

アクティブ音場制御における制御点の最適配置に関する研究

－特定スペースの騒音低減を目的とした基礎的検討－

Improvement of Active Noise Control

- Basic Examination for Noise Reduction in Specific Areas -

金澤朗蘭* 柳沼勝夫* 安井健治*

要 旨

騒音対策の手法のひとつとしてアクティブ・ノイズ・コントロール（以下、ANC）がある。ANC は、騒音を低減したい位置において騒音と逆位相となる音をスピーカから放射し、音波の干渉によって騒音を低減する騒音対策方法である。ANC の特徴として、防音パネル等によって騒音の伝搬を遮る遮音など、従来の方法では対策が難しい低音域の騒音を効果的に低減できる点がある。また、音波の干渉によって騒音を低減するため、騒音源を囲う、または騒音を対策したい場所に壁面を設置する必要がない。

本報では、同一空間内に騒音源が存在する、ある一定の面積をもつエリア（以下、特定スペース）の騒音対策として、フィードバックシステムを採用した ANC を適用することを検討した。その結果、およそ 400Hz の騒音が定常的に発生する屋内空間において、3m×3m の面積をもつ特定スペース内の音圧を平均で約 5dB 程度、低減することができた。

キーワード：ANC、Filterd-X-LMS、フィードバック、フィードフォワード、工場騒音、建設騒音

1. まえがき

アクティブ・ノイズ・コントロールは、音波の干渉により騒音を低減する騒音対策手法であり、低音域の騒音対策に有効なことや防音壁等によって視界を遮らないという特徴から、近年さまざまな騒音源への適用が検討されている。

騒音源を囲うことなく低音域の騒音を効果的に低減させる ANC は、熱が発生し空気の流出入が必要となる発電機類や、安全性および製品チェックの面から常に目視が必要となる工場内の大型機械など、さまざまな場所に適用のニーズがある。しかし、ANC は基本的に制御点（騒音を低減したいポイント）において、騒音と制御音（制御用のスピーカから放射した音）を干渉させ騒音を低減する手法であるため、制御点の配置によっては期待する効果が得られない場合がある。さらに ANC には、制御点に加えて参照点（騒音を観測するポイント）が必要な方式や、制御点をもたずに参照点のみをもつ方式などがあり、目的に応じて適切な制御方法を選択する必要がある。ANC を適用できる騒音の条件についても、低～中音域（500Hz 程度以下）の音であり、正弦波のようにある周波数の大きさが他の音域よりも卓越して大きい

特性をもつこと、音の大きさや周波数が急激に（およそ 1 秒以下）変化しないこと、などの条件があり、ANC を騒音対策として適用するには、状況に応じて騒音源の特性や騒音の伝搬状況を含めた検討が必要となる。

ANC による騒音対策のニーズのひとつとして、同一空間内に騒音源が存在する、特定スペースの騒音対策がある。特定スペースに対する一般的な騒音対策方法として、壁（衝立）を立てる等、騒音の伝搬を遮る方法が挙げられる。しかし、壁面を常時設置できない場合や、見学者への説明など衝立等によって視界を遮ることができない場合がある。また、騒音対策のニーズが多い低音を主成分とする騒音の場合、衝立等では効果が期待できない。そこで、制御用のスピーカとマイクロフォン（制御点および参照点に配置）により、騒音対策が可能な ANC の適用を検討した。

本報では、まず、既報¹⁾における ANC（以下、FF-ANC）と、本報で検討した ANC（以下、FB-ANC）との、システムの方式の違いと特徴を概説する。さらに、FB-ANC を使用した特定スペースにおける騒音対策のための基礎的検討として、参照点・制御点・制御スピーカの位置関係と特定スペースにおける騒音の低減効果の関係について把握するため、数値計算および実空間内に存

