

海洋石油資源探査における 人工信号源電磁探査法の概要

上 田 匠¹⁾

1. はじめに

近年, 主に欧米において海底下の石油・ガス資源探査への電磁探査法の利用が急速に広まり, 特に人工(制御)信号源を利用した海洋人工信号源電磁探査法(Marine controlled source electromagnetic (MCSEM)法)が注目されています(Ellingsrud *et al.*, 2002; Tompkins, 2004; Constable, 2006; Srnka *et al.*, 2006; Constable and Srnka, 2007). ここで「人工信号源」という言葉を「電磁探査」の前に付ける理由としては, 地磁気地電流(Magnetotelluric, MT)法(物理探査学会, 1998)のような「自然信号源」を利用した電磁探査法も広く利用されてきたため, 明確に区別する必要があるからです.

海洋でのMT法探査についてはすでに多くの発表が行われていますが(Edwards *et al.*, 1985; Hoversten *et al.*, 1998; Constable *et al.*, 1998; Hoversten *et al.*, 2000; de Groot-Hedlin and Constable, 2004; Key *et al.*, 2006), MCSEM法は近年急速に広まりつつある方法であり, 現在まさに発展途中にあると言えます.

一般に人工信号源電磁探査法(以下CSEM法)は, 主に地表や空中, あるいは孔井内での電磁探査法の一つとして, 金属・地熱資源探査, あるいは地下水・土壤汚染等の環境調査に広く用いられてきました. その測定原理は, 人工的に発生させた電磁波によって探査対象領域(通常地下)の比抵抗異常領域に発生した電磁場を測定, 解析することで地下の比抵抗構造を推定するというものです.

CSEM法を海底下の地下構造調査に特化させたものがMCSEM法と呼ばれ, 近年積極的に海底石油・ガス資源探査に利用されつつあります.

本稿では, 海洋電磁探査, 特にMCSEM法による

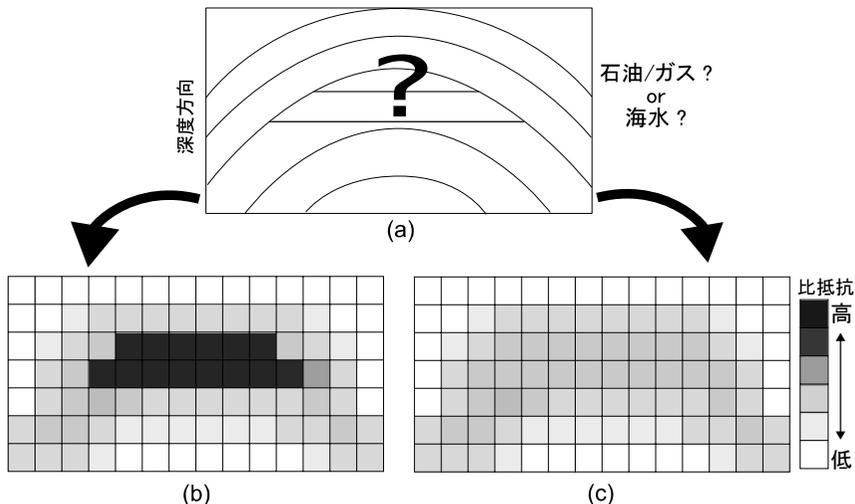
海底石油ガス資源探査の概要, 基礎理論について紹介します.

