

## 合成開口ソナーを用いた海底熱水噴出域のマッピング

澤 隆雄\*・笠谷貴史\*・八木原 寛\*\*

### 要 旨

音波を用いた水中でのリモートセンシング装置であるソナーは、日本では魚群探知機として広く普及しており、また海底地形の作成において必須の装置である。合成開口ソナーは従来のソナーより何十倍も性能が高く、近年の資源問題への関心の高まりから海洋資源探査等への活用が期待されている。

筆者らは熱水噴出域等での海底探査を見据え、中性浮力曳航体に合成開口ソナーを搭載した探査システムを開発した。このシステムに搭載する合成開口ソナーは指向性の広い音波を送信し、ソナーの動揺に合わせて電氣的に受信アレイの指向性を変更し、受信アレイを安定させる。また信号処理過程において sinc 関数のピーク値を高速に演算する手法を用いて、100倍以上高速に処理を実行できる。中性浮力曳航体は浮力材を用いることで水中重量を 0kg とし、かつ曳航索の途中にデプレッサ（おもり）を取り付けることで母船動揺による曳航索の張力変動を吸収し、曳航体の姿勢を安定させる。曳航索にはイーサネット線が入っており、生のソナーデータを母船に送信する事が可能で、ソナー画像を確認しながらソナーに設定変更の指示を送る事ができる。このシステムを筆者らは「響竜」と名付けた。

この「響竜」を用いて 2010 年 10 月、鹿児島湾北部の若尊カルデラ内の熱水噴出域の探査を実施した。約 7km<sup>2</sup> の海底面を探査した結果、これまでの潜航調査で確認された範囲よりも広範囲に熱水噴出域が存在している事が確認された。サツマハオリムシの生息域であるマウンドの部分では、熱水噴出に伴って立ち上るフィラメント状の音波反射を明瞭に捉え、付近に露岩や生物生息域と考えられる地形を検出することができた。またカルデラ最深部である約 200m の海底では、熱水兆候を伴う海底の起伏に加え、熱水噴出兆候がみられない箇所にも過去の熱水噴出域とも考えられる地形を多数確認した。

**キーワード：**熱水噴出孔・探査・ソナー・合成開口・若尊カルデラ

### 1. はじめに

ソナーは Sonar と記し、sound navigation and ranging の頭文字である。直訳すれば「音響航行と測位（装置）」であり、音波を用いた水中でのリモートセンシング装置である。1912 年のタイタニック号の悲劇で水中の障害物を探知できるソナーの重要性が認識され（海洋音響学会，2004）、第一次大戦中にはドイツの潜水艦を探知するために大きく発展する事となった。日本でも古くから研究が進められており、戦後は魚群探知機として広く普及し、現在では海底地形の把握のためには必須の装置となっており、調査船に当たり前のように装備され

るに至った。

近年、資源問題への関心の高まりから海洋資源が注目されている。レアメタルやレアアースなどを安定確保する事が急務となった現在において、特に 1980 年後半に発見された海底熱水噴出域周辺のレアメタルを含む鉱床（臼井，2010）は、将来の日本の経済成長を支える非常に重要な資源と考えられている。日本は世界第 6 位の排他的経済水域（EEZ）を持っており、この広大な EEZ 内に多くの熱水鉱床等を含む海底資源があると推定されている。そのため、この海底にある金属熱水鉱床を探査・探鉱するための技術確立が国家的にも重要であるとの認識の元、多くの調査船や有人および無人探査機を用いた、

2011 年 9 月 13 日原稿受付；2011 年 11 月 4 日受理

\* 独立行政法人海洋研究開発機構

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島 2-15

© 2011 SEGJ

\*\* 鹿児島大学大学院理工学研究科附属南西島弧地震火山観測所

〒892-0871 鹿児島市吉野町 10861

最先端の観測装置による海域試験と調査研究が続けられている。この広大な EEZ の何処に有望な熱水鉱床があるのかを特定するには、様々な探査技術を駆使する必要がある。物理探査の観点からは、探鉱地点決定のための精査が最終的には必要であるが、精査をする候補地域を絞り込むためには、最も基礎的な情報である海底地形や重磁力のデータの効率的な収集が必要不可欠である。この中でも特に海底地形は最も重要な観測項目である。広域の地形調査には一般的に 10~20 kHz 帯の音波を用いた測深器（たとえば、L-3 ELAC Nautik 社の Seabeam システムなど）を用いるのが一般的であるが、大水深になればなるほど音響ビームのフットプリントが大きくなる、つまりは解像度が低下するため、熱水鉱床の有望域を探査する上で十分とは言えない。

広い海域をくまなく詳細に調査するためには、従来のソナーよりも高精度かつ幅広いスワスをもつソナーを用いた効率的な調査が必要である。そこで広域リモートセンシング装置の一つである合成開口ソナー（SAS : Synthetic aperture sonar）が注目されている。SAS は 1950 年代に、合成開口レーダー（SAR : Synthetic Aperture Rader）とほぼ同時に開発された。この SAS は、移動しながら目標に何度も音響ビームを照射し、その反射波を相関処理する事で分解能が何十倍にも向上する。しかしその性能を発揮するためにはソナーが安定して前進する必要があり、波浪によって常に動揺する水上船舶には搭載が難しかった。この安定性の問題は、近年に急速に発達した自律型無人潜水機（AUV : Autonomous underwater vehicle, UUV : Unmanned underwater vehicle と呼ばれる）の登場によって大きく前進した。AUV は母船と独立して自由に行動できることから、波浪の影響をほとんど受けない大水深を安定した姿勢で航行できる。AUV に SAS を搭載することで、極めて高精細な海底音響画像が取得できることが実証された（Hagen, 2006）。SAR の有用性を実証したプラットフォームが人工衛星であったように、SAS にとってのそれは AUV であった。SAS を用いれば、幅広いスワスをとって従来ソナー以上の解像度で海底面を捉えることができるため、光学カメラでは不可能な 1km 離れた距離からの観測が可能であり、また従来ソナーよりも飛躍的に多い情報量で海底を観測する事ができる（Cutrona, 1975）。しかし現在の AUV は主として電池容量の問題で、長時間の連続航走が必要となるような広範囲のデータ取得は困難である。また、AUV は母船と高速通信する手段が無い場合、リアルタイムでソナーの得た情報を確認することができない。

