ダクト内の空洞部による音の低減*

椿 下 庸 二^{*1}, 島 野 嘉 樹^{*2}, 吉 川 孝 雄^{*3}

Sound Reduction by Cavities in a Duct

Yasuji TSUBAKISHITA, Yoshiki SHIMANO and Takao YOSHIKAWA

A numerical analysis is developed for sound reduction by cavities in a duct, focusing on the effect of cavity length on the transmitted sound. A linearized unsteady Euler equation for acoustic disturbances is solved by a finite difference scheme to obtain the multidimensional structures of the entire sound field. The validity of the present method is verified using a solution based on the plane wave theory and an available analytical solution. The present results show that the level of transmitted sound is reduced at specific values of the cavity length, with tendencies opposite those obtained using the plane wave theory. The results also indicate that a series of cavities yields a more effective reduction of the transmitted sound level.

Key Words: Compressible Flow, Numerical Analysis, Wave, Unsteady Flow, Finite Difference Method, Duct Acoustic, Sound Reduction

1. ま え が き

空洞形消音器については、従来より多くの研究がなされている。例えば、膨張形の段付き管に対する池谷らの一連の理論的研究⁽¹⁾⁽²⁾により、空洞部が消音器として有効であることが明らかになった。しかし、彼らの背景となる理論は平面波近似を発展させた剛体ピストン近似であったため、基本的には低周波数領域の適用に制限されていた。空洞部の寸法が波長と同程度となって高次モードの効果があらわれる場合には、これらの理論は適用できず厳密な多次元モデルとして解析する必要がある。

著者らは先に、空洞部をもつダクト内部音場特性への空洞部半径および平均流れの影響について時間二次・空間四次精度差分法を用いて数値解析した⁽³⁾。その結果、空洞部半径に基づく波数パラメータが3.8, 7.0などのように円管内音波のカットオフ周波数に対応する空洞部半径の値に対し、空洞部が透過波の音圧レベル低減に非常に効果があることがわかった。

本報では、まず池谷らのモデルと同一条件で計算を行い低周波数領域において本計算法の有効性を明らかにする。次に、高次モードのあらわれる周波数領域に対する音圧レベルおよび音響インテンシティの詳細な分布を数値計算で求め、それらに基づき空洞部をもつダクト内部音場特性への空洞部の長さおよび空洞部が複数個の場合の効果について報告する。

2. 数 値 計 算 法

2・1 計算モデル 簡単のため音場を軸対称と仮定する。数値計算モデルとして、図1に示すように一

Fig. 1 Computational model

* 原稿受付 1995年7月31日。

^{*1} 正員、中部大学工学部 (〒487 春日井市松本町1200)。^{*2} 日本オラクル(株) (〒154 東京都世田谷区弦巻3-9-22)。^{*3} 正員、大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-3)。

部に空洞部をもつ十分長い円筒ダクトを考える。したがって、ダクトの遠方端からの反射は考えなくてよい。ダクト内部には圧縮非粘性の垂音速流れが左から右へ流れていると仮定する。本論文では、平板あるいはピストンなどを振動させて音波を発生させるのではなく、空洞部の下流の適当な位置で微小な質量のわき出し吸込みを行うことによりじょう乱としての音波が発生し、それが垂音速流れに逆らって伝ばしていくとする。音波は空洞部のようなダクト径の不連続部を通過する際、その一部が反射する。この反射波は一般には高次モードを含んでいる。本論文ではダクト部分の半径を波長に比べ適度に小さくとり、平面波モードの音波のみが伝ばするように選んでいる。したがって、不連続部から離れるに従い反射波の高次モードは減衰する。音源側のダクト部分では音源からの入射波と不連続部からの反射波の干渉により、定在波の状態になる。ただし、不連続部のすぐ近傍のダクト部では、高次モードの音波を含むため音場は様ではないことに注意すべきである。この点が、いわゆる剛体ピストン近似との相違点である。一方、空洞部より上流では、透過波のみとなり平面波として無限上流へと伝ばしていく。

音場の基礎式、境界条件および数値スキームについては別に述べている⁽⁴⁾のでここでは概略のみにする。音場に対する基礎方程式は圧縮非粘性のオイラー方程式に等エントロピー流れを仮定して得られる。一般に、音波によるじょう乱は時間的な平均の流れ場と比較して十分小さいと仮定できるので、密度、圧力、速度成分を平均の量と微小じょう乱の項に分け、各物理量をオイラー方程式および等エントロピーの関係式に代入し、二次以上の微小項を無視すると音の伝ばに関する連立線形方程式が導かれる。なお本論文では方法の拡張性を考え、実際には一般曲線座標上で定式化を行っている。上述のように、音源は微小な質量流量の周期的わき出し吸込みで与え、これによりじょう乱としての音波が発生する。音源領域は音源位置を中心に数メッシュとし波長に対して十分小さく取っている。ただし、半径方向には一様とした。

