

Title	潜熱の影響を考慮した鼻腔壁面モデルを用いた鼻腔内流れに関する研究
Author(s)	埴田, 翔
Citation	
Issue Date	2014-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/12105">http://hdl.handle.net/10119/12105</a>
Rights	
Description	Supervisor:松澤 照男, 情報科学研究科, 博士

博士論文

潜熱の影響を考慮した鼻腔壁面モデルを用いた  
鼻腔内流れに関する研究

指導教員 松澤 照男 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

埴田 翔

2014年3月

## 要旨

鼻腔は、鼻孔から咽頭にかけての空間である。鼻腔内部は、甲介がはり出すことにより上鼻道、中鼻道、下鼻道に分割されており、複雑な構造をしている。鼻腔には、空気中の埃を取り除いたり、匂いを感知したり、音を反響させたり、吸気の温度や湿度を調節する機能がある。これらの機能は、様々な環境下における呼吸において肺や気管を保護する上で重要である。

数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics (CFD)) を用いて、鼻腔内の流れを数値シミュレーションすることで、鼻腔機能を解明するための検討が行われている。数値シミュレーションにおいては、実際の現象を精度よくシミュレーションするためのモデル化が重要である。

本研究では、鼻腔内の流れ、温度、湿度および潜熱の影響を明らかにするために、鼻腔壁面における温度と水蒸気交換モデルを提案し構築した。提案した鼻腔壁面モデルは、鼻腔粘膜の厚さをモデル化すると共に、検熱だけでなく水の移送に起因する蒸発潜熱や凝縮潜熱による熱の交換も考慮している。これらを考慮することによって、提案した鼻腔壁面モデルは、生体内の物理現象を、これまで以上に精密にシミュレーションすることが可能である。提案した鼻腔壁面モデルを用いて、鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布のシミュレーションを行った。シミュレーション結果は、実験により測定された温度および相対湿度の結果と良好に一致を示した。したがって、提案した鼻腔壁面モデルは、鼻腔内の流れ、温度、湿度の適切にシミュレーションを行う事ができる。

種々の環境下における鼻腔の温度および湿度調節機能を検討するために、暑く湿った空気、暑く乾燥した空気、冷たく湿った空気、冷たく乾燥した空気を吸った場合の、鼻腔内の流れのシミュレーションをおこなった。いずれの場合においても、吸気された空気は、咽頭に到達するまでに体温付近まで調節された。また、低湿度の吸気の場合においても、吸気は、相対湿度で100%近くまで、加湿された。全ての吸気ケースにおいても、温度および湿度が最適な状態に調節されることを明らかにした。また、鼻孔からの吸気の温度および湿度は、鼻腔前方部で、急激に調整され、鼻弁周辺で、最も熱および水蒸気の交換が行われていることを明らかにした。

さらに、種々の空気を吸気した場合における潜熱の影響の検討をおこなった。暑

く湿った空気を吸気した場合では、凝縮潜熱が働き、暑い空気が体温まで冷却されるのを妨げることを明らかにした。暑く乾燥した空気を吸気した場合では、蒸発潜熱が働き、暑い空気が体温まで冷却されるのを促進されることを明らかにした。冷たく乾燥した空気および冷たく湿った空気を吸気したケースでは、蒸発潜熱が働き、冷たい空気が体温まで加温されるのを妨げることを明らかにした。また、潜熱は、鼻腔粘膜からの水の移動に依存して変化するため、乾燥した空気を吸気した場合などの水の移動量が多い場合に潜熱の影響が大きくなることを明らかにした。

呼吸は、呼気と吸気からなる非定常な現象であるため、鼻腔内の流れの非定常性についても検討をおこなった。鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布には、ほとんど非定常的な現象は、観察されなかった。したがって、鼻腔内流れは、定常シミュレーションにより、十分に検討可能であると考えられる。

性別、年齢、体格などが異なる個体における鼻腔内流れの個体差について検討をおこなった。今回検討した個体では、鼻腔の体積が50%程度異なる個体が存在したが、鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布に顕著な個体差は見出されなかった。健常者の鼻腔においては、体格、年齢および性別による機能の差異を見出す事は困難であった。したがって、健常者の鼻腔においては、性別、年齢、体格などに鼻腔の機能は、ほとんど左右されないと考えられる。

副鼻腔の生理学的機能を数値流体力学の観点から検討した。副鼻腔については、副鼻腔の中で最も体積が大きい上顎洞を対象に検討をおこなった。数値流体力学シミュレーションを用いて、鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布について検討をおこなった。上顎洞を含む結果と上顎洞を含まない結果では、鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布には大きな変化は、確認されなかった。数値シミュレーションの観点からの検討においては、上顎洞は、鼻腔内の流れや温度・湿度分布には影響を及ぼさないことが示唆された。

キーワード： 鼻腔内流れ、鼻腔壁面モデル、潜熱、温度、湿度、数値流体力学

## Abstract

Among the several functions of the nasal cavity, temperature and humidity adjustments are important for preserving the trachea and lungs. The functions of the nasal cavity have been clarified in experiments investigating the condition in the nasal cavity. However, the difficulties of noninvasive measurements have rendered nasal cavity simulations an attractive alternative. Data are readily obtained from a simulated result.

In this study, airflow, temperature, and humidity transfer in the human nasal cavity were investigated in nasal cavity wall model of temperature and humidity transport. The nasal cavity wall model was examined by simple geometry such as straight pipe. The simulated result was verified by comparison with experimental data. A reasonable agreement was attained between experimental data and a model incorporating the latent heat effect. The model simulates heat and water exchange in the nasal cavity.

The four inhalation cases (hot-dry, hot-humid, cold-dry, and cold-humid) were simulated. In all cases, temperature and humidity of inhaled air were adjusted to suitable physiological values. Temperature and humidity gradients were highest at the front of the nasal cavity. The influence of latent heat was clarified by comparing simulation results with and without latent heat under several inhaled air conditions. In the hot-humid inhaled air case, temperature in the Kiesselbach area was increased by latent heat of condensation, and relative humidity declined. In the other inhaled air cases, the temperature in the Kiesselbach area was decreased by latent heat of evaporation, while relative humidity increased. Latent heat effect was particularly influential in the dry inhaled air case.

The breath is an unsteady phenomenon that consists of inhalation and exhalation. The nasal cavity simulation under unsteady conditions was examined. A little unsteady characteristic of nasal cavity flow was observed. However, the nasal cavity simulation under steady conditions is possible to examine flow, temperature and humidity in the nasal cavity.

Moreover, the several nasal cavities were simulated to examine individual char-

acteristic of nasal cavity. The difference flow, temperature, humidity distribution was not observed between several nasal cavity.

The physiological function of paranasal sinus was examined by computational fluid dynamics (CFD). In this examination, the maxillary sinus that have the largest volume in the paranasal sinus was focused. The flow, temperature and humidity was examined by CFD. The difference of flow, temperature and humidity in the nasal cavity was not observed. It is assumed that the maxillary sinus has not supporting function for heat and humidity adjustment.

Keywords : Nasal Cavity Simulation, Nasal Cavity Wall Model, Latent Heat, Temperature, Humidity , CFD

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	鼻腔内シミュレーションとその背景	1
1.2	研究の目的	3
1.3	論文の構成	3
<b>2</b>	<b>解析手法</b>	<b>5</b>
2.1	鼻腔内流れのモデル	5
2.2	鼻腔形状の再構築	6
2.2.1	医療画像について	6
2.2.2	形状の再構築について	11
<b>3</b>	<b>鼻腔壁面モデルについて</b>	<b>15</b>
3.1	鼻腔壁面のモデル化	15
3.2	温度交換のための鼻腔壁面モデル	18
3.3	水蒸気交換のための鼻腔壁面モデル	20
<b>4</b>	<b>鼻腔壁面モデルの検証</b>	<b>22</b>
4.1	直円管を用いた検討	22
4.1.1	計算条件	22
4.1.2	計算結果	25
4.1.3	まとめ	27
4.2	鼻腔形状を用いて検討	27
4.2.1	計算条件	27
4.2.2	Keck らの実験結果との比較検討	30
4.2.3	Lindemann らの実験結果との比較検討	33
4.2.4	まとめ	35

<b>5</b>	<b>鼻腔内流れのシミュレーション</b>	<b>36</b>
5.1	定常解析による鼻腔内シミュレーション	36
5.1.1	計算条件	37
5.1.2	種々の空気を吸気した場合の計算結果	37
5.1.3	まとめ	49
5.2	非定常解析による鼻腔内シミュレーション	50
5.2.1	計算条件	50
5.2.2	計算結果の検討	52
5.2.3	まとめ	61
5.3	個体による流れの違い	64
5.3.1	鼻腔形状について	64
5.3.2	計算条件	66
5.3.3	計算結果	66
5.3.4	まとめ	75
<b>6</b>	<b>上顎洞に関する検討</b>	<b>76</b>
6.1	数値流体力学からの知見	76
6.1.1	計算条件	77
6.1.2	結果	79
6.2	まとめ	87
<b>7</b>	<b>考察</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>結言</b>	<b>92</b>
8.1	まとめ	92
8.2	今後の展望	94
	<b>謝辞</b>	<b>96</b>
	<b>参考文献</b>	<b>97</b>
	<b>本研究に関する発表論文</b>	<b>101</b>
	本研究に関する発表論文	101

査読付き国際学会 . . . . .	101
国内学会 . . . . .	102
その他講演 . . . . .	103

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 鼻腔内シミュレーションとその背景

鼻腔は、鼻孔から咽頭にかけての空間である。内部は、甲介の張り出しによって、上鼻道、中鼻道、下鼻道に分割され、複雑な構造をしている。

鼻腔には、肺や気管を保護するために、吸気中の埃などを取り除く機能、吸気の温度および湿度を最適な状態に調整する機能、音を反響させる機能などがある。鼻腔内壁は、鼻前庭部分を除き粘膜で覆われている。鼻前庭部分は、粘膜は存在せず表皮機によって覆われている [1][2]。温度や水蒸気は、鼻腔粘膜や表皮を介して鼻腔内の吸気へと輸送される。

鼻腔の近傍には、副鼻腔と呼ばれる空間がある。副鼻腔は、前頭洞、篩骨洞、上顎洞、蝶形洞の4つがある。副鼻腔の生理学的機能は、解明されておらず、様々な研究者によって議論されている [4][3]。

人間が幅広い環境下で生活をおこなえるのは、鼻腔の優れた温度および湿度の調整機能によるものである。したがって、鼻腔や副鼻腔の機能を解明する事は、生物学上で重要である。

鼻腔の機能を解明するために、様々な実験による検討が行われている [5][7][8][9]。Doorly et al. や Spence et al. は、Computed Tomography (CT) 画像からシリコンを用いて鼻腔形状を再構築し、Particle Image Velocimetry (PIV) を用いて鼻腔内の流れの検討をおこなっている [5][7]。また、Kect et al. は、複数の被験者の鼻腔にセンサーを挿入することで、鼻腔内の温度や相対湿度の測定をおこなっている

[8]. 鼻腔内のセンサーを挿入することで、鼻腔粘膜表面の温度について検討をおこなっている [9]. 実験では、実際のデータを得る事ができるという利点がある。しかし、鼻腔構造が複雑であるため、センサーの大きさによっては測定できない領域などの制約を受ける。また、一般的に実験環境の構築には、多額のコストが掛かるというデメリットがある。

他方、Computational Fluid Dynamics (CFD) 解析を用いて、鼻腔の機能を解明するための検討がおこなわれている [10][6][12][28]. CFD を用いた解析では、計算結果より鼻腔内部の情報に容易にアクセスすることができる。しかし、正確なデータを得るためには、鼻腔内の現象の的確にシミュレーションできるモデルの構築が重要である。Naftali et al. は温度および湿度を含めた鼻腔内解析をおこなった [13][14]. また、Zachow et al. は、呼吸サイクルにおける鼻腔内での温度および湿度を含めた流れの解析を行うことで、鼻腔内の温度および湿度の輸送状況について検討をおこなった [15]. しかし、それらの検討においては、鼻腔粘膜の構造を考慮していない。鼻腔内では、鼻腔粘膜を介して温度および水蒸気が交換されるため、鼻腔粘膜の厚さを含めたモデル化が必要である。Kumahata et al. は、鼻腔壁面の構造を考え、粘膜の厚さを含めたモデルを提案し、鼻腔内の温度および湿度について検討を行った [16]. しかし、Kumahata らの検討では、潜熱を考慮しておらず、また、鼻前庭の部分でも水蒸気の交換を行っている。実際の鼻腔内では、鼻前庭は表皮で覆われているため、温度のみが交換されている。また、より生体現象に近い精密なシミュレーションを行うため、水の移動に起因する蒸発潜熱や凝縮潜熱を考慮する必要がある。

呼吸は、呼気と吸気からなる非定常の現象である。呼吸には、安静時や匂いを嗅ぐ際などに行う呼吸など、様々な種類がある。Ishikawa et al. は、鼻腔内の流れを、安静時の呼吸と匂いを嗅ぐ際に行う呼吸である Sniffing の流量波形を用いて、非定常解析を行い、それぞれの呼吸の違いにおける鼻腔内の流れについて検討を行い、それぞれの呼吸の特徴を明らかにした [11]. その他にも、鼻腔内非定常流れについて検討が行われているが、鼻腔内の非定常性を明らかにするためには、さらなる検討をおこなう必要がある。また、副鼻腔の生理学的機能を解明するために、数値シミュレーションを用いた検討が行われている [27][29][30][26]. しかし、副鼻腔の生理学的な機能を明らかにするためには、鼻腔の実形状を用いた一層の解析

および検討が必要である。

## 1.2 研究の目的

鼻腔の機能を CFD を用いて解明するには、鼻腔内の現象を正確にシミュレーションするための現象のモデル化が重要である。鼻腔内の温度および水蒸気の交換は、鼻腔粘膜を介しておこなわれる。本研究では、より精密に鼻腔内の流れをシミュレーションするために、鼻腔粘膜の厚さを考慮し、さらに鼻腔壁面からの検熱のみではなく水の移動によって発生する蒸発潜熱および凝縮潜熱を含めて解析を行うための鼻腔壁面モデルの提案をおこなう。提案した鼻腔壁面モデルを用いて、鼻腔内の流れ、温度、湿度および潜熱の影響について、種々の流入条件のもと検討をおこない、鼻腔の温度および湿度の調節機能および鼻腔内での潜熱の影響について明らかにする。呼吸は、吸気と呼気からなる非定常な現象である。したがって、鼻腔内の流れの非定常シミュレーションを行い、鼻腔内流れの非定常性を明らかにする。また、人間の鼻腔は、年齢、性別、体格により、ある程度の個体差を有していると推測される。そこで、年齢、性別、体格が異なる複数の鼻腔形状を構築し、人間の鼻腔の個体差について議論をおこなう。さらに、上顎洞の生理学的な存在意義についても、数値流体力学シミュレーションの観点から生理学的な機能を議論する。

## 1.3 論文の構成

1章では、研究背景について説明し、本研究の目的を述べる。2章では、鼻腔の形状の構築、解析手法について述べる。3章では、鼻腔粘膜の機能を考慮した熱および水蒸気の交換のための鼻腔壁面モデルについて述べる。4章では、直円管および再構築した鼻腔形状を用いて、3章にて構築をおこなった鼻腔壁面モデルの検討をおこなう。5章では、2章において再構築した鼻腔形状を用いて解析をおこない、様々な環境下における鼻腔内の流れ、温度、湿度について議論をおこなう。さらに、鼻腔内の温度や湿度に対して潜熱が及ぼす影響についても検討をおこなう。次に、鼻腔内の流れの非定常性について議論をおこなう。また、鼻

腔内のシミュレーションにおける非定常性について議論すると共に、年齢、性別、体格などが異なる様々な個体の鼻腔内の流れシミュレーションを行い、鼻腔の個体差について議論をおこなう。6章では、数値流体力学を用いて解析をおこなった結果から得られた知見に基づき、上顎洞の生理的存在意義について議論する。7章では、鼻腔内のシミュレーションにより得られた結果および知見について考察をおこなう。最後に、8章で、これまでに得られた知見をまとめ、今後の発展について述べる。

## 第 2 章

# 解析手法

本章では，鼻腔内流れのモデルおよび医療画像からの形状構築について述べる．鼻腔内の流れのモデルについては，鼻腔内の流れのシミュレーションにおける支配方程式および数値計算に用いたソルバについて説明おこなう．また，本研究で用いた医療画像について，説明すると共に，医療画像から鼻腔形状を再構築する手法についても説明をおこなう．

### 2.1 鼻腔内流れのモデル

鼻腔内の解析は，非圧縮粘性流れとしてシミュレーションをおこなった．また，鼻腔内での鼻腔壁面を介した温度および湿度の輸送についても考慮した．温度および水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルについては，次章で述べる．吸気における最大レイノルズ数は，臨界レイノルズ数より小さいため，乱流モデルは用いず，層流として解析をおこなった．

本シミュレーションにおける支配方程式は，*Navier – Stokes* 方程式 (2.1)，連続の式 (2.2)，エネルギー輸送の方程式 (2.3)，水の質量分率輸送の方程式 (2.4) である．ここで， $t, \mathbf{u}, p, \rho, \mu, K, T, C_p, F$  および  $D$  は，時間，速度，圧力，密度，粘性係数，熱伝導係数，温度，比熱，水の質量分率，および質量拡散係数である．それぞれの方程式は，汎用流体解析ソフトである FLUENT6.3.26(ANSYS,Inc.) によって解かれた [17]．また，シミュレーションにおいて，鼻腔内における温度および水蒸気の交換を行うには，温度交換のための境界条件および水蒸気交換のための境

界条件をそれぞれ記述する必要がある。温度および水蒸気交換のための境界条件については、3章にて説明をおこなう。

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot = 0 \quad (2.2)$$

$$\rho C_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right\} = K \nabla^2 T \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) F = D \nabla^2 F \quad (2.4)$$

## 2.2 鼻腔形状の再構築

鼻腔内の流れのシミュレーションをおこなうには、鼻腔形状の再構築をおこなう必要がある。本研究では、CTおよびMRIによって撮影された医療画像をもとに鼻腔形状の再構築をおこなった。本項では、形状の再構築に用いた医療画像について説明すると共に、鼻腔形状の再構築手順を示す。

### 2.2.1 医療画像について

CTおよびMRIで撮影された医療画像は、Digital Imaging and COmmunications in Medicine (DICOM) フォーマットによって記録される。表 2.1 に、本研究で用いた医療画像の情報を示す。本研究において使用した医療画像は、CTより撮影された個体が1個体、MRIにより撮影された個体が3個体であり、合計で4個体についての鼻腔形状の再構築をおこなった。ここでは、CT Vol 1およびMRI Vol 1についてのみ説明をおこなう。主な鼻腔内の流れの検討には、MRIに比べ解像度が高いCT Vol 1を用いて議論を進めた。CT Vol 1は、CT画像は、50歳の日本人男性のもので、524枚のスライス画像より構成される。画像のピクセルサイズは、 $512 \times 512$  pixelsであり、画像の解像度は $0.234\text{mm}/\text{pixel}$ 、画像のスライス間隔は、

0.3mm/slice である。MRI Vol 1 は、MRI 画像は、26 歳の日本人男性のもので、224 枚のスライス画像より構成される。画像のピクセルサイズは、 $512 \times 512$  pixels であり、画像の解像度は  $0.375\text{mm}/\text{pixel}$ 、画像のスライス間隔は、 $0.75\text{mm}/\text{slice}$  である。MRI Vol 2 は、MRI 画像は、28 歳の日本人男性のもので、224 枚のスライス画像より構成される。画像のピクセルサイズは、 $512 \times 512$  pixels であり、画像の解像度は  $0.375\text{mm}/\text{pixel}$ 、画像のスライス間隔は、 $0.75\text{mm}/\text{slice}$  である。MRI Vol 3 は、MRI 画像は、29 歳の日本人女性のもので、224 枚のスライス画像より構成される。画像のピクセルサイズは、 $512 \times 512$  pixels であり、画像の解像度は  $0.375\text{mm}/\text{pixel}$ 、画像のスライス間隔は、 $0.75\text{mm}/\text{slice}$  である。

図 2.1 に、人間の頭部 CT 画像を示す。図 2.1(a) から (f) までは、Coronal 断面での頭部 CT であり、鼻孔から咽頭までの断面を示している。また、図 2.1(g) は、Sagittal 断面の CT 画像であり、赤線により Coronal 断面の可視化位置を示した。X 線 CT は、MRI に比べて撮像に時間はかからないが、歯の治療の際に金属を用いていると、X 線の乱反射によって、図 2.1(d) のように撮像画像が乱れるアーチファクトが発生する。また、2.2 に、人間の頭部 MRI を示す。図 2.2(a) から (f) までは、Coronal 断面での頭部 CT であり、鼻孔から咽頭までの断面を示している。また、図 2.2(g) は、Sagittal 断面の MRI 画像であり、赤線により Coronal 断面の可視化位置を示した。MRI は、歯の治療の際の金属 (非磁性体) でアーチファクトを起こす事はないが、CT より撮像時間が多くかかり、その間に撮像する対象が動くとき撮像画像が不鮮明になるという欠点がある。鼻腔内部は、空気で満たされているため、CT および MRI とも黒のコントラストで示される。CT および MRI の画像から、甲介の張り出しにより、上鼻道、中鼻道、下鼻道が形成されていることが確認できる。また、左右の鼻孔から、鼻道は鼻中隔により分かれているが、咽頭付近で左右の鼻道が合流している。さらに、鼻腔の近傍には、大小の空洞があることが確認できる。それらの空洞は、副鼻腔と呼ばれる。副鼻腔には、前頭洞、篩骨洞、上顎洞、蝶形洞の 4 つがあり、それぞれの洞は、交通路によって鼻腔と繋がっている。

表 2.1: Medical Image Information

Name	Type	Sex	Age	Number of Image	Pixel Size	Resolution	Slice Pitch
CT Vol 1	CT	Male	50	524	$512 \times 512$	0.234 mm/pixel	0.3 mm/slice
MRI Vol 1	MRI	Male	26	224	$512 \times 512$	0.375 mm/pixel	0.75 mm/slice
MRI Vol 2	MRI	Male	28	224	$512 \times 512$	0.375 mm/pixel	0.75 mm/slice
MRI Vol 3	MRI	Female	29	224	$512 \times 512$	0.375 mm/pixel	0.75 mm/slice

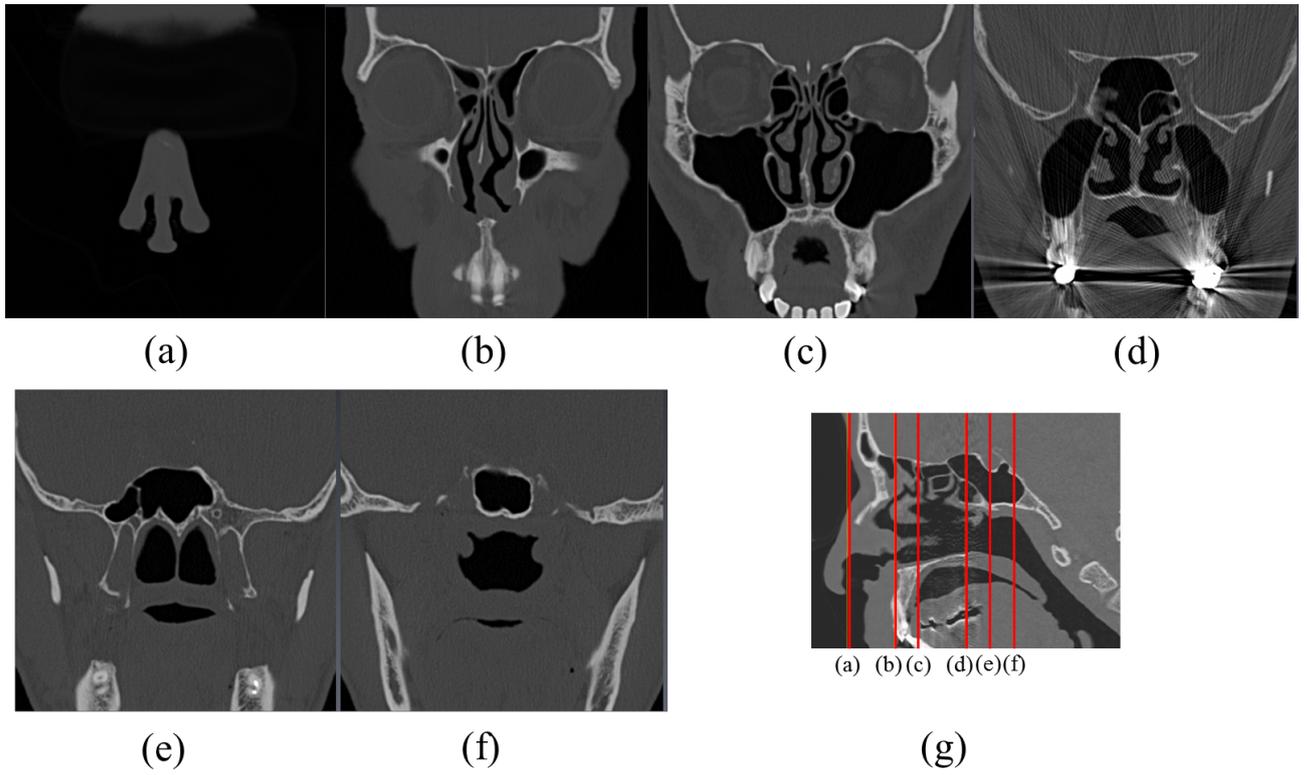


图 2.1: CT Image of Human Head

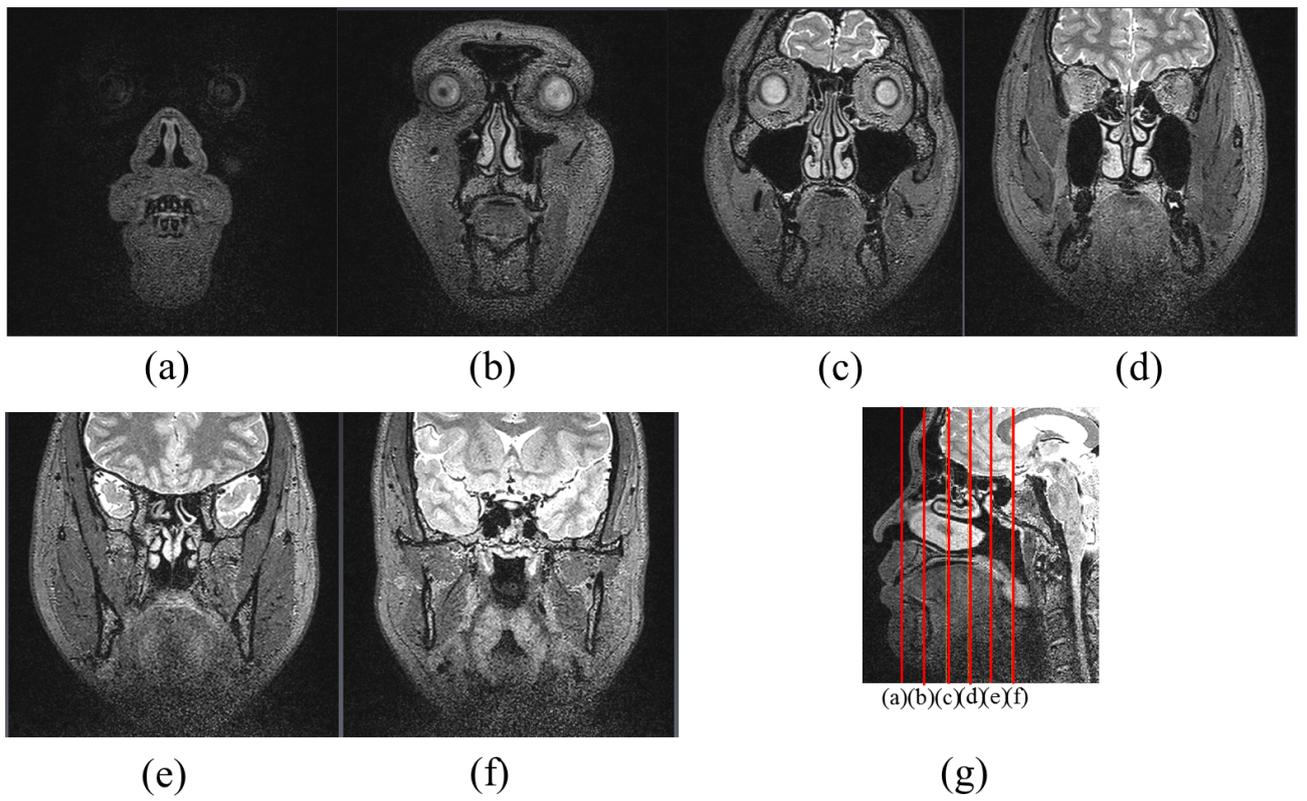


图 2.2: MRI Image of Human head

## 2.2.2 形状の再構築について

前項で紹介した医療画像をもとに、鼻腔形状の再構築およびメッシュ生成までの手順を説明する。図 2.3 に、鼻腔形状の再構築手順を示す。FEI Avizo[19] を用いて、医療画像から鼻腔領域を、医療画像の輝度値をもとに抽出を行い、ボクセルデータを作成する。ボクセルデータを表面データである STL データに変換する。STL データの表面メッシュは Triangle により構成されている。ここで、生成された表面メッシュは、ノイズなどの影響で、メッシュの重複や穴、アスペクト比が悪い歪な Triangle なメッシュが存在しているため、このままでは、内部メッシュが生成できない。内部メッシュが生成できるようにするために、Materialize Magics[20] を用いて、表面メッシュの削除や修正などの編集やスムージング処理などの最適化をおこない、STL データの最適化をおこなう。最後に、ANSYS Gambit を用いて、最適化された STL データから内部メッシュを生成する。

