

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

下茂道人¹・丹羽正和²・宮川和也²・天野健治²・戸野倉賢一³・徳永朋祥³

¹ 深田地質研究所

² 日本原子力研究開発機構

³ 東京大学

Estimation of gas migration pathways around faults based on the distribution of atmospheric methane near ground surface

SHIMO Michito¹, NIWA Masakazu², MIYAKAWA Kazuya², AMANO Kenji²,
TONOKURA Kenichi³ and TOKUNAGA Tomochika³

¹ Fukada Geological Institute

² Japan Atomic Energy Agency

³ The University of Tokyo

要旨：著者らは、高精度ガス濃度測定による地下の流体移行経路を特定する技術の実用化に向けた研究の一環として、新第三紀の珪質岩が分布する北海道幌延町において、地表の大気中メタン濃度測定を実施した。幌延町が位置する天北盆地周辺は、東西方向の地殻応力により南北を軸とする褶曲構造が発達しており、褶曲軸とほぼ平行に大曲断層が同町を南北に縦断している。大曲断層周辺では、地表に油・ガス徴が確認されており、大正～昭和初期にかけて、油・ガス田開発を目的とした物理探鉱が実施され、いずれも商業規模ではないものの油・ガス田が発見された。このことより、大曲断層周辺には、地下の根源岩または貯留岩から、油・ガスが地表に到達する移行経路が存在している可能性が考えられる。本報では、徒歩測定による大気中ガス濃度測定結果を報告するとともに、ガス滲出箇所の分布や地質構造から想定される大曲断層周辺の地下流体の移行経路について述べる。

キーワード：断層、背斜、移行経路、メタン、徒歩測定、キャビティ・リングダウン分光法

Abstract: To develop a new approach to identify the fluid flow paths in the rock formation using high-precision gas concentration detection technology, we carried out the on-ground methane concentration measurement in the Horonobe area, northern Hokkaido, located in the Neogene siliceous rock formation. Horonobe is located at Tempoku basin, a range comprising a set of NW-SE trending folds formed by the tectonic stress in the E-W direction. The Omagari fault runs in the NW-SE direction through the area. Based on the findings of oil and gas seepage at the surface along the Omagari fault, the petroleum exploration survey was conducted from the Taisho era to the early Showa era, and several reservoirs were discovered, although not on a commercial scale. These records suggest the existence of the fluid migration pathways around the Omagari Fault to reach the ground surface from an underground source. In this paper, we report the results of on-foot measurement of methane and carbon dioxide concentrations using CRDS apparatus and depict the possible migration paths around the Omagari fault based on the distribution of gas seeps and geological and geophysical information reported in the existing literature.

Keywords: Faults, anticlines, migration paths, methane, walk measurements, cavity ring-down spectroscopy

1. はじめに

岩盤内においては、大小の亀裂が選択的な流体や物質の移行経路となることが知られている (NRC, 1996 ; Berkowitz, 2002 ; Neuman, 2005). このため、石油・天然ガスの産出や貯留層管理 (Nelson, 1985 ; van Golf-Racht, 1982), 地熱や温泉開発 (Mock et al., 1997 ; 西村, 2013), 二酸化炭素地下貯留 (Yarushina, 2018), 放射性廃棄物の地層処分におけるサイト選定や安全評価 (原子力発電環境整備機構, 2021) などにおいて、流体移行経路となる亀裂の分布や透過特性の評価が非常に重要である. 流体移行経路を把握するための手法としては、地質観察により亀裂の分布や幾何構造を明らかにする地質学的手法の他、ボーリング孔内において流量や濃度、化学組成などを測定・分析する地球化学・水理学的手法 (Ishii, 2018), 地震波や電磁波を用いた地球物理学的手法 (Day-Lewis, 2017), などが用いられてきた. これらの手法では、特に調査地域が広域にわたる場合、調査に用いる装置や観測網が大規模になるとともに、測定やデータ解析に多大の時間を要することが多いという課題があった. 一方、石油資源開発 (加藤ほか, 2009 ; Etiope, 2015) や温泉開発および地震・活断層調査 (King, 1978 ; Wakita et al., 1980 ; Sugisaki, 1987 ; Toutain and Baubron, 1999 ; Umeda and Ninomiya, 2009 ; Niwa et al., 2011 ; Koike et al., 2014) などでは、地表で採取したガスサンプルを用いてガス組成分析や同位体比分析などを行う地球化学探査がしばしば実施されてきた. しかし、分析に供するサンプル数に限りがあることや、測定結果が得られるまでに時間を要することから、調査地域の面的なガス濃度分布を把握することは困難である.

そこで著者らは、地球温暖化ガスの測定など

に用いられているキャビティーリングダウン分光法 (以下、CRDS 法) を用いた高精度微量ガス測定技術に着目し、同技術の断層や破碎帯の調査への適用性について研究を進めている. CRDS 法は、キャビティー (測定容器) の中にレーザー光を注入し、一対の高反射率ミラー間を多数回反射させた時にミラーから漏れ出す光の強度を測定し、その減衰率からキャビティー内のガス濃度を求めるもので、O'Keefe and Deacon (1988) により発明された技術である. CRDS 法は、計測分解能が高く (メタンの場合、数 ppb 以下)、応答時間が短い (同, 1 秒以下) という特徴を有する. 現在では、原位置測定に用いるためのバックパック式の測定装置が開発されており、可搬性も大幅に向上している. 測定対象気体は、メタン (CH_4), エタン (C_2H_6), 二酸化炭素 (CO_2), 硫化水素 (H_2S), 水蒸気 (H_2O) などである.

本調査法では、車載または徒歩により、大気中のガス濃度を連続的に測定し、大気中の微量ガス濃度のアノマリ (バックグラウンド値からの変化) をとらえることで、地下からのガス滲出点の分布を把握することを目的としている. 同手法は、ボーリング削孔やパイプを地中に打ち込むなどの作業やデータ解析などの事後処理を必要とせず、ガス滲出点の分布をリアルタイムに把握できる利点を有する. このため、調査地域における地下から地表につながる流体移行経路の情報を簡便かつ短時間に取得することが可能となり、資源探査や地層処分のサイト選定等における調査の効率化や信頼性向上への貢献が期待される.

著者らはこれまで、岐阜県の阿寺断層や山形県酒田市の油・ガス田地域を対象として、CRDS 法を用いた大気中微量ガス濃度測定を実施しており、断層を通じたメタン滲出を示唆するアノマリを複数箇所を確認した (下茂ほか, 2019, 2020).

今回、本調査法の実用化に向けたデータ蓄積の一環として、堆積岩地域における地下岩盤内の流体移行経路の把握への適用性を確認する目的で、北海道幌延町周辺を対象とした車載および徒歩による大気中ガス濃度測定を実施した。本報では、そのうち、断層、背斜軸、地層境界などを跨ぐ林道や沢沿いで実施した徒歩測定の結果を報告する。また、得られた測定結果から想定される断層周辺のガス移行経路について考察する。

2. 測定概要

2.1 調査地域

大気中メタン測定は、北海道北部の天北盆地に位置する幌延町で実施した（図1）。当該地域には、後述するように新第三紀の珪質岩が分布しており、東西方向に作用する地殻応力の影響により褶曲構造が発達している。幌延町内には、北北

西―南南東方向に走向をもつ大曲断層が延びており、その東側には断層とほぼ平行な背斜軸が分布している。今回、徒歩測定を実施したのは、以下の3か所である（図2）。

- ①上幌延北進線林道および北進2号線の沢（大曲断層および背斜軸を横断する測線）
- ②上幌1号線および7号線の沢（大曲断層を横断する測線）
- ③ペンケオートマップ川および諏訪沢林道（大曲断層を横断する測線）

2.2 測定手法

CRDS法では、レーザーをミラー間で多重反射させることで、実質的な気体コラム長が数10 kmに延びるため、高分解能の測定が可能となる。原理の詳細については、O'Keefe and Deacon (1988), 戸野倉 (2012), 下茂ほか (2019) を参照されたい。

