時間域多重極境界要素法を用いた 大規模音場解析による道路交通騒音の可聴化

岡村理一郎¹・吉川仁²・高橋徹³・樫山和男⁴

¹学生会員 学士 中央大学大学院 理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1丁目13番地27))

²正会員 博士(工) 京都大学大学院講師 情報学研究科複雑系科学専攻 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

³非会員 博士(工) 名古屋大学大学院講師 工学研究科機械理工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

⁴正会員 工博 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1丁目13番地27))

本論文では、波動音響理論に基づく道路騒音の数値シミュレーション手法及びその可聴化手法の構築を行う。支配方程式として、非定常波動方程式を用い、離散化手法としては、外部問題に適している境界要素法を用いる。なお、時間域の境界要素法による大規模3次元非定常音場解析を可能とするため高速多重極法の導入を行った。数値解析例を通して、数値シミュレーション手法とインパルス応答を用いた可聴化手法の妥当性と有効性について検討した。

Key Words: Boundary element method, Acoustic wave theory, Fast multipole method, Traffic noise, Auralization

1. はじめに

騒音とは人間が不快と感じる音であり、都市人口の過密化、交通量の増加、建設工事の増加などが原因で発生しており、都市における大きな社会問題となっている。その中でも特に、道路交通騒音は、心理的不快感や睡眠障害などの影響を人体に及ぼす可能性があるため、道路や遮音壁等の計画・設計を行う際にその大きさを評価・検討し、必要に応じて低減させるなどの対策を講じる必要がある。都市空間の音伝搬の予測には、近年のコンピュータ性能の向上に伴い、波動音響理論や幾何音響理論に基づく数値シミュレーションが広く用いられるようになった¹⁾²⁾。また、数値シミュレーション結果の提示方法としては、騒音レベルの空間分布等をCG(コンピュータグラフィックス)により可視化することが行われている。しかし、CGによる可視化は騒音の影響範囲等の空間的な把握を行う上で極めて有効な手段であるが、騒音の大きさを直観的に理解・把握することは困難である。

そこで著者らは既往の研究において、CG映像(視覚情報)と音(聴覚情報)の双方を用いて道路交通を再現することを目的として、幾何音響理論に基づくVR(バーチャルリアリティ)技術を用いた道路交通騒音評価システム³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾の構築が行われてきた。このシステムは、道路の計画・設計支援ツールとして有効であり、さらに住民との合意形成を得る上でも有効な手段となることが期待できる。しかし、幾何音響理論は、計算時間が短く大規模空間を扱う際に適しているが、簡易式を用い

て計算を行っているため音の波動性が考慮されないの
で厳密性に欠け、複雑な音場環境での解析に適してい
ない。一方、波動音響理論は、複雑な幾何形状を有す
る問題への適用性と計算精度の点では優れるが、非定
常の微分方程式を解くため、計算時間、記憶容量が膨
大になるという問題点がある。

本論文では、VR技術を用いた道路交通騒音評価シ
ステム³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾の適用性および計算精度の向上を目的とし
て、波動音響理論に基づいた数値シミュレーション手法
の構築およびその可聴化手法の提案を行う。既往の研
究として波動音響理論に基づく騒音解析⁷⁾⁸⁾は数多く行
われているが、波動音響理論に基づく計算結果を実装
した実用的な道路交通騒音評価システムは提案されて
いない。支配方程式としては、非定常波動方程式を用
い、その離散化手法としては、外部問題の解析に適し
た境界要素法⁹⁾を用いる。境界要素法は境界上の離散化
のみで近似解を得る手法であるが、時間域の境界要素
法では、ある時刻の解はそれ以前の全ての時刻の境界
値からの影響を受けるため、大規模問題を解く場合に
は計算量・記憶容量が膨大となる。そこで、著者らは時
間域の境界要素法による大規模3次元非定常音場解析
を可能とするため、高橋による補間に基づいた高速多
重極法¹⁰⁾¹¹⁾を用いて、メモリ削減と高速化を行う¹²⁾¹³⁾。
また、インパルス応答を用いて道路交通騒音計測から
復元された音源を入力波とする数値解析を行い、音場
を可聴化することを試みる。さらに、遮音壁の騒音低
減効果を可聴化手法により再現された音を実際に聴く
ことで確認する。

