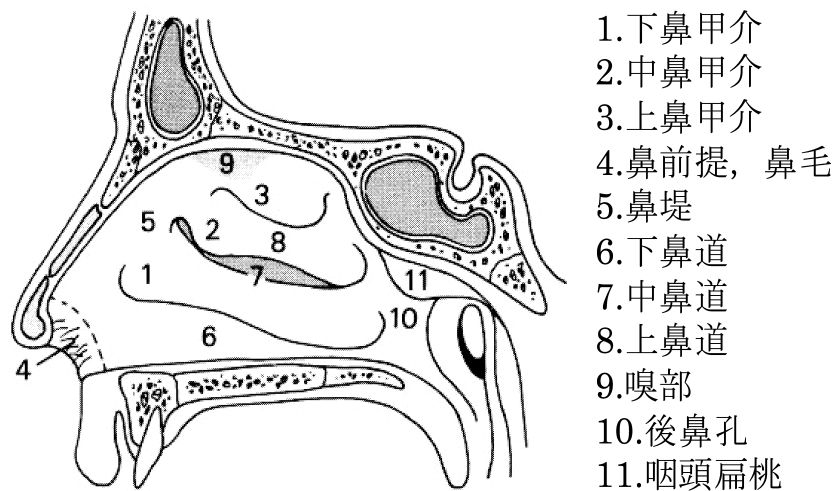


図 2.1: 鼻腔の構造

2.3 画像データ

本研究で用いた医療用画像について示す。画像データフォーマットは，Digital Imaging and COmmunications in Medicine (DICOM) であった。DICOM フォーマットファイルは，医療分野で用いられている画像として一般的なフォーマットである。DICOM ファイルには，撮影時に関する情報が記憶されている。DICOM ファイルに記憶されている情報を表 2.1 に示した。

表 2.1: 撮影時の画像情報

撮影情報	データ
撮影方向	冠状断面 (Coronal)
出力フォーマット	DICOM
ピクセル数	512 × 512[Pixel]
ピクセル間距離	0.196[mm/Pixel]
撮影枚数	142
撮影間隔	1.00[mm]

本研究で用いた医療用画像は，Simens 社製 SOMATOM PLUS4 にてヒトの鼻腔の撮影をおこなった。また撮影をおこなう際に造影剤などは使用せず，その日の被験者の鼻腔の撮影をおこなった。被験者は撮影時において，31 歳の成人男性であり現在過去共に鼻腔疾患等の病歴を持たない，健康な鼻腔であった。

医療用画像装置から出力された医療用画像を図 2.2 に示した。

図 2.2 の画像についてであるが、冠状断面画像 1 が外鼻孔に近い断面画像で、冠状断面画像 9 が中咽頭に近い側の断面画像である。まずはじめに医療用画像の表示についてであるが、低信号 (黒色部) で表されている部分が空気、中信号 (灰色部) で表されている部分が皮膚、高信号 (白色部) で表されている部分が骨である。図中の空気を表している黒色の中央付近が鼻腔であり、鼻腔周りの黒い部分が副鼻腔である。

各々の冠状断面画像についてであるが、(a) から (d) は鼻腔前方の部分の画像であり、(e) から (i) は鼻腔後方の画像である。(a) と (b) についてであるが、画像中心付近に黒の細長い部分が 2 つあり、画像下部から画像中部にかけて細長いすじ (総鼻道) が通っているが、この左側の黒い部分が右鼻、右側の黒い部分が左鼻である。冠状断面画像 (c) では、画像中心部の黒く表示されている総鼻道の下部から上方向に向かい繋がった黒い領域が表示されている。これは下鼻甲介と呼ばれている部分である。冠状断面画像 (d) から冠状断面画像 (f) についてであるが、左右に見られる大きな黒く表示された領域があるが、これは副鼻腔と呼ばれている部分である。また中心部の通ったすじ (総鼻道) から上部、中部、下部にそれぞれ細長い部分が繋がっている。上部が上鼻甲介、中部が下鼻甲介、下部が下鼻甲介と呼ばれている部分である。(g) から (i) についてであるが、これらは左鼻腔と右鼻腔とが 1 つの管となっている部分である。以上の空間を通過して中咽頭へ空気が運ばれている。

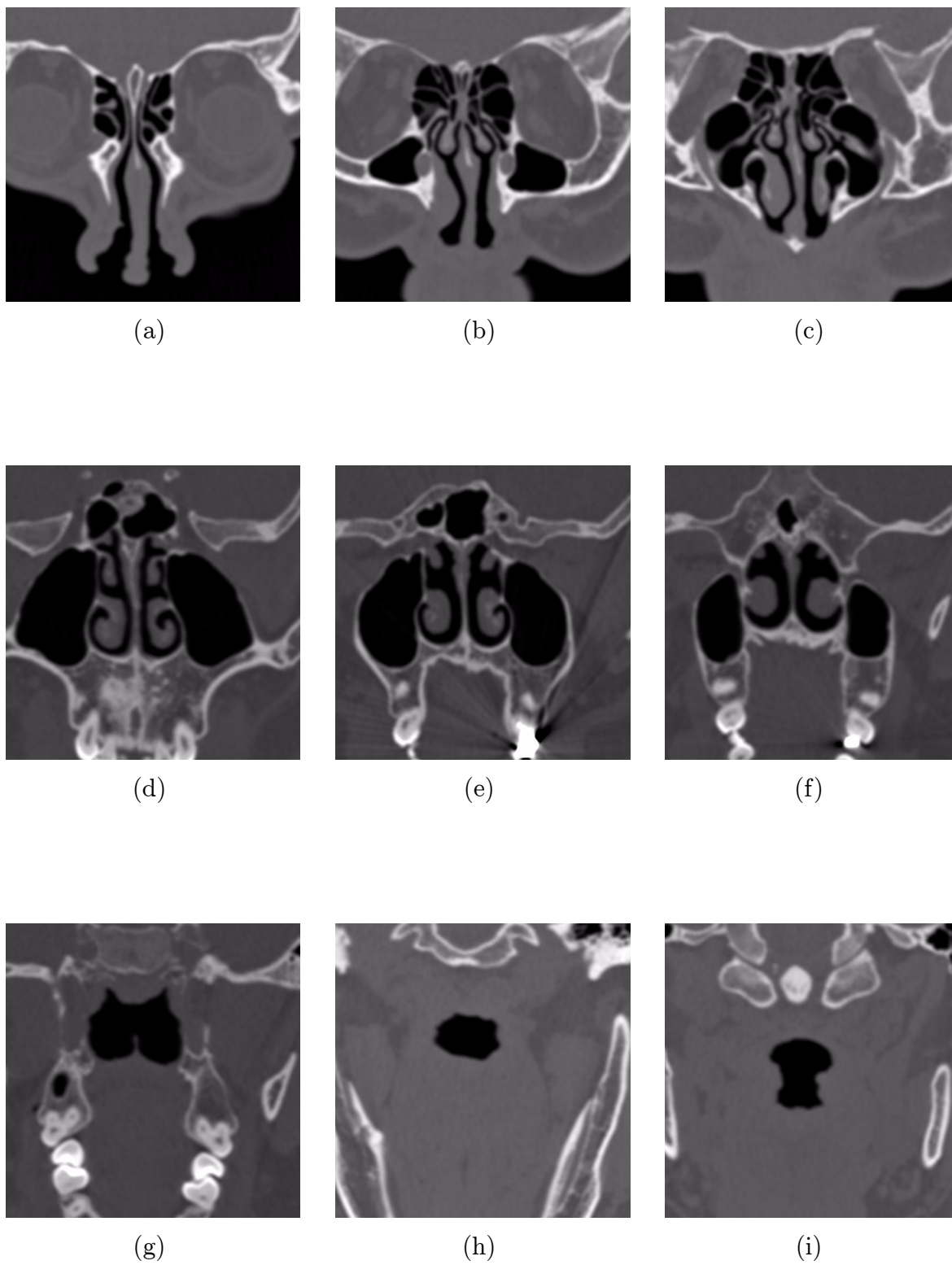


図 2.2: 医療用画像装置 (CT) から出力された冠状断面画像

2.4 形状再構築

流解析をおこなうために、3次元鼻腔形状の再構築をおこなう。本研究において、鼻腔内の熱解析は数値熱流体計算によっておこなうものであり、人体実験をおこなったり実際に鼻腔形状を作成して実験をおこなうのではない。形状再構築手法としては、Computed Tomography(CT) や Magnetic Resonance Imaging(MRI) といった医療用画像装置から出力された医療用画像 (DICOM) データから3次元形状を再構築する方法が用いられている[1][3]。

3次元鼻腔形状の再構築にあたっては、以下のソフトを使用した。

- KGT 社製 INTAGE3.1[5]：医療用画像を読み込み、鼻腔領域の抽出をおこないボリュームデータの生成をおこなうときに用いたソフトウェア
- Materialise 社製 MagicsRP9.51[6]：再構築した3次元鼻腔形状の表面形状の構築処理をおこなうときに用いたソフトウェア
- FLUENT 社製プリプロセッサ Gambit Ver.2.1.6：計算メッシュの生成をおこなうソフトウェア。

医療用画像データから3次元鼻腔形状の再構築をおこなう方法を以下に示した。

1. 医療用画像装置から出力された医療用画像をINTAGEに読み込み、12ビット階調である医療用画像を8ビット階調として読み込む。
2. 階調値の決定をおこなう。鼻腔前方から鼻腔中間部までの断面画像を見て、左鼻腔と右鼻腔が繋がっていない階調値を本研究での階調値として決定した。
3. 読み込んだ医療用画像に1ピクセルあたりの距離と撮影間隔の情報を与えてボリュームデータの生成をおこなう。これによりソフトウェア上で3次元、2次元の切り替え表示が可能となる。
4. 鼻腔内は空気であるので、医療用画像上において低階調(黒色)である。低階調では、INTAGE上での鼻腔領域の抽出作業がおこなえないので、階調値反転をおこなう。この処理により、空気の領域が高階調(白色)となり鼻腔領域の抽出作業がINTAGE上でおこなうことが可能となる。
5. 階調値反転をおこなっただけでは頭部の3次元形状が生成される。そこで、鼻腔領域の抽出をおこなう。抽出をおこなうために、鼻腔領域とそうでない領域とに2値化処理をおこなった。2値化処理をおこなうにあたっては、方法2で決定した階調値を境界としておこなった。
6. 2値化処理をおこなっただけでは鼻腔以外の部位(皮膚、脂肪、筋肉、骨)が残ってしまうので、これらの部位をINTAGE上の各断面画像において手動で削除し、鼻腔領域のみの抽出をおこなった。また本研究では、メインフローを見るために鼻腔に着目した。よって、副鼻腔においても手動により削除をおこなった。

ここまでの画像処理をおこなった医療用画像の一例を図 2.3 に示した．矢印左側の断面画像が，医療用画像装置から出力された医療用画像である．矢印右側の断面画像が階調値反転，2 値化，鼻腔以外の部位の削除，副鼻腔の削除をおこなった断面画像である．

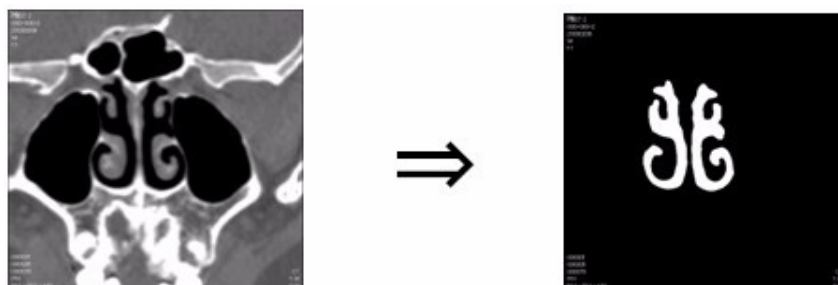


図 2.3: 医療用画像からの鼻腔領域の抽出

7. 方法 1 から方法 6 により鼻腔領域の抽出ができた．次に 3 次元鼻腔形状の再構築をおこなった．しかし，医療用画像から 3 次元鼻腔形状の再構築をおこなうので撮影間隔距離の段差が奥行き方向に生じる．この段差を低減し滑らかな局面を生成するために，移動平均法 [7] を用いてスムージング処理をおこなった．スムージングをおこなうことで滑らかな局面の生成をおこなうことができるが，スムージングをおこないすぎると元の形状とは異なった形状になるので注意が必要であった．
8. マーチングキューブ法 [8] により，鼻腔壁面データの構築をおこなった．
9. 表面形状データを STL Format で出力し，ソフト MagicsRP により，アスペクト比の悪い三角形を取り除く作業をおこなった．これはアスペクト比の悪い三角形が存在すると，後におこなう計算メッシュが生成できない可能性があるためである．また，トライアングルリダクション [9] をおこなった．そして，形状の荒い部分の三角形は形状を損なわないように削減し，形状の細かい部分に関しては，三角形の数を増やす作業をおこなった．この作業はのちにおこなう計算メッシュの生成を考慮しておこなった．
10. 次に計算メッシュの生成をおこなう．再構築した 3 次元鼻腔形状に対して，鼻腔形状の壁面内部に計算メッシュの生成をおこなう必要がある．この作業には，ソフト Gambit を用いた．鼻腔壁面は STL フォーマットにより三角形で構築されているので，この三角形を表面メッシュとして用いた．よって，表面メッシュを細かくすると計算メッシュも細かく生成される．ここで注意しなくてはならないのが，計算メッシュが細くなれば計算の精度は一般に向上するが，計算時間が莫大に必要となり，実用的な計算がおこなえなくなる．また計算メッシュが多いと計算機のメモリの量を超える場合がある．そのため，計算機のメモリの量を超えないように計算メッシュを生成しなければならない．また，計算メッシュが生成できな

い場合が発生する．この場合は，表面形状メッシュの生成がうまくおこなわれていない可能性があるので，再びソフト MagicsRP に戻り表面形状データの生成をおこなった．計算メッシュの生成ができるまでこの作業を繰り返しおこなった．

以上の手順で 3 次元鼻腔形状の再構築をおこなった．また本研究では，医療用画像から鼻腔の空気の領域の抽出をおこない形状を再構築することで鼻腔形状とした．方法 1 で 12 ビット階調を 8 ビット階調として読み込みをおこなったのは，12 ビット階調のままだと，後におこなわなければならない画像処理ができなかったためである．

再構築した 3 次元鼻腔形状を図 2.4，図 2.5，図 2.6 に示した．

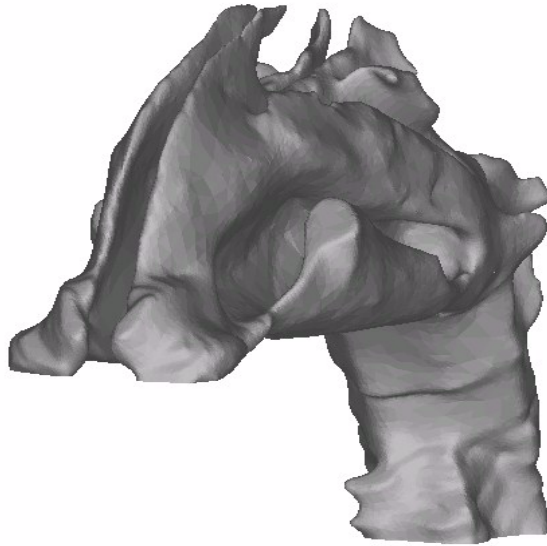


図 2.4: 再構築した 3 次元鼻腔形状

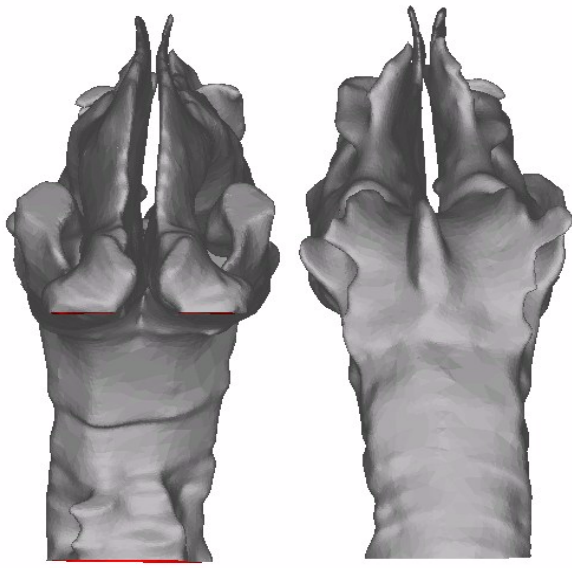


図 2.5: 鼻腔前方 (左), 鼻腔後方 (右)

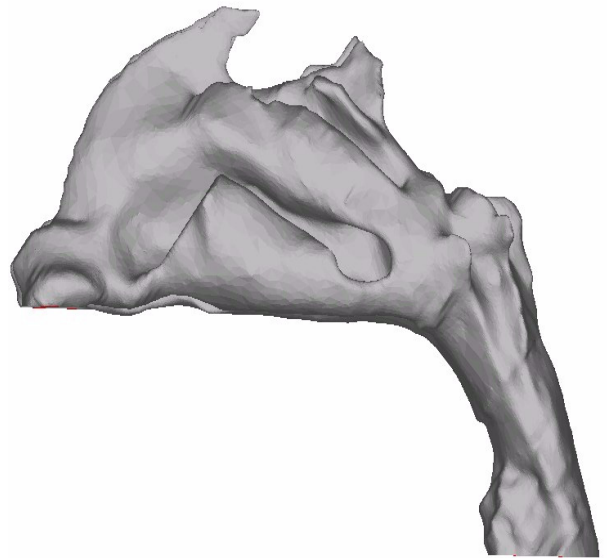


図 2.6: 鼻腔側面

図 2.4 は，本研究で再構築をおこなった 3 次元鼻腔形状である．画像向かって手前側が外鼻孔で，画像向かって奥側が中咽頭である．空気の流れとしては画像向かって手前から奥方向に流れることになる．図 2.5 は，3 次元鼻腔形状を前方から，後方から見た図である．鼻腔後方で左右に分かれていた鼻腔が 1 つになっているのが確認できる．図 2.6 は，3 次元鼻腔形状を左側面から見た図である．

第3章 熱解析

3.1 基礎方程式

第2章で再構築した3次元鼻腔形状を用いて定常計算による数値熱流体解析をおこなった。計算メッシュの生成は第2章でおこなった。以下に使用したソフトを示した。

- FLUENT 社製 FLUENT6.2.16 : 数値熱流体解析をおこなうのに用いたソフトウェア

数値熱流体解析をおこなうにあたっては以下の方程式を基礎方程式とした。

- 連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

- ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.2)$$

ここで、 u_i, u_j は速度、 t は時間、 x_i, x_j は座標、 P は圧力、 μ は動粘性係数をあらわす。

- エネルギー方程式

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (3.3)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.4)$$

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (3.5)$$

ここで、 k_{eff} は実効伝導率、 J_j は拡散流、 h はエンタルピー、 Y_j は質量分率をあらわす。

3.2 計算条件と境界条件

数値熱流体解析をおこなうにあたって、レイノルズ数は下記の仮定をもとに計算をおこなった。また、外鼻孔を流入面として一様分布の流速を与えた。外鼻孔直径を $1.0 \times 10^{-2}[m]$ の円とし、この直径を代表長さとした。安静時における呼吸 1 回あたりの流量は $5.00 \times 10^{-4}[m^3]$ 、呼気回数は毎分 12 回であるから、これらの条件から代表速さを算出すると、流速は $1.27[m/s]$ となった。レイノルズ数は、代表長さおよび代表速さから 841 と計算された。

本研究でおこなった数値熱流体解析における計算条件を表 3.1、境界条件を表 3.2 に示した。数値熱流体解析をおこなうにあたっては、定常・非圧縮粘性流体を仮定し、生活想定内における温度の流入とした。流入は両鼻腔に対して一様流とした。数値計算に用いた計算機は、Intel 社製 CPU Pentium4 2.8GHz、メモリー 2GB 搭載のパーソナルコンピュータと、SGI 社製 Altix3700 の大規模計算機を用いた。

表 3.1: 計算条件 (生活想定内時)

計算メッシュ数	約 120 万要素
密度	$1.225[kg/m^3]$
レイノルズ数	841
流入温度	$273.15[K]$ から $313.15[K]$

表 3.2: 境界条件 (生活想定内時)

鼻腔壁	no-slip, 等温壁 ($304.15[K]$)
流入条件	$1.27[m/s]$ (一様流)
流出条件	圧力ゼロ・速度勾配ゼロ (出口境界設定), 温度設定なし

3.3 鼻腔内における空気の流れの計算結果

鼻腔内における空気の流れの様子を図 3.1 と図 3.2 に示す.

