

TLM法を用いた波面合成法の検討

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、原音再生の考え方から三次元音響の開発が重要視されている。現在ある3次元音響システムは主に3種類に分けられる。

- (1) ステレオ音響
- (2) バイノーラル法
- (3) 波面合成法

(1)ステレオ音響は、現在普及している5.1chや7.1chといったシステムであるが、反響音を人工的に作り出すことにより臨場感を出すシステムである。しかし、一方で音像がスピーカの位置に依存してしまうという欠点がある。

(2)バイノーラル法は、両耳の入口における信号を再合成する方法である。この方法は、ヘッドホンやイヤホンに使用が制限される。また、頭部の形状には個人差があるといった欠点がある。

(3)波面合成法はキルヒホッフ積分方程式に基づき空間を制御する方法である。この方法は、スピーカの個数が多くなるという欠点があり、また物理的にも解明されていない¹⁾。

そこで本研究では、空間的に音場を制御可能な波面合成法に着目し、立体音響システムの検討として、TLM法を用いたコンピュータシミュレーションを開発し、波面合成法への適応を検討する。

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波動伝搬のメカニズムを時空間について離散

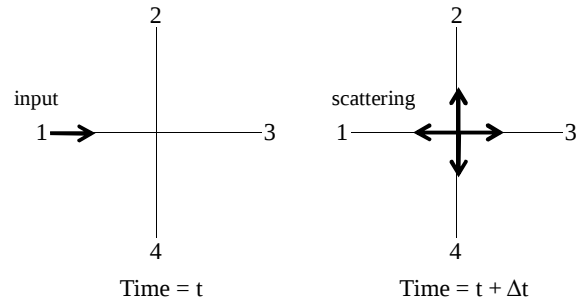


Fig.1 TLM method

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。

$$P_p = \frac{1}{4\pi} \oint \left[P_s \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial P_s}{\partial n} \right] dS \cdots (1)$$

但し G はグリーン関数であり、点音源を示す。

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

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を意味している。

Fig.2 に波面合成法の概略図を示す。

2.3 現実問題への適応³⁾

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、平面における波面合成法として第 2 種レイリー積分より以下の式になる。

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

(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。

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

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、

$$\Delta x \leq \frac{v}{2f_{nyq}} = \frac{\lambda}{2} \quad \dots (5)$$

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。

2.4 TLM 法による波面合成法シミュレーションの原理

原音場と合成音場の領域を二つ作成し、使用するスピーカの個数分を原音領域にマイク

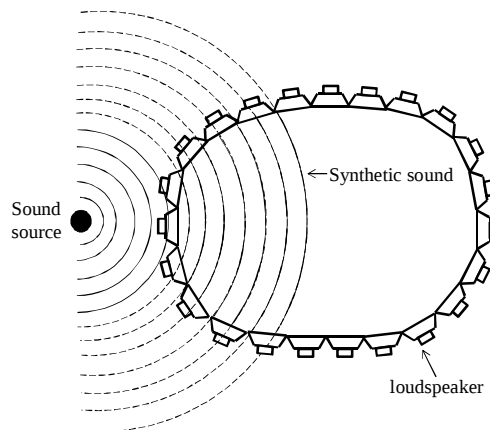


Fig.2 Sound wave synthesis

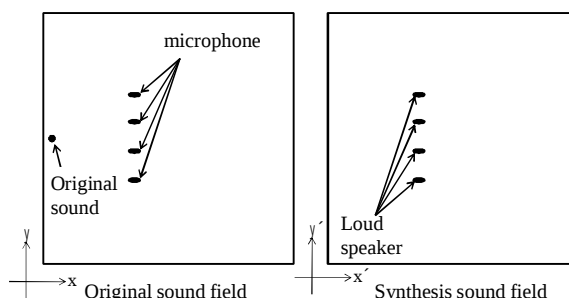


Fig.3 The example of simulation

ロホンとして配置する。原音場で任意の周波数の正弦波を任意の場所に入力し、マイクロホンによって音圧の時間変化を測定し、データとして保存する。さらに、合成場に原音場のマイクロホンの配置と同じ配置でスピーカを設置する。配置したスピーカに原音場で保存した音圧の時間変化をそれぞれスピーカの入力とする。これにより、(4)式を満たし波面合成されると考えられる。

3. シミュレーションの条件

Fig.3 にシミュレーションの状況の例を示す。図に示すように原音場の座標(x cm, y cm)とし、合成場の座標を(x' cm, y' cm)とする。また、それぞれの領域の広さを(x, y)=(x', y')=(300,300)とし、原音場にマイクロホン、合成場にスピーカを(x, y)=(x', y')=(60,0) ~ (60,300)で間隔 15 cm おきに合計 21 個配置する。本研究では、以下の 3 つに関して検討する。

