

# 最上トラフ酒田海丘(仮称)における海底下構造・比抵抗構造から見る 表層型メタンハイドレートの賦存状況

浅田美穂\* 横田俊之\* 小森省吾\*

\* 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門物理探査研究グループ

A knoll in the Mogami Trough on the eastern margin of the Sea of Japan, called the Sakata Knoll, is known as a shallow methane hydrate (MH) field. There are still many unknowns regarding the distribution of the shallow MH. We try an integrated analysis using seafloor geological and resistivity structures for understanding more accurate distribution of the shallow MH. We chose one of the seismic attribute analysis results “the acoustic blanking zone” as an initial model for the resistivity inversion. The result of the resistivity inversion shows a large anisotropy, strongly suggesting an anisotropic occurrence of the shallow MH. It is also suggested that the lower boundary of MH coincide with the depth of BSR. To promote integrated analysis using different data sets with different scopes and resolutions, we continue to develop more effective methods for the future.

## 1. はじめに

経済産業省による「国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発等事業(メタンハイドレートの研究開発)」の一環として、表層型メタンハイドレート(MH)賦存域を把握するための調査が進められている(森田 2015)。日本海東縁酒田沖の海丘(酒田海丘(仮称))には、頂部海底下浅部の深さ方向に断続的な表層型 MH 賦存が、LWD(掘削同時検層:Logging while drilling)および堆積物コアにより確認されている(Tanahashi et al., 2017; 宮嶋ほか 2022)。酒田海丘は、北東-南西に長さ約 15 kmの背斜軸を持つ海丘で、南東側で急峻な、北西側でなだらかな斜面を有する(Okamura et al., 1995)(図 1)。この海丘における表層型 MH のより確かな賦存域推定に資するモデル構築の構築を目指して、高分解能三次元反射法地震探査(HR3D:High-resolution 3D

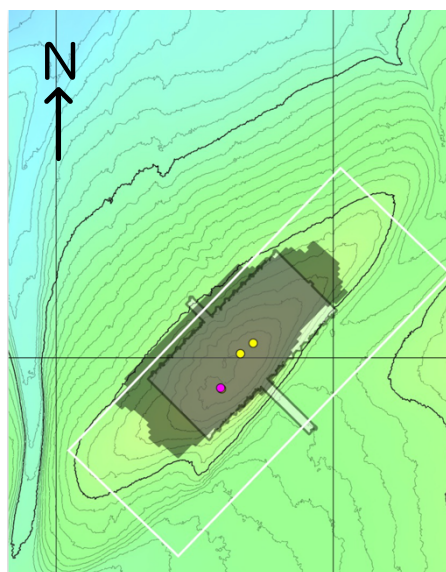


図 1 酒田海丘(仮称)における探査エリア。  
白枠：HR3D、灰色網掛け：CSEM、黒枠：AUV、  
黄点：LWD、赤点：堆積物コア取得位置  
Figure 1: Index map over the research area.  
White box: HR3D, gray shading area: CSEM, black box:  
AUV, yellow dots: LWD, red dots: sediment core

seismic reflection survey)により推定された海底下構造を、3次元海洋電磁探査(CSEM: Controlled source electromagnetics)による地下構造の逆解析に与えることを試みた。

## 2. データ取得および解析概要

### 2.1 HR3D

海底面付近から海底面下数 100 メートルまでの精密地下構造を3次的に把握するために、HR3D を、約 4 km×10 km(調査測線設定数 160 本)の範囲で実施した(横田ほか 2022)。データ取得には船舶「つしま」(総トン数 188t)を用いた。発震にはチャンバーサイズ 150 立方インチの GI ガンを用い、6.25 m 毎に発震した。受振のストリーマーケーブルは 100 m 長とし、6 本を平行になるように曳航した。各ストリーマーケーブルには 6.25 m 間隔で 16 個のハイドロフォンセンサーを付けた。速度解析のために測線間隔 500 m で2次元反射法地震波探査を実施し、3次元地震波探査データ処理に用いた。共通反射点にデータを並べ替えたのちに、データ密度が小さな Bin には周囲の Bin データから値を補い、水平 6.25m×12.5m の Bin を作成した。多重反射波やゴースト反射の抑制処理および共通反射点重合および重合後マイグレーション処理を実施した(横田ほか 2022)。

