

## 側頭骨手術トレーニングとシミュレーションの現状

高橋 邦行

新潟大学大学院医歯学総合研究科

耳鼻咽喉科・頭頸部外科

### Training and Simulation of the Temporal Bone Surgery

Kuniyuki TAKAHASHI

*Department of Otolaryngology, Head and Neck Surgery,*

*Niigata University Graduate School of Medical and Dental Sciences*

#### 要 旨

側頭骨は聴覚、平衡覚のセンサーなどの精密器官や、重要な神経、血管を内部に含む。一方で中耳炎などの炎症性疾患が生じやすい部位であり、炎症制御や聴力改善を目的とした手術が行われる。側頭骨手術は、術野が狭い顕微鏡下の手術であること、一度重要構造物を損傷すると不可逆になることなどの理由から、手術を行う際には三次元的な解剖の熟知が必須であり、難易度の高い手術と考えられていた。しかし近年、さまざまな模擬手術を行うことができるデバイスが発展し、実際の手術以外からも側頭骨解剖を学ぶことができる機会が増えてきた。現在ではカダバー、バーチャルリアリティ、3Dモデルを使用した側頭骨手術トレーニング、シミュレーションが可能であるが、それぞれ利点、欠点が存在する。そのうち3Dモデルは特に有用であり、高いトレーニング効果がみられる。コスト面や手間の問題が解決されることで、3Dモデルは今後さらに普及することが予想され、安全で確実な側頭骨手術に貢献できると期待される。

キーワード：側頭骨手術、トレーニング、シミュレーション、OJT、OFF-JT、3Dモデル

#### はじめに

側頭骨手術は、中耳炎の炎症制御や聴力改善を目的とした手術から、最近では頭蓋底、頭蓋内へ

アプローチするルートとしても行われている。解剖学的特徴や手術の特性から、側頭骨手術は耳鼻咽喉科手術の中でも難易度が高いものと考えられ、これまで一部のエキスパートにより行われる

Reprint requests to: Kuniyuki TAKAHASHI  
Department of Otolaryngology,  
Head and Neck Surgery,  
Niigata University Graduate School of  
Medical and Dental Sciences,  
1-757 Asahimachi-dori, Chuo-ku,  
Niigata 951-8510, Japan.

別刷請求先：〒951-8510 新潟市中央区旭町通1-757  
新潟大学医歯学総合研究科  
耳鼻咽喉科・頭頸部外科学分野

高橋 邦行

ことが多かった。新しく執刀医として側頭骨手術を行うには、エキスパートが行なっている手術と一緒に携わり、目で見て技術を習得するか、手術動画、成書などから学習した後に、段階を追って実際の患者に行うことが多かった。最近では、側頭骨領域に限らず、手術トレーニングツール、シミュレーターが発達し、安全に手術技術を習得できるようになってきている。本稿では手術手技の取得、向上のためのさまざまな手術学習法について述べ、最新の側頭骨手術トレーニング、シミュレーションについて紹介する。

### さまざまな手術学習法

手術を含め、さまざまな技術を学習する方法として、3つの方法が提唱されている。実際の業務を行いながら難易度の低いものから段階的に学習していく On the Job Training(OJT)、実際の業務とは違う場所で研修をしたり、模擬的な業務を行ったりすることで技術習得を行う OFF the Job Training(OFF-JT)、書籍、動画などさまざまなツールを用いて自分自身で知識を高める Self Development(SD) に分類される。これを手術に当てはめて考えると、執刀医、助手として実際の手術に携わる場合が OJT、講義による研修やシ

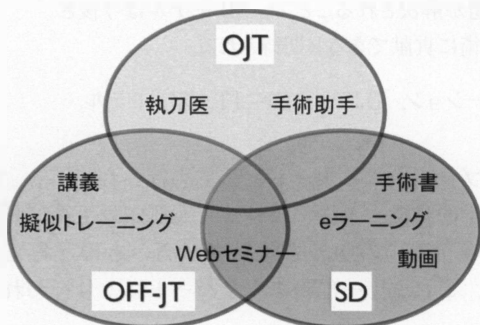


図1 さまざまな手術学習法。執刀医、手術助手として、実際の手術に携わりながら学習していく On the Job Training (OJT)、講義、模擬トレーニングなどを通して技術習得を行う OFF the Job Training (OFF-JT)、手術書、動画などのツールを用いて自分自身で知識を高める Self Development (SD) に分類される。

ミュレーター、モデルなどを使っての模擬トレーニングを行う場合を OFF-JT、手術書、eラーニングなどを使用しての自己学習を SD と考えることができる (図1)。

