

境界壁のアクティブ遮音による隣室空間の静音化

Noise Suppression for Neighboring Rooms by Active Sound Reduction

佐久間 崇* ・ 水野 耕** ・ 橋本 裕之** ・ 門脇 信諭*

Takashi Sakuma

Kou Mizuno

Hiroyuki Hashimoto

Nobutoshi Kadowaki

住宅居室で発生する音の隣室への漏れを抑制するため、発生音と同振幅逆位相の制御音を放射して境界壁の手前で音を打ち消し合うようにするアクティブ遮音法を考案した。この機能を境界壁に付設するパネル化建材に付与するため、パネル内部をセル構造として各セルに制御音発生用スピーカを配置し、マイクロホンで検出した入射音をアクティブノイズコントロール（ANC）処理して生成した制御音をこれらのスピーカから放射する。

80～300 Hz 周波数帯の音が隣室へ漏れるのを抑制するためには、従来のパッシブ遮音方式では壁が厚くなる問題があるが、この方式では厚み 70 mm のパネル建材で最大 20 dB 低減できる。

To suppress leakage of daily life noise into neighboring rooms, an active noise control method has been devised to cancel the generated noise in front of the boundary wall by emitting a noise-control sound with the same amplitude but the opposite phase of the noise, from a noise-control speaker. For providing the devised function to panel units on the boundary wall, the panel interior was designed to have a multi-cell structure. The noise-control speaker is placed in each cell. The noise is detected by microphones and processed to the noise-control sound by an active noise control (ANC).

Although conventional passive sound reduction method requires a thick wall to suppress noise leakage in the frequency band of 80 to 300 Hz, the developed method can cut leakage by up to 20 dB using a 70 mm-thick panel unit.

1. ま え が き

近年の住宅においては、さまざまな快適性の向上が求められる傾向にある。なかでも、音環境の快適性は強く要求される項目の一つである。これを向上させるためには、戸外からの音の侵入を防ぐと同時に、居室空間で発生する音を隣室隣家に漏らさないことも求められる。このため、多くの人は隣室隣家に音を漏らさないように配慮しながら生活しているのが実情である。

隣室隣家に漏れる音を抑制するためにまず考えなければならないことは、音の発生を抑えることである。しかし居室空間で発生する音には、生活機器から発生する動作音やTVやオーディオを再生するときの大音量で迫力あるAV視聴音なども含まれ、これらは快適な生活をおくるために必然的なものといえる。そのため、大きな音を発生させな

いように気にしながら生活することは、生活者自身の快適性を損なうことになる。

音の発生を気にせず隣室隣家への音漏れを抑制するためには、まず間仕切壁や外壁、集合住宅であれば境界壁の遮音性能を向上させることが有効である。壁の遮音性能を向上させるためには①質量を増加する、②厚みを増加する、③吸音材を充填する等の方法が挙げられる。しかし、これらのパッシブ遮音法では生活空間が狭くなるという問題が発生する。たとえば、集合住宅のコンクリート境界壁の遮音性能を約 5 dB 向上させるためには、厚みを一般的な 150 mm から 300 mm にする必要がある。また、既築住宅において壁の遮音性能を向上させる場合には、生活空間が狭くなるとともに大規模な工事が必要になる。そのため、十分な遮音性能が確保できるパッシブ遮音が導入されることはほとんどない。

* 住建事業本部 住建総合技術・商品開発センター General Technology & Products Development Center, Building Products Manufacturing Business Unit

** パナソニック株式会社 デジタル・ネットワーク開発センター Digital & Network Technology Development Center, Panasonic Corporation

そこで筆者らは、壁の透過音をアクティブ制御で低減することにより、壁を重厚化することなく隣室隣家への音漏れを抑制するアクティブ遮音法を開発した。さらに、この機能をパネル化建材に組み込み評価した結果、境界壁からの漏れ音を最大 20 dB 低減できたので以下に報告する。

