

## Study on the energetic prediction model of sound propagation

福島, 昭則

<https://doi.org/10.15017/458552>

---

出版情報 : Kyushu Institute of Design, 2002, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

# 第7章

## 総括

本研究で得られた成果をまとめるとともに、残された課題と今後の展望について述べる。

## 7. 1 研究成果のまとめ

本研究では、屋外での騒音伝搬予測におけるエネルギーモデルについて検討した。

第1章では、騒音の現状と騒音予測の現状について述べ、その中で騒音防止設計におけるエネルギーモデルの有効性について述べた。また、エネルギーモデルのうち、現段階でほぼ確立されている項目と未解決な項目について整理し、予測精度や適用条件まで含めた報告事例が見あたらない「周波数が考慮できる形式の地表面効果のエネルギーモデル」と、現段階では課題とされている「高架裏面反射音のエネルギー予測モデル」の必要性を述べた。

第2章から第4章では、エネルギーモデルを検討するのに必要な基礎検討を行った。

第2章では、音圧合成とエネルギー合成の関連について考察した。

最初に、複数の伝搬経路からの合成音圧の絶対値は、伝搬経路のインパルス応答と信号の自己相関関数で表現できることを示し、エネルギー合成で近似できるのは、個々の伝搬経路に関するインパルス応答の時間差に相当するラグ時間で信号の自己相関係数が0と見なせる場合であることを明らかにした。また各種信号の自己相関係数について整理した。

次に、半自由空間において波動解による音圧レベルの計算値をエネルギー合成で近似できる範囲について検討し、近似できる範囲が直接波と反射波の伝搬時間差 $\Delta t_{12}$ と帯域幅 $\Delta f$ で決まることが分かった。

帯域雑音の自己相関関数を数値計算で近似的に求めるのに必要な計算周波数を検討した。帯域を等間隔で分割する場合には、周波数間隔と自己相関関数を近似できるラグ時間の最大値との間にサンプリング定理を満足する必要がある。ラグ時間の最大値は帯域幅と計算周波数の数（帯域の分割数）で決まることを確認した。サンプリング定理を満足しない場合には本来あり得ないエイリアシング相関が生じるため、計算値に誤差が生じることを示した。また帯域を等比間隔に分割した場合にも、エイリアシング相関が生じるが、エイリアシング相関が生じ始めるラグ時間は等間隔に計算周波数を設定したときよりも短く、その大きさの最大値は等間隔に分割したときほど大きくないことも分かった。道路交通騒音のスペクトルを有する信号について考えると、1/9 オクターブバンド中心周波数で計算すれば、おおよそ $\pm 2\text{dB}$ 以内で、1/27 オクターブバンド中心周波数で計算すれば、おおよそ $\pm 1\text{dB}$ 以内で近似計算できることが分かった。

最後に、従来は有限長面音源からの騒音伝搬はランダム位相の点音源の集合として扱われていた有限長面音源からの騒音伝搬について検討した。通常の面音源は厳密にはランダム位

相の点音源の集合にはならない。もっともランダム性が高い拡散音場を考えても近傍の 2 点間では相関がある。そのため音源近傍では面音源上の相互相関の程度により音圧レベルの距離による変化の傾向が異なること、また長方形の面音源を考えたときに長辺以上距離が離れると距離減衰の傾向はランダムな位相の場合と拡散音場の相関の場合ではほぼ等しくなることを示した。

第 3 章では、干渉性線音源に対する波動解と点音源に対する波動解について、障壁の挿入損失と地表面効果を取り上げ、関連を検討した。エネルギーモデルの妥当性を検討するための基準となる解が必要であるが、境界条件が複雑になってくると数値解析解を用いざるを得ない。しかし、現在のコンピュータの性能面や時間の制約からは 3 次元での数値解析は非現実的であり、どうしても 2 次元での解析になることから、2 次元での波動数値解を 3 次元での波動数値解と見なせる範囲を検討した。

