

特定領域を対象としたアクティブ消音の制御方法

Active Noise Control Methods for Specified Areas

金澤朗蘭*

要旨

工場など、作業上の都合から騒音源を囲うことのできない生産施設において、作業場所を対象としたアクティブ消音システムを開発した。システムの制御方法として、複数のスピーカを使用した場合にスピーカ同士の影響を抑制し、対象領域の騒音を制御する方法を考案した。数値シミュレーションにより、制御方法の安定性と、騒音源の変動に対する追従性を確認できた。考案した制御方法と、複数のスピーカを利用した際の対象領域での効果を実験により確認した結果、領域の平均値として 250Hz で約 8dB の効果が得られた。

キーワード：アクティブ・ノイズ・コントロール、工場、作業環境

1. まえがき

工場などの施設では、労働者の作業環境改善の要望があり、騒音対策の提案を求められることが多い。騒音源を囲うことが有効な対策となるが、作業の都合で囲えないことも多く、アクティブ・ノイズ・コントロール（以下、ANC）技術の適用が期待される。しかし、工場には多くの騒音発生源があり、騒音源の近傍にスピーカを設置する既開発のシステム¹⁾では、制御システムが多数となるなどコスト面で問題となる。そこで、作業場所など騒音を低減したい場所のみの騒音低減を目的とし、対象領域の周辺に制御用スピーカを複数配置するアクティブ消音システム（以下、局所 ANC）の開発を目指している。

工場では、理想的な場所にスピーカやマイクを設置できないことが予想されるため、設置できる範囲内で最大

の効果が得られる配置を検討する必要があること、複数のスピーカを使用する場合にスピーカ相互の干渉により効果が減少する可能性があること、などの課題がある。これらの課題に対し、これまでに対象領域の効果の算定方法を提案して算定結果をもとにしたスピーカ配置の決定方法を考案した²⁾。さらに、複数のスピーカを使用した場合にスピーカ同士の干渉の影響を抑制する制御方法についても考案した。本稿では、これらの検討内容について報告する。

2. 複数のスピーカを使用した制御方法

2.1 対象とする騒音

本開発において対象とする騒音の特性を図-1に示す。図に示すように、卓越周波数をもつ騒音源には定常騒音だけでなく、機械類の負荷に応じて卓越周波数が変動する場合がある。例として、コンプレッサーやエンジン（発電機など）、金属加工機械のうち回転旋盤をもつもの、などがある。

上記の対象騒音は数秒の間に急激な変動が起こる場合があり、従来の制御方法では、騒音の変動に演算が追従できない場合がある。そこで、制御方法はフィードフォワード制御（以下、FF型）を基本とし、バンドパスフィルタを適用して制御対象を卓越周波数に限ることで、収束にかかる処理を高速化した制御方法を考案した^{1),2)}。

考案した制御方法を図-2に示す。参照マイクで観測した信号にバンドパスフィルタを適用し、信号から卓越周波数を含む範囲のみを抽出し処理対象としている。さらに、機械の負荷によって卓越周波数が変動するため、

