

令和 5 年 10 月 26 日現在

機関番号：12602

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K19261

研究課題名（和文）下顎骨前上方回転が気道に与える影響の流体力学的解析：睡眠時無呼吸の新規治療戦略

研究課題名（英文）Computational fluid dynamics of the effect of mandibular counter-clockwise rotation on the airway: a novel treatment strategy for sleep apnea

研究代表者

喜田 壮馬 (Kita, Soma)

東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・非常勤講師

研究者番号：40822515

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：顎矯正手術による上気道の形態変化と鼻腔呼吸機能の変化が注目されている。特に鼻咽腔狭窄については、上下顎の変化が複雑に影響し合うため、睡眠・呼吸機能に大きな影響を与える可能性があるが、機能的評価は不十分である。そこで、狭窄により呼吸機能が悪化し気道抵抗が大きくなる可能性のある、上顎後上方移動を伴う手術の影響について、計算流体力学を用いて解析した。結果、術前に比べ術後の圧力損失は減少した。また咽頭部に関して断面積については変化率が1に近いものの圧力損失が小さかった。従って現行の手術方法は、機能面においても妥当な手術計画であると考えられ、望ましい気道形状に関しても流体力学的観点から知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

骨格性下顎後退症に適用される従来の下顎骨前方移動術は術後安定性に不安があり、変形症顎関節症や進行性下顎頭吸収による後戻りに伴う気道狭窄が危惧されてきた。その狭窄は単に形態的变化であるのか、機能的な変動を伴うのか不明で、閉塞性睡眠時無呼吸症誘発の可能性も問題視される。それらに対応した術式として、下顎を離断せず下顎骨を前方移動させるMAC surgeryが考案された。MAC surgeryは上顎骨後上方移動による狭窄が懸念される一方、下顎骨前方移動で咽頭部は拡大するため、通気への影響を計算流体力学で評価する。その結果を元に、気道に影響を与える術式を解明することで、新たな術式の開発も可能となる。

研究成果の概要（英文）：Changes in the upper airway and the resulting alteration in the nasal respiratory function after jawbone repositioning during orthognathic surgery have garnered attention recently. This study aimed to perform a functional evaluation of the effects of surgery involving maxillary repositioning, which may result in a larger airway resistance if the stenosis worsens the respiratory function, using CFD for treatment planning. The pressure drop in the airway was lower in the postoperative compared to the preoperative. The closer the rate of change in the cross-sectional area of the mass extending pharynx is to 1, the smaller the pressure drop, so ideally the airway should be constant. Therefore, the analysis of the effects of repositioning on nasal ventilation showed that current surgery is appropriate with respect to functionality, as it does not compromise respiratory function. This study identified airway shapes that are favorable from the perspective of fluid dynamics.

研究分野：歯科矯正学

キーワード：顎変形症 上気道 流体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年では睡眠呼吸障害に対する社会的関心が高まっている。一方、外科的矯正治療、特に骨格性下顎後退症患者に適用される下顎骨前方移動術においては、術後の下顎骨の後戻りに伴う上部気道の狭窄が指摘されている。しかし、この気道狭窄が単なる形態的变化にとどまるのか、あるいは機能的な変調を伴うのかは不明である。また、外科的矯正治療が通気に与える影響に対して、計算流体力学 (CFD) が応用される機会が増えつつあるものの、下顎後退症に対する上下顎骨の移動が通気に与える影響の機能的評価は未だ不十分である。

これまで鼻気道のコンピュータシミュレーションを用いて、下顎前突症に対する鼻腔周囲の骨削除を伴う上下顎移動術前後の鼻呼吸機能の変化を解析してきた。そこで本研究では、下顎骨周囲筋や顎関節への影響が少ないと考えられる下顎骨のオートローションを用いた上下顎移動術の安定性および上部気道への形態的・機能的影響を解明するため、下顎後退症の三次元モデルを作成し CFD を用いて評価を行うこととなった。

2. 研究の目的

下顎後退症に対する外科的矯正治療においては、上顎骨の上方移動や後方移動を行うため、顎骨の移動に伴い鼻腔や咽頭部の狭小化を招く可能性がある。その中で、これまで評価が行われていなかった上咽頭部の狭窄が、鼻呼吸機能に与える影響を機能的に明らかにすること、治療計画に反映させることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 対象およびモデル作製方法

横浜市立大学附属市民総合医療センターにて、上顎骨後上方移動を伴う上顎移動術を施行した女性患者 3 名を対象とした。下顎移動術、種々の症候群や著しい非対称を伴う症例は除外した。