2. 時間域高速多重極法の概略

(1) 境界要素法を用いた騒音解析

本研究で扱う非定常波動散乱問題は次の通りである．

$$\frac{\partial^2 u(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u(\mathbf{x}, t) \quad \text{in } D, \quad (1)$$

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad \text{in } D, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t) \quad \text{on } \partial D, \quad (3)$$

$$u(\mathbf{x}, t) = u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t), \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty, t > 0, \quad (4)$$

ここに， D ， ∂D は領域とその境界を表し， u は（未知の）音圧， c は波速， $\bar{q}$ は既知関数， u_{in} は入射波， n は D の外向き単位法線ベクトル， t は時間である．式 (1) ～ (4) に対応する境界積分方程式は次式で得られる．

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}u(\mathbf{x}, t) &= \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \bar{q}(\mathbf{y}, s) dS ds \\ &- \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t), \end{aligned} \quad (5)$$

ここに， Γ ， $\frac{\partial \Gamma}{\partial n}$ はそれぞれ 3 次元波動方程式の基本解と二重層核であり， Γ は：

$$\Gamma(\mathbf{x}, t) =: \frac{\delta(t - \frac{|\mathbf{x}|}{c})}{4\pi|\mathbf{x}|} \quad (6)$$

である．ここで δ は Dirac のデルタ関数である．

空間を区分一定要素，時間を区分線形補間で離散化すると次の代数方程式を得る．

$$-u_{\text{in}}^n \simeq \sum_{m=1}^n U^{n-m+1} q_L^m - \sum_{m=1}^n W^{n-m+1} u_L^m, \quad (7)$$

ここで，

$$\{u_{\text{in}}^m\}_i := u_{\text{in}}(\mathbf{x}_i, m\Delta t), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \{u_L^m\}_i &:= u(\mathbf{x}_i, m\Delta t) - 2u(\mathbf{x}_i, (m-1)\Delta t) \\ &+ u(\mathbf{x}_i, (m-2)\Delta t), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \{q_L^m\}_i &:= \bar{q}(\mathbf{x}_i, m\Delta t) - 2\bar{q}(\mathbf{x}_i, (m-1)\Delta t) \\ &+ \bar{q}(\mathbf{x}_i, (m-2)\Delta t), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\{U^{n-m}\}_{ij} := \frac{1}{4\pi c \Delta t} \int_{S_j} U(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}, n\Delta t, m\Delta t) dS, \quad (11)$$

$$\{W^{n-m}\}_{ij} := \frac{1}{4\pi c \Delta t} \int_{S_j} W(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}, n\Delta t, m\Delta t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{y}) dS, \quad (12)$$

$$U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, s) := \frac{(c(t-s) - |\mathbf{x} - \mathbf{y}|) H(c(t-s) - |\mathbf{x} - \mathbf{y}|)}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} W(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, s) &:= \nabla_{\mathbf{y}} U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, s) \\ &= \frac{(c(t-s)(\mathbf{x} - \mathbf{y})) H(c(t-s) - |\mathbf{x} - \mathbf{y}|)}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^3}, \end{aligned} \quad (14)$$

ここに， $\mathbf{x}_j$ は境界要素 S_j の代表点を， Δt は時間増分， H は Heaviside の階段関数を表す．

また，式 (7) により求められた境界上の u の値を用いて，次式より，領域内部の任意点 $\mathbf{x}$ での音圧 u を求める．

$$u(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \bar{q}(\mathbf{y}, s) dS ds$$

図-1 セル間の層ポテンシャルの影響評価についての略図

$$- \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t). \quad (15)$$

上記の 3 次元時間域境界要素法を大規模な問題に対して厳密に実行することは，計算量および計算コストの観点から困難である．そこで，補間に基づいた時間域高速多重極法¹⁰⁾を採用する．この手法は，時空の階層化構造を利用して，観測点 $(\mathbf{x}, t)$ に対して「遠方」と「近傍」を導入する．遠方に関する影響係数の計算は，核関数 U および W の変数分離表現（補間を利用した多重極展開）を利用して，近似的かつ効率的に実行する．他方，近傍に関する影響係数の計算は従来法によって厳密に実行する．このとき，必要計算コストは $O(n^2 * k)$ から $O(n^{1.33 \sim 1.5} * k)$ に低減する (k は時間ステップ数)．また，必要メモリも従来法に比べて低減できる．以下，遠方計算および近傍計算について補足する．

