

複数の卓越周波数を含む騒音に適用した アクティブ消音システム

Application of Active Noise Control System to Noise Including Multiple Predominant Frequencies

金澤朗蘭* 竹本光慶** 出雲理祐***

要 旨

アクティブ消音システムとは、スピーカから騒音と逆位相の音を出力して騒音を打ち消す、騒音の対策技術である。このシステムは、エンジン音のように、防音壁などの従来の対策方法では低減が難しい低音域の音の対策に有効である。建設機械にアクティブ消音システムを適用する場合、エンジン音の主な音源である排気筒の近傍にスピーカを設置し、逆位相の音を出力することで、周囲の広い範囲で効果が得られる。エンジン音は、作業に応じて周波数変動するため、その変動に追従し対応できるシステムを既に開発したり。建設現場で使用する機械のエンジンは、排ガスなど環境への影響を考慮して年々改良されるため、それに伴いエンジン音についても変化しており、単一の卓越周波数のみならず、複数の卓越周波数をもつものが存在している。そこで、単一のみならず複数の卓越周波数を含む騒音について逆位相の音を出力できるシステムを開発した。建設現場においてコンクリートミキサー車および発電機に適用し低減効果を確認したので、概要を報告する。

キーワード：アクティブ・ノイズ・コントロール、エンジン音、騒音対策

1. まえがき

アクティブ消音システムは、バックホウやクレーン車などのエンジン音の騒音対策として、建設現場で適用されている（実績：バックホウ2件、クレーン2件、発電機1件）。上記のエンジン音は、低音域において単一の周波数の音圧が卓越し、周囲へ大きな影響を与える。このため、既に開発したアクティブ消音システムは、図-1に示すように、単一の卓越周波数をもつ騒音を消音の対象としており、約10dBの効果をj確認していた。

しかし、建設機械には、単一ではなく複数の卓越周波数をもつエンジン音を発生するものも多い。機械の動作によって複数の卓越周波数変動し、その変動幅や音圧は発生機構によって大きく異なる。そこで、複数の周波数に対応し、騒音低減効果を高めるため、アクティブ消音システムの機能を拡充した。

機能を拡充したアクティブ消音システムを、実際の建設機械（コンクリートミキサー車および発電機）のエンジン音に適用し、対象とした複数の卓越周波数の1/3オクターブバンド音圧レベルを5~9dB程度、低減することを確認した。以下、概要を報告する。

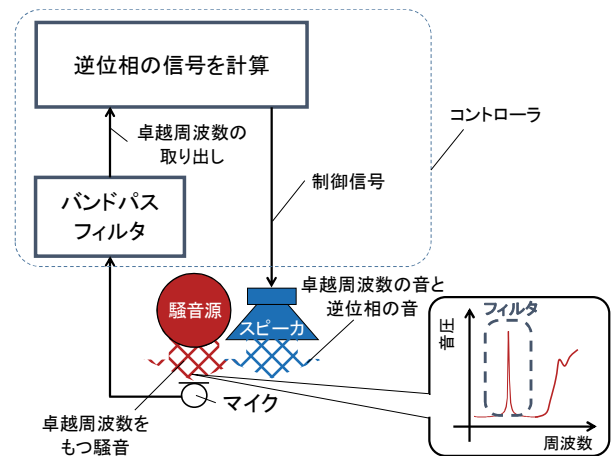


図-1 既開発のアクティブ消音システムの概念図

2. 卓越周波数の変動とシステムの概要

建設機械によって、卓越する周波数や音圧の変動は異なる。アクティブ消音システムを複数の卓越周波数に適用させるため、建設機械のエンジン音を大きく2ケースに分類した。それぞれの変動特性を図-2に示す。図-

