

# 高速移動音源に対する防音壁の遮音量算出に関する研究

環境エネルギー部 緒方 正剛  
 日東紡音響エンジニアリング(株) 中島 弘史 鶴 秀生  
 九州芸術工科大学 藤原 恭司

## 1. はじめに

道路沿道や鉄道沿線住民の生活環境保全を目的とする騒音対策手法の一つとして、防音壁が用いられている。交通機関の騒音の予測に際しては、実際には移動している音源を静止したものと仮定して、受音点での騒音を求める手法が用いられる。しかし本来、音源が移動する場合はドップラー効果により周波数の変調や指向性が変化することが知られており、移動速度が速くなるとその変化が無視できないと考えられる。本報では、音源が高速移動する場合にドップラー効果を考慮した防音壁の挿入損失について検討した結果を報告する。

## 2. 仮定条件

### 2.1. 音源

音源は、自由空間において無指向性の表面に  $u_a e^{j\omega t}$  の単振動を持つ呼吸球と仮定して、その音源は防音壁と平行に等速で直線上を移動するものとした。

音源の周波数は、移動音源が固定された受音点前を通過する際にはドップラー効果によりその速度に応じた周波数変調や音圧レベルの変化が知られている。その現象の検討にあたっては、解析精度は観測できる波数に依存するため、可能な限り多くの波数を抽出することが重要である。反面、シミュレーションにおける境界要素法の計算では、周波数が高くなると分割要素数の増大を招き、計算回数が発散することになる。これらを勘案し、今回検討する音源の周波数は15,000 Hzの正弦波(波

長23.1mm(25 )とした。

音源音圧 : 90.0 dB (0.5m)

音源移動速度条件 : 300, 500, 700 km/h (等速)

### 2.2. 音源と受音点の配置及び周波数変調

音源と受音点の配置図を図1に示す。音源及び受音点は自由空間内にあるものとし、防音壁は剛体のナイフエッジ半無限長障壁とした。

周波数  $f_i$  の音源が  $f_0$  で移動している時、それと  $f_0$  の方向にある静止した受音点で観測される音の周波数は  $f_0$  であり、

$$f_0 = f_i \frac{c - v \cos \theta}{c} \quad (1)$$

で表せる。

角度  $\theta$  を音源の位置に置き換えた場合の各速度を持つ音源が各位置を通過する際に受音点で観測される音の周波数変調を図2に示す。

## 3. 前川チャートによる検討

鉄道の騒音を予測する際の防音壁の回折減衰量の評価には、前川チャート<sup>1)</sup> 回帰式を用いる方法が用いられている。<sup>2)</sup> 前川チャートでは、防音壁の挿入損失はフレネル数  $N (= 2 / \lambda, \lambda : \text{音源と受音点の行路差(m)}; \lambda : \text{波長(m)})$  から求めるため、音源の周波数に依存する量である。そこで、音源と受音点を図1の配置において、音源は移動線上の各位置に静止していると仮定し、ドップラー効果を考慮する場合には図2の速度と位置に応じた周波数に対する回折減衰量を求めることにより受音

