

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

Placement of Control Speaker for Active Noise Control

– Effects of the Speaker Radiation Pattern –

金澤朗蘭* 柳沼勝夫* 安井健治** 稲留康一*

要 旨

騒音対策手法として、騒音と逆位相の音をスピーカから出力して騒音を打ち消す、Active Noise Control (以下、ANC と記す) がある。ANC は、基本的にマイクを配置したある点において騒音を低減させるシステムであり、ある面における騒音の低減には複数個のスピーカおよびマイクを必要とする。制御用スピーカおよび制御用マイクの数少なくするには、低減の対象を対象領域に最も影響する騒音に限定し、その騒音源近傍に制御用のスピーカを設置するのが効果的である。しかし、実際には設置可能な任意の場所に機器を配置せざるを得ない場合が多い。このため、合理的な ANC の機器配置には、低減対象の騒音、制御用スピーカおよび制御用マイクの位置に応じた対象領域における効果の予測方法が必要不可欠である。本報では、騒音がある一方向から伝搬する場合について、スピーカの位置とスピーカの指向性に応じた、騒音を低減させる領域における効果の予測方法を検討した。予測値と実験値を比較した結果、部分的に若干の差があるものの、ヒトの聴感における影響は小さく、実務的には十分適用性があることを確認した。

キーワード：能動騒音制御、スピーカの指向性、配置方法

1. まえがき

工場内では様々な騒音が存在しているが、生産状況を目視する必要性から、通常の騒音対策である遮音壁等で騒音源を囲うなどの対策ができない場合が多い。このため、遮音壁等を使用せずに作業員がいるエリアの騒音を低減したいという要望がある。騒音対策手法のひとつであるアクティブ・ノイズ・コントロール (Active Noise Control、以下 ANC と記す) は、視界を遮ることなくある領域での騒音を低減させることができる。ANC は、制御用のマイク位置において対象音を低減させるために、対象音と同振幅・逆位相の音を制御用のスピーカから出力する方法である。

ANC は、建設重機のエンジン音の対策¹⁾のように、騒音源の近傍に制御用スピーカを配置する場合には、制御用スピーカ 1 台および制御用のマイク 1 台で大きな騒音低減効果が得られる。しかし、騒音源から離れた位置に制御用スピーカを配置する場合、作業員がいるエリア等の領域全体の騒音を低減させるためには、多数の制御用スピーカおよび制御用マイクが必要になり、実現が難しい。

工場など実際の空間に適用する場合、騒音源の位置や伝搬方向、低減したい騒音の周波数は限定できる。したがって、騒音を低減させるための最適なスピーカ配置およびスピーカ放射角度とすることで、制御用のスピーカおよびマイクの数や数を数個または単一としても、対象領域の騒音を効果的に低減できると考えた。

本報告では、騒音を対象領域に一方向から伝搬するケースについて検討を行い、制御用スピーカの配置、指向性を考慮した騒音低減効果について、波面合成 (波の重ね合わせ) の考えに基づいた予測方法を提案した。騒音による音場を領域内に均等に配置した数点で代表させ、スピーカからの制御音による音場との合成によって効果の得られる範囲を予測し、実験値と比較した。予測結果は、実験結果の傾向を概ね模擬できることを確認した。