2. 壁の遮音性能

隣室に音が透過する際は、壁自身がパッシブ遮音材として機能する。図 1 に、住宅を構成する各部位の音響透過損失特性を示す^{1), 2)}。縦軸の透過損失は、値が大きいほど遮音性能が高いことを意味する。

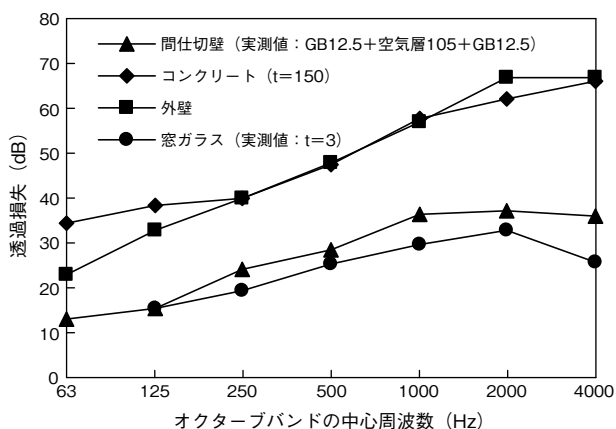


図 1 住宅構成部位の音響透過損失特性

この図から、部位にかかわらず低い周波数ほど遮音性能が低く、高い周波数ほど遮音性能が高いことがわかる。すなわち、壁自体で遮音が困難な低周波数域の音だけをアクティブ遮音技術で低減すれば、透過音を効果的に低減できる。

3. アクティブ遮音の開発目標

住宅における音漏れが問題となるのは、集合住宅の境界壁であることはよく知られている。表 1 に筆者らが行った集合住宅境界壁（コンクリート厚：150 mm，遮音等級：D-45，暗騒音レベル：27 (dB)）の透過音の音圧レベル測定結果を示す。音源室で発生させる音の音圧レベルは、85 dB (AP) とする。これは、居室空間で大きな音を発生する代表例であるホームシアタの大音量再生を想定している。

表 1 から、中心周波数が 100 Hz 以下と 315 Hz 以上では、受音室音圧レベルと暗騒音レベルの差は 10 dB 未満となっ

ており、これらの周波数帯域の音は境界壁によって十分遮音されていることがわかる。しかし、中心周波数が 125 ~ 250 Hz ではその差が 10 dB 以上あり十分に遮音されていない。

以上のことから、アクティブ遮音によって低減する透過音の中心周波数は 125 ~ 250 Hz と設定する。

また、中心周波数 125 ~ 250 Hz の受音室音圧レベルと暗騒音レベルの差は 11 dB (at 160 Hz) ~ 11.6 dB (at 125 Hz) であることから、環境によるばらつきも考慮して透過する音の目標低減レベルを 20 dB と設定する。

4. アクティブ遮音による境界壁面入射音の低減

境界壁を隔てて隣室から入った音を低減する方法として、同振幅逆位相の音によって相殺する ANC (アクティブノイズコントロール) が考えられる。ANC は自動車やヘッドホン等ですでに実用化されている。しかし、これらは耳元だけの非常に狭い空間での用途に限られている。

一方、境界壁を透過した音は壁全体から放射され、相互干渉によって周波数特性が変化しながら隣室空間を伝播するため、位置により周波数特性や伝播方向が異なる。そのため、従来方式をそのまま適用しようとする、音圧を低減できる範囲は空間の特定点に限られる。この音圧低減点を増やせば、広い範囲の静音化が原理上可能であるが、空間全域をカバーするには非常に多くのスピーカが必要になるため実用的とはいえない。

そこで、発生した音が隣室へ漏れる際のメカニズムに着目したアクティブ遮音法を開発を行う。

4.1 アクティブ遮音の原理

発生した音は境界壁に入射して壁を振動させ、これが隣室にとって新たな騒音源となる。したがって、この壁振動を発生しないようにすれば、隣室には騒音が入ることはない。そこで、境界壁の直前に制御用スピーカを並列設置し、壁に入射する直前の音に対して同振幅逆位相の制御音を放射するというアクティブ制御により壁振動を低減する。

