

「高精度微量ガス測定技術を用いた各種探査に関する研究委員会」報告

下茂道人

深田地質研究所

はじめに

深田地質研究所では、2018年6月に「高精度微量ガス測定技術を用いた各種探査に関する研究委員会」を設立し活動を続けてきた。本研究委員会は、近年技術の進歩が著しいレーザー分光法を用いた大気中微量ガス測定技術を地質調査や探査に応用する可能性を検討することを目的として設立されたものである。以後、技術の情報収集や現地測定の実施などを通じて多くの知見を得ることができた。その結果、同技術の断層や石油資源探査への適用可能性が確認され、当初の目的を概ね達成したと判断し、昨年度末(2025年3月)をもって終了した。本報告では、これまでの委員会の活動を振り返るとともに、委員会で得られた成果をとりまとめる。

二酸化炭素(CO₂)やメタン(CH₄)などのいわゆる温室効果ガスは、地球温暖化に大きな影響を及ぼす。中でもメタンは、100年スケールで二酸化炭素の25倍以上の地球温暖化係数を有し、産業革命以降の地球全体の気温上昇の約3分の1に寄与している(IPCC, 2021)。このため、大気中に含まれる二酸化炭素やメタンなどの濃度変化を高精度に測定する技術は、近年、気候科学(Climate Science)の分野で大きく進歩している。特に、キャビティリングダウン分光法(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)や中赤外レーザー吸収分光法(Mid-Infrared Laser Absorption,

MIRA)などのレーザー分光技術を用いた測定装置は、広いダイナミックレンジとppbオーダーの分解能を有し、大気中微量ガスの濃度データをリアルタイムに取得できる性能を備えている。さらに、小型化・軽量化が進み、現地観測への適用が容易になっている。

一方で、メタンをはじめとする炭化水素ガスは、地下深部に起源をもち、断層や亀裂を流体の経路として地表に滲出している事例が報告されている(例えば、黒澤ほか, 2011)。従来の地表近傍におけるガス徴の検知は、土壌中に浅いボーリング孔を掘削してガスを吸引する方法や、吸着材を設置して長期間にわたりガスを吸着させたのちに濃度を測定し、その分布をマッピングする方法がとられてきた。しかし、これらの手法では空間分解能を高くすることが極めて困難であり、実験室での分析に要する時間や費用の面でも課題を抱えている。

そこで、本委員会では、高精度レーザー分光計を活用して大気中のメタン濃度変化を面的に把握し、地質構造との関連を明らかにすることを目的として活動を進めてきた。

歴代の委員も含めた委員名簿を表-1に示す。

本委員会には、委員長の東京大学・徳永朋祥教授をはじめ、地質学、大気化学、地球物理学、地球化学、岩盤工学など、多様な分野の専門家が参加した。また、地球温暖化ガス研究の第一人者である米国ローレンス・バークレー国立研究所の

表 1 研究委員会委員

委員長	徳永 朋祥	東京大学
委員	戸野倉 賢一	東京大学
委員	安江 健一	富山大学(2022年6月～)
委員	横井 悟	公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)
委員	天野 健治	国立研究法人日本原子力研究開発機構(設立時～2023年6月)
委員	丹羽 正和	国立研究法人日本原子力研究開発機構
委員	宮川 和也	国立研究法人日本原子力研究開発機構(2021年4月～)
委員	国末 彰司	関東天然瓦斯開発株式会社
委員	宇澤 政晃	関東天然瓦斯開発株式会社(2023年4月～)
委員	松岡 俊文	公益財団法人深田地質研究所
委員	亀村 勝美	公益財団法人深田地質研究所
委員	中山 一夫	公益財団法人深田地質研究所(設立時～2021年3月)
委員兼幹事	下茂 道人	公益財団法人深田地質研究所
アドバイザー	Sebastien Biraud	米国ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)

表 2 測定技術の活用分野の例

分野	内容
地球科学分野	<ul style="list-style-type: none"> ・断層の分布・活動調査および水みち・ガスみち調査 ・泥火山の分布および活動調査 ・マントル由来流体の地表湧出機構 ・火山ガス調査 ・海底下地殻内流体湧出調査(水—岩石反応, 有機物代謝) ・地下水の海底湧出機構
産業分野	<ul style="list-style-type: none"> ・油田・天然ガス田開発 ・天然ガス貯蔵・供給施設の維持保全および周辺環境影響調査 ・CCSにおけるシール性能モニタリング ・メタンハイドレート資源探査 ・地熱開発調査 ・都市部・農村部におけるグリーンハウスガス排出量モニタリング ・温泉付随メタンガス対策のための調査 ・廃棄物処分場における有毒ガス発生調査 ・放射性廃棄物処分場のサイト特性調査 ・地上・地中および地下石油備蓄施設の健全性調査 ・掘削工事現場等における環境ガス/水質調査や爆発危険予測技術

セバスチャン・ピロード博士にも、アドバイザーとして加わっていただいた。

委員の多くは、放射性廃棄物処分、石油・天然ガス資源開発、二酸化炭素地中貯留（CCS）、地下空間開発などの実務・研究に携わっており、そのため、表-2に示すように、地球科学の学術的側面のみならず、産業応用をも視野に入れた成果の活用について、話題提供や活発な討議が行われた。

