

原著論文

音響管を組み込んだ防音壁による低周波音の制御

松本 源生, 藤原 恭司*

防音壁により低周波音を制御するには, 従来10m を超える高さを要すると考えられていた. 本論文では, 防音壁の側面に音響的にソフトな表面を広くとれば, 高さに頼らなくとも低周波音を制御することが可能であることを示した. そして, ソフトな表面を実現する音響管を用いて, 高さが2m であっても十分な遮音効果が得られることを明らかにした. また, 音響管による遮音のメカニズムを検討した結果, 音響管はソフトとなる周波数帯で音のエネルギーの流れを上方に転じるため, 受音領域で効果的な遮音が得られること, 更に, 音響管の管幅が大きくなるほど遮音効果のピーク値も大きくなり, 効果のある帯域も広くなることもわかった.

[キーワード: 低周波音, 制御, 遮音効果, 音響管, 数値計算]

1 はじめに

低周波音は, ここ数年急速に苦情が増加し, 環境省において2002年に測定マニュアル¹⁾が作成され, 重大な環境問題としての認識が高まっている.

音を制御するために広く利用される手段として防音壁がある. しかし, 高さ3m 程度の防音壁に対しては, 周波数80Hz 以下の低周波音は容易に回折するため, 遮音効果は極めて小さい. また, 低周波音に機能する吸音材は存在しない. そのため, 低周波音の制御に既存の防音壁を用いて十分な遮音効果を得るには, 10m を超える高さを要すると考えられていた.

道路交通騒音の制御に最も多く用いられている統一型防音壁は, 音源側(車道側)表面を吸音処理している. 交通量の増加などにより騒音レベルが上昇したときには, 高さを嵩上げすることにより対処することも有効であるが, 構造的な強度や景観上問題がある. このため, 防音壁背後の受音領域にとっては仮想的な音源とみなせる先端部(以後 エッジと呼ぶ)の音圧を減少させることが遮音量向上には有効であるため, この統一型防音壁のエッジ部分を音響的にソフト²⁾とする特殊形状を有する加工製品が開発されており, 嵩上げによらなくとも大きな遮音効果を得ることが可能となっている.

そこで今回, 防音壁の高さを抑えるためソフトな表面を狭いエッジに配置するのではなく, 防音壁側面に広く配置することにより遮音効果の向上を試みた. これまでも川瀬らによりソフトな表面を持つ防音壁により低周波音の制御を提案した研究³⁾があるが, 同一長の音響管の

配列を用いてソフトな表面を実現していたため, 高さ, 厚みとも非常に大きな防音壁を用いなければ低周波音の制御はできなかった.

本論文では低周波音の制御に, 防音壁の緩やかなスロープに音響管を配置する技術, 逆側の側面を活用する技術という, 新しい技術を適用することにより低周波音の制御の向上を図った.

2 検討方法

境界要素法⁴⁾による数値計算を用いて, 防音壁の遮音効果を計算した. 実在する音場は3次元であるが, Hothersall⁵⁾らにより遮音効果に着目すると, 3次元音場と2次元音による数値がほぼ一致することが示されている. そこで, 本論文の検討では防音壁の断面のみを考えればよいと計算時間が大きく減少し, プログラミングが容易な2次元音場を想定することとした.

ここでは, 防音壁に音響的にソフトなスロープを持たせることの効果の検討し, スロープ面をソフトとするために音響管を配置して高さを要しない低周波音用の防音壁の作成を試みた. なお, 防音壁の表面特性に関しては, 完全反射のときにはインピーダンスを0, ソフトと設定するときには無限大と設定した.

