非腫瘍性喉頭疾患に対する 3 次元 CT の有用性

—特に音声再建手術との関連について—

上 田 浩 之¹⁾・一 色 信 彦²⁾・富 樫 かおり³⁾・小 西 淳 二⁴⁾

The usefulness of 3D-CT for non-neoplastic laryngeal diseases

Hiroyuki Ueda¹⁾, Nobuhiko Isshiki²⁾, Kaori Togashi³⁾
and Junji Konishi⁴⁾

This article reviews the basics of 3 dimensional computed tomography (3D-CT) and its application for non-neoplastic laryngeal disease. A wide variety of 3D-CT images can be obtained with the use of helical or multislice-helical CT scans. Images that are especially useful are derived from multiplanar reconstruction (MPR) and virtual endoscopy. The combination of both techniques enables us to obtain accurate anatomical information on the basis of virtual reality, and to help plan phonosurgery. Such anatomical information that can be comprehensively evaluated include: severity of vocal fold atrophy, location and extent of laryngeal stenosis, size of the laryngeal ventricle, relative location of vocal folds and arytenoid cartilage to the thyroid cartilage, and the height of the paralyzed vocal fold. These characteristics are not adequately evaluated with only the use of laryngoscope, even though it is a golden-standard for diagnosis of laryngeal disease. At present, there are several limitations with 3D-CT. 3D-image reconstruction takes much time and skill. The movement of vocal folds cannot be evaluated, since time resolution is insufficient. These limitations still prevent 3D-reconstruction to be a widely used modality. However, as a modality for preoperative evaluation of phonosurgery, 3D-reconstruction images are already in practical use, making up for laryngoscope shortcomings.

Key words: 3 次元 CT, 非腫瘍性喉頭疾患, virtual endoscopy, 音声再建

I. は じ め に

喉頭は解剖学的に複雑な領域であり、通常の CT, MRI といった断層像では声帯、仮声帯、甲状軟骨、披裂軟骨などの立体的位置関係の把握が難しい。また、喉頭鏡で殆どの疾患の診断が容易であるため、腫瘍の進展範囲以外の評価でこれら断層画像が使用されることは少なかった。

一方、音声再建を目的として行われる手術には様々な方法が考案されている。中でも一色らにより開発された喉頭枠組み手術は、QOL の向上が世界的に要求されるようになりつつある中、今後益々普及していく手術法と考えられる¹⁻⁵⁾。発声機能はデリケートであり声帯などのわずかな位置のずれが声質に大きく影響を与えるため手術のデザインが重要であるが、今までは一般的には各種喉頭鏡所見

と術者の経験が頼りであった。

しかし、喉頭鏡検査には声門上狭窄が高度な場合は診断がつけられない、仮声帯肥厚や過内転の場合にも声帯、声門下、喉頭室深部の所見がよく把握できないといった限界がある。さらに喉頭鏡検査では音声再建手術の際問題となる声帯と軟骨（甲状軟骨、披裂軟骨）との立体的位置関係の把握はできないし、声帯萎縮の程度の評価も難しい。

このような喉頭鏡検査の限界を補うための方法としてヘリカル CT（用語解説）により得られたデータを元に再構成した 3D-CT による評価の試みが報告されているが⁶⁾、非腫瘍性疾患に対してはその数は少ない⁷⁻⁹⁾。しかし実際に施行してみると横断像のみと比べ喉頭の諸構造の立体的位置関係の把握が容易である上、声帯の萎縮の程度、喉頭室の拡大の程度、外傷による複雑な変形の理解など、喉頭

1) 京都大学医学部附属病院放射線部

2) 一色形成外科, 耳鼻咽喉科

3) 京都大学医学部映像医療学講座

4) 京都大学医学部核医学科

1) Radiology and Nuclear Medicine Service, Kyoto University Hospital

2) Isshiki Clinic for Plastic Surgery and Otolaryngology

3) Hitachi Medical Co. chaired Department of Diagnostic and Interventional Imageology, graduate school of medicine, Kyoto University

4) Department of Nuclear Medicine and Diagnostic Imaging, graduate school of medicine, Kyoto University

