

建物換気口に対するアクティブ騒音制御の遮音効果 に関する実験的検討

穴井, 謙
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

財津, 洋介
九州大学工学部建築学科

藤本, 一壽
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/19078>

出版情報：都市・建築学研究. 10, pp.65-70, 2006-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

建物換気口に対するアクティブ騒音制御の遮音効果に関する実験的検討

Experimental Investigation on Effects of Sound Insulation of a Ventilation Opening by Active Noise Control

穴井 謙*, 財津洋介**, 藤本一壽*

Ken ANAI, Yosuke ZAITSU and Kazutoshi FUJIMOTO

In this report, improvement in sound insulation of a ventilation opening by using the Active Noise Control (ANC) technology, which in general has excellent performance in the control of lower frequency noise, is considered. Firstly, model experiments are conducted in order to confirm the quantitative performance of ANC against a ventilation opening. The results show that ANC can insulate about 30 dB from steady noise in one-third-octave band with center frequency of 500 Hz passing through a ventilation opening. Then a practical effect is measured to verify the ability to control noise in an actual experimental house. As a result, it is found that the sound insulation by ANC is also effective in ventilation openings of actual houses.

Keywords : Active Noise Control, Ventilation opening, LMS algorithm

アクティブ騒音制御, 換気口, LMS アルゴリズム

1. はじめに

快適な住空間を提供するためには室内の静けさを確保する必要があるが、鉄道騒音や道路交通騒音などは依然として大きく、これら屋外騒音の侵入を防ぐためには建物の外周部に高い遮音性能が求められる。建物外周部に設置される開口部（窓や換気口）は、外壁に比べて遮音性能が低いと考えられるが、窓については、高断熱性能を有するペアガラスや高気密性のサッシを用いることで遮音性能も同時に向上させることが可能であり、あるいは防音を目的とした2重窓を選択することもでき、遮音に対する配慮が可能である。一方、換気口は、空気の流入出のために孔を開けておくことが本来の目的であり、これは騒音防止の基本である孔を塞ぐことと相反する。したがって、換気口は建物外周部の遮音性能のボトルネックとなりやすく、効果的な遮音対策が求められる。

換気口の遮音対策として、キャップ型フード¹⁾を換気口に被せるという音響的にパッシブな方法が従来から用いられているが、屋外騒音は低音域から高音域まで含んでい

るのに対し、一般的なキャップ型フードは1kHzより高音域では30dBを超える大きな透過損失を有しているものの、およそ800Hzより低音になるに連れて遮音能力が低下していく。また近年では、パッシブ手法を用いて広帯域に渡って換気口の遮音能力を高めることができる優れた技術^{2,3)}が提案されているが、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。

本報告では、従来のキャップ型フードと、中低音域の制御に優れているアクティブ騒音制御(ANC)技術を併用することで、パッシブ技術のみの手法に比べて小型の遮音装置を提案できるのではないかと考え、まずは換気口に対するANCの効果を定量的に把握することを目的に実験的な検討を試みた。

2. 戸建住宅外周部の遮音性能

建物外周部の遮音性能の傾向を把握するために、サッシおよびドアセットを対象に音響透過損失相当値(TL_q)の測定について規定された“JIS A 1520”⁴⁾を準用して、乾式煉瓦造の実験住宅⁵⁾を対象に、外壁(総厚250mm)、窓サッシ(2重ガラス)、換気口(径70mm円孔)の TL_q を測定した。各部材の測定結果を図1に示す。125-250Hz