1 測定方法

本研究委員会では、表-3に示す2台の装置を用いた。いずれの装置も、メタンや二酸化炭素が特定の波長の光を吸収しやすい性質を利用して濃度を測定するものである。

Picarro社のG4301は、キャビティリングダウン分光法（CRDS）を測定原理に採用している。CRDS法は、キャビティ（測定セル）内にレーザー光を導入し、一対の高反射ミラーの間で多数回反射させた際に、ミラーから漏れ出る光の強度を測定し、その減衰率からキャビティ内のガス濃度を求める技術である。測定は、ポンプによって外気

をキャビティ内に連続的に送り込みながら行われる。

一方、AERIS社のMIRA Picoは、中赤外レーザー吸収分光法（MIRA）を測定原理に用いている。本方式は、特定の波長の中赤外レーザー光をガス中に照射し、メタン分子による吸収スペクトルの強度から濃度を求めるものである。近赤外吸収方式と比較して高い感度と選択性を有し、短い光路長で十分な吸収信号が得られるため、CRDS法に用いられるような高反射ミラーを必要としない。その結果、光学系の汚染や機械的衝撃に対する耐性が高く、堅牢で安定した構造となっている。また、水蒸気などの共存成分の影響を受けにくいことも特徴である。さらに、本装置は小型軽量であり、車載観測や徒歩観測など、現地での多様な運用に適している。

いずれの装置も、下記の特徴を有している。

- ・測定レンジが広く、メタン濃度をppb（10億分の1）単位の精度で測定することができる。
- ・無線接続したタブレット上で、リアルタイムに測定結果を確認できる。
- ・GPSアンテナにより、ジオレファレンスされた濃度情報を取得できる。

表3 装置仕様

機種	G4301		MIRA Pico	
メーカー	PICARRO		AERIS Technology	
測定ガス	CH ₄	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
精度(測定間隔)	3 ppb(5s)	0.4ppm(5s)	1 ppb(1s)	0.5ppm(1s)
	0.3 ppb(300s)	0.04ppm(300s)	0.02(100s)	0.14(100s)
ドリフト(24時間)	1ppb	0.5ppm	30ppb or 1% of reading	
測定レンジ	0-800ppm	0-3%	約 0.1 ppm ~ 10,000 ppm	
レスポンス時間	5s	5s	3s(T90)	
測定方式	CRDS(Cavity Ring-Down Spectroscopy) キャビティリングダウン分光法		Mid-Infrared Laser Absorption Spectroscopy 中赤外吸収分光法	
重量	11.3kg		2.75kg	
温度条件	10℃～45℃		10℃～40℃	
オプション	GPS			

これらの特徴は、測定信頼性や迅速性を高めるとともに、測定計画の柔軟な変更を可能にし、効率的な観測に資するものである。また、得られた濃度データの空間分布把握や、クラウドシステム等を介したデータ共有・共同解析の促進にも大きく寄与している。

2 研究委員会活動の経過と実績

本研究委員会の設立に先立ち、2017年9月22日に、後に研究委員会のアドバイザーとなるローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL) Climate Science Department Head のセバスチャン・ビロード博士を日本に招聘し、特別講演会を開催した。講演会には、大学、国立研究所、企業などから約20名の参加を得た。ビロード博士からは「Challenges towards high-precision quantification of carbon dioxide and methane emissions by using on-ground and airborne approaches」と題して、研究委員会が目指すテーマに直結する技術の現状と課題について記念講演をいただいた。また、石油資源株式会社フェロー（当時）の早稲田周氏からは「油ガス貯留層を対象とした地表地化学探査技術の現状」と題して講演をいただいた。この講演内容は、その後のメタン起源評価を進めるうえで極めて示唆に富むものであり、早稲田氏からは委員会活動を通じて貴重な助言を幾度となくいただいた。ここに深く謝意を表す。

その後、準備期間を経て、2018年6月6日に第1回研究委員会を開催した。初年度は、LBNLとの共同研究契約を締結し、ビロード博士よりPicarro社製の装置を貸与いただいた。同装置を用いて、千葉県茂原市、新潟県十日町市、岐阜県下呂市などにおいて、上ガス、泥火山、断層などを対象に、測定技術の習得を兼ねた現地観測を

実施した。

翌2019年度（令和元年度）には、山形県酒田市の余目油田および庄内平野東縁断層帯を対象として、主に車載による測定を実施した。

2020年度（令和2年度）は、新型コロナウイルス感染症の影響により活動が一部制限されたものの、野外での測定が中心であったため、感染対策を講じながら現地観測を継続した。

2021年度（令和3年度）には、日本原子力研究開発機構の丹羽正和氏が研究代表者となり申請した「高分解能ガス濃度マッピングによる亀裂・断層を移行する流体の新しい調査手法の構築」が採択され、委員会の活動にも大きな弾みがついた。また、同機構にはPicarro社製メタンアナライザー（G4301）が導入され、同装置による測定が可能となった。

2022年度（令和4年度）には、2020年度下期から実施してきた北海道幌延地域での測定において、同町の東側を南北に延びる大曲背斜沿いの複数地点で再現性のあるメタン滲出が確認された。現地で採取したガス試料の同位体分析の結果、その起源が熱分解起源であることなど、多くの新たな知見が得られた。この成果を受けて、当初の委員会活動期間を延長する申請を行い、理事会の承認を得た。また、同年にはビロード博士を再度招聘し、幌延ほか複数地点において共同観測を実施した。

