

建物換気口のためのアクティブ騒音制御に関する研究

—音の到来方向に基づく生活音による遮音性能低下の改善—

志岐 朋晃

1. はじめに

鉄道沿線や幹線道路沿いのような騒音の大きな地域に立地する住宅の外周部には高い遮音性能が求められるが、住宅の外周部に設置される換気口は、通気が目的であり、気密性を必要とする騒音対策とは相反する。換気口の防音対策としてよく用いられるキャップ型フードは、高音域には効果的であるが低音域では遮音能力は落ちる。既往の研究では、一般的に低音域の騒音制御に優れるとされるアクティブ騒音制御 (Active Noise Control; ANC) に着目し、ANC を用いることで換気口の遮音性能の向上が図れることが示されている¹⁾。

しかし、実環境においては屋外騒音だけではなく室内の生活音も ANC システムに混入し、そのために ANC の効果が低下し、逆に室内の音圧レベルが大きくなってしまふ恐れがある。そこで、本研究では、騒音が屋外側から、生活音は室内側から到来することに着目し、生活音による影響を改善する手法を提案することを目的とする。

2. 生活音混入による ANC への影響

騒音が換気口の屋外側から、生活音が室内側から到来すると想定し、数値実験上で生活音による ANC 効果への影響を定量的に把握し、課題の確認を行う。

2.1 数値実験の概要

制御対象の建物換気口と ANC の参照点、制御点、2 次音源の位置関係を図-1 に示す。参照点は騒音が到来する屋外側に、制御点は換気口の屋外側中心部に設けた。制御点には、屋外騒音 (屋外側から到来) と生活音 (換気口から到来) の両方に等しい感度を有する無指向性マイクロホンと、屋外側以外からの到来音に対して感度が低くなる指向性マイクロホンの 2 つを設置した。また、換気口を透過して制御点に入射する生活音は室

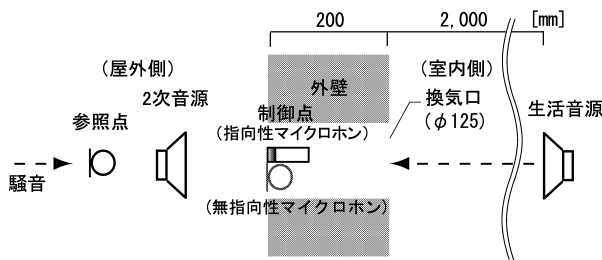


図-1 実験模型の配置図

内の 1 つの音源からのみ発生することとし、図-1 に示すように換気口の中心軸上に生活音源を想定した。

このような ANC システムのブロック図を図-2 に示す。音場特性 a , b は、それぞれ、生活音源から制御点の無指向性マイクロホンまで、生活音源から制御点の指向性マイクロホンまでのインパルス応答であり、音場特性 c は参照点から制御点までのインパルス応答である。数値実験に先駆け、自由音場内に外壁 (換気口) のみが存在すると想定した実物大模型を用いて、音場特性 a , b , c を測定した。ANC の機能として、参照点の信号 (x) に適応フィルタ (h) を畳込み、騒音を打ち消すような信号 ($y = x * h$) を生成し、2 次音源から発生させる。適応フィルタ (h) は、制御点にある 2 つのマイクロホンのうち、無指向性マイクロホンの信号 ($e + v * a$)、または指向性マイクロホンの信号 (e') を誤差信号とみなし、Normalized LMS アルゴリズム²⁾ により逐次更新される。なお、2 次音源から制御点までの音場特性は無視し、サンプリング周波数は 8 kHz、適応フィルタ (h) の更新は 1 サンプルごととした。

