

修士論文

鼻腔壁面における粘膜の乾燥と加湿を考慮した  
鼻腔の熱流体解析

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科情報科学専攻

北川 和佳

2010年3月

## 修士論文

# 鼻腔壁面における粘膜の乾燥と加湿を考慮した 鼻腔の熱流体解析

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 前園涼 講師  
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科学専攻

0810018 北川 和佳

提出年月: 2010年2月

## 概要

鼻腔は鼻の穴から喉へと続く空間であり、非常に複雑な形状をしている。また、鼻腔は人間の生命維持には欠かすことのできない呼吸に関わっており、吸い込んだ空気を加温・冷却したり、吸い込んだ空気に十分な湿り気を与えて肺や気管支を保護する機能なども備わっている。本研究では、特に鼻腔の温度調節機能と湿度調節機能の2つに着目した。

鼻腔内壁面は粘膜と液粘膜によって覆われ、鼻腔内で熱源となる血管や体組織は粘膜に覆われている。先行研究では、組織と空気との間に薄い壁があると仮定して熱のやり取りを再現した熱伝導モデル、そして鼻腔壁面は常に十分な湿り気を持った薄い水の膜として仮定することで水のやり取り、湿度変化を考慮した湿度モデルを用いて解析が行われた。本研究では、上記の熱伝導モデル、湿度モデルに加えて、鼻腔壁面での湿度変化によって起こる温度変化、すなわち蒸発熱が鼻腔の温度変化に与える影響に着目した。そして、鼻腔形状へ適応した熱流体解析を行うことによって、鼻腔内の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した。

まず、簡易モデルを用いて熱流体解析を行い、従来モデルを用いた場合の計算結果との比較を行うことで蒸発熱モデルの効果を確認した。次に、蒸発熱モデルを3次元鼻腔形状へ適応して熱流体解析を行った。従来モデルを用いた場合の計算結果と蒸発熱モデルを用いた場合の計算結果の比較を行い、鼻腔内における蒸発熱が温度変化に及ぼす影響を確認した。また、流入空気の温度と相対湿度を変化させたときの温度分布と湿度分布についても調べ、蒸発熱モデルを用いた場合でも鼻腔の加温・冷却機能、加湿機能が高いことを示した。最後に先行研究で行われた実際の鼻腔での温度の測定値、湿度の測定値と比較して蒸発熱モデルを用いた場合のパラメータについて検討を行った。

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	論文の構成	2
第2章	計算方法	3
2.1	鼻腔について	3
2.2	計算方法	5
2.3	鼻腔の壁面モデル	6
2.3.1	熱伝導モデル	6
2.3.2	湿度モデル	6
2.3.3	蒸発熱モデル	7
2.4	鼻腔形状の再構築	10
2.5	鼻腔形状	12
2.6	計算条件	14
第3章	簡易モデルによる実験	15
3.1	円管形状および計算条件について	15
3.2	解析結果	16
3.2.1	流入温度が 307.15[K] の場合	16
3.3	まとめ	20
第4章	定常流の熱流体解析	21
4.1	鼻腔内の空気の流れ	21
4.2	解析結果	23
4.3	流入空気の温度の違いによる温度，湿度への影響	32
4.4	測定値との比較	37
4.5	考察	42
第5章	結言	43

# 目次

2.1	鼻腔の構造	4
2.2	鼻甲介断面	4
2.3	熱伝導モデル	8
2.4	湿度モデル	8
2.5	蒸発熱モデル	9
2.6	再構築した鼻腔実形状	12
2.7	計算メッシュ	13
3.1	流入温度 307.15[K]，相対湿度 50[%] の温度分布	16
3.2	温度分布の差分	17
3.3	流入温度 307.15[K] におけるの壁面付近の温度変化	17
3.4	流入温度 307.15[K]，相対湿度 50[%] の湿度分布	18
3.5	流入温度 307.15[K] におけるの壁面付近の湿度変化	19
4.1	鼻腔内の流線図	22
4.2	鼻腔内の温度分布，湿度分布の断面の位置	23
4.3	従来モデルを用いた場合における鼻腔内の温度分布	25
4.4	蒸発熱モデルを用いた場合における鼻腔内の温度分布	26
4.5	従来モデルと蒸発熱モデルの温度分布の差分	27
4.6	従来モデルを用いた場合の温度変化の比較	28
4.7	従来モデルを用いた場合の温度変化の比較	28
4.8	従来モデルを用いた場合における鼻腔内の湿度分布	30
4.9	蒸発熱モデルを用いた場合における鼻腔内の湿度分布	31
4.10	流入温度 303[K] における鼻腔内の温度分布	33
4.11	流入温度 303[K] における鼻腔内の湿度分布	34
4.12	流入温度 313[K] における鼻腔内の温度分布	35
4.13	流入温度 313[K] における鼻腔内の湿度分布	36
4.14	測定地点	37
4.15	鼻腔内の温度変化	38
4.16	鼻腔内の湿度変化	39
4.17	鼻腔内の水の濃度変化	40
4.18	鼻腔内の相対湿度の比較	41

# 表 目 次

2.1	CT 画像の撮影条件 . . . . .	10
2.2	計算条件 . . . . .	14
3.1	計算条件 . . . . .	15
4.1	流入条件 . . . . .	37
4.2	測定地点 . . . . .	37

# 第1章 はじめに

## 1.1 背景

鼻腔は鼻の穴から喉へと続く空間で非常に複雑な形状をしており、人の生命維持には欠かすことができない呼吸に関わる器官である。その鼻腔の主な機能として、吸い込んだ空気を体温近くまで加温・冷却する温度調節機能、吸い込んだ空気を加湿することで十分な水分を与える湿度調節機能、鼻腔内に入り込んだゴミを除去する除塵機能、鼻腔内で音を共鳴させることで声を響かせる清音機能、そして空気中の匂いを感知する嗅覚機能等が挙げられる。

これまでに鼻腔の機能を解明するために様々な研究が行われてきた。吸気時における鼻腔内の温度、湿度に関しては Keck ら [1], Paul ら [2], Seeley ら [3] により測定が行われている。Keck ら [1] は鼻の穴から上咽頭までの間の壁面付近に3つセンサーを設置し、鼻腔内の温度および湿度の計測を行った。その結果、鼻腔前方の領域が吸い込んだ空気の加温・加湿に大きな役割を果たしていると述べている。Paul ら [2] は外気温が常温のときと低温のときに、鼻腔内に流入した空気の平均温度の測定を行った。これより、鼻腔は空気の加温において大きな役割を果たしていると述べている。そして、Seeley らは [3] 吸気時における鼻腔内の温度と湿度の計測を行った。その結果、外気の相対湿度が非常に低い場合でも鼻咽頭における湿度が高くなっており、鼻腔の湿度調節機能が高いことを述べている。

また、鼻腔内の流れシミュレーションにおいても様々な研究が行われている。堀内ら [4] は鼻腔壁面における温度を考慮した熱伝導モデルを適応してシミュレーションを行った。その結果、実際の鼻腔に近い温度分布を示した。そして工藤ら [5] は鼻腔壁面における湿度を考慮したモデルを適応してシミュレーションを行った。その結果、中鼻道から咽頭までの空間において、流入した空気が十分に加湿されることを示した。

実際の鼻腔では温度調節機能や湿度調節機能といった生理的機能だけでなく吸い込んだ空気を加湿するときに蒸発熱という形で空気から熱を奪うといった物理的な現象も考えられる。そこで、従来の熱伝導モデルと湿度モデルに新しく提案する蒸発熱モデルを加えることによってより実際の鼻腔の状態を再現した解析ができると考えた。

## 1.2 目的

実際の鼻腔に近づけた解析を行うために従来の温度モデルと湿度モデルに加えて、蒸発熱を考慮した新しいモデルの提案を行う。その後、三次元鼻腔形状を用いた熱流体解析を行い、鼻腔内の温度分布と湿度分布について検討する。そして、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5章から構成されている。

第1章でははじめにとして、研究の背景、目的、構成について述べる。

第2章では計算方法として、まず鼻腔について述べる。次に提案する新しいモデルすなわち蒸発熱モデルについて述べ、実装方法等について示す。そして、先行研究で用いら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。最後に、解析を行うために必要な基礎方程式、計算条件、境界条件を示す。

第3章では簡易モデルによる実験として、3次元円管形状を用いて熱流体解析を行った計算結果について述べる。円管形状に蒸発熱モデルを適用した結果と従来のモデルを用いた結果を比較することで蒸発熱モデルの有用性について検討を行った。

第4章では定常流の熱流体解析として、3次元鼻腔形状を用いて熱流体解析を行った計算結果、考察について述べる。

第5章では結言として、本研究におけるまとめ、そして今後の課題について述べる。



## 第2章 計算方法

### 2.1 鼻腔について

鼻腔は呼吸における気管の入口であり，気管支や肺を保護するために吸い込んだ空気を適度な温度まで加温・冷却する機能や吸い込んだ空気に十分な湿り気を与えるための機能が備わっている．これらの機能はこれまでの研究によって，非常に優れていることが示されている．例えば，Paul[2]らが行った鼻腔内の温度の測定では $-20^{\circ}\text{C}$ から $-31^{\circ}\text{C}$ という非常に厳しい条件下であっても，鼻腔の奥の温度は平均で $-25.4^{\circ}\text{C}$ ，最低で $-22.0^{\circ}\text{C}$ ，最高で温度が $-22.0^{\circ}\text{C}$ まで加温されることがわかった．この結果ではおおよそ $-42.0^{\circ}\text{C}$ の加温が行われているため，鼻腔の加温機能は優れていると言える．また，Seeley[3]が行った吸気時における温度と湿度の測定では，外気温度を最低で $-5^{\circ}\text{C}$ ，最高で $55^{\circ}\text{C}$ として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 $37^{\circ}\text{C}$ となった．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．この結果からも，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．

鼻腔はこれらの機能を高めるために，非常に複雑な形状をしている．図 2.1 [11]に鼻腔の断面図を示す．鼻腔の側壁には上鼻甲介，中鼻甲介，下鼻甲介と呼ばれる突起のような部分が存在し，各鼻甲介の下を上鼻道，中鼻道，下鼻道と呼ばれる通路が通っている．鼻腔を左右に隔てる鼻中隔との間の共通の通路を総鼻道と呼ぶ．吸い込んだ空気はこれらの通路を通過して気管支に入り，肺へと流れていく．

上鼻甲介，中鼻甲介，下鼻甲介は骨板を包む厚い粘膜と豊富な血管から成り立っている．図 2.2 に鼻腔壁面の構造を示す．粘膜の上皮は多量の繊毛と液粘膜で覆われており，これが鼻腔の浄化と吸い込んだ空気の加湿に大きな役割を果たしている．また，血管系に特徴があり，血液の貯留によって急激な鼻甲介の腫大を可能としている．この作用によって鼻腔内の温度が急激に変化したとしても十分な加温・冷却ができる．

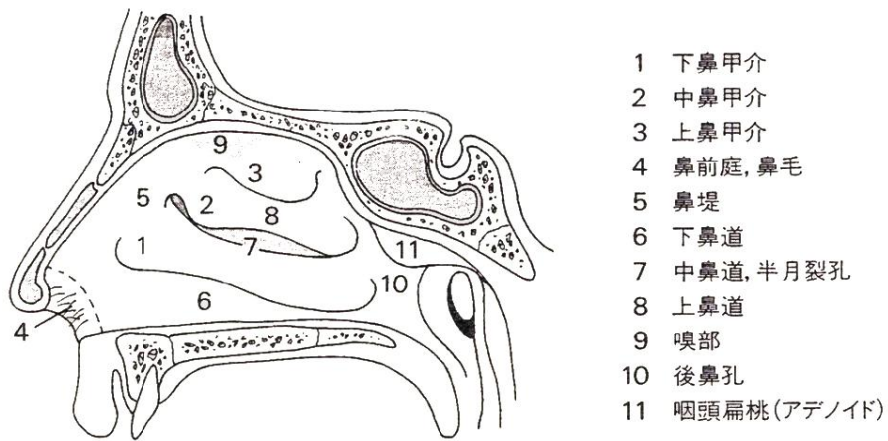


図 2.1: 鼻腔の構造



図 2.2: 鼻甲介断面

## 2.2 計算方法

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。鼻腔内における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(2.1)、運動量保存の式としてナビエ・ストークス方程式(2.2)、温度の計算を行う方程式としてエネルギー保存方程式(2.3)、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(2.4)[14]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。

