音波制御装置に関する研究*
(第3報, 音波制御装置の基本設計(2))

関口久美**, 水野恵一郎***, 飯田一嘉***

Research on a Noise Control Device
(3rd Report, The Fundamental Design (2) of the Device)

by Hisayoshi SEKIGUCHI, Keiichiro MIZUNO, and Kazuyoshi IIDA

The structural design method of the noise control device was described in the 2nd report and it is possible to design the structure of the device by this method. But it is necessary to design how to set the device to the noise source when it is applied. That is, the appropriate set position to the noise source is required in order to obtain more noise reduction effect. Therefore, the design method for setting the device was considered through some model experiments in the anechoic room and the field, and the sound pressure level prediction method for the device with a barrier was obtained. These results are described in this paper.

Key Words: Sound, Noise Control, Noise Reduction, Barrier, Set Design, Interference Zone

1. ま え が き

音波制御装置は、音波の構造的遅延回路を組みこんだ構造体であり、機械騒音、建設工事騒音、交通騒音などの騒音公害のうち、空気伝ば音に対する防音装置の一方である。第1報⁽¹⁾で、この音波制御装置の基本原理(図1)について述べ、音波屈折機能と破壊的干渉機能により大きな減音効果が得られることを示した。また、音響幾何学的作図手法による干渉ゾーン予測についても言及した。さらに、第2報⁽²⁾では、この装置の構造設計に必要な構造要素を把握し、装置を構成している管の設計法について考察した。しかし、実際にこの装置を騒音源に対して適用しようとするとき、音源、受音点、屈折音波をしゃ断するための防音壁などと音波制御装置の適正な位置関係、つまり、配置設計が問題となってくる。そこで、これらの配置設計因子を明確にして、防音壁との組合せ効果およびその予測法について、無響室内でモデル実験を実施し、検討、考察を行うとともに、音源の形態(点音源、線音源)に

対する音波制御装置の減音効果についても、確認実験を行った。以下に、それらの結果、考察について述べる。

2. 音源に対する基本配置設計

この音波制御装置を音源に対して、配置する際に問題となるのは、まず、音源に対する相対的な位置関係つまり、音源からの装置の水平距離と、音源に対する装置の設置高さである。そこで、この二つの要素について、無響室内で、音波制御装置を用い、音源-装置間距離、装置の音源に対する設置高さを変化させて、装

図1 音波制御装置の基本原理図 ($\alpha = 4/9\pi \text{rad}$)

* 昭和58年3月31日 第60期 通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年1月9日。

** 正員、姫路工業大学 (〒671-22 姫路市書写 2167)。

*** 正員、(株)ブリヂストン (〒244 横浜市戸塚区柏尾町1)。

置を設置しない場合の音圧レベルと装置を設置した場合の音圧レベルの差, すなわち装置の設置による減音量を計測した。その状態を図2に示す。また, 用いた音波制御装置を図3に示す。装置は, 上方ほど短い路長をもつ複数の中空通路からなる⁽¹⁾。

図2は音源としてのスピーカに対する装置(図3)の基準設置状態を示しており, 図2中の ΔX , ΔY は, この基準設置位置からの, 水平距離変化分(+記号は, 音源に近づく方向とする), 設置高さ変化分(+記号は, 音源に対して上方の方向)を表すものとする。ただし, 高さ変化に対しては, 音源(スピーカ)を相対的に高さ方向に変化させた。また, 音源からは, ホワイトノイズを出力させ, 受音点 O_1 , O_2 , O_3 について, 普通騒音計でそれぞれの実験ケースについて音圧レベルを計測した。計測時には, 屈折音波の床面反射を防ぐために, 図2のように床面には, 吸音材(厚さ50mmのグラスウール)を敷いている。

2・1 音源と装置との水平距離 図1に示した ΔX をそれぞれ90, 0(基準), -90, -180, -360mmにした状態で各受音点において, 減音量を計測した。減音領域(干渉ゾーン)すなわち, 図2の二点鎖線の間の領域)内のほぼ中心の位置 O_2 における減音量の ΔX による変化の状態を示したものが図4である。

これらの結果からみると, 周波数帯域によって多少の傾向の違いはあるが, 全周波数帯域についての傾向としては, 音源から装置が離れるに従って, 減音量は低下する。ただし, 供試体寸法の長さが1200mmと

