

# 逆相波を用いた回折音低減化実験

佐野 藤 治

## 要 旨

道路交通騒音を低減化する試みは、路面性状・路面素材、防音壁等で具体的に行われている。また、障壁からの回折音低減にかかる研究も適応フィルタを用いたアクティブノイズコントロール等で行われており、成果が公表されている。しかし、いずれも低減可能周波数、改善効果等の点で課題を有している。

今回、道路交通騒音低減化手法の一つの試みとして、背の低い防音壁からの回折音低減による沿道地域の静穏確保を視座に入れた、広帯域（低域から高域）での低減効果をアナログ手法を用いたアクティブノイズコントロール(ANC: Active Noise Control)により検討し、良好な結果を得ることができた。

キーワード：アナログ回路、アクティブノイズコントロール、道路交通騒音、回折、障壁

## ANC Noise Decrease Results for Diffracted Noise

Fujiharu Sano

### Summary

Studies aimed at attenuating levels of Road-Traffic Noise have been proceeded in fields as follows :

1. Road surface structures, 2. Road construction materials, and 3. Road side barriers.

Regarding barriers, diffracted noise problems are very important factors in measurements and have studied by ANC technology using Adaptive Digital Filter.

However, each study showed some difficulties to accomplish better attenuation.

In this study, good results of noise attenuation were obtained for diffracted noise by ANC Analog technology.

Keywords : analog circuit, active noise control, road traffic noise, diffraction, barrier

## 1 はじめに

本報告は、道路沿道での道路交通騒音低減に主眼を置き、広帯域にわたる交通騒音の低減を図1に示す低い高

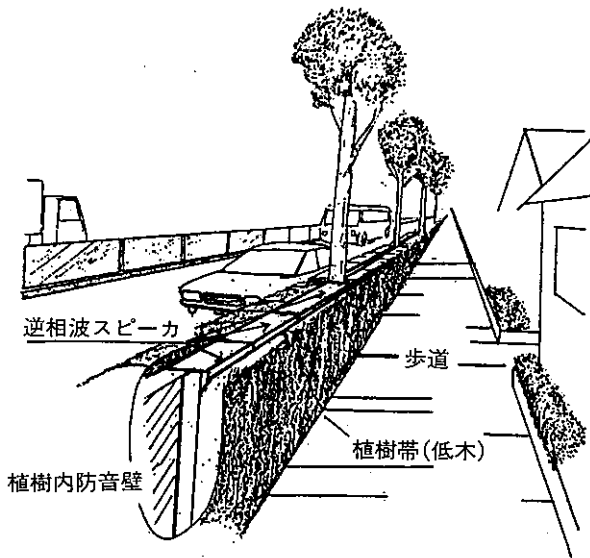


図1 背の低い防音壁設置予想図

さの防音壁を用い達成させようとするものである。このため、壁上面で回折する騒音の影響を改善することに研究の重きを置いた。

道路沿道での交通騒音低減効果を音の回折減衰によって得る試みは、道路端に設置する防音壁にみられるような具体的製品として現在応用事例をみることができる。しかし、一般道路のように、景観・交通安全の観点から設置高さの制約を受ける場合には、減音効果を十分得られないという問題がある。

設置高さを1.2m以下で減音効果を出すための試みは適応フィルタを用いたデジタル処理によるANC応用的研究が行われ、いずれにおいても低音域での効果は認められるものの高音域(500Hzを超える)での低減効果は芳しくなく、却って騒音レベルが増加することもあることが報告されている<sup>1),2)</sup>。

本報告では、この点を踏まえ、回折点での回折音と放出された二次音との位相・振幅の近似度の改善・向上を図ることのできる、アナログ方式でのANC回路を設計し、回折音低減効果を模型を用いて測定したところ、音源周波数制限用バンドパスフィルターでの高域カットオフ周波数である1KHzで良好な低減結果を得ることができた。