- 連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

- ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2)$$

$u_i, u_j$  : 速度       $t$  : 時間       $x_i, x_j$  : 座標

$P$  : 圧力       $\mu$  : 動粘性係数

- エネルギー保存方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)T = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T \quad (2.3)$$

$T$  : 温度       $\rho$  : 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

$$\frac{\partial}{\partial t} c_{H_2Oair} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) c_{H_2Oair} = D_{H_2O} \nabla^2 c_{H_2Oair} \quad (2.4)$$

$c_{H_2Oair}$  : 空気中の水蒸気濃度       $D_{H_2O}$  : 質量拡散係数

## 2.3 鼻腔の壁面モデル

前節で述べたように，鼻腔壁面は液粘膜の層と血管系の層から構成されている．鼻腔壁面での温度のやり取り，すなわち熱の移動は熱源である血管系の層から粘膜を介して空気中へ拡散，もしくは空気中から粘膜を介して血管系の層へと拡散することによって伝わる．そして，湿度のやり取り，すなわち水蒸気の移動は血管系の層から粘膜へと供給されて空気中へと拡散することによって伝わる．ここで研究に用いた熱伝導モデル，湿度モデルとともに新しく提案する蒸発熱モデルについて説明する．

### 2.3.1 熱伝導モデル

壁面における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 2.3 に示す．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 (2.5) 式から求めることができる．

$$q = \frac{k_s(T_s - T_w)}{\Delta n} - Q_A \quad (2.5)$$

$T_w$  : 壁面表面の温度     $k_s$  : 水の熱伝達係数     $\Delta n$  : 壁の表面と熱源との距離

$T_s$  : 熱源の温度     $q$  : 移動する熱量     $Q_A$  : ソース項

熱伝達係数  $k_s$  は，水の熱伝導率である  $0.6[W/m - k]$  とした．また，熱源の温度  $T_s$  は鼻腔内の体温に最も近い  $34[^\circ\text{C}]$  とした．そして熱源から壁面表面までの距離  $\Delta n$  は先行研究で最も測定値に近い結果となった  $3[\text{mm}]$  とした．

### 2.3.2 湿度モデル

壁面における湿度のやり取りは湿度モデルを適用することで求めることができる．湿度モデルを図 2.4 に示す．鼻腔粘膜は常に十分な水を持っていると考え，空気と血管層との間に薄い水の膜があると仮定した．鼻腔表面における湿度の交換はこの薄い水の膜を介した水蒸気濃度勾配による拡散と考えた．鼻腔壁面と空気との境界の水蒸気濃度の移動量は (2.6) 式から求めることができる．

$$M = \frac{k_w(C_s - C_g)}{\Delta n} \quad (2.6)$$

$k_w$  : 水の拡散係数     $C_s$  : 組織側の水蒸気濃度     $C_g$  : 空気側の水蒸気濃度

なお，質量輸送係数  $B_f$  はヌセルトの相関式 [6] [7] より，レイノルズ数  $Re$  とシュミット数  $Sc$  を用いて以下のように表される．

$$N_u = \frac{B_f}{k_s} = 2 + 0.6Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (2.7)$$

$k_s$  : 水蒸気の拡散係数       $Re$  : レイノルズ数       $Sc$  : シュミット数

### 2.3.3 蒸発熱モデル

蒸発熱は湿った地面から乾いた空気中へと水蒸気が移動する場合などにおいて発生する熱である。水が蒸発することによって発生する熱量は、壁面から蒸発した水の量と水の状態変化に必要な蒸発潜熱との積によって表すことができる。そこで、熱伝導モデル(2.1)式におけるソース項  $Q_A$  を蒸発に伴う熱量変化の項として扱うことで蒸発熱を再現する。鼻腔壁面における蒸発熱および熱の移動量は(2.7)式から求めることができる。

$$Q_A = \phi_w H_s / V \quad (2.8)$$

$\phi_w$  : 薄い水の膜における水の質量流量       $H_s$  : 水の蒸発潜熱       $V$  : 薄い水の膜の体積

ここで、 $\phi_w$  は薄い水の膜における質量流量であり、膜の断面を通過する水の速度、密度、断面積から求めることができる。 $H_s$  は水の蒸発潜熱であり、薄い水の膜の表面から水が蒸発するのに必要な熱量である。そして、 $V$  は薄い水の壁の体積であり、壁の断面積の大きさと膜の厚さから求めることができる。(2.8)式、(2.9)式に水の質量流量および体積の詳細を示す。

$$\phi_w = \int \rho \mathbf{u} \cdot d\mathbf{A} = \sum_{i=1}^n \rho_i \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{A}_i \quad (2.9)$$

$\rho$  : 水の密度       $\mathbf{u}$  : 薄い水の膜を通過する水の速度       $\mathbf{A}$  : 薄い水の壁の断面積

$$V = \Delta n A \quad (2.10)$$

$\Delta n$  : 膜の厚さ       $A$  : 薄い水の壁の断面積

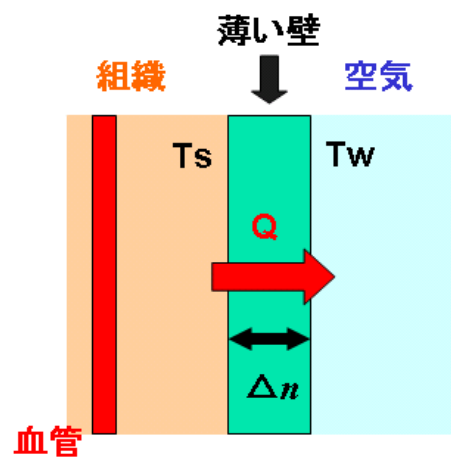


図 2.3: 熱伝導モデル

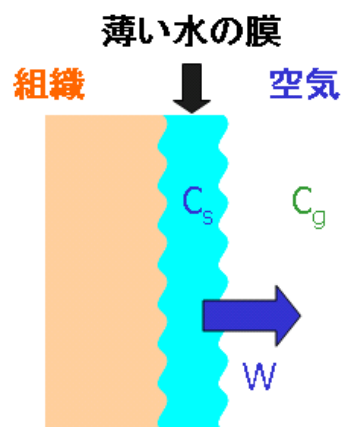


図 2.4: 湿度モデル

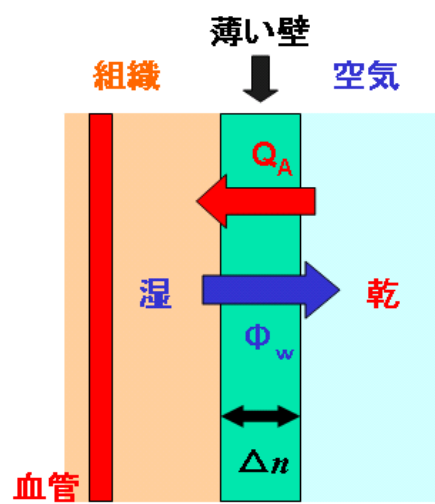


図 2.5: 蒸発熱モデル

## 2.4 鼻腔形状の再構築

本研究では，人体実験を行ったり実際に鼻腔形状を作成して実験を行うわけではなく，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．解析に用いるために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 [8] が用いたものと同じ方法で行った．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行う．
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行う．
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[9]
- 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行えないので、階調値反転を行う。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行うことが可能となる。階調値反転を行っただけでは頭部の3次元形状が生成されない。ここで、鼻腔領域の抽出を行う。抽出を行うために、鼻腔領域とそうでない領域との2つに2値化を行った。そして方法2で決定した階調値を境界として2値化を行った。しかし、2値化を行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行った。

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[10]

医療用画像から3次元形状の再構築を行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行った。スムージングを行うことで滑らかな局面の生成を行うことができるが、スムージングを行えば、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行った。アスペクト比の悪い三角形が存在すると、後に行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行った。また、トライアングルリダクションを行った。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行った。この作業は後に行う計算メッシュの生成を考慮して行った。

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ー 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四面体格子を用いた。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行い、計算メッシュが生成できるまで作業を繰り返す。

## 2.5 鼻腔形状

被験者のCT画像から再構築した形状を図 2.6，鼻腔形状の表面メッシュを図 2.7 に示す．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．

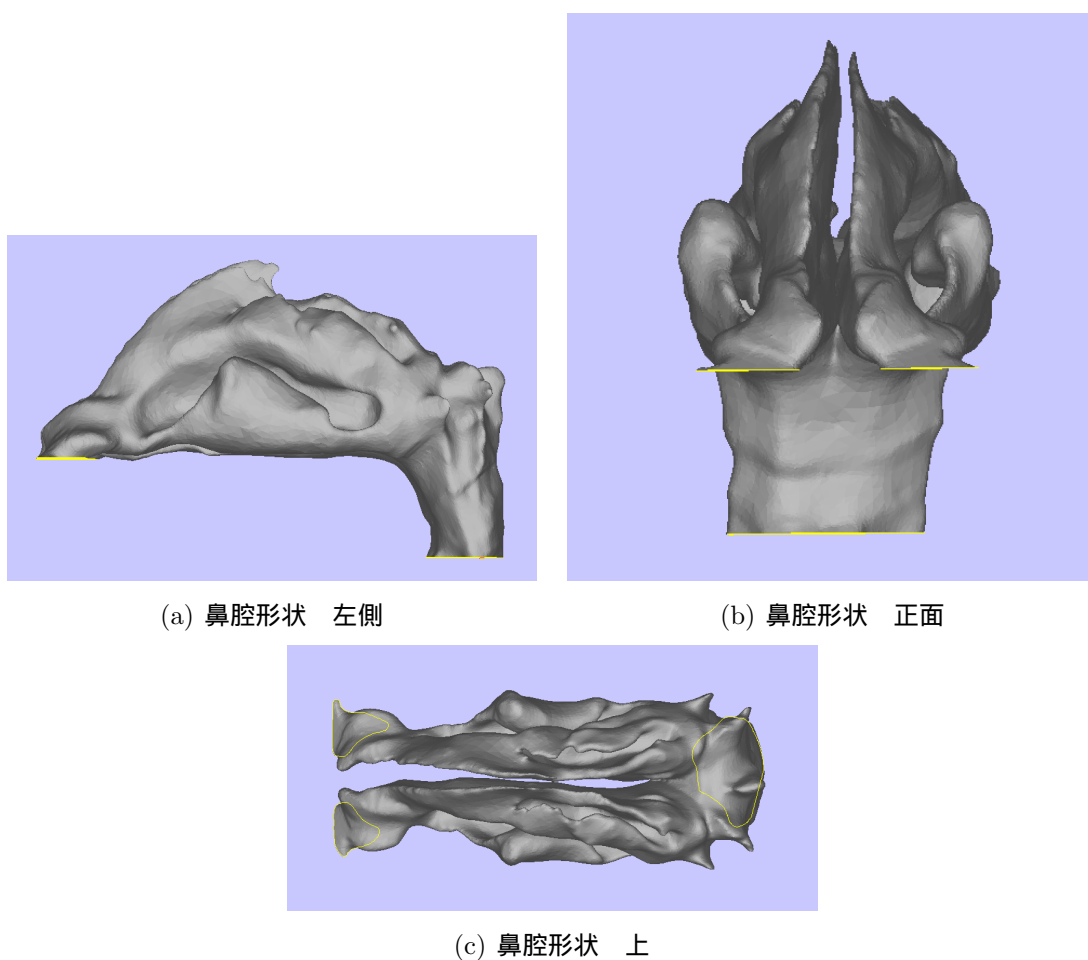


図 2.6: 再構築した鼻腔実形状

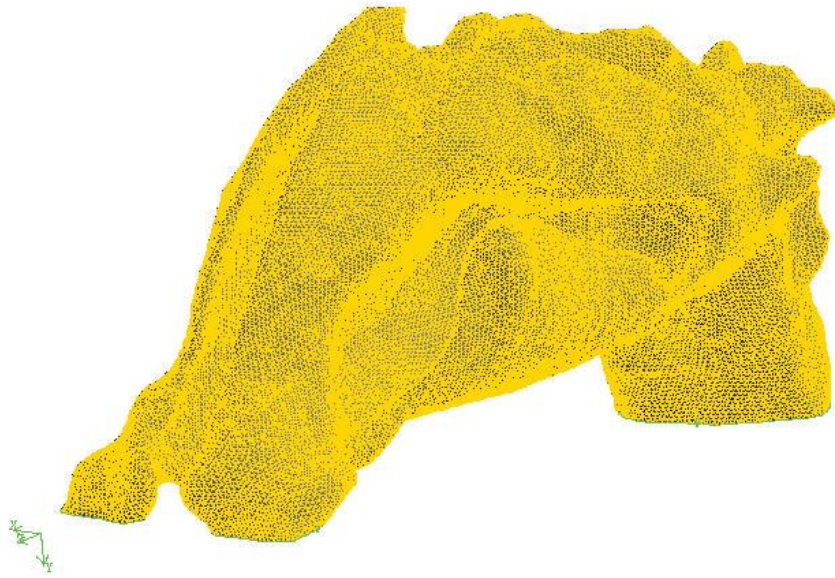


図 2.7: 計算メッシュ

## 2.6 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  $\nu$  を用いて定義される．

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (2.11)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.12)$$

