

ホルン奏者の上唇を伝搬する波動の特性とそのモデル化

吉川 茂, 武藤葉子*

九州芸術工科大学・音響設計学科
815-8540福岡市南区塩原 4-9-1, shig@kyushu-id.ac.jp

*(現) リオン株式会社

あらまし ホルン奏者の上唇の運動を3次元的に理解する目的で、透明のマウスピースとナチュラル・ホルンを用いて唇の運動を正面と横からのストロボによる擬似スロー・モーションとして観測し、さらに座標軸を設定して1コマごとに運動を解析した。上唇の開閉運動は上唇の先端を追跡することによって分かる。この開閉運動に重なってはいるが、別種の波動が上唇表面に発生しており、その伝搬経路と伝搬速度は唇を横から観察するときに現れる可視化映像上の輝点(波頭に相当する凸部)の運動を解析することによって知れる。最低の第2次モード音 F_2 (87.3 Hz)を上級者が吹奏すると、波動はマウスピースのリムに接する唇の端点から発生し、唇の中央まで水平に伝搬し、そこから上方に曲がり、リムで反射されて元に戻る。波動が唇の中央まで水平に伝搬するとき、唇は外向きに開いていく。高次モード音の F_3 や F_4 では波動は主に垂直方向にのみ伝搬する。伝搬速度は約1~4 m/sの範囲にあり、唇の張力や吹奏圧の影響を除外すると、約1.8 m/sと推定された。さらに波動をレイリー型表面波と仮定すると、唇のずり弾性率は約 4×10^3 N/m²となった。また、波動伝搬と開閉運動を再現できるような1質量-3バネモデルを提案した。

キーワード 金管楽器, 奏者の唇振動, 伝搬波動, 開閉運動, 表面波, ずり弾性率

WAVE PROPAGATION ON THE HORN PLAYER'S UPPER LIP AND ITS MODELING

*Shigeru Yoshikawa and Yoko Muto**

*Dept. of Acoustical Design, Kyushu Institute of Design
4-9-1 Shiobara, Minami-ku, 815-8540 Fukuoka; shig@kyushu-id.ac.jp*

** Present address: Rion Inc.*

Abstract With the aim of 3-D understanding of the French horn player's upper lip motion, its slow-motion picture was taken by the stroboscope from the frontal and side directions using a natural horn equipped with a transparent mouthpiece. A frame-by-frame analysis was then applied to the visualized results after setting up the coordinate system. The lip opening motion is obtained by tracing the tip. A distinct wave, which is superimposed on the opening motion, is generated on the upper lip surface. Its propagation path and velocity are estimated by analysing a bright spot (corresponding to the wave crest) appearing on the frame. When an advanced player plays a F_2 tone (87.3 Hz), the wave starts at the edge point crossing the mouthpiece rim, moves towards the lip center, then turns upwards, reflects at the rim, and returns to the edge point. The upper lip moves outwards during the horizontal propagation from the edge to the center. For higher-mode tones F_3 and F_4 , vertical propagation is dominant. The propagation velocity ranges between 1 to 4 m/s and is estimated as about 1.8 m/s if the effects of lip tension and blowing pressure are ignored. Moreover, assuming the surface-wave type propagation, the shear modulus of the lip is estimated as about 4×10^3 N/m². Also, a one-mass-three-spring model is proposed to reproduce the lip wave propagation and opening motion.

