

トランペット吹奏時の声道入力インピーダンスの推定*

福井崇 (九州大), 村山えり子 (ヤマハ), 楠木時彦 (九州大)

1 研究の背景と目的

トランペットの吹奏は、肺からの呼気流をエネルギー源とした唇の振動による音源波を、楽器内で共鳴させることで実現する。この音源波はまた、奏者の体内に存在する空気柱にも伝搬するため、吹奏時には、楽器、唇、奏者体内空気柱が、一つの物理システムを形成していると考えられる。

トランペットの演奏指導においては、吹奏ピッチの高低によって口腔形状を調節するよう指示される場合がある。また、プロ奏者とアマチュア奏者では、楽器吹奏時の声門開口面積に差があると言われている [1]。以上のことから、奏者体内空気柱は吹奏音の高低や、演奏者の楽器吹奏における技量に対して、変化するものであると言える。しかし、その変化が持つ物理的・音響的な役割については、いまだ明らかにされていない。

本研究は、奏者体内空気柱のうち最も唇に近い部分である声道に焦点を当て、トランペット吹奏時の唇から見た声道の入力インピーダンスを推定することによって、その共鳴特性を求めることを目標とする。

2 入力インピーダンスの推定方法

声道の入力インピーダンス推定は、声道の音響管モデル [2] を用いて行う。このモデルのパラメタとして声道断面積関数が必要となるが、これを推定するために MRI による声道の三次元観測を行った。以下、実際の推定手順に従い、それぞれについて述べる。

2.1 MRI による三次元計測

MRI による撮像は、被写体の任意断面に対して行うため、得られるデータは二次元である。ここで、この断面に平行な複数の断面についての撮像を行って画像群を得れば、被

写体についての三次元データが求められる。図 1 は、トランペット吹奏時の人間の頭部および頸部について、複数の矢状断面を撮像した結果である。各画像のピクセル間隔と、隣接する断面同士の間隔を等しくとれば、三次元ボクセルデータが得られる。

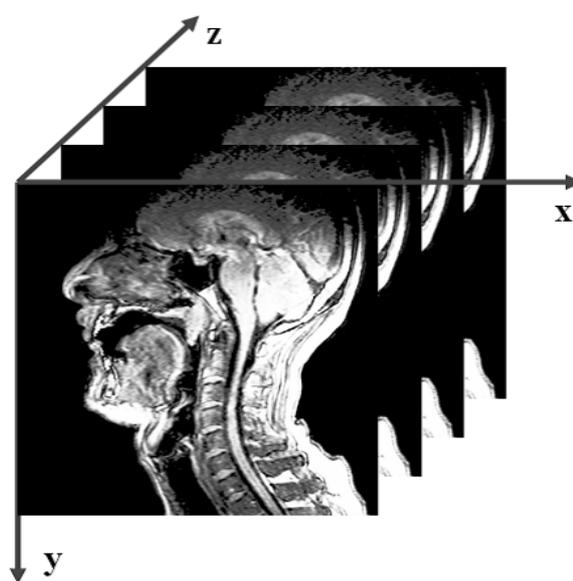


Fig. 1 頭部および頸部の矢状断面画像群。

2.2 声道断面積関数の推定

三次元データから声道断面積関数を推定するために、声道中心線に垂直な断面画像を得て、その画像上での声道内領域をマーキングするという方法を用いた。

まず、上述の MR 画像群のうち、正中矢状面に対応する画像を選定し、この画像において声道中心線を推定する。この声道中心線の全長を 40 等分し、各領域において声道中心線に垂直な線を得る (図 2)。三次元データ上では、この線は声道中心線に垂直な切断面を表しているため、この切断面の画像を、画像処理によって求める。得られた 40 枚の切断面画像 (図 3 にその一部を示す) において、

* Estimation of the vocal-tract input impedance during the performance of the trumpet by FUKUI, Takashi (Kyushu University), MURAYAMA, Eriko (YAMAHA CORPORATION), KABURAGI, Tokihiko (Kyushu University)