$\mu$  : 流体密度       $\rho$  : 流体粘度

中咽頭で最も長い部分が  $2.1 \times 10^{-2}[m]$  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  $5.0 \times 10^{-4}[m^3]$  ，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  $0.787[m/s]$  となった．そして，これらから求められたレイノルズ数は 1000 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  $0.787[m/s]$  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．

- Ansys 社製 流体解析ソルバ Fluent version 6.3.26[12]

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 120 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	$0.787[m/s]$

## 第3章 簡易モデルによる実験

本章では，前章で述べた蒸発熱モデルが機能していることを確認するために簡易モデルを用いて解析を行った．従来の温度モデル，湿度モデルを用いた場合と提案した蒸発熱モデルを用いた場合の計算結果について次に示す．

### 3.1 円管形状および計算条件について

実験に用いた簡易モデルは直径が0.03[m]，長軸方向の長さが0.5[m]の円管形状である．この円管形状を用いて壁面に従来の温度モデルと湿度モデルを適用した場合（以後従来モデルと呼ぶ）と前章で提案した蒸発熱モデルを適用した場合の計算を行い比較を行った．表3.1に示す．これらの条件は2.4節を参考に設定した．また，流入空気の温度は蒸発熱モデルによる効果を見るために流入空気の温度と相対湿度を変化させて管内の温度変化および湿度変化について調べた．

表 3.1: 計算条件

	条件
計算メッシュ数	約 45 万要素
密度	1.225[kg/m <sup>3</sup> ]
流入条件	圧力 0
壁面	No-slip
流出速度	0.487[m/s]

## 3.2 解析結果

### 3.2.1 流入温度が 307.15[K] の場合

前章で提案した蒸発熱モデルの効果を知るために流入空気の温度と円管の壁面の温度を 307.15[K] として計算を行った。図 3.1 に流入温度 307.15[K]，相対湿度 50[%] の場合の温度分布を示す。従来モデルを用いた場合，円管内の温度は一様に 307.15[K] となっていることがわかる。そして蒸発熱モデルを用いた場合は流入口付近の壁面で温度が下がっており，その大きさは 3[K] 程度であることが図 3.2 からわかる。

次に流入空気の温度を 307[K] に固定して，相対湿度を変化させた場合における円管内の温度分布について調べた。図 3.3 に流入空気の相対湿度を 20[%]，50[%]，100[%] とした場合の壁面付近における温度変化を示す。蒸発熱による温度変化が最も大きいのは相対湿度が 20[%] の場合であり，305.198[K] まで温度の低下が見られた。温度が下がった後は最終的に 306.178[K] まで加温されることがわかった。相対湿度が 50[%] の場合も相対湿度 20[%] の場合と同様に温度の低下が見られたが，こちらは最小で 306.178[K] であり，相対湿度 20[%] の場合よりも温度変化が緩やかで最終的に 307.099[K] まで加温されることがわかった。そして，相対湿度が 100[%] の場合は従来モデルと値は同じで常に 307.15[K] となっており，温度変化は一切見られなかった。

この結果から，蒸発熱モデルを用いた場合，流入空気の相対湿度が低いほど円管内の温度が下がるということがわかった。

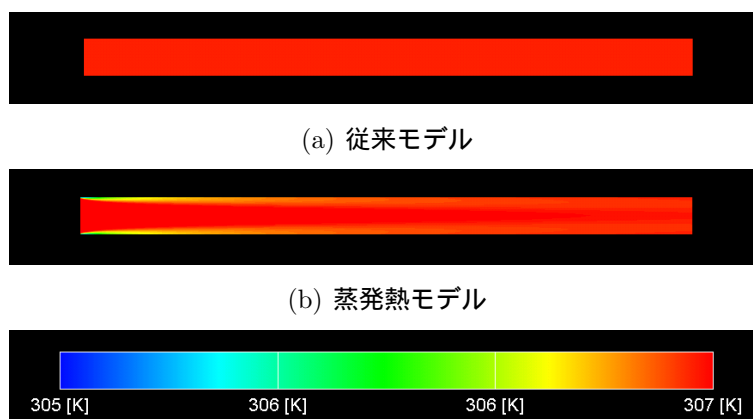


図 3.1: 流入温度 307.15[K]，相対湿度 50[%] の温度分布

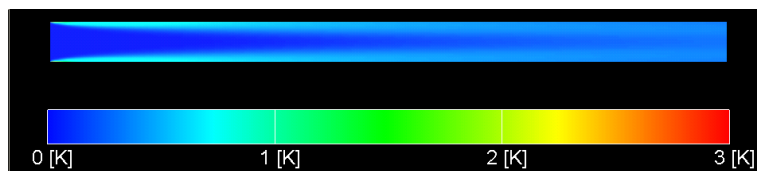


図 3.2: 温度分布の差分

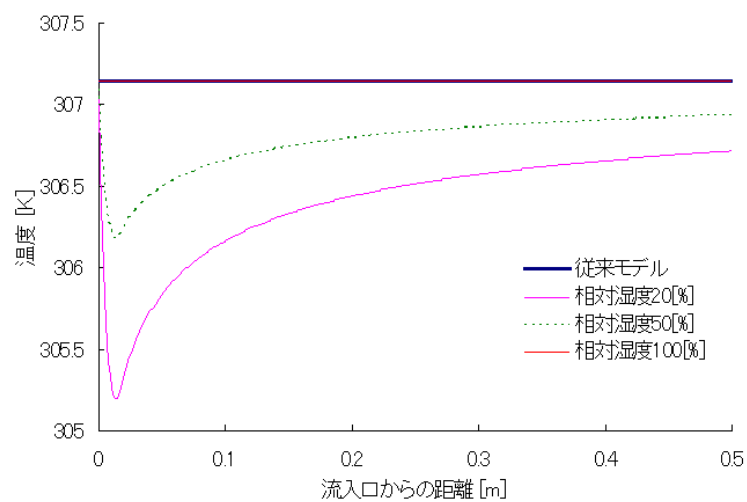


図 3.3: 流入温度 307.15[K] におけるの壁面付近の温度変化

図 3.4 に流入温度 307.15[K]，相対湿度 50[%] における円管内の湿度分布を示す．図より従来モデル，蒸発熱モデルともに円管内の空気が加湿されており，流入口付近の壁面において湿度の低下が見られる．しかし，湿度分布の比較による従来モデルと蒸発熱モデルの差はほとんど見られなかった．そこで，壁面付近における湿度変化を調べたところ，従来モデルと蒸発熱モデルとの間に差が見られることがわかった．図 3.5 に壁面付近における湿度の変化を示す．従来モデル，蒸発熱モデルともに漸近的に湿度 100[%] のラインへ近づいていることがわかるが，従来モデルと蒸発熱モデルの相対湿度には最大で 4.0067[%] の差が見られた．ここで，従来モデルと同じ湿度モデルを用いているのにも関わらず相対湿度に差が見られるのは次のためであると考えられる．円管内の空気に含まれる水の濃度は同じ湿度モデルを用いているために従来モデル，蒸発熱モデルともに水の濃度の値は同じである．しかし，先ほどの温度の結果から蒸発熱モデルを用いた場合，円管内の温度は下がることがわかっている．そのため従来モデル，蒸発熱モデルともに同じ水の濃度であっても温度が違っているので相対湿度に差が生じたと考えられる．

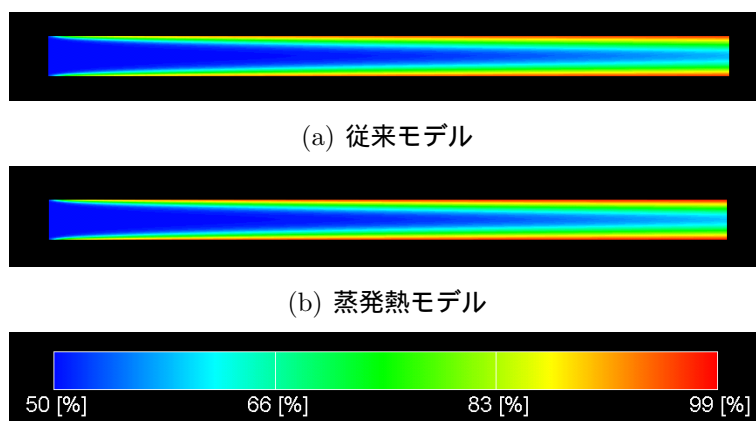


図 3.4: 流入温度 307.15[K]，相対湿度 50[%] の湿度分布



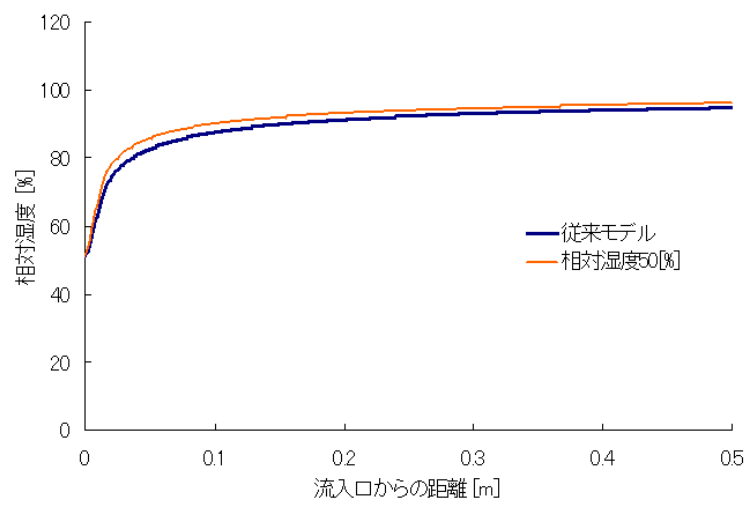


図 3.5: 流入温度 307.15[K] におけるの壁面付近の湿度変化

ここでは流入空気の温度を 307.15[K] として解析を行った結果を載せているが、その他に温度を 293.15[K]303.15[K] , 313.15[K] と変化させて解析を行った。その結果、流入空気の温度を変化させても相対湿度が低いほど蒸発熱の影響が大きく、逆に壁面との水の濃度が近いほど蒸発熱の影響が小さくなることがわかった。307.15[K] の場合と同じ傾向が見られた。

### 3.3 まとめ

本章では、提案する蒸発熱モデルについて簡易形状を用いて実験を行った。流入空気の温度と相対湿度を変化させ、従来モデルにおける結果と蒸発熱モデルにおける結果を比較した。その結果、蒸発熱モデルを用いた場合、円管内の温度は従来モデルを用いた場合よりも低くなることがわかった。特に流入空気の相対湿度を低くした場合が最も蒸発熱の影響が大きく、307.15[K] の場合で最大 3[K] ほどの差が生じた。また、円管内の湿度は従来モデルを用いた場合よりも高くなることもわかった。これは同じ湿度モデルを用いているため円管内における空気の水の濃度は同じであるが蒸発熱モデルを用いたことで円管内の温度が低下し、その結果同じ水の濃度であっても相対湿度に差が生じたと考えられる。