筆者らは効率的な調査が可能と考えられるこのソナーを中性浮力曳航体に搭載し、資源探査に活用する事を視野にいれながら様々な動作検証と実海域試験を実施し

てきた。中性浮力曳航体の姿勢制御性は AUV に劣るものの、一般的な吊下げ式の曳航体より安定した姿勢で水中を航行可能である（徳山, 2000）。加えて、AUV では難しいリアルタイムでのソナー状態と音響画像の確認ができるため、特に開発段階において最適なプラットフォームと考えている。曳航ケーブルで船舶と繋がっていることから動揺の影響は避けがたいが、それを克服するための動揺補正技術もあわせて開発している。この本稿ではまず 2 章で SAS の原理について説明する。3 章では海洋研究開発機構で開発した SAS と、それを搭載する中性浮力曳航体を紹介する。そして 4 章ではこの曳航体に SAS を搭載して行った海底熱水噴出域の探査結果を報告する。

## 2. 合成開口ソナーの原理とその信号処理

### 2.1 合成開口ソナーの歴史と現状

ソナーは遠隔目標を広範囲に調査できる反面、遠距離の探査ではソナーの進行方向分解能（アジマス分解能）が低下する。これは送波ビームが遠距離において広がるため、波動を用いる機器に共通する欠点である。その広がりを抑制するためには、通常は大きく、扱い難く、そして高価な送受波器を用いねばならない。このような問題を解消するため、合成開口技術は 1950 年代に航空機レーダー用の技術として考案され、1980 年代に人工衛星搭載レーダー用として SAR が成果を上げたのが始まりである。SAR の特徴は、移動しながら目標へ何度もパルス波を照射し、その反射波を集めコンピュータ上で相関処理することで、遠距離においても近距離同等の高いアジマス分解能が得られる点にある。

この技術はパルス圧縮技術の応用と位置付けられ、ソナーにも適用できることから、それを適用したソナーが SAS である。したがって、海底面での音波反射強度を計測して音響画像化するサイドスキャンソナーと比較しても、SAS の機械的構造に大差は無い。また広域の海底面高度を計測する測深機に対しても、合成開口技術は適用できる。サイドスキャンソナーと測深機の関係は白黒カメラとレーザースキャナの関係と同じであるが、SAS は遠距離での高分解能を追及するため、多くの SAS は探知距離で有利なサイドスキャンソナーを原型に開発されている。SAS が大きく異なるのは受信データの処理であり、特に音響画像生成（もしくは高度計測）過程に組み込まれた動揺補正処理過程では、高度な複素演算を実行する必要がある。SAS が検討されはじめた当時は、大学や軍所属研究所などでわずかに基礎研究される程度であり、レーダー分野と比較すると研究規模はかなり小さかった。その理由は単純に海底面よりも地球表面のほうが注目されていたからであり、特に経済や政治、軍事的側面が大

きかった。転機は 1990 年代に入った頃に訪れる。コンピュータ技術の進歩、特に DSP と呼ばれるデジタル演算装置により、合成開口処理が要求する高度な演算のデジタル処理化に実現の目処が付いたことが大きい。NATO 海軍はこの頃から NURC (Nato Underwater Research Center) において SAS に関する研究を推進しており、それは水中における戦闘を有利に進めるため、無人潜水機を用いた高分解能海底地形の取得に強い関心を持っていたためである。また海底下を SAS で探査する事も試みられ、1995 年頃には Raytheon Electronics System が機雷探知を目的として SAS を製作した。このソナーは曳航体に搭載されていた。さらに海底高度も計測できるインターフェロメトリック合成開口ソナー (InSAS) も製作されており、現在も研究が進められている (浅田, 2011)。これまでに Applied Signal Technology 社, Thales 社, QinetiQ 社, Ultra Electronics 社および IXSEA 社などから商用の SAS が発売されたが、特に Edgetech 社と Sensotek 社からの SAS は良い成果を上げている。

### 2.2 基本原理

ソナーの送信波形は周波数変調波の一つであるチャープ信号を用いることが多い。一般的なソナーにおける目標探知では、物体によって反射された送信波、すなわち受信音波は 1 度だけ時間方向にのみ相関処理され、音響画像化される。

振幅 1 のチャープ波  $s(t)$  を数式で表すと次のようになる。

$$s(t) = \begin{cases} \exp[j(\omega_0 t + \alpha_c t^2)] & -\frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau}{2} \\ 0 & t \leq -\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2} \leq t \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\omega_0$  は中心角周波数、 $\alpha_c$  は掃引周波数変化量を  $\Delta\omega$  として  $\alpha_c = \Delta\omega/2\tau$ 、 $\tau$  は周波数掃引時間で、パルスの時間幅とみてもよい。 $s(t)$  の共役複素を  $s^*(t)$  とすると、このチャープ波の自己相関  $g(t)$  は次のように表される。

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t+t')s^*(t')dt' \\ &= \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \exp[j\{\omega_0(t+t') \\ &\quad + \alpha_c(t+t')^2\}] \exp[-j\{\omega_0 t' + \alpha_c t'^2\}] dt' \\ &= \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \exp[j(\omega_0 t + \alpha_c t^2)] \exp[j2\alpha_c t t'] dt' \\ &= \exp[j(\omega_0 t + \alpha_c t^2)] \frac{\sin(\alpha_c \tau t)}{\alpha_c \tau t} \end{aligned}$$

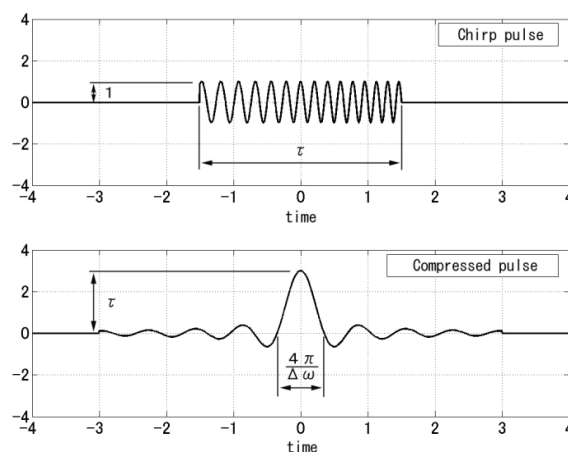


Fig.1. Chirp pulse(top) and compressed pulse(bottom). The compressed pulse is a function  $\text{sinc}(\alpha_c \tau t)$ .

$$= \tau \exp[j(\omega_0 t + \alpha_c t^2)] \text{sinc}(\alpha_c \tau t) \quad (2)$$

理解の簡単化のために、最後の式から指数関数を無視し、その波形と送信波形とを比較すると、時間方向にパルス幅が短く圧縮されていることがわかる (Fig. 1)。すなわちチャープ波を送信波として使って受信波形を相関処理することで、目標からの反射波を時間的に鋭いピークを持つ波形として検出する事ができる。これにより目標までの距離 (レンジ) をより正確に計測する事が可能となる。

