境界条件適合型応答関数を用いた境界積分方程式法による広域の
3次元音場波動解析THREE DIMENSIONAL ACOUSTIC WAVE MOTION ANALYSIS OF THE WIDE AREA
BY A BOUNDARY INTEGRAL EQUATION METHOD USING A RESPONSE
FUNCTION ADAPTED BOUNDARY CONDITIONS

谷川 将規*, 清川 哲志**

Masaki TANIGAWA and Tetsushi KIYOKAWA

This paper presents 3-D analysis of wave propagation over the wide area, such as an urban block by use of boundary integral equation method(BIEM). By introducing a new response function using the mirror image with respect to the ground surface, which has arbitrary acoustic admittance, so that the element division of the ground surface becomes unnecessary, and the calculation load is mitigated. Therefore, it is enable to analyze a sound field complicated with diffraction, multiplex reflection, etc., in which the conventional geometric sound analysis method cannot give good accuracy.

Keywords: Sound propagation over the wide area, 3-D sound field, Boundary integral equation method, Green's function, Response function adapted boundary conditions

広域の音波伝播, 3次元音場, 境界積分方程式法, Green 関数, 境界条件適合型応答関数

1 はじめに

街区等の広域な音場を的確に予測・評価することは、建物の配置計画や建物外壁の遮音構造等を最適設計する上で重要である。街区には多種多様の音源と音波の反射・散乱源となる建物が存在し、音場は非常に複雑となる。

音場解析法として従来からよく用いられてきた幾何音響解析法¹⁾は波動性を考慮せず、回折や多重反射を近似的に取り扱う。そのため、特に波動性が問題となる低周波数域では予測精度に限界がある。

これに対し、波動解析法は波動方程式あるいはその Fourier 変換によって得られる Helmholtz 方程式を与えられた境界条件の下で解く解析法である。境界条件が複雑な場合は解析解を得るのは困難であり、一般に数値解析することになる。しかし、文屋・吉村²⁾も指摘しているように、差分法や有限要素法等の数値解析法は解析領域全体を格子や要素に分割するために計算量が膨大となり、広域の音場解析への適用は難しい。そこで文屋らは境界近傍領域に有限要素法等の数値解析法を適用し、その他の領域に幾何音響解析法を用いる結合解法を提案しているが、実用的な段階ではないと思われる。

境界要素法(境界積分方程式法)は、Helmholtz 方程式を等価な積分方程式に帰着させて解く方法である。音源と観測点が一致する場合は解析的処理が必要だが、境界面のみ要素分割すればよく、差分法や有限要素法に比べて計算量が少ないという利点がある。しかし、境界要素法による音場解析は建物内部を対象としたもの³⁾や、2次元問題として扱うもの^{4),5)}が多い。広域の3次元音場解析の例は少なく、佐久間・安田⁶⁾による多重極展開法を用いた音場解析が挙げられるが、これもまだ研究段階にあると言える。

2 本研究の目的

本研究は、広域の3次元音場を境界積分方程式法により定式化する。その際、地盤面に関する支配方程式と同じ境界条件を満足する境界条件適合型応答関数(波動場の波源に対する応答を表す関数という意味で用いる。相反性を考慮しておらず Green 関数とは異なる)を導入した。本稿は、この解析法が地盤面と建物外壁面を吸音性境界面として扱うことができ、しかも計算量を低減した実用的な解析法であることを示す。次に、本解析法を用いて単一建物周りの3次元音場を解析してその特徴を述べ、さらに隣接する建物が音場に及ぼす影響とその音響インテンシティ分布について考察する。

* 清水建設技術研究所 研究員・工修

** 清水建設技術研究所 主席研究員・工博

Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

Chief Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

3 境界積分方程式法による音場の定式化

図1に示すように鉛直上向きを z 正方向とする直交座標系 xyz を設定し、平面 $z=0$ を水平な地盤面とする。解析領域 Ω を $z \geq 0$ の半無限空間とし、解析領域 Ω の内部に N 個の点音源 $\{q_n(\xi_n, \eta_n, \zeta_n) | n=1, 2, \dots, N\}$ 、観測点 $p(x, y, z)$ 、任意個数の建物群 C があるとす。個々の建物を区別する必要がない場合は C の境界面をまとめて Γ と表す。すなわち $\{\Gamma_i | i=1, 2, \dots, m, \dots\}$ を個々の建物の境界面とすると、 $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \dots \cup \Gamma_m \cup \dots$ である。また各境界面に対して外向き法線ベクトルを n とし、地盤面と境界面 Γ の音響アドミタンス比をそれぞれ A_g, A とする。