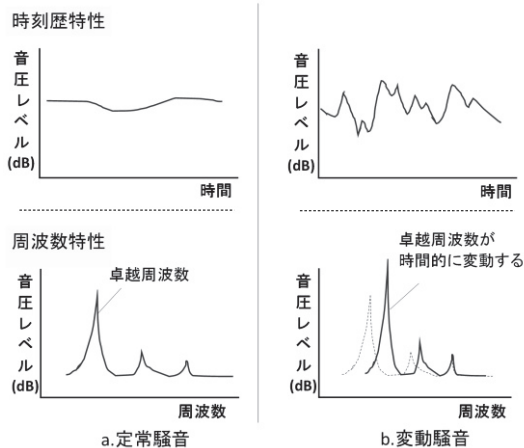
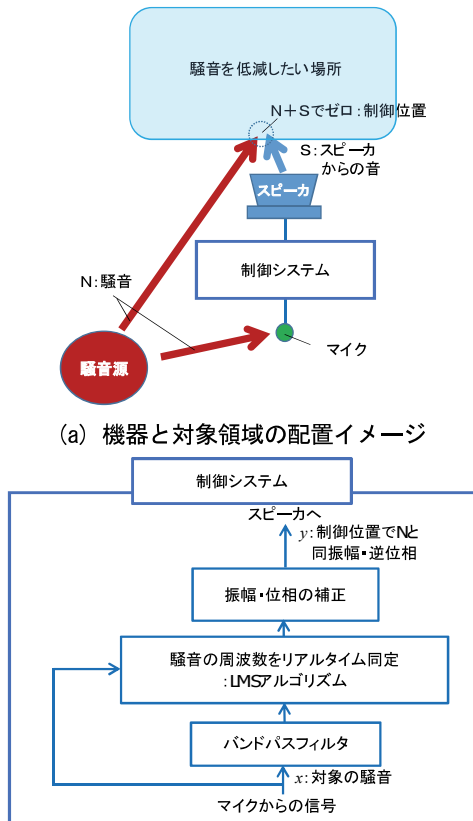
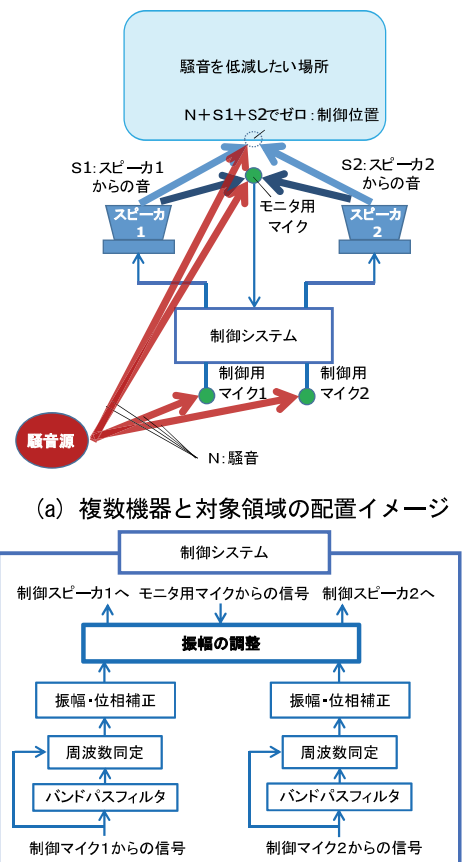


