

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：22701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23592933

研究課題名(和文) 流体解析シミュレーションによる顎骨移動前後の気道形態と呼吸機能の検討

研究課題名(英文) Analysis of airway morphology and function before and after jaw movement using computational fluid dynamics

研究代表者

大村 進 (Omura, Susumu)

横浜市立大学・市民総合医療センター・准教授

研究者番号：50145687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：下顎後方移動術により影響を受けた咽頭気道領域(PAS)の形態と圧力損失関係を数値流体力学により明らかにするために、下顎後方移動術を受けた下顎前突症患者10名を対象とし、術前後のCTデータからそれぞれ3次元気道モデルを構築した。気道の流体シミュレーションは、患者の吸気(200ml/s)を想定して行った。反復計算の収束後、PASにおける圧力損失を算出した。すべての症例においてPASにおける圧力損失は下顎後方移動術後に増加し、軟口蓋レベルでの最小断面積と非常に高い相関があった。断面積が1cm<sup>2</sup>以下の時、PASにおける圧力損失は急激に増大する傾向があった。

研究成果の概要(英文)：To investigate using computational fluid dynamic the relationship between morphology and pressure drop in PAS caused by mandibular setback surgery, each three-dimensional airway model was constructed from the preoperative and the postoperative CT data of 10 patients with mandibular protrusion who underwent mandibular setback surgery. The pressure drop was calculated in PAS. Flow simulation of airway was performed at the inspired air flow rate (200ml/s). In all cases, the pressure drop in PAS increased after mandibular setback surgery and has the high correlational relationship with the minimum cross sectional area at soft palatal level. When the cross sectional area was less than 1 cm<sup>2</sup>, the pressure drop in PAS tends to increase greatly.

研究分野：口腔顎顔面外科学

科研費の分科・細目：歯学・外科系歯学

キーワード：流体解析 シミュレーション 気道 顎矯正手術

### 1. 研究開始当初の背景

#### 研究の学術的背景

閉塞型睡眠時無呼吸症候群や顎変形症患者の気道の治療前後の形態変化に関する研究はこれまで2次元側面画像であるセファログラムから気道スペースを距離や面積として評価するものがほとんどであった。その後、CTの発達に伴いaxial画像より気道の断面積で評価するようになり、さらに3D-CTで体積の評価が行われるようになってきたが、いまだそれらは解剖学的・形態的評価のみであり、解剖学的変化に基づく機能的な検討はほとんど行われていない。閉塞型睡眠時無呼吸症候群に対するオーラルアプライアンスによる治療前後の気道の変化、無呼吸回数、低呼吸回数、無呼吸・低呼吸指数(apnea hypopnea index: AHI)、Lowest SpO<sub>2</sub>などの評価は以前より数多くの研究者により行われてきたが、airflowに関する研究はいまだほとんど行われていない。同様に、顎変形症に対する顎矯正手術による気道の解剖学的変化による呼吸状態の評価もSpO<sub>2</sub>程度しか行われていないのが現状である。そこで、2008年より東京大学生産技術研究所との医工連携により数値流体力学を応用することで顎動脈とその分枝の血流シミュレーションを行っており、閉塞型睡眠時無呼吸症候群や顎変形症の治療前後の呼吸状態の評価にも流体解析を用いることで気道のairflowシミュレーションが可能になると考え、われわれは本研究を考案した。流体解析を用いたairflowのシミュレーションを行い、顎骨の移動距離や方向による呼吸への影響を評価することで、理想的な顎骨の移動に関し呼吸への影響も考慮した治療計画や治療効果予測が可能になると考えている。