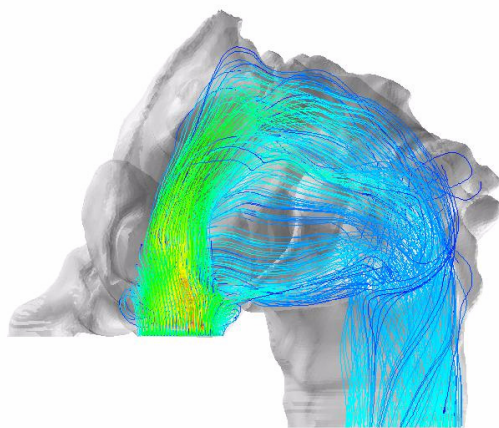


図 3.1: 左鼻腔内における空気の流れ

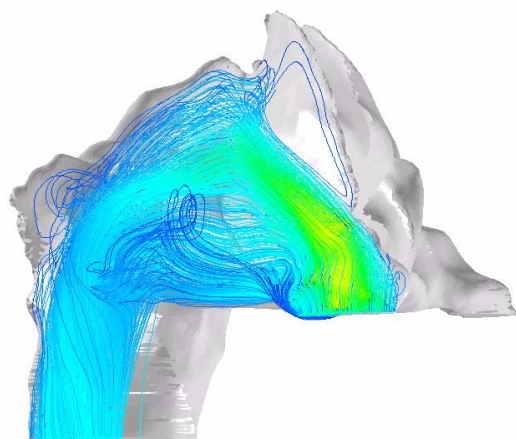


図 3.2: 右鼻腔内における空気の流れ

図 3.1 が左鼻腔内の流線図，図 3.2 が右鼻腔内の流線図である．各々，画像向かって手前側が外鼻孔で奥側が中咽頭である．よって，画像手前側から奥側に向かって空気は流れている．流線の色についてであるが，青色に近づくほど流速が小さく，赤色に近づくほど流速が大きいことをあらわしている．

図 3.1 の左鼻腔内の空気の流れでは，鼻腔形状に沿って空気が流れている様子が見られた．総鼻道中部から上部にかけて流速が大きかった．下鼻道においては流速が小さかった．また，鼻腔前方と鼻腔後方とでは，鼻腔前方の方が流速が大きかった．

図 3.2 の右鼻腔内の空気の流れでは，左鼻腔内とは異なった流れであることがわかる．まず総鼻道下部から中部にかけて流速が大きかった．下鼻道においては流速が小さかった．また，鼻腔前方の上鼻道で 2 次的流れがおこっていた．鼻腔前方と鼻腔後方とでは，鼻腔前方の方が流速が大きかった．

3.4 生活想定内における鼻腔内温度分布

数値熱流体解析によりおこなった生活想定内における鼻腔内温度分布の計算結果を示す．図 3.3 に図 3.4 で示す数値熱流体解析の結果の断面位置を示した．図 3.3 の断面 1，断面 2 で示す部分で計算結果を示したのは，ある特定の部位だけの流れを見ることが目的ではなく，全体の分布の様子を見ることが目的であるためである．

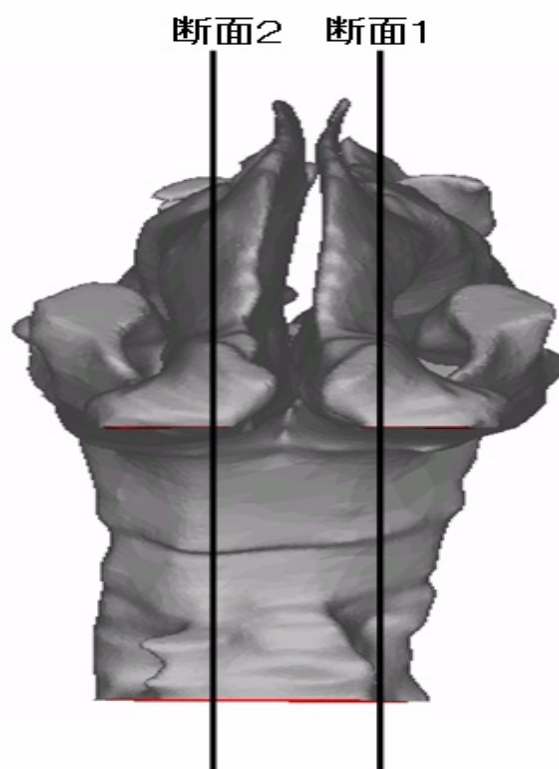


図 3.3: 鼻腔形状と断面位置

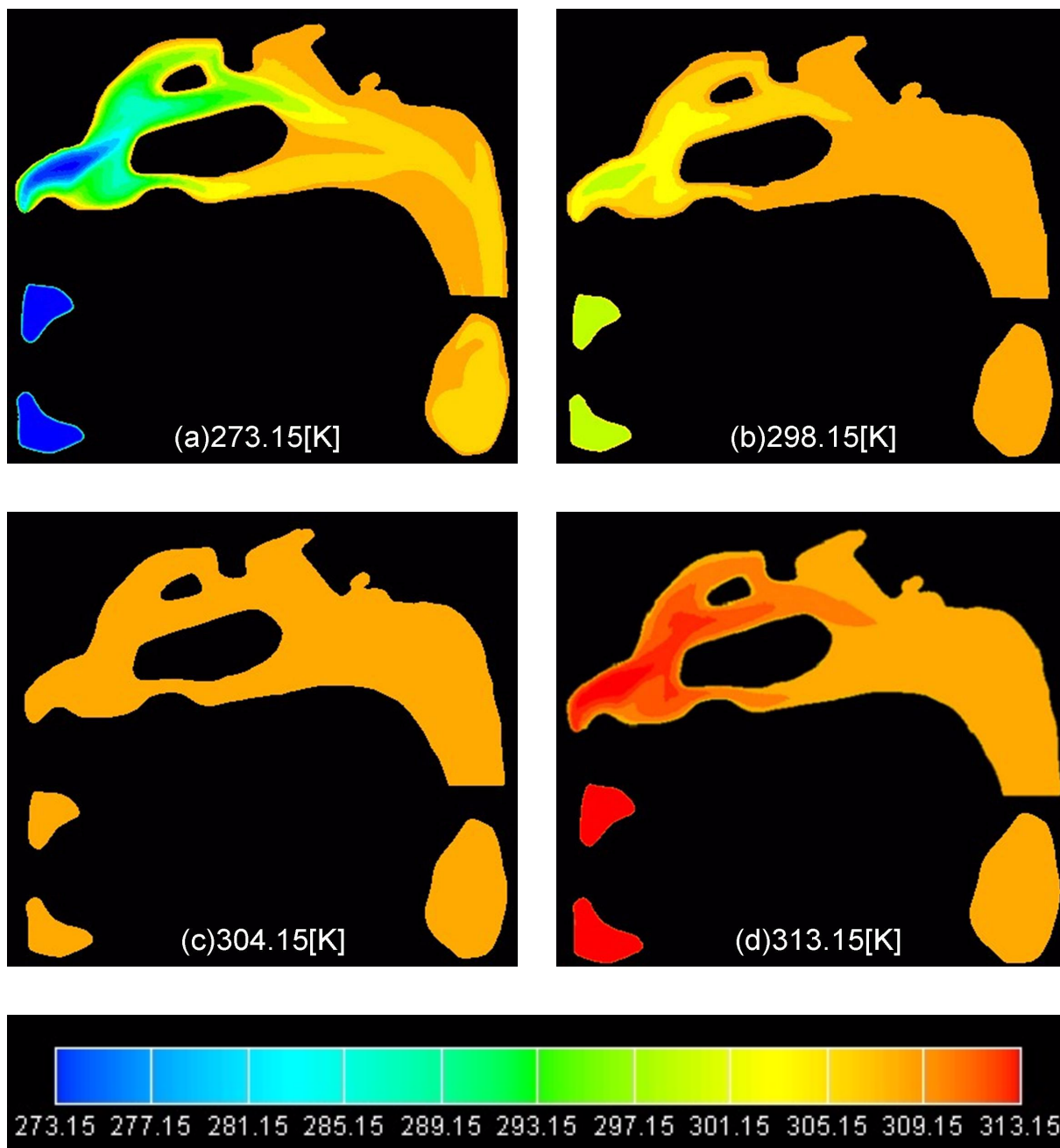


图 3.4: 左鼻腔内温度分布

図 3.4(a) から (d) は、それぞれ 273.15[K], 298.15[K], 304.15[K], 313.15[K] の空気が外鼻孔より流入されたときの左鼻腔内温度分布図である。また各々の左鼻腔内温度分布図の下部に示した断面は、左側の 2 つが外鼻孔の断面、右側が中咽頭の断面である。数値熱流体解析をおこなうにあたっては、流入温度と鼻腔壁面温度に対してのみ温度境界を設定し、流出温度に関しては温度境界は与えていない。鼻腔内での温度調整は鼻腔壁面からの熱の流入とした。

図 3.4(a) での流入温度は、冬の外気温度を想定した。外鼻孔から 273.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で加温され、鼻腔後方付近では低いところで 300.15[K]、高いところでは鼻腔壁面温度まで加温されていた。中咽頭の平均断面温度は 302.82[K] であった。図 3.4(b) での流入温度は、室内温度を想定した。外鼻孔から 298.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で加温され、鼻腔後方では鼻腔壁面温度まで加温されていた。中咽頭の平均断面温度は 303.89[K] であった。図 3.4(c) では、外鼻孔から 304.15[K] で空気が流入されているが鼻腔壁面温度と同じであるため、鼻腔内における温度上昇、温度下降の様子は見られなかった。中咽頭の平均断面温度は 304.15[K] であった。図 3.4(d) の流入温度は、暑い夏場を想定した。外鼻孔から 313.15[K] で流入された空気が鼻腔後方において、鼻腔壁面温度までの冷却されていた。中咽頭の平均断面温度は 304.54[K] であった。また、どの流入温度の場合においても中鼻道と下鼻道とでは、下鼻道の方が温度上昇、温度冷却が大きかった。

次に、断面 2 で切断した数値熱流体解析の計算結果を図 3.5 に示した。図 3.5(a) から (d) は、それぞれ 273.15[K], 298.15[K], 304.15[K], 313.15[K] の空気が外鼻孔より流入されたときの右鼻腔内温度分布図である。図 3.5(a) より、273.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で加温され、鼻腔後方では低いところで 295.15[K]、高いところで鼻腔壁面温度まで加温されていた。また中鼻道と下鼻道とでは、下鼻道の方が温度上昇が大きかった。図 3.5(b) では、298.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で加温され、鼻腔後方では低いところで 297.15[K]、高いところで鼻腔壁面温度まで加温されていた。また中鼻道と下鼻道とでは、下鼻道の方が温度上昇が大きかった。図 3.5(c) は、304.15[K] で空気が流入されているが、流入温度と鼻腔壁面温度が同じであるため温度分布は見られなかった。図 3.5(d) であるが、313.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で冷却され、鼻腔後方では高いところで 307.15[k]、低いところでは鼻腔壁面温度まで冷却されていた。また中鼻道と下鼻道とでは、下鼻道の方が温度冷却が大きいことがわかった。

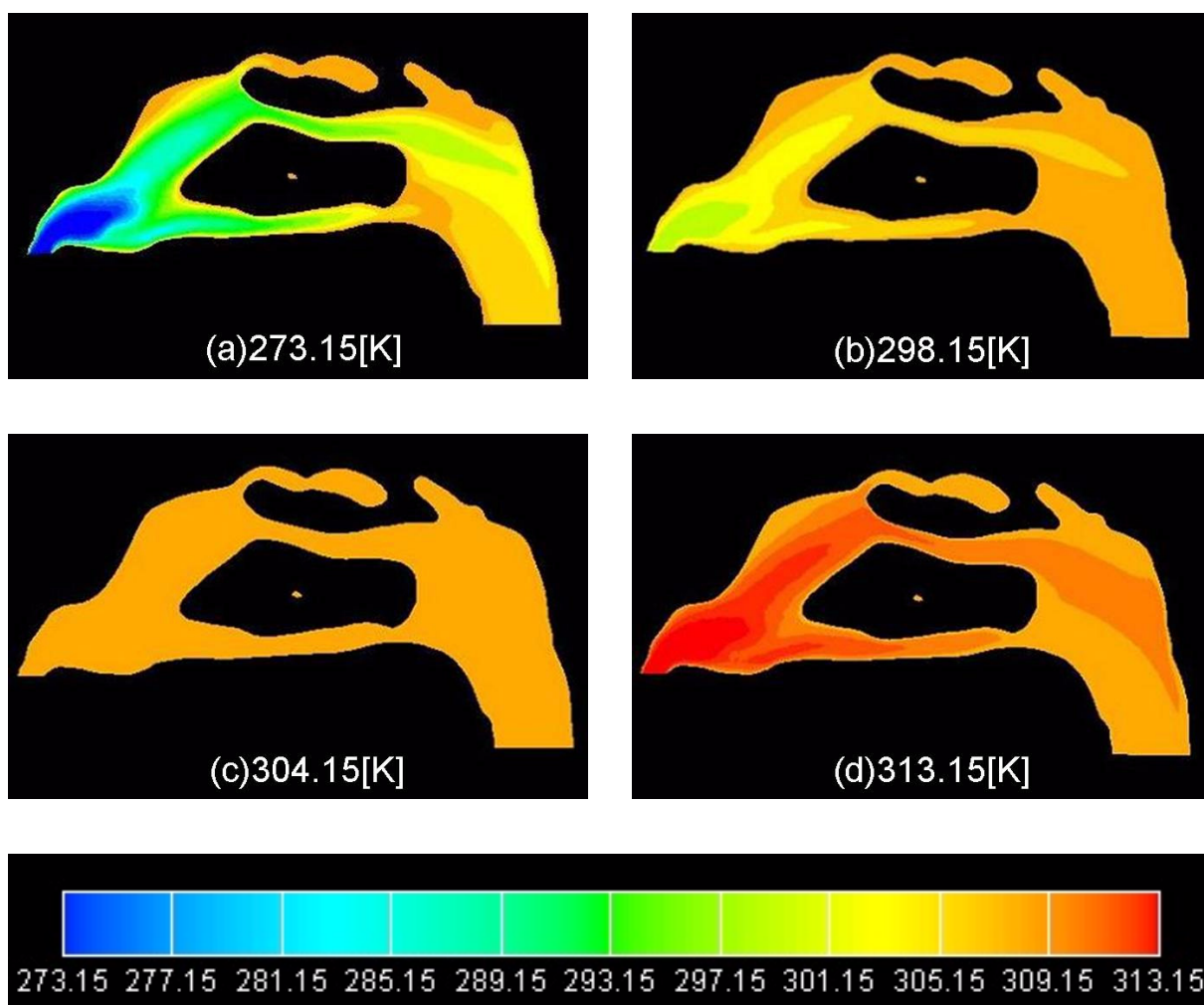


图 3.5: 右鼻腔内温度分布

3.4.1 同じ流入温度による左鼻腔と右鼻腔の比較

同じ流入温度での左鼻腔と右鼻腔の数値熱流体解析の計算結果を図 3.6 から図 3.9 に示した。図 3.6 は、273.15[K] の空気が外鼻孔より流入されたときの左鼻腔内 (左図) と右鼻腔内 (右図) の温度分布図である。左鼻腔内、右鼻腔内ともに、273.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で加温されていた。しかし、鼻腔後方で左右の鼻腔内の温度分布が異なるっていた。

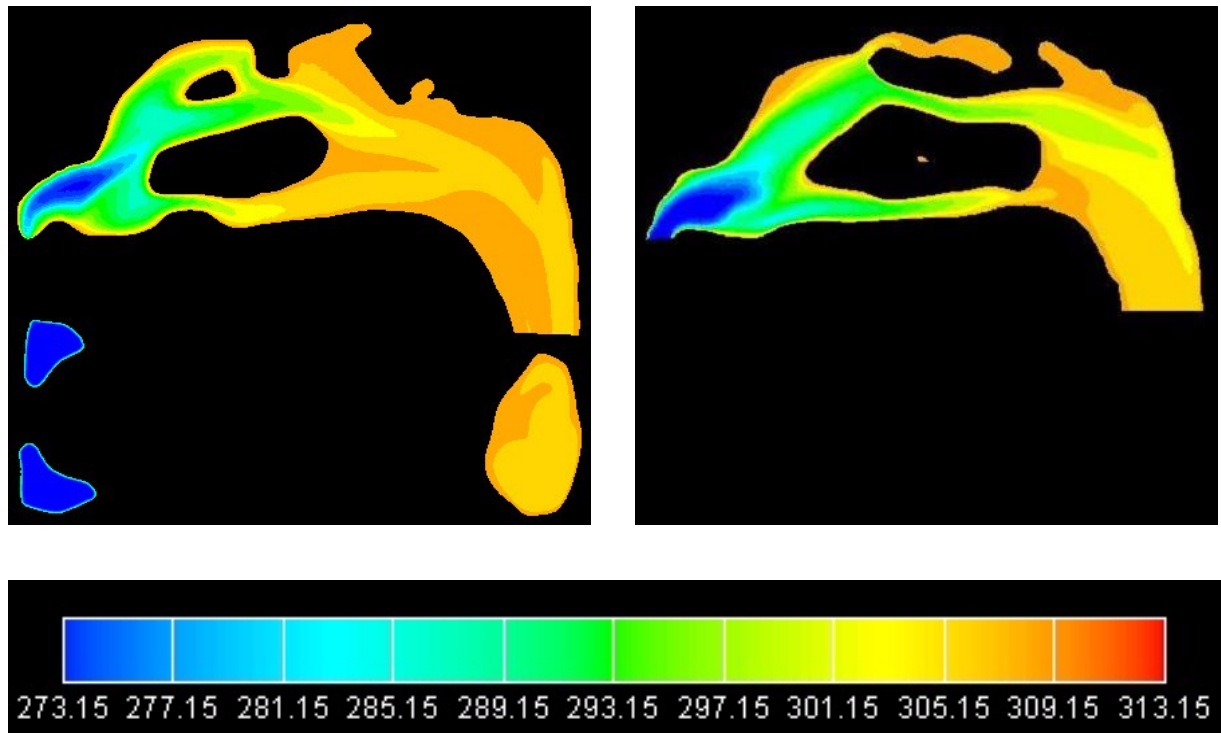


図 3.6: 流入温度 273.15[K] における左鼻腔内と右鼻腔内の温度分布

図 3.7 は、298.15[K] の空気が外鼻孔より流入されたときの左鼻腔内 (左図) と右鼻腔内 (右図) の温度分布図である。左鼻腔内、右鼻腔内ともに、298.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で加温されていた。しかし、図 3.6 同様、鼻腔後方で左右の鼻腔内の温度分布が異なっていた。

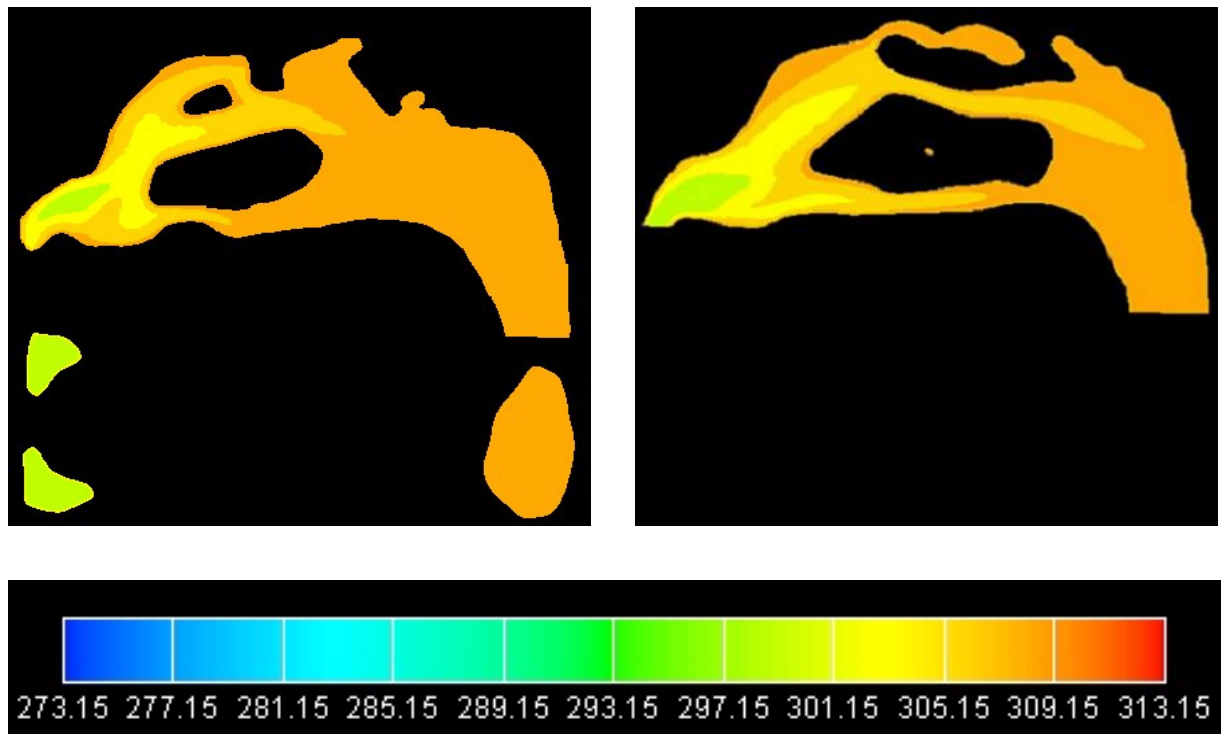


図 3.7: 流入温度 298.15[K] における左鼻腔内と右鼻腔内の温度分布

図 3.8 は、304.15[K] の空気が外鼻孔より流入されたときの左鼻腔内 (左図) と右鼻腔内 (右図) の温度分布図である。左鼻腔内、右鼻腔内ともに、304.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で加温されていた。しかし、図 3.6、図 3.7 同様、鼻腔後方で左右の鼻腔内の温度分布が異なっていた。