3 結果及び考察

3・1 ソフトな表面による遮音効果の向上

まず, ソフトなスロープ面による遮音性能を数値計算により検討した. 音源, 受音点および防音壁は図1に示

福岡県保健環境研究所

(〒818-0135 太宰府市大字向佐野39)

*九州芸術工科大学 芸術工学部

(〒815-8540 福岡市南区塩原4丁目9-1)

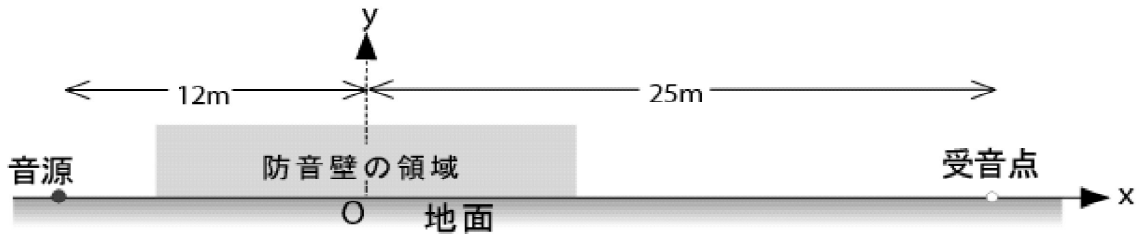


図1 数値計算に用いた音源，受信点と防音壁の位置

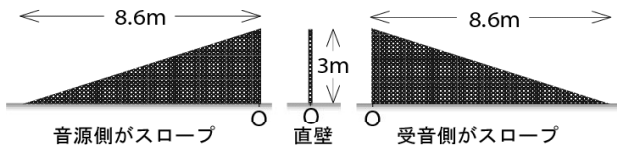


図2 防音壁の形状

す位置に置いた。防音壁に関しては図2に示すように、高さ3mの直壁、音源側または受信点側にスロープを持つ計3形状の防音壁を用い、防音壁の位置は図1の原点Oに図2のO点を置いた。音源側スロープと受信側スロープ形状のものは、それぞれ(0.05, 0)、(-0.05, 0)から真上3mにピークを置き、ピークからはそれぞれ3/8.6、-3/8.6の傾斜を持たせた。このように緩やかなスロープを持たせたのは、10Hz程度の超低周波音の制御をも視野に入れ、10Hzに対してソフトな表面を実現する1/4波長音響管の管長8.5mに対応させているためである。

防音壁の壁面の性状を表1に示すように設定し、4つのケースに対して受信点における遮音効果を算出した。図3に5Hzから50Hzまでの周波数帯での防音壁背後の遮音効果を示す。防音壁の全面が完全反射な直壁であるCaseAHにおいては遮音効果はわずかであり、20Hz以下では1dBの効果も得られていない。直壁のエッジのみをソフトとしたCaseESにおいては30Hz以下では2dB以下の効果しかなく、16Hz～20Hzにかけては遮音効果が特に減少している。一方、受信側スロープ面がソフトなRightSlopeSでは9～12dB、音源側スロープ面がソフトなLeftSlopeSの場合には12～16dBもの遮音効果が得られている。その遮音効果は、周波数が高くなるほど増加している。

道路交通騒音などの騒音の制御に関しては、受信点からすれば2次的な音源である防音壁エッジをソフトとすれば大きな遮音効果が得られるが、低周波音が対象であれば音波の回折が大きいために、エッジのみをソフトとしても効果は小さい。しかし、壁に広いスロープを持たせてスロープ面をソフトとすることにより大きな遮音効果を得ることが可能であることがわかった。

表1 壁面の性状の設定

名称	表面性状		
	音源側	エッジ	受信側
Case AH	完全反射	完全反射	完全反射
Case ES	完全反射	ソフト	完全反射
LeftSlope S	ソフト	完全反射	完全反射
RightSlope S	完全反射	完全反射	ソフト

