

エネルギー・資源の安定供給実現のために物理探査技術が果たすべき役割： 不確実な時代におけるエネルギー動向と探査結果の解釈における不確実性

松島 潤*

要 旨

現在、世界を取り巻くエネルギー危機において、エネルギー・資源の安定供給を実現することは極めて重要な課題であるにも関わらず、将来的な展望は深い不確実性に包まれている。最近のエネルギー・資源の動向の流れを把握するとともに、物理探査技術が果たすべき役割を明確にし、今後必要な技術開発の方向性について論考する。これまで物理探査データに関する取得技術や解析技術の技術革新は不断に行われてきたが、探査結果の解釈における技術革新があまり目立たないため、解釈における潜在的なブレイクスルーの可能性を述べる。とりわけ、不確実性の概念が有する多面性やその中における主観性の意味付けについて述べる。リスクと不確実性の概念の違いを明確にした上で、探査結果の解釈における主観性は不確実性を生じさせる原因ではなく、むしろ不確実性を低減するために重要な役割を果たす点を指摘する。大胆に仮説を立てその仮説を実証することに注力していく過程を通して、不確実性を減らせることが期待され、如何に人間の認知から有益な主観的要素を引き出すのが探査リスクを縮減するための重要な方向になることを示唆する。

キーワード：エネルギー／資源・安定供給・リスク・不確実性・解釈・主観性

1. はじめに

気候変動対策のための脱炭素化を目的として、石油などの化石燃料を手がける企業から投資資金を引き揚げて（いわゆるダイベストメント：投資撤退）、環境（Environment）、社会（Social）、ガバナンス（Governance）の頭文字を取って作られた ESG を重視する企業に投資する（いわゆる ESG 投資）流れが存在する。ダイベストメントの起源は 2011 年に発端し、学生活動家たちが米国の 6 つの大学で、大学への寄付金を石炭から分離するキャンペーンを開始し、2012 年には、米国内 50 以上の大学がダイベストメント運動に参加し、その動きはすべての化石燃料からの撤退とクリーンエネルギーへの投資を促すものへと拡大した。その後、英国の数十大学を含む世界中の数百の大学や地方自治体、その他の機関でダイベストメントキャンペーンが行われていった（Bergman, 2018）。

ダイベストメントの考え方は、当初の学生グループ

や社会志向の教育機関を超えて広がったが、注目すべきはこのような動きはこれまでのところ圧倒的に先進国に集中していることである（Bergman, 2018）。その一方で、たとえダイベストメント運動が金融機関に対し、化石燃料から数十億ドルの投資を撤退させる説得に成功したとしても、投資の撤退がエネルギー産業や温室効果ガスの排出に対してほとんど影響を与えないとの見解を経済学者は一般的に共有していること、その運動の支持者自体もこれが主に象徴的なジェスチャーであることを認識していること、一部の学者はこの運動が低炭素エネルギーの促進に対する効果的な手段から注目をそらしてしまう可能性を懸念していること、が指摘されている（Tollefson, 2015）。Tollefson (2015) の Nature 誌の記事においては、「企業を叩きのめしても問題は解決しない」こと、「真の変革をもたらすためには、より実効性のある行動に焦点を当てる必要がある」との Harvard 大学の経済学者 Robert N. Stavins 氏のコメントも紹介されている。実際、最近の研究では（例えば、

2024年1月29日原稿受付；2024年4月15日受理

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科
〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5

Johansmeyer, 2023), 化石燃料からのダイベストメントは最も有効な試みの一環と見なされているにもかかわらず、ダイベストメントを実践することは実際には資金の流れを阻害するのではなく、対象とされたセクターに資本をむしろ引き寄せる傾向があることが実証されている。つまり、石油資源に代わる代替エネルギーの存在無くして、無理に脱却を図ることは容易でないばかりでなく、むしろ適切な気候変動対策やエネルギー安定供給の将来を深い不確実性に導いているのではないだろうか。実際、このようなダイベストメント運動あるいは非合理的で現実性を伴わない脱炭素化の流れが様々な側面で影響を及ぼしている。

影響の一つとして、化石燃料関連の業界の見通しに懸念を感じ、そのような業界へのキャリアパスを敬遠する大学卒業が増えるとともに、探査関連の教育・研究を行う大学自体への進学が敬遠されている状況が生じている。Shragge (2022) は、米国のコロラド鉱山大学での炭化水素探査に対する学生の関心が著しく減退していることを指摘している(ただし、依然として一定の関心層は存在していることも示している)。その一方で、二酸化炭素の回収、利用、貯蔵、地熱探査、そして来るべきエネルギー転換に必要な鉱物資源の探査、などのエネルギー産業のトピックに対する関心の高まりもあり相殺されている状況であることも述べている。さらに、現在の規模のグローバルエネルギーシステムおよびそこからエネルギー転換の複雑さと費用を考慮すると、現在のエネルギー産業の技術的要件と必要とされる人材需要を将来の長年にわたって看過することは時期尚早であることも指摘している。

Dean (2022) は、オーストラリアの地球物理学教育ならびに豪州物理探査学会の状況について、「オーストラリアの地球物理学の未来はあるのか?」という刺激的なタイトルで論考している。オーストラリアは、石炭、石油、天然ガス、鉄鉱石、ウラン等の天然資源を豊富に有する資源国である。物理探査関連の卒業生を輩出するという点で、オーストラリアの大学の中で長い間最も成功を収めてきた Curtin 大学は、1995年から2010年代初頭まで、学生数は80人から100人規模で比較的安定していたが、2015年頃には、石油価格の急激な下落に伴って探査支出も下落し、学生数は10人から20人程度となっている。その一方で、鉱物資源産業に目を向けると状況は大きく異なり、価格は安定しており探査支出は増加し続けているが、残念ながら Curtin 大学の地球物理学の学生数の増加には至らず、現在では地球物理学の教育が見直しが必要なレベルに達している。Curtin 大学の教育体系では、オーストラリアの大学における地球物理学の独立科目27科目のうち12科目(44%)を占めており、もし Curtin 大学の地球物理学コースが削減されるとしたら、これは事実上、オーストラリアにおける地球物理学

