

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

Study on the Control Method of Active Noise Control

金澤朗蘭* 稲留康一*

要 旨

騒音の苦情件数は近年増加傾向にあり、そのおよそ 1/3 は工場や事業場（建設工事現場）に関わるものである（環境省 水・大気環境局大気生活環境室、「平成 22 年度騒音規制法施行状況調査について（2011.12）」より）。低周波数帯域の音は、中～高周波数帯域の音に比べて空気中の伝搬による減衰が少ない。さらに、低周波数帯域の音を遮音するには重量が必要となるため、騒音対策として一般的な防音パネルを用いて効果的に低減するのは難しい。そこで、スピーカから騒音の逆位相となる音を発生させ、干渉によって騒音レベルを低減させる、アクティブ・ノイズ・コントロールを適用した。アクティブ・ノイズ・コントロールによって騒音を効果的に低減するには、制御により騒音とスピーカからの音を精度良く干渉させる必要がある。そこで、誤差信号を参照しないフィードフォワード制御にローパスフィルタを挿入したアルゴリズムを提案し、ANC に適用して効果を確認した。本稿ではこの概要を報告する。

キーワード：低周波音、工事騒音、工場騒音、設備騒音、ANC

1. まえがき

工場や建設現場等から発生する騒音により、近隣住民から苦情が寄せられる場合が多い。これらの騒音は主に工業用または建設用機械から発生している。最近では、低騒音を謳う機械も増えているが、実際の作業で発生する騒音を十分に低減させるのは難しく、使用時間帯や使用頻度を制限して対処する場合が多い。工場や建設現場で使用される機械のうち、ファンなどの回転機械、室外機などの設備機器から発生する音の多くは、低周波数帯域（100Hz 付近）に他の周波数帯域よりも突出して音圧レベルの高い帯域（以下、ピーク音）をもつ¹⁾。

人の聴覚は低い音ほど感度が低く、高い音ほど感度が高くなる傾向をもつ。この特性を考慮した音圧レベルが騒音レベル（A 特性音圧レベル）であり、環境基本法や騒音規制法などにおける評価基準ではこの騒音レベルを指標としている。一般に、低い周波数帯域の音圧レベルは騒音レベルに大きな影響を与えないため、低い周波数帯域にピークがあっても、騒音レベルは基準値を満足している場合が多い。しかし、サッシなどの建具は低周波数帯域の透過時の低減量が小さいため、低周波数帯域にピークを持つ騒音が伝搬すると、図-1 に示すように室内では相対的に低周波数帯域のピーク音の影響が大きくなる²⁾。このため、居住者に不快な音として影響を与えてしまい、屋外での騒音レベルの値が基準値を満足し

ている場合でも、問題となる可能性がある。

前述の低周波数帯域の音を発生する設備機器等では、熱や空気を発生させるものが多く、騒音対策として一般的な、「音源を囲う」という方法をとることが難しい。音源を囲わずに敷地境界で対策を行う場合、従来の遮音方法（防音パネル、防音シート、防音塀）は、騒音レベルの低減には効果が得られるものの、低周波数帯域に対しては透過時の低減量が小さいため、低周波数帯域のピーク音に対しては効果が期待できない。

そこで、工場や建設現場から発生する低周波数帯域のピーク音を、囲うことなく低減する方法として、能動騒音制御（以下、ANC：Active Noise Control）の適用を検討した。ANC によって騒音を効果的に低減するには、制御により騒音とスピーカからの音を精度良く干渉させる必要がある。そこで、誤差信号を参照しないフィードフォワード制御にローパスフィルタを挿入したアルゴリ