*技術研究所

在する騒音源を使用した検討を行った。その概要を報告する。

2. システムの概要

2.1 フィードフォワードシステム

既報¹⁾において用いた FF-ANC システム (FF=Feed Forward) のブロック図を図-1 に示す。図-1 中のバンドパスフィルタは、あらかじめ計測した騒音の周波数特性から FF-ANC で対象とする周波数範囲を決めて作成し、参照点で観測する信号 $x(k)$ から対象外の周波数範囲の音をカットする。適応フィルタは、一般的な ANC の制御アルゴリズムの一つである Filtered-X-LMS³⁾ (以下、LMS) の LMS アルゴリズムにより、バンドパスフィルタを通過した後の信号 $d(k)$ の周波数を同定し、 $d(k)$ に適応フィルタ G をかける。ここで、適応フィルタ G によってシステムに位相遅れが生じるため、適応フィルタ通過後の信号 $y(k)$ をそのままスピーカへ入力しても $x(k)$ の逆位相の音とはならない。そこで、事前にバンドパスフィルタ、適応フィルタによる位相遅れを計測し、位相補正フィルタを作成する。スピーカには、 $y(k)$ の位相遅れを補正し、逆位相とした信号を入力する。

この FF-ANC システムは、参照点において騒音源の特性のみを観測し、観測した信号と逆位相の信号を作成してスピーカから放射するため、騒音源以外の別の騒音の影響を受けにくく、安定して制御が可能であるという特徴がある。さらに、バンドパスフィルタ、適応フィルタ、位相補正フィルタを併用することにより、参照点のみを入力としたシステムであっても、入力の周波数変動に追従する制御を可能にした。

2.2 フィードバックシステム

上記の FF-ANC システムは、適用対象の騒音源が制御用スピーカと同じ点音源の場合に、騒音源の近傍で騒音を低減することで、騒音源から離れた広い範囲の騒音を低減する²⁾。しかし、対象が点音源ではない場合には効果が得られない。

騒音源から離れた特定スペースの騒音対策に、制御アルゴリズムとして Filtered-X-LMS を利用したフィードバックシステムを用いた (Feedback ANC. 以下、FB-ANC)。LMS を利用した FB-ANC は、参照点 (消したい騒音の情報取得する点、参照マイクロフォンの位置) と制御点 (騒音と制御スピーカからの制御音を干渉させて騒音を低減するポイント、制御マイクロフォンの位置) を配置し、制御点において対象とする騒音と逆位相となる制御音を制御スピーカから放射し、騒音を低減するシステムである。そこで、参照点、制御点、制御スピーカを適切な配置とすることで、騒音源から離れた制御点周囲の特定スペースにおける騒音の低減を試みた。