### 形状の再構築およびメッシュの生成

1. 医療画像から医療画像の輝度値を用いて、鼻腔領域を抽出し、ボクセルデータを作成する。ボクセルデータの作成には、FEI Avizo を用いた
2. 医療画像から抽出した鼻腔のボクセルデータを STL データ (表面メッシュ) に変換する。FEI Avizo を用いて、STL データに変換した
3. 表面メッシュは、Triangle メッシュで構成されているが、ボクセルデータから変換した表面メッシュは、アスペクト比が悪い歪な Triangle メッシュが存在するため、スムージングやメッシュの生成・削除を行う事で、表面メッシュの最適化を行う。表面メッシュの最適化には、Materialize Magics を用いた。
4. 最適化された表面メッシュをもとに、鼻腔内のメッシュの生成をおこなう。メッシュの生成には、ANSYS Gambit を用いた

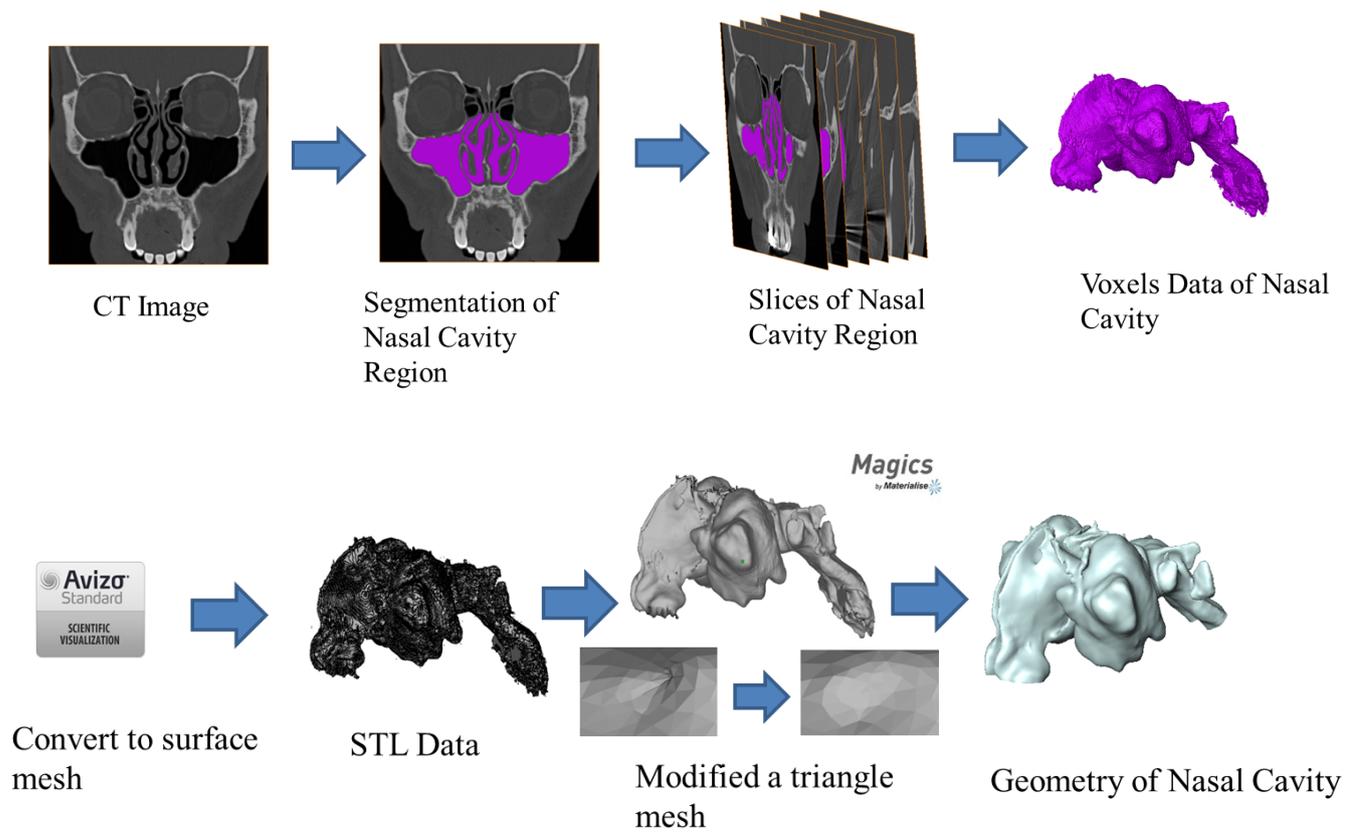


图 2.3: Process of Nasal Cavity Reconstruction

CT画像から再構築された鼻腔形状を、図2.4に示す。図2.4(a)は、上面から見た時の鼻腔形状、図2.4(b)は、上面から見た時の鼻腔形状、図2.4(c)は、側面から見た時の鼻腔形状である。鼻道は、鼻孔から咽頭付近までは、鼻中隔により左右に分断されている。また、甲介が張り出すことにより、上鼻道、中鼻道、下鼻道が形成されており、複雑な形状をしている。左右の鼻腔は、概ね対象な形状をしていることがわかる。本形状は、副鼻腔の一部である上顎洞を含む形状であり、鼻腔の両サイドに左右の上顎洞を確認することができる。上顎洞は、上鼻道付近からの交通路により、鼻腔と繋がっている。

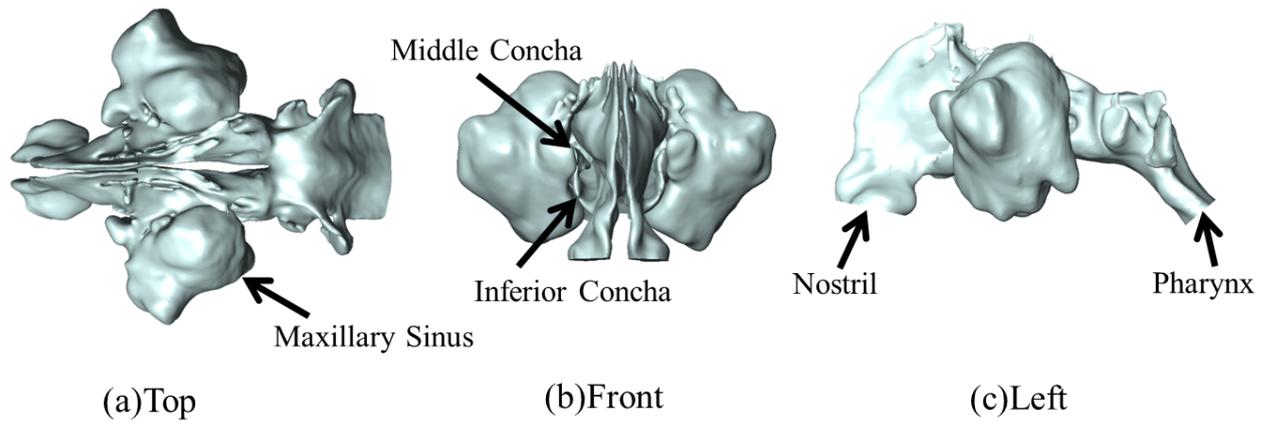


图 2.4: Reconstructed Geometry of the Nasal Cavity including the Maxillary Sinus

## 第 3 章

# 鼻腔壁面モデルについて

鼻腔の温度および湿度調節機能は、非常に優れており、鼻孔から吸気した空気は、咽頭に達するまでに、温度は、体温 (34 °C) 近くまで、湿度は、相対湿度で 100 % 近くまで調整される。鼻腔内における温度および水蒸気の交換は、鼻腔壁面を介して行われる。したがって、鼻腔内の温度および湿度を精密にシミュレーションするためには、鼻腔壁面における温度および水蒸気交換モデルが重要となる。鼻腔壁面は、鼻腔粘膜で覆われており、鼻腔粘膜の厚さは部位によって異なる。提案した温度および水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルは、より精密にシミュレーションを行うために、鼻腔粘膜を模した壁面の暑さを考慮するとともに、検熱だけでなく潜熱についても考慮している。これにより、鼻腔壁面からの検熱だけでなく、鼻腔壁面からの水蒸気の移動に伴う蒸発潜熱および凝縮潜熱を考慮したシミュレーションが可能となり、実際の生体现象に近い鼻腔内のシミュレーションができる。本章では、鼻腔粘膜の構造を述べるとともに、提案した温度および水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルについて説明する。

### 3.1 鼻腔壁面のモデル化

鼻腔内の壁面は、鼻前庭部分を除き、鼻腔粘膜で覆われている。鼻前庭部分は、皮膚によって覆われており、鼻毛が生えている。

図 3.1 に、鼻腔の粘膜の構造および鼻腔粘膜のモデルを示す。鼻腔粘膜は、粘膜上皮 (Membrane Epithelia)、鼻線 (Nasal Glands)、血管 (Blood Vessel)、毛細血管

(Capillary Blood Vessel) などで構成されている。鼻腔内の粘膜の厚さは、鼻海綿叢や鼻線の発達状況で異なり、おおよそ  $0.3\sim 5\text{ mm}$  程度であり、表面は滑らかではない [1]。熱および水蒸気は、血管などの組織から供給され、鼻腔粘膜を介して鼻腔内の空気へと伝達される。

図 3.1(b) に示すように、鼻腔壁面のモデル化をおこなった。鼻腔壁面モデルは、Organ-side Layer および Membrane Layer の 2 層より構成される。Organ-side Layer は、血管などの組織を仮定しており、熱および水蒸気の供給源となる。Membrane Layer は、Organ-side Layer より供給される熱および水蒸気を、鼻腔内の空気へと伝達する。

先に述べたように、鼻腔粘膜の厚さは、鼻腔内の部位により異なっているが、医療画像から、鼻腔粘膜の領域を正確に抽出することは、画像の解像度や輝度値の関係で困難である。したがって、本研究においては、鼻腔壁面は滑らかで、粘膜の厚さは一定であると仮定し、温度および水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルを構築した。

提案した鼻腔壁面モデルは、潜熱による熱の移動を考慮した事によって、より物理的に精密なモデルとなっている。また、鼻腔粘膜の厚さを考慮したことで、鼻腔内壁における表面の温度も再現することが可能であり、鼻腔壁面の温度についても検討することができる。

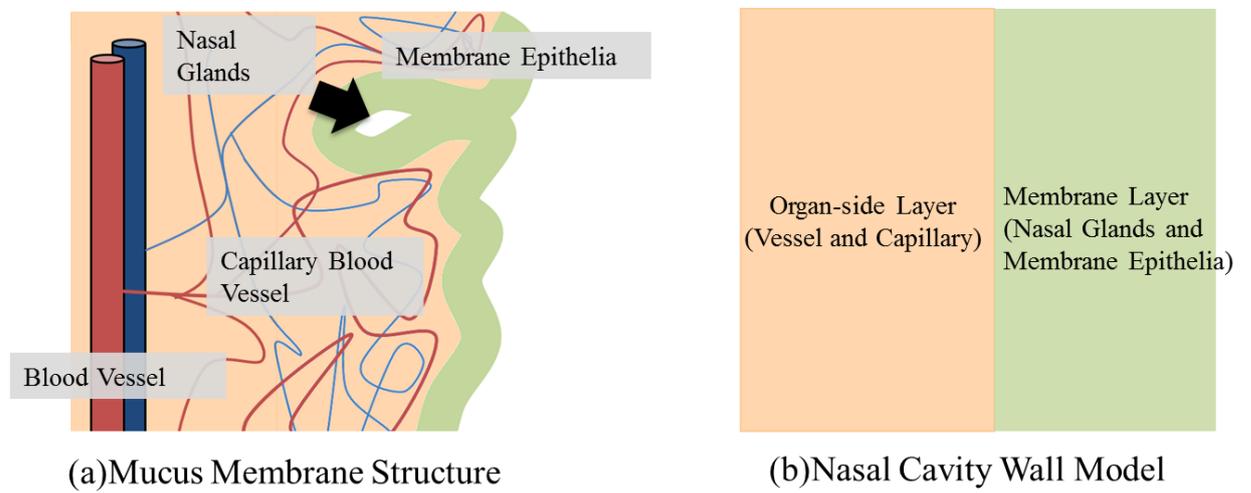


图 3.1: Left panel: Mucus Membrane Structure; Right panel: Nasal Cavity Wall Model:

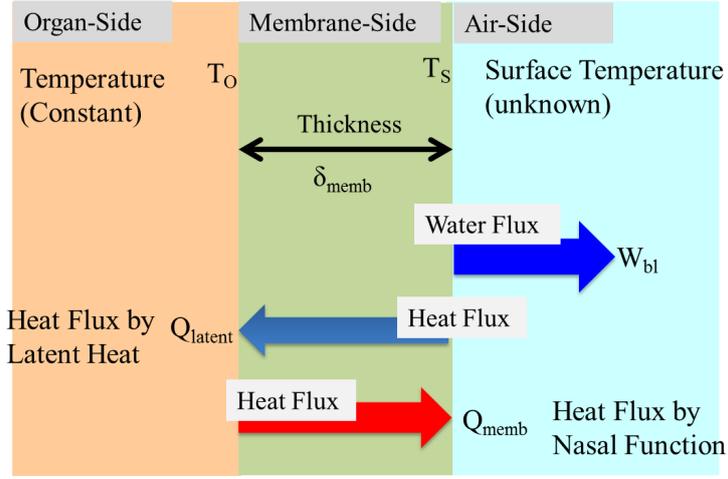
## 3.2 温度交換のための鼻腔壁面モデル

温度交換のための鼻腔壁面モデルは、Kumahata et al の手法を参考に粘膜の厚さを考慮した実装をおこなった [16]。提案する鼻腔壁面モデルでは、検熱による熱の交換だけでなく、鼻腔壁面からの水の蒸発や水蒸気の凝縮に伴う潜熱を含む温度交換を行う事ができる。

図 3.2 に、温度交換のための鼻腔壁面モデルを示す。熱は、組織 (Organ-Side) 側から鼻腔内の空気 (Air-Side) に、粘膜 (Membrane-Side) を介して伝達される。ここで、 $T_s$ ,  $T_o$ ,  $K_{memb}$ ,  $\delta_{memb}$  は、それぞれ粘膜表面の温度、組織側の温度、粘膜の熱伝導係数、粘膜の厚さである。本モデルにおいては、 $T_o$  は、血液からの熱の供給により体温 ( $34^\circ\text{C}$ ) で常に一定と仮定した。 $T_s$  は、解析的に計算される変数であり、鼻腔壁面からの熱量  $Q_{memb}$  と潜熱による熱量  $Q_{latent}$  の和である正味の熱量 ( $Q_{total}$ ) により決定される。

組織側からの熱の輸送  $Q_{memb}$  (図中の赤矢印) は、式 (3.1) によって導かれる。粘膜の表面温度  $T_s$  が、体温  $T_o$  より低い場合は、組織側から鼻腔内の空気中へと熱が輸送され、鼻腔内の空気は、加温される。反対に、粘膜の表面温度  $T_s$  が、体温  $T_o$  より高い場合は、鼻腔内の空気中から組織側へと熱が輸送され、鼻腔内の空気は冷却される。

潜熱による熱  $Q_{latent}$  の移動は、式 (3.2) によって計算される。ここで、 $L$  は、潜熱を示し、 $W_{bl}$  は、粘膜からの水の流束を示す。潜熱 ( $L$ ) は、粘膜表面の温度  $T_s$  によって変動するため、Rogers et al の式 (3.3) を用いて計算する [18]。水の流束が、粘膜の表面から鼻腔内の空気中へと向かうとき、 $Q_{latent}$  は負になり、蒸発潜熱として働き、冷却の作用をする。水の流束が、鼻腔内の空気中から粘膜へと向かうとき、 $Q_{latent}$  は正となり、凝縮潜熱として働き、加温の作用をする。正味の熱の輸送は、式 (3.4) によって定義される。これらの式は、境界条件として記述される。また、これらの実装は、Fluent の User Define Function(UDF) を用いて記述した。



☒ 3.2: Nasal Cavity Wall Model for Heat exchange

$$Q_{memb} = K_{memb} \frac{T_s - T_o}{\delta_{memb}} \quad (3.1)$$

$$Q_{latent} = -LW_{bt} \quad (3.2)$$

$$L = 2500.79 - 0.00000614342 \times T_s^3 + 0.00158927 \times T_s^2 - 2.36418 \times T_s \quad (3.3)$$

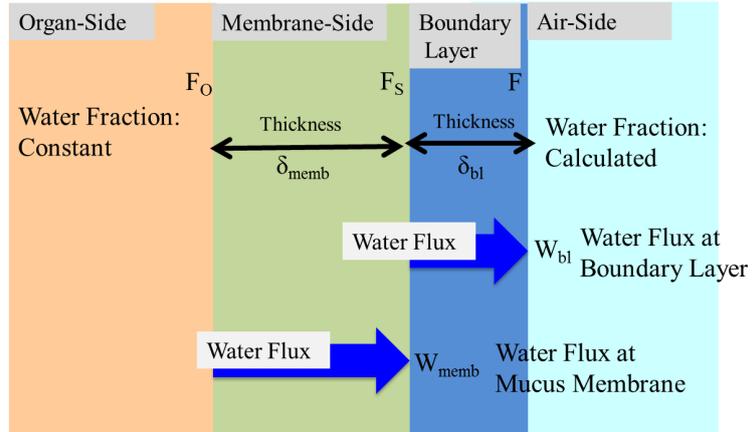
$$Q_{total} = Q_{memb} + Q_{latent} = K_{memb} \frac{T_s - T_o}{\delta_{memb}} - LW_{bt} \quad (3.4)$$

### 3.3 水蒸気交換のための鼻腔壁面モデル

水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルは、Kumahata et al. の手法を参考に実装をおこなった [16]. Fluent においては、質量輸送のための境界条件は、ディレクレ条件でしか定義することができない. そこで、two-film theory を用いる事で、粘膜表面における水の質量分率を定義をおこなう. two-film theory は、液体および気体間での相転移などを記述するのに用いられる原理である.

図 3.3 に、水蒸気交換のためのモデルを示す.  $W_{bl}$  (青の矢印) は、境界層からの水の流束であり、式 (3.5) によって定義される.  $W_{bl}$  は、前節での式 (3.2) 潜熱の計算に用いられる.  $W_{memb}$  は、組織側 (Organ-Side) からの水の流束であり、式 (3.6) によって定義される. ここで、 $F$  および  $F_s$ ,  $F_o$ ,  $\delta_{bl}$ ,  $\delta_{memb}$  は、それぞれ、境界層における水の質量分率、粘膜表面における水の質量分率、組織側における水の質量分率、境界層の厚さ、粘膜の厚さを示す. また、 $D_{bl}$  および  $D_{memb}$  は、境界層における水の拡散係数および粘膜における水の拡散係数である. 水の流束は、組織側から粘膜の層および境界層を通り、細胞側に輸送される.

先に述べたように、通常、Fluent では、ディレクレ条件でしか境界を指定できない. したがって、 $F_s$  を、解析的に求めることにより、鼻腔壁面における水蒸気の交換を実装する. まず、式 (3.5) および式 (3.6) を解く事によって、 $F_s$  を求める. ここで、two-film theory により  $W_{bl}$  は、 $W_{memb}$  に等しい. User Define Function (UDF) を用いて境界条件として  $F_s$  を指定するように、Fluent に実装することによって、鼻腔壁面を介した水蒸気の交換を可能とした [17]. 水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルは、鼻腔粘膜表面での水の質量分率 ( $F_s$ ) が鼻腔内の空気中の水の質量率 ( $F$ ) より小さければ、鼻腔内の空気中の水が凝縮し、鼻腔内の空気を除湿する. また、粘膜表面での水の質量分率 ( $F_s$ ) が鼻腔内の水の質量分率 ( $F$ ) より大きければ、鼻腔粘膜から水が蒸発し、鼻腔内の空気を加湿する.



☒ 3.3: Nasal Cavity Wall Model for Humidity exchange

$$W_{bl} = D_{bl} \frac{F - F_s}{\delta_{bl}} \quad (3.5)$$

$$W_{memb} = D_{memb} \frac{F_s - F_o}{\delta_{memb}} \quad (3.6)$$

$$F_s = \frac{\left(\frac{D_{memb}}{\delta_{memb}}\right)F_o - \left(\frac{D_{bl}}{\delta_{bl}}\right)F}{\left(\frac{D_{memb}}{\delta_{memb}}\right) + \left(\frac{D_{bl}}{\delta_{bl}}\right)} \quad (3.7)$$

## 第 4 章

# 鼻腔壁面モデルの検証

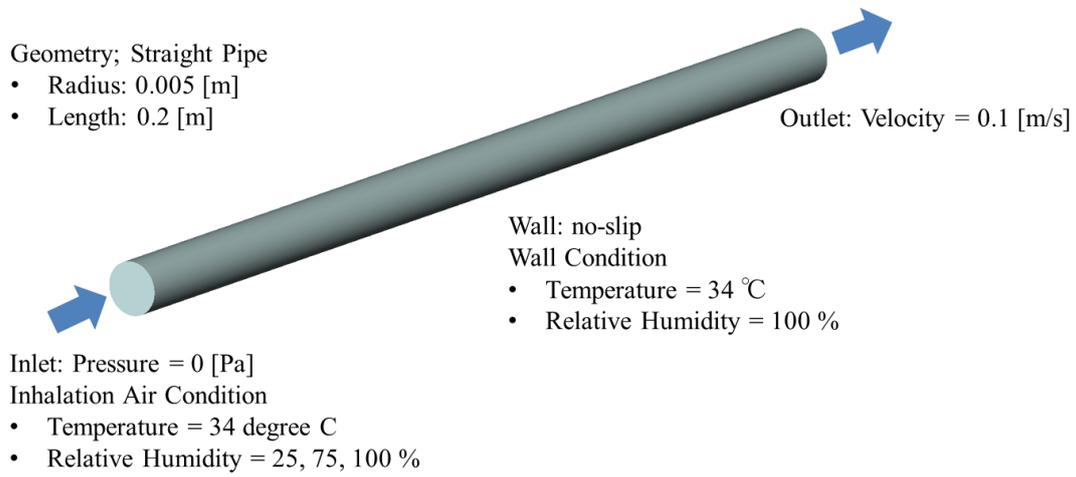
前章において、温度と水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルの提案および構築をおこなった。構築した鼻腔壁面モデルの検証のために、単純形状である直円管と医療画像から再構築した鼻腔形状を用いて、温度および相対湿度について検討をおこなった。まず、鼻腔壁面モデルに新たに組み込んだ潜熱の影響を検討するために、直円管において、潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルを用いたシミュレーションと、潜熱を考慮していない鼻腔壁面モデルでのシミュレーションをおこなった。直円管のシミュレーションにおいては、流入する空気の相対湿度を変化させた場合の潜熱の影響について検討をおこなった。さらに、医療画像から再構築した鼻腔形状を用いて、構築した鼻腔壁面モデルを適用した鼻腔内流れのシミュレーションを行い、シミュレーション結果を Keck et al. の実験での鼻腔内の温度および湿度の測定結果 [8] および Lindemann et al の鼻腔壁面における温度の測定結果 [9] と比較を行う事で、構築した鼻腔壁面モデルの検証とする。

### 4.1 直円管を用いた検討

#### 4.1.1 計算条件

図 4.1 に示すように、検討で用いた直円管の形状は、半径が 0.005 m で、パイプの長さが 0.2 m である。解析については、潜熱の効果が顕著に分かるように、壁面温度と流入空気の温度が同一になるように、34 °C に設定した。また、解析は、

相対湿度が、25 %、75 %、100%の3ケースについておこなった。境界条件は、流入面は、自由流入として設定し、流出面において、一様な速度を与えている。また、流出速度は、0.1 m/sとし、この時のレイノルズ数は、342である。これは、鼻腔内におけるレイノルズ数と近い値である。壁面については、no-slip条件を適用した。また、 $T_o$ に関しては、34 °Cで一定とし、 $F_o$ は、34 °Cにおける相対湿度100 %の時の水の質量分率である3.34%とした。粘膜の熱伝導係数  $K_{memb}$  は、0.6 W/mKとして、粘膜の厚さ  $\delta_{memb}$  は、0.3 mmとした。また、粘膜における水の拡散係数  $D_{memb}$  は、 $2.6 \times 10^{-5} m^2/s$ とした [21]。境界層における水の拡散係数  $D_{bl}$  は、 $3.0 \times 10^{-5} m^2/s$ とした。



☒ 4.1: Geometory of the Straight pipe

### 4.1.2 計算結果

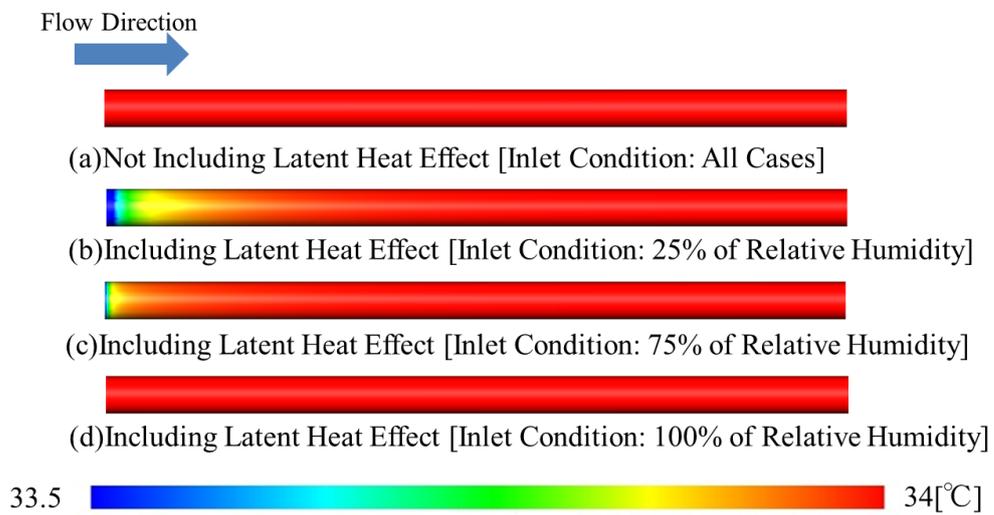
図 4.2 に、直円管の表面における温度分布を示したカラーコンター図を示す。図 4.2(a) は、潜熱を考慮していない鼻腔壁面モデルを用いてシミュレーションした結果である。また、図 4.2(b),(c),(d) は、それぞれ、提案した潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルを用いてシミュレーションをおこなった結果であり、25 %の相対湿度の吸気の場合、75 %の相対湿度の吸気の場合、100 %の相対湿度の吸気の場合の直円管表面での温度分布を示している。

