

音響ホログラフィ法を用いた 小さな音源の位置同定に関する検討

日大生産工(院) 識名 章博 日大生産工 山崎 憲
ワイテクノ(株) 瀬下 清

1. はじめに

近年、音源位置同定の手法として、マイクロホンアレイ法を用いた音源位置同定が盛んに行われている。しかし、小さい音源に対して行っている論文は見当たらない。そこで、2次元画像化し空間分解能が非常に高いとされる音響ホログラフィ法(NAH法)を用いて小穴から漏れる音を用いて小穴の同定を行った。本研究では、空間分解能を高くするため計測点に補間を使って補うことでNAH法で高精度に小さな音源の同定が行えるかの検討を行った。

2. 原理

図1に音場を示す。音源が $z = z_s$ の xy 面上にあるとする。音源面から平行な任意の測定面を $z = z_h$ (ただし $z_s < z_h$) とすると音源面の2次元音場 $p(x, y, z_s)$ から測定面の2次元音場 $p(x, y, z_h)$ をNAHを用いて計算する。伝搬関数を g とすれば2つの音場の関係式は

$$p(x, y, z_s) = p(x, y, z_h) * g(x, y, z_s - z_h) \quad \dots(1)$$

と表せる。ここで2次元フーリエ変換を行うことで波数空間に表すことができる。波数空間において畳み込み積分は積に置き換えることができる。

$$P(k_x, k_y, z_s) = P(k_x, k_y, z_h) G(k_x, k_y, z_s - z_h) \quad \dots(2)$$

また伝搬関数は波数空間において次下のように与えられる。

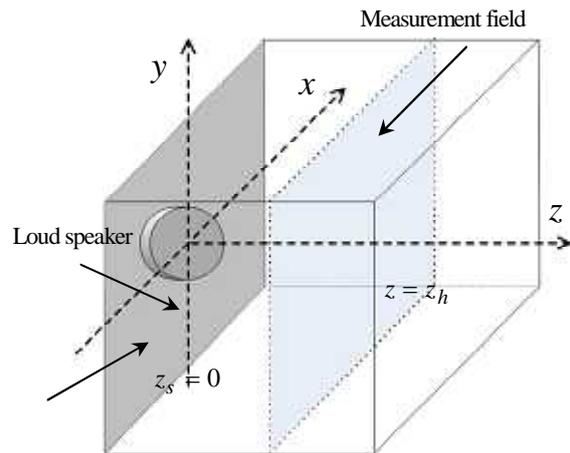


図1.音場

$$G(k_x, k_y, z_s - z_h) = e^{-ik_z(z_s - z_h)} \quad \dots(3)$$

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad \dots(4)$$

k は波数を表している。以上より $z = z_h$ の測定面の波数空間から $z = z_s$ の音源面の波数空間を計算することができ、これを2次元逆フーリエ変換することで $z = z_s$ の音圧分布を求めることができる。

NAHでの空間分解能(音源位置同定能力)は計測点数に依存する。そのため小さな音源に適用する場合膨大な計測点数が必要になってしまう。そこで本研究では音源位置の同定に特化するために計測点と計測点の間をいくつか補間することで計測点間を補い高分解能を得ることとした。

(2)式を変形すると

$$P(k_x, k_y, z_s) = \frac{d^2}{2\pi} \sum_{x,y} p(x, y, z_h) e^{-i(xk_x + yk_y)(z_s - z_h)} \quad \dots(5)$$

$$k_x = \frac{2\pi}{x_d m} b \quad (b = -\frac{m-1}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{m-1}{2})$$

$$k_y = \frac{2\pi}{y_d m} c \quad (c = -\frac{m-1}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{m-1}{2}) \quad \dots(6)$$

