

# 特定領域を対象とした アクティブ・ノイズ・コントロールにおける 機器配置の選定方法

## Method of Determining Optimal Arrangement of Active Noise Control Equipment for Predefined Spaces

金澤朗蘭\*

### 要 旨

工場等では作業者の労働環境を向上させるため、機械から発生する騒音の低減が求められる。中でも低い周波数で音圧が卓越する音は、作業者に不快感を与える可能性が高い。対処法として、音源を囲う等の対策が一般的であるが、目視管理が必要な場合には対策に苦慮している。そのため、当社ではこれまでアクティブ・ノイズ・コントロールによる対策の実用化を行っている。しかし、作業場の制約や筐体等により、制御用スピーカを必ずしも最適な配置にできないことが想定されるため、事前に効果を評価するための手法を検討した。この手法により効果的な機器配置を選定して機械騒音の対策に ANC を適用した結果、領域内の平均音圧を想定通り低減できることを確認した。

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

工場内には様々な騒音が存在しており、作業者の労働環境を向上するためには騒音対策が必要となる場合がある。中でも回転部をもつ機械の騒音は低い周波数帯域で音圧が卓越することが多く、作業者にとって不快な音となる場合が多い。また、工場では機械の目視管理が必要な場合もあり、目視管理できる状況で、作業場所の音圧を低減することが求められる。このため、遮音壁等で騒音源（機械）を全て囲うといった一般的な騒音対策を適用できず、全作業員の周囲に衝立等を設けることもできない。さらに、ビニルカーテン等による騒音対策は目視管理が可能であるが、中～高音域の騒音に効果が期待できるものの、低音域については十分な効果が得られない。

このような状況では、視界を遮らずに騒音を低減できる方法として、低音域に対して大きな効果が得られるアクティブ・ノイズ・コントロール（Active Noise Control、以下 ANC と記す）が有効である。ANC によって作業者が常時居る領域（以下、特定領域と記す）の騒音を低減するには、機械から発生する騒音の変化などの影響を受けにくい制御方法が求められる。また、ANC を適用する際にはスピーカなどの機器配置が重要となるが、作業上の制約や筐等により、必ずしも最適な配置にできない

場合がある。これまで、音場の変化の影響を受けにくく、安定性の高い制御方法を適用した ANC を提案し、特定領域における効果を確認した<sup>1) 2) 3)</sup>。続いて、特定領域における ANC の効果を事前に評価する効果指標<sup>4)</sup>を提案した。効果指標により特定領域における聴感上の効果を事前に把握することで、効果の得られる機器配置の順位や ANC 適用の可否を判断できる。本稿では、効果指標の概要と、この効果指標を用いて機器配置を選定した ANC の適用事例について述べる。

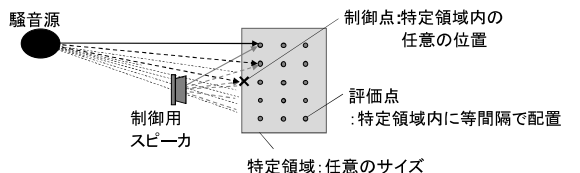
### 2. 効果指標

#### 2.1 機器配置の決定方法

これまで筆者らは、工場など最適な位置にスピーカを配置できない状況下において機器配置を決定するため、特定領域における ANC の効果を予測する方法を提案してきた。提案の方法により機器配置に応じた特定領域での ANC の効果は予測できるものの、聴感上の効果を評価する基準がないため、機器配置の選定が難しい場合があった。そこで、予測結果をもとにした効果指標（EI: Effect Index）を提案し、機器配置による効果を評価できるようにした。