2023年度（令和5年度）には、9月に山形県出羽丘陵西端の青沢断層において車載測定を実施し、断層周辺で顕著かつ再現性のあるメタン anomaliesを確認した。メタン濃度の上昇量は最大で約20 ppmに達した。これまで同断層からのメタン滲出は報告されておらず、高精度メタンアナライザーを用いることで初めて検知可能となった新たな発見である。

2024年度（令和6年度）には、青沢断層で再度測定を行い、再現性を確認するとともに、断層延長上の他の複数の沢でもメタン滲出を確認した。その結果、青沢断層沿いに約30 kmにわたってメタン滲出が継続していることが明らかとなった。なお、100 ppm以下の低濃度メタンの炭素同位体比（ $\delta^{13}C$ ）は通常の室内分析では決定が難しいが、LBNLが保有するキャピティリングダウン分光分析装置（G2201-i）により分析が可能となった。

以上のように、2018年6月に開始した本研究委員会では、当初の目的であった高精度微量ガス測定技術を用いた断層・亀裂からのメタン滲出検出に成功し、新たな地質調査技術としての適用性を確認するに至った。その成果をもって、2024年度末をもって研究委員会としての活動を終了した。これまでに得られた成果は、巻末に示すように、深田地質研究所年報、国内外の各種学会および講演会などの場で積極的に発表・共有してきた。主なものを巻末に一覧で示す。

研究委員会は終了したが、2025年度（令和7年度）からは、深田地質研究所、東京大学、日本原子力研究開発機構の三者による共同研究契約を新たに締結し、これまでの成果の発展とともに、メタン滲出の定量化および回収を視野に入れた新たな研究テーマに取り組み始めている。

3 研究委員会の成果事例

3.1 背斜軸におけるメタン滲出確認

可搬型高精度メタン測定装置（Picarro社、G4301）を用いて、北海道幌延町の大曲背斜周辺の林道および沢において、大気中メタン濃度の徒歩測定を実施した（図1）。その結果、いずれの測線においても、想定される背斜軸との交差部付

近で、バックグラウンドと比較して有意なメタン濃度の上昇が検知された（図2）。図4に、上幌延線北進線林道での測定結果を示す。約2 kmの測線において、一か所で約6.9 ppmの顕著な大気中メタン濃度上昇が確認された。復路の測定にお

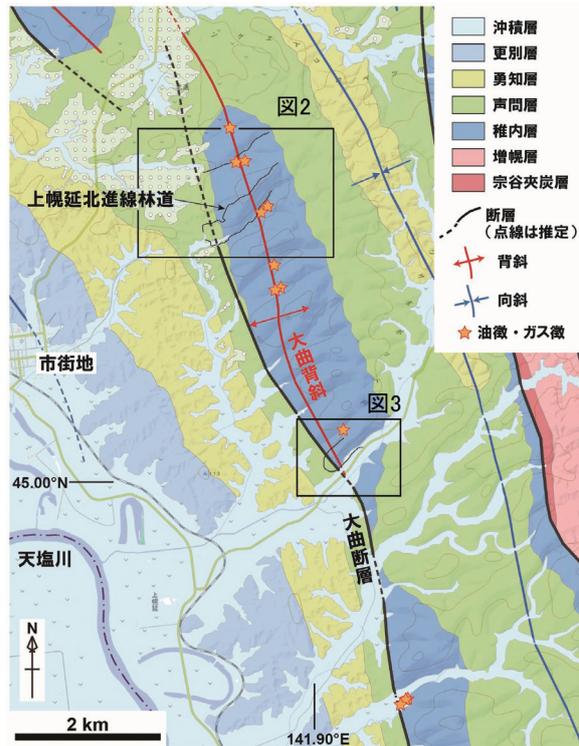


図1 調査位置 油・ガス徴の位置は長尾（1960）および動力炉・核燃料開発事業団（1987）による。ベースマップは、地理院地図に酒井・松岡（2015）の地質情報を重ね合わせたものであり、ArcGISを用いて描画した。

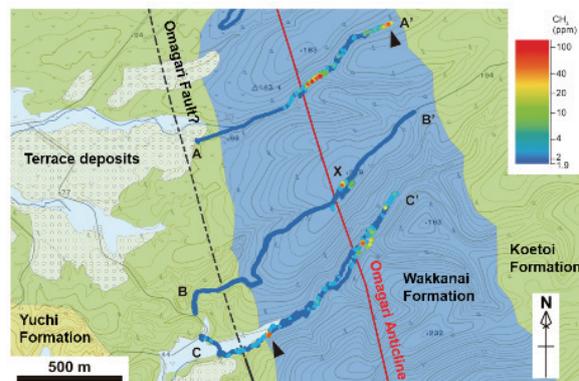


図2 沢及び林道沿いのメタン濃度 A-A' および C-C' は沢沿い、B-B' は林道沿いの側線。

いても同地点付近で再びメタン濃度の上昇が観測されたため、サンプリングチューブの先端を地表に近づけ、濃度の高い箇所の地表を約 5 cm ほど剥いだところ、350 ppm の高濃度メタン滲出を確認した (図 2 の「X」)。さらに、100 MHz アン

