

講 演  
 Lecture

## 三次元海洋電磁探査の高度化に向けた技術開発と課題\*

岡本 拓<sup>\*\*†</sup>・後藤 忠徳<sup>\*\*\*</sup>・笠谷 貴史<sup>\*\*\*\*</sup>・寺西 陽祐<sup>\*\*\*\*\*</sup>・石須 慶一<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
 稲盛 隆穂<sup>\*\*\*\*\*</sup>・阿部 進<sup>\*\*\*\*\*</sup>・高井 克己<sup>\*\*</sup>

(Received September 12, 2019 ; accepted November 9, 2019)

### Technological development and challenges for the advancement of 3D marine CSEM survey

Taku Okamoto, Tada-nori Goto, Takafumi Kasaya, Yosuke Teranishi  
 Keiichi Ishizu, Takao Inamori, Susumu Abe and Katsumi Takai

**Abstract :** In recent years, Marine controlled source electromagnetic (CSEM) technology has played an effective role to reduce the exploration risk in marine area. Meanwhile, the application of Marine CSEM is not easy due to its expensive survey cost and difficulty of quality control for data acquisition and analysis. Therefore, authors constituted the research consortium and advances the Marine CSEM technological development based on the know-how cultivated at university and research institute. In this paper, we discuss current status and future technological development of the consortium.

**Keywords :** Marine CSEM (MCSEM, mCSEM) consortium, ICA

海域での石油・ガスを対象にした資源探鉱において、その探鉱リスクを軽減させる物理探査手法として海洋電磁探査 (Marine CSEM) 技術が昨今注目を集めてきた。しかし、Marine CSEM 技術の適用においてはいまだにさまざまな問題点が存在している。例えば、高額な調査費用の低減やデータ取得時や解析時の品質管理が重要な課題である。そこで、著者らの各組織・機関では共同研究コンソーシアムを組成し、国内の大学および研究機関で培った Marine CSEM 技術のノウハウをベースにした技術開発を進めている。本稿では、共同研究コンソーシアムでの Marine CSEM 技術の開発現況と今後の技術開発方針について述べる。

### 1. はじめに

海域でのガス鉱床を対象にした探鉱開発では、地震探査

記録上に視認される HCI (Hydrocarbon Indicator) に基づいたプロスペクトやリードの抽出が一般に用いられている。しかし、図 1 に示すように地震探査データでは、ガス飽和率に対しては P 波速度の変化が相関的な応答ではないため、ガス埋蔵量の評価に不確実性がある。一方、2000 年代初期以降、海域での探鉱リスクを軽減させる物理探査手法として海洋電磁探査 (Marine CSEM, MCSEM) 技術

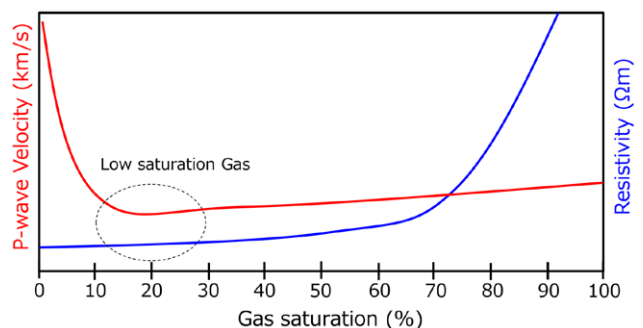


図 1 ガス飽和率に応じた P 波速度と比抵抗変化の模式図  
 横軸に砂岩層貯留層におけるガス飽和率を表し、縦軸は P 波速度 (赤) と比抵抗 (青) を表す。P 波速度は、低ガス飽和率において急激な速度低下があるが、それより飽和率の高い範囲では、あまり感度がない。一方で、比抵抗は、飽和率の変化に対して敏感であり、ガス飽和率が高くなるにつれて値が大きくなる性質がある。

\* 令和元年 6 月 12 日, 令和元年度石油技術協会春季講演会 地質・探鉱部門シンポジウム「天然ガス探鉱・開発の現状と課題—低炭素社会に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2019 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Natural Gas Exploration & Development - Current State & Challenges Toward Low Carbon Society" held in Tokyo, Japan, June 12, 2019.

\*\* 石油資源開発株式会社 JAPEX

\*\*\* 公立大学法人兵庫県立大学 University of Hyogo

\*\*\*\* 国立研究開発法人海洋研究開発機構 JAMSTEC

\*\*\*\*\* 株式会社地球科学総合研究所 JGI, Inc

\*\*\*\*\* 国立大学法人京都大学 Kyoto University

† Corresponding author : E-Mail : taku.okamoto@japex.co.jp

が注目を集めるようになった。ガス飽和率に応じて（特に高飽和度の場合に）比抵抗値が大きくなるため、MCSEMで推定された比抵抗と地震探査データで得られる構造や物性情報とを統合的に解釈することによって、探鉱リスク低減に寄与することが期待されている。実際に、バレンツ海を始めとして、地震探査とMCSEMの併用による探鉱成功事例が報告されている（例えば、Fanavoll *et al.*, 2012）。

一方で、MCSEM調査では、電流の送受信を行う際に観測資機材が搭載された専用調査船を使用する必要があり、調査費用の低廉化が課題となる。さらに面的に密な受信器配置を計画すると、調査費用の増大を招くことから、費用対効果を考えたデータ取得仕様の検討も必要である。また、良好な結果を得るには、データ取得時や解析時の品質管理が重要な課題であり、現状ではMCSEM調査のノウハウの蓄積が不十分であると考えられる。

