

石油・天然ガス探査における密度分布推定手法の進展と展望 —既存体系の課題抽出とミュオグラフィの貢献可能性

松島 潤*

要 旨

宇宙線ミュオンを利用した探査（ミュオグラフィ）は測定機器の着実な進化を遂げることにより、その適用先の多様化を図ってきている。今後、さらに様々な分野への適用が期待される中で、石油・天然ガス開発分野への適用性が検討されていくことが予想される。これまで石油・天然ガス開発分野に適用されている密度分布推定手法の体系を改めて整理することにより課題点を抽出し、そのような課題点に対してミュオグラフィがどのように貢献できるかを考察することは、密度情報の信頼性・適用性拡大の視点から重要である。本論説では、石油・天然ガス探査分野において密度情報が提供しうる価値を明確にし、密度分布推定手法の既存体系として中心的役割を成す重力探査と地震探査の進展と現状について技術的進展の視点も含めて概観することにより、それらを踏まえてミュオグラフィが貢献できる領域について展望する。

キーワード：ミュオグラフィ・密度分布・石油・天然ガス探査・重力探査・地震探査

1. はじめに

宇宙線ミュオンを利用して地下の密度情報推定は、土木分野において George (1955) によって最初に実施された。George (1955) は地下トンネルを利用することにより、トンネル上部の岩盤の厚さを測定した。しかし、測定装置は地下トンネル内に設置された実験室スケールで行われるほど大掛かりなものであった。その後、測定装置の可搬性が高まると、適用対象としてピラミッド内における隠された部屋の調査が実施され始めた (Alvarez et al., 1970)。その後、Tarkova et al. (1973) や Bondarenko et al. (1974) によって地質構造の密度分布推定が試みられ、Malmqvist et al. (1979) によって鉱物資源を対象とした物理探査への可能性も調査された。さらに、素粒子検出器の高度化と小型化がさらに進展すると、火山内部の時空間変動へと適用対象が広がった (Nagamine 1995; Tanaka et al., 2005, 2007)。ミュオンを用いたイメージング技術（以降ミュオグラフィと呼ぶ）の技術的進展の詳細については田中 (2012) に詳しいので参照されたい。また、鈴木 (2012) は土木物理探査への可能性の検討を詳細に行っ

ているのでこちらも参照されたい。近年、坑井内にミュオン検出器が設置されることが現実性を帯びてきており、CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) におけるモニタリングの可能性も数値シミュレーションによる検討が行われている (Kudryavtsev et al., 2012; Klinger et al., 2015)。

以上のように、宇宙線ミュオンを利用した地下探査は測定機器の着実な進化を遂げることにより、その適用先の多様化を図ってきていることがわかる。今後、さらに様々な分野への適用が期待される中で、石油・天然ガス開発分野におけるミュオグラフィの適用性に関する検討もされていくことが予想される。このとき、石油・天然ガス開発分野に適用される既存の密度分布推定手法の体系を改めて整理することにより既存体系の課題点を抽出し、そのような課題点に対してミュオグラフィがどのように貢献できるかを考察することは、密度情報の信頼性・適用性拡大の視点から重要である。Table 1 に石油・天然ガス開発分野に用いられる物理探査の種類と概要を示す。密度推定が可能な手法としては、重力探査と地震探査があげられる。なお、Table 1 において、括弧

2018年10月7日原稿受付；2018年11月19日受理

* 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

書きの項目は技術的観点からは現時点で必ずしも十分に確立・成熟していない手法を示す。例えば、重力探査はこれまで大局的な地質構造を把握する概査法として位置付けられ、堆積盆地の広がり、基盤形状、堆積盆地中の断層・貫入岩・背斜構造の抽出など堆積盆地の定義・概略記述を行うことが主要な用途であったが、測定機器の進展により近年では貯留層スケールの評価にも積極的に適用が試みられるようになってきている (Capriotti and Li, 2015; Reitz et al., 2015; Wilkinson et al., 2017; Elliott and Braun, 2017)。一方、地震探査においては、これまで弾性波の速度あるいは減衰情報が得られてきたが、近年では解析技術の進展により密度情報を推定する試みがなされている (Prioux et al., 2013; Luo and Wu, 2018)。

本論説では、まず石油・天然ガス探査分野において密度情報が提供しうる価値を明確にし、密度分布推定手法の現状について技術的進展の視点も含めて概観する。その後、それらを踏まえてミュオグラフィが貢献できる領域について展望する。

2. 密度情報の価値

岩石の密度は、鉱物組成、孔隙率、孔隙内充填物の関数となるが、ここでは石油・天然ガス探査分野における密度情報が提供しうる価値について、ヤング率やポアソン比などの地質力学的パラメータ推定ならびに孔隙内充填物推定の観点から以下にそれぞれ述べる。

2.1 地質力学的パラメータ推定

ここでは、地下の密度情報を獲得することが結果として、地下の地質力学的パラメータ推定を行えることについて述べる。在来型の石油・天然ガスを地下から生産すると間隙圧が低下することにより貯留層内外の応力・ひずみ場が変化し、結果として貯留層内外に変形をもたらすことが知られている (e.g., Herwanger and Horne, 2009)。一例として、北海に位置する石灰岩からなる油層からの生産に伴い貯留層が縮減し、さらにその上位層が伸張した現象が経時変化反射法地震探査によって

