

平成22年 5月20日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560232
 研究課題名（和文） アクティブ音響シールドイングに関する基礎研究
 研究課題名（英文） Basic Research on Active Acoustic Shielding
 研究代表者
 西村 正治（NISHIMURA MASAHARU）
 鳥取大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：60346369

研究成果の概要（和文）：アクティブ音響シールドイング（AAS）とは、マイクロホンとスピーカが一体化したアクティブ音響セルを境界面に沿って格子状に並べ、入射してくる音の波面に対して同振幅・逆位相の波面を生成し、入射音を消音する技術であり、風は通すが音は通さない窓の実現が期待される。本研究では、シミュレーションとモデル実験で、その基本コンセプトの成立性を明らかにした。また、AASを適用した小窓を製作し、それが、正面音源だけでなく、斜入射音源、複数音源、移動音源などにも有効であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：Active Acoustic Shielding (AAS) is a system that can attenuate the sound passing through an open window. The AAS system is constructed from many AAS cells set in an array each with an approximately collocated microphone and speaker. In this research, the feasibility of the basic concept of AAS was proved by some simple simulations and experiments. A small open window with four AAS cells was fabricated and its noise reducing performance was demonstrated for not only a normal incident noise source but an oblique incident source, multiple sources and moving sources.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：機械音響学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：騒音、音響、アクティブノイズコントロール、アクティブ遮音

1. 研究開始当初の背景

21世紀は環境調和型社会の実現が叫ばれているが、人間生活に身近な環境問題のひとつである騒音については、まだまだ静粛な環境が実現できているとは言いがたい。道路騒

音の大きな沿道の建物では、気候の良い季節でも騒音のため窓が閉められ、人間のストレスがたまるだけでなく、空調機の余分なエネルギーが使われるなどエネルギー問題にも影響している。また、建設工事の音などには

重厚な遮音対策はとりづらく、簡単な遮音シートでカバーしているのが現状である。このような課題に対しては、吸音材や遮音材を用いた騒音対策は原理的に不可能であり、何らかのアクティブな騒音対策が必要になってくる。そこで本研究では、風通しの良いアクティブ遮音通風窓や軽くて高性能なアクティブ遮音シートの開発に供せられる基本的な手法の開発を狙う。

2. 研究の目的

アクティブノイズコントロール（ANC）技術は、一言で言うなら逆位相の音を発生して元の音をキャンセル消音する技術で、すでに、空調機音やエンジンの排気音の低減、航空機機内音や自動車車内音の低減、道路防音壁の高性能化などに実用化されている。ANCは一般的に低周波音の消音が得意であり、制御システムが簡単なダクトなどへの応用が進んでいる。一方空間の消音は、一般に多チャンネル制御が必要で、システムが複雑になり、特定の用途以外に実用化が難しいとされてきた。そこで、本研究の研究代表者らは、シンプルな分散型制御で音場の境界を制御することによって静粛な空間を作ること提案し、一部アクティブソフトエッジ（ASE）遮音壁として実用化されている。

本研究は、そのような分散制御の考え方をさらに一歩進めたものである。まずマイクロホンとスピーカが一体化したアクティブ音響セルを製作し、それを窓などの境界面に沿って、制御対象音波の波長に比べて十分短い間隔で格子状に並べる。入射してくる音波の音圧をマイクロホンで検出し、逆位相の波形を生成して制御スピーカから放射すると、ホイヘンスの原理により、入射してくる音波の波面に対して同振幅・逆位相の波面を生成し、入射音を消音することが可能と考えられる。ここでは本手法をアクティブ音響シールドイング（Active Acoustic Shielding：AAS）と称する。

本研究の目的は、AASの基本コンセプトを提案し、その実現性を明確にすることである。具体的には下記の点を明らかにすることを目標とする。

- (1)シミュレーションにより、本手法が原理的に成り立つことを証明する。
- (2)シミュレーションにより、セル間隔の制約、波面入射角の制約などを明確にする。
- (3)マイクロホンとスピーカを一体化させたAASセルを試作し、その特性を調査する。
- (4)AASセルを用いたアクティブ遮音窓を試作し、部屋の窓に設置してその基本的な消音性能を調査する。また斜め入射音源、複数音源、移動音源などに対する消音性能を調査する。更に室内の反射音の影響や、室内での発生音の影響など実用的課題についても調