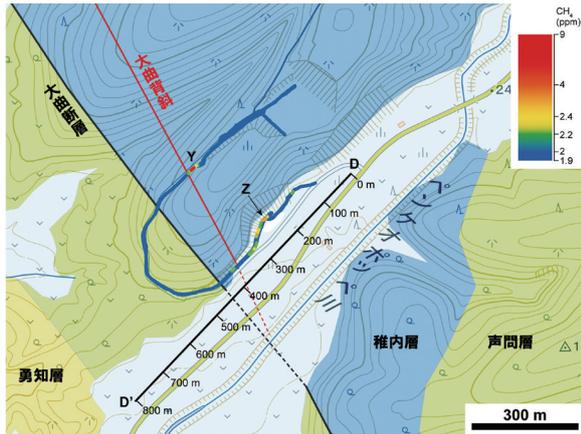


図 3 上幌延採石場におけるメタンガス測定結果

テナを用いた地中レーダー探査 (GPR) により、当該地点直下に背斜構造の軸が確認された (図 5)。また、同地点から約 5 km 南方に位置する採石場においても、工事用道路が背斜軸と交差する地点付近で大気中メタンの上昇を確認し、同じく地表を剥いだところ、メタン滲出が確認された。採取したガス試料の同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ および δD) を分析し、その結果を Schoell (1988) のダイアグラム上にプロットしたところ、熱分解起源であることが判明した。すなわち、地下の貯留層 (稚内層以深) から地表へと連なるガス移動経路 (ガスマイグレーションパス) が存在することが確認された。

背斜軸を横断する沢沿いではこれまで油徴が報告されているが (図 2 中に記載)、尾根部においてメタン滲出が確認されたのは、筆者らが知る

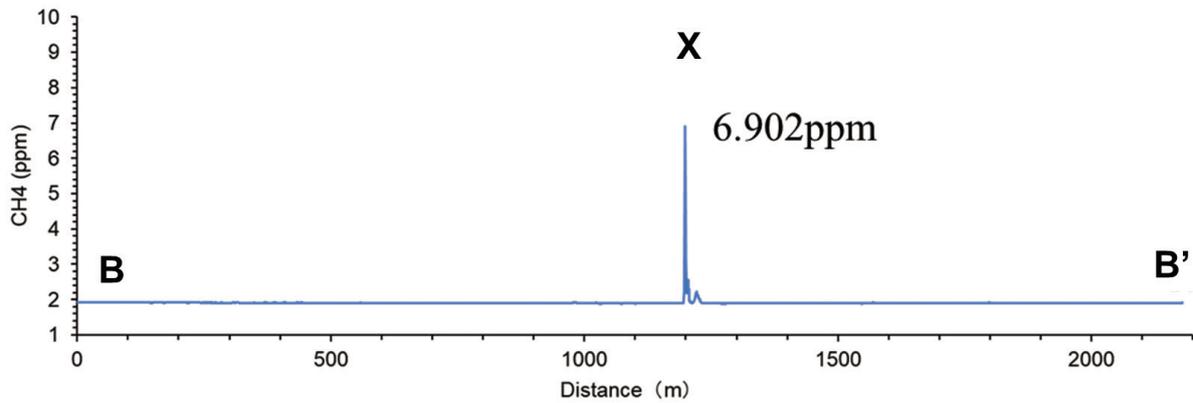


図 4 上幌延線北進線林道沿い (B-B') の大気中メタン濃度プロファイル 'X' の位置は、図 2 中に表示。

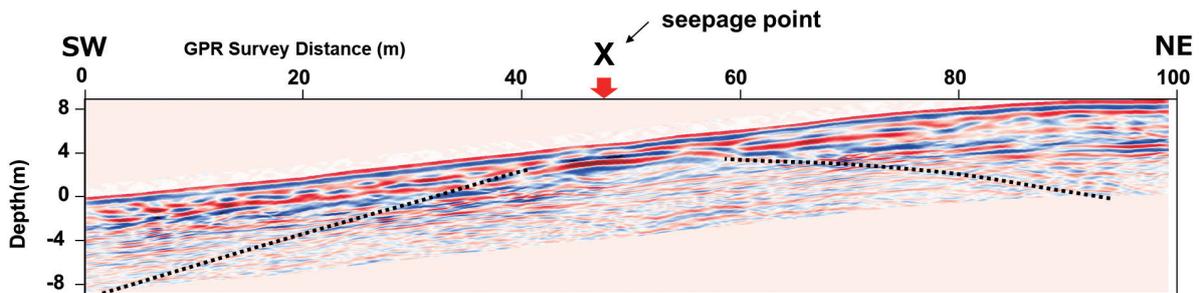


図 5 'X' 地点 (図 2) 付近における林道沿いの地中レーダー探査断面。

限り初めてである。これは、高精度メタンアナライザーの技術によって初めて可能となった観測結果である。

3.2 断層およびその周辺のメタン滲出確認

山形県の庄内平野と出羽丘陵の境界部には、東

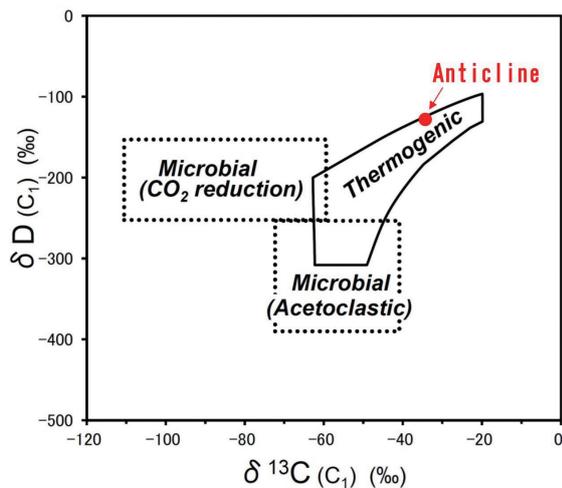


図6 同位体比分析結果の Schoell (1988) ダイアグラムへのプロット

から青沢断層群、酒田衝上断層群、庄内平野東縁断層帯が分布している。これらの断層群は、断層活動の前進による地形形成、震源断層調査、油・ガス田の探鉱などに関連して多くの調査や探査が実施されてきた（佐藤ほか，2010；石油公団，1994）。

