

# 上気道流体シミュレーションを用いた通気状態評価の臨床応用

岩崎 智憲

鹿児島大学医学部・歯学部附属病院 発達系歯科センター 小児歯科

## Clinical application of ventilation evaluation of upper airway using fluid-mechanical simulation.

Tomonori Iwasaki

Pediatric Dentistry, Dental center of the development stage,  
Kagoshima University Medical and Dental Hospital

### Abstract

Obstructive sleep apnea syndrome (OSAS) is not rare and is recognized as a major health problem. Currently, the primary treatment advocated for OSAS is surgical treatment of the airway. Unfortunately, surgery's success rate is relatively low because the obstruction site of the upper airway varies considerably. Therefore, an examination extending from the nose to the hypopharynx is crucial to precisely locate the obstruction. This examination can be carried out using a variety of techniques, including nasopharyngoscopy, fluoroscopy, pressure measurements, CT and MRI. But, these methods are not always well correlated with either the respiratory disturbance or the location of the obstruction. For the aforementioned reasons, establishing a specific method to simultaneously evaluate the morphology and function of the whole upper airway is indispensable to successful surgical treatment of OSAS.

A newly developed method combining CT and fluid-mechanical simulation (FMS) was introduced in this study. The results of FMS may be more reliable and can be evaluated more precisely than a morphological evaluation alone. Future comparisons between simulations and other functional results will be needed to prove this method's validity and efficiency.

**Key words:** OSAS, airway, CT, fluid-mechanical simulation, obstruction site

### I. はじめに

口腔の重要な機能のひとつに呼吸機能がある。そのため、気道形態、呼吸状態については歯科にも注目され、多くの研究が行われてきた<sup>1-6</sup>。これまで気道形態、呼吸状態の評価、通気抵抗の評価には頭部エックス線規格写真、CT、MRI、鼻腔通気度計、アコースティックリノメトリーなどを用いた研究<sup>7</sup>があるが、

それらの結果は必ずしも鼻閉感などの臨床症状と一致しないことが報告されている<sup>8,9</sup>。そのため、気道形態や気道通気状態の有効な評価方法は確立できていないといえる。気道形態の解析については、これまで頭部エックス線規格写真による2次元画像での評価が中心であった。しかし、近年開発された歯科用コーンビームCT (CBCT) を用いることで、これまでの2次元画

像では不可能であった気道形態が3次元画像を用いることで詳細に解析できるようになってきている<sup>10</sup>。気道通気状態については、気道の形態が複雑な長い管腔であるため、特定部分の大きさ（長径、幅径、断面積等）の形態評価のみで通気状態を評価するのは困難であった。そこで、通気状態の評価を形態の複雑さにかかわらず解析可能とするために流体力学的手法を用いて外鼻孔から下咽頭部までの上気道形態を機能的に解析して、通気状態を解析する上気道流体シミュレーションを考案した（鹿児島大学知的財産取得 Know-How 08K001）<sup>11</sup>。その結果、この方法を用いることで、これまで確立されていなかった、上気道通気状態の検査方法として、歯科だけでなく医科領域においても幅広く臨床応用できることが明らかになってきた。そこで、今回このような機会を頂いたので著者の研究について紹介させていただきたい。

## II. 上気道形態

これまで歯科において上気道形態の評価方法は側面頭部エックス線規格写真（図1A）による方法が数多くある<sup>12-16</sup>。そのため、現在においても、これまでの多くの研究結果を利用できるという点では、有効な方法であることは間違いない。しかし、頭部エックス線規格写真による2次元画像で複雑な上気道形態を正確

に評価することは難しい。ここに同一CTデータからそれぞれ構築した側面頭部エックス線規格写真様画像、中咽頭気道断面画像、3次元上気道画像を示す（図2-4）。このように上気道形態を2次元画像からの確に把握することは困難であること、また個人差も非常に大きいことがわかる。

### A. 反対咬合児の気道形態の特徴

これまで、反対咬合児の特徴として気道形態、低位舌、口蓋扁桃肥大等が示唆されていたが、側面頭部エックス線規格写真による評価のため、適確な評価ができないため、これらの関連は明らかになっていないといえない。そこで、CBCTを用いて気道形態を3次元的に詳細に解析することでこれらの関連を検討した。

CBCTの撮影はFH平面が床に平行になるよう座位にて、口唇を軽く閉じ、鼻呼吸をする、嚥下しない、舌を動かさないよう患児に指示し、CB MercuRay（日立メディコ社製、東京）を用いてF-mode（撮影範囲19cm）、撮影時間9.6secにて行った。得られた断層データは撮影装置から直接パーソナルコンピュータにDICOM形式で転送され保存した。

気道の大きさは頭位に影響されるため、cranio-cervical inclination（第二頸椎歯突起後関節面の最後上方点と第二頸椎の最後下方点を結ぶ直線とSN平面のなす角度）が90°~110°のものを対象者とした<sup>17</sup>。解

