

## 声道の立体模型作成の試み

白坂 康俊<sup>1)</sup>、熊田 政信<sup>2)</sup>、肥沼 武司<sup>3)</sup>、池上奈津子<sup>4)</sup>、町田 芳明<sup>5)</sup>

### 要 旨

工業分野で近年盛んに用いられる、試作品(prototype)を高速に(rapid)製造するラピッドプロトタイピングといわれる技術は、コンピュータ内に作成された三次元画像から、立体模型を作成する技法で、複雑な形状や物体内部の空間を再現することも可能である。

一方、CTスキャンは、空洞を含む人体を三次元画像的に取り込む方法である。したがって、ラピッドプロトタイピングを用いれば、CT画像データに基づき、人体内部の空洞を含む器官の立体模型を実物と全く同じ形状で作成できる。

言語聴覚学領域において関心の高い声道(発声発語の際の声の通り道)については、2次元画像から想像して作成した模型はあるが、正確に実物大の模型は存在しない。

今回、我々はラピッドプロトタイピング技術を用いて、気管上部から、口腔および鼻腔までの声道を1mm単位の精度で、正確に再現した立体模型を作成したので報告する。

キーワード：三次元模型、声道、積層造形、発声発語、ラピッドプロトタイピング

### I はじめに

#### 1. 目的

工業分野においては、製品開発を主な目的に、試作品(prototype)を高速に(rapid)製造するラピッドプロトタイピングと呼ばれる技術が実用化されている。このうち、コンピュータ内に作成された三次元画像から、立体模型を作成する技法である積層造形技術を用いると、実在する立体(モデル)の形状を三次元計測によりパソコンに取り込み、三次元画像に処理する過程を経て、モデルと全く同じ形態、同じ大きさの立体模型を作成することが可能である(図1、写真1)。

ところで、CTスキャンは、人体という実在の立体を三次元画像的に取り込む方法である。したがって、CT画像データを、積層造形技術に適応可能な三次元画像データに変換できれば、人体と同じ形状の立体模型が作成できる。<sup>[2][3]</sup>

これまで、人体の筋や骨、血管など器官の実質の部分を忠実に再現する模型は存在している。しかし、器官の

腔の部分については、二次元画像などをもとに想像により作成された立体模型は存在するが、実際に全く同じ形状で再現した立体模型作成は、報告されていない。

そこで、今回、我々は積層造形技術を用いて、発声発語器官のうちの腔である、いわゆる「声道」を再現した立体模型を作成したので報告する。

本研究の目的は、声道だけでなく、人体の腔の実物大立体模型を、簡易に作成する方法を検討することである。それは、言語障害分野において、声道の忠実な再現が、音響実験的な検証を可能にするばかりでなく、広く、医学的診断や医療教育、手術や補助具装用のシミュレーションなどに応用の可能性をもたらすことが期待できる。

#### 2. 声道

胸郭、横隔膜、肺、喉頭、咽頭、軟口蓋、硬口蓋、歯、舌、下顎、口唇、鼻腔等は、本来は、呼吸及び摂食・嚥下という生命維持に必要な活動のために存在するが、人は、これらの器官を発声発語に用いる。発声発語とは、そもそも音のない単なる空気の流れを、発声発語器官の

1) 弘前医療福祉大学 保健学部 医療技術学科 言語聴覚学専攻(青森県弘前市小比内3-18-1)

2) クマダ・クリニック(東京都西麻布4-2-6)

3) 国立障害者リハビリテーションセンター 病院(埼玉県所沢市並木4-1)

4) 東京都リハビリテーション病院 リハビリテーション部(東京都墨田区堤通2-14-1)

5) 埼玉県産業技術総合センター 技術支援室(埼玉県川口市上青木3-12-18)

