

拡張エネルギー積分方程式法による騒音伝搬予測

— 実用性の高い新しい騒音伝搬予測手法 —

増田 潔

Keywords : noise propagation, prediction method, energy integral equations, simultaneous analysis in and around buildings
騒音伝搬, 予測手法, エネルギー積分方程式, 建物内外同時解析

1. はじめに

騒音伝搬予測手法としては、幾何音響理論に基づく方法と波動音響理論に基づく方法が主流である。このうち前者は音の伝搬経路を幾何的に判断して、距離減衰や反射・回折による減衰を計算するもので、実用的な方法ではあるが計算条件によっては精度が著しく低下する。一方、後者は有限要素法や境界要素法など、音波の波動性を考慮でき、理論的には精度が高いものの、膨大な入力データと計算時間が必要となるなど、実用性が低い。

そこで、筆者は実用性を損なうことなく精度をできるだけ向上させることを目的に、室内音響の解析に古くから使用されていたエネルギー積分方程式法に改良を加えた「拡張エネルギー積分方程式法」を開発した。

ここでは、この手法の理論を述べるとともに、実際の現場に適用した例を紹介する。

2. 従来の予測手法の問題点

従来の幾何音響理論に基づく多くの騒音伝搬予測手法においては、多重回折と多重反射を別々に計算し、最後に合成する方法を採用しているものが多い。この方法は反射もしくは回折の一方の影響のみが支配的である場合は問題がないが、両者の組み合わせを考慮しなくてはならない条件で大きな誤差を持つようになる。このような誤差を回避するため図-1の(a)に示すように、虚像を用いて反射音の回折、回折音の反射を考慮する方法もあるが、図-1の(b)に示すような条件では、虚像の数が指数関数的に増大するため実用的でない。

波動音響理論に基づく手法では反射や回折を同時に取り扱うことが可能であるが、波長と建物の大きさのオーダーから適用できる周波数帯域が限定されるという問題がある。また、境界条件として主に表面材の複素音響

インピーダンスを周波数特性で与える必要があるが、我々が入手できる表面材の物性のほとんどは、1/1もしくは1/3オクターブバンドの残響室法吸音率のデータであり、波動音響理論に基づく手法に使用することはできない。

「拡張エネルギー積分方程式法」は、図-1の(c)に示すように表面を要素に分割し、要素間での反射および回折を計算することで、結果的に多重回折と多重反射が複雑に組み合わさった状況を考慮できるようになっている。

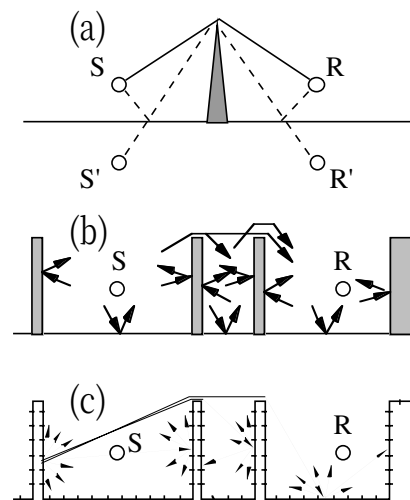


図-1 回折と反射の組み合わせ
Combination of diffraction and reflection
(a)虚像を用いる場合
(b)反射および回折経路を組み合わせた場合
(c)拡張エネルギー積分方程式を用いる場合

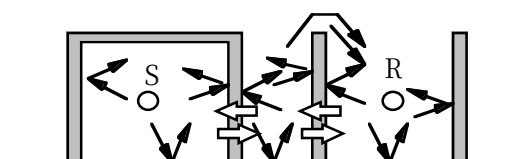


図-2 回折、反射、透過の組み合わせ
Combination of diffraction, reflection, and transmission

したがって、従来の幾何音響理論に基づく手法よりも精度の改善が期待される。また、音響透過を考慮することもでき、図-2に示すような建物内外での騒音伝搬を同時に計算することが可能となる。