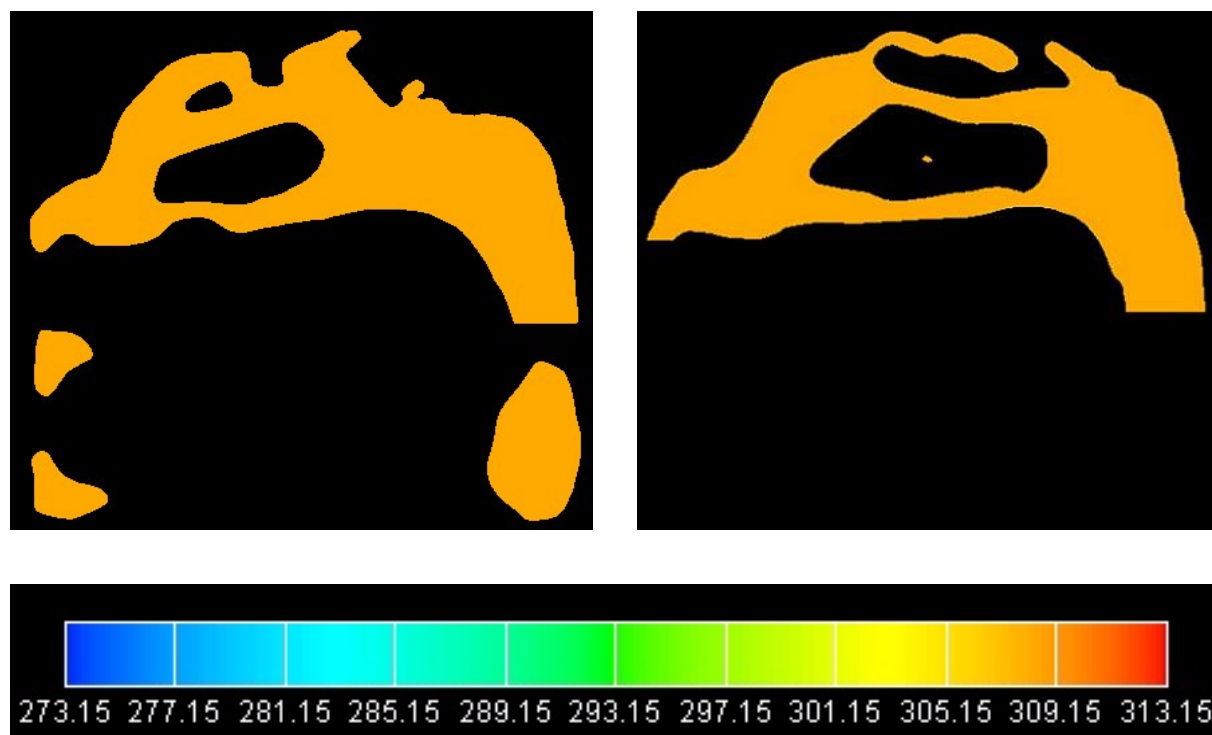


図 3.8: 流入温度 304.15[K] における左鼻腔内と右鼻腔内の温度分布

図 3.9 は，313.15[K] の空気が外鼻孔より流入されたときの左鼻腔内 (左図) と右鼻腔内 (右図) の温度分布図である．左鼻腔内，右鼻腔内ともに，313.15[K] で流入された空気が鼻腔前方で加温されていた．しかし，図 3.6，図 3.7，図 3.8 同様，鼻腔後方で左右の鼻腔内の温度分布が異なっていた．

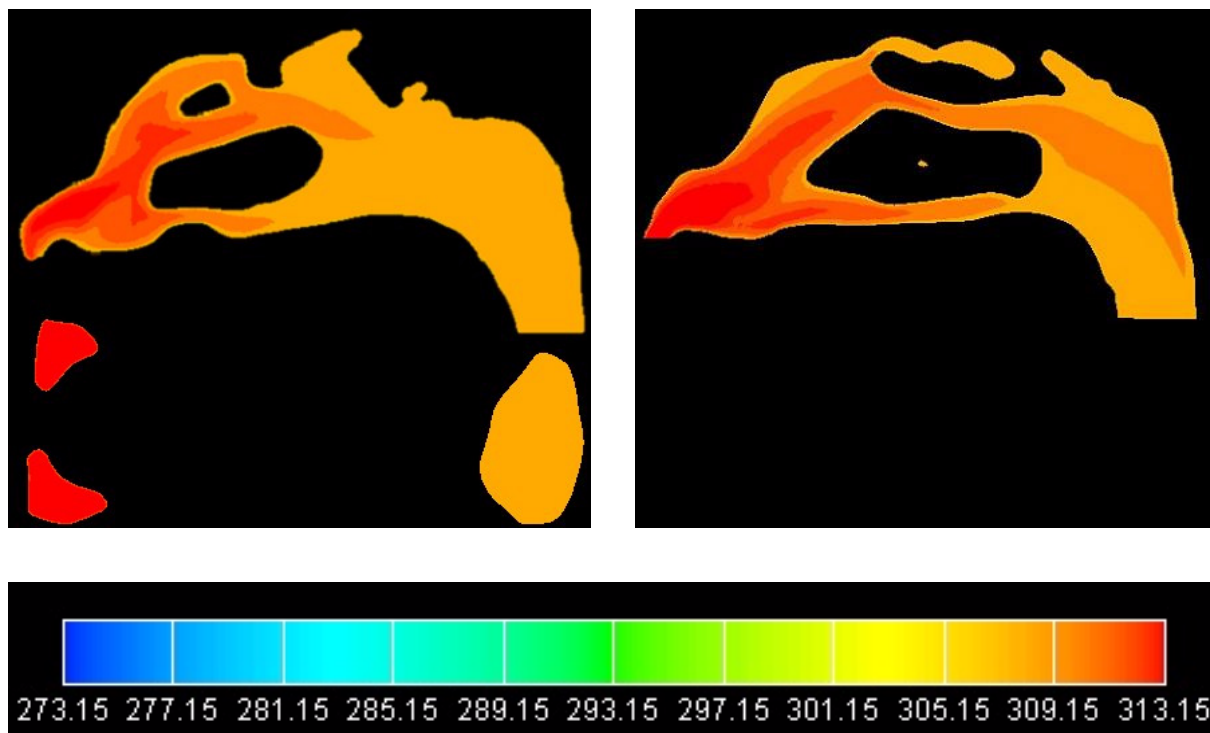
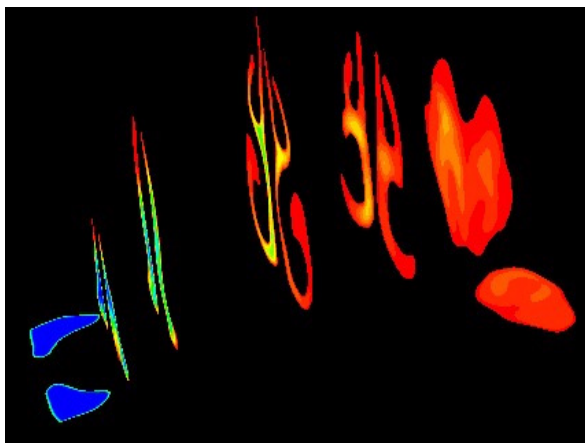


図 3.9: 流入温度 313.15[K] における左鼻腔内と右鼻腔内の温度分布

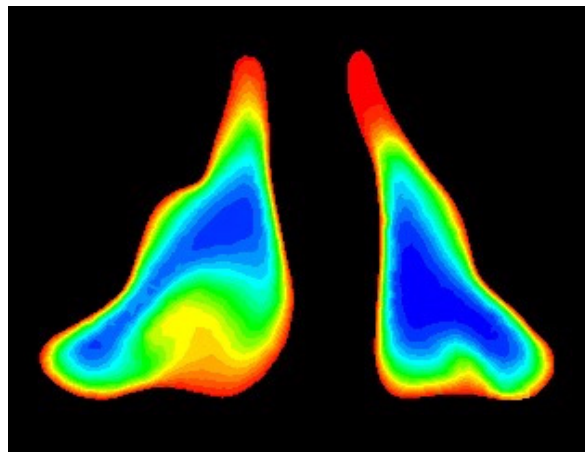
以上より，各々の流入温度において，鼻腔後方で左鼻腔と右鼻腔の温度分布が異なっていることがわかった．

3.4.2 複数の断面から見た鼻腔内温度分布

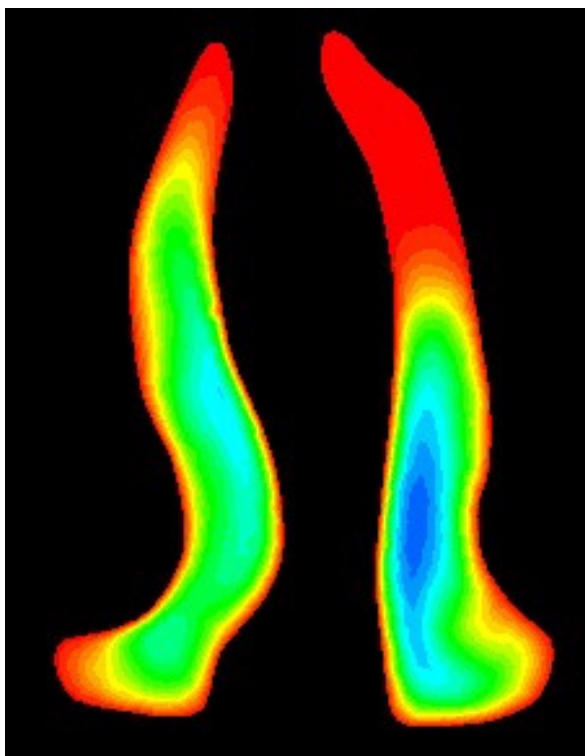
流入温度 273.15[K] から 313.15[K] まで 5.15[K] ごとに，5つの断面位置での切断をおこない温度分布を示した．まず，流入温度が 273.15[K] のときの各断面を示したのが図 3.10 である．切断面と形状との位置関係を図 3.10(a) に示した．図の左側が外鼻孔，右側が中咽頭である．図 3.10 断面 (b) から図 3.10 断面 (f) は，図 3.10(a) の各断面を示したものである．図向かって左側が左鼻腔，右側が右鼻腔をあらわしている．



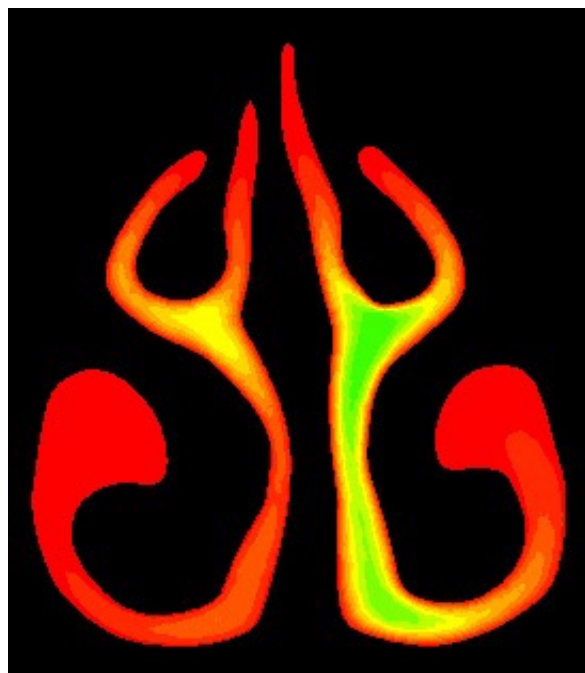
(a) 断面全体図



断面 b



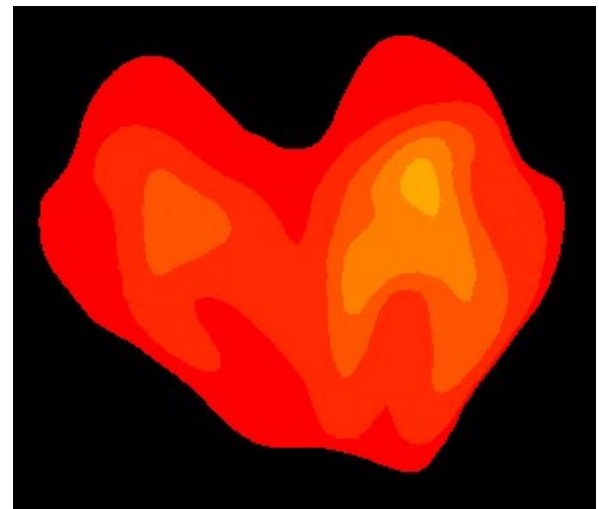
断面 c



断面 d



断面 e



断面 f

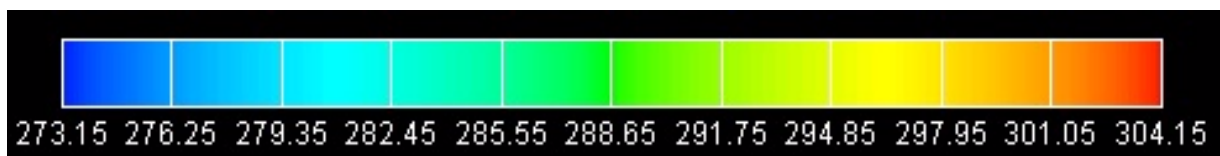
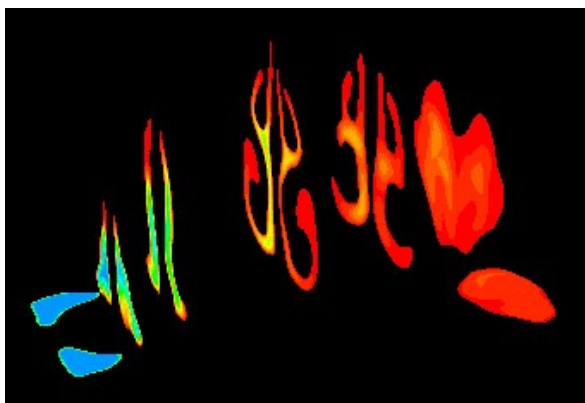


図 3.10: 流入温度 273.15[K] における鼻腔内断面図

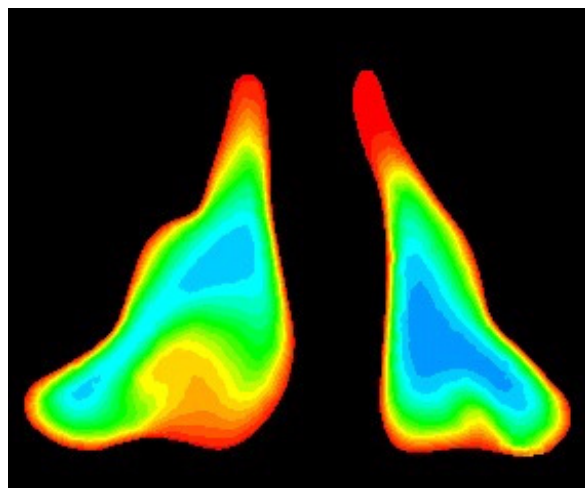
図 3.10 断面 b であるが，鼻腔下部においては，流入された空気が左鼻腔では 283.15[K]，右鼻腔では 286.15[K] まで加温されていた．鼻腔上部においては，両鼻腔共に鼻腔壁面温度程度まで流入された空気が加温されていた．鼻腔上部においては，右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きかった．図 3.10 断面 c であるが，鼻腔下部においては，流入された空気が左鼻腔では 284.15[K]，右鼻腔では 287.15[K] まで加温されていた．鼻腔中部においては，両鼻腔とも 286.15[K] であった．鼻腔上部においては，流入された空気が両鼻腔共に鼻腔壁面温度程度まで加温されていた．しかし左鼻腔と右鼻腔とでは，右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きかった．図 3.10 断面 d であるが，この断面は鼻腔形状の中間断面にあたる．下鼻道においては，左鼻腔では 300.15[K]，右鼻腔では 297.15[K] まで加温されていた．中鼻道においては，左鼻腔では 302.15[K]，右鼻腔では 291.15[K] であった．鼻腔上部においては，両鼻腔とも鼻腔壁面温度まで加温されていた．図 3.10 断面 b，断面 c，断面 d より，鼻腔前方では下鼻道においては，左鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きく，鼻腔上部においては，右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた．

次に図 3.10 断面 e であるが，下鼻道においては，左鼻腔では鼻腔壁面温度まで加温されていた．右鼻腔では低い部位で 302.15[K]，高い部位では鼻腔壁面温度まで加温されていた．図 3.10 断面 f であるが，左鼻腔と右鼻腔とが合流して 1 つの空間になっている部位で

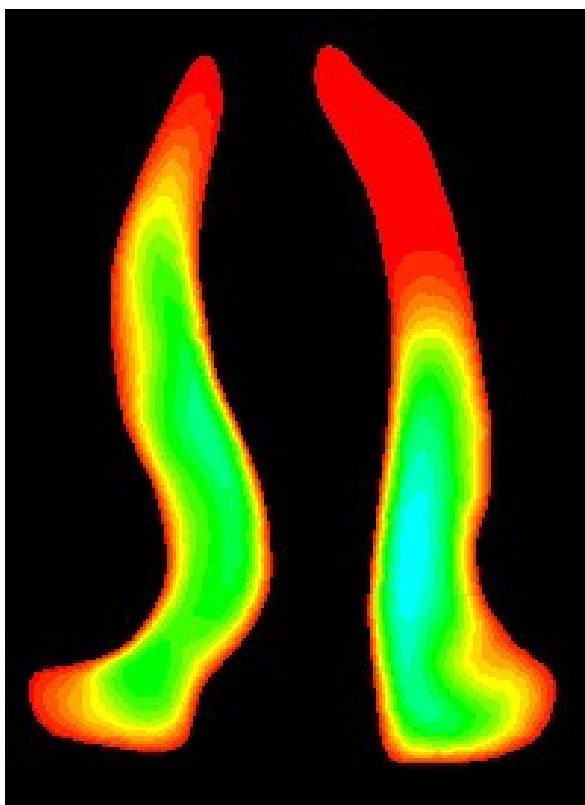
ある．鼻腔断面内において流入された空気が，温度の低い部位で 297.15[K]，高い部位で鼻腔壁面温度まで加温されていた．図 3.10 断面 e，断面 f より，鼻腔後方では両鼻腔とも鼻腔壁面温度まで加温されていたが，鼻腔断面においては，左側が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた．また，中咽頭断面での平均温度は 302.82[K]であった．



