

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

下茂道人¹・横井 悟²・丹羽正和³・松岡俊文¹・徳永朋祥⁴

¹ 深田地質研究所

² 地球環境産業技術研究機構

³ 日本原子力研究開発機構

⁴ 東京大学

High-precision trace methane gas measurement as a tool for petroleum exploration

SHIMO Michito¹, YOKOI Satoru², NIWA Masakazu³,
MATSUOKA Toshifumi¹ and TOKUNAGA Tomochika⁴

¹Fukada Geological Institute

² Research Institute of Innovative Technology for the Earth

³ Japan Atomic Energy Agency

⁴ The University of Tokyo

要旨：石油・天然ガスの開発，特にその初期段階においては，地表における炭化水素ガス滲出の有無が重要な判断材料となってきた。実際，多くの大規模油田は，炭化水素ガス滲出箇所近傍で実施した試掘により発見されている。しかし，地表におけるガス滲出分布は，リモートセンシング等で確認できるような大規模の滲出を除き，地表で採取したガス試料の分析により調べるほかはなく（地表地化学探査），面的分布の把握に必要な多点測定には限界があった。そこで，著者らは，大気中ガス濃度測定による滲出調査の可能性を調べるため，山形県酒田市周辺においてキャビティリングダウン分光法装置を用いた車載方式のメタンガス濃度測定を実施した。本論文では，測定データに見られるメタン濃度アノマリの分布と既往の物探・探鉱データから推定される石油システム内の石油胚胎状況との比較で得られた，高精度ガス濃度測定技術の石油地質構造探査への適用性に関する知見を述べる。

キーワード：石油資源調査，メタン，キャビティリングダウン分光法，背斜構造，断層

Abstract: Historically, gas seepage has been an important clue in the oil and natural gas development. In fact, many large oil fields have been discovered by exploration drilling located in the vicinity of the surface hydrocarbon seepage. The large-scale seepage, often called as macro-seepage, can be detected by airborne survey using satellites or airplanes equipped with infrared laser sensors. However, the distribution of small-scale seepage, often called as micro-seepage, can only be investigated by soil gas sampling and laboratory analysis, so called as surface geochemistry exploration. To evaluate the applicability of high-precision trace gas measurement technology for the detection of hydrocarbon seeps from the petroleum reservoir, the authors conducted on-road measurement at Sakata city, Yamagata prefecture, using a vehicle equipped with a cavity ring-down spectroscopy (CRDS) device. In this paper, the applicability of CRDS technology to petroleum exploration is discussed by comparing the methane anomalies with the existing geological and geophysical data.

Keywords: petroleum exploration, methane, cavity ringdown spectroscopy, anticline structure, faults

1. はじめに

地下に賦存する天然ガスは、液相流体との比重差により鉛直上方に移動し、断層や亀裂などの経路 (pathways) を通って地表に到達する。このため、地表におけるメタン滲出 (methane seeps) は、従来より、石油資源探査の初期段階における重要な手がかりとしての役割を果たしてきた (Etiope, 2015)。実際、多くの大規模油田は、炭化水素ガスの滲出がみられた箇所近傍で実施された探鉱ボーリングにより発見されている (Link, 1952; Macgregor, 1993; Klusman, 2000)。規模の大きなガス滲出 (Macroseeps : Etiope, 2015) は、リモートセンシングにより、広域的な分布を確認することができる。しかし、規模が小さいガス滲出 (Microseeps : Etiope, 2015) は、地表で採取したガスサンプルを用いた地球化学的分析が主であり、Microseeps の面的分布の把握に必要な多点調査には限界があった。根源岩をソースとする石油ガスは、地中を移動する過程で移流分散や拡散により濃度が低下し、地表に放出された後さらに大気により希釈される (図 1)。したがって、大気中に放出された石油ガスを検知するためには、極めて高精度の微量ガス濃度測定技術が必要とされる。

キャビティリングダウン吸収分光法 (Cavity Ringdown Spectroscopy, CRDS) は、O'Keefe and Deacon (1988)により発明された、大気中の微量ガス濃度を高精度に測定する技術であるが、近年、測定装置の高精度化と小型化が進み、バックパック型の装置も市販されている (Picarro Inc., Los Gatos Research など)。著者らは、活断層地域において同装置を用いた測定を行った結果、断層露頭のガウジ直上から約 30 ppm のメタンガスの放出を確認すると共に、道路と断層交差部においてメタンガスアノマリを観測した (下茂ほか, 2019)。

今回、大気中ガス濃度測定による石油ガス滲出点調査の可能性を調べるため、山形県酒田市周辺においてキャビティリングダウン分光法測定装置を用いた車載方式のメタンガス濃度測定を延べ6日間にわたり実施した。一部の測定には、風向風速の影響を調べるために風速測定を実施した。測定データの評価に当たっては、当日の気象条件 (温度、風速、気圧など) によるメタンガス濃度のバックグラウンドの変動を考慮したコンター描画方法を採用することにより、測定期間を通じた分析を可能とした。本論文では、測定データに見られるメタン濃度アノマリの分布と既往の物探・探鉱データから推定される石油システム内の石油胚胎状況との比較から、高精度大気中微量ガス濃度測定技術の石油ガス探査への適用性について得られた知見を述べる。

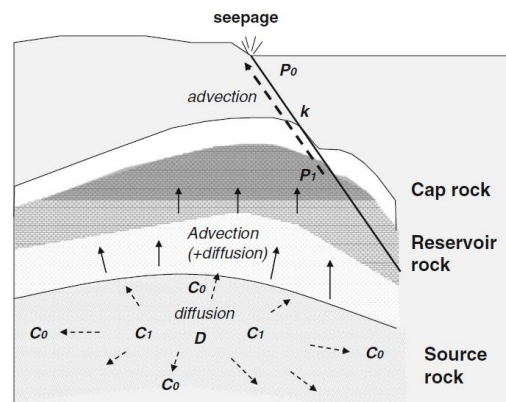


図 1 石油貯留層から地表に向かうガスの移動 (Etiope, 2015) .P はガス圧力, k は浸透率, D は拡散係数, C は濃度をそれぞれ表す。

2. 測定概要

2.1 調査場所

余目油田をはじめとする油ガス田が分布する山形県酒田市周辺において、CRDS 技術を用いた地表へのガス滲出の有無および滲出箇所の特定の

可能性を調べることを目的として、車載方式による大気中微量メタンガス測定を実施した。主な測定箇所は以下の通りである（図2）。

- ①最上川南側（余目油田およびその西部）
- ②最上川北側（砂越油田およびその北部）
- ③庄内平野東部および東縁辺丘陵地

①, ②では、調査中を含め複数の油田の存在が知られている。また、③は、酒田衝上断層群の分布域に位置する。

2.2 測定手法

CRDS 法による大気中微量ガス濃度測定法は、

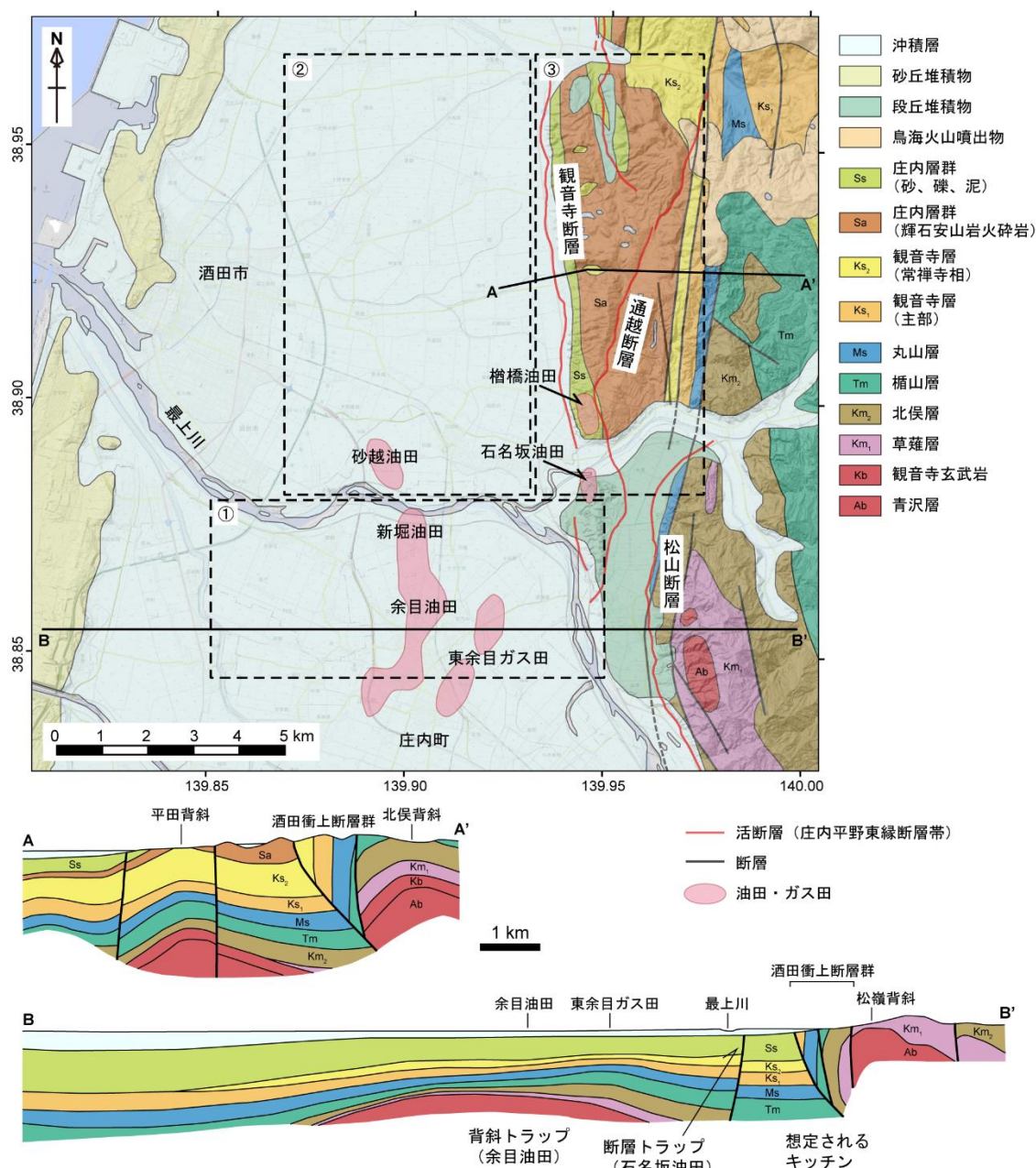


図2 測定箇所周辺の地質（「20万分の1地質図幅 新庄及び酒田」（大沢ほか、1988）に加筆）、AA'、BB' 両断面において草薙層珪質岩相（km1）は丘陵域から西方に向かい薄化する。

