

上下顎前方移動および舌骨上筋群牽引術前後における 数値流体力学解析を用いた上気道呼吸動態の変化

山 縣 加 夏 子

日本大学大学院歯学研究科歯学専攻 口腔構造機能学分野

(指導: 外木守雄 教授, 篠塚啓二 助教)

要旨: 閉塞性睡眠時無呼吸症の治療法である上下顎前方移動術(maxillo-mandibular advancement, 以下 MMA) および舌骨上筋群前方移動術(genioglossus advancement, 以下 GA)の研究は, 形態学的分析が主体で, 上気道形態の変化や呼吸生理学的機能の変化について評価は十分とはいえない。そこで本研究では, MMA+GA を行った症例に数値流体力学(computational fluid dynamics, 以下 CFD)解析を行い, 術後に起こる上気道呼吸動態の変化を, 気道断面積, 気道内の気流速度, 気道壁にかかる静圧および全圧, 気道抵抗の変化について検討し, MMA+GA の効果を評価した。その結果, MMA+GA 術後に口蓋咽頭の上端から喉頭蓋の上端における気道の断面積は明らかな増大を認めた。また, 気道内の流速は減少し, 気流も安定し整流化していた。特に断面積の増大を認めた軟口蓋の最下点では, 静圧力, 全圧力が有意に減少し, 気道内の抵抗も下がっていた。このことは, MMA+GA を行うことで, 気道壁面を潰そうとする力が減少し, 安定した潰れにくい気道になり, 気道内換気が容易になったと示唆された。また, CFD 解析は, 術前に気道狭窄部位の確認や静圧の高い部位の確認ができ, 気道閉塞が生じる可能性を警鐘することや, 手術での移動量や方向の検討に有効な予測データを提供できるものと考えられた。

キーワード: 数値流体力学, 閉塞性睡眠時無呼吸症, 上下顎前方移動術, 舌骨上筋群前方移動術

Changes in the upper airways of airflow dynamics using computational fluid dynamics analysis before and after maxillo-mandibular advancement and genioglossus advancement

Kanako Yamagata

Nihon University Graduate School of Dentistry, Major in Oral Structural and Functional Biology

(Directors: Prof. Morio Tonogi Prof. Keiji Shinozuka)

Abstract: Maxillo-mandibular advancement (MMA) and genioglossus advancement (GA) are surgical treatments for obstructive sleep apnea. Previous studies have focused on morphological analysis, yet changes in upper airway morphology and physiological respiratory function are still unknown. This study aimed to explore the changes in the upper airway dynamics, such as cross-sectional area, airflow velocity, pressure and resistance in the upper airway, using computational fluid dynamics (CFD) analysis on patients who underwent MMA+GA and to evaluate the effect of MMA+GA. The cross-sectional area of the upper airway from the upper boundary of the palatopharynx to the tip of the epiglottis was significantly increased postoperatively. In addition, airflow velocity in the airway decreased, and airflow was stable and straightened. The static and total pressures were significantly decreased, and airflow resistance was also reduced at the point of the tip of the soft palate, whose cross-sectional area was mostly increased postoperatively. These findings suggest that MMA+GA reduces the force that compresses the airway wall, helping the airway maintain its stability so that it is unlikely to be compressed. Therefore, the procedures may facilitate ventilation in the airway. Moreover, CFD analysis is effective in preoperatively identifying the location of airway stenosis and areas with high static pressure. Thus, this analysis may help provide valuable prediction data that can be used in taking precautions to prevent potential airway stenosis and in examining the amount and direction of movement during surgery.

Keywords: computational fluid dynamics, obstructive sleep apnea, maxillo-mandibular advancement, genioglossus advancement

(受付: 令和3年1月15日)

責任著者連絡先: 山縣加夏子

日本大学歯学部口腔外科学第I講座

〒101-8310 東京都千代田区神田駿河台 1-8-13

TEL : 03-3219-8102

FAX : 03-3219-8103

E-mail : deka17032@gnihon-u.ac.jp

緒 言

閉塞性睡眠時無呼吸症(obstructive sleep apnea, 以下 OSA)の要因のひとつに、解剖学的に狭窄もしくは閉塞した上気道があげられる。この閉塞を引き起こす要因には、一般的に肥満、鼻内疾患、アデノイド・口蓋扁桃肥大、巨舌など軟組織の要因があるが、小顎、過蓋咬合など硬組織の形態異常も原因のひとつとして考えられている¹⁻⁵⁾。顎骨および咬合状態と OSA に関する一連の研究で、骨格性下顎後退症に加え開咬を呈するもの、上顎が後方にあるものに上気道狭窄が起こりやすいことが報告されている^{6,7)}。

また、OSA の治療方法のひとつに睡眠外科手術があるが、このうち、上下顎前方移動術(maxillo-mandibular advancement, 以下 MMA)と舌骨を牽引する舌骨上筋群前方移動術(genioglossus advancement, 以下 GA, 両手術を同時に行うことを以後、MMA+GA と略する)は、無呼吸低呼吸指数(apnea and hypopnea index, 以下 AHI)を減少し、睡眠の質を改善すると報告されている^{8,9)}。

しかし、これまでの研究では、形態学的分析が主体で、上気道形態の変化と呼吸生理学的機能の変化は評価されていなかった。そこで荻澤らは、multi-detector computed tomography(以下 MDCT)を用い、その上気道呼吸動態変化について数値流体力学(computational fluid dynamics, 以下 CFD)解析を行い、MMA の移動量および方向と術後の上気道の呼吸動態の変化を予測するモデルを確立し、シミュレーションが実際の事象を再現しているという報告をしている¹⁰⁾。

