

建設機械の騒音に対するアクティブ消音技術の適用

株式会社奥村組	非会員	○柳沼 勝夫
株式会社奥村組	正会員	栗本 雅裕
株式会社奥村組	非会員	安井 健治
株式会社奥村組	非会員	深津 有彦
株式会社奥村組	非会員	杉村 晋之介

1. はじめに

建設現場や工場等では、現地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、低周波数領域の音（100Hz 以下）に係る苦情も増加しており、低周波数領域の騒音対策も重要視されている。

建設現場の騒音源には、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¹⁾。

低周波数領域の騒音に対する遮音対策は難しい。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図-1 に示すような回折により、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、建物のサッシなどの建具も中・高周波数領域に比べて低周波数領域の音が透過しやすい。このため、室内では中・高周波数領域の音が遮断され、相対的に低周波数領域の音が目立つようになる^{2) 3)}。上記より、建設現場や工場等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困難であった。

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⁴⁾。なお、ANC とは、図-2 に示すように制御対象の 1 次音源に対して逆位相の 2 次音源を出力し、音の干渉によって消音する技術である。本報では、低周波数領域で音圧レベルが卓越する騒音の対策として「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、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適用したので、その事例を報告する。

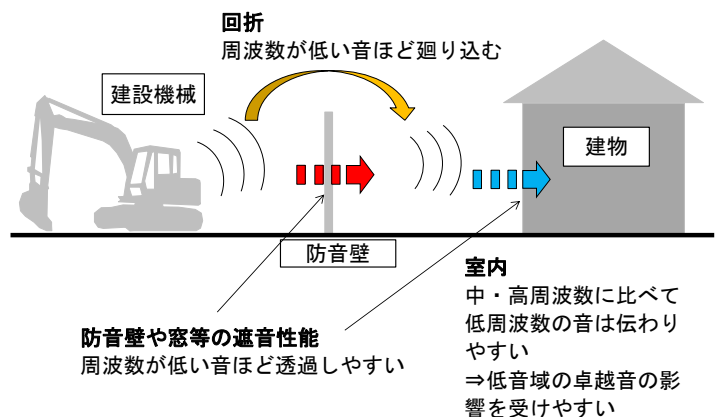


図-1 近隣建物への騒音伝搬

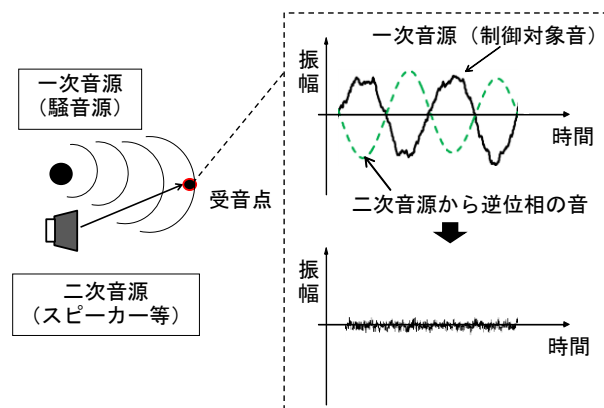


図-2 アクティブ・ノイズ・コントロールの概要

キーワード 騒音、低周波音、アクティブノイズコントロール、ANC、立坑掘削工事、ラフタークレーン
連絡先 〒300-2614 茨城県つくば市大砂 387 株式会社奥村組 技術研究所 TEL029-865-1521（代）

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-3、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、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、本システムに電源を供給する。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場面で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。