査する。

3. 研究の方法

まず、AASの基本コンセプトを図1に示す。アクティブ音響セルを波長に比べて十分短い間隔で格子状に設置することにより、さまざまな入射音波面に適合した制御音波面を作る手法である。各セルは独立にフィードフォワード制御され、固定した伝達関数を通した音が制御スピーカから出力される。この伝達関数はすべてのセルで同一とし、入射してくる音波に対して、ある遠方点で音圧がゼロとなるように調整される。このとき、検出マイクロホンと制御スピーカが同一位置であると仮定すると、ホイヘンスの原理から、任意の波面形状の入射音波に対しても同一の伝達関数で消音することが可能と考えられる。つまり、移動音源や複数音源に対しても減音が可能と期待される。

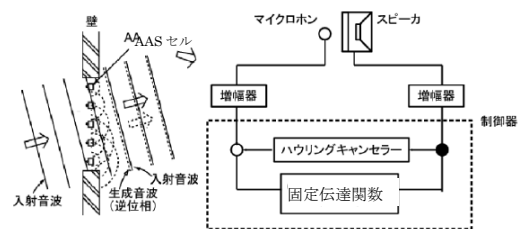


図1 AASの基本コンセプト

以下に各研究目標に対して検討を行うための研究手法をまとめる

(1)シミュレーション

図2のように、AASセルを制御面上に格子状に並べることにより、制御面後方に入射音場と同振幅逆位相の音場を形成することができるかどうかを単純なシミュレーションによって確認した。AASセルの制御スピーカは無指向性の点音源と仮定し、検出マイクロホンと制御スピーカは完全に同一位置にあると仮定した。また入射音波は平面波とした。制御面後方の任意の点における制御音は、各AASセル（点音源）からの寄与の重ねあわせと考え、減音量の予測式を導出し、MATLABによるシミュレーションプログラムを作成した。シミュレーションのパラメータとしては、入射音の波長 λ 、AASセル配置の間隔 w 、制御点までの距離 d 、平面波の入射角 θ を選んだ。

(2)AASセルの試作試験

AASセルは、その基本コンセプトから、検出マイクロホンと制御スピーカを波長に比べて十分短い間隔で設置する必要がある。しかし、フィードフォワード制御を基本としているため、信号の因果律を満足するだけ両者

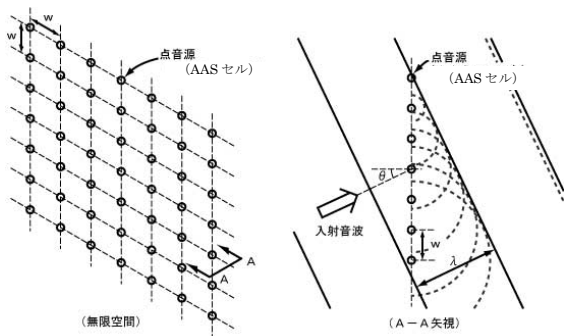


図2 AASのシミュレーションモデル

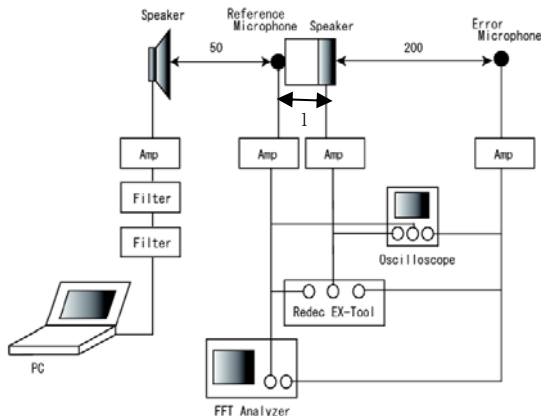


図3 AASセルの試作試験配置

の距離 l を離す必要がある。そこで、応答の速いフラットスピーカ (PROTRONCFR) を採用することとし、図3の配置で信号処理装置のサンプリング周波数と必要な l 寸法の間隔を調べた。なお、制御対象周波数としては $500\text{Hz} \sim 2\text{kHz}$ とし、制御アルゴリズムは単チャンネルの Filtered-X-LMS を使用した。