* 都市・建築学部門

** 工学部建築学科

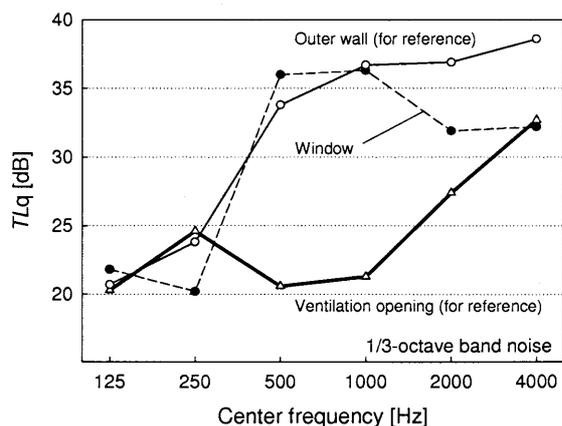


図1 建物外周部の音響透過損失相当値

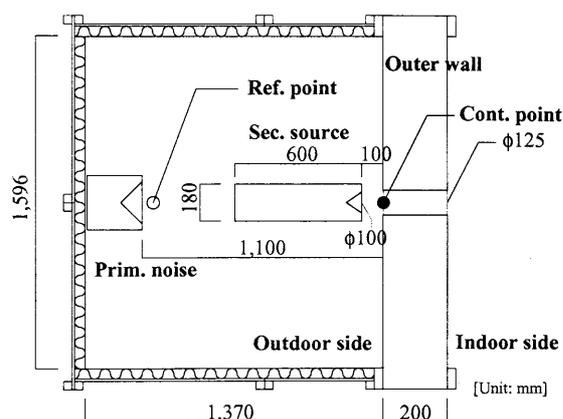


図2 実験模型の平面図

では部材によって遮音性能に違いは見られなかったが、500 – 1k Hz 帯では、換気口の遮音性能がその他の部材に対して 10 dB 以上劣っていた。壁面部分の遮音性能がより高いコンクリート造の建物では、換気口からの透過音が相対的により大きくなると思われ、建物換気口の遮音性能向上の必要性が示唆された。

3. 模型実験

換気口に対するアクティブ騒音制御の適用効果を検討するため、換気口を有する建物外壁を想定した実寸模型（図2）を簡易無響室内に設置した。外壁（Outer wall）は総厚 200 mm の石膏ボードで作成し、そこに径 125 mm の円孔の換気口を設けた。屋外と見なす空間は合板およびポリエステル吸音材で囲い、外壁周囲からの回折音を極力抑えるようにした。騒音源（Prim. noise）は1ウェイ・フルレンジの密閉型スピーカーを用い、外壁から 1,100 mm 離れた換気口の中心軸上に設置した。

3.1 換気口からの透過音

はじめに、本実験装置について、換気口を設けない場合と換気口を設けた場合の屋外側（Outdoor side）と室内側（Indoor side）の音圧レベル差を測定した。音源は屋外側に設置し、音圧レベルの測定点は、換気口を設けない場合は屋外側と室内側のそれぞれ外壁中央で壁面から 50 mm 離れた点、換気口を設けた場合は換気口の外壁面上の点とした。室内外の音圧レベル差の測定結果を図3に示す。折れ線グラフ [●] が換気口を設けない場合であり、周波数の上昇に伴って室内外の音圧レベル差は大きくなり、その傾向は概ね質量則にそった値となっている。ただし、実験模型上の制約からか、125 Hz 帯など、周波数によっては質量則から大きく外れたものもみられる。そして、折れ線グラフ [○] が換気口を設けた場合であり、その場合には、屋外より室内側の音圧レベルが高くなる換気口内の共鳴現象⁶⁾が現れている。

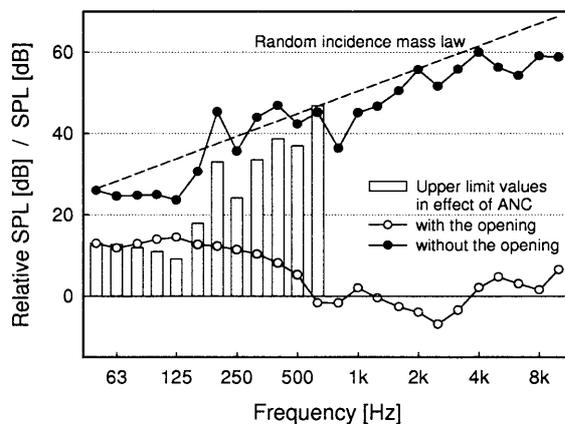


図3 換気口の設置前後の音圧レベル差

Random incidence mass law: $R_m \approx R_0 - 10 \log_{10}(0.23 R_0)$, where the mass law: $R_0 \approx 20 \log_{10}(f \cdot m) - 43$, and mass per unit area of the plaster board: $m = 170$ [kg/m²].