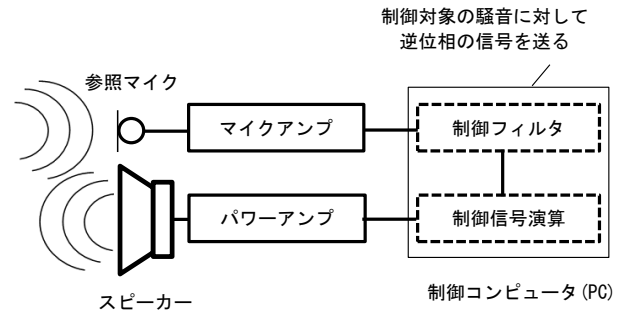


図-3 アクティブ消音システムの概要



写真-1 アクティブ消音システムの機器構成

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。

ANC のフィードバック制御では、制御点に誤差マイクを設置する。誤差マイクからの誤差情報をもとに制御点において目標効果が得られるように制御コンピュータで制御信号を作成し、スピーカーから制御音を発生させる制御方法である。制御効果を確認してから制御信号を作成するため、騒音の変化に対して制御が遅れやすい。

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、制御対象の騒音を検出する。その後、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参照信号をコンピュータで処理し、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⁵⁾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誤差修正を行っている。

一方、本システムは、誤差マイクを省略したフィードフォワード制御とした。本システムのフィードフォワード制御を図-4 に示す。本システムは、建設現場の比較的広いフィールドの低周波数領域で周期性をもつエンジン等の騒音に対して適用することを想定している。フィールドが広い場合、制御点が複数になることや制御対象外の様々な騒音が発生すること、また、機器の設置も制約を受けやすいため、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、事前に実験室で本システムの時間遅れ（位相特性）やゲイン特性を確認し、現場適用時にその誤差情報をもとにあらかじめ制御音の修正を行う方法が効果的と考えた。

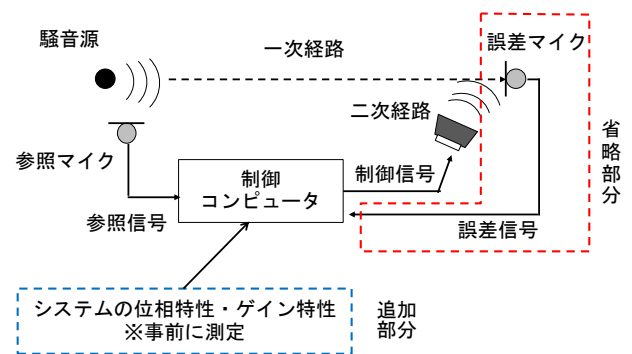


図-4 フィードフォワード制御（本システムの場合）

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⁶⁾と制御する周波数を時間領域で推定する適応フィルタ⁶⁾を使用した。これらのフィルタにより、時間領域で変動す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の周波数特性例を図-5に、位相差の周波数特性例を図-6に示す。なお、図-5、図-6のバンドパスフィルタは、30Hz～70Hzにおいて振幅比 1.0で通過する特性である。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。波の位相は、図-6より、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別に異なる。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る場合が生じてしまうことが考えられる。このため、効率良く音を低減させるには、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⁵⁾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。時間領域で卓越周波数を推定することにより、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位相補正が行える。また、このフィルタにおいて、ステップサイズパラメータと呼ばれる周波数の推定時間や推定精度に影響するパラメータを決めて、制御コンピュータの制御対象音に対する追従性能を決める。

適応フィルタの追従性能を確認するため、推定周波数の初期値を 50Hz とし、適応フィルタに 30Hz の信号の入力を行った。この時の周波数の推定時間を図-7に示す。図中のパラメータ k は、ステップサイズパラメータと信号処理時のサンプリング周期の積である。図-7より、 k を大きくすることで推定時間を短くでき、 $k=5$ の場合、約 1 秒で周波数を推定している。ただし、 $k=10$ の場合は、制御コンピュータの処理限界を超えて周波数を推定できなくなる。よって、本システムでは、 $k=5$ となるようにした。

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-8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⁵⁾で騒音を低減することになる。ダイポールによる放射パワー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。