*技術研究所環境研究グループ **東日本支社土木第2部 ***東日本支社ビルライフケア部

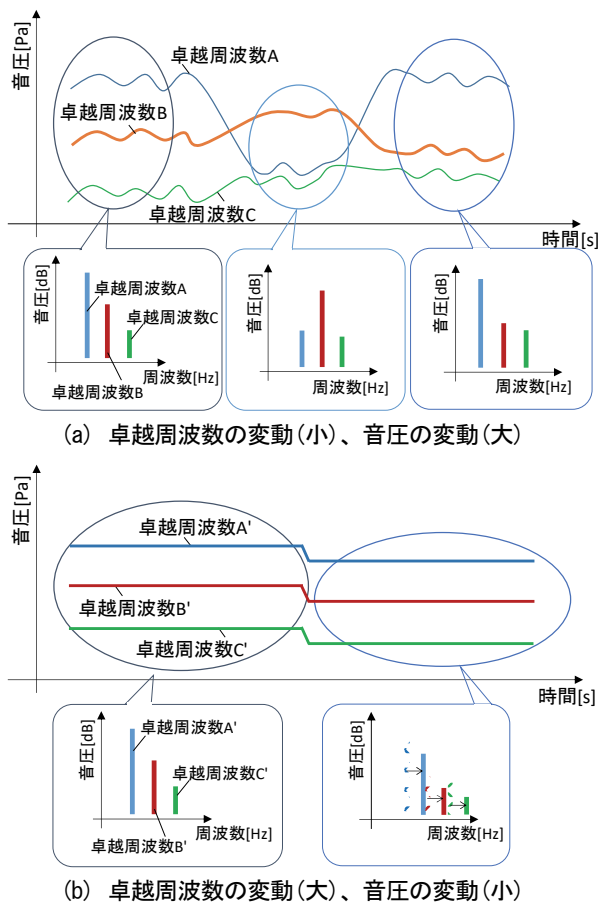


図-2 騒音の変動特性

2 (a)は、卓越する各周波数の変動(卓越する音の高さの変動)は少ないものの、各卓越周波数の音圧が大きく変動するケースであり、コンクリートミキサー車が例として挙げられる。建設機械のエンジン音の卓越周波数はエンジンの回転数で決まり、走行場所や負荷によってエンジン音の各卓越周波数に大きな変動はないものの、各卓越周波数の音圧については短い時間に大きく変動する可能性がある。このため、単一の卓越周波数を対象としていた場合と同程度の計算時間が必要となる。

図-2 (b)は、卓越する各周波数の音圧変動は小さいものの、周波数が大きく変動する可能性があり、例として負荷によってエンジンの回転が変動する発電機などの騒音が挙げられる。このようなケースでは、バンドパスフィルタの範囲を卓越周波数の変動範囲よりも大きくとり、さらにバンドパスフィルタ同士が互いに影響しないように設計する必要がある。しかし、卓越周波数の変動範囲が広い場合、バンドパスフィルタの範囲が重ならないように設計するのは難しい。

以上の課題を解決するため、図-2 (a)のケースでは、複数のバンドパスフィルタを用意し、それぞれのバンドパスフィルタで処理した騒音の卓越周波数を取り出し、並列に処理(以下、並列タイプ)することで、単一の卓越周波数を対象とした場合と同程度の処理時間を可能と

