

第二種レイリー積分を想定した NIM-WFS

日大生産工(院) ○新井 航 日大生産工 山崎 憲
早大・理工 関根 晃太

1 はじめに

立体音響の1つである波面合成法(Wave Field Synthesis)はキルヒホッフ積分方程式に基づいて音圧制御することで原音場を再現する方法である。そのため受聴者は再現された音場領域内であれば音を立体的に感じることができる。従来では波面合成法の離散化に中点公式(リーマン和)を利用している¹⁾。さらにマイクロホンにより観測した信号を用いてダイポール音源を駆動させることで原音場を再現する第二種レイリー積分に基づく波面合成法がある。この手法であれば平面上の音圧制御のみで原音場の再現が可能である。本研究では波面合成法の離散化には数値積分法(Numerical Integral Method)である中点公式、台形公式およびシンプソンの公式を用いる手法の提案をすると共に、実空間における第二種レイリー積分に基づく波面合成法を想定し、ダイポール音源として双指向性スピーカを用いての波面合成法を検証した。

2 原理

2.1 波面合成法の原理

波面合成法はキルヒホッフ積分定理に基づいて原音場を再現する方法であり、キルヒホッフ積分定理は以下の式で表される。

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

但し、 G はグリーン関数であり点音源を示す。また $\partial P_s / \partial n$ は法線方向の偏微分である。(1)式は任意の閉曲面上の音圧 P_s および微小面積 dS の \mathbf{n} 方向の法線ベクトルの粒子速度を制御することで、閉曲面 S 内の音圧 P_p を制御できることを証明している。しかし粒子速度の制御は実際に困難であるため境界条件としてディリクレ条件($G=0$)を与えると、以下の第2種レイリー積分に変形することが出来る

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

(2)式は平面 S 上の音圧 P_s を制御することにより半空間内の音圧 P_p を制御できることを証明している²⁾。この式より平面上に設置したマイクロホンを用いて、音源から放射される音圧を測定し録音した音圧をダイポール音源から放射することにより原音場を再現することが出来る。さらに式(2)の平面を離散化し、スピーカアレイを用いて制御すると以下のような式となる。

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

(3)式より Δx と Δy は x 方向と y 方向の各スピーカ同士の間隔とすることで実空間での波面合成法に適用することが出来る。本研究では中点公式、台形公式およびシンプソンの公式により平面を離散化する。ただし、スピーカ間隔は標本化定理より以下の式を満たさなければならない。

$$\Delta x \leq \frac{v}{2f} = \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

式(4)よりスピーカ間隔は音源の半波長よりも短くしなければ、空間エイリアシングにより正しく波面合成がなされない。

2.2 離散化

x と y に関する被積分関数 g を以下のように定義する。

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi} P_s \frac{\partial}{\partial Z_s} \left[\frac{\exp(ik|r_p - r_n|)}{|r_p - r_s|} \right] \quad (5)$$

したがって、(5)式を用いて(2)式を表すと以下の式になる。

$$P_p = \iint g(x, y) dx dy \quad (6)$$

ここで、スピーカを分点とすることで(6)式を離散化し、以下の式で表される。

$$P_{p1}^h = \sum \sum g(x, y) \Delta x \Delta y \quad (7)$$

Study on NIM-WFS using Rayleigh's second integral

Wataru ARAI, Ken YAMAZAKI and Kouta SEKINE

(7)式はリーマン和の形であることから、数値積分において中点公式と一致する。

台形公式は以下の式で表される。

$$\int_a^b f(x)dx \approx h \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2} \quad (8)$$

したがって、スピーカを分点とすることで(6)式を(8)式を用いて離散化すると以下の式で表される。

$$P_{p1}^h = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{4} (g(x_i, y_j) + g(x_i, y_{j+1}) + g(x_{i+1}, y_j) + g(x_{i+1}, y_{j+1})) \Delta x \Delta y$$

シンプソンの公式は以下の式で表される。

$$\int_a^b f(x)dx \approx h \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f(x_{2i}) + f(x_{2i+1}) + f(x_{2i+2})}{3} \quad (9)$$