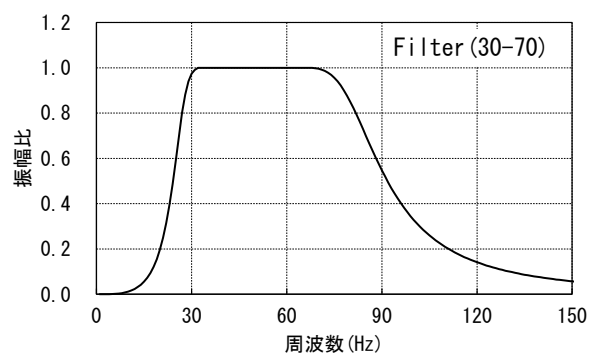


図-5 バンドパスフィルタの振幅比（例）

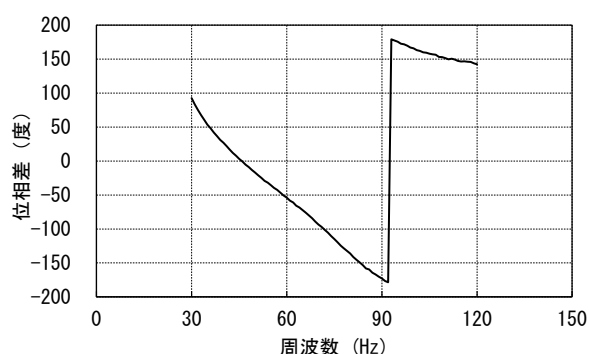


図-6 バンドパスフィルタの位相差（例）

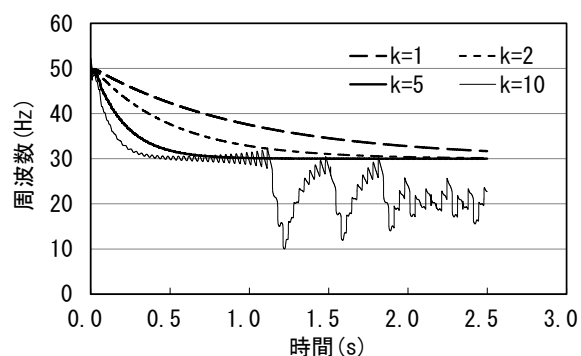


図-7 適応フィルタの周波数の推定時間

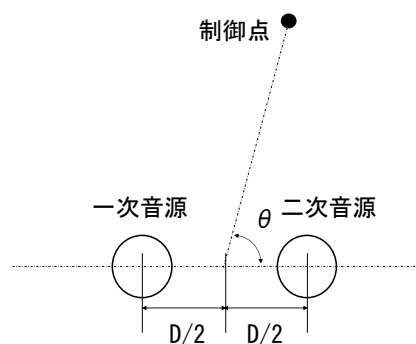


図-8 ダイポール放射

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

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-8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、制御対象音の卓越周波数を確認し、式（1）より $D < \lambda / (2\pi)$ 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、スピーカー等の機器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毎の位相特性が既知である。しかし、本システムに使用す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⁷⁾の無響室で本システムの予備試験を行った。測定ブロックダイアグラムを図-9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、本システムの参照マイクでスイープ音を測定しスピーカーから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求めた結果を図-10に、位相差を求めた結果を図-11に示す。なお、バンドパスフィルタの振幅比と位相差は、図-5、図-6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、予備試験の測定結果から求めた位相特性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。