3.1 TLM 法における波面合成の有無の検討

音源は半波長が 17 cm である 1 kHz とし、 $(x,y)=(10,50)$ 、 $(30,150)$ 、 $(50,250)$ と 3 つの位置に配置した場合についての音圧を検討する。

3.2 エイリアシングにおける影響の検討

音源は半波長が約 11 cm である 1.5 kHz とし、 $(x,y)=(10,50)$ 、 $(30,150)$ 、 $(50,250)$ と 3 つの位置に配置した場合についての音圧を検討する。

3.3 音響インテンシティの検討

音源は半波長が 17 cm である 1 kHz と波長が約 11 cm である 1.5 kHz とし、 $(x,y)=(30,150)$ の位置に配置した場合についてそれぞれの音響インテンシティの方向について検討する。

4. シミュレーション結果

4.1 $\lambda/2 > \Delta x$ の場合

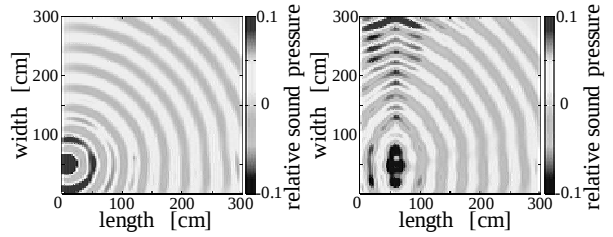
Fig.4、5、6 にそれぞれ音源の位置が $(x,y)=(10,50)$ 、 $(30,150)$ 、 $(50,250)$ 、周波数 1 kHz の場合における(a)原音場と(b)合成場の音圧場を示す。それぞれ(a)原音場と(b)合成場を比較すると合成場において、スピーカの前方には原音場の波面と同一と思われる波面が見られる。これは(4)式の第 2 種レイリー積分の意味合いと一致することから波面合成されている可能性が示される。

4.2 $\lambda/2 < \Delta x$ の場合

Fig.7、8、9 にそれぞれ音源の位置が $(x,y)=(10,50)$ 、 $(30,150)$ 、 $(50,250)$ 、周波数 1.5 kHz の場合における(a)原音場と(b)合成場の音圧場を示す。それぞれ(a)原音場と(b)合成場を比較すると合成場においてスピーカの前方は、音の節となる部分が発生することによって、原音場とは違った波形に見られる。これは(5)式の標本化定理を満たしていないことによるエイリアシングの影響だと思われる。

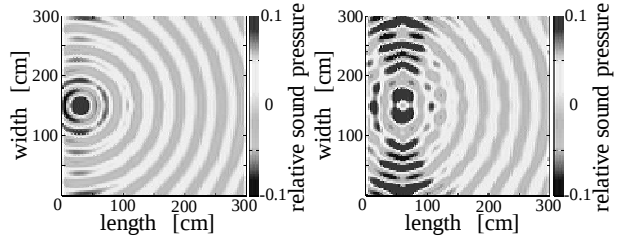
4.3 音響インテンシティ

Fig.10 に音源が 1kHz を用いた場合のインテンシティの方向成分を示す。(a)原音場と(b)合



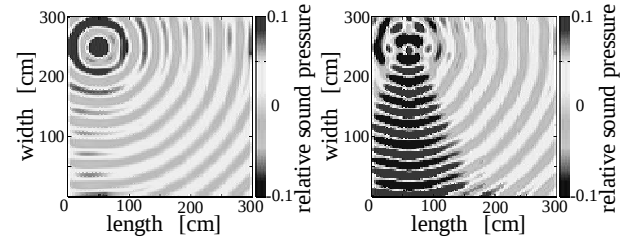
(a)Original sound field (b)Synthesis sound field

Fig.4 Original sound $f=1$ kHz, $(x,y)=(10,50)$



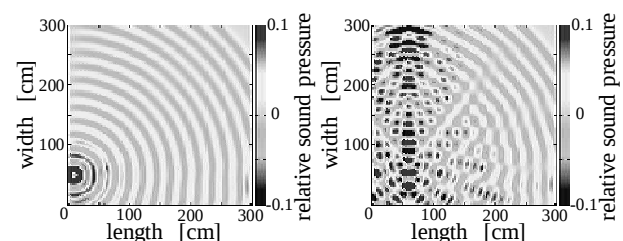
(a)Original sound field (b)Synthesis sound field

