

2018
Vol. **83**

石油技術協会誌

Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology



No. **2**



石油技術協会

石油技術協会役員・委員長・幹事

会 長 栗 原 正 典

副会長 塩 澤 有 史

副会長 浜 田 康 史

理 事

阿加井	宏	荒 戸	裕 之	安 楽	敏 行	市 川	真	伊 藤	慎
上 田	真 司	大 下	敏 哉	金 子	信 行	久 保	國 雄	栗 田	裕 司
栗 原	正 典	小 林	照 明	境	隆 志	坂 田	将 行	佐々木	久 郎
佐 藤	光 三	塩 澤	有 史	島 本	敏 充	鈴 木	德 満	高 山	邦 明
武 村	貢	多 田	隆 治	田 村	真 一	田 村	満 昭	土 屋	範 芳
浜 田	康 史	樋 口	朋 之	藤 原	勝 彦	古 谷	昭 一	松 原	三 喜
松 本	行 弘	峯 岸	政 人	村 田	澄 彦	横 井	研 一	和 田	卓 也

監 事

奥 田 義 久 田 中 哲 夫 矢 口 良 一

幹 事

遠 藤	秀 明	及 川	透	岡 本	誠 司	折 戸	雅 幸	加 藤	亮 一
工 藤	啓 靖	佐々木	直 人	島 田	正 雄	白 木	正 弘	土 田	邦 博
長久保	定 雄	中 嶋	秋	長 縄	成 実	林 田	泰 行	松 島	
森 田	澄 人	山 中	基 由	山之内	芳 徳	後 藤	博 史		

会 誌 編 集 委 員 長	島 本 辰 夫
探 鉱 技 術 委 員 長	久 保 國 雄
作 井 技 術 委 員 長	古 谷 昭 人
生 産 技 術 委 員 長	安 楽 敏 行
国 際 委 員 長	市 川 真
資 源 経 済 委 員 長	岩 間 剛 一
ホ ー ム ペ ー ジ 委 員 長	金 子 信 行

複写される方へ

石油技術協会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。
本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を終結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル
FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。直接、石油技術協会へお問い合わせ下さい。

石油技術協会 TEL: 03-3214-1701 FAX: 03-3214-1703
E-mail: office@japt.org

Reprographic Reproduction outside Japan

Making a copy of this publication
Please obtain permission from the following Reproduction Rights Organizations (RROs) to which the copyright holder has consigned the management of the copyright regarding reprographic reproduction.
Obtaining permission to quote, reproduce; translate, etc.
Please contact the copyright holder directly.

<Except in the USA>
Japan Academic Association for Copyright Clearance (JACC), Inc.
9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

<In the USA>
Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA
Phone 978-750-8400 FAX 978-646-8600

Users in countries and regions where there is a local RRO under bilateral contract with Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)
Users in countries and regions of which RROs are listed on the following website are requested to contact the respective RROs directly to obtain permission.

会 告

第 83 回定時総会・特別講演会・平成 30 年度春季講演会及び見学会の開催について

下記により第 83 回石油技術協会定時総会・特別講演会・平成 30 年度春季講演会および見学会を開催致します。会員多数のご参加を望みます。

なお、定時総会の出席 / 欠席（欠席の場合は委任状）を、別途郵送の“ハガキ”を郵送、またはメールに添付して pdf ファイルで 6 月 7 日（木）までに協会事務局宛必ず通知願います。

記

会 場：朱鷺メッセ（会場案内図別掲）
新潟県新潟市中央区万代島 6 番 1 号 TEL 025-246-8400

第 1 日 6 月 12 日（火）

1. 総 会 13:30 ～ 15:00：4 階 国際会議室
議 事：第 1 号 議案 平成 29 年度事業報告
第 2 号 議案 平成 29 年度決算報告
第 3 号 議案 平成 30 年度事業計画（案）ならびに予算（案）承認の件
第 4 号 議案 監事選出の件
第 5 号 議案 名誉会員承認の件
第 6 号 議案 会則の一部改正（案）承認の件

報 告：理事選挙結果報告、協会賞選考結果報告
表 彰：石油技術協会賞授与

2. 特別講演会 15:15 ～ 17:45：4 階 国際会議室

(1) 15:15 ～ 16:00

「新潟県下越～山形県域の中新世地質：露頭からベースンへ」

新潟大学理学部 准教授 栗田 裕司 氏

－休憩 15 分－

(2) 16:15 ～ 17:00

「新潟県における再生可能・次世代エネルギー分野の取組」

新潟県産業労働観光部 産業振興課 課長 和久津 英志 氏

(3) 17:00 ～ 17:45

「みなとまち新潟の歴史と文化」

新潟市文化スポーツ部 歴史文化課 課長補佐 廣野 耕造 氏

3. 懇 親 会 18:00 ～ 20:00：ホテル日航新潟 鳳凰の間

会費 一般 5,000 円、学生 2,000 円 当日会場にて受付

第2日6月13日(水) } 国際会議室ほか4会場
第3日6月14日(木) }

9:00～18:00(14日は17:30)

技術委員会(探鉱・作井・生産)シンポジウム・個人講演会

技術委員会シンポジウムテーマ

- ① 地質・探鉱…「効率化と技術の進展が石油・天然ガス探鉱にもたらす影響」
- ② 作井…「多様化するオペレーションマネジメント－操業環境の変化に対応したマネジメント」
- ③ 開発・生産…「貯留層の可能性を探る挑戦～更なる油ガスの回収を目指して～」

＊講演要旨集(特別講演・シンポジウム・個人講演)頒布価格:

会員3,000円(学生会員2,000円), 非会員5,000円(学生非会員3,000円)

第4日6月15日(金) 見学会

Aコース「新潟の地層と堆積盆地の地形」観察

Bコース「上・中越地域の石油・天然ガス関連施設」見学

ご案内は次頁

見学会のご案内

石油技術協会

平成 30 年度の見学会を下記の要領により行いますので、多数ご参加ください。
2 コースとなっておりますので、申し込みの際は間違えないようお願いいたします。

記

期 日：平成 30 年 6 月 15 日（金）

定 員：A コース先着順 40 名程度（大型観光バス）

B コース先着順 40 名程度（大型観光バス）

締切期日：5 月 29 日（木）

参加費：A コース：一般 4,000 円，学生 2,000 円（昼食代込み）

B コース：一般 4,000 円，学生 2,000 円（昼食代込み）

※原則、見学会前日までに会場受付にて確認の上お支払いください。

申し込み方法：以下を明記し、石油技術協会事務局宛に e メールにてお申し込みください。

- ・ 参加者氏名（ふりがな）・生年月日（保険手続きに必要となります）
- ・ 所属団体・部署
- ・ 携帯電話番号または携帯メールアドレス（当日連絡用）

※当日の集合場所などの案内を含んだ事務局からの返信メールにより参加受付が確認いただけます。申し込み後、数日経過しても返信メールが届かない場合は事務局までご連絡ください。

A コース：「新潟の地層と堆積盆地の地形」観察

集合時間・場所：（8:20）JR 新潟駅南口バスターミナル

行 程：JR 新潟駅南口発（8:30）同着（17:00）

STOP 1：西山層浜忠相 (Distal turbidite) @ 島崎川河口

STOP 2：椎谷層 (Proximal turbidite) @ 郷本川河口

STOP 3：昼食 @ 寺泊海岸 魚の市場通り

STOP 4：七谷期流紋岩，同質火砕岩類 @ 田ノ浦海水浴場

STOP 5：堆積盆地の地形遠望 @ 弥彦山 山頂

STOP 6：宝山酒造

見学内容：新潟県長岡市寺泊界限から新潟市西蒲区間瀬界限にかけての海岸沿いでは新潟の標準層序を観察することができます。今回の巡検では、この内、新潟堆積盆において油・ガス田の貯留岩となっている鮮新世の砂岩および中新世の緑色凝灰岩に焦点を当て、前者では、西山層および椎谷層の露頭においてタービダイトのなす岩質・岩相変化を観察します。後者では、七谷期の流紋岩および流紋岩質火砕岩類の産状を観察します。その後、弥彦山頂から新潟平野を遠望して堆積盆地の地形を俯瞰し、最後に宝山酒造敷地内にて巡検全体のまとめを行います。

案 内 人：栗田裕司先生（新潟大学），渡辺芳弘氏（国際石油開発帝石株）

服 装 等：・水に濡れても汚れても良く、滑りにくい靴（ハイヒール，革靴，サンダル禁止）。

・汚れてもかまわない長袖・長ズボン。

・雨天に備えてカッパや折たたみ傘をご用意下さい。

B コース：「上・中越地域の石油・天然ガス関連施設」見学

集合時間・場所：（8:20）JR 新潟駅南口バスターミナル

行 程：JR 新潟駅南口発（8:30）同着（18:00）

09:40～11:10 国際石油開発帝石株長岡鉦場越路原プラント見学

12:20～13:20 直江津駅前で昼食 @ ホテルハイマート

13:40 ～ 15:40 国際石油開発帝石(株)直江津 LNG 基地ほか見学

16:00 JR 直江津駅（東京方面降車）

18:00 新潟駅南口着

見学内容：関東甲信越方面のエネルギーを支える国際石油開発帝石(株)の上・中越方面の石油・天然ガス関連施設を見学します。午前中に、国内最大級を誇る南長岡ガス田の越路原プラント（含：発電所）を見学し、その後、上越へ移動して、海外からの LNG 受入・気化ガス供給基地である直江津 LNG 基地および総延長 1,500km のガスパイプラインを監視するパイプライン監視センター等を見学します。

案 内 人：高木元太氏，早川弘樹氏（国際石油開発帝石(株)）

お問い合わせ先：石油技術協会 事務局

TEL：03-3214-1701 FAX：03-3214-1703

e-mail：office@japt.org

以上

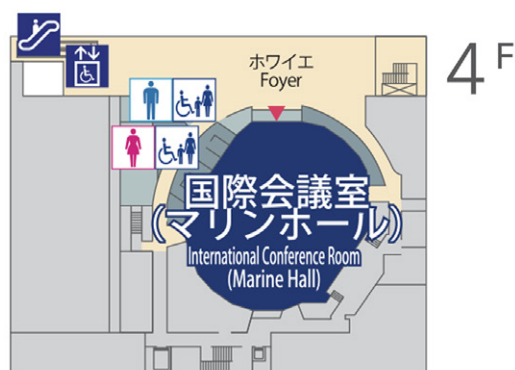
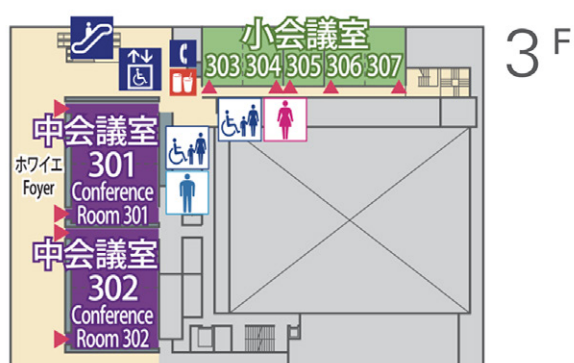
総会・懇親会・講演会 会場案内図

	国際会議室 (4階)	ホテル日航新潟 鳳 凰	小会議室 303
6月12日(火)	13:30～ 総 会 特別講演会	18:00～ 懇親会	(事務局) 控 室

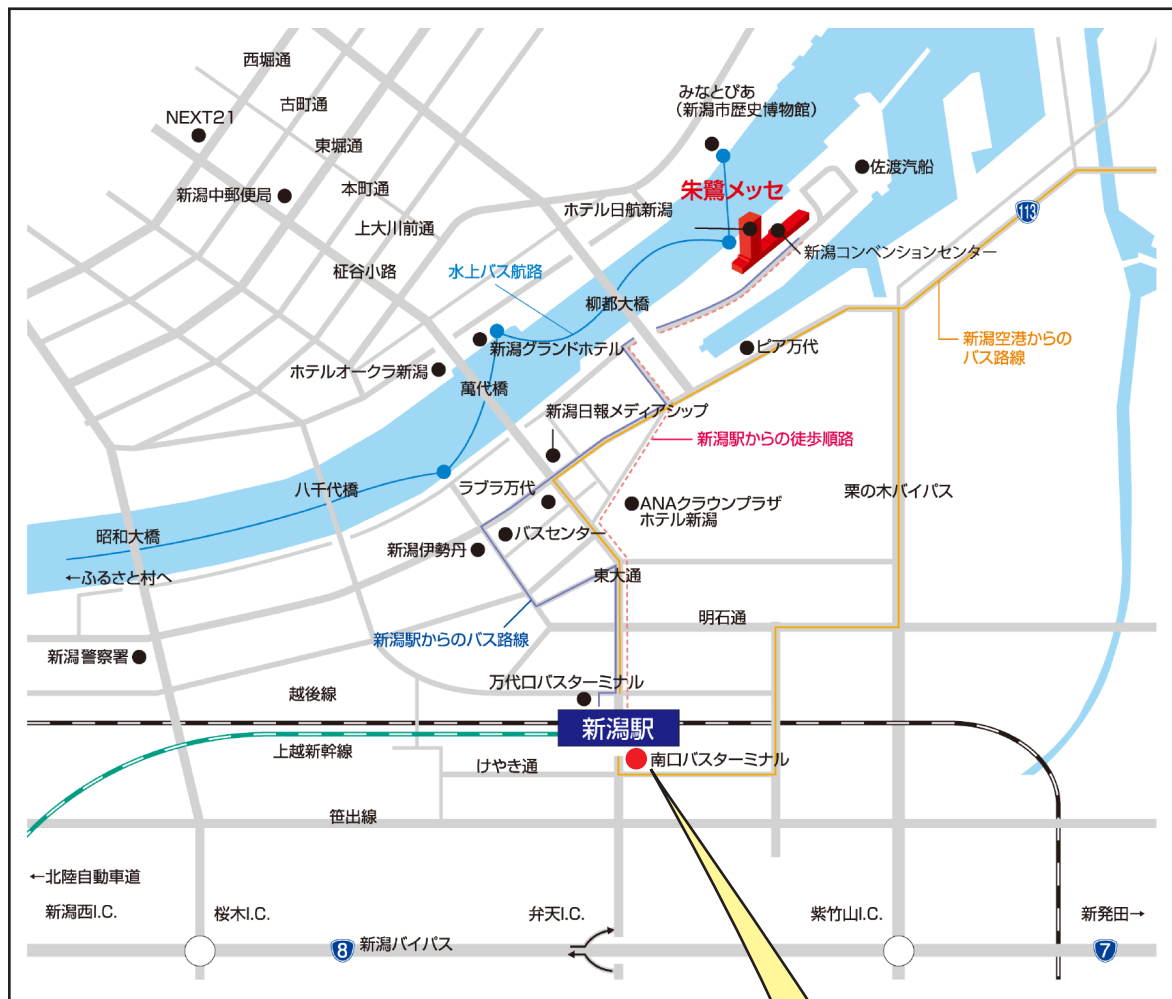
会 議 室	国際会議室	301	302 A	302 B	303
収容人数	230 名	198 名	84 名	84 名	16 名
6 月 13 日（水）	9:00 ～ 16:45	9:00 ～ 17:30	9:00 ～ 12:10 開発・生産 個人講演（1）	9:00 ～ 12:10 開発・生産 個人講演（2）	（事務局） 控 室
	地質・探鉱 シンポジウム	作 井 シンポジウム	13:00 ～ 13:50 ポスターセッション*		
			13:50 ～ 18:00 開発・生産 個人講演（1）	13:50 ～ 18:00 開発・生産 個人講演（2）	
6 月 14 日（木）	9:00 ～ 16:40	9:00 ～ 17:10	9:15 ～ 11:50 地質・探鉱 個人講演（1）	9:15 ～ 11:50 地質・探鉱 個人講演（2）	（事務局） 控 室
	開発・生産 シンポジウム	作 井 個人講演	12:50 ～ 13:40 ポスターセッション*		
			13:40 ～ 17:30 地質・探鉱 個人講演（1）	13:40 ～ 17:30 地質・探鉱 個人講演（2）	

*ポスター会場は3階中会議室302前のスペース

朱鷺メッセフロアー図



朱鷺メッセへのアクセス



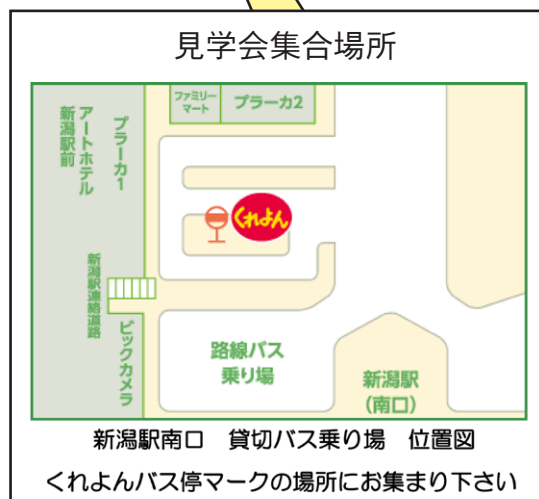
交通案内

■新潟駅から

- バス<佐渡汽船行き> 約 15 分
(5 番線乗り場)
- タクシー 約 5 分
- 徒歩 約 25 分

■新潟空港から

- バス<新潟駅まで> 約 30 分
(万代シティーバスセンター前にて下車
徒歩 10 分)
- タクシー 約 20 分





石油技術協会誌

第 83 巻 第 2 号 (平成 30 年 3 月)

— 目 次 —

会 告	第 83 回定時総会・特別講演会・平成 30 年度春季講演会及び見学会の開催について……………	i
	見学会のご案内……………	iii
口 絵		
	平成 29 年度特別見学会(地質編)の実施報告…………… 徳橋 秀一・岩本 広志・池田 秀史	
	名誉会員 故 和田 恭彦氏のご逝去を悼む…………… 島村 常男・平田 敏幸 ……	115
	平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦」－X 年後の石油ガス開発に向けて	
	開会の辞…………… 栗原 正典 ……	117
	石油・天然ガス開発上流におけるベンチャー企業動向…………… 金城 秀樹 ……	119
	GIS (Geographic Information System) データの石油探鉱への活用について	
	－未探鉱地域の根源岩を予測することは可能か?－…………… 山中 基由・谷脇 天司 ……	122
	海底下の微生物起源ガスと生命活動との関わり－海洋科学掘削の最前線－	
	…………… 稲垣 史生・井尻 暁・北田 数也・町山 栄章 ……	130
	微生物起源ガス探鉱の可能性－国内探鉱のパラダイムシフトと成り得るか?－…………… 瀬能 修 ……	138
	CO ₂ をエネルギー資源に－電気化学的微生物利用メタン生産技術の可能性－…………… 前田 治男 ……	143
	ミュオグラフィの地下探査への応用…………… 田中 宏幸 ……	148
	地中レーダによる地下探査への AI (機械学習) 利用例 …… 山下 善弘 ……	156
	AI を使った生産・製造設備運転データ解析の事例と今後の発展 …… 落合 勝博・大野 拓也 ……	162
	まとめ…………… 塩澤 有史 ……	167
論 説		
	原油のバイオマーカー組成からみた国内根源岩の特徴－秋田・山形地域の国内における位置づけ－	
	…………… 早稻田 周・西田 英毅 ……	169
ニュース		
	石油技術協会記事……………	181
	海外学会情報ソース……………	191
	坑井掘削状況……………	192
	編集後記……………	192



— Contents —

ANNOUNCEMENTS

PICTORIAL

MEMORIAL

SYMPOSIUM “Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years”

Opening address	Masanori Kurihara ...	117
Venture companies in the upstream of oil and natural gas development	Hideki Kinjo ...	119
Application of GIS (Geographic Information System) technology to the exploration activities – For a better prediction of source rock in frontier basin	Motoyoshi Yamanaka and Takashi Taniwaki ...	122
Interactions between biogenic gas and microbial activity in the subseafloor – Frontiers in scientific ocean drilling	Fumio Inagaki, Akira Ijiri, Kazuya Kitada and Hideaki Machiyama ...	130
The potential of biogenic gas exploration – a paradigm shift for exploration in Japan?	Osamu Senoh ...	138
Utilization of CO ₂ as Energy Resources – Electrochemical Bio-Conversion of Carbon Dioxide into Methane	Haruo Maeda ...	143
Application of Muography to Underground Surveys	Hitoyuki K. M. Tanaka ...	148
An Application Example of Machine Learning to Shallow Subsurface Exploration using Ground Penetrating Radar	Yoshihiro Yamashita ...	156
The cases and the future of plant data analysis with AI technology	Katsuhiro Ochiai and Takuya Ono ...	162
A summary of the Autumn Meeting	Yuji Shiozawa ...	167

ORIGINAL ARTICLE

Source rock characteristics based on biomarker compositions of crude oils in Japan: Focused on the Akita and Yamagata Area	Amane Waseda and Hideki Nishita ...	169
---	-------------------------------------	-----

NEWS

Proceedings of the JAPT	181
International scientific meetings	191
Drilling activities in Japan	192
Postscript	192

平成 29 年度特別見学会（地質編）の実施報告

徳橋 秀一*・岩本 広志**・池田 秀史**

平成 20 年度に始まり 10 年目という節目を迎えた平成 29 年度の特別見学会（地質編）は、石油技術協会主催、京葉天然ガス協議会協賛の下、「南関東ガス田における水溶性天然ガス・ヨウ素の生産施設と上総層群の代表的地層（タービダイト砂層など）の現場見学会」というテーマで、平成 29 年 11 月 8 日（水）に実施されました。天候は時折小雨の混じる曇り空でしたが、暑くも寒くもない、また風もない穏やかな 1 日でした。予定していた地点での見学はほぼ予定どおり順調に実施され、無事終了・解散することができました。参加者は、学生・院生が 21 名（秋田大学 6 名、茨城大学 1 名、信州大学 2 名、新潟大学 3 名、千葉大学 2 名、東京海洋大学 3 名、横浜国立大学 1 名、東京大学 3 名）、一般が 14 名（大学の教員 1 名と研究推進員 1 名、会社関係 7 名（うち事務職 3 名、新人技術者 3 名）、財団法人 1 名、国の研究所 1 名、千葉県関係者 2 名、会社 OB 1 名）、全体で 35 名でした。今年は、秋田、新潟、松本などの遠隔地からの若い学部学生の方の参加が目立ちました。

くなお、各見学地点の位置図や具体的な見学内容、参加者の感想文は本文の記事をご参照ください。（以下、本文 183 ページにつづく。）



写真 1 水溶性天然ガスの生産施設（生産井）の見学風景。Stop 1（㈱合同資源千葉事業所）。



写真 2 セパレーターでガスと分離されたかん水（地層水：100 万年以上昔の化石海水）を味わっているところ。Stop 1。



写真 3 ヨウ素の生産施設の見学風景。左側の建物は、ヨウ素を濃集するブロウアウト棟の並び。Stop 1。



写真 4 活発な質疑応答のあと、最後にご挨拶される山ノ井事業所長（左端の人）。Stop 1。



写真 5 合同資源産業株式会社千葉事業所前で会社の関係者の方とともに記念集合写真。Stop 1。

* 産業技術総合研究所 ** 関東天然瓦斯開発株式会社



写真6 西門（さいかど）橋の下の瑞沢川の川面にみられる天然ガスの自然湧出現象。無味・無色・無臭で水がないと認識できません。Stop 2。



写真7 いすみ市文化とスポーツの森 (Stop 3) のグラウンド横で、ねじりガマを使って大田代層のタービダイト砂層（暗色部）断面の堆積構造の観察。Stop 3。

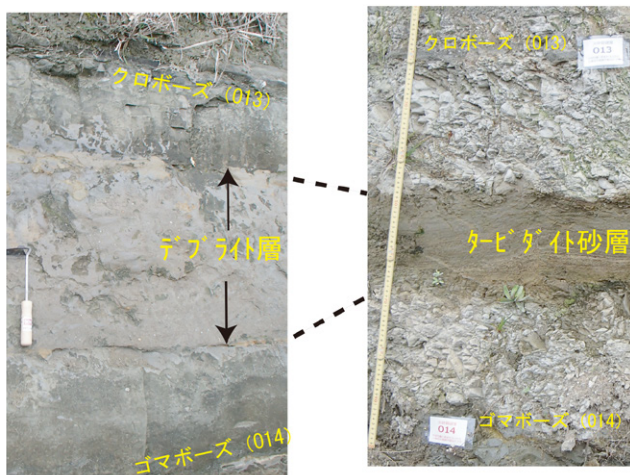


写真8 薄い火山灰鍵層クロボーズ (O13) とゴマボーズ (O14) に挟まれた厚さ 60 cm 前後のデブライト層（グラウンド横）が、古流向にほぼ直交する方向では急速に薄くなり、厚さ 20 cm 前後のタービダイト砂層（道路沿い）に変化する様子が観察できます。Stop 3。

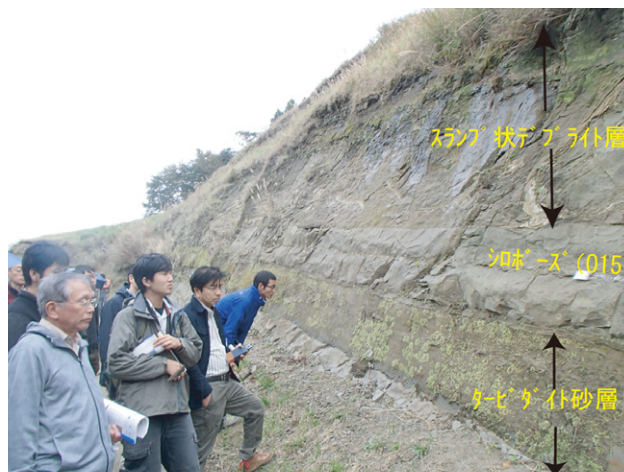


写真9 火山灰鍵層シロボーズ (O15) の上位には、直下のシロボーズを挟む泥岩が変形した泥岩ブロック（デブリス）が密に並ぶ厚さ 2 m 前後のスランプ状のデブライト層が、シロボーズの下位には、厚さ 1 m 前後のパウマシーケンスを示すタービダイト砂層が観察されます。Stop 3 の道路わき。



写真10 いすみ鉄道大多喜駅前にある大多喜町天然ガス記念館の内部を見学している様子。Stop 4。



写真11 大多喜町が管理する沢山林道沿いに露出する梅ヶ瀬層中の厚いタービダイト砂層の内部構造を観察しているところ。Stop 5。

名誉会員 故 和田 恭彦氏のご逝去を悼む



本協会の名誉会員を務められた和田恭彦氏は、去る平成 29 年（2017 年）9 月 29 日に病氣療養中のところご逝去されました。享年 75 歳でした。

和田さんは昭和 17 年（1942 年）3 月 25 日に石川県金沢市でお生まれになりました。金沢大学附属高等学校卒業後、東京大学に進学され、昭和 41 年（1966 年）3 月に工学部資源開発工学科を卒業されました。同年 4 月には石油資源開発株式会社（JAPEX）に入社され、秋田鉱業所生産課に配属されました。当時の秋田鉱業所では昭和 33 年に発見され、34 年に生産開始、40 年にピーク生産を迎えた申川油田の生産維持・増産が課題でした。増産のため、ガスリフトおよび水攻法が計画されていましたが、和田さんは申川油田への海水を使った水攻法の適用に取り組みされました。水攻法の適用は実質的に日本国内では初めてのことでありましたが、和田さんが昭和 48 年 3 月に本社に異動となるまでの 7 年間に、ガスリフトによる増産も含まれているものの原油の生産量が約 2.7 倍になるという実績を挙げられ、その後の申川油田の発展に大きな貢献をされました。

本社異動後間もない 6 月には当時の石油開発公団に出向し、翌 7 月にはジャパン石油開発株式会社（JODCO）に再出向されております。JODCO は BP がアブダビ沖で保有していた ADMA 利権に参加するために昭和 48 年 2 月にわが国の民間資本を結集して設立されたばかりの会社でした。JODCO においては企画部に所属されましたが、昭和 51 年 6 月に JODCO ロンドン事務所に転勤となり、ADMA 利権の実質的オペレーターである BP との折衝に当たられました。そして翌 52 年 1 月には、ADMA でも着手してまだ数年という海水を使った水攻法を推進した実績のある技術者としてアブダビ現地の操業会社である ADMA 社に出向されました。ADMA 社では Reservoir Engineer として世界的な大油田である Zakum 油田の主力油層の生産量推移の把握と水圧入による将来の油層挙動予測を担当して活躍され、メジャー側からも高い評価を受けました。このことは平成 15 年（2003 年）6 月に開催された石油技術協会創立 70 周年記念講演で名誉会員の故矢部孟氏（元石油公団理事、JAPEX 副社長）が紹介されておりますので、ご存知の会員の方も多いと思います。ADMA 勤務後、昭和 54 年 3 月には JODCO がオペレーターとして開発を進めていた Umm Al-Dalkh Development Company（UDECO）に移られ、UDECO 勤務期間中の昭和 56 年 3 月には JAPEX から石油公団に移籍しておられます。移籍後の 6 月、石油公団に技術部生産課長代理として復帰されましたが、当時、日中石油開発株式会社の渤海湾プロジェクトでは BZ28-1 構造の開発移行のための埋蔵量評価が進行中であり、生産課長、中国室主査として世界的にも数少ない、かつ評価の難しかった基盤岩油層開発プロジェクトを推進されました（BZ28-1 油田の開発移行決定は昭和 60 年 12 月）。その後、ジャカルタ事務所長（昭和 62 年 3 月～平成元年 7 月）、計画第二部長、技術部長を歴任された後、平成 7 年（1995 年）6 月には石油公団理事に就任されました。

石油公団に直接入団した島村が和田さんと接点を持ったのは和田さんが JODCO に出向された昭和 48 年であり、その後、JODCO ロンドン事務所、アブダビでの UDECO、石油公団本部と同じオフィスや同じ勤務地で勤務した時代が断続的に続きましたが、卒業年次の最も近い先輩後輩として同じ部課に配属されたのは石油公団の技術部生産課のほぼ 3 年間で唯一の機会です。その他の期間は同僚という関係に近い扱いで暖かく指導して貰えたと感謝しております。業務関係では就業時間後も残業は当たり前という時代でしたが、オフィスの一角の応接セットに座って、アルコールでのどを潤しながら、たばこの煙の中で、よくプロジェクトの進め方に

関して議論し、実直、豪快な和田さんから「よし、それで行こうじゃないか。」と結論付けてもらおうと安心して仕事に取り組めたことを思い出します。また、個人的にはJODCO ロンドン事務所勤務時代に和田さん、当時JODCO 本社勤務だった加藤真人氏と島村の3人がBPのWest Sole ガス田で研修を受ける機会を貰いましたが、ロンドンにご家族がおられた和田さんは毎週末、ロンドンに帰り、日曜日の晩に研修地に戻られる際には我々のために奥様手作りの和食弁当を差し入れて下さったのですが、その食事がおいしく、待ち遠しかったことが今でも懐かしく、ありがたく思い出されます。

平成12年6月、石油公団理事を退任され、JAPEXの顧問に就任されました。翌平成13年同社の常務取締役役に就任され、保安室、技術研究所、新技術事業推進室を担当、その後、海外本部カナダ室、環境エンジニアリング事業推進室、資材部を追加担当されましたが、平成17年6月、同社顧問に就任し、平成20年6月退任されました。この石油公団理事からJAPEX 常務取締役を務めておられた間に、石油技術協会においては平成8年から14年までの6年間、理事を務められ、29年に名誉会員となりました。

和田さんがJAPEX 復帰後に務められた役員、プロジェクト会社社長時代に部下として勤務されたJAPEXの平田敏幸氏からも和田さんのお人柄とリーダーシップに関する以下の感想・追悼文をいただいております。

初めて和田さんにお会いしたのは平成6年夏、石油公団技術部長を務めておられた時でした。JAPEXにてカナダオイルサンド事業を担当していた私は、新技術のSAGD法を適用する新規オイルサンドプロジェクトの説明に和田さんを訪ねました。新しい回収技術導入に自信をもって説明を行いましたが、期待に反して“地質状況の記述がお粗末”と、初対面にて一喝されました。「プロジェクトを進めるには、技術全般を見極め、コマーシャルの側面も十分考慮して包括的に説明しなければならない」という、油層エンジニアであった私への厳しい指導でした。目が覚める思いでした。それ以降、石油公団の和田部長、理事として何度もお会いすることとなりましたが、“自分の仕事に情熱を持て、信念を持て、オイルサンドをライフワークとして達成しろ”と繰り返されたことが強く記憶に残っています。和田さんは平成12年にJAPEXに復職され、14年から17年まで常務取締役として海外本部カナダ室を担当され、その後、19年まではカナダオイルサンド(株)社長としてオイルサンド事業を大きく推進されました。この間、油価環境はまだまだ厳しいものでしたが、和田さんは常に将来へ向けての準備を怠ることなく、新技術開発検討、操業の最適化や将来開発候補地の地質評価作業を地道に進めるようチームを指導されました。和田さんの実行力、推進力と何よりもその合理的、論理的リーダーシップから多くの中堅若手が育ちました。カナダ室を担当されると直ちに、当時としては斬新な技術/事務エリアをカバーするCross Functional Teamを結成し、オイルサンド事業の中期事業計画を策定し、東京本社と現地子会社とのガバナンスの枠組みを作り上げ、まさしくオペレーターとしてのProject Managementを実行されました。

オイルサンド事業(Hangingstone プロジェクト)は、平成29年8月に新たな拡張開発事業(20,000b/d)から生産を開始しました。平成11年に始まったDemo プロジェクトに続き、長年待ち望んでいたこの拡張開発からの生産開始を和田さんも心から喜んでくださったことと思います。

私たち、島村と平田は勤務した組織は違いますが、和田さんの薫陶を受けた後輩として、心からの感謝と哀悼の意を捧げるとともに謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

合掌

石油技術協会 特別会員	島村 常男
石油技術協会 会員	平田 敏幸

資 料
 Note

平成 29 年度秋季講演会

「次世代技術への挑戦」
 - X 年後の石油ガス開発に向けて
 Autumn Meeting

“Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years”

開 会 の 辞*

会長 栗 原 正 典**

Opening address of the Autumn meeting by Masanori Kurihara

皆様おはようございます。昨年 6 月より石油技術協会会長を務めさせていただいております栗原です。本日は皆様ご多忙の中、当協会秋季講演会にご参加いただきまして、誠にありがとうございます。主催者を代表いたしまして、一言ご挨拶を申し上げます。

本秋季講演会は、春季に開催されます広い専門分野を網羅した個人講演・シンポジウムとは異なり、石油・天然ガス開発業界の時代の動向に沿ったテーマを設定して、講演・議論していただくというものです。本年度は「次世代技術への挑戦 - X 年後の石油ガス開発に向けて -」をテーマとして選択しました。

昨年の秋季講演会の冒頭でも紹介しましたが、世界のエネルギー消費量は今後ますます増加していくと予測されており、さらには、25 年後にも全エネルギーの 3/4 以上は、石油・天然ガスを中心とした化石エネルギーによって供給されるであろうと予測されています。一方で、石油・天然ガスエネルギーには、枯渇、中東やロシアへの偏在、環境問題などの懸念事項があることも事実です。そこで世界の石油・天然ガス開発業界は、これらの問題を解決すべく、50 ドル / バレルという低油価の逆境下においても、新たな挑戦を続けているところです。すなわち、いわゆる「イージーオイル」から脱却して、複雑な地層や難地域を対象とした開発、高度な増進回収技術を適用した開発、非在来型石油・天然ガスの開発、これまで以上に環境に配慮した開発などに向けた努力・競争をしている訳です。

これらの競争を勝ち抜くためには、探鉱成功率の向上、コスト削減を含め、技術力の持続的発展が求められるのは言うまでもありません。石油開発技術は学際的・業際的な総合技術ですから、各専門技術の深化と専門技術領域間の連携を進める必要性が極めて高い分野です。石油技術協会は「石油・天然ガスの採取事業にかかわる技術の進歩と会員相互の親睦を図る」ことを目的に設立されており、まさにこの目的こそ、これから益々重要になってくると思われます。

そこで、昨年の秋季講演会では、当協会の目的の 1 つである「会員相互の親睦（ネットワーキング・コミュニケーション）を図る」に注目し、「人材」こそが複雑で困難な問題の解決を与えてくれると考え、「ダイバーシティ」をテーマとして、単純な「多様化」だけでなく、さまざまな人達と働くことによって、発想、視点、能力、環境などが多様化され、それが組織としての発展や利益につながっていくことを学びました。今年は、当協会のもう 1 つの目的の「技術の進歩を図る」に特化し、さまざまな会社、機関、大学の方々 8 組に、次世代技術への挑戦と題して、X 年後の石油・天然ガス開発においてはどのような技術革新がなされているかをご講演していただくことにいたしました。ご講演者の方々にはお忙しいところ講演をご快諾いただき、感謝申し上げます。次世代技術というと「ナノ」、「バイオ」、「IT」などが思い浮かびますが、本日のご講演の中にもこれらに関するものが多く含まれております。

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度 秋季講演会の冒頭挨拶 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled “Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years” held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** 石油技術協会会長 JAPT President

まず、株式会社三井物産戦略研究所の金城様には、石油・天然ガス開発における先端技術の導入動向を俯瞰的にご講演いただきたいと存じます。その後、7組の方々に、新技術についての実際の研究・適用事例をご紹介いただきたいと存じます。国際石油開発帝石株式会社の山中様・谷脇様には GIS データの活用について、国立研究開発法人海洋研究開発機構の稲垣様と石油資源開発株式会社の瀬能様には微生物起源ガスの現状について、国際石油開発帝石株式会社の前田様には微生物起源ガスの人工的な生成についてご講演を賜りたいと存じます。また、東京大学地震研究所の田中先生にはミュオグラフィの地下探査への応用についてご教示いただき、最後に AI の利用例として、応用地質株式会社の山下様には地中レーダーによる地下探査について、日揮株式会社の大野様および日本電気株式会社の落合様には生産・製造設備運転データの解析事例についてご講演いただきたいと存じます。

本日の講演と議論が、皆様にとって有益なものとなりますことを願って、開会のご挨拶とさせていただきます。

講 演
 Lecture

石油・天然ガス開発上流におけるベンチャー企業動向*

金 城 秀 樹**

(Received December 28, 2017 ; accepted March 9, 2018)

Venture companies in the upstream of oil and natural gas development

Hideki Kinjo

Abstract : Venture companies play an important role in creating innovative technologies in the upstream of oil and natural gas development. The technical field is extensive, such as analysis of production fluid based on the genetic analysis of underground microorganisms and drilling by plasma energy. On the other hand, notable in upstream digital transformation is the rise of venture companies offering digital solutions such as equipment failure prediction using advanced analysis techniques. Looking at trends in corporate venture capital (CVC), which is a form of venture investment by oil companies, the number of investments in oil and gas technologies that are synergistic with core business is on the increase. In the upstream ecosystem, the importance of venture companies creating innovative services/products is expected to increase further.

Keywords : innovation, venture companies, corporate venture capital

1. はじめに

長期化する低油価環境において、石油企業は CAPEX・OPEX 削減や生産性の改善を加速している。油田開発関連サービスなどを提供する油田サービス企業は、サービスの高付加価値化や低コスト化を目指し、買収・技術提携を進めている。直近では、(仏) Technip と (米) FMC Technologies が 2017 年 1 月に合併し、サブシーと呼ばれる海中の油・ガス生産設備分野において、売上高 200 億ドル超のトップ企業となっている。また、油田サービス企業は、デジタル技術の活用を加速させるため IT プラットフォーム企業との連携も進めている。2017 年 8 月には (米) Halliburton と (米) Microsoft が協業を発表している。

一方、大手石油企業・油田サービス企業は、ベンチャー企業とエコシステムを形成している。2003 ~ 2013 年の実績で言えば、大手石油企業の Corporate Venture Capital (CVC)[†]や石油サービス企業などから、約 70 億ドルの資金

がベンチャー企業に供給されている。石油企業や油田サービス企業が技術イノベーションへの取り組みを重要課題とするなか、独創的な発想でサービス・製品を創出するベンチャー企業への期待は大きい。本稿では、ベンチャー企業が創出する技術イノベーションを、①異業種からの技術転用、②廃坑技術、③デジタルトランスフォーメーション、の 3 つの視点から紹介する。

2. ベンチャー企業が創出する技術イノベーション

2.1 異業種からの技術転用

技術イノベーションを生み出す要素の 1 つが、既存技術の新たな組み合わせである。異業種からオイルフィールドへの技術転用が高い付加価値を生み出しており、そのアプリケーションは多様性を増している。

(米) Biota Technology (創業: 2013 年) は、地中微生物の遺伝子データを利用した生産挙動分析サービスを提供している (図 1)。医療分野などで活用されている遺伝子解析技術の転用である。同社は、掘削時のカッティングス (掘り屑) を入手し、カッティングスに付着した微生物の遺伝子をデータベース化する。遺伝子データは、カッティングスを介して掘削深度に紐づいており、生産流体中の微生物遺伝子とデータベースを照合すれば、地下のどの位置から生産が多いか推測することができる。米国の多くのシェール生産事業者を採用されており、(米) Anadarko や (ノルウェー) Statoil などの 200 以上の坑井での分析実績

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦 - X 年後の石油ガス開発に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled "Challenges to the technologies of the next generation - towards the E&P Industry after X years" held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** 株式会社三井物産戦略研究所 Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute

[†] 事業会社自らがベンチャー企業に対して投資活動を行うための組織

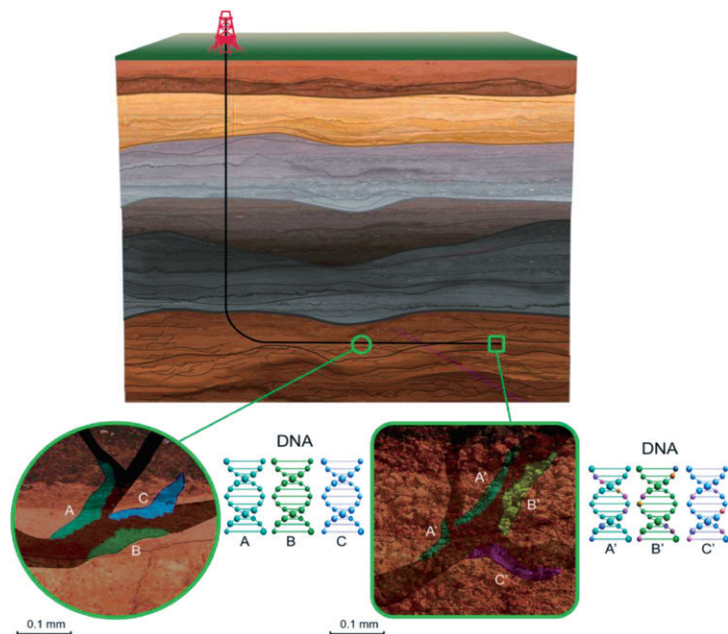


図1 地中微生物の遺伝子データを利用した生産挙動分析サービス (Biota Technology, 2017)

がある。さまざまな地層の膨大な微生物の遺伝子データは、生産挙動分析サービス分野において強い差別性を持つと考えられる。

(米) GEODynamics (創業：2003 年) は、ミリタリー分野の特殊金属技術を転用した穿孔用爆薬を提供している。従来の穿孔用爆薬では形成された孔の先端部に浸透性が低いデブリ (かす) が残る。そのため、追加で薬品による処理が必要となる場合がある。同社の爆薬は、孔形成の直後に、第二波として孔に高温・高圧を発生させるプロセスがあり、それがデブリを除去する。同社の爆薬を用いて形成された孔内では原油が移動しやすく、また、追加で破碎を実施する場合においては、圧力を孔先端部から地層内に効率的に伝えることができる利点がある。同社は創業より成長を続けている。

(米) GlassPoint Solar (創業：2008 年) は、再生可能エネルギー分野の技術を転用した、熱 EOR (thermal enhanced oil recovery) サービスを提供している。水蒸気の熱で地層内の原油を動きやすくさせる熱 EOR では、水蒸気製造のコストが課題である。同社は、太陽熱を用いて水蒸気を製造することで、その課題を解決している。また、二酸化炭素排出量を削減できる利点もある。中東地域でプロジェクト実績があり、オマーンにおいて 1 GW のプラントを建設している。また、今後の計画として、カリフォルニアで 850 MW のプラントを建設し、年間 1,200 万バレルの水蒸気を生産する予定である。(スロバキア) GA Drilling (創業：1994 年) は、多様な産業で利用されるプラズマエネルギーによる掘削技術を開発している。従来の掘削刃によるロータリー掘削の代替・補完手段として期待されている。

2.2 廃坑技術

油田の成熟化、設備老朽化といった要因により、廃坑が

増加傾向にある。設備老朽化は、維持費の上昇を招き、また、自然環境への脆弱性リスクを増大させる。低油価環境は、廃坑をさらに加速させる傾向にある。北海・米領メキシコ湾を中心とした廃坑市場は、2025 年まで年間 50 ～ 90 億ドルの規模で推移する見込みである。廃坑は利益を生み出さない工程である。そのため、従来、廃坑の多くは、探鉱・生産で使用する既存の坑井作業技術の組合せで行われていた。しかし、今後は、廃坑需要の拡大に伴い専用技術が求められている。技術課題としては、短い作業時間、小さな設備 (備船費用が安い小型作業船に搭載可能)、低い環境負荷、廃棄物が少ないことなどが挙げられる。今後、5 年間で関連技術は大きく進展すると考えられている。

廃坑には大きく、①坑井の閉塞、②海洋構造物の撤去、がある。①坑井の閉塞においては、(ノルウェー) HydraWell Intervention (創業：2008 年) が、従来の約 1/3 の時間で実施可能な閉塞サービスを提供している。同社のサービスでは、坑井内の閉塞させる区間のケーシング管を爆薬で穿孔し、ケーシング管の外周部を洗浄した後、セメント充填を行う。また、これらの 3 つの作業を一度の地下への機器の揚げ降ろしで行うことができるのが特徴である。これまでに約 150 の坑井で閉塞実績がある (2016 年 4 月時点)。Private Equity Firm^{*}である (ノルウェー) Norvestor が、2016 年に HydraWell Intervention の 60 % の株式を取得している。前述の GA Drilling は、掘削市場の落ち込みを受け、閉塞作業向けアプリケーションで廃坑市場参入を志向している。また、閉塞作業実施前にレーザー光源と光ファイバーを用いたセンシングにより坑井内の詳細なデータ収集を行う (ノルウェー) Ziebel も注目される。

②大型海洋構造物の撤去においては、ベンチャー企業で

^{*} 非公開株式投資会社



図2 ドローンを使った海洋リグなどの点検サービス (Sky-Futures, 2015)

はないが、(スイス) Allseas が就航させた巨大クレーン作業船 “Pioneering Spirit” が存在感を示している。船体は、2隻の船体をつなぎ1隻にした双胴船で、長さは382 m、幅は124 mである。吊上げ能力は、海洋構造物の洋上部のトップサイドに対して48,000 トン、海中部のジャケッットに対して25,000 トンである。大型の海洋構造物を一度に撤去・運搬できるため、作業時間を大幅に削減できる。2016年8月には、初号案件であるノルウェー沖100 kmでの13,500 トンの海洋構造物の撤去に成功している。

2.3 デジタルトランスフォーメーション

石油企業は2000年代よりデジタル技術に着目し、①計測・通信技術、②データ統合・解析技術、③自動化技術、を現場に導入してきた。大手調査企業が過去10年の石油企業各社のデジタル化 (digital oilfield) の効果を検証した結果、生産量は2～8%増加、CAPEXは1～10%削減、OPEXは5～25%削減となっており、その効果は業界の共通認識になってきている。近年、①～③の技術領域において、ワイヤレス通信、ビッグデータ解析、自律稼働技術などが進歩著しい。ビッグデータ解析においては、(米) GE の Predix に代表される、機器データ解析に基づく故障予測や稼働最適化サービスが進展している。また、(米) IBM の Watson に代表される、テキストデータなどの非構造化データ解析に基づく情報照会支援サービスなどは黎明期に入っている。石油企業は探鉱および生産の最適化に向け、デジタル技術の獲得を継続的に進めている。石油企業のデジタル分野への投資は、低油価環境下にあっても、今後3～5年は現状と同じ水準もしくは、それ以上との報告もある。

ベンチャー企業では、①計測・通信技術として、(米) Ingeni (創業：2008年) が、長距離・低電力通信を可能にするワイヤレス通信技術を提供している。パートナー企業である(米) WellAware が、米国シェール生産現場向けに遠隔監視アプリケーションを提供している。

②データ統合・解析技術としては、(米) Ayata (創業：2009年) が、操業プロセスを最適化するデータ解析サービスを提供している。パートナー企業でもある(米) Apache に対しては、ESP (electrical submersible pump) の故障予測サービスを提供している。(米) MAANA (創業：2012年) は、機器データ解析に基づく故障予測サービスに加え、作業レポートなどを解析した作業員安全対策サービスなどを行っている。(米) Motive Drilling Technologies は、掘削における計画坑跡と実坑跡のズレに対し、最適な補正坑跡を自動決定するシステムを提供している。システムは、補正坑跡の掘削時間、技術リスク、将来の原油生産量を予測し総合的に判断する。これまでに200以上の水平坑井で利用実績がある。掘削サービス企業である(米) Helmerich & Payne が2017年5月に買収を発表している。

③自動化技術では、(英) Sky-Futures (創業：2009年) が、ドローンを使った海洋リグなどの点検サービスを提供している (図2)。同社のソフトウェアはドローンで取得したデータセットと顧客アセットの3Dモデルを一元的に管理でき、アセットの効率的な管理が可能である。その他、多くの産業で活用が進む3Dプリンターでは、(ノルウェー) EnergyX (創業：2009年) が坑井内で使用可能な機器を製造している。

3. 展 望

石油企業のCVCは、主に、石油・天然ガス開発技術、代替燃料、再生可能エネルギー、分散型エネルギー、の4分野に投資を行っている。大手石油企業8社 (ここでは、BP Ventures, Chevron Technology Ventures, ConocoPhillips Technology Ventures, Repsol Energy Ventures, Statoil Technology Invest, Saudi Aramco Energy Ventures, Shell Technology Ventures, Total Energy Venture) の2010年～2015年の出資動向を俯瞰すると、コアビジネスと相乗効果の高い石油・天然ガス開発技術への出資 (件数ベース) が増加する傾向であった。2016年は、分散型エネルギーへの出資件数の増加が顕著であった。しかし、依然として出資件数の多くを占めるのは、石油・天然ガス開発技術であり、2016年の出資件数全体の約70%を占めている。今後、上流のエコシステムにおいて、革新的なサービス・製品を創出するベンチャー企業の重要性は、さらに増すと考えられる。

引 用 文 献

Biota Technology, 2017 : *Frequently Asked Questions*, <http://www.biota.com/wp-content/uploads/Biota-FAQ-1.pdf> (accessed 2017/12/28).

