

Title	数値流体力学による鼻腔内湿度調整機能に関する研究
Author(s)	工藤，之義
Citation	
Issue Date	2008-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/4329
Rights	
Description	Supervisor:松澤照男，情報科学研究科，修士

修 士 論 文

**数値流体力学による鼻腔内湿度調整機能
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

工藤 之義

2008 年 3 月

修 士 論 文

数値流体力学による鼻腔内湿度調整機能 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 党建武 教授
審査委員 井口寧 准教授

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

0610034 工藤 之義

提出年月: 2008 年 2 月

概 要

鼻腔とは人の顔の中央付近に存在する鼻の入口から喉に続く空間のことで、非常に複雑な形状をしており様々な重要な機能がある。温度調整機能とともにヒトの生命活動において欠かすことの出来ない重要な機能である湿度調整機能に着目した。これまでに医療用画像から再構築された3次元鼻腔実形状に対して熱流体解析は行われてきたが、湿度については考慮されていない。温度と湿度には密接な関係があるがそれが鼻腔内ではどう影響するのか不明である。湿度を考慮した熱流体解析を行うことによって、鼻腔の湿度調整機能について明らかにし、湿度が温度にどのような影響を与えているのかを解明することを目的とする。

医療用画像から再構築された3次元鼻腔実形状を用いて湿度を考慮した熱流体解析を行う。鼻腔内の湿度調整は鼻腔壁面を覆っている粘膜から空気へ水蒸気を受け渡すことにより行われる。そして空気内に水蒸気が含まれることにより、鼻腔内の温度分布にも影響があらわれると考えられる。

本研究では、湿度を考慮した熱流体解析を行うために鼻腔壁面のモデルを考案することが重要だと考え、鼻腔壁面を温度34℃相対湿度100[%]の壁とした場合と、熱伝導モデルを適用した水の層とした場合の計算を行い比較を行う。

流入相対湿度を様々な湿度の状況において鼻腔内で適度に調整されているのかを確認するために10[%](低湿度)、50[%](中湿度)、90[%](高湿度)として、それぞれの鼻腔内湿度分布の違いを検討する。また流入温度を25[°C]、50[°C]とし、鼻腔内の湿度がどのように加温・冷却機能に影響しているのかを検討する。

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	1
1.3 論文の構成	2
第2章 計算方法	3
2.1 鼻腔とは	3
2.2 鼻腔実形状の再構築	5
2.3 3次元鼻腔実形状	7
2.4 計算条件	9
2.5 基礎方程式	10
第3章 鼻腔壁面	12
3.1 鼻腔壁面	12
3.2 壁面モデル	12
3.3 検証計算	15
3.3.1 壁面温度 34 °C 相対湿度 100% の場合	15
3.3.2 壁面を水の層とした場合	16
3.4 まとめ	18
第4章 定常熱流体解析	19
4.1 鼻腔内の空気の流れ	19
4.2 34 °C, 相対湿度 100% の場合の結果	21
4.2.1 流入温度 25 °C の時	21
4.2.2 流入温度 50 °C の時	25
4.3 水の層とした場合の結果	29
4.3.1 流入温度 25 °C の時	29
4.3.2 流入温度 50 °C の時	33
4.4 測定値との比較	37
4.5 考察	41

第 5 章	非定常熱流体解析	43
5.1	計算条件	43
5.2	計算結果	45
5.2.1	鼻腔内の空気の流れ	45
5.2.2	25 °C 流入時の計算結果	47
5.2.3	50 °C 流入時の計算結果	52
5.3	考察	57
第 6 章	結言	58

目 次

2.1	鼻腔の構造	4
2.2	鼻甲介断面	4
2.3	再構築した鼻腔実形状	7
2.4	計算メッシュ	8
3.1	熱伝導モデル	14
3.2	水の層モデル	14
3.3	曲がり鉛管内の温度分布	15
3.4	曲がり鉛管内の温度分布	16
3.5	25℃流入時の円管内相対湿度分布	17
3.6	25℃流入時の円管内温度分布	17
4.1	鼻腔内の空気の流れ	20
4.2	25℃流入時の鼻腔内相対湿度分布	22
4.3	25℃流入時の断面ごとの平均相対湿度	23
4.4	25℃流入時の鼻腔内温度分布	23
4.5	25℃流入時の断面ごとの平均温度	24
4.6	50℃流入時の鼻腔内相対湿度分布	26
4.7	50℃流入時の断面ごとの平均相対湿度	27
4.8	50℃流入時の鼻腔内温度分布	27
4.9	50℃流入時の断面ごとの平均温度	28
4.10	25℃流入時の鼻腔内相対湿度分布	31
4.11	25℃流入時の入口からの距離ごとの鼻腔内相対湿度	31
4.12	25℃流入時の鼻腔内温度分布	32
4.13	25℃流入時の入口からの距離ごとの鼻腔内温度	32
4.14	50℃流入時の鼻腔内相対湿度分布	35
4.15	50℃流入時の入口からの距離ごとの鼻腔内相対湿度	35
4.16	50℃流入時の鼻腔内温度分布	36
4.17	50℃流入時の入口からの距離ごとの鼻腔内温度	36
4.18	測定地点	37
4.19	25℃35%流入時の鼻腔内温度分布	39
4.20	入口からの距離ごとの鼻腔内温度	39

4.21	25 °C 35%流入時の鼻腔内相対湿度分布	40
4.22	入口からの距離ごとの鼻腔内相対湿度	40
5.1	流速変化	45
5.2	非定常流れにおける流線図	46
5.3	温度 25 °C, 相対湿度 10%流入時の鼻腔内相対湿度分布	48
5.4	温度 25 °C, 相対湿度 90%流入時の鼻腔内相対湿度分布	49
5.5	25 °C流入時の時間ごとの鼻腔内温度分布	51
5.6	温度 50 °C, 相対湿度 10%流入時の鼻腔内相対湿度分布	53
5.7	温度 50 °C, 相対湿度 90%流入時の鼻腔内相対湿度分布	54
5.8	50 °C流入時の時間ごとの鼻腔内温度分布	56

表 目 次

2.1	CT 画像の撮影条件	5
2.2	計算条件	9
3.1	計算条件	15
4.1	流入条件	37
4.2	測定地点	37
5.1	計算条件	44
5.2	境界条件	44

第1章 序論

1.1 背景

鼻腔とは人の頭部の前面に存在する鼻の入口から喉に続く空間のことで呼吸において空気の通り道になっている。鼻腔は、非常に複雑な形状をしており、様々な重要な機能がある。主な機能として、吸引した空気を適度な温度に加温・冷却する温度調整機能、空気に適度な湿り気を与える湿度調整機能、空気によって運ばれた匂いを感知する嗅覚機能、声をきれいに響かせる清音機能などがある。本研究では、吸い込んだ空気を適度な湿り気を与える湿度調整機能に着目した。鼻から吸気した空気は気道や肺に送られる時に、気道や肺の機能を維持するために適度な温度や湿度に調整される。肺の機能は空気中から得た酸素を体内に取り込んだり、老廃物である二酸化炭素を空気中に排出する機能があり、気道には肺がガス交換する際に効率よく行うようにする機能がある。これらの機能はヒトが生命活動をするには欠かせない。従って鼻腔の温度調整機能と湿度調整機能は重要であると考え、その中でまだ明らかになっていない湿度調整機能に注目した。

これまでに鼻腔については様々な研究が行われている。Keck ら [1] は鼻腔内の外鼻孔から上咽頭までの間で3箇所の壁面において温度と湿度を実測し、加温・冷却機能と湿度調整機能の関係を示し、鼻腔の前方が加温と加湿の主な役割を果たしていることを明らかにした。また、坂本ら [2] は、CT スキャン画像から再構築した3次元鼻腔実形状を用いて熱流体解析をおこない、等温壁での鼻腔内温度分布を示した。そして、吸気した空気に対しての鼻腔の加温冷却機能が高いことを示した。堀内ら [3] は、鼻腔壁面に熱伝導モデルを適用することによって鼻腔壁面の温度を流入温度に依存させて変化させることによって実際の鼻腔に近い温度分布を示した。

1.2 目的

本研究ではより現実に近い熱流体解析を行うために、湿度を考慮した3次元鼻腔実形状に対する熱流体解析を行う。鼻腔内では温度調整と湿度調整が同時に行われているので、温度と湿度を同時に計算する必要がある。これまでの熱流体解析の研究では湿度については考慮されていない。温度と湿度には密接な関係があり、それが鼻腔内ではどう影響するのかは不明である。湿度を考慮した熱流体解析を行うことにより、鼻腔内の湿度分布を明らかにするとともに湿度が温度にどのような影響を与えているのかを解明することを目的とする。

1.3 論文の構成

本論文は次の6章から構成されている。

第1章では、研究の背景、目的について述べる。

第2章では計算方法として、まず、鼻腔について述べて、次に先行研究で行われた鼻腔形状の再構築について簡単に述べてから、本研究で用いた3次元鼻腔形状の特徴を述べる。そして、解析を行うための基礎方程式、計算条件、境界条件を示す。

第3章では湿度を考慮した熱流体解析を行うために、鼻腔壁面のモデルについて考案することが重要だと考えモデルについて議論する。まず、鼻腔壁面の説明をした後にそれに基づいたモデルの仮定をする。そしてその仮定したモデルを適用して簡易形状に対して検証計算を行う。

第4章では定常流での熱流体解析として、3次元鼻腔実形状を用いて湿度を考慮した熱流体解析の計算結果を示す。最後に実測値との比較を行い、湿度を考慮した計算モデルの有効性について検討をおこなった。

第5章では非定常流での熱流動解析として、解析を行うための計算条件と境界条件を示し、呼気時の状態を模した流出条件で熱流体解析を行った計算結果について述べる。

第6章では結言として、本研究のまとめと結論、および今後の課題について述べる。

第2章 計算方法

2.1 鼻腔とは

鼻腔は呼吸において入口のひとつであり，肺や気管を保護するため吸い込んだ空気を適度な温度まで加温・冷却機能したり適度な湿り気を与える加湿機能が備わっている．その機能は高く，Seeley[4]がおこなった吸気時における温度と湿度の測定では次のような結果が出ている．温度の測定は，外気温度を最低で $-5[^\circ\text{C}]$ ，最高で $55[^\circ\text{C}]$ の様々な温度として測定を行い，鼻咽頭において最低で $30[^\circ\text{C}]$ ，最高で $37[^\circ\text{C}]$ になっている．湿度の測定は，外気温度を $23[^\circ\text{C}]$ とし相対湿度を最低で $13.1[\%]$ ，最高で $97.1[\%]$ として測定を行い，鼻咽頭において $70[\%]\sim 85[\%]$ になっている．鼻腔の加温・冷却機能と加湿機能は優れていることが示されている．

鼻腔はこの機能を高くするために，非常に複雑な形状をしていて，鼻腔の容積はわずか $20[\text{cm}^3]$ であるにもかかわらずその表面積は $160\sim 180[\text{cm}^2]$ と広い．その断面図を図 2.1 [8] に示した．鼻腔の壁側には下にたれさがったような形をした部位があり，上から上鼻甲介，中鼻甲介，下鼻甲介と呼ぶ．それぞれの鼻甲介の下には上鼻道，中鼻道，下鼻道と呼ばれる空間がある．そして，各鼻道と鼻中隔の共通の空間を総鼻道と呼ぶ．総鼻道の最上部の狭い裂隙が嗅裂である．これら空間は呼吸を行うときに空気が流れる通路となっている．

上，中，下鼻甲介は骨を包む厚い粘膜と豊富な血管から成り，この断面図を図 2.2 に示した．3つの鼻甲介は豊富な血管に血液をためることで粘膜表面の面積を大きくすることができる．外部環境の変化や人の活動状況に応じてその容積や，粘膜表面を覆っている粘液膜の分泌液量を増減させる．これによって，豊富な血流をもつ粘膜からの放熱により鼻腔の加温・冷却機能を手助けしている．また，この粘膜と吸気した空気が接触することにより加湿が行われる．鼻腔内の空気を加温・冷却をして熱のやり取りが行われると，一時的に鼻腔壁面の粘液膜の温度が変化する．また，吸気時において鼻腔内の空気に対して加湿を行うと粘液膜から水蒸気を与えられて一時的に粘液膜の分泌液量が減少する．そして呼気時においては，水蒸気が十分に含まれる空気 (約 $100[\%]$) が鼻腔内を通ることによってその水蒸気が粘液膜に還元される．このように水分をリサイクルすることによって加湿は行われる．

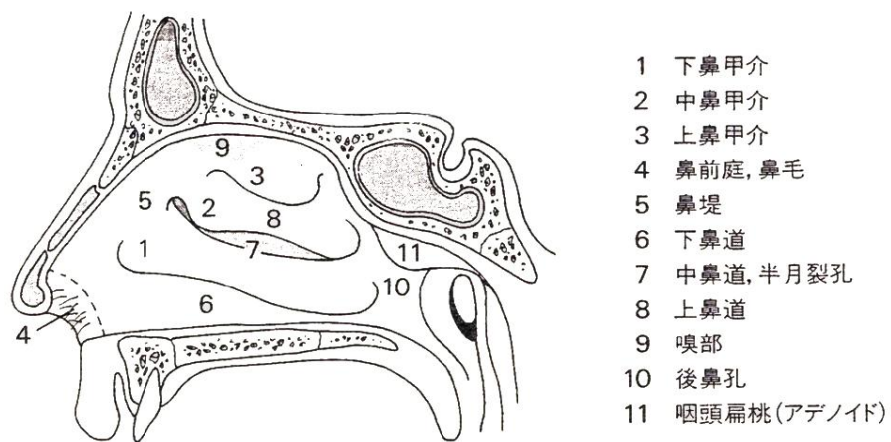


図 2.1: 鼻腔の構造



図 2.2: 鼻甲介断面

2.2 鼻腔実形状の再構築

本研究では，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わけではなく，リアリスティックな鼻腔の3次元形状を用いて熱流体解析を行う．解析に用いるため，対象となる人の鼻腔を医療用画像装置で撮影し形状を再構築した．今回，用いた医療用画像はComputed Tomography(CT)である．撮影にはSiemens社製SOMATOM PLUS4を用いた．鼻腔画像は，Digital Imaging and Communications in Medicine(DICOM)フォーマットで出力を行った．被験者は32歳の成人男性で，これまでに鼻腔疾患を患ったことがない健康な鼻腔である．撮影方向は身体の前から後ろにかけて冠状断面で撮影した．医療用画像の撮影条件を表2.1に示す．

表 2.1: CT 画像の撮影条件

被験者	32 歳 男性
フォーマット形式	DICOM
ピクセル数	512 × 512
ピクセルサイズ	0.192[mm]
スライス距離	0.702[mm]
撮影枚数	132

鼻腔形状を再構築するために，中山ら [5] が用いたものと同じ方法でおこなった．この方法は，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次元形状を再構築している．この方法の手順を次に示す．

1. CT の撮影条件をもとに鼻腔領域を含むボクセルデータを作成する．
2. 空気の階調値を調べ，鼻腔内の空気の階調値を選ぶ．画像をこの値でフィルタリングし，空気の領域のみを抽出する．
3. 副鼻腔やノイズも抽出されるので，これを手動で削除する．
4. 画像の階調値を空気領域とそれ以外のものに2値化する．
5. 鼻腔形状に対してスムージングをおこなう．
6. マーチングキューブズ法により，空気の領域とそれ以外の領域の間に境界面の生成をおこなう．
7. 生成された境界面の表面三角形にはアスペクト比が悪いものもあるので修正する．

手順の1から4までの作業を行うために次のソフトウェアを用いた.

- KGT 社製 INTAGE3.1[6]
- KGT 社製 RealINTAGE

CTの撮影条件をもとにしてDICOMフォーマットの画像を読み込み、鼻腔領域のみを抽出し、奥行き方向に画像を並べることでボリュームデータを生成する. 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、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おこなうことが可能となる. 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. ここで、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の2つに2値化をおこなった. 方法2で決定した階調値を境界として2値化をおこなった. 2値化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上の各断面画像で手動で削除し、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.

手順5から7までの作業に次のソフトウェアを用いた.

- Materialise 社製 MagicsRP11[7]

医療用画像から3次元形状の再構築をおこなうと撮影間隔距離の段差が生じる. この段差を低減し滑らかな局面を生成するために、移動平均法により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. マーチングキューブ法により、鼻腔壁面データの構築をおこなった. 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、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. また、トライアングルリダクションをおこなった. そして、形状の荒い部分の三角形を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.

次に、再構築した3次元の鼻腔形状に対して計算メッシュの生成を行った. 今回、計算メッシュの生成には次のソフトウェアを用いた.