図-1 対象騒音の周波数特性

*技術研究所環境研究グループ



(b) ブロックダイアグラム
図-2 制御方法¹⁾



(b) 複数スピーカ使用時のブロックダイアグラム
図-3 複数のスピーカの制御方法

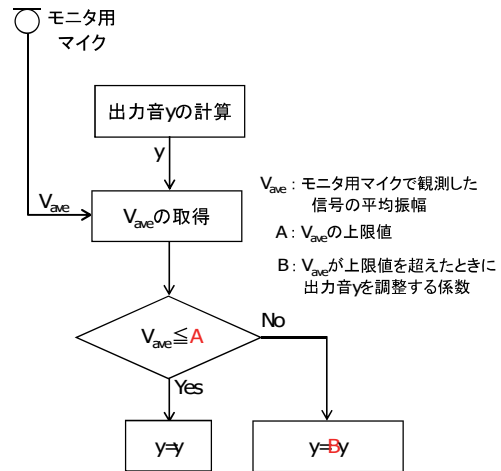


図-4 モニタ用マイクおよび振幅の調整部分のブロックダイアグラム

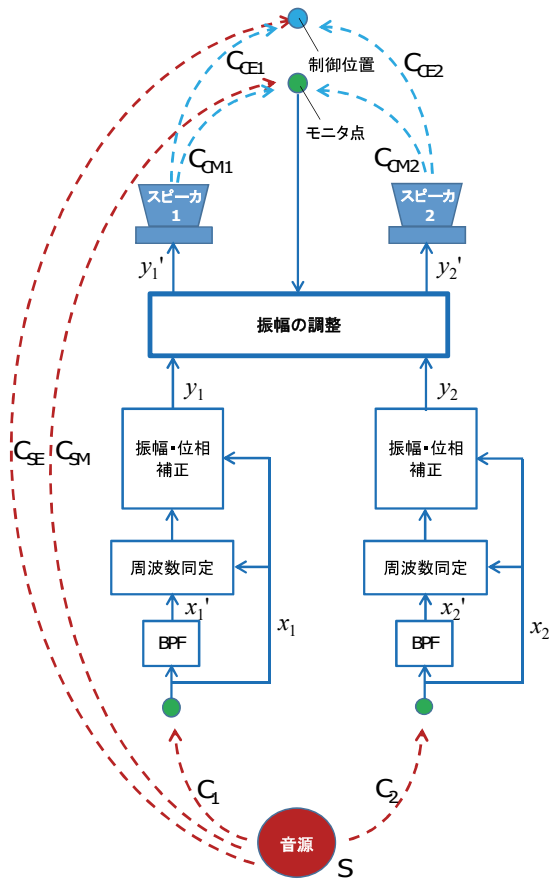
バンドパスフィルタを透過した信号の卓越周波数を LM S アルゴリズムにより同定する。同定した卓越周波数の情報をもとに、制御点で騒音と制御音が同振幅・逆位相となるように振幅・位相補正を行った信号を生成して制御スピーカより出力する。提案した制御方法は、従来の制御方法と比較して収束が早く、また対象とする騒音の情報のみを制御に使用するため、安定に制御できるという利点がある。

2.2 複数のスピーカの制御方法

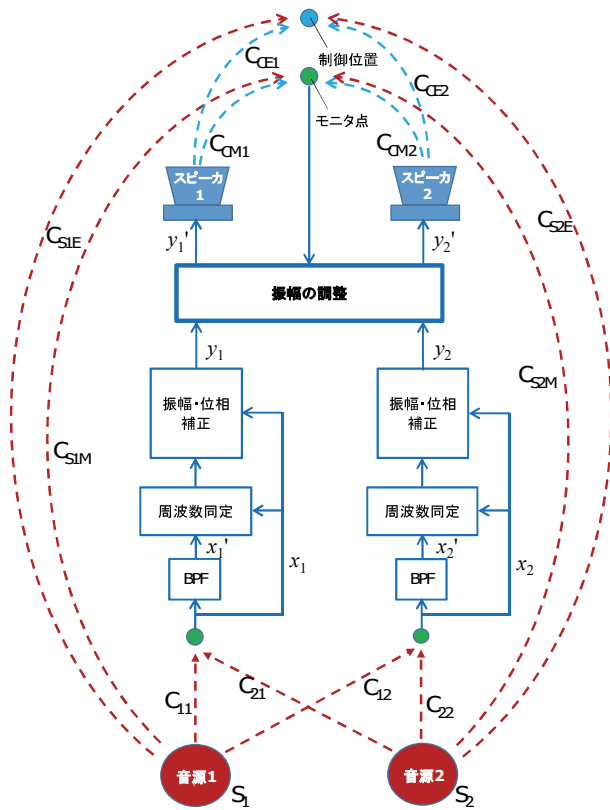
前節に記した制御方法は FF 型であるため、スピーカを複数使用する場合には、それぞれのスピーカ音が互いに干渉し想定通りに制御できない可能性があった。そこで、収束の早さと安定性を維持しながらスピーカ音の干渉（重なり）を制御する方法として、モニタ用マイクを用いた振幅の調整機能を加えた。この機能により、フィードフォワードでありながらモニタ用マイクで観測する信号によりフィードバックの仕組みを加えたことになるが、フィードバックの対象は振幅のみとし、また事前に上限値 A および係数 B（下記参照）を設定することで、特長である安定性を維持した。

複数のスピーカを用いる場合の制御方法を図-3に示す。制御位置において、騒音とスピーカ音が重なり、打ち消し合うようにスピーカ音 S₁、S₂ を制御する。このとき、制御位置とスピーカ 1 およびスピーカ 2 との距離によって S₁、S₂ の振幅比が異なる場合があるため、振幅の調整を行う。振幅の調整は、事前の配置検討³⁾時に振幅の重み係数を決定するだけでなく、モニタ用マイクにより観測し重み係数を調整する。図ではスピーカを 2 台使用する場合を示しているが、実際には 1 台のコントローラで 4 台のスピーカまで制御可能である。