(2) 遠方計算

まず，従来の時間域多重極法と同様に時空間を階層構造を持つセルに分割する¹¹⁾．次に式 (11) の核関数 $U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, s)$ について，図-1 に示すような時空間で離れたセル ($O \times I$ と $S \times J$) 間の影響を補間関数 ℓ を用いて次のように展開する．

$$\begin{aligned} U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, s) &\simeq \sum_{a < p_s} \sum_{b < p_t} \sum_{\alpha < p_t} \sum_{\beta < p_t} U_{a,b,\alpha,\beta}(O, S, I, J) \\ &\times \ell_a\left(\frac{\mathbf{x} - \bar{O}}{h_s}\right) \ell_b\left(\frac{\mathbf{y} - \bar{S}}{h_s}\right) \ell_\alpha\left(\frac{t - \bar{I}}{h_t}\right) \ell_\beta\left(\frac{s - \bar{J}}{h_t}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

ここに， p_s, p_t はそれぞれ空間・時間の補間点の数， h_s, h_t はそれぞれセルの空間・時間サイズの半分の値， $\bar{O}, \bar{S}, \bar{I}, \bar{J}$ はセルの中心である．式 (12) の $W(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, s)$ についても同様に展開する．なお，補間関数 $\ell_a, \ell_b, \ell_\alpha, \ell_\beta$ として 3 次エルミート補間を用いる．

(3) 直接計算

時空間で近い要素間の影響は精度を向上させるため、補間関数を用いずに直接計算する。時間域の境界要素法では、ある時刻の解はそれ以前の全ての時刻の境界値からの影響を受けるため、大規模問題を解く場合には計算量・記憶容量が膨大化する。この問題を解消するために直接計算をする際、本解析では以下の二つのメモリ削減手法を用いた。

a) 疎行列化

時間域の境界要素法において離散化により得られる係数行列の影響係数は、ソースと観測点間の距離と時間差により波動の影響が及ぶ点のみ非ゼロ成分となる¹⁴⁾。そこで、非ゼロ成分のみメモリに記憶することでメモリを削減できる。

b) cast forward

影響係数行列と既知の解との行列ベクトル積演算を、代数方程式を作成するタイミングよりも前に計算しておく手法 (cast forward) を適用する¹⁴⁾¹⁵⁾。この手法を用いることにより全時間ステップの半分より上のステップの影響係数行列はメモリに記憶する必要がなくなり、メモリを削減できる。

3. 車の走行音を想定した移動音源

道路交通騒音を考える場合、車両の移動を考慮する必要がある。そこで本研究では、一直線上を等速で移動しながら音波を発生する点音源を導入する。ある音源が時刻 $t = 0$ より初期位置 y_0 から x_1 方向に速度 v で移動するとし、その音源の発する時間波形を $f(t)$ とする。このとき、観測点 x における音波 (BEM 解析における入射波) は、Lienard-Wiechert のポテンシャル¹⁶⁾を用いて、次のように誘導できる。

$$\begin{aligned} u_{in}(x, t) &= \frac{1}{4\pi} \int_0^t \frac{\delta(t-t' - \frac{|x-y(t')|}{c})}{|x-y(t')|} f(t') dt' \\ &= \frac{1}{4\pi} \frac{f(t'_0)}{|x-y(t'_0)| - \frac{1}{c} \frac{\partial y(t'_0)}{\partial t'_0} \{x-y(t'_0)\}} \\ &= \frac{1}{4\pi} \frac{f(t'_0)}{\sqrt{(\xi_1 - vt)^2 + (1 - \frac{v^2}{c^2})(\xi_2^2 + \xi_3^2)}}, t'_0 > 0 \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、

$$t'_0 = \frac{(c^2 t - v \xi_1) - \sqrt{c^2 (\xi_1 - vt)^2 + (c^2 - v^2)(\xi_2^2 + \xi_3^2)}}{c^2 - v^2} \quad (18)$$

であり、 $\xi = x - y_0$ とする。 $y(t)$ は、時刻 t における音源の位置とする。なお、式 (17) は、図-2 に示すように時間方向に離散化した際の時間 step 間で放射される音圧と音源の移動が考慮されている式となる。また、複数の点音源 (車両) を同時に考慮する場合には、 y_0, v あるいは移動方向を適宜修正した上で、式 (17) を重ね合わせればよい。