FB-ANC のブロック図を図-2 に示す。騒音の情報を

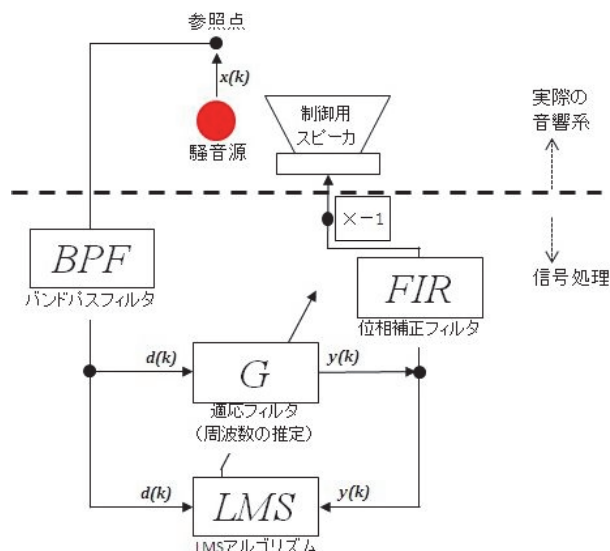


図-1 FF-ANC システムのブロック図

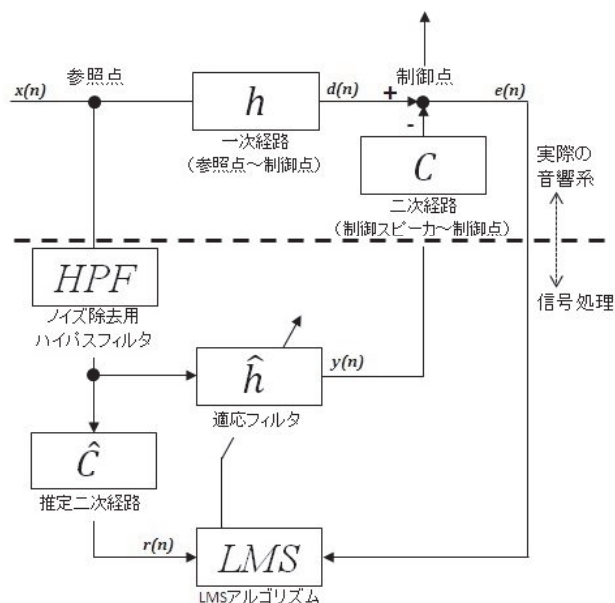


図-2 FB-ANC のブロック図

取得する参照点から制御点までの伝搬経路である一次経路 h の伝達関数、および制御スピーカから制御点までの伝搬経路である二次経路 C の伝達関数は、事前に計測してシステムに適用した。なお、高周波数帯域の音は、波長が短く LMS による適応フィルタ計算が収束する前に位相が変化するため、ANC を適用できない。計算速度は計算機の処理能力で決まるため、ANC の適用可能な周波数範囲は計算機の処理能力で決まるが、現行の計算機では概ね 400Hz 程度が上限となる。

2.3 LMS アルゴリズム

フィードフォワードシステム、およびフィードバックシステムで用いた、LMS アルゴリズム⁴⁾ について概説する。以下、記号および式は図-2 を参照した。

適応フィルタの出力 $y(n)$ と一次経路の出力 $d(n)$ の誤差

$e(n)$ は、

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (1)$$

と表される。LMS ではこの誤差が最小になるよう、フィルタ係数 \hat{h} を逐次更新する。 $e(n)$ の瞬時二乗誤差は、参照信号 $x(n)$ 、フィルタ係数 \hat{h} 、一次経路の出力 $d(n)$ を用いて、

$$e(n)^2 = \{d(n) - y(n)\}^2 = y(n)^2 - 2y(n)d(n) + d(n)^2 \quad (2)$$

$= \hat{h}^T(n)x(n)x^T(n)\hat{h}(n) - 2\hat{h}(n)x(n)d(n) + d(n)^2$ と表現できる。なお、

$$\hat{h}(n) = [\hat{h}_0(n), \hat{h}_1(n), \dots, \hat{h}_{N_h-1}(n)]^T$$

$$x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N_h+1)]^T \quad (3)$$

$$y(n) = \hat{h}(n)x(n)$$

$\hat{h}(n)$ は適応フィルタの係数ベクトル、 N_h はフィルタ長さである。ここで、

$$A = x(n)x^T(n), \quad b = x(n)d(n) \quad (4)$$

と定義すると、(3)は次式のように表せる。

$$J = e(n)^2 = \hat{h}^T(n)A\hat{h}(n) - 2\hat{h}(n)b + d(n)^2 \quad (5)$$

式(5)は二乗の項の係数が正である二次形式であるため、式(5)を \hat{h} で微分すると、

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{h}} = A\hat{h}(n) - 2b \quad (6)$$

となる。式(6)=0 となる $\hat{h}_{opt}(n)$ は、

$$\hat{h}_{opt}(n) = A^{-1}b \quad (7)$$

となる。しかし、式(7)は制御ごとに A の逆行列を求める必要があり、演算に時間がかかるため実用的ではない。そこで、最急降下アルゴリズムを適用して、適応フィルタの係数を導く。最急降下アルゴリズムを式(5)に適用すると、

$$\hat{h}(n+1) = \hat{h}(n) - \mu \frac{\partial J}{\partial \hat{h}(n)} \quad (8)$$