モニタ用マイクおよび振幅の調整部分のブロックダイアグラムを図-4に示す。モニタ用マイクで観測する信号の平均振幅が上限値 A 以下であれば、信号 y はその



(a) 音源の数 : 1



(b) 音源の数 : 2

図-5 計算モデル

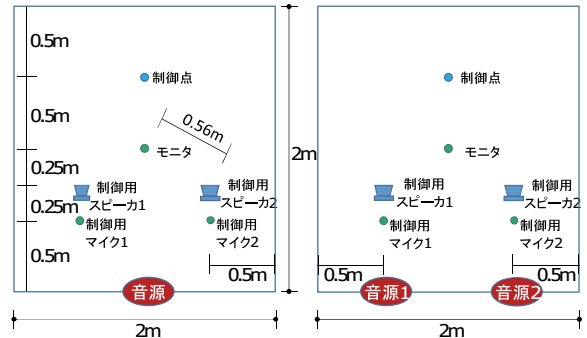


図-6 計算モデルの想定イメージ

表-1 数値シミュレーションの計算ケース

	音源数	音源の種類	音源の変動	外乱の有無
Case1	1	S: Source1	無	無
Case2	1	S: Source1	有	無
Case3	1	S: Source1	無	有
Case4	1	S: Source1	有	有
Case5	2	S ₁ : Source1 S ₂ : Source2	無	無
Case6	2	S ₁ : Source1 S ₂ : Source2	有	無
Case7	2	S ₁ : Source1 S ₂ : Source2	無	有
Case8	2	S ₁ : Source1 S ₂ : Source2	有	有

まま出力されるが、上限値Aを超える場合は、調整用の係数Bをかけて更新された信号がスピーカから出力される。上限値Aおよび係数Bは事前にスピーカごとに設定でき、さらに平均振幅を求める際の平均時間についても、音源の特性に合わせて設定可能である。

3. 提案する制御方法の効果と安定性

提案する制御方法の妥当性を数値シミュレーションにより確認した。計算モデルを図-5に、計算モデルの想定イメージを図-6に、計算ケースを表-1に示す。ここで図-5(a)より、

$$x_1 = C_1 S \tag{1}$$

$$x_2 = C_2 S \tag{2}$$

$$\text{制御位置の信号: } C_{SE}S + C_{CE1}y_1' + C_{CE2}y_2' = 0 \tag{3}$$

$$\text{モニタ点で観測する信号: } C_{SM}S + C_{CM1}y_1' + C_{CM2}y_2' \tag{4}$$

また、図-5(b)より、

$$x_1 = C_{11}S_1 + C_{21}S_2 \tag{5}$$

$$x_2 = C_{22}S_2 + C_{12}S_1 \tag{6}$$

制御位置の信号:

$$C_{S1E}S_1 + C_{CE1}y_1' + C_{S2E}S_2 + C_{CE2}y_2' = 0 \tag{7}$$

モニタ点で観測する信号:

$$C_{SIM}S_1 + C_{CML}y_1' + C_{S2M}S_2 + C_{CM2}y_2' \tag{8}$$

である。なお、 x_1 、 x_2 は制御用マイクの位置で観測する信号、 S 、 S_1 、 S_2 はそれぞれの音源信号、 y_1' 、 y_2' はスピーカへ出力する信号、 C_1 は伝達関数で、添え字は