Sky-Futures, 2015 : *FAA Awards Sky-Futures USA an Exemption to Use Drones for Oil and Gas Inspections*, <http://insideunmannedsystems.com/faa-awards-sky-futures-usa-an-exemption-to-use-drones-for-oil-and-gas-inspections/> (accessed 2017/12/28).

講 演
 Lecture

GIS (Geographic Information System) データの石油探鉱への活用について* – 未探鉱地域の根源岩を予測することは可能か? –

山中 基由^{**,†}・谷脇 天司^{**}

(Received December 25, 2017 ; accepted January 12, 2018)

Application of GIS (Geographic Information System) technology to the exploration activities – For a better prediction of source rock in frontier basin

Motoyoshi Yamanaka and Takashi Taniwaki

Abstract : GIS technology such as GPS loggings has become common recently. Real time route navigation can be displayed on our smartphone with high accuracy. This technology has already been applied for the tools of exploration in the E&P industry from 2000s. The exploration can utilize the plate reconstruction model and paleoclimate model more effectively by using the GIS technology for the play base exploration.

This presentation mentions the change of the exploration style by the application of the plate reconstruction and paleoclimate model with GIS technology. And then, we will discuss an oil major's example as a possible practice of the plate reconstruction and paleoclimate model for the exploration at the underexplored area of the Eastern Africa.

Keywords : GIS (Geographical Information System), plate tectonics, play system, AI, Big data, numerical simulation model, paleoclimate model, Exploration, Source Rock

1. はじめに

1990 年代初頭と比較して、PC をはじめとするデジタル技術が大きく発展している。生活でもスマートホンによるグーグルマップの利用などで GIS (Geographic Information System) データが活用されているが、石油探鉱においても、GIS データの活用が一般的になってきており、図表系、震探測線の緯度、経度が、デジタルデータとして、本格的に取り扱われるようになってきている。この GIS データの利用により、石油探鉱の手法が大きく変わってきている。1990 年代以前は、図表系データ、震探測線が紙媒体であったことから、既発見油・ガス田を中心とした周辺のプロスペクト (油、ガスの発見が期待できる構造的な高まりをプロスペクトと言う) の摘出が中心であった。2000 年代になると、探鉱手法が GIS データを利用したバズンアナロジーを水平展開するプレイベース探鉱へと変化してきている。

このプレイベース探鉱を実施するためには、プレートテクトニクスモデルの発展が重要なカギとなっている。本講演では、GIS データを基にしたプレートテクトニクスモデルの歴史と現在、および、その問題点について考察し、実際のプレートテクトニクスモデルの探鉱への活用の具体例として東アフリカを中心として紹介、その後、X 年後の探鉱について考えてみたい。

1.1 石油・ガス田の成立要件

石油・ガスの成立要件は、大きく分けると①根源岩、②貯留岩、③帽岩、④熟成、⑤移動・集積の 5 つからなり、この 5 つの条件が 1 つのバズン (堆積盆) 内で成立することによって、石油・ガス田が成立する (図 1)。

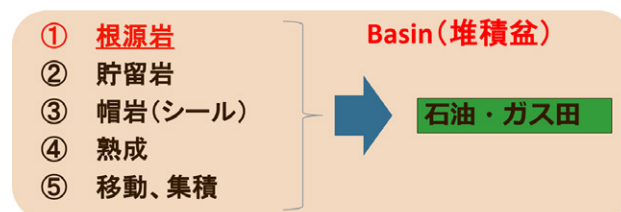


図 1 石油・ガスの成立要件

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦 – X 年後の石油ガス開発に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled “Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years” held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** 国際石油開発帝石株式会社 INPEX CORPORATION

† Corresponding author : E-Mail : motoyoshi.yamanaka@inpeco.jp

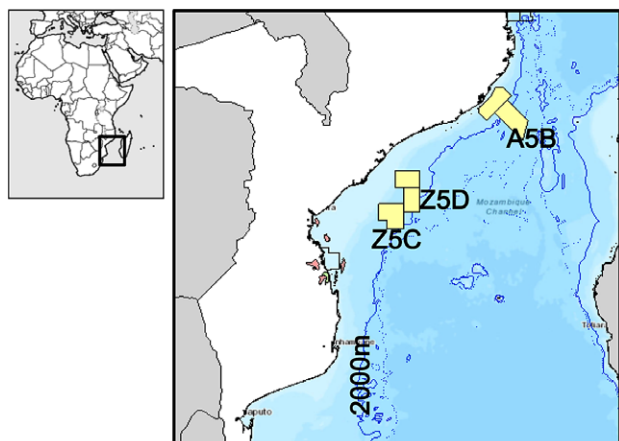


図2 モザンビーク南部での2014年公開入札とExxonMobilが入札した鉱区

ExxonMobil社をはじめ、Statoil社や、Total社などの石油メジャーは、油価低迷期の2015年にモザンビーク沖の鉱区に入札を行った（図2）。これらの海上鉱区周辺には油田の発見もなく、油徴なども確認されていない。また、いずれも水深2,000mを超えるような大水深鉱区であるにもかかわらず、ExxonMobil社は、これらの鉱区に合計5坑井掘削をコミットして、鉱区を取得している（図2のA5B, Z5C, Z5D 鉱区）。なぜ、このような鉱区取得に至ったのかを、今回の講演の主題であるGISデータの活用から考えたプレートテクトニクスモデル、さらには、プレートテクトニクスモデルを応用した古気候の観点から推測してみたい。

1.2 探鉱方法の違い（1990年代と2000年代）

1990年代の探鉱は、プロスペクトを抽出することに主眼が置かれていた。これは、扱っているデータが手書き情報なので、油、ガス田の周りで、発見構造の延長上にプロスペクトを探すことになる（図3のピラミッドの頂部）。

一方、2000年代になると、この手法が大きく変わりプ

レイベース探鉱が主体となる（Rose, 1999）。この方法は、油・ガスの発見が認められるベースズの成立条件を検討し、同様の条件が期待できるベースズを探し出す（ベースズアナロジーを展開）というもので、プロスペクトを検討するまで、以下の3つのステップを踏むことになる（図3）。

Step 1: “Basin Analogy” を用いて、油・ガスの成立しているベースズと同様の石油システムが成立している未探鉱ベースズを探す（図3のピラミッドの底辺部分）。

Step 2: “Play Focus”: このベースズに石油システムの5つの成立要件を積み上げて、すべての条件が成立するプレイフェアウェイマップを作成する（図3のピラミッドの中程）。

Step 3: “Prospect Generation” “Prospect Focus”: プレイフェアウェイマップ上にプロスペクトを抽出し、プロスペクトの評価を行う（図3のピラミッドの頂部）。

Rose (1999) は、プレイ探鉱の重要性を示しているが、この概念が提唱された時点では、PCの能力も非力であり、プレートテクトニクスモデルをデジタルデータのアニメーションのように動かすことに限界があった。このことから、紙媒体でのプレイ評価の重要性を示して、プレイベースから抽出されたそれぞれのプロスペクトの発見する確率を論じている。

プレイベース探鉱において、先ほど示したプロセスの中で基礎となるのはベースズアナロジーである。さらにベースズアナロジーを考える上で、重要なのはプレートテクトニクスモデルであり、プレートテクトニクスモデルの発達にはGISデータとPCの能力の向上が大きく寄与しており、以前、我々が頭の中でやっていたベースズアナロジーの水平展開を視覚的に分かるようになった（図3の右上の全地球のプレート地図）。

以下、この手法の基礎となるプレートテクトニクスモデルの歴史と、現在のプレートテクトニクスモデルについて紹介する。

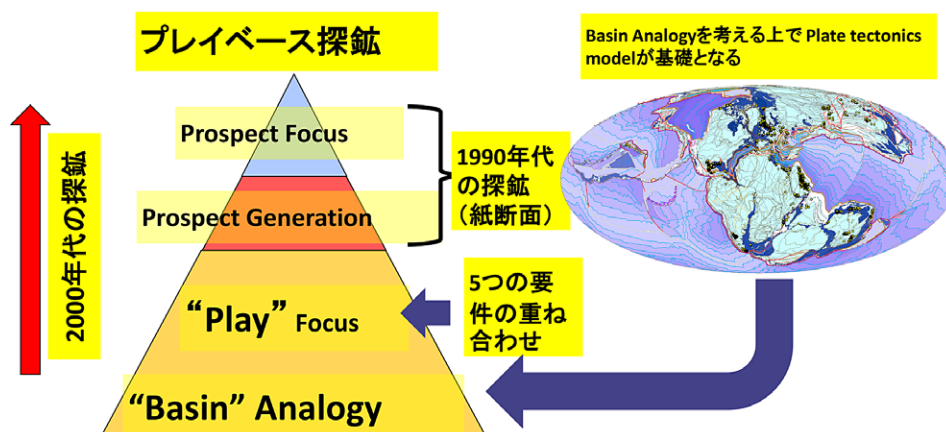


図3 1990年代と2000年代の探鉱方法の違い

2. プレートテクトニクスモデル (歴史と現在)

2.1 プレートテクトニクスモデルの歴史

プレートテクトニクスについて解説された代表的な書籍として、講談社から発行された竹内均氏のアルフレート・ウエーゲナー『大陸と海洋の起源』訳 (竹内, 1975) や、岩波新書から発行されている上田誠也氏の『新しい地球観』 (上田, 1971) などの名著がある。プレートテクトニクスモデルやウエーゲナーなどの概要については、これらを参照していただきたい。

プレートテクトニクスモデルの基礎となる“大陸移動説”は、1915年ウエーゲナーにより提唱されたが、概念自体は、それよりさらに300年近く前の1596年にオルテリウスが指摘している (Romm, 1994)。これは、南北アメリカや、アフリカ大陸が発見され、測地技術が発達、地図が正確に描かれるようになったことによって、生まれた考え方である。

1960年代以降、海洋底の観測技術、地磁気の観測精度の向上により、大陸移動説が裏づけられ、プレートテクトニクスモデルの概念が生まれた。マッケンジー、モーガン、ルピシヨンの3博士は、海洋底の地磁気縞模様から拡大速度、トランスフォーム断層の向きから拡大方向を求めることによってプレートの動きを決定し、プレートモデルを確立している。3博士の功績は“Japan Prize Foundation”として、1990年に「地球科学分野：プレートテクトニクスの創始とその発展に対する貢献」として表彰されている (http://www.japanprize.jp/prize_past_1990_prize02.html (cited 2017/12/19))。

これらの理論の発展に加えて、海洋底の観測精度の向上、GISデータの発達により、プレートの動きが正確に復元できるようになったことから、大学などの調査機関が、プレートテクトニクスモデルをインターネット上に公開している (Lahr, 1999)。

現在のプレートモデルは、海洋地殻の磁場の測定から年代を決めているが、海洋地殻は、時間がたつと大陸地殻の下に沈み込むので、現存する最も古い海洋地殻は、太平洋東部にある約2億年前 (前期ジュラ紀から後期三畳紀) である。これ以前の海洋地殻は存在しないことから、2億年より前のプレートモデルを正確に復元するためには、島弧

列島に付加した地殻の磁場データなどから、復元することになる。

このように海洋地殻が存在しない年代の復元には限界があるが、それでも復元技術を向上するための努力が続けられている。特に復元技術の向上を目指しているのが、次の3つの地域である (図4)。以下にそれぞれの地域について解説する。

2.2 地域毎のプレートテクトニクスモデル

2.2.1 メキシコ湾 (Pindell and Kennan, 2009 など)

メキシコ湾は、トランスフォーム断層が地質時代を通して、再活動を繰り返しており、復元が難しい地域である。Pindell and Kennan (2009) は、地磁気をはじめ、重力異常図、時間断面で10秒を超えるような超深度の地震探鉱データを丹念に解釈して、地質的な概念を加えることによって、プレートの動きを正確に復元している。

2.2.2 東南アジア、北東オセアニア海域 (Hall, 2002 など)

2つ目の例は、日本をはじめとする東南アジア、南太平洋地域である。この地域は、沈み込み帯に位置しており、海洋地殻あるいは大陸地殻の一部が沈み込んでいる。太平洋の海洋地殻については、太平洋の東側の中央海嶺で生成され、北西方向に移動し、日本海溝、マリアナ海溝に沈み込んでいく。太平洋プレートである海洋地殻は前述したとおり、約2億年前より前の地殻についてはすでに沈み込んでしまっている。これらの沈み込んだ地殻は、一部、付加体として島弧に付加しているが、この他にも、オーストラリア大陸から分離した大陸地殻 (マイクロプレート) も、一部、島弧に付加しており、Hall (2002) は、島弧の陸上の地質調査、重磁力調査により、これらの過去のプレート位置を復元する試みを行っている。

2.2.3 南インド洋 (Gaina *et al.*, 2007 など)

3つ目はインド洋の南極側である。南極は、そもそも海象条件も厳しく、船舶による観察が難しいことから、研究自体は遅れており、観測が本格化したのは、1980年以降となる。1980年代前半に石油公団 (JNOC) が、船舶による海洋測定を実施し、その実測結果を含め、公開しており、同資料を利用してGaina *et al.* (2007) が南極のプレートモデルとしてまとめている。

Gaina *et al.* (2007) では、インド洋の南極海域に明確なトランスフォーム断層が存在しないことを示している。気象、海象条件も厳しい上、もともと地質的に不明瞭なトランスフォーム断層であることや、アフリカ大陸の分裂、インド大陸、マダガスカルなどの拡大時期、拡大方向が分かりにくいことにより、南米-アフリカのプレート復元より研究が遅れていた。Gaina *et al.* (2007) は、丹念に地磁気の拡大速度、トランスフォーム断層の認定を行い、インド洋の動きを復元している。今回の講演で論じている東アフリカ周辺のプレート復元もこの論文を参考にしている。

2.3 GISデータによるプレートテクトニクスモデル

図5は、ESRI社のArcGISにプラグインのPaleoGIS (Rothwell社) を用いて作成した過去の全球のプレートテ

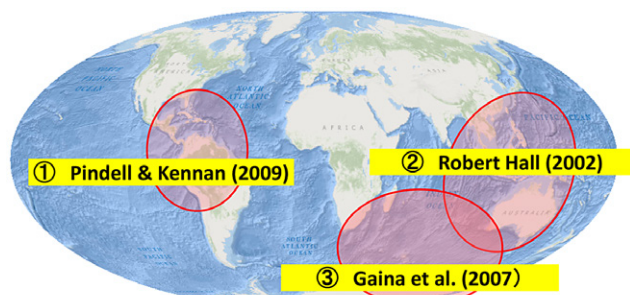


図4 地域ごとのプレート復元モデル

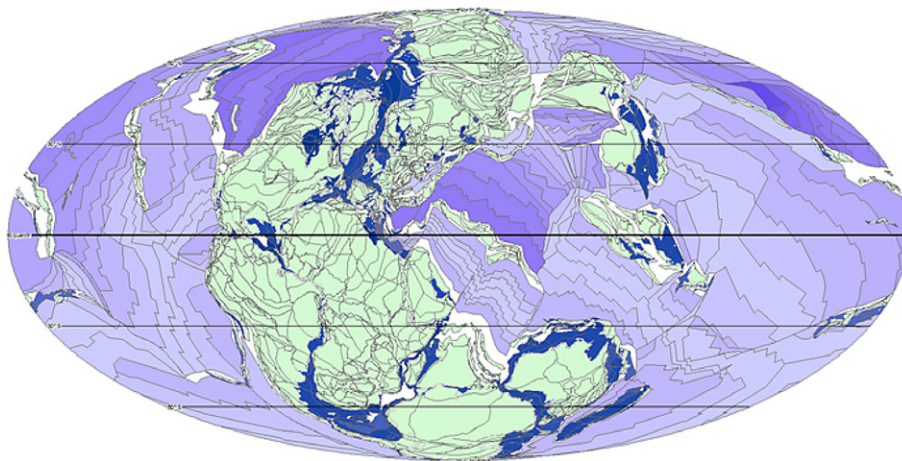


図5 GISデータを用いて作成したプレートテクトニクスモデル（ジュラ紀）
ESRI社のArcGISを用いて作成

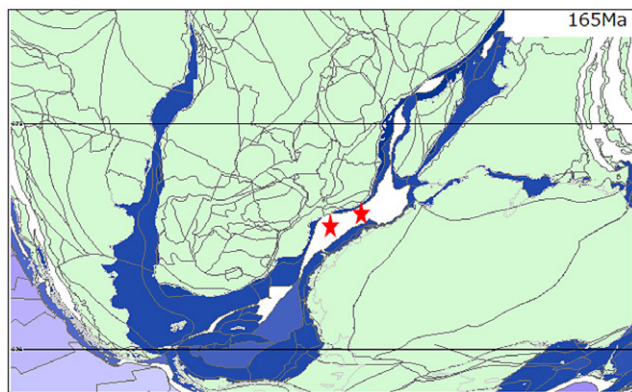


図6 GISデータを用いて作成したモザンビーク周辺のプレートテクトニクスモデル
星印は、モザンビークでのExxonMobilの入札鉱区

クトニクスモデルである（ここでは代表例としてジュラ紀を示している）。基礎となるデータについては、Neflex社（現 Halliburton-Landmark 社）のプレートモデルのデータを用いている。このモデルはGISデータより構成されていることから、必要に応じてデータの追加や描画エリアの調整拡大が可能で、それぞれの地域の位置を正確に把握することができる。たとえば、東アフリカモザンビークの鉱区公開エリアを過去の時代に戻すこともできる。図6は、この例であり、1億6500万年前（ジュラ紀中期）のアフリカ南部周辺を描いたものである。図中には、星印としてExxonMobil社が取得した鉱区位置をプロットしている。

3. プレートテクトニクスモデルの利用例

3.1 東アフリカの“油”探鉱

探鉱を成功させるためには、高い根源岩能力が分布するエリアを把握することが重要な要素の1つとなる。優秀な

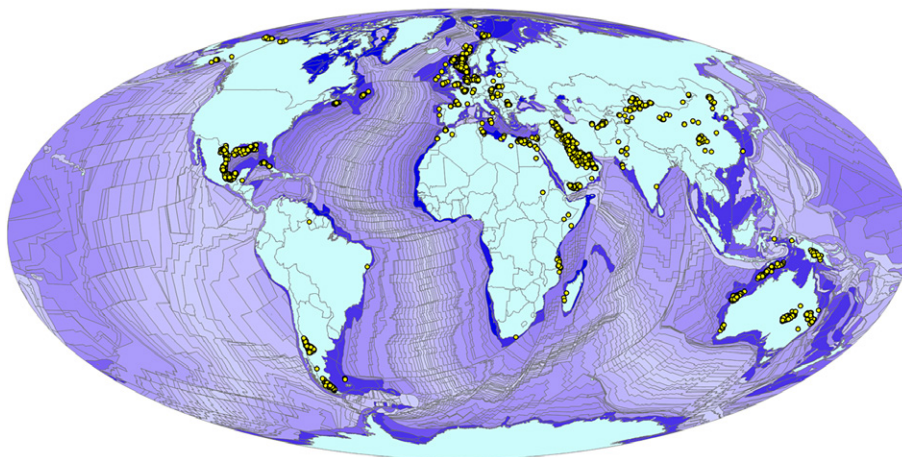


図7 GISデータを用いたジュラ系の根源岩ポテンシャル（現在）
IHS社の情報をもとに作成

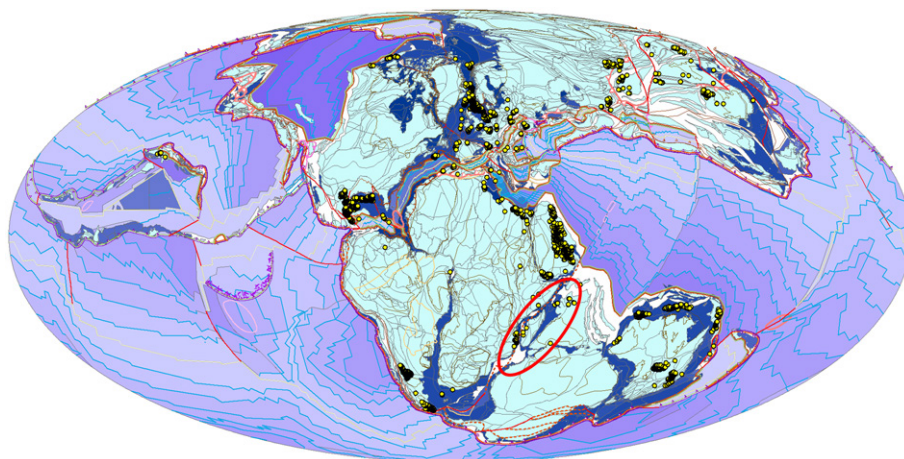


図8 GISデータを用いたジュラ系の根源岩ポテンシャル
IHS社の情報をもとに作成し、PaleoGISにて移動

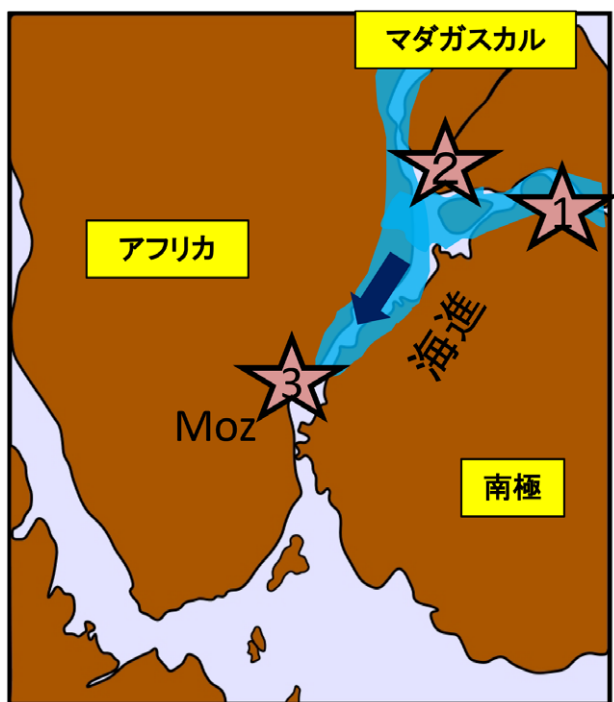


図9 ジュラ紀に拡大軸にそってテチス海に続く
“Super Sea Way”が発達
(星印がベースンアナロジーから考慮したポテンシャルエリア)

根源岩が発達しやすい環境の1つとして、大陸が分裂する初期のリフトベースンが挙げられる。

地質時代を通してみると、これまでの探鉱実績からジュラ紀の根源岩ポテンシャルは世界的に能力が高いと考えられている (Ulmishek and Klemme, 1990)。

IHS社が提供しているGIS情報は地理情報とそれに付随した属性情報を含むため、同社の油田GIS情報から、世界中のジュラ系の根源岩の油田がどこに分布するか地図上

に示すことができる (図7)。この情報を、PaleoGISを用いてジュラ紀のプレート位置に復元すると、根源岩が分布する地域は図8のようになる。黄色い点が、テチス海の西側周辺に集まることが分かる。加えて、東アフリカとインド大陸の間に注目すると、このテチス海から南西側のベースンのリフトベースンに黄色い点 (ジュラ系根源岩のポテンシャルが高いエリア) がプロットされる。

地質情報として、東アフリカ、マダガスカルで分析されている根源岩中に油指向性を持つType II ケロジェンが存在することが分かっている。Type II の根源岩は、Hydrogen Index (HI) が高く、油の排出に大きく関わるということが知られている。

この地質情報と大陸復元図を合わせて考察すると次のようになる。ジュラ紀にマダガスカルの北側のテチス海の入り口であるアフリカとマダガスカルの間が分裂し、この大陸間の拡大軸にそって、テチス海から海水が浸入し、“Super Sea Way (海の回廊)”が発達する。このような環境は、HIが高い海成の根源岩である泥岩が堆積したと考えられる (図9)。このHIの高い根源岩が、良好な油を排出する可能性があり、プレートモデルの復元図に基づく、この根源岩はモザンビークまで連続していると考えられる。この“Super sea way”に沿った地域は、いずれも油を排出する可能性のある良好な根源岩が期待できる場所であり、以下に良好な根源岩が期待できる3つの場所を挙げる。

3.2 GISデータを用いたベースンアナロジーの展開の例

3.2.1 南極大陸の探鉱ポテンシャル

1つ目は、南極大陸のエンダビーベースン (図9: 星印1) である。Gaina *et al.* (2007) には、深度断面図が示されており、この図からは、深度6,000 m付近 (水深4,000 m) に大陸分裂時のリフト初期の堆積物と推定される反射波が認められる。これはリフト初期の閉鎖環境であった可能性があり、プレート復元図から、リフト初期にはテチス海から続く“Super sea way”が侵入していたと考え、この震探断面の反射波は、炭化水素を排出する良好な海成根源

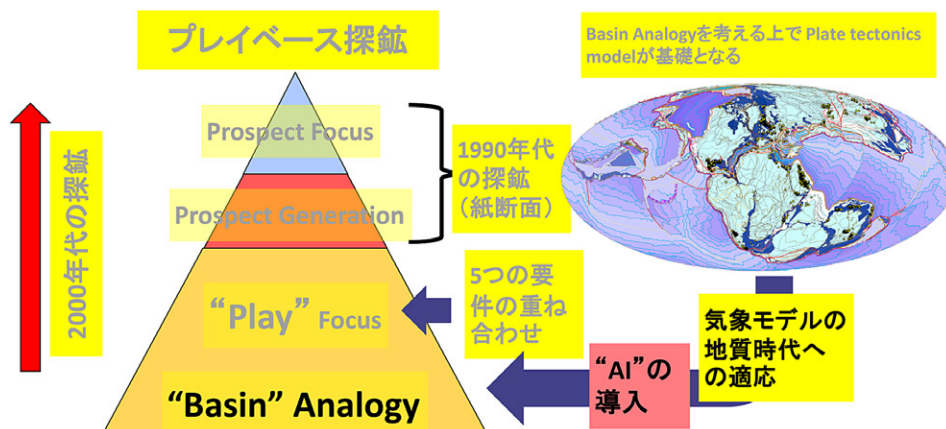


図 10 気候モデルの導入によるビッグデータ化

岩と考えることができる。貯留岩、マイグレーションパス、熟成度などの他の要素などの石油システムが成立すれば、このベーズンでは、油田が見つかる可能性がある。ただし、水深が 4,000 m を超えてしまう点や、冰山などの問題、環境問題、国際法上の問題からも、探鉱、開発は難しいであろう。

3.2.2 インド洋のマイクロプレートの探鉱ポテンシャル

2 つ目は、インド洋に存在するマイクロプレートである (図 9: 星印 2)。Ashwal (2017) によれば、インド洋に位置するモーリシャス島のジルコンを分析すると、3 億年前を示唆するとの結果になっている。モーリシャス島は、現在、インド洋上に浮かぶ島だが、かつては、マダガスカル、インドと 1 つの大陸を形成していた。これが大陸の分裂によりマイクロプレートとして分離し、これらの島々を形成したと考えられている。このようなマイクロプレートにおいては、大陸分裂時に初期リフトベーズンが形成され、そこに海成泥岩が堆積していれば、良好な根源岩が存在していた可能性もある。その他の石油システム (貯留岩、帽岩、移動、集積) が成立すれば、これらのマイクロプレートの上でも、探鉱の可能性も出てくると考えられる。

3.2.3 南部モザンビークの 2014 年公開鉱区

3 つ目は、冒頭で説明したモザンビークの例である (図 9: 星印 3)。2014 年、アフリカ、モザンビークの沖合鉱区が公開された (図 2)。翌 2015 年に ExxonMobil 社をはじめとするメジャー各社が落札している。2014 年末頃から始まった油価格の下落にもかかわらず、メジャー各社は鉱区の入札を行った。いずれの鉱区も水深 2,000 m を超えるような大水深鉱区であり、掘削には多額の費用のかかる鉱区である。ExxonMobil は、3 鉱区 (A5B, Z5C, Z5D 鉱区) に対して、計 5 坑井の義務作業として入札している。この地域では、油などの直接的な物証がない地域に、これだけの入札価格でなぜ、鉱区を取得できるのか? 大きな理由として、古環境の推定から良好な根源岩の存在を想定したのではないかとということがあげられる。

1990 年代後半から 2000 年代前半にかけて、メジャー各

社は、古環境を推定するためのプロジェクトを相次いで立ち上げている。このような動きの中、Rees *et al.* (2000) は、世界中に分布する石炭鉱床、ボーキサイトなどの鉱物鉱床など (これらの鉱床は堆積した時の環境を表す) の分布を堆積当時のプレート復元図にプロットし、それぞれの鉱床が形成された当時の環境を復元している。Rees *et al.* (2000) は、この分布に加え、植物の化石群からその時代の気候を推定し、古環境マップの精度向上を図っている。モザンビークの 2014 年の公開鉱区は、根源岩堆積当時、温暖な気候にあり、海洋の生物生産性が高い場所にあったと推測される。

4. X 年後の未来

現在は、この古環境マップの精度向上を目指して、それぞれの地質時代に気象シミュレーションモデルをあてはめることによって、当時の気象、気候を再現する試みがなされている。気象モデルについては、気象庁ホームページ (数値予報とは、<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html> (cited 2017/12/13)) に詳しく記載されている。

このようにプレートモデルに気象・海象シミュレーションモデルを加えて、根源岩の分布エリアをより具体的に特定 (300 km × 300 km のグリッド間隔) しようという動きが出てきているが、全球的な気候、海象モデルを作成するためには、膨大な量のデータを取扱う必要がある。これらは、いずれもビッグデータであり、計算に耐えられるコンピューター (スーパーコンピューター) が必要となる。メジャーもこのようなシミュレーションモデルに独自に取り組んでいるが、コントラクター各社が、この成果を製品化、販売している (例えば Halliburton-Landmark 社)。2013 ~ 2014 年時点では、これらの製品は、スーパーコンピューターを利用して計算されており販売価格が高いことが難点であり、直ちに探鉱に結び付くかどうか不明であることから購入するには至らなかった。

しかしながら、この数年、大きく情勢が変化しており、

クラウドシステムにより、スーパーコンピュータと同様の計算能力が獲得できるようになっていることや、AI による活用ということが大きく考えられ始めている。ビッグデータの取り扱いということだけであったものが、今後は、メジャーを巻き込んで、コントラクターがビッグデータをもとに、根源岩の予測モデルに加えて、他の石油システムの要素も検討した AI による探鉱モデルを販売する可能性もある。

2017 年 7 月 5 日付のインターネットの新聞記事 ZDNet (<http://www.zdnet.com/article/bp-invests-20m-into-ai-startup-beyond-limits-born-in-nasas-caltech-labs/>) (cited 2017/06/08)) によれば、BP 社は、上流プロジェクトの遂行のために AI の開発会社である Beyond 社へ投資を行っている。Beyond 社は、火星探査機キュリオシティの AI を開発した会社であり、この新聞記事では、現時点では、AI の使用はプラットフォーム上のパイプライン管理に限定されているようであるが、今後、BP 社は、AI を用いた探鉱も視野に入れているようである。2017 年 9 月 9 日付の The Telegraph 記事 (<http://www.telegraph.co.uk/business/2017/09/19/french-oil-major-talks-google-energy-sector-turns-ai/>) (cited 2017/09/19) では、Total 社が探鉱のための AI アルゴリズム開発を行うと宣言、AI を用いた新規の油田・ガス田の発見を目指している。

図 10 に本講演のまとめを示す。PC の発達、GIS データの精度の向上、海洋観測技術の発達、サテライトイメージによるデータ量が増加している。これらのデータに基づき、プレートテクトニクスを用いたペーズンアナロジーの展開が容易になった。プレートテクトニクスモデルに気象・海象モデルを加えること（図 10 の左下の矢印の箇所）によって、根源岩の予測精度が上がり、ペーズンアナロジーの展開が容易になる。さらに、石油システムの成立要件を考慮していけば、フロンティア地域でも良好な根源岩の予測が可能となってくる。ただし、GIS データを含む、気象、海象データがビッグデータ化していくことから、人間の脳で取り扱うことは難しくなる。今後、これらのビッグデータ情報を取り扱うためには、AI が活用されていくであろう。根源岩のみではなく、貯留岩や帽岩の存在、油の移動のタイミングについても、推測の方法のためのアルゴリズムが開発されれば、これらを組み合わせることによって、AI を用いた探鉱が実現可能だと考えられる。

先述の Neflex 社は 2015 年に Halliburton-Landmark 社に買収された。その後、2017 年 8 月の Microsoft 社のプレスリリース (<https://news.microsoft.com/2017/08/22/microsoft-halliburton-collaborate-digitally-transform-oil-gas-industry/>) (cited 2017/08/22) によれば、Halliburton-Landmark 社は、Microsoft 社と AI の事業にて提携している。この流れを見ても、探鉱の AI 化の下地が整っている。

前述の Beyond 社の社長であるアブドラット氏は、“AI can work with unknown or missing data and figure out hypothetical scenarios and fill in the missing pieces – much like humans with experience do” (人間が行っていたジグソー

パズルのミッシングピースを類推する力を AI が身につけるであろう) と語っている。石油探鉱もジグソーパズルのミッシングピースを探すことと同じであり、AI がこの力を身につければ、AI が探鉱を行う日も遠くはないのではないか。

謝 辞

講演、本稿の公表を許可して下さった国際石油開発帝石株、また、講演資料の作成、査読に多大な協力をいただいた多田良平理学博士に謝意を申し上げます。

SI 単位換算係数

$$\text{bbl} \times 1.589874 \text{ E} - 01 = \text{m}^3$$

引 用 文 献

- Ashwal, D. L., 2017 : Archaean zircons in Miocene oceanic hotspot rocks establish ancient continental crust beneath Mauritius. *Nature Communications*, **8**, 1–9.
- Gaina, C. R. Müller, D., Brown, B., Ishihara, T. and Ivanov, S., 2007 : Breakup and early seafloor spreading between India and Antarctica. *Geophys. J. Int.*, **170**, 151–169.
- Hall, R., 2002 : Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, **20**, 353–431.
- Japan Prize Foundation ホームページ : <http://www.japanprize.jp/index.html#5> (cited 2017/12/13).
- 気象庁ホームページ : 数値予報とは , <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html> (cited 2017/12/13).
- Lahr, J. C., 1999 : How to Build a Model Illustrating Sea-Floor Spreading and Subduction, USGS Open-File Report 99-132, On-Line Edition. accessed December 13, 2017; <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0132/>.
- Microsoft, 2017: Microsoft and Halliburton collaborate to digitally transform the oil and gas industry, Microsoft, <https://news.microsoft.com/2017/08/22/microsoft-halliburton-collaborate-digitally-transform-oil-gas-industry/> (cited 2017/08/22).
- Pindell, J. and Kennan, L., 2009 : Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In James, K., Lorente, M. A. and Pindell, J. eds.: *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate*, Geological Society, London, *Special Publications*, **328**, 1–55.
- Rees, P.M., Ziegler, A.M. and Valdes., P.J., 2000: Jurassic phytogeography and climates: new data and model comparisons. *Cambridge Univ. Press*: 297–318
- Romm, J., 1994: A New Forerunner for Continental Drift. *Nature*, **367**, 407–408.
- Rose, P., 1999 : 石油・天然ガス探鉱プレイ分析について、石油 / 天然ガスレビュー, **2**, 29–59.

- 竹内 均：1975, アルフレッド・ウエゲナー『大陸と海洋の起源』, 講談社.
- The Telegraph, 2017 : French oil major Total in talks with Google as energy sector turns to AI, The Telegraph, <http://www.telegraph.co.uk/business/2017/09/19/french-oil-major-talks-google-energy-sector-turns-ai/> (cited 2017/09/19).
- 上田誠也, 1971 : 『新しい地球観』, 岩波書店.
- Ulmishek, G.F. and Klemme, H.D., 1990 : Depositional Controls, Distribution and Effectiveness of World's Petroleum Source Rocks. *US Geological Survey Bulletin*, **1931**, 1-3.
- ZDNet, 2017 : BP invests \$20m into AI startup Beyond Limits to transform oil and gas exploration, ZDNet, <http://www.zdnet.com/article/bp-invests-20m-into-ai-startup-beyond-limits-born-in-nasas-caltech-labs/> (cited 2017/06/08).

講 演
 Lecture

海底下の微生物起源ガスと生命活動との関わり*
 — 海洋科学掘削の最前線 —

稲垣 史生^{**†}・井尻 暁^{**}・北田 数也^{**}・町山 栄章^{**}

(Received January 10, 2018 ; accepted January 23, 2018)

Interactions between biogenic gas and microbial activity in the subseafloor
 – Frontiers in scientific ocean drilling

Fumio Inagaki, Akira Ijiri, Kazuya Kitada and Hideaki Machiyama

Abstract : Scientific ocean drilling has a history of about half a century, which has so far brought remarkable discoveries in Earth Science, such as demonstration of plate tectonics and drastic environmental changes that occurred in the past on our planet. Among them, the substantial expansion of our knowledge on the discovery of “deep subseafloor biosphere” is one of the milestone scientific achievements that overturned the paradigm of the habitability in Earth’s interior. To date, numerous multidisciplinary studies of sediment samples cored from subseafloor have demonstrated that a remarkable number of physiologically and thus functionary unknown microorganisms are predominant, which have indigenously evolved under the dark subsurface biosphere. On-going effort on scientific exploration of the deep biosphere shows that functionality of the deep microbial ecosystem lurking inside of the Earth indeed plays important ecological roles in the global carbon and other elemental cycling; *e.g.*, degradation processes of the buried organic matter, formation processes of biogenic gas including methane hydrates in the global subseafloor sedimentary environments. In this lecture, we introduce the recent scientific knowledge on the interaction between the occurrence of biogenic gas and the deep-biosphere activity, and discuss how we could develop carbon and energy circulation systems for the sustainable human society and Earth’s environment in the future.