3. 既存のエネルギー積分方程式

拡張エネルギー積分方程式法を説明するに前に、その基礎となっている既存のエネルギー積分方程式について説明する。

エネルギー積分方程式は音場の境界面を幾つかの要素に分割し、それら要素間でのエネルギー収支に関する連立方程式を構築して各要素の放射インテンシティを先に求め、その結果から受音点での音圧を求める手法である。

要素で境界が構成される音場（図-3）において、要素上の点から伝搬する音のインテンシティ $I(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_k)$ は次式で与えられる。

$$I(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_k) = \sum_{i=1}^N \left[I(\mathbf{y}_i, \mathbf{x}_j) \times \iint_{\Delta S_i(\mathbf{y}')} R(\mathbf{y}', \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_k) \frac{\cos \theta \cos \theta'}{r^2} dS_i \right] + \frac{QW}{4\pi r_s^2} R(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_k) \cos \theta_s \quad (1)$$

ここで、 W は音響パワー、 Q は指向係数、 $\mathbf{x}_j$, $\mathbf{y}_i$, $\mathbf{y}_k$ は要素の節点であり、要素中のインテンシティは全て節点値に等しいと仮定する。

$R(\mathbf{y}', \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_k)$ は $\mathbf{x}_j$ における反射係数¹⁾で、

$$R(\mathbf{y}', \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_k) = \{1 - \alpha(j)\} \times \left[\frac{d(j)}{\pi} + 2\{1 - d(j)\} \delta(\theta_{in} - \theta_{out}) \delta(\varphi_{in} - \varphi_{out} \pm \pi) \right] \quad (2)$$

で表される。ここで、 $\alpha(j)$ は吸音率、 $d(j)$ は拡散反射係数（仮想的ではあるが、Lambert Lawによる。拡散反射エネルギーの入射エネルギーに対する割合²⁾で拡散反射以外は全て鏡面反射エネルギーとなる。図-4 参照。）である。 $I(\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_k)$ を要素間インテンシティと見なし、全ての要素について(1)式を当てはめれば、要素間インテンシティに関する連立方程式が得られる。この方程式の解を

$$E(\mathbf{x}_p) = \sum_{i=1}^N I(\mathbf{y}_i, \mathbf{x}_p) \iint_{\Delta S_i(\mathbf{y}_i)} \frac{\cos \theta_p}{r_p^2 c} dS_i + \frac{QW}{4\pi r_{sp}^2 c} \quad (3)$$

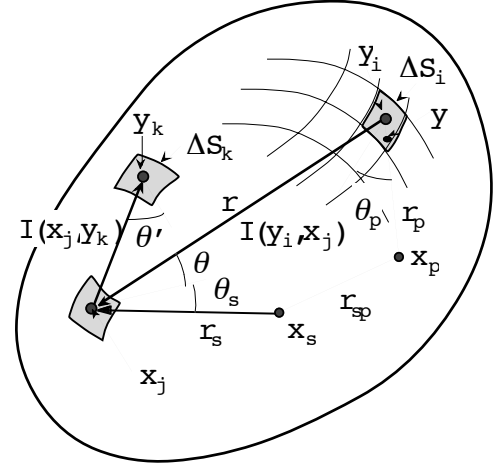
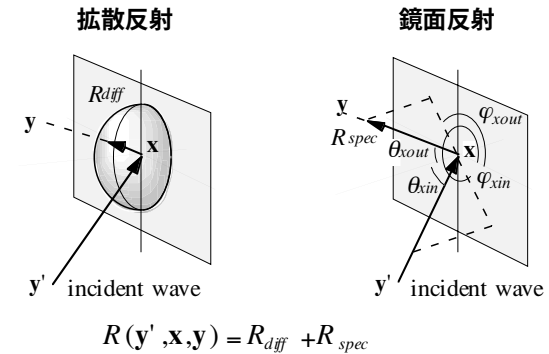