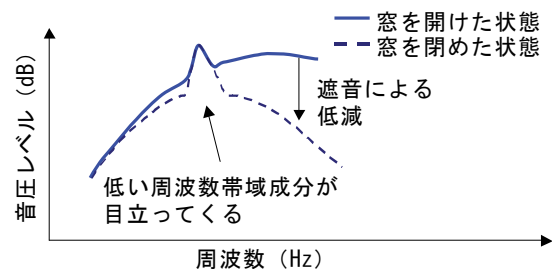


図-1 窓開閉による室内騒音の周波数特性概念図³⁾

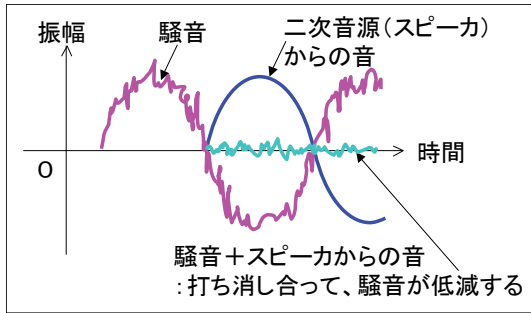


図-2 ANCのイメージ

ズムを提案し、ANC に適用して効果を確認した。本稿ではこの概要について報告する。

2. 対策方法の検討

2.1 ANCとは

ANC とは、対象とする騒音を、スピーカから音を発生させて干渉させ、受音点における音圧レベルを低減させるシステムである。イメージを図-2に示す。ANC が騒音対策に適用されているものに、車内におけるエンジンのこもり音の低減⁴⁾、などがあり、様々な分野で利用されている。

2.2 ANCの実例

ANC を使用した実例として、①一方向に音が伝搬する場合の騒音対策⁵⁾、②回折音の騒音対策、③点音源からの放射音の対策、などがある⁶⁾。①は、騒音が一方向に伝搬するダクト等における騒音対策で、サブコンや空調メーカーが製造したもの等、比較的多くの実用化例がある。②は、低周波数帯域の音の回折現象を利用したもので、高速道路の防音壁や、工事時の仮設囲いの上部に設置し、回折する低周波数帯域の音を低減するものなどがある⁷⁾。③は、ダクト開口端からの放射音など、点音源と仮定できる音源と近接した位置に二次音源を設置するもので、ガスタービンからの排気音対策などで使用されている⁸⁾。また、③には、重機の排気筒から発生する騒音を低減するもの^{9),10)}も含まれる。

①～③は、低周波数帯域の音を低減対象としており、音源を囲わずに対象音の音圧レベルを低減している。そこで、工場や建設現場から発生する低周波数帯域のピーク音を、囲うことなく低減する方法として、ANC を適用した。

3. 制御方法の検討

3.1 一般的なANCの制御フロー

ANC の制御方法には、フィードバック制御とフィードフォワード制御がある。フィードバック制御は、騒音

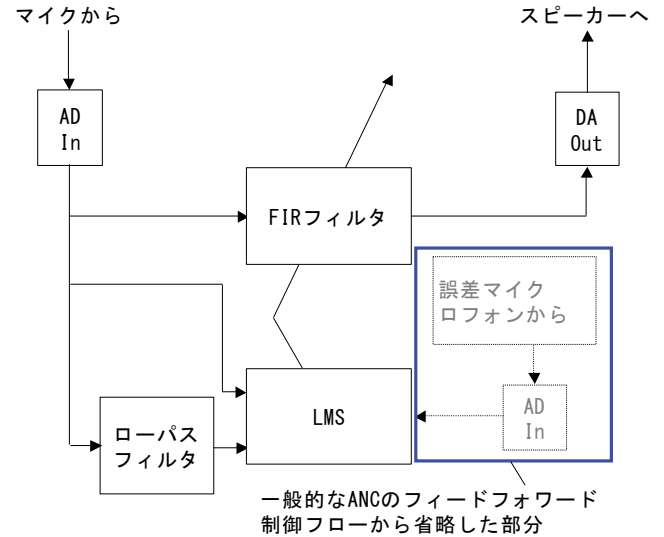


図-3 ブロックダイアグラム

を外乱と捉え、低減したい点(以下、制御点)において、スピーカから音を発生させて騒音を低減させる方法である。これに対しフィードフォワード制御は、騒音の情報を参照し、制御点において音源からの音波とスピーカからの音を干渉させて騒音を低減させる方法である。

フィードバック制御をANCに適用する場合、対象としている音場の特性をフィードバックするため、正確な音場を予測するための制御器の種類、位置、計測信号の処理方法、フィードバック演算アルゴリズムについて、解決すべきことが多く、開発対象の状況を考慮すると、フィードバック制御の適用は難しい。そこで、フィードフォワード制御をANCに適用した。フィードフォワード制御をANCに適用して効果的に騒音を低減するには、時々刻々と変化する騒音の特性を把握し、その特性を反映させた制御信号を作成する必要がある。

