

ホルンのストップ奏法に関する 数値シミュレーションと管壁振動測定

緞原孝康^{†1} 吉川 茂^{†2}

ホルンにおけるストップ奏法とは、右手の手のひらでベルをふさいで強く吹奏することで、鋭い金属的な音色を作る奏法である。この奏法において楽器の入力インピーダンスが変化することがこれまで研究されてきたが、その金属的な音色の原因については考えられてこなかった。本研究ではその原因として、(1) 伝達関数、(2) 唇の非線形振動と管内衝撃波、(3) 管壁振動の3つの可能性について検討し、数値シミュレーションと測定によって管壁振動がその音色の原因であることが明らかになった。

Numerical simulations on the hand-stopping and measurements of the associated wall vibration in a natural horn

TAKAYASU EBIHARA ^{†1} and SHIGERU YOSHIKAWA ^{†2}

Hand-stopping is a technique by strongly playing the French horn, closing the bell tightly with right hand. The tone is so brassy and penetrating, called the stopped tone. It has ever studied that the input impedance of the horn is changed by the playing technique, but the tone quality has not been considered. In this study what causes the change of the tone quality is discussed in three viewpoints, i) the transfer function, ii) the nonlinear lip vibration or shock waves in the pipe, and iii) the wall vibrations. Numerical simulations and measurements strongly suggested that the wall vibrations made the stopped tones.

^{†1} 九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻
Graduate School of Design, Kyushu University,

^{†2} 九州大学大学院芸術工学研究院

Faculty of Design, Graduate School of Design, Kyushu University,

1. はじめに

ホルンは右手をベルに入れて演奏され、これは音程や音色に影響を与えている。ストップ奏法とは、右手の手のひらでベルをできるだけふさいだ状態を作って強く吹奏することにより、鋭い金属的な音色を作る奏法である。楽譜では音符の上に + を付記することで表され、多くの作曲家がこの奏法を用いている。ファーカス¹⁾によれば、手を徐々に奥に差し込んでいくと音程は下がっていくが、より奥まで強く手を突っ込めばストップ状態になり、F管ホルンでは約半音、B^b管ホルンでは約3/4音、逆に音程が上昇することである。このためホルン奏者は半音低い運指やストップ奏法用のバルブを用いる。

手を奥に差し入れることで音程は下がるにも関わらず、ストップ状態になると急に音程が上がるというのは容易には理解しがたい。Backus and Hundley²⁾はホルンの入力インピーダンスを測定することで、この時の音程の変化を実験的に検証し、手を奥に差し込んでいく時に図1のように各モードの周波数が変化することを明らかにした。すなわち n 次モードの周波数がストップされると、オープン時に $n-1$ 次モードがあった周波数の約半音上まで周波数が下がることが示された。ストップによって音が上がるという前述の奏者の感覚は、手を差し込む時に元の音程を維持しようとして、途中で1つ上のモードの振動を選択しているために生じている。

このようにストップ奏法における音程の変化については研究がなされているが、その音色については Backus and Hundley²⁾ が右手の指の間の隙間がハイパスフィルターとして働くためであるとしているのみである。他に詳しく調べた研究は存在せず、Backus and Hundleyの主張だけで金属的な音色を説明できるかは非常に疑わしい。

そこで本研究では、ストップ音の金属的な音色の原因について考察した。原因として考えられる可能性は(1) 入力インピーダンスの変化によって伝達関数が変化するため、(2) 高



図1 オープンからストップへの音程変化の概念図。

右はF管ホルンの1~6次モードの音、左はベルを手でふさいでいった時に下がっていく音を表す。例えばオープンで3次モードのC₄は、F₃[#]へ下がっていく。ホルン奏者はこのF₃[#]は2次モードのF₃が半音上がった音だと思っていた。