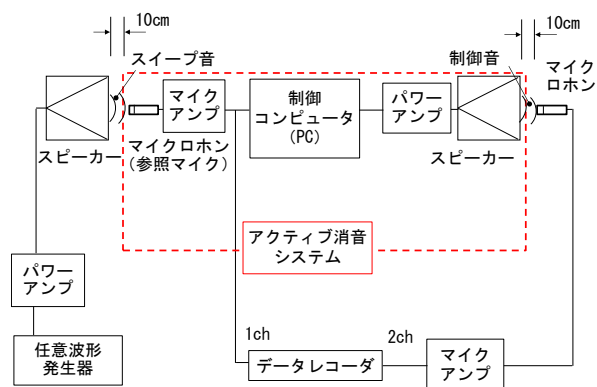


図-9 予備試験の測定ブロックダイアグラム

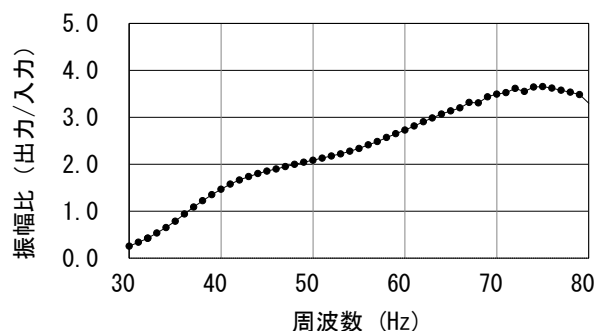


図-10 アクティブ消音システムのゲイン特性

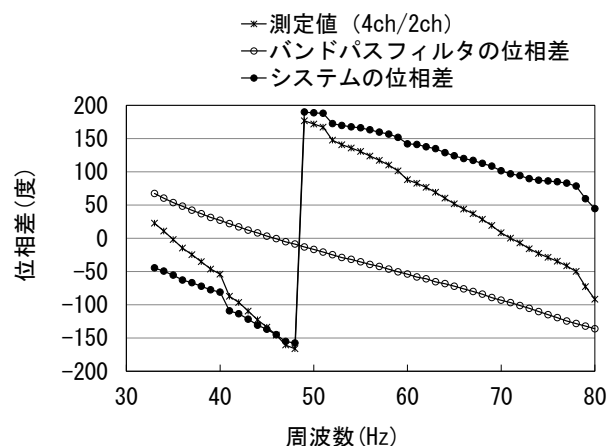


図-11 アクティブ消音システムの位相特性

4. シールドトンネル・立坑掘削工事への適用

4.1 工事概要

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図-12 に示すように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、写真-2 に示すラフターである。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。

4.2 50 t 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、排気筒や吸気ガラリ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 1 m（高さ GL+1.2m）離れた位置の騒音の周波数特性は、図-13 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わることがわかった。このため、中、高周波数領域の騒音に対しては、工事用の防音パネルを適用し、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は、本システムを適用することにした。

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-12 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 10 cm 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