観測されている (Guilbot and Smith, 2002)。貯留層管理の観点から、従来型の孔隙内流体の性状を予測する貯留層シミュレーションに加えて、岩石の変形を考慮した Reservoir Geomechanical Modeling (貯留層地質力学) の分野が近年盛んに研究されてきている (e.g., Herwanger and Koutsabeloulis, 2011)。貯留層の時間的なひずみ量と経時変化反射法地震探査により得られる反射面位置の時間的な変化量を関連付けて定量的に貯留層の地質力学の変動を見積もることも実施されている (Hatchell and Bourne, 2005; Staples et al., 2007)。また、貯留層に対して水圧刺激を行う際に発生する亀裂の方向は、現時点で作用している主応力方向に依存しているため、油ガスの生産に伴って主応力方向が変化することによる影響を評価できる (Herwanger et al., 2013)。さらに、貯留層地質力学のアプローチは、油ガスの生産に伴った長期的な坑井の健全性評価や坑井軌跡の最適化にも有効である (Herwanger et al., 2013)。

一方で、非在来型の石油・天然ガスとして2000年代後半以降急速に開発が進められているシェールガスやシェールオイルを胚胎するシェール層の評価においては、スイート・スポットと呼ばれる生産性の良い箇所を探知することが技術的に重要な課題となっている (Sena et al., 2011)。シェール層開発は技術先導型であり、主には水圧破碎・水平坑井・微小地震モニタリングの3つの要素技術が確立・普及したことによる貢献が大きいとされるが、最終的な生産性を決定づけるのは、スイート・スポットの検知能力、つまり如何に生産性の良い箇所に水平坑井を掘削できるかという判断結果に依存する。ここで、スイート・スポットは地質学的なものと工学的なもの2種類に分類され、地質学的スイート・スポットは全有機炭素量が高く熟成が進んでおりガス含有量が高い箇所であり、工学的スイート・スポットは脆性の性質を有する岩石から構成され亀裂系を生成しやすい箇所 (この性質は脆さを表現する brittleness 指標として定義されている) である (Chen et al., 2017)。Jarvie et al. (2007) は、石英・方解石・粘土鉱物のバランスで brittleness 指標が表現できることを提案し、石英は脆性性、方解石・粘土

Table 1. Geophysical methods for oil and gas exploration.

探査方法	測定パラメータ	得られる地下の物性	用途
重力探査	• 重力場	• 密度	• 堆積盆地の定義・概略記述 • (貯留層評価)
磁力探査	• 磁力場	• 磁化率 • 残留磁気	• 堆積盆地の定義・概略記述
地震探査	• 走時 • 波形	• 弾性波速度・減衰 • (密度)	• トラップの記述 • 貯留層評価
電磁探査	• 電磁放射に対する反応	• 比抵抗 • インダクタンス	• 堆積盆地の記述 • 炭化水素資源の集積ポテンシャルの直接検知

鉱物は延性を司ることを示した。Rickman et al. (2008) は、brittleness 指標をポアソン比とヤング率の関数で表現し、高いヤング率と低いポアソン比は脆性、低いヤング率と高いポアソン比は延性を司ることを示した。スイート・スポットの検知方法としては、コア試料に基づいた力学的試験ならびに鉱物分析を実施することが精度の高い情報を得られることが知られている。しかしこの方法は、空間的には点の情報しか得られないため、深度方向の評価には物理検層、水平方向の拡がりの評価には反射法地震探査を適用するのが一般的である。

以上のように、ヤング率やポアソン比のような地質力学的パラメータを推定することは、貯留層地質力学あるいはシェール層開発におけるスイート・スポットの検知において重要であることがわかる。ただし、後述するように地震探査データから地震波速度情報と密度情報を切り分けることは容易ではないため、結果として地質力学的パラメータの推定の精度は低下してしまう可能性に留意する必要がある。

以下では、地震波速度と密度と地質力学的パラメータとを関連付ける基本式に基づいて、地震探査データから地質力学的パラメータを求める方法について述べる。弾性体の線形性、等方性、均質性を仮定すると、P波速度 (V_p) と S 波速度 (V_s) は (1) 式と (2) 式でそれぞれ表現される。

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \tag{1}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{2}$$

(1) 式と (2) 式において、 K と G と ρ はそれぞれ体積弾性率、せん断率、密度である。(1) 式と (2) 式より、体積弾性率 (K)、せん断率 (G) は以下の (3) 式と (4) 式にそれぞれ表現される。

$$K = \rho V_p^2 - 4\rho V_s^2/3 \tag{3}$$

$$G = \rho V_s^2 \tag{4}$$

さらに、ポアソン比 (ν) とヤング率 (E) は以下の (5) 式と (6) 式にそれぞれ表現される。

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - 2V_s^2)} \tag{5}$$

$$E = 3(\rho V_p^2 - 4\rho V_s^2) \left(1 - \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{(V_p^2 - 2V_s^2)} \right) \tag{6}$$

地質力学的パラメータの中で、ポアソン比は密度によらず P 波速度と S 波速度で決定されるが、ヤング率などその他のパラメータは密度情報が必要となる。ただし、波動情報を経由して得られる地質力学的パラメータは動

的パラメータであり、貯留層地質力学に入力するために静的パラメータに変換する必要がある点に注意が必要である。

2.2 孔隙内充填物推定

ここでは、孔隙内充填物推定における密度情報の有効性について述べる。地震探査データにおける振幅異常や AVO (Amplitude Versus Offset) 解析により、在来型天然ガスを探査する際に頻繁に陥る失敗として、経済性がほとんど無い低飽和ガス層を検知してしまう点が知られている (Van Koughnet et al., 2003)。これは、孔隙内において比較的低飽和なガスしか存在しないにも関わらず、地震探査データに大きな影響を及ぼしてしまうため、ガス飽和度の大きさを地震探査データのみから判別することが困難なためである。孔隙内の充填物の判定において地震探査データによる AVO 特性に比較して密度情報の方がより有効的に機能することを Van Koughnet et al. (2003) はメキシコ湾の深海域に位置する 19 本の坑井で取得された検層データに基づいて示した。Van Koughnet et al. (2003) が観測した、孔隙内充填物の種類と密度あるいは AVO 特性 (ここでは AVO gradient) の関係を Fig. 1 に模式的に示す。孔隙内充填物の種類と密度との関係図 (Fig. 1a) においては、孔隙内充填物の種類に応じて密度情報が充填物の密度に応じて単純な反応を示しているのに対して、AVO 特性との関係 (Fig. 1b) においては、その関係が複雑になっていることがわかる。