ANC は、制御点において騒音が最も低減するが、振

\*技術研究所環境研究グループ



各評価点における効果 = (騒音のみの音圧レベル) - (制御後の音圧レベル)

$$\text{効果指標} = \frac{\text{特定領域の平均効果}}{\text{目標値(音圧レベル)}}$$

図-1 効果指標の概念

幅と位相のズレの大きさによっては完全には打ち消されないものの、ある程度騒音が低減する領域が制御点の周囲に存在する。そこで、対象とする特定領域内の複数の評価点において、騒音と制御音の振幅比と位相差から低減効果を推定し、領域内の平均と目標値との比を機器配置決定の指標とする。ただし、個々の作業場所によって異なる暗騒音の影響は考慮しないため、効果指標は実際の効果そのものとは異なることに留意する。

効果指標の概念を図-1に示す。特定領域内で等間隔に設けた評価点において、騒音の音圧実効値と、騒音と制御音の和の音圧実効値の比を効果とし、特定領域における効果の平均値と目標値の比を効果指標とした。効果指標=1のとき目標を達成するが、達成できないときには制御用スピーカの位置や数を変更し、機器配置を選定する。

なお、効果の予測計算では暗騒音を考慮せず、波面の干渉のみを計算するため、効果が極大となるなど現実的ではない値となる場合がある。そこで効果指標の値は対象領域全体の効果を代表する値として平均値を採用した。さらに、最小値を併記することで増幅の有無を判断する。

効果指標による機器配置の決定方法のフローを図-2に示す。iは騒音源の位置、騒音の低減領域、制御用スピーカ位置、制御用マイク位置、制御点などの配置パターン番号であり、n個の配置の中から最適な配置を選定する。制御用スピーカ位置は、作業状況に応じた配置可能な位置とすることで、影響の大きな卓越周波数の騒音を合理的に低減することができる。

効果指標と効果の目安を示したカテゴリーを表-1に示す。4章で詳しく述べるが、一般的には5dBのレベル差で概ね音の大きさの違いを区別することができることとされていることから、より明確に違いがわかる値として目標値を10dBと定義した。効果指標が0.5を超える場合、特定領域内において効果を感じると考えられる。