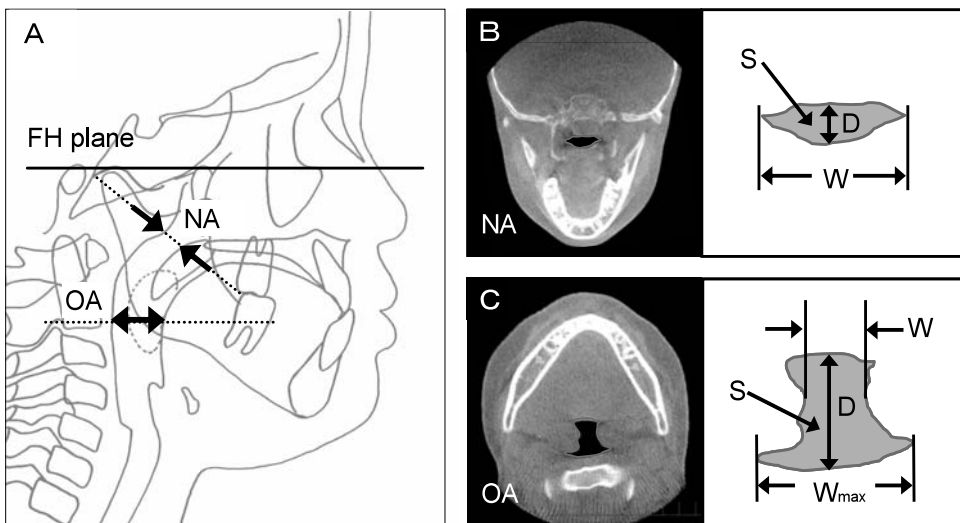


図1 気道形態の評価方法（文献10より）。A：従来の側面頭部エックス線規格写真，B：上咽頭部CT断面画像，C：中咽頭部CT断面画像（NA：上咽頭気道，OA：中咽頭気道，S：断面積，D：長径，W：幅径，Wmax：最大幅径）



図2 側面頭部エックス線規格写真様画像(A)と中咽頭部断面画像(B), 3次元上気道画像(C) (左; 右側面, 右; 正面) による中咽頭気道形態の相違(1)。口蓋扁桃肥大があるため(A, 矢印), 側面頭部エックス線規格写真様画像では的確な気道形態の把握は困難である

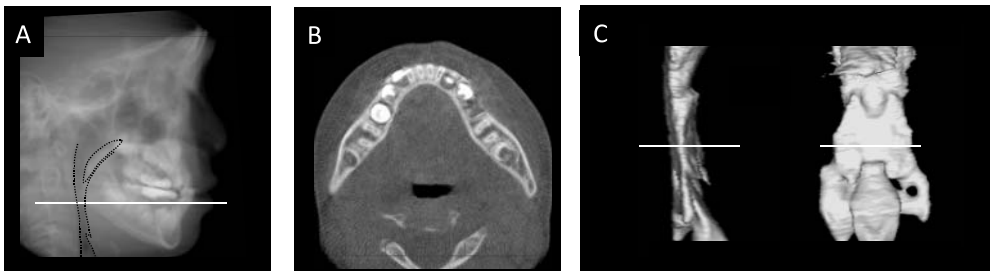


図3 側面頭部エックス線規格写真様画像(A)と中咽頭部断面画像(B), 3次元上気道画像(C) (左; 右側面, 右; 正面) による中咽頭気道形態の相違(2)。気道が横に変形して広がっており(B, C), 側面頭部エックス線規格写真様画像では的確な気道形態の把握は困難である

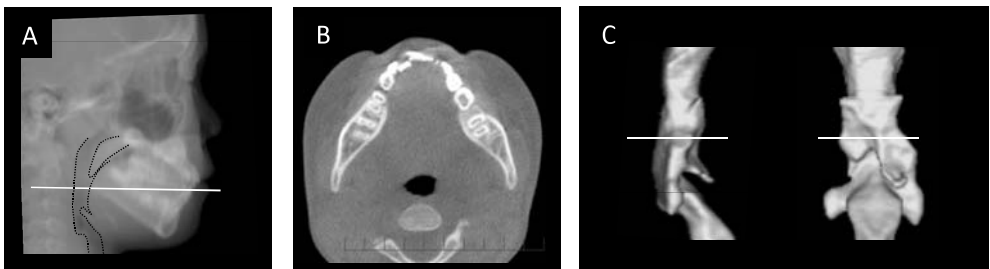


図4 側面頭部エックス線規格写真様画像(A)と中咽頭部断面画像(B), 3次元上気道画像(C) (左; 右側面, 右; 正面) による中咽頭気道形態の相違(3)。側面頭部エックス線規格写真様画像や中咽頭部断面画像からは予測できない複雑な形状をしていることが3次元上気道画像からわかる

析には、撮影された DICOM データを定位画像診断用医用画像処理システム (Imagnosis VE®, イマグノシス社製, 神戸市) を用い, 3次元画像を構築し, 基準座標系の設定を行った。基準座標系の設定は左右 Porion の中点を原点とし, その原点と左右 Orbitale を通る平面を Horizontal plane, Horizontal plane に垂直で左右 Porion を通る平面を Frontal plane, Horizontal plane と Frontal plane に垂直で原点を通る平面を Median plane とし, 3次元定位画像として再構築した(図5)<sup>10</sup>。