両端に高反射率のミラーを設置したキャビティ（容器）内にガスを導入し、レーザーを一定時間照射し停止した後の透過光のエネルギー減衰からキャビティ内のガス濃度を高精度に測定する技術である。原理の詳細については、文献（O'Keefe, 1988; 戸野倉, 2012; 下茂ほか, 2019 など）を参照されたい。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、Picarro 社の可搬型装置（G4301）を用いた。装置の外観を図3に、仕様を表1に示す。車載方式の測定では、自動車の後部座席に装置を固定し、装置の吸気チューブの先端を車外に出し、大気を連続吸引することにより道路沿いのメタンガス濃度を連続測定した（図4）。吸気チューブの先端が車両前方を向くように接着テープで固定し、雨水やほこりの侵入を防ぐため、チューブの途中にフィルタを取り付け、先端はポリプロピレンマスクで保護した。一般道を数 km/h ~25



図3 Picarro 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）	1 ppb	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℃	

km/h 程度で走行しながら 1 秒間に一回のサンプリングレートでデータを取得した。

測定中の風向・風速データの測定には、METER 社の超音波風向風速計（ATMOS 22）を用いた。装置仕様を表2に示す。写真2に示すように、車両上部にマグネットで固定し、風向・風速データを5分ごとに取得した。風向は車両前方（0°）からの時計回りの角度として記録される。位置情報は、G4301に装着したGPSで取得した。ATMOS 22で記録された風向・風速は、車両走行中の見かけの値であるため、風向・風速が記録された時間の前後5秒間の車の移動距離と方位角（車両の向き）から車両の速度と向きを計算し、これらを補正して、真の風向風速を算定した。



図4 車載測定の様子。自動車の後部座席にG4301を固定し、同装置に接続する吸気チューブの先端を車外に出して大気中メタン濃度を測定した。

表2 風向風速計仕様

品名	ATMOS-22 超音波風向風速計
出力	平均風速、瞬間風速、風向又は方向
風速	0~30 m/s
風速分解能	0.01 m/s
風速精度	0.30 m/s、又は3%（どちらか大きい方）
風向	0~359°
風向分解能	1°
風向精度	±3°
動作環境温度	-40~50℃
最大サンプリング速度	1Hz
装置寸法	直径100mm×高さ155mm

2.3 測定工程

地表メタンガス濃度測定は、下記の2回にわたり、延べ6日間にわたり実施した。

第1回目；2019年9月30日～10月2日

第2回目：2019年12月13日～12月15日

測定時間は、昼食休憩を挟んで概略午前9時から午後5時までである。10月2日と12月15日の測定は、午前中のみ測定した。なお、風向風速測定は第2回目の測定時のみ実施した。表3に、測定日の気象状況（気象庁アメダスデータ酒田より）を示す。第1回目と第2回目では気温が大きく異なる。また、第1回目は晴れの日が続いたが、第2回目の測定時は曇り～雨の天候であった。風向風速は、第1回目は北西～西方向、風速3±1m/s程度で安定していたが、第2回目は、時折10m/sを超える風が吹き、風向も不安定であった。

3. 測定地域概要

3.1 地表地質および地質構造発達史

測定対象領域を含む酒田地域では、東側の出羽丘陵に新第三系中下部（青沢層～草薙層）が広く分布し、西側の酒田平野に第四系が発達する（図2, 5）。本地域における新第三系の堆積は、日本海開口に伴う青沢リフト（現在の出羽丘陵が中心）での玄武岩を主とする海底火山活動に始ま

り、引き続き中新世中期には草薙層珪質岩が堆積する。草薙層は、同時期／同岩相の女川層（秋田地域）や下部寺泊層（新潟地域）と共に東北日本における主要な石油根源岩となっている。第四紀に入り、青沢リフトは反転し、出羽丘陵の隆起と共に、東西両側に大量の粗粒碎屑物が供給され、西側の酒田平野域では常禅寺層～庄内層群の粗粒相が厚く堆積することになる。この反転・隆起により、最終的に酒田衝上断層群が形成され、周辺では褶曲構造の形成により一部で石油ガスのトラップ（余目油ガス田等）が成立する。本調査では、この断層群および石油ガストラップからのメタン滲出に伴うアノマリの検知をめざした。

前述の衝上断層群は、リフト期の正断層の反転（inversion）構造、あるいは backthrust 系を含め初期の断層から”detach”するケースもあり、深部からの流体の移動を考える上では断層の深部形態に留意する必要がある。世界の石油ガス探査を通じて、一般的には、リフト堆積盆では断層を通じた炭化水素の垂直移動が卓越する事が知られている。また、断層群周辺に成立している油田群（後述）のうち、余目油ガス田含め主要なものは、上記断層群と同トレンドの断層（逆断層系主体）を伴っている。これらの断層の多くは、衝上断層群と同様に反転構造と推定される。油ガスの起源に関しては、従来より酒田平野中央部に求める意

表3 気象庁の観測点における気象データ。

気象庁観測点		酒田					狩川			
測定日		平均気圧(hPa)	平均温度(°C)	平均風速(m/s)	風向	天気	平均降水量(mm)	平均温度(°C)	平均風速(m/s)	風向
2019年9月30日	午前	1017.7	23.1	2.2	西北西～西	晴れ	0.0	23.1	1.8	北北西～西北西
	午後	1017.3	24.3	3.1	西北西～北西	晴れ	0.0	24.3	3.4	西北西～北西
2019年10月1日	午前	1021.4	23.0	2.5	北東～西北西	晴れ	0.0	23.0	1.9	東南東～東
	午後	1020.5	24.4	3.9	北西～北北西	晴れ	0.0	24.4	3.0	北北西～北西
2019年10月2日	午前	1020.6	23.9	2.6	南東～西北西	晴れ	0.0	23.3	3.9	東南東
	午後	1017.6	26.1	2.8	北西～北北東	晴れ	0.0	26.6	2.4	南東～西北西
2019年12月13日	午前	1026.3	6.3	3.8	西北西から西	みぞれ	0.0	5.1	4.1	西北西～北西
	午後	1025.3	6.8	3.6	北西～南東	雨時々曇り	0.0	4.6	3.1	北北西～東南東
2019年12月14日	午前	1015.2	8.8	4.9	南東～南西	曇り～雨	0.0	8.0	3.9	東
	午後	1012.8	9.0	10.3	西南西～西	雨	2.3	7.9	10.0	西～西北西
2019年12月15日	午前	1028.5	4.7	6.4	北西	曇り～雨	0.0	4.0	6.7	北西
	午後					測定は実施せず				

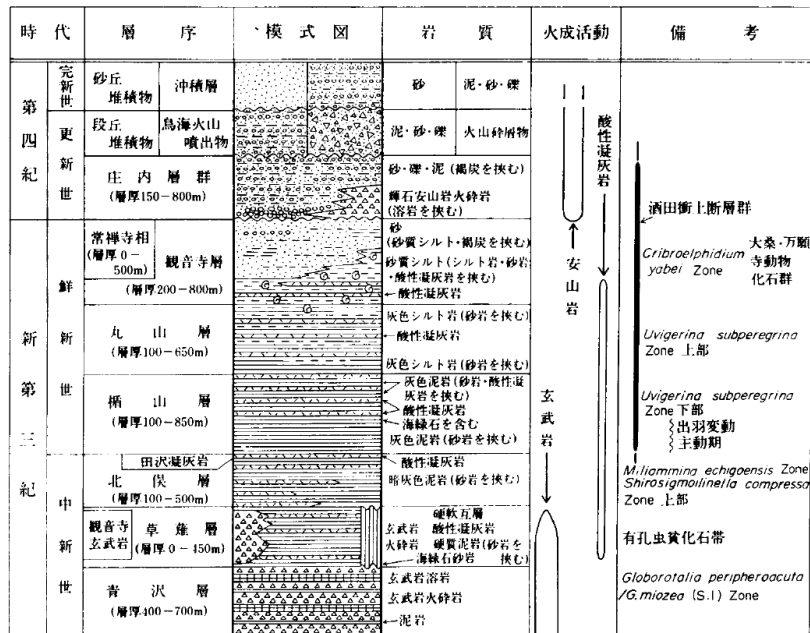


図5 酒田地域標準層序 (池辺ほか, 1979), 加藤ほか (2013) の微化石に基づく坑井標準層序によれば, 北俣層上部~楯山層下部は鮮新統に, その上位層は更新統に属する。

見もあるが (例えば, 加藤, 2013), 現時点で同地域での草葎層根源岩の発達を示す積極的な証拠はない。加えて隆起帯内部および前面での油田成立状況 (鳥海山油田/石名坂・楯橋油田) も勘案すれば, むしろ隆起帯前面の草葎層沈降部 (反転前の状況に近い) に油ガスの生成場 (キッチン) を求めるのが自然である (図2)。この沈降部における草葎層の最大埋没期 (おそらくは観音寺/常禪寺層堆積期) 以降に, リフト期の断層と草葎層以浅のキャリアベッド (効率的な流体移動をもたらす粗粒相) を通じてトラップへの炭化水素の移動が行われたと考えられる。