鏡検査のみでは獲得不可能かつ音声再建手術を施行する上で有用な情報が得られることがわかった。

本稿では、比較的なじみのない 3D-CT を作成する上での技術的側面を述べた後、非腫瘍性喉頭疾患に対する 3D-CT の臨床例にもとづきその有用性を概説する。

II. 3D-CT について

1. 3D-CT の基本的事項

3D-CT の厳密な定義は難しいがここでは広義にとらえ 3 次元的に得られた元データより再構成された各種の像を指すこととする。3 次元画像を作成する主な手法としては volume rendering, surface rendering, multiplanar reconstruction (MPR) が挙げられる (用語解説参照)¹⁰⁾。この稿でも扱う virtual endoscopy は volume rendering もしくは surface rendering により得られたデータの投影法の一つである (用語解説参照)。なお、CT ではヘリカル CT, マルチスライス (ヘリカル) CT により 3 次元のデータを得ることができる。

つい最近までは 3 次元画像を得るのにかかる膨大な時間と手間が普及を妨げるネックになっていたが、ハードウェアとソフトウェア双方の進歩によりこの問題は解消されつつあり、ようやく実用段階に入ってきた。実際血管や骨その他部位で臨床応用されはじめており、マルチスライス CT の普及、コンピューターの処理能力の向上により今後更に需要が増えると予想される¹¹⁾。

3 次元画像のメリットは今までの断層画像のみと比較して体内の構造、病変の大きさ、空間的位置関係がより直感的に把握しやすいという 1 点につきる。3 次元画像を作成したからと言って診断自体が変わることは少ないのであるが、3 次元画像により描出される「わかりやすい画像」は診断のみではなく手術計画、治療法の決定、患者へのわかりやすい説明などに対する応用が期待されている。

2. 3D-CT の作成方法 ―一般論―

一般的には 3D-CT の制作には CT 装置自体のコンソールで行う場合とネットワーク接続されたワークステーションにデータを転送して行う場合の 2 通りがある。

・CT 装置がネットワークに接続されていない場合：この場合 CT 装置自体で 3D の制作をする。この場合、作成されたデータをフィルム以外の形で出力するのは困難である。MO などのストレージデバイスがついている場合でもフォーマットが独自のことが多く、個人のパソコンでファイルを見ることはできない。この場合はフィルムに出力するか、耳鼻科医がコンソールまでやってきて観察するか、もし CT にビデオ出力端子があればビデオにして出力するのがいずれかになる。

・CT がネットワークに接続されている場合：この場合同じネットワーク上に接続されたワークステーションへデータを転送し、その上で 3D を制作することが多い。同じネットワーク上にパソコンを繋げば、比較的容易にできあがったデータを転送することができる。データの形式にはメー

カー各社独自のものと、DICOM 形式 (用語解説参照) と呼ばれるものの 2 通りがある。DICOM 形式のものをパソコンに転送すれば DICOM viewer というソフトを用いて画像を観察したり、JPEG, TIFF, PICT といったパソコンで使われるファイル形式に変換したりすることができる。フリーのソフトも多い。メーカー独自の形式のデータであってもこの DICOM viewer で読むことができることが多い。なお、ワークステーションには CT, MRI などの装置購入時に附属してくる場合が多いが、独自に購入しようとするとなかなか高価である (数 100 万円以上)。

3. 我々が現在用いている喉頭 3D-CT の作成方法

CT は GE 社製 High Speed Advantage を使用、ビーム厚/テーブル移動 3/3mm 再構成間隔は 1 mm とした。静呼吸時、および深吸気にての息止め時に撮影 (喉頭全体の撮影に約 15 秒程度かかる) した後、ワークステーション (GE 社製 Advantage Windows もしくは Advantage Workstation) に画像を転送、冠状断 MPR 像 (声帯に対し垂直な断面)、及び virtual endoscopy 像を作成している。この後、ワークステーションから直接ビデオに出力し、耳鼻科医に渡している。なお、virtual endoscopy 像は静呼吸時のもののみ作成しているが、MPR 像は静呼吸時、息止め時双方の画像を作成し、比較している。現在、軟骨、喉頭内腔の volume rendering 像も応用を検討中である。

4. 用語解説

聞き慣れない用語が多いかと思われるので簡単に解説する。

・ヘリカル CT：テーブル (患者が乗る台) を一定速度で動かし、X 線管球を回転させ続けると、結果的に X 線は患者周囲を螺旋状に操作されることになる (図)。3 次元のデータが得られる。