## 2 回折波動伝搬形状及び減音を図る上の理論的根拠

音波(騒音)が空間を伝搬する実体的問題を表現するためにはシュレディンガーの波動方程式を解く必要がある。しかし、簡易的に音波の伝搬を等位相波面の空間内での移動と近似的に把握できることをホイヘンスが提案した。これによるとある瞬間の波面上の全ての点はそれぞれ新たな点音源となり球面波を作り出す。波面は、それぞれの点音源で作られた球面波面をつなぐ包絡面である<sup>3)</sup>。

従って、進行方向に防音壁等の障壁があり、エッジにぶつかった音波はエッジにおいて新たな球面波を作り等位相で回り込み伝搬する。

そこで、障壁近傍での波の情報を収集し、それらに内包される周波数成分に対し二次音源スピーカ、電送系の位相、振幅特性に見合った補正を行った上で逆相波を作り回折点近縁で送出することができれば、回折音と干渉し騒音レベルの低減が図られ、著しい減音効果を期待することが可能となる。

## 3 アクティブ減音での技術的問題点

アクティブ減音における今日の課題は、概略次の3点である。

①障壁に到達する騒音の持つ情報をどのように精度よく収集し、また音伝搬にかかる二次音源スピーカとの位相のずれをどのようにすれば小さくできるかが、その後の処理において不可欠である。

②二次音源スピーカから放出される音の位相変位をみると、周波数が高くなるほど位相遅れが大きくなる傾向があるため、いかに逆相信号を完璧に作成してもスピーカから放出されることにより位相変位がおり不完全な干渉となる。それゆえ、周波数ごとの(バンドパスフィルターごとに)位相、振幅補正をスピーカの周波数特性を勘案し調整することが不可欠となる。

③回折音と二次音を良好に干渉させるためには二次音の放出形態をどのように確保すれば良いかが不可欠である。

## 4 問題解決手法

3で述べた問題点を改善し、良好なアクティブ減音が可能にするため、次のような解決手法を考案し、回路を設計した。

①騒音収録用マイクロホンの設置位置の選定は、二次音源スピーカの設置位置との位相誤差を僅少に押さえることから、双方を回折点に置くのが好ましいと考えるが実際的には困難である。そこで、音伝搬距離を稼ぎ、さらに音エネルギーの強度を高める上での利点から、パラボラマイクロホンを使用した。パラボラマイクロホンは放物面の焦点にマイクロホンを置いたもので、衛星放送用のパラボラアンテナに類似し、音質を向上し音強度を増強する働きを意図したものである。マイクロホンは、放物面で音が反射しマイクロホンに到る距離と通過音が二次音源設置位置に到る最短距離とが等距離となる位置に設置した。

②二次音放射スピーカの周波数に依存する位相遅延を補正改善するため、マイクロホンで収集した信号をバンドパスフィルタで周波数成分に分離した後、二次音源スピーカの周波数に依存した位相、振幅特性に見合う補正および電送系等の位相、振幅特性に対する改善をCR回路からなる位相・振幅調整回路で行った。また、アンプで増幅した出力の一部を遅延を入れた帰還回路を通して、再度増幅器に戻すことにより位相傾斜を補正する進相回路を加えた。

③二次音源スピーカから放出される音を持つ位相の不均一を避けるため、音波放出口の長径は最大周波数の1/2以下となるように設計した。回折波の発生部位が二次音放射スピーカボックス上端となるように配置するとともに、口短径が最大周波数の1/20以下になるよう設計し、回折音と二次音との位相誤差による減音効果に影響することが少ない程度（10度以内）に押さえた。

### 5 実験模型の構造

本システムが広帯域にわたる回折音に対する減音効果を確認するため、図2のような実験模型を製作した。

模型の内側は断面矩形形状とし、内面は音源からの放音音が壁面反射等でイレギュラーな挙動を防ぐため吸音材を貼付した。模型上面には200×100mmの長方形をした開口部がある。騒音を出す音源スピーカから放出された音は開口部後縁に設置された、2次音源スピーカを納めた防音ボックスの端辺で回折し、開口部端から回折音が出る。開口部直近には、二次音源スピーカからの音が放出されるスリット（170×20mm）が開いている。