3.2 制御フローの検討

ピーク音の周波数帯域はある程度限定される。このため、制御対象としているピーク音の周波数を推定することにより、誤差信号を使用しないフィードフォワード制御がANCに適用可能である。

そこで、ANCにおけるフィードフォワード制御の一般的なアルゴリズムである filtered-X LMS アルゴリズム¹¹⁾を使用し、誤差信号を使用しない騒音の低減が可能な信号処理プログラムのブロックダイアグラムを図-3に示す。さらに、対象音は低周波数帯域のピーク音であるため、ローパスフィルタ(構造:直接型FIR、次数:40、遮断周波数:200Hz)を挿入し、ピーク音の周波数を的確に捉えられるようにした。

3.3 システムの検証

提案した制御アルゴリズムの妥当性を検証するために、無響室にて信号処理プログラムの動作と低減効果の確認実験を行った。制御用スピーカを騒音源と逆位相に駆動

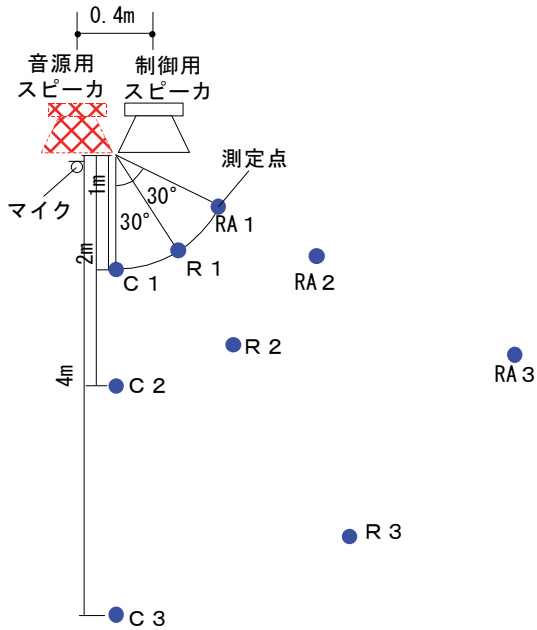


図-4 スピーカおよび測定点の配置

する点音源と考え、騒音源と想定したスピーカに制御用のスピーカを近接して設置した（中心間距離は 1/2 波長以下¹²⁾ の 0.4m）。

無響室内の測定点において、制御していない状態（以下、OFF）および制御状態（以下、ON）の音圧レベル（30 秒間の平均値（Leq））を測定した。測定は精密騒音計（RION 製 NA-28）で行った。音源用スピーカ、制御用スピーカ、測定点の配置を図-4 に示す。また、実験状況を写真-1 に示す。なお、スピーカアンプなど使用機器の特性の影響を避けるため、音源用スピーカと制御用スピーカとは異なる系により再生した。また、制御用スピーカの再生範囲の下限値は 40Hz である。実験では低周波数帯域にピークをもつ音源として、100Hz にピークのある送風機の音、80Hz にピークのある発電機の音を使用した。

各測定点における周波数特性を図-5、図-6 に示す。なお図-5、図-6 は、各測定点における周波数特性の平均値である。図-5、図-6 より、各測定点において、ピークの存在する周波数帯域での低減量は、送風機の場合で約 12dB、発電機の場合で約 8.5dB（いずれも平均値）であった。また、ピーク音以外の周波数帯域において、大幅な音圧レベルの増幅はみられなかった。