注) 1次モードの周波数は変化しない。また2次モードの入力インピーダンスのピークはとても小さくなり演奏には使われない。

吹奏圧によって唇の振動の非正弦性が大きくなる、もしくは管内で衝撃波が発生するため、(3) ベル部で管内音圧が高くなることにより管壁振動が励起されるため、の3つである。これらの可能性について2節から4節で検討を行う。その結果、ベル部の管壁振動が直接の影響であることが明らかになった。

管壁振動が放射音に影響を与えるかどうかは長年問われ続けてきた問題である³⁾⁻⁵⁾。直近の研究では Kausel *et al.*⁶⁾ がベル部の振動によって入力インピーダンスが変化することを実験的、理論的に明らかにした。しかしこれらの研究は管壁振動により放射音に生じる微小な差を明らかにしてきたものであり、本研究で管壁振動の影響が支配的な現象を確認できたことは大きな意義がある。

2. 入力インピーダンスと伝達関数

この節ではストップ状態で伝達関数が変化することによってストップ音が作られるという仮定を検証するため、ストップ状態での入力インピーダンスと伝達関数を数値計算で模擬する。その後、ストップ状態での管内音圧分布を計算してストップ状態での入力インピーダンスの変化を定性的に理解する。

2.1 ストップ状態での入力インピーダンス

管楽器の入力インピーダンスの計算方法は Caussé *et al.*⁷⁾ によって定式化された。これは管楽器を短い円筒管や円錐管に分割する近似を行う。分割した管の n 番目でのマウスピース側 (in)、ベル側 (out) の音圧 P_n および体積速度 U_n は、

$$\begin{pmatrix} P_{n,in} \\ U_{n,in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{n,out} \\ U_{n,out} \end{pmatrix} \equiv T_n \begin{pmatrix} P_{n,out} \\ U_{n,out} \end{pmatrix} \quad (1)$$

の形で関係付けられる。ここで行列 T_n は伝搬行列である。今回は T_n を計算する際に Mapes-Riordan⁸⁾ の式を用いた。

隣り合う管では境界で P と U が連続であることから、それらの伝搬行列をチェーンすることで管楽器全体の入力インピーダンスを求めることができる。楽器のマウスピース部での音圧 P_m と体積速度 U_m はベルでの音圧 P_{bell} と体積速度 U_{bell} を用いて、

$$\begin{pmatrix} P_m \\ U_m \end{pmatrix} = \prod_n T_n \begin{pmatrix} P_{bell} \\ U_{bell} \end{pmatrix} \quad (2)$$

と計算できる。これを用いて計算したホルンの入力インピーダンス $|Z_{in}| = |P_m/U_m|$ を図2の実線に示す。なおホルンは Lawson Brass Instruments Inc. の F 管ナチュラルホルンであり、管体形状データは同社から提供を受けた。マウスピースは同社の付属マウスピース

