

複数周波数の MUSIC 法を用いた超音波イメージングの実験的検討

Experimental study of ultrasound imaging using multifrequency MUSIC method

松尾太聖 (愛媛大・理工) 温品晴貴 (愛媛大・工) 丸山泰蔵 (愛媛大・理工)
中畑和之 (愛媛大・理工)

Taisei MATSUO, Ehime University
Haruki NUKUSHINA, Ehime University
Taizo MARUYAMA, Ehime University
Kazuyuki NAKAHATA, Ehime University
E-mail: matsuo.taisei.17@cee.ehime-u.ac.jp

A Multiple Signal Classification (MUSIC) method, which focuses on the phase of scattered waves, is one of the imaging methods using observed wave data. A multifrequency MUSIC algorithm has been proposed recently [Griesmaier & Schmiedecke 2017]. This study examines the performance of ultrasound imaging based on the multifrequency MUSIC method for measured data. As a fundamental study, two-dimensional acoustic wave scattering is considered. The waveform data are measured by the ultrasonic linear array transducer.

1. はじめに

超音波法によって取得した受信波形から部材内部の欠陥像を再構成する手法として、開口合成法 (SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique) 等の波動の到達時間から振幅を重ね合わせる方法が広く用いられている。その一方で、受信波形から作成した相関行列の固有値分解を利用して欠陥の位置推定を行う MUSIC (Multiple Signal Classification) 法が提案されている¹⁾。従来の単一周波数の散乱波に対して定式化されている MUSIC 法は、理想的な状況においては高分解能のイメージングが期待できる。しかしながら、受信波に点散乱源からの散乱波以外の影響やノイズが含まれる場合には、イメージングが不安定になることがある。

一方、近年提案された複数周波数の MUSIC 法²⁾は、帯域幅を持つ受信波形データによってイメージングするため、実測波形の情報をより多く利用できると考えられる。しかしながら MUSIC 法では、遠方の点散乱源による散乱に基づいて定式化がなされているため、有限距離かつ有限サイズの散乱体に対してどの程度有効であるか検討が必要である。また、実測データにはノイズが含まれるため、その影響を調べることは有用であると考えられる。そこで、超音波計測装置で取得した波形を用いて複数周波数の MUSIC 法によるイメージング性能の検討を行う。

本研究では基礎的検討として音響波動問題を想定し、流体中の金属棒による散乱波形を用いる。また、リニアアレイ探触子を用いて2次元的な散乱源の配置で計測実験を行うため、2次元問題に対する MUSIC 法を用いる。

2. 散乱源のイメージング手法

Fig.1 に示すように、 L 個のアレイ素子 $x_1, x_2, \dots, x_L$ からそれぞれ円筒波を入射し、点散乱源から発生した散乱波をアレイ素子位置で観測するものとする。その後、取得した散乱波から、点散乱源位置 $z_1, z_2, \dots, z_N$ を推定することを考える。素子 x_j から入射波を送信したときに素子 x_i で受信される散乱波 u_{ij}^{sc} は Born 近似を仮定すると次のように表される。

$$u_{ij}^{sc} = \sum_{n=1}^N q_n U(x_i, z_n) A U(z_n, x_j) \quad (1)$$

ここで、 q_n は z_n の点散乱源の散乱強さ、 A は入射波の振幅、 U は

$$U(x, y) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k|x-y|)$$

であり、 $H_0^{(1)}$ はゼロ次の第一種ハンケル関数である。また、 i は虚数単位、 k は波数である。

送受信点が散乱源から十分遠方であると仮定すると、式 (1) は次のように遠方近似できる。

$$u_{ij}^{sc} \approx \frac{A}{8\pi k} \frac{ie^{ik(|x_j|+|x_i|)}}{\sqrt{|x_j||x_i|}} u^{\text{far}}(\hat{x}_i, \hat{x}_j, k) \quad (2)$$

$$u^{\text{far}}(\hat{x}_i, \hat{x}_j, k) = \sum_{n=1}^N q_n e^{-ik\hat{x}_i \cdot z_n} e^{-ik\hat{x}_j \cdot z_n}$$