以上より、蒸発熱モデルを用いた場合の効果を確認することができた。次章では、この蒸発熱モデルを適用した三次元鼻腔形状における定常流れでの熱流体解析を行う。

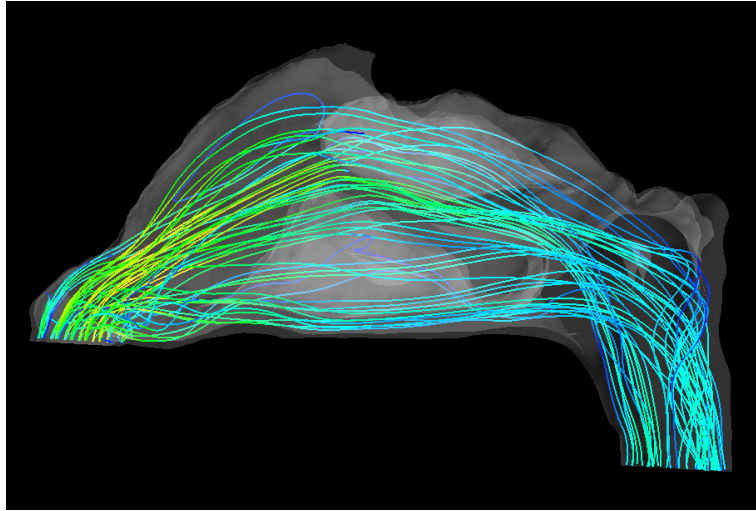
## 第4章 定常流の熱流体解析

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、温度調節機能を考慮した熱伝導モデル、そして湿度調節機能を考慮した湿度モデルを用いて解析が行われた。本章では、前節で仮定した蒸発熱モデルを考慮した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、鼻腔内における温度分布と湿度分布を求める。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。

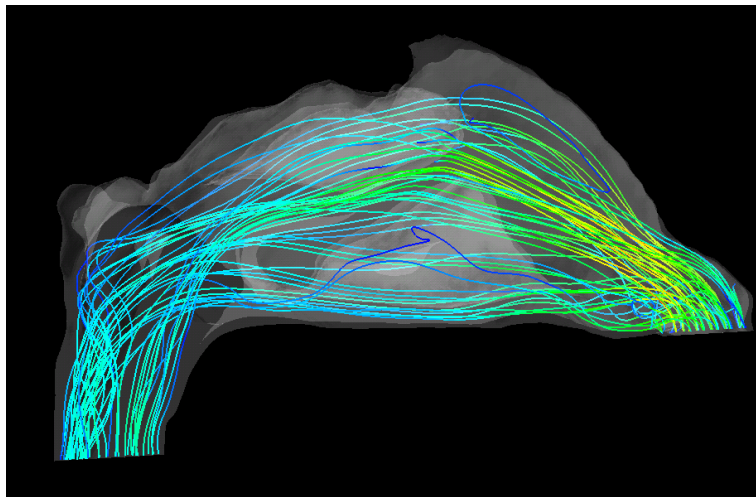
### 4.1 鼻腔内の空気の流れ

図 4.1 に鼻腔内の空気の流れを流線図で示す。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) 左鼻腔内の流線図



(b) 右鼻腔内の流線図



図 4.1: 鼻腔内の流線図

## 4.2 解析結果

図 4.2 は鼻腔を正面から見た図と，側面から見た図である．鼻腔内の温度分布および湿度分布は，図に示す 1 から 10 までの線で描かれている部分の断面となっている．

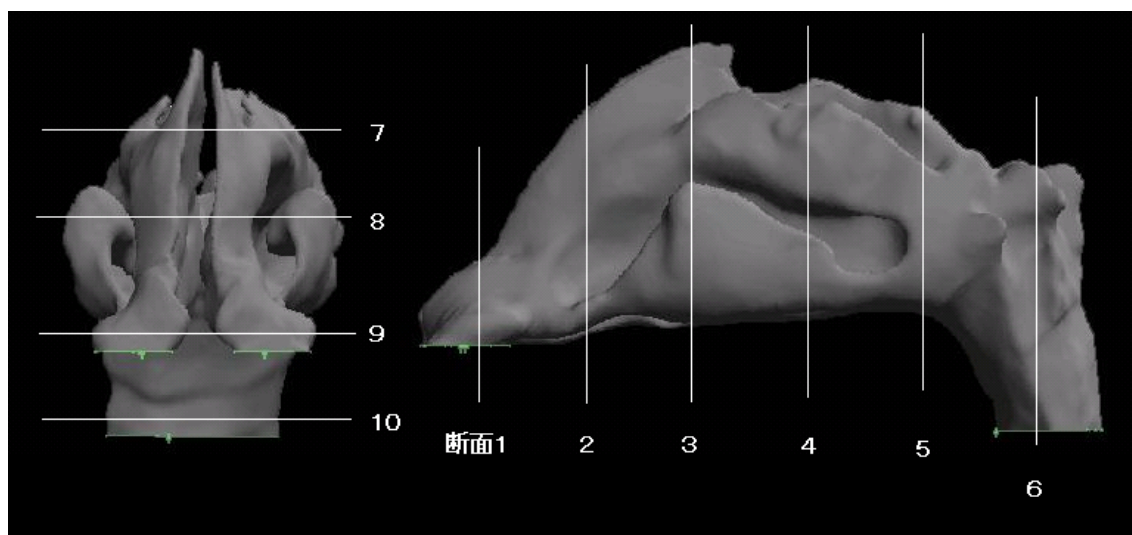


図 4.2: 鼻腔内の温度分布，湿度分布の断面の位置

まず，従来モデルを用いた場合と蒸発熱モデルを用いた場合における温度分布と湿度分布の違いを見るために温度を  $293.15[\text{K}]$  として熱流体解析を行った．図 4.3 に従来モデルを用いた場合の温度分布，図 4.4 に蒸発熱モデルを用いた場合の温度分布を示す．なお，図 4.3(a) と図 4.4(a) は流入空気の相対湿度が  $20[\%]$  の場合，図 4.3(b) と図 4.4(b) は流入空気の相対湿度が  $50[\%]$  の場合，図 4.3(c) 図 4.4(c) 流入空気の相対湿度が  $80[\%]$  の場合を示しており，左の図は図 4.2 における断面 1 から 6，右の図は断面 7 から 10 をそれぞれ示している．温度分布の色は温度の高さを表し，青色ほど温度が低く，赤色ほど温度が高くなっている．図 4.5 に従来モデルを用いた場合の温度分布と蒸発熱モデルを用いた場合の温度分布の差分を示す．こちらの図は従来モデルの温度の大きさから蒸発熱モデルの温度の大きさを引くことで求めた．

図 4.3 より，流入した空気は鼻腔前方の領域，特に鼻甲介の部分で急激に加温され，総鼻道を抜けて上咽頭に達するころには平均温度が  $306[\text{K}]$  を超えている．鼻腔内の温度変化は総鼻道と下鼻道での変化が特に大きくなっており，中鼻道や上鼻道では温度がほとんど変化していない部分が存在することが断面 3, 4 や断面 7, 8 からわかる．断面 1 での最低温度は  $293[\text{K}]$  ほどであるが，断面 3 や断面 4 の鼻道で加温されることによって断面 6 では  $304[\text{K}]$  まで加温されることがわかった．最大温度は断面 2 で  $305[\text{K}]$  まで低下したが，その後の断面では  $307[\text{K}]$  でほぼ一様となった．また，従来モデルを用いた場合，流入空気の相対湿度の違いによる温度変化はほとんど見られなかった．

図 4.4 より，蒸発熱モデルを用いた場合における温度変化も従来モデルを用いた場合と同様に鼻腔前方の領域で急激に加温されている．しかし，蒸発熱モデルを用いた場合は総鼻道や下鼻道における温度が低くなっており，断面 6 の上咽頭の部分にも温度の低い領域が存在することがわかる．次に，流入空気の相対湿度の違いによる温度変化を比較すると，平均温度は相対湿度が 20[%] のときが最も小さく，上咽頭での平均温度は相対湿度 20[%] の場合は 304.8715[K]，相対湿度 50[%] の場合は 305.0702[K] 相対湿度 80[%] が 305.2683[K] となった．このことから，相対湿度が低い空気が流入する場合の方が鼻腔内の温度低下が大きいことがわかる．

図 4.5 より，従来モデルと蒸発熱モデルの温度変化が最も大きい部分は，断面 1 での鼻前庭の壁面部分，総鼻道と下鼻道の一部であることがわかる．その大きさは相対湿度 20[%] の場合で最大 10[K]，相対湿度 50[%] の場合は 8[K]，相対湿度 80[%] の場合は 7[K] であることがわかる．

図 4.6 に従来モデルを用いた場合における鼻腔内の平均温度，図 4.7 に蒸発熱モデルを用いた場合における鼻腔内の平均温度を示す．図より従来モデルを用いた場合，相対湿度を変化させても平均温度の推移はほとんど変わらないことがわかる．一方，蒸発熱モデルを用いた場合の温度変化は相対湿度 20[%] の場合が最も温度が低くなり，相対湿度 50[%]，相対湿度 80[%] の順に温度が高くなっていることがわかる．また，従来モデルを用いた場合と蒸発熱モデルを用いた場合の温度変化を比較すると，蒸発熱モデルを用いた場合の方が従来モデルを用いた場合よりも温度が低くなった．断面 1 の地点でのその温度差は，相対湿度 20[%] の場合で 3.9535[K]，相対湿度 50[%] 場合で 3.3861[K]，相対湿度 80[%] の場合で 2.8206[K] となった．

蒸発熱モデルを用いた場合ともに流入口からの距離が 1[cm] の地点で温度の低下が見られる．これは，この地点から鼻腔の面積が急に狭くなることによって空気の流速が速くなるために温度が低下するものだと考えられる．

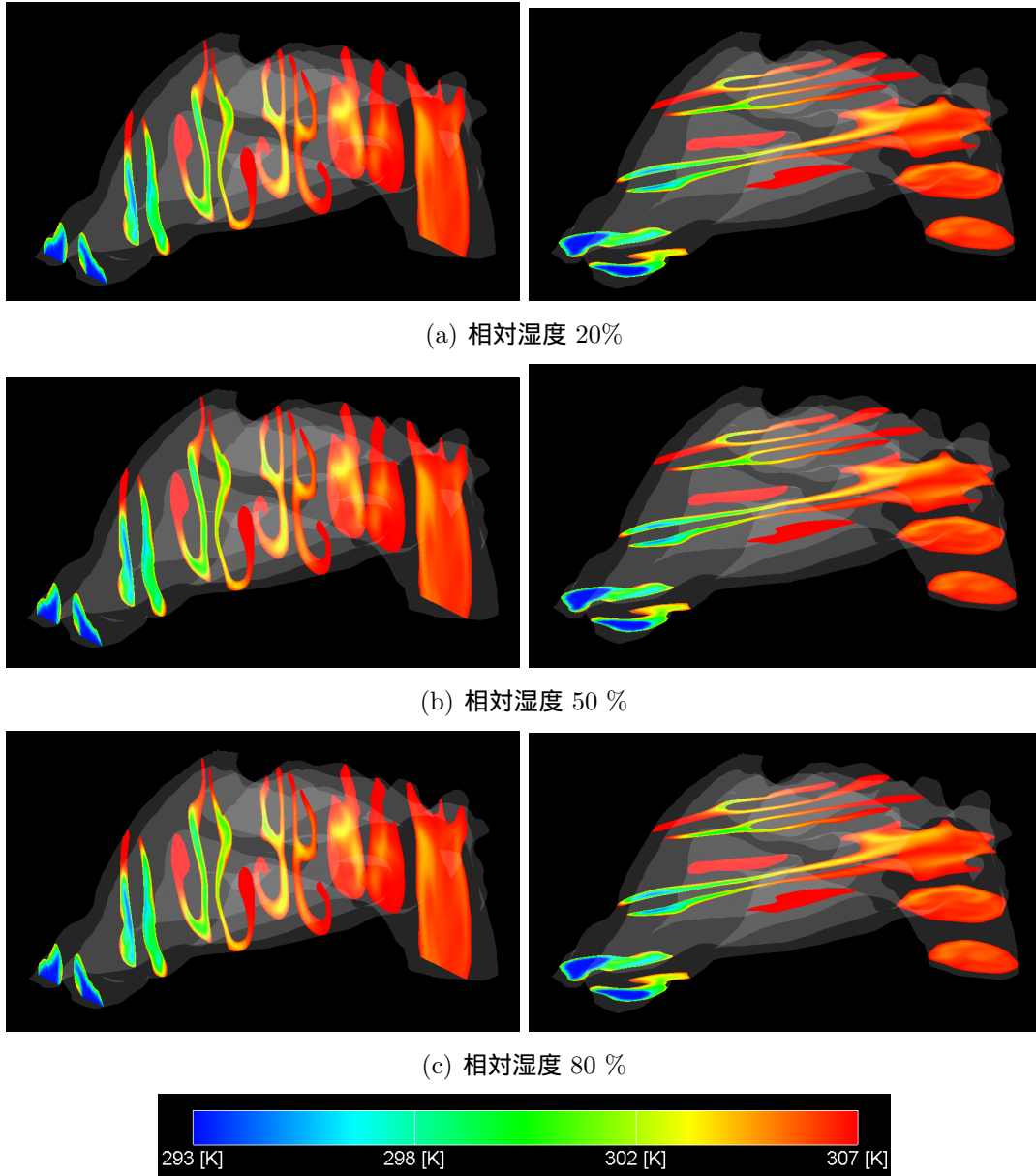
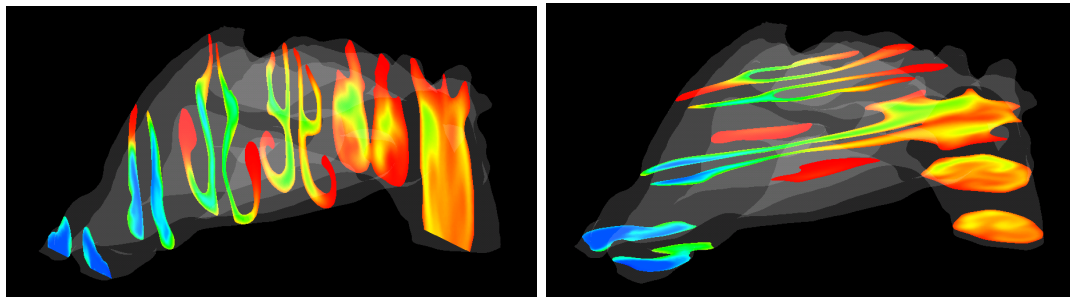
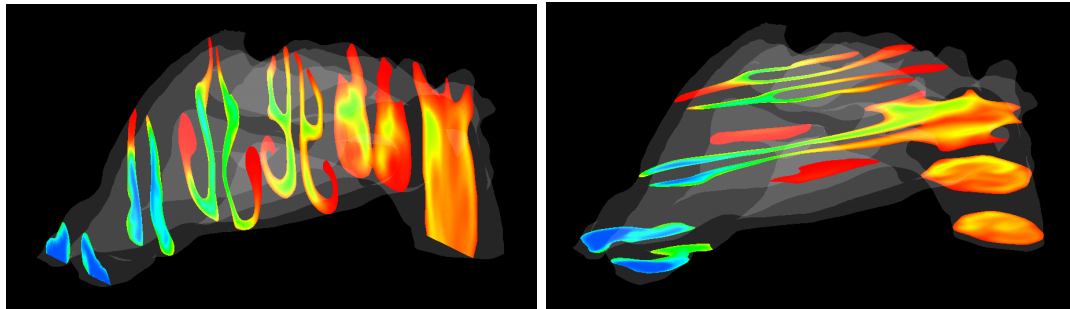


