

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

－アクティブ消音システムの実工事への適用－

A Study on Active Noise Control Method

- Application of Active Noise Attenuation System to Actual Construction Work -

柳沼勝夫* 安井健治* 金澤朗蘭*

要 旨

建設現場や工場では、建設機械や産業機械から発生する騒音によって近隣から苦情が寄せられることが多い。建設機械や産業機械には、低周波数領域（100Hz 以下）で他の周波数よりも特出して音圧レベルが高い騒音を発生するものがある。防音パネル等の材料を用いて囲いや塀を設ける従来の騒音対策は、低周波数領域の騒音に対して低減効果が少ない。また、建物におけるサッシ等の建具も低周波数領域の遮音性能が悪いため、屋外の低周波数領域の卓越音は建物内へ伝搬しやすい。低周波数領域の卓越音が不快な音として居住者の心身に悪い影響を与える可能性があることから、その対策として「アクティブ消音システム」の開発を行った。本研究では、卓越周波数や音圧が時々刻々と変動する低周波数領域の騒音（シールドトンネル・立坑掘削工事に使用される 50t ラフタークレーンの騒音）に対して「アクティブ消音システム」を適用し、低周波数領域の卓越音の低減効果を確認できた。

キーワード：アクティブ・ノイズ・コントロール、低周波音、建設機械、ラフタークレーン

1. まえがき

建設現場や工場等から発生する騒音により、近隣住民から苦情を寄せられることが多い。環境省、水・大気環境局大気生活環境室の「平成 24 年度騒音規制法施行状況調査について」によれば、平成 24 年度に全国の地方公共団体が受理した苦情は 16,518 件であり、その中で建設作業や工場が約 60%を占めている。また、近年では、低周波音に係る苦情も増加しており、低周波数領域（100Hz 以下）の対策も重要視されている。

建設現場や工場の騒音源には、建設用または産業用機械がある。騒音の周波数特性は機械によって様々であるが、ラフタークレーンやバックホウ等のエンジンで稼働する建設機械や室外機でファンをもつ産業機械は、低周波数領域で他の周波数よりも音圧レベルが卓越する騒音（以下、卓越音と記す）を発生する。

低周波数領域の音に対する遮音対策は難しく、従来の防音パネル等を用いた囲いや塀の対策では、周波数が低いほど材料の遮音性能が悪いことや回折などにより、低周波数領域の騒音に対しては遮音効果を期待できない。また、建物のサッシ等の建具も低周波数領域の遮音性能

が悪い場合、屋外の低周波数領域の卓越音が建物内へ伝搬しやすい。このため、建設現場や工場で発生する低周波数領域の卓越音が近隣建物の居住者に不快な音として影響を与える可能性がある場合には対応が難しかった。

以上のことから、低周波数領域の騒音対策として、これまで能動騒音制御（以下、ANC：Active Noise Control と記す）に関する研究を行ってきた。ANC とは、図 1 に示すように制御対象の一次音源の音に対して逆位相の音を二次音源から出力し、音の干渉によって消音する技術である。既報¹⁾では、ANC のシステムをバックホ

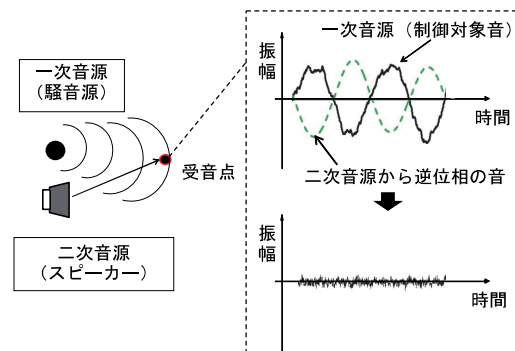


図 1 ANC の概要

* 技術研究所

ウ（容量 0.8m³）の騒音に対して適用した結果、卓越周波数の変動が少ない状況で低周波数領域の卓越音を低減できることを報告した。本報では、低周波数領域の卓越周波数が大きく変動する騒音も対象にした「アクティブ消音システム」（以下、本システムと記す）を開発し、立坑掘削工事に使用する 50t ラフタークレーンの騒音に対して適用したので、その事例を報告する。