道路交通騒音や鉄道騒音などの屋外騒音は広帯域で時間的にも変動する。また、生活音の周波数成分は純音成分の多い音から広帯域音にわたりさまざま、時間変動も定常音、変動音、衝撃性の音など多様である。本研究では、騒音を広帯域変動音の代表として小型自動車騒音³⁾ とし、生活音として表-1 に示す 8 種³⁾ を用いた。騒音および生活音をそれぞれ 3 秒間とし、ANC システムの制御点に到来する生活音が騒音に比べて大きい場合に焦点を絞って検討するため、生活音 (3 秒間) の 1~2 秒までの 1 秒間の平均音圧レベルを騒音より 0, 10, 20, 30 dB 大きく設定した。なお、ANC の効果が期待できる中低音のみを検討対象とするため、騒音、生活音とも 562 Hz より高い周波数域は遮断した。

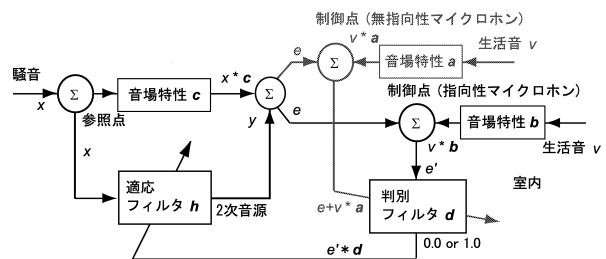


図-2 ANC システムのブロック図

表-1 生活音の種類

スペクトル による分類	時間変動による分類		
	定常音	変動音	衝撃性の音
広帯域音・狭帯域音	掃除機 洗濯機(脱水) 除湿機	貨幣計算機 男性の朗読音	—
離散純音	ドライヤー	ピアノ バイオリン	—

2.2 生活音による影響

騒音に対して ANC が適応した後に 3 秒間の生活音を混入させた(制御点は無指向性マイクロホン)。生活音が混入して 1~2 秒までの 1 秒間の信号 e の平均音圧レベルで ANC 効果を評価したものを表-2 に示す。生活音がなければ 22.4 dB の効果があったものが、どの生活音に対しても、ANC の性能が大きく低下していた。このことから、生活音の混入を防御しない ANC システムでは、制御点で捉えた間違った誤差信号に応じて適応フィルタを更新してしまうことが原因で、アクティブに制御しないときよりも室内の音圧レベルが上昇してしまう恐れがあることが分かった。

3. 指向性マイクロホンを利用した改善手法

生活音は室内側から入射するため、室内側から到来する音をシステム内に混入させなければ ANC 効果への影響を抑制できると考えられる。そこで、制御点に指向性マイクロホンの指向軸を屋外側に設置し、室内側からの感度を下げることで、生活音による影響を改善する検討を行った。

図-3 に、騒音しか存在しない場合に ANC-Off から On にした場合の制御効果(制御点は無指向性マイクロホン)、生活音の混入が ANC 効果に及ぼす影響、そして制御点を指向性マイクロホンにしたときの改善効果を、生活音を男性の朗読音、生活音と騒音の音圧レベル差を 0 dB とした場合について例示する。ANC 効果を、生活音混入後の信号 e の平均音圧レベル(1~2 秒の 1 秒間)で評価すると、生活音の影響により ANC 効果が 1.9 dB と性能が低下していたものを 15.4 dB の ANC 効果まで抑制することができた。

同様に検討対象の 8 種の生活音に対して指向性マイクロホンを利用したときの、信号 e の 1~2 秒の 1 秒間の平均音圧レベルで ANC 効果を評価した結果を表-3 に示す。生活音と騒音のレベル差が大きくなるにつれ ANC 効果は減少し、特に生活音と騒音のレベル差

