

## MRIによる歯列計測法

### 熱可塑性エラストマー製マウスピースを用いて

北村 達也<sup>†</sup> 平田 宏之<sup>††</sup> 本多 清志<sup>††,†††</sup> 藤本 一郎<sup>††††</sup> 島田 育廣<sup>††††</sup>  
正木 信夫<sup>††††</sup> 西川 員史<sup>†††††</sup> 福井孝太郎<sup>†††††</sup> 高西 淳夫<sup>†††††</sup>

<sup>†</sup> 甲南大学 理工学部 情報システム工学科  
658-8501 兵庫県神戸市東灘区岡本 8-9-1

<sup>††</sup> ATR 認知情報科学研究所

<sup>†††</sup> Laboratoire de Phonetique et de Phonologie, Univ. Paris III

<sup>††††</sup> ATR-Promotions 脳活動イメージングセンタ

<sup>†††††</sup> 早稲田大学 理工学術院 機械工学科

E-mail: ††-kitamu@konan-u.ac.jp

あらまし 熱可塑性エラストマーを成形してマウスピースを作り、これを用いて磁気共鳴画像法 (MRI) により歯列形状を計測する手法を開発した。この素材には食品用パラフィンが混ぜ合わされているため、MRI によって高輝度に造影される。また、真空状態で成形するため、マウスピースに気泡が入りにくく、その結果ムラのない MR 画像が得られる。一方で、歯列は低輝度に造影されるため、マウスピースとの間にコントラストが生じ、歯列形状を抽出することができる。

キーワード MRI, 歯列, 熱可塑性エラストマー, セプトン, マウスピース

## A Method for Measuring Tooth Shape by Magnetic Resonance Imaging Using a Thermoplastic Elastomer Dental Mouthpiece

Tatsuya KITAMURA<sup>†</sup>, Hiroyuki HIRATA<sup>††</sup>, Kiyoshi HONDA<sup>††,†††</sup>, Ichiro FUJIMOTO<sup>††††</sup>,  
Yasuhiro SHIMADA<sup>††††</sup>, Shinobu MASAKI<sup>†††††</sup>, Takafumi NISHIKAWA<sup>†††††</sup>, Kotaro FUKUI<sup>†††††</sup>,  
and Atsuo TAKANISHI<sup>†††††</sup>

<sup>†</sup> Department of Information Science and Systems Engineering, Faculty of Science and Engineering, Konan University

8-9-1 Okamoto, Higashinada, Kobe, Hyogo, 658-8501, Japan

<sup>††</sup> ATR Cognitive Information Science Laboratories

<sup>†††</sup> Laboratoire de Phonetique et de Phonologie, Univ. Paris III

<sup>††††</sup> ATR-Promotions Brain Activity Imaging Center

<sup>†††††</sup> Department of Mechanical Engineering, Waseda University

E-mail: ††-kitamu@konan-u.ac.jp

**Abstract** This work proposes a method for measurement of tooth shape by magnetic resonance imaging (MRI) using a dental mouthpiece made of a thermoplastic elastomer. Because this material is blended with edible paraffin, it can be imaged with high signal intensity MRI. Also, this dental mouthpiece is formed in a vacuum in order to eliminate formation of air bubbles and thereby obtain even MR images. The teeth, on the other hand, are imaged with low signal intensity that contrasts against the dental mouthpiece, thus enabling extraction of tooth shape from the MR images.

**Key words** magnetic resonance imaging, tooth, thermoplastic elastomer, Septon, dental mouthpiece

## 1. はじめに

磁気共鳴画像法 (MRI) は、医学のみならず様々な分野の研究にとって極めて重要なツールとなっている。音声生成系研究もその分野の 1 つであり、発話器官の任意断面の形態や動態の観測に盛んに利用されている。今や MRI は発話機構や声道内音響現象の解明に欠くことのできないものになっている [1]。

歯は発話器官における重要な要素の 1 つであるが、MRI では歯が空気と同じく低輝度に撮像されるため、その境界を抽出することが難しい。そのため、声道内の音響現象の研究に不可欠な発話時の声道形状を正確に計測できないという問題がある。この問題を解決するために、いくつかの手法が考案されてきた。楊ら [2] は、被験者の歯形の石膏模型を水中に入れて 3 次元 MRI で撮像することによって歯列のポリウム・データを得て、後で発話時の MR 画像に補填するという方法を採用した。著者らも同様の撮像を試みたが、石膏歯形の表面に付着した気泡や水に含まれる気泡によって MR 画像にムラが生じ、歯列形状の正確な抽出が困難であった。

