U.D.C. 〔628.517.2:534.5〕:〔681.534′136:681.323〕:〔621.635:621.643.2〕

ダクト用電子消音システムの開発

Development of Electronic Sound Cancellation System for Duct Noise

三上照夫* *Teruo Mikami*
浜田晴夫** *Hareo Hamada*
髙橋　稔*** *Minoru Takahashi*

騒音に対し逆位相の音波を電気的に作り，原音と干渉させて消音する能動形消音器と呼ばれる新消音技術が注目されている。

日立プラント建設株式会社では，東京電機大学との共同研究によってディジタル信号処理技術を応用した連続スペクトル騒音用能動形消音器(電子消音システム)を検討し，新たに“Dual Sencing Microphone”方式と称する消音システムを開発した。

本システムは音波干渉付加音制御に加え，スピーカとマイクロホン間で生ずるハウリングを抑制する差動増幅器とによって構成され，ターボファン騒音に対して70～600 Hzの周波数で約15 dBの実用的消音効果が得られた。さらに，伝達関数の経時変化に対して消音用フィルタの特性を適応制御できる適応形電子消音システムを試作し，同じく約15 dBの消音効果を得た。

1 緒　　言

各種プラント設備，建物の空調設備，各種内燃機関などのダクトを伝搬する騒音は，現在，内部に空洞や吸音材を設けた**図1**のような消音器によって減音されているが，低周波域の消音量，圧力損失，気流による二次騒音などの点で改善が望まれている。

これに対して，古くから騒音に対して逆位相の付加音(二次音)を発生させ，干渉効果によって能動的に消音する能動形消音器が提案されている[1]。これが実用化できれば，従来形消音器の欠点を改善できる方法として大きな期待がかけられており，1953年のOlson[2]の研究以来，多くの研究成果が報告されている。

特に最近では，急速に発達したディジタル信号処理技術や各種の電気音響機器の活用によって研究が加速され，エンジン騒音のような離散スペクトル音だけでなく，ダクト騒音のような連続スペクトル音に対しても高い消音効果が報告されるまでに至っている[3)~11)]。

日立プラント建設株式会社では，消音のニーズが高く原音と付加音を合わせやすい一次伝搬音(ダクトなど)の新しい消音技術の実用化を目指した。

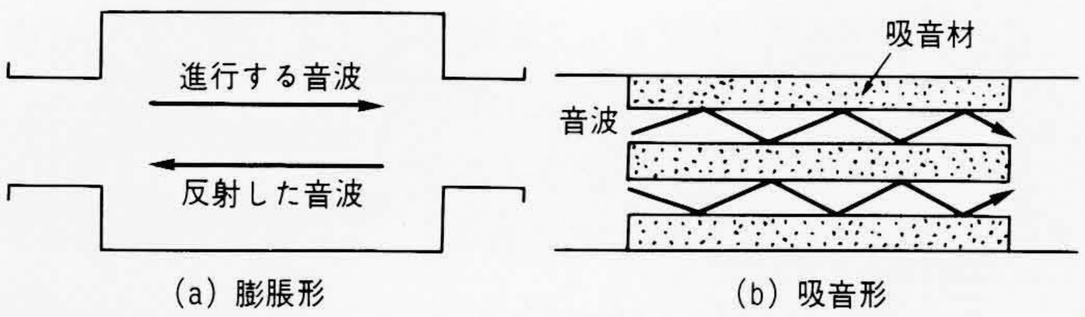


図1　従来のダクト用消音器　　従来の消音器は，吸音材で流路抵抗を付けたりダクトを急激に拡大・縮小するため，圧力損失の増大，気流による二次騒音の発生など改善すべき課題がある。

2 能動的音波干渉消音の原理

能動形消音器は，基本的に**図2**(a)のように構成される。センサマイクロホンで入力した騒音の情報を，センサマイクロホンからスピーカに至るまでの音波の伝搬時間を利用して解析し，この結果をもとに騒音に対して同音圧で逆位相の付加音を放射し，強制的に音波干渉を生じさせ消音するものである。騒音が純音の場合には同図(b)のような付加音を放射することになる。

高い消音効果を得るためには，高精度な付加音を放射することが要求される。騒音と付加音が完全に逆位相のときの音圧レベル差と消音量の関係を算出した結果を**図3**に示す。同音圧レベルの場合，消音量は無限大となり音圧レベル差によって実線上を移動することになる。例えば，20 dB以上の消音量を得るためには，音圧レベル差は約1 dB以内に収めなければならない。さらに，ファン騒音などの連続スペクトル騒音は多数の正弦波音波が合成されたものと考えられ，電子消音

* 日立プラント建設株式会社空調事業本部　** 東京電機大学助教授 工学博士　*** 日立プラント建設株式会社松戸研究所

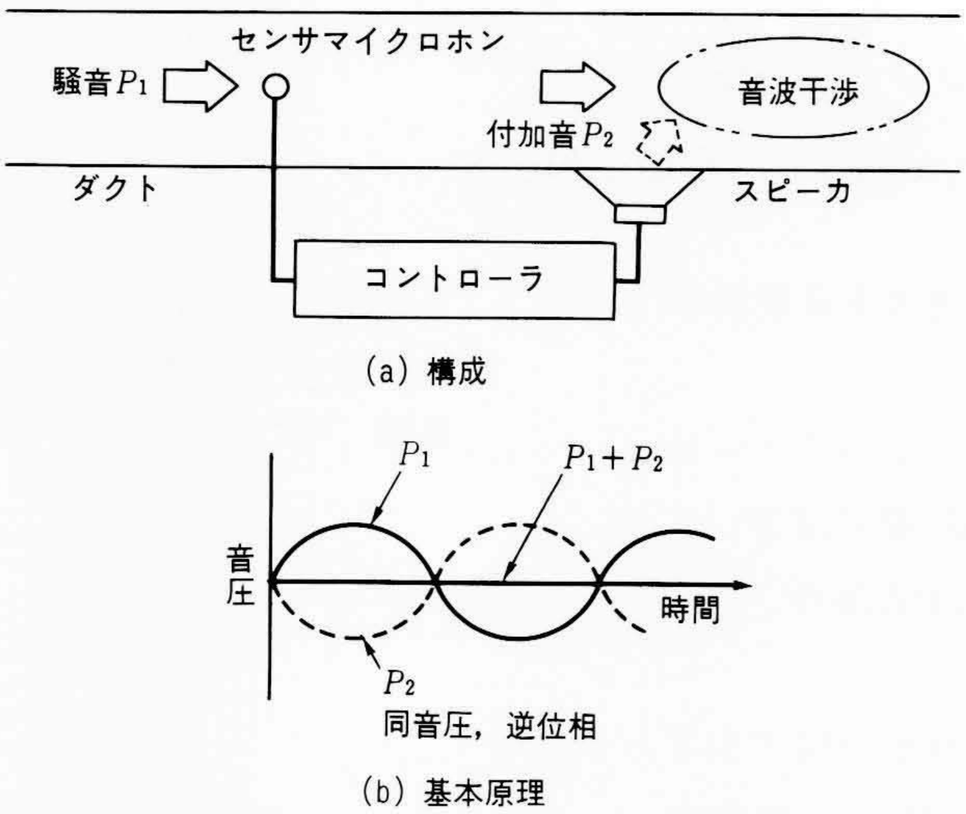


図2 能動形消音器 純音に対する音波干渉消音は，(b)のように「山」には「谷」，「谷」には「山」の音波を付加することによって実現できる。騒音が複雑な場合には，数多くの成分に対して瞬時に逆位相の音波を発生する必要がある。