音源用、二次音源用スピーカはいずれも□150mm平面

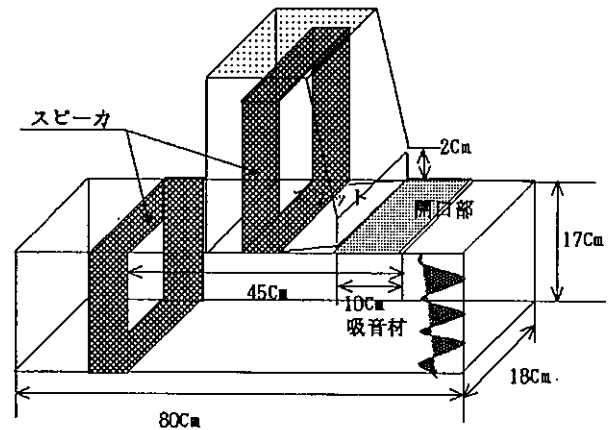


図2 実験模型の構造

スピーカを用いた。

### 6 音源及びアナログ回路構成

音源から出力する騒音は、二次音源スピーカの音特性及び今回用いたバンドパスフィルタ（386Hz、545Hz、771Hz、1090Hzを用いた）に鑑み500～1000Hzに帯域制限した。騒音は図3に示すようにスピーカから放出され、模型内断面矩形筒内を伝搬し、開口部直近に設置したパラボラマイクロホンで集音される。

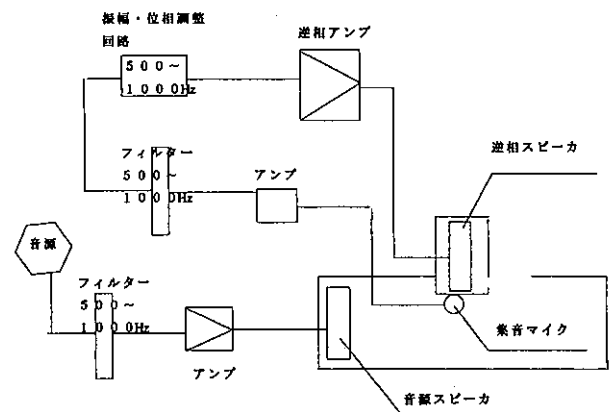


図3 回路図

マイクロホンで収集された音情報は並列的にバンドパスフィルタ群に入力される。入力した信号は、振幅・位相調整回路が組み合わされた振幅・位相調整回路によって、帯域フィルタで切り出された信号を持つ全ての周波数に対して、二次音源スピーカが示す出力波の位相・振幅変位（スピーカの周波数特性は周波数が高くなるにつ

れて入力された位相に対して出力される周波数の位相が遅れる傾向を有する。)を打ち消すことができる大きさの振幅と位相が与えられ、系全体の狂いを補正する。この振幅・位相調整回路は、振幅波状特性と位相波状特性のそれぞれと補完関係にある2組の振幅・位相調整回路を組み合わせて平坦特性としたものであり、バンドパスフィルタで切り出された信号が持つ全ての周波数に対して振幅・位相補正を行うことができ、系全体の狂いを補正することができる。さらに、振幅・位相調整回路内に残る傾斜した位相・振幅の平坦特性による歪みを正し精度を高めるため、増幅器出力信号の一部を振幅・位相調整回路から出力された周波数が持つ位相の傾斜に相当する遅延時間を与えて増幅器入力側へ帰還させることにより、位相前進が行われる。この操作により並列に重ね合わされたバンドパスフィルタを通過する信号の全ての周波数帯域について振幅と位相がより精密に補正され、伝搬音とはほぼ同一の振幅と位相の音を放出することができる。このようにして、補正を終了した信号は、逆位相信号に変えられ二次音源スピーカから放出され、伝搬音と干渉を起こす。以上の一連の操作は連続的垂れ流式的に行われる。