SAS では一つの目標識別に複数の受信波形を用い、移動方向に相関処理を行って仮想的に長大な受信アンテナを生成し、移動方向の分解能、すなわちアジマス分解能を向上させる (Fig. 2)。ここで合成開口システムを搭載したプラットフォームが一定速度で移動しつつ、一定間隔でパルスを繰り返し放射して反射波を受信するものとする。時間方向と移動方向は垂直であるので若干の近似

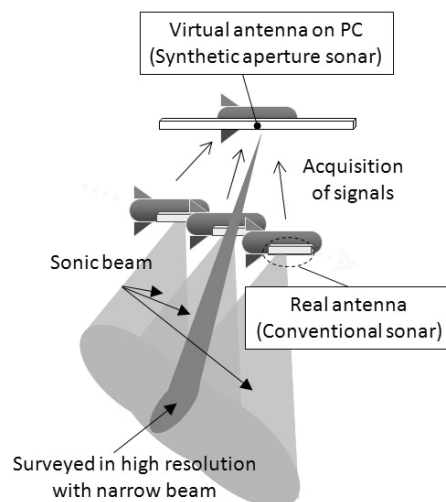


Fig. 2. Principle of synthesizing aperture.

が必要となるが、合成開口処理は時間関数を含めずに実行可能である。音波を送信した位置(番号)を  $n$  とし、物体からの反射波がソナーの移動によってどのように変化するかを表す関数を  $R(n)$  で表す。単独目標からの反射音波によって記録される信号は  $R(n)$  は

$$R(n) = \exp\left\{-j\left(\frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{2\pi v^2 n^2}{R_0 \lambda}\right)\right\} \quad (3)$$

と記述できる。ここで  $R_0$  は目標最近傍での距離、 $\lambda$  は送信波の波長、 $v$  はパルス送信間隔におけるソナー前進距離(速度)であり、また  $n$  は最近傍において0となる符号付き整数である。この信号はソナーの位置  $n$  の変化によって位相が変化するが、これは時間  $t$  の変化によって位相が変化する事と同じである。したがって  $n$  についても相関処理が実行可能で、この相関処理を合成開口処理と呼ぶ。合成開口処理後の波形  $G(n)$  は

$$\begin{aligned} G(n) &= \int_{-\infty}^{\infty} R(n+n') R^*(n') dn' \\ &= \int_{-T_1/2}^{T_1/2} \left\{ -j \left[ \frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{2\pi v^2}{R_0 \lambda} (n+n')^2 \right] \right\} \exp\left\{ j \left[ \frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{2\pi v^2}{R_0 \lambda} n'^2 \right] \right\} dn' \\ &= T_1 \exp\left(-j \frac{2\pi v^2}{R_0 \lambda} n^2\right) \text{sinc}\left(\frac{2\pi v^2 T_1}{R_0 \lambda} n\right) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで  $T_1$  は合成開口長である。この合成開口処理により、受信波形はソナーの移動方向に鋭いピークを持つ波形として検出できるため、目標のソナー進行方向における位置(アジマス)をより正確に計測する事が可能となる。

これら計算結果の  $g(t)$  および  $G(n)$  は観測範囲内におい

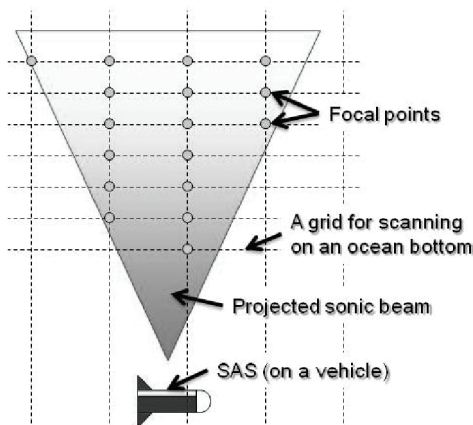


Fig. 3. Adaptive beam-focus.

ては独立な関数となるため、 $s(t)$ の代わりに  $g(t)$ を受信波形とみなして  $R(n)$ を計算する事が出来る。この時  $G(n)$ は  $G(n,t)$ という二つの独立変数を持つ関数として表す事ができ、地表面の情報を有している。この  $G(n,t)$ を適切にスケール変換することで、最終的に高精度な海底音響画像を得る事となる。

### 2.3 動揺補正処理

SASは非常に高い性能を持っているが、その性能を発揮するのはソナーが一定速度で安定して移動している時に限定される。観測中にソナーが揺れると、受信音波の振幅と位相には狂いが生じる。サイドスキャンソナーのような従来型ソナーでは、この揺れの振幅分だけ最終処理結果である音響画像がずれて表示されるだけであるが、SASではその狂いにより仮想アンテナが歪み、合成開口処理がうまく機能しなくなる弱点を持っている。海では波と潮流が決して止む事はないので、したがって動揺補正は必ず実施せねばならない。またソナーは必ず水中に存在するため、位置計測には全地球位置計測システム(GPS)だけでは不十分であり、音響測位装置や慣性航法装置、ドップラ式音響速度計測装置(DVL: Doppler Velocity Logger)などを併用してソナー位置を計測する必要がある。それら計測装置からの位置情報を用いることで、受信音波到達時刻の予想されるずれ量を計算し、合成開口処理に反映するのが動揺補正処理の基本である。さらにより正確な動揺補正方法として、受信信号同士の相互相関からずれを補正するDPCA(Displacement Phase Center Algorithm)(Raven, 1981)、生成画像同士の相互相関からずれを補正するPGA(Phase Gradient Autofocus)(Brown, 1988)などが用いられる。これらの方法は受信音波の情報を用いて補正を行ため、水中の温度変化などによる媒質のゆらぎを含めた補正をする事ができる。反面、受信音波の質が悪い場合には有効に機能せず、場合によっては結果を劣化させる。そのため状況に応じて具体的に観測対象を絞った処理をする必要がある。

筆者らは位置計測装置と多チャンネルの受信アレイを用いた動揺補正法を適用している。この動揺補正では指向性の広い音波を送信し、ソナーの動揺に合わせて受信アレイの指向性を変更して電的に受信アレイを安定させ、海底からの反射音波を受信する(Fig. 3)。この処理は受信音波の質によらず常に安定して動揺補正が実施できる利点がある。筆者はこれをアダプティブビームフォーカス補正と呼んでいる。

### 2.4 演算処理の高速化

ソナーに動揺がないと仮定すれば、合成開口処理は事前に算出したデータ列を用いて相関演算をすれば良い。

この場合は現在の計算機の性能でも十分にリアルタイム処理が可能である。しかし動揺する場合、受信音波の振幅と位相が変動するため、動揺情報の取得後にデータ列を再計算する必要がある。また送信波にチャープ波を用いる場合、受信波形は sinc 波形パルスに変換されるため、その短い幅のピーク値の取得にはデータ取得間隔、すなわち AD コンバータの動作クロックをより高速にする必

