画像解析プログラムを用いた音声外科手術前後の声門面積の計測

後 藤 英 功・湯 本 英 二

Quantitative Measurement of Glottal Area with Image Analysis Software before and after Phonosurgery

Hidehori Gotoh and Eiji Yumoto

Purpose:

Thyroplasty type I and arytenoid adduction surgery are effective surgical treatments for dysphonic patients with unilateral vocal fold paralysis. Adduction of the vocal fold decreases the glottal gap during phonation and improves breathy voice. The decrease of glottal area during inspiration, however, may cause an increase in upper airway resistance. The purpose of this study is to quantify the glottal area during inspiration and to examine the relationship between glottal area and upper airway resistance in phonosurgical treatment.

Materials and Methods:

Eleven patients with unilateral vocal fold paralysis underwent multi-slice helical computerized tomography (MSHCT) before and after phonosurgical treatment. Seven of them underwent pulmonary function tests and FEV1.0/PEF ratio was calculated to evaluate upper airway obstruction. Six of them underwent body plethysmography to evaluate airway resistance. Image analysis software was developed to measure the glottal area during inspiration.

Results:

Glottal area during inspiration was significantly decreased after phonosurgical treatment. The mean glottal area decreased in size to 77.0% of that before phonosurgery. The FEV1.0/PEF ratio was not significantly increased after phonosurgery. The mean airway resistance was 114.4% of that before phonosurgery. A correlation between glottal area and airway resistance was not found.

Conclusion:

It is possible to measure glottal area by MSHCT, and upper airway resistance does not significantly increase after phonosurgical treatment.

Key words: 声門面積, 画像解析プログラム, 上気道抵抗, 披裂軟骨内転術, 甲状軟骨形成術 I 型

はじめに

一側性反回神経麻痺に対する外科的治療法として甲状軟骨形成術 I 型 (以下 I 型) や披裂軟骨内転術 (以下 AA) などの喉頭枠組み手術が行われている。いずれの手法においても声帯の内転操作により発声時声門間隙を減少させ発声機能を改善させるが, この内転にともない声門レベルでの気道面積は減少することが予想される。手術後に呼吸困難が生じ, 気管切開を必要とした頻度について Rosen¹⁾ は 2.9%, Weinman ら²⁾ は 3.5%, Abraham ら³⁾ は 4.2% であったと報告している。しかし, これらの統計はいずれも周術期における呼吸困難についてのものであり, 気道面積減少に伴う長期的な気道閉塞についての評価はほとんどなされていないのが現状である。今回, 我々はマルチスライスヘリカル CT (以下 MSHCT) による喉頭の撮影を行い, 得られた画像より声門面積を計測するプログラムを開発した。このプログラムを用いて喉頭枠組み手術前後の吸気時

声門面積を測定し, 術後声門面積の減少が上気道抵抗に与える影響について検討した。

対 象

対象は I 型, AA のいずれか, あるいは両者を施行された一側性反回神経麻痺患者 11 名 (男性 8 名, 女性 3 名, 年齢 37~83 歳, 平均 60.6 歳) である。施行された手術と原疾患の内訳は表 1 のとおりである。手術前後に MSHCT による発声時及び吸気時の撮影を施行した。術前 CT 撮影から手術までの期間は平均 77.4 日 (4~247 日), 手術から術後 CT 撮影までの期間は平均 118.7 日 (91~157 日) であった。

方 法

1. CT の撮影法について

MSHCT 撮影装置は GE 社製 High Speed Advantage QXi を使用した。撮影条件は管電流 200mA, 管電圧 120Kv,

図1 画像解析プログラムの全画面。左側は声門面積測定のためのウインドウであり、(a)に冠状断の拡大像、(b)に声門モデル表示用キャンバスと操作ボタン、(c)には計測した数値が表示されている。右側(d)にMPR像(軸位断、冠状断、矢状断)を表示したウインドウが表示される。

表1 手術と原疾患の内訳

I型	3名
I型+AA	8名
特発性	4名
甲状腺腫瘍	2名
大動脈瘤	2名
その他	3名

スライス厚1.25mm, テーブルピッチ6とした。関心領域(region of interest)は96×96mm, 画像マトリックスは512×512pixel, ビット数は12bitであった。撮影時間は約8秒であった。発声時及び吸気時の撮影を行ったが、今回の測定には吸気時の画像のみを使用した。撮影法の詳細については文献を参照されたい^{4, 5)}。