なお、実際の工場では複数の騒音源に対し複数の制御用スピーカを使用する場合があるが、本稿では1騒音源1制御用スピーカの配置の決定方法について検討した。

2.2 振幅比と位相差に着目した効果予測と効果指標

効果指標を求める際の機器配置と、直接音および床面

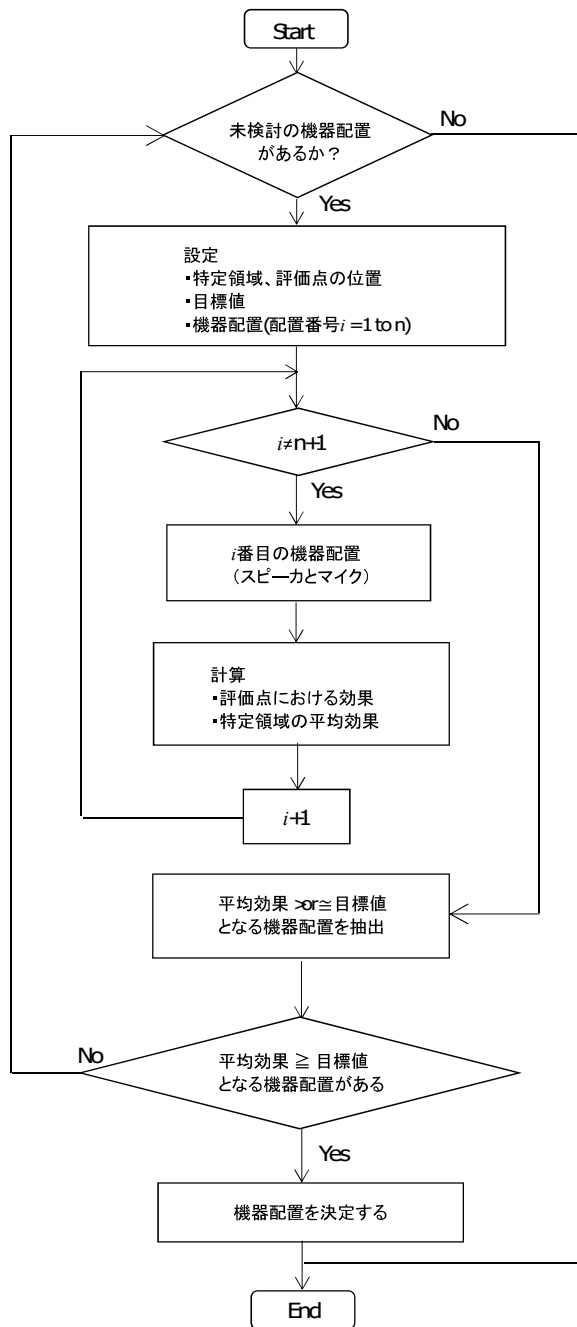


図-2 機器配置の決定フロー

表-1 効果指標と効果の目安

| 効果指標<br>EI: 効果の平均値/目標値 |                   | 特定領域における効果   |
|------------------------|-------------------|--------------|
| 効果の最小値/目標値 > 0         | good EI ≥ 1       | 明確に効果を感じられる  |
|                        | fair 1 > EI ≥ 0.5 | 効果を感じられる     |
|                        | poor 0.5 > EI     | あまり効果を感じられない |

反射に係る機器の位置関係を図-3に示す。工場のように空間が大きく、上面や壁面からの反射の影響が少ない状況を想定した。なお、実際の工場では機器からの反射等による複雑な定在波音場も存在するが、本検討では作業場所の環境向上を目標としており、騒音源が近く、床

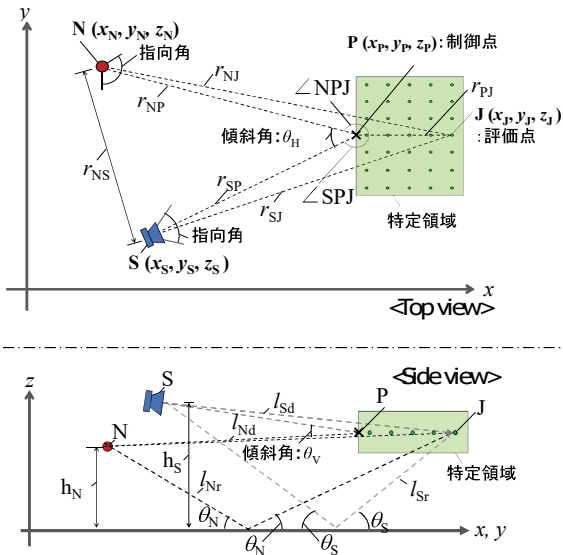


図-3 機器配置と、直接音および床面反射に係る機器の位置関係  
評価点: 35 点 (一例)

面反射以外の反射音の影響が小さい場合を想定した。床面からの反射の影響は次節において述べる。なお以降において、騒音源または制御用スピーカの指向性を示す角度を指向角、騒音源からの騒音の伝搬方向に対する制御用スピーカの向きを示す角度を傾斜角と定義した。図-3において、N は騒音源、S は制御用スピーカ、P は制御点である。特定領域において、N、S、および P は任意の位置に配置できる。特定領域における平均的な効果を把握するため、評価点 J は特定領域内に等間隔に配置する。制御点位置 P において、騒音源からの騒音と制御用スピーカからの制御音を同振幅、逆位相とすることから、評価点 J における騒音と制御音の振幅比、および位相差を予測し、各評価点における制御の効果 (制御の有無による音圧レベル差) を式(1)により評価する<sup>4)</sup>。

$$E_{J_{SPL}} \approx 91 - 20 \log_{10} \left\{ \Lambda (1 + A_J^2 + 2A_J \cos \Delta \phi_J)^{1/2} / p_0 \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\Lambda$  は単位振幅の正弦波の実効値=0.707、 $p_0$  は基準の音圧 ( $2 \times 10^{-5}$  [Pa])、 $E_{J_{SPL}}$  は各評価点 J における効果[dB]、 $A_J$  は各評価点 J における騒音と制御音の振幅比、 $\Delta \phi_J$  は各評価点 J における騒音と制御音の位相差を示す。