そこで、著者らは共同研究コンソーシアムを組成し、国内の大学および研究機関で培った海洋電磁探査技術の知見をもとに、データ取得資機材および三次元解析ソフトウェアの技術開発を進め、データ取得から解析に至る基盤技術の確立を目指すこととした。併せて、国内周辺海域において国内の調査船および観測資機材を使用した実施調査体制の構築を予定し、MCSEM調査のノウハウの蓄積を目指している。本稿では、共同研究コンソーシアムでのMCSEMの技術開発現況と今後の進め方を述べる。

## 2. 共同研究コンソーシアムの組成

日本周辺海域における三次元MCSEM技術の確立に向けて、2018年度に共同研究コンソーシアムを立ち上げた。図2に体制の概略図を示す。海洋における地殻・プレート構造探査研究で世界を牽引する国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）、高精度比抵抗構造解析の経験が豊富な公立大学法人兵庫県立大学および国立大学法人京都大学、坑井データ評価および三次元地質構造モデル構築に長じた石油資源開発株式会社（JAPEX）、海洋電磁探査の解析評価の経験がある株式会社地球科学総合研究所（JGI）が協力し、データ取得・解析・評価の一連の作業を国産技

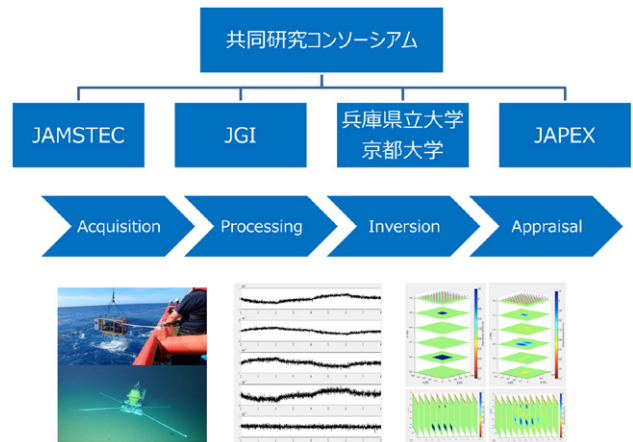


図2 共同研究コンソーシアムの実施体制図

術で構成することを目指している。ここで開発した技術や蓄積されるノウハウを使用することで、各段階での作業の可視化と品質管理を的確に実施し、必要に応じた修正・改良が容易な拡張性の高さを生かすことができる。これは研究機関・大学と民間企業が作った共同研究コンソーシアムの特長である。また、コンソーシアムで所有する観測資機材や解析ツールの効率的な利用を通じて、調査費用の大幅な削減が期待される。

## 3. 共同研究コンソーシアムにおける海洋電磁探査技術の現状

共同研究コンソーシアムにおける海洋電磁探査技術の現状と取り組みについて、データ取得・データ処理・データ解析に関してそれぞれ紹介する。

### 3.1 データ取得技術の現状

#### 3.1.1 国産技術による調査実績

海底熱水鉱床探査や学術調査では、JAMSTECが開発した調査資機材を利用したMCSEMの実績がある。例えば、2017年に三陸沖の日本海溝アウターライズエリアにおけるYK17-13調査航海において、JAMSTECが保有する調査

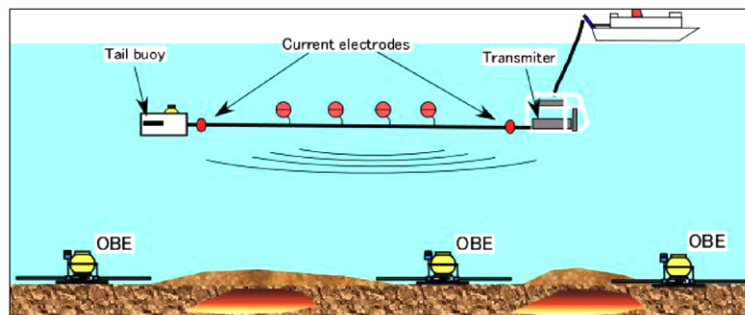


図3 共同研究コンソーシアムで実施可能なMCSEM法の模式図  
海底面に受信機を設置し、人工電流送信源を曳航しデータを取得する。

船（深海潜水調査船支援母船「よこすか」）と曳航式の人工電流送信源（Kasaya *et al.*, 2018）を使用した MCSEM が実施された（JAMSTEC, 2017）。本航海では、図 3 に示すように、水深 5,500 ~ 6,000 m の測線上にダイポール長が 5.4 m である海底電位差計（OBE）を海底面に 6 台設置し、人工電流送信源を海底から一定高度（約 100 m）で曳航し、データを取得した。これらの観測機器は基本的に海底熱水鉱床探査を目的として開発されたものであるが、機器構成の自由度の高さを有しており、さらに電流送受信能力において余裕を持たせた設計となっているため、共同研究コンソーシアムにおいては、これらのすでに稼働実績のある既存観測機器を活用した調査を想定している。