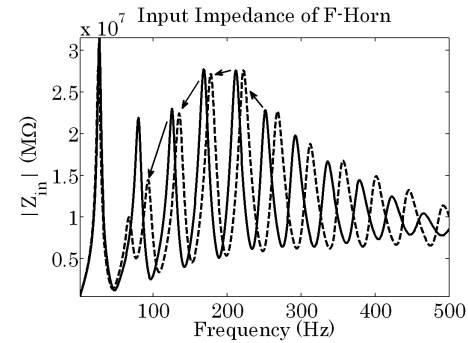


図2 入力インピーダンスの数値計算結果。
 実線：オープン、破線：ストップ

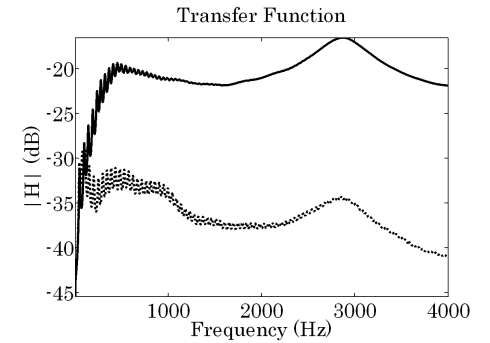


図3 伝達関数の数値計算結果。
 実線：オープン、破線：ストップ

であり、形状は筆者が測定した。ピーク周波数は第1次ピークを除いてほぼ整数比の関係になっている。

続いてストップ状態を再現するため、右手を直径6 cmの円盤と考え、ベルから内側へ16.5 cm(内直径6.4 cm)の所へ置いた状態で同様の計算を行った。この結果を図2の破線に示す。3次以上のピーク周波数は、矢印のようにオープン状態における1次下のピーク近くまで低下している(正確には1次下のピークより半音高い)。また、第2次ピークの高さは非常に低くなっている。1次ピークの周波数は変化しない。これらは Backus and Hundley²⁾ の実験結果と一致する。

2.2 伝達関数

オープン/ストップの各状態での入力インピーダンスから伝達関数を計算した。伝達関数 H は $H = P_{bell}/P_m$ で定義される。オープンとストップでの伝達関数を図3に示す。ストップ状態での伝達関数の値がオープン状態より小さいのは手でふさいだことによりベルから放射される音圧が下がることを反映している。両者では関数形に大きな違いはなく、伝達関数が増加することによりストップ音の音色が発生しているとは考えられない。

2.3 管内音圧分布

ストップ状態で周波数が下がることを定性的に理解するため、管内音圧分布を式(1)を用いて計算した。ベルでの体積速度は典型的な値として $1 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$ とした。第4次モード (F_3 、ストップ時には C_3^{\sharp}) の結果を図4に示す。これを見るとオープン時にはマウスピース部で音圧最大、ベル部で音圧最小となっていて、[閉-開管]の構造を取っているが、ストッ

ブ状態になると、ストップ位置でも音圧最大となり、オープン時より管長の短い [閉-閉管] に近い構造に変化したことが分かる。さらに、ストップ状態での波形は [閉-閉管] の第3次モードに相当しており、オープン状態よりも波長が伸びて周波数が下がっていることが分かる。

このことを一般化すると、オープン状態で [閉-閉管] の第 n 次モードであった音は、ストップ状態では管長の短い [閉-閉管] の第 $n - 1$ 次モードとなり、[閉-閉管] から [閉-閉管] への変化・管長が短くなる効果・モードが1つ下がる効果が組み合わさって音程が下がっていると考えられる。

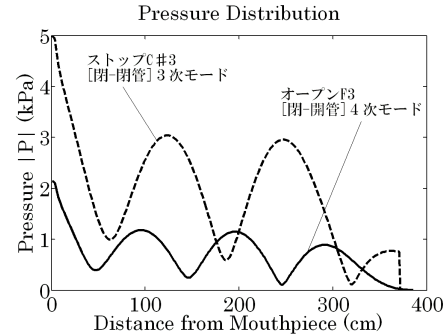


図4 管内の音圧分布。実線：オープン、破線：ストップ。

3. 吹奏シミュレーション

金管楽器における倍音は、周期的に変化する唇のインピーダンスと楽器の入力インピーダンスとの間の相互作用によって生成される⁹⁾。唇の開口幅 (低吹奏圧ではおおよそ正弦的に変化する¹⁰⁾) の関数としての唇のインピーダンスは、唇が少し開くと急激に減少するために、マウスピース音圧が正弦的ではなくなり、倍音成分を持つのである。さらに、以下に示すようにストップ状態での吹奏圧はオープン状態に比べ約2倍大きい。このような高吹奏圧状態では高いマウスピース音圧と吹奏圧により唇の動きが制限されるために振動が正弦的ではなくなり¹¹⁾、さらに倍音成分が増えると考えられる。加えて Hirschbarg *et al.*¹²⁾ は、高吹奏圧によって生まれる大きな音圧時間変化が長い円筒管を伝播する時に衝撃波が発生し、トロンボーンやトランペットの *ff* の音質に大きな影響を与えると述べており、これはホルンにおいても発生する可能性がある。