孔隙内充填物の種類と AVO 特性との関係が複雑性を呈する原因は、孔隙内充填物を含む孔隙系と地震波動伝播との相互作用が複雑であるためである。流体で満たされた孔隙系における地震波伝播過程の複雑性 (速度分散現象、減衰現象の周波数依存性) については Biot (1956)

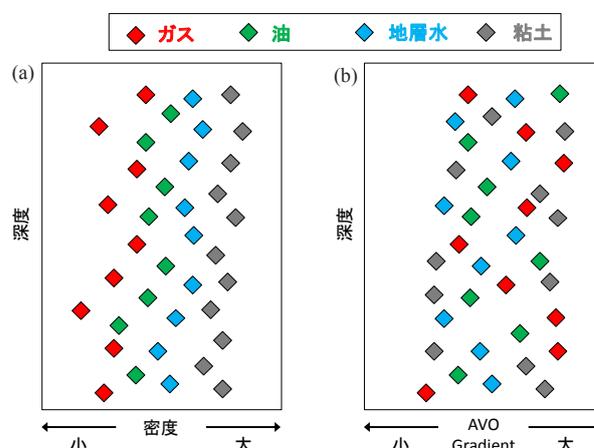


Fig. 1. Illustration of the importance of density in differentiating between different types of pore fluid and lithology (schematically drawn from Van Koughnet et al., 2003): (a) depth versus density versus fluid/lithology type (color), (b) depth versus AVO gradient versus fluid/lithology type (color).

によって提示されており、さらに地震波伝播過程において誘因される流体の流れ (WIFF: Wave Induced Fluid Flow) の様々な形態については Müller et al. (2010) が詳細に述べている。また、Takei (2002) は、流体で満たされた孔隙系における孔隙形状が地震波動伝播に及ぼす影響を理論的に指摘している。また、孔隙内流体にガス気泡を含有する場合、地震波動伝播に伴うガス気泡の振動 (Smeulders et al., 1997)、ガス気泡の離溶と溶解 (Tisato et al., 2015)、ガス気泡のサイズ分布 (Wilkens and Richardson, 1998) などの影響で地震波動伝播現象が複雑になることも指摘されている。さらに、粘土成分が孔隙内に存在する際において、Neasham (1977) は Fig. 2 に示すような3種類の存在形態 (Fig. 2a: 薄片状, Fig. 2b: 粒状, Fig. 2c: 分散状) を提示している。この場合、仮に粘土成分の量が同じであっても存在形態によって地震波動伝播過程は異なることを意味する。

3. 重力探査の進展と現状

商業的石油産業の勃興という観点からは、1859年の米国ペンシルバニア州のアレゲニー川支流オイル・クリーク流域のタイタスビル周辺におけるエドウィン・ドレークによる石油掘削が有名である。ドレークが石油を調査していた頃は、石油が地表にしみ出している場所を有望地点と考えていたが、その下にどれくらいの石油が溜まっているのかという評価は不可能であった。石油がどこで生成し、それがどのように移動して、最終的にどのような所にどれくらい溜まっているのかという評価は、油井の位置を決定するために必要かつ重要な情報である。ドレーク油井が掘削された1859年の約2年後にはグラスゴー大学のヘンリー・ロジャース、米国の地質学者エブネザー・バルドウィン・アンドリュース、ステリー・ハント等によって石油貯留と背斜構造の関連性(いわゆる背斜構造論)が提唱された。

背斜構造論は現在でも石油地質学の根幹であるが、20世紀初頭において背斜構造論とは別の岩塩ドームに関連した地質概念が米国テキサス州で生まれた。米国ペンシルバニア州のドレーク油井の掘削は近代石油産業の幕開けと捉えることができ、1901年における米国テキサス州のスピンドルトップ油井の掘削に伴う高さ46 mにも及ぶ大自噴 (Fig. 3) は人類の豊かさの幕開けと位置づけることができる。スピンドルトップはテキサス州ポーモントの南の海岸平野に位置する小さい丘で、現地の人には「Big Hill」と呼ばれている。

岩塩ドームの初期の頃の探査は非常に単純で、海岸平野において丘のような構造を見つけること、石油やガスの漏出、硫酸分を含む湧水などの地表に見られる直接的な徴候の観測が行われた。しかし、このような直接的徴候が地表で見られないような、地下に伏在する岩塩ドーム

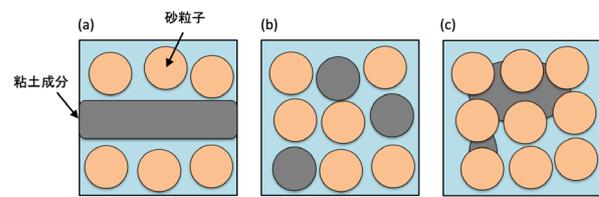


Fig. 2. Various distribution types of clays in sand grains: (a) laminar type, (b) structural type, (c) dispersed type.