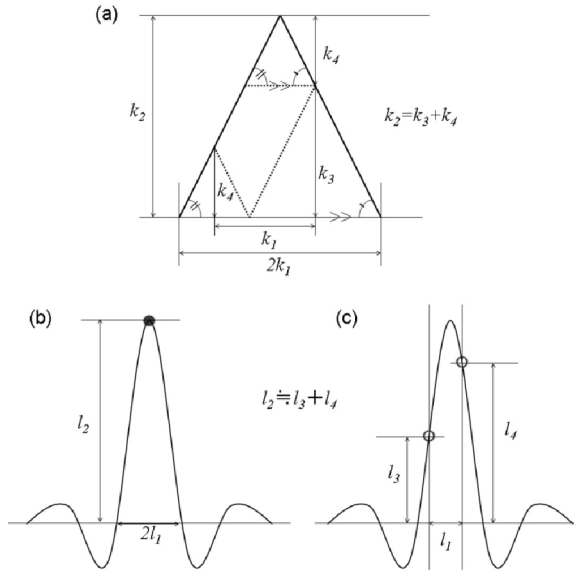


Fig. 4. Approximation on a sinc waveform.  $k_2$  is equal to  $k_3+k_4$  in (a). The horizontal distance  $k_1$  between the each peaks of the small triangles is equal to half of the big triangle's base. When we approximate a sinc pulse to an isosceles triangle, the amplitude of the pulse peak  $l_2$  in (b) which is shown as a filled circle in (b), is approximated to the sum of amplitude of the open circles in (c).

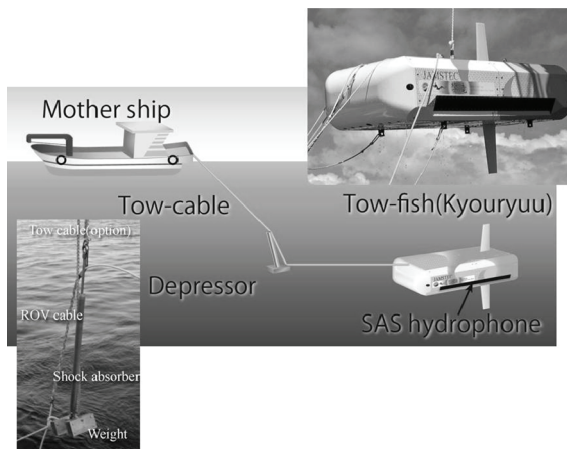


Fig. 5. A sketch of Kyouryuu system in tow. Upper right: The neutral buoyancy tow-fish loading the SAS. Lower left: The depressor with a weight and shock absorber for cancelling the heave of the mother ship.

要がある。これにより取得データは増大し、演算処理量も増大する。さらに先述の DPCA や PGA を追加で実行する事は、現在の計算機ではリアルタイム演算が非常に難しい。

そこで演算処理を高速化してリアルタイムに合成開口処理を実行するため、筆者らは sinc 関数のピーク値を高速に求める手法を用いている。この手法では相似な三角形の底辺と高さの比が一定であることを利用して、sinc 波形を二等辺三角形に近似し、sinc 波形のピーク値を、ピーク値を挟む 2つのサンプリングデータから求める (Fig. 4)。これによりデータサンプリング速度をサンプリング定理を満たす範囲で設定可能となるだけでなく、チャープ波帯域の情報が欠損しない範囲で相関処理後に大幅なデータ間引きができる。これらにより最大で 100 倍以上に処理を高速化できる (Sawa, 2009)。位相情報はこの過程で欠損しないため、信号のコヒーレント性への影響は極めて軽微である。

### 3. 曳航体搭載合成開口ソナーシステム「響竜」

#### 3.1 開発の経緯

AUV は SAS のプラットフォームとして十分な安定性を持つが、母船とのデータ通信が最大でも数百 kbps である音響通信に限られる。SAS で記録されるデータは従来型ソナーよりはるかに多く、例えば筆者らの制作した SAS では約 50Mbps のデータ量であり、音響通信で母船に生データを送る事は不可能である。そのため現状では AUV が母船に格納された後に、LAN ケーブルなどを接続してデータを回収する事になる。すなわち、観測中に海底情報を確認出来ない。これは実際の観測活動においては不利であり、観測効率が低下するという観点からも対策すべき課題である。

筆者らはこの課題の解決のために、中性浮力曳航体への SAS の搭載を試みた。曳航体と母船はイーサネット線と電力供給線が入った曳航索で接続し、生の受信データを母船に送信し、母船上で音響画像を確認しながら逐次ソナーに設定変更の指示を送る事ができる。曳航索の途中にデプレッサ (おもり) を取り付けすることで、母船の動揺による曳航索の張力変動を吸収し、曳航体の姿勢を AUV のように安定させる事ができる (Fig. 5)。曳航深度や行動範囲においては AUV に劣るが、中性浮力曳航体は観測効率において AUV に勝る点がある。この実証のために開発した中性浮力曳航体に SAS を搭載したシステムを、筆者らは「響竜 (きょうりゅう)」と名付けた。

#### 3.2 アダプティブビームフォーカス合成開口ソナー

Table 1 は先述したアダプティブビームフォーカス動揺補正を採用した、筆者らの開発した SAS システムの仕

様で、Fig. 6はソナーのブロック図である。ソナーは1chの送波器と8chの受波器を持ち、慣性計測装置(IMU)からの動揺情報と合わせて受信音波をソナーに記録し、かつ母船に転送する。母船に転送されたデータはノートパソコン型のコントローラで受信し、ただちに音響画像化する。このコントローラにはGPSが接続可能で、接続時は水中の曳航体の位置と動揺をより正確に把握することができる。コントローラと並列に接続されるオンライン合成開口処理装置では、合成開口処理をリアルタイムに実施し、合成開口後の音響画像を直ち確認することができる(Fig. 7)。これらはすべて100VACで動作する事から、一般的な可搬型発電機があれば使用可能である。このSASでは受波器と比較して相対的に小さい送波器を使用しているが、これは構成を簡単化し開発費を低減するためである。同じ大きさの受波器を用いるサイドスキャンソナーと比較して、感度と分解能が約40%程度低下し、また重量は若干増加するが、しかし合成開口処理による数十倍以上の性能向上はそれを十分に補う事が可能である。

3.3 中性浮力曳航体

Table 2は先述した中性浮力曳航体の仕様である。開

Table 1. Sonar specification.