### 2. 研究の目的

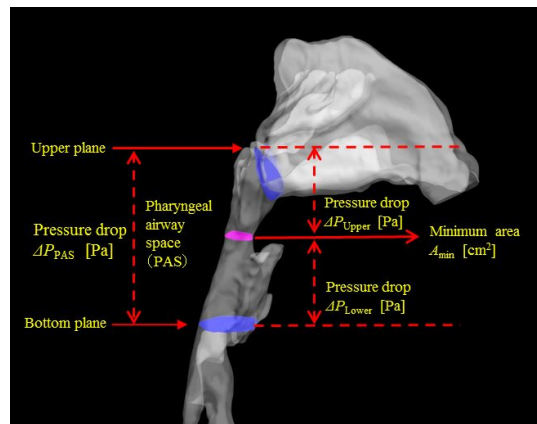
下顎枝矢状分割術(SSRO)による下顎の後方移動により気道は狭窄するため、閉塞型睡眠時無呼吸症候群(OSAS)の発症リスクがある。本研究の目的は流体解析を用いることにより下顎前突症に対するSSROによって影響を受けた上気道での気流を調べることで、形態だけでなく呼吸も考慮した術前計画を提案することである。

### 3. 研究の方法

対象は下顎後方移動術(SSRO)を施行した下顎前突症患者10名(男性2,女性8)であり、平均年齢は24.5歳(17.7~42.4歳)であった。術直前と術後1年でCTの撮影を行った。スライス厚さは1.0mm、幅・高さは512×512ピクセルで撮影した。患者は意識下でフランクフルト平面を床と垂直にした仰臥位にて一呼吸したときの吸気の後で息を止めてもらいCTの撮影を行い、CTデータは

DICOM形式で保存した。一連のDICOMデータは3次元画像処理ソフトウェアであるmimicsにインポートしCT値に基づいたセグメンテーションを行った。閾値は障害陰影を除くためと気道領域を抽出するために調整した。3次元気道モデルは副鼻腔を除く外鼻孔から声門下腔までを構築し、上気道形態の患者特性を失わないようにモデルの平滑化を行った。両側入り口平面は両側の外鼻孔で鼻腔壁面に対し垂直であり、出口平面は声門下腔の壁に垂直とした。表面メッシュはmimics 15.0で3次元気道モデルから作成し出力した。表面メッシュは流体解析の前処理としてvolume meshを作成するためICEM-CFDに入力した。非構造的なテトラ-プリズムメッシュを気道内部に作成した。プリズムメッシュは壁面から3層とし、volume meshはおよそ180万であった。流体解析ソフトウェアのFluentを用いて流体の支配方程式を解き、作成した気道モデルでの流体指標(速度と圧力)値の分布を算出した。支配方程式は非圧縮性流体の連続の式とNavier-Stokes方程式を用いた。方程式は空間上の離散化は二次精度の有限体積法を用い、時間に対しては二次精度の陰解法を用いた。速度の圧力のカップリングはコロケート格子上でSIMPLE法を適応した。乱流モデルは低レイノルズ型k-を用いた。

このシミュレーションは、大気圧下(1.013×10<sup>6</sup> Pa)気温20℃で、ヒトの安静時吸気を想定した。流体データとして、粘性(1.822×10<sup>-5</sup> Pa·s)、密度(1.205 kg/m<sup>3</sup>)の物性条件を与えた。流入条件は境界面に垂直な速度で定義し流量200ml/sと2か所の入り口の面積から速度を算出した。出口は自由流出境界条件(圧力勾配0)として定義した。壁面境界条件はnon-slipの剛体壁と定義した。計算収束後、結果ファイルをポスト処理ソフトウェアCFD-Postに入力した。PASは2つの平面で切り分けられた。PASを上咽頭から喉頭蓋の先端までと定義し、上面は鼻腔と上咽頭の間であり、下面は喉頭蓋の先端を通る平面で流線に対し垂直な平面とした。それぞれの平面の面積平均圧力から圧力損失(PPAS)を算出し、軟口蓋レベルでの狭窄した最小断面積(A<sub>min</sub>)を算出した(図1)。



(図1)

