

高速多重極境界要素法による遮音壁の騒音低減効果予測に関する研究

Prediction of Sound Attenuation of Noise Barriers using the Fast Multipole Boundary Element Method

学籍番号 16713

氏名 伊藤 敦子 (Ito, Atsuko)

指導教官 佐久間 哲哉 助教授

1. 研究の背景と目的

道路交通騒音は深刻な社会問題の一つであり、騒音低減を目的とした様々な形態の遮音壁が近年盛んに開発されている。^{[1][2]}一方、現在日本では道路交通騒音予測手法として ASJ Model 1998^[3] が実務上用いられているが、直壁を仮定した簡易計算に基づく手法であるため特殊形態の遮音壁については適用が困難となっている。一方、遮音壁の3次元数値解析は計算機能力の制限により困難であったが、近年開発された高速多重極境界要素法 (FMBEM) を用いることにより、計算量・必要記憶容量を大幅に低減され、大規模解析が可能である。

本研究では3次元音響数値解析を導入することにより任意形態の遮音壁の性能評価を実現する。特に、ユニットパターン (一台の自動車) が道路上を走行した時の予測地点における音圧の時刻暦) の予測を目指す。

2. 本研究の流れ

① **FMBEM 適用領域の拡張** 本論文で一貫して用いている FMBEM について、遮音壁規模の問題まで FMBEM の適用範囲を拡張する。手法実行の前提となる各種パラメータ設定について検討し、具体的な設定式を定める。

② **遮音壁解析のための基礎的検討** 種々の遮音壁解析の前段階として、計算手法の妥当性、解析モデルの設定、遮音壁による遮音効果評価量に関して検討する。

・ **FMBEM の妥当性の検証**: 前章の設定を踏まえた FMBEM 解析を行い、理論近似解との比較から手法の妥当性を検証する。

・ **側方回折波の影響**: 本研究では無限長壁による騒音低減効果予測を目的としており、数値解析にあたっては解析モデルの有限性が問題となる。有限長壁の側方回折波の影響を数値解析により検討することで、有限長壁を無限長壁とみなせる解析範囲を設定する。

・ **減音効果評価量**: 受音点による空間サンプリングに対する音圧レベル値の安定性を高めるため、領域エネルギー平均による音圧レベルを導入し、平均領域との関係を検討する。

③ **遮音壁解析のための応用的検討** 前章までの設定のもと様々な形態の遮音壁を解析し、2次元解析との比較や形状・吸音処理の影響を見ることで3次元解析の必要性を具体的に明らかにする。

3. FMBEM 適用領域の拡張

FMBEM では音場の基本解を無限級数和を含んだ多重極展開で表現するため、数値計算にあたってはその打ち切り次数 (以下 N_c) を解析周波数、多重極展開点の位置関係等によらず高精度となるよう適切に設定する必要がある。既往の提案式は $kD \leq 200$ (k : 波数、 D : 解析対象の代表長) (100m 規模の問題では 200Hz まで対応) の範囲でしか精度の確認がなされておらず、遮音壁のような大規模問題には適用できなかった。ここでは、多重極展開表現と厳密解との比較により N_c を設定し、 $kD \leq 1000$ (同規模で 1kHz の解析に相当) まで適用領域を拡張した。

4. 遮音壁解析のための基礎的検討

4-1. **FMBEM 計算結果の妥当性の検証**
Macdonald の理論近似解 (厚みのない無限

長壁の解。以下、Macdonald) と FMBEM による 3次元解析の結果を比較し、FMBEM 計算結果の妥当性を検証する。

(1) 解析方法 剛な地表面上の剛な直壁 (厚み 10cm、0 の 2種類) と点音源から成る解析モデルを Fig.1 に示す。但し、Macdonald は厚みのない無限長壁を対象としている。

(2) 結果と考察 Fig.2 に 500Hz での受音面 A における FMBEM と Macdonald による挿入損失分布を示す。いずれも位相干渉によるディップの位置がよく合っていることから、上記の設定では、厚みの有無によらず理論近似解とほぼ一致することが分かった。

4-2. 側方回折波の影響

FMBEM の解析結果から、側端部と音源・受音点の位置関係による側方回折波の影響について検討する。

(1) 解析方法 Fig.3 に解析モデルの平面図を示す。障壁の高さ h は 2.5m とし、音源・受音面を同一平面に設定する。障壁側端部・受音面間距離 d を変化させ、各受音面における側方回折波の影響を、前節で既に精度の確認された type1 との音圧レベル差 (絶対値) で評価する。

(2) 結果と考察 Fig.4 に 500Hz での各受音面における type1 との音圧レベル差の分布を示す。type3 ($d=2h$) ではディップ以外の場所

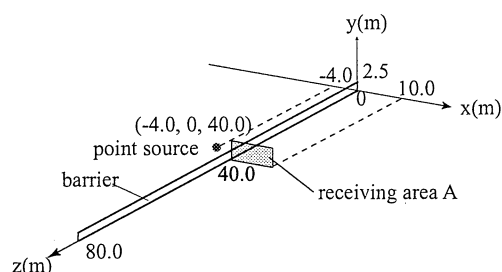


Fig. 1 Geometry of a point source, finite noise barrier, and receiving area.