Frequency	72-80 kHz FM chirp pulse
Operating Range	Max. 1000 m
Beam Width	6 Deg. in horizon 70 Deg. in vertical
Resolution	9 cm in both along and across track
Depression Angle	20 - 40 Deg.
Pulse Width	10 ms
Hydrophone array	total 1.5m in length with 8 Ch. elements
Projector	0.4m in length with 1 Ch. element
Depth rating	4000m

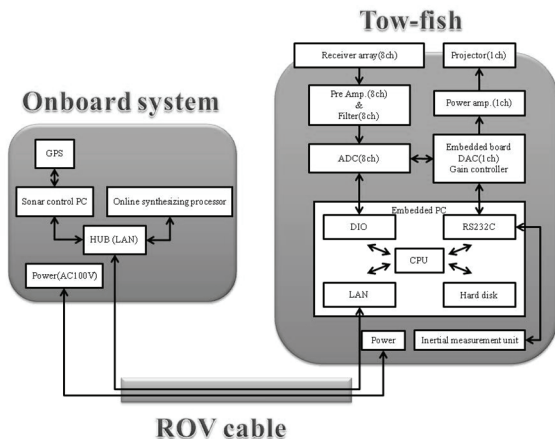


Fig. 6. Block diagram of Kyouryuu system.

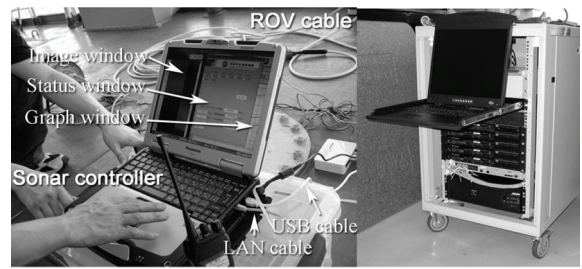


Fig. 7. Onboard electronics. Left: Sonar control PC shows sonar status and sonar image before synthesizing, and an operator can control embedded PC of the sonar on real time. GPS receiver fixes the position of sonar on the Earth and necessary for mapping. Right: Online synthesizing processor for generating synthesized sonar image on real-time.

Table 2. Towfish specification.

Size	2.3 m in length 1.3 m in width 1.5m in height
Weight	100 kg in air 0 kg in water
Depth Rating	100 m

発費を抑えるために浮力材は漁業用の浅海用のものを用いており、最大使用可能深度は100mである。また使用する曳航ケーブルが50mであり、漁船等の小型船舶で曳航する場合は10m以浅の潜航深度を想定した設計となっている。デプレッサはショックアブソーバを有しており、母船の上下動などによる曳航張力の急変動を吸収する機能を持っている。

3.4 「響竜」の海域動作試験

2010年1月に初めて海域での着揚収を含む水中動作を実施後(澤, 2010), 2010年8月にシステム全体の総合動作確認を目的として、静岡県沖相模湾の手石海丘付近(Fig. 8)において海域試験を実施した。図の中央を

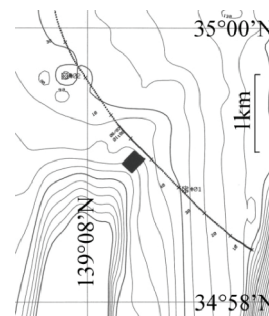


Fig. 8. Track of the tow-fish and surveyed area at Sagami bay. The sonar images and the sonar attitude at the painted square area are processed and shown in this paper.

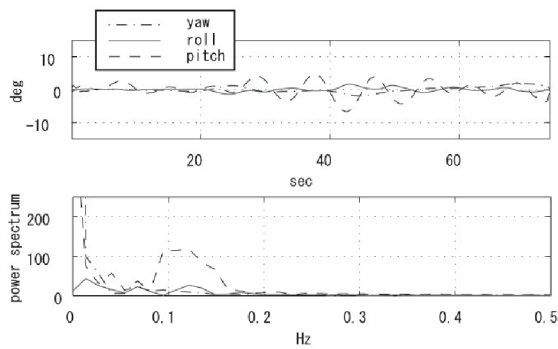


Fig. 9. The upper graph shows yaw, roll and pitch of the tow-fish. The lower shows those power spectrum.

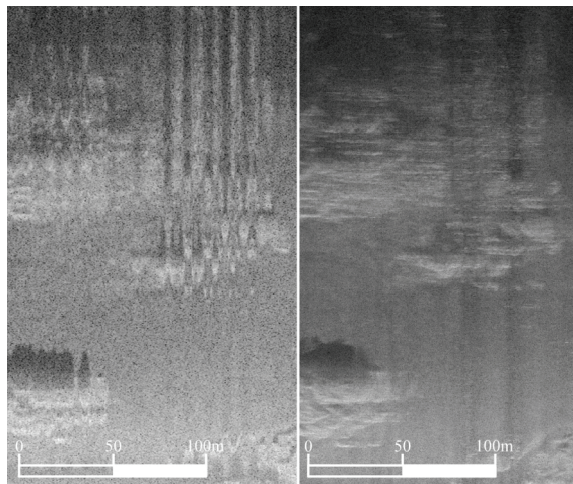


Fig. 10. Comparison of the Sonar images in different sonar signal processing. The left is generated by conventional process as a side scanning. The right is by synthetic aperture process with the adaptive beam-focusing.

斜めに横切るラインは航跡を表しており、曳航速度は2kt、航跡上での海底深度は約80mである。曳航中は常にソナーを動作させて海底観測を実施した。図の塗りつぶされた四角領域を観測した際の曳航体の姿勢が Fig. 9 である。上段が曳航体の Yaw, Roll, Pitch で、下段はそれぞれの周波数解析である。グラフを見ると曳航体のピッチが±6度以上も変動し、0.12Hz 近傍で強いスペクトルピークがある。その姿勢状態において観測した音響画像 (Fig. 10) を見ると、8ch 受波器のそれぞれのチャンネルからのデータを単純に加算処理 (サイドスキャンソナー相当の処理) によって生成した画像 (左) には多くの縦のすじが入っており、画像が劣化して海底地形の情報が毀損している。一般的にこの状態の機体は合成開口に必要な安定性は確保されていないが、しかし動揺補正処理を適用した合成開口処理後の画像 (右) では、画質が改善し多くの海底地形の情報が得られるようになった

ている。この画質の改善は今回の試験探査全般で確認され、後述する鹿児島湾の熱水探査でも同じように画質改善が確認できた。従来、SAS は動揺に弱いというのが通説であったが、適切な動揺補正を適用した上での合成開口処理は、一般的なサイドスキャンソナーよりむしろ強いと言う事が明らかとなった。