2. 海洋電磁探査法の概略

電磁現象を利用した海洋における探査技術は, 20世紀前半から主に潜水艦や艦船の通信等を目的として軍事関連で研究が始められました. このような軍事研究とは別に, 大西洋中央海嶺の構造調査といった地球科学, 学術調査において, 海洋MT法が用いられました. 前述したように, MT法は自然信号源電磁探査法であり, 極めて有力な地下探査手法ではありますが, 自然の電磁信号源が不安定であるという問題があり, 加えて比較的高周波数帯域では海水の高導電性のために入射信号の減衰が著しく, 海底では十分な信号強度が得られないという問題が発生しました. そこで, 高周波数帯域の信号を補うために, 人工信号源を利用する海洋電磁探査法が, 1970年代後半から, 主に米国のScripps海洋研究所を中心に開発されました(例えば, Cox *et al.*, 1968; Flosadottir and Constable, 1996). この方法は, 海洋地殻の比抵抗構造の推定など, 地球科学の分野で成果を納め, 現在も国内外の大学や研究機関において利用されています. このような地球科学での学術的な調査の他に, 海底石油資源探査での利用を目指した研究も, 例えばExxonMobil等が1980年代から進めました(Srnka *et al.*, 2006). しかし, 当時の探査海域は水深300m前後であり, この水深での電磁場測定技術や解析用計算機能力が開発途上であったことに加え, 既に海洋での3次元地震探査が有効な技術として確立し, 費用対効果も十分であったことから, MCSEM法の商用石油資源探査への適用へ向けた本格開発は見送られました. その後20年程度は, 海洋石油資源探査にお

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 物理探査, 海洋探査, 石油探査, 電磁探査, 人工信号源電磁探査



第1図 海洋石油ガス資源探査における地震探査と電磁探査のデータ解釈概念図. (a)は地震探査による地下構造解釈, (b)および(c)は電磁探査による比抵抗構造解釈図. (b)では背斜構造内に高比抵抗異常が推定されますが, (c)は低~中比抵抗のみが推定されています. 地震探査による(a)の構造解釈と合わせることで, (b)の場合は高比抵抗の石油ガス貯留層が存在する可能性があるかと判断されます.

る主力探査手法は3次元地震探査であり, 大きな成功をおさめてきました. しかしながら, 1990年代後半に入り, 海洋石油探査の対象域が水深1,000mを越える深海へと拡大し, また, これまでの3次元地震探査では試錐での空井戸リスクが無視できない地点も顕在化してきたこともあり, 改めて本格的な海洋電磁探査の研究開発が活発化してきました (Srnlka *et al.*, 2006 ; Constable and Srnlka, 2007).

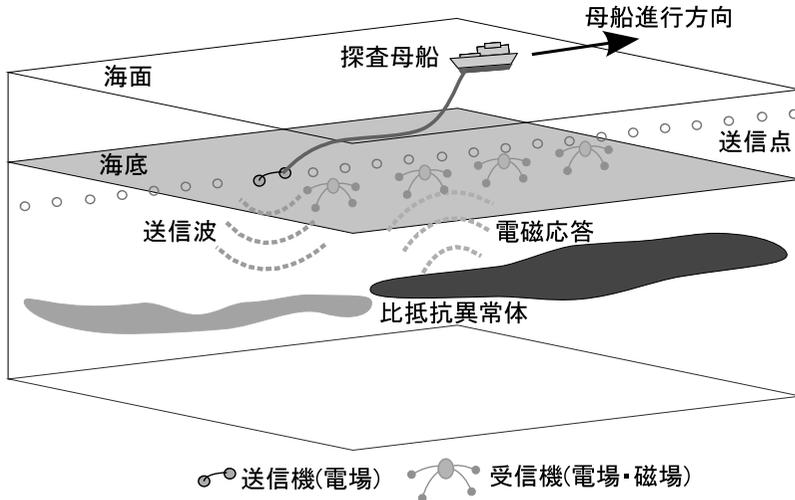
石油資源探査において海洋電磁探査を地震探査と共に利用する最も大きな理由としては, 前者は導電率(比抵抗), 後者が地震波速度という異なる物性値を探査対象にしているため, 互いの弱点を補い合って利用することで, より確度の高い解釈が可能になると考えられるからです. 具体的には, 例えば地震探査では, 石油貯留層と関連が深い背斜型構造において, 背斜構造そのものを精度良く探査できますが, 背斜上部に流体を含む層があると予測される場合, それが石油なのか海水なのかを明確に区別できないことがあります. 一方電磁探査は, 背斜構造そのものを地震探査と同様の解像度で探査することは非常に難しいですが, 海水(低比抵抗)と石油, ガス(高比抵抗)の区別は比較的容易に行えます(第1図). したがって, 両手法を排他的でなく, 補完協力的に利用することで, より