でも 2dB 以上の差が生じているが、type2 ($d=4h$) の場合、ディップ以外では差が 2dB 以内であり、実用上十分な範囲と思われる。これは 125Hz においても同様であり、周波数依存性は低いと思われる。これより、今回の解析においては、type2 ($d=4h$) からを無限長壁として扱える範囲として設定した。

4-3. 減音効果評価量 遮音壁解析は、地表面の影響により干渉が顕著な音場となることから、受音点の空間サンプリングにより音圧レベルが変動しやすく、特に鋭いディップ部においてはそれが顕著となる。受音点の空間サンプリングに対する音圧レベル値の安定性を高めるため、受音点周辺の領域でエネルギー的に平均する方法を検討する。

(1) 検討方法 Fig.1 における面 A で、平均化領域の異なる 3 タイプの平均化を行う。 $\lambda/4$ 間隔で格子状に受音点を設け、それぞれ一辺の長さが $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 λ の立方体内に含まれ

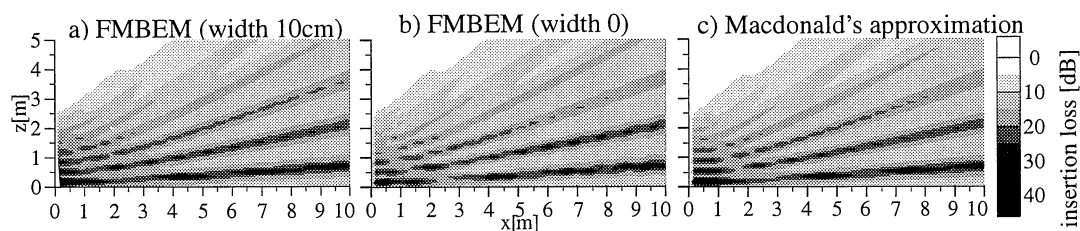


Fig. 2 Contour maps of insertion loss in the receiving area, analyzed by a) FMBEM (width 10cm), b) FMBEM (width 0), and c) Macdonald's approximation, at 500Hz.

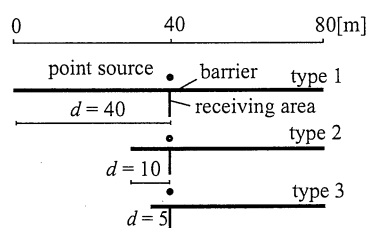


Fig. 3 Site plan of types of models for analysis.

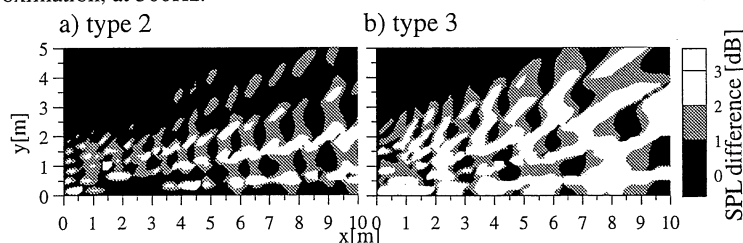


Fig. 4 Contour maps of absolute SPL difference between a) type1 and type2, and b) type1 and type3, at 500Hz.

る受音点でエネルギー平均し、立方体の中心点における値とする。さらに、面Aにおける全受音点をx、y、z軸の正の方向にそれぞれ $\lambda/16$ ずらした面(面A'とする)で同様の平均化を行い、空間サンプリングが音圧レベル値に与える影響をみる。

(2) 結果と考察 面Aと面A'での挿入損失の差を各受音点ごとにとり、面Aの挿入損失との関係を見た。平均なしの場合と $\lambda/4$ 平均の場合の分布をFig.5に示す。平均しない場合は、干渉によるディップ部では著しい差が生じている一方、 $\lambda/4$ 平均ではその差は解消され、差は3dB以内に収まった。さらに、面Aでの平均前と $\lambda/4$ 平均後の挿入損失分布(Fig.6)から、 $\lambda/4$ 平均では全体的な分布傾向を維持していることがわかった。