#### 4. 海底熱水噴出域の探査結果

##### 4.1 探査の背景

鹿児島湾北部に位置する始良 (あいら) カルデラは、約2万5千年前に形成されたと考えられ、現在の主たる活動域はカルデラ南部の桜島火山と、鹿児島湾北東部にある最大水深約200mの若尊 (わかみこ) カルデラを中心とした海域である。若尊カルデラは、火山噴火予知連絡会で活火山として認定されているが、海底での噴気活動に伴うと考えられるバブル (「たぎり」と呼ばれる) が海面で観察される以外は、特に火山活動をしめす兆候を観察することは出来ない。しかしながら、海底では多くの熱水チムニーや熱水噴出孔 (前藤, 2007)、高い地殻熱流量域 (藤野ほか, 2009) があることが、これまでの潜航調査などで明らかになっている。また、世界で最も浅い所に住むチューブワームである「サツマハオリムシ」が生息していることでも知られている (橋本, 1993)。熱水鉱床の形成という点でもアンチモン等のレアメタル (小見山ほか, 2011) の存在や熱水と有機物を含む堆積物が反応してできる熱水性石油の存在 (Yamanaka et al., 1999; Yamanaka et al., 2000) が示唆されており、最も浅く海岸から非常に近い内湾に位置する世界でも希な熱水地域であることから、熱水鉱床探査のテストフィールドとしても重要であるといえる。しかしながら、比較的小規模なカルデラであるにもかかわらず、海底下にあるためにその熱水活動の全容は未解決の問題も多い。潜航調査による観察やサンプル採取は、ビークルからの視野が限られるため潜航測線に沿った「線」の調査となり、限られた潜航時間では「面的」にカルデラ内をしらみつぶしに調べるのが困難である。そのため、過去の潜航調査で、カルデラ内のすべての熱水兆候を網羅しているとは言い難い。この「線」を「面」とする試みは、巻ほか (2008) において自律型ロボットを用いて行われているが、光学カメラによるモザイクでは、解像度は高いもののカメラの視角の狭さによって調査範囲は著しく限定されてしまう。よって、広い範囲の海底面の様子を取得することが出来るソナーが、重要なデータであることは間違いない。しかしながら、比較的周波数の高い50kHzの測深器を搭載するR/Vなつしまで取得された地形データでも、カルデラ底の熱水兆候域を識別するのはかなり困難である。これは最大強度の音波が到達した時間を計

測する測深機の特性によるものであり、熱水兆候のような微弱な音波反射しか得られない対象を捉えるように作られていないためである。そこで SAS を搭載した曳航体「響竜」を若尊カルデラへ適応することによって、微弱な音波反射もそのまま表示される音響画像として海底を観測し、熱水噴出活動の分布をあきらかにする調査を実施した。

#### 4.2 探査の概要

探査は 2011 年 10 月に実施し、若尊カルデラの最深部である約 200m の海底と、東側にある比高約 100m のマウンドを重点的に探査した (Fig. 11)。両海域ともに過去の無人水中ロボットによる調査によって活発な熱水噴出が確認されており (巻ほか, 2008), マウンド周辺にはサツマハオリムシの生息も確認されている。本探査で用いた母船は約 15 トンの小型船舶であり、着揚収は小型船舶据え付けの汎用作業用クレーンで実施した。曳航時の曳航体は母船後方約 10m, 水深約 3m 程度のごく浅い深度とし、およそ速度は 2.5kt で曳航を行った。曳航深度が浅いため、海底までの深度がほぼソナーの高度となる。探査には合計 15 時間を費やし、約 7km<sup>2</sup> の海底面を探査した。

#### 4.3 探査結果

Fig. 12 は探査海域の音響画像によるモザイクマップ (データ処理は従来のサイドスキャンソナー相当) である。調査範囲はカルデラ底を中心とする領域 (モザイク左側) とカルデラ北東部にあるマウンド (モザイク図右側) である。図中の楕円で塗りつぶされた複数の領域は、海底から上層に向かってたなびくようなフィラメント状の強い反射が確認できた領域である。この様な現象は測深機やサイドスキャンソナーの water column に記録されることが過去にも報告されている (例えば Kumagai, et al. 2010)。この強い反射は周囲とは異なる温度もしくは成分の海水が存在した証拠であり、それは海底から上方に吹き出す活発な熱水噴出が存在する領域であることを示す。このモザイクマップで検出された熱水噴出領域は、これまで潜航調査でみつかった熱水噴出の範囲よりも広範囲にわたって検出されており、広域にわたって音響調査を実施することが熱水兆候を検出する上で非常に有効であることを示す結果である。本調査海域は、熱水兆候のある地域以外は短波長の海底の起伏が少ない海底であることが分かる。特に、地形図上では傾斜が大きく変わるカルデラ壁やマウンドの斜面においても海底の短波長の起伏は全く検出されていないのは非常に興味深い。

次に、合成開口処理を行った音響画像について述べる。Fig. 13 はカルデラ北東部のマウンド最頂部付近 (Fig. 12

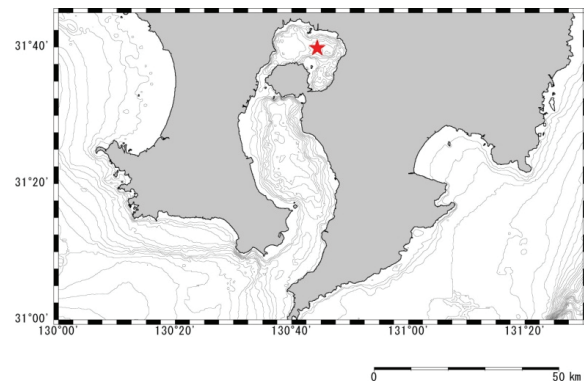


Fig. 11. Kagoshima bay. Wakamiko caldera is at the star.

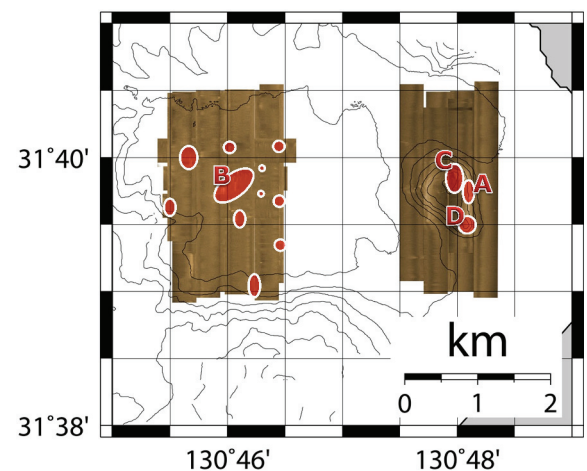


Fig. 12. Hydro-thermal map at Wakamiko caldera. Hydro-thermal vents were detected at the ellipse areas, and Fig. 13 and 14 are sonar images at the areas A and B respectively.