2. ANC の対象領域と効果

ANC は、制御対象とする領域の広さにより、極小領域 (耳元などの小さな領域)、閉空間全体、開空間における一部の領域、の 3 つに分類できる。対象の領域が広

* 技術研究所環境研究グループ ** 技術研究所企画・管理グループ

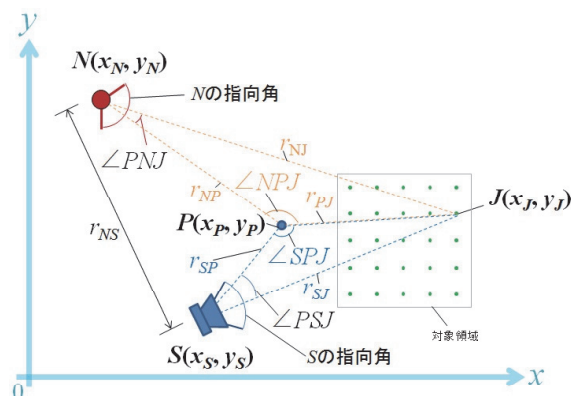
くなるほど、対象全体を制御するのが困難になる。

極小領域を対象とする ANC には、一般に広く普及しているノイズキャンセリングヘッドホンのように、耳元に制御用マイクおよび制御用スピーカを配置して、制御用マイク近傍の騒音を低減するもの²⁾³⁾や、耳元に制御用のマイクを、空間内に制御用のスピーカを配置し、スピーカから耳元のマイクまでの伝達関数を逐次計算することで、移動するマイク位置に追従して逆位相の音を制御用スピーカから出力し騒音を低減するもの^{4)~6)}等がある。このような ANC では、対象領域が狭いため、少ない数の制御用スピーカおよび制御用マイクで制御が可能であり、また高い周波数でも大きな効果が得られる。しかし、制御用のスピーカまたはマイクを耳元に配置する必要があり（イヤーマフ型）、工場においては作業の集中を妨げるなど、実際の適用には難しい場合がある。

閉空間全体を対象領域とする ANC は、空間内に存在する様々な周波数の音をすべて対象とするため、空間内に多数の制御用スピーカ、制御用マイクを設置する必要がある⁷⁾。このため、多数のスピーカやマイクが設置可能なスペースがあり、さらにある程度狭い空間である、自動車の運転室内のこもり音対策⁸⁾⁹⁾に適用されている。

上記の極小領域および閉空間を対象とする ANC は、領域全体を制御の対象としている。しかし、実際に騒音が伝搬する状況を考慮すると、対象領域は、工場内の作業員がいる場所のように大空間の中の一部や、工事現場等などの屋外において近隣へ騒音が影響する領域など、全体のうちの一部の領域であることが多い。一部の領域における騒音を対象とする ANC には、境界音場制御の原理¹⁰⁾に基づき、ある面を通過する騒音を低減させるもの¹¹⁾や、指向性の鋭いパラメトリックスピーカを利用するもの¹²⁾がある。これらの ANC では、対象領域内において、制御用マイク位置とその周囲において大きな効果を発揮するものの、それ以外の部分において増幅する場合がある。また、パラメトリックスピーカ単体では、通常、約 200Hz 以下の低音や 100dB 以上の大音圧の音を再生するのが難しく、ANC に適用できない場合がある。

対象領域における騒音の伝搬方向と同軸上に制御用のスピーカを配置すると、広い範囲で騒音と制御用スピーカからの制御音が同振幅・逆位相（もしくはそれに近い状態）となり、対象領域内で騒音が低減する。しかし、実際の工場においては必ずしも同軸上に配置できないため、騒音の伝搬方向と異なる方向に制御用スピーカを配置する場合がある。さらに、制御用スピーカの指向性によっては、対象領域内での効果や増幅位置が変わる。対象領域において騒音の卓越する周波数および伝搬方向を考慮し、制御用スピーカを効率的に配置し、適切な指向性を選定することで、少ない機材で、効果的に騒音を低減できると考えられる。そこで、騒音が一方向から伝搬



図一 位置関係

する場合について、制御用スピーカの配置と指向性を評価できる予測方法を検討した。

3. 振幅比と位相差に着目した予測方法

騒音源から伝搬する音波と制御用スピーカから伝搬する音波を、対象領域内に等間隔で設けた評価点において重ね合わせることによって、ANC の効果を予測する。なお、工場などの天井の高い空間を想定し、2 次元平面を仮定した。以下、考え方を示す。

図一 1 に騒音源(N)、制御用スピーカ(S)、制御用マイク(P)、および対象領域を示す。評価点Jは対象領域内に等間隔に配置した。制御用マイク位置Pにおいて、騒音源Nおよび制御用スピーカSから伝搬する音波の速度ポテンシャルを式(1)および式(2)のように仮定する。なお、騒音源Nは正弦波、騒音源Nと制御用マイク位置PおよびJでなす角∠PNJを θ_1 、制御用スピーカSと制御用マイク位置PおよびJでなす角∠PSJを θ_2 とし、 θ_1 、および θ_2 が、騒音源および制御用スピーカの指向角よりも大きい場合、その評価点Jにおける騒音源および制御用スピーカの振幅を減衰させる。振幅の減衰特性は、騒音源および制御用スピーカの指向特性に応じた値（実測値や仕様データ）を使用する。

$$\delta_N = -\frac{Q_0}{4\pi r_{NP}} \frac{1 + \cos \theta_1}{2} e^{-ikr_{NP}} e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\delta_S = -\frac{\alpha Q_0}{4\pi r_{SP}} \frac{1 + \cos \theta_2}{2} e^{-i(kr_{SP} + \phi)} e^{i\omega t} \quad (2)$$

