講 演
 Lecture

多種物理探査データ統合解析・評価による構造形態推定と岩相推定*

高井 克己^{**†}・東中 基倫^{***}・持永 尚子^{***}

(Received September 17, 2018 ; accepted November 6, 2018)

Multi-physics data integration for interpretation and lithology classification

Katsumi Takai, Motonori Higashinaka and Hisako Mochinaga

Abstract : In recent years, the progress of data acquisition and analysis technology is remarkable in the field of non-seismic. Comprehensive evaluation of seismic data and non-seismic data is becoming important to increase success probability in exploration field. However, there are many issues to be considered for effective utilization, such as sensitivity and resolution of each data. In this paper, we introduce current status and problems of attempts to estimate structure and lithofacies by integrated analysis using multi-species geophysical data.

Keywords : non-seismic, multi-physics, lithology classification

1. はじめに

近年、空中重力・磁気探査および海洋電磁探査に関して、高解像度の実現とともに、物性・岩相情報抽出に向けたデータ取得および解析技術の進展が顕著である。低油価が継続する現状において、石油・天然ガス資源探査における地質的成功率評価の精度向上、迅速な探査開発は喫緊の課題であり、地震探査データに Non-Seismic データを加えた統合解析・評価への期待・ニーズは非常に高い。実際に、海洋電磁探査データを用いた HCI (Hydrocarbon Indicator) 再評価を通じた探査成功事例がバレンツ海などで報告されている (Stein *et al.*, 2014)。また、東アフリカ地域などの難地域では、空中重力偏差および MT を含む Non-Seismic データをプロスペクト抽出に積極的に活用する事例が報告されている (Colombo *et al.*, 2012)。さらに、重力偏差法探査に続き磁力偏差法探査も開発され、重力探査、電磁探査より探査開発への貢献が少なかった磁力探査に関して、有意な成果を提示できる可能性が見いだされている。

一方で、複数の Non-Seismic データを用いた複合解析、

統合インバージョンおよびモデリングを通じて、構造把握に止まらず、物性情報からマクロな岩相モデル構築が期待されているが、個別の物性不均質構造を踏まえた有効活用には、各インバージョン解析の感度、分解能などの相違点の把握が必要であり考慮すべき課題は多い。

本稿では、多種物理探査データを用いて統合解析・評価による構造形態推定と岩相推定の試みの現状と課題について実証スタディを通じて紹介する。

2. Non-Seismic データの重要性と技術進展

石油業界において、高分解能である地震探査データの使用頻度は高く、重・磁力探査データは、地震探査データの断面図上部に異常値を投影し構造区分の把握に活用する場合や、平面図でコンター間隔の粗密や異常値のトレンド変化からリニアメント解析を行い断層位置の推定に活用する

図 1 各種物理探査データの統合評価に関わる概念図
 既往概念から測定・解析技術が向上した将来の概念を示す。

* 平成 30 年 6 月 13 日、平成 30 年度石油技術協会春季講演会 地質・探査部門シンポジウム「効率化と技術の進展が石油・天然ガス探査にもたらす影響」で講演 This paper was presented at the 2018 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Impacts of Efficiency and Technology Development on Oil and Gas Exploration" held in Niigata, Japan, June 13, 2018

** 石油資源開発株式会社 JAPEX

*** 地球科学総合研究所 JGI, Inc

† Corresponding author : E-Mail : katsumi.takai@japex.co.jp

など補助的に活用されてきた。

また、電磁探査データの使用頻度は低く、地熱開発などの他分野で主に使用されるに留まっていた。しかしながら、重力偏差法探査や磁力偏差法探査の開発、海洋電磁探査の実用化やインバージョン解析技術の向上によって、地震探査に比べて低分解能ではあるが異なる物性値について高精度に測定することが可能となり、石油・天然ガス資源探査における地質的成功確率評価の精度向上、迅速な探鉱開発実施に応えるため、地震探査データに Non-Seismic データを加えた総合解析・評価への期待が高まってきている。図 1 に各物理探査データ統合評価に関する概念図を示す。

近年の測定技術進展においては、重力偏差法探査で使用される測定機器がヘリコプターに搭載可能となるほど小型軽量化され、陸上重力探査と同等以上の空間分解能となり、地形が険しく陸路ではアクセス困難な地域においても高精度の重力探査が可能となってきた（Mark Dransfield, 2010）。図 2 に衛星重力、地上重力、空中重力、空中重力