以上の原理を図 2 に示す。従来の ANC では空間上の特定点（以下、制御点と記す）の音圧を 3 次元的に制御するのに対し、アクティブ遮音法は境界壁近傍の平面上の音圧を 2 次元的に制御する。これにより、アクティブ遮音法はシステム規模を抑制しつつ、従来の ANC の問題を解決することができる。

表 1 集合住宅境界壁の空間透過音圧レベル

中心周波数 (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
音源室音圧レベル (dB)	55.8	63.8	73.0	75.4	74.8	73.0	71.4	75.4	71.5	66.7	65.0	73.0	73.1	72.9
①受音室音圧レベル (dB)	36.9	41.0	37.0	32.5	32.4	38.3	34.2	33.8	30.6	24.6	21.3	21.7	21.4	21.5
②暗騒音レベル (dB)	35.0	41.0	32.0	27.6	20.8	27.3	22.8	22.5	21.9	21.0	21.2	18.5	14.4	13.0
①-② (dB)	1.9	0.0	5.0	4.9	11.6	11.0	11.4	11.3	8.7	3.6	0.1	3.2	7.0	8.5

騒音音圧レベル：85 dB (AP)

境界壁厚み：150 mm

音源：ピンクノイズ

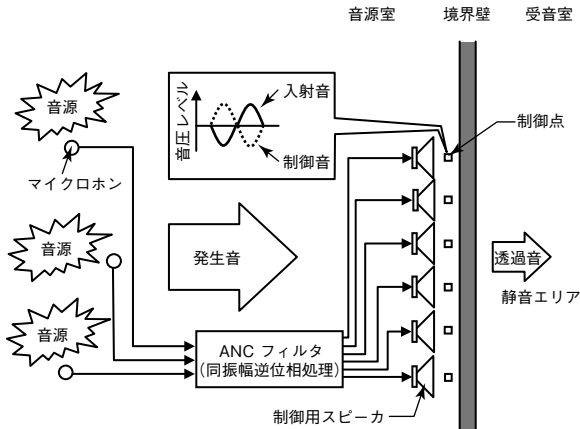


図2 アクティブ遮音原理

以下では、この原理を実際の製品として実現するため、図3に示すパネル化建材に組み込んだ構成での検討を進める。

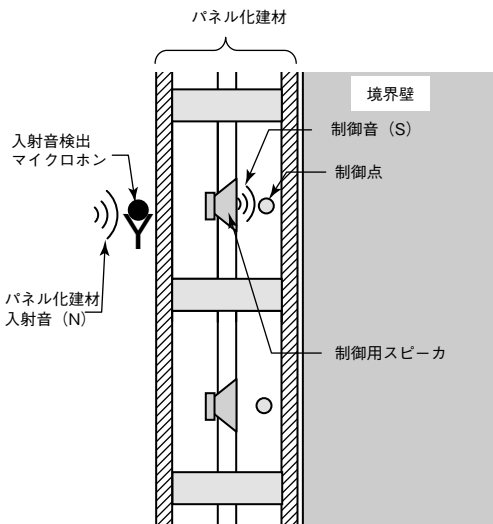


図3 アクティブ遮音の概略

4.2 ANCフィルタの設計アルゴリズム

ANCにおいて、騒音を低減する空間の点が一つの場合の制御フィルタ設計アルゴリズムを図4に示す。アクティブ遮音法では、これを拡張して³⁾複数チャネルの騒音制御を行う。

