

円形空気薄膜層を壁面内に有する機械開口部からの音響放射* (能動型分布音源による消音特性)

渡部 誠二*¹, 柳本 憲作*¹, 谷藤 克也*²
坂本 秀一*², 伊藤 孝宏*³, 一宮 亮一*⁴

Sound Radiation from Ventilation Aperture with Circular Thin Air Layer Setting up Machinery Wall (Noise Attenuation by Using Active Noise Sources)

Seiji WATANABE*⁵, Kensaku YANAGIMOTO, Katsuya TANIFUJI,
Syuhichi SAKAMOTO, Takahiro ITOH and Ryohichi ICHIMIYA

*⁵ Tsuruoka National College of Technology, Dept. of Control and Information Systems,
104 Inooka Sawada, Tsuruoka-shi, Yamagata, 997-8511 Japan

This paper describes insulation characteristics of slit resonator that a single channel ANC system for silencing leakage noise at ventilation aperture of package. The circular slit resonator composed of thin air layer that is radial expansion with very short axial length was set up package wall. The circular thin air layer is driven by one to four speakers that are controlled using Filtered-X-LMS algorithm to minimize sound power at error microphone. The experimental results show that the noise reduction region spreads to the high frequency side, as the slit depth decreases. The noise reduction quantity increases, as the slit width widens. Visualization of SPL and phase on the circular slit resonator indicate that the noise reduction mechanism is the interference of control sound and noise.

Key Words: Machine Tool, Noise, Noise Control, Active Noise Control, Circular Slit Resonator, Filtered-XLMS

1. 緒 言

音源を隔離する目的で使用する各種パッケージでは、その使用目的と相反して内部冷却の必要性から、穴や換気口といった開口部を設けることが多い。このため、パッケージの遮音性能を著しく低下させる一要因となっている。

著者らは、放熱ならびに通気や通風といった目的と両立して、換気口や間げきなどの開口部における局所的な遮音・消音対策を目的に、機器壁面内に設けた円形状の空気薄膜層のアドミタンス特性を用いたスリット状共鳴器を提案してきている⁽¹⁾。そして、円形スリット状共鳴器の設計手法に指針を与えると伴に、消音効果ならびに挿入損失の特性を理論的、実験的に明らかにしてきた。

このスリット状共鳴器は、通風口と同心な開口径を持った壁厚に比べそのスリット幅が十分な薄さの寸法を特徴としたリアクティブ形の音波吸収装置である。また、このような同心な開口部を持った共鳴器は、分布型の受動消音器として動作するため音響パワーを最小化するのに大変有効であることが理論的に明らかにされている⁽²⁾。

しかしながらこの反面、消音目標が低周波数にいくほど円形空気薄膜の外径を大きくする必要があり、デザイン上の制約が生じる。また消音特性が、円形空気薄膜の共鳴点で鋭いピークを持つため、周期音であってもその周波数が大きく変動するような場合は、消音効果が小さくなる。

そこで本研究は、このスリット状共鳴器の持つ分布型の受動消音器としての特性とANCを複合することにより、開口部での遮音をアクティブに行うことを目的とした。本研究のような能動・受動型の消音を併用した研究として、Tight Coupled Monopoleを比較的小さなゲインで管路や拡張室内で作動させた音響コンダクタンスを利用した管路内騒音制御⁽³⁾や、一段膨張

* 原稿受付 2002年4月18日。

*¹ 正員, 鶴岡工業高等専門学校制御情報工学科(☎997-8511 鶴岡市井岡字沢田104)。

*² 正員, 新潟大学工学部(☎950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

*³ 正員, オリエンタルモータ(株)(☎997-0011 鶴岡市宝田3-4-10)。

*⁴ 正員, 福山大学工学部(☎729-0251 福山市学園町一番地三蔵)。

E-mail: watanabe@tsuruoka-nct.ac.jp

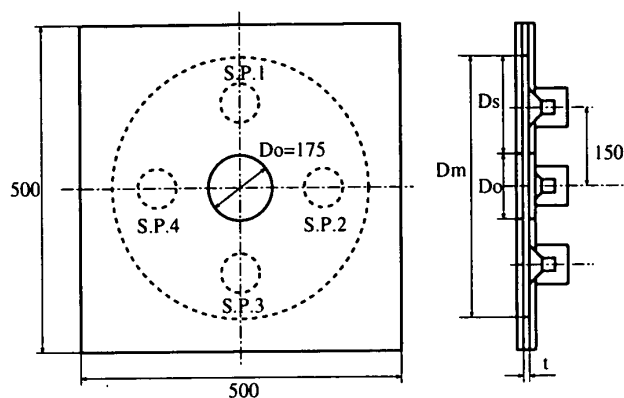


Fig. 1 Circular slit resonator with loudspeakers

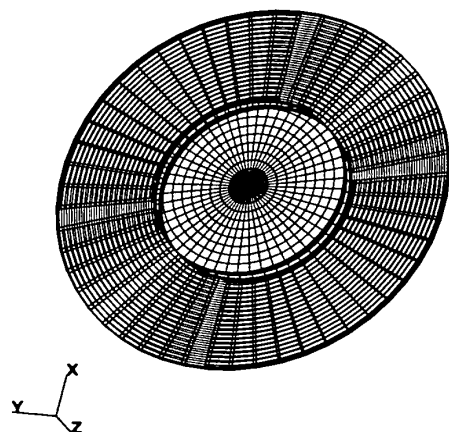


Fig. 2 BEM Model for circular slit resonator

形消音器と ANC を組み合わせた複合型アクティブマフラー⁽⁴⁾について、その有効性について明らかにされている。これらの報告は、ダクトや管路内を一次元方向に伝搬する平面波を対象としており、スリット状共鳴器や三次元空間における制御については不明な点が多い。