### 1. 咽頭気道断面形態

上咽頭気道については側面観から鼻咽腔部の最狭窄部の横断面, 中咽頭気道については Gonion を通り FH 平面に平行な平面での横断面のそれぞれ断面積, 長径, 幅径を計測した (図1B, C)<sup>10</sup>。

その結果, 反対咬合児は正常咬合児と比較して上咽頭気道には有意差を認めなかったが, 中咽頭気道では断面積, 長径, 幅径すべてに有意差を認め大きかった (表1)<sup>10</sup>。特徴のみられた中咽頭気道の断面形状にはバリエーションがあったが, これまで, その形状につ

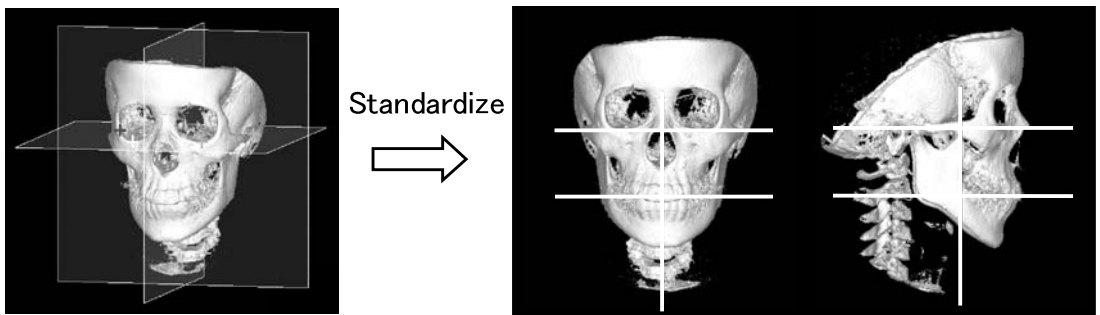


図5 3次元定位画像の構築 (文献10より)。左右 Porion の中点と左右 Orbitale から基準平面を設定した

表1 上気道形態の比較 (文献10より)

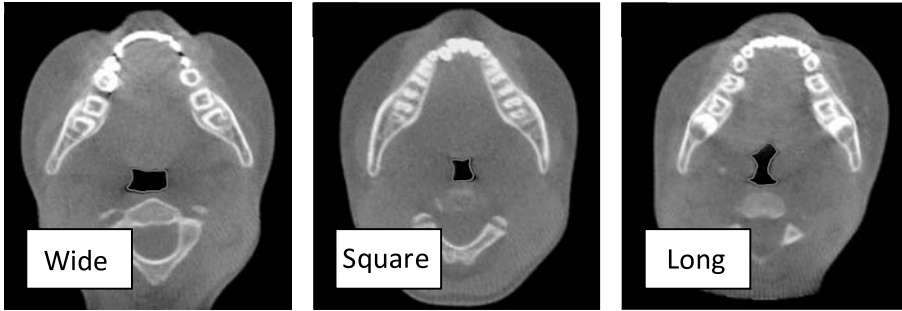
	正常咬合児 (n = 25)		反対咬合児 (n = 20)		P
	mean	SD	mean	SD	
上咽頭気道					
断面積 (mm <sup>2</sup> )	181.12	64.57	182.77	64.89	0.993
長径 (mm)	8.27	2.65	9.57	3.64	0.173
幅径 (mm)	26.80	3.84	25.79	3.36	0.360
中咽頭気道					
断面積 (mm <sup>2</sup> )	119.18	48.09	168.56	54.40	0.002**
長径 (mm)	10.68	2.52	13.58	3.16	0.001**
幅径 (mm)	14.97	3.98	18.40	4.47	0.021*
幅径差 (最大幅径-幅径) (mm)	3.33	2.17	6.09	3.72	0.008**
咽頭気道体積 (mm <sup>3</sup> )	6260.15	3010.03	7326.89	2593.40	0.295
口腔内空気体積 (mm <sup>3</sup> )	702.02	1289.18	2101.51	2148.17	0.016*

\*\* statistically significant at  $P < 0.01$

\* statistically significant at  $P < 0.05$

いての報告は見当たらないため、気道断面の長径、幅径、断面積を用いてクラスター分析を行い、断面形状の分類を行った。その結果、Wide, Square, Long の3

type に分類され、反対咬合児は Wide type, Long type に多いことがわかった (図6, 7, 表2)<sup>10</sup>。タイプごとの顎顔面骨格形態の特徴をみると、Wide type, Long



□ : 10mm

図6 気道断面形態の分類 (文献10より)。Wide type, Square type, Long type を認める

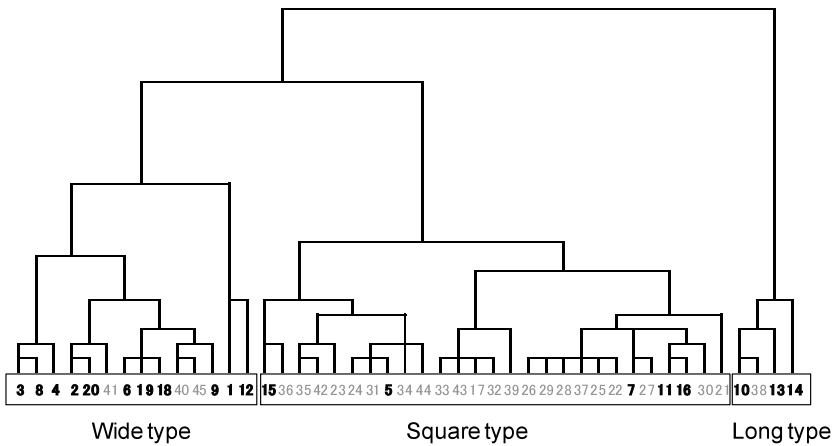


図7 気道断面形態による反対咬合児(黒字)と正常咬合児(白字)のクラスター分析による分布 (文献10より)。Wide type と Long type に反対咬合児が多いのがわかる