- Fluent 社製 流体解析プリプロセッサ GAMBIT version 2.41

鼻腔形状の表面は三角形で構築されており、この三角形を表面メッシュとして用いた. 鼻腔形状内部の計算メッシュには4面体格子を用いた. このとき、計算の精度を向上させるためには、計算メッシュを細かくする必要がある. しかし、細かくするほど計算精度は向上するが、計算時間は長くなる. また、計算メッシュが多いために計算機のメモリの量を超えてしまい、計算ができなくなることもある. 計算メッシュを生成するときは、計算機のメモリの量を考慮する必要がある. 計算メッシュが生成されない原因に、表面メッシュ

の生成がうまくできていないということがある。このときは、再び MagicsRP を用いて鼻腔形状の表面データの編集をおこない、計算メッシュが生成できるまで作業を繰り返す。

2.3 3次元鼻腔実形状

被験者の CT 画像から再構築した形状は図 2.3 に示した。鼻腔形状の表面メッシュを図 2.4 に示した。本研究で用いる実形状は前後と上下方向にやや鼻曲がりがある。中隔壁が前方から見て左側に、上方から見て前後方向に曲がっているために右鼻腔が狭くなっている。そのため左右の鼻腔の断面積比に相違が多い。鼻腔の形状を変形させる生理的な現象としては、2.1 節で書いたように外部環境の変化などによって形状を変化させるというものがある。また、鼻腔には粘膜の容積が周期的に変動する生理的な現象もあり、左右の粘膜は交互に腫脹と収縮を繰り返している。今回の実形状は左右での相違が多く、右鼻腔の鼻道の一部が狭くなっており、上述の生理的な現象の影響を受けたと考えられる。

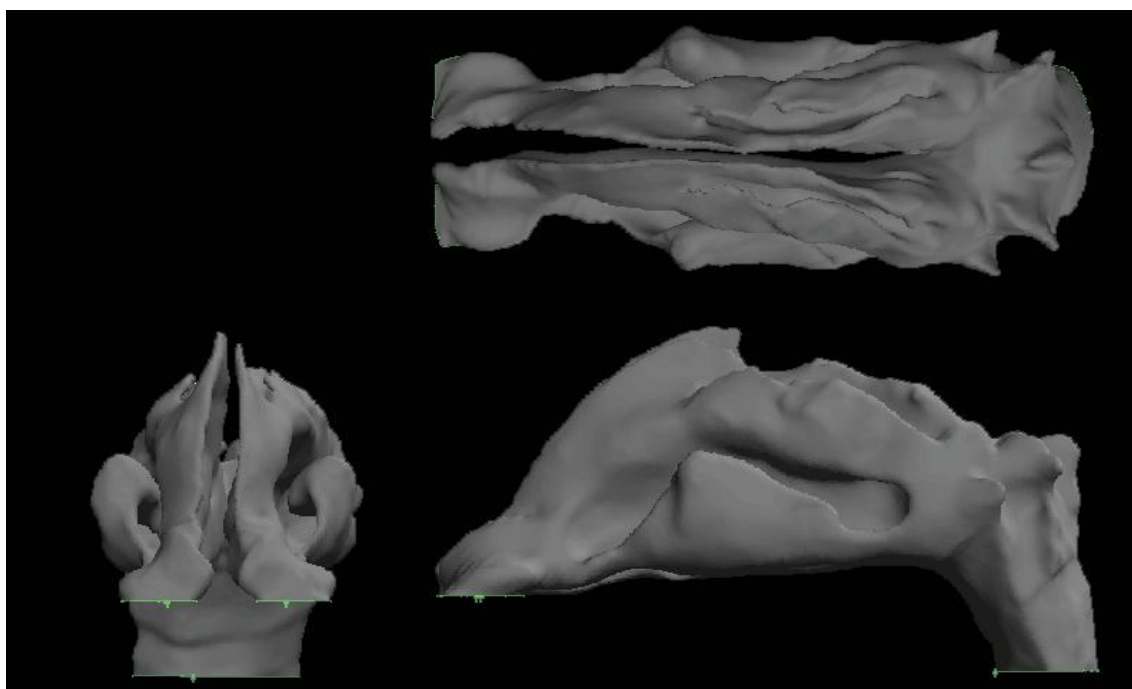


図 2.3: 再構築した鼻腔実形状

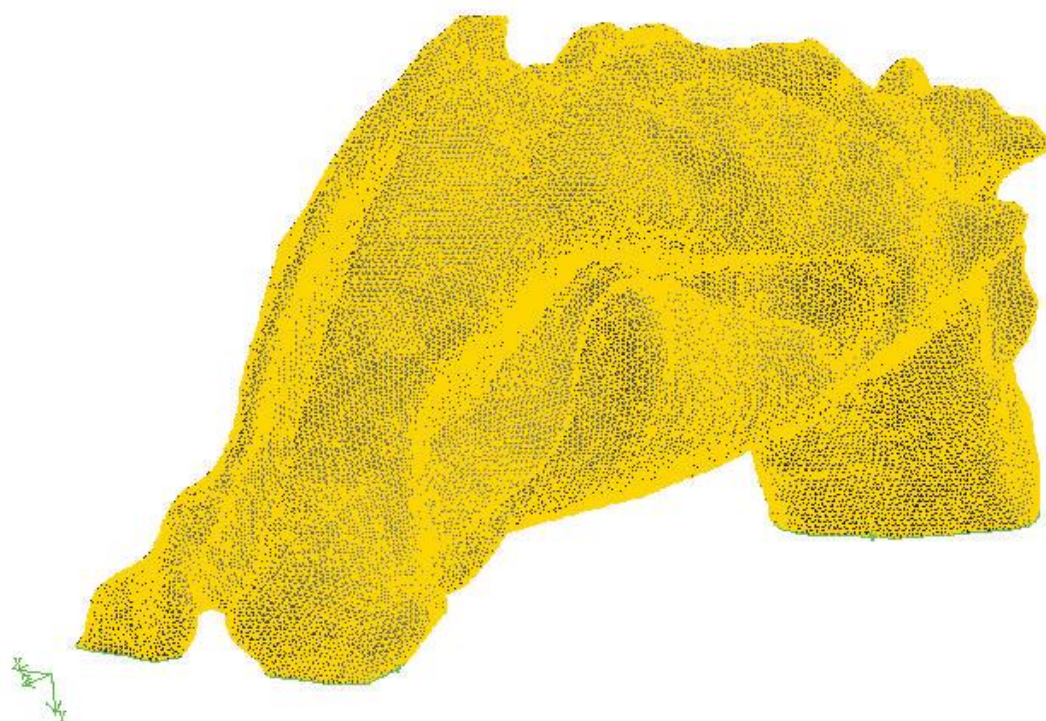


図 2.4: 計算メッシュ

2.4 計算条件

本研究では，中咽頭の断面上において速度を与える．従って，計算を行うにあたり，鼻腔の中咽頭におけるレイノルズ数を求めた．レイノルズ数 Re は無次元数であり，動粘性係数 ν を用いて定義される．

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (2.1)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

μ : 流体密度 ρ : 流体粘度

中咽頭のもっとも長い部分が $2.1 \times 10^{-2}[m]$ であり，この長さを代表長さ L とした．人の安静時における呼吸は，1 回あたりの換気量が $3.50 \times 10^{-4}[m^3]$ ，1 分間の呼吸回数は 12 回である．この条件から代表速さ U を計算すると流速が最も速いときで $0.635[m/s]$ となった．そして，これらから求められたレイノルズ数は 881 であるため，先行研究と同様に鼻腔内の流れは層流域であると考えられる．

今回の数値解析にあたって，計算条件と境界条件を表 2.2 に示した．これは，Keck ら [1] が行った鼻腔内温度の測定条件を参考にして設定した．外鼻孔と中咽頭における境界条件は，流入口を外鼻孔として圧力を $0[Pa]$ として，中咽頭で流出速度を設定した．これは人の鼻腔は左右対称ではないために，左右の外鼻孔の空気の色度異なるためである．流出速度は，上記で求めた平均速度である $0.404[m/s]$ とした．これは人の安静時の呼吸を想定したものである．鼻腔壁面の境界条件については前節で述べた通りである．今回，数値計算には次のソフトウェアを用いた．

- Fluent 社製 流体解析ソルバ Fluent version 6.3.26[9]

計算機は，Altix4700 の大規模計算機を用いた．

表 2.2: 計算条件

	条件
計算メッシュ数	約 128 万要素
密度	$1.225[kg/m^3]$
流入条件	圧力 0
鼻腔壁	No-slip
流出速度	$0.404[m/s]$

2.5 基礎方程式

本研究では3次元鼻腔実形状に対して熱流体解析を行う。鼻腔の流れは層流域であり、熱流体解析では非圧縮性粘性流体と仮定する。基礎方程式は、質量保存の方程式として連続の式 (2.2)，運動量保存の方程式としてナビエ・ストークスの式 (2.3)，温度の計算を行う方程式としてエネルギー保存方程式 (2.4)，湿度の計算を行う方程式として水蒸気の移流拡散方程式 (2.5)[10] の4つとした。基礎方程式の離散化には有限体積法を用いた。

これまでに行われた鼻腔に対する熱流体解析では、湿度を考慮していないので鼻腔内の空気の比熱と熱伝導率が一定であったが、本研究での熱流体解析は湿度を考慮して計算が行われるので、鼻腔内の空気の比熱と熱伝導率が空気中の水蒸気濃度に依存する。従って鼻腔内の温度分布が変わってくるものと思われる。

- 連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3)$$

- ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.4)$$

u_i, u_j : 速度 t : 時間 x_i, x_j : 座標

P : 圧力 μ : 動粘性係数

- エネルギー保存方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T \quad (2.5)$$

T : 温度 ρ : 密度 k : 熱伝導率 ($= f(c_{H_2O})$)

c_p : 比熱 ($= f(c_{H_2O})$)

- 水蒸気の移流拡散方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} c_{H_2O} + (\vec{u} \cdot \nabla) c_{H_2O} = D_{H_2O} \nabla^2 c_{H_2O} \quad (2.6)$$

c_{H_2O} : 水蒸気濃度 D_{H_2O} : 質量拡散濃度

第3章 鼻腔壁面

3.1 鼻腔壁面

鼻腔壁面では外鼻孔の後方にある鼻前庭の鼻限までは皮膚に覆われていて、そこから後方において粘膜に覆われている。前章の図 2.2 で示したように、鼻粘膜固有層は豊富な血管網と腺組織からなり、それらはコラーゲン線維を主とする結合組織によってしっかりと保持されている。深部の動脈からは細動脈が分枝し毛細血管に移行するが、毛細血管網には表在性のものと腺周囲のものがある。鼻粘膜では有窓性毛細血管がありこの部位の物質の吸収や透過により、周囲組織や細胞との間に盛んな物質交換を行っている。この機能により吸入されてきた外気への加湿も行われている。毛細血管はやがて著しく内径を拡大し洞様血管に移行する。この洞様血管の占める容積は鼻粘膜の 70～80[%] に及ぶといわれ、大量の血液を貯え、加湿機能や鼻粘膜の腫脹や収縮に関与する。洞様血管は分枝吻合を繰り返し大きな静脈叢を形成し、やがて細静脈叢を経て静脈に至る。鼻粘膜循環系には、さらに末梢血流のコントロールにあたる動静脈吻合も存在する。鼻粘膜上皮内には杯細胞が存在しており、その分布は成人の下鼻甲介で約 8,000～11,000[mm²] である。また、また粘膜下固有層には豊富な鼻腺の分布をみる。鼻腺は漿液腺細胞と粘液腺細胞とが混在する混合腺でその数は成人で鼻粘膜 1[mm²] あたり 8 個である。杯細胞や腺細胞からは粘液が絶えず産生され鼻粘膜上皮の表面を被っており、鼻腔の加湿作用に関与する。

3.2 壁面モデル

湿度を考慮した 3 次元鼻腔実形状に対して熱流体解析を行うために鼻腔壁面のモデルを考える。前節で述べたように、鼻腔壁面は粘膜があり、血管や組織から成っている。粘膜のなかにある血管には血液が流れその血液の温度は体温に近い温度である。血液を流れる血管と粘膜の間で熱のやりとりが行われている。空気を加温する時は欠陥から粘膜に熱を伝えてその熱を空気に渡し、空気を冷却する時は空気から粘膜に熱を伝えて粘膜から血管へ熱を渡す。そして鼻腔内の湿度の調整は粘膜と空気との間で水蒸気のやり取りを行うことによりされる。従って本研究では、鼻腔壁面を次の 2 つの状態を仮定した。

- 温度 34[°C]、相対湿度 100[%] の壁
- 水の層

温度 34[°C], 相対湿度 100[%] の壁は, 温度は一定の等温, そして 34[°C] 時の相対湿度 100[%] 分水蒸気を含んでいるものとした. 壁から鼻腔内を流れる空気に熱と水蒸気を渡す.

壁面を水の層として考えた場合は, 鼻腔壁面と空気との境界の温度は熱伝導モデルを適用することにより求められる. 熱伝導モデルを図 3.1 に示す. これは鼻腔壁面の温度分布は空気との熱のやりとりで変化するのでそれを再現するために適用した. 鼻腔壁面と空気との境界の温度は (2.1) 式から求めることができる.

$$q = \frac{k_s(T_s - T_w)}{\Delta n} + T_s \quad (3.1)$$

T_w : 固体表面の温度 k_s : 固体の熱伝導率 Δn : 壁の表面と熱源間の間隔

T_s : 熱源の温度 q : 熱量

熱伝導率 k_s は, 水の熱伝導率である $0.6[W/m \cdot K]$ とした. 熱源の温度 T_s は先行研究と同様に 34[°C] とした. Δn は先行研究でもっとも測定値に近い結果となった 3[mm] とした.

鼻腔壁面から鼻腔内を流れる空気への水蒸気の受け渡しについては, 水の層からの蒸発させることによってモデル化を行う. 水蒸気の移動量は (2.2) 式で求めることができる. 水の層のモデルを図 3.2 に示す.

$$N = k_c(C_{H_2OWall} - C_g) \quad (3.2)$$

N : 水蒸気の移動流束 k_c : 水の移動係数 C_{H_2OWall} : 壁の表面の水蒸気濃度

C_g : 空気中の水蒸気濃度

T_i が 0 より大きい値であれば蒸発が起きて, 0 より小さい値であれば吸収が起きる.

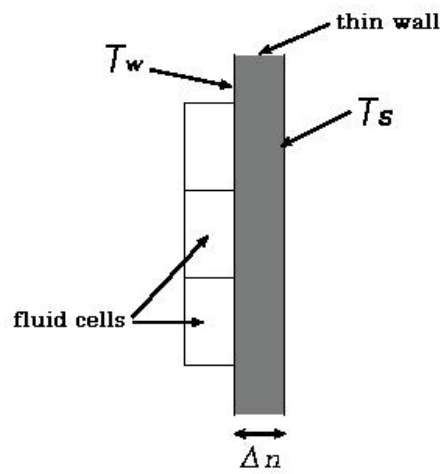


図 3.1: 熱伝導モデル

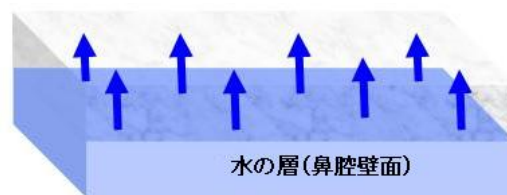


図 3.2: 水の層モデル

3.3 検証計算

前節で仮定したことが実際に行われているのかを検証するために、簡易形状で計算を行った。壁面を 34[°C] 相対湿度 100[%] の状態にした時と、水の層とした時の計算結果を示す。

3.3.1 壁面温度 34 °C相対湿度 100%の場合

曲がり円管を用いて壁面を温度 34[°C] 相対湿度 100[%] として計算を行った。流入温度は 25[°C] で流入相対湿度は 50[%] とした。その他の計算条件と境界条件は表 3.1 に示す。これらの条件は 2.4 節を参考にし設定した。湿度を考慮した場合と考慮していない場合の計算を行い比較を行った。

表 3.1: 計算条件

	条件
計算メッシュ数	約 20 万要素
密度	1.225[kg/m ³]
流入条件	圧力 0
壁面	No-slip
流出速度	0.6468[m/s]

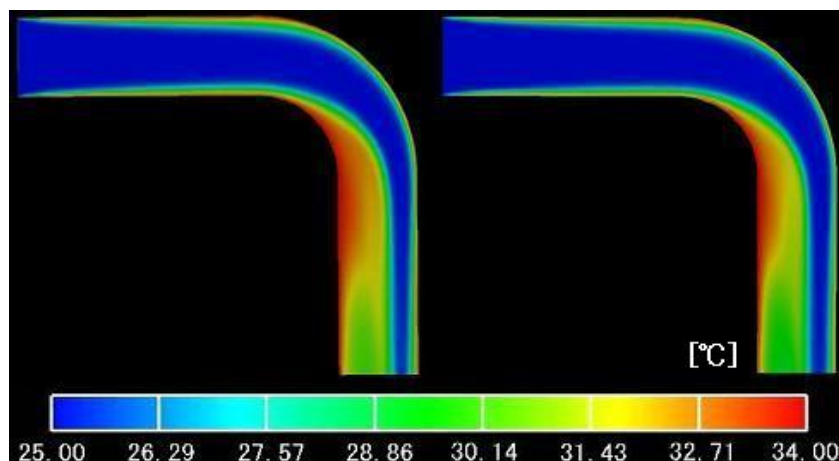


図 3.3: 曲がり鉛管内の温度分布

図 3.2 に曲がり鉛管内の温度分布を示す．右側が湿度を考慮した場合で左側が湿度を考慮しない場合である．画像内の左側から流入して右下から流出する．流入してから曲がり部分までは両条件ともあまり違いが見られなかったが，曲がり部分を過ぎてからは違いが見られた．曲がり部分の内側においては湿度を考慮しない場合の方が温度が高い箇所が多く見られた．流出口においても湿度を考慮した場合の方が低温（青色）の箇所が多かった．

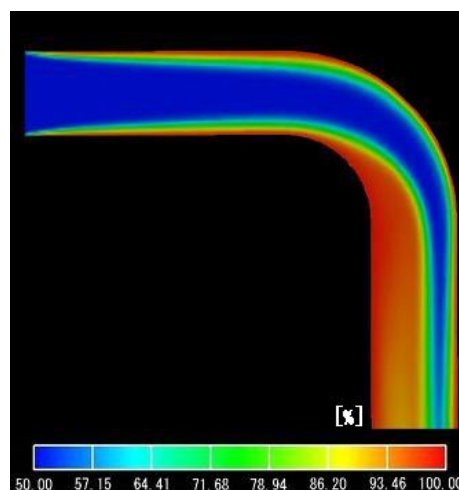
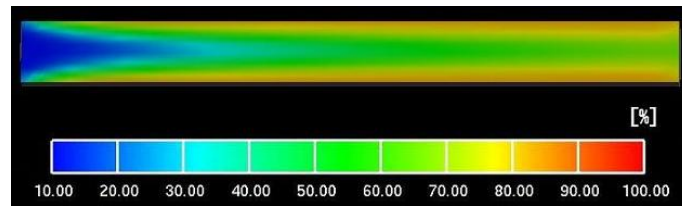


図 3.4: 曲がり鉛管内の温度分布

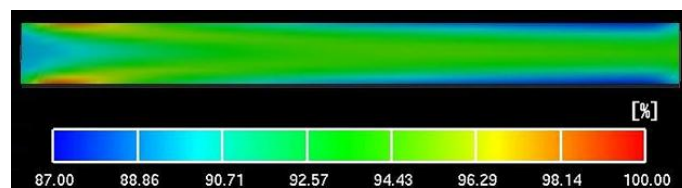
図 3.4 に曲がり鉛管内の相対湿度分布を示す．入り口から進むにつれて壁面から徐々に相対湿度が増加している．曲がり部分においては外側に比べて内側で高い湿度の箇所が多い．曲がり部分を過ぎると内側部分では相対湿度が減少している．流出口においても壁面付近では高湿度のままである．また，流出口に向かうにつれて低湿度（青色）の箇所が減少している．

3.3.2 壁面を水の層とした場合

円管を用いて壁面を水の層として計算を行った．流入温度は 25[°C] で流入相対湿度は 10[%](低湿度)，90[%](高湿度) とした．その他の計算条件と境界条件は表 3.1 と同条件とする．計算メッシュ数は約 10 万要素とした．流入相対湿度ごとの円管内の相対湿度分布と温度分布を比較する．図 3.5 に壁面を水の層とした場合で流入温度 25[°C] の時の円管内相対湿度分布を示す．また，図 3.6 に壁面を水の層とした場合で流入温度 25[°C] の時の円管内温度分布を示す．

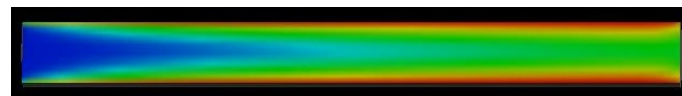


(a) 10%流入

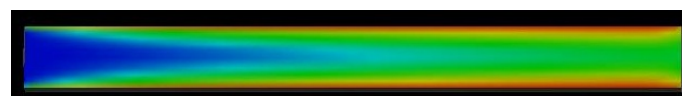


(b) 90%流入

図 3.5: 25 °C流入時の円管内相对湿度分布



(a) 10%流入



(b) 90%流入

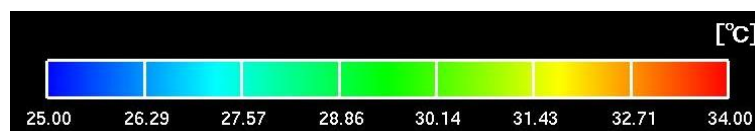


図 3.6: 25 °C流入時の円管内温度分布

円管内相対湿度を見ると、10[%] 流入時は壁面付近を中心に相対湿度が増加している。一番高い箇所で85[%] ほどまで増加している。流入口から奥に進むにつれて円の中央部でも相対湿度が60[%] 前後まで増加している。低湿度を流入することにより蒸発が起こっていることが示せた。90[%] 流入時は流入口近くの壁面において相対湿度が100[%] まで増加している。しかし流入口から距離が広がるにつれて壁面付近で相対湿度が減少している。一番小さい場所では87[%] ほどであった。これは壁面から円管の空気内へ水蒸気が吸収されていると考えられる。壁面から離れている円の中心では相対湿度は94[%] であった。円管内相対湿度を見ると、10[%] 流入時と90[%] 流入時を比べると円の中心部でわずかに違いが見られる。90[%] 流入時に比べて10[%] 流入時では温度が高い箇所が多く見られる。また、流入口から離れた箇所で壁面において10[%] 流入時の時の方が高温である箇所が多い。空気内の水蒸気によって円管内の温度分布が変化することが示すことができた。