有効な石油貯留層の探査と試掘位置の決定が行えると考えられ, 空井戸のリスクも下げることが可能になると期待されています. 現在は, 欧米や中国, ロシアなどで石油企業や大学, 研究機関が積極的にMCSEM法の技術研究, 開発を進めています.

3. MCSEM法の概要

本節ではMCSEM法の測定方法や解析方法の基礎を簡単に説明します. すでに述べたように, MCSEM法は地表でのCSEM法を海底で行う方法であり, 一般的には母船に曳航された信号源から送信された電磁波の応答を海底に設置した受信機で測定します(第2図).

MCSEM法の利点としては送信信号を制御することで, 目的に応じて探査の仕様を設定しやすいことが挙げられ, 欠点としては人工信号源を利用することによるコストの増加や, MT法で利用される平面波近似を利用しないことによるデータ解析の複雑化などが考えられます. MCSEM法の利用は現在試験段階から実際の商業探査へと進みつつありますが, 探査装置や測定方法の開発状況に比べ解析方法の開発は遅れており, その確立が急がれているのが現状です.



第2図

海洋人工信号源電磁探査法の測定概念図。

3.1 測定方法

通常、MCSEM法では海底から数十m上を曳航された送信源から電磁信号を海底に向けて発信し、地下の比抵抗構造によって生じた電磁場を、海底に設置した受信機で受信、記録します。曳航される送信機は母船進行方向に平行な長さ100mから300mの電線(電気バイポール)が用いられることが多く、この送信機から約0.1Hz前後の周波数帯域で正弦波を発信します。

送信機からの信号は海水を伝播し、海底下に浸透し、さらに地下へと伝播していきます。海底下で比抵抗構造に何らかの変化があれば、その変化に対する電磁応答が生じるので、それを海底に設置した受信機で受信します。大規模な調査においては、送信電流値は数百から1キロアンペアに達します。現在まで、このような大電流を用いた探査によって、海生生物や海洋環境に悪影響が生じたという報告は、特になされていませんが、沿岸域や経済活動圏での探査においては、今後留意すべき事項であるといえます。

受信機は、通常水平方向の電場を測定するための電極と、水平及び垂直方向の磁場を測定するための磁場センサーから構成され、重りを付けた状態で母船から海底に投下されます。着底後は遠隔操作によって海底での電磁場を測定、探査終了後は重りを分離して浮上し、回収されます。

探査深度の大まかな目安としては、入射信号強度が $1/e$ (e は自然対数の底)となる「表皮深度」を用いることが多く、一般的な海底地層の比抵抗値として1

ohm-mから10ohm-m、使用周波数を0.01Hzから10Hz程度を採用すると、探査深度は海底下1～数km程度になります。また、MCSEM法においては、海底に設置した受信機と曳航される送信機を利用することで、送受信機間隔が探査範囲に大きな影響を与えます。送受信機間隔が近すぎると信号が大きすぎ、また遠すぎると信号がノイズレベルを下回ることがあるため、現在はおよそ送受信機間隔が数百mから10km未満程度の測定配置で探査を行い、送受信機の間隔と位置関係によって、探査対象領域を調節しています。送受信機間隔、位置、周波数、海底下の比抵抗は複雑に影響し合うため、探査深度や探査範囲を定量的に解釈するための感度解析も現在研究が進められています。