(3) AAS付小窓の試作試験

上記試作AASセル(2)の試験の結果、 1 寸法 50mm 、サンプリング周波数を 48kHz とした)を4個備えたAAS付小窓を試作し、無響室のドアを改造して設置した(図4、5参照)。一次音源をドアの外側に設置して、制御有無の条件で室内の定点で音圧スペクトルを計測すると共に、窓後方の減音コンターを計測した。具体的手順は以下による。

①窓正面 500mm の位置に一次音源を置き、それぞれのAASセル後方 100mm の位置に設置した4つの誤差マイクロホンを用いて、 $4(1-1)-4$ Filtered-X-LMS アルゴリズムを用いてシステムを収束させ、減音効果を計測した。

②収束した4つのフィルタが類似していることを確認し、平均値でフィルタを固定した。以後の実験は、すべてこの固定フィルタを用いて行った。

③一次音源を正面 500mm に置いた場合、斜め 30 度においた場合、一次音源として正面音源、

斜め 30 度の音源の2つの相関のない音源を設置した場合のそれぞれについて減音効果を計測した。

④一次音源を移動させた場合の定点での減音効果を計測した。

⑤一次音源を正面 500mm に設置した状態で無響室内の壁に合板を設置し、部屋の反響を増加させてその減音効果に与える影響を確認した。同時に室内での話し声などがシステムに及ぼす影響などを確認した。

(4) FPGA ボードを用いた信号処理速度改善

FPGA(Field Programmable Gate Array)を備えた信号処理ボードを用いて、高速信号処理が因果律の更なる改善に役立つ可能性を検討した。

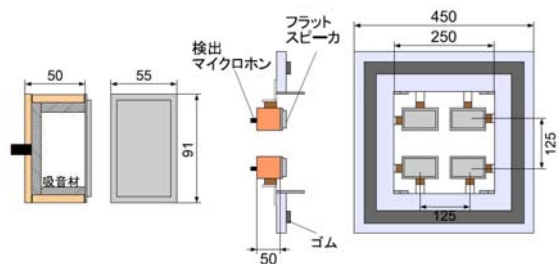


図4 AAS付試作小窓

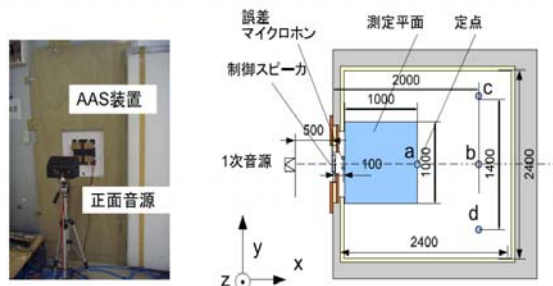


図5 AAS付小窓の無響室ドアへの設置状況

4. 研究成果

得られた主な研究成果を以下にまとめる。

(1) シミュレーション

50×50 個の制御音源を $w = 0.125\text{m}$ の間隔で設置する条件でシミュレーションを行い、検出マイクロホンと制御スピーカが全く同一位置にある場合は次の結果を得た。

- ①誤差マイクロホンまでの距離 d はセル間隔 w 程度離しておけば十分である。 ($d/w \geq 1$)
- ②正面音源に対しては、 $w/\lambda \leq 0.75$ 程度まで減音可能である。
- ③斜め音源に対しては $w/\lambda \leq 0.5, \theta \leq 60\text{deg}$ 程度まで減音可能である。 ($w/\lambda = 0.25, d/w = 1$ の場合の結果を図6に示す。)

