

## 超低周波用防音ハウスにおけるANCを用いた騒音低減法の実用化に向けた研究

宮部, 佑太郎  
九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/2558920>

---

出版情報 : 九州大学, 2018, 修士, 修士  
バージョン :  
権利関係 :

平成 30 年 度

修 士 論 文

超低周波用防音ハウスにおける  
ANC を用いた騒音低減法の実用化に向けた研究

九州大学大学院総合理工学府  
環境エネルギー工学専攻  
エネルギー流体科学研究室

宮部 佑太郎

指導教員 青木俊之 教授

提出年月日 平成 31 年 2 月 6 日

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.1.1 防音ハウス.....	1
1.1.2 超低周波音 <sup>[2]</sup> .....	1
1.1.3 ANC(アクティブ・ノイズ・コントロール) <sup>[3]</sup> .....	1
1.2 過去の研究.....	2
1.3 本研究の目的.....	2
第2章 実験装置および実験方法.....	4
2.1 実験装置.....	4
2.1.1 実験装置概要.....	4
2.1.2 模型防音ハウス.....	4
2.1.3 模型防音ハウスの透過損失.....	5
2.1.4 模型防音ハウスの音響特性.....	5
2.1.5 ANC システム.....	6
2.1.6 一次音源.....	6
2.1.7 一次音源の模型防音ハウスにおける音響特性.....	7
2.1.8 二次音源.....	7
2.1.9 二次音源 fd16 の設計.....	8
2.1.10 二次音源の模型防音ハウスにおける音響特性.....	10
2.2 実験環境.....	11
2.2.1 測定機器.....	11
2.2.2 実験室での特性.....	12
2.2.3 ノイズ.....	13
2.3 実験方法.....	13
2.4 実験の評価方法.....	13
2.4.1 音圧スペクトル.....	13
2.4.2 測定点.....	13
2.5 実験のセットアップ.....	14
2.5.1 ANC のソフトウェアのパラメータ.....	14
2.5.2 ステップサイズ・パラメータ $\mu$ の設定.....	14
2.5.3 フィルタタップ長の設定.....	15

第 3 章 実験結果および考察 .....	26
3.1 条件 No.1 fd20 を用いた 16Hz-100dB 騒音の低減結果 .....	26
3.1.1 16Hz 騒音の低減量 .....	26
3.1.2 距離減衰 .....	26
3.2 条件 No.2 fd16 を用いた 16Hz-100dB 騒音の低減結果 .....	27
3.2.1 16Hz 騒音の低減量 .....	27
3.2.2 距離減衰 .....	27
3.2.3 エラーマイク位置 .....	28
3.3 条件 No.3 fd16 を用いた 16Hz-110dB 騒音の低減結果 .....	29
3.3.1 16Hz 騒音の低減量 .....	29
3.3.2 距離減衰 .....	29
3.3.3 エラーマイク位置 .....	30
3.4 条件 No.4 fd16 を用いた 16Hz-93dB 騒音(ダクト底部無し) .....	31
3.4.1 16Hz 騒音の低減量 .....	31
3.4.2 距離減衰 .....	31
3.4.3 エラーマイク位置 .....	32
3.5 条件 No.5 fd16 を用いた 16Hz-100dB 騒音(ダクト底部無し) .....	33
3.5.1 16Hz 騒音の低減量 .....	33
3.5.2 距離減衰 .....	33
3.5.3 エラーマイク位置 .....	34
3.6 増音周波数 .....	35
3.6.1 模型防音ハウスの共鳴周波数との因果関係 .....	35
3.6.2 考察 .....	36
3.6.3 実際の防音ハウスにおける共鳴周波数 .....	36
第 4 章 結論 .....	79
4.1 16Hz-100dB 騒音に対する ANC 適用 .....	79
4.2 16Hz-110dB 騒音に対する ANC 適用 .....	79
4.3 二次音源の特性による低減効果の変化 .....	79
4.4 騒音の強さによる低減量の変化 .....	80
4.5 ダクト底部の有無による特性 .....	80
4.6 距離減衰 .....	80
4.7 エラーマイクの位置による特性 .....	81
参考文献 .....	82

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 防音ハウス

騒音に対しての人々の意識は年々敏感なものとなっており、都道府県条例などの規制が厳しさを増している。これにより、工事現場における騒音対策は非常に重要なものとなっている。

超低周波用防音ハウス (Soundproof house) は水道工事、地下鉄工事等での騒音対策装置として用いられている。内部では、掘削泥水中の土砂等と水を分離するために振動ふるい (Vibration sieve) が駆動される。建設工事で用いられる振動ふるいは大型であるため、大きな振動および超低周波音 (Infrasound) が発生する。超低周波音は振動ふるいの振動数 (一般的に、1000 rpm = 16 Hz または 20Hz) に一致する<sup>[1]</sup>。また、超低周波用防音ハウスには内部の土砂 (Gravel) を取り除くための開口部 (Opening) が設けられており、この開口部からの超低周波音の漏れが作業員や周辺住民に騒音被害を与え問題になっている。Fig.1-1 に防音ハウスにおける超低周波音の発生機構を示す。

### 1.1.2 超低周波音<sup>[2]</sup>

超低周波音とは、人間の可聴域 (20 Hz~20000 Hz) の下限である 20 Hz 以下の音のことである。この超低周波音は人間の耳には聞こえないような低い周波数の音波であるが、圧迫感や振動感により頭痛、めまい、吐き気、不眠などの生理的な影響を引き起こすことが明らかとなっている。加えて、超低周波音が住宅に伝搬し窓ガラスや建具などを振動させることによって、二次的な騒音を発生することもある。周波数 20 Hz の音は音圧レベルがおよそ 85 dB 程度で人間の耳がその存在を感知することができる。また、約 77 dB で窓ガラスや建具を振動させる。超低周波用防音ハウスから漏れる音圧レベルは 100 dB を超える大きな音なので、開口部から漏れる超低周波音を低減することは、非常に重要な意味を持つ。超低周波音は波長が長く、一般の遮音材・防音材などのパッシブ消音器では透過してしまうため、低減効果がほとんどないことがわかっている。

そこで、近年ではアクティブ消音器である ANC が超低周波音などの低い周波数に対する低減法として期待されている。

### 1.1.3 ANC(アクティブ・ノイズ・コントロール)<sup>[3]</sup>

騒音源の音に対して同振幅・逆位相の音を重ね合わせるにより、互いに打ち消し合い消音することを ANC という。デジタル処理技術の進歩により、実現可能な技術となってきた。完全な打消しが可能なのは一次元の音場となる平面波のみであり、例としてダクト内の音場等が挙げられる。特徴として周波数が低い方が波長や周期が長く、波面の重ね合わせがうまくいきやすい。そのため、超低周波音に対する低減法として期待されている。

## 1.2 過去の研究

過去の研究では、まず、超低周波防音ハウスの開口部から漏れる超低周波音の低減方法として、パッシブ消音を試みた。1/12 模型ハウス開口部の外側に膨張型消音器を、開口部内側に直管を、定在波を抑制する目的でハウス内部に斜板を組み合わせて設置することで制御対象周波数である 192 Hz に対し約 12 dB の高い減衰効果を得ることが出来た。しかし、消音器の大きさが実用化するには大きすぎるという課題が残った<sup>[4]</sup>。

そこで消音器を用いず、定在波を抑制するためにハウス内部に 1/4 波長管を 16 本設置した場合、最大で 7.8 dB の低減効果が得られた<sup>[5]</sup>。

より高い消音効果を得るため、1/12 模型ハウスに ANC を適用した。実用化のためヘルムホルツ共鳴を用いたスリット型二次音源によりダクトの短縮化を図った。その結果、制御対象周波数である 192 Hz 純音に対し約 25 dB の低減が得られた。更に 1/4 波長管を併用することで定在波を抑制し、特定の周波数領域での低減効果を向上させることが出来た<sup>[6]</sup>。

実際に ANC が 20 Hz に対し消音効果が得られるかを実証するために、開口部を実際の 1/4 スケールとして、防音ハウスをできる限り小さく、低コストで模型ハウスを設計した。作成した模型ハウスに ANC を適用し、実験を行った。その結果 20 Hz 純音に対して約 31 dB の効果が得られた。これにより振動ふるいの周波数である 20 Hz に対しての消音効果を実証することができた。また、防音ハウス外部からの外乱による影響や、防音ハウス内部からの外乱の影響を確認するため、騒音源と同時にピンクノイズを発生させた。その結果、外乱が生じて ANC にほとんど影響はないことが分かった<sup>[7]</sup>。

しかし、研究対象の超低周波音である 20 Hz に対し ANC を適用すると、すぐに大きな音が発生し消音失敗したため ANC が適応できなくなる場合もあった。二次音源の形式によって実験結果が異なることから、二次音源の性能が ANC の適用可否に大きく影響すると考えた。そこで、二次音源にバスレフ型という形式を採用し、低減対象とする 20Hz の出力を増加させた結果、20Hz-約 110dB 騒音に ANC を適用することができ、低減効果が得られた<sup>[8]</sup>。

## 1.3 本研究の目的

ダクト内での ANC を利用し超低周波用防音ハウスに対し ANC を適用して、騒音被害を無くすことを目的としている。超低周波音での消音実験が可能な実験装置を使用し、実用化に向けその特性を検証し、低減効果を向上させる。そのためには、実際に近い周波数と音圧レベルで消音させる必要がある。振動ふるい機から発生する超低周波騒音の代表周波数は 16Hz と 20Hz である。低減用の音源にはスピーカーを用いるが、超低周波音を出力することは想定して設計されていない。そのため、騒音が低周波であるほど、低減用スピーカーから低減音を出力するのが難しく、低減効果も得られにくいと考えられる。これまでの研究で 20Hz-110dB 騒音<sup>\*1</sup>に ANC を適用し、低減効果が得られている。本研究ではさらに低周波の 16Hz-110dB<sup>\*1</sup>騒音に対して低減効果を得ることを目標とする。

周辺住民の超低周波による騒音被害を考慮する場合、近距離場よりも遠距離場を考慮することも重要である。そのため、本研究では特に遠距離場での測定を可能にし、その特性に着目して、研究を行った。

※1 本論文では実験用の模型防音ハウスのダクト開口端で計測される音圧レベルを基準としている。

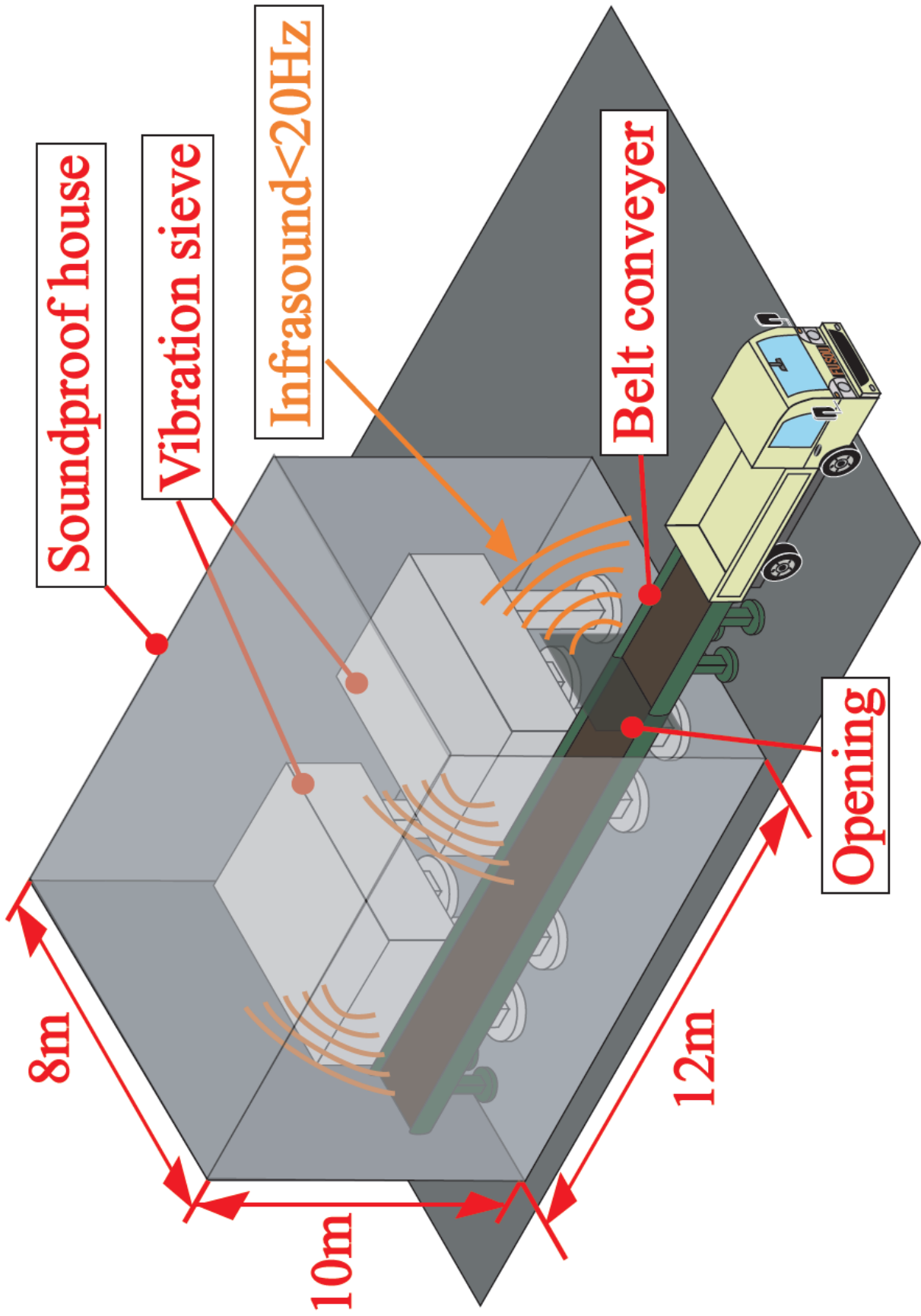


Fig.1-1 超低周波音の発生機構

## 第2章 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

#### 2.1.1 実験装置概要

本研究で使用した実験装置全体の概略図を Fig.2-1 に示す。CD プレーヤー (CD Player) で再生した騒音源の信号をアッテネーター (Attenuator) で減衰させ、アンプ (Amplifier) により増幅する。そして、屋内 (Indoor) に配置した実験用模型ハウス (Soundproof house model) に取り付けられたスピーカーから騒音源である一次音源 (Noise speaker) を発生させる。その騒音に対してダクト上部に設置した二次音源 (Secondary noise speaker) を用いて ANC を行い、ダクト外部または実験用模型ハウス内において測定用マイクロフォン (Microphone) にて音響信号を測定し、FFT Analyzer (Fast Fourier Transform Analyzer) で FFT 解析を行う。

本研究では必要に応じて、一次音源の音源に CD プレーヤーおよびアッテネーターを用いず、発振器を用いて実験を行った。入力電圧は発振器に付属するアッテネーターを用いて調節し、音圧の調整をした。

#### 2.1.2 模型防音ハウス

本実験では、Fig.2-2, Fig.2-3 に示す実験用模型ハウスを使用した。模型ハウスには図のように、開口部を一ヶ所設け、ダクトを取り付けた。模型ハウス上部には騒音を発生させる二つの一次音源用スピーカーを、ダクト上部には消音用の音を発生させる二次音源スピーカーを一つ設置した。模型ハウス、ダクト、スピーカーは全て厚さ 24 mm のラワンベニヤ板で製作した。加えて、強度を高めるため木材等で補強を行った。この模型ハウスの開口部は実際の防音ハウスの 1/4 スケールで製作している。ダクトは過去の研究より<sup>[6]</sup>、1/12 の模型ハウスにヘルムホルツ共鳴器を取り付けダクトの短縮化を図った後の寸法の 3 倍で製作している。その他の模型ハウス部分やスピーカーBOX は材料やコストの面からできる限り小さくなる様に設計を行った。



### 2.1.3 模型防音ハウスの透過損失

透過損失 ( $TL$ : Transmission loss) は透過率の逆数をデシベル単位で表示したもので、遮音性能を表す量である。平板に垂直に音が入射した場合の透過損失  $T_0$  は次式で表される<sup>[9]</sup>。

$$T_0 = 10 \log \left\{ 1 + \left( \frac{\omega m}{2z} \right)^2 \right\} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

ここで、 $\omega$  は入射波の角周波数、 $m$  は平板の単位面積当りの質量、 $z = \rho c$  は媒質の固有音響インピーダンス密度である。これにラワンベニヤ板の質量、空気の密度、空気中の音速を代入すると、16 Hz に対する等価損失は

$$T_0 = 10 \log \left\{ 1 + \left( \frac{2\pi \times 16 \times 24 \times 0.6}{2 \times 1.3 \times 340} \right)^2 \right\} \approx 5.7 \quad [\text{dB}]$$

これは決して十分な遮音性能とは言えないが、低周波に対しての遮音はかなりのコストと手間、空間的余裕が必要なので今回はこの状態で実験を行うこととした。よって、十分な遮音性能を持つ実際の超低周波用防音ハウスに ANC を適用した場合、透過音の影響が少なくなるので今回の実験よりも良い効果が期待できる。

### 2.1.4 模型防音ハウスの音響特性

今回製作した模型ハウスは、頸部をもつ空洞として見ることができ、空洞内に閉じ込められた空気がばねとなり、ある特定の周波数で共鳴する。この周波数は運動方程式から導かれ、以下の式で表される<sup>[2]</sup>。

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

ここで、 $S$  はダクト断面積、 $V$  は空洞の体積(5%の体積減を考慮=約 38L 減)、 $l (= l_0 + l_e)$  は管端補正したダクト長さで、 $l_0$  はダクトの長さ、 $l_e (= 0.1b)$  は管端補正の長さ、 $b$  はダクト短辺の長さである。模型ハウスの寸法を代入すると

$$f \approx \frac{340}{2\pi} \sqrt{\frac{0.125}{0.729 \times 0.801}} \approx 25 \quad [\text{Hz}]$$

また、直方体としてみた場合の固有振動数は、次式で与えられる<sup>[2]</sup>。

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left( \frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{l_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z}{l_z} \right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (3)$$

ここで、 $l_x, l_y, l_z$  : 防音ハウスの長さ、幅、および高さ[m]、 $n_x, n_y, n_z$  : 正の整数である。防音ハウスは直方体であり、構造上定在波が発生しやすい形状になっている。

一次モードの固有振動数での防音ハウス  $x$  方向 (開口部のある防音ハウス正面から奥行き方向) に発生する定在波は 144 Hz、 $y$  方向 (水平横方向) に発生する定在波は 175 Hz、 $z$  方向 (垂直方向) に発生する定在波は 243 Hz である。

### 2.1.5 ANC システム

本実験で使用した ANC システムを Fig.2-4 に示す. 消音アルゴリズムには **filtered-X LMS** アルゴリズムを用いた. **LMS** アルゴリズムは制御対象の騒音に関する情報である入力信号  $x$  と, 制御効果に関する情報である誤差信号  $e$  の二つの信号をマイクや加速度計などから受け取り, リアルタイムで演算しながら出力信号を望ましいものへと逐次に調整していくアルゴリズムである. このアルゴリズムは適応アルゴリズムに入力する信号は  $x$  ではなく, 推定した伝達特性  $c(\omega)$  でフィルタリングした信号を使うことから, **filtered-X LMS** アルゴリズムと呼ばれる<sup>[10]</sup>.

ダクト内を伝播する騒音をリファレンスマイクで測定し, それを元に **DSP (Digital Signal Processor)** 上で計算された打消し音を二次音源から発生させる. そしてエラーマイクで測定した誤差信号  $e$  を適応アルゴリズムへ送り, 誤差が  $0$  になるように適応フィルタ  $\hat{w}$  を調整するシステムである. また, 二次音源から出力した逆位相の音が上流のリファレンスマイクに入ってハウリングが生じないように, ハウリング防止用フィルタ  $\overline{hw}(\omega)$  が組み込まれている. 本研究では実験を行う際, 前もって伝達特性  $c$ ,  $hw$  を測定し消音実験を行った. 伝達関数  $c$ ,  $hw$  はそれぞれ二次音源から  $M$  系列ノイズを発生させ, 測定をしている. リファレンスマイクから二次音源までの未知システムを推定したものである適応フィルタは, 次式に従い逐次更新される<sup>[11]</sup>.

$$\hat{w}_k = \hat{w}_{k-1} - 2\mu e_{k-1} x_{k-1} \quad (4)$$

ここで,  $\mu$  はフィルタ更新の係数である. この  $\mu$  が小さい程調整量も小さくなりシステムは安定するが, その分フィルタが最適な値へと収束するまでの時間が長くなる.

### 2.1.6 一次音源

模型ハウスの上部に騒音源用の一次音源スピーカーを二つ設置した. 本実験で使用したスピーカーのスペックを下の Table.2-1 に示す.

Table.2-1 specification of ROCKFORD T215D2

Nominal Impedance(ohms)	2Ω	Power Handling(MAX)	2000
Voice Coil Diameter-inch(mm)	4(101.6)	Mounting Dia.-inch(mm)	13-13/16(350.84)
FS(Hz)	24	Mounting Depth.-inch(mm)	9.875(250.83)
QTS	0.383	Speaker Dis.-cu.ft.	0.176(4.98)
VAS-cu.ft.(liter)	3.18(90)	Sealed Box Vol.-cu.ft	-
Xmax-inch(mm)	0.75(19)	Vented Box Vol.-cu.ft	2.75(77.75)
SPL(dB@1w/1m)	87.0	Port Diameter&Length(in.)	(1)6×17
Power Handling(RMS)	1000	Port Diameter&Length(cm)	(1)15.24×43.18

Number of ports noted in ( )

### 2.1.7 一次音源の模型防音ハウスにおける音響特性

#### (1) ホワイトノイズ解析

実際に実験装置の周波数特性を調べるため、はじめに騒音源となる模型防音ハウス上部の二つの一次音源からホワイトノイズを出力し、ダクト開口端にてマイクロホンを用いて音圧測定を行った。そのFFT解析結果を Fig.2-5(a)(b)に示す。

ダクト長さが 0.5m の場合、音圧のピークが 25Hz 付近にあり、これは 2.1.4 節の模型防音ハウスの共鳴周波数の理論値に一致する。例えば、本研究で扱う 16Hz は 60dB 以下で計測されており、共鳴周波数である 25Hz とは 10dB 以上の大きな音圧差がある。よって、模型防音ハウスの共鳴周波数が 25Hz 付近にあることは無視できず、実験結果に影響を及ぼす可能性がある。

ダクト長さが 0.5m のままダクト底部を取り外した場合、音圧のピークは 27Hz または 29Hz で計測され、共鳴周波数は高周波側に移動した。式(2)より、ダクトの実効長さが小さくなったためである。

ダクトの長さを 1m に伸ばした場合、理論上は模型防音ハウスの共鳴周波数は低周波側に移動する。Fig.2-5(b)を見てもそのような結果となっており、22Hz において音圧のピークが計測された。2.1.7 節の理論値とは一致しないが、共鳴周波数が低周波側に移動する傾向は一致した。

#### (2) 音圧-インピーダンス特性

発振器を用いて一次音源用スピーカーで 10Hz ~ 100Hz の音圧レベルとインピーダンスの特性を測定した。その結果を Fig.2-6(a)(b)に示す。一次音源は二つあるが、単体での特性をみるため個別に計測を行なった。それぞれダクト開口端側から見て(a)奥、(b)手前と表現している。

ダクト長さが 0.5m の場合、Fig.2-6(a)(b)共に 24Hz において最大の音圧が計測された。2.1.4 節および(1)ホワイトノイズ解析の共鳴周波数 25Hz とは一致していないが、近い値が計測された。インピーダンス特性を見ると 23Hz でインピーダンスが極小になることから、23Hz で共鳴していると見れる。このことから、ダクト長さが 0.5m の場合、模型防音ハウスの共鳴周波数は 24Hz 付近にあることは明らかだろう。50 Hz 付近での音圧レベルのピークはインピーダンスの結果からスピーカーを模型ハウスに設置しない場合のスピーカーの共振周波数であると考えられる。

ダクト長さが 1m の場合、Fig.2-6(a)(b)共に 21Hz において最大の音圧が計測された。インピーダンスも 21Hz で極小値を取り、Fig.2-6 からは模型防音ハウスの共鳴周波数は 21Hz であると言える。2.1.4 節の式(2)より、ダクト長さ 1m の場合、開口端補正を考慮すると、模型防音ハウスの共鳴周波数は

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}} = \frac{340}{2\pi} \sqrt{\frac{0.125}{0.729 \times (1 + 0.276 + 0.25 \times 0.9)}} \approx 20 \text{ Hz}$$

より、理論値は 20Hz である。また、(1)ホワイトノイズ解析の結果では、模型防音ハウスの共鳴周波数は 22Hz であった。いずれも共鳴周波数が一致していないが、ダクト長さが 1m の場合、模型防音ハウスの共鳴周波数は 21Hz 付近にあることは明らかだろう。

### 2.1.8 二次音源

模型ハウスのダクト出口部に取り付けたダクトの上部に消音用の二次音源スピーカーを一つ設置した。スピーカーは一次音源と同じものを使用した。スピーカーのスペックを Table.2-1 に示した。

### 2.1.9 二次音源 fd16 の設計

Fig.2-7 は昨年度<sup>14)</sup>作成した二次音源 fd20 の寸法である。エンクロージャーの体積は 146L である。スリット型のダクトを設け、ダクトの共鳴周波数が 20Hz になるよう設計したため fd20 と名付けた。fd20 の音圧-インピーダンス特性を Fig.2-8 に示す。

今年度は 16Hz 騒音の低減を目標とするため、新たにダクトの共鳴周波数が 16Hz になるよう、fd20 の体積を増加させ fd16 を製作した。同じく共鳴周波数の 16Hz に因んで名付けた。以下に設計思案を示す。

#### (1) バスレフ型の原理 ヘルムホルツ共鳴

バスレフ型の原理はヘルムホルツ共鳴に基づくものである。ヘルムホルツ共鳴の概念図を Fig.2-9 に示す<sup>14)</sup>。ダクト内の空気質量を  $m[\text{kg}]$  とすると、これは微小に振動し、エンクロージャー内の空気を圧縮するピストンと見なすことができる。Fig.2-10 に示すように、ダクト内の空気が  $x[\text{m}]$  だけ模型防音ハウス内の空気を圧縮する方向に移動したとする。エンクロージャー内の圧力  $p[\text{Pa}]$  と、大気圧  $p_0$  に差が生じ、微小に振動する。よって、ダクト内の空気は次の運動方程式を得る。 $S[\text{m}^2]$  はダクトの断面積である。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = p_0 S - p S \quad (5)$$

ここで、ダクト内の空気の振動は微小であるため、エンクロージャー内の空気は断熱変化と見なす。等温変化と扱うこともあるが、ここでは断熱変化として扱う。

圧縮前のエンクロージャー内の体積を  $V_0[\text{m}^3]$ 、圧縮後の体積を  $V[\text{m}^3]$  とすると、次式を得る。

$$p_0 V_0^\gamma = p V^\gamma \quad (6)$$

$$V = V_0 - Sx$$

式(6)より、整理すると、圧縮後のエンクロージャー内の圧力は、

$$p = \left( \frac{V_0}{V_0 - Sx} \right)^\gamma p_0$$

と表される。

ここで、括弧内の

$$\frac{V_0}{V_0 - Sx} = \frac{V_0(V_0 + Sx)}{(V_0 - Sx)(V_0 + Sx)} = \frac{V_0(V_0 + Sx)}{V_0^2 - (Sx)^2}$$

と変形すると、 $Sx$  は微小より、 $(Sx)^2 \approx 0$ 。

よって、圧縮後のエンクロージャー内の圧力  $p$  は、

$$p = \left( 1 + \frac{Sx}{V_0} \right)^\gamma p_0$$

また、 $\frac{Sx}{V_0} \ll 1$  より、 $(1 + \varepsilon)^a = 1 + a * \varepsilon$  を用いると、

$$p = \left( 1 + \gamma \frac{Sx}{V_0} \right) p_0$$

である。

よって、運動方程式は式(5)より、

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -S \left\{ \left( 1 + \gamma \frac{Sx}{V_0} \right) p_0 - p_0 \right\} = -\frac{p_0 \gamma S^2}{V_0} x$$

定数  $k = \frac{p_0 \gamma S^2}{V_0}$  とおくと、

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \quad (7)$$

を得る。この式(7)は振動工学におけるバネの単振動の方程式である。

この解は特性方程式によって導かれる。  $x = e^{\lambda t}$  とすると、

$$x = e^{i\sqrt{\frac{k}{m}}t} + e^{-i\sqrt{\frac{k}{m}}t}$$

よって、固有角振動数  $\omega$  [Hz] は、

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{Hz}]$$

したがって、共鳴周波数  $f$  [Hz] は、

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p_0 \gamma S}{V_0 \rho L}} \quad [\text{Hz}]$$

となる。ここで、  $m = \rho SL$  [kg]、 $\rho$ : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $L$ : ダクト長さ [m] である。

音速  $c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}}$  [m/s] なので、

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_0 L}} \quad [\text{Hz}] \quad (8)$$

となる。

## (2) スリット型ダクト

Fig.2-11 にスリット型ダクトの概念図を示す。スリット型の開口端補正を考慮したダクトの共鳴周波数  $f_r$  [Hz] には次の式(9)を用いた<sup>[12]</sup>。

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L \left[ h + \left( \frac{b}{\pi} \right) \left\{ 1 + 2 \ln \left( \frac{2a}{b} \right) \right\} \right]}} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

ここで開口率  $P = S/D = \text{ダクト断面積} / \text{エンクロージャーの底面積}$ 、 $a$  はスリット長辺の長さ [m]、 $b$  はスリット短辺の長さ [m]、 $h$  は板厚 [m] である。

上記の式を用いて作成した fd16 の詳細寸法を Fig.2-12 に示す。

エンクロージャー体積は fd20 の約 1.55 倍の約 226L となった。

### (3) 二次音源 fd16 の音圧-インピーダンス特性

Fig.2-13(a)(b)に今回作成した fd16 の音圧-インピーダンス特性を示す。fd20 と性能を比較するため、発信器を用いて 20Hz において入力電圧が同等になるよう調節した。その後、発信器で純音を 10Hz から 100Hz まで周波数を変化させ出力し、特性を見た。また、模型防音ハウスは 25Hz 付近で共鳴することから、二次音源の特性計測に影響を及ぼしかねない。よって今回は模型防音ハウスには音が入らないよう出口部を板で塞ぎ、計測を行なった。

Fig.2-13 から、fd16 は設計思案通り 16Hz で共鳴していることが分かる。(a)音圧のグラフでは、20Hz 以下の超低周波領域において、16Hz が最大の音圧となっている。(b)インピーダンスのグラフでも、二つ山が見られ、この間の極小値が共鳴周波数を示す。16Hz においてインピーダンスが極小になっており、設計思案通り 16Hz で共鳴している。

### (4) 二次音源 fd20 と fd16 の特性比較

Fig.2-14(a)(b)に fd20 と fd16 の音圧-インピーダンス特性の比較を示す。Fig.2-14(a)より、fd16 は同じ入力電圧に対して 16Hz では出力が増加しているのが分かる。その音圧差は約 3dB である。

Fig.2-14(b)インピーダンス特性より、fd16 は 16Hz で極小値を取り、16Hz で共鳴している。本研究では主にこの fd16 を用いて実験を行なった。fd20 も fd16 との性能比較のため用いた。

#### 2.1.10 二次音源の模型防音ハウスにおける音響特性

模型防音ハウス設置時の二次音源の周波数特性を調べるため、模型防音ハウスの出口部を塞がずに二次音源 fd16 の音圧-インピーダンス特性の計測を行なった。ダクト長さは 0.5m である。その結果を Fig.2-15 に示す。図中の OPEN で示すデータがそれである(以下、OPEN 時とする)。

Fig.2-15(a)音圧比較より、OPEN 時には 20Hz 前後に山が二つ見られ、二箇所共鳴しているように見える。それぞれ 16Hz-約 101dB、22Hz-約 102dB であった。16Hz における共鳴は二次音源 fd16 のダクトの共鳴周波数と考えられる。

(a)より、OPEN 時の 22Hz における音圧の極大は、模型防音ハウスの共鳴周波数であると考えられる。これは、2.1.4 節の共鳴周波数の理論値や 2.1.7 節とは一致していないが、原因は出力したスピーカーが異なるためだと考えられる。本節では二次音源 fd16 から純音を出力して計測を行なっているが、2.1.7 節では一次音源から音を出力して計測を行なった。よって、模型防音ハウスの共鳴周波数は測定方法によって前後すると言える。

OPEN 時は 26Hz 以下に於いてのみ、出口部を塞いだ場合よりも高い音圧が計測されている。このことから、模型防音ハウスが 20~26Hz 付近に共鳴周波数が存在すると言える。

## 2.2 実験環境

本研究では模型防音ハウスを広いスペースのある実験室屋内の2階に設置し実験を行った。

### 2.2.1 測定機器

#### (1) マイクロホン

本研究で使用したマイクロホンは小野測器製 MI-1271 である。以下に仕様を示す。

製品名	MI-1271 自由音場型 1/2 インチエレクトレットコンデンサマイクロフォン
周波数範囲(1kHz 基準)	1Hz~20kHz(±2dB)
最大音圧レベル (250Hz,全高調波歪率 3%)	140dB 以上(マイクロホン単体) 135dB 以上(MI-3170 使用時)
自己雑音レベル (MI-3170 使用時)	周波数重み付け特性 A:14.0dB(代表値) 周波数重み付け特性 Z:34.3dB(代表値)

#### (2) プリアンプ

本研究で使用したプリアンプは小野測器製 MI-3170 である。以下に仕様を示す。

製品名	MI-3170 マイクロホン プリアンプ
周波数範囲	10Hz~40kHz(+0.1dB,-0.2dB,1kHz 基準) 1Hz~40kHz(+0.1dB,-1.5dB,10Hz 基準)
最大出力電圧 <sup>※1</sup>	±8V(peak)、音圧換算 135dB(感度 50mV/Pa マイクロホン使用時)
自己雑音 <sup>※1</sup>	周波数重み付け特性 A : 3.3 $\mu$ V 以下 周波数重み付け特性 Z,10Hz~20kHz,50 $^{\circ}$ C以下時 : 16.0 $\mu$ V 以下

※1 電源 4mA(24V) マイクロホン等価容量 14pF にて

#### (3) センサアンプ

FFT 測定機器(CF-5210)を用いて、MI-1271 および MI-3170 で測定を行なうためセンサアンプ SR-2210(小野測器)を導入した。

製品名	2チャンネルセンサアンプ SR-2210
使用周波数範囲	1Hz~20kHz(±0.5dB、FLAT にて 1kHz 基準)
入力換算自己雑音	-95dBVrms 以下(FLAT)

#### (4) 校正

マイクロホンの校正には、音圧レベル 114 dB – 250 Hz の音を発生させるピストンフォン (リオン社, NC-72) を用いた。

#### (4) FFT 計測装置

FFT 計測装置 (小野測器, CF-5200) である。これらの増幅された信号は、FFT 計測装置により FFT 解析されディスプレイ上に表示される。なお、FFT 計測装置のサンプリング周波数は 2560 Hz (レンジ 0 Hz ~800Hz) である。サンプル点数は 2048 点で分解能は 1/800 で、平均化回数は 50 回である。

## 2.2.2 実験室での特性

### (1) 暗騒音レベル

ある位置における騒音は、一般に多数の騒音源からの騒音が合成されたものである。その中のある1つの騒音に着目したとき、その騒音に対してそれ以外のすべての騒音を暗騒音という。

条件として、実験室内の機器を全部停止したときに1/3オクターブバンドで測定した。規格では、暗騒音レベルは最低限、被測定物の発生音圧レベルよりも10dB低ければよい。

測定結果をFig.2-16(a)(b)に示す(ここで、NC曲線とは室内騒音をオクターブ分析して評価するために、1957年にBeranekらにより提案されたものをIEC規格に適合するようにShultzが修正したものである)。(a)と(b)はそれぞれダクト開口端(0m)、ダクト開口端から1m離れた位置での測定結果である。これらを見て分かるように、低周波領域でも暗騒音レベルが十分小さいので、被測定音圧が60dB程度あれば有意なデータが得られる。

### (2) 逆自乗則特性

逆自乗則特性は、音源からの距離を $r$ とすると、音の強さは $r^2$ に逆比例し、 $r_0$ を基準とした音の強さのレベル(音圧レベル)は $20\log_{10}(r/r_0)$ だけ減衰する特性のことである。簡単には距離が2倍になると、6dB減衰すると考えることができる。これは自由音場での性質であり、この特性を示す範囲が自由音場として扱える範囲だといえる。

JIS Z 8732によると、無響室・半無響室の音圧レベル距離減衰特性の許容最大偏差は次のように示される。

周波数 [Hz]	許容最大偏差	
	無響室	半無響室
630以下	±1.5	±2.5
800～5000	±1.0	±2.0
6300以上	±1.5	±3.0

測定周波数は16Hzとした。ダクト出口部の音圧を100dBに設定した時の測定結果をFig.2-17(a)に、110dBに設定した時の測定結果をFig.2-17(b)に示す。ただし、直線は次式とする。

$$y = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{x} \right) + (\text{各周波数の基準値}) \pm \text{許容偏差} \quad (9)$$

ここで、基準値はダクト開口端から1m離れた位置でのdB値とした。16Hzに対して2mまでしか性能は満たしていない。よって、およそ2m程度までは反射音などの影響があまりないと考えられる。

本研究では16Hz騒音に対してANC適用による騒音低減を主な目的とするため、半無響室の性能が得られる2m地点までの測定結果を評価した。



### 2.2.3 ノイズ

音響信号と電気信号間の変換の過程において、たびたびノイズが発生し得る。この節では測定機器や実験機器から発生するノイズについて述べる。

Fig.2-18(a)～(d)はアンプによるノイズの影響を示している。AMP ON で示すデータは、アンプの電源はON の状態だが入力信号は与えていない場合に測定された音圧である。AMP OFF で示すデータは、実験室内の全ての機器の電源を落とした場合に測定された音圧である。ただし、測定に必要なFFT計測装置とマイクロホンの電源は入っている。

特に注目すべきはFig.2-19(a)である。AMP ON 時に電源周波数である60Hzの波が計測された。またその高調波である120Hz、180Hzの波も計測された。これはアンプから入る電源ノイズであり、ダクト開口端から防音ハウス内部に耳を近づけると、わずかに音が聞こえる。

電源ノイズがアンプを介してスピーカーから計測されることが分かったが、16Hz騒音の低減量の評価には影響しないと考え、この測定機器および実験機器を用いて実験を行なった。

## 2.3 実験方法

本実験では、模型防音ハウス上部に設置した二つのスピーカー（ROCKFORD T215D2）から発生させた騒音に対し、二次音源から打ち消し音を発生させるANC実験を行った。そして、ANC前後の音圧をダクト外部に設置した測定用マイクで測定した。

リファレンスマイクはダクト入口部、エラーマイクはダクト開口端に設置している。主としてエラーマイクはダクト内に取り付けたが、本研究では実験によってエラーマイク位置を変更した。

使用する騒音源は発信器(LEADER,LAG-120B)であり、付属のアッテネーターで音圧を調整する。この入力信号を2 × 1200 Wのアンプ（BEHRINGER, EUROPOWER EP2500）によって増幅させ、スピーカーから発生させる。アンプとスピーカーの接続法について、騒音源のスピーカーはパラレルモードである。また、二次音源はモノブリッジモードで接続した。アンプのゲインはどちらもMAXの状態である。

## 2.4 実験の評価方法

### 2.4.1 音圧スペクトル

測定結果は音圧測定実験で取得したデータをFFT解析し、音圧スペクトル（SPL）で表した。これにより、周波数ごとの低減効果を評価することができる。音の大きさの指標であるSPLは次式で与えられる<sup>[9]</sup>。

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_0} = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

ここで、基準値  $P_0=2 \times 10^{-5}$  [Pa]は可聴音の最小可聴音圧である。

Gonzalezらの研究により、ANCによる音圧の低減が精神的・心理的負担を和らげることが実証されている<sup>[13]</sup>。よって、騒音被害を減らすという目的に沿って、SPLの減少量でANCの効果を評価した。

### 2.4.2 測定点

Fig.2-19に測定位置の概観図を示す。2.2.2(2)の逆自乗側に従い半無響室と見なせる、ダクト開口端から2m離れた地点まで測定し、低減効果を評価した。

## 2.5 実験のセットアップ

### 2.5.1 ANC のソフトウェアのパラメータ

ANC プログラム適応の際，対象物の形状や周波数に対して適切なパラメータを設定する必要がある．プログラムを修正する必要がある箇所は，基本的にはステップサイズ・パラメータとフィルタタップ長だけである．ダクト長によっては，ディレイライン長を用いた遅延調整が必要な場合もある．測定プログラムのデフォルトの動作条件設定を下の Table.2-2 に，消音実験プログラムのデフォルトの動作条件設定を下の Table.2-3 に示す．

Table.2-2 測定プログラムの動作条件設定

	$\alpha(\omega)$	$hw(\omega)$
サンプリング周波数 [Hz]	8000	8000
ステップサイズ・パラメータ	0.00001	0.00001
適応フィルタタップ長	200	200
遅延補正ディレイライン長	—	20

Table.2-3 消音実験プログラムの動作条件設定

	消音実験プログラム
サンプリング周波数 [Hz]	8000
ステップサイズ・パラメータ	0.00001
$c(\omega)$ 補正フィルタタップ長	200
ハウリング防止フィルタタップ長	200
遅延補正ディレイライン長	20
消音用適応フィルタタップ長	500

### 2.5.2 ステップサイズ・パラメータ $\mu$ の設定

filtered-x LMS アルゴリズムにおける適応フィルタの更新係数である  $\mu$  の設定を行う．

$$\hat{w}_k = \hat{w}_{k-1} - 2\mu e_{k-1} x_{k-1} \quad (11)$$

上の適応フィルタ更新式から分かるように， $\mu$  が小さい程調整量も小さくなりシステムは安定するが，その分フィルタが最適な値へと収束するまでの時間が長くなってしまふ．この  $\mu$  は消音対象となる周波数により最適な値が異なることが知られている． $\mu$  が大きすぎると，ANC を ON にした直後，二次音源の出力信号の振幅が急に大きくなり，一瞬大きな音がした後全く信号が出なくなってしまう．これは  $\mu$  が大きすぎて計算が発散してしまったためだと考えられる．また，小さすぎても計算に時間がかかりすぎてしまい，十分な消音効果が得られなくなってしまう．そこで今回は様々な周波数で実験を行うため，20Hz に適した  $\mu$  の値である  $10^{-7}$  に設定し，他の周波数に対しても同じ値で実験を行い，二次音源からきれいな正弦波が出力され，安定して消音することができることを確認した．したがって，本実験ではステップサイズ・パラメータを  $\mu=10^{-7}$  に設定し，実験を行った．