音場は速度ポテンシャル $\Phi = \phi(p) \exp(-i\omega t)$ によって記述され($i \equiv \sqrt{-1}$: 虚数単位, ω : 角周波数, t : 時間)、本問題は Φ の空間依存項 $\phi(p)$ を求めることにある。したがって、以下では時間依存項 $\exp(-i\omega t)$ を省略する。

図1 座標系と記号の定義

観測点 p における速度ポテンシャル $\phi(p)$ は次の非同次3次元Helmholtz方程式の解として表される。

$$\nabla^2 \phi(p) + k^2 \phi(p) = - \sum_{n=1}^N s_n \delta(p - q_n) \quad (p \in \Omega) \quad (1)$$

ここで k は波数($= \omega/c_0$, c_0 : 音速), s_n は音源 q_n の強さ, δ はDiracのデルタ関数を表す。また ∇^2 はLaplace演算子($= \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$)である。

式(1)に対し、境界条件は次式で与えられる。

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \phi(p)}{\partial r} - ik \phi(p) \right) \cdot r = 0, \quad r = |p| \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \phi(p)}{\partial z} \right|_{z=0} = -ik A_g \phi(p) \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \phi(p)}{\partial n} \right|_{\Gamma} = ik A \phi(p) \quad (p \in \Gamma) \quad (4)$$

式(2)はSommerfeldの放射条件、式(3)、式(4)はそれぞれ地盤面と境界面 Γ に関するインピーダンス境界条件を表す。なお、音響アドミタンス比が0である境界面は完全反射面となる。

式(1)はGreenの定理とGreen関数 G を用いて次の積分方程式に帰着できる⁷⁾。

$$\begin{aligned} \mathcal{A} \cdot \phi(p) &= \sum_{n=1}^N s_n G(p, q_n) \\ &- \iint_{\partial\Omega} \left\{ \phi(p') \frac{\partial G(p, p')}{\partial n} - G(p, p') \frac{\partial \phi(p')}{\partial n} \right\} dS \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $\partial\Omega$ は地盤面と境界面 Γ の総和、 p' は $\partial\Omega$ 上の任意の点を表す。また、 $\mathcal{A} = 1$ ($p \in \Omega$), $\mathcal{A} = 1/2$ ($p \in \partial\Omega$), $\mathcal{A} = 0$ ($p \notin \Omega$)である。以下では、個々の音源を区別する必要が無い場合は添え字を省略して q と表すことにする。

ある音源 q と観測点 p に関して、Green関数 G は次に示す方程式および放射条件を満足する関数として与えられる。

$$\nabla^2 G(p, q) + k^2 G(p, q) = -\delta(p - q) \quad (6)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial G(p, q)}{\partial r} - ik G(p, q) \right) \cdot r = 0, \quad r = |p - q| \quad (7)$$

3.1 境界条件適合型応答関数の導出

Green関数が式(6)、式(7)の他に速度ポテンシャル $\phi(p)$ と同じ境界条件を満足すれば、式(5)右辺の第2項におけるその境界面に関する積分は0となる。Green関数が境界条件を満たさない場合は、その境界面上の積分を数値解析することになる。

Green関数が速度ポテンシャル $\phi(p)$ と地盤面に関して同じ境界条件を満足するならば、次式を満足する。

$$\left. \frac{\partial G(p, q)}{\partial z} \right|_{z=0} = -ik A_g G(p, q) \quad (8)$$

既存の研究から式(6)~(8)を満足するGreen関数は、後述する式(19)として求められている。しかし、式(19)は4.1節で示すように区間 $[0, \infty]$ に関する積分を含むので計算量が膨大となり、広域の音場解析への適用は難しい。

本解析ではGreen関数の代わりに同じ境界条件を満足する関数を用いることにし、これを境界条件適合型応答関数(以下、応答関数と記す)と呼ぶことにする。応答関数を導出するため、まず図2に示すように音源 q の地盤面に関する鏡像 q_{img} を考える。