本報告は、スリット状共鳴器と ANC との複合化により構成される能動型の分布音源の音響放射特性ならびに消音性能、およびこの特性におよぼすスリット寸法の影響について、数値解析と実験の両面から示した。その結果、スリット形状変化による消音に有効な周波数帯域の拡張性について明らかにした。さらに、共鳴器内部の音圧・位相分布と音場との可視化を行い、本複合システムによる消音の原理を明らかにした。

2. 能動型分布音源について

2.1 スリット状共鳴器と ANC の複合化 図 1 に示したように、スリット状共鳴器には通風のための円形の開口部を持った円板状の空気薄膜が形成されている。スリット状共鳴器は、形状寸法 $\square 500\text{mm}$ 、厚さ

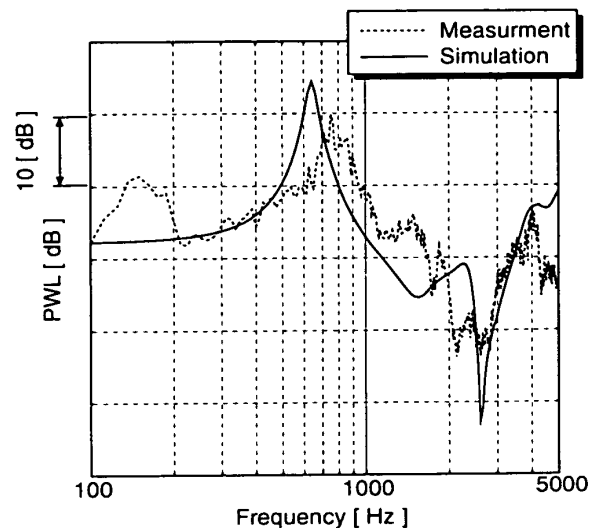


Fig. 3 Radiation characteristics of slit resonator with control speakers

8mm のアクリル樹脂製の外装パネル 2 枚により、同じく $\square 500\text{mm}$ 、厚さ t mm、穴径 D_m mm のスペースをさむことにより円板状のスリットを内部に形成している。このスリット幅 t およびスリット深さ $D_s = (D_m - D_o)/2$ を適切にチューニングすることで、目標周波数を消音する。この共鳴器は、スリット幅に対応したリング状の開口部によって消音対象となる音源を囲むため、受動型の分布音源として動作する⁽⁵⁾。提案したスリット状共鳴器は、制御スピーカにより共鳴器内部の空気薄膜を音響加振することにより、共鳴器開口部で能動型の分布音源を実現している。

2.2 分布音源の放射特性 スリット幅やスリット深さなどのスリット寸法が、分布音源の放射特性におよぼす影響を明らかにするため、境界要素法 (BEM: Boundary Element Method) による解析を行った。解析では、制御スピーカを点音源として扱っている。図 2 は解析に使用したスリット状共鳴器の BEM モデルを示している。計算値との比較を行うため、図 3 にスリット深さ $D_s = 92.5\text{mm}$ 、スリット幅 $t = 7\text{mm}$ における分布音源の放射パワーを示す。制御スピーカの個数、設置位置は図 1 に示した通りである。計算値と実測値は、100Hz において同一レベルとなるように調整してある。放射パワーの周波数特性は、円形空気薄膜の持つアドミタンス特性⁽¹⁾と一致して空気薄膜の共鳴点でピークを、反共鳴点においてその放射パワーは低下している。両者の比較から、解析結果は全体的な傾向として良い対応が得られている。実測における 150Hz 付近のピーク値は、実験に使用したスピーカの共鳴周波数によるものである。

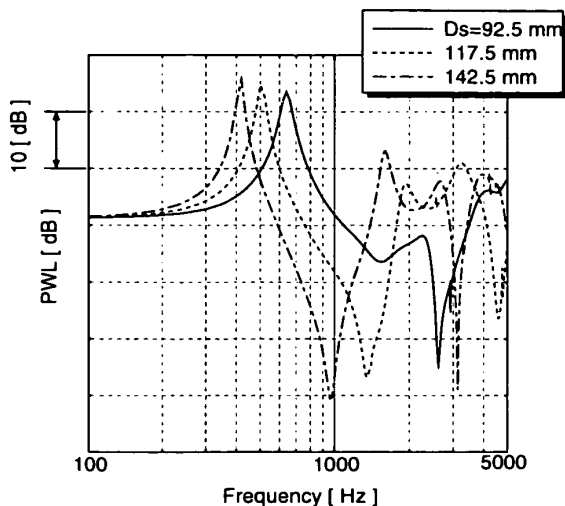


Fig. 4 Simulation results of radiation characteristics for various slit depth D_s