key words brass instruments, lip wave, lip opening, surface wave, shear modulus

1. はじめに

人間は極めて優秀な発音源を2つもっていて、一つは声帯であり、もう一つは唇である。声帯は声を生み、唇は金管楽器を駆動してその音を生む。両者はやわらかい生体組織としても、振動体としても、かなり類似した特徴をもっているように見える。しかし、声帯に関する研究が物理的、生理的、医学的側面から詳細に行なわれてきたのに比べ、唇に関する研究は1990年代から始まったと言ってもよいであろう。声が万人にとって必須であるのに対して金管楽器の音は音楽愛好家という一部の人々にとってのみ必要であるにすぎないことがこの大きな研究レベル差をもたらしている。また、人間は生まれたときから声を出しており、歌手の声を除けば、発声に関しては皆プロフェッショナルであり、病気などを介して正常（健常）者と異常（障害）者に分類される。一方、唇を使って出される金管楽器の音には演奏の熟練度が反映され、上級者と初心者、プロとアマチュアのような分類が成り立つ。すなわち、唇の振動には個体差があって、それが楽器の音の相違になって現れる。この点については昨年12月の研究会で述べた。今回は上唇の表面を伝搬する波動の2次元軌跡から伝搬速度を求め、さらに波動のタイプを仮定して、唇の弾性率を推定してみたい。また、将来の理論的考察のために波動伝搬を単純化して唇振動のモデル化を試みたい。

2. 上唇の運動を3次元的に理解しよう

声帯でも唇でも、その運動を3次元的に理解することが重要である。ストロボなどを使った可視化は唇運動の実際を知るのに有益である。欧米では実際のマウスピースの代わりに平たい透明な箱を作り、その横面から楽器の管を出すようにして正面から歪みのない映像が得られるように工夫している。この方法はトランペットからチューバまで広く応用できるが、唇の運動を3次元的に理解するためには役立たない。また、実際の唇の代わりに人工物で唇を模擬して研究を進めることも欧米日などで行なわれている。この人工唇を使った研究からは唇開口、振動周波数、共鳴のQ値などの音響量を推定しやすいが、実際の唇との相違を議論できるレベルの模擬にはなっていない。我々はあくまで「実際の唇」にこだわりたい。そうすると、使えるマウスピースは限定されるが、唇運動の3次元的理解が容易になる。

光学的な歪みをほとんど無視できるマウスピースはフレンチ・ホルンのマウスピースである。それを透明なアクリルで製作し、ナチュラル・ホルン（ともに米国の Lawson Brass Instruments Inc. から提供された）に取り付け、フレンチ・ホルン奏者5名（上級者2名、中級者2名、初級者1名）が吹奏した。Fig. 1 が唇の運動を横から見た一例である。

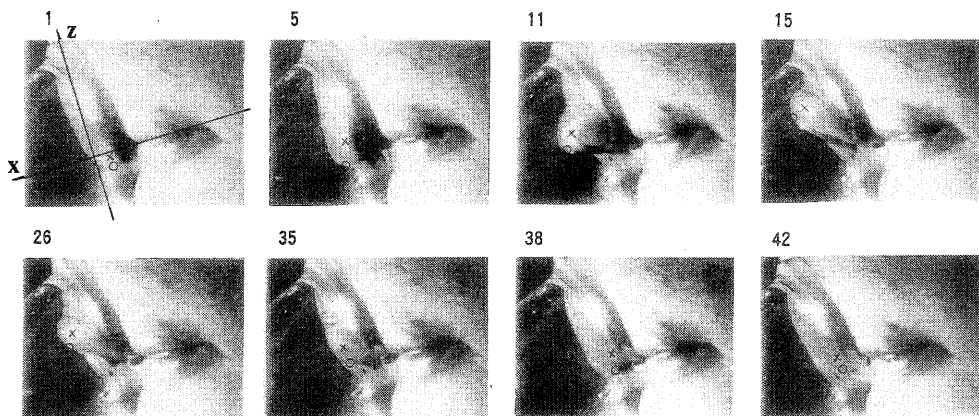


Fig. 1. Sequential pictures from stroboscopic side viewing of the lip motion (player A; F₂ tone in forte). 1 period = 45 frames. ○: lip tip; ×: wave crest.

