

## 笙の物理モデリング

引地 孝文<sup>†‡</sup>      小坂 直敏<sup>†</sup>      板倉 文忠<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>NTT コミュニケーション科学基礎研究所  
〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1  
046-240-3514 hikichi@bri.ntt.co.jp

<sup>‡</sup>名古屋大学 統合音響情報研究拠点 (CIAIR)  
〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

あらし 本研究では、笙の物理モデル構築を目的としている。フリーリード振動に関する文献で用いられた定式化を参考に笙の物理モデルを構築し、時間領域シミュレーションを行う。また、人工吹鳴装置を用いて実際の楽器のリード振動、管内圧力、発振閾値圧を実測する。管長と発振閾値圧、管長と発音周波数、吹鳴圧と発音周波数等の関係について、実測値とシミュレーション結果を比較する。その結果、管長と閾値圧及び発音周波数について類似した傾向が見られた。吹鳴圧と発音周波数についてはやや異なる結果となった。また、笙のリードは、クラリネットやオルガンのリードパイプとは異なり外向き発振をしているという結論が得られた。

キーワード 笙、物理モデル、フリーリード、シミュレーション、外向き発振

## Physical Modeling of the Sho

Takafumi Hikichi<sup>†‡</sup>      Naotoshi Osaka<sup>†</sup>      Fumitada Itakura<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>NTT Communication Science Laboratories  
3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0198 Japan  
046-240-3514 hikichi@bri.ntt.co.jp

<sup>‡</sup>Nagoya University, Center for Integrated Acoustic Information Research (CIAIR)  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603 Japan

Abstract The purpose of this study is to construct a physical model of the sho, one of Japanese traditional musical instruments. Based on mathematical formulation of the free-reed used in a reference, a physical model of the sho is proposed, and time-domain simulation is done. The reed vibration, pressure variation inside the tube, and threshold blowing pressure for oscillation are measured by artificially blowing the sho. The experimental results are compared with simulation results, and the agreement is acceptably good for the relationships between the tube length and the threshold pressure, and between the tube length and the sounding frequency. The calculated sounding frequency for blowing pressure variation fails to reproduce the actual one. Further, it is concluded that the sho reed acts as "outward-striking valve" in contrast with that of clarinet or organ reed pipe.

key words sho, physical model, free-reeds, simulation, outward-striking oscillation

## 1 はじめに

笙は日本の伝統音楽である「雅楽」に用いられる楽器であり、主に和音を奏する。音響的には、ハーモニカやアコーディオン、オルガンにおけるリードパイプ等と同様フリーリード (free-reed) の管楽器である。笙の原型となる楽器は中国に紀元前数世紀から存在したと考えられ、中国の笙 (Sheng)、ラオスのケーン (Khaen) 等、南アジア諸国には同族の楽器が見られる。日本にはおよそ8世紀頃伝わり、その後ほとんど変化していないといわれている [1]。

笙の全体像を図1に示す。全長は50cm程度で、直径8cm程度の漆塗りの匏<sup>ほう</sup>と呼ばれる中空の部分に、17本の竹管が差し込まれている。通常、17本のうちの15本の竹管の先端には銅合金製のリードが取り付けられている。リードはコの字型に切込みが入った青銅片であり、切り込み (振動する部分) の長さは1~2cm程度、幅は2mm程度と非常に小さい。リードの両面には青石<sup>しょうせき</sup> という孔雀石を擦った微粒子が塗られ、リードの切り込みの隙間を埋めている。演奏をしているうちにこの青石が飛ぶと息漏れがする。リード先端付近には調律のための鉛が接着されている。また、リードは呼吸による湿気を運びやすく、乾燥させるために演奏の前後には火鉢等で匏を良く暖める必要がある [2][3]。15本の竹管はそれぞれ異なる音高を持ち、竹管の途中には屏上<sup>びょうじょう</sup> と呼ばれる長方形の窓が開けられているものもある。

その演奏方法は、匏の吹口より空気を吹き込むことで匏内の圧力が上昇し、竹管の側面下部に開けられた小さな穴を指で塞ぐことにより、リードと管との共鳴が成立し発音する。リードは表にも裏にも振動するようになっているため吹いても吸っても発音する。また、通常は一本のみでなく同時に複数の指穴を押さえ、和音として演奏する。そのため、あたかも深呼吸をするように吹く、吸う動作を繰り返すことにより、途切れること無く続く和音を奏することができ、笙の演奏音の特徴となっている。