$\dots(7)$

ここで x_d, y_d は各方向の計測間隔、 m は計測点数、 d は計測点間隔を表している。以上より計測点を補間で補うことで高分解能が期待できる。

NAH法では2次元のフーリエ変換を行うに当たり、波長あたりのサンプル数によって周波数範囲が制限される^[3]。つまり計測点の間隔、測定領域の大きさで周波数範囲が決定される。標準化定理より

$$d \leq \frac{v}{2f_{\max}} = \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad \dots(8)$$

$$D \leq \frac{v}{f_{\min}} = \lambda_{\max} \quad \dots(9)$$

d は計測点の間隔、 D は測定領域の大きさを表す。(5)式(6)式を満たさなければ空間エイリアシングが発生し正確に正弦波を再現することができない^{[2][3]}。

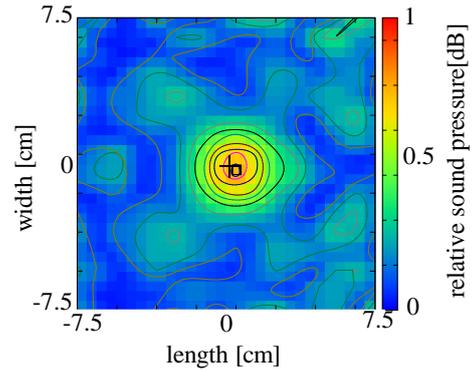
3.シミュレーションによる検討

3.1.シミュレーション条件

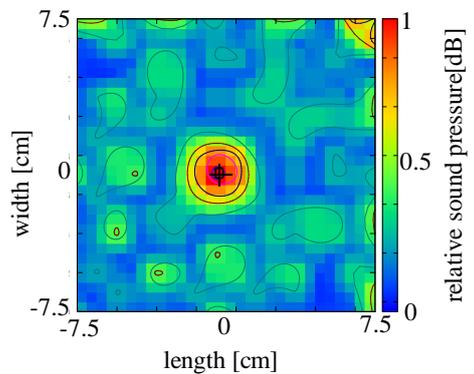
本研究のNAH法における小さな音源の位置同定の性能を確認するためにTLMシミュレーションを使って検討を行った^[4]。15cm×15cmの正方形にマイクロホンを1cm間隔に設置し16点×16点のマイクロホンアレイを考える。音源は点音源で0.3cmとし中心(0cm,0cm,0cm)のところに設置する。周波数は6000Hzの正弦波とした。また、マイクロホンアレイは音源から $z_h = 5\text{cm}, 10\text{cm}, 15\text{cm}, 20\text{cm}$ の4面計測することとし今回行う補間は間隔1cm,0.5cm,0.25cm,0.125cmとなるようにしてそれぞれの条件でシミュレーションを行った。

3.2.シミュレーションの結果

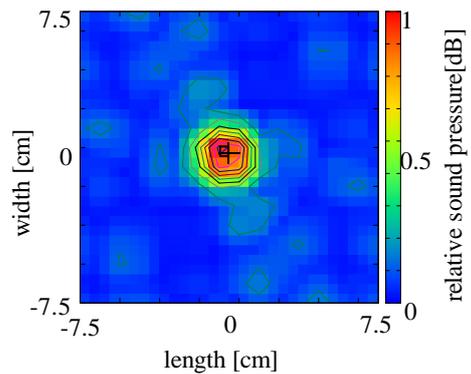
結果を図2に示す。四角で囲ったところがNAH



(a) 補間なしのホログラフィ図 ($z_h = 10\text{cm}$)



(b) 補間 0.125cm のホログラフィ図 ($z_h = 10\text{cm}$)



(c) 補間 0.125cm のホログラフィ図 ($z_h = 20\text{cm}$)

図2. シミュレーションによるホログラフィ図

法による音源の推定位置を示しており、十字の点が実際の音源の場所を表している。(a)は $z_h = 10\text{cm}$ のときで補間処理を行っていない状態で誤差が 5mm となった。(b)は(a)同様の条件で補間を行った場合で推定位置と真値がほぼ一致している。また音源との距離を $z_h = 20\text{cm}$ にした場合の(c)でも 2mm の誤差はあるものの精度よく推定ができているといえる。また図3に今回のシミュレーションの誤差をまとめた。図より補間なしよりも補完した場合の方がどの条件でも誤差が大幅に減っている。このことから補完することでNAH法の精度を上げることができると考えられる。

