円形ダクトにおける複数の偏心スリットによる音の低減 Sound Reduction by Eccentric Slits in a Circular Duct

椿下庸二,中部大工,〒487-8501 春日井市松本町 1200, E-mail:tsub@isc.chubu.ac.jp 伊東勇樹,中部大院,〒487-8501 春日井市松本町 1200

貞本 晃,筑波技短大,〒305-0005 つくば市天久保 4-3-15, E-mail:sada@a.tsukuba-tech.ac.jp 村上芳則,筑波技短大,〒305-0005 つくば市天久保 4-3-15, E-mail:yoshi@a.tsukuba-tech.ac.jp Yasuji TSUBAKISHITA, Dept. of Mech. Eng., Chubu Univ., Kasugai, Aichi 487-8501, Japan. Yuki ITOH, Dept. of Mech. Eng., Chubu Univ., Kasugai, Aichi 487-8501, Japan.

Akira SADAMOTO, Dept. of Mech. Eng., Tsukuba College of Tech., Tsukuba, Ibaraki 305-0005, Japan. Yoshinori MURAKAMI, Dept. of Mech. Eng., Tsukuba College of Tech., Tsukuba, Ibaraki 305-0005, Japan.

The transmission characteristics of sounds in a duct with eccentric three slits are numerically analyzed and measured with various size of slits. The three-dimensional structure of sound field in the duct is computed with a finite difference method. The present results show that effective frequency range on sound attenuation becomes to be wider, compared with the case of a single eccentric slit or that of concentric three slits. The computed transmission coefficient give excellent agreement with our experimental data.

1.まえがき

円形ダクトの途中にスリット状の膨張空洞を設けると,ス リット透過側の音圧がある特定の周波数(共鳴周波数)で大 きく低減することが知られている.この共鳴周波数はスリッ ト直径によって変化し,スリット直径を大きくしていくと低 周波数側に,小さくしていくと高周波数側へ移動する.この ようなスリットは,軸方向設置スペースが小さいため流体機 械の出入口などに取り付けやすいこと,ダクト内流れに対し て流体抵抗になりにくく流体起因騒音を生じにくいことな どの利点がある.

そこで,我々はこのような形状的利点をもつスリットによ るダクト内の騒音の低減に関連して,主として二つのモデル について実験および数値解析を行ってきた^{(1)~(3)}.最初に, スリットは一つであるがダクト軸から偏心させることによ り,低周波数側および高周波数側の二つの共鳴周波数が現れ ることを示した^{(1),(2)}.次に,ダクトと同軸で複数の直径の異 なるスリットを並置した場合を考えた.その結果,共鳴周波 数の数は増えるが,各スリットの共鳴周波数が近い場合には 共鳴周波数の数はスリットの数より減少するものの,その付 近での周波数帯域では透過側音圧が十分に低減することが わかった⁽³⁾.

そこで本研究では、このような結果に基づき、さらに幅広 い周波数範囲で音の低減を図ることを目的に、偏心スリット をダクトに複数個並置したモデルを考える.特に、ここでは ダクト内部の数値計算結果に基づき、ダクト内での音場特性 およびスリット透過率の周波数特性を求め実験結果と比 較・検討する.

2.計算モデルおよび計算条件

図1に示すように,十分に長い円形ダクトがあり,その途 中に三つの偏心スリットが並置して設けられている.音源は スピーカのような振動板を振動させることで発生させるの ではなく,スリットから数波長手前の位置で微小な質量の周 期的なわき出し吸い込みを行うことにより平面波を発生さ せる.この音波はスリットを通過するとき,スリット内で反 射した音波により一部が打ち消し合い,残りが透過していく

ここではダクト直径を固定し,各スリット直径や偏心量を 変化させ,スリット透過側における音場への影響を調べる. 本計算で用いる音場の基礎方程式は非定常の三次元線形オ イラー方程式である.この方程式に対する最近の数値解法と しては, DRP 法とルンゲ・クッタ法を組み合わせた方法がよ く用いられている⁽⁴⁾.しかし,この方法の三次元問題への具 体的な適用例は少なく,計算には人工粘性項の付加が必要で ある.そこで,ここでは人工粘性項の付加の必要性がなく, 我々が従来から三次元問題にも適用してきて有効であるこ とが確かめられている空間四次・時間二次精度のマコーマッ ク形陽的差分法を用いる.なお,固定壁での境界条件の定式 化については参考文献(1)を参照していただきたい.