写真-2 立坑掘削工事

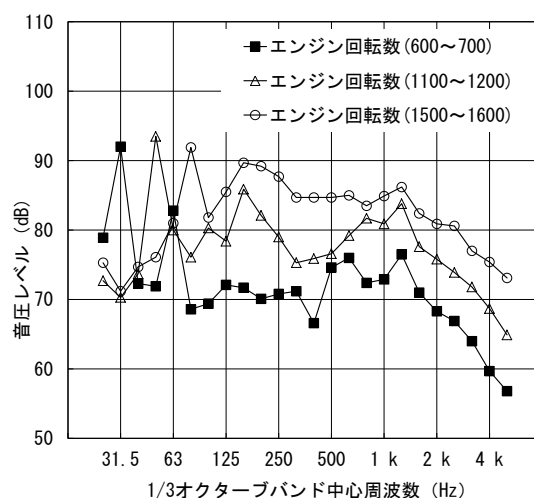


図-13 50t ラフタークレーン騒音の周波数特性

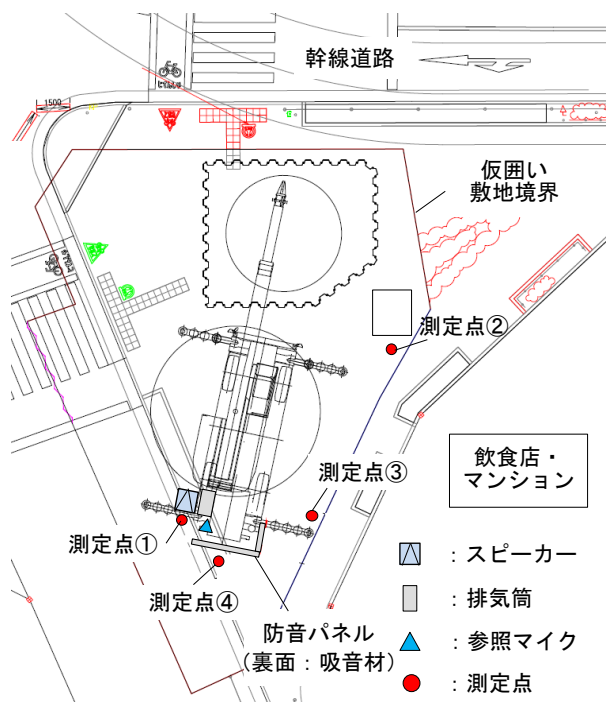


図-12 システムの設置および測定点概要（現場配置図）

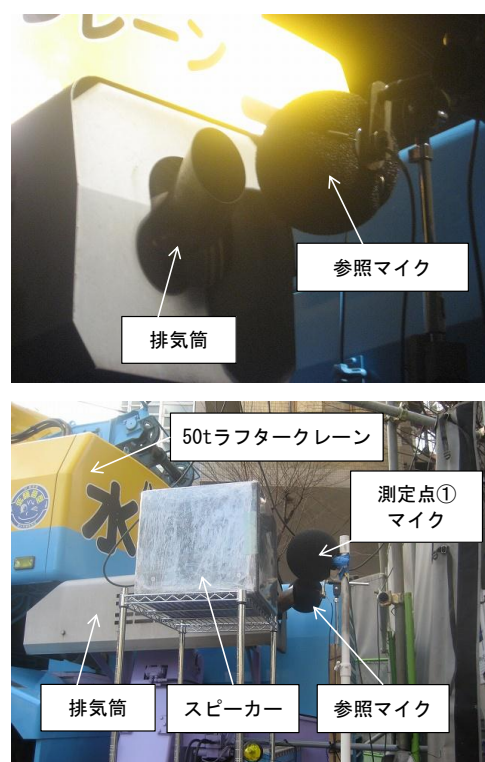


写真-3 スピーカーと参照マイクの設置状況

て設置した。排気筒中心とスピーカー中心の距離は、75 cm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-14 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。本工事の場合は、卓越周波数が 30Hz～60Hz 程度の幅で変化した。30Hz 付近はアイドリング時、60Hz 付近はバケットを高速で巻下げ、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時である。また、掘削土積込時は 50Hz 付近である。以上の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、および制御コンピュータから出力される制御信号（電圧）を測定した。測定点の位置を図-12 に示す。

測定点は、参照マイクの位置、スピーカーから 10 cm 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 1 m 離れた位置（測定点④）とした。また、測定点②、測定点③、測定点④は、JIS Z 8731 に準拠して測定高さを GL+1.2m とし、普通騒音計（RION NL-22）を用いて音圧をデータレコーダに収録した。なお、参照マイクで測定した音圧と制御信号の電圧も同時にデータレコーダに収録した。

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-15 に示す。また、排気筒前とスピーカー前の音圧波形を図-16 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あった。この原因もスピーカーの出力限界が考えられる。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-17 に示す。

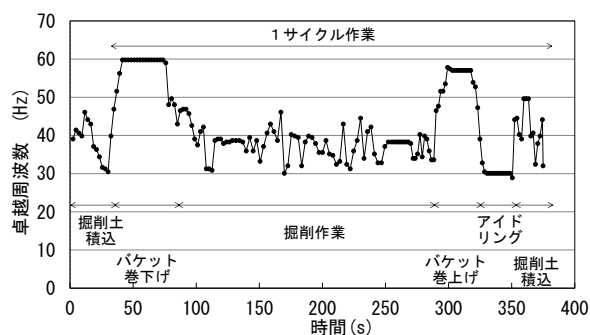


図-14 排気筒から発生する騒音の卓越周波数

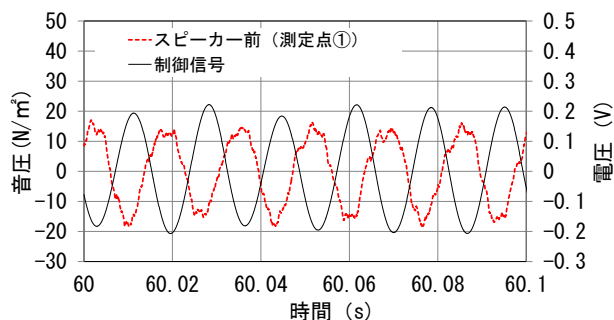


図-15 制御信号とスピーカー前の波形(バケット巻下げ)