### 2.5.3 フィルタタップ長の設定

フィルタタップ長は ANC 対象周波数によって設定を変える必要がある。タップ長が長くなるとそのデータ量も多くなる。

昨年度の研究<sup>9)</sup>では 20 Hz 騒音に対してはデフォルトのフィルタタップ長では ANC の適応が上手くいかなかったため、測定プログラムの適応フィルタタップ長を変更した。デフォルトの設定では  $c(\omega)$  と  $hw(\omega)$  のフィルタタップ長が 200 タップとなっている。20 Hz において ANC の適用ができなかったのは特性が上手く取れていなかったためだと考え、タップ長を 400 タップに設定して ANC の適用を行った。400 タップとした理由は、プログラムのサンプリング周波数が 8000 Hz の周期は 0.000125 s であるため、400 タップだと 0.05 s となる。これは 20 Hz の周期と同じとなる。20 Hz に ANC を適用させるためには最低 400 タップ必要であると考え設定を行った。

本研究では 16Hz 騒音に対して ANC を適用し騒音低減を行なう。そのため、上記の算出方法に基づき適応フィルタタップ長を 500 タップとした。

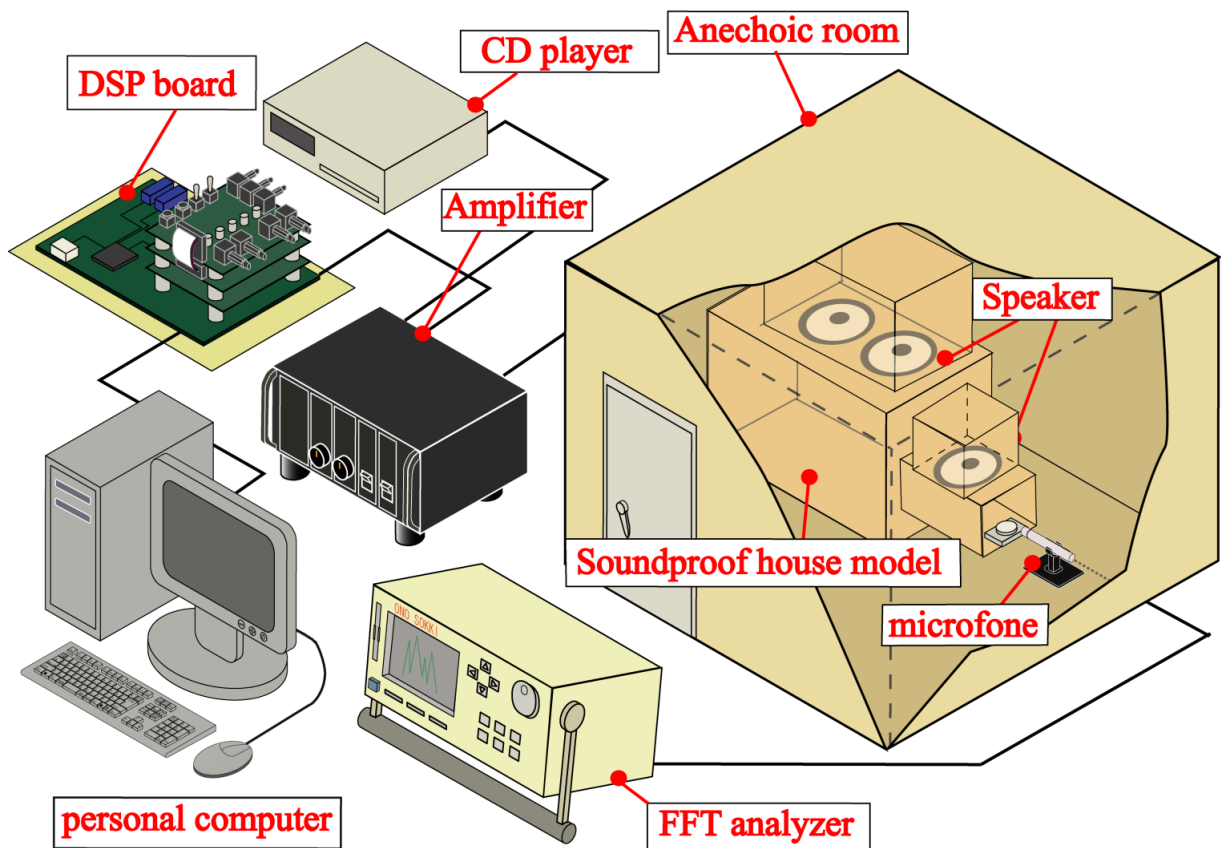


Fig.2-1 実験装置概略図

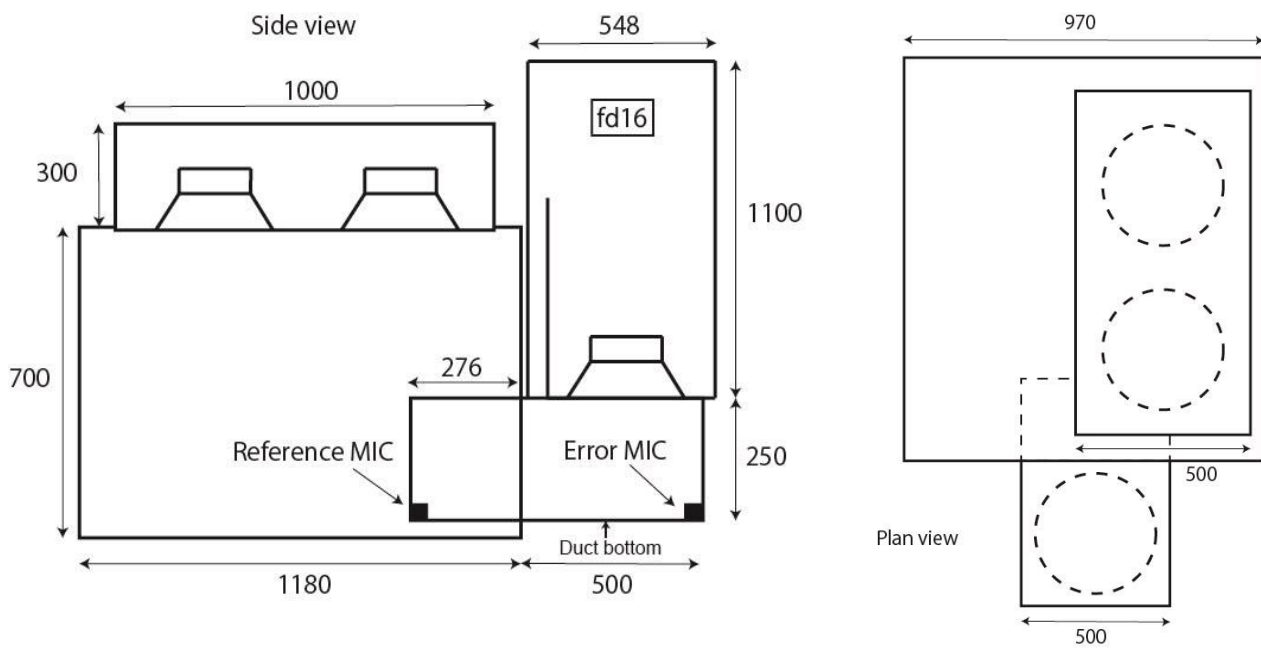


Fig.2-2 実験用模型防音ハウス(単位:mm)

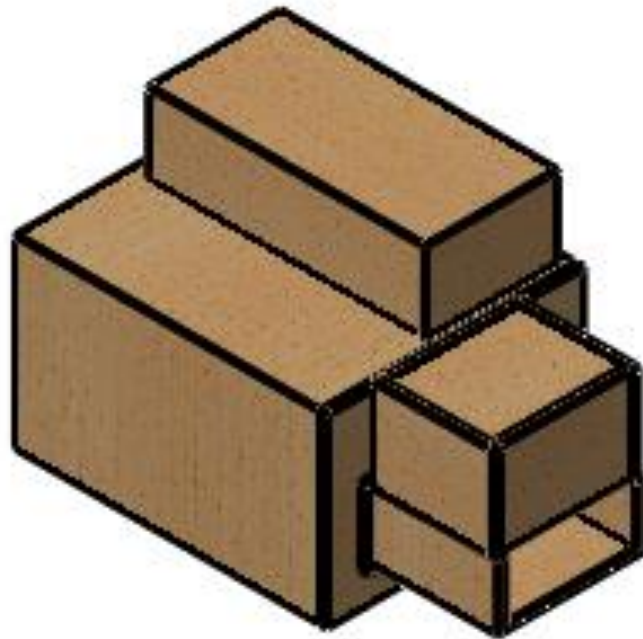


Fig.2-3 模型防音ハウス鳥瞰図

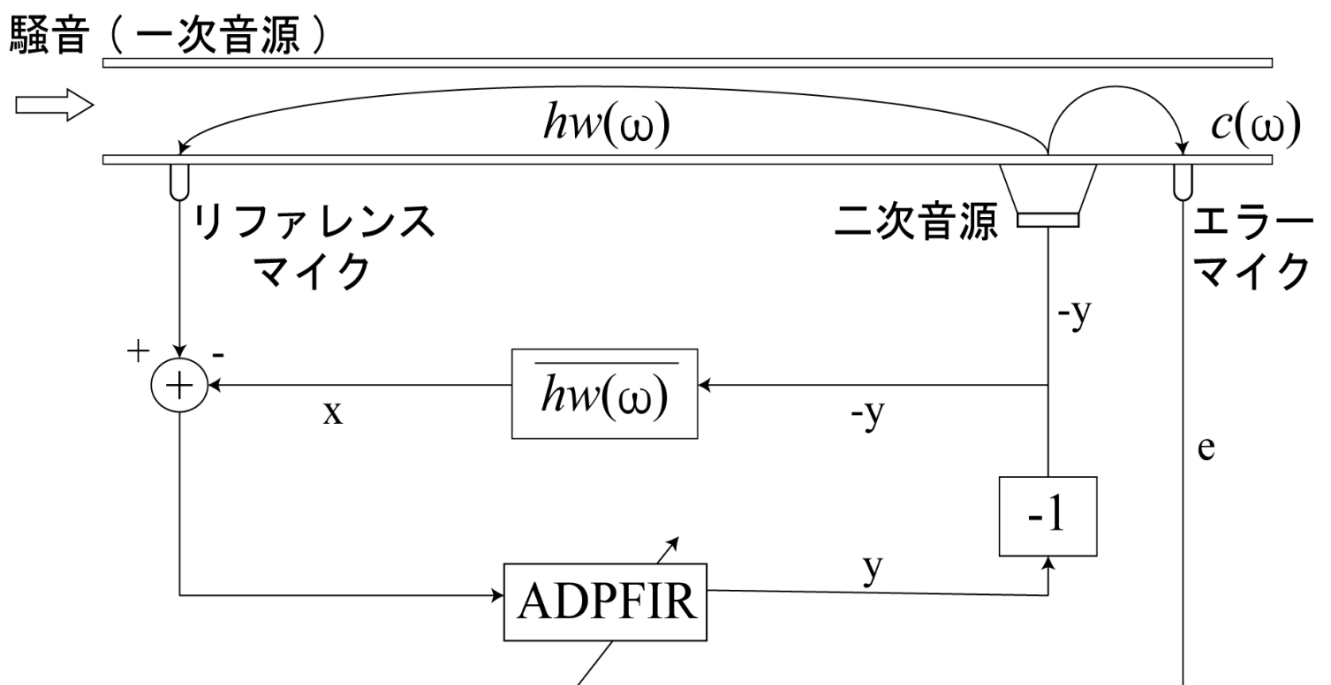
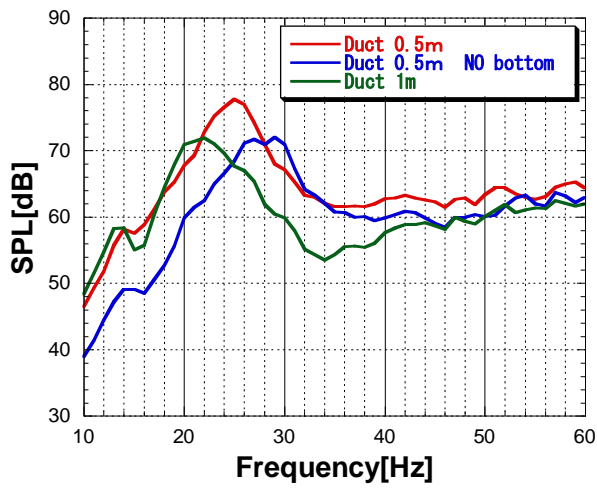
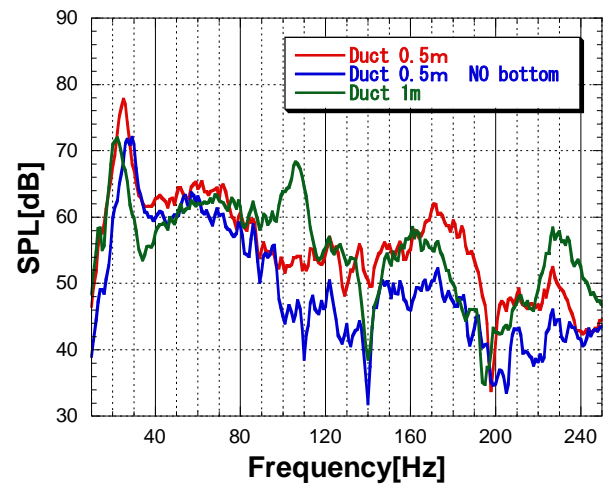


Fig.2-4 filtered-X LMS アルゴリズムブロック線図

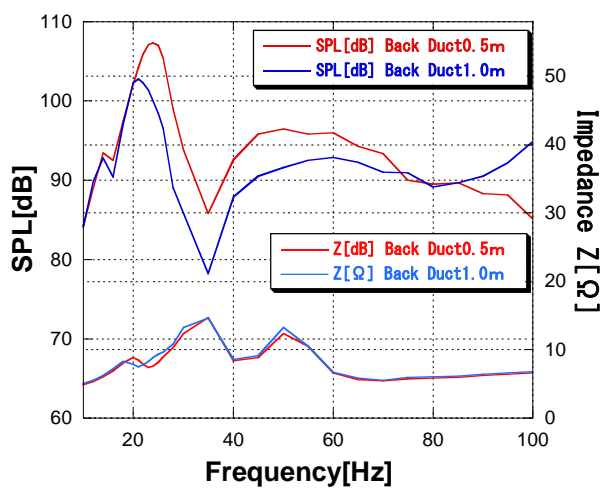


(a) 10 ~ 60 Hz

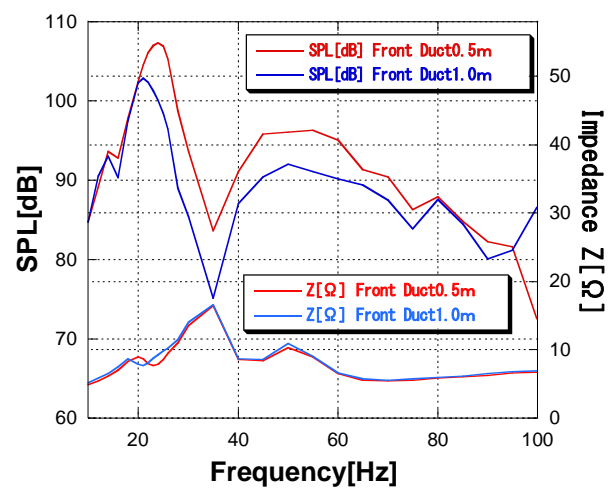


(b) 10 ~ 250 Hz

Fig.2-5 一次音源周波数特性(ホワイトノイズ解析)



(a) 奥



(b) 手前

Fig.2-6 一次音源 音圧-インピーダンス特性(発振器)

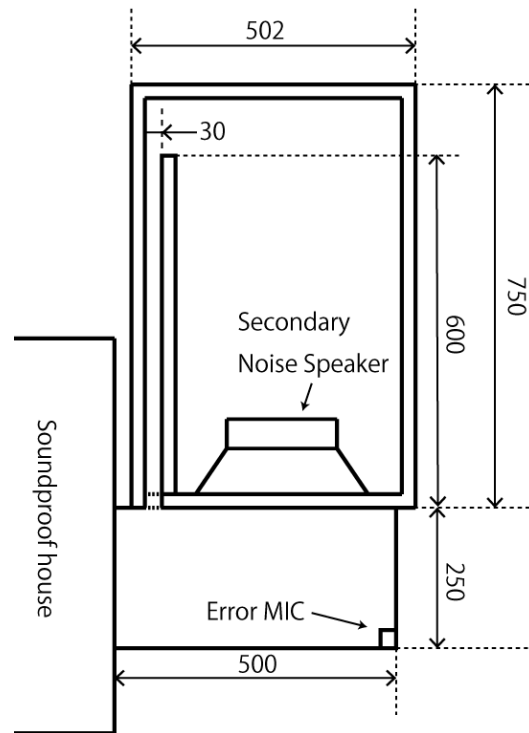
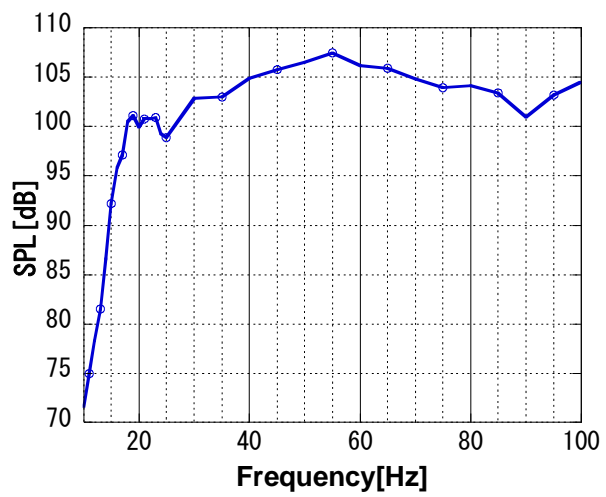
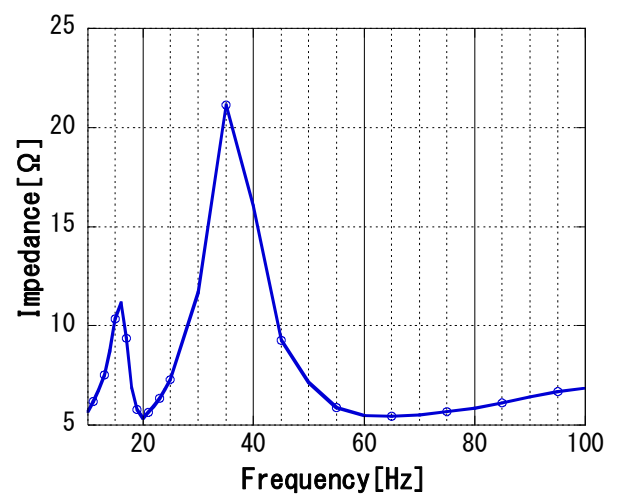


Fig.2-7 二次音源 fd20 の寸法(単位 : mm)



(a) 音圧



(b) インピーダンス

Fig.2-8 二次音源 fd20 音圧-インピーダンス特性

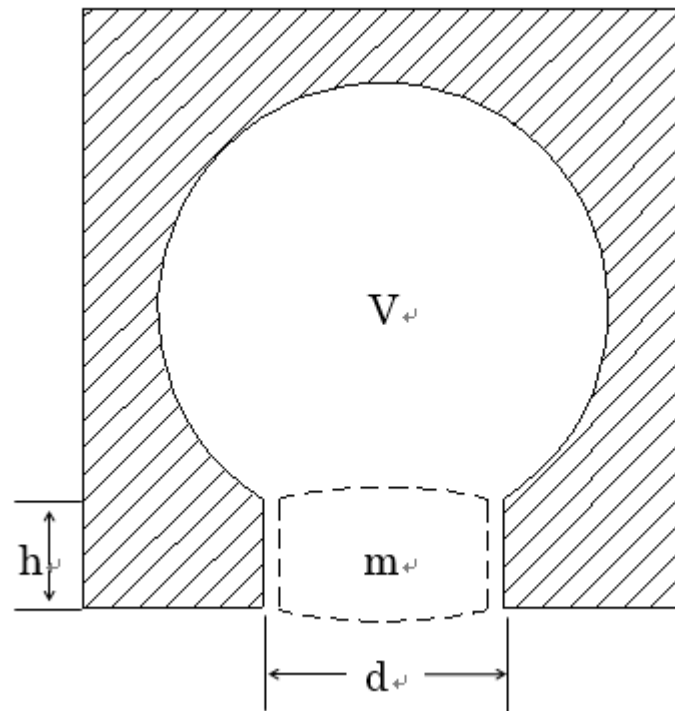


Fig.2-9 ヘルムホルツ共鳴

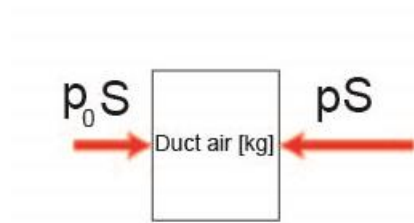
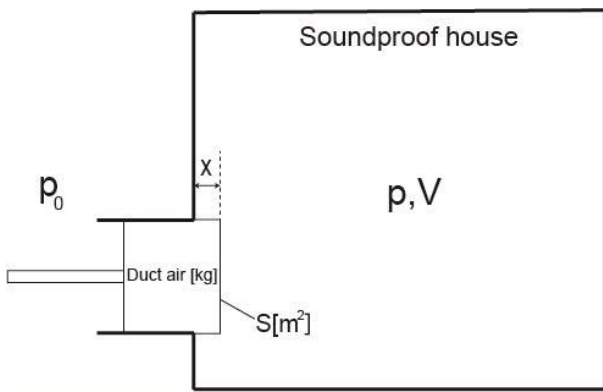


Fig.2-10 ヘルムホルツ共鳴 原理

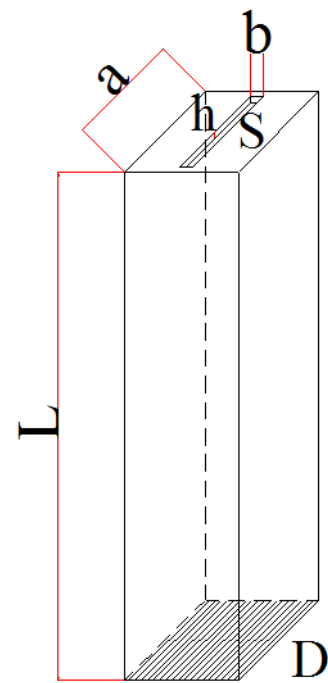


Fig.2-11 有限スリット



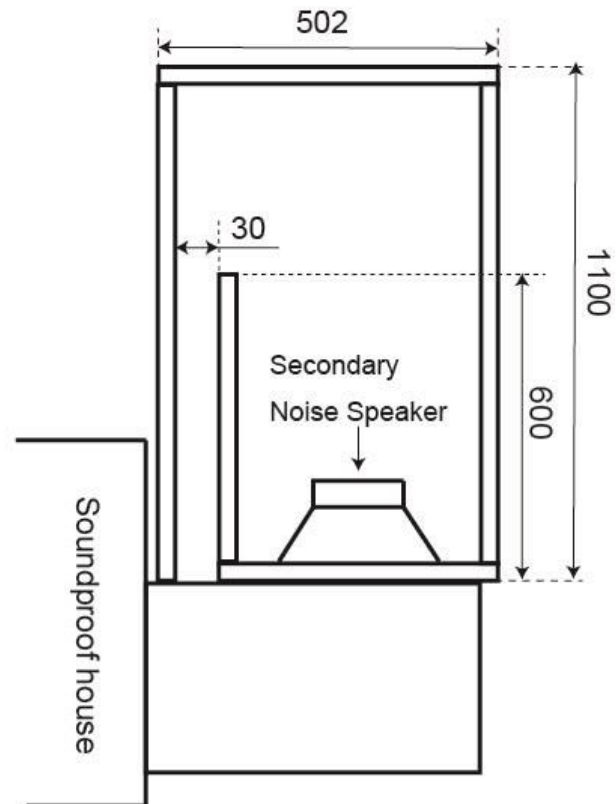
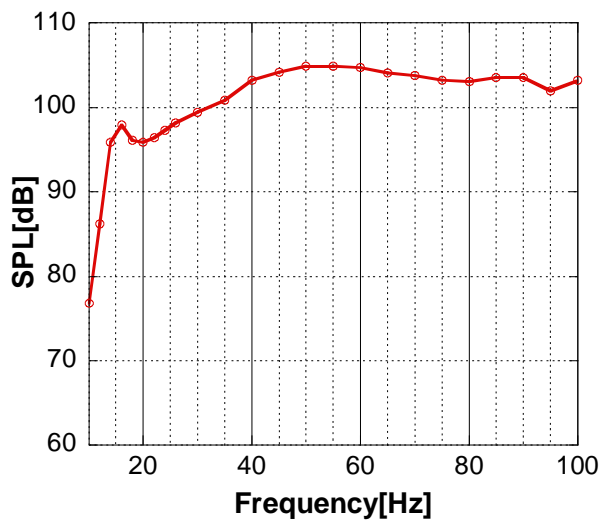
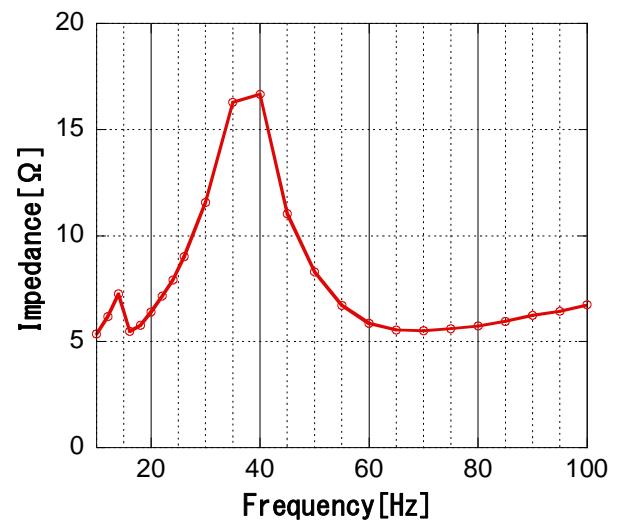


Fig.2-12 二次音源 fd16 の寸法(単位:mm)

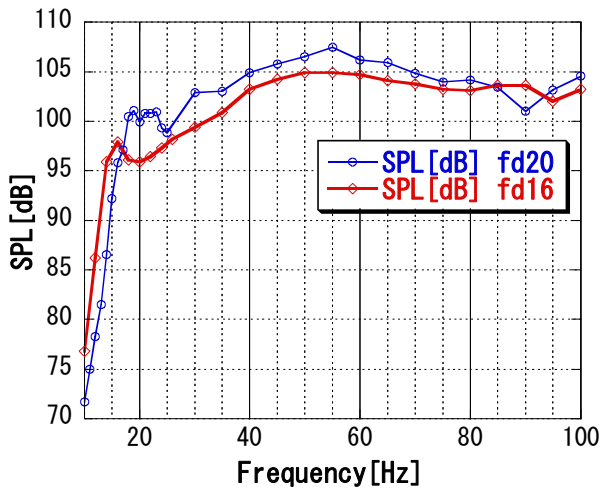


(a) 音圧

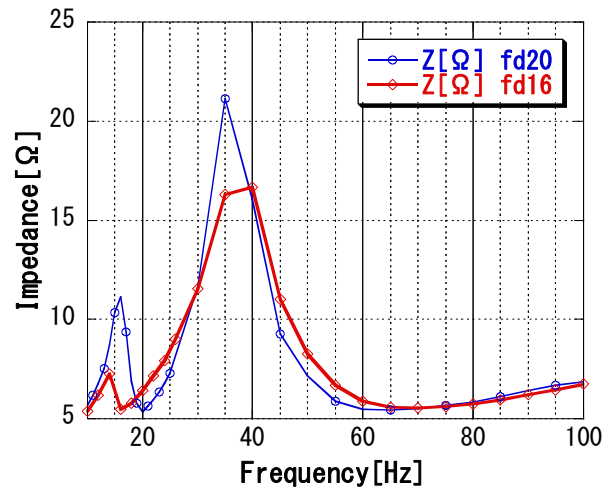


(b) インピーダンス

Fig.2-13 二次音源 fd16 音圧-インピーダンス特性

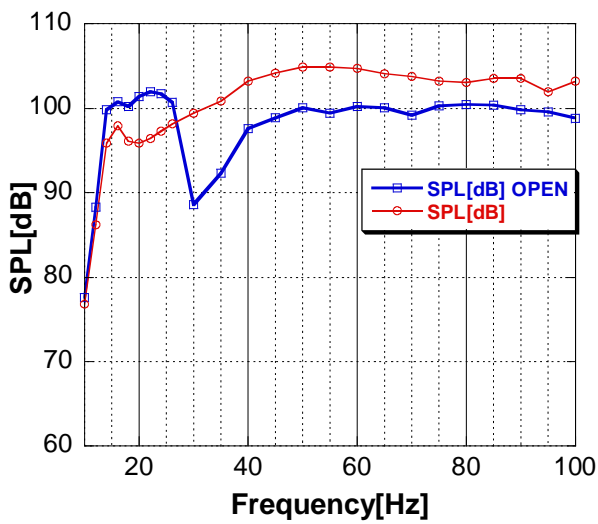


(a) 音圧比較

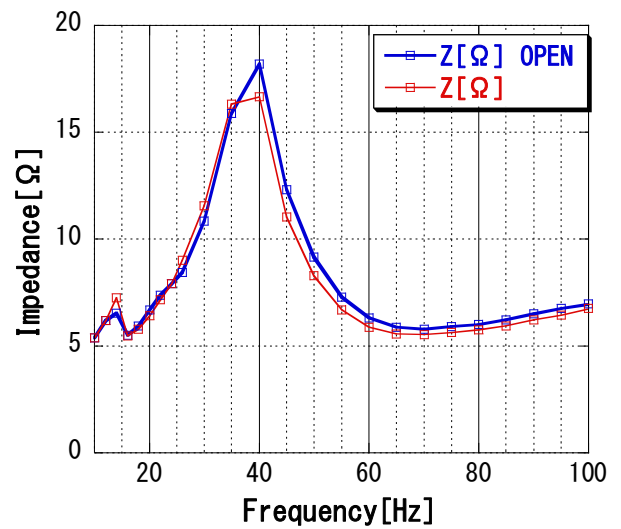


(b) インピーダンス比較

Fig.2-14 二次音源 fd20 と fd16 比較



(a) 音圧比較



(b) インピーダンス比較

Fig.2-15 模型防音ハウス設置時の fd16 の音響特性

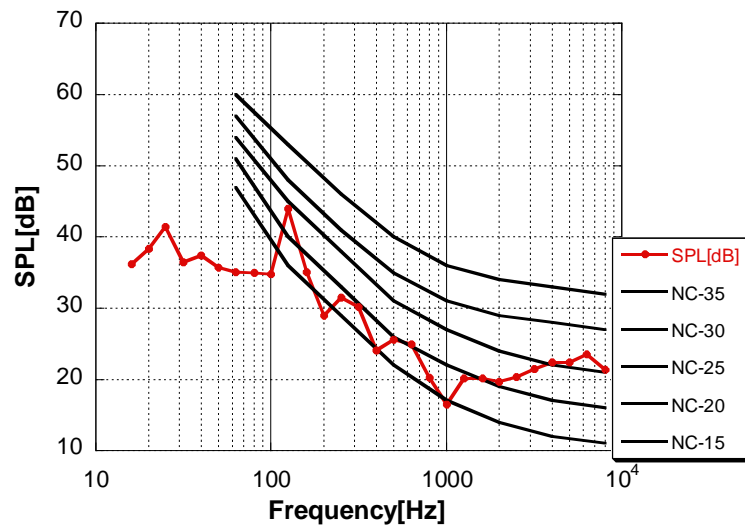


Fig.2-16 (a) 暗騒音レベル 測定点:0m

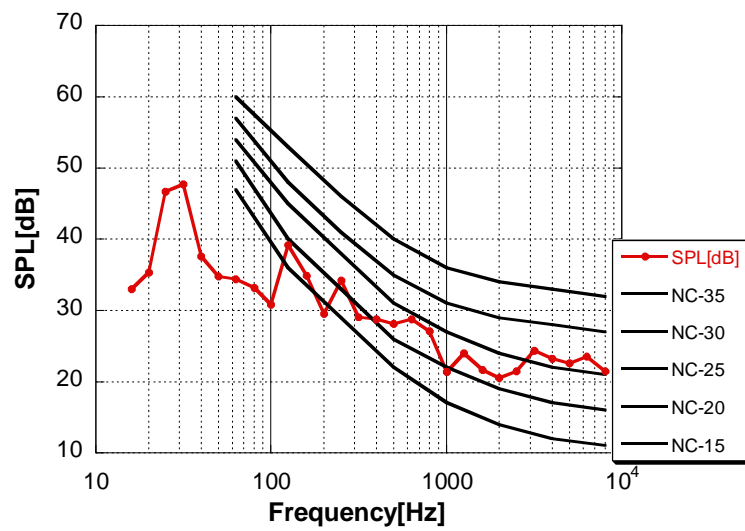


Fig.2-16 (b) 暗騒音レベル 測定点:1m

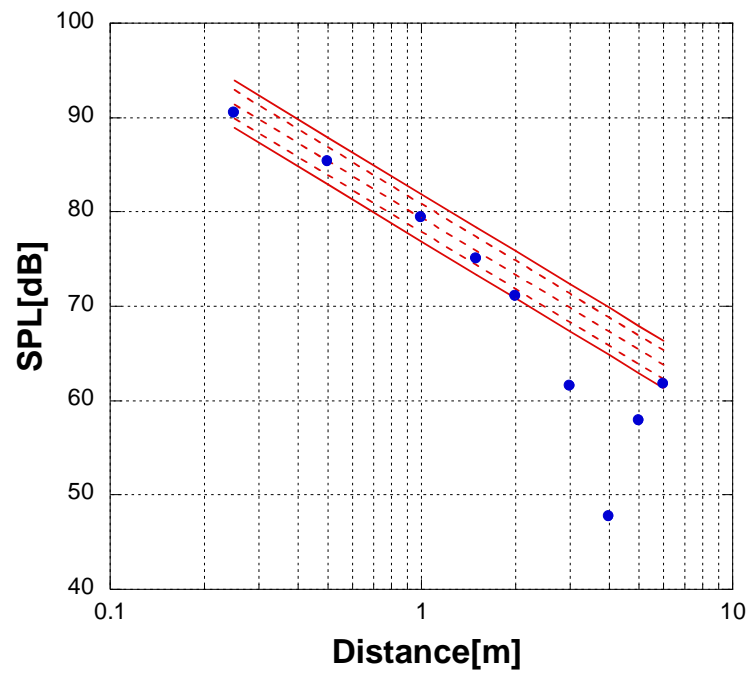


Fig.2-17 (a) 逆自乘特性(16Hz 100dB)

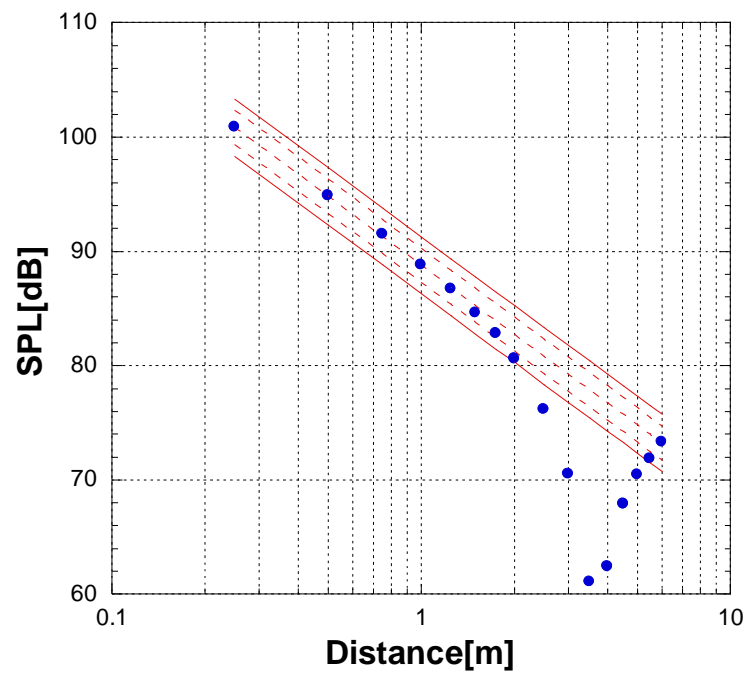
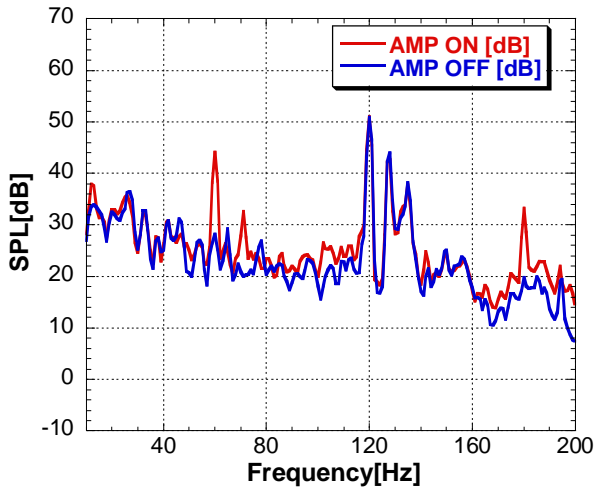
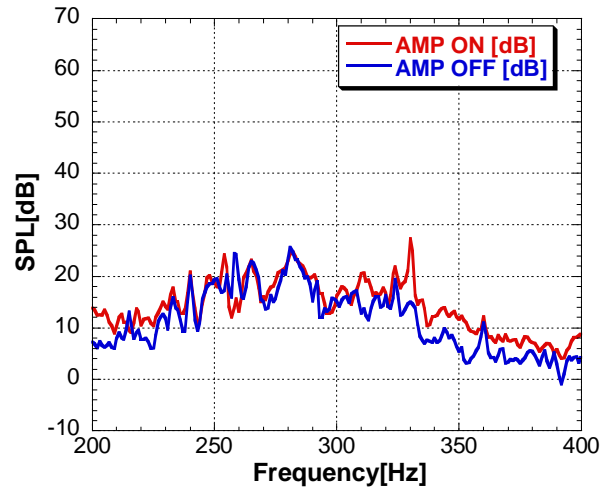


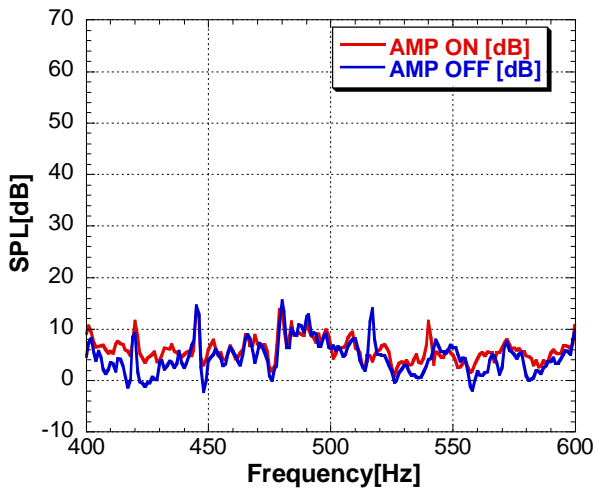
Fig.2-17 (b) 逆自乘特性(16Hz 110dB)



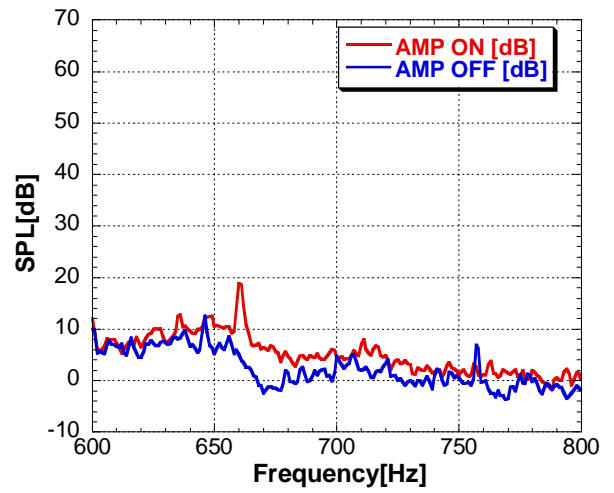
(a) 10-200Hz



(b) 200-400Hz



(c) 400-600Hz



(d) 600-800Hz

Fig.2-18 暗騒音特性の比較 アンプ ON-OFF 比較

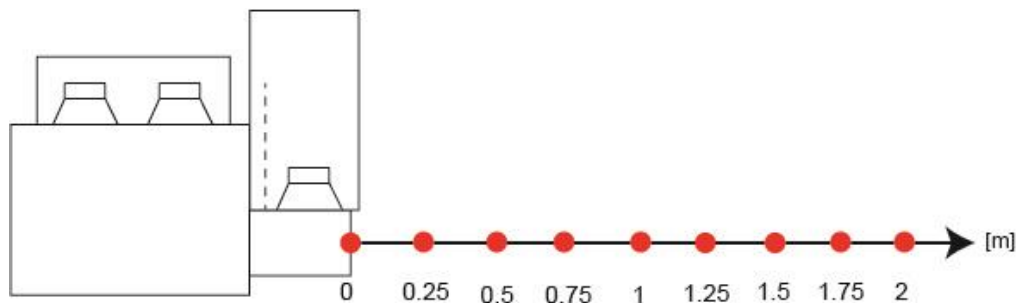


Fig.2-19 測定点

## 第 3 章 実験結果および考察

Table.3-0-1 は実験条件と実験結果の対応表である。Table.3-0-2 には、条件 No.1 から No.5 まで、各条件で実験を行った結果である低減量と低減後音圧を示す。それぞれ、エラーマイクを設置した位置と、ダクト開口端(0m)の位置での測定結果を代表値として示した。

### 3.1 条件 No.1 fd20 を用いた 16Hz-100dB 騒音の低減結果

まず、昨年度<sup>[8]</sup>作成したダクトの共鳴周波数が 20Hz の二次音源 fd20 を用いて、16Hz で約 100dB の騒音低減を行った。結果を Fig.3-1-1 から Fig.3-1-12 に示す。