DICOM データから画像処理ソフト (Mimics®, 3-matic®) を用いて、各患者の術前および術後の CT を用い、術前モデル (PRE) および術後モデル (POST) を作製した。また、上咽頭部の気道狭窄が通気に及ぼす影響を調べるため、POST からさらに後鼻棘を中心に狭窄させ、強度の鼻咽腔狭窄を想定したモデル (STENOSIS) を作製した (図 1)。

作製したモデルそれぞれに対し ICEM-CFD® でモデルに計算格子 (Mesh) を付与し、流体解析 (FLUENT®, CFD-Post®) を行った。

(2) 解析条件

解析条件は大気圧下 (1.013×10^5 Pa)、気温 20 °C、安静時吸気を想定し、非圧縮性ニュートン流体定常流、密度: 1.205 kg/m^3 、粘度: $1.822 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ とした。支配方程式は連続の式、ナビエ-ストークス方程式を用い、乱流モデルは低レイノルズ型 k- ϵ モデルを適用した。境界条件は入口境界条件を流量 200 ml/s 、出口境界条件を自由流出境界条件とし、壁面は Non-slip と設定した。また、入口・出口境界条件の影響を緩和するため、外鼻孔と声門下腔にドライバーを付与した。

(3) 評価方法

評価断面は、鼻腔から咽頭方向へ順に NOS、NV、PNA、NP、 PA_t 、 PA_{min} 、 PA_b とした。鼻腔および上咽頭部の圧力損失は、それぞれ P_{Nose} 、 $P_{Pharynx}$ とし、合計を P_{All} とした。また $P_{Pharynx}$ はさらに $P_1 \sim P_4$ と 4 分割し、各分割面に対しては順に断面積の変化率 () も算出した (図 2、3)。

4. 研究成果

(1) 圧力損失

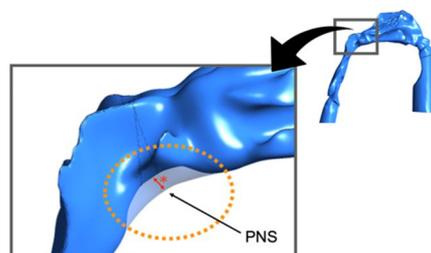


図 1 モデル作製

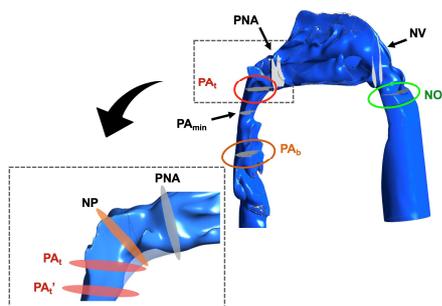


図 2 上気道評価断面

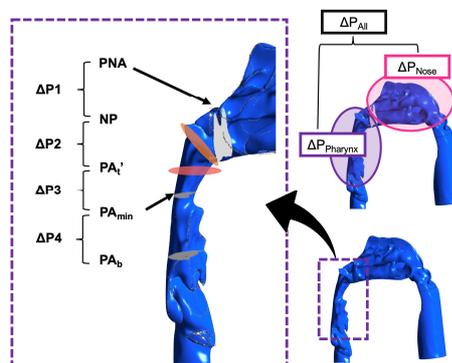


図 3 咽頭部評価

P_{All} は、PRE と POST を比較すると手術後に減少した。また、各症例における P_{All} に対する P_{Nose} 、 $P_{Pharynx}$ の割合は、 P_{Nose} が多くを占めていた（図 4）。

(2) 断面積

PRE と POST を比較すると、CSA-NOS と CSA-VaI は術後減少し、CSA-PA_{min} と CSA-PA_b は術後増加した。上咽頭部 4 区間における P と α の関係については、部位に関わらず、 α が 1 に近いものの圧力損失が小さかった（図 5）。

(3) 考察

PRE と POST の比較では、POST の方が P_{All} が小さくなっていった。流量を一定としているため、圧力損失は気道抵抗と比例関係にある。圧力損失の大きさは気道抵抗の大きさとして評価することができるので、本研究の結果から、各症例の術前と術後を比較すると上気道全体を通し術後通気の改善がみられた。

また、先行研究では下顎前突症の術後において圧力損失は咽頭よりも鼻腔の影響を受けやすいと考えられたが、本研究のような上顎前突症においても同様の傾向で、上顎骨の後上方移動が上咽頭に与える影響は鼻腔に比べて少ない可能性がある。これは、上咽頭と中咽頭を円柱とみなすと、Hagen-Poiseuille の法則に基づき気流に対する抵抗は気道半径の 4 乗に反比例することから、PNA、NP に代表される上咽頭部の断面積は NOS、NV に代表される鼻腔断面積よりも大きく、また断面積形態も鼻腔と比べて咽頭部は円管に近いこともあり、同等の顎骨移動による影響が少ないためと考えられる。