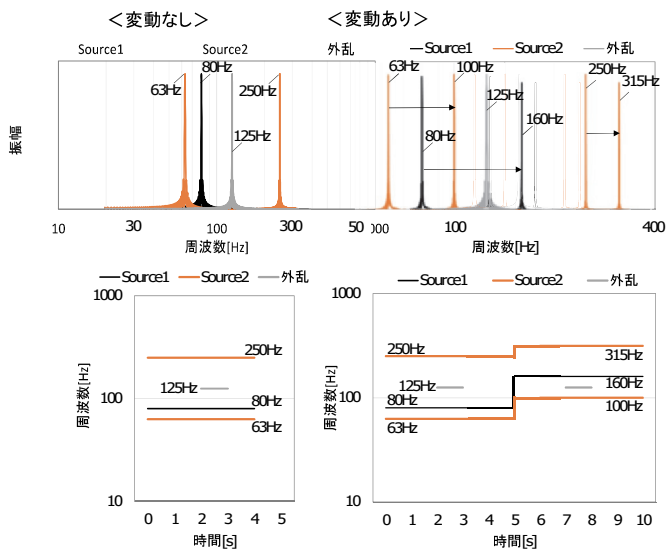


図-7 音源および外乱に用いた信号の周波数特性と時系列特性

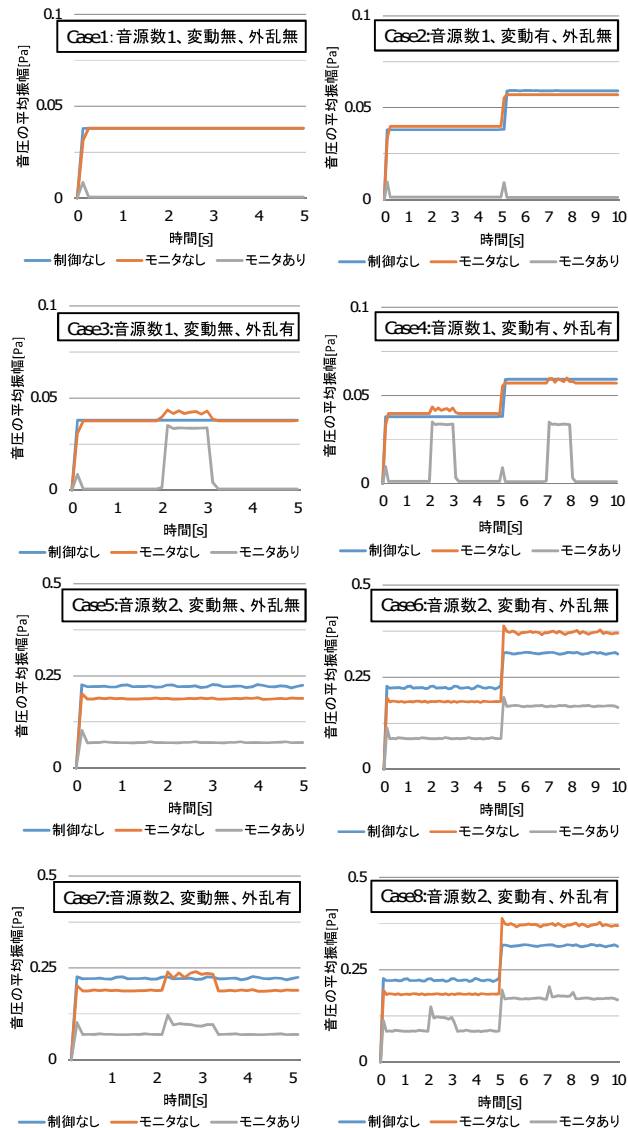


図-8 平均振幅 ($\tau = 125\text{ms}$) の変化

それぞれの経路における伝達関数である。また、実際にはスピーカによって遅延が生じるが、シミュレーションでは考慮しないこととした。制御用のスピーカは2台とし、音源が1個の場合と2個の場合について、制御点における音圧をシミュレーションした。さらに、外乱(突発的な信号)を与えて制御の安定性についてもシミュレーションを行った。各ケースにおいて、音源から制御用マイクまでは同距離(0.5m)とし、各制御用スピーカからモニタ用マイク(以下、モニタ)、および各制御用スピーカから制御点(以下、評価点)までについても同距離とした。音源に用いた信号、および外乱に用いた信号の周波数特性および時系列特性を図-7に示す。Source1は卓越周波数が1つ、Source2は卓越周波数が2つ存在し、時系列変化は定常および変動とした。外乱は、突発的、あるいは対象エリア付近を通行する音源を想定したもので、卓越周波数が1つ存在し1秒間継続するものとした。シミュレーションにおいてサンプリング周波数は25600Hz、周波数の同定に用いたLMSアルゴリズムのステップサイズは0.001、BPFのタップ数は200とした。なお、シミュレーションに使用したPCのCPUは3.6GHzであった。