ダクト固定壁面上の境界条件は壁の接線方向に対する速度成分については内部からの補外、壁に垂直方向の速度成分は零と与えた。これらの条件と壁上での運動量の式から音圧に対する関係式が導出される。最後に等エントロピーの条件より、壁上での変動密度が与えられる。遠方境界条件についてはリーマン不変量に基づく方法など種々の方法⁽⁵⁾が提案されているが、ここでは後述するように計算領域を十分大きく取り外部

境界からの反射波が計算時間内に興味ある領域に到達しないという方法を採用した。

2・2 計算条件 本計算では、平均流れのない場合の波長 λ に対するダクト半径 a_0 の比として定義される無次元波数パラメータ $ka_0(=2\pi a_0/\lambda)$ は2、また、後述する理由から、空洞部半径 a に対する無次元波数パラメータ ka は3.8で固定した。これに対して、空洞部長さ l を $l/\lambda=0.25\sim 1.25$ と変化させた。また音源の強さは128 dBで、その位置は空洞部の2波長下流とした。

軸方向の計算領域は $-190 \leq x/a_0 \leq 190$ とする。これにより、計算領域外端が音源の60波長遠方となり、計算時間内にじょう乱が到達しない。計算格子は軸方向に4000点、半径方向にはダクト部で13点、空洞部でさらに45点与えている。単一空洞をもつダクトに対する以前の研究⁽³⁾に比べ、計算領域および格子点数はダクトの軸方向に約4倍程度となっている。これは本計算のように複数個の空洞部では、断面積不連続における反射が増えるため、音場が定常状態におちつくまでに計算時間がかかり、その結果計算領域を大きくする必要があるのである。なお、格子は不等間隔で与え、空洞部付近では反射や回折により音場の変化が大きいことを考慮し、 x 方向に1波長当たり40点以上の格子点を確保している。時間間隔は、陽的差分法としての安定条件を満足すると同時に時間方向の精度を保つように、1周期当たり240タイムステップとった。計算はすべて16周期まで行った。

3. 計算結果

本論文では、平均流れのない場合の結果のみ報告する。

3・1 単一空洞で低周波数の場合 池谷らは消音器で利用されている膨張形円筒形導波管内部を考えた。入射円管B、中央部円管A、出力円管Dの内径をそれぞれ $2b, 2a, 2d$ とし、入射波として正弦的に変化する平面進行波を与え、円管内音場を軸対称モードの一次結合で展開し解析的に解を得ている。本計算法との比較の一例として、図2に、 $ka \leq 3$ で空洞部長さに対して $kl=1(l/\lambda=0.16)$ の場合における、入射平面波の音圧の振幅を1とした場合の軸上音圧を示す。両者の一致はかなり良好である。ただし、彼らによる解析解では半径方向の粒子速度成分を無視しているため、空洞部半径に基づく波数パラメータの範囲が $ka=3$ 程度までという限界がある。いずれにしても、このような平面波近似のほぼ成立するような低周波数領域については、池谷らの解法も十分適用できることを示し

Fig. 2 Pressure amplitude distribution along axis.
($b/a = 0.7$, $d/a = 0.5$, $kl = 1$)

ている。

次に、平面波近似の成立し $b = d$ の場合、空洞部における透過波の音圧レベルの減衰量 R は理論的に次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$R = 10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2(kl) \right] \quad [\text{dB}]$$

ここで、 m はダクト断面積に対する空洞部断面積の比を示す。図 3 に $ka = 1$, $ka_0 = 0.5$ で空洞部長さを変化させた場合の理論減衰量を示す。このようにダクトおよび空洞半径が十分小さく平面波モードの音波のみ管内を伝ばする場合の特徴は、空洞部長さが半波長の整数倍のとき透過減衰がなく、 $l/\lambda = 0.25, 0.75, \dots$ のときに減衰量が最も大きい。図 3 には、本数値計算結果も示す。計算結果は理論値に定量的によく一致している。

3・2 高次モードを含む単一空洞の場合 著者らは以前、膨張形消音器の透過減衰特性に対する空洞部半径の影響を数値解析して調べた⁽³⁾。その結果、図 4 に示すように、平面波理論では透過減衰特性において空洞部半径増加とともに減衰量が単調に増加する。これに対し、本計算のように多次元音場解析に基づく場合には、波数パラメータが 3.8, 7.0 のように円管内音波の一次および二次のカットオフ周波数に対応する空洞部半径の値に対し、透過波の音圧レベルがかなり低減することがわかった。そこで、ダクト部では平面波のみが伝ばするようなダクト半径であるが、空洞部ではその半径が一次のカットオフ周波数に対応した ka

Fig. 3 Comparison between computed and theoretical⁽⁶⁾ transmission loss

Fig. 4 Effect of cavity radius on transmission loss
($kl = 3.8$)