2. アクティブ消音システムの概要

2.1 アクティブ消音システムの構成

本システムは、ANC を適用したシステムである。

本システムの主な機器構成を図-2、写真-1 に示す。本システムは、主に参照マイク、スピーカー、アンプ、制御コンピュータ（PC）で構成されている。音源近くに参照マイクを設置して制御対象の音を測定後、制御コンピュータ内で制御対象音と逆位相になる信号を作成し、音源近くに配置したスピーカーから制御音を出力させて制御対象音を低減する。

また、本システムは、インバータと無停電電源装置も使用する。インバータは、建設現場で電源供給が不可能な場合に使用する機器である。建設機械のシガーライターからインバータで 24VDC を 100VAC へ変換し、本システムの電源を供給する。無停電電源装置は、現場作業員による本システムの操作負担を減らす目的で追加した。無停電電源装置により、本システムへの電源供給が断たれると制御コンピュータが自動停止し、電源供給が開始されると自動起動する。このため、建設機械から電源供給する際に、エンジンを停止する時やエンジンを始動する時も本システムの操作は不要である。

2.2 アクティブ消音システムによる制御方法

ANC の制御方法には、主にフィードバック制御とフィードフォワード制御が用いられる。本システムは、既報¹⁾の ANC システムと同様な理由でフィードフォワード制御を採用した。本システムのフィードフォワード制御を図-3 に示す。

ANC のフィードフォワード制御では、騒音源近くに参照マイクを設置し、騒音を代表する参照信号を検出する。その後、参照信号を制御コンピュータで処理し、制御点で音源からの到達音に対して逆位相・同振幅になるようにスピーカーから制御音を出力する。ただし、制御点では、制御コンピュータ等による時間遅れ（位相差）や振幅の誤差が生じる。このため、一般にダクト等に採用する場合²⁾には、誤差マイクを制御点に設置し、誤差マイクから誤差信号を制御コンピュータに送ることで制御音を修正している。一方、本システムの場合は、屋外の建設現場で使用することを想定している。建設現場では、フィールドが広く制御点が複数あることや様々な騒音が発生すること、また、機器の設置に制約を受けや

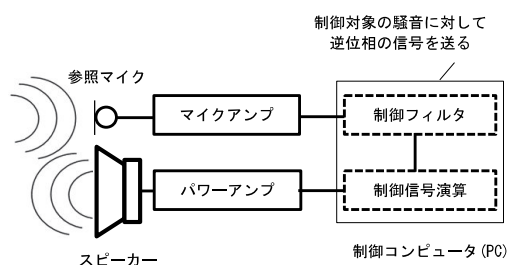


図-2 アクティブ消音システムの概要

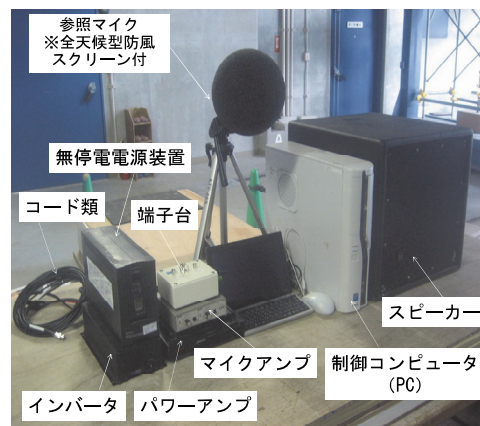


写真-1 アクティブ消音システムの機器構成

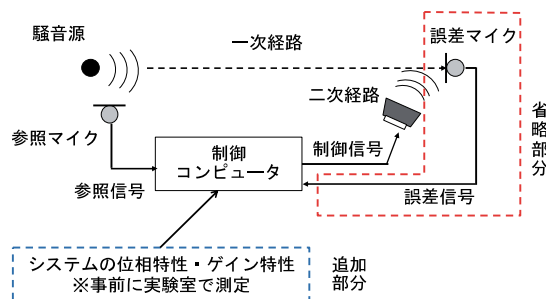


図-3 フィードフォワード制御
（アクティブ消音システムの場合）

すいため、ANC の誤差を的確に捉えられる最適な位置に誤差マイクを設置することが難しい。このため、事前に本システムの誤差を確認し、現場適用時にその誤差情報をもとに修正を行う方法が効果的と考え、誤差マイクを使用しない制御方法とした。