表2 気道断面形態の分布 (文献10より)

	Wide type	Square type	Long type
正常咬合群 (n = 25)	3	21	1
反対咬合群 (n = 20)	11	6	3
合計	14	27	4

Fisher exact test: df = 2,  $\chi^2 = 14.18$ ,  $p < 0.01$

type では 級傾向を示すことがわかり、中咽頭気道形態と反対咬合には密接な関連があることがわかった(表3)<sup>10</sup>。

## 2. 低位舌に対する評価

低位舌の評価方法についてもこれまで、側面頭部エックス線規格写真によって(図8A)評価されていた。しかし、十分な定量的な評価は困難であった。その理由の一つに2次元からの横方向の情報がないだけでなく、低位舌により、生じる空間形態が多様であるため、多数の計測点を用いて総合的に評価する方法で用いられている<sup>18</sup>。

今回、CBCT データを用いて低位舌により生じる空間の体積を評価することで空間形態にかかわらず、低

位舌の程度を定量的に評価できる方法を用いた(図8B)。

その結果、これまで低位舌は反対咬合児の特徴とされていたものの<sup>19,20</sup>、定量的には示されていなかった。しかし本法によって、反対咬合児は口腔内空気が多く、低位舌を認めることを示すことができた(表1)<sup>10</sup>。

## 3. 口蓋扁桃肥大に対する評価

口蓋扁桃肥大の評価方法ではFriedmanの分類<sup>21</sup>があるが、開口状態での口腔からの視診によるもので、5段階の評価でしかない(図9)。また、開口量、軟口蓋、舌位に影響され、前後的厚みの評価は不可能である。一方、側面頭部エックス線規格写真を用いた分析<sup>4</sup>がある。この方法では前後長径の評価は可能であるが、左右幅径の評価は出来ない。

表3 気道断面形態によって分類された3タイプの上下顎骨の前後的位置関係と中咽頭気道のサイズの比較(文献10より)

	Wide (n = 14)	Square (n = 27)	Long (n = 4)	ANOVA <i>P</i>	post- hoc Scheffe test		
	mean (SD)	mean (SD)	mean (SD)		Wide vs Square	Wide vs Long	Square vs Long
ANB (degree)	0.72 (1.94)	3.22 (2.08)	1.25 (2.50)	0.002**	< .05†	0.9	0.221
AF-BF (mm)	1.46 (2.76)	5.26 (3.20)	1.30 (4.11)	0.001**	< .05†	0.995	0.074
Wits (mm)	4.23 (1.80)	1.76 (2.23)	4.02 (3.41)	0.003**	< .05†	0.986	0.174
APDI (degree)	86.84 (5.18)	80.60 (4.09)	86.25 (6.29)	0.006**	< .05†	0.975	0.094
CSA (mm <sup>2</sup> )	198.58 (44.68)	105.70 (30.68)	132.75 (24.52)	< .001**	< .05†	< .05†	0.385
Depth (mm)	13.07 (1.52)	10.12 (1.87)	19.12 (1.53)	< .001**	< .05†	< .05†	< .05†
Width (mm)	16.64 (4.21)	10.49 (4.06)	7.22 (2.37)	< .001**	< .05†	< .05†	0.328

\*\* statistically significant at  $P < 0.01$

† statistically significant at  $P < 0.05$

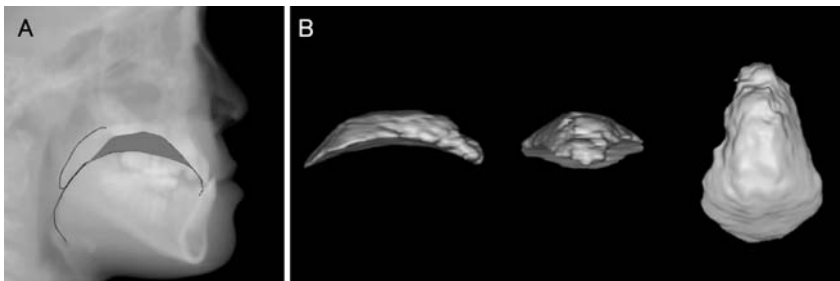


図8 低位舌の評価方法。A:側面頭部エックス線写真 B:低位舌によって口腔内に生じる空間(左より右側面,正面,上面)



