

フルートの吹き込み角度による音色変化のメカニズム解明

小野木君枝, 横山博史, 飯田明由

豊橋技術科学大学

1. 緒言

フルートは、リコーダーやオルガンパイプなどと同じエアリード楽器に属する楽器で、流れと音が相互に作用して発音する。フルートからの発生音は、楽器形状のほか、唇形状や唇と楽器との相対的な位置関係といった演奏時の物理的諸条件（吹鳴条件）によって変化する¹。安藤¹は、フルート演奏での吹鳴条件が基本周波数や音色（倍音構造）に与える影響について、人工吹鳴機を用いた実験によって調査した。この研究によると、倍音構造に主に影響する吹鳴条件は、エッジに対する呼気ジェットの相対的な高さ（偏心値）、呼気ジェット出口とエッジとの距離、流量と考えられている。さらに、小野木ら²は、吹き込み角度も倍音構造に影響することを人工吹鳴機実験および熱線計測から明らかにした。これら吹鳴条件のうち、偏心値と倍音構造の関係については、フレッチャー³と吉川⁴が簡易オルガンパイプを対象として理論的に説明しているが、それ以外の吹鳴条件が倍音構造に影響するメカニズムについては未だ不明点が多い。このメカニズムを明らかにするため、流れと音を同時に解く計算手法である空力音直接計算は有効な手段と考えられ、これまでもエアリード楽器の発音メカニズムの調査に用いられてきた^{5,6}。しかし、フルートを対象として空力音直接計算を行った例は、現時点では数少ない。フルートの場合は、共鳴管長手方向と息の流れる方向が直行するため3次性を考慮する必要がある。さらに、人が吹き得る音を計算で再現するためには、人の吹鳴条件を模擬した条件で計算を行う必要がある。こうしたことが、適用例が少ない理由として考えられる。

そこで本研究では、吹き込み角度が倍音構造に影響するメカニズムを解明することを目的として、実際の演奏状態を模擬した条件下でフルートの空力音直接計算を行い、吹き込み角度変化時の発生音と流れ場の変化を調査する。計算には、実際のフルート形状を用い、予備実験で実測した人間演奏者の吹鳴条件で3次元空力音直接計算を行う。計算結果の妥当性は、人工吹鳴機を用いて予備計測した音と比較して検証する。

2. 計算手法

2. 1. 計算条件

呼気ジェットとフルートの幾何学的位置関係は、吹き込み角度 θ_j 、エッジに対する呼気ジェットの偏心値 $y_{j,e}$ および呼気ジェット出口からエッジまでの距離 l によって変化する¹。これら吹鳴条件の定義を図1に示す。吹き込み角度 θ_j は、呼気ジェット進行方向とウィンドウ水平線のなす角度、偏心値 $y_{j,e}$ は、エッジから呼気ジェット進行方向までの距離、距離 l は、口腔モデル出口

¹ Ando, *J. Acoust. Soc. Jpn.*, 26 (6), 253–260, 1970

² Onogi et al., *Proc. International Symposium on Music Acoustics 2019*

³ Fletcher and Douglas, *J. Acoust. Soc. Am.*, 68 (3), 767–771, 1980

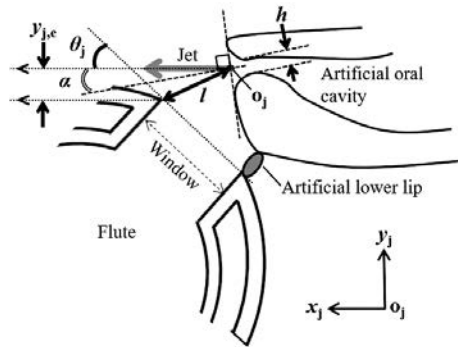
⁴ Yoshikawa, *J. Acoust. Soc. Jpn.*, 5 (1), 17–29, 1984

⁵ Yokoyama et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, 138 (2), 858–873, 2015

⁶ Onogi et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, 146 (2), 1427–1437, 2019