笙は非常に長い歴史を持ち、ハーモニカやアコーディオン等、現存する様々な楽器の源とも考えられるが、その長い歴史にも関わらず、楽器の発音機構を探るという視点からの音響学的な研究はこれまでほとんど見られない。特に楽器全体の振る舞いを定式化し、発音過程の時間領域シミュレーションを行った例はなかった。関連研究として、Cottingham[4]はラオスのケーンについて、吹鳴圧と発音周波数やスペクトルとの関係等を検討し、吹鳴圧の上昇にともない発音周波数が低下すること、発音周波数は管長に依存し変化すること等を実験的に示した。その他のフリーリード楽器に関する従来研究については [5] にまとめられている。主なものとしては、St.Hilaireらによるハー

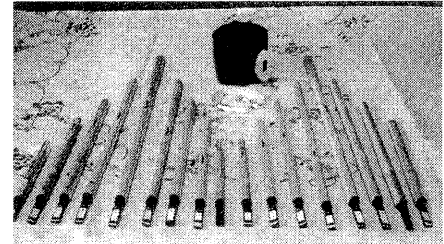
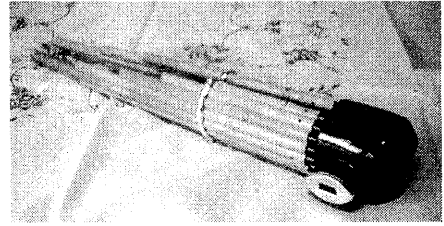


図1: 笙の全体像 (上)、及び分解した状態 (下)

モニウムリード振動の計測 [6]、リードオルガン、アコーディオン等の金属リードの自励共振理論の検討 [7][8][9]、ハーモニカについてのピッチベンドに関する理論 [10] 及び計測 [11] 等がある。近年発表されたリード振動に関する研究 [12] では、下流側が大気にさらされているフリーリードの振る舞いに関して理論的予測を実証しており、実験結果とかなり良い一致を示している。今回、ここで用いられている定式化を一部修正して利用する。

楽器の物理的振る舞いを再現する時間領域モデルを構築することは、楽器音響学の分野において新たな知見をもたらすのみならず、コンピュータによる音合成への利用という視点から見ても意義がある。楽器の発音機構に関する知見が楽音合成技術と結び付いた良い例として、クラリネットを挙げることができる。クラリネットを対象として、古くから精力的に基礎的、実験的な研究が行われ [13]、その基本的な発音機構を模擬したモデル [14] は広く受け入れられている。このようなモデルに基づく楽音合成手法は物理モデル合成として盛んに応用研究が行われ、現在ではコンピュータ音楽分野における合成手法の一つとして一般的となっている [15][16]。一方、笙を含め多くのフリーリード楽器に関しては、発音機構を模擬した物理モデル合成が研究される段階に至っていない。笙に関して、コンピュータ音楽におけるライブ演奏を目的とした笙センサの試み [17] はあるものの、これは笙の発音機構そのものには立ち入っておらず、インタフェースとしての利用に留まっている。

本研究では、笙の発音機構の解明とモデル化を行

い、物理的振る舞いを模擬し、楽音合成に利用出来る計算モデルを提案することを目的としている。我々はこれまでに、竹管の開放端から発振器により正弦波を入射し、指穴からプローブマイクを挿入して、管の共鳴周波数特性を観測した。その結果、発音周波数よりもやや大きく低域にずれた周波数にピークが生じ、クラリネット型のモデルとの相違（すなわち、管の共鳴周波数と発音周波数が異なる）が明らかになった[18]。そして、リードの固有周波数に対応すると考えられるディップが観測された。リード振動をハイスピードカメラにより撮影した結果、リードは「穴を通り抜けるように」振動していることを確認した。

本報告では、これまでに得られた知見、及び、リード振動に関する文献[12]等を参考に、簡略化された笙の物理モデルを構築し計算機シミュレーションを行う。そして、楽器形状（管長、リード長等）の実測データを用いて行ったシミュレーション結果と、実際の楽器の人工吹鳴による実測結果を比較する。また、管の長さを変化させた時の、発振閾値及び発音周波数の変化を調べ、提案モデルの妥当性を検証する。