最初に干渉性線音源に対する剛な単障壁の挿入損失について、数値計算により点音源あるいは非干渉性線音源と比較した。既往の研究では干渉性線音源に対する障壁の挿入損失は、観測点の直前の点音源に対する挿入損失とほぼ一致することが報告されている。しかし、回折角が充分大きい場合には点音源に対する挿入損失の方が大きくなり、点音源と干渉性線音源で挿入損失が 1dB 以内の差で一致するのは回折角が  $75^\circ$  以内であることが分かった。さらに、線音源の干渉性／非干渉性が障壁の挿入損失におよぼす影響を検討し、従来の研究と同様、障壁の影の領域では干渉性線音源に比べ非干渉性線音源は障壁の挿入損失が最大で 5dB 小さいことを確認した。また、干渉性線音源の観測点の直前から離れた部分からの音波は干渉により減少し、直前付近の点音源列の寄与が支配的となることが分かった。非干渉性線音源に対する障壁の挿入損失についても線音源をランダム位相の点音源列と考えて検討したが、観測点から有限長の点音源列を見込む角度が等しければ、観測点直前から音源が離れるほど障壁の挿入損失は小さくなることが分かった。これは干渉性線音源とは逆の傾向である。障壁の影の領域において干渉性／非干渉性の違いにより障壁の挿入損失が異なるのは観測点直前から離れた音源部分の寄与の違いによるものであり、また点音源と干渉性線音源に対する挿入損失が比較的良好に一致するのも、干渉性線音源の場合には観測点の直前付近の寄与が大きく、観測点から離れた音源部分については干渉により減衰するためであることが明らかになった。

同様に、地表面上の騒音伝搬における地表面効果についても干渉性線音源と点音源の解析解を比較した。この場合もやはり、干渉性線音源の場合には観測点の直前付近の寄与が大きく、観測点から離れた音源部分については干渉により減衰するため、点音源に対する地表面効果とよく一致することが分かった。

第4章では、指向性点音源に対する障壁の挿入損失のエネルギーモデルについて既存の研究報告をもとに検討した。

2つの無指向性点音源の位相と振幅を調整することにより指向性音源をモデル化し、指向性音源に対する障壁の挿入損失のエネルギー計算モデルとその適用範囲を検討した。

最初に半波長の間隔で設置された2つの無指向性点音源の周囲の音圧分布を計算した。騒音予測における点音源の指向性モデルとして用いられることが多い  $\cos \theta$  の指向性音源であれば2つの点音源の位相と振幅を調整することにより近似できることを示した。また漸近解を用いて2つの点音源による音圧分布を計算し、騒音制御でよく用いられる前川の実験チャートと比較した。その結果、指向性が強くなるほど前川の実験チャートとの差が大きくなり、場合によっては障壁を設置したことにより騒音が増加する場合もあり得ることが分かった。指向性音源に対する障壁の挿入損失のエネルギーモデルを松本の方法を用いて検証した。半波長の間隔で設置された場合であれば松本の方法で障壁エッジでの音圧レベルを考慮することで計算できることを確認した。

次に、無指向性点音源が地表面近傍にある場合を想定し、任意の間隔で設置された2つの無指向性点音源についての障壁の挿入損失を検討した。まず障壁周りの位相分布とアクティビティベクトルの分布を数値解析により求めた。位相分布は障壁の影では地表面位置に関係なく回折点を中心とした円弧状の分布であり、またインテンスティベクトルは地表面と音源の位置関係により増減が見られた。松本のモデルの適用条件である「指向特性が音源からの距離によらず安定していること」および前川の実験チャートの適用条件である「エッジ上部の音圧レベルが無指向性点音源の音圧分布に近いこと」について検討し、音源が地表面から  $\lambda/4$  以内の場合であれば、これらの条件は満足でき、またエッジの音圧レベルを用いてエネルギーモデルで計算可能であることが分かった。

第5章では、本研究の主目的の一つである、周波数が考慮可能な地表面効果のエネルギーモデルを検討した。

最初に、純音に対する均一で平坦な地表面に対する地表面効果のエネルギーモデルを検討した。モデルを導くために、観測点が音源に近い場合と観測点が音源から十分離れている場合について漸近解をエネルギー近似し、近似計算式とその適用範囲の目安を与える基準距離の計算式を導いた。それらを用いて全空間で連続した地表面効果のエネルギー計算モデルを提案し、波動解との比較により妥当性を検証した。エネルギーモデルにより計算値は、干渉により急激なディップが生じる場合と表面波の影響が顕著になる付近をのぞけばほぼ漸近解と一致しており、妥当性が示された。また、精度はやや劣るが簡便な計算モデルも提案した。これらのモデルにおいては、周波数や地表面の特性は地表面の表面インピーダンスの設定式

に含まれ、周波数が考慮可能である。

この結果を踏まえて、帯域雑音に対するエネルギーモデルを提案した。また伝搬経路上に障壁が設置されているときの地表面効果を与えるエネルギーモデルを検討した。障壁が設置された場合の地表面効果を、波動解の近似により音源側地表面の影響と観測点側地表面の影響の和で表した。音源側地表面の影響は音源が地表面からおおよそ $\lambda/4$ 以内の場合には音源とその虚像をあわせて指向性音源として扱える。また観測点が障壁から十分離れると観測点側地表面の影響は障壁のエッジに音源を仮定したときの地表面効果に漸近することを式の展開により明らかにした。それらを総合したエネルギー計算モデルを提案し、波動解との比較によりモデルの妥当性を示した。