### 2.2 CSEM

CSEM には SUESI-Vulcan システム(米国スクリプス海洋研究所)を使用した(小森ほか 2022)。システムは海底面から高度 50-100 m で曳航し、アンテナ(送信機、ダイポール長 50 m、送信電流 200 A 程度)から電磁場を発生させ、海底下の地層の比抵抗分布に伴い生じる電場3成分(Ex, Ey, Ez)を、離れた4台の受信器により一定間隔で記録した。送信電流には、1、3、5、7、9、11、13、15、17 Hz にピーク強度を持つ波形を使用した。得られた電場の時系列データは、電流ソースのダイポールモーメントにて規格化し、受信機の姿勢情報(yaw, roll, pitch)により水平2成分と鉛直成分に変換して、周波数領域に変換した(小森ほか 2022)。なお、逆解析にはインライン方向の水平電場および鉛直電場の実部・虚部のデータを用いた。

## 3. 地震波探査による海底下構造推定モデルを CSEM 初期モデルに用いる試み

一般に構造解析においてはデータ数に対して解くべきモデルパラメータが多いために、用いる逆解析手法によっては、得られる構造モデルが初期値に依存する可能性がある。CSEM の逆解析により得られる構造モデルの初期値依存性を検討するため、HR3D より抽出される属性等を用いて、CSEM の初期モデルを複数構築して与えることを試みた。ここでは、一般に高密度かつ高速度であり海底下表層付近の地層とは異なる性質を持つ MH と、低密度かつ低速度であるガスを含む部分に指標を求めた、「音響空白域」にあたる属性を HR3D から抽出して初期モデルに用いた結果を報告する。

音響空白域は「地震波のシグナルが海底下の構造を示さない(プロファイルが抜けて見える)」領域を指す。音響空白域は、その上面でシグナルが跳ね返されるか、または領域内でシグナルの減衰が著しく受波器で受信波を捉えることが出来ない程度にエネルギーを失う場合に現れると解釈される。領域内に地下構造が存在しない(分解能以上の大きさを有する構造(速度と密度の変化)がない)場合も考えられる。ここでは音響空白域は、その領域上面に MH が存在する、または領域内にガスが存在すると仮定し、MH 賦存推定に有効な指標のひとつであると考えた。音響空白域の

抽出にあたっては、設定した閾値を基準とする二値化処理を行い、CSEM 解析セル(水平方向 100m, 鉛直方向 40m)に合わせてアップスケーリングを実施した。指定の Bin に含まれる値の割合により、各セルに 1-5  $\Omega\text{m}$  の値を与えて初期モデルを構築した(図2)。本研究では、海底下の比抵抗が異方性を持つことを考慮した解析を実施したため、モデルパラメータ(未知数)は、異方性を考慮しない場合の倍(水平比抵抗および鉛直比抵抗)である。なお初期モデルにおいては、水平比抵抗、鉛直比抵抗ともに同一の値を与えている。