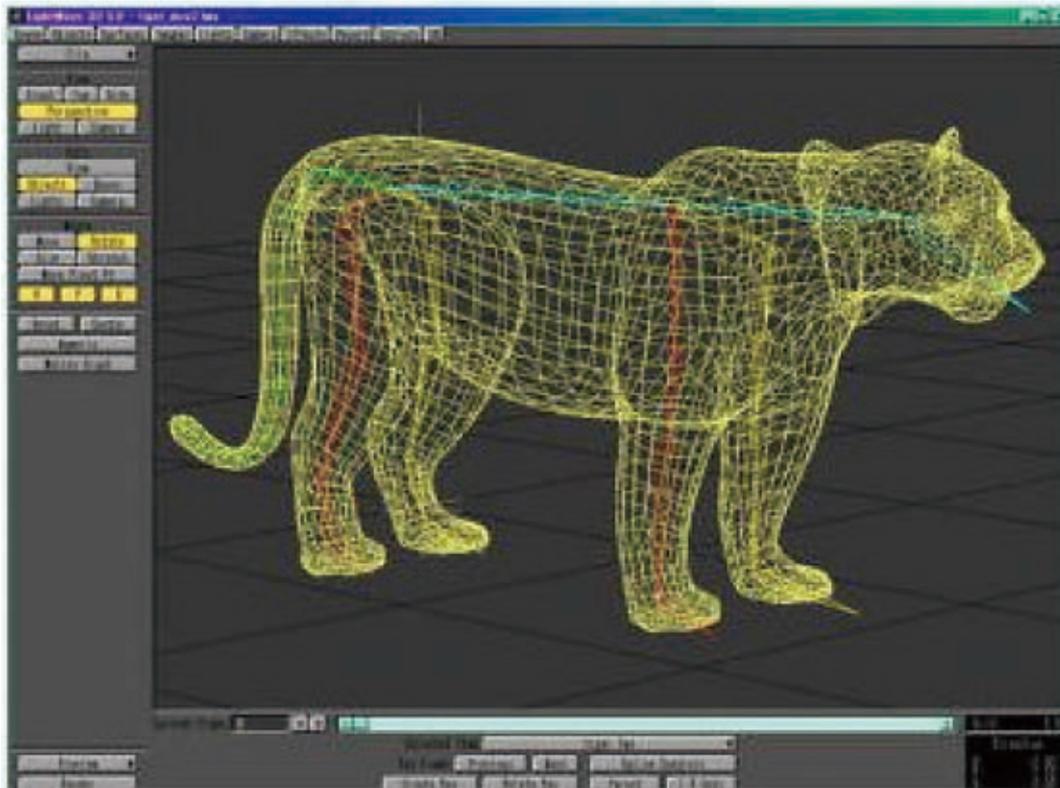


図1 元形状画像（パソコン上で作成した3次元画像）



写真1 造形による実体モデル（図1の元形状画像から作成した立体模型）

運動によって、母音、子音という音に変換する行為である。音への変換は、これらの器官と器官の間に形成される腔でなされ、母音や子音の異なる音色は、基本的には、

腔の位置や形態、容積などによって決定されている。肺から気管、口腔、鼻腔へ至るこの腔のうち、声帯から上が「声道」と呼ばれている。

発声発語器官の動きは、口唇を除けば体内での動きであり、直接観察することが不可能である。したがって、その運動メカニズムの解明は長い間困難であったが、19世紀中ごろから実験音声学的方法が始まり、20世紀に入り大きく発展した。X線マイクロビームシステムやマグネトメータの応用や、超音波を用いる方法などで舌運動が解析されており、光電声門図による声帯運動の解析も知られている。しかし、これらは、あくまで発声発語器官の動態の解析であった。結果的には、硬口蓋と舌面との空間に関する情報も得られるが、そのほとんどが顔面中央部の矢状断面上における動態の解析であり、口腔内部とはいえ平面的な情報に限られているという点でも不十分であった。また、これらの部分的情報や、外部からの計測から、声道の擬似模型の作成は試みられており、発声メカニズム解明のための音響実験も行なわれているが、人体モデルの形状、大きさともに正確に再現された模型の作成は報告されていない。<sup>[1]</sup>