### 3.1.2 調査仕様および機器

JAMSTEC では、図 3 のように人工電流源（トランスミッター）を海底から一定高度で曳航し、海底面に設置した海底電位差計（OBE）でデータを収録する観測方式を採用している。この方式は、周波数領域の電磁探査法であり、炭化水素探査に広く用いられている。ここでは、送信波形には主に矩形波の交番電流（例：2 秒間通電、2 秒間停止）を用いている。また、OBE は水平 2 成分、鉛直 1 成分の電場 3 成分の測定が可能であり、簡易的な磁力計も実装されている。図 4 に JAMSTEC が保有する人工電流送信

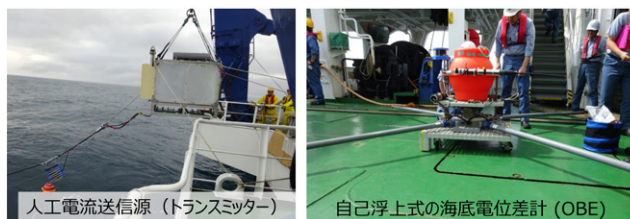


図 4 JAMSTEC が保有する MCSEM の調査機器  
左図に人工電流送信源装置、右図に自己浮上式の海底電位差計を示す。

源（トランスミッター）および自己浮上式の海底電位差計（OBE）を示す。これらの調査機器とカリフォルニア大学サンディエゴ校のスクリプス海洋研究所が保有する調査機器との仕様比較を表 1 に示す（[https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/suesi\\_specs.html](https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/suesi_specs.html), [suesi\\_specs.html](https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/suesi_specs.html)）。スクリプス海洋研究所は、MCSEM の発展を牽引してきた研究機関であり、彼らが開発してきた調査機器は、商用で広く使用されている調査機器の原型になっているため、比較の対象とした。一方、JAMSTEC 保有の海底受信機は、軽量化かつ小型化が実現されており、船上での限られたデッキスペースでの作業を容易にし、観測中の海底の底層流による電極アンテナの揺動を抑え、良質なデータを取得することが可能である。小型化の特徴として、電極アンテナは揚収時に折りたたむように製作されており、浮上時間の短縮と揚収作業の効率化が図られている。また、このシステムは「回収型観測機器」として特許（特許番号 No.4346606）を取得している（Kasaya and Goto, 2009）。内部の時計には原子時計が使用されており、海底観測中の時刻精度が保証されている点も特長として挙げられる。一方、人工送信機では、スクリプス海洋研究所の仕様と比較すると、送信電流量およびダイポール長と送信電流量の積であるダイポールモーメントが 1 オーダー程度低いことが分かる。これまでの調査実績では、10 kW の出力能力があるにもかかわらず、カメラ曳航体などを運用するための既存の光・電気ウィンチケーブルの電力供給能力の制限により曳航体の能力を生かしきれていなかった。そこで、本共同研究では送電能力に余裕のある他のウィンチシステムを流用することにより、送信電流量を 50 A から 300 A 程度に増強することを 2019 年度に予定している。また、JAMSTEC が開発した受信機と送信電流量を増大させた送信源を用いた MCSEM 調査を計画している。

### 3.1.3 調査機器の汎用性

3.1.2 で述べたように JAMSTEC が保有する調査機器は軽量化・小型化が図られている。さらに、汎用性があり、

表 1 JAMSTEC とスクリプス海洋研究所の調査機器仕様の比較表

JAMSTEC の海底受信機は、小型化かつ軽量化が図られている。人工送信機は、送信電流量に課題があり、改善を目指している。

#### 海底受信機

	JAMSTEC	スクリプス海洋研究所
重さ	約 100 kg（電池仕様による）	136.078 kg
アンテナ長	4.5 m（水平）、50 cm（鉛直）	10 m（水平）、1.5 m（鉛直）
バッテリー	2（or 4）weeks（リチウム）	2 months（リチウム電池）
時刻精度	原子時計（時刻ずれ無し）	水晶時計（時系列データの補正必要）

#### 人工送信機（トランスミッタ）

	JAMSTEC	スクリプス海洋研究所
ダイポール長	200 m（YK17-13 航海）	250 m （送信電流量と DM から推測）
送信電流量	50 A（ウィンチによる制限） トランス自体の能力は 10 kW	500 A（max）、400 A（typical）
ダイポールモーメント	10 kAm（YK17-13 航海）	100 kAm（typical）