図2 応答関数導出のための鏡像の設定

次に、式(8)を満足する応答関数 $\mathcal{G}(p, q)$ は基本解 $\exp(ikr)/4\pi r$ と図2に示す r_0 の関数 $\beta(r_0)$ を用いて次式で表されると仮定する。

$$\mathcal{G}(p, q) = \frac{e^{ikr_1}}{4\pi r_1} + \{1 + \beta(r_0)\} \cdot \frac{e^{ikr_2}}{4\pi r_2} \quad (9)$$

ただし、 r_1, r_2 は次式で表される。

$$r_1 = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + \zeta)^2}$$

観測点 p が地盤面に近い場合、 $r_0 \approx \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + \zeta^2}$ とみなせる。このとき、形式的に $\beta(r_0)$ は観測点 p の z 座標には依存しないもの、すなわち $\partial\beta(r_0)/\partial z$ を0とみなして式(8)、式(9)から次式を得る。

$$\beta(r_0) = \frac{-2ik A_g}{(ik - 1/r_0)\zeta/r_0 + ik A_g} \quad (10)$$

ただし、実際の r_0 は次式で表される。

$$r_0 = |\zeta/(z + \zeta)| \cdot r_2$$

式 (10) を式 (9) に代入して得られる応答関数は一般に $\mathcal{G}(p, q) \neq \mathcal{G}(q, p)$ であり、Green 関数の性質である相反性 (reciprocity) を満足しない。すなわち、応答関数は Green 関数とは異なるものである。しかし、後述するように応答関数は積分計算が不要であるため、計算負荷を大幅に低減できるという利点がある。

3.2 境界積分方程式の離散化

応答関数 $\mathcal{G}$ を導入すると、式 (5) の地盤面に関する積分は不要となり、残る積分は境界面 Γ に関するものだけとなる。式 (4) を式 (5) に代入して次式を得る。

$$\mathcal{A} \cdot \phi(p) = \sum_{n=1}^N s_n \mathcal{G}(p, q_n) - \iint_{\Gamma} \phi(p') \cdot \left\{ \frac{\partial \mathcal{G}(p, p')}{\partial n} - ikA \mathcal{G}(p, p') \right\} dS \quad (11)$$

観測点 p が境界面 Γ 上にある場合、式 (11) は境界面 Γ 上の速度ポテンシャルを未知関数とする積分方程式となる。

次に式 (11) を離散化する。境界面 Γ を M 個の面要素に分割すると、式 (11) から次式を得る。

$$\frac{1}{2} \phi(P_l) = \sum_{n=1}^N s_n \mathcal{G}(P_l, q_n) - \sum_{m=1}^M \phi(P_m) \cdot \iint_{\partial \Gamma_m} \left\{ \frac{\partial \mathcal{G}(p, P_m)}{\partial n} - ikA_m \mathcal{G}(p, P_m) \right\} dS \quad (l = 1, 2, \dots, M) \quad (12)$$

ここで P_l , P_m はそれぞれ l 番目と m 番目の面要素の中心座標、 $\partial \Gamma_m$ は m 番目の面要素 (面積 Δs_m)、 A_m は面要素 $\partial \Gamma_m$ の音響アドミッタンス比を表す。本解析法は面要素毎に音響アドミッタンス比を設定することができ、吸音率が大きく変化する壁面も考慮できる。

式 (12) は速度ポテンシャル $\phi(P_l)$ に関する複素係数連立 1 次方程式である。式 (12) は、その右辺の第 1 項を $\psi_0(P_l)$ とおいて行列形式に書き改めると次式となる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MM} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi(P_1) \\ \phi(P_2) \\ \vdots \\ \phi(P_M) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \psi_0(P_1) \\ \psi_0(P_2) \\ \vdots \\ \psi_0(P_M) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

ただし、 $l = m$ の場合は音源と観測点一致して応答関数が発散するため、3.3 節で述べる特異点処理を行う必要がある。式 (13) 左辺の行列要素 a_{lm} ($l, m = 1, 2, \dots, M$) は、特異点処理の要 ($l = m$) / 不要 ($l \neq m$) に応じて場合分けすると次式となる。

$$a_{ll} = \frac{1}{2} + \iint_{\partial \Gamma_l} \left\{ \frac{\partial \mathcal{G}(p, P_l)}{\partial n} - ikA_l \mathcal{G}(p, P_l) \right\} dS \quad (14)$$

$$a_{lm} = \left\{ \frac{\partial \mathcal{G}(P_l, P_m)}{\partial n} - ikA_m \mathcal{G}(P_l, P_m) \right\} \cdot \Delta s_m \quad (l \neq m) \quad (15)$$