Keywords : biogenic gas, coal, mud volcano, methanogenesis, deep biosphere

1. はじめに

約半世紀の歴史を持つ海洋掘削科学は、プレートテクトニクスの実証や過去の劇的な地球環境変動など、教科書にその名を刻む輝かしい科学的成果をもたらしてきた。中でも、「海底下生命圏」の発見による生命生息可能域の大幅な拡大は、それまでの地球生命科学の概念（パラダイム）を覆すマイルストーン的な科学成果の 1 つであろう。これまでに、世界各地の海洋底から掘削されたコアサンプルの多面的な分析研究がなされ、水・エネルギー供給が極めて限られた海底下環境に、固有の進化を遂げた膨大な数の未

知微生物が生息していることが明らかとなっている（例えば、Inagaki *et al.*, 2006 ; Hinrichs and Inagaki, 2012 ; Inagaki and Orphan, 2014 を参照）。その地球内部に潜む生態系の機能は、地質学的時間スケールで、地球表層から供給される有機物の分解プロセスや、メタンハイドレートの形成プロセスなど、地球規模の炭素循環に重要な役割を果たしていることが明らかとなってきた。本稿では、科学海洋掘削により得られた海底下生命圏と微生物起源ガスに関する最新の知見を紹介し、地球環境と調和した持続可能な炭素循環システムの重要性について議論する。

2. 下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査
 (IODP 第 337 次掘削航海)

2012 年、筆者らの国際研究チームは、青森県八戸沖約 80 km、水深 1,180 m のサイト C0020 にて、地球深部探査船「ちきゅう」のライザー掘削による統合国際深海掘削計画 (IODP) 第 337 次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査」を実施し、海底下 2,466 m までの堆積物コ

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦 — X 年後の石油ガス開発に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled “Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years” held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** 国立研究開発法人海洋研究開発機構 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

† Corresponding author : E-Mail : inagaki@jamstec.go.jp

アサンプルと詳細な物理検層データを得た (Inagaki *et al.*, 2012)。同掘削調査で採取されたサンプルの堆積学・古環境学的な分析結果や当該海域における過去の掘削調査の結果 (大澤ら, 2002) を統合すると、海底下約 1.2 km よりも深い地層は、約 2000 万年前に湿原や干潟のような陸源有機物の影響を強く受けた浅海～湖沼性の堆積環境であり、海緑石やシデライトなどを含む泥岩やシルト岩が主体であることが示された。海底下約 1.9～2.0 km と 2.4 km の深度には、ビトリナイト反射率が 0.2 程度の熟成度の低い厚さ 30 cm 以上の褐炭層が 13 層存在し、一部固結した石灰岩やシデライトに富むビーチサンドを含む砂岩・頁岩・褐炭の夾炭層ユニットを形成していた (Gross *et al.*, 2015; Glombitza *et al.*, 2016; Ijiri *et al.*, 2017)。掘削孔の最下部の温度は約 60℃であり、自然界における微生物が十分に生息可能と思われる温度であった (Inagaki *et al.*, 2012; Tanikawa *et al.*, 2016)。

その後、陸上施設における生命圏の限界を規定する環境要因や微生物生態系の炭素循環に関わる機能に関する詳細な分析研究が進められ、海底下の生命活動と生物起源ガスとの関わりに関して、興味深い発見があった (Inagaki *et al.*, 2015)。まず、海底下約 1.2 km から深い地層では、

堆積物中の微生物細胞密度が 1 cm³ あたり 100 細胞以下に急激に減少する傾向が認められ、褐炭が存在する夾炭層ユニットなどでは、100～1,000 倍程度の細胞密度の増加が認められた。また、ライザー掘削の循環泥水に含まれるマッドガスの連続的な化学組成 (C₁/C₂₊) やメタンの炭素・水素同位体組成の深度プロファイル、CO₂ の炭素同位体組成の深度プロファイルは、海底下約 2.5 km の深度においてもなお、現場地層における CO₂ 還元型・水素資化性のメタン生成が起きていることが確認された (図 1)。また、シュルンベルジェ社の Quicksilver プロープにより、海底下 2 km の夾炭層から得られた保圧流体サンプル中からガス成分を抽出し、メタンのクランプト同位体組成 (¹³CH₃D) によるメタン生成温度指標を測定した結果、70±10～20℃の値を得た (図 1)。同深度の現場温度は約 50℃であるため、メタン生成温度指標値は若干高い温度を示しているものの、熱分解起源を示す温度指標に比べて有意に低く、現場付近の微生物活動により生成されたメタンであることを示唆している。また、メタン菌のメタン生成代謝に必須の補酵素である F₄₃₀ バイオマーカーがエビマー化されていない完全体の状態で検出され、海底下深部炭層環境にメタン菌の生細胞が存在していることが支持された

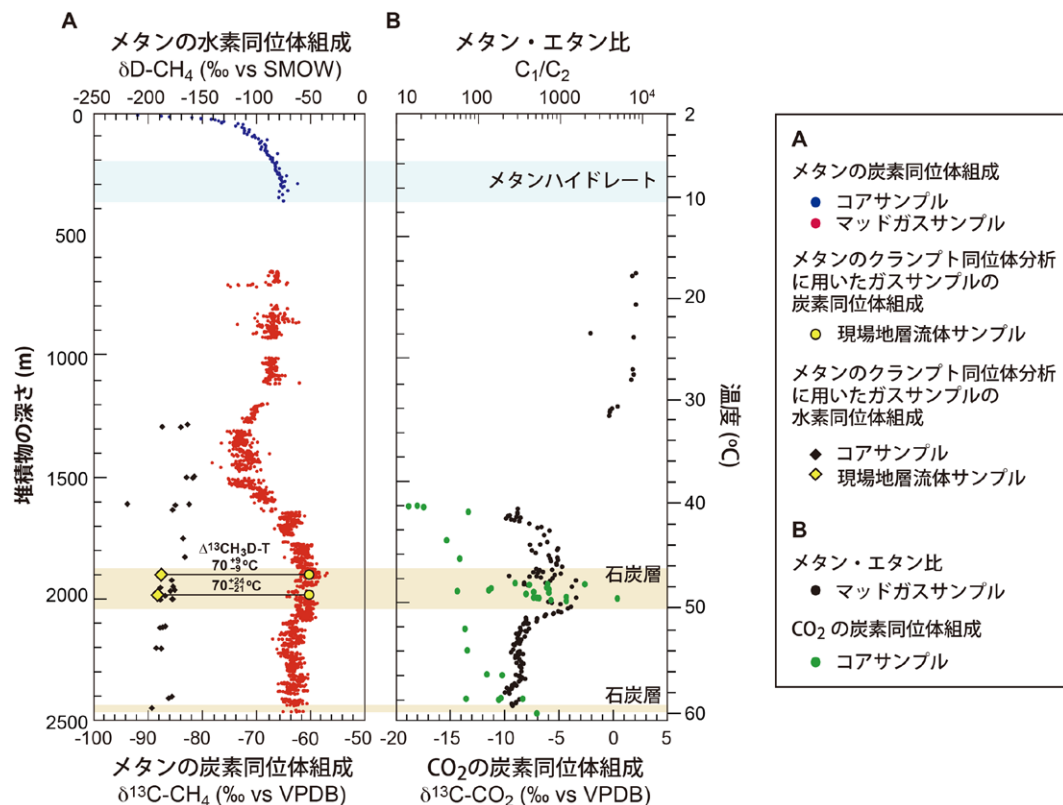


図 1 「ちきゅう」のライザー掘削による統合国際深海掘削計画 (IODP) 第 337 次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査」で得られた微生物起源ガスの存在を示す地球化学的データの深度プロファイル

(A) メタンの炭素・水素同位体組成とクランプト同位体 (¹³CH₃D) によるメタン生成推定温度。(B) マッドガス成分の化学組成 (C₁/C₂₊) と堆積物コアサンプルに含まれる CO₂ の炭素同位体組成。これらのデータは、海底下約 2.5 km においてもなお、微生物の CO₂ 還元によるメタン生成が起きていることを示唆している。(Inagaki *et al.*, 2015 より AAAS の許可を経て改変したものを転載)

(Inagaki *et al.*, 2015)。これらの微生物学的・同位体地球化学的・生物地球化学的データは、有機物に富む大陸沿岸の堆積物環境において、微生物起源ガスが従来考えられてきた以上に深部にまで広がっていることを示している。

また、筆者らの研究チームは、米国クレイグ・ベンター研究所と共同で、それらのコアサンプルから環境 DNA を抽出し、その塩基配列の網羅的な解読から微生物群集構造を評価した。その結果、海底下 1.5 km 付近より深い地層に生息する微生物群集は、海底表層から深度 365 m までの上部堆積物中に生息する海洋性の微生物種とは全く異なり、陸域の森林土壌などに多く見られる微生物種が優占的に検出された (Lipp *et al.*, 2008; Inagaki *et al.*, 2015)。また、カリフォルニア工科大学と共同で、「ちきゅう」船上で頁岩と褐炭層に安定同位体で標識されたメタノール ($^{13}\text{CH}_3\text{OH}$)、メチルアミン ($^{13}\text{CH}_3\text{NH}_2$ または $\text{CH}_3^{15}\text{NH}_2$)、アンモニウムイオン ($^{15}\text{NH}_4^+$)、重水 ($^2\text{H}_2\text{O}$) を基質として少量ずつ添加し、1 細胞あたりに取り込まれた安定同位体の量を、超高空間分解能二次イオン質量分析器

(NanoSIMS 50L) を用いて測定した結果 (Morono *et al.*, 2011)、メタノールやメチルアミンなどのメチル化合物を基質として超低速で生育する微生物群の検出に成功した (Trembath-Reichert *et al.*, 2017)。1 細胞あたりに取り込まれた ^{15}N と ^2H の量の割合から、細胞の倍加時間を推定したところ、少なくとも数十年から数百年の時間を要することが明らかとなった (図 2)。これらの知見は、海底下に埋没した頁岩や褐炭には、それらの地層に多く含まれるメチル化合物などを利用しながら超スロースピードで生育 (または長期的に生命機能を維持) する固有の地下圏微生物群集が存在し、地質学的時間スケールをかけて、海底下の炭素循環や炭化水素資源の形成プロセスに重要な役割を果たしていることを示している。

さらに特筆すべきは、海底下 2 km の褐炭サンプルから、森林土壌に広く分布するカビ・菌類や (Liu *et al.*, 2017)、スポンジ懸垂型バイオリアクターを用いて、メタン生成を行う世界最深部サンプルを含む海底下微生物群集の培養に成功したことである (Imachi *et al.*, 2011; Inagaki *et al.*,

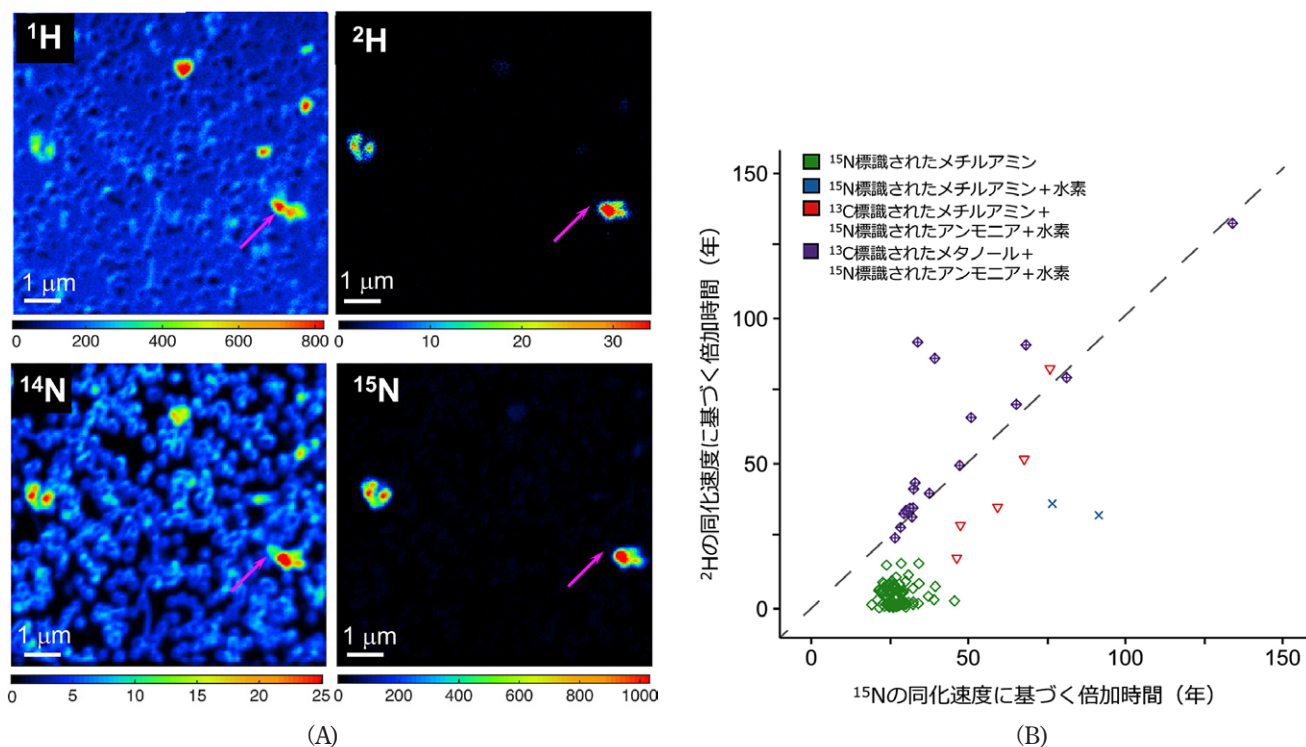


図 2 「下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査」により採取された海底下 2 km の褐炭サンプルに含まれる微生物細胞の活性測定

(A) 海底下 2 km の石炭層 (^{15}N 標識されたメチルアミンと ^2H 標識された重水を添加し、45°C で 30 か月間放置したもの) から検出された微生物細胞の超高空間分解能二次イオン質量分析器 (NanoSIMS) を用いた元素組成イメージ。各画像は、 ^1H (左上)、 ^2H (右上)、 ^{14}N (左下)、 ^{15}N (右下) を示し、色が青から赤に近づくほど、多くの元素が存在することを示している。ピンク色の矢印で示した細胞は、 ^1H と ^{14}N で構成されるが ^2H と ^{15}N を同化していない不活性な細胞と判別された。(B) 細胞内に取り込まれた水素 (^2H) と窒素 (^{15}N) の相関から推定される倍加時間のプロット。安定同位体で標識された基質を添加してから 30 か月の間に、1 細胞あたりが ^2H や ^{15}N を同化した元素量を NanoSIMS により測定し、細胞全ての元素が置き換わる理論時間 (倍加時間) を算出したプロット図。細胞への ^2H と ^{15}N の取り込み率は良い相関を示し、海底下約 2 km の石炭層から検出された微生物の倍加時間は、少なくとも数十年から数百年に及ぶと推定された。現場環境における活性・倍加時間は、これらの実験室内の推定時間よりもさらに遅いと考えられる。

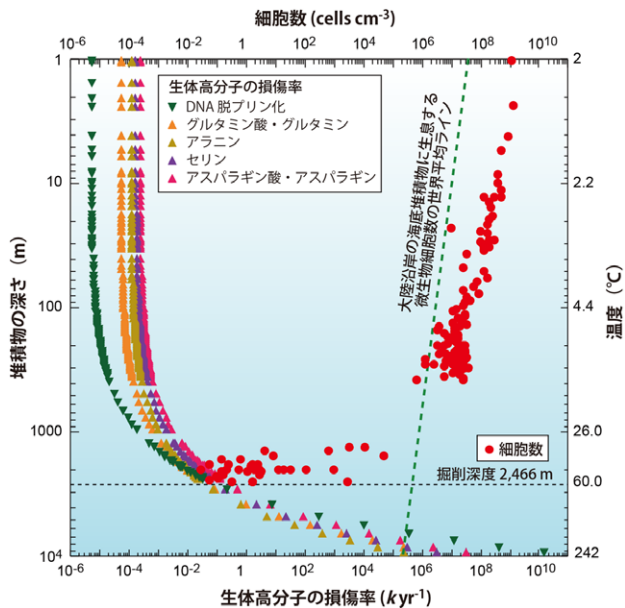


図3 下北八戸沖の海底堆積物環境における現場の地層温度と生体高分子の熱力学的な損傷率との関係を示す深度プロファイル

海底下深部において、生体高分子の損傷が加速するにつれて、細胞数が急激に低下したことが考えられる。(Inagaki *et al.*, 2015 より AAAS の許可を経て改変したものを転載)

2015)。これらの研究成果は、約 2000 万年前の堆積環境から現在に至るまで、有機物を分解して最終的にメタンを生成するといった従属栄養型の微生物生態系が長期間・広範囲で存続することを示すと同時に、一般的に実験室内での培養が困難であるとされてきた海底下微生物が、人間の時間スケールで培養（復活）可能であることを示している。また、微生物起源ガスを発酵する日本近海の堆積物環境から、嫌気性微生物による脱ハロゲン化を担う遺伝子ホモログや一酸化炭素脱水素酵素など、海底下に固有かつ新規な遺伝子配列が検出されている (Futagami *et al.*, 2009; Kawai *et al.*, 2014; Hoshino and Inagaki, 2017)。今後、さらに改良された培養技術で、変質を受けていない海洋堆積物に適用することにより、地下圏に存在するさまざまな新規微生物・遺伝子資源の獲得が期待される。さらに、その詳細なオミックス分析などにより、地下圏微生物生態系の存続メカニズムやゲノム進化・環境適応に関する基礎科学的知見が拡大することが予想される。

一方、下北八戸沖の海底下生命圏において、なぜ海底下 1.2 km より深い地層で急激に微生物細胞密度が低下したのであろうか？筆者らは、熱と水・エネルギー供給のバランスが問題であると考えている。つまり、40～50℃以上の高温の堆積物環境に生息する微生物が、持続的にその生命機能を維持するためには、生体内の酵素を用いて温度上昇に伴う生体高分子の変質・損傷率を上回る速度で損傷部位を修復するか、新しい世代やパーツを作るための生合成

を一次生産的に行う必要がある (Inagaki *et al.*, 2015) (図3)。下北八戸沖の深部地層は、生命生息のための間隙スペースやエネルギー基質（例えば水素や有機物）が十分であっても、全体のバイオマスを維持するための水（自由水）の量や供給が極めて限られている可能性が高い。つまり、日本海の拡大に伴って大陸沿岸環境が沈降し、それ以降に外部環境からの水の供給経路が限られた準安定的な成層環境であったために、約 2000 万年前の堆積環境に由来する微生物の一部が水・エネルギー供給とバランスをとりながら縮小した可能性が考えられる。

3. 日本近海の海底泥火山に見る微生物起源ガスと生命活動との接点

海底泥火山は、高間隙水圧をもった堆積物が泥ダイアビルとして上昇し海底に噴出した小丘であり、世界各地の大陸縁域やプレート収束帯で確認されている。日本近海では、南海トラフ熊野海盆や種子島沖に、泥火山に特徴的なマウンド地形が確認されている。海底泥火山の噴出堆積物中に含まれる流体やガスに共通の化学的特徴は、一般的に、海底堆積物に含まれる粘土鉱物の脱水反応や有機物の熱分解のシグナルを強く示し、流体・ガスの供給源は地温 60–100℃ 以上の海底下深部と推察される (井尻, 2009)。一方、特に付加体に付随する深部流体やガスの移動・局所的濃縮は、海底下の微生物起源ガスの生成にとって不可欠な水と栄養・エネルギー基質の供給源となっている可能性がある。

2009 年と 2012 年に、筆者らを含む国際研究チームは、「ちきゅう」を用いて南海トラフ熊野灘第五泥火山の山頂から深度 200 m までの科学掘削を実施した。採取されたコアサンプル中には、約 100～1 万細胞/cm³ 程度の微生物細胞を含んでいた。堆積物の間隙水に含まれるメタンの炭素・水素同位体比、溶存無機炭素や酢酸の炭素同位体比などの地球化学分析に加え、放射性トレーサー基質を用いて微生物代謝活性を測定した結果、硫酸が枯渇したダイアビル深部においても CO₂ 還元型のメタン生成と酢酸生成が起きていることが示唆されている。筆者らは、「ちきゅう」に保圧コアリングシステム (Hybrid-PCS) を導入し、掘削により得られた保圧コアサンプルの X 線 CT スキャンなどの分析により、熊野灘第五泥火山の堆積物間隙にメタンハイドレートが充填されていることを確認した (Kubo *et al.*, 2014) (図4)。さらに、保圧コアサンプルから抽出したメタンのクランプト同位体組成に基づくメタン生成温度指標の推定値や、リチウム (Li) 同位体が示す間隙水の経験温度推定値 (Nishio *et al.*, 2015)、脂質バイオマーカー組成、16S rRNA 遺伝子による分類・多様性解析などの結果を統合的に解釈すると、深部付加体における粘土鉱物の変質・脱水により生じる水や、地熱による有機物の熱分解、断層活動により生じる水素など、深部付加体において地質学的・非生物学的要因によって生じる水・エネルギー基質とそれを付加体―堆積盆境界へと運ぶ地殻内流体の移流により、堆積盆内における微生物起源ガスの生成・濃縮が支配され

ていることを示唆している。

一方、種子島沖では、比較的沿岸に近い海域まで多数の泥火山の存在を示すマウンド地形の発達が認められる。しかしながら、泥火山の分布や活動度、メタンなどの炭化水素組成やそれらの分布・規模、あるいはプレート沈み込み帯～沿岸域に至るトランセクトでの発達様式などの詳細は明らかではない。これまでに、筆者らの研究チームは、2012年より種子島沖における泥火山分布の把握を目的として、船底装備のマルチビーム測深機を用いた広域マッピングを行ってきた。そして精査の対象となるマウンド地形について、巡航型自律無人探査機（AUV）「うらしま」を用いた高解像度マッピングを実施し、詳細な海底地形・音響画像・海底表層の地下構造データを取得した。その結果、種子島沖に存在する多数のマウンド地形が、実際に泥火山であることを確認した。このうち、泥火山 MV1, MV3, MV7, MV8, MV13（いずれも仮称番号）などにおいて、海底音響画像から泥質流体の明瞭な噴出痕を確認した（図5）。これら泥質流体は、マウンド頂部火口から山体斜面を流下しており、規模の大きなものは海底谷を形成しながら末端に扇状地を形成しているものも認められる。また、調査海域の南方に位置する巨大な泥火山 MV14 は、陥没した円形の火口を有し、火口内は平坦な地形である。AUV「うらしま」のサブボトムプロファイラーから、認められる限りでは 15 m 程度の成層した堆積物によって埋積されている。頂部火口には新鮮な泥流痕跡は認められず、

すでに活動を停止したものと推定される。

他方、広域マッピングと併せて実施したシングルチャンネル反射法地震波探査の結果からは、いずれの泥火山も山体の下部の反射面が不明瞭であり、ガスを胚胎する堆積物で構成されている可能性が高いと考えられる。また、データとしては十分ではないが、調査海域内中部～北部の泥火山群は泥流が流下した新鮮な痕跡が良く認められる反面、南部はそれらの活性を示すシグナルは顕著とはいえない傾向にある。それらの種子島沖の泥火山群に推定される活動史は、泥火山に胚胎（あるいは泥火山から噴出）される炭化水素ガスの地球化学的特性と微生物生態系の寄与に反映されている。例えば、筆者らの研究チームは、調査海域北側に位置する MV1 と南側に位置する MV14 の表層堆積物および直上水塊に含まれるメタン濃度と微生物群集構造を調査した結果、間隙水中のメタン濃度は MV14 よりも MV1 の方が高く、ともに水塊中にメタンブルームを形成することや、有機物に富む海底堆積物に優占的に存在する嫌気性地下微生物であるアトリバクテリア属細菌がメタンブルームとともに海水中に拡散しているなどの興味深い結果が得られている（Hoshino *et al.*, 2017）。今後、当該海域の他の泥火山について、高解像度マッピングや詳細な地球化学的・微生物学的な調査を行い、南北トランセクトの泥火山と微生物起源ガスの発達過程にどのような相違があるか考察する必要がある。加えて、種子島沖の多数の泥火山群を発達せしめたテクトニックな要因を解明するために

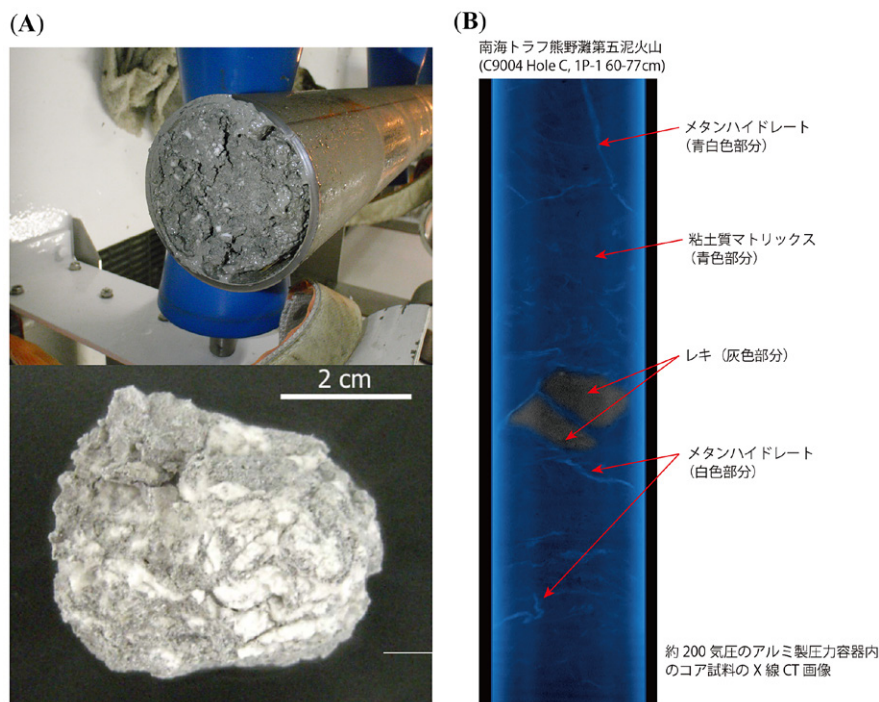


図4 「ちきゅう」により南海トラフ熊野灘第五泥火山から掘削採取されたメタンハイドレート

(A) ピストンコアにより採取されたコアにパッチ状（写真上）または塊状（写真下）に含まれるメタンハイドレート。(B) ハイブリッド型保圧コアリングシステム（Hybrid-PCS）を用いて採取されたメタンハイドレートを含むコアのX線CTイメージ（Kubo *et al.*, 2014）。

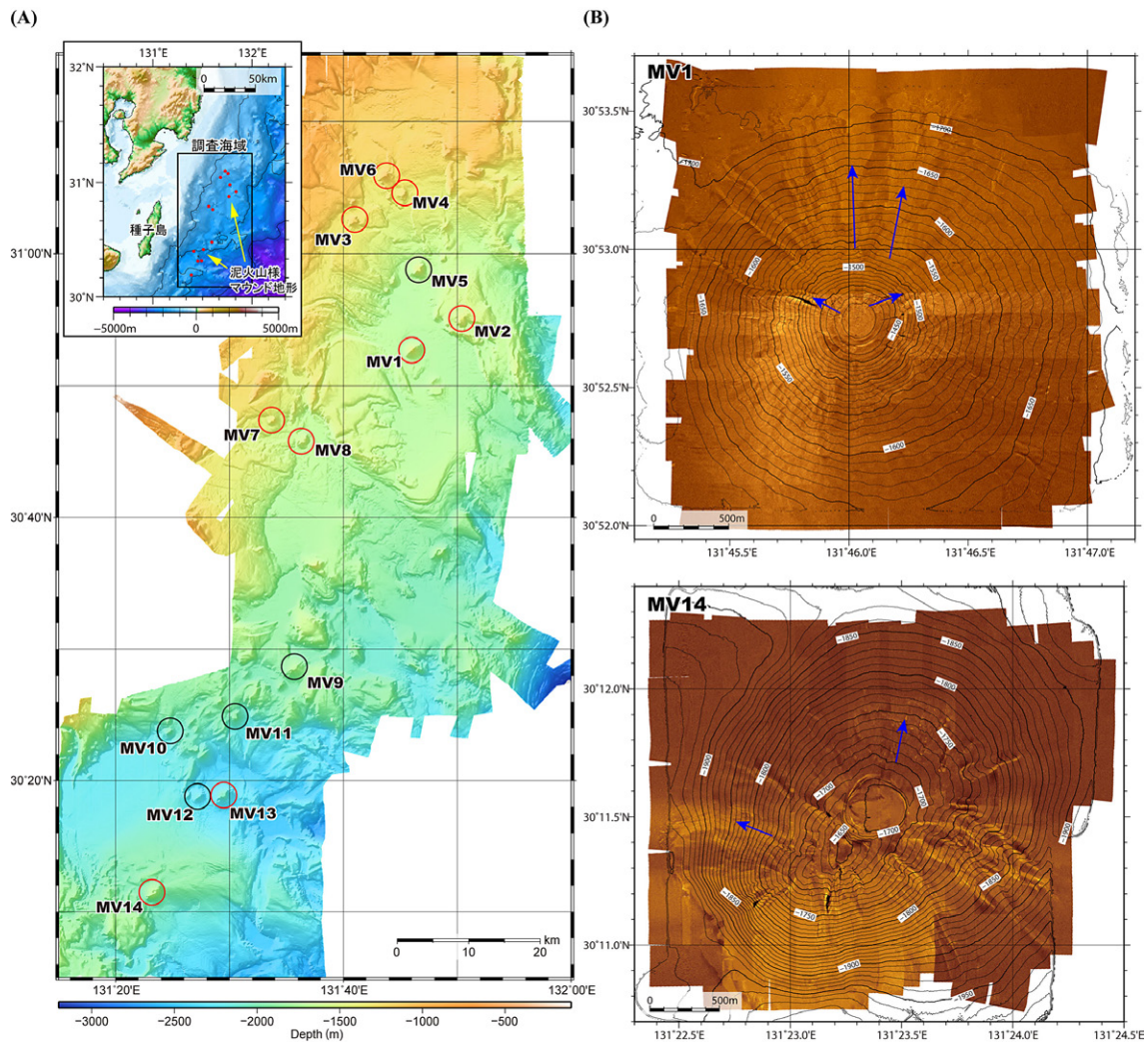


図5 種子島沖泥火山群の分布と海底地形図

(A) 種子島沖周辺の泥火山様マウンド地形の分布を示す海底地形図。丸で示した泥火山様マウンド地形のうち、赤丸についてはAUV「うらしま」による調査を実施した。(B) AUV「うらしま」により取得された泥火山MV1とMV14の音響画像と詳細地形図。いずれの泥火山においても泥質流体の噴出痕が観察された(青矢印)。MV1においては末端部に顕著な扇状地の発達が認められる。

も、深部構造探査をはじめとする総合的な調査を推し進める必要があるだろう。

4. 人間社会と地球環境の調和を目指した未来創成科学

現在の地球環境は、地球温暖化や海洋酸性化など、人為的な要因により過去に例を見ない急速な勢いで変化しており、新しい地質時代「人新世 (Anthropocene)」に突入したと考えられている。産業革命以降に失われた生物種はすでに5万種を超えており、6600万年前の白亜紀に恐竜が絶滅して以降、最も早いペースで生物種が失われている。つまり、我々は無意識のうちに、地球史における生物大量絶滅イベントに直面している。これまでに、世界の気候や生物多様性の分布、自然に対する人間活動の影響など、地球環境に関するさまざまなレベルの取り組みがなされ、そ

の科学的知見は、IPCC 報告書や気候変動枠組条約、生物多様性条約、SDGsなどの国際的な政策・意思決定に反映されてきた。同時に、地球環境に負荷を与えず、人口増加や人間社会の持続的な発展を支えるエネルギーベストミックスのあり方や循環システムの構築手法が議論されている。地球規模でさまざまな問題が顕在化する一方で、情報や物流・IoTに関するグローバル化やロボット・AI技術の普及は確実に進行している。それは、地域や人間社会におけるさまざまなシステムが、地球という1つの惑星システムとしてガイア的に連結しつつある、つまり「システム・オブ・システムズ」の潮流と言っても良いだろう。他方、海洋・地球・生命に関する統合的なデータベースを最新の情報科学技術で構築・活用し、人間社会と地球環境を構成するサブシステムの未来を、科学的・体系的・流動的に理解・予測する試みは端緒についたばかりであり、

学術界と産業界の垣根を超えた協働が求められるところである。

人新世を含めた近未来（10年後）から人類・地球の終焉を見据えた中長期的な未来展望を考えた場合、人為的要因がもたらした地球環境への影響は、自らの責任で人為的に修復・マネッジしていく必要がある。その際、地球が生命を宿す惑星として本来有する合理的な機能や特性を、どのように未来社会の創造に生かしていくかが問われている（森田ら, 2011; 稲垣ら, 2014）。特に、現代社会における「持続可能」というキーワードを体現していくには、あらゆる生産活動を支えるエネルギーの供給とその消費産物を低コスト・高効率の酸化還元反応で結び、いかにして無駄の少ない循環システムを創出するかにかかっている。その鍵は、地球内部に存在する余剰還元力の活用と、投資エネルギーの少ない創エネルギー・循環メカニズムを有する地球内部の生態系にあるのかもしれない。今後は、地球と生命が築き上げてきた合理的システムの潜在性を人為的に数桁以上のレベルで加速させる、あるいは既存の地球生態系にはないレベルの超高効率なエネルギー転換機能を創り上げることを目指し、地球と生命の未来を長期的に支えうる革新的技術や、宇宙に存在する地球と生命に対する新しい価値観・世界観を切りひらいていく必要がある。

謝 辞

本稿を執筆するにあたり、石油技術協会平成29年度秋季講演会「次世代技術への挑戦ーX年後の石油ガス開発に向けて」（平成29年10月24日、東京大学小柴ホール）の実行委員および同探鉱新技術分科会の関係者の方々に深く御礼を申し上げます。国際深海科学掘削計画（統合国際深海掘削計画）第337次研究航海・南海トラフ熊野灘第五泥火山掘削調査を実施するにあたり、地球深部探査船「ちきゅう」の乗組員・掘削チーム・乗船研究者・陸上研究者の方々や、海洋研究開発機構高知コア研究所及び海底資源研究開発センターのスタッフに深く御礼を申し上げます。また、種子島沖泥火山群の調査にあたり、深海潜水調査船支援母船「よこすか」によるYK12-17, YK13-07, YK14-15航海の乗組員・乗船研究者および深海巡航探査機「うらしま」の運航チームの方々、海洋調査船「なつしま」によるNT15-15航海の乗組員・乗船研究者および無人探査機「ハイパードルフィン」の運航チームの方々、学術研究船「白鳳丸」によるKH-15-2航海の乗組員・乗船研究者の方々に深く御礼を申し上げます。本研究は、日本学術振興会による最先端研究基盤事業および最先端・次世代研究開発支援プログラム（GR102, 研究代表：稲垣史生）、科学研究費助成事業（no. 26251041）の支援を受けて実施されました。

引 用 文 献

- Futagami, T., Morono, Y., Terada, T. and Inagaki, F. 2009 : Dehalogenation activity and distribution of reductive dehalogenase homologous genes in marine subsurface sediments. *Appl. Environ. Microbiol.*, **75**, 6905–909.
- Glombitza, C., Adhikari, R. R., Riedinger, N., Gilhooly, W. P., Hinrichs, K.-U. and Inagaki, F. 2016 : Microbial sulfate reduction potential in coal-bearing sediments down to ~2.5 km below the seafloor off Shimokita Peninsula, Japan. *Front. Microbiol.*, **7**, 1576. doi: 10.3389/fmicb.2016.01576.
- Gross, D., Bechtel, A. and Harrington, G. J. 2015 : Variability in coal facies as reflected by organic petrological and geochemical data in Cenozoic coal beds offshore Shimokita (Japan) - IODP Exp. 337. *Int. J. Coal Geol.*, **152**, 63–79.
- Hoshino, T. and Inagaki, F. 2017 : Distribution of anaerobic carbon monoxide dehydrogenase genes in deep subseafloor sediments. *Lett. Appl. Microbiol.*, **64**, 355–363.
- Hoshino, T., Toki, T., Ijiri, A., Morono, Y., Machiyama, H., Ashi, J., Okamura, K. and Inagaki, F. 2017 : *Atribacteria* from the subseafloor sedimentary biosphere disperse to the hydrosphere through submarine mud volcanoes. *Front. Microbiol.*, **8**, 1135. doi: 10.3389/fmicb.2017.01135.
- Hinrichs, K.-U. and Inagaki, F. 2012 : Downsizing the deep biosphere. *Science*, **338**, 204–205.
- Imachi, H., Aoi, K., Tasumi, E., Saito, Y., Yamanaka, Y., Saito, Y., Yamaguchi, T., Tomaru, H., Takeuchi, R., Morono, Y., Inagaki, F. and Takai, K. 2011 : Cultivation of methanogenic community from subseafloor sediments using a continuous-flow bioreactor. *ISME J.*, **5**, 1751–1925.
- Inagaki, F., Nunoura, T., Nakagawa, S., Teske, A., Lever, M., Lauer, A., Suzuki, M., Takai, K., Delwiche, M., Colwell, F. S., Nealson, K. H., Horikoshi, K., D'Hondt, S. and Jørgensen, B. B. 2006 : Biogeographical distribution and diversity of microbes in methane hydrate-bearing deep marine sediments on the Pacific Ocean Margin. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **103**, 2815–2820.
- Inagaki, F., Hinrichs, K.-U., Kubo, Y. and the Expedition 337 Scientists. 2012 : Deep coalbed biosphere off Shimokita: microbial processes and hydrocarbon system associated with deeply buried coalbed in the ocean. *IODP Preliminary Reports*, **337**, 1–62, the International Ocean Drilling Program Management International, Inc., Tokyo. doi: 10.2204/iodp.pr.337.2012.
- Inagaki, F. and Orphan, V. J. 2014 : Exploration of subseafloor life and the deep biosphere through IODP (2003–2013). In: Stein, R., Blackman, D., Inagaki, F., Larsen, H. C. Eds.: *Earth and Life Processes Discovered from Subseafloor Environments –A Decade of Science Achieved by the Integrated Ocean Drilling Program (IODP). Developments in Marine Geology*, **7**, 39–63, Elsevier, Netherlands.
- Inagaki, F., Hinrichs, K.-U., Kubo, Y., Bowles, M. W., Heuer, V. B., Hong, W.-L., Hoshino, T., Ijiri, A., Imachi, H., Ito, M., Kaneko, M., Lever, M. A., Lin, Y.-S., Methé, B. A., Morita, S., Morono, Y., Tanikawa, W., Bihan, M., Bowden, S. A., Elvert, M., Glombitza, C., Gross, D., Harrington, G. J., Hori, T., Li, K., Limmer, D., Liu, C.-H., Murayama, M., Ohkouchi,

- N., Ono, S., Park, Y.-S., Phillips, S. C., Prieto-Mollar, X., Purkey, M., Riedinger, N., Sanada, Y., Sauvage, J., Snyder, G., Susilawati, R., Takano, Y., Tasumi, E., Terada, T., Tomaru, H., Trembath-Reichert, E., Wang, D. T. and Yamada, Y. 2015 : Exploring deep microbial life in coal-bearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor. *Science*, **349**, 420–424.
- 稲垣史生・高野修・山田泰広・森田澄人・鈴木庸平・真田佳典・久保雄介・東垣・岡津孔明, 2014 : 「海底下の炭化水素資源・炭素循環と地球生命工学」シンポジウム開催報告－生態系と調和した循環型カーボンマネジメントの重要性－. 石技誌, **79**(3), 190–192.
- Ijiri, A., Ikegawa, Y. and Inagaki, F. 2017 : Data report: permeability of ~1.9 km deep coal-bearing formation samples off the Shimokita Peninsula, Japan. In: Inagaki, F., Hinrichs, K.-U., Kubo, Y., the Expedition 337 Scientists, *Proc. IODP*, **337**, IODP-Management International, Inc., Tokyo. doi: 10.2204/iodp.proc.337.202.2017.
- 井尻 暁, 2009 : 海底泥火山堆積物中の間隙水の起源. 地学雑誌, **118**(3), 435–454.
- Kawai, M., Futagami, T., Toyoda, A., Takaki, Y., Nishi, S., Hori, S., Arai, W., Tsubouchi, T., Morono, Y., Uchiyama, I., Ito, T., Fujiyama, A., Inagaki F. and Takami, H. 2014 : High frequency of phylogenetically diverse reductive dehalogenase-homologous genes in deep subseafloor sedimentary metagenomes. *Front. Microbiol.*, **5**, 80. doi: 10.3389/fmicb.2014.00080.
- Kubo, Y., Mizuguchi, Y., Inagaki, F. and Yamamoto, K. 2014 : A new hybrid pressure-coring system for the drilling vessel *Chikyu*. *Sci. Drill.*, **17**, 37–43.
- Lipp, J. S., Morono, Y., Inagaki, F. and Hinrichs, K.-U. 2008 : Significant contribution of Archaea to extant biomass in marine subsurface sediments. *Nature*, **454**, 991–994.
- Liu, C.-H., Huang, X., Xie, T.-N., Duan, N., Xue, Y.-R., Zhao, T.-X., Lever, M. A., Hinrichs, K.-U. and Inagaki, F. : 2017 Exploration of cultivable fungal communities in deep coal-bearing sediments from ~1.3 to 2.5 km below the ocean floor. *Environ. Microbiol.*, **19**, 803–818.
- 森田澄人・東 垣・高野 修・山田泰広・真田佳典, 2011 : 地下圏微生物と石炭期限の炭化水素資源－西太平洋沿岸海域におけるエネルギー資源と生成メカニズム－. 石技誌, **76**(4), 338–340.
- Morono, Y., Terada, T., Nishizawa, M., Hillion, F., Ito, M., Takahata, N., Sano and Y., Inagaki, F. 2011 : Carbon and nitrogen assimilation of deep subseafloor microbial cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **108**, 18295–18300.
- Nishio, Y., Ijiri, A., Toki, T., Morono, Y., Tanimizu, M., Nagaishi, K. and Inagaki, F. 2015 : Origins of lithium in submarine mud volcano fluid in the Nankai accretionary wedge. *Earth Plant. Sci. Lett.*, **414**, 144–155.
- 大澤正博・中西 敏・棚橋 学・小田 浩, 2002 : 三陸～日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉱床ポテンシャル. 石技誌, **67**(1), 38–51.
- Tanikawa, W., Tadai, O., Morita, S., Lin, W., Yamada, Y., Sanada, Y., Moe, K., Kubo Y. and Inagaki, F. : 2016 Thermal properties and thermal structure in the deep-water coalbed basin off the Shimokita Peninsula, Japan. *Mar. Petrol. Geol.*, **73**, 445–461.
- Trembath-Reichert, E., Morono, Y., Ijiri, A., Hoshino, T., Dawson, K. S., Inagaki, F. and Orphan, V. J. 2017 : Methyl-compound use and slow growth characterize microbial life in 2-km-deep subseafloor coal and shale beds. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **114**, E9206–E9215.

講 演
 Lecture

微生物起源ガス探鉱の可能性*
 —国内探鉱のパラダイムシフトと成り得るか?—

瀬 能 修**†

(Received December 19, 2017 ; accepted January 12, 2017)

The potential of biogenic gas exploration
 – a paradigm shift for exploration in Japan?

Osamu Senoh

Abstract : Biogenic methane gas is generated by methanogen in sediments. The generated gas can be concentrated as water dissolved gas and accumulated as methane hydrate or free gas. The sea areas around Japan have optimal conditions for biogenic gas generation comparable with other biogenic gas generating basins in the world. Gas bubbles generated from oversaturated dissolved gas cause free gas accumulation effectively, and the mechanism to produce oversaturation differs by basin. The main mechanism for oversaturation is the continuation of gas generation and decompression caused by vertical crustal movement or upward migration of formation water.

Biogenic free gas accumulation often occurs at shallow depths, and direct hydrocarbon indicators (DHIs) on the seismic section provide a strong clue of their existence. The combined implementation of marine electro-magnetic survey with seismic survey is however recommended to reduce exploration risk, as low saturation gas also causes DHIs.

In near future, it is expected that the understanding of the underground carbon cycle and gas accumulation mechanism will advance, and biogenic gas exploration in the seas around Japan will become more common.

Keywords : biogenic gas, methanogen, free gas, electro-magnetic survey

1. はじめに

微生物起源ガスは、地下におけるメタン菌の活動によって生成される。国内海域のメタンハイドレートや陸域の水溶性天然ガスの大部分は微生物起源ガスであることが多くの研究者によって報告されており（例えば金子ほか, 2002）、それらの資源量が莫大であることも指摘されている（例えば藤井ほか, 2009）。また、国内外における構造性ガス鉱床の一部についても微生物起源ガスであることが明らかとなっている（Katz, 2011）。近年、商業規模の微生物起源の構造性ガス鉱床の発見が地中海東部やミャンマー沖合などで相次いでいる。世界の微生物起源ガスの構

造性ガス鉱床をレビューし、日本周辺海域での鉱床発見の可能性について検討した結果を紹介する。

2. 微生物起源の構造性ガス鉱床

微生物起源ガスの構造性ガス鉱床は、陸域および浅海～深海におよぶ各地ですでに発見例があり、国内においては、水溶性天然ガスやメタンハイドレートの存在が確認されている地域の周辺において新たに発見される可能性が残されている（図 1）。

東新潟ガス田は、新潟平野の沿岸部に位置しており、水溶性天然ガスの胚胎地域内に存在している。同ガス田の浅部では微生物起源の水溶性天然ガスが胚胎しており、深部では微生物起源ガスと熱分解起源ガスの混合ガスからなる構造性ガスがそれぞれ胚胎している。同ガス田での混合ガスの胚胎深度は約 3,000 m に及ぶ（早稲田ほか, 2011）。地中海東部では深海域においてメタンハイドレートの安定領域の下位に構造性ガス鉱床が形成されており、当海域で探鉱活動をしている各社の発表によれば、近年の発見量は In-Place で数十 Tcf に及ぶ。また、インドネシアの東ジャ

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦 – X 年後の石油ガス開発に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled “Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years” held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** 石油資源開発株式会社 国内事業本部 Japan Petroleum Exploration Co., Ltd. Domestic E&P Project Division

† Corresponding author : E-Mail : osamu.senoh@japex.co.jp

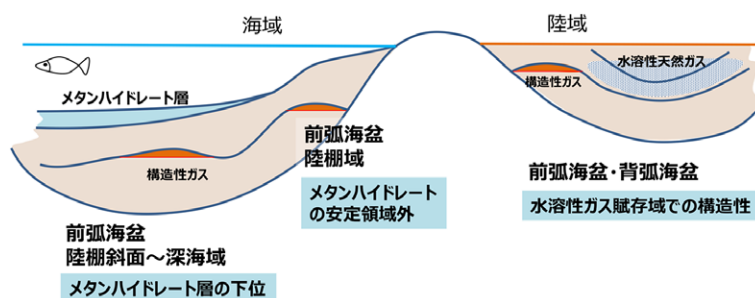


図1 微生物起源の構造性ガス鉱床の発見が期待できる地質状況

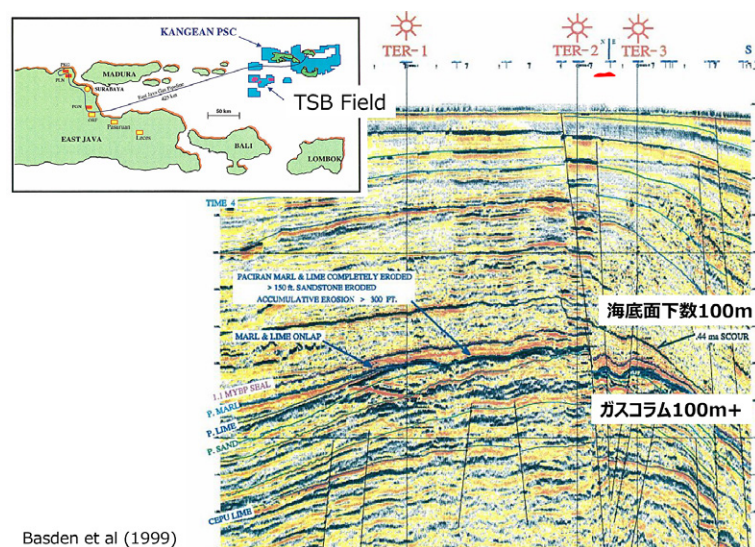


図2 インドネシア東ジャワ海における微生物起源の構造性ガス鉱床例

ワ海、バリ島北方沖合に位置する TSB ガス田は、メタンハイドレートの安定領域が存在しない大陸棚上に位置しており、約 1Tcf の埋蔵量がある (図 2)。同ガス田での事例では、熱分解起源ガスを伴わず、微生物起源ガスだけで鉱床が成立している。またその胚胎深度は海底面下数 100 m、胚胎層準は後期中新世～鮮新世の Pachiran 層であり、ガスコラムは 100 m 以上ある。シール層は、第四系の 0.44 Ma 以降に急速に堆積した Lidah 層の泥質岩である (Noble and Henk, 1998)。地震探査断面図上で海底面近くにガスの存在を示唆するアノマリーが検知された場合、掘削上のハザードとして扱われることが多いが、商業規模の構造性ガス田が成立している可能もあり、視点を変えて地震探査データを見る必要がある。

3. 微生物起源ガス鉱床の生成条件

十分な微生物起源ガスが生成し、鉱床が成立するには、好適な条件が複数揃う必要がある (図 3)。

微生物起源ガスの生成スピードや生成量は、メタン菌の活動度に依存している。メタン菌は生物であるので、極端に低温や高温の領域ではその活動度は低下する。地下に多く生息しているメタン菌の活動度は、おおむね 10 ～ 50℃

の温度領域で高くなり、20 ～ 45℃の領域で最も高い (図 4)。100℃以上の温度領域でもメタン菌が報告されている (例えば Kurr ほか, 1991) が、熱水湧出口の近辺など特殊な環境下における好熱菌の活動である。

メタン菌の活動空間が確保されるという観点からは、地温勾配が重要な要素となる。低地温勾配の条件下ではメタン菌の活動限界に達する深度が深くなるため、広いメタン菌の活動空間が確保され得る。低地温勾配の深海域においては、埋没が一定程度進んだ後にメタン菌の活動が活発となっている可能性がある (図 5)。深海域では浅海域や陸域と比べて海底面近傍の地層が低温下にあるため、メタン菌の活動領域が狭くなると想定できる一方、埋没が進んだ後に生成のピークを迎えるので、生成後の拡散が抑制されている可能性がある。

また、堆積物中においてメタン菌が活動できる孔隙径が一定以上あることも重要な条件であり、埋没深度 1,500 m 程度が活発に活動してメタンを生成できる限界と言われていている (金子, 2003)。これは孔隙率で 30%前後に相当する。

本検討の一環で世界中の微生物起源の構造性ガス鉱床の成立条件をレビューした結果、有機炭素量 (TOC) が 0.5 ～ 1.0%程度で Tcf クラスの構造性ガス田が形成されてい