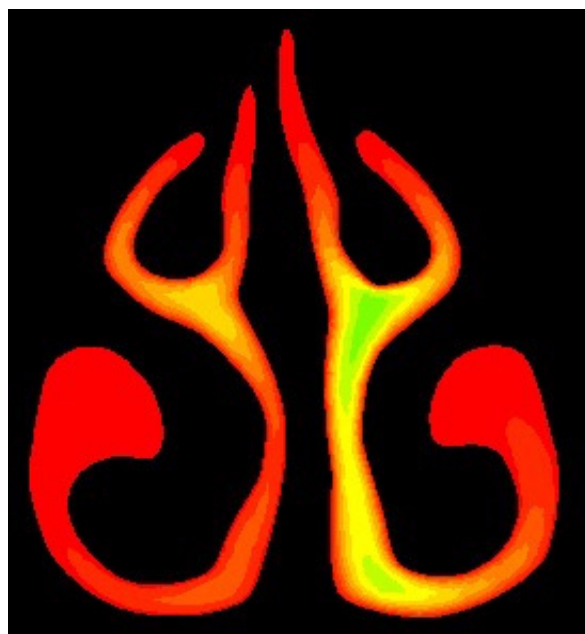
(a) 断面全体図



断面 b



断面 c



断面 d

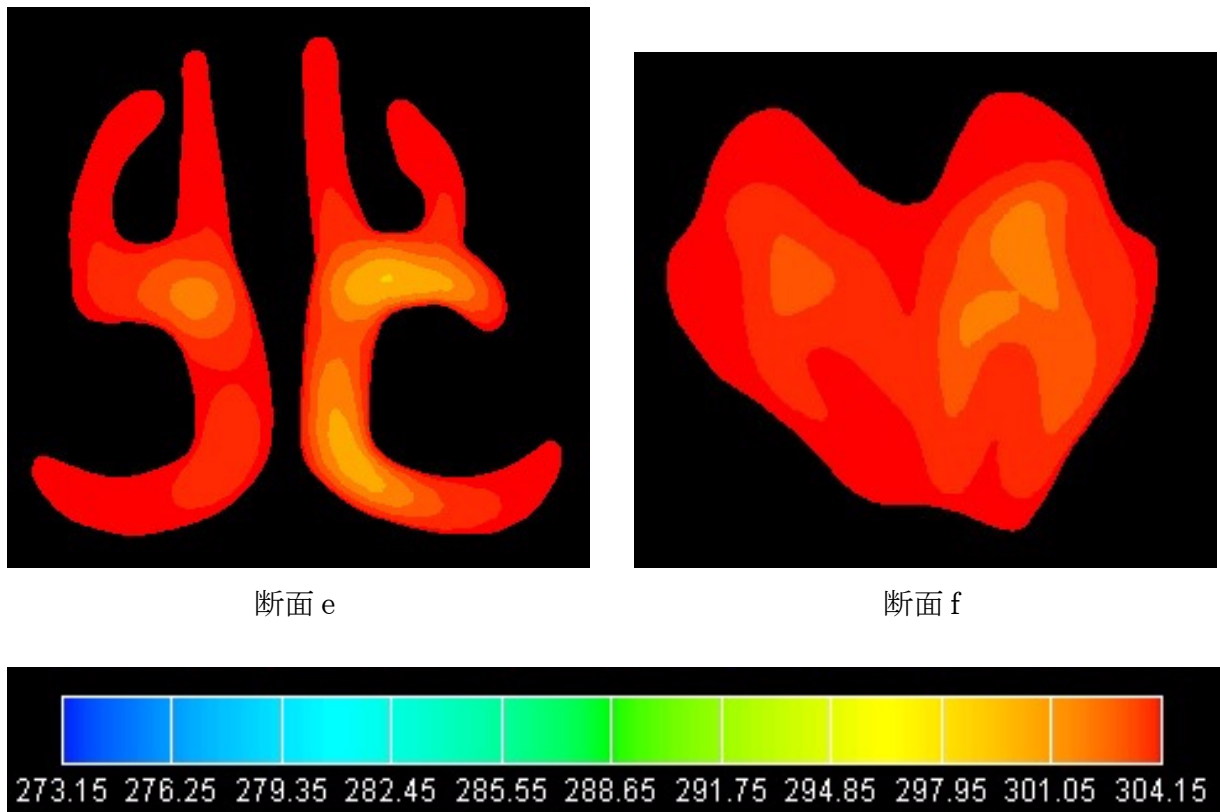
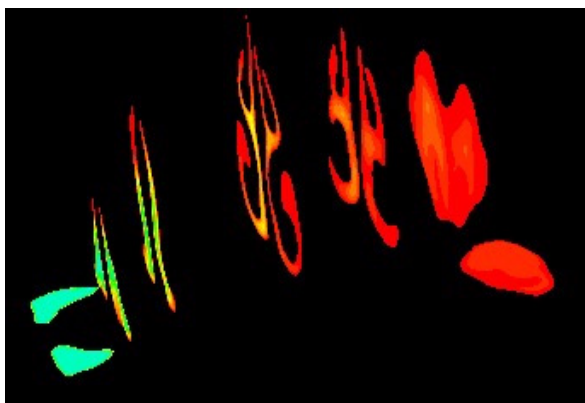


図 3.11: 流入温度 278.15[K] における鼻腔内断面図

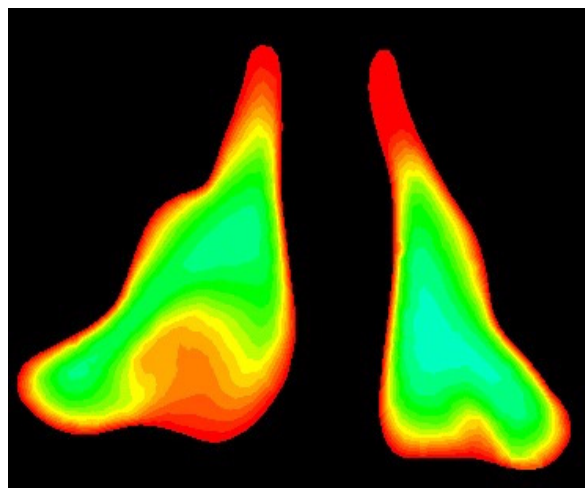
図 3.11 に流入温度が 278.15[K] のときの各断面を示した。図 3.11 断面 b であるが、鼻腔下部においては流入された空気が、左鼻腔では 284.15[K]、右鼻腔では 286.15[K] まで加温されていた。鼻腔上部においては、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きかった。図 3.11 断面 c であるが、鼻腔下部においては流入された空気が、左鼻腔では 289.15[K]、右鼻腔では 286.15[K] まで加温されていた。鼻腔上部においては、両鼻腔共に鼻腔壁面温度まで加温されていたが、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きかった。図 3.11 断面 d であるが、下鼻道においては流入された空気が、両鼻腔とも鼻腔壁面温度まで加温されていた。しかし、総鼻道下部においては、左鼻腔では鼻腔壁面温度まで加温されているのに対して、右鼻腔では 296.15[K] であった。鼻腔上部では両鼻腔とも鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.11 断面 b, 断面 c, 断面 d より、鼻腔前方では下鼻道においては、左鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きく、鼻腔上部においては、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた。

次に図 3.11 断面 e であるが、下鼻道においては、左鼻腔では鼻腔壁面温度まで加温されていた。右鼻腔では低い部位で 302.15[K]、高い部位で鼻腔壁面温度まで加温されていた。鼻腔上部においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.11 断面 f

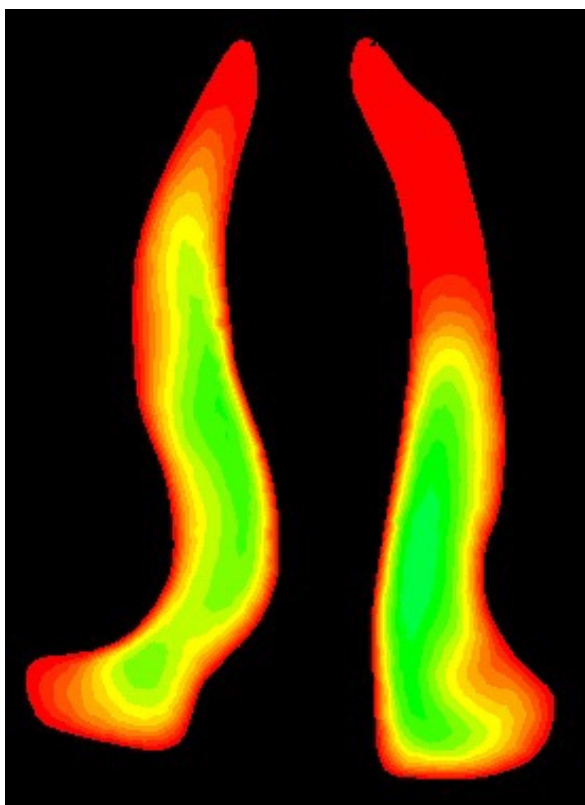
であるが，流入された空気が温度の低い部位で 299.15[K]，高い部位で鼻腔壁面温度まで加温されていた．図 3.11 断面 e，断面 f より，鼻腔後方では両鼻腔とも鼻腔壁面温度まで加温されていたが，鼻腔断面においては左側が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた．また，中咽頭断面での平均温度は 303.03[K] であった．



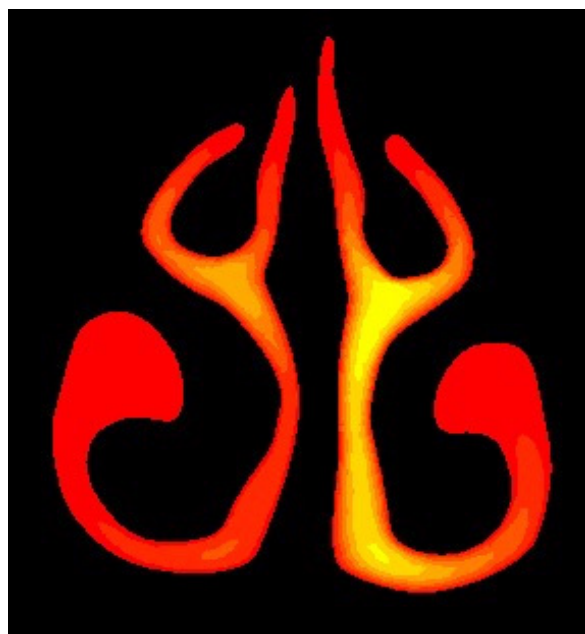
(a) 断面全体図



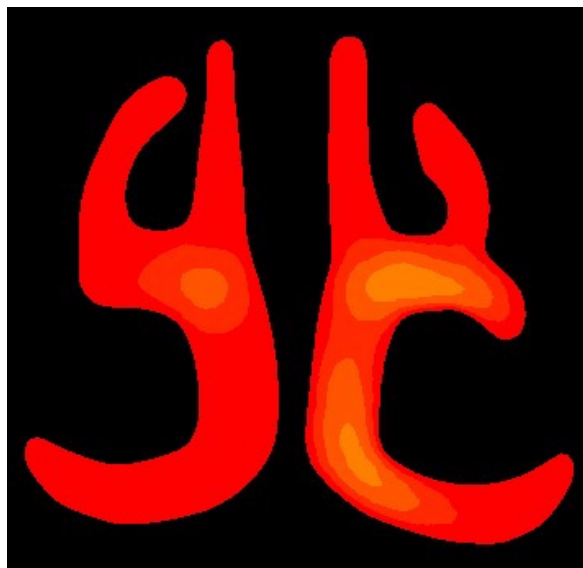
断面 b



断面 c



断面 d



断面 e



断面 f

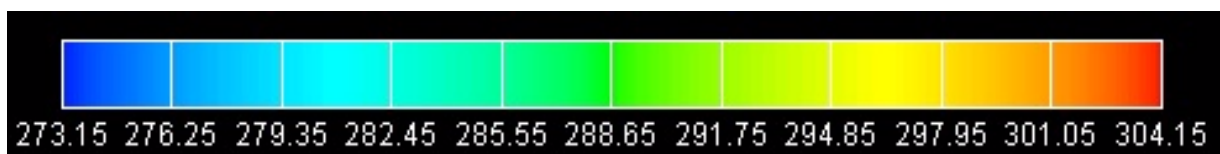
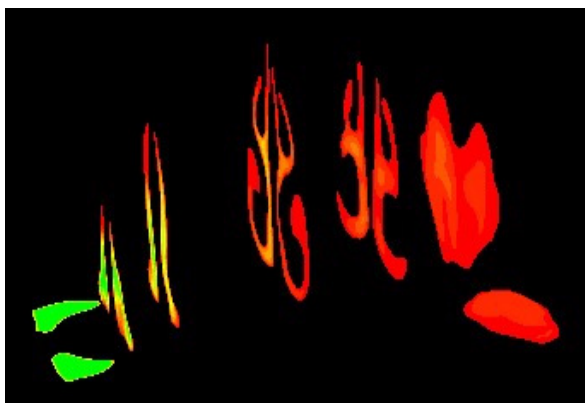


図 3.12: 流入温度 283.15[K] における鼻腔内断面図

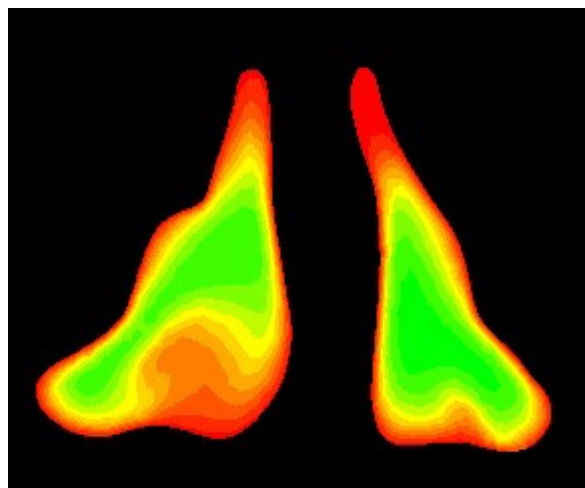
図 3.12 に流入温度が 283.15[K] のときの各断面を示した。図 3.12 断面 b であるが、鼻腔下部においては、流入された空気が左鼻腔では 287.15[K]，右鼻腔では 286.15[K] まで加温されていた。鼻腔上部においては、両鼻腔とも流入された空気が鼻腔壁面温度まで加温されていたが、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きかった。図 3.12 断面 c であるが、下鼻道においては、流入された空気が左鼻腔では 294.15[K]，右鼻腔では 291.15[K] まで加温されていた。鼻腔上部では、両鼻腔とも流入された空気が鼻腔壁面温度まで加温されていたが、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きかった。図 3.12 断面 d であるが、下鼻道においては、流入された空気が左鼻腔では鼻腔壁面温度まで加温されていた。右鼻腔では低い部位で 300.15[K]，高い部位で鼻腔壁面温度まで加温されていた。総鼻道においては、流入された空気が左鼻腔では 302.15[K]，右鼻腔では 296.15[K] まで加温されていた。鼻腔上部においては、両鼻腔とも鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.12 断面 b，断面 c，断面 d より、鼻腔前方では鼻腔下部，下鼻道においては、左鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きく、鼻腔上部においては、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた。

次に図 3.12 断面 e であるが、下鼻道においては、両鼻腔とも流入された空気が鼻腔壁面温度まで加温されていた。総鼻道においては、左鼻腔では鼻腔壁面温度まで流入された

空気が加温されていたが，右鼻腔では低い部位で 299.15[K]，高い部位で鼻腔壁面温度まで加温されていた．鼻腔上部では両鼻腔とも鼻腔壁面温度まで流入された空気が加温されていた．図 3.12 断面 f であるが，流入された空気は低い部位で 299.15[K]，その他は鼻腔壁面温度まで加温されていた．図 3.12 断面 e，断面 f より，鼻腔後方では両鼻腔とも鼻腔壁面温度付近まで加温されていたが，鼻腔断面においては左側が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた．また，中咽頭断面での平均温度は 303.24[K] であった．



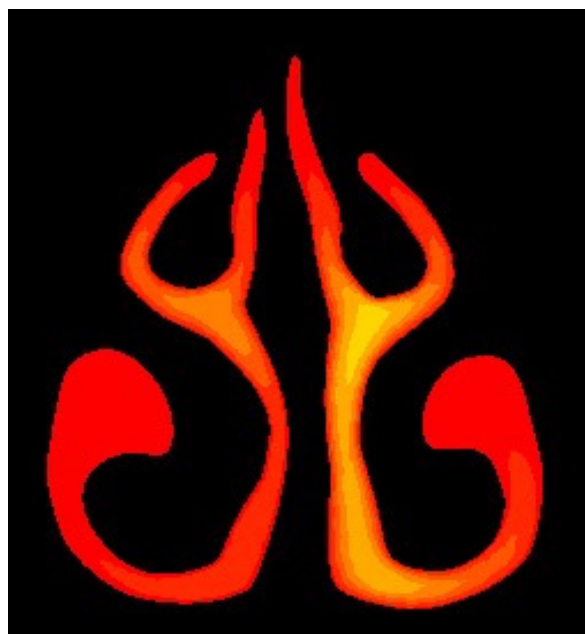
(a) 断面全体図



断面 b



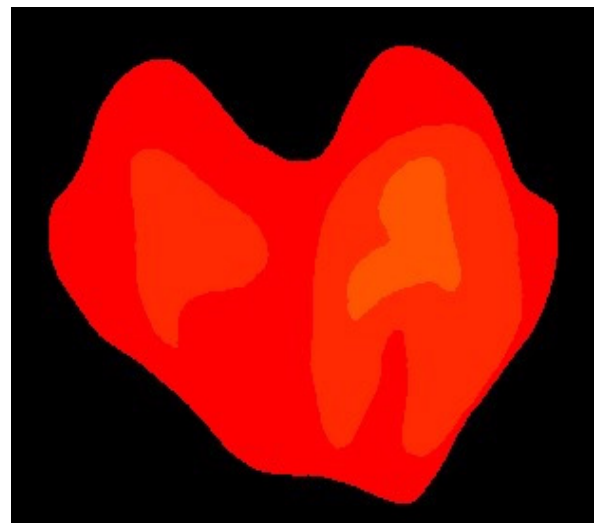
断面 c



断面 d



断面 e



断面 f

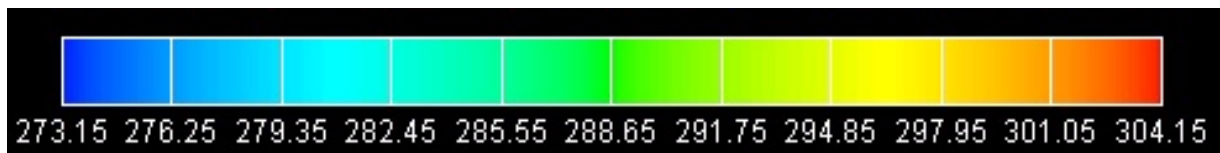


図 3.13: 流入温度 288.15[K] における鼻腔内断面図

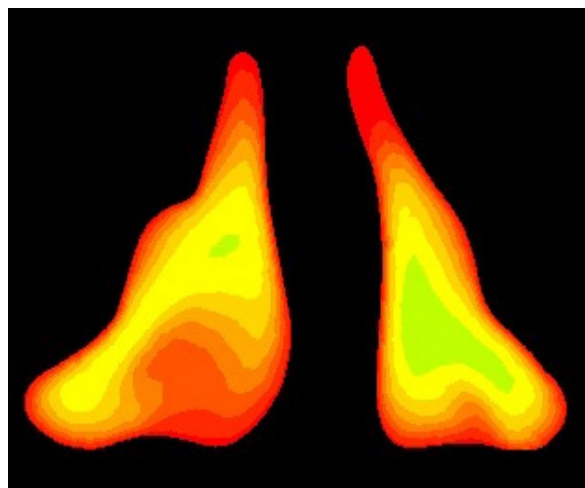
図 3.13 に流入温度が 288.15[K] のときの各断面を示した。図 3.13 断面 b であるが、鼻腔下部においては、流入された空気が左鼻腔では 292.15[K]、右鼻腔では 291.15[K] まで加温されていた。鼻腔上部では、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていたが、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度に加温されていた部位が大きかった。図 3.13 断面 c であるが、鼻腔下部においては、流入された空気が両鼻腔ともに 300.15[K] まで加温されていた。また鼻腔上部では、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていたが、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きかった。図 3.13 断面 d であるが、下鼻道においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていた。また左鼻腔に関しては、総鼻道においても鼻腔壁面温度まで加温されていた。右鼻腔の総鼻道においては、温度の低い部位で 297.15[K]、高い部位 (鼻腔上部) で鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.13 断面 b, 断面 c, 断面 d より、鼻腔前方では下鼻道においては、左鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きく、鼻腔上部においては、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた。

次に図 3.13 断面 e であるが、下鼻道においては、両鼻腔ともに流入された空気が鼻腔壁面温度まで加温されていた。中鼻道においては、左鼻腔では 300.00[K]、右鼻腔では 299.15[K] まで加温されていた。鼻腔上部では、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていた。図

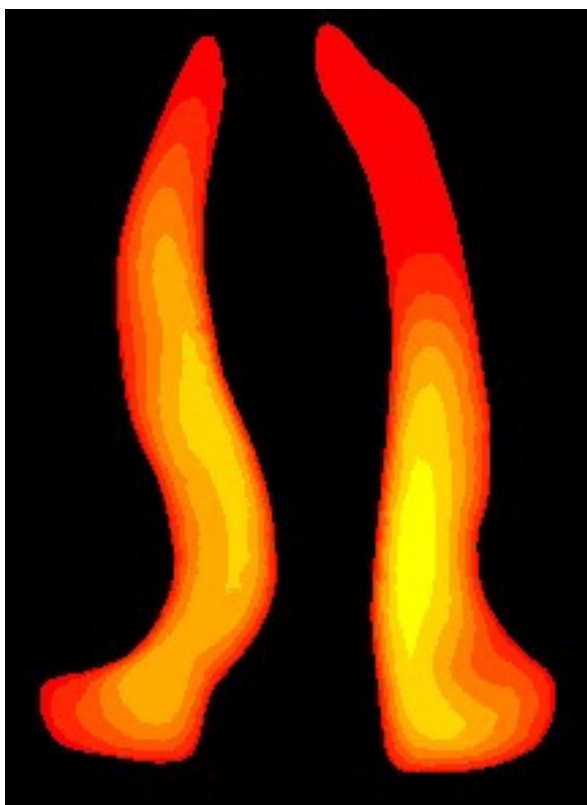
3.13 断面 f であるが，流入された空気は最も低い部位で 300.15[K]，その他は鼻腔壁面温度まで加温されていた．また断面 f 左側と断面 f 右側とでは，断面 f 右側に鼻腔壁面温度以外の温度分布が大きかった．図 3.13 断面 e，断面 f より，鼻腔後方では両鼻腔とも鼻腔壁面温度付近まで加温されていたが，鼻腔断面においては左側が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた．また，中咽頭断面での平均温度は 303.46[K] であった．



