

# 試験住宅に設置された換気口における自動車騒音に対する アクティブ騒音制御効果の検証

三小田 亮

## 1. はじめに

近年、省エネルギーの志向から、住宅を始めとするあらゆる建物で高气密・高断熱化が進み、建物外周部に換気口を設けなければ十分な換気量が確保されなくなっている。ところが、幹線道路沿道など屋外騒音の大きな地域では、換気口を透過する騒音が静穏な住空間を損なう原因になる恐れがある。そのため、建物の遮音性能のボトルネックとなる換気口に対する効果的な対策が望まれている。換気口の遮音対策としてはキャップ型フードなどのパッシブ手法が一般的であるが、この対策では、1kHzより高音域の透過損失は30dBを超えているものの、およそ800Hz以下の低音域では遮音能力が落ちていく。一方、屋外騒音は一般的に広帯域であるため、換気口の遮音技術も広帯域のもでなければならない。しかし、一般に低音域の遮音には大きな材料や空間を必要とするため、換気口周辺の限られた空間に適用するのは難しい。そこで、換気口からの透過音を広帯域に抑制するためには、パッシブ手法と組み合わせて中低音域の制御に適しているアクティブ手法を用いることが有効ではないかと思われる。

このような観点から、当研究室では、自動車騒音に対するアクティブ手法の制御効果を数値シミュレーションによって検討し、10dB程度の制御効果があることを把握している<sup>1)</sup>。本研究では、このようなアクティブ手法の制御効果を試験住宅に設置された換気口について検証することを目的とする。

## 2. 試験住宅に設置された換気口における実験

### 2.1 実験対象の換気口

実験対象の換気口は、図-1に示すように住宅外壁に設置されているものである。断面形状は、図-2に示すように、直径75mmの円筒形で、奥行きは200mm、屋外側に雨避けのフードが付いている。住宅の壁体はレンガ造、窓サッシはペアガラスである。

JIS A 1520「建具の遮音試験方法」に準じて、窓サッシおよび外壁の音響透過損失相当値を測定した<sup>2)</sup>結果を表-1に引用する。例えば500Hz帯では窓サッシ・外壁ともに30dB以上の遮音性能を有し、外周部分は一般の木造住宅と同等の遮音性能を有している。

### 2.2 換気口を透過する騒音の周波数特性

換気口から透過する騒音の周波数特性、すなわち、ア

表-1 外壁構成部材の音響透過損失（相当値）

Frequency [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
Window [dB]	21.8	20.2	36	36.3	31.9	32.2
Outer wall [dB]	20.7	23.8	33.8	36.7	36.9	38.6

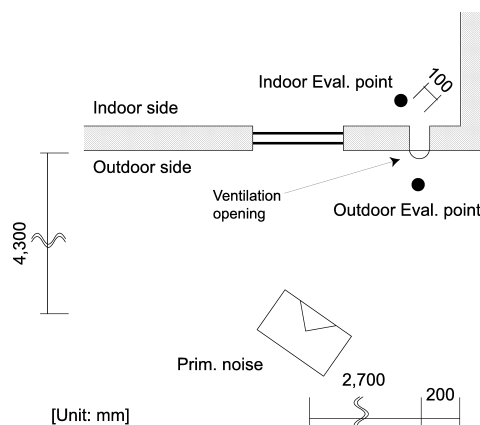


図-1 換気口（平面図）

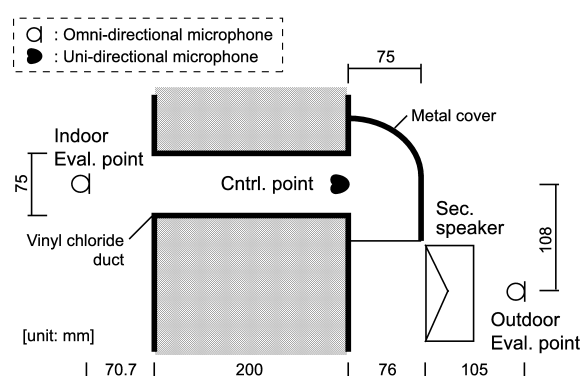


図-2 換気口（断面図）

クティブ制御の対象周波数域を確定するために、換気口の屋外と室内の音圧レベル差を評価する。

換気口と評価点（外・内）の位置関係を図-2に示す。室内の評価点は換気口の中心軸から45°振り、換気口端から直線距離で100mmの位置とした。また、屋外の評価点も中心軸から外れており、直線距離で211mmの位置とした。評価のための音源はピンクノイズを用い、換気口から直線距離で約5m離れた箇所にラウドスピーカー（Prim. source）を設置した（図-1参照）。