となる。式(8)を整理すると、フィルタ係数 \hat{h} の更新式は以下となる。

$$\hat{h}(n+1) = \hat{h}(n) + 2\mu\kappa(n)e(n) \quad (9)$$

ここで、 μ はステップサイズパラメータである。

上記では、図-2のFB-ANCを例として概説したが、FF-ANCにおけるLMSでも同様の形でフィルタ係数が更新される。

3. シミュレーションによる検討

3.1 FDTD法の概要

特定スペースの騒音を低減するための参照点、制御点、二次音源の最適な配置を検討するため、二次元FDTD法(Finite-Difference Time-Domain method: 時間領域有限差分法)を使用した数値計算を行った。二次元の計算領域内に一次音源(騒音源に相当)、参照点、制御点、二次音源(制御スピーカに相当)の位置を設定し、制御点における時間領域の計算結果を逐次LMSで計算し、二次音源から出力させて制御点および計算領域における音圧の変化を確認した。二次元FDTD法における音圧と粒子速度の更新式⁵⁾を以下に概説する。

音波は、 x, y, z の3次元の運動方程式

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

および連続の式

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (11)$$

を満たす。ここで、

p : 音圧

u_x, u_y, u_z : 各軸方向の粒子速度

ρ : 媒質密度

κ : 媒質の体積弾性率

である。今、 x 軸方向の運動方程式において中心差分で近似して整理すると、

$$u_x^{n+1}(i+1) = u_x^n(i+1) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} [p^n(i+1) - p^n(i)] \quad (12)$$

と表現できる。ただし、 i はセル番号で、スタガード格子を用いて離散化した。スタガード格子の概念図を図-3に示す。スタガード格子は、音圧と粒子速度が互いにずれた格子である。図-3に示すように、時間軸方向についてもスタガード格子を採用することで、時間と空間の両方の中心差分を同じ点で定義でき、既知の音圧や粒子速度から Δt 後の粒子速度が得られる。連続の式についても式(12)と同様に、

$$p^{n+1}(i) = p^n(i) - \frac{\Delta t \kappa}{\Delta x} [u_x^{n+1}(i+1) - u_x^{n+1}(i)] \quad (13)$$

と近似できる。

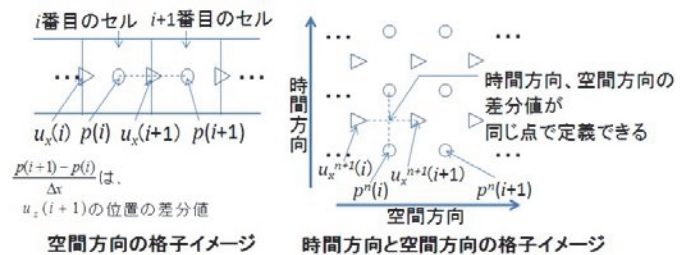


図-3 スタガード格子イメージ²⁾

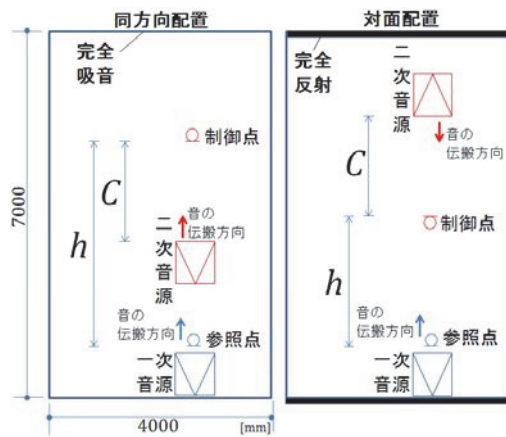


図-4 計算パラメータの概要
 左：完全吸音、同方向配置の場合
 右：1 対面完全反射、対面配置の場合

本検討では、式(12)、式(13)を二次元に拡張し、計算を行った。二次元の計算領域内の制御点における音圧 p^{n+1} を式(1)の誤差とし、 p^{n+1} が最小となるよう $y(n)$ を計算して二次音源の値とした。