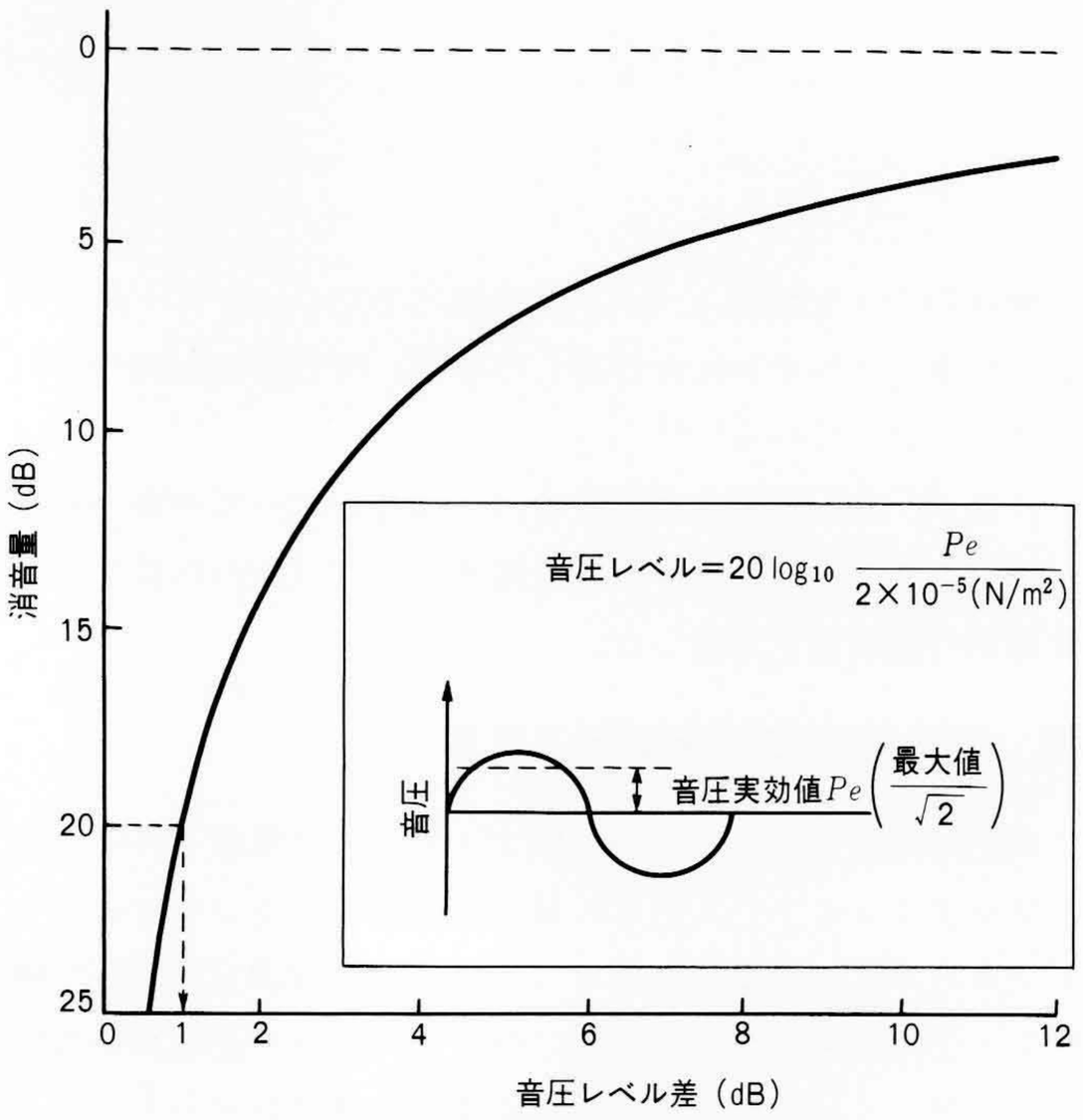


図3 騒音源，付加音源の音圧レベル差と消音量の関係 周波数と位相の設定誤差がない場合の関係を表している。この場合でも20 dBの消音量を得るためには，1 dB以内の高い精度が必要となり，位相のずれがある場合はさらに高い精度が要求される。