3.4 まとめ

本章では鼻腔壁面について議論した。湿度を考慮した熱流体解析を行うためには鼻腔壁面のモデルを考案することが重要であると考えた。鼻腔壁面の上層は液粘膜となっている。このような状態を参考にして計算モデルとして2パターン仮定した。そしてそのモデルを適用して簡易形状に対して検証計算を行った。その結果2パターンとも適切な結果となり実証することができた。次章ではこの2パターンのモデルを適用して3次元鼻腔実形状に対して定常流れの熱流体解析を行う。実際の鼻腔では、鼻前庭の鼻限までは皮膚に覆われていて、そこから後方において粘膜に覆われているが、本研究では、鼻腔壁面全域に対して仮定したモデルの適用を行う。

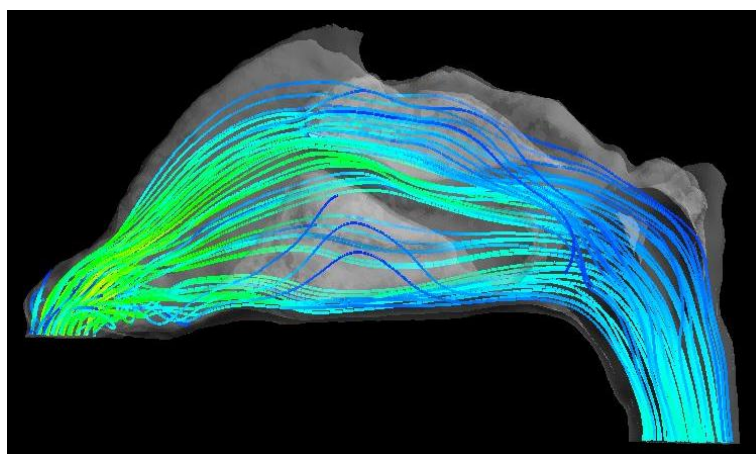
第4章 定常熱流体解析

鼻腔には吸い込んだ空気を適度な温度まで加温・冷却機能と適度な湿度まで加湿機能がある。この機能は、外部環境の変化に応じて鼻腔粘膜の容積や粘液膜の分泌量を増減させることで調整している。鼻腔粘膜の内側には血管が存在し、これが熱源となり鼻腔内の温度を高くしている。また、粘液膜から水蒸気が鼻腔内の空気に移動することによって鼻腔内の湿度が調整されている。先行研究では、湿度については考慮しない熱流体解析が行われた。本章では、前節で仮定した2通りの鼻腔壁面状態を適用して湿度を考慮した3次元鼻腔実形状に対して熱流体解析を行うことによって、鼻腔内の湿度分布を求める。そして鼻腔内の温度と湿度がどのように関係しているのかを明らかにしていく。また両方の計算結果と実際に測定された値の比較を行う。その解析結果を次に示す。

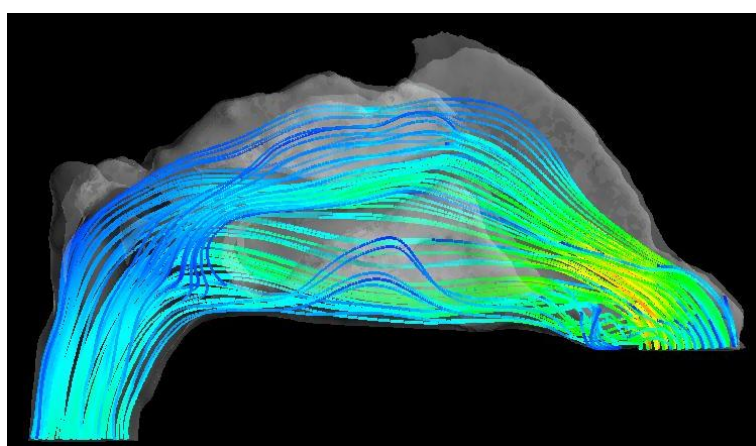
4.1 鼻腔内の空気の流れ

図 4.1(a) と 図 4.1(b) に鼻腔内の空気の流れを流線図で表した。流線の色は流速の大きさを表しており、青色ほど流速が小さく、赤色ほど流速が大きくなっている。図 4.1(a) は左鼻腔内流れで、左側が外鼻孔で右側が咽頭部分である。図 4.1(b) は右鼻腔内流れで、右側が外鼻孔で左側が咽頭部分である。吸気時には外鼻孔から流入した空気は上に向かい流れて総鼻道に入る。上鼻道、中鼻道、下鼻道へ向かう流れの中では総鼻道から中鼻道にかけてもっとも流速が速く、弧を描くような経路をとって後鼻孔に入る。下鼻道においては流速が小さかった。鼻腔前方の流れは鼻腔後方に比べて流れが速かった。

鼻腔形状は右鼻腔が狭いために、左鼻腔と比べて流速が遅くなっていることがわかる。



(a) 左鼻腔の流線図



(b) 右鼻腔の流線図

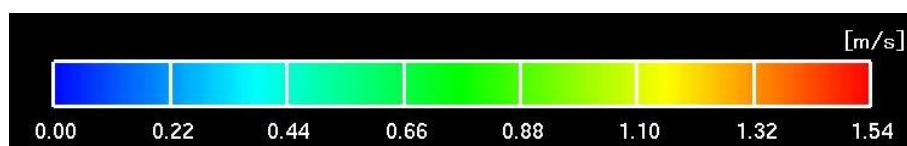


図 4.1: 鼻腔内の空気の流れ

4.2 34℃，相対湿度100%の場合の結果

4.2.1 流入温度 25℃の時

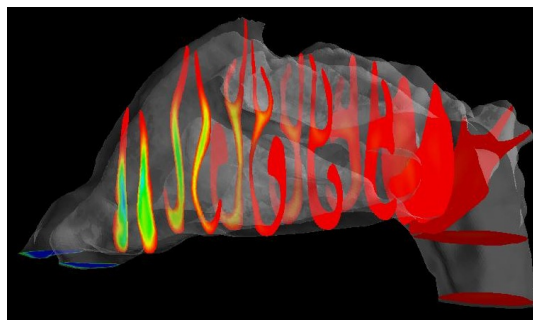
図 4.2(a)(b)(c) に流入温度を 25[°C] で相対湿度を 10[%](低湿度)50[%](中湿度) 90[%](高湿度) とした場合の鼻腔内湿度分布を示す。どの流入相対湿度の場合でも鼻腔半ばあたりでは相対湿度 100[%] まで上昇していて半ばから後ろの断面では一様分布になっている。また、どの断面においても鼻腔壁面付近では相対湿度が 100[%] になっている。流入相対湿度ごとに見ると、10[%] 流入時には一番手前の断面では断面の広範囲で相対湿度 50[%] 前後となっている。断面 2 においては左側の断面では一部中央付近を除いては 75[%]～80[%] ほどになっている。右側の断面では 60[%] 前後ほどの部分が多くなっている。断面 3 と断面 4 においては中鼻道の中央では周りより相対湿度が低く 90[%] 前後となっている。それ以外の部分ではほぼ 100[%] となっている。50[%] 流入時には一番手前の断面の中央の一部では 50[%] であるがほかの大部分では 65[%]～80[%] の分布になっている。左断面に比べて右断面では相対湿度が低い箇所が多く見られる。断面 2 では左鼻腔では相対湿度は 100[%] の箇所が大部分であったが、右鼻腔では 80[%]～90[%] の部分が多く見られた。断面 3 においては中鼻道の一部で 95[%] ほどであるが、その他の部分では 100[%] となっていた。断面 4 以降ではほぼ全域で相対湿度が 100[%] となっており一様分布になっていた。90[%] 流入時はほぼ全域で 90[%] 以上となっており、他の流入相対湿度と異なり鼻腔前方の断面でも一様分布となっている。

図 4.3 に図 4.2 の鼻腔内の断面ごと平均相対湿度の値を示す。10[%] と 50 [%] 流入時は鼻腔後方に向かうにつれて相対湿度が上昇しているが、特に鼻腔前方において上昇が高い。またすべての流入相対湿度において断面 6 より後ろでは相対湿度が 100[%] となっており差が見られない。断面ごとの上昇数に着目すると、10[%] 流入時は断面 1 から断面 2 で 25[%] の上昇、断面 2 から断面 3 でも 25[%] の上昇が見られ、50[%] 流入時は断面 1 から断面 2 で 20[%] の上昇、断面 2 から断面 3 でも 15[%] の上昇が見られる。断面 4 以降を見ると、10[%] 流入時は断面 6 まではほぼ断面ごとに 10[%] ずつ上昇している。50[%] 流入時は断面 6 まではほぼ断面ごとに 5[%] ずつ上昇している。90[%] 流入時は断面 1 から平均相対湿度が高い。また、断面 3 ではすでに 100[%] に達している。断面 3 から後方にかけてほぼ相対湿度 100[%] で一定である。100[%] をわずかに超えている断面もあるが、いずれも 1[%] 以上超えていない。これは計算誤差によるものである。

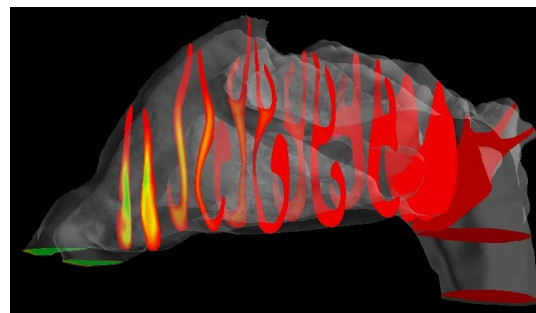
図 4.4(a)(b) に流入温度を 25[°C] として、これまでの研究での条件と同様の湿度を考慮しない場合と今回の湿度を考慮した鼻腔内温度分布を示す。流入相対湿度ごとの湿度を考慮した場合の温度の分布の違いは見られなかった。鼻腔前方の断面に着目すると、断面 2 では湿度を考慮しない場合に比べて、湿度を考慮した場合の方が温度が低い部分 (青い部分) が多く見られる。断面 3 や断面 4 を見るとわずかに湿度を考慮した場合の方が温度が低い部分が見られるが、大きな差ではない。断面 5 から後ろでは湿度を考慮してもしていない場合でも断面ごとの分布はほとんど差が見られなかった。

図 4.5 に図 4.3 の鼻腔内の断面ごと平均温度の値を示す。鼻腔前方の断面では湿度を考

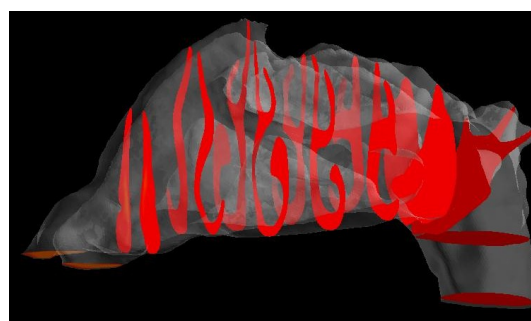
慮しない場合と湿度を考慮した場合の平均温度差が見られた。逆に鼻腔後方の断面では、ほとんど差が見られなかった。一番差が大きい断面は断面3で0.31の差がある。断面2と断面4においても0.2の差がある。断面5では0.16の差で、そこから後ろに向かうにつれて両条件の差が小さくなっている。断面7から後ろの断面では、差は0.05~0.07でありほとんど差が見られない。両条件とも断面1から断面2においては3[°C]上昇している。断面2から断面3にかけては1.5[°C]の上昇で断面3から断面4においても同じほど上昇している。従って鼻腔前方で大きく温度変化していることがわかる。



(a) 10%流入



(b) 50%流入



(c) 90%流入

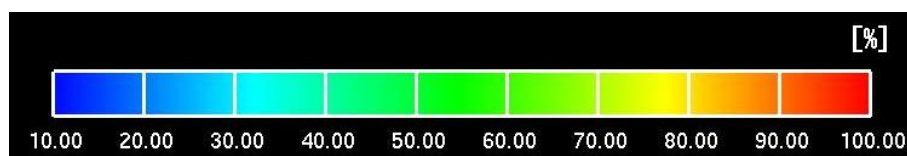


図 4.2: 25 °C流入時の鼻腔内相対湿度分布

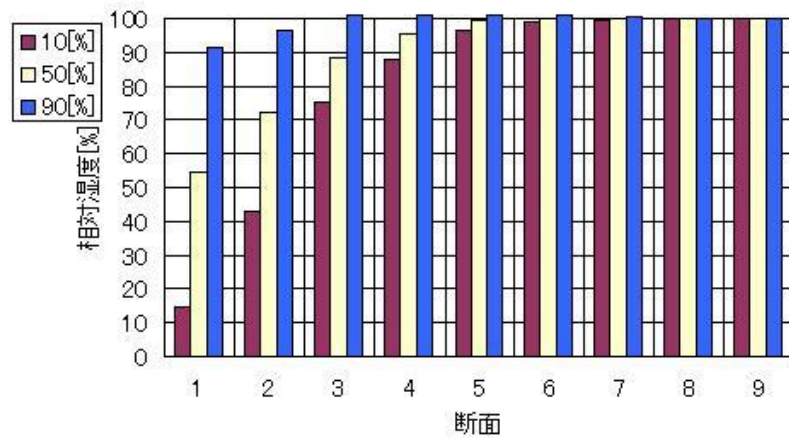
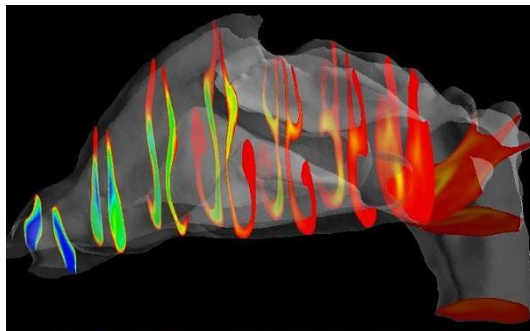
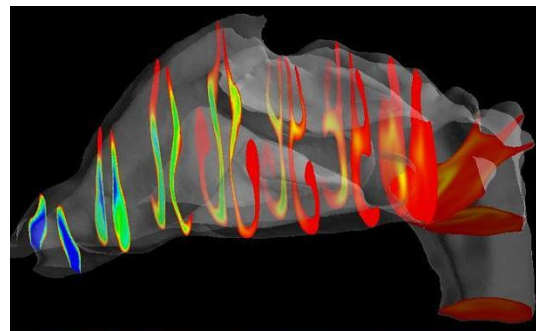


図 4.3: 25 °C流入時の断面ごとの平均相対湿度



(a) 湿度を考慮しない場合の温度分布



(b) 湿度を考慮した場合の温度分布

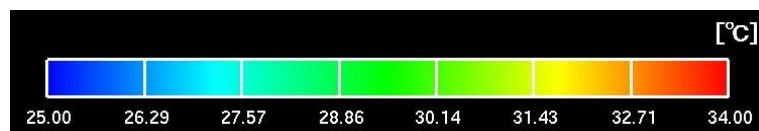


図 4.4: 25 °C流入時の鼻腔内温度分布

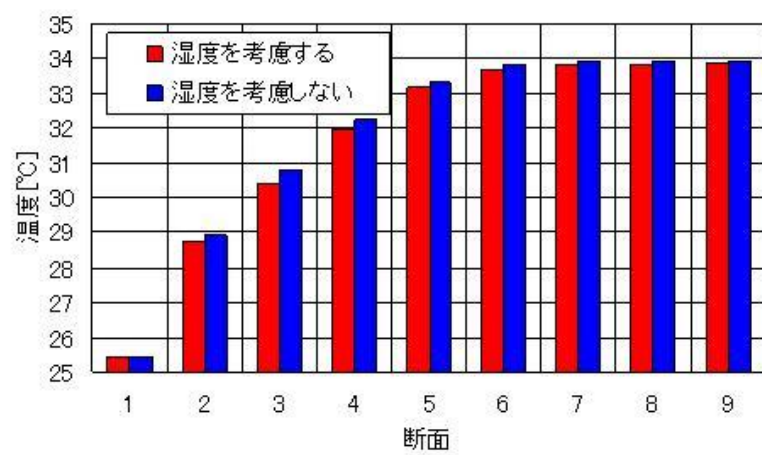


図 4.5: 25 °C流入時の断面ごとの平均温度

4.2.2 流入温度 50℃の時

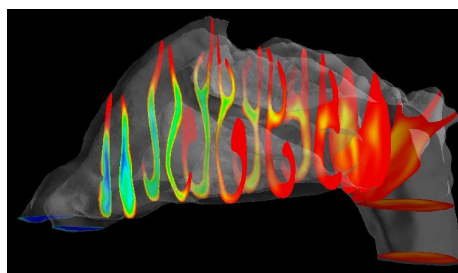
図 4.6(a)(b)(c) に流入温度を 50[°C] で相対湿度を 10[%](低湿度)50[%](中湿度) 90[%](高湿度) とした場合の鼻腔内湿度分布を示す. 25[°C] 時と同様にどの断面においても鼻腔壁面付近では相対湿度が 100[%] になっている. 25[°C] の時に比べてどの流入相対湿度の場合でも相対湿度の上昇は少ない. しかし, どの流入相対湿度の場合でも中咽頭の断面では相対湿度 100[%] まで上昇しているが 10[%] 流入時と 50[%] 流入時においては 100[%] でない部分がある. 10[%] 流入時では鼻咽頭断面での相対湿度は低くて, 右鼻腔では大部分で 85[%] 前後である. 50[%] 流入時では鼻咽頭断面において 100[%] の箇所が大部分であるが, 一部で 90[%]~95[%] の箇所が見られる. 鼻腔前方に着目すると, 10[%] 流入時と 50[%] 流入時は断面 1 の中央部分では, 流入相対湿度とほぼ同じの相対湿度となっている. 断面 2 においては流入相対湿度 10[%] の時は左側の断面では一部中央付近を除いては 50[%]~60[%] ほどになっている. 右側の断面では 35[%]~50[%] ほどの部分が多くなっている. 流入相対湿度 50[%] の時は左側の断面では鼻腔壁面付近では 80[%] 付近まで上昇しているが, 壁面から遠い断面中央付近では相対湿度は 60[%] 程度となっている. 右側の断面では 60[%] 前後の箇所が多く見られる. 90[%] 流入時はほぼ全域で 90[%] 以上となっており, 25[°C] 流入時と同様に他の流入相対湿度と異なり鼻腔前方の断面でも一様分布となっている.