#### 3.1.1 16Hz 騒音の低減量

二次音源 fd20 を用いて 16Hz-99.3dB の騒音に対し ANC を適用させた結果、ダクト開口端に於いて約 30dB の低減量が得られ、低減後の音圧は約 69dB であった。低減後の音圧はどの測定点においても 70dB 以下であり、騒音被害を起こしうる基準音圧とする 80dB を下回る結果となった。

昨年度<sup>[8]</sup>は fd20 を二次音源に用いて 20Hz-100dB 騒音に対して ANC を適用させた結果、約 43dB の低減量が得られ、低減後の音圧は約 57dB(20Hz 騒音低減時)であった。

二次音源に同じ fd20 を用いた上記の 2 つの結果を比較すると、低減量と低減後音圧に 10dB 以上の差があり、16Hz 騒音に対しては低減効果が減少した。これは二次音源の特性に起因するものであると考えられる。fd20 はダクトの共鳴周波数が 20Hz に設計されている。バスレフ型の性質上、共鳴周波数より低周波側の音は不得意としており急激に出力が低下する。よって二次音源の周波数特性が ANC による低減効果に影響すると言える。

#### 3.1.2 距離減衰

Fig.3-1-10 は 16Hz 騒音の音圧の距離減衰を示したものである。開口端における音圧が約 69dB と最も高く、その後は距離に比例して減少傾向にあった。昨年度<sup>[8]</sup>は fd20 を二次音源に用いて 20Hz-100dB および 110dB 騒音に対し ANC による低減を行った結果、近距離場において、開口端で一旦下がった音圧が近距離場で増音するという現象が起きた。しかし今回の実験結果では見られず、距離減衰が得られた。

## 3.2 条件 No.2 fd16 を用いた 16Hz-100dB 騒音の低減結果

3.1 節では fd20 を用いて 16Hz-100dB 騒音に ANC を適用した結果、低減効果が得られた。しかし、挙動が不安定で現象が収束しない時もあった。また今年度の目標である 16Hz-110dB 騒音への ANC 適用も試みたが、適用直後に fd20 がガタガタと揺れだし、実験が続行不可能となることが多々あった。そのため、20Hz よりもさらに低周波側の 16Hz をダクトの共鳴周波数とする fd16 を新たに製作した。設計思案や音圧-インピーダンス特性は、2.1.9 節の通りである。ここでは今年度新たに設計した fd16 を用いて ANC を適用した結果を Fig.3-2-1～Fig.3-2-12 に示す。まず、3.1 節の fd20 を用いた低減結果と比較するため、周波数と音圧は 3.1 節と同様に 16Hz-100dB で実験を行った。

### 3.2.1 16Hz 騒音の低減量

ダクト開口端(0m)に於いて約 42dB の低減量が得られ、低減後音圧は約 60dB であった。Fig.3-2-51 に二次音源に fd20 を用いた場合と、fd16 を用いた場合の低減効果の比較を示す。3.1 節の fd20 を用いた結果と比較すると、約 12dB 低減量が増加した。fd16 はエンクロージャー体積を増やしダクトの共鳴周波数を 16Hz に設計した。その結果、16Hz の出力が増加し、これが低減量の増加をもたらしたと考えられる。

### 3.2.2 距離減衰

Fig.3-2-10 は 16Hz 騒音の距離減衰を示したものである。エラーマイク位置はダクト開口端である。ダクト開口端(0m)では低減後音圧が約 60dB であったが、それ以外の全ての測定点ではダクト開口端での音圧より高い値が計測され、距離減衰が得られなかった。

本節ではエラーマイクを設置したダクト開口端に於いて最も大きな低減量が得られた。このように ANC のシステムは、エラーマイクを設置した地点で最も大きな低減量が得られるよう作動する。エラーマイクから計測される誤差信号  $e$  が 0 に近づくよう二次音源が制御されるためである。このことから増音の原因は、エラーマイク位置で最も低減量が得られるようシステムが作動している半面、その他の測定点においては騒音と、二次音源から出力される騒音と逆位相の音の位相がずれており、お互いの打消しが上手くいかず低減量が減少したことであると考えた。また、ダクト開口端とそれ以外の地点では、音場特性が異なることから、これがエラーマイクの測定に影響しているのではないかと考えた。

### 3.2.3 エラーマイク位置

エラーマイクをダクト開口端に設置し 16Hz-100dB 騒音に ANC を適用した結果、0m 地点で計測された低減後音圧より、0.25m～2m の測定点で計測された低減後音圧の方が高く計測された。これは 2.2.2 節(2)で示した逆自乗側には従わない結果となった。そこでエラーマイクの位置をダクト開口端(0m)だけでなく、0.25m、0.5m、1m 地点に変更しそれぞれ実験を行った。この目的は、騒音被害を無くすために、工事作業員や近隣住民への影響を考慮し、エラーマイクの適切な位置を検討するためである。

Fig.3-2-49 及び Fig.3-2-50 はそれぞれ、エラーマイクの位置による低減後音圧の比較と、低減量の比較である。Fig.3-2-49 から、エラーマイク位置によって結果が異なる。

ダクト開口端での低減後音圧は、ダクト開口端にエラーマイクを設置した場合は約 60dB であり比較的大きな低減量が得られた。しかし、0.5m 以降は低減後音圧が最大となった。

エラーマイクを 0.25m～1m 地点に設置した場合、低減後音圧はダクト開口端に於いて 80dB を越えているが、一方で 0.25m 以降は 80dB 未満に抑えられている。

これはエラーマイクの位置によって音場特性が異なることが原因であると考えた。エラーマイク位置がダクト開口端に近いほど、自由音場での増音が大きいためである。反対にエラーマイク位置がダクト開口端から離れると自由音場の特性が強くなり、ダクト開口端での低減量が小さくなるが、自由音場では低減量が比較的大きいことから考察した。

実際の現場では、防音ハウスのダクト開口端には土砂を運び出すベルトコンベアーなどの装置があるため、工事作業員が近づくことは少ないと想定される。そのため、工事作業員への騒音被害を考慮すれば、0.25m～1.00m の近距離場での音圧の大小に重きを置くべきと考える。

近隣住民への騒音被害を考慮した場合には、ダクト開口端から最も距離が大きい 2m 地点で評価すべきである。2m 地点では、エラーマイクを 0.25m 以降に設置した場合の方が大きな低減量が得られている。以上のことから、エラーマイクはダクト開口端から少し離れた距離に設置すべきであると考えられる。



### 3.3 条件 No.3 fd16 を用いた 16Hz-110dB 騒音の低減結果

ここでは今年度の目標である 16Hz-110dB 騒音に ANC を適用し低減を行った結果を示す。3.2 節とは音圧の違いによる影響を比較する。また、本節でもエラーマイク位置を変更し、それぞれ実験を行った。Fig.3-3-1～Fig.3-3-50 にその結果を示す。

#### 3.3.1 16Hz 騒音の低減量

Fig.3-3-1 はエラーマイクをダクト開口端(0m)に設置した場合の実験結果である。ダクト開口端では約 39dB の低減量が得られ、16Hz 騒音の低減後音圧は約 72dB であった。昨年度<sup>[8]</sup>は 20Hz-110dB 騒音に ANC を適用した結果、約 41dB の低減量が得られ、低減後音圧は約 69dB であった。fd16 を二次音源に用いて 16Hz-110dB 騒音に ANC を適用させた結果、fd20 を二次音源に用いて 20Hz-110dB 騒音に ANC を適用した結果と同程度の低減量が得られた。また、fd20 では 16Hz-110dB 騒音の低減が不可能もしくは不安定であったが、16Hz の出力を増加させた fd16 では低減が可能となった。

これはヘルムホルツ共鳴を用いて 16Hz の出力を増加させたことが要因であると考えられる。よって、二次音源の騒音周波数における出力を増加させることで、より高い音圧の騒音にも ANC による騒音低減が可能であると言える。

#### 3.3.2 距離減衰

Fig.3-3-10 はエラーマイクをダクト開口端(0m)に設置し、16Hz-110dB 騒音に ANC を適用した場合の距離減衰を示している。端的に言えば 3.2.2 項の fd16 を用いて 16Hz-100dB 騒音を低減した結果と同様の傾向となった。ダクト開口端(0m)に於いて約 39dB の低減量が得られたが、0.25m～1.75m の範囲に於いてはダクト開口端(0m)よりも高い音圧が計測された。また、0.25m～0.75m の範囲に於いて騒音被害を起こしうる基準となる 80dB を越える音圧が計測された。

上記の原因の考察については 3.2.2 項と同様なので省略する。

### 3.3.3 エラーマイク位置

Fig.3-3-49, Fig.3-3-50 はそれぞれ、エラーマイク位置による低減後音圧の比較と低減量の比較を示したものである。エラーマイク位置によってそれぞれ結果が異なるが、これらの原因の考察についてはこれまでと同様のため省略する。

今回はエラーマイクをダクト開口端(0m)に設置した場合と 0.25m 地点に設置した場合は、似たような特性が見られた。エラーマイク位置で両者とも 70dB 付近まで音圧が下がっているが、エラーマイク位置以降は増音する傾向にあった。

一方、エラーマイクを 0.5m 地点と 1m 地点に設置した場合は、音圧は距離に比例して減少傾向にあり、距離減衰が得られた。

前に述べたように、実際の現場では防音ハウスの開口端には装置があり、工事作業員がダクト開口端に近づくことは少ないと想定される。よって工事作業員への騒音被害を考慮した場合、0.25m～1m 付近の音圧の大きさを評価すべきと考えられる。Fig.3-3-49 および Fig.3-3-50 からは、エラーマイクの位置は 0.25m 地点が最適だと言えよう。エラーマイクをダクト開口端(0m)に設置した場合、ダクト開口端において約 39dB の比較的大きな低減量が得られたが、0.25m～0.75m 地点において 80dB を超える音圧が計測された。

エラーマイクを 0.5m および 1m 地点に設置した場合、0m および 0.25m 地点では 80dB を超えているが、0.5m 以降は低減後音圧が 80dB を下回っている。特に 0m ではそれぞれ、約 96dB、約 98dB の比較的高い音圧が計測されており、この低減後音圧は許容できないと考えた。

最適であると述べたエラーマイクを 0.25m 地点に設置した場合は、0m 地点に於いて約 90dB の比較的高い低減後音圧が計測された。しかし、エラーマイク位置である 0.25m 地点では約 71dB まで急激に音圧が下がっている。0.5m 地点以降に増音は見られるものの、0m 以外の全ての測定点において基準音圧の 80dB を下回る音圧が計測された。よって本項ではエラーマイクの設置位置は 0.25m 地点が最適であると考えた。

### 3.4 条件 No.4 fd16 を用いた 16Hz-93dB 騒音の低減結果(ダクト底部無し)

条件 No.1～No.3 までは低減量の増加を期待し、Fig.2-2 のダクト底部を取り付けて実験を行っていた。しかし、実際の防音ハウスにダクト底部はないため、本節では実用化に向けてダクト底部を取り外して実験を行いその特性を見た。

まず、条件 No.2 と比較するため、音の強さ [ $W/m^2$ ] を同等にして実験を行なった。ダクト底部を取り付けた状態で 0m 地点に於いて約 100dB が計測されるよう入力電圧を設定した。その後ダクト底部を取り外し、ダクト開口端(0m)において計測された音圧は約 93dB であった。

本節でもエラーマイクの位置を変更して実験を行った。結果をそれぞれ Fig.3-4-1～Fig.3-4-50 に示す。

#### 3.4.1 16Hz 騒音の低減量

エラーマイクをダクト開口端(0m)に設置し、16Hz-約 93dB 騒音に ANC を適用させた。0m 地点に於いて約 31dB の低減量が得られ、低減後音圧は約 62dB であった。

条件 No.2 のダクト底部を取り付けて ANC を適用した結果と比較する。低減量は約 11dB 減少した。しかし、低減後音圧は同等であり、ダクト底部を取り付けることで低減効果が向上したとは言えない。

#### 3.4.2 距離減衰

Fig.3-4-10 は 16Hz 騒音の距離減衰を示している。エラーマイクをダクト開口端(0m)に設置して低減を行った結果、0m 地点で一旦下がった音圧が 0.25m～1.5m 地点の範囲で増音するという現象が見られた。この原因についての考察はこれまでと同様なので省略する。

Fig.3-4-51 はダクト底部の有無による、距離減衰の比較を示している。両者ともエラーマイクはダクト開口端(0m)に設置し実験を行った結果である。両者ともダクト開口端(0m)で一旦下がった音圧が 0.25m 地点以降に増音するという現象が起きた。

両者の異なる点は 0.25m 地点以降の増音の大きさである。ダクト底部有りの場合には 0.25m 地点以降の増音によって 70dB を超える音圧が計測された。一方で、ダクト底部無しの場合には、全ての測定点において 70dB を下回った。以上の結果から、ダクト底部を取り外した、実際の防音ハウスに近い条件で ANC を適用し騒音低減を行った方が距離減

衰を得られやすいと言える。この原因は、ダクトの底部を取り付けると騒音の伝達方向が限定され、ダクト底部無しの場合と比較して、遠距離場まで騒音が伝わりやすいことであると考えた。

本節ではダクト底部を取り付けた状態で、ダクト開口端において **16Hz-100dB** 騒音が計測されるよう一次音源の出力を調節した。その後ダクト底部を取り外すと、ダクト開口端に於いて **16Hz-約 93dB** まで音圧が下がった。言い換えれば、ダクト底部無しの場合には約 **93dB** であった音圧が、ダクト有りの場合には約 **100dB** まで上昇してしまう。これは実際の防音ハウスでも同様のことが言えるだろう。低減量の増加を期待しダクト底部を取り付けて実験を行っていたが、ダクト底部の有無に関わらず低減後音圧は **60dB** 程度であった。よって、ダクト底部を取り付けた場合でも低減効果の向上は期待できず、反対に開口端における騒音の音圧を上昇させてしまい、かつ距離減衰を得られにくくなってしまった。そのため、実際の防音ハウスと同様にダクト底部無しの状態で **ANC** を適用した方が好ましいと言えるだろう。

### 3.4.3 エラーマイク位置

**Fig.3-4-49** および **Fig.3-4-50** はそれぞれ、エラーマイク位置による低減後音圧の比較と、低減量の比較を示したものである。これまでと同様に、エラーマイク位置以降で増音するという結果が見られた。この原因の考察についてはこれまでと同様なので省略する。

エラーマイク位置はこれまでと同様に **0.25m** 地点が最適であると考えた。ダクト開口端 (**0m**) に於いては、エラーマイクをダクト開口端に設置した場合が最も低減後音圧が低く約 **62dB** である。しかし **0.25m** 地点では、エラーマイクを **0.25m** 地点に設置した場合に約 **62dB** で、低減後音圧が最も低い。エラーマイクを **0.25m** 地点に設置した場合、**0.25m** 以降で増音は見られるが低減後音圧は **65dB** 以下であり、基準とする **80dB** を大きく下回った。そのため **0.25m** が最適であると考えた。

### 3.5 条件 No.5 fd16 を用いた 16Hz-100dB 騒音の低減結果(ダクト底部無し)

3.4 節ではダクト開口端(0m)に於いてダクト底部を取り付けた状態で 16Hz 騒音が約 100dB で計測されるよう一次音源の入力電圧を調節した。

本節ではダクト底部を取り外した状態で 16Hz 騒音が約 100dB で計測されるよう一次音源の入力電圧を調節し実験を行った。その後ダクトを取り付けると、16Hz 騒音は音圧が増加し約 108dB が計測された。再びダクト底部を取り外し、この条件で実験を行なった。

#### 3.5.1 16Hz 騒音の低減量

Fig.3-5-1 に上記の条件で実験を行った結果を示す。エラーマイク位置はダクト開口端であり、測定点もダクト開口端である。ダクト開口端に於いて約 31dB の低減量が得られ、低減後音圧は約 70dB であった。

条件 No.4(Fig.3-4-1)と比較をする。両者の違いは、16Hz 騒音の音の強さである。エラーマイク位置は共にダクト開口端(0m)に設置した結果である。低減量は 30dB 程度で同等であった。しかし、低減後音圧は約 8dB の差があり、本節の条件で実験を行った方が、騒音の強さに比例し低減後音圧は高く計測された。このことから、ANC による騒音の低減後音圧は、騒音の強さに比例すると言える。

実際の防音ハウスでは、振動ふるい機から騒音が発生している。仮に振動ふるい機の動力を制御することで騒音の音圧を下げる事が可能なら、騒音自体のエネルギーを下げる事ができ、騒音被害の低減に効果があると言えるだろう。

#### 3.5.2 距離減衰

Fig.3-5-10 はエラーマイクをダクト開口端(0m)に設置し ANC を適用した際の距離減衰を示している。端的に言えば、これまでと同様の結果となった。エラーマイク位置であるダクト開口端(0m)に於いて約 70dB まで音圧が下がったが、0.25m~1.25m ではエラーマイク位置であるダクト開口端(0m)よりも高い音圧が計測された。しかし、全ての測定点に於いて 80dB は下回った。この原因の考察についてはこれまでと同様のため省略する。

### 3.5.3 エラーマイク位置

Fig.3-5-49 と Fig.3-5-50 はそれぞれ、エラーマイク位置による低減後音圧と、低減量の比較を示している。エラーマイク位置によってそれぞれ結果が異なるが、これらの考察はこれまでと同様のため省略する。

エラーマイクをダクト開口端(0m)に設置した場合、約 **31dB** の大きな比較的大きな低減量が得られた。しかし、**0.5m** 以降は比較的高い音圧が計測されている。

エラーマイクを **0.25m** 地点に設置した場合は、ダクト開口端にエラーマイクを設置した場合と比較すると、ダクト開口端に於ける低減量は約 **8dB** ほど低下した。低減後音圧は約 **78dB** で、ダクト開口端(0m)にエラーマイクを設置した場合と比べて約 **8dB** 増加した。ANC のシステム上、エラーマイク位置で最も低減量が得られる。**0.25m** 地点にエラーマイクを設置した場合、エラーマイク位置の **0.25m** 地点で約 **30dB** の低減量が得られた。そのため、ダクト開口端(0m)での音圧差は約 **8dB** あるが、両者はエラーマイク位置で同等の低減量が得られると言えるだろう。

エラーマイクを **0.5m** および **1m** 地点に設置した場合、ダクト開口端(0m)において騒音の基準とする **80dB** を超える低減後音圧が計測された。しかし、**0.25m** 以降は **70dB** を下回る低減後音圧が得られた。

以上の結果から、本項でもエラーマイクの位置は **0.25m** 地点が最適であると考えた。以下に判断理由を示す。エラーマイクをダクト開口端(0m)に設置した場合、ダクト開口端に於いて約 **31dB** の比較的大きな低減量が得られるが、それ以降の **0.25m**、**0.5m**、**0.75m** 地点では約 **75dB** の低減後音圧が計測されている。騒音基準とする **80dB** を下回ってはいるが、エラーマイクを **0.25m** 地点以降に設置した場合と比較して低減後音圧は高く、好ましい結果だとは言えない。エラーマイクを **0.25m** 地点に設置した場合の、ダクト開口端(0m)に於ける低減後音圧は約 **78dB** であるが、騒音基準の **80dB** を下回っており、実際の防音ハウスのダクト開口端に人間が近づくことは少ないと想定されるため、許容できると考えた。

### 3.6 増音周波数

前節までは触れなかったが、16Hz騒音にANCを適用して低減を行った結果、ANC ON時に増音する音が見られた。この音の周波数は22～25Hz付近にあった。例えば、Fig.3-2-1やFig.3-3-1のように、それぞれ23Hz、22Hzにおいて低減量が-20dB以上の負の値を示し、これはANC適用時に増音していることを意味する。ANCを適用した際にだけ増音する音が見られることから、この音は二次音源から出力されるものであると考えられる。

本論文で示しているFFTアナライザーから得たデータは、全て時間平均をしたものである。目視でFFTアナライザーの画面を確認すると、増音する周波数は時間変動が大きかった。そのため、暗騒音レベル(約40dB)まで音圧が下がることも、約70dBの大きな音圧が計測されることもあった。よって記載した増音する周波数のデータについては、偏差が大きく計測したタイミングによって音圧が最大30dB程度上下し得る。つまり定常的にデータで示した音圧が計測されているわけではないことに注意されたい。以下に増音する音が発生する原因の考察を述べる。

#### 3.6.1 模型防音ハウスの共鳴周波数との因果関係

Table.3-6-1はダクト開口端(0m)に於いて計測された増音する音の周波数を、条件毎に纏めたものである。増音した音の周波数は最も音圧が高く計測される傾向にあった音の周波数を代表値として示した。その右側には、その条件における模型防音ハウスの共鳴周波数の実測値(2.1.7節(1)ホワイトノイズ解析を引用)を示した。

増音する音の周波数は22～25Hz付近にあった。実験では防音ハウスを縮小した模型を使用している。模型防音ハウスの共鳴周波数は、ダクト底部有りの場合が25Hz、ダクト底部を取り外した場合が27Hz付近にあることが確認されている。増音する音の周波数と、模型防音ハウスの共鳴周波数が近い値であることから、両者には因果関係があると考えた。

また、Table.3-6-1に示したように、ダクト底部を取り外すと、模型防音ハウスの共鳴周波数は高周波側に移動する。条件No.4及びNo.5のようにダクト底部を取り外して実験を行った結果、増音する音の周波数も高周波側に移動する傾向にあった。このことから、増音する音と模型防音ハウスの共鳴周波数には因果関係があると考えた。

### 3.6.2 考察

3.6.1 節を踏まえ、以下のように考察した。

実験では騒音源として一次音源から 16Hz の純音を出力している。そのため、二次音源から出力される低減音は、騒音とは逆位相の 16Hz の純音に近いと考えられる。しかし騒音の音圧が高いほど、二次音源から出力される低減音の音圧も大きくなるため歪みが生じやすい。模型防音ハウスの共鳴周波数を  $f_r[\text{Hz}]$  とすると、二次音源の歪みによって出力された  $f_r[\text{Hz}]$  付近の音は、共鳴によって増幅される。これをリファレンスマイク又はエラーマイクが感知し、次のステップで二次音源から  $f_r$  付近の音の低減音が出力される。しかし、二次音源は定常的に 16Hz 騒音の低減音を高音圧で出力しているため、 $f_r[\text{Hz}]$  付近における低減効率は悪いと考えられる。そのため、二次音源から出力された  $f_r[\text{Hz}]$  付近の増幅された音または低減音が計測され、これが増音の原因だと考えた。この考察が正しいとすれば、騒音の音圧が大きいほど二次音源の出力は大きくなる。そのため、二次音源の歪みが大きく、大きな増音が見られると考えられる。Fig.3-2-1 と Fig.3-3-1 はそれぞれ 16Hz-100dB 騒音、16Hz-110dB 騒音の低減結果であるが、予想通り騒音の音圧が大きい Fig.3-3-1 の方が大きな増音が見られた。

### 3.6.3 実際の防音ハウスにおける共鳴周波数

実験で使用している模型防音ハウスの寸法は、一辺が約 1m 程度である。対して実際の防音ハウスの寸法は約 10 倍で、一辺が十数メートルである。つまり体積比は約 1000 倍となる。ヘルムホルツ共鳴の共鳴周波数は、第 2 章の式(2)から分かるように体積やダクト長さ、ダクトの断面積に依存する。体積は約 1000 倍となりダクト長さも長くなることから、実際の防音ハウスの共鳴周波数は大きく低周波側に移動し、数ヘルツまで下がる。本実験で使用しているような低周波用スピーカーであっても、数ヘルツの音を出すのは想定して設計されていない。よって数ヘルツの音を出力するにはスピーカーの能率が悪く、低出力となる。そのため実際の防音ハウスではこの増音は緩和されると考えられる。



Table.3-0-1 対応表

図表番号	条件	二次音源	エラーマイク位置	ダクト底部
Fig. 3-1-1 ~ 3-1-12	No.1	fd 20	開口端	○
Fig. 3-2-1 ~ 3-2-12	No.2	fd 16	開口端	○
Fig. 3-2-13 ~ 3-2-24		"	0.25m	○
Fig. 3-2-25 ~ 3-2-36		"	0.50m	○
Fig. 3-2-37 ~ 3-2-48		"	1.00m	○
Fig. 3-3-1 ~ 3-3-12	No.3	"	開口端	○
Fig. 3-3-13 ~ 3-3-24		"	0.25m	○
Fig. 3-3-25 ~ 3-3-36		"	0.50m	○
Fig. 3-3-37 ~ 3-3-48		"	1.00m	○
Fig. 3-4-1 ~ 3-4-12	No.4	"	開口端	×
Fig. 3-4-13 ~ 3-4-24		"	0.25m	×
Fig. 3-4-25 ~ 3-4-36		"	0.50m	×
Fig. 3-4-37 ~ 3-4-48		"	1.00m	×
Fig. 3-5-1 ~ 3-5-12	No.5	"	開口端	×
Fig. 3-5-13 ~ 3-5-24		"	0.25m	×
Fig. 3-5-25 ~ 3-5-36		"	0.50m	×
Fig. 3-5-37 ~ 3-5-48		"	1.00m	×

※測定点はグラフ中の凡例を参照.

条件	二次音源	エラーマイク位置	ダクト底部	音の強さ <sup>※2</sup> [W/m <sup>2</sup> ]	騒音 <sup>※3</sup>		於 開口端		於 エラーマイク位置	
					周波数[Hz]	音圧[dB]	低減量[dB]	低減後音圧[dB]	低減量[dB]	低減後音圧[dB]
No.1	fd 20	開口端	○	0.01	16	99	30	69	30	69
No.2	fd 16	開口端	○	0.01	〃	102	42	60	42	60
	〃	0.25m	○	〃	〃	100	17	84	26	64
	〃	0.5m	○	〃	〃	100	13	87	25	60
	〃	1m	○	〃	〃	100	10	90	17	60
No.3	〃	開口端	○	0.1	〃	111	39	72	39	72
	〃	0.25m	○	〃	〃	110	21	90	30	71
	〃	0.5m	○	〃	〃	110	14	96	22	74
	〃	1m	○	〃	〃	110	13	98	21	68
No.4	〃	開口端	×	0.01	〃	93	31	61	31	61
	〃	0.25m	×	〃	〃	93	22	71	24	62
	〃	0.5m	×	〃	〃	93	16	77	23	59
	〃	1m	×	〃	〃	93	13	79	17	59
No.5	〃	開口端	×	0.06	〃	100	31	70	31	70
	〃	0.25m	×	〃	〃	100	23	78	29	65
	〃	0.5m	×	〃	〃	100	17	83	24	65
	〃	1m	×	〃	〃	100	14	86	21	63