中心 o_j からエッジまでの距離である。 θ_j および $y_{j,e}$ で基準とした呼気ジェット進行方向は、本研究の予備実験で測定した、楽器が無い状態での呼気ジェット進行方向である。呼気ジェット進行方向を x_j 軸、その垂直方向を y_j 軸、管長手方向を z_j 軸とし、値は口腔モデル出口狭窄部の高さ h で無次元化する。口腔モデルとウィンドウの z_j 方向中心断面は一致しており、吹鳴条件 θ_j , $y_{j,e}$ および l は、この断面 ($z_j = 0$) で定義される。

人の実演奏状態を再現するため、予備実験では、人間がフルート頭部管を吹いている状態で、シュリーレン法を用いて呼気ジェットを可視化して吹き込み角度 θ_j を、写真計測により距離 l を測定した。本研究では、実測した人間演奏状態の吹き込み角度 $\theta_j = 39^\circ$ で計算および実験を行い、計算の妥当性を検証した。また、吹き込み角度変化の影響を調べるため、実演奏で人間が変化させうる範囲¹の下限付近 $\theta_j = 32^\circ$ と上限付近 $\theta_j = 58^\circ$ に対して計算を行った。このさいの偏心値は、実演奏で人間が変化させうる範囲¹の中央付近の値 $y_{j,e}/h = 0.69$ に設定した。距離 l は実測した人間演奏状態に、流量 Q は、人間演奏者と人工吹鳴機の放射音を比較することによって見積もった値に設定した。計算と実験で用いた吹鳴条件を表 1 に示す。

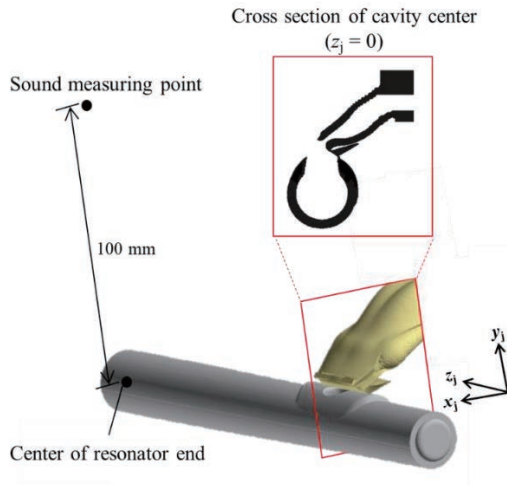


第 1 図：呼気ジェット条件の模式図

第 1 表：計算および実験における吹鳴条件

吹鳴条件	値		
吹き込み角度 θ_j [$^\circ$]	39	32	58
エッジに対する呼気ジェットの偏心値 $y_{j,e}/h$	0	0.69	
唇からエッジまでの距離 l/h	5.6		
流量 Q [L/min]	16.0		
口腔モデル出口断面平均流速 U_0 [m/s]	21.5		

表 1 の吹鳴条件で口腔モデルと楽器の幾何学的位置関係を設定した計算モデルを図 2 に示す。本研究では、頭部管を対象とする。口腔モデル形状は、人がプラスチック製頭部管を吹鳴している状態で撮影した MRI 画像をもとに作成した。



第2図: 計算モデル

2. 2. 支配方程式と差分スキーム

流れと音の連成作用を再現するために、式(1) - (3)に示す三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、空間差分には6次精度コンパクトスキーム(境界では4次精度)⁷、時間積分は3次精度ルンゲクッタ法⁸を用いて空力音直接計算を行った。直行格子上で複雑形状を再現するため Volume Penalization 法を用いた。

$$\mathbf{Q}_t + (\mathbf{F}_x - \mathbf{G}_x)_x + (\mathbf{F}_y - \mathbf{G}_y)_y + (\mathbf{F}_z - \mathbf{G}_z)_z = \mathbf{V}, (1)$$

$$\mathbf{V} = -\left(\frac{1}{\phi} - 1\right)\chi \begin{pmatrix} \partial \rho u_i / \partial x_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \phi = 0.25, (2)$$

$$\chi = \begin{cases} 1 & \text{(inside object)} \\ 0 & \text{(outside object)} \end{cases}, (3)$$