図 4.7 に図 4.6 の鼻腔内の断面ごと平均相対湿度の値を示す. 10[%] と 50 [%] どの相対湿度の流入時においても鼻腔後方に向かうにつれて相対湿度が上昇しているが, 特に鼻腔前方において上昇が高い. しかし 25[°C] 流入時に比べると上昇は小さい. 断面ごとの上昇数に着目すると, 10[%] 流入時は断面 1 から断面 2 で 18[%] の上昇, 断面 2 から断面 3 でも 20[%] の上昇が見られ, 断面 3 からは断面 5 まで断面ごとに 15[%] ずつ上昇している. 断面 6 から後ろに向かうにつれ断面ごとに 5[%]~10[%] 上昇しているが一番後ろの断面でも 100[%] には達してなく 97[%] ほどであった. 50[%] 流入時は断面 1 から断面 2 で 14[%] の上昇, 断面 2 から断面 3 でも 15[%] の上昇が見られ, 断面 3 からは断面 5 まで断面ごとに 10[%] ずつ上昇している. 断面 6 から後ろに向かうにつれ断面ごとに 5[%] 前後上昇しているが一番後ろの断面でも 100[%] には達してなく 99[%] ほどであった. 90[%] 流入時は断面 1 から平均相対湿度が高い. しかし 25[°C] の場合ほど上昇してなく, 断面 5 で 100[%] に達した.

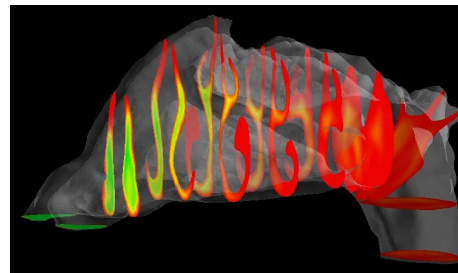
図 4.8(a)(b) に流入温度を 50[°C] として, これまでの研究での条件と同様の湿度を考慮しない場合と今回の湿度を考慮した鼻腔内温度分布を示す. 流入相対湿度ごとの湿度を考慮した場合の温度の分布の違いは見られなかった. 鼻腔前方の断面に着目すると, 断面 2 では湿度を考慮しない場合に比べて, 湿度を考慮した場合の方が温度が高い部分 (赤い部分) が見られるが, 25[°C] の時ほど違いは見られなかった. その他の断面でも断面 3 の右側でわずかな違いが見られるが, それより後ろの断面では温度分布の差は 25[°C] 流入時ほどの違いは見られなく, 後鼻孔から後ろの断面では全く違いが見られなかった. 左右の鼻腔を比べると, 湿度を考慮した場合としてない場合両方とも左鼻腔に比べて右鼻腔の方が温度低下が少なかった.

図 4.9 に図 4.8 の鼻腔内の断面ごと平均温度の値を示す. 鼻腔前方の断面では湿度を考

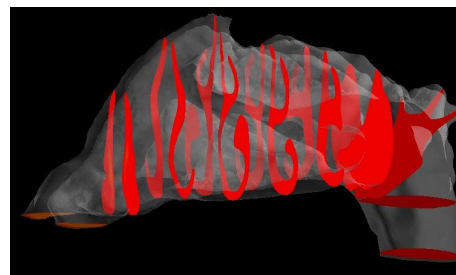
慮しない場合と湿度を考慮した場合の平均温度差が見られた。しかし 25[°C] 流入時より差は小さく一番差が大きい断面でも断面2で0.2の差がある。断面3においても0.14の差がある。断面3から鼻腔後方に向かうにつれてどんどん差が小さくなっていった。断面4においては0.1で断面5では0.09となっている。断面5から後ろの断面では、差は0.05～0.07であり25[°C] 流入時と同様にほとんど差が見られない。両条件とも断面1から断面2においては4[°C] 低下している。断面2から断面3にかけても4[°C] 低下している断面3から断面4においては3[°C] 弱低下している。断面5においては35[°C] ほどになっていてそこから後ろにおいてはほぼ温度変化が見られなかった。従って鼻腔前方で大きく温度変化していることがわかる。



(a) 10%流入



(b) 50%流入



(c) 90%流入

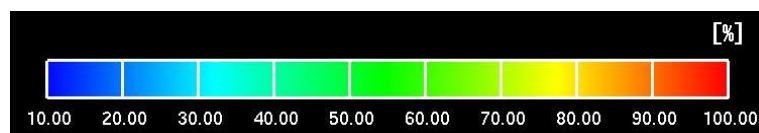


図 4.6: 50 °C流入時の鼻腔内相対湿度分布

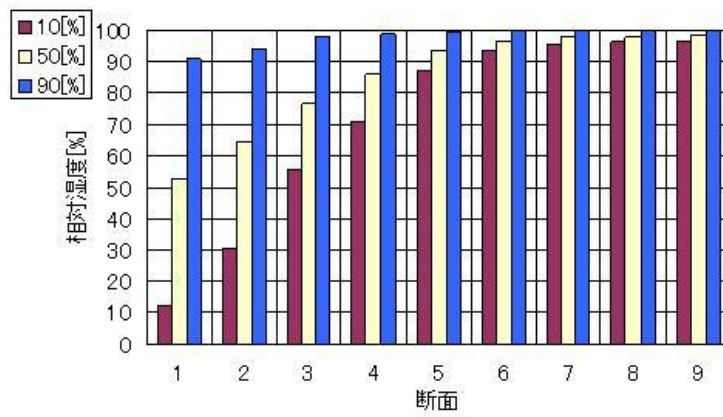
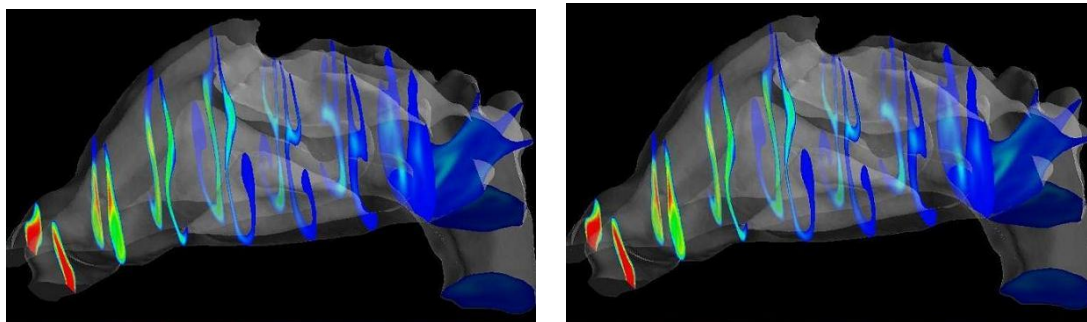


図 4.7: 50 °C流入時の断面ごとの平均相対湿度



(a) 湿度を考慮しない場合の温度分布

(b) 湿度を考慮した場合の温度分布

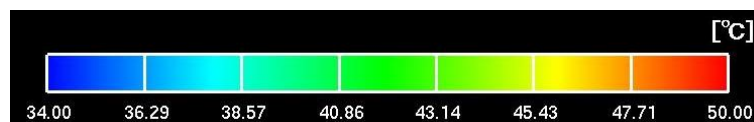


図 4.8: 50 °C流入時の鼻腔内温度分布

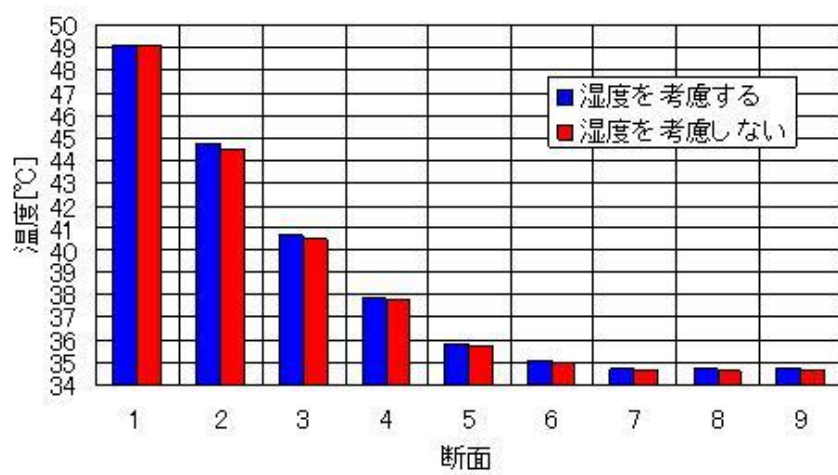


図 4.9: 50 °C流入時の断面ごとの平均温度

4.3 水の層とした場合の結果

4.3.1 流入温度 25℃の時

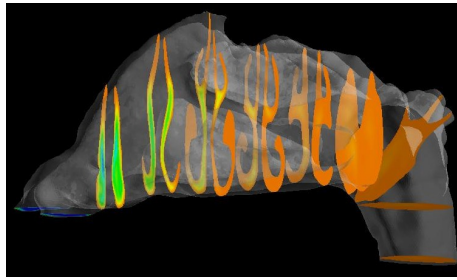
図 4.10(a)(b)(c) に流入温度を 25[°C] で相対湿度を 10[%](低湿度)50[%](中湿度) 90[%](高湿度) とした場合の鼻腔内湿度分布を示す。どの流入相対湿度の場合でも、壁面付近では相対湿度は 85[%]~90[%] くらいになっている。50[%] 流入時と 90[%] 流入時は鼻咽頭断面では 92[%] ほどまで上昇していて断面の分布を見るとほぼ一様な分布である。10[%] 流入時の場合は、特に右鼻腔から流れてきた空気が鼻咽頭断面では 85[%] ほどまでしか上昇していない。左鼻腔から流れてきた空気も一部中央付近では、90[%] に達していない部分がある。どの流入相対湿度の場合でも、鼻腔前方の断面 1 の相対湿度分布は壁を温度 25[°C]、相対湿度 100[%] とした場合と大きな違いはなかった。しかし断面 2 の場合は違いが見られた。流入相対湿度 10[%] 流入時では相対湿度が 40[%]~60[%] の箇所が見られ、特に右鼻腔で多く見られた。流入相対湿度 50[%] 流入時では相対湿度が 70[%]~80[%] の箇所が多く見られた。断面 3 においては 10[%] 流入時は左鼻腔においては中鼻道では 75[%]~80[%] ほどになっていて、そのほかの部分では 85[%]~90[%] ほどまで上昇していた。右鼻腔においては中鼻道を中心に 50[%]~60[%] の箇所が多く見られた。50[%] 流入時は左右鼻腔ともに 80[%]~90[%] 部分が多く見られるようになった。中鼻道付近においては周りより相対湿度が低くなっていた。断面 4 と断面 5 では 10[%] 流入時は中鼻道の一部では相対湿度は 85[%] 前後となっていたが大部分では 90[%] ほどまで上昇していた。50[%] 流入時にはほぼ全域で 89[%]~91[%] ほどとなっていた。90[%] 流入時は全体的に同じ分布で、鼻腔壁面付近では相対湿度は 90[%] 前後であるが鼻腔壁面から遠い部分では相対湿度がほぼ 100[%] までになっている。

図 4.11 に図 4.10 と同じ条件の鼻腔からの入口からの距離ごとの相対湿度を示す。10[%] と 50[%] 流入時は鼻腔後方に向かうにつれて相対湿度が上昇しているが、特に鼻腔前方において上昇が高い。10[%] 流入時は入り口から 1.5[cm] で 30[%] の上昇、1.5[cm] から 2.5[cm] でも 20[%] の上昇が見られ、2.5[cm] から 3.5[cm] においても 18[%] の上昇が見られる。3.5[cm] から後ろにおいても 1[cm] ごとに 6[%] ずつ上昇していった 6.5[cm] においては相対湿度は 87.8[%] となっている。50[%] 流入時は入り口から 1.5[cm] で 20[%] の上昇、1.5[cm] から 2.5[cm] でも 10[%] の上昇が見られ、2.5[cm] から 3.5[cm] においても 8[%] の上昇が見られる。3.5[cm] から後ろにおいても 1[cm] ごとに 4[%] ずつ上昇していった 6.5[cm] においては相対湿度は 90.5[%] となっている。90[%] 流入時は入口から相対湿度が高い。入り口から 1.5[cm] では 94.1[%] で入り口から 2.5[cm] では 96.2[%] となっている。2.5[cm] の箇所までは増加していたが、3.5[cm] の箇所では 93.9[%] となっていてそれから後ろにおいては少しずつ減少していった。6.5[cm] の地点では 92.8[%] となっている。

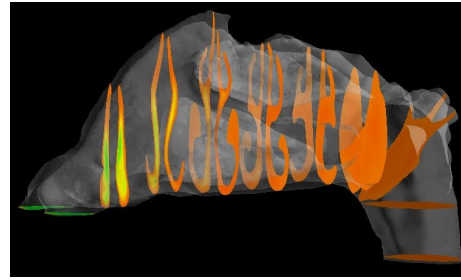
図 4.12(a)(b)(c) に流入温度を 25[°C] として、相対湿度を 10[%]、50[%]、90[%] とした場合の鼻腔内湿度分布を示す。鼻腔壁面を 25[°C]、相対湿度 100[%] とした場合と異なり流入相対湿度ごとに鼻腔内温度分布が変化している。流入相対湿度を 10[%] とした場合と 50[%] とした場合を比較すると鼻腔前方において 10[%] 流入時の方が温度が低い部分 (青い

部分)が少ない。断面3の左側の中鼻道では29[°C]~30[°C](緑の部分)部分が50[%]流入時より10[%]部分の方が少ない。断面4の左側の中鼻道では30[°C]~31[°C](黄緑の部分)部分が50[%]流入時より10[%]部分の方が少ない。しかし、50[%]とした場合と90[%]とした場合を比較するとほとんど違いが見られなかった。中咽頭付近に着目すると50[%]とした場合と90[%]とした場合は10[%]にした場合に比べて温度が低い部分が多いことが見られる。

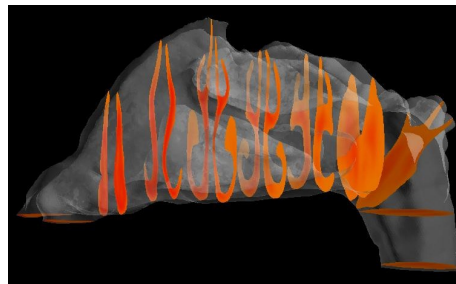
図4.13に図4.12と同じ条件の鼻腔からの入口からの距離ごとの温度を示す。距離ごとの増加を見ると、入り口から1.5[cm]にかけてが一番増加している。どの流入相対湿度においても3[°C]~4[°C]増加している。その後ろにおいても1[cm]ごとに見ていくとほぼ同じ割合で増加している。入り口から6.5[cm]の箇所においては、33[°C]前後までになっている。流入相対湿度ごとに見ると、鼻腔前方の入口から1.5[cm]~3.5[cm]の時に温度の差が大きい。10[%]と50[%]の場合は1.5[cm]の時は0.24、2.5[cm]の時は0.32で3.5[cm]の時は0.28の差であった。50[%]と90[%]の場合は1.5[cm]の時は0.23 2.5[cm]の時は0.19で3.5[cm]の時は0.09の差であった。10[%]と50[%]の差より50[%]と90[%]の差の方が小さくなっている。より差が小さくなっている。鼻腔後方では、前方ほど差が見られなかった。入口から6.5[cm]部分では、50[%]と90[%]の場合は差はほとんどなくて0.04であった。10[%]と50[%]の場合も差は小さくて0.07であった。



(a) 10%流入



(b) 50%流入



(c) 90%流入

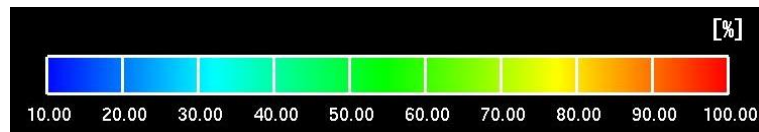


図 4.10: 25 °C流入時の鼻腔内相対湿度分布

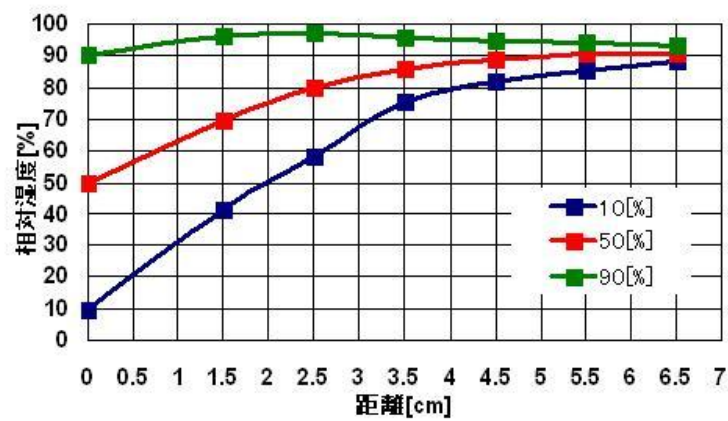
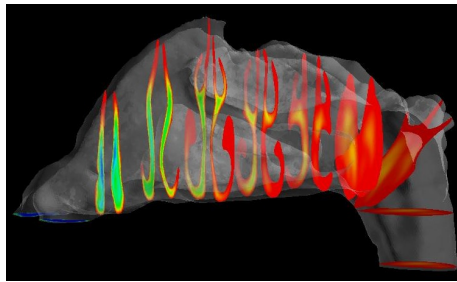
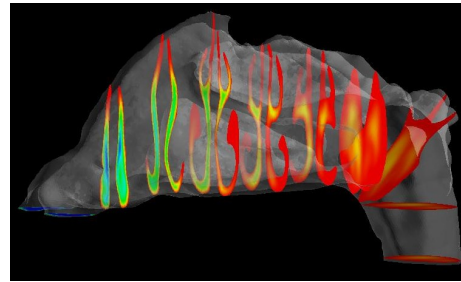