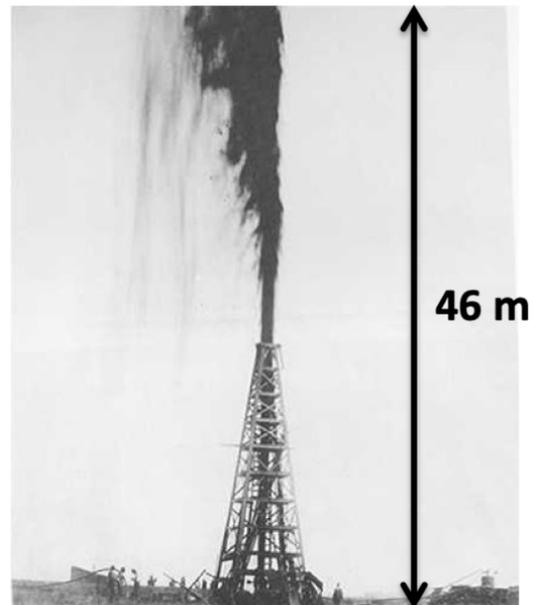


Fig. 3. The gusher at Spindletop, January 10, 1901. This was the first major gusher in the world (from Wikipedia).

の発見は後に物理探査が重要な役割を果たす先駆けとなった。重力探査の基礎理論は、すべての物体は互いに引き合うというニュートンの万有引力の法則に基づく。地下を構成する物質の密度不均質性に起因する重力異常を抽出して、地下の密度特性を間接的に推定することができるため、低い密度を有する岩塩ドームを検知することに適していた。実際、石油・天然ガス探査を目的とした物理探査の中では、重力探査法が最初に適用された手法である。1924年に米国テキサス州の岩塩ドーム由来のナッシュドーム油田の発見に貢献し、1930年代は地震探査より頻繁に実施された探査法であった (Nabighian et al., 2005)。

その後、石油・天然ガス探査の対象が岩塩ドームから成層構造仮定が有効となる背斜構造に移ると、反射法地震探査が探査の中核技術として位置付けられていった。しかし、探査対象が容易な背斜構造での未探査エリアが減少してくると、より複雑な地質構造が探査対象となった。とりわけ、メキシコ湾深海域においては岩塩流動に関連した構造が発達し油田生成条件が成立していたため、再び岩塩ドームに関する地質構造が注目された。技術的には、1990年代における反射法地震探査データの

重合前マイグレーション技術と掘削技術の進展により岩塩ドーム周辺における油ガス探査は進んだ。1997年に米国物理探査と欧州物理探査とが共同で設定した三次元数値シミュレーションモデルは岩塩とオーバースラストに関連した構造であった (Aminzadeh et al., 1997)。

しかしながら、反射法地震探査では、岩塩ドームの底面や側面構造を得るのが難しいことが認識されてくると重力探査による補助が要請されるようになった (Huston et al., 2004)。重力測定器は、高精度化、測定時間の短縮化、可搬性、自動化の観点から着実に進化し、その多様性も豊富で数百種類の測定器が切磋琢磨を行い技術的進歩を深めていったことが想起される。このような多様な重力測定器の技術的発展については Nabighian et al. (2005) に詳しく述べられている。重力探査が反射法地震探査を補助できるようになった重要な転機は、地震探査船に重力測定器を可搬し同時測定が実施できるようになった点にあることを Nabighian et al. (2005) は指摘している。近年では、重力探査の中でも重力偏差法が空間分解能の高さならびに深度方向の感度の良さの点で注目されている。

重力偏差計は、1890年ハンガリーの物理学者エトベスにより発明され、20世紀半ば頃まで適用されたが、測定の実験的困難さと測定時間の長さのため、1949年にスプリング式の可搬型重力計が開発されてからは適用が大幅に減少した。しかし、前述のように1990年代後半より状況は一変し、石油・天然ガス探査にも積極的に適用されるようになった。ただ、重力偏差計の商業化と技術の高度化が開始された1990年代後半は、期待と懐疑が混在していたことが指摘されている (DiFrancesco et al., 2009)。技術の高度化を推し進めた要素は、第一次ならびに第二次石油ショックによる1970年代から1980年代にかけての原油価格高騰を背景にして、新たに起こった基礎研究の取り組みであったことを DiFrancesco et al. (2009) は指摘している。技術の高度化の具体的内容は、測定原理自体の開発、低ノイズ化、高信頼性化、小型化・軽量化（ヘリコプターへの搭載が可能となる）などが挙げられ、これらを達成するための綿密な課題抽出と技術ロードマップの構築がなされていた点も留意する必要がある。つまり、測定記録は、計測器自身が出すノイズ、測定時ノイズ、測定場所における外的要因によるノイズ、探査対象（信号）から構成されると捉え、系統的に信号抽出技術が磨かれていった。さらに重力偏差計が、様々な測定シナリオで適用されることにより（人工衛星、潜水艦、航空機、気球船、船舶など）、知見と経験が広がり、技術の高度化をより深化させたことも想起される。

石油・天然ガス貯留層における重力モニタリングは2000年代以降に実施されている。高精度の要求仕様（1 μ gal 以下）と可搬性が課題であったが、両者をクリアした超伝導重力計の商用化（GWR Instruments社のiGrav）の貢献が大きいとされる (Hinderer et al. 2015)。

とりわけ、非在来型石油資源であるオイルサンドの原位回収（SAGD: Steam-Assisted Gravity Drainage）法の適用時におけるモニタリングが注目されている。オイルサンドは侵食や地殻変動によって油層が地表付近に移動し、軽質成分が揮発してしまい重質化した石油（ビチューメンと呼ばれる）を含んだ砂であり、すでにカナダでは商業生産が行われている。SAGD法は、地下に水蒸気スチームを圧入して重質油を流動化させ回収する方法で、水蒸気によって置換された領域は水蒸気チャンバーと呼ばれており、水蒸気チャンバーの時空間的広がりをモニタリングすることは、経済的便益の最適化（ビチューメン回収領域の特定）と環境リスクの緩和（ビチューメンの想定領域外への漏出の特定）にとって重要となる。