## 2 笙の発音機構のモデル化

文献[12]では、フリーリードが取り付けられた空胴に一定流速の空気を流入させた時に生じるリードの自励振動について、圧力閾値、振幅、発振周波数等の体積依存性等に関して理論的及び実験的に検討している。ここでは、笙の匏からリードまでのモデルとして、文献で用いられたモデルを若干修正して用いた。そして、リード下流側の管については反射関数の形でモデル化した。これは従来の木管楽器等のモデル化において一般的に用いられている手法である[14]。図2に実際の笙の構造と簡略化されたモデルの模式図を示す。実際には笙は17本の竹管を持つが、ここでは簡単のため一本の管が結合している状態を考える。対象として「一」管（B4, 482.7Hz）に着目する。「一」管を選ぶ理由は、側面に屏上という窓穴を持たず、管の構造が最も簡単であるためである。

以下、モデルを記述する方程式について説明する。記述に用いられる変数を表1にまとめて示す。

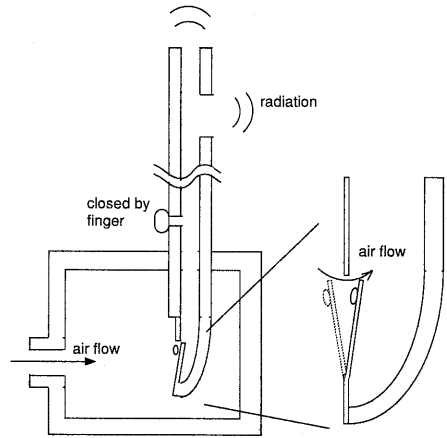
### 2.1 物理モデル

図3において、リード先端部分の変位が $x$ の時に生じる間隙の面積 $F(x)$ は以下の様に表される。

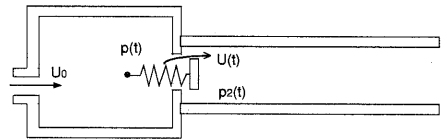
$$F(x) = W[x^2 + b^2]^{1/2} + 2L[a(x)^2 + b^2]^{1/2} \quad (1)$$

ここで $a(x)$ はリード側面の平均変位であり、片持ち梁の基本振動モード形状より、

$$a(x) \approx x_0 + 0.4(x - x_0) = 0.6x_0 + 0.4x$$



(a) 実際の笙の構造（ただし管は一本のみを考慮）



(b) 簡略化されたモデル

図2: 実際の笙の構造と簡略化された物理モデル

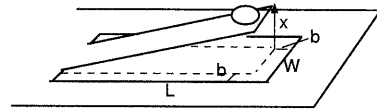


図3: 笙のリード

と求められる（導出は[12]Appendix参照）。今回、笙のリードの初期変位はほぼ $x_0 = 0$ であること、また振動時には両側に変位することから、側面の平均変位 $a(x)$ を、

$$a(x) = 0.4x \quad (2)$$

とした。

匏内圧力 $p(t)$ 、管端圧力 $p_2(t)$ 、及び、間隙を流れる体積速度 $U(t)$ の関係は、Bernoulliの法則より以下の様に表される。

$$p(t) - p_2(t) = \frac{\rho U(t)^2}{2C^2 F(x)^2} + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\rho U(t) \delta}{CF(x)} \right], \quad (3)$$

ここで $C$ はくびれの係数（flow contraction coefficient）[19]であり、開口部の形状、角度等により異なる値を取る。文献[12]ではsharp edged-slitの場