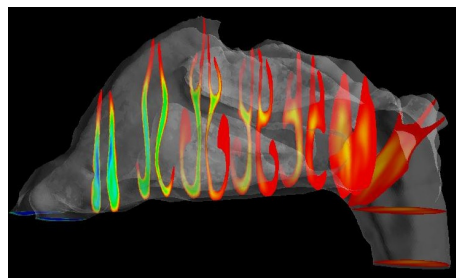
図 4.11: 25 °C流入時の入口からの距離ごとの鼻腔内相対湿度



(a) 10%流入



(b) 50%流入



(c) 90%流入

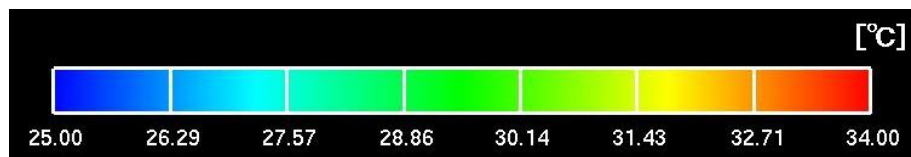


図 4.12: 25 °C流入時の鼻腔内温度分布

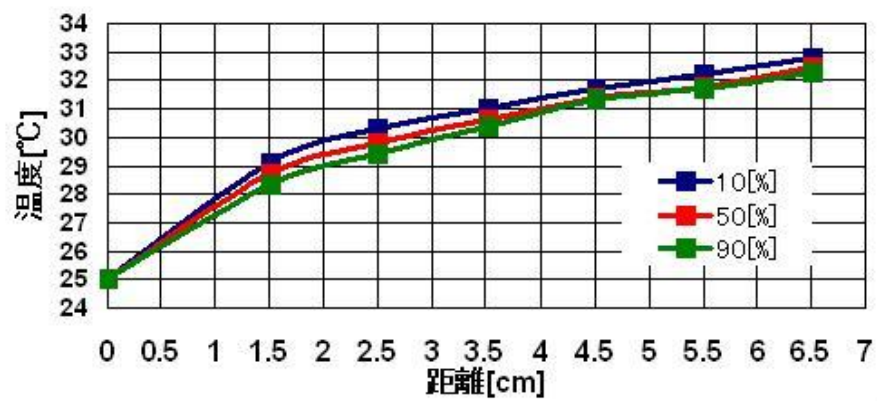


図 4.13: 25 °C流入時の入口からの距離ごとの鼻腔内温度

4.3.2 流入温度 50℃の時

図 4.14(a)(b)(c) に流入温度を 50[°C] で相対湿度を 10[%](低湿度)50[%](中湿度) 90[%](高湿度) とした場合の鼻腔内湿度分布を示す. どの流入相対湿度の場合でも, 壁面付近では 85[%]~90[%] くらいになっている. 流入温度を 25[°C] とした時よりも, 相対湿度 10[%] と 50[%] 流入時においては相対湿度の増加が少ない. 10[%] 流入時の場合は, 特に右鼻腔から流れてきた空気が鼻咽頭断面では 70[%] ほどまでしか上昇していない部分が多く見られる. 左鼻腔から流れてきた空気も一部中央付近では, 80[%] に達していない部分がある. 後鼻孔においても特に中鼻道で同じような傾向が見られた. その他の断面を見ても中鼻道部分においては相対湿度が 50[%]~60[%] ほどであった. 前方の断面 1 では鼻腔壁面から離れた部分では 20[%]~30[%] 部分の箇所が多く見られた. 断面 2 においては左側では相対湿度 50[%]~60[%] の箇所が多かったが右側では 30[%]~40[%] ほどの上昇であった. 断面 3 においては 60[%]~70[%] ほどの箇所が一番多かったが右鼻腔の一部では 40[%] 前後の箇所が見られた. 50[%] 流入時の場合は, 中咽頭断面では, 一様分布でなく壁面から遠い部分では 80[%] 前後ほどであった. 鼻腔前方の断面 1 の相対湿度分布は壁を温度 34[°C], 相対湿度 100[%] とした場合と大きな違いはなかった. 断面 2 では両鼻腔とも 60[%]~70[%] の箇所が多くなっている. 左右の鼻腔では大きな違いが見られなかった. 断面 3 では 70[%]~75[%] 前後となっている. 左鼻腔では中鼻道を中心に分布しているが, 右鼻腔では全体的に分布している. 相対湿度 10[%] 流入時と同様に後鼻孔の断面と中咽頭の断面で同じような傾向が見られた. どちらの断面も中心では相対湿度が 80[%] 前後となっていた. 90[%] 流入時は全体的に同じ分布で, 鼻腔壁面付近では相対湿度は 90[%] 前後であるが鼻腔壁面から遠い部分では相対湿度がほぼ 100[%] までになっていて, 25[°C] 流入時とあまり変わらない分布となっている.

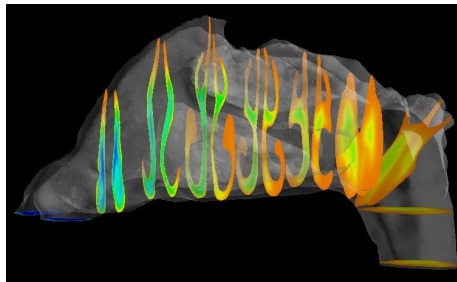
図 4.15 に図 4.14 と同じ条件の鼻腔からの入口からの距離ごとの相対湿度を示す. 10[%] と 50[%] 流入時は鼻腔後方に向かうにつれて相対湿度が上昇しているが, 特に鼻腔前方において上昇が高い. しかし, 25[°C] 流入時よりは上昇は少ない. 10[%] 流入時は入り口から 1.5[cm] で 20[%] の上昇, 1.5[cm] から 2.5[cm] でも 15[%] の上昇が見られ, 2.5[cm] から 3.5[cm] では 9[%] の上昇が見られた. 3.5[cm] から後ろにおいても 1[cm] ごとに 6[%] ずつ上昇していった 6.5[cm] においては相対湿度は 78.7[%] となっている. 50[%] 流入時は入り口から 1.5[cm] で 9[%] の上昇, 1.5[cm] から 2.5[cm] でも 7[%] の上昇が見られ, 3.5[cm] から後ろにおいても 1[cm] ごとに 6[%] ずつ上昇していった 6.5[cm] においては相対湿度は 86.4[%] となっている. 90[%] 流入時は入口から相対湿度が高い. 入り口から 1.5[cm] では 92.2[%] で入り口から 2.5[cm] では 91.8[%] となっている. 2.5[cm] の箇所までは増加していたが, 3.5[cm] の箇所では 91.1[%] となっていてそれから後ろにおいては少しずつ減少していった. 6.5[cm] の地点では 90.3[%] となっている.

図 4.16(a)(b)(c) に流入温度を 50[°C] とし, 相対湿度を 10[%], 50[%], 90[%] とした場合の鼻腔内湿度分布を示す. 鼻腔壁面を 34[°C], 相対湿度 100[%] とした場合と異なり流入相対湿度ごとに鼻腔内温度分布が変化している. 流入相対湿度を 10[%] とした場合と 50[%] とした場合を比較すると鼻腔前方において 10[%] 流入時の方が温度が高い部分 (赤い

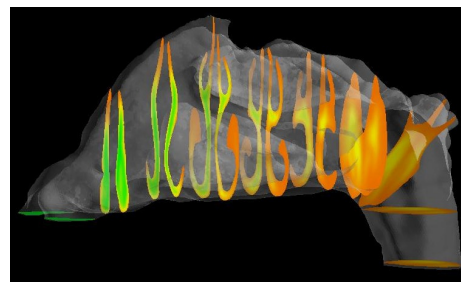
部分)が少ない。断面3の左側の中鼻道では42[°C]~45[°C](緑の部分)部分が50[%]流入時より10[%]部分の方が少ない。断面4の左側の中鼻道では36[°C]~38[°C](水色の部分)部分が50[%]流入時より10[%]部分の方が少ない。しかし、50[%]とした場合と90[%]とした場合を比較するとほとんど違いが見られなかった。中咽頭付近に着目すると50[%]とした場合と90[%]とした場合は10[%]にした場合に比べて温度が低い部分がわずかにだが見られる。

図4.17に図4.16と同じ条件の鼻腔からの入口からの距離ごとの温度を示す。距離ごとの増加を見ると、入り口から2.5[cm]にかけてが一番減少している。どの流入相対湿度においても4[°C]~4.5[°C]増加している。その後ろにおいても1[cm]ごとに見ていくとほぼ同じ割合で増加している。入り口から6.5[cm]の箇所においては、35[°C]前後までになっている。流入相対湿度ごとに見ると、鼻腔前方の入口から1.5[cm]~3.5[cm]の時に温度の差が大きい。10[%]と50[%]の場合は1.5[cm]の時は0.24、2.5[cm]の時は0.32で3.5[cm]の時は0.28の差であった。50[%]と90[%]の場合は1.5[cm]の時は0.23で2.5[cm]の時は0.19で3.5[cm]の時は0.09の差であった。10[%]と50[%]の差より50[%]と90[%]の差の方が小さくなっている。より差が小さくなっている。鼻腔後方では、前方ほど差が見られなかった。入口から6.5[cm]部分では、50[%]と90[%]の場合は差はほとんどなくて0.04であった。10[%]と50[%]の場合も差は小さくて0.07であった。

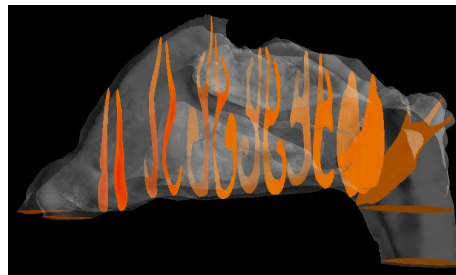
25[°C]流入時と同様に流入温度や流入相対湿度をどんな値にしても、左鼻腔に比べて右鼻腔の方が変化が少なかった。



(a) 10%流入



(b) 50%流入



(c) 90%流入

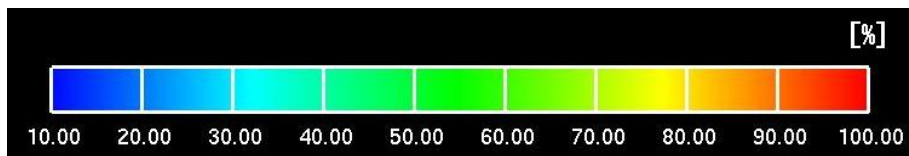


図 4.14: 50 °C流入時の鼻腔内相対湿度分布

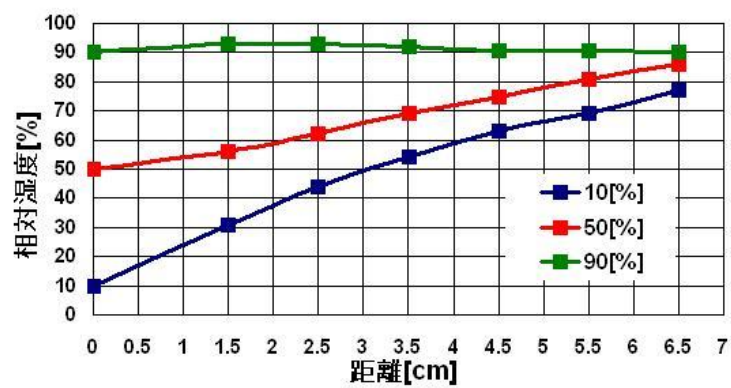
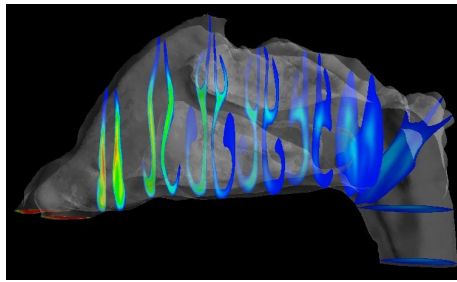
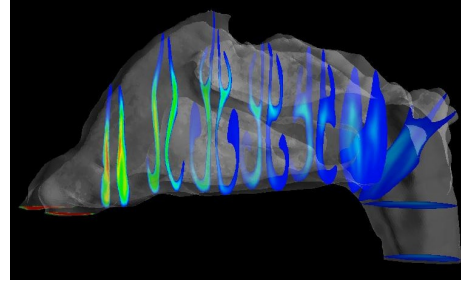


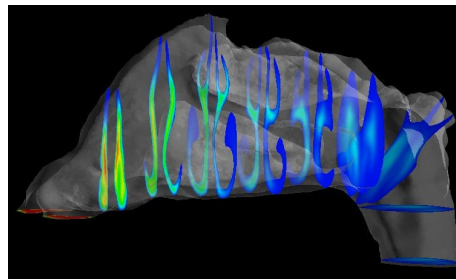
図 4.15: 50 °C流入時の入口からの距離ごとの鼻腔内相対湿度



(a) 10%流入



(b) 50%流入



(c) 90%流入

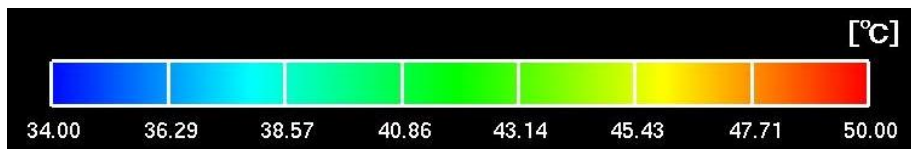


図 4.16: 50 °C流入時の鼻腔内温度分布

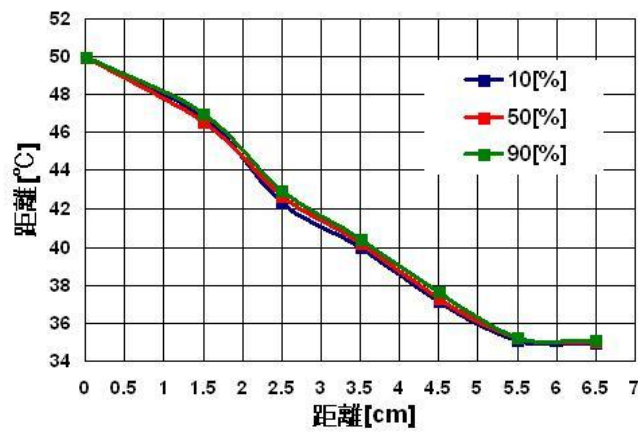


図 4.17: 50 °C流入時の入口からの距離ごとの鼻腔内温度

4.4 測定値との比較

今回検討した湿度を考慮した計算モデルの有用性を確かめるために，計算結果と Keck ら [1] によって測定された実測値との比較を行った．Keck らは，20 人の成人男女の吸気時の鼻腔内の温度と相対湿度を測定して平均を計算した．流入条件を表 4.1 に，測定地点を表 4.2，図 4.18 に示す．流入条件は測定した病院の室内の空気温度 25[°C]，相対湿度 35[%] である．測定地点は外鼻孔から 1.5[cm] の鼻弁，2.5[cm] の鼻甲介，6.5[cm] の鼻咽頭である．前節で仮定した 2 つの湿度を考慮したモデルを用いて計算条件を測定条件と同じにして熱流体解析を行った．流出速度は中咽頭で 0.404[m/s] とした．これは安静時の吸気時を想定したものである．

表 4.1: 流入条件

流入温度	25[°C]
流入相対湿度	35[%]

表 4.2: 測定地点

測定地点	外鼻孔からの距離
鼻弁	1.5[cm]
鼻甲介	2.5[cm]
鼻咽頭	6.5[cm]

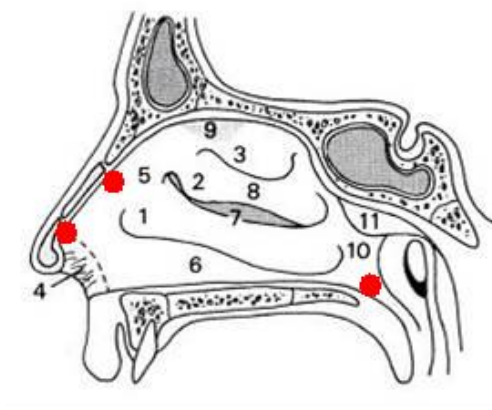


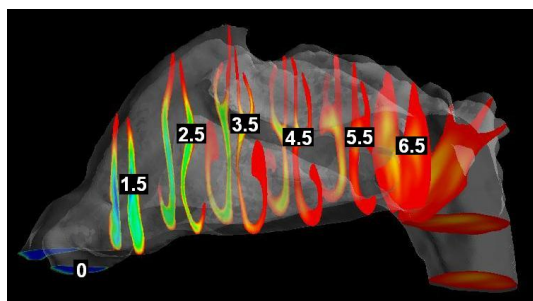
図 4.18: 測定地点

図 4.18(a)(b) に測定条件と同様の流入条件で計算した鼻腔内温度分布を示す。(a) は鼻腔壁面を水の層とした場合で (b) は鼻腔壁面を 34[°C]、相対湿度 100[%] の場合の温度分布である。図の中の数字の場所は測定地点で、数字は外鼻孔からの距離を示している。34[°C]、相対湿度 100[%] の場合と水の層とした場合では温度分布は大きな違いは見られなかった。わずかに水の層とした場合の方がどの断面においても中心部でわずかに低温である箇所が見られた。しかし鼻腔壁面付近ではほとんど変わりがなかった。他の流入相対湿度の時と同様に、左鼻腔に比べて右鼻腔の温度の上昇が遅かった。

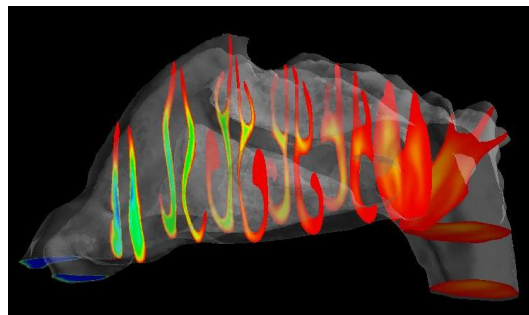
図 4.19 に図 4.18 中に示した地点での鼻腔内温度を示す。1.5[cm] の時と 2.5[cm] の時は両条件時とも実測値と大きな違いは見られなかった。水の層とした場合は 1.5[cm] 時で実測値 28.9[°C] に対して 28.6[°C] であり、34[°C]、相対湿度 100[%] とした場合は 29.1[°C] であった。2.5[cm] 時で実測値 30.1[°C] に対して水の層とした場合は 29.7[°C] であり、34[°C]、相対湿度 100[%] とした場合は 30.3[°C] であった。水の層の場合は 6.5[cm] 部分で実測値とほぼ一致して 32.6[°C] であった。34[°C]、相対湿度 100[%] の場合はわずかに実測値を上回ったが大きな違いは見られなかった。その他の計測地点では両条件の時は大きな差は見られなかった。

図 4.20(a)(b) に測定条件と同様の流入条件で計算した鼻腔内相対湿度分布を示す。温度分布と異なり両条件の大きな違いが見られた。一番手前の断面では鼻腔壁面から距離がある部分ではほぼ同じ分布であるが、鼻腔壁面付近では異なる。壁面付近では水の層の場合は相対湿度 90[%] 前後、34[°C]、相対湿度 100[%] の場合は 100[%] 前後となっている。また水の層とした場合に比べて 34[°C]、相対湿度 100[%] の壁の方が高湿度の範囲が広い。全体的に見ていくと、奥に進むにつれての相対湿度の上昇は水の層の場合の方が少ない。34[°C]、相対湿度 100[%] とした場合は鼻腔半ばから後ろではほぼ全体的に相対湿度が 100[%] まで上昇している。しかし水の層とした場合は鼻腔後方の断面においては、中鼻道の一部で周りより相対湿度が低い箇所が見られた。大部分では 92[%] 前後となっていた。

図 4.21 に図 4.20 中に示した地点での鼻腔内温度を示す。1.5[cm] の時は両条件の時と実測値に大きな違いが見られなかった。水の層とした場合は 68.5[%] となっていて、34[°C]、相対湿度 100[%] の壁の場合でも 69.1[%] となっていた。実測値の 69.9[%] と比べても大きく異ならなかった。2.5[cm] の時は水の層とした場合は 78.7[%] となっており実測値の 79.6[%] と大きな違いが見られなかった。34[°C]、相対湿度 100[%] の壁の場合は 2.5[cm] の地点で 85[%] まで上昇して実測値と差が現れた。3.5[cm] 以降を見ると水の層とした場合に比べて 34[°C]、相対湿度 100[%] の壁の場合は相対湿度の上昇が大きくなって 5.5[cm] では相対湿度 100[%] となっている。水の層とした場合は 6.5[cm] の地点では 91.8[%] となっていて実測値の 90.2[%] と大きな違いが見られなかった。