表-2 生活音が混入したときの ANC 効果

生活音の種類	生活音と騒音の音圧レベル差 [dB]							
	0	10	(12)	(14)	(16)	(18)	20	30
掃除機	2.1	-7.8	-9.8	-11.8	-13.8	-15.8	-17.8	-27.6
洗濯機(脱水)	4.0	-5.9	-7.9	-9.9	-11.9	-13.9	-15.8	-25.5
除湿機	2.9	-7.1	-9.1	-11.1	-13.1	-15.1	-17.1	-26.8
ドライヤー	1.5	-8.5	-10.5	-12.5	-14.5	-16.5	-18.5	-28.2
貨幣計算機	1.8	-8.2	-10.2	-12.2	-14.2	-16.2	-18.2	-28.0
男性の朗読音	1.9	-8.1	-10.1	-12.1	-14.1	-16.1	-18.0	-27.7
ピアノ	2.2	-7.7	-9.7	-11.7	-13.7	-15.7	-17.7	-27.5
バイオリン	-1.3	-11.3	-13.3	-15.3	-17.3	-19.3	-21.3	-31.1

※ ■ は ANC が逆効果となる条件

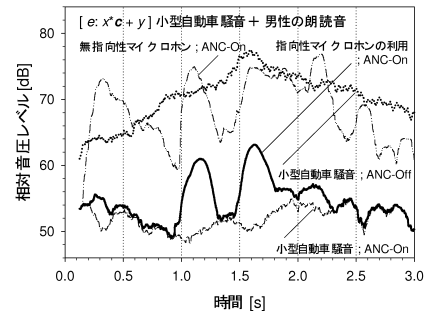


図-3 指向性マイクロホンの利用による改善効果

18 dB 以上の場合では、ANC が逆効果に働いてしまうことが分かる。以上の結果から、特に生活音が騒音より大きいときに生活音の影響を抑制できるような、さらなる改善手法が必要であると考えられる。

4. 指向性・無指向性マイクロホンを用いた改善手法

制御点に入射する生活音と騒音の到来方向に着目すると、生活音の音圧レベルが騒音に比べて大きいほど、制御点の無指向性マイクロホンの音圧レベルは指向性マイクロホンより大きくなると予想される。そこで、生活音による影響を抑制する手法として、2つのマイクロホンの瞬時の音圧レベル差から生活音の混入の有無を判断して、生活音の混入時は 0.0、混入しないときは 1.0 と出力する新たな判別フィルタ (d) を導入し、生活音の混入時には誤差信号 (e') を強制的に 0.0 にして適応フィルタを更新させないような手法を検討する。

4.1 判別フィルタの閾値およびフィルタ長の決定

判別フィルタ (d) の役割は、制御点に指向性マイクロホンを用いても ANC が逆効果に働いてしまう場合に、それを抑制することである。つまり、指向性マイクロホンのみでも ANC システムへの生活音の混入を抑制できる場合は通常どおり ANC を動作させ (d は 1.0 を出力)、ANC が逆効果となるほど大きな生活音が発生したときのみ、適応フィルタの更新を止めるよう動作 (d は 0.0 を出力) させる必要がある。したがって、指向性マイクロホンと無指向性マイクロホンの音圧レベル差がどの程度大きくなれば ANC の更新を中断させるかといった、閾値となるレベル差と、音圧レベルを計算する時間幅(フィルタ長)を適切に設定する。

生活音による影響の程度は生活音の種類によって異なるため、判別フィルタの閾値とフィルタ長は、さま

表-3 指向性マイクロホンを用いたときの ANC 効果

生活音の種類	生活音と騒音の音圧レベル差 [dB]							
	0	10	(12)	(14)	(16)	(18)	20	30
掃除機	15.9	6.9	5.1	3.1	1.1	-0.9	-3.0	-12.4
洗濯機(脱水)	20.2	13.4	11.7	9.8	7.9	6.0	3.9	-5.3
除湿機	17.3	8.7	6.9	5.0	3.0	1.1	-1.1	-10.0
ドライヤー	20.3	13.9	12.3	10.4	8.5	6.6	4.5	-5.1
貨幣計算機	19.9	13.1	11.5	9.6	7.7	5.8	3.7	-5.9
男性の朗読音	15.4	6.3	4.5	2.5	0.6	-1.4	-3.5	-11.2
ピアノ	17.2	8.6	6.8	4.8	2.8	0.9	-1.3	-10.1
バイオリン	20.7	15.1	13.6	11.8	10.0	8.1	6.0	-1.3