以上より、提案した信号処理プログラムを ANC の制御システムに適用することにより、ピークをもつ低周波数帯域の音圧レベルを低減できることを確認した。

4. 実機による検証

4.1. 適用対象の選定

建設現場には、建設機械のエンジン音など、様々な低



写真-1 実験状況

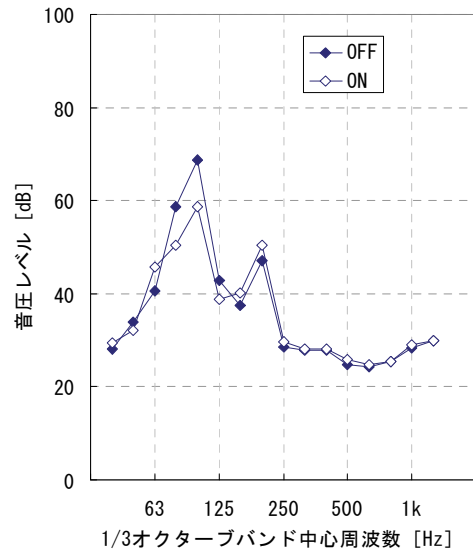


図-5 制御によるピーク音の低減
（音源：スピーカより送風機の音を再生（ピークの周波数 100Hz））

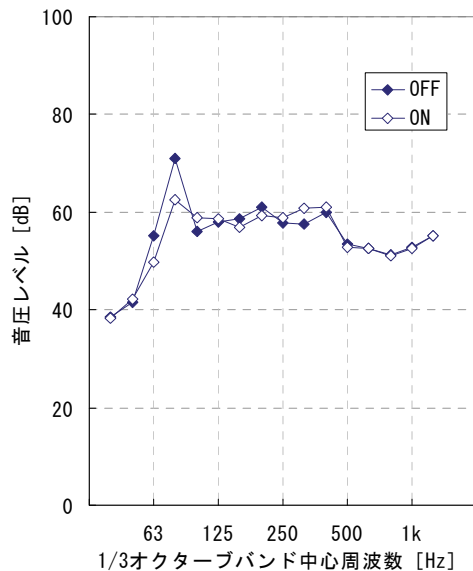


図-6 制御によるピーク音の低減
（音源：スピーカより発電機の音を再生（ピークの周波数：80Hz））



写真-2 重機A

周波数帯域の騒音がある。そこで、重機騒音への ANC の適用性を判断するため、屋外で重機騒音の特性を把握した。測定した重機の一例を写真-2に示す。測定は JIS Z 8731 に準拠して行った。

重機はそれぞれ異なるメーカーのバックホウ（バケット容量はすべて 0.8 m³）であり、重機が静止しエンジン音のみが発生している状態で測定した。いずれも重機の排気筒側から 1m 程度の位置、高さ 1.5m で測定を行った。重機 A から発生する騒音の周波数特性を図-7に示す。63Hz の低周波数帯域にピークがあることを確認した。また、ピーク以外の周波数帯域はほぼ一様であった。重機 A 以外の重機（異なるメーカー 2 社の製品）についても、同様の周波数特性であることを確認した。

さらに、建設現場での作業時の重機騒音の特性を把握するため、走行時、掘削時の場合について測定した。測定は重機 A のみについて、重機の側面から 5m 地点、高さ 1.5m で行った。測定結果を図-8に示す。図-8 から、走行時や掘削時にも 63Hz の低周波数帯域にピークが存在することが分かる。

排気筒周辺の音圧レベルの分布を水平面、鉛直面ともに測定した。測定した排気筒周辺の 63Hz 帯域の音圧レベル分布を図-9に示す。排気筒を中心に同心円状の分布を示していることがわかる。これらの特性は重機 A 以外についても同様である。

このことから、建設現場で使用される重機の騒音特性について、以下のことを確認した。

- i. 63Hz 程度の低い周波数帯域にピークが存在する
 - ii. エンジン音は、排気筒からの発生音が最も大きい
- i、ii より、考案した信号処理アルゴリズムを適用した ANC を、音圧レベルが最大である、排気筒付近の音圧レベルを低減するために適用して、重機から発生する騒音の影響を低減できると判断した。