シミュレーション結果を図-8に示す。図の縦軸は音圧の平均振幅であり、時定数は125msである。モニタなしの場合、Case1~4において制御により評価点での音圧が微増した。Case5~8については、モニタなしでも制御により評価点での音圧が低減する場合があったが、いずれもモニタありと比較して低減量が小さい結果となった。モニタありの場合、すべての計算ケースにおいて制御の開始から急速に音圧が低減し、効果を確認できた。また外乱が存在する場合でも、外乱の開始時には音圧が上昇するものの、発散することなく、その後音圧が低減した。さらに、音源が時系列変化する場合(Case2、4、6、8)においても、卓越周波数の変動に対して迅速に対応でき、制御なしの場合と比較して音圧が低減した。

以上より、モニタ用マイクを用いた振幅の調整機能により、FF型の制御方法でありながら、複数のスピーカを用いた制御が可能であること、また外乱の有無によらず制御によって音圧を低減でき、安定であることを確認した。

4. 提案する制御方法による効果

制御方法をコントローラに実装し、実験室において効果を確認した。実験状況を図-9および写真-1に、実験ケースを表-2に示す。音源は2個とし、それぞれのスピーカから卓越周波数が1つの信号を出力した。制御用のスピーカは4台とし、事前の配置検討で振幅の重み係数を決定した。制御点は中心位置と対象領域内の4点の2パターンとし、高さ1.2m、1.4m、1.7mにおいて、

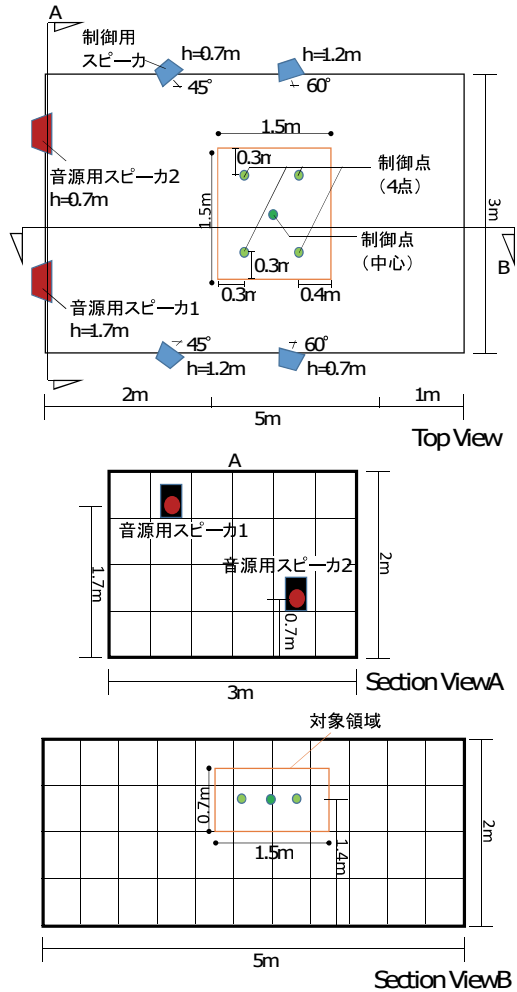


図-9 実験状況

0.5m ピッチで音圧を計測し、制御の有無による音圧差（制御による効果）を確認した。

対象領域における制御効果を図-10 に示す。制御効果は、対象領域内の各測定点（9点×計測高さ3面=27点）での効果を平均した値である。制御点が中心にある場合の方が、制御点を4点設けた場合と比較して効果が小さくなる傾向が確認できる。また、制御点の位置にかかわらず、モニタの制御により効果が向上した。250Hz で効果を比較すると、モニタありでは制御点が中心の場合は約5dB、4点の場合は約8dBとなった。

測定で確認した効果の平面分布の一例として、音源が250Hz の場合を図-11 および図-12 に示す。なお、両図とも、モニタ制御ありのケースである。図-11 より、制御点が中心の場合、制御点でもっとも効果が高く20dB を超えたが、中心から離れるにつれて効果が小さくなり、対象領域の一部では制御により音圧が増幅した。これは、制御点で音源スピーカーからの騒音と制御スピーカー音の合計が打ち消し合うのに対し、それ以外の場所では騒音とスピーカー音にずれが生じて完全には打ち消し合わないことが原因として考えられる。また、スピーカーを4台使用したため、音源スピーカーの放射方向とは反対方