・マルチスライス CT (multidetector CT, 多検出器 CT)：断面に対し垂直方向に X 線検出器を複数おいたヘリカル CT。通常のヘリカル CT に比べ、より高分解能の画像を、広い範囲で、高速に撮像することが可能になった。

・surface rendering：閾値により画像を 2 値化し物体の表面のみを描出する方法である。表面の情報のみ扱うため計算が軽い。閾値の設定により不連続といったアーチファクトを作りうる。

・volume rendering：surface rendering が表面のみの情報を扱うのに対し、物体内部の情報全てを 3 次元化する方法である。計算が重い。データが抜け落ちないので、surface rendering に見られる不連続といったアーチファクトを作りにくい。

・DICOM：Digital Imaging and COmmunications in Medicine の略。医用画像の保存と通信に関する規格である。つまりネットワーク自体の規格であると同時に画像の形式も指す。最近の放射線診断装置はほぼ例外なくこの規格をサポートしている。

・ワークステーション：パソコンと比べ処理能力が高いコンピューター一般のこと。オペレーティングシステムも

UNIX のものが多い。しかし、パソコンの高性能化に伴い性能的な差は縮まっている。

・MPR 像：元々横断像である CT 画像のデータを冠状断像、矢状断像と言った任意の断面に再構成した画像のことである。ワークステーション上では、マウスでポインタを動かすことにより、ある 1 点（例えば声帯）が他の断面でどこに位置するのかわかる。横断像のみでは把握しにくい構造の評価には有効であるがあくまで断層像であり、全体像の把握は難しい。喉頭では特に冠状断像が有用である。

・Virtual endoscopy 像：volume rendering によるものと、surface rendering によるものがあるが見た目は大差ない。後述のように volume rendering の方がデータが重く計算に時間がかかるが、アーチファクトには強い。

Virtual endoscopy は 3 次元画像の投影法の一つで、腸管、気道、血管といった管腔構造内部の一点に視点及び光源をおき、そこから内腔を眺めたような像、つまり各種内視鏡に類似した像が得られる。この方法では声帯などの動きは画像化できないものの、下部からの観察をはじめ、通常の内視鏡では物理的に不可能な方向からの観察も可能である（図 1）。内視鏡を見慣れた人には理解しやすい像であると思われる。

Ⅲ. 非腫瘍性喉頭疾患に対する応用

1. 本検査の対象

2000 年 3 月より現在まで 14 例（正常 1 例：一色形成外科耳鼻科より紹介 12 例：京大病院症例 1 例）について施行し

図 1 32歳男性。正常例。

a：喉頭鏡。b：virtual endoscopy（上方より下方の観察）。c：virtual endoscopy. 下方より上方の観察。d：横断像（静呼吸時）。e：横断像（息止め時）。f：冠状断再構成像（静呼吸時）。g：冠状断再構成像（息止め時）。右側では、声帯（vc）、仮声帯（f）、披裂軟骨（矢頭）、甲状軟骨（Th）、輪状軟骨（c）を示す。

図1 32歳男性. 正常例.

a : 喉頭鏡. b : virtual endoscopy (上方より下方の観察). c : virtual endoscopy. 下方より上方の観察.
d : 横断像 (静呼吸時). e : 横断像 (息止め時). f : 冠状断再構成像 (静呼吸時). g : 冠状断再構成像 (息止め時).

右側では, 声帯 (vc), 披裂軟骨 (a), 甲状軟骨 (Th), 輪状軟骨 (c) を示す.
声門 (矢印) が息止め時に閉鎖しているのがわかる.

た. 内訳は正常1例の他, 声帯麻痺8例, 外傷例2例, 痙攣性発声障害1例, 声帯萎縮1例, 原因不明の慢性喉頭炎1例である. 声帯麻痺の1例については術前, 術後の2回にわたり検査した. 代表例を図示する. (図1~3)

2. 喉頭の3D-CTで得られる情報

以下に喉頭3D-CTで得られる情報を列挙する.

・狭窄の程度, 位置: 喉頭より上部, たとえば下咽頭に

狭窄がある場合, 喉頭鏡ではそれより下方の情報が得られない. しかしCTでは容易に狭窄部位, 程度の診断ができる¹²⁾ (図3).

・声帯の状態: 声帯の萎縮の有無, 程度, 麻痺がある際正中よりどの程度偏位しているか左右声帯のレベル差の評価が可能 (図1~3). また声帯の形状 (弓状声帯の有無), 長さもわかる.

