披裂軟骨運動の3次元コンピュータ解析

森 一功・児嶋 久剛・本庄 巖

Three-Dimensional Computer Graphics of the Movement of the Arytenoid Cartilage

Kazunori Mori, Hisayoshi Kojima and Iwao Honjo
(Kyoto University)

The structure of the crico-arytenoid joint was demonstrated by computer graphics of the human larynx reconstructed from serial cross sections. The cricoid facet was more or less oval, and its sagittal cross section could be approximated to part of a circle. In frontal cross sections of the cricoid facet, the medial part was more sharply curved than the lateral part. At the anterior part of the facet, these curvature radii became similar.

Computer simulation of the movement of the arytenoid cartilage was then performed. Simulation of the sliding motion of the arytenoid cartilage showed the vocal process to move less in the antero-posterior direction than in the other direction. Simulation of the rocking motion of the arytenoid cartilage showed the arytenoid cartilage to move more widely at the median position than at the anteriorly- or posteriorly-sliding position. The movement of the vocal process was greatest at this median position.

It will be necessary to identify the direction of the internal laryngeal muscle fibers by examination of the reconstructed larynx. Then it will be possible to simulate the relationship between the condition of the laryngeal muscles and the glottal shape.

Key words: larynx, arytenoid cartilage, crico-arytenoid joint, computer graphics, computer simulation

緒 言

発声のメカニズムの解明のためには、披裂軟骨の3次元的な動きによる声門形態の変化のメカニズムを明らかにすることが必要と思われる¹⁾。我々は既に喉頭の硬組織非脱灰法による連続切片からの3次元再構築を報告²⁾³⁾し、輪状披裂関節や披裂軟骨などの3次元表示には、スライス幅を小さくした切片からの再構築が必要で、これにより声門運動のコンピュータ・シミュレーションが可能になると述べた。そこ

で今回はヒト摘出喉頭のパラフィン包埋による連続大切片を作成し、輪状披裂関節を3次元表示し、その形態の再確認を試みた。また、従来、ヒトの披裂軟骨の運動は輪状軟骨の関節面の縦軸あるいは長軸回りの回転運動と、縦軸に平行な滑り運動とからなるとされている(Snell⁴⁾, Sonesson⁵⁾, Frable⁶⁾, von Leden⁷⁾)ので、我々はこの回転運動と滑り運動とのコンピュータ・シミュレーションを試み、この2つの運動による披裂軟骨の変位を知ろうとした。

輪状披裂関節の形態

(1) 方法と結果

ヒト男性 (63~79才, 平均70才) 摘出喉頭 (4例) からパラフィン包埋で厚さ30ミクロンの前額断連続切片を200ミクロンに1枚の割合で作成し, 基準点確保のために脱パラフィンせずに染色した。

グラフィック・ディジタイザ (NEC MPC-8501) で連続切片をトレースして2次元のXYデータをパーソナル・コンピュータ (NEC PC 9801VM2) に取り込んだ。パラフィン・ブロックの基準点を中心として, 連続性を保持して適宜座標を補正した後に, スライス幅から

図1 前上方から眺めた輪状軟骨, 披裂軟骨

図2 下前方から眺めた披裂軟骨, 輪状披裂関節

計算したZ座標値と視点の座標値とから, 座標変換, 2次元投影変換を行い, 視点から遠方にあるものから描写することで陰線処理を行った。なお, ワイヤー・フレーム・モデルとするために, 軟骨その他の断面を多角形で近似したが, この処理による各図形の変形は少なかった。これらの操作はすべてFORTRAN (MS-DOS ver 3.11) と機械語とで処理した。1画面の描写は約2分であった。

一方, 関節カプセルの判別のためにワン・ギーソン染色で膠原繊維を明瞭に染めて顕微鏡で拡大写真を撮り, 関節カプセルの長さを実測した。

図1に前上方からみた輪状軟骨, 披裂軟骨を示す。

図2は前やや下方から左右の披裂軟骨を眺めたもので, 輪状披裂関節面が示されている。

図3に右上方からみた輪状軟骨と輪状披裂関節面を示す。輪状軟骨関節面の輪状軟骨との境界部をXY平面, このXY平面に垂直な軸をZ軸とし, この新座標系へ関節面上の点を座標変換して描写すると図4のようになる。この際, 関節面の幅を計算し, この幅が最大になる所をX軸とし, X軸に垂直な方向をY軸とした。