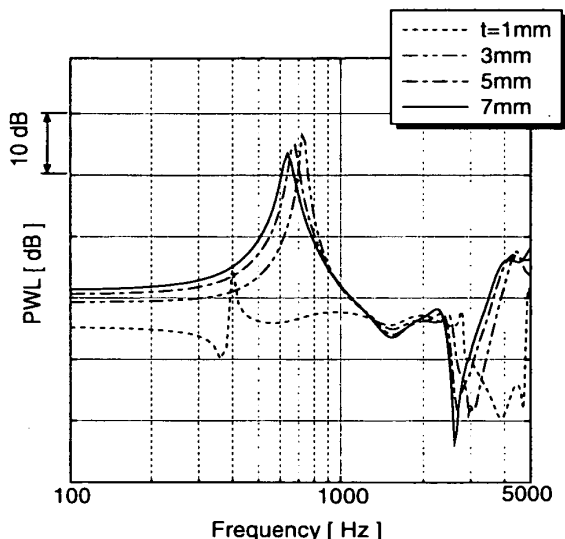


Fig. 5 Simulation results of radiation characteristics for various slit width t

図4は、スリット幅を $t=7\text{mm}$ に固定し、スリット深さを種々変化させたときの分布音源の放射パワー特性である。スリット深さが小さいほど第一共鳴点は高周波数側へシフトする。反共鳴点もまた高周波数側へシフトしており、これに伴い第一共鳴点から反共鳴点における周波数領域で、放射パワーが増大する。また、図5はスリット深さを $D_s=92.5\text{mm}$ に固定し、スリット幅を変化させたときの放射パワー特性を示している。スリット幅が 3mm から 7mm と広がるにしたがって第一共鳴点はわずかではあるが低周波数側へシフトする。また第一共鳴点より低周波数側の領域において、放射パワーが増加する傾向にある。スリット幅が 1mm

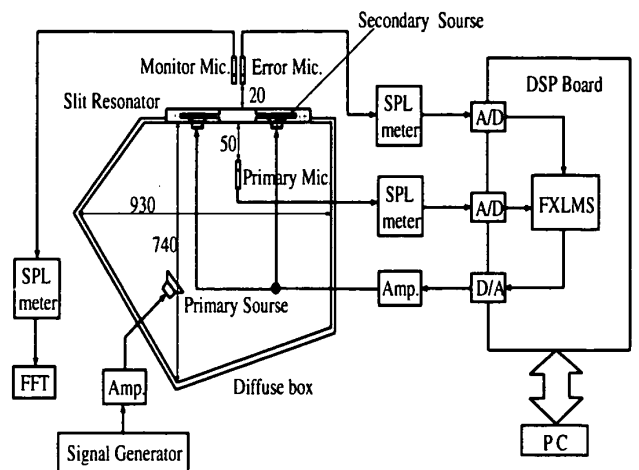


Fig. 6 Experimental system for ANC

と非常に小さい場合、放射パワーは他のスリット幅の場合に比べて小さくなっている。

3. 実験装置および方法

3.1 実験システムの構成 図6に実験システムの構成を示す。実際の機械パッケージに近い状態として拡散場からの開口放射音を制御することとした。スリット状共鳴器は、拡散室形のパッケージの前面にボルトで固定されている。拡散室は 10mm 厚の合板製で、厚さ 20mm のグラスウールを内張りし、外周面には 1.5mm 厚の遮音シートが貼られている。さらに共鳴器の前面パネルにも音の透過を防ぐために同様の遮音シートが貼られている。この開口径 175mm の穴を持った拡散室では、 257Hz 、 392Hz 、 532Hz に1次元および2次元の低次モードによる共鳴周波数がみとめられた。

制御用スピーカは、直径 83mm 、出力 10W 、振幅ならびに位相特性のほぼ等しいものを 90° 間隔でスリット状共鳴器の側面内、半径 150mm に取り付けている。拡散室の内部後方に、騒音源（一次音源）を配置した。できるだけ開口部近傍で音の放射を制御する意味で、エラーマイク（制御点）の設置はスリット状共鳴器に近い 20mm の位置とした。また、拡散室内の音波はダクト内伝搬に比べ、音源からの直接波と散乱波が開口部に入射される。このため、プライマリマイクの設置は、ANCによる消音が可能で開口部に近い 50mm の位置とした。

3.2 制御系の構成 ANCの実行は、Filtered-X Least Mean Square (FXLMS) アルゴリズム^{(6),(7)}を採用している。図7にANCによる制御系の構成を示す。図中の \hat{C}_1 と \hat{C}_2 は、それぞれ制御用スピーカからプライマリマイクまでの1次経路の伝達関数 C_1 と制御用