3.2 数値計算による検討

参照点、制御点、二次音源の配置を変化させたときの、FB-ANC による特定スペースの音圧変化を確認した。計算パラメータの概要を図-4 に示す。制御点と二次音源の距離を C 、制御点と参照点の距離を h とし、 C と h の距離を変化させたときの各計算メッシュにおける音圧を計算した。計算領域の境界は、4 面すべて完全吸音の場合、および 1 対面（長辺方向）のみ完全反射とし、反射のない状況との違いを確認した。また、一次音源と二次音源は、音の伝搬方向と対面配置、および同方向配置の 2 通りとした。一次音源は、ANC 適用の上限周波数である 400Hz の正弦波とし、計算領域の上端中心位置に固定とした。二次元の計算領域の範囲は 400Hz の波長である $\lambda=0.85\text{m}$ を考慮して、騒音伝搬状況の観測が可能な $7\text{m}\times 4\text{m}$ とした。計算メッシュは 400Hz の検討が可能な 0.05m 間隔とした。

境界条件がすべて完全吸音のときの計算結果（音圧コンタ）を図-5 に示す。二次音源を一次音源と対面に配置した場合では、制御点で音圧が低減するものの、制御点以外において音圧が大きくなる部分が発生した。これは、一次および二次音源から放射された音の波頭面が円弧形であるため、波頭面が向かい合って互いに前進すると、制御点では干渉により音圧がゼロになっても、その他の位置では位相がずれてしまい音圧が増幅したと考えられる。一方、一次音源と二次音源の音の伝搬方向を同方向に配置すると、同形状の波頭面が重なり合うため、制御点で一次音源・二次音源の位相が逆になれば、その他の位置でも位相がほぼ逆になるため、計算領域全体で音圧が低減した。

