

時間領域差分法を用いた音源形状のモデル化による 指向性の再現*

鈴木 淑正 (上智大), 中島 弘史 (HRI-JP), 荒井 隆行 (上智大)
中臺 一博, 長谷川 雄二 (HRI-JP)

1 はじめに

近年、コンピュータの性能向上によって、波動音響理論に基づいた数値シミュレーションが実用的な時間で利用可能となってきた。音響処理に欠かせない情報である音響伝達関数をシミュレーションにより算出することは、コストの点でメリットが大きい。しかし実際問題として、自由音場で精度の良い計算が可能であっても、実環境のシミュレーションによって得られる音響伝達関数は実測で得られるものと一致しない。原因として吸音率、反射、音源の指向性などの実環境要素が挙げられる。そこで我々は、時間的に初期的な問題である音源の指向性について着目した。音源の指向性が音響特性に及ぼす影響は先行研究より提起されている [1]。

通常のシミュレーションでは音源は点音源であり、指向性を持たない。シミュレーションにおける指向性の再現にはいくつか方法があるが [2]、多くの場合、先に対象とする音源の指向性を知る必要があり実用性に欠ける。そこで比較的シンプルな手法である音源形状のモデル化を行い、指向性の再現を試み、その精度を検証した。本研究ではスピーカの水平面 1 m 周りにおける指向性の再現を対象とした。実用的なメモリ、計算時間の範囲で、音源定位に必要な 1000 Hz 以下、5 % (0.42 dB) 以下の誤差を目標の精度とした。

以降、2章で使用したシミュレータについて説明する。3章で計算領域設定について説明する。4章で音源のモデル化によるスピーカの指向性の再現を行う。

2 使用したシミュレータ

音響シミュレーションには幾何的手法と波動的手法がある。幾何的手法は音を線として捉える音線法を用いた手法で、音の波動性を考慮していないため、位相干渉、回折、固有モードといった現象を正確に再現できない。これに対し、波動的手法は波動音響理論に基づいたアルゴリズムを持つため、理論的には波動の性質を正確に再現することができる。波動的手法には、代表的なものとして有限要素法、境界要素法、

時間領域差分法がある。本研究では、物性値、空間の再現性能、計算メモリと計算量の点でバランスが良いと考えられる時間領域差分法 [3] を用いた波動音響数値計算ソフト COMFIDA ver.2.03 (日東紡音響エンジニアリング) を利用した。空間を格子状に分割して計算する時間領域差分法は、精度を高めるために空間格子間隔を小さくする必要があるが、本ソフトにおいては、コンパクト差分法を適用することにより、比較的大きな空間格子間隔でも高精度なシミュレーションが可能である [4]。

3 計算領域設定

今研究で行う計算の領域設定について説明する。シミュレータの主なパラメータとして空間格子間隔と格子数、計算時間ステップ間隔と計算時間ステップ数がある。安定した計算のためには、満たすべき条件については、参考文献 [5, 6] を参考にされたい。決定された各パラメータを Table 1 にまとめた。

計算境界は PML (Perfect Matched Layer) 境界吸収条件とした。PML 境界吸収条件とは、境界に達した波が反射しないように完全整合層を付加するものである [7]。

音源には TSP (Time Stretched Pulse) を用いた。TSP は時間的に引き伸ばした正弦波 (スイープ信号) であり、TSP 応答に時間反転 TSP 信号を畳み込むことで引き伸ばされた信号からインパルス応答を求めることができる。TSP は円状畳み込みを行うため連続して 2 回生成した。本シミュレータへの TSP の適用については参考文献 [8] を参照されたい。

Table 1 Parameter setting for simulation

Space	Grid interval	0.02 [m]
	Number of grids	140 × 140 × 40
	Boundary condition	PML
Time	Time step interval	1/48000 [sec]
	Number of time steps	32768
Source	Waveform	TSP
	Bandwidth	100 ~ 1000 [Hz]

*The Acoustic Simulation of Directivity by Modeling the Shape of a Sound Source with a Finite Difference Method in Time Domain. by SUZUKI, Toshimasa (Sophia University), NAKAJIMA, Hirofumi (HRI-JP), ARAI, Takayuki (Sophia University), NAKADAI, Kazuhiro, HASEGAWA, Yûji (HRI-JP)

4 指向性再現における課題と対策

4.1 課題：伝播方向に依存する計算誤差

時間領域差分法において、計算精度に影響を与える要因として数値分散がある。数値分散とは波長 (λ) に対する空間格子間隔 (ΔL) の比率により計算上での伝播速度が変わる現象である。 $\lambda/\Delta L$ の値が低いほど計算精度は悪化し、その計算誤差は伝播するほど大きくなる [6]。例として、格子 50 個だけ離れた点における数値分散が及ぼす影響を時間波形により確認する。Fig. 1 に $\lambda/\Delta L$ が 4.25, 2.13 の場合の音源波形と、離れた点での応答波形を示す。 $\lambda/\Delta L$ が 2.13 の場合、応答波形に伝播の遅れが見られることが確認できる。