63 – 500 Hz 帯の両者（換気口を設けない場合と設けた場合の室内外音圧レベル差）の差を図3の棒グラフに示す。63 – 125 Hz で 10 dB 程度、250 – 500 Hz で 25 – 40 dB 程度となっており、建物換気口を想定した模型として概ね妥当な音場が形成されたと考えている。これらの値が、本装置を実験に用いた場合の換気口に対する ANC の効果の上限値となる。

3.2 騒音源と ANC アルゴリズム

一般的に用いられる ANC アルゴリズム⁷⁾は、制御対象によって異なる。本研究で対象としている騒音源は、鉄道騒音や道路交通騒音などの広帯域の変動騒音であるため、フィードフォワード制御の1つで広く用いられている Filtered-X LMS アルゴリズム⁸⁾が効果的と思われる。

しかし、本報告では初期段階の検討として、建物の換気口に対して ANC の効果があるか否かを確認することを目的とし、単純な音場において単純なアルゴリズムによる

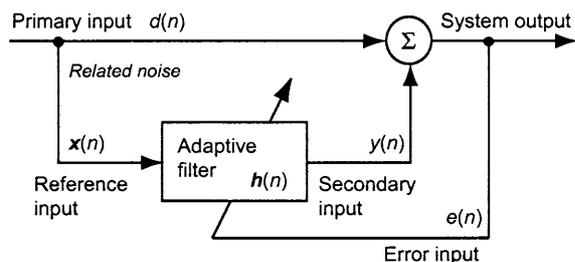


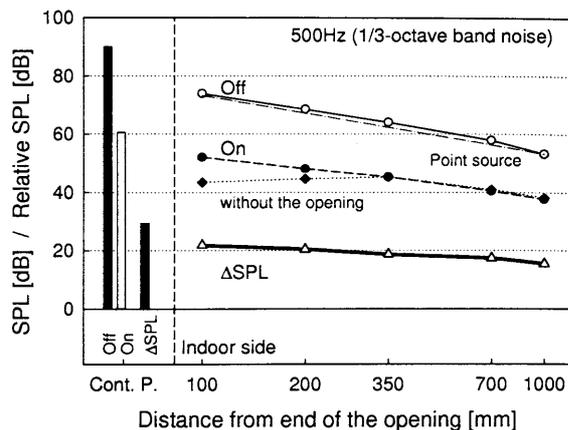
図 4 LMS アルゴリズムを用いた制御システム

制御実験を行うこととした。すなわち、定常音に対する ANC の効果を把握することとし、騒音源として中心周波数 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz の 1/3 オクターブバンドノイズを用い、ANC アルゴリズムとして単純な制御を行う LMS アルゴリズムを用いた。

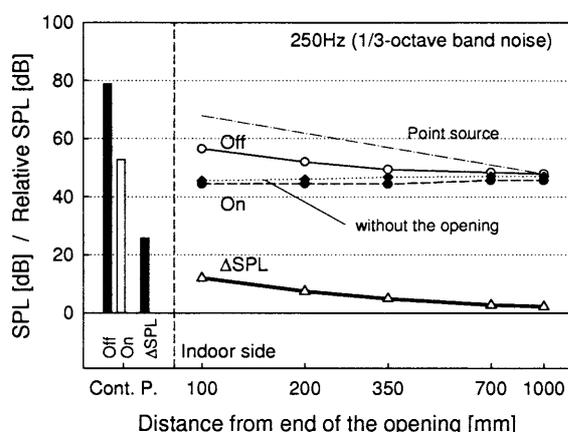
LMS アルゴリズムを用いた制御システムのブロック図を図 4 に示す。LMS アルゴリズムは、騒音源 (Primary input) に関する情報である参照信号 (Reference input) を参照マイクロホンから、制御効果に関する情報である誤差信号 (Error input) を誤差マイクロホンからそれぞれ受け取り、最小 2 乗法の考え方をを用いて誤差信号の値が小さくなるように、すなわち騒音 (System output) が減少するように 2 次音源からの出力信号 (Secondary input) を逐次調整するアルゴリズムである。2 次音源の出力信号は、誤差信号の 2 乗を評価基準とし、ある瞬間における 2 乗誤差曲面上の勾配を求め、その最小値を探索する仕組みになっており、適応フィルタ (Adaptive filter) の係数を更新することにより調整される。その更新式は、 $\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) + \mu e(n)\mathbf{x}(n)$ であり、ここで、 $\mathbf{h}(n)$ はフィルタ係数、 μ はステップサイズパラメータ、 $e(n)$ は誤差信号、 $\mathbf{x}(n)$ は参照信号をそれぞれ表している。なお、ステップサイズパラメータは 2 乗誤差曲面上の移動の幅を表す係数であり、本報告では試行錯誤して求めた、収束後の変動が安定する値を用いた。なお、適応フィルタの実装には、デジタル信号処理装置 (mtt 社製 Heron Wing DSP6367) を用い、A/D, D/A 変換のサンプリング周波数は 8kHz とした。