教育の完全な終焉を意味するだろうと Dean (2022) は推測している。しかし現実には、豪州における資源業界は非常に健全な状態にあり、特に資源の発見が困難になるにつれて、物理探査と物理探査技術者の需要は高まるばかりとの指摘もしているが、この衰退は資源産業全体に反映されており、次世代の地球科学者を惹きつけなくなっているという問題が生じている。恐らくこれは、業界と地球物理学などの関連分野が気候変動問題の解決策ではなく、その問題を発生させている一部であるという認識の結果によるものと推察している。ちなみに、2013年から2021年までに豪州物理探査学会の会員数は半減している。米国物理探査学会も2012年頃をピークとして会員数が減少しており、さらに会員数が最も多い年齢層は56~65歳、つまりほぼ退職年齢であり、26~35歳、つまり新卒から若手の年齢層はかなり薄い状況であり(Shragge, 2022)、このようなデータからも次世代の若者を惹き付けることに成功していないことがわかる。

ここで重要なことは、例えば石油資源の需要が今後実際のところどうなるのかという将来的な展望である。この展望については、OECD加盟国を背景とするIEA(International Energy Agency: 国際エネルギー機関)と産油国を背景とするOPEC(Organization of the Petroleum Exporting Countries: 石油輸出国機構)では異なる見解を示している。IEAは、世界がクリーンなエネルギー源に移行するにつれて、石油、ガス、石炭に対する世界的な需要は2030年までにピークに達する見通しだと発表し(2023年10月24日)、「化石燃料への継続的な投資は不可欠だ」と説明しつつも投資家に対し化石燃料よりも再生可能エネルギーを支持するよう促している。IEAは2023年版の「世界エネルギー展望」で、世界各国の政府が現在の政策を継続した場合、化石燃料の世界需要は2030年までにピークに達するとの見解を初めて示した(Hart, 2023)。さらに、電気自動車(EV)へのシフトが進むことで、世界の石油使用量が2030年までに日量約1億200万バレルでピークを迎えると予測。今後数年で、道路を走る電気自動車の数が、現在の約10倍になるとの見通しを示した。ただし、石油需要は大幅に減少せず、2050年でも日量9,700万バレル程度にとどまると見ている(Hart, 2023)。このHart(2023)のForbesの記事では、Chevron社のCEOが英紙フィナンシャル・タイムズ誌に対し、2030年までに石油需要がピークに達するというIEAの予測が「少しも正しいとは思わない」と語ったことも付記されている。

その一方で、2023年10月9日に、OPECは年次見通しで中長期の世界石油需要予測を引き上げ、再生可能燃料の使用が増加し電気自動車の登場が増えても、この需要を満たすには投資の拡大が必要だと述べた。需要が今後10年間にピークに達する可能性があるとするIEAの見解とは対照的である(Lawler, 2023)。OPECの事務総

長は「新規石油プロジェクトへの投資停止を求める声は見当違いで、エネルギーと経済の混乱につながる可能性がある」と付け加え、石油セクターへの必要投資額は2045年までに14兆ドルと、前年の推計12兆1,000億ドルから増加したと述べた (Lawler, 2023)。需要が増加する要因としては、中国、インド、その他のアジア諸国、アフリカ、中東などの経済成長を挙げている。IEAとOPECのどちらの見解が正しいのかについては、歴史が証明するしかないが、供給側の制約としてシェール開発の停滞により2040年までに石油の生産ピークが訪れるとの予想もある (Laherrère et al., 2022)。

さて、我が国では、2020年10月、当時の菅総理は2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル (CN)、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言し、さらに2021年4月、米国主催の気候サミットにおいて、菅総理は、2030年度における温室効果ガスの排出量を2013年度比で46%削減するとの宣言とともに、さらに、50%の高みに向け挑戦を続けていく決意を表明している (高木, 2023)。2050年までにCNを達成するために、需要側における省エネ、供給側における電化・水素化等のエネルギー転換を促進するとともに、削減しきれないCO₂を地中貯留するCCSは必要不可欠な技術であることが広く認識され、世界的にも政策導入が進んでいる (経済産業省, 2023)。その一方で、現在、世界を取り巻くエネルギー危機において、物価高騰と景気後退の複合効果、いわゆるスタグフレーションが、経済活動や人々の生活に影響を与えており、結果として脱化石燃料のプロセスが思うように進まず、エネルギー転換への道筋に不透明感を与えている状況である。そのような中、近年ではエネルギー安定供給 (つまり、化石燃料への一定依存) とカーボンニュートラルとの両立が重要視される動きもみられる (例えば、橘川, 2023)。また、エネルギー転換がもたらす別の懸念として、鉱物資源リスクがある。再生可能エネルギー、自動車の電動化、省エネ技術の普及・拡大は、特定の鉱種の鉱物資源の需要を増大させ、世界的な需給逼迫が実際に起きている状況である。IEAの予測 (STEPSシナリオ：公表政策シナリオ) によれば、2040年における鉱物資源需要は2020年比で銅1.7倍、コバルト6.4倍、リチウム約13倍、ニッケル6.5倍、レアアース3.4倍になることが見込まれている (IEA, 2021)。

エネルギーや鉱物資源の探査・開発・生産の困難性は増していくなかで、エネルギー・資源の国際需給が逼迫・複雑化してきているとともに、高度な技術スキルが必要となる案件が急速に増加している。本論説では、物理探査技術が果たすべき役割を明確にし、今後必要な技術開発の方向性について論考する。

2. エネルギー・資源分野において物理探査技術に求められることは何か？

エネルギー・資源分野において今後求められる物理探査技術に関する論考はこれまで鉱物資源探査 (Farquharson and Lelièvre, 2017; Okada, 2021; Okada, 2022) ならび石油探査分野 (松岡・本田, 2014) で行われてきており、それら有益な文献を読むことを薦めたい。ここでは、俯瞰的な視点からの指摘をしておきたい。マクロに見れば鉱物資源探査と流体資源探査とでは、技術発展の進化が異なっているように見える。物理探査の中でも、とりわけ主として石油探査に用いられる反射法地震探査においては、エレクトロニクス技術・通信技術の進展により大規模データ (terabytes から petabytes) の取得・記憶・処理・可視化・解釈が可能となり、2次元から3次元、さらに時間軸を加えた4次元へと地下の捉え方が進化してきており、エレクトロニクス技術・通信技術の進展に依存した (あるいはエレクトロニクス技術の進展に影響を与えた) 経緯を持っているのが特徴的ではないだろうか。