図 4.2(a) に示すように、潜熱を考慮していないモデルを用いたシミュレーション結果では、流入空気の相対湿度を変化させても、直円管内の温度分布には一定であり、変化は確認されなかった。

吸気の相対湿度が 25 %の場合は、蒸発潜熱により、流入口周辺の直円管の表面の温度が低下していることが確認できる。流入直後の上流部が最も、温度の低下が大きく、下流に行くほど、温度の低下が小さくなる。十分に加湿された下流部では、潜熱による温度の変化は、ほとんど確認されなかった。

吸気の相対湿度が 75 %の場合、蒸発潜熱により、流入口周辺の直円管の表面の温度が低下していることが確認できる。また、吸気の相対湿度が 25 %の場合と同じように、流入直後の上流部が最も、温度の低下が大きく、下流に行くほど、温度の低下が小さくなる。十分に加湿された下流部では、潜熱による温度の変化は、ほとんど確認されなかった。

吸気の相対湿度が 100 %の場合、潜熱による熱の交換は行われないので、直円管における温度の変化は、確認されなかった。吸気の湿度が小さくほど、潜熱による温度の低下が顕著になり、吸気の湿度が大きくなると、潜熱による温度の変化は小さくなることが確認された。したがって、構築した鼻腔壁面モデルは、壁面からの水の移動に起因する潜熱による熱の移動を再現することができると考えられる。



☒ 4.2: Temperature Distribution on the Straight pipe surface

### 4.1.3 まとめ

構築した温度と水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルを直円管において検討した。構築したモデルは、潜熱を考慮した計算を行える事を確認した。吸気の相対湿度が小さい場合は、蒸発潜熱による温度の低下が顕著に確認された。また、吸気の相対湿度が100%の場合は、潜熱による温度の変化は、見られなかった。したがって、構築した鼻腔壁面モデルは、壁面からの水の移動に起因する潜熱による熱の移動を再現することができると考えられる。また、潜熱による温度の変化は、大きなところで3°C程度確認されており、鼻腔内での温度分布や湿度分布の影響を及ぼすと考えられる。

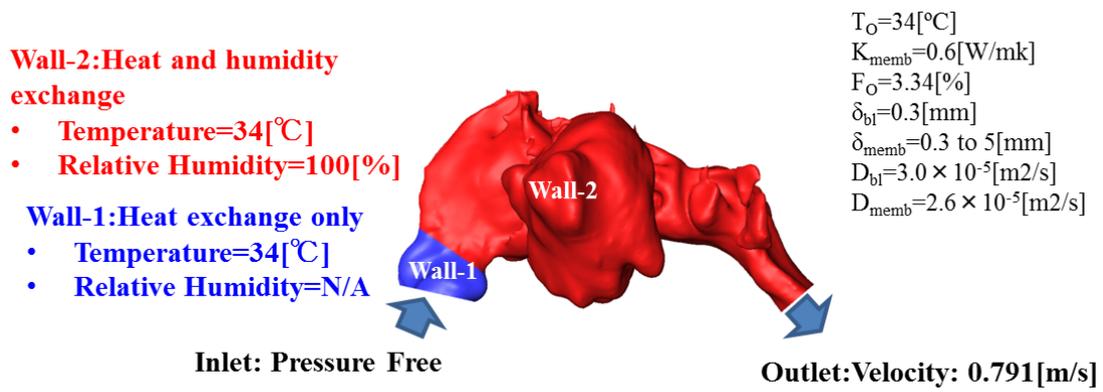
## 4.2 鼻腔形状を用いて検討

### 4.2.1 計算条件

鼻腔壁面は、鼻前庭部分を除き、鼻腔粘膜で覆われている。温度と水蒸気は、鼻腔粘膜を介して、鼻腔内への空気へと輸送される。しかし、鼻前庭部分については、粘膜が存在していないため、水蒸気は輸送されず、熱のみの交換がおこなわれる。これらを考慮した鼻腔の計算モデルを構築し、鼻腔内の流れのシミュレーションをおこなった。

図4.3に、シミュレーションにおける境界条件を示す。Wall-1(青色の領域)は、鼻前庭の領域であり、温度のみの交換をおこなう。鼻前庭の領域では、鼻腔壁面の組織側の温度 $T_o$ は、体温(34°C)で一定である。この領域では、水蒸気の交換は行わない。Wall-2(赤色の領域)は、鼻腔粘膜の領域であり、温度と水蒸気の交換をおこなう。鼻腔粘膜の領域では、鼻腔壁面の組織側の温度 $T_o$ は、体温(34°C)で一定であり、組織側における水の質量率 $F_o$ は、3.34%(34°Cにおける相対湿度100%)である。また、鼻腔粘膜の熱伝導係数 $K_{memb}$ は、0.6 W/mKである。鼻腔粘膜の水の拡散係数 $D_{memb}$ は、 $2.6 \times 10^{-5} m^2/s$ 、境界層の水の拡散係数 $D_{bl}$ は、 $3.0 \times 10^{-5} m^2/s$ であり、境界層の厚さは、0.3 mmとした。境界層の水の拡散係数 $D_{bl}$ は、鼻腔粘膜における水の拡散係数 $D_{memb}$ より、大きな値を定義した。

咽頭では，流出速度を境界条件として，吸気フェーズにおける時間平均速度を与えた．咽頭における時間平均速度は，一回換気量 (500 ml)，呼吸のサイクル (12 breath/min) および咽頭断面積 ( $253 \text{ mm}^2$ ) から計算され，0.791 m/s である．この時の，鼻孔および咽頭におけるレイノルズ数は，それぞれ 536 と 486 である．咽頭における温度および相対湿度は，計算により求められる．鼻孔の境界条件は，自由流入とし，流入空気の温度および水の質量分率を定義する．鼻腔壁面は，no-slip 条件を適用する．



☒ 4.3: Nasal Cavity Wall Model for Heat exchange

#### 4.2.2 Keck らの実験結果との比較検討

Keck et al. は、センサーを挿入することで、複数の被験者の吸気における鼻腔内の温度および相対湿度の測定をおこなった [8]。Keck らの用いた測定位置を図 4.4 に示す。Keck らは、鼻孔から 1.5, 2.5, 6.0 の位置で、温度および相対湿度を測定をおこなった。図 4.4(b) に示すように、測定点は、鼻弁 (nasal-valve) 付近と中鼻道に設定をおこなっている。また、実験においては、吸気の温度が 25 °C で一定、相対湿度は 35 % である。シミュレーション結果を検討するために、Keck らの測定結果と比較をおこなった。同等な条件で検討のためにシミュレーションにおいても、Keck らの実験と同様の吸気条件および測定点を用いた。

鼻腔粘膜の厚さは、0.3 0.5 mm で鼻腔内の部位によって異なる。また、本研究においては、鼻腔内の粘膜の厚さを一定と仮定したため、粘膜の厚さの検討をおこなう。本検討においては、粘膜の厚さが 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 3.0, 5.0 mm の場合について解析をおこなった。解析をおこなった結果、鼻腔粘膜厚さを 1.0 mm 以上とした場合は、実験による測定結果と異なったことから、比較的に良好な結果が得られた 0.3, 0.5, 0.7 mm について示す。

鼻前庭部分の皮膚の表皮の厚さは、平均的な表皮の厚さである 0.2 mm を用いた [22]。また、皮膚部分の熱の伝導係数は、鼻腔粘膜と同一の値を用いた。

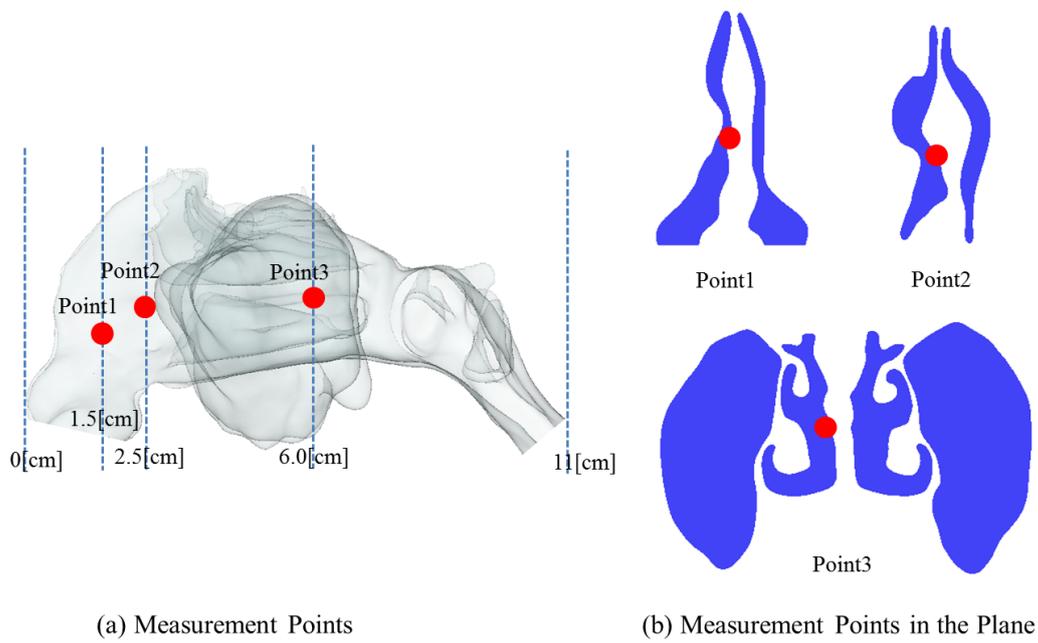


图 4.4: Measurement Point of Keck's Experiment

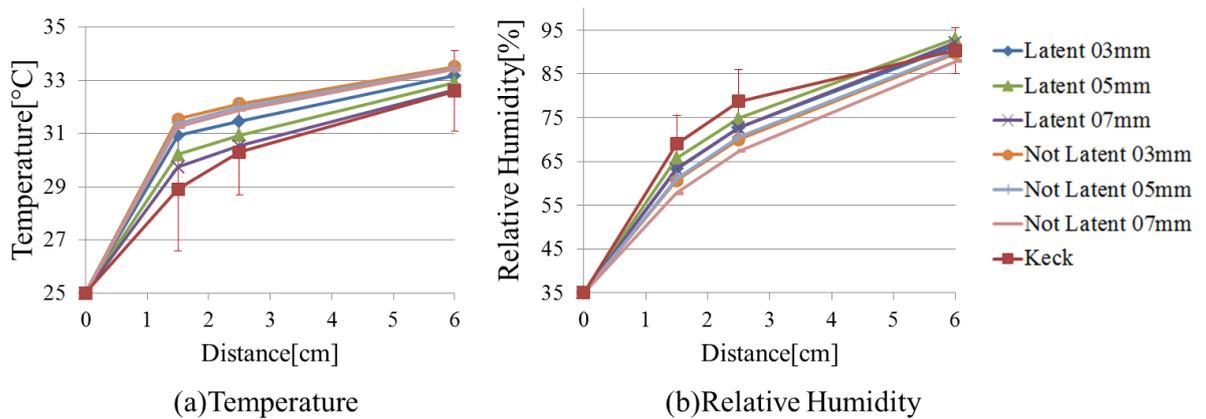


図 4.5: Temperature and Relative Humidity probe for different thickness of the mucus membrane

図 4.5 に、鼻腔粘膜の厚さを変化させた場合の鼻腔シミュレーション結果および実験結果を示す。図 4.5(a) に、温度についての結果を示す。横軸は、鼻孔からの距離であり、縦軸は、温度を示している。Keck らの測定結果は、赤四角で示しており、誤差範囲を含んでいる。潜熱を含まない解析結果は、Keck らの測定結果と比べ、全体的に高い温度分布を示した。測定結果との温度差は、前方部の測定点である 1.5, 2.5 cm で顕著に確認された。

潜熱を考慮した場合の解析結果では、0.3, 0.5, 0.7 mm すべてが、測定結果の誤差範囲に収まった。また、0.7 mm の鼻腔粘膜の厚さをを用いた場合が、温度については、最も測定結果に、近い値であった。

図 4.5(b) に、相対湿度についての結果を示す。横軸は、鼻孔からの距離であり、縦軸は、相対湿度を示している。Keck らの測定結果は、赤四角で示しており、誤差範囲を含んでいる。潜熱を含んでいない解析結果では、Keck らの測定結果と比べ、相対湿度は全体的に低い値を示した。また、温度の結果と同様に、潜熱を考慮した解析結果では、相対湿度の値は、測定結果の誤差の範囲に収まった。相対湿度については、0.3, 0.5 mm の結果が最も実験による測定結果に近い値を示した。

鼻腔内の温度および相対湿度は、鼻腔粘膜の厚さの影響を受け、鼻腔粘膜が薄くなるにつれ、温度の上昇率は小さくなり、相対湿度の上昇率は大きくなった。本検討においては、潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルを用いた場合が、実験による測定結果と近い値が得られた。

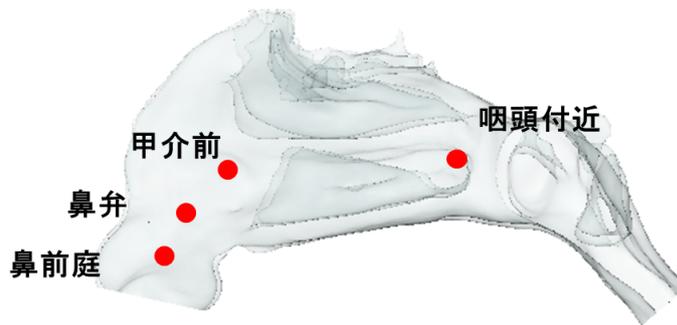


図 4.6: Measurement Point of Lindemann's Experiment

### 4.2.3 Lindemann らの実験結果との比較検討

Lindemann らは、鼻腔内にセンサーを挿入することにより、複数の被験者の吸気における鼻腔壁面の温度の測定をおこなった。[9] Lindemann らの、測定位置を図 4.6 に示す。Lindemann らは、鼻前庭、鼻弁、甲介前、咽頭付近での鼻腔壁面の温度の測定をおこなっている。Lindemann らの実験と比較するために、実験と同等の測定位置および流入空気を用いた。また、潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルと潜熱を考慮していない鼻腔壁面モデルの両方を用いてシミュレーションを行い、Lindemann らの実験による測定結果と比較を行うとともに、潜熱が及ぼす影響についても議論する。

図 4.7 に、それぞれの測定位置での鼻腔壁面の温度を示した。縦軸は、鼻腔壁面の温度であり、横軸は、測定位置である。赤色が Lindemann らの実験による測定結果であり誤差範囲を含む、緑色が潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルでのシミュレーション結果、空色が潜熱を考慮していない鼻腔壁面モデルでのシミュレーション結果である。潜熱を考慮していないシミュレーション結果では、鼻腔前方における温度の顕著な温度の低下を確認することができないが、潜熱を考慮したシミュレーション結果では、Lindemann らの実験と同様に鼻腔前方部での温度の低下が確認された。また、潜熱を考慮したシミュレーションは、Lindemann らの実験による測定結果と近い結果を得られる事が確認された。

図 4.8 は、鼻腔壁面の温度分布をカラーコンタで可視化した結果である。左図は、潜熱を考慮していないシミュレーション結果、右図は、潜熱を考慮したシミュレーション結果である。潜熱を考慮していないシミュレーション結果は、鼻弁付近

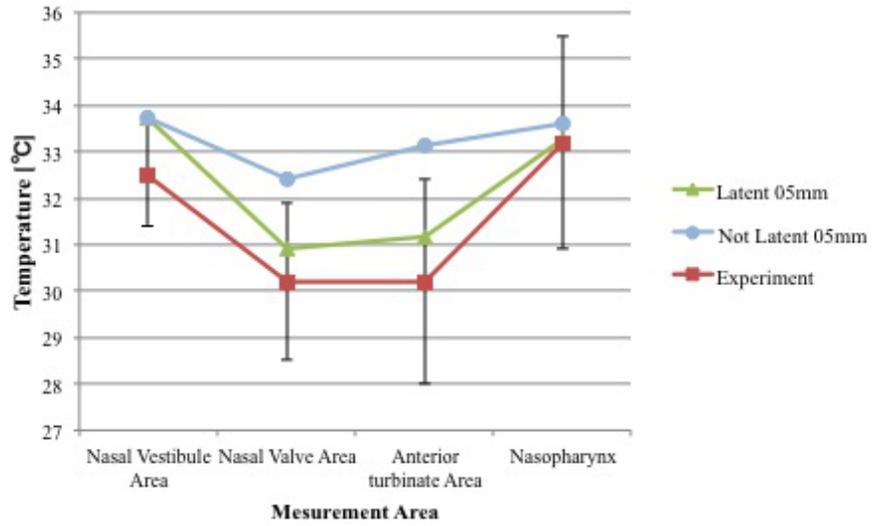


图 4.7: Temperature of Nasal Cavity Wall Comparison: Comparison Including Latent Heat, Excluding Latent Heat and Experimental Data

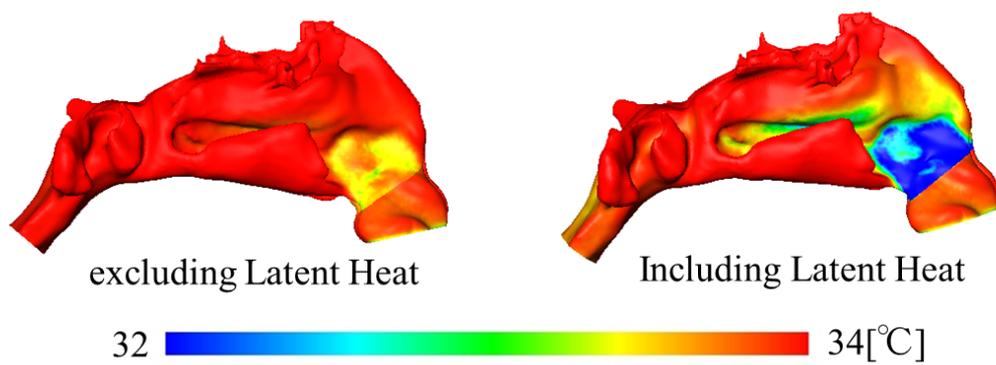


图 4.8: Temperature of Nasal Cavity Wall: Comparison Including Latent Heat and Excluding Latent Heat

においても、あまり温度の低下は無いが、潜熱を考慮したシミュレーション結果は、鼻弁付近において、大きく温度が低下している事が確認できる。また、鼻腔前方部において、鼻腔壁面の温度分布が顕著に違う事が確認できる。これは、蒸発潜熱により鼻腔壁面の熱が奪われて温度が低下したと考えられる。

#### 4.2.4 まとめ

鼻腔粘膜の厚さは、鼻腔内の部位によって厚さが異なる。生体现象に則したシミュレーションを行うには、鼻腔内の部位によって粘膜の厚さを変更したシミュレーションを行う事が望ましいが、医療画像から鼻腔粘膜を正確に抽出することは、困難である。したがって、鼻腔壁面の粘膜の厚さを一定と仮定して、鼻腔壁面モデルを構築し、実形状においてシミュレーションの結果を検討した。鼻腔粘膜の厚さを均一と仮定したシミュレーション結果においても、潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルを用いたシミュレーション結果は、Keckの実験における鼻腔内の温度および相対湿度の測定結果と概ねの一致を得られる事を示した。さらに、Lindemannらによって測定された鼻腔内壁面の温度とも潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルを用いたシミュレーション結果は概ねの一致を示した。したがって、潜熱を考慮した温度および湿度交換のための鼻腔壁面モデルは、鼻腔内の温度および湿度を考慮したシミュレーションを行う事ができると考える。

## 第 5 章

# 鼻腔内流れのシミュレーション

本章では、暖かく湿った空気、暖かく乾燥した空気、冷たく湿った空気、冷たく乾燥した空気を吸気として与えた場合の定常における鼻腔内のシミュレーションをおこない、鼻腔内の流れ、温度分布、相対湿度分布について検討をおこなう。また、それぞれの吸気における潜熱が温度分布や湿度分布に及ぼす影響について検討をおこなう。

また、呼吸は、吸気と呼気からなる非定常的な現象である。したがって、定常のシミュレーションでは、観測できない非定常的な流れの現象が存在する可能性がある。よって、呼吸を模した流入条件を与えて非定常における鼻腔内流れのシミュレーションをおこない、鼻腔内の流れの非定常性について議論をおこなう。最後に、人間の鼻腔は、年齢、性別、体格などで個体差があることが、予想される。したがって、年齢、性別、体格などが異なる鼻腔形状を医療画像から再構築し、それぞれの鼻腔における流れ、温度分布、湿度分布などにおける個体差の検討をおこなう。

### 5.1 定常解析による鼻腔内シミュレーション

CT 画像より、再構築した鼻腔形状を用いて、様々な吸気の下において、鼻腔内の流れの定常解析をおこなった。各吸気の下における鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布について検討をおこない、様々な吸気における鼻腔の温度および湿度調節機能を明らかにする。さらに、潜熱を考慮した場合、潜熱を考慮してい

場合のそれぞれについて、シミュレーションをおこない、各吸気条件における潜熱の影響の検討をおこなう。

### 5.1.1 計算条件

様々な吸気条件による潜熱の影響および鼻腔内の温度および湿度調節機能を明らかにするために、吸気する空気として暖かく乾燥した吸気 (Temperature = 40 °C, Relative Humidity = 5 %), 暖かく湿った吸気 (Temperature = 40 °C, Relative Humidity = 90 %), 冷たく乾燥した吸気 (Temperature = 5 °C, Relative Humidity = 10 %), 冷たく湿った吸気 (Temperature = 5 °C, Relative Humidity = 90 %) を鼻孔において流入境界条件に設定し、シミュレーションをおこなった。

鼻腔の境界条件は、4章における鼻腔のシミュレーションと同様に境界条件を用いており、図 4.3 に示す。Wall-1(青色の領域)は、鼻前庭の領域であり、温度のみの交換をおこなう。鼻前庭の領域では、鼻腔壁面の組織側の温度  $T_o$  は、体温 (34 °C) で一定である。この領域では、水蒸気の交換は行わない。Wall-2(赤色の領域)は、鼻腔粘膜の領域であり、温度と水蒸気の交換をおこなう。鼻腔粘膜の領域では、鼻腔壁面の組織側の温度  $T_o$  は、体温 (34 °C) で一定であり、組織側における水の質量率  $F_o$  は、3.34 % (34 °C における相対湿度 100 %) である。また、鼻腔粘膜の熱伝導係数  $K_{memb}$  は、0.6 W/mK である。鼻腔粘膜の水の拡散係数  $D_{memb}$  は、 $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、境界層の水の拡散係数  $D_{bl}$  は、 $3.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  であり、境界層の厚さは、0.3 mm とした。4章の鼻腔の実形状における検証において、温度および相対湿度の双方で、実験における測定結果と近い値が得られた鼻腔粘膜の厚さ 0.5 mm を用いて解析をおこなった。

### 5.1.2 種々の空気を吸気した場合の計算結果

#### 流れについて

図 5.1 に、鼻腔内の流れの様相を流線およびカラーコンターで可視化した結果を示す。流線およびカラーコンターの色は速度の Magnitude を表しており、青いほ

ど流速が遅く、赤にほど流速が早い。鼻孔から徐々に絞り込まれて断面積が、最も小さくなる鼻弁付近に、流速の速い領域が確認できる。

鼻腔内の流れの主流は、中鼻道に存在し、流れが最も少ないのは、下鼻道である。また、下鼻道の外側部は、特に流速が遅く乱れた流れであり、逆流している流れも確認された。上鼻道付近には、匂いを感知する器官である臭球があり、上鼻道の流れは、中鼻道に比べ遅い流れであり、匂いを効率良く感知するのに合理的な流れになっている。咽頭付近で、鼻中隔によって分けられていた左右の鼻道の流れが合流する部分においても、乱れた流れが確認された。左右の鼻道の流れを比較してみると、右の鼻道の流れの流速が早いことが、確認できるが、左右の鼻腔内の流れの様相は、ほとんど同等である。

潜熱を考慮した場合と潜熱を考慮していない場合のシミュレーション結果では、流れについての差異はほとんど確認されなかった。また、吸気の温度および湿度を変えてシミュレーションをおこなった場合は、鼻腔内の流れへの僅かにはあるものの、大きな変化は確認されなかった。したがって、吸気する空気の温度および湿度が、鼻腔内の流れに及ぼす影響は、ほとんど無いと考えられる。

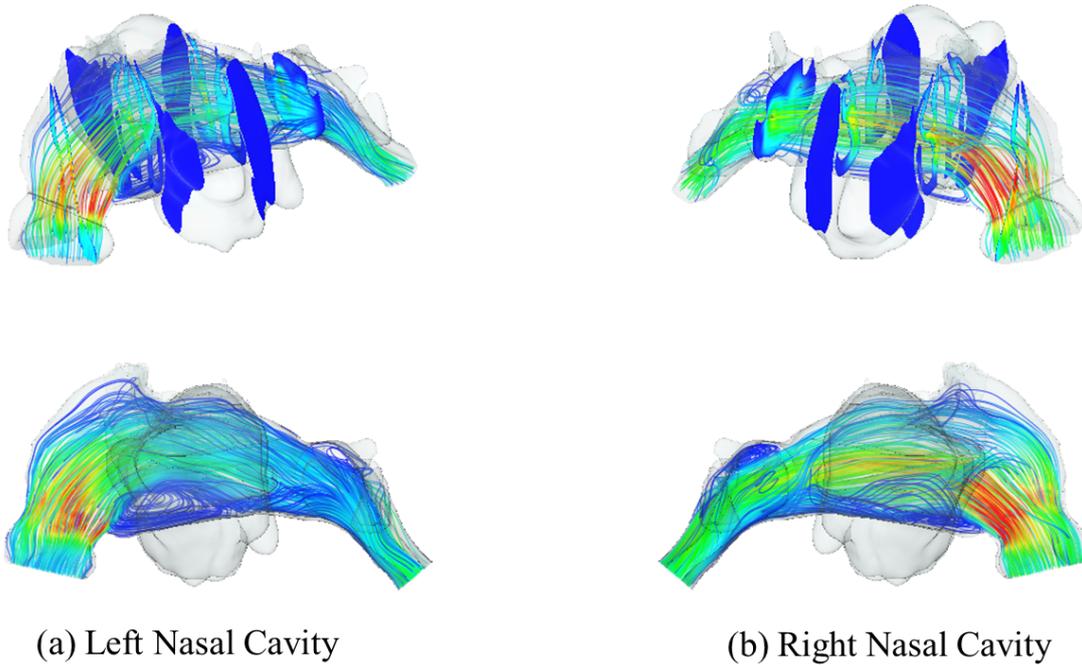


图 5.1: Airflow in the Nasal Cavity (StreamLine)

