

TLM法を用いた波面合成法の応用

日大生産工(院) ○ 関根 晃太 日大生産工 山崎 憲

1. はじめに

近年、サラウンドシステムやバイノーラルシステムなどの立体音響のシステムが普及し始めている。一方でこれらのシステムの欠点である受聴者の位置や向きの移動によって目的の立体音響が得られないという問題はいまだ解決されていない。

そこで、受聴者の位置や向きの移動を考慮した立体音響の方法として波面合成法がある。この方法は、キルヒホッフ積分定理に基づき原音と同一の音圧場を再現することによって立体音響を実現するシステムである。現在、再現するスピーカの入力として実際に録音した音源を用いる場合と音の線形性を用いたシミュレーションによる予測した音源が用いられる。しかし、録音は手間がかかり、音の線形性を用いたシミュレーションは境界条件が自由空間の場合にのみ用いられる。

筆者らは以前に波面合成法を解析するために、波動方程式の近似解を得る手法の一つである3次元TLM法を用いた時間領域シミュレーションを作成した¹⁾。

そこで本研究では、3次元TLM法を用いた波面合成法のシミュレーションを用いて、再現するスピーカの入力を予測し、その予測した音源を用いて実験とシミュレーションから波面が合成されていることを確認する。

2. 原理

2.1 TLM法の原理²⁾

TLM法とは、ホイヘンスの原理に基づいた

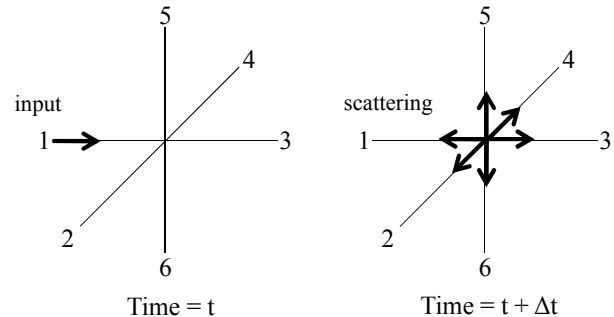


Fig.1 TLM method

波動伝搬のメカニズムを時空間について離散化して、コンピュータ上で波動伝搬を追跡する時間領域シミュレーションの方法である。

これを定量的に行うために波動の伝搬を電気回路における回路素子に置き換え、線路の伝達を考える手法である。Fig.1にTLM法におけるインパルス起振とインパルス起振による散乱の様子を示す。

音波に用いる場合は、音圧を電圧と考え、粒子速度を電流と考える。よって、電圧もしくは電流のどちら一方が求まれば、残りの一つが同一時間上で求まる。同一時間上において音圧と粒子速度が求まるということが、FDTD法との違いの一つであるといえる。

2.2 波面合成法³⁾

波面合成法はキルヒホッフ積分定理に基づき音場を制御する方法である。キルヒホッフ積分公式は以下のように示されている。

$$P_p = \oint \left[P_s \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial P_s}{\partial n} \right] dS \cdots (1)$$

但し G はグリーン関数であり、点音源を示す。

$$G(S, P) = -\frac{\exp(ik|r_s - r_p|)}{4\pi|r_s - r_p|} \cdot \cdot \cdot (2)$$

ここで、 $\partial P/\partial n$ は任意の閉曲面 S 上にある微小面積 dS の法線ベクトルで n 方向の粒子速度にあたる。

(1)式より任意の閉曲面 S 上の音圧と微小面積 dS の n 方向の法線ベクトルの粒子速度を制御することによって、閉曲面内の音を制御できること意味している。

2.3 現実問題への適応³⁾

Fig.2 に波面合成法の概略図を示す。現実問題として、任意の閉曲面 S をスピーカと置き換えることによって実現可能である。そこで、(1)式に $G=0$ の境界条件を与えることにより平面における波面合成法として第2種レイリー積分となる。

$$P_p = \frac{1}{2\pi} \int P_s \frac{\partial}{\partial Z_s} \left[\frac{\exp(ik|r_p - r_n|)}{|r_p - r_s|} \right] dS \cdot \cdot \cdot (3)$$

(3)式より、1つの面の音圧から他方の音の関係を示す。すなわち、1つの平面の音圧を制御できれば、その後の音圧を制御することができる。さらに(3)式を離散化すると以下のようなになる。

$$P_p = \frac{1}{2\pi} \sum P_s \frac{\partial}{\partial Z_s} \left[\frac{\exp(ik|r_p - r_n|)}{|r_p - r_s|} \right] \Delta x \Delta y \cdot \cdot \cdot (4)$$