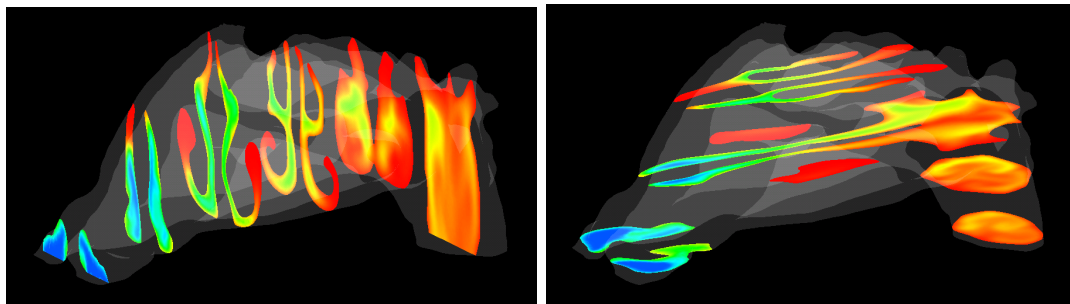
図 4.3: 従来モデルを用いた場合における鼻腔内の温度分布



(a) 相対湿度 20%



(b) 相対湿度 50%

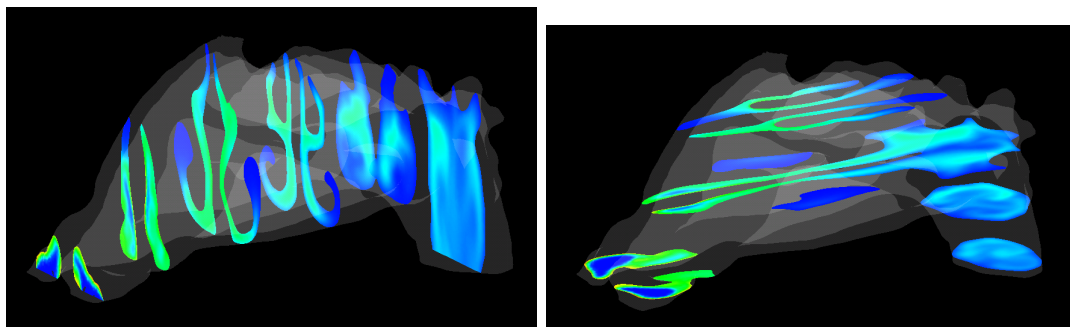


(c) 相対湿度 80%

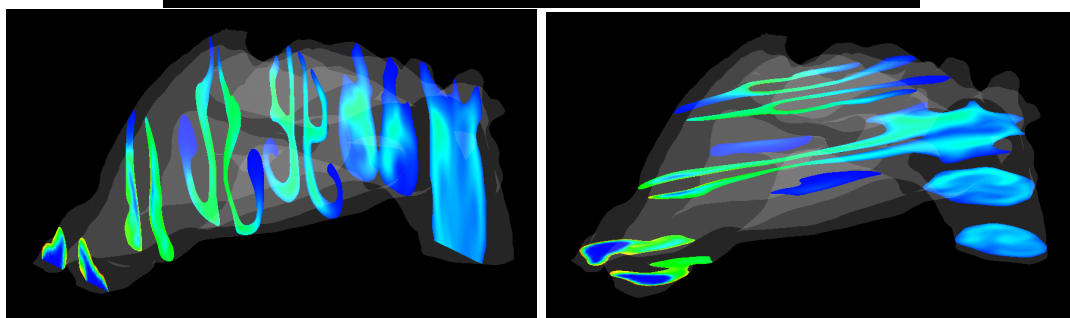


図 4.4: 蒸発熱モデルを用いた場合における鼻腔内の温度分布

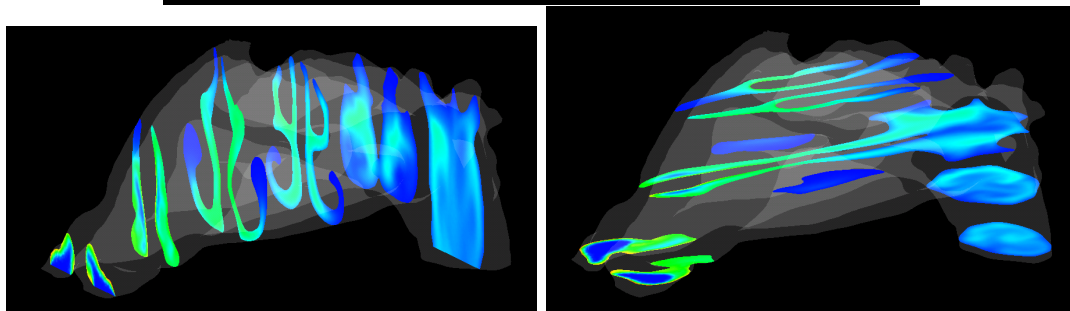




(a) 相対湿度 20%



(b) 相対湿度 50%



(c) 相対湿度 80%



図 4.5: 従来モデルと蒸発熱モデルの温度分布の差分

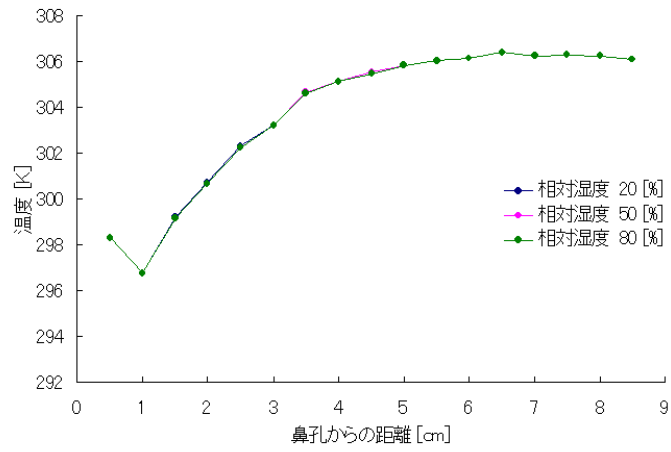


図 4.6: 従来モデルを用いた場合の温度変化の比較

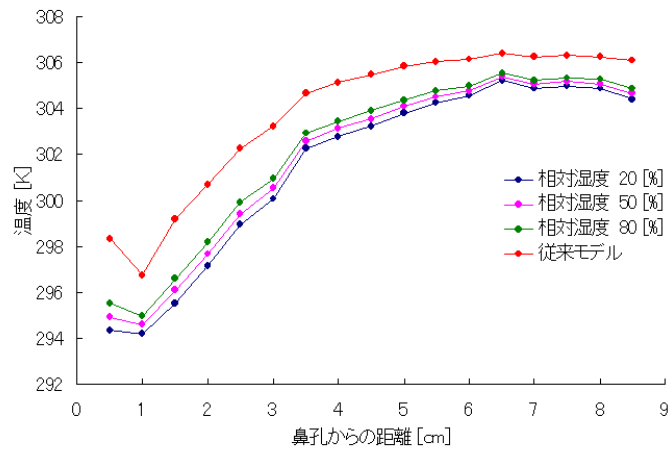
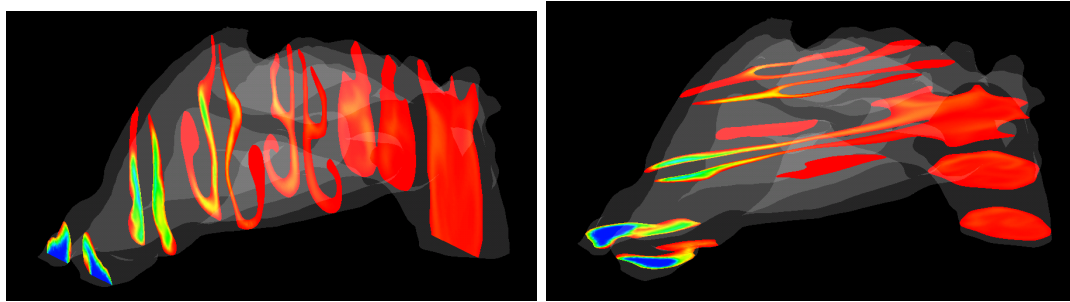


図 4.7: 従来モデルを用いた場合の温度変化の比較

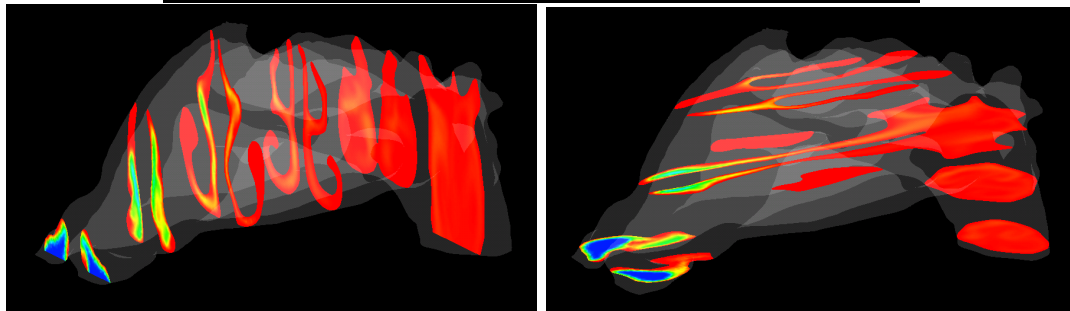
図 4.8 に従来モデルを用いた場合の鼻腔内の湿度分布，図 4.9 に蒸発熱モデルを用いた場合の鼻腔内の湿度分布を示す．なお，湿度分布の図の中で相対湿度が 100[%] を超えた表示となっているが，これは流入温度である 293.15[K] を基準とした相対湿度であるためである．

図 4.8 より，鼻孔から入った空気は鼻腔内で加湿されており，上咽頭に達するまでに相対湿度はほぼ 100[%] となっていることがわかる．また，鼻腔前方の領域を通過するまでに空気が急激に加湿されており，相対湿度 20[%] での断面 1 における平均湿度は 60.4385[%] であるが，断面 3 以降の領域では平均湿度が 90[%] を超えている．湿度の変化は総鼻道の部分で大きくなっているが，上鼻道や中鼻道，下鼻道では湿度の変化がほとんど見られないことがわかる．