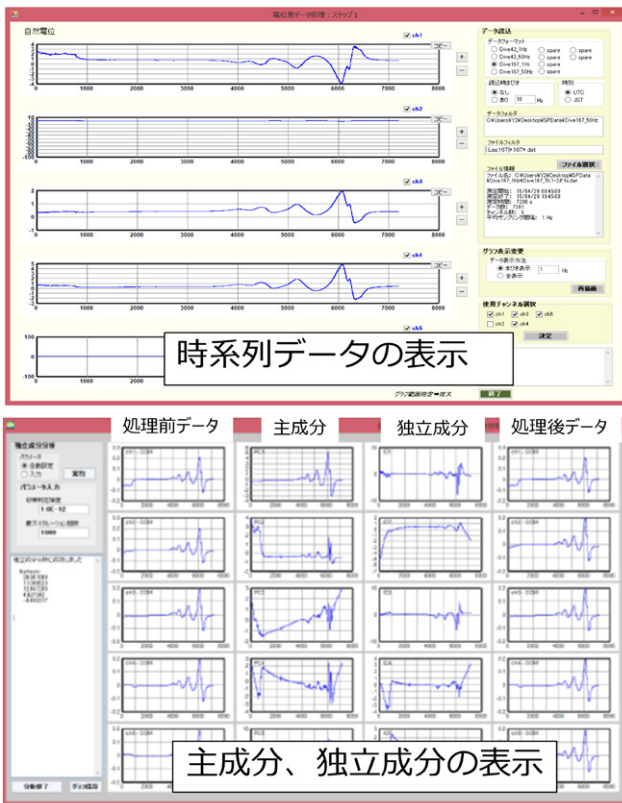


図5 データ品質管理に資する表示・評価ツール  
 上図は時系列データ、下図はデータの主成分・独立成分の表示画面の例を示す。

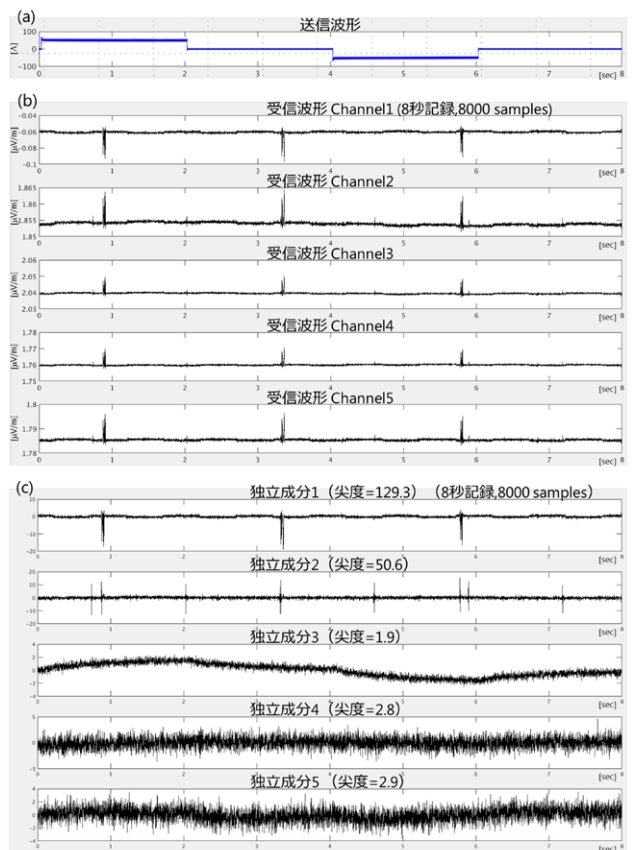


図6 MCSEMの時系列データとICAによるフィルター処理の適用例  
 (a)送信電流波形、(b)各電位電極で得られた受信波形 (ICAの入力データ)、(c)ICAにより推定した各独立成分。

調査船からウィンチケーブルへの給電およびデータ通信が担保されていれば、曳航体による調査実施が可能である。MCSEMに特化した専用調査船を用いる必要はなく、民間が所有する汎用調査船による調査実施も可能である。

### 3.1.4 データ取得時の品質管理に資する表示・評価ツール

データ取得時には、データ品質管理の徹底が必須となる。共同研究コンソーシアムでは、JAMSTECが開発・所有する品質管理を行う各種表示・評価ツールの利用が可能である。本ツールでは、図5に示すように取得データの時系列表示、簡単なフィルター処理や主成分分析、独立成分分析などが、WindowsがインストールされたPCで実施可能である。これらは、PCベースでのソフトウェアであるため、船上に回収されたOBEから抽出されたデータに対しての迅速な品質管理に役に立つツールである。

## 3.2 データ処理・解析技術の現状

### 3.2.1 データ処理技術の開発

データ処理とは、フィールド記録からインバージョン解析の入力データを作成するまでの過程であり、時刻同期、高速フーリエ変換 (FFT) による時系列データの周波数領域への変換、受信機の方位・傾斜補正、送信-受信モーメントによる正規化などを含む一連の操作のことを指している。共同研究では、観測記録に含まれるノイズ (機器固

有のノイズや海流による電極の揺動などに起因するノイズなど) の低減に注力し、インバージョン解析に用いる入力データの信号雑音比向上を目指した処理手法を開発している。

その一例として、ここでは、独立成分分析 (ICA, Independent Component Analysis) を用いたノイズ抑制技術について紹介する。ICAとは、複数の信号成分が混合された観測データが得られた場合に、各信号成分が統計的に独立であることを仮定して、各信号成分を推定する多変量解析手法の1つである。地球電磁気学の学術分野においては、自然の電場信号を利用した物理探査手法である自然電位探査やMT法のデータに対して適用された事例がある (佐藤他, 2017a; 佐藤他, 2017b)。共同研究においては、MCSEMの時系列データに混入した機器固有ノイズと考えられる強振幅および矩形波ノイズを効果的に分離・除去するため、ICAを利用したノイズ成分の抽出手法を開発中である。機器固有ノイズが認められた一部のMCSEMの時系列データに対してICAによるフィルター処理を適用した例を図6に示す。観測データ (図6(b)) とICAにより分離した独立成分 (図6(c)) を比較すると、独立成分