3.2 解析方法

次に、データ解析の基礎理論について簡単に説明します。海底における電磁探査法の支配方程式は地表や空中での電磁探査と全く同様にMaxwell方程式であり、その数値解析法も基本的には地表や空中での電磁探査法と同じです(Zhdanov, 2002)。相違点としては、地表、空中での探査が「大気層、大地」という構成を想定するのに対して、海洋電磁探査では「大気層、海水層、海底下」となることであり、通常海水層の比抵抗は1ohm-m以下であるため、海水層は低比抵抗層とみなすことができます。

1次元解析はすでに多くの論文や報告(MacGregor and Sinha, 2000; Eidesmo *et al.*, 2002; Constable

and Weiss, 2006) が発表されていますが、依然として課題が山積しています。その原因の一つは、低比抵抗な海水層を含む海洋地下構造での数値計算理論が複雑であることが挙げられます。例えば水深が300 m程度より浅い場所では、海底から海水を通り大気に達して、再び海底の受信機に到達する電磁波(一般にair waveと呼ばれます)が、本来受信したい海底下の比抵抗構造による影響を含む応答より大きいため、地下構造の情報を得られないという問題が議論されています(Srnka *et al.*, 2006)。Air waveの影響を考慮しなくてはならない水深は、地下の比抵抗や信号周波数、送受信機間隔にも依存することも、議論を複雑にしています。

3次元順解析については、海洋電磁探査に限らず、電磁探査法における現在最も重要な研究テーマの一つとして世界中で研究が進められており、数値解法としては差分法、有限要素法、積分方程式法がよく知られていて、それぞれが短所、長所を持っています。例えば、差分法・有限要素法は計算対象とする地下構造全体を格子状に離散化し、離散化した一つの格子(要素)内、あるいは格子枠上での電磁場や電磁ポテンシャルを数値的に求めます。対象領域と対象外領域での境界では何らかの物理的な境界条件を満足させる必要があります。一方で積分方程式法では、対象の地下構造を、単純なバックグラウンド構造と比抵抗異常領域に分けて、異常領域内のみを離散化し、積分方程式を構築して数値的に解きます。異常領域のみに注目して離散化すれば良いという利点がありますが、バックグラウンド構造における基本解(Green関数)をあらかじめ導出する必要があり、バックグラウンド構造は通常均質半無限あるいは水平多層構造となります。そのため、広範囲に渡る複雑な地下構造における電磁場を計算する場合には差分法や有限要素法に比べて不利になることがあります。したがって、それぞれの数値計算手法の特性を理解し、取り組むべき問題の状況に応じて使い分けることが重要になります。

そのような中で、MCSEM法のデータ解析は定性解釈から定量解析へと発展しつつあり、近年は電磁マイグレーションを利用した解析(Tompkins, 2004)、あるいは積分方程式法の準解析的(quasi analytical, QA)近似を用いた逆解析法(QA逆解析)(Gribenko and Zhdanov, 2007)、差分法や有限要素法を順解析

に採用した手法等が利用されています。

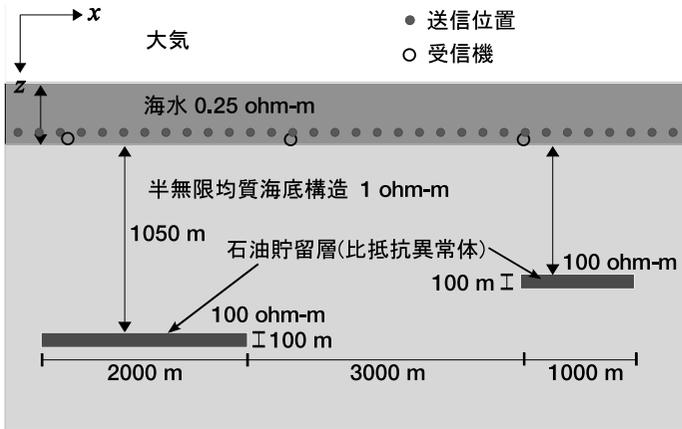
QA逆解析は、非線形問題である電磁探査の逆解析において最大の問題点となる感度行列(ヤコビアン)の計算を極めて容易に行うことができるという利点があります(Zhdanov, 2002)。このため、感度行列を反復毎に更新して再計算することが求められる共役勾配(Conjugate gradient, CG)法において強力な解法となっています。しかし、QA近似が有効に機能するような比抵抗構造や測定配置については今後の更なる研究が必要となると考えられます。