一般にアクティブ手法は1kHz以下の低い周波数域で有効に働くが、今回の検討対象のような住宅に用いら

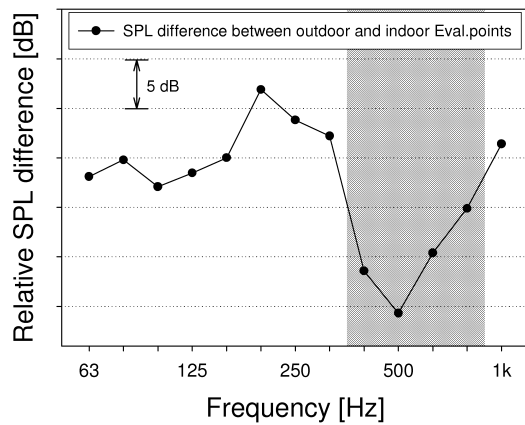


図-3 評価点（屋外）と評価点（室内）の音圧レベル差



図-4 換気口と2次音源

れる比較的小型の換気口は、中高音域の騒音が透過しやすく、低音域の騒音は透過しにくいと思われる。また、高音域の騒音はパッシブ手法によって遮音が可能であることから、換気口のアクティブ手法の制御対象周波数域は中音域であると予想される。換気口の屋外-室内間の音圧レベル差の実測値（図-3）を見ると、換気口を含む外壁の遮音性能は、中心周波数  $f_c$  が 400–800 Hz の中音域が他の周波数域に比べて 5–10 dB ほど小さい。したがって、この周波数域を以降のアクティブ制御の検討対象とする。

### 2.3 実験システム

換気口のアクティブ制御システムは、信号処理 (DSP) 部以外に参照点・2次音源・制御点から構成される。本研究では参照点の設置位置については検討しない。騒音源の出力信号を DSP にライン入力した上で、Filtered-X LMS アルゴリズム<sup>3)</sup>により適応させ、2次音源から干渉音を出力させる。2次音源は、発せられるすべての音波が必ずしも騒音の干渉音となるわけではなく、アクティブ制御による新たな騒音源となる可能性も少なくないため、室内側ではなく換気口の屋外側に設置すべきと考え、図-4のように、雨避けフードの下端に設置した。制御点は、2次音源より騒音に対して下流側（室内側）に設置しなければならない。その位置によ