図5は4例の左輪状軟骨関節面を, Z軸方向 (上方) からXY平面に投影したものである。このX軸方向の幅を縦径とし, Y軸方向の幅を

図3 上右側方からみた輪状軟骨と輪状披裂関節面

横径として4喉頭8関節について計算すると、縦径は平均 6.06 mm, 横径は 4.28 mm であった。その結果、輪状軟骨の関節面は前後に長い形をしているという共通点を持つことがわかった。

一方、図6は4例の左輪状軟骨関節面をY軸方向（内方）からXZ平面に投影した側面像である。その稜線を円で近似して曲率半径と曲率中心を求めると、誤差は3%以下で、関節面

図4 新XYZ座標系へ座標変換した輪状軟骨関節面

図5 左輪状軟骨関節面をZ軸方向（上方）からXY平面に投影したもの

図6 左輪状軟骨関節面をY軸方向（内方）からXZ平面に投影した側面像

の前後方向の稜線は円で近似する事は妥当であると考えられた。なお、この曲率半径は平均 6.24 mm であった。

図7は4例の左輪状軟骨関節面をX軸方向（前方）からYZ平面に投影した正面像である。関節面の稜線は内側では緩やかな曲面（以下、水平部と仮称）であるが、外側（以下、垂直部）では急峻なカーブをなしていることがわかる。そこで、関節面の断面の各点の差分から傾きの変化を計算すると、図8のように、関節面は、点Pが変曲点となって、水平部PRが点Tを中心とする円、垂直部PQが点Sを中心とする円に近似できることがわかった。それぞれの曲率半径は、関節の中央では、水平部では 3.41 mm, 垂直部では 1.57 mm であり、関節の前1/3では、曲率半径は水平部 2.57 mm, 垂直部 2.00 mm で両者は近い値となり、関節の前方では垂直部、水平部の区分は曖昧となり、全

図7 左輪状軟骨関節面をX軸方向（前方）からYZ平面に投影した正面像

図8 左輪状軟骨関節面の断面

体として円周に近づくことがわかった. 一方, 関節の後ろ1/3では曲率半径は水平部 4.49 mm, 垂直部 1.50 mm で, 水平部と垂直部の区分は明瞭となる(表1).

表2に輪状披裂関節の関節カプセルの実測値の代表例を挙げる. 全例で, 関節の中央部では内側部のカプセルの長さは外側部のカプセルの長さよりも大きかった.

図9に症例Bの披裂軟骨関節面を輪状軟骨関節面とともに示す. 全例で披裂軟骨関節面はほぼ円形であった.

(2) 考 按

輪状軟骨関節面は前後に長い円筒状であると

表1 輪状軟骨関節面の縦径, 横径, 曲率半径

長 軸 長	6.06±0.90 mm	
短 軸 長	4.28±0.32 mm	
長軸曲率半径	6.24±1.36 mm	
短軸曲率半径	水 平 部	垂 直 部
前 1/3	2.57±0.57 mm	2.00±0.97 mm
中央	3.41±0.64 mm	1.57±0.45 mm
後 1/3	4.49±1.23 mm	1.50±0.93 mm

表2 輪状披裂関節の関節カプセルの長さ

左輪状披裂関節			右輪状披裂関節		
スライス番号	外側	内側	スライス番号	外側	内側
22	4.01	2.51	14	2.44	2.28
23	3.36	2.65	15	2.91	2.64
24	2.77	2.58	16	3.15	2.80
25	2.73	2.36	17	3.00	2.66
26	2.78	2.64	18	2.53	2.61
27	2.57	3.12	19	2.17	3.14
28	2.47	3.35	20	2.15	3.99
29	2.69	3.75	21	2.38	4.54
30	2.86	4.55	22	2.75	4.94
31	2.82	5.01	23	2.75	5.57
32	2.73	4.74	24	2.67	5.71
33	2.70	4.45	25	2.67	5.13
34	2.78	4.27	26	2.34	4.97
35	2.85	4.09	27	2.11	5.28
36	2.95	4.21	28	2.18	5.34
37	3.01	4.61	29	2.40	5.00
38	2.83	4.63	30	2.48	4.39
39	2.72	3.96	31	2.37	3.83
40	2.86	3.54	32	2.56	3.35
41	3.03	3.50	33	2.96	2.27
42	3.17	3.16	34	3.16	2.41
43	3.38	2.90	35	3.18	2.34
44	3.52	2.88	36	3.28	2.39
45	3.41	2.84	37	3.58	2.57
46	3.62	2.80	38	3.70	2.83
47	4.26	2.84	39	3.65	2.96

(単位: mm)

従来指摘されてきた (Snell⁴⁾, Sonesson⁵⁾, von Leden⁷⁾, Maue⁸⁾, 平本⁹⁾) が, 今回の検討ではそれより複雑な形であることがわかった. つまり, 関節面は前に行くほどカーブの急峻となる曲面で, その後外側が欠けた形となっていると言える.