2. 声門面積計測プログラムについて

声門面積計測のための画像解析プログラムを開発した。開発にあたって山口大学大学院理工学研究科・知情報処理学研究室より画像処理プログラムの提供をいただき、これをもとに今回の解析に必要な機能を随時我々で付け加えた。このプログラムはJavaという言語で記述されており、Windows OSを含むマルチプラットフォーム上で動作する。

39歳男性、左側反回神経麻痺患者(手術前・吸気時)の画像を用いてプログラムの動作について説明する。まずMSHCTによって撮影された画像をDICOM形式にてパーソナルコンピュータ(OS: Microsoft Windows 2000, CPU: Pentium 1.5 GHz, Memory 640 MB)に取り込んだ。DICOMとはDigital Imaging and Communi-

cations in Medicineの略であり、医用画像の保存と通信に関する規格である⁶⁾。Multiplanar Reconstruction (MPR) 像の作成、面積計測などの作業はすべて同コンピュータ上で行った。

図1にプログラムの全画面を示す。右側(図1-d)にMPR像(軸位断、冠状断、矢状断)を表示したウインドウ、左側(図1-a)に声門面積測定のためのウインドウが表示されている。左側ウインドウでは、左上方(図1-a)に冠状断の拡大像、右上方(図1-b)に声門モデル表示用キャンバスと操作ボタン、下方(図1-c)には計測した数値が表示されている。気道を描出するため、ウインドウレベル-500, ウインドウ幅400を用いて表示している。拡大された冠状断は画像をマウスでドラッグすることで表示位置を変えることができる。図1-a中央に表示されている四角が抽出の対象となる範囲であり、この範囲内で声帯の内側縁を自動判別し、それを結んだ直線を表示する。気道と声帯粘膜の境界閾値が-660HUになるようにプログラムにて設定されている。自動判別の対象となる範囲はサイズを変更できる。冠状断像が切り替わるたびに、声帯内側縁を結ぶ直線が自動的に引かれていく。また冠状断に同期して右側ウインドウのMPRに現在位置を示す直線が引かれ、位置の確認が容易にできる。このようにして得られた直線の空間座標、距離は自動記録される。この作業を前交連から後交連まで繰り返すことで両側の声帯内側縁を結んだ100本前後の直線が得られる。また、自動判別が困難な画像については手動での内側縁設定も可能である。これらの直線をもとに作成された声門モデルを図2に示す。上方が前交連、向かって右が右声帯になる。拡大してみると、この声門モデルが先ほど得られた直線の集合であることがわかる(図3)。図3において①の距離は冠状断像のスライ

図2 上 上方からみた声門モデル。上が前交連、右が右声帯。声門は両側の声帯内側縁を結んだ100本前後の直線で表示される。
下 左側方からみた声門モデル。上方のラインが右声帯縁、下方のラインが左声帯縁を示す。声帯の左右レベル差があることがわかる。

ス厚に等しく、当プログラムでは0.1875mmである。また、②の距離は自動抽出した段階で記録されている。よって直線①と直線②で構成される長方形の面積が計算できる。この計算を前交連から後交連まで繰り返すことで声門面積を得ることができる。

3. 上気道抵抗について

上気道抵抗を評価するため呼吸機能検査にて1秒量 (forced expiratory volume in one second, 以下 FEV1.0), 呼気ピークフロー (peak expiratory flow, 以下 PEF) を測定し, FEV1.0/PEF (ml/L/min) を算出した。また, 体プレチスモグラフ法を用いた気道抵抗 (Raw) の測定を行った。

結 果

表2に全11例の術前後の声門面積変化と呼吸機能検査及び気道抵抗との関係を示す。手術前の声門面積は平均92.0 mm², 手術後は平均70.8mm²であった。術前後の面積比は平均77.0%となり, 声門部の面積は手術操作により約23%減少するという結果となった ($p < 0.01$ paired t-test, 以下同様)。いずれの症例でも面積は減少していたが, 90