ここで、 Δx と Δy はそれぞれ x 方向と y 方向のスピーカの間隔を示している。

スピーカの間隔の条件は標本化定理より、

$$\Delta x \leq \frac{v}{2f_{mq}} = \frac{\lambda}{2} \cdot \cdot \cdot (5)$$

となる。(5)式からスピーカの間隔は音源の波長の半分よりも小さくしなければ、エイリアシングが発生し波面合成がされない。

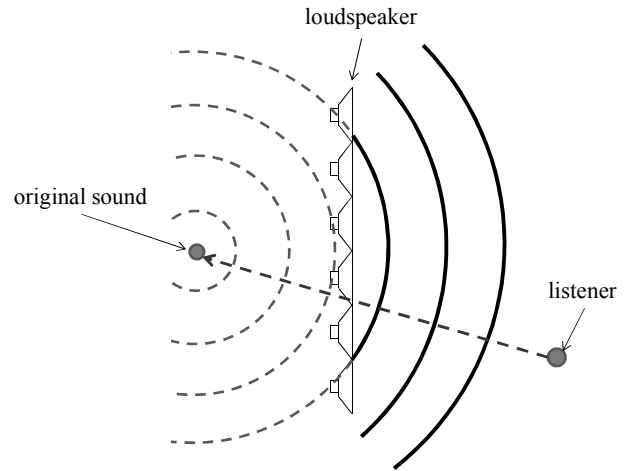


Fig.2 Sound wave synthesis

3. シミュレーション及び実験の方法

3.1 シミュレーション及び実験手順

Fig.3 にシミュレーション及び実験手順を示す。まず、原音場のシミュレーションに原音とマイクロホンを設置し、それぞれマイクロホンに入力される音圧の時間波形から音圧比、位相差の情報を得る。そして、その音圧比、位相差の情報を実際のスピーカアレイの入力として設定し、実験を行う。また、実験と同一の条件のシミュレーションを作成し、シミュレーションを行う。

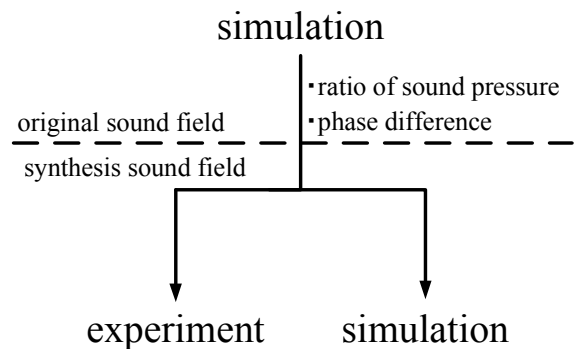


Fig.3 Procedure of simulation and experiment

3.2 シミュレーション及び実験条件

Fig.4 にシミュレーション及び実験条件(1)の図を示す。図のように原音を録音し、音圧比と位相差を求めるシミュレーションとして、原音場シミュレーションを領域 98 [cm]、174 [cm]、200 [cm]で作成する。この原音場シミュ

レーションに原音を 49 [cm]、57 [cm]、100 [cm]のところに配置し、1 [kHz]の音を放射する。原音が放射した音を位置 0~98 [cm]の 14 [cm] 間隔、117 [cm]、100 [cm]にある計 8 個のマイクロホンによって録音する。この録音したデータから音圧比と位相差を求める。

次に、実験条件として領域 98 [cm]、174 [cm]、200 [cm]の無響室を用いる。音源として、位置 0~98 [cm]の 14 [cm] 間隔、20 [cm]、100 [cm]にドライバーユニットを配置する。それぞれドライバーユニット(uni-pex 社製、P-300)の入力としてシミュレーションで求めた音圧比と位相差を用いる。ドライバーユニットへの入力 は PXI-4461 (National Instruments 社製、サンプリング周波数 204.8 [kHz])を用いる。ドライバーユニットから前方に 10 [cm] 離れたところから縦横共に 2 [cm] ずつ操作し、マイクロホン(Brüel & Kjær 社製、1/4 マイクロホン、type-4135) から PXI-4461 を用いて PC に入力し、IIR フィルタ(バンドパスフィルタ、次数 2、カットオフ周波数低域 800 [Hz]、高域 1300 [Hz])を通して音圧の時間波形を測定する。この際、PXI-4461 による入出力は 1 [μs] 以下の時間で同期を行っている。また、実験条件と同じ領域、音源の配置、音源の入力を行ったシミュレーションを作成し、実験とシミュレーションの整合性を図る。