ANCフィルタは、マイクロホンで検出したパネル化建材への入射音の信号に基づく同振幅逆位相音を放射するための制御信号を生成する。パネル化建材に入射した音は、制御点に到達するまでにその音響伝達関数に基づき音響特性が変化する。また、制御用スピーカから放射された同振幅逆位相音も、同様に音響特性が変化する。そこで、LMS演算に基づく適応フィルタを基本とするフィルタ設計アルゴリズムにより⁴⁾、音響特性変化を考慮した精度の高いANCフィルタを設計する。

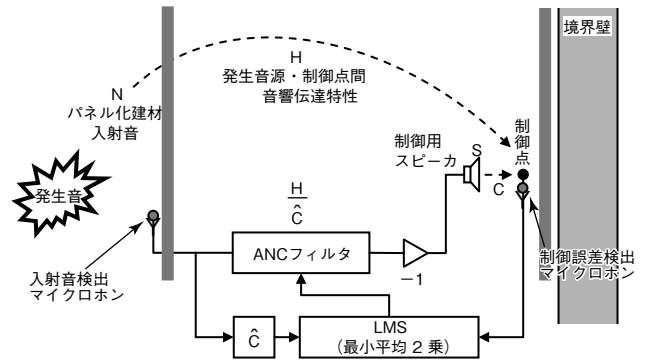


図4 ANCフィルタ設計アルゴリズム

図4において、制御点は境界壁面直前の位置とし、制御誤差検出マイクロホンをフィルタ設計時のみ配置する。

入射音検出マイクロホンの位置での音をN、入射音検出マイクロホンと制御点間の音響伝達関数をH、制御用スピーカと制御点間の音響伝達関数をC（スピーカの音響変換伝達関数を含むものとする）とする。

事前に測定したCをデジタルフィルタ化した \hat{C} の出力と制御誤差に基づき、制御誤差を最小化するようにLMS演算を行うと、ANCフィルタの特性は H/C に収束する⁴⁾。

そのとき、入射音が制御点に到達したときの音 N_p は式(1)で表される。

$$N_p = H \times N \quad (1)$$

また、制御用スピーカから放射される制御音をSとすると、式(2)で表される。

$$S = N \times \frac{H}{C} \times (-1) \quad (2)$$

さらに、制御音が制御点に到達したときの音 N_c は式(3)で表される。

$$N_c = S \times C = N \times \frac{H}{C} \times (-1) \times C = -H \times N \quad (3)$$

したがって、 N_p と N_c は同振幅逆位相音であり、打消し合うことができる。

適応フィルタを複数個に拡張したマルチチャネル適応フィルタ⁴⁾により、すべてのANCフィルタを同時に高精度設計する。

5. パネル化建材への組み込み

境界壁の遮音性能を向上させるにあたり、既存境界壁への後付けを可能とするため、パネル化建材にアクティブ遮音を組み込む。その課題は、次の2点である。

- (1) スピーカの組込構造の薄型化と遮音面積の拡大
- (2) 入射音検出の高精度化

5.1 スピーカの組込構造の薄型化と遮音面積の拡大

境界壁に後付けするパネル化建材は、居住者に圧迫感を与えないように厚みを 100 mm 以下にすることが望ましく、その内部に配置する制御用スピーカは薄くする必要がある。しかし、薄型スピーカは一般に口径が小さいことから、広い範囲で境界壁の遮音性能を向上させるためには制御用スピーカの個数が増大する懸念がある。このことは ANC 処理の演算量の増大につながり実用化するときの問題となる。

また、パネル化建材にアクティブ遮音を付加し、かつ薄型化するためには、ANC における制御用スピーカと制御点ができるだけ至近距離であることが望ましい。しかし、小口径スピーカから放射される音波は至近距離では平面波ではなく波面が乱れており、位置による特性変化が大きく遮音性能を発揮することが困難となる。