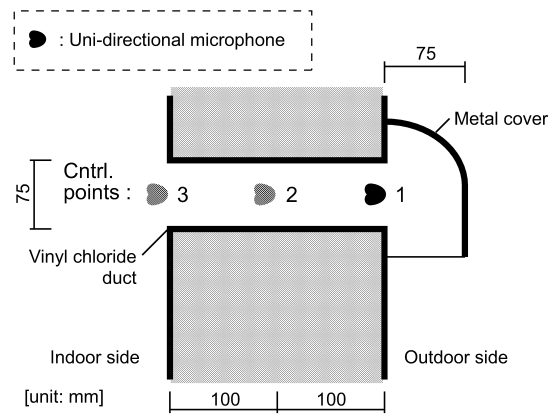


図-5 制御点の設置位置

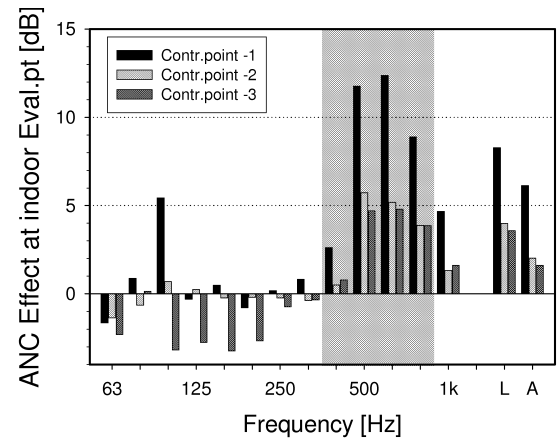


図-6 制御点の設置位置による ANC 効果の違い

て ANC 効果が異なると思われ、制御点は換気口のための制御システムの有効性を決定づける重要な役割を担っている。

## 3. 実験結果

### 3.1 制御点の設置位置

換気口に対してアクティブ手法を適用する場合、制御点の設置位置が ANC 効果に大きく影響することが予想される。そこで、自動車騒音の制御実験に先立ち、制御点の適切な設置位置を検討する。図-5に示すように、換気口内の屋外側 (point-1)、中央部 (point-2)、室内側 (point-3) の3箇所に制御点 (単一指向性マイクロホン) を設置して、ANC 効果の違いを検討する。Prim. source からピンクノイズを出力し、ANC-On のときと Off のときの室内の評価点における音圧レベル差で ANC 効果の評価した。

検討結果を図-6に示す。制御対象周波数域  $f_c$ :400–800 Hz 帯に着目すると、 $f_c$ :400 Hz 帯ではいずれの位置においても効果が小さいものの、 $f_c$ :500–800 Hz 帯では、point-1 が最も効果が高く、ほかの2点に比べて 5 dB 以上大きな効果がある。したがって、制御点の設

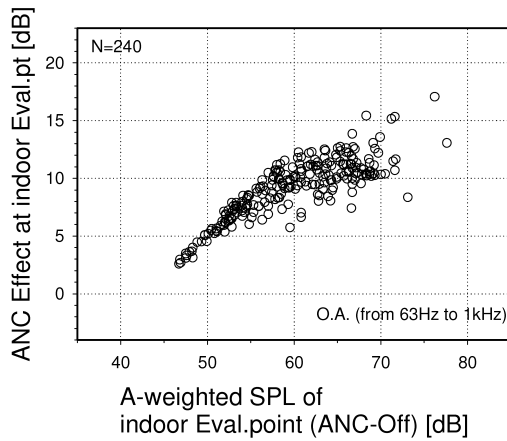


図-7 評価点（室内）の騒音レベルと ANC 効果

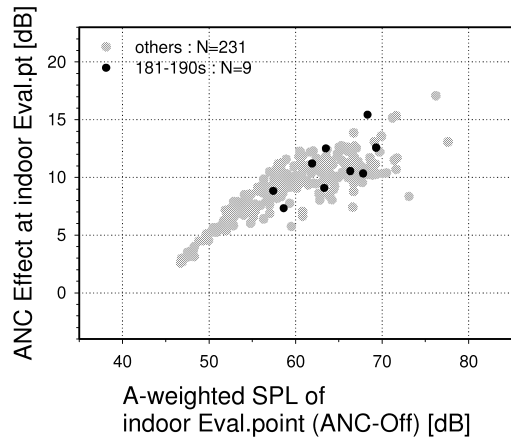


図-9 181-190s の騒音レベルと ANC 効果

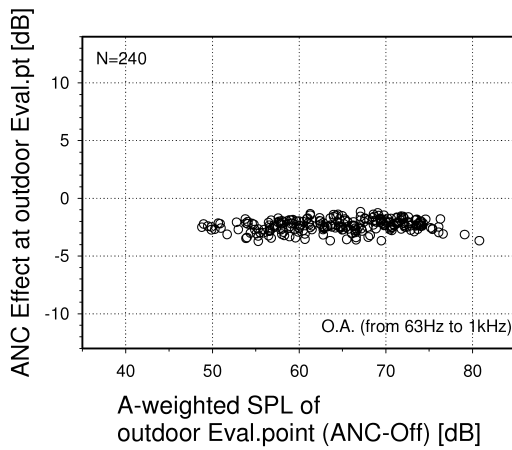


図-8 評価点（屋外）の騒音レベルと ANC 効果

置位置は屋外面が適していると判断し、以降の検討では制御点を point-1 に設置する。

### 3.2 自動車騒音に対する ANC 効果

自動車騒音は大きさや周波数特性が時々刻々と変化する。そのような広帯域で非定常な騒音に対しても、ANC 効果を保ち続けることができるのか検討する。

換気口から透過する自動車騒音に対するアクティブ騒音制御の効果量を明確に捉えるために、ANC-Off と ANC-On の場合でまったく同じ騒音を入力し、評価点（室内・屋外）における騒音レベルの大小を比較できるように、騒音源は実際に走行している自動車騒音ではなく、事前に道路端で収録した自動車騒音をラウドスピーカーから出力する。また、制御対象音の騒音以外の音やシステムが出力する干渉音の影響を排除するため、ANC システムに参照点は設けず、スピーカーから出力する騒音の音圧信号をライン入力する。