速度ポテンシャルと音圧の関係¹³⁾から、式(1)、式(2)を時間tで微分し空気密度 ρ_0 をかけると、N、Sの音圧となる。

$$P_N = i\omega\rho_0 \frac{Q_0}{4\pi r_{NP}} \frac{1 + \cos \theta_1}{2} e^{-ikr_{NP}} e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$P_S = i\omega\rho_0 \frac{\alpha Q_0}{4\pi r_{SP}} \frac{1 + \cos \theta_2}{2} e^{-i(kr_{SP} + \phi)} e^{i\omega t} \quad (4)$$

ここで、

δ_N : Pにおける騒音源Nの速度ポテンシャル

- δ_S : P における騒音源 S の速度ポテンシャル
- P_N : P における騒音源 N からの伝搬音による音圧[Pa]
- P_S : P における制御用スピーカ S からの伝搬音による音圧[Pa]
- ρ_0 : 空気密度[kg/m³]
- ω : 角周波数 [rad/s]
- k : 波数 ($2\pi/\lambda$)
- λ : 波長[m] ($\lambda=c/f$, c : 音速[m/s])
- Q_0 : 音源 S_1 の強さ (体積速度) [m³/s]
- α : 騒音源に対する制御用スピーカの音源の強さを表す係数
- r_{NP} : 騒音源 N から P の距離[m]
- r_{SP} : 制御用スピーカ S から P の距離[m]
- θ_1 : 騒音源 N と制御用マイク位置 P および評価点 J でなす角 $\angle PNJ$
- θ_2 : 制御用スピーカ S と制御用マイク位置 P および評価点 J でなす角 $\angle PSJ$
- ϕ : 騒音源 N に対する制御用スピーカ S の位相差[rad]を示す。

ここで、騒音源 N の位置に対し、対象領域と制御用マイクの P 位置、および制御用スピーカ S の位置を決めると、図-1における r_{NP} , r_{SP} が既知となる。 P 点において騒音源 N からの伝搬音と制御用スピーカ S からの伝搬音の振幅比が 1、位相差が π のとき、騒音が打ち消されて P 点の音圧が低減する。このときの P_N および P_S の条件を求めると、振幅比について、式(1)および(2)の振幅に関わる部分の比から、

$$A_r = \frac{i\rho_0\omega \frac{\alpha Q_0}{4\pi r_{SP}} \frac{1+\cos\theta_2}{2}}{i\rho_0\omega \frac{Q_0}{4\pi r_{NP}} \frac{1+\cos\theta_1}{2}} = \frac{r_{NP}}{r_{SP}} \frac{\alpha(1+\cos\theta_2)}{1+\cos\theta_1} \quad (5)$$

P 点における振幅比 $A_r=1$ なので、

$$\alpha = \frac{r_{SP}(1+\cos\theta_1)}{r_{NP}(1+\cos\theta_2)} \quad (6)$$

より、 α が求められ、騒音源の音源強さに対する制御用スピーカの音源強さを設定できる。

続いて、位相差は、式(3)および(4)の位相から、

$$\Delta\phi = kr_1 - (kr_2 + \phi) \quad (7)$$

となり、 P 点における位相差 π なので、

$$\phi = k(r_1 - r_2) + \pi \quad (8)$$

より、 ϕ が求められる。

対象領域における ANC の効果は、騒音源と各評価点との距離 r_{NJ} 、制御用スピーカと各評価点との距離 r_{SJ} から、式(5)および式(7)の r_{NP} および r_{SP} に、 r_{NJ} 、および r_{SJ} を代入し、振幅比と位相差で求められる。 r_{NJ} 、 r_{SJ} は、 P 点と各評価点 J の関係から導くことができる。 P を直角座標の (x_p, y_p) としたとき、 P から評価点 J までの距離を r_{PJ} 、騒音源 N と P および評価点 J の内角 $\angle NPJ$ を θ_α 、

