

凹曲面音場のための連続波面追跡法

Continuous Wave Tracing for Concave Sound Field

1W130499-9 古澤 苑子 指導教員 及川 靖広 教授

FURUSAWA Sonoko

Prof. OIKAWA Yasuhiro

概要：音線法は、音波を直線に近似して伝搬経路を追跡するシミュレーション手法であり、現在建築分野で主に用いられている。しかしシミュレーション結果が音線の本数、初期放射角、受信エリアの大きさ、という3つの計算条件に依存するため、シミュレーションを行う際には適当な値を検討しなければならない。そこで本研究では、計算条件を懸念する必要のないシミュレーション手法として、音線法を拡張した連続波面追跡法を提案する。連続波面追跡法では、音の波面を音線に近似せず連続関数で一意に表現する。よって音線法でシミュレーション結果に影響を及ぼしていた3つの計算条件について考慮することなくシミュレーションができる。実際にシミュレーションを行ってインパルス応答を求め、結果を音線法と比較した。音線法によるシミュレーション結果が計算条件に依存することが示された一方で、提案手法では一意なインパルス応答を求めることができた。

キーワード：建築音響、凹曲面空間、音響数値シミュレーション、音線法

Keywords: architectural acoustics, concave surfaces, numerical acoustic simulation, ray tracing

1. まえがき

凹曲面を有する空間では、音の集中やフラッタエコーなどの音響障害が起こりやすく、[1,2]、事前の周到的音響シミュレーションによる検討、対策がより重要となる。

その際にはある受信点でのインパルス応答を求めれば畳み込みによって受信点での音場を再現して聞くことができ、設計への直感的なフィードバックとなる [3]。しかし現在、建築分野の音響シミュレーションにおいて広く用いられている音線法 [4] でインパルス応答を求める場合、受信エリアの設定、音線の本数や初期放射角など、計算条件によって音源位置と受信位置が同じであってもシミュレーション結果に差異が生じてしまう [5]。

そこで本研究では、計算条件を懸念せずにインパルス応答を求めることができるシミュレーション手法として、音線法を拡張した連続波面追跡法を提案する。連続波面追跡法では、音の波面を連続関数で一意に表現し、その変遷の追跡を行う。よって音線法でシミュレーション結果に影響を及ぼしていた、音線の本数、初期放射角、受信エリアの大きさについて考慮することなくインパルス応答を求めることができる。

2. 音線法

音線法 [3,4] は、球面波を放射状に放射される有限本数の直線に模擬して、幾何学的に音の伝搬を追跡するシミュレーション手法である。計算負荷の小ささや伝搬経路のわかりやすさのために設計へのフィードバックが容易であり、広く用いられている [4,5]。音を直線として扱うため、インパルス応答を求める際には受信点の代わりに受信球というエリアを設定し、受信球を通過すれば受

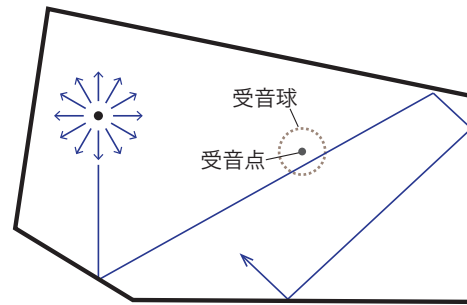


図-1: 音線法の概略図

音点を通るものとみなす。

音線法の計算では各音線を、初期放射角 θ によって定まるベクトルとして扱う。 N 回目の境界上の交点 \mathbf{p}_N は

$$\mathbf{p}_N = \mathbf{p}_0 + \sum_{i=1}^N t_i \mathbf{v}_i \quad (1)$$

と表される。ただし \mathbf{p}_0 は音源位置、 \mathbf{v}_i は i 次反射点に入射する音線の方向ベクトル、 t_i は音線の i 次反射時の伝搬距離である。

音線法を曲面で用いると、その形状や反射点の位置によっては、非常に近接した複数の音線がまったく異なる方向に向かって反射していく場合がある。このような反射を繰り返すうちに音線は誤差の蓄積によってまったく異なる伝搬経路を通ることとなり、受信球を通過するかどうか、すなわちインパルス応答の算出結果に影響をおよぼしうる。

3. 提案手法

本研究では、2 節で述べた、曲面の平面近似をせずと

も計算可能な条件を満たす曲面形状を取り扱う。提案手法によって、インパルス応答の算出結果が計算条件に依存するという課題を解消する。

音線法では球面波を有限本数の音線に分割し、各音線の放射角度 θ についての音線軌道を追跡していた。これに対して、本研究で提案する連続波面追跡法では、 θ の連続関数で表現される反射音の波面や壁面上の反射点の位置の変遷を追跡する。つまり、音線法ではある音線放射角度について一つずつ方向ベクトルや反射点の値を計算し境界上の反射点を追跡していたが、提案手法ではこれをすべて θ の関数として計算する。 N 回目の境界上の交点 $\mathbf{q}_N(\theta) = (q_{Nx}(\theta), q_{Ny}(\theta))$ は

$$\mathbf{q}_N(\theta) = \mathbf{p}_0 + \sum_{i=1}^N \tau_i(\theta) \boldsymbol{\nu}_i(\theta) \quad (2)$$