図3 声門モデル拡大像。①の距離は当プログラムでは0.1875mm, ②の距離は自動抽出した段階で記録されている。よって直線①と直線②で構成される長方形の面積が計算できる。この計算を前交連から後交連まで繰り返すことで声門面積を得ることができる。

表2 声門面積と呼吸機能・気道抵抗の関係

症例	年齢	性別	手術	声門面積 (mm ²)			FEV1.0 (L)			PEF (L/s)			FEV1.0/PEF (ml/L/min)			気道抵抗 (cmH ₂ O/L/s)		
				術前	術後	術後/術前(%)	術前	術後	術後/術前(%)	術前	術後	術後/術前(%)	術前	術後	術後/術前(%)	術前	術後	術後/術前(%)
1	72	M	I 型	100.8	76.4	75.7												
2	75	M	I 型	108.7	85.7	78.9	2.8	2.5	92.0	6.5	5.3	81.9	7.1	7.9	112.4	1.94	1.90	97.9
3	39	M	I 型	168.7	164.0	97.2	3.9	4.0	103.4	6.9	7.6	110.6	9.3	8.7	93.5	1.22	1.46	119.7
4	51	F	I + AA	48.8	30.8	63.2	2.3	2.4	102.2	7.4	8.0	107.3	5.2	4.9	95.2	1.67	1.17	70.1
5	72	F	I + AA	36.5	35.4	97.1												
6	76	F	I + AA	64.9	40.3	62.2										1.96	1.71	87.2
7	54	M	I + AA	140.0	50.6	36.1												
8	37	M	I + AA	101.5	59.0	58.2	1.8	1.6	84.8	6.5	5.5	84.9	4.7	4.7	99.9			
9	55	M	I + AA	72.5	68.4	94.4	2.6	2.9	109.5	6.6	6.9	104.4	6.6	6.9	104.9			
10	53	M	I + AA	69.2	68.5	99.1	1.5	1.6	105.2	4.3	4.3	98.4	5.9	6.3	106.9	1.07	2.29	214.0
11	83	M	I + AA	100.4	99.5	99.2	1.8	1.6	92.1	2.8	2.8	99.6	10.7	9.9	92.5	1.35	2.01	148.9
平均	60.6			92.0	70.8	77.0	2.4	2.4	99.2	5.9	5.8	98.3	7.1	7.1	99.9	1.5	1.8	114.4
標準偏差	±15.7			±39.1	±37.5		±0.8	±0.9		±1.7	±1.9		±2.2	±1.9		±0.4	±0.4	

%台とほとんど変化のないものから、36%と半分以上の減少を認めるものまで症例によりばらつきが見られた。

表3に性別による声門面積の比較を示す。女性と比較し男性の声門面積は大きく ($p < 0.01$)、術前で約2.2倍、術後で約2.4倍となった。

表4に術式による比較を示す。I型単独よりもI型+AA併用の方が手術による面積減少の影響が大きいことが示唆されたが、有意差は認められなかった。

呼吸機能検査及び気道抵抗については術前後で呼吸機能検査を施行できたのは7名、気道抵抗を測定できたのは6

名であった。全症例で検査時の呼吸困難の訴えはなかった。呼吸機能検査を施行できた7名については、術後に上気道狭窄の指標となる $FEV1.0/PEF > 10$ (ml/L/min) を示す症例はなく、術前後での有意差もみられなかった。気道抵抗測定を施行した6名では、3例で増加、3例で減少を示しており、平均14%の増加がみられたが、paired t-testによる術前後の比較では有意差は認められなかった。術前後での面積の減少率と気道抵抗の上昇率の間に相関関係はみられなかった。

図4 CTによる吸気の確認。54歳男性、左特発性反回神経麻痺 手術 (I型+AA) 前後の吸気時CT。披裂軟骨の位置より健側声帯 (右側) は術前後ともに外転位にあることがわかる。

表3 性別による声門面積の比較

	性 別		男性/女性 (%)
	男 性	女 性	
症例数	8	3	
術前面積 (mm ²)	107.7±33.0	50.0±14.2	215.4
術后面積 (mm ²)	84.0±35.7	35.5±4.8	236.6
術後/術前 (%)	78.0	71.0	