図-3 エネルギー積分方程式におけるパラメータ
Parameters of energy integral equations



$$R(\mathbf{y}', \mathbf{x}, \mathbf{y}) = R_{diff} + R_{spec}$$

$$R_{diff} = \{1 - \alpha(\mathbf{x})\} \frac{d(\mathbf{x})}{\pi}$$

$$R_{spec} = 2\{1 - \alpha(\mathbf{x})\} \times \{1 - d(\mathbf{x})\} \delta(\theta_{xin} - \theta_{xout}) \times \delta(\varphi_{xin} - \varphi_{xout} \pm \pi)$$

図-4 反射係数の考え方
Reflection Coefficient

に代入することで、音場内の任意の点におけるエネルギー密度 $E(\mathbf{x}_p)$ が計算できる。

この手法の問題点としては、仮想的な拡散反射を用いていることと、あくまでも幾何計算であるため波長に比して狭い空間に対する適用に限界があるということである。しかし、このような手法を採用することで、多重反射に関する計算を短時間のうちに処理することが可能になる。

4. 拡張エネルギー積分方程式

上で示した従来のエネルギー積分方程式法では、多重反射のみの計算しかできず、建物内外にまたがる騒音伝搬や多重回折の影響を予測することはできない。ここでは

新たに多重回折、音響透過を考慮できるように改良した拡張エネルギー積分方程式を構築する。

図-5の上図に示すように要素間に障害物がある場合には、(1)式の積分の項を、

$$2R'(\mathbf{y}', \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_k) \Delta S_i \cos \theta_f \cos \theta'_f 10^{(SPL_f(i,j)-120)/10} \quad (4)$$

で置き換えることとする。ここで、 $SPL_f(i,j)$ は、図-5の下図に示すように、 $\mathbf{y}_i$ に単位パワーの無指向性音源がある場合の $\mathbf{x}_j$ における音圧レベルで、文献³⁾に示す多重回折計算により算出される。また、(3)式においても第1項および第2項で直接伝搬する経路がなければ、多重回折計算を行う。

音響透過を考慮する際は、図-6に示すように要素への入射インテンシティ I_{in} にその要素に定義された透過率を乗じて、要素の裏側に放射される放射インテンシティ I_{out} を算出する。ある境界面を挟んで、2つの音場が存在する場合、裏側に対する放射インテンシティを、放射される空間側の反射インテンシティと同様に取り扱うことで、2つの空間にまたがる一組の連立方程式を構築することが可能になる。

このように、多重反射、多重回折および音響透過が一組の連立方程式内で表現されたものを拡張エネルギー積分方程式と呼ぶ。

5. 実測値との比較例

本手法による計算値と実測値とを比較した例を3つ紹介する。

5.1 従来法との比較

予測対象の居室が建物を挟んで騒音源の反対側にある場合、音源から外壁面までの騒音伝搬計算において回折による回り込みの他に、近接する建物や対象建物自身の反射の影響が大きくなる。しかし、図-7中の点線で示すような多重回折の計算は比較的容易にできて、実線で示した多重反射や、回折して反射、もしくは反射して回折という現象を考慮することは困難であった。そこで、このような現象を考慮できる本手法と従来の多重回折のみを考慮した計算方法で図-7に対する計算結果を比