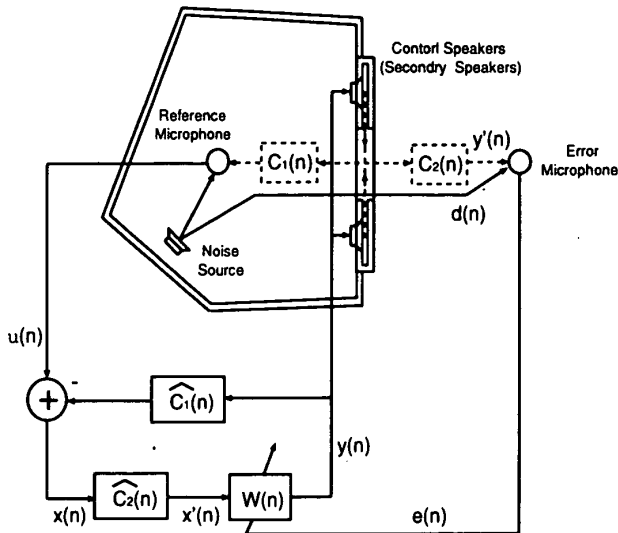


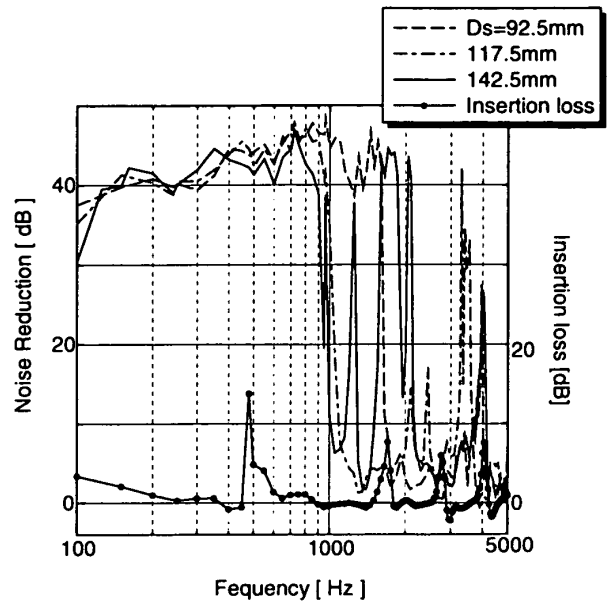
Fig. 7 Block diagram of ANC

スピーカからエラーマイクまでの2次経路の伝達関数 C_2 を推定した伝達関数である。FXLMSでは、プライマリマイクからの入力信号を $x(n)$ 、エラーマイクからの誤差信号を $e(n)$ とすれば、次式にしたがって消音フィルタの係数 $w(n)$ が更新される。

$$w(n+1) = w(n) + \mu x'(n)e(n) \quad (1)$$

ただし、 $x'(n)$ は C_2 の出力、 μ はステップサイズである。これにより、プライマリマイクからの入力信号とエラーマイクからの入力信号の二乗誤差を最小にするように制御用スピーカからの出力音が制御され、エラーマイク位置での消音が行われる。また、本アルゴリズムは、制御用スピーカからの1次経路の伝達関数が考慮されているため、ハウリングが生じにくいという特徴をもつ⁽⁸⁾。

3.3 制御実験 実験に使用した ANC システムは、2つの検出マイクと1つの制御用スピーカからなる単チャンネル ANC である。制御用スピーカは4個であるが、コントローラからの同一な出力信号で同時に駆動されている。本実験ではステップサイズを $\mu = 1 \times 10^{-6}$ 、消音フィルタならびに C_1 、 C_2 のタップ数をそれぞれ 250、サンプリング周波数を 10kHz とした。能動型分布音源からプライマリマイクおよびエラーマイクの各経路の音響伝搬特性は、あらかじめインパルス応答による FIR フィルタとして同定している。本複合システムによる消音効果の基本特性を調べるために、音源には純正弦波音を使用し、制御点での音圧レベルが 75dB と一定になるように騒音源の出力を調整してから行っている。音の測定は、消音効果を調べるために暗騒音レベル 35dB 程度の半無響室で行った。

Fig. 8 Noise reduction characteristics of slit resonator for various slit depth D_s

4. 実験結果および考察

4.1 分布音源による消音特性 図8は、スリット状共鳴器のスリット幅を7mmに固定し、スリットの深さを变化させたときの消音特性を表している。消音量は、ANC制御実行前後のときのエラーマイクで得られる音圧レベルの差としている。また、比較のために既報のスリット状共鳴器の挿入損失⁽¹⁾も示してある。同図よりANC制御実行による消音量は、150Hzから1kHz付近までの周波数帯域で連続して約40dB以上得られている。これは、エラーマイクでの音圧レベルが、暗騒音レベルまで低減していることを意味している。スリット状共鳴器 ($D_s=142.5\text{mm}$, $t=7\text{mm}$) の挿入損失と比較すると、提案装置が明らかに消音に対して効果的であることがわかる。