この数値分散の影響が、空間を格子状に分割する時間領域差分法においては、音の伝播する方向によって異なり、これが指向性の精度に影響を与える課題となる。例として、Fig. 2 に $\lambda/\Delta L = 5.67, 3.40$ の時の瞬時音圧分布を示す。音源はガウシアン波形を用いた。点音源の伝播は同心円状であるべきだが、 $\lambda/\Delta L$ が小さくなるにつれて同心円状の波の形が崩れて円というよりは四角形に近く、シミュレーションの精度が低下していることが分かる。

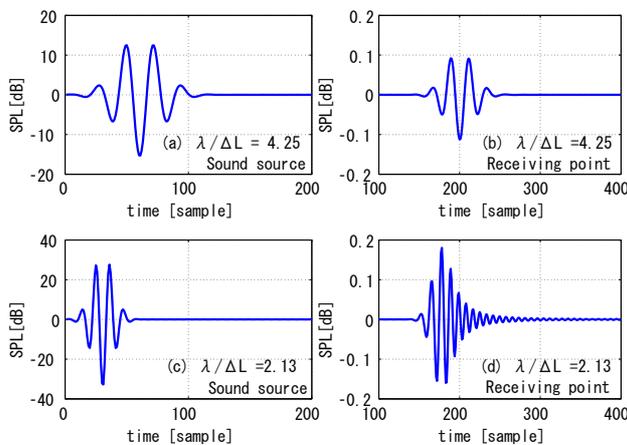


Fig. 1 Waveform representing numerical dispersion

4.2 対策：点音源の指向性に対する精度検証

伝播方向による数値分散の影響の差を検証する。点音源の周り 15 度おきに一周 (計 24 点) の観測点を用意し、指向特性を解析した。結果として、1000 Hz ($\lambda/\Delta L=17$) における指向特性を Fig. 3 示す。本来フラットであるべき指向特性に誤差が生じていることが確認できる。しかし、この誤差は 0.05 dB (0.5 %) 以下であり、今回のパラメータでは、伝播方向に依存する計算誤差は微小である。

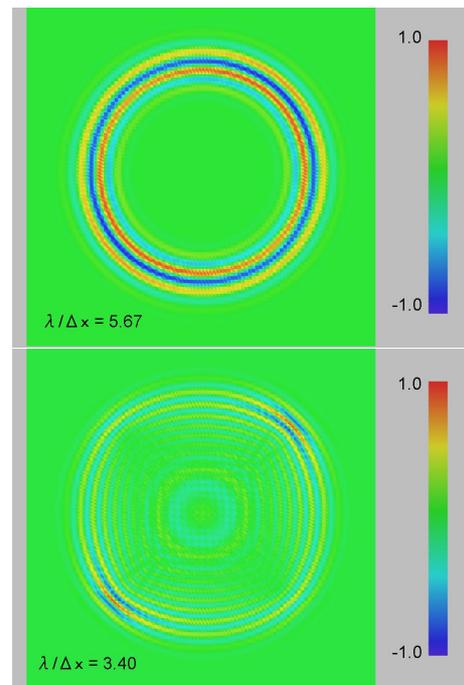


Fig. 2 Sound pressure distribution originated from a point source

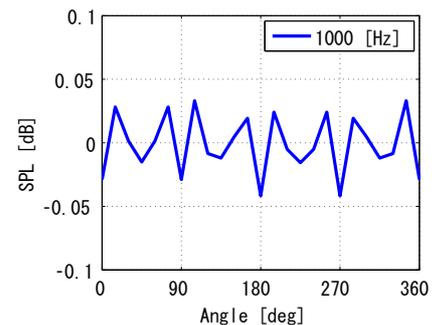


Fig. 3 Directivity patterns at a free acoustic field

5 スピーカの指向性再現

音源形状のモデル化によるスピーカ指向性の再現を行った。最初の実測データの収録状況を説明する。次に今回提案したモデルを説明し、最後に、モデルと実測の比較・検証を行う。

5.1 実測データの収録条件

対象とする実環境の測定データについて説明する。測定は無響室で行った。スピーカは GENELEC 1029A (Fig. 4) を用いた。スピーカ振動板の中心から 1 m 離れた正面にマイクロホンを設置し、時計周りに水平面上で 15°ずつスピーカを回転させ、計 24 点でインパルス応答の測定した。スピーカの仕様は Table 2 にまとめた。音源には TSP を用いた。長さ 16384、サンプリング周波数 48000 Hz の TSP を 3 回出力し、同期加算してインパルス応答を求めた。