評価点の点数を  $N_J$  とし、特定領域における効果指標 EI を、

$$EI = \left( \frac{1}{N_J} \sum_{k=1}^{N_J} E_{J_{SPL,k}} \right) / V_T \quad (2)$$

とする。ここで  $V_T$  は効果の目標値=10dB であり、 $V_T = 10$  となる。式(1)を用いて各評価点における効果を求めた後、式(2)に示す効果指標を算出することで、目標以上の効果が得られる機器配置を決定できる。なお、スピーカの指向性を示す指向角は、実際に使用する機器の

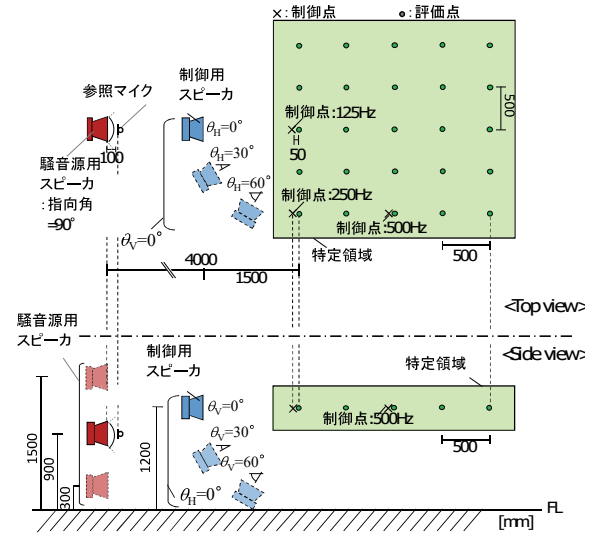


図-4 実験状況  
評価点: 25 点, 500 mm 間隔

仕様に応じ、-6 dB までの範囲と定義した。

### 2.3 床面反射の影響

床面反射に係る機器の位置関係を図-3に示す。各評価点における効果  $E_{J_{SPL}}$  は、床面反射の影響を受ける。そこで、想定する空間において最も影響の大きな一次床面反射の影響を考慮し、振幅比  $A_J$  に補正係数をかけ、位相差  $\Delta \phi_J$  に補正値を加えることで、式(1)を床面反射の影響を考慮した式(3)に書き換えた。なお、以降の検討では、効果を安全側に評価するため最も影響する場合を想定し、床面の反射係数を 1 とした。

$$E_{J_{SPL,F}} = 20 \log_{10} \frac{c_N / \sqrt{c_N^2 + c_S^2 \cdot A_J^2 + 2c_N c_S A_J \cos(\Delta \phi_J - \phi_{c_S} + \phi_{c_N})}}{p_0} \quad (3)$$

ここで、 $c_N$  および  $c_S$  は騒音源および制御用スピーカの床面反射に係る振幅の補正係数、 $\phi_{c_N}$  および  $\phi_{c_S}$  は床面反射に係る位相差の補正値である。式(3)における振幅比の補正係数および位相差の補正値は、機器の位置関係から導出する<sup>4)</sup>。

### 3. 実験による効果指標の評価

提案方法の妥当性を検証するため、実験室において制御による騒音の低減効果を計測し、効果指標と比較した。実験状況を図-4、写真-1に示す。実験室 (無響室) の床面は板張りし、床面反射が起こる状況とした。騒音源用スピーカ 1 台、制御用スピーカ 1 台とし、2000 mm × 2000 mm の広さをもつ特定領域に 500 mm ピッチで評価点を設けた。制御点は特定領域内とし、空間の影響を排除するため音源の周波数によって異なる位置とした (図-4 参照)。騒音源用スピーカの高さは 900 mm と