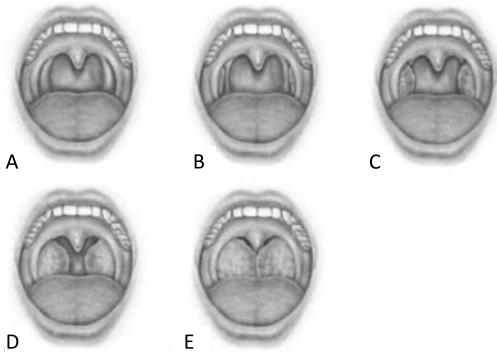


図9 フリードマンによる口蓋扁桃肥大の分類 (文献19より)。

今回はCBCTを用いることで閉口時の中咽頭部の幅径差(最大幅径 - 幅径)により口蓋扁桃肥大の評価が可能になった(図1)<sup>10</sup>。その結果、反対咬合児は中咽頭部の幅径差が大きく、口蓋扁桃が肥大していることを閉口時の定量的な値で示すことが出来た(表1)<sup>10</sup>。

今回、CBCTを使うことで気道を3次的に解析できた。得られた反対咬合児の気道形態の特徴は、今後

の臨床診断、治療方針立案に有用なものとなったといえる。

### III. 上気道流体シミュレーションの臨床応用

#### A. 小児閉塞性睡眠時無呼吸症候群の現状

小児期の閉塞性睡眠時無呼吸症候群(OSAS)はアデノイドや口蓋扁桃肥大等を原因とする耳鼻科的疾患である。顎顔面の成長にも影響を及ぼすため、歯列不正を主訴とする小児の中には、OSASを疑う者も少なくない。その発現頻度は0.7%から2.9%と報告されており、重症例では成長障害、高血圧、呼吸不全、心不全、知的障害、昏睡が生じるといわれている(表4)<sup>22</sup>。治療法的第一選択とされるアデノイド切除・口蓋扁桃摘出術はアメリカでは年間25万人の小児OSAS患者が受けている<sup>23</sup>。しかし、治癒率は60%前後で、改善をみない場合、自宅での継続的な持続陽圧呼吸療法が検討されるが、小児では患者、家族への負担は大きい<sup>22</sup>。

小児OSASの原因部位は鼻腔、上咽頭、中咽頭、下咽頭と広範囲にあり、しかも症例の半数は複数箇所にあるといわれている(図10)。しかし、現在の検査方法では、複雑な形態の上気道から障害部位を特定することは困難なため、病態に応じた適切な治療方法が選択されず、良好な治療成績が得られているとはいえ

表4 睡眠時無呼吸症候群の合併症とその他の影響

小児
成長障害
高血圧
心不全
行動異常(多動, 攻撃的, 注意散漫, 倦怠感)
胸郭変形(漏斗胸, 鳩胸)
慢性的な低酸素に伴う精神遅滞
夜尿
学習障害
成人
高血圧
冠動脈疾患(狭心症, 心筋梗塞)
脳血管障害
糖代謝異常
メダボリックシンドローム
交通事故, 社会活動の作業効率低下

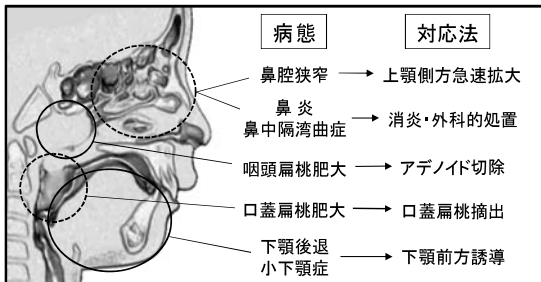


図10 上気道通気障害が生じる病態と対応法。

ない。そのため、有効な通気障害部位の特定方法が待ち望まれている。

#### B. 上気道流体シミュレーションを用いた通気状態の評価

今回、CBCT によって気道形態を詳細に評価できることが示された<sup>10</sup>。しかし、気道形態の評価のみで通気状態の評価や通気障害部位の特定は困難である。

そこで、複雑な3次元気道形態を流体力学的解析法を用いて機能的に解析する上気道流体シミュレーションを考案した<sup>11</sup>。本方法はCBCTより得られたDICOMデータを、三次元画像構築ソフト (INTAGE Volume Editor<sup>®</sup>, CYBERNET社製, 東京) を用いて上気道 (外鼻孔から下咽頭) の抽出を行い、表面形状データとしてstereolithographic format (STL) 化し、熱流体解析ソフト (PHOENICS<sup>®</sup>, CHAM社製, 東京) を用い、上気道流体シミュレーションを行った。本研究では、基本的な乱流モデルとして、流入条件は下咽頭部面鉛直方向に一様流で、流量はこれまでの安静時の呼吸の

peak flowの研究<sup>24</sup>から200 ml/sec、流出条件は自由流出、壁面は non-slip、メッシュ数は約100万要素、計算回数は1000回として、解の収束を確認したうえで最大圧力、最高速度を算出した (図11)<sup>25</sup>。

上気道流体シミュレーションと従来の形態評価の方法と比較するため、同一CBCTデータから、側面頭部エックス線規格写真様画像、断面画像、3次元画像、上気道流体シミュレーションによる解析結果を示す。

#### 症例1 8歳4か月 女児

側面頭部エックス線写真様画像、CT断面画像、3次元上気道画像からは明らかな上気道狭窄部位は認めなかった。上気道流体シミュレーションでも、上気道通気障害を認めなかった (図12)<sup>25</sup>。