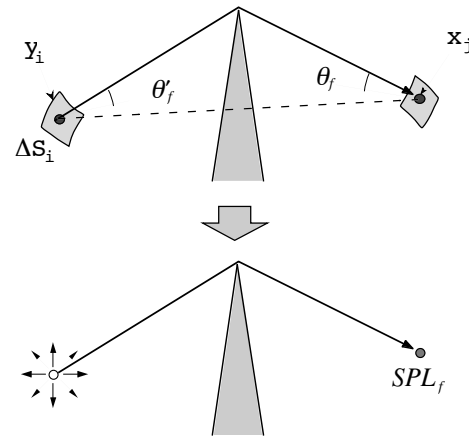


図-5 本手法における回折の取扱い
Diffraction calculation between elements

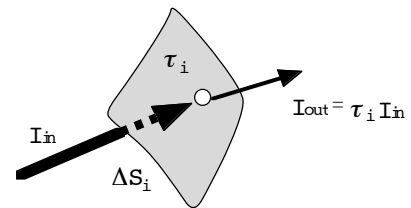


図-6 本手法における透過の取扱い
Sound transmission calculation

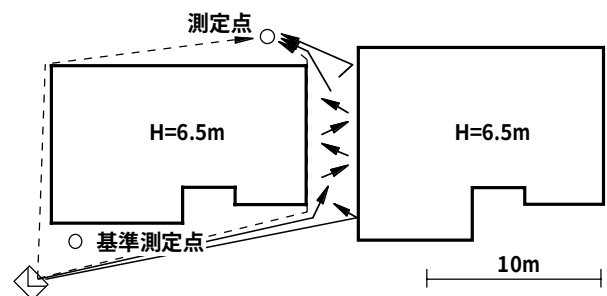


図-7 計算条件
Calculation condition

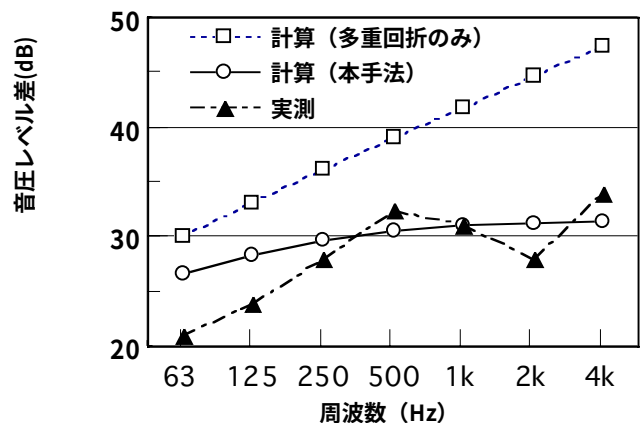


図-8 計算結果と実測との比較
Comparison among calculations and measurements

較した。本手法における計算では要素を一辺が約1mの四角要素とし、地面、建物とも吸音率は0.1と仮定した。結果を図-8に示す。測定および計算結果とも図-7中

の基準測定点に対する測定点での減衰量を意味する音圧レベル差で示してある。

多重回折のみの計算では、実測値との差が10～15dBと大きい。特に高い周波数になるほど差は大きくなる。これは回折による減衰効果が高い周波数ほど大きいのにに対し、実際には建物間の狭い空間を伝搬する際、ほとんど減衰せずに伝搬することが原因と考えられる。これに対し、多重反射を考慮できる本手法では大幅に誤差が改善している。

ただし、低い周波数では改善の程度が小さい。これは本手法があくまでも幾何音響理論に基づいた計算法であることによる。

5.2 室内外の遮音に関する計算例

集合住宅のバルコニーのように、外壁近傍で反射や回折を生じる場合の予測については、回折と反射を同時に取り扱わねばならない。さらに、居室内部の条件まで考慮する場合、透過も同時に扱える方が良い。ここでは、バルコニー天井が反射性の場合と吸音性の場合で居室内の騒音レベルがどの程度変化するのか本手法を用いて予測した例を示す。

対象建物は43階建の高層住宅で、バルコニー天井に吸音材を設置した場合としない場合で外壁の遮音性能がどの程度改善されるか検討した。

対象居室は4階で、バルコニー中央と室内に受音点を設置した。地上レベルにおいてコンクリートカッターで現場打ちコンクリート（厚100mm程度の板状に成型）を切断する音を発生騒音とした。まず、