によって高い消音効果を得るためには，おのおのの周波数成分に対応した付加音の制御を高精度かつ短時間で実現することが必要となる。

3 電子消音システムの開発

3.1 モデル化の検討

電子消音システムで高い消音量を得るためには，ダクト内での音の伝搬のほか，マイクロホン，スピーカなど電気音響機器の周波数特性，指向特性を考慮した制御系の構築が重要

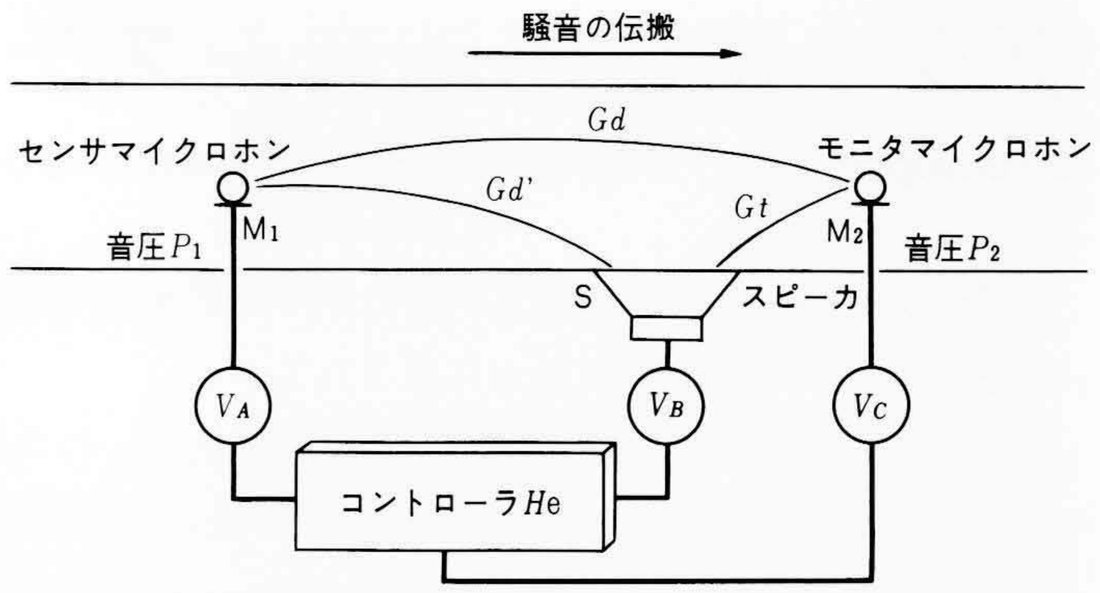


図4 基本的な電子消音システムの構成 三点の評価点V_A，V_B，V_Cを設定することによって，本システムのブロック線図が記述できることを明らかにした。

であるが，この点を明らかにした報告は見当らなかった。

図4の基本的な電子消音システムを解析した結果，センサマイクロホンの出力端子，付加音源用スピーカの入力端子，モニタマイクロホンの出力端子おのおのに電気的に測定可能な評価点V_A，V_B，Vを設けることによって，電子消音システムの制御系設計の基礎となるモデルを構築できることを明らかにした[4)~7)]。この方法は，センサマイクロホンとモニタマイクロホン間のダクトや電気音響機器を，線形時不変システム(出力に振幅，位相変化があっても周波数スペクトラムが不変なシステム)として仮定していたものであり，これから**図5**に示す制御系のブロック線図が記述できる。同図で太線の矢印は音波の伝搬方向を示し，実線で示した矢印は電気信号の流れを示している。他の信号の内容は下記のとおりである。

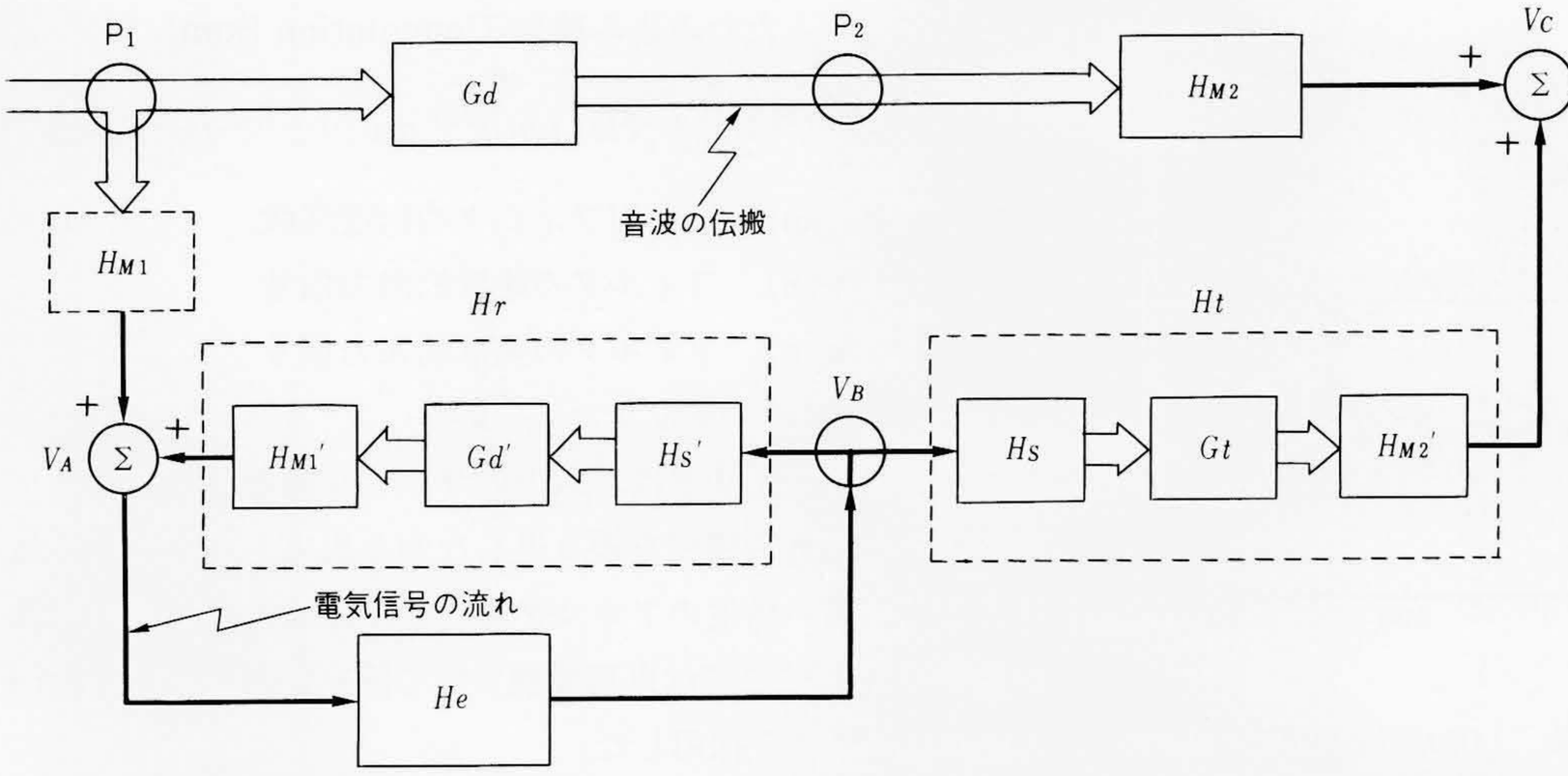
G：図示された点での音圧伝達関数
H_{M1}：M_1の騒音に対する音圧-電圧変換特性
H_{M2}：M_2の騒音に対する音圧-電圧変換特性
H_{M1}'：M_1の付加音に対する音圧-電圧変換特性
H_{M2}'：M_2の付加音に対する音圧-電圧変換特性
Hs：付加音源SのM_2方向への電圧-音圧変換特性
Hs'：付加音源SのM_1方向への電圧-音圧変換特性
He：コントローラの制御特性を示す伝達関数

また，**図5**に示したブロック線図の一部をHr，Htに置き換えることによって，構成はさらに簡素化される。

コントローラの制御特性を与える伝達関数Heは**図5**に示したブロック線図から次式で表される。

$$He=\frac{-Gd(H_{M2}/H_{M1})}{Ht-Gd(H_{M2}/H_{M1})Hr} \quad \cdots\cdots(1)$$

(1)式からわかるように，付加音のコントローラの伝達関数を決定するためには$Gd\cdot(H_{M2}/H_{M1})$，Ht，Hrの各伝達関数が必要となるが，これらはいずれもV_A，V_B，V_Cを測定点として同定することができる。コントローラに内蔵した消音用