(a) 水の層とした場合



(b) 34 °C 100%とした場合

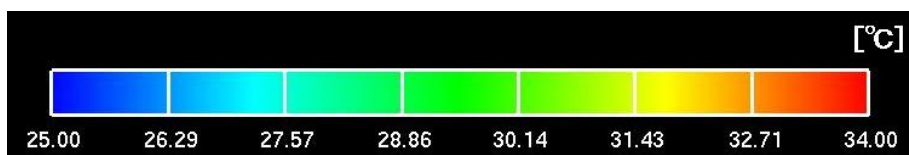


図 4.19: 25 °C 35%流入時の鼻腔内温度分布

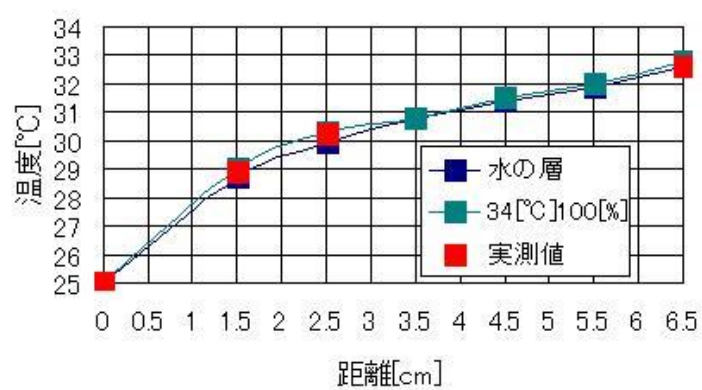
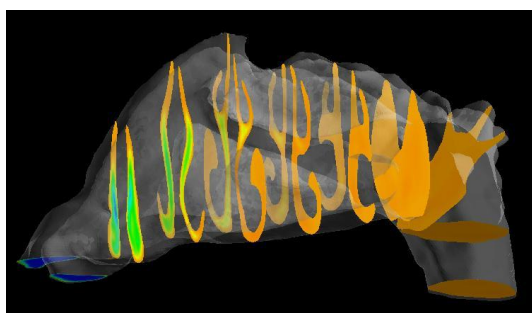
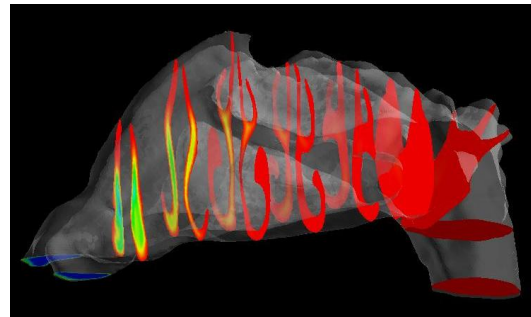


図 4.20: 入口からの距離ごとの鼻腔内温度



(a) 水の層とした場合



(b) 34 °C 100%とした場合

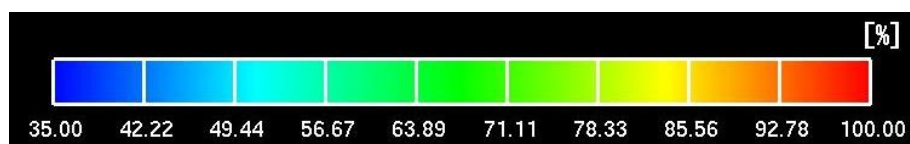


図 4.21: 25 °C 35%流入時の鼻腔内相対湿度分布

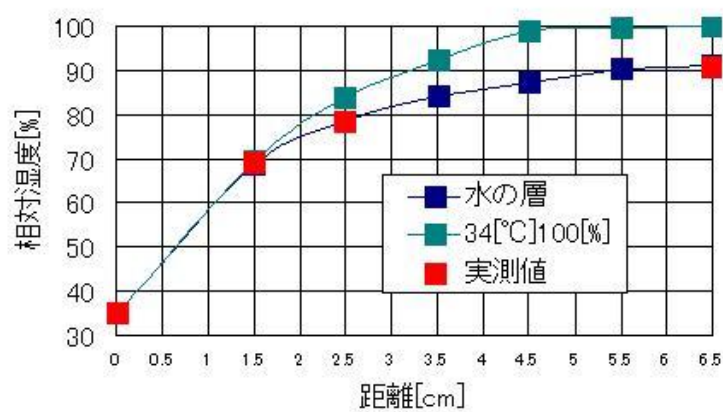


図 4.22: 入口からの距離ごとの鼻腔内相対湿度

4.5 考察

本章では、湿度を考慮した熱流体解析をするために鼻腔壁面のモデルが重要と考え鼻腔壁面のモデルについて議論した．鼻腔壁面を温度 34[°C]、相対湿度 100[%] とした場合と水の層とした場合の計算結果の比較を行った．

両方の場合でも低湿度の流入した場合は、相対湿度は前方で大きく増加している．これは速度が速い箇所では鼻腔壁面から多くの水蒸気が空気中に加えられていることと、鼻腔前方では後方に比べて温度が低いことが要因であると考えられる．また、右鼻腔に比べて左鼻腔は温度、相対湿度両方とも変化が大きかった．今回の熱流体解析で用いた実形状は、右鼻腔の鼻道の一部が狭くなっておりこれが影響していると考えられる．

鼻腔壁面を 34[°C]、相対湿度 100[%] とした場合では様々な流入相対湿度を流入させた結果、どの相対湿度の場合でも鼻咽頭付近では鼻腔壁面と同じ相対湿度となっていた．しかし、実際の様々な文献では鼻咽頭付近では 75[%]～90[%] くらいが一般的 [8] となっている．これは完全に鼻腔の湿度調整機能を再現できているとは言えない．また、温度に着目すると先行研究で行われていた湿度を考慮しない熱流体解析と、本研究での湿度を考慮した熱流体解析では鼻腔内の温度分布に違いが見られ湿度を考慮した方が温度の変化が少ないが、流入相対湿度ごとでは違いが見られなかった．これは温度と湿度の関連性を正しく再現できていないと思われる．本来流入相対湿度ごとに空気の温度変化が変わるはずである．

次に鼻腔壁面を水の層と考えた．様々な流入相対湿度を流入させた結果、どの相対湿度の場合でも鼻咽頭付近では 70[%]～93[%] ほどの相対湿度となっている．低湿度を流入した場合でも高湿度を流入させた場合でも水の層からの蒸発や吸収によって適度な相対湿度まで調整されていると考えられる．これは適切なモデルであると考えられる．温度に着目すると、流入相対湿度ごとに鼻腔内の温度を比較した．低湿度を流入した場合に比べて、高湿度を流入した場合は加温・冷却ともに温度変化が小さい．これは鼻腔内の水蒸気量が鼻腔内の温度の変化に影響を与えていると考えられる．適切な温度と湿度の関係を示せたと考える．

これらの考えの有効性を確かめるために、2つの仮定のもとに熱流体解析を行った結果と実測値との比較を行った．鼻腔内の温度に着目すると 34[°C]、相対湿度 100[%] の場合と水の層の場合でも鼻咽頭部分では、実測値と大きく違いが見られなかった．しかし相対湿度に着目し両方の場合を比較すると鼻腔半ばから後方にかけて大きく異なる．中鼻甲介から後ろでは 34[°C]、相対湿度 100[%] の場合では後鼻孔でほぼ 100[%] まで上昇している．一方水の層とした場合は鼻腔内の空気が高湿度になるほど相対湿度の上昇が少なくなっていて、鼻咽頭では 91.5[%] となっている．実測値と比較しても、ほとんど違いが見られない．34[°C]、相対湿度 100[%] とした場合は鼻腔内を流れる空気の相対湿度に依存しないで壁から水蒸気が渡されているが、水の層とした場合は鼻腔内を流れる空気の相対湿度に依存して壁から水蒸気が渡されることがこの鼻腔内湿度分布の違いに現れていると考えられる．

従って本研究では、鼻腔壁面を 34[°C]、相対湿度 100[%] とした場合よりも水の層とし

た場合の方が適切な湿度を考慮したモデルであると考える．本研究では鼻腔壁面全域を水の層として考えたが，実際の鼻腔は壁面前方においては粘膜ではないので完全には鼻腔を完全に再現はできなかった．

第5章 非定常熱流体解析

人の呼吸には吸気と呼気があり、時間の経過にともない流入・流出する空気の流れも変化する非定常流である。そこで本章では、人の呼吸におけるフローパターンに近づけるために非定常流による鼻腔の熱流動解析を行った。空気の流れの非定常性を考慮した解析を行うことで、鼻腔内の空気流れの変化と加温・冷却機能と加湿機能との関連性について検討を行う。

5.1 計算条件

鼻腔内流れの非定常上流での熱流動解析を行うにあたり、鼻腔の中咽頭におけるレイノルズ数を求めた。中咽頭を円としてその直径 $2.1 \times 10^{-2}[m]$ を代表長さ L とした。代表速度 U は中咽頭における流速が最も速いときで $0.635[m/s]$ とした。そして、これらから求められたレイノルズ数は 881 であるため、鼻腔内の流れは層流域であると考えられる。よって、計算をおこなうにあたり非定常・非圧縮粘性流体を仮定した。今回は、吸気時における鼻腔内の熱流体解析を行うために、非定常計算による熱流動解析を行う。基礎方程式は、連続の式、ナビエ・ストークス方程式、エネルギー保存方程式、水蒸気の移流拡散方程式である。また、数値流体解析を行うにあたって、基礎方程式の離散化には有限体積法を用いた。

本章での計算条件を表 5.1、境界条件を表 5.2 に示した。外鼻孔と中咽頭における境界条件は、外鼻孔では加温・冷却の様子を確かめるために、温度を $25[^\circ\text{C}]$ 、 $50[^\circ\text{C}]$ とし、相対湿度を $10[\%]$ (低湿度)、 $90[\%]$ (高湿度) と設定した。また、外鼻孔では圧力を $0[Pa]$ とした。速度境界は流出速度を中咽頭において次のように設定した。今回は吸気時のみを想定している。流出速度は時間経過にとともに正弦波関数で変化するように設定した。これは、人が安静にしているときの呼吸を想定している [11]。安静時における人の呼吸 1 回あたりの換気量を $350[ml]$ 、呼吸回数を毎分 11.5 回として下記のように設定した。

$$\text{吸気時: } 0.635 \sin\left(2\pi \frac{t}{5}\right) \quad [m/s] \quad (5.1)$$

$$\text{その後: } 0 \quad [m/s] \quad (5.2)$$

1 回の呼吸かかる時間は吸気時を 2.5 秒とし、流出速度が再び $0[m/s]$ になった後はその

ままの状態様子を見ることにした．時間経過にともなう流速の変化を図 5.1 に示した．鼻腔壁面は前章で議論した湿度を考慮した熱流体解析で適切だと思われる水の層として考えた．鼻腔壁面と鼻腔内の空気の境界温度は熱伝導モデルを適用し，鼻腔壁面から鼻腔内の空気への水蒸気の受け渡しは水の層からの蒸発によって行われる．

表 5.1: 計算条件

	被験者 1
計算メッシュ数	約 120 万要素
密度	$1.225[kg/m^3]$
流入温度	$25[^\circ C], 50[^\circ C]$
流入相対湿度	$10[\%], 90[\%]$

表 5.2: 境界条件

流入条件	圧力 0
流出条件	図 4.1
鼻腔壁	No-slip
鼻腔壁面状態	水の層
壁面温度境界	熱伝導モデル

5.2 計算結果

5.2.1 鼻腔内の空気の流れ

図 5.2 には鼻腔実形状を用いて非定常熱流体をおこなった結果を時間ステップごとに流線図で示した。 T_1 から T_4 は図 4.1 に示した時間のことで、 T_1 は 0.625[s]、 T_2 は 1.25[s]、 T_3 は 1.875[s]、 T_4 は 2.5[s] の時である。色は速度の大きさをあらわし、青色ほど小さく赤色ほど大きくなっている。鼻腔内時刻 T_1 における流線図は吸気時における流速増加期の鼻腔内流れを示したものである。流速が増加するにあたり、鼻腔内の流速の速い領域が上昇することが見られる。時刻 T_2 における流線図は吸気時の最大流量期の鼻腔内流れを示したものである。鼻腔内の流速の速い領域は中鼻道付近にある。時刻 T_3 における流線図は流速減少期の鼻腔内流れを示したものである。流速が減少しているにもかかわらず流速の速い領域の下降がみられない。時刻 T_4 における流線図は吸気時の休息期の鼻腔内流れを示したものである。鼻腔内にわずかではあるが空気の流れが存在している。外鼻孔から流入した空気は流入速度にかかわらず中鼻道付近を主体にながれていることがわかった。

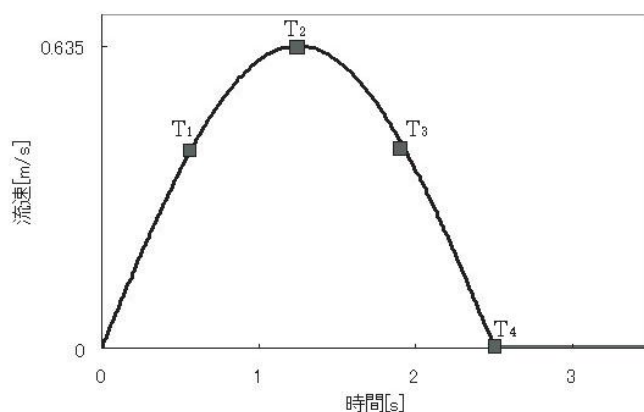
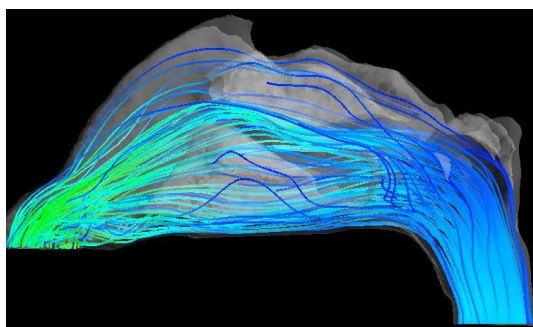
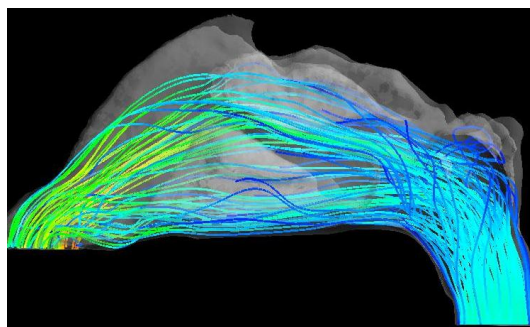


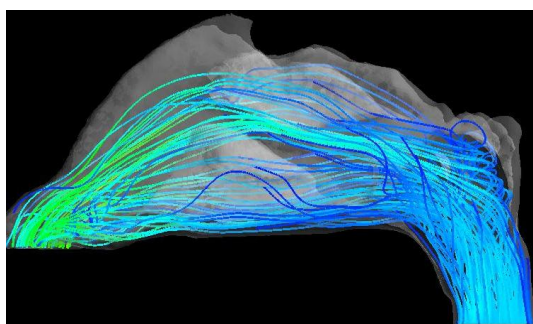
図 5.1: 流速変化



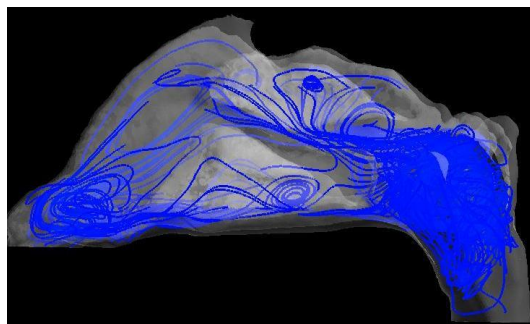
(a) T1 の時



(b) T2 の時



(c) T3 の時



(d) T4 の時

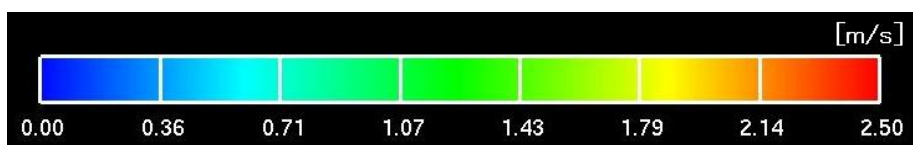


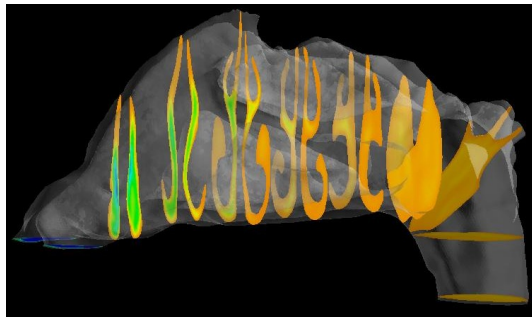
図 5.2: 非定常流れにおける流線図

5.2.2 25℃流入時の計算結果

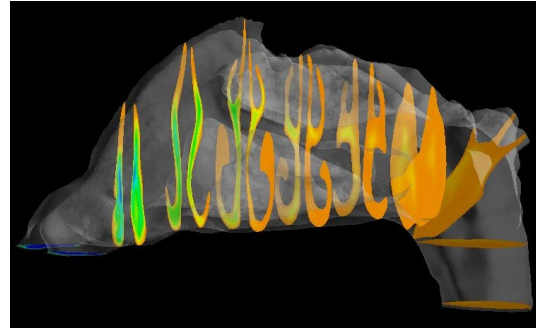
図 5.3 に流入空気を温度 25[°C]、相対湿度 10[%] とした時の鼻腔内相対湿度分布を示す。鼻腔壁面付近ではいずれの時間でもどの断面でも相対湿度が 90[%] 前後となっていた。鼻咽頭の断面に着目すると、時間が経つにつれて全体的に相対湿度が高くなっていることがわかる。T₁ の時では左鼻腔で全体的に 85[%] 前後まで上昇していて右鼻腔では 80[%] 前後の箇所が多い。T₂ の時では左鼻腔では全体的に見ると 95[%] 前後の箇所が多いが中央付近では一部 85[%] 前後の箇所が見られる。右鼻腔を見ると左鼻腔同様に 95[%] 前後の箇所が多いが左鼻腔よりは少ない。T₃ の時では左右どちらの鼻腔ともほとんどの部分で 95[%] 前後となっている。右鼻腔の一部にわずかながら 90[%] 前後である箇所が見られる。後鼻孔断面でも鼻咽頭断面とほぼ同じような傾向が見られ、時間が経つにつれて全体的に相対湿度が高くなっていることがわかる。異なる点は T₂ の時の中鼻道付近では T₁ に比べて相対湿度が低くなっていることである。鼻腔半ばの断面でも T₂ の時の中鼻道付近での相対湿度は T₁ や T₃ の時に比べて低くなっている。断面 3 の左側を見ると T₁ の時は 80[%] 前後、T₂ の時は 70[%] 前後、T₃ では 85[%] 前後となっていた。鼻腔前方の断面では、T₁、T₂、T₃ の時はあまり異なる分布傾向が見られなかった。どの時間の場合でも断面 1 の断面中央においては 30[%] 前後であった。断面 2 でもほぼ同じで断面中央付近においては 50[%] 前後であった。T₄ の時は外鼻孔の中心では流入相対湿度と同じ相対湿度であったが、それ以外はほぼ 90[%] ほどですべての断面において一様分布であった。