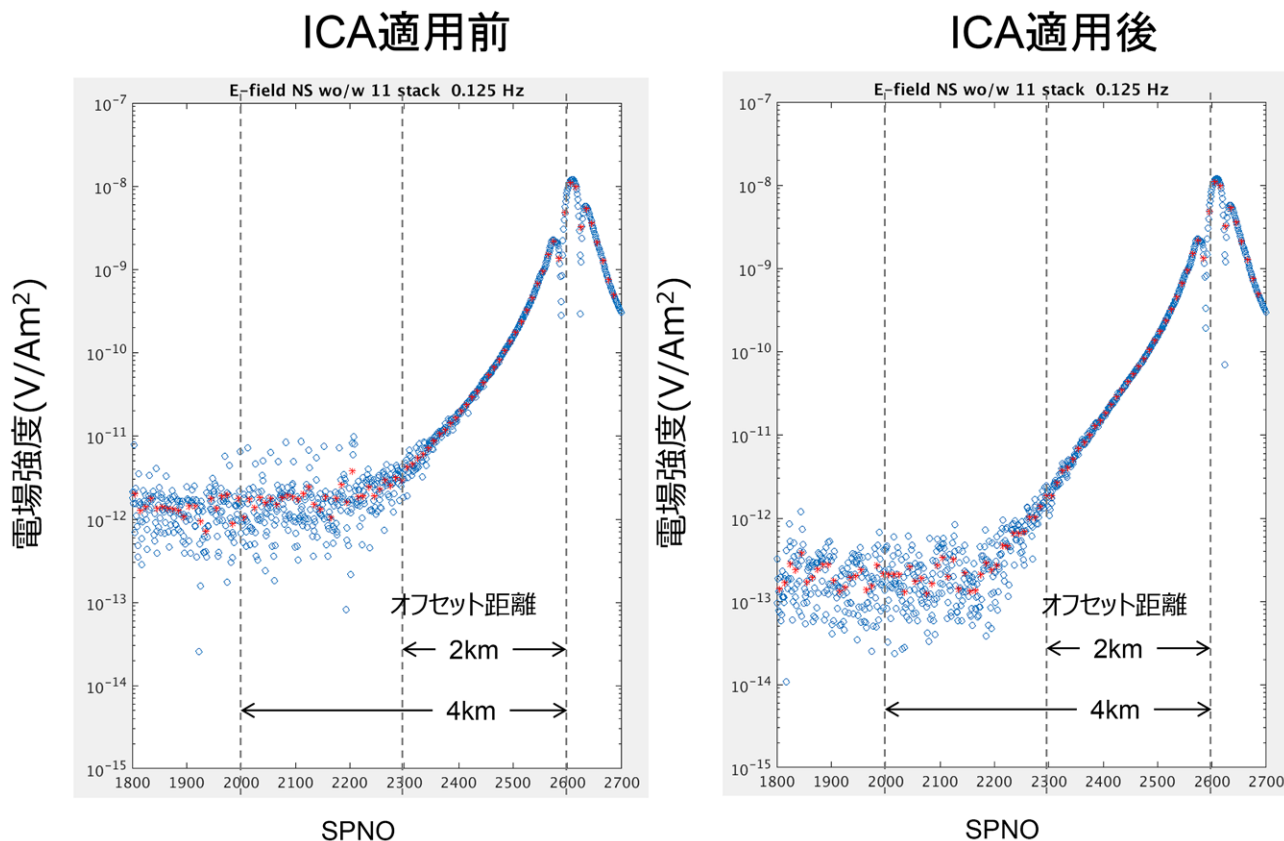


図7 ICA適用前後における電場振幅スペクトルの例

ICA適用後では、適用前の結果と比べてノイズレベルが1オーダー程度小さくなっており、信号雑音比の向上がみられる。

1と独立成分2は機器固有ノイズと非常に近い波形記録を示し、独立成分3は電流送信波形(図6(a))と整合的な波形となっている。このことから、ICAによりシグナル成分とノイズ成分が効果的に分離されていることが分かる。ここで、ノイズ成分を分離抽出する際の指標として、尖度(kurtosis)を導入する。尖度とは平均まわりの四次モーメントを分散の2乗で正規化した値であり、データが正規分布に従う場合に3を示し、データにスパイク成分が含まれると非常に大きな値を示す(図6(c))。図6の例では尖度が15以上となる独立成分に関しては、ノイズ成分と判断し除去した。ノイズ成分以外の独立成分を用いて、各チャンネルにおける受信波形を復元した。

図7では、上記のICAによるフィルター処理適用前後の電場成分に対し高速フーリエ変換(FFT)を行い、得られた各送信点における振幅スペクトルにおいて基本送信周波数成分に相当する0.125 Hzの振幅スペクトルを比較している(横軸にSP、縦軸に周波数成分(0.125 Hz)の電場振幅を片対数で示す)。なお、振幅スペクトルに対しては受信ダイポール長、送信ダイポールモーメント、送信波形の振幅スペクトルによる正規化を施している。図7中の青色は各SPにおける電場振幅を示し、赤色はスタック処理後(11送信サイクル分)の電場振幅である。一般に、送受信機距離(オフセット距離)が大きくなるにつれて、観

測される電場強度は小さくなり、データのばらつきが大きくなる。図7において、ICA適用前の結果ではノイズフロアが $1 \times 10^{-12}$  (V/Am<sup>2</sup>)程度である一方、ICA適用後の結果ではノイズフロアが1オーダー程度小さくなっているのが分かる。すなわち、ICAを適用することにより信号雑音比が向上し、解析可能なオフセット範囲が増加したといえる。有効オフセット範囲は、次項のインバージョン解析において深部イメージング精度に大きく影響するため、本項で検討したような時系列データに対するフィルター処理は非常に重要と考えている。