この節では、高吹奏圧によって生じるこれら2つの高次倍音生成の可能性をストップ音で検証するため、Adachi and Sato¹³⁾ による唇の2次元振動モデルを用いた数値シミュレーションを行った。

なお、以下ではストップ奏法による音色の変化を議論するので、オープンとストップで音域に近い方が良い。そこで (ホルン奏者の感覚のように) オープン状態での音と、ストップ状態でのその半音上の音 (F_3 と F_3^\sharp など) をセットにして扱うことにする。

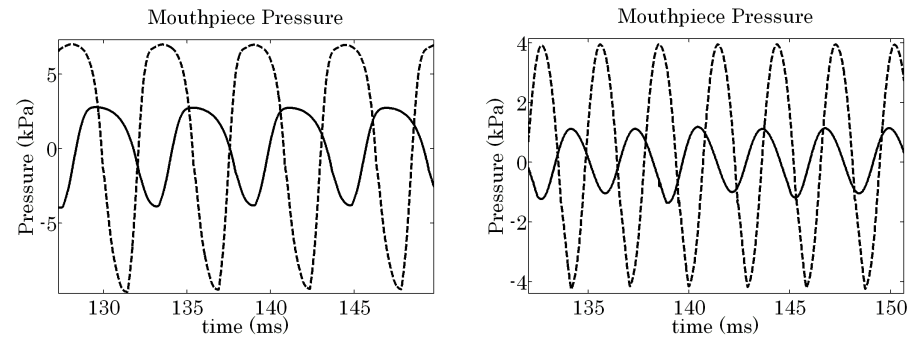


図5 吹奏シミュレーション結果。実線：オープン F_3 、吹奏圧 4kPa、破線：ストップ F_3^\sharp 、吹奏圧 8kPa
 図6 吹奏シミュレーション結果。実線：オープン F_4 、吹奏圧 4.5kPa、破線：ストップ F_4^\sharp 、吹奏圧 9kPa

3.1 ストップ状態での吹奏圧と吹奏シミュレーション結果

ホルン吹奏時における吹奏圧をマノメーターを用いてホルン経験10年のアマチュア奏者2名で測定した。測定結果を表1に示す。これよりストップ奏法時にはオープン状態よりも約2倍吹奏圧が高いことが分かる。

表1 吹奏圧の測定結果。音量は *mf*、単位は kPa である。

この結果を用いて吹奏シミュレーションを行った。Adachi and Sato¹³⁾ による唇の2次元振動モデルを使用し、オープン/ストップの各状態での入力インピーダンスから反射関数を求めて計算した。吹奏圧は測定より高めに設定した。この計算で得られたマウスピース音圧波形の安定な部分を図5と6に示す。

	F_3 (Open)	F_3^\sharp (Stop)
奏者A	2.4	4.5
奏者B	1.6	3.4
	F_4 (Open)	F_4^\sharp (Stop)
奏者A	3.6	6.4
奏者B	2.9	5.3

図5の F_3 、 F_3^\sharp での波形は非正弦性が強く現れているのに対し、図6の F_4 、 F_4^\sharp の波形は正弦波に近く、倍音成分をあまり含まない。また、それぞれの音程でオープンとストップでの違いは振幅以外にはあまり見られない。ストップ状態では高吹奏圧の影響により極小値で波形が滑らかではなく、高次成分を含んでいることが分かるが、それは実際のストップ音が含まれるものに比べてわずかである。このことからストップ状態での入力インピーダンスおよび高吹奏圧によって高次倍音が増えるという仮定は否定された。

3.2 管内衝撃波の可能性

この吹奏シミュレーションの結果から、管内での衝撃波の発生の可能性について議論することができる。Hirschbarg *et al.*¹²⁾ によれば、マウスピース内音圧の時間変化の最大値