$= 3.8$ である計算を行った。本論文では空洞部長さの音場特性への影響に注目しているため、空洞部長さを、 $0.25 \leq l/\lambda \leq 1.25$ の範囲で変化させた。 $l/\lambda = 0.25, 0.5, 0.75$ における音圧レベル分布およびインテンシティ分布を図 5 および図 6 に示す。 $l/\lambda = 0.5$ の場合、空洞部入口付近を軸方向で見ると壁面でレベルが高く中央部付近で逆にレベルが低くなっている。これは管内の共鳴現象において、管端が閉じていて入口端で板が振動している場合の音場と類似している。このような場合、管の長さが半波長の整数倍のときに共鳴がおこることが知られている⁽⁷⁾。図 7 に空洞部における透過減衰特性を、図 8 に軸上音圧レベルを示す。図 7 より、空洞部長さが半波長の整数倍の場合、透過側の音圧レベルが低減し、逆に $1/4$ 波長の奇数倍 ($l/\lambda = 0.25, 0.75, 1.25$ など) で低減効果は小さい。空洞部長さ変化に対する透過減衰特性は半波長ごとにピークが生じている。これに対し、平面波理論では、空洞部長さが半波長の整数

Fig. 5 Effect of cavity length on sound pressure level ($ka=3.8$)

Fig. 6 Effect of cavity length on intensity ($ka=3.8$)

Fig. 7 Effect of cavity length on transmission loss ($ka=3.8$)

Fig. 8 Sound pressure level along axis ($ka=3.8$)

倍の場合、透過側の音圧レベルが低減せず、逆に $1/4$ 波長の奇数倍で低減効果は大きい。平面波理論では、空洞部長さによる位相差を考慮して入射波と反射波の干渉を考えていると考えてよい。いずれにしても透過減衰特性の最大値、最小値が逆転していることは注目値する。

3・3 複数個の空洞の場合 これまでは単一空洞

についての結果であったが、ここでは空洞部が複数の場合の結果について述べる。空洞部の個数が増加するにつれ、断面積不連続における反射が増えより複雑になる。そのため、音場が定常状態におちつくまでに計算時間および計算領域が非常に大きくなるため、現実問題としてあまり多く取れない。そこで、ここでは、空洞部の個数としては3個とした。空洞部長さを $kl=3$

(a) $ka=7$ (b) $ka=5$ Fig. 9 Contours of sound pressure level ($kl=3$)

Fig. 10 Effect of distance between two cavities on sound pressure level along axis

Fig. 11 Effect of cavities on sound pressure level along axis ($kl=3$)

で固定し、空洞間寸法 l_0 を変えた場合の SPL 分布を図 9 に、それらに対応する軸上音圧レベル分布を図 10 に示す。空洞内部の音圧レベルの分布は多少異なっているが透過側音圧レベルの結果に関しては、空洞間寸法の影響は小さい、このことは空洞間のダクト部 ($ka_0=2$) では音のエネルギーを低減させるメカニズムが特に存在しないことから予想できることである。最後に、図 11 に示すように、単一空洞でレベル低減に有効である空洞部半径(例えば $ka=7$) に対しては空洞部の個数を増やすことでレベル低減がさらに大きくなるが、透過波のレベル低減がほとんどない空洞部半径 ($ka=5$) に対しては空洞部の個数を増やしても透過側のレベル低減に効果がない。

4. 結 論

空洞部をもつダクト内部の音場が差分計算により解かれた。音圧レベルおよび音響インテンシティの詳細な分布が求められ、その結果、空洞部における音場特性が明確となった。以下に、本研究で得られた結論を示す。

(1) 平面波近似のほぼ成立するような低周波数範囲に対し、膨張形空洞消音器の理論減衰特性と非常によく一致した。またこの場合、音圧分布についても他

の解析解と定性的に一致した。

(2) 平面波近似の成り立たない周波数範囲では、空洞部長さが半波長の整数倍において、透過波の音圧レベル低減量が極大となる。このことは、平面波理論から単純に決まる減衰特性、つまり空洞部長さが半波長の整数倍で減衰量が極小となるということとは正反対の特性になっている。

(3) 単一空洞で透過減衰量が大きい場合にさらに空洞部を複数個にすると、より減衰効果は大きくなる。しかし、単一で減衰量が小さい場合には空洞部を複数にしてもほとんどその効果がない。また、空洞間

距離の透過減衰量に与える影響は、空洞部半径、長さの影響に比べ小さい。

文 献

- (1) 池谷和夫・ほか2名, 日本音響学会誌, **25** 5 (1969), 256-263.
- (2) 池谷和夫・久野和宏, 日本音響学会誌, **25** 2 (1969), 51-59.
- (3) 椿下庸二・ほか2名, 機論, **60**-576, B (1994), 2780-2784.
- (4) 椿下庸二・ほか2名, 機論, **59**-559, B (1993), 846-851.
- (5) Hayder, M. E. and Turkel, E., *AIAA Paper*, 94-2195 (1994).
- (6) 前川純一, 建築・環境音響学, (1990), 124, 共立出版.
- (7) 小橋豊, 音と音波, (1978), 102, 裳華房.