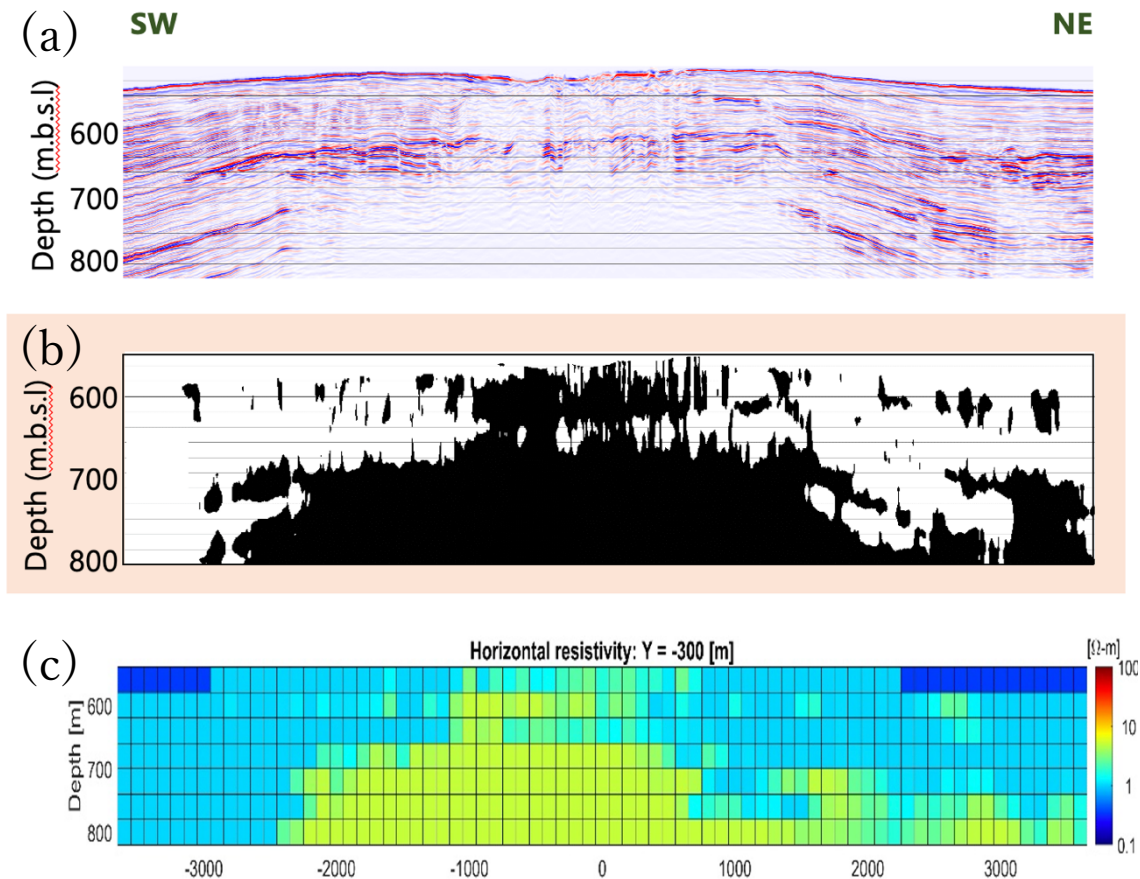


図 2 HR3D から CSEM 初期モデルを構築した手順。(a)–(c)は同一の領域を示す。(a) HR3D プロファイル、(b) HR3D から音響空白域を示す属性を抽出し二値化処理を実施した結果、(c)(b)を CSEM 解析セルサイズにアップスケーリングし、それぞれのセルに振り分けられた値の割合により1–5 $\Omega\text{m}$ を与えた。

Figure 2 Steps in constructing the initial CSEM model from HR3D. (a)-(c) show the same area. (a) HR3D profile, (b) an attribute indicating “acoustic blanking zone” were extracted from HR3D and subjected to a binarization process, and (c) upscaled (b) to the CSEM analysis and given 1-5 $\Omega\text{m}$  by the ratio of the values placed in each cell.

#### 4. 結果

HR3D の音響空白域を初期モデルとした CSEM データの3次元逆解析の結果を図3に示す。異方性を考慮した逆解析では、水平および鉛直比抵抗構造に大きな差異が現れた。海丘頂部の水深 650 m 以浅に 10~100  $\Omega\text{m}$  程度の高い鉛直比抵抗領域が、複数に分かれて推定された。鉛直比抵抗が高い領域は、HR3D に見られる海底擬似反射面 (BSR: Bottom simulating reflector) よりもおよそ上位に推定された(図3)。海丘頂部で取得されている LWD が取得した比抵抗値と、

当該地点の水平・鉛直比抵抗構造から抽出した値を比較したところ、良い相関を示した。他方、高角断層の密度が大きな海丘北東側斜面には鉛直比抵抗が高い領域が見られなかった。

一連の試みにおいては、地層の水平方向の不連続性を抽出して、図2とは異なる初期モデルを与えた場合の逆解析等も実施した。それぞれの解析条件が異なるにもかかわらず、海底下浅部の高鉛直比抵抗領域に関する解析結果は似たパターンを示した。このことは、この高鉛直比抵抗領域が取得データより説明されており、解析の信頼度が高い深度区間に存在することを意味する。