Fig.5 にシミュレーション及び実験条件(2)の図を示す。原音場シミュレーションの領域及び実験の環境についてはシミュレーション及び実験条件(1)と同一である。相違点として、原音場シミュレーションの原音とマイクロホンの間である位置 0~49 [cm]、85~89 [cm]、0~200 [cm] に無反射境界条件の壁面を設置し、このときに放射される音をマイクロホンによって録音し、データから音圧比と位相差を求める。なお、シミュレーションは東京大学のスーパーコンピュータ HA8000 を用いる。

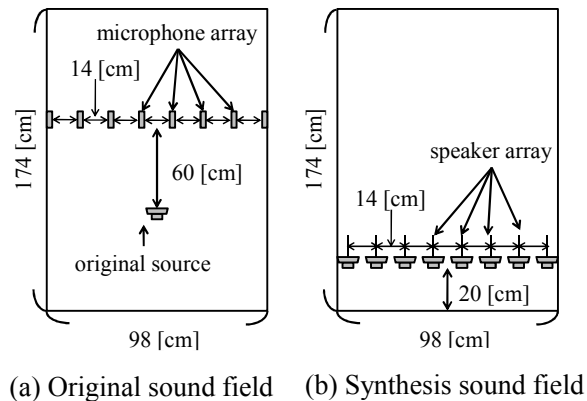


Fig.4 Condition of simulation and experiment (1)

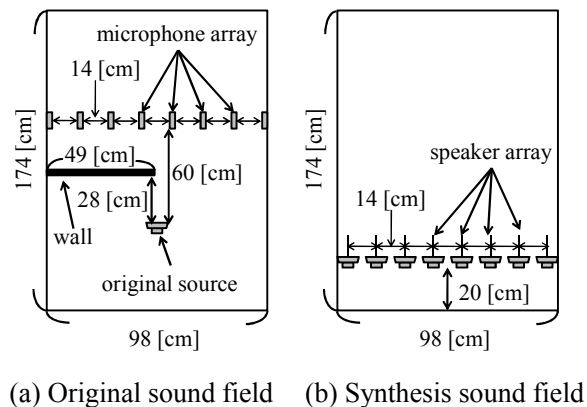


Fig.5 Condition of simulation and experiment (2)

4. 結果

4.1 シミュレーション及び実験条件(1)の場合

Fig.6 にシミュレーション及び実験条件(1)の場合の結果を示す。図の(a)は理想状態を示し、(b)は実験による結果を示し、(c)は実験と同一の環境におけるシミュレーションの結果を示す。(a)の理想状態と(b)、(c)をそれぞれ比較すると、やや誤差が認められるが波面が進むごとに波面が合成され、ほぼ同一の波面が描けていることが見てとれる。また、同一環境における結果である(b)実験と(c)シミュレーションを比較すると(b)実験に対し(c)シミュレーションは、ほぼ同一の波面が描けていることがわかる。

4.2 シミュレーション及び実験条件(2)の場合

Fig.7 にシミュレーション及び実験条件(2)

の場合の結果を示す。図の(a)は理想状態を示し、(b)は実験による結果を示し、(c)は実験と同一の環境におけるシミュレーションの結果を示す。(a)の理想状態と(b)、(c)をそれぞれ比較すると、やや誤差が認められるが波面が進むごとに波面が合成され、ほぼ同一の波面が描けていることが見てとれる。また、同一環境における結果である(b)実験と(c)シミュレーションを比較すると(b)実験に対し(c)シミュレーションは、ほぼ同一の波面が描けていることがわかる。

5. まとめ

研究では、3次元 TLM 法を用いた波面合成法のシミュレーションを用いて、自由空間の場合と壁面がある場合の再現するスピーカの入力を予測し、その予測した音源を用いて実験とシミュレーションから波面が合成されていることを確認した。

その結果、自由空間の場合と壁面がある場合のどちらも理想状態と実験結果が似ていることが見てとれた。このことから、自由空間の場合と壁面がある場合においても再現するスピーカの入力を TLM 法シミュレーションで予測し、実際にスピーカにより出力することにより波面合成される可能性が示された。