声道内領域と思われる部分のピクセル数を求め、1ピクセルあたりの分解能より断面積に換算する。なお、梨状窩および歯冠間隙は声道内領域に含めないこととする。



Fig. 2 正中矢状面上の声道中心線と断面線。

2.3 声道の音響管モデル

声道の音響管モデル [2] では、声道を一次元の音響管であるとみなし、声道全体を断面積が一定の複数の円筒管の縦続接続によって表す。各円筒管の断面積として、三次元データから推定された声道断面積を用いる。

特定の円筒管に対して、その入力となる音圧 P_i と体積速度 U_i およびその出力となる音圧 P_o と体積速度 U_o の関係は、以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} P_o \\ U_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\frac{\sigma l}{c}) & -\frac{\rho c}{S} \gamma \sinh(\frac{\sigma l}{c}) \\ -\frac{S}{\rho c} \frac{1}{\gamma} \sinh(\frac{\sigma l}{c}) & \cosh(\frac{\sigma l}{c}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_i \\ U_i \end{pmatrix}$$

上式における ρ は媒質（空気）の密度、 c は音速、 S は円筒管の断面積、 l は円筒管の長さ、 γ および σ は、媒質の粘性に起因する壁面での損失や、壁面振動による損失を表す。

声道全体の入出力は、各円筒管を表す行列の積によって求められる。声道全体での入出力の関係を一般化して以下のように書けば、行列 K が管全体の音響的特性を表している。

$$\begin{pmatrix} P_o \\ U_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_i \\ U_i \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} P_i \\ U_i \end{pmatrix}$$

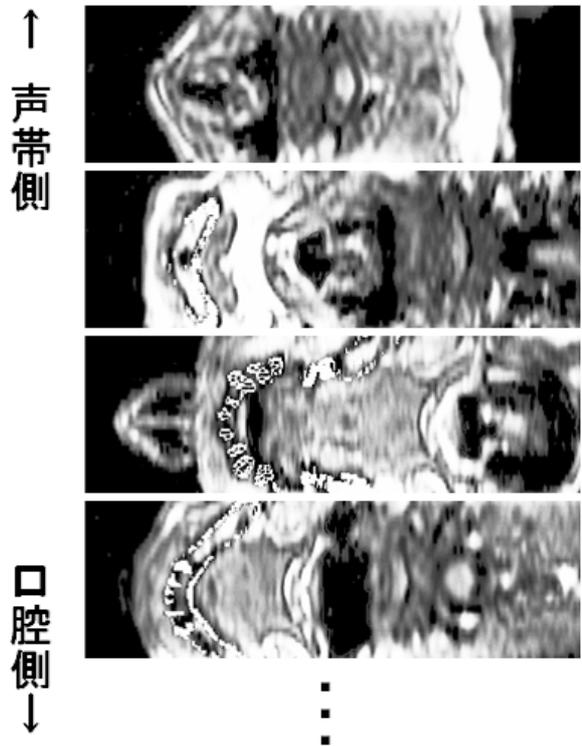


Fig. 3 声道中心線に垂直な切断面画像の一部（声帯側から4枚分）。

この管の入力インピーダンスは $Z_i = P_i/U_i$ で表される。いま、行列 K は断面積が推定されているので既知である。また出力端（声帯）でのインピーダンス $Z_o = P_o/U_o$ は、 $Z_o = \infty$ 、すなわち声帯にて音波が完全反射すると仮定する。以上より、声道の入力インピーダンスを求めることができる。

3 実験条件

撮像に用いた MRI 装置は、島津 Marconi 社製、MAGNEX ECLIPSE 1.5T Power Drive 250 である。撮像はプロのトランペット奏者（男性、58歳）が、トランペットにて低音域（E₄、約 311Hz）、中音域（B₄、約 466Hz）、高音域（F₅、約 698Hz）を吹奏している状態で行った。MRI では、撮像時に金属を身に付けることができないため、楽器として塩化ビニルで作成した模擬トランペットと、アクリル製のマウスピースを用いた。