※2 模型防音ハウスのダクト底部を取り付けた際の、ダクト開口端に於いて計測される 16Hz 騒音の音圧レベルから算出。

※3 模型防音ハウスのダクト開口端に於いて計測される 16Hz 騒音の音圧レベルを表記している。

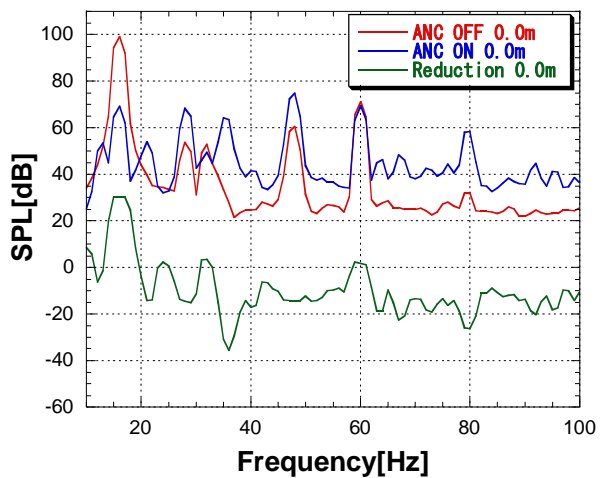


Fig.3-1-1

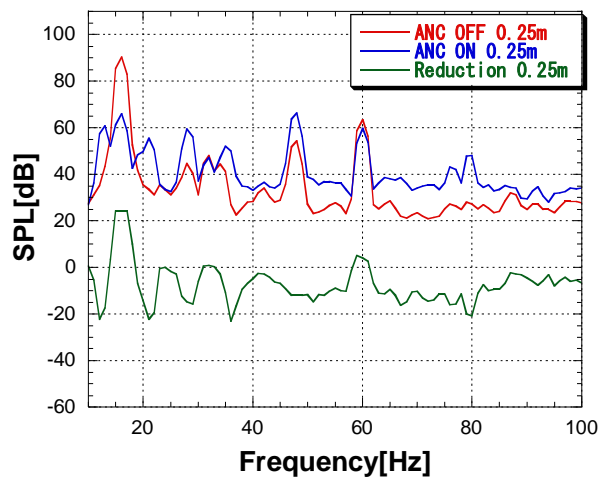


Fig.3-1-2

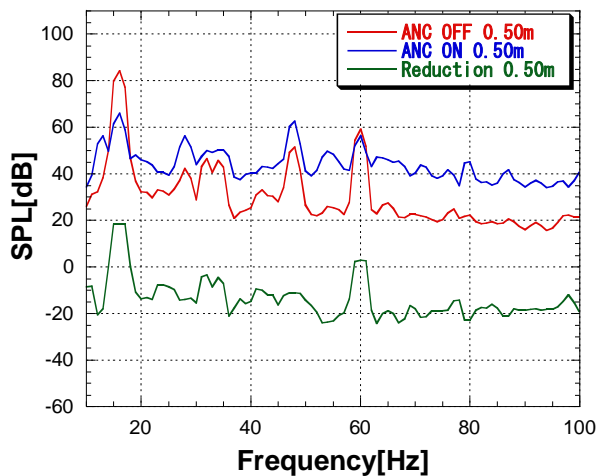


Fig.3-1-3

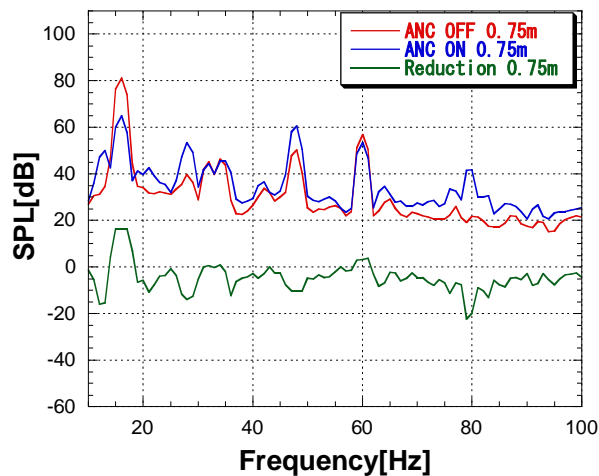


Fig.3-1-4

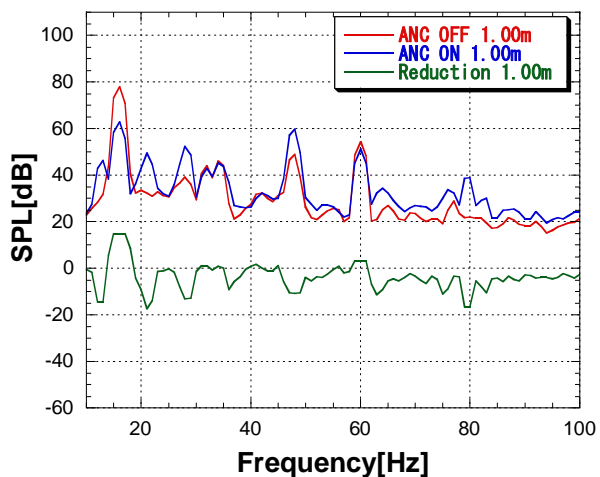


Fig.3-1-5

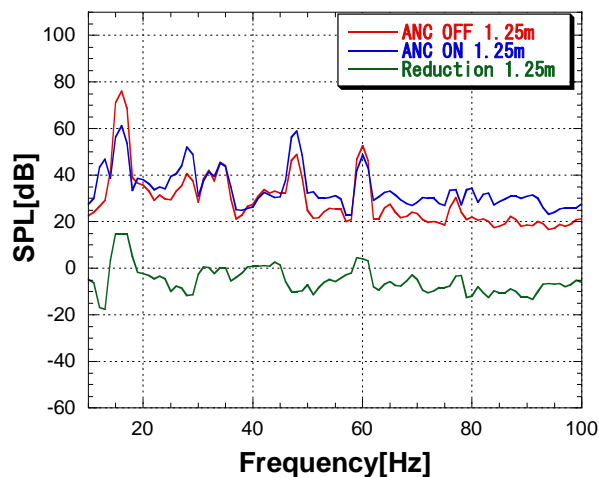


Fig.3-1-6

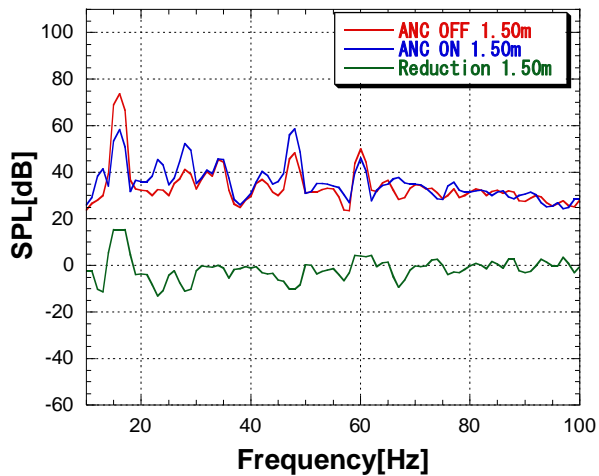


Fig.3-1-7

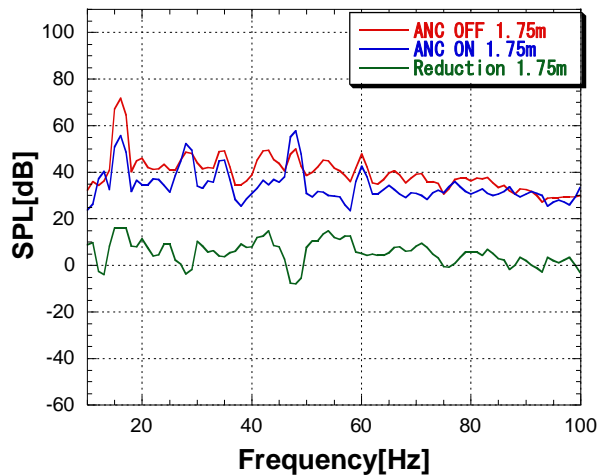


Fig.3-1-8

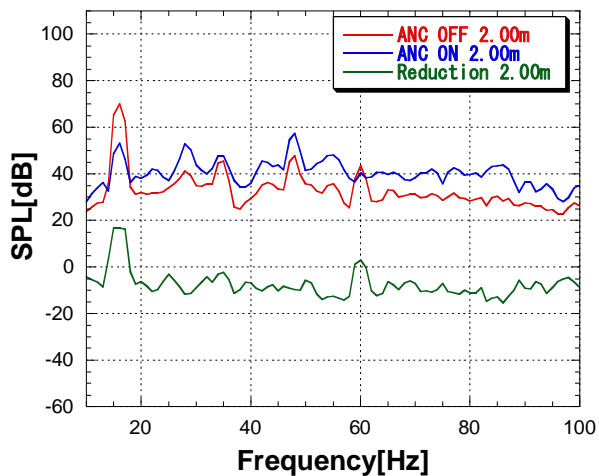


Fig.3-1-9

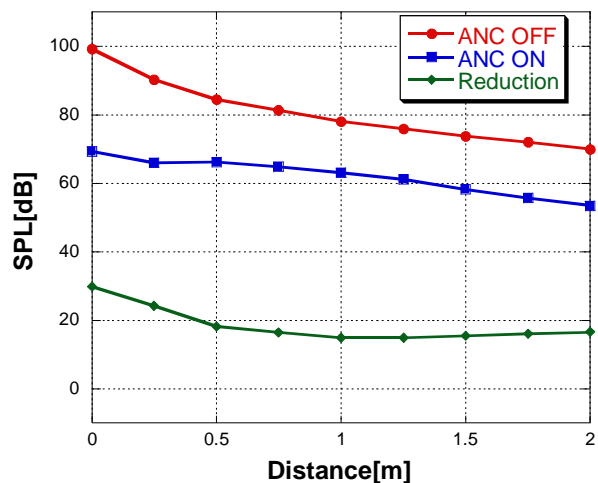


Fig.3-1-10 距離減衰

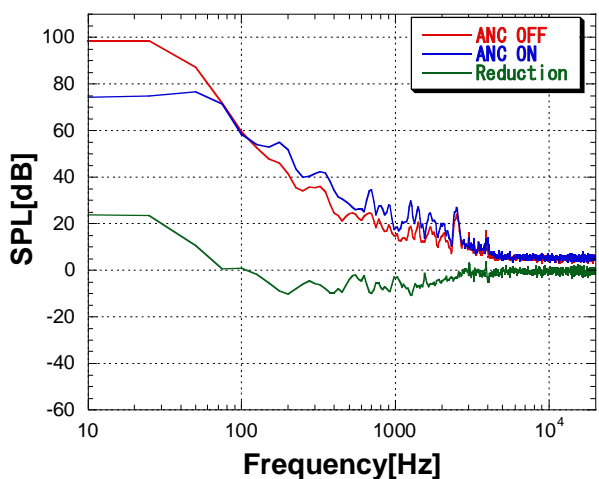


Fig.3-1-11 測定点 0m

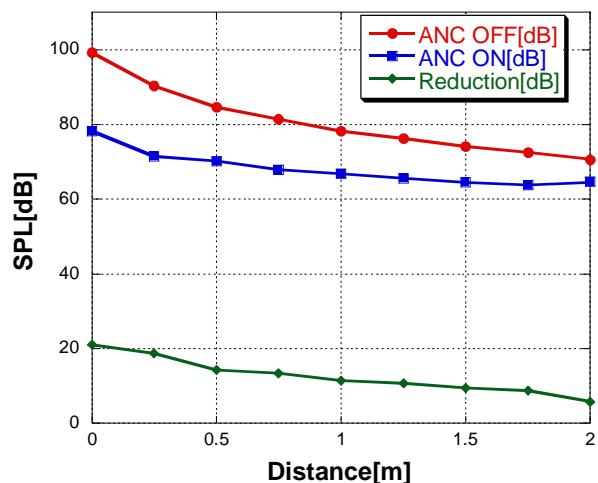


Fig.3-1-12 OA 値の距離減衰

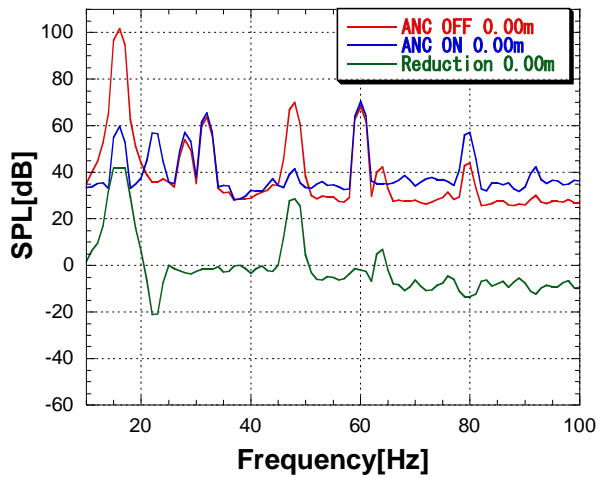


Fig.3-2-1

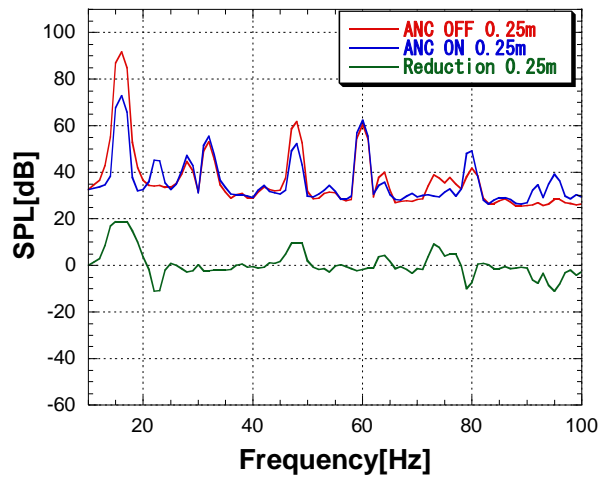


Fig.3-2-2

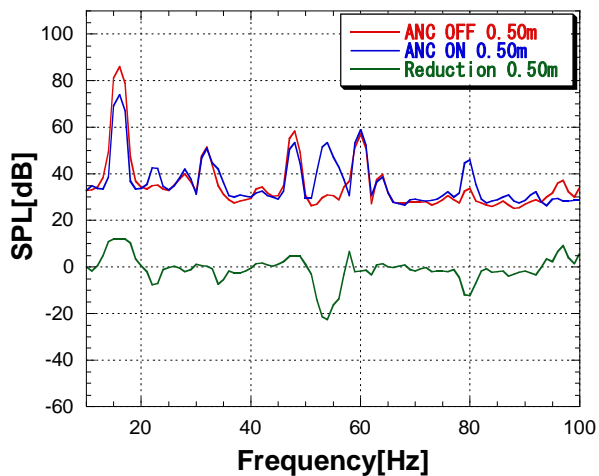


Fig.3-2-3

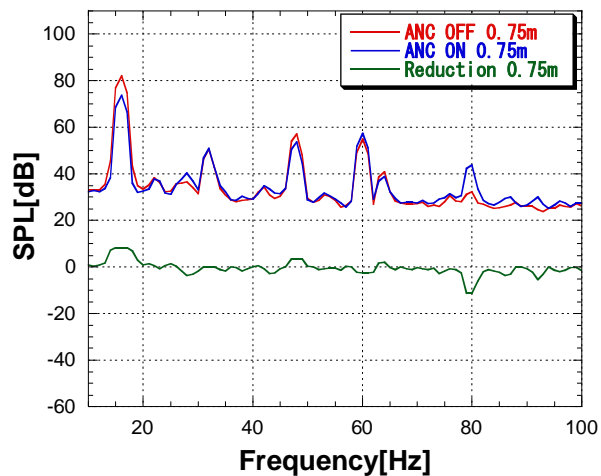


Fig.3-2-4

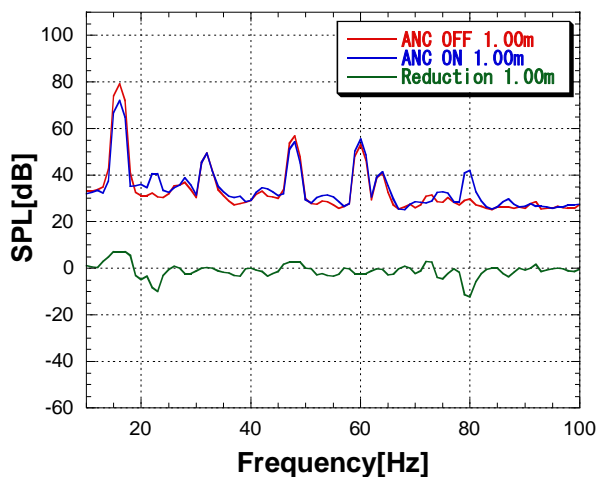


Fig.3-2-5

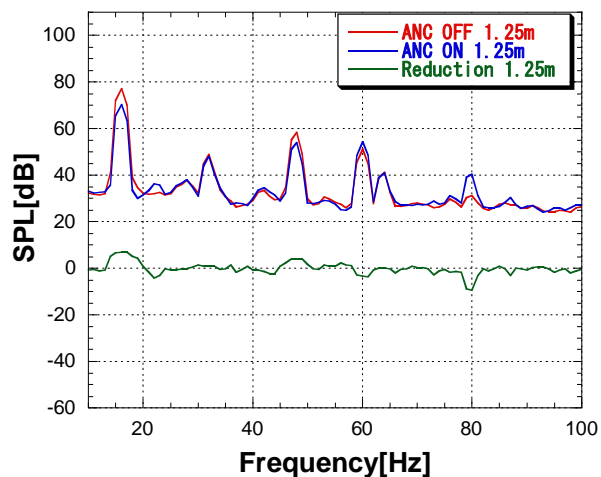


Fig.3-2-6

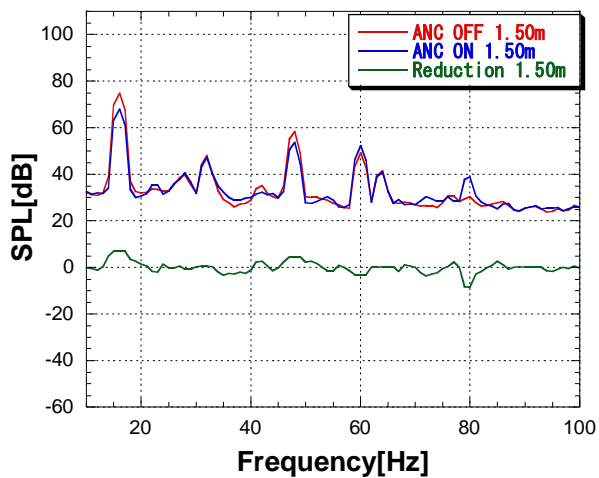


Fig.3-2-7

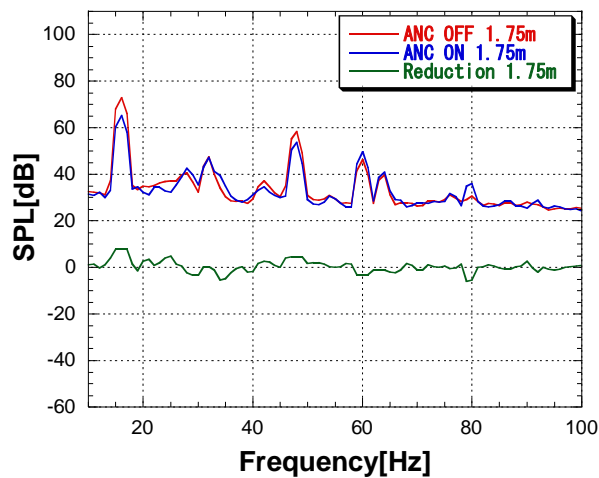


Fig.3-2-8

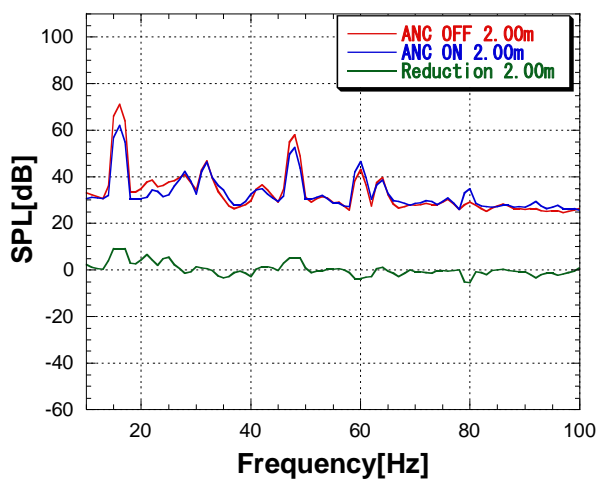


Fig.3-2-9

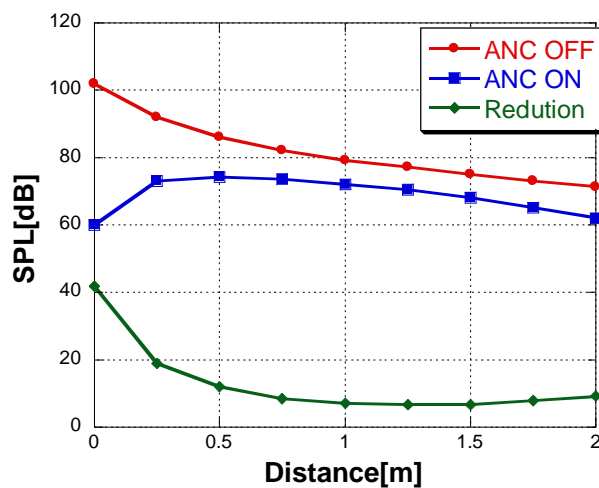


Fig.3-2-10 距離減衰

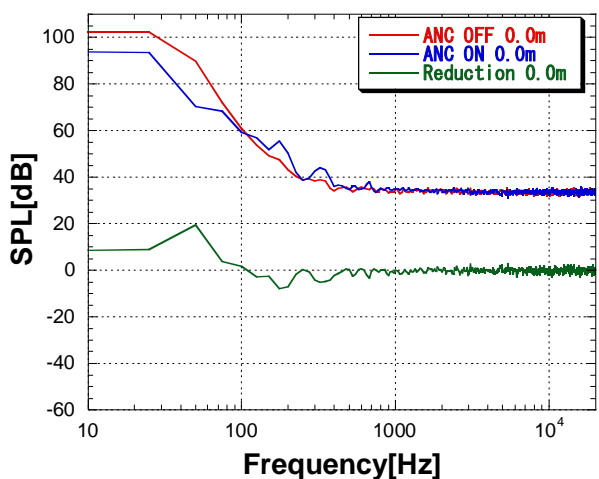


Fig.3-2-11

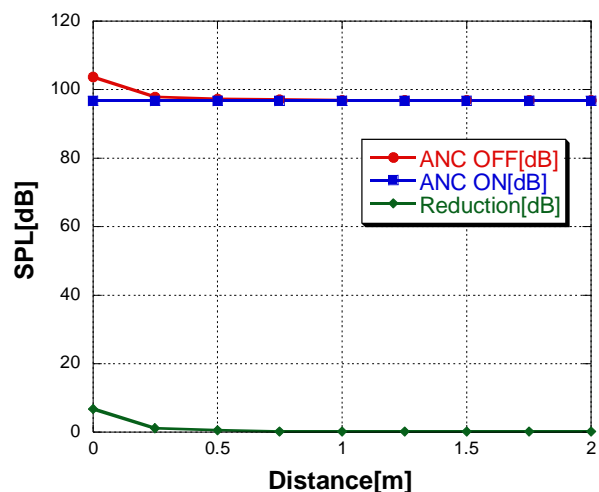


Fig.3-2-12 OA 値の距離減衰

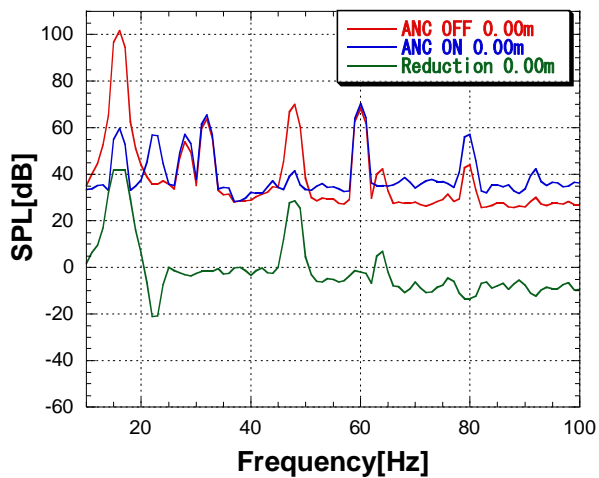


Fig.3-2-1

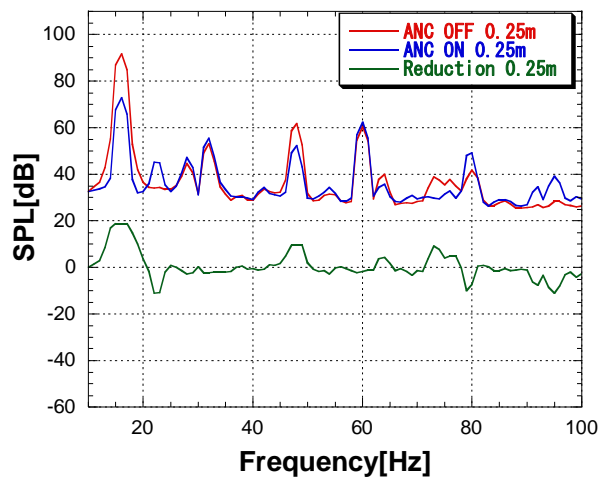


Fig.3-2-2

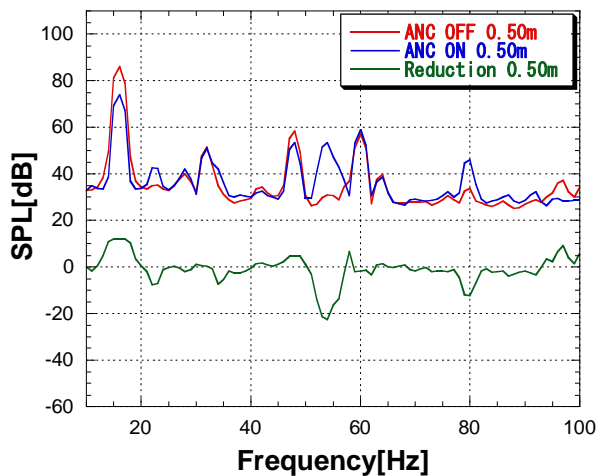


Fig.3-2-3

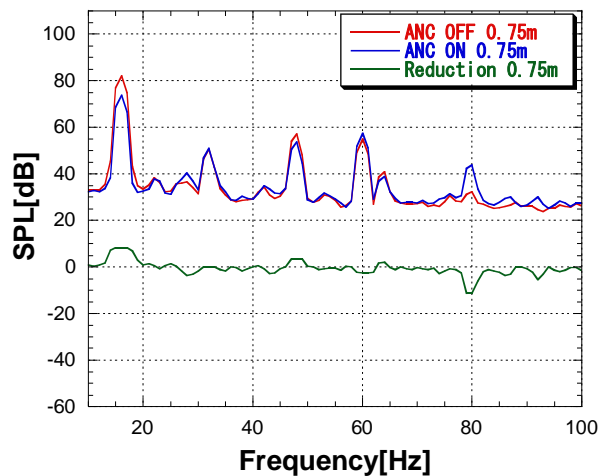


Fig.3-2-4

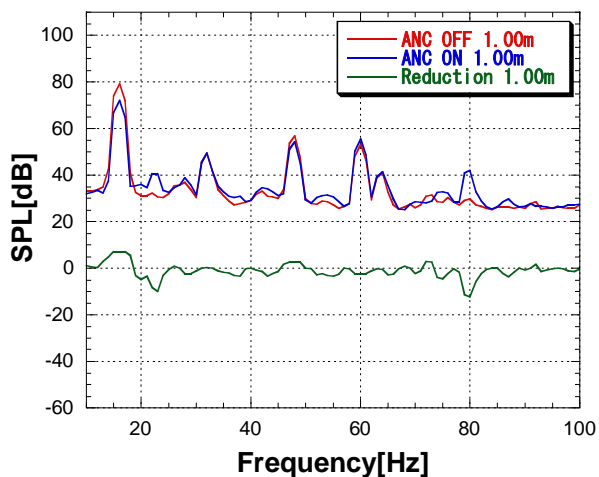


Fig.3-2-5

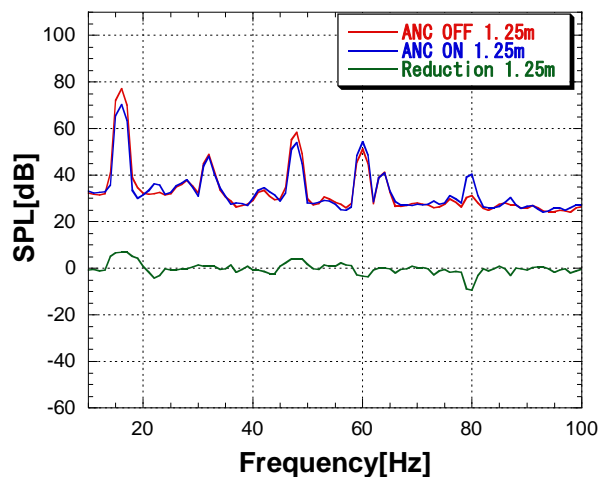


Fig.3-2-6

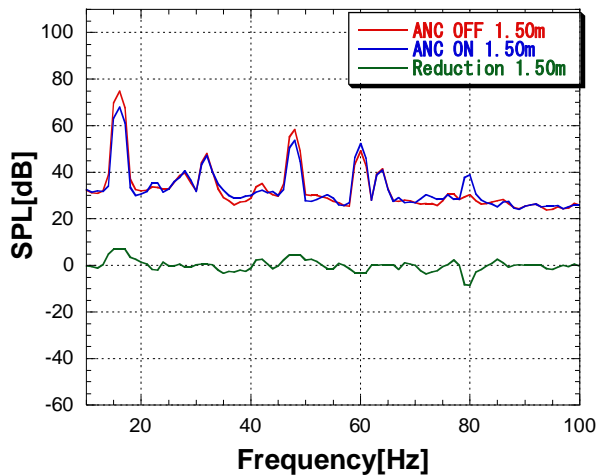


Fig.3-2-7

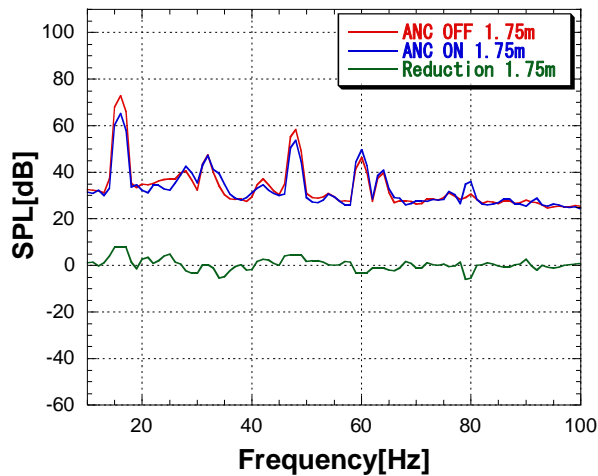


Fig.3-2-8

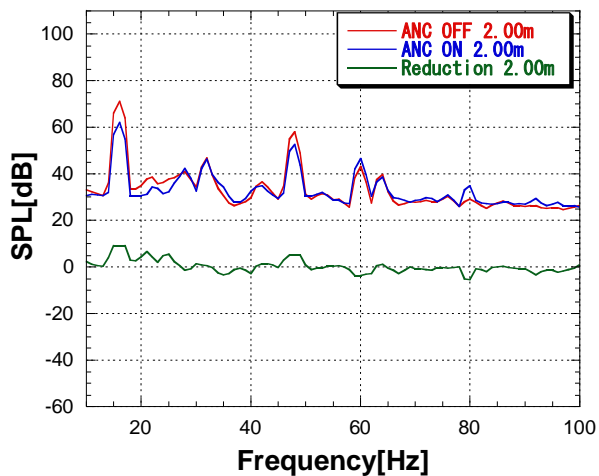


Fig.3-2-9

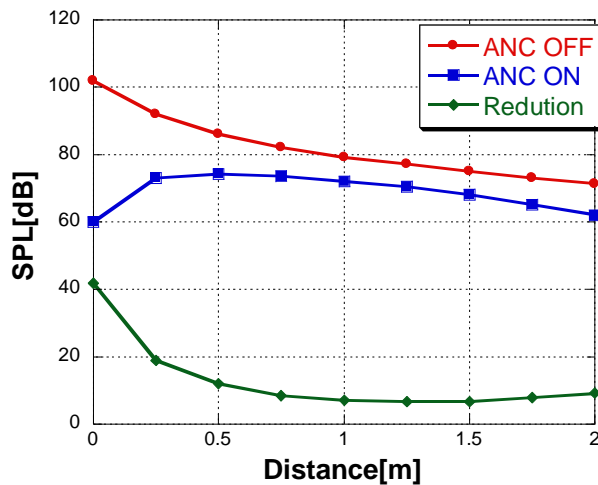


Fig.3-2-10 距離減衰

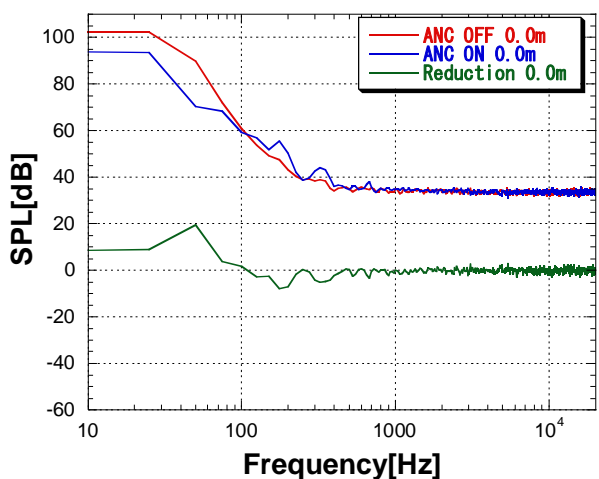


Fig.3-2-11

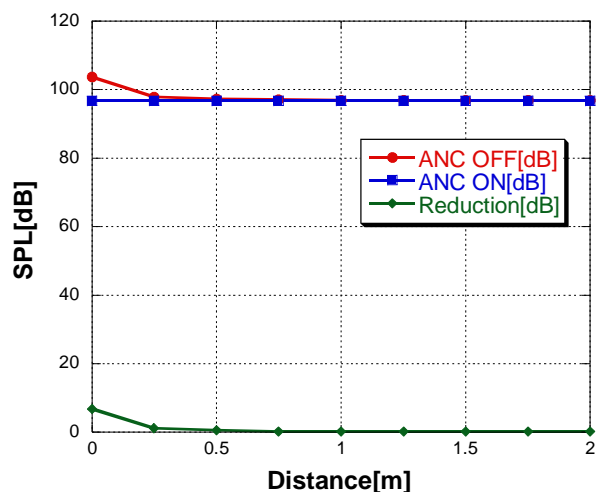


Fig.3-2-12 OA 値の距離減衰



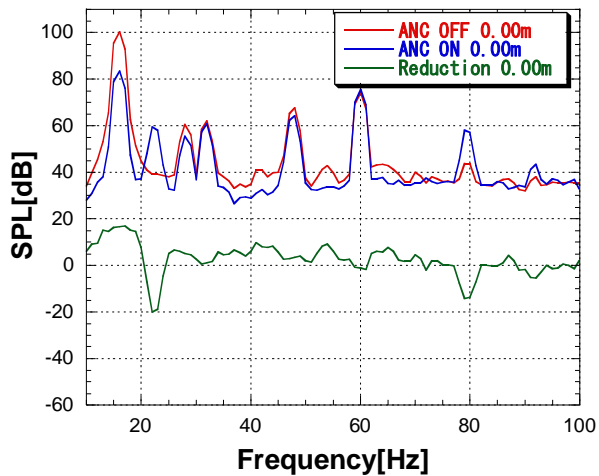


Fig.3-2-13

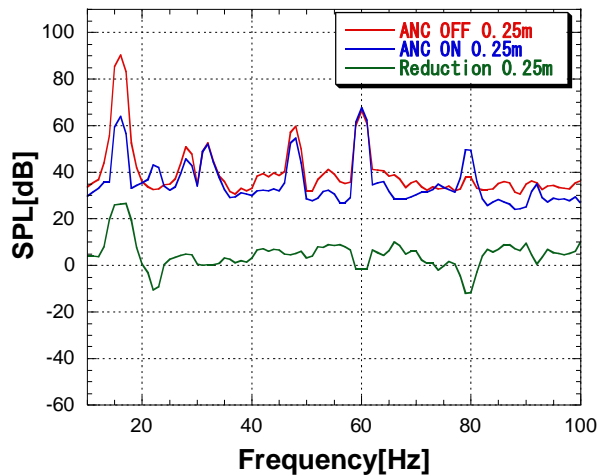


Fig.3-2-14

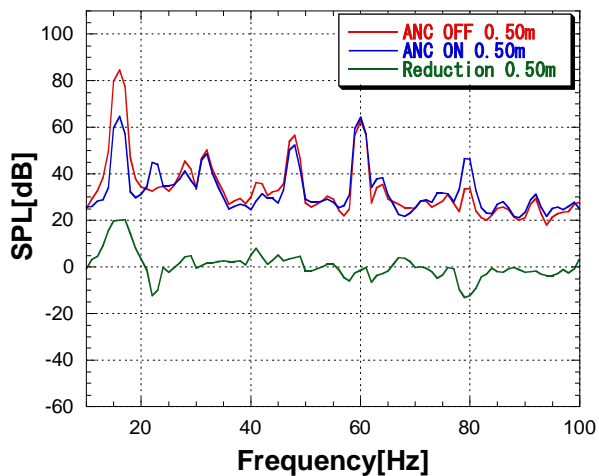


Fig.3-2-15

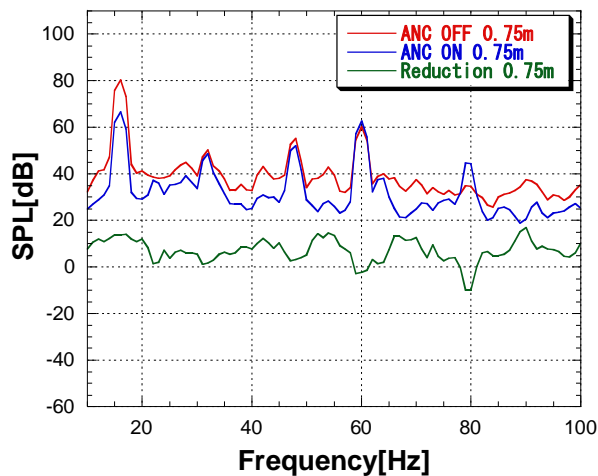


Fig.3-2-16

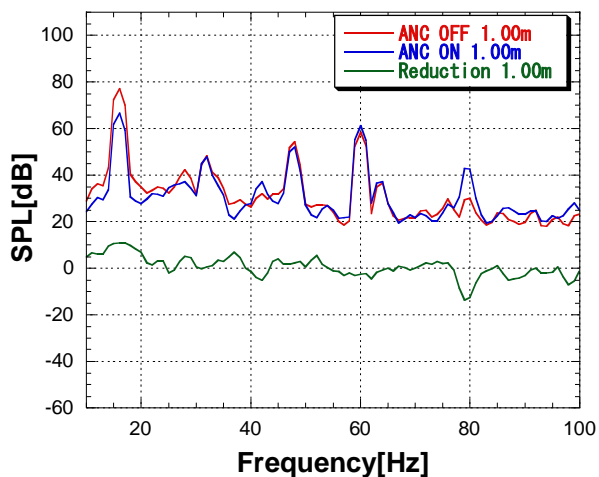


Fig.3-2-17

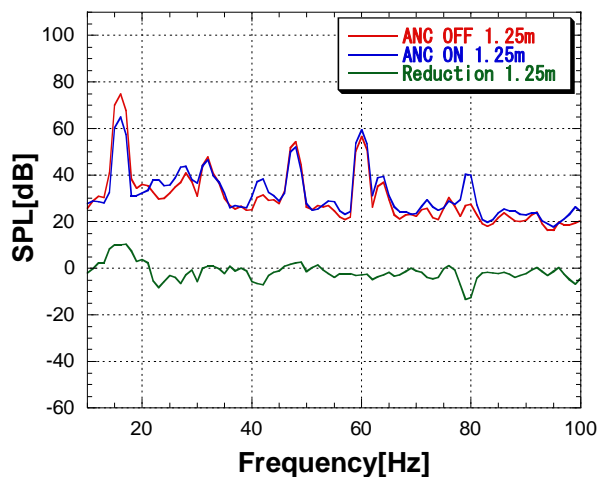


Fig.3-2-18

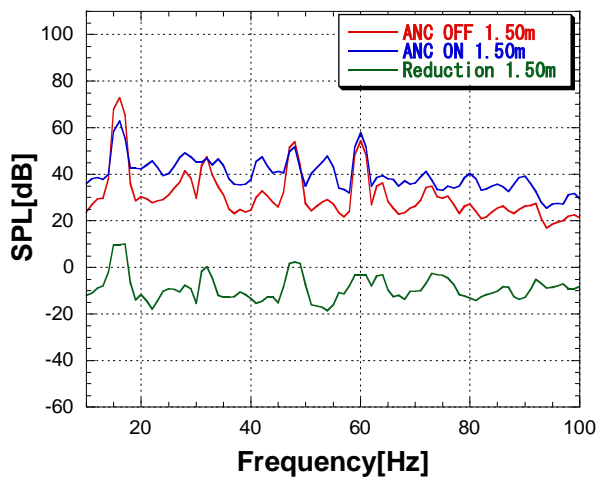


Fig.3-2-19

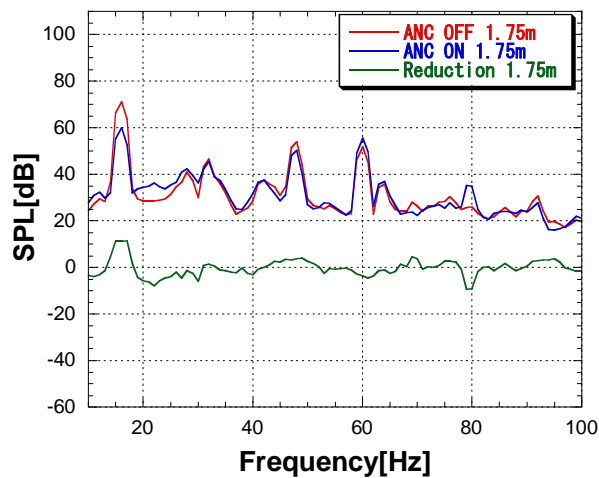


Fig.3-2-20

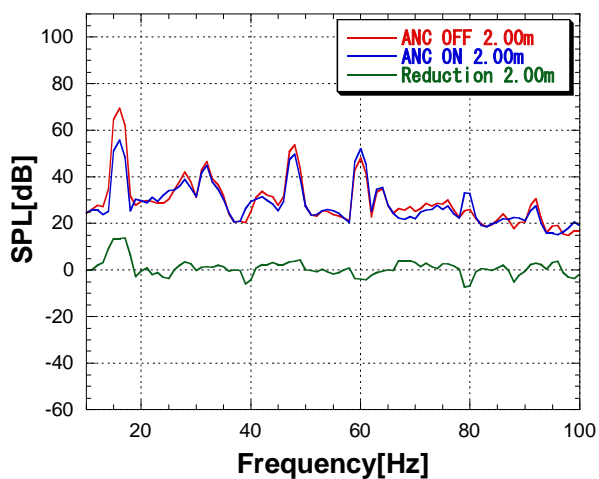


Fig.3-2-21

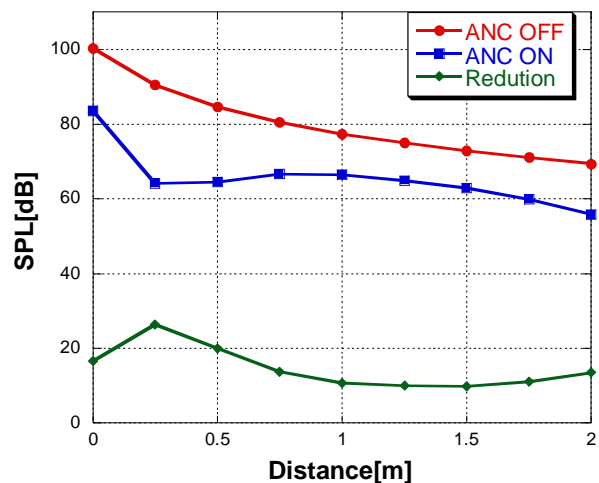


Fig.3-2-22 距離減衰

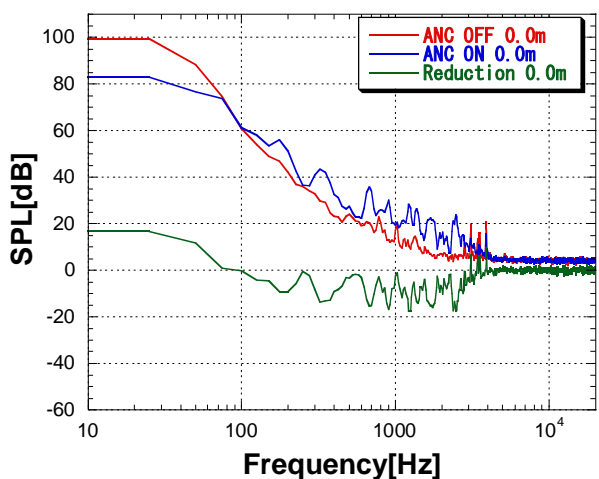


Fig.3-2-23

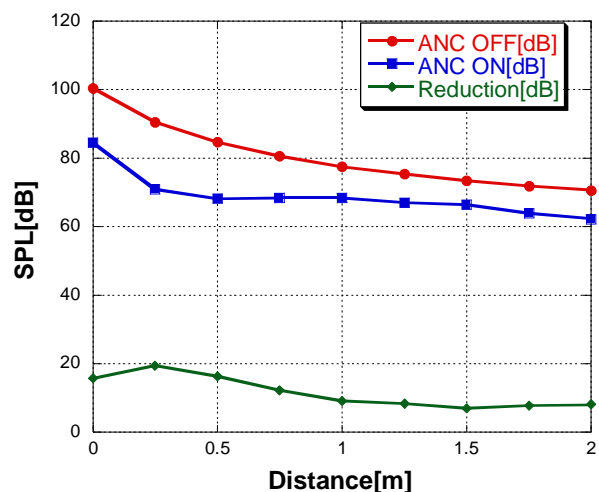


Fig.3-2-24 OA 値の距離減衰

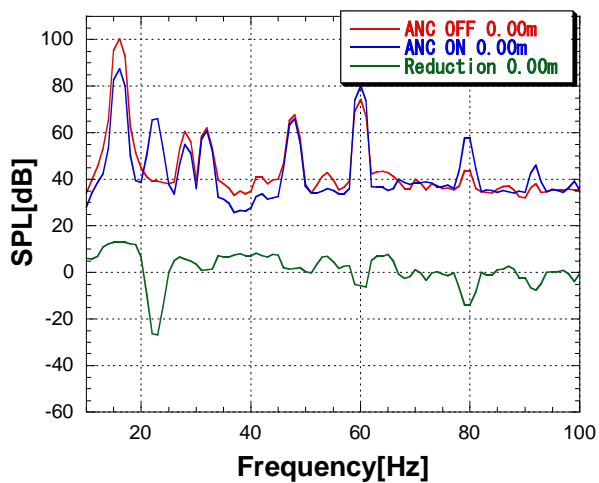


Fig.3-2-25

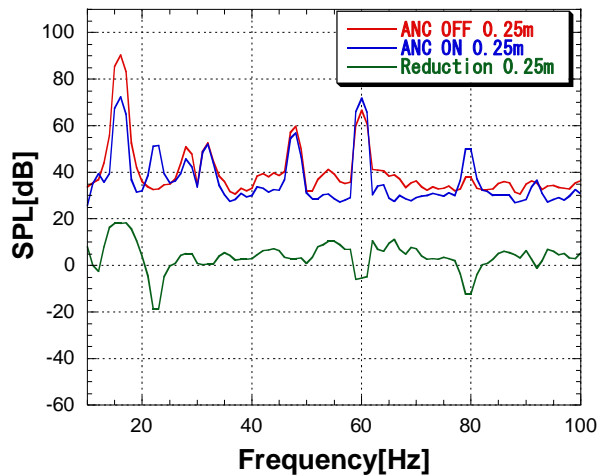


Fig.3-2-26

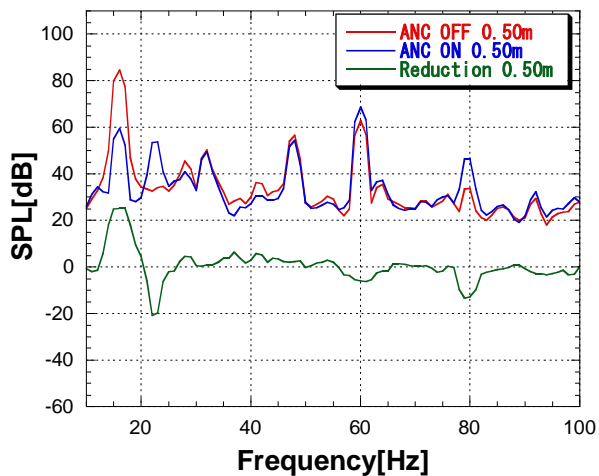


Fig.3-2-27

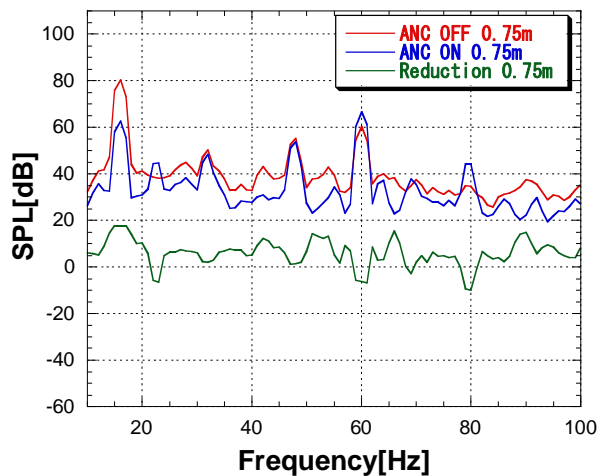


Fig.3-2-28

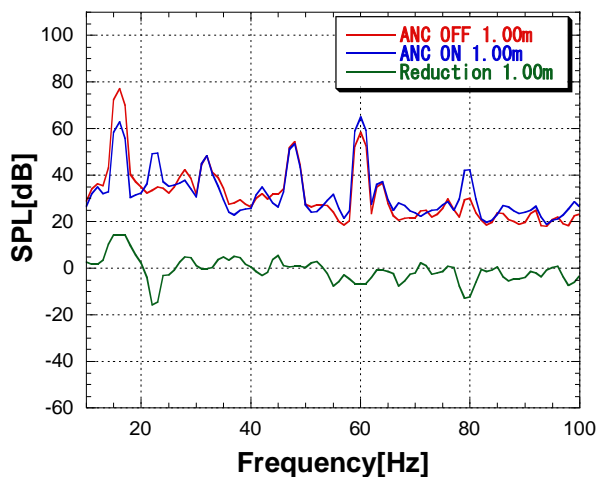


Fig.3-2-29

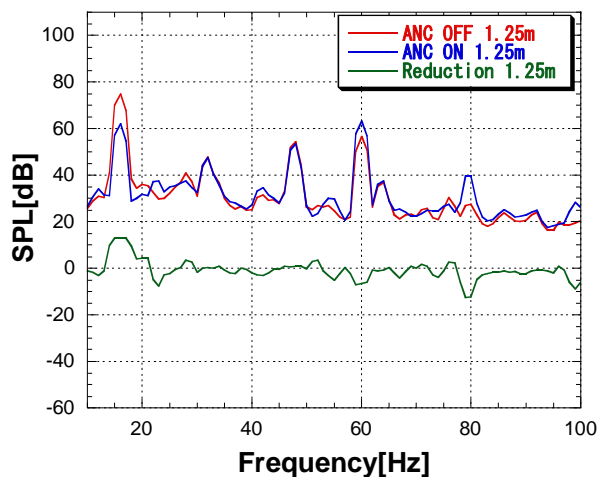


Fig.3-2-30

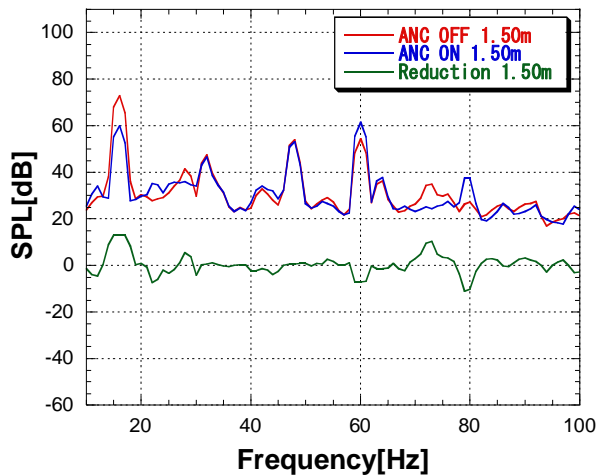


Fig.3-2-31

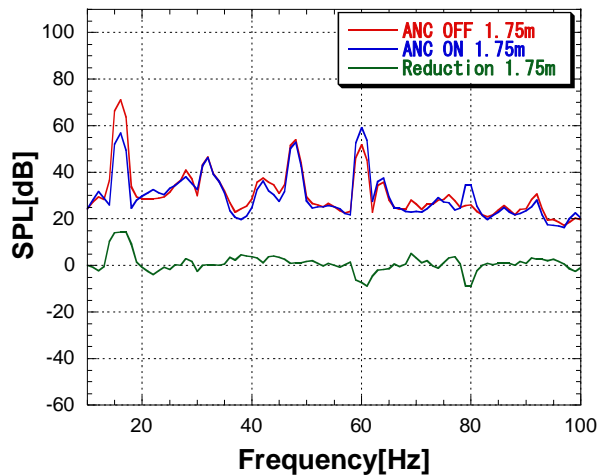


Fig.3-2-32

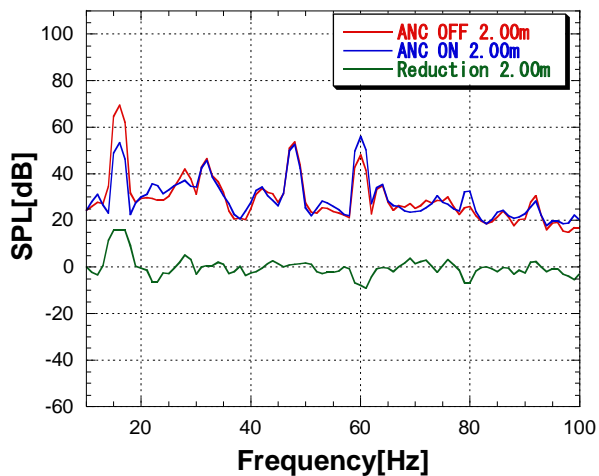


Fig.3-2-33

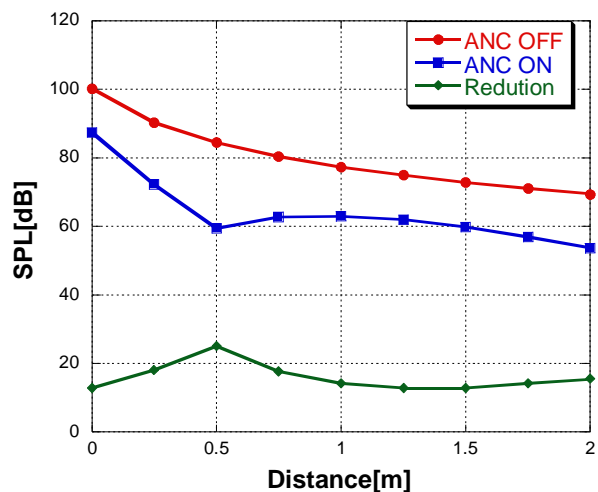


Fig.3-2-34 距離減衰

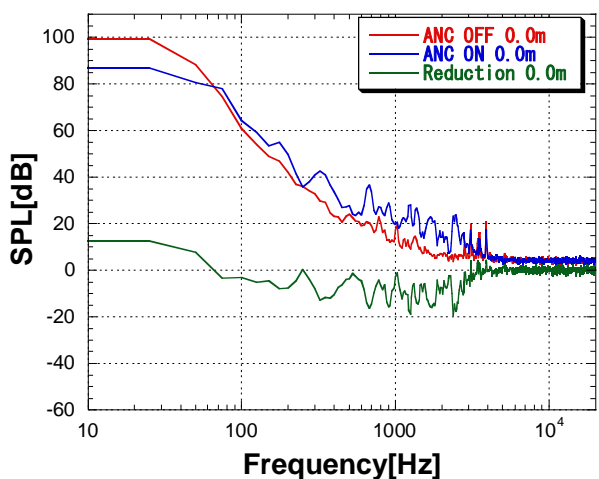