偏差法による解析結果の比較図を示す。

また、海洋電磁探査においては、地震探査データから解釈されたホライズンを拘束条件として、ホライズン以深の比抵抗値を探索するインバージョン解析を行い、高比抵抗域を抽出し炭化水素の存在を示す指標として使用され、探鉱開発に貢献できるようになってきている (S.Chakraborty *et al.*, 2013)。図 3 の地震探査断面からは Well-1 と Well-2 の構造に違いは認められない。しかし、海洋電磁探査のインバージョン結果を重ね合わせと Well-1 の構造と高比抵抗域が一致しており、ガス飽和率の高い貯留層と解釈されている。

3. 多種物理探査データ統合解析・評価の技術開発に関わる実証スタディ

本実証スタディの目的は、多種物理探査データを用いた統合解析・評価を通じて、スタディ地域の主要層の構造形態推定と主要岩相の分布推定について、その解析手法の標

図 2 各種重力探査の比較図

測定手法の違いによる分解能の違いを示す。陸上重力探査は短波長の変化が捉えられているが、アクセスできない空白域がある。しかし、空中重力偏差法探査では、空中から測定を行うことによってアクセスできない地域は存在しない。

(Chakraborty *et al.*, 2013, Fig.3)

図 3 海洋電磁探査の使用例

左に地震探査断面、右に地震探査断面に比抵抗値を重ね合わせした図を示す。Well-1 構造が高比抵抗域となっており Well-2 構造とは異なることが分かる。

準化を試みるとともに、技術課題を精査することである。その結果、解析手法の標準化として、後述の基本手順を作成し他地域への適応の可能性が見いだされ、インバージョ

ン解析において技術課題が明らかになった。

3.1 実証スタディ対象の概要

スタディ地域は、主要層の第1層および第3層、主要層に挟まれた第2層の3層から構成されており、第1層および第3層の構造形態は、三次元地震探査データから解釈を行うことによって推定はされている。本稿では、第1,3層の既存解釈と解析手法の標準化で推定された構造形態との整合性を評価する。一方、主要岩相は、A, B, Cの3岩相から構成されており、火成岩相A, B, Cの分布については、西から東へA, B, Cと大よその分布域が坑井地質から推定されている(図4)。

スタディ地域の物理探査データは、三次元地震探査(4 km × 8 km)が約32 km²、陸上重力探査(25 km × 25 km)が約500点、地質調査総合センター(2005)の空中磁気異常データベース(25 km × 25 km)が使用可能である(図4)。また、地域内には17坑井があり、検層データおよびFMIを解析することによって岩相区分がなされている。

3.2 統合解析・評価の基本手順

実証データの事例適用に際して、三次元物性モデルの構築、疑似検層データの作成を経て、構造形態および岩相推定を実施した。以下に基本手順を示し、解析手法の標準化とした。

- [1] 入手可能な物理探査データと地表地質状況および坑井情報などの知見を統合して、大まかな構造形態と岩相分布域を推定し、品質管理のための資料を作成する。
- [2] 物理探査データについて解析又は処理を行い、データに含まれる物性値を取り出し、1つのセルに速度、密

図4 実証スタディ対象の物理探査データと岩相分布域
重・磁力探査データの三次元インバージョン実施範囲(25 km × 25 km)と三次元地震探査データ範囲(4 km × 8 km)、坑井地質から推定された岩相A, B, Cの分布域を示す。

図5 構造形態推定ワークフロー図

4物性値を保持した物性モデルからしきい値内のセルを抽出し、各層準の構造図を作成するフローを示す。

震探	振幅値	PSTM Velocity	Density
	P-impedance	S-impedance	Vp/Vs
	Poisson's ratio	Young's modulus	Brittleness Index
	Mu-Rho	Lambda-Rho	AntTrack
重力 (相対密度)	検層の拘束条件なし	検層の拘束条件あり	
磁力 (相対磁化率)	検層の拘束条件なし		

図 6 構造形態推定で使したデータ

マルチアトリビュート解析によって各種物性が取り出されているが、構造形態推定では4物性（白丸）を使用した。

図 7 構造形態推定で使したデータのヒストグラムと最適なしきい値
選定した4物性における層準区間ごとのヒストグラムと最適なしきい値（Max, Min）を示す。

度、磁化率などの複数の物性値が保管されている三次元物性モデルを構築する。

- [3] 構築された三次元物性モデルから、坑跡に沿って各物性値を取り出し疑似検層データを作成する。
- [4] 坑井情報にはターゲットとする層準または岩相の区間が認定されており、認定区間内における疑似検層データからヒストグラムを作成する。
- [5] ヒストグラムから使用する物性値と最適なしきい値を選定する。
- [6] 三次元物性モデルから全物性値のしきい値に収まるセルを抽出し、構造図または岩相分布域を作図する。
- [7] [1] で作成した品質管理資料の大まかな構造形態と岩相分布域と比較し、地質学的観点とのそごが生じた場合には、しきい値を見直し再度抽出を行う。
- [8] 地質学的観点とのそごがなくなったと判断した場合、終了とする。