### 7 実験方法の概要

#### (1) 定常ノイズに対する効果

リオン社製ノイズジェネレータからオールパスの白色雑音をフィルタを用い500~1000Hzに帯域制限しアンプを経て一次音源スピーカから出力した。

模型開口部から回折する騒音レベルの分布を測定するため、図4に示したように回折口に平行に30cm間隔の格

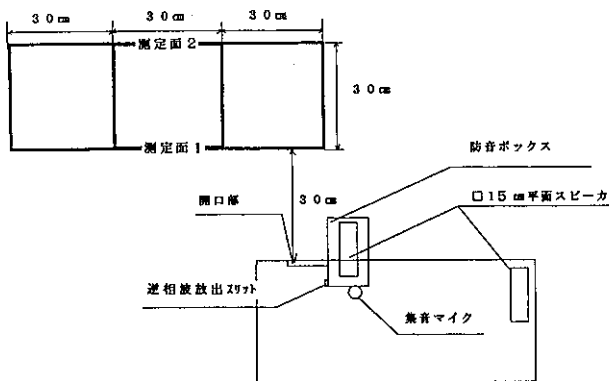


図4 測定面および測定点の配置

子点からなる2面の測定面を作成し、格子点ごとにA Weightでアクティブon/offでの騒音レベルの差を計測した。ここで、2面の測定面は平行かつ30cm隔たっている。

また、本システムの周波数別減音性能を評価するため500,630,800,1000Hzごとのレベル差についてもA Weightで計測を行った。さらにアクティブがonになってから低減が完了するまでの各周波数成分の挙動についても測定した。

#### (2) 道路交通騒音に対する効果

幹線道路の道路端地上高1.2mで収録した道路交通騒音を用い、防音壁(地上高1.2mを想定)だけの効果とアクティブを加えたときの騒音レベルの差を壁面から1.2m離し設置したマイクロホンにてA Weightで(地上高0.9mを想定) Leq、L<sub>50</sub>、L<sub>10</sub>を計測した。

### 8 実験結果

実験は、半無響室内で行った。半無響室内の暗騒音は31.8dBAであり、周波数分析結果を図5に示す。騒音レベルの測定はマイクロホン移動装置を用いて行った。

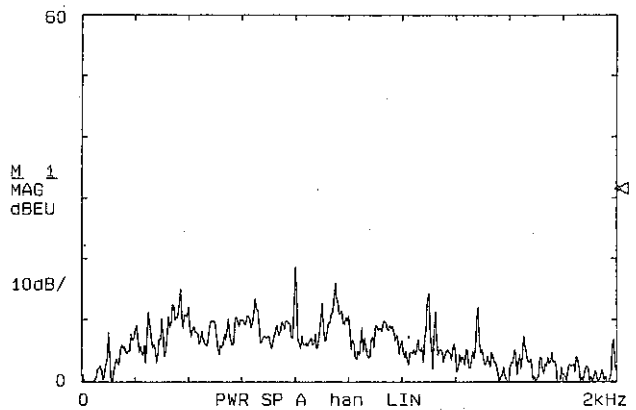


図5 暗騒音

#### (1) 定常ノイズに対する効果

音源からの騒音は、測定点(0, 0, 0)で47dBAとなるよう調整し、測定の終わりにおいても、(0, 0, 0)で47dBAであることを確認した。

アクティブon/offでの測定面1及び2での騒音レベルの差異の分布を図6、7に示した。また、(3, 3, 0)でのアクティブon/off時の周波数分析結果を図8に示す。減音レベルは、測定面のいずれにおいても9 dBAを越える低減を示した。また、測定面1、2における騒音レ