Fig.3-2-35

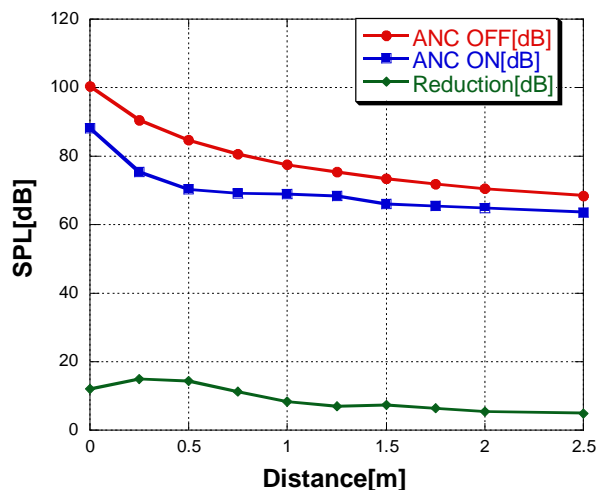


Fig.3-2-36 OA 値の距離減衰

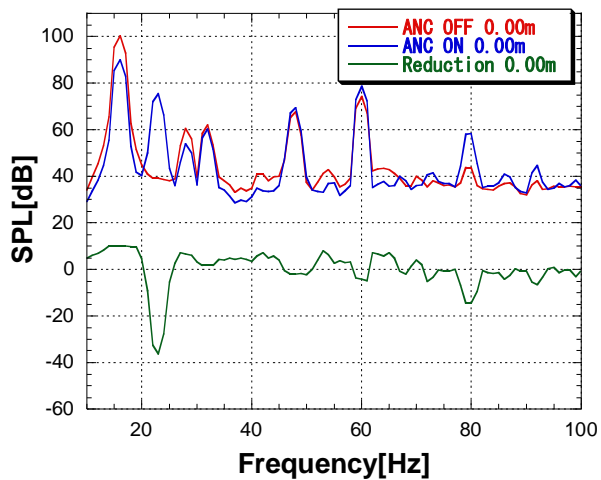


Fig.3-2-37

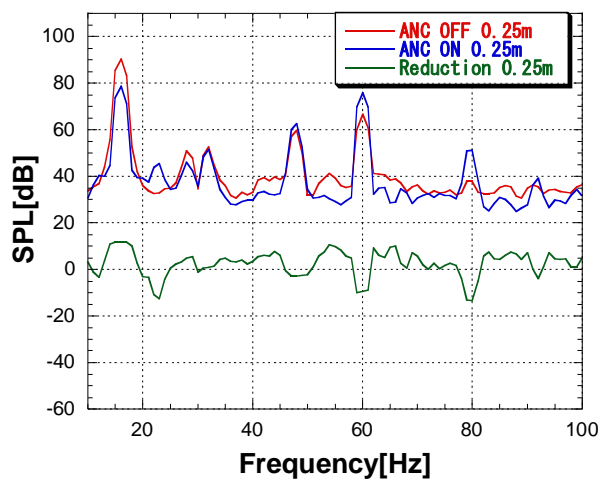


Fig.3-2-38

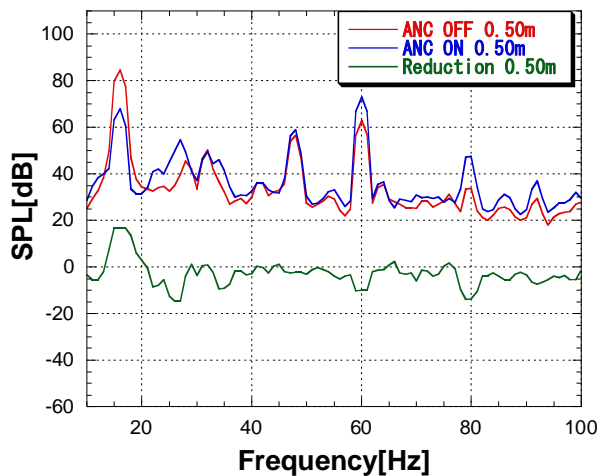


Fig.3-2-39

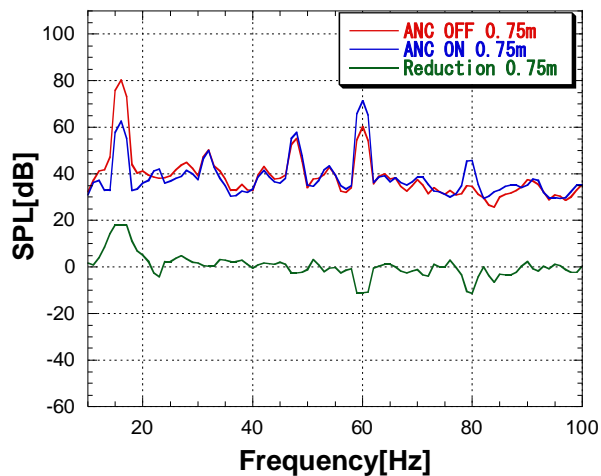


Fig.3-2-40

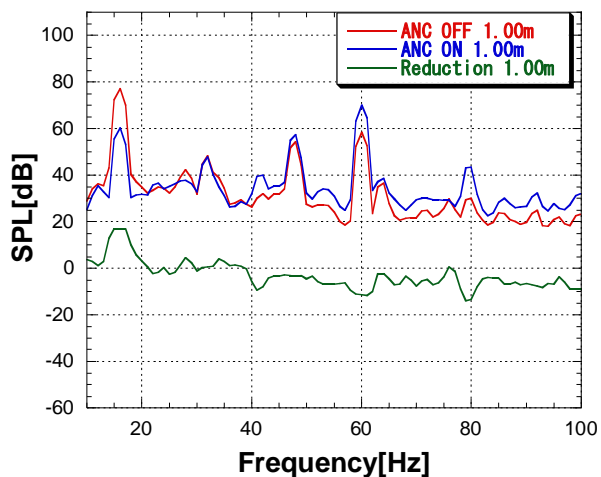


Fig.3-2-41

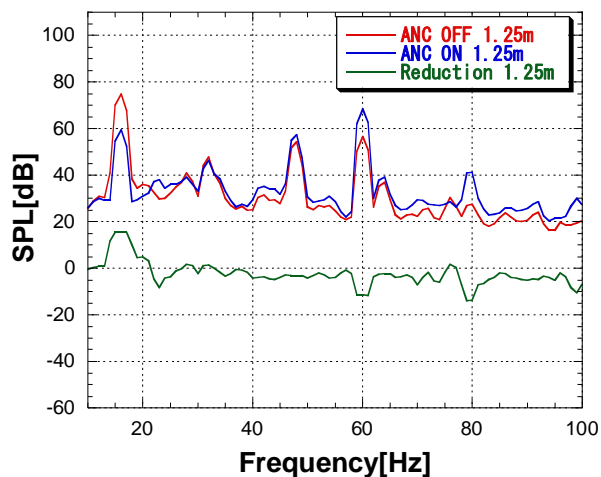


Fig.3-2-42

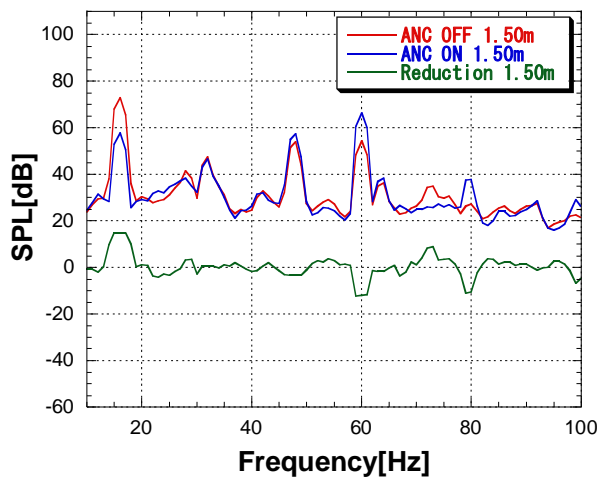


Fig.3-2-43

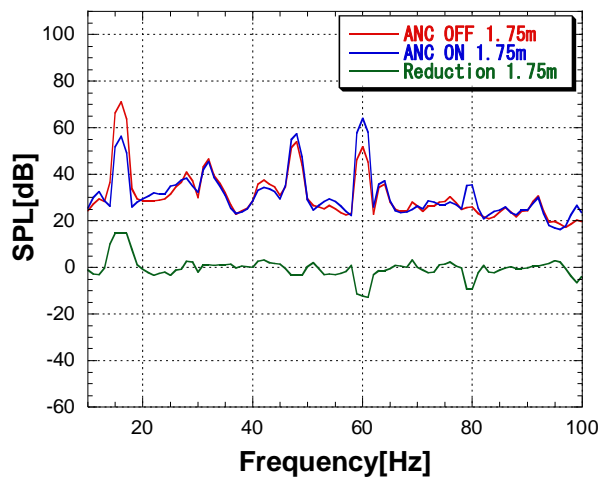


Fig.3-2-44

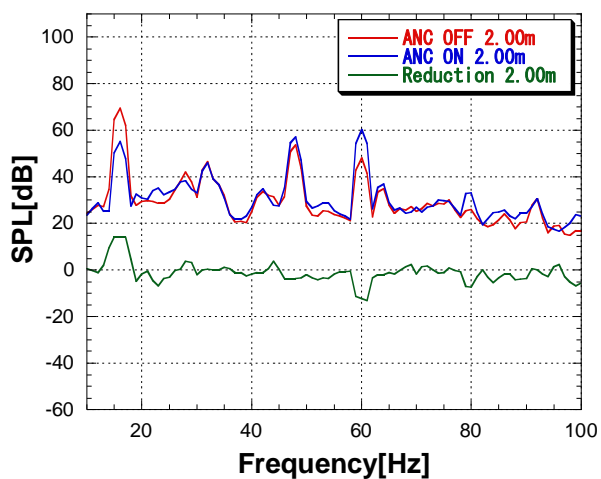


Fig.3-2-45

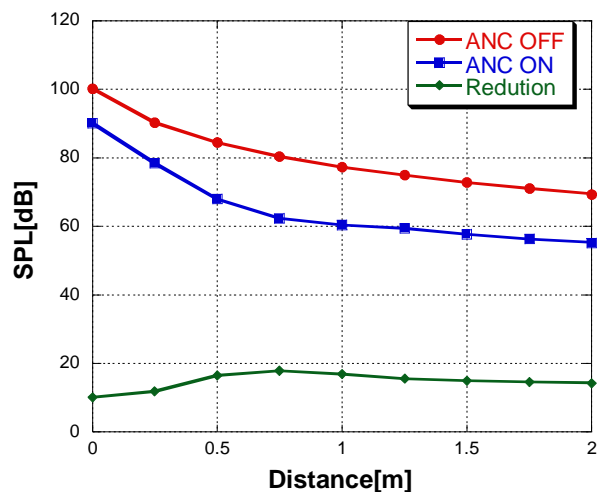


Fig.3-2-46 距離減衰

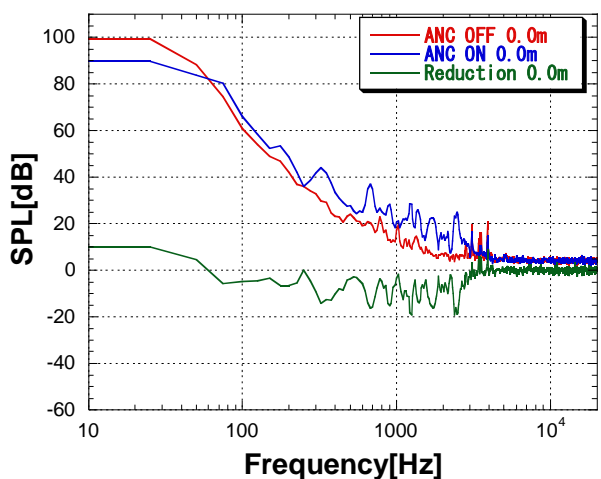


Fig.3-2-47

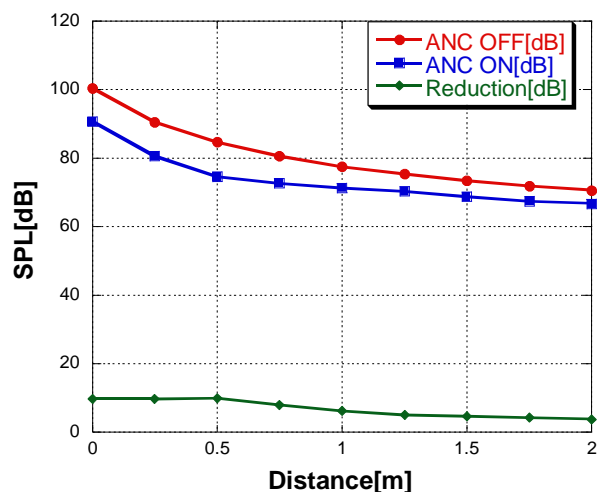


Fig.3-2-48 OA 値の距離減衰

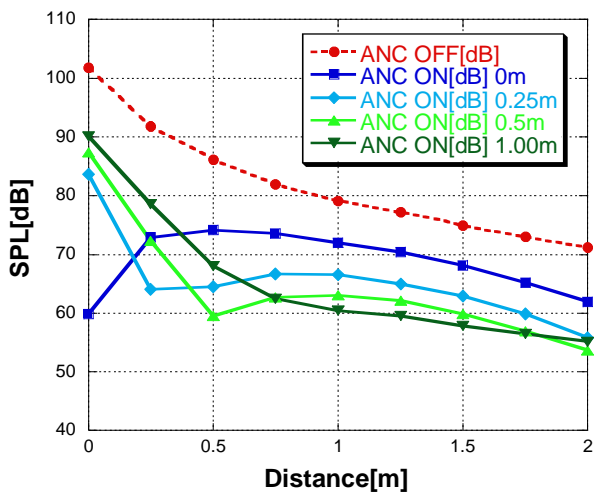


Fig.3-2-49 低減後音圧比較

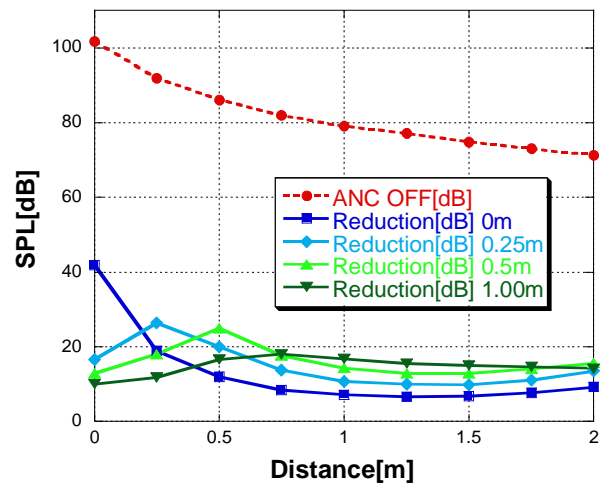


Fig.3-2-50 低減量比較

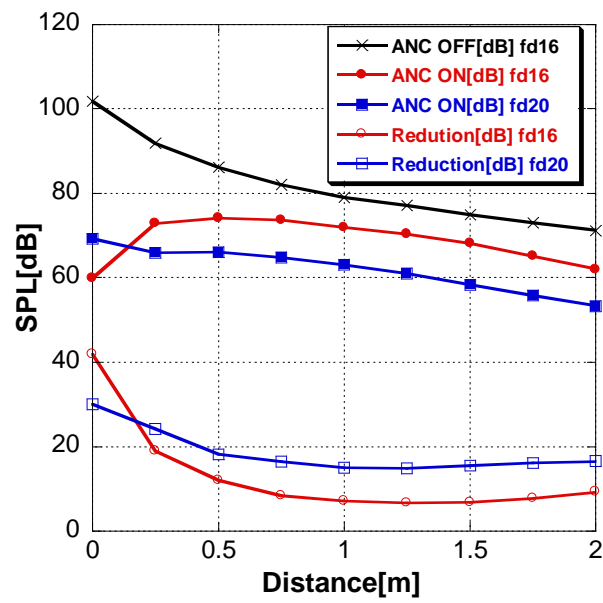


Fig.3-2-51 二次音源による低減効果の比較

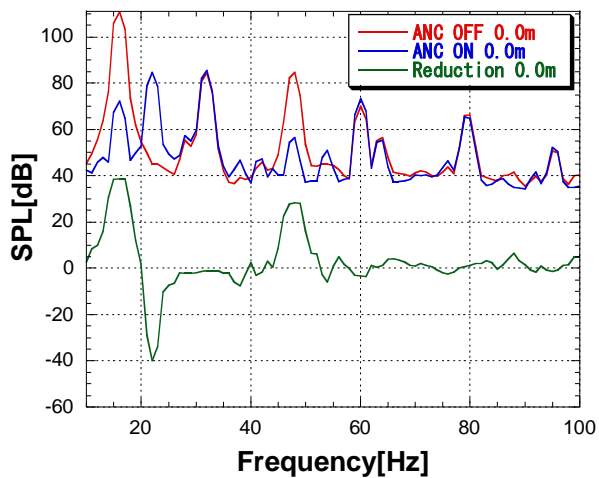


Fig.3-3-1

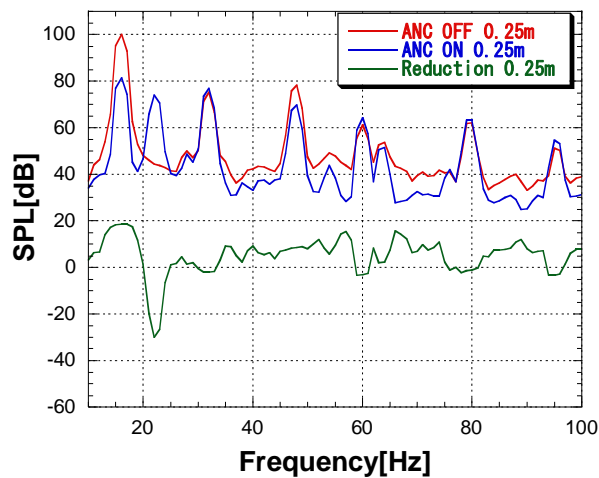


Fig.3-3-2

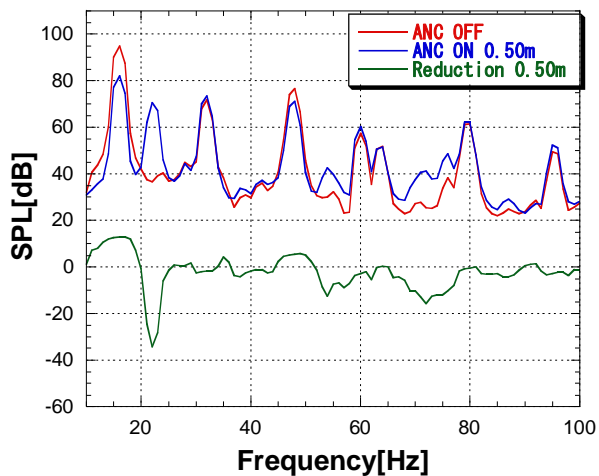


Fig.3-3-3

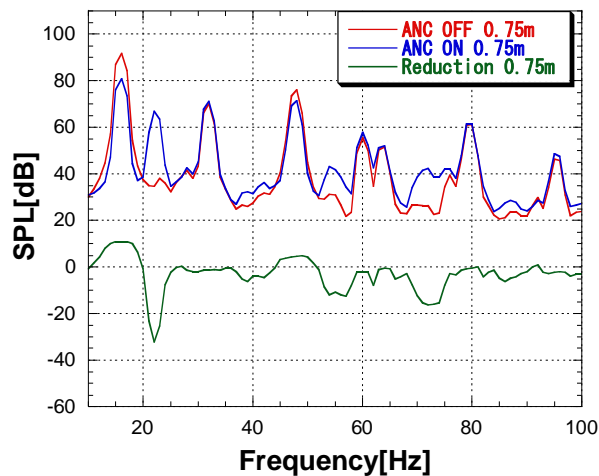


Fig.3-3-4

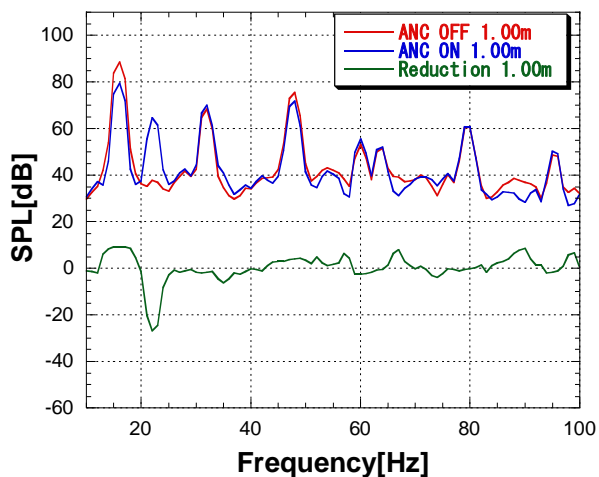


Fig.3-3-5

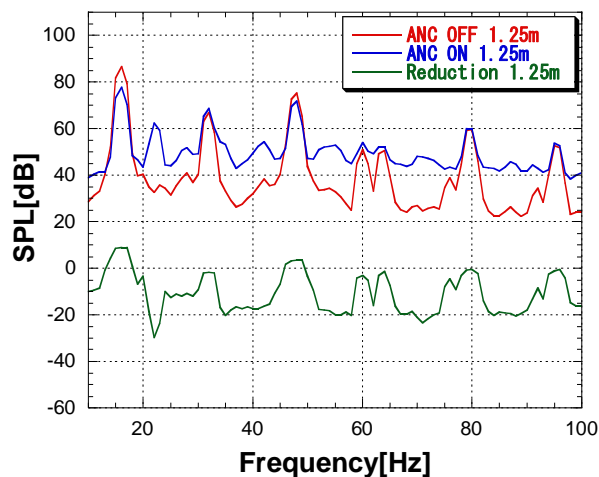


Fig.3-3-6



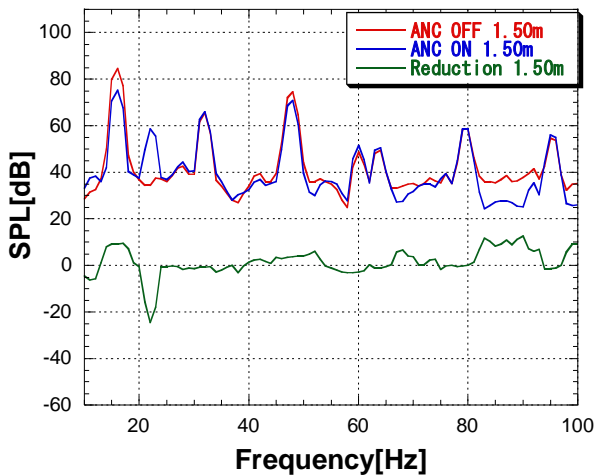


Fig.3-3-7

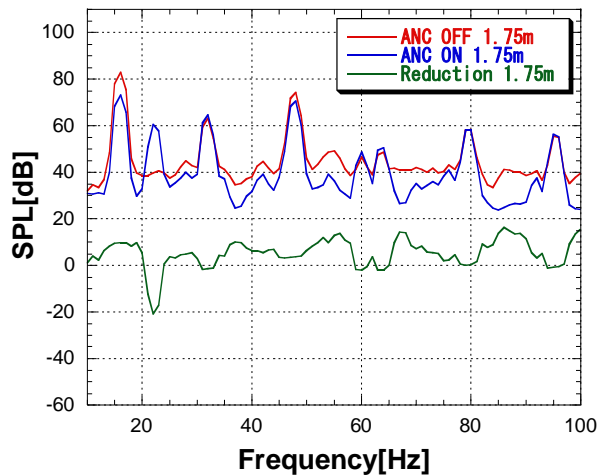


Fig.3-3-8

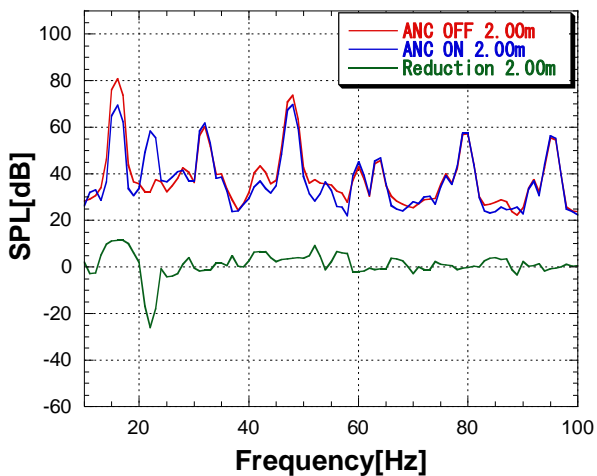


Fig.3-3-9

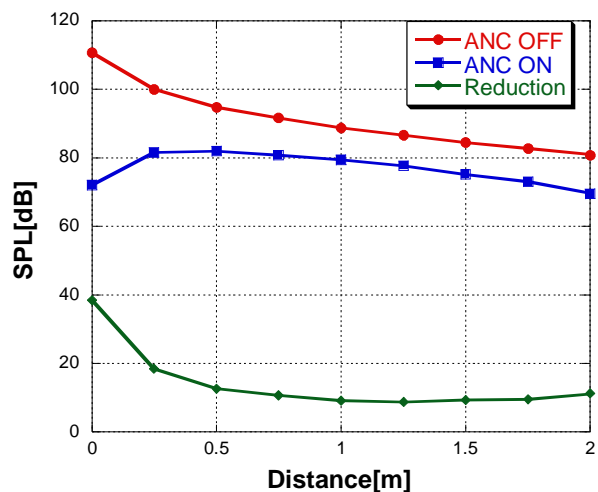


Fig.3-3-10 距離減衰

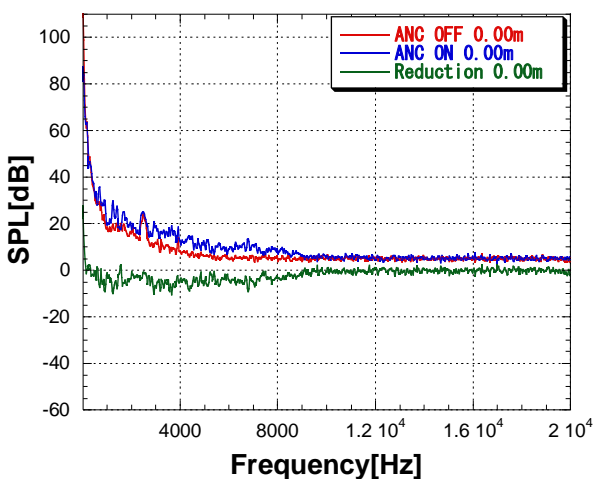


Fig.3-3-11

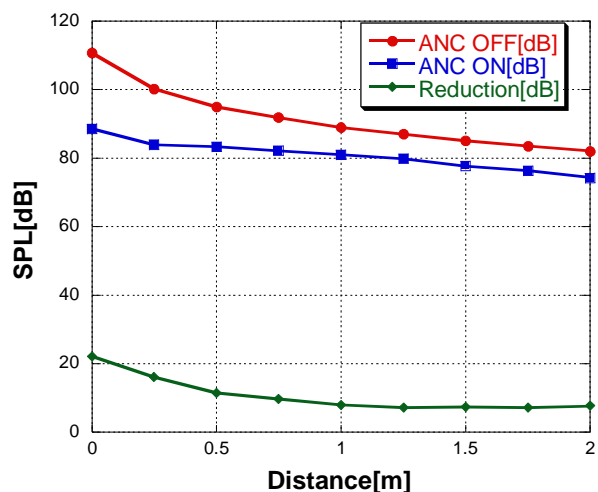


Fig.3-3-12 OA 値の距離減衰

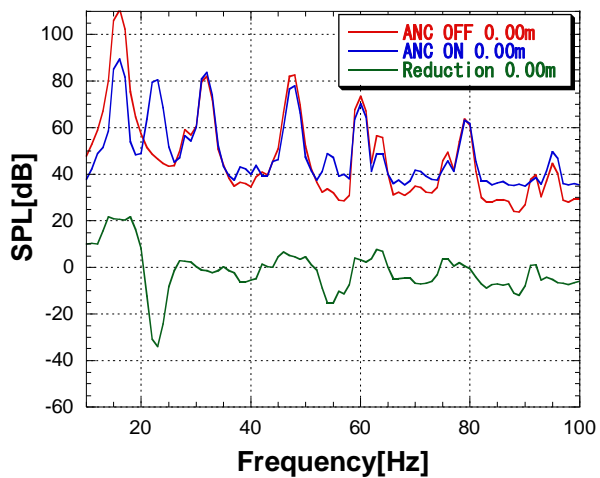


Fig.3-3-13

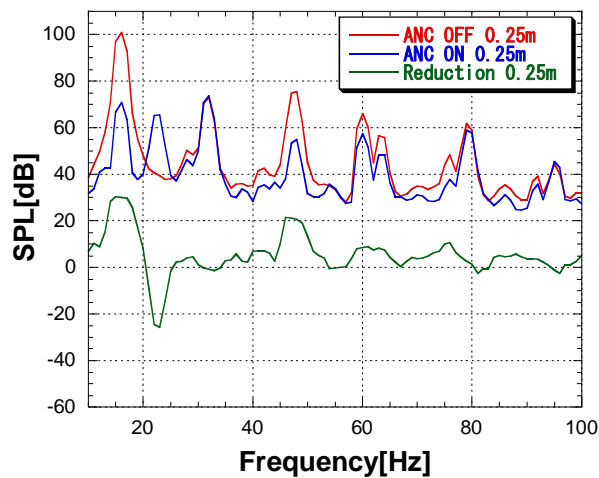


Fig.3-3-14

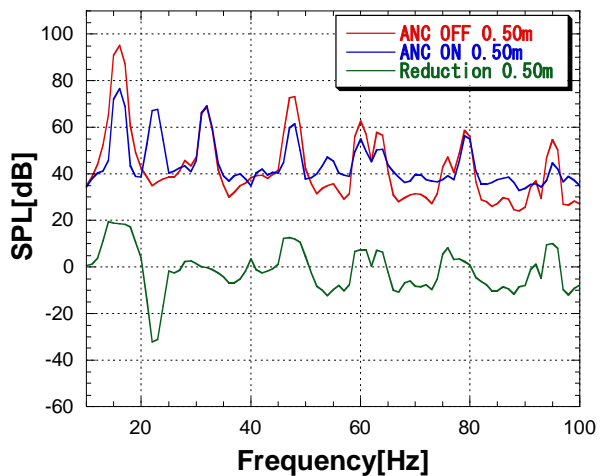


Fig.3-3-15

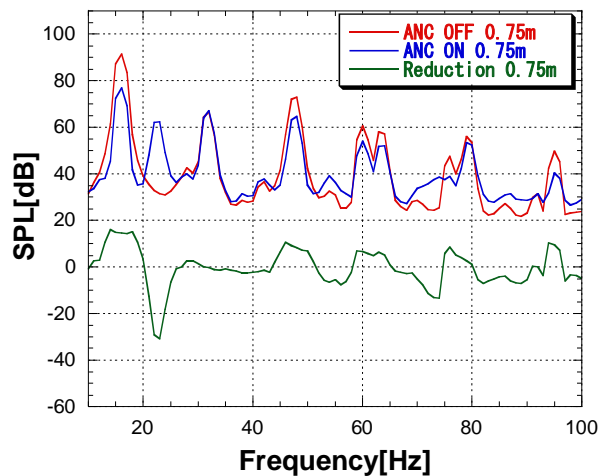


Fig.3-3-16

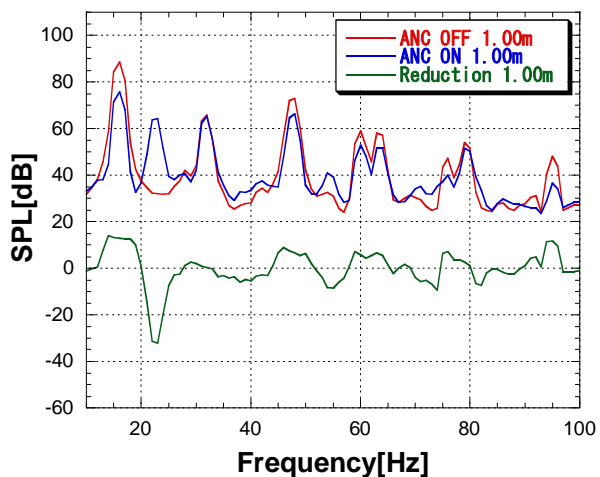


Fig.3-3-17

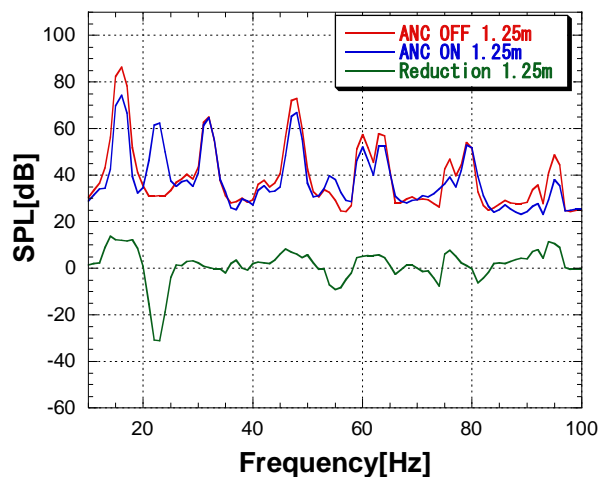


Fig.3-3-18

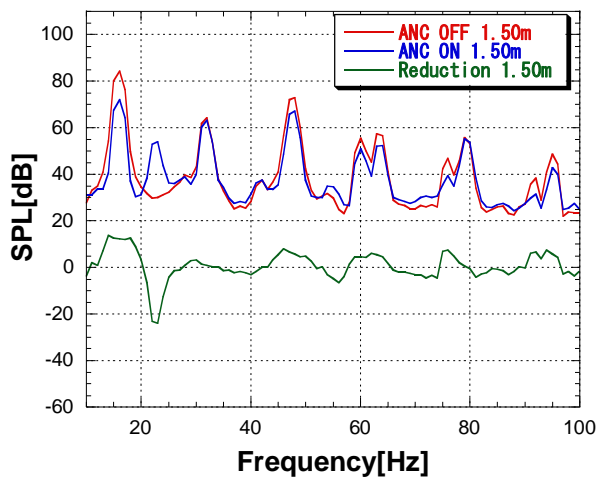


Fig.3-3-19

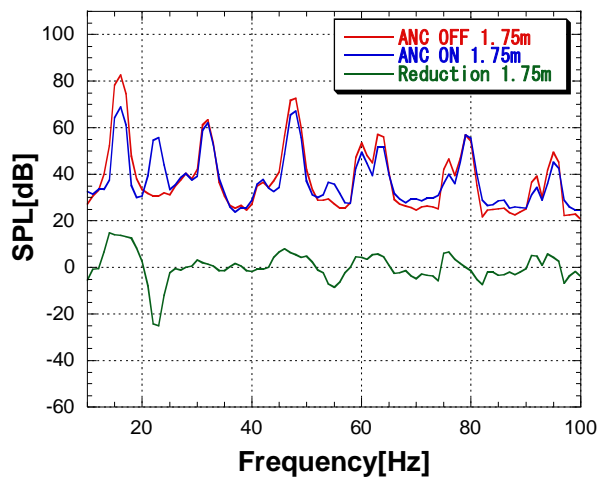


Fig.3-3-20

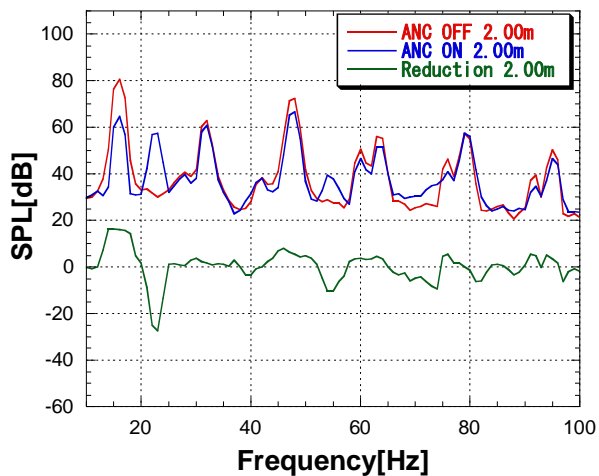


Fig.3-3-21

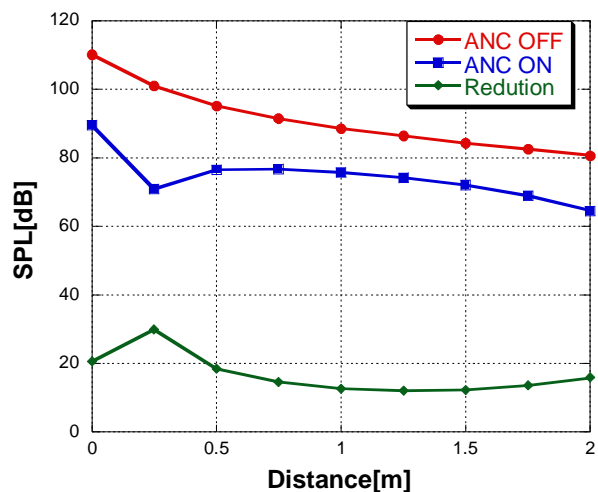


Fig.3-3-22 距離減衰

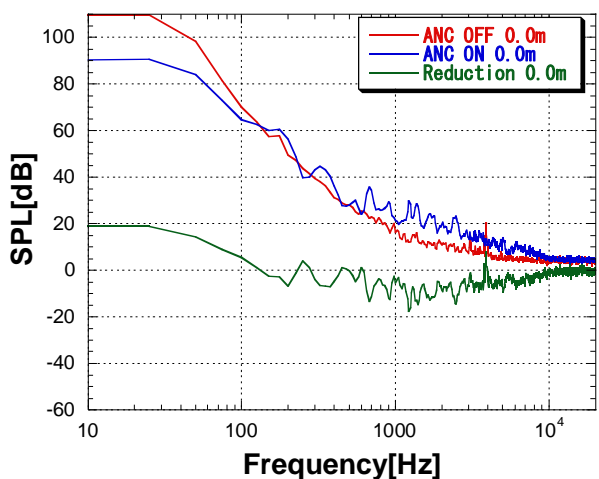


Fig.3-3-23

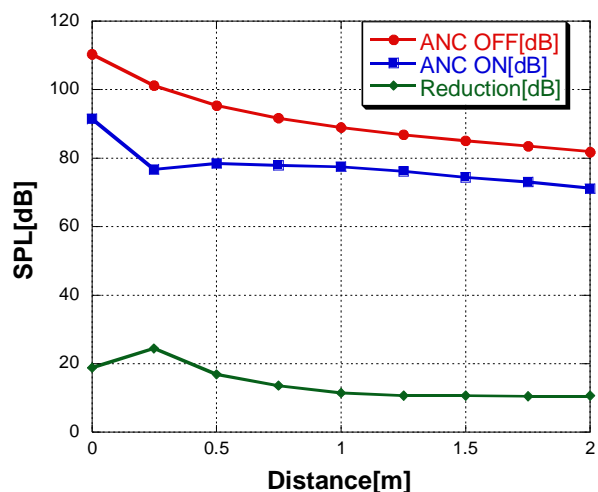


Fig.3-3-24 OA 値の距離減衰

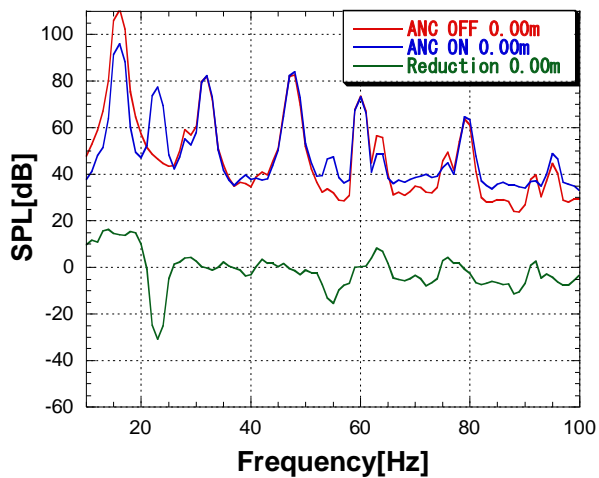


Fig.3-3-25

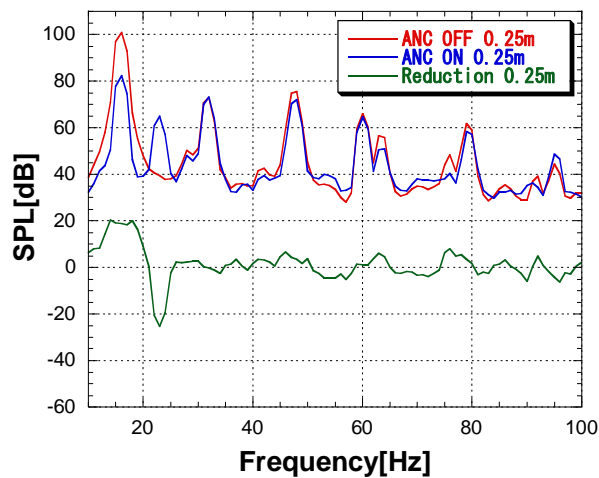


Fig.3-3-26

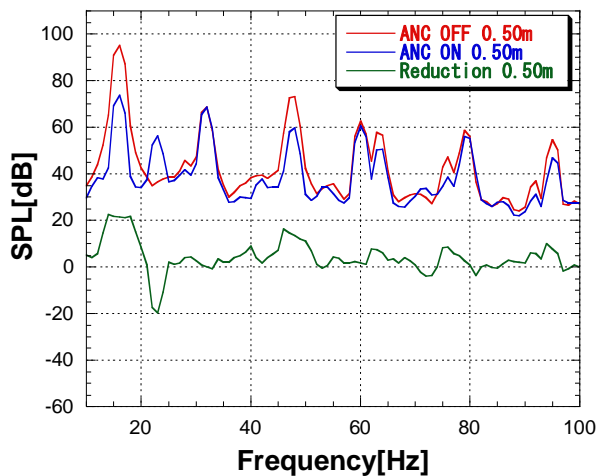


Fig.3-3-27

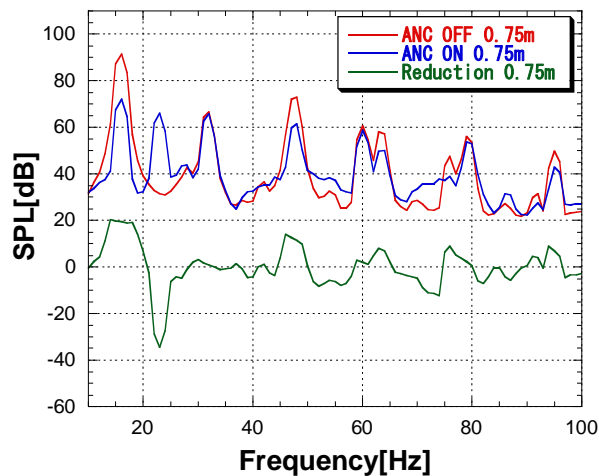


Fig.3-3-28

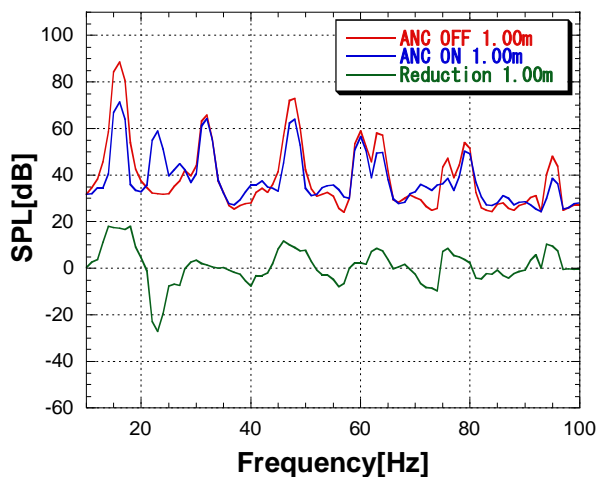


Fig.3-3-29

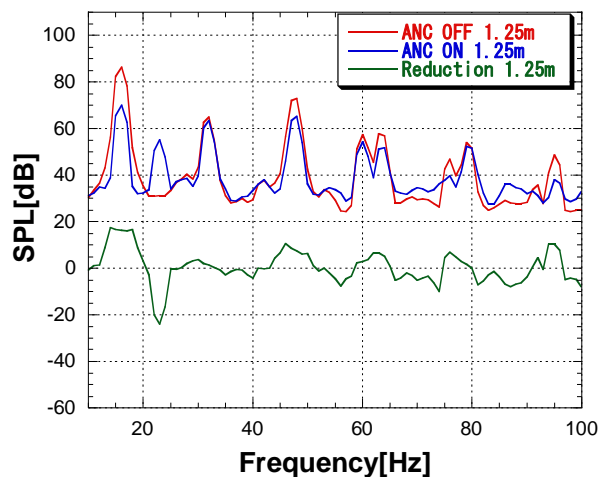


Fig.3-3-30

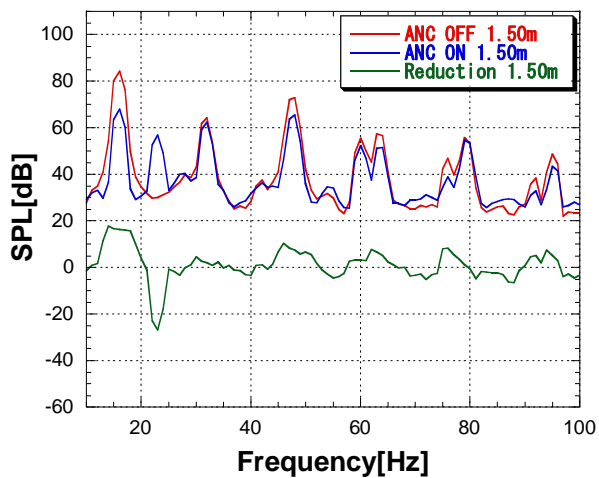


Fig.3-3-31

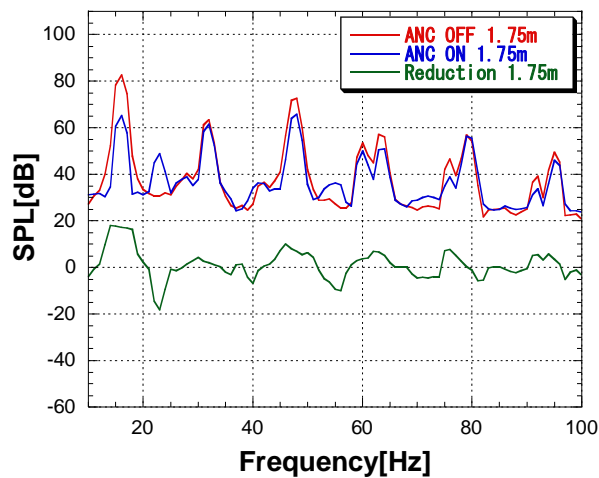


Fig.3-3-32

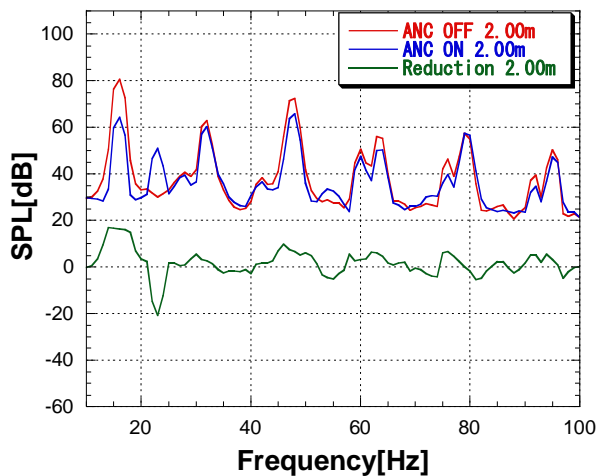


Fig.3-3-33

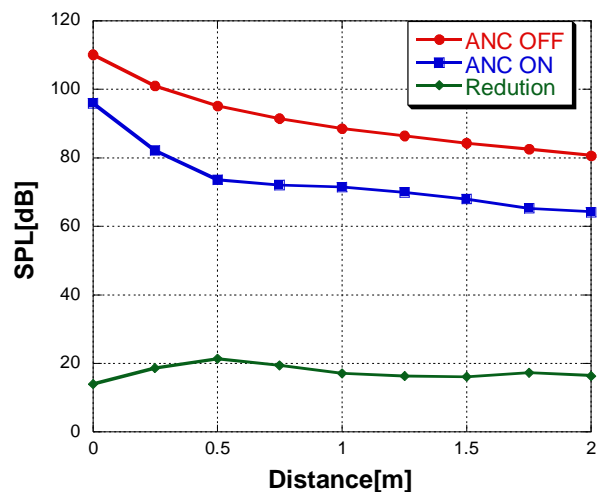


Fig.3-3-34 距離減衰

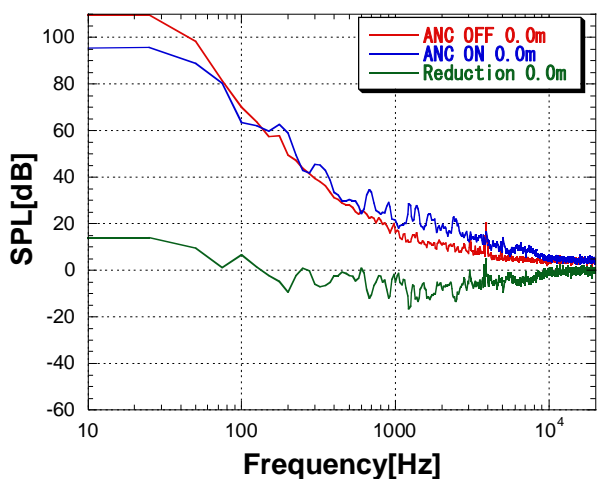


Fig.3-3-35

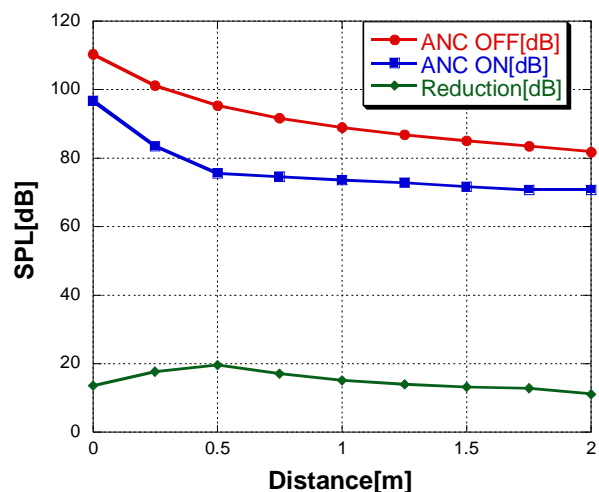


Fig.3-3-36 OA 値の距離減衰

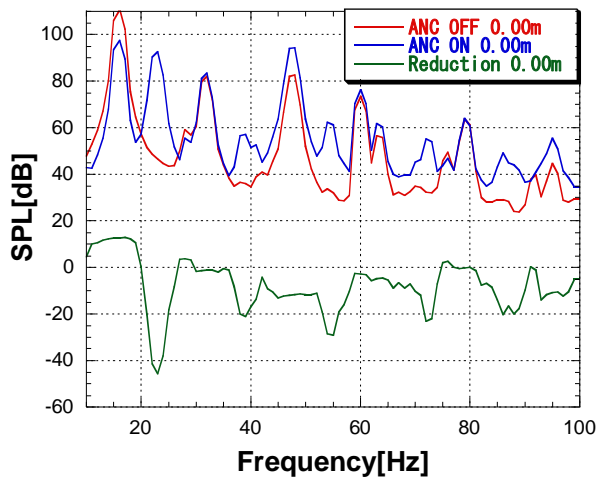


Fig.3-3-37

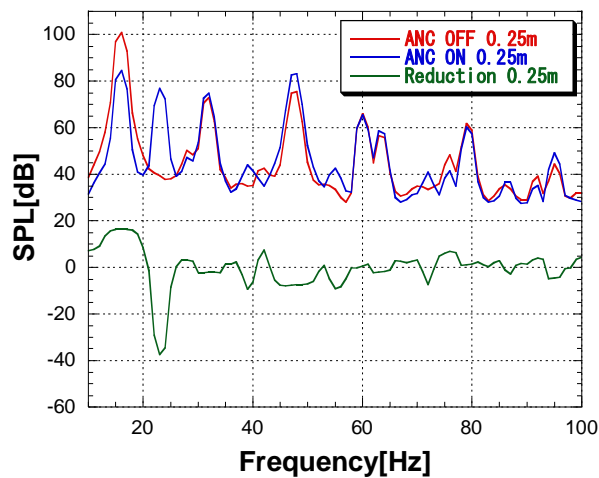


Fig.3-3-38

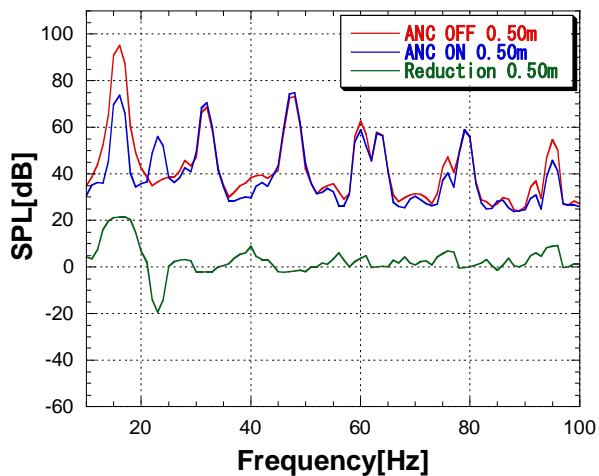


Fig.3-3-39

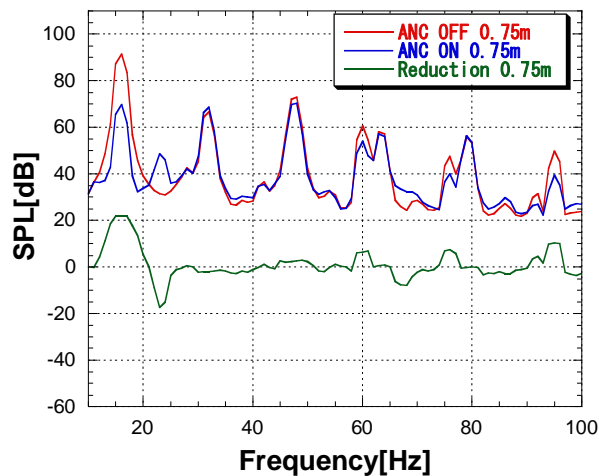


Fig.3-3-40

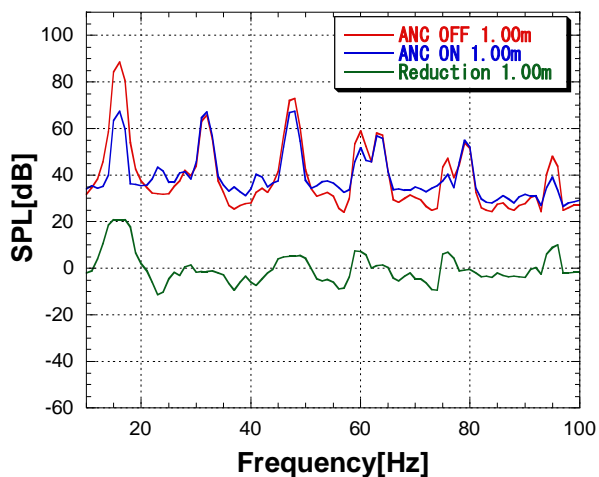


Fig.3-3-41

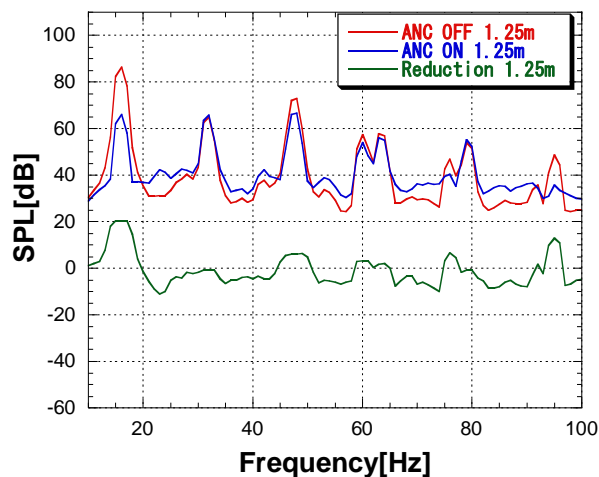


Fig.3-3-42

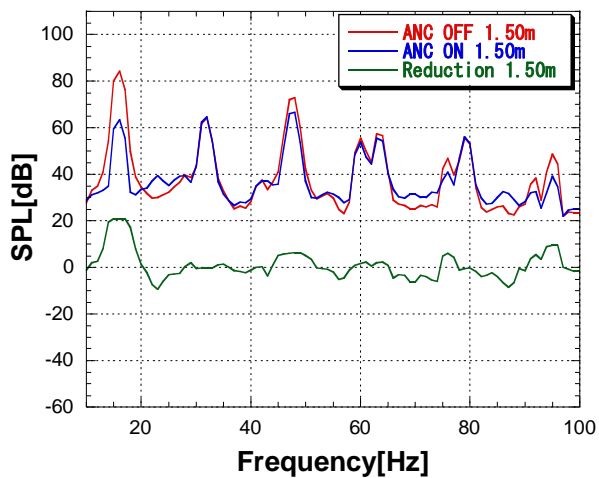


Fig.3-3-43

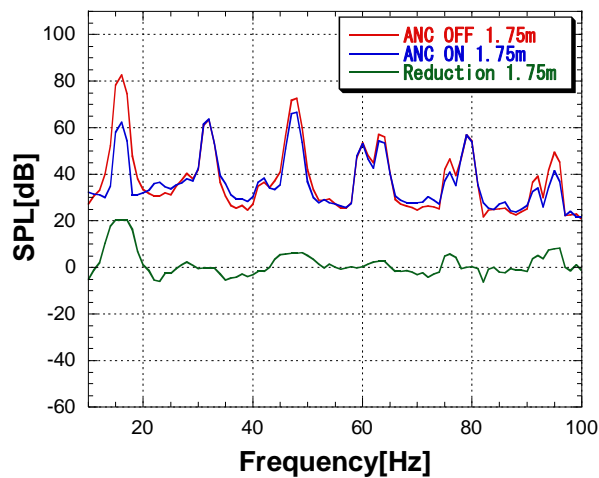