さらに、しきい値が重なり岩相が複数抽出されることが

予想されるため、抽出されたセルにはフラグを立て、各セルにおける出現率を算出し保管しておく。出現率を算出することによって、複数の岩相に対しても抽出が可能となるが、1つのセルが単一岩相として認定されていない場合があることに留意が必要である。

3.3 構造形態推定結果

構造形態推定手順については、三次元物性モデルから坑跡に沿って各物性値を取り出し疑似検層データを作成し、ターゲットとする層準区間の物性値のヒストグラムを作成する。ヒストグラムから使用する物性値と最適なしきい値を選定後、三次元物性モデルから全物性値のしきい値に収まるセルを抽出し構造図を作図した。構造形態推定を行ったワークフローを図5に示す。

使用したデータは、三次元地震探査処理結果の振幅値と速度解析結果の速度値、陸上重力探査データに対して検層データを拘束条件として加えた三次元インバージョン解析後の相対密度値（深部になるほど密度が高くなる傾向を除

図8 構造形態推定結果と既存構造図

上段が図5のワークフローから作成された構造図、下段が既往震探解釈結果から作成された構造図を示す。

図9 岩相推定ワークフロー図

4物性値を保持した物性モデルからしきい値内のセルを抽出し、岩相モデルを構築するフローを示す。

震探
	振幅強度	PSTM Velocity	Density

	P-impedance	S-impedance	Vp/Vs
重力 (相対密度)
	Poisson's ratio	Young's modulus	Brittleness Index

	Mu-Rho	Lambda-Rho	AntTrack
磁力 (相対磁化率)
	検層の拘束条件なし	検層の拘束条件あり

	検層の拘束条件なし		

図10 岩相推定で使用了4物性データ

岩相推定では4物性（白丸）をを使用した。

いた密度)、空中磁気探査を拘束条件なしで行った三次元インバージョン解析後の相対磁化率値(傾向面を除いた磁化率)、以上4つの物性値を基に構造形態推定を行った。図6に示すように、三次元地震探査処理結果から、マルチアトリビュート解析によって複数の物性値が算出されており、どの物性値を使用するかは坑井地質などの知見から選定している。

構造形態推定においては、まず選定した物性値を三次元物性モデルから坑跡近傍のデータを抽出し、疑似検層データを作成した。その上で、ターゲットとなる層準ごとに疑似検層データからヒストグラムを作成し、最適なしきい値を選定した。図7に示すように、速度は第1層区間が2,019 m/sec ~ 2,130 m/sec(しきい値幅 111 m/sec)、第2層区間が2,037 m/sec ~ 2,133 m/sec(しきい値幅 96 m/sec)、第3層区間が2,074 m/sec ~ 2,154 msec(しきい値幅 80 m/sec)と第1層区間のしきい値幅は広く、第2、3層区間では若干しきい値幅が狭くなっている。同様に、震探振幅値は第1層区間が-3.18 ~ 2.04(しきい値幅 5.22)、第2層区間が-3.87 ~ 3.89(しきい値幅 7.76)、第3層区間が-4.17 ~ 2.38(しきい値幅 6.55)と各層区間はゼロを挟んで正負の値がしきい値となったことから広い範囲で抽出され、セルの絞り込み(基本手順の[6])の寄与は低いことが判明している。相対密度は第1層区間が-0.127 ~ 0.209(しきい値幅 0.336)、第2層区間が0.028 ~ 0.275(しきい値幅 0.247)、第3層区間が0.09 ~ 0.336(しきい値幅

0.246)であるが、ヒストグラムの最頻値を比較すると第3層区間の相対密度が大きく、セルの絞り込みの寄与は高く、構造形態推定に貢献している。相対磁化率は第1層区間が $-0.945 \times 10^{-3} \sim 1.586 \times 10^{-3}$ (しきい値幅 2.531×10^{-3})、第2層区間が $-0.958 \times 10^{-3} \sim 1.41 \times 10^{-3}$ (しきい値幅 2.368×10^{-3})、第3層区間が $-0.996 \times 10^{-3} \sim 1.307 \times 10^{-3}$ (しきい値幅 2.303×10^{-3})と各層区間は震探振幅と同様にゼロを挟んで正負の値がしきい値となったことから広い範囲で抽出され、セルの絞り込みの寄与は低かった。