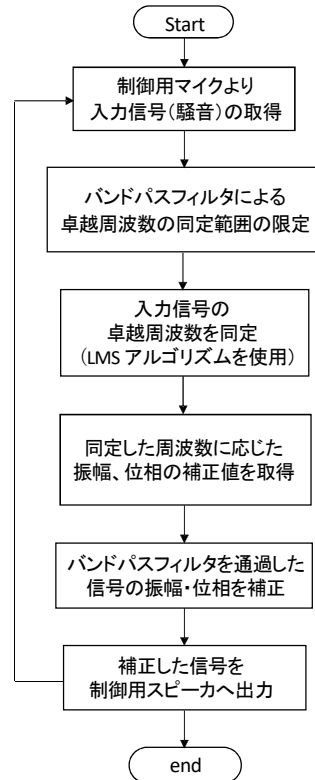


図-3 基本的な制御方法のフロー

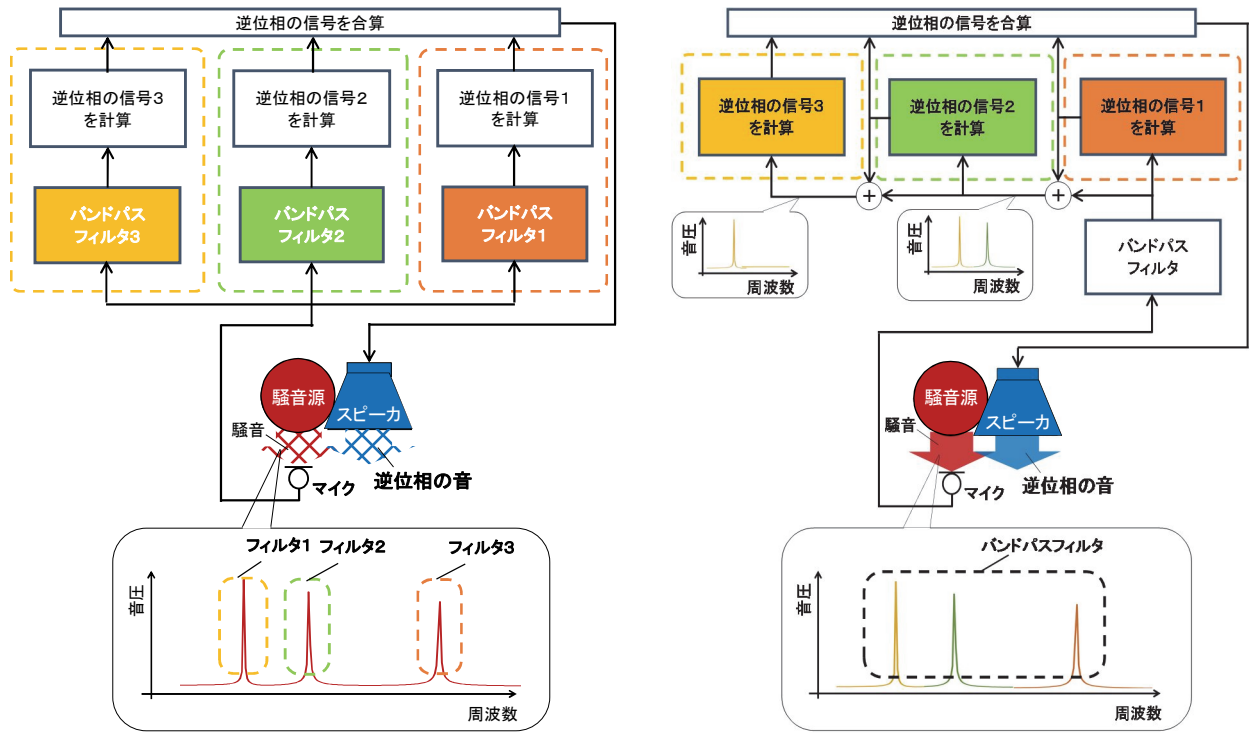
した。また、図-2 (b)のケースに対しては、複数の卓越周波数が変動する範囲よりも広い範囲をもつバンドパスフィルタを複数用意し、それぞれのバンドパスフィルタを直列に設けることで、フィルタ間の影響を除去する方法とした(以下、直列タイプ)。考案したそれぞれの制御方法について、概要を3章で述べる。

3. 複数周波数へ適用したシステム

3.1 基本的な制御方法

複数の周波数を対象とした制御方法は、単一の卓越周波数の制御方法を複数組み合わせる方法であるため、まず、単一の卓越周波数を対象とした制御方法について概説する。

単一の卓越周波数を対象とした場合における、制御方法のフローを図-3に示す。同定時間を短縮させるため、制御用マイクからの入力信号をバンドパスフィルタに通過させ、同定範囲を限定する。バンドパスフィルタを通過した信号に LMS アルゴリズムを適用し、時間領域で卓越周波数を同定する。バンドパスフィルタを通過した信号は、制御用マイクで観測した信号に対して振幅や位相が変化しており、対象とした卓越周波数の音と同振幅・逆位相とならず、音圧を低減できない。このため、あらかじめ設定した補正値を用いて信号を補正することで、対象の卓越周波数の音と同振幅・逆位相の音を出力する。



(a) 並列タイプの制御方法 (b) 直列タイプの制御方法
 図-4 複数の卓越周波数に対応したアクティブ消音システム概念図

卓越周波数の同定時間は、LMS アルゴリズムにおけるステップサイズパラメータの値によって変わる²⁾が、対象音の変動速さに適した値を選択することで、対象音の卓越周波数が 1 秒以内に 30Hz、かつ卓越周波数の音圧が 20dB 変動する場合でも、十分に対応可能である。