図-2 音源の移動による影響

4. 数値解析例

精度検証のための数値解析例として、3次元非定常波動問題を解く。

(1) 音源が移動する音場問題

解析メッシュは図-3 に示す。境界の離散化には一辺の最大空間離散化幅を 0.085m とする三角形メッシュを用い、総要素数は 47636 とし、時間離散化幅を 0.25ms、初期音源点を $(x_1, x_2, x_3) = (-7.5, -3.0, 1.0)$ に設け、 x_1 の正の方向に $v = 27.8\text{m/s} (=100\text{km/h})$ で移動させる。受音点を $(x_1, x_2, x_3) = (0.0, 3.0, 1.5)$ に設定し数値解と厳密解の比較を行った。このときの、境界条件は完全反射の条件、

$$\bar{q} = 0 \quad (\text{on } \partial D) \quad (19)$$

とした。また、波速を 340.0m/s、時間ステップ数を 2160 とし解析を行った。図-4 に音源点における入力波形を示す。この波形はオープンソースクロスプラットフォームのレコーディング・サウンド編集ソフトウェア (Audacity) を用いて作成された 400Hz を上限とするホワイトノイズ (サンプリング周波数 1600Hz 刻みの離散的な周波数において同じ強度を持つ音) であり、この波形を式 (17) の $f(t'_0)$ に代入し解析を行った。不規則な波を入力波として解析することにより、今後、道路交通騒音などの不規則な波を取り扱う際の準備とする。400Hz の周波数を上限のホワイトノイズとしたのは、時間離散化幅 0.25ms で十分に表現可能な波とするためである。また、使用した計算機のメモリ、CPU、コア数はそれぞれ 256GB、Intel®Xeon®CPU E5-2687W @3.10Hz、16 コアである。

図-5 に境界面上の音圧の可視化結果の鳥瞰図を示す。図より音が放射状に正しく伝搬していることが確認できる。また、ホワイトノイズを入射波として解析をしているので不規則な波が伝搬していることが確認でき

図-3 解析モデル 1

図-4 入力波形

るとともに時間が進むにつれ音源が進行方向に移動しているのがわかる．図-6に $x_1 = 0$ の断面における内点の音圧と境界面上の音圧の可視化結果を示す．図より，地面による反射を再現でき， $x_1 = 0$ の断面において音源が近づくにつれ音圧が上がっているのが確認できる．図-7に受音点における厳密解と解析結果を示す．なお，厳密解は，完全反射境界を持つ半無限領域の Green 関数と移動音源との畳み込みにより求める．図より，解析結果は厳密解と良い一致を示しており，本手法の妥当性を確認することができた．また，高速多重極法の導入により，導入しない境界要素法と比べて影響係数行列の記憶メモリ量を約 1/6 に削減，計算時間は約 1/2 に短縮できた．

図-5 境界面上における音圧の可視化

図-6 $x_1 = 0$ 断面および境界面上における音圧の可視化

図-7 受音点における音圧の比較

(2) インパルス応答を用いた数値解析

インパルス応答を用いた数値解析例として固定音源における数値解析を行う．入力波にインパルスを用い，得られたインパルス応答と入力（解析したい波形）との畳み込み積分を行うことにより受音点における音圧を求める．解析領域は図-8に示す．一辺の長さが0.2mの三角形メッシュを用い境界をメッシュ分割する，このとき，総要素数は10490である．また，時間離散化幅を0.7msとする．音源点を $(x_1, x_2, x_3) = (0.0, -3.0, 1.0)$ に設け，受音点を $(x_1, x_2, x_3) = (0.0, 3.0, 1.5)$ に設定し数値解と厳密解の比較を行った．また，入力波は次式より与え，

$$u_{in}(x, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{f(t - \frac{r}{c})}{r}, \quad t > 0, \quad (20)$$

境界条件は完全反射とした．

$$\bar{q} = 0 \quad \text{on } \partial D, \quad (21)$$

ここに，波速 c を 340.0m/s， r を音源から要素の中心までの距離とする．図-9に示すインパルス (1step のみ 1 の大きさを持つ波形) を式 (20) の f として解析を行った．

図-8 解析モデル 2

図-9 入力波形 (インパルス)

図-10 受音点におけるインパルス応答

図-11 入力 (100Hz の sin 波)

