

1. 音圧と伝達関数

Fig. 2-1において、原点0にある音源からの進行波に基づいて発生する反射波も加え、それらが 管内往復を繰り返す立ち上がり期間を経て、やがて定常状態になったときを考えるとして、音響管要 素の一端Iにおける、ある周波数の音圧既知の音波から、他端IIにおける音圧を算出する。



Fig. 2-1 音響管要素

ここで音響管の端部から数えてi番目にある音響管要素の音圧の伝達関数をGM_i(ω)とすると

 $GM_{i}(\omega) = \frac{p(x_{2})}{p(x_{1})} = \frac{x_{1}}{x_{2}} \frac{\sinh(\varphi_{1} + jkl + \alpha(l))}{\sinh(\varphi_{1})}$ $p(x_{2}) = p(x_{1}) \times GM_{i}(\omega)$

(2.9)

と表わされる。音響管がn個の要素からなるとすると,音響管要素全体の音圧の伝達関数は

 $G(\omega) = \prod_{i=1}^{n} GM_{i}(\omega)$

(2.10)

となる。 ここで、**隣り合う要素断面の音圧は等しい**ので次の関係が保たれる。 $p_{i-1}(x_2) = p_i(x_1), p_i(x_2) = p_{i+1}(x_1)$

2. キャビティ・レゾナンスの解析

音響管理論と管体のモデル化精度を検証するために,まず従来のキャビティ・レゾ ナンスの手法により,マウスピースを含んだ楽器全体の音響管としての共振特性を解析 する。

2.1 キャビティ・レゾナンス計測実験によるモデル化精度の確認

キャビティ・レゾナンス実験では、管体の唄口端部にマイクロホンを密閉状態に装着して閉端とし、 開口端から一定音圧の正弦波を入射する。フィードバック用のマイクロホン(Compressor Mic.)はキャ ビティに入射する音圧を一定に保つ目的で、測定された音圧を駆動源にフィードバックするためのも のである。入射する正弦波の周波数を一定速度で掃引して、閉端部のマイクロホンで観測される音圧 が極大値を示す周波数を共振周波数とする。ここでは実験による実測と計算の両面からモデル化精度 を検証

する。



Fig. 2-2 キャビティ・レゾナンス計測実験システム図 図中, B.F.O. はうなり周波数発生

トランペットのモデル管体でいずれのピストンも押されていない場合(オープン運 指)の共振特性の音圧の計算値(実線で示した曲線,レゾナンスカーブ)と実験系に より観測される共振点(極大値)と谷(極小値)の音圧実測値(+印)をFig. 2-3 に示す。



Fig. 2-3 レゾナンスカーブ(音圧計算値)と共振点と谷の音圧実測値(+印)

計算条件は

• (2.3) 式で $r = 3.0 \times 10^{-4}$ とする。

- ベル開口部から一定音圧の正弦波を入射し、唄口閉端部の音圧の周波数特性を算出。
- ・唄口閉端部は弾性薄板で閉じている。
- ベル開口端の境界条件は無限大バッフル面内のピストン運動に仮定する。
 計算値と実測値では、

音圧の極大値を示す周波数が音響管の定在波(各共振モード)の共振周波数であり、共振 点は周波数軸上にほぼ整数倍に並ぶ。しかし実奏時の音高はこの共振周波数とは必ずし も一致しない。図に示すように唄口閉端部の音圧の周波数特性の計算値と実測値の一致 度は高く、モデル化精度と解析方法が妥当であると言える。

3. ポッピング音の解析と音圧伝達特性の算出によるモデル化精度の確認

ここではさらに,

唄口端を手の平でポンと打つ時のポッピング音を分析して,実測と音圧伝達特性の算出の両面 からモデル化精度を検証する。

計算値は唄口端部から一定音圧の正弦波を入射したときの,開口端部の放射音圧の周波 数特性である。計算では(2.3)式で $r = 1.0 \times 10^{-4}$ として,唄口閉端部はリジッドに閉 じている。開口端の境界条件は無限大バッフル面内のピストン運動に仮定する。

実測値は唄口端からのインパルス入力に対する出口音を FFT 分析した音圧伝達特性である。インパルス入力はすべての音圧周波数成分を均等に含むと仮定すれば計算値と実測値が一致すると予想される。

解析は3種類のマウスピースに対して、マウスピース単体と管体全体について行った。



3.1 管体のモデル化

ここでは C 管の管体を円錐台要素の組み合わせとしてモデル化する。 マウスピースは標準的な形状のもの「3 C」と,カップを深くしたもの「1 A」と,浅くしたもの「9 E」の 3 種類を使った。

Fig. 2-4 管体形状のモデル化



Fig. 2-5 実験に使用したマウスピースの形状; 左から「3 C」, 「1 A」, 「9 E」

3.2 ポッピング音の解析

トランペットの C 管のモデル管体「C02」で,いずれのピストンも押されていない場合(オープン運指;(0.0.0))の音圧の伝達特性の(2.10)式による計算例を(a)に示す。



(a) M.P.を含む管体全体の音圧伝達特性計算値;C 管(0.0.0) 系列 1,2,3 はマウスピース「3C」、「1A」、「9E」に対応する。

ここではマウスピース単体の音圧の伝達特性の計算例(c)とポッピング音の実測例(d) を示す。計算例は3種類のマウスピースについて示す。F1,F2は1次と2次の共振周波数 を示す。実測例はM.P.単体のポッピング音のFFT分析例を示す。太い実線は包絡線を示 す。F1,F2は抱絡線のピークの周波数を示す。L1はF1のピークと次の谷のレベルの差 とする。

マウスピース単体のポッピング音には4 kHz までに2つの共振ピークが見られるが, モデル化精度について更に詳細に評価するために計算値と実測値がほぼ対応している第 1次共振に注目して F1 の周波数とそのレベル L1 について解析してみた。

F1の周波数は1A<3C<9Eの順に高くなり820Hz,741Hz,933Hz で、マウスピースのカッ プの容量が小さいほど周波数は高くなる。レベルL1についても計算値と実測値ともに1A< 3C<9Eの順に高くなる。すなわち9Eのポッピング音はピッチが高く音量が大きいと言え る。



(d) M.P.単体のポッピング音の実測例

太い実線は包絡線を示す。 F1,F2 はフォルマント(抱絡線のピーク)周波数を示す。 F1の周波数の実測値は計算値よりそれぞれ高めとなるがこれは唄口端を手の平で打つた めに実効的な閉端面がカップ内に入り込んでカップ容量が減るためにマウスピースの実効長 が変わるためである。例えば標準的なマウスピースである「3 C」の場合には実測値 F1 は 843Hz であり、これはカップの実効的な閉端面をカップ側に 1.3mm 詰めた状態の F1 の計算 値と一致する。

以上,特に断面形状変化が大きいマウスピースのポッピング音の解析に音圧伝達特性理論 を適用して,理論の有効性とモデル化精度の妥当性が確認できた。

プレーヤや製作者はポッピング音により楽器の響きやマウスピースの特徴をチェックすること がある。入力条件が不明確で再現性の低いポッピング音の観測に代わって、ここで示した音圧 の伝達特性の解析により音響特性を厳密に推定し、評価することができる。インパルスレス ポンス解析が音響特性解析のために有用であることが検証された。