と表せて、波面の反射やその位置を θ の連続関数の足し合わせで表現できる。音線の初期放射角や本数に依存しない一意な波面を取り扱うことができるので、計算条件を懸念することなくインパルス応答を求めることができる。

4. シミュレーション結果

単純な曲面音場の例として、楕円形状の室空間において提案手法を用いたシミュレーションを行い、音線法との比較を行った。

長軸半径 5 m、短軸半径 2.5 m の楕円形状空間について、壁面の吸音率 0.2 の空間を想定して反射回数 30 回の音響シミュレーションを行った。連続波面追跡法と音線法とを用いて、それぞれインパルス応答を求めた結果を図-2 に示す。ただし音源位置は、(1, 0.5)、受音点位置は (-2, -1)、音線法に用いる音線の本数は 500 本とした。音線法によるシミュレーションでは、計算条件がインパルス応答の計算結果に及ぼす影響を確認するため、初期放射角や受音球の大きさを変えてそれぞれのインパルス応答を求めた。

音線法では、計算条件が異なる 3 通りのシミュレーション結果にピークの位置や受音球を通った音線の本数に違いが見られ、計算条件がシミュレーション結果に影響することが示唆されている。一方連続波面追跡法では連続関数によって一意な波面を取り扱うので、結果が一通りに定まり、計算条件を懸念する必要はない。

5. むすび

凹曲面音場でのシミュレーション手法として、音波面の遷移の追跡を連続関数で表現する連続波面追跡法を提案した。音線法の、境界上の反射点の移動のみを追跡する計算方法を応用することで、音の波面そのものの遷移を計算することができた。また、波面の表現に連続関数を用いたことによって、受音球の概念を用いずにインパ

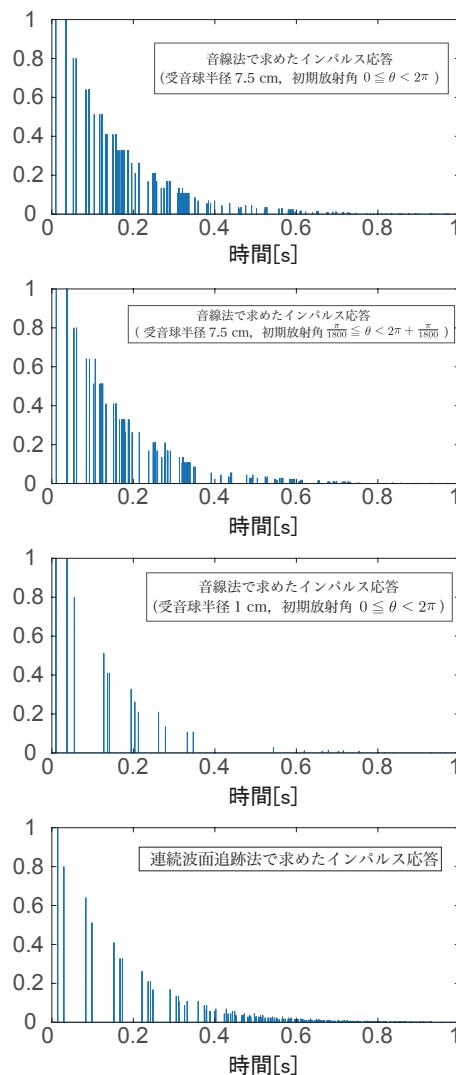


図-2: インパルス応答の算出結果

ルス応答を得ることができた。音線法の実用性の高さを保ちつつ計算条件に依存しないシミュレーション結果を得られるので、凹曲面空間でのシミュレーションにより適した手法となることが期待される。

今後は音の減衰や周波数の帯域等の条件を反映し、より精度の高いインパルス応答を取得できるようにしたい。また、実際に室内で、あるいは模型を用いてインパルス応答の計測を行い、提案手法による算出との比較検討をおこなうことも課題である。

参考文献

- [1] 小口恵司, “凹曲面と音響設計,” 音響技術, vol.41, no.1, pp.6–9, Mar. 2012.
- [2] 橘秀樹, “凹曲面による音響現象,” 音響技術, vol.41, no.1, pp.1–5, Mar. 2012.
- [3] A. Krokstad, S. Strom, S. Srsdal, “Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique,” J. Sound Vib., vol.8, no.1, pp.118–125, Jul. 1968.
- [4] 日本建築学会, はじめての音響数値シミュレーション プログラミングガイド, コロナ社, 東京, 2012.
- [5] H. Lehnert, “Systematic errors of the ray-tracing algorithm,” Appl. Acoust., vol.38, pp.207–221, 1993.