制御用スピーカ S と P および評価点 J の内角 $\angle SPJ$ を θ_β とすると、余弦定理から

$$r_{NJ} = (r_{NP}^2 + r_{PJ}^2 - 2r_{NP}r_{PJ} \cos\theta_\alpha)^{1/2} \quad (9)$$

$$r_{SJ} = (r_{SP}^2 + r_{PJ}^2 - 2r_{SP}r_{PJ} \cos\theta_\beta)^{1/2} \quad (10)$$

となる。

次に、各評価点における ANC の効果 E を、

$$E = \left(\frac{1}{T} \int_0^T D^2 dt \right)^{1/2} - \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T (D+C)^2 dt \right\}^{1/2} \quad (11)$$

ここに、

E : 評価点における ANC の効果

D : 評価点における騒音源からの伝搬音

C : 評価点における制御用スピーカからの伝搬音

T : 周期[sec]

と考えると、 D および C は、評価点における振幅比 A_r および位相差 $\Delta\phi_j$ を用いて

$$D = \sin \omega t \quad (12)$$

$$C = A_r \sin(\omega t + \Delta\phi_j) \quad (13)$$

と表すことができる。なお、 D を単位振幅とし、 C の振幅を評価点 $J(x_j, y_j)$ における A_r である A_j とすることで、騒音源からの伝搬音と制御用スピーカからの伝搬音の振幅比を表現する。

よって、

$$E = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt \right)^{1/2} - \left[\frac{1}{T} \int_0^T \{ \sin \omega t + A_j \sin(\omega t + \Delta\phi_j) \}^2 dt \right]^{1/2} \\ = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt \right)^{1/2} - \{ 1 + A_j^2 - 2A_j \cos(\Delta\phi_j) \}^{1/2} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t + \Delta\phi_j) dt \right]^{1/2} \quad (14)$$

ただし、

$$\cos \phi_j = \frac{1 + A_j \cos \Delta\phi_j}{\sqrt{1 + A_j^2 + 2A_j \cos \Delta\phi_j}}$$

となる。ここで、式(14)の第2項の後半は、単位振幅をもつ正弦波の実効値なので、

$$E = \Lambda \left[1 - \{ 1 + A_j^2 - 2A_j \cos(\Delta\phi_j) \}^{1/2} \right] \quad (15)$$

ただし、 Λ : 単位振幅の正弦波の実効値=0.707

となる。評価点において上式により効果を評価することで、騒音源、制御用スピーカ、および制御用マイク位置と対象領域の位置関係より、ANCによる効果を予測できる。

式(9)~式(15)は、二次元空間を仮定しており、高さ方向の効果については検討していない。今回対象としている工場等は高い天井を有するため、騒音源、制御用スピーカ、制御マイク、評価点を同一高さとする事で、二次元空間と仮定できる。

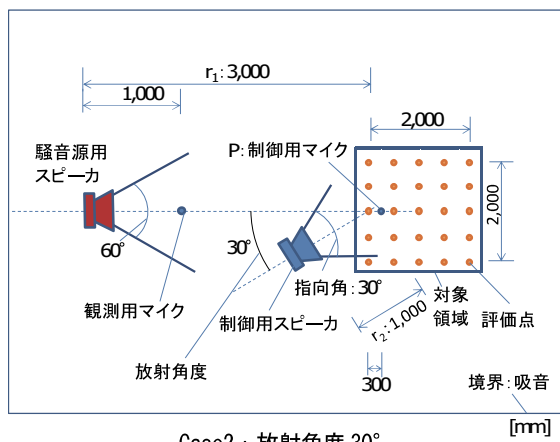
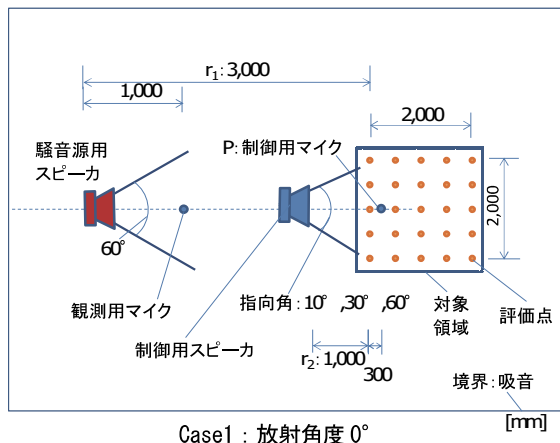