さらには、石油探査における物理探査は、原油価格の高低に大きく依存し、原油価格高騰時代に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ることも特徴的と考えられる。具体例として、松島 (2018) は、重力偏差計の例を挙げて以下のように紹介している。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、測定の高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、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、新たに起こった技術革新を指向し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。Nakhle (2023) は、世界の国内総生産に占める石油・ガス部門への投資割合の経緯 (1970～2021年) について、原油価格と投資割合が非常に良い相関性を有することを示し、2018年のOPECの報告書に記載されている「価格が下支えすれば、投資も後続し、少なくとも中期的には供給が需要に見合ったものになるのに十分である」を紹介している。

また、歴史的には大規模ターゲットを対象として探査段階で適用されていた物理探査は、小規模で複雑な探査ターゲットにおける探査で適用されるようになってきた。技術シーズの観点から、松島 (2019) は自然環境

や民族の感性を活かした技術開発の必要性を提案している。例えば、芭蕉の俳句に「古池や蛙飛びこむ水の音」があるが、我々の頭には、静寂な古池にカエルが飛び込むことによる水音がこだま（散乱）しながら減衰し、再び静寂を取り戻す一連のシーンが描き出されるのではないだろうか。そうすると、そういう物理現象には強いということを示すのかもしれない。我が国における石油開発は欧米に比較して後塵を拝していると評されることがあるが、松島 (2019) はこの理由について、我が国の自然環境に原因があるのではないかと考え、林 (1953) による以下の論考を紹介している。「我が国における石油を対象とした物理探査はその誕生の時期については世界的に見てもあまり遅れてはいないにもかかわらず、その生長は決して順調なものではなく、最近に至るまで諸外国における様々な華々しい成果を見ることのできない有様である。この原因としては根本的に、途中省略・・・、加えるに我が国油田地帯は地質的にも物理探査の対象として極めて困難なものがあり、低い技術をもってしては早急な効果が現れなかったことがますますその発展を阻害してきたものと考えられる。」すなわち、我が国の地質環境の複雑性が原因であることを指摘している。しかしながら、探査・開発対象が単純な地質構造から複雑ものに移行してきている現状においては、むしろ我が国の自然環境を活かして、国産資源で技術を磨き海外で勝負することができる (松島, 2019)。この点については、日本国内における油ガス田においては、新潟・秋田地域ではグリーンタフ層、北海道勇払ガス田ではフラクチャーを伴う花崗岩・礫岩層等の、非常に不均質性の高い深部貯留層を対象として、物理探査・地質評価に関わる技術開発が進められてきた歴史的な背景があることにも留意する必要がある。

エネルギー・資源分野を専門とする会員が多数在籍する、米国物理探査学会の Research committee が実施した興味深いアンケート結果がある (Ore et al., 2023)。アンケート調査の目的は、(1) 物理探査に関する最近の進化についての見識を得ること、(2) 主要な新興研究トピックを洗い出し関心を醸成する機会を創ること、および (3) 現在の技術的優先事項を要約することであり、技術トピックの成熟度、現在および将来のニーズへの重要性、長期間の課題への対応能力、および関心度に基づいて評価されている。また、実施時期は 2022 年であるが、類似の内容で 2012 年に実施した調査結果とも比較している。

過去 5 年間で最も価値をもたらしたとされるトピックとして、1 位：Full Waveform Inversion (FWI)、2 位：機械学習と人工知能 (AI)、3 位 (同率で 4 件)：リザーバモニタリング、非在来型資源、分散型光ファイバセンシング、微動/受動地震探査となった。長期に渡り課題として対処する可能性が高いとされたトピックとして、1

位：ハイパフォーマンス・コンピューティング (HPC)、2 位：地熱、3 位：リザーバモニタリング、4 位：二酸化炭素地中貯留・利用 (CCUS)、5 位：FWI となっている。成熟度に関しては、基盤的な技術進展が必要なトピックとして、1 位：自律的なデータ取得、2 位：CCUS、3 位：低周波地震記録の取得、4 位：FWI、5 位：リザーバモニタリングとなっている。現在のニーズに最も重要と見なされるトピックは、1 位：HPC、2 位：FWI、3 位：CCUS、4 位：リザーバモニタリング、5 位：機械学習と AI となっている。将来のニーズに関しては、1 位：HPC、2 位：リザーバモニタリング、3 位：機械学習と AI、4 位：FWI、5 位：CCUS となっている。トピックに対する興奮度として、1 位：FWI、2 位：機械学習と AI、3 位：ベイズ推定、4 位：CCUS、5 位：分散型光ファイバセンシングとなっている。

また、2012 年のアンケート調査では、42 人の物理探査の専門家が、(1) そのトピックが革新的かどうか、(2) 物理探査への潜在的な貢献、(3) 予想される短期および長期の影響の基準でランク付けを行っていた。結果としては、FWI が最も革新的なトピックであり、分野を前進させるための最も重要な潜在力を持っており、物理探査分野において最も大きな短期および長期の影響を与えると予測されていたトピックでもあった。2012 年の回答者が次の 10 年で物理探査分野に大きな影響を与えると予想した他のトピックには、リザーバモニタリング、CCUS、および非在来型資源があった。

以上の結果は、2022 年の調査結果が過去の価値と現在のニーズに関するものとしてほぼ反映されていることを示しているものの、過去 10 年間に新たに浮かび上がった完全に新しい価値ある研究方向も存在することを考慮することが重要であり、このようなランキングを超えてオープンマインドを保つべきことを Ore et al. (2023) は指摘している。物理探査の専門家のみならず関連分野の専門家に対するアンケート調査をさらに精緻化し包括的に行うことは、今後の物理探査技術に求められることを洗い出すことに効果的であると思われる。

