

背斜軸周辺の大気中メタンアノマリについて

下茂道人¹・丹羽正和²・宮川和也²・安江健一³・戸野倉賢一⁴・徳永朋祥⁴

¹ 深田地質研究所

² 日本原子力研究開発機構

³ 富山大学

⁴ 東京大学

On the atmospheric methane anomalies around the anticlinal axis

SHIMO Michito¹, NIWA Masakazu², MIYAKAWA Kazuya², YASUE Kenichi³,

TONOKURA Kenichi⁴ and TOKUNAGA Tomochika⁴

¹ Fukada Geological Institute

² Japan Atomic Energy Agency

³ University of Toyama

⁴ The University of Tokyo

要旨：断層や割れ目は、しばしば地下深部で生成されるガスの移行経路となる。このため、地表における微小なガス徴を捉えることで、地下構造に関する情報が得られることが期待される。近年、レーザーセンシング技術を用いたキャビティリングダウン分光法による可搬型の測定装置が開発され、野外観測において大気中のメタン濃度を実験室レベルの精度でリアルタイムに測定することが可能となった。著者らは、同装置を用いて、北海道幌延町における大気中メタン濃度測定を実施したところ、地表と断層や背斜軸が交差する地点付近で通常より有意に高いメタン濃度の上昇（アノマリ）を検知した。そこで、今回、背斜軸に沿ったアノマリの連続性や滲出量、および滲出か所付近の地下構造に関する情報を取得するため、背斜軸沿いの沢や林道における大気中メタン濃度や地中レーダー測定などを実施した。本報では、これらの測定で得られた知見について報告する。

キーワード：キャビティリングダウン分光法、野外測定、油・ガス徴、フラックス、地中レーダー

Abstract: Faults and fractures often create pathways for migrating gases formed in the subsurface. Signatures in trace gas concentration due to gas seeps, therefore, are expected to indicate geological discontinuities from the depth to the ground surface. Recently, a portable measurement device based on Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) using laser sensing technology has been developed and can be used for atmospheric methane concentration measurements in real time with laboratory-level accuracy. The authors performed atmospheric methane concentration measurements in Horonobe, Hokkaido, Japan, using the CRDS device and detected significant increases in methane concentration (anomalies) near the faults and anticlinal axes. This paper describes the new findings from the additional measurement to obtain information on the areal persistency and flux of methane seeps and geological settings near the anticlinal axis.

Keywords: Cavity Ring-Down Spectroscopy, field measurement, oil and gas signatures, fluxes, ground penetrating radar

1. はじめに

従来、断層調査や、油・ガス田の調査には地表および空中からの物理探査技術を用いた地下構造調査が主として実施されてきた。一方、地表に微量なガス徴が見られる場合では、地下の構造や油・ガス資源に関する情報を取得する目的で、ガス試料の採取および分析などが地球化学的調査の一環として行われてきた。大気中には、メタンが2ppmほどの低濃度であるが普遍的に存在しており、断層や油・ガス田地帯など、地下深部から地上につながるガスみちが存在するか所では、周辺と比較して高い濃度を示すことが報告されている。



図1 メタンガスアナライザー (Picarro 社, 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 (5 s)	0.4 ppm (5 s)
	0.3 ppb (300 s)	0.04 ppm (300 s)
ドリフト(24時間)	1 ppb	0.5 ppm
測定レンジ	0 - 800 ppm	0 - 3 %
レスポンス時間	5 s	5 s
測定方式	CRDS (Cavity Ring-Down Spectroscopy)	
重量	11.3 kg	
温度条件	10 ~ 45 °C	

る。しかし、地下から滲出したメタンは、大気中で希釈されるため、泥火山や温泉地帯などを除き、大気中の濃度変化はごく微小であると考えられる。

近年、レーザーセンシング技術を用いた Cavity Ring-Down Spectroscopy (以下、CRDS) による超高精度ガス濃度測定技術が大きく進展し、小型で可搬型の測定装置が開発されている (図1, 表1)。同装置は、軽量でありながら測定レンジが広く (メタンの場合、0-800ppm)、かつ高分解能 (メタンの場合、1ppb) のデータをリアルタイムに取得できることから、野外における大気中メタン濃度の微小な変化を実験室レベルの精度で検知することが可能である。最近では、同装置をドローンに搭載したシステムも開発されており (図2)、徒歩、車載、空中など測定方法が多様であることから、様々なスケールでの測定が可能である。

CRDS 技術により、地表における大気中メタンのアノマリ (通常の大気中濃度からの有意な上昇) を捉えられれば、既往の物理探査技術と組み合わせることで地下の流体経路 (水みち、ガスみち) の把握が可能になると期待される。また、CRDS による高精度ガス濃度測定技術は、地質工学分野だけでなく、油・ガス田などの資源探査や



図2 ドローン搭載型メタンガス測定システム (LBNL Biraud 博士より写真提供)。

表 2 高精度メタン測定技術の地質工学および産業分野の応用例.

分 野	内 容
地質工学分野	・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	・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 ・掘削工事現場などにおける環境ガス／水質調査や爆発危険予測技術

燃料の貯蔵・供給インフラ施設の老朽化に伴うガス漏れの検知など，産業分野における活用も期待される（表 2）.

このような状況を踏まえ，深田地質研究所では，2018 年 6 月に CRDS 技術を用いた高精度ガス濃度測定技術の地質工学および産業分野への活用の可能性を探るための研究委員会（委員長・徳永朋祥東京大学教授）を設置して活動が続けてきた．委員会には，CRDS 技術を用いた地球規模での気候変動に関する先駆的な研究を行っている米国立ローレンスバークレー研究所（LBNL）の Sebastien Biraud 博士（現在，同研究所気象科学部長）をアドバイザーに迎え，測定手法に関する最新情報の提供ならびに指導をいただきながら，これまで，断層や褶曲・背斜構造が分布する地域や油・ガス田における測定を実施し，その成果を報告してきた（下茂ほか，2019・2020・2021；丹羽ほか，2022；宮川ほか，2021）.