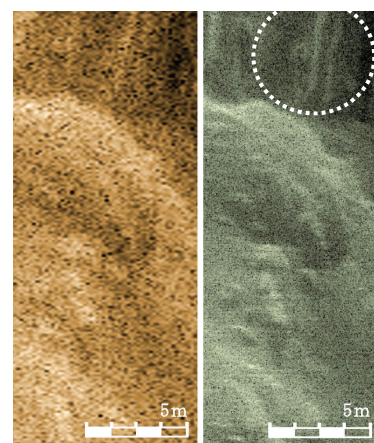


Fig. 13. Images taken by the sonar at the mound in the caldera. The left is generated by conventional process, and right is by synthesizing aperture process with the adaptive beam-focus. we can see the filament-like reflections in the circle at the right image.



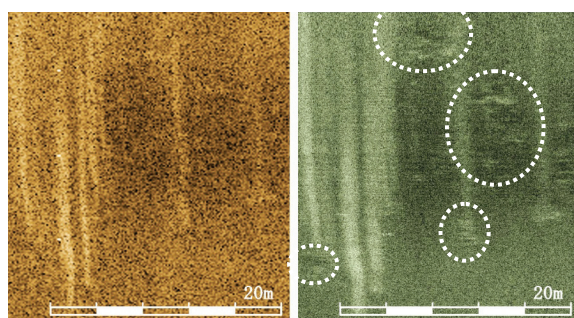


Fig. 14. Images taken by the sonar at the bottom in the caldera. The left is generated by conventional process, and right is by synthesizing aperture process with the adaptive beam-focus. Unevenness of the caldera is visible in the circles at the right image.

における A 領域)の音響画像であり、左側は従来のサイドスキャンソナー相当の処理による画像、右側が合成開口ソナー処理による画像である。合成開口長は約 7m である。サツマハオリムシの生息域であるこのマウンドの部分には、マウンドの東側の広い範囲で熱水噴出に伴うフィラメント状の反射を検出した。また本稿では画像を例示しないが、北側のマウンド最頂部付近 (Fig. 12 における C 領域) および南端部 (Fig. 12 における D 領域) には、露岩や生物生息域と考えられる地形を検出することができた。Fig. 13 は斜め上 25 度前後からマウンドを見下ろすアングルでの画像で、画像下部は凹凸の激しい海底が確認される。さらに画像上部の点線で囲う部分には立ち上る熱水が確認されており、合成開口処理後はその熱水がより明瞭に捉えられている。SAS は原理的に水中部の観測が苦手であり、また変動する対象の観測は難しいというのが従来の考え方であったが、それを覆す結果である。Fig. 14 は若尊カルデラ最深部 (Fig. 12 における B 領域) の音響画像である。同様に左がサイドスキャンソナー相当の処理、右が合成開口ソナー処理による画像である。合成開口長は 10m である。Fig. 14 はマウンドの例よりも計測高度が高いために見下ろし角が 45 度前後と大きく、熱水噴出によるフィラメント状の反射が海底面を這うような形で多数確認できる。この図で最も特徴的なのは、サイドスキャンソナー相当の処理では明瞭ではない周囲の未固結堆積物と明らかに異なる特徴を持つ地形の起伏が、合成開口処理後の画像の確認できることである。点線で囲う部分がそれであるが、その一部はフィラメント状の熱水噴出兆候がみられない箇所にも検出されている。

## 5. 議論・まとめ

本稿では、JAMSTEC で開発した SAS と、その調査結果について述べた。一連の機器試験および鹿児島湾での調査によって、開発された SAS の優れた能力を示すことが出来た。ソナーのピッチが  $\pm 6$  度以上も変動する状況下においても、開発した SAS は鮮明な音響画像を得られる事が分かった。また曳航体深度約 3m、曳航速度約 2.5kt という SAS としては浅い深度での高速曳航を行うことによって、合計 15 時間で約 7km<sup>2</sup> の広範囲を探索する事ができた。その条件においても、レンジ約 200m における遠距離の海底を含む海底全域にわたった詳細な音響画像を得る事ができた。

鹿児島湾における調査では、若尊カルデラ底および北東側マウンドでの熱水噴出域を明らかにすることが出来た。カルデラ北東部のマウンドでは熱水噴出と考えられるフィラメント状の反射と、多くの反射強度の強い海底面の起伏がマウンド東側の山腹から頭頂部に近い領域に集中して分布し、それ以外は火山灰や軽石などが主である未固結堆積物に覆われていることが明らかとなった。これは過去の潜航調査で観察された海底面の様子と整合するものである。前藤ほか (2007) によれば、このマウンドは割れ目の発達した流紋岩体であるとしており、この海底面の起伏はマウンドを形成する流紋岩体の露岩、あるいは巻ほか (2008) で広く分布していることが明らかになっているサツマハオリムシなどの生物群集域を検出したものと推定される。一方、カルデラ底においては、フィラメント状の熱水噴出の兆候や、周囲を覆う未固結堆積物とは異なる海底面の起伏が多数検出された。また、これらの熱水兆候が期待されるエリアは過去の潜航調査で知られている領域外にも広く分布している。このことは、海底での熱水活動を検出する上で、音響画像が重要なツールであることが示唆される。合成開口処理による音響画像からは、熱水兆候を伴う海底地形の起伏と、それを伴わないものが狭い範囲で同時に検出されている (Fig. 14)。双方の音響画像上での特徴に大きな差はないことから、熱水兆候を伴わない海底地形の起伏は、現在は熱水活動を停止した熱水噴出域である可能性が高いと考えられる。また、この海域は桜島の噴火活動による火山灰や軽石などの未固結堆積物が非常に厚く分布しており (Yamanaka et al., 1999; Yamanaka et al., 2000)、堆積速度が早い。よって、熱水兆候のない海底地形の起伏は堆積物に覆われていないことから、比較的短いタイムスケールで熱水噴出の場所が変わったことを示唆している可能性がある。

本稿で述べた SAS の技術的に特筆すべきは、72kHz と周波数の低い音波を用いるソナーであるにもかかわらず、高度約 200m からの調査においてもサブメーターの物体を識別可能なことである。低い周波数を用いることはつまり、広いスワスを持つことを意味する。それはつ