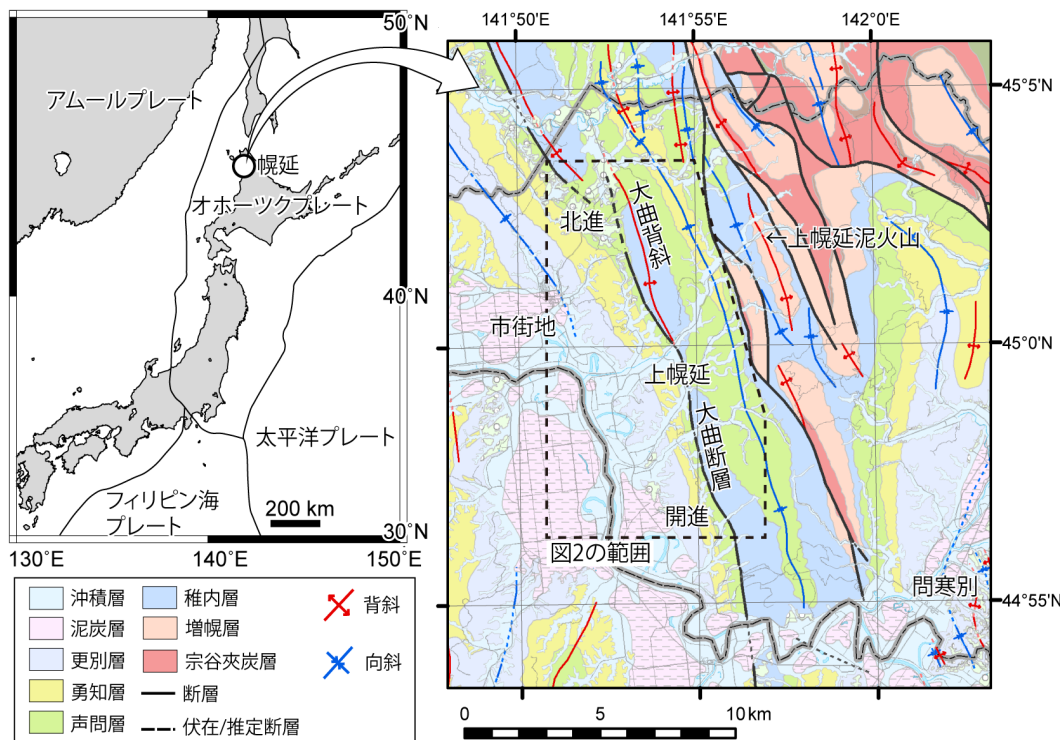


図1 幌延町の位置および地質概要。地質情報は酒井・松岡（2015）に基づく。

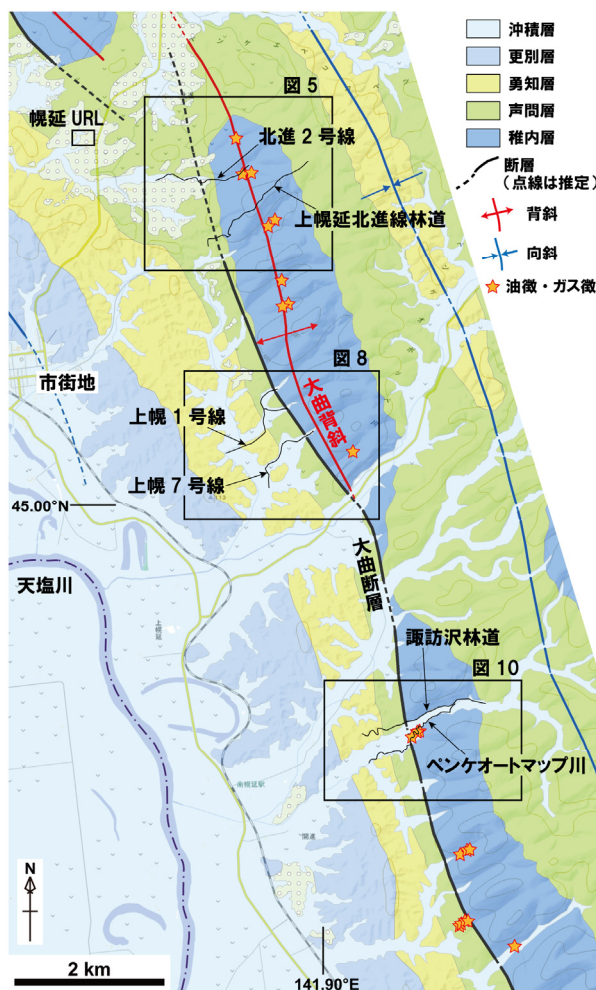


図2 徒歩測定実施ルート. 油・ガス徴の位置は長尾（1960）および動力炉・核燃料開発事業団（1987）による。ベースマップは、地理院地図に酒井・松岡（2015）の地質情報を重ね合わせたものであり、ArcGIS を用いて描画した。



図3 Picarro GasScouter™ G4301.

表1 G4301 の仕様.

機種	G4301	
測定ガス	CH ₄	CO ₂
精度（測定間隔）	3 ppb (5s)	0.4ppm (5s)
	0.3 ppb (300s)	0.04ppm (300s)
ドリフト（24時間）	1ppb	0.5ppm
測定レンジ	0-800ppm	0-3%
レスポンス時間	5s	5s
測定方式	CRDS (Cavity Ring-Down Spectroscopy)	
重量	11.3kg	
温度条件	10℃～45℃	

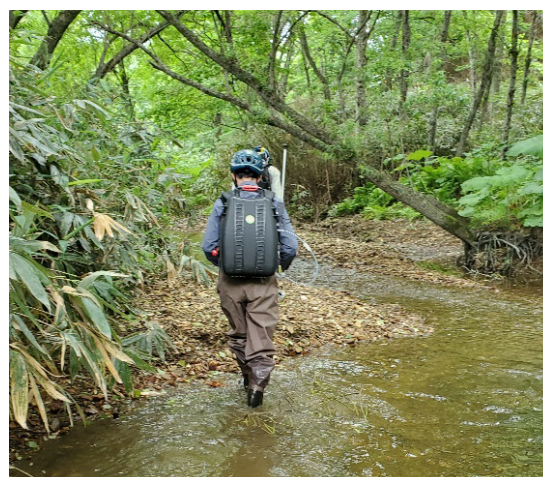


図4 徒歩測定の様子.

近年、装置の高精度化および小型化が進み、可搬型の測定装置が市販されている。今回の測定には、メタンおよび二酸化炭素濃度が測定できる Picarro 社の可搬型装置（Picarro GasScouter™ G4301）を用いた。装置の外観を図3に、仕様を表1に示す。

徒歩測定では、装置を背負った状態で、手に持った吸気チューブの先端が地表 30～50 cm 程度の高さになるように保持し、大気を連続吸引することによりガス濃度を連続測定した（図4）。ガス濃度の情報は、装置と Wi-fi 接続した、測定参加者が持つスマートフォンやタブレット上に数値およびグラフとしてリアルタイムに表示される。

測定位置は、装置に付属した GPS により、測定値とともに記録され、測定完了後に地図上に測定ルート上の濃度分布をプロットすることができる。

2.3 測定工程

幌延町での地表ガス濃度測定は、下記の 3 回にわたり実施した。

第 1 回目：2020 年 10 月 15 日～10 月 19 日

第 2 回目：2021 年 6 月 29 日～7 月 3 日

第 3 回目：2021 年 8 月 7 日～8 月 11 日

測定は、車載および徒歩の 2 種類で実施した。再現性確認のため、同ルートを複数回測定した。本報では徒歩測定の結果を中心に示す。

3. 調査地域の地質概要

幌延町の地質は、白亜系が露出する東部の天塩山地を除き、大半が新第三系～第四系からなる。新第三系～第四系は南北走向の軸を持つ背斜・向斜を繰り返しているが、これらの褶曲構造は、鮮新世以降に顕著となった東西圧縮の構造運動により、東から順次、褶曲構造が形成されたと考えられている（小椋・掃部，1992；岡，1999）。この東西圧縮の構造運動に伴い、南北走向の複数の断層やリニアメントも分布する（長尾，1960；岡，1985）。本調査地域には、大曲断層と大曲背斜（長尾，1960）が分布している（図 2）。大曲断層は、試錐調査と物理探査の結果から、東側隆起の逆断層と解釈されている（小椋・掃部，1992；石油公団，1995）。また、日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター（図 2 の幌延 URL）の近傍において、大曲断層は地表部でオーバーステップしていると考えられている（石井ほか，2006）。大曲断層の地表露頭の調査からは、本断層は幅約 120 m 程度のダメージゾーン（割れ目

が密に発達する領域）を伴うことが示されている（安江・石井，2005；石井ほか，2006）。

調査地域の新第三系～第四系は下位より、稚内層、声間層、勇知層、更別層からなる（福沢ほか，1992；図 2）。稚内層および声間層は、ともに珪質泥岩を主体とする。福沢（1985）は、詳細な岩相層序学的検討に基づき、層理の明瞭な珪質タービタイトを主体とする地層を稚内層、細～巨礫サイズの円礫が点在する無層理塊状の珪藻質泥岩を主体とする地層を声間層としている。本調査地域では、下位の稚内層は続成作用による珪藻化石の溶解・消失に伴ってオパール CT 化した硬質泥岩を主体とし、上位の声間層はオパール A として保持された珪藻質泥岩を主体とする傾向がある（岡・五十嵐，1993）。