5. 遮音壁解析のための応用的検討

5-1. 2次元解析と3次元解析の比較

遮音壁による騒音低減効果予測については、簡便さや計算機資源の点から2次元解析によることが多いが、音源と受音点を結ぶ直線が障壁と直交しない場合には3次元解析が必要である。そこで2次元と3次元での解析結果を比較し、障壁の厚みと音源・受音点の位置関係の解析結果に与える影響を考察する。

(1) 解析モデル 解析モデルをFig.7に示す。解析対象は直壁(厚み10cm、0: Fig.8のtype1-aとtype2-a)の2種類とし、2次元と3次元での解析結果を比較、考察する。

(2) 結果と考察 Fig.9に500HzにおけるSA断面とSB断面での挿入損失分布を示す。SA断面では、FMBEMによる解析のみ側方回折波の影響が僅かにみられるもののいずれもよく対応している。また、厚みの影響も微小である。SB断面では、厚みがない場合FMBEMとMacdonaldがよく対応する一方、2D-BEMでは干渉縞の数や角度に大きな違いが生じた。厚みのある場合は、2D-BEMでは厚みによる影響が微小であるのに対し、FMBEMでは障壁近傍で複雑な干渉が見られ、厚みの影響が大きいことがわかった。こ

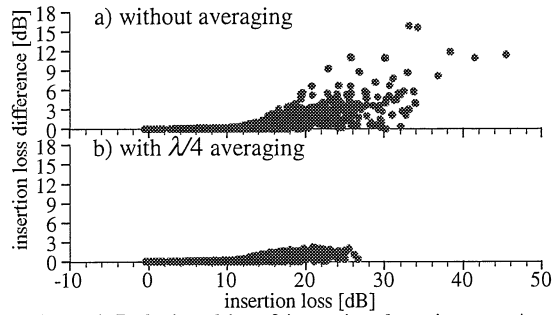


Fig.5 a) Relationship of insertion loss in area A and insertion loss difference of area A and area A'; a) without averaging and b) with $\lambda/4$ averaging..

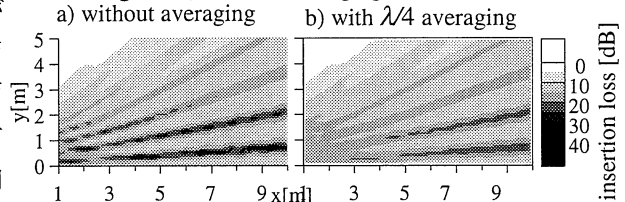
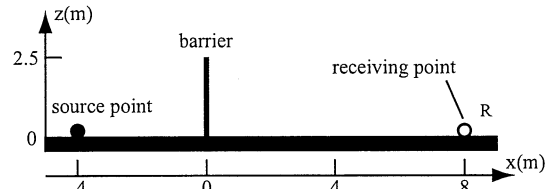


Fig.6 Insertion loss of area A a) without averaging and b) with $\lambda/4$ averaging.

a) site cross-section



b) site plan

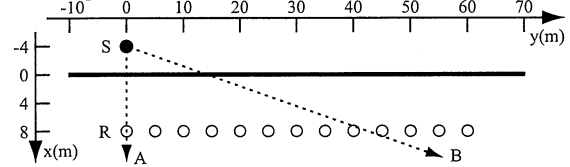


Fig.7 a) Site cross-section and b) site plan of barriers, a source point and receiving points.

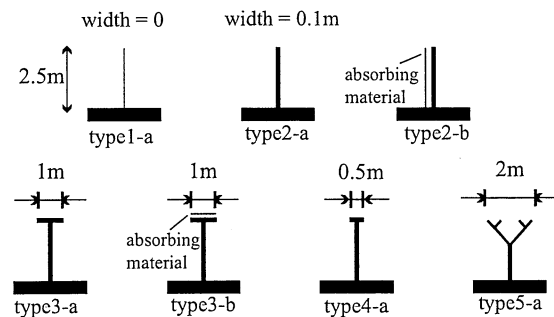


Fig.8 Barrier types.