### 側頭骨の解剖学的特異性

側頭骨は頭蓋骨側方に位置し、上方は側頭葉を内部に含む中頭蓋窩、後方は小脳を含む後頭蓋窩と接し、下方では頭蓋骨下面で側頭下窩に面する。側頭骨内には聴覚、平衡覚のセンサーである蝸牛、前庭、半規管という感覚器があり、それらの感覚を中枢に伝える聴神経、さらには顔面運動機能を司る顔面神経が存在する。また脳血流の多くを担う内頸動脈、内頸静脈も側頭骨内を走行している。

また聴覚機能において、音を効率よく伝導するために、側頭骨は特殊な構造を有している。音は外界の空気の振動により、鼓膜が振動することで捉えられる。鼓膜と連結している耳小骨はその振動を増幅し、蝸牛内基底板上に伝導、内耳有毛細胞が脱分極することで、電気信号に変換される。すなわち側頭骨内には、聴覚機能における音を伝導、増幅させるトランスデューサー、アンプが組み込まれている。そのためには鼓膜、耳小骨が物理的に振動する必要があり、鼓膜の奥の空間である中耳腔は含気化され、外気圧と等しく圧調整されている必要がある。この圧調整は、主に中耳腔と鼻咽腔を交通する耳管が適宜開放することで行われる。すなわち側頭骨内の広い領域を占める中耳腔は、鼓膜という非常に薄い膜で外界と境し、耳管を通じて鼻咽腔と交通している。そのため、容易に細菌感染を生じやすく、炎症性疾患が発生しやすい場ともなっている。まとめると、側頭骨は聴覚、平衡覚の感覚器や、重要な神経、血管を多く含む部位であると同時に、細菌感染、炎症性疾患が生じやすいという特徴を持っていると言うことができる。

### 側頭骨手術の特徴 (表1)

側頭骨手術を行う際、外観から見る事ができるのは平坦な骨面だけである。しかしその内部に

表 1

## 側頭骨手術の特徴

- ・ 外観からは骨しか見えない
- ・ 骨の中に感覚器、神経、血管などの重要かつ繊細な構造物が含まれている
- ・ 頭蓋内と薄い骨一枚で接している
- ・ 顕微鏡下手術である
- ・ 術野が狭く、執刀医しか手が入らない
- ・ 高回転ドリルを使用する

は重要かつ繊細な感覚器、神経、血管などが含まれている。例えば耳小骨の1つであるアブミ骨は大きさ3mm程度の小さな骨であり、音を振動として伝えるために、完全には固定されておらず可動性を持っている。また頭蓋内とは薄い骨1枚で接している。側頭骨手術では、これらの繊細な構造を損傷せず、確実に操作するために、顕微鏡を用いるのが一般的である。そのため術野は非常に狭く、執刀医しか手が入らない。加えて、高回転ドリルを用い、骨を削開していくことで、初めてさまざまな構造物が見えてくるため、重要構造物を損傷しないように確実に病変の除去を行うには慎重な手術が必要となる。感覚器、神経などは一度損傷してしまうと不可逆的な障害になることが多く、側頭骨手術を行うためには側頭骨内の3次元解剖の熟知が大切となる。

## 擬似トレーニング

- ・ カダバー
- ・ バーチャルリアリティ(VR)
- ・ 3Dモデル

OFF-JT

図2 OFF-JTに含まれる模擬トレーニングの種類。現在では、主にカダバー、バーチャルリアリティ(VR)、3Dモデルを用いる方法がある。

## 側頭骨手術学習法

これまでの側頭骨手術では圧倒的にOFF-JTが不足しており、手術書などで学習(SD)、手術助手を体験(OJT)した後に、いきなり執刀医として手術を行うことが多かった。しかし側頭骨手術ではその解剖学的特性、手術の特異性から、執刀医と手術助手では視野、操作範囲、使用する器具、必要な技術に大きな差があり、手術助手を多く経験しても執刀医で行うべき技術が習得できず、難易度が高いものとなっていた。そこで側頭骨手術学習のOFF-JTとして擬似トレーニングがされるようになり、その重要性が述べられている。そのうちここでは、カダバー、バーチャルリアリティ(VR)、3Dモデルを用いた方法について紹介する(図2)。