(2) AASセルの試作試験

次の結果が得られた。

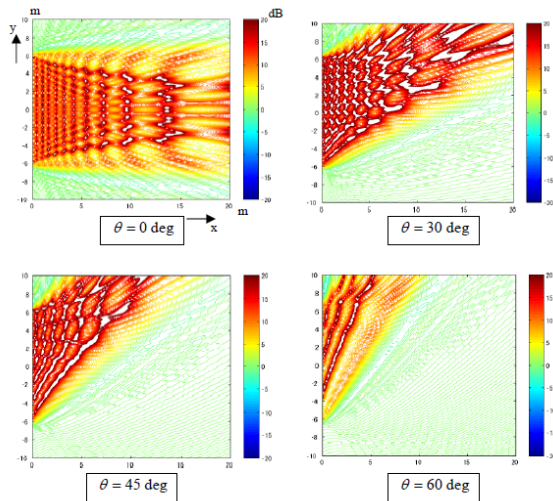


図6 シミュレーションで求めた減音コンター
($w/\lambda = 0.25, d/w = 1$ の場合)

- ① サンプル周波数 $f_s = 24\text{kHz}$, アンチエイリアジングフィルタ周波数 $f_c = 10\text{kHz}$ では $l = 100\text{mm}$ のとき十分因果律は確保できるが, $l = 50\text{mm}$ 以下では減音効果が悪くなる.
- ② $f_s = 48\text{kHz}, f_c = 20\text{kHz}$ にすると $l = 20\text{mm}$ でも何とか因果律が確保でき, $10 \sim 15\text{dB}$ の減音効果が得られる. (図7参照)
- ③ その結果, AASセルとしては余裕を持って $l = 50\text{mm}$ とし, $f_s = 48\text{kHz}, f_c = 20\text{kHz}$ を採用した.

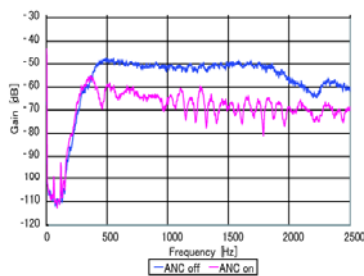


図7 AASセル単体の減音効果
($l = 20\text{mm}, f_s = 48\text{kHz}, f_c = 20\text{kHz}$ の場合)

(3) AAS付小窓の試作試験

- ① 4(1-1)-4Filtered-X-LMS アルゴリズムで収束したそれぞれのAASセルのフィルタ係数は, 計画通り図8に示すように似たものとなった. そこで, 4つの平均値を求め, 以後すべての実験は, その同一フィルタを4つのAASセルにセットして行った. なお, ハウリング防止フィルタ, クロストーク補償フィルタの設置は不要であった.
- ② 一次音源を正面に設置した場合, それぞれのフィルタを 4(1-1)-4Filtered-X-LMS アルゴリズムで適応させた場合と, 上記の同一フィルタを設置した場合の減音効果を定点aで図9に比較する. どちらの場合も $500\text{Hz} \sim$

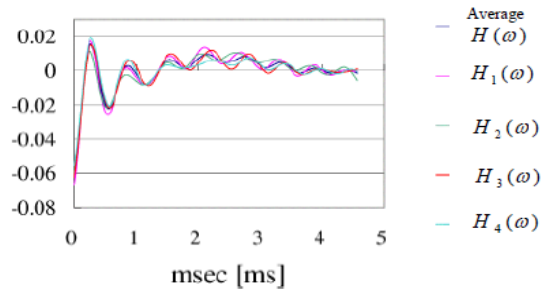
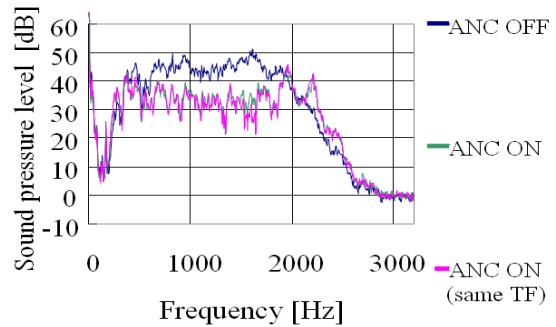
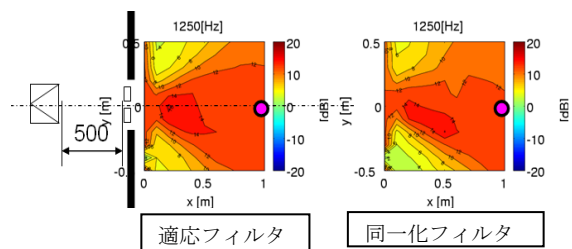