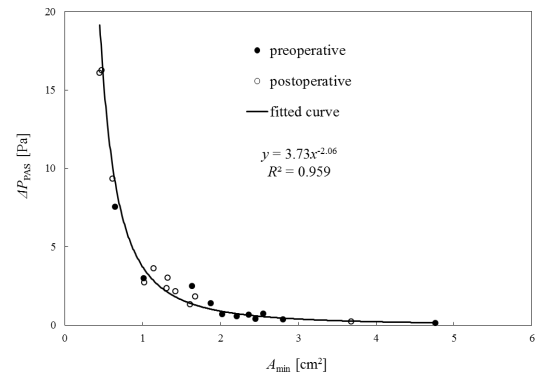
#### 4. 研究成果

PPAS と  $A_{min}$  は図 2 に示した．すべての症例において術後は PPAS が増加し， $A_{min}$  は減少したが，術前術後どちらのデータも最小 2 乗方で求めた同じ近似曲線付近に分布した．PPAS と  $A_{min}$  の決定関数 ( $R^2$ ) は 0.9496 であった． $A_{min}$  が  $2 \text{ cm}^2$  になると PPA は急激に増大した．さらに上面から最小断面までと最小断面から下面までの圧力損失をそれぞれ  $P_{Upper}$ ， $P_{Lower}$  として算出し，圧力損失と  $A_{min}$  の関係を図 3 に示した． $P_{Upper}$  が  $2 \text{ cm}^2$  になると  $P_{Upper}$  は  $P_{Lower}$  より大きかった．また， $P_{Upper}$  と  $A_{min}$  の間の  $R^2$  は  $P_{Lower}$  と  $A_{min}$  の間の  $R^2$  より大きかった． $A_{min} = 0.48$  の症例における正中矢上平面上の圧力と流速を図 4 に示した． $A_{min}$  平面の上部では等圧線が密で流速が上昇していた． $A_{min}$  平面の下部では逆圧力勾配と流れの剥離が認められた．

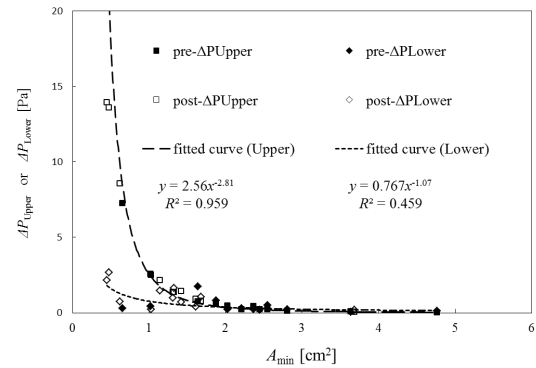
ハーゲン・ポワズイユの法則によれば圧力損失 ( $P$ ) は抵抗 ( $R_s$ ) と流量 ( $Q$ ) の積である．今回の研究ではすべての症例において流量  $200 \text{ ml/s}$  と定義しているため，上気道を通る気流の抵抗は圧力損失と比例関係にある．つまり，PAS 間の圧力損失の増加は PAS での抵抗値の増加を意味する．直鉛管での層流では圧力損失 ( $P$ ) と断面積 ( $A$ ) の関係は， $P$  が  $A^2$  と比例関係にあり，これが圧力損失を見積もる際，最小断面積に注目した理由である．セファロを用いた多くの研究では下顎後方移動術は中下咽頭レベルでの気道を有意に減少させ，上咽頭では有意な差がないとしている．しかし，本研究では  $A_{min}$  が  $2 \text{ cm}^2$  以下で  $P_{Upper}$  は  $P_{Lower}$  より大きくなっていた．上面から最狭窄断面までの上方領域はほぼ上咽頭であり，最狭窄断面から底面までの下方領域は概ね中咽頭である．上咽頭での圧力損失は中咽頭よりも  $P_{PAS}$  に対する影響が大きかったが，特に  $A_{min}$  が  $1 \text{ cm}^2$  以下であれば  $P_{PAS}$  は上咽頭の圧力損失に依存する．そのため，術後の気道形態の相対的な変化ではなく，気道の絶対的な大きさに注目すべきである．下顎単独後方移動術より，上下顎移動術のほうが，級の矯正の際咽頭気道の狭窄を回避しやすいとの報告があり，術前に  $A_{min}$  が  $2 \text{ cm}^2$  以下であれば，下顎単独後方移動術より上下顎移動術の方が咽頭気道の圧力損失の増加を回避するためには，適当であると思われる．