この CFD 解析法を用いて、MMA+GA の移動量および方向と呼吸生理学的変化を検討することは、MMA+GA の効果を解明するために重要なことであり、術前の資料から術後予測することが可能となって、治療方針の決定に有用な情報となり得ると考える。

今回、本研究では、MMA + GA 術後に起こる気道の変化について、術前後の上気道の断面積、気道内の気流速度、気道壁にかかる静圧および全圧、気道抵抗の変化を、CFD 解析を用いて検討し、MMA + GA の効果を評価した。

材料および方法

1. 対象

2012 年 9 月から 2017 年 8 月に咬合の改善を目的とし日本大学歯学部付属歯科病院口腔外科での顎変形症の診断のもと、顎矯正手術を施行した患者のうち、MMA と GA を同時に行い、術前および術後 1 年経過時に MDCT を撮影し、本研究の趣旨に同意が得られた 6 名(男性 1 名、女性 5 名、平均年齢 32 歳 ± 8 歳、平均 BMI 20.63 ±

2.68)を対象とした。

本研究は日本大学歯学部倫理委員会の許可を得ている(倫理許可番号: EP16 D007)。

2. 手術術式

1) MMA + GA

(1) 上顎に対する手術は、Le Fort I 型骨切り術、すなわち、犬歯窩部を梨状口側縁、下鼻甲介下部から、翼口蓋窩に向かって水平に骨切り後、翼突上顎縫合部を離断し上顎骨体を分離した後、これを任意の前方位に移動する術式を用いた。本研究での前方への平均移動量は、 3.17 ± 1.07 mm で、上方への平均移動量は 3.75 ± 1.35 mm であった(表 1)。

(2) 下顎に対する手術は、両側の下顎枝を矢状分割し、近位顎関節部骨と遠位下顎骨体部と分離して、下顎骨体部を上顎と中心咬合位で嵌合するように前方に移動した。本研究での前方への平均移動量は、 9.20 ± 3.40 mm であった(表 1)。

すなわち MMA は、上下顎を一体として前方へ移動する術式で、上気道が拡大すると考えられている術式である^{6,9,10)}。

(3) GA は下顎骨内面に付着する舌骨上筋群を牽引し、MMA と同様に上気道を拡大する効果がある⁹⁾。本研究での前方への平均移動量は、 6.33 ± 2.13 mm であった(表 1)。

3. 計測方法

1) 資料採取、MDCT 撮影

術前、術後 1 年経過時に治療を目的に、Asteion Super4 Edition(東芝メディカルシステムズ、大田原)を用いて MDCT 撮影を行った画像を用い、顎骨形態、気道形態の評価を行うため 3D モデルを作成した。MDCT の撮影条件は、仰臥位で、頭位は frankfort horizontal plane(FH 平面)を床と垂直にした。撮影中は患者に、咬頭嵌合位で口唇を閉鎖し舌を口蓋につけるよう指示し、

表 1 MMA および GA による顎骨移動量

症例	MMA			
	上顎		下顎	GA
	前方移動量 (mm)	上方移動量 (mm)	前方移動量 (mm)	前方移動量 (mm)
1	3.0	3.0	15.4	6.0
2	5.0	2.0	5.8	6.0
3	2.0	5.0	7.5	5.0
4	2.0	6.0	8.0	9.0
5	4.0	3.0	12.0	9.0
6	3.0	3.5	6.5	5.0
Mean ± SD	3.17 ± 1.07	3.75 ± 1.35	9.20 ± 3.40	6.33 ± 2.13

MMA : Maxillo-mandibular advancement; 上下顎前方移動術

GA : Genioglossus advancement; 舌骨上筋群前方移動術

安静呼吸で嚥下を行わないようにした。

撮像範囲は、舌骨から頭頂までとし、管電圧 120 kV、管電流 100 mA マトリックスサイズ 512 × 512 pixel で 1 mm スライス撮影を行った。

2) CFD 解析方法

(1) 気道の抽出

対象患者 6 名の digital imaging and communications in medicine (DICOM) データから INTAGE Volume Editor version 1.1 (Cybernet) を用いて、空気の部分を体組織と区分し、気道を抽出した。上方は前頭洞を含み、下方は喉頭蓋最上部、左右は上顎洞を含み、前方は顔面前方空間を含め、後方は頰椎の位置で上気道を取り巻く軟組織は除外した。複雑な気道データのメッシュを作成するためには全ての形状を多数の小さな三角形の集まりとして表現する必要があるため、3次元形状の standard triangulated language (以下 STL) を作成した (図 1)。

(2) CFD メッシュの作成

STL から HEXPRESS version 7.2 (NUMECA) を使用

し、CFD メッシュを作成した。外鼻孔の外側から鼻腔に入り込む気流を正確に再現するために顔面前方部に入口境界を設定、気道最下方部に出口境界を設定して計算メッシュ (computational mesh) を作成した。メッシュ生成においては鼻腔および口腔の複雑な構造を表現できる非構造メッシュ (unstructured mesh) を用い、6 面体メッシュとした (図 2)。複雑な空間形状にこのようなメッシュを生成するために、密な 6 面体メッシュと比較的粗な 6 面体メッシュの間を 4 面体 (テトラ) メッシュでつなぐことで、各メッシュの歪みを極力抑制し、3次元形状のモデル化精度を向上させている。メッシュ規模は total number of cell 約 1000 万、total number of vertices 約 1000 万 ~ 1100 万とした。