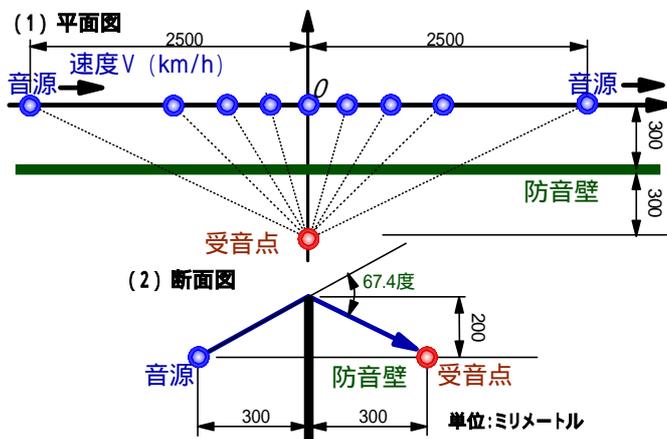


図1 音源と受音点の配置図

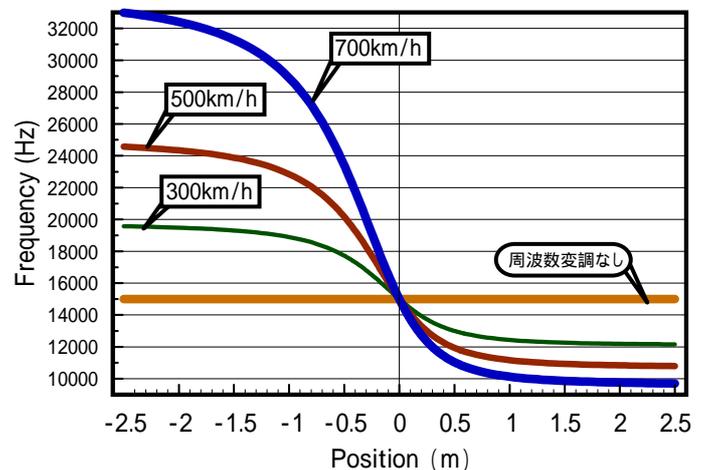


図2 受音点における周波数変調

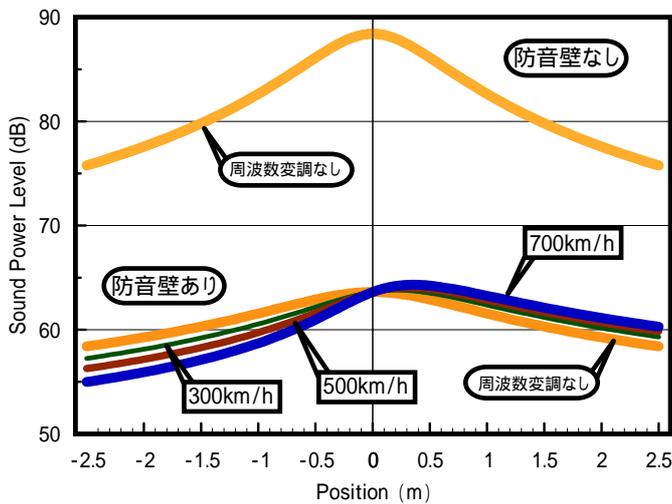


図3 音源が静止した条件での音圧の変化

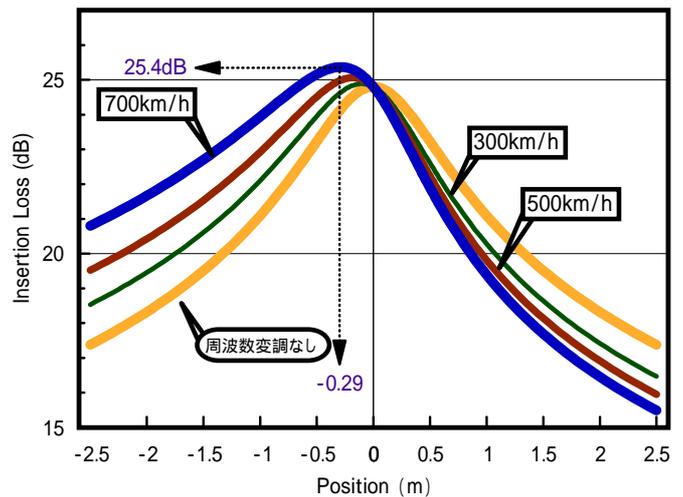


図4 音源が静止した条件での挿入損失

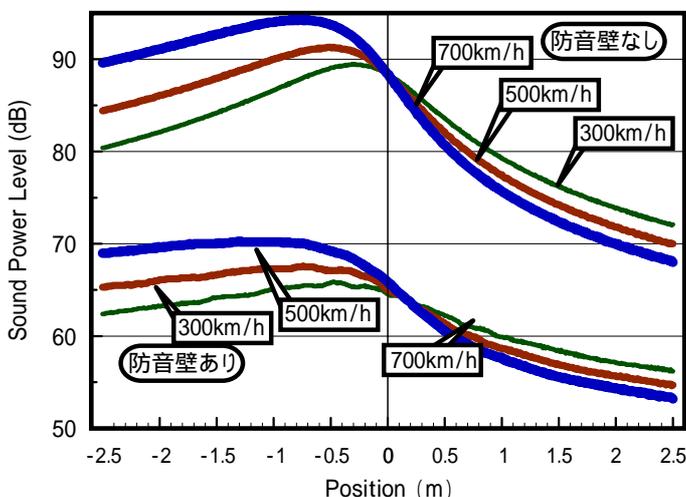


図5 3D-BEMによる音圧の変化のシミュレーション結果

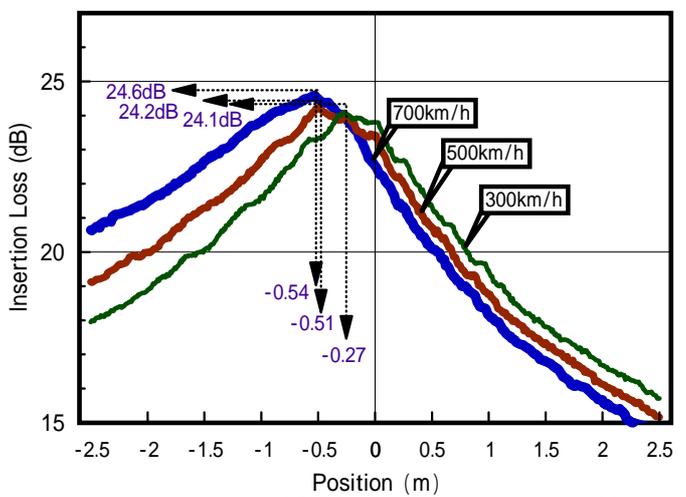


図6 3D-BEMによる挿入損失のシミュレーション結果

点での音圧レベルを求めてこれらと比較した。結果を図3に示す。また防音壁の挿入損失を図4に示す。

図3より、防音壁がある条件において、ドップラー効果による周波数変調を考慮した場合の受信点の音圧レベルのピークは、受信点の中心を通過した後に移動し、その距離は速度が速くなるに従い後方になる傾向にある。また図4より、防音壁の挿入損失のピークは、中心より手前であり、その距離は速度に応じて手前になる傾向がある。この理由としては、音源は静止しているものの、防音壁の挿入損失は音源の各位置での周波数に依存するために、受信点前を境に周波数が低くなることで挿入損失が下がり音圧レベルが上昇するのに対して、音源と受信点の距離は中心通過後に隔たるために距離減衰が大きくなりレベルが減少するという、周波数変調と距離との相互の関係により、挿入損失のピークの位置が移動するものと考えられる。

これらから、音源が静止した状態において防音壁の遮音量を算出する際にドップラー効果による周波数変調を

考慮することにより、防音壁の挿入損失のピークは、速度が700km/hでは約0.3m手前で観測され、レベルは0.6dB大きくなり、ドップラー効果を考慮する必要があることが分かった。

#### 4. 境界要素法によるシミュレーション

鉄道騒音などの数値的予測に際して、2次元空間での境界要素法で求めた基本解を積分変換することにより3次元音場の解を求める手法<sup>3)</sup>やその応用例<sup>4) 5)</sup>が報告されている。今回はこの手法を移動音源の防音壁の挿入損失の検討に適用し、ドップラー効果による周波数変調や指向性の変化などが防音壁の挿入損失に与える影響について検討を行った。