2021 年度は，北海道幌延町において測定を実

施し，大曲背斜の背斜軸付近で明瞭な大气中メタンアノマリを検知することに成功し，同地点付近の地下からのメタン滲出を確認した（下茂ほか，2021）. 2022 年度は，さらに測定範囲を広げ，背斜軸に沿ったアノマリの連続性やメタン滲出量（フラックス）の評価，および滲出地点の地下構造に関する情報の取得を目的とする大气中メタン濃度測定やチャンバーテスト，地中レーダー測定などを実施した．

本報では，これらの測定で得られた知見について報告する．

2. 測定概要

2.1 調査場所

測定を行った幌延町は，北海道北部の天北地域に位置する．当該地域には，新第三紀の珪藻質・珪質の泥岩が分布しており，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．

町内には、北北西－南南東方向に大曲断層が縦走しており、その東側には大曲背斜が発達している（図 3）。調査地域の概要については、既報（下茂ほか，2021）を参照されたい。

これまで実施した大気中メタン測定では、上幌延北進線林道およびその北側の北進 2 号線沿いの沢（図 5 の A-A' 側線）において、それぞれ大曲背斜の想定背斜軸のやや東側で、通常の大気中のメタン濃度（約 2 ppm）より有意に高い値（3.6 ～ 31.9 ppm），すなわちメタンアノマリを確認した。このうち、上幌延北進線林道では、メタンアノマリが確認された地点で表土を 5 cm ほど剥いで測定した結果、280 ppm という高い濃度のメタン滲出が確認された。さらに、同地点で採取したガス試料のメタンの炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）を測定したところ、 -31.9% という熱分解起源を示唆する値が得られた。これらの結果は、背斜軸付近において、根源岩から地表へとつながる移行経路が存在することを示唆している。これまで、沢部において油徴やガス徴が報告されているものの、我々の測定結果により、尾根部でもメタン滲出が確認されたことから、背斜軸に沿った連続的なメタン滲出が生じている可能性が示された。そこで今回は、メタンアノマリの空間的連続性やメタン滲出量、滲出か所周辺の地下構造などの情報を得ることを目的として、図 3 中に示す大曲背

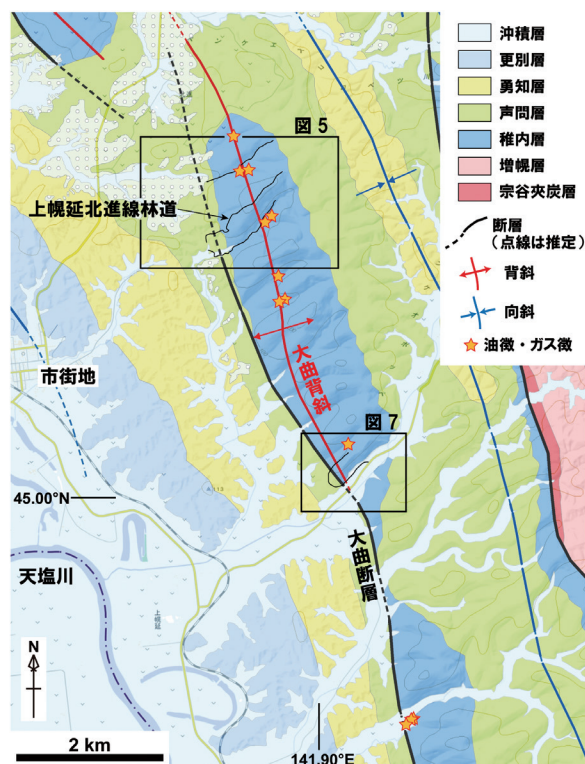


図 3 調査位置。油・ガス徴の位置は長尾（1960）および動力炉・核燃料開発事業団（1987）による。ベースマップは、地理院地図に酒井・松岡（2015）の地質情報を重ね合わせたものであり、ArcGIS を用いて描画した。

斜と交差する林道や沢および採石場において、メタン濃度測定を実施した。さらに、メタンアノマリの分布と岩盤内の割れ目分布との関係を調べるため、かつて電力中央研究所により実施されたコントロールボーリング（電力中央研究所，2012）のコア観察データの再評価を行った（表 3）。

表 3 実施内容。

内 容	場 所	目 的
大気中メタン測定	上幌延北進線林道およびその周辺の沢（図 5）	背斜軸沿いのアノマリの連続性、再現性確認
	上幌延採石場（図 7）	
チャンバーテスト	上幌延北進線林道	フラックス測定
	上幌延採石場	
地中レーダー	上幌延北進線林道	アノマリ直下の地下構造に関する情報取得
既往ボーリングデータの再評価	道道 645 号線沿いの大曲断層通過部	

3. 測定方法と測定結果

3.1 大气中メタン濃度測定

3.1.1 上幌延北進線林道およびその周辺

Picarro 社製の可搬型 CRDS メタンアナライザー G4301 を用いて、沢や林道を歩きながら大气中メタン濃度の測定を行った。測定状況を図 4 に示す。

測定装置に接続した吸入チューブの先端を地表 30 ～ 50 cm の位置に保ち、地表付近のメタン濃度を測定した。データは、タブレット上にリアルタイムで表示され、GPS による位置情報とともに装置内の記録装置に保存される。上幌延北進線林道およびその周辺の沢を対象とした、大曲背斜を横断する 3 本のルートで徒歩測定を行った結果を図 5 に示す。測定の結果、図中に示すように、すべてのルートにおいて、背斜軸の近傍（いずれも、想定背斜軸のやや東側）でバックグラウンドを大きく上回るメタン濃度を検出した。ただし、沢沿いのルート（図 5 の A-A' および C-C'）では、背斜軸から離れた地点でも高濃度のメタンが検出された（例えば、図 5 の黒三角矢印）。これらの地点では、ぬかるみの分布や湧水が認められた。大曲断層の推定通過位置（図 5 の破線、ただし、同地点における大曲断層の分布に関する明確な情報は得られていない）では、明瞭なメタン濃度の上昇は認められなかった。