3.2 酒田周辺における石油探査/開発の歴史と地下地質概要

3.2.1 石油開発の歴史 (油田位置は図2参照)

酒田周辺, 庄内地域での石油探査は, 出羽丘陵周辺の褶曲帯において, 戦前の背斜構造および

地表油徴を狙った試掘に始まり, 鳥海山麓での鳥海山油田 (1934), 戦争を挟んで石名坂油田 (1944, 帝石) と楯橋油田 (1947, 帝石) が発見されている。戦後は, 物理探査技術の導入により丘陵前面の平野域の探鉱が進み, 庄内地方において, おそらく最後で最大となる余目油田 (1960) の発見に結び付く。その後, 新庄地域あるいは海域も含め, 少ないながらも 1980 年代まで試掘は続けられたが新規発見には至っていない。発見された油田の規模はいずれも小さく, 最大の余目油田で累計生産量が 70 万 KL を超えたところである。現在操業中の油田は, 余目 (JAPEX) と隣接する新堀 (INPEX) の2油田のみであるが, いずれも減退が進み, 最近では油田構造の北方延長を含め再開発/新規探鉱をめざした検討も行われている (鬼嶋ほか, 2018)。

3.2.2 余目油田の概要 (図2, 図6)

余目油田は, 酒田市街の南東約 10 km, 最上川

南岸の水田地帯に位置する。本油田の発見・開発が行われた昭和 30 年代は、現在のような質の良い地震探査記録はほとんどなく、多数の坑井による直接的な地質データに基づき油田開発が進められた。油層は、北俣層～草薙層の凝灰岩および砂岩よりなり、深度は概ね 900 m 前後である。トラップとしては典型的な背斜型であるが、一般的に油層の分布が不均質なため、一部層位型（尖滅）の要素もある。原油は主として軽質油で、北部で GOR（ガス油比）が高くなる傾向にある（加藤ほか, 2013）。本油田の成立に関わるキッチン（石油の生成領域）は、前述のように東方の出羽丘陵前面の沈降帯が想定される。一方、余目油田の構造は、北方の砂越油田も含め全体として南北に延び、NNW-SSE 系構造の集合体と見なせる。個々の構造では、下位層の層厚変化と形態から、その西側に同トレンドの反転構造としての断層が推定され、これらは、元々青沢リフトの縁辺における正断層群を構成していたと考えられる。

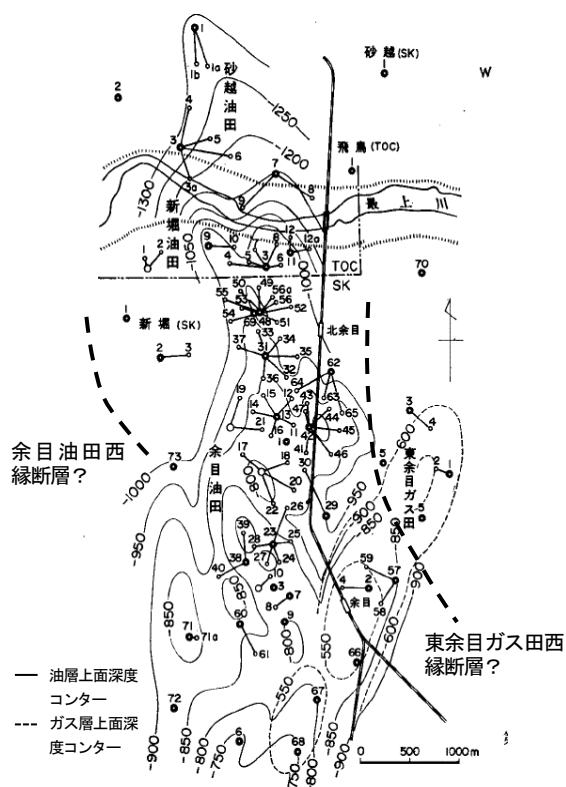


図 6 余目油田、東余目ガス田および砂越新堀油田の地下構造（酒田地域の地質 池辺ほか, 1979 に加筆）。

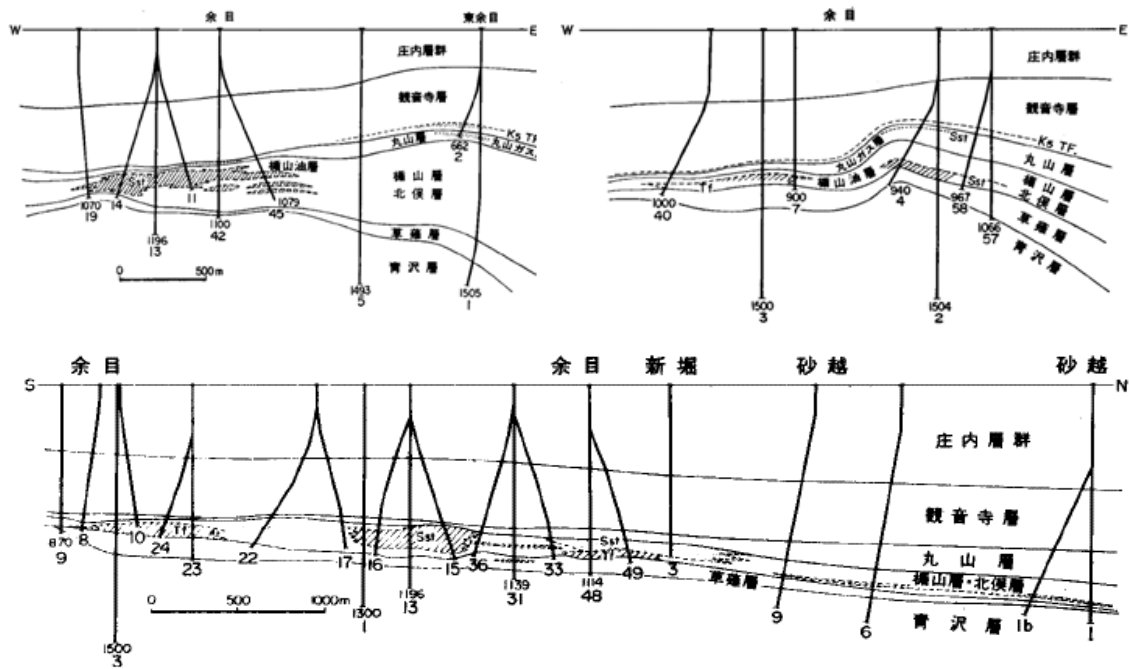


図 7 余目油ガス田、新堀油田、砂越油田断面図（酒田地域の地質 池辺ほか, 1979）、加藤ほか（2013）によれば、油層の大部分は北俣層下部（上部中新統）に属する。

3.2.3 周辺の油ガス田 (図2, 図6, 図7)

庄内地域におけるその他の油ガス田の多くも余目油田周辺に分布する。余目油田北隣の新堀油田は、余目油田とほぼ同じトラップに属する。さらに北隣の砂越油田も余目油田と一連の構造と見なせるが、小規模な鉱床ながら油層は青沢層 basalt であり、余目本体とは性格が異なる。東隣の東余目ガス田は、余目本体と異なり浅所で油を伴わないガス層 (丸山層砂岩/深度 600m 前後) から構成されるため、余目とは別構造として取り扱われている。一方、余目油田の東北東方、出羽丘陵前面の褶曲帯に位置する石名坂・檜橋油田は、庄内層群のなす背斜と断層の組み合わせトラップであるが (図8)、油層深度が百数十 m ときわめて浅く、強度の微生物分解により重質油となっている。両油田は、余目油田で想定される migration path (キッチンからトラップへの炭化水素の移動経路) 上にあり、その油は余目と共通のキッチンから由来していると考えられる。

4. 測定結果

4.1 大気中メタン濃度

図9に、車載測定で得られた、測定日毎の大気中メタン濃度時系列データを示す。測定間隔は1秒である。また、図10にメタン濃度ヒストグラムを示す (ただし、2.1 ppm 以上の高濃度データを除く)。午後から天候が崩れ風速の変化が大きくなった12月14日の測定結果を除き、メタン濃度は、中央値±10~20 ppb 程度の範囲に分布している。すなわち、中央値から±20 ppb 程度の範囲の濃度は、バックグラウンド濃度のゆらぎと見なせるが、この幅を大きく超える濃度スパイクについては、何らかのアノマリと見なすことができる。

一方、メタン濃度のバックグラウンドの中央値は、測定日毎に最大約 0.1 ppm の相違が見られる。そこで、全データの相互比較が可能のように、各測定日のメタン濃度の中央値が基準値 (ここでは、1,900 ppm とした) に等しくなるように、デ

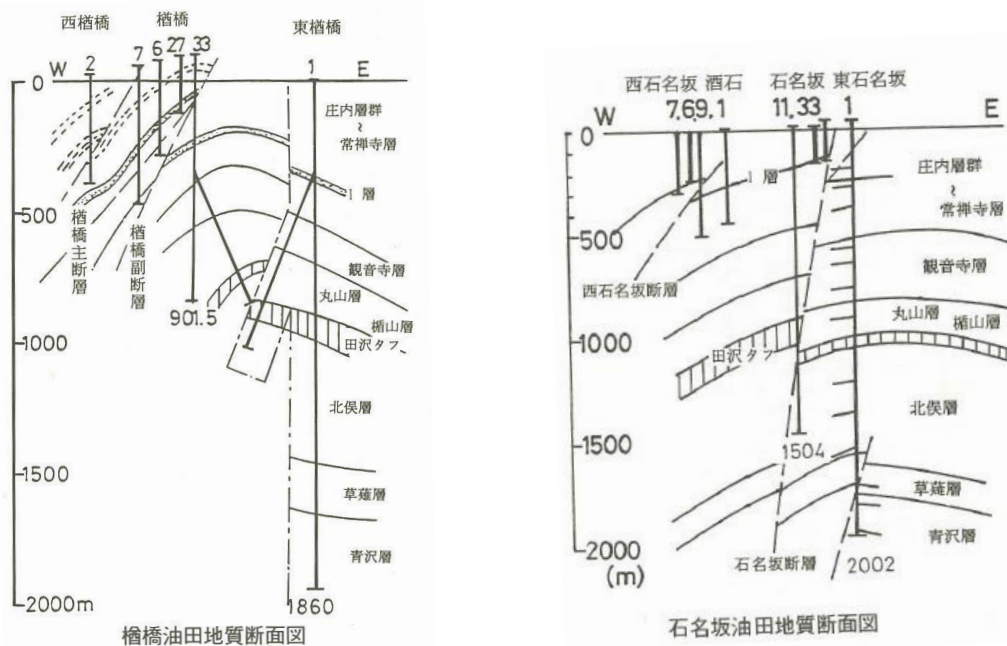


図8 檜橋油田および石名坂油田断面図 (庄内油田史 (帝国石油))