図2 29歳男性. 左声帯麻痺例.

a : 喉頭鏡. b : virtual endoscopy (上方から下方を観察). c : 横断像. d : 冠状断再構成像.

横断及び冠状断に再構成した CT では喉頭鏡で予想される以上の声帯萎縮 (矢頭), 喉頭室の拡大が見られる (→).

・異物：魚骨，木片など．存在診断自体は通常の CT で十分可能であるが，異物の刺入方向など 3 次元的な異物の状態の評価が必要な時には 3D-CT が役立つと考えられる．

・軟骨の状態の評価：骨折の有無，破裂軟骨（筋突起）の位置．軟骨骨折に関しては石灰化がない場合は評価が難しい場合もあることが予測される．しかし，多くの場合軟骨の輪郭が断裂していることで診断がつくと思われる．

・喉頭室のサイズ：声帯萎縮に伴う喉頭室の拡大がよくわかる（図 2）．喉頭鏡で予想されたより拡大が強い症例が多い．シリコン，ゴアテックス等を挿入する際の目安になりうる．

・各種計測：声帯長，健側と患側の声帯での高さの差，

声帯の厚み，甲状軟骨切痕から声帯までの高さなど任意の 3 次元上の 2 点間の距離計測が可能である．声門などの面積を計測することができる．

・術後検査：我々が経験した症例のうち術前，術後に撮像された 1 例では，術前後での声帯の位置の変化のほか充填物（ゴアテックス）の位置，及び息止め時の声門閉鎖が確認された．良好な発声機能の回復が得られている場合には必ずしも必要とはいえないが，結果が思わしくない場合や，一旦発声機能が回復しその後増悪するような場合には声帯，充填物の位置等の評価に有用な検査となるであろう．

・なお，経験した症例の中で，痙攣性発声障害，慢性喉

図3 24歳男性. 外傷による失声例. 下咽頭の狭窄(図示せず)のため喉頭鏡では観察不能であった.
a: virtual endoscopy. b: 横断像. c: 冠状断再構成像.
両側の声帯(矢印)が確認でき, 左の被裂軟骨が外転(矢頭), また左右の声帯の高さが異なることがわかる. 喉頭には目立った狭窄は認められない.

頭炎, 声帯萎縮といった, 病変が両側対称性の疾患においては異常所見を指摘することが困難であった. しかし痙攣性発声障害の1例においては喉頭鏡で声帯が確認できず, virtual endoscopy のみにより声帯の状態が把握可能であった. このように喉頭鏡での声帯の確認が困難な症例についても virtual endoscopy を用いることで一定の情報を得ることができることがある.

これら 3D-CT により得られる声帯, 軟骨といった喉頭の構造に関する情報の多くが喉頭枠組み手術を計画する上で重要な役割を果たしうるの言うまでもない.

3. 応用可能な疾患

現在, 我々は反回神経麻痺, 喉頭外傷, 痙攣性発声障害, 声帯萎縮の症例で, 特に喉頭鏡での声帯の評価が困難な症

例について 3D-CT を施行している. どのような疾患にも応用は可能であるが, 疾患の質的診断は多くの場合喉頭鏡検査で十分であり, 本検査の主目的は喉頭諸構造の術前評価にあるため被爆, 検査のコストを考慮し今後適応に関してある程度の基準を作成する必要があると思われる.

4. 今後の展望

音声再建手術がより精密に行えるように, また, より簡便に 3D-CT が使えるようにするため, 現在以下の 2 点を考慮中である.

・マルチスライス CT の応用: マルチスライス CT の登場はより高速に高分解能の画像を得ることを可能にした. 今まで喉頭のスキャンをするのに 10 秒以上かかっていたのが, 5 秒以内ですむと考えられる. このことは, ヘリカ

ル CT のみでは不可能であった、発声しながら、息を吸いながら、はきながらのスキャンを可能にする。つまり、ある程度喉頭の機能自体の評価が CT で可能になるということの意味する。マルチスライス CT を用いた喉頭の機能解析については第13回喉頭科学会総会においても中野らによる発表があったが今後の研究、臨床応用が期待される分野といえよう。

・作業の自動化、アプリケーションの開発

3D 制作自体も煩雑であるが、3 次元画像上で距離、面積など各種測定を行うのも面倒なことである。できれば、3D 制作、計測といった作業がある程度自動的に行われるようなアプリケーションの開発が可能ならそれにこしたことはない。既存のプログラムに組み込むような形でモジュールを組み込むことができないか、可能性を検討中である。