ここで、 $\hat{x}_i = x_i/|x_i|$ である。 u^{far} は原点、散乱源位置、及び送受信方向から成る遠方場パターンであり、散乱源の位置推定に用いる。

Griesmaier と Schmiedecke²⁾ は、ある 1 つの方向から入射波を送信し、1 つの方向で受信した場合の波形データを用いて、複数周波数による相関行列を作成している。送信点方向 $\hat{x}_j$ 、受信点方向 $\hat{x}_i$ に対する相関行列 $F^{(ij)}$ は

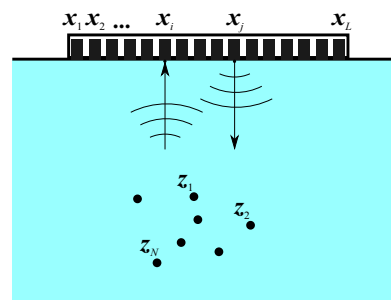


Fig. 1 Ultrasonic testing using linear array transducer.

次のように定義する.

$$\mathbf{F}^{(ij)} = \begin{bmatrix} F_{1,1}^{(ij)} & \cdots & F_{1,p+1}^{(ij)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{2q-p,1}^{(ij)} & \cdots & F_{2q-p,p+1}^{(ij)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F_{n,m}^{(ij)} = \frac{1}{k_{n+m-1}} u^{\text{far}}(\hat{\mathbf{x}}_i, \hat{\mathbf{x}}_j, k_{n+m-1}) \quad (4)$$

ここで, $k_n = n\Delta k$ であり, Δk は用いる波数の刻み幅である. また, $p, 2q$ はそれぞれ想定される最大の散乱源数, 使用する周波数の数であり, $p < q$ で与える.

イメージング領域中の検査点 $\mathbf{z}$ で散乱波が発生した場合に各受信点で観測される位相をまとめた位相情報ベクトルを次のように定義する.

$$\phi^{(ij)}(\mathbf{z}) = [\xi^0, \xi^1, \xi^2, \dots, \xi^{2q-p-1}]^T \quad (5)$$

ここで, 上付き T は転置を表しており, $\xi = e^{i\Delta k(-\hat{\mathbf{x}}_j - \hat{\mathbf{x}}_i) \cdot \mathbf{z}}$ である. 式 (5) の $\phi^{(ij)}(\mathbf{z})$ と式 (3) の $\mathbf{F}^{(ij)}$ を用い, 次の関係²⁾ から散乱源を推定する.

$$\begin{aligned} \mathbf{z} \in \{\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_N\} &\Leftrightarrow \phi^{(ij)}(\mathbf{z}) \in \text{ran}(\mathbf{F}^{(ij)}) \\ &\Leftrightarrow \phi^{(ij)}(\mathbf{z}) \perp \ker(\mathbf{F}^{(ij)H}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, 上付き H は共役転置を表している. 相関行列 $\mathbf{F}^{(ij)}$ を次のように特異値分解する.

$$\mathbf{F}^{(ij)} = \sum_{l=1}^M \sigma_l \mathbf{u}_l \mathbf{v}_l^H \quad (7)$$

ここで, $M = \text{rank}(\mathbf{F}^{(ij)})$ であり, σ_l , $\mathbf{u}_l$, $\mathbf{v}_l^H$ は, それぞれ特異値, 左特異ベクトル, 右特異ベクトルである. 左特異ベクトル $\mathbf{u}_l$ を用いて次の $\mathbf{P}^{(ij)}$ を定義する.

$$\mathbf{P}^{(ij)} = \sum_{l=1}^M \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H \quad (8)$$

さらに指示関数 W を次式で定義する.