図7に示した4物性値のしきい値を満たすセルを、坑井マーカーから内挿によりガイドライン面を作成し、制約条件を与えて抽出した。抽出されたセルは層準の厚さとなっていることから、最上面のセルで層準の構造図を作成した。図8に示すように、既往震探解釈図と比較して、抽出された構造形態の頂部と伸びの方向においておおむね整合性があり、第1層上面の構造頂部が3層では北東側に移動していることが既往震探解釈図とも整合している。しかしながら、既往震探解釈図では断層など短波長の構造変化を捉えているのに対して、推定された構造図では短波長成分はなく、中波長以上の大局的な構造変化を捉えている。要因としては、地震探査データの方が深度方向の分解能が高いため短波長の構造変化を解釈することが可能であったと考えている。

図11 岩相推定で使用したデータのヒストグラムと最適なしきい値
選定した4物性における岩相ごとのヒストグラムと最適なしきい値(Max, Min)を示す。

3.4 岩相推定結果

岩相推定手順については、三次元物性モデルから坑跡に沿って各物性値を取り出し疑似検層データを作成し、ターゲットとする岩相区間の物性値のヒストグラムを作成する。ヒストグラムから使用する物性値と最適なしきい値を選定後、三次元物性モデルから全物性値のしきい値に収まるセルを抽出し、岩相モデルを作成した。岩相推定を行ったワークフローを図9に示す。

使用したデータは、三次元地震探査処理結果のアトリビュートの一種である振幅強度と速度値、相対密度と相対磁化率の4つの物性値である（図10）。

手順としては構造解釈と同様であるが、三次元物性モデルから坑跡近傍のデータを抽出し、疑似検層データを作成する。ターゲットとなる岩相ごとに疑似検層データからヒ

ストグラムを作成し、最適なしきい値を選定した。図11に示すように、速度は岩相Aが2,040 m/sec～2,141 m/sec（しきい値幅101 m/sec）、岩相Bが2,044 m/sec～2,153 m/sec（しきい値幅109 m/sec）、岩相Cが2,055 m/sec～2,181 m/sec（しきい値幅126 m/sec）をしきい値とし、岩相Cにおいては最大値を累積分布関数 F （0.75）に当たる速度を採用し、セルの絞り込みの寄与を均等にした。既存スタディで、岩相Cの分布域と震探の強振幅域との相関が指摘されていたことから震探アトリビュートの中から振幅強度を採用して、岩相Aが0.31～1.99（しきい値幅1.68）、岩相Bが0.6～1.62（しきい値幅1.02、最大値を累積分布関数 F （0.75）に当たる相対密度）、岩相Cが0.46より大きい値をしきい値とした。しかしながら、セルの絞り込みの寄与は低く、振幅強度のみではなく連続性など総合的に

図12 岩相分布推定結果と出現率

岩相ごとによる特定の深度における推定分布域の平面図と、同深度における出現率を示す。赤は単一岩相と推定された地域、緑と青は2岩相が推定された地域、白は3岩相が推定された地域を示す。

解釈担当者が相関を指摘していたと推測される。相対密度は岩相 A が $-0.029 \sim 0.216$ (しきい値幅 0.187), 岩相 B が $0.18 \sim 0.364$ (しきい値幅 0.184), 岩相 C が $0.2 \sim 0.314$ (しきい値幅 0.114) であるが, ヒストグラムの最頻値を比較すると岩相 B と C の相対密度が同等であることから重複することが予想される。相対磁化率は岩相 A が $-0.263 \times 10^{-3} \sim 0.946 \times 10^{-3}$ (しきい値幅 1.209×10^{-3}), 岩相 B が $0.512 \times 10^{-3} \sim 0.802 \times 10^{-3}$ (しきい値幅 0.29×10^{-3}), 岩相 C が $0.244 \times 10^{-3} \sim 0.969 \times 10^{-3}$ (しきい値幅 0.725×10^{-3}) と岩相 B のしきい値幅が狭く, セルの絞り込みの寄与は高かった。

図 11 に示した 4 つの物性値のしきい値を満たすセルを抽出し, 深度平面図として岩相 A, B, C の分布域を表し

た (図 12 左)。岩相 A は, 南西域に広く広がり坑井地質から予想される広がり調和的であった。岩相 B は, 北北西-南南東トレンドは再現できているが西方に延びるトレンドが認識できる。また, 岩相 C は, 坑井地質から最も東側に分布すると予想されており, おおむね調和的であった。