5. 喉頭 3D-CT の問題点

このように有用である 3D-CT にもいくつか問題点がある。以下に各問題点を挙げる。

・時間：いくら高速になったとはいえそれなりに時間がかかる。忙しい一般臨床の間を縫って作業することになる。なれた人が最近の高速ワークステーションを使っても 1 例につき 2 時間くらいはかかる。

・作業を誰が行うか？：放射線科医、耳鼻科医、放射線技師、の 3 つの選択肢がある。しかし、喉頭に携わる全ての耳鼻科医に 3D の作成を任せるのには無理があり、一般には放射線科医、放射線技師に依頼するのが現実的であろう。しかし、喉頭の解剖学的、機能的な知識がある程度は必要であるのはいうまでもない。

・データの受け渡し：耳鼻科医が各自でデータ処理する場合とはともかく、放射線科で処理して出来上がったデータを耳鼻科医に渡す場合、データの出力形式（どのような形で作成したデータを渡すか）が問題となる。フィルム出力する場合には膨大な枚数となり、フィルムを並べるのも一苦労という状態になりかねない。我々はワークステーションからビデオ (S-VHS) へ画像を出力することによりこの問題を解決している。最近ではデータを変換してビデオファイルを作成するシステムを構築し、ビデオファイルとパソコンで読めるファイル形式 (JPEG 等) に変換した画像ファイルを CD-ROM に納めて渡すことを始めさらに有用性が高まっている。ビデオや画像ファイルをモニタ上で観察するのは視点を動かさずにすむというメリットがあり画像の枚数が非常に多い場合にはフィルムに比べ有効であると考えている。

・データの信頼性

特に距離計測において問題となる。通常のヘリカル CT では断面に対し垂直方向の距離計測はやや信頼性が低い。この問題はマルチスライス CT では解消されている。しかし、機械に誤差はつきもので精密な距離計測を問題にする場合、定規に相当するものを患者と一緒にスキャンして collimation しておくにこしたことはない。

IV. おわりに

今後マルチスライス CT の普及、コンピューターの高速化により 3D-CT は益々身近なものになっていくと予想される。まだまだ敷居が高いかもしれないが、多くの施設で 3D-CT が施行され少しでも発声機能の回復に役立てばこれほどうれしいことはない。

参 考 文 献

- 1) Isshiki N et al: Thyroplasty as a new phonosurgical technique. *Acta Otolaryngol* 78: 451~457, 1974.
- 2) Isshiki N et al: Thyroplasty type I (lateral compression) for dysphonia due to vocal cord paralysis or atrophy. *Acta Otolaryngol* 80: 465~473, 1975.
- 3) Isshiki N et al: Arytenoid adduction for unilateral vocal cord paralysis. *Arch Otolaryngol* 104: 555~558, 1978.
- 4) Isshiki N: Phonosurgery: theory and practice. Springer-Verlag, Tokyo, 1989.
- 5) Isshiki N: Progress in Laryngeal Framework Surgery. *Acta Otolaryngol* 120: 120~127, 2000.
- 6) Aschoff AJ et al: High-resolution virtual laryngoscopy based on spiral CT data. *Radiologie* 38: 810~815, 1998.
- 7) Yumoto E et al: Three-dimensional endoscopic mode for observation of laryngeal structures by helical computed tomography. *Laryngoscope* 107: 1530~1537, 1997.
- 8) Yumoto E et al: Three-dimensional endoscopic images of vocal fold paralysis by computed tomography. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 125: 883~890, 1999.
- 9) 石川雅洋ほか：ヘリカル CT による披裂軟骨の 3 次元表示：耳喉頭頸 68: 748~749, 1996.
- 10) 奥本忠之、石橋忠司：Virtual endoscopy の実際：消化管、気道への応用。画像診断 20: 551~558, 2000.
- 11) 山下康行ほか：マルチスライス CT の臨床的有用性と問題点：臨床放射線 45: 477~486, 2000.
- 12) Rodenwaldt J et al: Three-dimensional surface imaging of the larynx and trachea by spiral CT: virtual endoscopy. *Rofo Fortschr Geb Rontgenstr Neuen Bildgeb Verfahr* 165: 80~83, 1996.