スリット深さに対する消音効果への影響を示すと、スリット深さが $D_s=142.5\text{mm}$ の場合、700Hz付近をピークに消音量が減少してきているのに対して、 $D_s=92.5\text{mm}$ の場合では1.6kHz付近まで消音が連続しており、スリット深さが小さいほど高周波数側へ消音領域が広がってゆく傾向にある。これは図4に示したシミュレーションの結果から、スリット深さが小さいほど、第一共鳴点および反共鳴点が高周波数側へシフトしており、これに伴って1kHz前後の音圧レベルはスリット深さが小さいほど上昇している。このため、スリット深さが小さい共鳴器では、1kHzから1.6kHzの範囲においても発音能力が高くなり、高い消音量が達成されたものと推測される。

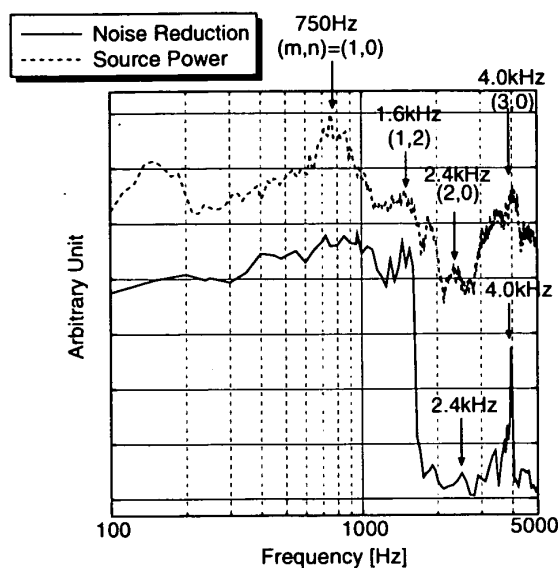


Fig. 9 Compared with characteristics of noise reduction and sound source ($D_s=92.5\text{mm}$ and $t=7\text{mm}$)

一方、連続して高い消音量を維持している領域より高周波数域では、不連続にスリット状共鳴器の共鳴周波数に一致して高い消音量を示している。図9は一例として、スリット深さ $D_s=92.5\text{mm}$ 、スリット幅 $t=7\text{mm}$ のスリット形状による分布音源の放射特性と ANC による消音性能を比較したものである。図中に示したように主な共鳴周波数は 750Hz 、 1.6kHz 、 2.4kHz 、 4.0kHz であり、円形空気薄膜の節円、節直径がそれぞれ $(m,n)=(1,0)$ 、 $(1,2)$ 、 $(2,0)$ 、 $(3,0)$ のモードを示している。図9から不連続な消音領域では、ANCによる消音量は $5\text{dB}\sim 28\text{dB}$ の範囲にある。共鳴周波数であっても、それぞれの周波数における放射エネルギーが異なるため、共鳴周波数 2.4kHz に比べ 4.0kHz のように発音能力の大きな周波数では、比較的高い消音量が達成されている。

図10にスリット幅を変化させたときの消音性能を示す。スリットの深さは $D_s=142.5\text{mm}$ に固定している。スリット幅が 1mm の場合では、図5に示したように他のスリット幅と比べ極端に音源の放射パワーが低いことや、空気薄膜のステイフネス^{(9),(10)}の増加により $150\text{Hz}\sim 500\text{Hz}$ の範囲で消音量は低下している。しかし、 $550\text{Hz}\sim 1.0\text{kHz}$ の範囲では、他のスリット幅における消音量と同等な高い消音量を得ている。またスリット幅が 3mm と 5mm の場合、 $200\text{Hz}\sim 315\text{Hz}$ 付近で消音量の低下がみられる。これは、 257Hz 付近が拡散室自体の共鳴点であり、残響が大きいため消音効果が飽和してしまうからと考えられる。この対策として、分

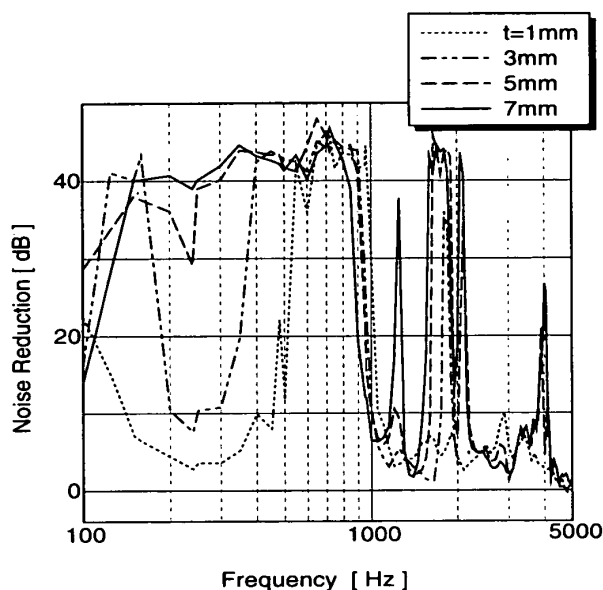


Fig. 10 Dependence of slit width t on noise reduction ($D_s=142.5\text{mm}$)