図8 AASの各フィルタ係数



(a) 定点aでの減音効果



(b) 減音コンターの比較 (1250Hz)

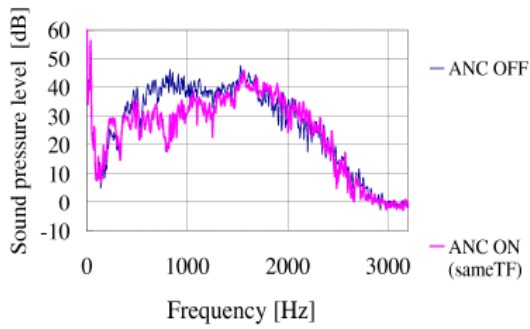
図9 適応フィルタと同一化フィルタの減音効果の比較

2kHz でほぼ同様に $15 \sim 20\text{dB}$ の減音量が得られていることが分かる. また代表例として $1250\text{Hz} 1/3$ オクターブバンドレベルの減音コンターを同様に図9に示すが, こちらも同様に広い範囲で減音効果が得られていることが分かる.

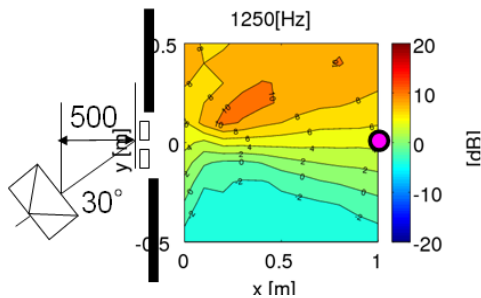
③ 正面音源の場合に合わせて同一化フィルタに固定した条件で, 斜め入射音源に対する減音効果を計測した. 入射角が 30° の場合の定点aでの減音効果を図10に示す. 1300Hz 以下 ($w/\lambda \leq 0.5$) で減音効果が得られていることが分かる. 減音コンターは特に音圧レベルの高い領域で大きく減音しており有効である.

④ 複数音源に対する定点aでの減音効果を図11に示す. ANC-ONの状態でもそれぞれの音源に対する減音後のスペクトルが重なったスペクトルを示しており, 特に問題なく減音が得られていることがわかる.

⑤ 窓から 500mm 離れた位置を窓に平行に一次音源を移動させた場合の, 定点aにおけるバンド音圧レベルの変化を計測した. 代表的結



(a) 定点 a での減音効果



(b) 減音コンター

図 10 斜め入射音源に対する減音効果 ($\theta=30^\circ$)

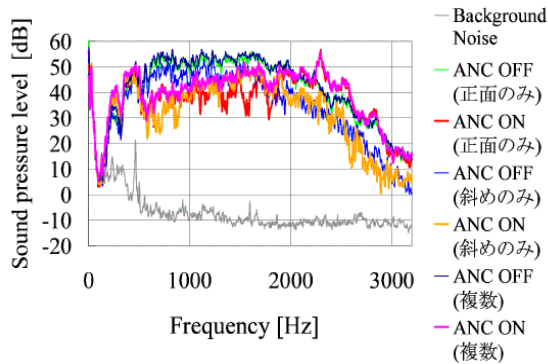


図 11 複数音源に対する減音効果 (定点 a)

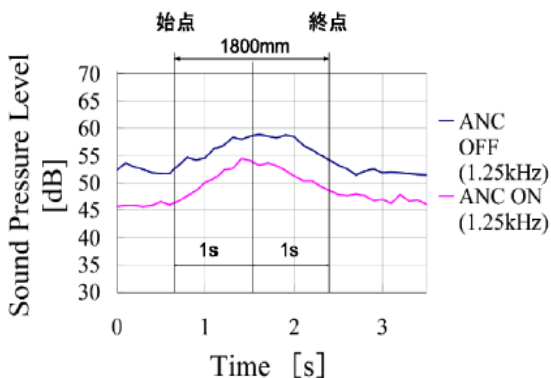


図 12 移動音源に対する減音効果
(0.9m/s, 1250Hz $1/3$ オクターブバンドレベル)