3.3 2 次音源と制御点

ANC によりダクトでの減音を行うときには、2 次音源をダクト内に設置することが一般的であるが、建物の換気口のように極端に短い場合には適当ではないと思われる。ここでは、図 2 に示すように、空気の流入 (流出) を著しく妨げないと思われる、換気口から 100 mm 離れた箇所に 2 次音源 (Sec. source) を設置した。制御点 (Cont. point) すなわち誤差マイクロホンは換気口の屋外側外壁面に設置し、換気口への騒音の入射を制御するようにした。また、参照点 (Ref. point) すなわち参照マイクロホンは騒音源の



(a) 中心周波数 500 Hz の場合



(b) 中心周波数 250 Hz の場合

図 5 換気口からの距離と ANC の効果

直近に設置した。なお、2 次音源は低音域から出力を得るため、小型のコーン型ウーハー (Fostex 社製 FW-108N) を用い、密閉型エンクロージャーに納めて使用した。

4. 実験結果と考察

ANC が無効のとき (Off) と有効のとき (On) の音圧レベル差 (Δ SPL) を ANC の効果と見なして考察する。なお、音圧レベルの測定は 1/3 オクターブバンドごとに行い、60 s 間のエネルギー平均とした。ANC-On の場合は、収束の確認後の平均とした。

4.1 制御点における ANC の効果

500 Hz と 250 Hz の場合について、ANC-Off/On 時の音圧レベルの変化と ANC の効果を、制御点 (図 5 の棒グラフ) と室内空間 (図 5 の折れ線グラフ) 別に示す。

制御点における ANC の効果は、500 Hz: 29.4 dB, 125 Hz: 9.4 dB, 250 Hz: 25.9 dB, 63 Hz: 10.6 dB となり、いずれの周波数でも ANC の効果が認められ、周波数が高いほど効果が大いという結果になった。本来、ANC

は周波数が低いほど有効であるが、低い周波数では換気口への入射音が小さいため、必然的に ANC の効果も小さくなったものと考えられ、妥当な結果であると判断した。

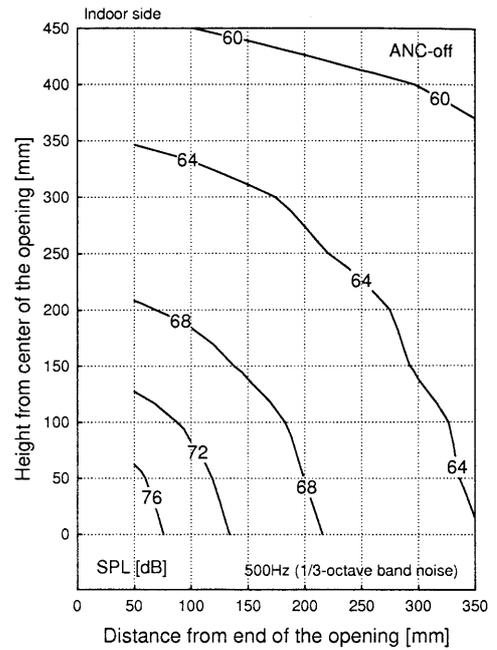
換気口からの距離による音圧レベルの減衰傾向を見ると、500 Hz の場合 (図 5 上図)、ANC-Off では点音源の距離減衰の傾向を示し (図 5 には 1,000mm 点の音圧レベルから導いた点音源の距離減衰も併記している)、換気口からの出力が支配的であることが分かる。ANC-On にすると室内の音圧レベルは換気口を開ける前の値に近づき、換気口と同心軸上の室内における ANC の効果 (Δ SPL) を見ても、1m 離れるまで 20 dB 前後の効果があった。したがって、500 Hz の場合、ANC は室内においても明らかに効果があると考えられる。250 Hz の場合 (図 5 下図) は、ANC-Off のときの距離減衰の傾向が点音源とは見なせないことから、換気口からだけではなく外壁自体からも透過していると推察する。ANC-On にすると換気口の設置前とほぼ同じ値となるため、換気口からの透過音をほぼ消すことができたと考えている。 Δ SPL を見ると、換気口から離れるに連れて効果が薄れていくが、これは、外壁からの透過音が原因であり、外壁の遮音性能が高ければ、室内での ANC の効果はより大きく現れるものと思われる。なお、125 Hz、63 Hz の場合に室内側で ANC の効果が確認できなかったが、これは実験模型の不備から換気口や外壁以外から音が伝わったためと考えている。

