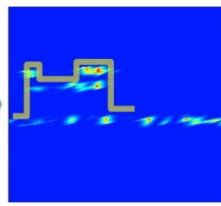
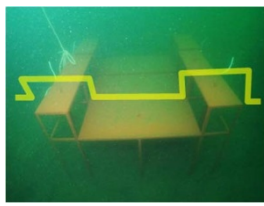


# 適応アレイ信号処理の導入によるアクティブソーナーの高精度化

## Improvement of the Active Sonar with Adaptive Array Processing



藤島 泰郎\*<sup>1</sup>  
Yasuo Fujishima

田崎 智\*<sup>2</sup>  
Satoshi Tasaki

測量船や海底探査ビークルに搭載される海底地形計測・沈底物体探査用のマルチビームソーナーでは、測定対象物の形状を精緻に観測するために角度及び距離の分解能向上が求められている。しかしながら、角度分解能を向上させるには一般にアレイ開口を大型化する必要がある、搭載装置に対する寸法・質量制約が厳しい小型水中無人機では特に困難である。角度分解能が高いヌル走査法を採用するなど、信号処理により角度分解能を向上させる方策もあるが、この場合、計測信号に時間窓をかけて平均化するなどの処置が必要で、角度分解能と距離分解能がトレードオフの関係となり、両立が困難である。本研究では、ヌル走査法において必要となる時間窓幅を大幅に低減し、アレイを大型化することなく、かつ、角度分解能と距離分解能を両立することを可能とする信号処理技術を開発した。実測データを用いて、提案法の有効性を確認した。

### 1. はじめに

海洋調査船や海底探査ビークル等（以下、ビークルと呼称）では、船底に取り付けたアクティブソーナーにより、海底地形の計測や沈底物体の探査を行う。アクティブソーナー（以下、ソーナーと略す）とは、持続時間の短いパルス波の超音波を海底に向かって放射し、海底面や沈底物からの反射波が到来する時刻（距離）や反射波の方位を計測する装置である。その構成は、音波の送信機・受信器（音響センサ）を複数並べたセンサアレイからなることが多く、それにより反射源の距離だけでなく方位の計測も可能となっている。以上の原理に基づき、1回のパルス波送受信により、ソーナーの真下の海底地形断面を計測できる。図1に示すように、ソーナーを取り付けたビークルが移動しながらパルス波の送受信を行うことにより、海底地形の音響画像を生成することができる。

ソーナーの計測性能を評価する指標として、角度分解能と距離分解能がある。角度分解能は、反射体の方位を計測する際の分解能を表し、分解能が粗いと隣り合う二つの物体から到来するそれぞれの反射波の方位を分離できず、それらが一つの物体に見える。一方、距離分解能はソーナーから反射体までの距離を計測する際の奥行方向の分解能を表し、分解能が粗いと海底地形や沈底物体の凹凸を精度良く計測できない。

角度分解能を向上させるには、一般にソーナーのセンサアレイ開口（両端の音響センサ間の距離）を大型化する必要がある。しかしながら、搭載装置に対する寸法・質量制約が厳しい小型水中無人機に対しては、極端に大きなソーナーを搭載することはできない。一方で、ヌル走査法を採用するなど信号処理により角度分解能を向上させる方策もあるが、この場合には計測信号に時間窓をかけて平均化する処理を行うため、一定数のデータサンプルを必要とする。特に、音響センサの数が多ければ多いほどセンサアレイ全体の性能は向上する可能性があるものの、適応信号処理に必要なデータサンプル数も増大するため、角度分解能は向上する一方で距離分解能が劣化するというトレードオフが発生する。