写真-1 実験状況

表-2 実験および効果指標の算出条件

|   |  |
|---|--|
| 制御用スピーカの指向角 [°]                           | 90   |
| 騒音源用スピーカと制御点の距離 [mm]                      | 4000   |
| 騒音源の周波数 [Hz]                              | 125, 250, 500  |
| 傾斜角 [°]<br>水平: $\theta_H$ 、鉛直: $\theta_V$ | $(\theta_H, \theta_V)$ :<br>(0, 0), (30, 0), (60, 0), (0, 30), (0, 60) |

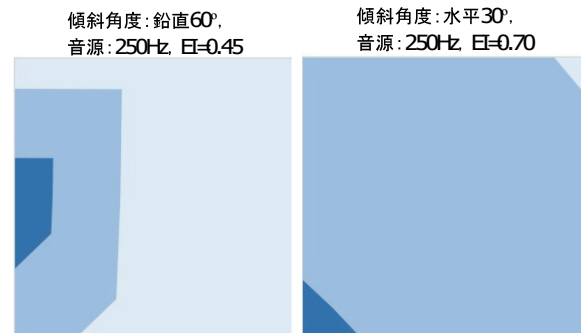
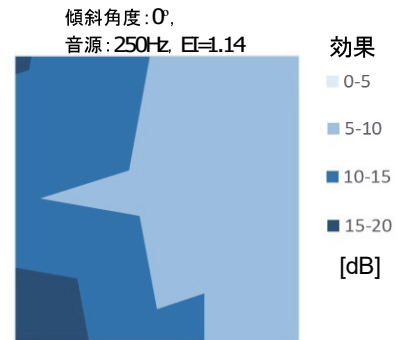


図-6 効果指標と効果の分布例

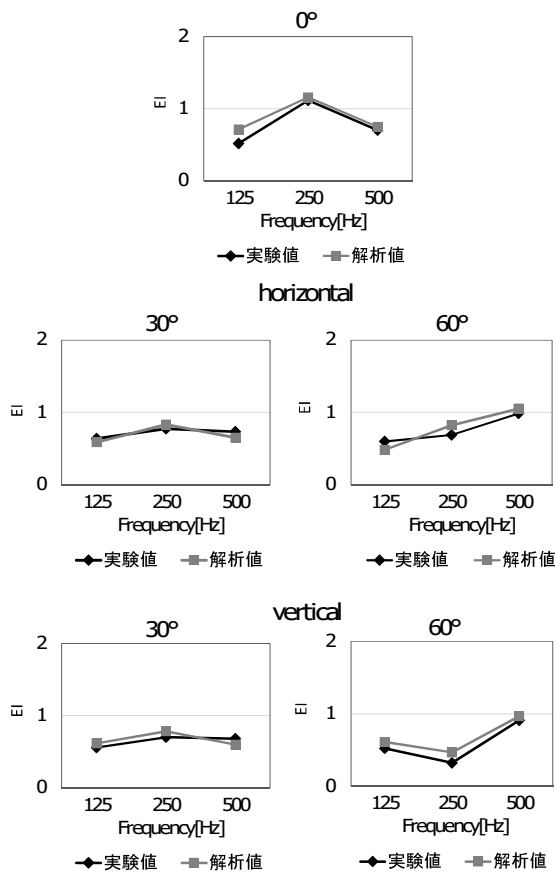


図-5 実験および解析による効果指標

した。制御用スピーカは、特定領域の境界点（音源の周波数が 125Hz のときの制御点と同等の位置）から 1000 mm の位置とし、制御スピーカの高さは、 $\theta_v$  が  $0^\circ$  の場合は 1200 mm、 $\theta_v$  が  $30^\circ$  および  $60^\circ$  の場合は、それぞれ 700

mm、300 mm とした。特定領域の高さは 1200 mm を中心として 800 mm~1400 mm とした。また、実験条件および効果指標の算出条件を表-2 に示す。制御用スピーカの指向角は  $90^\circ$ 、傾斜角（スピーカの向き、水平:  $\theta_H$ 、鉛直:  $\theta_V$ ）は  $(\theta_H, \theta_V) = (0^\circ, 0^\circ), (0^\circ, 30^\circ), (0^\circ, 60^\circ), (30^\circ, 0^\circ), (60^\circ, 0^\circ)$  の 5 ケースとした。それぞれのケースにおいて、制御の有無における評価点での音圧を測定し、式(3)および式(2)を用いて効果指標を求めた。なお、目標値  $V_T$  は 10 dB とした。