一方、QA近似以外の逆解析法として、電磁マイグレーションと呼ばれる高速な解析手法の研究が進められてきました(Zhdanov *et al.*, 1996; Zhdanov, 2002; Tompkins, 2004; Mittet *et al.*, 2005)。例えば、筆者らは電磁マイグレーションの概念を、物理探査の逆解析で広く利用されている正規化CG法に組み込み、MCSEM法探査の逆解析への適用を試みしました(Zhdanov *et al.*, 2006)。この方法を反復電磁マイグレーションと呼び、ヤコビアンを厳密に、かつ極めて高速に計算できるという利点を活用し、近似解法を用いずCG法の計算時間を大幅に短縮することが可能になりました。

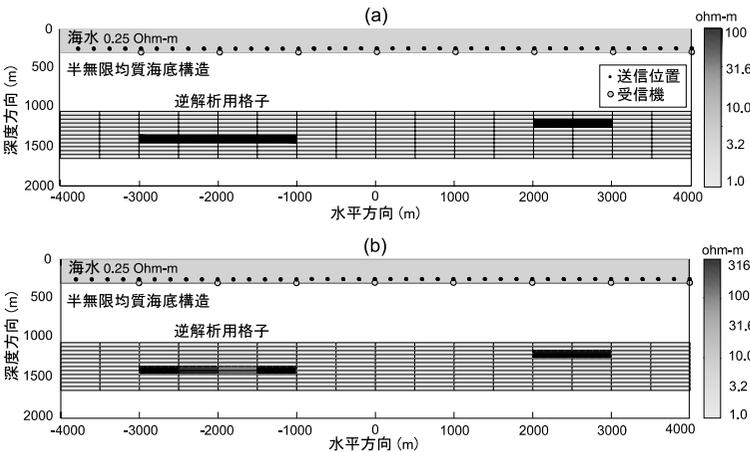
しかしながら、本稿で紹介したいずれの手法も、2, 3次元解析においては精度や計算コストの点で完成されたとは言えず、今後も世界中で研究開発が続いていくと考えられます。電磁探査法においては、2次元以上の数値解析のほとんどが解析解を求められない偏微分方程式の数値解法であることや、測定データから地下比抵抗構造を求める逆解析が典型的な悪条件問題であるということを考えれば、それぞれの数値解法の特徴を把握した上で利用することが、より確度の高い地質解釈を行う上で不可欠であると言えます。

4. 数値実験例

次に、第3図に示されるようなMCSEM法探査モデルでの解析実証試験を行った結果を示します。人工観測データは積分方程式法の高速高精度な近似解法の一つとして筆者らが開発した多重格子型QL近似法(Ueda and Zhdanov, 2006)を利用してあらかじめ用意し、また、送受信点間隔が長くなるにつれて増加するような人工ノイズを付加しました。受信は海底17点



第3図
海洋人工信号源電磁探査法の人工データ解析試験モデル。海底下は1ohm-mの均質構造とし、100ohm-mの比抵抗異常体とする石油貯留層を2箇所想定。海中を移動する送信源からの信号を発信し、海底に設置した複数の受信点で測定。



第4図
人工データによる数値実験設定モデルと解析結果例。上段(a)は設定した真の比抵抗構造断面を、(b)は反復電磁マイグレーションによる逆解析結果。両図ともに、x-z方向の垂直断面として表示。