\*1 ICTソリューション本部 CIS 部

\*2 総合研究所振動研究部

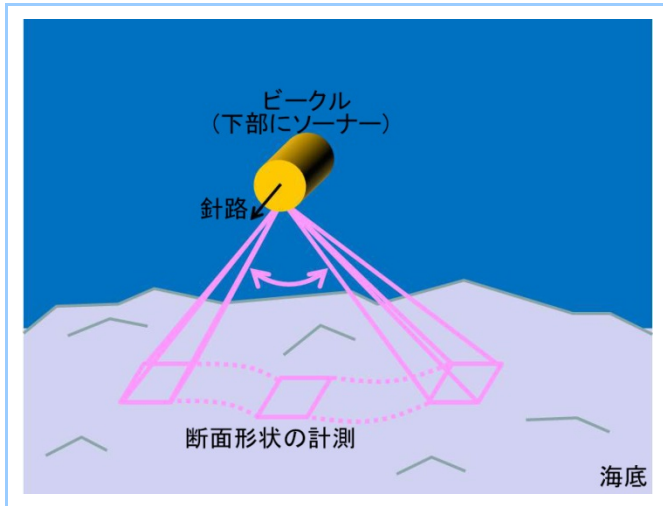


図1 ビークルによる海底地形の計測・海底沈底物の探査

そこで本稿では、このような距離分解能と角度分解能のトレードオフを解決するために開発した、適応信号処理に基づく方位推定技術<sup>(1)</sup>について述べる。特に、本技術の有効性について、実際のソーナーで取得したデータによる海底断面の計測結果を用いて紹介する。

## 2. センサアレイを用いた海底地形計測・沈底物体探査の原理

パルス波の送信時は、同じ波形の音波を各送信機から放射することにより、特定の方向においては各音波が重なり合い、高い送波レベルが得られる。一方で別の方位については各音波が互いに打ち消し合い、送波レベルが低くなる。このとき、各送信機の波形の位相を送波前に適切に調整することにより、特定の方位に対する送波レベルを上げたり、別の方位に対する送波レベルを意図的に下げたりすることができる。これにより、送信アレイ全体を一つの送信機と見立てたとき、送信機の指向性パターンをソフトウェアで制御できる。受信時も同様に、各受信器が計測した音波の位相を調整してそれらを加算することにより、特定の方向に対する受信感度を高めたり、逆に極端に弱めたりすることができる。センサアレイの指向性パターンにおいて受信感度が特に高い領域を“ビーム”・受信感度が極端に低い領域を“ヌル”と呼称する。また、位相調整(ソフトウェア)による送信・受信アレイの指向性パターン形成を“ビームフォーミング”と呼称する。

図2を用いて、ビームフォーミングに基づく反射体の方位推定の原理を説明する。まず、この図に示すように、 $M$ 個のセンサが時刻 $k$ において受信する信号ベクトル(複素ベースバンド信号ベクトル)を $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ とおく。この受信信号ベクトルが方位 $\theta$ からの反射波を含んでいる場合、

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{a}(\theta)s(k) + \mathbf{n}(k), \quad \mathbf{a}(\theta) = [a_1(\theta) \ \cdots \ a_M(\theta)]^T$$

と書ける(2)。ここで、 $s(k) \in \mathbf{C}$ と $\mathbf{n}(k) \in \mathbf{C}^{M \times 1}$ はそれぞれ反射波の波形および加法性白色ガウス雑音(観測雑音)を表す。 $\mathbf{T}$ は転置作用素を表す。 $\mathbf{a}(\theta)$ は各素子に到来する反射波の位相差を表す方向ベクトルである。位相差は、反射源と各センサの間の距離(伝搬距離)の差によって生じる。図3に示す通り、伝搬距離の差は $(m-1)d \sin \theta$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ と表せるため、反射源の方位によって変わる。なお、 $d$ はセンサの素子間隔を表す。今、水中音速を $v$ とおくと、各センサに到来する反射波の時間遅れは

$$\tau_m(\theta) = (m-1) \frac{d \sin \theta}{v}, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

と表せる。時間遅れは位相差と等価であるから、上式の方法ベクトルの要素 $a_m(\theta)$ は

$$a_m(\theta) = \exp(-j2\pi f \tau_m(\theta)), \quad m = 1, 2, \dots, M$$

となる。ここで、 $f$ はソーナーが送信する超音波の周波数を表す。これは、図2の位相調整を行うアレイウェイトベクトルを $\mathbf{w} = M^{-1}\mathbf{a}(\theta)$ とおくことで、アレイ出力が

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k) = s(k) + M^{-1}\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{n}(k)$$