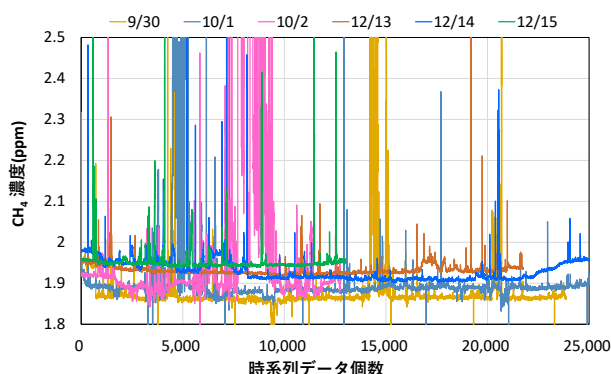


図9 メタンガス濃度測定結果（元データ，測定日毎）

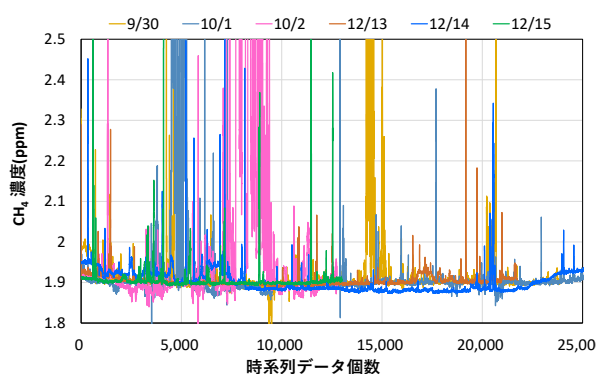


図11 メタンガス濃度測定結果（中央値が1.900ppmとなるように図9のデータをシフト）

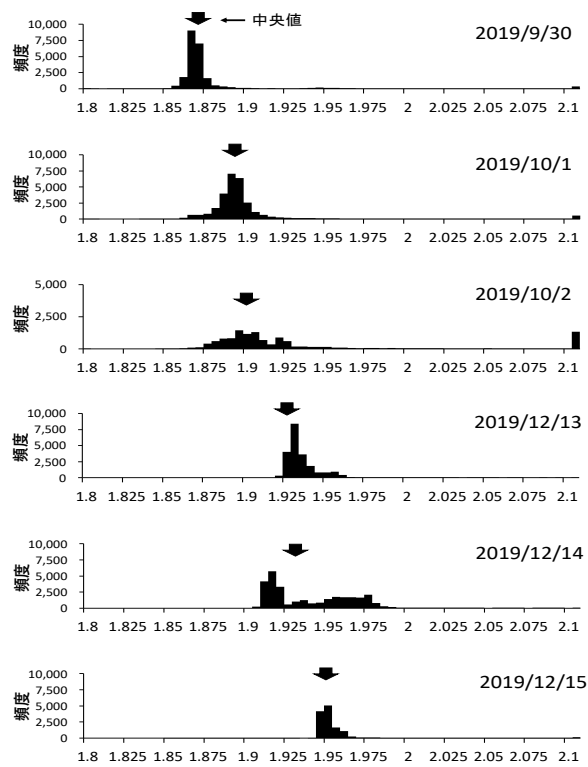


図10 メタンガス濃度ヒストグラム（測定日毎）

ータを補正した。バックグラウンドの中央値をそろえた補正後の結果を，図11に示す。

測定結果の地図上表示には，GPS Visualizer (<https://www.gpsvisualizer.com/>) を用いた。GPS Visualizer は，緯度，経度情報を伴う測定データ

から Google Earth 用の kmz ファイルを作成するフリーのオンラインユーティリティである。最大値・最小値を指定すると，ルート沿いのメタン濃度が hue の色相表現により表示される。

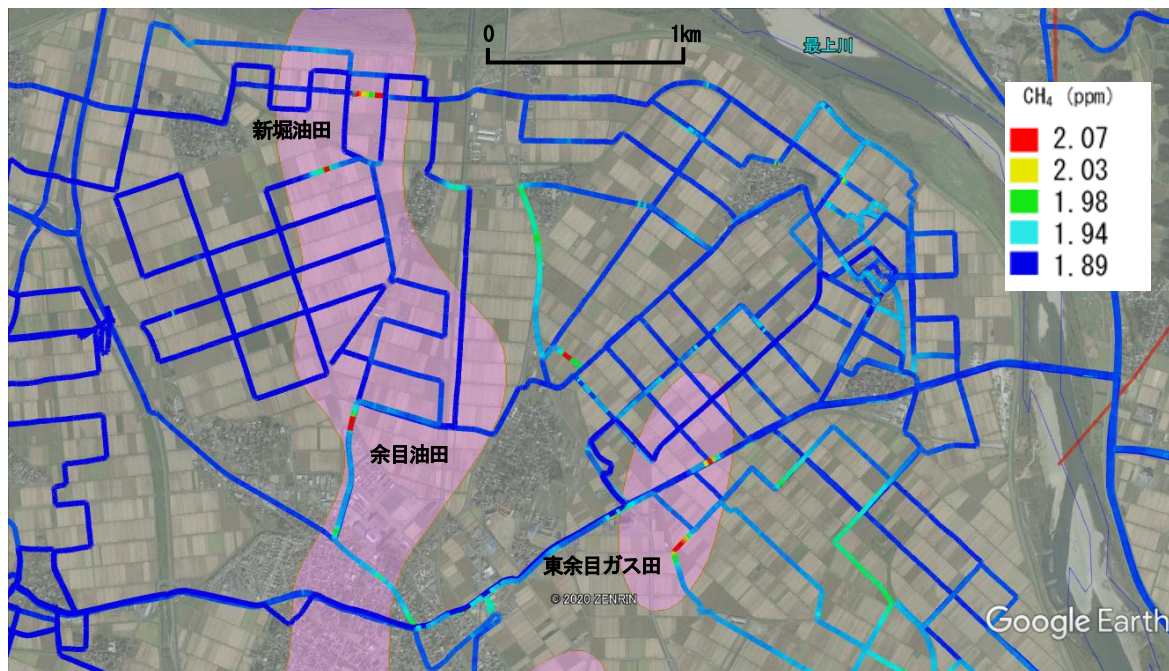
今回は，基準値（1.900 ppm）に対して，下記の2種類のカラーマップを用いて描画した。

狭域レンジ：基準値から幅 90 ppb の濃度範囲（1.890～1.980 ppm）

広域レンジ：基準値から幅 180 ppb の濃度範囲（1.890～2.070 ppm）

狭域レンジは，数10ppb以下の低濃度アノマリの抽出を，広域レンジは，数10ppb以上の相対的に高い濃度のアノマリの確認を目的とする。

以上のようにして作成したメタン濃度の測定結果を図12～図17に示す。余目油田周辺の測定結果（図12，図13）は，広域および狭域の2レンジのカラーマップで示した。バックグラウンド（青色系）と比較してメタン濃度が高い場所は，緑～赤色で示されている。狭域レンジで表示した結果は，広域レンジでは判別が難しい低濃度のアノマリを確認することができる。なお，複数回通過して測定した場所では，軌跡の重なりにより高濃度部が印刷では判読できない箇所があるが，Google Earth 上で拡大すると確認できる。



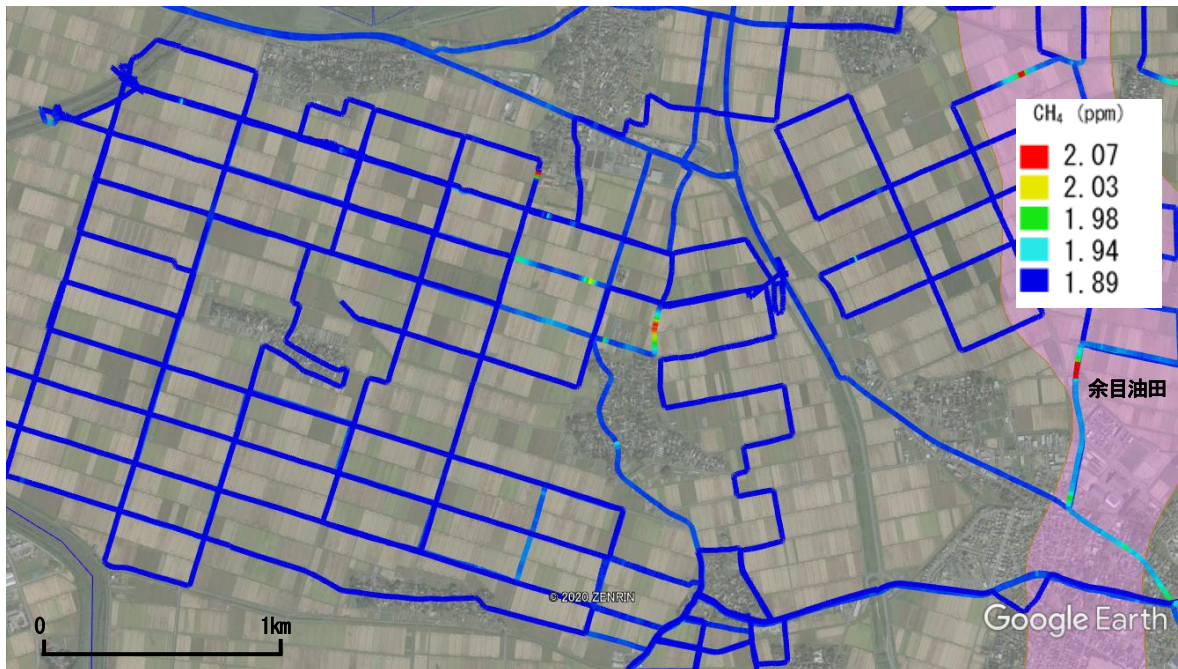
a. メタン濃度分布 (カラーマップ: 広域レンジ)