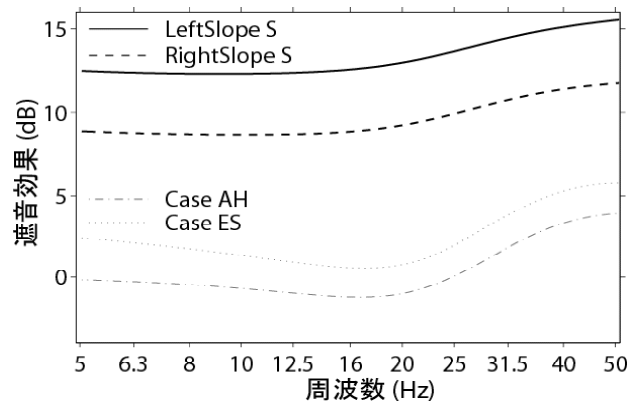


図3 遮音効果の周波数応答

3・2 音響管によるソフトな表面の実現

ソフトな表面を実現する素材は存在しないが、形状により実現が可能である。なかでも1/4波長音響管を表面に配置し、ソフトな表面を近似的に実現させる方法が代表的である。図4にその原理を示している。音波の波長を λ とおくと、音響管内部は管幅 W に対して $W < 0.59\lambda$ であれば音の伝搬は管の長さ方向のみに生じ平面波伝搬となる⁶⁾。音響管表面に入射した音波は管内を往復した後、反射波となって放出される。その際、管長が $\lambda/4$ である1/4波長音響管では、往復した経路が半波長となり開口端における反射波の位相は入射波に対して逆相となり音圧が0となる。すなわちソフトな表面が実現できる。管長 L が $\lambda/4$ と等しければ、開口端において音圧が0となりソフトになる。しかし、 $\lambda/4$ に近い管長に対しては開口端における音圧は0にはならないが、0に近い値となるため、開口端表面ではソフトに近い性状となる。

このように表面がソフトとなる周波数は音響管の長さ

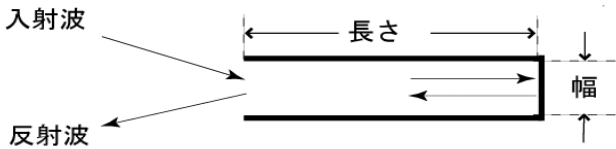


図4 音響管によるソフトな表面の原理

に依存するが、その周波数を中心として、ある程度の周波数幅で有効な遮音効果が得られる。ただ、その中心となる周波数は、厳密には管長の4倍の波長を有する周波数ではない。それは、空気には粘性があるため、音響管は管長よりも長いものとして振る舞うためである。その長くなる数値は、開口端補正值として知られおり、管幅 Width よりも小さい数値となる⁷⁾。

図2に示したスロープ面を有する防音壁に音響管を組み込むことを試みる。ここでは、受信側にスロープを持つ防音壁に音響管を配置して、ソフトな表面を作成した(音源側スロープに関して後で検討を行う)。ただし、スロープ面に配置するため、通常の1/4波長音響管のように方形とはせずに、下部になるにつれ音響管が長くなる図5に示すような楕円形とした。(a)は高さ2.6mの間に0.1m厚の剛板を置き、(b)はその2.6mに等間隔に3枚の剛板を置き、それぞれは2本(Tube i, Tube ii)と4本(Tube I, Tube II, Tube III, Tube IV)の音響管をスロープに配置したものとなる。なお、原点 O から上向きにある高さ3mの剛板は0.1m厚である。

図6に、音響管を用いたときの遮音効果の計算結果を示す。点線が2本の音響管による遮音量であり、14.9Hzおよび46.3Hzにピークがある。また、実線で示す4本の音響管によれば、遮音量がピークとなる周波数は、