表-1 各要素に与えた物性
Sound absorption coefficient and transmission loss

各部位の吸音率		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
居室内	天井	0.26	0.13	0.06	0.06	0.06	0.06
	壁	0.26	0.13	0.06	0.06	0.06	0.06
	床	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
	サッシ	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
バルコニー	天井（吸音性）	0.12	0.32	0.65	0.82	0.80	0.82
	天井（反射性）	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03
	床、立ち上がり	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03
	隔板	0.18	0.13	0.06	0.06	0.06	0.06
外壁		0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03

各部位の透過損失 (dB)		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
外壁		39	44	49	53	59	64
サッシ		14	18	21	23	23	24
バルコニー隔板		10	14	21	27	35	38

バルコニー天井が反射性の時の音圧レベルを各々の受音点で測定し、続いてバルコニー天井にグラスウールを施工した後に、同様の測定を行った。測定結果はグラス

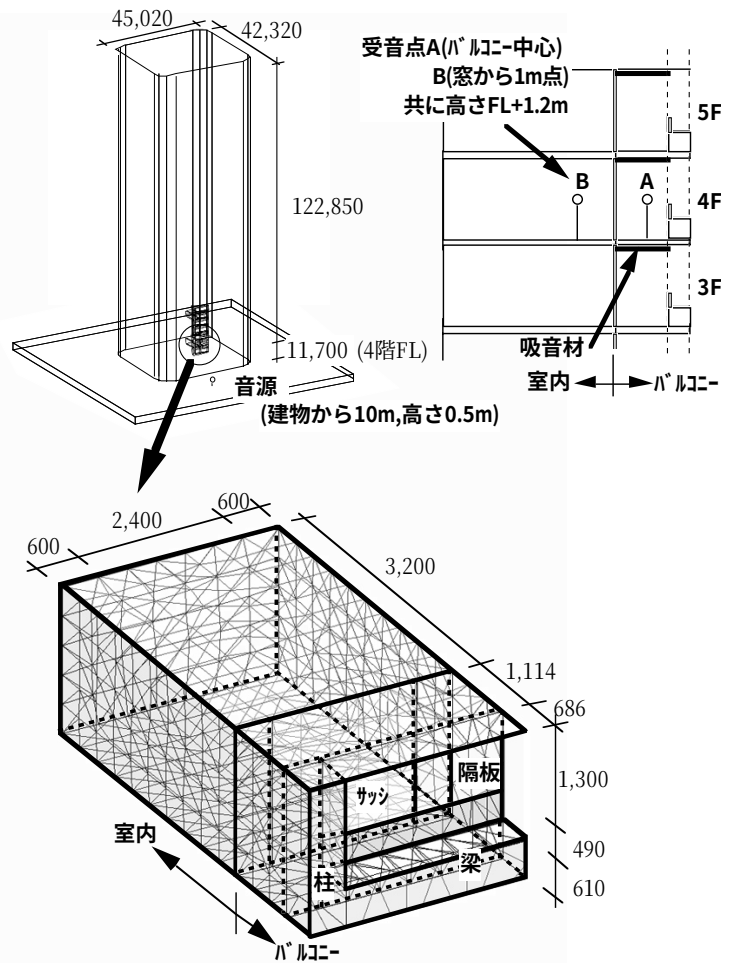


図-9 測定および計算条件と計算モデル
Measurement procedure and calculation model

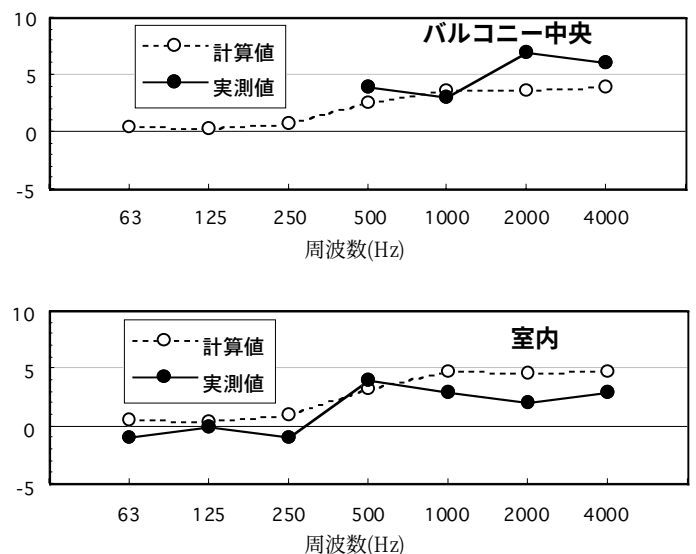


図-10 バルコニー天井に吸音材を設置した時の挿入損失
Insertion loss of absorption material

ル施工による挿入損失の形でまとめた。

予測計算では3階から5階までバルコニー形状を考慮してモデルを作成した。要素は地面から5階まで設定し、その大きさは0.5～1.0mとした(図-9)。サッシと外壁、バルコニー立上がりおよび隔板部分は音響透過も考慮した。結果は測定と同様に挿入損失で整理した。

実測値と計算値の比較を図-10に示す。この結果では両者は良く一致している。

5.3 屋外設備機器の騒音に関する計算例

図-12に示すように、空調屋外機が建物と防音塀によって音源が囲まれてしまうような状況について、本手法による解析結果と実測値を比較した。

騒音源となる室外機は二台あり、どちらも鉄板によりケーシングされている。ファンから排気を吸い込まないように排気ダクトが取り付けられている。

防音塀はALC厚 100mmで上部の傾斜部分のみ高圧木毛セメント板である。建物外壁もALCである。

拡張エネルギー積分方程式の解析モデルを図-11に示

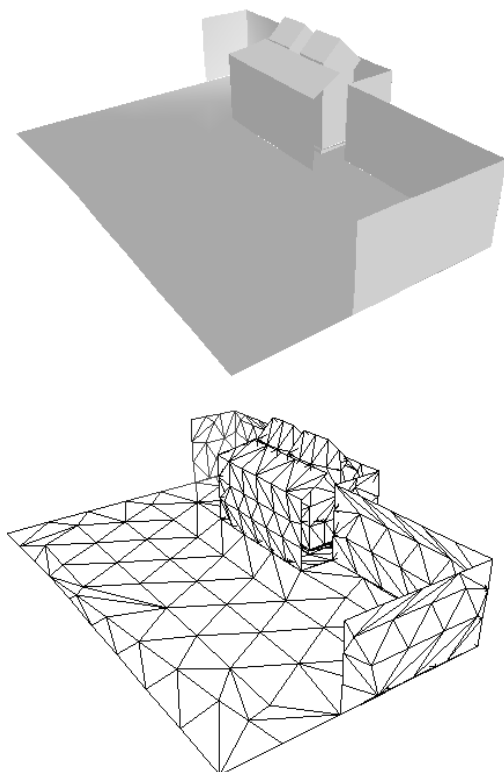


図-11 計算モデル
Calculation model
上：モデル表面形状
下：要素分割状況

す。音源はケーシング側面および上面にあるファン取り付け面に面音源を仮定した。排気ダクトについてはダクト面を定義しダクト面での音響透過および面の表裏での反射も考慮した。防音塀も音響透過および表裏での反射