図-2 実験条件 (無響室)

4. 実験値との比較

4.1 実験条件

実験状況を図-2に示す。実験室は無響室であり、反射音の少ない空間とした。実験は、騒音と制御用スピーカから制御音が同方向に伝搬する Case1 と、騒音の伝搬方向に対し、制御用スピーカからの放射音が角度を持って伝搬する Case2 の2 ケースとした。

実験条件を表-1に示す。騒音源に対する制御用スピーカの角度 (以下、放射角度) は、0° および 30° とした。騒音源に用いた正弦波は、63Hz、125Hz、250Hz、500Hz の正弦波とした。また、スピーカの指向角は周波数によって変化するため、事前の実測により指向角を決定した。実験に使用したスピーカの周波数と指向角を表-2に示す。Case1で使用したSPCは、再生可能周波数が400Hz以上であり、騒音源の周波数が500Hzの場合のみ実験に使用した。音圧の低減効果の確認は図-2に示す0.5mピッチで配置した評価点で行い、音圧を低減したい対象領域の大きさは、2m×2mの範囲とした。低減効果は、ANCのON/OFF時の、各測定点における音圧レベル差とした。

表-1 実験条件

	放射角度 (騒音源に対する 制御用スピーカの傾き)	使用スピーカ	
		騒音源用	制御用
Case1	0°	SP A	SP B、SP C
Case2	30°		SP B

表-2 スピーカの周波数と指向角

スピーカ名	公称 指向角	測定した指向角[degree]			
		63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
SP A	60	90	60	60	60
SP B	30	90	50	40	30
SP C	1	-	-	-	2

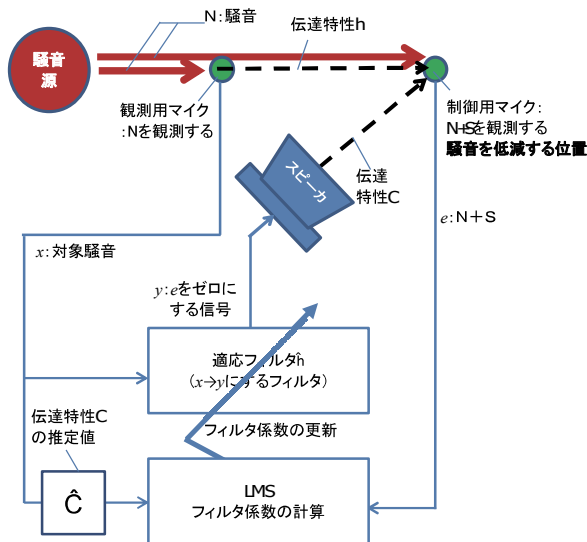
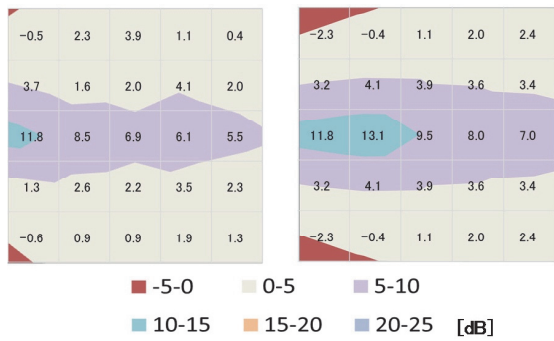


図-3 ANCに適用した制御方法

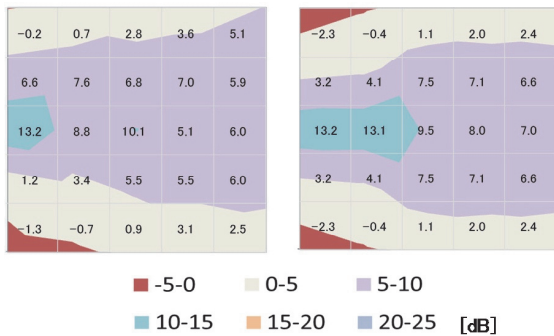
4.2 制御方法

ANCの制御方法は、図-3のブロック図に示す、Filtered-X-LMS アルゴリズム¹⁴⁾を使用した。この制御方法は、図に示す観測用マイクで観測した音圧を制御の対象とし、制御用マイクで観測する音圧を最小とするように、適応フィルタにより出力信号を制御し出力する方法である。適応フィルタは、観測用マイクで観測した対象騒音と、制御用マイクで観測した音をもとに逐次計算により適応フィルタが同定される。2章で述べたイヤーマフ型のANCの多くは、この制御方法を基本としている。