※ ■ は ANC が逆効果となる条件

表-4 閾値とフィルタ長を検討する際の条件

生活音の種類	ピンクノイズの定常音, 掃除機, 125, 250, 375, 500Hz 純音の複合音の定常音, 除湿機, 男性の朗読音, ピアノ
制御点に到来する生活音と騒音のレベル差 [dB]	0, 10, 20, 30
判別フィルタの閾値 [dB]	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
判別フィルタのフィルタ長 [ms]	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100

計 2,904 パターン (6×4×11×11)

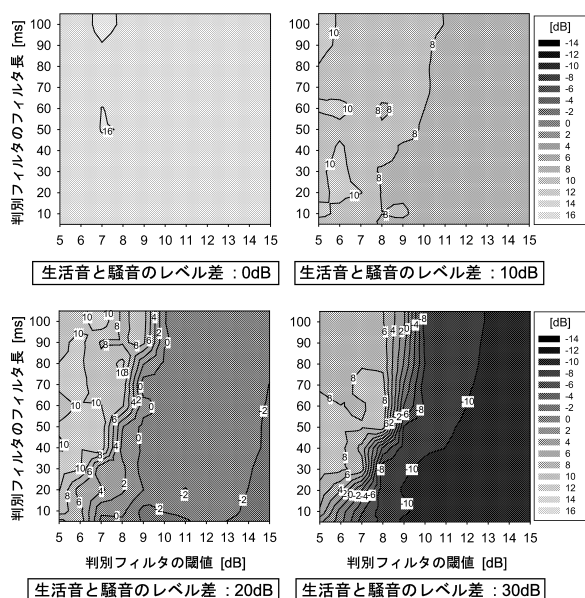


図-4 判別フィルタの閾値とフィルタ長の変化によるANC効果の例 (男性の朗読音)

さまざまな生活音に対応できるように決定する必要がある。そこで、生活音に広帯域音の代表として全ての周波数特性を含む「ピンクノイズの定常音」、純音成分を多く含む代表として「125, 250, 375, 500 Hz 純音の複合音の定常音」、また、表-1の8種のうち「掃除機, 除湿機, 男性の朗読音, ピアノ」の4種を用いることとした。判別フィルタの適切な閾値とフィルタ長を検討する際の条件を表-4に示す。

図-4に、生活音を男性の朗読音としたときの判別フィルタの閾値およびフィルタ長の変化によるANC効果(3秒間のうちの1~2秒の1秒間)を例として示す。色の薄い領域が効果が大きく、色が濃くなるほど効果が低下している条件である。生活音と騒音のレベル差が0dBと10dBの場合は、3秒間のほとんどが騒音と判断されるため、どの条件でも色が薄くなっており、制御点に指向性マイクロホンを利用するだけで十分高い効果がある。しかし、生活音と騒音のレベル差が20dB、さらに30dBと大きくなると、閾値が5~8dB、フィルタ長が30~80msあたりでANC効果が高くなっている。同様に上記6つの生活音に対して検討し、適応フィルタの更新を止めることによる悪影響が最も小さ