4.2 室内側の音圧レベル分布

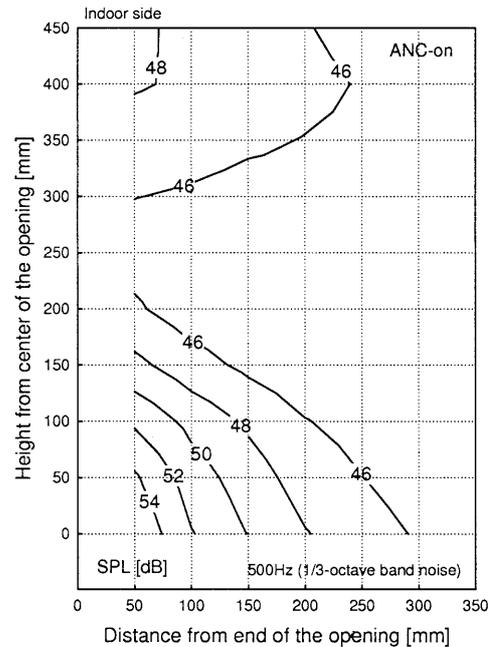
制御点あるいは換気口の同心軸上以外の室内空間においても ANC の効果があるのか、あるいは逆効果をもたらす箇所が存在しないか検討するため、ANC-Off/On それぞれの場合の室内側の音圧レベル分布を測定し、それぞれの差 (Δ SPL) として求めた ANC 効果の分布を確認した。ここでは、換気口の同心軸上で ANC の効果が認められた 500 Hz と 250 Hz の場合について述べる。

図 6 に 500 Hz の場合の ANC-Off/On それぞれの場合の室内の音圧レベル分布を示す。ANC-Off の場合は前節でも述べたとおり、換気口からの出力が支配的であり、換気口を中心とする同心円状の分布であった。ANC-On にすると、換気口からの透過音は 500 Hz では若干見られるが、250 Hz ではほとんど認められなくなった。

ANC-Off 時と ANC-On 時の音圧レベルの差 (Δ SPL) として求めた ANC の効果の分布図を図 7 に示す。いずれの周波数でも、 Δ SPL が負となる、すなわち ANC が逆効果に働く箇所は認められなかった。したがって、制御点を換気口の屋外側とすることで、換気口に入射する音を適切に減音でき、室内において ANC が逆効果に働くことはないものと考えている。



(a) ANC-Off の場合 (中心周波数: 500 Hz)

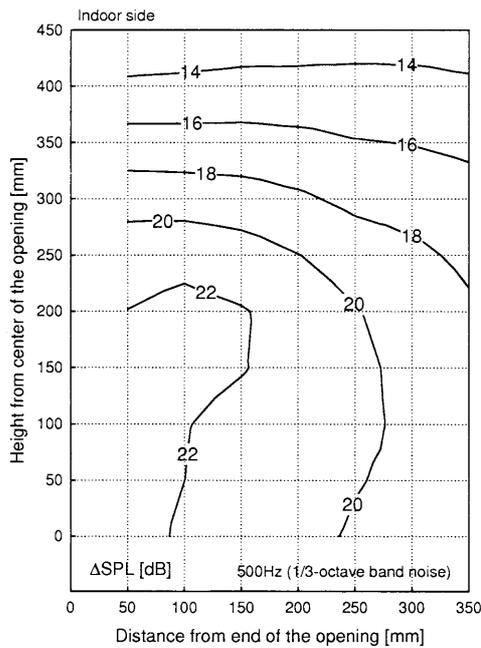


(b) ANC-On の場合 (中心周波数: 500 Hz)