図 5.4 に流入空気を温度 25[°C]、相対湿度 90[%] とした時の鼻腔内相対湿度分布を示す。全体的に見ると、T₂ の時が相対湿度が一番高かった。また、鼻腔後方に比べて相対湿度は鼻腔前方の方が高かった。鼻咽頭断面を見ると、T₂ の時が断面中心部での相対湿度が一番高くなっていた。最大で 97.2[%] まで上昇していた。大部分では 92[%]～95[%] 前後となっていた。T₃ の時では T₁ の時に比べて相対湿度が高い箇所が多く見られる。T₃ の時は 92[%]～95[%] 前後の箇所が多く見られ、T₁ の時は 90[%] 前後の箇所が多く見られた。後鼻孔断面でも鼻咽頭断面とほぼ同じような傾向が見られ、T₂ の場合が特に中鼻道において相対湿度がもっとも高い。特に右鼻腔では 98[%]～100[%] ほどになっている箇所が見られる。T₃ の時では中鼻道の一部で 97[%] ほどとなっている部分が見られる。右鼻腔においては下鼻道部分では 95[%] 前後の箇所が見られた。T₁ の時では左鼻腔においては中鼻道においては 92[%] 前後であったが、それ以外の部分では 90[%] 前後であった。右鼻腔においては T₃ 時と同様に中鼻道と下鼻道において鼻腔壁面近くより相対湿度が高くなっていた。前方の断面に着目すると、一部で相対湿度が 100[%] となっていた。どの時間においても断面 3 の中鼻甲介部分では 100[%] となっていた。T₂ においては下鼻道においても 100[%] の箇所が見られた。その他の場所を見ると 97[%] 前後である場合が多かった。T₃ においては左鼻腔で 95[%] 前後である箇所が多く、右鼻腔では 98[%] 前後である箇所が多かった。T₁ においては左鼻腔で 92[%] 前後である箇所が多く、右鼻腔では 95[%] 前後である箇所が多かった。断面 2 では T₃ と T₂ において下鼻道の一部で相対湿度が 100[%] 近くとなっていた。T₁ においては中鼻道、下鼻道ともに 94[%] 前後となっていた。断面 1 では断面 2 とほぼ同じ傾向が見られた。T₄ の時は鼻腔前方（主に鼻弁）の一部では 92[%] 前後

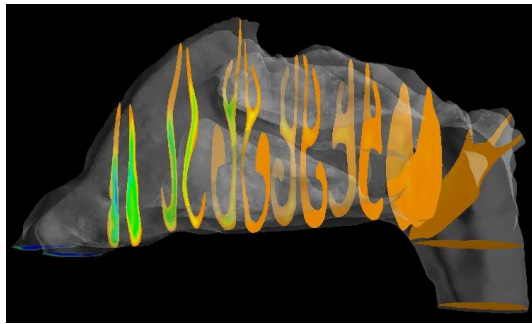
であったが、それ以外はほぼ90[%] ほどですべての断面において一様分布であった。



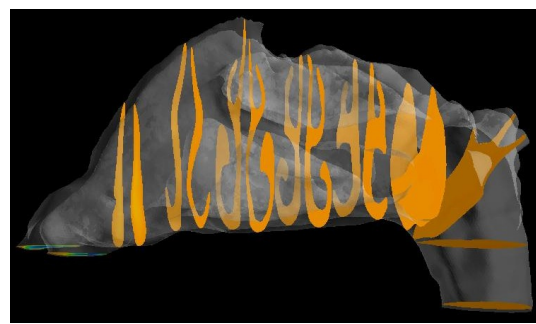
(a) T1 の時



(b) T2 の時



(c) T3 の時



(d) T4 の時

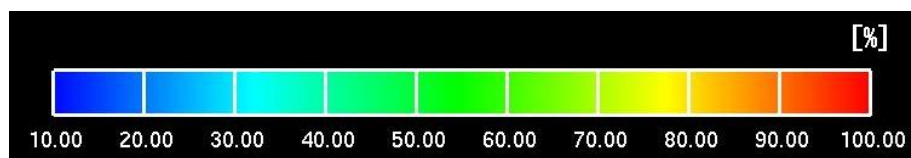
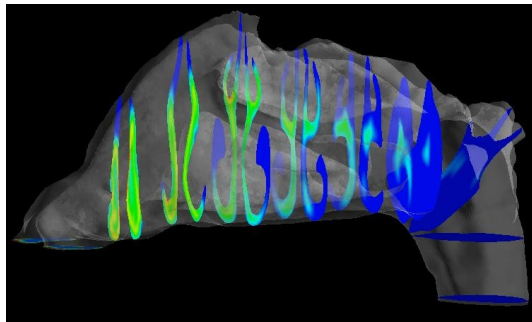
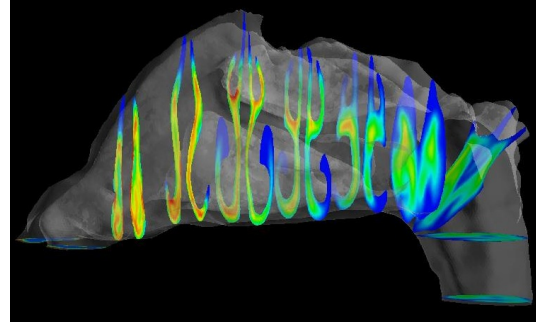


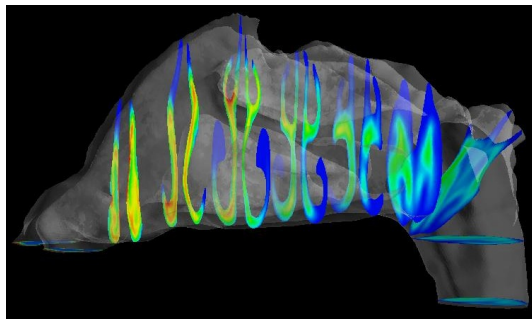
図 5.3: 温度 25 °C, 相对湿度 10%流入時の鼻腔内相对湿度分布



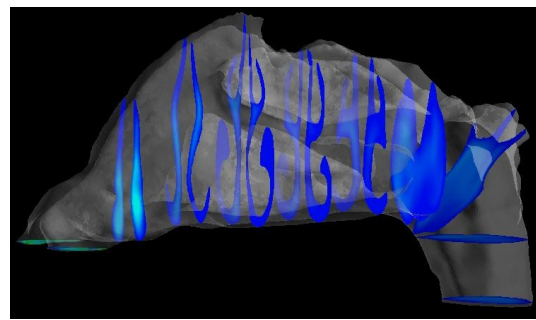
(a) T1 の時



(b) T2 の時



(c) T3 の時



(d) T4 の時

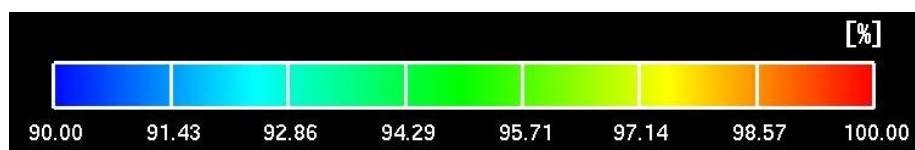
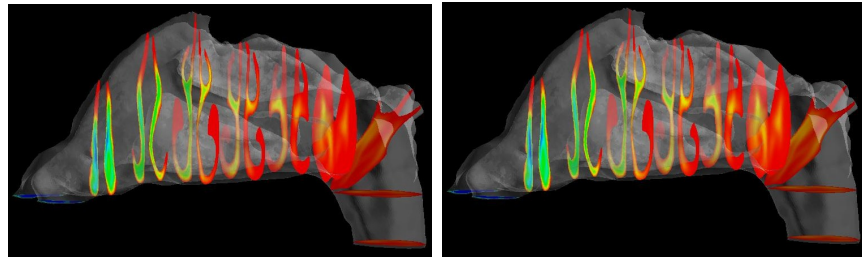
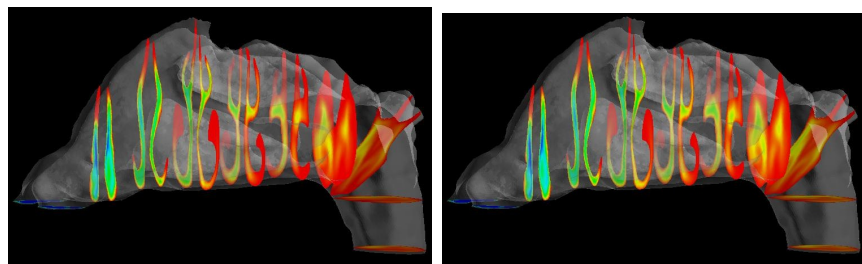


図 5.4: 温度 25 °C, 相対湿度 90%流入時の鼻腔内相対湿度分布

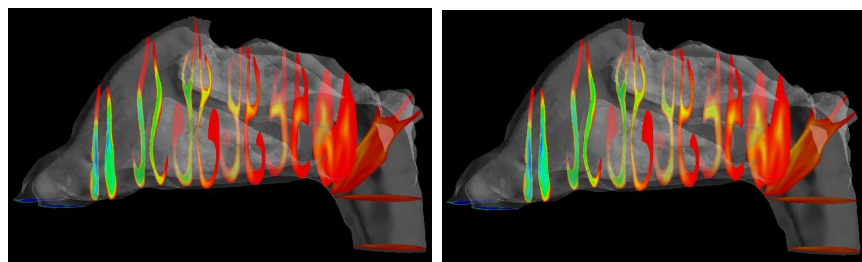
図 5.5 に 25[°C] 流入時の時間ごとの鼻腔内温度分布を示す。左側が流入相対湿度 10[%] の時、右側が流入相対湿度 90[%] の時である。両方の場合とも T_2 の時が一番全体的に見て温度が低い。すべての時間において流入相対湿度 10[%] の時の方が、流入相対湿度 90[%] より温度が高かった。一番その傾向が見られたのが T_2 の時である。 T_2 の時は鼻咽頭断面において流入相対湿度 90[%] の場合は断面中央で 31.4[°C] の箇所が見られる。流入相対湿度 10[%] の場合は断面中央付近では 32.4[°C] 程度となっている。また、後鼻孔の断面においても特に中鼻道では温度に差がある。流入相対湿度 10[%] の場合は中鼻道では 32.4[°C] となっており、流入相対湿度 90[%] の場合は中鼻道では 31.4[°C] となっている。鼻腔半ばの断面においても中鼻道においてわずかに温度差が見られる。断面 3 と断面 4 では 30.14[°C] ほどの箇所の面積が流入相対湿度 90[%] の場合に比べて流入相対湿度 10[%] の場合の方が多く温度が高い。鼻腔前方の断面においては、26.29[°C] ほどの箇所が流入相対湿度 90[%] の場合の方が広い。 T_1 と T_3 を比較すると、両方の場合とも流速が 0.625[m/s] と同じにもかかわらず T_3 の方がわずかに全体的に温度が低かった。温度分布で見ると、両方の時間とも大きく違いはなかった。流入相対湿度ごとに見ていくと、90[%] 流入時の方が温度が低い。 T_1 の時も T_3 の時も 90[%] 流入時においては、鼻咽頭断面では中心部は 32.4[°C] ほどの箇所が 10[%] 流入時に比べて広がった。後鼻孔断面においても T_1 の時も T_3 の時はあまり変わらない。流入相対湿度ごとに見ていくと、90[%] 流入時の場合は 10[%] 流入時の場合に比べて右鼻腔の中鼻道においてわずかに温度が低い部分が見られ、30.14[°C] の箇所が多く見られる。鼻腔半ばの断面では T_1 と T_3 を比べると、 T_3 の方が温度が低い箇所が見られる。流入相対湿度ごとに見ていくと、90[%] 流入時の場合は 10[%] 流入時の場合に比べて左鼻腔の中鼻道においてわずかに温度が低い部分が見られ、28.36[°C] であった。鼻腔前方の断面を見ると、 T_2 の時と T_1 、 T_3 を比べると大きく違いはない。流入相対湿度ごとに見ると、26.29[°C] ほどの箇所が流入相対湿度 90[%] の場合の方が広い。 T_4 の場合は鼻弁部分で一部低温度であった他は 34[°C] 前後で一様である。どちらの流入相対湿度においてもほとんど同じような分布である。



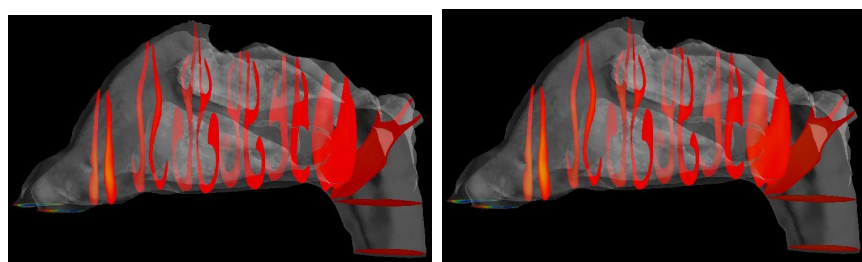
(a) T1



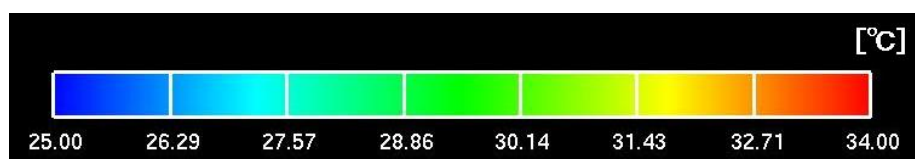
(b) T2



(c) T3



(d) T4



5.2.3 50℃流入時の計算結果

図 5.6 に流入空気を温度 50[°C]、相対湿度 10[%] とした時の鼻腔内相対湿度分布を示す。流入温度 25[°C] の時と比べて高湿度の箇所と低湿度の箇所の差が大きい。鼻腔壁面付近ではいずれの時間でもどの断面でも相対湿度が 96[%] 前後となっていた。25[°C] 流入時に比べて鼻腔壁面付近では相対湿度が高い。鼻咽頭の断面に着目すると、 T_2 の時が全体的に一番相対湿度が低い。 T_1 の時では左鼻腔で全体的に 95[%] 前後まで上昇していて断面中心部では 80[%] 前後であった。右鼻腔では 80[%] 前後の箇所が多い。 T_2 の時では左鼻腔では全体的に見ると 96[%] 前後の箇所が多いが中央付近では一部 65[%] 前後の箇所が見られる。右鼻腔を見ると 95[%] 前後の箇所が見られるが左鼻腔よりは少ない。中心部を中心に 70[%] 前後の箇所が多く見られる。 T_3 の時では左右どちらの鼻腔とも多くの部分で 97[%] 前後となっている。右鼻腔では断面の半分くらいの箇所で 85[%] 前後である箇所が見られる。後鼻孔断面でも鼻咽頭断面と同じような傾向が見られ、 T_2 の時が全体的に一番相対湿度が低い。 T_2 の時は中鼻道部分では 60[%] 前後となっている。 T_1 と T_3 の場合は右鼻腔の中鼻道では 70[%] 前後で左鼻腔の中鼻道では 80[%] 前後となっている。鼻腔半ばの断面でも T_2 の時の中鼻道付近での相対湿度は T_1 や T_3 の時に比べて低くなっている。断面 3 の左側を見ると T_1 の時は 70[%] 前後、 T_2 の時は 60[%] 前後、 T_3 では 75[%] 前後となっていた。鼻腔前方の断面では、 T_1 、 T_2 、 T_3 の時はあまり異なる分布傾向が見られなかった。どの時間の場合でも断面 1 の断面中央においては 25[%] 前後であった。断面 2 でもほぼ同じで断面中央付近においては 40[%] 前後であった。 T_4 の時は鼻腔前方の断面では 83[%] 前後の箇所が見られたが、それ以外はほぼ 95[%] ほどですべての断面において一様分布であった。

図 5.7 に流入空気を温度 50[°C]、相対湿度 90[%] とした時の鼻腔内相対湿度分布を示す。流入温度 25[°C] の時と比べて全体的に相対湿度が低かった。全体的に見ると、 T_2 の時が相対湿度が一番高かった。また、鼻腔後方に比べて相対湿度は鼻腔前方の方が高かった。鼻咽頭断面を見ると、 T_2 の時が断面中心部での相対湿度が一番高くなっていた。最大で 94.5[%] まで上昇していた。大部分では 88[%]～92[%] 前後となっていた。 T_3 の時では T_1 の時に比べて相対湿度が高い箇所が多く見られる。 T_3 の時は 86[%]～88[%] 前後の箇所が多く見られ、 T_1 の時は 85[%] 前後の箇所が多く見られた。後鼻孔断面でも鼻咽頭断面とほぼ同じような傾向が見られ、 T_2 の場合が特に中鼻道において相対湿度がもっとも高い。特に右鼻腔では 93[%]～95[%] ほどになっている箇所が見られる。 T_3 の時では中鼻道の一部で 88[%] ほどとなっている部分が見られる。右鼻腔においては下鼻道部分では 89[%] 前後の箇所が見られた。 T_1 の時では左鼻腔においては中鼻道においては 85[%] 前後であったが、それ以外の部分では 87.1[%] 前後であった。右鼻腔においては T_3 時と同様に中鼻道と下鼻道において鼻腔壁面近くより相対湿度が高くなっていた。前方の断面に着目すると、一部で相対湿度が 96[%] となっていた。どの時間においても断面 3 の中鼻甲介部分では 96[%] となっていた。 T_2 においては下鼻道においても 95[%] 前後の箇所が見られた。その他の場所を見ると 92[%] 前後である場合が多かった。 T_3 においては左鼻腔で 89.7[%] 前後である箇所が多く、右鼻腔では 93[%] 前後である箇所が多かった。 T_1 においては左鼻

腔で 86[%] 前後である箇所が多く、右鼻腔では 89[%] 前後である箇所が多かった。断面 2 では T_3 と T_2 において下鼻道の一部で相対湿度が 94.43[%] 近くとなっていた。 T_1 においては中鼻道、下鼻道ともに 88.14[%] 前後となっていた。断面 1 では断面 2 とほぼ同じ傾向が見られた。 T_4 の時はほぼすべての箇所ですべての断面において一様分布であった。