ここで、 \mathbf{Q} は保存量ベクトル、 \mathbf{F} は非粘性流束ベクトル、 \mathbf{G} は粘性流束ベクトル、 \mathbf{V} は外力項 (Volume Penalization 項)、 ϕ は多孔質媒体の孔隙率、 χ はマスク関数をそれぞれあらわす。解析手法の詳細については、文献5を参考にされたい。最小格子間隔は、口腔モデル出口周辺

⁷ Lele, *J. Comp. Phys.*, 103, 16-42, 1992

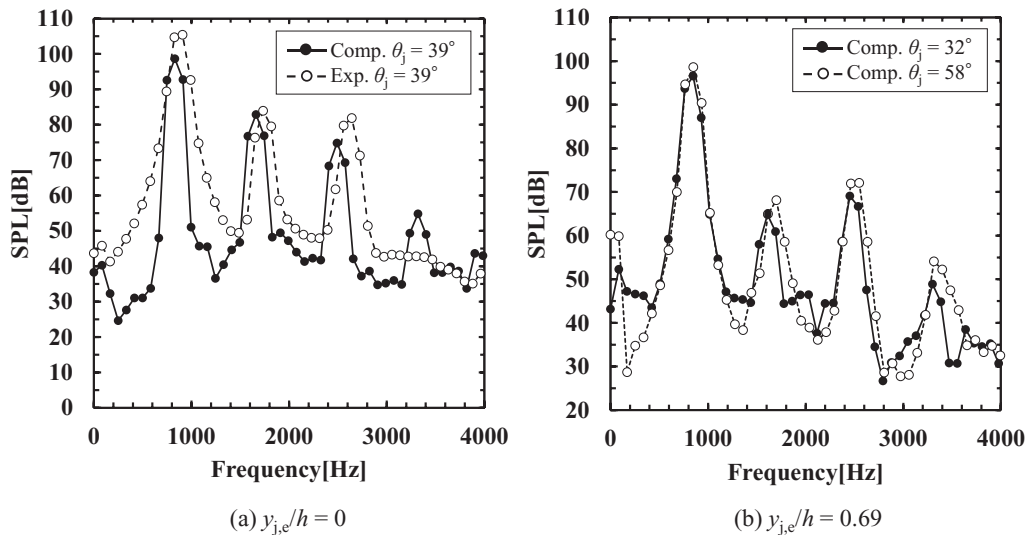
⁸ Jameson *et al.*, *AIAA Paper* 83-1929