## 温度および湿度についての検討

### 暖かく乾燥した吸気 (Temperature = 40 °C Relative Humidity = 5 %)

図 5.2 に、暖かく乾燥した空気を吸気した場合の温度についてのシミュレーション結果を、カラーコンターを用いて可視化した結果を示す。図 5.2(a),(b) は、それぞれ潜熱を考慮していない場合の結果と潜熱を考慮した場合の結果である。吸気の温度は、咽頭付近に到達するまでに、体温近くまで冷却されていることが確認できる。また、吸気は、鼻弁付近でも急激に冷却されていることが、確認できる。潜熱を考慮した結果は、潜熱を考慮していない結果に比べて、蒸発潜熱により、鼻腔前方部で冷却が促進されていることが、確認できる。この条件においては、潜熱は鼻腔の温度調節機能を高めるような働きをしている。

図 5.2(c) は、潜熱を考慮した結果と潜熱を考慮していない結果の温度の差分をカラーコンターで可視化した結果である。鼻前庭の部分では、水蒸気の交換を行わないため、潜熱による温度の変化はない。鼻腔粘膜が存在する領域にはいると、蒸発潜熱によって-3 °C程度、温度が低下していることがわかる。鼻腔の前方部で潜熱の影響が顕著であり、後方に行くほど潜熱による影響は小さくなることが、確認できる。図 5.2(d) に、鼻腔壁面からの熱量における潜熱の割合を示す。鼻腔前方部で、鼻腔壁面からの正味の熱の移動における割合は、60%程度であることが確認できる。鼻腔前方部では、検熱より潜熱による熱の影響の方が、支配的であるという事がわかる。また、潜熱による影響は、鼻腔の前方部のみで、鼻腔後方においては、潜熱の寄与は、ほとんど無い事が確認できる。

図 5.3 に、暖かく乾燥した空気を吸気した場合の湿度についてのシミュレーション結果を、カラーコンターを用いて可視化した結果を示す。図 5.3(a),(b) は、それぞれ潜熱を考慮していない場合の結果と潜熱を考慮した場合の結果である。いずれの結果においても、吸気は、咽頭付近に到達するまでに、相対湿度で100%近くまで加湿されていることがわかる。また、鼻孔からの吸気は、鼻弁付近で、急激に加湿されていることが、確認できる。

図 5.3(c) は、潜熱を考慮した結果と考慮していない結果の相対湿度の差分をカラーコンターで可視化した結果である。潜熱を考慮した結果では、潜熱を考慮していない結果に比べ、相対湿度が高くなっている事が確認できる。鼻腔前方部で

は、5%程度、相対湿度が上昇していることが、確認できる。

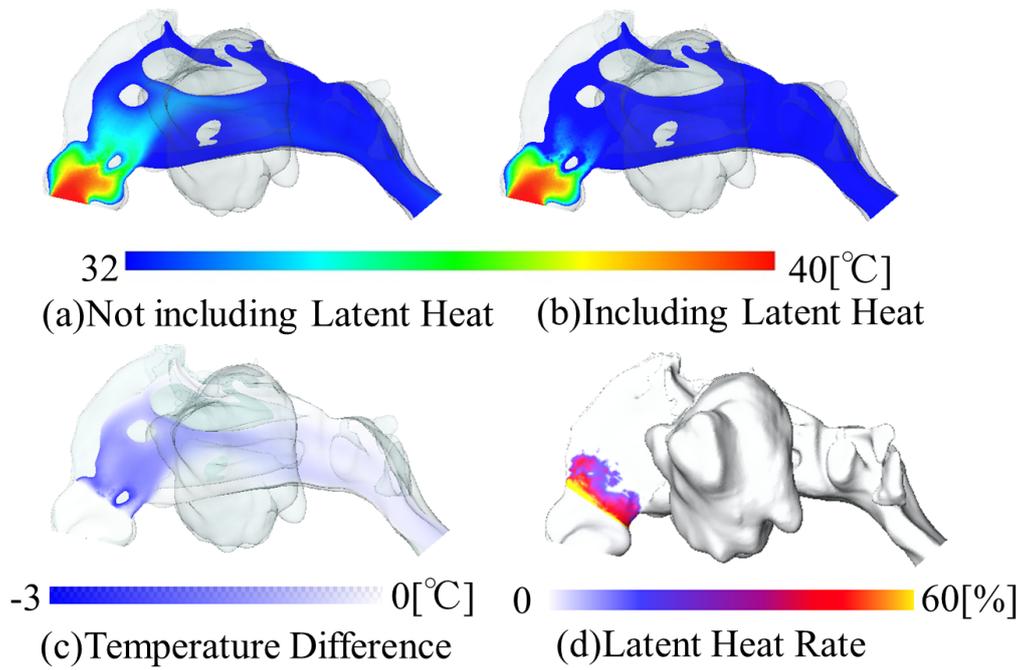


図 5.2: Temperature Distribution in the Nasal Cavity [Hot-Dry case]

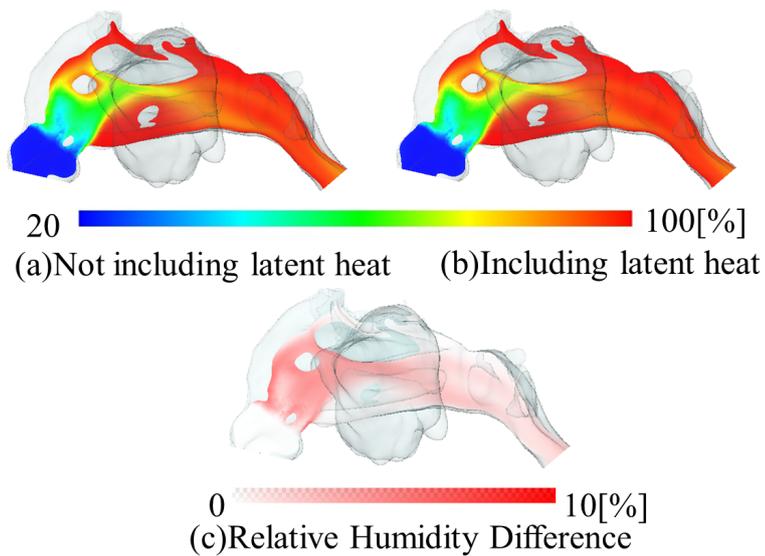


図 5.3: Temperature Distribution in the Nasal Cavity [Hot-Dry case]

## 暖かく湿った吸気 (Temperature = 40 °C Relative Humidity = 90 %)

図 5.4 に、暖かく湿った空気を吸気した場合の温度についてのシミュレーション結果を、カラーコンターを用いて可視化した結果を示す。図 5.4(a),(b) は、それぞれ潜熱を考慮していない場合の結果と潜熱を考慮した場合の結果である。吸気温度は、咽頭付近に到達するまでに、体温近くまで冷却されていることが確認できる。また、吸気は、鼻弁付近でも急激に冷却されていることが、確認できる。潜熱を考慮していない結果に比べ、潜熱を考慮した結果では、吸気の冷却が遅延していることがわかる。これは、凝縮潜熱に影響により、冷却が阻害されたことが原因であると考えられる。この条件においては、潜熱は鼻腔の温度調節機能を低下させる様な働きをしている。

図 5.4(c) は、潜熱を考慮した結果と潜熱を考慮していない結果の温度についての差分を、カラーコンターによって可視化した結果である。凝縮潜熱により、0.4 0.5 °C 程度、潜熱を考慮していない結果に比べ、温度が上昇していることが確認できる。また、図 5.4(d) は、鼻腔壁面からの正味の熱量における潜熱の割合をカラーコンターにより可視化した結果である。暖かく湿った吸気のシミュレーション結果では、鼻腔壁面からの正味の熱量における潜熱の割合は、暖かく乾燥した吸気の場合よりも小さい。しかし、鼻腔前方部では、正味の熱の移動において潜熱の割合は、20% 程度を占めていることが確認できる。

図 5.5 に、暖かく湿った空気を吸気した場合の湿度についてのシミュレーション結果を、カラーコンターを用いて可視化した結果を示す。図 5.5(a),(b) は、それぞれ潜熱を考慮していない場合の結果と潜熱を考慮した場合の結果である。吸気は、咽頭付近に到達するまでに、相対湿度で 100 % 近くまで調節されている。潜熱を考慮した結果は、潜熱を考慮していない結果に比べ、相対湿度の値が低下している。また、相対湿度が 100 % を超えている領域が、鼻前庭の部分にみられるが、これはこの部分で、凝縮が起こっていると考えられる。

図 5.5(c) は、潜熱を考慮した結果と潜熱を考慮していない結果で、相対湿度についての差分をカラーコンターで可視化した結果である。潜熱を考慮した結果では、潜熱を考慮していない結果に比べ、5 % 程度の相対湿度が低下していることが確認できる。相対湿度の低下は、凝縮潜熱の影響により、潜熱を考慮した結果では、相対的に鼻腔内の温度が高くなったことで、相対湿度が低下したと考えられる。

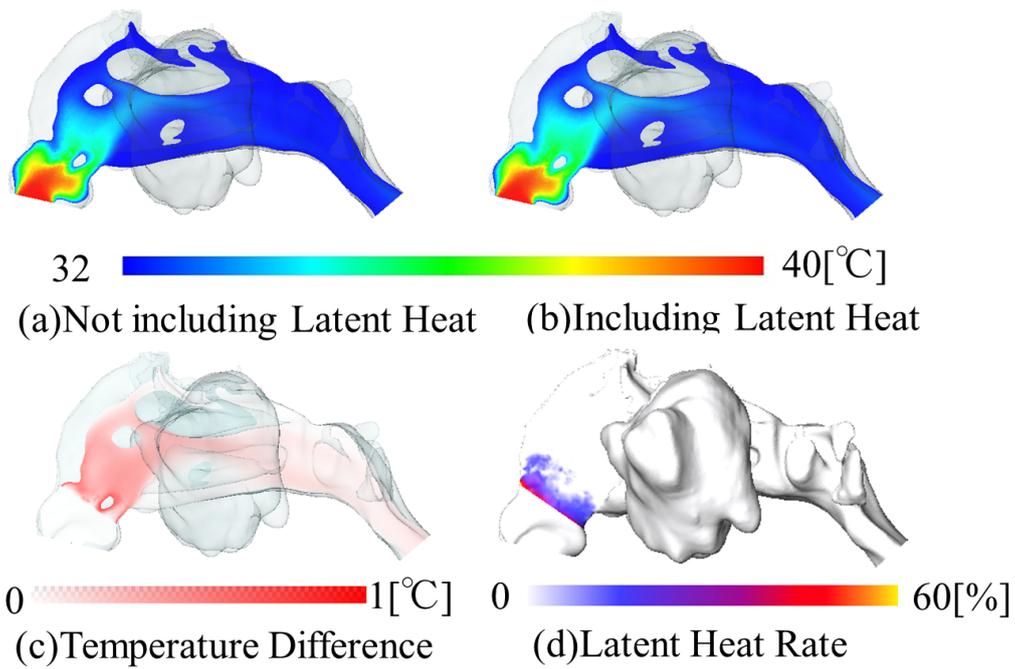


図 5.4: Temperature Distribution in the Nasal Cavity [Hot-Humid case]

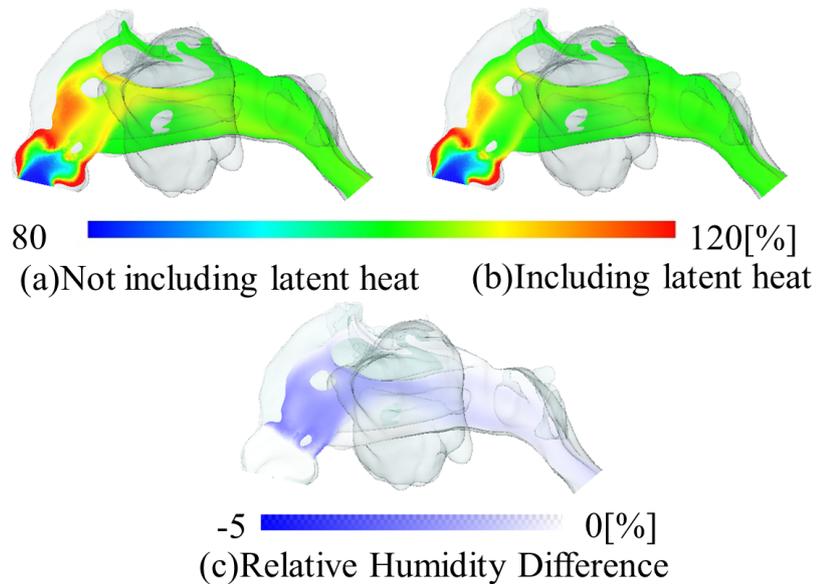


図 5.5: Relative Humidity Distribution in the Nasal Cavity [Hot-Dry case]

### 冷たく乾燥した吸気 (Temperature = 5 °C Relative Humidity = 10 %)

図 5.6 に、冷たく乾燥した空気を吸気した場合の温度分布をカラーコンターを用いて可視化した図を示す。図 5.6(a),(b) は、それぞれ潜熱を考慮していない場合の結果と潜熱を考慮した場合の結果である。鼻孔から吸気された空気は、咽頭に到達するまでに、体温付近まで加温されている。鼻腔の前方部で、急激な温度変化が起こっている事が確認できる。この条件においては、潜熱は鼻腔内の空気の加温を阻害し、温度調節機能を低下させる様な働きをしている。図 5.6(c) は、潜熱を考慮した結果と潜熱を考慮していない結果の温度についての差分をカラーコンターで可視化した結果である。潜熱を考慮していない結果に比べ、蒸発潜熱を考慮した結果では、3 °C 程度、低下していることが確認できる。図 5.6(d) に、鼻腔壁面からの正味の熱量における潜熱の割合を示す。正味の熱量における潜熱の割合は、暖かく湿った空気の場合よりさらに小さくなっているが、鼻腔の前方部において、20% 程度であることが、確認できる。また、潜熱の作用する範囲は、暖かく湿った空気を吸気した場合より狭くなっている。

図 5.7 に、冷たく乾燥した空気を吸気した場合の相対湿度分布をカラーコンターを用いて可視化した結果を示す。図 5.7(a),(b) は、それぞれ潜熱を考慮していない場合の結果と潜熱を考慮した場合の結果である。鼻孔から吸気した空気は、徐々に加湿されて行き、咽頭に到達するまでに、相対湿度で 100 % 近くまで加湿された。また、他のシミュレーション結果の場合と同様に、鼻腔前方部の鼻弁周辺で急減に加湿されている事が確認できる。図 5.7(c) は、潜熱を考慮した結果と潜熱を考慮していない結果の相対湿度についての差分をカラーコンターで可視化した結果である。鼻腔の前方部で、5 % ~ 10 % 程度、相対湿度の値が上昇していることが確認できる。

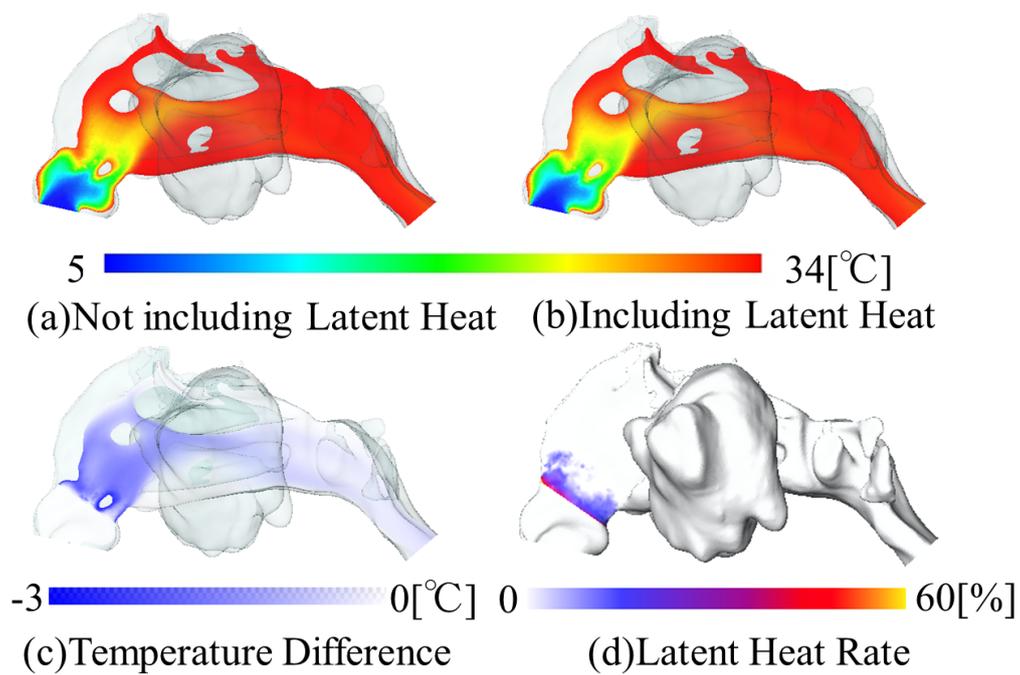


图 5.6: Temperature Distribution in the Nasal Cavity [Cold-Dry case]

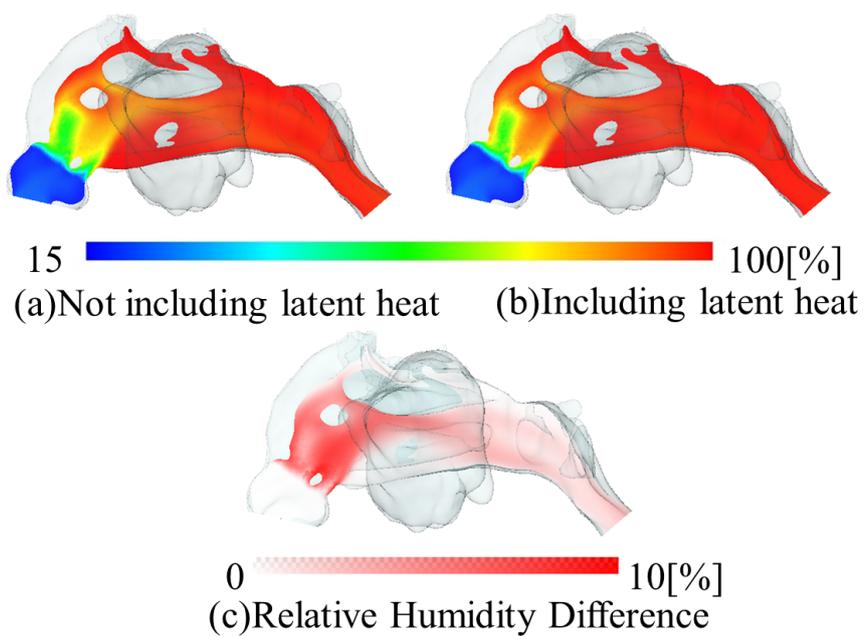


图 5.7: Relative Humidity Distribution in the Nasal Cavity [Cold-Dry case]

### 冷たく湿った吸気 (Temperature = 5 °C Relative Humidity = 90 %)

図 5.8 に、冷たく湿った空気を吸気した場合の温度分布をカラーコンターを用いて可視化した図を示す。図 5.8(a),(b) は、それぞれ潜熱を考慮していない場合の結果と潜熱を考慮した場合の結果である。鼻孔から吸気された空気は、咽頭に到達するまでに、体温付近まで加温されている。また、他のシミュレーション結果と同様に、鼻腔の前方部で、急激な温度変化が起こっていることが確認できる。潜熱を考慮してない結果に比べ、潜熱を考慮した結果では、鼻腔前方部で温度が低下していることがわかる。この条件においては、潜熱は鼻腔内の空気の加温を阻害し、温度調節機能を低下させる様な働きをしている。

図 5.8(c) は、潜熱を考慮した結果と潜熱を考慮していない結果の温度についての差分をカラーコンターで可視化した結果である。潜熱を考慮していない結果に比べ、蒸発潜熱を考慮した結果では、3 °C 程度、低下していることが確認できる。図 5.8(d) に、鼻腔壁面からの正味の熱量における潜熱の割合を示す。今回の検討においても、正味の熱量における潜熱の割合が、最も小さかった。正味の熱量における潜熱の割合は、冷たく乾燥空気の場合よりさらに小さくなっているが、鼻腔の前方部において、15% 程度であることが、確認できる。

図 5.9 に、冷たく湿った空気を吸気した場合の相対湿度分布をカラーコンターを用いて可視化した結果を示す。図 5.9(a),(b) は、それぞれ潜熱を考慮していない場合の結果と潜熱を考慮した場合の結果である。鼻孔から吸気した空気は、徐々に加湿されて行き、咽頭に到達するまでに、相対湿度で 100 % 近くまで加湿された。温度の場合と同様に、鼻腔前方部の鼻弁周辺で急減に加湿されている事が確認できる。図 5.9(c) は、潜熱を考慮した結果と潜熱を考慮していない結果の相対湿度についての差分をカラーコンターで可視化した結果である。鼻腔の前方部で、5 % 10 % 程度、相対湿度の値が上昇しているが、後方においては、ほとんど変化がないことが確認できる。

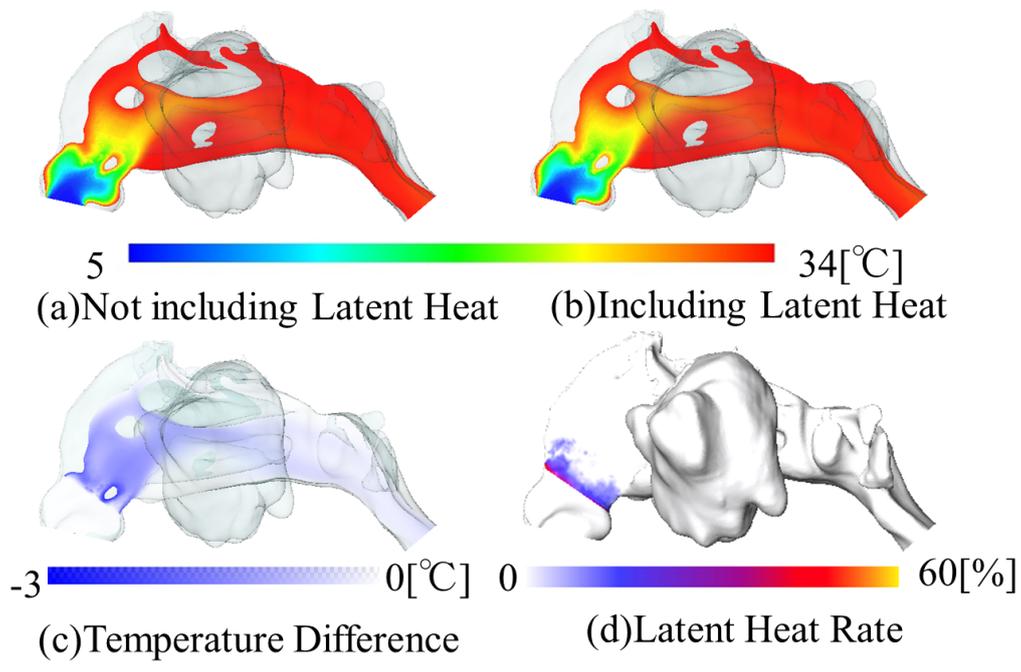


図 5.8: Temperature Distribution in the Nasal Cavity [Cold-Humid case]

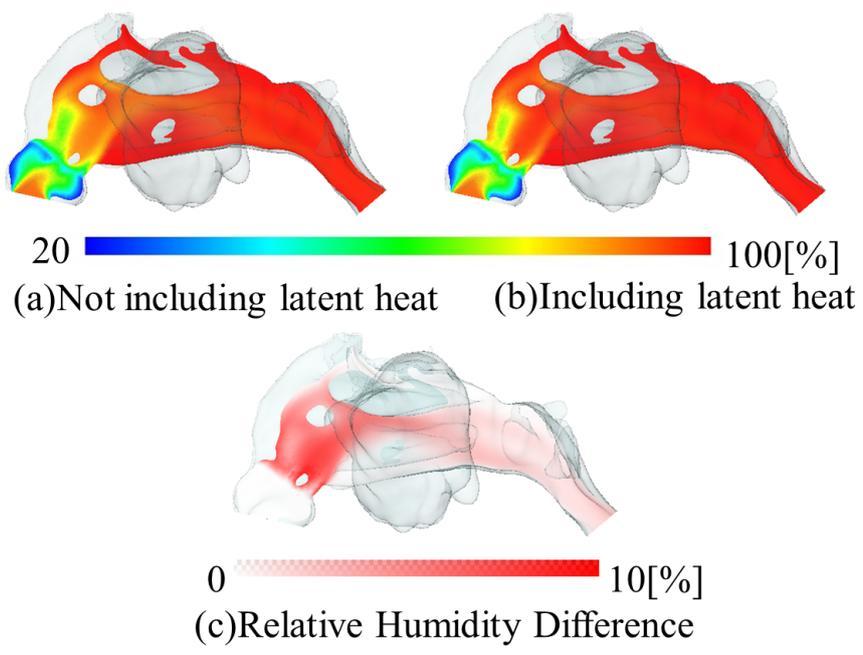


図 5.9: Relative Humidity Distribution in the Nasal Cavity [Cold-Humid case]

### 5.1.3 まとめ

暖かく乾燥した空気から冷たく湿った空気までの種々の空気を吸気した場合に、鼻腔内の流れ、温度分布、相対湿度分布、潜熱の影響について検討をおこなった。吸気の温度や湿度が変化しても、鼻腔内の流れに変化は、ほとんど確認されなかった。何れの空気を吸気した場合においても、吸気の温度および湿度は咽頭に到達するまでに最適な状態に調節されていた。暖かく湿った空気を吸気した場合は、凝縮潜熱の影響が確認され、それ以外の空気を吸気した場合は、蒸発潜熱による影響が確認された。暖かく乾燥した空気を吸気した場合が、最も潜熱の影響が大きく、鼻腔前方部では、正味の熱量における潜熱の割合が60%程度であった。また、冷たく湿った空気を吸気した場合が、最も潜熱の影響が小さく、鼻腔前方部での正味の熱量における潜熱の割合は、20%程度であった。潜熱は、鼻腔内の温度を3°C程度変化させ、湿度についても10%程度変化させた。したがって、潜熱は鼻腔内の温度および湿度分布に大きく影響を及ぼし、鼻腔内のシミュレーションを行う上で考慮すべき要素であると考えられる。

## 5.2 非定常解析による鼻腔内シミュレーション

呼吸は、吸気と呼気の繰り返しからなる非定常な現象である。したがって、鼻腔内の流れの非定常シミュレーションをおこない、流れ、温度分布、相対湿度分布について検討をおこなった結果について述べる。また、鼻腔内の流れの非定常性について、議論をおこなった。

### 5.2.1 計算条件

図 5.10 に、本シミュレーションにおける境界条件を示す。Wall-1(青色の領域)は、鼻前庭の領域であり、温度のみの交換をおこなう。鼻前庭の領域では、鼻腔壁面の組織側の温度  $T_o$  は、体温 (34 °C) で一定である。この領域では、水蒸気の交換は行わない。Wall-2(赤色の領域)は、鼻腔粘膜の領域であり、温度と水蒸気の交換をおこなう。鼻腔粘膜の領域では、鼻腔壁面の組織側の温度  $T_o$  は、体温 (34 °C) で一定であり、組織側における水の質量率  $F_o$  は、3.34 % (34 °C における相対湿度 100 %) である。また、鼻腔粘膜の熱伝導係数  $K_{memb}$  は、0.6 W/mK であり、鼻腔粘膜の厚さ  $\delta_{memb}$  は、0.5 mm とした。鼻腔粘膜の水の拡散係数  $D_{memb}$  は、 $2.6 \times 10^{-5} m^2/s$ 、境界層の水の拡散係数  $D_{bl}$  は、 $3.0 \times 10^{-5} m^2/s$  であり、境界層の厚さは、0.3 mm とした。境界層の水の拡散係数  $D_{bl}$  は、鼻腔粘膜における水の拡散係数  $D_{memb}$  より、大きな値を定義した。1 回あたりの換気量 500 ml、呼吸回数は 12 breath/min とし、安静時の呼吸を想定し、正弦波により呼吸を近似した。また、吸気と呼気が切り替わる際に、0.1 sec の安静期を考慮している [10]。さらに、計算を 3 周期おこなうことで、前の周期との差を少なくしている。図 5.11 に、本シミュレーションで用いた流量波形を示す。境界条件としては、咽頭において、一様な速度として定義している。鼻孔からの流入空気は、Keck et al. の実験の値を参照し、温度は、25 °C、相対湿度は 35 % と設定した [8]。