Fig.3-3-44

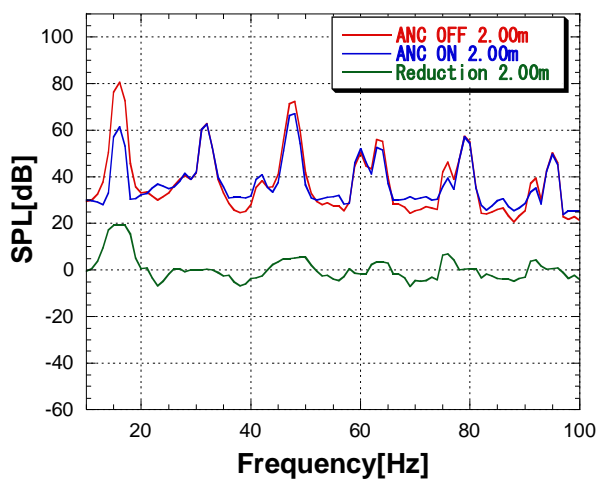


Fig.3-3-45

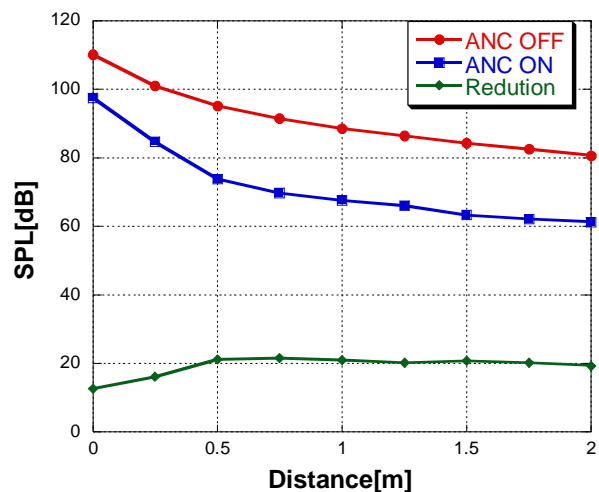


Fig.3-3-46 距離減衰

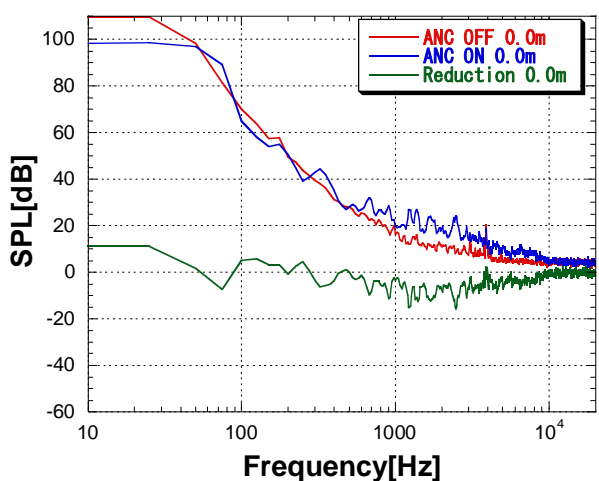


Fig.3-3-47

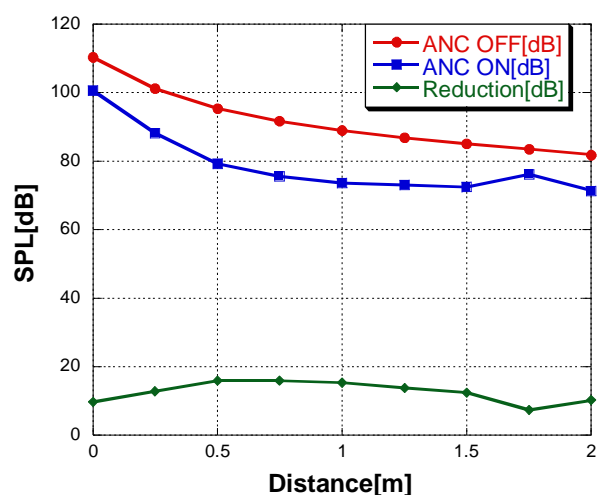


Fig.3-3-48 OA 値の距離減衰

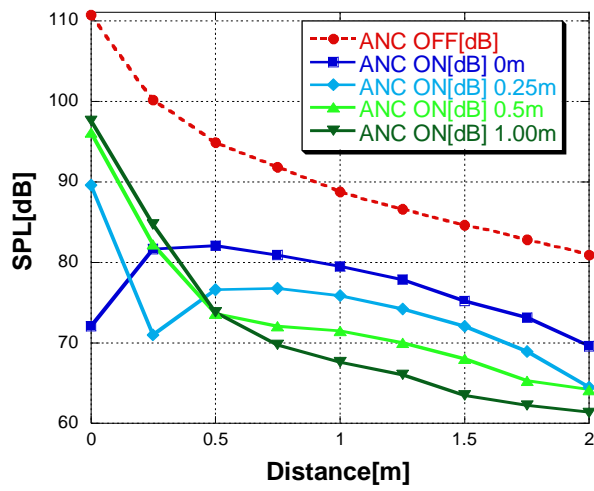


Fig.3-3-49 低減後音圧の比較

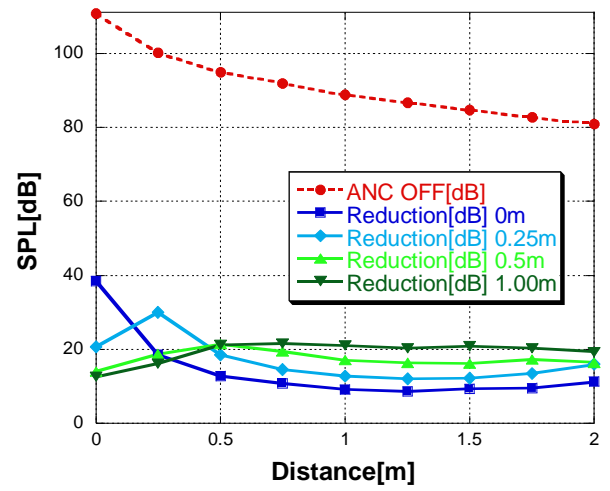


Fig.3-3-50 低減量の比較



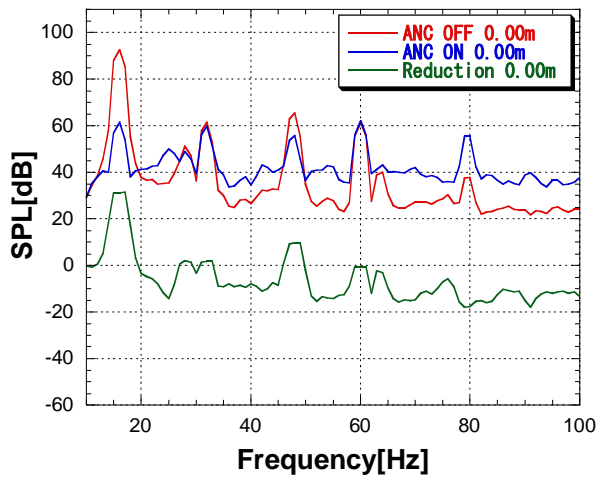


Fig.3-4-1

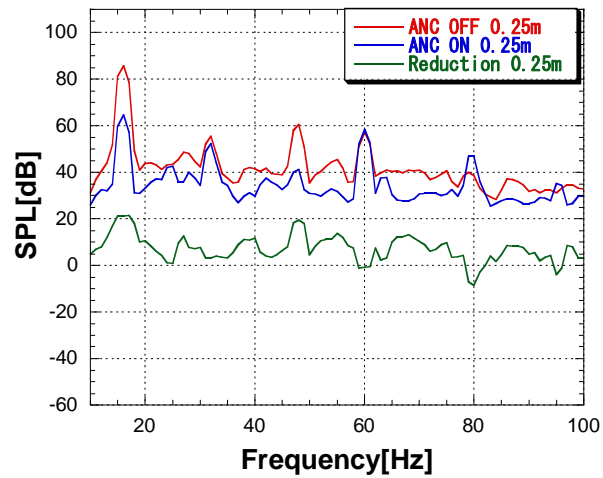


Fig.3-4-2

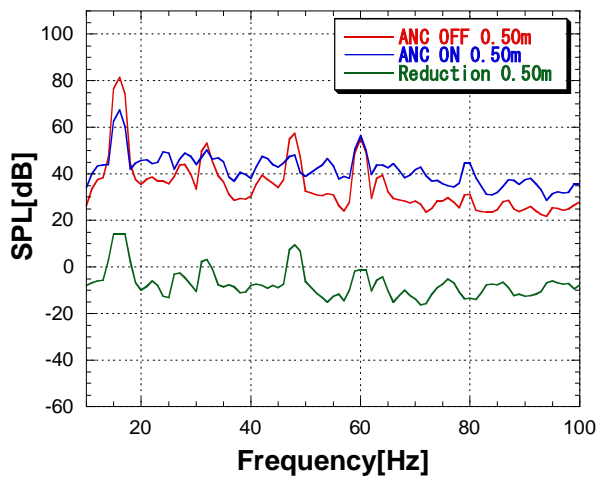


Fig.3-4-3

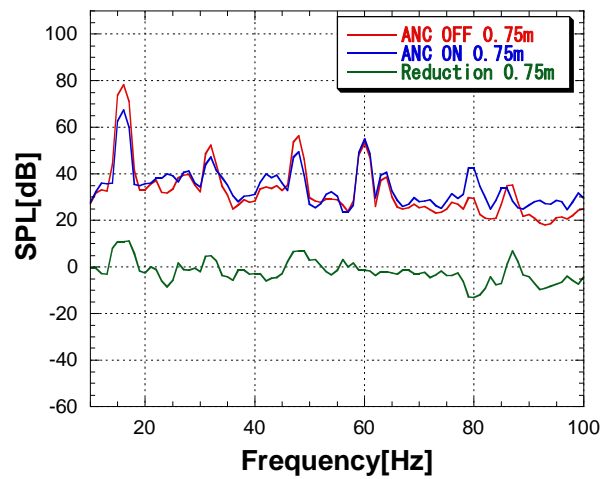


Fig.3-4-4

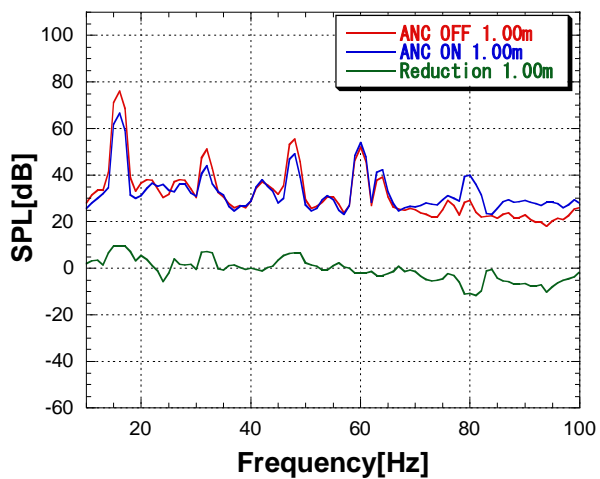


Fig.3-4-5

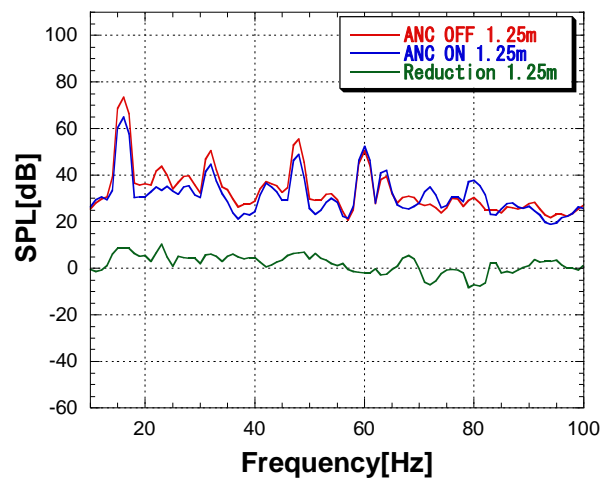


Fig.3-4-6

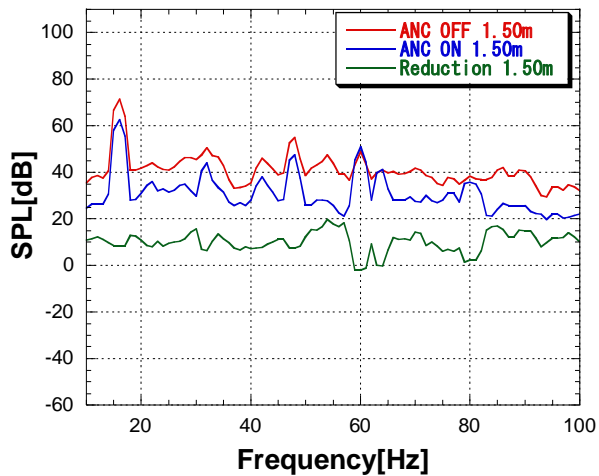


Fig.3-4-7

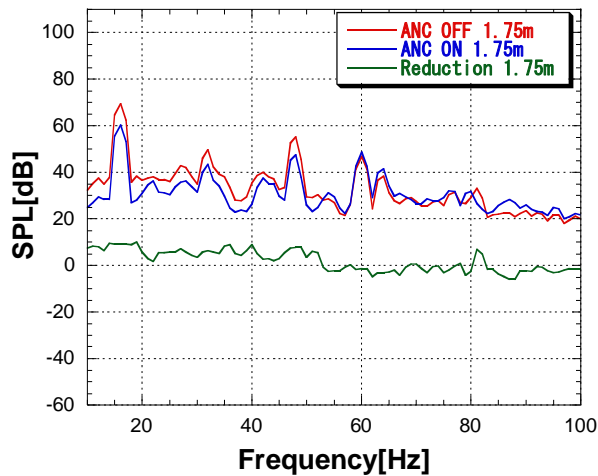


Fig.3-4-8

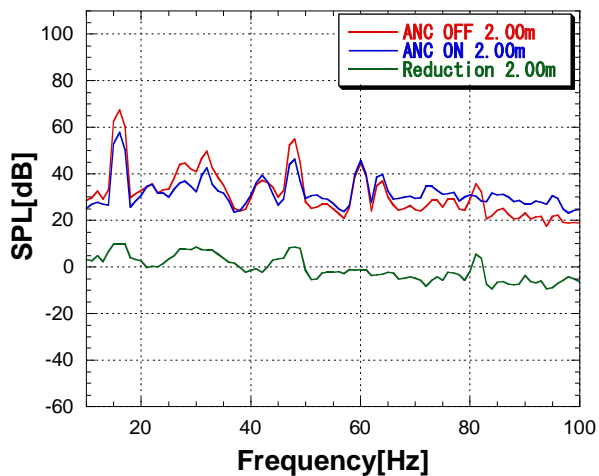


Fig.3-4-9

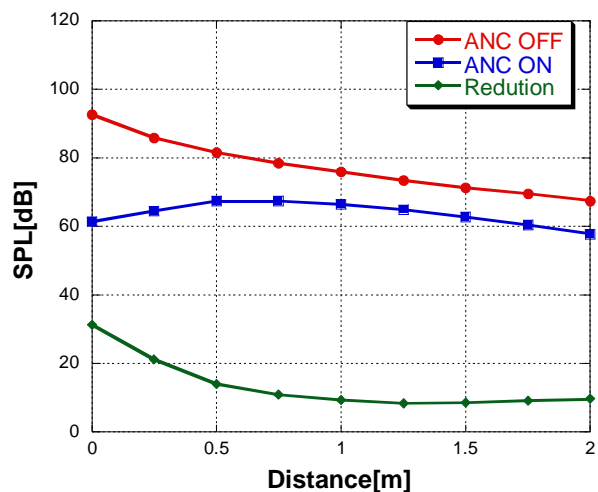


Fig.3-4-10 距離減衰

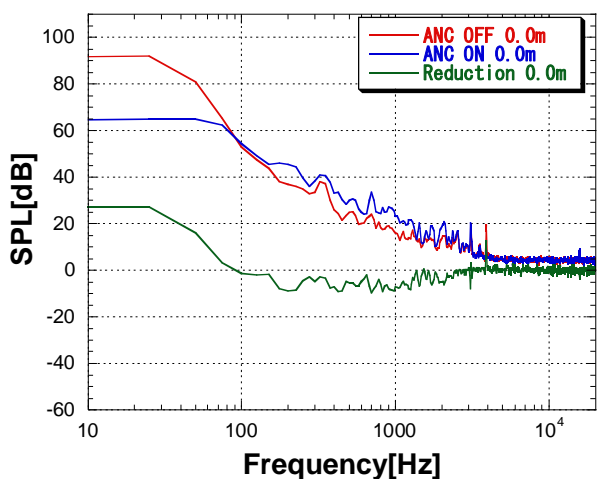


Fig.3-4-11

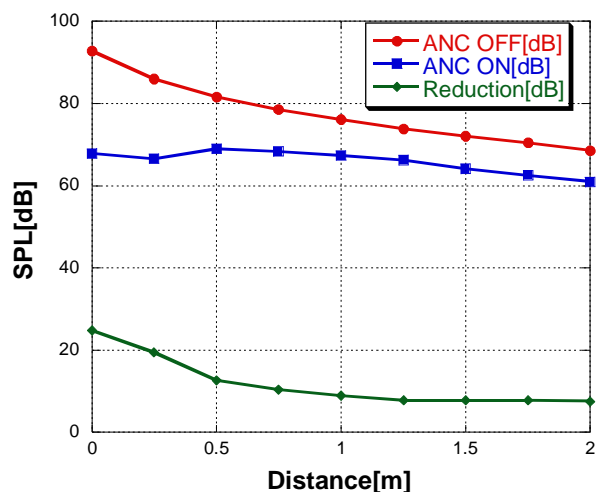


Fig.3-4-12 OA 値の距離減衰

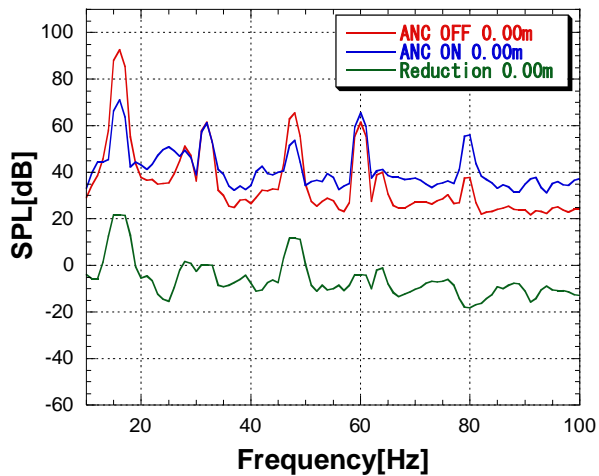


Fig.3-4-13

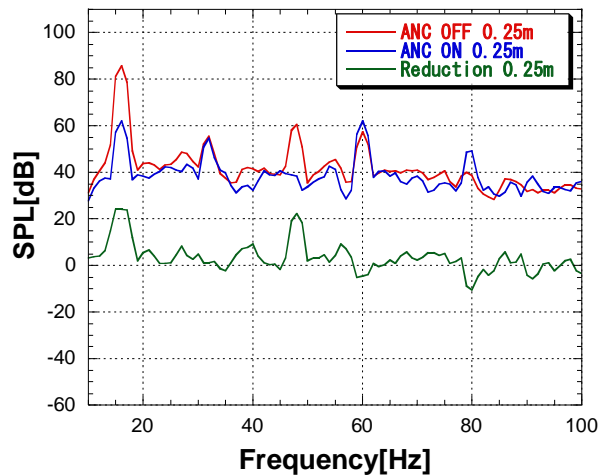


Fig.3-4-14

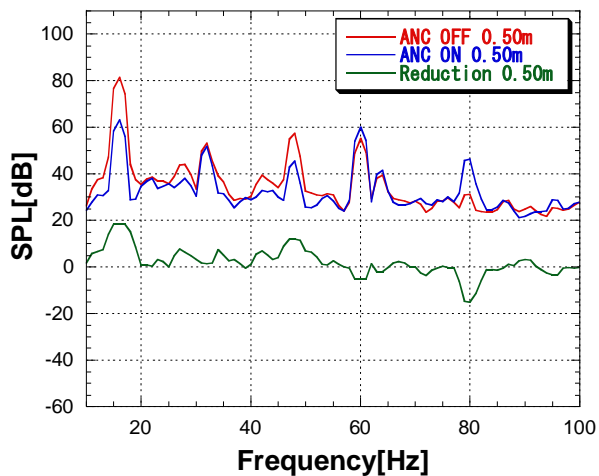


Fig.3-4-15

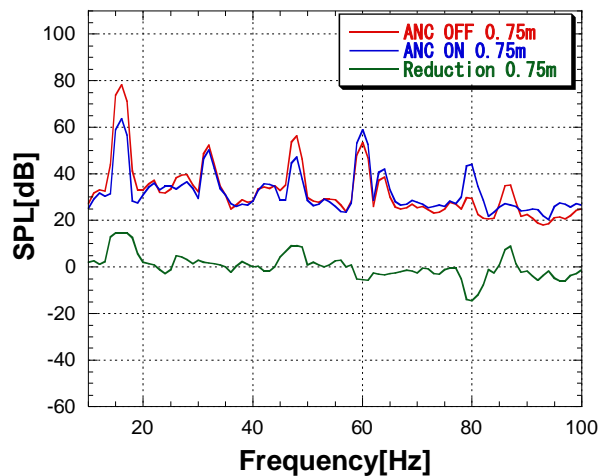


Fig.3-4-16

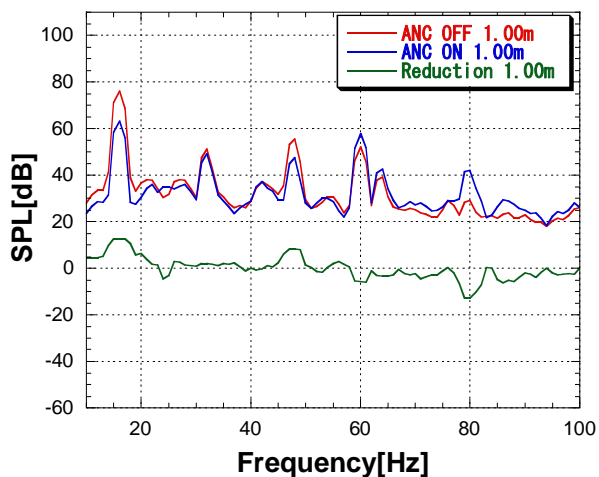


Fig.3-4-17

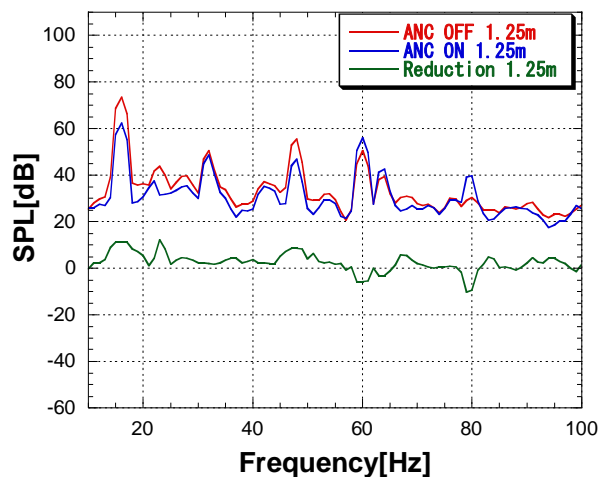


Fig.3-4-18

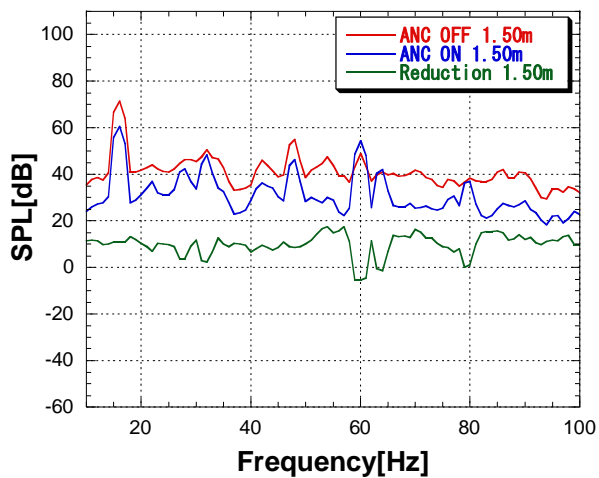


Fig.3-4-19

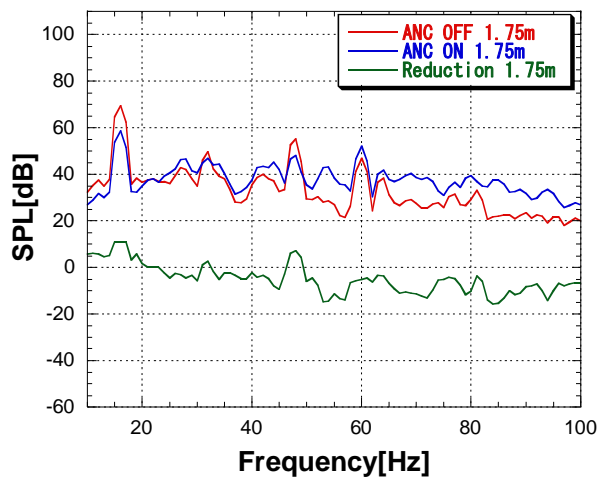


Fig.3-4-20

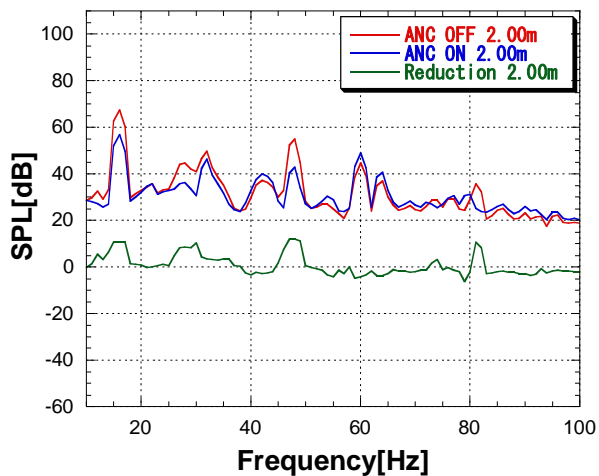


Fig.3-4-21

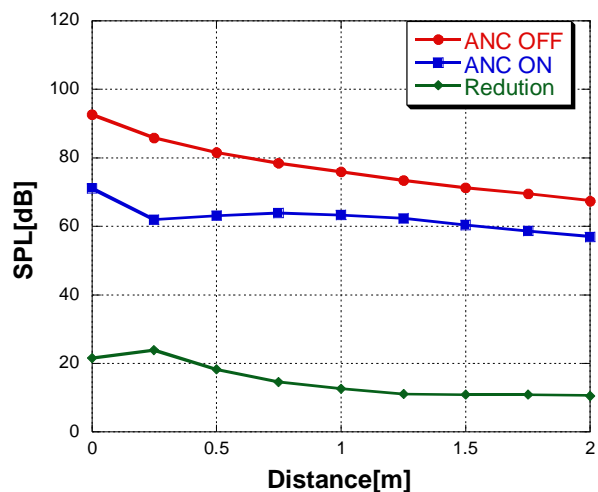


Fig.3-4-22 距離減衰

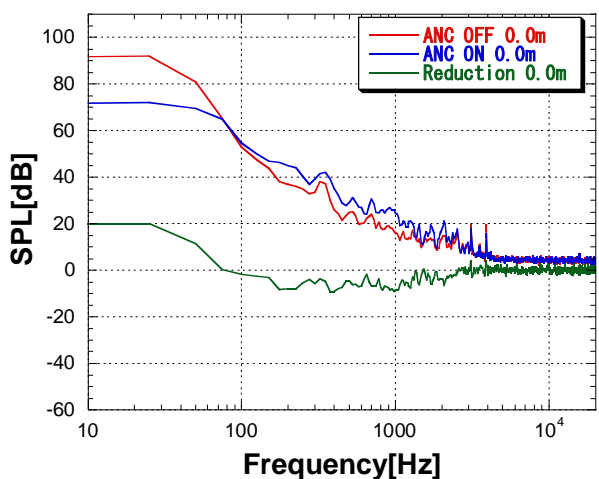


Fig.3-4-23

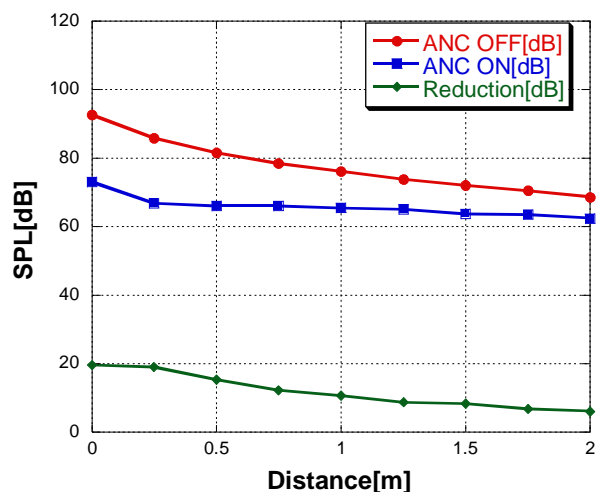


Fig.3-4-24 OA 値の距離減衰

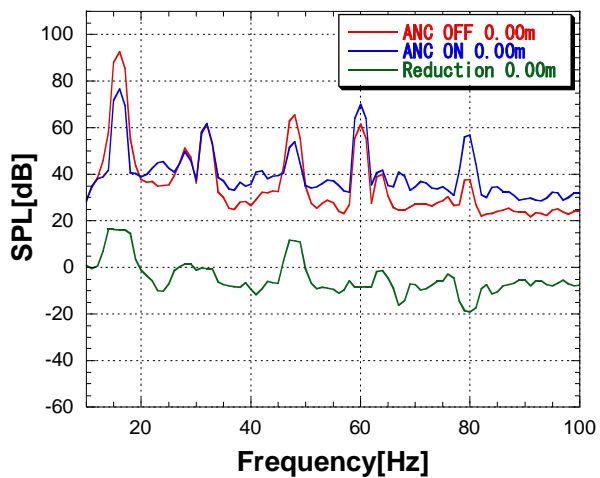


Fig.3-4-25

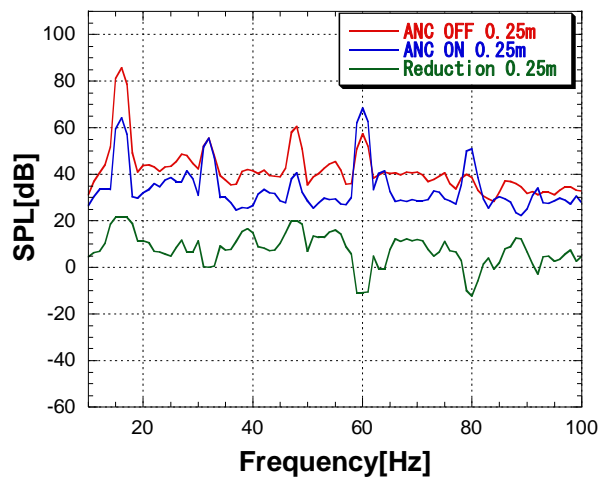


Fig.3-4-26

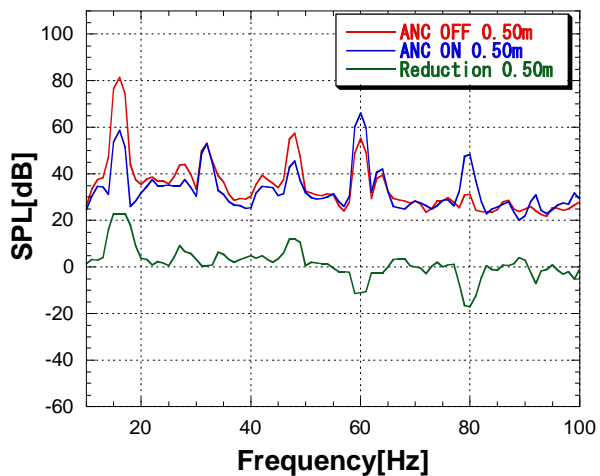


Fig.3-4-27

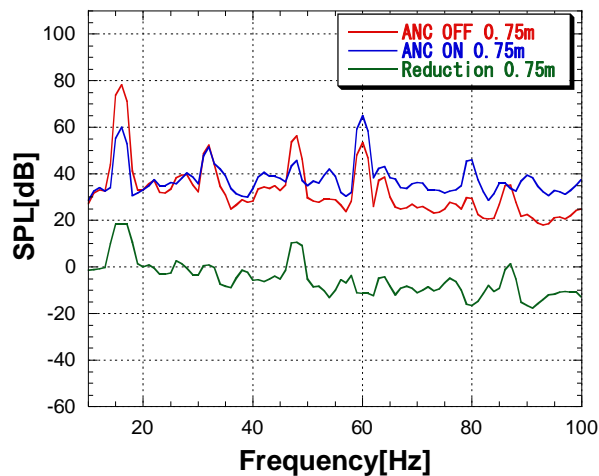


Fig.3-4-28

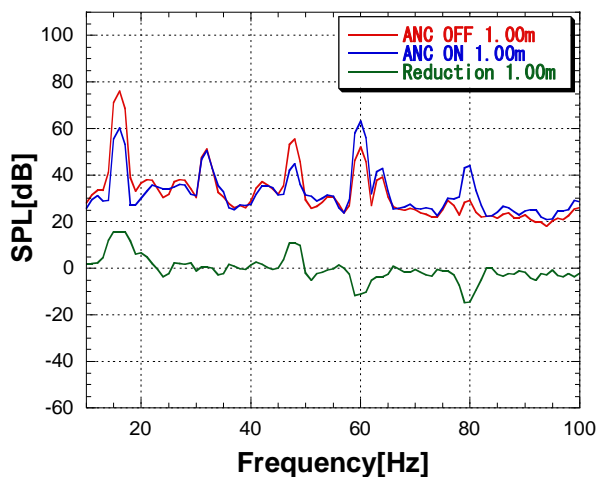


Fig.3-4-29

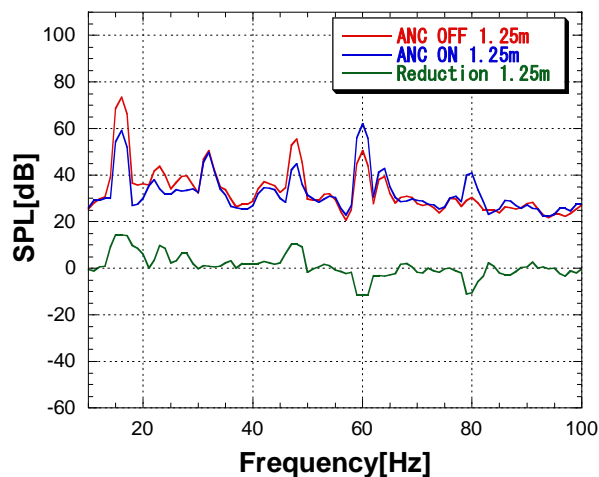


Fig.3-4-30

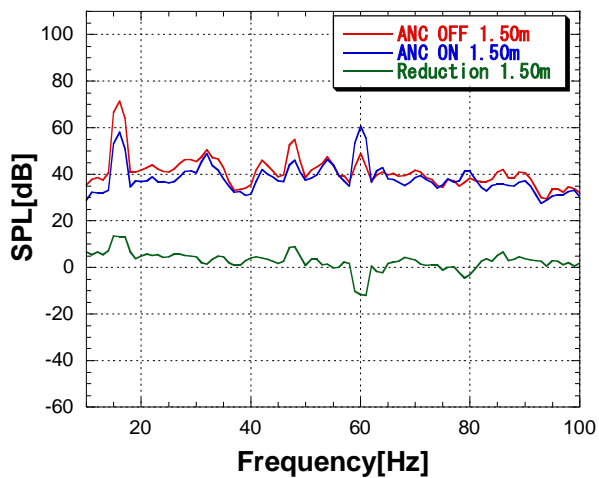


Fig.3-4-31

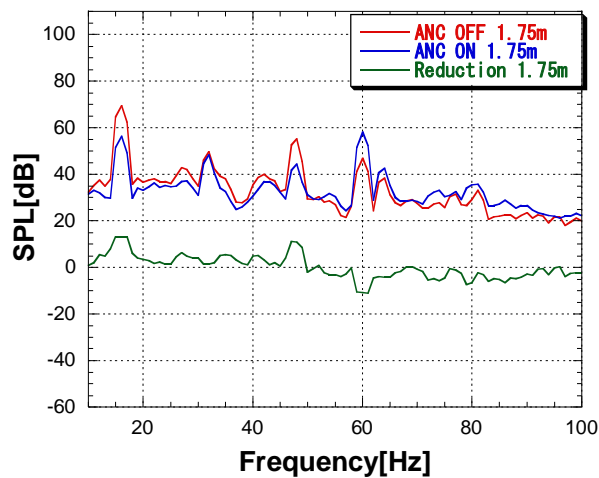


Fig.3-4-32

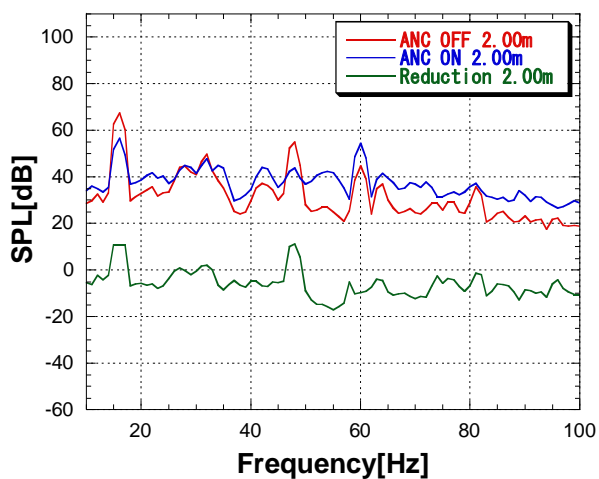


Fig.3-4-33

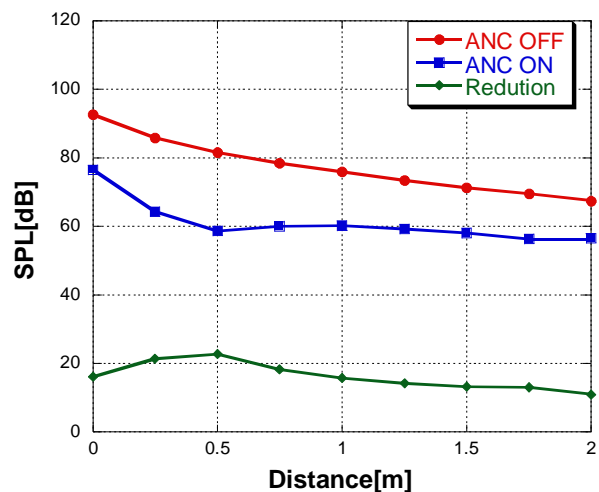


Fig.3-4-34 距離減衰

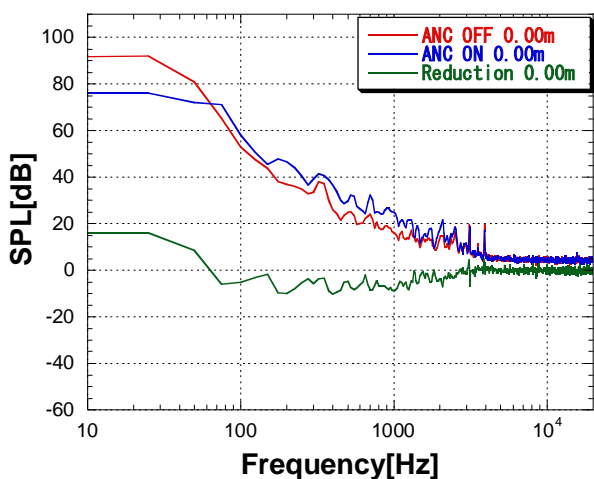


Fig.3-4-35

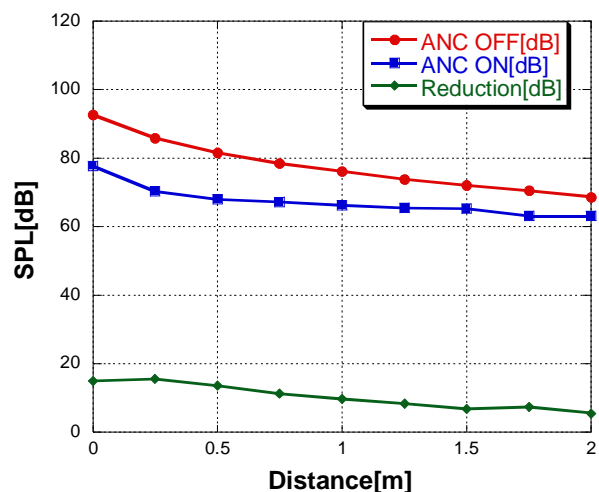


Fig.3-4-36 OA 値の距離減衰

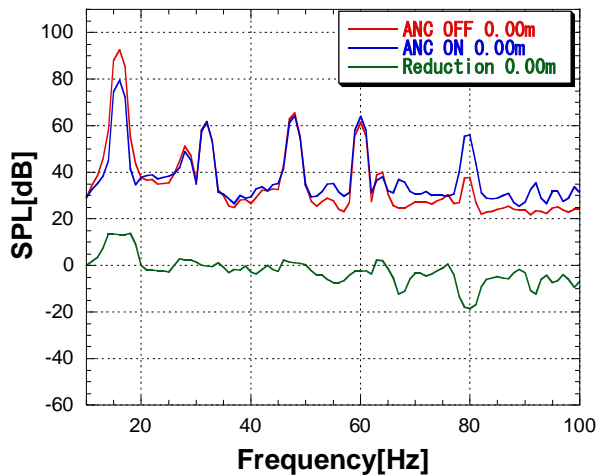


Fig.3-4-37

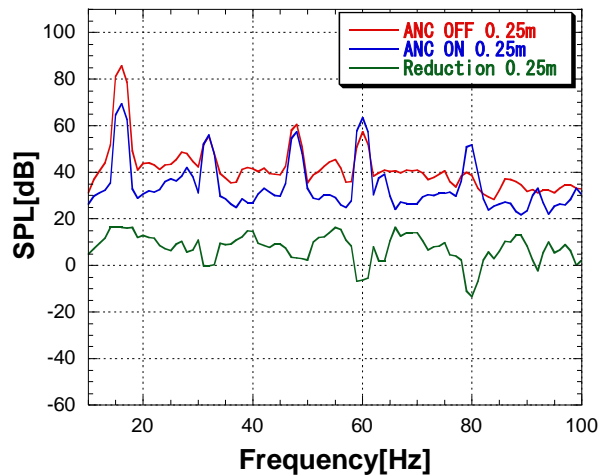


Fig.3-4-38

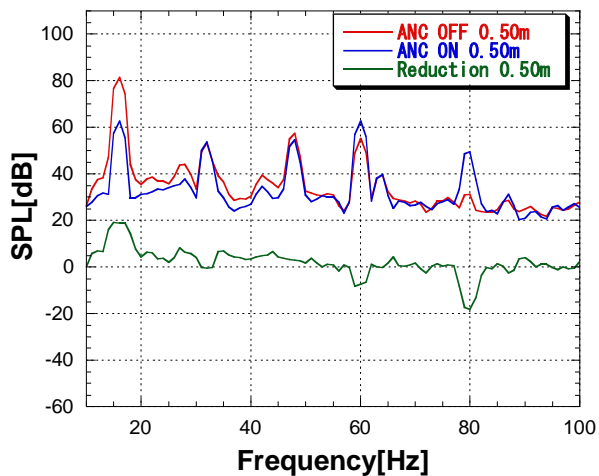


Fig.3-4-39

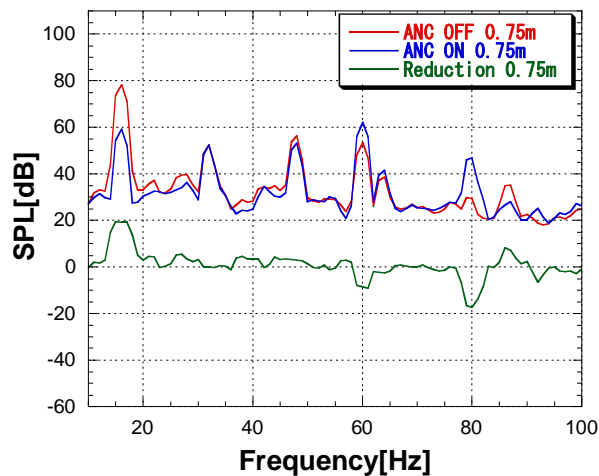


Fig.3-4-40

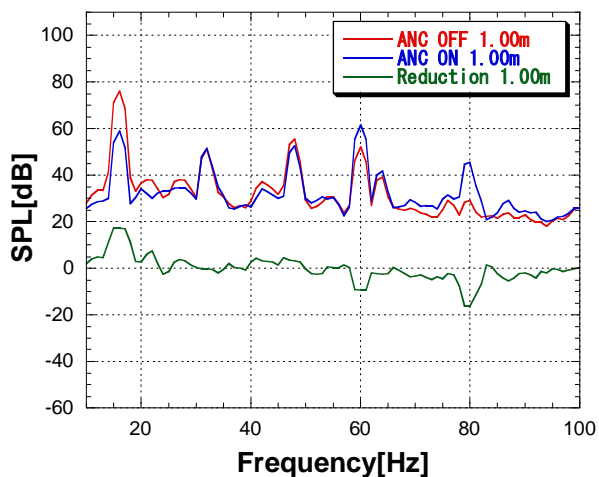


Fig.3-4-41

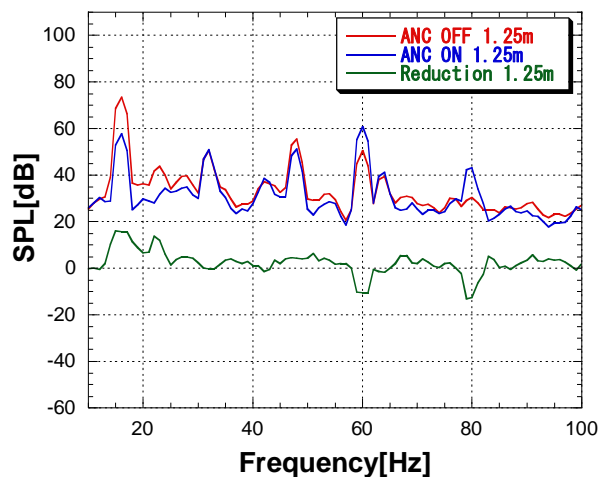


Fig.3-4-42

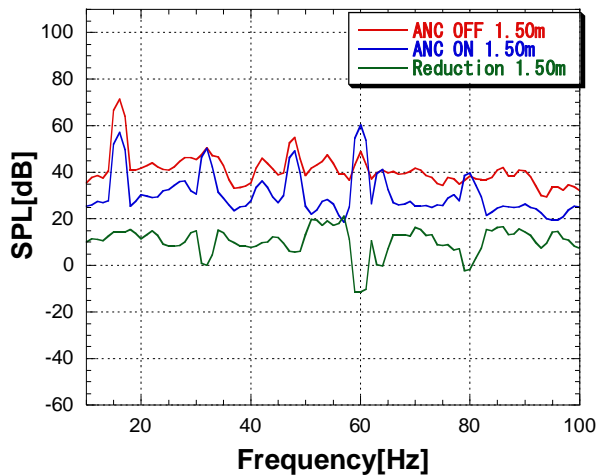


Fig.3-4-43

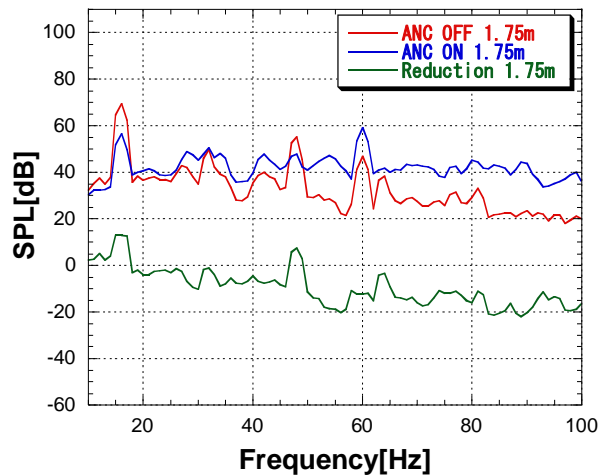


Fig.3-4-44

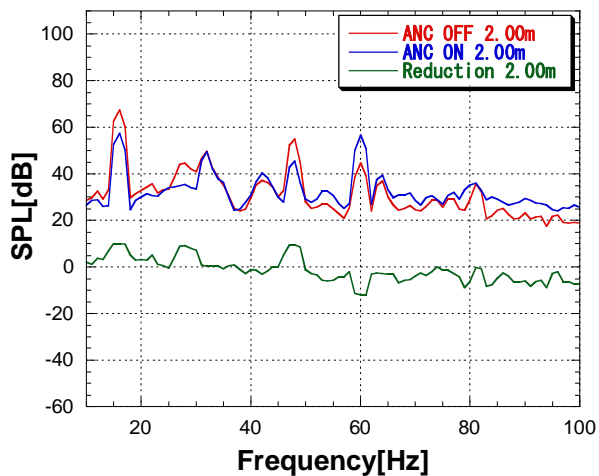


Fig.3-4-45

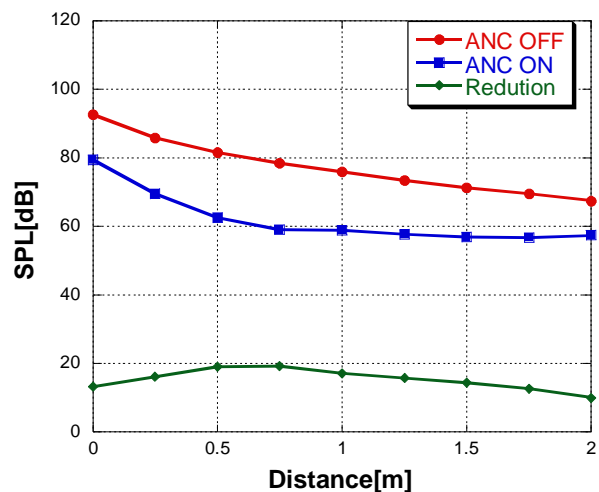


Fig.3-4-46 距離減衰

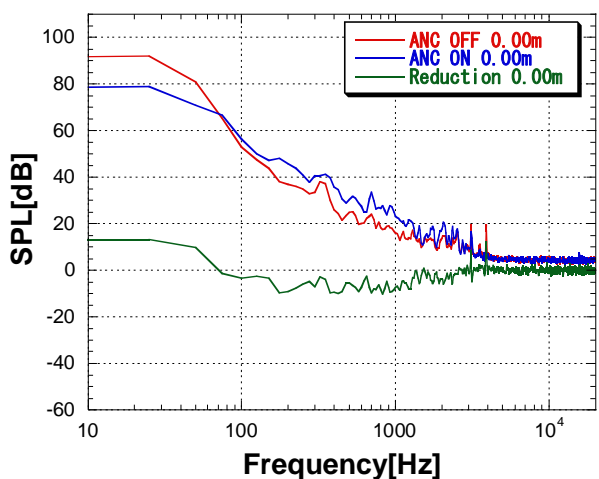


Fig.3-4-47

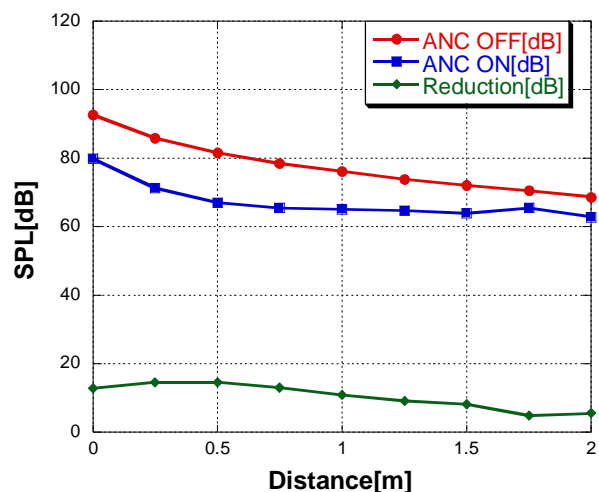


Fig.3-4-48 OA 値の距離減衰



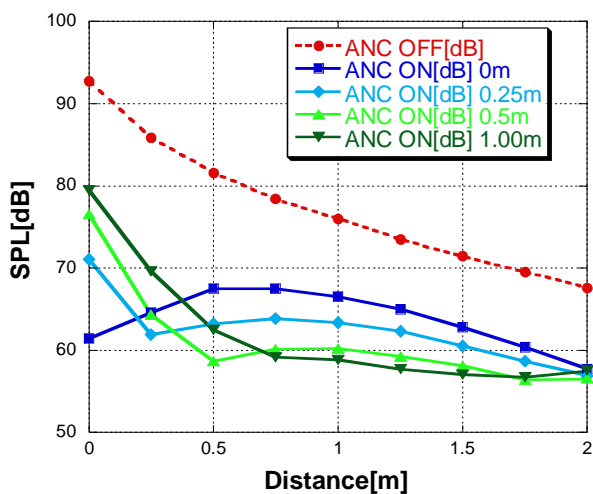


Fig.3-4-49 低減後音圧の比較

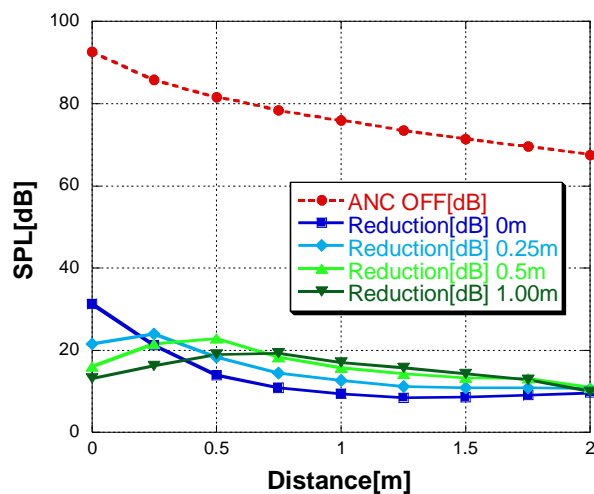


Fig.3-4-50 低減量の比較

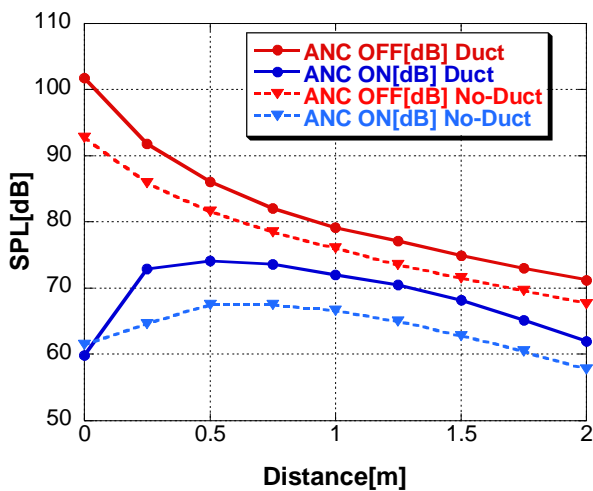


Fig.3-4-51 ダクト有無による低減効果

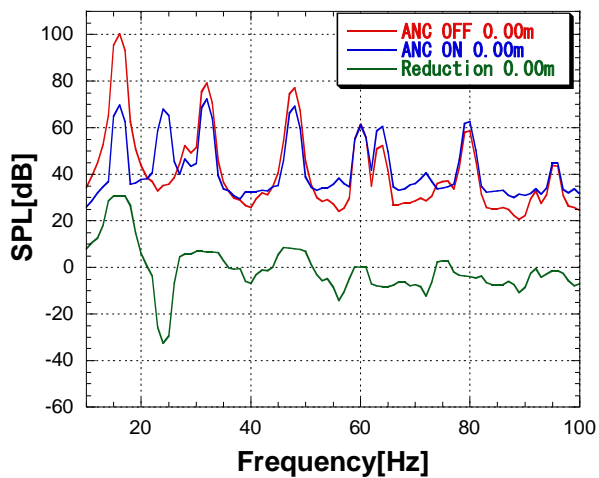


Fig.3-5-1

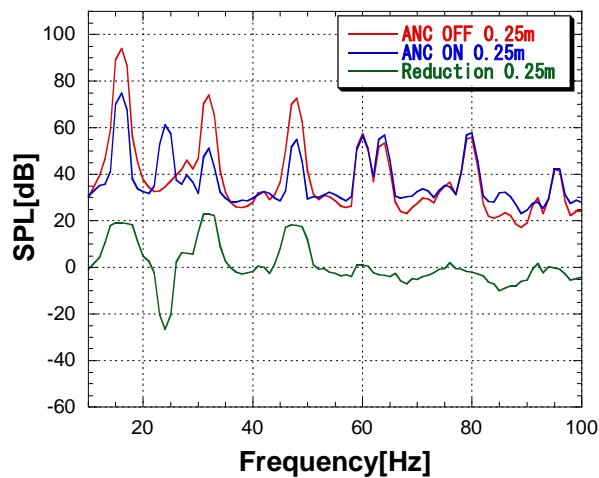


Fig.3-5-2