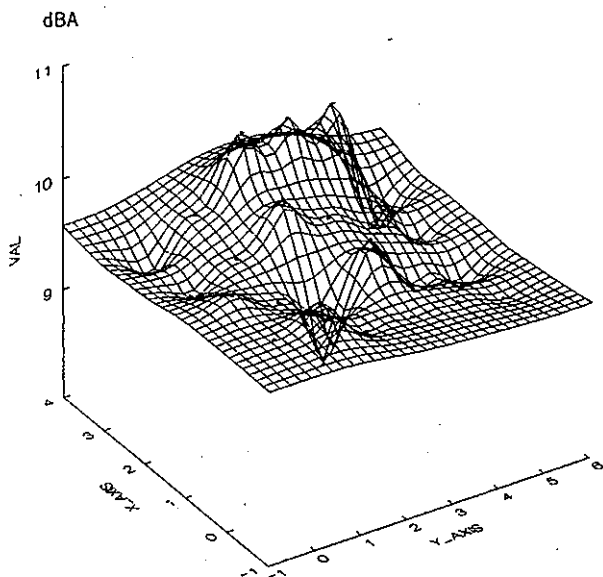


図6 騒音レベルの低減 (測点面1)

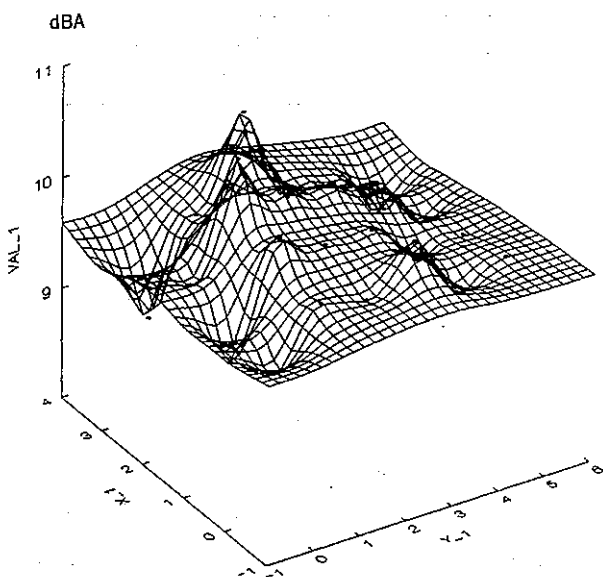


図7 騒音レベルの低減 (測定面2)

レベルを比べると、両者において大きな差異は認められなかった。

周波数別低減レベルを図9～12に示す。600Hzおよび1000Hzの低減レベルが8 dBAを超えていたが500および800Hzは2dBAを下回るていどであり、低減効果において相違が顕著であった。この結果は、今回用いた周波数分析用バンドパスフィルタの効果に起因するものと考えられる。図8に示した測定点(3、3、0)のアクティブon/offの結果を見ると、低減効果の大きいところと小さ