この Fig. 1 において○印をつけた上唇の先端を追跡すると、開口運動に関する2次元軌跡が得られる。また、×印はストロボ写真では広がりをもった輝点であり、上唇表面にできる凸部を示し、ある種の波動が表面に沿って伝搬しているものと推察される。このような輝点を追跡すると、波頭の2次元軌跡 (Fig. 2) が得られる。本報告では唇の開口運動ではなく、唇表面上の伝搬波動に注目する。ただし、両者を別々に分離することは困難であり、むしろ両者を結びつけることによって上唇の運動を3次元的に理解することができる。また、波動の発生と伝搬の形態はホルン奏者の熟練度と深く関わっており、非熟練者では波動が発生していても、伝搬状態が不明確であったり、波動そのものが発生していない場合 (高次モードでの吹奏) が多い。一方、上級者では明らかに波動が上唇を伝搬しており、この波動が唇の開閉運動をコントロールしているように考えることもできる。

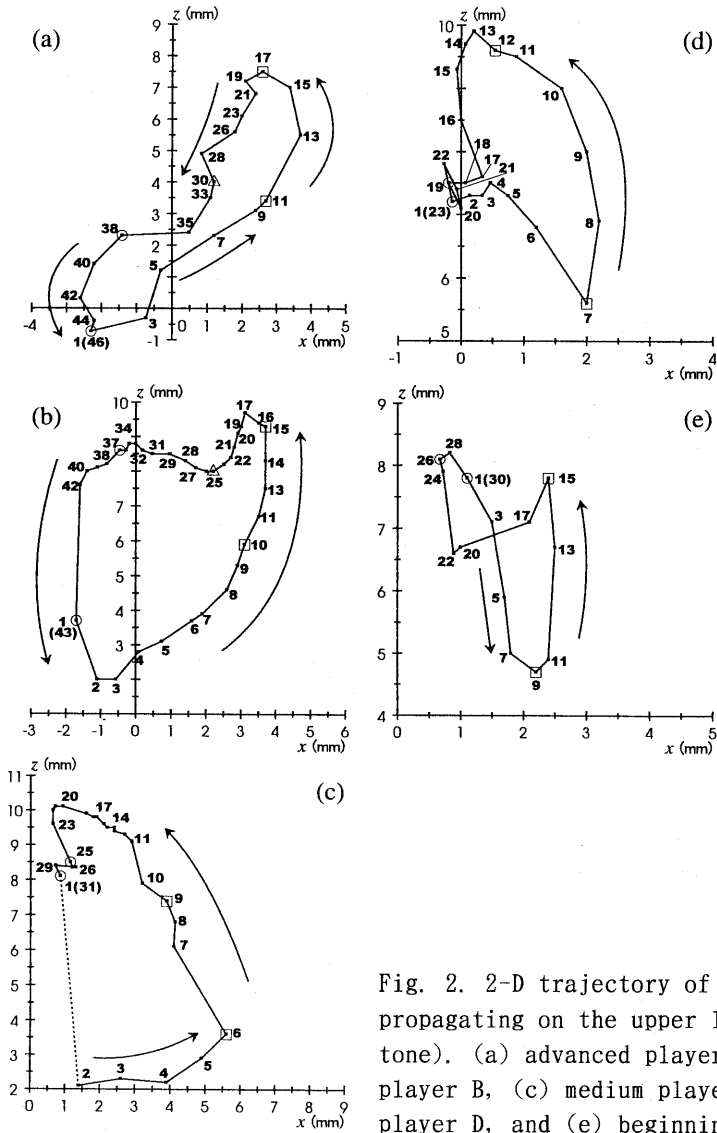


Fig. 2. 2-D trajectory of the wave crest propagating on the upper lip surface (F_2 tone). (a) advanced player A, (b) advanced player B, (c) medium player C, (d) medium player D, and (e) beginning player E.