表 1: 笙（「一」管）のモデルに用いる諸変数

変数	記号	用いた値
リード		
長さ	$L$	10[mm]
幅	$W$	2[mm]
厚さ	$h$	0.15[mm]
先端部の変位	$x$	variable
初期変位	$x_0$	0
リードと板の間隙	$b$	0.01[mm]
$Q$ 値	$Q$	30~110
固有角周波数	$\omega_r$	$2\pi \times 470$ [Hz]
密度	$\rho_r$	$8 \times 10^3$ [kg/m <sup>3</sup> ]
実効質量	$m$	$\rho_r W L h$
匏		
体積	$V$	300[cm <sup>3</sup> ]
圧力	$p$	variable/input
流入する体積速度	$U_0$	input
管		
管内圧力	$p_2$	variable
共鳴周波数	$f_p$	150~600[Hz]
半径	$r_p$	3.5[mm]
特性インピーダンス	$Z_0$	$\rho c / \pi r_p^2$
その他		
リードを通過する体積速度	$U$	variable
空気慣性の長さ	$\delta$	1[mm]
空気密度	$\rho$	1.2[kg/m <sup>3</sup> ]
音速	$c$	340[m/s]

合  $C = 0.61$  とされており、ここでもこの値を採用した。

リードは主に基本モードで振動すると仮定すると、運動方程式より、リード先端部の変位を  $x$  として、

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2k \frac{dx}{dt} + \omega_r^2 (x - x_0) = \frac{1.5WL}{m} (p(t) - p_2(t)), \quad (4)$$

が導かれる ([12]Appendix 参照)。

リードの減衰係数として、[12]では渦の発生による減衰作用の増加を考慮した定式化を行っているが、同時にこの効果は小さいとも述べている。そのため、本稿では簡単のため減衰係数の変化は考慮せず、次式を用いる。

$$k = \frac{\omega_r}{2Q}. \quad (5)$$

管内圧力  $p$  とそこに流入／流出する空気流の関係は

次式で表される。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\rho c^2}{V} (U_0 - U_{in}(t)). \quad (6)$$

$$U_{in}(t) = U(t) + 0.4WLdx/dt$$

ここで、 $U_{in}(t)$  は、管に入力される体積速度である。

今回、笙をモデル化するため、[12]とは異なり下流に管を取りつけた状態を模擬した。すなわち、管内圧力  $p_2(t)$  は、管の反射関数  $r(t)$ 、管の特性インピーダンス  $Z_0$  を用いて次式より求められる。

$$p_2(t) = Z_0 U_{in}(t) + r(t) * (p_2(t) + Z_0 U_{in}(t)). \quad (7)$$

ただし、管の反射関数はガウス型関数 [14] を用いた。(1)~(7)式により匏に体積速度  $U_0$  が入力された場合の振る舞いが記述される。

なお、匏の体積の影響を考慮しない場合には、入力体積速度の代わりに匏内圧力をパラメータとして用いることも可能である。その場合には、(6)式は不要である。予備的なシミュレーションの結果匏の体積の影響はほとんどなかったため、後の検討では圧力をパラメータとして用いている。これは従来よく採用されている定式化の一つである。

## 2.2 数値シミュレーション

(1)~(7)式を差分化することにより各変数を求める式が導かれる。

- (3)式を  $U$  に関して解く。  
 $U(n-1), F(n-1), p(n-1), p_2(n-1)$  より  $U(n)$  を計算
- (4)式から  $x$  を更新する式を導出する。  
 $x(n), x(n-1), p(n), p_2(n)$  より  $x(n+1)$  を計算
- (6)式から  $p$  を更新する式を導出した。  
 $p(n-1), U(n), x(n), x(n-1)$  から  $p(n)$  を計算
- (7)式から  $p_2$  を計算する。  
 $U(n), x(n), x(n-1)$  から  $p_2(t)$  を計算

計算はサンプリング周波数 48[kHz]で行った。初期状態及び入力体積速度  $U_0$  (あるいは匏内圧力  $p$ ) を指定することにより、リード変位  $x$ 、間隙を流れる体積速度  $U$ 、管内圧力  $p_2$  を再帰的に計算できる。

シミュレーションにおいて、物理定数は管長、口径等計測が容易なものに関しては計測したデータを用いた。リードの共鳴周波数は、前報 [18]にて共鳴周波数の計測を行った際に、周波数応答に谷が生じる周波数をリードの共鳴周波数と考え、その値 ( $f_r=470$ Hz) を用いた。リードの減衰係数については不明なため、シミュレーションでは幾つかの値を用いた。