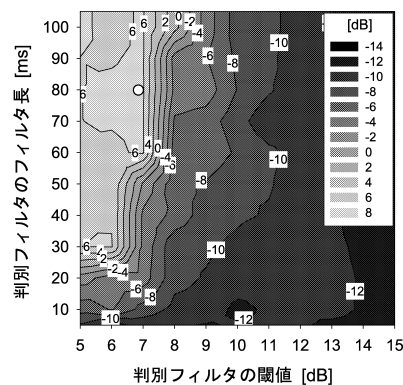


図-5 判別フィルタの閾値とフィルタ長の変化によるANC効果の最低値

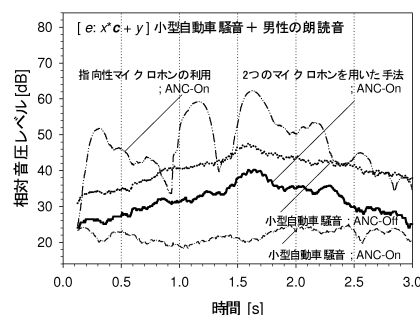


図-6 改善手法を用いたときのレベル変動

い条件を求めるため、全ての条件についてANC効果の最低値を重ね合わせた結果を図-5に示す。この図の最も色の薄い領域(効果が6dB以上となる部分)が最も適切な閾値とフィルタ長であると考え、閾値は7dB、フィルタ長は80msと決定した。

4.2 2つのマイクロホンを用いた手法の改善効果

前節で定めた生活音混入の判別フィルタを用いることによって、ANC効果の低減が緩和されるかについて検討を行う。騒音に小型自動車騒音、生活音に表-1の8種の音源を用い、生活音の混入を判断させた。

2つのマイクロホンを用いたときの信号eの125msの平均音圧レベル変動の例(生活音:男性の朗読音, 生活音と騒音のレベル差:30dB)を図-6に実線で示す。一般的に、制御点に混入した生活音の影響が抑えられており、生活音が大きい箇所でも2つのマイクロホンを用いる手法によって大きく改善できたことが分かる。同様に各生活音に対して改善手法を検討し、信号eの1~2秒の1秒間の平均音圧レベルで評価した結果を表-5に示す。表-3と比較してみると、生活音と騒音の音圧レベル差が18dB以上の場合で指向性マイクロホンを用いてもANCの効果が低下していたものが大きく改善された。ただし、レベル差が0dBや10dBの場合、「脱水, ドライヤー, 貨幣計算機」では指向性マイクロホンを用いたときよりANC効果がやや小さくなった。これは指向性マイクロホンのみで十分効果があるにも

表-5 2つのマイクロホンを用いた手法の改善効果

生活音の種類	生活音と騒音の音圧レベル差 [dB]							
	0	10	(12)	(14)	(16)	(18)	20	30
ANC効果 [dB]								
掃除機	16.2	7.4	6.3	6.4	6.2	6.3	6.5	6.2
洗濯機(脱水)	19.6	6.2	6.4	6.4	6.4	6.0	5.6	6.4
除湿機	17.5	8.1	6.7	6.4	6.3	6.4	6.5	6.2
ドライヤー	19.1	6.5	6.6	6.6	6.6	6.6	6.5	6.3
貨幣計算機	19.0	7.1	6.6	6.5	6.4	6.5	6.4	6.4
男性の朗読音	15.9	9.0	7.0	7.9	9.8	10.7	8.5	7.7
ピアノ	17.2	8.9	6.8	6.4	6.3	6.4	6.2	6.4
バイオリン	16.1	13.4	13.4	13.3	13.2	12.9	12.5	10.9

拘わらず、適応フィルタの更新を止めてしまうことでANCの機能が弱まるためと考えられる。しかし、どの条件においてもANCを用いない場合より5.6dB以上の効果があり、ANCが逆効果となることはなかった。

5. 検証実験

4.で提案した手法を用いて、騒音と生活音が単一の音源のみではなく、さまざまな音が同時に発生している場合においても効果があるか確認するため、実空間において騒音源と生活音源をそれぞれ道路端と住宅内で録音したものをを用いて数値実験上で検証を行った。騒音には交通量の多い道路交通騒音と航空機騒音が逐次発生しているもの、生活音には住宅内でエアコンとテレビが同時に発生しているものそれぞれ140秒間の音源を用い、生活音の混入を判断させた。制御点で捉える生活音と騒音の平均音圧レベル差(1秒毎)を算出するとおよそ1.0~36.0dBであった。

