

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K10745

研究課題名(和文)安全、確実な側頭骨手術のための高精度3D側頭骨モデルの開発

研究課題名(英文)Creating an optimal 3D printed model for temporal bone dissection training

研究代表者

高橋 邦行 (TAKAHASHI, Kuniyuki)

新潟大学・医歯学系・准教授

研究者番号：40452057

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：側頭骨内には耳小骨のような微細な構造とともに、神経、血管などの重要構造物が存在する。そのため安全、確実な側頭骨手術を行うには、解剖を熟知することが必須である。近年の3Dモデル造形技術の発展に伴い、CTデータから3Dモデルを作成することが可能となったが、微細な構造が多く、内部に含気腔を持つ側頭骨を再現することは難しかった。今回、その問題点を克服する工夫を行い、外側、内部の再現性の観察とともに、モデル自体をCTと元データの比較、手術トレーニング参加者による評価を行った。その結果、一部の微細な構造以外、ほぼ再現性の良いモデルを作成することができ、手術トレーニングに十分使用できることが検証された。

研究成果の概要(英文)：An accurate 3D temporal bone model would be useful as a training tool in surgical anatomy. However, temporal bone has many small structures and air-containing spaces, therefore the internal anatomical structures of the temporal bone model are not easily reproducible. To overcome these limitations, we made slight manual modifications to the conventional 3D printing method. After the optimal 3D temporal bone models were produced, anatomical fidelity was evaluated by macroscopic and endoscopic inspection, CT images, as well as dissection by several surgeons. In results, macroscopic and endoscopic inspection, CT images, and assessment by surgeons were in agreement in terms of reproducibility of model structures. Most structures could be reproduced, but some small structures were unsatisfactory. Perioperative tactile sensation of the model was excellent. Although this model still does not embody perfect reproducibility, it proved sufficiently practical for use in surgical training.

研究分野：耳鼻咽喉科学

キーワード：3Dモデル 側頭骨 手術トレーニング

## 1. 研究開始当初の背景

側頭骨手術は骨という硬組織の中に入っている重要な神経、血管を損傷せずに、骨組織を削開、病変を除去しなくてはならない。骨削開時にはノミ、鋭匙だけでなく、毎分3～6万回転程度のハイスピードドリルを用いることが多い。ハイスピードドリルの扱いには注意が必要で、耳小骨に接触すると感音難聴、顔面神経を傷害すると顔面麻痺を生じ、不可逆的な障害となることも多い。さらにS状静脈洞、内頸動脈などの大血管損傷を生じると、致命的になることもある。これまで手術手技の習得は、熟練術者の指導のもと、実際の患者を対象に段階的に行うのが通常であった。近年ではより安全な側頭骨手術を行うために、ご遺体を用いたCadaver Dissectionによる手術研修により、解剖を熟知、手術手技の向上を目指すことが多くなっている。海外では手術手技の向上を目的に、ご遺体、その一部を購入することが可能であり、Cadaver Dissection Course も用意されている。Cadaver 側頭骨は手術手技修練のもっとも優れた対象であることは間違いないが、高価であること、わが国では倫理的な問題がまだ整備されておらず、使用することが困難である。

Cadaver Dissection により倫理的に問題がなく、実践に近い手術手技研修を行うために、主に2つの方法が行われている。1つはバーチャルリアリティ側頭骨シミュレーターを用いた方法である。本法の利点としては力学的フィードバックデバイスにより、実際に近い感触を体感できること、操作履歴の記録ができ反復して実習ができることが挙げられる。欠点としては、3D眼鏡を使用する際のバーチャル3Dであるため深さの感覚や、見る角度で視野に違和感があること、力学的フィードバックの感覚が実際の手術とは違うことがある。そのため、現時点でバーチャルリアリティ側頭骨シミュレーターは側頭骨手術を体感する程度であり、実際の手術のシミュレーションという意味では、発展途上であると言わざるを得ない。Cadaver Dissection に代わるもう一つの方法として、実物大3D側頭骨モデルがある。これまで3D側頭骨モデルの作成には高価な機械の使用、特殊な技術が必要であり、専門の企業から購入する必要があった。現在の市販品は、材質の工夫により削った感触が骨と近くなっているが、血管以外の構造物には色がないこと、乳突蜂巣内の再現が悪いこと、高価であることから、手術研修、術前シミュレーションとして用いるには普及していない。