(3) CFD 解析における境界条件の設定

CFD 解析には FINE/Open with OpenLabs version 7.2 (NUMECA) を用い、鼻腔から上気道の空気の流れを解析する為に圧縮性流体の Navier-Stokes 式を解く解析法を用いた。乱流モデルは Spalart-Allmaras 方程式でこ

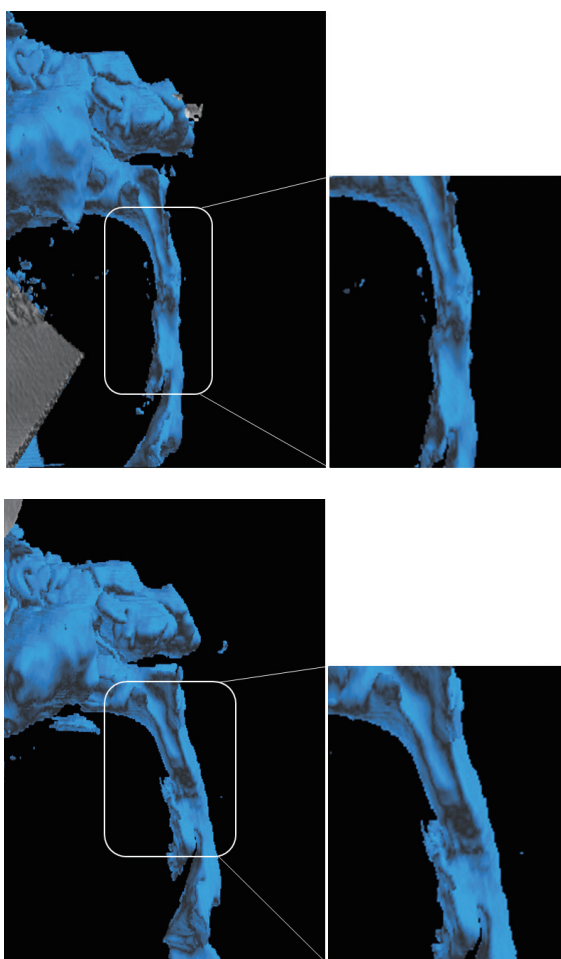


図 1 3次元形状の術前後上気道 (症例 1)
DICOM データより抽出した気道の STL データ。
上段：術前、下段：術後

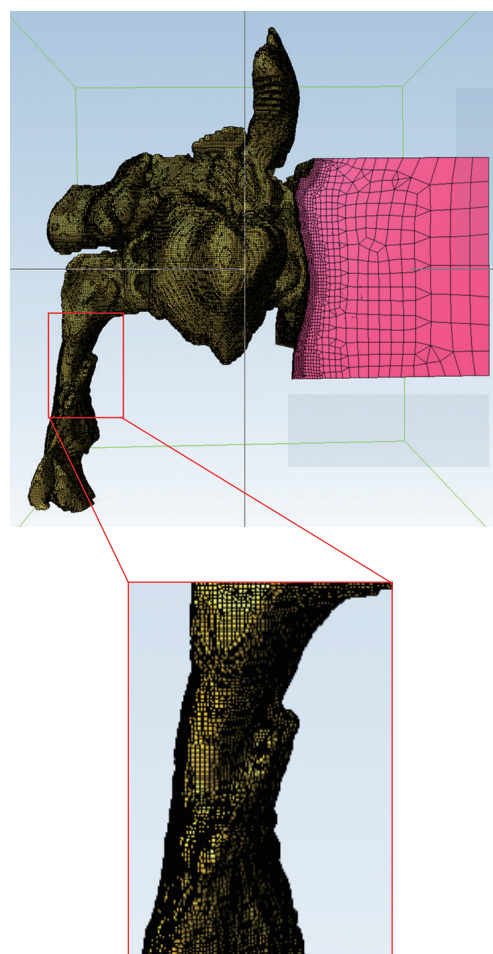


図 2 気道メッシュモデル (側面観) (症例 1)
6 面体を主とした非構造メッシュを用いて作成した気道メッシュモデル。

の研究の気流の流れにおける粘性の影響を表す最大 Reynolds 指数は 10000 ~ 25000 とした。境界条件は入口で質量流量を固定して出口で静圧を固定した。質量流量は後述する鼻腔通気度測定より得られた体積流量 V (cm^3/s) から求めた質量流量 (massflow rate) を用いた。空気は perfect gas と仮定して室温 25°C の空気密度を $\rho = P(\text{大気圧 Pa}) / R(287.03 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}) \times T(273.15 + t^\circ\text{C})$ から求めた。質量流量は測定された体積流量と $\rho = P/RT$ から求められた空気密度より $\text{massflow rate} = \rho V \cdot 10^{-6}$ を用いて算出した。出口境界条件は各ケースの相対的評価を容易にするために 100836 Pa に固定した。