の 0.05 mm であり，格子数は約 1.5×10^8 である。

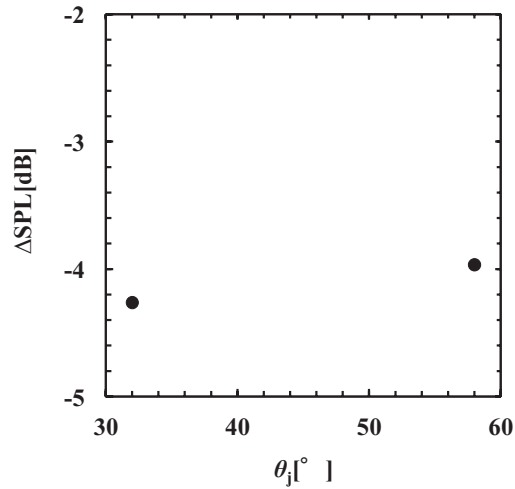
3. 結果

3. 1. 放射音

頭部管後端から距離 $r = 100$ mm の位置で計測した放射音の音圧スペクトルを図 3 に示す。図 3(a) は， $\theta_j = 39^\circ$ での計算と実験の比較を，図 3(b) は吹き込み角度を変化させた計算結果をあらわす。周波数解像度は 84 Hz である。図 3(a) から，計算，実験とも基本周波数 f_1 は 840 Hz 付近であり，ほとんど一致していることが確認できる。さらに，計算の 2, 3 次倍音 f_2, f_3 のピークが， f_1 のそれぞれ 2, 3 倍の周波数付近にあらわれていることから，計算でこれら倍音放射のための共鳴管内圧力変動を再現できたと考えられる。図 3(b) から，吹き込み角度を増加させることによって， f_1 の音圧レベルはほとんど変化していないが， f_2, f_3 の音圧レベル(以下， SPL_2, SPL_3)はともに増加している。このときの f_2, f_3 の音圧レベル差 $\Delta SPL (= SPL_2 - SPL_3)$ を図 4 に示す。 $\theta_j = 32^\circ$ と比較して $\theta_j = 58^\circ$ はわずかに 2 次倍音の音圧レベルが相対的に増加している。



第 3 図: 音圧スペクトル

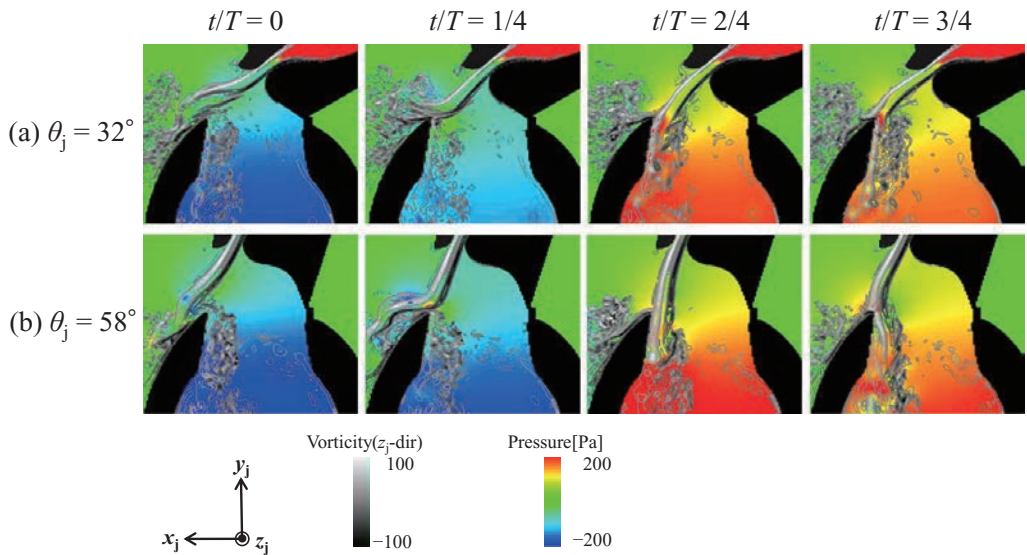


第4図: 2次倍音の3次倍音に対する音圧レベル差

3. 2. 流れ場

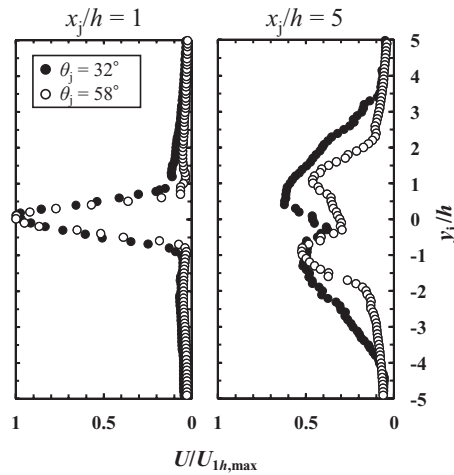
計算で得られた渦度および圧力分布の時間変化を図5に示す。 T は基本周期をあらわし、 $r = 100 \text{ mm}$ での放射音圧が最大になる瞬間を $t=0$ とした。共鳴管内の圧力が、基本周波数(半波長モード)で周期的に変化している。共鳴管内が低圧時($t/T=0$)、ジェットはエッジの外側を向き、共鳴管内が高圧時($t/T=2/4$)、ジェットはエッジの内側を向いている。このジェットと共鳴管内圧力の変動の位相関係は、音響的パワー生成に適した位相関係⁹である。ジェットがエッジ内側を向いているとき($t/T=2/4$)、 $\theta_j=32^\circ$ ではエッジ内側の壁面に沿って高圧領域が発生しているが、 $\theta_j=58^\circ$ では壁面に沿った高圧領域はみられない。さらに、 $\theta_j=32^\circ$ と比較して $\theta_j=58^\circ$ は、ジェット進行方向がエッジ内側壁面により平行である。このため、ジェットが壁面に沿って流れ、壁面沿いに高圧領域が発生しなかったと考えられる。