注：略語説明
G（図示された点での音圧伝達関数）
H_{M1}（M1の騒音に対する音圧-電圧変換特性）
H_{M2}（M2の騒音に対する音圧-電圧変換特性）
H_{M1}'（M1の付加音に対する音圧-電圧変換特性）
H_{M2}'（M2の付加音に対する音圧-電圧変換特性）
H_S（付加音源SのM2方向への電圧-音圧変換特性）
H_S'（付加音源SのM1方向への電圧-音圧変換特性）
He（コントローラの制御特性を示す伝達関数）

図5　基本的な電子消音システムのブロック線図　　付加音を発生するコントローラHeの特性を三つの伝達関数$Gd(H_{M2}/H_{M1})$，Hr，Htによって導出した。

フィルタに伝達関数Heを設定することによって，モニタマイクロホンM2の位置で同音圧で逆位相の付加音が得られることになる。

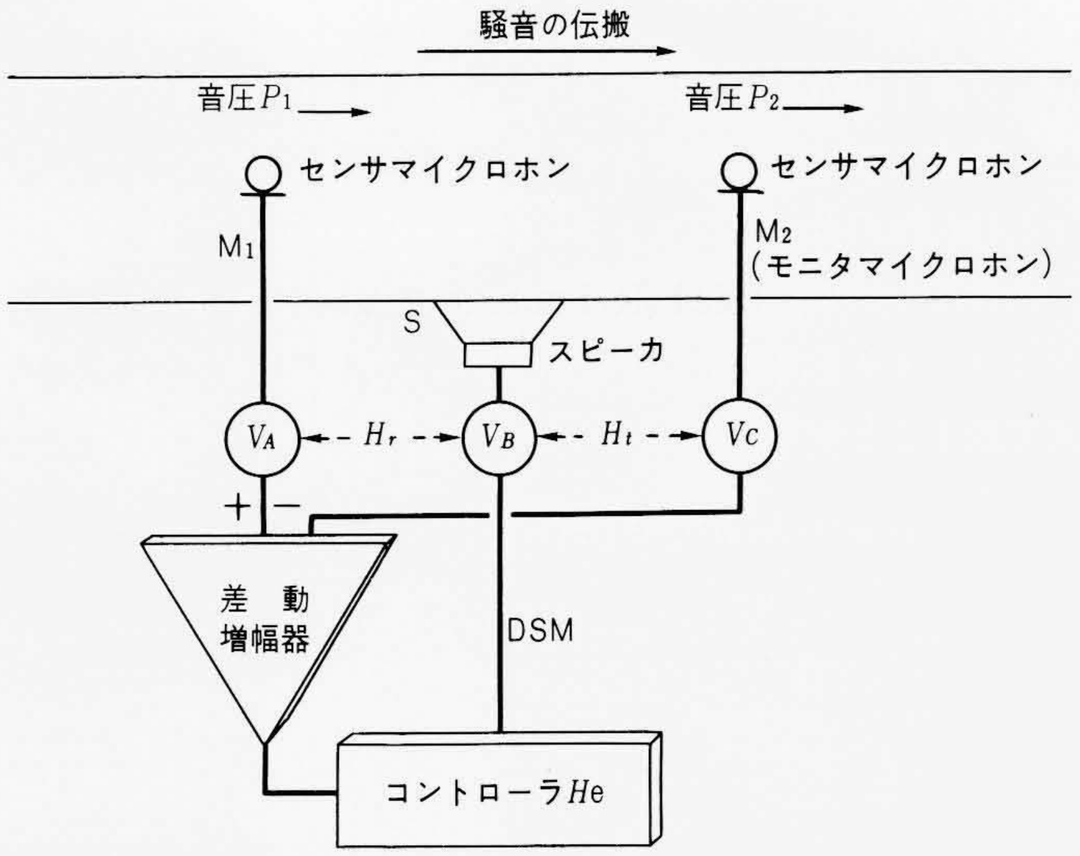
図4のような基本的な消音システムでは，付加音源から上流側のマイクロホンへの音響的フィードバック，いわゆるハウリングが生じるため，なんらかの対策によって減衰特性を持たせることが必要である。

従来は，この問題に対処するために別の付加音源用スピーカを設置し，これら複数個の付加音源によって指向性を持たせたり，あるいは上流側のマイクロホンを工夫して付加音源からの音を抑圧する試みが行われてきた[10),11)]。しかし，指向性を付けにくい低周波帯域が対象であることや複数個のディジタルフィルタ，遅延素子など，電子回路が複雑になるなどの問題があった。**図4**の方式は上述のような問題があるものの，構成要素が少なくシンプルであるために，制御，保守，経済性などの点で優れている。

そこで**図4**の簡単な構成を生かし，しかも上述のハウリングの問題を解決するために，次節で述べるDSM(Dual Sensing Microphone)方式と称する新しい構成を開発した。

3.2　DSM方式の開発

図6に示すように，DSM方式では付加音源から上流側，下流側におのおの1本のマイクロホンを配置しており，下流側のマイクロホンはモニタマイクロホンを兼ねている。両マイクロホンに入力された付加音の信号は差動増幅器によって電気的に干渉させ，これによりハウリングの抑制をねらったものである。このためには，付加音用スピーカSの入力V_Bから両マイクロホンの出力V_A，V_Cまでの伝達関数Hr，Htが等しいことが必要となるが，この条件は実用的には両マイクロホンの中央にスピーカを置くだけで満足できることが種々の実験から確認されている。



注：略語説明　DSM (Dual Sensing Microphone)

図6　DSM方式の構成　　基本的な電子消音システムに差動増幅器を付けただけで，スピーカからセンサマイクロホンに対する音響的フィードバック(ハウリング)を抑制できるDSM方式を開発した。

ハウリングの抑制効果を実測した結果を**図7**に示す。縦軸は閉ループ利得を示しており，DSM方式採用前，すなわち基本的電子消音システムでは0 dBを上回っているが，DSM方式では下回っており，ハウリングが抑制されていることがわかる。