3.2 複数の卓越周波数に対応した制御方法

複数の卓越周波数に対応したアクティブ消音システム概念図を図-4に示す。図では一例として、対象騒音の卓越周波数が3つの場合を示している。

図-4 (a)は、卓越周波数の変動が少なく、音圧の変動が大きなケースに対応した制御方法であり、複数の異なるバンドパスフィルタを並列に接続したものである。この制御方法では、マイクからの入力音が各卓越周波数を含む範囲をもつ複数のバンドパスフィルタへそれぞれ同時に入力し、それぞれの処理系統で入力音と逆位相の音が計算され、最終的に一つの信号に合算してスピーカへ出力される。

図-4 (b)は、卓越周波数の変動が大きく、音圧の変動が小さいケースに対応した制御方法である。卓越周波数の変動が大きな場合、小さな幅のバンドパスフィルタでは複数の卓越周波数を捉えるのが難しい。このため、この方法では、大きな周波数範囲のバンドパスフィルタに入力信号を1度通過させた後、逆位相の信号処理を直列に接続する。まず、最も音圧の大きい卓越周波数について逆位相の音を計算する。入力音の卓越周波数の音を除去した信号を用いて、次に音圧の大きい卓越周波数の

逆位相音の計算に使用する。順次、逆位相音の計算を繰り返したのち、それぞれの逆位相音を合算してスピーカに出力する。

並列タイプは、各卓越周波数の音圧の大きさに関係なく、逆位相音を同時に計算するため、効果を得るまでの時間は単一の卓越周波数を対象とする場合とほとんど変わらない。しかし、直列タイプは、各卓越周波数に対して順番に逆位相音を計算するため、効果を得るまでの時間は単一の卓越周波数を対象とする場合よりも長くなる傾向がある。このため、直列タイプは図-2 (b)のように、頻繁に音圧が変動することが少ない騒音に適している。また、並列タイプは各フィルタの範囲が直列タイプと比較して狭いため、卓越する周波数の変動が小さい図-2 (a)のような騒音に適している。

上述の制御方法は、事前に対象とする騒音の卓越周波数や変動特性を把握し、特性に合わせて制御方法を選択するため、大きな効果が期待できる。

4. 適用効果

4.1 並列タイプの適用例

並列タイプの制御方法を用いたアクティブ消音システムを、音圧変動の大きなコンクリートミキサー車の騒音に対して適用した。アクティブ消音システムの適用状況を写真-1に示す。コンクリートミキサー車のエンジン音の主な音源は排気筒であり、排気筒の近傍でスピーカ



写真-1 アクティブ消音システムの適用状況 (コンクリートミキサー車)