となり、雑音の影響はあるものの、反射波 $s(k)$ が得られることを意味する。ここで、 $H$ はエルミート転置作用素を表す。次に、受信信号ベクトルが方位 $\theta_1$ と $\theta_2$ から到来する二つの反射波からなる場合には、

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{a}(\theta_1)s_1(k) + \mathbf{a}(\theta_2)s_2(k) + \mathbf{n}(k)$$

となる。この場合でも、アレイウェイトベクトルを $\mathbf{w} = \mathbf{a}(\theta_1)$ とすることにより、 $s_2(k)$ やノイズ $n(k)$ を抑圧しつつ方位 $\theta_1$ から到来する信号 $s_1(k)$ が得られる。逆に $\mathbf{w} = \mathbf{a}(\theta_2)$ とすることで、今度は方位 $(\theta_2)$ から到来する信号 $s_2(k)$ が得られる。このように $\mathbf{w} = \mathbf{a}(\theta)$ とおくことで、任意の方位 $\theta$ に対して強い感度を持つ指向性パターンがソフトウェアで瞬時に得られる。これを応用して

$$\mathbf{W} = [\mathbf{a}(\theta_1) \quad \mathbf{a}(\theta_2) \quad \cdots \quad \mathbf{a}(\theta_N)], \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta_1, \dots, \theta_N \leq \frac{\pi}{2}$$

とおくことで、全方位に対する信号レベルの強さ(角度スペクトラム)

$$\mathbf{Y}(k) = [y(\theta_1, k) \quad y(\theta_2, k) \quad \cdots \quad y(\theta_N, k)]^T = \mathbf{W}^H \mathbf{x}(k)$$

を即座に計算することができる。実際に反射源が存在する方位に対応したアレイ出力レベルは大きくなり、なにも存在しない方位に対応するアレイ出力レベルは小さい値となる。これが、ビームフォーミングに基づく基本的な到来方向推定手法である。以上の原理を踏まえると、 $|\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)|$ をセンサアレイの指向性パターンとして定義するのが自然である。センサの素子間隔  $d$  を半波長に設定し、センサの数  $M$  を 10 とした場合と 40 とした場合の指向性パターンを、[図3](#)に示す。この条件では、センサの数が多い方が大きなセンサである。この図は $-20$ 度の方位に対してビームを形成した場合( $\mathbf{w} = \mathbf{a}(-20\pi/180)$ )の指向性パターンであるが、センサの数が 40 個の場合のビームの幅は 10 個の場合に比べて細いことが分かる。このビームの幅が角度分解能を表しており、この結果から、センサを大型化するにつれて角度分解能が向上することが分かる。また、 $-20$ 度以外の方位に対する感度についても、センサの数が 40 個の場合の方が、ピーク値との落差が大きいことが分かる。これは、センサが大きい方が、指定した方位に対する信号だけをより正確に取得できることを意味する。この方式では、時刻 $k$ の受信信号の瞬時値のみを用いて方位を計算できるため、距離(時間)分解能が高い。その反面、角度分解能はビーム幅に依存するため粗く、隣接する二つの反射源を分離できない場合がある。そこで、次章で述べるような、適応信号処理に基づく方位推定技術が既に提案されている。次章では、特に角度分解能が高い MUSIC (Multiple Signal Classification) とよばれる方位推定技術<sup>(3)</sup>を紹介して距離分解能の粗さについて述べ、その問題を解決できる方位推定技術を紹介する。