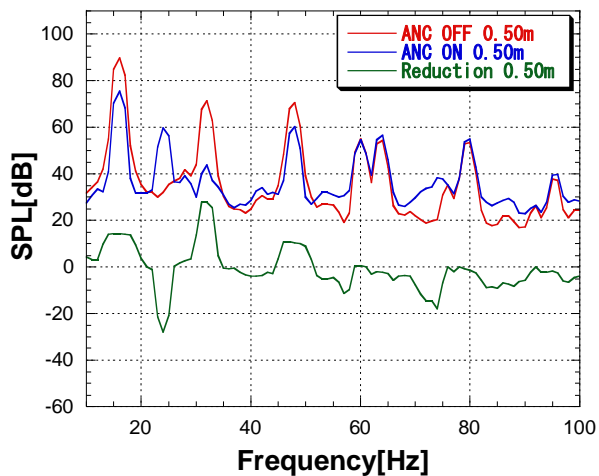


Fig.3-5-3

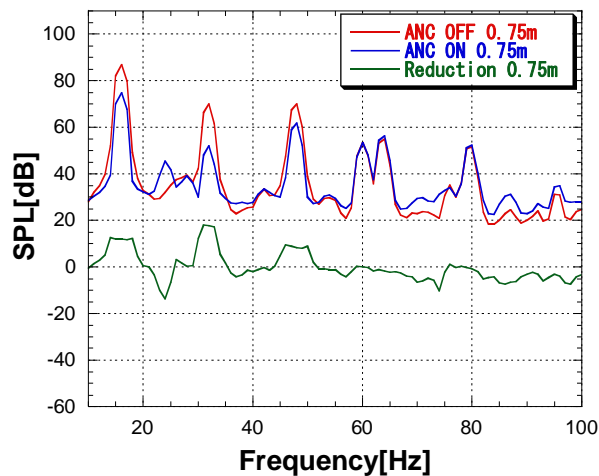


Fig.3-5-4

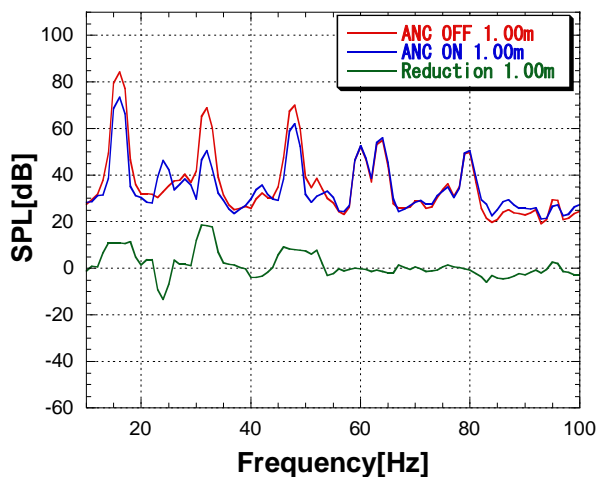


Fig.3-5-5

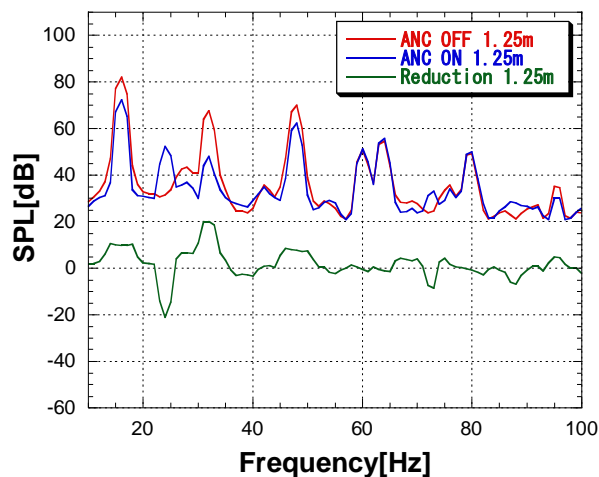


Fig.3-5-6

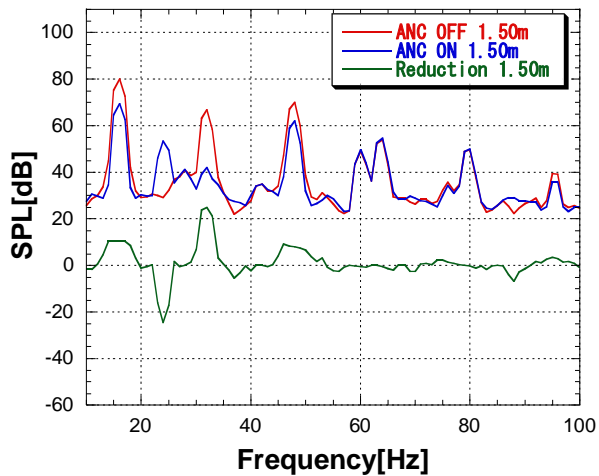


Fig.3-5-7

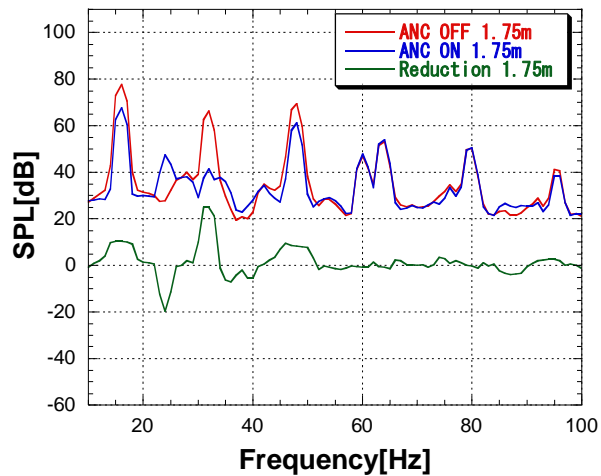


Fig.3-5-8

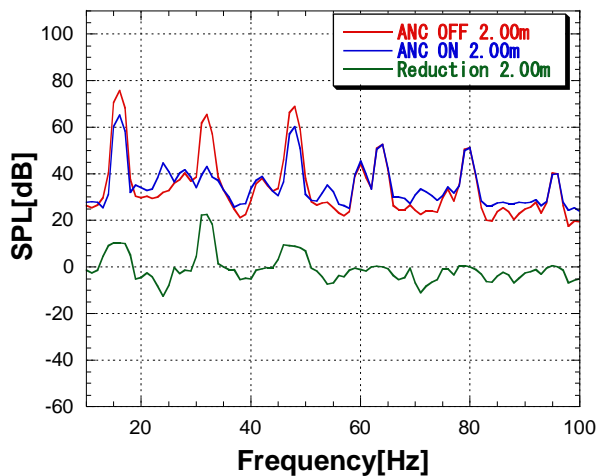


Fig.3-5-9

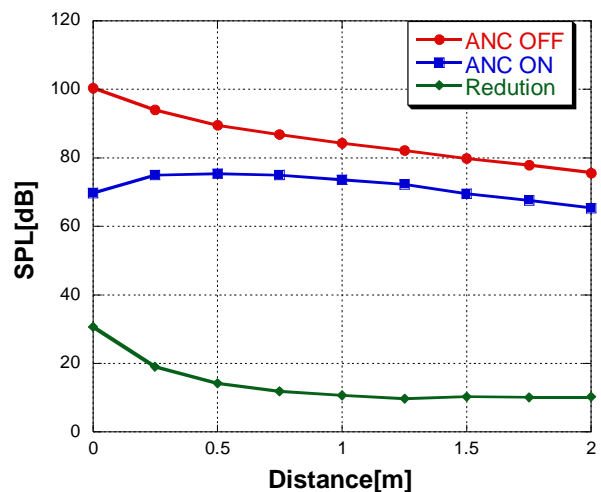


Fig.3-5-10 距離減衰

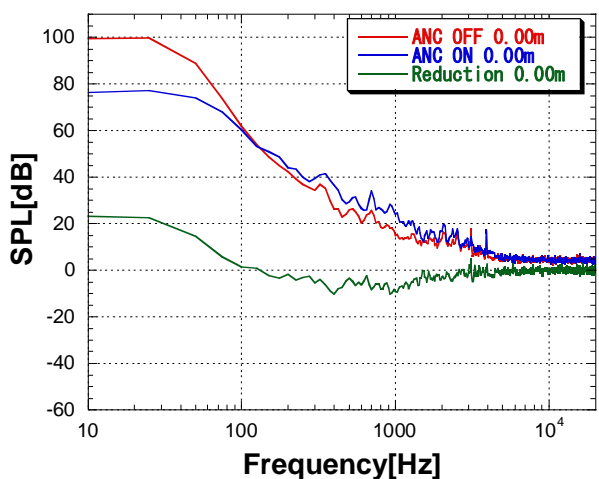


Fig.3-5-11

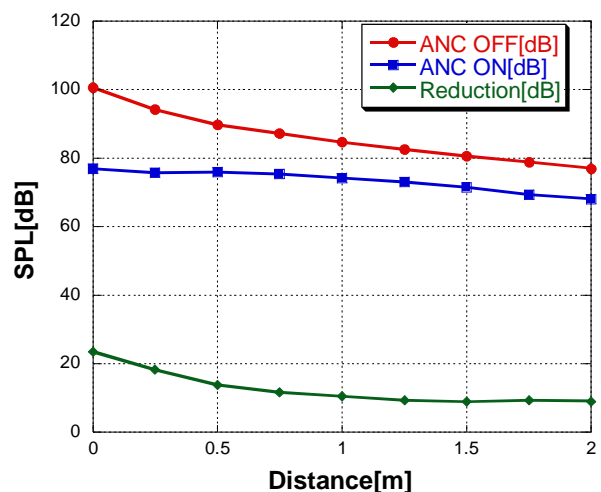


Fig.3-5-12 OA 値の距離減衰

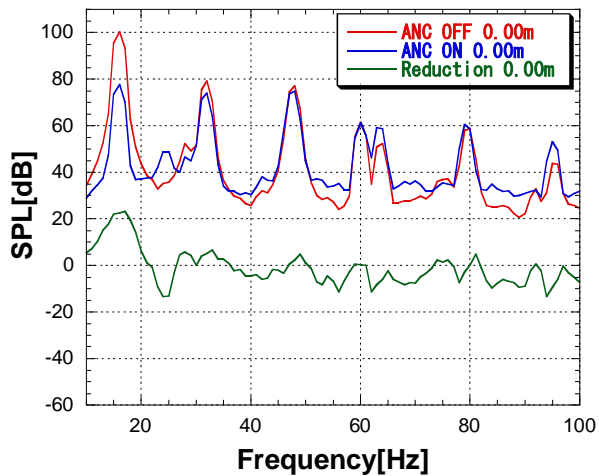


Fig.3-5-13

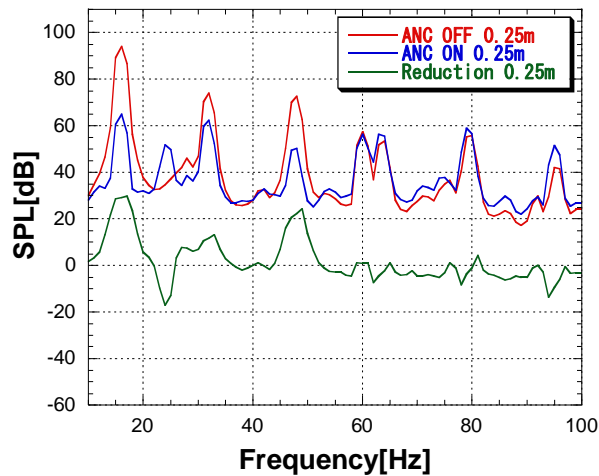


Fig.3-5-14

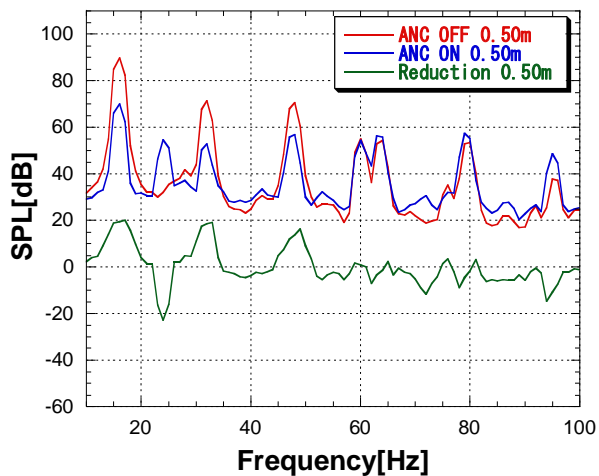


Fig.3-5-15

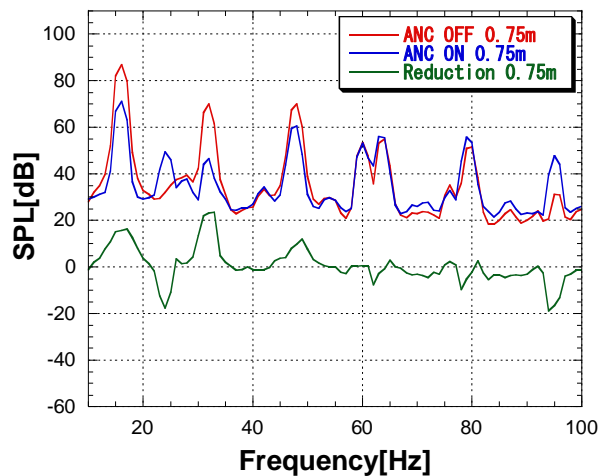


Fig.3-5-16

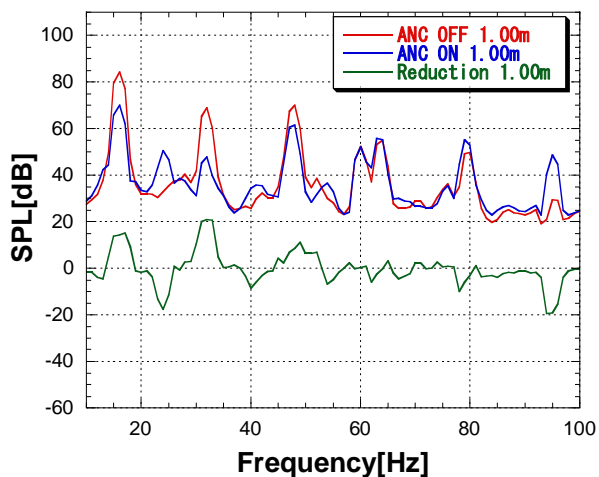


Fig.3-5-17

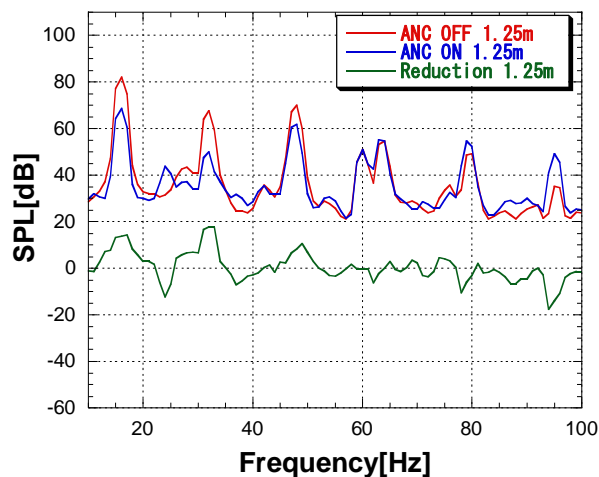


Fig.3-5-18

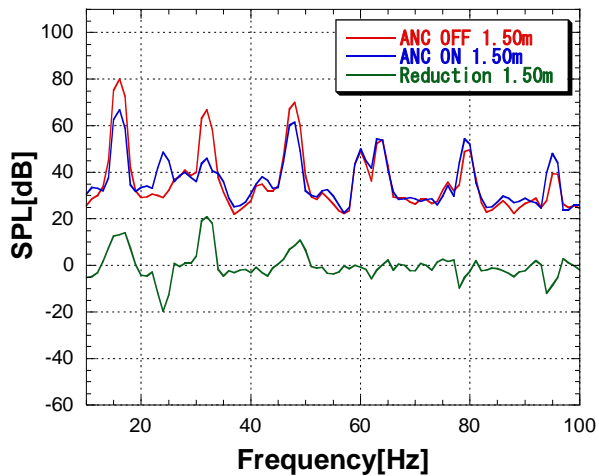


Fig.3-5-19

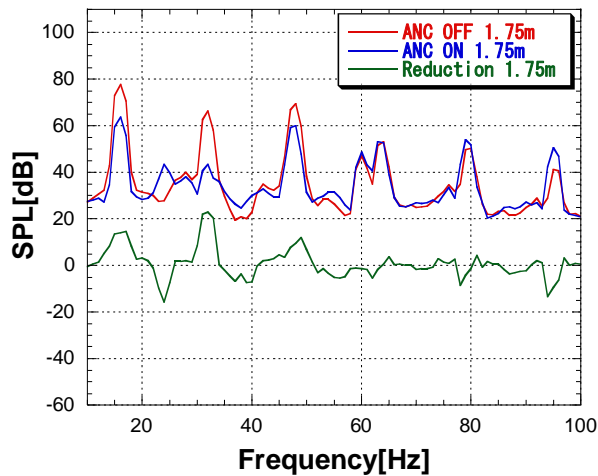


Fig.3-5-20

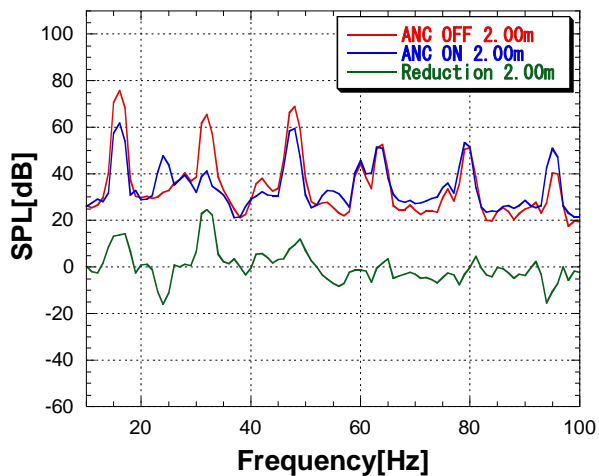


Fig.3-5-21

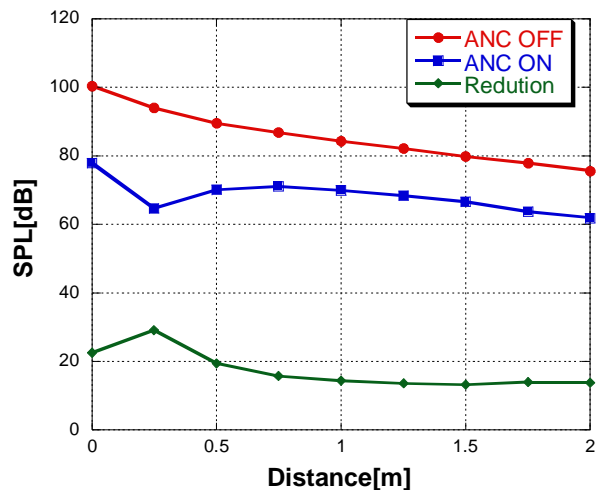


Fig.3-5-22 距離減衰

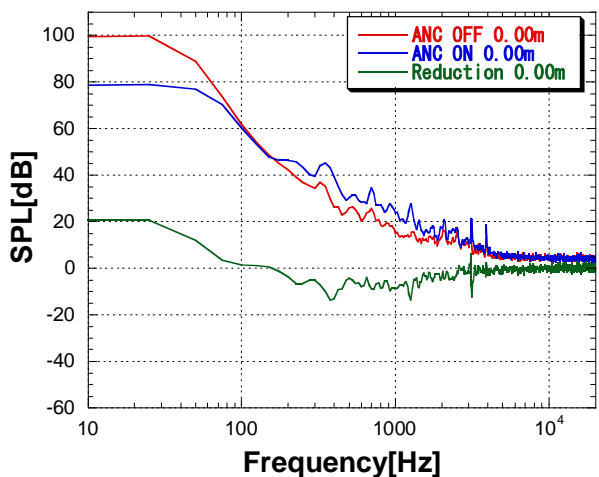


Fig.3-5-23

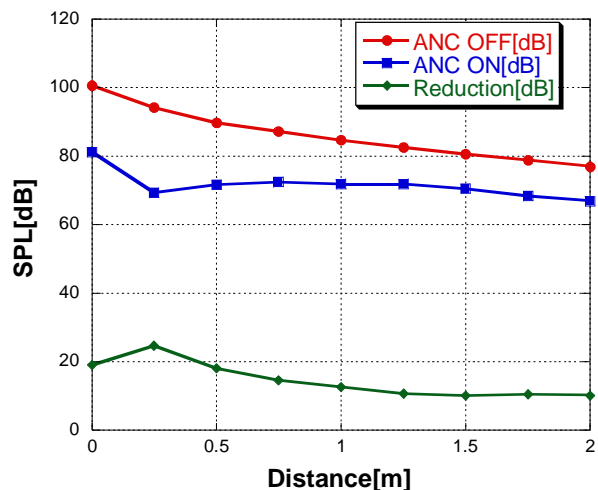


Fig.3-5-24 OA 値の距離減衰

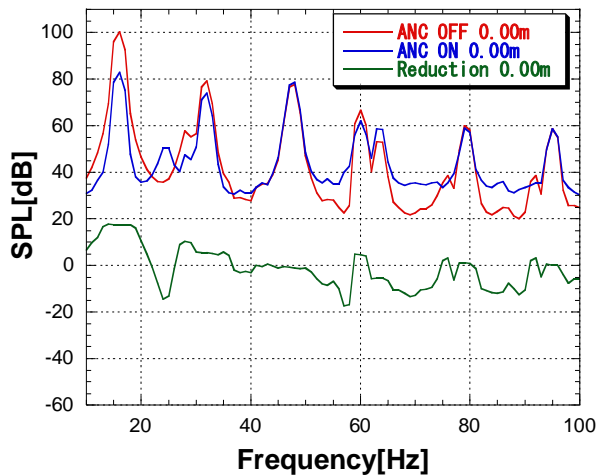


Fig.3-5-25

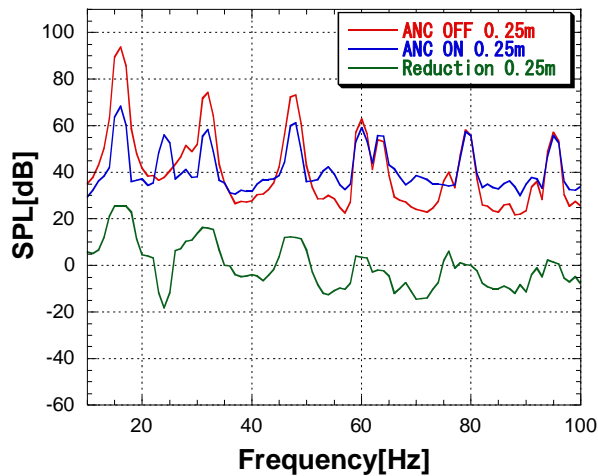


Fig.3-5-26

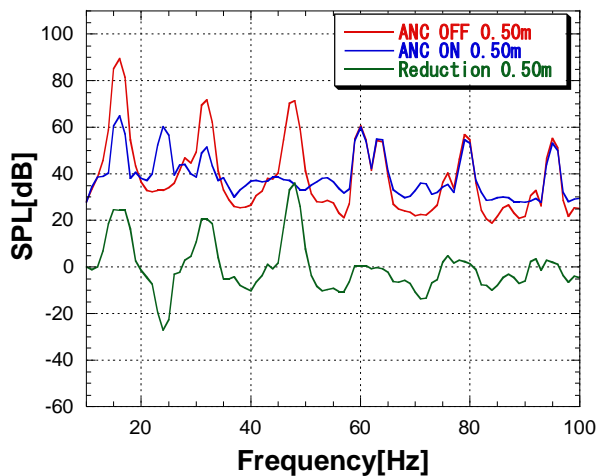


Fig.3-5-27

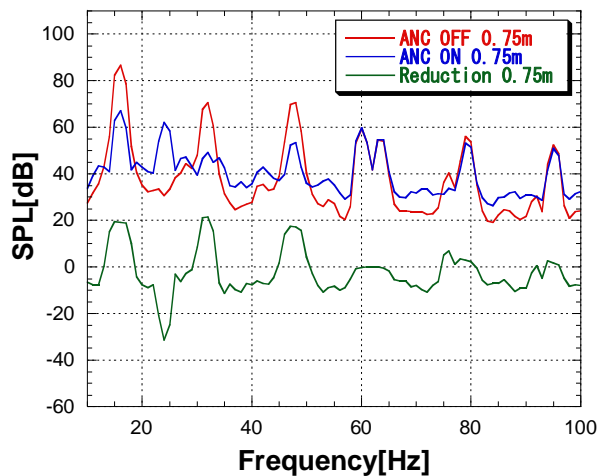


Fig.3-5-28

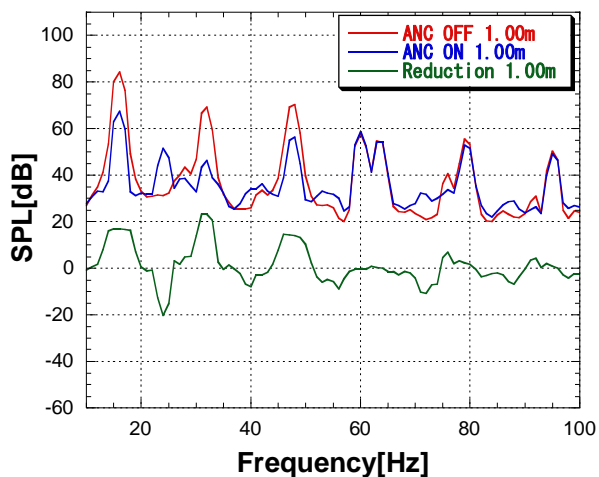


Fig.3-5-29

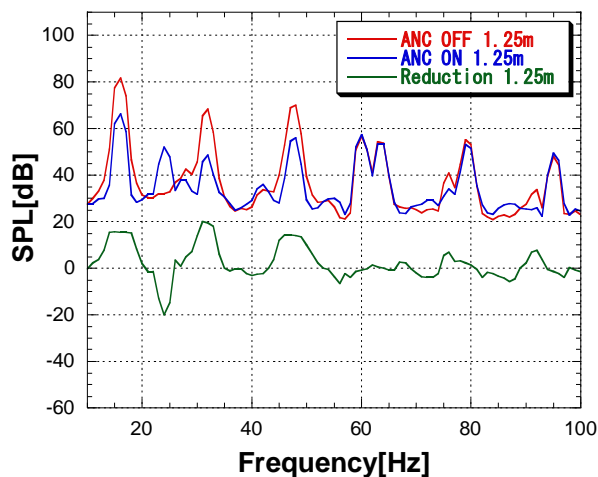


Fig.3-5-30

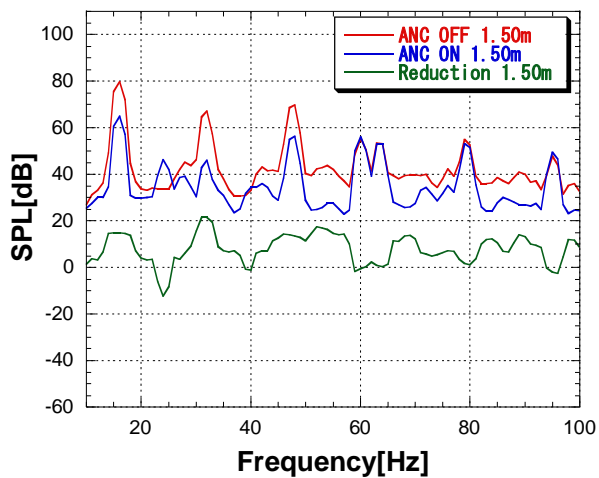


Fig.3-5-31

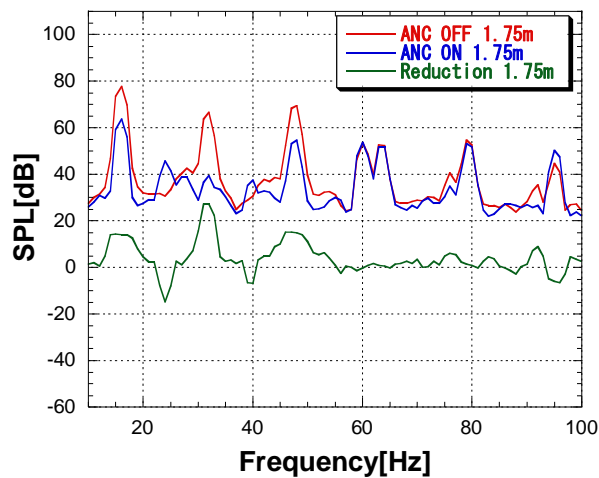


Fig.3-5-32

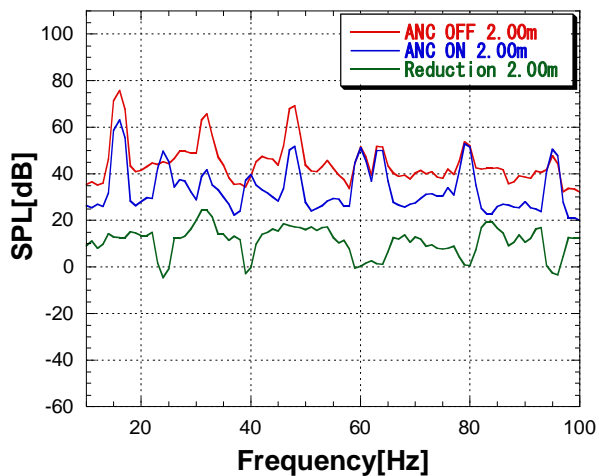


Fig.3-5-33

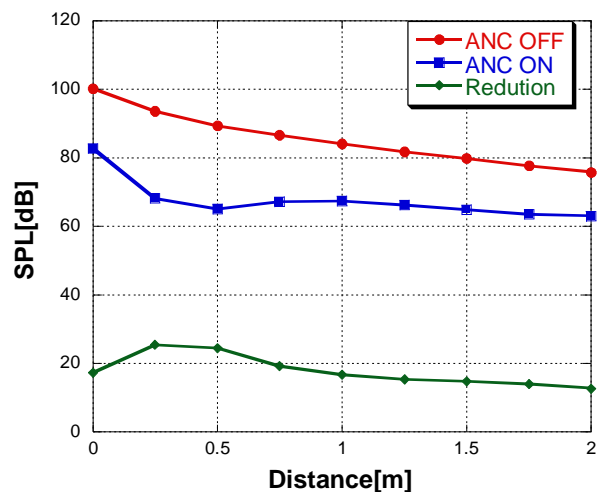


Fig.3-5-34 距離減衰

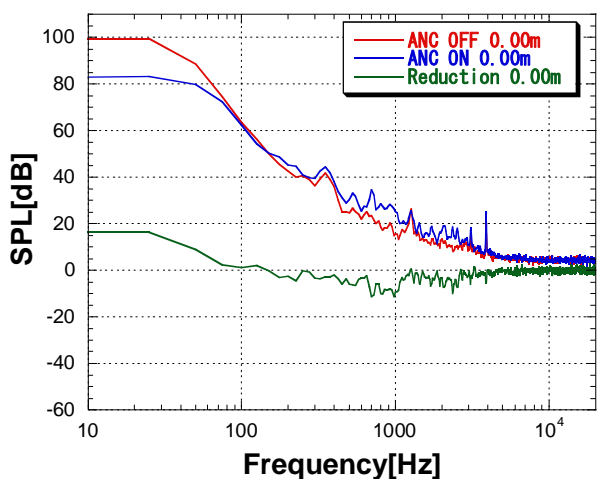


Fig.3-5-35

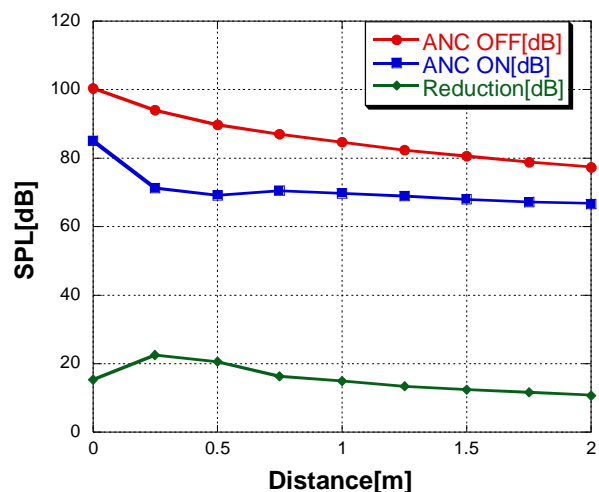


Fig.3-5-36 OA 値の距離減衰

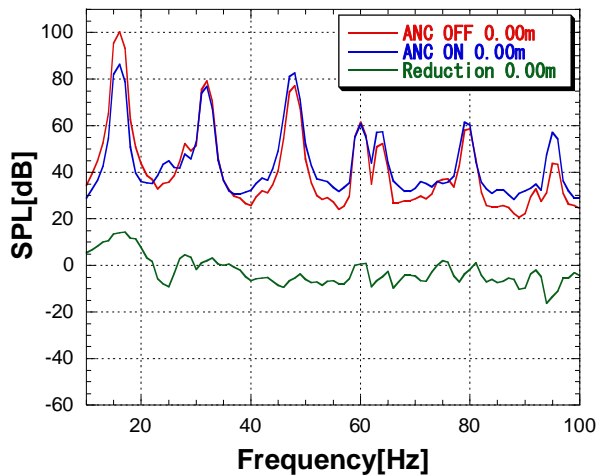


Fig.3-5-37

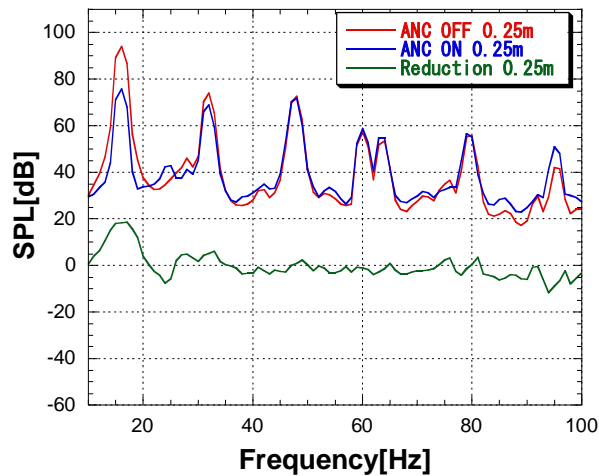


Fig.3-5-38

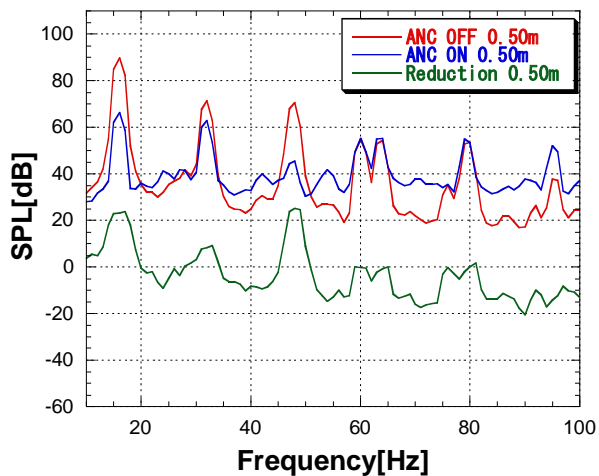


Fig.3-5-39

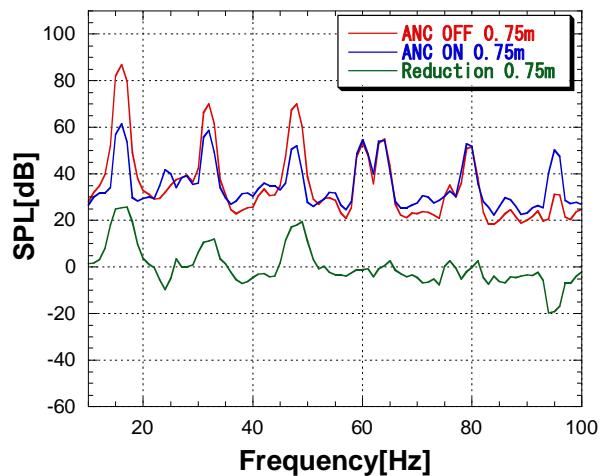


Fig.3-5-40

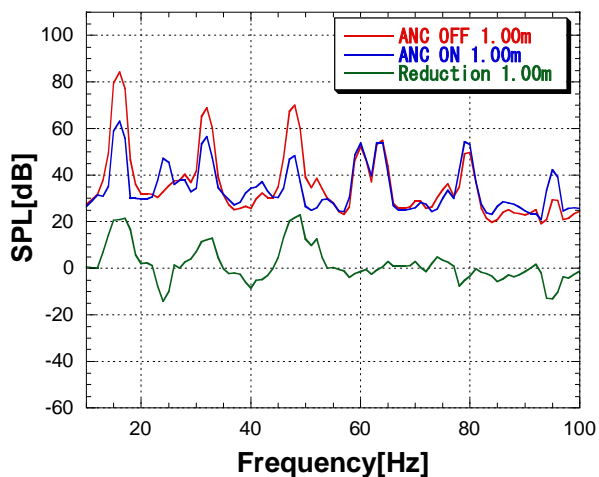


Fig.3-5-41

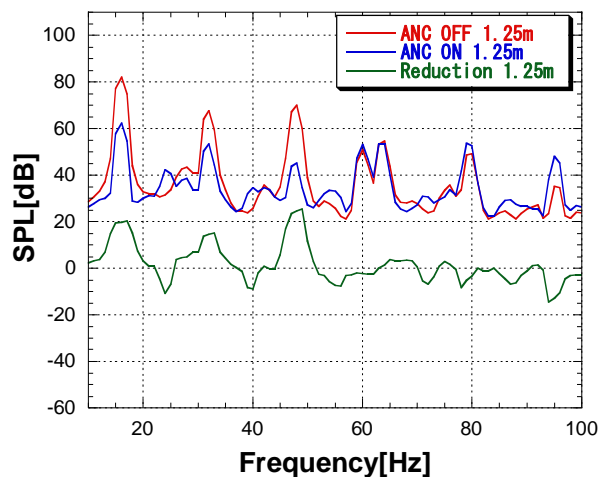


Fig.3-5-42



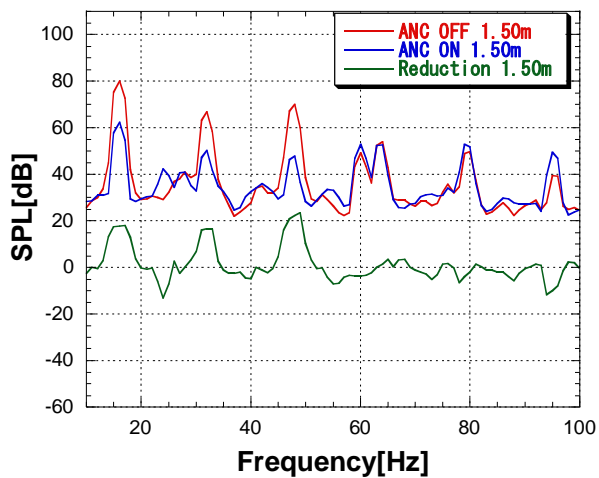


Fig.3-5-43

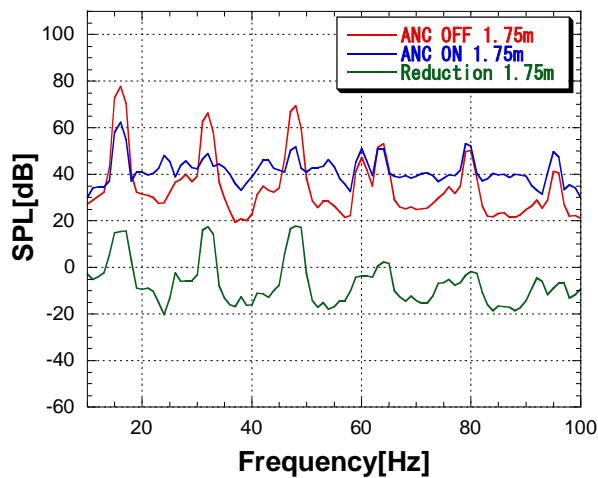


Fig.3-5-44

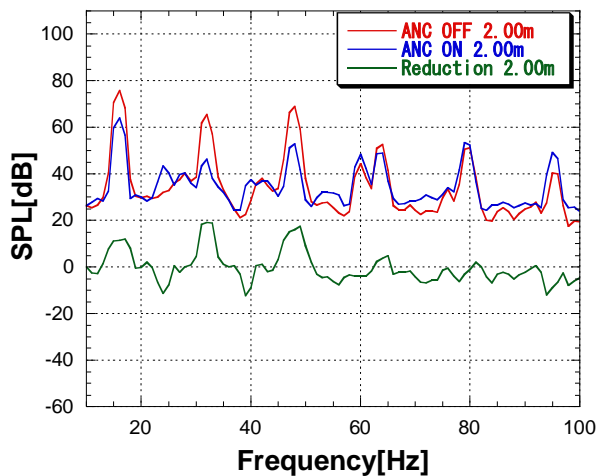


Fig.3-5-45

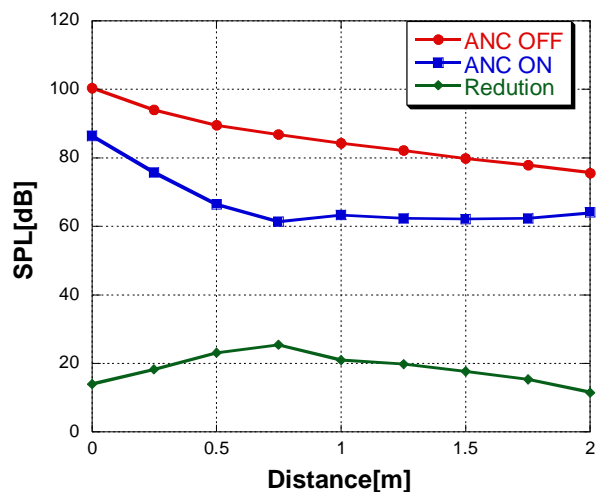


Fig.3-5-46 距離減衰

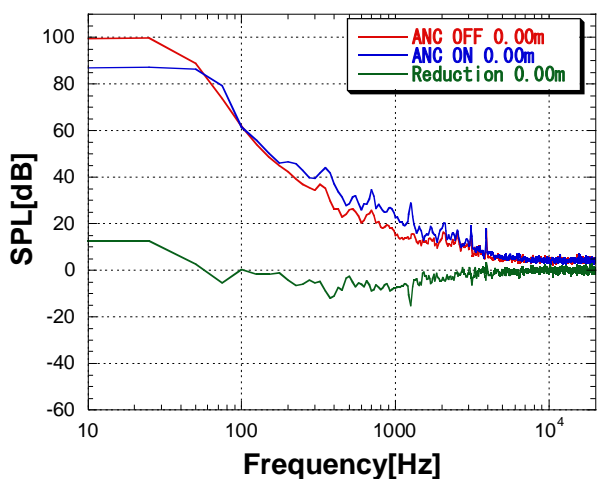


Fig.3-5-47

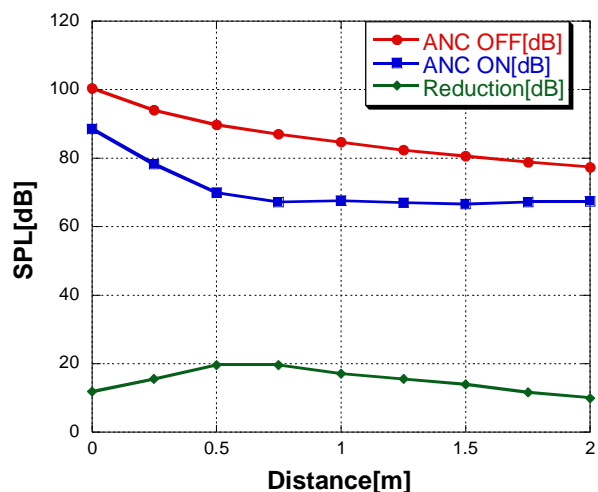


Fig.3-5-48 OA 値の距離減衰

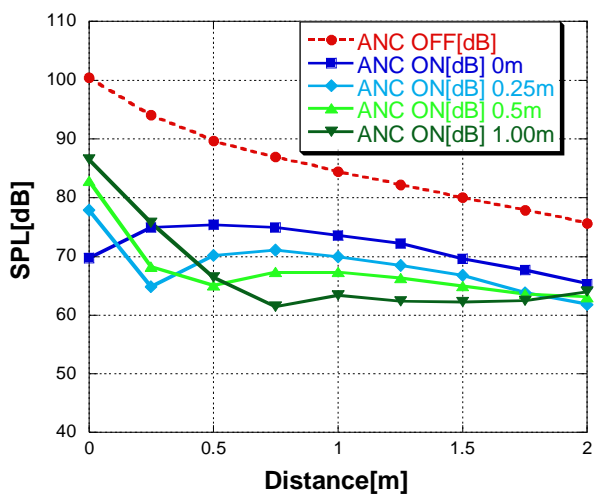


Fig.3-5-49 低減後音圧の比較

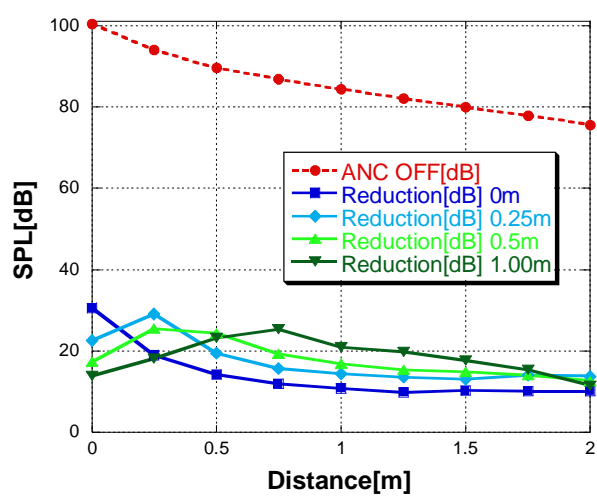


Fig.3-5-50 低減量の比較

Table.3-6-1

条件	二次音源	エラーマイク位置	ダクト底部	増音周波数[Hz]	模型防音ハウスの 共鳴周波数
No.1	fd 20	開口端	○	22	25
No.2	fd 16	開口端	○	23	25
	"	0.25m	○	22	25
	"	0.50m	○	23	25
	"	1.00m	○	23	25
No.3	"	開口端	○	22	25
	"	0.25m	○	23	25
	"	0.50m	○	23	25
	"	1.00m	○	23	25
No.4	"	開口端	×	25	27 or 29
	"	0.25m	×	25	27 or 29
	"	0.50m	×	24	27 or 29
	"	1.00m	×	-	27 or 29
No.5	"	開口端	×	24	27 or 29
	"	0.25m	×	24	27 or 29
	"	0.50m	×	24	27 or 29
	"	1.00m	×	25	27 or 29

## 第 4 章 結論

### 4.1 16Hz-100dB 騒音に対する ANC 適用

fd20 および fd16 を用いて、16Hz-100dB 騒音に ANC を適用した。その結果、以下のことが分かった。

- ・バスレフ型でダクトの共鳴周波数が 20Hz である二次音源 fd20 を用いた場合、少なくとも 16Hz-100dB 騒音までは低減効果が得られ、ANC が適用可能である。
- ・低減量は二次音源の周波数特性によって増減し、騒音の周波数とダクトの共鳴周波数を一致させ出力を増加させることでより大きな低減効果が得られる。
