

IV-21

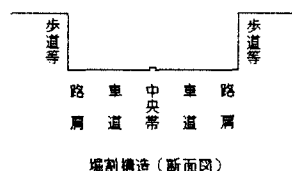
境界要素法による堀割構造周辺の3次元音場シミュレーション

北海道大学工学部 佐々木啓聡
 北海道大学工学部 正会員 長谷部正基
 北海道大学工学部 正会員 金安 公造

1. はじめに

近年、交通量の多い都心部や高速道路などにおいて、道路構造として堀割構造が採用されてきている。堀割構造とは、右下に示すような断面を持つもので、道路交通騒音の軽減対策の一つとして利用されている。これまでに、遮音壁・切土構造などのウェッジ（くさび状のかど）を持つ構造物周辺の音場分布に関する研究が数多くなされてきている。しかし、側壁による反射音の影響が無視できない堀割構造周辺の音場の解析は、いまだ十分でないのが現状である。

本研究では、数値解析法として境界要素法を用いる。境界要素法は形状変更問題に有効であり、境界面（壁面等）での反射や吸音を比較的容易に取り込める利点がある。この手法による計算の検証として、剛板のまわりの音場を無響室で測定し、計算結果と比較した。



2. 境界要素法

定常音響問題は、Helmholtzの方程式

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1)$$

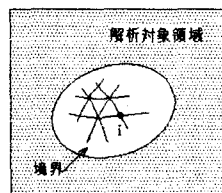
を適当な境界条件で解く境界値問題となる。境界要素法では、この支配微分方程式を境界型の積分方程式に変換し、被積分境界を境界要素に離散化することによって、次のような連立一次方程式を得る。⁽¹⁾

$$\sum_{i=1}^n h_i p_i = \sum_{i=1}^n g_i q_i \quad (2)$$

h_i および g_i は境界上の節点 i と音圧を知りたい点とのあいだの位置関係および物理的状态によって決まる係数、 p_i および q_i はそれぞれ節点 i の音圧及び音圧の解析対象領域方向の法線方

向微分値である。また、 n は全節点数である。境界の外側が解析対象領域である場合の境界と領域の概念を右図に示す。

境界は、三角形の境界要素に分割



している。計算の第1段階として、境界上の節点の未知数（ p_i あるいは q_i ）を求める。すなわち（2）式に節点の境界条件として p_i あるいは q_i を与えることで、境界上のすべての節点の p_i および q_i が求められる。次に、領域上の点の音圧を次式によって求める。

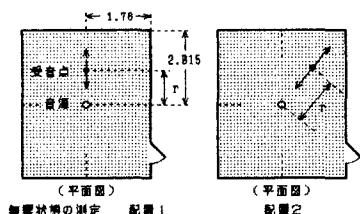
$$p = \sum_{i=1}^n g_i q_i - \sum_{i=1}^n h_i p_i \quad (3)$$

Three-Dimensional sound field simulation around depressed road by Boundary Element Method
 by Yoshiaki Sasaki, Masaki Hasebe and Kozo Kaneyasu

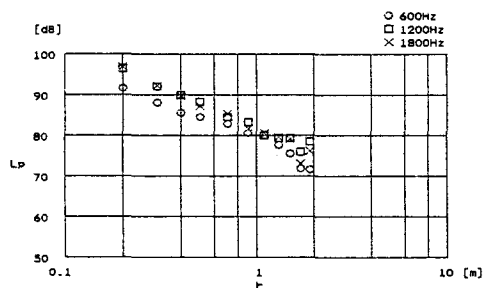
3. 剛板周辺の音場分布

3. 1 無響室の性能

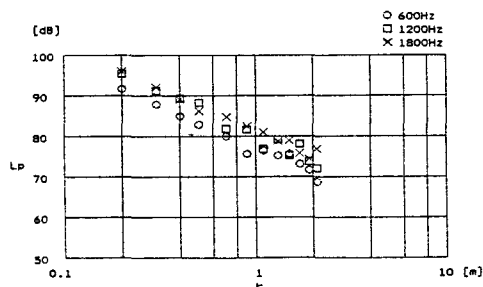
実験をおこなった無響室の性能を測定した。下に示す2通りの配置での測定結果を図-1に示す。壁からおおよそ



1 m 以内では逆 2 乗則が成り立っていないことがわかった。



配置 1



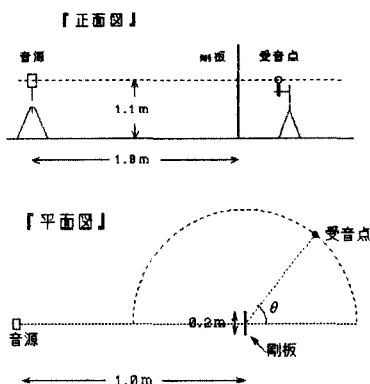
配置 2

図-1

3. 2 実験

(1) 実験の配置

無響室内において、下に示すような配置で剛板のまわりの音場を測定した。半径 0.5m の円周上に受音点をおき、中央からの角度 θ でその位置を決定した。



また、音源にはホーンドライバーユニットを、マイクロフォンは RION 社 UC-26 を使用した。放射した音は 600Hz、1200Hz、1800Hz の純音である。剛板としては 0.2m × 2.0m、11mm 厚の木製の板を使用した。