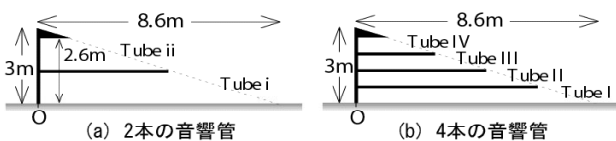


図5 防音壁の形状

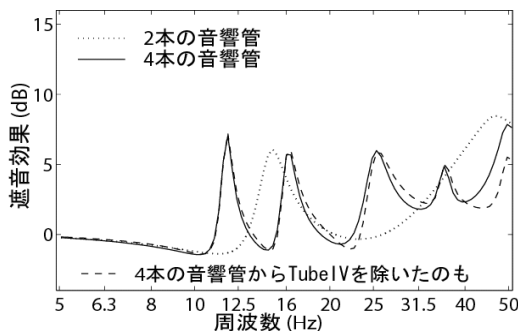


図6 遮音効果の周波数特性

-受信側スロープに音響管を配置した場合-

11.9Hz, 16.0Hz, 25.4Hz, 35.9Hz, 49.6Hz であり、2本の音響管によるピーク形状よりも急になっている。更に、音響管の幅を狭くして高さ2.6mの間に0.1m厚の剛板を等間隔に4枚置き、5本の音響管として同様に計算したところ、11.9Hz, 14.9Hz, 19.7Hz, 30.6Hz, 45.3Hzの周波数を中心として5dB程度の遮音効果が得られた。しかし、ピークが鋭くなり、有効な遮音効果が得られる周波数幅が狭まる結果となった。つまり、スロープに置く剛板の数を増やすことにより遮音効果がピークとなる周波数は増すが、ピークを中心とした有効な遮音効果が得られる周波数帯域は減少する傾向がある。

次に、4本の音響管で出現した多数のピークが、どの音響管の効果によるものかを調べることにした。TubeIVに関しては、音源との位置関係および形状から推測すると音響管として機能しない可能性もある。そこで、TubeIVを除いた図7に示す形状を作成し、再度遮音効果を計算した。その結果は図6の破線に示しているが、図5(b)によるものと比べると、30Hz以上の周波数帯域では1dB程度の差が見られる。しかし、図6による遮音効果のピークとなる周波数は11.9Hz, 16.4Hz, 25.4Hz, 35.9Hz, 49.6Hzであり、図5(b)によるものとほとんど同一である。従って、TubeIVは不要なものと結論づけることができる。

そこで、図7の防音壁形状に関して考察を行った。11.9Hzの1/4波長は7.1m、TubeIの長さは6.5m、開口端補正を考慮すると両者は良い対応を示しており、11.9Hzにおける遮音量の向上はTubeIによる効果であることがわかる。同様な解析により、16.0Hzと25.4Hz周辺での遮音量の向上は、それぞれTubeIIとTubeIIIによる効果であることがわかる。遮音量がピークを示した残りの周波数35.9Hzと49.6Hzは、それぞれの3/4波長とTubeI, TubeIIの管長との対応が良く3/4波長音響管として効果であることがわかる。

このように音響管によれば管長の4倍また4/3倍の波長を有する周波数を中心として有効な遮音効果が得られることがわかった。しかしながら、管長の異なる複数の音響管を用いれば遮音効果がピークとなる周波数は増えるがディップ(2つのピークの間を生じる谷間)となる周波数も増えるというデメリットも生じていた。