#### 症例2 9歳8か月 男児

側面頭部エックス線写真様画像、CT断面画像から、口蓋扁桃肥大と上顎洞の不透過像を認めた。3次元上気道画像からは口蓋扁桃肥大による狭窄と右側鼻腔部分および副鼻腔の一部が消失を認めた。上気道流体シミュレーションでは形態観察では認めなかった左側鼻腔にも通気障害を認め、反対に通気障害が疑われた口蓋扁桃部には通気障害を示す所見は認めなかった (図13)<sup>25</sup>。

このように上気道流体シミュレーションは鼻腔から下咽頭までの上気道全体の通気状態を評価することが可能だけでなく、感度と特異度が高く、通気障害部位が複数ある場合でも客観的に検出できると考えられる。

現在、閉塞性睡眠時無呼吸症候群の治療に歯科領域で用いられている、下顎を前方に移動させるオーラルアプライアンスは臨床的効果に個人差があると報告されている<sup>26</sup>。この理由に通気障害部位の特定が出来な

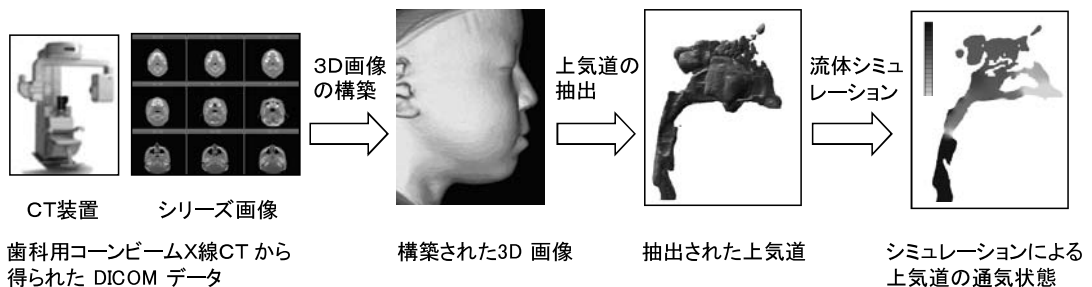


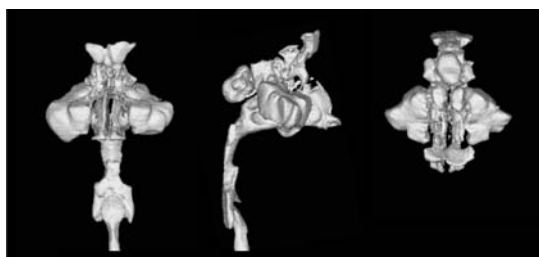
図11 上気道流体シミュレーションの解析の流れ (文献25より)。





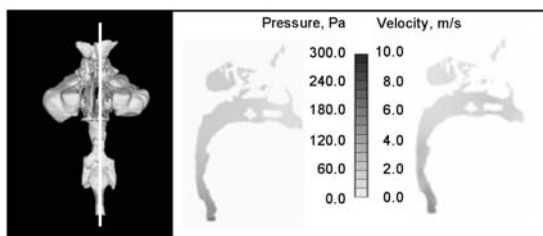
A CT から構築された側面画像と断面形態 左：顔貌と気道、中央：側面頭部エックス線規格写真様画像、右：断面画像。

明かな上気道狭窄部分は認めない



B 抽出された3次元上気道画像(左より正面、右側面、上面)。

明かな狭窄部分や消失部分は認めない



C 流体シミュレーションを行った上気道 左側鼻腔矢状断面(左)での圧力分布(中央)と速度分布(右)。

通気障害を示す所見は認めない

図12 症例1の従来の形態的評価 (A, B) と上気道流体シミュレーションによる通気状態の評価 (C) (文献25より一部改編)。

いことと、気道形態の個人差があげられている。そのため、上気道流体シミュレーションと3次元形態とあわせて評価することで通気障害部位を特定し、それに対応する有効な治療方法(医科, 歯科)の選択が可能になることで治療成績は向上するものとする(図14)。今後、実際の臨床データとの整合性を向上させて通気障害部位の特定方法, 治療方法選択に有効なものとしてエビデンスを確立させたい。



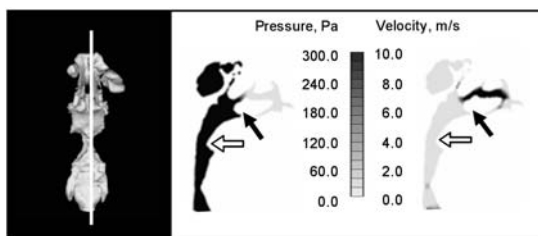
A CT から構築された側面画像と断面形態 左：顔貌と気道、中央：側面頭部エックス線規格写真様画像、右：断面画像。

口蓋扁桃肥大と上顎洞の不透過像を認める(矢印)



B 抽出された3次元上気道画像(左より正面、右側面、上面)。

口蓋扁桃肥大による狭窄と右側鼻腔部分および副鼻腔の一部が消失している(矢印)