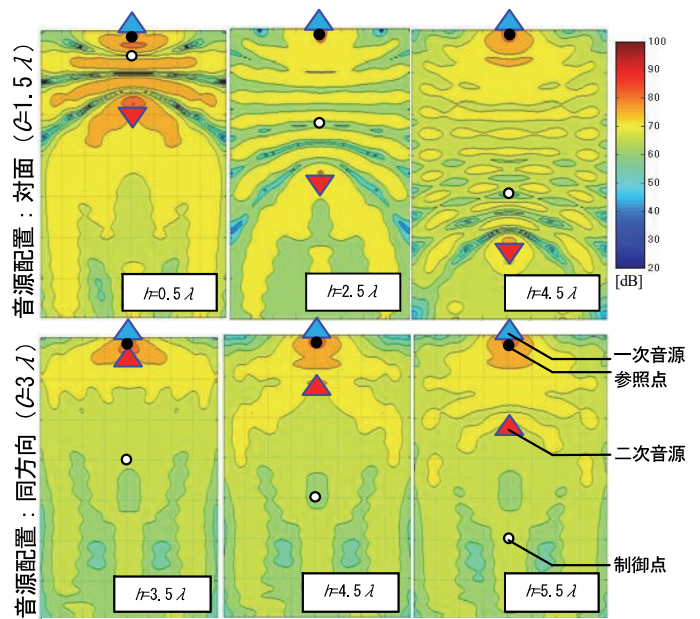


図-5 音圧コンタ 計算結果（騒音源：400Hz）

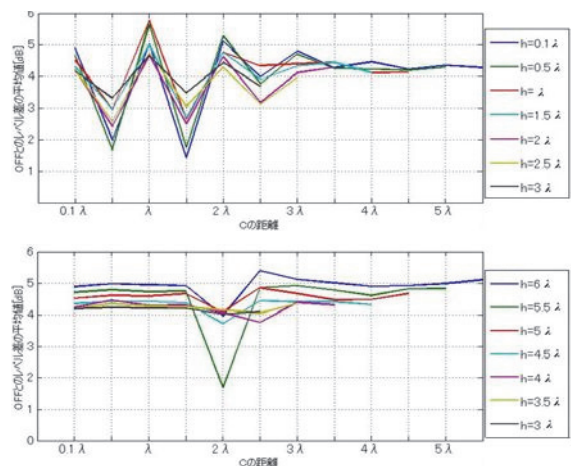


図-6 境界が完全吸音の場合の効果（400Hz）
 上：各音源が対面配置、下：各音源は同方向配置

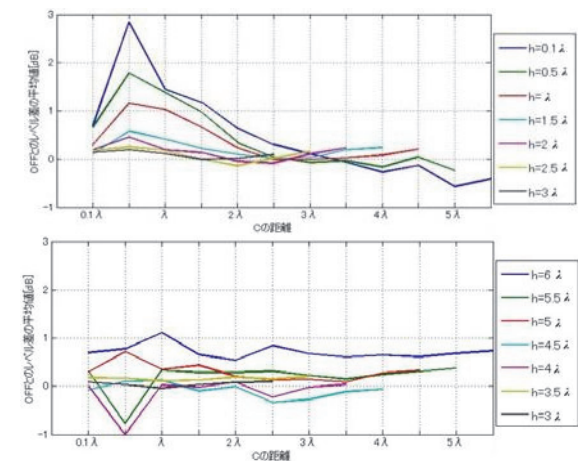


図-7 境界が1 対面完全反射の場合の効果（400Hz）
 上：スピーカ対面、下：スピーカ同方向

制御信号を出力しない状態（以下、OFF）との各計算点での音圧レベルの差を計算領域内で平均したものを図-6 に示す。図-6 より、一次音源と二次音源の音の伝搬

方向が対面配置の場合、一次経路 h の距離に関わらず、二次経路 C の距離に応じて低減量が変動する傾向が見られた。これは、一次音源からの伝搬音よりも、制御点へ到達する二次音源からの伝搬音が計算領域全体の低減量に大きく影響していることを示す。一次音源と二次音源の音の伝搬方向が同じ場合には、二次経路 C の距離に関わらず低減量が一部を除いて一定であった。これは、一次音源と二次音源の音の伝搬方向が同じ場合には、一次経路 h と二次経路 C の重なる部分が存在するため、対面配置と比較して二次経路 C の距離が干渉現象に影響する割合が相対的に小さくなったためと考えられる。

次に、計算領域の 1 対面の境界条件を完全反射、もう一方の対面の境界条件を完全吸音とし、境界条件が完全吸音の場合と同様に騒音源を 400Hz の正弦波として計算を行った。各計算点における OFF との音圧レベルの差を計算領域内で平均したものを図-7 に示す。計算領域の境界条件の 1 対面が完全反射であるため、制御点において反射音の影響が大きく、計算領域の境界条件が完全吸音の場合と比較して低減量が小さくなった。また、低減量は、一次音源と二次音源の音の伝搬方向が対面の場合の方が同方向の場合よりも大きくなった。さらに、このとき二次経路 C の距離が小さいほど、より低減量が大きくなった。これは、反射音が存在する場面では、一次音源と二次音源の音の伝搬方向が対面の方が、反射音の影響を受けにくく、全体の音圧低減に効果を発揮できるためと考えられる。

4. 実音源による検討

実際に、正弦波に近い騒音を発生している屋内において、ANC を適用し効果を確認した。

技術研究所内の三次元振動台は、油圧装置の振動に起因する騒音が定常的に発生する。振動台を操作する際の騒音レベルは 80dBA 程度となり、通常の会話に支障が生じるレベルである。そのため見学者の来場時、振動台実験の説明時、打ち合わせ時など、特定のスペースで振動台からの騒音を低減したいというニーズがあった。

振動台から発生する騒音の 400Hz 帯域の音圧コンタを図-8 に、図-8 中に示した測定点における時間変動および周波数特性を図-9 に示す。図-8 より、振動台周囲において特に音圧が大きい点が数か所存在するが、これらの点の地下ではそれぞれサーボ弁（入力信号を油圧制御に変換する弁）が振動しており、音源となっている。また、図-8 の振動台から図の下端に向かって音圧の高い場所と低い場所が交互に現れているが、これは振動台からの音と壁面からの反射音が重なることで定在波が発生しているためである。図-9 より、振動台からは約 400Hz の純音を主成分とした騒音が発生しており、