SAGD法適用におけるモニタリングとしては、歴史的には経時変化反射法地震探査が有効な貢献をしてきたが、コスト的負担が大きいためモニタリング頻度は低いという欠点がある。低コストな手法が開発されれば、高頻度でのモニタリングが可能となり、さらに地震探査の実施回数を減らせれば、モニタリングのための最終コストの軽減が可能となる。経時変化重力探査・重力偏差法による、水蒸気循環領域の検知能力が実証されつつあり、重力偏差法を用いたビチューメン回収領域モニタリングの実行可能については、Reitz et al. (2015) や Elliott and Braun (2017) が数値モデルによる検証を行っている。

4. 地震探査データから密度情報を推定する方法の進展と現状

地震探査データから密度情報を得る方法としては、密度-速度関係の経験式を用いる方法、AVO解析を用いる方法、全波形インバージョンを用いる方法の3つに大別できる。以下にそれぞれの概要を述べる。

密度-速度関係の経験式を用いる方法としては、Gardnerの式が有名である。Gardner et al. (1974) は様々な堆積盆地における様々な年代・深度における密度データ (ρ) とP波速度データ (V_p) から以下の経験式を導いた。

$$\rho = \alpha V_p^\beta \quad (7)$$

(7)式において、 α, β は岩種に固有な係数である。(7)式の両辺を対数を取ると、以下の(8)式のような線形関係となり最小二乗法的なアプローチにより係数 α, β を決定することができる。

$$\log(\rho) = \log(\alpha) + \beta \log(V_p) \quad (8)$$

Gardner et al. (1974) はいくつかの岩種の線形関係を示した。Gardnerの式は、砂岩、頁岩、炭酸塩岩には比較的良い近似を与えるが、石炭層や蒸発岩では適用性に問題があることが指摘されている (Quijada and Stewart,

2007)。また、比較的良い近似を与える場合であっても誤差は小さくなく、貯留層解析、地質力学解析、孔隙圧力解析などの岩石特有の特性を考慮して定量的な解析を行う場合には適さないことも指摘されている (Nwozor et al., 2017)。密度 - 速度関係の経験式を用いる方法としては、Gardner の式の他にも Lindseth (1979) が提案した式もある。

AVO 解析を用いて密度情報を推定する方法については、多くの論文にて解析結果が非常に不安定で極めて適用性が乏しいことが指摘されている (e.g., Behura et al., 2010; Schulte and Manthei, 2014)。その解決に向けて例えば、オフセット距離の範囲ができるだけ大きいトレースを使用することや (Li, 2005)、密度コントラストが振幅変化の卓越因子である場合にはオフセット距離が比較的短いトレースを使用すること (Li, 2005) が提案されているが、実フィールドデータに対して信頼性の高い密度情報を得るには至っていない。AVO 現象に伴う反射波振幅変化は Aki and Richard (1979) によって定式化されているが、Fatti et al. (1994) はその式を再構成し、入射角 (θ) に対する反射波振幅変化 ($R(\theta)$) を、P 波反射係数 (r_{pp})、S 波反射係数 (r_{ss})、密度の変化 ($\frac{\Delta\rho}{\rho}$) に関する項で表現した (9) 式)。

$$R(\theta) = (1 + \tan^2\theta)r_{pp} - 8\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \sin^2\theta r_{ss} - \left(\frac{1}{2}\tan^2\theta - 2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \sin^2\theta\right) \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (9)$$

Lines (1999) は (9) 式を用いた感度分析を実施し、AVO 現象から密度情報を推定することの困難さを定量的に示した。

全波形インバージョンを用いる方法については、AVO 解析と同様に多くの論文にて密度情報を適切に推定することの困難性が指摘されている (e.g., Köhn et al., 2012; Alkhalifah and Plessix, 2014)。このような困難性のため、全波形インバージョンを適用する際には、均質密度を仮定する場合、速度 - 密度経験式を利用する場合、音響インピーダンスとして求める場合などの対応が多い。この手法により密度情報が得にくい理由は以下の2点である。1点目は、(1) 式ならびに (2) 式に示したように、速度と密度は連結しトレードオフの関係にある点である。そして、2点目は速度と密度とでは散乱放射パターンが異なる点である。Luo and Wu (2018) はレイリー散乱を仮定することにより、入射波に対する散乱波放射パターンが速度場と密度場において異なることを示している (Fig. 4)。Fig. 4 より、速度場の場合では等方的な放射パターンであるのに対して、密度場の場合では放射パターンが散乱角が大きな領域に限定されていることがわかる。すなわち、速度場による放射パターンはどのオフセット距離でも観測されるのに対して、密度場による放射パター

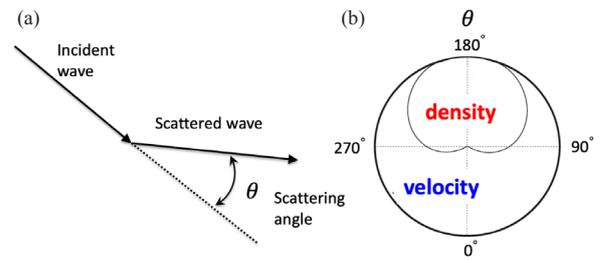


Fig. 4. Relationship between radiation pattern and scattering angle (schematically drawn from Luo and Wu, 2018): (a) scattering geometry, (b) radiation patterns for velocity and density.