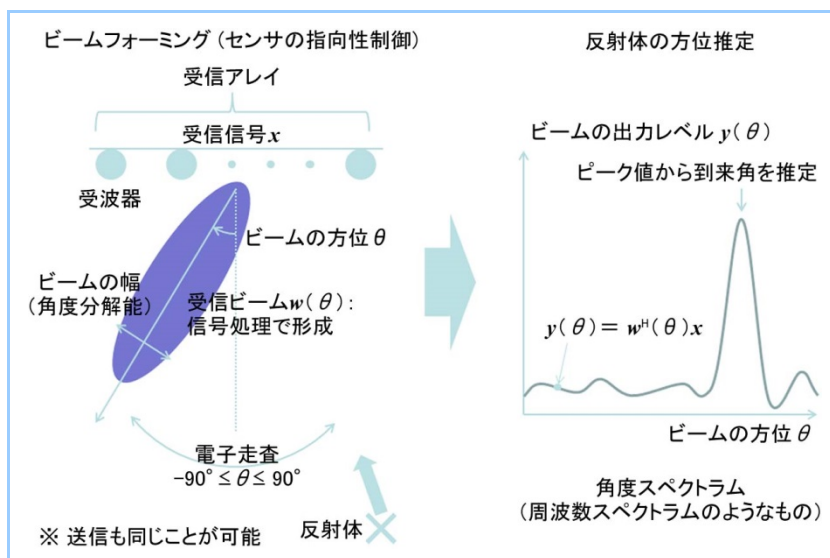


図2 ビームフォーミングに基づく反射体の方位推定

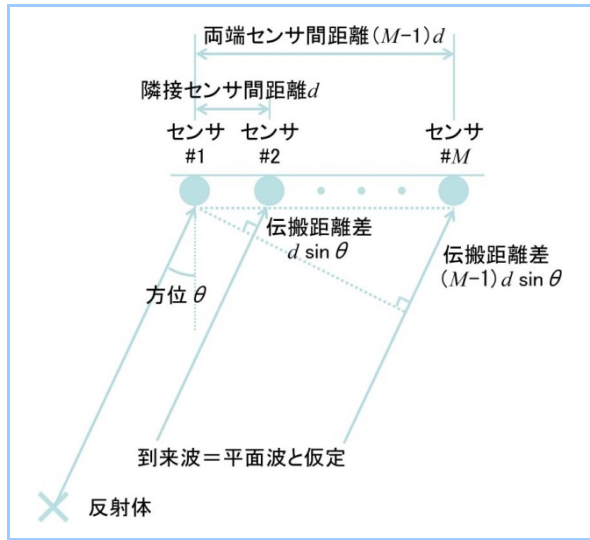


図3 音源(反射体)からセンサへの伝搬距離と方位の関係

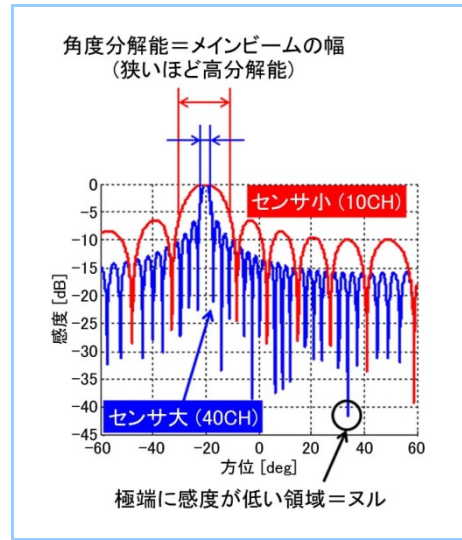


図4 指向性パターンの例(理論値)

### 3. 開発した信号処理アルゴリズム

図4にセンサアレイの指向性パターンの例を示した。この図を見ると、随所で極端に感度が低い領域(ヌル)が存在することが分かる。この図から明らかなように、ヌルの幅はビーム幅よりもはるかに細い。実際、前章で述べたようなビームではなくヌルを用いることで、センサアレイの角度分解能が大幅に向上することが知られている<sup>(2)</sup>。ヌルを用いた方位推定の基本的な考え方は、全ての反射波に対してヌルを形成する指向性パターンを適応信号処理技術により求め、その指向性パターンの逆数を角度スペクトラムとみなす、というものである。全ての反射波に対してヌルが形成されるとは、

$$\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_l) = 0, \quad l = 1, 2, \dots, L$$

が成立することを意味する。ここでLは反射源の数を表し、 $\theta_l$ は第l番目の反射源の方位を表す。この条件を満足するアレイウェイトベクトル $\mathbf{w}_0 \neq \mathbf{0}$ を得る方法は、たとえば次の制約付き最適化問題

$$\mathbf{w}_0 = \underset{\mathbf{w}}{\operatorname{argmin}} E [|\mathbf{w}^H \mathbf{x}(k)|^2], \quad \text{s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{w} = 1$$