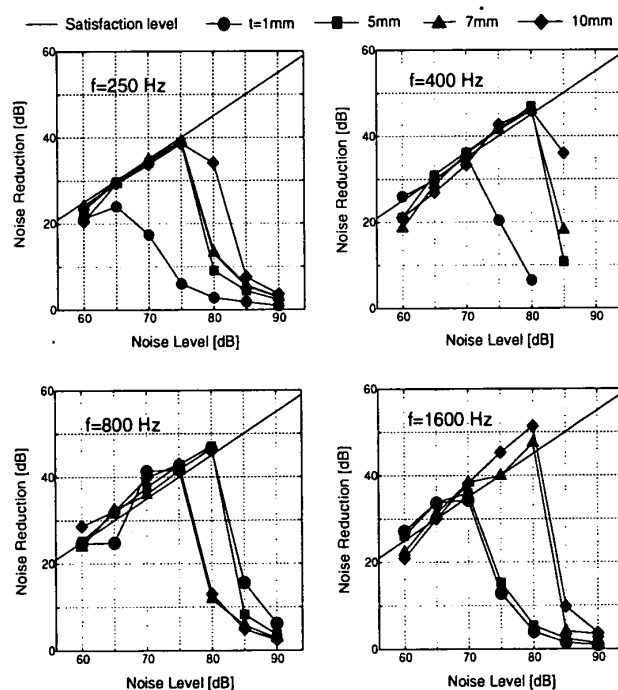


Fig. 11 Relationship between noise reduction and noise source output level

布音源の放射能力および ANC 制御における消音フィルタのタップ数を大きくすることが考えられる。

そこで、図11は制御対象となる開口部からの放射音のレベルに対する消音効果について、スリット幅をパラメータとして拡散室の共鳴周波数付近の 250Hz と

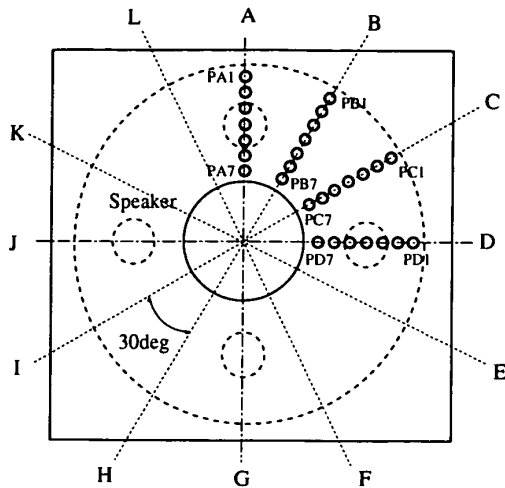


Fig. 12 Measurement points of inner sound pressure and phase

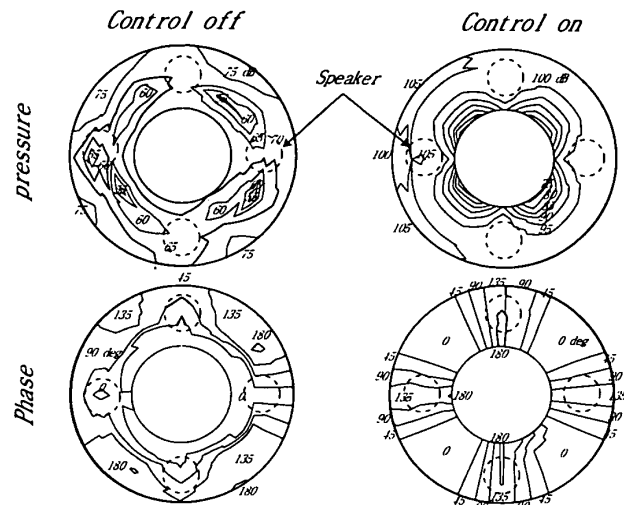


Fig. 14 Distribution of inner sound pressure level and phase at $f=1.2\text{kHz}$ ($D_s=142.5\text{mm}$, $t=7\text{mm}$)

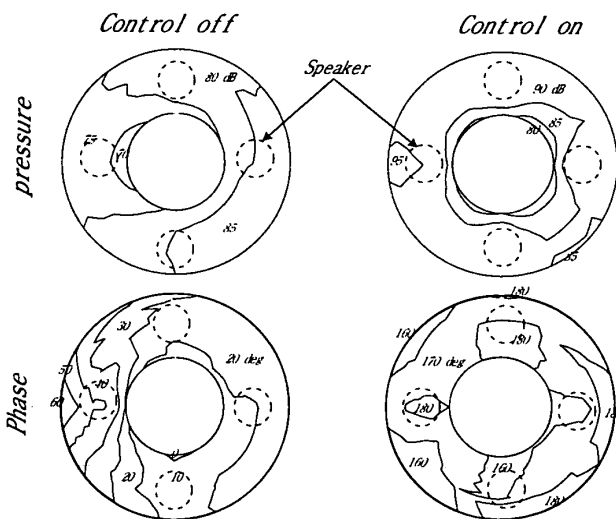


Fig. 13 Distribution of inner sound pressure level and phase at $f=480\text{Hz}$ ($D_s=142.5\text{mm}$, $t=7\text{mm}$)