図2 無響室内モデル実験配置図

図3 距離, 高さ変化実験供試体

有限なため, まわりからの回折音の影響も考えに入れなければならない。しかし, 逆に, 装置を音源に近づけすぎても減音量は, やはり低下するので, これは, やはり, 第1報にも示した干渉ゾーン(減音領域)の形成のされ方が音源との相対的位置関係によって異なるためであろうと推察される。また, 図4では示さなかったが干渉ゾーンの上の境界線近く的位置でかつ, 減音ゾーン内の受音点 O_1 の減音量, 干渉ゾーン内でも下方の受音点である O_3 の位置における減音量から, 干渉ゾーンの内に受音点が位置していれば, 多少の減音量の変化はあるが, 極端に大きい変化はなく, 干渉ゾーンから受音点がはずれると, 極端に減音量が小さくなってしまふということがわかっている。そして, O_1 , O_2 , O_3 の減音量の結果から, 干渉ゾーン内にある受音点の減音量の変動は, 第1報にも示したように, 干渉ゾーン内でも干渉の形成のされかたによって, 減音効果が大きい部分と小さい部分があるためと考えられる。したがって, 騒音対象受音点の位置と対象とする周波数がきまれば, 音源とこの音波制御装置の水平距離には, 適正値が存在するものと思われる。この適正配置を求めるためには, 設置制限条件を考慮したうえで, 第1報で示したように, 音響幾何学的な作図法を用いて, 対象受音点が干渉ゾーンの内でも最も干渉効果が大きい部分に位置するように, 音源-装置間水平距離を設計しなければならない。

2・2 音源に対する装置の設置高さ 図2における ΔY をそれぞれ0, 40, -210, -420mmと変化した場合の受音点 O_2 における減音量を図5に示した。ただし, $\Delta Y = -210, -420$ mmについては, 実際には, 装置を固定した状態で音源(スピーカ)を上方へ移動させ, それに従って, その変化分だけ各受音点も上方へ移動させて計測するという相対位置関係を一致させる方式をとった。図5から, 減音領域(干渉ゾーン)内にある点 O_2 については, 装置を上方へ移動させる

図4 音源-装置間距離による O_2 の減音量の変化

場合(移動量については装置の形状のため下方へ移動する場合に比べて少ない。)には、減音量の変動は、あまり見られないが、下方へ装置を移動させると、減音効果が極端に少なくなる。これは、干渉ゾーンの形成のされ方が大きく異なってきた理由によるものが多いと思われる。この場合(特に $\Delta Y = -420$ の場合)、受音点 O_2 の位置が干渉ゾーンの上方の境界線近辺になり、この位置における減音量が非常に大きく低下したものと考えられる。また、図5では示さないが、 O_1 、 O_3 の減音量結果から、干渉ゾーン内に受音点が位置していれば、やはり、極端な減音量の低下はないことが推察された。したがって、装置の音源に対する設置高さについては、減音対象受音点が干渉ゾーン内に位置するようにし、また、その干渉ゾーン内でも最も干渉効果の大きい部分に位置するようにすれば、装置の適正な配置となる。この場合、装置の形状などで、音源から装置を上方へ移動できる距離は制限されるから、この制限条件下で適正配置を見いださねばならない。したがってこの場合も、音源-装置間水平距離の場合と同様、第1報で示した、音響幾何学的な干渉ゾーン作図法で、装置の適正な設置高さを設計する必要がある。

2.3 点音源と線音源に対する効果 音波制御装置の点音源に対する減音量と線音源に対する減音量との差異を見るために、図2に示した配置で、図6の供試体を用いて、受音点 O_1 、 O_2 、 O_3 における減音量(装置なしの場合の音圧レベルと装置を設置した場合の音圧レベルの差)を計測した。音源として、点音源の場合は、フルレンジ出力スピーカ1個を装置の長さ方向の中心位置に配置し、線音源の場合は、このスピーカを200 mmの間隔で等間隔に装置の長さ方向に配置し、擬似線音源とした。そして、受音点 O_2 において装置のない場合とある場合の差、つまり、減音量を求めたのが図7である。図7から、全周波数帯域にわたって、

点音源に対しても、線音源に対しても、ほぼ同等の減音効果が得られることを確認した。受音点 O_1 、 O_3 においても同様の傾向を示す。

3. 音波制御装置と防音壁との組合せ効果とその予測法

音波制御装置を実際に騒音対策に用いようとする場合に、まず、具体的に考えられるのは、防音壁と組合せて、屈折音波をしゃ断し、かつ、防音壁天端からの回折音を減少させ、防音壁の背後にある騒音減少対象受音点の減音効果を増大させようとするシステムである。このように音波制御装置と防音壁とを組合せたものを音波制御装置システムとよぶ。