関節面の形態のみから披裂軟骨の運動を推定してみると, 上方からみると前後に長い形をし, 側方からみると関節面は緩いカーブを成すことから, 前後に滑り運動できる (Sonesson⁵⁾, von Leden⁷⁾, Maue⁸⁾, 平本⁹⁾) ことは容易に推測できる. また, Sellars ら^{10) 11)} の報告と同じく曲率半径は前方ほど小さいことから, 披裂軟骨は前方で内外転しやすいものと考えられる. さらに, 関節の後外側の垂直部については, 高瀬¹²⁾ は哺乳動物の比較解剖学的研究から, 声門開大による関節面の摩擦減であるとしており, 披裂軟骨の外転は後方で行ない易いことを示すと思われた. 一方, 関節カプセルの長さは外側の方が短く, 披裂軟骨が過内転して喉頭内腔に落ち込むのを防ぐ形となっており, 合目的的と考えられた (Sellars ら^{10) 11)}).

次にこれらのデータをもとに披裂軟骨の3次元の滑り運動, 回転運動のコンピューター・シミュレーションを試みた. これについては Broad¹³⁾ が理論的に詳細な計算式を報告しているが, 我々は輪状軟骨関節面の側面像は円で近似できることを確認したので, 披裂軟骨の滑り運動も一種の回転運動とみなして以下の計算を行なった.

図9 披裂軟骨関節面と輪状軟骨側関節面

披裂軟骨の運動のシミュレーション

(1) 方法と結果

上記4喉頭(8関節)について、披裂軟骨の関節運動は、関節カプセルによって制限されるとしてシミュレーションを行なった。つまり、あるスライスでの輪状軟骨関節面の開始点、終了点をそれぞれP、Qとし、披裂軟骨を変位させた時の披裂軟骨関節面の開始点、終了点をそれぞれR、Sとして、PRの長さ、QSの長さを計算し、これらがそれぞれ関節カプセルの実測値よりも大きくならないように可動範囲を計算した。また、披裂軟骨が関節面も含めて輪状軟骨と接触しないことも条件とした。

滑り運動のシミュレーションは、図6のように、輪状軟骨関節面の側面像から曲率中心を求め、この点を中心にして披裂軟骨を回転(滑り運動)させた。図10に披裂軟骨が最も後方へ滑り運動したとき(以後、後方位と仮称する)、最も前方まで滑り運動したとき(以後、前方位)のグラフィックスを示す。この前後に最大限移動した時の声帯突起の動きは左右方向には1.52 mm、頭側尾側方向(上下方向)には1.23 mm、腹側背側方向(前後方向)には0.61 mmで、合計すると平均2.06 mmであった(表3)。

回転運動のシミュレーションは図11のように変曲点Pを求め、まず水平部PRの曲率中心T

図10 披裂軟骨が最も前後へ滑り運動したときの披裂軟骨

を求め、点Tを中心にして披裂軟骨を回転させた。この際、披裂軟骨関節面の中心をAとして披裂軟骨が点Tを中心として外転可能なBまで回転運動したとすると、角度ATB(α)は、すべての症例で角度ATP(β)より小さいか、ほぼ等しかった。つまり、披裂軟骨は垂直部の曲面に沿って回転することはない、言い替えると変曲点Pを越えて外転することはないことがわかった。このことは披裂軟骨が前方位、後方位に滑り運動した時にもあてはまったので、回転運動はすべて水平部で行なわれるとして、回転運動のシミュレーションを行なった。

図12に披裂軟骨が最も内転した時、図13に最も外転した時のグラフィックスを示す。この内転、外転の可能角度は披裂軟骨が後方位のときには39.0度、前方位のときには28.1度であった(表4)。中間位(前方位と後方位のほぼ中間点)では、48.5度で、中間位で回転可能角度は最大となり、前方位、後方位では回転角度は小さくなることがわかった。また、前方位では内転可能角度(19.4度)が外転可能角度(8.8度)より大きく、後方位では逆に外転可能角度(26.1

表3 滑り運動による声帯突起の変位

左右方向	1.52±0.94 mm
上下方向(頭側尾側方向)	1.23±0.51 mm
前後方向(腹側背側方向)	0.61±0.42 mm
変位の合計	2.06±0.55 mm

図11 披裂軟骨の回転運動と変曲点、曲率中心

度)が内転可能角度(12.9度)より大きく, 中間位では内転可能角度(24.0度), 外転可能角度(24.5度)はほぼ等しかった.