最後に、グラスウール上の音圧分布を実験し、グラスウールの表面インピーダンスを用いエネルギーモデルで計算した値と比較した。その結果、計算値に干渉によるディップが生じる付近を除けば、実験値と計算値はほぼ $\pm 3\text{dB}$ 以内の対応を示した。

以上より、従来のエネルギー予測では考慮できなかった地表面効果の計算モデルが提案できた。周波数が考慮できるため各種の音源に適用可能である。

第6章では、従来の道路交通騒音予測では課題とされていた平面道路上に高架道路が併設された道路での高架裏面反射音のエネルギー計算モデルを検討した。

2次元境界要素法で標準的な高架裏面での反射音のレベル分布を計算した結果、定性的にはI桁裏面や箱桁裏面に入射した音波が広い範囲に乱反射している傾向を示し、音源が高架道路中心軸からずれても音源側に大きな反射音が返ってくることが分かった。この結果を踏まえ、高架裏面の反射特性が*Lambert*の余弦則に従う散乱反射面であると仮定し、反射音のエネルギー計算モデル（散乱反射モデル）を提案した。モデルの妥当性を検討するために、境界要素法による数値解析結果と比較したところ、境界要素法の数値解には干渉によるピークやディップが見られるが、散乱反射モデルによる計算結果は広い範囲で境界要素法のおおよその傾向を近似しており、両者の差は5dB以内となることが多かった。また従来、高架裏面反射音の予測に用いられているスリット法による計算値と境界要素法の計算値を比較すると、スリット法が過大となるときで最大10dB、過少となるときで最大20dBの差があり、I桁構造や箱桁構造の場合には高架裏面の反射特性として散乱反射を仮定した計算モデルの方がスリット法よりも妥当であることを示した。

この結果を踏まえ、I桁構造高架裏面を反射特性が*Lambert*の余弦則に従う平坦面と仮定し、境界エネルギー積分法を適用し、高架裏面と地面での多重反射音の予測方法を検討した。計算結果を実際の道路での測定値と比較し、手法の妥当性を検討した。競技用スターターを用いた実験値と比較した結果、境界エネルギー積分法での計算値は測定値に比べ、 $-1\sim+6\text{dB}$

大きく、特に反射角が  $90^\circ$  に近づく場合には差が大きくなる傾向にあった。この原因のひとつとして余弦則の仮定による誤差が考えられる。従来の高架裏面反射音の予測に用いられているスリット法の計算値は測定値に比べ  $0\sim+10\text{dB}$  大きく、散乱反射を考えた境界エネルギー積分法の方が測定値との対応はよかった。

道路交通騒音の  $L_{Aeq}$  の測定値と境界エネルギー積分法による計算値を比較すると、空気吸収を考慮したときには計算値の方が測定値よりも  $1\sim4\text{dB}$  程度大きく、また空気吸収を考慮した方が考慮しない場合よりも  $1\text{dB}$  程度測定値との対応がよかった。

以上、騒音予測において未報告あるいは未解明であった「地表面効果のエネルギーモデル」と「高架裏面反射音のエネルギーモデル」を検討し、適用範囲を含めてモデル式を導いた。騒音予測精度の向上につながるものとする。

### 7. 2 今後の課題

「地表面効果のエネルギーモデル」については異なる地表面が接する場合の地表面効果のエネルギーモデル、および自動車などの実音源に対する地表面効果の実測による検証が今後の課題である。

また、「高架裏面反射音のエネルギーモデル」については、地面での反射も考慮するためにはマトリクス演算を行わなければならない。本来のエネルギーモデルの特徴の一つである「見通しの良さ」からはほど遠い。境界エネルギー積分法をさらに近似したエネルギーモデルが必要となろう。また高架裏面反射音対策として、近年、裏面吸音板の設置工事が実施されているが、非常に高コストの騒音対策であり、裏面吸音板設置の効果を精度よく予測できるエネルギーモデルも必要である。

さらに、今後、波動数値計算が予測計算のひとつの大きな流れとなると考えられる。近い将来を考えると、2次元境界要素法などによる干渉性線音源に対する数値波動解の3次元への適用方法、あるいは数値波動解析のための媒質のインピーダンスなどの音響特性のモデル化も重要な課題である。