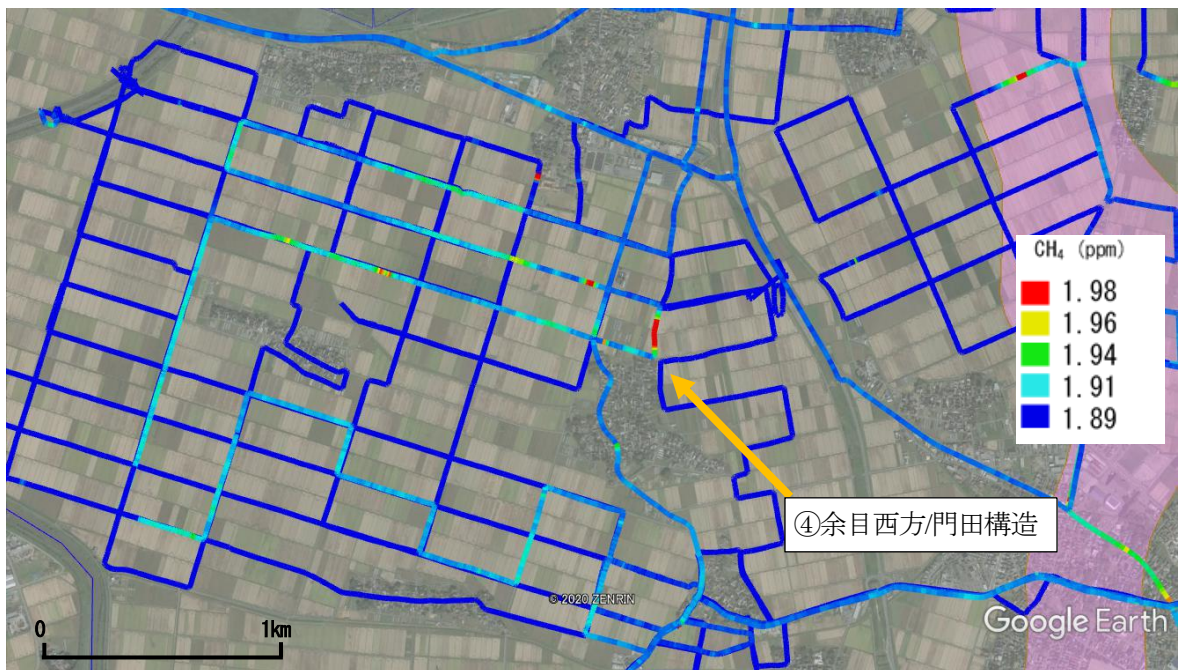
②余目ガス田本体に由来? ① 東余目ガス田西縁断層 (白矢印の間)?

b. メタン濃度分布 (カラーマップ: 狭域レンジ)

図12 余目油田東側のメタン濃度分布 (場所は, 図2中の領域①東側), 東余目ガス田の範囲は石油資源開発(2006)に基づき修正. ベースマップには, Google Earthを使用した. 赤線は, 産業技術総合研究所活断層データベースの「活動セグメント」を示す.



a. メタン濃度分布 (カラーマップ: 広域レンジ)



b. メタン濃度分布 (カラーマップ: 狭域レンジ)

図 13 余目油田西側のメタン濃度分布 (場所は、図 2 中の領域①西側), ベースマップには、Google Earth を使用した。

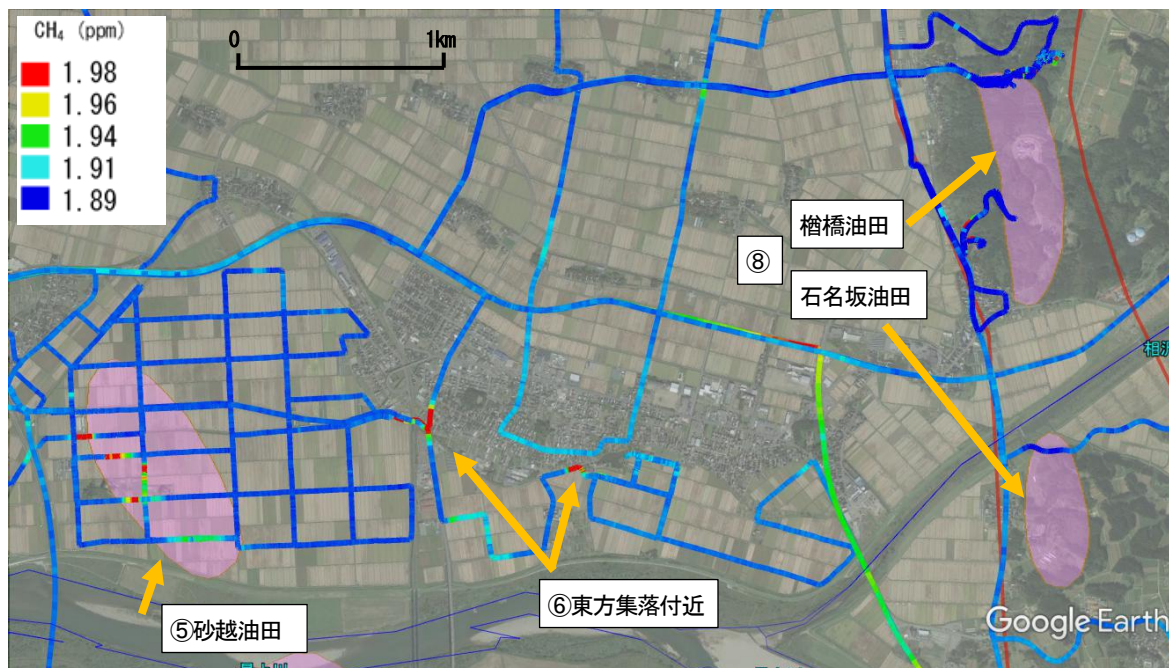


図 14 砂越油田周辺のメタン濃度分布（場所は、図 2 中の領域②南側，カラーマップ：狭域レンジ），ベースマップには，Google Earth を使用した。赤線は，産業技術総合研究所活断層データベースの「活動セグメント」を示す。



図 15 砂越油田周辺のメタン濃度分布（場所は、図 2 中の領域②北側，カラーマップ：狭域レンジ），ベースマップには，Google Earth を使用した。赤線は，産業技術総合研究所活断層データベースの「活動セグメント」を示す。白破線は，推定されるアノマリ列を示す。

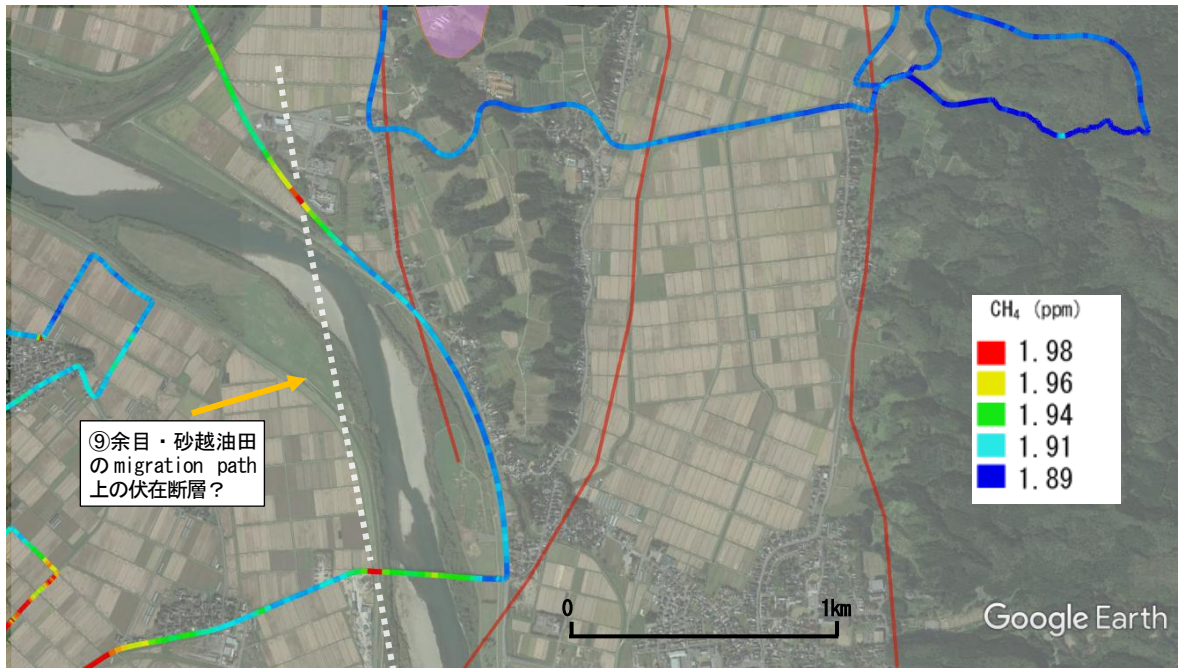


図 16 余目東方のメタン濃度分布（場所は、図 2 中の領域②東端），2019 年 10 月 1 日のデータ，ベースマップには、Google Earth を使用した。赤線は、産業技術総合研究所活断層データベースの「活動セグメント」を示す。白破線は、推定されるアノマリ列を示す。