(4) CFD モデルを用いた上気道の断面積、気流速度、静圧、全圧、気道抵抗の測定

CFD モデルより作成した気道を図 3 に示す。測定した境界断面は、1 を両鼻合流部、2 は口蓋咽頭の上端、4 は軟口蓋の最下点、3 を境界断面 2 と 4 の中間点、6 は喉頭蓋の上端、5 を境界断面 4 と 6 の中間点を設定した。この 6 つの境界断面における断面積をそれぞれ測定した。また、手術前後に最も断面積の変化が大きかった境界断面において、入口境界から出口境界までの気流の速度、流体が外界に及ぼす圧力である静圧力、静圧力と動圧力の和である全圧力、気道の換気の程度を示す気道抵抗をそれぞれ計測し比較検討した。気道抵抗は $R = \Delta P(\text{静圧差}) / Q$ の式にて算出し、 Q は massflow rate で、 0.2408 g/s とした。

3) 鼻腔通気度測定

MPR3100 (日本光電社製、東京) を用いて、術前後で

MDCT 撮影と同時にを行い、鼻腔通気度測定ガイドライン¹¹⁾に沿って、アンテリオール・マスク法により測定した。計測時の諸条件は MDCT 撮影と同一とした。鼻腔通気度計測より得られた体積流量 V (cm^3/s) は CFD 解析での質量流量を算出するために使用した。

4) 統計学的解析

術前後の気道断面積、流速、静圧力、全圧力、気道抵抗に関する統計学的解析は Paired t -test を用いて有意差検定を行った (SPSS version 24.0, International Business Machines, Armonk, NY, USA)。なお、 $p < 0.05$ を有意差ありとした。

結 果

1. CFD 解析

1) 気道断面積

6 断面境界における手術前後の変化を表 2 および図 4

表 2 術前後の気道断面積

症例	術前		術後		P-value	変化率
	Mean ± SD (cm^2)	Mean ± SD (cm^2)	Mean ± SD (cm^2)	Mean ± SD (cm^2)		
1	4.22 ± 1.03	4.15 ± 1.26	4.15 ± 1.26	4.15 ± 1.26	0.670	-1.66
2	3.26 ± 0.44	3.70 ± 0.68	3.70 ± 0.68	3.70 ± 0.68	0.033	13.50
3	1.76 ± 0.60	2.43 ± 0.48	2.43 ± 0.48	2.43 ± 0.48	0.008	38.07
4	1.25 ± 0.63	2.33 ± 0.86	2.33 ± 0.86	2.33 ± 0.86	0.004	86.40
5	1.80 ± 0.95	2.60 ± 0.89	2.60 ± 0.89	2.60 ± 0.89	0.018	44.44
6	2.42 ± 1.26	3.05 ± 1.50	3.05 ± 1.50	3.05 ± 1.50	0.048	26.03

1: 両鼻合流部, 2: 口蓋咽頭の上端, 3: 境界断面 2 と 4 の中間点, 4: 軟口蓋の最下点, 5: 境界断面 4 と 6 の中間点, 6: 喉頭蓋の上端

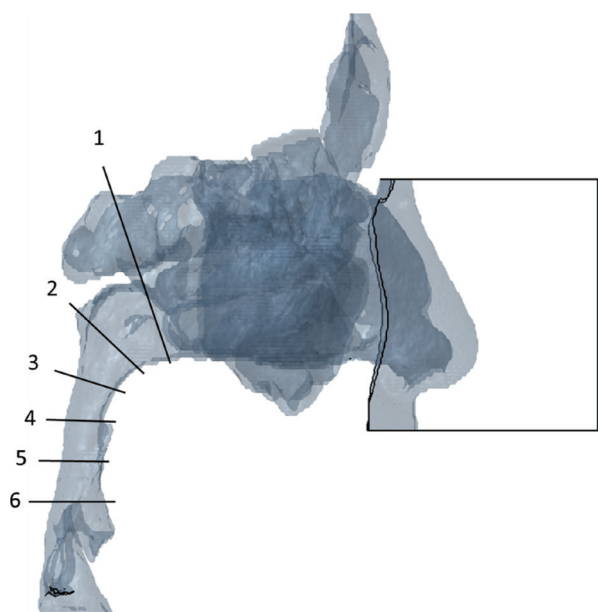


図 3 気道断面積の計測部位 (症例 1)

1 は両鼻合流部, 2 は口蓋咽頭の上端, 4 は軟口蓋の最下点, 3 を境界断面 2 と 4 の中間点, 6 は喉頭蓋の上端, 5 を境界断面 4 と 6 の中間点を設定した。

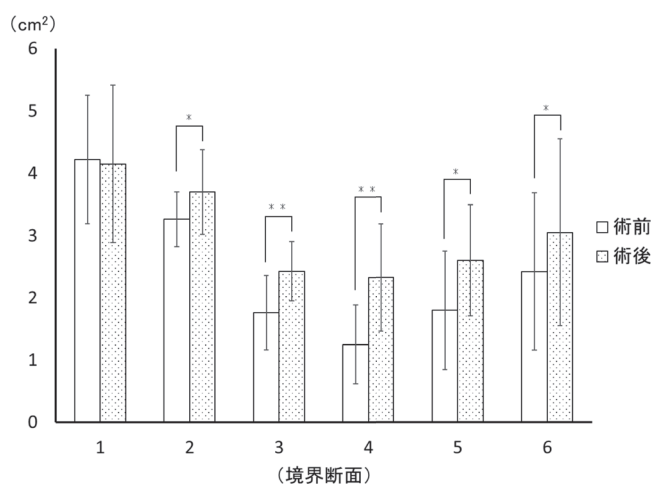


図 4 術前後の気道断面積

1 は両鼻合流部, 2 は口蓋咽頭の上端, 4 は軟口蓋の最下点, 3 を境界断面 2 と 4 の中間点, 6 は喉頭蓋の上端, 5 を境界断面 4 と 6 の中間点を示す。