3. 正面からの運動解析と横からの運動解析を結びつける

3.1 座標軸の設定

唇の開閉運動や上唇を伝搬する波動を可視化データから抽出し、さらに何らかの定量的な情報を得るためには座標軸の設定が重要である。Fig. 1の第1コマにはx軸とz軸を書き入れてある。このx-z平面は唇の中央に想定されていて、唇を上下に切っている。x軸はほぼマウスピースおよびホルンの軸に沿って選定される（唇から外向きを正方向とする）。z軸はx軸に垂直であるが、原点の取り方には任意性がある。ただし、吹奏していない状態での唇の表面がz軸に沿うようにするのが自然であろう。Fig. 2の2次元軌跡はこのようなx-z平面への射影と見なせる。正面からの映像に対しては、y-z平面を想定する必要がある。y軸は唇の中央から唇のすき間（あるいは下唇）に沿って右向き（外から唇を見て）に取る。正面からの唇の開口軌跡はこのようなy-z平面への射影に相当する。

さて、Fig. 2の写真は完全に真横からの撮影によるものではなく、若干斜めから撮影したものである（その方が波頭の動きを見やすい）。したがって、x軸とy軸が重なっている。波動はあくまで唇の表面（y-z平面）を伝搬しているので、Fig. 2のx-z平面へ射影した2次元軌跡はy-z平面に変換して考える必要がある。

3.2 波動伝搬速度の算出

この変換を全体的にスマートに行なうことは難しいが、必要とする情報（表面波動の伝搬速度）を得るといふ目的をかなえるには、正面からの映像解析結果を援用すればよい。その一例をFig. 3に示す。(a)が正面から得た唇の開口運動の2次元（y-z）軌跡、(b)はFig. 2(a)に示した横から得た唇上での波動伝搬の2次元軌跡である。Fig. 3(b)で第1コマから第11コマまでの間、波頭はほぼx軸に沿って外に向かっていく。しかし、Fig. 1からも分かるように、実際には波頭はFig. 3(a)における唇の端点（ $y \approx 5.3$ mm）から中央に向かっていく。第1コマから第11コマまでの伝搬時間は音（ F_2 音；87.3 Hz）の周期が $1/87.3$ で、1周期が45コマに分割されているので、 $\Delta t = (1/87.3)[(11-1)/45] = 2.6$ msとなる。このときの伝搬距離を $\Delta y = 5.3$ mmと推定すれば、yの負方向に向かう波動速度として $v_{y-} = \Delta y / \Delta t = 2.0$ m/sなる近似値を得る。また、第11コマから第17コマまでは波動がほぼ中央（ $z \approx 0$ ）から上（ $z > 0$ ）に向かっていく。このような波動の速度はFig. 3(b)だけから求め、 $v_{z+} = 2.7$ m/sと近似され、上から下に向かう波動（第17コマから第30コマ）の速度は $v_{z-} = 1.0$ m/sと近似される。多くの場合のデータから伝搬速度は大略2 m/sから4 m/sの間にあることが分かった。これらの値は吹奏状態での値であり、吹奏圧の他アンブシュアにともなう張力やマウスピースとの結合状態などの影響を受けている。

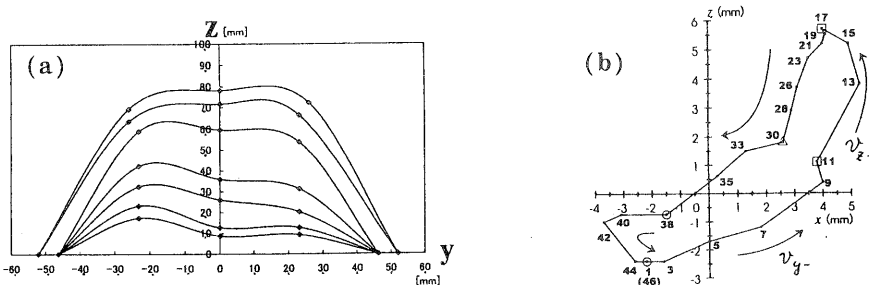


Fig. 3. An example of how to calculate the wave velocity propagating on the lip surface (player A; F_2 tone in forte). (a): 2-D lip opening obtained from frontal view analysis; (b): 2-D trajectory of the lip wave from side view analysis.