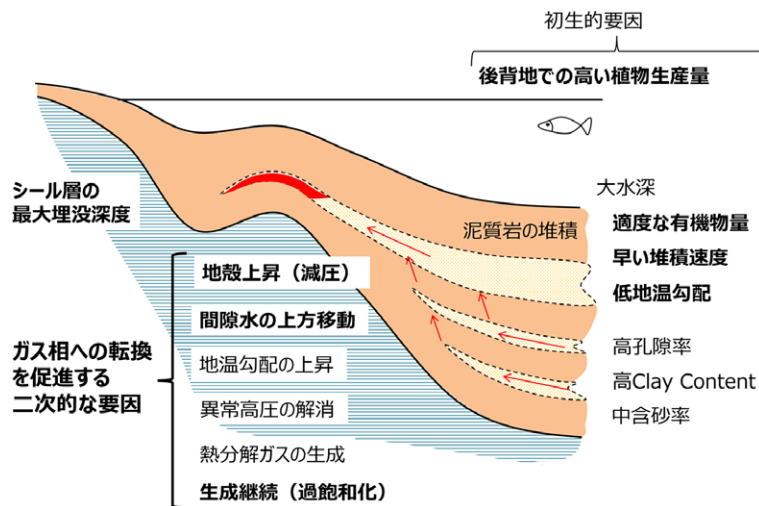
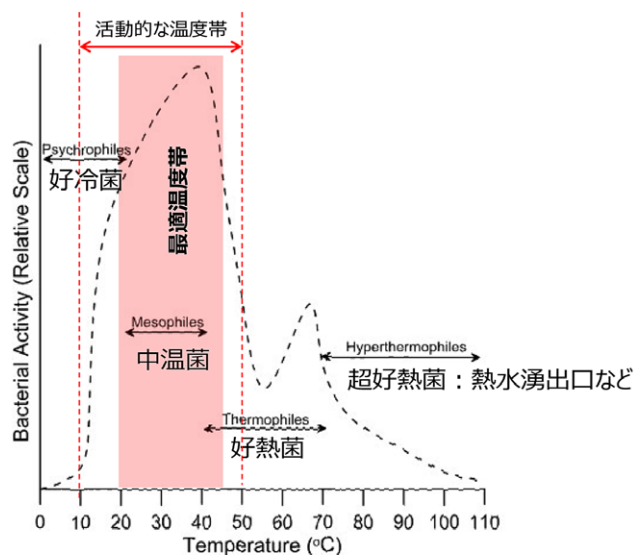


図3 微生物起源ガスの生成 / 移動 / 集積の概念図 (太字：特に重要な要因)



Barry Jay Katz (2011) に加筆

図4 メタン菌群集の温度に対する活動度

ることを確認した。また、根源岩のケロジェンタイプは8割以上がタイプIIIであった。後背地での高い植物生産量が初生的な要因として必要であるが、温暖湿潤な国内においては問題とならない。

堆積速度と鉱床成立との関係性についてもレビューした結果、100～1,000 m/My の範囲で鉱床が成立しており、堆積速度が速い程、巨大な鉱床が多い傾向があることが明らかとなった。堆積速度が速い程、生成直後の拡散が抑制されるとも考えられるが、100 m/My は 0.1 mm/y に 1000 m/My は 1 mm/y にそれぞれ相当し、生物擾乱の影響など考えると有意な差があるとは考え難い。Clayton (1992) は、堆積速度が遅すぎる場合、海底面下 10 m 程度までに存在する好気性酸化帯や硫酸還元帯に留まる時間が長くなり、

それ以深のメタン生成帯でメタンに変換可能な有機物が消費されてしまうと指摘している。

堆積速度が速い海域では沈降と堆積物の供給がバランスしており、メタン菌の広い活動空間が維持されていることが本質的に重要であると考えられる。一方、Clayton (1992) は、逆に堆積速度が速すぎる場合、メタンの生成に好適な温度帯に留まる時間が短くなるため、十分な量のメタン生成が起こらないと指摘している。総じて言えば、有意な規模の微生物起源ガス鉱床の成立には、100～1,000 m/My 程度の適度な堆積速度が必要である。

4. 微生物起源ガスの移動 / 集積

メタン菌の活動が活発な深度は、海底面の温度や地温勾配および圧密に伴う孔隙率の減少によって変化するが、深海域においては埋没深度がおおむね 1,000 m 前後でピークに達する (図5)。メタン菌によって生成したガスは生成当初は溶存ガスとして存在するが、生成量が十分に多いと過飽和となり、ガス相が生じると考えられる。生成したメタンガスは、間隙水とともに埋没によって深部へ送達されて行くと同時に、埋没に伴う間隙水の排出によって上方へも排出されて行く。溶存ガスまたはガス相として浅部へ移動し、メタンハイドレートの安定領域に達すると、メタンハイドレートとして固定される。メタンハイドレートの安定領域よりも深部にシール構造が存在してトラップされると構造的なガス鉱床を生じ得る。さらに深部からの熱分解起源ガスの供給を伴うと混合ガス鉱床が形成される (図6)。

移動集積を促す条件として、溶存ガスとして存在していたメタンガスからガス相が生じることが最も重要と考えられ、原因として下記に記す複数の事象が挙げられる。

1. 微生物起源ガスの生成継続による過飽和化
2. 地殻の上昇 (海水準の低下)
3. 間隙水の上方移動
4. 地温勾配の上昇

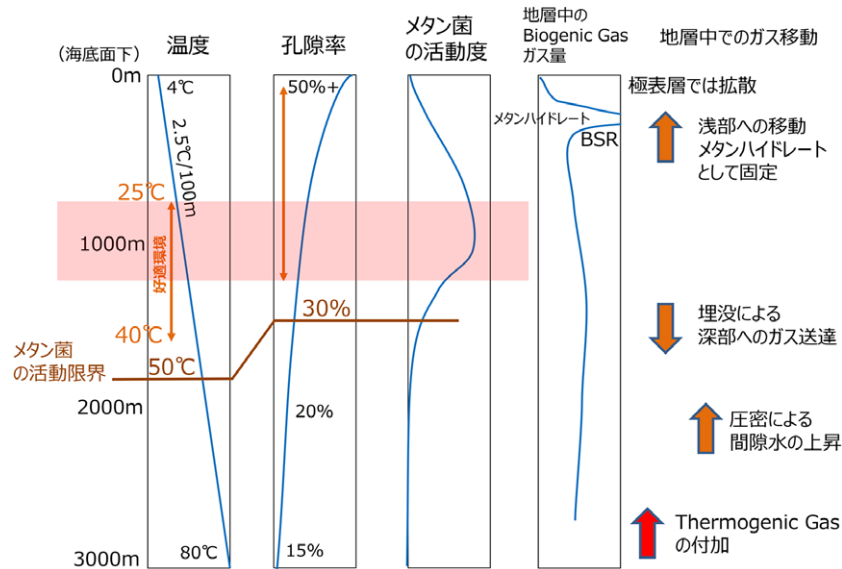


図5 深海域でのメタン菌の活動的な深度帯と地層中のガス量、ガスの垂直移動

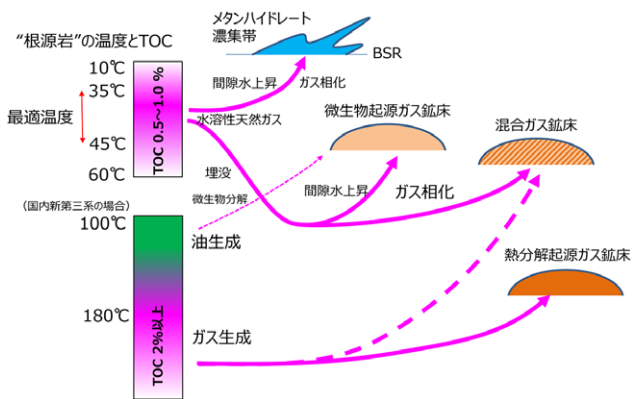


図6 微生物起源ガスと熱分解起源炭化水素の生成条件および移動集積の概念図

た要因であると考えられる。

5. 国内探鉱での可能性

世界的には低い有機炭素量とタイプ III ケロジェン優勢な条件で巨大な微生物起源ガス鉱床が成立している事実や、早い堆積速度と低地温勾配が有利である点は、国内での探鉱を想定した場合に重要である。これまでの熱分解起源の炭化水素を対象としてきた探鉱では、主として日本海側の中新世の優秀な根源岩を追究してきたが、微生物起源ガスの探鉱では対象海域が太平洋側に大きく拡大すると期待できる。北海道の日高山脈上昇に伴い形成された前縁堆積盆やフィリピン海プレートの沈み込みに伴い形成された前弧海盆は、有機炭素量、ケロジェンタイプ、堆積速度および地温勾配の点において、世界の商業規模の微生物起源ガス鉱床が発見されている堆積盆に比類しており、今後の探鉱対象海域と成り得る。

6. 探鉱手法

微生物起源ガスの胚胎深度は比較的浅いことが多く、地震探査や海洋電磁探査の利用が有効である。一般的に海域の地震探査データは品質が高く、DHI (Direct Hydrocarbon Indicator) の検知が容易であるため、三次元地震探査による探鉱が主流になると想定される。図7に熊野灘で認められるDHIの一例を示す。BSR (Bottom Simulating Refractor) よりも下位にある4way dipping closureの形態と調和的にブライトスポット、フラットイベントなどのDHIが認められる。

しかしながら、低飽和率のガスでもDHIは発現し、高飽和率のガスとは音響的に区別が付かないため、DHIだけを頼りに探鉱を進めるのではリスクが高い。近年の海洋電磁探査では海底面下の比抵抗分布を高精度で画像化でき

5. 異常高压の解消

6. 熱分解ガスの生成 (移動集積過程での微生物起源ガスとの混合)

いずれの場合もガス量の増加 (事象1および6) や溶解度の低下 (事象2~5) による過飽和化がガス相への転換の要因となっているが、実際の鉱床の形成過程における各事象の貢献度はさまざまである。先に微生物起源ガス鉱床の事例として挙げたインドネシアのTSBガス田では、インバージョンテクトニクスによる地殻上昇と浅海化に伴う地層圧力の低下がガス相化と集積を最終的に促進したとされている (Basden ほか, 1999)。地中海東部の例ではメッシニアン海水準の低下が同様の効果をもたらしたと言われている (Wygrala ほか, 2014)。一方、東新潟ガス田では顕著な地殻上昇は認められず、微生物起源ガスの生成継続による過飽和化や熱分解ガスの付加がガスの集積を促し

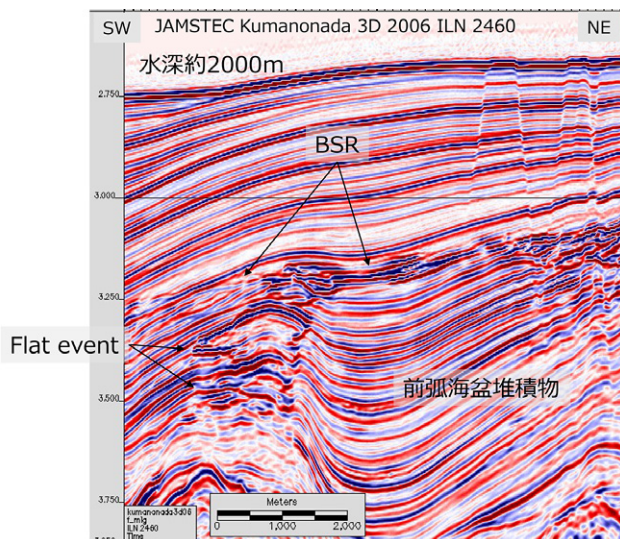


図7 熊野灘深海域でのDHI (Direct Hydrocarbon Indicator) の例

図の左側4Way dipping closure 部分のBSR (Bottom Simulating Reflector) 下にBright spot、Flat eventなどのDHIが認められる

るように進歩してきた (Chakraborty ほか, 2013 など)。三次元地震探査と海洋電磁探査とを組み合わせる探鉱より、リスクを軽減しながらの試掘が可能になると期待できる。

7. 今後の課題

微生物起源ガスの濃集によって形成された構造的ガス鉱床が存在することについては既知の事実であるが、有機物からの変換効率、生成スピード、付加体などの深部からの流体移動や熱分解起源炭化水素の貢献度などについて十分に解明されているとは言えない状況にある。微生物の研究者によってメタン菌の活動温度や生息深度については明らかになりつつある (JAMSTEC, 2015 など)。今後はこれらの成果を石油・天然ガス探鉱の石油システムの一部に組み込んで微生物起源ガスと熱分解起源炭化水素の生成システムを統合的に解釈し、検討を深化させて行く必要がある。生成/移動/集積の各過程についてパラメーターを定量的に評価、シミュレーションスタディーを実施し、その精度と確度を上げてゆく必要がある。

8. X年後の微生物起源ガス探鉱

以下に著者が期待するX年後の微生物起源ガス探鉱について記述する。

5年後：メタンや二酸化炭素の地下で循環メカニズムの理解が進み、微生物起源ガスが集積する海域を特定できるだけでなく、定量的に集積量を予測できるようになる。この検討には炭素同位体分析技術の進歩が大きく貢献する。また、国内技術による海洋電磁探査の実施が可能となり、微生物起源ガスの探鉱が成功、探鉱対象として普遍化する。

10年～15年後：大水深域での大型ガス田の開発作業が開始され、これに伴い国内では前例のない海底仕上げやFPSO (Floating Production Storage and Offloading system) での操業、LNG 液化プラントの建設が必要となる。

引用文献

- Basden, W. A., Posamentier, H. W. and Noble, R. A., 1999 : Structural history of the Terang and Sirasun fields and the impact upon timing of charge and reservoir performance, Kangean PSC, East Java Sea, Indonesia, IPA, 99, 269–286.
- Chakraborty, S., Choo, M. and Pedersen, H.T., 2013 : Looking through the haze, -How CSEM can improve reservoir imaging where seismic struggles-, A case study from Malaysia, 75th EAGE conference & exhibition incorporating SPE EUROPE 2013.
- Clayton, C., 1992 : Source volumetrics of biogenic gas generation. In Vialy, R. ed.: *Biogenic Gas*, 191–204, Editions Technip, Paris.
- 藤井哲哉・佐伯龍男・小林稔明・稲盛隆穂・林 雅雄・高野 修・高山徳次郎・川崎達治・長久保定雄・中水 勝・横井研一, 2009 : 確率論的手法による東部南海トラフのメタンハイドレート資源量評価, 地学雑誌, **118**(5), 814–834
- 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC), 2015 : Blue Earth, **138**(4), 0–1.
- 金子信行, 2003 : メタン生成アーケア (古細菌), 石技誌, **68**(5), 450–457.
- 金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎, 2002 : アーケアによるメタン生成と間隙水への濃集機構, 石技誌, **67**(1), 97–110.
- Katz, B. J., 2011 : Microbial Processes and Natural Gas Accumulations. *The Open Geology Journal*, **5**, 75–83.
- Kurr, M., Huber, R., König, H., Jannasch, H.W., Fricke, H., Trincone, A., Kristjansson, J.K. and Stetter, K.O., 1991 : *Methanopyrus kandleri*, gen. and sp. nov. represents a novel group of hyperthermophilic methanogens, growing at 110°C. *Arch. Microbiol.*, **156**, 239–247.
- Noble, R.A. and Henk JR, F.H., 1998 : Hydrocarbon charge of bacterial gas field by prolonged methanogenesis: an example from the East Java, Indonesia. *Org. Geochem.*, **29**(1–3), 301–314.
- 天然ガス鉱業会, 2016 : 天然ガス資料年報, 平成 28 年版, 3–4
- 早稲田周・岩野裕継・浅利康介, 2011 : ガス同位体組成から見た北蒲原地域における炭化水素の移動集積, 石技誌, **76**(1), 43–51
- Wygrala, B., Rottke, W., Kornpihl, D., Neumaier, M., Al-Balushi, A. and Marlow, L., 2014 : Assessment of controlling factors in mixed biogenic and thermogenic petroleum system -A case study from the Levantine Basin, Search and Discovery Article #10636, AAPG.

講 演
 Lecture

CO₂ をエネルギー資源に
 —電気化学的微生物利用メタン生産技術の可能性—*

前 田 治 男^{**†}

(Received January 12, 2018 ; accepted March 9, 2018)

Utilization of CO₂ as Energy Resources
 – Electrochemical Bio-Conversion of Carbon Dioxide into Methane

Haruo Maeda

Abstract : We are proposing a sustainable carbon cycle system which gives a solution not only to mitigate global warming but also to supply a carbon-neutral energy resource. Carbon Capture and Storage technology could become a practical countermeasure to reduce emission of the greenhouse gas. Depleted petroleum reservoirs and aquifer have been proposed as candidate sites of CCS. The long-term aim of this research is to establish a bio-technological system to convert geologically-stored CO₂ into methane, as energy resources.

To develop a means for the conversion, we focus on technological application of a bio-electrochemical system using microbial catalyzed electrode (bio-cathode). On the surface of bio-cathode, methanogenic microorganisms utilize electrons to convert CO₂ to methane. Such system is an attractive option for energy conversion, as the bio-cathode yields methane from electrical current, which can be provided by renewable energy sources. In other words, intermittent electrical energy provided by, for instance, wind turbines and solar cells can be stored in a stable energy form, methane.

Toward technological application of the electro-methanogenic system, we examined electro-methanogenic activity of subsurface microorganisms. Indigenous microorganisms originated from a domestic oil reservoir were inoculated into bio-electrochemical reactor cells. Upon application of constant voltage of -0.70 V, the reactors produced methane at a rate of 1,100 mmol/day·m⁻² (cathode surface area), which was the highest electro-methanogenic production rate. Moreover, current-to-methane conversion efficiency was almost 98%.

Thus, we concluded microorganisms indigenous to the subsurface reservoir are highly capable of electro-methanogenic conversion of CO₂. Electrochemical and microbial analyses suggested a reaction mechanism, in which electron-releasing bacteria mediated electron transfer from the electrode to methanogenic archaea. These outcomes imply the possibility of electro-methanogenesis in subsurface CO₂ storage reservoirs. For further enhancement of the electro-methanogenic activity, we are currently biotechnologically improving the biocatalysts as well as optimizing configuration of the reactor system for subsurface reservoirs.

Keywords : CCSU, electro-methanogenic system, subsurface microorganisms

1. 緒 言

CO₂ 排出が主因と考えられる地球温暖化に代表されるグローバルスケールでの環境問題、また化石燃料をベースと

したエネルギー資源の枯渇問題は、近年解決すべき喫緊の課題となっている。本研究においては、二酸化炭素地中貯留 (CCS) 後に、地中隔離された CO₂ を微生物反応によりメタンに変換することにより、有用な資源である天然ガスとして再利用する技術 (CCSU : CCS&Utilization) の構築を目指している。そのシステム概念を図 1 に示した。

これらの微生物メタン変換反応には、地下に常在している水素資化性メタン生成菌と電子放出細菌が関与していることが、我々の最近の研究により明らかとなっている。本講演においては、メタン生成菌に水素を供給する手法として、ソーラー発電や風力発電など非化石燃料である再生可

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦—X 年後の石油ガス開発に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled “Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years” held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 地圏微生物研究グループ Geomicrobiology Resource Research Group Institute for Geo-Resources and Environment AIST

† Corresponding author : E-Mail : haruo-maeda@aist.go.jp

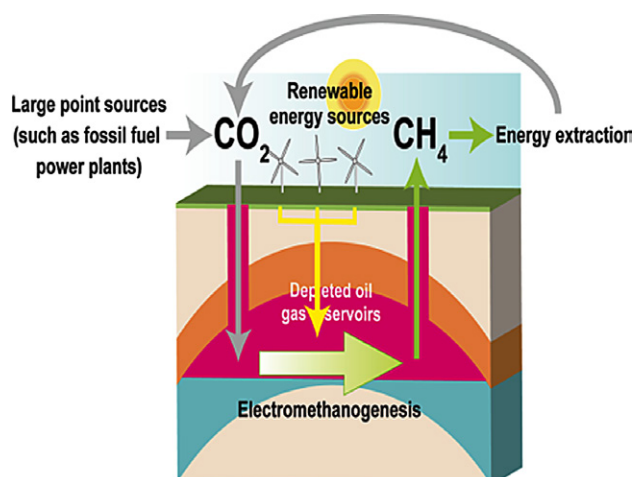


図1 CO₂の電気化学的微生物メタン変換システム概念図

能なエネルギーをベースとした電気化学的な水素還元力利用の可能性につき、また国内油田に常在する微生物を利用した培養実験ならびに当該実験の電気化学的な評価をもとに得られた結果につき紹介する。

2. 研究の背景

地球温暖化の主要因と考えられている二酸化炭素の排出が現状のまま、抑制されずに継続すると、今世紀末までに地球の平均気温が最大4.8℃上昇すると、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書 (2013年) は警告している。実際、日本各地でも記録的な猛暑や、過去に例がない集中豪雨など被害が相次いでいるが、温暖化は、このような異常気象をも引き起こす要因でもあることが気象専門家からも報告されている。このように、CO₂の排出抑制は人類に与えられた喫緊の課題と考えられる。

一方で、グローバルなエネルギー資源の情勢に目を転じてみると、産業革命以後、石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料の利用は、その構成比率に変化はあるものの、人間活動には不可欠なエネルギーであるという地位は、再生エネルギーの利用というエネルギーシフトの傾向が顕著となっている現状においても、全世界で、一次エネルギーの9割近くを化石燃料資源が占めているという統計が示すように、揺るぎないというのが現状である。しかしながら我々は、化石燃料資源が有限であることを認識する必要がある。

50年後、100年後を考えると、化石燃料資源に依存するというグローバルなエネルギー政策の継続が破綻することは明白なことである。化石燃料を燃焼しエネルギーとして利用する際に、エネルギー生成とともに二酸化炭素が生成される。

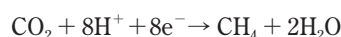
仮に、二酸化炭素をエネルギー資源である炭化水素に効率よく変換できれば、二酸化炭素排出による温暖化およびエネルギー資源の枯渇という2つの課題への相補的な解答が得られることになる。我々は、相補的な解の得られる究極的なシステムを「持続的炭素循環システム」と称して、

地下に普遍的に存在し、二酸化炭素を容易にメタンに変換し得る能力を有する微生物 (古細菌) であるメタン生成菌を利用したエネルギー変換技術の可能性に関する研究を開始した。

3. 常圧電気化学的実験手法によるメタン生成反応の評価

電気化学的微生物メタン生成の反応プロセスにおいては、地下油層や帯水層に常在している水素資化性メタン生成古細菌がCO₂をメタンに変換する際に、水素分子 (H₂) を直接利用する代わりに油層水、地下水などをソースとするプロトン (H⁺) および反応系に印加された電流から得られる電子 (e⁻) を利用することを想定している。

当該電気化学的微生物反応式は以下のとおりである。



当該反応の評価実験に利用した電気化学的微生物メタン生成リアクター装置は図2に示したように小容量 (100 ml) のガラス瓶を使い、アノード、カソード電極を設置したうえで電極間をセパレータにより仕切った構造としている。

この場合、電極表面に微生物が吸着生息し、バイオ触媒の役割を果たすものと想定される。リアクターボトル内には秋田県八橋油田の坑井から嫌気条件に維持し採取したメタン生成古細菌ならびに各種細菌群の存在が確認されている油層水を培養液として添加し、ヘッドスペースガスとして80%窒素、20% CO₂の混合ガスを封入し55℃で嫌気培養を行った。系内には直流電源装置により電極に0.75ボルトの電圧を加えた場合と、同じ系で電圧を加えない場合のメタン生成速度と電流ーメタン変換効率を観測した。

また印加電圧を0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8ボルトに設定したうえで、同様にメタン生成速度および電流ーメタン変換効率を経時的に測定した。なお、当該システムでは、1ボルト以下の定電圧であるため、電気分解反応は生じていな

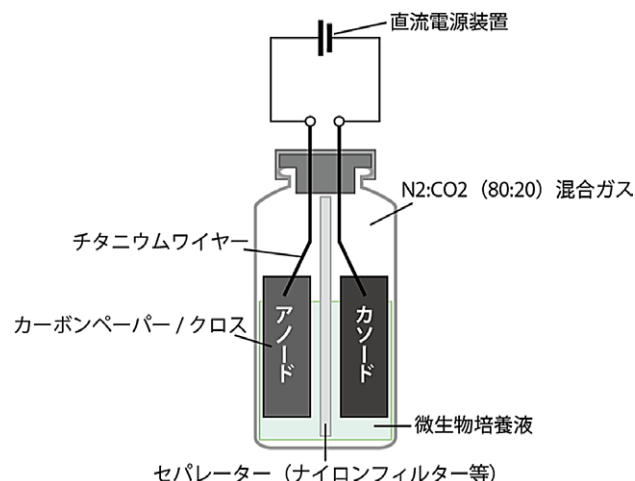


図2 常圧電気化学的微生物メタン生成リアクター装置

いと考えられる。

結果として、0.75 ボルト電圧印加した場合とまったく印加しない場合のメタン生成実験においては、電圧非印加実験においてはメタンの生成は見られず、一方、電圧印加したケースでは、ほぼ定率のメタン生成がみられており、当該生成速度は $386 \text{ mmol/day} \cdot \text{m}^{-2}$ と算定された。また、電流-メタン変換効率もほぼ 100% と高い値を示した。

一方、図 3 に示したとおり、印加電圧を変えた実験では電圧が 0.4 から 0.8 ボルトに増加するにつれて、メタン生成速度は最小で 84, 最大 $1,103 \text{ mmol/day} \cdot \text{m}^{-2}$ まで上昇した。また、電流-メタン変換効率は、全ての印加電圧において 90% を超えており、非常に高い電流-メタン変換効率となっている。

さらに、電気化学的微生物メタン生成反応に関与している微生物を調査すべく、当該リアクター試験のカソード電極に付着している微生物群（古細菌および細菌）を同定解析した結果、図 4 に示したとおり、古細菌（archaea）としては、水素資化性メタン生成菌である *Methanothermobacter*（分類名 *Methanobacteria*, 図中の棒グラフ赤）さらに細菌（Bacteria）としては、電子放出菌である *Thermincola*（図中、灰色）が優占化していること

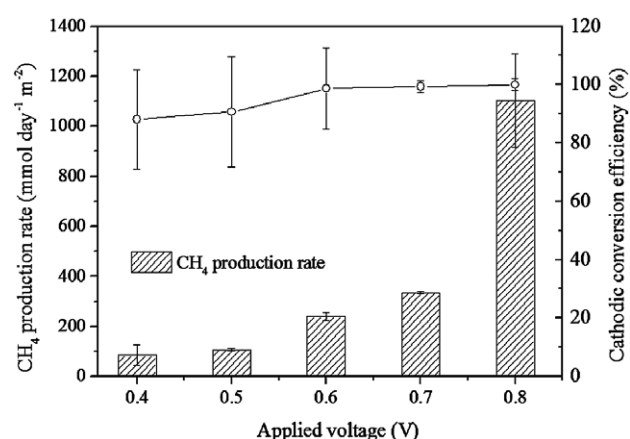


図 3 印加電圧強度のメタン生成量への影響

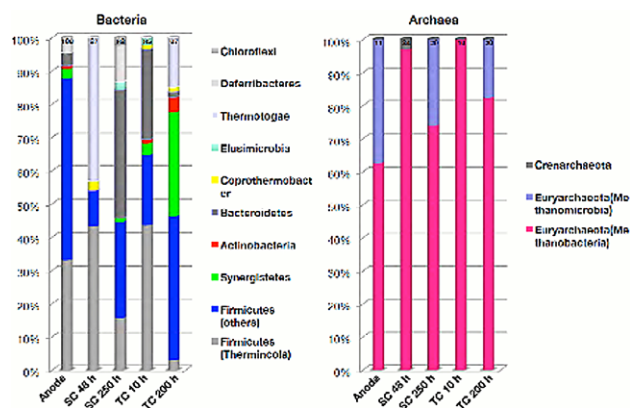


図 4 カソード電極付着微生物の菌叢解析結果

が明らかとなった。

一方で、菌株バンクより入手した同種のメタン生成菌である *Methanothermobacter* 単菌のみのメタン生成実験を実施したところメタン生成速度は $80 \text{ mmol/day} \cdot \text{m}^{-2}$, 電流-メタン変換効率は 20% 以下と低い値を示した。

現在までの実験結果から、八橋油田由来の微生物群による電気化学的メタン生成反応については、水素資化性メタン生成古細菌が電子放出細菌を介し、間接的に電子を受容してメタンを生成していることが示唆されている。

これまでの常圧電気化学的微生物メタン生成実験、電極付着微生物の菌叢解析、および電気化学的手法による解析の結果、以下の新たな知見が得られている。

- ① 八橋油田の地下常在微生物を利用した常圧下での電気化学的リアクター試験により、水素分子の直接的な供給を必要としない CO_2 の電気化学的微生物メタン変換の技術的な可能性が示された。これにより地下常在微生物を利用した CO_2 のバイオメタン変換の可能性を初めて実験的に実証した。
- ② 常圧下での上記リアクター試験の電気化学的な解析およびカソード表面に付着した微生物の菌叢解析により電気化学的メタン生成はカソード表面にバイオフィルムを形成した微生物群によることが判明した。
- ③ 水素資化性メタン生成古細菌は菌叢解析の結果 *Methanothermobacter thermoautotrophicus* に分類される菌であり、一方の細菌は好熱性電子放出菌 (*Thermincola ferriacetica*) がカソード表面において優占化しており、これらの微生物のメタン生成反応への関与が示唆された。

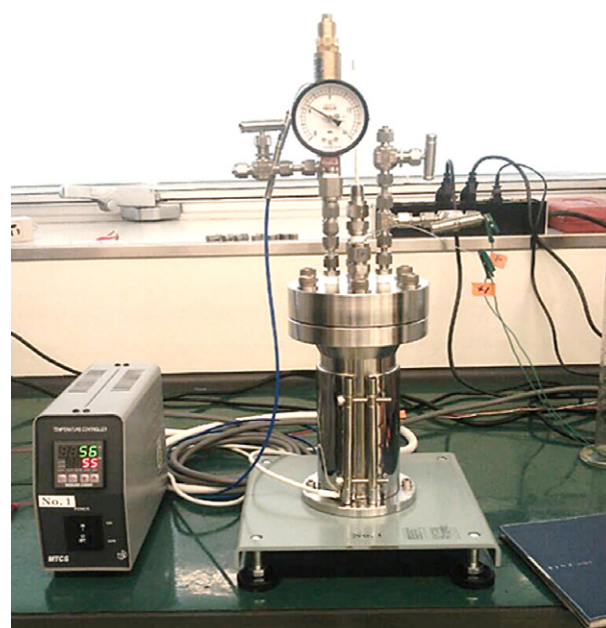


図 5 高温高压電気化学微生物メタン生成実験装置

4. 高圧電気化学的実験手法によるメタン生成反応の評価

4.1 実験手法

当該技術を実油田などで実施する場合には、地下環境が高温高压であることから、高压条件下においても微生物反応が起きるか否かを実証する必要がある。前述した常圧実験においては、温度を 55℃ に設定し、常圧条件下で実施し、電気化学的なメタン変換反応を実証した。

高压下実験においては、図 5 のような 10 MPa 耐圧の高压ステンレスシリンダー製の高压実験装置を作製した上で 5 MPa に設定し、常圧実験と同様な電気化学的微生物メタン生成リアクター実験を実施した。

4.2 印加電圧強度の影響

高温高压条件下で実施可能な電気化学的微生物メタン生成実験装置を用い、常圧培養実験と同様に印加電圧のメタン生成レートへの影響を調査した。その結果、図 6 に示したとおり、印加電圧の上昇に伴い、メタン生成速度が増加し、電流ーメタン変換効率（図には不記載）も 100% に近い極めて高い電子捕獲効率（システムにおける電子の授受効率）

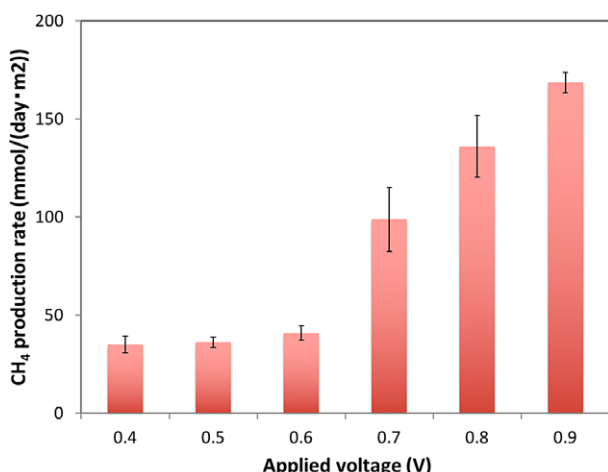


図 6 印加電圧のメタン生成速度への影響

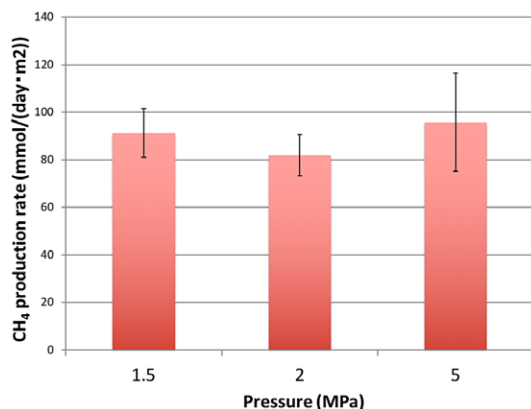


図 7 実験圧力のメタン生成速度への影響

であることが確認された。

また、当該実験においてカソード付着微生物の菌叢解析を実施したところ、常圧電気化学的微生物メタン生成実験で確認された *Methanothermobacter* ならびに電子放出菌と考えられる細菌の存在が明らかとなった。この事実、高压下の地下油層においても微生物による CO₂ の電気化学的メタン変換は成立することを示唆している。

4.3 圧力の影響

さらに、当該システムへの圧力の影響を明確にするため、高温高压電気化学的微生物メタン生成実験装置を用い、0.7 ボルト電圧印加条件下でのメタン変換速度への培養圧力の影響を評価した。その結果、図 7 に示したとおり、メタン生成速度は圧力の影響は受けないことを示唆する結果となった。

5. 地下空間適用のための今後の課題

当該システムを地下において利用する場合には、カーボンニュートラルのシステムの構築という観点から、再生可能エネルギーを用い、電流をシステムに流すことが望ましいと考える。また電気化学的微生物メタン生成装置のカソード、アノードに相当する電極設置のために、坑井を掘削する必要がある。

さらには圧入された CO₂ が、地下の油層水あるいは地下水に溶解したうえで、設置した電極と効率よく接触する必要がある、当該接触効率を高めるためにも、水平仕上げ距離をできるだけ長くして電極を設ける必要がある、現状では、図 8 に示したように、油ガス田の掘削仕上げを想定し、直径約 20 cm の電極坑井を例えば、水平長さ約 1,000 m に掘削したうえで仕上げることを想定している。この場合、カソード、アノードは同心円状に配置した構造とし、圧入井から圧入した CO₂ との接触効率が高くなるような坑井配置とする。またカソードの表面に微生物吸着しやすい材質（たとえばグラファイトグラニューールなど）を選定する必要がある。

一方で、現在、電気化学的メタン変換反応が確認されて

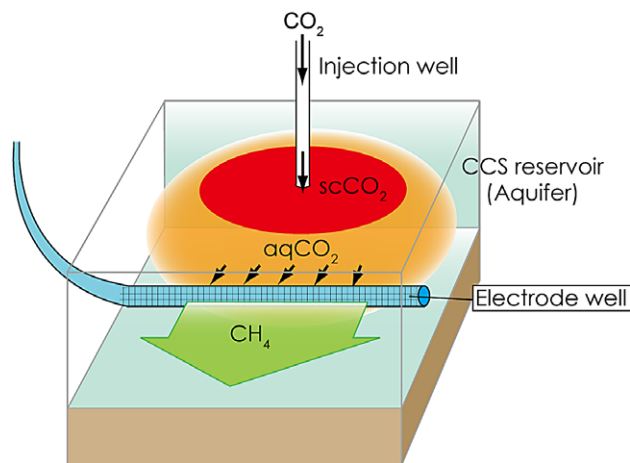


図 8 水平掘削による電極井を利用した CO₂ の微生物電気化学的メタン変換応用例

いる微生物は、八橋油田由来のいわゆる好熱嫌気性菌であり、適用温度が60℃以下に限定されている。より広範な利用を考えるとさらなる高温でも生育可能な超高熱菌の探索など進めて行く必要があると考えられる。

参 考 文 献

- Cheng, S., Xing, D., Call, D.F. and Logan, B.E., 2009 : Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis. *Environmental Science Technology*, **43** (10), 3953–3958.
- Kobayashi, H., Saito, N., Fu, Q., Kawaguchi, H., Vilcaez, J., Wakayama, T., Maeda, H. and Sato, K., 2013 : Bio-electrochemical property and phylogenetic diversity of microbial communities associated with bioelectrodes of an electro-methanogenic reactor. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **116** (1), 114–117.
- Maeda, H., Miyagawa, Y., Ikarashi, N., Kobayashi, H., Sato, K., Sakata, S. and Mochimaru, H., 2010 : Development of Microbial Conversion Process of Residual Oil to Methane in Depleted Oil Fields. *Paper SPE 122573 presented at 2009 SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia*, 4–6 August 2009.
- Fu, Q., Kuramachi, Y., Fukushima, N., Maeda, H., Sato, K. and Kobayashi, H., 2015 : Bioelectrochemical Analysis of the Development of a Thermophilic Biocathode Catalyzing Electromethanogenesis. *Environmental Science and Technology*, **49**, 1225–1232.
- 国際石油開発帝石㈱－東京大学社会連携研究持続型炭素循環システム工学社会連携講座「持続型炭素循環システムにおける地中生物代謝の挙動解明と活性促進」成果報告書 平成28年6月.

講 演
 Lecture

ミュオグラフィの地下探査への応用*

田 中 宏 幸^{**†}

(Received January 4, 2018 ; accepted January 26, 2018)

Application of Muography to Underground Surveys

Hitoyuki K. M. Tanaka

Abstract : Underground survey has long been dominated by classical mechanics, largely disregarding the potential of particle physics to augment existing techniques. The purpose of this article is to describe a potential of a new imaging technique called muography to apply to surveying underground structures. High-energy muons that are produced via the reaction between primary cosmic rays and the Earth's atmosphere can be used as a probe to explore the density distribution in gigantic objects including shallow parts of the Earth's crust. Muography has the potential to serve as a useful paradigm to transform our understanding of underground structures as the X-ray transformed our understanding of medicine and the body. Existing results for various underground targets are discussed here, and an outlook regarding anticipated future observations is briefly discussed.

Keywords : Muography, muon, underground structure, imaging

1. 緒 言

これまで、資源開発、地下構造のモニタリングなどを目的として地震波探査法、比抵抗測定法、放射線検層法など多くの種類の地下探査技術が開発されてきた。いずれの手法も一長一短があるため、複数の手法を組み合わせることで構造推定を行う場合が多い。だが、これらの手法に共通するのは探査手法がアクティブであること、すなわちプローブを人工的に発生させ、地中に伝搬させる必要があることである。一方、近年、自然のプローブを用いた巨大構造物の透視法であるミュオグラフィの有効性が火山調査を対象として実証され（例えば、Tanaka *et al.* 2007a）、その後、ピラミッドなどの歴史的建造物（Morishima *et al.* 2017 ; Saracino *et al.* 2017a）、断層（Tanaka *et al.* 2011 ; Tanaka 2015）、電炉（Tanaka *et al.* 2013）、原子炉（Morishima 2015）、核廃棄物サイロ（D'Alessandro *et al.* 2017）などの産業用プラントなどに適用され、それぞれの分野において実績があらがりつつある。最近では、鉱床の探査（Schouten 2017）や二酸化

炭素貯留層モニタリング（Klinger *et al.* 2015）などにも応用され、地下探査技術としてのミュオグラフィの実用化が目指されている。

ミュオグラフィは銀河宇宙線に由来するミュオンと呼ばれる素粒子の強い透過性を利用して大規模な物体の内部構造を可視化する透視技術である。原理はX線レントゲン写真とほぼ同じであるが、X線の透過能力がメートルオーダーに限られるのに対して、ミュオンはキロメートルにも及ぶ岩盤を透過することができる。ただし、X線レントゲン写真が対象とするサイズ（透過能力）以下の物体ではすべてのミュオンが通り抜けてしまうため、ミュオグラフィを適用できない。文献に残るミュオグラフィの初めての試みは1955年、オーストラリアの物理学者であるE.P. Georgeによってなされた（George 1955）。Georgeはすでに掘削されていた坑道内部にミュオン検出器を挿入して、その上部に位置する岩盤の厚みを精度よく決定することに成功した。しかし、その当時用いられた検出器はガイガーカウンターであったため、ミュオンの到来方向を決定することができず、観測対象のイメージングを行うことはできなかった。13年後の1968年、アメリカの物理学者、L.W. Alvarez *et al.* によってエジプトのピラミッドのミュオグラフィ観測が試みられた（Alvarez *et al.* 1970）。Alvarez *et al.* が用いたミュオン検出器はミュオンの到来方向を決定できる、スパークチェンバーと呼ばれる検出器であったため、イメージングが可能であった。Alvarez *et al.* はカ

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦 - X 年後の石油ガス開発に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled "Challenges to the technologies of the next generation - towards the E&P Industry after X years" held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017..