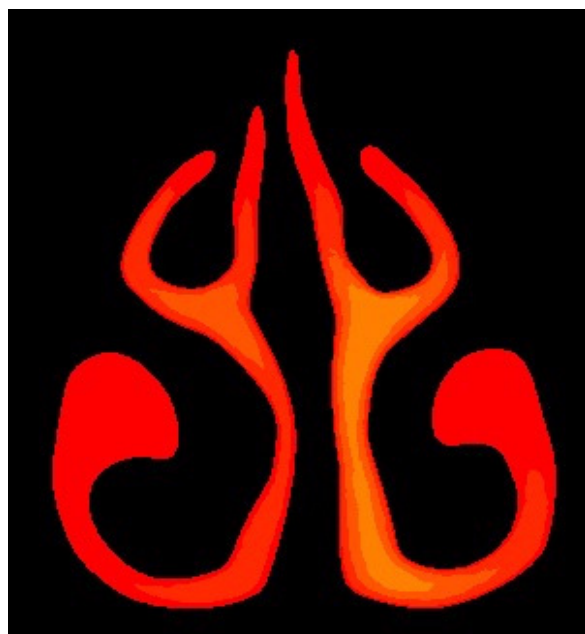
(a) 断面全体図



断面 b



断面 c



断面 d

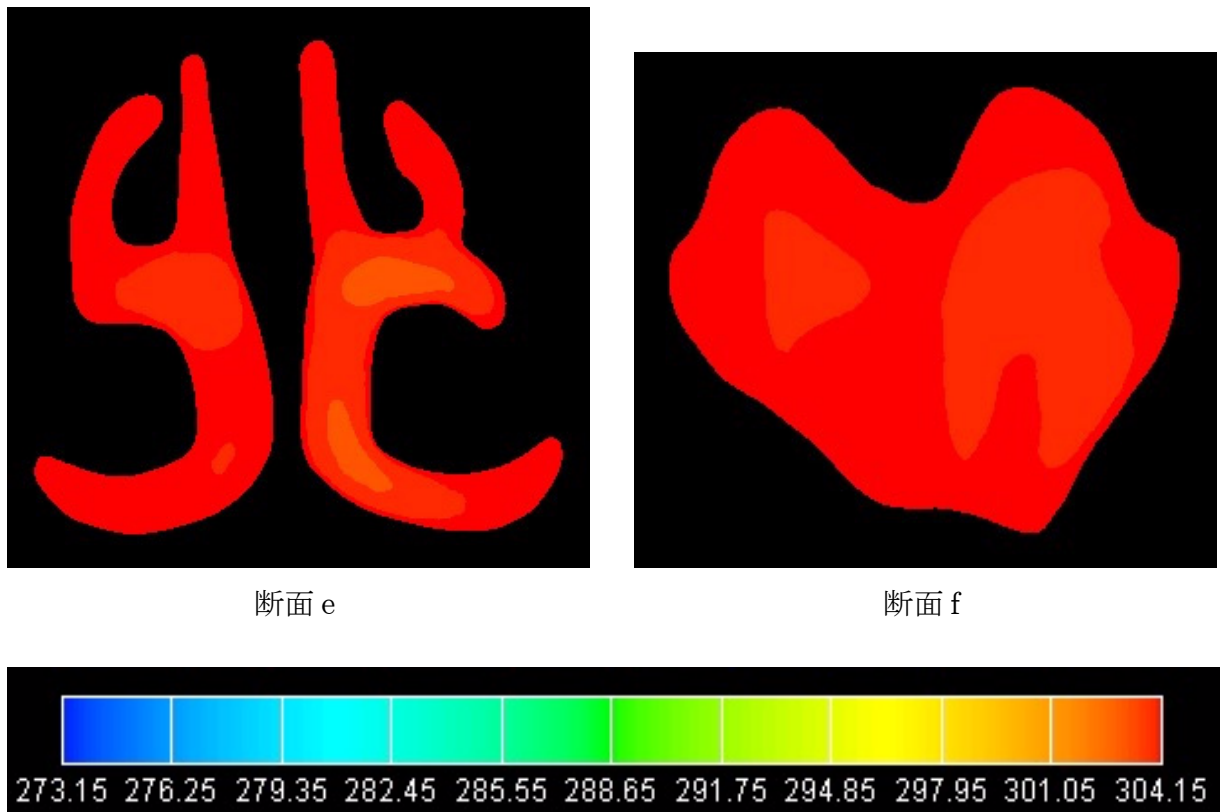


図 3.14: 流入温度 293.15[K] における鼻腔内断面図

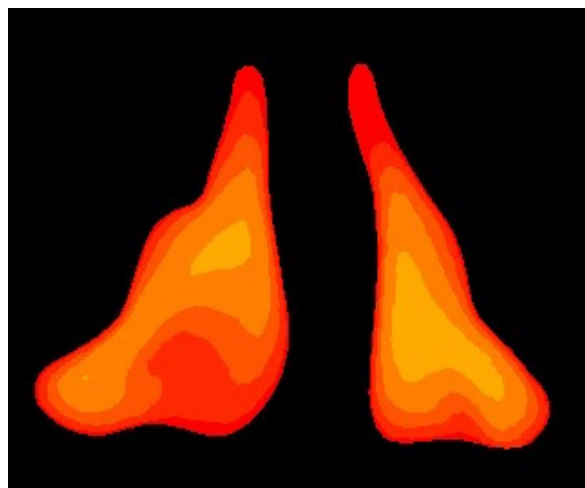
図 3.14 に流入温度が 293.15[K] のときの各断面を示した。図 3.14 断面 b であるが、鼻腔下部においては、流入された空気が両鼻腔ともに低い部位で 295.15[K]、高い部位で鼻腔壁面温度まで加温されていた。鼻腔上部においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.14 断面 c であるが、鼻腔下部においては、流入された空気が両鼻腔ともに 300.15[K] まで加温されていた。また鼻腔上部では、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていたが、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きかった。図 3.14 断面 d であるが、下鼻道においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていた。総鼻道においては、右鼻腔では 298.15[K] の部位が見られたが、左鼻腔では鼻腔壁面温度まで加温されていた。鼻腔上部においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.14 断面 b、断面 c、断面 d より、鼻腔前方では下鼻道においては、左鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きく、鼻腔上部においては、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた。

次に図 3.14 断面 e であるが、両鼻腔とも総鼻道において 301.15[K] の温度分布が見られるが、その他の部位では鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.14 断面 f であるが、断面右側、断面左側において 302.15[K] の温度分布が見られたが、その他の部位では鼻腔壁面温度まで流入された空気が加温されていた。図 3.14 断面 e、断面 f より、鼻腔後方では両

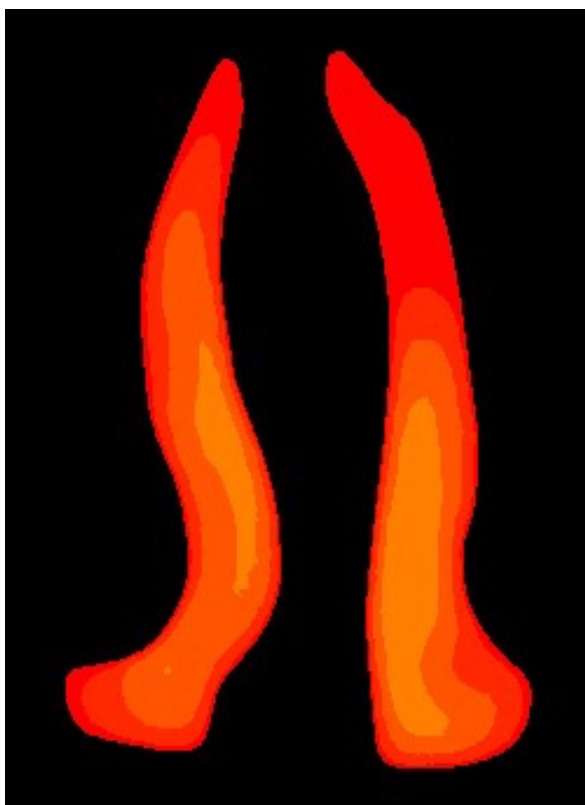
鼻腔とも鼻腔壁面温度付近まで加温されていたが，鼻腔断面においては左側が鼻腔壁面温度まで加温されていた部位が大きいことが確認できた．また，中咽頭断面での平均温度は303.67[K]であった．



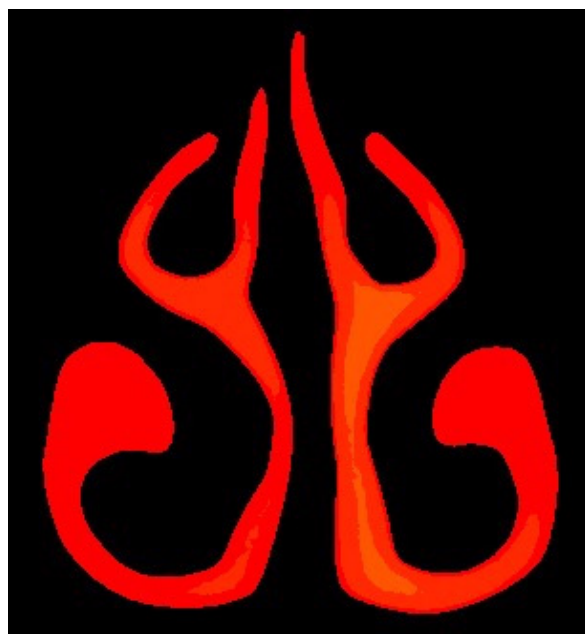
(a) 断面全体図



断面 b



断面 c



断面 d



断面 e



断面 f

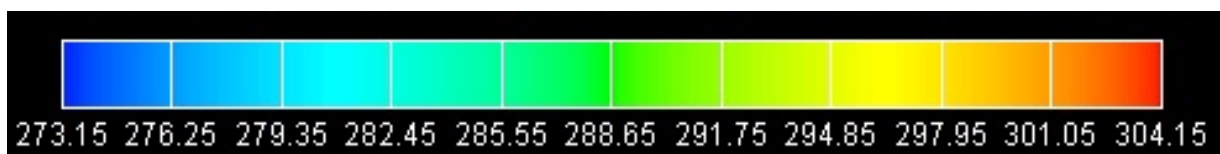


図 3.15: 流入温度 298.15[K] における鼻腔内断面図

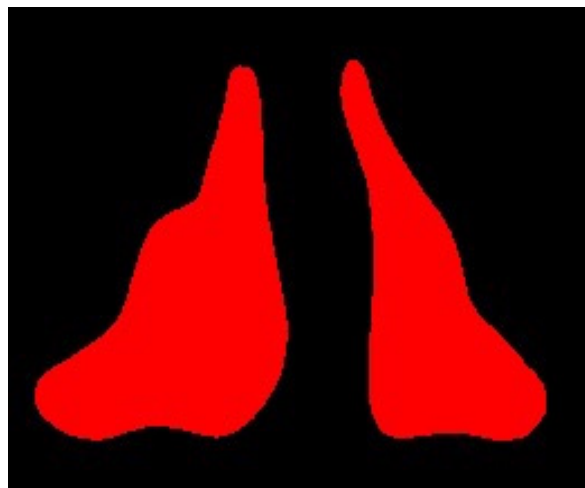
図 3.15 に流入温度が 298.15[K] のときの各断面を示した。図 3.15 断面 b であるが、鼻腔下部においては、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていなかった部位が大きかった。鼻腔上部においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.15 断面 c であるが、鼻腔下部においては、左鼻腔が低い部位で 302.15[K]、高い部位で鼻腔壁面温度まで加温されていた。左鼻腔の方が右鼻腔より速く加温されていることが確認できた。鼻腔上部においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.15 断面 d であるが、左鼻腔では、断面全体が鼻腔壁面温度まで加温されていた。右鼻腔では、総鼻道の一部で 300.00[K] の温度分布が見られたが、その他の部位では鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.14 断面 b, 断面 c, 断面 d より、鼻腔前方では両鼻腔ともに最も低い部位で 300.15[K] まで加温されていたが、その他の部位では鼻腔壁面温度まで加温されていることが確認できた。

次に図 3.15 断面 e であるが、左鼻腔では総鼻道の一部で 302.15[K] の温度分布が見られたが、その他の部位では鼻腔壁面温度まで加温されていた。右鼻腔では総鼻道下部から中鼻道にかけて 302.15[K] の温度分布が見られが、その他の部位では鼻腔壁面温度まで加温されていた。図 3.15 断面 e では少なくとも 302.15[K] まで加温されていた。図 3.15 断面 f であるが、断面右側で 302.15[K] の温度分布が見られた。その他の部位では鼻腔壁面温度

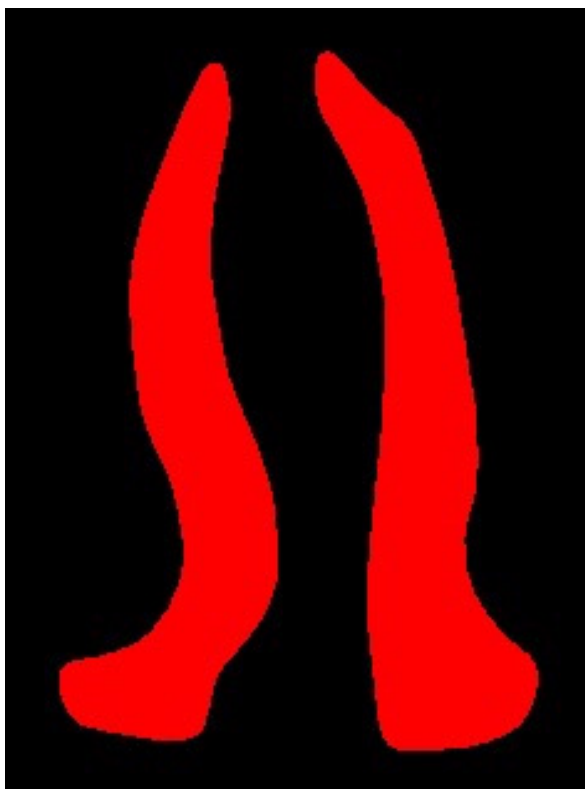
まで流入された空気が加温されていた．図 3.15 断面 e，断面 f より，鼻腔後方では両鼻腔とも鼻腔壁面温度付近まで加温されていたが，鼻腔断面においては左側が鼻腔壁面温度まで加温されている部位が大きいことが確認でき，少なくとも 302.15[K] まで加温されていた．また，中咽頭断面での平均温度は 303.89[K] であった．



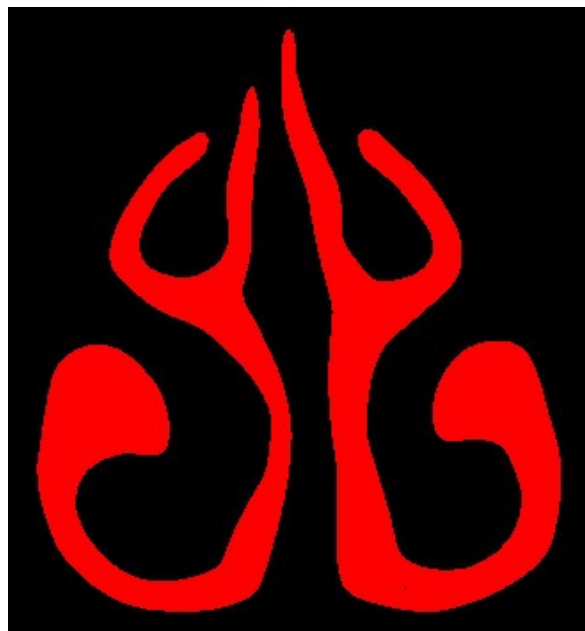
(a) 断面全体図



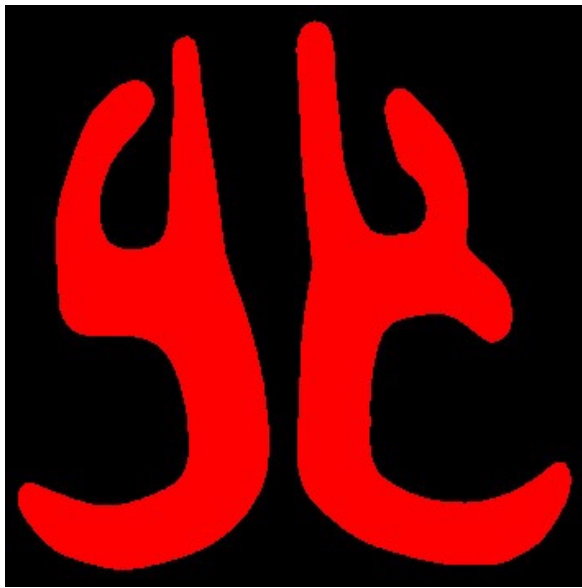
断面 b



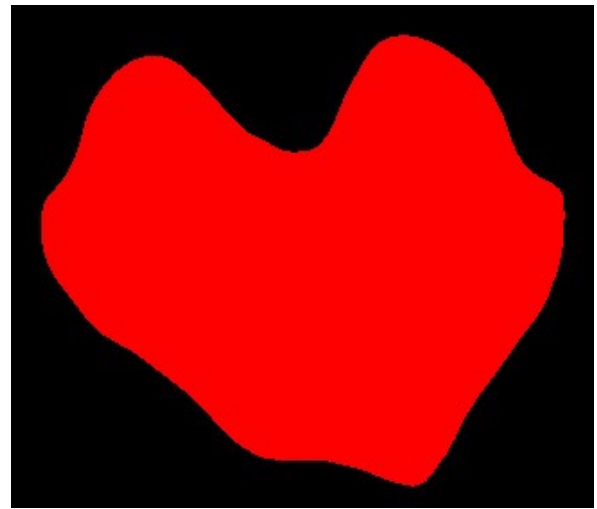
断面 c



断面 d



断面 e



断面 f

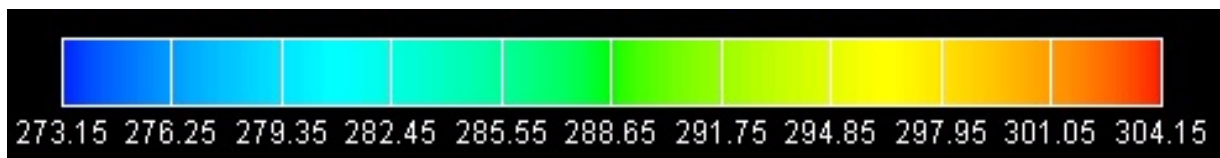
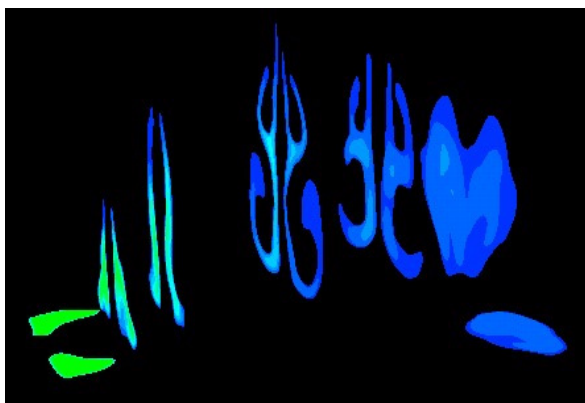
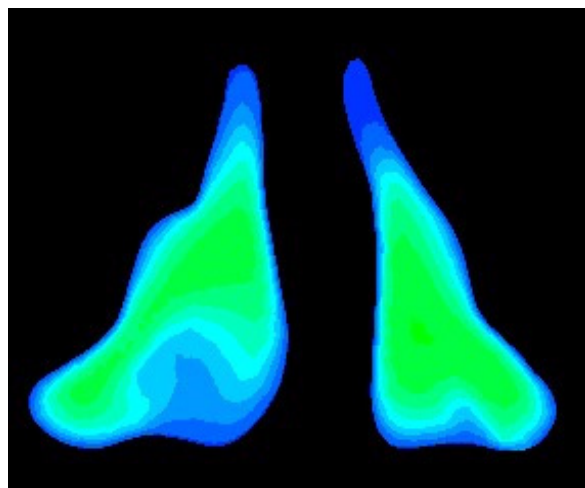


図 3.16: 流入温度 304.15[K] における鼻腔内断面図

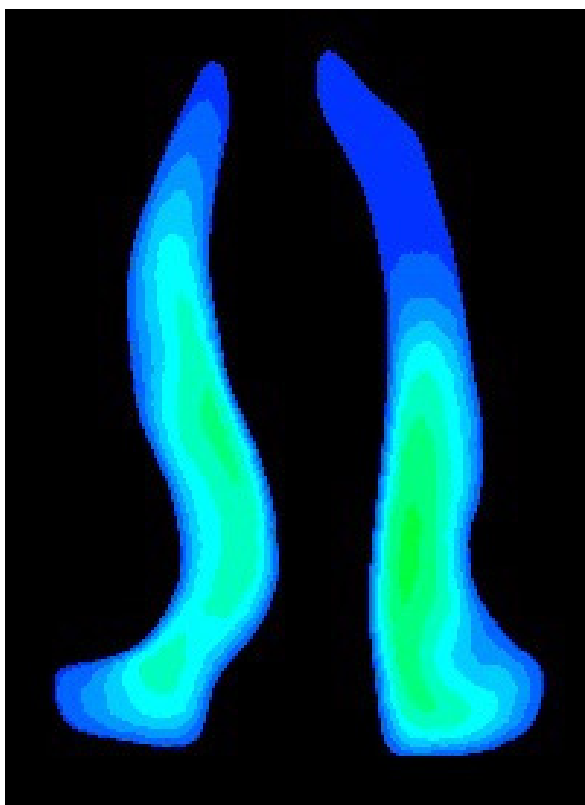
図 3.16 に流入温度が 304.15[K] のときの各断面を示した．図 3.16 であるが，流入温度と鼻腔壁面温度とが同じであるため，一様な温度分布しか見られなかった．また，中咽頭断面での平均温度は 304.15[K] であった．