### 3. 積層造形

実際に存在する物体を三次元画像データとしてパソコンに取り込むためには、物体の三次元形状を測定する必要がある。

測定方法には、直接物体に触れて計測する点単位測定や、光レーザが対象物体表面で反射し戻ってくるまでの時間で距離を計測する光レーザ法、赤外線と奥行きを計測する方法などがある。測定方向も、固定された単方向から測定するもの、固定された複数方向から測定するもの、対象物体を周回して測定するものなど、方法によって異なる。これらは、いずれも外形の測定方法であり、内側にある腔、垂れ下がった外壁の内側などは測定できない。しかしCTスキャンについていえば、内部の形状を測定できる三次元測定システムである。この点、本研究の目的である内部の腔部分の再現という点で重要である。

次に、立体形状を作成する積層造形技術とは、1980年代初めに基本的なアイデアが提示された方法で、作成したい立体の高さ方向にスライスされた断面一枚毎のデータをコンピュータで作成、そのデータに基づいて、粉体、樹脂、板、紙などの材料を薄い膜状の平板として作成し、これを一枚一枚重ねる（積層）ことにより目的の立体を実現する技術である。

現在製品化されている積層造形技術は、カッターで切り取った一枚ずつの紙で各層を構成し、接着剤で接着する紙積層法、加熱し溶融状態の樹脂を微細ノズルで噴射し、積層していく溶融物積層法、樹脂粉末を炭酸ガスレーザにより溶融焼結させて平板を形成する粉末焼結法、樹脂粉末をノズルからデータ部分に対し吐出させた接着剤で固める粉末接着法などがある。今回、最終的に用いた

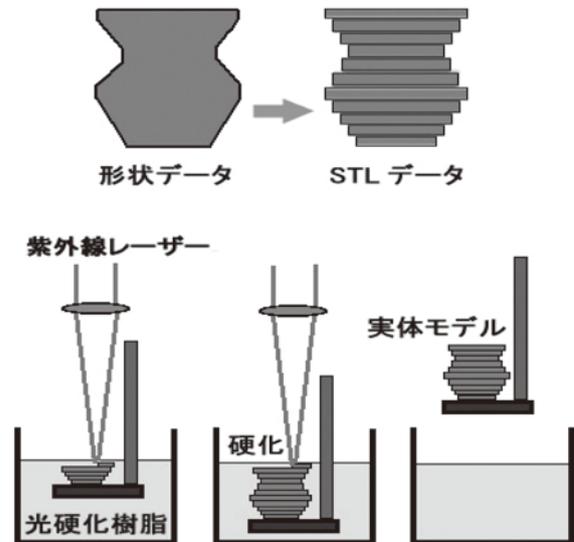


図2 光硬化樹脂を用いた積層造形技術の原理

光造形は、紫外線があたると硬化する樹脂を用いる（図2）。造形装置は、モデルのスライス断面第1層の平面データに基づいて、液体樹脂表面の対応する部位にレーザ光を照射し、樹脂を硬化させる。ついで硬化した部分の厚み分を樹脂内に沈め、第2層目のデータに基づいて、樹脂表面にレーザ光を照射し、硬化させる。これによって、樹脂側の2層目が作成される。なお、硬化のさい、二つの層の重なった断面は、結合される。この作業を順に繰り返すことによって、最終的にコンピュータ内のモデルと同じ形状のものができあがる。この時、一つの層の物理的厚みが薄いほど、模型の精度は細くなる。

積層造形に共通の特徴、利点は（1）内部の腔を実現できる、（2）人による熟練した技術を必要とせず、無人連続運転も可能である、（3）人の手では難しい、幾何学的な形状が容易にできる、という3点である。このうち、前者の2点が本実験において有用であった。

（1）内部の腔を実現できる。

立体造形で古くから用いられている切削法では、内部の腔や重なりの内側部分は、工具が入らないため造形不可能であるが、積層造形では、一度の工程で比較的簡単にできる。また対象物が相当の肉薄であっても加工可能である。特に、本研究では、腔の作成が重要な課題であり、積層造形のこの利点が最大限に活用される。