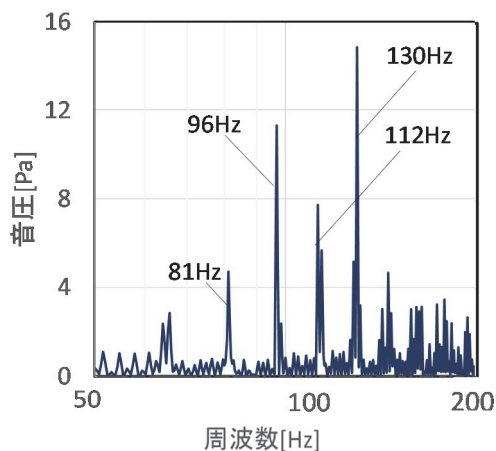


図-5 排気筒近傍における騒音の周波数特性

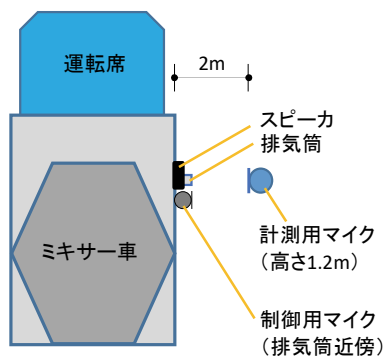


図-6 マイクの配置

から逆位相の音が発生するように、スピーカおよびマイクの配置を決めた。なお、制御用のパソコンなどは、運転席内に配置した。事前に計測したコンクリートミキサー車の騒音の周波数特性を図-5に示す。図は、騒音源である排気筒近傍で計測した音圧の周波数特性である。図より、エンジン音は80~130Hzにおいて、4~16Pa (約100~120dB) 程度の音圧をもつ、複数の卓越周波数を含んでいることがわかる。そこで、制御の対象周波数を81Hz、96Hz、112Hz、130Hzの4つとし、各周波数の前後10Hz、20Hzの範囲をバンドパスフィルタの範囲とした。制御の時間刻みは1波長を128点以上に分割することを想定し、1/25,600sとした。また、アクティブ消音システムの効果を確認するために設置した計測用マイクの配置を図-6に示す。コンクリートミキサー車は停止状態として、実際の走行時と同程度のエンジン回転数となるよう、エンジンを作動させ(約1500~2500rpm)、アクティブ消音システムの制御の有無によるマイク位置での1/3オクターブ音圧レベルを計測した。

計測結果を図-7~図-9に示す。図-7は、制御時の排気筒近傍におけるエンジン音と、スピーカ近傍における出力音である(高速回転時:2500rpm程度)。図より、排気筒からのエンジン音と、スピーカからの出力音はほぼ逆位相となっていることがわかる。図-8に制御の有無による、卓越周波数の音圧レベルが急激に変動する範囲を含むスペクトログラム(横軸が時間、縦軸が周波数、

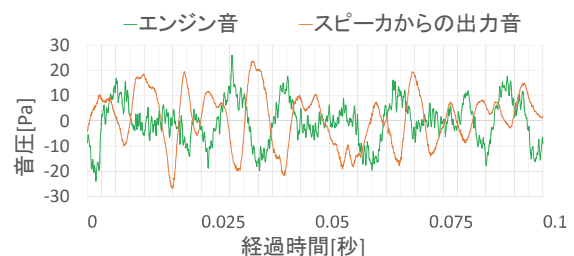


図-7 エンジン音とスピーカからの出力音

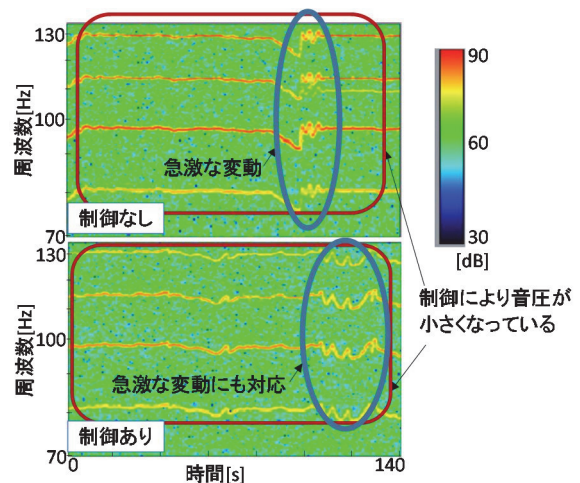


図-8 制御の有無によるスペクトログラム

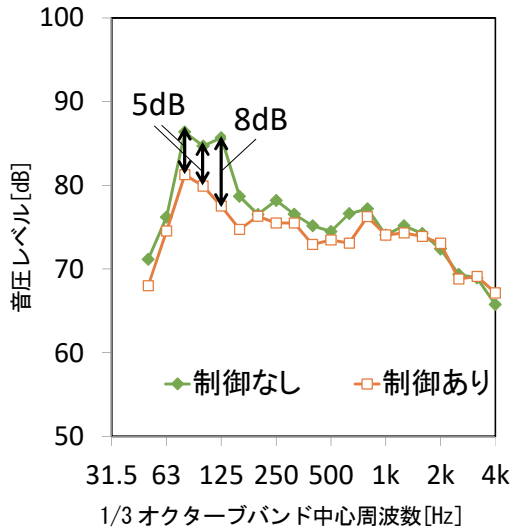


図-9 アクティブ消音システムの効果
(計測マイク位置、30秒間の平均値)