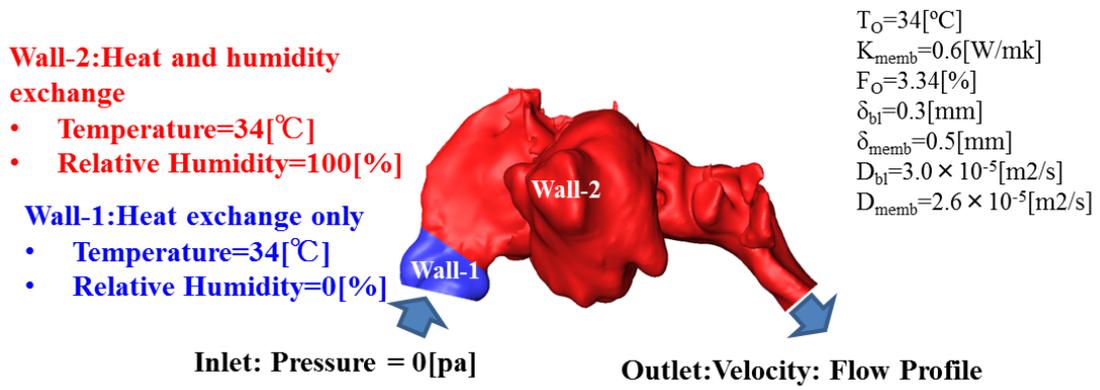


図 5.10: Boundary Condition for Unsteady Nasal Cavity Simulation

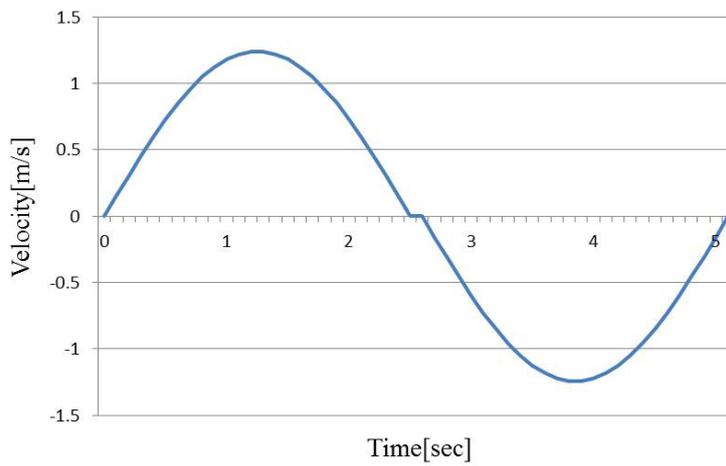


図 5.11: Flow Profile for Velocity of the Pharynx

## 5.2.2 計算結果の検討

### 流れについて

図5.15に、鼻腔内の流れの非定常解析によるシミュレーション結果の吸気フェーズを、流線により可視化した結果を示す。流線の色は速度の Magnitude を表しており、青いほど流速が遅く、赤にほど流速が早いことを示している。吸気においては、中鼻道に主流があり、上鼻道の流れは中鼻道に比べ遅い流れである。また、下鼻道では、中鼻道および上鼻道に比べ、流量が少ないことが、確認できた。時間が進むごとに、流速が増して行き、 $T=1.25$  sec で吸気におけるピークを迎える。非定常性を検討するために、 $T=0.2$  sec,  $T=0.4$  sec,  $T=0.8$  sec,  $T=1.25$  sec,  $T=1.7$  sec,  $T=2.1$  sec,  $T=2.3$ sec における咽頭のレイノルズ数と同等な境界条件を用いて、定常によるシミュレーションをおこない、非定常シミュレーションの結果と比較をおこなった。図5.13に、吸気における定常解析におけるシミュレーション結果を示す。非定常の場合と同様に、中鼻道に主流があり、上鼻道付近の流れは遅い事がわかる。また、下鼻道についても、非定常解析と同様の傾向である。咽頭付近において、わずかに流れの様相に違いが見られる。流れが比較的遅い時刻において、非定常と定常の間に流れの差異が確認された。図5.14に、吸気における定常との差異が顕著にみられた時刻での Sagittal 断面における流線と速度の Magnitude のカラーコンタを重畳して可視化した結果を示す。図中において、赤色の四角で示した部分が、流れの様相に差異があった領域である。

赤色の四角 (a) で示した鼻腔前方下部では、渦の大きさの違いが確認できる。加速期 ( $T=0.2$  sec) の渦が最も小さく、減速期 ( $T=2.3$  sec) の渦が最も大きいことが確認できる。定常計算の結果は、加速期と減速期の中間的な大きさの渦が確認できる。赤色の四角 (b) で示した咽頭付近でも、渦の大きさや有無に差異を確認することができる。加速期 ( $T=0.2$  sec) の渦が無く、減速期 ( $T=2.3$  sec) および定常計算の結果では、渦を確認することができる。

図5.15に、鼻腔内の流れの非定常解析によるシミュレーション結果の呼気フェーズを、流線により可視化した結果を示す。呼気においては、中鼻道および下鼻道に主流があり、上鼻道への流れは非常に少ないことが確認できる。上鼻道付近には、臭球と呼ばれる匂いを感知する器官があり、上鼻道付近への流れが少ないこ

とで、自分の吐き出す行きの匂いを感じ難いのだと考えられる。また、時間が進むごとに、流速が増して行き、 $T=3.85$  sec で呼気におけるピークを迎える。吸気のシミュレーション結果と同様に、速い速度分布が、鼻弁付近で確認できた。図 5.16 に、呼気における定常解析におけるシミュレーション結果を示す。主な流れの様相については、定常および非定常との間に差異はほとんど確認できない。咽頭付近において、わずかに流れの様相に違いが見られる。流れが比較的遅い時刻において、非定常と定常の間に流れの差異が確認された。

図 5.17 に、呼気における定常との流れの様相に差異が顕著にみられた時刻での Sagittal 断面における流線と速度の Magnitude のカラーコンタを重畳して可視化した結果を示す。図中において、赤の四角で示した部分が、流れの様相に差異があった領域である。図 5.17 中の赤色の四角 (a) で示した咽頭付近で渦の大きさや有無に差異を確認することができる。加速期 ( $T=2.8$ ) では、咽頭付近で渦は確認できないが、減速期 ( $T=4.9$ ) および定常計算では、渦を確認することができる。減速期における渦と定常の結果での渦は、同様の位置に発生していることが確認できる。また、渦の大きさは、非定常計算における減速期の方が大きいことが確認できる。

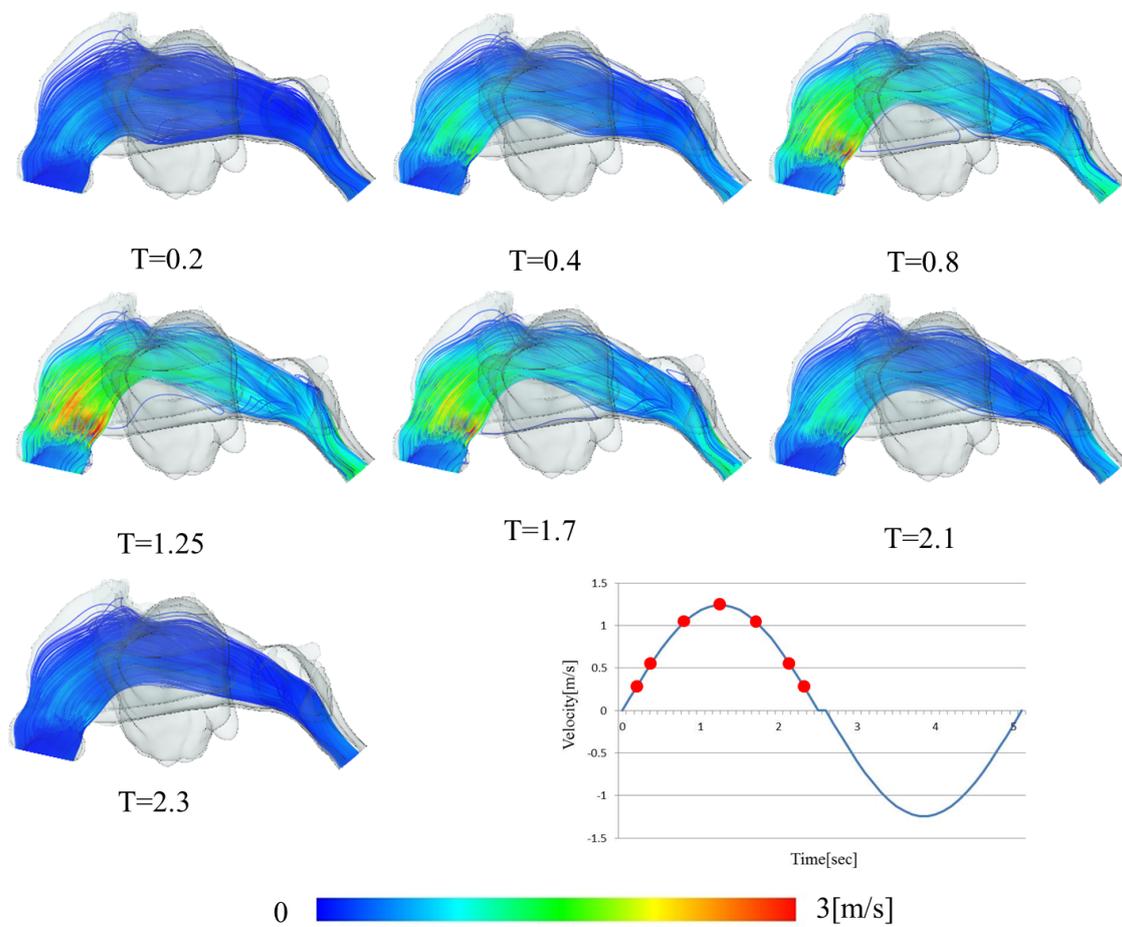


図 5.12: Flow on Unsteady Condition (Inhalation Phase)

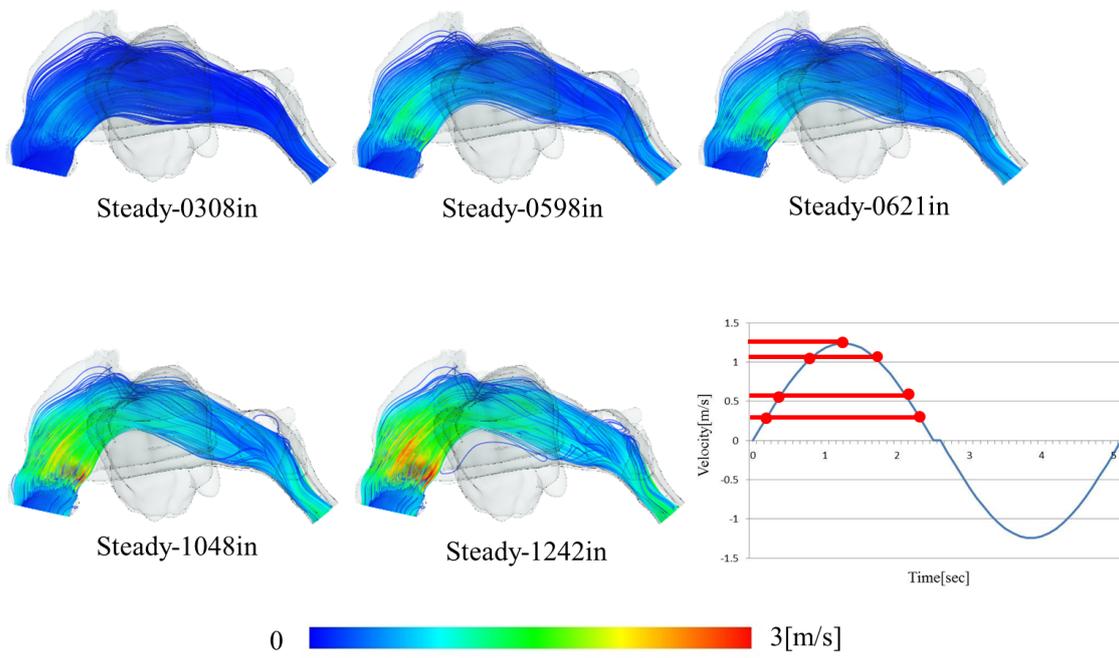


図 5.13: Flow on Steady Condition (Inhalation Phase)

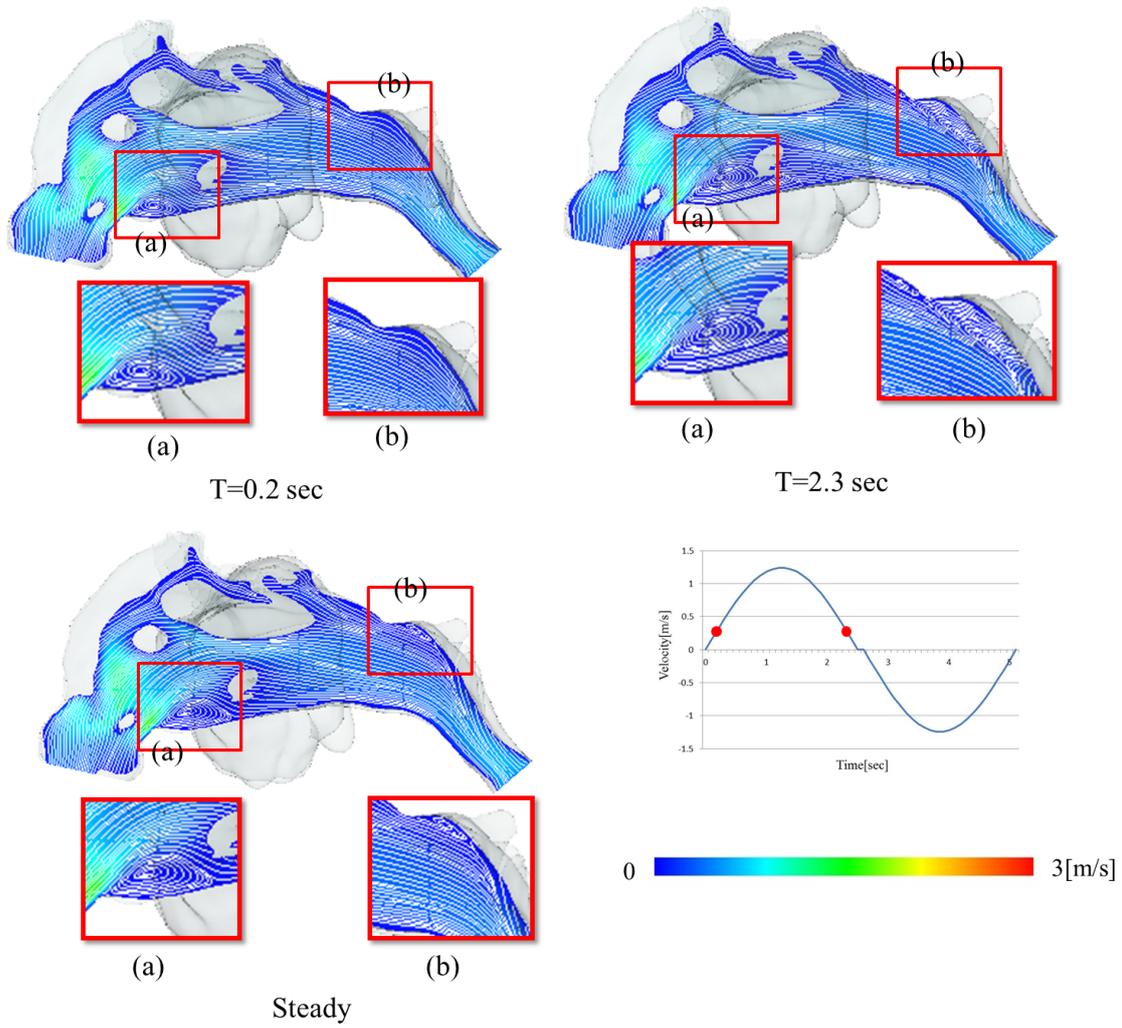
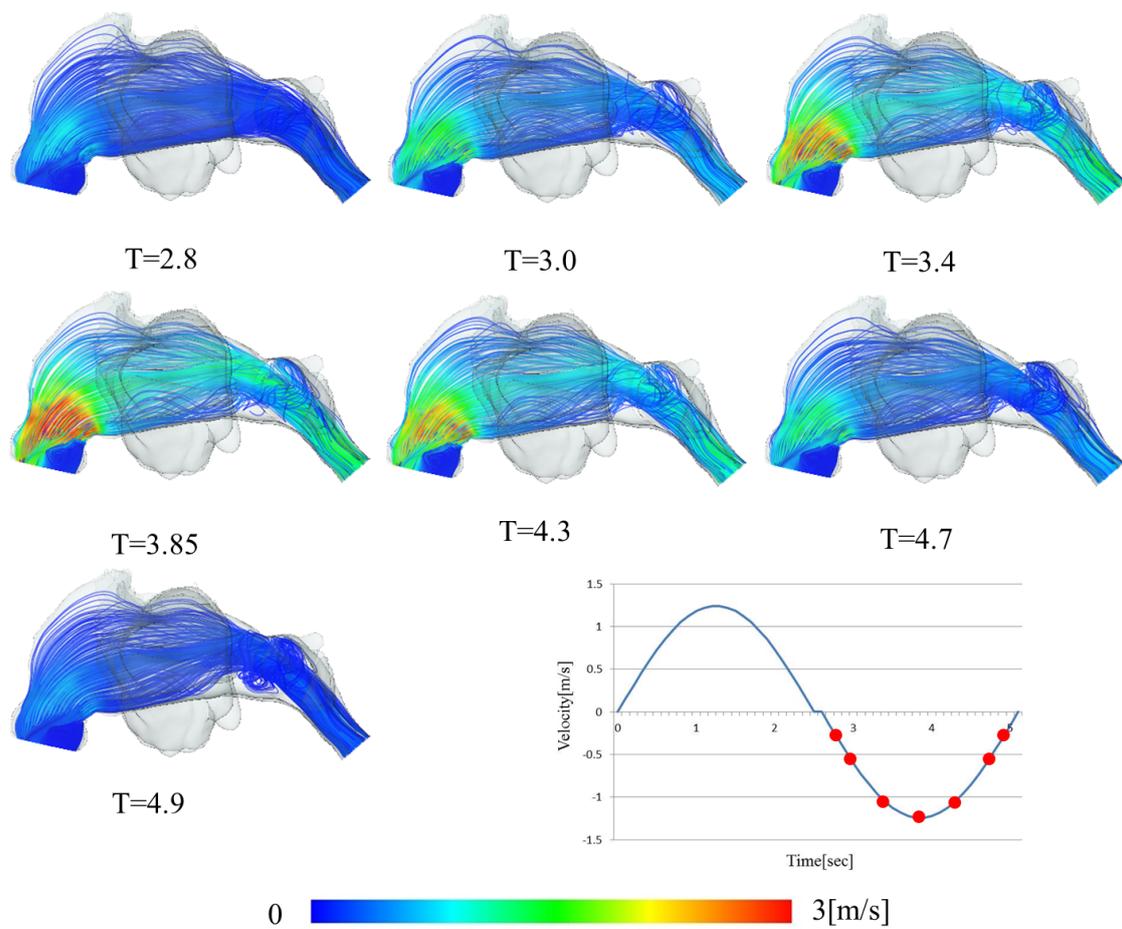


図 5.14: Flow Comparison Unsteady with Steady (Inhalation Phase)



☒ 5.15: Flow on Unsteady Condition (Exhalation Phase)

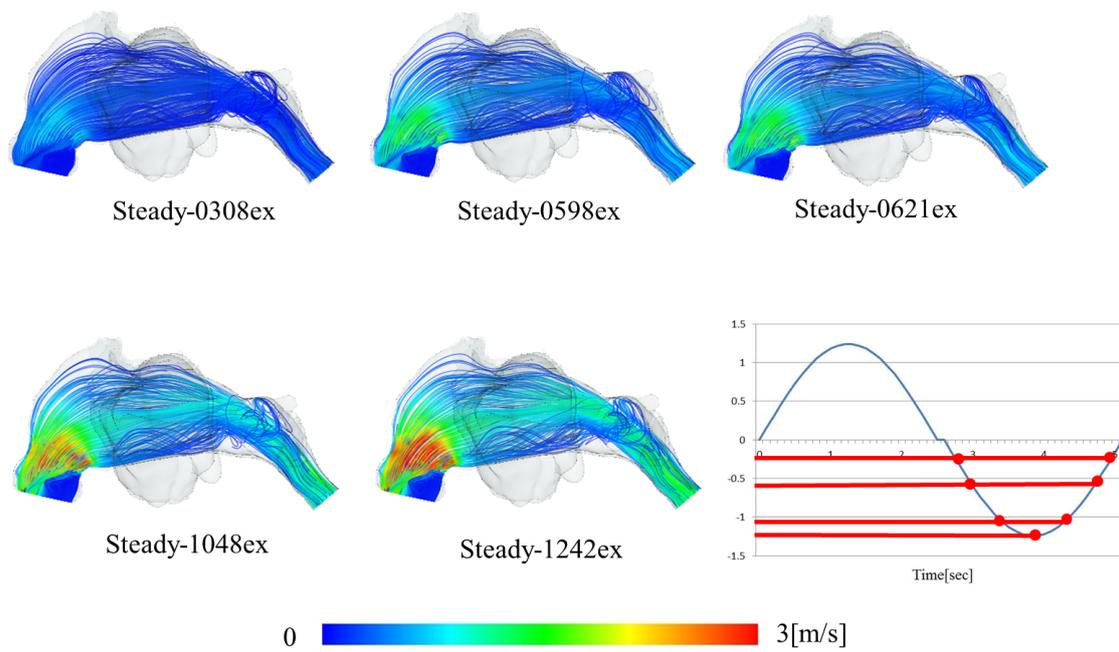


図 5.16: Flow on Steady Condition (Exhalation Phase)

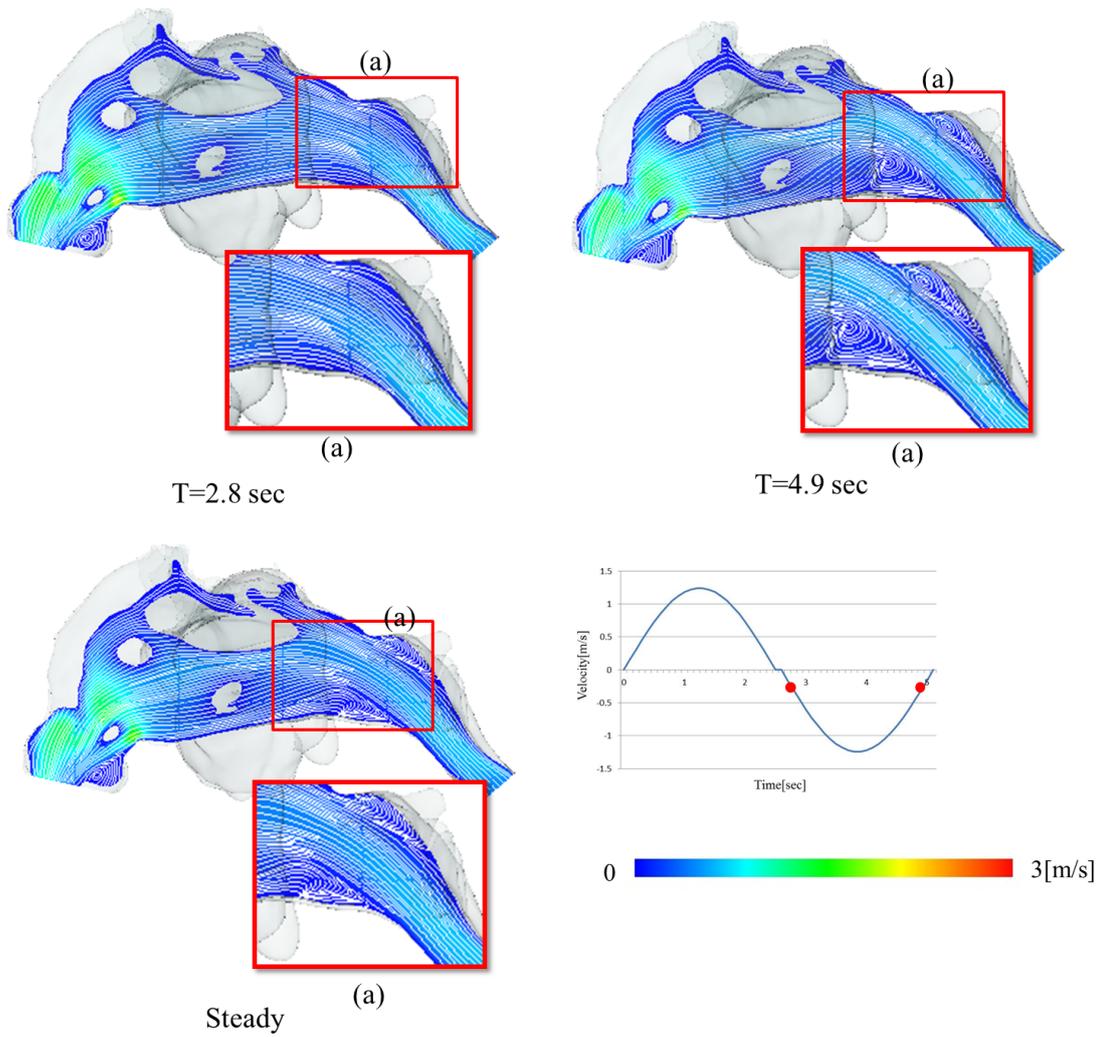


図 5.17: Flow Comparison Unsteady with Steady (exhalation Phase)

## 温度について

図 5.18 に、鼻腔内の非定常解析による温度に関するシミュレーション結果を、カラーコンターで可視化した結果である。加速期および減速期において、鼻腔内の流れの速度が遅い時は、鼻腔の前方部で完全に体温近くまで、加温されていた。時間が進むごとに、鼻腔内の流れの速度が増して行き、 $T=1.25$  sec で吸気のピークを迎えている。このときが、流速が最も早いため、冷たい空気が、咽頭付近まで達し易いが、吸気のピークにおいても、吸気された空気は、咽頭に達するまでに十分体温に近い温度まで加温されていた。また、呼気の際は、咽頭からの暖められた空気が鼻孔に向けて流れるのみであるため、鼻腔内の空気の温度は体温であり、ほとんど鼻腔内の空気の温度分布に変化は生じない。温度分布について、定常解析における結果と比較を行ったが、加速期、ピーク、減速期においても、非定常解析でのシミュレーション結果と定常でのシミュレーション結果との流れの違いは、ほとんど確認できなかった。