## 2. 研究の目的

これまでの側頭骨手術研修で行われていたCadaver Dissection に近いクオリティを有し、臨床医でも作成できる簡便、安価な、高精度3D側頭骨モデルを開発することを目的とする。本研究により作成した3D側頭骨モデル

を用いれば、手術研修にCadaverを用いることがなくなり、倫理的な問題なく、多くの手術研修を行うことができるようになる。それにより若手側頭骨外科医の解剖理解、技術向上が見込まれ、ひいては患者利益にもつながると思われる。さらに患者CTデータを用いることで術前シミュレーションとして利用できるように、安全かつ確実な手術の遂行に寄与することが可能である。

## 3. 研究の方法

### ・精密な3Dポリゴンデータの作成

3Dプリンターで精密な側頭骨モデルを作成する際に、もっとも大切なことは出力する3Dポリゴンデータをどれだけ精密にかつ実物に近く作成するかである。現在われわれが利用しているソフト ZedView®では、1枚ごとのスライスデータを加工し、その後3Dデータに変換している。本ソフトは専門の技術者でなくとも臨床医が簡単に取り扱えるが、作業が煩雑であるとともに、上下のスライス間でのズレが生じると3Dモデル上で段差が生じる。そこで3Dポリゴンデータ自体を直接修正、加工できる新たなソフトウェアを導入し、CTデータから作成、変換された3Dデータ自体を修正し、スムーズにかつ実物に近く加工できることを目指す。

### ・3Dモデルから余分な石膏粉末を取り出す工夫

3Dポリゴンデータを3Dプリンターで読み込みプリントアウトすると、積層された石膏粉末の中に3Dモデルが出来上がってくる。そのため、あたかも遺跡の発掘作業のように、粉末の中から3Dモデルを取り出すこととなる。精密な3Dモデルを作成するにはその後のポストプロセスが最も大切となる。ポストプロセスで最も大切となるのは3Dモデル表面、鼓室、乳突腔などの内部に付着、堆積している石膏粉末をきれいに取り除く作業である。基本的にはエアブローにより3Dモデル表面、内部の石膏粉末を吹き飛ばすことで、形態を完成させる。側頭骨外側面、頭蓋底などの表面についた粉末は簡単に吹き飛ばすことが可能であるが、神経の通過する孔などは、解剖通りにひとつひとつ取り除かないと取り切ることができない。また鼓室のように片側が閉鎖された空間、もしくは乳突蜂巣のように完全に閉鎖された空間の場合、石膏粉末を取り除くことが難しい。本研究では(半)閉鎖空間内を再現するために通気孔の作成を行い、余分な石膏粉末の除去を試みる。

### ・耳小骨を正しい位置に再現、重要構造物を認識しやすく再現する工夫

実際の側頭骨内での耳小骨は、腱、靭帯に吊られた形で可動性を得ているが、全て石膏からできている3Dモデルでそれを再現するこ

とは難しい。CT で骨濃度の陰影から耳小骨を再現することは難しくはないが、それを正しい位置に配置し、前述のエアブローにて吹き飛ばさないようにするには工夫が必要である。正しい位置に耳小骨を再現できるような工夫とともに、解剖学的に重要な構造物を実習者にわかりやすくする方法についても探る。

#### ・ 3Dモデルの検証

3Dモデルの完成後には、それが実際の側頭骨をどの程度精密に再現出来ているか検証する必要がある。検証でもっとも大切なことは、実際に削開し、解剖学的な相違、削った感触を確かめることである。われわれの施設では Cadaver Dissection などを行うための専用の顕微鏡、ハイスピードドリルが常備されており、モデルの削開がいつでも可能である。常に側頭骨手術を行っている術者だけでなく、初心のものにも削開してもらい、それを検証する。また、完成した3Dモデル自体のCTを撮影することで、元となった側頭骨CTデータとの相似を検証する。