3.1 無響室内基本モデルテスト 音波制御装置システムの減音効果を確認するために、図8に示すようなシステムモデルを無響室内に設置し、受音点 O における減音量(装置および防音壁が設置されていない状態を基準とする)を各ケースにつき計測した。その結果を図9に示す。供試体は図6に示したものをを用いた。

図9から、音波制御装置システムは、防音壁単体の減音効果より、かなり大きな減音効果を示しており、かつ、その状態で装置の音波放射側の管出口をふさいだ場合の減音量は低下し、防音壁単体の減音効果に近づいている。すなわち、管をふさいだ場合は、二重壁

図6 音源種類、防音壁との組合せ実験供試体

図5 装置の高さによる O_2 の減音量の変化

図7 点音源と線音源の減音効果

の性能しか発揮されず、装置本来の干渉ゾーン形成による大きな減音効果は発揮されないことがわかる。図10に防音壁天端近辺相当位置Pにおける音波制御装置のみを設置した場合の減音量を示した。この図10の減音量を図9の防音壁のみの減音量に加えれば、ほぼ、音波制御装置システム(音波制御装置+防音壁)の減音量になることが確認される。つまり、音波制御システムの減音量は、防音壁のみによる減音量に、音波制御装置単体の防音壁天端近辺相当位置における減音量を加えたものと考えられる。また、あわせて、防音壁と音波制御装置との水平距離を変化させた場合の減音量を図11に示した。防音壁を装置前面に近づけていくと、図11に示すように、低い周波数帯域側から、減音量が低下してくる。これは、屈折音波と直接伝播音波とが十分干渉せず、干渉ゾーンが十分に形成されないうちに防音壁で屈折音波がしゃ断されてしまう理由によるものと思われる。装置と防音壁前面との水平距離、周波数による音波の波長計算を行うと、音波制御システムの減音効果を十分に発揮させるためには、装置前面と防音壁との水平距離は、ある程度の間隔、つまり、対象周波数について少なくとも半波長分は必要であると考えられる。

3・2 音波制御装置システムのフィールドテスト
無響室内での音波制御装置システムの減音量確認テストでは、対象受音点がかなり遠方の場合には、スペースの関係上評価不可能となる。したがって、フィールド

図8 防音壁との組合せ実験配置図

図9 受音点Oの防音壁との組合せ効果

ドテストにより、その減音効果を確認する必要がある。このために、図12に示すような配置で、減音効果の計測を実施した。

供試体は、外形は図6に示した室内テストで用いたものと同じであるが、コンクリート製で50 mm□の管(肉厚5 mm)で構成されているものを用いている。そして、装置の管傾斜角 α がフロアレベルから $5/18\pi$ [rad]になるように、装置を設置し、組合せる防音壁は、その天端位置が干渉ゾーン内に存在するようにフロアレベルから1.9 mのもの(厚さ20 mmのラワン合板製で音源側に吸音材を取付けている。)を採用した。受音点O(地上1.0 m上で音源から25 m離れた位置)における各実験ケース(防音壁のみ設置、音波制

図10 防音壁天端近辺相当位置Pにおける減音量

図11 防音壁-装置間距離Xによる減音量の変化

図12 フィールドテスト配置図

御装置と防音壁とを組合せた場合、つまり音波制御システム、音波放射側の管出口をふさいだ音波制御装置と防音壁とを組合せた場合、つまり二重壁)についての音圧レベルを図13に示した。この結果から、無響室内モデルテスト結果と同様、装置の音波放射側の管をふさぐと単なる二重壁となり、音波制御装置システムと比較すると両方の受音点での音圧レベルが増加している。すなわち、装置の音波放射側の管出口をふさいだ場合には、減音効果がかなり低下していることがわかる。図14にこのフィールドテストにおいて装置単体のみを設置した場合の防音壁天端近辺相当位置Pの減音量(装置がない場合を基準)を示した。この減音量を図13の防音壁のみ設置した場合の音圧レベルから差引くと装置と防音壁とを組合せた場合(音波制御装置システム)の音圧レベルにほぼ等しくなる。したがって、無響室内モデルテストと同様、音波制御装置システムの減音効果は防音壁のみ設置の場合の減音効果と音波制御装置単体のみを設置した場合の防音壁天端近辺相当位置における減音効果とを加えたものであることが、このフィールドテストについても成り立つことがわかる。つまり、かなり遠方の受音点についても成り立つことが確認された。また、受音点O'についても同様であることが確認されている。