4.2 実験概要

ANC のシステムを実際の重機に適用し、効果を確認した。重機は、写真-2の重機 A を使用し、周囲に測定点を設けて制御の OFF、ON による低周波数帯域の

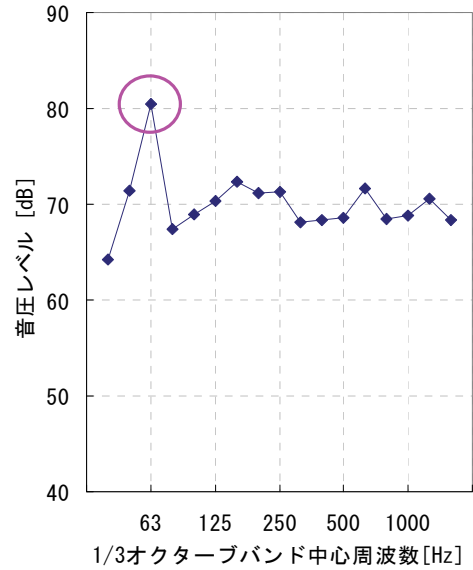


図-7 重機Aから発生する騒音の周波数特性

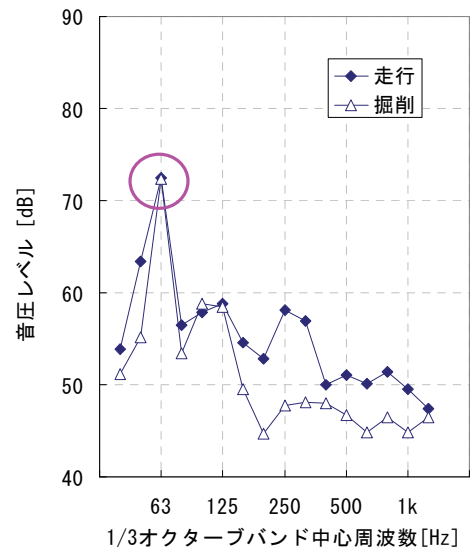


図-8 走行時および掘削時に重機から発生する騒音の周波数特性

ピークの音圧レベルの変化を測定した。各測定点とバックホウとの位置関係を図-10に示す。制御用スピーカを排気筒に隣接して設置した。写真-3～写真-5に実験状況を示す。マイクには、全天候用の風防を設置し、排気による風切音の影響を小さくした。また、制御装置、マイクアンプ、スピーカアンプなどは運転室内に設置した。

4.3 騒音の低減量

各測定点において、制御装置が OFF と ON の場合の音圧レベル (30 秒間の平均値 (Leq)) を測定した。測定は精密騒音計 (RION 製 NA-28) を使用した。測定結果を図-11に示す。すべての測定点において、制御によりピークである 63Hz 帯域の音圧レベルが 7~10dB 程度、

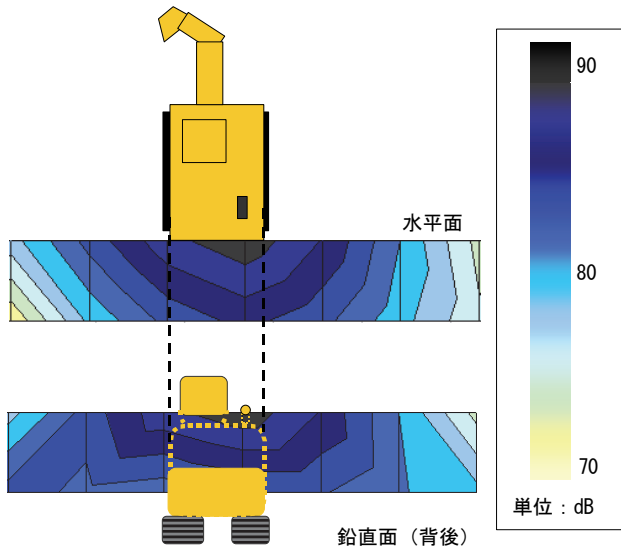


図-9 排気筒周辺の63Hz帯域の音圧レベル分布

低減していることを確認した。また、ピーク音以外の周波数帯域における音圧レベルの顕著な増幅はみられなかった。

次に、測定点①において、制御装置が ON と OFF の場合の音圧レベル変動を測定した。63Hz 帯域の音圧レベルの変動波形 (1/3 オクターブバンド) を図-12 に示す。エンジンをかけた状態で制御を開始すると、音圧レベルが低減し、効果が現れることを確認した。適応制御により、制御の継続時間が長くなるほど制御効果が大きくなるのが分かる。

これらの結果より、本システムを使用することで、目的とする低周波数帯域のピーク音の音圧レベルを低減できることを確認した。

5. おわりに

騒音源としてスピーカから騒音を発生させた実験室実験では、音源を純音、送風機の音、発電機の音のように、低周波数帯域にピークをもつ音の場合、ピーク音を10dB以上、低減できることを確認した。さらに、屋外においてバックホウへの適用実験を行い、40m程度の距離で、7~10dB程度、低周波数帯域のピーク音を低減できることを確認した。