3.3　空調ダクト騒音への適用

(1)　実験装置

実験装置を**図8**に示す。消音実験に使用したダクトは口径350 mm角，全長13 mであり，付加音用スピーカはダクトのほぼ中央付近に設置した。

騒音源には**図8**の音源1，音源2で示す二つの音源を用い

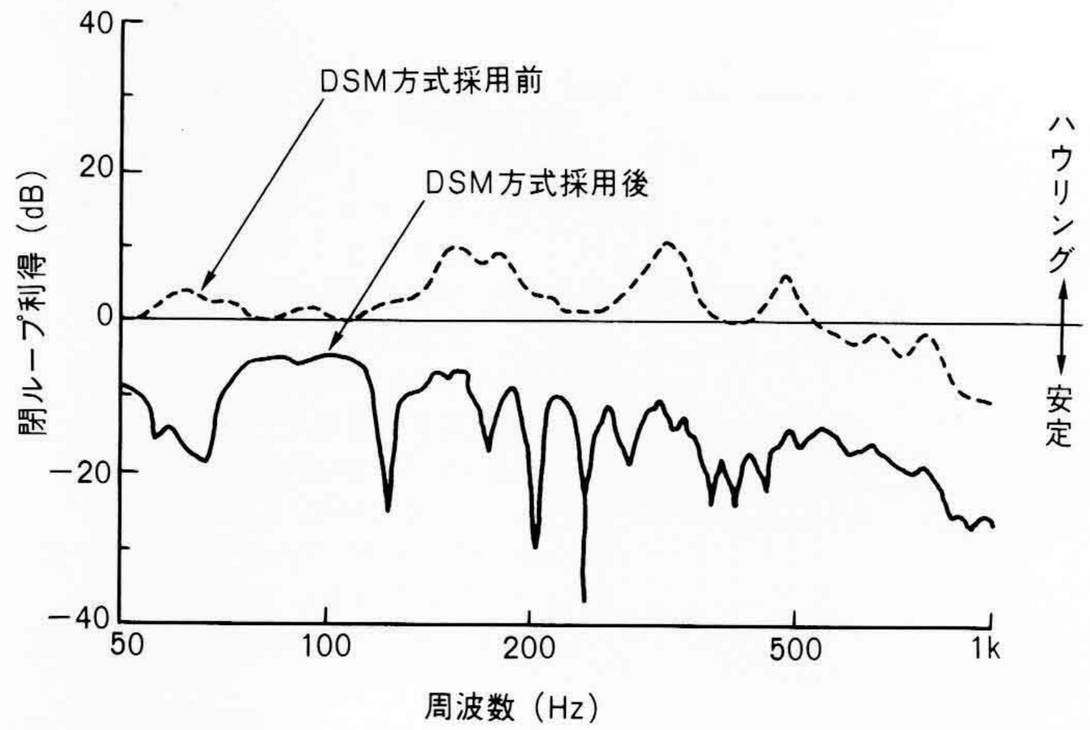


図7 DSM方式のハウリング抑制効果 DSM方式採用前が基本的電子消音システムのデータを示しており，これに比べてDSM方式は，ハウリングが全帯域にわたって抑制されていることがわかる。

た。音源1は20～1 kHzのホワイトノイズを駆動用信号とする広帯域スピーカ騒音であり，音源2は風量3,600 m³/h，静圧2,450 Paのターボファンである。

消音用フィルタにはFIR(Finite Impulse Response)ディジタルフィルタを用いた。ディジタルフィルタの動作原理は次式で表すことができる。

$$y(n)=h(n)*x(n)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}x(n-k)h(k)\cdots\cdots(2)$$

ここに ＊：たたみ込み積和(Convolution Sum)

$$h(n)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}He(j\omega)e^{jwn}d\omega\cdots\cdots(3)$$

$He(j\omega)$：消音用フィルタの伝達関数

$y(n)$：フィルタの離散的出力信号

$x(n)$：フィルタの離散的入力信号

$h(n)$：単位サンプル応答

ディジタルフィルタは，入力のサンプル値と単位サンプル応答のたたみ込み積和を繰り返しながら出力を求めているわけである。高い精度のフィルタを得るためには，(3)式の算出が重要であり，ここでは東京電機大学で開発したLeast Square Algorithm[12),13)]を採用した。

(2) ファン騒音に対する消音効果

消音実験はダクト内風速を3.7～9 m/sに設定して行った。**図9**はダクト内風速6.5 m/sの場合を示すものであり，消音量は70～600 Hzで15 dB程度得られた。マイクロホンM_2の出力電圧も電子消音システム動作後は著しく小さくなっていることがわかる。ほかの風速でも同様な結果が得られた。

製品化したコントローラを**図10**に，専用マイクロホンを**図11**に示す。

4 適応形電子消音システム

3章で述べた電子消音システムでは，消音状態での伝達関数$Gd\cdot(H_{M2}/H_{M1})$，Ht，Hrは不変として扱っており，消音用ディジタルフィルタの特性は初期設定のまま一定である。