4. 唇組織のずり弾性率の推定（表面波の仮定）

波動伝搬から媒質の弾性を推定するためには、波動のタイプを特定する必要がある。しかし、この特定は単純ではない。唇表面を伝搬するからといって表面波（レイリー波）とは速断できない。また、唇の運動を見ると曲げ波のようにも考えられるが、これは表面上の波動に唇の開口運動が重なっているからである。アンプシュアを維持するための唇の筋肉による張力を考えると、表面張力波のような波なども考慮する必要があるかも知れない。一方、人間の声帯や動物の肝臓などのように柔らかい生体組織の弾性特性を推定する際には表面波がよく仮定されている〔崔博坤, "表面波でやわらかい物質を調べる," 音響学会誌 56, 445-450 (2000)]。表面波は曲げ波の極限形態であり、板の厚さが波長に比べて十分に大きい場合や高周波数の波動に対して成り立つが、深さ（厚さ）方向への減衰が大きいような場合にも仮定でき、生体組織ではそのようなになっているのであろう。

ここでも簡単のために、表面波を仮定しよう。唇のポアソン比を 0.5, 密度を $1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とすると、ずり弾性率 (shear modulus) は $G = 1.2 \times 10^3 c_s^2$ で近似できる。 c_s が表面波の速度である。また、ヤング率は $E = 3G$ で与えられる。

次の問題は、可視化で求めた伝搬速度のうちどれを c_s として採用するかである。いくつかのデータを調べると、異方性 (y 方向と z 方向での伝搬速度の系統的な相違) は期待できないことが分かった。また、 v_{y-} は唇にかかる張力の影響を強く受けることも分かった。したがって、 z 方向の伝搬速度を採用することが最も妥当であるが、上方向と下方向への伝搬速度に大きな相違がある。しかし、この相違は吹奏圧に依存していると考えられる。上方向へ伝搬するとき唇は吹奏圧の影響で開くため、伝搬時間が見かけ上、短くなる。逆に、下方向へ伝搬するときには唇は吹奏圧に対抗して閉じようとするので、伝搬時間が長くなる。このような吹奏圧の影響は両方向への伝搬速度を平均することによって相殺できるであろうと思われる。したがって、 $c_s = (v_{z+} + v_{z-})/2$ と仮定した。その結果 $G \approx 4 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ と推定された。

5. 上唇の振動モデル

上級者の唇を観察すると、上唇表面を伝搬する波動が唇の開閉運動をコントロールしているように考えられる。したがって、この表面波動に従って上唇の適当な振動モデルを作ることができれば、理論解析やシミュレーションの役に立つであろう。現在、研究者の多くは唇も声帯と同様に 2 質量でモデル化すべきであろうという考えに傾いている。しかし、石坂一松平の 2 質量モデルの本質は 2 質量間の位相差が振動に自由度を与えている点であり、そのような位相差をもった 2 つの質量を上唇の振動からは確認し難い。唇振動は声帯振動とは異なり、吹奏圧とともにマウスピース内での共鳴音圧からの影響を強く受ける。したがって、唇振動には声帯振動ほどの自由度はないと予想される。もちろん、この自由度の差を定量的に検討することは将来の重要な課題である。

唇振動の可視化から得られた表面波動の伝搬経路をスケッチすると、Fig. 4 のようになる。(a) は上級者 A の F_2 音 (第 2 次モード, 通常の最低音), (b) は上級者 B の F_2 音, (c) は上級者 A の F_3 音の場合である。(b) のようにマウスピースの内側の縁に沿って波動が伝搬する形態よりも (a) のように上向きの波動がマウスピースのところで反射して下向きに戻ってくる形態の方が自然なので、最低音の F_2 に関する伝搬モデルは (a) をベースにするのが妥当であろう。第 3 次モード音の F_3 に関する伝搬モデルには (c) を用いる。高次モードでは表面波動が y 方向には発生せず、 z 方向に限定される。このような波動伝搬形態の遷移は唇振動の外向き発振から上向き発振への遷移に非常に良く対応していることも注目し値する。なお、重要なことはこの表面波動に唇の開閉運動が重畳していることである。(a)