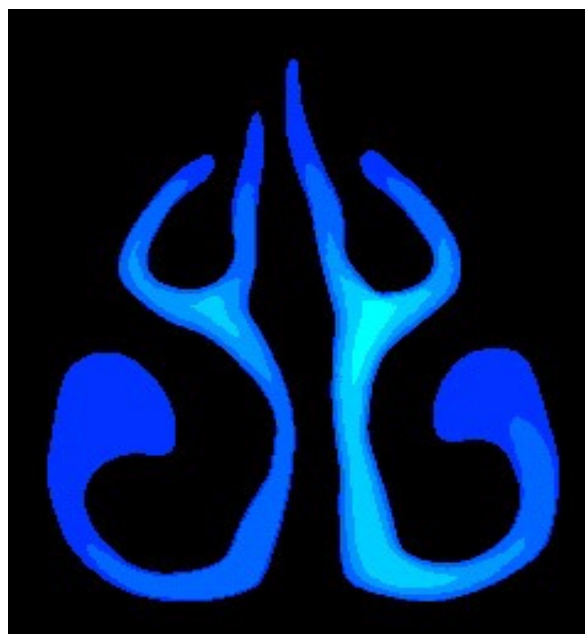
(a) 断面全体図



断面 b



断面 c



断面 d

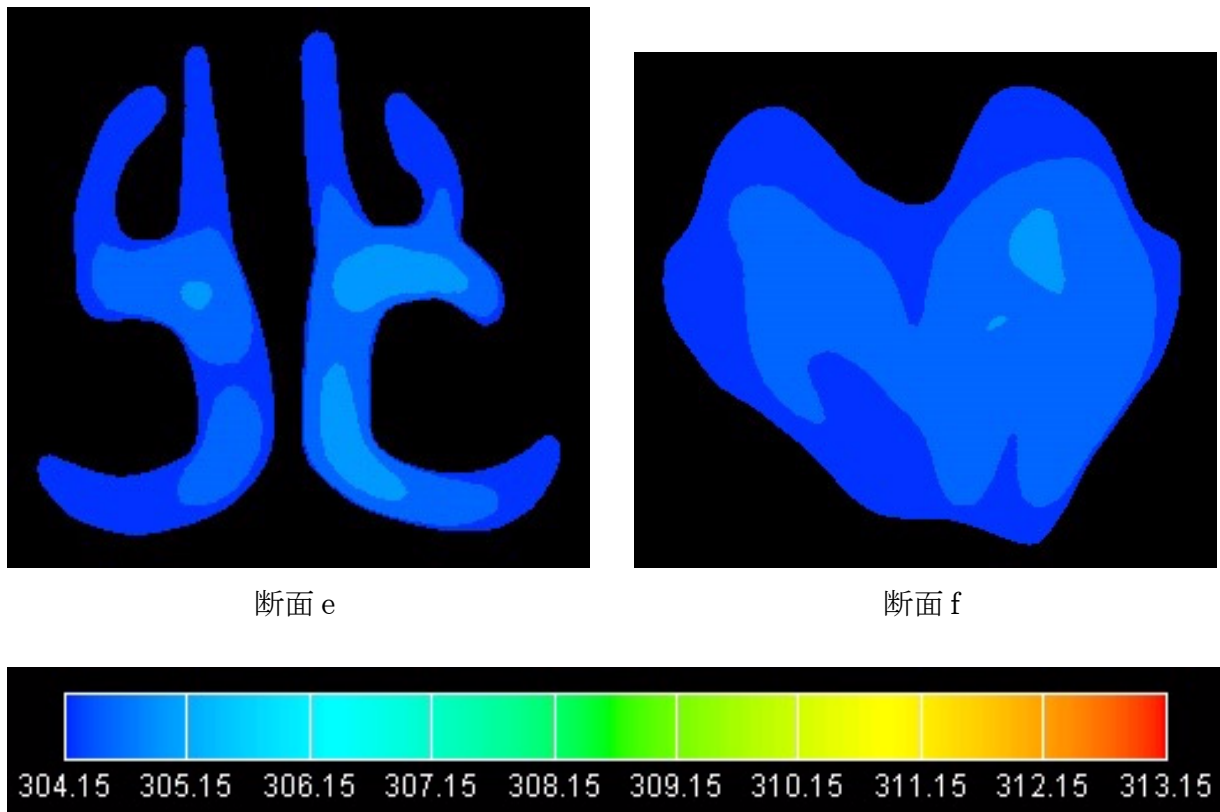
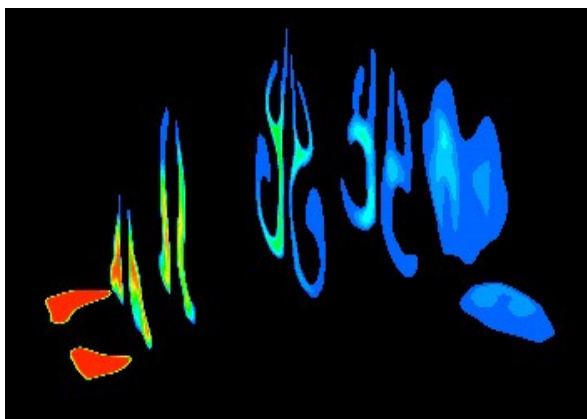


図 3.17: 流入温度 308.15[K] における鼻腔内断面図

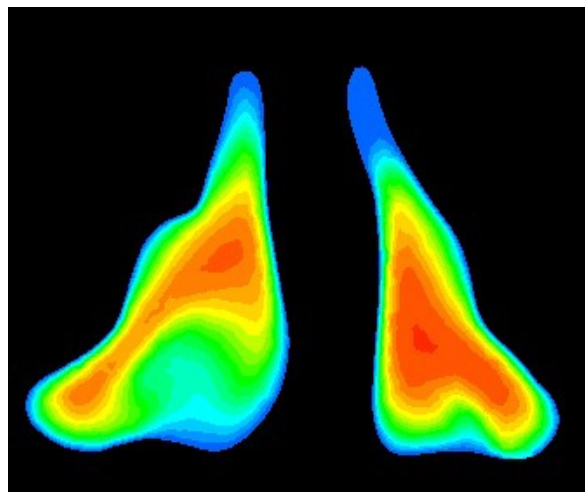
図 3.17 に流入温度が 308.15[K] のときの各断面を示した。図 3.17 断面 b であるが、鼻腔下部においては、流入された空気の温度 (308.15[K]) であった。鼻腔上部では、流入された空気が鼻腔壁面温度まで冷却されていた。図 3.17 断面 c であるが、鼻腔下部においては、左鼻腔では 306.15[K] であった。鼻腔上部では鼻腔壁面温度まで冷却されていた。右鼻腔では、鼻腔下部で 307.15[K] であった。鼻腔上部では鼻腔壁面温度まで冷却されていた。また左鼻腔と右鼻腔とでは、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度であった部位が大きかった。図 3.17 断面 d であるが、下鼻道においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで冷却されていた。総鼻道においては、左鼻腔では温度の高い部分で 305.15[K]、低い部分で鼻腔壁面温度であった。右鼻腔では、温度の高い部分で 306.15[K]、低い部分で鼻腔壁面温度であった。中鼻道においては、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで冷却されていた。鼻腔上部においても、両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで冷却されていた。図 3.17 断面 b, 断面 c, 断面 d より、鼻腔前方では左鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで冷却されていた部位が大きいことが確認できた。

次に図 3.17 断面 e であるが、左鼻腔では、総鼻道中部において 305.15[K] の温度分布が見られたが、その他は鼻腔壁面温度であった。右鼻腔では、総鼻道中部から総鼻道下部にかけて 305.15[K] の温度分布が見られた。その他の部位では鼻腔壁面温度であった。図

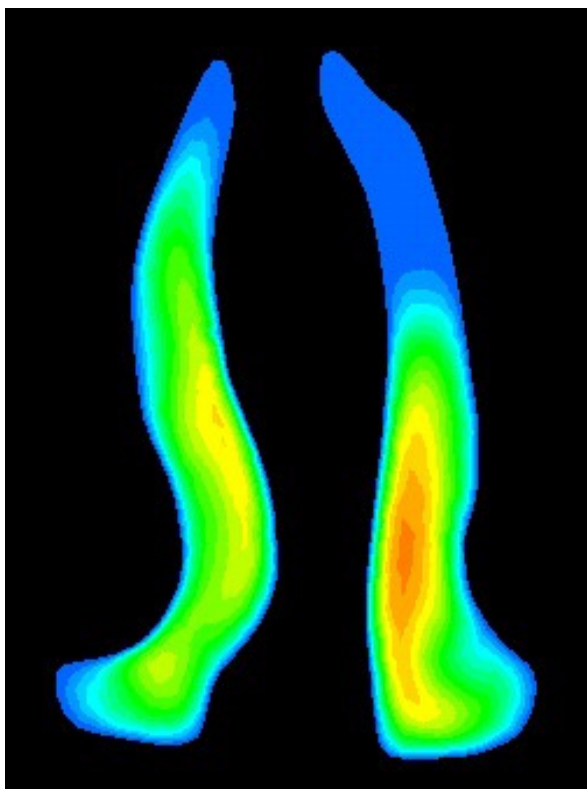
3.17 断面 f であるが，流入された空気が鼻腔壁面に近い部位においては，鼻腔壁面温度まで冷却されていたが，鼻腔断面中心付近では 305.15[K] に冷却されていた．図 3.17 断面 d，断面 e，断面 f より，中咽頭に近づくにつれて，鼻腔断面全体が鼻腔壁面温度に冷却されていたことが確認できた．また，中咽頭断面での平均温度は 304.32[K] であった．



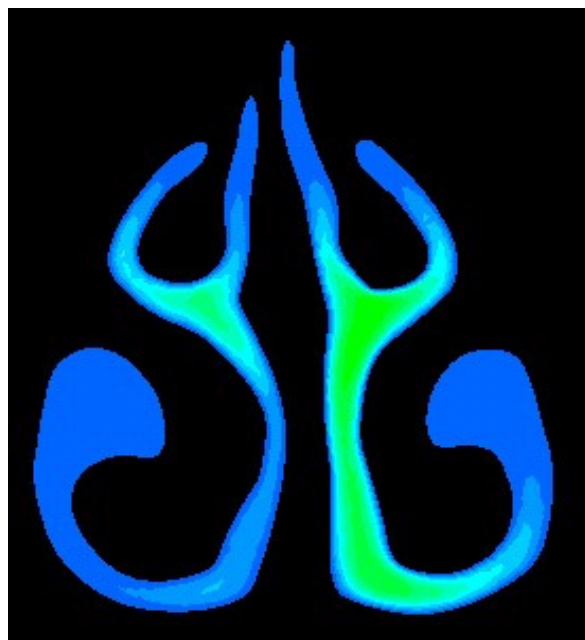
(a) 断面全体図



断面 b



断面 c



断面 d

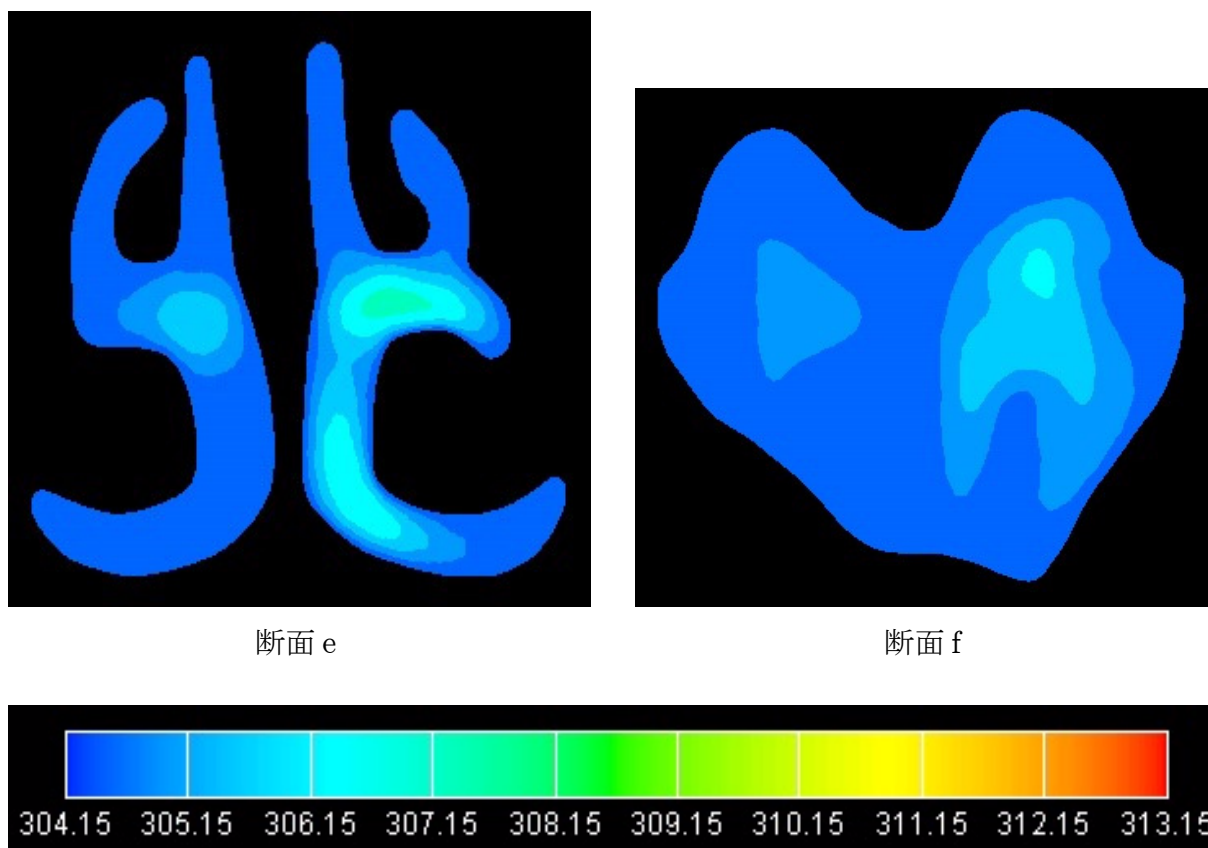


図 3.18: 流入温度 313.15[K] における鼻腔内断面図

図 3.18 に流入温度が 313.15[K] のときの各断面を示した。図 3.18 断面 b であるが、左鼻腔と右鼻腔とでは、右鼻腔の方が流入された空気の温度 (313.15[K]) が鼻腔下部で大きく分布していた。鼻腔上部においては、鼻腔壁面温度まで冷却されていたが、右鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで冷却されていた部位が大きかった。図 3.18 断面 c であるが、鼻腔下部においては、鼻腔壁に近い部分では鼻腔壁面温度であったが、鼻腔壁から遠い部位では 310.15[K] であった。また右鼻腔では 312.15[K] の温度分布が見られた。図 3.18 断面 d であるが、下鼻道においては両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで冷却されていた。総鼻道においては、左鼻腔では温度の低い部位で 305.15[K]、高い部位で 306.15[K] であった。右鼻腔では温度の低い部位で 307.15[K]、高い部位で 308.15[K] であった。中鼻道、鼻腔上部においては両鼻腔ともに鼻腔壁面温度まで冷却されていた。

次に図 3.18 断面 e であるが、左鼻腔では、下鼻道、中鼻道、鼻腔上部において壁面温度まで冷却されていたが、総鼻道中部では 306.15[K] の温度分布が見られた。右鼻腔では、下鼻道、中鼻道、鼻腔上部では壁面温度まで冷却されていたが、総鼻道下部から中部においては温度の低い部分で 305.15[K]、高い部分で 307.15[K] の温度分布が見られた。図 3.18 断面 f であるが、流入された空気が断面左側で大きく冷却されていた。断面右側では 306.15[K] まで冷却されていた。また、中咽頭断面での平均温度は 304.54[K] であった。

3.5 生活想定外における鼻腔内温度分布

ここまでは生活想定内における数値熱流体解析の計算結果を示した。こちらに関しては、中山氏によって研究、検討がおこなわれている [11]。本研究では生活想定外におけるシミュレーションについてもおこなった。表 3.3 と表 3.4 に計算条件と境界条件を示した。

表 3.3: 計算条件 (生活想定外時)

計算メッシュ数	約 120 万要素
密度	$1.225[\text{kg}/\text{m}^3]$
レイノルズ数	841
流入温度	$273.15[\text{K}]$, $373.15[\text{K}]$

表 3.4: 境界条件 (生活想定外時)

鼻腔壁	no-slip, 等温壁 ($304.15[\text{K}]$)
流入条件	$1.27[\text{m}/\text{s}]$, $2.54[\text{m}/\text{s}]$
流出条件	圧力ゼロ・速度勾配ゼロ (出口境界設定), 温度設定なし

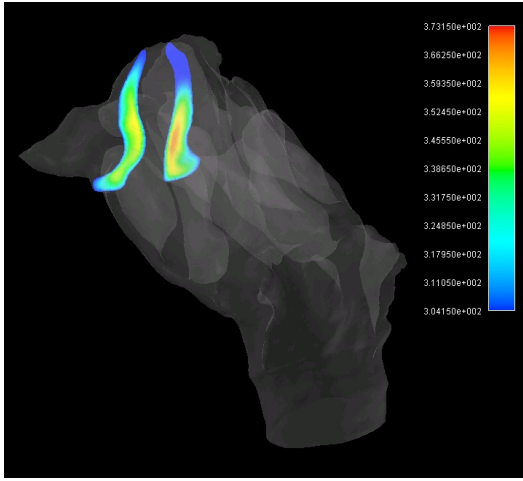
3.5.1 計算結果

(イ) 流入温度 $373.15[\text{K}]$

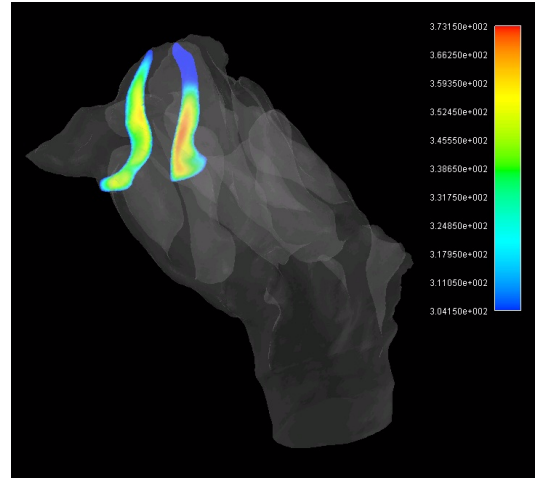
図 3.19 は、流入温度が $373.15[\text{K}]$ 、流速が $1.27[\text{m}/\text{s}]$ (A) と $2.54[\text{m}/\text{s}]$ (B) のときの鼻腔内温度分布である。(A-1) と (B-1) が外鼻孔に近い断面であり、(A-5) と (B-5) は中咽頭の断面である。

図 3.19(A-1) と (B-1) を見ると、鼻腔前方では、右鼻腔上部で急激な冷却がおこなわれていた。また (A-1) と (B-1) とでは、(B-1) の方が温度冷却が小さかった。図 3.19(A-2) と (B-2) は鼻腔の中間断面である。下鼻道においては鼻腔壁面温度まで冷却されていた。また左鼻腔の方が温度冷却が大きかった。(A-2) と (B-2) とでは、(B-2) の方が温度冷却が小さかった。図 3.19(A-3) と (B-3) を見ると、(A-3) の左鼻腔では、ほぼ鼻腔壁面温度まで冷却されていたが、右鼻腔では $324.15[\text{K}]$ の温度分布が見られた。(A-3) と (B-3) とでは、(B-3) の方が温度冷却が小さかった。

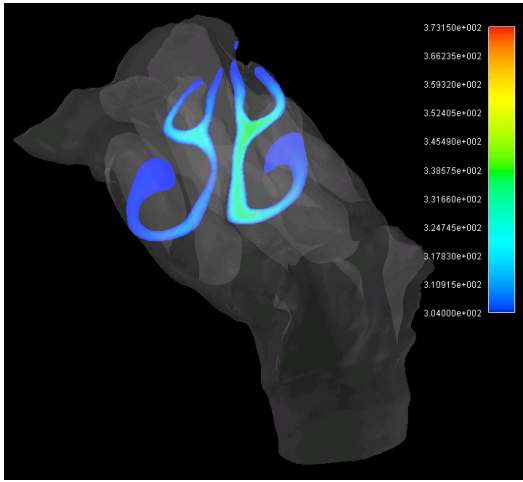
図 3.19(A-4) と (B-4) を見ると、どちらも鼻腔壁面温度まで冷却されていたが、流速の大きい方に $324.15[\text{K}]$ の分布が多く見られた。図 3.19(A-5) と (B-5) は中咽頭断面であるが、こちらにおいても流速の大きい方が $324.15[\text{K}]$ の分布が多く見られた。