** 東京大学地震研究所 Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

† Corresponding author : E-Mail : ht@eri.u-tokyo.ac.jp

フラー王のピラミッド中央下部にすでに発見されていた Belzoni 玄室に 10 トンにも及ぶ観測装置を運び込み、その上部にあるかもしれない未発見の玄室の探査を行った。Alvarez *et al.* の観測では未知の構造を発見することはできなかったが、George による観測から一歩進んで、イメージングを試みた点に大きな意義がある。

以上の事例からも分かるように、ミュオグラフィによる測定では観測装置が観測対象よりも低い高度に位置している必要がある。これは、宇宙から到来する銀河宇宙線が大気と反応することでミュオンが生成されるため、ミュオンの進行方向が上半球上空から地表へと向かう方向に限られるからである。すなわち、ミュオグラフィでは上空から到来して、観測対象を通り抜け、検出器へと到達するミュオンを捉える必要がある。一方、地球の裏側で生成したミュオンは地球そのものを透過してくることができないため、地下から地上へ向かったミュオンフラックスは、ほぼゼロである。

ミュオンは上半球から地表に向かってあらゆる方向から到来するので、水平に近い方向から到来するミュオンもある。これらは地表から突出した構造物の探査に便利である。この場合、観測装置は観測対象の下に設置する必要はない。探査領域より標高が低い周辺部に装置を設置すればよい。対象を斜めに透過してきたミュオンを周囲の観測装置で捉えるのである。2006 年、H.K.M. Tanaka *et al.* はこの方法により、世界に先駆けて火山を対象としたミュオグラフィ観測技術の実証に成功した (Tanaka *et al.* 2007a)。対象となった火山は長野県と群馬県の県境に位置する活火山浅間山であった。観測により、2004 年の噴火の際に火口底に溜まったマグマとその下に通じるマグマ流路が透視された。その後、バスビオ (Saracino *et al.* 2017b), エトナ (Carbone *et al.* 2013), ストロンボリ (Tioukov *et al.* 2017), ケンブレ・ピエハ (Miyamoto *et al.* 2017), ピュイ・ド・ドーム (Caroganu *et al.* 2016), ラ・スフリエール (Jourde *et al.* 2016) など世界の火山を対象としてミュオグラフィが実施された。一方国内でも、有珠山 (Kusagaya and Tanaka 2015), 昭和 新山 (Tanaka *et al.* 2007b), 雲仙岳 (Tanaka 2016), 霧島新燃岳 (Kusagaya and Tanaka 2015), 桜島 (Olah *et al.* 2017), 薩摩硫黄島 (Tanaka *et al.* 2009a) などで観測が実施されてきた。2013 年の薩摩硫黄島噴火ではマグマの昇降を示す動的なミュオグラフィ観測にも成功している (Tanaka *et al.* 2014)。

岩盤の厚さが厚くなるほどミュオンの透過量は少なくなる。通常、火山は岩盤にして 1 キロメートルの厚みを超えるが、その火山におけるミュオグラフィ観測技術の実証によって、それより小さなサイズを持つ対象であればミュオグラフィ観測が実施可能であることが示された。そのため、冒頭で示したさまざまな構造物を対象としたミュオグラフィ観測が試みられるようになってきている。本論ではこれらの中でも特に、地下探査技術に焦点を当て、原理、観測方法、ミュオグラフィによる地下構造探査法を示しつつ、将来の展望へとつなげる。

2. ミュオグラフィの原理

ミュオンは地球外から到来する銀河宇宙線が地球の大気と反応することによって生成される二次宇宙線の一種である。ミュオンは荷電粒子であり、物質と強い相互作用を介した反応をせず、その質量は電子の 207 倍であるため、透過力が強い。ミュオンの元となる銀河宇宙線は地球表面から約 20 km 上空の成層圏で大気原子核である窒素や酸素の原子核と反応することで、メソンを生成する。メソンはおよそ 1 億分の 1 秒でミュオンとニュートリノに崩壊する。生成されたミュオンは静止していると約 2.2μ 秒で電子と 2 つのニュートリノに崩壊するが、相対性理論の効果により、高エネルギーのミュオン、すなわち光速に近い速度で運動するミュオンは真空中の光速に 2.2μ 秒をかけた距離 660 m より遥かに長い距離を運動できる。メソンの崩壊ではミュオンの他にニュートリノも同時に生成されるが、ニュートリノは透過力が極めて強く、地球全体も簡単に通り抜けるものの検出が難しく巨大な観測装置を要するため、地殻浅部の探査には向かない。

超新星爆発などの銀河系内の高エネルギーイベントによって加速される銀河宇宙線は陽子を主体とした荷電粒子であることから系内を伝搬中に銀河磁場によって進行方向を変え、地球に到達する頃には移動方向はランダムとなり、結果として等方的となる。そのため、地表に到来するミュオンも方位角方向にはほぼ等方的である。ところが、天頂角方向には等方的にはならない。それは、ミュオンの元となるメソンの崩壊と反応の頻度が大気中における進行方向で異なってくるからである。銀河宇宙線と同様にメソンも大気の原子核と反応する。メソンのエネルギーが高いと、反応の結果、新たなメソンが複数生成 (多重化) されることがある。鉛直方向に大気中を運動するメソン周囲の大気密度はすぐに高くなるが、水平方向に運動するメソン周囲では大気密度は中々高くない。そのため、鉛直方向に運動するメソンではメソンの崩壊頻度と反応頻度の比が水平方向に運動するメソンと比べて低くなり、メソンの多重化がより起きやすい。その結果、平均エネルギーは低いが多く数のミュオンが生成される。一方、水平方向に運動するメソンでは反応する前に崩壊する確率が高くなるため、平均エネルギーが高いミュオンが生成される。

地球に到来する銀河宇宙線の成分のほとんどが陽子とアルファ粒子が占めており、他の原子核はごくわずかである。銀河宇宙線のエネルギーとフラックスは power law の関係を持っており、その index は -2.7 である。したがって、銀河宇宙線が元となることができるミュオンのエネルギースペクトルも崩壊の効果をあまり受けない高エネルギー領域では、同様の power law の関係を持っている。地表に到達したミュオンは地中へと進入する。これらのミュオンは岩盤中で少しずつエネルギーを失うことで、ついには止まり、崩壊する。そのため、エネルギーが高いほどミュオンの透過能力は上がる。高エネルギーミュオンのエネルギー損失は以下の式で表される (Patrignani *et al.* 2016)。

$$-dE/dX = a(E) + b(E)E. \quad (1)$$

ここで、 E はミュオンのエネルギー、 X は進入深度、 $a(E)$ は電離によるエネルギー損失、 $b(E)$ は突発的反応によるエネルギー損失をそれぞれ表している。電離によるエネルギー損失とは、ミュオンが物質中の電子をはねとばすことによってエネルギーを失う過程のことであり、この過程では少しずつ連続的にエネルギーを損失する。したがって、もし、次に説明する突発的反応がなければ、ミュオンの入射エネルギーが決まれば岩盤中でのミュオンの透過可能距離（飛程）もほぼ一意に決まる。突発的反応によるエネルギー損失とは、制動輻射、直接対生成、光核反応によってエネルギーを失う過程のことである。これらの反応では、頻度は低いが、1回の反応で多くのエネルギーを失う。その結果、実際のミュオンの飛程は式(1)で求められる平均の周囲に揺らぐこととなる。突発的反応の頻度はミュオンのエネルギーが高くなることに応じて高くなり、突発的反応によるエネルギー損失が電離によるエネルギー損失を上回るエネルギーは岩盤でおよそ 700 GeV である (Groom *et al.* 2001)。このエネルギーを持つミュオンの飛程は水等量で約 2 km である。これより高いエネルギーでは突発的反応によるエネルギー損失が主体となるため、入射エネルギーと飛程の関係が一意には決まりにくくなる。したがって、できるだけ多くのミュオンイベントを記録することにより、観測精度をあげる必要がある。

地中に進入するミュオンにはエネルギースペクトルがあるので、ある決まった岩盤に対してでも一部は止まり、一部は通り抜けるといったことが起きる。ミュオグラフィではこの一部止まった領域が画像として透かし出される。対象物体の平均密度 (ρ) を与えると、その外形からミュオンの透過経路に沿った岩盤の厚み (x) を以下の関係式を用いて密度 1 gcm^{-3} で換算した厚み (X)、すなわち水当量で与えることができる。

$$X = \rho x \quad (2)$$

岩盤の厚みが水当量で与えられると、式(1)より、岩盤を通り抜けられるミュオンの最低エネルギー E_c を導くことができる。与えられた仰角に対してミュオンのエネルギースペクトル $dN/(dEd\Omega)$ を E で E_c から ∞ まで積分することで岩盤を通り抜けられるミュオンの単位立体角 (Ω) あたりの積分フラックス $I(X)$ を求めることができる。一般的に対象物体の厚みは方向ごとに異なるため、天頂角 (θ) と方位角 (ϕ) の関数としてミュオン積分フラックス $I(\theta, \phi, \rho)$ が得られる。実際のミュオグラフィ観測では、 $dN/(dEd\Omega)$ が既知で、 θ, ϕ, Ω が測定条件などから与えられ、 ρ が未知であるので、ミュオン積分フラックスの測定値 $I_{\text{observation}}(\theta, \phi, x)$ と $I(\theta, \phi, X)$ を比較することでさまざまな θ, ϕ においてミュオンの透過経路に沿った ρ を算出できる。

通常、観測装置のサイズは観測対象のサイズと比して無視できるほど小さいため、ミュオグラフィ画像は角度空間

(θ, ϕ) で表現される。観測対象における空間分解能は装置の角度分解能を ($\Delta\theta, \Delta\phi$)、装置一対象間の距離を L と置き、($L\Delta\theta, L\Delta\phi$) で表される。

3. ミュオグラフィの観測方法

前節までに述べたように、ミュオグラフィでは対象物体を通り抜けてきた後のミュオンの到来方向ごとのフラックスを測定して、透過前のフラックスと比較する。そのために地表から突出している物体ではその麓に測定装置を設置するか、地下の埋設物を探査するためにはその下部に測定装置を設置する必要がある。そのために必要なのがミュオンを検出する機器である。本節ではミュオンの到来方向と数を記録できる装置について述べる。

ミュオグラフィ観測装置は複数の位置敏感な荷電粒子検出器と放射線遮蔽体より構成される。荷電粒子検出器だけでは、上空から到来するミュオン以外の荷電粒子も記録されるのでミュオグラフィ画像を撮影することはできない。これらの荷電粒子が記録されると、それらは得られる画像の背景ノイズとなり、コントラストを著しく落とす原因となる。そこで、到来イベントの直線性を判定するための位置分解能が十分に高い検出器複数と十分な放射長を持った散乱体が必要である。原子核乾板、シンチレーション検出器、多線式比例計数管などの面状の荷電粒子検出器は位置分解能 ($\Delta X, \Delta Y$) を持っている。そして、検出器の有感面積 ($X \times Y$) と ($\Delta X \times \Delta Y$) の比が得られるミュオグラフィ画像の最大画素数を定義する。ミュオグラフィ観測装置の角度分解能 ($\Delta\theta, \Delta\phi$) は観測装置内部における最上流の検出器と最下流の検出器の間の距離 (D) が ($\Delta X, \Delta Y$) について十分長いとき、($\Delta X/D, \Delta Y/D$) で定義される。したがって、検出器の位置分解能を上げるか、検出器間の距離を大きく取ることによって装置の角度分解能を向上させることが可能である。到来イベントの直線性判定の精度は ($\Delta X/D, \Delta Y/D$) および観測装置内に実装される検出器の数によって決まる。

ミュオグラフィ観測では原子核乾板、シンチレーション検出器、比例計数管を検出器として用いることができる。それぞれの検出器は一長一短があり、ケースバイケースでその観測に適した検出器を選定することで最適なミュオグラフィ観測を実施することが可能である。

原子核乾板。原子核乾板は電源が使えない限られた環境下でミュオグラフィ観測を行なえるため、野外観測において取り扱いが便利な装置の1つである。その一方で、回収、現像の作業が必須となるため、噴火中の火山など内部に動きのある物体を観測する場合、必ずしも理想的な検出器であるとは言えない。原子核乾板を用いた方式では放射線が写真作用を持つことを利用してミュオンを感度の高い写真乳剤（感光材料）に記録する。乳剤とはハロゲン化銀の微結晶をゼラチンの中に分散させたもので、荷電粒子が通過すると、現像によってその部分の銀が解離され、飛跡に沿って粒が黒くなる。原子核乾板では乳剤中のハロゲン化銀の量を増すと同時に、1個のハロゲン化銀結晶中の感光核の

密度を増大させている。原子核乾板には、記録にあまり外部のリソース（電源、外部記録メディア、データ取得用コンピューターなど）なしに、6か月程度のミュオンの積分事象を記録することができる。ただし、これより観測期間が延びると、フェーディングと呼ばれる作用により、記録が少しずつ消えていく。これまでは、浅間山 (Tanaka *et al.* 2007a), 昭和新山 (Tanaka *et al.* 2007b), ストロンボリ火山 (Tioukov *et al.* 2017) におけるミュオグラフィ観測で運用実績があり、最近では、クフ王のピラミッドの内部探査 (Morishima *et al.* 2017) にも活用された。

シンチレーション検出器。シンチレーション検出器は主に光電子増倍管とプラスチックシンチレーターの組み合わせで構成される。イベントの数え落としがほとんどなく、高い時間分解能が得られる。プラスチックシンチレーターは、シンチレーターの溶媒をプラスチックに置き換えたもので、比較的軽い、不燃性、衝撃に強い、非毒性などの特長があり、さらに形状、大きさが自由に換えられるため、ミュオグラフィ各種の測定をよい条件で行えるという利点もある。プラスチックシンチレーターは遮光され、外界とは「光学的に」独立されており、シンチレーターと光電子増倍管を（ライトパイプあるいはライトガイドと呼ばれる）光学的ジョイントでつなぐことにより、荷電粒子がシンチレーターを通ったとほぼ同時に光が電子に変換される。棒状のプラスチックシンチレーターストリップを縦方向と横方向に何本も並べることで、横方向（ X 方向）と縦方向（ Y 方向）のミュオンの通過位置を決めることができる。縦方向と横方向に並べたストリップを組み合わせることで、ミュオンの通過位置の X, Y 座標を決定できる。 $(\Delta X, \Delta Y)$ はストリップの幅で定義される。また縦方向と横方向に並べたストリップが重なっている部分がミュオンに対する有感面積となる。これまでに数多くのミュオグラフィ観測に活用されてきた標準的な検出器である。複数のシンチレーション検出器と放射線遮蔽体を実装した第2世代のミュオグラフィ観測装置を用いて、2009年の浅間山噴火に伴う火口内物質の欠損 (Tanaka *et al.* 2009b) 2013年の薩摩硫黄島噴火に伴うマグマ動態が観測された (Tanaka *et al.* 2014)。

比例計数管。シンチレーション検出器ではシンチレーターでいったんミュオンを光に変換してからその光をさらに電子に変換して増幅するという過程が必要だったが、比例計数管ではミュオンが電離した電子を直接増幅して取り出す点が大きく異なっている。特に多線式比例計数管は、検出器にワイヤーが複数本張ってあるので、増幅された電子を面的に取り出すことができる。縦横にワイヤーを張れば、ワイヤーの間隔を変えることで、位置分解能の調節も比較的容易に行える。この方式では、比例計数管内部を後述の特殊なガスで満たして使用する。その中をミュオンなどの荷電粒子が通過するとガス分子をイオン化する。ワイヤーに高電圧を流すことで、ワイヤー周辺に高い電場勾配を形成する。ガスのイオン化で、できた電子がワイヤーに寄ってくると、電場からエネルギーをもらって加速される。

加速された電子は他のガス分子を電離することでさらに多くの電子を発生させる。発生した電子はすぐさま電場からエネルギーをもらって加速され別の電子を作る。このような過程を繰り返して電子を増幅させ、最終的に電流パルスとして取り出す。シンチレーション検出器では、ミュオンに対する有感領域はシンチレーターの部分であったが、比例計数管ではこれがガスの部分である。これが軽量化につながる一番の要因である。多線式比例計数管は、数十年前からある粒子検出器であるが、ミュオグラフィ観測に使われるようになったのはごく最近である。これは、可燃性のガスを用いる必要があったことに起因する。この問題はハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センターが開発した技術によって解決した。ガス検出器では通常、メタンやイソブタンなどの可燃性のガスを用いるが、ハンガリーの技術では二酸化炭素、アルゴン混合気体を用いる。2016年、東京大学地震研究所はハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センターと共同で第3世代ミュオグラフィ観測装置の開発を行った。シンチレーターの代わりにワイヤーを使うので、安価に検出器の位置分解能を向上でき、装置全体の軽量化にもつながった (Tanaka *et al.* 2016)。

4. ミュオグラフィによる地下構造探査法

ミュオグラフィは最初、火山内部に対する測定で実績を上げたため、世界的にも火山を対象とした実施例が多い。だが、火山以外の巨大物体を対象とした実施例も少しずつ増えてきている。本節では、地下探査の方法について、鉱床探査を例にとり述べる。

地下に埋蔵されている物体の密度が周囲と異なる場合、ミュオグラフィを利用することができる。この場合、観測装置は縦孔ないしは横孔に挿入して見たい対象物体より下部に位置する必要がある。観測深度が電離損失過程によるミュオンエネルギー損失がドミナントなエネルギー領域に相当する深度、すなわち数百メートル程度までの場合、異なる厚みの岩盤 (X_1, X_2) を透過後の鉛直ミュオンフラックスの比 (I_1/I_2) とミュオン経路長と密度 (ρ_1, ρ_2) の積の比 ($X_1\rho_1/X_2\rho_2$) との間に以下の関係がある (Tanaka and Ohshiro 2016)。

$$(I_1/I_2) \sim (X_1\rho_1/X_2\rho_2)^{-2.2}. \quad (3)$$

カナダでは、2011年、スズ鉱床の探査を目的としたミュオグラフィ観測が試みられた (Liu *et al.* 2012)。この観測を例にとり、式(3)を利用したミュオグラフィによる地下構造探査法を具体的に示す。観測対象に選ばれた Myra Falls スズ鉱山では、ダイヤモンドドリリングにより、鉱床の位置、密度、サイズが見積もられ、その結果、坑道上部には一様な密度 $\rho_1 = 2.7 \text{ gcm}^{-3}$ の岩盤中に平均密度 $\rho_{\text{zinc}} = 3.2 \text{ gcm}^{-3}$ のスズ鉱床が厚み 10^2 m で存在していることが分かった。この鉱床の下に開けられた坑道に、ミュオグラフィの観測装置をインストールすることで、坑道上部に位置する岩盤を鉛直方向に地表から地下に向かって通

り抜けてきたミュオンが観測された。鉱床を外した位置と鉱床の真下でそれぞれ 348 時間、283 時間のミュオンを測定した結果、それぞれ 5.6×10^5 個、 1.6×10^5 個のミュオンが計数された。すなわち、

$$I_1/I_2 = 2.8, \quad (4)$$

である。したがって、式(2)より、

$$X_2 \rho_2 / X_1 \rho_1 = 1.6, \quad (5)$$

である。一方、幾何学的な岩盤の厚さ、すなわち地表から坑道までの距離は、地形図よりそれぞれ鉱床を外したところで $X_1 = 1.0 \times 10^2$ m、鉱床の真下で $X_2 = 1.4 \times 10^2$ m であった。 ρ_1 、 X_1 、 X_2 を式(5)に代入すると、平均密度 ρ_2 が 3.1 gcm^{-3} と導出される。 ρ_{zinc} を用いて鉱床の厚みを計算すると 1.0×10^2 m となり、ボーリング調査で見積もられた値とほぼ一致する。これを複数の箇所からさまざまな到来方向に対して実施することで、鉱床の形状をマッピングすることができる。測定は坑道内部複数箇所から行われ(図 1)、その結果、鉱床の規模は 15.5 kt と推定された。ボーリング調査から推定された鉱床の規模は 14.5 kt と比

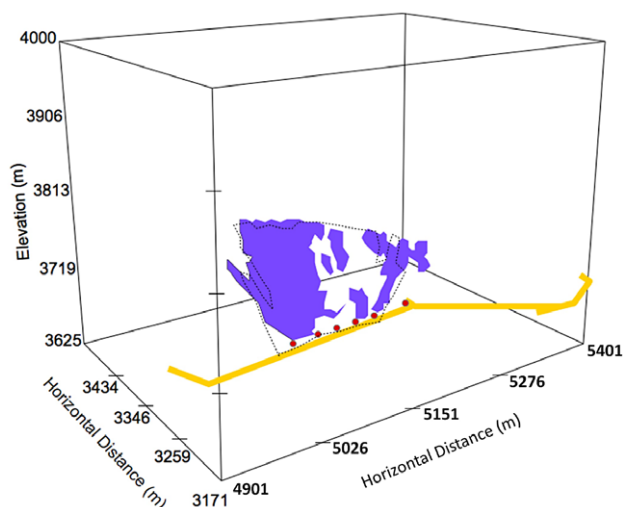


図 1 マイラ・フォールズ鉱山におけるミュオグラフィ観測スキーム (Liu *et al.* 2012)

黄色のラインは坑道、赤丸は観測位置を示す。青色の領域はミュオグラフィ観測によって見積もられた鉱床の領域、点線はボーリング調査によって見積もられた鉱床の領域をそれぞれ表す。

表 1 ボーリング調査結果とミュオグラフィ調査結果との比較 (Liu *et al.* 2012)

	Drill Data	Muographic Data	Difference
Extra-mass	14.5 kt	15.5 kt	1.0 kt
x_{CM}	5,158.7 m	5,124.6 m	34.1 m
y_{CM}	3,384.9 m	3,408.7 m	-23.8 m
z_{CM}	3,685.0 m	3,705.1 m	-20.1 m

べて若干多めに見積もられたが、両者は良く一致している。鉱床の位置についてはボーリング調査と、ミュオグラフィ調査との食い違いは 20~30 m であった。ボーリング調査結果とミュオグラフィ調査結果との比較を表 1 に示す。

5. 議 論

ミュオグラフィは鉱山採掘をはじめとして、従来の地下構造探査手法に加わる新たな手法として活用され始めている。地層中に含まれる天然資源の密度は周囲の密度と比べて違うことが多いので、その部分をミュオグラフィでイメージングする。これまでに、イタリアの地下古代都市、米国、カナダの鉱山などにおいて地下イメージングの実証観測が行われてきた。前節で例示した Myra Falls 鉱山では深度約 300 m の位置で観測が行われたが、McArthur River ウラン鉱床では深度約 500 m、Pend Oreille 亜鉛・鉛鉱山では深度 650 m 以深でのミュオグラフィ観測が実施されている (Schouten 2017)。観測方法はいずれも Myra Falls 鉱山と同じくすでに掘削済みの坑道に観測装置を設置することでその周囲の密度異常をイメージングしている。特に Pend Oreille 鉱山では 270 本以上のボーリング調査が行われ、鉱床の形状に対する詳細なモデルが作られていたが、そのうち 10 本のボーリングデータと 5 か所からのミュオグラフィ観測データとのジョイントインバージョンを実施することで、シート状の鉱床が再現され、ミュオグラフィによってボーリング調査の本数を減らせることが示された。

鉱床探査以外にもミュオグラフィの地下探査への応用は進んでいる。イタリアのナポリ市では、都市システムにおける耐久性と安全性を確保するための新たなテクノロジーの統合開発プロジェクトが進められている。都市経済の脆弱性の評価など 6 つのテーマから構成されているこのプロジェクトの 1 テーマとして、ナポリ市都心部における地下空間の調査および、その有効利用法の検討が進められている (Saracino *et al.* 2017a)。Echia 山探査プロジェクトはこのテーマに対するミュオグラフィの有効性を検証するためにイタリア国立原子核物理学研究所が中心となって推進するプロジェクトである。Echia 山はパレオポリスとも呼ばれ、紀元前 5 世紀に新たな都市を意味するネオポリス (ナポリ) が作られる遥か昔の紀元前 8 世紀、もともとの移住者であったギリシャ人が作った町である。Echia 山の主成分はナポリタナフで、その平均密度は $1.0 \sim 1.2 \text{ gcm}^{-3}$ である。また、もっとも高いところで海拔 60 m である。内部には多くの洞窟が張り巡らされているが、現在でもその全貌は明らかになっておらず、最近でも新たな構造が次々と発見されている。Echia 山の調査を目的として、Galleria Borbonica にミュオグラフィ観測装置が設置された。Galleria Borbonica は 1853 年に 2 つのシチリア王国、ブルボン家のフェルディナンド 2 世によって発見され、最近内部の改装が行われた空間でもある。この場所は海拔 12 m の位置にあり、地表までは 35 m ある。装置と地表の間には部屋があることが分かっている。26 日間の観測で 1.4×10^6 個のミュオンが記録され、Echia 山の内部構造が映

し出された。そして、装置と地表の間に存在している部屋は予想どおりの形でイメージングされた。一方、未発見の空間を示唆する画像も得られた。今後、ミュオグラフィは、新たに調査すべき領域を狭めることに活用されることが期待される。

一方、英国ではミュオグラフィの二酸化炭素貯留層 (CCS) モニタリングへの応用が検討されている。英国では多額の費用を掛けずに、400 を超える油田、ガス田のボーリング孔を CCS の実証試験に利用できる。その中で、二酸化炭素の回収効率の問題を解決していかなければいけない。例えば、二酸化炭素の漏出レベルに対して欧州連合そして英国政府は 1000 年間で 1% 以下を要請している。そのため CCS のモニタリングが要求されている。CCS モニタリングには現在、海と陸で異なる方法が用いられている。海域では地震波探査手法と電磁的な探査。そして、陸域では地震波探査手法以外に合成開口レーダーと二酸化炭素漏出検出器が用いられている。海域、陸域ともに用いられている地震波探査では①連続観測が行えないこと（つまり観測と観測の間に何かが起こってもそれは分からない）、そして②地震波速度構造が分かるだけで密度を直接測定できないといった短所がある。そこで、ミュオグラフィの活用が検討されている。ミュオグラフィは地震波探査と相補的に①連続観測が行え、②密度を直接測定でき、③プローブ（短針）を発生させる必要がないため、長期にわたって安定かつ安価に運用ができる（地震波探査ではプローブとして人工的に地震波を発生させる必要がある）。一方、ボーリング孔内部で実用的な有感面積を達成するのは困難であ

る。有感面積を十分確保できないボーリング孔内部での観測では短時間でイメージングを行うことは大変難しい。だが、年オーダーのゆっくりとした変化を捉えることができれば、CCS モニタリングに対して手法が有効であることが示されている (Klinger *et al.* 2015)

CCS モニタリングの例のように一般的なボアホールに挿入できるように観測装置はできるだけダウンサイジングすることが望ましい。その一方で、装置の有感面積を落とせば、単位時間あたりに取得できるミュオン数が減少することにも注意が必要である。ミュオン数が減少すれば、画像の精度が劣化する。ミュオグラフィ画像においては、1 画素あたりに記録されるミュオンイベント数が画像の精度を決定する。例えば、 10^3 meter water equivalent (m.w.e.) の深度では、ミュオンの積分フラックス (I) は $5 \times 10^5 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ である。一方、画素数 10^2 かつ、ピクセルごとの統計誤差を 10% に抑えようとすると、トータルで 10^4 イベント必要なことが分かる。この統計誤差は約 5% の密度決定誤差に相当する。残る変数は有感面積と観測時間であるから、これらがトレードオフとなる。すなわち、有感面積 (S) と観測時間 (t) の間に $ISt = \text{const.}$ の関係がある。図 2 にさまざまな深度において画素数、 $n = 10^2 \text{ sr}^{-1}$ 、1 ピクセルあたりの統計誤差、 $\sigma = 0.1N$ 、で画像を取得するために必要な S と t の関係を示す。

ミュオンの透過力は、岩盤にしてせいぜい 5 キロメートル程度までなので、これ以深ではミュオグラフィの実施は不可能である。だが、これより浅いところでも実用的なミュオグラフィの可否は利用できる観測装置の有感面積や観測

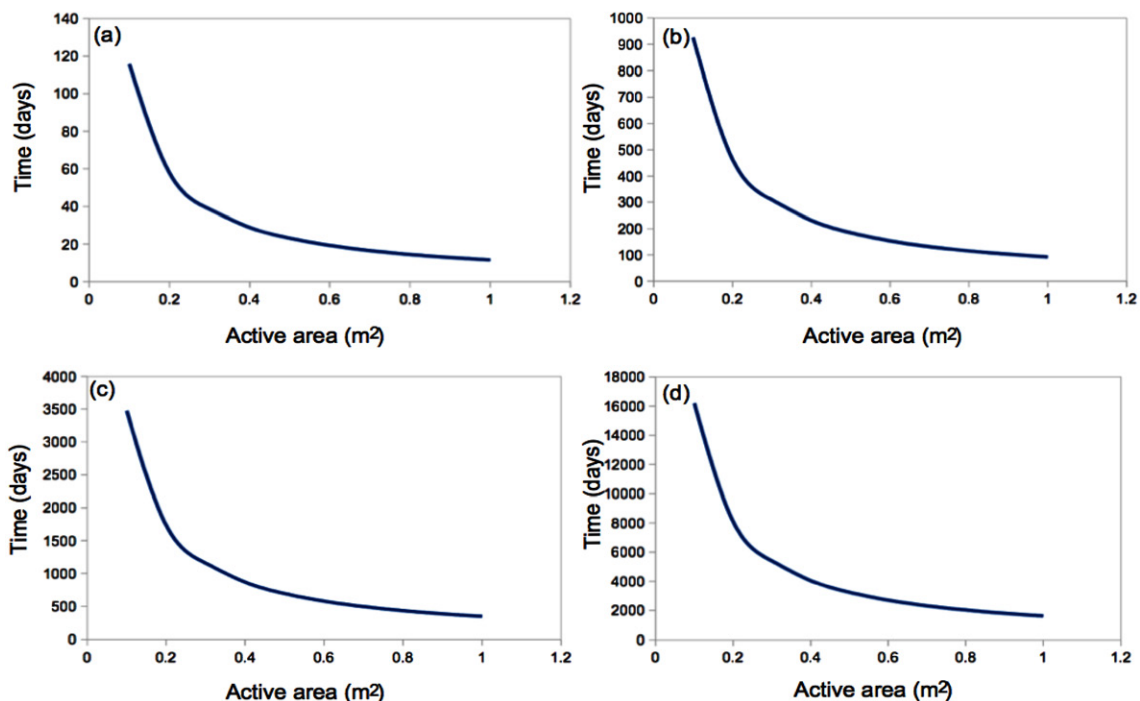


図 2 深度 1.0×10^3 m.w.e. (a), 2.0×10^3 m.w.e. (b), 3.0×10^3 m.w.e. (c), 4.0×10^3 m.w.e. (d), において画素数 10^2 sr^{-1} 、1 ピクセルあたりの統計誤差 10% で画像を取得するために必要な有感面積と観測時間の関係

に許される測定時間によって決まる。ミュオグラフィの地下探査への応用はこの部分の検討がエッセンシャルである。

参 考 文 献

- Alvarez, L. W., Anderson, J. A., Bedwei, F. E., Burkhard, J., Fakhry, A., Girgis, A., Goneid, A., Hassan, F., Iverson, D., Lynch, G., Miligy, Z., Moussa, A. H., Sharkawi, M. and Yazolino, L., 1970: Search for hidden chambers in the pyramids. *Science*, **167**, 832–839.
- Carbone, D., Gibert, D., Marteau, J., Diamant, M., Zuccarello, L. and Galichet, E., 2013: An experiment of muon radiography at Mt Etna (Italy). *Geophys. J. Int.*, **196**, 633–643.
- Carloganu, C., TOMUVOL muography project, MUOGRAPHERS 2016, Tokyo, November 7, 2016. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/MUOGRAPHERS16/General-Assembly/program.html> (accessed October 2, 2017)
- D'Alessandro, Raffaello *et al.*, 2017: Muography applied to nuclear waste storage sites, *Annals of Geophysics* **60**, 1, S0106. doi:10.4401/ag-7381
- George, E. P., 1955: Cosmic rays measure overburden of tunnel. *Commonwealth Engineer*, **1**, 455–457.
- Groom, D.E. *et al.*, 2001: Muon stopping-power and range tables: 10 MeV–100 TeV. *At. Data Nucl. Data Tables* **78**, 183–356.
- Jourde K. *et al.*, 2016: Muon dynamic radiography of density changes induced by hydrothermal activity at the La Soufrière of Guadeloupe volcano **6**, 33406.
- Klinger, J. *et al.*, 2015: Simulation of muon radiography for monitoring CO₂ stored in a geological reservoir. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **42**, 644–654.
- Kusagaya, T. and Tanaka, H.K.M., 2015: Muographic imaging with a multi-layered telescope and its application to the study of the subsurface structure of a volcano, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* **91**, 501–510.
- Kusagaya, T. and Tanaka, H.K.M., 2015: Development of the very long-range cosmic-ray muon radiographic imaging technique to explore the internal structure of an erupting volcano, Shinmoe-dake, Japan, *Geosci. Instrum. Methods Data Syst.* **4**, 215–226.
- Liu, Z., Bryman, D. and Bueno, J., Application of Muon Geotomography to Mineral Exploration, International Workshop on “Muon and Neutrino Radiography 2012”, Clermont-Ferrand, France, 17–20 April 2012.
- Miyamoto, S. *et al.*, 2017: Muography of 1949 fault in La Palma, Canary Islands, Spain, *Annals of Geophysics* **60**, 1, S0110. doi:10.4401/ag-7385
- Morishima, K., 2015: Muographic investigation of Fukushima nuclear power plant. *Muography: Perspective Drawing in the 21st Century*, 87.
- Morishima, K. *et al.*, 2017: Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, *Nature* **552**, 386–390. doi:10.1038/nature24647
- Oláh, L., Tanaka, H.K.M., Varga, D., SAKURAJIMA Muography Project, MUOGRAPHERS 2017, Tokyo, October 2, 2017. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/MUOGRAPHERS17/GA/program.html> (accessed October 2, 2017)
- Patrignani C. *et al.* (Particle Data Group), 2016: 2016 Review of Particle Physics, *Chin. Phys. C*, **40**, 100001.
- Saracino, G. *et al.*, 2017a: Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples), *Scientific Reports* **7**, 1181. doi:10.1038/s41598-017-01277-3
- Saracino, G. *et al.*, 2017b: The MURAVES muon telescope: technology and expected performances, *Annals of Geophysics* **60**, 1, S0103. doi:10.4401/ag-7378
- Schouten, D. Mineral Exploration Muography Project, MUOGRAPHERS 2017, Tokyo, October 2, 2017. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ht/MUOGRAPHERS17/GA/program.html> (accessed October 2, 2017)
- Tanaka, H. K. M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Takeo, M., Oikawa, J., Ohminato, T., Aoki, Y., Koyama, E. and Tsuji, H., 2007a: High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **263**, 104–113.
- Tanaka, H. K. M. *et al.* 2007b: Imaging the conduit size of the dome with cosmic ray muons: The structure beneath Showa Shinzan Lava Dome, Japan, *Geophys. Res. Lett.* **34** L22311.
- Tanaka, H. K. M., Uchida, T., Tanaka, M., Shinohara, H. and Taira, H., 2009a: Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L01304.
- Tanaka, H. K. M., Uchida, T., Tanaka, M., Takeo, M., Oikawa, J., Ohminato, T., Aoki, Y., Koyama, E. and Tsuji, H., 2009b: Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography) : First results from measurements at Asama volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L17302.
- Tanaka, H. K. M., Miyajima, H., Kusagaya, T., Taketa, A., Uchida, T. and Tanaka, M., 2011: Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zones: Rainwater permeation into the mechanical fractured zones in Itoigawa–Shizuoka Tectonic Line, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **306**, 156–162.
- Tanaka, H. K. M., 2013: Development of stroboscopic muography, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, **2**, 41–45.
- Tanaka, H. K. M., Kusagaya, T. and Shinohara, H., 2014: Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano. *Nat. Commun.*, **5**, 1–9.
- Tanaka, H. K. M., 2015: Muographic mapping of the subsurface density structures in Miura, Boso and Izu

- peninsulas. *Japan. Sci. Rep.* **5**, 1–10.
- Tanaka, H. K. M., 2016: Instant snapshot of the internal structure of Unzen lava dome, Japan with airborne muography. *Sci. Rep.* **6** 39741.
- Tanaka, H.K.M. and M. Ohshiro, 2016: Muographic data analysis method for medium-sized rock overburden inspections, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, **5**, 427-435. <https://doi.org/10.5194/gi-5-427-2016>.
- Tanaka, H.K.M., T. Kusagaya, D. Varga, L. Olah, and G. Hamar, 2016: ミュオン検出装置, 特願 2016-087436.
- Tioukov V. *et al.*, 2017: Muography with nuclear emulsions - Stromboli and other projects. *Annals of Geophysics.* **60**, S0111.

講 演
 Lecture

地中レーダによる地下探査への AI (機械学習) 利用例*

山下 善弘^{**†}

(Received March 8, 2018 ; accepted March 19, 2018)

An Application Example of Machine Learning to Shallow Subsurface Exploration using Ground Penetrating Radar

Yoshihiro Yamashita

Abstract : We applied a supervised machine learning method for the purpose of auto detecting cavities under paved roadway from GPR (Ground Penetrating Radar) images. In cavity detection surveys under paved road way, we typically use vehicle-born GPR systems for the necessity to cover wide survey area without any traffic controls. To detect cavity from massive data acquired by vehicle-borne GPR swiftly, skilled-engineers carefully interpret GPR data considering features based on physics of GPR response. Automatic process based on knowledges of skilled-engineers is required, although automatic anomaly detection has not practically realized cause of un-uniform or complex responses from cavities. We applied machine learning methods to detect cavity anomalies using actual GPR data which were acquired on natural occurred cavities as training data. At the verification with actual survey data, our method was able to detect cavity-caused GPR patterns. This will be helpful for analyzer to narrow down cavity responses, meanwhile there were still too many over detections. We think accumulation of labeled GPR data of cavity will also contribute to improvement of our method.

Keywords : GPR, cavity detection, machine learning, decision tree learning, kernel-SVM

1. はじめに

舗装道路における安全安心を確保するための維持管理の一環として、道路陥没を未然に防ぐための路面下空洞調査が計画的に行われている。このような調査では、一般的に車載型の地中レーダ測定器により 1 日あたり数十キロ以上といった広範囲を効率的に測定する。陥没の危険性が高い空洞箇所などは、このような短時間で大量に取得されるデータの中からいち早く検知することが望まれる。舗装道路構造という比較的均一な中で発生する空洞の地中レーダによる応答は、ごく典型的な応答を示すものも数多いが、空洞そのものの形状や周辺土質・人工構造物の反応といった不規則な要因も加わり複雑な形状を示すものも少なくない。このような空洞か否かの判断に迷うような空洞反応箇所を車載レーダのみのデータで漏れなく抽出することは技術者の経験に頼る部分が大きい。また技術者単独による目視判定のゆらぎが誤判定の原因とならないよう、複数人で

同一のデータを解析して結果を統合することで確度を向上させることも行われる。多くの場合、経験豊富な技術者への負担が集中するため、自動化による省力化が求められている。埋設管や空洞の地中レーダ応答箇所のパターン認識による自動抽出に関する研究は過去にも例が多いが自動処理には課題も多い。本講演では、実際に空洞を確認した箇所での地中レーダデータをもとに類似箇所を自動抽出することを目的とし、近年、画像認識などの広範な分野で普及が進む機械学習の適用を試みた結果について紹介する。

2. 地中レーダによる路面下空洞調査

道路施設の老朽化や地震に伴う損傷などといった要因で、道路下に空洞が発生し陥没に至ることがある。国土交通省¹⁾によれば、管路施設に起因した道路陥没件数は平成 27 年度で約 3,300 件に及んでいる。このような背景から、道路および道路構造物の適切な維持管理の重要性がますます高まっている。舗装道路管理においては、例えば直轄国道では道路パトロールによりわだち掘れやポットホールといった路面上での異常を把握するとともに、地下で発生する空洞の有無を調査するために、おおむね 1 年~数年程度に 1 回、路面下空洞探査を含む調査を実施している。路面下空洞探査では、電磁波により道路下の異常を捉える地中レーダ調査と、削孔を伴うファイバースコープ調査により

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦 - X 年後の石油ガス開発に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled "Challenges to the technologies of the next generation - towards the E&P Industry after X years" held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** 応用地質株式会社 技術本部 OYO Corporation

† Corresponding author : E-Mail : yamashita-yoshi@oyonet.oyo.co.jp

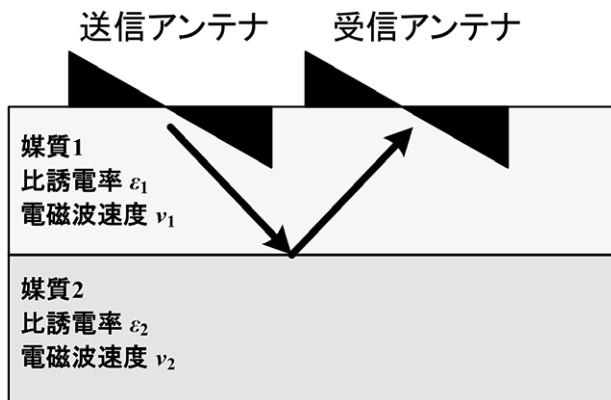
図1 車載型地中レーダシステムの例⁴⁾

図2 地中レーダの概念図

空洞の有無を調査し、路面陥没の未然防止を図っている²⁾。路面下空洞探査における地中レーダ調査では、まず一次調査として交通規制をすることなく広範囲の測定を効率的に行うために、地中レーダ機器や測位機器などを搭載した車載型測定器が利用される。この一次調査において得られた地中レーダデータより、空洞の可能性のある異常信号箇所を抽出する。一次調査により抽出された異常信号は、異常箇所の独立性や規模・深さ、あるいは過年度データがある場合は経年変化といった異常箇所の個別属性に加えて、周囲の空洞履歴や舗装構成など総合的に勘案した上で、ハンディ型地中レーダによる詳細調査の必要性の有無について判定が行われる³⁾。図1に路面下空洞調査で用いられる車載型地中レーダシステムの例を示した。図1で示した例では1日に50 km程度の路線長のデータを取得することが可能である。例示したシステムでは地中レーダアンテナを6台

搭載しており、地中レーダデータの延べ距離では300 km程度のデータが1日で取得される。

地中レーダの概念図を図2に示した。地中レーダは電磁波の波動的性質を利用した計測法であり、電磁波速度の異なる媒質の境界面からの反射波を計測することで地下構造を推定する調査手法である。

地中レーダで用いられる10 MHzより高い周波数領域では、電磁波速度は主に比誘電率 ϵ_r に依存し、地中での電磁波速度 v は(1)式で与えられる。比誘電率の異なる境界における電磁波の反射の強さを示す割合を反射係数(または反射率) Γ と呼び、図2で示したような媒質1(比誘電率が ϵ_1)と媒質2(比誘電率が ϵ_2)の水平2層構造の境界面では(2)式で与えられる。

$$v = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m/s)} = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (cm/ns)} \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2)$$

この反射係数の値が大きいほど反射波の信号強度は大きくなり、また反射波形の位相(極性)も反射係数の符号によって決まる。反射係数が正の場合には反射波は入射した波形と同位相になり、負の場合は位相が反転する。

舗装道路を対象とした路面下空洞調査の場合、舗装構造内部と空洞との比誘電率のコントラストの違いで空洞検知が可能になる。図3に舗装構造内での主な境界面と空洞との反射係数の模式図を示した。アスファルト舗装道路の構造は、大きく分割して表層・基層・路盤層の3層からなりその下部は路床と呼ばれる。表層・基層部はアスファルト混合物層などから構成され、比誘電率は経験的に4.5～9

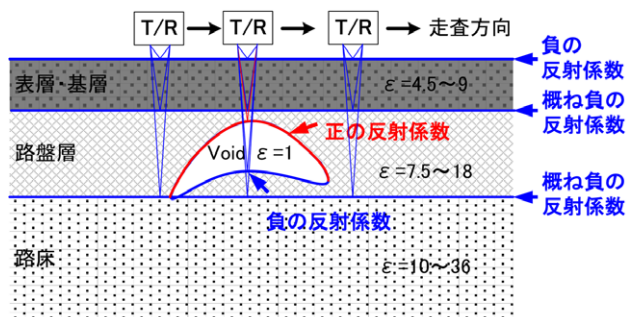


図3 舗装構造内での空洞と主な境界面での反射係数

程度と3層の中では最も低い。路盤層は主に碎石からなり比誘電率は7.5～18程度で中間的な値と想定される。路床部は路盤下約1mの部分で改良地盤や自然地盤の一部から構成される。舗装構造内での各層の境界では経験的に反射係数が負になることが多い。一方で空気からなる空洞部分の比誘電率は約1であるため空洞上面での反射係数は周囲に比べて大きくなり、なおかつ正の反射係数を示す。これが空洞上面からの応答として着目すべき大きな特徴になる。図4には典型的な金属埋設管と空洞でのプロファイル図（距離－時間の断面図）の比較例を示した。プロファイル図は、各距離・深度における波形振幅値をグレースケール画像における輝度値と対応させてラスタ画像としたものである。空洞や埋設管のように、走査断面内で孤立して存在する小さい反射体は点反射体とみなせるため、反射波による応答はプロファイル図上では特徴的な双曲線形状を呈する。図4では、金属埋設管、空洞とも応答形状は類似しているが、金属埋設管では上面の反射面が負の反射係数になるため空洞の反射波とは逆位相になっていることが分かる。図4のプロファイル図は、応用地質社製の路面下探査車で取得された記録例で、発信波形をパルス波形（中心周波数400MHz）とするインパルスレーダーを用いている。

距離方向の記録密度は2.5cm間隔で1波形を取得している。

図4では比較的典型的な応答例を示したが、実際にはこのような明瞭な応答が常に得られるとは限らない。プロファイル図における反射応答画像は、空洞の形状や地盤状況、周囲の人工構造物の有無や車載測定時のアンテナと空洞との平面的な相対位置関係などの要因で複雑な様相を呈する場合も少なくない。図5に比較的不規則な形状をした実際の空洞確認箇所のプロファイル例（図中、赤点線枠内）を示した。

一次調査データの解析では、図4や図5で示したようなプロファイル図上の画像や代表箇所の波形記録を、隣接アンテナの応答も考慮しながら目視判定し、さらにデータ取得時に同時撮影する周辺画像、埋設物の管理台帳などにも必要に応じて参照しながら空洞・非空洞の判定を行う。本研究ではこのような大量データ処理の省力化・迅速化を目的として、教師あり機械学習による空洞記録の自動認識と識別の適用を試みた。

3. 機械学習手法を用いた地中レーダデータの自動処理

機械学習とは一般に、データに含まれる規則性などを見つけ出し、類似したものの分類・検知などをコンピュータにより実現するための技術群の総称である。本研究では類似したパターンを見つけ出す教師あり機械学習手法を用いて、空洞異常箇所の自動抽出を行った。分類対象となる入力データとその分類結果である教師データ（ラベル）の対は学習データと呼ばれるが、ここでは学習データとしてこれまで技術者の目視判定により空洞による異常信号と判定され、掘削により実際に空洞と確認された箇所での地中レーダの実測データを用いた。これと合わせて非空洞箇所の地中レーダデータも学習データとして用いた。アルゴリズム選定においては、実運用をふまえて一般的なPCでも十分に実行できる高速性を有し、学習データとして利用できる空洞の実測データ数にはある程度制限があることを考

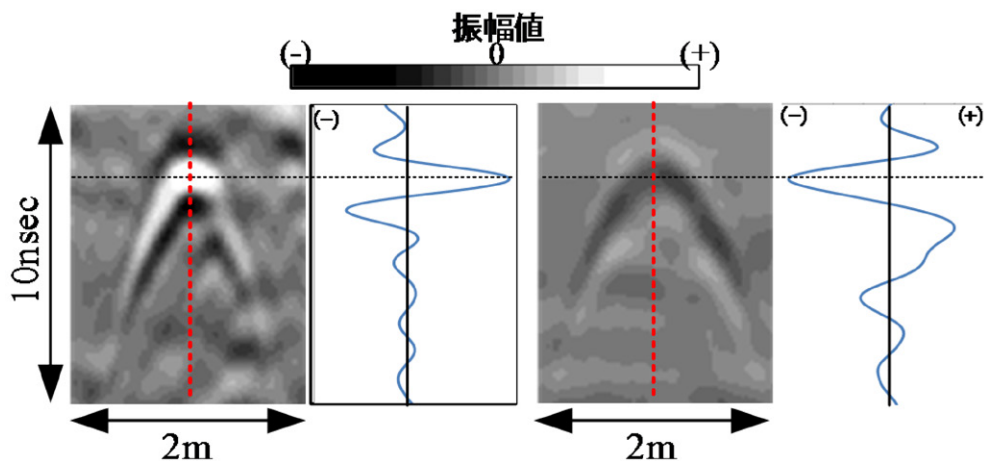
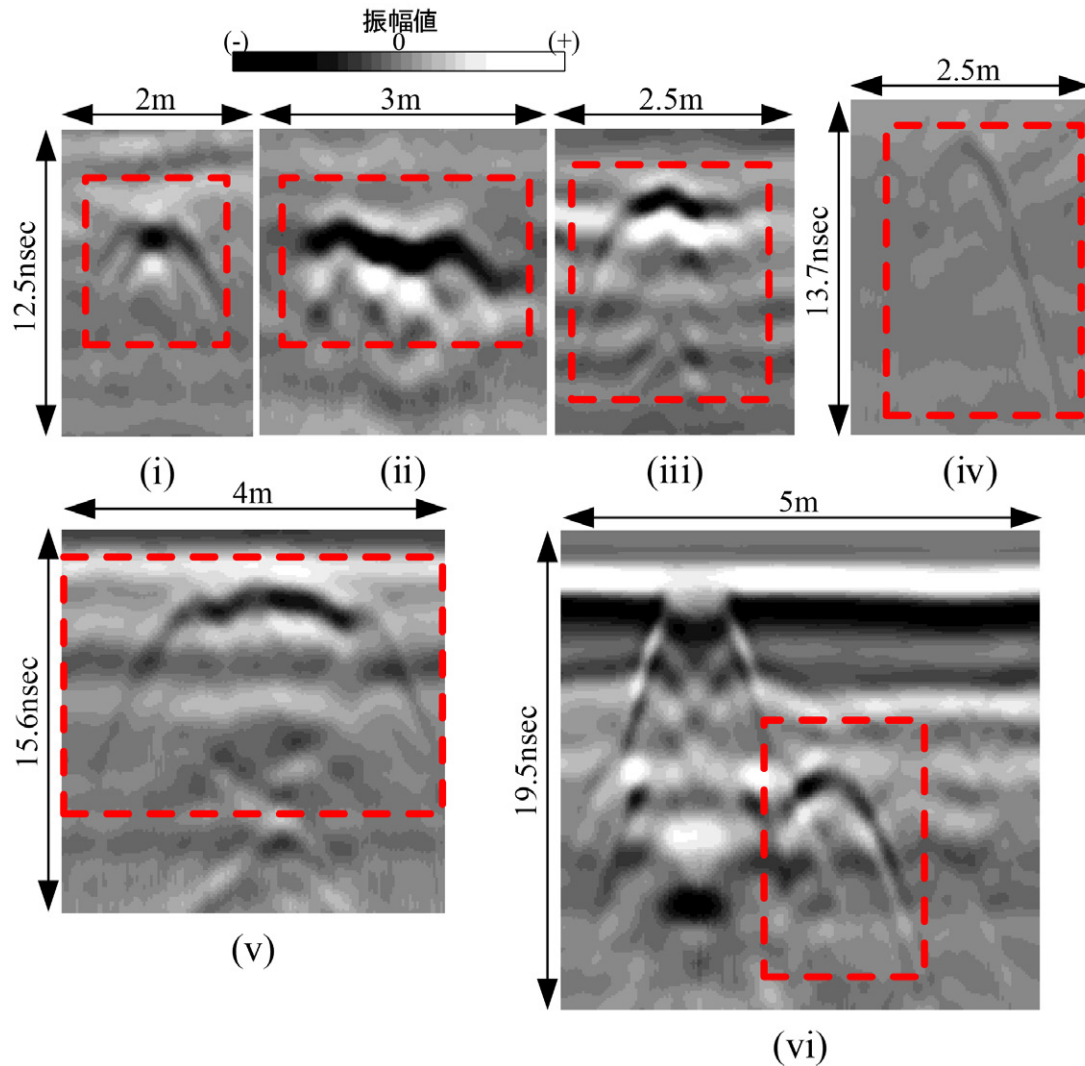


図4 埋設管による応答 (i) と空洞箇所での応答 (ii)



(i) 2つの応答が重なり合うような形状	(ii) 応答が比較的広範囲にわたり、端部の回折パターンが不明瞭な形状	(iii) 土質境界などの背景応答と重なるような形状
(iv) 双曲線形状が半分不明瞭になっている形状	(v) 応答が広範囲に広がっている形状	(vi) 人孔設備による応答(赤点線枠の左上)と近接している形状