Fig.5 Original sound $f=1$ kHz, $(x,y)=(30,150)$



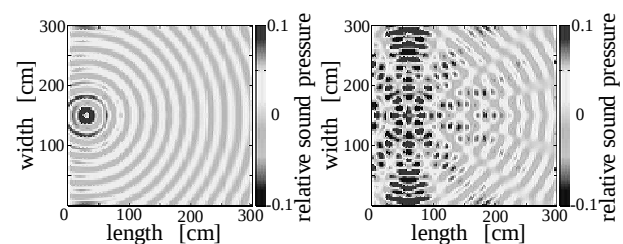
(a)Original sound field (b)Synthesis sound field

Fig.6 Original sound $f=1$ kHz, $(x,y)=(50,250)$



(a)Original sound field (b)Synthesis sound field

Fig.7 Original sound $f=1.5$ kHz, $(x,y)=(10,50)$



(a)Original sound field (b)Synthesis sound field

Fig.8 Original sound $f=1.5$ kHz, $(x,y)=(30,150)$

成場を比較すると、合成場においてスピーカの位置より前方に原音場と近い方向を示していることが見られる。これより、合成場のスピーカの前方において原音場と同様な方向から音を知覚する可能性が示される。

Fig.11 に音源が 1.5kHz を用いた場合のインテンシティの方向成分を示す。(a)原音場と(b)合成場を比較すると、合成場において一部は原音場と同様な方向を示しているが、全体的にみると明らかに原音場とは異なるベクトル場となっていることが見られる。これより、合成場において原音場とは異なった方向から音を知覚する可能性が示される。

5. まとめ

本研究では、波面合成法に関してコンピューターシミュレーションの方法の一つである TLM 法を用いて検討を行った。

その結果、第 2 種レイリー積分と標本化定理に基づいた条件によるシミュレーションを行うことによって、原音場に近い合成場を得られることが確認された。

一方で、標本化定理に基づかない条件によるシミュレーションを行うと、一部は原音場に近い合成場を得られたが、全体的には原音場とは異なる場になることが確認された。

また、音響インテンシティにおいても同様の結果が得られた。

以上のことから TLM 法を用いたシミュレーションを行うことにより、波面合成法の検討を行うことができる可能性が示された。

今後の課題としては、本シミュレーションで得た結果と実験によって得た結果を比較する必要がある。

また、TLM 法によるシミュレーションの特徴である逆伝搬プログラム、位相の異なる複数音源プログラム、移動音源プログラムなどを作成し、検討する余地がある。

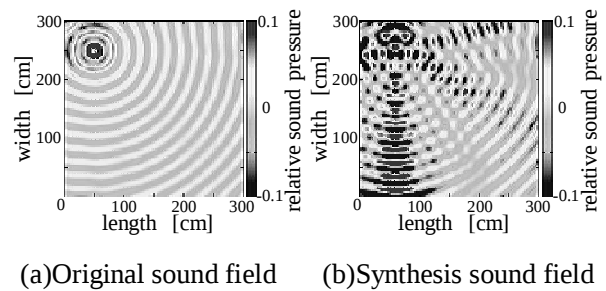


Fig.9 Original sound $f=1.5$ kHz, $(x,y)=(50,250)$

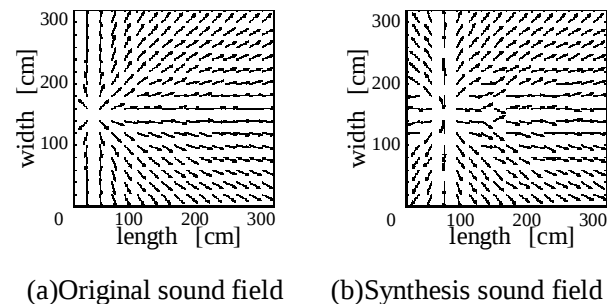


Fig.10 Original sound $f=1$ kHz, $(x,y)=(30,150)$

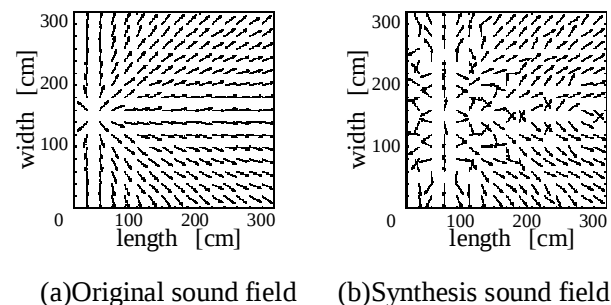


Fig.11 Original sound $f=1.5$ kHz, $(x,y)=(30,150)$

<参考文献>

- 1) ギュンター タイレ, ヘルムート, ヴィテック, 抄訳 小野 一穂, 濱崎 公男 “Wave Field Synthesis による空間レンダリング手法について” 日本音響学会誌 60 巻 10 号, (2004), pp608-613
- 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, pp.2764-2778, May1993