勇知層は主に塊状の極細粒～細粒砂岩からなり、一部で泥質極細粒砂岩を伴う。上位に向かい粗粒化し、ガラス質火山灰層や細～中礫層、亜炭を挟むところも認められる（嵯峨山，2003）。また、しばしば生物擾乱を受けている（岡・五十嵐，1993）。本層は、層相および貝化石構成に基づき、浅海成の堆積物とされている（岡・五十嵐，1997）。更別層は、浅海成の勇知層に続いて堆積した内湾～ラグーンの堆積物であり、礫・砂礫・砂・泥・亜炭層の互層からなる（岡・五十嵐，1993）。層相および貝化石構成に基づき、本層の下部は浅海～ラグーン、上部はラグーン～河川の堆積環境が推測されている（岡・五十嵐，1997）。

幌延町を含む北海道天北地域は、大正から昭和の初期にかけて、地表の油・ガス徴をもとに探鉱が行われ、深度 1,000 m 以浅の稚内層～増幌層の砂岩を対象に増幌油田や豊富ガス田などの小規模油・ガス田が開発された地域である（石油公団，1995）。本地域で行われたこれまでの地質調査により、大曲断層および大曲断層周辺の背斜軸付近

で油・ガス徴が確認されている（長尾，1960；動力炉・核燃料開発事業団，1987；高畑ほか，2004；阿部ほか，2009）。一方，基礎試錐「天北」の調査からは，稚内層・声間層は未熟成帯に区分され，油・ガスの生成はできない地層とされている（石油公団，1995）。そのため，大曲断層および大曲断層周辺で認められる油・ガス徴は，稚内層より下位の根源岩層で生成した油・ガスが，断層・亀裂を移行経路として地表まで上昇してきたものである可能性がある。また，阿部ほか（2009）によって取りまとめられている，日本原子力研究開発機構による浅層ボーリング孔でのガス測定においても，一部で高濃度のメタンおよび二酸化炭素が検出されているが，ガスの起源や，大曲断層などのガス移行経路となり得る地下地質構造との関係については，未だ不明な点が多い。

4. 測定結果

4.1 大気中メタン濃度のバックグラウンド

各測定日について，2 ppm 未満の値の平均 $\pm 2\sigma$ として求めた大気中メタン濃度のバックグラウンドは，表2の通りとなった。この結果を踏まえ，1.97 ppm 以上を有意なメタンアノマリと見なし，メタン濃度分布を描画した。なお，徒歩測定を行った日の気象状況（「豊富」の気象庁アメダスデータ）は，表3の通りであった。

4.2 上幌延北進線林道および北進2号線の沢

大曲背斜を横断するルートとして，尾根沿いの上幌延北進線林道（7月1日と8月8日）と沢沿いの北進2号線（8月7日）の2ルートで測定を行った（図5）。上幌延北進線林道では，両日

表2 メタン濃度のバックグラウンド（2 ppm 未満の値の平均 $\pm 2\sigma$ ）

測定日	測定場所	バックグラウンド
6月30日	上幌1号線および7号線の沢	1.911 $\pm$ 0.031 ppm
7月1日	上幌延北進線林道	1.905 $\pm$ 0.024 ppm
7月2日	ペンケオートマップ川および諏訪沢林道	1.911 $\pm$ 0.051 ppm
8月7日	北進2号線の沢	1.869 $\pm$ 0.097 ppm
8月8日	上幌延北進線林道	1.900 $\pm$ 0.039 ppm

表3 測定日の気象状況（「豊富」の気象庁アメダスデータ）

測定日		平均気温（℃）	平均風速（m/s）	風向	降水量（mm）
6月30日	午前	16.8	4.3	東	0
	午後	17.5	3.6	東	0
7月1日	午前	16.5	3.0	東	0
	午後	17.2	2.7	東	0
7月2日	午前	18.9	2.2	東～東南東	0.5
	午後	21.4	3.1	東	0
8月7日	午前	28.8	2.3	南西	0
	午後	29.8	2.8	西～北～東	0
8月8日	午前	16.1	5.6	東	2.5
	午後	15.7	6.3	東	0.5

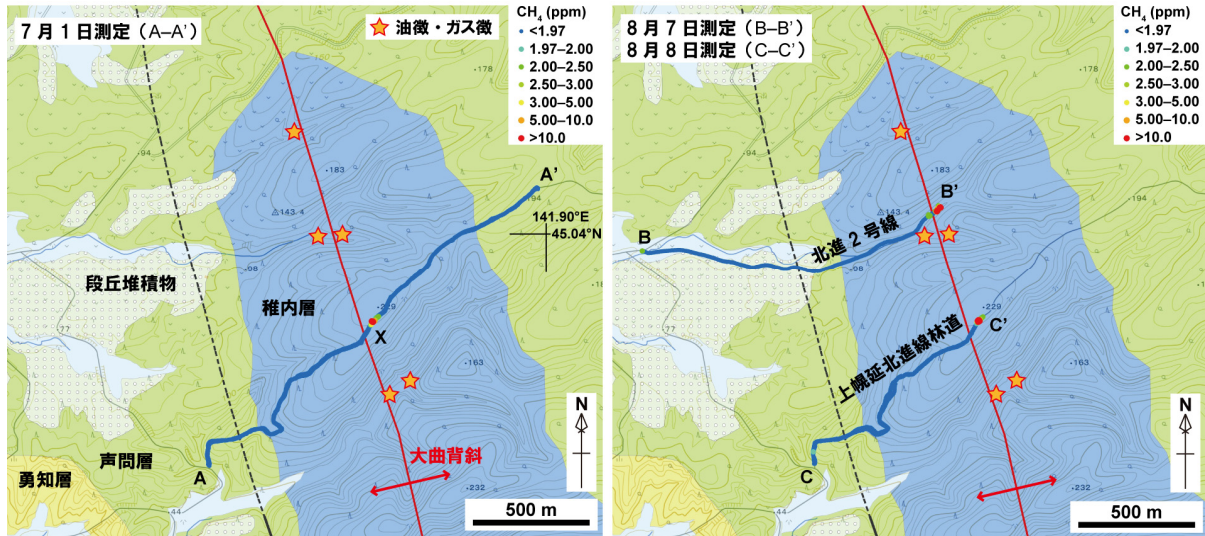


図 5 幌延北進線林道および北進 2 号線の沢での測定結果. 油・ガス徴の位置は長尾 (1960) による. ベースマップは, 地理院地図に酒井・松岡 (2015) の地質情報を重ね合わせたものであり, ArcGIS を用いて描画した. 地質図の凡例は図 1 参照.