沢沿いのルートにおける大曲背斜軸近傍での高濃度メタン検出地点は、長尾（1960）により油徴・ガス徴が報告された地点と一致する。A-A' ルートの当該地点では油膜が広く認められた。C-C' ルートの当該地点ではガスが絶え間なく放出している様子が認められた（図 6）。沢沿いの油徴・ガス徴については、既往調査で報告されているものの、尾根部に位置する上幌延北進線



図 4 徒歩による大气中メタン測定状況。

表 4 上幌延北進線林道（図 5 中の X）で実施したメタンガス測定結果と測定前日（測定終了時間の 48 ～ 24 時間前）の降雨量との比較。降雨量のデータは気象庁アメダスから取得した。

日付	大气中メタン濃度 (ppm)	地中メタン濃度 (ppm)	測定前日の降雨量 (mm)
2021/7/1	3.6-6.9	280 ガスサンプル	2
2021/8/8	5-30	345 深さ 5 cm の孔	0
2022/5/28	10-35	—	0
2022/5/29	ND	—	9.5
2022/5/30	11.8	30-60 チャンバー測定	1
2022/8/17	ND	16 チャンバー測定	9.5

林道（図 5 の B-B'）における大曲背斜軸近傍でのメタン滲出は、本研究ではじめて明らかになった知見である。本ルートでは、これまでに 6 回徒歩測定を行っているが、このうち 4 回の測定において、大气中での明瞭なメタン濃度の上昇が確認できた（表 4）。なお、メタン濃度の上昇が確認できなかった 2 回（表 4 中の“ND”）については、前日に 9.5 mm の降雨があった点が他の 4 回とは

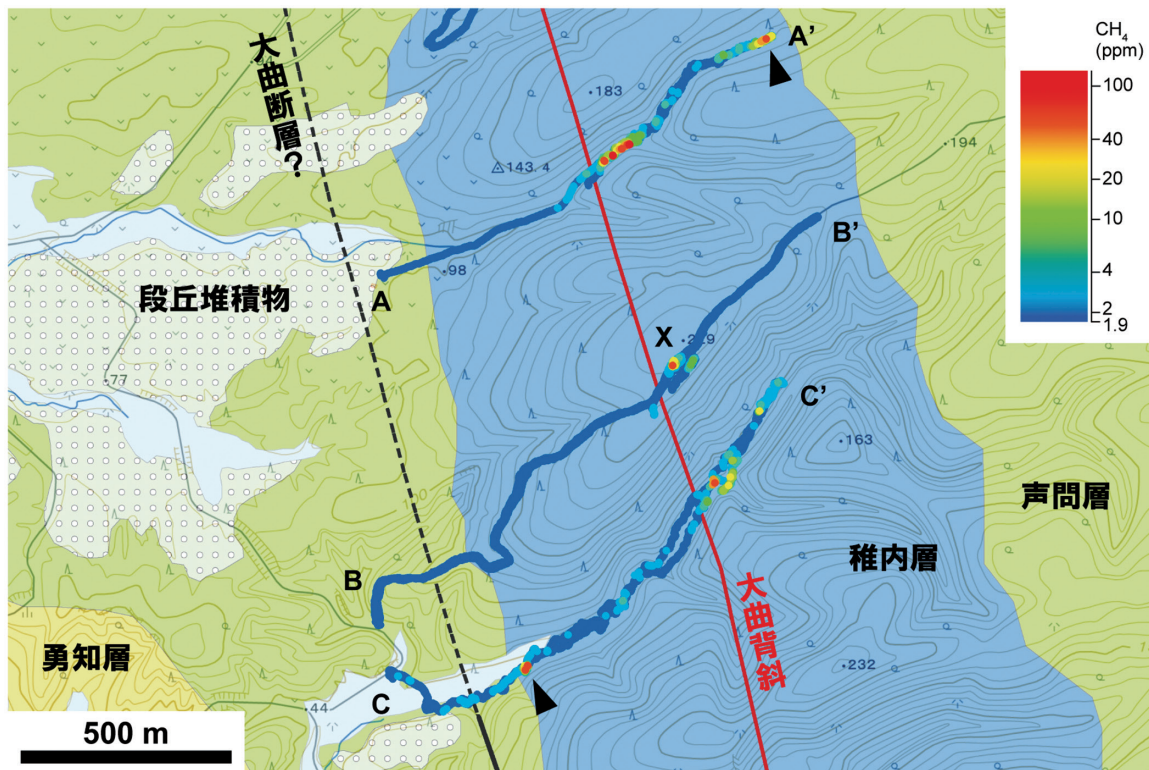


図5 上幌延北進線林道およびその周辺の沢におけるメタンガス測定結果（2022年5月26～28日に測定したもの）。メタン濃度は対数レンジで示してある。黒三角矢印で示した高濃度部の説明については本文参照。ベースマップは、地理院地図に酒井・松岡（2015）の地質情報を重ね合わせたものであり、ArcGISを用いて描画した。