また、実験結果と実験と同一の条件のシミュレーションを比較しても波面が似ていることが見てとれた。このことから、実験により波面合成されているかを解析するよりも実験と同一の条件のシミュレーションを行うことにより時間短縮や機器等の設備のコストを削減できること示された。

今後の課題としては、複数の音源や音源の周波数、壁面の形状等を変化させた場合の検討がさらに必要だと考えられる。また、さらに合成場を理想状態に近づける必要があると考えられる。

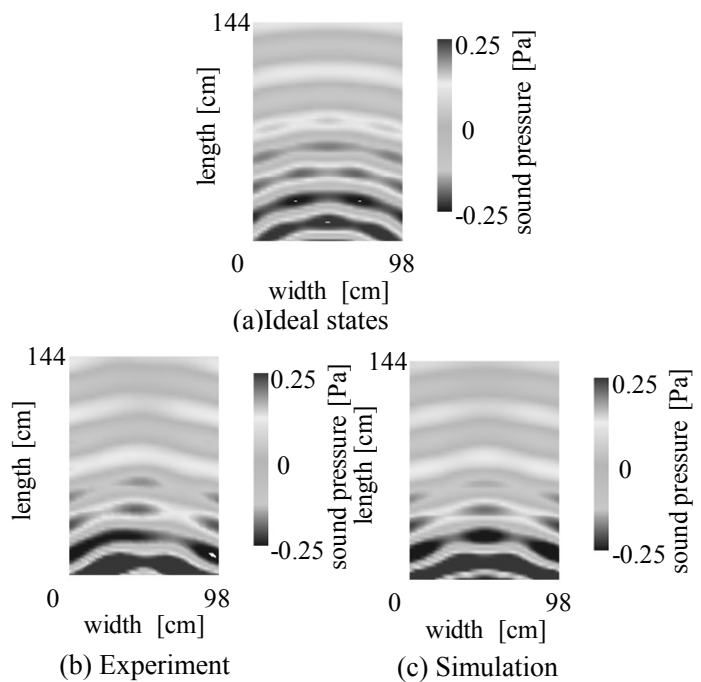


Fig.6 Result of simulation and experiment (wall none)

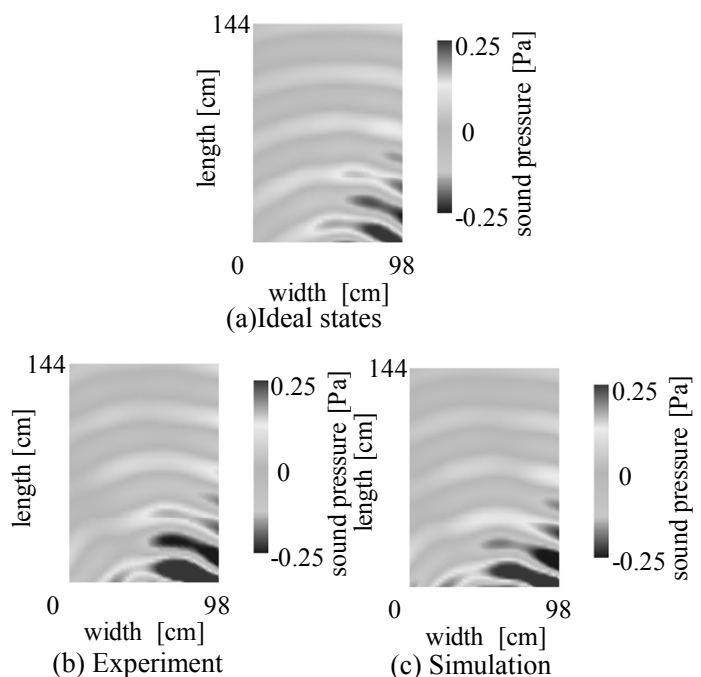


Fig.7 Result of simulation and experiment (wall)

<参考文献>

- 1) 関根晃太,山崎憲“3次元 TLM 法を用いた波面合成法の解析”
日本音響学会秋季講演発表会論文集, (2010), pp28
- 2) C.クリストポリス, 訳 加川 幸雄 “TLM 伝達線路行列法入門” 培風館, (1999),pp.166-168
- 3) A.J.Berkhout, D. de Vries and P.Vogel, “Acoustic control by wave field synthesis”, Journal of Acoustical Society of America, Vol93, No.5, (1993),pp.2764-2778