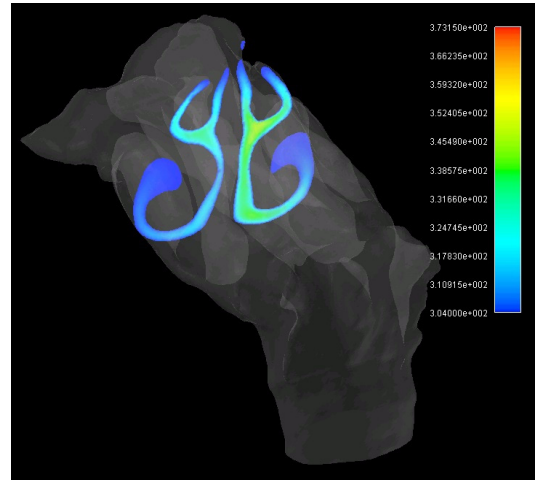
(A-1) 373.15[K], 1.27[m/s]



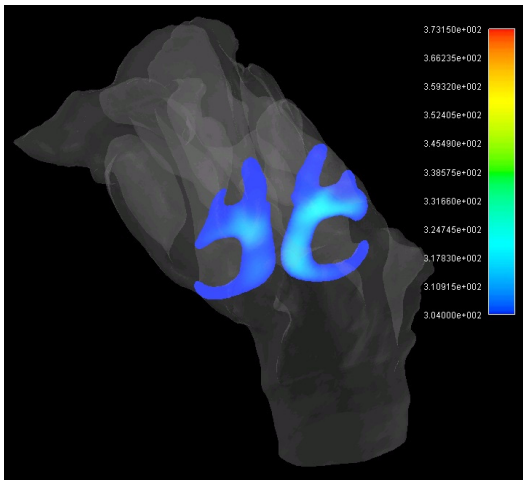
(B-1) 373.15[K], 2.54[m/s]



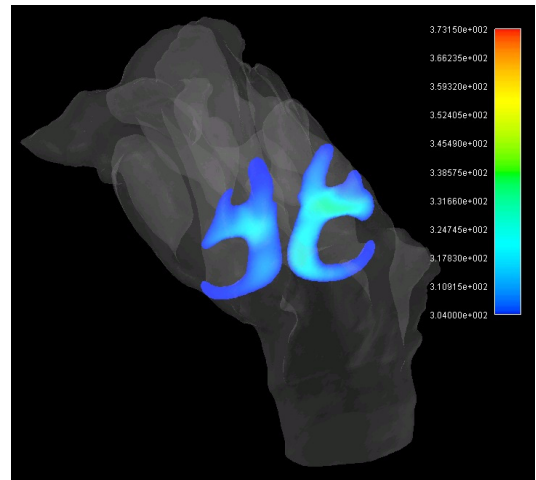
(A-2) 373.15[K], 1.27[m/s]



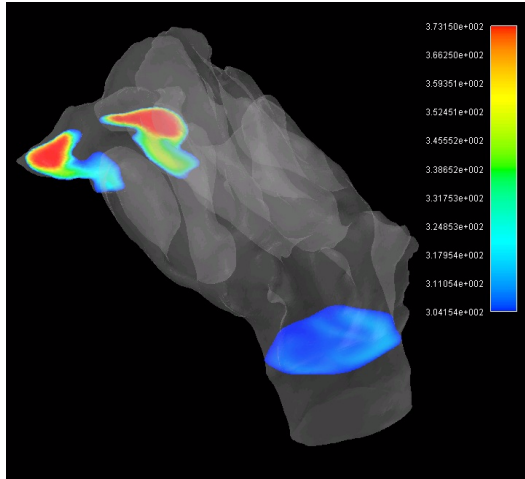
(B-2) 373.15[K], 2.54[m/s]



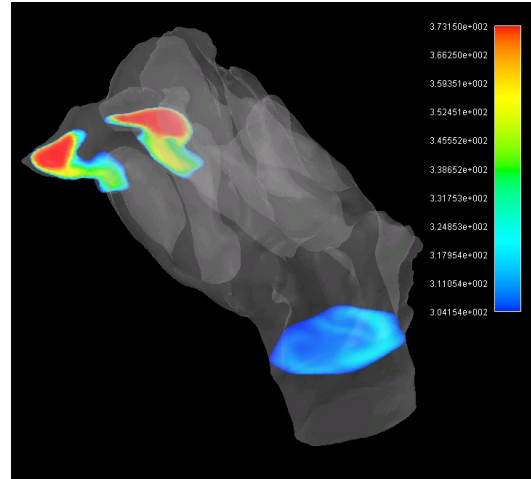
(A-3) 373.15[K], 1.27[m/s]



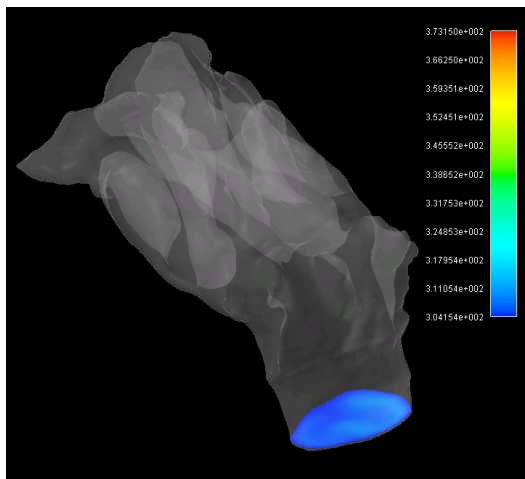
(B-3) 373.15[K], 2.54[m/s]



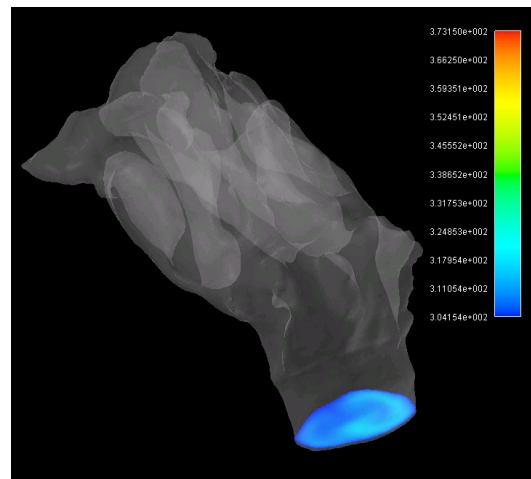
(A-4) 373.15[K], 1.27[m/s]



(B-4) 373.15[K], 2.54[m/s]



(A-5) 373.15[K], 1.27[m/s]



(B-5) 373.15[K], 2.54[m/s]

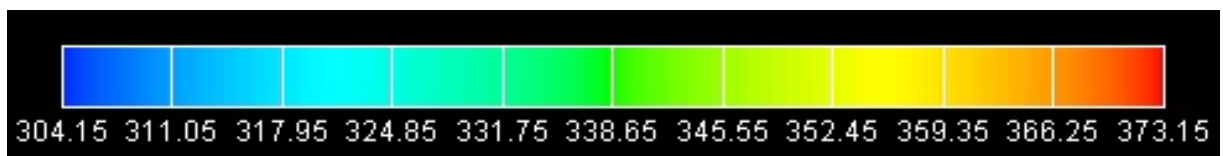


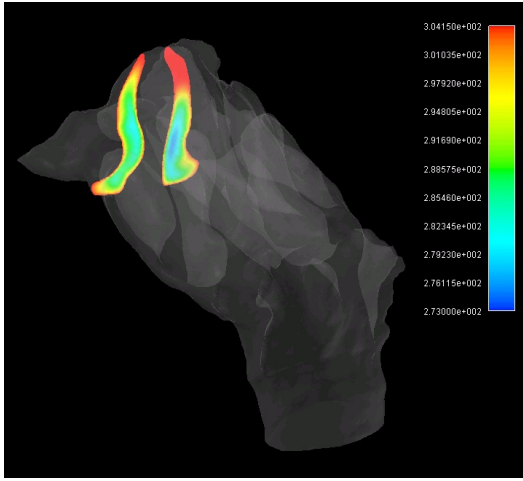
図 3.19: 流入温度 373.15[K] における流速の違いによる鼻腔内温度分布の比較

(口) 流入温度 273.15[K]

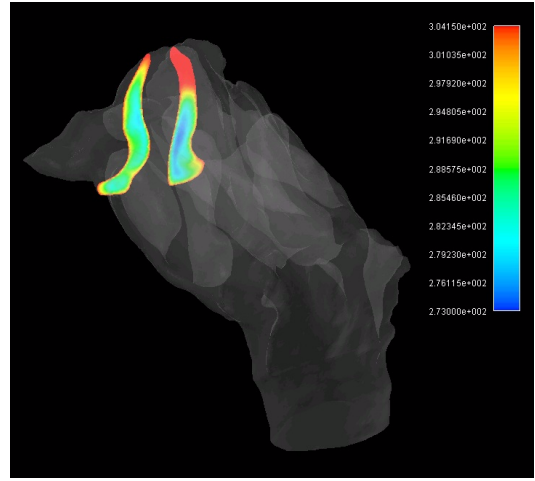
図 3.20 は，流入温度が 273.15[K]，流速が 1.27[m/s](A) と 2.54[m/s](B) のときの鼻腔内温度分布である．(A-1) と (B-1) が外鼻孔に近い断面であり，(A-5) と (B-5) は中咽頭の断面である．

図 3.20(A-1) と (B-1) を見ると，鼻腔前方では，右鼻腔上部で急激な加温がおこなわれており鼻腔壁面温度であった．図 3.20(A-2) と (B-2) は鼻腔の中間断面である．下鼻道において鼻腔壁面温度まで加温されていた．また他の部位についても温度上昇は見られたが，右鼻腔の方が温度上昇は小さく，流速が大きい方が温度上昇が小さかった．図 3.20(A-3) と (B-3) を見ると，(A-3) の左鼻腔では，ほぼ鼻腔壁面温度まで加温されていたが，右鼻腔では 296.15[K] の温度分布が見られた．(B-3) の右鼻腔では 296.15[K] の温度分布が多く見られた．

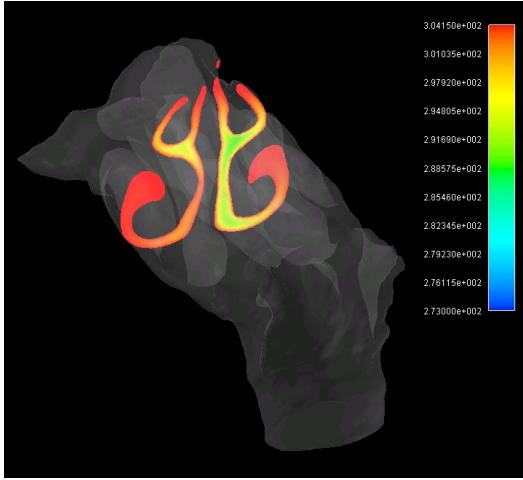
図 3.20(A-4) と (B-4) を見ると，(A-4) では鼻腔壁面温度まで加温されていたが，(B-4) では 297.15[K] の温度分布が多く見られた．図 3.20(A-5) と (B-5) を見ると，(A-5) では鼻腔壁面温度まで加温されていたが，(B-5) では 297.15[K] の温度分布が多く見られた．



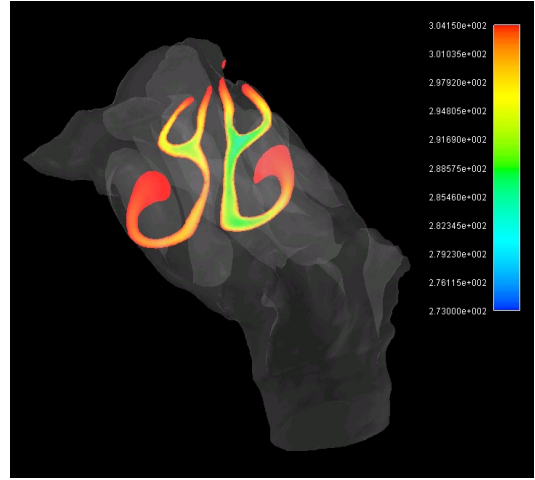
(A-1) 273.15[K], 1.27[m/s]



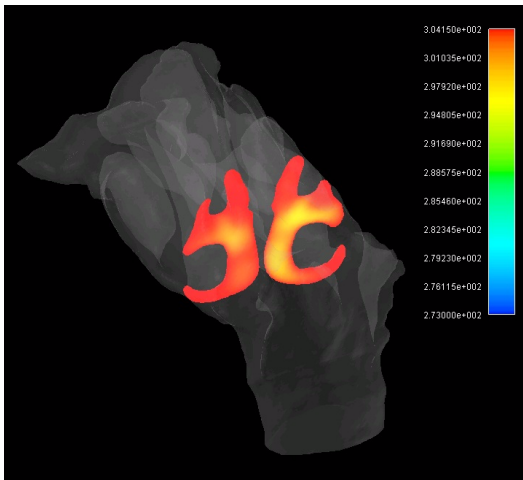
(B-1) 273.15[K], 2.54[m/s]



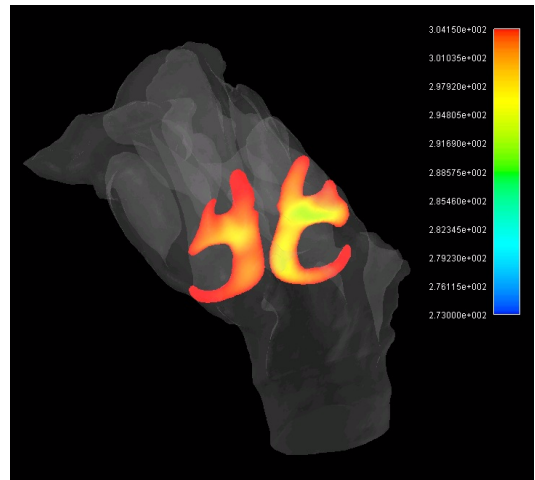
(A-2) 273.15[K], 1.27[m/s]



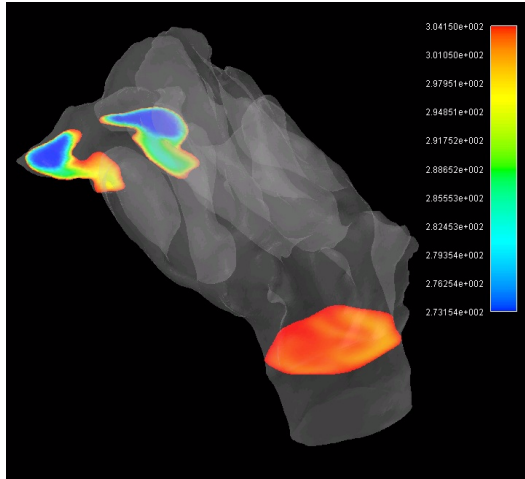
(B-2) 273.15[K], 2.54[m/s]



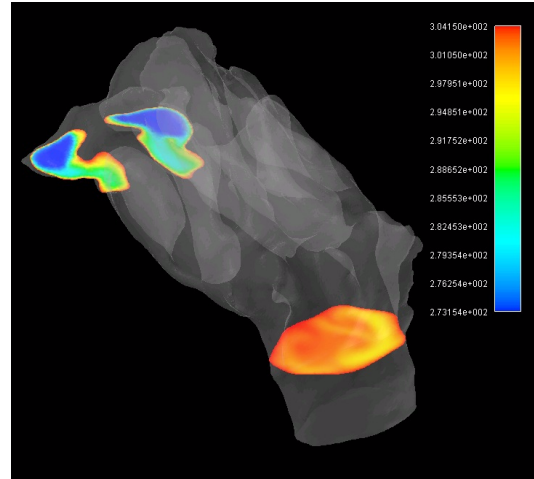
(A-3) 273.15[K], 1.27[m/s]



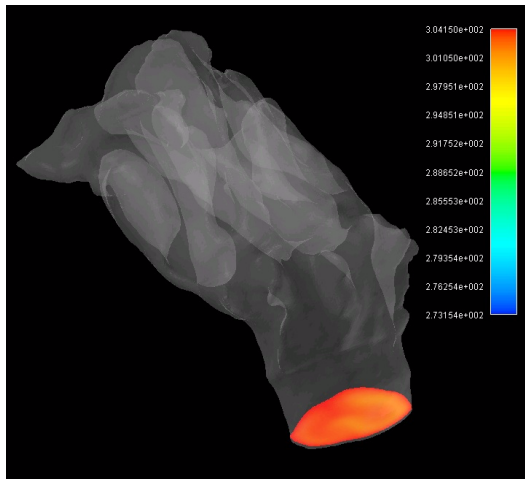
(B-3) 273.15[K], 2.54[m/s]



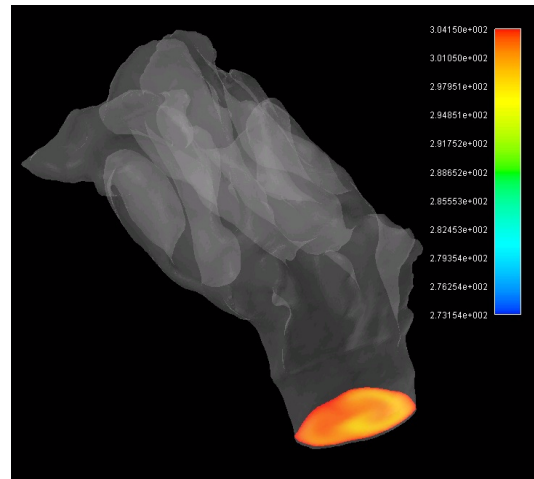
(A-4) 273.15[K], 1.27[m/s]



(B-4) 273.15[K], 2.54[m/s]



(A-5) 273.15[K], 1.27[m/s]



(B-5) 273.15[K], 2.54[m/s]

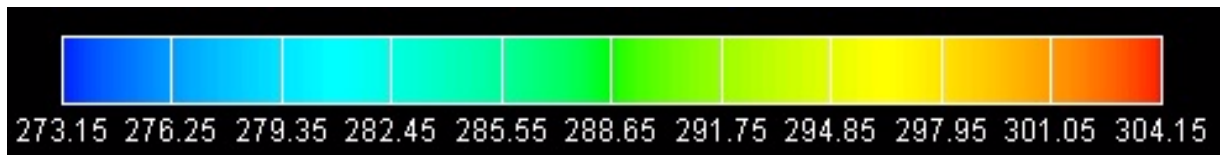


図 3.20: 流入温度 273.15[K] における流速の違いによる鼻腔内温度分布の比較

(ハ) 下鼻甲介切除

図 3.21 は 3 次元鼻腔形状である．下鼻甲介とは図の中の丸で囲まれた部位をさす．

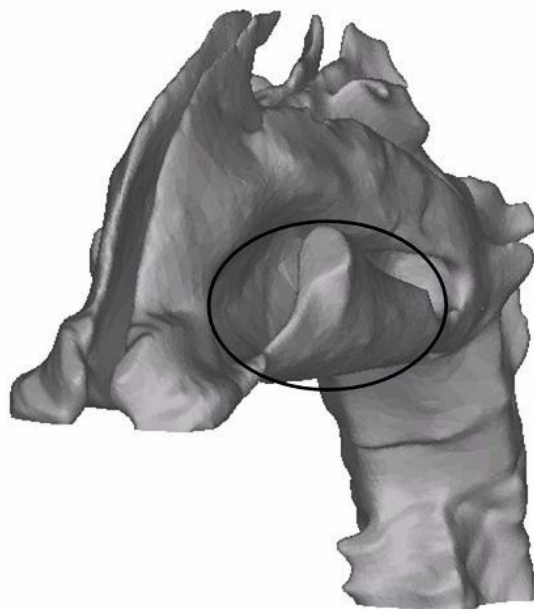


図 3.21: 下鼻甲介

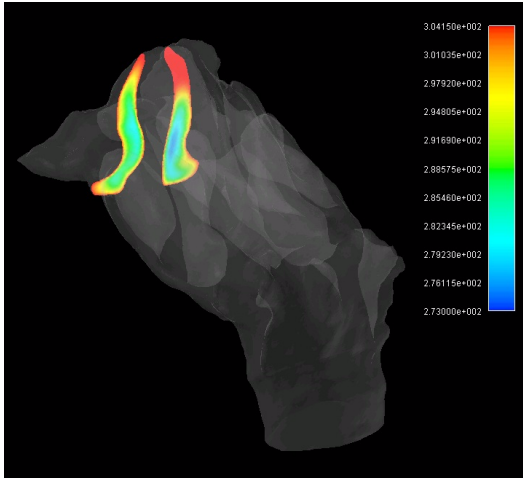
下鼻甲介切除は実際に医療現場でおこなわれている手術である．さまざまな要因で下鼻甲介が腫れることがあり，腫れると鼻づまりが発生し呼吸をすることが苦しくなる．これを改善するためにおこなわれる手術が下鼻甲介切除である．下鼻甲介切除手術をおこなうことで，鼻腔内の温度分布がどのように変化するかシミュレーションをおこなった．尚，本研究で用いた下鼻甲介切除の鼻腔形状は，実際の患者のデータを用いたのではなく，耳鼻咽喉科の先生の指導の下で画像処理をおこない 3 次元鼻腔形状を再構築したものである．