図6 大曲背斜軸近傍の沢沿いで認められる油徴（左：図5のA-A'ルート）およびガス徴（右：図5のC-C'ルート）。

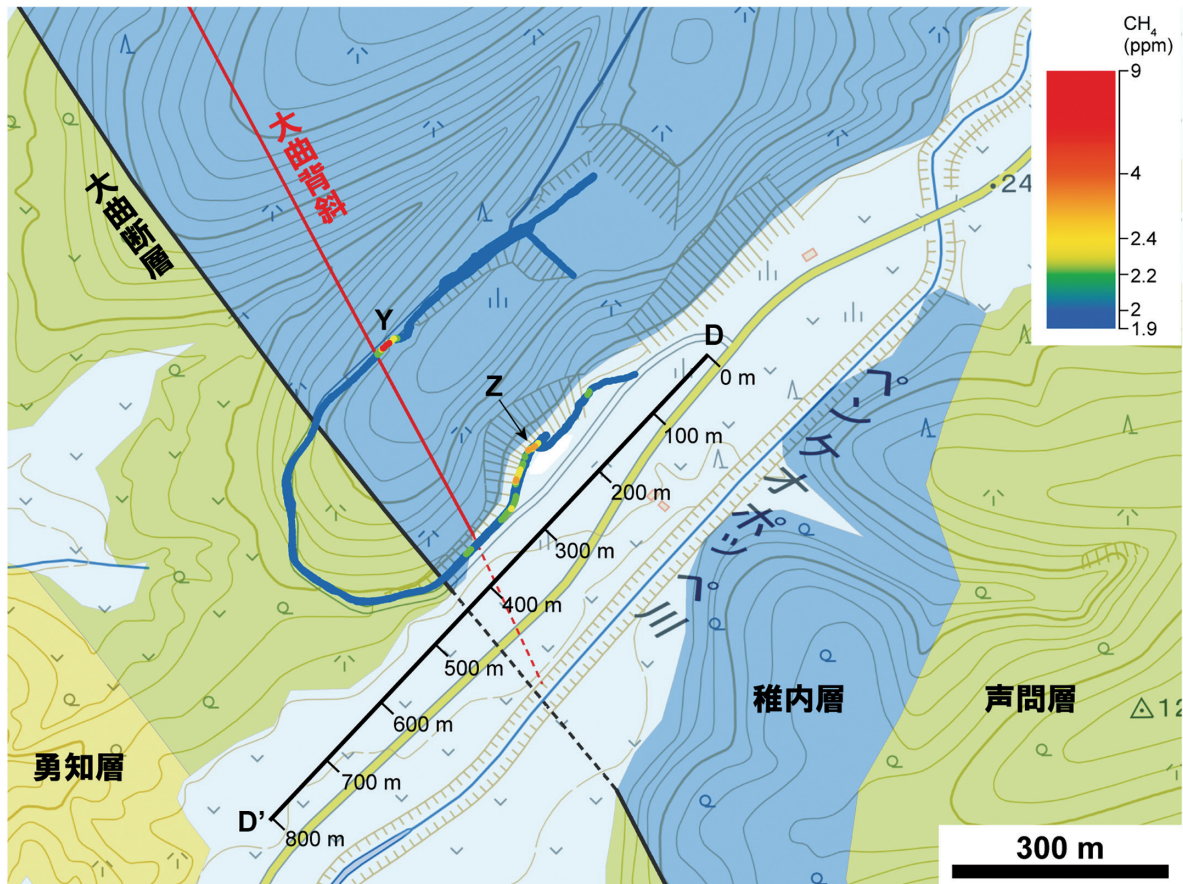


図7 上幌延採石場におけるメタンガス測定結果（2022年8月19日に測定したもの）。D-D'は電力中央研究所（2012）によるコントロールボーリングの軌跡を示す（距離は水平距離）。ベースマップは、地理院地図に酒井・松岡（2015）の地質情報を重ね合わせたものであり、ArcGISを用いて描画した。

異なる。ただし、大気中メタンの上昇が捉えられなかった場合でも、後述のチャンバーテストにより、地表付近のメタン滲出が継続している事実は確認された（2022年8月17日測定）。

3.1.2 上幌延採石場

上幌延採石場内の未舗装道路沿いで実施した徒歩測定結果を図7に示す（測定日：2022年8月19日）。測定ルートでは2か所で大曲背斜軸の想定通過位置を横断するが、いずれにおいても、近傍（想定背斜軸の東側）でバックグラウンドを大きく上回るメタン濃度を検出した。ただし、北側の背斜軸との交差部では、メタンの高濃度部

が1点の狭い範囲に集中するが、南側では、メタンの高濃度部にやや広がりがあり、少なくとも2か所のピークが認められた。一方、本ルートでは大曲断層とも2か所で交差し、うち南側の交差部では断層露頭も認められるが（安江・石井，2005），いずれの地点でもバックグラウンドを大きく上回るメタンは検出されなかった。

3.2 フラックス測定

大気中のメタンアノマリが確認されたか所において、地表におけるメタン滲出量や濃度を測定するため、チャンバーを用いたフラックス測定を実施した。測定概念を図8に示す。円筒形のアク

リル製容器（チャンバー）の上部に2か所の通気孔を設け、G4301の吸気ポートと排気ポートと各通気孔をチューブで接続した。G4301を用いて特定した大気中メタンの高濃度部付近の表土を約2～5cm剥いで平らに成型した後、チャンバーを設置し、メタン濃度を測定した。測定時間は、1回あたり10分間を目安とした。G4301の吸気量と排気量とは等しいため、チャンバー内の圧力は理論的には一定であるが、確認のため圧力計を取り付けた。地下からのメタンフラックスは、図9に示すように、メタン濃度の勾配から、次式を用いてフラックスを計算した。

$$Q = \rho_{air} \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt}$$

ここに、 Q はメタンフラックス（ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）、 V 、 A はそれぞれチャンバーの体積（ $= 7.854 \times 10^{-3} \text{m}^3$ ）および断面積（ $= 3.14 \times 10^{-2} \text{m}^2$ ）、 $\frac{dC}{dt}$ はメタン濃度変化速度（ ppm s^{-1} ）である。空気のモル濃度 ρ_{air} （ mol m^{-3} ）および測定地点の大気圧 p_{air} （kPa）は、それぞれ次式で求めた（Campbell and Norman, 1998）。

$$\rho_{air} = 44.6 \times \left(\frac{p_{air}}{101.3} \right) \times \left(\frac{273.15}{T} \right)$$

$$p_{air} = 101.3 \times \exp\left(\frac{-z}{8200}\right)$$



図8 チャンバーテストの概念.