##### 4.1. 2次元境界要素法

防音壁の形状は、厚みが無視できる高さ3mの剛な壁として、地面による反射はないものとした。気温は25℃、音速は346.75m/sである。2次元解を得るための断面方向の周波数刻みは5Hzとし0Hz付近では積分変換を考

慮して細かく刻むこととした。

#### 4.2. 積分計算適用の検討

音場における音圧  $p$  および粒子速度  $v$  [m/s] は、時間  $t$  [sec]、密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、速度ポテンシャル  $\phi$  を用いて(2)式で計算できる。

$$p = - \frac{\rho}{t} \quad v = \quad (2)$$

また、移動する点音源による音場の速度ポテンシャルは、波動方程式より次式の解として得ることができる。

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -s(t) \quad \phi = x_0(t) \quad (3)$$

ここで、 $s(t)$  は、体積速度を単位とする音源波形であり、 $x$  は受音点の位置[m]、 $x_0(t)$  は音源の位置[m]である。音源は、 $z$  軸に平行に移動するものとし、(3)式を  $t$  と  $z$  でフーリエ変換することにより、2次元音場における解  $\phi(x, y, k_x, k_y)$  と音源の移動を考慮した際の音源の周波数特性  $S(k_z)$  から、3次元音場における速度ポテンシャルは、

$$\phi(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} S(k_z) \phi(x, y, \sqrt{k^2 - k_z^2}) e^{i k_z z} \right] e^{i k_z z} dk_z \quad (4)$$

で表せる。また、音源が等速度で移動し、音源の  $z$  座標が、

$$z(t) = z + Vt \quad (5)$$

として表現できる場合には、 $S(k_z)$  は、元の音源波形  $s(t)$  の周波数特性  $\bar{S}(k_z)$  を用いて、

$$\phi(x, y, z, t) = \frac{1}{2} e^{-i k_z z} \phi(x, y, \sqrt{k^2 - k_z^2}) e^{-i k_z (z - z_0)} dk_z \quad (6)$$