C 流体シミュレーションを行った上気道 左側鼻腔矢状断面(左)での圧力分布(中央)と速度分布(右)。

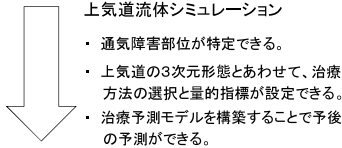
形態観察では認められなかった左側鼻腔に通気障害を認め(黒矢印), 反対に通気障害が疑われた口蓋扁桃部には通気障害を示す所見は認めない(白矢印)

図13 症例2の従来の形態的評価 (A, B) と上気道流体シミュレーションによる通気状態の評価 (C) (文献25より一部改編)。

### C. 上気道流体シミュレーションを用いた上顎前突児の通気状態の評価

成長期の呼吸状態は顎顔面形態に影響を及ぼすことが報告されているものの、いまだ明確な関連が示されていない。この理由として上気道全体の通気障害に対する客観的な評価方法が確立されていないことが挙げられる。そこで、上気道通気障害の評価方法として、流体シミュレーションを用いて上気道通気障害が上顎

閉塞性睡眠時無呼吸症候群に対するオーラルアプライアンスの臨床効果には個人差がある<sup>26)</sup>。



オーラルアプライアンスによる治療が必要な症例の鑑別と適切な治療方針立案が可能になり、治療成績の向上が期待できる。

図14 上気道流体シミュレーションを用いた閉塞性睡眠時無呼吸症候群への臨床応用。

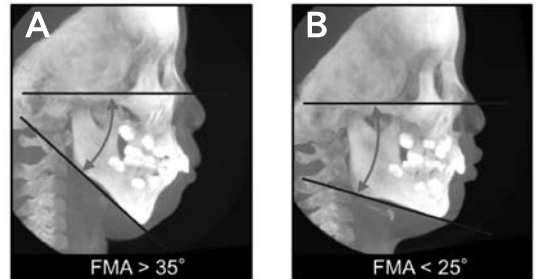


図15 側面頭部エックス線規格写真による顔面形態の分類 (文献11より)。A : dolichofacial type child, B : brachyfacial type child

表5 上顎前突児の上気道通気状態 (文献11より)

	dolichofacial type (n = 18)		brachyfacial type (n = 20)		P
	mean	SD	mean	SD	
Maximum pressure (Pa)	151.12	125.38	49.15	35.97	0.002 **
Maximum velocity (m/sec)	15.39	9.44	7.53	3.19	0.001 **

\*\* statistically significant at P < 0.01

前突児の顎顔面形態に及ぼす影響について検討した。その結果、顔面の成長方向が下方に旺盛な dolichofacial type とそうでない Brachyfacial type を比較したところ、dolichofacial type に有意な上気道通気障害を認めることがわかった (図15, 表5)<sup>11)</sup>。また、通気障害部位は鼻腔が多く、それ以外の上咽頭、中咽頭、下咽頭にも認め、同時に複数箇所に通気障害を認めることを示した (図16, 表6)<sup>11)</sup>。

この結果は dolichofacial type の上顎前突児と上気道通気状態との関連を示し、今後の臨床診断、治療方針立案に有用なものとなった。

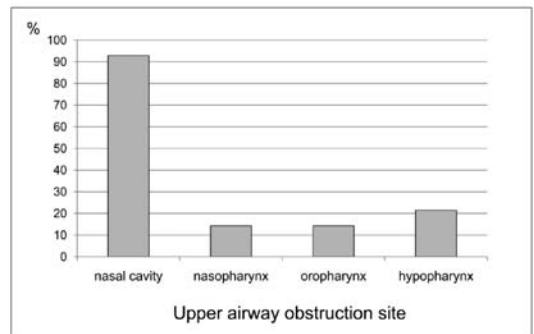


図16 上気道通気障害部位の頻度 (文献11より)。

表6 上気道通気障害者の障害部位別分類 (文献11より)

	鼻腔のみ	鼻腔+ 上咽頭	鼻腔+ 中咽頭	鼻腔+ 下咽頭	下咽頭のみ
dolichofacial type	6	2	2	2	0
brachyfacial type	1	0	0	0	1
Total (%)	7 (50%)	2 (14.3%)	2 (14.3%)	2 (14.3%)	1 (7.1%)

## IV. おわりに

OSASをはじめとした上気道通気障害改善方法は主に医科によって狭い気道確保のための内腔の切除（アデノイド切除・口蓋扁桃摘出，口蓋形成術）が中心となって行われてきている。一方，Oral Appliance, Tongue device, RME, Mandibular Advancement 等の狭い気道を広げる発想に基づいた歯科的方法の有効性を示唆する研究も多い<sup>27</sup>。しかし，現時点では歯科の治療が有効である症例の鑑別方法は確立していないため，積極的な治療への参加はみられない。

今後，今回紹介した上気道流体シミュレーションの結果と実際の臨床症状との整合性を向上させることで，通気障害部位の特定方法の確立と歯科の治療が有効な症例の選択を容易にしたい。その結果，歯科医療が上気道通気障害改善に貢献できると考える。