を解くことである<sup>(2)</sup>。ここで、 $E[\cdot]$ は期待値演算子を表す。この最適解は、アレイ受信信号ベクトルの空間自己相関行列 $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}^H(k)\mathbf{x}(k)]$ の最小固有値に対応する固有ベクトルであることが知られている<sup>(2)</sup>。この考え方を応用・改良したものが有名な MUSIC アルゴリズムであり、各方位 $\theta_n$ に対する角度スペクトラムは

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta_n) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta_n)\mathbf{a}(\theta_n)}{\mathbf{a}^H(\theta_n)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta_n)}, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

である<sup>(2)(3)</sup>。ここで、 $\mathbf{E}_N \in \mathbf{C}^{M \times (M-L)}$ は、 $\mathbf{R}_x$ の小さい $N-L$ 個の固有値に対応する固有ベクトルを並べた行列である。このMUSICを用いた方位推定により、センサアレイを大型化せずに角度分解能をビーム走査よりも向上させることが可能であるため、超分解能法とよばれることがある。

常に特定の音源や反射源のみが存在している定常的な環境であれば、MUSICは非常に有効な手法である。しかし本稿のテーマである海底地形の計測や小型の沈底物の探査では、受信信号ベクトルの数式モデルは

$$\mathbf{x}(k) = \sum_{l=1}^{L(k)} \mathbf{a}(\theta_l(k))s_l(k) + n(k)$$

と表現すべきであり、時間の経過とともに反射源の方位 $\theta_l(k)$ や反射源の数 $L(k)$ が変化すること



で問題となるのが、空間自己相関行列 $\mathbf{R}_x$ の推定である。期待値は標本平均で近似できるため、相関行列の推定は

$$\mathbf{R}_x(k) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \mathbf{x}^H(k-p)\mathbf{x}(k-p)$$

のように行うことが多い。ここで $P$ は相関点数を表し、サンプリング周期を $T_S$ とおくと $PT_S$ が時間窓幅となる。反射源の方位や反射源の数が一切変化しない環境では、 $P$ を大きくとることにより精度良く相関行列を推定できる。しかし本件では $P$ は距離(時間)分解能に比例するため、可能な限り小さい値に設定することが望ましい。一方で、相関行列の標本平均 $\mathbf{R}_x(k)$ をフルランクにするためには、 $P \geq M$ を満足するように $P$ を設定しなければならない。これは、センサの数が多ければ多いほど、相関点数を大きく設定せざるを得ないことを意味する。前述した通りセンサの数が多ければ角度分解能が向上するが、相関行列計算の際にその効果が打ち消される。

そこで我々は、時間窓幅を拓げずに相関点数を増やすことで相関行列をフルランクとし、距離分解能と角度分解能を両立させる技術を開発した。最も重要なポイントは、時間窓幅を拓げる以外に如何にして相関点数を増やすか、ということであった。そこで空間平均法<sup>(2)</sup>とよばれるテクニックを導入し、短い時間窓幅で多くの相関点数を得ることに成功した。図5にその原理を示す。この図では簡単のためセンサの数を6としているが、実際のセンサアレイでは数十~100個ものセンサを用いることに注意されたい。まず、センサアレイ全体をいくつかのサブアレイに分割する。サブアレイの数と一つのサブアレイを構成するセンサの数をそれぞれ $N_S$ および $M_S$ とおくと、

$$N_S = M - M_S + 1$$

という関係式が成立する。各々のサブアレイの標本相関行列を $\mathbf{R}_x^q(k) \in C^{M_S \times M_S}$ ,  $q = 1, 2, \dots, N_S$ とおき、それらの算術平均をとることで

$$\mathbf{R}_x(k) = \frac{1}{N_S} \sum_{q=1}^{N_S} \mathbf{R}_x^q(k)$$

のように標本相関行列が得られる。この処理により、相関点数が元の $P$ (各サブアレイにおける処理の相関点数)から $N_S P$ に倍増する。加えて、Forward-Backward 空間平均処理<sup>(2)</sup>を採用することで更に相関点数は2倍になるため、最終的な相関点数は $2N_S P$ となる。相関行列がフルランクとなるためには、