## 1. カダバートレーニング

側頭骨の構造は非常に繊細なものであることから、人工的にこれを再現することが難しい。そのため、これまではヒト解剖体の側頭骨を用いたカダバートレーニングがOFF-JTの主流であった。当然のことながら、カダバー側頭骨は三次元解剖が正確であり、実際の手術と同様の術野展開、感触を得られることができ、正常解剖を学ぶ上では最適な対象である。海外ではカダバー側頭骨を購入することが可能であるが、比較的高価であることに加え、組織固定に用いられるホルマリンの毒性や感染症を完全に防ぐことができないという問題<sup>1)2)</sup>、倫理的な側面などから<sup>3)</sup>、我が国では広く普及していない。現在、倫理的側面を考慮した法制定が検討されており、一般的にカダバートレーニングが行える環境整備が待たれる。

## 2. VRトレーニング

側頭骨手術におけるOFF-JTとして、カダバートレーニングに代わって、バーチャルリアリティ(VR)による模擬手術が発達した。VRとして市販されているものとしてボクセルマンがあり、新潟大学もこれを所持している(図3)。本機器はコンピューターで作成され、モニターに映し出された画像を3D眼鏡を通して見ることで、奥行



図3 パーチャルリアリティ (VR) の代表であるボクセルマン。A: 外観。3D眼鏡を装着し擬似的な3次元画像に対し、模擬手術をしている。B: プレインストールされている例での実際の画面。各重要構造物は視認しやすいように着色してある。

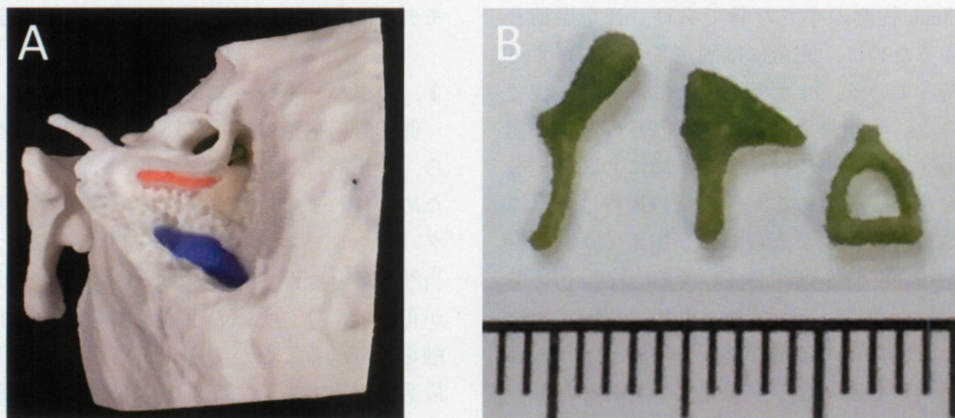


図4 われわれが作成している側頭骨3Dモデル。A: 乳突削開後の側頭骨モデル。重要構造物は着色してある。B: 耳小骨モデル。実際の形状にほぼ近く作成されているが、アブミ骨(一番右)は実物よりもやや大きい。

きのある3次元画像として見る事ができる。フォースフィードバックと呼ばれるスティック状の装置を擬似的なドリルとし、フットスイッチ、モニター画面が連動することにより、実際の手術のようにドリルで削開する感触を得られる。プレインストールされているトレーニングケースでは脳硬膜、内耳構造、顔面神経などの重要構造物が色づけされており、ドリル先端がこれらに触れると警告音が発生する。患者のCTデータを取り込めば、患者独自の側頭骨3D画像を作成することもできるが、骨濃度だけのデータとなり、内耳構造、神経などを区別することは困難である。VRトレー

ニングの利点として、一度装置を購入すればドリルなどのコストを気にせずに何度でも模擬的な手術を行えること、失敗してもその前段階まで戻れること、記録が簡単で自分の手技を振り返られることなどが挙げられる。実際に側頭骨手術トレーニングにVRを用いることで、トレーニング効果があったとの報告もある<sup>4)5)</sup>。一方で欠点としては、擬似的な3D画像であり、骨削開の感触が本物とは違いがあること<sup>6)7)</sup>、プレインストールされたデータを用いれば典型的な側頭骨のトレーニングは可能であるが、患者個別のシミュレーションには限界があることが挙げられる。

### 3. 3D モデルトレーニング

近年の3Dプリント技術の向上により、3Dモデルが比較的簡単に作成できるようになり、もう一つのOFF-JTの方法として利用されるようになった。これまでは専門業者が作成したモデルを購入することが主流であったが、現在では個人でも作成することが可能である(図4)。側頭骨CTデータを専用のコンピューターソフトで処理すると、自動的に2次元データから3次元の3Dデータが構築される。耳小骨、顔面神経、内頸動脈、内頸静脈など個々のパーツを個別の3Dデータとして保存することで、それ自体の形状を加工したり、色づけしたりすることもできる<sup>8)</sup>。また一度3Dデータが完成すれば、3Dモデルをいくつも作