図 3.22 は，流入温度 $273.15[\text{K}]$ ，流速 $1.27[\text{m/s}]$ における健康体 (A) と下鼻甲介切除 (B) との鼻腔内温度分布の比較である．(A-1) と (B-1) が外鼻孔に近い断面であり，(A-5) と (B-5) は中咽頭の断面である．

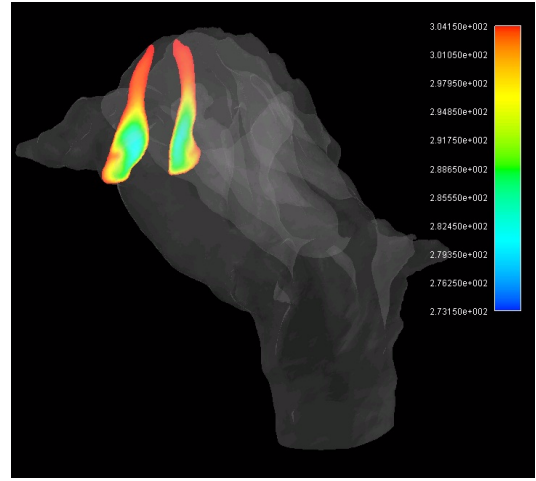
図 3.22(A-1) と (B-1) を見ると，鼻腔前方においては，(A-1) では右鼻腔上部，(B-1) では両鼻腔上部で急激な加温がおこなわれており鼻腔壁面温度まで加温がおこなわれていた．図 3.22(A-2) と (B-2) は鼻腔の中間断面である．(A-2) では下鼻道においては鼻腔壁面温度まで加温がおこなわれていたが，(B-2) では左鼻腔においては下鼻甲介が切除されているため十分な加温がおこなわれず，右鼻腔よりも温度が低いことがわかった．右鼻腔の下鼻道においては鼻腔壁面温度まで加温がおこなわれていた．図 3.22(A-3) と (B-3) を見ると，(A-3) では左鼻腔においては鼻腔壁面温度まで加温がおこなわれていたが，(B-3)

では 297.15[K] の温度分布が鼻腔下部で見られた。

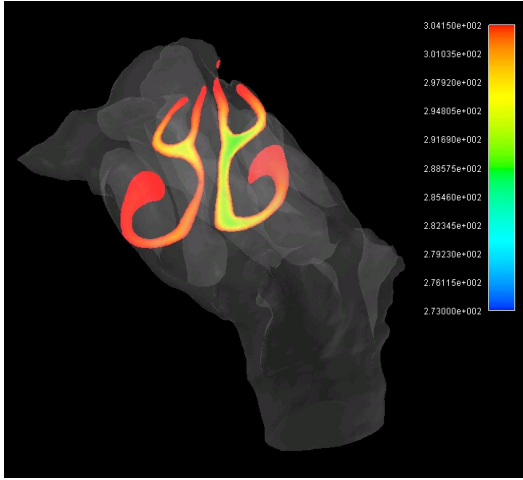
図 3.22(A-4) と (B-4) を見ると、(A-4) では鼻腔壁面温度まで加温がおこなわれていたが、(B-4) では 298.15[K] の温度分布が多く見られた。図 3.22(A-5) と (B-5) を見ると、(A-5) では鼻腔壁面温度まで加温がおこなわれていたが、(B-5) では 298.15[K] の温度分布が多く見られた。



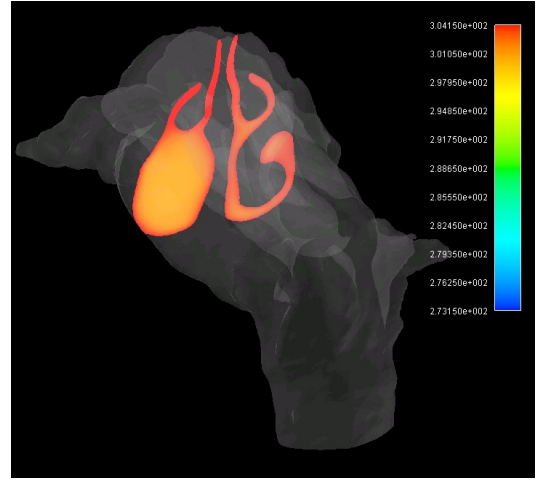
(A-1) 273.15[K], 1.27[m/s]



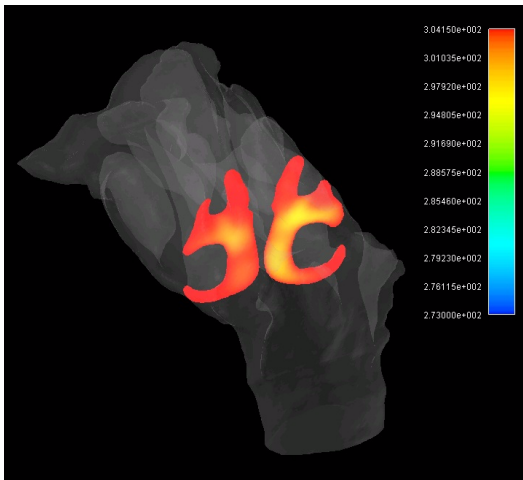
(B-1) 273.15[K], 1.27[m/s]



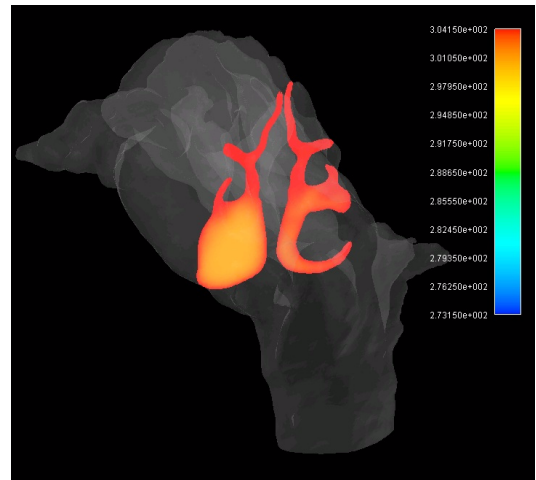
(A-2) 273.15[K], 1.27[m/s]



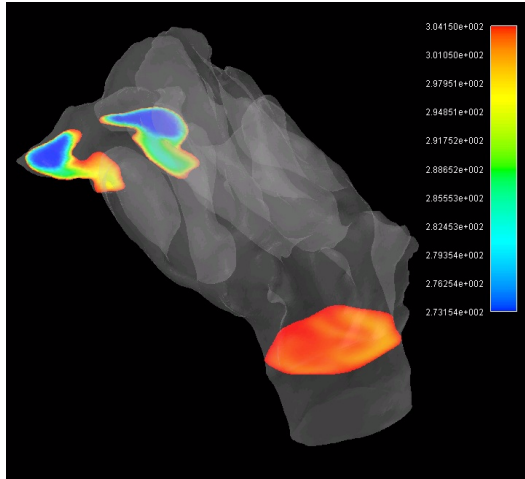
(B-2) 273.15[K], 1.27[m/s]



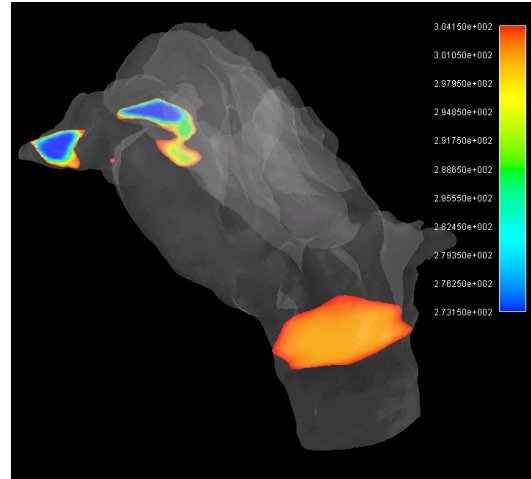
(A-3) 273.15[K], 1.27[m/s]



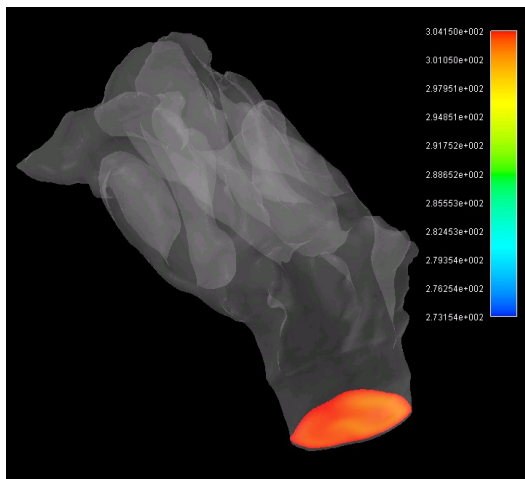
(B-3) 273.15[K], 1.27[m/s]



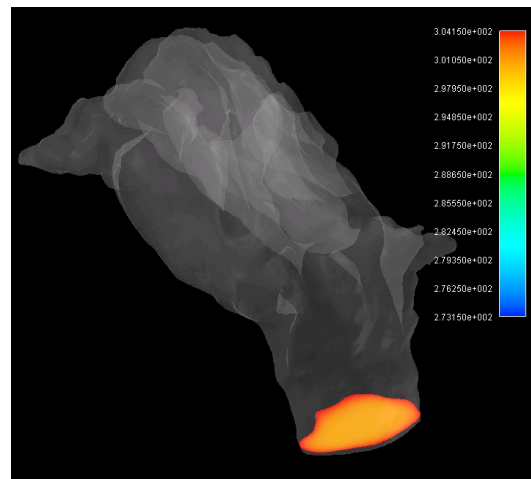
(A-4) 273.15[K], 1.27[m/s]



(B-4) 273.15[K], 1.27[m/s]



(A-5) 273.15[K], 1.27[m/s]



(B-5) 273.15[K], 1.27[m/s]

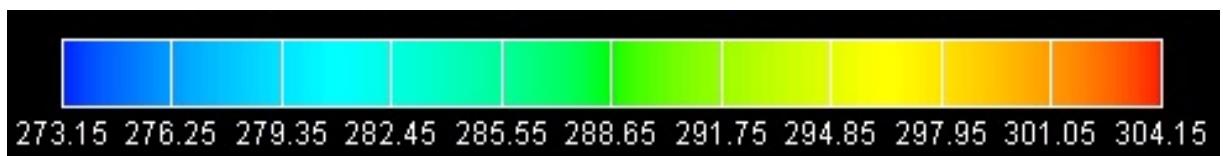


図 3.22: 流入温度 273.15[K] における健康体と下鼻甲介切除の鼻腔内温度分布の比較

第4章 考察

本研究では、現在過去共に鼻腔疾患等の病気を持たない健康な鼻腔において数値熱流体解析をおこなった。生活想定内の場合と生活想定外の場合に分け結果を示した。これらの計算結果について検討をおこなう。

4.1 生活想定内における鼻腔内温度分布

図 3.4 についてであるが、左鼻腔内分布を各流入温度ごとに示したものである。図 3.4(a) から (c) においては鼻腔前方で大きく加温、図 3.4(d) においては冷却されていた。なぜ、鼻腔前方で加温、冷却が大きいのか議論をおこなった。図 3.1 で左鼻腔内における空気の流れを示した。鼻腔前方で大きく温度変化が生じている要因として、鼻腔内における空気内の流れが関係していると考えた。左鼻腔内における空気の流れでは、鼻腔前方で流速が大きく鼻腔後方では流速が小さい。また、鼻腔前方においても鼻腔上部では流速が大きい、中鼻道、下鼻道においては流速が小さい。流速が大きいということは、鼻腔内を流れる空気は鼻腔壁面からの温度の影響を受ける時間が短く、逆に流速が小さいということは、鼻腔内の流れる空気は鼻腔壁面からの温度の影響を受ける時間が長いと考えた。その結果、図 3.10 断面 (d) で示したように左鼻腔においては、下鼻道においては鼻腔壁面温度まで加温され、鼻腔上部に近づくほど鼻腔壁面温度から遠ざかる温度分布結果が得られたと考えた。このことは左鼻腔内における他の流入温度においても同様のことが言えると考えた。

図 3.5 についてであるが、右鼻腔内分布を各流入温度ごとに示したものである。図 3.5(a) から (c) においては鼻腔前方で大きく加温、図 3.5(d) においては冷却されていた。なぜ、鼻腔前方で加温、冷却が大きいのか議論をおこなった。図 3.2 で右鼻腔内における空気の流れを示した。右鼻腔内における空気の流れを見ると、外鼻孔から流入された空気が鼻腔前方で流速が大きく、鼻腔後方では流速が小さい。また鼻腔前方においては、左鼻腔とは異なり鼻腔上部では流速は小さく、総鼻道下部から中部での流速が大きかった。左鼻腔と同様、流れの速い部位では鼻腔壁面からの温度の影響を受ける時間が短く、流れの遅い部位では鼻腔壁面からの温度の影響を受ける時間が長いと考えると、図 3.10 断面 (d) の結果が得られるのは妥当であると考えられる。断面 (d) を見ると、鼻腔上部では流速が遅いので流入された空気は鼻腔壁面の影響を受け鼻腔壁面温度まで加温され、総鼻道下部から中部では流速が速いので鼻腔壁面から受ける温度の影響の時間が短いため、291.15[K] までの加温となり、鼻腔前方では鼻腔壁面温度まで加温されなかったと考えた。

中咽頭断面についてであるが、各流入温度ごとに中咽頭断面での平均温度を示した。流入温度が高くなるにつれて中咽頭の平均断面温度も高くなっているが、流入温度と中咽頭断面の平均温度は線形性であることを確認した。

4.1.1 左鼻腔と右鼻腔

図 3.6 から図 3.9 は同じ流入温度での左鼻腔と右鼻腔との温度分布図である。左鼻腔と右鼻腔とで温度分布に違いがあり、鼻腔後方において左鼻腔の方が鼻腔壁面温度まで加温されていた部分が多いことを確認した。

まず左鼻腔と右鼻腔とで、同じ流入温度で鼻腔内の温度分布に差が出た要因としては、左鼻腔と右鼻腔は対象な形状ではないことが考えられる。図 3.1, 図 3.2 で示したように左鼻腔、右鼻腔において鼻腔内の空気の流れが異なっている。この形状の違いにより、鼻腔内での空気の流れに対して変化が生じ、左鼻腔と右鼻腔において温度分布に違いが生じたと考えた。よって、左鼻腔においては鼻腔前方の下鼻道の表面積は大きく、流速は小さいため十分に加温・冷却がおこなわれ、鼻腔後方では右鼻腔とは異なり、鼻腔壁面温度まで加温・冷却がおこなわれた部位が大きく見られたと考えた。

4.2 生活想定外における鼻腔内温度分布

生活想定外として流入温度が $273.15[\text{K}]$ と $373.15[\text{K}]$ 、流速が安静時 ($1.27[\text{m/s}]$) と安静時以外 ($2.54[\text{m/s}]$) の場合の計算をおこなった。

はじめに流入温度が $373.15[\text{K}]$ の場合であるが、流入された空気が鼻腔内で冷却されていたことがわかる。しかし、生活想定内温度では中咽頭では鼻腔壁面温度まで冷却されていたが、 $373.15[\text{K}]$ の場合は中咽頭での平均温度は鼻腔壁面温度とは大きく差があった。これにより、生活想定外における流入温度に対しては十分な冷却がおこなわれないことを示すことができた。

4.2.1 下鼻甲介切除の場合

図 3.22 は、健康な鼻腔と下鼻甲介切除をおこなった鼻腔との比較した計算結果である。健康な鼻腔では、鼻腔壁面温度まで加温されていたが、下鼻甲介切除の場合は十分に加温されていないことがわかった。これは、鼻腔内での温度調節に下鼻甲介が大きく影響していると考えた。下鼻甲介は鼻腔内の中でも流速が小さい部位である。つまり、温度上昇が大きい部位ということになる。その下鼻甲介が切除されたため、温度調節機能が十分に働かなかったと考えた。

第5章 結言

5.1 形状再構築

本研究では、対象臓器としてヒトの鼻腔を取り扱った。撮影方法は冠状 (Coronal) 断面でおこなった。これらの複数毎の医療用画像を奥行き方向に積み重ねることで3次元鼻腔形状の再構築をおこなった。しかし、単純に奥行き方向に積み重ねていくだけでは、撮影間隔の距離だけ段差が生じてしまい奥行き方向の解像度が低くなってしまう。そこでスムージング処理をおこなった。これにより滑らかな局面を生成し、3次元鼻腔形状を再構築した。また表面形状データを構築する際にはアスペクト比の悪い三角形形状を手動により削除をおこなった。

5.2 鼻腔内温度分布

再構築した3次元鼻腔形状に計算メッシュを生成することで、鼻腔内における数値熱流体解析をおこない、鼻腔内の温度分布について検討をおこなった。本研究の数値計算では、吸気における鼻腔内熱計算をおこない、外鼻孔の断面に様に流速を与えた。計算結果として、生活想定内における鼻腔内温度分布と生活想定外における鼻腔内温度分布について示した。流速は安静時の呼吸 ($1.27[\text{m/s}]$) を想定したものと、安静時以外の呼吸 ($2.54[\text{m/s}]$) を想定した場合の計算をおこなった。また鼻腔壁面は等温壁として計算をおこなった。生活想定外における鼻腔内温度分布として、流入温度が $273.15[\text{K}]$, $373.15[\text{K}]$ の場合について計算をおこなった。そして最後に下鼻甲介を切除した場合の数値計算について示した。

5.3 今後の課題

以下の項目が今後の展開としてあげられる。

- 鼻腔において重要な役割を果たしている機能はさまざまあるが、今後考慮していかなければならないと考えられるのが、湿度調節機能である。本研究では、湿度に関しては考慮されていない。湿度を考慮した数値計算の検討をおこなう。
- 本研究では、鼻腔壁面を等温壁として設定した。しかし、ヒトの鼻腔壁面が等温壁

であるとは考えにくい。また、温度調節機能には鼻腔壁面の温度が影響していることが考えられる。鼻腔壁面の境界条件の検討をさらにおこなう必要がある。

- 本研究では、吸気における定常計算をおこなった。吸気における非定常計算についてもおこなう。

以上の検討課題が存在し、今後検討をおこなう。

参考文献

- [1] 中山敏男, 渡邊正宏, 石川滋, 松澤照男, 医療用画像から再構築した鼻腔内流れシミュレーション, シミュレーション, 23, PP22-29, 2004.
- [2] S.Naftali, R.C.Schroter, R.J.Shiner, D.Elad, Transport Phenomena in the Human Nasal Cavity: A Computational Model, Annals of Biomedical Engineering, Vol.26, PP831-839, 1998.
- [3] 渡邊正宏, 松澤照男, “医療用画像から再構築した大動脈瘤内の定常流れの検討”, シミュレーション, 23, PP14-21, 2004.
- [4] 森満保, “イラスト耳鼻咽喉科”, 文光堂, 1987
- [5] KGT 社製 INTAGE3.1 Manual.
- [6] マテリアライズ日本支社, MagicsRP Reference Manual
- [7] 田村秀行, “コンピュータ画像処理入門”, 総研出版.
- [8] M.W.vannier, H.Cline, “A High resolution on 3D Surface Construction Algorithm”, Compt.Graph., Col.21, No.4, pp163-169, 1987.
- [9] Michael Garland, Paul S.Heckbert, “Surface Simplification Using Quadric Error Metrics” Carnegie Mellon University.
- [10] FLUENT 社, FLUENT Reference Manual
- [11] 中山敏男, “鼻腔における空気の流れと温度調節に関する研究”, 博士論文, 2006

発表論文

阪本雅樹，中山敏男，石川滋，渡邊正宏，松澤照男：“数値熱流体力学による鼻腔の熱解析に関する研究”，第18回日本機械学会 計算力学講演会，2005

その他

中山敏男，阪本雅樹，石川滋，渡邊正宏，松澤照男：“人鼻腔内の温度分布と流れの可視化”，第18回日本機械学会 計算力学講演会 ビジュアライゼーションコンテスト，2005

謝辞

本研究をおこなうにあたり，多くの有益な御指導・御助言を賜りました情報科学センター 松澤照男教授に深く感謝するとともに，ここに御礼申し上げます。

適切な御意見，御助言を頂きました本学の党建武教授，井口寧助教授に深く御礼申し上げます。

貴重な御意見，討論を頂いた渡邊正宏研究員，多方面に渡り御指導を賜りました松澤研究室の先輩である中山敏男氏，本論文をまとめるにあたり御協力頂いた松澤研究室の皆様に深く感謝いたします。

また日々のお世話をして頂いた向千晶氏にも感謝致します。