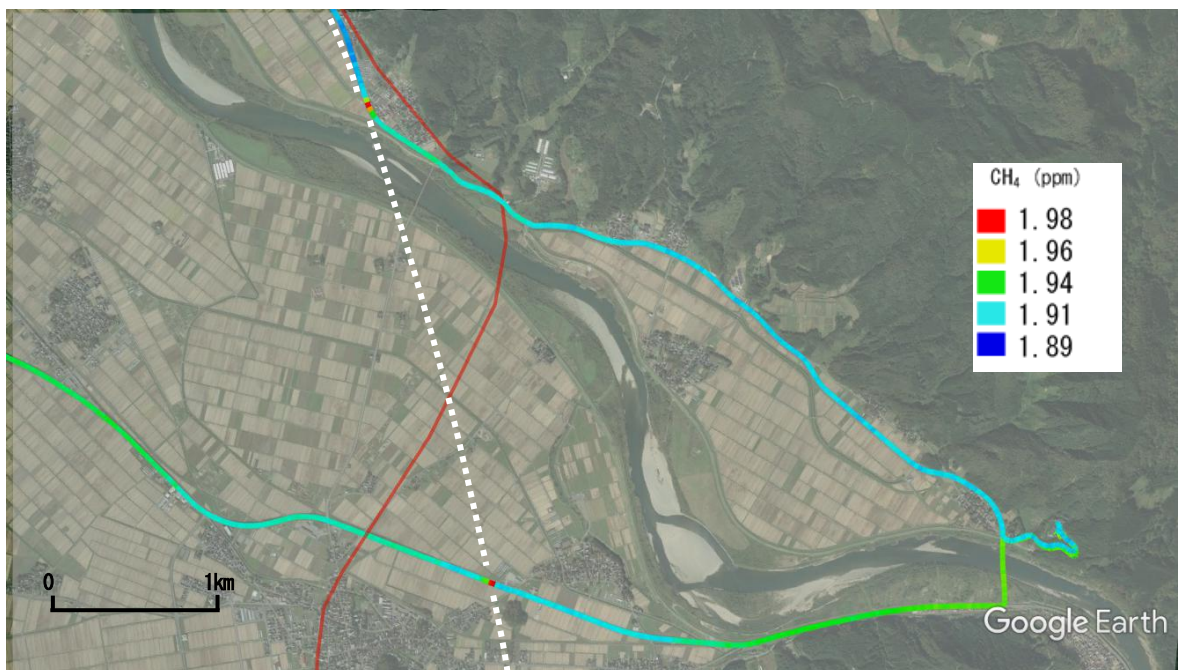


図 17 余目南東方／庄内平野東縁断層帯南部のメタン濃度分布（場所は、図 2 の範囲外，松山断層の南側延長部と最上川が交差する付近，2019 年 12 月 14 日のデータ，ベースマップには、Google Earth を使用した。赤線は、産業技術総合研究所活断層データベースの「活動セグメント」を示す。白破線は、推定されるアノマリ列を示す。

4.2 風向風速測定結果に基づくメタン濃度データの分析

風向・風速データとメタン濃度データが同時に取得できた範囲について、メタン濃度分布に風向・風速データを重ね合わせた結果を図 18～図 21 に示す。余目油田東側における 12 月 13 日 (14:20～16:25) の測定で求められた平均風速は 2.2 m/s であった (図 18)。風向は、北東および南からの風がやや卓越する (図 22)。天気は曇りで、降雨はほとんど認められなかった。12 月 14 日の測定では、余目油田分布域で測定した時間帯 (10:35～11:25) の平均風速は 4.3 m/s、天気は曇りであった。一方、余目油田西側で測定した時間帯 (11:30～15:25) の平均風速は 5.8 m/s と大きくなり、天気は雨となった。また、この時間帯は、西南西からの風が卓越する傾向が認められた (図 19, 20)。

砂越油田を含む最上川右岸側での 12 月 15 日 (9:00～11:30) の平均風速は 5.3 m/s、天気は曇り時々晴れであった。風向は北、北西および南西からの風が卓越する傾向が認められた (図 21, 22)。

メタン濃度と、風向・風速との関係を見ると、12 月 13 日の余目油田東側における測定では、風向・風速がメタン濃度分布に明瞭に影響している傾向は認められなかった (図 18)。12 月 14 日の余目油田分布域の測定では、鉱場 (図 19 の①) 起源のメタンが南からの風で流されて測定される様子が認められる。

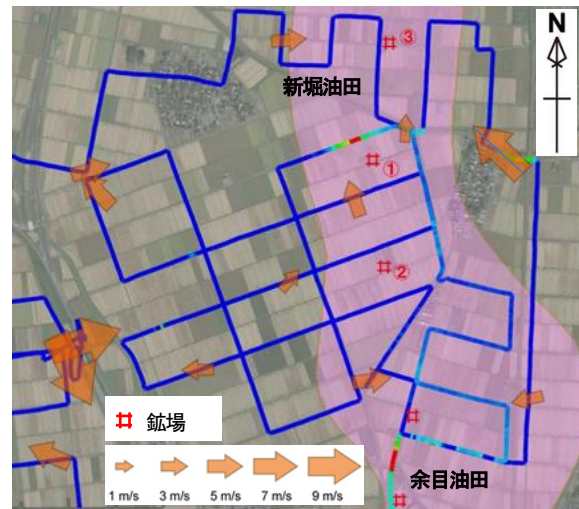


図 19 余目油田分布域での 12 月 14 日 (10:35～11:25) の測定における風向・風速データ (矢印) とメタンガス濃度データ (狭域レンジ) の重ね合わせ。ベースマップには Google Earth を使用した。

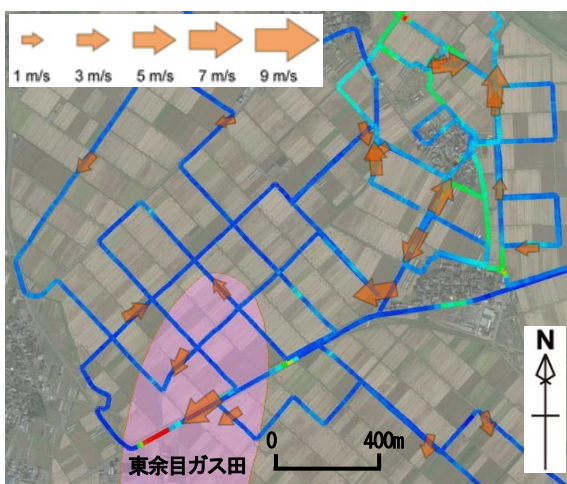


図 18 余目油田東側での 12 月 13 日 (14:20～16:25) の測定における風向・風速データ (矢印) とメタンガス濃度データ (狭域レンジ) の重ね合わせ。ベースマップには Google Earth を使用した。

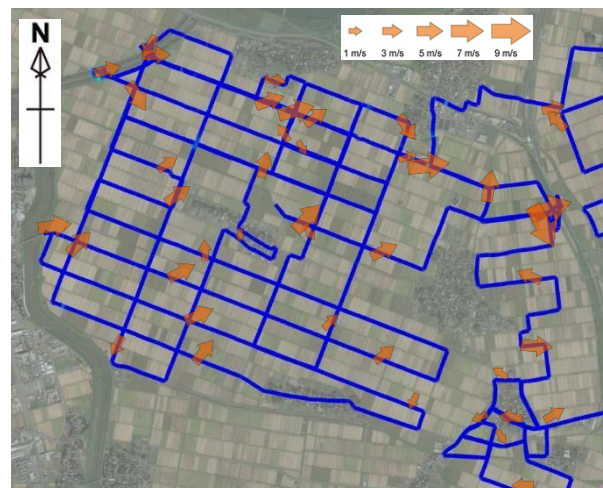


図 20 余目油田西側での 12 月 14 日 (11:30～15:25) の測定における風向・風速データ (矢印) とメタンガス濃度データ (狭域レンジ) の重ね合わせ。ベースマップには Google Earth を使用した。

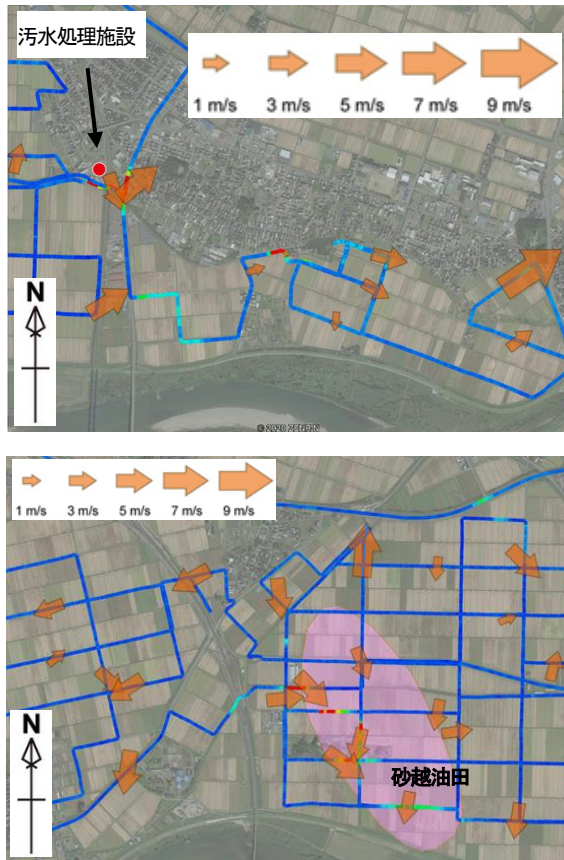


図 21 最上川右岸側での 12 月 15 日 (9:00~11:30) の測定における風向・風速データ (矢印) とメタンガス濃度データ (狭域レンジ) の重ね合わせ (上が東部, 下が西部)。ベースマップには Google Earth を使用した。