ところが，産業用機械の排気ダクト内などでは，温度，圧力，風速が著しく変化する場合があり，これに伴って伝達関数も

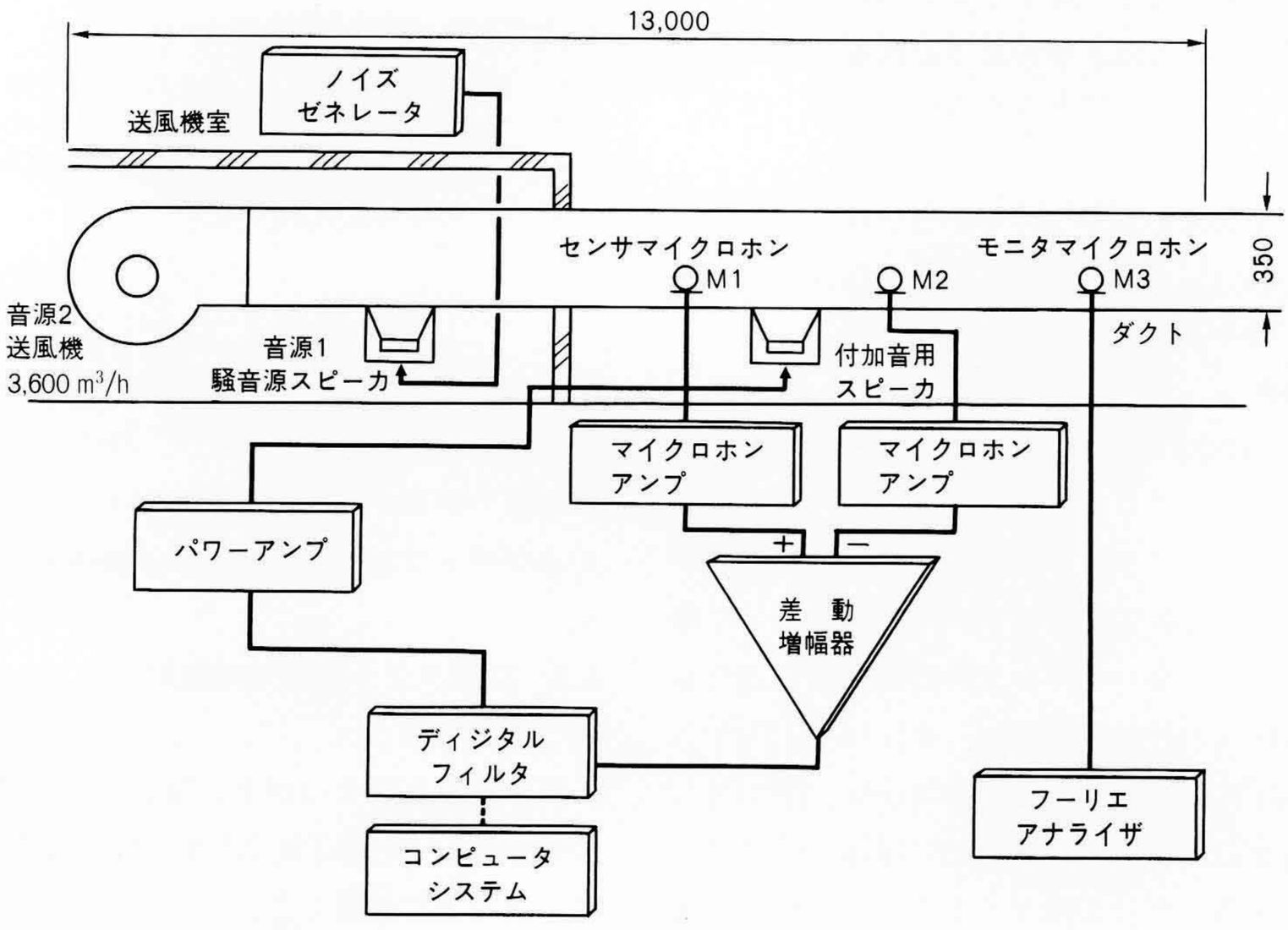
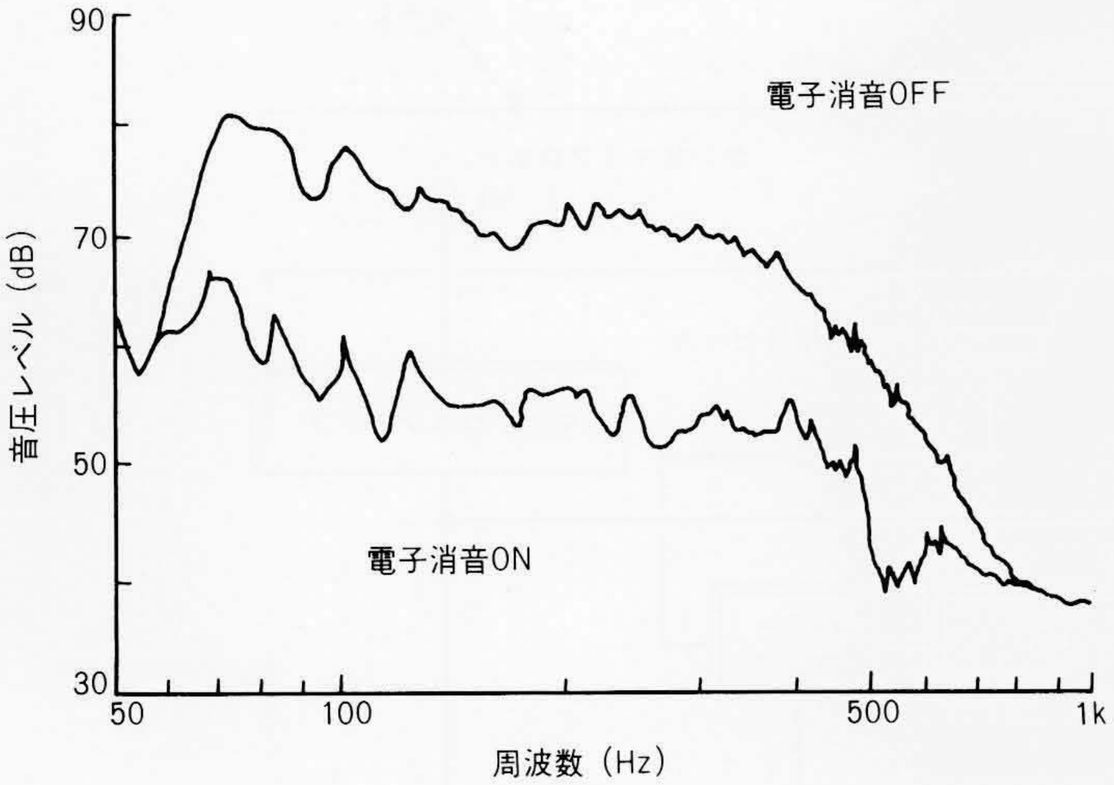
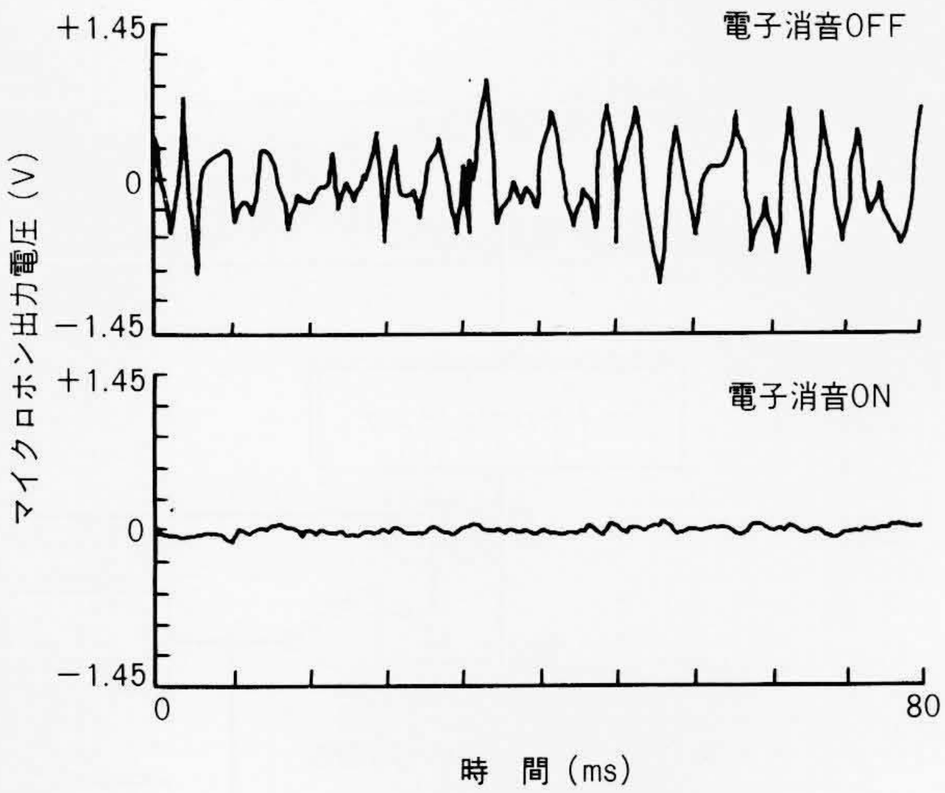