### 3 実験

人工吹鳴装置を用いた計測実験の方法について述べる。図4に実験装置の構成を示す。コンプレッサにより圧縮された空気を、タンクを介して透明なアクリル製容器（これは実際の笙における匏に相当する）に導く。そして、アクリル製容器に笙の竹管を一本差し込む。容器にはチューブを介して圧力計が接続され、圧力を読み取ることが可能である。また、指穴にはプロブマイクロフォンのシリコンチューブを挿入し、ゴム製粘着テープで密閉する。

コンプレッサを動作させ、手でレギュレータを操作し容器内圧力を調整し、発振を生じた時の管内音圧をプロブマイクにより計測する。（ただし、指穴位置は、リード先端からおおよそ3cm離れている。）また、笙のリード振動をレーザ変位計を用いて計測する。変位計出力と音圧波形を同時AD変換し、DATインタフェースを介してコンピュータに取り込む。今回、圧力は一定とし、定常状態でのリード変位と管内圧力を計測した。主な実験装置の仕様及び条件を表2に示す。吹鳴圧力の上限は、笙の通常の演奏音から推測して1kPa程度とした。

表 2: 主な実験装置の仕様及び条件

コンプレッサ	日東工器 AC0910
圧力センサ	Omron E8Y-A2Y-R
レーザ変位計	Keyence LC-2440
マイクロフォン	Etymotic ER7C
サンプリング周波数	24 [kHz]
カットオフ周波数	(変位) 10 [kHz] (音圧) 3.6 [kHz]

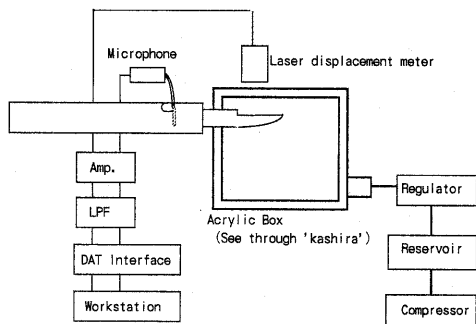


図 4: 実験装置の構成

### 4 検討事項

ここではモデルパラメータを変化させ、提案モデルの妥当性を検証する。

演奏者は、指穴を開閉することにより管の音響特性を変化させ、音のオンオフをコントロールしている。そして指穴が開いている状態は、近似的には実効管長が短くなったと考えられるため、管長が発振状態に与える影響について知ることは重要である。そこで、管長を変化させて、

- 管長と吹鳴圧力閾値の関係
- 管長と発音周波数  $f_p$  の関係

をそれぞれ調べた。管長は24.1cmを基準とし、11.1cmから52.1cmの範囲で変化させた。人工吹鳴装置を用いた実測においても、管端に内径のほぼ等しい延長管を接続し、音響的な管長を変化させた。

また、他に演奏者の行うコントロールとしては吹鳴圧がある。そこで、吹鳴圧力のピッチや音量、音色に与える影響を考察するため、ここでは、

- 吹鳴圧力と発音周波数の関係
- 吹鳴圧力と管内圧力のパワーの関係
- 吹鳴圧力と管内圧力のスペクトルの関係

について検討した結果を示す。

#### 4.1 管長 - 発振閾値圧特性

吹鳴圧力の閾値特性は、発振条件との関係という点で物理的にも重要であるばかりでなく、演奏し易さという観点からも興味深い。すなわち、発振に要する吹鳴圧が適当であれば、演奏者は圧力を幅広くコントロールし発音することができる。

実験においては、圧力計の値を見ながら約1kPaまで徐々に圧力を上昇させ、発振が始まる圧力を閾値圧力と定義した。また、シミュレーションにおいては、圧力  $p(t)$  を時間と共に徐々に増加させ、発振が生じた時の圧力を閾値圧力とした。リードのQ値（減衰に関する係数）としては30, 55, 110を用いた。

図5に吹鳴圧力の閾値を示す。ただし横軸は、管長を共鳴周波数  $f_p$  に変換して表した。ここで、笙の竹管は一端閉鎖、他端開放と考えられるため、1/4波長共振を仮定した。

図5より以下のことが言える。

- おおよそ  $f_p=400\sim 450\text{Hz}$  付近で最も閾値圧力が低いが、実際の笙の「一」管の長さ(24.1cm,  $f_p=350\text{Hz}$ )付近でも閾値が低い。すなわち、小さな吹鳴圧力により効率よく発音できる領域である。