上気道壁を剛体と単純化すると、上気道内で失われる圧力損失は、粘性由来と乱流由来の損失とに分けることができる。呼吸により気道内を空気が通過する際、空気と上気道壁との間に働く粘性によって空気の流れを阻止しようとする力が働く。また、上気道内に狭窄がある場合は、流れに剥離を引き起こすことがある。径が減少する区間では圧力が減少し、流れは加速されるので剥離は起こらないが、径が増加する区間では圧力は増加するため、流れは減速され剥離が起きる。剥離が起きると、剥離点の下流には逆流によって渦が形成されるために大きなエネルギーの損失が起き、断面積の大きさに依存した気道抵抗に加えさらに P が大きくなる。

狭窄部の断面積の大きさに加え、段面積径の変化を客観的に評価するために変化率（ α ）を算出し、 P と比較した。 α が 1 に近いものほど管径の変化が少ないことを意味しており、圧力損失も小さい。通気状態を悪化させないためには、乱流が起きないように形状を直管に近づければよいので、気道径は気道全体を通して均一にするようにするのが望ましいと考えられる。

今回の結果に基づいた気道形態を手術により実現させるには、骨片移動に伴う気道形態の変化の予測が必要となると思われる。現状では、顎矯正手術により上咽頭気道部に関しては上顎骨の移動方向が影響を及ぼし、咽頭気道下部については下顎骨の移動方向が影響を及ぼすと考えられている。しかし顎顔面形態の違いによる気道形態の違いや、手術・術式による移動量に応じた気道形態の詳細な変化予測は今後の課題である。また、気道形態変化は個体差がある上、変化様式は明らかでないため、今回の研究では、顎の動きに伴って生じる狭窄を模倣し、狭窄を数値的に変化させることで、流体的な考察を加えた。その考察より、条件が同じであれば他の症例に対しても適用することが可能で、汎用性が高いと考えられる。

今後、術前の CT より気道形態を把握し呼吸機能変化の予測を立てることができれば、今回の結果と併せて、咬合や顎顔面形態とともに呼吸機能についても配慮した手術計画を立てる際の支援になるのではと考えられる。

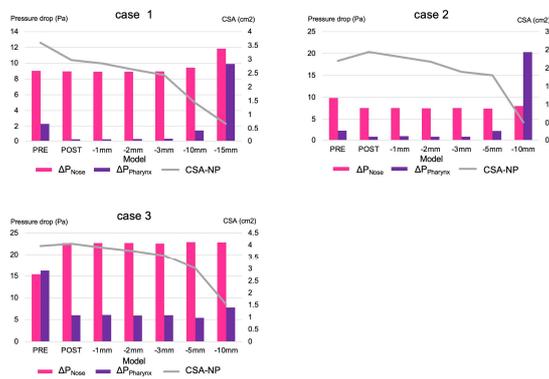


図 4 鼻腔・上咽頭の圧力損失

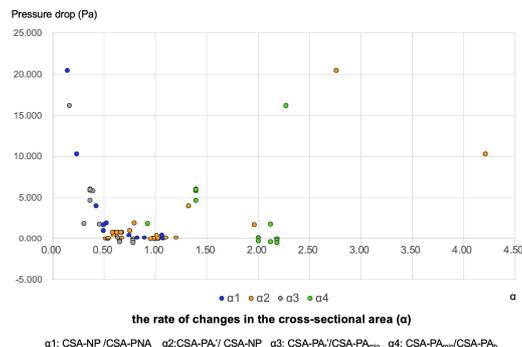


図 5 圧力損失と断面積比率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kita S., Fujita K., Imai H., Aoyagi M., Shimazaki K., Yonemitsu I., Omura S., Ono T.	4. 巻 58
2. 論文標題 Postoperative stability of conventional bimaxillary surgery compared with maxillary impaction surgery with mandibular autorotation for patients with skeletal class II retrognathia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery	6. 最初と最後の頁 57 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bjoms.2019.10.309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aoyagi Misaki, Oshima Marie, Oishi Masamichi, Kita Soma, Fujita Koichi, Imai Haruki, Oishi Shuji, Ohmori Hiroko, Ono Takashi	4. 巻 17
2. 論文標題 Computational fluid dynamic analysis of the nasal respiratory function before and after postero-superior repositioning of the maxilla	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0267677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	青柳 美咲 (AOYAGI Misaki)		
研究協力者	小野 卓史 (ONO Takashi) (30221857)	東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・教授 (12602)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大島 まり (OSHIMA Marie) (40242127)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	
研究協力者	藤田 紘一 (FUJITA Koichi) (30451909)	横浜市立大学・附属市民総合医療センター・講師 (22701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関