そのため、薄型小口径スピーカを用い、かつ制御点が至近距離にあっても大面積で均一な遮音効果が得られる制御方法が必要となる。

5.1.1 音響シミュレーションによるスピーカサイズ設定

アクティブ遮音において、制御音を閉空間に放射すれば広い範囲で音圧を均一に制御することができると考えられる。またパネル化建材を薄型、大面積化するためには、強度面から内部を格子状構造とすることが望ましい。そこで、これらを両立する方法として、パネル化建材内を格子状のセル構造とし、各セルに制御用スピーカを配置する構成とする。

音を制御する空間の大きさは、ANC の実用経験から制御する音の $1/3$ 波長以下が望ましいため、300 Hz の $1/3$ 波長に相当する 380 mm 以下と考えられる。また、パネル化建材を薄型、大面積化し、その強度を確保するためには格子ピッチは小さいほうが望ましい。したがって、1 個の小型スピーカで構成する基本制御系を 350 mm 角と設定する。

そこで、薄型のパネル化建材内に制御用スピーカを内蔵することを想定し、閉空間におけるスピーカ至近距離での音圧分布を、スピーカ口径を変化させて解析する。これにより、スピーカの大きさを決定する。

以下に記す解析条件を、図 5 に示す。

- (1) スピーカ口径
 - ① 50 mm, ② 150 mm, ③ 300 mm
- (2) スピーカと観測面の距離

20 mm
- (3) 閉空間サイズ

350 × 350 mm
- (4) 解析周波数
 - ① 100 Hz, ② 300 Hz
- (5) 閉空間の境界条件

吸音率：0.1

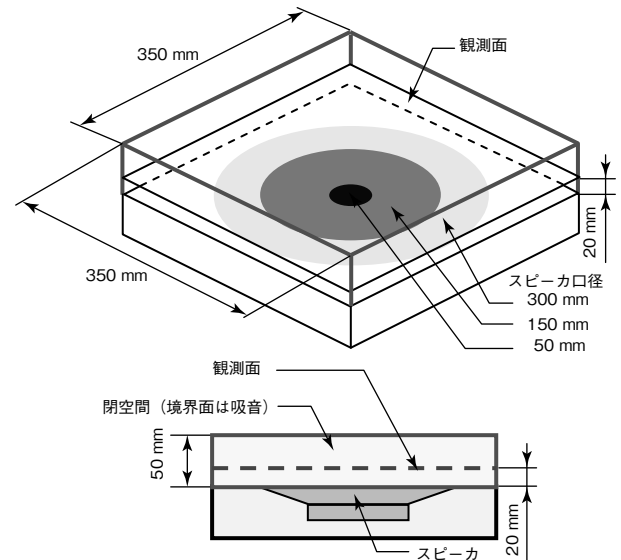


図5 解析条件

図 6 と図 7 に、音響シミュレーションで求めた閉空間内部の音圧分布を示す。

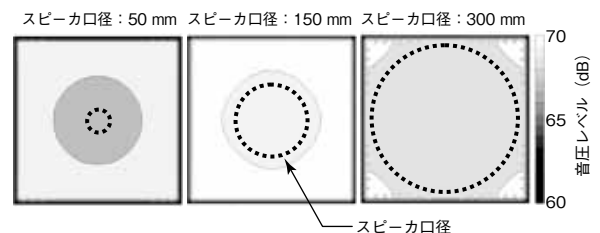


図6 音圧分布 (周波数：100 Hz)

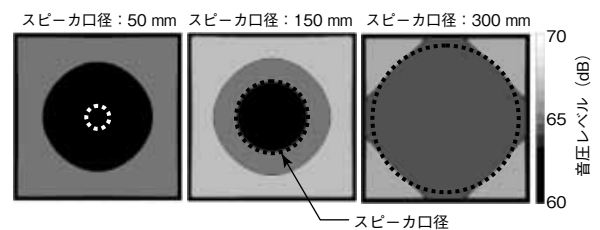


図7 音圧分布 (周波数：300 Hz)