3. 不確実性を扱う領域の必要性

前章では、物理探査に求められる技術について言及した。前章でみてきたように、物理探査データ取得技術や解析技術の技術革新は不断に行われてきたが、探査結果の解釈における技術革新があまり目立たないことがわかる。ここでは、探査結果の解釈における不確実性に着目し、不確実性を扱う領域を深めることにより、新たな解釈パラダイムが拓くことの可能性について考える。

3.1 「リスク」と「不確実性」の違い

近年、いくつかの科学・技術分野において、「不確実性」

の概念への注目が高まっている（例えば、Bond, 2015）。なぜ「不確実性」が注目されてきているのかの理由については、場合により異なるが、市民が様々な意思決定の場に参加するシーンが世界的に増加している点や、どのような不確実性が存在し、リスクと不確実性との関係を明確に述べるのが、社会受容性の担保や政策・規制の制定にとって不可欠である点などが考えられる。また、技術の進化・発展の観点からも不確実性を扱う学問・技術の確立が必要である。物理探査を形容する表現として、「脅威の物理探査」と表現される場合と「当たらない物理探査」と表現される場合があり、極めて両極端である。この両極端が生じる原因は不確実性の扱いが適切に行われていないことによるのではないだろうか。

実は「不確実性」の定義は難しく分野により異なることもある。最良な状態に対して不確実な部分をエラーバーで表現する方法（Rowbotham et al., 2010）、conceptual uncertainty（概念的な不確実性）を定義する方法（Bond et al., 2007）、measurement uncertainty（測定上の不確実性）を定義する方法（Leahy and Skorstad, 2013）など様々な定義されている。例えば、物理探査の分野においては、複数の探査解釈者間でコンセンサスがとれた状態は不確実性が無い状態とすることは適切では無いかもしれない。つまり、「変動性」と「不確実性」は異なり、概念としては「正解さ（真値からの誤差）」の意味に近い定義を用いることが物理探査の分野では一般的なように感じる。石油や天然ガスにおける探鉱プロスペクト評価では、発見確率を評価し、発見時に期待される埋蔵量は不確実性を考慮して確率分布として見積もり、地質リスク評価が行われ、経済性評価に用いられている（高山, 2018）。つまり、この場合、不確実性は確率分布評価に包含されている。

地球統計学と呼ばれる手法は、不確実性の量的な評価が可能であるとして位置付けられている。既存のデータの空間依存性を考慮して空間的な内外挿が可能であり、物理探査データ、坑井データ、油層あるいは鉱物賦存分布データ等異なる種類のデータを統合して扱うことができる。例えば坑井数などの既知データが増えることにより、理想的には推定値の不確実性が小さくなっていくことが期待されるが、その不確実性を見積もることができる。しかしながら、Deutsch (2006) は、地球統計学にのみ基づいて意思決定をすることへの警鐘をおこなっている。理由は簡単で、地球統計学は、統計的な内挿・外挿を実施しているに過ぎないためである。Li et al. (2015) は、地球統計学的に生成される多数のモデルに対して得られる地震波マイグレーション断面間の揺らぎを不確実性マップとしているが、これをもって意思決定を行う不確実性として捉えることには慎重さが必要であろう。

ここでは、まず「リスク」と「不確実性」の違いにつ

いて確認しておきたい。Lee and Lee (2006) は、「リスク」と「不確実性」の概念の違いを以下のように述べている。「リスク」の概念は、人間に対する潜在的な危害の可能性を表現するものであり、過去 20 年間にわたり「リスク」の概念に対して様々な角度から検討されてきており、「リスク」の一般的な概念を導入することにより、リスク分析に関する概念的な指針が提供されてきた。その定義によれば、「リスク」とは、シナリオ（何が起こりえるのか）、可能性（どれくらいの可能性で起こりえるのか）、帰結（終端測定は何か）の 3 要素から構成される。一般に確率論的リスク評価として知られる、リスクを定量化する確率論的アプローチは、事象の確率と結果の積で表現され、さまざまな分野で終端測定の確率分布を提供するために使用されてきた。

一方で、不確実性の考え方については、主観的確率分布を、認識不足や確率過程の影響に対する不確実性として表現するとしている。終端測定の推定では、このような不確実性を実際に確率過程として取り扱う。不確実性の深さは、評価者の全体的な認識状態に依存し、過去の同様の一連の行動に関するすべての根拠、データ、および経験に基づいている。したがって、多くの要因がリスク結果の変動に影響を与える。また、不確実性を分類するための多様なアプローチが、過去 20 年間にわたって確立されてきており、ほとんどのリスクアナリストは、リスク分析モデルで使用されるすべての変数には、その固有の性質のために認識論的不確実性（知識や情報が限定されているために生じる不確かさ）と偶然的な不確実性（自然の不可抗力やランダムな要素に起因する不確かさ）の両方が含まれていると考えている。

Paté-Cornell (1996) は、認識論的不確実性と偶然的な不確実性の違いについて、以下のように述べている。偶然的な不確実性と認識的不確実性について、過去にはそれぞれ「リスク」と「不確実性」と呼ばれることが多く、その区別には長い歴史があり、確率の定義と期待効用決定理論の発展に基づいている。どちらのタイプの不確実性も、定性的変数だけでなく、数値的変数にも影響を与える可能性があり、また、ほとんどのリスク分析の問題には、既知の統計サンプルと、未知または部分的に既知のメカニズムの両方が含まれる。

リスクと不確実性の違いをより明確にするために、CCS を例にして説明する。CCS において定量化・予測が可能でリスクとして、市場リスク（経済性・CO₂ 供給確保等）や技術リスク（坑井健全性・断層漏洩・圧入性能低下・貯留量不足・誘発地震・モニタリング等）など様々なあるが、ここでは CO₂ 漏洩について考える。リスク評価には様々な手法が存在するが、定性的あるいは定量的な手法により潜在的なリスクシナリオを特定することでリスクの評価を行うことが一般である（Gholami et al., 2021）。一方、Gholami et al. (2021) は、不確実性として、