Filtered-X-LMS アルゴリズム制御は、制御用スピーカ、観測用マイクおよび制御用マイクの配置によってANCの効果は変わるものの、自由度が高い。ANCの効果の検討では制御用スピーカの位置を変更するため、Filtered-X-LMS アルゴリズム制御方法によるANCを適用し、実験を行った。



実験値 予測値
(a) 500Hz、放射角度 0° 指向角 2°



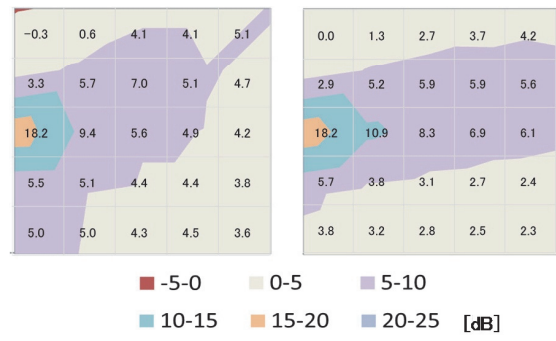
実験値 予測値
(b) 500Hz、放射角度 0° 指向角 30°

図一 4 実験値と予測値の効果比較 (Case1)

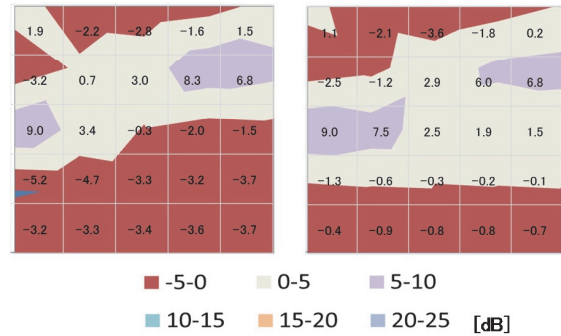
4.3 実験値と予測値

騒音源に対する制御用スピーカの放射角度が 0°、騒音源の周波数が 500Hz、騒音用スピーカの指向角が 60°、制御用スピーカの指向角が 30°および 2°の場合の、実験と予測による効果を図一 4 に示す。図中に示した値は実験および式(15)から得られた ANC の効果である。また、制御マイク近傍における実測値（効果が最大）の値を、予測計算における制御マイク位置の効果とした。

図一 4 (a) より、制御用スピーカの指向角が小さいため、5dB 以上の効果（ヒトが体感可能な差）が得られる範囲も狭く、帯状となった。また、5dB 以上の効果が現れる範囲は実験値が若干小さくなっているが、予測値とほぼ同等の範囲で効果が得られた。図一 4 (b) より、制御用スピーカの指向角が大きくなると、5dB 以上の効果が得られる範囲も広がった。また、5dB 以上の効果が得られる範囲は、実測値の方が大きくなったが、この理由として、制御用スピーカの減衰特性の影響が考えられる。予測では点音源として音源の減衰特性を与えていたが、騒音源および制御用スピーカに使用したスピーカの特性や評価点との距離によっては、面音源の減衰特性であった可能性がある。Case1 において、騒音源用スピーカと対象領域の距離は 4 波長以上離れていたが、制御用スピーカと対象領域の距離は 1 波長程度と近かった。



実験値 予測値
(a) 125Hz、放射角度 30° 指向角 50°



実験値 予測値
(b) 500Hz、放射角度 30° 指向角 30°

図一 5 実験値と予測値の効果比較 (Case2)

制御用スピーカの放射面積を考慮すると、対象領域と各スピーカとの距離に応じた減衰特性が実験と予測で異なり、振幅に差が生じたため、実験値と予測値に若干の違いが生じたと考えられる。

放射角度が 30°の場合の実験値と予測値を図一 5 に示す。図一 4 と同様、図中に示した数字は実験および予測によって得られた ANC の効果であり、制御マイク近傍における実測値（効果が最大）の値を、予測計算における制御マイク位置の効果とした。