本研究委員会では、これらの断層を横断する測線において、地表近くの大気中メタン濃度を測定した。測定には可搬型高精度メタン分析装置を車内に設置し、車外のチューブから吸気して時速 20～30 km/h で走行しながら連続測定を行う車載測定方式を採用した。その結果、南北に約 3 km 離れた 2 本の東西測線において、青沢断層が想定される地点で顕著なメタン濃度の上昇が確認された（図 7）。この値は、大気中バックグラウンドレベル（約 2 ppm）および装置の測定精度と比較して明らかに有意であった。往復測定でもほぼ同地点でメタン濃度の上昇が再現され、その再現性が確認された（図 8）。

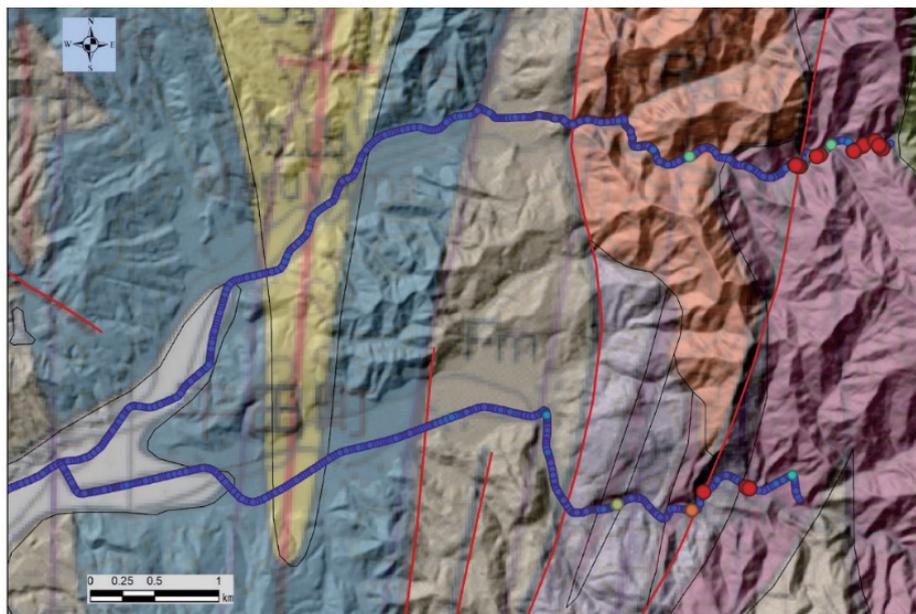


図7 調査領域および大気中メタンの車載測定結果 地質図はシームレス地質図の shp ファイル版（産総研）を使用。

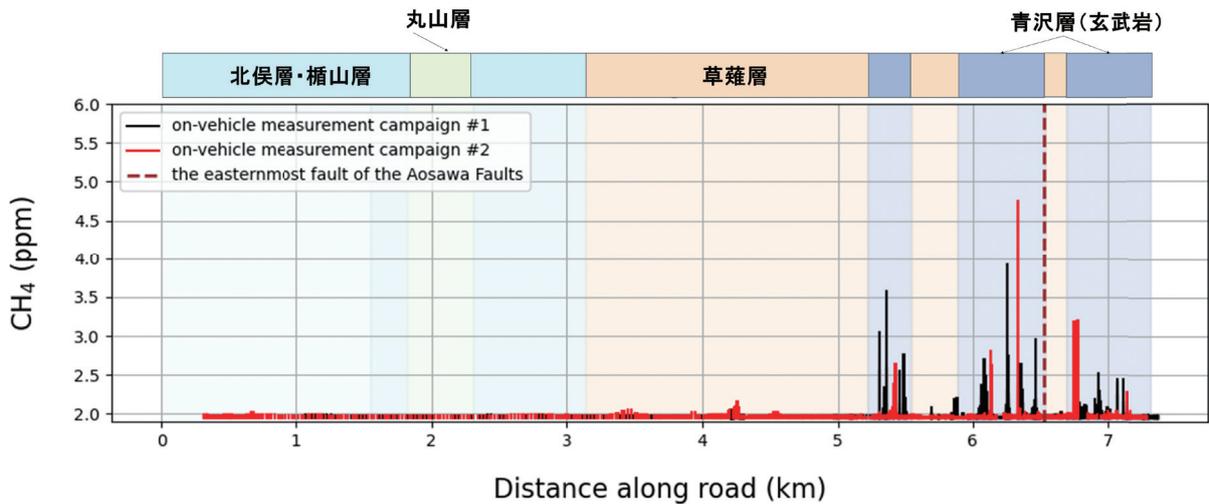


図8 メタン濃度分布と表層地質との関係 表層地質は、20万分の1地質図幅、酒田及び新庄（大沢ほか、1988）による。

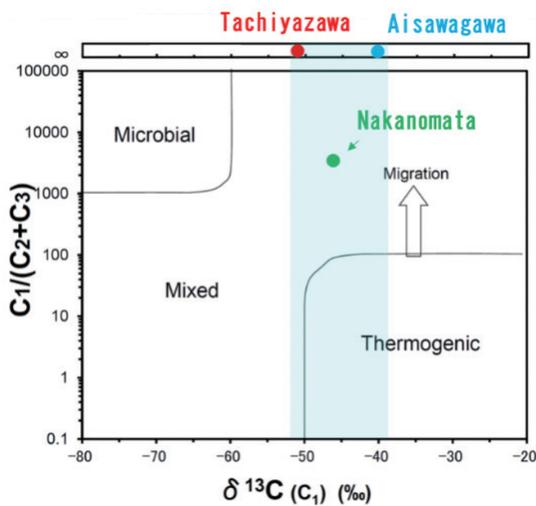


図9 メタン炭素同位体組成とガス組成 Bernard (1978)図上のプロット。ブタン(C3)を0%と仮定した。

著者らの知る限り、これまで青沢断層におけるメタン滲出を示す測定事例は報告されておらず、レーザー分光計技術を用いたことにより初めて検知が可能となった。アノマリは青沢断層近傍および青沢層玄武岩の分布域に集中する傾向が認められた(図8)。

測定は2023年および2024年の2回実施し、結果の再現性を確認した。2回目の測定では、相沢川、中野俣川および立谷沢川の3地点でガス試