和久本ら [3] は、歯冠プレートに MRI 造影剤 (マグネビスト) を封入した「造影プレート」を用いた。歯冠プレートとは、個々の被験者の歯列に密着するように造形された樹脂製のプレートである。歯冠プレートに封入した造影剤が高輝度に造影されるため、MR 画像中の歯列概形を把握することができる。従って、後処理による歯列補填が必要ない。しかし、造影プレートの樹脂部分は造影されないため、歯冠の境界を正確に抽出することが難しい。加えて、造影プレートに数 mm の厚みがあるため、調音に影響を与える可能性がある。

その後も歯列形状を計測する手法が検討された。ATR 人間情報科学研究所と ATR 脳活動イメージングセンタでは、MRI で高輝度に造影される脂肪分や鉄分を豊富に含む食品をマウスピースとして用いる方法や、これらの食品をゼラチンに混ぜてマウスピースを成形する方法などが試みられた。しかし、このようにして作られたマウスピースはもろく壊れやすかったり、成形時に気泡が混入することによって MR 画像にムラを生じさせたりするなどの難点があった。

このような検討を経て、Takemoto ら [4] はブルーベリーゼリー飲料を用いて歯列形状を抽出し、後で発話時の MR 画像に補填する手法を開発した。彼らは、被験者にブルーベリーゼリー飲料を口にふくませて撮像した MR 画像から歯列のポリウム・データを得た。鉄分を豊富に含むブルーベリーゼリー飲料は MRI で高輝度に造影されるため、低輝度で造影される歯列を正確に抽出することができる。ただし、被験者はキャリブレーションおよび撮像に要する約 10 分間ゼリー飲料を口腔内に保持し続ける必要があり、負担は小さくない。また、呼吸がしやすいように伏臥位で撮像するため、呼吸に伴って頭部が動いてモーション・アーチファクトを生じることがあった。

本研究では、発話時の MR 画像に補填する歯列のポリウム・データを得ることを目的として、熱可塑性エラストマーを成形したマウスピースを用いて MRI により歯列形状を計測する方法を提案する。この素材は MRI で高輝度に造影される上、

真空状態で成形するため、気泡が混入しにくく、MR 画像にムラが生じにくい。さらに、本手法では仰臥位で撮像するため、呼吸に起因するモーション・アーチファクトを抑えることができる。ただし、この素材は化学シフトを生じさせるため、その補正法も合わせて提案する。

## 2. 方法

### 2.1 マウスピース

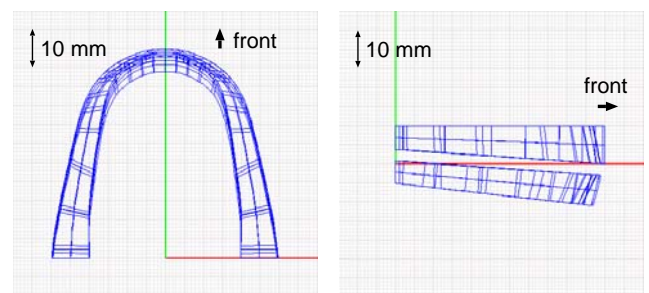
マウスピースは熱可塑性エラストマーの 1 種であるクラレ社製セプトン [5], [6] を用いて成形した。エラストマーとは弾力性に富む高分子化合物を意味する。セプトンの特徴としては、成形が容易であることや弾力性に富むことなどが挙げられる。さらに、成形時に加えるパラフィンの脂肪分によって MRI で高輝度に造影されるという利点がある。

まず、図 1 に示す歯形をもとにマウスピースの型を作成した。歯にマウスピースが密着しやすくするために、上下の門歯および犬歯の形状はくさび状に、臼歯部の形状は角状にした。門歯および犬歯の長さを臼歯に対して長くして歯列とマウスピースとの間に隙間が生じないようにした。さらに、マウスピースをくわえた状態で自然な咬合になるように上の歯列に対して下の歯列が若干後方に位置するようにした。

この型を用いて真空乾燥機によりセプトンを成形した。型にペレット状のセプトンとパラフィンを入れ、200 まで加熱し溶解させる。その際、真空状態にして気泡を抜きながら溶解させる。これは気泡が入ることによってマウスピースがもろくなることを防ぐに加え、気泡が MR 画像にムラを生じさせるのを防ぐ効果もある。セプトンの溶解後、温度を下げて成形させる。なお、この型は繰り返し利用してマウスピースを成形することができる。