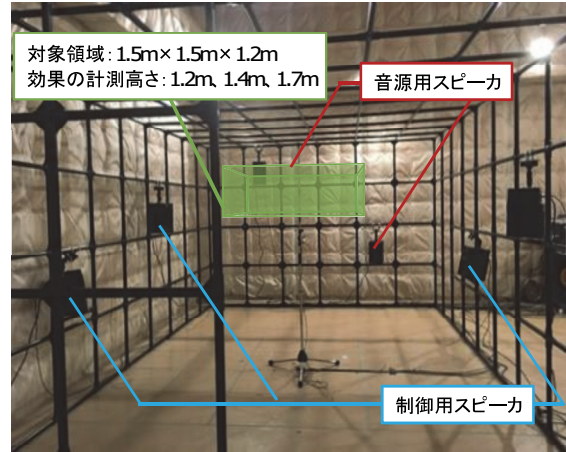


写真-1 実験状況

表-2 実験ケース

	モニタ制御	音源の周波数	制御点
Case1	なし		中心
Case2	あり	音源スピーカー1: 63Hz, 125Hz 音源スピーカー2: 250Hz	中心
Case3	なし		4点
Case4	あり		4点

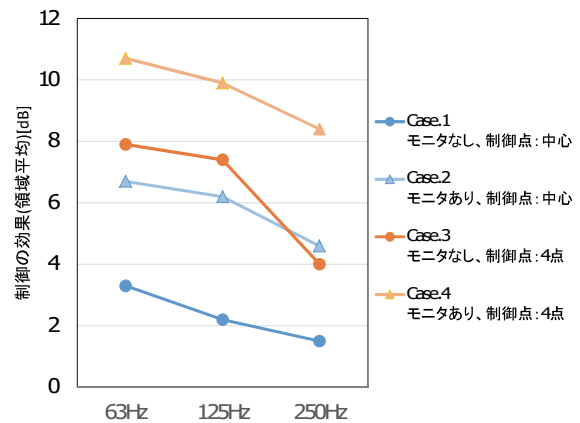


図-10 制御効果

向からも音を放射するスピーカーがあり、モニタ制御による振幅の調整では、中心以外の効果の低下および周辺での音圧増幅の傾向を抑制できなかったと考えられる。

図-12 より、制御点を対象領域内に分散させた場合、制御の効果が高い点は音源に近い位置に分布し、また対象領域内での効果の差は、制御点が中心の場合と比較して小さくなった。これは、各制御点で騒音と打ち消し合ったスピーカー音が他の点において別のスピーカー音と干渉し合うものの、モニタ制御により各スピーカー音の振幅が異なるため、増幅の傾向が抑制されたためと考えられる。