図-12 インパルス応答と入力の畳み込み積分により求められた受音点における音圧と厳密解との比較

図-10に受音点におけるインパルス応答を示す．この波形を図-11に示す入力 (100Hz の sin 波) との畳み込み積分を行うことにより求めたい波形 (入力) における受音点での音圧を算出する．畳み込み積分の結果と厳密解との比較を図-12に示す．なお，厳密解は，完全反射境界を持つ半無限領域の Green 関数と移動音源との畳み込みにより求める．図より，厳密解と数値解が良い

一致を示していることがわかり、インパルス応答を用いた数値解析の妥当性を確認することができた。

(3) 遮音壁を有する問題での可聴化の試み

可聴化の数値例として、遮音壁を設けた 3 次元非定常波動問題を取り上げる。音源に用いる入力データとしては計測により得られた道路交通騒音⁵⁾を用い、インパルス応答との畳み込み積分を行うことにより、受音点での可聴化を試みる。解析領域は図-13 に示す。一辺の長さが 0.02m の三角形メッシュを用い境界をメッシュ分割する、このとき、総要素数は 250840 である。また、時間離散化幅を 0.0585ms とする。受音点の音圧を求め、時系列の数値データ解析ツール (Oscope2) を用いて wav データに変換し可聴化を行った。また、入力波、境界条件を以下に示す。

$$u_{\text{in}}(x, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{f(t - \frac{r}{c})}{r}, \quad t > 0, \quad (22)$$

$$\bar{q} = 0 \quad \text{on } \partial D, \quad (23)$$

ここに、波速 c を 340.0m/s, r を音源から要素の中心までの距離とする。式 (22) の f として、図-14 に示す音源点における入力データ⁵⁾を用い解析を行った。この入力データは道路交通騒音計測から復元された音源データである。

図-15、図-16 に時刻 $t = 0.00585\text{s}$ における境界面上 (半無限境界も含む) の音圧の可視化結果、 $x_1 = 0$ 断面の音圧の可視化結果を示す。図より音が放射状に伝搬するとともに地面による反射が再現できていることが確認できる。図-17、図-18 に時刻 $t = 0.01170\text{s}$ における境界面上 (半無限境界も含む) の音圧の可視化結果、 $x_1 = 0$ 断面の音圧の可視化結果を示す。図より、遮音壁による音の反射が再現されていることを確認できる。

図-13 解析モデル 3

図-14 入力データ (計測により得られた音源データ)

図-19、図-20 に時刻 $t = 0.02334\text{s}$ における境界面上 (半無限境界も含む) の音圧の可視化結果、 $x_1 = 0$ 断面の音圧の可視化結果を示す。図より、遮音壁により音の反射や干渉が再現されていることが確認できる。また、遮音壁により、音源側からみて遮音壁の裏側の音圧が下がっていることが確認できる。受音点における音圧の波形を図-21 に示す。図より、遮音壁により音圧が下がっていることが確認できる。

また、受音点における音圧の可聴化の結果を下記 URL に示す。

・遮音壁なし

<http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/keisan/img/wav/road.wav>

・遮音壁あり

<http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/keisan/img/wav/barrier.wav>

可聴化の結果より、遮音壁により音の大きさと音色が変化していることが確認できる。

図-15 境界面上 (半無限境界も含む) の音圧の可視化 ($t = 0.00585\text{s}$).

図-16 $x_1 = 0$ 断面における音圧の可視化 ($t = 0.00585s$).

図-19 境界面上 (半無限境界も含む) の音圧の可視化 ($t = 0.02334s$).

図-17 境界面上 (半無限境界も含む) の音圧の可視化 ($t = 0.01170s$).

図-20 $x_1 = 0$ 断面における音圧の可視化 ($t = 0.02334s$).

図-18 $x_1 = 0$ 断面における音圧の可視化 ($t = 0.01170s$).