- 実際の管長の場合、 $Q=30$  程度ではほぼ閾値圧力が一致した。そこから管長を短くしていくと、シミュレーション結果よりも若干閾値圧力の上昇が遅いが、閾値圧は上昇する。この理由の一つとして、リードの固有周波数がややずれている可能性が考えられる。
- $f_p$  が 220~250 Hz の範囲では発振しない。
- $f_p$  が 150~200 Hz 付近の低い範囲で発振が得られた。これは、第二共振点付近で発音していると考えられる。
- 第二共振点付近で実測結果の方が閾値が大きいのは、シミュレーションにおいて実際よりも損失の少ない円筒管近似を適用しているためであると考えられる。

また、実験において、ある圧力値に設定して数秒後に発振が始まると若干圧力値が低下する傾向が見られた。これはヒステリシスが存在する可能性を示唆している。

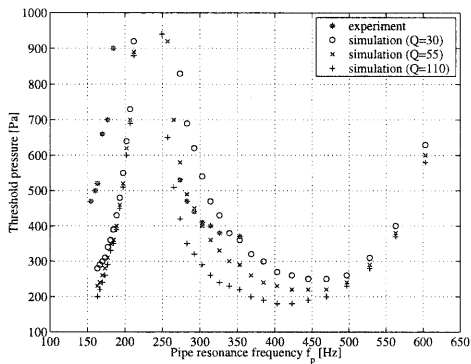


図 5: 管の共鳴周波数  $f_p$  と閾値圧力の関係

## 4.2 管長 - 発音周波数特性

次に管長と発音周波数との関係を調べた。ここで周波数は管内音圧波形の定常部分を切出し、FFTのローカルピーク抽出により求めた。

吹鳴圧力は一定 (0.8kPa) とした。また、前に述べた通り、実際の管長 (24.1cm) の場合、 $Q=30$  の時にはほぼ閾値圧力が一致したため、ここでは  $Q=30$  としてシミュレーションを行った。

結果を図 6 に示す。図 6 より次のことが分かる。

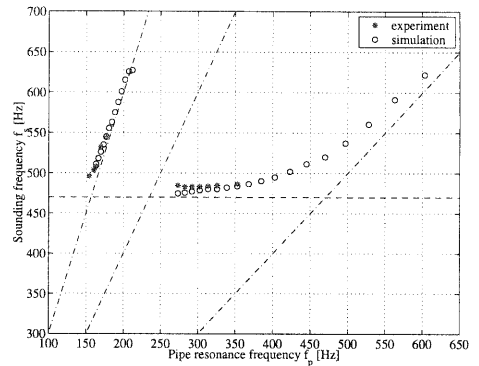


図 6: 管の共鳴周波数  $f_p$  と発音周波数  $f_s$  の関係

- 実験結果の得られた範囲 ( $150 < f_p < 350\text{Hz}$ ) では、シミュレーション結果と類似した傾向が見られる。
- リードの共鳴周波数  $f_r$  よりも高域側が発振領域 (すなわち、 $f_r < f_s$ ) である。これは、笙のリードが外向き発振をしていることを示している。
- 管の共鳴周波数  $f_p$  よりも少し高域側で発音している。管長を長くしていくと、すなわち  $f_p$  を低下させていくと、2 倍の周波数 (反共振点) 付近では発音せず、反共振点を越えて 3 倍の周波数 (第二共振点) の高域側で再び発音する。
- 実際の笙の「一」管の長さの時、得られる発音周波数も実際の笙と比較的近い (約 480Hz)。これはモデルの妥当性を示す根拠の一つと言える。

## 4.3 吹鳴圧力 - 発音周波数特性

先行研究では、ハーモニカや他のフリーリード楽器について、吹鳴圧力の増加に伴いピッチが低下するという報告がある [4][10]。図 7 に、延長管を接続しない場合、2cm 及び 4cm の延長管を接続した場合の、吹鳴圧力に対する発音周波数の変化を示す (図中 exp.)。図より、通常の状態では 1.5Hz 程度低下することが分かる。この理由について、圧力が増加するとリードの変位、間隙を流れる気体流量共に増加し、その結果振動を妨げるような流体力学的作用が生じることが考えられる。