実験および解析による効果指標の比較を図-5 に示す。図より、解析による効果指標は概ね実験と同等の値が得られた。拡散音場を想定した一般的な ANC の予測方法<sup>5)</sup>では、検討した空間のように波長よりも大きな領域における効果を表現できないが、実際の空間の多くは拡散音場ではないため、効果が期待できる場合がある。本提案のように騒音および制御音の伝搬方向を考慮すると、実際の空間で確認できるように、波長よりも大きな領域における効果を表現することができる。

また、効果指標と特定領域における効果の分布の一例を図-6 に示す。効果指標が 1.14 の場合、10dB を超える効果が得られる範囲も広く、領域内のどの位置においても 5dB 以上の効果が得られ、明確に効果を感じると考えられる。また、効果指標が 0.7 の場合では、領域内で概ね 5 dB 以上の効果が得られ、効果を感じると考えられるものの、効果指標が 0.45 の場合では領域内の効果は概ね 5 dB 未満であり、効果を感じにくいと考えられる。以上より、効果指標と特定領域内の効果の分布は表-1 に示したカテゴリーとほぼ一致することを確認した。

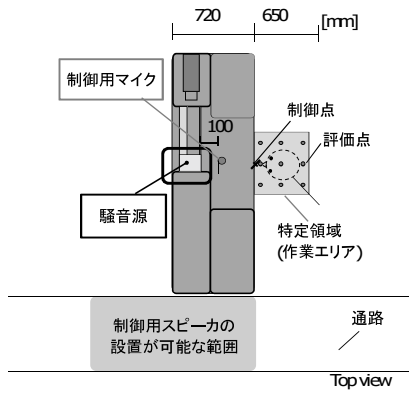


図-7 削孔機と作業領域（特定領域）

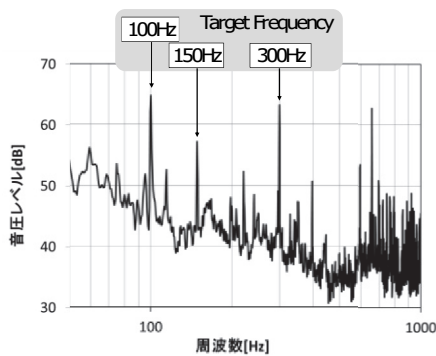
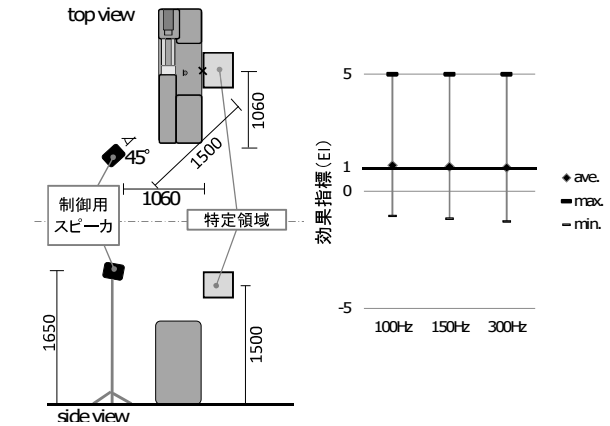
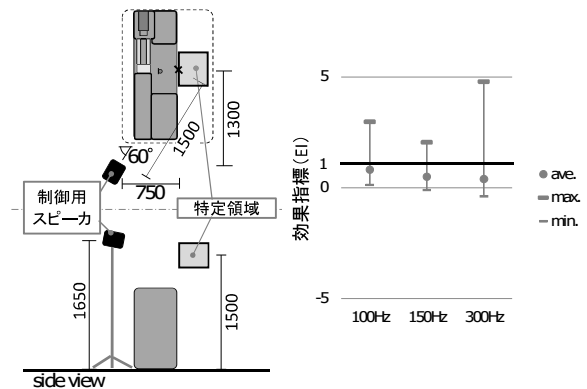