ただし、積層造形の中でも、方法によっては、内部の腔作成の過程で、造形する部分同士を支えるために、実際には存在しないサポートを必要とする場合がある。この場合、外部に開口していない腔や、開口していても開口部が狭い場合は、作成後サポートを取り除くことができないので、腔の正確な再現を必要とする場合には使用できないことがある。粉末焼結法や粉末接着法では、サポートなしで内部の腔が造形可能である。

(2) 人による熟練した技術を必要とせず、無人連続運転も可能である。

切削による方法などでは、高度な切削技術が必要であり、型をとって造形する方法でも、同様に熟練の技術が求められる。しかし、積層造形は、造形装置が、ほぼ自動的に作業を行うので、人による機械加工の専門技術、高度な技術を必要とせず、かつ、連続無人運動が可能である。<sup>(2)(3)(4)</sup>

## II. 方法

### 1 予備実験(第一次模型作成)

予備実験として、CT画像撮影、CT画像データから積層造形データへの変換処理、積層造形のそれぞれについて問題を明らかにするため第一次模型を試作した。<sup>(5)</sup>

#### 1) 発声時のCT画像撮影

CTスキャン装置(HiSpeed Advantage SG-0084、GE、Fairfield)により計測を行うにあたって、発声メカニズムを検証する目的があるので、発話時の口腔内形状を測定することにした。対象音は、発声時に最も口腔の腔が広い母音[a]および腔が最も狭い母音[i]とした。ただし、発声状態では、声門は閉鎖する。しかし、最終的に声道の立体模型を用いて音響分析を行う場合、声門部で人工の声を呈示することを想定したため、声門部のみ閉鎖せず、他の器官は発声時の状態で撮影を行なうこととした。

具体的には、被験者の喉頭下部5センチのあたりから鼻腔上部まで、上下約30cmの部分を1mm間隔で撮影した。所要時間は2分弱であった。声門を開放した状態で撮影するために、喉頭下部から上方へスキャンを始め、喉頭を通過するまでは発声をしなかった。喉頭通過後発声を開始し、口蓋の上部に至って発声を中止した。この間約30秒であった。<sup>(5)(6)</sup>

なお、予備実験および3.2で述べる本実験におけるCT画像撮影に関する個人情報保護、および被爆の問題等倫理的な問題に関しては、弘前医療福祉大学倫理委員会において承認されている。

#### 2) データ処理

CT画像のデータ形式は、そのままでは、積層造形装置で使用できないため、積層造形で処理可能なSTLデータに変換する必要があった。STLデータに変換可能な三次元CAD画像の処理ソフトで、かつCT画像のデータの取り込みが可能なソフト(FORGE、レキシシー社、東京)を採用した。CT画像をDICOM形式でFORGEに取り込み、FORGEから積層造形可能なSTLデータ形式で出力した。

また、CT画像を、FORGEを通じてデータに変換する時、FORGEのCT画像を三次元画像で表示する機

能を利用し、人体の外側、皮膚の部分と声道側の粘膜部分をそれぞれ境界として設定した。そして、二つの境界面に挟まれる部分、すなわち実際の人体では筋肉や骨などの実質がある部分をデータ加工し、均一な実質として埋めることにした。<sup>(5)(6)</sup>

#### 3) 予備実験の結果

造形方法は、樹脂粉末焼結積層造型機(EOSINT-P、コンネクト株式会社、東京)によるナイロン樹脂(PA2200 ファインナイロン)粉末焼結を用いた。

形状は、頭部の外形を再現し、内部に声道部分(副鼻腔を含む)のみを腔として再現し、他の部分(実際の人体では、骨や筋肉の部分)は、積層造形素材で均一に埋める、いわゆるソリッドモデルで作成した。この形状では、腔全部を観察することができず、軟組織と空間の境界設定の妥当性は正確には検証できなかった(写真2)。

さらに、第一次模型では、被験者の補綴物によるアーチファクトにより、正確な造形ができなかった(写真3)。

また、造形の精度が粗く(スライド幅4mm)、微細な音響実験には不十分であると推測された。

### 2. 本実験(第二次模型作成)

予備実験で明らかになった課題をふまえ、モデルを忠実に再現した立体模型で、かつ音響実験に使用できる第二次模型を作成した。造形したのは、第一次模型と同様の声道部分(副鼻腔を含む)である。