本システムは、①点音源と仮定でき、②200Hz以下の低周波数帯域にピークをもつ、騒音源に対し、適用できる。今後の課題として、適用可能な条件の拡大が挙げられるが、制御システムの工夫等により検討していきたい。

なお、本実験を進めるにあたり多大な協力をいただいた方々および関係者各位に、深く感謝の意を表する。

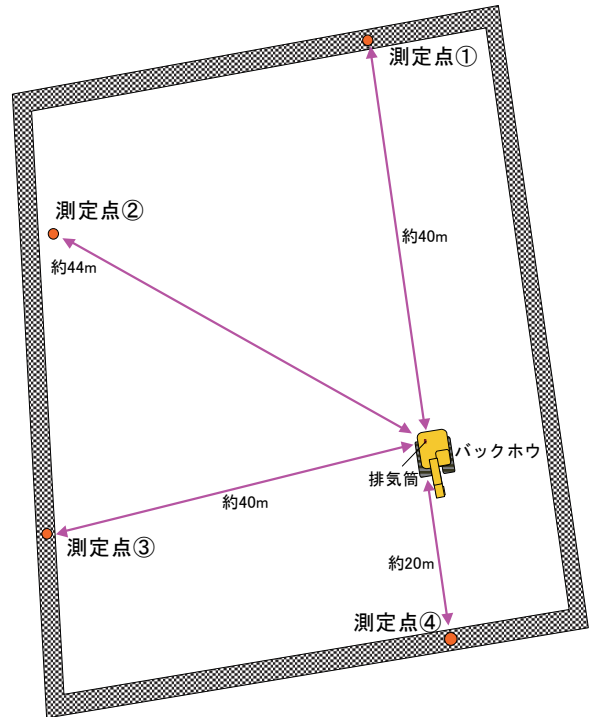


図-10 各測定点とバックホウとの距離



写真-3 使用重機

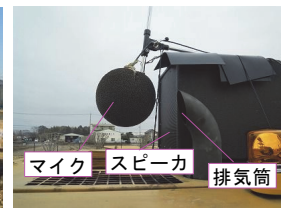


写真-4 システム



写真-5 測定点④

【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) 「音のなんでも相談室 F.低周波音・超低周波音」、音響技術、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」、日本建築学会、pp.27、2010.1
- 4) 例えば、長谷川聡、「自動車用アクティブ・ノイズ・コントロール (ANC) システム」、日本造船学会誌、pp.839-842、1992.11