それ以外の400Hz, 800Hz, 1600Hzについて示したものである。放射レベルは、制御点での音圧レベルとしている。また、図中の直線は、暗騒音レベル(35dB)までに必要な消音量を示している。この測定結果から、スリット幅の増加に伴って放射レベルに対する消音量が大きくなっており、消音効果の飽和がスリット幅を大きくすることで改善できることを示している。このことから、スリット幅は消音量に影響を与え、安定した消音量を得るためには一定のスリット幅が必要といえる。

4.2 共鳴器内部の音圧・位相特性 ANC制御前後における共鳴器内部の挙動を明らかにするために、内部音圧および位相分布を測定した。測定箇所は図12に示した30°間隔のラインAからLを、それぞれ共鳴器内部の外周から中心部の開口に向かって20mm間隔で7点(P_{A1} から P_{A7})の計84点である。マイクロフォンには音圧型1/2インチコンデンサマイクロフォンを使用し、共鳴器の前面パネルに内部まで貫通して垂直に開けられた各測定穴に挿入して測定している。測定対象以外の穴は、栓を用いてふたをしている。内部の各測定点における位相は、開口部中心に設置されたプライマリマイクの受信信号に対する位相差を求めている。図13は、消音効果が連続的な領域の周波数480HzにおけるANC制御実行前後における共鳴器内部の音圧分布ならびに位相分布を表わしている。この周波数は、スリット状共鳴器($D_s=142.5\text{mm}$, $t=7\text{mm}$)の共鳴周波数で、円形空気薄膜は(1,0)の節円モードを示し、音圧分布は外周部の閉口端で最大、開口部の閉口端で最小になる。ANC制御が実行されると、制御スピーカにより内部音圧は全体的に5dB~20dB上昇し、開口部付近ではほぼ同心円状に80dBの分布となっている。位相については、制御スピーカおよびその近傍では180°に、さらに共鳴器全体にわたり160°~180°で制御されている。このことから、ほぼ逆位相の音が共鳴器開口部から同心円状に放射され、制御対象音と干渉して消音されていると思われる。図14は、周波数1.2kHzでの内部音圧と位相分布を表わしている。この

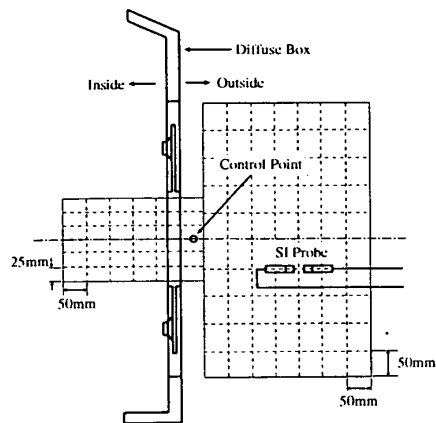


Fig. 15 Measurement of sound intensity around slit resonator opening

周波数において円形空気薄膜は、節円と節直径が現れる(1,2)モードを示す。この周波数帯域以上では、消音効果は不連続である。また、この周波数では図8に示した当該のスリット状共鳴器の挿入損失はゼロに近いが、制御スピーカにより共鳴が励起され消音効果が大きくなっている。ANC制御が実行されると、制御スピーカを中心に内部音圧が上昇するが、節直径では開口部付近の音圧はあまり上昇しない。このため、開口部に形成される分布音源は、制御スピーカの個数に対応した音源強さの分布となっている。位相分布については、節直径付近では 0° を示し、制御スピーカ近くでの位相変化が著しい。また分布音源となる開口部においては、音圧レベルの高いところで 180° の逆位相となっている。

4.3 共鳴器開口部近傍における SI 分布 以上の共鳴器内部の音圧分布および位相分布に対応させて、開口部近傍の音場における音響インテンシティ分布を測定した。音響インテンシティは、図15に示したようにスリット状共鳴器の開口部において、拡散室の内側を $125\text{mm} \times 250\text{mm}$ 、外側を $500\text{mm} \times 350\text{mm}$ の範囲で、開口面に対して垂直な方向の音響インテンシティを計測している。図16は周波数480HzにおけるANC制御実行前後のSI分布である。ANC制御が実行されると拡散室の外側の共鳴器開口部付近で制御点を中心に音響インテンシティレベルが低下し、これに伴い外周囲の音場のレベルも低くなっている。図17は周波数1.2kHzにおけるSI分布を示している。前項4.2で示したように開口部における分布音源としては、円形空気薄膜の節直径モードに影響された不連続な分布音源を形成していたが、この周波数の場合にも制御ポイントで音圧を最小にするようにANCが動作している