一方, 図 19 の②や③の鉱場近傍では, メタン濃度の上昇は認められておらず, 鉱場の操業状況による違いがあると思われる。同じく 12 月 14 日の余目油田西側での測定では, 全体的にメタンアノマリが小さかったが (図 20), 強風のため, 地下から放出したメタンの拡散が早く, メタン濃集部を検知する感度が低下した可能性も考えられる。12 月 15 日の測定では, 砂越油田分布域の近傍にメタン濃度の高い領域が認められるが, この範囲では北西ないし北からの比較的強い風が記録されている (図 21)。また, 領域の北西部のメタン濃度が特に高く, 北西に放出源のあるメタンが風で南東方面に流された様子が測定された可能性がある。12 月 15 日の測定範囲からは, 砂越油田分布域以外でもメタン濃度の高い地点が複数認められるが (図 21), このうち一つは酒田市の汚水処理施設 (飛鳥砂越) の近傍に位置しており (酒田市上下水道部, 2019), 検知されたメタンの起源については, 更なる詳細な検討が必要である。

なお, 測定範囲の北西および南東に位置する

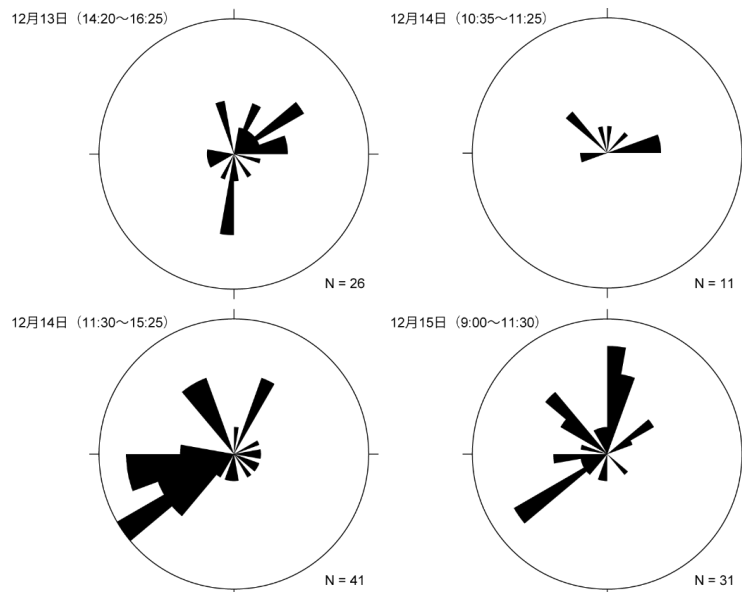


図 22 超音波風速計で測定された風向のローズダイアグラム。

気象庁の観測点（酒田および狩川）における当該時間帯の平均気温、降水量、平均風速、風向、天気は表3の通りであった。本研究で測定された風向の傾向（図22）は気象庁の観測データと整合的である。車載測定においてメタンの放出範囲を正確に特定するためには、メタンガス濃度と風向・風速のデータを同時に取得することが非常に重要であると言える。

5. 地下地質情報に基づく測定結果の評価／解釈

5.1 想定されるアノマリ／石油地質的予察

地表における油ガス徴は、典型的には炭化水素の集積構造となる背斜軸部に沿って断続的に分布することが多い。これは、背斜構造の隆起削剥に伴う貯留層／トラップそのものの露出あるいは局所的な引張断層によるシールの破れに起因する。しかし、油ガス田が成立しているトラップでは、一定の深度においてシールが健全に機能している

ため、本来油ガスプール直上での顕著なアノマリは期待しにくいはずで、むしろそれが我々のめざす探査における標準的な状況と考えるべきである。

余目油田では、過去に実施した地表地化学探査において何らかのアノマリが観測されているが、これは一定期間炭化水素を吸着させる、言い換えれば信号を増幅させる手法であり、今回の我々の手法に同等の検知効率は期待しにくい。したがって、もっとも期待されるのは断層に沿ったリークであり、次のような状況下にある断層において起こりうると考えられる（図23）。

- a) 炭化水素の migration path 上（トラップへの集積と同時に浅所へのリークがありえる）
- b) トラップにおける油ガスプールの範囲（シールに対し局所的な弱線となりうる）
- c) 断層トラップ（断層が油ガスプールを規制：断層自体のシール能力を超える分がリークする、石名坂・檜橋油田が典型）
- d) トラップ／油ガスプールの外側（油ガスプー

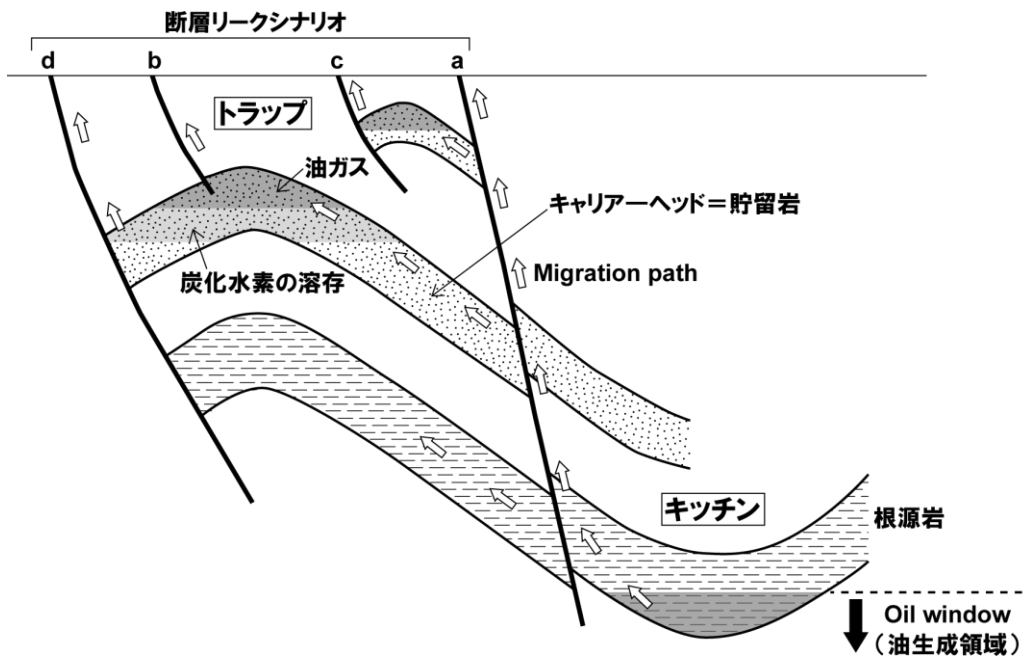


図23 想定される断層からの炭化水素リークシナリオ

ル周辺の地層水は炭化水素による飽和傾向にある)。本研究の一環として 2018 年 9 月に予察調査を実施した新潟県見附油田がこれに相当すると考えられる (図 24)。

上記の他、浅部帯水層においては微生物起源ガスの集積がありえるため、浅所における粗粒堆積層の分布にも留意する必要がある (例えば、旧河道/海岸砂丘など)

5.2 観測されたメタン濃度アノマリの解釈

前節の考察を参考にしつつ、測定結果の解釈

を試みる。総論としては、余目油田周辺 (東余目ガス田を含む) と北部 (砂越油田) で比較的強いアノマリ (メタン上昇) が観測され、地下構造とも整合的である。一方、酒田衝上断層群周辺では一部を除きほとんどアノマリは認められなかった。

5.2.1 余目油田周辺 (図 2 の領域①)

① 余目油田東部 (図 12b の①)

油田東側に NNW-SSE 方向 (余目における卓越トレンド) の線状アノマリが認められる (図 12b 中の 2 本の白矢印の間)。その位置と方向性から、

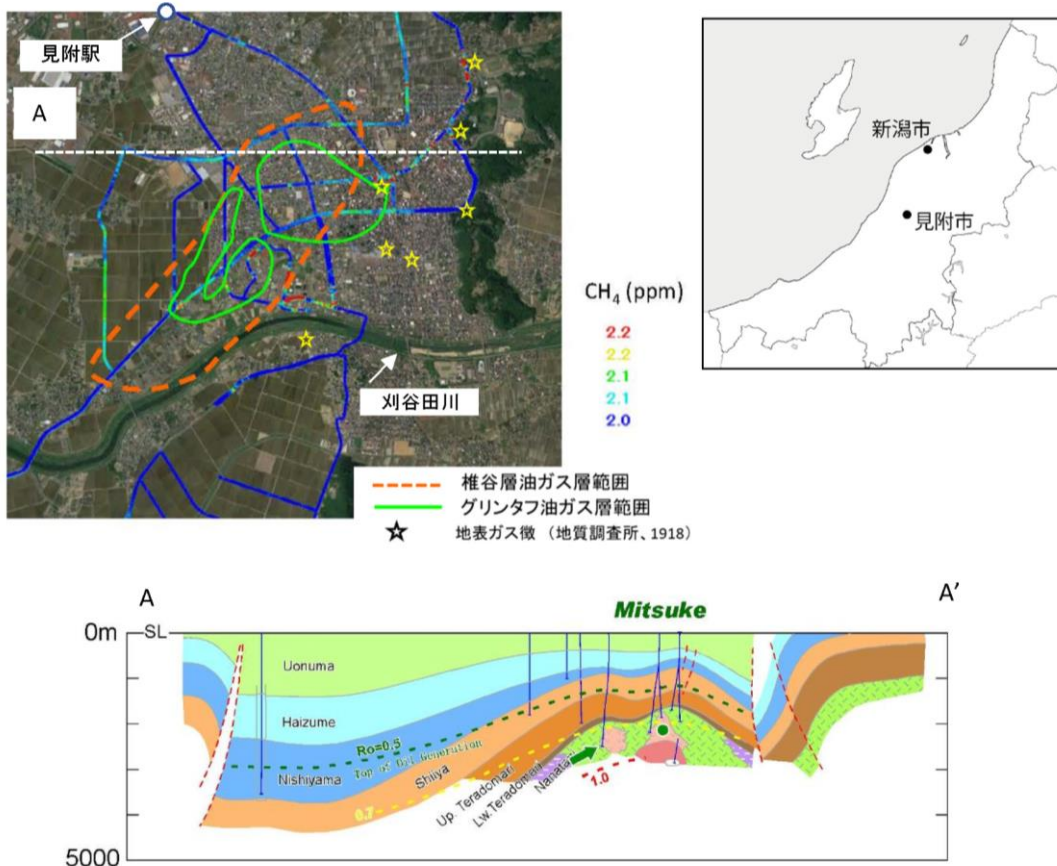


図 24 見附油田における予察調査結果 (2018), 左上: 見附油田における予察結果, 下: 地質断面 (Katahira and Ukai, 1976), 断面線は上図に表示。油田東縁 (油ガスプールの外側) に、従来より推定される断層 (下の図) 沿いに地表ガス徴が多数報告されており、2018 年に著者らが実施した予察調査においても同傾向のアノマリ (測線上の赤色部) が観測された。地質断面で示された東縁断層は、リフト期の正断層 (西落ち) が西山期以降に反転したものと解釈される。