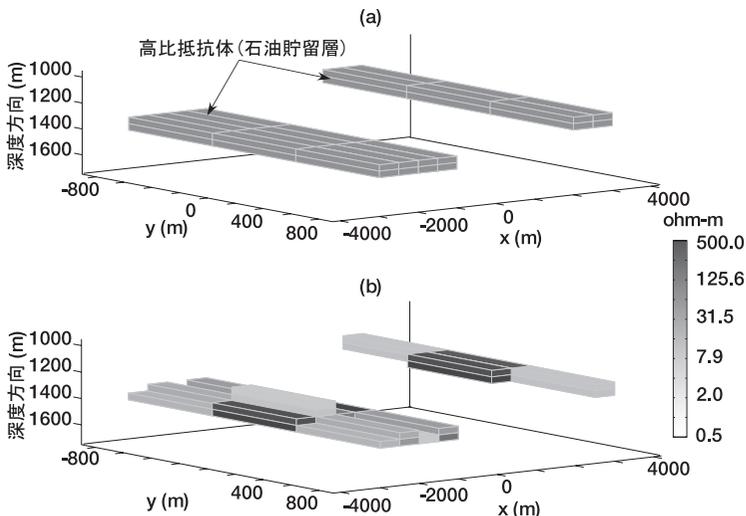
(間隔1,000m)で行うことを想定し、送信は200m間隔で周波数領域の信号を発信すると仮定しました。1次元のバックグラウンド構造は水深300m、比抵抗0.25 ohm-mの海水層と比抵抗1ohm-mの均質な海底堆積物層を想定しました。逆解析の離散化セルは、x、y、およびz方向にそれぞれ16×3×12であり、セル各辺の長さは500m、600m、および50mとしました。解析結果の品質を向上させるため、反復電磁マイグレーションを適用し、逆解析を行いました。

第4図(a)は仮定した真の比抵抗構造を示し、第4図(b)が反復マイグレーション解析結果を表しています。また、同じ解析結果を3次元表示したものが第5図です。貯留層の水平位置及び埋没深度が、非常に明瞭に解析されていることがわかります。観測データ及び、解析結果から計算した人工応答の一例が第6図(電場強度)および第7図(電場位相差)です。観測

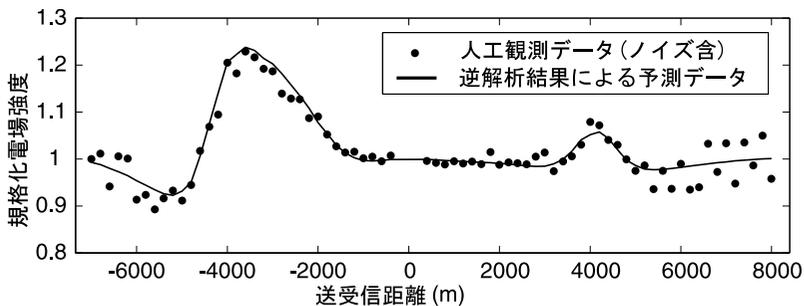
データが人工ノイズに汚染され、また予測データがノイズを含んだ観測データをよく再現していることがわかります。以上から、マイグレーションイメージング及び反復電磁マイグレーションが、MCSEM法探査の3次元逆解析法として有効に利用できる可能性を十分有していると考えられます。今後は、より複雑なモデルでの試験や、現場データでの適用検証を続けていく必要があります。

6. まとめと課題

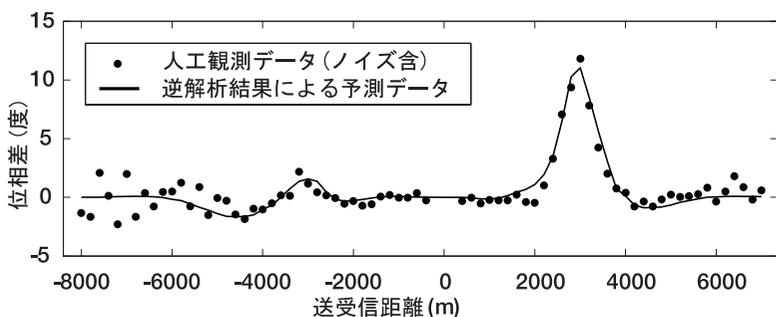
近年、海洋石油資源探査を中心に利用が広がっているMCSEM法について、その概略を簡単にまとめました。母船に曳航された送信源からの電磁信号を海底に設置した受信機で測定するという探査方法は実用段階に入り、現在はノイズレベルの詳細な検討