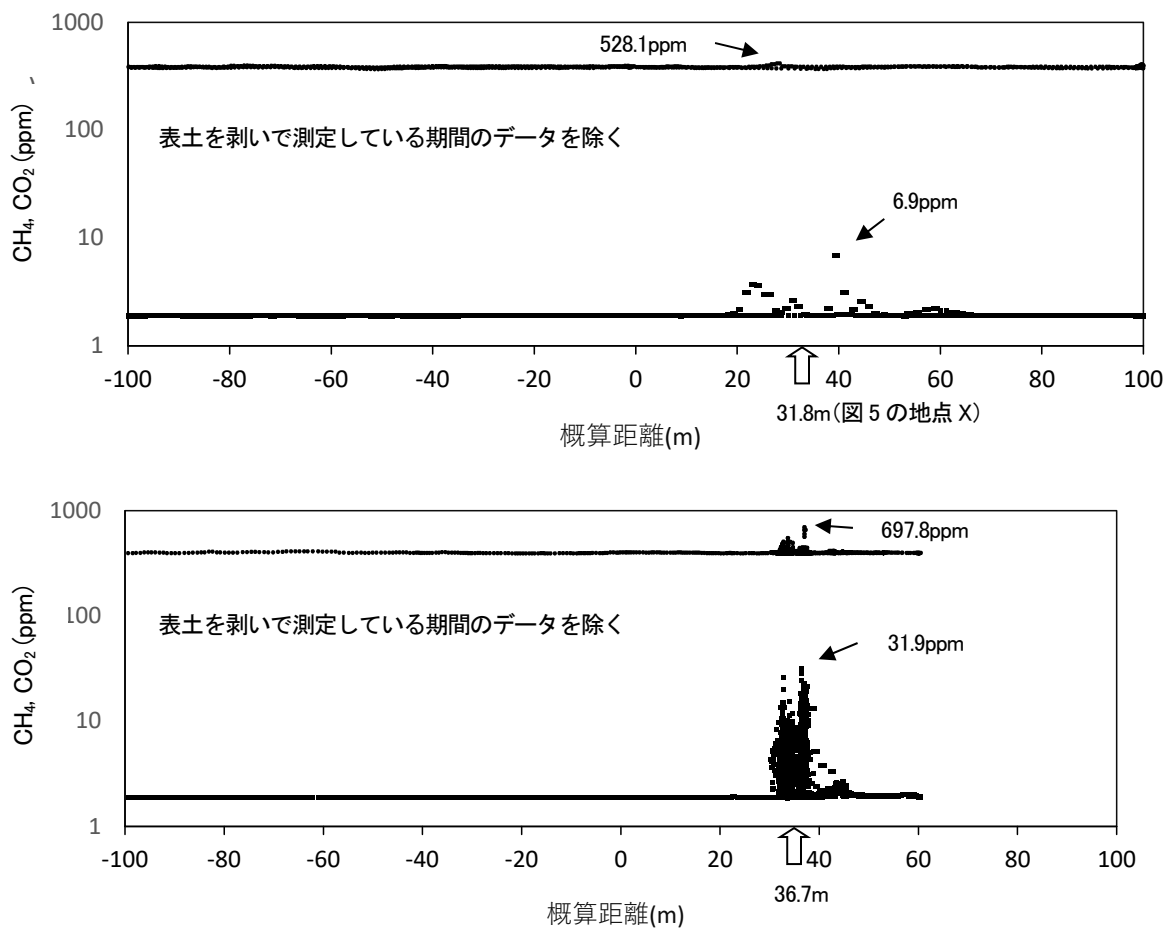


図 6 上幌延北進線林道の太曲背斜軸を横断する徒歩測定におけるメタンと二酸化炭素濃度のプロファイル. 図の横軸は想定される背斜軸からの概算距離を示す. $\uparrow$ は, 表土を剥いで高濃度のメタンを検知した位置を示す. 上段は 7 月 1 日, 下段は 8 月 8 日の測定結果である.



図7 上幌延北進線林道の地点X(図5参照)で地面の表土をスコップで剥いてインレットチューブを近づけている様子。8月8日の測定時に撮影。350 ppmに達する高濃度のメタンが検知された。

とも林道沿いを往復することで測定した。北進2号線では、片道の測定となった。なお、北進2号線の犬曲背斜軸上には油・ガス徴の存在が知られているが(長尾, 1960), 植生が激しいことにより、背斜軸より東を歩いて測定することはできなかった。

測定の結果、いずれの日の測定においても、犬曲背斜の背斜軸付近において、明瞭なメタンアノマリが検知された。図6に、上幌延北進線林道での測定結果を示す。想定される背斜軸の東側約35 mの位置を中心に、幅約20~50 mの範囲で大気中メタン濃度が上昇した(図6)。メタン濃度の最大値は、6.9ppm(7月1日)および31.9 ppm(8月8日)であった。北進2号線の測定では、背斜軸付近で最大28.6 ppmのメタンを検知した。高濃度のメタンが検知された箇所では、二酸化炭素濃度の上昇も認められた(図6)。

上幌延北進線林道沿いの犬曲背斜軸上の高濃度部では、スコップで地面の表土を5 cmほど剥

いてインレットチューブを近づけると、7月1日・8月8日ともに、250~350 ppmの高濃度のメタンが検知された(図6および図7)。そのため、この場所ではG4301のポンプの吸引を利用して、G4301のOutletとアルミニウムバックを接続することにより、ガス試料の採取を行った。採取したガス試料の地化学分析結果(JAPEX技術研究所で実施)を表4に示す。

なお、調査地域西部では犬曲断層の北方への延長が推定されているが(図5の黒点線)、その直上ではメタンアノマリは認められなかった。ただし、推定断層の直上では段丘堆積物が被覆し、かつ鉄塔の設置のため人工的な盛り土がなされていたため、地下に伏在する断層に沿ったメタンの移行があったとしても、地表からの観測では検知できなかった可能性がある。

4.3 上幌1号線および7号線の沢

上幌1号線および7号線の沢では、6月30日に測定を行った(図8)。測定はいずれも川沿いのルートとなるが、上幌7号線のA-A'区間については、川の中は植生が激しく歩けなかったため、川に沿った草地沿いを主に測定した。測定結果を、図9に示す。上幌1号線のB-B'区間については、主に川の中を歩いて測定した。A-A'区間では、地点a, b, c, A'でバックグラウンドを有意に超えるメタンアノマリが検知されたが、これらの地点はいずれも、ぬかるみを通過した地点に相当する。中でも地点A'では、50 ppm以上の高濃度のメタンが検出されたが、周囲はぬかるみが見られるだけで岩盤の露頭などは無く、犬曲断層や犬曲背斜との関係は不明である。B-B'区間では、声間層/勇知層境界付近に位置する地点B''を通過する川沿いにおいて、最大37.3 ppmの高濃度のメタンが検出された。地点B''周辺では地表の性状(ぬ

表 4 ガス試料の地化学分析結果

試料名	ガス組成分析値 (vol, %)					$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	δD (‰)
	O_2	N_2	C_1^*	$\text{C}_2^*, \text{C}_3^*$	CO_2	C_1^*	C_1^*
大曲背斜 (上幌延北進線林道)	21.17	78.71	0.028	N/D	0.10	-31.9	N/D
上幌延泥火山 (2020/10/18 採取)	21.00	78.61	0.336	N/D	0.06	-44.0	-177

* C_1 : CH_4 , C_2 : C_2H_6 , C_3 : C_3H_8



図 8 上幌 1 号線および 7 号線の沢での測定結果. 電力中央研究所 (2012) によるコントロールボーリングの孔口および軌跡を合わせて示した. 白四角は安江・石井 (2005) で報告された大曲断層の露頭位置を示す. 油徴の位置は長尾 (1960) による. ペースマップは, 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. 地質図の凡例は図 1 参照.

かるみの有無など) に関係なく高濃度のメタンが連続して検出されており, 地下からのメタンの強い放出源となっている可能性が高い. なお, 上幌 1 号線および 7 号線の両方とも, 植生が激しいことにより, 稚内層分布域の大曲背斜軸を横断する測定はできなかった.

4.4 ペンケオートマップ川および諏訪沢林道

ペンケオートマップ川沿い (図 10 の A-A' 区間) で 7 月 2 日に実施した徒歩測定の結果, 複数の地点でメタンアノマリが検出された. 特に, 勇

知層/声問層境界付近に位置する地点 A' の周辺では, 顕著に高濃度 (最大 13.6 ppm) のメタンが連続的に検知された (図 11). 地点 A 近くで認められるメタンアノマリは, めかるみの分布域に相当する. 大曲断層通過位置とされている声問層/稚内層境界から稚内層分布域にかけての複数地点においてもメタンアノマリが認められ, そのうちの一部は, 岩盤 (稚内層泥岩) の割れ目からの放出の可能性のある地点も存在する (図 10 の地点 a, 図 12). 一方, 諏訪沢林道沿いでは, メタンアノマリは全く認められなかった.