したがって、スピーカを分点とすることで(6)式を(9)式を用いて離散化すると以下の式で表される。

$$P_{p1}^h = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} (g(x_{2i}, y_{2j}) + 4g(x_{2i}, y_{2j+1}) + g(x_{2i}, y_{2j+2}) + 4g(x_{2i+1}, y_{2j}) + 16g(x_{2i+1}, y_{2j+1}) + 4g(x_{2i+1}, y_{2j+2}) + g(x_{2i+2}, y_{2j}) + 4g(x_{2i+2}, y_{2j+1}) + g(x_{2i+2}, y_{2j+2})) \Delta x \Delta y$$

上記の各数値積分法により導出された式より各分点に対する重み付けが決定される。

3 シミュレーションおよび実験方法

3.1 シミュレーション方法

Fig.1 にシミュレーション空間の図を示す。図より原音場および合成音場の領域内のメッシュ間隔は 0.5cm として、領域内のメッシュ間隔を 0.5cm として、領域内の広さを座標 $(x, y) = (0,0) \sim (600,600)$ とした。原音は座標 $(300,100)$ の場所に設置し、原音から垂直方向に 100 メッシュ離れた場所にマイクロホンを設置した。なお、マイクロホン同士は全て 14 メッシュ間隔で設置した。またマイクロホンと対応させるように 9 つダイポール音源を設置した。なお中点公式、台形公式およびシンプソンの公式による離散化は 7cm 等間隔に設定した。シミュレーション方法は原音からの音をマイクロホンで取り込み、取り込んだ音の数値データに対して中点公式、台形公式およびシンプソンの公式により重み付けした。その数値データをダイポール音源に設定し、合成音を出力させ、原音と同様の波面が形成されるか確認した。

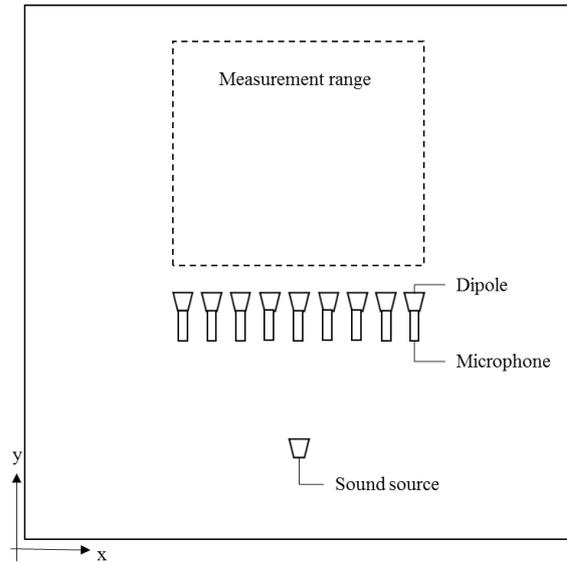


Fig.1 Synthesis sound field

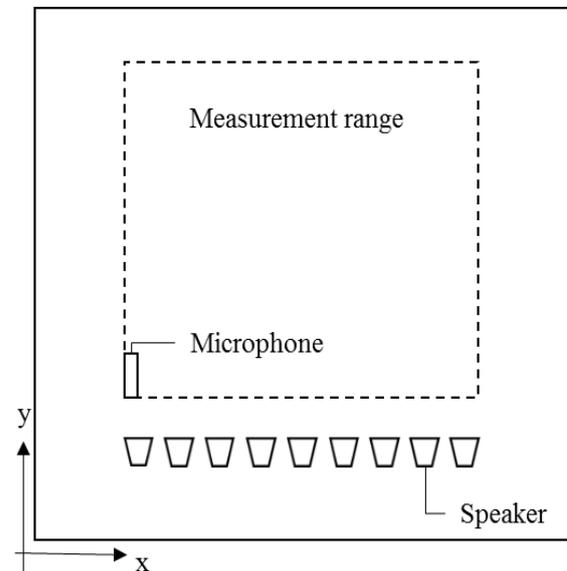


Fig.2 Actual sound field

3.2 実験方法

実験には無響室を使用した。Fig.2 に無響室の図を示す。無響室の壁から 50cm 離れた場所に双指向性スピーカをシミュレーションと同様の間隔で設置した。マイクロホンによる測定は双指向性スピーカから 30cm 離れた場所から行った。測定範囲は縦を 90cm、横を 60cm とし、トラバースを用いて縦横 2.5cm 間隔で測定を行った。なお、測定にはスピーカ()とマイクロホン()を使用した。実験方法はシミュレーションにおいてマイクロホンで取り込んだ音の数値データに対して中点公式、台形公式およびシンプソンの公式に従って重み付けした。その数値データを双指向性スピーカに設定し、合成音を出力させることでシミ