料を採取し、地化学分析を行った(図7)。測定には、ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)が保有するPicarro社製G2201-i(Picarro Inc., 2017)を用いた。同装置は数ppmレベルのメタン濃度に対しても $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4)をリアルタイムで測定可能である。炭素同位体比は、全体で $-40 \sim -51\text{‰}$ の範囲を示し、メタン濃度が高い中野俣川ではエタン(C_2H_6)の存在も確認された。これらの結果をBernardプロット(図9)に示す。同図から、青沢断層周辺で滲出したメタンは熱分解起源、あるいは微生物起源メタンとの混合である可能性が示唆される。

以上の結果から、草薙層に相当する根源岩、青沢断層、およびそれに接する青沢層(玄武岩)内に発達した亀裂群が、一連の流体移動経路を構成していると解釈される(図10)。

今回の測定結果は、当該地域に分布する断層群のうち、青沢断層が地下深部のメタンソースと連結するガスマイグレーションパスとして機能していることを示すものであり、断層構造や周辺の石油システムとの関連について新たな視点を提供するものである。

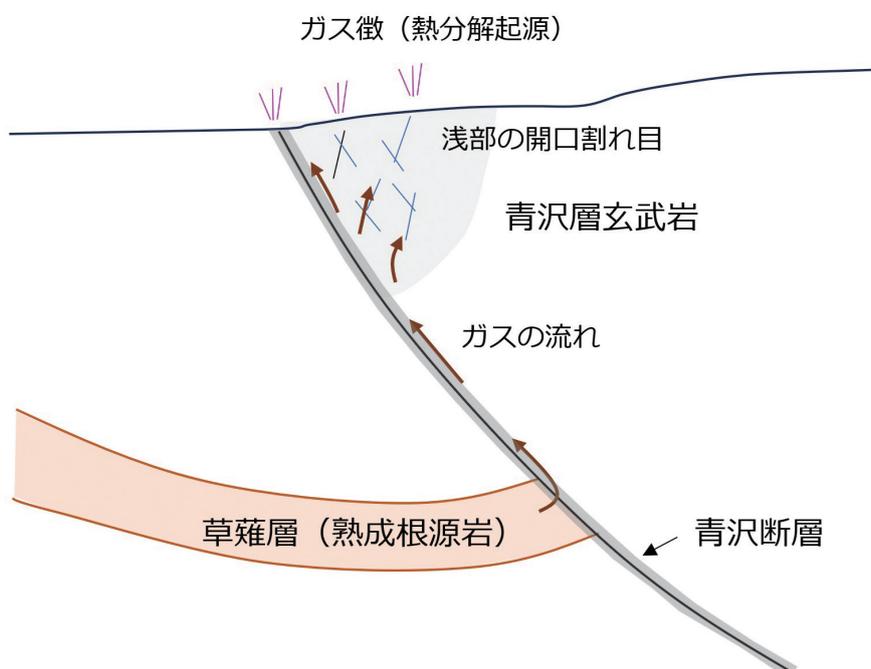


図 10 青沢断層周辺おメタン移行経路の概念

4. 測定手順のシステム化と研究委員会成果の発信

測定事例を重ねる中で、測定範囲を段階的に絞り込みつつ、系統のかつ効率的にメタン滲出箇所を抽出するための標準的な測定手順を整理した。その概要を図 11 に示す。

まず、第 1 段階の「車載測定」では、一般道や林道などを車で走行しながら大気中のメタン濃度を測定する。空間分解能は比較的粗いものの、短期間で広域を効率的に調査することができる。メタンアナライザーではリアルタイムに測定結果が得られるため、アノマリ（濃度上昇）が確認された箇所では、繰り返し同じルートを走行して再現性を確認することが可能である。車載測定により、測定対象区域を効果的に絞り込むことができる。