果を図 12 に示す。固定音源の場合と同程度の減音効果が得られていることが分かる。また減音効果は移動スピードに依存しないことが分かっている。

⑥無響室の壁にベニア板を立てかけて、部屋の中の反射音の影響を調べた。定点 a での音圧スペクトルを図 13 に示す。反射の影響でスペクトル自身はぎざぎざが激しくなっているが、全体的に反射がない場合とほぼ同程度の効果が得られていることが分かる。

⑦特にデータの計測はできなかったが、室内での会話など内部音源によってシステムが悪影響を受けることはなかった。これは検出マイクロホンが外側にあること、固定フィルタで制御していることのメリットと考えられる。

以上により、AASの実現性が明確になった。

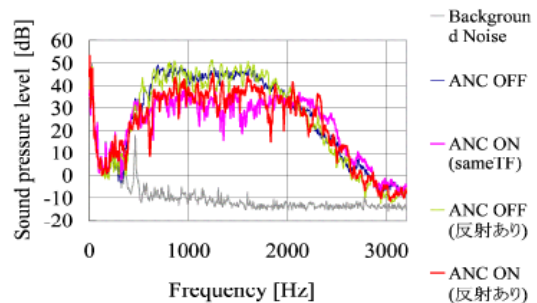


図 13 室内における反射の影響 (定点 a)

(4) FPGA ボードを用いた信号処理速度改善

図 3 の配置で FPGA ボードを用いて更に演算速度を向上させた場合の減音効果を図 14 に示す。コントローラ自身のサンプリング周波数は 1MHz であるが、内部でのデシメーションにより、実際の演算タイミングは 100kHz となっている。図から 1 寸法が 10mm でも因果律を満足し、十分な減音効果が得られていることが分かる。コントローラに FPGA を用いることにより、更なるシステム高性能化の可能性が見出された。

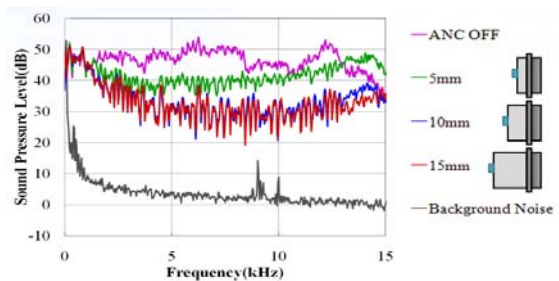


図 14 FPGA コントローラを用いた更なる因果律の改善効果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- ① 西村正治, 西影研一, 村尾達也, 和田信敬, 検出マイクロホン・制御スピーカ一体型ユニットの開発, 第20回環境工学総合シンポジウム, 2010年6月28日, パシフィコ横浜
- ② Masaharu Nishimura, Tatsuya Mura, Nobutaka Wada, Basic Study on Active Acoustic Shielding ; Phase 2 Noise Reducing Performance for a Small Open Window, Internoise2010, 2010年6月14日, Lisbon, Portugal
- ③ 村尾達也, 西村正治, 和田信敬, アクティブ音響シールドイングに関する基礎研究(第2報), 日本騒音制御工学会2010年春季研究発表会, 2010年4月22日, 産業総合技術研究所臨海副都心センター
- ④ 西影研一, 西村正治, 和田信敬, FPGAを用いたANC用高速信号処理ボードの開発, 日本機械学会中国四国支部第48期総会・講演会, 2010年3月6日, 広島工業大学
- ⑤ Masaharu Nishimura, Katsuya Ohnishi, Naoki Kanamori, Kazuhisa Ito, Basic Study on Active Acoustic Shielding, Internoise2008, 2008年10月27日, Shanghai, China

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 正治 (NISHIMURA MASA HARU)
鳥取大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60346369

(2) 研究分担者

金森 直希 (KANAMORI NAOKI)
鳥取大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 90363897
(H19, H20年度のみ)