## 湿度について

図 5.19 に、鼻腔内の非定常解析による相対湿度に関するシミュレーション結果を、カラーコンターで可視化した結果を示す。加速期および減速期において、鼻腔内の流れの速度が遅い時は、鼻腔前方部で相対湿度 100 % に加湿されていることが、確認できる。時間が進む事に、鼻腔内の流れの速度が増して行き、 $T=1.25$  sec で吸気のピークとなる。流速のピークにおいても、鼻孔からの吸気は、徐々に加湿され、咽頭に達するまでには、相対湿度で 100% に加湿されていることが、確認できる。また、呼気の際は、咽頭からの暖められた空気が鼻孔に向けて流れるのみであるため、鼻腔内の空気の相対湿度が 100% であり、ほとんど鼻腔内の空気の相対湿度分布に変化は生じない。湿度分布について、定常解析における結果と比較を行ったが、加速期、ピーク、減速期においても、非定常解析でのシミュレーション結果と定常でのシミュレーション結果との流れの違いは、ほとんど確認できなかった。

### 5.2.3 まとめ

呼吸における鼻腔内の流れ，温度分布，湿度分布の非定常的な特徴について，非定常シミュレーションおよび定常シミュレーションを比較することで検討をおこなった．鼻腔内の流れについては，吸気および呼気の加速期および減速期において，鼻腔前方の鼻腔底部および咽頭付近で非定常性が確認された．呼気および吸気 velocities のピークおよび加速期および減速期の流れが速い時刻に関しては，非定常シミュレーションと定常シミュレーションとの間の流れの様相に大きな差異は確認できなかつた．また，温度分布および相対湿度分布に関しては，吸気および呼気において，非定常的な特徴を見出す事ができなかつた．したがって，鼻腔内の流れ，温度分布，湿度分布を検討する場合においては，定常シミュレーションにより十分に検討可能であると考えられる．

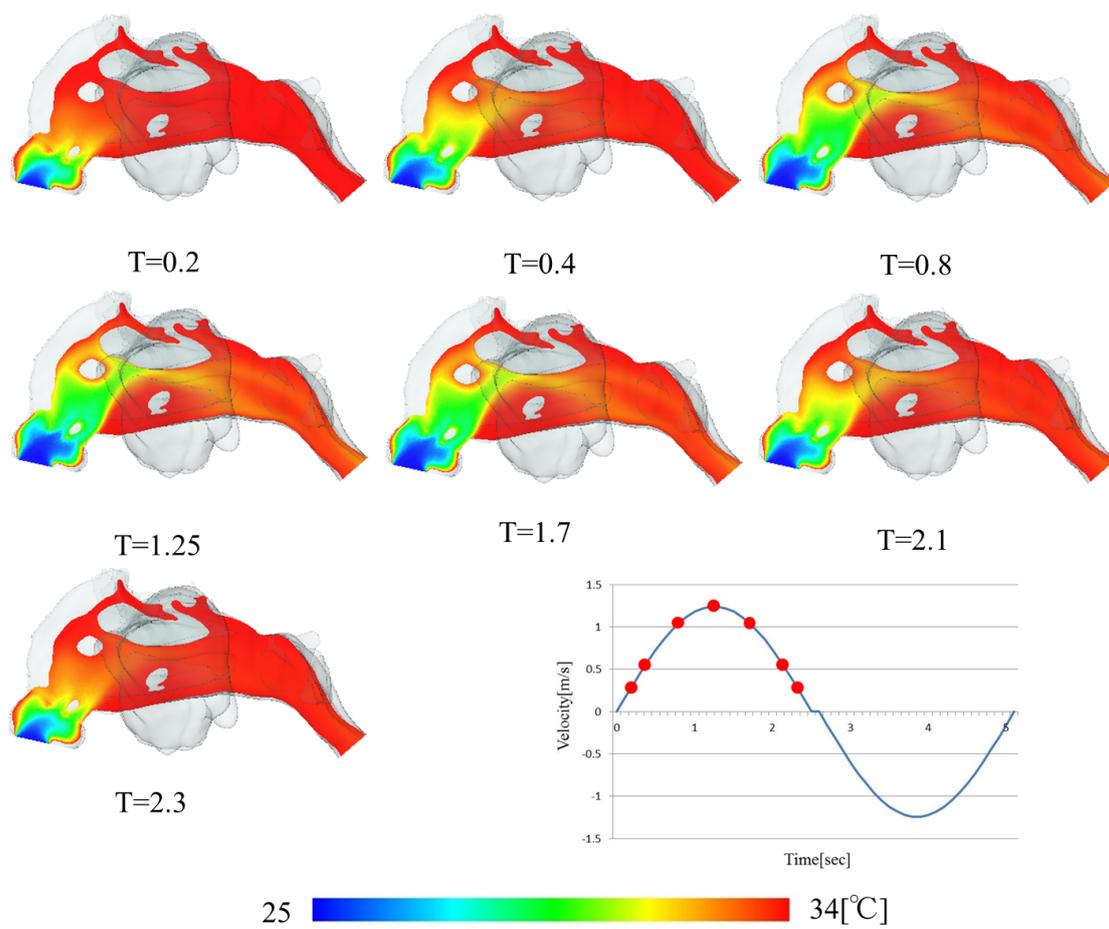


図 5.18: Temperature distribution on Unsteady Condition (Inhalation Phase)

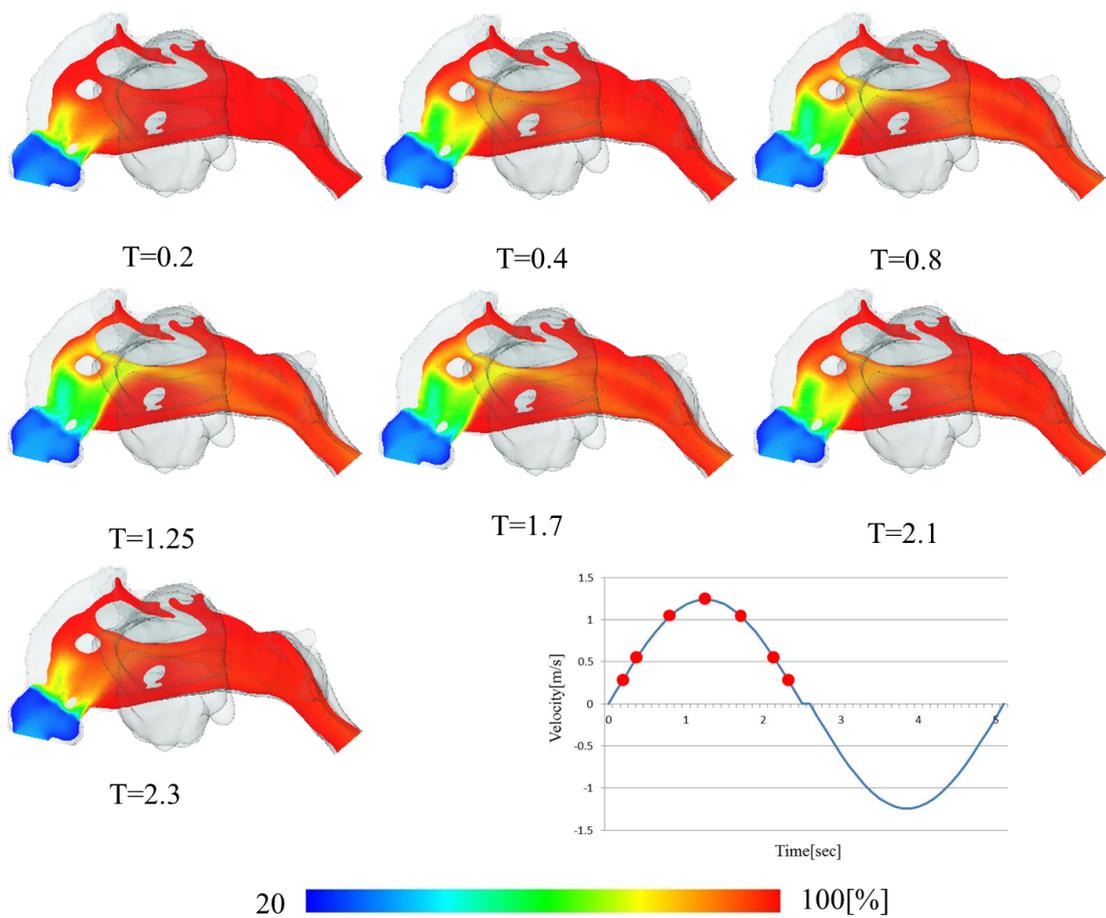


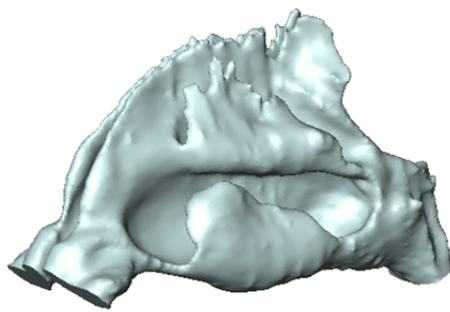
図 5.19: Relative Humidity on Unsteady Condition (Inhalation Phase)

## 5.3 個体による流れの違い

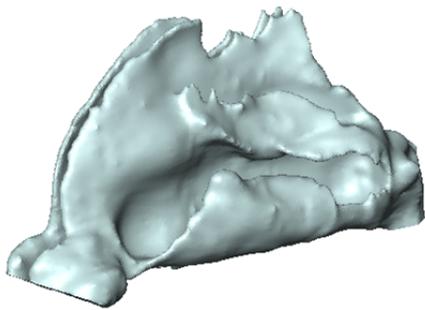
鼻腔は、性別、体格、人種などで個体差があると考えられる。本項では、3つの個体について、鼻腔内の流れ、温度分布、相対湿度分布について検討をおこなった。検討する個体は、鼻腔の疾患のない健常者である。本検討において使用する医療画像は、MRIで撮像された個体が3個体について検討をおこなう。MRIで撮像された個体であるMRI Volunteer 1(Vol 1)は、年齢26歳の日本人男性である。MRI Volunteer 2(Vol 2)は、年齢28歳の日本人男性である。MRI Volunteer 3(Vol 3)は、年齢29歳の日本人女性である。また、医療画像の解像度などの情報は、2章の表2.1に示す。

### 5.3.1 鼻腔形状について

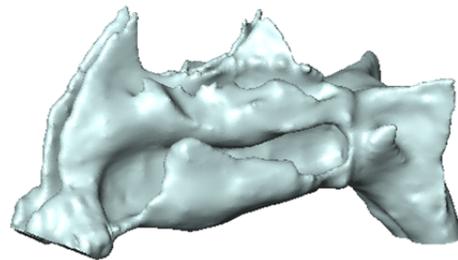
図5.20に、2章で説明した手順により、医療画像から再構築した鼻腔形状をそれぞれ示す。図5.20(a)は、MRI画像より再構築された26歳男性の鼻腔形状である。図5.20(b)は、MRI画像より再構築された28歳男性の鼻腔形状である。図5.20(c)は、MRI画像より再構築された29歳女性の鼻腔形状である。いずれの形状も鼻孔から咽頭までの長さは、 $0.1\text{ m}$ 程度であり、鼻底からの高さは、 $0.05\text{ m}$ 程度であり、幅は、 $0.03\text{ m}$ 程度である。MRI Vol 1では、 $0.33296\text{ m}^3$ であり、表面積は、 $0.22335\text{ m}^2$ であり、MRI Vol 2では、 $0.25744\text{ m}^3$ であり、表面積は、 $0.21021\text{ m}^2$ であり、MRI Vol 3では、 $0.33109\text{ m}^3$ であり、表面積は、 $0.18447\text{ m}^2$ である。最も体積が大きい鼻腔と最も体積が小さい鼻腔を比較した場合、50%近い差があることが、確認された。また、表面積については、いずれの個体も $0.2\text{ m}^2$ 程度であった。



(a) MRI Vol.1



(b) MRI Vol.2



(c) MRI Vol.3

图 5.20: Various Nasal Cavity Geometry

### 5.3.2 計算条件

鼻腔の境界条件は、4章における鼻腔のシミュレーションと同様に境界条件を用いており、図4.3に示す。Wall-1(青色の領域)は、鼻前庭の領域であり、温度のみの交換をおこなう。鼻前庭の領域では、鼻腔壁面の組織側の温度  $T_o$  は、体温 (34 °C) で一定である。この領域では、水蒸気の交換は行わない。Wall-2(赤色の領域)は、鼻腔粘膜の領域であり、温度と水蒸気の交換をおこなう。鼻腔粘膜の領域では、鼻腔壁面の組織側の温度  $T_o$  は、体温 (34 °C) で一定であり、組織側における水の質量率  $F_o$  は、3.34 % (34 °Cにおける相対湿度 100 %) である。また、鼻腔粘膜の熱伝導係数  $K_{memb}$  は、0.6 W/mK である。鼻腔粘膜の水の拡散係数  $D_{memb}$  は、 $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、境界層の水の拡散係数  $D_{bl}$  は、 $3.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  であり、境界層の厚さは、0.3 mm とした。また、鼻腔粘膜の厚さ 0.5 mm とした。呼吸は安静時の呼吸を想定しており、一回換気量を 500 ml、呼吸回数を 12 breath/min とし、それぞれの咽頭断面積から、それぞれの個体の咽頭における時間平均流速を求めた。それぞれの咽頭速度は、MRI Vol.1 では、1.574 m/s、MRI Vol.2 では、1.68 m/s、MRI Vol.3 では、1.11 m/s である。また、鼻孔、咽頭でのそれぞれのレイノルズ数は、MRI Vol.1 では、鼻孔で 515、咽頭で 685、MRI Vol.2 では、鼻孔で 549、咽頭で 708、MRI Vol.3 では、鼻孔で 596、咽頭で 577 である。鼻腔におけるレイノルズ数は、鼻孔においては、500 程度であり、咽頭では、500 700 程度であった。流入空気については、温度 25 °C、相対湿度 35 % として解析した結果において検討をおこなった。

### 5.3.3 計算結果

#### 流れについて

図5.21に、3つの個体の鼻腔のシミュレーション結果を流線により可視化した結果を示す。流線およびカラーコンターの色は速度の Magnitude を表しており、青いほど流速が遅く、赤にほど流速が早い。いずれの個体においても、鼻腔内での主流は、中鼻道付近存在しており、上鼻道付近では、遅い流れとなっている。MRI Vol.1, MRI Vol.2, MRI Vol.3 の全ての結果で、下鼻道付近においてもある程度の

流量を確認することができる。下鼻道の外側部分については、流れが乱れており、流速も遅いことが確認できる。また、全ての個体において、左と右の鼻道が合流する付近で流れが乱れていることが確認できる。各個体において、流れについては、顕著な個体差は、確認できなかった。

図 5.22 に、Transvers 断面における流線および速度の Magnitude をカラーコンタで重畳して可視化した結果を示す。咽頭付近において、右と左の鼻道が合流している部分において、渦ができていることが確認できる。これは、何れの個体においても存在しており、共通する特徴であると考えられる。

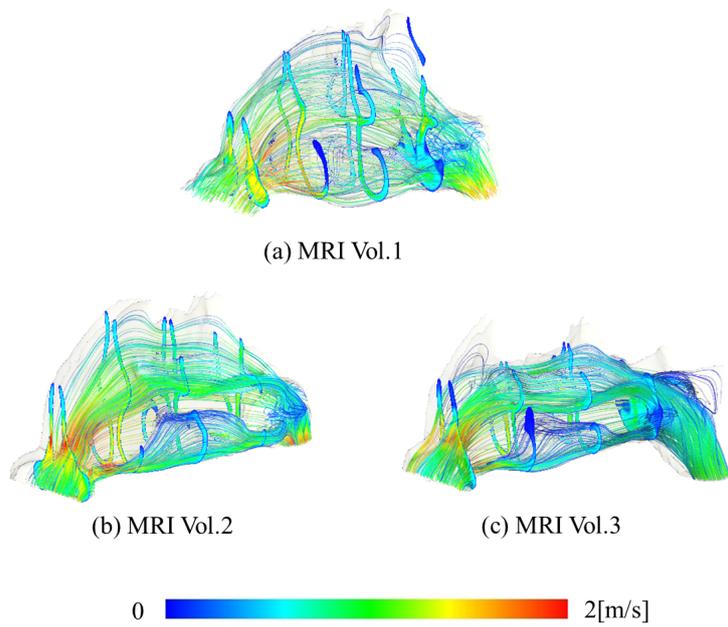


图 5.21: Nasal Cavity Flow of Three Volunteers

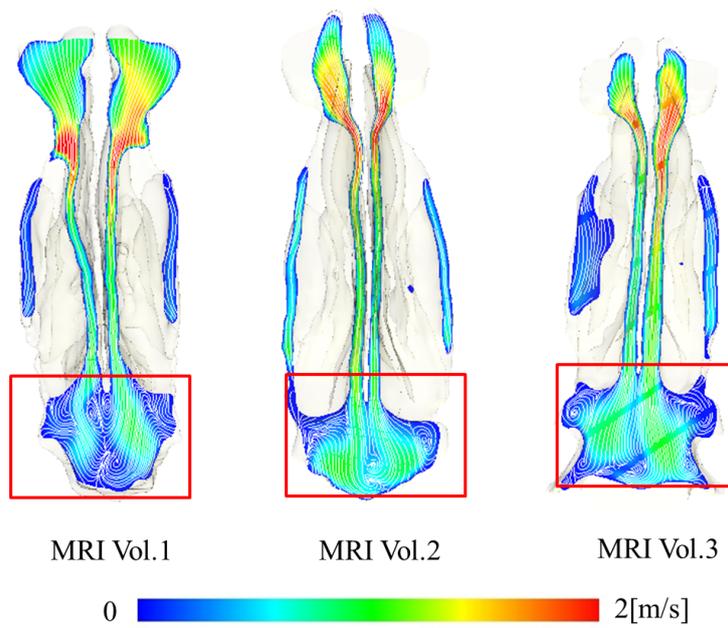


图 5.22: Nasal Cavity Flow of Three Volunteers (Transvers)

## 温度について

図 5.23 に、3 個体の鼻腔のシミュレーション結果の温度分布をカラーコンターにより可視化した結果を示す。いずれの個体においても、吸気された空気は、鼻孔から徐々に加温されて行き、咽頭に到達するまでに、体温近くまで十分に加温されていた。また、鼻弁付近で、急激に温度の変化があることが、確認された。鼻腔の前方部および咽頭付近においても、個体差による温度の顕著な変化を見出すことができなかった。

図 5.24 に、3 個体の鼻腔内シミュレーション結果および Keck らの実験結果を定量的に比較した。測定位置は Keck らの実験と同様に、鼻孔から 1.5cm, 2.5cm, 6.0cm とし、断面における平均温度を比較した。縦軸は鼻腔内の空気の温度であり、横軸は鼻腔前方からの距離を示している。何れの測定位置においても、温度の差は 0.5°C 未満であり、また Keck らの実験での測定範囲に収まっており、健常者における鼻腔形状による温度分布に関する個体差は、今回の検討では見出すことができなかった。したがって、健常者における鼻腔形状に起因する温度調節機能に関する個体差は、ほとんど無いと考えられる。

## 湿度について

図 5.25 に、3 個体の鼻腔のシミュレーション結果の相対湿度分布をカラーコンターにより可視化した結果を示す。いずれの個体においても、吸気された空気は、鼻孔から徐々に加湿されて行き、咽頭に到達するまでに、相対湿度で 100% 近くまで十分に加湿されていた。鼻腔の前方部および咽頭付近においても、個体差による相対湿度の顕著な変化は確認されなかった。各個体について相対湿度分布については、顕著な個体差を見出す事はできなかった。

図 5.26 に、相対湿度について、3 個体の鼻腔内シミュレーション結果および Keck らの実験結果を定量的に比較した。測定位置は Keck らの実験と同様に、鼻孔から 1.5cm, 2.5cm, 6.0cm とし、断面における平均相対湿度を比較した。縦軸は鼻腔内の空気の相対湿度であり、横軸は鼻腔前方からの距離を示している。何れの測定位置においても、湿度の差は 1% 程度であり、また Keck らの実験での測定範囲に収まっており、健常者における鼻腔形状による相対湿度分布に関する個体差は、ほ

とんど無いと考えられる.

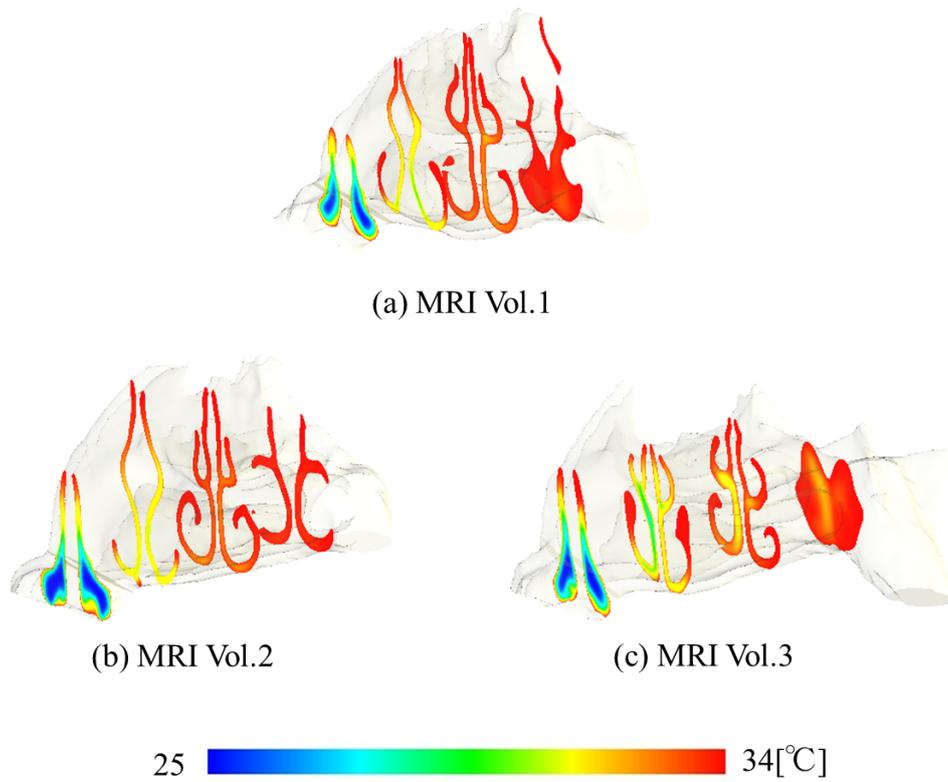


图 5.23: Temperature distribution of Three Volunteers

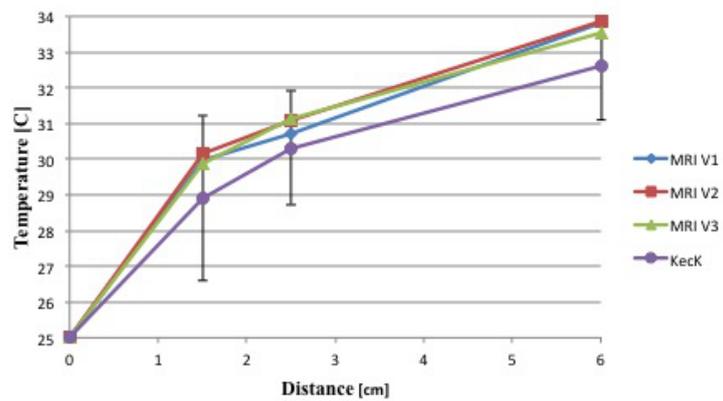


图 5.24: Temperature Comparison of Three Volunteers

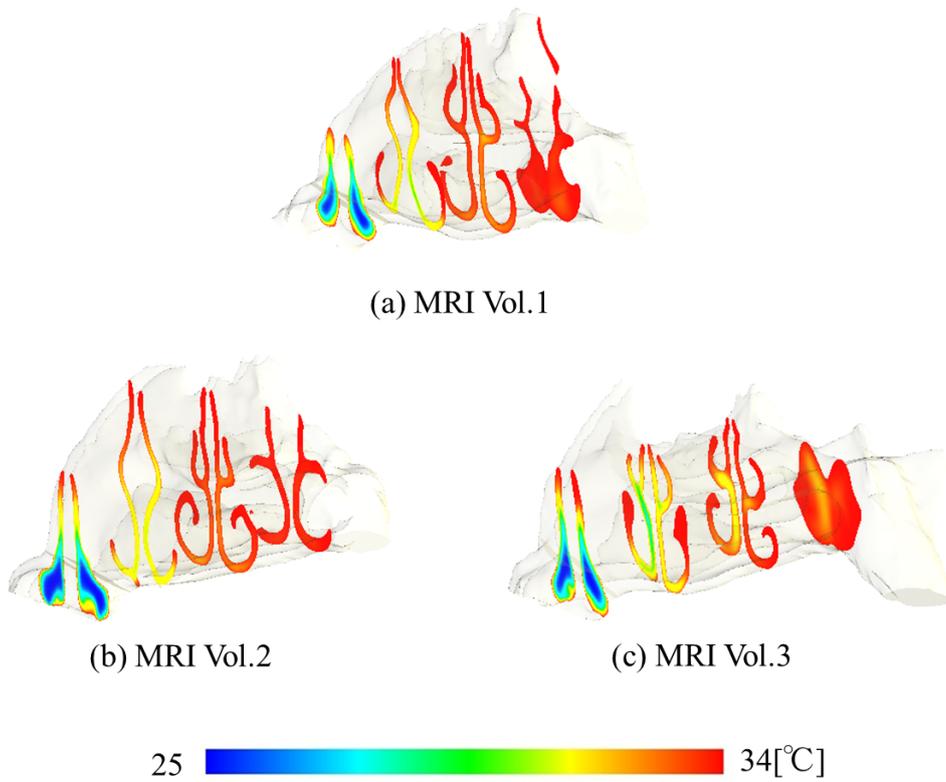


图 5.25: Relative Humidity distribution of Three Volunteers

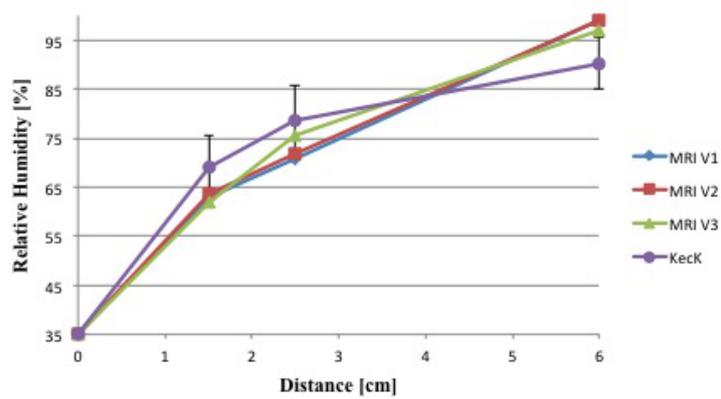


图 5.26: Relative Humidity Comparison of Three Volunteers

## 鼻腔壁面温度について

図 5.27 に、鼻腔壁面における温度について、3 個体の鼻腔のシミュレーション結果の温度分布をカラーコンターにより可視化した結果を示す。Lindemann らの実験と同様に、何れの個体においても、鼻弁から甲介前で鼻腔壁面の温度が急激に低下していることが、確認できる。また、何れの個体においても、鼻弁付近が最も鼻腔壁面の温度が低く、咽頭に近づくにつれて体温近くの温度になっている。何れの個体においても、概ね同様の温度の分布を示しており、顕著な個体差を見出すことはできなかった。