$$2N_S P \geq M_S$$

を満足する必要がある。ところで前述の通り $N_S = M - M_S + 1$ であるから、この不等式は

$$\frac{M+1}{1+0.5P^{-1}} \geq M_S$$

と書き直せる。距離分解能は、本技術を適用する製品の要求機能により与えられる。よって、距離分解能に比例する相関点数 $P$ が要求性能により定められたとき、設定すべきサブアレイのセンサ数は

$$M_S = \frac{M+1}{1+0.5P^{-1}}$$

となる。これより小さい値に $M_S$ 設定しても良いが、その分だけアレイ開口長が小さくなり角度分解能が劣化するため、そのメリットが存在しない。よって上式に基づいてサブアレイのセンサ数を設定したとき、相関行列をフルランクにしつつ最大の角度分解能を達成できる。

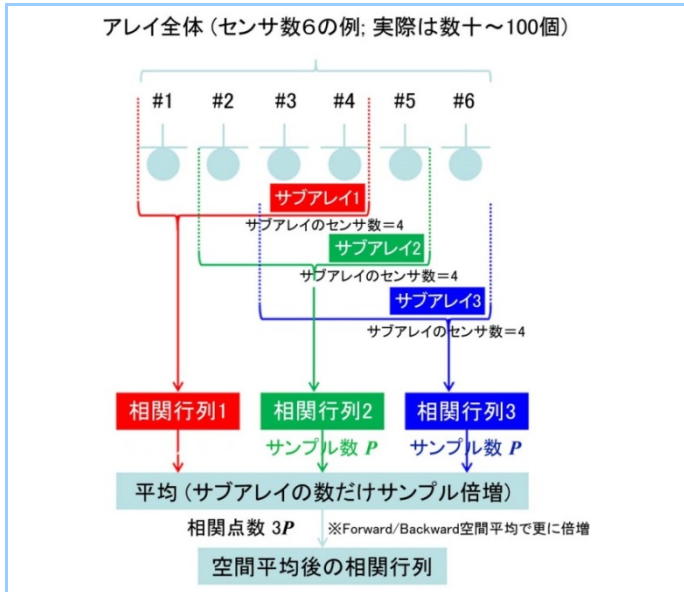


図5 サブアレイ分割と空間平均処理による相関点数の増大

具体的な数値を用いて提案法の有効性を示す。たとえばセンサの数  $M = 100$  である場合を考える。このとき、従来であれば相関点数は  $P \geq 100$  を満足するように設定する必要があり、センサが巨大な場合には距離分解能が犠牲となっていた。それに対して提案法を適用し、敢えて  $P = 4$  と微小な値に設定する。このとき、設定できるサブアレイのセンサ数の最大値は

$$M_s = \frac{100 + 1}{1 + 0.5 \times 0.25} \cong 89$$

となり、そのときのサブアレイの数は  $N_s = 100 - 89 + 1 = 12$  となる。よって最終的な相関点数は

$$2N_s P = 2 \times 12 \times 4 = 96 > M_s$$

となる。すなわち、元の相関点数はわずか4点であったのに対して、サブアレイ分割を行い適切なサブアレイの大きさとするすることで、時間窓幅は  $4T_s$  のままで(距離分解能を犠牲にせずとも)、相関点数を 96 点まで増やせることが分かる。

#### 4. 実測データ取得試験

図6に、実測データ取得試験の概略図を示す。本試験では水深 10~15m の海底に3種類の異なる形状の物体を設置し、その直上にできるだけ船を静止させてソーナーによる定点観測を行った。計測したソーナーのセンサアレイの受信信号に対して、2章で述べたビーム走査と3章で述べた提案法を適用した。