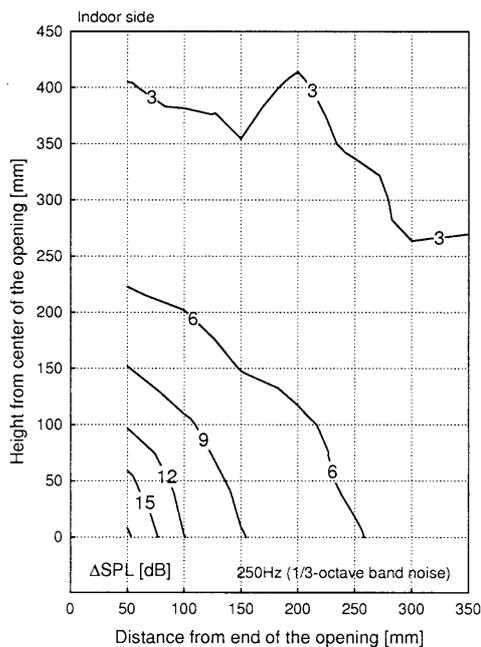
図 6 室内の音圧レベル分布の変化

4.3 屋外側の音圧レベルの変化

ANC では、屋外側に設置した 2 次音源から干渉音波を放射するため、屋外で新たな騒音が発生してしまう恐れがある。そこで、2 次音源と同一の面上 (屋外側の外壁から 100 mm の距離) の数点について、ANC-Off/On 時の音圧レベルの変化を測定し、それらの音圧レベル差 (Δ SPL) を求めた。500 Hz と 250 Hz の場合を図 8 に示す。ANC-On により、500 Hz の場合に 2 次音源から半波長ほど離れた箇所でおよそ 3 dB 上昇したが、いずれの周波数でも 2



(a) 中心周波数 500 Hz の場合



(b) 中心周波数 250 Hz の場合

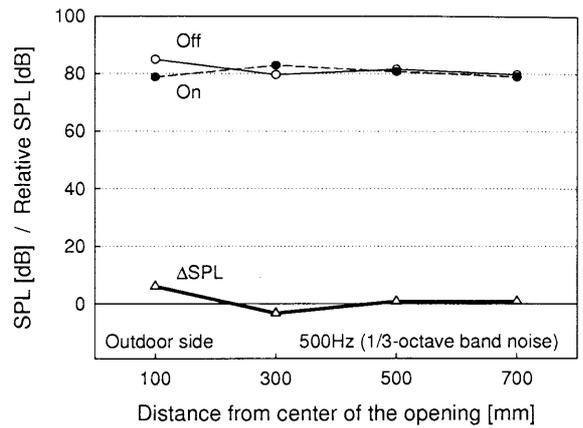
図 7 ANC 効果 (Δ SPL) の分布

次音源の近くでは音圧レベルが数 dB (4.6 – 7.3 dB) 下降した。屋外側では ANC が逆効果に働く箇所が存在するが、その悪影響は小さいことが確認できた。

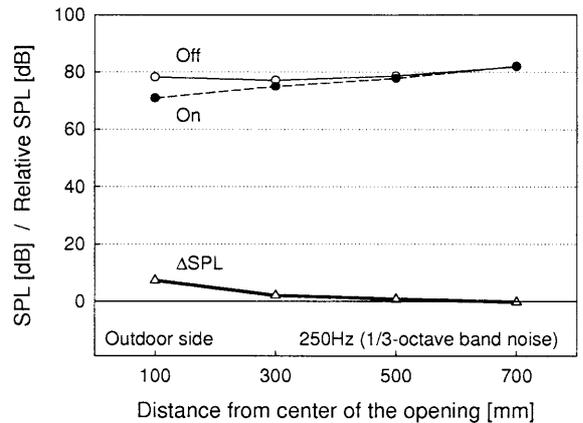
5. 実験住宅での検証実験

模型実験において確認された換気口に対する ANC の適用効果が、実際の建物に対しても有効かどうかを検証するため、実験住宅 (乾式煉瓦造) の換気口を対象に ANC の適用実験を行った。実験状況を図 9 に示す。

実験の概要は模型実験の場合と同様に、屋外に騒音源を



(a) 中心周波数 500 Hz の場合



(b) 中心周波数 250 Hz の場合

図 8 屋外側での ANC の影響

設置し、2 次音源および制御点を換気口周辺に設けた。騒音源 (Prim. noise) は 11.5cm フルレンジドライバー × 8 の密閉型スピーカユニットを用い、換気口から 3,700 mm 離れた箇所に設置し、2 次音源は換気口の雨避けのフード先端から 50 mm 離れた箇所に設置した。制御点は、換気口の屋外側外壁面上に設置することができなかつたため、便宜的に換気口の管内中心軸上で室内側から約 50 mm の点に設置した。また、参照点は騒音源の近傍とした。