セプトンに混ぜ合わせるパラフィンの分量によって完成品の柔軟性を制御することができる。本研究ではマウスピースが歯列に密着しやすくするために柔軟性が高くなるようパラフィンの分量を設定した。パラフィンは食品添加用のもの (カネダ社製ハイコール K-350) を用いた。

作成したマウスピースの写真を図 2 に示す。このマウスピースの大きさは縦 67 mm、横 70 mm、高さ 20 mm であり、咬合部の厚さは 4 mm である。MR 画像中の上下歯列を分離するためには、MR 画像の解像度に対して十分な厚さのセプトン



(a) top view

(b) lateral view

図 1 歯形の CAD モデル: (a) 上面図, (b) 側面図。

Fig. 1 Tooth CAD model: (a) top view and (b) lateral view.

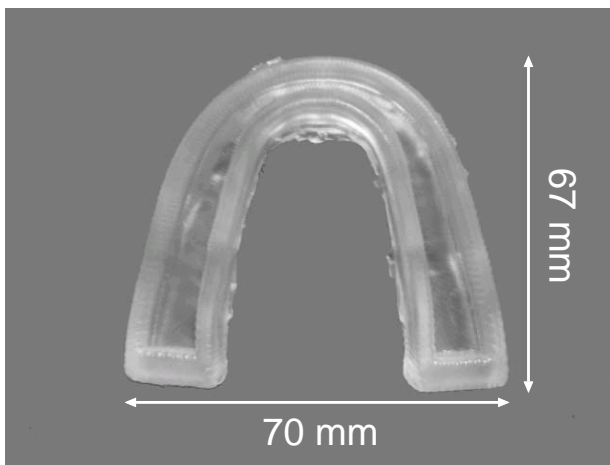


図 2 熱可塑性エラストマー製マウスピース。  
Fig.2 Thermoplastic elastomer dental mouthpiece.

が上下歯列間に存在する必要がある。咬合部の厚さは、被験者がマウスピースを噛むことによる変形，MR 画像の解像度  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ，および被験者のくわえやすさを考慮して決定した。なお，マウスピースの臼歯部を切断することにより被験者の歯列の大きさに合わせることができる。

## 2.2 MRI 撮像

撮像は ATR Promotions 脳活動イメージングセンタに設置された Shimadzu-Marconi ECLIPSE 1.5T Power Drive 250 にて行った。シーケンスは Fast Spin Echo 法，echo time (TE) = 11 ms，repetition time (TR) = 3,200 ms，flip angle (FA) = 90 度，撮像領域は  $256 \times 256 \text{ mm}$ ，分解能は  $512 \times 512 \text{ pixel}$  である。スライスは矢状方向で，厚み 2 mm，間隔 2 mm，51 スライスで撮像した。加算回数は 1 回である。

予備実験を行ったところ，マウスピースに含まれるパラフィンにより化学シフトが生じることがわかった。化学シフトとは，水や脂肪などに含まれるプロトンの共鳴周波数が異なることに起因して，脂肪からの信号が低周波数側にずれて画像化される現象である [7], [8]。そこで，頭部を高磁場に設定した撮像と，脚部を高磁場に設定した撮像を行い，後述する方法で化学シフトを補正して歯列を抽出した。以下，これらの撮像によって得られる画像をそれぞれ「head-to-foot(HF) 画像」，「foot-to-head(FH) 画像」と呼ぶ。

被験者は成人男性 1 名である。被験者はマウスピースを口にくわえ，撮像台の上で仰臥位になった。被験者の頭頸部をクッションとバンドでできる限り固定した後，ヘッドネックコイルを用いて撮像を行った。

## 2.3 画像処理

MR 画像からの上顎および下顎歯列の抽出は以下の方法で行った。この処理のフローチャートを図 3 に示す。まず，MR 画像からマウスピースの領域を抽出し，それを化学シフトと逆方向にシフトさせて化学シフトによるずれを補正した。HF 画像ではマウスピースは上向きに化学シフトし，FH 画像では逆に下向きに化学シフトする。この逆シフト操作を施すと，HF 画像では下顎歯列の形状が正確になり，FH 画像では上顎歯列