ここに、 T は温度（K）、 z は標高（m）である。測定状況を図10に示す。上幌延北進線林道（図5中のX）、および上幌延採石場内の2か所（図5中のY、Z）で実施したフラックス測定を図11～13に示す。チャンバー内の濃度が上昇してほぼ一定になるまでの期間（図中に黒線で示す期間）の濃度変化を近似した直線の勾配からフラックスを求めた。

フラックスの測定結果は、上幌延北進線林道Xで $5.87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、上幌延採石場の北側道路Yで $7.90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、であった。最大メタン濃度（安定時のメタン濃度）は、それぞれ50ppmおよび

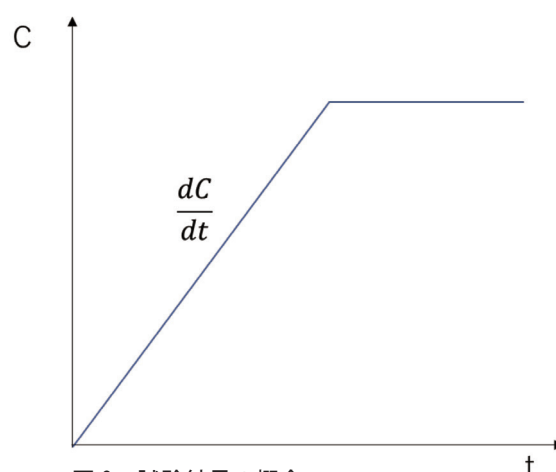


図9 試験結果の概念.



図10 チャンバーテストの様子.

329ppm であった。一方、上幌延採石場の南側道路 Z における測定では、図 13 に示すように、チャンバー内の濃度が上昇した後一旦低下し、数分後に再び上昇するという、間欠的な挙動が見られた。比較的直線的に上昇する 2 区間から求めたフラックスは、 $0.37\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $3.11\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、最大濃度はそれぞれ約 6ppm および約 12ppm であり、フラックス、濃度とも変動する様子が見られた。

以上の結果から、林道や採石場道路が背斜軸と交差する地点の周辺において、フラックスや濃度に変動があるものの、地下からの継続的なメタン滲出が生じていることが確認された。

3.3 地中レーダー探査

大气中のメタンアノマリが確認されたか所周辺の地下浅部の地質構造を把握するため、地中レーダー探査を実施した。地中レーダー探査は、電磁波による地下物質からの反射を利用して地下構造を探る手法であり、地下数十 m までの地質構造を非破壊で把握できる。測定システムは、Sensors & Software 社製 pulse EKKO PRO を用いた。データ取得は、プロファイル測定により行い、周波数が 50MHz、100MHz、200MHz の 3 種類のアンテナを用いて計測した (図 14)。各アンテナの間隔は、50MHz で 2.0m、100MHz で 1.0m、200MHz で 0.5m とした。また、アンテナのステップサイズは 50MHz で 0.5m、100MHz で 0.2m、200MHz で 0.1m とした。アンテナ周波数は、大きいほど分解能が高くなるが、可探深度は浅くなる。データの解析は、Sensors & Software