制御点から 50 mm 離れた室内側の 1 点で、ANC-Off/On 時の音圧レベル差を測定した結果を図 10 に示す。ANC の効果は、500 Hz: 10.0 dB, 250 Hz: 1.0 dB, 125 Hz: 3.1 dB, 63 Hz: 0.9 dB であり、特に換気口の遮音能力が低い 500 Hz で大きな効果が認められた。

6. まとめ

模型実験により建物換気口に対する中低音域の ANC の効果を把握し、屋外での ANC の悪影響は僅かであることを確認した。また検証実験により、ANC の遮音効果が実際の建物換気口においても有効であることを確認した。ANC により、建物換気口の中低音の遮音性能を向上させ

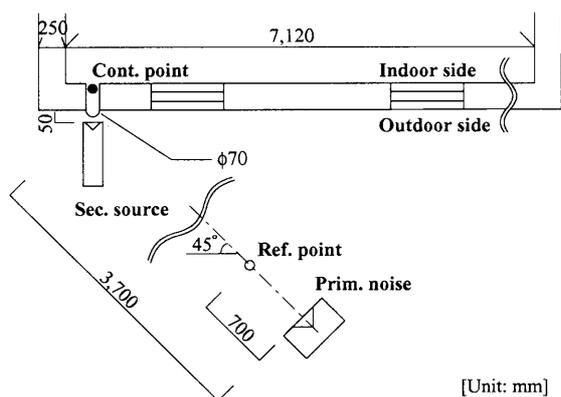


図 9 検証実験の状況

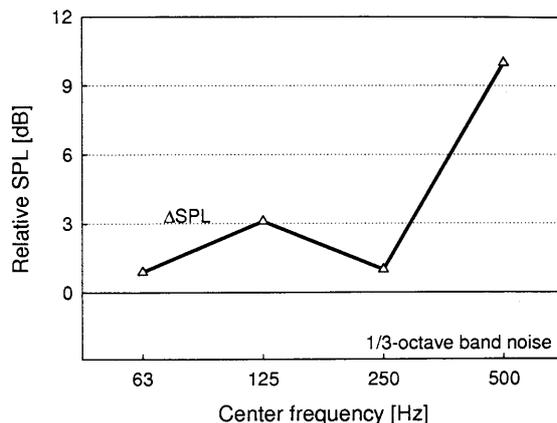


図 10 実験住宅の換気口における ANC の効果

ることが可能であり、その効果は外壁など換気口以外の部材の遮音能力に影響されることが示された。

本報告では、2次音源や制御点の位置を換気口周辺に便宜的に設定したが、空気の流入出を妨げないことと制御効果のバランスを見ながら、それぞれの最適な設置位置を検討する必要がある。また、道路交通騒音や鉄道騒音などの広帯域の変動騒音に対応する ANC アルゴリズムへ拡張を図るなど、実用に適う遮音システムを今後検討する必要があると考えている。

謝辞

本研究の一部は、九州大学 21 世紀 COE プログラム「循環型住空間システムの構築」による成果である。ここに記して感謝します。

参考文献

1) (株) シルファー: 換気口総合カタログ 2005, <<http://www.sylpha.co.jp/>>.

- 2) 坂下聡康, 寺尾道仁 ほか, 換気口用共鳴器列型消音器の開発, 日本騒音制御工学会 平成 17 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 73-76, 2005.
- 3) 朝倉 巧, 坂本慎一 ほか, ダクト型換気ユニットの遮音性能向上に関する検討, 日本音響学会 建築音響研究会資料, AA2005-54, 2005.
- 4) 日本工業規格: 建具の遮音試験方法 (Method for Field Measurements of Sound Insulation of Windows and Doors), JIS A 1520, 1988.
- 5) 九州大学 21 世紀 COE プログラム「循環型住空間システムの構築」: 2005 Sustainable Habitat News Letter - No.2, <<http://coe.mine.kyushu-u.ac.jp/>>.
- 6) George Willson and Walter Soroka, Approximation to the diffraction of sound by a circular aperture in a rigid wall of finite thickness, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 32, pp. 286-297, 1965.
- 7) 西村正治, アクティブ制御今昔 - これまでと今後の展望 -, 日本音響学会誌, 第 59 巻, pp. 399-400, 2003.
- 8) P. A. Nelson and S. J. Elliott: Active Control of Sound, Academic Press Ltd., pp. 161-203, 1992.

(受理: 平成 18 年 6 月 8 日)