CO₂ 圧入に伴う地球化学的作用により CO₂ 漏洩経路が形成されてしまう未解明現象を挙げている。すなわち、Gholami et al. (2021) では、シナリオとして描けるものをリスク、描けないものを不確実性として区別している。また、断層は CO₂ 漏洩経路となり得るため、その位置・形態が重要になってくるが、測定・解析方法の違いによりその情報を一意に確定することができないことが一般的であり、これは上述の measurement uncertainty (測定上の不確実性) として考えることができる。

3.2 解釈における不確実性

物理探査データから情報を引き出す過程は、データ取得→データ解析→解釈の流れで行われるが、不確実性は解釈段階のみならず、それぞれの段階に存在する。辞書的な定義による「解釈」の意味は、「物事などの意味・内容を理解し、説明すること。解き明かすこと。また、その説明。」となるが、1990年代において地震探査の分野では、「2000年になると、三次元地震探査が一般的になり、解釈という作業は専門的な作業ではなくなるだろう。」とも言われていた (Rankey and Mitchell, 2003)。つまり、1990年代においては、二次元的な断面から三次元的なボリュームを推測することが求められていた。確かに、地震探査データが二次元から三次元に拡張したことで、解釈の不確実性は大幅に軽減されることになるが、そのすべてが解決したわけではない。

地震探査における解釈技術では、反射イベントの形状に着目する定性的に地質情報を解釈する方法、坑井での複数の物性同士の関係式を地震探査データを仲介として空間的に展開する方法、地震探査データからインバージョン法や岩石物理モデルにより定量的に解釈する方法に大きく分けられるが、それぞれに不確実性を有している。例えば、定性的解釈の不確実性例として、Hart (2013) は、異なる周波数での地質構造の見え方の違いを指摘している。これは、解釈者が正しく解釈しているにも関わらず、限られた周波数帯域では見える構造が異なってくる問題である。さらに、定量的解釈の不確実性例として、AVO (Amplitude Versus Offset) レスポンスの反射面付近の状態の影響を指摘している。Bond (2015) は、不確実性を客観的なものと主観的なものとに分け、地震探査データから解析した結果は客観的な不確実性を含み、解釈した結果は主観的な不確実性を含んでいると考え、解析結果の不確実性は解釈結果のそれより小さいことを述べている。このことを裏付ける根拠として、Bond et al. (2007) は、数値シミュレーションにより作成された二次元の地震探査断面に対する412名の解釈作業を集計したところ21%しか正解が得られなかったことを報告している。Bond (2015) は、この原因を認知バイアスに帰属させている。認知バイアスはさらに様々なバイアスに分類されるが、ここでは割愛する。なお、認知バイ

アスを分析する方法として、Elicitation (誘導質問) 法を適用した興味深い例がある (Polson and Curtis, 2010)。なお、上述した Li et al. (2015) のスタディ (地球統計学的に生成される多数のモデルに対して得られる地震波マイグレーション断面間の揺らぎを評価) や中東 (2018) のスタディ (データ品質の影響、流体置換による波形変化の影響、深度変換の感度、アトリビュートの組み合わせの影響) は、客観的な不確実性に該当する。

3.3 「解釈」は科学か？

Bond (2015) の指摘では、地震探査断面の解釈作業は主観的なものであるとされていた。そうになると、解釈作業は科学的な行為にはならないのではないかと疑問が湧いてくる。そもそも科学の定義は、第三者による再現性が可能なもの (客観的なもの) とされる。ここで注意すべきは、正しいかどうかは問われないことである。すなわち、科学的であるかどうかという切り分けは、意外と敷居が低い。

主観的なもの (例：解釈) は科学ではないのか？という問いに対する答えは「否」である。つまり、科学的方法是「仮説を検証あるいは反証」することにより構成されるが、「仮説」は主観的なものであるからである。主観性を許容することは科学的方法の正の側面であり、地質学的解釈における人の主観性がアイデアの進展にどのように貢献しているのかについての研究も行われている (Aspinall, 2010)。

主観的要素は解釈の発展にとって不可欠であることが指摘されており、Rowbotham et al. (2010) や Curtis (2012) は解釈作業における主観的要素 (subjectivity) の重要性を指摘し、不確実性を認識し定量化しようと試みることによって、新しい仮説を生み、地質モデルにおけるリスクを減少できることを述べている。すなわち、大胆に仮説を立てその仮説を実証することに注力していく過程を通して、認識的不確実性を減らせるということを意味し、如何に人間の頭から有益な主観的要素を引き出すのが重要であり、このことが探査結果の解釈作業におけるブレークスルーを生むのではないだろうか。

3.4 解釈の不確実性を減らす技術・方法論

ここでは、解釈の不確実性を減らすための技術や方法論、人間の主観性を引き出す方法について述べる。まず、物理探査における特徴的かつ最も重要な概念として、測定データの S/N (Signal-to-Noise) 比の改善が挙げられる。例えば、反射法地震探査における CMP (Common Mid-Point) 重合処理 (Mayne, 1962) は提案されてから半世紀以上経っており、重合前マイグレーションに技術に進化しても、重合効果 (つまり、冗長であること) の考え方は重要で有り続けている。Omar (2022) は、若手の技術者に向けて、「物理探査においては、電磁気学的手法