成することができる。3Dプリンターは造形に用いる材料によっていくつかの種類があるが、石膏粉末を材料として用いると、触った感触が骨に近いモデルとなる。現状では3Dデータを3Dプリンターで造形した後は、ポストプロセスと呼ばれる工程が必要となる。ポストプロセスの一般的なものとして、解剖学的な孔、窪みなどに堆積した余分な石膏粉末を取り除いたり、確実に硬化させるための硬化剤の含浸が必要である。この余分な石膏粉末の除去、硬化剤の含浸の程度が3Dモデルの精度を左右するため、丁寧に行う必要がある<sup>8)</sup>。また側頭骨の場合、耳小骨などの小さく可動性を持つパーツを後から組む必要もあり、一般的なポストプロセス以上に作成に手間がかかる。

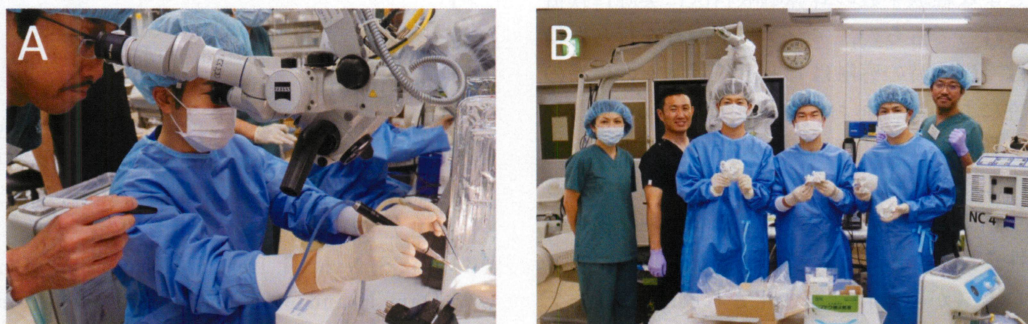


図5 側頭骨3Dモデルを用いた模擬手術実習の風景。A：全体像。実際の手術用顕微鏡、ドリルを用いて、指導者のもとで模擬手術を行なっている。B：実習生各1人に1つずつ3Dモデルを使用している。

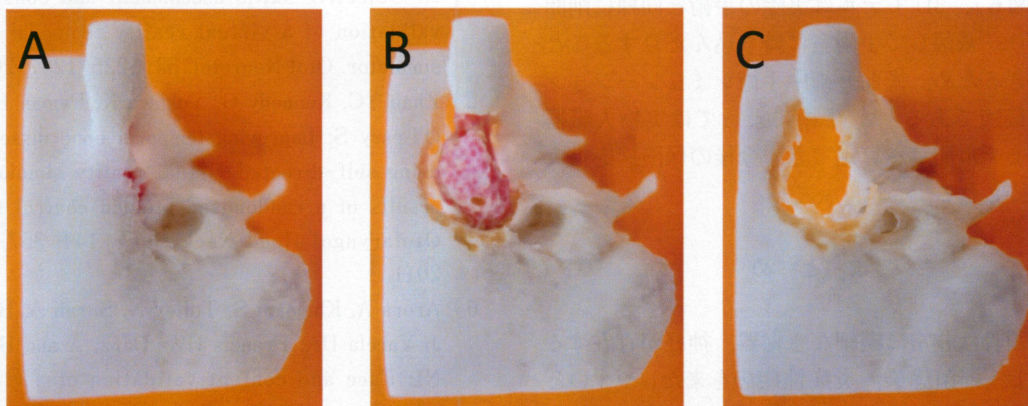


図6 側頭骨腫瘍(巨細胞腫)症例のシミュレーションモデル。腫瘍はピンクに色づけしてある。A：骨削開前の状態。B：外側の骨を削開し腫瘍を露出させた状態。C：腫瘍摘出後の状態。側頭骨上面の骨は欠損しており、中頭蓋窩硬膜が広く露出することが予想された。