#### 3.2.1 騒音レベルと ANC 効果

検討した制御対象騒音は 240.0s 間で、普通車、大型車、二輪車が混在して走行している道路端（密粒舗装）で収録したものである。交通量は 287 台/h であった。

室内の評価点における、騒音レベルと ANC 効果（1s ごとに A 特性で評価）の関係を図-7 に示す。騒音レベルが 60 dB 以下では、騒音が小さくなるにつれて ANC 効果が減少していく。この現象は暗騒音が影響しているためであり、SN 比が大きくなければアクティブ制御の性能が十分に発揮されないことを示していると考えている。騒音が 40 数 dB と小さいときには、暗騒音の影響のため ANC 効果は 3 dB 程度と小さいが、騒音レベルがおよそ 60 dB 以上になると、10–13 dB 程度の一定の ANC 効果が得られている。したがって、ANC システムが生成する干渉音の大きさは、騒音の大きさに連動して適切に調整されていると判断される。

屋外の評価点における効果（図-8）は、騒音レベルに関わらず常に 3 dB 程度の逆効果になっている。室内の騒音を小さくするためにアクティブ制御を行うと、2 次音源が屋外で新たな騒音源となってしまう。

#### 3.2.2 周波数特性の変動と ANC 効果

自動車騒音の周波数特性が大きく変動するようなどときには、適応フィルタが十分に追従できずに ANC 効果が一時的に下がる可能性がある。そこで、ANC 効果が大きく変化している 181–190s（図-9 参照）の連続した 9s 間に着目して、周波数特性の変動と ANC 効果の関係を調べてみた。

周波数特性の変動量 ( $V$ ) は、0.2s ごとに 1/3 オクターブバンドの周波数特性の変化を比較し、ある時間帯の前後 ( $t, t-1$ ) における各バンド  $i$  の音響エネルギー密度  $d_i$  の変化量  $|d_{i,t} - d_{i,t-1}|$  の総和で評価することとした。また、各時間帯の音響エネルギー密度の合計で基準化し、騒音の大きさに影響されない指標とした。式で表すと次のようである。

$$V = \sum_{i=1}^j \left| \frac{d_{i,t}}{\sum_{i=1}^{12} d_{i,t}} - \frac{d_{i,t-1}}{\sum_{i=1}^{12} d_{i,t-1}} \right|$$

$V$  が大きいほど、周波数特性の時間変化が大きいことを示している。アクティブ制御対象域の 400–800 Hz 帯域 ( $j = 4$ ) と、それ以下の 63–315 Hz 帯域 ( $j = 8$ ) に分けて、ANC 効果との関係を検討した。

図-10 および図-11 に、 $V$  と ANC 効果の時間変化を示す。400–800 Hz 帯では、両者には関係がないように思われる。63–315 Hz 帯では、181–184s の間で  $V$  が小さくなるにつれて ANC 効果が大きくなり、184–189s の間で  $V$  が大きくなるにつれて ANC 効果が減少していくという傾向が確認できる。9s の間、常に 6 dB 以上の ANC 効果が保たれているものの、換気口以外の外壁や窓を透過してくる 315 Hz 帯以下の低い周波数帯の変動騒音が適応フィルタに影響を及ぼし、ANC 効果を減少させていると考えられる。

自動車のエンジンから低い騒音が放出されることから、自動車が換気口（住宅）に近づくと ANC 効果が数 dB 減少することになると思われる。より安定した ANC 効果を得るために、低音域の騒音は遮断し、換気口を透過しやすい中音域の周波数帯域に制限して ANC システムに入力する方が望ましいと思われる。