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

に示す。術前後で比較すると、両鼻合流部1は、有意差を認めなかった($P=0.67$)。口蓋咽頭の上端2から喉頭蓋の上端6では、術後、断面積の明らかな増大を認め、特に軟口蓋の最下点4で最も拡大していた($P<0.01$)。

2) 気流速度

図5に症例1のCFD解析による気流速度の分布を可視化したものを示す。これは、入り口境界の等間隔点群からの流線であり、速度の大きさをカラーで示している。副鼻腔にはほとんど気流は流れないことが分かる。術前では鼻腔内および軟口蓋の最下点付近で流速が大きく、鼻腔内においては4.1 m/sの速度、また軟口蓋の最下点付近では2.9 m/sの速度が生じており、流速が速いところが収束していた。術後に同様の部位はそれぞれ2.7 m/sおよび1.0 m/sと明らかに流速が減速しており、上気道全体で流速が均一化して、鼻腔内および軟口蓋の最下点の速度の速い部分がほぼ無くなっていた。さらに、

鼻腔内および上気道全体において、気流の整流化を認めた。また、6症例における、最も断面積の変化のあった軟口蓋の最下点での術前後の流速を比較すると平均値2.20 m/sから1.49 m/sへと速度の減少を認めた(図6)。

3) 静圧

図7に症例1のCFD解析による吸気時の静圧分布の結果を示す。軟口蓋の最下点における静圧力は、術前で100842 Paなのに対して術後では100836 Paの静圧力であった。6症例の静圧を術前後で比較すると、平均値10844 Paから100838 Paへ統計学的に有意に減少していた(図8)。また、外部圧力と気道内との静圧の差(静圧差 ΔP)を比較するために、入口境界である外鼻孔と出口境界の喉頭蓋先端との静圧差を調べた結果、症例1において、術前で25 Paの圧力差なのに対して術後では6 Paの圧力差であった。6症例における、静圧差の術前の平均値は41.83 Paであったが、術後の平均値は23.50 Paと有