東余目ガス田の西側に推定される反転断層に由来する(図23のケースd)可能性が高い。その南東側に不明瞭ながら広範囲に広がるアノマリは、最上川に沿っての微地形を勘案すると、東余目ガス田から浅部地下水層に沿ってのメタンの拡散・移動を示している可能性も考えられる。

② 余目油ガス田主部(図12bの②)

余目油田において一番高い位置にあたり、油田に由来するアノマリの可能性は残るが、アノマリ自体が不明瞭で、今回の測定では再現性を確認できなかった。

③ 新堀油田生産基地(図12bの③)

明確に生産操業に由来するものと判断される。

④ 余目西方/門田構造(図13bの④)

NW-SE系線状アノマリと解釈される。“門田構造”や余目油田本体の間に推定されているNNE-SSW系断層とは必ずしも整合的でないが、この断層の確度はあまり高くないことを勘案すれば、むしろ両構造を含めた余目構造全体の西縁を区切る断層(図6中に破線で示す)の存在を示唆している可能性(図23のケースd)もある。

5.2.2 砂越油田周辺(図2の領域②)

⑤ 砂越油田(図14の⑤)

砂越油田とはほぼ一致する形でNW-SE系の線状アノマリが認められ、油田との相関が強く示唆される。地下構造に関する情報は不十分であるが、本構造西側(アノマリの位置)に、余目本体西側の推定断層と同系統の断層の存在が示唆される。

⑥ 東方集落(図14の⑥)

集落の分布が旧河道沿いとするならば、前述のように微生物起源ガスの可能性もある。ただし、西側のアノマリについては、近傍の汚水処理施設に由来する可能性が高い。

⑦ 余目構造北方延長/生石周辺(図15)

2条のNNW-SSE系のアノマリ列が解釈できる。このうち北東側の系列については、近傍坑井(生石SK1)で炭化水素の胚胎が確認されており(石油資源開発,2006)、断層やトラップの存在等、余目油田をアナロジーとした再検討も可能と考える。

5.2.3 丘陵域/酒田衝上断層群周辺(図2の領域③)

⑧ 石名坂・檜橋油田(図14)

3.2節で述べたように、石名坂・檜橋油田は油層深度が浅く、何らかの徴候が期待されたが、アノマリは検知できていない。この原因としては、i)油に溶存している軽いガス成分が極端に少ない、ii)生産により油プールの範囲が大幅に縮小している、あるいは、iii)最上川周辺の地下水系に水封されている可能性(本油田の油層圧は最上川の水位にコントロールされているとの記録もある)、などが考えられる。

⑨ 余目東方(図16)

東余目ガス田に伴うアノマリ(①)とは離れて、東側の断層群との間に、観測点は少ないもののN-S系のアノマリ列が推定できる。地震探査等により確認されていないが、余目油ガス田/砂越油田のmigration path上の断層(図23のケースa)の可能性もある。

⑩ 余目南東方/庄内平野東縁断層帯南部(図17)

これも観測点は少ないものの、庄内平野東縁断層帯南部(地震調査研究推進本部,1999)の活断層の一部として解釈できる可能性がある。地表リニアメントを結ぶ既往解釈に対し、断層セグメントがリレーする形で二つに分ける解釈も可能である。なお断層北側(松山断層)についてはトレンチで確認されている(遠田ほか,2008)。

⑪ 酒田衝上断層群主部および前縁断層帯(図15の東側丘陵部)

活断層としての評価が最も進んでいる地域であり、今回は庄内平野東縁断層帯北部の観音寺断層および通越断層（図 2）の調査を行ったが、明確なアノマリは検知できていない。原因としては、今回はこの領域の調査測線自体が少なかったこともあるが、断層自体の透水性の欠如に加え、断層の深部形態（地質図幅における断層群と地震調査研究推進本部による活断層は必ずしも一致していない点にも注意が必要である、特に通越断層）および周辺深部でのキッチンの油ガス生成能力不足が考えられる。後者については、草薙層根源岩の埋没深度が不十分で未熟成段階にあるか、basalt が卓越し珪質岩相（根源岩）の発達が不十分である可能性があり、周辺の地表あるいは坑井における油ガス徴候がきわめて乏しいこともキッチンの能力不足を示唆する。

6. 石油探査への適用性評価

本調査の成果は、石油ガス探査におけるこの手法の有効性についてその可能性を示したものと考える。本手法で得られるシグナルは本質的に小さく、バックグラウンドノイズとしての短周期変動（今回は、日単位の変動が観測された）さらには季節変動（地表地化学探査においてしばしば見られる）も加わることになり、測定方法や解析にある程度の標準化の工夫は必要となる。

しかしながら、何より手法の簡便さ（本調査では数日オーダーの時間と数十万円オーダーのコスト）を鑑みれば、通常の地表地化学探査（数カ月オーダー／数千万円以上）と同レベルの精度を期待するよりは、“60%の確度”でこの **advantage** を最大限活かすべきと考える。実際の探鉱活動においては、従来の地表地化学探査に先立つ、プレ一次スクリーニング手法となりうる。また、リモ

ートエリアなど初期段階の探鉱活動（地震探査等）が困難な地域や地表付近のノイズの少ない乾燥地域においては、さらに威力を発揮することが期待される。

7. おわりに

大気中微量ガスの高精度測定技術の地質構造調査への適用に関する研究の一環として、石油胚胎地域における車載方式によるメタン濃度測定を行い、地下貯留層からのメタン滲出箇所の特性を試みた。その結果、測定結果は、人工的なメタン排出源や気象の影響を大きく受けるものの、油ガス鉱床周辺あるいは根源岩からの断層を通じたガス滲出を強く示唆するメタン濃度アノマリが複数箇所で見出された。石油開発を目的とした場合、高精度微量ガス濃度測定技術は、従来用いられてきた物理探査やボーリング調査の代替とはなりえないものの、①リアルタイムにデータが得られる、②設備が軽微で繰り返し測定が可能である、③線的（測定密度によっては面的）情報が得られる、などの特徴から、探査エリアの絞り込みやボーリング実施箇所やガスサンプリング位置の検討などにおいて重要な知見を与える事前調査技術としての役割が期待される。

また、著者らは、石油開発以外の分野においても、昨年度実施した活断層地域における測定で得られた知見も踏まえると、高精度微量ガス濃度測定技術と既存の地質情報を組み合わせることにより、これまでの探査技術だけでは明らかにならなかった地下の流体経路（水みち、ガスみち）を把握できる新たな可能性が示されたと考えている。

今後、様々な地質環境下における測定データを蓄積し、同技術の地質工学および産業分野への活用に関する検討を行う予定である。

文献

- Etiopio, G. (2015): *Natural Gas Seepage: The Earth's Hydrocarbon Degassing*. Springer, Berlin, 199p.
- 池辺 穰・大沢 稔・井上寛生 (1979) : 酒田地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 42p.
- 地震調査研究推進本部 (1999) : 庄内平野東縁断層帯の評価.
- 加藤 進・早稲田 周・西田英毅・岩野裕継 (2013) : 山形県余目油田の石油地質と地球化学. 石油技術協会誌, **78**, 265–275.
- Katahira T and Ukai, M. (1976): Petroleum fields of Japan with volcanic rock reservoirs - summary. In Halbouty, M. T., Maher, J. C. and Lian, H. M., eds., *Circum-Pacific Energy and Mineral Resources. AAPG Memoir*, **25**, 276–279.
- Klusman, R. W., Leopold, M. E. and LeRoy, M. P. (2000): Seasonal variation in methane fluxes from sedimentary basins to the atmosphere: results from chamber measurements and modeling of transport from deep sources. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 24, 661–24, 670.
- Link, W. K. (1952): Significance of oil and gas seeps in world oil exploration. *AAPG Bulletin*, **36**, 1505–1540.
- Macgregor, D. S. (1993): Relationships between seepage, tectonics and subsurface petroleum reserves. *Marine and Petroleum Geology*, **10**, 606–619.
- 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.
- 鬼嶋正則・古屋 京・守屋俊治・横井 悟・奥村文章・内田真之介・天羽美紀 (2018) : 余目・福川油田における地表地化学探査—国内開発フィールドでの適用—. 石油技術協会, 平成 30 年度春季講演会.
- 大沢 稔・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.
- 産業技術総合研究所, 活断層データベース, <https://gbank.gsj.jp/activefault/> (参照 2020 年 8 月 1 日)
- 石油資源開発株式会社 (2006) : 石油資源開発 50 年史, 82–84.
- 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ガス測定による活断層調査. 公益財団法人深田地質研究所年報, **20**, 45–54.
- 遠田ほか (2008) : 庄内平野東縁断層帯の古地震調査. 活断層・古地震研究報告, **8**, 91–118.
- 戸野倉賢一 (2012) : 光を用いた大気環境計測技術. 光学, **41**, 1–8.
- 山形県酒田市上下水道部 (2019) : 酒田市污水処理施設供用開始図 (平成 31 年 3 月末時点). http://www.water.sakata.yamagata.jp/enkaku5_03.pdf