次に、音響管による遮音のメカニズムを調べるため、

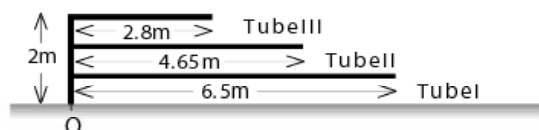


図7 4本の音響管(図5(b))から TubeIVを除いた防音壁形状

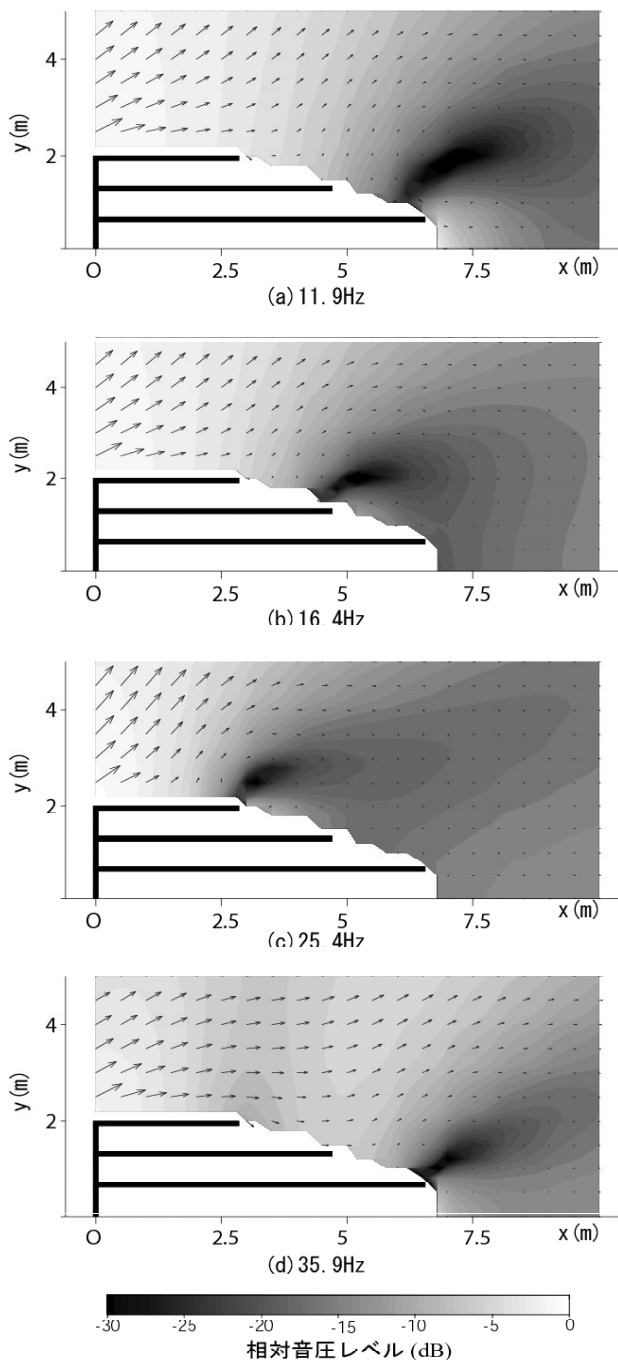


図8 音圧レベルとインテンシティの分布

音圧レベルとインテンシティの分布を描いてみた。遮音効果がピークとなった4つの周波数11.9Hz, 16.4Hz, 25.4Hz, 35.9Hz に対して計算を行った。音響管の開口端付近の分布図を図8に示す。矢印の大小と向きは、それぞれインテンシティの強さと向きを表している。

分布図(a)を一見すれば、音圧レベルの極小値は TubeII の開口端付近に位置し、音エネルギーの流れもその開口端を避けるように右上に転じており11.9Hz での遮音効果はあたかも TubeII による効果のように見える。しかしながら、等音圧レベル面を見ると、TubeI の開口端の

平面波面が徐々に丸い波面となっているものと、防音壁上部から到達する平面波に近い波面とが交わっている領域において、音圧レベルが極小値をとっていることがわかる。実際、TubeI のみを単体で設置して分布図を描いても、(a)と同じように TubeI の開口端の右上に音圧レベルの極小値が現れ、そこでエネルギー流が右上に向かっていった。従って、分布図(a)は TubeI の効果を示しているものである。他の3つの分布図においても、やはり音響管の右上に音圧レベルの極小値が存在しエネルギー流が右上に転じている。このように、受信側スロープの音響管の効果は、音のエネルギー流が斜め上方に転ずる影響であることがわかった。

3・3 広い周波数帯域での遮音効果向上 -音源側スロープの音響管に対する工夫-

遮音効果を広帯域化するための手段を考察した。具体的には、図7の防音壁形状で生じた13~15Hz にわたるディップを抑制するため、音源側に音響管を追加する。図3で示したように音源側をソフトとすることは受信側よりも遮音効果が高いため、ソフトな性質を持つ音響管によって優れた効果が期待できる。