れらのことから、音源・受音点を結ぶ直線が障壁に対して直交しない場合は2次元解析では不十分であり、3次元解析が必要であることが示された。

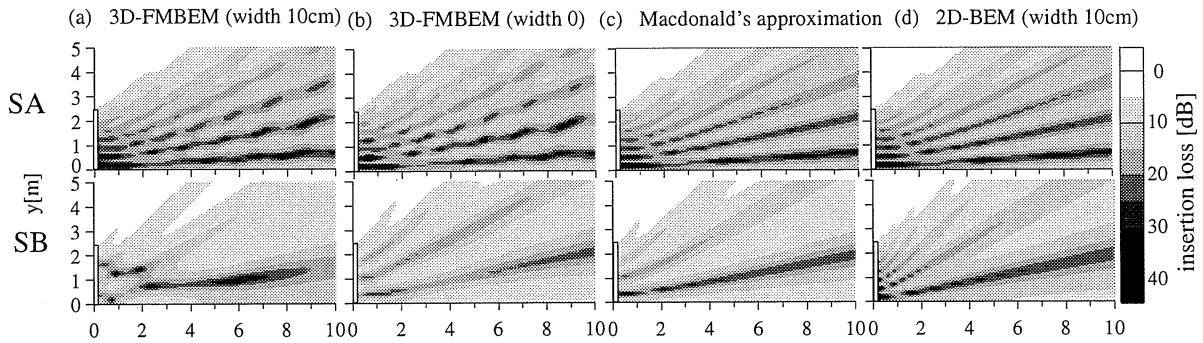


Fig.9 Contour maps of insertion loss in SA and SB section at 500Hz, calculated by (a)3D-FMBEM(width 10cm), (b)3D-FMBEM(width0), (c)Macdonald's approximation and (d)2D-BEM.

5-2. 吸音処理と形状の違いによる影響
音源と受音点の相対的な位置関係より、音源固定で壁に平行に受音点が並んでいるモデルの解析結果を、受音点固定で音源が移動する場合の結果と読み替えることができる。ここでは、吸音処理や形状の異なる障壁のユニットパターンを求め、それぞれの特性を述べると共に、3次元解析の有効性について検討する。

(1) 解析モデル Fig.7に解析モデルを、Fig.8に解析対象の形状を示す。

(2) 結果と考察 125Hzと500HzでのType2-a, 3-a, 4-a, 5-aにおける受音点列(R)の挿入損失をFig.10に、Type2-a, 2-b, 3-a, 3-bのものをFig.11に示す。形状により斜線方向分布が大きく変わること、さらに分岐型はばらつきが大きいことがわかる。また、吸音のある場合の500HzでのT型の分布も大きくばらついている。このことから、複雑形状の遮音壁の性能評価や、吸音処理の影響を把握するには、3次元解析が必要であることがわかった。

6. まとめ 3次元数値解析により任意形態の遮音壁の性能評価を行うことを目的として、まず、大規模化のためにFMBEMの適用領域を拡張し、理論解との比較を通してFMBEM計算精度の確認を行った。遮音壁解析のための基礎的研究である側方回折波の影響に関しては、障壁側端部・受音面間距離 d に対して障壁の高さ h の場合に、 $d=4h$ の時に無限長として扱えることがわかった。減音効果評価量による検討より、 $\lambda/4$ 平均では

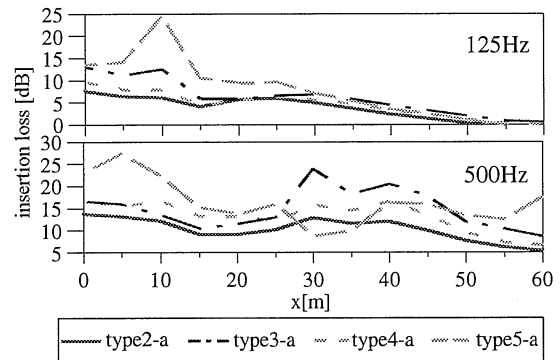


Fig.10 Profiles of insertion loss on the receiving line(R) with different shapes of barriers, at 125Hz and 500Hz.

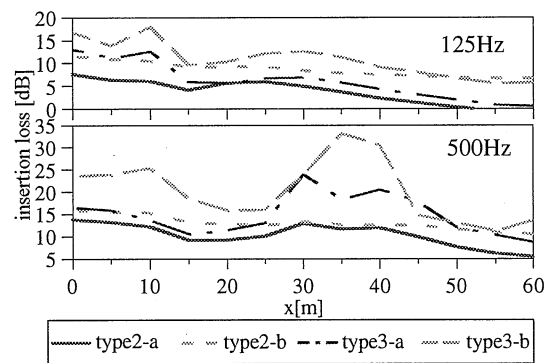


Fig.11 Profiles of insertion loss on the receiving line(R) with different shapes and different absorption effect of barriers, at 125Hz and 500Hz.

ディップによる著しい挿入損失の差を解消でき、かつ全体的な分布傾向を維持することを確認した。さらに、2次元解析・3次元解析の比較や、形状や吸音の影響より、3次元解析が不可欠であることが示された。

[1] 日本音響学会誌 54 巻 4 号 (1998), pp. 327-332

[2] 騒音制御: Vol. 23, No. 3 (1998) pp. 131-136

[3] 日本音響学会誌 55 巻 4 号 (1999), pp. 281-324