また、MRI では原理的に、歯列などの骨組織を撮像することができない。歯列は口腔の境界として重要であるため、先行研究 [3] にならぬ、造影剤を口中に含んで歯列形状を

得るための撮像を別に行った。得られた歯列画像を、楽器吹奏時の画像に重ね合わせることで、最終的な口腔内画像とした。撮像した画像のパラメタは表 1 にまとめた。

Table 1 MR 画像のパラメタ。

	声道	歯列
スライス厚	2mm	1.5mm
スライスギャップ	なし	なし
画像枚数	30	51
トータルの厚さ	58mm	75mm
視野	256*256mm	256*256mm
画像サイズ	512*512pixels	512*512pixels
ピクセル間隔	0.5mm	0.5mm
ビット深度	16bit	16bit

音響管モデルにおける定数として、音速には 3.5×10^4 [cm/sec] を、媒質密度には 1.14×10^{-3} [g/cm³] を、壁面損失のパラメタ類には先行研究 [4] のデータを用いた。

4 実験結果

以下に、MRI 撮像の結果、声道断面積関数の推定結果、入力インピーダンスの推定結果についてまとめた。

4.1 MRI 撮像の結果

MRI 撮像結果を図 4 に示した。図は上から順に、低音域、中音域、高音域吹奏時の、正中矢状断面である。口腔前部に注目すると、吹奏する音域が高いほど、その容積が小さいという傾向がある。

4.2 声道断面積関数の推定結果

声道断面積関数の推定値を図 5 に示した。それぞれの図は、上から順に、低音域、中音域、高音域吹奏時のものであり、横軸は声帯からの距離 [cm] を、縦軸は断面積の推定値 [cm²] を表す。なお、声道全体の長さは上から順に 174.079[mm]、166.286[mm]、170.182[mm] であった。

4.3 入力インピーダンスの推定結果

声道断面積関数を元に推定した、声道入力インピーダンスを図 6 に示した。それぞれの図は、上から順に、低音域、中音域、高音域吹奏時のものであり、横軸は周波数 [Hz] を、縦軸は入力インピーダンスの推定値 [g/(sec · cm⁴)] を表す。