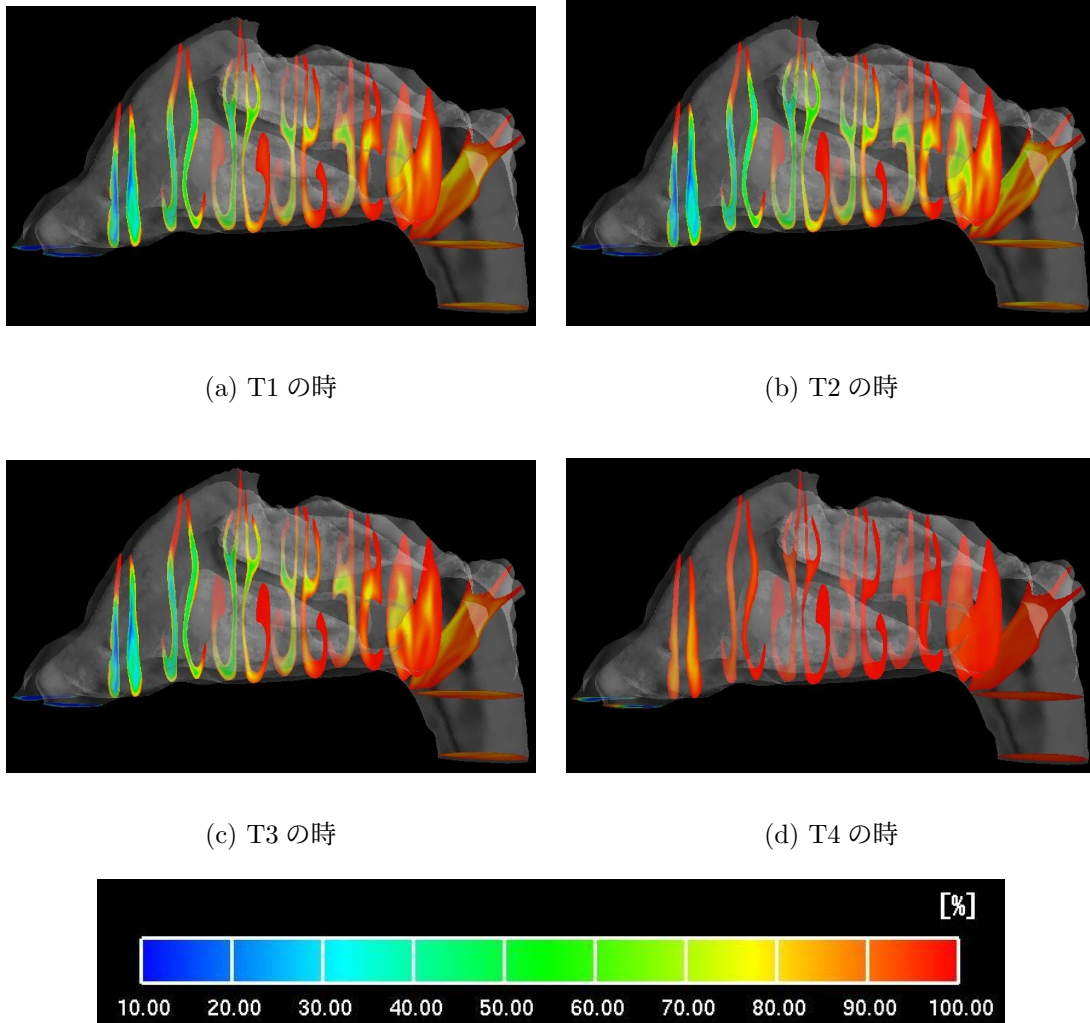
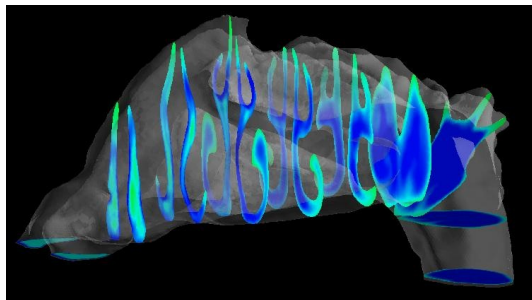
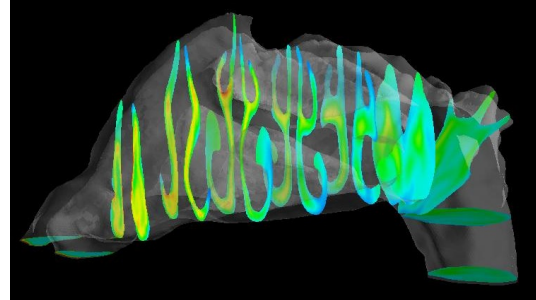


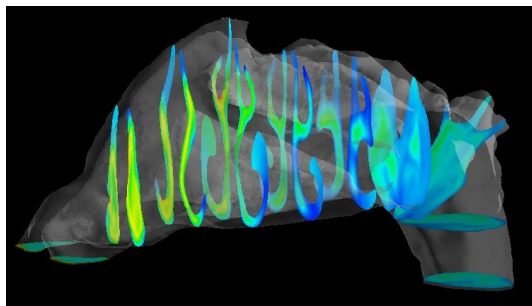
図 5.6: 温度 50 °C, 相対湿度 10%流入時の鼻腔内相対湿度分布



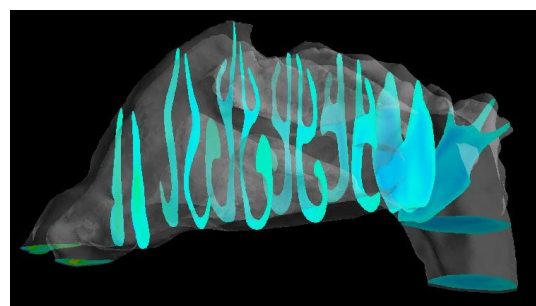
(a) T1 の時



(b) T2 の時



(c) T3 の時



(d) T4 の時

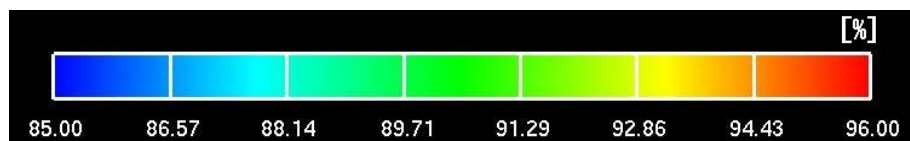
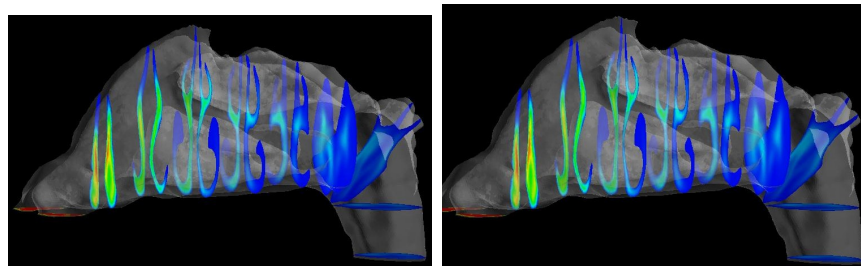
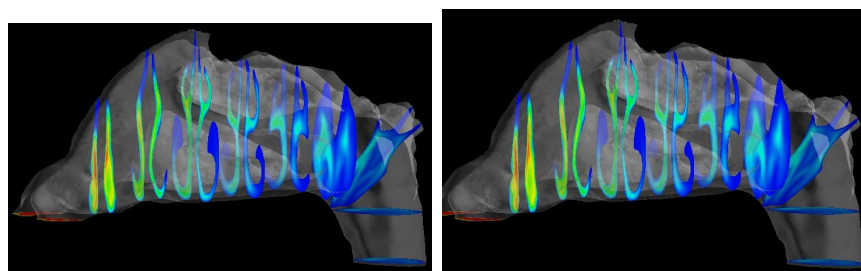


図 5.7: 温度 50 °C, 相対湿度 90%流入時の鼻腔内相対湿度分布

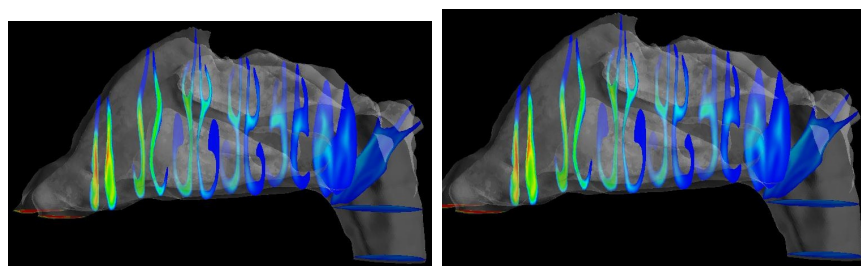
図 5.8 に 50[°C] 流入時の時間ごとの鼻腔内温度分布を示す。左側が流入相対湿度 10[%] の時、右側が流入相対湿度 90[%] の時である。両方の場合とも T_2 の時が一番全体的に見て温度が低い。すべての時間において流入相対湿度 10[%] の時の方が、流入相対湿度 90[%] より温度が低かった。25[°C] 流入時に比べると両方の差は少ない。一番その傾向が見られたのが T_2 の時である。 T_2 の時は鼻咽頭断面において流入相対湿度 90[%] の場合は断面中央で 37.6[°C] の箇所が見られる。流入相対湿度 10[%] の場合は断面中央付近では 36.8[°C] 程度となっている。また、後鼻孔の断面においても特に中鼻道では温度に差がある。流入相対湿度 10[%] の場合は中鼻道では 38.7[°C] となっており、流入相対湿度 90[%] の場合は中鼻道では 39.4[°C] となっている。鼻腔半ばの断面においても中鼻道においてわずかに温度差が見られる。断面 3 と断面 4 では 38.9[°C] ほどの箇所の面積が流入相対湿度 90[%] の場合に比べて流入相対湿度 10[%] の場合の方が多く温度が高い。鼻腔前方の断面においては、47.71[°C] ほどの箇所が流入相対湿度 90[%] の場合の方が広い。 T_1 と T_3 を比較すると、両方の場合とも流速が 0.625[m/s] と同じにもかかわらず T_3 の方がわずかに全体的に温度が高かった。温度分布で見ると、両方の時間とも大きく違いはなかった。流入相対湿度ごとに見ていくと、90[%] 流入時の方が温度が高い。 T_1 の時も T_3 の時も 90[%] 流入時においては、鼻咽頭断面では中心部は 36.4[°C] ほどの箇所が 10[%] 流入時に比べて広がった。後鼻孔断面においても T_1 の時も T_3 の時はあまり変わらない。流入相対湿度ごとに見ていくと、90[%] 流入時の場合は 10[%] 流入時の場合に比べて右鼻腔の中鼻道においてわずかに温度が高い部分が見られ、38.44[°C] の箇所が多く見られる。鼻腔半ばの断面では T_1 と T_3 を比べると、 T_3 の方が温度が高い箇所が見られる。流入相対湿度ごとに見ていくと、90[%] 流入時の場合は 10[%] 流入時の場合に比べて左鼻腔の中鼻道においてわずかに温度が高い部分が見られ、39.66[°C] であった。鼻腔前方の断面を見ると、 T_2 の時と T_1 、 T_3 を比べると大きく違いはない。流入相対湿度ごとに見ると、47.29[°C] ほどの箇所が流入相対湿度 90[%] の場合の方が広い。 T_4 の場合は鼻弁部分で一部高温度であった他は 35[°C] 前後で一様である。どちらの流入相対湿度においてもほとんど同じような分布である。



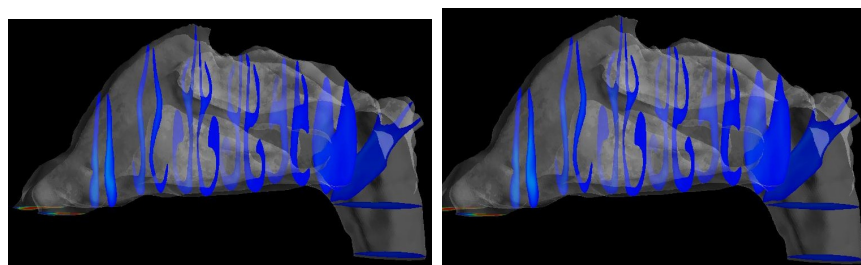
(a) T1



(b) T2



(c) T3



(d) T4

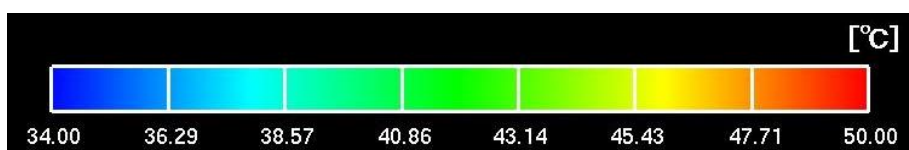


図 5.8: 50 °C流入時の時間ごとの鼻腔内温度分布

5.3 考察

実際の人の吸気を再現するために、非定常計算を行った。非定常での計算結果は定常計算で鼻腔壁面を水の層として計算した場合と同様に相対湿度 10[%] の空気と相対湿度 90[%] の空気を流入させた場合鼻咽頭部分ではほぼ適度な相対湿度まで調整されている [8]。しかし咽頭断面においては定常計算とは違い一様分布ではなかった。どの時間ステップにおいても鼻腔壁面付近と鼻腔壁面から離れた断面中央部とでは相対湿度の差が定常計算と比べて大きくなっていた。これは定常計算時に比べて T_1 , T_2 , T_3 における鼻腔内の流速が早いからであると考えられる。時間ごとに見ると、 T_2 時が低湿度流入時は一番鼻腔内の湿度が低く、高湿度流入時は一番鼻腔内の湿度が高かった。これは流入速度があがることにより鼻腔内における湿度調整機能が低下することを示している。また、 T_1 と T_3 は流速が同じにもかかわらず T_3 の方が全体的に相対湿度が高い。これは前時間のステップでの計算結果が次のステップに影響していると考えられる。 T_4 時においては鼻腔内に流れがないので一様な分布となっていた。これは鼻腔内の流速が遅いことが要因であると考えられる。相対湿度 10[%] の空気を流入した場合 T_2 から T_3 にかけて全体的に相対湿度が増加している。これは鼻腔壁面から鼻腔内の空気へ水蒸気の移動が行われているからであると考えられる。相対湿度 90[%] の空気を流入した場合 T_2 から T_3 にかけて全体的に相対湿度が減少している。これは鼻腔内の空気から鼻腔壁面へ水蒸気の移動が行われているからであると考えられる。いずれの場合も鼻腔の湿度調整が行われたことが示せた。

温度に着目すると、定常計算の結果と比較すると、断面の中央部で温度が低い箇所が多く見られた。特に T_2 の時がそれが一番顕著に見られた。これは鼻腔内を流れる空気の流速が影響していると考えられる。定常計算と同様に相対湿度が高い場合の方が加温・冷却両方とも温度の変化が少なかった。時間ごとに見ると T_2 の時が流入相対湿度 10[%] 時と流入相対湿度 90[%] 時の温度差が一番大きかった。 T_2 時が一番流速が早いことが要因であると考えられる。 T_1 と T_3 を比べると流速は同じであるが、わずかに T_3 の方が鼻腔の平均温度が高くなっている。相対湿度と同様に前時間のステップでの計算結果が次のステップに影響していると考えられる。流入相対湿度ごとに T_1 と T_3 の差を比べると相対湿度 90[%] の場合の方が小さい。これは空気中の水蒸気が影響していると思われる。 T_4 時においては相対湿度同様に鼻腔内に流れがないので一様な分布となっていた。また、10[%] 流入時と 90[%] 流入時では鼻腔内の温度分布に違いがなかった。これは流入相対湿度にかかわらず鼻腔内の相対湿度が同じであることが要因だと考えられる。

第6章 結言

本研究では、湿度を考慮した鼻腔内での熱流体解析の検討をした。そのためには鼻腔壁面のモデルを考えることが重要であると考えた。まず、鼻腔壁面の状態を温度 $34[^\circ\text{C}]$ 、相対湿度 $100[\%]$ であることと、水の層であることと仮定した。そしてそのモデルを適用した検証計算を行い適切な結果となったので実証することができた。

次に上記で仮定した計算モデルを適用して3次元鼻腔実形状に対して定常流での熱流体解析を行いそれぞれの結果の比較をおこなった。流入温度は $25[^\circ\text{C}]$ と $50[^\circ\text{C}]$ として流入相対湿度は $10[\%]$ (低湿度)、 $50[\%]$ (中湿度)、 $90[\%]$ (高湿度) と $35[\%]$ (測定条件) とした。鼻腔壁面を水の層とした場合に相対湿度は、測定結果に近い結果が得られた。そして鼻腔内の相対湿度が鼻腔前方で大きく増加していることを確認した。また、流入相対湿度ごとに、鼻腔内温度分布を見ると相対湿度ごとに鼻腔内温度分布が異なることが確認できた。

次に鼻腔壁面を水の層として安静時呼吸の吸気時のみを想定し、湿度を考慮した非定常流での熱流体解析をおこなった。流入温度を $25[^\circ\text{C}]$ と $50[^\circ\text{C}]$ とし流入相対湿度を $10[\%]$ (低湿度) と $90[\%]$ (高湿度) とした場合の時間経過ごとに鼻腔内の空気の流れ、相対湿度分布を示し、低湿度と高湿度の鼻腔内温度の比較をおこなった。そして、時間経過にともなう湿度調整機能について検討した。

今後の課題として、疾患を持った鼻腔実形状や手術後の状態である鼻腔実形状に対しても熱流体解析を行う必要がある。これは手術を行う前や術後の鼻腔内の状態をあらかじめ知りたいという要望があるからである。

吸気時のみでなく呼気時も考慮して非定常熱解析を行い、本来の人間の呼吸を再現した熱流体解析を行う。実際には鼻腔内で温度調整や湿度調整をする際に鼻腔壁面の粘液膜の状態が変化するからである。本研究ではそれは考慮されていないので解明する必要がある。

以上のことを今後行う予定である。

参考文献

- [1] T.Keck,R.Leiacker,H.Riechelmann.G.Rettinger, Humidity and temperature profile in the nasal cavity, Rhinology,38(2000),167-171
- [2] 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 計算力学講演会論文集, (2005), pp. 51-52.
- [3] 堀内佑至, 中山敏男, 石川滋, 渡邊正宏, 松澤照男, 鼻腔内壁に熱伝導モデルを適用した加温・冷却機能の解析, 日本機械学会 北陸信越支部 第44期総会・講演会, (2007), pp. 19-20.
- [4] Seeley LE, Study of changes in the temperature. and water vapor content of respired air in the. nasal cavity, J ASHVE Sec 1940:377-83
- [5] 中山敏男, 渡邊正宏, 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 ”, 日本シミュレーション学会, シミュレーション第23巻, pp22-29, 2004.
- [6] KGT 社製 INTAGE3.1 Manual.
- [7] マテリアライズ日本支社, MagicsRP Reference Manual
- [8] 森満保, “ イラスト耳鼻咽喉科 ”, 文光堂, 1987.
- [9] FLUENT 社 “ FLUENT Reference Manual ”,
- [10] Guilherme J.M.Garcia, Nell Bailie, Dario A. Martins, and Julia S. Kimbell “ Atrophic rhinitis: A CFD study of air conditioning in the nasal cavity ”, J Appl Physiol 103 (2007) , pp. 1082-1092 2007.
- [11] 野中聡, 畑山尚生, “ 鼻呼吸のサイクル ”, JOHNS, Vol.12, No.5, pp640-643, 1996.
- [12] 真島雄一, 坂倉康夫, “ 生体防御における鼻腔・副鼻腔の役割 ”, 日胸 1996 年 11 月増刊, pp11-19, 1996.
- [13] 湿度計算シート, <http://www010.upp.so-net.ne.jp/catwalk/humid/>

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，ここの御礼申し上げます。

本研究に関して有益な御意見，御助言，御協力をいただきました東北大学 流体科学研究所の中山敏男様，金沢市民病院 耳鼻咽喉科の石川滋先生には心から感謝いたします。

また，多方面に渡り御指導を賜りました松澤研究室の博士後期課程である森太志様を始め，色々一年間お世話になり，迷惑をおかけした松澤研究室の皆様に深く感謝いたします。

発表論文

工藤之義，堀内佑至，中山敏男，石川滋，松澤照男：”湿度モデルを適用した鼻腔内熱流体解析 ”，第 21 回数値流体力学シンポジウム，2007