#### 4. 研究成果

##### ・ 閉鎖空間から余分な石膏粉末を取り出すための工夫

モデル内部の閉鎖空間から余分な石膏粉末を取り出すためには、モデルをいくつかに分割して行う方法が主流であった。しかしこの方法では分割面をどこに設定するのか、その後貼り合わせの段階で不自然な段差が生じることがあった。それを修正するにはある程度の技術を要するため、本研究の目的である臨床医が簡便に作成できるというものから外れてしまう。そこでわれわれは上鼓室天蓋、乳突洞天蓋から乳突蜂巣内にかけてと、上鼓室外側面、乳突蜂巣外側面に通気孔を作成することで、閉鎖空間内の石膏粉末を取り除くことができるようモデルのデザインを作成した。この通気孔から内部の石膏粉末を吹き飛ばすことで、後から貼り合わせることなく、側頭骨 3D モデルを作成することができた。最後に少量の石膏粉末で通気孔を閉じる作業を行うことで、簡便に再現性の高い側頭骨 3D モデルが出来上がる (図 1)。

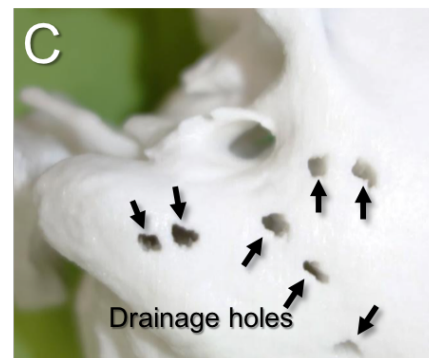
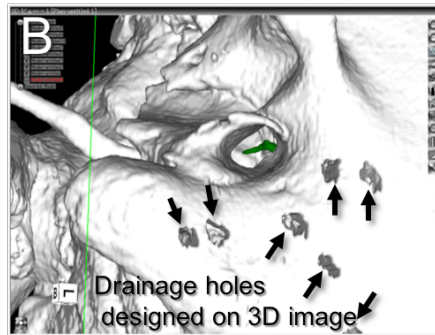
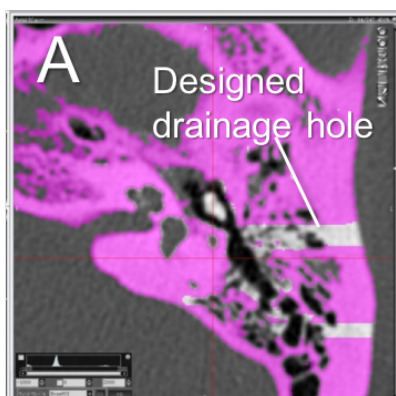


図 1：閉鎖空間から余分な石膏粉末を取り出すために作成したモデル

A：平面（2D）データ上で通気孔をデザイン

B：3D データに変換した際のデザイン

C：実際に出来上がった 3D モデル

##### ・ 耳小骨を正しい位置に再現、重要な構造物を認識しやすく再現するための工夫

耳小骨を正確な位置に再現しつつエアブローで吹き飛ばないようにするために、実際には軟部組織である腱、靭帯をデータ上骨として表現した。それにより正確な位置にしっかりと固定できる耳小骨を再現することができた (図 2)。