3.3 音波制御装置システム減音効果予測法 以上の無響室内モデルテストとフィールドテストとの結果から音波制御装置と防音壁とを組合せた場合、すなわち音波制御装置システムの減音効果の予測については、以下に示すような式が成立するものと考えられる。

$$\Delta L = \Delta L_p + \Delta L_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

ΔL : 防音壁と装置を組合せた場合、つまり音波制御システムの減音量

ΔL_p : 音波制御装置単体を設置した場合の干渉ゾーン内での防音壁天端近辺相当位置における減

図13 受音点Oにおける音圧レベル

音量

ΔL_w : 防音壁のみ設置による減音量

式(1)中 L_w については、従来からよく用いられる式から推算可能である。したがって、無響室内モデルテストなどで得られる ΔL_p を用いれば、実際にその音波制御装置システムを適用した場合について、任意の騒音低減対象受音点における減音効果が予測推算できる。さらに、音源のパワーレベルが既知であれば、受音点における音圧レベル、騒音レベルをも推算可能となる。以下に、点音源の場合の音圧レベル、騒音レベルの予測計算式を示す。

まず、点音源の場合は、

$$SPL_i = PWL_i - 20 \log r - 8 - \Delta L_{wi} - \Delta L_{pi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで

SPL_i : 周波数帯域 i における音圧レベル (dB)

PWL_i : 周波数帯域 i におけるパワーレベル (dB)

$$\Delta L_{wi} = 10 \log (0.2 + 2\delta/\lambda) + 12.5$$

防音壁による減音量 (dB)

ΔL_{pi} : 音波制御装置単体を設置した場合の干渉ゾーン内での防音壁天端近辺相当位置における減音量

λ : 波長

r : 音源と受音点間距離

S : 点音源

R : 受音点

また、 SPL_i を式(1)で計算した SPL_i に A 特性による補正を行ったものとする、騒音レベル SPL は、

$$SPL = 10 \log (\sum_i 10^{SPL_i/10}) \quad (\text{dBA}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

として計算できる。ただし、 δ は図15で定義される行路差である。

4. 結 論

音波制御装置を実際に騒音対策に適用するにあたっ

図14 装置単体の防音壁天端近辺相当位置Pの減音量

図 15 点音源と受音点位置関係図

て、重要となる装置の音源に対する配置設計法と音波制御装置システムとして用いる場合の設計法に関して多くの実験を行い考察を行った。そして、装置の配置設計については、装置によって形成される干渉ゾーンが各配置設計因子によって変化するので、最終的には、騒音対策対象受音点について、干渉ゾーンの位置が適正なものになるように第1報で述べた音響幾何学的な作図法を用いて、適正な配置設計因子を決定する必要があることを確認した。また、実際には音波制御装置システム(音波制御装置と防音壁とを組合せた場合)として用いる場合がかなり多いと思われるが、この場合の受音点における減音効果予測手法としては、

式(1)を用いて、無響室内モデルテストで比較的簡便に行える方法を見いだした。さらに、受音点の音圧レベル、騒音レベルの推算も式(2)、(3)などを用いれば可能であることを示した。第1報の基本原理解、第2報の構造設計、および本研究第3報の配置設計により、音波制御装置を実際に騒音対策に適用することは可能となったが、さらに、無響室内テストなどを通じて、装置適用設計法、実用化設計法を検討、考察していきたいと考えている。

5. 謝 辞

本研究を行うにあたって、数多くのご教示をいただいた元九州芸術工科大学 北村音壹教授、および、数多くの実験に協力していただいた㈱ブリヂストンの防音防振研究グループの方々に深く感謝いたします。

文 献

- (1) 水野・関口・飯田, 機論, 49-447, C (昭58), 1982.
- (2) 水野・関口・飯田, 機講論, No. 830-6, (昭57), 127.

51 巻 469 号, C 編 (昭 60-9) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
有 浦 泰 常 ほか	2300	左	4	軽量比	軽量化
	2301	右	9	あらさ	粗さ
	2304	右	2	あらさ	粗さ
	2306	右	下5	グラフアト	グラフアイト
寺 内 喜 男 ほか	2334	図3	図中	Crowing value	Crowning value
		図4	図中		
	2339	左	2	$(\beta+1) \cdot \alpha$	$(\beta+1) \cdot r$
高 田 一 ほか	2394	左	4~17	ρ	ρ_i
佐 藤 啓 仁 ほか	2407	文献(7)		(7)頼, 斉東, 伊藤...	(7)頼・斉藤・伊東...