となり、音源が周波数  $\omega$  の正弦波が等速で移動する音源の場合には、 $\bar{S}(k_z)$  に関する積分を含まないで速度ポテンシャル  $\phi$  を得ることができるため、音源特性  $\bar{S}(k_z)$  が変化した場合にも、周波数合成をすることにより  $\phi$  を得ることができる。

#### 4.3. 3次元への積分変換

分析時間  $-0.1 \sim 0.1$  sec

波数  $k_z$  の範囲  $-1.15 \sim 1.15$  ( $\bar{k}_z$ )

刻み・通常領域 ( $-0.9 < \bar{k}_z < 0.9$ )  $\bar{k}_z$  で等間隔に12000点(実間隔1.8/12000)

・特異点周辺領域 ( $-0.9 < |\bar{k}_z| < 1.15$ ) では  $\bar{k}_{z,y} = 1 - \bar{k}_z$  で等間隔に3000点、 $\bar{k}_z$  では非等間隔

サンプリング周波数 96000 Hz

#### 4.4. 計算結果

音源が各速度で移動した場合における3次元境界要素法で求めた解を図5に示す。また、防音壁の挿入損失を図6に示す。

図5より、速度が早くなるに従い音圧レベルの最大値は大きくなり、その位置は中心より手前に移る傾向がある。この傾向は、図3において周波数変調を考慮した場合に中心より後側に移動する傾向と反している。この理由としては、土肥<sup>6)</sup> や鶴<sup>7)</sup> の報告にあるように、音源が高速で移動する場合、ドップラー効果により音圧が上昇すると同時に音源が進行方向への指向特性を持つためと考えられる。

図6より、速度が700km/hの場合の挿入損失の最大値は中心より0.54m手前で24.6dBである。前章の前川チャートで周波数変調を考慮した場合と比べて0.25m手前であり、挿入損失は0.8dB小さくなる。この理由は前川チャートにおけるドップラー効果の検討と同様に受音点で観測する最大音圧が防音壁の有無で異なることによるものと考えられる。

また、挿入損失の変化はどの速度においてもスムーズではなく小刻みな凹凸がある。これは図5における防音壁の回折減衰を伴う音圧レベルの変化にも見られる凹凸に起因している。これは、移動している音源から受音点へ向かう直達音と防音壁に反射して音源に向かう音が干渉することによる影響と考えられる。

これらにより、音源が高速で移動する場合、ドップラー効果による周波数の変調や音源の指向性が変わることにより、防音壁の挿入損失の最大値の位置が変動すると共に挿入損失が減少することが分かった。

#### 5. まとめ

音源が高速移動する場合にドップラー効果を考慮した防音壁の挿入損失について前川チャートの回帰式を用いる方法と3次元境界要素法を用いて検討した結果は以下にまとめられる。

1) 前川チャートの回帰式を用いて、音源が静止した状態において防音壁の遮音量を算出する際にドップラー効果による周波数変調を考慮することにより、防音壁の挿入損失のピークは、速度が700km/hでは約0.3m手前で観測され、そのレベルは0.6dB程度大きくなることから、音源が高速で移動する場合にはドップラー効果を考慮する必要がある。

2) 3次元境界要素法の計算結果から、音源が高速で移動する場合、ドップラー効果による周波数の変調や音源の指向性が変わることにより、防音壁の挿入損失の最大値の位置が変動すると共に挿入損失が減少する。

## 6. おわりに

本報告では、音源が移動する場合の防音壁の挿入損失を求める際に、これまでは音源が静止しているものとして扱っていたが、ドップラー効果を考慮することが必要であることを提示した。今後は、実験などを行い、より詳細な検討を行う予定にしている。

### < 参考文献 >

- 1) 前川純一、音響学会誌、No.18, p.187-196, 1962年
- 2) 長倉清、善田康雄、騒音・振動研究会資料(N2000-01), 2000年1月
- 3) D.Duhamel, Journal of Sound & Vibration, 197(5), p.547-571, 1996年
- 4) 井上瑞希、藤原恭司、2001年秋季日本音響学会講演論集, p823-824, 2001年9月
- 5) 山中高章、鶴秀生、安部由布子、北川俊樹、2001年秋季日本音響学会講演論集, p.825-826, 2001年9月
- 6) 土肥哲也、廣江正明、加来治郎、1997年春季日本音響学会講演論集, p.739-740, 1997年
- 7) 鶴秀生、中島弘史、高橋宏治、2000年秋季日本音響学会講演論集,p.667-668, 2000年