4.実験による検討

4.1.実験方法

前項より補完することでNAH法の精度を上げることができることが分かった。そこで実際に実験を行い同様に計測し精度が向上するか検討を行う。マイクロホンを1本使い x 軸と y 軸に走査させていくことで1面のアレイとして行う。アレイの大きさはシミュレーションのときと同様に $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ の正方形に 16 点 \times 16 点測定を行う。音源はドライバーユニットとし小さな音源とするために 0.3cm の小穴の空いたキャップを付けることで再現した。設置場所は $(0\text{cm}, 0\text{cm}, 0\text{cm})$ で周波数は 6000Hz の正弦波とした。マイクロホンと音源までの距離 $z_h = 5\text{cm}, 10\text{cm}, 15\text{cm}, 20\text{cm}$ の4面計測し補間は間隔が $1\text{cm}, 0.5\text{cm}, 0.25\text{cm}, 0.125\text{cm}$ を行い、それぞれの条件で実験を行った。また $z_h = 5\text{cm}$ のときのみ音源の設置場所を $(-3\text{cm}, -3\text{cm}, 0\text{cm})$ に変更した場合も測定した。

4.2.実験結果

結果を図4, 図5に推定結果を示す。四角で囲ったところがNAH法による音源の推定位置を示しており、十字の点が実際の音源の場所を表している。図4の(a), (b)よりどちらの条件でも推定位置がほぼ真

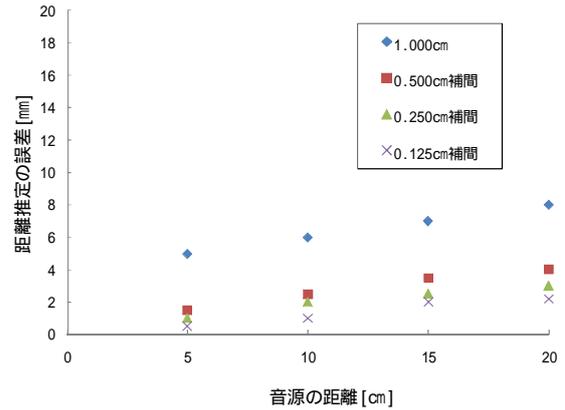
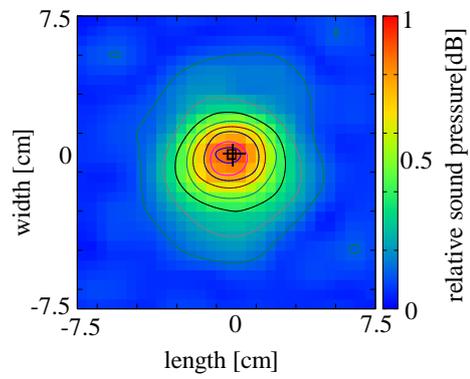
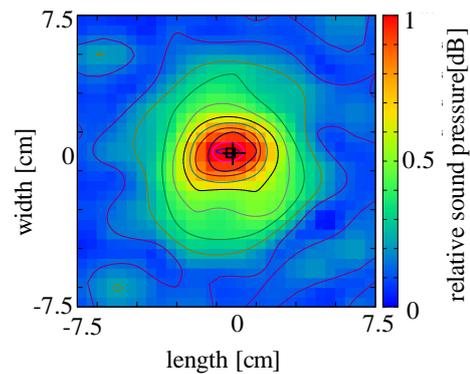


図3. シミュレーションでの補間による誤差



(a)補間0.125cmのホログラフィ図($z_h = 10\text{cm}$)



(b)補間0.125cmのホログラフィ図($z_h = 20\text{cm}$)