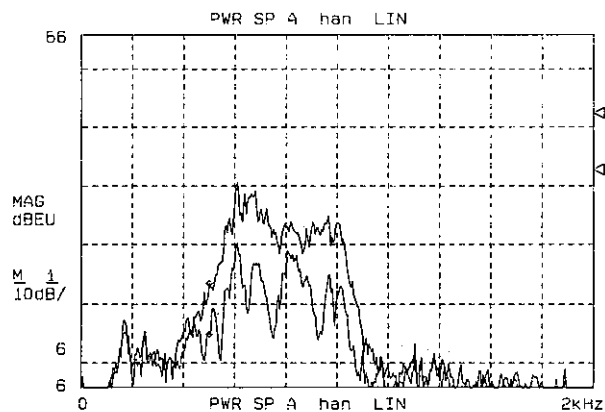


図8 ANC制御による効果

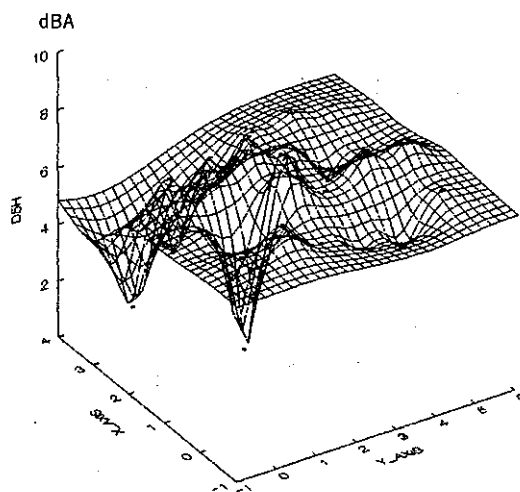


図9 500Hzでの低減レベル (測定面1)

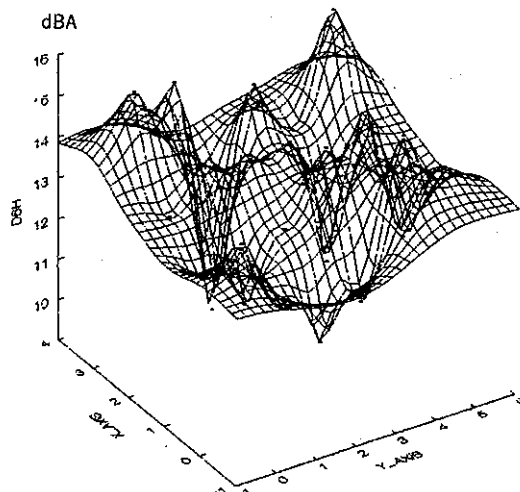


図10 600Hzでの低減レベル (測定面1)

いところのあることがわかる。大きいところはフィルタがあるところであり位相差が小さくコントロールが良好であることを示している。一方、小さいところはフィル

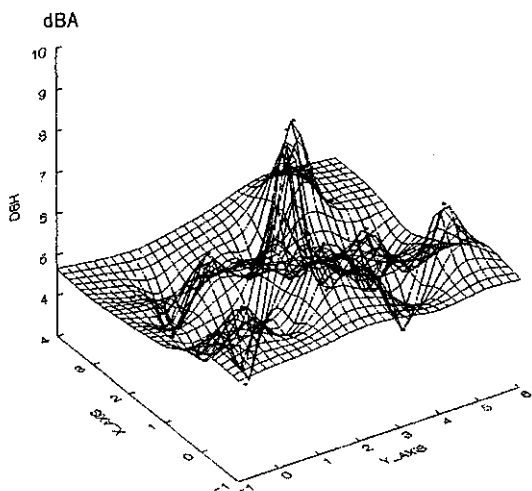


図11 800Hzでの低減レベル (測定面1)

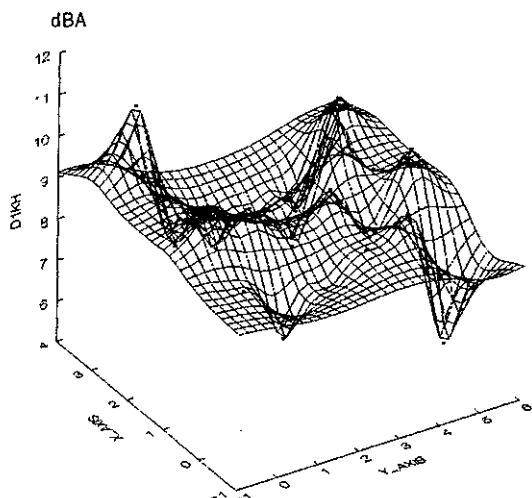


図12 1000Hzでの低減レベル (測定面1)