図9に示すように、地面上に横たえる状態で0.1m厚の剛板を用いて音響管を設置する。0点から垂直に立つ剛板の高さは Width(m)とした。地面による鏡像を考慮すると、Widthの倍の長さの管幅を有する音響管となる。開口は音源側に向け、0点を図1の原点Oに合わせた。13~15Hzの制御のため管長は5.0mで固定し、Widthを0.5m, 1.0m, 1.9mと変化させたときの遮音効果の周波数応答を図10に示す。大きな管幅のほうが、遮音効果がピークとなる周波数が小さくなっている。更には、管幅が大きくなるほど遮音効果のピーク値も大きくなり、効果のある帯域も大きくなることがわかる。Width=1.9のケースでは遮音効果は、13.6Hzでピーク値7.6dBをとり、12.8Hzから15.3Hzにわたって5dB以上の効果が認められる。

ここでも、音源向きに開口を持つ音響管による遮音のメカニズムを調べるために、音響管の開口周辺の音圧レベルとインテンシティの分布を描いた。図11に Width=1.9のケースにおける13.6Hzでの分布図を示す。音圧レベルが極小となる領域は開口の前方で、高さ2mあたりに位置しており、インテンシティをみると音のエ

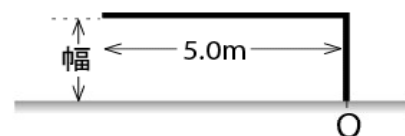


図9 音源側に音響管を置く防音壁形状

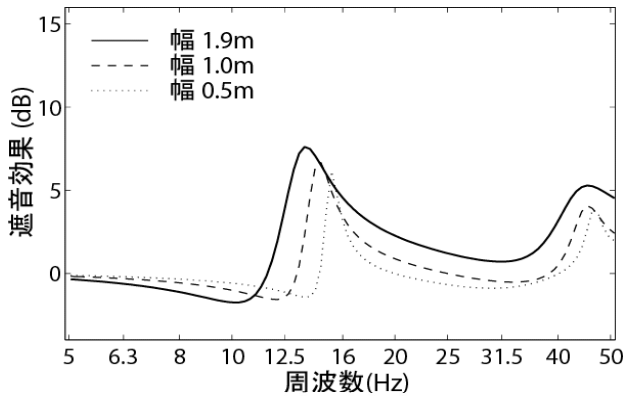


図 1 0 3つの管幅に対する遮音効果の周波数特性
-音源側スロープに音響管を配置した場合-

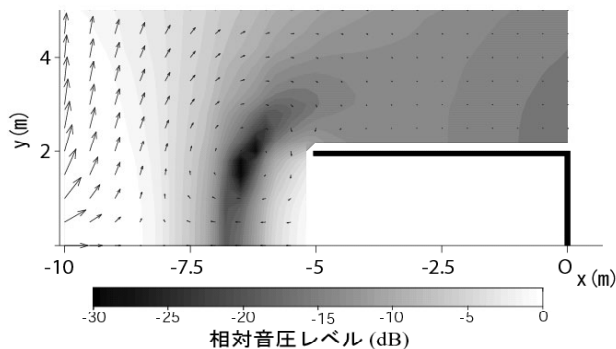


図 1 1 音圧レベルとインテンシティの分布 -13Hz-

エネルギーは開口よりも2.5m から5m 前方で真上に転じている。このように、受音点とかけ離れた領域で、エネルギーの向きが真上に転じることにより大きな遮音効果が得られたと結論できる。