⁹ Yoshikawa *et al.*, *J. Sound Vib.*, 331, 2558-2577, 2012



第 5 図：渦度および圧力分布の時間変化($z_j = 0$)

計算で得られた $x_j/h = 1, 5$ における時間平均場の流速プロファイルを図 6 に示す。流速は、 $x_j/h = 1$ での最大流速 $U_{1h,max}$ で無次元化されている。口腔モデル出口付近 ($x_j/h = 1$) では、 $\theta_j = 32^\circ$ 、 $\theta_j = 58^\circ$ とともに、原点 ($y_j = 0$) 付近を中心にジェットが吹き出ている。エッジ付近 ($x_j/h = 5$) では、 $\theta_j = 32^\circ$ の流速プロファイルは管外側 ($y_j > 0$)、 $\theta_j = 58^\circ$ は管内側に傾いた分布をしている。吹き込み角度を増加させると、ジェットはより管内側に傾くと考えられる。これは、図 5 に示したように、吹き込み角度を増加させるほど、ジェットがエッジ内側壁面に沿って流れやすいためだと考えられる。吹き込み角度の変化によって、ジェットが偏向することで、エッジ ($x_j/h = 5.6 = l/h$, $y_j/h = 0$) とジェットとの実効的な偏心値も変化する可能性が考えられる。フルートと同じエアリード楽器に属するオルガンパイプの放射音に対する理論的な計算⁴では、偏心値の絶対値が大きいほど 3 次倍音に対して 2 次倍音が優勢になることが示されている。図 3 (b) に示した音圧スペクトルで、 $\theta_j = 32^\circ$ と比較して $\theta_j = 58^\circ$ でより 2 次倍音が優勢であったことから、 $\theta_j = 58^\circ$ でより実効的偏心値が大きいと推察される。これを明らかにするため、今後は、瞬時場の流速プロファイルをもとに実効的偏心値を算出し、吹き込み角度変化ともなう実効的偏心値の変化と音との関連について調査する。



第 6 図:時間平均場の流速プロファイル

4. 結言

本研究は、吹き込み角度が倍音構造に影響するメカニズムを解明することを目的として、人の実演奏状態を模擬した計算モデルを用いて、3次元空力音直接計算を行った。その結果、実験と同等の基音周波数を計算で再現できていることが確認できた。このことは、ジェットと管内圧力の変動の位相関係が、基本周波数での音の発振に良好な関係であったことから確認できる。吹き込み角度を変化させて計算を行った結果、吹き込み角度の増加にともない、わずかに2次倍音が優勢になった。また、時間平均場の流速プロファイルを調べた結果、吹き込み角度の増加にともない、ジェットが管内側に傾くことがわかった。これは、計算の可視化結果に示されたように、吹き込み角度を大きくすると、ジェット進行方向とエッジ内側壁面の成す角度が平行に近づき、ジェットがより管内に流れ込みやすくなるためと考えられる。吹き込み角度が増加するとジェットが管内側に傾くため、エッジとジェットの実効的偏心値が増加し、2次倍音が増加したと考えられるが、これについてはより詳細な調査が必要である。今後は、各吹き込み角度のジェットの实効的偏心値を算出し、倍音構造変化との関係性を明らかにする。

謝辞

本研究を進めるにあたって、有元 慶太様には、有益な助言をいただきました。また、本研究は、文部科学省「フラッグシップ2020プロジェクト」、東京大学情報基盤センター「スーパーコンピューター若手・女性利用制度」の助成を受けたものです。ここに記して感謝いたします。