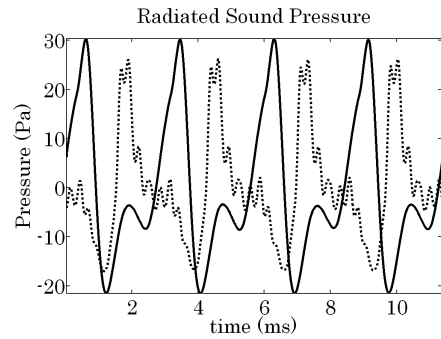


図7 放射音圧の時間変化。
実線：オープン F₄、破線：ストップ F₄[#](10倍)

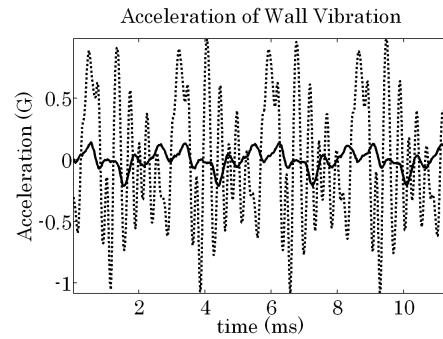


図8 管壁振動の加速度の時間変化。
実線：オープン F₄、破線：ストップ F₄[#]

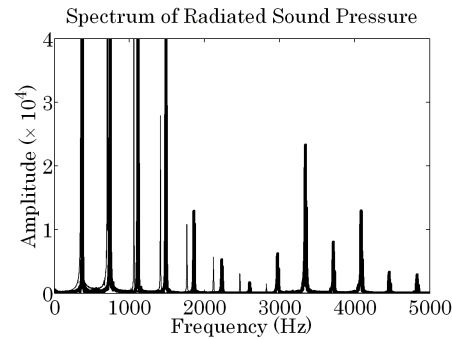


図9 放射音のスペクトラム (拡大図)。
細線：オープン F₄、太線：ストップ F₄[#]。基音の振幅が等しくなるよう、ストップを約 15 倍している。

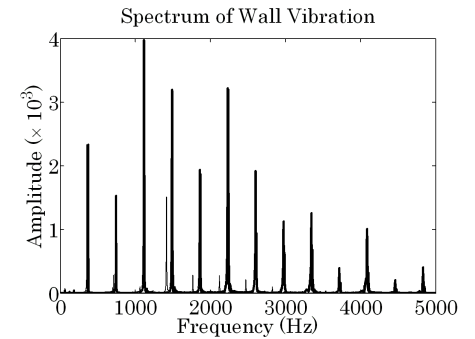


図10 管壁振動のスペクトラム。細線：オープン F₄、太線：ストップ F₄[#]。基音の振幅が等しくなるよう、オープンを約 1.7 倍している。

$M = \left(\frac{\partial P_m}{\partial t} \right)_{max}$ に対して、臨界距離 $x_s = \frac{2\gamma P_{at} c}{(\gamma + 1)M}$ を上回る長さの円筒管があると、管内衝撃波が発生する。ここで $\gamma = 1.4$ は比熱比、 P_{at} は大気圧、 c は音速である。つまり、 M が大きいほど x_s が小さくなり、短い円筒管で衝撃波が発生するようになる。ストップ状態の F₃[#] でのシミュレーション結果をこの式に代入すると、 $M = 1.4 \times 10^7$ (Pa/s) より $x_s = 2.8$ m となる。使用したナチュラルホルンの円筒部分は 1.8 m なので、衝撃波は発生しないことが示された。