3Dモデルを用いた手術トレーニングの利点は、実物大の3次元解剖を学べること、顕微鏡やドリルなど実際の手術器具を用いてトレーニングできること、骨と同様の感触が得られることなどが挙げられる。一方欠点としては、3Dプリンター、材料が高価であること、ポストプロセスなど作成に手間がかかること、模擬手術を行うには顕微鏡、ドリルなどの手術器具が必要なことなどが挙げられる。これらの問題点がクリアできれば、現時点では3Dモデルによるトレーニングが最も効率的な側頭骨手術トレーニングであり、実際にカダバーとの比較でも遜色ないという報告もある<sup>9)</sup>。新潟大学にも3Dデータ作成ソフト、3Dプリンターがあるため、われわれも実際に側頭骨3Dモデルを作成し、臨床、教育に使用している(図5)。さまざまな経験年数の耳鼻咽喉科医に実際に模擬手術を行ってもらい、アンケート調査を行った検討では、削開時の感触は骨と近く、個々の構造の再現性においてもおおむね満足度が高かったが、アブミ骨のような微細構造、乳突蜂巣のような側頭骨内部の含気腔に関しては再現性に限界があるという結果であった<sup>8)</sup>。このような微細な構造の再現性を良くすること、また機器が進歩し、ポストプロセスが自動化、簡便化されれば、3Dモデルの活用は飛躍的に増加すると考えられる。また症例に応じたCTデータを用いれば、疾患をともなった個別の側頭骨3Dモデルの作成が可能である(図6)。3Dモデルは実際の手術と同様に削開したり、滅菌して手術室に持ち込んだりすることもできるため、術前、術中手術シミュレーションにも最適である<sup>10)</sup>。手術によっては実物大臓器立体モデル加算を算定でき、今後の保険適応拡大も期待される。

## ま と め

側頭骨は非常に繊細な感覚器、神経が存在する一方で、細菌感染、炎症性疾患を来しやすいという特徴を持っている。多くの重要な器官は骨の内部に存在するため、ドリルなどで削開して初めて見ることができる。これまで側頭骨手術の習得には

OFF-JTが圧倒的に不足しており、手術助手というOJT、手術書などでのSDの後に、いきなり執刀医として手術を行うことが多いため、側頭骨手術は難易度の高いものと思われていた。近年では、カダバー、VR、3Dモデルを用いることで、模擬的に手術トレーニングをするOFF-JTが可能となった。特に3Dモデルは実際の手術にかなり近く、患者個別の術前シミュレーションにも適している。今後、コストやモデル作成の手の軽減が図られることで、簡便に3Dモデルを作成することができるようになれば、さらなる普及が期待され、安全で確実な側頭骨手術に貢献できると思われる。

## 参 考 文 献

- 1) Demiryürek D, Bayramoğlu A and Ustaçelebi S: Infective agents in fixed human cadavers: a brief review and suggested guidelines. *Anat Rec.* 269: 194-197, 2002.
- 2) Whitehead MC and Savoia MC: Evaluation of methods to reduce formaldehyde levels of cadavers in the dissection laboratory. *Clin Anat.* 21: 75-81, 2008.
- 3) Naz S, Nazir G, Iram S, Mohammad M, Umair R, Qari H and Mohammad S: Perceptions of cadaveric dissection in anatomy teaching. *J Ayub Med Coll Abbottabad.* 23: 145-148, 2011.
- 4) Khemani S, Arora A, Singh A, Tolley N, Darzi A: Objective skills assessment and construct validation of a virtual reality temporal bone simulator. *Otol Neurotol.* 33: 1225-1231, 2012.
- 5) Zhao YC, Kennedy G, Yukawa K, Pyman B and O'Leary S: Improving temporal bone dissection using self-directed virtual reality simulation: results of a randomized blinded control trial. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 144: 357-364, 2011.
- 6) Arora A, Khemani S, Tolley N, Surgh A, Budge J, Varela DA, Francis HW, Darzi A and Bhatti NI: Face and content validation of a virtual reality temporal bone simulator. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 146: 497-503, 2012.
- 7) Sorensen MS, Mosegaard J and Trier P: The

- visible ear simulator: a public PC application for GPU-accelerated haptic 3D simulation of ear surgery based on the visible ear data. *Otol Neurotol.* 30: 484-487, 2009.
- 8) Takahashi K, Morita Y, Ohshima S, Izumi S, Kubota Y, Yamamoto Y, Takahashi S and Horii A: Creating an Optimal 3D Printed Model for Temporal Bone Dissection Training. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* Jul; 126: 530-536, 2017.
- 9) Hochman JB, Rhodes C, Wong D, Kraut J, Pisa J and Unger B: Comparison of cadaveric and isomorphic three-dimensional printed models in temporal bone education. *Laryngoscope.* 125: 2353-2357, 2015.
- 10) Rose AS, Webster CE, Harrysson OL, Formeister EJ, Rawal RB and Iseli CE: Pre-operative simulation of pediatric mastoid surgery with 3D-printed temporal bone models. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.* 79: 740-744, 2015.
-