### 3.2.2 データ解析技術の開発

データ解析技術、すなわちインバージョン解析技術に関して、共同研究では二次元および三次元の解析ツールが利用可能となっている。二次元解析については、主にスクリプス海洋研究所で開発されたオープンソースを利用している(Key, 2016)。三次元解析に関しては、京都大学で開発されたインバージョン解析コード(石須他, 2019)を使用している。この解析コードはData Space法を採用しており(Siripunvaraporn *et al.*, 2005)、少ない計算メモリかつ現実的な計算時間で三次元比抵抗構造が取得できるという特徴がある。ここでは、ガス貯留層を模した高比抵抗異常体を含む地下比抵抗構造モデルを作成し、このモデルから計算されるシミュレーションデータを用いたMCSEM法

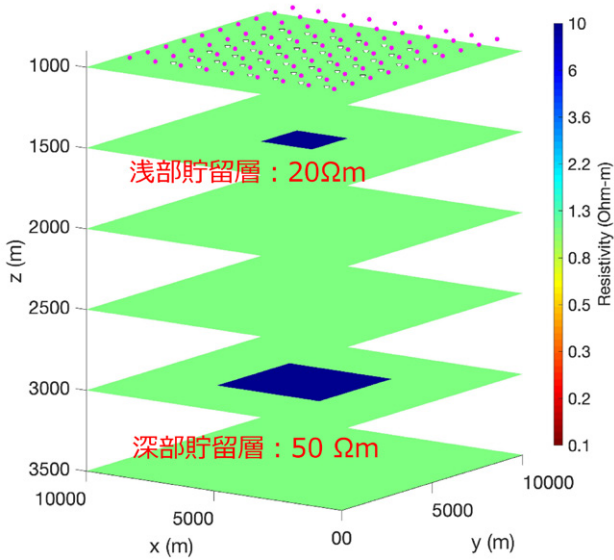


図8 数値計算に用いた三次元比抵抗モデル

の三次元インバージョン解析の例を紹介する。ここで設定したモデルは、海水層、堆積層および堆積層中の2つのガス貯留層から構成されている(図8)。海水の比抵抗は0.3  $\Omega\text{m}$ 、堆積層の比抵抗は1.0  $\Omega\text{m}$ 、浅部ガス貯留層の比抵抗は20  $\Omega\text{m}$ 、深部ガス貯留層の比抵抗は50  $\Omega\text{m}$ と設定した。海水層の厚さは1,000 mであり、浅部貯留層(幅2,000 m、厚さ100 m)は海面から深度1,500 m、深部貯留層(幅4,000 m、厚さ300 m)は深度3,000 mにそれぞれ存在すると設定した。

本研究では、三次元インバージョンを用いた数値テストの一例として、MCSEM 探査時の送受信点の粗・密の度合いがインバージョン結果にどの程度の差異を生じさせるかを示す。まずMCSEM 探査の送信源には、水平電気双極子を用いることとする。送信ダイポールは海底面から高度50 mの海中に置くこととし、これをy方向に曳航すると仮定した。送信信号の周波数は0.05、0.2および1.0 Hzの3種類である。海底面の受信機に関しては、インライン成分と呼ばれる送信電気双極子に平行な電場成分( $E_y$ )のみ