一方, 回転移動による声帯突起の動きは中間位では前後方向には1.55 mm, 左右方向には4.47 mm, 上下方向には4.72 mmで, 合計すると平均6.61 mmであった(表4). また, 披裂軟骨が前方位の時には前後方向は0.70 mm, 左右方向2.51 mm, 上下方向2.20 mmで, 後方位では前後方向0.53 mm, 左右方向2.80 mm, 上下方向3.66 mmで, 披裂軟骨が中間位にあるときに, 声帯突起の変位は最大であることがわかった. また, この内外転運動による声帯突

起の前後方向の変位は上下, 左右方向の変位に比べて少ないことがわかった.

(2) 考 按

従来, 披裂軟骨の運動を調べるために, 摘出喉頭での糸での牽引(Frable⁶⁾)や, X線写真(Ardan¹⁵⁾, Fink¹⁶⁾)などによる解析などが行なわれてきた. これらの研究では, 披裂軟骨の滑り運動と回転運動とを完全に区別して調べることはできなかったが, 今回のコンピュータ・グラフィックスによるシミュレーションで, 分析的に調べることができた.

図12 披裂軟骨が最も内転した時

図13 披裂軟骨が最も外転した時

表 4 回転運動による声帯突起の変位

披裂軟骨の位置	前 方 位	中 間 位	後 方 位
内転可能角度	19.4 ± 5.7	24.0 ± 7.2	12.9 ± 8.5 度
外転可能角度	8.8 ± 5.8	24.5 ± 5.1	26.1 ± 9.5 度
角度の合計	28.1 ± 8.6	48.5 ± 8.3	39.0 ± 11.5 度
前後方向の変位	0.70 ± 0.45	1.55 ± 0.50	0.53 ± 0.49 mm
左右方向の変位	2.51 ± 1.11	4.47 ± 1.54	2.80 ± 1.08 mm
上下方向の変位	2.20 ± 1.32	4.72 ± 1.45	3.66 ± 1.68 mm
変位の合計	3.77 ± 0.91	6.61 ± 0.91	5.14 ± 1.71 mm

披裂軟骨の滑り運動による声帯突起の変位の合計は Sonesson¹⁴⁾ の約 2 mm という実測値に近く、我々の方法の妥当性を示すと思われる。また、滑り運動のみによる声帯突起の変位が、左右、上下方向に大きく前後方向には小さいことは滑り運動も声門の閉鎖開大にある程度関与し得ることを示すものと考えられる。

回転運動の可動角度は、中間位では平均48.5度で、Sonesson¹⁴⁾ の35度、Ardan¹⁵⁾ の40度という報告に比べると大きな値となっている。これは生体内での場合は、披裂軟骨に付着する筋肉や結合組織により内外転が阻害されるため我々の計算結果より小さくなると考えられる。Frable⁶⁾ は内喉頭筋、結合組織を除外した摘出喉頭で約54度と報告しており、我々の結果と近い。

この回転可能角度の合計は前方位、後方位では小さくなること、回転移動による声帯突起の変位は中間位で最大であることから、声門の閉鎖開大はこの中間位で行なわれる可能性が高いと思われる。また、前方位で内転可能角度が大きく、後方位で外転可能角度が大きいのは、内転は前方位で、外転は後方位で行われ易いことを示しており、関節形態からの推量と一致している。またこれは反回神経麻痺時の健常側声帯の過内転のメカニズムなどにも関係するのではないと思われるが、今後の検討が必要である。

Baken と Isshiki¹⁷⁾ は、披裂軟骨に糸をかけて筋走行の方向に牽引する実験で、側筋方向に牽引すると声帯突起は前後方向には殆ど変位せず、左右、上下方向に大きく変位すると報告している。これは、我々のシミュレーションでの、回転運動のみによる声帯突起の変位が左右上下方向に大きく、前後方向には小さいという結果とは少し異なる。これは Sonesson¹⁴⁾ らの指摘のように、側筋方向の牽引力は滑り運動の方向の分力も有するために、側筋方向に牽引すると披裂軟骨は前方へ滑り運動しつつ回転するからと考えられる。筋走行のデータを今回のシミュレーションに追加することでこのことは明