式 (13) を解くことにより、境界面上の速度ポテンシャル分布を求めることができる。境界面上の速度ポテンシャル分布が求められると、式 (11) から領域 Ω 内の速度ポテンシャルが得られる。

3.3 特異点処理

式 (14) の a_{ll} を求める方法は、日野・宮永⁸⁾、清川⁹⁾らが用いた Laplace 方程式に関する Green 関数の特異点処理法に準じる。この処理法による数値解は実験値とよく一致することが示されている^{8), 9)}。

図 3 に示すように、面要素 $\partial \Gamma_l$ の中心 P_l を原点として法線ベクトル n を z 負方向とする局所座標系 $x'y'z'$ を考える。

図 3 特異点処理のための局所座標系

このとき $p \approx P_l$ が成り立ち、応答関数は第 1 項の寄与が支配的となり、第 2 項の鏡像による寄与は無視できる。次に面積 Δs_l を同じ面積の半径 a の円に置き換えると、応答関数 $\mathcal{G}$ に関する面積分は次式に近似できる。

$$\begin{aligned} \iint_{\partial \Gamma_l} \mathcal{G}(R) dS &\approx \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{e^{ikR}}{4\pi R} \cdot R d\theta dR \\ &= \frac{1}{2} \int_0^a e^{ikR} dR = \frac{i}{2k} (1 - e^{ika}) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで $R = |p - P_l|$ である。

応答関数の法線方向微分 $\partial \mathcal{G} / \partial n$ も同様に鏡像による寄与は無視できて次式に近似できる。

$$\iint_{\partial \Gamma_l} \frac{\partial \mathcal{G}(R)}{\partial n} dS \approx \iint_{\partial \Gamma_l} \frac{e^{ikR}}{4\pi R^3} (ikR - 1) p \cdot n dS = 0 \quad (17)$$

式 (16)、式 (17) から式 (14) は次式となる。

$$a_{ll} \approx \frac{1}{2} \{ 1 + A_l (1 - e^{ika}) \} \quad (18)$$

4 計算例

4.1 精度検証

地盤面がインピーダンス境界である場合、相反性を満足する Green 関数は次式で与えられる。

$$G(p, q) = \frac{e^{ikr_1}}{4\pi r_1} + \frac{e^{ikr_2}}{4\pi r_2} + 2ikA_g \int_0^\infty \frac{e^{ikr_3}}{4\pi r_3} \cdot e^{ikA_g \varepsilon} d\varepsilon \quad (19)$$

ただし、 r_3 は次式で表される。

$$r_3 = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + \zeta + \varepsilon)^2}$$

式 (19) は、Sommerfeld¹⁰⁾ が導いた波動場の表現に相当する。河井¹¹⁾ も述べているように、Ingard¹²⁾、Lawhead and Rudnick¹³⁾ らはこの式から境界面周りの音場を求める近似式を導いた。例え

ば Wenzel¹⁴⁾, Thomasson¹⁵⁾ らは式から音源と観測点の位置や境界面の音響アドミッタンス比の値に応じて場合分けした近似解を求めている。

応答関数の精度を検証するため、同一条件に対して応答関数, Green 関数, 応答関数と同じ積分計算が不要な Wenzel, Thomasson の近似式^{*1}による速度ポテンシャルを計算してその結果を比較した。

図4 応答関数 G の精度検証のための計算条件

図4に示すように、音源 q は地上 1.5 m に設定し、周波数は 100 Hz とした。地盤面の吸音率 α_g は 0.1 とし、地盤面からの反射音の位相のずれ (phase shift) は 0 と仮定した。すなわち、吸音率 α_g と音響アドミッタンス比 A_g は次の関係式を満足する¹⁶⁾。

$$A_g = \frac{1 - \sqrt{1 - \alpha_g}}{1 + \sqrt{1 - \alpha_g}} \quad (20)$$

観測点 p の高さは $z = 1.5 \text{ m}$, 5.0 m , 10.0 m の 3 条件として、音源・観測点間の水平距離 r を 0~20 m まで変化させた場合の 4 式による速度ポテンシャルを計算した。