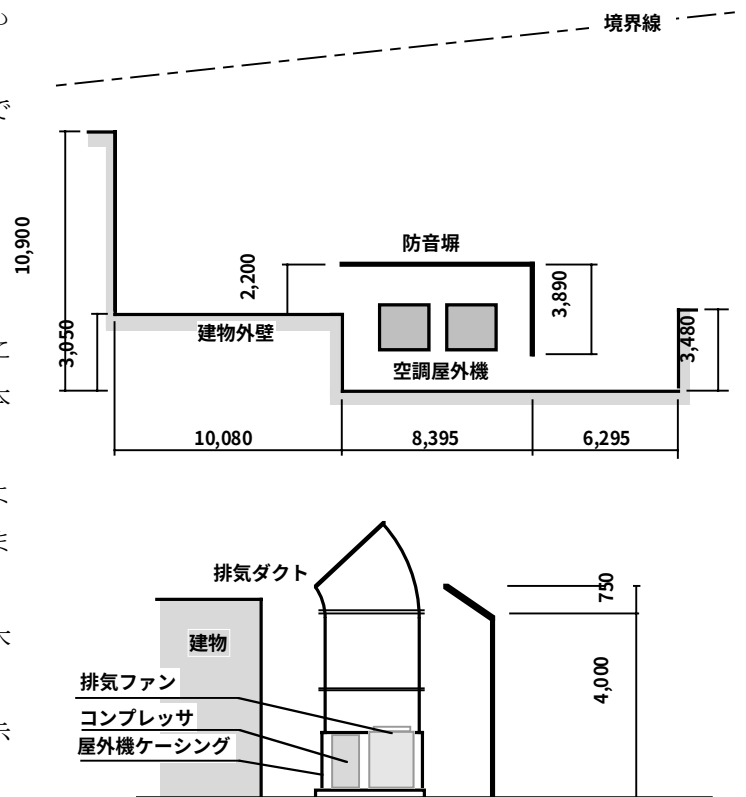


図-12 対象とした空調屋外機と設置状況
Air-conditioning systems as noise sources

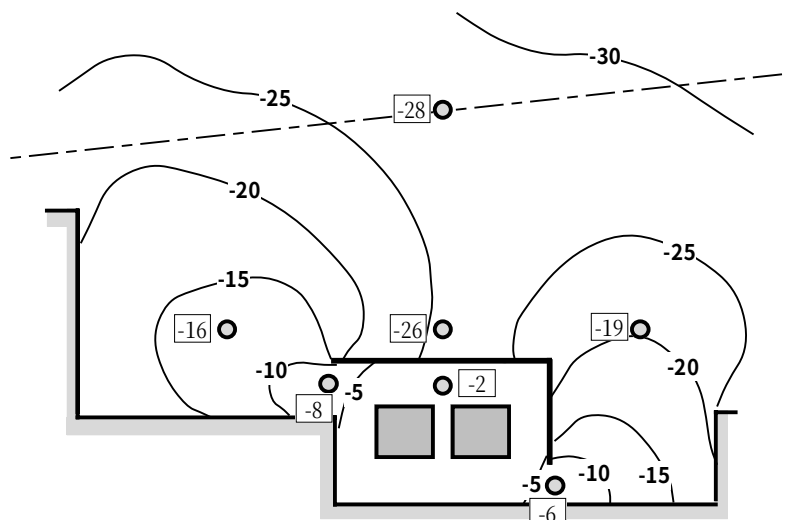


図-13 計算結果と実測値との比較
Comparison among calculation and measurement results
コンタマップ：拡張エネルギー積分方程式による計算値。
○点と囲数値：測定点と測定値。
尚、数値はファン直上の騒音レベルで基準化した相対騒音レベル[dB]

を考慮した。受音点は高さ1.5m水平面内に配置した。

測定は、暗騒音が十分低い状況で空調屋外機のみを稼動して実施した。1分間の等価騒音レベルをもって測定結果とした。

測定結果と計算結果との比較を図-6に示す。測定値はファン直上騒音レベルで基準化し、計算値は空調機近傍の測定点で実測値と対応を取るよう基準化した。測定値と実測値は比較的良好一致を見せている。

5.4 その他の計算例

本手法の汎用性の高さを示す例として図-14に幹線道路の道路交通騒音の影響について広範囲について解析した例を、図-15に建物内設備騒音の建物内外への伝搬状況を解析した例を示す。ここでも建物や高架道路の裏面などでくり返し反射する音の影響や、建物を回り込む音、建物壁面を透過する音の影響が同時に計算されている。これらの予測精度に関する検証実験が今後の課題である。