# 高速移動音源に対する防音壁の遮音量算出に関する研究

環境エネルギー部 緒方 正剛  
 日東紡音響エンジニアリング(株) 中島 弘史 鶴 秀生  
 九州芸術工科大学 藤原 恭司

## 1. はじめに

道路沿道や鉄道沿線住民の生活環境保全を目的とする騒音対策手法の一つとして、防音壁が用いられている。交通機関の騒音の予測に際しては、実際には移動している音源を静止したものと仮定して、受音点での騒音を求める手法が用いられる。しかし本来、音源が移動する場合はドップラー効果により周波数の変調や指向性が変化することが知られており、移動速度が速くなるとその変化が無視できないと考えられる。本報では、音源が高速移動する場合にドップラー効果を考慮した防音壁の挿入損失について検討した結果を報告する。

## 2. 仮定条件

### 2.1. 音源

音源は、自由空間において無指向性の表面に  $u_a e^{j\omega t}$  の単振動を持つ呼吸球と仮定して、その音源は防音壁と平行に等速で直線上を移動するものとした。

音源の周波数は、移動音源が固定された受音点前を通過する際にはドップラー効果によりその速度に応じた周波数変調や音圧レベルの変化が知られている。その現象の検討にあたっては、解析精度は観測できる波数に依存するため、可能な限り多くの波数を抽出することが重要である。反面、シミュレーションにおける境界要素法の計算では、周波数が高くなると分割要素数の増大を招き、計算回数が発散することになる。これらを勘案し、今回検討する音源の周波数は15,000 Hzの正弦波(波

長23.1mm(25 )とした。

音源音圧 : 90.0 dB (0.5m)

音源移動速度条件 : 300, 500, 700 km/h (等速)

### 2.2. 音源と受音点の配置及び周波数変調

音源と受音点の配置図を図1に示す。音源及び受音点は自由空間内にあるものとし、防音壁は剛体のナイフエッジ半無限長障壁とした。

周波数  $f_i$  の音源が  $f_0$  で移動している時、それと  $f_0$  の方向にある静止した受音点で観測される音の周波数は  $f_0$  であり、

$$f_0 = f_i \frac{c - v \cos \theta}{c} \quad (1)$$

で表せる。

角度  $\theta$  を音源の位置に置き換えた場合の各速度を持つ音源が各位置を通過する際に受音点で観測される音の周波数変調を図2に示す。

## 3. 前川チャートによる検討

鉄道の騒音を予測する際の防音壁の回折減衰量の評価には、前川チャート<sup>1)</sup> 回帰式を用いる方法が用いられている。<sup>2)</sup> 前川チャートでは、防音壁の挿入損失はフレネル数  $N (= 2 / \lambda \cdot M)$  (  $\lambda$  : 音源と受音点の行路差(m) ;  $M$  : 波長(m)) から求めるため、音源の周波数に依存する量である。そこで、音源と受音点を図1の配置において、音源は移動線上の各位置に静止していると仮定し、ドップラー効果を考慮する場合には図2の速度と位置に応じた周波数に対する回折減衰量を求めることにより受音