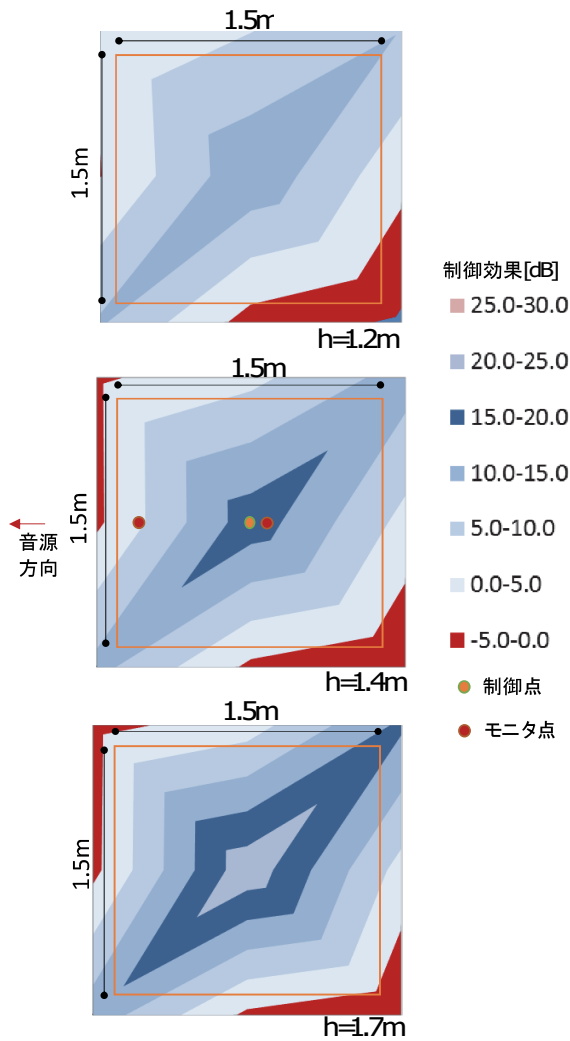


図-11 250Hz の制御効果の分布
(モニタあり、制御点：中心)

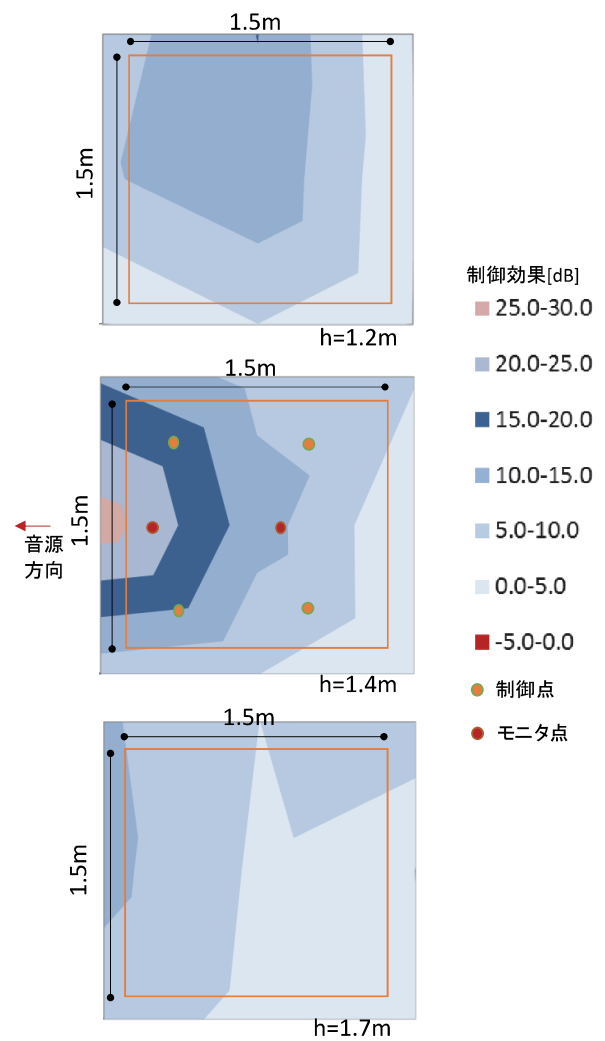


図-12 250Hz の制御効果の分布
(モニタあり、制御点：4点)

5. あとがき

工場などの生産施設において、作業領域の環境改善を目的とした局所 ANC を開発した。複数のスピーカを使用した場合に、スピーカ同士の影響を抑制して対象領域の騒音を制御するモニタ制御を考案し、シミュレーションおよび実験によって効果を確認した。シミュレーションで収束の速さ、および安定性確認した結果、モニタ制御を採用しない制御方法とほぼ同等であった。また、実験により、制御点の設定によって対象領域における平均 8dB 程度の効果を確認した。

今後は、モニタ制御に用いる値について、対象領域の空間条件を加えた検討を行うなど、より制御効果を向上する検討を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 金澤朗蘭、安井健治、柳沼勝夫、「フィードフォワード型能動制御による重機騒音の低減効果」、日本建築学会環境系論文集第 82 巻 732 号、pp.97-103、2017.2
- 2) 金澤朗蘭、柳沼勝夫、安井健治、稲留康一、「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—騒音変動に対する追従性能の検討—」、奥村組技術研究年報、No.42、pp.101-106、2016.9
- 3) 金澤朗蘭、柳沼勝夫、安井健治、稲留康一、「アクティブ音場制御における制御スピーカの配置および指向性に関する研究」、奥村組技術研究年報、No.43、pp.107-112、2017.9