図8 試作した消音実験システムの構成 消音実験には，送風量3,600 m³/hのターボファンを用いた。



(a) 周波数領域



(b) 時間変化

図9　ターボファン騒音に対する消音効果

実機ターボファンで，15 dB程度の高い効果が得られた。ダクト内風速は3.7～9 m/sに変化させて実験したが，同様な消音効果を得た。

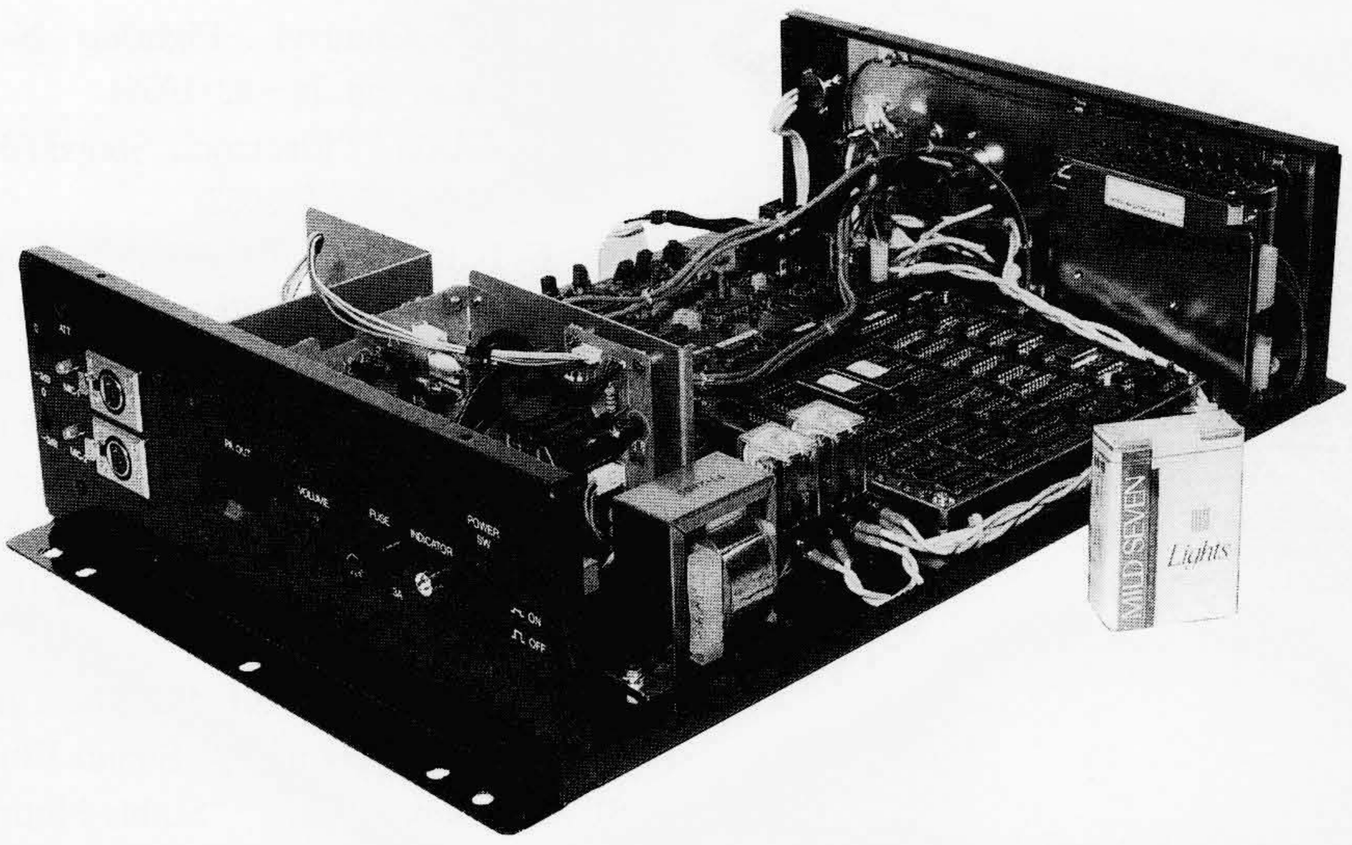


図10　電子消音システムコントローラ

消音用ディジタル回路，マイクアンプ，スピーカアンプおよび電源を一体化している。

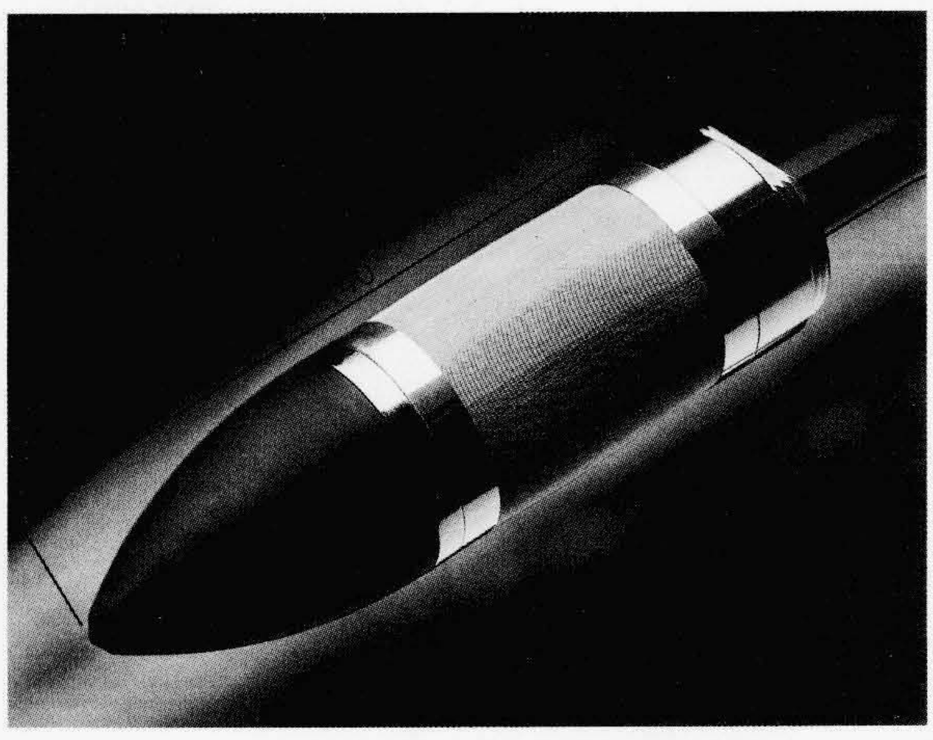


図11　センサマイクロホン

自己気流発生音の低減のため砲弾形とした。

変化する。

これらの変動に追従し，常に最良の消音効果を保持するために消音用ディジタルフィルタの特性を適応制御することが必要であり，種々の試みがなされている[4),5),7),9)]。