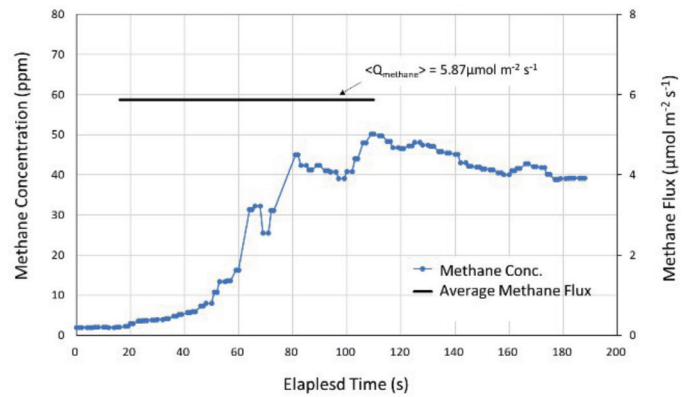


図 11 フラックス測定結果（上幌延北進線林道，測定日：2022 年 5 月 30 日）。

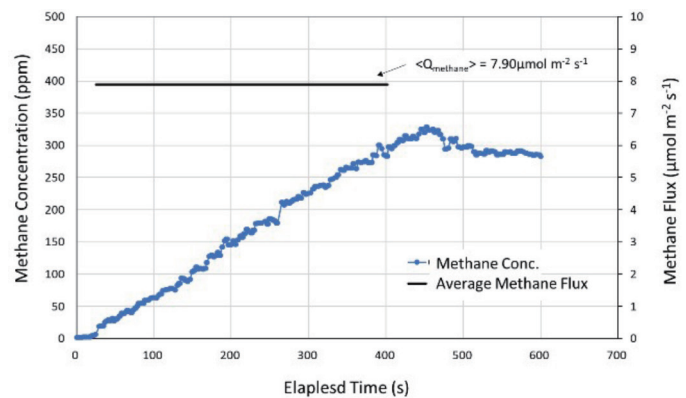


図 12 フラックス測定結果（上幌延採石場北側道路，測定日：2022 年 8 月 19 日）。

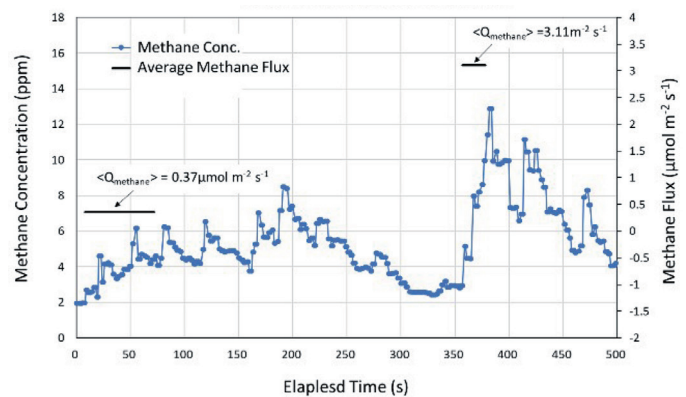


図 13 フラックス測定結果（上幌延採石場南側道路，測定日：2022 年 8 月 16 日）。

社製 EKKO_Project を用いた。地中伝搬速度は、湿った岩石の一般的な値である 0.1 m/ns を用いた。

探査の結果、反射面の連続と不連続の特徴から 3 周波数で共通する構造が認められる (図 15，



図 14 地中レーダー探査の様子
(上幌延北進線林道)。

16, 17). また, メタンアノマリが確認されたか所の地下浅部は, 比較的連続性の良い反射面であり, 50MHz と 100MHz では, わずかに上へ凸の構造が推定される (図 15, 16). その付近を境に, 北東側では北東へ緩く傾く構造が推定され, 南西側では南西へ緩く傾く構造が推定される. これらの特徴は, 背斜構造を反映している可能性がある. また, 水平距離 40m 付近で反射面の不連続が認められ, その不連続は地下で北東側へ傾斜するように見え, 断層などの割れ目を反映している可能性がある.

3.4 コントロールボーリング結果の見直し

上幌延採石場の南側では, 2006 ~ 2011 年にかけて, 大曲断層を貫くコントロールボーリングが実施されている (図 7; 電力中央研究所, 2012). この際に記録されたコア観察結果 (電力中央研究所, 2007・2008・2009・2010・2011・2012) に基づき, 大曲背斜軸周辺における地下深部への割れ目 (断層や節理) の連続性について検討を行った. ボーリングは定方位

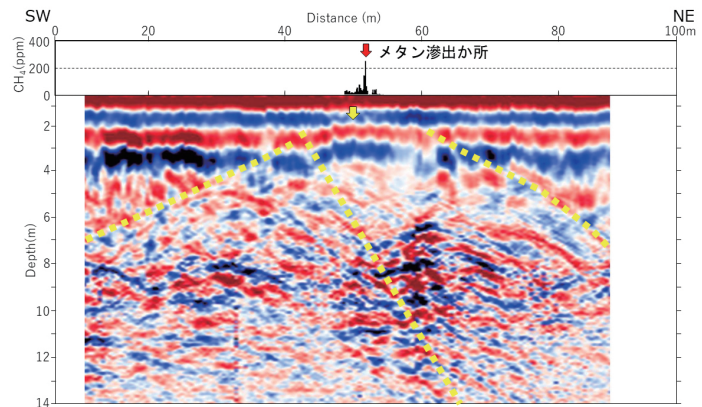


図 15 地中レーダー探査断面 (50MHz). ↓は反射面が上へ凸になっている部分を示す, 黄色破線は反射面から解釈した不連続面を示す.

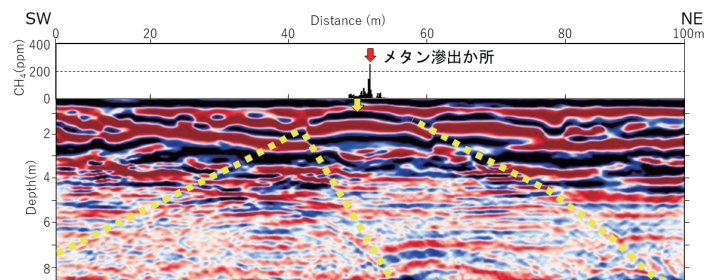


図 16 地中レーダー探査断面 (100MHz). ↓は反射面が上へ凸になっている部分を示す, 黄色破線は反射面から解釈した不連続面を示す.

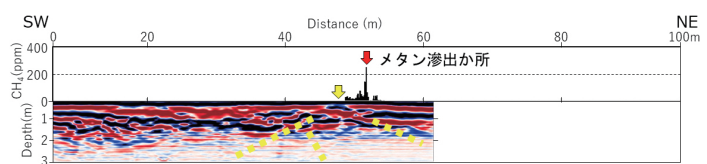


図 17 地中レーダー探査断面 (200MHz). ↓は反射面が上へ凸になっている部分を示す, 黄色破線は 100MHz 反射面から解釈した不連続面を投影 (浅部に延長) した線を示す.

では行われていないが, コア観察記録に明記されていない限りコアは回転していないとみなし, 割れ目の傾斜データを場所ごとに集計して頻度分布図を作成した. なお, 掘削時に新たに発生した人工的な割れ目である可能性が高いと判断されたものについては集計から除外した.