#### 4. まとめ

本研究では、試験住宅に設置された実際の換気口を対象にアクティブ制御実験を行い、自動車騒音に対する ANC 効果を検証した。住宅換気口にアクティブ手法を適用することによって、レベルおよび周波数特性が時々刻々と変化する自動車騒音に対しても、騒音レベルで 10–13 dB 程度の ANC 効果が得られることを確認した。この結果は、これまでの研究で数値シミュレーションによって把握していた 10 dB 程度の効果と同程度のものであり、実空間においてもアクティブ手法が有効に機能することを検証できた。

本研究で得られた知見は次のとおりである。住宅に設置される小型の換気口からは、400–800 Hz 帯の中音域の騒音が大きく透過する。定常音に対する ANC 効果は、400–800 Hz 帯域でおよそ 3–13 dB であり、換気口から透過しやすい周波数域の騒音をアクティブ手法によって低減することが可能である。また、ANC 効果は制御点の設置位置により 5 dB 以上異なり、換気口内では屋外面に揃えた箇所が最も適している。自動車騒音のような変動音に対してもアクティブ手法は有効であり、騒音のレベルに応じて干渉音を出力することから、ANC 効果は騒音のレベル変動に左右されない。一方、周波数特性の変動は、制御中に随時更新される適応フィルタに影響を及ぼす。特に、換気口以外の外周部からも透過する 315 Hz 以下の帯域の変動は、換気口を透過

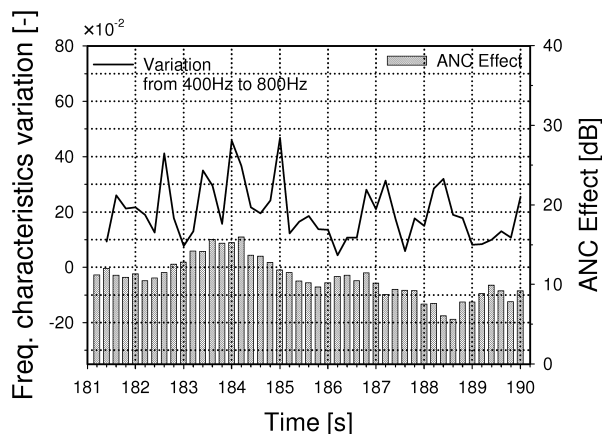


図-10 周波数特性の変動と ANC 効果（中音域）

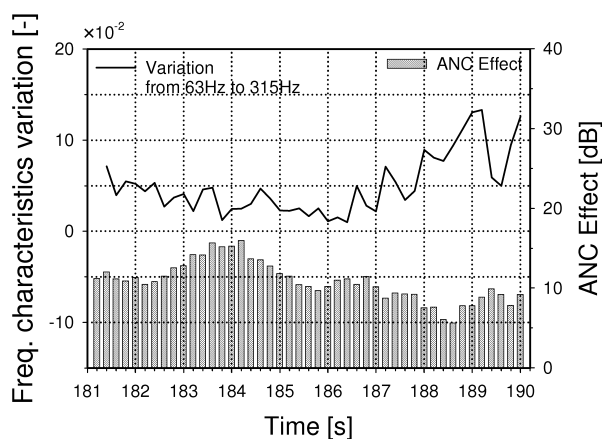


図-11 周波数特性の変動と ANC 効果（低音域）

する騒音だけを制御対象としている本システムに対してはノイズとして作用し、ANC 効果を低下させる。

周波数特性の変動による ANC 効果の低下を防ぐために、バンドパスフィルターを併用して、換気口を透過しやすい中音域の騒音のみ ANC システムに入力するという改善策が考えられるが、その効果の検証は今後の課題である。また、実際に走行する車両の騒音に対する ANC 効果の検証も今後行う必要がある。

**謝辞** 本研究で使用したレンガ住宅は、福岡市が管理している施設である。ご協力いただいた関係諸氏に感謝する。

#### 参考文献

- 1) 柴田拓郎, 穴井 謙, 平栗靖浩, 藤本一寿, アクティブ騒音制御による建物換気口の遮音効果に及ぼす生活音の影響—その 4 周波数特性に基づく制御対象音の判別による ANC 効果低減の改善—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, 275–276, 2009.
- 2) 穴井 謙, 藤本一寿, アクティブ騒音制御による建物換気口の遮音性能向上に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, 113–114, 2006.
- 3) P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Sound*, Academic Press Ltd., 161–203, 1992.