計算はパソコン (CPU: Pentium 4 1.8 GHz) を使用し、Green 関数に含まれる半無限区間に関する積分は有限区間 $[0, 1000]$ の積分に置き換えて Romberg 法により計算した。最大反復回数は 20 回とし、積分値の相対誤差が 1.0×10^{-10} 以下になれば計算打ち切りとした。なお、Wenzel, Thomasson の両近似式で特異点となる $r = 0$ は計算から除外した。

計算結果を図5に示す。横軸は音源・観測点間の水平距離 r , 縦軸は上記の 4 式から計算された速度ポテンシャルの絶対値を示す。計算結果から、応答関数は観測点高さ z によらず Green 関数の計算値に良く一致し、両者はほとんど重なっている。 $z = 1.5 \text{ m}$ の場合で相対誤差は最大 4.2 % であり、音圧レベルに換算して 0.4 dB 以下である。一方、Wenzel, Thomasson の近似式はその適用範囲からして音源・観測点間距離 r が大きい場合や観測点が地盤面から離れる場合は精度が急激に悪化する。

1 ケース (観測点数 200 点) の計算に関して、応答関数および Green 関数による計算に要した時間は、それぞれ 0.016 s, 294.2 s であった。応答関数による計算時間は Green 関数の場合に比べて約 1/19000 以下であった。

以上の結果から、応答関数は既存の近似式に比べて計算精度が高いことが明らかである。しかも、積分計算が不要であるため計算速度は速く、観測点位置などの計算条件による場合分けも必要はない。そのため、応答関数は広域の 3 次元音場解析への適用が可能であると考えられる。

*1 Wenzel の Hard Boundary Case の近似式¹⁴⁾ および Thomasson の Hard Impedance Case の近似式¹⁵⁾を用いた。

図5 応答関数, Green 関数, Wenzel, Thomasson の近似式による速度ポテンシャル計算値の比較

4.2 音場の 3 次元分布特性

図6に示すように、観測領域を $60 \text{ m} \times 80 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ として内部に点音源と直方体の建物がある場合について、本解析法により音圧レベル分布を求めた。

図6 解析領域と音源, 建物の位置

周波数は 50 Hz, 200 Hz の 2 条件とし、式 (11) における音源の強さ s_n を 1 とした。これは、音源が自由空間中にあるとしてパワーレベルに換算すると 50 Hz の場合で約 136 dB に相当する。各境界面は一定の大きさの矩形面要素に分割した。境界面の分割長は最低でも波長の 1/5 が必要とされる。そのため、周波数 50 Hz, 200 Hz に対して面要素の辺長はそれぞれ波長の 1/10, 1/5 とした。その他の計算条件は表 1 に示す。

計算結果を図7, 図8に示す。上段は 4 つの水平面 ($z = 1.5 \text{ m}$, 7.5 m , 15.0 m , 22.5 m), 下段は鉛直面 ($x = 30.0 \text{ m}$) における音圧レベル分布であり、音源のパワーレベルを基準とした相対レベルで表す。計算結果から、建物前方では直接音と壁面からの反射音が干渉して重複波の場となるのが分かる。また建物

図 7 建物周りの音圧レベル分布 (50 Hz)

図 8 建物周りの音圧レベル分布 (200 Hz)

表 1 計算条件一覧

音源座標	(10, 30, 1.5)
建物寸法	幅 10 m × 奥行 15 m × 高 20 m
建物境界面の 音響アドミタンス比	0.003 (吸音率 0.01 相当)
地盤面の 音響アドミタンス比	0.026 (吸音率 0.1 相当)
媒質密度	1.205 kg/m ³
音速	343.5 m/s

図 9 建物を底面を中心に $\pi/6$ 回させた場合の建物周りの音圧レベル分布 (100 Hz, 観測点高さ $z = 1.5$ m)

後方ではおおむね音圧レベルは低いが、建物から離れるにつれて側方、上方からの音波の回り込みにより音圧レベルが上昇する観測点も確認される。

次に、建物の配置が音場に及ぼす影響を考察するため、建物を底面の中心を通る鉛直軸周りに角度 φ 回転させた場合の音圧レベル分布を求めた。周波数は 100 Hz とし、その他の計算条件は表 1 と同じとした。

図 9 は観測点高さを地上 1.5 m, $\varphi = \pi/6$ とした場合の音圧レベル分布の計算結果である。計算結果から、図 7, 8 と同様に音源のパワーレベルを基準とした相対音圧レベルで示す。建物前方は音源と建物の中心を結ぶ線に対してほぼ対象に音圧レベルが分布するが、後方では対称性が崩れるのが確認される。