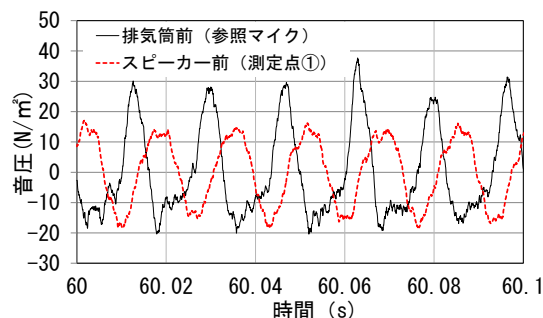


図-16 排気筒前とスピーカー前の波形(バケット巻下げ)

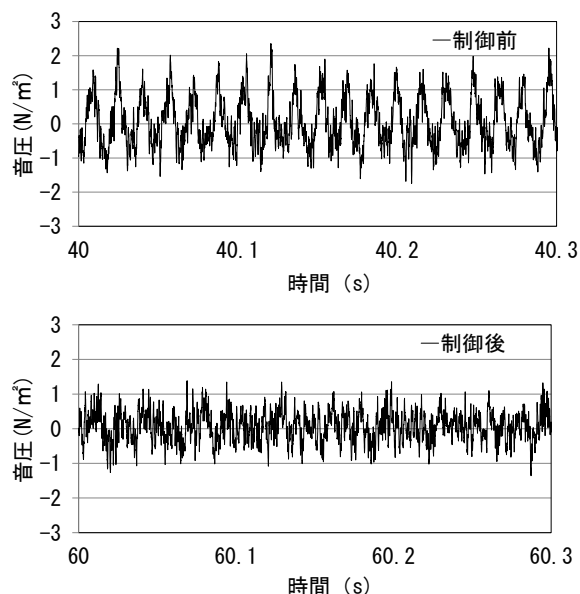


図-17 測定点②の音圧波形(バケット巻下げ)

なお、作業は、バケットを高速で巻下げている状態である。

制御後は、制御前と比較して、低周波成分の波が減り、中・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得ているといえる。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-18 に示す。63Hz 帯域の卓越音が制御後に 10dB 以上低減しており、低周波数領域の卓越音に対して本システムによる低減効果を得ていることが確認できる。

また、本システムの周波数の追従状況を確認するため、ラフター騒音の卓越周波数と制御信号の周波数を時系列で確認した。参照マイクで測定した騒音の卓越周波数と制御信号の周波数を時系列で重ねた結果を図-19 に示す。図-19 より、卓越音の変動が大きい掘削作業時（図中 100s～280s 間）を含めて、本システムの制御コンピュータが卓越周波数の変動に対してほぼ追従できていることが確認できる。

敷地境界付近の測定点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-20 に示す。

卓越周波数の変動が激しい掘削作業も含んだ 1 サイクルの時間帯で本システムの効果を評価した場合、制御後の低減効果は、40Hz 帯域で 3 dB、50Hz 帯域で 7 dB、63Hz 帯域で 5 dB であった。また、測定点③、測定点④の測定結果を図-21、図-22 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、周波数や音圧が変動する低周波数領域の卓越音に対して本システムによる低減効果を確認できた。

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。また、掘削工事中は、近隣と騒音によるトラブルが生じることもなく終えることができた。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ので、低周波数領域で十分な制御音を出力できる機器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。