計算条件として,音源の位置は上記のようにスリットより 数波長手前の位置に固定して与えているが,音源位置の変化 による音場への影響はほとんど無視できる範囲,具体的には 0.1dB 程度であった.音源の強さはスリットがない場合 126dBである実験条件と一致させるため,音速を346.75m/s, ダクト直径Dを41.3mm,スリット軸方向長さを5mm,スリ ット間距離を1mmとした.スリット直径については64mm, 68mm および72mmとし,そのなかから適当な組み合わせを 選んだ.また,各スリットの偏心量 e e 1 ~ 6mm, 音源周波 数 f e 3 ~ 6.5kHz の範囲で変化させた.ダクト半径に基づく 波数パラメータ kD/2の値では 1.12 ~ 2.43の範囲となる.

単独の偏心スリットで得られる共鳴周波数の実験結果を 図2に示す.この実験結果を参考にして,三つのスリットに 対しそれぞれの偏心量を与えるのであるが,共鳴周波数の組 み合わせをどのように与えれば幅広い周波数範囲で透過率 が低減するかが重要なポイントである.複数スリットにおい て,例えば,音源側よりスリット直径 64mm,68mm,72mm の場合を 64_68_72 と略し,それぞれの偏心量 2mm,4mm, 6mmの組み合わせを246 スリットと記すことにする なお,



Fig. 1 Computational model



Fig. 2 Measured resonant frequency for single eccentric slit²)



Fig. 3 Comparison of calculated transmission coefficients for eccentric three slits with measured ones

このように正の数を三つ併記した場合,三つのスリットは同 一方向に偏心している.

計算は,スリット部を含め興味ある領域での音圧レベルが 定常となるまで行った.計算領域としては,計算時間内に擾 乱が外乱計算境界に到達しないように十分大きくとってい る.

3.計算結果

スリット直径がすべて 72mm の 72_72_72 の 026 スリット およびスリット直径が異なる 64_68_72 の 410 スリットにお ける透過率の周波数特性を実験値と比較して図 3 に示す.計 算値はいずれの場合も実験結果とよく一致しており,他の計 算例についてもほぼ同程度の一致を示し,今回の計算の信頼 性は十分であるといえる.

3.1 スリット直径が同一の場合 この節では、72_72_72 の場合の結果を示す。図4の単独偏心スリットと複数偏心ス リットの比較より、スリットを複数設置することによって消 音効果のある周波数範囲が広がることが明らかである。図5 に246スリットの音圧レベル分布を各周波数に対して示して いる.透過率の極小値となる周波数で透過側の音圧レベルが 低くなっている.また、ここでの音速やダクト内径に対し、 高次のモード波は4.9kHz以上で減衰しないことが理論から 求められる.計算結果より、この付近の周波数以上で、音源 側および透過側で高次モードの音場ができている。参考とし て、図6に各スリット断面内音圧レベル分布を示しておく.



Fig.4 Calculated transmission coefficient for eccentric three slits compared with that of corresponding single slit



Fig. 5 SPL distribution for 246 slit of 72_72_72



Fig. 6 SPL distribution on cross sections for 246 slit of 72_72_72

図7に72_72_72における透過率の特性の一例を示しておく. 定性的にはいずれも似かよった特性で,低周波数側での透過 率の低減は小さく,狭い通過帯域が生じる傾向にある.