以上の音源について、騒音のみ存在する場合にANC-OffからOnにした場合のANC効果(制御点は無指向性マイクロホン)、生活音加わり制御点を指向性マイクロホンにしたときのANC効果、制御点に2つのマイクロホンを利用したときのANC効果の1秒毎の変動を図-7に示す。また図-8に、制御点で捉える生活音と騒音のレベル差とANC効果との関係を示す。ANC-Onで生活音がない場合、140秒を通して10dB前後のANC効果があったが、制御点に指向性マイクロホンを利用するだけでは、特に生活音と騒音のレベル差が15dB以上になると、ANCが逆効果となった。また、制御点に2つのマイクロホンを利用することで、指向性マイクロホンの利用のみでは逆効果となっていたものが、特にレベル差が15dB以上の場合では安定して生活音による影響が抑制される結果となった。以上の結果から、複数の音が生活音に含まれていても、生活音が特に大きいほど改善効果が顕著であり、大きく誤作動を起こさないことが分かった。

6. まとめ

建物換気口にANCを適用することで遮音性能を向上させることが可能であるが、制御対象でない生活音が制御点に混入することで性能が低下する恐れがある。そこで本研究では、生活音による影響を抑制するため、生活音と騒音の到来方向に着目した改善手法を提案した。

まず、ANCシステムに生活音が混入すると、それに応じて適応フィルタが更新され、ANC効果が低下する

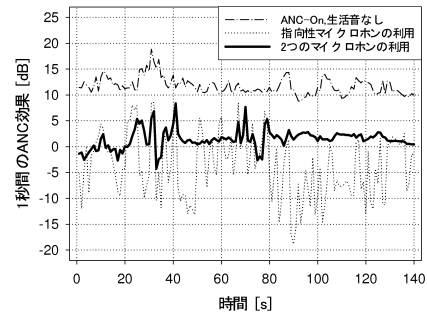


図-7 検証実験における改善効果

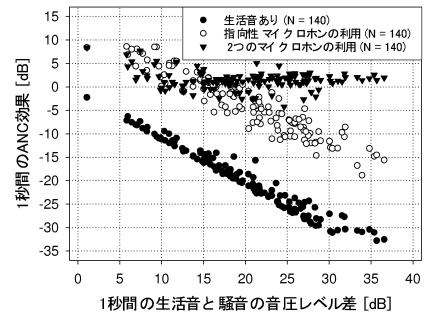


図-8 生活音と騒音のレベル差とANC効果との関係

ことを確認した。次に、生活音による影響を改善するため、室内側からの感度が低くなるよう制御点に指向性マイクロホンを用いた手法による改善効果を検討した。その結果、システム内に混入する生活音が小さくなることで影響を緩和できた。しかし、特に大きな生活音が混入するとANCが逆効果となることが分かった。

その対策として、ANCシステムに指向性・無指向性の2つのマイクロホンを導入し、両者に入射する瞬時の音圧レベルの差から、音の到来方向を判断する手法を新たに提案した。その結果、指向性マイクロホンのみの利用ではANC効果が低下するほどの大きな生活音が混入しても、生活音によって大きく影響を受けることはなかった。また、生活音と騒音の音圧レベル差が小さい場合では指向性マイクロホンのみの効果よりANC効果は劣る場合があったが、2つのマイクロホンを利用する手法はANCが逆効果となることはなかった。

最後に、検証実験を行った結果から、2つのマイクロホンを用いる手法は、ANC-Offのときより逆効果となる箇所も存在し可能な手法ではないが、生活音がないときはANCで遮音性能の向上を図ることができ、生活音が混入しても大きく誤作動しない安定した手法であるといえる。

参考文献

- 1) 穴井 謙, 藤本一寿, 建物換気口に対するアクティブ騒音制御の適用効果に関する実験的検討, 日本建築学会九州支部研究報告 45, 81-84, 2006.
- 2) P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Sound*, Academic Press Ltd., 161-203, 1992.
- 3) 日本建築学会編, 建築と環境のサウンドライブラリ, 技報堂出版, 2004.