#### 1) CT画像の撮影とアーチファクトへの対応

アーチファクトについては、データの加工処理による対応は不可能であったため、歯科治療歴のない者を被験者にして撮影し、アーチファクトのない画像を得た。撮影の方法は、第一次模型と同じであった。

#### 2) データ処理

CT画像のDICOMデータから、積層画像用のSTLデータへの変換は、第一次模型と同じ方法で行った。

軟組織と空間との境界設定は、耳鼻科医師、X線技師、言語聴覚士が三次元画像上で討議しながら決定した。軟組織と空間との境界は、画像上のコントラストから抽出する。この場合、画像の輝度の設定により、明暗の境界には、ずれが生じる。そこで、FORGE画像上で輝度を変化させながら、かつ気管から鼻腔までに至る全ての境界面をチェックし、どの部位でも確実に実際の境界面を示していると考えられる輝度を選択した。そして、その輝度における、水平画面で腔の輪郭線をトレースし、積層化することで腔の境界を最終的に決定した。<sup>(6)</sup>



写真2 予備実験において作成したソリッドモデルの模型。声道は実現しているが、空洞全体を観察することができなかった。



写真3 アーチファクトを反映させて、正確な造形ができなかった第一次模型。



写真4 第二次模型 母音〔a〕発声時の模型 側面（左）と正面（右）



写真 5 第二次模型 母音〔i〕発声時の模型 側面（左）と正面（右）

### 3) 積層造形

造形方法としては、形態の再現性の精度が高い（スライス厚0.1mm）光硬化樹脂（TSR-820）による光造形装置（SOLIFORM 500-EP、シーメット株式会社、横浜）を用いた。

第一次模型のようなソリッド形式では、内部の腔を直接観察することができない。そこで、第二次模型では、腔部分のみを再現することにした。そのため、軟組織と空間の境界面を軟組織側に1mmの厚さで作成する、いわゆるサーフェイスモデルとした。

当然、筋肉や骨などの実質がある部分を削除することになるが、外鼻孔や口唇の周辺の形状は、音響実験の際に音色に影響すると考えられたので、顔面の表面部分は削除しない模型を作成することにした。上下には眉毛から下顎の先端まで、左右にはそれぞれの目の目尻までの顔面を、外側の面から1mmの厚さで作成した。母音[a]および[i]の二つの状態で作成したのは、第一次模型と同じである。

## Ⅲ. 結果と考察

作成した第二次模型を写真4および5に示した。積層造形におけるスライス厚は、0.2mm以下であり、CT画像のスライス厚は1mmであったことを考えると、論理的には1mm単位での再現が可能である。実際、被験者の顔面および口腔内部と、作成した第二次模型を可能な範囲で非可動部分を中心に実測し、比較したところ、両者に1mm以上の差を認めなかった。

音響実験は、様々な条件で行う必要があるため、音響実験が可能かどうかを判断するために予備的実験として、以下の方法で実施した。

まず、声道模型の気管側の開口部から、笛式人工喉頭（マイナ宮本式人口笛、永島医科器械株式会社、東京）のチューブを挿入し、チューブ先端を声門部分にあてた。そして、マウスピースからチューブに息を吹き込み、チューブ途中にあるリード板を振動させ音源として呈示した。[a]と[i]の模型それぞれに対して実施した。健聴者5名で聴覚的に判断したところ、5名ともが[a]と[i]の模型で音色が異なると判断した。しかし、それぞれの模型で、[a]と[i]に明瞭に聞き取れると判断した者はいなかった。

今後は、模型の素材による影響、また、骨や筋肉などの実質部分を削除し、腔のみを再現したことによる共鳴への影響などを検討する必要がある。

明瞭度に最も影響していると考えられるのは、音源であった。模型は、声門部から2cmほど下まで作成されており、人工喉頭のチューブの先端を声門の位置に置いて音源呈示したが、笛式喉頭の音源は20cmほどのチュー