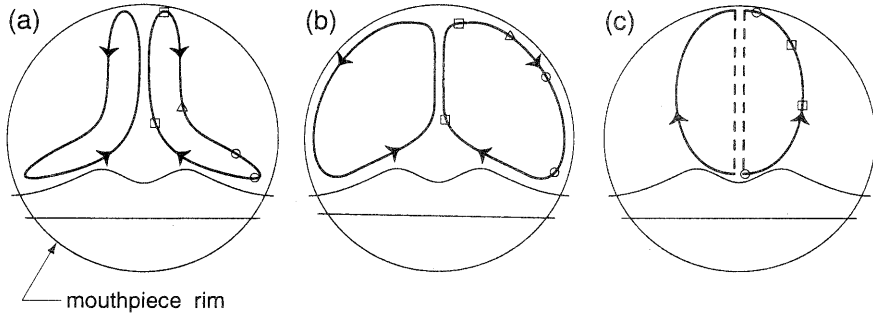


Fig. 4. Rough sketch of wave-propagation path on the upper lip. (a): player A, tone F_2 ; (b): B, F_2 ; (c): A, F_3 . Note that the lip opening motion is superposed on this wave motion to make up the overall motion observed.

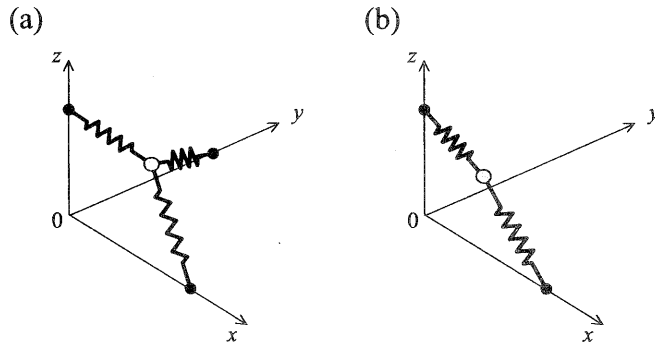


Fig. 5. A conceptual model to reproduce the lip-wave propagation. (a): one-mass-three-spring model for F_2 ; (b): one-mass-two-spring model for F_3 .

で y の負方向に波動が伝搬するとき、唇は外向き (x の正方向) に開いていき、 y の正方向に伝搬するとき、唇は内向きに動き、最終的には完全に閉じる。

波動伝搬 (Fig. 4) と開閉運動を重ねて振動モデルを考えてみると、Fig. 5 のようなモデルが得られよう。(a) は最低音 F_2 用のモデル、(b) は高次モード音用のモデルである。質量はともに1つであるが、バネは (a) では3つ、(b) では2つである。なお、このモデルは上唇の半分 (右側) を対象にしている。左半分は右半分のモデルを折り返せばよい。(a) では、 x 、 y 、 z 軸上に支点をもつ3つのバネによって保持された質量が x 方向での圧力 (音圧) 差と z 方向でのベルヌーイ圧によって駆動される。それぞれのバネの強さは今後検討する必要がある。また、初期条件としては質量の位置座標を $(0, y_0, 0)$ とし、初期速度はゼロと置くことが適当であろう。(b) では y 軸上に支点をもつバネが実質的に不必要になり、 z 軸上に支点をもつバネが主要になる。なお、このモデルは波動伝搬を再現しようとした荒いモデルなので、楽器に入力される音響的体積流などと結びつけるには唇の開閉運動を再現できるように変更する必要がある。ともかく、より現実的な上唇の振動モデルを構築することは今後の課題である。

謝辞 実験に参加してくれた方々、データ整理などに協力してくれた学生諸君に感謝する。