続いて、図 10 に示すように建物を中心に高さ地上 1.5 m, 半径 $r = 15, 30, 60$ m の各円周上に観測点を設定して建物の回転角を $\varphi = 0, \pi/6, \pi/4, \pi/3$ と変化させた場合の音圧レベルを求めた。

計算結果を図 11 に示す。横軸は建物の中心と観測点を結ぶ直

図 10 建物の回転角 φ と観測点位置 図 11 建物を φ 回転させた場合の建物周りの音圧レベル (100 Hz)

線と x 軸がなす角 θ , 縦軸は観測点における音圧レベルを示す。計算結果から、建物周りの音場は建物の回転角 φ の違いによって音圧レベルの変化が大きい観測点と小さい観測点があることがわかる。これは、壁面からの反射音の寄与が観測点位置により異なるためと考えられる。すなわち、建物周りの音場は壁面からの反射音の寄与に着目すると図 12 に示すようにおおよそ次の 3 つの領域に区分される。

- 領域 I** 建物近傍を除いておよそ $\theta = 2\pi/3 \sim 4\pi/3$ の領域では、回転角 φ の違いによる音圧レベルの変化は小さい。この領域では反射音の寄与は小さく、直接音の寄与が支配的であると考えられる。
- 領域 II** 建物近傍を除いて建物の側方から後方にかけての領域では、回転角 φ の違いにより音圧レベルが大きく変化する。この領域では反射音の寄与が大きいと考えられる。
- 領域 III** 建物の近傍領域では、観測点位置によらず回転角 φ によって音圧レベルが大きく変化する。この領域では全方向に対して反射音の寄与が大きいと考えられ、領域 I, II のような明らかな領域の区分は見られない。

図 12 反射音の寄与に着目した建物周りの音場区分

4.3 隣接建物が音場に及ぼす影響

隣接する 2 つの建物が音場に及ぼす影響を検討するため、図 13 に示すように建物を 2 つ配置した場合の音圧レベル分布を求めた。周波数は 100 Hz とし、その他の計算条件は前節と同じとした。

図 13 音源と隣接する 2 つの建物の位置

計算結果を図 14 に示す。計算結果は、図 7、8 と同様に上段は 4 つの水平面、下段は鉛直面における音源のパワーレベルを基準とした相対音圧レベルで表す。計算結果から、建物前方では直接音と壁面からの反射音が干渉して重複波の場となるが、建物後方では 2 つの建物間から放射される音波によって複雑な音場となるのが確認される。

次に、図 15 に示すように音源と 2 つの建物 Building [1], [2] を考える。2 つの建物はいずれも 1 辺の長さ $D = 10.0$ m の立方体であり、Building [1] と音源間の距離を $2D$ 、2 つの建物間の距離を r とする。Building [1] を固定して Building [2] を x 正方向へ移動させた場合 ($r = 5.0 \sim 40.0$ m) の Building [1] の壁面 a, b から 0.1 m 離れた壁面近傍の観測点における音圧レベルの平均値 $\bar{P}$ を求めた。周波数は 25, 50, 100, 200 Hz の 4 条件とし、その他の計算条件は前節と同じとした。Building [2] が無い場合も同様に各壁面近傍の音圧レベル $\bar{P}_0$ を求め、これを基準値とした。

計算結果を図 16 に示す。計算結果は λ/D (λ : 波長) をパラメータとして横軸は建物寸法 D に対する建物間距離 r の比 r/D 、縦軸は相対音圧レベル $\bar{P} - \bar{P}_0$ を表す。計算結果から、壁面 a 近傍の音圧レベルは r/D , λ/D に関わらずほぼ一定である。一方、壁面 b 近傍では r/D が小さい場合は Building [2] の影響が大きく、 r/D が大きくなるにつれて相対音圧レベル $\bar{P} - \bar{P}_0$ は 0 に近づく傾向にある。また、 λ/D が大きいほど Building [2] が壁面 a, b 近傍の音圧レベルに及ぼす影響が小さくなる事が分かる。

4.4 隣接建物がインテンシティ分布に及ぼす影響

隣接建物が音場に及ぼす影響をエネルギーの流れの観点から考察するため、前節と同じ計算条件に対して周波数 100 Hz、観測点高さ 1.5 m として隣接建物がない場合/ある場合 ($r = 5.0$ m) について音響インテンシティを求めた。