その結果、孔口から水平距離で 150 ～ 300 m の区間において、ほかの区間よりも明瞭に鉛直方向の割れ目の数が増えることが分かった（図 18）。

4. 考察

4.1 メタンアノマリの空間的連続性について

前回の年報（下茂ほか，2021）では，上幌延北進線林道およびその北側の北進 2 号線沢部において，大曲背斜軸の想定通過地点のやや東側で，大気中メタンのアノマリを確認したことを報告した．その後，背斜軸に沿ったメタン滲出の空間的連続性や再現性を確認するため，上記 2 測線で再度測定を実施したほか，さらに南側の沢および道道 645 線に近い上幌延採石場の未舗装道路においても測定を実施した．その結果，3.1 に述べたように，いずれのルートでも，想定背斜軸との交差部のやや東側で明確な大気中メタンアノマリを確認した．また，上幌延北進線林道や上幌延採石場では，地表の表土を数 cm 程度剥ぐことにより，最大 345 ppm のメタン滲出を確認した．沢部においては，大気中メタンのアノマリを確認した地点周辺の河床で油徴・ガス徴を確認した．

以上のことから，北進から上幌延に向かって南北に延びる延長約 7km の背斜軸に沿って，空間的に連続した地下からのガス移行経路が存在する可能性が高いことが明らかになった．過去の調査において，沢部における油徴やガス徴が報告されているものの（長尾，1960），今回の測定の結果，沢部以外（上幌延北進線林道や上幌延採石場）でも地下からのメタン滲出が生じていることがはじめて明らかになった．

本研究による可搬型 CRDS 装置（G4301）による徒歩測定では，地表での生物活動起源のメタンが蓄積されている可能性のあるぬかるみを通過

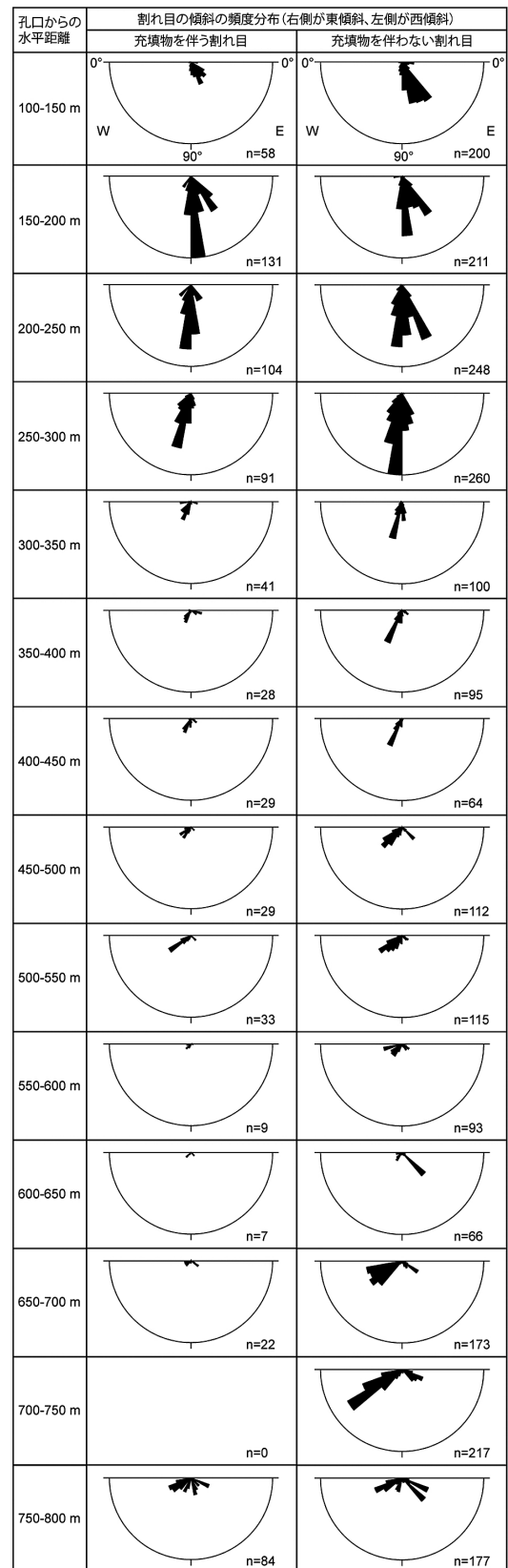


図 18 コントロールボーリングのコア観察において記載された割れ目の傾斜の頻度分布。

する際も、メタン濃度が顕著に上昇する場合があることに注意する必要がある。沢部では、そのようなぬかるみが多く分布するため、地下から移行してきたメタンの滲出位置を正確に捉えることは必ずしも容易ではない。一方、上幌延北進線林道のような尾根部では、地形・地質学的に全くの手がかりがないところでも、CRDS 技術を用いた大気中メタン濃度測定が、地下からのガス移行経路を効率よく把握する上で非常に有効な手法となり得ると考えられる。

4.2 メタン滲出の時間的継続性と降雨の影響について

上幌延北進線林道では、約 1 年の期間に実施した 6 回の測定のうち、4 回で背斜軸東側のほぼ同一地点で大気中のメタンアノマリを確認した。このことから、背斜軸近傍では、地下からのメタン滲出が、準定常的に生じていることが明らかになった。アノマリが確認されなかった 2 回は、いずれも前日に 10mm 近い降雨があった。このうち、前日に 9.5mm の降雨があった 2022 年 8 月 17 日の測定では、大気中メタン濃度の有意な上昇は検知されなかったものの、地表にチャンバーを設置して測定したところ、間欠的なメタン滲出が確認され、濃度は最大約 16ppm まで上昇した。このことから、降雨によりメタン滲出量が抑制される傾向があることが示唆される。降雨がメタン滲出に与える影響の大きさや原因は現時点では明らかでないが、飽和度の上昇による地表付近の土壌や岩盤の透気係数の低下、さらに地表付近における一時的な水面の形成などが考えられる。今後、効率的な測定に適した気象条件を検討するため、土壌水分と滲出量との関係に関するデータの取得を行う予定である。