4. 管壁振動の測定と解析

ストップ音を作る3つ目の可能性として、ストップ状態にしたことでベル部で音圧が高くなる (図4参照) ことで管壁振動が励起されることを考えた。Kausel *et al.*⁶⁾ は管壁振動の振幅 s について、 $s = p \frac{r^2}{Et \cos^3 \phi} \dots (3)$ という関係を導いた。ここに p は s の測定部分での管内瞬時最大音圧、 r は管内半径、 E はヤング率、 t は管壁の厚さ、 ϕ は円錐管の広がり角である。ベル部では ϕ が大きく管壁も薄いため、管壁振動が起こりやすい。しかし通常はベル部での音圧が小さいのでその振幅は小さくなる。これに対しストップ奏法では内部音圧も高いため、大きな管壁振動が起こると予想される。この節ではストップ音を録音・解析すると共に、加速度ピックアップで管壁振動を測定した実験からこの仮説を検証する。

4.1 放射音・管壁振動の測定

測定は無響室で行い、ベルから約 15 cm にマイクを置いた。また、ベルに両面テープで加速度ピックアップを固定した。2つの信号はメジャーリングアンプ、オーディオインターフェイスを通してサンプリング周波数 44.1kHz で PC に取り込んだ。奏者は表1の奏者Aであり、オープン状態で C₃, F₃, C₄, F₄ を、ストップ状態でその半音上の音を F 管の開放運指でそれぞれ約 4 秒間吹奏した。音量は *p*、*mf*、*ff* の3段階で吹き分けた。ホルンは2節で用いた F 管ナチュラルホルンである。

図7、8に *mf* で吹いた F₄(オープン)、F₄[#](ストップ)での音圧波形および管壁振動の振幅を示す。図7のストップ状態での音圧は10倍して示している。ストップ状態の音圧波形にはオープン状態に比べ、高次倍音が非常に多く含まれていることが分かる。強調すべきは、ストップ状態では音圧が約 1/10 に減少するのに対して加速度は約 10 倍に増大していることである。これはストップ状態にすることによって管壁振動が強く励起されていることを示している。

4.2 実験データの解析

この実験データについて周波数分析を行った。*mf* で吹奏した F₄(オープン)、F₄[#](ストップ)の音圧・加速度両データからトランジェントと減衰を除いた部分を取り出してフーリエ変換を行った。この結果得られたスペクトラムを図9、10に示す。両データとも、ストップ状態で 2~4kHz の成分が強く出ていることが分かる。これらのピーク周波数は音圧と加

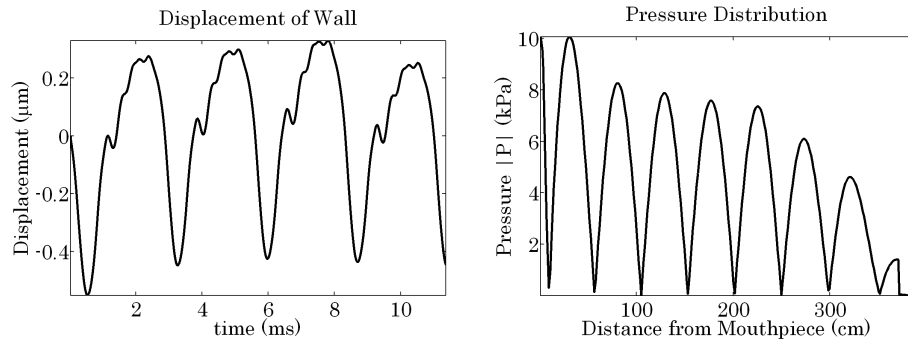


図 11 測定した加速度から求めた、管壁振動の振幅の時間変化。 図 12 ストップ状態、 F_4^{\sharp} における管内音圧分布。ベル部での体積速度を $U = 1.3 \times 10^3 (\text{m}^3/\text{s})$ とした。

速度で一致しており、また吹奏音の整数倍の周波数となっている。このような管壁振動による高次倍音成分が金属的な音色の原因である。

また、管壁振動においてオープン状態でも 1.5~2.5kHz に比較的大きな成分があることから、一般的な金管楽器における管壁振動においても、高次の周波数が励起されることが分かった。