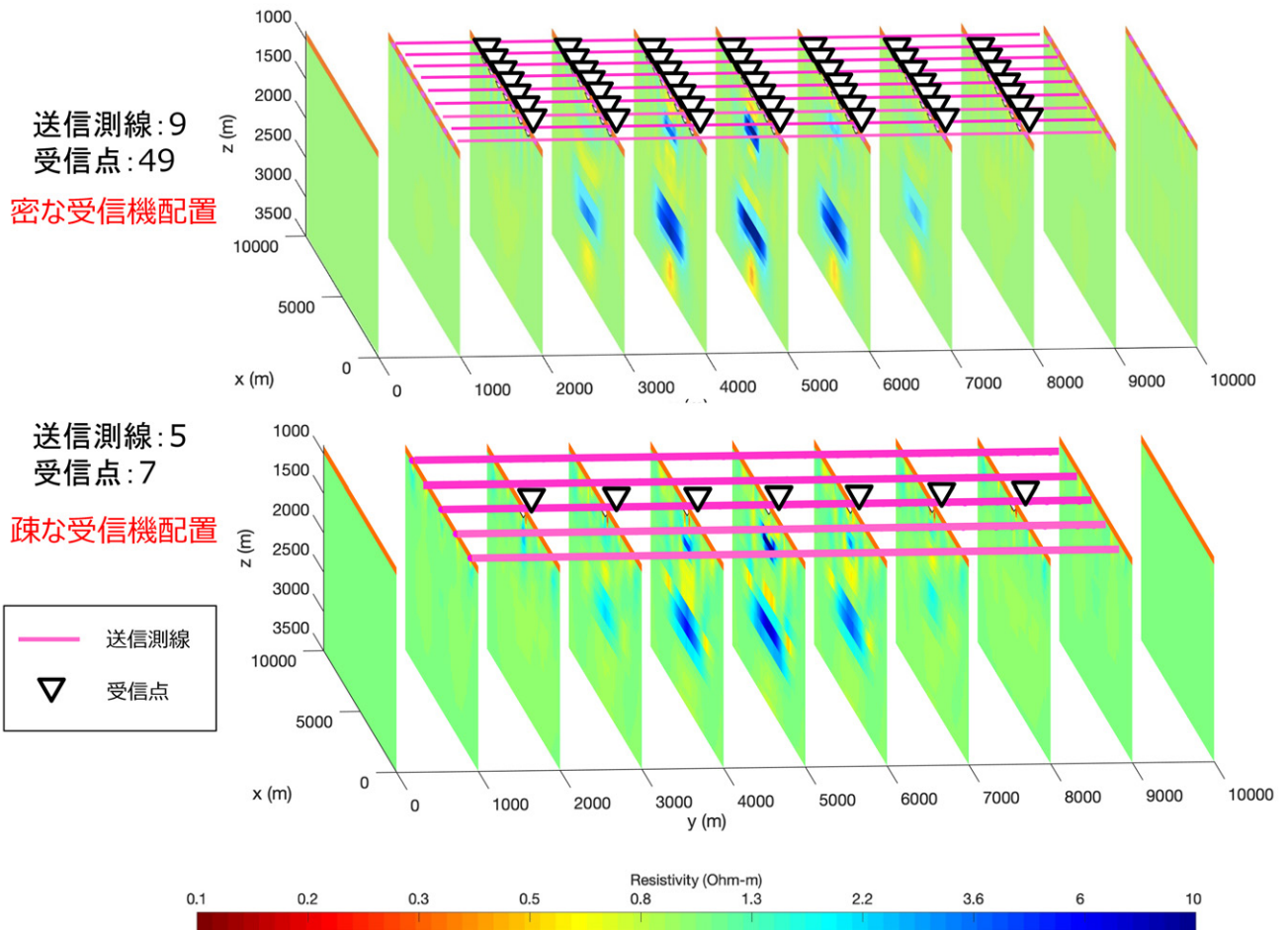


図9 三次元インバージョン結果

上段は、送信測線の間隔が密で、受信点も平面的に配置した場合、下図は、送信測線の間隔が疎で、受信点を直線的に配置した場合の結果である。

を測定することとした。ここで、受信点を海底に多数配置して、送信測線の多く配置する「ケースA」と、受信点を1測線上にのみ配置し、送信測線も少なくした「ケースB」について、インバージョンで得られる比抵抗モデルの違いを考える。まず、両ケースについて上述の海底下比抵抗モデルからそれぞれ順解析を行い、各順解析結果に3%のガウシアンノイズを加えることで、ケースAとBのシミュレーションデータをそれぞれ作成した。このデータに対して、インバージョンをそれぞれ実施した。解析結果を図9に示す。図9上段は、送信測線の間隔を密にして、受信点も平面的に配置したケースAの場合の結果である(9送信測線+49受信点)。一方、図9下段は、送信測線の間隔が疎で、受信点は直線的に配置したケースBの場合の結果である(5送信測線+7受信点)。両結果とも、浅部と深部の高比抵抗体が再現されており、比抵抗体の存在を検出するという観点において、ほぼ同等の結果が得られていると言える。すなわち、図9下段の観測仕様の方が、費用対効果の点で有利であり、この結果から、最適な調査仕様を決める上では、三次元インバージョン解析までを含めたモデリングスタディが重要であることを示している。

#### 4. ま と め

本稿のまとめを以下に記述する。

- (1) MCSEM 技術の可視化、高度化と調査費用の削減を目指して、共同研究コンソーシアムを組成した。
- (2) 共同研究コンソーシアムでの MCSEM 技術の現状を整理した。
  - (ア) データ取得分野においては、MCSEM の調査を実施するには、すでに稼働実績のある観測機器の利用が可能であることを確認した。
  - (イ) データ処理分野においては、ノイズ抑制処理の重要性を認識した。
  - (ウ) データ解析分野においては、インバージョン解析コードの利用が可能であることを確認した。

これまで、国内の海洋での資源探査、特に海洋における石油・ガス探査の分野においては、MCSEM 技術はあまり使用されてこなかった。これは高い調査費用とともに、高精度なデータを得るために必要なデータ取得段階およびデータ処理・解析時の品質管理の難しさが原因と考えている。共同研究コンソーシアムでは、自ら開発してきた内容を熟知した調査機材やソフトウェアを使用して、データ取得から解析までを実施できる体制を整えつつある。共同研究コンソーシアムが MCSEM 調査のコスト低減とともに、品質管理に関するノウハウを蓄積し、前述のような課題が大きな障壁となり、MCSEM に興味があるにもかかわらず実施できない状況が改善し、実施できる体制を目指している。

#### 5. 今後の技術開発方針

本コンソーシアムでは、炭化水素や金属鉱物などのさま

ざまな海底資源に対して、調査対象に応じた最も有効かつ実効な手法を考案し、実施することを今後の技術開発の基本方針としている。当面の技術開発目標を以下に列挙した。

- (1) さらなる信号雑音比の向上を目指した機器の改良および改修。
- (2) データ取得時の調査仕様の最適化と品質管理の標準化・文書化。
- (3) 坑井や他の物理探査データ、異方性情報の解析モデルへの取り込み。

今年度は、特に(1)に関連した送信機の出力増強と受信機のダイポール長の延長などの機器改良を推進し、データ取得から解析に至るまでの技術パッケージを完成させる予定である。(2)および(3)に関しても、適宜進めていく方針である。