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。

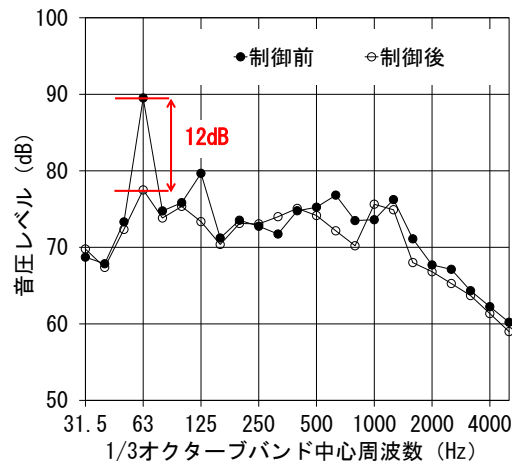


図-18 測定点②オクターブバンド(バケット巻下げ)

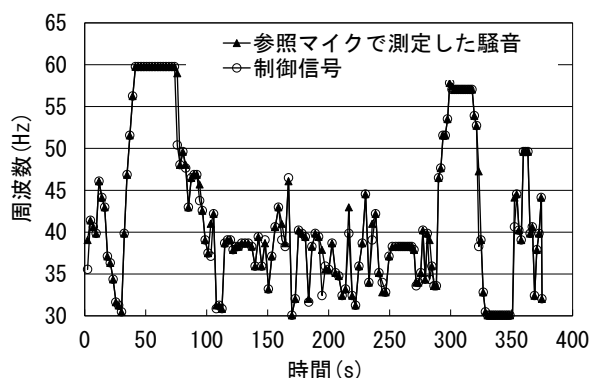


図-19 騒音の卓越周波数と制御信号の周波数

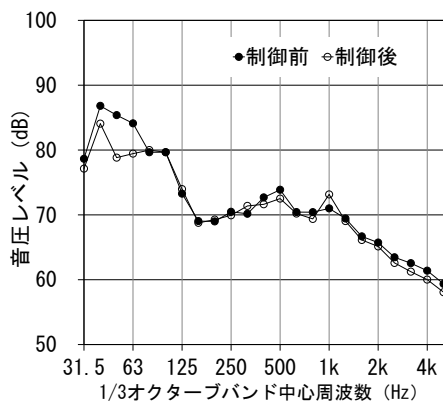


図-20 測定点②（1サイクル作業）

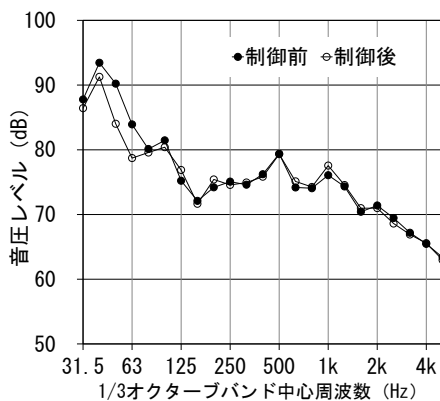


図-21 測定点③（1サイクル作業）

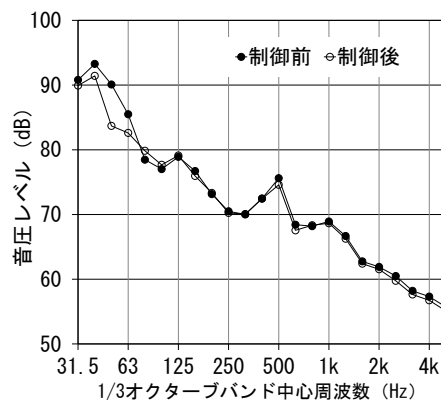


図-22 測定点④（1サイクル作業）

【参考文献】

- 1) (社) 日本騒音制御工学会、「地域の音環境計画」、技報堂、pp.170-175、1997.4
- 2) (社) 日本音響材料協会、「音のなんでも相談室 F.低周波音・超低周波音」、音響技術、No.123、pp.51、2003.9
- 3) (社) 日本建築学会、「住宅の設備機器を対象とした低周波数領域の音と振動問題への対応資料」、丸善、pp.27、2010.10
- 4) 金澤朗蘭、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
- 5) 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
- 6) 日本音響学会編、「音響用語辞典」、コロナ社、pp.266、pp.331、2003
- 7) 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