次の段階の「徒歩測定」では、測定装置を携帯しながら、アノマリが検出された箇所を詳細に調べる。地形や露頭地質を観察しながら、滲出箇所の特定を行う。

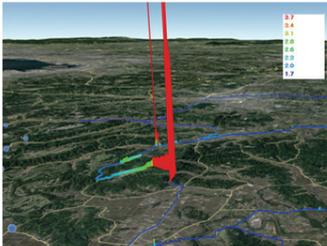
最終段階の「滲出箇所測定」では、メタン滲出が確認された地点の地表または表土を一部剥ぎ取り、直上の大気中メタン濃度を測定する。測定装置の排気口にテドラーバッグまたは金属シリンダーを接続してガス試料を採取する。採取した試料は地化学分析に供し、ガス組成および同位体比を測定してメタンの起源に関する情報を得る。また、チャンバーテストを実施し、滲出量の定量評価を行う。

このように、本研究委員会では、広域スクリーニングから局所観測、さらに地化学分析へと至る一連の調査手順を体系化し、前節で述べたような実際の現地測定への適用を通じて有効性を実証し

①車載測定

- 広域調査
- 時速20~40km/h
- 詳細調査箇所の選定

CRDS分析装置を車に積んで、
広範囲のデータを取得



②徒歩測定

- 詳細調査
- 露頭地質確認
- 滲出箇所の特定

CRDS分析装置を背負って、
林道や沢の中を歩いて測定



③滲出箇所測定

- 地質・滲出濃度確認
- 試料採取・ガスの起源
- フラックス測定

表土を剥ぎ、チャンバーを
設置して測定・試料採取



図 11 断層調査のための測定方法

た。

これらの成果は、深田地質研究所年報のほか、日本地球惑星科学連合（JpGU）、石油技術協会、および米国地球物理学連合（AGU）などの学会で発表し、国内外に広く発信してきた。

5. おわりに

メタンは無色透明無臭の気体であるが、大気および地下に普遍的に賦存している。本研究委員会では、大気中のメタン濃度分布のわずかな揺らぎから、地下深部と地表をつなぐ流動経路に関する情報が得られることを明らかにした。既往の地質調査や物理探査技術と組み合わせることで、地下構造や流体の挙動解明に大きく資するものと期待している。高精度メタン測定技術は現在でも高精度化、小型化、高性能化が進んでおり、

本研究委員会で得られた知見が、今後、地質、資源、環境、防災などさまざまな分野で活用されていくことを願うものである。

最後に、本研究委員会の委員長を快くお引き受けいただき、委員会活動をご指導いただいた東京大学・徳永朋祥教授に深甚の謝意を表す。また、委員会に参加いただき、積極的に活動していただいた各委員に深く感謝申し上げる。ローレンス・バークレー国立研究所（LBNL）の Sebastien Biraud 博士には、研究委員会立ち上げ時に Picarro 装置を貸与いただいたほか、アドバイザーとして終始、貴重な情報提供および助言を賜った。さらに、日本原子力研究開発機構殿にはメタンアナライザーを貸与いただき、同装置を用いたことにより、本研究委員会として多くの成果を上げることができた。ここに、これらの方々をはじめ、本研究委員会の活動に関わってくださっ

たすべての方々に、心より謝意を表す。

委員会成果発表リスト

[2019年]

1) 下茂道人, 丹羽正和, 天野健治, 徳永朋祥, 戸野倉賢一, 松岡俊文, セバスチャン・ピロード (2019): キャビティーリングダウン分光法を用いた大気中微量ガス測定による活断層調査. 深田地質研究所年報, 20, 45–54.

2) 下茂道人, 丹羽正和, 天野健治, 徳永朋祥, 戸野倉賢一, 松岡俊文, セバスチャン・ピロード (2019): 可搬型キャビティーリングダウン分光装置を用いた地表付近の極微量メタンガス濃度測定による活断層位置の特定: 阿寺断層での測定事例. 地球惑星科学連合 2019 年大会, SSS15-P11.

3) Michito Shimo, Masakazu Niwa, Kenji Amano, Tomochika Tokunaga, Kenichi Tonokura, Toshifumi Matsuoka and Sebastien C. Biraud (2019): Using precise trace gas measurements to investigate active fault: an example at the Atera Fault, Gifu Prefecture, Japan. AGU Fall Meeting 2019, A21L-2801, San Francisco, USA.

[2020年]

4) 下茂道人, 横井悟, 丹羽正和, 松岡俊文, 徳永朋祥 (2020): 大気中メタン濃度アノマリに基づく石油構造地質評価. 深田地質研究所年報, 21, 15–34.

[2021年]

5) 島田耕史, 後藤翠, 丹羽正和, 下茂道人 (2021): 和歌山県田辺市本宮町川湯温泉周辺の露頭の赤外線画像. 地質学雑誌, 127 (10).

6) 下茂道人, 丹羽正和, 宮川和也, 天野健治, 戸野倉賢一, 徳永朋祥 (2021): 大気中メタンの分布に基づく断層周辺のガス移行経路の推定. 深

田地質研究所年報, 22, 119–137.

7) 宮川和也, 下茂道人, 丹羽正和, 天野健治, 戸野倉賢一, 徳永朋祥 (2021): 大気環境中のメタンと二酸化炭素濃度変化の関係に着目した地下起源ガスの判別. 深田地質研究所年報, 22, 139–153.