第5図
人工データによる数値実験設定モデルと解析結果の比抵抗構造3次元表示例。上段(a)は設定した真の比抵抗構造を、(b)は反復電磁マイグレーションによる逆解析結果を示します。



第6図
電場信号を人工観測データ(点)と解析結果比抵抗構造から予測される応答(実線)の比較例。貯留層を含む構造における電場を貯留層を含まない構造の電場で規格化した結果を表示。X軸は送受信機距離。



第7図
人工観測データ(点)と解析結果比抵抗構造から予測される応答(実線)の比較例。貯留層を含む構造における電場と貯留層を含まない構造の電場の位相差を表示。X軸は送受信機距離。

や、より有効な測線配置の考察等へ研究開発の中心が移ってきています。一方、地上や空中での電磁探査法と同様、海洋でのCSEM法も、複雑な電磁場挙動や計算コストの増大により、その数値解析方法(特に2次元、3次元解析)は確立されていません。そのため欧米等の石油関連企業では大学や公的研究機関に所属していた電磁探査数値解析の研究者や技術者を次々と採用し、データ解析面での技術開発を急

いでいるというのが現状であります。

日本は海洋に囲まれた国であり、資源、防災、環境など海洋での地下調査の重要性は非常に高いものがあります。MCSEM法はこの問題に関して大きな貢献ができる可能性を持っており、特に沿岸域等の浅海域における電磁探査は、数値解析のみならずデータ測定に関してもほとんど前例がなく、また技術的、理論的にも問題が多いため、今後のさらなる研究開

発が期待されます。

謝辞：本稿の研究内容の多くは、著者が米国Utah大学地質・地球物理学博士課程在籍中に行った海洋人工信号源電磁探査法の研究内容に基づいています。原稿作成にあたりUtah大学のConsortium for Electromagnetic Modeling and Inversion (CEMI) (電磁探査数値解析コンソーシアム)の構成企業 (BAE Systems, Baker Atlas Logging Services, BGP China National Petroleum Corporation, BHP Billiton World Exploration Inc., British Petroleum, Centre for Integrated Petroleum Research, EMGS, ENI S. p. A., ExxonMobil Upstream Research Company, INCO Exploration, Information Systems Laboratories, MTEM, Newmont Mining Co., Norsk Hydro, OHM, Petrobras, Rio Tinto - Kennecott, Rocksource, Russian Research Center Kurchatov Institute, Schlumberger, Shell International Exploration and Production Inc., Statoil, Sumitomo Metal Mining Co., Zonge Engineering and Research Organization)とMichael S. Zhdanov教授の多大な支援に深く感謝します。本稿執筆にあたり、助言を頂いた産業技術総合研究所の内田利弘博士、光畑裕司博士に感謝いたします。