最後に、以上にあげた当面の技術開発方針ではなく、次世代の技術を紹介して本稿を閉じることとしたい。その技術とは、無索で海中を航行できる自律型無人潜水機(AUV)を使用することである。海底熱水鉱床の探査においては、自然電位法のためのAUVを用いた探査が行われてきており(Constable *et al.*, 2018; Kawada and Kasaya, 2018), Constable *et al.* (2018) では海底に設置した送信機の信号をAUVで受信する形態でのMCSEM探査も実施している。Goto *et al.* (2013) では、短い電流ダイポールではあるが、AUVからの電流送信にも成功している。また、Kasaya *et al.* (2019) では、曳航式の電気探査の送受信の系を、2機のAUVに送信と受信それぞれの役割を担わせ、既知鉱床域での探査に成功するなど、AUVを物理探査に適応させる事例が報告されつつある。

AUVを用いる最大の利点は、無索であることによる海中での航行の自由度の高さである。従来のMCSEM探査では、探査範囲および解像度を担保するために、多数の海底受信機の投揚収に、調査期間の多くを割く必要がある。一方、AUVを受信機として用いることにより、設置する受信機の数減らせる可能性があり、調査期間の削減と観測の自由度の高さから空間分解能の向上が期待される。バッテリーの問題があるため、熱水鉱床探査で行われたように、送信源としてもAUVを用いるには技術的な進展が必要であるが、電流送信を行う曳航体と受信機としてのAUV(もしくは複数のAUV)を組み合わせることで、より高効率で低コストなMCSEM探査を実現できる可能性が期待される。

#### 謝 辞

石油資源開発株式会社には、本稿の外部発表を許可して頂きました。データ処理技術の検証には、YK17-13調査航海(首席研究員:東京大学地震研究所山野誠教授)において取得されたデータを使用させて頂きました。また、匿名の査読者には貴重なご指摘、ご助言を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 引用文献

- Constable, S., Kowalczyk, P., and Bloomer, S., 2018 : Measuring marine self-potential using an autonomous underwater vehicle. *Geophysical Journal International*, **215**, 49-60, doi:10.1093/gji/ggy263.
- Fanavoll, S., Ellingsrud., Gabrielsen, P. T., Tharimela. R. and Ridyard, D., 2012 : Exploration with the use of EM data in the Barents Sea: The potential and the challenges. *First Break*, **30** (4), 89-96.
- Goto, T., Kasaya, T., Imamura, N., Mikada, H., Takekawa, J. and Sayanagi, K., 2013 : Electromagnetic survey around the seafloor massive sulfide using autonomous underwater vehicle. The 11th SEGJ International Symposium, 342-345, doi.org/10.1190/segj112013-087.
- 石須慶一・後藤忠徳・Weerachai Siripunvaraporn, 2019 : 3次元 CSEM 法逆解析法を用いた海底熱水鉱床探査. 第140回物理探査学会学術講演会, 63-64.
- JAMSTEC., 2017 : Studies of fracturing and pore fluid circulation in the oceanic crust subducting along the Japan Trench through electromagnetic survey. YOKOSUKA YK17-13 Cruise Data, doi.org/10.17596/0001689.
- Kasaya, T., Hyakudome, T. and Iwamoto, H., 2019 : Using AUV-ASV Combo to Find Hydrothermal Sulfide Deposits. *Sea Technology*, August 2019, 10-13.
- Kasaya, T. and Goto, T., 2009 : A small ocean bottom electromagnetometer and ocean bottom electrometer system with an arm-folding mechanism (Technical Report), *Exploration Geophysics* **40**, 41-48; *Butsuri-Tansa*, **62**, 41-48; *Mulli-Tansa*, **12**, 41-48, 2009.
- Kasaya, T., Goto, T., Iwamoto, H. and Kawada, Y., 2018 : Development of multi-purpose electromagnetic survey instruments. SEGJ The 13th International Symposium Tokyo 2018, 159-161, doi.org/10.1190/SEGJ2018-042.1.
- Kawada, Y. and Kasaya, T., 2018 : Self-potential mapping using an autonomous underwater vehicle for the Sunrise deposit, Izu-Ogasawara arc, southern Japan. *Earth, Planets and Space*, **70**,142, doi:10.1186/s40623-018-0913-6.
- Key, K., 2016 : MARE2DEM: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data. *Geophysical Journal International*, **207** (1), 571-588.
- 佐藤 真也・後藤 忠徳・笠谷 貴史・川田 佳史・岩本久則・北田 数也, 2017a : 独立成分分析を用いた海底自然電場データのノイズ除去. *物理探査*, **70**, 42-55.
- 佐藤 真也・後藤 忠徳・笠谷 貴史・市原 寛, 2017b : 周波数領域独立成分分析を用いた電磁探査データのノイズ除去手法の開発. *物理探査学会第136回学術講演会論文集*, 259-262.
- Scripps institution of oceanography : [https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/suesi\\_specs.html](https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/suesi_specs.html) (accessed 2019/10/25).
- Scripps institution of oceanography: [https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/receiver\\_specs.html](https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/receiver_specs.html) (accessed 2019/10/25).
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., and Uyeshima, M., 2005 : Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. *Physics of the Earth and planetary interiors*, **150** (1-3), 3-14.