[2022年]

8) 丹羽正和, 下茂道人, 島田耕史, 後藤翠 (2022): キャビティーリングダウン法による携帯型装置の車載測定に基づくメタン漏出の効率的な検出手法の検討. JAEA-Research 2022-004, 38p.

9) 下茂道人, 丹羽正和, 宮川和也, 安江健一, 戸野倉賢一, 徳永朋祥 (2022): 背斜軸周辺の大気中メタンアノマリについて. 深田地質研究所年報, 23, 21–34.

10) 下茂道人, 丹羽正和, 宮川和也, 戸野倉賢一, 徳永朋祥 (2022): 高精度メタン測定による断層・褶曲軸周辺のガス移動経路の特定. 日本地球惑星科学連合 2022 年大会 (JpGU2022).

11) 横井悟, 下茂道人, 宮川和也, 丹羽正和, 松岡俊文, 徳永朋祥 (2022): CRDS 微量ガス検知器の石油ガス探鉱への応用～予察的探鉱のすすめ. 石油技術協会春季講演会 (2022 年度).

12) Michito Shimo, Masakazu Niwa, Kazuya Miyakawa, Kenichi Tonokura, Tomochika Tokunaga (2022): Identification of gas migration pathways around faults and fold axes using high-precision methane measurement technology. JpGU 2022 (poster).

[2023年]

13) 横井悟, 下茂道人, 宮川和也, 丹羽正和, 松岡俊文, 徳永朋祥 (2023): CRDS 微量ガス検知器の石油ガス探鉱への応用 (その 2): 北海道幌延地域の石油地質的考察. 石油技術協会春季講演会 (2023 年度).

- 14) Michito Shimo, Masakazu Niwa, Kazuya Miyakawa, Kenichi Yasue, Tomochika Tokunaga, Kenichi Tonokura, Sebastien C. Biraud (2023): Identifying pathways around faults and anticlinal axes using precise trace gas measurements: a field survey example at Horonobe, Hokkaido, Japan. AGU Fall Meeting 2023, EP53C-1728, San Francisco, USA.
[2024年]
- 15) 横井悟, 下茂道人, 丹羽正和, 松岡俊文, 徳永朋祥 (2024): CRDS 微量ガス検知器の石油ガス探鉱への応用 (その3): 酒田・青沢断層におけるメタンガス徴の意義. 石油技術協会春季講演会 (2024年度).
- 16) 下茂道人, 丹羽正和, 横井悟, 八木浩司, 徳永朋祥 (2024): 青沢断層における大気中メタン濃度のアノマリについて. 日本地球惑星科学連合2024年大会 (JpGU2024).
- 17) 下茂道人 (2024): Methane-Sniffing (メタン検知) による断層調査の試み. 2024年度 深田地質研究所研究成果報告会, 2024年6月14日.
- 18) 下茂道人 (2024): 青沢断層はメタンガスの移動経路になっている? 第10回東北ジオパーク学術研究者会議話題提供, 2024年2月15日.
- 19) 下茂道人, 丹羽正和, 横井悟, 八木浩司, 徳永朋祥 (2025): メタンマイグレーションパスとしての青沢断層の役割: 一空間連続性とメタン起源についての考察一. 日本地球惑星科学連合2025年大会 (JpGU2025).
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Aeris Technologies (2019): MIRA-PicoMobile-LDS_191208_FINAL_quartz.pdf.
- 大沢穠・広島俊男・駒沢正夫・須田芳朗 (1988): 20万分の1地質図幅「新庄及び酒田」, 地質調査所.
- 佐藤比呂志・加藤直子 (2010): 北部本州背弧域の地殻構造と震源断層, 地質学雑誌, **116**, 592–601.
- 酒井利啓・松岡稔幸 (2015): 幌延地域を対象とした地表踏査および地形データにもとづく地質分布の推定, 日本原子力研究開発機構 研究開発報告書 JAEA-Research 2015-004, 109 pp.
- 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 シームレス地質情報研究グループ (2025): 20万分の1日本シームレス地質図® V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>.
- Schoell, M. (1988): Origin of natural gases in the Apulian basin in south Italy: A case history of mixing of gases of deep and shallow origin, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **52**, 145–169.
- 石油公団 (1994): 国内石油・天然ガス基礎調査 陸上基礎物理探査「鳥海山南麓地域」調査報告書, 46 pp.
- 動力炉・核燃料開発事業団 (1987): 貯蔵工学センター立地環境調査, PNC TJ1027 98–014.
- 長尾捨一 (1960): 5万分の1地質図幅「豊富」および同説明書, 北海道立地下資源調査所.
- Picarro, Inc. (2017): G2201-i Isotopic Analyzer, https://www.picarro.com/environmental/products/g2201i_isotopic_analyzer.
- Picarro Inc. (2021): GasScouter™ G4301

文献

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the

Analyzer Datasheet.

Bernard, B. B., Brooks, J. M. and Sackett, W. M.

(1978) : Light hydrocarbons in recent Texas continental shelf and slope sediments, *Journal of Geophysical Research*, **83**, 4053–4061.

黒澤英樹・丹羽正和・石丸恒存・島田耕史 (2010) :

断層ガス (水素・二酸化炭素・メタン) 原位置測定による断層破碎帯調査手法の検討 (データ集), JAEA-Data/Code 2010-036.