図-8 削孔機音の周波数特性



(a) Case 1



(b) Case 2

図-9 特定領域における効果指標

以上の実験および解析から、125～500 Hz、0～60°（水平、鉛直）の範囲において、提案した方法により想定通りに効果が得られる機器配置を決定できることを確認した。

#### 4. 実機への適用

##### 4.1 適用条件の検討

音源である対象機械および作業領域を図-7に示す。対象機械は削孔機であり、作業時には材料の削り音とともに、削孔機の回転に伴う低周波音が発生する環境である。削孔機の正面が作業領域であり、制御の特定領域はこの作業領域の範囲となる。また、図-7に示す通路が、制御用スピーカの設置が可能な範囲である。

事前の計測結果を図-8に示す。騒音源である回転軸の前方 100 mm の位置で音圧を計測した。100 Hz、150 Hz、300 Hz で音圧が卓越しており、概ね 60 dB 以上であった。これらの卓越周波数が聴感に与える影響が大きいと判断し、低減の対象とした。

##### 4.2 配置の決定

提案した方法により、騒音源と制御用スピーカおよび評価点の位置から制御用スピーカの配置を検討した。それぞれの条件を図-9、表-3に示す。制御用スピーカの指向角、制御用スピーカから制御点までの距離、対象

表-3 計算条件

|                        | case1                                       | case2 |
|------------------------|---|-------|
| 制御用スピーカの指向角            |   | 90°   |
| 制御用スピーカから制御点までの距離 [mm] |   | 1500  |
| 対象周波数 [Hz]             | 100, 150, 300                               |       |
| 制御用スピーカの傾斜角            | 45°   | 60°   |
| $\alpha$               | 2.4:100Hz, 1.8:150Hz, 1.3:300Hz             |       |
| 位相差                    | -1.4rad:100Hz, -1.5rad:150Hz, -1.4rad:300Hz |       |

周波数、制御用スピーカの傾斜角、および騒音源の音の強さに対する制御用スピーカの音の強さを表す係数  $\alpha$  を、表-3に示す値とした。制御用スピーカの指向角や制御点までの距離は等しいが、制御点となす傾斜角は、Case1の方が騒音の伝搬方向に近い角度である。

計算で求めた効果指標を図-9に示す。目標値は 10 dB として効果指標を求めた。効果指標の算出後、併せて効果の最大値および最小値を目標値で割った値も記し、効果の最大値が5を超える場合は5とした。このことは、音圧レベルでの最大効果の予測値が 50 dB を超えることを意味しており、現実的な値とはいえない。これは 2.3 節で述べたように、効果の予測では波面の干渉のみを予測値の計算に使用したためと考えられる。