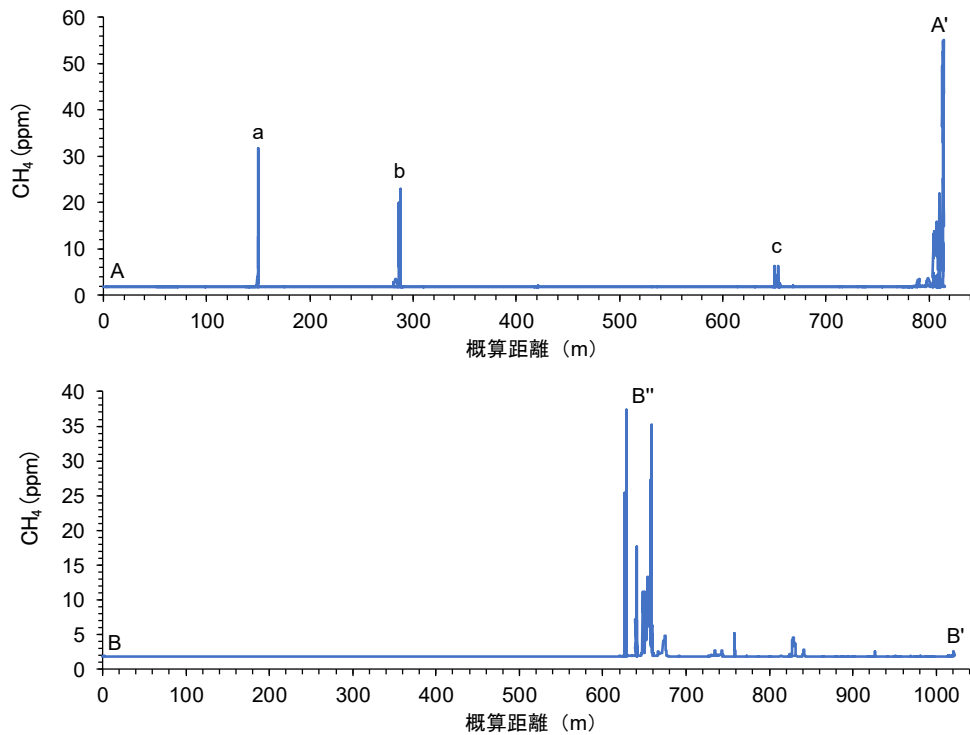


図9 上幌1号線および7号線の沢の測定ルート(図8のA-A'およびB-B'区間)におけるメタン濃度プロファイル。a, b, c, B''の位置は図8参照。

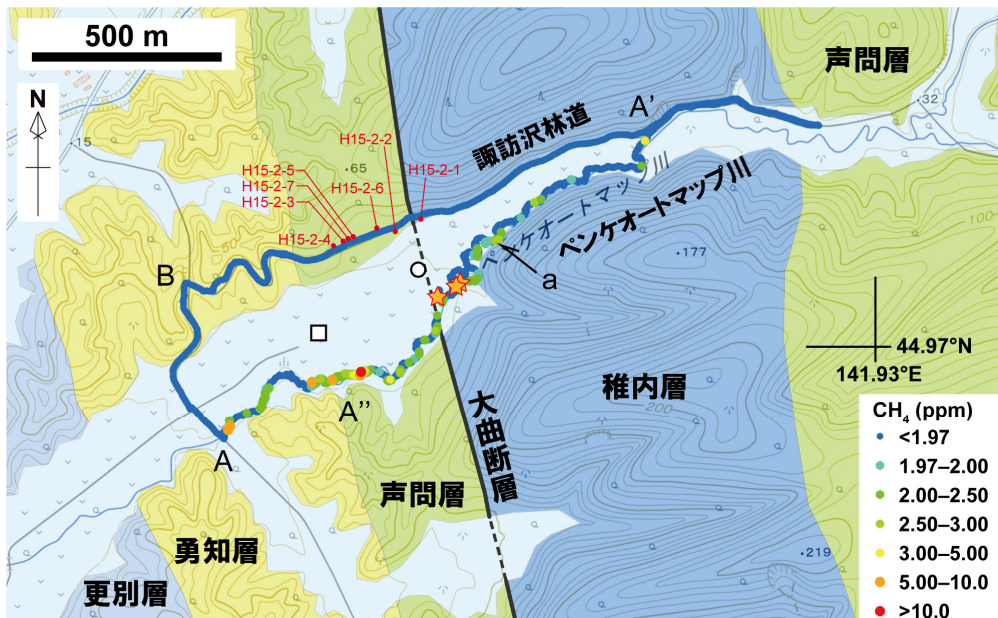


図10 ペンケオートマップ川および諏訪沢林道での測定結果。ボーリング跡および泥部の位置を白丸および白四角で示した。星印は動力炉・核燃料開発事業団(1987)で報告されている油徴の位置を示す。H15-2-1~7は阿部ほか(2009)による浅層ボーリングの位置を示す。ベースマップは、地理院地図に酒井・松岡(2015)の地質情報を重ね合わせたものであり、ArcGISを用いて描画した。地質図の凡例は図1参照。

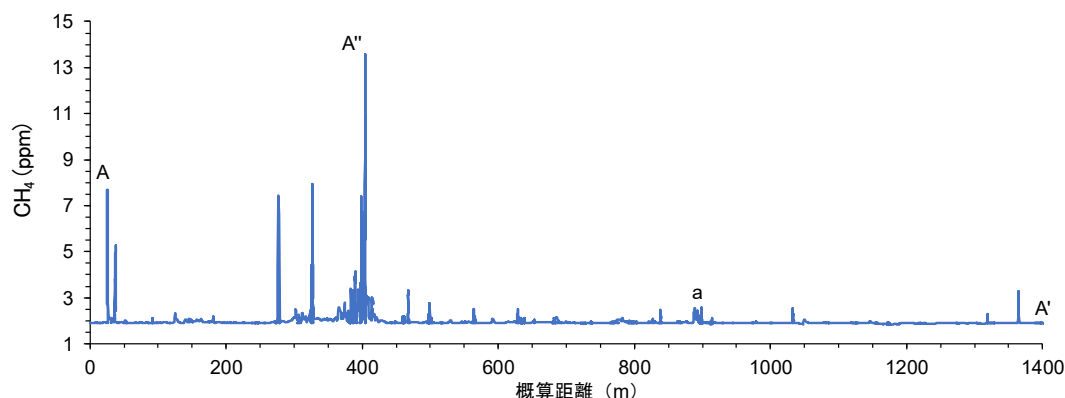


図 11 ペンケオートマップ川沿いでの測定（図 10 の A-A' 区間）におけるメタン濃度プロファイル。A''および a の位置は図 10 参照。



図 12 ペンケオートマップ川沿いでメタンアノマリが検出された地点の写真。（左）地点 A''近傍。勇知層砂岩中に発達する空隙を伴う割れ目（白矢印）から高濃度のメタンが検知された。（右）地点 a の稚内層泥岩中の割れ目から高濃度のメタンが検知された。

なお、ペンケオートマップ川沿いでは動力炉・核燃料開発事業団（1987）により油徴の存在が報告されているが、本調査ではそれに相当するものを見つけることはできなかった。これらとは別に、ペンケオートマップ川の北側の牧草地の中に、ボーリング跡（過去の石油探査試掘坑井；北海道鉱業振興委員会，1968）および泥部（泥がむき出しになって草が生えていないスポット状の部分）の存在が知られており（図 10，図 13），地化学分析のためのガスサンプリングを 8 月 9 日に行った。

これらの場所で G4301 による測定を行うと、ボーリング跡で最大 860 ppm，泥部で最大 387 ppm の非常に高濃度のメタンが検知され，二酸化炭素濃度も 1000 ppm 以上に大きく上昇した。

5. 考察

今回実施した徒歩測定結果に基づき，大曲背斜軸，大曲断層周辺，大曲断層より西側の勇知層／声間層境界付近，の各エリアにおけるメタン濃



図 13 ペンケオートマップ川北側の牧草地にあるボーリング跡および泥部。(左) ボーリング跡 (図 10 の○)。口元から塩分濃度の高い水とガスの湧出を確認した。(右) 泥部 (図 10 の口)。大きさ約 1.5m×2.5m、中央左の水たまりから間歇的なガス湧出を確認した。

度分布の特徴を整理する。また、過去に実施されたコントロールボーリングによる調査や反射法探査の結果から推定された地下の地質構造調査結果と今回の測定で得られた地表メタン濃度分布との比較から、メタンの移行経路となり得る地質構造について考察する。

5.1 大曲背斜軸直上のメタン濃度分布

上幌延北進線林道および北進 2 号線で実施した徒歩測定で得られた大曲背斜軸直上のメタンアノマリ (図 5) は、表 2 に示したバックグラウンドの変動幅と比較して明らかに有意である。メタン濃度が上昇した区間の外側では、東西方向に少なくとも数 100 m の区間にわたり、大気中メタン濃度がバックグラウンド値を示しており、メタン濃度の上昇は、上記区間に限定されていた。大気中メタン濃度が上昇した区間において、表土を剥いで測定した地中ガスの濃度は 250 ppm 以上に達し、地中に高濃度のメタンが存在することが確認された。大気中ガス濃度のアノマリは、毎回確認されたことから、背斜軸付近で、常時、同一箇所からガス湧出が生じていると考えられる。大曲背斜ではこれまで、沢部において油・ガス徴の