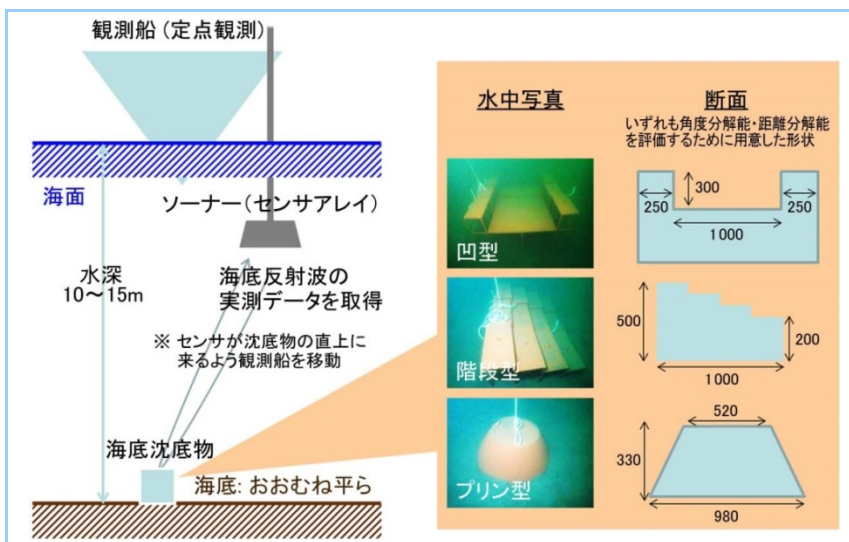


図6 実測データ取得試験の様子

その結果の比較を図7に示す。いずれの形状の物体に対しても、ビーム走査はソーナー画像から物体の断面形状を推定するのは困難である。それに対して提案法では、距離・角度分解能とも高く、実際の断面形状に近いソーナー画像が得られていることが分かる。

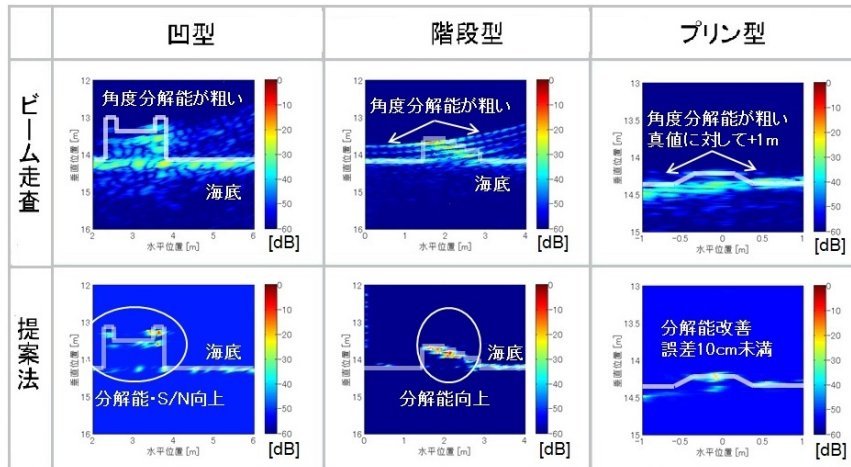


図7 3種類の物体断面の計測結果

## 5. まとめ

船舶・水中無人機に搭載するアクティブソーナーのセンサアレイを対象とし、距離・角度分解能のトレードオフを解消した、適応信号処理に基づく方位推定アルゴリズムを開発した。具体的には、従来のビーム走査よりも精度良く海底地形計測や海底沈底物の探査を行うために、MUSIC とよばれる高精度な方位推定技術を導入した。更に、アレイ全体をサブアレイに分割することで、MUSIC の処理に必要な時間窓幅を大幅に短縮できる技術を確認した。特に、サブアレイの分割方法の指針を明確化し、要求された時間窓幅に対して、できるだけ多くのサブアレイセンサ数を確保して高い角度分解能を保持できる技術を開発した。実測データを用いて提案法の有効性を評価した。今後は、開発した技術を実時間で処理するためのシステム検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- (1) 藤島泰郎, 空間平均法と MUSIC による海底の物体形状測定 -実測データを用いた評価-, 電子情報通信学会総合大会 2016, 2016.
- (2) 菊間信良, アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, 1998.
- (3) R.O. Schmidt, Multi Emitter Location and Signal Parameter Estimation, IEEE Trans., vol.AP-34, No.3, pp.276-280, Mar., 1986.