図 6 から、100 Hz で駆動するとスピーカ口径が 50 mm のものであっても閉空間内の音圧レベル差は最大 2 dB である。口径が大きいほど音圧レベル差は小さく、口径 300 mm では閉空間内全域にわたりほぼ均一な音圧分布となっている。また図 7 から、300 Hz で駆動する場合、スピーカ口径 50 mm のものでも音圧レベル差が最大で 3 dB であり、口径にあまり影響されず、均一な音圧分布となっている。

スピーカ口径が大きいほど音圧レベル差がより小さく有利であると推察されるが、閉空間で駆動させる場合、スピーカは口径が大き過ぎるとスチフネスの影響で振動しにくくなり、低音が出にくくなるとともに音圧が上がらない

と考えられる。

したがって、スピーカは閉空間の容積において十分な低音能力が確保できて、かつ薄型化が可能な小口径であることが望ましい。

そこで、制御用スピーカとして、振動板面積が口径 50 mm のものとはほぼ同じで、広帯域再生と薄型を両立できるプラズマ TV 用の薄型小型スピーカ「サウンドスリム」(パナソニックエレクトロニクスデバイス製: W = 200 mm, H = 34.7 mm, D = 20.4 mm) を用いる。

5.1.2 パネル化建材モデルによるセル内音圧均一化検証

音響シミュレーションによって、閉空間においては制御用スピーカの振動板面積がそれほど大きくなくても音圧を均一に低減できる可能性を確認した。そこで、図 8 に示す実験モデルを使用して騒音低減効果の検証を行う。

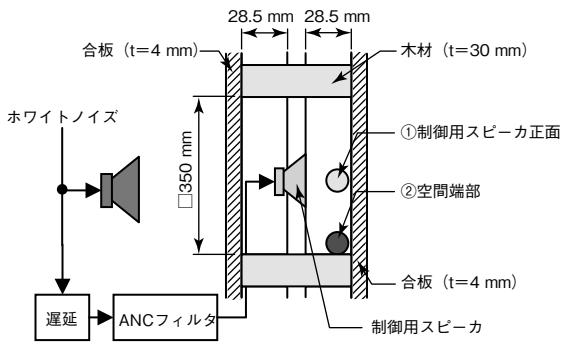


図 8 セル内音圧均一化実験モデル

実験モデルにおいて、アクティブ遮音が機能している場合と、していない場合の制御対象空間を透過する音の音圧低減度合を比較する。効果確認点は、①制御用スピーカ正面と②制御対象空間端部の 2 箇所とする。

①と②では周波数にかかわらず音圧低減効果の大きな差異はなく、制御対象空間内で均一な音圧低減制御が可能なが確認できる (図 9)。

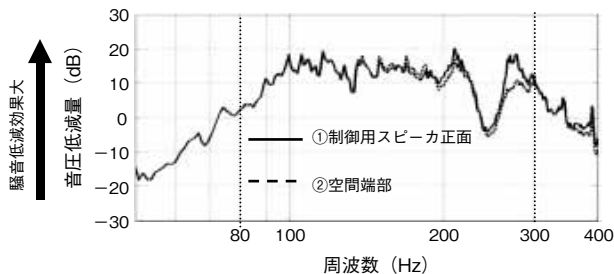


図 9 音圧低減量

以上のことから、設定した大きさの閉空間であれば薄型で振動板面積が小さいスピーカでも空間全域を均一に音圧低減制御することが可能と考えられる。

図 9 から、縦軸の音圧低減量は値が大きいほどセル内の音圧低減性能が高いことを意味しているため、この実験

モデルでは十分な遮音性能が得られるものと予測できる。

次に、パネル化建材内への制御用スピーカ組込構造を検討する。パネル化建材の内部を 350 × 350 × 70 mm のセル構造とし、各セルにスピーカ 1 個のシンプルな制御系を並列に配置する方法が適切といえる。これによりパネル化建材を薄型化し、かつ広範囲の騒音低減を行う。