カラーマップで音圧レベルの大きさを示す図)を示す。81Hz、96Hz、112Hz、および130Hzにおいて、卓越周波数の音圧レベルが低減していることがわかる。また、制御なしの120秒付近および制御ありの130秒付近を比較すると、エンジンの回転数が変化して卓越周波数が急激に変動しても、効果が得られることが確認できる。さらに図-9に、図-6に示した計測用のマイク位置における、制御の有無による1/3オクターブバンド音圧レベルの計測結果を示す。対象とした卓越周波数を含む帯域である、80Hz帯域(81Hz)、100Hz帯域(96Hz、112Hz)、125Hz(130Hz)帯域において、それぞれ約5dB、5dB、8dB低減できることを確認した。

4.2 直列タイプ適用例

直列タイプの制御方法を用いたアクティブ消音システムを、音圧変動が小さい発電機音(発電のために作動するディーゼルエンジンの音)に対して適用し、効果を確認した。適用状況を写真-2に示す。発電機音の音源はコンクリートミキサー車の場合と同様、排気筒である。スピーカおよびマイクは、排気筒の近傍に配置した。事前に計測した発電機音(エンジン音)の周波数特性を図-10に示す。図は、騒音源である排気筒近傍で計測した音圧の周波数特性である。発電機音は、コンクリートミキサー車の場合と同様、複数の卓越周波数を含んでおり、75Hz、150Hz、164Hzで卓越していた。そこで、各卓越周波数を対象として、バンドパスフィルタの範囲をこれらの卓越周波数を含む65~180Hzとした。制御の時間刻みは並列タイプの場合と同様、1/25,600sとした。アクティブ消音システムの効果を確認するための計測用マイクは、図-11に示すように制御用のスピーカから2mの位置とし、コンクリートミキサー車の場合と同様、アクティブ消音システムの制御の有無による、1/3オク

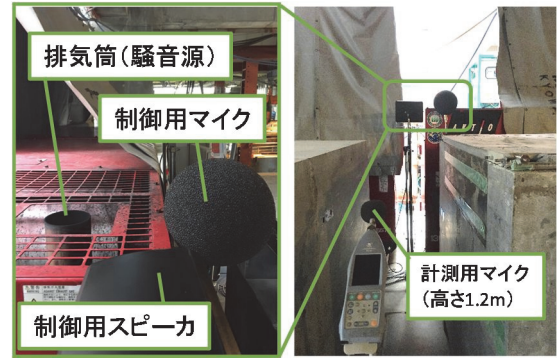


写真-2 アクティブ消音システムの適用状況(発電機)