また、実験に用いた笙は調律がやや高めになっていたため、シミュレーションでは管長を調節して  $L=23.1\text{cm}$ ,  $24.1\text{cm}$  を使い、同様に吹鳴圧力に対する

発音周波数の変化を調べた (図中 sim.)。結果を図7に重ねて示す。

その結果、シミュレーションでは実測結果とは逆に、圧力が増加すると共に発音周波数も上昇するという結果となった。流速によるリードの減衰の変化を考慮に入れること等を含め検討の余地がある。

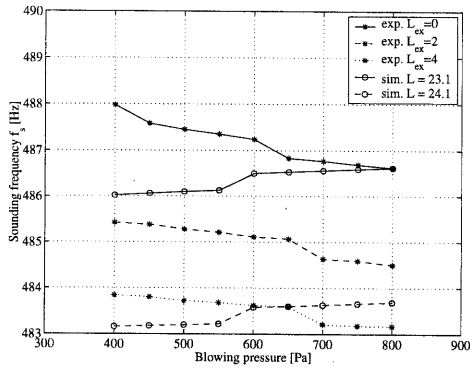


図 7: 吹鳴圧力と発音周波数  $f_s$  の関係

#### 4.4 吹鳴圧力と管内圧力波の関係

図 8 に、吹鳴圧力と管内に発生する圧力パワーの関係を図示する。ただし、吹鳴圧 0.8kPa において等しくなるよう正規化を行っている。図 8 より、実測では圧力上昇に伴い飽和する傾向がある。この理由として、間隙を通過できる体積速度が飽和するためであると考えられる。

また、吹奏圧による圧力波のスペクトル変化に関して、吹鳴圧が上昇するにつれて高調波のパワーが増加することが確認された。

### 5 まとめと今後の課題

クラリネット、リードパイプの振る舞いは内向き振動モデルとされている [5] ことから、当初、笙も同様であると推測して検討を始めた。しかし、管の形状、長さ等の条件を検討すると、クラリネットのように管の入力インピーダンスのピーク付近で発音していると考えるのは無理があることが分かった [20]。その後、共鳴周波数の計測実験により、共鳴周波数と発音周波数とはやや大きく異なるという結果を得た [18]。

そこで今回、初期変位の偏りを持たないリードのモデルを用いてシミュレーションを行い、管長を変化させて発音周波数変化を検討した結果、 $f_r < f_s$  の条件を満たしており、外向き振動モデルであるという結論に達した。実際の笙にも延長管を接続し、限定され

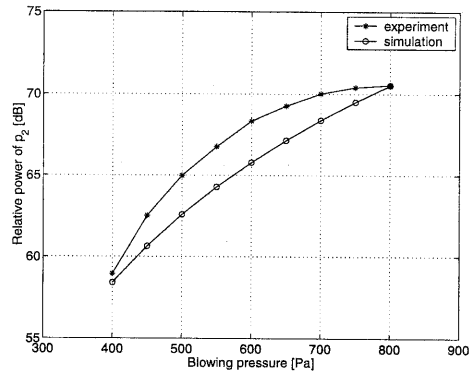


図 8: 吹鳴圧力と管内に発生する圧力パワーの関係

た範囲ではあるが同様の傾向が見られることを確認した。管長と発振閾値圧及び発音周波数について、実測値と類似したシミュレーション結果が得られた。吹鳴圧力と発音周波数の関係については、実測値とモデルとは一致しなかった。この点については今後の課題である。

今回、実際の楽器を用いた計測結果とシミュレーション結果を比較した。そのため、円筒管近似の近似誤差、延長管接続による反射の影響、モデルとのリードの向きの違い等の影響を受けた可能性がある。また、可逆的に管を短くすることが不可能であったため実験結果に制限を受けてしまった。これらの点を回避するため、現在、アクリル製の円筒管に笙のリードを取りつけた笙のアクリル管模型を作成し、この模型を用いた人工吹鳴実験を始めている。その結果については、今後報告する予定である。

今回、提案した発音機構モデルの基本特性に焦点を当てるため、吹鳴圧一定での特性 (静特性) を調べた。今後、動的に変化する入力に対する振る舞いを調べる予定である。そのためには、圧力を自動的にコントロールするよう装置を改良する必要がある。