3・4 両側のスロープに音響管を配置

続いて、図7で示した形状、すなわち防音壁の受音側に3本の音響管を配置した形状において生じた15Hz 前後での遮音効果のディップを、小さくすることを試みた。そのためには、図7の防音壁と、遮音効果のピークが緩やかな図9の Width=1.9のケースの防音壁とを組み合わせることが有効だと思われる。そこで、広帯域での遮音が可能となる防音壁形状の一例として図12に示す形状を考えた。遮音効果を計算したところ、図13の実線に示すように12Hz から18Hz という2/3オクターブバンド幅にわたり4.5dB 以上の遮音効果がある。その間には11.9Hz に5.6dB、13.6Hz に7.7dB、16.0Hz に8.2dB の大きな遮音効果を持つ3つのピークがある。図には結合前の図7と図9の単体での遮音効果も示しているが、単体時における遮音効果が重なり合う相乗効果として遮音効果が向上したことが明確に現れている。

防音壁に音響管を並列に配置したときには遮音効果がピークとなる周波数の間に大きなディップが生じていた。しかし、防音壁の反対の側面に追加した音響管に対

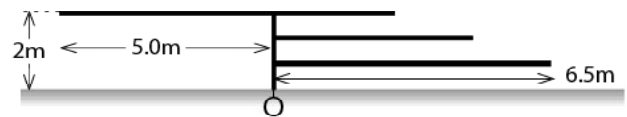


図 1 2 両側のスロープに音響管を配置

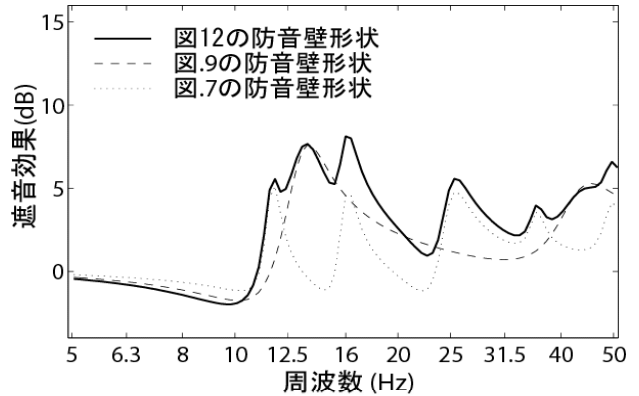


図 1 3 遮音効果の周波数特性
-両側のスロープに音響管を配置した場合-

しては、遮音効果が相乗的に増加することがわかった。ここで示した形状では8dB を超える遮音効果をも生じており、組み合わせのパターンによっては更なる効果の向上が期待できる。

以上の検討では、遮音効果は地面に沿った一地点に限っていた。ここで地面上空を含めた広い領域における遮音効果を確認するため、図14に遮音効果の分布図を描いた。対象としたのは、遮音量がピークを示した13.6Hz および16.0Hz である。広い範囲で7dB を超える遮音効果が得られている。

4 まとめ

低周波音の制御に防音壁を用いる場合、回折音波を抑えるため壁にかなりの高さが必要だと考えられていたが、防音壁の側面を音響的にソフトとすることにより、大きな遮音効果が得られた。ソフトな表面を近似的に実現できる音響管を用いた結果、防音壁の高さが2m であっても十分な遮音効果が得られた。音響管によれば開口端がソフトとなる周波数帯で、音のエネルギーを上方に転じるため、受音領域で効果的な遮音が得られる。また、音響管の管幅が大きくなるほど、遮音効果のピーク値が大きくなり、効果のある帯域も大きくなることもわかった。今回は10Hz ~ 20Hz までの制御を想定したため、防音壁に12m 程度の幅を要しており、まだ実用的とは言えない。しかし、20Hz ~ 40Hz の制御だと半分の幅で十分であり、対象とする周波数が高くなるほど幅は小さくて済む。