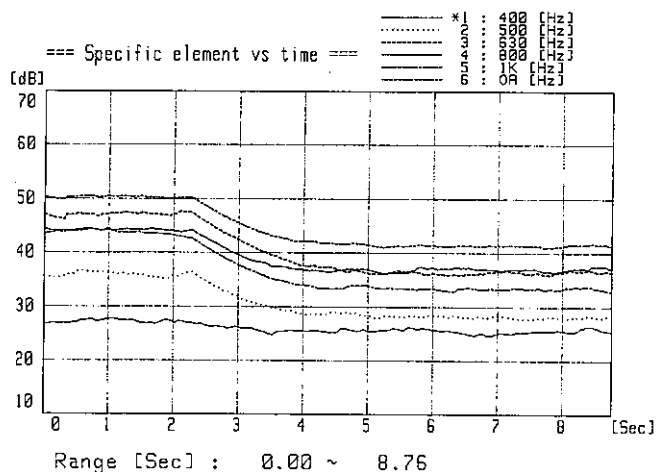


図13 ANC/onでの周波数別挙動

タを含む位相振幅調整回路での補正が初期設定において曖昧であったため位相誤差が大きいことを示している。

6の「音源およびアナログ回路構成」で記述したが二次音源スピーカの位相特性を補正するための回路では入力信号に対する位相を各バンドパスフィルタごとにできるだけ平坦に出力させられるように設計してあるため、バンドパスで切り取られた周波数に対して個別に位相補正を行うことは本来必要としない。

次に、アクティブがonになって減音がはかられるまでの挙動を図13に示す。この傾向は測定点のいずれにおいてもほぼ同様であった。

(2) 道路交通騒音に対する効果

測定位置での騒音レベルを5秒間隔で200個サンプリングし、Leq、L50、L10を求めた。その結果を表に示した。いずれの結果においても、8 dBA程低減することがわかった。

表1 道路交通騒音に対する効果

	Leq (dBA)	L50(dBA)	L10 (dBA)
アクティブon	42.7	39	47
アクティブoff	50.8	47	55

9 残された課題

インパルス (突発的) 騒音に対する、システムの追従性及び安定性については、変動騒音である道路交通騒音を用いた結果においては、有効であると認めることができた。しかし、これよりも早い応答を要する爆発音で見られるような場合を考えるとさらに早いレスポンスで機能する高速応答性の回路に改善することが求められる。さらに、道路交通騒音への適応を考えた場合、500~2000Hz帯域での低減をすることが求められる。

従って、これに対応可能なフィルタおよび一部回路変更により、実際このシステムが道路沿道対策に効果を持つ手段となりうるか、道路沿道に実証モデルを設置し効果の確認を行い、適応の可能性を確認することが緊要であると考えられる。

10 まとめ

防音壁模型を用い、二次音源スピーカへの対応を考慮した帯域の騒音及びバンドフィルターを組み込んで実験を行った結果、構成部品の限界である1KHzにおいても顕著な低減効果を見ることができた。本システムは、6

の「音源およびアナログ回路構成」で触れたように、二次音源スピーカの音特性を補正し、回折音とごく近似した逆位相音をコンピュータといった外部の演算処理器を介すことなく連続的に回折波と干渉させることが出来ることを特色とする。

このシステムでは、逆相波の振幅を回路に組み込んだ微調整用振幅補正ダイヤルにより調整できるため、音色を思いのままにコントロールすることも可能であり、心地よい音作りにも役立つものと考ええる。

## 11 おわりに

本実験の成果を踏まえ、実験を支えてくれた八百板晃氏に深く感謝します。また、本実験を進めるに当たり貴重な示唆をいただきました国立音楽大学の福原博篤氏に深謝いたします。

## 引用文献

- 1) S.Ise, *et al.* : Basic study on active noise barrier, *J. Acoust. Soc. Jpn(E)* **12**, p.299-306(1991)
- 2) A.Omoto and K.Fujiwara : Basic study of actively controlled noise barrier, in Proceedings of Inter Noise '91, p.513-516.
- 3) E.Skudrzyk : The Foundations of Acoustics (Springer Verlag, NewYork, 1971), Chap. 24, p.513- 516.