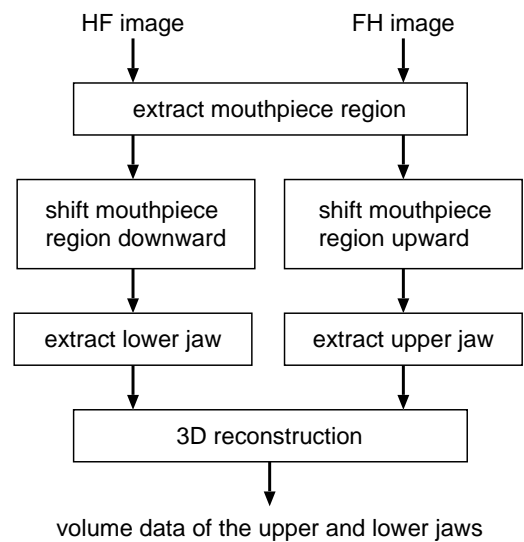
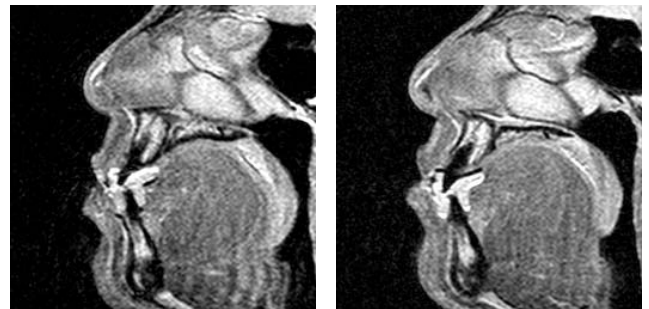


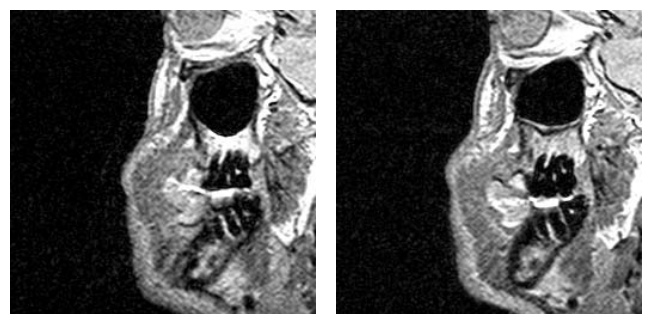
図 3 HF および FH 画像から上顎および下顎歯列を抽出する手続き。  
Fig.3 Procedure to obtain volume data of the upper and lower jaws from head-to-foot (HF) and foot-to-head (FH) images.



(a) head-to-foot image (b) foot-to-head image

図 4 正中矢状断面の MR 画像: (a) HF 画像，(b) FH 画像。

Fig.4 MR images on the mid-sagittal plane: (a) head-to-foot image and (b) foot-to-head image.



(a) head-to-foot image (b) foot-to-head image

図 5 右側方の矢状断面の MR 画像: (a) HF 撮像，(b) FH 撮像。

Fig.5 MR images on a right side sagittal plane: (a) head-to-foot image and (b) foot-to-head image.

の形状が正確になる。そこで，次に，HF 画像，FH 画像からそれぞれ下顎歯列，上顎歯列を抽出する。最後に，得られたデータを 3 次元構築することによって，上顎および下顎歯列のボリューム・データを得る。



### 3. 結 果

HF 画像と FH 画像をそれぞれ図 4, 5 に示す．これは正中矢状断面と臼歯部の矢状断面の MR 画像で，いずれも画像中の左が口唇の方向である．マウスピースが高輝度に造影され，歯冠との間で高いコントラストを示している．これはこのマウスピースにパラフィンが含まれているためである．

これらの MR 画像ではマウスピースに化学シフトが生じ，その結果，歯冠とマウスピースとの間に低輝度の領域が存在している．HF 画像 (図 4(a), 5(a)) では上方向に約 4 ピクセル (約 2.0 mm) のずれが生じている．すなわち，これらの画像では上顎歯列が約 2.0 mm 短く，下顎歯列が 2.0 mm 長く造影されている．一方，FH 画像 (図 4(b), 5(b)) ではこの逆の現象が生じている．

これらの MR 画像から 2.3 節に示した手法で抽出した歯列のポリウム・データを図 6 に示す．化学シフトの補正量は 4 ピクセルとした．マウスピース領域は閾値処理にて抽出し，歯列領域は目視にて抽出した．

### 4. 考 察

提案法により歯列のポリウム・データを抽出できることを示した．抽出した歯列のポリウム・データは，Takemoto ら [4] の手法により発話時の MR 画像に補填することが可能である．彼らの手法では，歯列のポリウム・データと発話時の MR 画像に共通する指標点にもとづいて位置合わせを行う．