4.3 メタンフラックスについて

通常メタンフラックス測定は、チャンバーを設置後、一定の時間間隔で採取したガス試料を実験室に持ち帰り、ガスクロマトグラフィーで濃度を測定する手順を踏む。一方、今回大気中メタンの測定に用いた CRDS 法による装置は、数 ppm ～ 数 100ppm の範囲のメタン濃度をリアルタイムに測定できるため、現地で濃度を確認しながら簡便にフラックス測定が可能である。

背斜軸に沿ったメタンフラックスの測定点数は、まだ少ないものの、上幌延北進線林道および上幌延採石場での測定結果は、それぞれ $5.87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($339 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), $7.90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($456 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) であった（ただし、雨天時のデータを除く）。この値は、一般的な水田からの単位面積メタン発生量の 1 ～ 2 オーダー大きな値である（例えば、細野ほか, 1996）。フラックス測定は、地表に滲出するメタン濃度を正確に測定できるという利点も有している。前述のように、ガスの滲出量は、降雨の影響を受けている可能性が考えられるため、今後のフラックス測定に当たっては、土壌水分の測定も併せて実施することが望ましいと考えられる。

4.4 メタン滲出点付近の地下構造について

上幌延北進線林道で確認されたメタン滲出点付近で実施した地中レーダー探査の結果、滲出点直下に、わずかながら上方へ凸な曲率を有する比較的明瞭な反射面が確認された。さらに、3 種類の周波数で得られた反射断面に共通した傾向として、同地点の東側では東落ちの反射面が、西側では西落ちの反射面が推定された。この結果は、メタン滲出位置付近の地下に背斜構造が存在することを示唆している。

上幌延採石場の南側で掘削されたコントロー

ルボーリングのコア観察データを見直した結果、孔口からの水平距離で 150 ～ 300m の区間において鉛直方向の割れ目の数が顕著に多くなることが分かった（図 18）。同区間は上幌延採石場の南側道路におけるメタンアノマリの分布域の近傍であり、メタン滲出点の地下にガスが移行する割れ目が連続していることを示唆する。実際、鉛直方向の割れ目の数が多い区間のコアからも、油・ガス徴が報告されている（電力中央研究所、2012）。大曲背斜軸も、酒井・松岡（2015）による従来の解釈より東の、ボーリング孔口からの水平距離 150 ～ 300m の区間を通過する可能性がある。酒井・松岡（2015）による大曲背斜の分布は、これまでの地表地質調査により得られた地層の走向・傾斜のデータに基づいている。大曲背斜の詳細な分布については、今後、既存の地表地質データに加え、本研究で報告したような地下地質に係るデータも踏まえて再検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

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や沢において気中メタン濃度の測定を行った。その結果、いずれのルートにおいても、想定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上昇を検知した（林道および未舗装道路 3 か所、沢部 2 か所）。このうち、沢部においては、気中メタンアノマリを検知したか所付近の河床で、油徴およびガス徴を確認した。また、道路部では表土を剥いで測定したところ、最大 300ppm 程度のメタン滲出を確認した。これらの測定結果から、大曲背斜の背斜軸に沿って、地下から継続的にメタンが滲出して

いる可能性が示された。

さらに、上幌延北進線林道で実施した地中レーダー探査の結果、メタン滲出点付近を頂点とする上方へ凸の反射面が確認され、メタン滲出点の直下に背斜軸が位置することを裏付ける結果が得られた。上幌延採石場の未舗装道路で検知されたメタン滲出点近傍の地下においても、過去に実施されたコントロールボーリングデータを見直した結果、地下からのメタン移行経路となり得る鉛直方向の割れ目が顕著に卓越することが明らかになった。

現在、採取したガスの組成や安定同位体比を測定中であるが、昨年、上幌延北進線林道の背斜軸付近で採取したガス試料のメタンの炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）は、 -31.9‰ と熱分解起源を示唆する重い値が得られており、背斜軸付近に滲出しているメタンは増幌層以深の根源岩で生成された可能性がある（下茂ほか、2021）。

以上のことから、気中メタンアノマリの調査と地球物理探査やボーリング調査、地球化学分析などを組み合わせることにより、地下の流体移行経路に関する有用な情報が得られる可能性があることが示された。

本測定技術は、地表におけるガス滲出か所の分布や滲出量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。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費（22K05011）の助成を受けて実施したものです。米国立ローレン

スパークレー研究所のSebastien Biraud博士には、CRDS装置を用いた測定法のご指導のほか有益なご助言を多数いただきました。

文献

- Campbell, G. S. and Norman J. M. (1998): *An Introduction to Environmental Biophysics*, Springer, 2nd ed., New York, 286p.
- 電力中央研究所 (2007): 平成 18 年度 地層処分技術調査等委託費 (ボーリング技術高度化開発) 報告書.
- 電力中央研究所 (2008): 平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 (ボーリング技術高度化開発) 報告書.
- 電力中央研究所 (2009): 平成 20 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 (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 (2011): 平成 22 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) 成果報告書.
- 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.
- 細野達夫・野内 勇 (1996): 水田からのメタンフラックスと水田土壌水中メタン濃度の季節変化. 農業気象, **52** (2), 107-115.
- 宮川和也・下茂道人・丹羽正和・天野健治・徳永朋祥・戸野倉賢一 (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.
- 長尾捨一 (1960): 5 万分の 1 地質図幅「豊富 (旭川 - 15)」および同説明書. 北海道立地下資源調査所.
- 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.
- Picarro INC. (2021): GasScouter™ G4301 Analyzer Datasheet.
- 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.
- 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): キャビティー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.
- 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.
- 安江健一・石井英一 (2005): 北海道北部, 幌延町における大曲一豊富断層の正確な位置の特定. 活断層研究, **25**, 39-46.