報告はあったが、尾根部で見つかった事例の報告はなく、今回、尾根部においてもガス湧出が確認された。

大曲背斜軸上のメタン高濃度部で採取したガスには、大気より濃い濃度の二酸化炭素が含まれており (表 4)、G4301 の測定でも検知された二酸化炭素の上昇が、湧出ガスの影響であることを裏付けている。炭化水素ガスについては、メタンより重い成分は、検出限界以下であった。メタンの炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は、 -31.9‰ であり、熱分解起源であることを示唆する (Whiticar, 1999)。このような重いメタンの炭素同位体比は、増幌層以深で確認されており (石油公団, 1995)、稚内層で生成されるメタンは、生物分解起源である (荒巻ほか, 2015) ことから、背斜軸に湧出しているガスは、より深部の根源岩で生成された可能性がある。著者らは、2020 年 10 月 18 日の測定時に、今回の測定箇所の東方に約 4 km 離れたところにある松尾背斜軸上の小規模泥火山 (上幌延泥火山, Miyakawa, et al., 2013) において、湧出ガスの採取および地化学測定を実施した。同結果を、表 4 に合わせて示した。泥火山のメタン濃度は、大曲背斜軸で採取したガスより 1 オーダー高

いものの、炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ および水素同位体比 δD は、熱分解起源（一部で生物分解の影響を二次的に受けた可能性もある）を示唆する結果が得られた。

以上から、今回の測定により、大曲背斜軸の尾根部において、限定された箇所から、熱分解起源のガスが定常的に滲出している可能性が高いことが確認された。

5.2 大曲断層周辺のメタン濃度分布

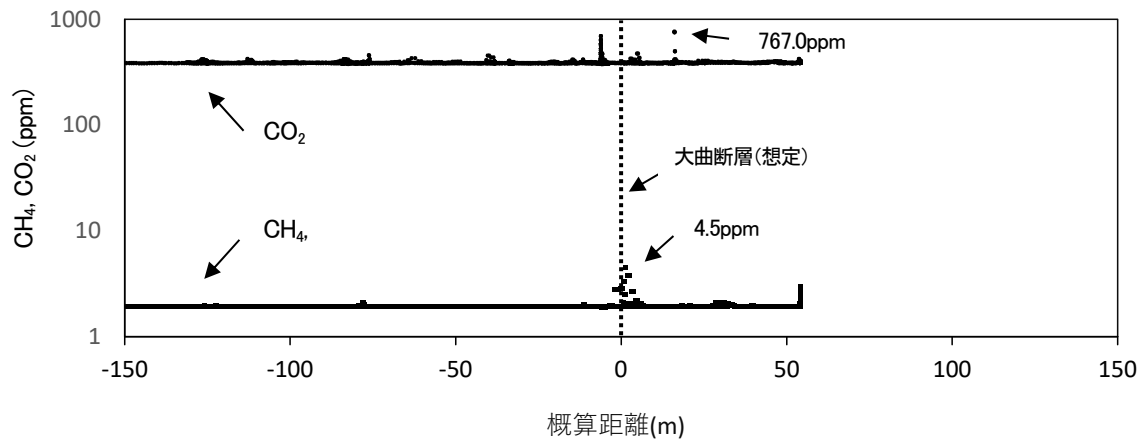
図 14 に、上幌 1 号線および 7 号線の沢およびペンケオートマップ川における大曲断層周辺のメタン濃度プロファイルを示す。横軸は、地質図上で想定された断層位置からの概算距離である。同図から、各ルートとも大曲断層直上においては顕著なメタン濃度上昇は見られないものの、断層の両側幅約 150 m の範囲に 2~7 ppm 程度のメタン濃度のアノマリがスパイク状に分布する。濃度上昇は小さいものの、表 1 に示した装置の測定精度および表 2 に示したバックグラウンドの変動幅からすると明らかに有意である。アノマリは、約 20~50 m の間隔を置いて分布しており、地下に互いに独立した移行経路が存在していることを示唆している。背斜軸と比較して、メタン濃度上昇が小さいことから、移行経路の透過性が背斜軸付近の移行経路と比較して低い可能性がある。なお、上幌 7 号線の沢において、大曲断層の東側約 100 m の位置で確認された 55.1 ppm のメタンアノマリは、沢の上流に位置する大曲背斜軸上からのメタン滲出の可能性も考えられる（図 8）。二酸化炭素濃度は、メタン濃度にピークが見られた区間で上昇する傾向が見られるものの、それ以外でも上昇している区間が認められる。測定ルート沿いには、ぬかるみや植生が分布しており、これらの影響を受けた可能性がある。ガスの起源について

は、今後、ガス試料を採取し地化学分析を行うなどにより検討することが必要である。

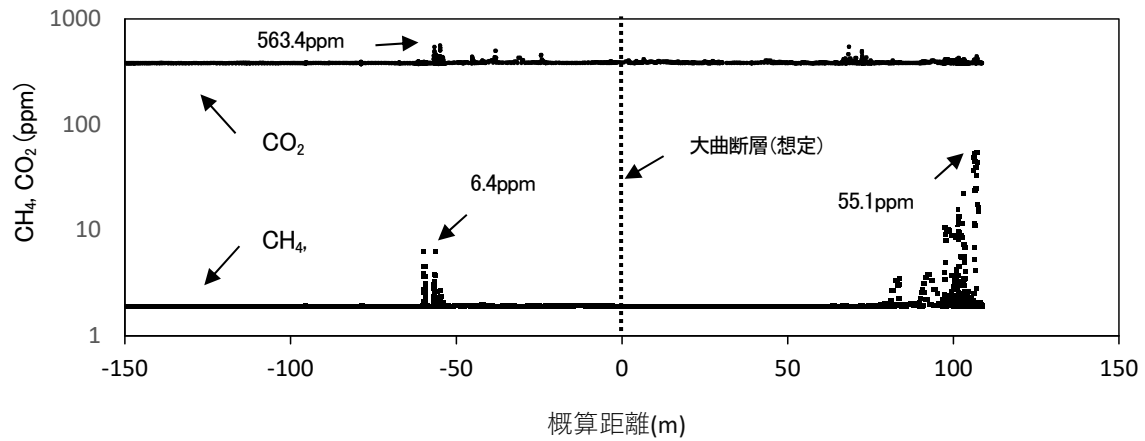
本調査では、ペンケオートマップ川沿いの大曲断層近傍で動力炉・核燃料開発事業団（1987）により報告されている油徴を見出すことができなかったが、ペンケオートマップ川北側の大曲断層のほぼ直上に位置するボーリング跡（図 10 の○）からは、前述のように最大 860 ppm の高濃度メタンが検知されることから、大曲断層がガスの移行経路と関連している可能性は非常に高いと考えられる。

5.3 勇知層／声問層境界周辺のメタン濃度分布

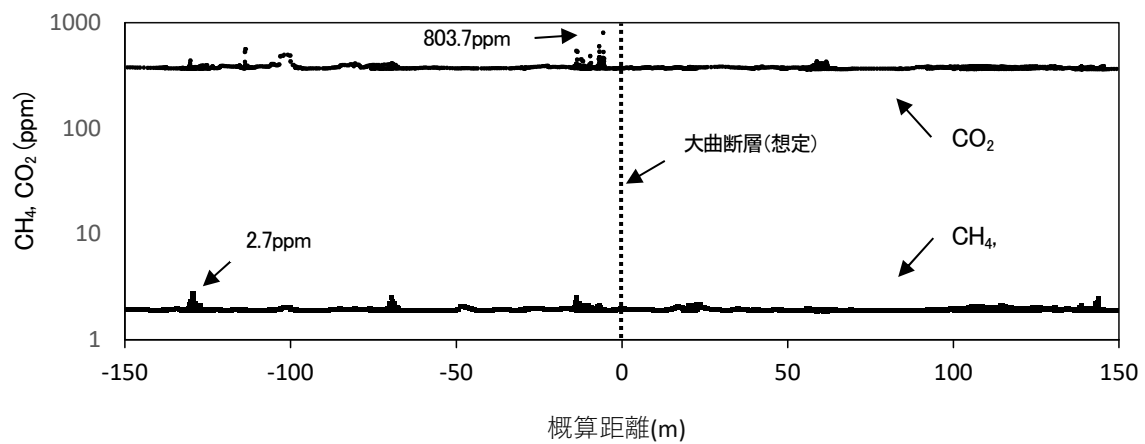
上幌 1 号線やペンケオートマップ川における測定では、大曲断層西側の勇知層／声問層境界の周辺で顕著なメタンアノマリが確認された（図 8 の B' および図 10 の A'）。メタン濃度のピークは最大で 40 ppm 程度を示し、大曲断層周辺で検知された濃度と比較して高い。4.4 節で述べたように、ペンケオートマップ川では、勇知層／声問層境界の延長上の泥部（図 10 の□）で、最大 387 ppm の高いメタン濃度を示した。これらの結果から、大曲断層の西側の勇知層／声問層境界周辺においても、地下からの有力なメタン滲出がある可能性が高いことが明らかになった。諏訪沢林道沿いにおける阿部ほか（2009）による浅層ボーリング調査でも、大曲断層より約 200 m 西側（図 10 の H15-2-7 および H15-2-3）で高濃度のメタンが検知されており、勇知層／声問層境界周辺のメタンアノマリと関係している可能性がある。本調査における諏訪沢林道での G4301 による測定では、メタン濃度はバックグラウンドのままであったが、これは林道敷設に伴う盛土といった人為的改変などが影響している可能性がある。上幌 1 号線の勇知層／声問層境界の河川屈曲部については、



a. 上幌1号線



b. 上幌7号線



c. ペンケオートマップ川

図 14 大曲断層周辺の測定結果. 図の横軸は断層の想定位置からの概算距離.