ミュレーションと同様の波面が形成されるか確認した。

なお、原音の周波数は 750Hz、1000Hz、2500Hz の 3 通りとした。本研究ではスピーカ間隔を 7cm と設定したため、空間エイリアシングが発生する周波数は約 2400Hz より高い周波数であると考えられる。

4 シミュレーションおよび実験結果

Fig.3、Fig.4およびFig.5にシミュレーションおよび実験結果を示す。Fig.3より、原音の周波数750Hzではシミュレーションにおいて(b)台形公式、(c)シンプソンの公式および(d)中点公式を離散化に用いた場合、波面合成がなされることが確認できた。しかし、(a)原音場に比べ、波面が平面波に近い形となっていること、音圧に差があることを確認できた。台形公式、シンプソンの公式および中点公式ではほぼ同じ波面が形成されていることを確認できた。また、(d)シミュレーション結果と(e)実験結果を比較すると実験においてもシミュレーションに近い波面が得られることを確認できた。しかし、音圧に差があることを確認できた。

Fig.4より、原音の周波数1000Hzではシミュレーションにおいて(b)台形公式、(c)シンプソンの公式および(d)中点公式を離散化に用いた場合、波面合成がなされることが確認できた。しかし周波数が750Hzの場合と同じく、(a)原音と比べ、波面が平面波に近い形となっていること、音圧に差があることを確認できた。台形公式、シンプソンの公式および中点公式による合成波面を比較すると中点公式と比べ台形公式とシンプソンの公式の方が球面波に近いことが確認できた。また、(d)シミュレーション結果と(e)実験結果を比較すると実験においてもシミュレーションに近い波面が得られることを確認できた。しかし音圧に差があることを確認できた。

Fig.5は空間エイリアシングの発生する周波数よりも高い2500Hzでのシミュレーションおよび結果である。Fig.3とFig.4の結果と比べると音圧の乱れが大きいことが確認できた。台形公式、シンプソンの公式および中点公式による合成波面を比べると台形公式による合成波面が最も原音の波面に近いことを確認できた。

5 まとめ

本研究では第二種レイリー積分に基づく波面合成法の離散化に精度の異なるいくつかの

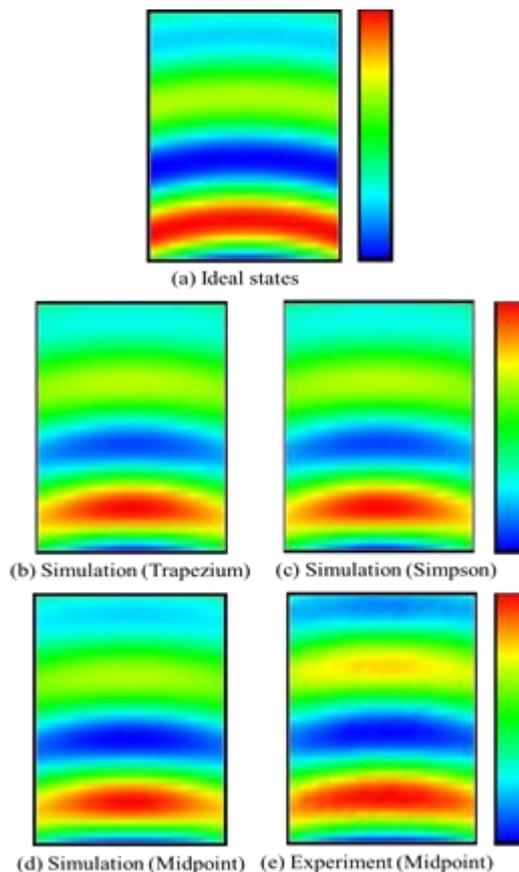


Fig. 3 Result of the simulation and experiment (750Hz)