2.3 アクティブ消音システムに適用したフィルタ

本システムの制御コンピュータでは、測定した騒音から制御対象の周波数の音を取り出すバンドパスフィルタと制御する卓越周波数を時間領域で推定する適応フィルタを使用している。これらのフィルタにより、時々刻々と変わる低周波数領域の卓越周波数や音圧を推定できるようにした。

バンドパスフィルタの振幅比と位相差の周波数特性の

事例を図-4に示す。図-4は、30Hz～70Hzにおいて振幅比1.0で通過するバンドパスフィルタの特性を示している。対象周波数以外の音は、振幅比を小さくし、スピーカーからの出力を小さくする。ただし、バンドパスフィルタを通過する際に波の位相差が生じる。図-4の下段にバンドパスフィルタの位相差を示すが、波の位相は、例えば60Hzの入力信号に対して出力信号が50°遅れる。このように、バンドパスフィルタでは、入力と出力の位相差は周波数の変化とともに変化する。したがって、バンドパスフィルタを通過した信号は、位相補正を行わないと位相遅れにより騒音を増幅させてしまうことが考えられる。このため、効率良く音を低減するには、バンドパスフィルタの出力信号に位相補正が必要となる。

適応フィルタは、LMS アルゴリズム²⁾を使用し、測定した騒音の卓越周波数を時間領域で推定を行うフィルタである。このフィルタにより、その周波数に合わせてバンドパスフィルタを通過した制御信号も時間領域での位相補正が可能となる。

2.4 アクティブ消音システムのスピーカーの設置位置

本システムでは、スピーカーを音源に近接して設置することを想定している。このため、図-5に示すような一次音源（音源）と二次音源（スピーカー）を近接して設置するダイポールによる放射パワーの低減方法²⁾で騒音を低減することになる。この低減方法を適用した場合、遠方での音の強さ I_d は、騒音源のみの場合の音の強さ I_m に対して式(1)の関係になる。

$$\frac{I_d}{I_m} = \left| \frac{2\pi D}{\lambda} \right|^2 \cos^2 \theta \quad \dots (1)$$

ここで、D：一次音源と二次音源の中心間距離(m)
 λ ：波長(m)
 θ ：図-5に示す角度

よって、全方向で制御対象の音を低減する場合、式(1)より制御対象音の卓越周波数を確認し、 $D < \lambda / (2\pi)$ となるようにスピーカーを設置する。

3. アクティブ消音システムの特性

3.1 制御機器の位相特性とゲイン特性

ANCを使用する場合、制御対象音と制御音の位相差や音圧差が騒音の低減量に影響する。このため、本システムの開発においては、バンドパスフィルタや制御コンピュータ、また、スピーカー等の位相特性やゲイン特性を考慮した。

バンドパスフィルタは、設計段階において周波数ごとの位相特性が既知である。しかし、本システムに使用す

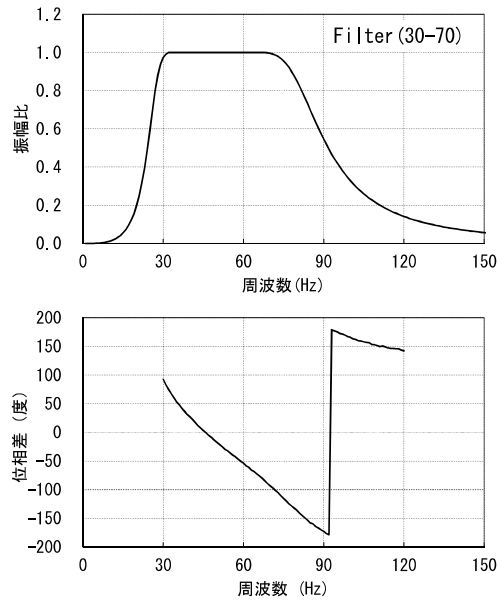


図-4 バンドパスフィルタの振幅比と位相差 (例)