連続したメタンアノマリが観測されており（図 8 および図 9 の B'），地形変化と移行経路との関連が示唆される。

現在、泥部から採取したガスの地化学分析を実施中であるが、今後、勇知層／声間層境界の沢部においても地中ガスを採取し、メタンの起源についての検討を行うことが望ましい。

5.4 測定結果から想定されるガス移行経路

今回の G4301 による測定結果から、大曲断層周辺では、背斜軸、大曲断層、勇知層／声間層境界の周辺においてメタンアノマリが確認され、それぞれに異なる特徴があることが明らかになった。さらに、背斜軸の地中（図 7）、大曲断層の延長上のボーリング跡、および勇知層／声間層境界の延長上の泥部（図 10）から、それぞれ高濃度のメタンを確認し、表層付近あるいは地下深部にメタンが存在することが確認された。

背斜軸周辺では、限定された区間のみから集中したメタン滲出が確認された。褶曲の形成に伴い、背斜軸では局所的に割れ目が発達することが知られており（Beaudoin et al., 2015）、大曲背斜軸上でのメタンアノマリも、このような割れ目がガスの移行経路を担っている可能性がある。

大曲断層周辺では、少なくとも 10 m 以上の間隔でスパイク状に分布する低濃度のメタン滲出が確認された。石井ほか（2006）などにより、大曲断層は幅約 120 m 程度のダメージゾーンを伴うことが報告されており、大曲断層周辺には複数のガス移行経路が成立しうる可能性がある。

勇知層／声間層境界周辺では、大曲断層より高濃度のメタンアノマリが分布することが確認された。幌延町の上幌延地域では、大曲断層の性状把握を目的としたコントロールボーリング調査および反射法地震探査が実施されている（電力中央

研究所, 2005, 図 8 中にボーリング位置を示す）。その結果、反射法地震探査からは、主断層の前縁（西側）に分岐断層が推定されている。また、コントロールボーリングのコアやボアホールテレビ画像の観察結果から、主断層の前縁部に、潜在背斜構造が推定されている（電力中央研究所, 2010）。ボーリング孔内では、大曲断層の想定通過位置を含む幅広い区間で油・ガス徴が認められている。油・ガス徴は、断層上盤（東側）の背斜軸に当たる付近で最も多く、次いで断層下盤の潜在背斜構造の背斜軸付近で顕著であった。逆に、過去の勇知層／声間層境界を貫くボーリングからは、地層境界で油・ガス徴や顕著な割れ目密集帯は認められていない（山本ほか, 2004）。したがって現時点では、勇知層／声間層境界周辺でのメタンアノマリは、地層境界に起因するものではなく、断層などの構造的な要因によるものである可能性が高いと考えられる。

今回の地表ガス測定で得られた知見と反射法地震探査およびコントロールボーリング調査結果から、当該地域の地下においては、図 15 に示す 3 つのガス移行経路が想定される。すなわち、根源岩または貯留岩から上昇したガスが背斜軸の割れ目に沿って上向きに滲出する経路（①）、主断層に沿って上昇したのち浅層の岩盤中割れ目に沿って滲出する経路（②）、主断層西側の前縁断層に沿って上昇した後、地層境界付近の地下を出口として地表に滲出する経路（③）、である。①は、地表の滲出範囲が限定的であり、表層で高濃度のメタンが観測されたことから、地下に透過性の高い集中的な経路が存在すると考えられる。②の経路は、低濃度のアノマリがスパイク状に分布することから、相対的に透過性は低い経路がネットワーク状に発達していると考えられる。③の経路では、②より 1 オーダー高い濃度値を示しているこ

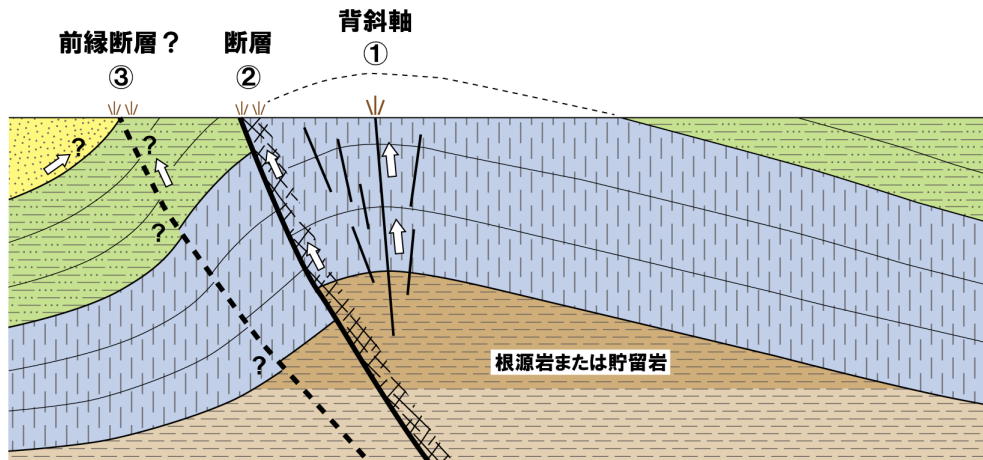


図 15 ガス移行経路の概念図。①～③は本文中の説明に対応。

とから、経路沿いの岩盤の透過性は②より高いと考えられる。ただし、上記の想定は、現時点で得られた知見に基づいたものであり、今後追加される情報により修正される可能性がある。例えば、①の経路については、メタンの炭素同位体比から、微生物分解の影響をほとんど受けていないガスが地表に滲出していることが明らかになったため、地下の根源岩または貯留岩に直接つながる経路が存在している可能性も考えられる。

当該地域では引き続きデータの蓄積を行っていく予定であるが、今回実施した高精度微量ガス測定により、地表でのガス滲出箇所の分布が明らかになるとともに、既往の地質調査や物理探査の結果と合わせて考察することで、地下のガス移行経路の想定が可能になることが示された。

6. まとめ

北海道幌延町において、CRDS方式のガス濃度測定装置を用いた大気中メタン濃度の徒歩測定を実施し、次のような知見を得た。

(1) 大曲背斜軸上の尾根部において、大気中メタン濃度のアノマリからメタン滲出箇所を特定することができた。滲出範囲は限定的であり、地中

において集中的なガス移行経路が形成されていることが示唆された。メタンと二酸化炭素の濃度には相関が見られた。また、採取したガスの炭素同位体比から、メタンは熱分解起源であることが推定された。

(2) 大曲断層周辺では、断層を挟んで両側約150 mの範囲に2～7 ppm程度のメタンアノマリが“分散して”分布することが確認され、地下におけるガス移行経路が、ネットワーク状に分岐していることが示唆された。今回、大曲断層延長上の坑井の口元湧水から分離したガスからも最大860 ppmの高濃度メタンが検知され、同地点の地下にメタンが胚胎していることが確認された。

(3) 大曲断層西側の勇知層／声間層境界付近を中心に大気中メタン濃度のアノマリが確認された。また、ペンケオートマップ川の北側の牧草地内の勇知層／声間層境界付近において、最大387 ppmのメタン滲出を伴う泥火山に似た泥部の存在を確認した。

(4) 以上から、大曲断層周辺には、根源岩または貯留岩からのガスが、①背斜軸の割れ目内を通じて地上に滲出する経路、②大曲断層沿いの割れ目帯に沿った移行経路、③前縁断層沿いの移行経