図一 5 (a) より、制御用スピーカの指向角が 50° と Case1 よりも広いものの、放射角度があるため、5dB 以上の効果が得られる範囲は、放射角度に沿って帯状に現れた。5dB 以上の効果が得られる範囲は実測値の方が若干大きくなったが、予測値との差は小さく、ほぼ同等となった。図一 5 (b) より、図一 5 (a) と同様、放射角度に沿って効果が現れた。また、5dB 以上の効果が得られる範囲、増幅する範囲ともに実験値と予測値でほぼ一致しており、予測方法の妥当性を確認した。

実験値と予測値の比較より、放射角度によらず、また音源の周波数、および制御用スピーカの指向角に関わらず、制御用スピーカの放射方向に沿って効果が現れ、5dB 以上の効果が得られる範囲がほぼ同等となった。予測値と実測値の差についてもすべての評価点（測定点）

で5dB未満となった。制御用スピーカから離れた位置において、制御用スピーカの減衰特性の影響により実験値と予測値が若干異なる傾向があるが、数 dB 程度であり、実務上は十分に適用性があると考えられる。

5. おわりに

低減対象の騒音が対象領域に一方から伝搬するケースについて、制御用のスピーカおよびマイクの最適配置を決めるための、ANC の効果の予測方法を提案した。波面合成の考え方に基づいた方法により、対象領域における ANC の効果をほぼ模擬できた。ただし、今回の検討に用いた予測計算では、制御用スピーカと対象領域の距離に応じた減衰特性を考慮していないため、対象領域において制御用スピーカから離れるに従って効果の差が大きくなった。

今回の検討では、騒音が1方向から伝搬する場合について、制御用スピーカを1台配置した場合のANCによる効果の予測方法を検討した。より実際の状況を考慮するため、今後は、制御用スピーカと対象領域との距離に応じた減衰特性を考慮した予測方法を検討する。さらに、複数の騒音源および複数の制御用スピーカ、またこの場合の制御スピーカ同士の干渉による増幅を考慮し、予測に適用する方法について検討する。さらに、空間からの反射音の影響についても評価可能な方法について検討を行う。

【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) 山川航平、梶川嘉延、「ヘッドマウント型 ANC システムによるMR騒音の低減」、日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集、pp.117-120、2013.4
- 3) 原田拓実、梶川嘉延、西村正治、「FPGA を用いたフィードフォワード型ANCシステムに関する基礎検討」、日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集、pp.5-8、2016.4
- 4) 池田生馬、大野佳子、雉本信哉、「評価点の移動に追従する能動音響制御」、日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集、pp.97-100、2013.4
- 5) 平 隆志、田中信雄、「騒音源情報推定による Virtual Sensing ANC」、日本機械学会論文集 (C 編)、78 巻 790 号、pp.162-173、2012.6
- 6) 宮崎信浩、梶川嘉延、「バーチャルマイクロホンを用いたフィードバック ANC システムに関する検討」、電子情報通信学会技術研究報告、第 112 巻 49 号、pp.59-64、2012.5
- 7) Stephan Elliott、「Signal Processing for Active Control」ACADEMIC PRESS、pp.188-189、2001
- 8) 鮫島俊哉、安岡正人、「状態フィードバック制御による室内残響抑圧」、日本音響学会誌 55 巻 1 号、pp.12-22、1999
- 9) 佐野 久、井上敏郎、高橋 彰、山下 剛、中村光勇、寺井賢一、中村由男、「低周波ロードノイズのアクティブ制御システムの開発(1) -実用化に向けた課題解決法とシステム概要-」、日本音響学会講演論文集、pp.499-500、2000.9
- 10) 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.64-65、2006
- 11) 仲島崇博、金 慎也、井本桂右、伊勢史郎、「Active Noise Reflection Unit (ANRU)の騒音低減効果における物理的な振る舞いに関する検討」、日本音響学会誌、Vol. 65、No. 9、pp. 461-468、2009
- 12) 小松崎俊彦、畑中健介、岩田佳雄、「パラメトリックスピーカを用いた能動騒音制御（音響特性に関する実験的検討）」、日本機械学会論文集(C 編)、pp.75-82、74 巻 737 号、2008.1
- 13) 吉川 茂、藤田 肇、「基礎音響学」、講談社サイエンティフィック、p.168、2002
- 14) 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.74-75、2006