3.2 スリット直径が異なる場合 次に,スリット直径が 異なる場合の結果を示す.ここでは,64_68_72の場合につい ての結果を示す.図8に,各スリットが単独にある場合の共



Fig. 7 Transmission coefficient for 72_72_72 slit



Fig. 8 Resonant frequencies of single eccentric slit composing eccentric 64_68_72 slit

鳴周波数をプロットしているが、この図より Type 1 (422,044,124,424の偏心スリット)では共鳴周波数が 3.4kHz ~ 6kHz の範囲で6つ離散的にあり、一方、Type 2 (410,110,200,210の偏心スリット)では共鳴周波数が 4.1kHz ~ 6kHz の範囲で3~4 つ寄り合っている.図9はそれぞれを 並置した場合の透過率特性を示している.スリット偏心量の 組み合わせの違いによる透過率特性の変化は、Type 2 の方の、 特に4.5kHz 以下ではほとんどない.これは、Type 2 では、 図8に示したように4kHz 以下で共鳴周波数がみられないこ とによる.逆に、Type 1 での低周波数側での特性の差異は共 鳴周波数が低周波数に孤立してあるためと考えられる.なお、 410 スリットで64mm、68mm、72mmの各スリットが単独の 場合の共鳴周波数は4.3kHz 5.0kHz および5.7kHz であるが、 3.5kHz 付近で計算値、実験値とも極小値となって新たに共鳴 周波数となっていることは興味ある現象である.

3.3 偏心方向が異なる場合 これまでは三つのスリットとも偏心方向が同じであったが,スリットの偏心方向が異なる場合を考えた.図10に,スリット直径72_72_72の246スリットにおいて一つだけ逆方向に偏心させた-246,2-46および24-6スリットの場合の透過率特性を示す.各スリットの偏心量はダクト軸に対し四つの場合とも同じであるが,得られた透過率特性には大きな差異がある.各スリット相互の位置関係がかなり影響していると推察される.次に,24-6



Fig. 9 Transmission coefficient for 64_68_72 slit

スリットで スリットの順番を変えた場合に得られる透過率 の周波数特性およびそれぞれの格子分布を図 11 に示してお く 24-6 スリットと 42-6 スリットの透過率特性は似ていて, 4-62 スリットの特性が他と異なっている.なお,スリットの 順番を逆に並べた場合には,透過率特性の差異は小さかった. 3.4 音圧の時間変動 スリット直前の入射側ダクト内, スリットの入り口付近およびスリット直後の透過側ダクト 内(図 12(a)で点 A, A, B, B, C, C, D, D, Eおよ びE で示している)での音圧の時間変動の一例を図 12 に

示す.図中の,p₀およびT₀はそれぞれ空気の比熱比と標準 大気圧および周期を表す.共鳴周波数では,いずれかのスリ ット入り口での音圧変動が,A点およびA点での音圧変動 とほぼ逆位相である.これに対し,透過率が極大値となって いる周波数では,A点およびA点での音圧変動に対し各場 所の音圧変動は不規則な位相差をとる.

4.結論

偏心スリットをダクトに複数個並置することにより,幅広 い周波数範囲での音の低減の可能性について数値的および 実験的に確かめた.得られた主な結論としては以下のように なる.

(1) 単一の偏心スリットの場合に比べ,複数偏心スリットの場合の方が広い周波数範囲で透過率が低減する.

- (2) 今回の比較の範囲内では,スリットを同一方向に偏心させた場合,スリット直径が同じ場合の透過率特性はスリット直径が異なる場合の結果と定性的に同じである.
- (3) それぞれのスリットの偏心方向が異なる場合,透過率特性に大きな変化が生じ,偏心方向を適切に選ぶと通過帯域が無く広い周波数範囲で音の低減が図られる可能性を示す.
- (4) 数値計算結果はいずれの場合も,実験値と非常に良く一致した.

参考文献

- (1) 椿下,長崎,貞本,村上,機論,65-640,C(1999),pp.4660-4664.
- (2) 貞本,村上,椿下,機論,65-636,C(1999),pp.3175-3180.
- (3) 貞本,椿下,村上,機論,66-650,C(2000),pp.3283-3288.
- (4) 例えば, C.Bailly and D. Juve, AIAA J., Vol.38, No.1, Jan., 2000.



Fig. 10 Effect of eccentric direction to duct axis on transmission coefficient , 72_72_72 slit



Fig.11 Effect of alignment of three slits on transmission coefficient, 72_72_72 slit





(a) Transmission coefficient



(b) 460 slit



(c) 406 slit

Fig.12 Calculated time history of sound pressure at inlet of each slit, 72_72_72 slit