## 文 献

- Linder-Aronson S. Respiratory function in relation to facial morphology and the dentition. *Br J Orthod* 1979; 6: 59-71.
- Linder-Aronson S, Leighton BC. A longitudinal study of the development of the posterior nasopharyngeal wall between 3 and 16 years of age. *Eur J Orthod* 1983; 5: 47-58.
- McNamara JA. Influence of respiratory pattern on craniofacial growth. *Angle Orthod* 1981; 51: 269-300.
- McNamara JA, Jr. A method of cephalometric evaluation. *Am J Orthod* 1984; 86: 449-469.
- Warren DW. A quantitative technique for assessing nasal airway impairment. *Am J Orthod* 1984; 86: 306-314.
- Warren DW, Hairfield WM, Seaton D, Morr KE, Smith LR. The relationship between nasal airway size and nasal-oral breathing. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1988; 93: 289-293.
- Rama AN, Tekwani SH, Kushida CA. Sites of obstruction in obstructive sleep apnea. *Chest* 2002; 122: 1139-1147.
- Oliveira De Felipe NL, Da Silveira AC, Viana G, Kusnoto B, Smith B, Evans CA. Relationship between rapid maxillary expansion and nasal cavity size and airway resistance: short- and long-term effects. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 134: 370-382.
- Andre RF, Vuyk HD, Ahmed A, Graamans K, Nolst Trenite GJ. Correlation between subjective and objective evaluation of the nasal airway. A systematic review of the highest level of evidence. *Clin Otolaryngol* 2009; 34: 518-525.
- Iwasaki T, Hayasaki H, Takemoto Y, Kanomi R, Yamasaki Y. Oropharyngeal airway in children with Class III malocclusion evaluated by cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 136: 318 e311-319.
- Iwasaki T, Saitoh I, Takemoto Y, Inada E, Kanomi R, Hayasaki H et al. Evaluation of upper airway obstruction in Class II children using fluid-mechanical simulation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2011; 139: e135-145.
- Joseph AA, Elbaum J, Cisneros GJ, Eisig SB. A cephalometric comparative study of the soft tissue airway dimensions in persons with hyperdivergent and normodivergent facial patterns. *J Oral Maxillofac Surg* 1998; 56: 135-139; discussion 139-140.
- Kirjavainen M, Kirjavainen T. Upper airway dimensions in Class II malocclusion. Effects of headgear treatment. *Angle Orthod* 2007; 77: 1046-1053.
- Samman N, Mohammadi H, Xia J. Cephalometric norms for the upper airway in a healthy Hong Kong Chinese population. *Hong Kong Med J* 2003; 9: 25-30.
- Malkoc S, Usumez S, Nur M, Donaghy CE. Reproducibility of airway dimensions and tongue and hyoid positions on lateral cephalograms. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 128: 513-516.
- Takemoto Y, Saitoh I, Iwasaki T, Inada E, Yamada C, Iwase Y et al. Pharyngeal airway in children with prognathism and normal occlusion. *Angle Orthod* 2010; 81: 75-80.
- Muto T, Takeda S, Kanazawa M, Yamazaki A, Fujiwara Y, Mizoguchi I. The effect of head posture on the pharyngeal airway space (PAS). *Int J Oral Maxillofac Surg* 2002; 31: 579-583.
- Ozbek MM, Memikoglu UT, Altug-Atac AT, Lowe AA. Stability of maxillary expansion and tongue posture. *Angle Orthod* 2009; 79: 214-220.
- Graber TM, Neumann B. Removable orthodontic appliance. In: Graber TM, Neumann B, editors. *Removable orthodontic appliance*. Philadelphia: Saunders; 1977.
- Onodera K, Niikuni N, Yanagisawa M, Nakajima I.

- Effects of functional orthodontic appliances in the correction of a primary anterior crossbite--changes in craniofacial morphology and tongue position. *Eur J Orthod* 2006; 28: 373-377.
21. Friedman M, Tanyeri H, La Rosa M, Landsberg R, Vaidyanathan K, Pieri S et al. Clinical predictors of obstructive sleep apnea. *Laryngoscope* 1999; 109: 1901-1907.
  22. Richardson MA. Sleep Apnea in children. In: Richardson MA, Friedman NR, editors. *Clinician's Guide to Pediatric Sleep Disorders*. New York: informa; 2006.
  23. Brietzke SE, Gallagher D. The effectiveness of tonsillectomy and adenoidectomy in the treatment of pediatric obstructive sleep apnea/hypopnea syndrome: a meta-analysis. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2006; 134: 979-984.
  24. Xu C, Sin S, McDonough JM, Udupa JK, Guez A, Arens R et al. Computational fluid dynamics modeling of the upper airway of children with obstructive sleep apnea syndrome in steady flow. *J Biomech* 2006; 39: 2043-2054.
  25. 岩崎智慧, 早崎治明, 嘉ノ海龍三, 齊藤一誠, 山崎要一. 上気道流体シミュレーションからみた通気状態が顎顔面形態に及ぼす歯科的影響. *小児耳鼻咽喉科* 2009; 30: 5-9.
  26. Ferguson KA, Cartwright R, Rogers R, Schmidt-Nowara W. Oral appliances for snoring and obstructive sleep apnea: a review. *Sleep* 2006; 29: 244-262.
  27. Guilleminault C, Lee JH, Chan A. Pediatric obstructive sleep apnea syndrome. *Arch Pediatr Adolesc Med* 2005; 159: 775-785.