らかになると思われる。

以上のように、輪状披裂関節の関節形態のデータからだけでも、披裂軟骨の3次元的な運動のシミュレーションはある程度可能であることがわかった。今後、これらのデータに各内喉頭筋の筋走行の方向や収縮力等のデータを追加することで、各内喉頭筋が収縮した時の披裂軟骨の変位の方向、筋突起の変位の方向を推定することができるものと考えられる。

まとめ

1) ヒト喉頭の連続大切片からコンピューター・グラフィクス化し、輪状関節面の形態を調べた。関節面は縦長の形をしており、側方から見ると関節面は円で近似できること、前後方向での断面は、曲率半径の小さな外側部と曲率半径の大きな内側部とに分けられること、この2つの曲率半径は前方では近い値になり、断面はほぼ円形となることがわかった。

2) 滑り運動のシミュレーションでは、滑り運動による声帯突起の変位は、左右上下方向に大きく、前後方向には小さいことがわかった。

回転運動のシミュレーションでは、前方位では内転可能角が大きく、後方位では外転可能角が大きいこと、中間位では内転可能角と外転可能角とはほぼ等しく、回転可能角度の合計は最大となることがわかった。また、回転移動による声帯突起の変位は中間位で最大で、左右、上下方向に大きく、前後方向には小さいことがわかった。

3) 今後、これらのデータに各内喉頭筋の筋走行の方向等のデータを追加すれば、声門形態のシミュレーションは実際のものに近づくとと思われる。

稿を終わるにあたり、摘出喉頭を提供して下さった、京都大学医学部解剖学教室、星野一正教授に深謝致します。

本論文の一部は、第90回日本耳鼻咽喉科学会総会(大阪)、第21回国際音声言語医学会(チェコスロバキア)で口演した。

文 献

- 1) 森 一功, 児嶋久剛 : 声門形態のシミュレーション (披裂軟骨の形態と運動). 耳鼻臨床 82 : 759~763, 1989.
- 2) 森 一功, 児嶋久剛, 本庄 巖, 他 : 喉頭の3次元コンピュータ・グラフィクス (第1報). 耳鼻臨床 82 : 93~98, 1989.
- 3) 森 一功, 児嶋久剛, 本庄 巖 : 喉頭の3次元コンピュータ・グラフィクス (第2報). 耳鼻臨床 82 : 693~696, 1989.
- 4) Snell C : On the function of the crico-arytenoid joints in the movements of the vocal cords. Proc Kon Nederl Acad Wet 50 : 1370~1381, 1947.
- 5) Sonesson B : On the anatomy and vibratory pattern of the human vocal folds. Acta Otolaryngol Suppl 156 : 1~80, 1960.
- 6) Frable MA : Computation of motion at the cricoarytenoid joint. Arch Otolaryngol 73 : 73~78, 1961.
- 7) von Leden H and Moore P : The mechanics of the cricoarytenoid joint. Arch Otolaryngol 73 : 541~550, 1961.
- 8) Maue WM and Dickson DR : Cartilages and ligaments of the adult human larynx. Arch Otolaryngol 94 : 432~439, 1971.
- 9) 平本道昭 : 喉頭機能外科の解剖学的基礎に関する研究. 耳鼻臨床 70 : 177~197, 1977.
- 10) Sellars IE and Keen EN : The anatomy and movements of the cricoarytenoid joint. Laryngoscope 88 : 667~674, 1978.
- 11) Sellars IE and Sellars S : Cricoarytenoid joint structure and function. J Laryngol Otol 97 : 1027~1034, 1983.
- 12) 高瀬晴郎 : 哺乳動物内喉頭筋および喉頭関節の比較解剖生理学的研究. 耳鼻 10 : 18~58, 1964.
- 13) Broad DJ : Kinematic consideration for evaluating laryngeal cartilage motions. Folia phoniatr 20 : 269~284, 1968.
- 14) Sonesson B : Die funktionelle Anatomie des Cricoarytenoidgelenk. Z für Anatomie und Entwicklungsgeschichte 121 : 292~303, 1959.
- 15) Ardan GM and Kemp FH : The mechanism of the larynx. Br J Radiol 39 : 641~654, 1966.
- 16) Fink BR, Basek M and Epanchin V : The mechanism of opening of the human larynx. Laryngoscope 66 : 410~425, 1956.
- 17) Baken RJ and Isshiki N : Arytenoid displacement by simulated intrinsic muscle contraction. Folia phoniatr 29 : 206~216, 1977.

原稿受付 : 平成元年 7 月 12 日
原稿採扱 : 平成元年 8 月 1 日
別刷請求先 : 森 一功
〒606 京都市左京区聖護院川原町54
京都大学医学部耳鼻咽喉科学教室