表4 術式による声門面積の比較

	術 式	
	I 型	I 型+AA
症例数	3	8
術前面積 (mm ²)	126.1±37.2	79.2±33.3
術后面積 (mm ²)	108.7±48.1	56.6±22.5
術後/術前 (%)	86.2	71.4

図5 摘出喉頭を用いた面積の検討。図左から摘出喉頭の実際の写真、撮影した写真より二値化処理にて抽出した声門部、CT画像より-660HUを境界閾値として作成した声門モデル。

考 察

声門面積測定方法について

声門面積については過去にも様々な手法を用いて計測が行われている。Geterud ら⁷⁾ は気道閉塞患者の安静呼吸時 CT 撮影を行い、声帯面を含む軸位断画像より声帯縁の CT 値を用いて領域抽出した声門面積について報告している。また Omori ら⁸⁾ や Habermann ら⁹⁾ はストロボスコピーで得られた画像をもとに、発声時の声門面積と発声機能について報告している。今回、我々は主に CT 冠状断像を基準とし、声帯が気道側に最も突出した部位を自動的に抽出することで声門面積を定義した。これは正確には面ではなく、100 本前後の傾きの異なった直線で定義される、緩やかなカーブを描きながら変化する曲面である。このような手法で得られた曲面の面積を声門面積と定義するのは問題があるかもしれないが、声門レベルに操作が加えられる喉頭枠組み手術では、その術前後の指標として有用であると考えられる。また、Geterud らが用いた CT 軸位断像から得られる声門面積及び Omori らが用いたストロボスコピーから得られる声門面積は一軸位断面上での計測となるが、一側性反回神経麻痺患者では声帯レベル差を生じていることが多く、それを考慮した測定方法が必要である。本手法を用いればそのようなレベル差が生じた症例に対応することができる。ストロボスコピーから得られる値は各々の声門面積を声帯長で標準化した相対値であるのに対し、本手法では実測値が得られるという利点もある。得られたデータは非常に単純な空間座標の集合であるため一般的なパーソナルコンピュータ上で容易に閲覧でき、さまざまな方向から声門の形態を観察することが可能である。

声門面積の妥当性について

術前後で声門面積を比較するにあたり、撮影された画像の妥当性を検討する必要がある。術前後の披裂軟骨の位置を比較し、健側声帯が十分に外転し吸気が上手くできていることを確認した (図 4)。外転不十分なものは対象から除外した。

声帯縁と空気の境界の自動抽出にあたっては partial volume 効果による影響を考慮する必要がある。Geterud ら⁷⁾ は声帯縁を 0HU と仮定し、空気の CT 値 -1000HU から partial volume 効果を考慮して得られる -500HU を境界閾値と定義し声門面積を計測している。

我々は測定値の妥当性を考察するため、摘出喉頭を用いた声門面積の計測を行った。喉頭の軸位方向からデジタルカメラによる撮影を行い、得られた画像を Scion-Image (Macintosh 用 NIH-Image を Windows 用に移植した米 Scion 社のソフトウェア) 上で二値化処理を行い声門モデルを作成した。更に摘出喉頭の MSHCT による撮影を行い、声門面積計測プログラム上に CT 画像データを読み込んだのち、様々な境界閾値を用いて声門モデルを作成した。図 5 にその結果を示す。図左から摘出喉頭の実際の写真、

撮影した写真より二値化処理にて抽出した声門部、CT 画像より -660HU を境界閾値として作成した声門モデルである。写真から測定した声門面積は 42.3mm^2 、CT から測定した声門面積は 52.1mm^2 であった。この結果より -660HU を境界閾値として採用し、面積の計測を行なった。

音声外科手術による声門面積の変化について

文献上 CT を用いた、喉頭枠組み手術前後での声門面積の計測は検索しえなかった。過去の研究では、ストロボスコピーから得られた画像をもとに、pixel カウントしたもの (Omori ら⁸⁾) があるが、発声時の声帯振動解析が中心であり、吸気時の評価については皆無である。ストロボスコピーあるいはファイバースコープによって撮影された画像をもとに声門面積を求めることも可能である。そのような方法と比較した場合、我々の手法は声門面積の実測値が得られる、声帯レベル差を考慮した値が得られるという利点がある。

声門面積と上気道抵抗について

今回我々は 1 秒量とピークフローの比 (FEV1.0/PEF) および気道抵抗 (Raw) を用いて手術前後での上気道狭窄の評価を行った。なお、対象となった患者はいずれも術前に下気道疾患の既往がなく、また術後に新たな下気道疾患を生じることもなかった。術前後で肺活量、1 秒量等の呼吸機能検査上の変化はみられなかった。よって術前後にみられる変化は喉頭枠組み手術によるものと仮定することができる。

上気道狭窄については過去にもさまざまな検討がなされている。D'Antonio ら¹⁰⁾ は圧センサーを用いた声門下圧の計測より in vivo での気道抵抗を測定した。Empey¹¹⁾ は上気道狭窄の指標として 1 秒量とピークフローの比・FEV1.0/PEF (ml/L/min) を用いており、この値が 10 以上であれば重篤な上気道狭窄が存在すると述べている。Empey が調査した上気道狭窄患者 18 例全例が FEV1.0/PEF > 10 (平均 14.0) を示した。1 秒量は最大呼出気流において 1 秒間に呼出される肺気量であり、PEF と比較すると呼気努力や上気道狭窄に依存度は低い。上気道狭窄が存在するとき、PEF の減少は FEV1.0 の減少に比較してより大きいと Empey¹¹⁾ は予想している。よって上気道狭窄患者では FEV1.0/PEF が 10 ml/L/min 以上を示す。呼吸機能検査を施行できた 7 名では、術後に上気道狭窄の指標となる FEV1.0/PEF > 10 (ml/L/min) を示す症例はなく、喉頭枠組み手術による上気道抵抗への影響はみられなかった。

Raw の測定には体プレチスモグラフ法を用い、肺胞と口腔の間の圧差を気流速度で割ったものが気道抵抗として算出される。Schneider ら¹²⁾ は喉頭枠組み手術 30 症例に対し、手術前後での Raw を測定し、統計学的に有意な上昇はみられなかったと報告している。我々の症例においても Raw は平均 14% の増加がみられたが、術前後での有意差

は認められなかった。Raw の正常値は年齢、性別等により異なるが、1.5~2.0cmH₂O/L/s 程度と言われている。3例で術後 Raw の上昇がみられ、1例では2.3cmH₂O/L/s と正常範囲をこえて上昇がみられた。この3例について、FEV1.0/PEF の値をみると、いずれの症例でも上気道狭窄を示唆するような値は得られなかった。この原因として、Raw の検査時に被験者はごく小さな速い換気努力 (panting 呼吸) を行う必要があり、この手技は患者にとって難しい場合が多いことが考えられる。Raw は FEV1.0/PEF に比べて、より敏感に気道内腔の変化を捉えるが、再現性の面で劣ることを考慮する必要がある¹³⁾。今回の上気道狭窄の判定においても、再現性の高い FEV1.0/PEF を用い、Raw は参考値にとどめた。

声門面積との関連について

声門面積と上気道抵抗の関係について Templer ら¹⁴⁾ は摘出喉頭を用いた検討を行い、男性では声門面積が50 mm² 以下であると正常呼吸時の上気道抵抗が上昇すると報告している。Al-Bazzaz ら¹⁵⁾ によれば上気道狭窄のある患者でも気道面積が79mm² 以上であれば自覚症状がなく、50mm² 以下で呼吸苦が出現し、20mm² 以下で喘鳴が聴取されるとのことである。11例中、手術後に声門面積が50mm² 以下になるものが3例見られたが、いずれも手術後の呼吸困難の訴えはなかった。Raw 値が測定できた2例では上昇を認めなかった。FEV1.0/PEF が測定できた1例でも上気道狭窄を示す所見は得られなかった。

結 論

これらの結果より、音声改善手術により声門レベルの面積は23%程度減少するが、その減少は呼吸苦の出現、上気道抵抗の上昇などをきたすまでには至っておらず、我々の症例では長期的な気道狭窄の原因とはなりえないと結論付けることが出来た。

ま と め

MSHCT により得られた吸気時の画像を用いて一側性反回神経麻痺に対する音声外科手術前後の声門面積を計測した。さらに呼吸機能検査、気道抵抗測定による上気道狭窄の評価を行い、声門面積との関連について検討した。

1. MSHCT を用いて吸気時の声門面積を実測できた。声門面積は平均77.0%に減少した。
2. 1秒量とピークフローの比 (FEV1.0/PEF) からは上気道狭窄を示唆する所見は得られなかった。
3. 気道抵抗は平均14%の増加がみられたが、術前後での有意差は認められなかった。再現性の低い検査であり、その取り扱いには注意が必要であると考えられた。
4. 喉頭枠組み手術により声門レベルの面積は減少するが、長期的な気道狭窄の原因とはならないと推測した。

追記

プログラム動作中の映像及びデータをインターネット上で閲覧できます。下記のアドレスまでアクセス下さい。
http://srv02.medic.kumamoto-u.ac.jp/dept/otorhino/larynx/index_3d.html

最後に呼吸機能検査について貴重な意見と御助言をいただきました熊本大学大学院医学薬学研究部呼吸器病態学分野・興相博次先生に心より感謝申し上げます。また、画像解析プログラムを提供していただいた山口大学大学院理工学研究科知識情報処理学研究室・木戸尚治教授、兼清 博先生、井上陽介先生に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Rosen CA : Complications of phonosurgery: results of a national survey. *Laryngoscope* 108 : 1697~1703, 1998.
- 2) Weinman EC & Maragos NE : Airway compromise in thyroplasty surgery. *Laryngoscope* 110 : 1082~1085, 2000.
- 3) Abraham MT, Gonen M & Kraus DH : Complications of type I thyroplasty and arytenoid adduction. *Laryngoscope* 111 : 1322~1329, 2001.
- 4) Yumoto E, Nakano K & Oyamada Y : Relationship between 3D behavior of the unilaterally paralyzed larynx and aerodynamic vocal function. *Acta Otolaryngol* 123 : 274~278, 2003.
- 5) 小山田幸夫, 中野幸治, 湯本英二 : 一側声帯麻痺患者における発声時軟骨間距離の定量的解析. *喉頭* 14 : 5~10, 2002.
- 6) 上田浩之, 一色信彦, 富樫かおりほか : シンポジウム II : 喉頭画像診断の最新 非腫瘍性喉頭疾患に対する三次元 CT の有用性 特に音声再建手術との関連について. *喉頭* 13 : 61~67, 2001.
- 7) Geterud A, Ejnell H, Berthelsen B et al : Laryngeal obstruction assessed by computed tomography. *Acta Otolaryngol* 108 : 305~310, 1989.
- 8) Omori K, Kacker A, Slavit DH et al : Quantitative videostroboscopic measurement of glottal gap and vocal function: an analysis of thyroplasty type I. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 105 : 280~285, 1996.
- 9) Habermann W, Jiang J, Lin E et al : Correlation between glottal area and photoglottographic signal in normal subjects. *Acta Otolaryngol* 120 : 778~782, 2000.
- 10) D'Antonio LL, Wigley TL & Zimmerman GJ : Quantitative measures of laryngeal function following Teflon injection or thyroplasty type I. *Laryngoscope* 105 : 256~262, 1995.

- 11) Empey DW : Assessment of upper airways obstruction. Br Med J 3 : 503~505, 1972.
 - 12) Schneider B, Kneussl M, Denk DM et al : Aerodynamic measurements in medialization thyroplasty. Acta Otolaryngol 123 : 883~888, 2003.
 - 13) 三嶋理晃 : 肺機能検査法と評価 体プレチスモグラフィ (肺気量, 気道抵抗). 呼吸 17 : 1214~1218, 1998.
 - 14) Templer JW, Von Doersten PG, Quigley PR et al : Laryngeal airway resistance: The relationship of airflow, pressure, and aperture. Arch Otolaryngol Head Neck Surg 117 : 867~870, 1991.
 - 15) Al-Bazzaz F, Grillo H & Kazemi H : Response to exercise in upper airway obstruction. Am Rev Respir Dis 111 : 631~640, 1975.
-
- 別刷請求先 〒860-8556 熊本市本荘1-1-1
熊本大学大学院医学薬学研究部
頭頸部感覚病態学 後藤英功
電話096-373-5255, ファクス096-373-5256