であれ、弾性学的な手法であれ、雑音の中から信号を解読するという普遍的な概念について訓練され、雑音を抑制し信号を強調する方法を教えてくれる指導者を探すべきである」と述べている。さらには、「この雑音は、個々の動機や意識だけでなく、自己の疑念によっても生み出される。」ということ述べており、信号と雑音を峻別する行為自体が主観的なものであることにも言及している。情報理論の観点から冗長性の重要性を説明している物理探査の教科書は極めて少ないが、石井（1988）は冗長性の重要性について情報エントロピーを用いて説明している。確率 p で起こる情報量 Iq は以下の(1)式で表現される。

$$Iq = \log_2 \frac{1}{p} \quad (1)$$

(1)式は、生起確率が小さい事象ほど情報量が大きいことを意味しており、例えば、「白いカラスがいた」の情報量は「黒いカラスがいた」の情報量より大きい。情報エントロピー H は情報量の期待値として(2)式で表現される。

$$H = \sum_i p_i \cdot \log_2 \frac{1}{p_i} \quad (2)$$

情報エントロピー H が最大であるとき ($H=H_{max}$)、すべてが等しい確率で生起する場合である。つまり、いずれの状態が起ころうとも不思議ではない混沌とした無秩序な状態を意味する。逆に、情報エントロピー H が小さくなるほど、ある特定の状態が生起する確度が高まることになる。ここで、冗長度 R は以下の(3)式で表現される。

$$R = \left(1 - \frac{H}{H_{max}}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

(3)式において、冗長度は「不確かでないこと」の量的表現である。情報の伝達においては、この冗長度が大きいほど（つまり、 H が小さくなるほど）情報が確かになることを意味する。つまり、何回も同じことを伝えればすれば情報を確実に伝達できるため、意識的に無駄を大きくすることの重要性を示唆している。つまり、上述の物理探査における重合効果は不確実性を軽減させる点で極めて重要な概念であることがわかる。上述した光ファイバセンシングは、坑井も利用した立体的な測定や長期モニタリングにより飛躍的な時間・空間サンプリングの実現を通じて、時空間解像度の向上ばかりでなく飛躍的な重合効果により不確実性低減が可能である。

一方で、熱力学の第二法則におけるエントロピー S は以下の(4)式で表現される。

$$S = k \cdot \log W \quad (4)$$

ここで k はボルツマン定数、 W は取り得る微視的状态の数である。取り得る微視的状态の数 W が増加するこ

とは場の不確実性が大きくなることを表現している考えることもできる。我々の実生活の中では、エネルギーを投入することによって、不確実性を減らそうとしている（つまりエントロピーを減少させている）のである。このように考えると、熱力学の第二法則におけるエントロピー S と情報エントロピー H とは根本的な部分で共通点を有することがわかる。Natal et al. (2021)は、熱力学におけるエントロピー S と情報エントロピー H とは大局的に同じ概念であることを指摘している。上述したように、エネルギー転換が上手く進まず、エネルギー問題が混沌とするのは、熱力学におけるエントロピーが理解されないからであり、地下に関する探査データ解析・解釈が混沌とするのは、情報エントロピーが理解されないからではないだろうか。

Leahy and Skorstad (2013)は、measurement uncertainty (測定上の不確実性)を軽減させるための新しいワークフローを提案している。従来型のワークフローは、地震探査結果の解釈→地質モデリング→単一で決定論的な貯留層モデルの構築となっており、不確実性を定量化する方法論になっていない。探査結果においては、分解能、感度、ノイズなどに起因する不確実性による影響を受けている。例えば、断層付近の探査結果は、断層の影響により品質が低下するケースが多いが、断層を含む地質モデルとして可能性のあるモデル群を考え、これらのモデル群において数値シミュレーションを実施することにより、断層付近における探査結果の揺らぎを評価する。このようなモデル駆動型の解釈アプローチは、探査データに含まれる不確実性を定量的に評価できるため、意思決定支援に必要な情報を与える方法論として期待できる。ここで留意すべきは、地質モデルとして可能性のあるモデル群を考えることは、人の主観性を考慮している点とこのような方法論にはHPCの利用は必須である点である。また、地下物性を表すパラメータに対して確率分布を定義し、観測データとの適合度を最大化するようにパラメータを確率的に推定し、推定されるパラメータの不確実性や誤差の影響を考慮するStochastic inversion (例えば、Francis, 2006)も不確実性を定量的に評価する技術として位置付けられる。

Boschetti and Moresi (2001)は、主観性、知識、経験、直感が果たす役割の重要性を指摘し、合理的な地質学的知識と経験を持つ解釈者による主観的な判断によって駆動されるインバージョン解析手法を提案している。具体的には、AIを利用して芸術的な創造性を支援するために開発されたシステム (Takagi, 2001)を利用する。このシステムは、画像や音楽のシーケンスとして生成されたものに対して、アーティストが個人の好みに応じてそれらをランク付けすることで、アーティストの好みやインスピレーションに合う画像や音楽に向かって反復的に収束する手法である。この手法をインバージョン解析結

果に対して適用することで知識と経験を持つ解釈者による主観性を取り入れる。このアプローチは、解から非一意性を取り除くわけではないが、地質的信頼性の基本的な基準を満たす解の再構築を可能にする。

要素技術的な視点から、2章で紹介した各要素技術についても、不確実性軽減の観点から眺めてみる。反射法地震探査におけるコンボリューションモデルでは、基本波形と地層の反射係数列とのコンボリューションとなるが、基本波形はインパルス波形であることが理想であるので、できるだけ広帯域の地震記録を取得することが重要となる。広帯域性を実現させるためには、低周波数ならびに高周波数の両方向に対して周波数領域を広げる必要があるが、散乱が少なく、地層内での透過性の高い低周波数成分の重要性が指摘されている (Ten Kroode et al., 2013)。FWI は、イメージングに不可欠な速度構造の客観的推定手法であり、将来的には、速度、密度、反射係数及び減衰係数を高い解像度による統合評価が可能となる技術である。また、現在、多段階の複雑なステップを経て生成されている地下構造モデルを、より単純かつ客観的に、パラメータ評価の不確実性を低減して構築できる技術である。FWI の適用においても最小二乗法におけるミスフィット関数の局所最小値の数が少なくなるという観点からも、低周波数成分は重要とされている。