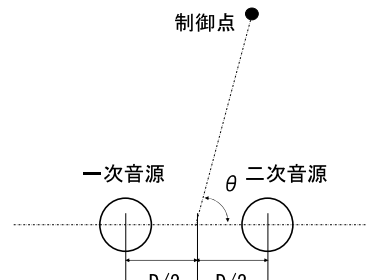


図-5 ダイポール放射

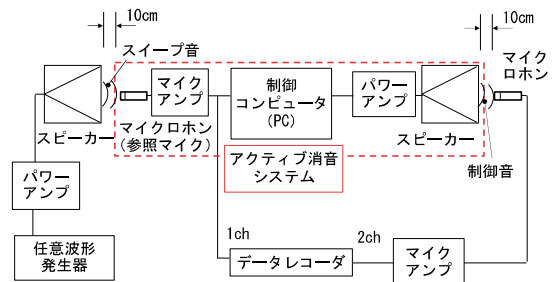


図-6 予備試験の測定ブロックダイアグラム

る機器の位相特性とゲイン特性については、未知であるため、予備試験により確認した。

3.2 予備試験

奥村組技術研究所・音響実験棟³⁾の無響室で予備試験を行った。測定ブロックダイアグラムを図-6に示す。

予備試験では、周波数が漸増するスイープ音を音源とし、スイープ音を測定した本システムより制御音を発生させた。そして、スイープ音と制御音をデータレコーダに収録し、収録データを処理して周波数別に本システムの位相特性とゲイン特性を確認した。なお、スイープ音

を出力するスピーカーと本システムの参照マイクの距離、および制御音を出力するスピーカーと制御音を測定するマイクの距離については、実工事での参照マイクの設置を想定して10cmとした。

収録したデータより入力(1ch)と出力(2ch)の振幅比と位相差を求めた。振幅比から本システムのゲイン特性を図-7に、位相差を図-8に示す。なお、バンドパスフィルタの振幅比と位相差は、図-4と同様の特性である。また、スイープ音を20Hzから80Hzまで連続して出力させた。

本システムのゲイン特性は、30Hzから70Hzまで周波数の増加に伴って振幅比が増加している。本システムの位相差は、30Hzから50Hz程度まで大きくなっている。また、50Hzで -180° から 180° となり、50Hz以上から位相遅れが小さくなっていくことがわかる。ただし、この予備試験により求めた本システムの位相特性は、バンドパスフィルタの位相特性も含んでいる。このため、測定結果と既知のバンドパスフィルタの位相特性の差より本システムの位相特性とゲイン特性を求める。

以上より、予備試験で得た本システムの位相特性およびゲイン特性を用いて制御信号の補正を行い、スピーカーから逆位相の制御音を出力させる。

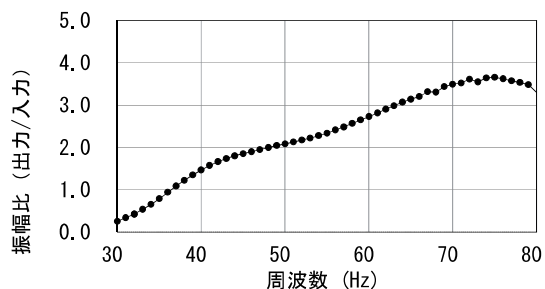


図-7 アクティブ消音システムのゲイン特性

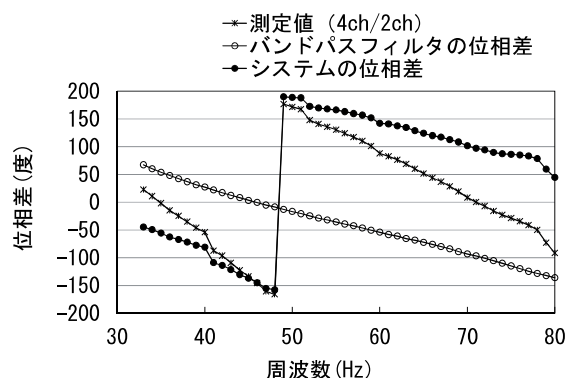


図-8 アクティブ消音システムの位相差

4. 立坑掘削工事への適用

4.1 立坑掘削工事の概要

写真-2に示すシールドトンネル・立坑掘削工事の50tラフタークレーン(以下、ラフターと記す)から発生する低周波数領域の卓越音に対して、本システムを適用した事例を報告する。