和久本ら [3] による「歯冠プレート」を用いる歯列撮像法では，造影プレート内に封入された造影剤が高輝度に造影されるが，樹脂製のプレートそのものは歯冠と同様に造影されないため，歯冠の境界を抽出することが難しい．一方，本手法でマウスピースそのものが高輝度に造影され，かつマウスピースが歯冠に接するため，歯冠の境界を抽出できることが示された．ただし，歯冠とマウスピースとの間に空気が入る可能性があり，その部分に関しては歯冠の正確な抽出ができない．

歯列形状は揚ら [2] のように歯形石膏模型から求めることもできる．しかし，本手法では歯形を作成する手間が省くことができ，作業時間を大幅に短縮することができる．ただし，歯の治療などによって磁性体が歯に充填されている被験者の場合には，その充填剤が周辺磁場を乱すため，周辺組織を正確に撮像できない．そのような場合には歯形石膏模型を使うのが有効である．

また，提案法は Takemoto ら [4] による手法のように液体を口腔内で保持しておく必要がないため，彼らの手法と比較して被験者の負担が非常に小さかった．しかし，歯列の隙間まで正確に抽出するには液体の方が有利である．また，彼らの方法では伏臥位で撮像を行うため，呼吸によるモーション・アーチファクトを生じてしまうことがある．提案法では仰臥位で撮像するため，呼吸によるモーション・アーチファクトが生じにくいという利点もある．

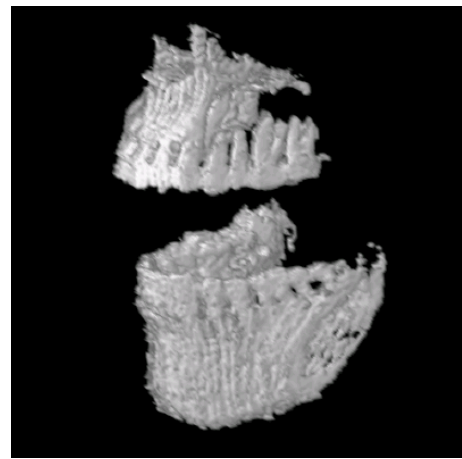


図 6 提案法により MR 画像から抽出した歯列のポリウム・データ．  
Fig.6 Volume data of tooth obtained from MR images by the proposed method.

### 5. おわりに

本研究では，発話時の MR 画像に補填する歯列のポリウム・データを得ることを目的として，熱可塑性エラストマー製マウスピースを用いて MRI により歯列形状を計測する方法を提案した．提案法にて得られる歯列のポリウム・データは，X 線観測で得られるものに対して分解能や SN 比が劣る．しかし，健康者を対象にした発話時の形態観測は非侵襲的であることが求められるため，そのような場面では提案法が有効である．なお，歯列の計測精度の評価は今後の課題である．

謝辞 早稲田大学 理工学術院 機械工学科 (2005 年当時) の新宅英磁氏，石川優馬氏，澤崇氏にはマウスピース製作にご協力いただいた．ATR 認知情報科学研究所の竹本浩典氏には撮像法および画像処理に関してご助言いただいた．ここに感謝の意を表す．なお，本研究の一部は，情報通信研究機構の研究委託「人間情報コミュニケーションの研究開発」，総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (071705001) の援助を受けた．

### 文 献

- [1] 北村達也，正木信夫，“MRI 観測を基礎にした音声生成系研究の進展，” 日本音響学会誌，**62**，385-390 (2006)．
- [2] 楊長盛，粕谷英樹，加納滋，佐藤俊彦，“MRI による声道形状の精密計測法の検討，” 信学論，**J77-A**，1327-1335 (1994)．
- [3] 和久本雅彦，正木信夫，党健武，本多清志，藤本一郎，中村裕二，島田育廣，“造影プレートを利用した MRI による歯冠部造影法とその構音への影響，” 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋)，397-398 (1997)．
- [4] H. Takemoto, T. Kitamura, H. Nishimoto, and K. Honda, “A method of tooth superimposition of MRI data for accurate measurement of vocal tract shape and dimensions,” *Acoust. Sci. & Tech.*, **25**, 468-474 (2004)．
- [5] 高松秀雄，“スチレン系熱可塑性エラストマー「セプトン」，「ハイブラー」，” *JETI*, **48**，143-145 (2000)．
- [6] 西川亮，“スチレン系エラストマー「セプトン」，「ハイブラー」，” *JETI*, **51**，93-96 (2003)．
- [7] R. H. Hashemi and W. G. Bradley, Jr., 荒木力 監訳，MRI の基本パワーテキスト：基礎理論から高速撮像法まで，*メディカル・サイエンス・インターナショナル* (1999)．
- [8] 荒木力，はじめての MRI，秀潤社 (2000)．