最後に、取得された探査データの共有化やオープンアクセス化も不確実性の軽減に貢献する可能性について述べる。米国で起こったシェール革命においては、弛まない研究・技術開発が技術イノベーションに結実したことは言うまでもないが、様々な環境がこのようなイノベーションの生起に有効的に作用したことが指摘されている。まず、米国では、公的資金で取得されたデータは公的に還元する（つまり公開する）ことが当たり前のことになっている。科学データを取得する研究者の立場で考えると、独占した方が研究成果を出せると考えがちだが、むしろ積極的に公開して競争的環境に仕向けることの方が、多角的なアプローチが採用され、結果として周りを含めて優れた成果を出し、計り知れないイノベーションを生む環境を醸成する。さらには、多様なアプローチを戦略的に誘導するフレームを醸成していくことは不確実性を減らすばかりではなく、科学・技術の透明性を高めることに繋がり、結果として合理的な意思決定や社会受容性にも寄与するだろう。このような状況が進展すると、多様で膨大なデータから最大限の情報・価値を引き出す能力を有する人・組織が優位性を持つ場面が生じ、学際化の進行あるいは同分野内での活性化が生まれることで、新たな学問分野を萌芽させるかもしれない。

4. おわりに

脱炭素が叫ばれる中、最近ではエネルギー安定供給と

カーボンニュートラルとの両立が重要視される動きもみられ、エネルギー・資源の安定供給実現に取り組むことは引き続き重要となり続けることが予想される。歴史的には大規模ターゲットを対象として探査段階で適用されていた物理探査は、小規模で複雑な探査ターゲットにおける探査で適用されるようになってきており、引き続き技術革新を推進してニーズへの対応と技術シーズを醸成していくことが必要である。とりわけ今後必要な技術開発の方向性として、本論説では、主として探査結果の解釈に注目し、不確実性の概念が有する多面性やその中における主観性の意味付けならびに重要性について論考した。主観性は不確実性を生じさせる原因ではなく、むしろ不確実性を低減するために重要な役割を果たす点を指摘した。また、現在のところ、物理探査データから導かれる地下情報における不確実性の定義は若干曖昧な点があることも指摘し、単に不確実なものを定量化することのみに留まらず、認知科学の分野にまで及んでいることを認識することが重要である。今後、不確実性を扱うことができる系統的なフレームを構築して、人間の主観性を効果的に抽出していく方法論を確立することが必要になるだろう。また、不確実性を定量化し低減する方法はいくつか提案されてきているが、今後のさらなる進展が望まれる。

謝辞

本稿を執筆する機会を与えて下さった公益社団法人物理探査学会創立75周年記念シンポジウム記念事業実行委員会ならびに会誌編集委員会に感謝の意を表します。また、原稿を改善するための極めて有益なご助言をいただいた匿名の査読者にも感謝の意を表します。

参考文献

- Aspinall, W. (2010): A route to more tractable expert advice, *Nature*, **463**, 294-295. <https://doi.org/10.1038/463294a>
- Bergman, N. (2018): Impacts of the fossil fuel divestment movement: Effects on finance, policy and public discourse, *Sustainability*, **10**, 2529. <https://doi.org/10.3390/su10072529>
- Bond, C.E. (2015): Uncertainty in structural interpretation: Lessons to be learnt, *Journal of Structural Geology*, **74**, 185-200. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.03.003>
- Bond, C.E., Gibbs, A.D., Shipton, Z.K., and Jones, S. (2007): What do you think this is? "Conceptual uncertainty" in geoscience interpretation, *GSA today*, **17**, 4.
- Boschetti, F., and Moresi, L. (2001): Interactive inversion in geosciences, *Geophysics*, **66**, 1226-1234.
- Curtis, A. (2012): The science of subjectivity, *Geology*, **40**, 95-96. <https://doi.org/10.1130/focus012012.1>
- Dean, T. (2022): Is there a future for geophysics in Australia?,