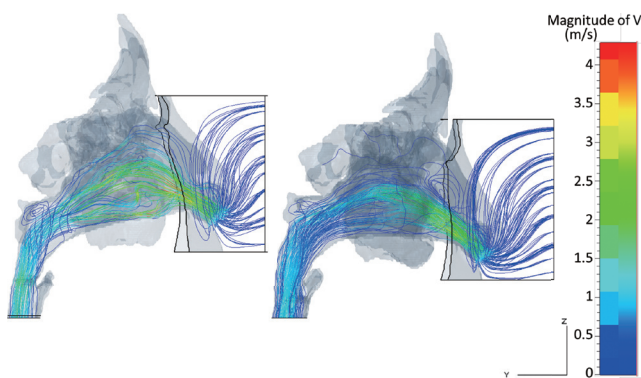


図5 術前後の気流速度の分布(症例1)
左：術前，右：術後

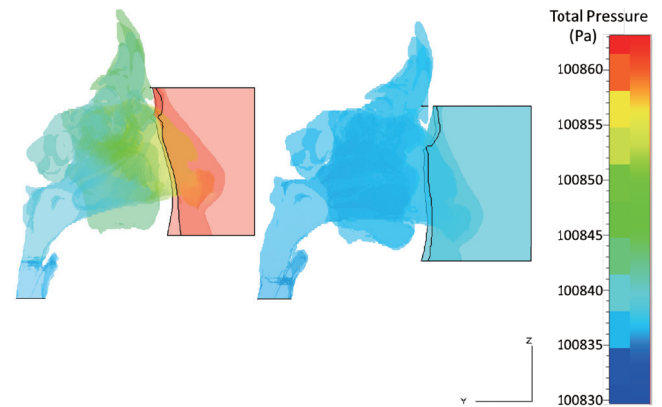


図7 術前後の静圧分布(症例1)
左：術前，右：術後

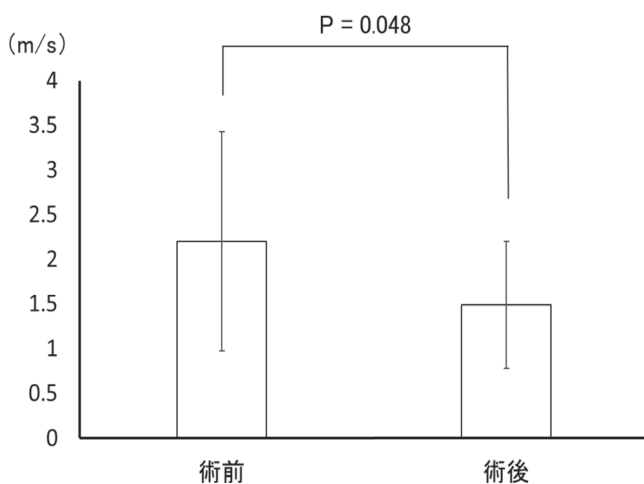


図6 術前後の気流速度
術前後の変化率は-31.58であった。

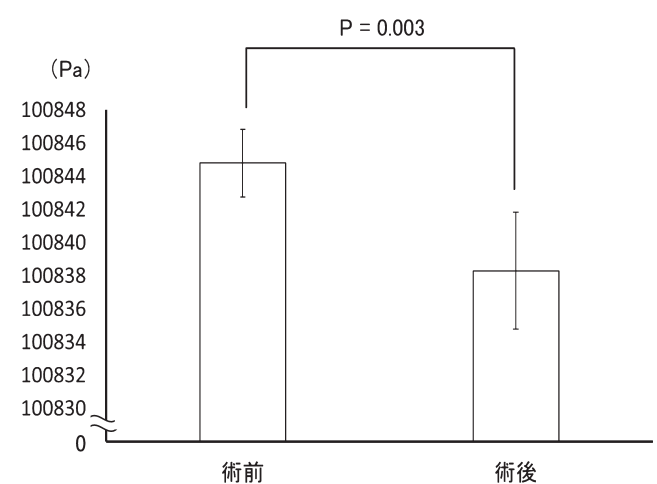


図8 術前後の静圧力
術前後の変化率は-0.007であった。

意な減少を認めた(表 3)。

4) 全圧

図 9 に症例 1 の CFD 解析による吸気時の全圧分布の結果を示す。軟口蓋の最下点における全圧力は、術前で 100838 Pa なのに対して術後では 100836 Pa の全圧力であった。6 症例の全圧力は、術前で平均値 100852 Pa に対して術後で 100840 Pa であり、統計学的に有意に減少していた(図 10)。また、入口境界である外鼻孔と出口境界の喉頭蓋先端との全圧力の差(全圧差)を調べた結果、症例 1 において、術前で 26 Pa から術後で 7 Pa に大きく減圧していた。(図 9)。

5) 気道抵抗

軟口蓋の最下点における気道の抵抗 R は術前で平均値 173.71 Pa・s/g から術後で 97.59 Pa・s/g に統計学的に有意に減少した(表 3)。

考 察

1. CFD 解析の有用性について

CFD 解析は、偏微分方程式の数値解法等を駆使して流

表 3 術前後における静圧力の差と気道抵抗の差

症例	術前		術後		P-value
	ΔP (Pa)	R (Pa・s/g)	ΔP (Pa)	R (Pa・s/g)	
1	25	103.82	6	24.92	
2	39	161.96	21	87.21	
3	60	249.17	33	137.04	
4	29	120.43	11	45.68	
5	70	290.70	48	199.34	
6	28	116.28	22	91.36	
Mean	41.83	173.71	23.50	97.59	0.001
± SD	± 17.18	± 72.91	± 13.91	± 52.33	

ΔP: 静圧差, R: 気道抵抗

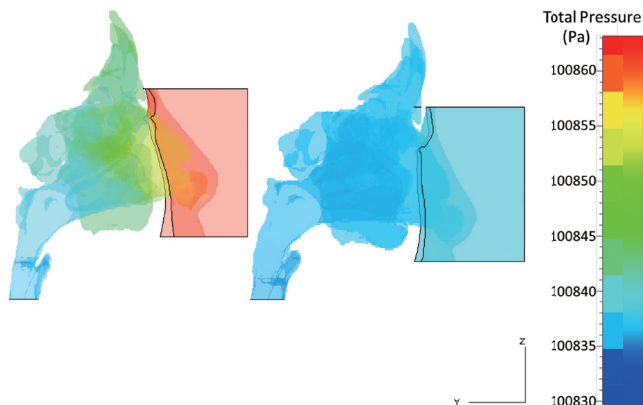


図 9 術前後の全圧分布(症例 1)
左: 術前, 右: 術後

体の運動に関する方程式(オイラー方程式, ナビエ-ストークス方程式, またはその派生式)をコンピュータで解くことによって流れを観察する数値解析・シミュレーション手法である¹²⁾。これまでに CFD 解析に関する研究は脳動脈瘤コイル塞栓術後の閉塞状態の予測に有用なパラメーターを開発するもの¹³⁾やステント留置による血行力学的変化を解析¹⁴⁾, 人工肺の血流や圧力損失の検討¹⁵⁾など活発に行われている。口腔顎顔面領域では、口蓋垂軟口蓋咽頭弁形成術前後¹²⁾や顎矯正手術, 上下顎前方移動術前後^{10,16,17)}および口腔内装置の装着による気流の変化¹⁸⁾を検討した報告や持続陽圧呼吸療法を行った状態での呼吸時の定時流れ解析による圧力損失の検討¹⁹⁾など OSA に関連する報告もされてきている。CFD 解析はセファロや CT 等の静的な評価と比較し, 非侵襲的で, かつ, 動的評価が行えることで近年注目されている。今回, MMA+GA を施行した術前後の CFD 解析を行い, 断面積の違いにより生じる生理学的な変化, すなわち, 気流速度, 静圧, 全圧, 抵抗を詳細に検討できたことからその有用性が示唆された。

2. CFD 解析の結果について

気道断面積については、術前と比較し術後 1 年経過時において、口蓋咽頭の上端から喉頭蓋の上端までの断面積は有意に増加し、特に軟口蓋の最下点で著しかった (P<0.01)。このことから、MMA+GA は気道を拡大する効果を持つことが示唆され、上顎を前方移動させることで気道の前後径が拡大し、下顎の前方移動で気道の幅径が増大すると報告した Okushi ら⁶⁾の研究結果と一致した。

流速について、症例 1 では、最も狭窄していた鼻腔内における流速は 4.1 m/s から 2.7 m/s に減少し、さらに整流化していた。また、上気道全体でも流速が均一化して、軟口蓋の最下点の速度の速い部分がほぼ無くなってい