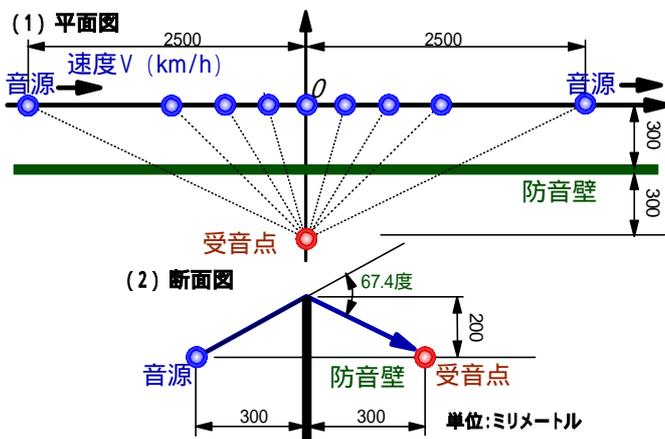


図1 音源と受音点の配置図

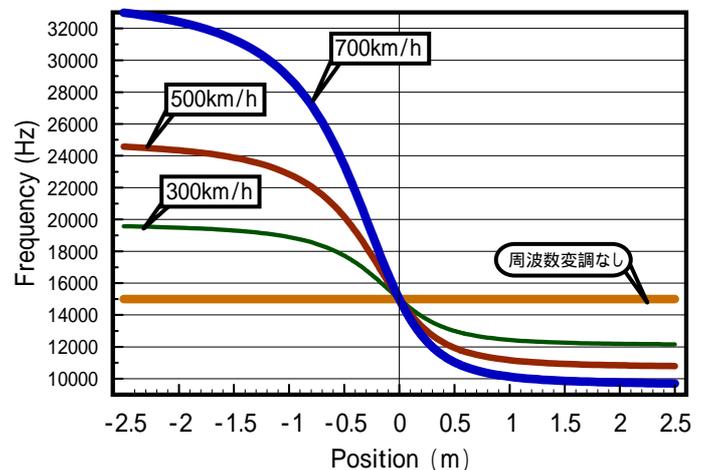


図2 受音点における周波数変調

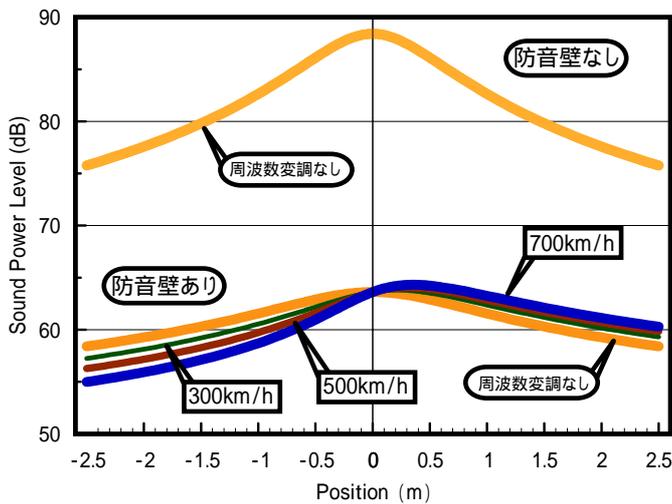


図3 音源が静止した条件での音圧の変化

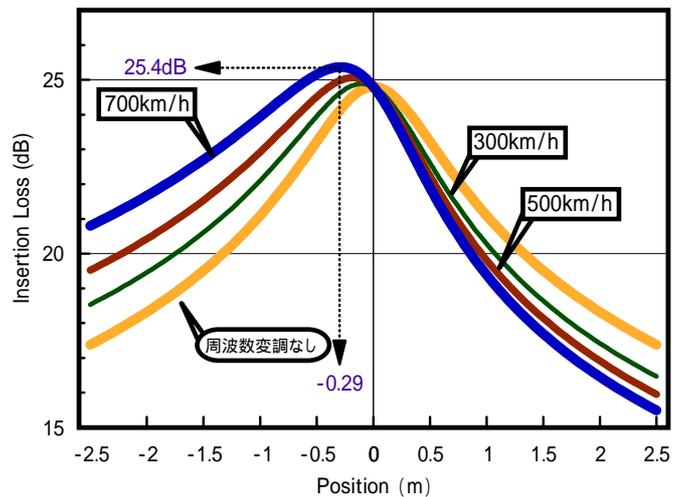


図4 音源が静止した条件での挿入損失

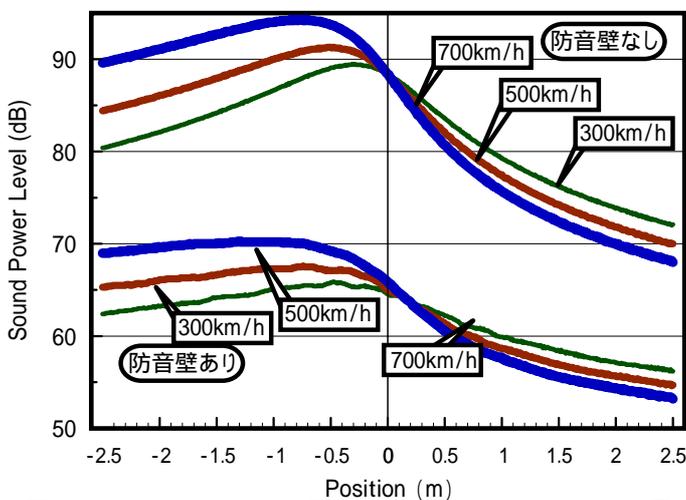


図5 3D-BEMによる音圧の変化のシミュレーション結果

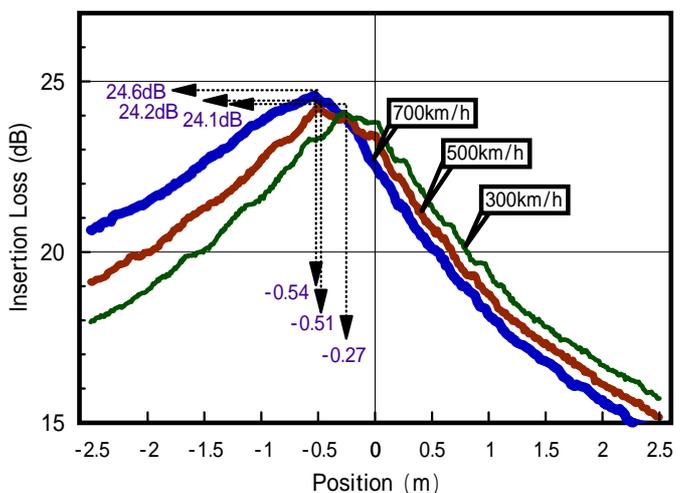


図6 3D-BEMによる挿入損失のシミュレーション結果

点での音圧レベルを求めてこれらと比較した。結果を図3に示す。また防音壁の挿入損失を図4に示す。

図3より、防音壁がある条件において、ドップラー効果による周波数変調を考慮した場合の受信点の音圧レベルのピークは、受信点の中心を通過した後に移動し、その距離は速度が速くなるに従い後方になる傾向にある。また図4より、防音壁の挿入損失のピークは、中心より手前であり、その距離は速度に応じて手前になる傾向がある。この理由としては、音源は静止しているものの、防音壁の挿入損失は音源の各位置での周波数に依存するために、受信点前を境に周波数が低くなることで挿入損失が下がり音圧レベルが上昇するのに対して、音源と受信点の距離は中心通過後に隔たるために距離減衰が大きくなりレベルが減少するという、周波数変調と距離との相互の関係により、挿入損失のピークの位置が移動するものと考えられる。

これらから、音源が静止した状態において防音壁の遮音量を算出する際にドップラー効果による周波数変調を

考慮することにより、防音壁の挿入損失のピークは、速度が700km/hでは約0.3m手前で観測され、レベルは0.6dB大きくなり、ドップラー効果を考慮する必要があることが分かった。

#### 4. 境界要素法によるシミュレーション

鉄道騒音などの数値的予測に際して、2次元空間での境界要素法で求めた基本解を積分変換することにより3次元音場の解を求める手法<sup>3)</sup>やその応用例<sup>4) 5)</sup>が報告されている。今回はこの手法を移動音源の防音壁の挿入損失の検討に適用し、ドップラー効果による周波数変調や指向性の変化などが防音壁の挿入損失に与える影響について検討を行った。