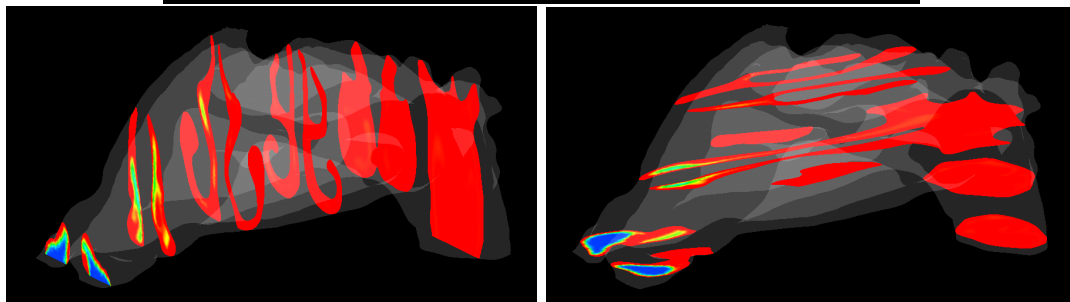
流入空気の相対湿度の違いによる湿度変化を見ると，湿度変化の様相が似ていることがわかる．どの条件においても断面 2，3 まで湿度の低い部分が存在するが，上咽頭部では 100[%] 近くまで加湿されることがわかる．図から，従来モデルと比較して湿度の最大値が飛び抜けて大きくなっていることがわかる．断面 1 や 9 の一部分で大きくなっているが，その理由として蒸発熱によって温度が低くなった領域と空気中の水分濃度が大きい領域が重なった結果，最大で 160[%] となるような領域が発生してしまったと考えられる．鼻孔から流入した空気は鼻腔前方の領域で急激に加湿され，鼻甲介や鼻腔を通過して上咽頭へ至るまでに平均湿度が 100[%] をこえていることがわかる．また，湿度の変化は断面 1 の壁面付近で最も大きくなっており，相対湿度 20[%] の場合では最大で 162[%]，最も小さい相対湿度 80[%] の場合でも湿度が 153[%] という結果となった．



(a) 相対湿度 20%



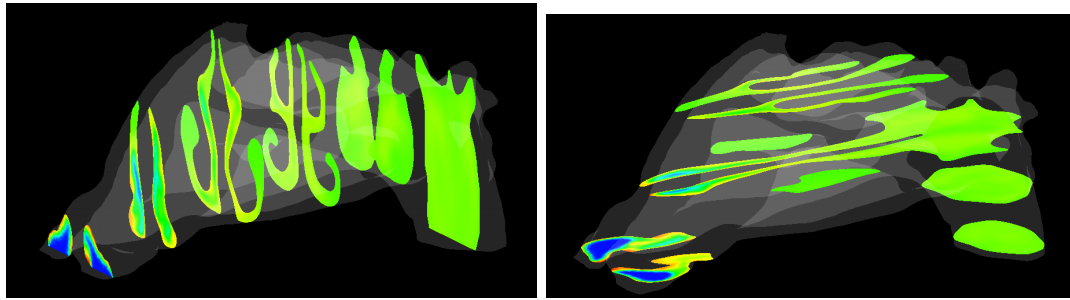
(b) 相対湿度 50%



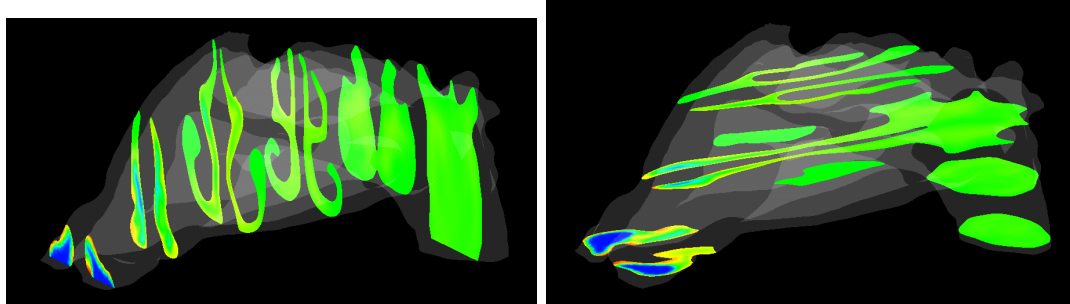
(c) 相対湿度 80%



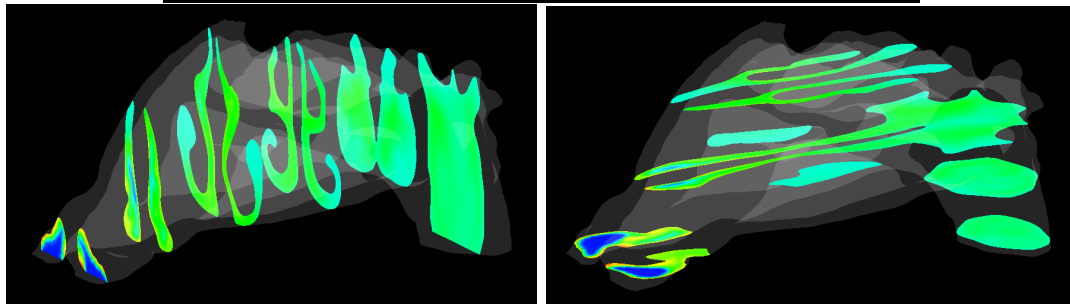
図 4.8: 従来モデルを用いた場合における鼻腔内の湿度分布



(a) 相対湿度 20%



(b) 相対湿度 50%



(c) 相対湿度 80%



図 4.9: 蒸発熱モデルを用いた場合における鼻腔内の湿度分布

### 4.3 流入空気の温度の違いによる温度，湿度への影響

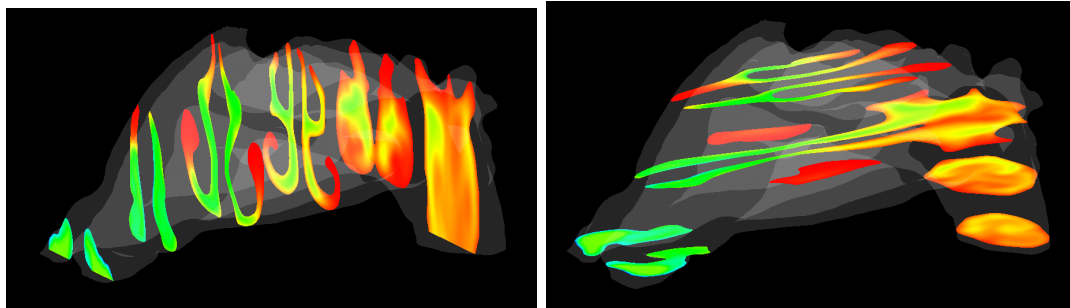
本節では，日常生活における温度を想定した解析を行うために流入空気の温度を 303.15[K]，313.15[K] と設定して熱流体解析を行った．

流入空気の温度が 303.15[K] のときの結果である図 4.10(a)，図 4.10(b)，図 4.10(c) を見ると，低温の空気が上咽頭部まで達していることがわかる．このときの上咽頭部の平均温度は相対湿度 20[%] の場合で 305.6118[K]，相対湿度 50[%] の場合で 305.9754[K]，相対湿度 80[%] の場合で 306.3408[K] であった．相対湿度が低いほど蒸発熱の影響を受けており，相対湿度 20[%] の場合で温度が 297.1928[K] まで低下したが，どのケースにおいても咽頭に達するまでに十分加温されることがわかった．

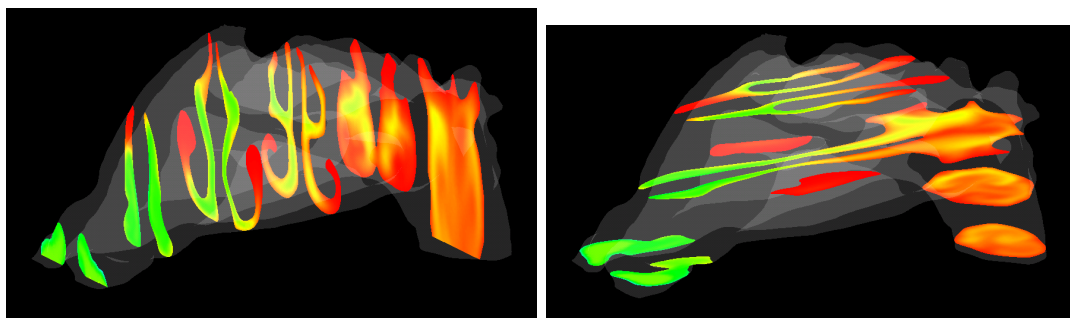
図 4.11(a)，図 4.11(b)，図 4.11(c) に 303.15[K] における湿度分布を示す．図から最大湿度が非常に大きくなっている部分が存在するが，293.15[K] における結果よりも値が小さくなっていることがわかる．鼻孔から入った空気は鼻腔内で加湿されており，上咽頭に達するまでに相対湿度はほぼ 100[%] となっていることがわかる．また，鼻腔前方の領域を通過するまでに空気が急激に加湿されており，相対湿度 20[%] での断面 1 における平均湿度は 65.9488[%] であるが，断面 3 以降の領域では平均湿度が 100[%] を超えている．湿度の変化は総鼻道の部分で大きくなっているが，上鼻道や中鼻道，下鼻道では湿度の変化がほとんど見られないことがわかる．

次に流入空気の温度が 313.15[K] のときの結果である図??，図??，図??を見ると，流入空気が鼻腔内で冷却され，咽頭部分に至るまでに 306[K] 近くまで温度が下がっている．このときの上咽頭部の平均温度は相対湿度 20[%] の場合で 306.4121[K]，相対湿度 50[%] の場合で 307.052[K]，相対湿度 80[%] の場合で 307.6792[K] であった．相対湿度が低いほど蒸発熱の影響を受けており，相対湿度 20[%] の場合で温度が 302.4221[K] まで低下したが，どのケースにおいても咽頭に達するまでに十分冷却されることがわかった．

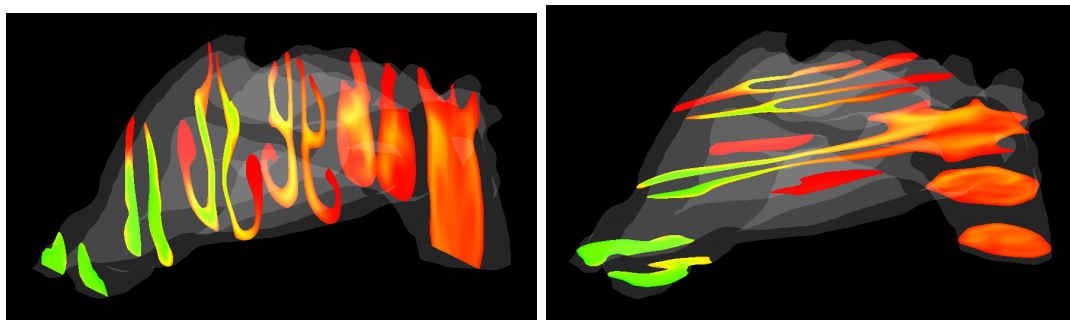
図 4.13(a)，図 4.13(b)，図 4.13(c) に 313.15[K] における湿度分布を示す．鼻孔から入った空気は鼻腔内で加湿されており，上咽頭に達するまでに相対湿度はほぼ 100[%] となっていることがわかる．また，鼻腔前方の領域を通過するまでに空気が急激に加湿されており，相対湿度 20[%] での断面 1 における平均湿度は 53.8643[%] であるが，断面 3 以降の領域では平均湿度が 100[%] を超えている．湿度の変化は総鼻道の部分で大きくなっているが，上鼻道や中鼻道，下鼻道では湿度の変化がほとんど見られないことがわかる．