今後は、低周波音を発生する音源のスペクトルを考慮

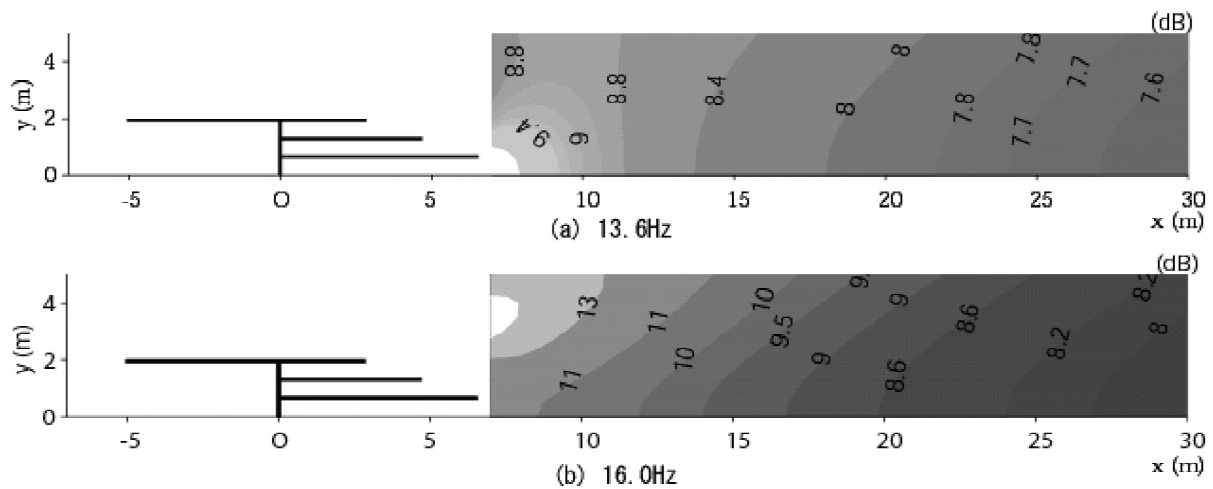


図 1 4 遮音効果の分布図 -両スロープに音響管を配置-

して、効果的な音響管配列を提案していきたい。加えて、音響管に比べて長さを必要としないヘルムホルツ共鳴器により、改良を進めていく方針である。

文献

1) 環境庁大気保全局：低周波音の測定法に関するマニュアル，2000。
 2) 藤原恭司，四元英治：ソフトな表面を持つ防音壁について，日本音響学騒音研究会資料 N-92-7，187-196，1992。
 3) 川瀬康彰：低周波域用防音壁に関する基礎研究，平成8年度九州芸術工科大学修士論文，1997。
 4) R. Seznec：Diffraction of sound around barriers: use of the boundary elements technique, J. Sound. Vib. **73** (2), 195-209, 1980。
 5) D. C. Hothersall, S. A. Chandler-Wild and M. N. Hajmirzae：Efficiency of single noise barriers, J. Sound. Vib. **146**, 303-322, 1991。
 6) 前川純一：建築・環境音響学，共立出版，1992。
 7) 伊藤毅：音響工学原論，コロナ社，1955。

Control for low frequency noise by the shielding barrier built in sound tubes

Gensei Matsumoto and Kyoji Fujiwara*

*Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences,
 39 Mukaizano, Dazaifu, Fukuoka 818-0135, Japan
 *Kyushu Institute of Design, Lab. of Acoustical Environment Analysis,
 4-9-1 Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka 815-8540, Japan*

It has been considered that a shielding barrier needs height over 10 m to reduce low frequency noise sufficiently. Nevertheless, numerical calculation showed that a shielding barrier, which had wide soft surface in side, did not require such height. In this paper, sound tube was used for making soft surface. A shielding barrier built in sound tubes had sufficient shielding effect even if its height was only 2 m. Investigations for the mechanism of reduction by sound tube revealed that a sound tube made energy flow turn to upward, and sufficient noise reduction was gained in receiving region. Moreover, as width of sound tube was longer, the peak value of sound shielding effect was bigger and frequency region having sufficient shielding effect was wider.

[Key words : low frequency noise, noise control, sound shieding effect, sound tube, numerical method]