5.2 入射音検出の高精度化

アクティブ遮音では、発生音を境界壁に入射する直前で制御し、透過する音を低減する。そのため、制御音の生成に使用する基準音は、パネル化建材に到達する直前で検出することが望ましい。本方式は 4.1 節で述べたように、入射音をマイクロホンで検出して制御処理を行うフィードフォワード制御となる。

また、入射音検出マイクロホンはパネルの直前に配置することが望ましいことは前述した。しかし、パネル化建材を薄型化するほど、制御用スピーカと入射音検出マイクロホンが近接する。そのため発生音に加えて制御音もマイクロホンに検出され、制御の精度を低下させる原因となる。

そこで、マイクロホンに入った音から制御音を除くエコーキャンセル処理を行う。そのアルゴリズムを図 10 に示す。まず、制御用スピーカと入射音検出マイクロホンの間の音響伝達特性 H_2 を計測する。これを用いて ANC フィルタで生成した信号に演算処理を施し、入射音検出マイクロホンに入った音から制御音を減算することでエコーキャンセル処理を行う。

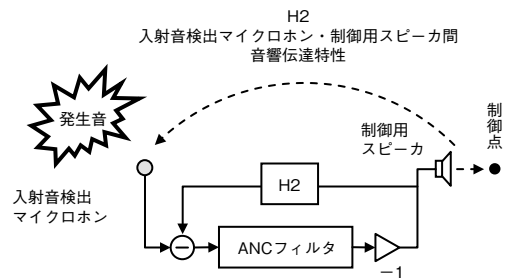


図 10 エコーキャンセル処理アルゴリズム

6. 騒音低減効果

6.1 評価方法

パネル化建材と同面積の境界壁面から騒音が透過する評価環境を構築して、アクティブ遮音を組み込んだパネル化建材の騒音低減効果を検証する。図 11 にその評価系を示す。遮音等級 D-45 の防音室 (ミュージックキャビン製) の一面 (1800 × 1500 mm) を厚み 9 mm の合板に入れ替え、防音室側にアクティブ遮音システムを組み込んだ厚み 70 mm のパネル化建材を設置する。その直前にスピーカを配置し、騒音源としてホワイトノイズを使用する。

制御用スピーカは計 12 個 (縦 4 列、横 3 列) とし、それらを各セル内の ABS 製 (t = 5 mm) バッフル板に取り

付ける。

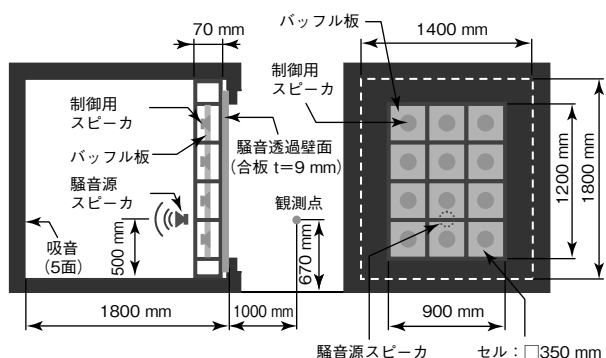


図11 アクティブ遮音効果確認検証系

評価は、PCでANCフィルタ演算した後、生成した制御音を制御用スピーカーから放射させて行う。また、騒音となる生活発生音は多種多様であるが、今回は代表例として境界壁面付近に配置されているTVを想定し、TVのスピーカーとほぼ同じ位置に騒音源スピーカーを設置する。

6.2 騒音低減効果

6.2.1 セル内制御点の騒音低減効果

図12にパネル化建材内の制御点における音圧低減効果を示す。ここでは、全12の制御点のうち、中央列下から2段目のセル内の制御効果を代表として示す。

この図から、80～300 Hzの周波数で最大20 dB近い音圧低減効果が得られていることがわかる。他のセル内でも同等の結果が得られており、パネル化建材内全体としての騒音低減効果が期待できる。