Case 1 での効果指標は全ての周波数で1以上となったものの、最小効果は全ての周波数でマイナスとなった。

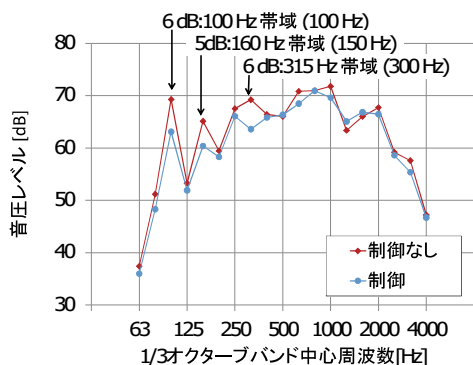


図-10 制御点における低減効果

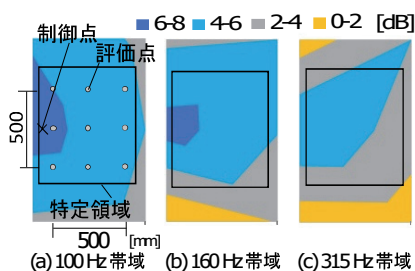


図-11 特定領域における制御効果  
評価点:9点, 250 mm 間隔

Case 2 では、100 Hz で 0.81、150 Hz で 0.50、300 Hz で 0.39 となり、全ての周波数で 1 未満となったが、最小効果は 300 Hz を除いて 0 以上となった。このため、制御用スピーカの配置は、300 Hz では効果を感じにくいものの、その他の周波数で概ね効果を感じられる、Case 2 の配置に決定した。

### 4.3 適用効果

フィードフォワード型の制御方法（直列型）<sup>1) 2)</sup> を適用し、制御用スピーカを Case 2 の配置として特定領域における効果を確認した。なお、制御の対象は事前計測で確認した 100 Hz、150 Hz、300 Hz の卓越周波数とした。評価点は、作業領域内（500 mm×500 mm）に 250 mm ピッチで等間隔に配置し、高さは 1500 mm とした。計測結果は 30 秒間の平均値であり、ヒトの耳が等比的に周波数特性を感じることから、1/3 オクターブ分析結果を示した。

図-7 に示した作業領域内の制御点における、各卓越周波数の音圧の低減効果を図-10 に示す。制御の有無により、対象の卓越周波数を含む帯域において 100 Hz 帯域では約 6 dB、160 Hz 帯域では約 5 dB、315 Hz 帯域では約 6 dB、それぞれ低減することを確認した。また、評価点とその周囲における制御効果（制御の有無による差）を図-11 に示す。それぞれの周波数帯域の領域における効果の平均値は、100 Hz 帯域で 5.5 dB、160 Hz 帯域で 4.7 dB、315 Hz 帯域で 3.5 dB となり、表-1 に示したカテゴリーと概ね一致した。また、図-9 に示した効

果指標との差は 0.3 ポイント程度であった。

なお、特定領域の効果は周波数が低くなるほど大きく、5 dB 以上となる範囲も広くなることが確認できた。さらに、周波数が高くなるほど制御用スピーカの傾斜角の影響が大きく現れることが図-11 から確認できる。

## 5. まとめ

ANC により特定領域の音圧を低減することを目的として、合理的な機器配置の選定方法を提案した。提案した効果指標を用いた方法により、機器配置による領域での効果を簡易に評価できることを確認した。また、効果の検証のため、工場の制約条件を考慮した機器配置を事前に検討し、実際の工場機械の騒音対策に適用した。その結果、事前に検討した機器配置によって、対象とする卓越周波数の音圧を想定通り低減できることを確認した。したがって、効果指標を 0.5 以上とする機器配置を選定することで、目視管理が可能な状態で、作業者のいる特定領域の音圧を低減でき、作業環境の改善に寄与できると考えられる。

今後の課題としては、機器配置の選定方法における、効果指標の精度向上や、複数の騒音源・制御用スピーカを使用した際の配置の検討方法および制御方法が挙げられ、引き続き取り組んでいく予定である。

### 【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、Vol.82、No.732、pp.97-103、2017.2
- 2) L. Kanazawa, K. Mizutani, "Reduction of construction machinery noise in multiple dominant frequencies using feedforward type active control", Internoise2018, Chicago, 2018.8.26-29
- 3) 金澤朗蘭、「特定領域を対象としたアクティブ消音の制御方法」、奥村組技術研究年報、No.45、pp.103-108、2019.9
- 4) 金澤朗蘭、水谷孝一、「機器配置を考慮したフィードフォワード型能動制御による特定領域の騒音低減」、騒音制御、Vol.44、No.2、pp.1-9、2020.4
- 5) Nakashima, T. and Ise, S., "A theoretical study of the discretization of the boundary surface in the boundary surface control principle", Acoustical Science and Technology, 27, 4, pp.199-205, 2006.