Fig. 4 GENELEC 1029A

Table 2 Loudspeaker specification

Size	0.15 × 0.25 × 0.19 [m]
Bandwidth	70 ~ 18000 [Hz]
Crossover frequency	3300 [Hz]

5.2 音源のモデル化

対象のスピーカに近い形をした剛壁の立方体に対し、振動板に対応する面に円柱形状の窪みを作った形状をモデルとし (Fig. 5)、これを点音源に付加することで、指向性音源の再現を試みた。Fig. 6 に示す様に立方体の横幅、奥行きを x 、 y 、窪み部分の円柱の奥行き、直径を h 、 d とした。スピーカの構造、吸音率、平面振動などは無視した簡単なモデルとし、 $[x,y,h,d]$ をパラメータとして、概形を変化させシミュレーションを行った。なお、今回は水平面のみを対象とするため、スピーカの高さは 0.24 m に統一した。具体的なパラメータを Table 3 に示す。Fig. 7 に計算領域の簡易図を示す。中央にモデルを配置し、周りに観測点を並べた。観測点はスピーカ正面方向を 0° 点とした。

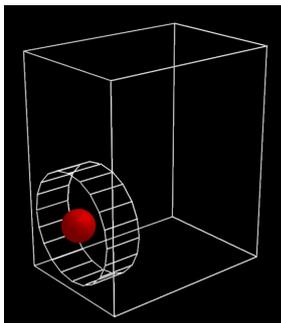


Fig. 5 Loudspeaker model

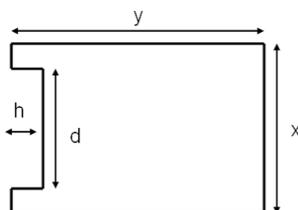


Fig. 6 Speakermodel at Horizontal View

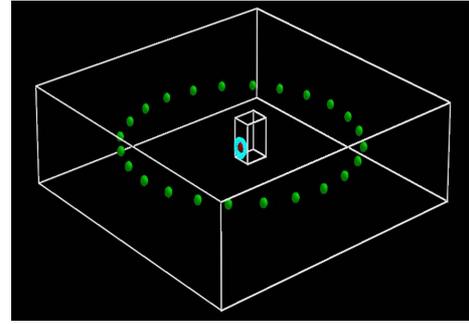


Fig. 7 Simulation field

Table 3 Palameter of models

Size	x, y, h, d [m]
Model 1	0.14, 0.20, 0.02, 0.12
Model 2	0.14, 0.20, 0.04, 0.12
Model 3	0.14, 0.20, 0.04, 0.08
Model 4	0.14, 0.20, 0.02, 0.08
Model 5	0.18, 0.20, 0.02, 0.12
Model 6	0.14, 0.24, 0.02, 0.12
Model 7	0.22, 0.10, 0.02, 0.12

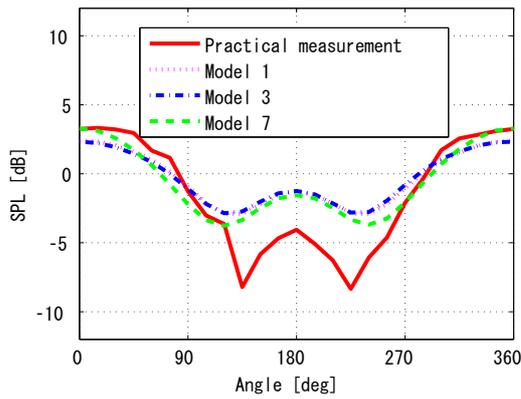
5.3 結果

本稿では、Table 3 に載せたモデルのうち、代表的な Model 1,3,7 について説明する。Model 1 は計算境界を考慮したとき、対象のスピーカに最も近い形状である。比較のため、Model 3、7 はそれぞれ円柱の形状、立方体の形状を対象のスピーカから離れた大きさとした。

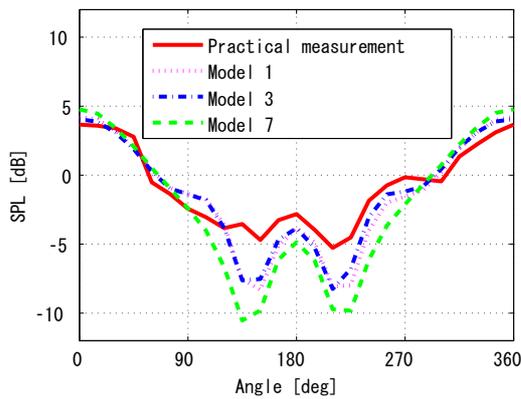
まず、実測と各モデルでのシミュレーションによって得られる 500, 1000 Hz の指向特性を Fig. 8 に示す。各モデルで、実測に近い指向特性が再現されていることが分かる。さらに厳密に解析するため、実測とシミュレーションの誤差の平均を取った。また、モデルの有効性を検証するため、従来法となる点音源のみの場合の実測との誤差も解析した。Fig. 9 に周波数別の全観測点における誤差平均、Fig. 10 に観測点別の全周波数における誤差平均を示す。