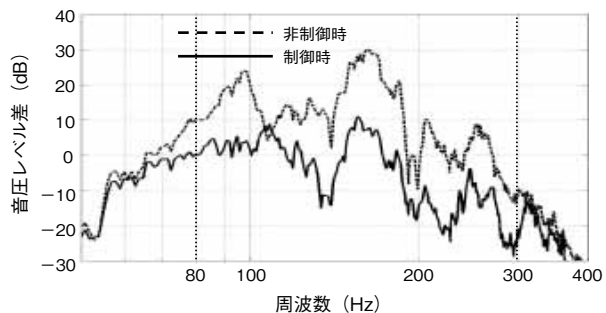


図12 制御点での音圧低減効果

6.2.2 隣室の騒音低減効果

次に隣室に設定した観測点（境界壁面からの距離：1000 mm、高さ：床から670 mm）における騒音低減効果を図13に示す。図から、隣室の観測点においても80～300 Hzの周波数帯で最大20 dB近い音圧低減効果が得られており、隣室への音漏れを低減できることがわかる。

しかし、これを詳細にみると、125 Hz近辺で約9 dB、250 Hz近辺で約4.3 dBの音圧低減効果となる。これは各セルで放射する制御音の相互干渉により効果にばらつきが

生じ、均一に騒音低減されていないことが原因と考えられる。したがって、各セル間の相互干渉を抑制し、騒音低減の均一化を図ることが今後の課題である。

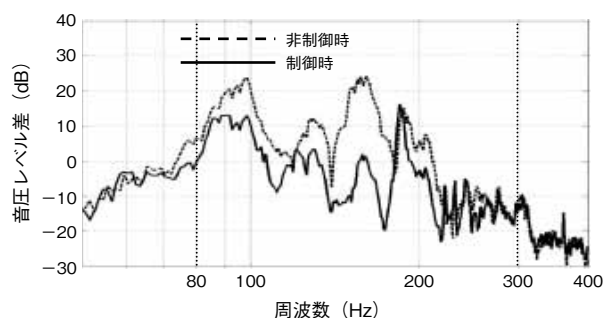


図13 観測点騒音低減効果

7. あとがき

住宅居室で発生する音の隣室への漏れを抑制するため、発生音と同振幅逆位相の制御音を放射して境界壁の手前で音を打ち消し合うようにするアクティブ遮音法を考案した。この機能を境界壁に付設するパネル化建材に付与するため、パネル内部をセル構造として各セルに制御用スピーカーを配置し、マイクロホンで検出した入射音をANC処理して生成した制御音をこれらのスピーカーから放射する。

80～300 Hz周波数帯の音が隣室へ漏れるのを抑制するためには、従来のパッシブ遮音方式では壁が厚くなる問題があるが、この方式では厚み70 mmのパネル建材で最大20 dB低減できた。

今後は、パネル化建材のさらなる薄型化と制御用スピーカー数の削減を行うとともに、本技術を拡張して適用周波数範囲の拡大や多種多様な生活発生音の隣室への透過を低減する研究を進める。

*参考文献

- 1) 日本建築学会編：建物の遮音設計資料，技報堂出版（1988）
- 2) 平野 滋：わかりやすいマンションの防音設計，オーム社（2001）
- 3) 西村 正治，宇佐川 毅，伊勢 史郎：アクティブノイズコントロール，コロナ社（2006）
- 4) 大賀 寿郎，山崎 芳男，金田 豊：音響システムとデジタル処理，（社）電子情報通信学会（1995）

◆執筆者紹介



佐久間 崇

住建総合技術・商品開発センター



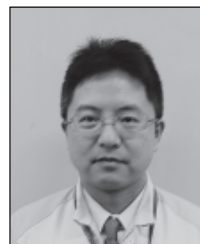
水野 耕

パナソニック（株）



橋本 裕之

パナソニック（株）



門脇 信諭

住建総合技術・商品開発センター