ンではニアオフセット付近で観測できることを示唆している。Luo and Wu (2018) は散乱放射特性の違いを利用する手法を提案し、数値シミュレーションデータに対して全波形インバージョン適用による密度分布導出の成功例を示した。

5. 考察とおわりに

本論説では、石油・天然ガス探査分野における密度分布推定手法の既存体系として中心的役割を成す重力探査と地震探査の進展と現状について述べた。密度推定の重要性・困難性は十分に認識されており、困難性を克服するための測定・解析技術の進展が試みられ、貯留層スケールでの密度推定も視野に入りつつあるが、実フィールドデータへの適用レベルには至っていないことがわかった。その意味で、当該分野においてミュオグラフィ技術が貢献できる可能性は十分にあると思われる。以下では、個別具体的な可能性やそれを引き出す視点について述べる。

5.1 密度情報の優位性とミュオグラフィの貢献可能性

密度情報が提供しうる価値として2つの点を指摘した。1点目は、地下の密度情報を獲得することにより地質力学的パラメータの推定が可能となり、近年研究が盛んになってきた貯留層地質力学分野に貢献できる点である。地震探査データを利用して地震波速度情報と密度情報を切り分けて推定することは容易でないため、密度情報を地震探査以外の手法、すなわちミュオグラフィから導出できれば地質力学的パラメータ推定の不確実性を減らすことに繋がる。2点目は、孔隙内充填物推定における密度情報の有効性の点である。孔隙内充填物の種類や特性を地震波で把握することは、波動伝播に伴う様々な複雑な相互作用により容易でない一方で、密度情報にはそのような複雑な相互作用が働かないため、孔隙内充填物の種類や特性を把握しやすい点がある。ミュオグラフィから導出される密度においては、ミュオンと流体と固体から成る孔隙系との相互作用は極めて少ないため、単純に孔隙系の密度を反映することが期待される。

5.2 ミュオグラフィにおける時空間的分解能・精度の定量的評価の必要性

重力偏差法を用いたピチューメン回収領域モニタリングにおいて、Reitz et al. (2015) や Elliott and Braun (2017) が数値モデルによる検証を行っている点を述べたが、Elliott and Braun (2017) は、ピチューメン生産に伴う数値モデリングを用いた検討を行っており、重力測定器配置、坑井同士の間隔、掘削深度をパラメータとして密度変化検知能力 (Resolvability と呼んでいる) を詳細に調査している。また、地震探査データの全波形インバージョンを利用した密度推定法においては、精度や分解能についても定量的な評価が未成熟である。一般的に使用されるチェッカーボード法は、解析結果の信頼性を定量的に提供することはできず、視覚的・直感的に信頼性を定量的に評価する方法として使用されている。しかし、このような視覚的な評価は、みかけの小規模不均質性が存在する場合に、解析結果の高分解能性を誤って示唆してしまう欠点が指摘されている (Fichtner and Trampert, 2011)。Fichtner and Trampert (2011) は、チェッカーボード法に代わる定量的な分解能評価法を提案しており、地殻スケールでの分解能評価が実施されているが、このような性能評価が石油・天然ガス貯留層スケール等での実施例は見られない。

以上のように、重力探査、地震探査、ミュオグラフィのそれぞれの探査手法における時空間分解能、精度などの性能評価指標を整理することで、ミュオグラフィの位置付けを明確にしていくことが今後必要である。このような定量的な性能評価の構築を進める中で、油ガスの生産シミュレータとも融合した数値シミュレーション的検討が重要な役割を果たすであろう。また、モニタリング探査を念頭においた場合、モニタリング頻度の視点も重要になってくるのでコスト的視点も同時に評価することも重要である。

5.3 時機を掴む重要性和技術進化を醸成する生態系 (様々な組織間における相互作用) の必要性

石油・天然ガス開発の黎明期であった1930年代までは、物理探査の中で最も頻繁に実施されていた重力探査は、探鉱・開発対象が岩塩ドームに関連した構造から背斜構造へと変化することにより、その後長い間目立たない存在になっていた。しかし、探鉱・開発が容易な背斜構造での未探鉱エリアが減少してくると、1990年代以降再び岩塩ドームに関連した構造への関心も高まり重力探査が再び見直されていった。つまり、探鉱・開発対象によって要請される技術が異なってくることを示唆している。ミュオグラフィの地層透過特性を考慮すると、深部より浅部の油ガス田において適用性が期待できるため、非在来型資源であるオイルサンドやメタンハイドレートなどは対象になり得るし、今後このような非在来

型資源に対する時代的要請の動向も重要である。

また、以上のような時代要請ばかりではなく、その研究・技術開発を進展させる生態系やその活動を下支えする資金的視点も重要である。重力探査における重力偏差法の開発では、1990年代後半までは期待と懐疑が混在していたが、石油ショックによる原油価格高騰を背景にして多彩な基礎研究と技術開発が様々な組織・研究機関にて実施され、一種の生態系を形成していたことが想起される。重力探査に関わる技術進展史から学べることとして、また、現在は原油価格が高騰するステージにあることも考慮すると、ミュオグラフィ分野においても多様な組織・人材が切磋琢磨する生態系を醸成することが将来的な技術進展の鍵を握っているように思われる。