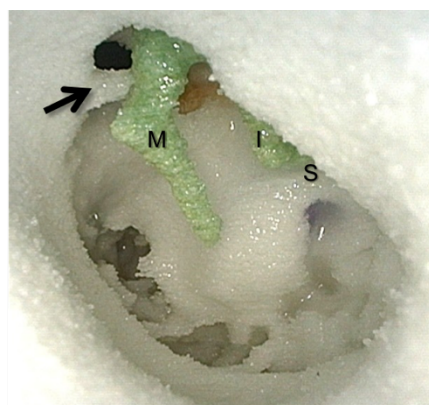


図 2：再現された鼓室内

M：ツチ骨、I：キヌタ骨、S：アブミ骨

矢印：骨として表現された前ツチ骨靭帯

また側頭骨内の重要な構造物として、顔面神経、内頸動脈、S 状静脈洞、蝸牛・前庭・半規管からなる内耳が挙げられる。それを再現す

るために、それぞれの構造に疑似的に色をつけて表現した (図 3)。

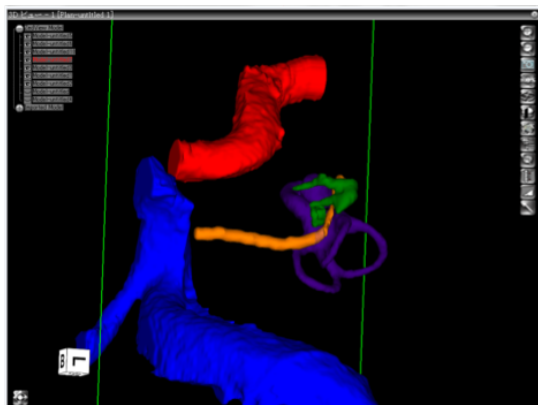


図 3 : 色付けされた 3D データ  
 橙 : 顔面神経、赤 : 内頸動脈、青 : S  
 上静脈洞、紫 : 内耳、緑 : 耳小骨

・CT によるモデルの検証

完成した側頭骨 3D モデル自体の CT 撮影を行い、元となった CT データと比較した。その結果、細かな乳突蜂巣の再現はできていなかったが、耳小骨は正確な位置、形状で再現できていた (図 4)。

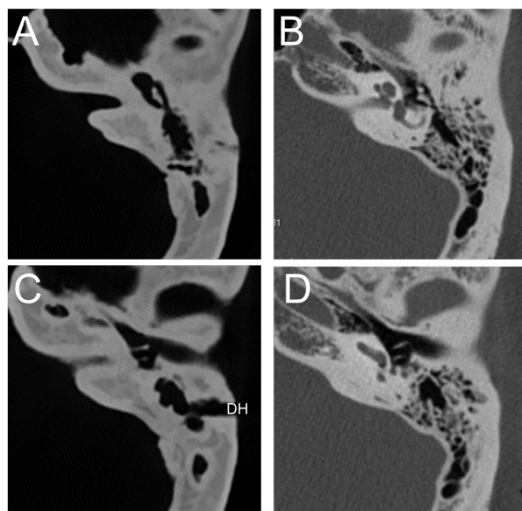


図 4 : CT による比較  
 A, C : 側頭骨 3D モデルの CT。B, D : A, C に対応するスライス元データ。DH : ドレナージホール。

・側頭骨 3D モデルを用いた実際の手術実習による評価

20 名の参加者を対象に、完成した側頭骨 3D モデルを顕微鏡下に実際の手術で用いるドリルを使用して、削開してもらい、削った感触、それぞれの構造物の再現性を 5 段階で評価してもらった。その結果、骨の硬さ、削り心地は 4.4 と高評価であった。解剖学的構造に関しては、概ね 4 点以上であったが、乳突蜂巣、アブミ骨といった微細な構造の再現性は 3 点

台の評価であり、再現性に課題が残った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Takahashi K, Morita Y, Ohshima S, Izumi S, Kubota Y, Yamamoto Y, Takahashi S, Horii A. Creating an Optimal 3D Printed Model for Temporal Bone Dissection Training. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2017 Jul;126(7):530-536. (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

- ① Combined Otolaryngology Spring Meeting: 28-30th April 2017, Manchester Grand Hyatt, San Diego, CA, USA: Development of Bone Density of the Temporal Bone in Healthy Subjects
- ② 第 726 回新潟医学会 : 平成 28 年 10 月 21 日, 有壬記念館, 新潟市 : 特別講演 「側頭骨手術解剖 : トレーニングとシミュレーションの変遷」
- ③ Combined Otolaryngology Spring Meeting: 20-22th May 2016, The Hyatt Regency Chicago, Chicago, Ill, USA: Creating an ideal 3D printed model for temporal bone dissection training
- ④ 5<sup>th</sup> East Asian Symposium on Otology: 27-29 May 2016, Hong Kong: Usefulness of 3D printed model for temporal bone surgery
- ⑤ 第 18 回 耳鼻咽喉科手術支援システム・ナビ研究会 : 平成 28 年 10 月 22 日, 神奈川県総合医療会館, 横浜市 : 術前 3D モデルシミュレーションが有用であった側頭骨巨細胞腫症例

- ⑥ 第26回日本耳科学会：平成27年10月  
6-8日，ホテル国際21，長野市：CTを  
用いた側頭骨3Dモデルの検証
  
- ⑦ 第25回日本耳科学会：平成27年10月  
7-10日，長崎ブリックホール，長崎  
市：側頭骨手術研修における3Dモデル  
の有用性と限界

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕（計0件）

〔その他〕なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 邦行 (TAKAHASHI, Kuniyuki)  
新潟大学・医歯学系・准教授  
研究者番号：40452057

### (2) 研究分担者

堀井 新 (HORII, Arata)  
新潟大学・医歯学系・教授  
研究者番号：30294060