(a) 相対湿度 20%



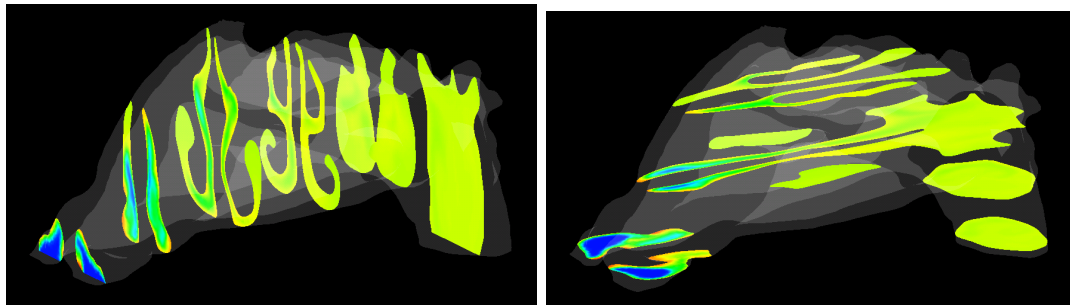
(b) 相対湿度 50%



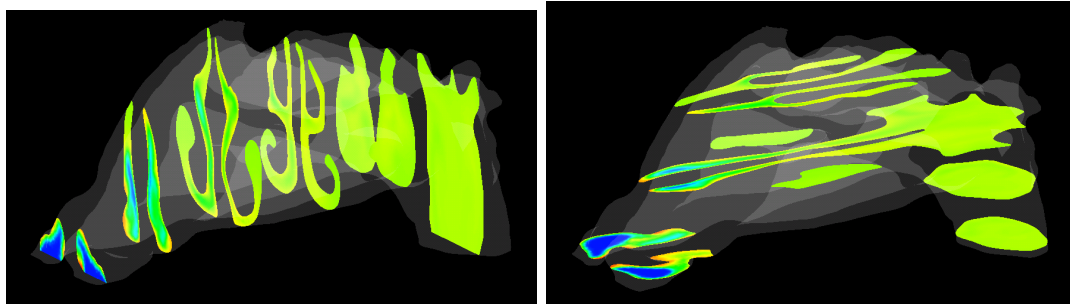
(c) 相対湿度 80%



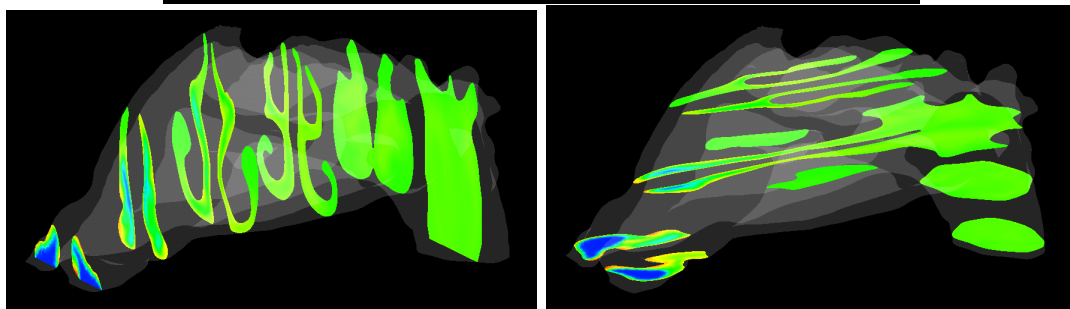
図 4.10: 流入温度 303[K] における鼻腔内の温度分布



(a) 相対湿度 20%



(b) 相対湿度 50%

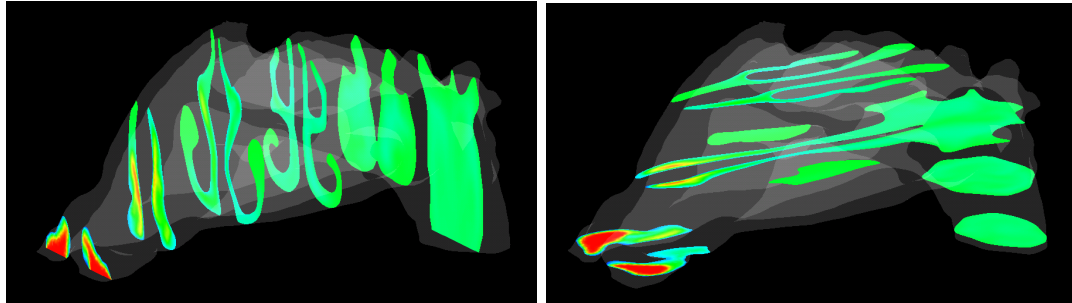


(c) 相対湿度 80%

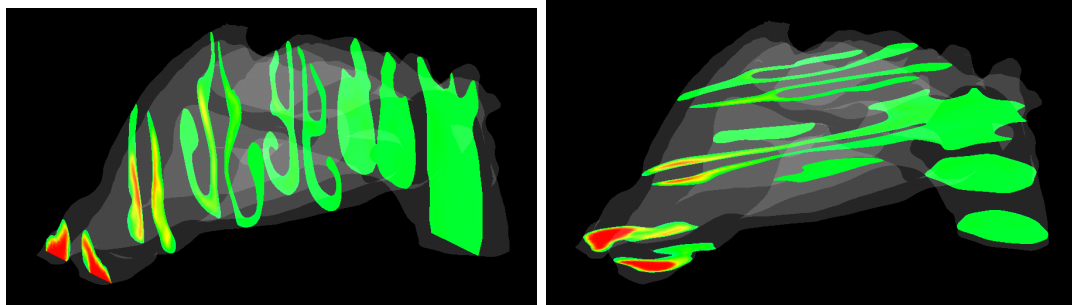


図 4.11: 流入温度 303[K] における鼻腔内の湿度分布

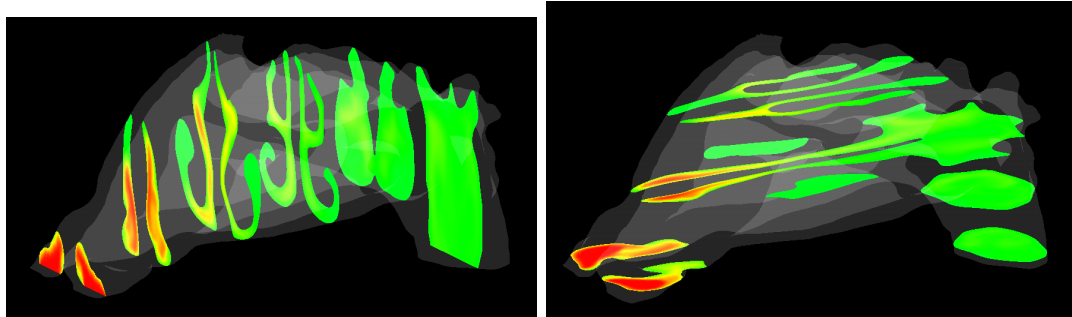




(a) 相対湿度 20%



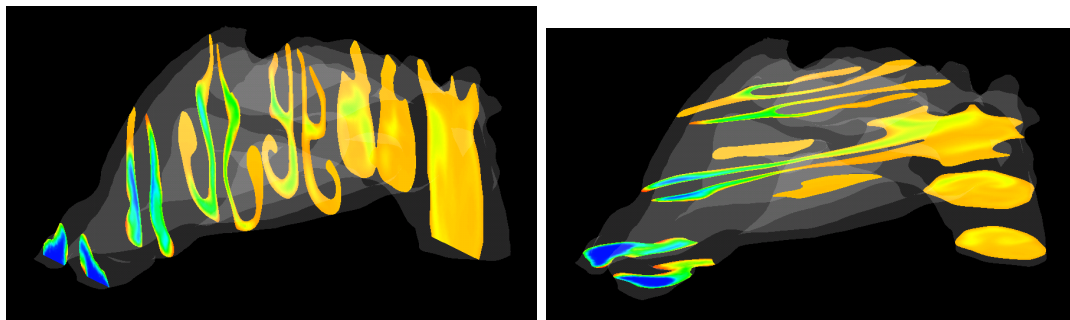
(b) 相対湿度 50%



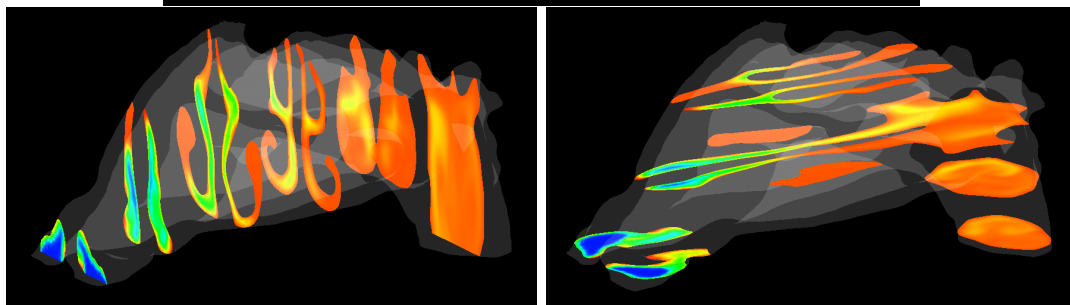
(c) 相対湿度 80%



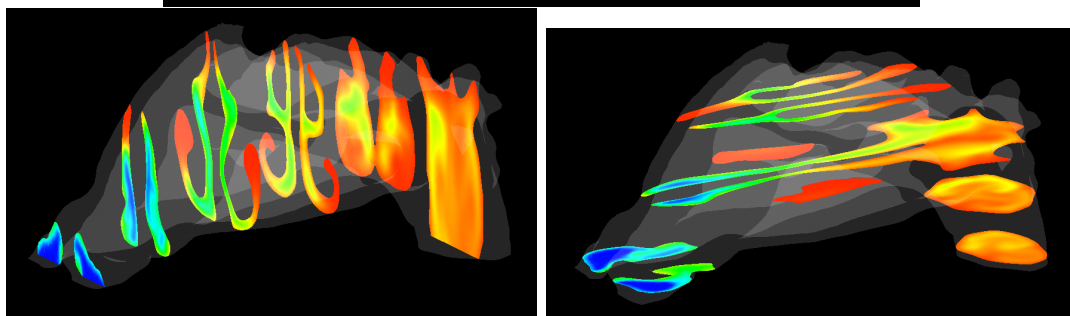
図 4.12: 流入温度 313[K] における鼻腔内の温度分布



(a) 相対湿度 20%



(b) 相対湿度 50%



(c) 相対湿度 80%



図 4.13: 流入温度 313[K] における鼻腔内の湿度分布

## 4.4 測定値との比較

本章での計算結果の有効性を検討するため、実際に行われた鼻腔内の温度と湿度の測定結果との比較を行った。Keckら [1] によって行われた鼻腔内の温度と湿度の測定は熱伝対を鼻腔内部の壁面に当てて行われた。鼻腔の鼻弁，中鼻甲介，上咽頭の3カ所で人の吸気時に測定を行っている。この測定結果と蒸発熱モデルの計算結果を比較するために同じ場所での温度と湿度の計測を行った。また，計測箇所以外の場所も参考にするために計測を行っている。

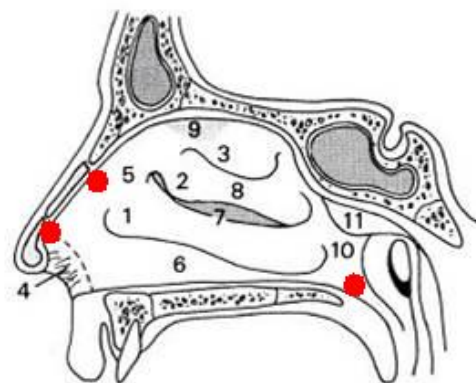


図 4.14: 測定地点

表 4.1: 流入条件

流入温度	298.15[K]
流入相対湿度	35[%]
流入速度	0.787[m/s]

表 4.2: 測定地点

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

図 4.15 に鼻腔内の温度変化を示す．鼻孔からの距離が 1.5[cm] の地点における温度を比較すると，測定結果が 302.15[K] であるのに対して，蒸発熱モデルを用いた結果では平均温度が 298.8839[K]，最大温度が 305.7659[K] となっており，測定値と蒸発熱モデルの結果が異なっていることがわかる．次に鼻孔からの距離が 2.5[cm] の地点における温度を比較すると，測定結果が 305.15[K] であるのに対して，蒸発熱モデルを用いた結果では平均温度が 301.1399[K]，最大温度が 307.0956[K] となっており，測定結果と蒸発熱モデルの結果が異なっているが，平均温度よりも最大温度の方が測定値に近い値となった．そして，鼻孔からの距離が 6.5[cm] の地点における温度を比較すると，測定結果が 307.15[K] であるのに対して，蒸発熱モデルを用いた結果では平均温度が 305.6453[K]，最大温度が 307.1276[K] となっており，最大温度と測定値が非常に近い値となった．