また, 当該岩相に相当するセルを抽出する際には, 岩相毎に重複して抽出されたセルを記録しておき, 重複しているセルがどの岩相と重複しているかを出現率として深度平面図に表した (図 12 右)。岩相 A は南西域と北東域で単一岩相 (赤) として抽出されており, 中央部付近では岩相 B (緑), C (青) との重複や未抽出域となった。岩相 B は中央部の限られた地域で単一岩相 (赤) と抽出されたが,

図 13 Facies Log と岩相抽出結果の対比

左列から検層データおよびFMI解析から認定された岩相, 岩相Aの抽出結果(緑), 岩相Bの抽出結果(黄), 岩相Cの抽出結果(ピンク)を示し, 帯の幅は出現率 (0 ~ 100%) を表す。

他の地域では岩相 C（緑）との重複域となった。岩相 B と C のしきい値が類似しているため重複域が広がったと考えている。岩相 C は中央より東側と南側で単一岩相（赤）と抽出されたが、その他の地域では岩相 B（緑）との重複域となった。

岩相モデルから坑跡に沿って作成された疑似検層と検層データから区分された岩相と比較を行った。図 13 に示すように、岩相 A 代表坑井において、抽出された岩相は全区間で岩相 A と認定され非常に良い岩相推定結果となった。岩相 B 代表坑井においても、抽出された岩相は B が卓越しており良い岩相推定結果となっている。また、岩相区分 C と混在する区間（X,900 m 以深など）では、抽出された岩相 B と C の出現率が 50% として良く表現されている。岩相 C 代表坑井においても、抽出された岩相は全区間で岩相 C と認定され非常に良い岩相推定結果となった。3 坑井において、比較対象とした岩相区分は、検層データおよび FMI を解析することによって認定されており、Non-Seismic データの分解能を考慮すると十分に良い抽出結果となったと考えている。

4. まとめと今後の展望

実証スタディを通じて、地震探査データに加えて異なる物性値について高精度に測定する Non-Seismic データを複数入力として統合解析・評価を実施することで、層準上面および岩相の抽出ワークフローを構築することができた。また、層準上面については、既往地震探査データ解釈との整合性は良いことが判明し、岩相の抽出については、坑井の岩相区分との整合性は非常に良かった。

本実証スタディの目的であった、解析手法標準化の試みは基本手順の作成によって達成されたと考えるが、ワークフローで使用する物性値、ヒストグラム、しきい値などの組み合わせを見出す上で試行錯誤が必要であり、適用するフィールドの地質学的特徴および坑井情報を十分に理解し、パラメータ選定および評価指針はフィールドの地質学的特徴の再現度合いを比較検討しながら定めていく必要があった。

地震探査データと対比して、Non-Seismic データは長波長の物性不均質を捉えるため、Non-Seismic データを含めた総合解析評価において、分解能のうちの波長の違いが顕在

化しがちである。しかしながら、火成岩などの岩相変化への適応の観点からは Non-Seismic データは地震探査データに対して優位性を持ち、本解析・評価結果において広域的岩相推定には大きく寄与していると考えられる。

今後の課題としては、今回の実証スタディでは、各探査データ単独の三次元インバージョンを実施しており、物性および岩相への感度が異なることからインバージョン結果が整合しない場所があった。したがって、各物理探査データの特徴を踏まえた統合されたインバージョンの実施は不可欠であり、解析手法の標準化において、ジョイント・インバージョンを組み込むことは重要な課題であると考えている。さらに、ワークフローで使用する物性値の選定、しきい値の最適化において任意性が大きく、パラメータ選定の客観性を担保するために AI 技術を活用した物性値の選定、しきい値の最適化についても課題として、今後の解析技術の進展に期待したい。

謝 辞

本稿の外部発表を許可して頂きました石油資源開発株式会社 に深甚の謝意を表します。

引 用 文 献

- Colombo, D., T. Keho and G. McNeice, 2012 : Integrated seismic-electromagnetic workflow for sub-basalt exploration in northwest Saudi Arabia. *The Leading Edge*, **31**, 42–52.
- Chakraborty, S., Choo, M. and Pedersen, H.T., 2013 : Looking Through the Haze - How CSEM can Improve Reservoir Imaging Where Seismic Struggles - A Case Study from Malaysia, 75th EAGE Conference & Exhibition.
- 地質調査総合センター, 2005 : 日本空中磁気データベース. 数値地質図 P-6, 地質調査総合センター
- Mark Dransfield, 2010 : Conforming Falcon gravity and the global gravity anomaly. *EAGE Geophysical Prospecting*, **58**, 469-483
- Stein F, Pål T. G. and Svein E., 2014 : CSEM as a tool for better exploration decisions: Case studies from the Barents Sea, Norwegian Continental Shelf, SEG Volume 2, Issue 3, SH55-SH66.