図-21 受音点における音圧の比較

5. おわりに

本論文では、VR 技術を用いた道路交通騒音評価システムの適用性および精度の向上を目的として、波動音響理論に基づいた高速多重境界要素法を用いた数値シミュレーション手法およびその可聴化手法の提案を行った。数値解析例を通して、本手法の妥当性と有効性について検討し、以下の結論を得た。

- 補間に基づいた高速多重境界要素法を用いたことで、従来の時間域境界要素法と比較し、計算時間および計算メモリを削減できていることが確認でき、大規模な問題を取り扱うことが可能となった。
- インパルス応答を用いた音場解析の妥当性が確認でき、様々な音源を取扱い、可聴化することが可能となった。
- 遮音壁の騒音低減効果を可聴化により再現された音を実際に聴くことで確認できた。

以上より、波動音響理論に基づいた VR 技術を用いた道路交通騒音評価システムの構築に向けた準備が整った。今後は、より高周波な音源が移動する問題を取扱うと共に VR 技術を用いた道路交通騒音システムへの実装を目指す。

参考文献

- 1) 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：「道路交通騒音の予測モデル”ASJ RTN Model 2008”」, 日本音響学会誌, Vol.65, pp.179–232, 2009.
- 2) 日本音響学会 (編)：音環境の数値シミュレーション 波動音響解析の技法と応用, 丸善, 2011.
- 3) 田近伸二, 櫻山和男, 志村正幸：VR 技術を用いた対話型道路交通騒音評価システムの構築, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.13, pp.231–240, 2010.
- 4) 柴田啓輔, 田近伸二, 櫻山和男, 志村正幸：可視化・可聴化技術を用いた道路交通騒音評価システムの構築, 土木情報利用技術講演集, 土木学会, Vol.35, pp.25–28, 2010.
- 5) 谷川将規, 守屋陽平, 江嶋孝, 櫻山和男, 志村正幸：VR 技術を利用した道路交通騒音評価システムの立体音響化と現実感向上に関する研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.69(2), pp.L155–L162, 2013.
- 6) 谷川将規, 江嶋孝, 櫻山和男, 志村正幸：混合交通を考慮した VR 技術に基づく道路交通騒音評価システムの構築, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 70(2), pp. L195–L202, 2014.
- 7) D. Duhamel : EFFICIENT CALCULATION OF THE THREE-DIMENSIONAL SOUND PRESSURE FIELD AROUND A NOISE BARRIER, J. Sound and Vibration, Vol.197(5), 547–571, 1996.
- 8) 珠玖達良：差分法による不規則形状の音場解析, 日本音響学会誌, Vol.28, pp.5–12, 1972.
- 9) 小林昭一：波動解析と境界要素法, 京都大学学術出版会, 2000.
- 10) T. Takahashi : An interpolation-based fast-multipole accelerated boundary integral equation method for the three-dimensional wave equation, Journal of Computational Physics Vol.258, pp.809–832, 2014.
- 11) T. Takahashi, N. Nishimura, S. Kobayashi: A fast BIEM for three-dimensional elastodynamics in time domain, Engineering analysis with boundary elements, Vol.27, pp.491–506, 2003.
- 12) 岡村理一郎, 吉川仁, 櫻山和男：境界要素法による大規模 3 次元音場シミュレーション, 平成 26 年度全国大会第 69 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, CS11-026, 2014.
- 13) 岡村理一郎, 吉川仁, 高橋徹, 櫻山和男：境界要素法による大規模 3 次元非定常音場解析, 第 63 回理論応用力学講演会 (NCTAM2014) 概要集, 日本学術会議, OS07-3-4, 2014.
- 14) 吉川仁, 松浦亮介：影響波動の到達時間を考慮した Lubich の CQM を用いた時間域境界積分方程式, 計算数理工学論文集, 日本計算数理工学会, Vol.12, pp.73–78, 2012.
- 15) H. Yoshikawa, N. Nishimura : An improved implementation of time domain elastodynamic BIEM in 3D for large scale problems and its application to ultrasonic NDE, Electronic Journal of Boundary Elements, Vol. 1, No. 2, pp. 201–217, 2003.
- 16) 砂川重信：理論電磁気学, 紀伊國屋書店, 1999.

(2015. 6. 23 受付)

AN AURALIZATION OF ROAD TRAFFIC NOISE BY THE LARGE SCALE ACOUSTIC WAVE ANALYSIS BASED ON THE TIME DOMAIN FM-BEM

Riichiro OKAMURA, Hitoshi YOSHIKAWA, Toru TAKAHASHI,
and Kazuo KASHIYAMA

This paper presents a numerical simulation method for transient acoustic field analysis based on boundary element method and its application to the auralization of road traffic noise. For the governing equation, the unsteady wave equation is employed. In order to solve a large scale problem, the fast multipole boundary element method (FMM) is applied. Three dimensional wave scattering problem with a road traffic noise is solved by the time domain FM-BEM. The auralization is investigated by using the computed sound pressure.