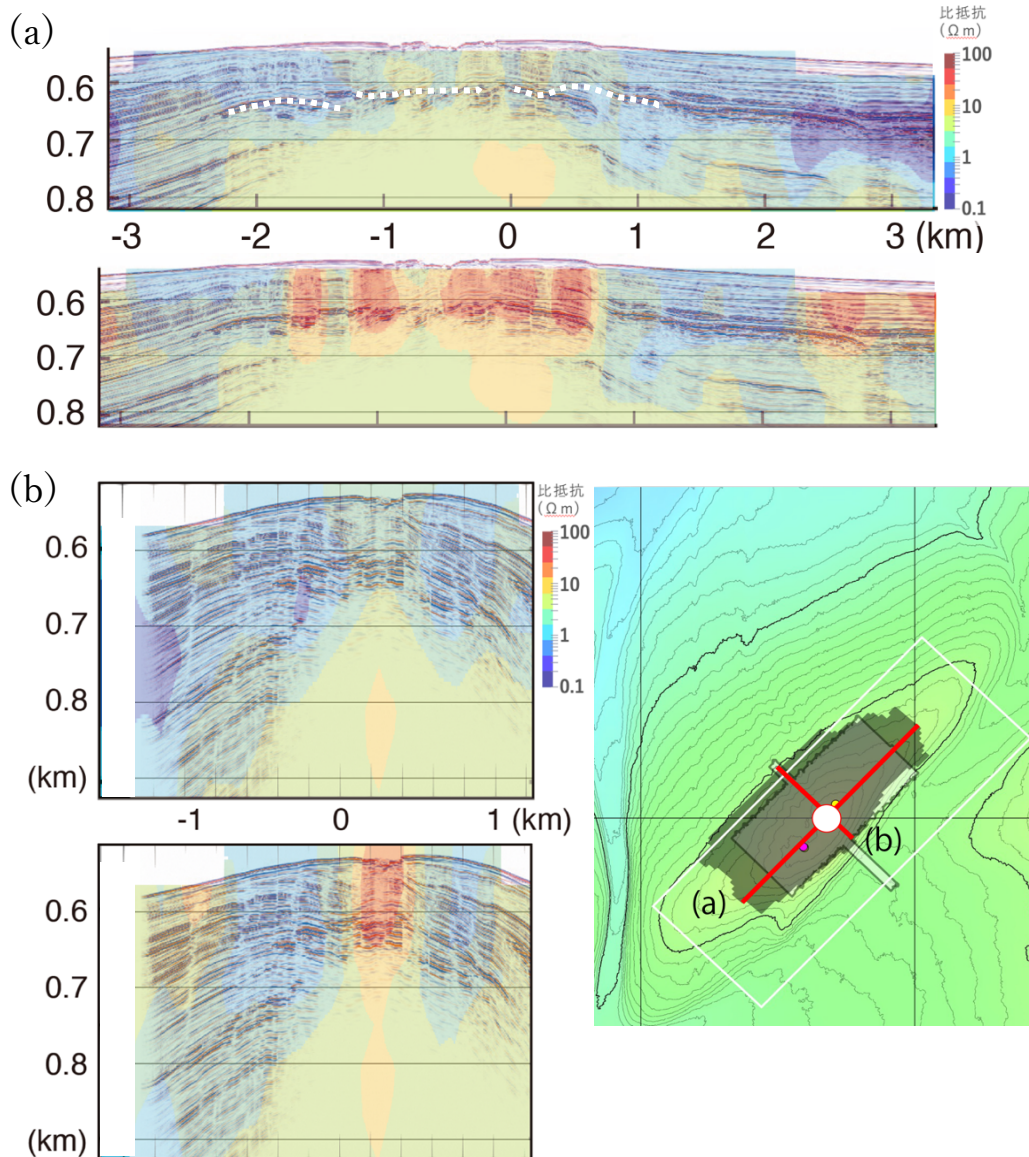


図3 CSEM3次元解析結果(カラーマップ)と同領域のHR3Dプロフィール(線)の重複表示。白丸:LWD実施点。(a)・(b)の縦軸は水深、横軸は距離、上段:水平比抵抗構造、下段:鉛直比抵抗構造を示す。(a)海丘長軸方向に頂部を横断する断面図、白点線:BSR解釈線、(b)海丘短軸方向の断面図。水平比抵抗構造と鉛直比抵抗構造に差異がある。鉛直比抵抗構造に見られる高比抵抗領域がおおよそBSRの上位に示された。

Figure 3 CSEM results (color map) and HR3D profile (lines). White circle: LWD site. In (a) and (b), vertical axis: water depth, horizontal axis: distance, upper: horizontal resistivity structure, and lower: vertical resistivity structure. (a) Cross section across the top along major axis. Dotted line: BSR; (b) Cross section in the direction along minor axis. There are differences between the horizontal and vertical structures. The high resistivity region in the vertical structure is shown above the BSR.