参 考 文 献

- Aki, K., and Richards, P. (1979): Quantitative seismology. W.H. Freeman & Co.
- Alkhalifah, T., and Plessix, R. É. (2014): A recipe for practical full-waveform inversion in anisotropic media: An analytical parameter resolution study. *Geophysics*, **79**(3), R91-R101.
- Alvarez, L. W., Anderson, J. A., El Bedwei, F., Burkhard, J., Fakhry, A., Giris, A. et al. (1970): Search for hidden chambers in the pyramids. *Science*, **167**(3919), 832-839.
- Aminzadeh, F., Jean, B., and Kunz, T. (1997): 3-D salt and overthrust models. Society of Exploration Geophysicists.
- Behura, J., Kabir, N., Crider, R., Jilek, P., and Lake, E. (2010): Density extraction from P-wave AVO inversion: Tuscaloosa Trend example. *The Leading Edge*, **29**(7), 772-777.
- Biot, M. A. (1956): Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, I. Low-Frequency Range and II. High-Frequency range, *Journal of the Acoustical Society of America*, **28**, 168-191.
- Bondarenko, V. M., Brovkin, V. I., Tarkhov, A. G., Chettkov, V. Ya., Polyakov, V. N., and Prozorov, L. B. (1974): Applications of the muon method to determination of the density of rocks in the case of a background of high radioactivity, *Sov. At. Energy (USA)*, **36**, 656-658.
- Capriotti, J., and Li, Y. (2015): Inversion for permeability distribution from time-lapse gravity data. *Geophysics*, **80**(2), WA69-WA83.
- Chen, S., Zhao, W., Ouyang, Y., Zeng, Q., Yang, Q., Hou, H., Gai, S., Bao, S. and Li, X. (2017): Prediction of sweet spots in shale reservoir based on geophysical well logging and 3D seismic data: A case study of Lower Silurian Longmaxi Formation in W4 block, Sichuan Basin, China. *Energy Exploration & Exploitation*, **35**(2), 147-171.
- DiFrancesco, D., Meyer, T., Christensen, A., and FitzGerald, D. (2009): Gravity gradiometry—today and tomorrow. In *11th SAGA Biennial technical meeting and exhibition*.
- Elliott, E. J., and Braun, A. (2017): On the Resolvability of Steam Assisted Gravity Drainage Reservoirs Using Time-Lapse Gravity Gradiometry.

- Pure and Applied Geophysics*, **174**(11), 4119-4136.
- Fatti, J. L., Smith, G. C., Vail, P. J., Strauss, P. J., and Levitt, P. R. (1994): Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique. *Geophysics*, **59**(9), 1362-1376.
- Fichtner, A., and Trampert, J. (2011): Resolution analysis in full waveform inversion. *Geophysical Journal International*, **187**(3), 1604-1624.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., and Gregory, A. R. (1974): Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, **39**(6), 770-780.
- George E. P. (1955): Cosmic rays measure overburden of tunnel, *Commonwealth Engineer*, 455.
- Guilbot, J., and Smith, B. (2002): 4-D constrained depth conversion for reservoir compaction estimation: Application to Ekofisk Field. *The Leading Edge*, **21**(3), 302-308.
- Hatchell, P., and Bourne, S. (2005): Rocks under strain: Strain-induced time-lapse time shifts are observed for depleting reservoirs. *The Leading Edge*, **24**(12), 1222-1225.
- Herwanger, J. V., and Horne, S. A. (2009): Linking reservoir geomechanics and time-lapse seismics: Predicting anisotropic velocity changes and seismic attributes. *Geophysics*, **74**(4), W13-W33.
- Herwanger, J., and Koutsabeloulis, N. (2011): Seismic geomechanics: How to build and calibrate geomechanical models using 3D and 4D seismic data. Houten (the Netherlands).
- Herwanger, J. V., Mohamed, F. R., Newman, R., and Vejbaek, O. (2013): Time-lapse seismic data-calibrated geomechanical model reveals hydraulic fracture re-orientation. *In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013*, 4949-4953.
- Hinderer, J., Crossley, D., and Warburton, R. J. (2015): Superconducting gravimetry. *In Treatise on Geophysics*, 59-115, Amsterdam: Elsevier.
- Huston, D. C., Huston, H. H., and Johnson, E. (2004): Geostatistical integration of velocity cube and log data to constrain 3D gravity modeling, deepwater Gulf of Mexico. *The Leading Edge*, **23**(9), 842-846.
- Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble, T. E., and Pollastro, R. M. (2007): Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG bulletin*, **91**(4), 475-499.
- Kabir, N., Crider, R., and Xia, G. (2005): Can hydrocarbon saturation be estimated using density contrast parameter?. *In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005*, 214-217.
- Klinger, J., Clark, S. J., Coleman, M., Gluyas, J. G., Kudryavtsev, V. A., Lincoln, D. L., Pal, S., Paling, S.M., Spooner, N.J.C., Telfer, S., Thompson, L.F., Woodward, D. (2015): Simulation of muon radiography for monitoring CO2 stored in a geological reservoir. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **42**, 644-654.
- Köhn, D., De Nil, D., Kurzmann, A., Przebindowska, A., and Bohlen, T. (2012): On the influence of model parametrization in elastic full waveform tomography. *Geophysical Journal International*, **191**(1), 325-345.
- Kudryavtsev, V. A., Spooner, N. J., Gluyas, J., Fung, C., and Coleman, M. (2012). Monitoring subsurface CO2 emplacement and security of storage using muon tomography. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **11**, 21-24.
- Li, Y. (2005): A study on applicability of density inversion in defining reservoirs. *In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005*, 1646-1649.
- Lindseth, R. O. (1979): Synthetic sonic logs—A process for stratigraphic interpretation. *Geophysics*, **44**(1), 3-26.
- Lines, L. (1999): Density and AVO. *Canadian Society of Exploration Geophysics*, 35, 32-35.
- Luo, J., and Wu, R. S. (2018): Velocity and Density Reconstruction Based on Scattering Angle Separation. *Pure and Applied Geophysics*, 1-17.
- Malmqvist, L., Jönsson, G., Kristiansson, K., and Jacobsson, L. (1979): Theoretical studies of in-situ rock density determinations using underground cosmic-ray muon intensity measurements with application in mining geophysics. *Geophysics*, **44**(9), 1549-1569.
- Müller, T. M., B. Gurevich, and M. Lebedev (2010): Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks — A review. *Geophysics*, **75**(5), A147–A164.
- Nabighian, M.N., Grauch, V.J.S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Peirce, J.W., Phillips, J.D. and Ruder, M.E. (2005): The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, **70**(6), 33ND-61ND.
- Nagamine, K., Iwasaki, M., Shimomura, K., and Ishida, K. (1995): Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction. *Nucl. Instrum. Methods A*, **356**, 585–595.
- Neasham, J. W. (1977): The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effect on sandstone shaliness, pore space and fluid flow properties. *In SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Nwozor, K. K., Onuorah, L. O., Onyekuru, S. O., and Egbuachor, C. J. (2017): Calibration of Gardner coefficient for density–velocity relationships of tertiary sediments in Niger Delta Basin. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **7**(3), 627-635.
- Prieux, V., Brossier, R., Operto, S., and Virieux, J. (2013): Multiparameter full waveform inversion of multicomponent ocean-bottom-cable data from the Valhall field. Part 1: Imaging compressional wave speed, density and attenuation. *Geophysical Journal International*, **194**(3), 1640-1664.
- Quijada, M. F., and Stewart, R. R. (2007): Density estimations using density-velocity relations and seismic inversion. *CREWES Res. Rep.*, **19**, 1-20.
- Reitz, A., Krahenbuhl, R., and Li, Y. (2015): Feasibility of time-lapse gravity and gravity gradiometry monitoring for steam-assisted gravity drainage reservoirs. *Geophysics*, **80**(2), WA99-WA111.
- Rickman, R., Mullen, M., Petre, J., Grieser, W., and Kundert, D. (2008): A

- practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale. *Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
- Sena, A., Castillo, G., Chesser, K., Voisey, S., Estrada, J., Carcuz, J., Carmona, E., and Hodgkins, P. (2011): Seismic reservoir characterization in resource shale plays: Stress analysis and sweet spot discrimination. *The Leading Edge*, **30(7)**, 758-764.
- Schulte, B., and Manthei, D. (2014): Chasing Density – An Introduction to Seismic Acquisition, Processing, and Interpretation Methods Leading to Quantitative Interpretation. *CSEG Recorder*, **39(8)**, 18-26.
- Smeulders, D. M. J., and M. E. H. van Dongen (1997): Wave propagation in porous media containing a dilute gas-liquid mixture: Theory and experiments. *J. Fluid Mech.*, **1343**, 351-373.
- Staples, R., Ita, J., Burrell, R., and Nash, R. (2007): Monitoring pressure depletion and improving geomechanical models of the Shearwater field using 4D seismic. *The Leading Edge*, **26(5)**, 636-642.
- Takei, Y. (2002): Effect of pore geometry on Vp/Vs: From equilibrium geometry to crack. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **107(B2)**, ECV-6.
- Tanaka, H., Nagamine, K., Nakamura, S.N., and Ishida, K. (2005): Radiographic measurements of the internal structure of Mt. West Iwate with near horizontal cosmic ray muons and future developments. *Nucl. Instrum. Methods A*, **555**, 164-172.
- Tanaka, H., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Ohshima, H., Maekawa, T., Watanabe, H., and Niwa, K. (2007): Imaging the conduit size of the dome with cosmic ray muons: the structure beneath Showa Shinzan Lava Dome, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22311.
- Tarkova, A. G., Vintorov, G. G., and Bondarenko, V. M. (1973): A muon method for the measurement of the density of rock. *Atomisdat, Moscow, U.S.S.R.* (in Russian).
- Tisato, N., Quintal, B., Chapman, S., Podladchikov, Y., and Burg, J. P. (2015): Bubbles attenuate elastic waves at seismic frequencies: First experimental evidence. *Geophysical Research Letters*, **42(10)**, 3880-3887.
- Van Koughnet, R. W., Skidmore, C. M., Kelly, M. C., and Lindsay, R. O. (2003): Prospecting with the density cube. *The Leading Edge*, **22(10)**, 1038-1045.
- Wilkens, R. H., and Richardson, M. D. (1998): The influence of gas bubbles on sediment acoustic properties: in situ, laboratory, and theoretical results from Eckernförde Bay, Baltic sea. *Continental Shelf Research*, **18(14-15)**, 1859-1892.
- Wilkinson, M., Mouli-Castillo, J., Morgan, P., and Eid, R. (2017): Time-lapse gravity surveying as a monitoring tool for CO₂ storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **60**, 93-99.
- Wikipedia, "Spindletop", <https://en.wikipedia.org/wiki/Spindletop> (accessed November 19, 2018)
- 鈴木敬一 (2012): ミュー粒子による土木物理探査の可能性, *物理探査*, **65(4)**, 251-259.
- 田中宏幸 (2012): ミュオグラフィの現状と将来について, *物理探査*, **65(1_2)**, 93-102.

Progress and perspective on the estimation methods for subsurface density distribution in oil and gas exploration: identification of issues in existing exploration schemes and investigation of possible contributions of muography

Jun Matsushima*

ABSTRACT

Subsurface density investigation using cosmic ray muons (muography) has been evolving and diversifying its application due to continuous improvement of measurement systems. Investigation of its applicability in oil and gas exploration can promote wider discussion to take forward its application to different promising areas. To increase the reliability and applicability of density information, it is important to identify issues in existing exploration schemes in terms of estimating subsurface density distribution and to investigate possible contributions of muography. This review paper first clarifies the superiority of density information, and then reviews the technical progress of gravity and seismic surveys which have been playing an important role for estimating subsurface density distribution, and finally, based on the reviews, proposes several suggestions to encourage the application of muography to oil and gas exploration.

Keywords: muography, density distribution, oil and gas exploration, gravity survey, seismic survey