Fig. 9, 10 より、誤差平均は目標誤差 5% (0.42 dB) には到達していないが、点音源の場合と比べて音源のモデル化により、スピーカの指向性の再現精度が高まっていることが分かる。また Fig. 10 より、スピーカの正面方向において比較的精度が高いことが分かる。

各モデルで比較すると、モデルの概形を大きく変えた Model 7 における結果が他のモデルに比べると精度が下がり、また、Fig. 9 より固有モードの影響も見られる。Model 1 と 3 の間では、大きな差は得られなかった。つまり、モデルの窪み部分の寸法を少し変えたところで、結果に大きな差は生じなかった。その他のモデルにおいても、同様な結果が得られた。



(a) 500 [Hz]



(b) 1000 Hz

Fig. 8 Directivity patterns

6 まとめと今後の課題

本研究では音源の形状をモデル化することで指向性の再現を試み、その精度を検証した。結果として、目標とする精度は得られなかったが、従来法である点音源の場合と比較すると、精度は向上していることが示された。また、モデルは実際のスピーカの概形に近い方が精度が良くなるが、細かい部分の差は精度に影響を与えないことが明らかになった。

モデル化を厳密にするためには空間格子間隔を小さくする必要があるが、計算時間やメモリが増えてしまうため、実用性を失う。また、波動の性質から考えても波長に対して小さい領域での変化は波動の伝播に対して大きな影響を与えないと考えられる。

よって音源形状の簡単なモデル化を行うことで指向性を再現することは可能であるが、更に精度を上げるためには、他の要素を考える方が適切であり、今後の課題である。その例としてスピーカの吸音率があり、スピーカ自体を伝播する波動を考慮することにより、背面方向における指向特性の精度向上が期待できる。

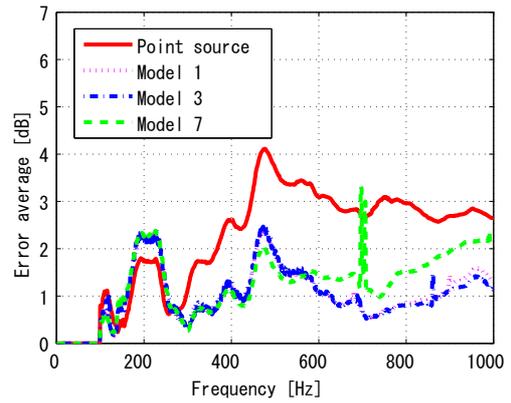


Fig. 9 Error average versus frequency

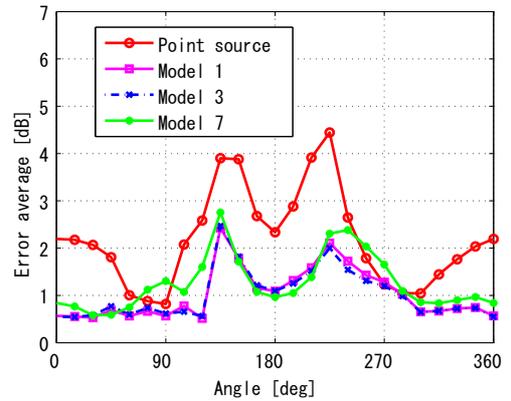


Fig. 10 Error average versus angle

謝辞 本研究を進めるにあたり、波動音響シミュレーションに関してご助言を頂いた日東紡音響エンジニアリングの鶴秀生博士と、波動数値解析に関してご助言を頂いた上智大学の大概東巳教授に感謝致します。

参考文献

- [1] 西山恭平, 黒本荘一郎, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 2, 環境系, pp.105-108, 2006.
- [2] J. Escolano, J. Acoust. Soc. Am. Volume 121, Issue 6, pp.256-262, 2007.
- [3] 工藤祥典 他, 電子情報通信学会論文誌, J84-A(6), pp.736-744, 2001.
- [4] S. K. Lele, J. Comput. Phys. 103, pp.16-42, 1992.
- [5] 鈴木淑正 他, 電子情報通信学会技術研究報告, 109(100), pp.109-114, 2009.
- [6] 鶴秀生, 岩津玲磨, 電子情報通信学会技術研究報告, 107(469), pp.13-18, 2008.
- [7] J. Berenger, J. Comput. Phys. 114, pp.185-200, 1994.
- [8] 鶴秀生, 岩津玲磨, 日本音響学会 (春季) 講演論文集 1-3-7, 2009.