図 5 比較的不規則な空洞応答の例

慮した。この中で、近年盛んに研究されている深層学習による手法は、十分な性能を発揮するためには例えば 100 万個を超えるような大量の学習データとそのための計算資源を必要とするため、本研究の選定アルゴリズムからは除外した。図 6 に、本研究で採用した手法の概念図を示した。本研究での識別プロセスは、大きく分けて 2 段階からなる。1 段階目の識別器では図 4 や図 5 で示したようなプロフィール図でのグレースケール二次元画像とそのラベル（空洞か非空洞か）を学習データとし、空洞箇所との類似画像の候補箇所を全体のデータから抽出する。2 段階目では、1 段階目で抽出された箇所から、典型的な空洞応答を示している箇所での波形データを利用して空洞であるかどうかの識別を

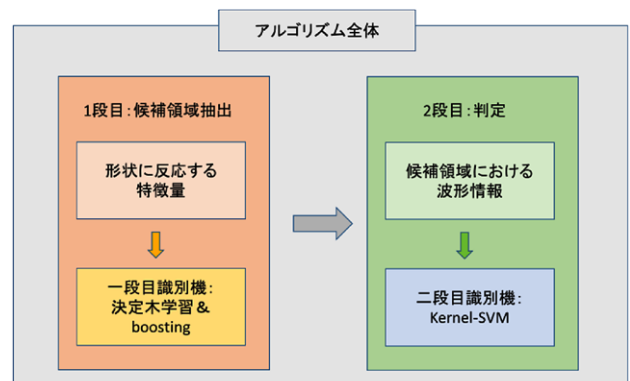


図 6 空洞箇所自動抽出処理の概念図

行い、最終的に空洞箇所候補箇所を絞り込む。

1 段目の処理では、形状に起因する特徴量を画像から抽出して識別器の入力とした。1 段目では長距離の地中レーダデータ全体に対してサーチを行うので、特に高速性が要求される。そこで識別器には決定木学習を用いた。決定木とはその名のとおりのツリー構造を持つ識別器であり、入力されたデータはツリー構造におけるノード（分岐点）において特徴量に関わる設定条件に則って分岐していく。学習の際には、学習データのうち同じラベルをもつ入力データが各ノードでなるべく少数の枝に集中して分岐するように条件が設定される⁵⁾。さらに決定木学習において、目標どおり識別できなかった学習データに対して強い重みをつけて再度学習を繰り返すブースティングと呼ばれる手法を組み合わせることで高速性と性能を両立させた。2 段目の処理では、1 段目で抽出した空洞候補領域の代表的波形を識別器の入力として空洞・非空洞の識別を行う。ここではさまざまな種類のデータに対して高い識別性能を有するカーネルサポートベクターマシン（kernel-SVM）を識別器に用いた。SVM は学習データの集合を 2 値分類するための境界を決定する識別器である。SVM では識別境界とそれに最も近いデータ点との距離を最大にするマージン最大化と呼ばれる学習を行う。SVM は高次元かつ比較的少ない学習データに対しても、学習データ以外の実データに適用した際の正解率が高い安定した性能を発揮できる特長がある⁶⁾。SVM は決定木学習ほどではないが機械学習手法の中では比較的高速に実行可能な手法の 1 つであり、本研究では上述の 2 段構成により高速かつ次章で述べるように比較的安定したアルゴリズムを実現できた。

4. 走行データによる検証

本手法による実データに対する空洞箇所の検出性能に関して検証を行うことを目的として、実際の走行データを用いて自動解析を実施した結果と、従来どおりの技術者による目視判定解析を行い、削孔とファイバースコープ調査で空洞確認まで行った結果とを比較した。走行データは前述の路面下探査車により取得された記録である。なお検証に用いたデータに含まれる空洞箇所の地中レーダデータは学習データに含めていない。検証には 2 か所の調査データを

用いて、確認済みの空洞からの応答と考えられる記録が得られている箇所が自動解析により抽出された中に含まれているかについて主に確認した。

検証結果を表 1 に示した。なお空洞 1 か所につき複数の地中レーダアンテナで応答が捉えられていることもあるため、このようなケースはそれらを独立した応答として計数して比較した。このため空洞箇所数（表 1 中(1)）が応答箇所数（表 1 中(2)）はよりも少なくなっている。検証対象 A では、空洞による応答箇所 15 か所のうち 14 か所、検証対象 B では、空洞による応答箇所 16 か所のうち 12 か所が自動解析で抽出された異常箇所に含まれる結果となった。自動解析結果で抽出されなかった検出対象 1 での 1 か所、検出対象 2 での 4 か所については、同一空洞によると思われる応答が近接する別のアンテナでの応答で抽出できており、空洞そのものの検出としては抽出漏れのない結果を得ることができた。一方で、自動解析により抽出された異常箇所は、各アンテナでの 1 km あたりの平均で 31.6 個～42.5 個と、空洞応答箇所の数と比較して誤検出が大幅に多い結果となっている。これは、解析の過程で可能な限り抽出漏れが出ないようにパラメータなどを設定した結果と考えている。このため、本アルゴリズムでの自動解析結果は解析作業の補助という位置づけで、自動抽出結果から手動での絞り込作業が必要である。今後、解析作業の負担をより軽減させることができる実用的なものにするために、空洞からの応答を漏らさず抽出し、かつ誤検出を減らすような改良を進める必要がある。

5. ま と め

本報では、舗装道路下の路面下空洞を対象とした車載型地中レーダデータにおいて、空洞による応答箇所の自動抽出を行うことを目的として、画像認識と機械学習手法を用いた自動解析を試みた結果について報告した。その結果、削孔により確認されている実際の空洞箇所を漏れなく抽出することができた。一方で、本手法により自動抽出した異常箇所数は、実際の地中レーダによる空洞応答箇所数に比べてまだ大幅に多く、実用に供するためには手動での選別作業が欠かせない。これはできるだけ抽出の漏れが出ないようにパラメータ設定などを行った結果であり、作業効率

表 1 実走行データを用いた自動解析の検証結果

	検証対象 A	検証対象 B
走行距離 (km)	約 13.3 km	約 17.3 km
チャンネル数 (= 地中レーダアンテナ数)	6	6
(1) 空洞箇所数 (削孔確認済み)	8	6
(2) 空洞確認箇所からの応答数 (全アンテナでの合計)	15	16
(3) (2) のうち自動抽出できた応答箇所数	14	12
(4) (1) のうちいずれかのチャンネルで空洞応答箇所を抽出できた空洞数	8	6
1 km あたり (1 アンテナ) の自動抽出数	31.6	42.5

改善のためにはこれらをより精度良く絞り込んでいくことが重要である。今後、深層学習などの最新知見を取り入れたアルゴリズムの改良や、前処理の最適化などの処理手法の改善を検討するとともに、地中レーダデータを継続的に集積・整理し、優良な学習データを蓄積し学習を重ねることで性能を向上させたいと考えている。

謝 辞

SOINN 株式会社には地中レーダデータ解析のご協力を頂いた。ここに記して感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省:計画的な改築・維持管理－下水道, 国土交通省ウェブサイト, http://www.mlit.go.jp/mizukoku-do/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html (2018 年 3 月閲覧).
- 2) 直轄国道の舗装(路面)に関する保全検討委員会, 2011:「路面地下の適切な管理のあり方について」, 国土交通省ウェブサイト, http://www.ktr.mlit.go.jp/road/shihon/road_shihon00000048.html (2018 年 3 月閲覧).
- 3) 吉澤幸佑, 2014:地下レーダによる路面下の空洞探査について, 国土交通省関東地方整備局 平成 26 年度スキルアップセミナー, <http://www.ktr.mlit.go.jp/soshiki/soshiki000000092.html> (2018 年 3 月閲覧).
- 4) 前川 聡・山下善弘・村上弘行, 2011:路面下探査車「ロードビジュアライザー」の開発—概要と適用例—, 応用地質年報, No.30, 81–89.
- 5) Rokach, L., Maimon, O., 2008: Data mining with decision trees: theory and applications, *World Scientific Pub Co Inc*. ISBN 978-9812771711.
- 6) Cortes, C., Vapnik, V., 1995: Support-vector networks. *Machine Learning*, **20**, 273–297.

講 演
 Lecture

AI を使った生産・製造設備運転データ解析の事例と今後の発展*

落合 勝博**・大野 拓也***,†

(Received December 25, 2017 ; accepted March 20, 2018)

The cases and the future of plant data analysis with AI technology

Katsuhiko Ochiai and Takuya Ono

Abstract : In the fields of oil refining, chemicals, natural resource development, power generation, gas and LNG, etc., “System Invariant Analysis Technology” detects signs of anomalies through the real-time analysis of plant operation data. SIAT is an AI technology designed by NEC to identify the cause-and-effect relationship of large amounts of sensor data. This supports plant owners in preventing occurrences of operation trouble.

JGC and NEC jointly analyzed operation data of a number of plants and found anomalous signs at locations separate from the functional failure of each equipment. These examples show that process engineering knowledge combined with advanced AI such as SIAT works quite effective for reduction of plant downtime.

Keywords : AI, anomaly detection, cause of failure, plant operation

1. はじめに

昨今、先進国においてはプラントの老朽化、運転員の高齢化が進み、新興国では熟練運転員の確保が難しい状況にある。この中で、プラントの安定・安全運転を維持し、運転・メンテナンスコストの低減を進め、より高効率のプラント操業を行うことが喫緊の課題となっている。そのため、プラント操業において、AI・IoTの活用が検討され、実施され始めている。

こうした世界的動向の中、日揮は高度なエンジニアリングノウハウを基に、これまでに国内外で延べ6製油所、1 LNG プラント、1 化学プラントに対し、異常予兆の特定を含むプラント運転データ解析を実施している(日揮, 2017)。一方 NEC でも、データの相関関係から異常予兆を検知するインバリエント分析技術を含む、独自の最先端 AI 技術群「NEC the WISE」を活用し、プラントの異常

予兆監視・エネルギー需要予測・品質解析などのシステムを電力・石油・化学プラントなどに対して実施している(NEC, 2017; Guofei *et al.*, 2006; 梶田ほか, 2015)。

両社の協業により、多数の機器・制御計器が連動し、かつ運転員による手動調整・切替えなど複雑な運転がなされているプラントの全体運転データを基に、異常予兆の因果関係をリアルタイムで特定し、トラブルの未然防止の機械化・自動化に大いに資するものとなる。

本稿では、日揮のエンジニアリング技術基盤のデータ解析技術と、NEC のインバリエント分析技術の融合により、一般に解析が難しいとされるプロセスプラントを対象として、プラント全体にわたる広範囲の運転データの解析に成功した事例を紹介する。具体的には、センサ情報間の相関関係の崩れを異常度合として検知し、異常度合の時間推移と異常箇所を可視化することにより(図 1)、異常を発生させた根本原因を解明した。

2. インバリエント分析技術について

2.1 概 要

コンピュータシステムや、プラント、工場、発電所などの物理システムでは、監視ポイント(センサ)の観測データ間に相関関係がある。例えばコンピュータシステムでは、ネットワークパケットをキーとして相関関係があり、相関関係を把握すれば計測点の集合やシステム全体の動きを捉えることができる。

インバリエント分析技術では、複雑な設定やドメイン知

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度秋季講演会「次世代技術への挑戦 - X 年後の石油ガス開発に向けて」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled “Challenges to the technologies of the next generation - towards the E&P Industry after X years” held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** NEC プラットフォームサービス事業部 エキスパート (現 NEC サービスプラットフォーム事業部 シニアエキスパート NEC Corporation Service Platform Division Senior Expert)

*** 日揮株式会社 デジタル事業部 技術理事 (現 日揮株式会社 技術イノベーションセンター 特別理事 JGC Corporation Technology Innovation Center Associate Executive Officer)

† Corresponding author : E-Mail : oono.takuya@jgc.com

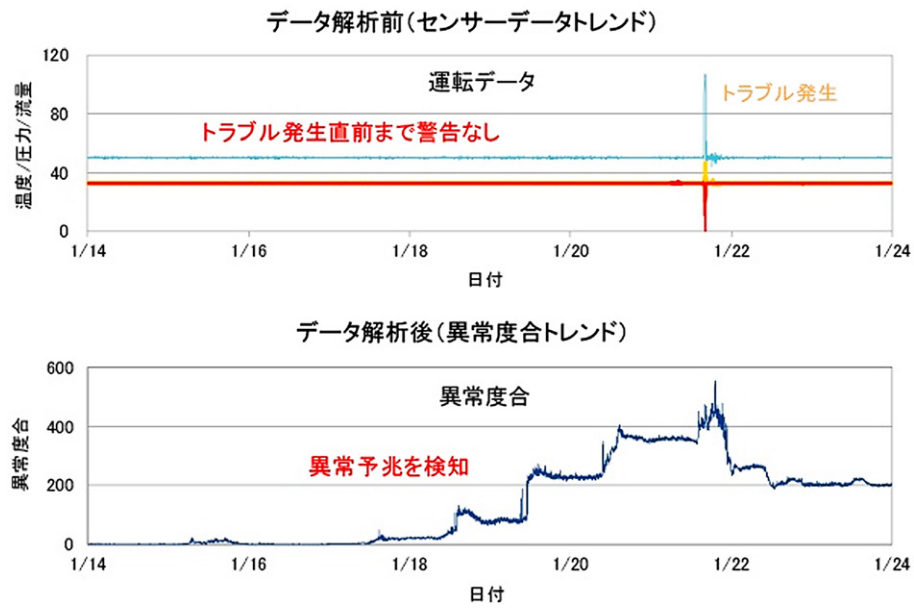


図 1 異常度合による異常予兆検知

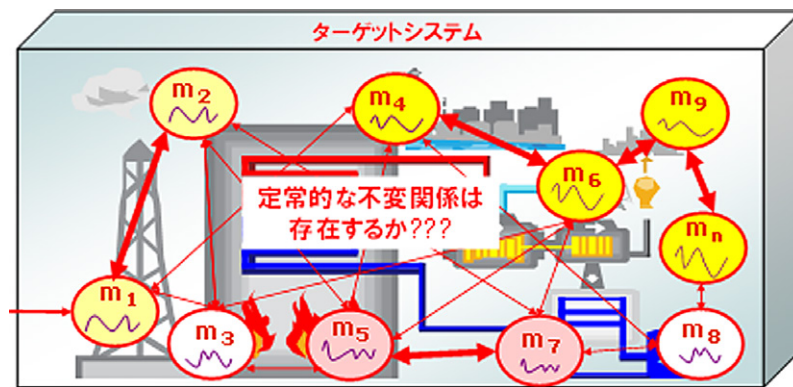


図 2 インバリエントモデルの構築

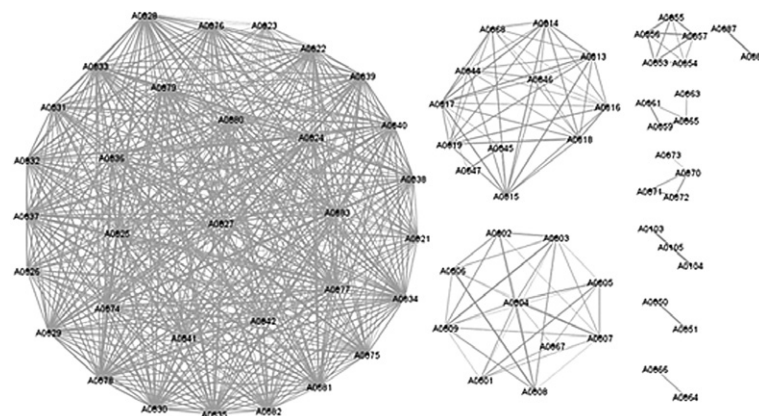


図 3 構築したインバリエントモデルの例

識がなくとも、システムから得られる複数の観測データから、平常時のシステムに成り立つ不変関係（Invariant：インバリエント）を自動的に見つけ出す。そして、それらのインバリエントを関係式としてモデル化し、現在の観測データとモデルからの予想値を比較して「いつもと違う」動きを発見する。

このインバリエントを自動的に導き出すモデル構築、モデルを用いていつもと違う状態を検知する方法について、以降説明する。

2.2 インバリエントモデルの構築

インバリエント分析技術では、監視ポイントの時系列データ間に存在するインバリエントを、網羅的、自動的かつ高速に抽出する。抽出された局所的な関係を積み上げることで、システム全体をモデル化することができる。

図2に示すように、物理システムには多くの監視ポイント（ m_1, m_2, \dots, m_n ）が存在し、例えば m_4 と m_6 , m_5 と m_7 のように、常に一定の関係性が存在するセンサ間の関係を関係式でモデル化する。

インバリエントモデルの一例を図3に示す。テキストが記載されているところがセンサで、センサとセンサを結んでいる線がインバリエントな関係が存在することを示している。

2.3 いつもと違う状態の検知

局所的な関係式を積み上げて構築したインバリエントモデルを利用して、システムの今の状態を把握することができる。

図4を用いて具体的な方法を説明する。はじめに、定常状態のシステムから採取した時系列データから、インバリエントモデルを構築しておく。説明のために、3つの監視ポイント x, y, z に着目し、 x と y , および x と z の間にそれぞれ $y=f(x)$, $z=g(x)$ というインバリエントな関係性が存在しているものとする。監視対象のシステムから時々

刻々と集められた時系列データと関係式から、予想値が得られる。たとえば、観測値 x から $y=f(x)$ の関係式を用いて、 y の予想値 y^* を得る。同様に z の予想値 z^* も得ることができる。一方、実際の観測値 y, z もシステムから得られており、関係式から得られた y^* と実際の観測値 y を比較して、同じであれば、インバリエントモデル構築時と現在のシステムの状態が（いつもと）同じと判断でき、この z^* と z のように異なる場合は、システムの状態がいつもと異なる判断できる。すべての関係性についてこれらの判断を行うことで、システムの状態がいつもと同じか違うかを判断することができる。

3. 協働による設備監視サービス

日揮と NEC が協働で提供する生産・製造設備関連サービスについて概要を説明する。

3.1 設備故障の予兆検知サービス

プラントなどの設備の異常は、通常、閾値による警報領域を設定し、その領域へセンサの値が入るかどうかで判断されている。一方、インバリエントは、センサの値が警報領域へ入るよりも早く壊れる（関係性がなくなる）ことから、関係性の状態を監視することで、設備異常の予兆を捉えることができる。

実際の予兆検知では、正常システムの時系列データでインバリエントモデルを構築し、そのモデルと観測データからシステムの状態をリアルタイムに判断して予兆を捉えることができる。

インバリエント分析技術は、センサからの時系列データを対象にしているが、その種類は一切問わない。したがって、同種類のセンサ間だけでなく、圧力センサと流量センサ間などの異なる種類のセンサ間に存在する関係性も抽出できる。

また、これまでの実データを用いた検証では、プラント

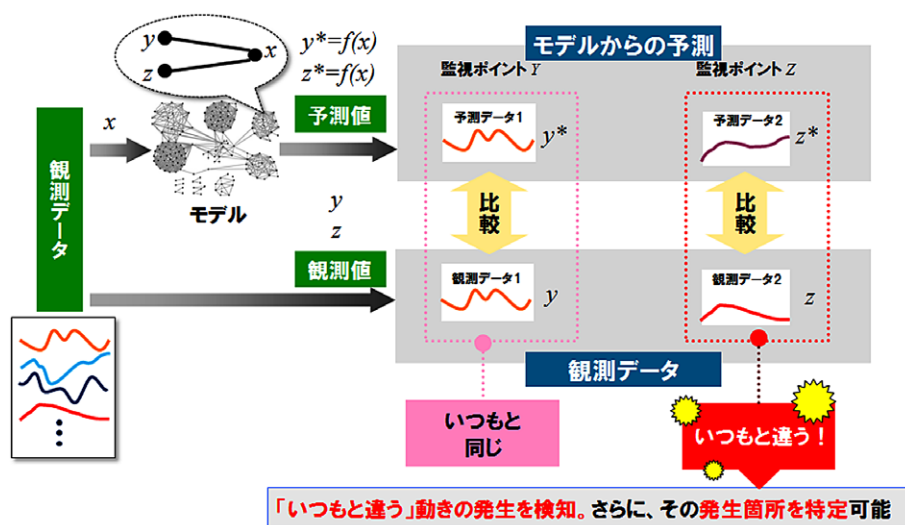


図4 いつもと違う状態の検知

のオペレータが認識していなかった関係性を抽出できている。これらの関係性を使ってシステムを監視することで、これまで捕捉できなかった異常の予兆を捉えられる可能性がある。

故障をより早期に検知（予兆検知）することで、致命的な故障に至る前に対処して、システムの停止時間を最小限にすることができる。

3.2 設備故障の原因特定サービス

故障検知あるいは故障予兆検知の際には、多くの事例で、複数のインバリアントの同時破壊が見られる（図5）。これは特定のセンサが異常値を示す場合でも、そのセンサとインバリアントを持つ他の複数のセンサには異常がないために、それらの複数センサとの間にあったインバリアントが一斉に壊れるためである。故障の原因特定においては、

この性質を利用して、異常の中心にいるインバリアントがより原因に近いと判断することができる。

4. 石油化学プラントにおける共同解析事例

日揮とNECが共同で解析した石油化学プラントは、原料が上流から下流に流れるに従って反応・分離して製品に近づいていく、代表的なプロセスプラントである。インバリアント分析では、通常、全てのセンサデータを対象に網羅的な解析を実施するが、本件では、解析結果の精度を高めるため、あらかじめ、プラントエンジニアが設計知見を元に無関係のセンサデータを除外してから解析した。

本プラントはプロセス系の生産設備であるために、3.2で説明した定性的な異常箇所特定手法では、最初の異常発生（と思われる箇所）が、本当に下流で観測した異常事象

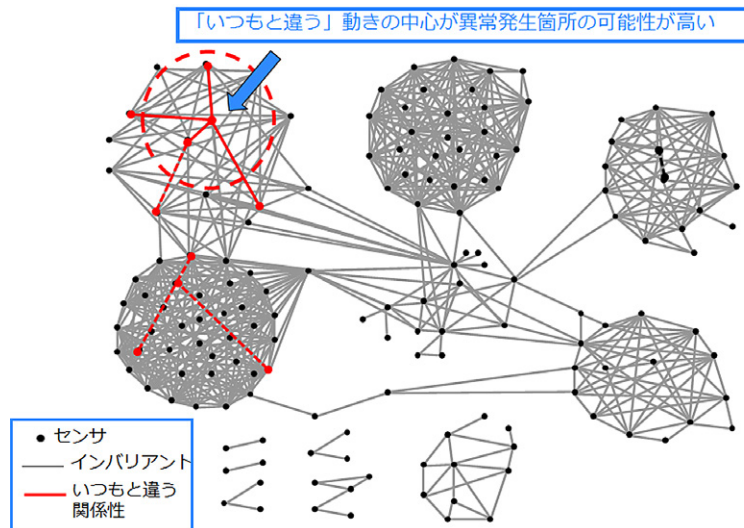


図5 異常箇所特定の仕組み

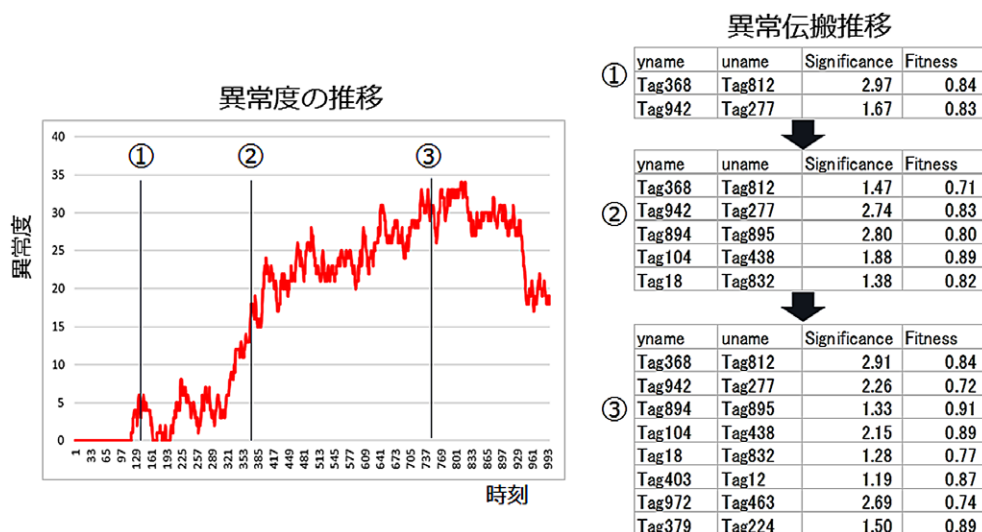


図6 インバリアント分析による異常度の推移（左）と異常伝搬過程の解明（右）

の原因なのか、あるいは関係ないことを捉えた誤検知なのかを判断するのが難しかった。そこで、解析上、異常を捉えたと思われる最初の時刻から、時刻方向に順番にシステム全体の異常箇所を抽出し、抽出した時刻ごとに異常がいつどこで発生していたかを可視化して、異常発生の時系列関係を明らかにした（図 6）。その結果、設備上流で最初の異常が発生し、それが徐々に伝搬して、最終的には設備下流での異常現象として観測された一連の異常伝搬の流れを、設計知見で連続的に解釈・説明して、根本原因を特定することに成功した。また、根本原因が分かったことから、エンジニアがお客様に適切な対策案を提示することができた。

5. おわりに

本稿では、AI によるデータ起点の解析結果をプロセスエンジニアが解釈することにより、これまで単独では到達できなかった、プロセスプラントにおける広く深い解析を元にした根本原因の特定と、そこを起点としたコンサルを

実現できたことを述べた。今後も、日揮と NEC が共同でさまざまなプラント課題の解決にあたりながら、得られた知見のシステム化に取り組んでいく予定である。

引用文献

Guofei Jiang, Haifeng Chen and Kenji Yoshihira, 2006 : Modeling and Tracking of Transaction Flow Dynamics for Fault Detection in Complex Systems. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 3(4), 312-326.

棗田昌尚・落合勝博・朝倉敬喜, 2015 : インバリエント分析技術の大規模物理システムへの適用－原子力発電所の監視への適用を例に－, 情報処理学会デジタルプラクティス, 6(3), 207-214.

NEC, <http://jpn.nec.com/bigdata/analyze/index.html?invariant> (cited 2017/12/2).

日揮, http://www.jgc.com/jp/02_business/06_bigdata/index.html (cited 2017/12/2).

資 料
 Note

平成 29 年度秋季講演会

「次世代技術への挑戦」
 – X 年後の石油ガス開発に向けて
 Autumn Meeting

“Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years”

ま と め*

副会長 塩 澤 有 史**

A summary of the Autumn Meeting by Yuji Shiozawa

石油技術協会副会長を務めております塩澤でございます。本日は午前中から長時間、秋季講演会「次世代技術への挑戦」– X 年後の石油ガス開発に向けて–にご参加いただきまして誠にありがとうございます。また講演者の皆様には、革新的技術の石油探鉱・開発への適用について、丁寧なご説明と画期的なご提案をいただき、深く御礼申し上げます。今回のご講演内容で得られた知見が、会場の皆様の今後の石油探鉱・開発ビジネスに少しでもお役に立てれば幸いです。

少し今日の話題から離れますが、昔の話をさせていただきます。石油技術協会では 1995 年秋季講演会で、「インターネットの石油探鉱開発に果たす役割」というテーマで議論しました。年配の方はご記憶あるかと思いますが、1990 年代前半はようやく各社のオフィスにパソコンが導入された時代で、まだ各人 1 台ではなかったと思います。その中で秋季講演会では、インターネットプロバイダーや利用者の方々から先駆的なインターネット技術についてご説明、ご紹介をいただきました。今振り返ってみますと、聴衆の皆様が講演会でインターネットに親しみを感じ、その後のビジネスに有効に活用されてきたものと思います。現在はインターネットなくして石油探鉱・開発技術が進歩しないという事を考えますと、今日ご紹介いただいた各々の次世代技術も、5 年後 10 年後、あるいは 20 年後に石油鉱業で広く活用されているのではと期待しております。

それでは、今日のご講演について私なりの感想を述べさ

せていただきたいと存じます。

最初に三井物産戦略研究所の金城様から、「石油・天然ガス開発上流におけるベンチャー企業動向」についてご説明をいただきました。大手企業がベンチャー企業の開発資金にかなり大金をつぎ込んでいること、特に近年ではオイルアンドガス向け投資が増加しているという点には驚きました。現在の低油価環境から、コスト削減や廃坑などにベンチャー企業の技術開発が向いているという点も新しい視点でした。

続きまして国際石油開発帝石(株)の山中様から「GIS データの石油探鉱への活用について」というご講演をいただきました。GIS データについて名前だけは承知していましたが、根源岩の探鉱に有効に活用できる、あるいは古気象の推定にも利用できるというのには驚愕しました。またそれらの解析に AI を活用できるのではないかというのは、非常に示唆に富んだご提案かと思えます。

続きまして JAMSTEC の稲垣様から、「海底下の微生物起源ガスと生命活動との関わり」というテーマでご講演をいただきました。海底下 2,500 m でも微生物が存在し、それが炭化水素の生成に活躍しているという点は新しい知見でした。微生物の活性は摂氏 80 度以上で低下しますが、栄養と水の存在で進化する可能性も考えられることから、限界生命圏の解明は残された研究課題かと感じました。

続きまして石油資源開発の瀬能様から、「微生物起源ガス探鉱の可能性」というテーマでご説明をいただきました。私、微生物起源ガスというのは水溶性ガスだと思っておりましたが、もっと広く深い意味があり、大水深に微生物起源ガスの探鉱価値が見出せるというのは驚きでございます。

その後、国際石油開発帝石(株)の前田様から「CO₂ をエネルギー資源に」というテーマで、微生物を使って CO₂ を

* 平成 29 年 10 月 24 日、平成 29 年度 秋季講演会のまとめ This paper was presented at the 2017 JAPT Autumn Meeting entitled “Challenges to the technologies of the next generation – towards the E&P Industry after X years” held in Tokyo, Japan, on October 24, 2017.

** 石油技術協会副会長 JAPT Vice-President

エネルギー資源に変換するご提案をいただきました。実験もかなり進み、現在では150年あれば計算上CO₂を商業量のメタンに変えられるという想定は、非常に感銘を受けました。反応速度を3倍、10倍、30倍の速度に高めていく目標を、ぜひ成功裏に導いていただきたいと祈念しております。

東京大学地震研究所の田中先生からは「ミュオグラフィの地下探鉱への応用」についてご紹介をいただきました。私はピラミッドを透視するテレビ番組を観たことがあります、それが資源開発に適用できるという点には深く感銘を受けました。ただ、測定器を目的物より必ず深部に設置せねばならないという点は、石油探鉱・開発に活用するにはハードルが高いかと思っています。

最後にAI活用について2件、ご講演をいただきました。まず「地中レーダによる地下探査のAI利用例」というテーマで、応用地質㈱の山下様から、地下レーダデータを機械学習で解読する技術をご紹介いただきました。実用例を用いたご説明で、非常に解りやすく理解できました。課題と

なっている過検出を、少しでも減らしていかれるよう期待しています。

最後に日揮㈱の大野様と日本電気㈱の落合様から「AIを使った生産製造設備運転データの解析事例と今後の発展」というテーマでご紹介をいただきました。最初に設備の故障検知事例を非常に分かりやすくご紹介いただき、その背景にあるインバリエント解析をご説明いただきました。最後にご提示いただいた将来像については、おっしゃられるように悪いシナリオと良いシナリオが考えられますが、良いシナリオに導くのが我々人間の義務ですので、AIの有効活用のため、設備運転状況の見える化をぜひ進めていきたいと考えております。

以上、今回の秋季講演会「次世代技術への挑戦」はいかがでしたでしょうか。本日のご講演が、皆さまの今後の技術の発展に有効にご活用いただければ、石油技術協会としては大変嬉しく存じます。長い間ご清聴大変ありがとうございました。

論 説
 Original Article

原油のバイオマーカー組成からみた国内根源岩の特徴 —秋田・山形地域の国内における位置づけ—*

早稲田 周^{*,†}・西田 英毅^{**}

(Received November 27, 2017 ; accepted January 23, 2018)

Source rock characteristics based on biomarker compositions of crude oils in Japan: Focused on the Akita and Yamagata Area

Amane Waseda and Hideki Nishita

Abstract : The factor analysis of biomarker composition on the marine oils from the Akita and Yamagata Basins, Japan, was conducted to clarify their source rock characteristics. Three major factors controlling source rock facies are interpreted to be lithologies (Factor 1: clastic vs. siliceous / calcareous), organic origins (Factor 2: variable contributions of land plants) and oxic / anoxic depositional conditions (Factor 3). The Akita and Yamagata oils are differentiated into six types by the score plot of the Factor 1 and 2. The areal distribution of the oil types revealed regional variation of source rock facies, such as the higher clastic input in the Yamagata basin than in the Akita basin, higher marine organic input in the west anticline series than the east series in the Yabase oil field area. The Factor 1 and 2 are mainly represented by oleanane / norhopane ratio and the relative abundance of C_{29} sterane among C_{27-29} steranes, respectively. Based on these two biomarker parameters, the source rock lithologies in the Sea of Japan side of the Tohoku District are interpreted to change from siliceous / calcareous in the Akita area to clastic in the southwest Niigata area. The source rocks of the oils from the Sagara area in the Pacific side of the main island are evaluated to have higher land plant contributions than those from the Sea of Japan side. The oils distributed in the coal-bearing basins extending from the central Hokkaido to the offshore Pacific side of the Tohoku District contain much higher amount of C_{29} sterane, suggesting their source rocks are coals or coaly shales.

Keywords : source rock facies, biomarker, crude oils in Japan, factor analysis, lithology, organic origin, marine oil, land plant

1. はじめに

原油のバイオマーカー組成は起源有機物、岩質、堆積場の酸化還元環境、熟成度、微生物分解、移動などの指標として広く使われている (Peters *et al.*, 2005 など)。国内油・ガス田地帯である秋田～新潟堆積盆においても原油のバイオマーカー組成から根源岩の地域的な違いが検討

されている。その結果、原油はすべて海成根源岩起源であるが、秋田堆積盆は新潟堆積盆に比べて、熟成度の低いものがあること (Sakata *et al.*, 1988 ; 坂田ほか, 1990)、陸源有機物の影響が小さいこと (坂田ほか, 1990 ; Chakhmakhchev *et al.*, 1996)、より還元的环境で堆積したこと (Chakhmakhchev *et al.*, 1996) が指摘されている。また、鈴木ほか (1995) は、秋田地域と新潟地域では原油のジーステラン組成が異なっていることを示し、この違いが両地域における根源岩の岩質 (粘土質頁岩と珪質頁岩) と密接に関連している可能性を指摘している。平井ほか (1995) は新潟堆積盆内での原油のバイオマーカー組成の地域的な違いを検討し、オレアナン / ノルホパンが 1 より小さい新津型と 1 より大きい頸城型に分類できることを示している。

本研究の目的は、日本国内に産する原油のバイオマーカー組成を横断的に比較検討し、その原油を生成した根源岩相の地域的な特徴を明らかにすることである。まず、秋

* 平成 28 年 3 月 17 日, 北海道大学 創成研究機構 JAPEx 寄附研究部門・石油技術協会 探鉱技術委員会共催 公開シンポジウム「新たな炭化水素資源と革新的地化学探査技術」で一部講演 This paper was partly presented at the public symposium co-hosted by Research Division of JAPEx Earth Energy Frontier, Creative Research Institution, Hokkaido University and JAPT Exploration Technology Committee, entitled "New Hydrocarbon Resources and Innovative Geochemical Exploration Technology" held in Sapporo, Japan on March 17, 2016.

** 石油資源開発技術本部 技術研究所 JAPEx Research Center, Technical Division, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

† Corresponding author : E-Mail : amane.waseda@japex.co.jp

田・山形地域において、原油のバイオマーカー分析データの多変量統計解析（因子分析）を行い、根源岩相を規制する要因について考察する。因子分析は試料間の類似度・相違度の明確化やデータの変動要因の抽出に有効である。Schiefelbein *et al.* (1997) は、東南アジアの原油の分類に因子分析が有効であることを示している。また南大西洋縁辺の原油の対比にも地化学データの統計解析が有効に使われている (Schiefelbein *et al.*, 2000)

しかし、新規の試料を因子分析で評価するには、試料が増えるたびに、その試料のデータを含めて再解析をする必要が出てくる。また、過去の分析データについては必要な分析種目のデータが得られないこともある。したがって、新規試料のデータを簡便に評価するには、因子を代表するバイオマーカー指標の抽出が望まれる。本論文では、秋田原油の因子分析で得られた第1因子と第2因子を代表するバイオマーカー指標を抽出したあと、その指標を使って新潟、北海道、三陸沖および静岡・相良油田周辺の海成根源岩起源原油を秋田・山形地域の原油と比較することにより各地の根源岩の特徴を考察する。

また、秋田堆積盆の原油については、女川層および西黒沢層根源岩との対比を行う。秋田～新潟堆積盆の根源岩層については、有機炭素量やロックエバル分析などの根源岩分析やバイオマーカー・炭素同位体組成による対比から、中新統中部～上部の海成頁岩（秋田地域では女川層・西黒沢層、新潟地域では下部寺泊層・七谷層）が主要な根源岩層と考えられている（関口ほか, 1984；早稲田・重川, 1990；平井ほか, 1990；天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992）。本論文では、原油および根源岩抽出物のバイオマーカー分析結果について因子分析を行い、原油と根源岩を対比する。

さらに、これらの国内原油の根源岩について、その形成年代を考察する。北海道の原油については、海成頁岩起源と非海成（石炭・炭質泥岩）起源があり、海成原油の根源岩は中新統頁岩、非海成原油の根源岩は古第三系石狩層群夾炭層と考えられている（西田ほか, 1997；Waseda and Nishita, 1998）。本論文では、原油のバイオマーカーおよび炭素同位体組成から、各地域の根源岩の年代を比較・検討する。

2. バイオマーカー分析法

根源岩試料については、粉碎済みの試料約 100 g から、ジクロロメタン・メタノール (93:7) 混合溶媒を用いたソックスレー抽出法により、40 時間かけて有機物を抽出した。得られた抽出物は室温にて乾燥し恒量とした。原油については軽質留分を分留除去して沸点 125℃以上の留分を分取した。

得られた根源岩抽出物および原油の重質留分について高速液体クロマトグラフ分析装置（横河電気㈱製 LC100 型）を使用して飽和炭化水素分画成分を分取し、ガスクロマトグラフィー質量分析計（HP5890A/5970B 型）にて分析した。分離カラムは HP ウルトラ 1（長さ 25 m, 内径 0.20 mm,

膜厚 0.33 μm）を用い、スプリットレス法により試料を注入した。昇温条件は、50℃で 1 分保持した後、50℃から 200℃まで 15℃ / 分、200℃から 300℃まで 2℃ / 分で昇温し、300℃で 10 分間保持した。イオン化電圧は 70 eV で、重質飽和炭化水素はスキャン法、ステラン、トリテルパンは選択イオンモニター法により分析した。

3. 秋田・山形地域における原油バイオマーカー指標による根源岩相の推定と原油と根源岩の対比

3.1 原油の因子分析による根源岩相の推定

秋田県および山形県において油・ガス田の坑井および基礎試錐「仁賀保」の産出テスト（石油公団, 1988）から採取した原油 60 試料、地表および海底から採取した油徴 6 試料の計 66 試料についてバイオマーカー分析を行った。試料の採取位置を図 1 に、分析結果を表 1 に示す。

有機物の起源推定や原油と根源岩の対比にはステランの C₂₇, C₂₈, C₂₉ の組成が最もよく使われている。しかし、秋田・山形地域の油・ガス田から採取された原油・油徴試料のステラン組成は三角図上で狭い範囲に入り、海洋藻類を主な