まり、高精度でありながら広範囲のデータを取得することができる、非常に効率の良い調査を可能にする技術である。事実、今回の調査でも限られた短い時間の間に広範囲の計測を実施することが出来ている。また、リアルタイム計測ではなくなるが、プラットフォームを AUV などの無人潜水機として観測することも可能となっている。本稿を通して述べたこの新しい技術の確立は、資源探査にとっても重要であると共に、地球科学の面でも新しい発見を導くであろうと期待される。

## 謝 辞

KY10-11 での調査にあたり、同航海の首席研究者である JAMSTEC 工学センター吉田弘 GL および石橋正二郎技術研究主任には機器試験に関して多くのご助力をいただいた。鹿児島湾での調査で質の高いデータを得ることが出来たのは、和美学産の篠原船長の操船によるところが大きい。鹿児島市桜島支局には、調査にあたって西道待避所の利用を快く承諾いただいた。鹿児島県漁連、海上保安庁、海上自衛隊鹿児島試験所には本調査に対するご理解をいただき、調査を滞りなく終えることができた。ここに記して謝意としたい。

## 参 考 文 献

- 浅田昭・浦環・望月将志(2011): 海底熱水鉱床域開発のための高精度音響測位法と合成開口インターフェロメトリ法の開発について, 海洋音響学会 2011 年度研究発表会講演論文集, 69-72.
- Brown, W. D. (1988): Some methods for reducing propagation-induced phase errors in coherent imaging systems. I. formalism, *J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci.*, **5**, 924-941.
- Cutrona, L. J. (1975): Comparison of sonar system performance achievable using synthetic aperture techniques with the performance achievable with more conventional means, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **58**, 336-348.
- 藤野恵子・江原幸雄・山中寿郎(2009): 始良カルデラ若尊加工下の熱構造の推定, 日本地球惑星科学連合 2009 年連合大会予稿集, V161-P002 (CD-ROM).
- Hagen, P. E., Hansen, R. E., and Langliz, B. (2006): Synthetic aperture sonar for the Hugin 1000-MR AUV, *Proc. undersea Defense Technology pacific*, San Diego, CA, 191-200.
- 橋本惇(1993): 有光層におけるハオリムシの発見, しんかいシンポジウム報告書, 321-326.
- 海洋音響学会(2004): 海洋音響の基礎と応用, 海洋音響学会, 5.
- 小見山力多・山中寿郎・前藤晃太郎・村上浩康・石橋純一郎・島田和彦・中谷武志・千葉仁(2011): 正解熱水湧出に関連したアンチモンに富み金を含む沈殿物の形成条件, 日本地球惑星科学連合 2011 年連合大会予稿集, SRD043-04 (CD-ROM).
- Kumagai, H. (2010): Hydrothermal plumes imaged by high-resolution side-scan sonar on a cruising AUV, Urashima, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, doi:10.1029/2010GC003337.
- 前藤晃太郎・千葉仁・杉山拓・岡村慶・木村浩之・中島美和子・石橋純一郎・山中寿郎(2007): 鹿児島湾若尊海底火山火口底に確認された活発な高温熱水噴出活動の地球科学, 地球化学会第 54 回年会講演要旨, 2A07.
- 巻俊宏・近藤逸人・浦環・坂巻隆・水島隼人・柳澤政生(2008): 自立型水中ロボットによる鹿児島湾たぎり噴気帯の 3 次元画像マッピング, 海洋調査技術, **39**, 1-17.
- Raven, R. S. (1981): Electronic Stabilization for displaced Phase centers systems, U. S. Patent 006037892.
- 徳山英一(2000): 高解像度サイドスキャン・ソナー WADATSUMI(わだつみ), 海洋調査技術学会, **12**, **1**, 35-36.
- Sawa, T. (2009): Modified synthetic aperture algorithm for sonar systems, *Int. J. Adapt. Control Signal Process*, DOI:10.1002/acs.1121.
- 澤隆雄(2010): デプレッサ併用型中性浮力曳航体への合成開口ソナーの搭載, 平成 22 年日本船舶海洋工学会春期講演会講演論文集, **10**, 137-138.
- 白井朗(2010): 海底鉱物資源, オーム社, 131.
- Yamanaka, T., Mizota, C., Murae, T. and Hashimoto, J. (1999): A current forming petroleum associated with hydrothermal mineralization in a submarine Caldera, Kagoshima Bay, Japan. *Geochemical Journal*, **33**, 355-367.
- Yamanaka, T., Ishibashi, J. and Hashimoto, J. (2000): Organic geochemistry of hydrothermal petroleum generated in the submarine Wakamiko caldera, southern Kyushu, Japan. *Organic Geochemistry*, **31**, 1117-1132.

## Ocean bottom survey with synthetic aperture sonar around hydro-thermal vents

Takao Sawa\*, Takafumi Kasaya\* and Hiroshi Yakiyama\*\*

### ABSTRACT

A sonar, a kind of remote-sensing device with sonic wave in water, have been used in fishery for over 60 years. Sonars are essential devices to survey ocean bottom and generate the ocean bottom map. A synthetic aperture sonar has performance over several times higher than conventional sonar, so we expect the synthetic aperture sonar to be applied in surveying natural resources at ocean bottom.

We developed a neutral buoyancy tow-fish as a stable platform equipped with synthetic aperture sonar for ocean resource survey. In the system, the synthetic aperture sonar sends wide sonic pulses and receives its echoes compensating the sonar motion, by changing the array directivity. The phase errors are minimized by the compensation. And we propose a calculating method to acquire a peak of amplitude in a sinc function from two sampled data near the peak. It enables a decimation of the recorded data after the pulse compression, keeping a resolution of sonar image and compensating a sonar motion. Synthetic aperture process can be done over 100 times faster with this methods than without it. The tow-fish is neutral buoyancy by using floats, and has a depressor that prevents mother ship's rock propagating to the tow-fish by the tow-line. An Ether line is within the ROV cable or the towline of the tow-fish. So the sonic signals are transferred to the mother ship immediately, and we can look ocean bottom on real time. Besides, the sonar conditions are checked and the sonar parameters are changed at any time. We named the surveying system Kyouryuu.

The survey of 7 km<sup>2</sup> ocean bottom was conducted in the Wakamiko Caldera in Kagoshima Bay, October. In the survey, existence of more hydro-thermal vents than we previously confirmed was revealed. Filament-like reflections of sonar signals were detected in the east side of the 100-m sea mound. The images depicted rocks and rugged topography which are considered to be suitable for tubeworm habitation. At the caldera floor, topographic relief patterns apparently distinguishable from the surrounding muddy sediments were identified even in areas absent of the filament-like reflections. This indicates a possible change of hydrothermally active sites over the course of time.

**Keywords:** Hydro-thermal vents, seabed mapping, sonar, synthetic aperture, Wakamiko caldera