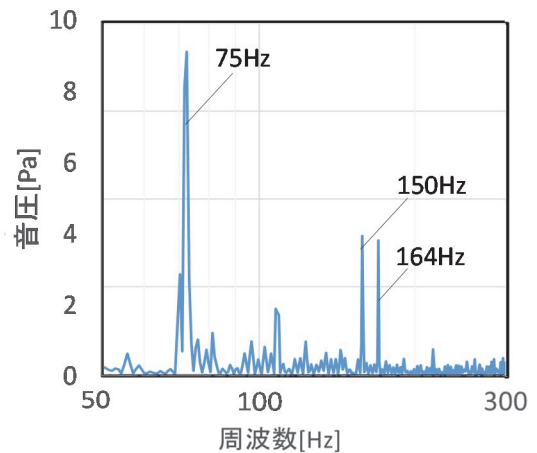


図-10 排気筒近傍における
発電機音(エンジン音)の周波数特性

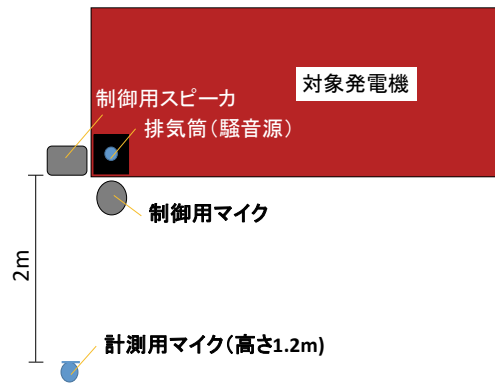


図-11 マイクの配置

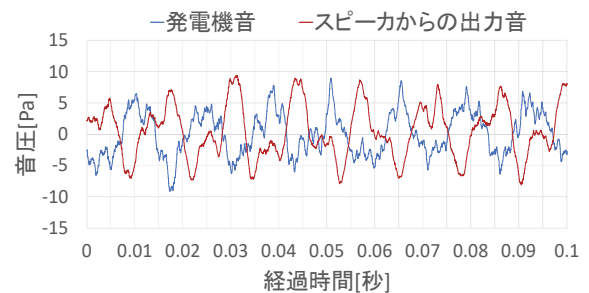


図-12 発電機音とスピーカからの出力音

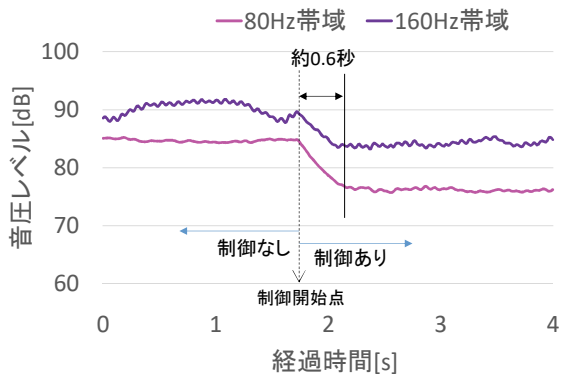


図-13 卓越周波数を含む帯域音圧レベルの時系列変動

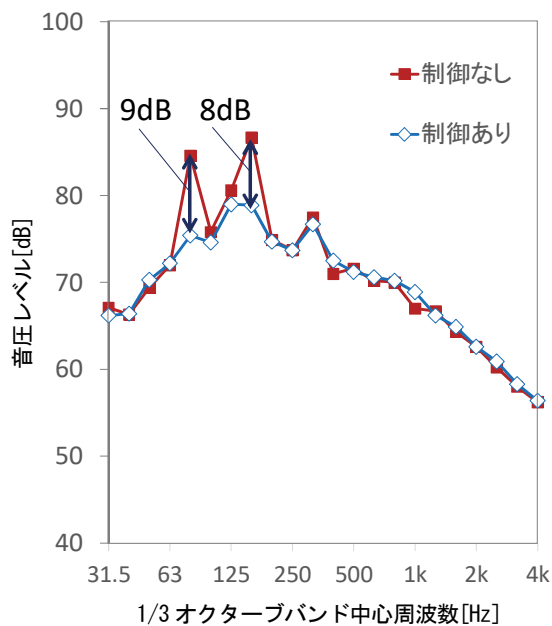


図-14 アクティブ消音システムの効果
(計測用マイク位置、30 秒間の平均値)

ター音圧レベルの差を効果とした。

計測結果を図-12～図-14 に示す。図-12 は、制御時の排気筒近傍における発電機音と、スピーカ近傍における出力音を示す。計測時、発電機のエンジン回転数は1600rpmであり、排気筒からは約75Hz、約150Hz、約164Hzで卓越する音が発生していた。図より排気筒からの発電機音（エンジン音）と、スピーカからの出力音はほぼ逆位相となっていることが確認できる。図-13に、75Hz、および150Hz、164Hzを含む1/3オクターブバンド音圧レベル(80Hz帯域、および160Hz帯域)の時系列変動を示す。図中に示した制御開始点までは制御なし、開始点以降に制御を開始とした。制御を開始した時点以降から卓越周波数の音圧レベルが低減していることが確認できる。また、制御の開始から効果が得られるまでの時間は約0.6秒であった。直列タイプの場合、同時に複数の卓越周波数の逆位相音を計算する並列タイプと比較

すると、効果が得られるまでに若干の時間が必要であるが、1秒以内には効果が得られることを確認した。図-14に、計測用マイク位置における、制御の有無による1/3オクターブバンド音圧レベルを示す。対象とした卓越周波数を含む帯域において、9dB(80Hz帯域)、8dB(160Hz帯域)の効果を確認した。

5. あとがき

複数の周波数に対応できる機能を拡充したアクティブ消音システムを開発した。機能を拡充したアクティブ消音システムを実際の建設機械（コンクリートミキサー車および発電機）のエンジン音に適用したところ、対象とした複数の卓越周波数の1/3オクターブバンド音圧レベルを5～8dB程度（コンクリートミキサー車）、8～9dB程度（発電機）、低減することを確認した。

今後は、効果を向上させる制御方法を検討するとともに、より多くの現場への適用を考慮して、耐久性や小型化を検討していきたい。

【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