##### 4.1. 2次元境界要素法

防音壁の形状は、厚みが無視できる高さ3mの剛な壁として、地面による反射はないものとした。気温は25℃、音速は346.75m/sである。2次元解を得るための断面方向の周波数刻みは5Hzとし0Hz付近では積分変換を考

慮して細かく刻むこととした。

#### 4.2. 積分計算適用の検討

音場における音圧  $p$  および粒子速度  $v$  [m/s] は、時間  $t$  [sec]、密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、速度ポテンシャル  $\phi$  を用いて(2)式で計算できる。

$$p = - \frac{\rho}{t} \quad v = \quad (2)$$

また、移動する点音源による音場の速度ポテンシャルは、波動方程式より次式の解として得ることができる。

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -s(t) \quad \phi = x_0(t) \quad (3)$$

ここで、 $s(t)$  は、体積速度を単位とする音源波形であり、 $x$  は受音点の位置[m]、 $x_0(t)$  は音源の位置[m]である。音源は、 $z$  軸に平行に移動するものとし、(3)式を  $t$  と  $z$  でフーリエ変換することにより、2次元音場における解  $\phi(x, y, k_x, k_y)$  と音源の移動を考慮した際の音源の周波数特性  $S(k_z)$  から、3次元音場における速度ポテンシャルは、

$$\phi(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} S(k_z) \phi(x, y, \sqrt{k^2 - k_z^2}) e^{i k_z z} \right] e^{i k_z z} dk_z \quad (4)$$

で表せる。また、音源が等速度で移動し、音源の  $z$  座標が、

$$z(t) = z + Vt \quad (5)$$

として表現できる場合には、 $S(k_z)$  は、元の音源波形  $s(t)$  の周波数特性  $\bar{S}(k_z)$  を用いて、

$$\phi(x, y, z, t) = \frac{1}{2} e^{-i k_z z} \phi(x, y, \sqrt{k^2 - k_z^2}) e^{-i k_z (z - z_0)} dk_z \quad (6)$$