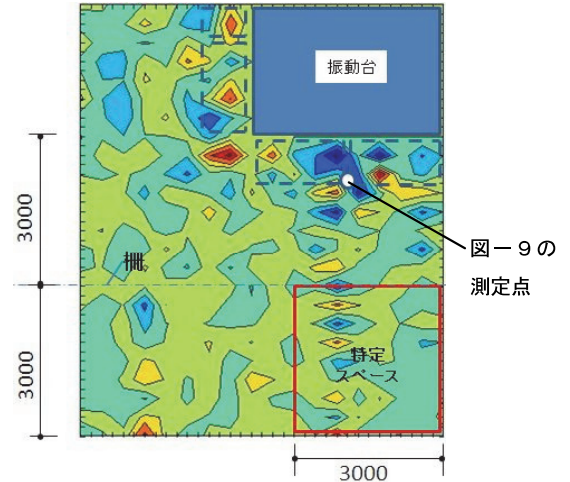


図-8 振動台からの発生音：400Hz 帯域の音圧コンタ

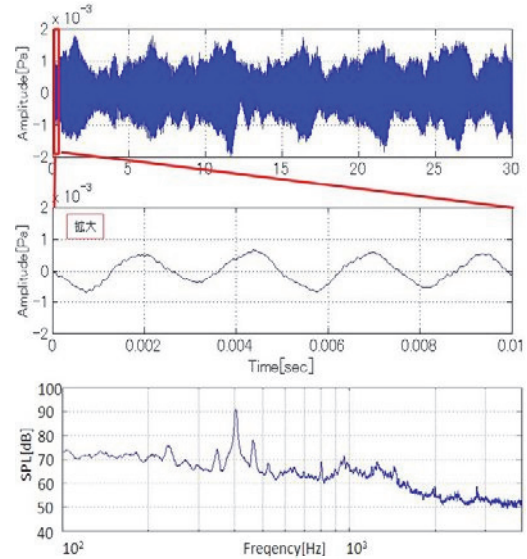


図-9 振動台から発生する騒音の特性



写真-1 実験状況

さらに振幅が時間変動していることが確認できる。また、400Hz の音圧は約 90dB 程度である。実験では対象とした特定スペース内外に制御点、および二次音源である制御用のスピーカーを配置し、参照点と制御点の距離 h_s と、二次音源と制御点の距離 C を変化させ、特定スペース内の複数点における音圧を測定した。

実験状況を写真-1に示す。実験にあたり、まずシステムを作動していない状態で特定スペースにおける振動台からの音圧（以下、OFF）を測定した。また、制御用スピーカは振動台からの騒音の伝搬方向と対面配置の場合、および同方向配置の場合の2通りとした。

特定スペース内における各測定点での 400Hz 帯域の OFF との音圧レベルの差を図-10、図-11に示す。 hs と C の大きさによってばらつきはあるものの、FB-ANC の適用により全体としておよそ 5dB 程度、騒音が低減したことがわかる。一部 OFF よりも音圧が増幅している場合があるが、これは、制御用スピーカと振動台からの騒音の伝搬方向が同方向配置の場合、制御点において振動台から伝搬した音波に加えて後壁からの反射音を観測したため、制御音が必要以上に大きくなってしまい、特定スペース全体の音圧が増幅したものと考えられる。また、制御用スピーカと振動台からの騒音の伝搬方向が対面配置の場合には、シミュレーション結果と同様、反射音の影響を受けにくいいため、同方向配置よりも音圧が増幅しない傾向があった。

FB-ANC の効果は、制御用スピーカの向きに関わらず、二次経路 C の距離が大きいほど FB-ANC の効果が小さくなり、増幅する傾向があった。さらに、制御用スピーカと振動台からの騒音の伝搬方向が対面配置の場合には、制御点と参照点の距離 hs は大きい方が FB-ANC の効果が大きくなる傾向を示し、制御用スピーカと振動台からの騒音の伝搬方向が同方向配置の場合には、 hs が小さい方が FB-ANC の効果が大きくなった。二次経路 C の距離によって FB-ANC の効果に変化するの、反射音の影響を受けるためであり、制御用スピーカと制御点の位置が遠いほど（二次経路 C の距離が大きいほど）、二次経路 C への反射音の影響が大きくなるため、FB-ANC の効果が小さくなる。