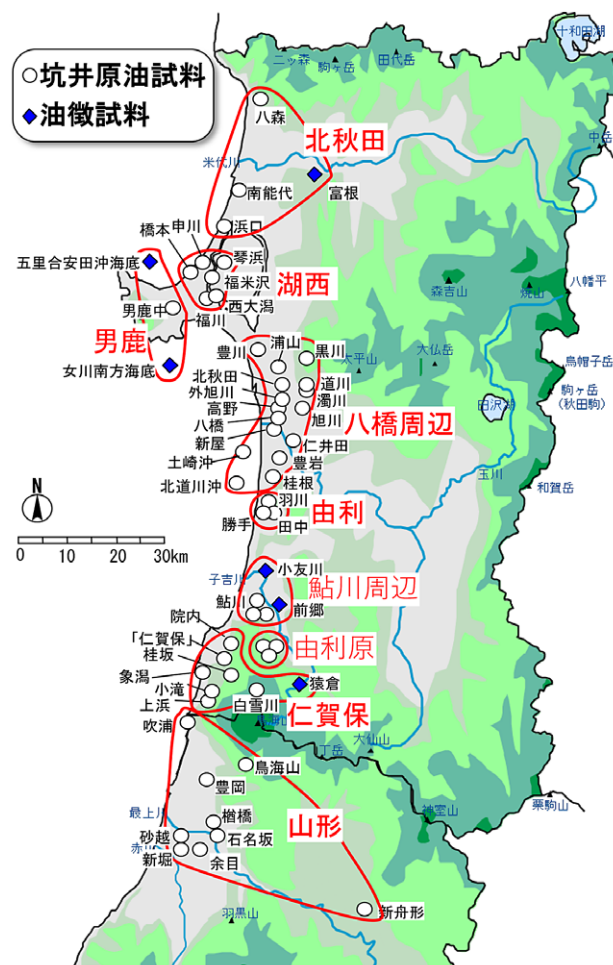


図 1 秋田・山形地域の原油・油徴試料採取位置
図 5, 7, 8 の地域区分も示す。

表 1 秋田・山形地域原油のバイオマーカー分析結果

試料名	産出層名	Pristane/ Phytane	ステラン					トリテルパン								因子スコア		
			C ₂₇ (%)	C ₂₈ (%)	C ₂₉ (%)	C ₂₉ S/(S+R)	Diaste./ Sterane	Ts/ (Ts+Tm)	Tricyc./ Hopane	Norhop./ Hopane	Olean./ Hopane	C ₃₅ /C ₃₄ Homoh.	C ₃₂ S/(S+R)	Olean./ Norhop.	因子 1	因子 2	因子 3	
八森 (混)	船川層	—	45.0	24.7	30.3	(0.65)	(1.44)	0.42	1.01	0.66	0.19	0.92	0.60	0.29	1.90	-0.99	0.81	
南能代	船川層	1.50	40.0	37.7	22.3	0.42	0.26	0.35	0.64	0.70	0.13	0.78	0.57	0.19	-0.95	0.85	-0.87	
富根油微	船川層最下部?	—	42.0	33.0	25.0	(0.45)	(0.22)	0.27	0.57	0.60	0.20	1.22	0.57	0.33	-0.30	-0.73	2.06	
浜口		42.0	35.0	24.0	0.48	0.25	0.33	0.70	0.65	0.13	0.92	0.59	0.20	-0.56	-0.53	1.04		
男鹿半島五里合安田沖海底油微		40.0	34.0	25.0	(0.52)	(0.33)	0.34	0.69	0.81	0.14	0.67	0.59	0.17	-0.63	-0.05	-1.09		
男鹿半島女川南方海底油微	—	—	43.0	32.0	25.0	(0.49)	(0.51)	0.44	0.65	0.74	0.16	0.91	0.60	0.22	0.35	-0.08	0.25	
男鹿中	上部天徳寺層	1.75	40.0	34.0	26.0	0.45	0.13	0.19	0.49	0.97	0.10	0.83	0.58	0.10	-2.14	-0.26	-0.36	
申川 a	船川層	1.35	41.1	35.0	23.9	0.47	0.23	0.29	0.72	0.75	0.13	0.77	0.58	0.18	-0.98	0.29	-0.22	
申川 b	船川層	1.51	42.0	33.1	24.9	0.48	0.30	0.33	0.61	0.72	0.14	0.85	0.59	0.19	-0.42	-0.07	0.04	
申川 c	船川層	1.63	42.5	32.5	25.0	0.49	0.32	0.36	0.64	0.65	0.13	0.64	0.59	0.20	0.20	0.29	-1.00	
橋本	—	1.54	41.7	34.2	24.2	0.46	0.21	0.22	0.63	0.86	0.12	0.68	0.60	0.14	-1.55	0.42	-0.48	
琴浜		36.0	37.1	26.8	(0.46)	(0.24)	0.25	0.63	0.75	0.14	0.81	0.59	0.19	-1.28	-1.11	-1.20		
福米沢	女川層	1.50	41.7	34.4	23.9	0.43	0.22	0.27	0.71	0.78	0.14	0.89	0.58	0.18	-1.16	0.51	0.30	
西大潟	船川層	1.35	43.6	33.0	23.5	0.50	0.28	0.26	0.92	0.79	0.17	0.93	0.61	0.21	-0.88	0.98	1.00	
福川	船川層	1.45	44.5	32.7	22.8	0.51	0.25	0.24	0.85	0.71	0.14	0.91	0.54	0.20	-0.87	1.17	1.20	
豊川	女川層	—	45.7	30.4	24.0	(0.66)	(2.09)	0.35	0.58	0.57	0.15	0.87	0.56	0.27	0.54	-0.01	1.23	
黒山	女川層	—	44.5	32.6	22.9	(0.54)	(0.66)	0.38	0.73	0.70	0.18	0.67	0.60	0.26	0.26	0.91	-0.26	
浦川合同	女川層	—	40.2	34.9	24.9	(0.45)	(0.31)	0.26	0.68	0.61	0.16	0.84	0.56	0.27	-0.52	-0.28	-0.03	
道川	女川層	—	—	—	—	(0.85)	—	0.33	0.70	0.65	0.17	0.91	0.56	0.26	-0.20	0.01	0.32	
濁川合同	船川層	—	39.9	35.8	24.3	0.42	0.26	0.32	0.68	0.69	0.15	0.78	0.56	0.22	-0.60	0.06	-0.67	
旭川合同(18坑)	船川層	1.56	40.0	32.4	27.6	0.54	0.48	0.36	0.72	0.64	0.18	0.78	0.57	0.28	0.50	-0.70	-0.97	
北秋田合同	女川層	1.66	42.1	34.5	23.4	0.48	0.29	0.34	0.84	0.65	0.19	0.79	0.57	0.29	-0.01	1.26	-0.66	
外旭川	女川層	1.50	42.4	34.1	23.5	0.41	0.20	0.30	0.58	0.62	0.16	0.90	0.58	0.25	-0.37	0.21	0.47	
高野合同	女川層	1.51	42.4	34.6	23.0	0.40	0.18	0.31	0.68	0.61	0.17	1.07	0.57	0.27	-0.45	0.57	1.11	
八橋合同(浅層)	桂根層	1.55	43.1	33.3	23.7	0.47	0.33	0.42	0.66	0.62	0.18	0.68	0.58	0.30	0.68	0.64	-0.88	
八橋合同(深層)	女川層	1.38	40.4	35.4	24.2	0.47	0.23	0.34	0.82	0.64	0.21	0.95	0.57	0.32	-0.11	0.30	0.03	
新屋合同	女川層	1.45	41.3	34.2	24.4	0.45	0.25	0.36	1.02	0.71	0.21	0.93	0.57	0.30	-0.01	0.97	-0.12	
仁井田	女川層	1.18	41.1	35.8	23.1	0.39	0.21	0.32	0.50	0.65	0.12	0.70	0.56	0.19	-0.71	-0.35	-0.19	
豊岩	女川層	1.16	40.5	34.7	24.8	0.36	0.20	0.34	0.44	0.61	0.12	0.82	0.54	0.20	-0.35	-1.21	0.22	
土崎沖混合	下部天徳寺, 女川層	1.34	43.5	33.4	23.1	0.43	0.30	0.37	0.80	0.74	0.21	0.79	0.60	0.29	0.05	0.82	0.04	
桂根混合	桂根層, 女川層	1.67	39.6	35.7	24.7	0.33	0.17	0.35	0.56	0.66	0.14	0.87	0.55	0.21	-0.47	0.05	-0.79	
北道川沖	—	1.50	41.1	36.5	22.4	0.38	0.23	0.32	0.67	0.70	0.15	0.75	0.57	0.22	-0.81	0.90	-0.66	
羽川	船川層	1.57	41.1	35.4	23.5	0.36	0.19	0.34	0.61	0.57	0.15	0.86	0.58	0.27	-0.15	0.37	-0.29	
田中	—	1.62	40.9	33.3	25.7	0.49	0.38	0.43	0.79	0.59	0.17	0.71	0.58	0.28	0.83	0.30	-1.46	
勝手	—	1.52	40.9	34.5	24.7	0.32	0.17	0.34	0.55	0.63	0.14	0.84	0.52	0.22	-0.26	-0.21	-0.26	
小友川油微	—	—	41.0	33.0	26.0	(0.53)	(0.37)	0.33	0.93	0.71	0.20	1.00	0.57	0.28	-0.06	0.05	0.39	
前郷油微	—	1.21	41.0	36.0	23.0	0.38	0.19	0.28	0.73	0.71	0.20	—	0.57	0.28	-0.80	0.24	0.29	
新子吉川	女川層	1.51	43.0	34.7	22.4	0.34	0.20	0.34	0.82	0.72	0.18	1.17	0.56	0.25	-0.66	1.25	1.41	
黒沢	西黒沢層	1.32	42.0	34.0	23.0	0.47	0.36	0.43	0.66	0.78	0.21	1.00	0.57	0.27	-0.05	0.35	0.52	
新鮎川	女川層	1.41	40.8	36.6	22.6	0.37	0.23	0.37	0.83	0.72	0.19	0.88	0.56	0.27	-0.51	1.09	-0.38	
由利原 a	西黒沢層	1.52	43.0	34.0	23.0	0.45	0.40	0.40	0.82	0.68	0.20	0.71	0.59	0.29	0.33	1.24	-0.79	
由利原 b	西黒沢層	1.47	43.0	33.0	24.0	0.45	0.37	0.42	0.57	0.65	0.18	—	0.57	0.28	0.48	0.11	0.03	
由利原 c	西黒沢層	1.29	45.0	34.0	22.0	0.50	0.43	0.44	0.83	0.65	0.21	—	0.58	0.32	0.52	1.27	0.43	
白雪川	船川層	1.33	41.0	36.0	23.0	0.51	0.39	0.31	0.81	0.76	0.25	—	0.62	0.33	-0.51	0.70	-0.15	
白雪川	女川層	1.24	39.0	36.0	24.0	0.50	0.37	0.32	0.69	0.74	0.23	—	0.60	0.31	-0.51	-0.24	-0.32	
白雪川南	船川層	1.28	40.0	35.0	25.0	0.49	0.48	0.39	0.69	0.69	0.20	0.69	0.61	0.29	0.20	-0.31	-1.15	
白雪川南	女川層	1.24	42.0	33.0	25.0	0.40	0.19	0.25	0.39	0.94	0.14	1.00	0.56	0.15	-1.64	-1.08	1.43	
子吉川河原 (猿倉油微)	—	—	—	—	—	—	—	0.35	0.44	0.67	0.19	0.90	0.56	0.28	-0.05	-0.64	0.29	
院内 (合同?)	—	0.99	40.0	36.0	24.0	0.54	0.42	0.33	0.71	0.60	0.24	0.85	0.58	0.40	0.05	-0.65	0.17	
院内	—	1.17	44.0	33.0	23.0	0.53	0.33	0.32	0.60	0.71	0.19	0.73	0.59	0.27	-0.17	0.04	0.50	
桂坂	—	1.35	40.0	35.0	25.0	0.42	0.34	0.33	0.52	0.56	0.18	1.06	0.59	0.33	-0.09	-0.92	0.75	
小滝 (合同?)	—	1.40	39.0	36.0	26.0	0.47	0.27	0.30	0.63	0.68	0.18	0.80	0.58	0.26	-0.49	-0.68	-0.79	
上浜 (合同?)	—	1.50	37.0	36.0	27.0	0.46	0.40	0.29	0.66	0.78	0.19	0.78	0.58	0.24	-0.74	-0.84	-1.45	
新象潟	船川層	1.06	37.0	35.0	28.0	0.47	0.25	0.35	0.52	0.76	0.17	—	0.53	0.22	-0.39	-2.31	-0.53	
新象潟	女川層	1.23	35.0	35.0	30.0	0.46	0.25	0.35	0.54	0.73	0.18	—	0.58	0.25	-0.12	-2.74	-1.27	
基礎試鑑(仁賀保)	女川層	1.20	41.0	26.0	34.0	0.34	0.15	0.24	0.27	0.74	0.23	0.93	0.53	0.31	-0.53	-2.03	1.05	
基礎試鑑(仁賀保)	青沢層	1.35	33.0	42.0	24.0	0.51	0.20	0.30	0.92	0.70	0.23	0.94	0.60	0.33	-0.21	0.63	0.48	
吹浦	—	1.67	40.4	35.6	24.1	0.49	0.32	0.38	0.73	0.67	0.19	0.81	0.59	0.28	-0.03	0.76	-1.14	
豊岡	草薙層	1.11	46.0	33.0	21.0	0.38	0.30	0.43	0.86	0.54	0.36	1.14	0.58	0.67	1.45	1.04	2.13	
鳥海原油	—	—	43.8	27.9	28.3	(0.47)	(1.58)	0.32	0.35	0.46	0.24	1.21	0.59	0.51	1.40	-2.46	2.53	
樽橋	—	—	48.7	28.4	22.9	(0.64)	(2.11)	0.44	0.60	0.50	0.28	1.03	0.60	0.56	1.98	0.41	2.17	
石名坂合同(14坑)	—	—	50.0	25.9	24.1	(0.66)	(2.09)	0.44	0.75	0.55	0.28	0.91	0.57	0.51	2.30	0.54	1.94	
砂越	—	1.67	43.6	32.5	23.8	0.52	0.60	0.56	1.29	0.58	0.39	0.77	0.62	0.67	2.75	2.37	-1.66	
新堀	—	1.48	39.2	36.1	24.7	0.44	0.35	0.45	0.82	0.63	0.29	0.87	0.55	0.46	0.88	0.33	-1.27	
余目販売用	—	1.56	43.3	32.3	24.3	0.49	0.44	0.47	1.05	0.57	0.31	0.90	0.60	0.54	1.78	1.28	-0.42	
新舟形	古口層	1.12	40.0	34.0	26.0	0.43	0.36	0.41	0.37	0.57	0.35	0.77	0.57	0.61	1.51	-1.96	-0.56	

—: not detected

() 付きのデータ: 微生物分解作用の影響を受けていると推定されるため, 因子分析には不使用。

Diaste./Sterane: C₂₇ 13β,17α-diacholestane (20S+20R)/C₂₇ 5α, 14α, 17α-cholestane (20S+20R)C₂₇, C₂₈, C₂₉: 5α-20RTricyc.: C₂₈+C₂₉ Tricyclic terpene 22S+22R Hopane: 17α (H), 21β (H)-hopaneC₂₉ S/(S+R): 5α 20S/(20S+20R)

Norhop.: 17α (H), 21β (H)-30-norhopane

Homoh.: 17α (H), 21β (H) Homohopane 22S+22R

Olean.: 18α (H)-oleanane

C₃₂ S/(S+R): 17α (H), 21β (H) 22S/(22S+22R)

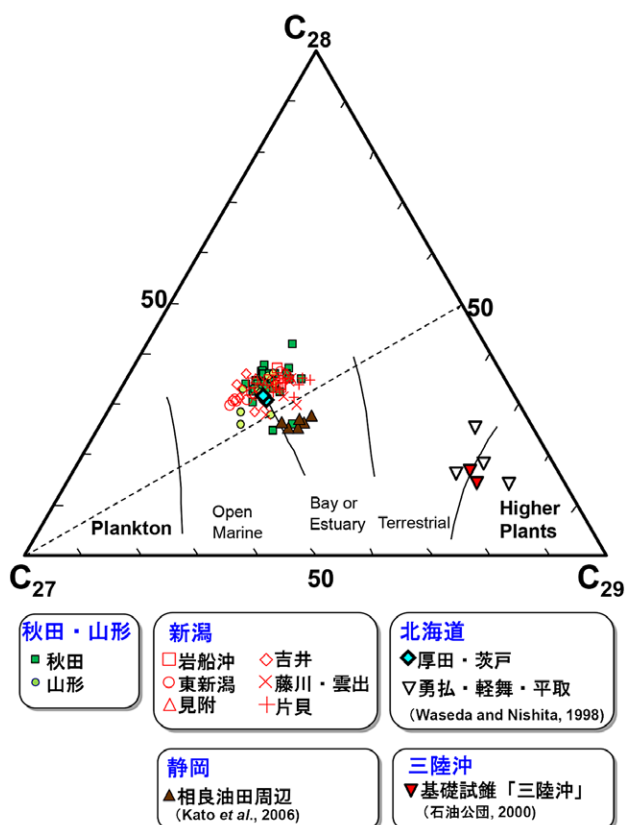


図2 原油の C₂₇, C₂₈, C₂₉ ステランの相対組成
堆積環境の区分は Huang and Meinschein (1979) による。

起源とすることは分かるが、地域的な違いは認められない (図2)。ただし、さらに多くのバイオマーカー指標を加えて統計的に解析すれば、より詳細な根源岩相の地域的な差が現れる可能性がある。そこで、バイオマーカー・データを使った多変量解析 (因子分析) を行った。解析には汎用統計解析ソフト (StatSoft 社製 Statistica) を用いた。

3.1.1 因子分析の手順・方法

原油のバイオマーカー組成に影響する主要な要因には有機物起源および根源岩相の他に熟成度、微生物分解がある。今回は微妙な根源岩相の違いを検出することが目的であるため、Peters *et al.* (2005) などを参考にして根源岩相を主に反映するとされる以下の10指標を選択した。

プリスタン/フィタン, C₂₇ ステラン%, C₂₈ ステラン%, C₂₉ ステラン%, ジアステラン/ステラン, Ts/(Ts+Tm), トリサイクリックテルパン/C₃₀ ホパン, ノルホパン/C₃₀ ホパン, オレオナン/C₃₀ ホパン, C₃₅/C₃₄ ホモホパン

微生物分解作用の影響により測定不能の場合や測定値は得られても明らかに微生物分解作用の影響があると判断したデータは因子分析に使用せず、欠損値として全試料の平均値で代用した。

上記の指標のうち、Ts/(Ts+Tm) やジアステラン/ステランは根源岩相に加えて熟成度の影響を受けるといわれ

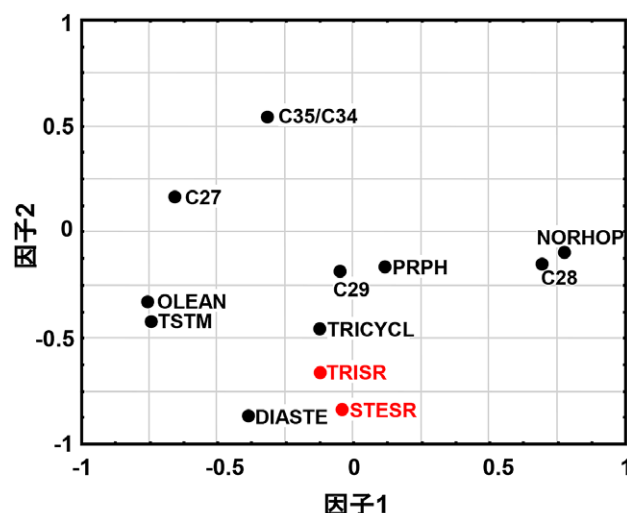


図3 根源岩相を主に示すとされるバイオマーカー10指標と熟成度2指標の計12指標による因子分析 (因子負荷図)

PRPH: プリスタン/フィタン, C₂₇: C₂₇/(C₂₇+C₂₈+C₂₉) ステラン, C₂₈: C₂₈/(C₂₇+C₂₈+C₂₉) ステラン, C₂₉: C₂₉/(C₂₇+C₂₈+C₂₉) ステラン, DIASTE: ジアステラン/ステラン, TRICYCL: トリサイクリックテルパン/C₃₀ ホパン, TSTM: Ts/(Ts+Tm), OLEAN: オレオナン/C₃₀ ホパン, NORHOP: C₂₉ ノルホパン/C₃₀ ホパン, C₃₅/C₃₄: C₃₅/C₃₄ ホモホパン, STESR: C₂₉ ステラン 20S/(20S+20R), TRISR: C₃₂ トリテルパン 22S/(22S+22R)

ている (Peters *et al.*, 2005)。そこで各指標に熟成度の影響があるかどうかを確かめるため、これらにステラン熟成指標 C₂₉ 20S/(20S+20R), トリテルパン熟成度指標 C₃₂ 22S/(22S+22R) を加えた12指標で予備的な因子分析を実施した。ステラン熟成指標 C₂₉ 20S/(20S+20R) については、微生物分解の影響を受けていると判断した試料を除いて、0.32 から 0.54 の範囲で変動しており (表1)、地域的な変化については横井ほか (2013) で報告している。

熟成度指標を加えた12指標による因子分析結果 (因子負荷) を図3に示す。ステランとトリテルパンの熟成指標 (図3中の STESR と TRISR) は、第一因子 (因子1) の負荷は0に近く、因子2に負の負荷を示している。したがって、第二因子 (因子2) は熟成度を反映していると推定される。ジアステラン/ステランはステラン, トリテルパンの熟成指標よりも強い負の負荷を因子2に示しており、根源岩相よりも熟成度の影響を強く受けている可能性が高い。Inaba *et al.* (2001) は、秋田県八橋油田の女川層および船川層泥岩のジアステラン量は粘土鉱物量とともに熟成度にも相関していることを示している。Chakhmakhchev *et al.* (1996) も、秋田～新潟原油の因子分析の結果からジアステラン量は熟成度に主に規制されていることを示している。一方、一般に熟成度の影響を受けるとされている Ts/(Ts+Tm) は因子2に強い負荷を示しておらず、今回

用いた試料については熟成度の影響は小さいと判断した。この結果から、10 指標からジアステラン/ステランのみを除いた 9 指標で最終的な因子分析を行った。

3.1.2 因子分析結果と因子の解釈

9 指標（プリスタン/フィタン, C_{27} ステラン%, C_{28} ステラン%, C_{29} ステラン%, $Ts/(Ts+Tm)$), トリサイクリックテルパン/ C_{30} ホパン, ノルホパン/ C_{30} ホパン, オレアナンの/ C_{30} ホパン, C_{35}/C_{34} ホモホパン) による因子分析の結果, 因子 1 (寄与率 32%), 因子 2 (同 17%), 因子 3 (同 15%) が抽出された。因子 1 と 2 の因子負荷図を図 4 上に, 因子 1 と因子 3 の因子負荷図を図 4 下に示す。

(1) 因子 1

因子 1 に強い正の負荷を示すのは $Ts/(Ts+Tm)$ とオレアナンの/ C_{30} ホパン, 負の負荷を示すのが C_{28} ステラン%とノルホパン/ C_{30} ホパンである。オレアナンは陸上被子植物が主な起源とされるが, 原油中のオレアナンの含有量は

陸上植物の寄与量には必ずしも相関しない。Murray *et al.* (1994) は, 炭素同位体組成から陸上植物の寄与は小さいと推定される海成根源岩起源の原油にオレアナが多く含まれる場合があることを報告している。その原因として, 植物起源有機物と海水との接触がオレアナンの保存を促進することが指摘されている (Murray *et al.*, 1997)。また, $Ts/(Ts+Tm)$ は泥質岩で高く, 炭酸塩岩で低いことが分かっている (Price *et al.*, 1987)。

海成根源岩起源と考えられる原油においては C_{28}/C_{29} ステランが地質時代とともに増加していることから, C_{28} ステランは, ジュラ紀や白亜紀における珪藻や円石藻, 渦鞭毛藻を含む植物プランクトンの多様性の増大と関連している可能性がある (Grantham and Wakefield, 1988)。秋田地域原油の根源岩として考えられている女川層頁岩は全体的に珪質である (辻ほか, 1991; 渡部ほか, 1995; 早稲田ほか, 1995) ことから, C_{28} ステラン%は珪質であるほど高い可能性がある。また, ノルホパン/ホパンは炭酸塩根源岩や蒸発岩で高いといわれている (Clark and Philp, 1989)。以上の考察から因子 1 については岩質の違い [碎屑質 (粘土質) vs. 非碎屑質 (石灰質/珪質)] を主に反映していると解釈した。

(2) 因子 2

因子 2 に強い負荷を示す指標はトリサイクリックテルパン/ C_{30} ホパンと C_{29} ステラン%である (図 4 上)。トリサイクリックテルパンは湖成および海成根源岩に広く含まれる (Peters *et al.*, 2005)。一方, C_{29} ステランの前駆体である C_{29} ステロールは現世の陸上植物や陸源有機物に多く含まれる (Huang and Meinschein, 1979)。したがって, 因子 2 は起源有機物の違い (海洋藻類 vs. 陸上植物) を主に反映していると解釈した。

(3) 因子 3

因子 1 と因子 2 に負荷がほぼ 0 で因子 3 に強い負荷を示すのは C_{35}/C_{34} ホモホパンである (図 4 下)。この指標は海洋堆積物の続成における酸化還元電位を反映し, この指標が高いほど還元的であったことを示す (Peters and Moldowan, 1991)。プリスタン/フィタン (Pr/Ph) も堆積場の酸化還元環境の指標として使われており, 酸化的環境ほどこの指標は高くなる (例えば Didyk *et al.*, 1978)。因子分析の結果では, 因子 3 に強くはないが負の負荷を示している。以上の結果から因子 3 は堆積場の酸化還元環境を反映していると解釈した。

Pr/Ph は因子 2 (有機物の起源) にも正の負荷を示している。一般に陸上植物起源の寄与が多いほど, 酸化的環境である可能性が高いため, Pr/Ph が高いほど陸上植物の寄与が大きくなると予想される。しかし, 因子分析の結果は逆になっている。この原因は不明であるが, プリスタンおよびフィタンには複数の起源が考えられている (Peters *et al.*, 2005) ことと関連しているかもしれない。

3.1.3 各原油試料の根源岩相

各原油試料における因子 1 と因子 2 のスコアを表 1 と図 5 に示す。因子 1 の違いにより, 0.85 以上を示す山形堆積

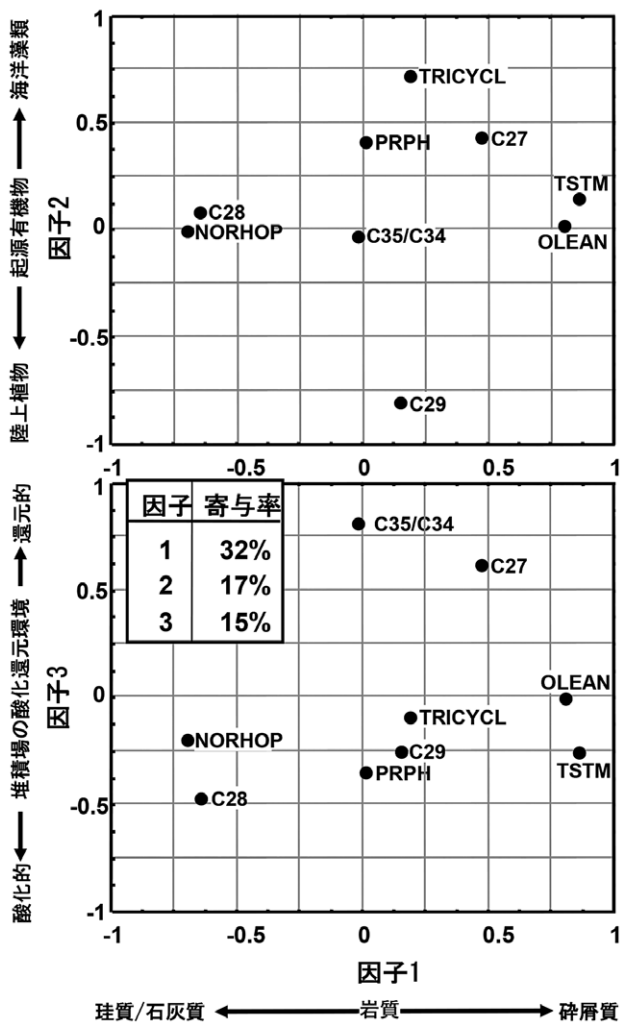


図 4 秋田・山形地域における原油の因子分析結果 (因子負荷図)

上図: 因子 1 と因子 2, 下図: 因子 1 と因子 3, 指標の略号は図 3 と同じ。

盆と0.85以下を示す秋田堆積盆の原油に分かれる。山形堆積盆の原油は秋田堆積盆に比べて碎屑質な根源岩から生成し、秋田堆積盆の原油はより珪質 / 石灰質な根源岩から生成したと推定される。

秋田堆積盆の原油は、因子2に強い負の負荷を示す仁賀保地域のいくつかの試料や山形原油と同様な領域にプロットされる北秋田地域の八森油田を除いて、比較的狭い領域に入る。しかし、詳細にみると地域的な違いが認められる。因子1を三分割、因子2を二分割して6種類に分類したところ地域による特徴がみられた(図5, 6)。分割値(因子1の0と0.85, 因子2の0.1)は地域的な違いが出るように試行錯誤で決定した。各地域における原油を生成した根源岩の特徴は以下のようにまとめられる。

- (1) 秋田地域は山形地域よりも珪質 / 石灰質である。
- (2) 湖西は北秋田, 男鹿に比べて海洋有機物に富む。
- (3) 八橋周辺では、西側の背斜系列が東側の背斜系列に比べて海洋有機物に富む根源岩から生成したと推定される。この地域の根源岩分布域は東西両系列の間の向斜部と西系列の西側の向斜部が考えられる。西側の向斜部の根源岩は両系列の間の向斜部の根源岩よりも海洋有機物に富み、西系列のみに油を供給した可能性がある。
- (4) 鮎川・由利原地域と仁賀保地域では、東側の鮎川・由利原地域の方が海洋有機物に富む。この位置関係は、前述の八橋周辺とは逆である。この理由は明確ではないが、根源岩堆積時の海底地形の違いや水深の違いなどにより海洋藻類と陸上植物の寄与率が変化した可能性が考えられる。
- (5) 鮎川地域は山形原地域よりも珪質 / 石灰質である。

3.2 因子分析による原油と根源岩(女川層, 西黒沢層)の対比

秋田堆積盆の原油の根源岩層としては、女川層が有機物の量・質ともに最も優秀である(早稲田・重川, 1990)。しかし、その下位の西黒沢層泥岩も地域によっては高い根源岩能力を示す(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)。そこで、鮎川・由利原地域坑井の女川層および西黒沢層コアの根源岩抽出物についてバイオマーカーの因子分析結果に基づき、原油との対比を行った。前節の原油の因子分析に使った9指標のうち、原油に比べて根源岩抽出物では欠損値が多いプリスタン / フィタンと C_{35}/C_{34} ホモホパンを除いた7指標により因子分析を行った。

因子負荷図を図7の左上に示す。因子1はノルホパン/ C_{30} ホパンが大きな正の負荷を示し、 $Ts/(Ts + Tm)$ およびオレアナン/ C_{30} ホパンが負の負荷を示す。この結果は、正負が逆であることと C_{28} ステラン%が負荷を示さないことを除いて原油のみの因子分析の因子1と同じ傾向である。3.1.2項で考察した各指標の特徴から、ここでの因子1は石灰質か碎屑質かを示す因子と解釈した。因子2は C_{27} ステラン%, C_{28} ステラン%が大きな正と負の負荷を示す。 C_{27} ステランの前駆体である C_{27} ステロールは現世の海洋プランクトンに多く含まれる(Huang and Meinschein,

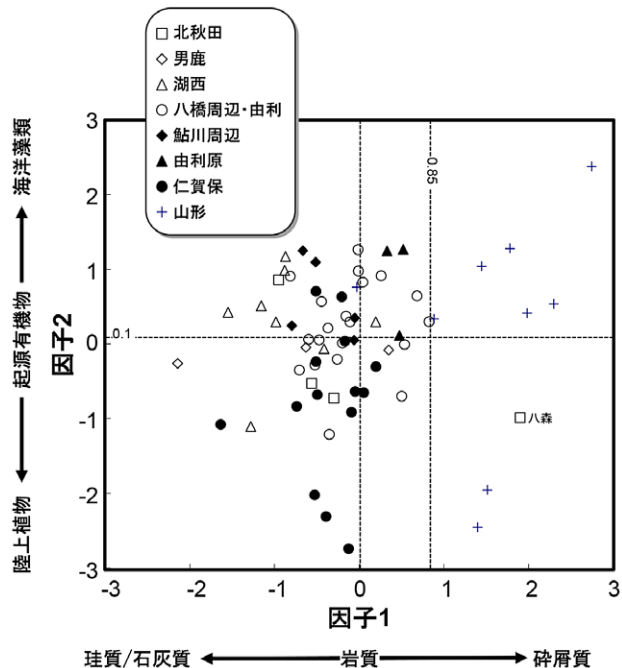


図5 秋田・山形地域における原油の因子分析結果(因子1と因子2のスコア・プロット)

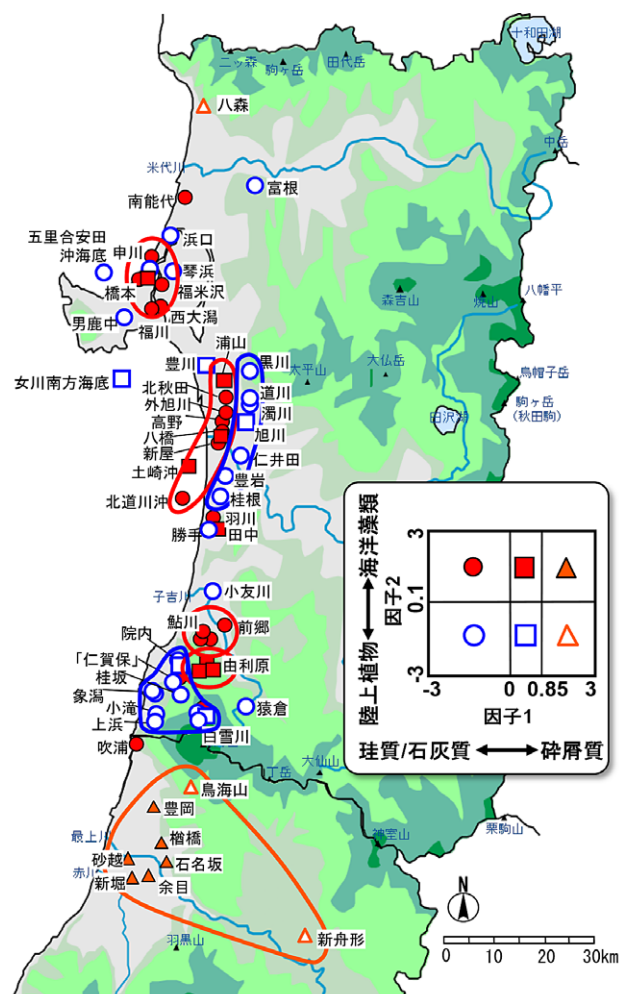


図6 秋田・山形地域における原油の因子分析結果からみた根源岩の分類結果

1979)。前述したように C_{28} ステランは珪藻の寄与を示す指標と考えられる。したがって、藻類における珪藻の寄与の大きさが主な因子と解釈した。

各試料の因子スコアを図7に示す。根源岩は西黒沢層と女川層で異なる因子負荷を示し、西黒沢層は女川層に比べて珪藻以外の藻類からの寄与が大きく、より石灰質であると解釈できる。秋田地域の原油は女川層根源岩と図7における分布範囲がほぼ重なり、両者は対比されるが、西黒沢層には対比されない。また、山形地域の原油は秋田地域より碎屑質な根源岩から生成したと推定される。この結果は前項でみた原油のみの因子分析の結果と一致している。

3.3 原油因子分析の因子1と因子2を代表する指標の抽出

秋田・山形原油の因子分析では、因子1は根源岩の岩質の違い（碎屑質 vs. 珪質 / 石灰質）を反映すると解釈した。因子1に正および負の強い負荷を示す指標はオレアナ / C_{30} ホパンとノルホパン / C_{30} ホパンである。両指標は因子2（海洋藻類 vs. 陸上植物）と因子3（還元的 vs. 酸化的）にはほとんど負荷を示さない（図4）。オレアナ / C_{30} ホパンが、因子2に負荷を示さないことは、その起源とされる陸上被子植物の寄与率を反映していないことを示す。以上の考察から因子1に正の負荷を示すオレアナ / C_{30} ホ

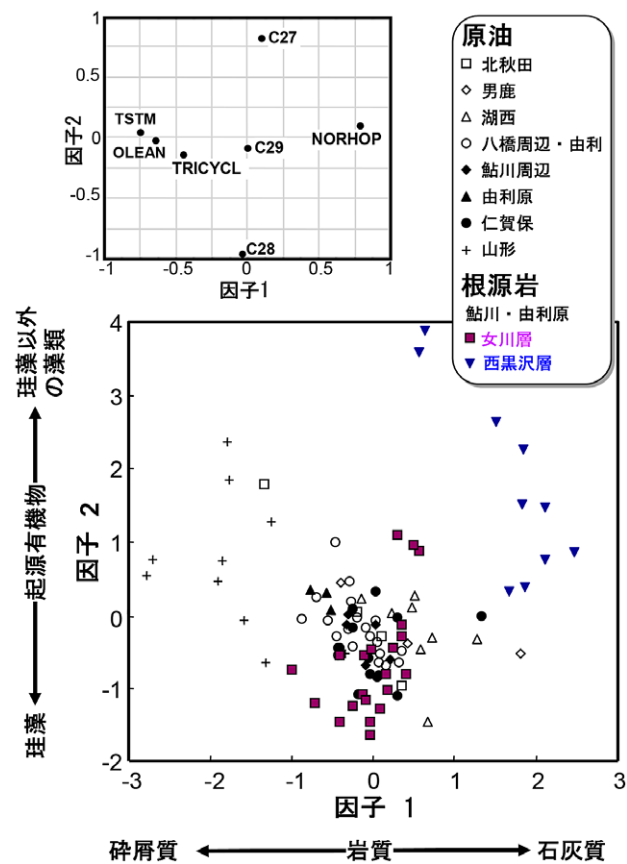


図7 鮎川・由利原油・ガス田の女川層および西黒沢層コア試料と原油の因子分析による原油－根源岩対比

パンと負の負荷を示すノルホパン / C_{30} ホパンの比（オレアナ / ノルホパン）は、海成根源岩の岩質の違いを表す指標として広く使える可能性がある。

同様に、因子2については、 C_{29} ステラン%が最も強い負荷を示しており、因子1および3に対する負荷は小さい（図4）。トリサイクリックテルパン / C_{30} ホパンも C_{29} ステラン%に次いで因子2に高い負荷を示しており因子1および3に対する負荷も小さいが、熟成度の影響が比較的強い（図3）。したがって、 C_{29} ステラン%が起源有機物の違い（海洋藻類 vs. 陸上植物）を表す指標として最も有効と考えられる。

秋田・山形原油について横軸にオレアナ / ノルホパン、縦軸に C_{29} ステラン%を取った結果を図8に示す。データは因子スコア・プロットの結果（図5）と同様な分布を示すことから、この二成分図が海成根源岩の分類に有効と考えられる。

4. 新潟、北海道～常磐沖、静岡地域における原油バイオマーカーによる根源岩相の推定

4.1 新潟地域

新潟地域の27坑井から採取した原油のバイオマーカー分析データを表2に示す。オレアナ / ノルホパンと C_{29} ステラン%の関係を図9に示す。オレアナ / ノルホパンは平井ほか（1995）で頸城型原油と新津型原油の分類に使われた指標であり、この比が1より高いものを頸城型、1より低い原油を新津型としている。今回の分析結果では、岩船沖油・ガス田、東新潟ガス田、見附油田、吉井ガス田の原油は新津型に分類される（図9）。一方、藤川ガス田、

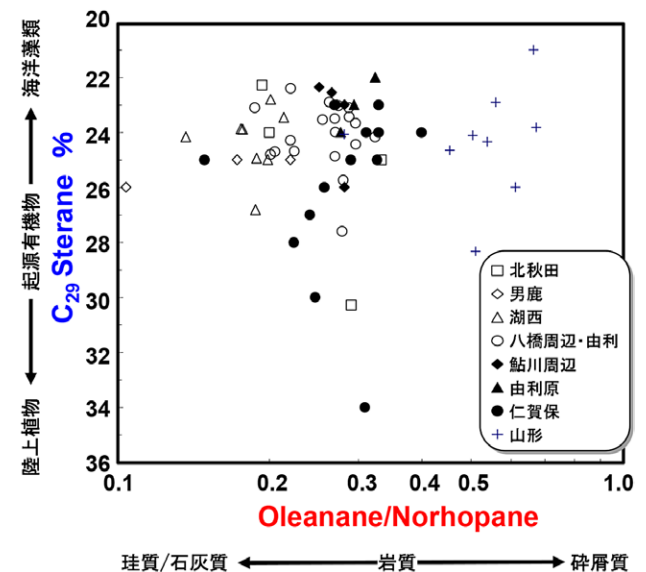


図8 秋田・山形地域における原油のノルホパン / オレアナと C_{29} ステラン%の関係

図5との比較の関係から C_{29} ステラン%は軸を反転（上ほど低い値に）して示している。

雲出ガス田、片貝ガス田の原油は 8 試料中 6 試料のオレアナ／ノルホパンが 1 以上で頸城型と判断される。残り 2 試料は 0.8 から 1 の間を示しており、今回の分析結果では、頸城型と新津型の境界は 0.8 付近が適当と考えられる。

平井ほか（1995）は、頸城型と新津型はステラン C_{27} , C_{28} , C_{29} の三角ダイアグラム上で 2 つには分かれられないものの頸城型は新津型に比べて C_{29} ステランに富む傾向が認められることから、頸城型は新津型よりも相対的に陸源有機物の供給が大きい根源岩から生成した油であるとしている。今回の分析結果でもステラン C_{27} , C_{28} , C_{29} の三角ダイアグラム上で同様な分布が認められる（図 2）。また、図 9 の新潟地域原油では、新津型（オレアナ／ノルホパン < 0.8）の C_{29} ステラン % は 20.8 ～ 28.1，頸城型（オレアナ／ノルホパン > 0.8）が 26.4 ～ 32.0 を示し、新津型が頸城型よりも海洋藻類の寄与が全般的に高く、オレアナ／ノルホパンと C_{29} ステラン % の間には正の相関関係が認められる。一方、前述したように秋田・山形原油の因子分析の結果ではオレアナ／ノルホパンは有機物の起源よりも岩質を反映していると考えられ、オレアナ／ノル

ホパンと C_{29} ステラン % の間には相関関係が認められない（図 8, 9）。山形地域の原油は新潟地域の新津型原油とほぼ同じオレアナ／ノルホパンおよび C_{29} ステラン % を示している。秋田地域の原油は新潟の新津型原油よりもオレアナ／ノルホパンがさらに低く、珪質／石灰質な根源岩から生成したと解釈される（図 9）。新潟地域の頸城型原油では、秋田・山形地域よりも海洋藻類起源有機物の寄与が低く、より碎屑質な根源岩になることによって、秋田・山形地域では認められなかったオレアナ／ノルホパンに対する有機物起源の影響（海洋藻類に対する陸上植物起源の寄与の増加）が顕著になり、新潟地域全体においてオレアナ／ノルホパンと C_{29} ステラン % との間に相関関係が現れてきたと推定される。

加藤ほか（2017）は、東山油田周辺における原油についてオレアナ／ノルホパンから大面油田、見附油田、東山油田は新津型、西長岡油・ガス田は頸城型であることを示している。今回の結果と平井ほか（1995）、加藤ほか（2017）の結果をまとめて、新潟堆積盆における新津型と頸城型原油の分布を図 10 に示す。新潟地域の北東側が新津型、南

表 2 新潟地域原油のバイオマーカー分析結果

試料名	産出層名	Pristane/ Phytane	ステラン				トリテルパン						
			C_{27} (%)	C_{28} (%)	C_{29} (%)	C_{29} S/(S+R)	Ts/ (Ts+Tm)	Tricyc./ Hopane	Norhop./ Hopane	Olean./ Hopane	C_{35}/C_{34} Homoh.	C_{32} S/(S+R)	Olean./ Norhop.
岩船沖 a	西山層	2.99	38.2	36.9	24.9	0.48	0.29	0.84	0.59	0.23	—	0.57	0.39
岩船沖 b	西山層	1.76	39.4	33.5	27.1	0.46	0.35	0.74	0.59	0.27	0.73	0.61	0.47
岩船沖 c	西山層	1.45	39.5	33.9	26.6	0.47	0.37	0.79	0.55	0.27	0.78	0.62	0.49
岩船沖 d	西山層	1.47	39.5	33.0	27.5	0.47	0.36	0.79	0.57	0.27	0.91	0.61	0.47
岩船沖 e	西山層	1.46	43.9	33.9	22.2	0.50	0.41	0.91	0.51	0.29	0.76	0.60	0.57
岩船沖 f	西山層	1.46	40.9	34.5	24.7	0.51	0.35	0.73	0.52	0.26	0.76	0.59	0.50
東新潟 a	椎谷層	1.67	39.8	34.5	25.7	0.50	0.40	0.70	0.58	0.25	0.84	0.59	0.43
東新潟 b	椎谷層	1.52	38.1	36.1	25.8	0.51	0.42	0.67	0.60	0.26	0.63	0.59	0.44
東新潟 c	椎谷層	1.36	40.2	33.4	26.5	0.49	0.39	0.50	0.51	0.23	0.86	0.58	0.45
東新潟 d	椎谷層	1.96	48.6	30.7	20.8	0.46	0.46	1.11	0.71	0.27	0.76	0.59	0.38
東新潟 e	椎谷層	2.00	46.6	30.5	22.9	0.46	0.46	1.06	0.66	0.27	0.68	0.57	0.41
東新潟 f	椎谷層	2.57	45.1	31.8	23.0	0.48	0.47	0.90	0.63	0.24	0.72	0.54	0.39
見附 a	椎谷層	1.43	37.1	35.8	27.2	0.34	0.45	0.34	0.49	0.28	0.78	0.57	0.57
見附 b	下部寺泊層	0.95	42.9	34.8	22.3	0.35	0.49	0.47	0.58	0.24	0.75	0.56	0.41
見附 c	七谷層	2.02	36.8	35.1	28.1	0.44	0.51	0.45	0.47	0.31	0.74	0.57	0.65
見附 d	七谷層	1.51	37.6	35.8	26.6	0.46	0.50	0.45	0.44	0.30	0.77	0.56	0.67
藤川 a	椎谷層	4.08	44.8	27.5	27.7	0.51	0.58	0.57	0.57	0.48	0.80	0.59	0.85
藤川 b	上部寺泊層	2.50	38.6	29.5	32.0	0.57	0.59	0.29	0.45	0.63	0.54	0.56	1.39
雲出 a	西山層	2.03	44.3	29.4	26.4	0.55	0.58	0.50	0.46	0.52	0.57	0.60	1.14
雲出 b	西山層	1.15	37.4	34.2	28.4	0.50	0.61	0.43	0.48	0.58	0.49	0.58	1.21
吉井 a	七谷層	1.79	46.4	28.1	25.4	0.47	0.55	0.71	0.78	0.36	1.18	0.61	0.46
吉井 b	七谷層	0.53	47.6	30.9	21.5	0.49	0.47	0.60	0.72	0.30	0.85	0.59	0.42
吉井 c	七谷層	0.79	44.8	31.3	23.9	0.52	0.57	0.79	0.65	0.46	0.81	0.61	0.71
片貝 a	上部寺泊層	1.31	41.3	32.0	26.7	0.51	0.61	0.50	0.48	0.68	0.56	0.60	1.43
片貝 b	下部寺泊層	1.49	40.0	32.5	27.5	0.57	0.59	0.64	0.56	0.67	0.50	0.60	1.20
片貝 c	下部寺泊層	1.96	34.9	34.9	30.2	0.54	0.48	0.34	0.52	0.58	0.70	0.58	1.13
片貝 d	下部寺泊層	1.07	36.1	33.6	30.4	0.53	0.56	0.37	0.46	0.43	0.74	0.57	0.93
— : not detected			Tricyc.: $C_{28} + C_{29}$ Tricyclic terpane 22S+22R				Hopane: 17 α (H), 21 β (H) -hopane						
C_{27} , C_{28} , C_{29} : 5 α -20R			Norhop.: 17 α (H), 21 β (H) -30-norhopane				Homoh.: 17 α (H), 21 β (H) Homohopane 22S+22R						
C_{29} S/(S+R): 5 α 20S/(20S+20R)			Olean.: 18 α (H) -oleanane				C_{32} S/(S+R): 17 α (H), 21 β (H) 22S/(22S+22R)						

西側に頸城型が分布する。吉井ガス田は周囲が頸城型でありながら新津型を示している。

秋田～山形～新潟堆積盆全体でみると、オレオナン／ノルホパンは秋田<0.35<山形・新潟（新津型）<0.8<新潟（頸城型）となっている（図9）。したがって、東北日本の日本海側ではほぼ北東から南西に向かって原油を生成した根源岩は珪質／石灰質なものから碎屑質なものへ変化していると考えられる。この傾向は、秋田の主要根源岩である女川層がシリカの含有量が高い珪質岩であるのに対して、新潟の主要根源岩層である寺泊層が通常の泥質岩であること（鈴木，1979；飯島，1992）と整合的である。起源有機物については、前述したように、新潟の頸城型原油は海洋藻類に対する陸上植物の寄与が新津型よりも大きい傾向は認められるものの、その他の地域では試料によるバラツキが大きく、地域間での顕著な差は認められない。

4.2 北海道～三陸沖～常磐沖

北海道の原油については、古第三系石狩層群夾炭層を起源とする陸上植物起源の原油と、秋田～新潟地域と同様の新第三系海成泥岩を起源とする海洋藻類起源の原油があることが分かっている（西田ほか，1997；Waseda and Nishita, 1998）。夾炭層起源の原油は北海道道央部の石狩層群夾炭層の分布範囲とほぼ一致している。海洋藻類起源の原油には、石狩湾周辺の厚田・茨戸油田と道東および道南の油徴が含まれる。

厚田・茨戸油田原油のステラン C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 組成は秋田・

山形～新潟原油と同様な値を示し、海成根源岩起源であることを示す（図2）。オレオナン／ノルホパンは0.8以下を示し、新津型原油と同様に比較的珪質／石灰質な根源岩から生成したと推定される（図9）。 C_{29} ステラン%からみた起源有機物は、秋田・山形および新潟の新津型原油の平均的な値を示している（図9）。

一方、勇払油・ガス田、軽舞油田、平取油田原油は、 C_{29} ステランに富む陸上植物（石炭・炭質泥岩）起源の原油に特徴的な組成を示す（図2）。夾炭層は日高沖、三陸沖から常磐沖まで白亜紀前弧堆積盆地に広く分布している。基礎試錐「三陸沖」の産出テストで得られた原油のステラン組成（石油公団，2000）は北海道の夾炭層起源原油と同じ組成を示し、石炭あるいは炭質泥岩が根源岩であることを示す（図2）。基礎試錐「三陸沖」では始新統石狩層群相当層から上部白亜系函淵層群相当層に石炭層・炭質泥岩層が夾有されている（大澤ほか，2002）。また、磐城沖ガス田を含む常磐沖における根源岩はマーストリヒト階から古第三系の「石炭」と考えられている（岩田ほか，2002）。

4.3 静岡・相良油田周辺

静岡県の相良油田は本邦太平洋岸唯一の油田である。産油層は、中新統相良層群最下部時ヶ谷層の砂礫岩である（天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会，1992）。相良油田の原油については、2002年に海洋科学技術センター（現：海洋研究開発機構）および静岡大学が共同で掘削した「相良学術ボーリング」と相良油田の旧坑井から採取された原油6試料（相良原油）についてバイオマーカー分析データが報告されている（Kato *et al.*, 2006）。ステラン