路、の3つのガス移行経路が存在すると考えられる。このうち、②の経路については、①、③と比較してメタン濃度が低く、移行経路の透過性が低いと考えられる。

今回の測定結果から、CRDS方式による高精度メタンガス測定技術を用いることにより、大気中メタン濃度のアノマリから、メタン滲出箇所を特定できることが分かった。また、アノマリが見つかった場所で採取したガスの地化学分析、ボーリング調査、地球物理探査などを組み合わせることにより、地下流体の移行経路を明らかにできる可能性が示された。

幌延地域においては、今回想定したガス移行経路の妥当性の検証のため、CRDS方式による大気中メタン濃度測定データの蓄積に加え、アノマリが見つかった箇所におけるガス試料の地化学分析やボーリング調査などによる更なる検討が望まれる。

本測定技術は、簡便な装置で、地表におけるガス滲出箇所の分布を迅速かつ直接的に把握することが可能なため、石油・ガス資源探査、地層処分サイトの選定調査、二酸化炭素地中貯留のモニタリングなど様々な分野への活用が期待される。今後、技術の実用化に向けて、測定技術やデータ評価技術のさらなる高度化を目指す予定である。

文献

- 阿部寛信・高橋一晴・藤島 敦 (2009) : 幌延町北進地区および開進地区における地表部および浅層ボーリング孔のガス測定. JAEA-Data/Code 2009-007, 35p.
- 荒牧憲隆・玉村修司・ALAM Badrul・金子勝比古 (2015) : 北海道北部における地層内バイオメタン生産技術に関する研究の現状と展望-バイオメタン鉱床造成/生産法の提案-, *Journal of MMIJ*, **131**, 285–292.
- Beaudoin, N., Huyghe, D., Bellahsen, N., Lacombe, O., Emmanuel, L., Mouthereau, F. and Ouanhnon, L. (2015): Fluid systems and fracture development during syn-depositional fold growth: An example from the Pico del Aguila anticline, Sierras Exteriores, southern Pyrenees, Spain. *Journal of Structural Geology*, **70**, 23–38.
- Berkowitz, B. (2002): Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Advances in Water Resources*, **25**, 861–884.
- Day-Lewis, F.D., L.D. Slater, J.R., C.D. Johnson, N. Terry and D. Werkema (2017): An overview of geophysical technologies appropriate for characterization and monitoring at fractured-rock sites. *Journal of Environmental Management*, **204**, 709–720.
- 電力中央研究所 (2005) : 平成 17 年度地層処分技術調査等 (ボーリング技術高度化調査) 報告書.
- 電力中央研究所 (2010) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 (地層処分共通技術調査 : ボーリング技術高度化開発) 報告書.
- 電力中央研究所 (2012) : 平成 23 年度地層処分技術調査等事業 (地層処分共通技術調査 : ボーリング技術高度化開発) 成果報告書.
- 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.
- Etiopie, G. (2015): Natural Gas Seepage: The Earth's Hydrocarbon Degassing. Springer, Berlin, 199p.
- 福沢仁之 (1985) : 北海道天北一羽幌地域の上部新第三系層序の再検討—とくに“稚内”・“声間”層について—. 地質学雑誌, **91**, 833–849.
- 福沢仁之・保柳康一・秋山雅彦 (1992) : 北海道

- 中央北部の新第三系の層序と古環境. 地質学論集, **37**, 1-10.
- 原子力発電環境整備機構 (2021): 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現ー適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築ー, NUMO-TR-20-03.
- 北海道鉱業振興委員会 (1968): 北海道の石油・天然ガスの探査と開発.
- Ishii, E. (2018): Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations. *Water Resources Research*, **54**, 3335–3356.
- 石井英一・安江健一・田中竹延・津久井朗太・松尾公一・杉山和稔・松尾重明 (2006): 北海道北部, 幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性. 地質学雑誌, **112**, 301-314.
- King, C. Y. (1978): Radon emanation on San Andreas Fault. *Nature*, **271**, 516–519.
- 加藤 進・早稻田周・西 英毅・岩野裕継 (2009): 新潟県東頸城地域における泥火山および周辺の原油・ガスの地球化学. 地学雑誌, **118**, 455–471.
- Koike, K., Yoshinaga, T., Ueyama, T. and Asaue, H. (2014): Increased radon-222 in soil gas because of cumulative seismicity at active faults. *Earth, Planets and Space*, **66**, 57. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-57>
- Miyakawa, K., T. Tokiwa and H. Murakami (2013): The Origin of Muddy Sand Sediments associated with mud volcanism in the Horonobe area of northern Hokkaido, Japan. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **14**, 4980–4988.
- Mock, J.E., Tester, J.W. and Wright, P.M. (1997): Geothermal energy from the Earth: Its potential impact as an environmentally sustainable resource. *Annual Review of Energy and the Environment*, **22**, 305–356.
- 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.
- National Research Council (NRC) (1996): Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications, National Academy Press, Washington D.C., 551p.
- Nelson, R. A. (1985): Geological Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- 西村進 (2013): 地熱流体の温泉利用と地熱発電利用. 温泉科学, **63**, 66–75.
- Niwa, M., Kurosawa, H., Shimada, K., Ishimaru, T. and Kosaka, H. (2011): Identification of pathways for hydrogen gas migration in fault zones with a discontinuous, heterogeneous permeability structure and the relationship to particle size distribution of fault materials. *Pure and Applied Geophysics*, **168**, 887–900.
- Neuman, S. P. (2005): Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks. *Hydrogeology Journal*, **13**, 124–147.
- 小椋伸幸・掃部 満 (1992): 天北・羽幌地域の石油地質ー深部構造特性と炭化水素ポテンシャル. 石油技術協会誌, **57**, 32–44.
- 岡 孝雄 (1985): 北海道天北・間寒別構造盆地のネオテクトニクス. 活断層研究, **1**, 19–29.
- 岡 孝雄 (1999): 北海道付近のネオテクトニクス像ー特にネオテクトニクスの地域区分と特徴ー. 月刊地球, **21**, 549–556.
- 岡 孝雄・五十嵐八枝子 (1993): 北海道北部・間寒別構造盆地の鮮新-更新統一とくに堆積相および花粉層序についてー. 地質学雑誌, **99**, 365–389.

- 岡 孝雄・五十嵐八枝子 (1997): 北海道・天塩平野北部の上部新生界—特に勇知層・更別層の堆積相と花粉化石層序について—. 加藤誠教授退官記念論文集, 341–365.
- O'Keefe, A. and Deacon, D. A. G. (1988): Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources. *Review of scientific instruments*, **59**, 2544.
- 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. JAEA-Research 2015-004, 109p.
- 石油公団 (1995): 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「天北」調査報告書.
- 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・ビロード (2019): キャビティリングダウン分光法を用いた大気中微量メタンガス測定による活断層調査. 深田地質研究所年報, **20**, 45–54.
- 下茂道人・横井 悟・丹羽正和・松岡俊文・徳永朋祥 (2020): 大気中の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.
- 嵯峨山 積 (2003): 北海道北部地域の遠別層・声間層と勇知層の地層境界の地質年代—ルベシユベ川と上ヌカナン川ルート—. 地質学雑誌, **109**, 310–323.
- Sugisaki, R. (1987): Behavior and origin of helium, argon, and nitrogen from active faults. *Journal of Geophysical Research*, **92**, 12523–12530.
- 高畑裕之・長根将格・松本尚巳 (2004): 幌延町における新第三紀堆積岩の地質・地質構造に関する調査. JNC TJ5420 2004-002, 143p.
- 戸野倉賢一 (2012): 光を用いた大気環境計測技術. 光学, **41**, 1–8.
- Toutain, J.P. and Baubton, J.C. (1999): Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*, **304**, 1–27.
- Umeda, K. and Ninomiya, A. (2009): Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **10**, Q08010, <http://doi.org/10.1029/2009GC002501>.
- van Golf-Racht, T.D. (1982): Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering, Developments in Petroleum Science, Volume 12.
- Wakita, H., Nakamura, Y., Kita, I., Fujii, N. and Notsu, K. (1980): Hydrogen release; New indicator of fault activity. *Science*, **210**, 188–190.
- Whiticar, M.J. (1999): Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology*, **161**, 291–314.
- 山本卓也・下茂道人・藤原 靖・服部弘通・名合牧人・田所照夫・中垣真一 (2004): 幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-6, 7, 8 孔) のうち HDB-7 孔. JNC TJ5400 2005-005.
- Yarushina, V. M. (2018): Potential leakage mechanisms and their relevance to CO₂ storage site risk assessment and safe operations, FME SUCCESS Synthesis report Volume 2.
- 安江健一・石井英一 (2005): 北海道北部, 幌延町における大曲-豊富断層の正確な位置の特定. 活断層研究, **25**, 39–46.