図4. 実験によるホログラフィ図

値と一致していることがわかる。 $z_h = 10\text{cm}$ の場合の誤差は 1.5mm、 $z_h = 20\text{cm}$ の場合は 3mm の誤差となっている。また図 5 では中心から音源が (-3cm,-3cm,0cm) の位置のときの結果を示す。こちらも推定位置と真値がほぼ一致していることがわかる。しかし音圧分布が図 4 と比べ横と下に広がってしまっている。これは中心からずれたことにより音源距離がマイクロホンアレイの中心から離れたことによる誤差だと考えられる。このとき誤差は 3mm となっている。

それぞれの条件による誤差のグラフを図 6 に示す。補間を使って計測点を補うことで誤差はかなり減らせることが分かる。さらに補間の間隔は小さくすることで誤差は低減できることがわかった。また音源の距離が離れるにつれ誤差が大きくなっている。これはシミュレーションでも同様の傾向がみられることや、図 5 のようにマイクロホンアレイの中心からずれることで誤差がでてきている。これはマイクロホンアレイの中心から音源との距離が離れることで測定音圧の減衰が大きくなるためホログラフィ図を正確に作成するとき誤差の要因となることが考えられる。

5.まとめ

空間分解能を高くするため計測点に補間を使って補うことで NAH 法で高精度に小さな音源の同定が行えるかをシミュレーションと実験で検討を行った。その結果、シミュレーションでも実験でも同様に誤差の低減が確認できた。そのとき補間の間隔を小さくすることで誤差は低減することがわかった。またマイクロホンアレイの中心から音源との距離が離れると誤差が大きくなることがわかった。これは測定音圧の減衰による影響だと考えられた。今後の課題として今回は周波数が 6000Hz のみの結果なので他の周波数での検討。小さい音源が複数あった場合の検討などが必要である。

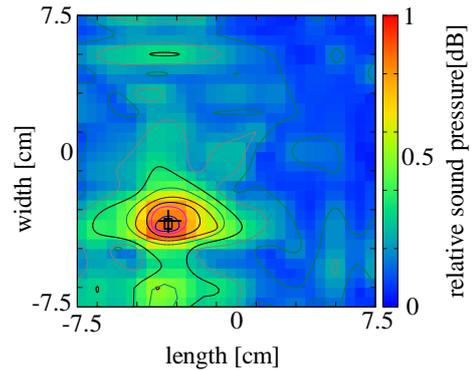


図 5. 音源位置 (-3.5cm,-3.5cm,0cm) の補間 0.125cm、($z_h = 5\text{cm}$) のホログラフィ図

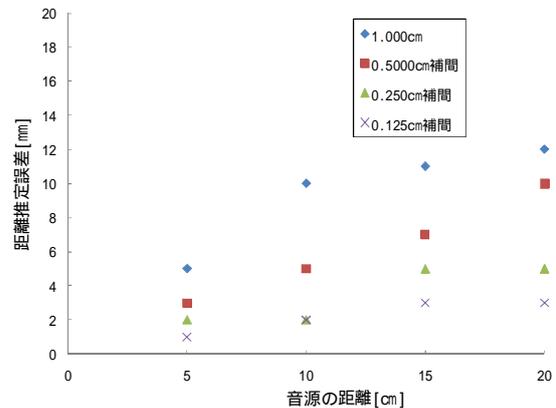


図 6. 実験での補間による誤差

[参考文献]

- [1]E.G.ウィリアムズ[著],吉川茂・西條献児[訳], "フーリエ音響学",シュプリンガー・フェアラーク東京,(2005) pp.41-46,pp.110-113
- [2]佐藤利和,長友宏,石井豊 "近距離音響ホログラフィの発展とその周辺技術" 日本音響学会講演論文集 pp.1505-1508(2008)
- [3]識名章博,山崎憲,"音の伝搬シミュレーションの検討" 日本音響学会講演論文集(2010)
- [4]識名章博,山崎憲 "音響ホログラフィ法を用いた小穴の同定に関する検討" 日本音響学会講演論文集 (2010)