となり、音源が周波数  $\omega$  の正弦波が等速で移動する音源の場合には、 $\bar{S}(k_z)$  に関する積分を含まないで速度ポテンシャル  $\phi$  を得ることができるため、音源特性  $\bar{S}(k_z)$  が変化した場合にも、周波数合成をすることにより  $\phi$  を得ることができる。

#### 4.3. 3次元への積分変換

分析時間  $-0.1 \sim 0.1$  sec

波数  $k_z$  の範囲  $-1.15 \sim 1.15$  ( $\bar{k}_z$ )

刻み・通常領域 ( $-0.9 < \bar{k}_z < 0.9$ )  $\bar{k}_z$  で等間隔に12000点(実間隔1.8/12000)

・特異点周辺領域 ( $-0.9 < |\bar{k}_z| < 1.15$ ) では  $\bar{k}_{xy} = 1 - \bar{k}_z$  で等間隔に3000点、 $\bar{k}_z$  では非等間隔

サンプリング周波数 96000 Hz

#### 4.4. 計算結果

音源が各速度で移動した場合における3次元境界要素法で求めた解を図5に示す。また、防音壁の挿入損失を図6に示す。

図5より、速度が早くなるに従い音圧レベルの最大値は大きくなり、その位置は中心より手前に移る傾向がある。この傾向は、図3において周波数変調を考慮した場合に中心より後側に移動する傾向と反している。この理由としては、土肥<sup>6)</sup> や鶴<sup>7)</sup> の報告にあるように、音源が高速で移動する場合、ドップラー効果により音圧が上昇すると同時に音源が進行方向への指向特性を持つためと考えられる。

図6より、速度が700km/hの場合の挿入損失の最大値は中心より0.54m手前で24.6dBである。前章の前川チャートで周波数変調を考慮した場合と比べて0.25m手前であり、挿入損失は0.8dB小さくなる。この理由は前川チャートにおけるドップラー効果の検討と同様に受音点で観測する最大音圧が防音壁の有無で異なることによるものと考えられる。

また、挿入損失の変化はどの速度においてもスムーズではなく小刻みな凹凸がある。これは図5における防音壁の回折減衰を伴う音圧レベルの変化にも見られる凹凸に起因している。これは、移動している音源から受音点へ向かう直達音と防音壁に反射して音源に向かう音が干渉することによる影響と考えられる。

これらにより、音源が高速で移動する場合、ドップラー効果による周波数の変調や音源の指向性が変わることにより、防音壁の挿入損失の最大値の位置が変動すると共に挿入損失が減少することが分かった。

#### 5. まとめ

音源が高速移動する場合にドップラー効果を考慮した防音壁の挿入損失について前川チャートの回帰式を用いる方法と3次元境界要素法を用いて検討した結果は以下にまとめられる。

1) 前川チャートの回帰式を用いて、音源が静止した状態において防音壁の遮音量を算出する際にドップラー効果による周波数変調を考慮することにより、防音壁の挿入損失のピークは、速度が700km/hでは約0.3m手前で観測され、そのレベルは0.6dB程度大きくなることから、音源が高速で移動する場合にはドップラー効果を考慮する必要がある。

2) 3次元境界要素法の計算結果から、音源が高速で移動する場合、ドップラー効果による周波数の変調や音源の指向性が変わることにより、防音壁の挿入損失の最大値の位置が変動すると共に挿入損失が減少する。

## 6. おわりに

本報告では、音源が移動する場合の防音壁の挿入損失を求める際に、これまでは音源が静止しているものとして扱っていたが、ドップラー効果を考慮することが必要であることを提示した。今後は、実験などを行い、より詳細な検討を行う予定にしている。

### < 参考文献 >

- 1) 前川純一、音響学会誌、No.18, p.187-196, 1962年
- 2) 長倉清、善田康雄、騒音・振動研究会資料(N2000-01), 2000年1月
- 3) D.Duhamel, Journal of Sound & Vibration, 197(5), p.547-571, 1996年
- 4) 井上瑞希、藤原恭司、2001年秋季日本音響学会講演論集, p823-824, 2001年9月
- 5) 山中高章、鶴秀生、安部由布子、北川俊樹、2001年秋季日本音響学会講演論集, p.825-826, 2001年9月
- 6) 土肥哲也、廣江正明、加来治郎、1997年春季日本音響学会講演論集, p.739-740, 1997年
- 7) 鶴秀生、中島弘史、高橋宏治、2000年秋季日本音響学会講演論集,p.667-668, 2000年