術前の CT データから術後の顔貌を予測するために軟組織シミュレーションを行うソフトウェアが多くある．そのうちの一部に，顎矯正手術の術後の気道を予測するものがある．われわれの数式モデルは軟口蓋レベルの最小断面積を用いて咽頭の圧力損失を予測できる可能性がある．これらの軟組織シミュレーションとわれわれの数式モデルを両方用いれば下顎前突症患者に対する顎矯正手術を計画する上で術後の O S A S 発症を

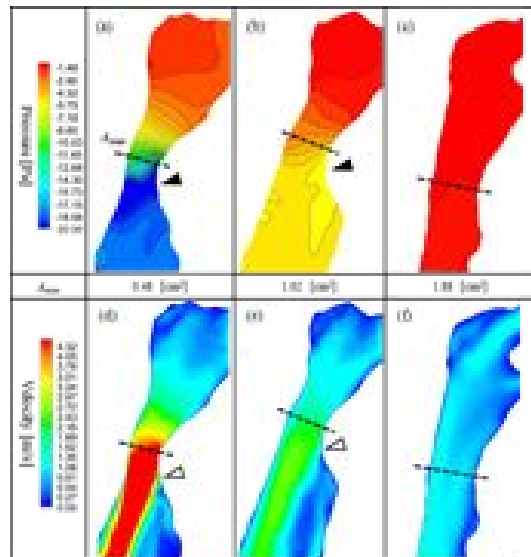
回避するための有用なツールになりうると考えられた．



(図 2)



(図 3)



(図 4)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 4 件)

矢島康治, 岩井俊憲, 本田康二, 君塚幸子, 村田省吾, 高須 曜, 藤田紘一, 渋谷直樹, 島崎一夫, 大村 進, 藤内 祝.  
下顎枝矢状分割術による下顎後方移動に伴う上気道変化の流体力学的解析. 第 23 回日本顎変形症学会総会・学術大会, 2013 年 6 月, 大阪.

矢島康治, 岩井俊憲, 本田康二, 山下陽介, 村田彰吾, 藤田紘一, 渋谷直樹, 島崎一夫, 大村 進, 大島まり, 藤内 祝.  
咽頭における CFD を用いた流体力学解析時の流入境界条件による影響. 第 12 回日本睡眠歯科学会総会・学術大会, 2013 年 9 月, 大阪.

矢島康治, 岩井俊憲, 本田康二, 山下陽介, 村田彰吾, 藤田紘一, 渋谷直樹, 島崎一夫, 大村 進, 大島まり, 藤内 祝.  
下顎後方移動術前後における咽頭部圧力損失の変化 - CFD による流体力学解析 -. 第 12 回日本睡眠歯科学会総会・学術大会, 2013 年 9 月, 大阪.

Iwai T. Novel computer assisted simulation and navigation in oral and maxillofacial surgery. 第 58 回日本口腔外科学会総会・学術大会, 2013 年 10 月, 福岡.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大村 進 (OMURA SUSUMU)

横浜市立大学・附属市民総合医療センター・准教授

研究者番号: 50145687

### (2) 研究分担者

藤内 祝 (TOHNAI IWAI)

横浜市立大学・医学研究科・教授

研究者番号: 50172127

大島まり (OSHIMA MARIE)

横浜市立大学・情報学環・教授

研究者番号: 40242127

岩井俊憲 (IWAI TOSHINORI)

横浜市立大学・附属病院・助教

研究者番号: 00468191

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: