総 説

声門形態のシミュレーション

— 披裂軟骨の形態と運動 —

森 一功・児嶋 久剛

Computer Simulation of Movements of Arytenoid Cartilages

Kazunori Mori and Hisayoshi Kojima

(Kyoto University)

Three-dimensional computer graphics and computer simulation should be useful to clarify the relationship between the three-dimensional movement of the arytenoid cartilage and the contraction power of the internal laryngeal muscles. The literature is reviewed in an attempt to clarify this relationship.

It is necessary to identify both the three-dimensional structure of the crico-arytenoid joint and the direction of the internal laryngeal muscle fibers by observation of the three-dimensional computer graphics reconstructed from cross sections of the larynx. It is also necessary to draw the glottal shape transformed by electrical stimulation, using computer graphics, and to calculate the contraction power of the laryngeal muscles, using three-dimensional vector analysis. Then it will be possible to simulate the relationship between the condition of the internal laryngeal muscles and the position of the arytenoid cartilage.

The computer simulation of the glottal shape should make it possible to know the condition of the internal laryngeal muscles in phonation.

Key words: larynx, computer, simulation, graphics

緒 言

音声学における基本的な命題である発声機構は、従来の膨大な研究^{1)~3)}にも拘らず未解決の部分が残されている。この解明の一助として、披裂軟骨の3次元的な動きと内喉頭筋との関係から声門形態の変化の機構を明らかにしておく必要があると思われる。この輪状披裂関節での披裂軟骨の運動は、主として、関節面の形状と付着する筋の走行と筋力で規定されるが、これらのデータの総合、解析には、3次元ベク

トルの解析的な検討、なかでもコンピューター・グラフィックスやシミュレーションによる方法が有用と思われる。本稿ではコンピューター・グラフィックスとシミュレーションによる声門形態の解明に必要な情報、従来の研究につけ加えるべき点などを文献的に整理し、声門形態の解明の手がかりにしようとした。

文献的考察

3次元的な披裂軟骨の動きをシミュレートするには、1) 披裂軟骨と輪状披裂関節の形態と

可動範囲(ベクトルの作用点), 2) 披裂軟骨へ付着する内喉頭筋群の筋走行の方向(筋収縮ベクトルの方向), 3) 内喉頭筋群の筋収縮力(ベクトルの大きさ), の3つが必要と思われる。それぞれのデータが得られたときにどの程度のシミュレーションが可能かを, 以下に文献的に考察した。

1) ベクトルの作用点について

ヒトの輪状披裂関節は円筒形であることが従来指摘⁴⁾されており, その後, 詳細な計測^{5)~7)}が行なわれてきた。これらの報告で一致することは, 輪状軟骨の関節面は縦長(縦軸)のほぼ半円筒形をしていること, 披裂軟骨の関節面はほぼ円形とも言える凹面で, 関節面の横径は披裂軟骨の方が輪状軟骨より長く, 縦径は逆に輪状軟骨の方が披裂軟骨より長いことである¹⁾。一方, 輪状披裂関節の形態から披裂軟骨の運動を推察した報告^{4) 5) 8) 9)}では, 披裂軟骨の運動は輪状軟骨の関節面の縦軸回りの回転, 縦軸に平行な滑行からなり, 後輪状披裂靱帯の回りにも動くと考えられる。

このように, 披裂軟骨の動きは関節面での制約が大きいため, 形態だけから披裂軟骨の動きを推定することは比較的容易と思われる。コンピュータ・グラフィックスの手技を用いれば, 披裂軟骨が輪状披裂関節の関節面を滑って変位したときの筋突起の位置は容易に求めることができるからである。そのためには, 関節面の形態を3次的に確認し, 関節の長さや湾曲度を測定し, さらに関節カプセルの長さを考慮する必要がある。これには喉頭の大切片からのコンピュータによる3次元構築が必須と思われる。

2) ベクトルの方向について

ヒト内喉頭筋の筋走行から声帯位を推察する従来の報告^{10) 11)}では, 内筋, 側筋, 横筋は声門閉鎖筋, 内筋は声帯を内転かつ短縮, 側筋は声帯突起を下降内旋, 横筋は声帯軟骨部を内旋閉鎖するとされ, 前述の輪状披裂関節の形態からの推測とほぼ一致している。これらの報告は筋

収縮ベクトルの方向をほぼ明らかにしたものであるが, 筋繊維の複雑な走行を詳細に見るのにも喉頭の大切片からの3次的再構成が有用であり, その後, 3次元のXYZデータとして定量化する必要がある。関節の形態のデータにこのデータを併せることで, 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。これにより, 例えば内筋を構成する声帯筋, 外甲状披裂筋の声門形態への関与の違いも, ある程度推定することができると思われる。

なお, 前筋と後筋については, 筋電図学的研究^{12)~18)}では後筋は単なる声門開大筋ではなく調音機能もあるとされている。また, 筋繊維の走行の観察^{19) 20)}などから, 後筋は披裂軟骨を輪状軟骨上に固定して声帯の緊張を助長するとされている。声門閉鎖時には, 後筋ベクトルは筋弛緩時の一定の緊張度だけを持っているのではないと考えられる。また, 前筋は, 筋電図学的検討^{12) 21)~24)}では声帯の位置によっては声門開大筋としても働く声帯緊張筋とされる。前筋は内喉頭筋によって規定される声帯位を微妙に修飾する作用を持つと考えられる。そのため, コンピューター・シミュレーションの際, この後筋, 前筋も考慮する必要があると思われる。

さて, 摘出ヒト喉頭の筋起始部にかけた糸をひいて披裂軟骨の動きを3次的に計測すると, 披裂軟骨は輪状披裂関節の縦軸の回りに回転することが報告^{25) 26)}されている。披裂軟骨は回転運動と滑り運動で変位するために筋収縮によるベクトルは最後まで一定の方向を保つとは限らない。そのため, 糸による牽引実験は生体での筋収縮をそのままは表わさないという問題がある。しかしコンピュータ・シミュレーションでは披裂軟骨の変位にともない筋収縮ベクトルの方向が計算できるので, その点の解決はできると考えられる。

しかし, ここまでの段階ではあくまでも関節と筋の形態からのシミュレーションであり, 生体での声門運動との間にはずれがある。

3) ベクトルの大きさについて

披裂軟骨の変位は、主に各内喉頭筋の収縮力のバランスの上に成立しており、この収縮力の相対的な比 (ratio) だけでもわかれば、披裂軟骨の動きはかなり明らかになると考えられる。こうして関節の形態と筋走行のデータに収縮力のデータを併せれば、生体での声門運動のシミュレーションに一步近づくことができる。この収縮力あるいはその相対的な比を調べるには、①支配神経あるいは喉頭筋の電気刺激で声門形態の変化を調べ、これから逆に筋収縮ベクトルを求める方法、②電気刺激による収縮ベクトルを直接計測する方法、がある。また、筋自体は弛緩時にも一定の緊張度を有するわけであるが、この緊張度は複数筋の同時刺激によりある程度求め得ると思われる。

①声門形態からの逆算

内喉頭筋が収縮した時の声門形態を、関節の形態と筋走行からのシミュレーションによる声門形態と比較することで、筋収縮ベクトルの相対的な比を求めることができる。

従来、各内喉頭筋や支配神経を直接刺激して内喉頭筋と声門形態との関係を見た報告^{22) 23) 27) ~32)}は声門の平面的分析で3次元的な検討はされていなかったが、最近、声帯の長さ、厚み、内転外転の程度、声帯レベル、声門面積の変化についての定量的な報告^{33) 34)}が見られるようになった。今後、3次元座標値で表わすことで、逆算による収縮力の比を求めるデータとして使えると考えられる。

②筋力そのものの計測

電気刺激での筋収縮力は、喉頭筋に糸をかけて実測されている^{24) 33) ~37)}。この方法では筋収縮ベクトルの大きさを直接求めることができ、そのままデータとして使用が可能である。

また、筋力そのものではなく、神経の電気刺激で声帯の水平方向の閉鎖開大力を測定した報告^{38) 39)}もある。声門閉鎖力とは、声帯上面のなす平面上にあってかつ声帯縁に直角な方向のベクトルと解釈でき、ベクトルの大きさを実際の

値で表わしたものと考えられる。これは内喉頭筋の筋収縮力ベクトルがどの程度の大きさを換算できるデータとなりうる。

しかし、声門形態から逆算する方法、直接計測する方法の2つとも、電気刺激は非生理的であること、刺激頻度と筋収縮力とは比例しないことから、そのデータをただちに生体での声門運動に結びつけることは難しいと思われる。

まとめと今後の展望

筋収縮ベクトルの作用点 (披裂軟骨) の移動の方向と可動範囲、及びベクトルの方向は既に定性的に明らかにされており、糸での牽引などのシミュレーションが試みられている。また、内喉頭筋の収縮による声門形態の変化は3次元的にも定量化されつつある。しかし、これらのデータだけからでは内喉頭筋の収縮力と声門形態との関係を明らかにすることはできない。これは、1. 輪状披裂関節での動きが複雑なこと、2. 披裂軟骨の変位の方向はどの喉頭筋の収縮方向とも異なること^{37) 39)}、などによると思われる。この解明はベクトル解析的検討により可能と思われ、そのためにはコンピューターによるグラフィクスとシミュレーションが有用と考えられる。今後、声門運動のシミュレーションを行っていく上で必要な手続きは次の2点である。1. 輪状披裂関節と筋走行の定量的検討: 喉頭の大切片からのコンピューター・グラフィクスを用いた3次元構築。2. 各内喉頭筋収縮時の声門形態の3次元把握: 電気刺激などによる声門形態の変化をコンピューター・グラフィクスで正確に表わす。更にこのデータから各内喉頭筋の収縮力をベクトル解析的な方法で求め、各内喉頭筋の収縮力の変化と披裂軟骨の変位との関係を推定する。また、筋収縮力あるいは声門閉鎖圧を実測すれば、声帯縁に平行なベクトルの大きさ (このベクトルは声帯緊張度を表わす一つのパラメータと思われる) も定量化できると考えられる。

しかし、電気刺激のデータと生体での声門運動とを直接結びつけることはできず、この解決

は今後の課題である。

以上述べてきたように、声門形態のシミュレーションは発声機構解明の一つの手がかりになると思われる。すなわち、声門形態の解明で内喉頭筋群の働きはより明確になり、発声時の内喉頭筋群の収縮力などの解明に役立つと考えられる。また、上述の声帯緊張度の定量化により、各内喉頭筋と音声のピッチとの関係など喉頭の基礎的問題の解明の手段となり得る。また、臨床的には、声門の形態から内喉頭筋の状態（筋力、萎縮度、悪性腫瘍の浸潤度など）の推測が可能になるものと思われる。

稿を終えるに当たり、御校閲をいただいた本庄 巖教授に深謝致します。

参考文献

- 1) 広戸幾一郎：発声機構の面より見た喉頭の病態生理。耳鼻臨床 59 : 229~291, 1966.
- 2) 一色信彦：喉頭機能外科。京都大学医学部耳鼻科同窓会, 1977.
- 3) 平野 実：音声外科の基礎と臨床。耳鼻 21 : 239~440, 1975.
- 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) Maue WM and Dickson DR : Cartilages and ligaments of the adult human larynx. Arch Otolaryngol 94 : 432~439, 1971.
- 6) 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.
- 7) 佐藤公則：喉頭の立体解剖。耳鼻 33 : 153~182, 1987.
- 8) 山下喜六：喉頭関節の機能解剖学的研究。熊本医学会雑誌 27 : 83~94, 1953.
- 9) von Leden H and Moore P : The mechanics of the cricoarytenoid joint. Arch Otolaryngol 73 : 541~550, 1961.
- 10) 万城目忠男：日本人の喉頭筋に関する解剖学的研究。日耳鼻 62 : 1890~1900, 1959.
- 11) 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.
- 12) Andersen KF : Electromyographic investigation of intrinsic laryngeal muscles of humans. Acta Physio Scan 41 : 140 ; 1~148, 1957.
- 13) 沢島政行, 佐藤正夫, 船坂宗太郎, 他：喉頭筋の筋電図およびその臨床的応用。日耳鼻 61 : 1357~1364, 1958.
- 14) 浦田敬造：発声時の人の内喉頭筋の筋電図学的研究。耳鼻臨床 53 : 811~841, 1960.
- 15) Hiroto I, Hirano M, Toyozumi Y, et al : Electromyographic investigation of the intrinsic laryngeal muscles related to speech sounds. Ann Otol 76 : 861~871, 1967.
- 16) 平野 実：起声時の喉頭調節に関する筋電図的研究。日耳鼻 74 : 1572~1579, 1971.
- 17) 広瀬 肇：起声時における内喉頭筋の活動様式。日耳鼻 75 : 981~988, 1972.
- 18) 広瀬 肇：後輪状披裂筋の機能（特に発話に関連した機能を中心として）。耳鼻 19 : 711~723, 1973.
- 19) 村上 泰：後輪状披裂筋反射とその生理的意義。日耳鼻 74 : 1263~1270, 1971.
- 20) 村上 泰：喉頭の臨床解剖と生理。日耳鼻 76 : 911~914, 1973.
- 21) 広瀬 肇：声門閉鎖筋の機能分化。日耳鼻 77 : 46~57, 1974.
- 22) 中村文雄, 植田 豊, 竹之内智, 他：喉頭神経の電気的刺激による声帯の運動。日耳鼻 64 : 380, 1961.
- 23) 広戸幾一郎：発声機能面よりみた喉頭の病態生理。日耳鼻 69 : 2097~2106, 1966.
- 24) 牛島達次郎：喉頭筋の機械的収縮特性に関する実験的研究。日耳鼻 71 : 1494~1509, 1968.
- 25) Frable MA : Computation of motion at the cricothyroid joint. Arch Otolaryngol 73 : 73~78, 1961.
- 26) 清川兼輔：内喉頭筋のはたらきと声門の形態（ヒトの摘出喉頭による実験的研究）。耳鼻 33 : 183~217, 1987.
- 27) Brewer DW and Dana ST : Investigation in laryngeal physiology; the canine larynx. Ann Otol 72 : 1060~1075, 1963.
- 28) 竹之内智：喉頭神経刺激による声門の運動に関する研究。耳鼻臨床 56 : 398~420, 1963.
- 29) Williams AF : The nerve supply of the laryngeal

- muscles. J Laryngol 65 : 343, 1951.
- 30) Capps FCW : Abductor paralysis in theory and practice since Semon. J Laryngol 71 : 1, 1958.
- 31) Kotby MN and Haugen LK : Attempts at evaluation of the function of various laryngeal muscles in the light of muscles and nerve stimulation experiments in man. Acta Otolaryngol 70 : 419~427, 1970.
- 32) 岩村 忍 : 喉頭筋の機能区分. 音声言語 15 : 77~78, 1974.
- 33) 小池裕一, 平野 実, 森尾倫弘, 他 : 内喉頭筋の機能 (声門及び声門形態の変化に関して). 日耳鼻 78 : 1250~1257, 1975.
- 34) 森尾倫弘 : 内喉頭筋の機能 (特に声門部の形態的变化に関する実験的研究). 耳鼻臨床 22 : 143~179, 1976.
- 35) Hast MH : Mechanical properties of the cricothyroid muscles. Laryngoscope 76 : 537~548, 1966.
- 36) Hast MH : Mechanical properties of the vocal fold muscle. Prac Oto-Rhino-Laryngol 29 : 53~56, 1967.
- 37) 佐藤文彦, 矢野原邦生, 竹之内智, 他 : 内喉頭筋収縮と声門の形態ならびに力学. 気食 33 : 302~308, 1982.
- 38) 村上 泰 : 声帯運動と声帯位 (神経筋生理の立場から). 耳鼻 19 : 64~78, 1973.
- 39) 佐藤文彦, 矢野原邦生, 竹之内智, 他 : 内喉頭筋の収縮特性と声門運動. 日耳鼻 85 : 951~956, 1982.

(原稿採択 : 昭和63年11月 5 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)