引用文献

物理探査学会 (1998) : 物理探査ハンドブック 手法編。

- Constable, S. (2006) : Marine electromagnetic methods-a new tool for offshore exploration: *The Leading Edge*, 25, 438-444.
- Constable, S. and Srnka, L. J. (2007) : An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration: *Geophysics*, 72, WA3-WA12.
- Constable, S. and Weiss, C. J. (2006) : Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: Insights from 1D modeling: *Geophysics*, 71, G43-G51.
- Constable, S. C., Orange, A. S., Hoversten, G. M. and Morrison, H. F. (1998) : Marine magnetotellurics for petroleum exploration part i: A sea-floor equipment system: *Geophysics*, 63, 816-825.
- Cox, C. S., Constable, S. C., Chave, A. D. and Webb, S. C. (1968) : Controlled source electromagnetic sounding of the oceanic lithosphere: *Nature*, 320, 52-54.
- de Groot-Hedlin, C. and Constable, S. C. (2004) : Inversion of magnetotelluric data for 2D structure with sharp resistivity contrasts: *Geophysics*, 69, 78-86.
- Edwards, R. N., Law, L. K., Wolfgram, P. A., Nobes, D. C., Bone, M. N., Trigg, D. F. and DeLaurier, J. M. (1985) : First results of the MOSES experiment: sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, but magnetometric offshore electrical sounding: *Geophysics*, 50, 153-160.

- Eidesmo, T., Ellingsrud, S., MacGregor, L. M., Constable, S. C., Sinha, M. C., Johansen, S. E., Kong, F. N. and Westerdahl, H. (2002) : Sea Bed Logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas: *First Break*, 20, 144-152.
- Ellingsrud, S., Eidesmo, T., Johansen, S., Sinha, M. C., MacGregor, L. M. and Constable, S. C. (2002) : Remote sensing of hydrocarbon layers by seabed logging (SBL): Results from a cruise offshore Angola: *The Leading Edge*, 21, 972-982.
- Flosadottir, A. H. and Constable, S. C. (1996) : Marine controlled source electromagnetic sounding, 1, modeling and experimental design: *Journal of Geophysical Research*, 101, 5507-5517.
- Gribenko, A. and Zhdanov, M. (2007) : Rigorous 3D inversion of marine CSEM data based on the integral equation method: *Geophysics*, 72, WA73-WA84.
- Hoversten, G. M., Constable, S. C. and Morrison, H. F. (2000) : Marine magnetotellurics for base-of-salt mapping: Gulf of Mexico field test at the Gemini structure, *Geophysics*, 65, 1476-1488.
- Hoversten, G. M., Morrison, H. F. and Constable, S. C. (1998) : Marine magnetotellurics for petroleum exploration, part ii: Numerical analysis of subsalt resolution: *Geophysics*, 63, 826-840.
- Key, K. W., Constable, S. C. and Weiss, C. J. (2006) : Mapping 3D salt using the 2D marine magnetotelluric method: Case study from Gemini Prospect, Gulf of Mexico *Geophysics*, SEG, 2006, 71, B17-B27
- MacGregor, L. M. and Sinha, M. C. (2000) : Use of marine controlled source electromagnetic sounding for sub-basalt exploration: *Geophysical Prospecting*, 48, 1091-1106.
- Mittet, R., Maaø, F. O., Aakervik, M. and Ellingsrud, S. (2005) : A two-step approach to depth migration of low frequency electromagnetic data: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 24, 522-525.
- Srnka, L. J., Carazzone, J. J., Ephron, M. S. and Eriksen, E. A. (2006) : Remote reservoir resistivity mapping: *The Leading Edge*, 25, 972-975.
- Tompkins, M. J. (2004) : Marine controlled-source electromagnetic imaging for hydrocarbon exploration: *First Break*, 22, 27-33.
- Ueda, T. and Zhdanov, M. S. (2006) : Fast numerical modeling of multitransmitter electromagnetic data using multigrid quasi-linear approximation: *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1428-1434.
- Zhdanov, M. S. (2002) : Geophysical inverse theory and regularization problems: Elsevier.
- Zhdanov, M. S., Traynin, P. and Booker, J. (1996) : Underground imaging by frequency domain electromagnetic migration: *Geophysics*, 61, 666-682.
- Zhdanov, M. S., Ueda, T. and Gribenko, A. (2006) : Iterative migration in marine CSEM data interpretation: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 25, 810-814.

UEDA Takumi (2008) : An overview of marine controlled source electromagnetic method for offshore hydrocarbon exploration.

<受付：2008年2月22日>