工事場所は、都市部の幹線道路沿いの狭隘地で飲食店やマンションに近接している。掘削工事に使用する主な建設機械はラフターである。工事場所と飲食店、およびマンションが近接しているため、近隣住民への配慮としてラフターの騒音対策を行った。



写真-2 立坑掘削工事状況

4.2 50tラフタークレーンの騒音特性

使用されるラフターの騒音の発生状況を調査した結果、ラフターのエンジンを稼働させた場合、排気筒や吸気ガラーがあるラフター後方から主に騒音を発生することがわかった。また、排気筒からは、低周波数領域の卓越音も発生していた。ラフターから後方1m(高さGL+1.2m)離れた位置でラフターの騒音を測定した結果、騒音の周波数特性は、図-9に示すようにエンジンの回転数に応じて低周波数領域の卓越周波数が変化することがわかった。このため、ラフターの排気筒から発生する低周波数領域の卓越音に対して、本システムを適用した。

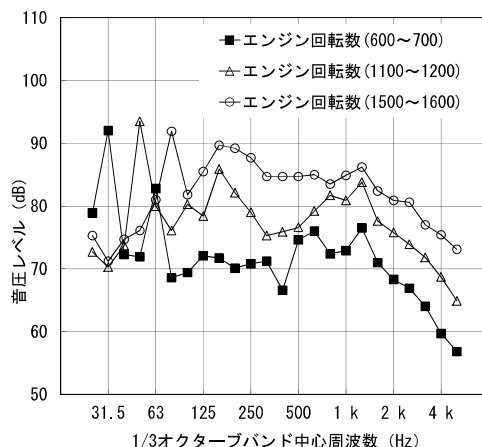


図-9 50tラフタークレーン騒音の周波数特性

4.3 アクティブ消音システムの設置概要

アクティブ消音システムの設置概要を図-10に、スピーカーとマイクの設置状況を写真-3に示す。本シス

テムの参照マイクは、音源である排気筒の中心から予備試験と同様に 10cm 離して設置した。スピーカーは、可能な限り排気筒に近づけて設置した。排気筒中心とスピーカー中心の距離は、75cm である (式(1)より 70Hz まで全方位で低減可能)。

立坑掘削工事におけるラフターは、立坑の掘削、運搬車への積込みの作業を繰り返し行う。1 サイクルの作業時間は、約 6 分である。また、作業に応じてエンジンの回転数が異なる。一連の作業において、排気筒から発生する卓越周波数を測定した例を図-11 に示す。作業状況によりエンジンの回転数が変わり、それに伴って卓越音も変化する。本工事の場合、卓越周波数が 30Hz~60Hz 程度の幅で変化した。30Hz 付近はアイドルリング時、60Hz 付近はバケットの高速巻下げ、または巻上げ時、40Hz 付近の卓越周波数の頻繁な変動は掘削作業時である。また、掘削土積込み時は 50Hz 付近である。このため、ラフターから発生する卓越音の状況から、本システムのバンドパスフィルタを 30Hz~60Hz で振幅比 1.0 となるように設計した。

4.4 アクティブ消音システムの適用効果

本システムの効果を確認するため、ラフター作業時の音圧を測定した。測定点の位置を図-10 に示す。測定点は、参照マイクの位置、スピーカーから 10cm 離れた位置 (測定点①)、飲食店側の敷地境界付近の 2 点 (測定点②、測定点③)、防音パネル背後から 1m 離れた位置 (測定点④) とした。なお、制御コンピュータから出力される制御信号も測定した。測定点②、測定点③、測定点④は、JIS Z 8731 に準拠し、高さ GL+1.2m とした。