音響インテンシティ I は音圧を P 、粒子速度を V 、それらの複素共役を P^* 、 V^* として次式で表される¹⁷⁾。

$$I = \frac{1}{2} (P^* V + P V^*) \quad (21)$$

計算結果を図 17 に示す。隣接建物がある場合は Building [1] の前方 (音源側) では音源からの直接音の影響が大きく、隣接建物の影響は小さい。また Building [2] の前方では壁面からの反射音の影響によって音響インテンシティが大きく変化している。一方、隣接建物間から建物後方への放射が確認され、Building [2] が Building [1] 建物後方の音場にまで影響を及ぼすのが確認される。

図 14 隣接する建物周りの音圧レベル分布 (100 Hz)

図 15 隣接する2つの建物と壁面 a , b の位置

図 16 隣接建物がある場合の壁面近傍の相対音圧レベル

隣接建物がない場合

隣接建物がある場合

図 17 音響インテンシティ分布 (100 Hz)

5 まとめ

本稿では境界積分方程式法に基づいた独自の3次元音場の波動解析法を示し、基本的な建物周りの音場の特性、隣接建物が音場に及ぼす影響について考察した。本解析法は、地盤面に関する境界条件を満たす応答関数を導入することによって Green 関数を用いた場合に比べて大幅に計算量が低減している。しかも従来の近似式と比較して精度が高く、計算条件による場合分けも不要である。以上の理由から、本解析法は街区レベルの広域3次元音場解析が可能な実用的な解析法であると考えられる。

今後、本解析法の適用範囲についての更に検討を進め、実測、模型実験による精度検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会 (編)：実務的騒音対策指針 応用編，技報堂出版，1987
- 2) 文屋信太郎，吉村忍：開領域波動音響の手法と幾何音響の手法との結合解法，日本音響学会講演論文集，No. 2-7-1，pp. 1281-1282，2001.10
- 3) 堀之内吉成，寺井俊夫，古江嘉弘：積分方程式による低音域定常音場の計算，建築音響研究会資料 AA92-30，日本音響学会，1992
- 4) 田村正行：境界要素法による屋外騒音伝搬の予測，日本音響学会誌，Vol.48，No.6，pp. 451-454，1992
- 5) 河井康人：境界積分方程式による掘割道路からの騒音伝搬予測，日本音響学会誌，Vol.56，No.3，2000
- 6) T.Sakuma and Y.Yasuda: Fast multipole boundary element method for large-scale steady-state sound field analysis, part I: Setup and validation, *Acustica*, Vol.88, No.4, pp. 513-525, 2002
- 7) 寺井俊夫：積分方程式による建築の音場計算に関する研究，博士論文，京都大学，1979
- 8) 日野幹雄，宮永洋一：グリーン関数および仮想法による波力と波の回折計算，土木学会論文報告集，No. 237，pp. 51-62，1975.5
- 9) 清川哲志，大山巧，小林浩：グリーン関数法による任意形状浮体の動揺解析，土木学会論文報告集，No. 332，pp. 21-31，1983.4
- 10) A.Sommerfeld: Über die ausbreitung der wellen in der drahtlosen telegraphie, *Annalen der Physik*, Vol.28, pp. 665-736, 1909
- 11) 河井康人：吸音性地盤面上の伝播音に対する近似解の整理と考察，日本建築学会近畿支部研究報告集，No. 4016，pp. 61-64，1988
- 12) Uno Ingard: On the reflection of a spherical sound wave from an infinite plane, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 23, No. 3, pp. 329-335, 1951.5
- 13) R.B. Lawhead and I.Rudnick: Acoustic wave propagation along a constant normal impedance boundary, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.23, No.5, pp. 546-549, 1951.9
- 14) A.R. Wenzel: Propagation of waves along an impedance boundary, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.55, No.5, pp. 956-963, 1974.5
- 15) Sven-Ingavir Thomasson: Reflection of waves from a point source by an impedance, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.59, No.4, pp. 780-785, 1976.4
- 16) JIS A1405 音響 インピーダンス管による吸音率及びインピーダンスの測定定在波比法，1998
- 17) 例えば 寺井俊夫，古江嘉弘，堀之内吉成，池田雅弘：インテンシティ場の計算とその表現，近畿支部研究報告集 第 33 号計画系，日本建築学会，1993

(2002年6月10日原稿受理，2003年2月17日採用決定)