図 5.28 に、鼻腔壁面における温度について、3 個体の鼻腔内シミュレーション結果および Keck らの実験結果を定量的に比較した。測定位置は Lindemann らの実験と同様に、鼻孔から鼻前庭、鼻弁、甲介前、咽頭付近とし、鼻腔壁面における温度を示した。縦軸は鼻腔壁面の温度であり、横軸は測定位置を示している。Lindemann らの実験と同様に、何れの個体においても、鼻弁から甲介前で鼻腔壁面の温度が急激に低下していることが確認できる。鼻弁において、MRI Vol.1 と MRI Vol.3 では、 $1^{\circ}\text{C}$  程度の差を確認することができる。その他の測定位置においては鼻腔壁面の温度の差は、 $1^{\circ}\text{C}$  未満である。また、何れの個体においても、Lindemann らの実験による測定範囲に概ね収まっており、健常者における鼻腔形状による鼻腔壁面の温度関する個体差は、ほとんど無いと考えられる。

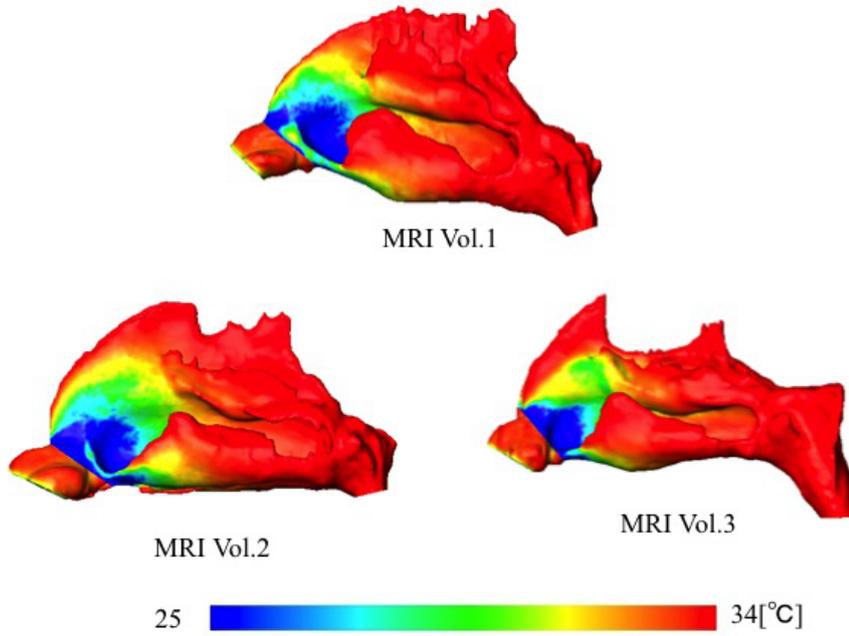


图 5.27: Nasal Wall Temperature distribution of Three Volunteers

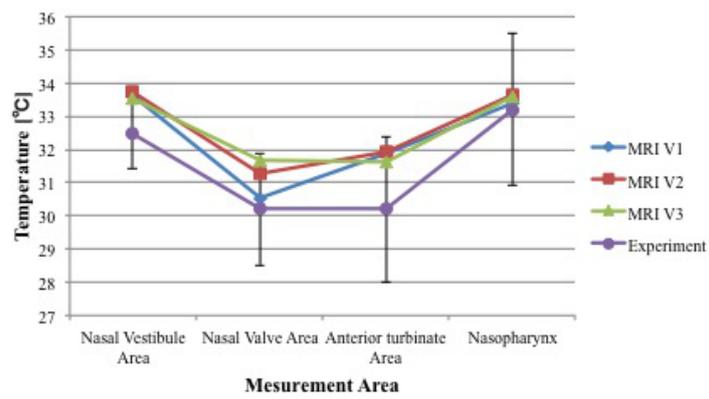


图 5.28: Nasal Wall Temperature Comparison of Three Volunteers

#### 5.3.4 まとめ

鼻腔に疾患がないの3つの個体について、鼻腔内の流れ、温度分布、相対湿度分布について検討をおこなった。疾患の無い鼻腔においては、吸気時における鼻腔内の慣れ、温度分布、湿度分布に、鼻腔形状の違いによる有意な個体差を見出す事ができなかった。今回の検討においては、吸気は、温度25°C相対湿度35%人間が通常生活するような一般的な条件により検討をおこなった。通常的生活を行うような範囲の吸気においては、何れの個体においても温度および相対湿度を十分調節することが出来たため、個体差が見出せなかったと考えられる。したがって、様々な吸気条件において検討を行う事で、健常者の鼻腔形状における個体差を見出せるのではないかと考える。また、今回は、健常者の鼻腔形状の個体差を検討をおこなったが、健常者に比べて鼻腔内の形状が大きく変異している疾患を持った鼻腔についても検討を行えば、より詳細に鼻腔形状による個体差について議論が可能になると考えられる。

## 第 6 章

# 上顎洞に関する検討

副鼻腔の機能は、様々な研究者により議論されており、頭蓋の軽量化、音の反響、温度および湿度調節の補助などの諸説があげられているが、明らかにはなっていない。本章では、副鼻腔の中で最も体積が大きく、生体機能に何らかの機能を有していると推測される上顎洞について、数値シミュレーションを用いた検討をおこなった。数値流体力学を、鼻腔内の流れをシミュレーションし、流れ、温度分布、湿度分布について検討を行った。数値流体力学の視点から、上顎洞の生理学的な機能について検討をおこなった。

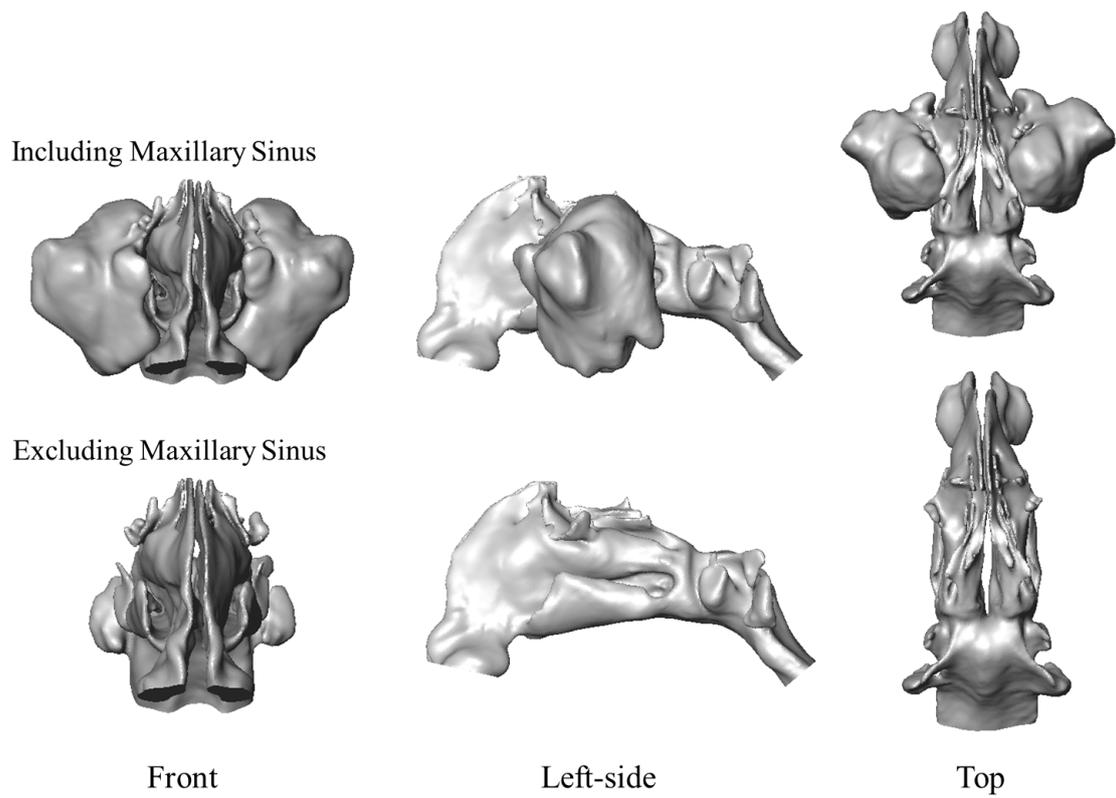
### 6.1 数値流体力学からの知見

本節では、数値流体力学の視点から、副鼻腔の生理学的な機能について検討をおこなう。副鼻腔には、前頭洞、篩骨洞、上顎洞、蝶形洞の4つがあるが、本検討においては、副鼻腔の中で最も体積が大きい上顎洞について検討をおこなう。上顎洞を含む鼻腔形状および上顎洞を含まない鼻腔形状の構築をおこない、本研究で構築した鼻腔壁面モデルを用いてシミュレーションを行い、上顎洞の有無による鼻腔内の流れ、温度、湿度の差異について検討をおこなった。

### 6.1.1 計算条件

図 6.1 に，上顎洞を含む鼻腔形状および上顎洞を含まない鼻腔形状を示す．上顎洞は，鼻腔と交通路を介して繋がっている．4 章 2 項と同様の境界条件を用いている．鼻前庭の領域では，鼻腔壁面の組織側の温度  $T_o$  は，体温 ( $34\text{ }^\circ\text{C}$ ) で一定である．この領域では，水蒸気の交換は行わない．鼻腔粘膜の領域では，鼻腔壁面の組織側の温度  $T_o$  は，体温 ( $34\text{ }^\circ\text{C}$ ) で一定であり，組織側における水の質量率  $F_o$  は， $3.34\%$  ( $34\text{ }^\circ\text{C}$  における相対湿度  $100\%$ ) である．また，鼻腔粘膜の熱伝導係数  $K_{memb}$  は， $0.6\text{ W/mK}$  である．鼻腔粘膜の水の拡散係数  $D_{memb}$  は， $2.6 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ ，境界層の水の拡散係数  $D_{bl}$  は， $3.0 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$  であり，境界層の厚さは， $0.3\text{ mm}$  とした．境界層の水の拡散係数  $D_{bl}$  は，鼻腔粘膜における水の拡散係数  $D_{memb}$  より，大きな値を定義した．

咽頭では，流出速度を境界条件として，吸気フェーズにおける時間平均速度を与えた．咽頭における時間平均速度は，一回換気量 ( $500\text{ ml}$ )，呼吸のサイクル ( $12\text{ breath/min}$ ) および咽頭断面積 ( $253\text{ mm}^2$ ) から計算され， $0.791\text{ m/s}$  である．この時の，鼻孔および咽頭におけるレイノルズ数  $Re$  は，それぞれ  $536$  と  $486$  である．咽頭における温度および相対湿度は，計算により求められる．鼻孔の境界条件は，自由流入とし，流入空気の温度および水の質量分率を定義する．鼻腔壁面は，no-slip 条件を適用する．



⊠ 6.1: Nasal Cavity Geometry (include Maxillary Sinus and excude Maxillary Sinus)

## 6.1.2 結果

### 流れについて

図 6.2 に、上顎洞の有るモデルと上顎洞の無いモデルにおいて、それぞれシミュレーション結果を、流線によって可視化した結果を示す。上図は、流線および Sagittal 断面における速度の Magnitude をカラーコンターを用いて可視化した結果であり、カラーコンターの色は、流れ速度の Magnitude であり、青色へ行くほど速度が遅く、赤色へ行くほど速度が速いことを示す。また、下図は、Coronal 断面における流線、速度の Magnitude をカラーコンターで可視化した結果である。上顎洞が有るモデルおよび上顎洞が無いモデルにおいても、鼻腔内の流れは、中鼻道に主流があり、下鼻道の流れは、非常に遅い流れである。上鼻道、中鼻道、下鼻道とも、流れは大局的に同等であり、大きな変化は確認できない。また、断面における流線で可視化においては、上顎洞の有無による流れの様相の差異は、確認することができない。

図 6.3 に、上顎洞内の流れを流線で可視化した結果を示す。上顎洞内の流れは、非常に遅く鼻腔内の流れの速度と比較して、10000 分の 1 程度の速度である。

図 6.3(a) は、左の上顎洞内の流れを流線により可視化した結果である。上図は、横から見た図であり、下図は、上から見た図である。横から見た可視化結果では、半時計周りの旋回流れを確認することができる。また、上から見た図では、複数の旋回流れを確認でき、右の上顎洞内は、複雑な流れとなっている。

図 6.3(b) は、右の上顎洞内の流れである。図 6.3(b) は、右の上顎洞内の流れを流線により可視化した結果である。上図は、横から見た図であり、下図は、上から見た図である。横から見た可視化結果では、2つの旋回流れを確認することができる。また、上から見た可視化結果では、3つの旋回流れが確認でき、左の上顎洞内の流れも複雑である。

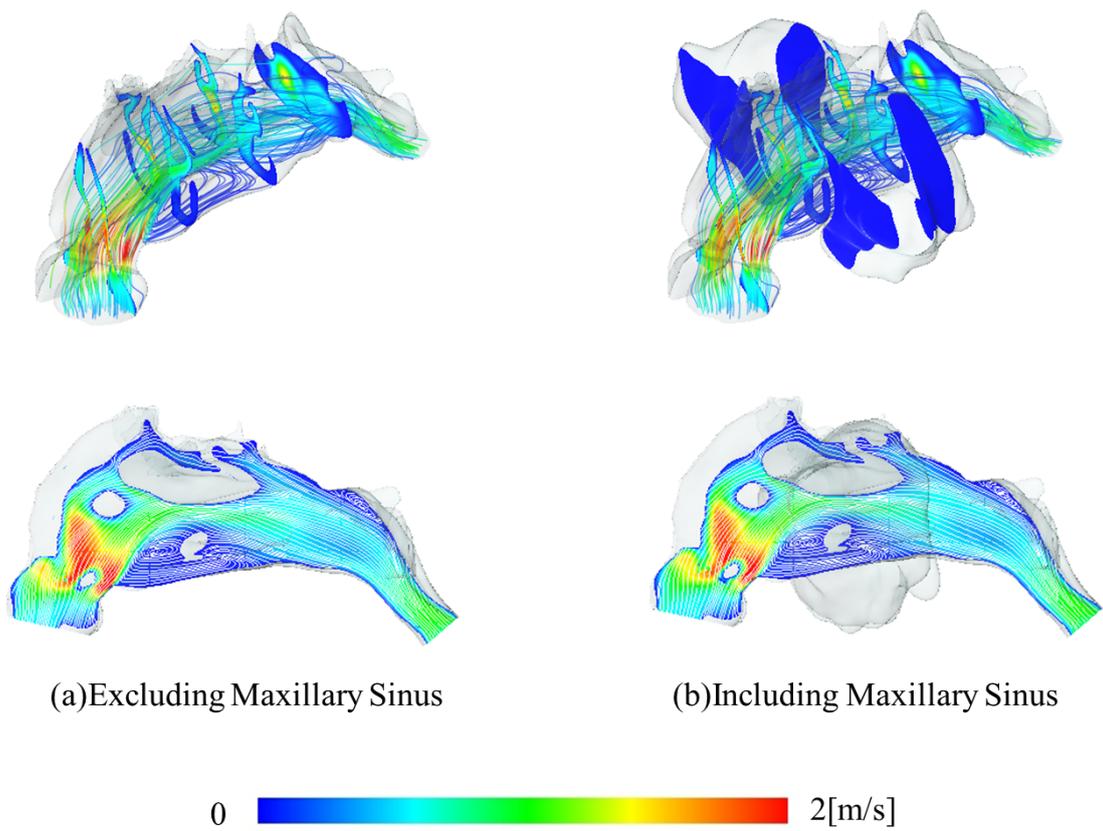


图 6.2: Flow in the Nasal Cavity (include Maxillary Sinus and excude Maxillary Sinus)

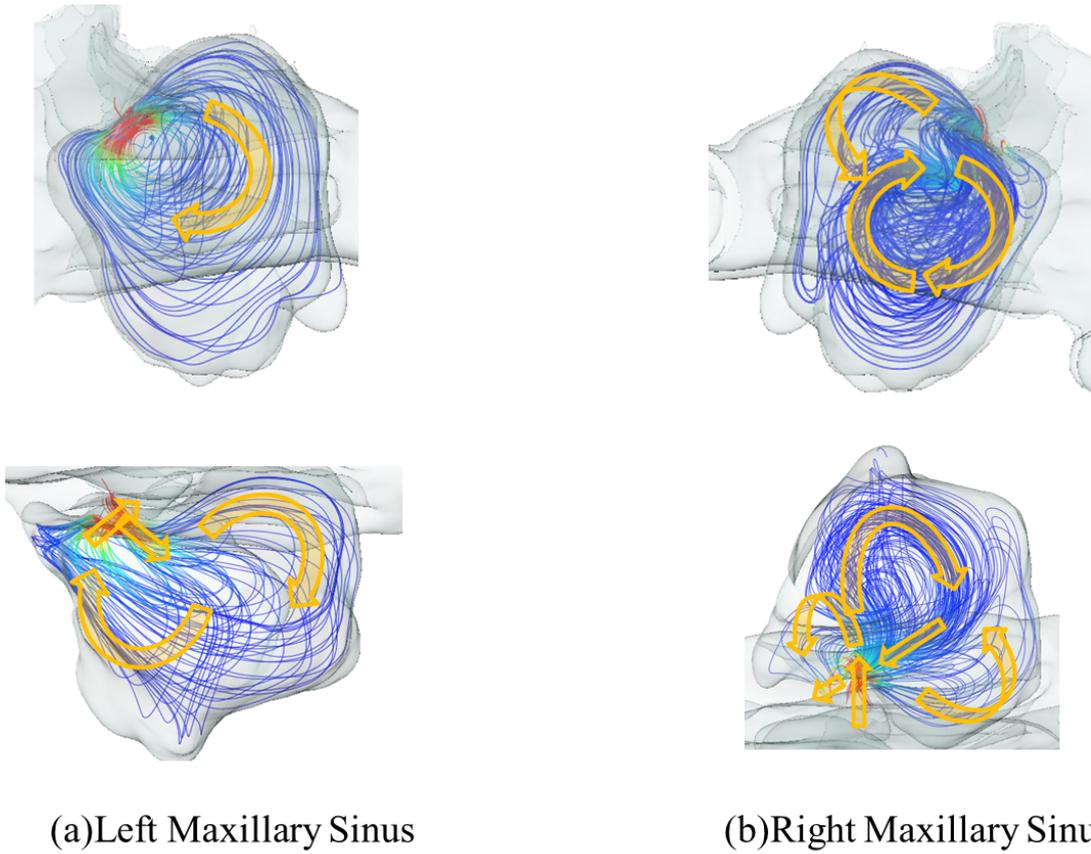


图 6.3: Flow in the Maxillary Sinus

## 温度について

図 6.4 に、温度分布についての可視化結果を示す。上図は、温度分布を Sagittal 断面において、カラーコンターを用いて可視化した結果であり、下図は、Coronal 断面において、温度分布をカラーコンターおよび白い等値線で可視化した結果である。上鼻道、中鼻道、下鼻道とも、上顎洞の有無による大きな温度変化は、ほとんど確認できない。また、Coronal 断面における可視化結果においても、温度分布の様相に差異がほとんど無い事が確認できる。上顎洞内の温度は、体温 (34 °C) で一定である。また、定量的な比較のため、図 6.6 に示すように 4 つの測定点において、温度の計測をおこなった。図 6.7(a) に、各測定点における温度の比較を示す。横軸は、測定点を示しており、縦軸は温度を示している。青色の印は、上顎洞を含んだシミュレーション結果、赤色の印は、上顎洞を含まないシミュレーション結果である。全ての測定点において、温度の変化は、1 °C 未満であり、上顎洞は、鼻腔内の温度変化に、ほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。

## 相対湿度について

図 6.5 に、相対湿度分布についての可視化結果を示す。上図は、相対湿度分布を Sagittal 断面において、カラーコンターを用いて可視化した結果であり、下図は、Coronal 断面において、相対湿度分布をカラーコンターおよび白い等値線で可視化した結果である。相対湿度においても、上鼻道、中鼻道、下鼻道とも、上顎洞の有無による差異は、ほとんど確認できない。上顎洞内の相対湿度は、100 % で一定である。また、定量的な比較のため、図 6.6 に示すように 4 つの測定点において、相対湿度の測定をおこなった。図 6.7(b) に、各測定点における相対湿度の比較を示す。横軸は、測定点を示しており、縦軸は相対湿度を示している。青色の印は、上顎洞を含んだシミュレーション結果、赤色の印は、上顎洞を含まないシミュレーション結果である。全ての測定点において、相対湿度は、数パーセント程度の変化しか確認できなかった。したがって、上顎洞は、鼻腔内の相対湿度の変化に、ほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。

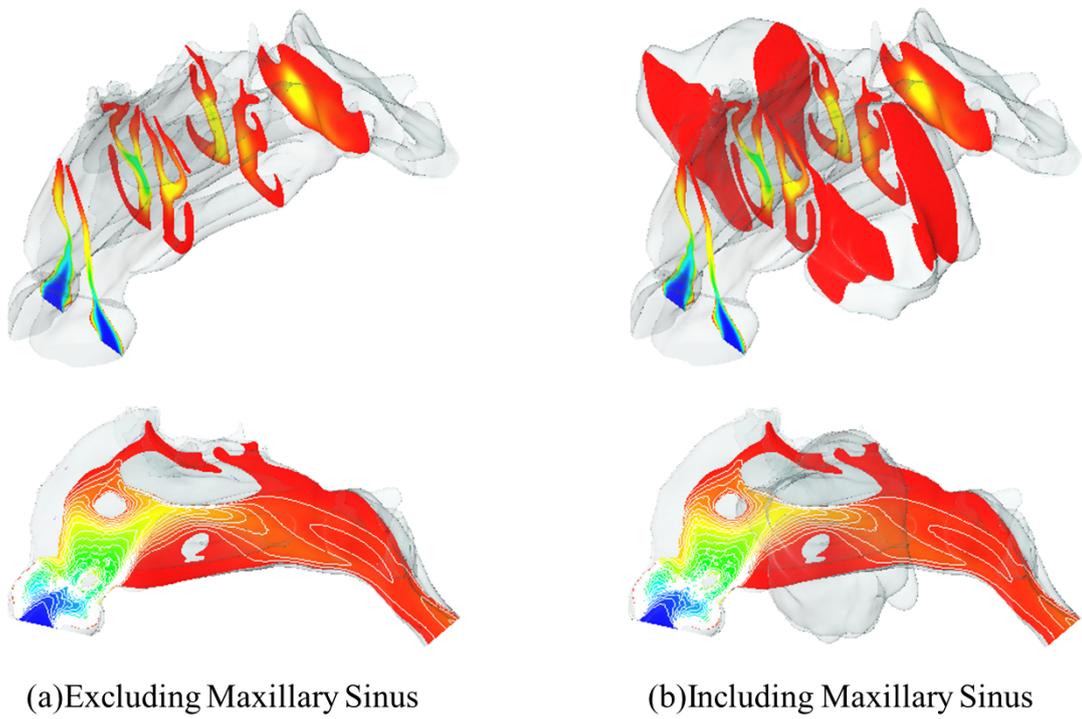


图 6.4: Temperature Distribution (include Maxillary Sinus and excude Maxillary Sinus)

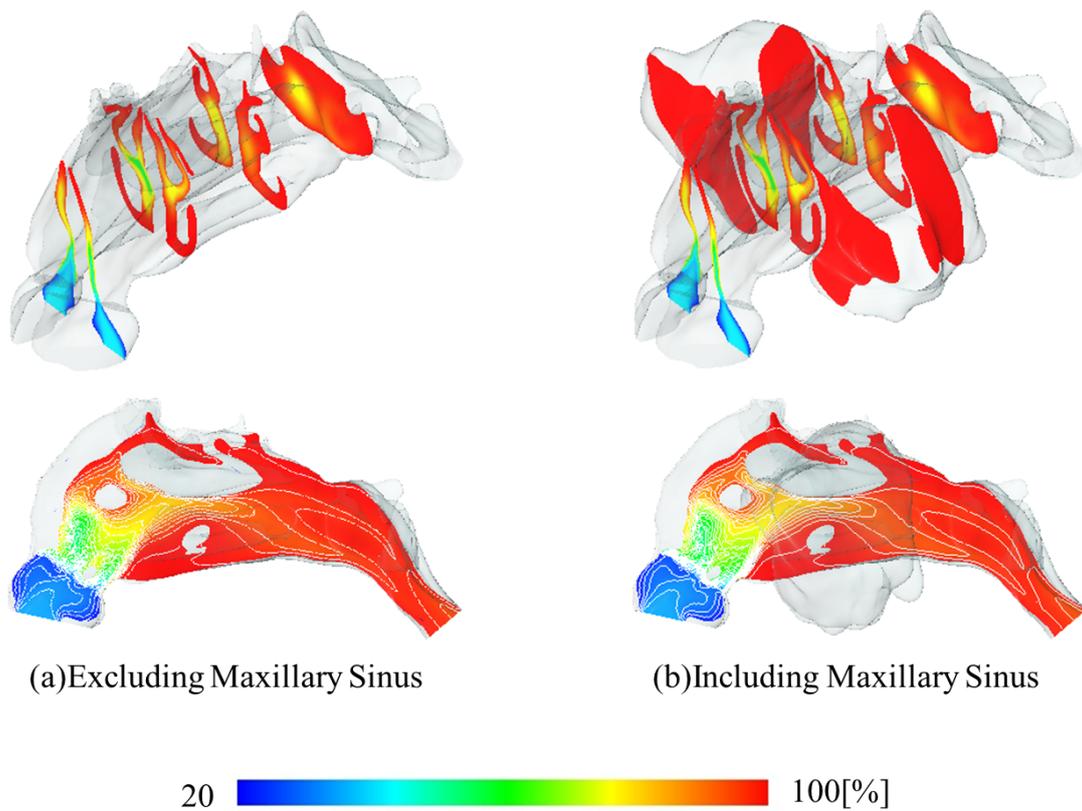
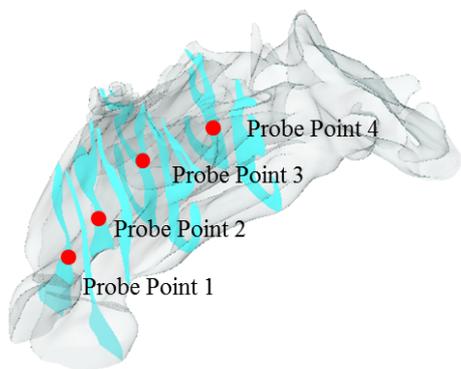
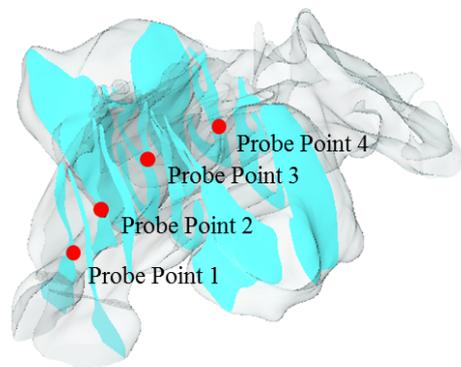


图 6.5: Relative Humidity Distribution (include Maxillary Sinus and excude Maxillary Sinus)

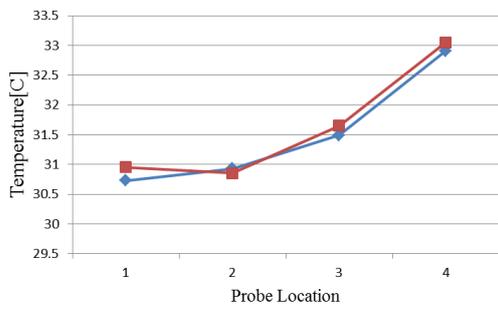


(a) Excluding Maxillary Sinus

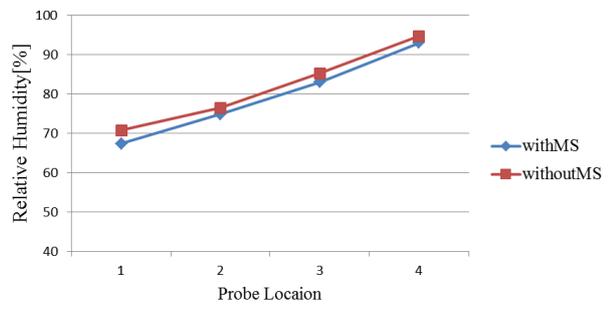


(b) Including Maxillary Sinus

图 6.6: Probe Points for Temperature and Relative Humidity Comparison (include Maxillary Sinus and excude Maxillary Sinus)