バケット巻下げ時の制御信号 (電圧波形) とスピーカーから出力された音圧波形を図-12 に示す。また、排気筒前とスピーカー前の音圧波形を図-13 に示す。

制御信号は正弦波で出力しているが、スピーカーから出力される音圧は波の山の部分で歪を生じており、制御音がスピーカーの出力限界を超えている可能性がある。排気筒前とスピーカー前の両波形を比較すると騒音源に対してほぼ逆位相であり、スピーカーから逆位相の音を出力できている。音圧の大きさについては、“排気筒前”に対して“スピーカー前”の最大音圧が半分程度で



図-10 システムの設置および測定点概要 (現場配置図)

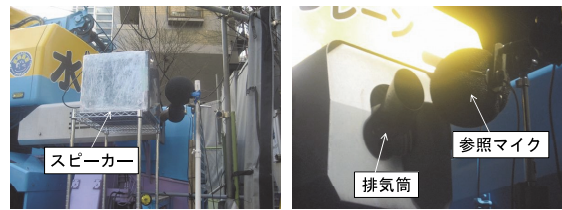


写真-3 スピーカーと参照マイクの設置状況

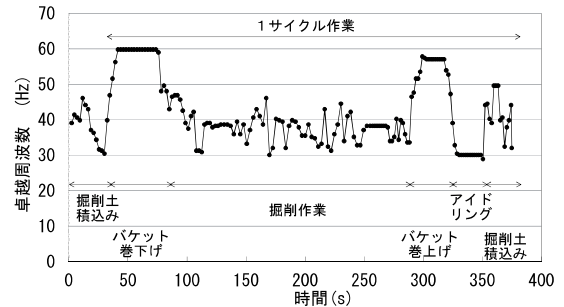


図-11 排気筒から発生する騒音の卓越周波数

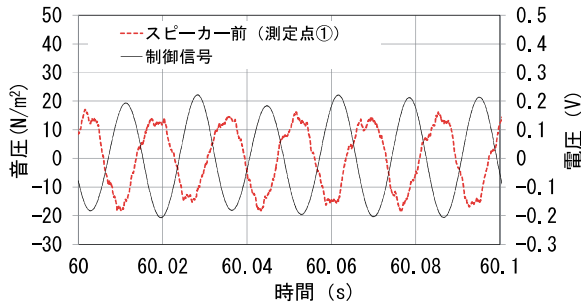


図-12 制御信号とスピーカー前の音圧波形 (バケット巻下げ)

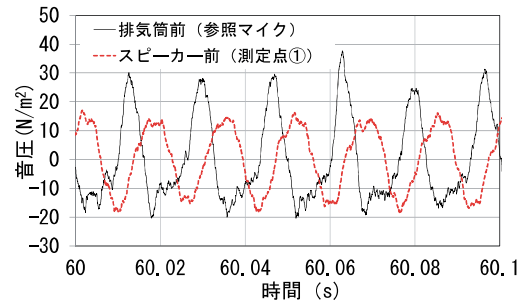


図-13 排気筒前とスピーカー前の音圧波形 (バケット巻下げ)

あった。この原因も卓越音の大きさがスピーカーの出力限界を超えていることが考えられる。このため、本システムの性能を向上させるためには、低周波数領域の音を十分に出力できる機器の選定が必要と考える。

飲食店前の敷地境界付近(測定点②)における本システムによる制御前、および制御後の音圧波形を図-14に示す。なお、作業は、バケットを高速で巻下げしている状態である。制御後は、制御前と比較して、低周波成分の波が減り、高周波成分が残っている波に変化した。また、音圧の最大値は約30%低減していることから、敷地境界付近で本システムの効果を確認できた。同作業時、同測定点における音圧を1/3オクターブバンド分析した結果を図-15に示す。63Hz帯域の卓越音が制御後に10dB以上低減しており、低減卓越周波数の卓越音に対して本システムによる効果を確認できた。

測定点②において1サイクルの作業時間帯(約6分)で音圧レベルを求めた結果を図-16に示す。卓越周波数の変動が激しい掘削作業も含む1サイクルの時間帯で評価を行った場合、制御後の低減効果は、40Hz帯域で3dB、50Hz帯域で7dB、63Hz帯域で5dBであった。また、測定点③、測定点④の測定結果を図-17、図-18に示す。他の測定位置でも40Hz帯域から63Hz帯域で測定点②と同程度の低減効果を得た。