- Preview, **2022**, 21-23. <https://doi.org/10.1080/14432471.2022.2129829>
- Deutsch, C.V. (2006): What in the reservoir is geostatistics good for?, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **45**, 14-20. <https://doi.org/10.2118/06-04-DAS>
- DiFrancesco, D., Meyer, T., Christensen, A., and FitzGerald, D. (2009): Gravity gradiometry-today and tomorrow, *In 11th SAGA Biennial technical meeting and exhibition*. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.241.difrancesco_paper1
- Farquharson, C.G., and Lelièvre, P.G. (2017): Modelling and inversion for mineral exploration geophysics: A review of recent progress, the current state-of-the-art, and future directions, *In Proceedings of Exploration 17: Sixth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, **17**, 51-74.
- Francis, A.M. (2006): Understanding stochastic inversion: Part 1, *First Break*, **24**. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2006026>
- Gholami, R., Raza, A., and Iglauer, S. (2021): Leakage risk assessment of a CO₂ storage site: A review, *Earth-Science Reviews*, **223**, 103849. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103849>
- Hart, B.S. (2013): Whither seismic stratigraphy?, *Interpretation*, **1**, SA3-SA20. <https://doi.org/10.1190/INT-2013-0049.1>
- Hart, R. (2023): 世界の化石燃料需要、2030年までにピークに IEA予測, *Forbes Japan*, <https://forbesjapan.com/articles/detail/66963> (2024年1月27日アクセス).
- 林 一 (1953): 石油の物理探査の現状, *物理探査*, **6**, 137-140.
- IEA (International Energy Agency) (2021): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.
- 石井吉徳 (1988): 地殻の物理工学, 東京大学出版会, 東京.
- Johansmeyer, T. (2023): Greenwashing and Divestment: The Hidden Problem in an Old Sustainable Finance Strategy, *The Journal of Impact and ESG Investing*. <https://doi.org/10.3905/jesg.2023.1.068>
- 経済産業省 (2023): CCS長期ロードマップ検討会最終とりまとめ.
- 橋川武郎 (2023): エネルギー安定供給とカーボンニュートラル, *圧力技術*, **61**, 219-226. <https://doi.org/10.11181/hpi.61.219>
- Laherrère, J., Hall, C.A., and Bentley, R. (2022): How much oil remains for the world to produce? Comparing assessment methods, and separating fact from fiction, *Current Research in Environmental Sustainability*, **4**, 100174. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100174>
- Lawler, A. (2023): OPEC raises oil demand view in long-term outlook, *REUTERS*, <https://jp.reuters.com/article/idUSL8N3BD0SU/> (2024年1月27日アクセス).
- Leahy, G.M., and Skorstad, A. (2013): Uncertainty in subsurface interpretation: a new workflow, *First Break*, **31**. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.31.9.71079>
- Lee, C.J., and Lee, K.J. (2006): Application of Bayesian network to the probabilistic risk assessment of nuclear waste disposal, *Reliability Engineering & System Safety*, **91**, 515-532. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.03.011>
- Li, L., Caers, J., and Sava, P. (2015): Assessing seismic uncertainty via geostatistical velocity-model perturbation and image registration: An application to subsalt imaging, *The Leading Edge*, **34**, 1064-1070. <https://doi.org/10.1190/tle34091064.1>
- 松岡俊文・本田博巳 (2014): 石油鉱業史とその将来展望における物理探査, *石油技術協会誌*, **79**, 4-16. <https://doi.org/10.3720/japt.79.4>
- 松島 潤 (2018): 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, *物理探査*, **71**, 179-188. <https://doi.org/10.3124/segj.71.179>
- 松島 潤 (2019): エネルギー資源論から考える石油技術者の重要性和果たすべき役割, *石油技術協会誌*, **84**, 130-137. <https://doi.org/10.3720/japt.84.130>
- Mayne, W.H. (1962): Common reflection point horizontal data stacking techniques, *Geophysics*, **27**, 927-938. <https://doi.org/10.1190/1.1439118>
- 中東秀樹 (2018): 地震探査技術を使った地質リスク評価と不確実性評価, *石油技術協会誌*, **83**, 9-15. <https://doi.org/10.3720/japt.83.9>
- Nakhle, C. (2023): Oil and gas: The investment gap dilemma, <https://www.gisreportsonline.com/r/oil-gas-investment/> (2024年1月27日アクセス).
- Natal, J., Ávila, I., Tsukahara, V.B., Pinheiro, M., and Maciel, C.D. (2021): Entropy: From thermodynamics to information processing, *Entropy*, **23**, 1340. <https://doi.org/10.3390/e23101340>
- Okada, K. (2021): A historical overview of the past three decades of mineral exploration technology, *Natural Resources Research*, **30**, 2839-2860. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09721-4>
- Okada, K. (2022): Breakthrough technologies for mineral exploration, *Mineral Economics*, **35**, 429-454. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00317-3>
- Omar, S. (2022): President's Page: A perspective from 'the future', *The Leading Edge*, **41**, 812-813. <https://doi.org/10.1190/tle41120812.1>
- Ore, T., Martin, E.R., Rubio-Cisneros, I., Girard, A., Ma, J., Kanakiya, S., Sanuade, O., Titov, A. and de Souza, R. (2023): Research Hot topics in geophysics: Progress, trends, and perspectives, *The Leading Edge*, **42**, 360-363. <https://doi.org/10.1190/tle42050360.1>
- Paté-Cornell, M.E. (1996): Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment, *Reliability Engineering & System Safety*, **54**, 95-111. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(96\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(96)00067-1)
- Polson, D., and Curtis, A. (2010): Dynamics of uncertainty in geological interpretation, *Journal of the Geological Society*, **167**, 5-10. <https://doi.org/10.1144/0016-76492009-055>
- Rankey, E.C., and Mitchell, J.C. (2003): That's why it's called interpretation: Impact of horizon uncertainty on seismic

- attribute analysis, *The Leading Edge*, **22**, 820-828. <https://doi.org/10.1190/1.1614152>
- Rowbotham, P., Kane, P., and Bentley, M. (2010): Bias in geophysical interpretation-the case for multiple deterministic scenarios, *The Leading Edge*, **29**, 590-595. <https://doi.org/10.1190/1.3422459>
- Shragge, J. (2022): A university perspective on the future of applied geophysics, *The Leading Edge*, **41**, 162-163. <https://doi.org/10.1190/tle41030162.1>
- Takagi, H. (2001): Interactive evolutionary computation: Fusion of the capabilities of EC optimization and human evaluation, *Proceedings of the IEEE*, **89**, 1275-1296. <https://doi.org/10.1109/5.949485>
- 高木 聡 (2023): 我が国の資源確保戦略, 石油技術協会誌, **88**, 199-207.
- 高山邦明 (2018): 地質リスク・不確実性評価の課題～効果的な適用に向けて, 石油技術協会誌, **83**, 3-8. <https://doi.org/10.3720/japt.83.3>
- Ten Kroode, F., Bergler, S., Corsten, C., de Maag, J.W., Strijbos, F., and Tijhof, H. (2013): Broadband seismic data - The importance of low frequencies, *Geophysics*, **78**, WA3-WA14. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0294.1>
- Tollefson, J. (2015): Reality check for fossil-fuel divestment, *Nature*, **521**, 16-17.

Investigating the Role of Geophysical Exploration Techniques in Achieving Stable Supply of Energy Resources: Energy Trends in an Uncertain Era and Uncertainty in the Interpretation of Exploration Results

Jun Matsushima*

ABSTRACT

In the current global energy crisis, ensuring a stable supply of energy resources is an extremely important challenge; however, future prospects are shrouded in deep uncertainty. This article aims to grasp recent trends in energy and resource dynamics, clarify the role of geophysical exploration technologies, and discuss the direction of necessary technological advancements. While there have been continuous innovations of data acquisition and analysis technologies in geophysical exploration, there has been less focus on innovation in interpreting exploration results. We discuss the potential for breakthroughs in interpretation of exploration results, particularly addressing the multifaceted nature of uncertainty and the significance of human subjectivity within it. Emphasizing the distinction between the concepts of risk and uncertainty, I point out that human subjectivity in the interpretation of exploration results is not a cause of uncertainty but, rather, plays a vital role in reducing uncertainty. Through focusing on boldly formulating hypotheses and validating them, it is expected to reduce uncertainty, suggesting that extracting beneficial subjective elements from human cognition is an important direction for reducing exploration risks.

Keywords: energy and resources, stable supply, risk, uncertainty, interpretation, human subjectivity

Manuscript received January 29, 2024; Accepted April 15, 2024.

* Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8563, JAPAN