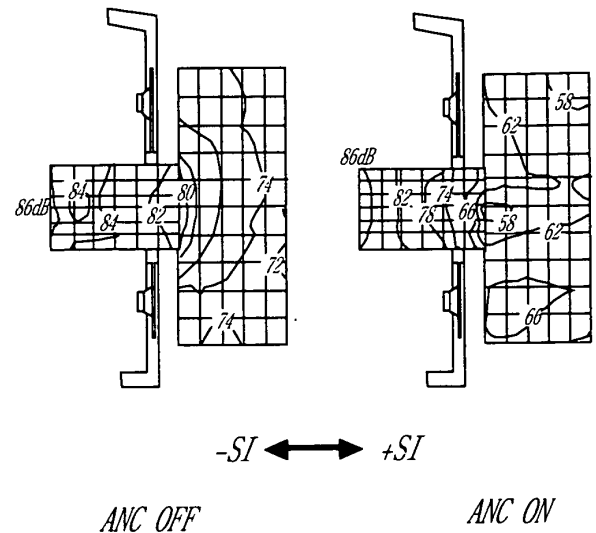


Fig. 16 SI distribution around resonator opening at $f=480\text{Hz}$

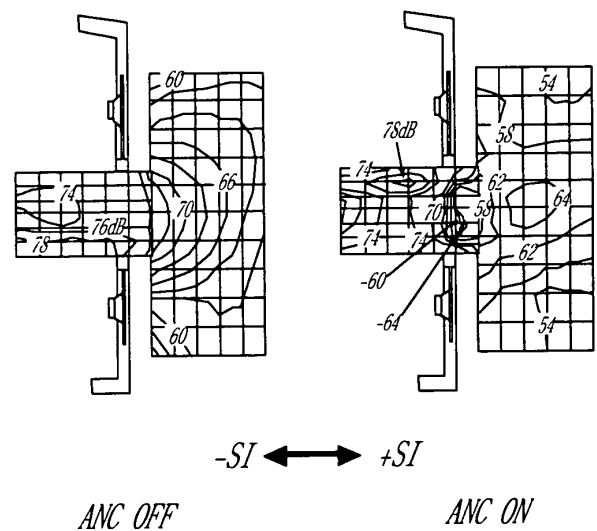


Fig. 17 SI distribution around resonator opening at $f=1.2\text{kHz}$

のがわかる。また、制御ポイント近傍には負の音響インテンシティが現れており、音の干渉による音響インテンシティの循環が生じている。

5. 結 言

機械パッケージの開口部から放射される騒音を能動消音する目的で、円形空気薄膜を特徴とするスリット状共鳴器と能動制御の複合システムを提案した。これにより開口部に形成された分布音源による消音性能ならびに共鳴器のスリット寸法が能動消音に及ぼす影響について実験を行った結果、以下の点が明らかに

なった。

- (1) 能動型の分布音源を開口部に設けることで、ANC制御点以外の外部音場の広範囲で消音効果が得られた。
- (2) スリット寸法が分布音源の消音特性に与える影響として、スリット深さは連続して高い消音量を維持する周波数範囲に影響を及ぼし、スリット深さが小さいほど、有効な消音領域は高周波数側へ拡張する。
また、スリット幅は消音量に影響を与え、安定して大きな消音量を得るためには、ある一定幅以上のスリットを用いる必要がある。
- (3) 本システムの消音機構を明らかにするため、スリット状共鳴器内部の音圧ならびに位相分布、さらに開口部周囲の音場を測定した結果、分布音源となるスリット状共鳴器開口部からの干渉波による消音であることが明らかになった。

文 献

- (1) 柳本 憲作, 伊藤 孝宏, 一宮 亮一, 円形空気薄膜層を壁面内に有する機械開口部からの音響放射, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 66 巻 646 号, 2075~2081, June, 2000
- (2) 本田 善久, 松久 寛, 佐部利 誠司, 佐藤 進, 軸流送風機の動翼回転騒音の能動的最小化, 日本機械学会論文集 C 編, 59 巻 562 号, p1830-1835, 6, 1993
- (3) 森 卓支, 音響コンダクタンスを利用した管路内騒音制御, 騒音制御, Vol.20, No.6, Dec., 44-46, 1996,
- (4) 井坂 秀治, 西田 公至, 斎藤 建一, アクティブマフラーと受動型消音器の複合化に関する検討, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集 No.98-8 I, vol.A, 1998
- (5) 本田 善久, 松久 寛, 自由音場に放射される音響パワーの受動制御, 日本機械学会論文集 C 編, 66 巻 643 号, p817-823, Mar., 2000
- (6) Sen M.Kuo, Dennis R.Morgan, Active Noise Control Systems, Jhon Wiley and Sons, Inc, New York, 1996
- (7) 中部電機株式会社, 浮動小数点 DSP とその応用によるノイズキャンセル, ADSP324-00A ユーザーズマニュアル, 2001
- (8) 雉本 信哉, 下鴨 浩, 能動的音響制御における適応ハウリングキャンセラの効果, 日本機械学会論文集 C 編, 62 巻 598 号, p2272-2277, 6, 1996
- (9) 早坂 壽雄, 吉川 昭吉郎, 音響振動論, 丸善, p722-726, 東京都, 1983
- (10) 貞本 晃, 村上 芳則, 減衰の影響を考慮したスリット状膨張空洞の消音効果の定量評価, 日本機械学会論文集 C 編, 64 巻 622 号, p1985-1990, 6, 1998