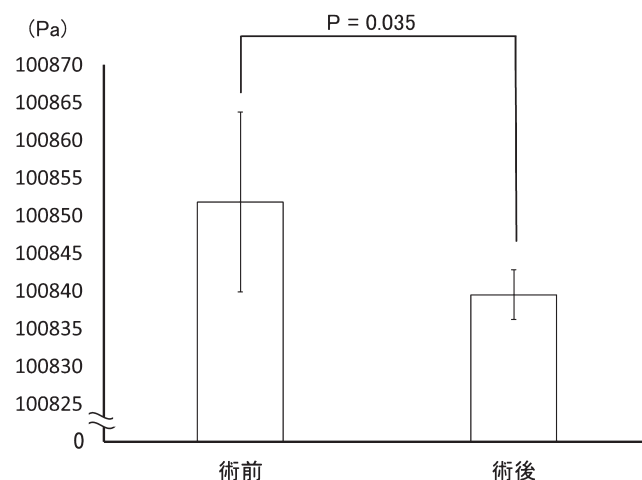


図 10 術前後の全圧力
術前後の変化率は-0.009であった。

た。軟口蓋の最下点における6症例の術前後の流速を比較すると平均値2.20 m/sから1.49 m/sへと速度の減少を認めた。気流速度が減速することで気道にかかる圧が正常化され、OSAの治療に効果があることが示唆された。

また、本研究では、注目する気道狭窄部周辺の解析条件をそろえるために、喉頭蓋先端の出口境界の静圧を固定する境界条件を用いてCFD解析を行っている。これにより、術前後の静圧力、全圧力の比較が可能となった。静圧について、術前後で比較すると、6症例の平均値は100844 Paから100838 Paと有意に減圧していた。このことは、気道壁面を潰そうとする力が減少し、安定した潰れにくい気道になったことを意味している。また、入口境界である外鼻孔と出口境界の喉頭蓋先端の静圧差が大きいと、気道内の陰圧による軟口蓋や舌根部を引き込む力が大きくなり、力学的に咽頭付近の気道狭窄を促進する要因となると考えられている²⁰⁾。全6症例の解析結果において、術前では平均値41.83 Paであった静圧差が、術後で平均値23.50 Paに大きく減少している。この結果から、静圧差による力学的な気道狭窄促進リスクが、手術によって低減されたことが分かる。

さらに、症例1において、術前の入口境界である外鼻孔と出口境界の喉頭蓋先端との全圧差は26 Paから術後で7 Paに大きく減圧していた。このことより、手術の効果により気道が広がったことが示唆された。

気道抵抗は、定義された気体の体積を指定された時間内に押し出すために必要な特定の圧力を表し、抵抗が高いと気流が流れにくいことを示しており、気道抵抗Rが吸気の難易度を決定する重要な指標である。本研究の結果では、術前の気道抵抗は平均値173.71 Pa・s/gから術後平均値97.59 Pa・s/gに有意($P < 0.05$)に減少し、減少率は44%であった。これは気道内換気が容易になったこと、すなわち呼吸が楽になったことを示唆している。

OSA患者で、気道が狭窄もしくは閉塞する原因のひとつには、気道にかかる流速、静圧などの圧力の上昇が考えられる。本研究の結果から、MMA+GAを行うことで、気道の断面積が拡大し、気道内の流速が減少して、気道にかかる静圧、全圧が減少し、潰れにくい気道となって気道内の抵抗が下がり、呼吸が楽になることが示唆された。これは、睡眠外科治療として、口蓋垂軟口蓋咽頭形成術を施行し、同部を流れる流速や圧力が減少したことで、AHIが明らかに低下したという報告¹²⁾や口腔内装置を用いることで、流速や全圧、抵抗が低下し、AHIが改善した報告¹⁸⁾と同様の結果であった。したがってMMA+GAはOSAに対する有効的な治療法である根拠となり、いままでの報告^{8,9)}とも一致する結果となった。

また、今回の結果からCFD解析は、術前に気道狭窄部位の確認や静圧の高い部位の確認ができ、気道閉塞が生じる可能性を警鐘することや、MMA+GAの移動量

や方向を検討する手段として有用性が高いことが示唆された。今後、症例数をさらに増やし、予測値との差異を反映した修正をモデル計算にフィードバックすることで、モデルの精度をさらに向上させ、手術での最適な各部位の移動量の検討に有効な予測データを提供できるものと考えられた。

結 論

本研究の結果から、以下の結論を得た。

1. MMA+GAを行うことで、気道の断面積が拡大し、気道内の流速が減少して、気道にかかる静圧、全圧が減少し、潰れにくい気道となって気道内の抵抗が下がり、呼吸が楽になることが示唆された。
2. CFD解析は、術前に気道狭窄部位の確認や静圧の高い部位の確認ができ、気道閉塞が生じる可能性を警鐘することや、MMA+GAの移動量や方向を検討する手段として有用性が高いことが示唆された。

本研究遂行にあたり、格別たるご指導ご鞭撻を賜りました日本大学歯学部口腔外科学第I講座の外木守雄教授に謹んで心から感謝申し上げます。本研究をご指導およびご高閲賜りました帝京大学戦略的イノベーション研究センター流体および構造解析・設計応用研究部門の田沼唯士教授に謹んで深く感謝申し上げます。