## 5. 考察

一般に、海域における反射法地震探査で検出される BSR は、MH 賦存領域の下限に現れると解釈される。今回、海丘頂部付近において見られた 10~100  $\Omega\text{m}$  程度の高鉛直比抵抗領域がおおよそ BSR よりも上位に示されたことを考えると、この高い鉛直比抵抗を持つ領域に MH が濃集している可能性が強く示唆される。この領域の水平比抵抗は 1-3  $\Omega\text{m}$  程度であり、鉛直比抵抗値と比較すると1-2 桁小さい。このことは、水平方向よりも鉛直方向に電流が流れにくいこと、すなわち、解析セルのスケール(水平方向 100m、鉛直方向 40m)で検出されうる MH が、水平方向に連続性をもって分布している可能性を示唆する。同海域ではこれまでに、LWD プロファイル(比抵抗、P 波速度、密度等)により MH 賦存が示唆され、さらに堆積物コアにより塊状または粒状の MH が採取されているが、地下の MH の賦存形態そのものを推定できる情報はなかった。本研究による解析比抵抗分布により示された異方性の特徴は、地下の MH 賦存状況に重要な制約条件を与えることが期待される。

海丘頂部に存在する高角断層は、特に北西側斜面に高密度に発達している。北東側斜面の比抵抗は鉛直・水平ともに低い傾向にある。海丘頂部においても、縦に伸長して見える高比抵抗領域が、高角断層の影響を受けているとすると、高角断層の存在が鉛直方向への低比抵抗領域として現れている可能性がある。同時にこれら高角断層は、MH の生成に必要なガスを含む流体の移動経路として機能していることが考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

最上トラフにある酒田海丘(仮称)において、HR3D と CSEM の統合解析による、海底下の表層型 MH の賦存状況推定を試みた。比抵抗の異方性を考慮した CSEM データの3次元逆解析の実施にあたっては HR3D の属性解析から抽出される情報を CSEM 逆解析の初期モデルとして用いた。初期値依存性を検討するために、複数の初期モデルを設定し解析結果を比較したところ、浅部の解析比抵抗値は初期値に大きく依存せず、概ねデータにより説明されることを確認した。酒田海丘頂部では、鉛直比抵抗が水平比抵抗よりも 1-2 桁高い領域が、HR3D が示す BSR よりもおおよそ上位に存在することが明らかになった。これは表層型 MH の濃集を強く示唆するとともに、当該領域に賦存する MH が、鉛直方向よりも強い連続性を水平方向に持っている可能性を強く示唆した。このことは、海域の MH の賦存形態の理解に重要な制約を与える。

海丘頂部で2022年に採取された堆積物コア(宮嶋ほか2022)を用いて、それに含まれた鍵層や有孔虫を用いる年代情報が解析過程にある。今後、このLWDや堆積物コアによる目視精度の情報を、HR3Dによる詳細な地下構造と、比抵抗構造、AUVによる高分解能かつ海底下浅部に特化した地質構造等と統合して解釈することで、表層型MHのより正確な賦存形態と分布の把握とともに、表層型MHの性質解明を目指したい。より確からしい比抵抗構造を得るための初期モデルを、HR3Dの属性解析により抽出する方法の検討も含めて、異なる観測が、異なる観測目的、手法、観測される情報、深度情報決定方法、分解能の違いなど、それぞれの情報をより有機的に統合する、確かな方法を構築する必要がある。

## 謝辞

本研究は、経済産業省のメタンハイドレート研究開発事業の一部として実施した。

## 参考文献

- 小森省吾、横田俊之、後藤秀作(2022)山形県酒田沖最上トラフにおける海洋 CSEM 調査及び比抵抗構造解析について:表層型メタンハイドレート賦存状況調査、日本地球惑星科学連合 2022 年大会、講演要旨.
- 宮嶋佑典、太田雄貴、青木伸輔、金子雅紀、吉岡秀佳、高橋浩、井川怜欧、町田功、棚橋学、鈴木清史、佐藤幹夫(2022)日本海酒田海丘における掘削調査で発見されたメタンハイドレートと堆積物間隙水の地球化学的特徴、日本地球惑星科学連合 2022 年大会、講演要旨.
- 森田(2015)日本海表層型メタンハイドレート胚胎域における 2014 年度 AUV 詳細調査、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、MIS24-02、講演要旨.
- Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri, R., Sato, M. (1995) Rifting and basin inversion in the eastern margin of the Japan Sea, *Isl. Arc*, **4**, 166-181.
- Okamura, Y., Morijiri, R., Sato, M. (1996) 秋田西方海底地質図, 通商産業省工業技術院地質調査所.
- Tanahashi, M., Matsumoto, R., Morita, S. (2017) Quantitative estimation of massive gas hydrate in gas chimney structures, the eastern margin of Japan Sea, from the physical property anomalies obtained by LWD, AGU, OS53C-2134, 2017. Dec. (New Orleans, USA)
- 横田俊之、山口和雄、佐藤幹夫、後藤秀作、浅田美穂、寺西陽祐、東中基倫(2022)日本海東縁酒田沖における高分解能三次元反射法地震探査、日本地球惑星科学連合 2022 年大会、講演要旨.