ブの、反対側の一端にあるリン青銅製のリード板の振動であった。今後は、模型での音声再現において、声門部分において、声門閉鎖により近い状態による振動を実現するなどの検討が必要である。

以上のように、人体のCTスキャン画像から、声道を、ほぼ正確に立体模型として再現した。音響実験においては、音源呈示の方法、模型の素材、腔以外の部分を削除した影響などについて検討課題を残したが、人の音声の音響実験を行うための、腔を忠実に再現した模型の作成が十分可能であることが示唆された。

## Ⅳ. まとめ

積層造形技術を用いて、人体の腔である声道を含む立体模型を作成した。簡易的な測定では、再現された模型は、モデルと形態、大きさともに1mm単位の精度で近似のものが実現できた。また、腔としての声道の機能を検証するための音響実験も可能であることが分かった。

## 参考文献

1. 廣瀬 肇, 柴田貞雄, 白坂康俊: 言語聴覚士のための運動障害性構音障害, 202-208, 医歯薬出版, 東京, 2000
2. 町田芳明, 白坂康俊, 池上奈津子: デジタルメディア技術を応用した発声発語メカニズムの研究, 埼玉県工業技術センター研究報告, 3, 276-280, 2001
3. 町田芳明, 近藤邦雄, 佐藤 尚, 星野伸行: デジタルデザインハンドブック, デザインインフォメーション, 24, 4-11, 2000
4. 町田芳明, 箕輪幸三, 増田伸二, 星野伸行, 小柳久佐, 中嶋吉男: デジタルメディアを応用した設計手法に関する研究, 埼玉県工業技術センター研究報告, 4, 132-136, 2002
5. 町田芳明, 白坂康俊, 池上奈津子: デジタルメディア技術を応用した発声発語メカニズムの研究(Ⅱ)―口腔内空間の三次元模型の作製―, 埼玉県工業技術センター研究報告, 4, 251-255, 2002
6. 町田芳明, 本多春樹, 山口葉子, 白坂康俊, 池上奈津子: デジタルメディアを利用した障害者向け支援機器の開発, 埼玉県工業技術センター研究報告, 6, 40-43, 2004

注 音は、空気の波動であり、音響的な分析を行う場合、波動の出発点(音源)が重要である。音響実験等で、特定の位置において、人工的、意図的に音を発生することを、音(音源)の呈示と表現する。自然発生的な音には用いない。

(受理日 平成22年2月3日)

---

## Manufacture a Three-dimensional Model of the Human Vocal Tract

Shirasaka Yasutoshi<sup>1)</sup> Kumada Masanobu<sup>2)</sup>  
Kinuma Takeshi<sup>3)</sup> Ikegami Natsuko<sup>4)</sup> Machida Yoshiaki<sup>5)</sup>

1) Hirosaki University of Health and Welfare 3-18-1, Sanpinai, Hirosaki, Aomori

2) Kumada Clinic 4-2-6, Nisiazabu, Tokyo

3) National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Hospital 4-1, Namiki, Tokorozawa, Saitama

4) Tokyo Metropolitan Rehabilitation Hospital, Department of Rehabilitation 2-14-1 Tutumidoori, Sumidaku, Tokyo

5) Saitama Prefectural Industrial Technology Center 3-12-18, Kamiaoki, Kawaguchi, Saitama

### Abstract

Rapid prototyping (RPT) is a technology used to form a three-dimensional model from a three-dimensional image on the computer, and is capable of reproducing complex forms or objects including spaces within them. It would also be possible to use rapid prototyping to create a model of the human body which reproduces it in exact form and size.

CT scans are used to create three-dimensional images of the human body, including internal cavities. It should therefore be possible, using the data of a CT image, to reproduce precise images of cavities inside a human body using RPT.

In the field of speech and hearing disorders, if one were able to create an accurate reproduction of the human vocal tract, it could make empirical analysis of human speech production possible.

In this study, we utilize RPT to create a three-dimensional model of a human vocal tract, reaching from the upper trachea to the oral and nasal cavity.

key words: three-dimensional model, human vocal tract, rapid prototyping