日立プラント建設株式会社では，適応制御のアルゴリズムとして時間領域のVS-LMS(Variable Step Least Mean Square)アルゴリズム[14)]を用いて適応形コントローラを試作して実験を行った結果，前述の電子消音システムと同等の約15 dBの消音量を得た。適応形電子消音システムの概要を**図12**に示す。

これにより，電子消音システムの適用分野を拡大できるとともに，消音用フィルタの初期設定時間を省略することができた。製品化した適応形コントローラの外観を**図13**に示す。

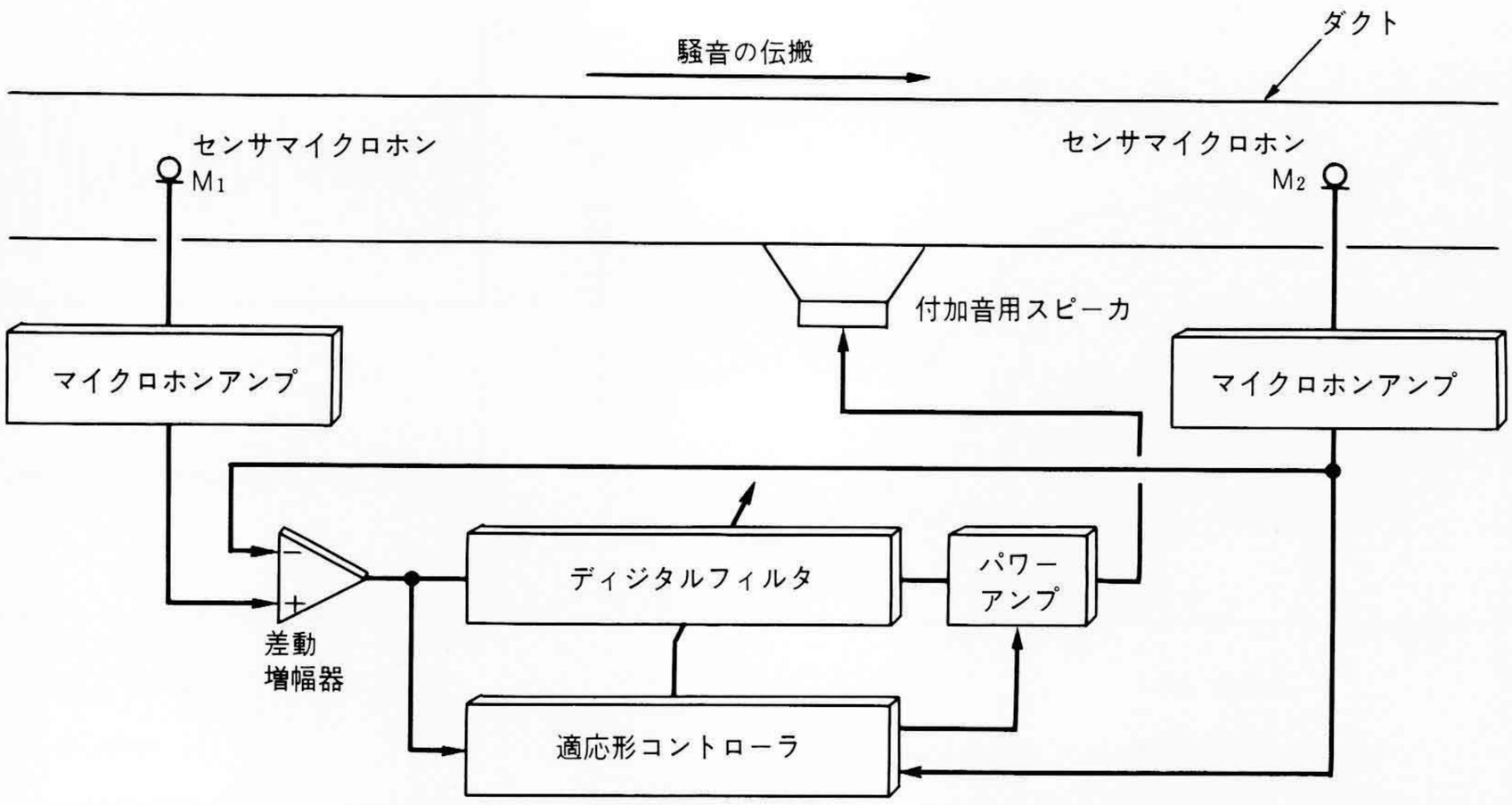


図12 適応形電子消音システムの構成　ディジタルフィルタの特性を，最適消音量が得られるように適応形コントローラで制御する。

図13 適応形電子消音システムコントローラ　製品化した適応形コントローラの外観を示す。

5 結　言

ダクト内の広帯域騒音に対して，高精度な逆位相の付加音を発生できる消音技術を開発し，ターボファン騒音に対して70～600 Hzの周波数で約15 dBの実用的消音効果を得た。

騒音問題の多くを占める3次元騒音の消音対策が今後の課題となる。

本研究を進めるに当たり，ご指導をいただいた東京電機大学工学部電気通信工学科教授の三浦種敏工学博士に対し心から感謝する次第である。

参考文献

1) W.B. Conover : Fighting Noise with Noise : Noise Control, pp.78～82(1956)
2) H. Olson : "Electronic Sound Absorber", J. Acoust. Soc. America 25, 6(1953)
3) G.B.B. Chaplin : "The Cancellation of Repetitive Noise and Vibration", Proc. Inter-Noise 81(1980)
4) C.F. Ross : "An Adaptive Digital Filter for Broadband Active Sound Control", J. Sound Vib. 80(1982)
5) G.E. Warnaka, et al. : "Active Control of Noise in Interior Spaces", Proc. Inter-Noise 80(1983)
6) 小坂，外：管内周期性低周波音の能動的吸音，日本音響学会誌41(1985)
7) A. Roure : "Self-Adaptive Broadband Active Sound Control System", J. Sound Vib. 101(1985)
8) K. Kido, et al. : "Stable Method for Active Cancellation of Duct Noise by Synthesized Sound", Tran. of the ASME 109(1987)
9) 西村，外：ダクト出口放射音のアクティブコントロール，日本音響学会講演論文集(昭62-3)
10) M. Jessel, et al. : Active Sound Absorbers in an Air Duct : Journal of Sound and Vibration, 23(1972)
11) M.A. Swinbanks : The Active Control of Sound Propagating in Duct : Journal of Sound and Vibration, 27 (1973)
12) 高橋，外：空調ダクト騒音に対するDSM方式の適用，管路用電子消音システムの研究(第5報)：日本音響学会，昭61秋季講論(1986)
13) 榎田，外：適応型DSMシステム，管路用電子消音システムの研究(第6報)：日本音響学会，昭61秋季講論(1986)
14) 浜田，外：適応型ディジタルフィルタを用いた空調ダクト用電子消音システムの構成，電子情報通信学会技術報告EA87-7(1987)