また、管の特性については理想化されたモデルを用いた。管の途中に窓がある場合、そこまでの距離で音響的な長さは決まるが、それ以降の部分の存在が発生する音のスペクトルに大きく影響すると言われている [4]。もう少し精度良く管の特性を模擬し、その影響を調べる予定である。

さらに、笙の重要な特徴として吸っても発音するという点がある。吸気を実現するためには吹鳴装置の改良が必要であり、この点についても今後の課題である。

笙には、指穴を押さなくても息を吹き込むだけで音が鳴ってしまう、いわゆる「空鳴り」という現象が

生じることがあり、これはリードがどちらかへ偏った場合に生じると言われている。本稿で提案したモデルは、リードの初期変位の発振条件への影響等の検討にも利用できる。また逆に、この現象は笙の発音メカニズムを考える上で有益な示唆を与えると期待される。

その他、以下の課題が挙げられる。

- 調律の影響
- 管内の湿度の影響
- 良い楽器とそうでない楽器の違い
- リアルタイム音合成システムへの応用

## 謝辞

本研究の遂行に当たり御支援頂く NTT コミュニケーション科学基礎研究所石井健一郎所長、メディア情報研究部萩田紀博部長に感謝します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金 COE 形成基礎研究費（課題番号 11CE2005）の援助を受けて行なわれた。名古屋大学 CIAIR（統合音響情報研究拠点）において御議論頂く信号構造論サブグループの皆様感謝します。

## 参考文献

- [1] 柴田南雄, 楽器への招待, 新潮文庫, 56-57(1983).
- [2] 吉川英史 (監修), 邦楽百科事典 雅楽から民謡まで, 音楽之友社, 513-514(1984).
- [3] 増本喜久子, 雅楽 - 伝統音楽への新しいアプローチ -, 音楽之友社, 46-58(1968).
- [4] J. Cottingham and C. Fetzer, "Acoustics of the Khaen," Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics, 261-266(1998).
- [5] N. Fletcher and T. Rossing, The physics of musical instruments (second edition), Springer-verlag, 401-428(1998).
- [6] A. Hilaire, et al, "Aerodynamic excitation of the harmonium reed," J. Fluid Mech. 49, 803-816 (1971).
- [7] 実吉純一, "金属リード楽器の帰還自動発振の理論," 日本音響学会春季講演論文集, 505-506(1977).
- [8] 吉川茂, "管楽器の発音モデルにおける問題点", 音楽音響研究会資料, MA85-25, 25-34 (1985).
- [9] 吉川茂, "パイプオルガンの音響学" 日本音響学会誌 47 巻 11 号, 834-843 (1991).
- [10] R. Johnston, "Pitch control in harmonica playing" Acoust. Aust. 15, 69-75 (1987).
- [11] H. Bahnson and J. Antaki, "Acoustical and physical dynamics of the diatonic harmonica," J. Acoust. Soc. Am. 103 (4), 2134-2144 (1998).
- [12] A. Tarnopolsky, et al., "Oscillating reed valves -An experimental study," J. Acoust. Soc. Am. 108(1), 400-406(2000).
- [13] 井戸川徹, "最近における木管楽器の音響学的研究", 日本音響学会誌 44 巻 12 号, 955-962 (1988).
- [14] R. Schumacher, "Ab initio calculations of the oscillations of a clarinet," Acustica, vol.48(2), 71-85(1981).
- [15] J. Smith, "Physical modeling synthesis update," Computer Music J. 20, 44-56 (1996).
- [16] P. Cook and G. Scavone, "The Synthesis ToolKit (STK)," Proceedings of International Computer Music Conference, 164-166(1999).
- [17] Y. Nagashima and T. Ito, "It's SHO time -An interactive environment for SHO(Sheng) performance," Proceedings of International Computer Music Conference, 32-35(1999).
- [18] 引地孝文, 小坂直敏, "笙の音響特性の計測," 音楽音響研究会資料, MA00-26, 73-80(2000).
- [19] 今井功, 流体力学 (前編), 裳華房, 50-52(1973).
- [20] 引地孝文, 小坂直敏, "フリーリード楽器の発音機構について," 音楽音響研究会資料, MA00-02, 7-13(2000).