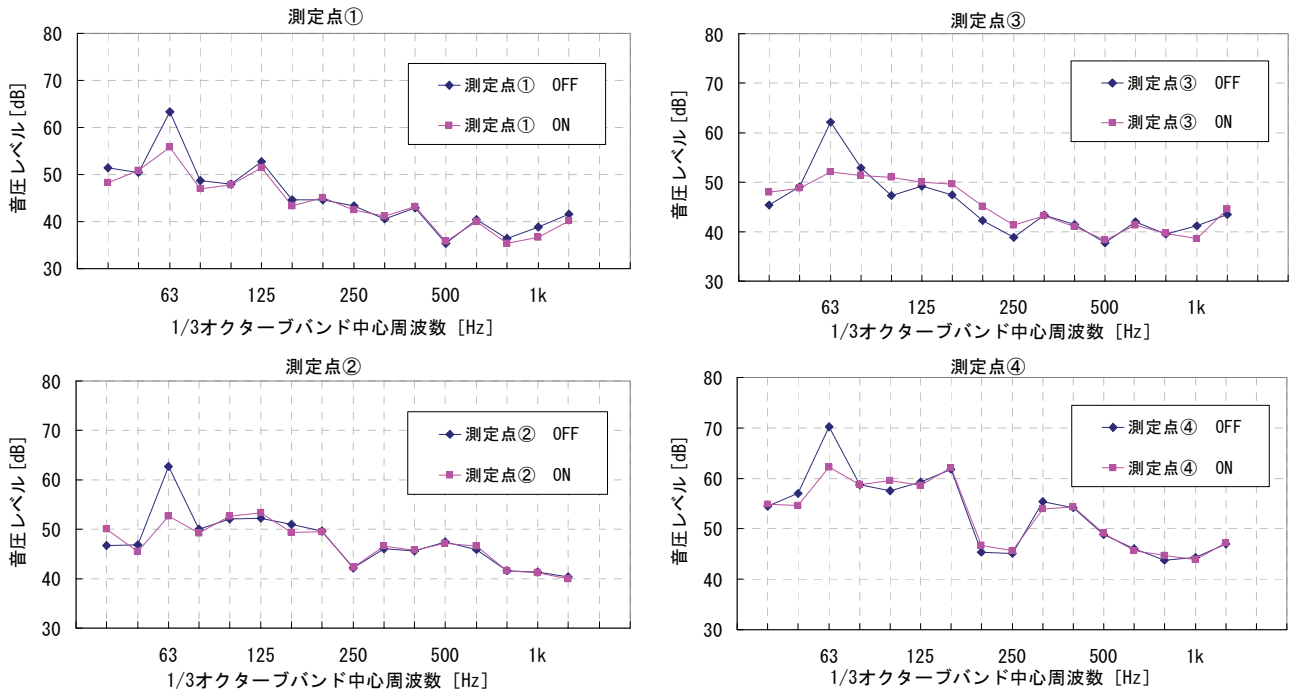


図-11 各測定点における測定結果

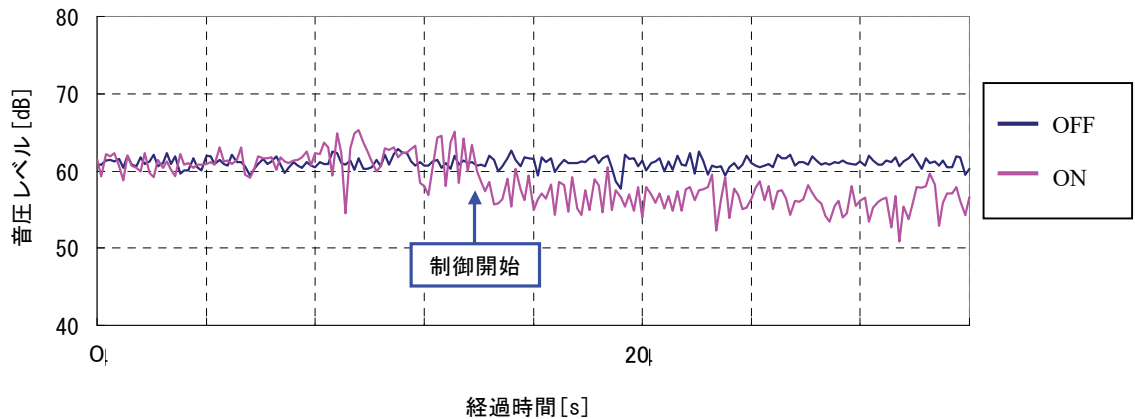


図-12 63Hz 帯域のレベル変動波形 (測定点①)

- 5) 例えば、高橋 稔、小栗敬堯、浜田晴夫、三浦種敏、「空調ダクトにおけるアクティブ・ノイズ・コントロール」、音響技術 No.60、pp.29-32、1987.12
- 6) 西村正治、「ANC 実用化の現状と将来」、騒音制御 27(4)、pp.223-225、2003.8
- 7) 例えば、中島立視、鈴木和憲、「位置固定騒音源を対象とした障壁回折音の能動制御に関する基礎実験 (その 2) - システムの設計・製作と基本性能の実験的確認 -」、日本音響学会研究発表会講演論文集、pp.617-618、2002.9
- 8) 例えば、阿部真一、栗栖清浩、「IPP ガスタービン排気音等の ANC による低減」、騒音制御、Vol.27 No.4、pp.247-251、2003.8
- 9) 松岡明彦、小林正明、半田雅俊、鈴木信也、「ANC を用いた建設機械騒音の低減に関する実験的検討」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.227-228、2008.9
- 10) 小林正明、松岡明彦、半田雅俊、鈴木信也、「ANC を用いた建設機械騒音の低減に関する実験的検討 その 3 2 次音源スピーカに設置したレジューサの効果」、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.239-240、2010.9
- 11) 例えば、B.Widrow and S.D.Stearns、「Adaptive Signal Processing」、Prentice Hall、(1985).
- 12) Stephen Elliott、「Signal Processing for Active Control」、ACADEMIC PRESS、pp.2-48、2000.10