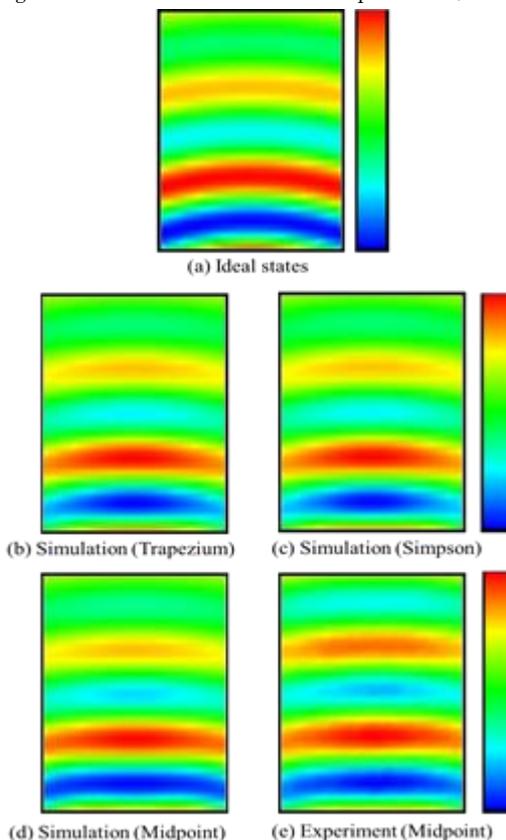


Fig. 4 Result of the simulation and experiment (1000Hz)

数値積分法を用いた結果、全ての数値積分法で波面が合成されることを確認できた。しかし、波面に大きな差異が見られなかったことから、数値積分における離散化する際の分点数、すなわちスピーカの個数に問題がある可能性が示唆された。

さらに第二種レイリー積分による波面合成法を実空間での再現を想定した双指向性スピーカによる実験ではシミュレーションに近い結果が得られた。しかし、音圧に差が現れたことからシミュレーションによる実空間の再現に問題点があることが示唆された。

本研究では、現時点で実空間における台形公式とシンプソンの公式を用いた波面合成法の実験が行えていない。そのため今後、その点を検証する必要がある。

「参考文献」

1) 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

2) 関根晃太、山崎 憲、大石進一、“数値積分法からみた波面合成法の離散化について”、日本大学生産工学部第45回学術講演会概要、(2012)

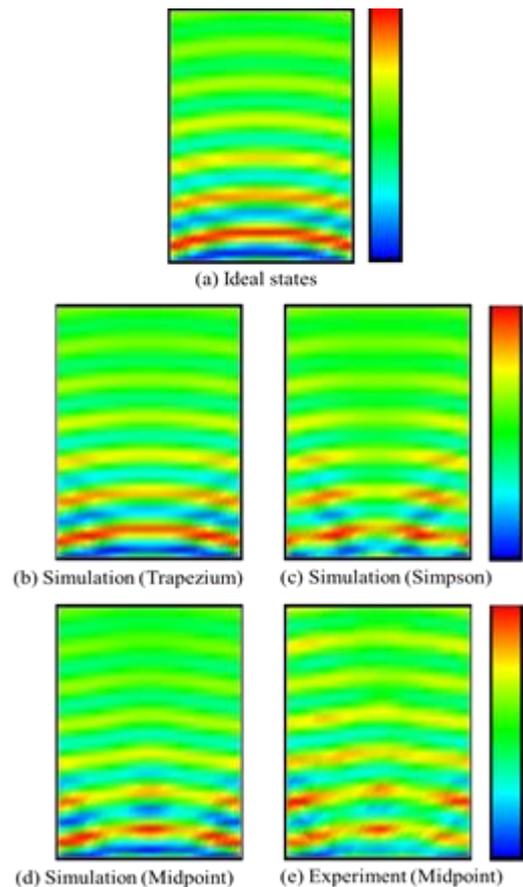


Fig. 5 Result of the simulation and experiment (2500Hz)