測定値との誤差は鼻孔からの距離が 1.5[cm] の地点が最も大きく，次いで 2.5[cm] の地点となっているが，誤差が大きくなった理由として鼻孔付近での流入空気の影響や鼻腔内の形，特に鼻前庭から鼻甲介にかけて形状が急に狭くなることなどが考えられる．

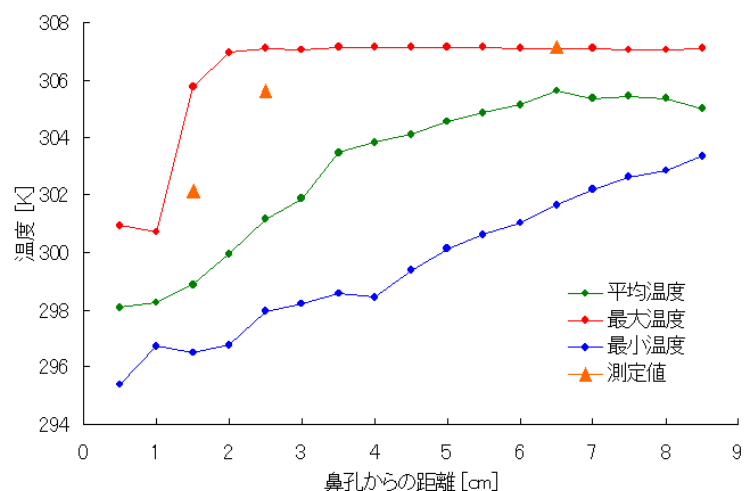


図 4.15: 鼻腔内の温度変化

図 4.16 に鼻腔内の湿度変化を示す。湿度変化の図から、鼻腔内の平均湿度は鼻孔から 1.0[cm] の地点で最も低くなり、1.5[cm] の地点から 3.0[cm] の地点の間で加湿され、その後一定の値となっていることがわかる。1.0[cm] の地点で平均湿度が下がる理由として、この地点から鼻の間隔が狭くなることで空気の流速が上がり、乾いた空気が通りやすくなるためであると考えられる。また、最大湿度は 0.5[cm] から 5.0[cm] の地点にかけて緩やかに湿度が減少しており、最小湿度も同じく 0.5[cm] から 5.0[cm] の地点にかけて増加していることがわかる。

図 4.17 に鼻腔内における水の濃度変化を示す。相対湿度は基準となる温度によって値が変化するため、こちらの水の濃度を用いて比較を行った。図より、測定値と鼻腔内における流入空気の水の平均濃度が非常に近いことがわかる。また、最大濃度はほぼ一定であり、3.337[%] となっている。そして、最小濃度は鼻孔から咽頭にかけて緩やかに増加していることがわかる。

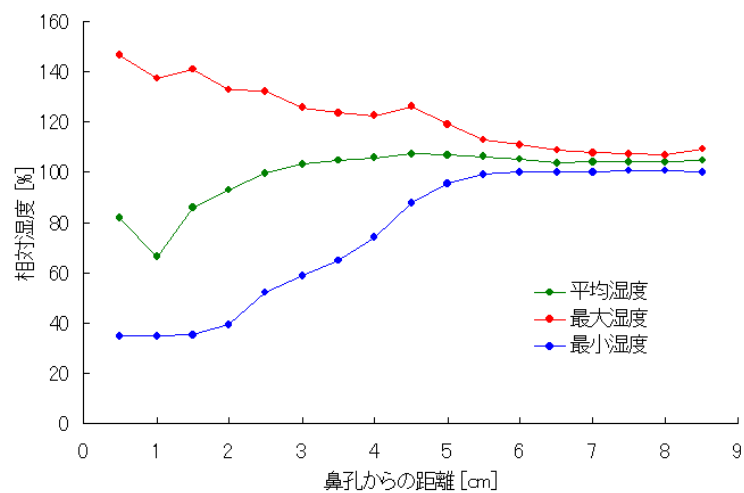


図 4.16: 鼻腔内の湿度変化

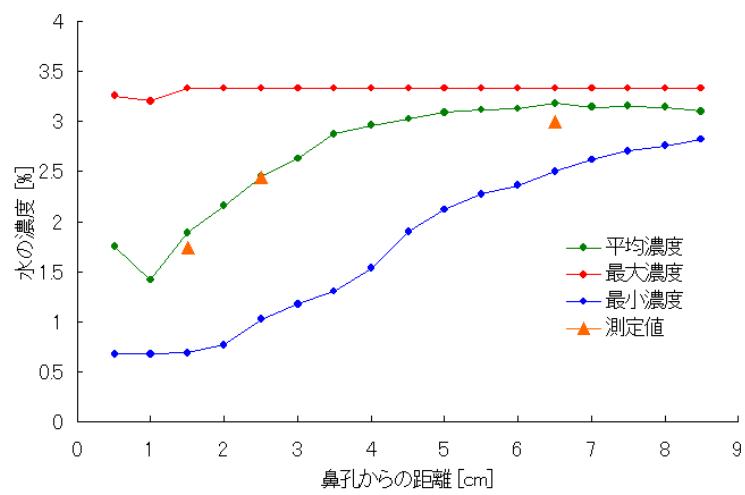


図 4.17: 鼻腔内の水の濃度変化

最後に、各測定地点における温度と水の濃度から湿度を計算し、測定値と計算による値にどの程度開きがあるのかについて調べた。図 4.18 に各測定地点における相対湿度の比較図を示す。流入口、すなわち 0[cm] の地点では値が等しくなっているが、各測定地点での相対湿度は蒸発熱モデルの方が大きくなっており、最大で 24[%] の誤差が生じていた。誤差が生じた理由として、蒸発熱モデルを用いた場合の水の濃度と計測による水の濃度は近い値となっているが、蒸発熱モデルを用いた場合は全体の温度が低くなっているため鼻腔内の相対湿度が増加したと考えられる。

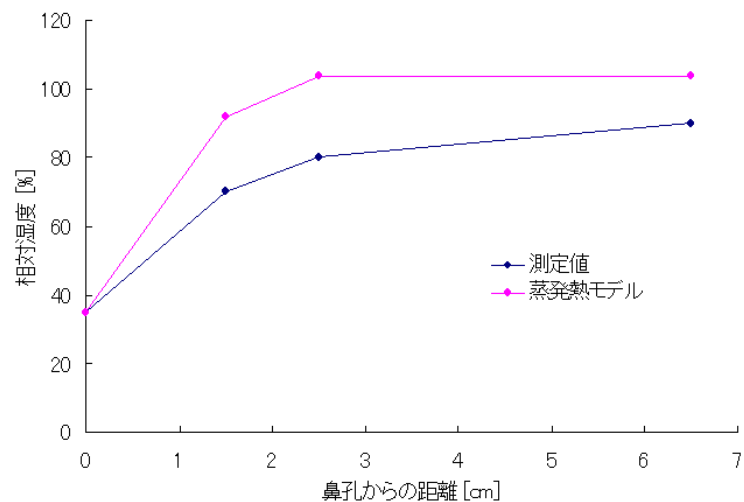


図 4.18: 鼻腔内の相対湿度の比較

## 4.5 考察

今回行ったシミュレーションについて、鼻腔壁面に対して蒸発熱モデルを適用して解析を行った。まず、流入空気の温度が  $293.15[\text{K}]$  として、蒸発熱モデルを用いた場合の計算を行い、従来の熱伝導モデルと湿度モデルを用いた場合の計算結果と比較した。その結果、蒸発熱モデルを用いた場合、従来モデルを用いた場合ともに流入空気が鼻腔前方の領域で急激に加温されていた。しかし、蒸発熱モデルを用いた場合は総鼻道や下鼻道における温度が従来モデルよりも低くなっており、上咽頭の部分にも温度の低い空気が流入していた。また、湿度の計算結果から蒸発熱モデルを用いた場合は従来モデルを用いた場合に比べて最大湿度の大きさが非常に大きくなることがわかった。従来モデルと蒸発熱モデルでは用いられている湿度モデルが同じものなので鼻腔内における空気の水分濃度はほぼ同じであるが、蒸発熱を考慮したことによる温度下によって極端に温度が低い部分と壁面近傍の水分濃度が高い部分が重なったために最大で  $160[\%]$  となるような湿度になったと考えられる。

最後に Keck らが行った鼻腔内の温度と湿度の測定結果との比較を行った。その結果、温度の計算結果の比較では測定値と今回行った計算結果との間に差が生じており、測定値と平均温度との差は最大で  $5[\text{K}]$  となった。また、各測定点における温度と湿度の関係を調べたところ、蒸発熱モデルを用いた場合と測定値の湿度の差は最大で  $24[\%]$  と非常に大きな差が生じてしまった。しかし、Keck らの測定した温度と湿度の関係から求められた鼻腔内における空気の水分濃度を比較したところ、測定値と計算によって得られた水分濃度の値が近かったことから、今後この蒸発熱モデルを用いる場合には蒸発熱モデルや熱伝導モデルの膜の厚さといったパラメータを変更して計算すれば実測値に近づいていくものと思われる。



## 第5章 結言

本研究では、先行研究で用いられた熱伝導モデル、湿度モデルに加えて蒸発熱モデルを考慮することで、より鼻腔の生理現象に近づけた条件で解析を行った。まず、簡易モデルでの熱流体解析を行った。蒸発熱を考慮したモデルを用いた場合の解析結果と先行研究で熱伝導モデルと湿度モデルを適用した場合の解析結果を比較した。その結果、蒸発熱モデルを適用した場合、円管内の温度の低下と相対湿度の増加が見られた。

次に3次元鼻腔形状を用いた定常流の熱流体解析を行った。こちらも簡易モデルの実験同様、従来モデルを適用した場合の解析結果と蒸発熱モデルを適用した場合の解析結果との比較を行った。その結果、蒸発熱モデルを適用した場合、鼻腔内の温度が低下することがわかった。また、鼻腔内における空気の水分濃度は従来モデル、蒸発熱モデルともにほとんど同じであったが、蒸発熱モデルを用いた場合は鼻腔内の温度が低くなるために相対湿度が高くなることがわかった。最終に Keck らの測定値との比較を行ったが、今回提案した蒸発熱モデルの解析結果と測定値の間には大きな誤差が見られた。そのため、今後この蒸発熱モデルを考慮して解析を行う場合、計算条件や解析条件、あるいは関係するパラメータ等について検討する必要があると確認した。

今後の課題として、上記の条件の検討も行う必要があるが、Keck らの測定データだけでは少ないため、更に文献に関して調査を行う。そして、様々なケースにて解析を行い、蒸発熱モデルの適用について検討を行う。また、今回は定常流の熱流体解析を行ったが、実際の鼻腔では呼吸時に流速が変化するため、非定常流の熱流体解析も行う必要がある。更にリアリスティックな解析を行い、鼻腔の温度調節機能、湿度調節機能の働きを示すために、計算条件や境界条件に関しても検討を行う。

## 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] Paul Webb, *Air Temperatures in Respiratory Tracts of Resting Subjects in Cold*, 1951.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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回数値流体シンポジウム, (2007), pp. 149.
- [6] W.E.Ranz and W.R.Marshall,Jr. “ Evaporation from Drops, Part I. ”, *Chem. Eng. Prog.*, 48(3):141-146, March, 1952.
- [7] W.E.Ranz and W.R.Marshall,Jr. “ Evaporation from Drops, Part II. ”, *Chem. Eng. Prog.*, 48(4):173-180, April, 1952.
- [8] 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.
- [9] KGT 社製 INTAGE3.1 Manual.
- [10] マテリアライズ日本支社, *MagicsRP Reference Manual*
- [11] 森満保, “ イラスト耳鼻咽喉科 ”, 文光堂, 1987.
- [12] ANSYS 社 “ *FLUENT Reference Manual* ”,
- [13] ANSYS 社 “ *FLUENT UDF Manual* ”,

- [14] 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.
- [15] 野中聡, 畑山尚生 , “ 鼻呼吸のサイクル ”, JOHNS, Vol.12, No.5, pp640-643, 1996.
- [16] 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.

# 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，ここに御礼を申し上げます．

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致します．

また，多方面に渡り御指導を賜りました松澤研究室の熊畑清様，森太志様を始め，松澤研究室の皆様深く感謝致します

# 発表論文

北川和佳，熊畑清，森太志，石川滋，松澤照男：“鼻腔内における熱と湿度を伴った数値流体シミュレーション”，日本機械学会 2009 年度年次大会，2009