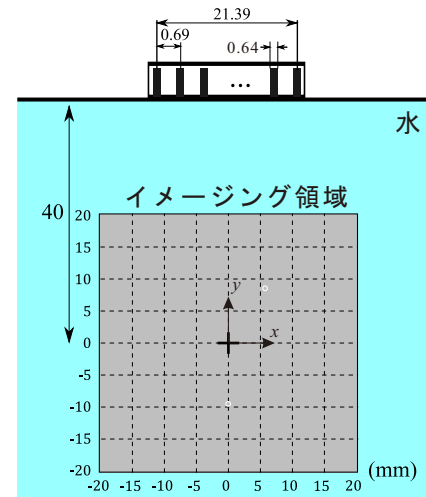
$$W(\mathbf{z}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L |(\mathbf{I} - \mathbf{P}^{(ij)})\phi^{(ij)}(\mathbf{z})|} \quad (9)$$

ここで, $\mathbf{I}$ は単位行列である. 式 (6)-(9) より, 検査点と散乱源位置が一致するとき W は発散するため, 実測データを用いた解析においても大きな値を取ることが期待できる. そこで, イメージング領域全体に渡って W をプロットすることで散乱源の位置推定を行う.

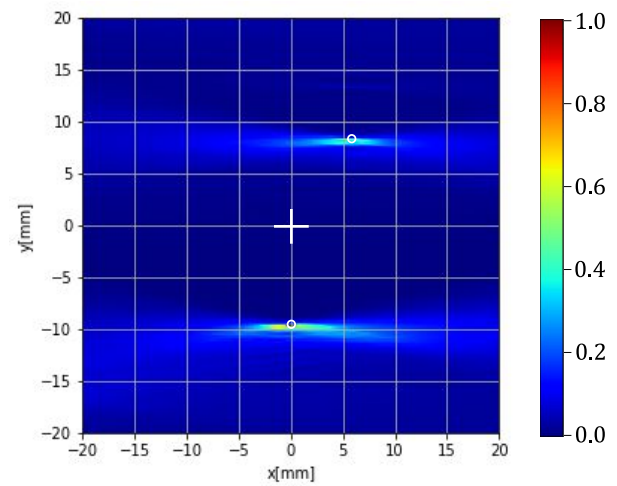
3. 計測実験と欠陥像のイメージング結果

超音波計測には, パルサレーバ (Japan Probe 製 JAS21), リニアアレイ探触子 (振動素子 32 個, 公称中心周波数 5.0MHz) を用いた. Fig. 2(a) に示すように, リニアアレイ探触子素子中心間距離 (エレメントピッチ) は 0.69mm, 1 素子の幅は 0.64mm であり, 奥行きは 22.5mm である. 超音波の計測時間は 102 μ s と設定し, 探触子の不感帯, 及び水槽底面の影響を除去した波形をイメージングに用いた. 計測実験は, 水中に散乱源として直径 0.87mm のアルミニウム製針金を Fig. 2(a) 中の白丸の位置に 2 本設置して実施した. MUSIC 法の計算は, 水の縦波音速 $c = 1.48\text{km/s}$, 密度 $\rho = 0.998\text{g/cm}^3$ とし, Fig. 2(a) に示すイメージング領域に対して行った. また, 式 (3), (4) 中のパラメータは $p = 100$, $q = 128$ とし, 周波数の刻み幅は $\Delta f = c\Delta k/(2\pi) = 0.02\text{MHz}$ とした.

Fig. 2(b) にイメージング結果を示す. 図中の白丸は設置した針金の位置を示している. ここでは, 式 (9) で表



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Ultrasonic measurement setup and (b) imaging result by multifrequency MUSIC method.

される W をイメージング領域の最大値で正規化した値をプロットしている. Fig. 2(b) より, 両方の針金位置が概ね正しくイメージングされていることがわかる. しかしながら, y 方向に対する解像度は比較的良好いものの, x 方向の解像度は低く, 再構成像が横に伸びていることがわかる.

4. まとめ

本研究では非破壊検査を見据え, 複数周波数の MUSIC 法をリニアアレイ探触子を用いた超音波イメージングに適用し, その性能を検討した. 今後, 単一周波数の MUSIC 法¹⁾ との結果の比較を行う予定である.

参考文献

- 1) A. Kirsch: The MUSIC-algorithm and the factorization method in inverse scattering theory for inhomogeneous media, *Inverse Problems*, 18, pp.1025-1040, 2002.
- 2) R. Griesmaier and C. Schmiedicke: A multifrequency MUSIC algorithm for locating small inhomogeneities in inverse scattering, *Inverse Problems*, 33, 035015, 2017.