最後に、本研究を通じて多大なるご協力と助言を賜りました本学部口腔外科学第I講座の篠塚啓二助教を始め、同講座の皆様にも深く感謝いたします。

本論文に関して、開示すべき利益相反はありません。

文 献

- 1) Riley RW, Powell N, Guilleminault C (1987) Current surgical concepts for treating obstructive sleep apnea syndrome. *J Oral Maxillofac Surg* 45, 149-157.
- 2) Schellenberg JB, Maislin G, Schwab RJ (2000) Physical findings and the risk for obstructive sleep apnea. The importance of oropharyngeal structures. *Am J Respir Crit Care Med* 162, 740-748.
- 3) Tsai WH, Remmers JE, Brant R, Flemons WW, Davies J, Macarthur C (2003) A decision rule for diagnostic testing in obstructive sleep apnea. *Am J Respir Crit Care Med* 167, 1427-1432.
- 4) Zonato AI, Bittencourt LR, Martinho FL, Júnior JF, Gregório LC, Tufik S (2003) Association of systematic head and neck physical examination with severity of obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome. *Laryngoscope* 113, 973-980.
- 5) Yagi H, Nakata S, Tsuge H, Yasuma F, Noda A, Morinaga M, Tagaya M, Nakashima T (2009) Morphological examination of upper airway in obstructive sleep apnea. *Auris Nasus Larynx* 36, 444-449.
- 6) Okushi T, Tonogi M, Arisaka T, Kobayashi S, Tsukamoto Y, Morishita H, Sato K, Sano C, Chiba S, Yamane GY, Nakajima T (2011) Effect of maxillomandibular advancement on morphology of velopharyngeal space. *J*

- Oral Maxillofac Surg 69, 877-884.
- 7) 柳川圭一(2019)顎顔面骨格形態が上気道形態におよぼす影響について - 日本人の側面頭部 X 線規格写真を用いた検討 - . 日大歯学 93, 33-43.
 - 8) Liu SY, Huon LK, Ruoff C, Riley RW, Strohl KP, Peng Z (2017) Restoration of sleep architecture after maxillomandibular advancement: Success beyond the apnea-hypopnea index. *Int J Oral Maxillofac Surg* 46, 1533-1538.
 - 9) 中村亮太(2019)上下顎前方移動術およびオトガイ舌筋・舌骨筋前方移動術が上気道形態と睡眠におよぼす影響. 日大歯学 93, 25-32.
 - 10) Ogisawa S, Shinozuka K, Aoki J, Yanagawa K, Himejima A, Nakamura R, Yamagata K, Sato T, Suzuki M, Tanuma T, Tonogi M (2019) Computational fluid dynamics analysis for the preoperative prediction of airway changes after maxillomandibular advancement surgery. *J Oral Sci* 61, 398-405.
 - 11) 内藤健晴, 宮崎総一郎, 野中 聡 (2001) 鼻腔通気度測定法 (Rhinomanometry)ガイドライン. 日鼻科会誌 40, 327-331.
 - 12) 野村 務, 西 寫大宣, 近藤健二, 菊地 茂 (2017) Computational fluid dynamics により術後機能評価した睡眠時無呼吸症候群. 日耳鼻 120, 1073-1078.
 - 13) 梅田靖之, 石田藤麿, 辻 正範, 古川和博, 佐野貴則, 当麻直樹, 阪井田博司, 霜坂辰一, 鈴木秀謙 (2015) 多孔質媒体モデルを用いた CFD 解析による脳動脈瘤コイル塞栓術後閉塞状態の予測. *JNET* 9, 69-77.
 - 14) 辻 正範, 石田藤麿, 古川和博, 三浦洋一, 佐野貴則, 芝 真人, 種村 浩, 梅田靖之, 安田竜太, 当麻直樹, 霜坂辰一, 鈴木秀謙 (2017) 脳動脈瘤に対するステント留置による血行力学的効果 - 多孔質媒体モデルを用いた数値流体力学 (CFD) による検討 - . *脳外誌* 26, 444-451.
 - 15) 舟久保昭夫, 幡多徳彦, 多賀一郎, 福井康裕 (2013) 人工肺開発における流れの解析と最適化. *可視化情報* 33, 13-18.
 - 16) Sittitavornwong S, Waite PD, Shih AM, Cheng GC, Koomullil R, Ito Y, Cure JK, Harding SM, Litaker M (2013) Computational fluid dynamic analysis of the posterior airway space after maxillomandibular advancement for obstructive sleep apnea syndrome. *J Oral Maxillofac Surg* 71, 1397-140.
 - 17) Yajima Y, Oshima M, Iwai T, Kitajima H, Omura S, Tohnai I (2017) Computational fluid dynamics study of the pharyngeal airway space before and after mandibular setback surgery in patients with mandibular prognathism. *Int J Oral Maxillofac Surg* 6, 839-844.
 - 18) Song B, Li Y, Sun J, Qi Y, Li P, Li Y, Gu Z (2019) Computational fluid dynamics simulation of changes in the morphology and airflow dynamics of the upper airways in OSAHS patients after treatment with oral appliances. *PLoS One* 14, e0219642.
 - 19) Wakayama T, Suzuki M, Tanuma T (2016) Effect of nasal obstruction on continuous positive airway pressure treatment: computational fluid dynamics analyses. *PLoS One* 11, e0150951.
 - 20) 村田 朗 (2007) 睡眠時無呼吸症候群の診断と治療 寝ている間に病気が作られる. *日医大医会誌* 3, 96-101.