なお、対象とした振動台からの発生音を特定スペースで平均 5dB 低減するには、制御スピーカからの音と騒音の伝搬方向が同方向の場合は、 $hs=\lambda$ 、 $C=0.1\lambda\sim\lambda$ 、制御スピーカと騒音の伝搬方向が対面の場合は、 $hs=\lambda$ 、 $C=0.1\lambda$ 程度とする必要があることがわかった。

5. あとがき

特定スペースにおける騒音の低減を目的に FB-ANC を適用し、二次音源（制御用スピーカ）、参照点、制御点の位置が、騒音の低減効果に及ぼす影響について検討した。その結果、騒音源の特性を考慮し、適用したいスペースに合わせて制御用スピーカと参照点、制御点を配置することで、特定スペースで平均約 5dB 程度、騒音を低減することを確認した。ただし、機器類を設置する場所の音場によって騒音の低減量が限定される場合があるため、効果を精度よく予測することが難しい。

今後は、シミュレーションによりさらに詳細な検討を

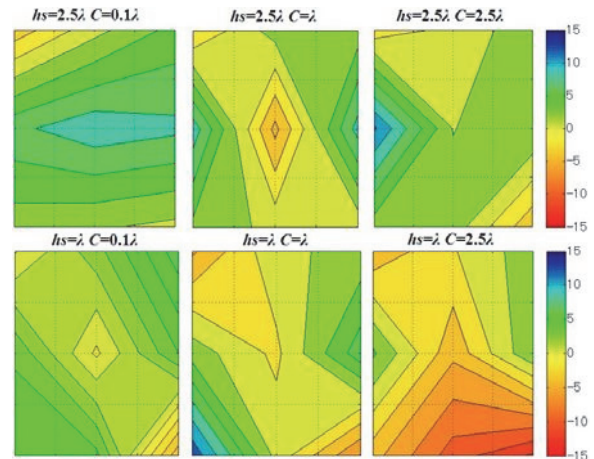


図-10 FB-ANC の効果（二次音源の方向：対面）

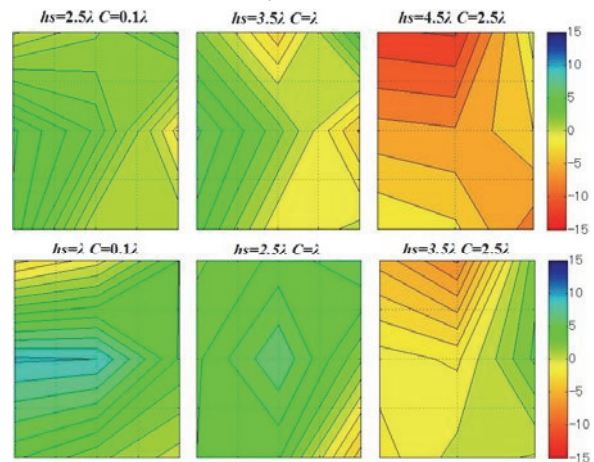


図-11 FB-ANC の効果（二次音源の方向：同方向）

行い、音場の状況と効果について検討を行う。さらに、音場の影響を受けにくいシステムを検討し、スピーカから発生する制御音の伝搬特性に工夫をすることで、特定スペースにおける騒音の低減効果を向上させることを検討する。

【参考文献】

- 1) 柳沼勝夫、安井健治、金澤朗蘭、「アクティブ・ノイズ・コントロールの制御方法に関する研究 ーその 2 アクティブ消音システムの実工事への適用ー」、奥村組技術年報、pp.5-6、2014.9
- 2) S.J.Elliott、「Signal Processing for Active Control-A volume in Signal Processing and its Applications-」、ACADEMIC PRESS、pp.18-21
- 3) たとえば、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、pp.74-76
- 4) 高井哲仁、「三重大学学術機関リポジトリ 研究教育成果コレクション 管状装置内騒音のアクティブ低減制御に関する研究」、pp.3-14、2008
- 5) 日本建築学会編、「はじめての音響数値シミュレーション プログラミングガイド」、コロナ社、pp.100-121