(a) Temperature



(b) Relative Humidity

Figure 6.7: Comparison of Temperature and Relative Humidity (include Maxillary Sinus and exclude Maxillary Sinus)

## 6.2 まとめ

上顎洞の生理学的な機能を，数値流体解析および数値音響解析の観点から検討をおこなった．上顎洞を含む鼻腔形状と上顎洞を含まない鼻腔形状を用いて，鼻腔内流れのシミュレーションを行い，上顎洞の有無による鼻腔内の流れ，温度分布，湿度分布の差異について検討をおこなった．上顎洞を含むシミュレーション結果と上顎洞を含まないシミュレーション結果では，鼻腔内の流れ，温度分布，相对湿度分布に顕著な差は，確認されなかった．今回の検討においては，鼻腔内の流れ，温度，湿度には，上顎洞の有無による影響を見出すことができなかった．しかし，人間に比較的近い個体であるサルにおいては，生息する地域によって上顎洞を持つ個体と上顎洞を持たない個体が存在する．進化の過程において，生息地域によって上顎洞が退化したのではないかと推測される．したがって，上顎洞は鼻腔内に何らかの影響を及ぼしていると推測される．今回の検討においては，温度25°C 相对湿度35%の一つの条件のみの検討であったが，吸気の変化させる事で，上顎洞が鼻腔内に与える影響を見出す事が出来るのではないかと考える．

## 第 7 章

### 考察

本研究においては、温度および水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルの構築おこなった。構築した鼻腔壁面モデルは、検熱のみではなく潜熱を含むシミュレーションを行う事ができる。

単純な形状である直円管を用いて、潜熱の影響について検討をおこない、構築した鼻腔壁面モデルが潜熱による熱の移動をシミュレーションできることを確認した。また、CT 画像より再構築した鼻腔形状を用いて、シミュレーションをおこない、実験による鼻腔の測定結果と比較することで、構築した鼻腔壁面モデルの検証をおこなった。

再構築した鼻腔形状対象に、種々の吸気条件で、シミュレーションをおこなった。シミュレーションについては、潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルおよび潜熱を考慮していない鼻腔壁面モデルの双方について行い、潜熱の影響について検討をおこなった。

潜熱を考慮した鼻腔壁面モデルと潜熱を考慮していない鼻腔壁面モデルでは、温度分布および相対湿度分布に大きな差異を確認した。潜熱は、暖かく湿った空気を吸気した場合は、凝縮潜熱として働き、鼻腔が、暖かい空気を冷却するのを阻害する働きをした。また、暖かく乾燥した空気、冷たく乾燥した空気、冷たく湿った空気を吸気した場合については、潜熱は、蒸発潜熱として働き、暖かい空気を冷却するケースでは、冷却を促進するとともに、冷たい空気を暖めるケースでは、加温を阻害する働きをした。したがって、潜熱が鼻腔の温度調節機能を高める働きをするのは、暖かく乾燥した空気を吸気した場合である。その他の場合につい

ては、潜熱は鼻腔の温度調節機能を、低下させる働きをする。

凝縮潜熱は、空気中の水の質量分率が、組織側の水の質量分率を超えるような、高温高湿の吸気の場合に発生する。蒸発潜熱は、空気中の水の質量分率が、組織側の水の質量分率を超えない場合に、発生する。高温高湿という条件は、一般的に日常生活で遭遇するのは稀でありため、我々の鼻腔内では多くの場合、検熱とともに蒸発潜熱による熱のやり取りが行われていると考えられる。また、式3.2に示すように、潜熱の大きさは、水の移動量に依存しており、吸気した空気の水の質量分率と組織側における水の質量分率との間の差が大きいほど、潜熱による影響は顕著になると考えられる。これらのことから、潜熱が鼻腔にもっとも悪影響を与えるのは、暖かく湿った空気を吸気した場合であると考えられる。非常に暖かく十分湿った空気を吸気した場合は、吸気した空気からの鼻腔壁面への水の移動が大きくなる事で、潜熱による熱量が大きくなる。これにより、高温の空気を十分に冷却することができず、高温の空気により鼻腔組織へ悪影響を及ぼし易いと考えられる。

また、鼻腔内で移動する正味の熱量に対する潜熱の割合は、それほど高くは無いが、鼻腔内では数度の小さな温度変化でも、鼻腔内の温度分布および相対湿度分布に大きく影響するため、潜熱を考慮することは、重要であると考えられる。

種々の吸気条件全てにおいて、吸気した空気は、咽頭に到達するまでに、徐々に加温加湿または低容除湿され、温度は体温(34°C)近く、相対湿度は100%近くまで調節されていた。また、いずれのケースにおいても、鼻腔前方部においての温度および湿度の調節が、顕著に確認された。鼻腔の前方部には、鼻孔から絞り込まれて、断面積が小さくなる鼻弁と呼ばれる部位があり、この鼻弁部分で、急速に温度および湿度が調節される傾向があった。

呼吸は、吸気と呼気からなる非定常な現象である。したがって、鼻腔内流れの非定常性を検討する必要がある。呼吸を正弦波により模した非定常の条件を与えて検討をおこなった。

鼻腔内の流れは、時間経過とともに速度を増し、 $T=1.25$  secでピークとなる。吸気時における流れの様相は、定常でのシミュレーションと大きな差異は、確認されなかった。速度のピークからの減速フェーズにおいて、咽頭付近において、定常でのシミュレーションの結果とわずかな差異が観察されたが、鼻腔内のメイン

フローでは、ほとんど差異は確認されなかった。温度分布および湿度分布についても、同様の傾向を示しており、鼻腔内の流れについては、非定常的な特性はほとんど無いと考えられる。また、人間の呼吸の Womersley Number も小さいことから、非定常性がほぼ無いというのは、妥当な結果であると考えられる。よって、鼻腔のシミュレーションにおいては、定常解析で十分に流れ、温度分布、湿度分布などについて検討できると考えられる。

性別、年齢、体格が異なる鼻腔内の流れのシミュレーションを行い、形状の個体差が及ぼす流れ、温度分布、相対湿度分布について検討をおこなった。流れについては、Vol3の個体においては、鼻腔前方部で縦渦が確認されたが、それ以外の個体においては、鼻腔前方部での縦渦は、確認されなかった。この縦渦は、Nasal Cycleによって、生成や消滅が行われると推察される。健常者の鼻腔形状においては、大局的な流れに大きな個体差を見出すことが出来なかった。温度分布および相対湿度分布についても、何れの個体においても咽頭に到達するまでに、最適な状態にコントロールされており、有意な個体差を見出す事が出来なかった。吸気の温度 25°C 相対湿度 35% のような人間が通常生活するような一般的な条件においては、性別、年齢、体格が異なるとしても、鼻腔内の流れ、温度分布、相対湿度分布に大きな影響は無いと考えられる。したがって、様々な吸気条件において検討を行う事で、健常者の鼻腔形状における個体差を見出せるのではないかと考える。また、今回は、健常者の鼻腔形状の個体差を検討をおこなったが、健常者に比べて鼻腔内の形状が大きく変異している疾患を持った鼻腔についても検討を行えば、より詳細に鼻腔形状による個体差について議論が可能になると考えられる。

上顎洞の生理学的な機能を明らかにするために、数値シミュレーションの観点から検討をおこなった。本研究においては、数値流体力学を用いて、鼻腔内の流れ、温度分布、相対湿度分布に上顎洞が与える影響について検討をおこない、得られた知見から上顎洞の機能について考察をおこなった。数値流体力学の観点からは、上顎洞の有無によって、鼻腔内の流れ、温度分布、相対湿度分布に、ほとんど差異を見出すことができなかった。上顎洞は、鼻腔と交通路を介して繋がっており、流れも存在しているが、交通路の位置が、上鼻道付近にあり、交通路自体も細いため、流速は、鼻腔内の流れに比べて極めて遅く、鼻腔内の上顎洞間で交換される流量は非常に微細なものである。そのため、鼻腔のシミュレーションにおいて、

流れ，温度分布，湿度分布へ，上顎洞がほとんど影響を及ぼさなかったのだと考えられる。したがって，吸気温度 25°C 相対湿度 35% のような人間が通常生活するような一般的な条件においては，上顎洞は，鼻腔内の流れ，温度分布，湿度分布に影響を及ぼさないと考えられる。しかし，サルにおいては，生息する地域によって上顎洞を持つ個体と持たない個体が存在する。これは，上顎洞が何らかの生理学的な機能を持っており，生息地域によっては退化し，上顎洞を持つ個体と持たない個体が存在するのだと推測される。よって，種々の条件下で検討を行う事により，上顎洞の生理的な機能をより詳細に見出す事が出来るのではないかと考える。

# 第 8 章

## 結言

### 8.1 まとめ

鼻腔内の流れを精密にシミュレーションするために、温度と水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルを構築をおこなった。構築した鼻腔壁面モデルは、鼻腔壁面の構造を考慮し、粘膜の厚さなどを考慮するとともに、検熱のみではなく潜熱を考慮している。単純形状である円柱を対象に、構築した鼻腔壁面モデルを用いて、潜熱についての検討をおこなった。構築した鼻腔壁面モデルは、潜熱をシミュレーションできることを確認した。

鼻腔での様々な検討を前に、構築した温度と水蒸気交換のための鼻腔壁面モデルが、鼻腔のシミュレーションに用いることができるかを検討した。CT 画像から鼻腔形状を再構築し、再構築した鼻腔形状を用いて、構築した鼻腔壁面モデルを適用し、鼻腔内のシミュレーションをおこなった。鼻腔内のシミュレーション結果を実験による測定で得られた結果を比較したところ、温度及び相対湿度とも概ねの一致を示した。したがって、構築した鼻腔壁面モデルは、鼻腔内のシミュレーションに用いることができると考えた。

人間が、暑い地域から寒い地域までの様々な環境で生活を行えるのは、鼻腔の優れた温度および湿度調節機能によるものであると考えられる。そこで、暖かく乾燥した空気、暖かく湿った空気、冷たく乾燥した空気、冷たく湿った空気を吸気として与え、鼻腔内のシミュレーションをおこなった場合の流れ、温度分布、相対湿度分布、潜熱の影響について、検討をおこなった。全てのケースにおいて、吸

気の温度および相対湿度は、咽頭付近に到達するまでに、温度は体温近く、相対湿度は100%近くまで調節された。この結果は、鼻腔が高い温度および湿度の調節能力を持っていることを示している。また、鼻腔の前方部にある鼻弁の周辺で、急激に温度および相対湿度が調節されていることが、シミュレーション結果から確認された。鼻腔内の流れに関しては、中鼻道に主流があり、下鼻道が最も遅い流れとなっている。上鼻道への流れは、中鼻道と比較して、遅い流れである。これは、上鼻道付近には、匂いを感知する器官である嗅球があり、鼻腔は、匂いを感知し易いような合理的な構造であることがわかる。潜熱を考慮した場合および考慮してない場合、吸気の温度および湿度を変更した場合においても、鼻腔内の流れの変化は、ほとんど確認できなかった。温度分布については、暖かく乾燥した空気を吸気したケースで、潜熱を考慮していない結果に比べて、蒸発潜熱の影響で顕著な温度の低下が確認された。また、相対湿度については、潜熱による鼻腔内の温度変化により、顕著な変化が確認された。潜熱の大きさは、鼻腔壁面からの水の移動量に依存して、暖かく乾燥した空気を吸気した場合にもっとも顕著に影響を及ぼした。潜熱は、鼻腔内の温度および湿度分布に大きく影響を及ぼすため、鼻腔内のシミュレーションにおいては、潜熱を考慮することは、重要である。

呼吸を模した流量プロファイルを咽頭に与える事で、鼻腔内の流れの非定常性について検討をおこなった。温度分布および湿度分布については、非定常解析と定常解析の結果の間に、ほとんど差異は確認されなかった。流れの様相については、上鼻道付近および左右の鼻道が合流している咽頭付近において、非定常解析の結果と定常解析の結果に、多少の差異は確認されたが、概ねの部分では、非定常解析の結果も定常解析の結果も同様の傾向を示した。したがって、鼻腔内の流れにおける非定常性は、ほとんど無く、鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布などを検討する場合は、定常解析で十分に検討することが可能である。

性別、年齢、体格が異なる鼻腔内の流れのシミュレーションを行い、形状の個体差が及ぼす流れ、温度分布、相対湿度分布について検討をおこなった。流れについては、Vol3の個体においては、鼻腔前方部で縦渦が確認されたが、それ以外の個体においては、鼻腔前方部での縦渦は、確認されなかった。吸気の温度25°C相対湿度35%のような人間が通常生活するような一般的な条件においては、性別、年齢、体格が異なるとしても、鼻腔内の流れ、温度分布、相対湿度分布に大きな

影響は無いと考えられる。

副鼻腔の生理学的な機能を、数値流体力学の観点から検討をおこなった。副鼻腔の中で、最も体積が大きい上顎洞を対象に検討をおこなった。数値流体力学の観点からは、上顎洞の含む場合と上顎洞を含まない場合の鼻腔形状での流れ、温度分布、湿度分布について検討をおこなった。上顎洞を含む鼻腔形状および上顎洞を含まない鼻腔形状を用いてシミュレーションを行い比較した結果、流れ、温度分布、湿度分布に大きな差異は、確認できなかった。したがって、今回検討をおこなった温度 25°C 湿度 35% の一般的な吸気においては、鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布に、上顎洞はほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。温度 25°C 湿度 35% の一般的な吸気条件下においては、上顎洞は、鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布には、ほとんど影響を及ぼさない事を明らかにした。

## 8.2 今後の展望

本研究では、鼻腔壁面における温度と水蒸気交換モデルの提案を行い、再構築した鼻腔形状を用いて定常および非定常シミュレーションを行うことで、鼻腔内の流れ、温度分布、湿度分布、潜熱の影響などについて明らかにした。提案した鼻腔壁面モデルは、鼻腔内の粘膜の表面は、滑らかであり、の厚さを一定であると仮定して、シミュレーションをおこなった。しかし、実際の鼻腔内は部位により、鼻線、鼻海綿叢などの発達が異なり、粘膜の厚さが不均一であるとともに、粘膜の表面も微細な凹凸により、表面は滑らかではない。より精密なシミュレーションを行う場合、鼻腔内の部位による粘膜の厚さを変える必要がある。また、鼻腔内の粘膜表面の微細な凹凸を再現することで、鼻腔内の表面積の大きくなる。表面積の変化は、鼻腔内の温度、水蒸気、潜熱に大きく影響すると考えられ、精密な鼻腔壁面モデルを実現する上で考慮する必要がある。したがって、医療画像から鼻腔領域および鼻腔粘膜を、それぞれ抽出する必要がある。鼻前庭は、鼻腔粘膜ではなく皮膚で覆われているが、皮膚からは鼻毛が生えており、鼻毛が鼻腔内の空気の流れに影響を及ぼしている可能性があり、鼻前庭における鼻毛をモデル化する必要がある。副鼻腔には、上顎洞の他に前頭洞、篩骨洞、蝶形洞があり、副鼻腔の機能の解明には、それらの洞についても考慮する必要がある。さらに、様々

な吸気条件下において、副鼻腔の機能について議論を行う必要がある。

# 謝辞

本研究を行なうに当たり、終始御指導を賜りました松澤 照男 教授に深謝致します。CT 画像の提供並びに、医学的な視点から有益な御助言を賜りました金沢市立病院 石川 滋 先生に感謝致します。MRI 画像の提供並びに、有益な御助言を賜りました京都大学 霊長類研究所 西村 隆 准教授に感謝致します。

本論文を纏めるに当たって御協力頂きました党 建武 教授，前園 涼 准教授，井口 寧 教授に感謝致します。また，日頃より有益な御助言を頂き，多面に渡って励まして頂きました富士通株式会社 渡邊 正宏 博士，理化学研究所 熊畑 清 博士，東京大学 森 太志 博士に感謝致します。最後に，本論文をまとめるに当たって御協力頂きました松澤研究室の諸兄に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Lang, J., “Anatomy of the Nose, Nasal Cavity and Paranasal Sinuses” *Thieme Publishing Group (1989)*
- [2] 森満 保, “イラスト耳鼻咽喉科” 文光堂, (1987)
- [3] Rea, TC., and Kopper, T., “Hole in the Head: Evolutionary Interpretations of the Paranasal Sinuses in Catarrhines” *Evolutionary anthropology*, Vol.13, No.6, pp.221-223 (2004)
- [4] Blanton, P., and Biggs, N., “Eighteen hundred years of controversy: The paranasal sinuses” *American Journal of Anatomy*, Vol.124, Issue 2, pp.135-147 (1969)
- [5] Doorly, D., Taylor, D.J., and Schroter, R.C, “Experimental Investigation of nasal airflow” *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol.222, pp.439-453 (2008)
- [6] Doorly, D., Taylor, D.J., A. M. Gambaruto, Schroter, R.C, and N. Tolley, “Nasal architecture: form and flow” *Philosophical Transaction of the Royal Society A*, Vol 336, pp.3225-3246 (2008)
- [7] Spence, C.J.T., Buchmann, N.A., Jermy, M.C, and Moore, S.M., “Stereoscopic PIV measurements of flow in the nasal cavity with high flow therapy” *Experiments in Fluids*, Vol 50, Issue 4, pp.1005-1017 (2011)
- [8] Keck, T., and Leiacker, R., “Humidity and Temperature profile in the nasal cavity” *Rhinology*, Vol 38, pp167-171 (2000)

- [9] J. LINDEMANN, R. LEIACKER, G. RETTINGER, and T. KECK, “Nasal mucosal temperature during respiration” *Clinical Otolaryngology*, Vol 27, pp.135-139
- [10] Ishikawa, S., Nakayama T., Watanabe, M., and Matsuzawa, T., “Visualization of Flow Resistance in Physiological Nasal Respiration” *Archives of Otolaryngology - Neck Surgery*, Vol 132, pp.1203-1209 (2006)
- [11] Ishikawa, S., Nakayama T., Watanabe, M., and Matsuzawa, T., “Flow Mechanisms in the Human Olfactory Groove” *Archives of Otolaryngology - Neck Surgery*, Vol 135, No.2, pp.156-162 (2009)
- [12] Lee, J.H., Na, Y., Kim, S.K., and Chung, S.K., “Unsteady flow characteristic through a human nasal cavity” *Respiratory Physiology & Neurobiology*, Vol.172, pp.136-146 (2010)
- [13] S. Naftali, R. C. Schroter, R. J. Shiner, and D. Elad, “Transport Phenomena in the Human Nasal Cavity: A Computational Model” *Annals of Biomedical Engineering*, Vol 26, pp.831-839 (1998)
- [14] Naftali, S., Rosenfeld, M., Wolf, M., and Elad, D., “The Air-Conditioning Capacity of the Human Nose” *Annual of Biomedical Engineering*, Vol.33, No.4, pp.545-553 (2005)
- [15] Zachow, S., Muigg, P., Hidebrandt, T., Doleisch, H., and Hege, H.C., “Visual exploration of nasal airflow” *IEEE transaction on visualization and computer graphics*, Vol.15, No.6, pp.1407-1414 (2009)
- [16] Kumahata, K., Mori, F., Ishikawa, S., and Matsuzawa, T., “Nasal Simulation using Heat and Humidity Models” *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.5, No.5, pp.565-577 (2010)
- [17] ANSYS, Inc., “ANSYS Fluent Flow Modeling Simulation Software” (*online*), available from <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology>

*/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent* ,  
(accessed 2013-02-12)

- [18] Rogers, R.R., and Yau, M.K., “A Short Course in Cloud Physics 3rd-Edition”  
*Pergamon Press*,pp.15-26 (1989)
- [19] FSI, “Avizo — FSI Visualization Science Group” (*online*), *available from*  
<http://www.vsg3d.com/avizo/overview>, (accessed 2013-10-24)
- [20] Materialize, Inc “Magics — Software for additive manufacturing” (*online*),  
*available from* <http://software.materialise.com/magics>, (accessed 2013-02-12)
- [21] Lee, C.Y., and Wilke, C.R., “Measurement of vapor diffusion coefficient” *In-*  
*dustrial and Engineering Chemistry*,Vol.46,No.11,pp.2381-2387 (1954)
- [22] Igarashi, K., Nishino, K., and Nayar S.K., “The Apperance of Human Skin”  
*Technical Report: CUCS-024-05*, Columbia University, June 2005
- [23] ESI, “The open Source CFD toolbox” (*online*), *available from*  
<http://www.openfoam.com>, (accessed 2013-06)
- [24] OpenFoam, “potential WaveFoam” (*online*), *available from*  
[http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib](http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib_potentialWaveFoam)  
*\_potentialWaveFoam*, (accessed 2013-01)
- [25] Oshima, T., and Imano, M., “A Full Finite-Volume Time-Domain Approach  
towards General-purpose Code Development for Sound Propagation Predic-  
tion with Unstructured Mesh” *Proceedings of Inter-Noise 2008* ,No.287,15  
pages in CD-ROM (2008)
- [26] Sakakibara, H., Ishida, A., Nakai, T., and Suzuki, H., “鼻腔・副鼻腔の3次元  
音響管モデルによるシミュレーション” 電子情報通信学会, 信学技報, E94-17,  
pp.48-52 (1994)

- [27] Zang, H., Liu, Y., Han, D., Zhang, L., Wang, T., Sun, X., and Li, L., “Airflow and temperature distribution inside the maxillary sinus: a computational fluid dynamics simulation” *Acta Otolaryngol*, Vol.132, No.6, pp.637-644
- [28] 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の流れシミュレーション” *シミュレーション*, Vol.23, No.1, pp.22-29 (2003)
- [29] C. M. Hood, R. C. Schroter, D. J. Doorly, E. J. S. M. Blenke, and N. S. Tollery, “Computational modeling of flow and gas exchange in models of the human maxillary sinus” *Journal of Applied Physiology*, Vol.107, pp.1195-1203 (2009)
- [30] Cole, P., “Physiology of the Nose and Paranasal Sinuses” *Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, Vol.16, pp.25-54 (1998)

# 本研究に関する発表論文

## 査読付き論文

- [1] Sho Hanida, Futoshi Mori, Kiyoshi Kumahata, Masahiro Watanabe, Shigeru Ishikawa, Teruo Matsuzawa “Influence of Latent Heat in the Nasal Cavity”, *JSME Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.8, No.3, pp.209-224 (2013).

## 査読付き国際会議

- [1] Sho Hanida, Masahiro Watanabe, Futoshi Mori, Kiyoshi Kumahata, Akira Asato, Shigeru Ishikawa, Teruo Matsuzawa: “Examination of Extraction with Vortex Region of the Paranasal Sinus in Human Nose”, The 6th World Congress on Biomechanics, IFMBE Proceedings, Vol.31, pp.736-739 (2010)
- [2] Akira Asato, Sho Hanida, Masahiro Watanabe, Futoshi Mori, Kiyoshi Kumahata, Shigeru Ishikawa, Teruo Matsuzawa: “Flow Visualization in Human Nasal Cavity”, Proceeding of the 11th Asian Symposium on Visualization (2010)
- [3] Teruo Matsuzawa, Futoshi Mori, Kiyoshi Kumahata, Sho Hanida, “Computational Fluid Dynamics using Medical Images on Biomechanics” Proceeding of Eighth International Conference on Flow Dynamics, 8th(CD-ROM), pp450-451 (2011)
- [4] Sho Hanida, Futoshi Mori, Kiyoshi Kumahata, Masahiro Watanabe, Shigeru Ishikawa, Teruo Matsuzawa: “Airflow Simulation of Nasal Cavity with Maxil-

lary Sinus using Latent Heat Model” 10th International Symposium Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (2012)

- [5] Bui Minh Nhat, Futoshi Mori, Sho Hanida, Hiroshi Ohtake, Go Watanabe, Teruo Matsuzawa: “Effect of Post Treatment for Multiple Aortic Aneurysms using CFD”, 10th International Symposium Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering 2012
- [6] Sho Hanida, Futoshi Mori, Kiyoshi Kumahata, Masahiro Watanabe, Shigeru Ishikawa, Teruo Matsuzawa: “Airflow Simulation considering Latent Heat Effect”, The European Society of Biomechanics (2013)
- [7] Yosuke Otsuki, Sho Hanida, Futoshi Mori, Takeshi Nishimura, Hiroshi Ohtake, Go Watanabe, Shigeru Ishikawa, Teruo Matsuzawa: “Computational Fluid Simulation in Living Body”, Proceeding of MJIT-JUC Joint International Symposium 2013 (MJJIS2013), MB-1-2 (2013)
- [8] Kaouthar Samarat, Kiyoshi Kumahata, Sho Hanida, Takeshi Nishimura, Futoshi Mori, Shigeru Ishikawa, Teruo Matsuzawa: “Application of Computational Fluid Dynamics to Simulate a Steady Airflow in all Regions of Chimpanzee Nasal Cavity”, 25th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, 2013

## 国内学会

- [1] 埴田 翔, 渡邊 正宏, 安里 彰, 門岡 良昌, 松澤 照男: “非圧縮粘性流れにおける渦領域の抽出及び可視化”, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, pp.119, 2009
- [2] 埴田 翔, 渡邊 正宏, 安里 彰, 門岡 良昌, 松澤 照男: “非圧縮粘性流れにおける渦領域の可視化手法の提案”, 第 6 回生体工学と流体工学に関するシンポジウム, pp.7-10, 2010

- [3] 埴田 翔, 渡邊 正宏, 森 太志, 熊畑 清, 安里 彰, 石川 滋, 松澤 照男: “鼻腔内流れにおける渦領域の抽出及び可視化” 可視化情報学会全国講演会 2010, pp.241-242, 2010
- [4] 埴田 翔, 森 太志, 熊畑 清, 安里 彰, 石川 滋, 松澤 照男: “潜熱を考慮した壁面モデルを用いた上顎洞を含む鼻腔内解析”, 第 24 回バイオエンジニアリング講演論文集, 2012
- [5] 西村 剛, 森 太志, 埴田 翔, 熊畑 清, 石川 滋, 鈴木 樹理, 宮部 貴子, 林 美里, 友永 雅己, 松沢 哲郎, 松澤 照男: “チンパンジーにおける鼻腔の生理学的機能に関する数値流体力学的研究” SAGA15 要旨集, pp.30, 2012
- [6] 埴田 翔, 森 太志, 熊畑 清, 安里 彰, 石川 滋, 松澤 照男: “潜熱を考慮した壁面モデルを用いた鼻腔内流れの解析”, 第 8 回生体工学と流体工学に関するシンポジウム, pp11-12, 2012
- [7] 埴田 翔, 森 太志, 熊畑 清, 安里 彰, 石川 滋, 松澤 照男: “潜熱を考慮した鼻腔内の流れの非定常解析”, 日本機会学会 北陸信越支部 第 50 期総会・講演論文集, 2013
- [8] 西村 剛, 森 太志, 埴田 翔, 熊畑 清, 石川 滋, 鈴木 樹理, 宮部 貴子, 林 美里, 友永 雅己, 松沢 哲郎, 松澤 照男: “ヒトとサル類における鼻腔の生理学的機能に関する数値シミュレーション” 第 29 回日本霊長類学会・日本ほ乳類学会 2013 年度合同大会, 2013

## その他講演

- [1] 埴田 翔: “鼻腔内の流れのシミュレーションについて” 第 6 回新生金沢コンピュータグラフィック談話会, 2012