Fig. 4 奏者正中矢状断面の MRI 画像。

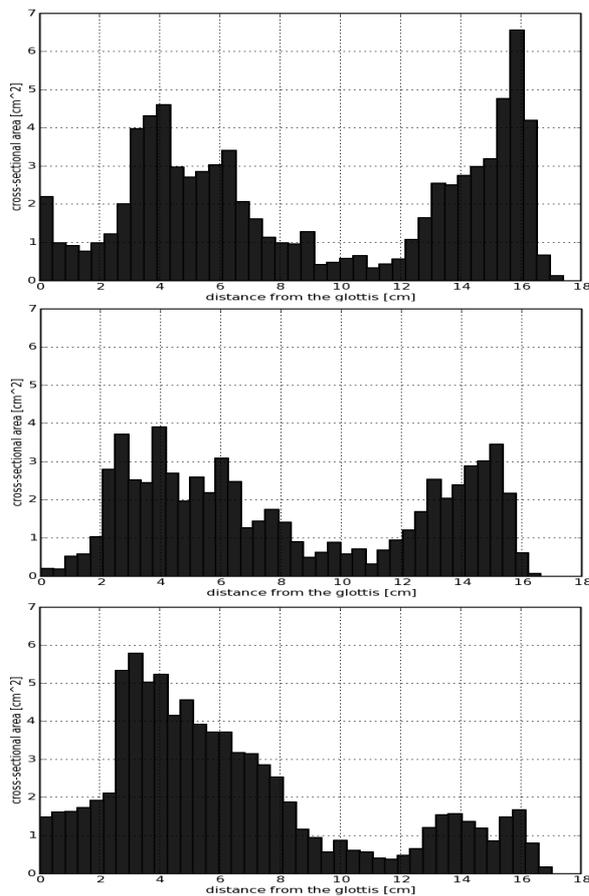


Fig. 5 声道断面積関数の推定値。

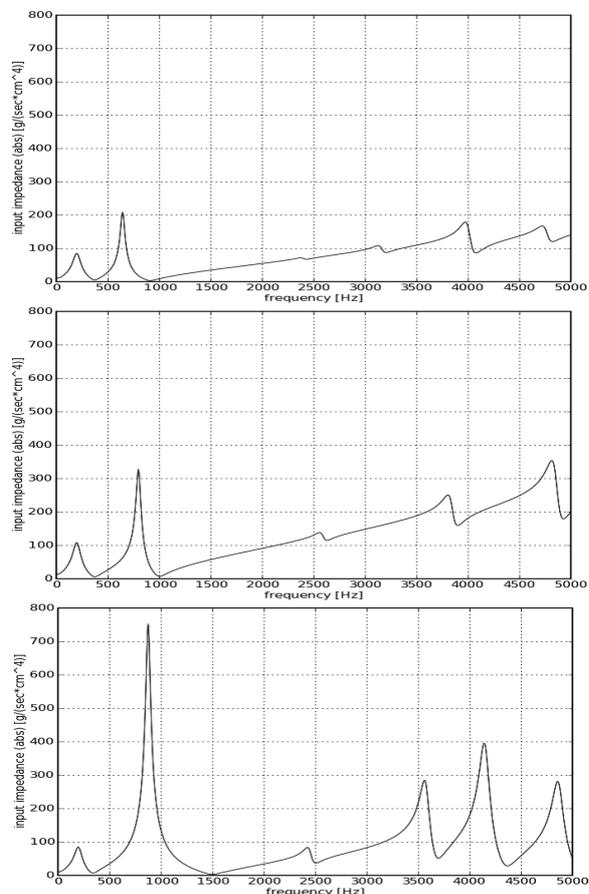


Fig. 6 入力インピーダンスの推定値。

5 今後の課題

本研究の目標は、奏者体内空気柱が、トランペット吹奏システム全体におよぼす影響について、定量的に見積もることである。当面の課題として、声道両端の唇と声帯のモデル化手法についての検討があげられる。

声道と楽器の接合部である唇は、楽器吹奏時には振動している。そのため、MR画像から唇の開口面積を求めることはできない。唇の「実効的」な開口面積を求める方法について、今後検討する必要がある。また、本論では声門が閉鎖（音波が完全反射）していると仮定したが、楽器吹奏時の声門は実際には開いた状態になっている。その断面積や長さについて、声道と同様にMR画像からの推定を検討中である。

最終的には、楽器、唇、声道、声帯、声門下部（気管・気管枝・肺）を含むトランペット吹奏シミュレータの構築を目指したい。

謝辞 本研究は、財団法人ヤマハ音楽振興会の平成18年度ヤマハ音楽支援制度、および財団法人サウンド技術振興財団の平成19年度研究助成制度による援助を受けた。

参考文献

- [1] 向井将, 峰岸壮一, "「管楽器と声帯」の大発見", Pipers, 第66巻, pp.20-26, 杉原書店, 1987.
- [2] Man Mohan Sondhi and Juergen Schroeter, "A Hybrid Time-Frequency Domain Articulatory Speech Synthesizer", IEEE ASSP-35(7), pp.955-967, 1987.
- [3] Hironori Takemoto, Tatsuya Kitamura, Hironori Nishimoto and Kiyoshi Honda, "A method of tooth superimposition on MRI data for accurate measurement of vocal tract shape and dimensions", Acoust. Sci. and Tech., 25(6), pp.468-474, 2004.
- [4] Man Mohan Sondhi, "Model for wave propagation in a lossy vocal tract", J. Acoust. Soc. Am., 55(5), pp1070-1075, 1974.