以上より、周波数や音圧が時々刻々と変動する低周波数領域の卓越音に対して低減効果を得ることができた。

5. まとめ

立坑掘削工事のラフターから発生する低周波数領域の卓越音に対して、本システムを適用した。

その結果、ラフターから発生する低周波数領域の卓越音を低減できること、作業状況に応じて卓越音が時々刻々と変化する場合にも対応できることを確認した。なお、制御対象音の音圧に対して、本システムの制御音の出力が十分でないで、低周波数領域で十分な制御音を出力できるアンプやスピーカーを選定することにより、さらに低減効果を向上させることが可能と考える。

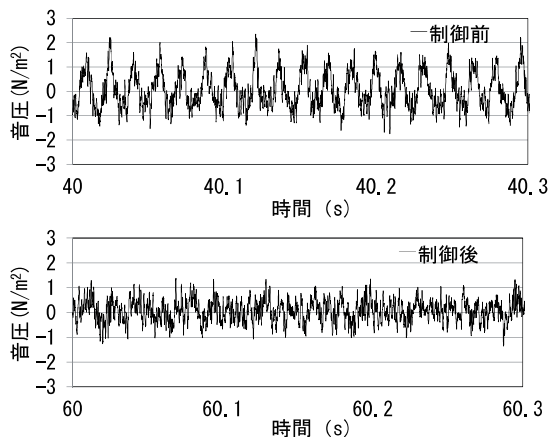


図-14 測定点②の音圧波形(バケット巻下げ)

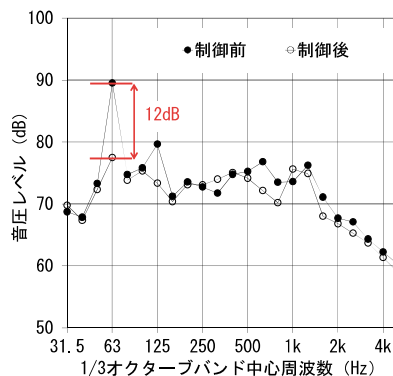


図-15 測定点②の1/3オクターブバンド分析結果(バケット巻下げ)

今後は、他の建設現場にも適用し、より低減効果を得られるアクティブ消音システムに改良していきたい。

【参考文献】

- 1) 金澤蘭蘭、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」、奥村組年報、pp.98-103、2012.9
- 2) 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.6-12、pp.72-73、2006
- 3) 稲留康一、「奥村組技術研究所の音響実験施設」、騒音制御、Vol.28、No.3、pp.180-184、2004.6

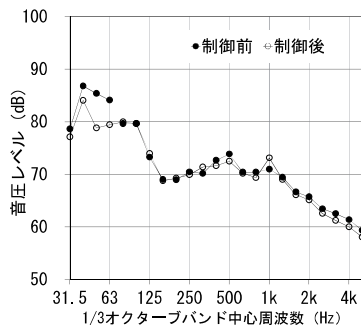


図-16 測定点② (1サイクル作業)

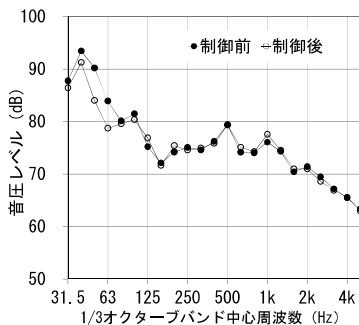


図-17 測定点③ (1サイクル作業)

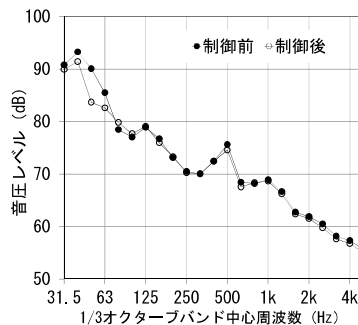


図-18 測定点④ (1サイクル作業)