- ・バスレフ型でダクトの共鳴周波数が 16Hz の二次音源 fd16 を用いた場合、16Hz-100dB 騒音に対し低減効果が得られ、ANC が適用可能である。

### 4.2 16Hz-110dB 騒音に対する ANC 適用

fd16 を用いて、16Hz-110dB 騒音に ANC を適用した。その結果、以下のことがわかった。

- ・バスレフ型でダクトの共鳴周波数が 16Hz の二次音源 fd16 を用いた場合、16Hz-110dB 騒音に対し低減効果が得られ、ANC が適用可能である。

### 4.3 二次音源の特性による低減効果の変化

今年度作成したバスレフ型でダクトの共鳴周波数が 16Hz の fd16 を用いて実験を行った。また、同じくバスレフ型で共鳴周波数が 20Hz の fd20 を用いた実験結果と比較した。その結果、以下のことが分かった。

- ・バスレフ型の共鳴周波数を 16Hz に設計することで 16Hz の出力が増加し、低減効果の向上が期待できる。
- ・バスレフ型の共鳴周波数を騒音の周波数と一致させることで、より大きな音圧の騒音へも ANC の適用が可能となる。

#### 4.4 騒音の強さによる低減量の変化

16Hz 騒音の音の強さを変えて実験を行なった結果、以下のことが分かった。

- ・同程度の低減量は得られるが、低減後音圧には差がある。そのため ANC を適用した場合でも、騒音の強さが強いほど騒音被害を起こす可能性が高い。

#### 4.5 ダクト底部の有無による特性

低減量の増加を期待しダクト底部を取り付けて実験を行なっていたが、実際にはダクト底部はないため、実用化に向けてダクト底部を取り外して実験を行なった。その結果、以下のことが分かった。

- ・低減量はダクト底部有りの場合の方が大きな値が得られたが、低減後音圧は同等であり、ダクト底部を取り付けることの利点は少ない。
- ・ダクト底部を取り付けると騒音の伝達方向が限定されるため、ダクト底部無しの場合と比較して、距離減衰が得られにくい。
- ・上記の結論より、実際の防音ハウスと同じように、ダクト底部は取り外し ANC 適用を行なった方が好ましい。

#### 4.6 距離減衰

工事作業員や近隣住民への騒音被害を想定すると、防音ハウスから離れた音場での特性の把握は重要である。そのため、逆自乗則に従い実験室で半無響室として扱える 0～2m の範囲に於いても音圧の測定を行なった。その結果、以下のことが分かった。

- ・エラーマイク位置によって、ダクト開口端で一旦下がった音圧が逆自乗側に従わず増音する可能性があり、エラーマイクの位置は音場特性に合わせて検討する必要がある。
- ・実際に ANC を適用し騒音低減を行なう際には、防音ハウス付近だけでなく、遠距離場に於いても音圧を測定し低減効果を評価すべきである。

#### 4.7 エラーマイクの位置による特性

エラーマイクをダクト開口端に設置し ANC 適用を行なった結果、距離減衰が得られず近距離場で増音する結果が多々見られた。そのため、エラーマイク位置を 0.25m, 0.5m, 1m 地点に設置し、それぞれ実験を行なった。その結果、以下のことが分かった。

- ・エラーマイク位置がダクト開口端に近いほどダクト開口端に於ける低減量が得られるが、ダクト開口端から離れるほど低減量が得られにくい。
- ・エラーマイクをダクト開口端から離れた点に位置することで逆自乗側に従い音圧が距離減衰する傾向にあるが、ダクト開口端付近に於ける低減量は減少する。
- ・ダクト開口端に於いてある程度の低減量が得られ、かつ近距離場に於いても騒音の基準音圧を下回る結果を得られたため、実験上は 0.25m 地点にエラーマイクを設置すべきである。
- ・0.25m 地点はダクト開口端の音場特性と、近距離場の音場特性を併せ持つと考えられる。実際に ANC を適用する場合、ダクト内の特性と自由音場の特性を併せ持つ位置にエラーマイクを設置すべきである。

## 参考文献

- [1] 実用 騒音・振動制御ハンドブック, 株式会社エヌ・ティー・エス, (2000).
- [2] 中野有朋, 超低周波音 基礎・測定・評価・低減対策, 技術書院, (2002).
- [3] 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, (2006).
- [4] 小島健太, 防音ハウスの低周波音減衰性能の最適化に関する研究, 九州大学大学院総合理工学府修士論文, (2007).
- [5] 古賀智, 防音ハウスの超低周波音低減装置に関する研究, 九州大学大学院総合理工学府修士論文, (2008).
- [6] 川口大輔, 防音ハウスにおける ANC を用いた超低周波低減装置の開発研究, 九州大学大学院総合理工学府修士論文, (2010).
- [7] 牛島大樹, 超低周波用防音ハウスにおける ANC 適用のための研究, 九州大学大学院総合理工学府修士論文, (2011).
- [8] 沖崎省太, 超低周波用防音ハウスにおける ANC を用いた騒音低減に関する研究, 九州大学大学院総合理工学府修士論文, (2017).
- [9] 鈴木昭次, 西村正治, 雉本信哉, 御法川学, 機械音響学, コロナ社, (2004).
- [10] 辻井重男, 適応信号処理, 株式会社昭晃堂, (1995).
- [11] 飯國洋二, 適応信号処理アルゴリズム, 培風館, (2000).
- [12] 太田光雄, 基礎物理音響工学, 朝倉書店, (1990).
- [13] A.Gonzalez, M.Ferre, M.de Diego, G.Pinero, J.J Garcia-Bonito, Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control, Journal of sound and vibration, (2003).
- [14] Vance Dickason, Loudspeaker Design Cookbook 7<sup>th</sup> edition, Audio Amateur Press(2006).

## 謝辞

修士課程から青木研究室に所属し、本論文を書き上げるまでに、沢山の方々にお世話になりました。

青木先生には研究分野である音響工学について様々な知識をご教授頂きました。また、人生の大先輩でもある先生には、幅広い知識を教えて頂きました。二年間大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

安養寺先生は研究者としての功績はもちろん、先生の格好良い姿に憧れています。また、私たちが研究に専念できるよう、大変お忙しい中でも研究室全体のお世話もして頂きました。ありがとうございました。

本研究のパートナーである横山恭平君と共に研究ができ、二年間楽しく伸び伸びと研究に打ち込むことができました。不器用な私に知恵をお貸し頂き、大変助かりました。横山君の今後の学生生活が実りあるものになるよう願っています。

修士2年の猪頭宏平君、工藤寛之君、高岡大樹君、中村圭佑君、濱田大生君、山下直城君、山元龍君には公私共に大変お世話になりました。研究室での会話や、皆で昼食を食べた楽しい時間は私の大切な思い出です。これからもエンジニアとして切磋琢磨し合う、良い関係でありたいと思っています。大変お世話になりました。

修士1年生、学部4年生も、人付き合いが苦手な私に優しく接して頂き感謝しています。これからも研究頑張ってください。残り少ない学生生活を楽しんでください。

最後に、大学院まで進学させてくれた両親と祖父母に感謝申し上げます。私の選んだ道を尊重して頂き、学業に専念できる環境と時間を頂戴致しました。一生掛かっても返しきれない御恩を頂きました。心より感謝申し上げます。

2019年2月6日

宮部 佑太郎