(2) 減衰量の計算

上に示した配置での音圧と、剛板を取り除いたとき（自由音場）の音圧を測定し、次の式によって剛板がある場合の減衰量を計算した。

$$\Delta L = L_p - L_{p0} \quad (4)$$

L_p : 剛板があるときの音圧レベル

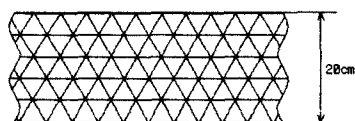
L_{p0} : 自由空間での音圧レベル

3. 3 数値計算

600Hz の音を対象とし、計算は北海道大学工学部汎用シミュレーター室の Apollo 社 Domain10000 でおこなった。

(1) 境界の分割

音響問題を境界要素法によって数値解析する場合、境界要素として三角形要素を選ぶときには、一辺の長さが波長の1/10程度以下になるようにすること、その形は著しい鋭角や鈍角を含まないようにすることなどに注意が必要である。⁽²⁾ここでは、一辺が5.6cm以下であればその条件に適合することから、高さ4cm（一辺は約4.6cm）の正三角形の要素に分割した。全要素数は450、全節点数は235である。



剛板表面（境界）の要素分割

(2) 境界条件

剛体の表面で音が完全反射すると考えて良い場合には、音源側で粒子速度がゼロであり、音源の裏側についても同様に扱うことができる。ここで、音響問題では粒子速度を v とすれば、音圧の法線方向微分値 q と v の間に次の関係が成り立つ。

$$q = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -j\omega\rho v \quad (5)$$

ρ : 媒質の密度

したがって、境界条件としてすべての節点に $q_i = 0$ を与えた。ただし、音源の裏側についてはさらに音圧をゼロ（ $p_i = 0$ ）として計算した。これは、板が剛体である場合には妥当な近似である。

(3) 減衰量の計算

以上のモデルで数値解析によって求めた音圧 p と、自由音場での音圧 p_0 が

ら、次式によって剛板がある場合の自由音場に対する減衰量を求めた。

$$\Delta L = 20 \log_{10} (p/p_0) \quad (6)$$

3次元の自由音場における音圧 p_0 は次の式で求めることができる。

$$p_0 = \frac{1}{4\pi r} e^{-jkr}$$

k : 波数

r : 音源と受音点の距離

3. 4 結果

実験及び数値計算の結果を図-2に示す。横軸は受音点の座標を決める角度 θ 、縦軸は減衰量である。実験の精度等を考慮すると、両者の結果はよく一致している。

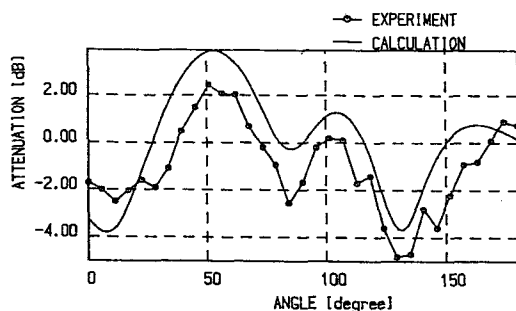
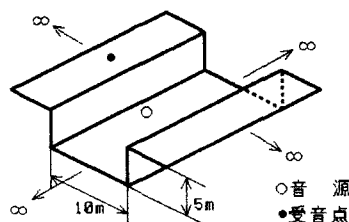


図-2

4. 堀割構造周辺の音場分布

4. 1 モデル

現在、堀割構造周辺の音場分布の数値計算を進めている。ここで数値計算の対象とする堀割構造のモデルを図で示した。



堀割構造のモデル

道路の進行方向及び堀割上部の横方向の境界面は本来無限に続くと考えべきものである。しかし、受音点に与える影響の大きさは、受音点から離れるほど小さくなるため、受音点を沿道においた場合、無視できる部分を省いた有限な境界面で計算する。

4. 2 数値解析の検証

計算結果の妥当性は、無響室内で縮小モデルによる実験をおこなって確認する予定である。

5. むすびに

解析手法として境界要素法を用いることで、計算プログラムをブラックボックス的に使って、比較的容易に回折や反射のある音場の把握ができた。従来困難だった堀割構造周辺の音場の把握を現在進行中である。

この手法によれば、境界の形状変更問題に対しては境界の座標データを変えことにより計算することができる。吸音性の壁面の扱いも可能であり、音圧を知りたい点が多いほど有効であるという特徴を持つので、道路交通騒音の予測手法として有望と思われる。

課題としては、道路などの広い境界を扱う際に、境界要素の数が多くなり、計算機的能力を越えてしまうことが考えられる。何らかの近似が必要であり、現在検討中である。

[参考文献]

- (1) 境界要素法研究会編：“境界要素法の理論と応用”，p.200，コロナ社(1986)
- (2) 鏡 慎、深井 一郎：“三次元音場問題の境界要素法による定式化”，電子情報通信学会論文誌 '87/1 Vol.J70-A No.1, p.110～p.115, (1987)
- (3) 加川 幸雄：“開領域問題のための有限／境界要素法”，サイエンス社(1987)
- (4) 金安 公造 編著：“道路の環境”，p.81～p.138，技術書院(1988)
- (5) Yasuhito Kawai and Toshio Terai: “THE APPLICATION OF THE INTEGRAL EQUATION METHODS TO THE CALCULATION OF SOUND ATTENUATION BY BARRIERS”, IN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL ACOUSTICS, KOBE JAPAN MAY 15.16 1989