6. おわりに

騒音伝搬予測手法として新たに開発した拡張エネルギー積分方程式法の理論とその適用例を紹介した。

これまで主流であった幾何音響理論に基づく予測法では、反射、回折は別々に取り扱われ、そのことが大きな誤差を生む要因となっていた。しかし、本手法は多重回折と多重反射、音響透過の同時解析が可能であるため、予測精度は大幅に改善された。また、波動音響理論に基づく予測手法では取扱いの難しかった広い範囲での計算や、より現実に近い複雑な計算モデルを取り扱うことができるようになり、実用性も高められた。

今後、広範囲の複雑なモデルに本手法を適用した時の予測精度の検証を実施していく予定である。

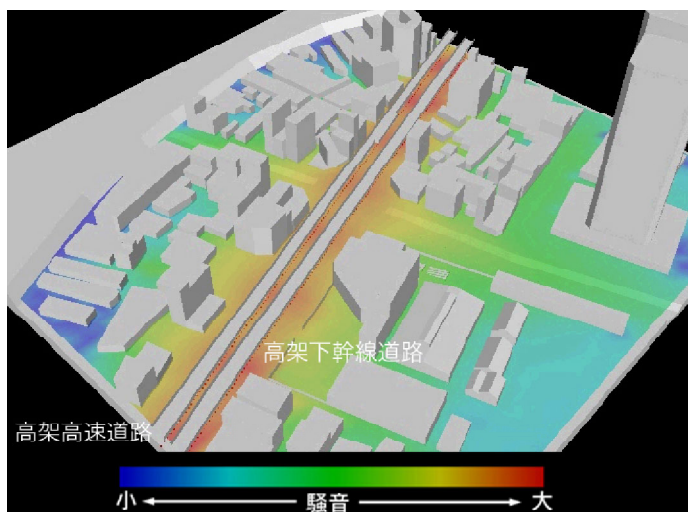


図-14 高架道路下の幹線で発生する自動車交通騒音の解析例
Calculation example of road traffic noise

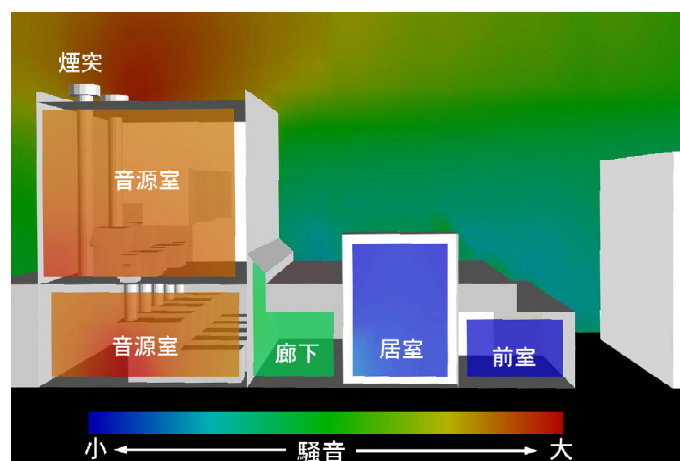


図-15 建物内発生騒音の建物内外へ伝搬解析例
Calculation example of noise propagation in and around buildings

参考文献

- 1) H. Kuttruff : Simulierte Nachschallkurven in Rechteckraeumen mit diffusem Schallfeld, Acustica, 25, (1971)333-342
- 2) W.B. Joyce : Exact effect of surface roughness on the reverberation time og a uniformly absorbing spherical enclosure, J.Acoust.Aoc.Am. 64, 5, (1978) 1429-1436
- 3) K. Masuda, Sound environment simulation system for prediction of noise propagation in and around buildings, ASVA97 proceedings, 97, 585-590, (1997)