4.3 理論式による実験結果の評価

最後に、Kausel *et al.*⁶⁾ による式 (3) と今回の実験の整合性について議論する。まず、図 8 に破線で示した加速度ピックアップの測定結果を 2 回積分することで管壁振動の振幅 s を求めることができる。この結果を図 11 に示す。振幅は約 $0.3 \mu\text{m}$ であることが分かった。

一方、図 7 で得られたストップ状態での音圧波形からベル部での体積速度が求められ、それを用いて 2.3 節で示した管内圧力分布を計算することで、ストップ位置での管内瞬時最大音圧 p を求めることができ、式 (3) によって管壁振動の振幅 s を計算できる。図 7 破線の最大音圧は 2.6Pa であり、これよりベル部での体積速度は $U = 1.3 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$ と求まる。これを用いて F_4^{\sharp} での管内音圧分布を計算すると図 12 を得る。これから、ストップ位置 ($x = 370 \text{ cm}$) での管内瞬時最大音圧は $p = 1.4 \text{ kPa}$ であり、 $r = 3.2 \text{ cm}$ 、 $E = 100 \text{ GPa}$ 、 $t = 0.5 \text{ mm}$ 、 $\phi = 8.5^\circ$ と共に式 (3) へ代入すると $s = 0.030 \mu\text{m}$ を得る。これは測定に基づいて図 12 で得られた振幅よりも 1 桁小さい値である。この不一致については実験の正当性、Kausel の理論式の妥当性の両面から検討する必要がある。

5. ま と め

本研究ではホルンのストップ奏法における金属的な音色の原因について考察した。入力インピーダンスと伝達関数、唇の非正弦振動と管内衝撃波、ベル部の管壁振動、の 3 つの観点から数値シミュレーションおよび実験を行い、ベル部の管壁振動によって高次倍音が生成され、金属的な音色が生じていることを明らかにした。管壁振動の振幅に関して、Kausel の式との不一致が生じていることは今後の課題であり、さらなる実験および理論的検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) ファーカス, P. 著、守山光三訳 フレンチ・ホルン演奏技法、全音楽譜出版社 (1995)
- 2) Backus, J. : Input impedance curves for the brass instruments, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 60, No.2, pp.470-480(1976)
- 3) Miller, D. C. : The influence of the material of wind-instruments on the tone quality, *Science*, Vol. 29 pp.161-171(1909)
- 4) Backus, J. and Hundley, T. C. : Wall Vibrations in Flue Organ Pipes and Their Effect on Tone, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 39, No. 5, pp.936-945(1965)
- 5) Yoshikawa, S. : Energy dissipation in underwater and aerial organ pipes, *J. Acoust. Soc. Jpn.*, Vol. 6, pp.181-192(1985)
- 6) Kausel, W., Zietow, D. W. and Moore, T. R. : Influence of wall vibration on the sound of brass wind instruments, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.128, No.5, pp.3161-3174(2010)
- 7) Caussé, R., Kergomard, J. and Lurton, X., : Input impedance of brass musical instruments - comparison between experiment and numerical models, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 75, No.1, pp.241-254(1984)
- 8) Mapes-Riordan, D. : Horn Moderating with Conical and Cylindrical Transmission-Line Elements, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 41, No. 6, pp.471-484(1993)
- 9) Backus, J. and Hundley T. C. : Harmonic Generation in the Trumpet, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 49 No. 2 pp.509-519(1970)
- 10) Martin, D. W. : Lip Vibration in a Cornet Mouthpiece, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 13 No. 1 pp.305-308(1942)
- 11) フレッチャー N. H.、ロッシング T. D. 著、岸憲史、久保田秀美、吉川茂訳 : 楽器の物理学、シュプリングァーフェアラーク東京 (2002)
- 12) Hirschberg, A., Gilbert, J., Msallam, R. and Wijnands, A. P. : Shock waves in trombones *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 99, No. 3, pp.1754-1758(1996)
- 13) Adachi, S. and Sato, M. : Trumpet sound simulation using a two-dimensional lip vibration model, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 99, No. 2, pp.1200-1209(1996)