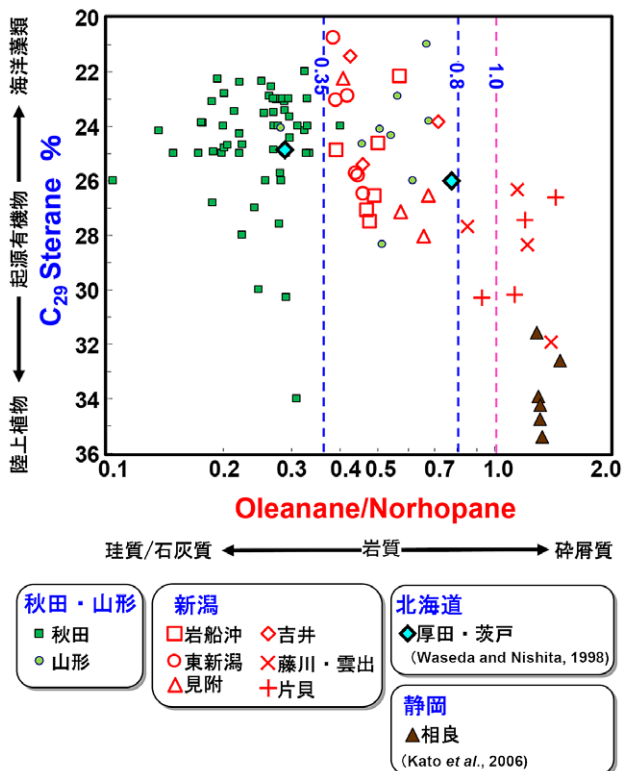


図9 国内各地域における原油のノルホパン／オレオナンと C_{29} ステラン%の関係

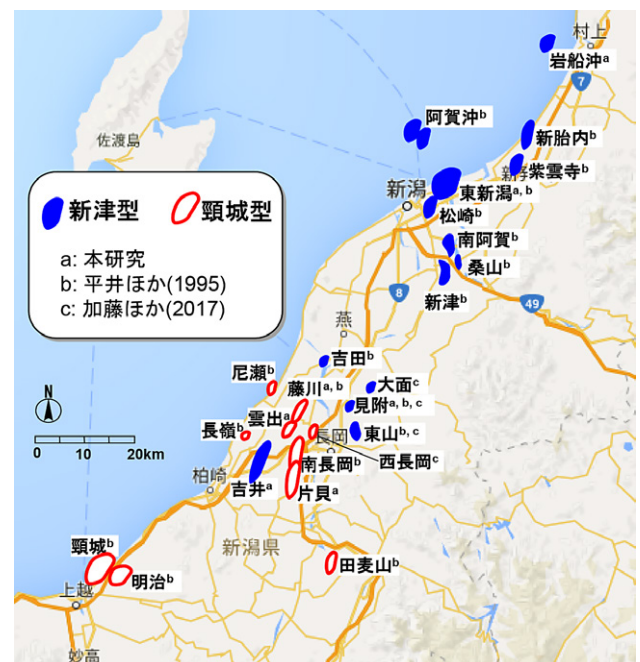


図10 新潟地域における新津型原油と頸城型原油の分布

C₂₇, C₂₈, C₂₉ 炭素数分布は秋田～新潟原油に近い組成を示し、海成根源岩から生成したことを示す (図 2)。ただし、秋田～新潟原油および北海道の海成原油のほとんどのステラン C₂₈/C₂₉ が 1 以上であるのに対して、相良油田周辺原油は 1 以下となっている。海成根源岩起源原油のステラン C₂₈/C₂₉ は地質時代が新しくなるほど高くなる傾向がある (Grantham and Wakefield, 1988)。このことは、相良油田周辺原油は秋田～新潟原油よりも時代的に古い根源岩から生成した可能性が高いことを示す。根源岩の年代については、次章で炭素同位体組成からさらに考察する。

オレオナン / ノルホパンは 1.3 ～ 1.5 を示し、新潟の頸城型原油と同様に比較的碎屑質な根源岩から生成されたと推定される (図 9)。C₂₉ ステラン % からみた起源有機物は、他の地域に比べて最も陸上植物の寄与が大きいことを示す (図 9)。また、プリスタン / フィタンは新潟地域原油よりも高い値を示し、より酸化的環境で根源岩が堆積したことを示す (Kato *et al.*, 2006)。Yessalina *et al.* (2006) は、相良原油について植物起源バイオマーカーを多く含むことなどから、沿岸から河川 - デルタ成の碎屑質根源岩から生成したと推定している。

5. 原油の炭素同位体組成からみた根源岩の年代

原油の炭素同位体組成はその原油を生成した根源岩の炭素同位体組成と密接に関連している。根源岩の炭素同位体組成は地質年代が新しくなるにしたがって値が重くなる傾向がある。Andrusevich *et al.* (1998) は、過去 6 億年間

を 13 の区間に分け、根源岩の年代や堆積環境が地質・地化学データから推定されている原油 514 試料の飽和炭化水素の炭素同位体組成を測定した。その結果、海洋泥岩、炭酸塩岩、石炭などの有機物相にはほぼ関係なく、時代による $\delta^{13}\text{C}$ 値の変化が認められ、カンブリア紀 / オルドビス紀、三疊紀 / ジュラ紀、古第三紀 / 新第三紀の境界で $\delta^{13}\text{C}$ 値が正にシフトしていることが分かった (図 11)。このシフトの原因は必ずしも明らかではないが、有機質の膜から石灰質の殻、珪酸質の殻というように植物プランクトンの殻のタイプの進化との関連が指摘されている (Andrusevich *et al.*, 1998)。

秋田～新潟の原油の飽和炭化水素 $\delta^{13}\text{C}$ 値は -23.9 ～ -21.6‰ で (早稲田, 1993) 新第三紀原油の組成範囲に入る (図 11)。また、前述したように海成頁岩起源と考えられる北海道の厚田・茨戸油田原油の飽和炭化水素 $\delta^{13}\text{C}$ 値は -23.4 と -22.8‰ (Waseda and Nishita, 1998) で秋田～新潟原油の組成範囲に入り、同時代 (中新統) の根源岩から生成したことを支持する。一方、勇払油・ガス田、平取油田、軽舞油田などの北海道道央部の夾炭層起源の原油の飽和炭化水素 $\delta^{13}\text{C}$ 値は -27.8 ～ -26.4‰ を示す (Waseda and Nishita, 1998)。この値は古第三紀原油の組成範囲に入っており、石狩層群夾炭層が根源岩であることを支持する。同様にステラン組成から陸上植物起源と推定される基礎試錐「三陸沖」の原油は -26.3 ～ -26.0‰ の飽和炭化水素 $\delta^{13}\text{C}$ 値を示し (石油公団, 2000)、やはり古第三系夾炭層が根源岩の可能性が高いことを示す。

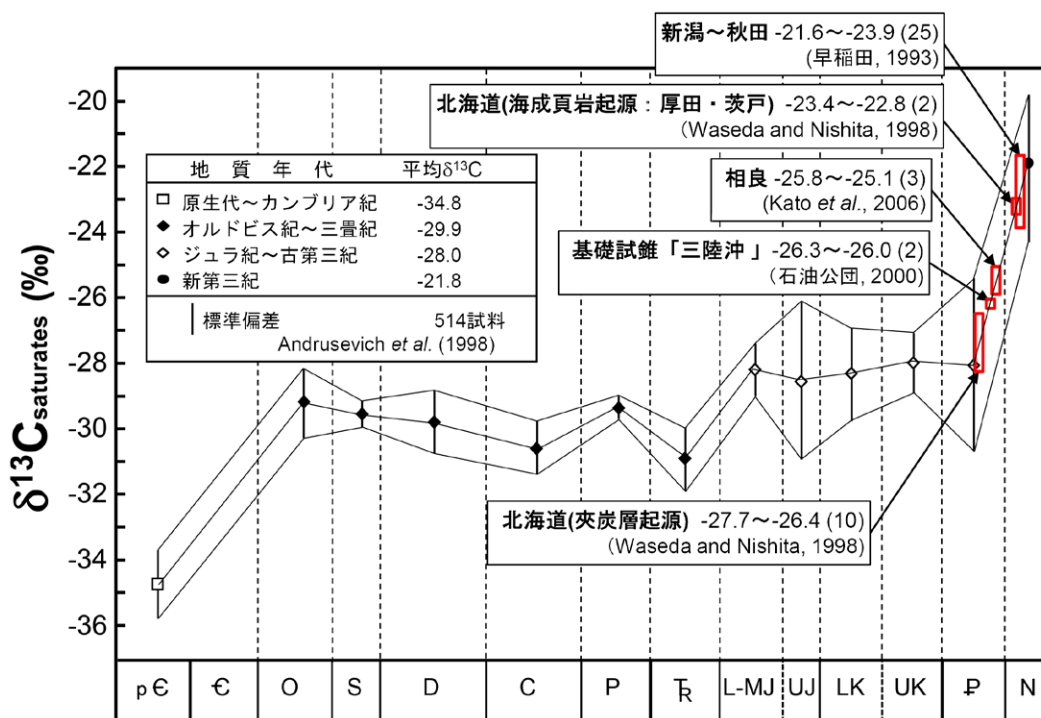


図 11 原油の飽和炭化水素・炭素同位体組成の地質年代における変化と国内原油の炭素同位体の組成範囲

() 内: 試料の個数。北海道原油については Waseda and Nishita (1998) から油徴・温泉井・炭田からの試料を除いた石油坑井からのデータのみを使用。

相良油田周辺地域の原油の飽和炭化水素 $\delta^{13}\text{C}$ は -25.8 ~ -25.1% を示し (Kato *et al.*, 2006), 古第三系根源岩を示唆する。また, 同じ古第三系でも基礎試錐「三陸沖」の根源岩よりも飽和炭化水素 $\delta^{13}\text{C}$ は重く, より若い年代の根源岩である可能性を示唆する。前述したようにステラン $\text{C}_{28}/\text{C}_{29}$ から相良地域の原油は秋田~新潟原油よりも時代的に古い根源岩から生成した可能性が高いと示唆されることと, この結果は整合的である。上田ほか (2007) はバイオマーカー組成などと石油生成シミュレーションにより古第三系三倉層群から相良地域の原油が生成したと推定している。また, 加藤ほか (2009) は, 油・ガスの地化学性状や石油地質から総合的に検討した結果, 相良原油は古第三系瀬戸川層群から生成したと推定している。これらの結果も炭素同位体組成による結果と整合的である。

6. ま と め

秋田・山形地域の原油のバイオマーカー組成から根源岩相を反映するバイオマーカー指標を選び因子分析を実施した。その結果, 因子 1 は岩質 (珪質 / 石灰質 vs. 砕屑質), 因子 2 は起源有機物 (海洋藻類 vs. 陸上植物), 因子 3 は堆積場の酸化還元環境を反映すると解釈した。因子 1 と因子 2 のクロスプロットにより根源岩相を 6 種類に分類したところ, 地域や背斜系列により根源岩相に以下の違いが認められた。

- (1) 秋田地域は山形地域よりも珪質 / 石灰質である。
- (2) 湖西は北秋田, 男鹿に比べて海洋有機物に富む。
- (3) 八橋周辺では, 西側の背斜系列が東側の背斜系列に比べて海洋有機物に富む。
- (4) 鮎川・由利原地域は仁賀保地域に比べて海洋有機物に富む。
- (5) 鮎川地域は由利原地域よりも珪質 / 石灰質である。

因子 1 を代表するノルホパン / オレアナン, 因子 2 を代表する C_{29} ステラン% で新潟地域, 北海道地域, 静岡・相良油田周辺地域の海成原油の根源岩相を評価し, 以下の結果を得た。

- (1) 秋田地域が最も珪質 / 石灰質である。秋田<山形・新潟 (新津型)・北海道 (厚田・茨戸) <新潟 (頸城型)・相良油田周辺の順に砕屑質な根源岩に変化する。
- (2) 新潟 (頸城型) は, 秋田・山形・新潟 (新津型) に比べて陸上植物の影響が強い傾向がある。相良原油はさらに陸上植物の影響が強い。

北海道道央部の古第三系石狩層群夾炭層分布域には, C_{29} ステランに富む陸上植物起源の油・ガス田が分布する。古第三系および白亜系夾炭層堆積盆は北海道道央から三陸沖~常磐沖まで広く分布しており, 夾炭層中の石炭・炭質泥岩がこれらの地域の石油根源岩となっていると考えられる。原油の炭素同位体組成から相良原油の根源岩は古第三系と推定される。

謝 辞

経済産業省資源エネルギー庁および独立行政法人石油天

然ガス・金属鉱物資源機構, 国際石油開発帝石株式会社, 三菱ガス化学株式会社, JX 石油開発株式会社, 石油資源開発株式会社には本稿の公表を許可していただきました。査読者からは有益なご意見, ご指摘をいただきました。これらの方々に厚く感謝します。

引 用 文 献

- Andruevich, V. E., Engel, M. H., Zumberge, J. E. and Brothers, L. A., 1998 : Secular, episodic changes in stable carbon isotope composition of crude oils. *Chemical Geology*, **152**, 59–72.
- Chakhmakhchev, A., Suzuki, N., Suzuki, M. and Takayama, K., 1996 : Biomarker distributions in oils from the Akita and Niigata basins, Japan. *Chemical Geology*, **133**, 1–14.
- Clark, J. P. and Philp, R. P., 1989 : Geochemical characterization of evaporite and carbonate depositional environments and correlation of associated crude oils in the Black Creek Basin, Alberta. *Canadian Petroleum Geologists Bulletin*, **37**, 401–16.
- Didyk, B. M., Simoneit, B. R. T., Brassell, S. C. and Eglinton, G., 1978 : Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation. *Nature*, **272**, 216–222.
- Grantham, P. J. and Wakefield, L. L., 1988 : Variations in the sterane carbon number distributions of marine source rock derived crude oils through geological time. *Organic Geochemistry*, **12**, 61–73.
- 平井明夫・佐藤時幸・高島 司, 1990 : 八橋油田における油の根源岩と生成・移動・集積. 石技誌, **55**(1), 37–47.
- 平井明夫・岡田静子・若松屋伸一・宮本泰行・八戸和巳, 1995 : 有機地球化学的にみた新潟地域における原油とその根源岩の関係. 石技誌, **60**(1), 87–97.
- Huang, W.-Y. and Meinschein, W. G., 1979 : Sterols as ecological indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **43**, 739–745.
- 飯島 東, 1992 : 日本海の開口と第三紀堆積盆の変遷. 石技誌, **57**(2), 171–179.
- Inaba, T., Suzuki, N., Hirai, A., Sekiguchi, K. and Watanabe T., 2001 : Source rock lithology prediction based on oil diacholestane abundance in the siliceous-clastic Akita sedimentary basin, Japan. *Organic Geochemistry*, **32**, 877–890.
- 岩田尊夫・平井明夫・稲場土誌典・平野真史, 2002 : 常磐沖堆積盆における石油システム. 石技誌, **67**(1), 62–71.
- Kato, S., Waseda, A. and Nishita, H., 2006 : Geochemical characteristics of crude oils from the Sagara oil field, Shizuoka Prefecture, Japan. *Island Arc*, **15**, 304–312.
- 加藤 進・早稲田 周・西田英毅・岩野裕継, 2009 : 静岡県相良地域におけるガスの地球化学. 石技誌, **74**(5), 462–471.
- 加藤 進・西田英毅・星 一良, 2017 : 東山油田周辺における原油の地球化学と移動・集積. 石技誌, **82**(3), 171–180.

- Murray, A. P., Summons, R. E., Boreham, C. J. and Dowling, L. M., 1994 : Biomarker and n-alkane isotope profiles for Tertiary oils: relationship to source rock depositional setting. *Organic Geochemistry*, **22**, 521–542.
- Murray, A. P., Sosrowidjojo, I. B., Alexander, R., Kagi, R.I., Norgate, C. M., and Summons, R. E., 1997 : Oleananes in oils and sediments: evidence of marine influence during early diagenesis? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **61**, 1261–76.
- 西田英毅・早稲田 周・岩野裕継・加藤恵悦, 1997 : 北海道原油の地化学的特徴. 石油資源開発株式会社技術研究所研究報告, **12**, 25–31.
- 大澤正博・中西 敏・棚橋 学・小田 浩, 2002 : 三陸～日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉱床ポテンシャル. 石技誌, **67**(1), 38–51.
- Peters, K. E. and Moldowan, J. M., 1991 : Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum. *Organic Geochemistry*, **17**, 47–61.
- Peters, K. E., Walters, C. C. and Moldowan, J. M., 2005 : *The Biomarker Guide. Second Edition*. Cambridge University Press, 1155p.
- Price, P. L., O'Sullivan, T. and Alexander, R., 1987 : The nature and occurrence of oil in Seram, Indonesia. In *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association 16th Annual Convention*, 141–173.
- Sakata, S., Suzuki, N. and Kaneko, N., 1988 : A biomarker study of petroleum from the Neogene Tertiary sedimentary basins in northeast Japan. *Geochemical J.*, **22**, 89–105.
- 坂田 将・金子信行・鈴木徳行, 1990 : 東北日本の堆積盆地における油のバイオマーカー. 石技誌, **55**(1), 48–53.
- Schiefelbein, C. F., Zumberg, J. E. and Brown, S. W., 1997 : *Petroleum systems in the Far East*. In *Proceedings of the Petroleum Systems of SE Asia and Australasia Conference*, Indonesian Petroleum Association, 101–113.
- Schiefelbein, C. F., Zumberge, J. E., Cameron, N. R. and Brown, S. W., 2000 : Geochemical comparison of crude oil along South Atlantic margins. In: M. R. Mello and B. J. Katz, eds.: *Petroleum Systems of South Atlantic Margins*, AAPG Memoir **73**, 15–26.
- 関口嘉一・重川 守・平井明夫・宮本泰行, 1984 : 地化学的見地からみた長岡・柏崎地域のグリーンタフ油・ガス鉱床の形成. 石技誌, **49**(1), 56–64.
- 石油公団, 1988 : 昭和 62 年度国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「仁賀保」調査報告書.
- 石油公団, 2000 : 平成 10 年度国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「三陸沖」調査報告書.
- 鈴木徳行・三瓶良和・松林英樹, 1995 : 秋田, 新潟地域における根源岩の有機地球化学的相違. 石技誌, **60**(1), 62–75.
- 鈴木宇耕, 1979 : 東北裏日本海域の石油地質. 石技誌, **44**(5), 291–307.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992 : 日本の石油・天然ガス資源. 520p.
- 辻 隆司・増井泰裕・早稲田 周・井上洋子・栗田裕司・甲斐邦男, 1991 : 秋田県矢島町周辺の女川層の岩相区分と堆積環境, およびその根源岩特性. 石油資源開発株式会社技術研究所報告, **7**, 45–99.
- 上田広和・三瓶良和・日浦祐樹・石橋正敏, 2007 : 静岡県掛川一相良油田地域における古～新第三系前弧堆積盆地の根源岩と石油システム. 石技誌, **72**(4), 333–346.
- 早稲田 周, 1993 : 東北日本原油の炭素・水素同位体組成と熟成度. 石技誌, **58**(3), 199–208.
- Waseda, A. and Nishita, H., 1998 : Geochemical characteristics of terrestrial- and marine-sourced oils in Hokkaido, Japan. *Organic Geochemistry*, **28**, 27–41.
- 早稲田周・重川 守, 1990 : 由利原油・ガス田における炭化水素の生成・移動・集積. 石技誌, **55**(4), 233–244.
- 早稲田 周・辻 隆司・梶原義照・西田英毅, 1995 : 女川層の有機物相と堆積環境—モンテレー層との比較—. 石技誌, **60**(1), 49–61.
- 渡部芳夫・山本正伸・渡辺真人, 1995 : 無機地球化学組成から見た女川珪藻質根源岩相の堆積物組成と古海洋環境. 石技誌, **60**(1), 15–26.
- Yessalina, S., Suzuki, N. and Saito H., 2006 : Geochemical characteristics of Tertiary Sagara oil from an active forearc basin, Shizuoka, Japan. *Island Arc*, **15**, 292–303.
- 横井 悟・早稲田 周・辻 隆司, 2013 : 秋田地域における女川層タイトオイルの可能性. 石技誌, **78**(1), 68–78.

石油技術協会記事

I. 理事会

第 82 期第 5 回

開催日時：平成 29 年 12 月 13 日（水）15:30 ～ 17:00

開催場所：石油鉱業連盟 会議室

出席者：栗原会長、塩澤副会長、浜田副会長、安楽、市川上田、金子、久保、小林、島本（敏）、田村（満）、樋口、藤原、古谷、松本、峰岸理事以上 16 名、島本委員、奥田監事、田中監事、矢口監事事務局 後藤、計 21 名

議題：

【確認事項】

1. 第 82 期第 4 回理事会議事録について

【審議・承認事項】

1. 会員の異動（平成 29 年 10 月 11 日～12 月 5 日）
2. 石油技術協会誌の冊子体廃止について
3. 第 62・63 回石油技術協会賞選考委員会設置について
4. 石油技術協会誌投稿規程・同要領の一部改正について
5. 平成 29 年度特別見学会（物理探査編）開催について（会告案）

【報告事項】

1. 会計報告（平成 29 年 10・11 月末 予・実績比較）
2. 平成 29 年度秋季講演会開催結果報告
3. 平成 29 年度特別見学会（地質編）開催結果報告
4. 各委員会の活動状況報告
5. その他

【確認事項】

1. 第 82 期第 4 回理事会議事録について
前回議事録の確認を行った。

【審議・承認事項】

1. 会員の異動

平成 29 年 10 月 11 日～平成 29 年 12 月 5 日

（イ）入 会

【正 会 員】……2 名

（ロ）退 会

【正 会 員】……1 名

【学生会員】……4 名

（ハ）在籍会員

	名誉会員	特別会員	正会員	学生会員	賛助会員	合 計
平成 29 年 10 月 11 日	76	120	1,607	81	67	1,951
平成 29 年 12 月 5 日	76	120	1,608	77	67	1,948
増 ・ 減	0	0	+2-1 =+1	+4	0	+3

以上の期間中の入退会について承認された。

2. 石油技術協会誌の冊子体廃止について（会告案）

石油技術協会誌を第 83 巻第 1 号（2018 年）より冊子体を廃止することについて諮ったところ異議なく承認された。また合わせて会告案で冊子体廃止を会員皆さん及び関係者に伝えることが承認された。冊子体廃止会告は 83 巻第 1 号掲載をまたず、速やかに website に上げる。なお、紙で協会誌が欲しい方には、印刷物の実費相当を支払うことにより（年間 6 巻で 10,000 円）協会誌の冊子体の代用品として簡易カラー印刷物の配布もある旨補足説明があった。

3. 第 62・63 回石油技術協会賞選考委員会設置について

石油技術協会賞選考委員 12 名すべてが承認され、同選考委員会が設置された。

なお委員 12 名の内、新任 3 名、重任 9 名。

4. 石油技術協会誌投稿規程・同要領の一部改正について

会誌デジタル化、冊子体廃止に伴う投稿規程の記載方法、掲載ページ、カラー掲載の制約の解除等及び原稿区分、論説を論文と報告に分ける等の同規定、同要領の一部改正が承認された。

印刷から掲載に変更されているが、掲載の時点はどこか、印刷業者が PDF を協会に持ってきた日か、PDF ファイルをウェブに上げた日か、掲載の意味を確認することとなった。

5. 平成 29 年度特別見学会（物理探査編）開催について（会告案）

協会誌第 82 巻第 6 号に掲載予定の会告案に基づき、昨年 3 月に見学会実施が今年は 1 月 30 日に、会費が昼食の 1,000 円を入れて昨年 1,000 円から 2,000 円に値上げとなっている等の実施要領の説明があり、承認された。

【報告事項】

1. 会計報告（平成 29 年 11 月末現在）

収入の部：秋季講演会費の入金約 20 万円。

収入累計は予算比 81.2%。

支出の部：秋季講演会の費用は約 60 万円

地質の特別見学会の費用は約 13 万円

82 巻第 4 号、第 5 号で各 200 万円の支出

支出累計は予算比 67.9%

会費納入率は現在 82%程であり、400 万円程会費が未納であるのでこれより幹事を通して各社会費未納者に催促して会費の回収を図る。

2. 平成 29 年度秋季講演会開催結果報告

10 月 24 日に開催された秋季講演会（テーマ：次世代技術への挑戦）について報告があった。参加総数は 129 名で、昨年より 50 名以上多く、例年並みに戻った。今後もタイムリーなテーマを求めている。

3. 平成 29 年度特別見学会（地質編）開催結果報告

11 月 8 日に実施した特別見学会（地質編）について報告があった。

時降り雨が降る中、徳橋氏、国末氏の案内により、皆さん熱心に研修され好評であった。参加総数は 35 名で、学生が 21 名、一般が 14 名（大学 2 名、国研 1 名、公財 1 名、県 2 名、企業 8 名）であった。

4. 各委員会の活動状況報告

各委員会委員長より活動状況について報告があった（本誌後掲、III. 各委員会の活動状況報告参照）。

II. 幹事会

第 82 期第 10 回

開催日時：平成 30 年 1 月 16 日（火）15:30～17:20

開催場所：石油鉱業連盟 会議室

出席者：浜田副会長、島本編集委員長、及川、岡本加藤、島田、林田、山中、後藤以上 9 名

議 題：

1. 第 82 期第 9 回幹事会議事録について（確認）
2. 前回理事会・評議員会報告
3. 会員の異動（平成 29 年 12 月 6 日～平成 30 年 1 月 15 日）
4. 一般会計報告（平成 29 年 12 月末日現在）
5. 石油技術協会賞「業績賞」について
6. 日本海洋工学会からの年会費制移行に伴う年会費納入についての御願い
7. その他

第 82 期第 11 回

開催日時：平成 30 年 2 月 15 日（水）15:30～18:20

開催場所：石油鉱業連盟 会議室

出席者：栗原会長、浜田副会長、及川、岡本、折戸、加藤工藤、長久保、中嶋、林田、後藤以上 11 名

議 題：

石油技術協会誌 83 巻 2 号（2018）

1. 第 82 期第 10 回幹事会議事録について（確認）
2. 会員の異動（平成 30 年 1 月 16 日～2 月 14 日）
3. 一般会計報告（平成 30 年 1 月末日現在）
4. 石鉱連との業務委託契約に基づく平成 30 年度の委託料について
5. 会則の一部改定（案）について
6. 協会 OB による協会業務の一部応援について
7. 平成 29 年度一般会計決算見込み及び平成 30 年度一般会計予算（第一次案）について
8. 第 83 回定時総会・特別講演会・平成 30 年度春季講演会および見学会の開催について（会告案）
9. 春季講演会個人講演応募状況（2/2 締切）および石油技術協会賞推薦状況（2/16 締切）について
10. 平成 30 年度主要会議日程案について
11. 第 83・84 期理事候補者名簿について
12. 平成 29 年度特別見学会（物理探査編）開催について（会告案）
13. 石油技術協会の SPE Workshop 日本開催の協力について
14. その他

III. 各委員会の活動状況について（要旨のみ）

1. 会誌編集委員会（委員長 島本 辰夫）

○平成 29 年度第 4 回委員会

開催日時：平成 29 年 11 月 9 日（木）

開催場所：石油鉱業連盟 会議室

出席者：島本委員長、長縄副委員長、竹内、松井（耕）大竹、各運営幹事、稲葉、川崎、中野、牟田各運営委員、五十嵐、岩本、岡田、中嶋、藤井各委員、中東探鉱技術委員会シンポジウム原稿担当、後藤事務幹事 以上 16 名

1. 第 82 巻第 6 号の準備状況
平成 29 年度春季講演会、生産技術委員会シンポジウム原稿 12 編、一般投稿原稿 1 編他で 12 月中旬発刊予定
2. 平成 29 年度春季講演会探鉱地質シンポジウムの原稿のうち論説の 2 編を除く 8 編全てが受理となった。
3. 第 83 巻第 1 号の準備状況
平成 29 年度春季講演会探鉱地質シンポジウムの講演原稿並びに一般投稿原稿ほかを予定

2. 探鉱技術委員会（委員長 久保 国男）

○平成 29 年度第 4 回委員会

開催日時：平成 29 年 11 月 21 日（火）

開催場所：三菱商事石油開発㈱

出席者：久保委員長・図師副委員長・中東副委員長 安河内、足立原、奥井、寺本、金子、及川八木、佐藤、原、和気各委員、以上 13 名

1. 今年は分科会活動を活発にということで分科会 2 回

実施、年明けに1回予定。

- 平成30年度シンポジウムのテーマは仮であるが「効率化と技術の進展が石油・天然ガス探鉱にもたらす影響」としている。
- 探鉱シンポジウムの著者が外国人単独で日本語概要を提出が出来なかった現状を踏まえ、各技術委員会のシンポジウム原稿は、著者が外国人で共著者に日本人がおらず日本語の概要を本人が作成出来ない場合は、それぞれの技術委員会をお願いしたいとのコメントがある。

3. 作井技術委員会（委員長 古谷 昭人）

○平成29年度第3回作井技術委員会運営幹事会

開催日時：平成29年11月24日（木）

開催場所：日本海洋掘削機5M-1,2会議室

出席者：古谷委員長、末永、前田、石黒、池田、長縄菅野、片岡、三好、橋口、武田（11名）

欠席者：工藤、藤田、筑井、佐藤、木下、中井佐々木（7名）

- 今年中を目標に石油開発ABC改訂作業を行っているが少し遅れる見込み。
- 平成30年度シンポジウムについてはアンケート結果、「オペレーションマネジメント」をテーマとする。来年1月の幹事会でテーマを最終決定する予定。

4. 生産技術委員会（委員長 安楽 敏行）

○平成29年度第4回委員会

開催日時：平成29年11月10日（金）

開催場所：九州大学伊都キャンパス ウエスト2号館543号室

出席者：安楽委員長、倉本副委員長、近藤、森口、尾串三浦、中村、菅井、大内、田代（運営幹事）協園（運営幹事）
以上26名中11名

- 平成30年度シンポジウムテーマに関して、「IOR/EOR」、「人工採油、坑井刺激」「生産障害」の3キーワードをもとに調査を行っていて、今後さらに検討する。
- 委員会協議の後、話題提供として、九州大学より2件の研究発表、その後生産技術委員会により各社（各5分程度）の活動紹介があった。その後の懇会に大学より15名が参加。

5. 国際委員会（委員長 市川 真）

- AAPG日本開催に向けて、AAPGアジアパシフィックと日本サイドの役割分担を詰めている。少人数で協議してから、またもう少し詰めて行く。
- Mr.DatukとはペトロナスというよりSPEアジアパシフィックのチェアマンとして面談した。SPのワークショップを日本で開催という話は出なかった。ただ、アジアパシフィック事務局では日本

でのワークショップを考えているとのことであった。

6. 資源経済委員会（委員長 岩間 剛一）

今回報告事項なし

7. ホームページ委員会（委員長 金子 信行）

- 理事選挙の公示に関する会告、協会誌第82巻第5号、他団体ニュース等をホームページに掲載。
- メールマガジン配信（12/8）、会員マイページにて第77巻～82巻第5号迄デジタルファイル公開中。
- 82巻第1号～4号迄、モノクロ版からカラー版に差替え完了。
- 石油開発ABC、探鉱部門改訂出来たところから順次改訂していく。
- 11月アクセス4,000件台で少ない。
- 委員交代 西 陽子→上妻 佑梨

2017年10月～11月のセッション数

月/週	サイト全体	石油開発ABC (第一階層)	English (第一階層)
10月第1週	1,742	675	68
10月第2週	1,061	338	59
10月第3週	1,103	448	30
10月第4週	1,060	396	30
10月第5週	385	212	12
合計	5,351	2,069	199
11月第1週	261	102	9
11月第2週	949	438	28
11月第3週	997	402	26
11月第4週	769	355	24
11月第5週	774	358	37
合計	3,750	1,655	124

※石油開発ABC・Englishのセッション数はサイト全体の数の内数を表記しています

<口絵の続き>

平成29年度特別見学会(地質編)実施報告(口絵のつづき)

1) 行きのバスの中で

当日は、JR千葉駅東口前大通りに面したNTT千葉前に8時30分集合、8時40分出発の計画でしたが、ほぼ予定通り出発することができました。バスは、出発後間もなく千葉東金道路に入り、途中野呂パーキングエリアでトイレ休憩を取った後、圏央道経由で、最初の見学地点へと向かいました。途中の移動時間を利用して、当日の見学地点(図1)と見学内容の概要をテキストで説明しました。次に、DVDに収納された戦前の昭和18年頃に制作されたというビデオ映像および最近制作されたビデオ映像をバス内の前後2台のテレビデッキでみていただき、南関東ガス田に位置する千葉県房総半島の北部域では、昔から水溶性天然ガスやヨウ素の生産が盛んで、特異な地場産業として今日まで発展してきていることを理解していただきました。自動車専用道路を利用したこともあって、バスの移動は順調に

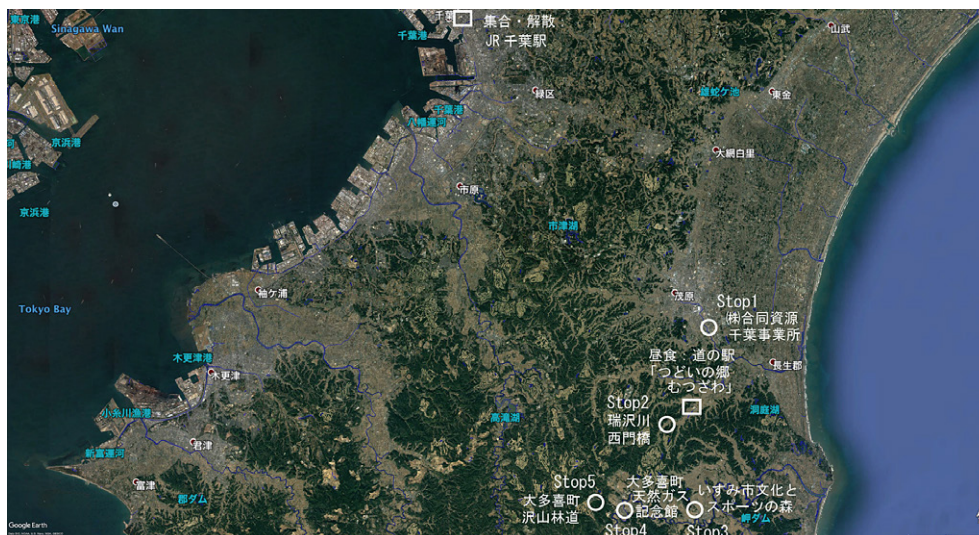


図1 見学地点等位置図 (Google Earth 使用)

進み、予定より30分あまり早く、9時45分頃にStop1の(株)合同資源千葉事業所に到着しました。

2) (株)合同資源の千葉事業所 (Stop 1) にて

到着が予定よりかなり早かったことから、(株)合同資源千葉事業所の受け入れ体制が間に合うか心配しましたが、幸い既に準備は整っており、到着後全会議室に招かれ、会社のパンフレット一式にカラーマーカーセットと多色ボールペンなどが置かれた椅子に各自着席しました。そして、今回の見学会で窓口になっていただいた樋口康則鉱業部長を初めとする会社幹部の方からの挨拶や会社の概要説明、当日の案内予定などをお聞きしました。その後、ヘルメットをかぶり、見学上の注意を聞いた上で、学生・院生班と一般の人の2班に分かれて構内を見学することになりました。学生・院生班は、最初に水溶性天然ガスの生産施設を見学するために、道路を挟んで反対側にある近くの天然ガスの生産施設基地まで5分間ほど歩き、そこでまず生産井を見学しながら、水溶性天然ガスの生産システムと井戸の構造の説明を聞きました(口絵写真1)。次にいくつか近隣の生産井から集められてきた輸送管が集まり、天然ガスとかん水とに分離するセパレーターを見学しました。ここでは、100年以上前に形成された地層中に閉じ込められた化石海水(地層水)が揚水されて地表に出てきたばかりのかん水を味わうと長生きする可能性があるということで、その塩っぱい味をみなさんが順に味わいました(口絵写真2)。この後、採取した天然ガスを各所に送り出すコンプレッサーなどの施設も見学した後、ふたたび元の構内にもどり、ヨウ素の生産施設の見学を行いました。まず、各所で分離され送られてきたかん水の一時貯留池を観察した後に、ヨウ素を分離・濃集するための各種の大規模な施設の間を歩きながら、ヨウ素の濃集方法などについて説明を受けました(口絵写真3)。そして、建物の中に入ってヨウ素の最終生成物の工程を見学し、またヨウ素の生産過程全体を監視しコントロールするヨウ素製造プラント制御

室なども見学させていただきました。この他、国内外から集められているというヨウ素を含んだ廃液の入った容器も構内で見学しました。最近では、こうした廃液が(株)合同資源のヨウ素生産物の3割前後を占めるなどヨウ素の重要な原材料になっているということで、リサイクルへの取り組みとその重要性についての説明も受けました。このように2班に分かれて、天然ガスの生産施設とヨウ素の生産施設を交互に通って見学した後に、11時半頃に再び最初の会議室に全員が戻りました。

この後、会社の幹部の方に対する質問の時間が設けられ、活発な質疑応答が行われました。最後に、山ノ井敏夫千葉事業所長が、今回の見学会への歓迎の意を述べられるとともに、今回が特別見学会(地質編)の10周年にあたることへのお祝いの祝辞も述べられました(口絵写真4)。それをうけて、見学会の世話人・案内人を代表して徳橋が、株式会社合同資源千葉事業所さんには、特別見学会(地質編)以前の石油技術協会春季講演会見学会の時代も含めて、これまで何度も見学させていただき、その都度会社をあげて歓迎していただいたことを紹介し、お礼を申し上げました。そこで後日、過去の資料を検討したところ、春季講演会見学会として2回(平成9年度、19年度)、特別見学会(地質編)として3回(平成21年度、25年度、29年度)、石油技術協会としてはこれまで合計5回見学させていただいていることが分かりました。こうした会議室での質疑応答の終了後、最後に千葉事業所前で記念の集合写真を撮りました(口絵写真5)。そして11時50分頃に、会社幹部の方々のお見送りをうけるなか、バスは出発しました。

3) 瑞沢川西門橋 (Stop 2) にて

Stop2の瑞沢川西門橋には、12時10分頃に到着しました。ここには、道路際のすぐ近くで活発な天然ガスの自然湧出現象を観察できるために、毎年訪問しています。最初、橋の上から瑞沢川の川面のあちこちでガスの泡が噴出していることを観察した後に、事前に関係者で土手の

斜面上に掘っておいたステップを降りながら川辺近くまで行き、そこに露出する梅ヶ瀬層最上部の泥岩層からなる岩盤の上から、川面で起きている天然ガス（メタンガス）の自然湧出現象を観察しました（口絵写真 6）。春先にここを訪問すると、周辺の田んぼに水を送るために下流側で流れをせき止めており、その結果川面の水位は非常に高く、両側の土手の間はすべて水で覆われていること、そして、現在立っている足元の岩盤からも多数のガスが湧出していることを説明し、メタンガスが無味無臭無色であるために人間の五感では認識できないこと、ただ、メタンガスは空気よりも軽いため速やかに空中に拡散して生物には無害であることなどを説明して、メタンガスの特性の一端を理解してもらいました。また、岩盤表面には、橋げた方向にほぼ平行に多数の割れ目（節理）が観察されますが、川面のメタンガスもよくみると川底の割れ目から湧出する現象も数多く観察され、こうした割れ目の存在が自然湧出と関係していることが想像されます。実際、関東天然瓦斯開発株のサポーターの方が持参したメタンガス濃度測定装置を岩盤の割れ目めがけて照射しますと、測定用の針が振れる様子を観察することができました。一通り観察を終えたところで、再びバスのところにもどり、12時25分頃にここを出発しました。

4) 道の駅「つどいの郷むつざわ」にて

Stop 2 のすぐ近くにある道の駅「つどいの郷むつざわ」には12時半頃に到着し、ここで昼食をいただきました。ここには、物産館やコンビニもあり買い物には便利なのですが、みんながまとまって食べられるような広い空間がなく、それぞれ適当なところを探しては持参の弁当などをいただくことになります。この道の駅は現在道の反対側で新しい道の駅を建設中であり、これが完成すれば空間的にももっと楽になるものと期待されます。ここで30分くらい昼食休憩をした後、午後1時頃にここを出発しました。

5) いすみ市文化とスポーツの森（Stop 3）にて

Stop 3 のいすみ市文化とスポーツの森には、午後1時半頃に到着しました。ここは隔年で訪れているところで、上総層群中部の大田代層の地層を高台にあるグラウンド脇の露頭や高台に登るV字型の道路の切割などで観察します。ここでは、到着後、地層観察の際に便利な特別見学会（地質編）特製の粒度票を参加者に1個ずつ配布し、これを作成された案内者の1人の関東天然瓦斯開発株の岩本さんから、作成の際の苦労話などを披露していただきました。この粒度票は、岩本さんの好意で最近毎年参加者に配布していますが、実用的であるとともに参加へのよい記念になっていると好評です。

このあと、テキストを使ってこの文化とスポーツの森周辺でみられる地層の特徴を説明した後、サポーターの皆さんによって別動車で運ばれてきた地層観察用のねじりガマを各自受け取り、グラウンド脇でみられる地層から観察を始めました。そして、まず泥岩層に挟まれている数枚のタービダイト砂層の断面をねじりガマで削りながら、そこにみられる堆積構造（混濁流の流れの化石）を観察しました（口

絵写真 7）。次に、いろんな変形構造を有する大小の泥岩破片（デブリリスという）の密集体が大部分を占め、最上部を薄いタービダイト砂層で覆われるデブライトとよばれる地層が泥岩層に挟まれているのを観察しました。

また、泥岩層には、この他にいくつかの薄い火山灰層も挟まれていることを観察しました。これらの火山灰層は、それぞれ特徴が違うとともにその特徴が広い範囲につづくことから個別に名前がつけられ、火山灰鍵層として利用されていること、この文化とスポーツの森周辺には、大田代層の鍵層ということで、O13 から O16 という層準の火山灰鍵層が分布すること、また、こうした正式名称の他に、一般の人が親しみが持てるように、その火山灰鍵層の特徴をとらえたニックネームを特別見学会（地質編）の関係者が独自につけて呼んでいることも説明しました。たとえば、薄いスコリア火山灰層から成る O13 鍵層にはクロボーズという名称を、また、その下の薄いゴマシオ状の火山灰鍵層から成る O14 鍵層には、ゴマボーズなどという名称をつけていることを紹介しました。

そして、このクロボーズとゴマボーズの間には1枚のデブライト層（厚さ 60 cm 前後）が存在し、タービダイト砂層の堆積構造から古流向にほぼ平行すると思われるグラウンド脇方向にはほぼ同じ厚さでつづくのに対して、これにはほぼ直交する道路沿いの露頭では、厚さ 20 cm 前後のタービダイト砂層に変化していることをこうした火山灰鍵層を使って確認できることを観察しました（口絵写真 8）。また、グラウンド脇ではゴマボーズ直下の厚さ 2 m 前後のデブライト層が、道路わきの露頭では、直下の薄い軽石質タービダイト砂層を挟む泥岩層が上下に幾重にも折り畳まれ、まるでスランプ堆積物のような様相を呈するスランプもどきタービダイト砂層に変化していることも確認しました。また、道路沿いで観察される薄い白色火山灰層から成る O15 火山灰鍵層（シロボーズ）直上には、このシロボーズを挟む泥岩層のブロックが変形して横方向に密集する厚さ 2 m 前後のスランプ状のデブライト層が最上部を薄いタービダイト砂層で覆われて分布するのを観察・確認しました。また、このシロボーズ火山灰鍵層の下位の泥岩層には、完全パウマシーケンスを示す厚さ 1 m 前後の典型的なタービダイト砂層が挟まれていることを観察・確認しました（口絵写真 9）。

このようにこのいすみ市文化とスポーツの森周辺では、泥岩層に、タービダイト砂層とともに、デブライト層やスランプもどきタービダイト砂層といった異なるタイプの重力流堆積物が挟まれるとともに、火山灰鍵層を利用することによって、一見特徴を異にするこれらの重力流堆積物が実際には横方向に互いに変化しあう同時異相の関係にあり、広い範囲に連続して分布するタービダイト砂層の一部である可能性が高いことを説明しました。このようにここで観察する内容は変化に富み、地層観察としてはやや高度な応用編に属するので、一度に理解するのは少し無理がある人も多かったかもしれませんが、テキストでも詳しく説明しているので、復習してくださいとお伝えしています。

この Stop 2 は、その人のレベルや興味に応じて、いろいろ楽しんだり悩んだりできる人気の地点でもあります。午後 2 時半頃にここを出発しました。

6) 大多喜町天然ガス記念館 (Stop 4) にて

このあとバスは西に向かって進み、次の見学地点であるいすみ鉄道大多喜駅前にある大多喜町天然ガス記念館には、午後 2 時 50 分頃に到着しました。こちらは、大多喜町で天然ガス開発事業が最初に本格化したことを記念して建てられた記念館で、小休憩をかねて毎年訪問しています。記念館の前では、まずレトロな雰囲気を醸し出すガス灯が訪問者を歓迎し、次に受付では、2 体のおじさん人形が今年もにっこり笑って迎えてくれました。内部には、大多喜町と天然ガス開発事業との関わりを示すパネルが配置されるとともに (口絵写真 10)、上総掘りの模型など、いくつかの模型なども展示されています。また、記念館の隣には、大多喜本陣という名前の観光物産館もあり、コーヒーなどを無料でいただきながら、適当なおみやげなどないか物色することができます。一通り見学と買い物を終えた後、バスの待つ駐車場へと向かいました。この駐車場は町営で、1 時間以内であれば大型バスも含めて無料で駐車できます。こちらを午後 3 時 10 分頃に出発しました。

7) 大多喜町沢山林道 (Stop 5) にて

最後の見学地点である沢山林道入り口には、午後 3 時 25 分頃に到着しました。こちらは、大多喜町役場が管理しており、最近では隔年で訪問していますが、今年も下草などが刈り取られていて、大変見学しやすくなっていました。ここでは、上総層群中部に属し大田代層の上位に重なる梅ヶ瀬層の主体をなす厚いタービダイト砂層が泥岩層と互層する様子や厚いタービダイト砂層の堆積構造、泥岩層に挟まる各種火山灰鍵層の特徴などを、順次下位の層準に向かって林道沿いを歩きながら観察するのが目的です。入口で地層観察用のねじりガマを各自再度受け取った後、まずは林道沿いに露出する厚いタービダイト砂層と泥岩層の互層 (砂勝ち互層) を観察しながら、厚いタービダイト砂層の場合、大部分が葉理構造をもたない塊状の粗粒砂層から構成されていることを確認しながら歩きました。また、薄いベージュ色の火山灰層の上面が厚いタービダイト砂層によって浸食され、その境界にフレーム構造 (火炎構造) が発達する様子なども観察されました。またある場所では、厚さ 2 m 前後の厚いタービダイト砂層の最下部に砂層の偽礫が観察され、このような未固結の砂層が混濁流による浸食によって雲散霧消せずに固体として偽礫を形成するためには、浸食当時この未固結の砂層はハイドレート化によって固体化していたこと、すなわち海底にハイドレートが存在していたことを示すものであるという仮説、議論があることを紹介しました (口絵写真 11)。さらに林道を進んでいくと、泥勝ち互層が卓越する部分も一部層準に存在することや、それを越えると再び砂勝ち互層が分布すること、それらの厚い塊状のタービダイト砂層の断面に水抜き構造の一種といわれる皿状構造が一面に発達する様子を観察したりしました。そしてさらに奥に向かって歩くと、やや泥

勝ちな互層の泥岩層中に、U6B や U6C といった梅ヶ瀬層中の代表的な火山灰鍵層の一つである U6 グループの火山灰鍵層を観察することができました。さらにその先では、スランプ層ともスランプもどきタービダイト砂層とも解釈できそうな厚いタービダイト砂層を見学することができました。

林道はこの先もう少しつづくのですが、周りも少し暗くなってきたことや帰る時間のことを考慮してここで引き返して急いでもどることにしました。入口に到着後、ねじりガマを返すとともに、ここで、別動車に載って現地で合流した関東天然瓦斯開発 (株) の人々とお別れをし、そのあと急いでバスに乗り、午後 4 時 50 分頃現地を出発しました。

8) 帰りのバスの中で

帰りのバスの中では、毎年恒例となっていますが、参加者一人一人の方に、各自の所属と名前とともに、今回の見学会に参加した経緯や動機、そして参加した上での感想などを述べていただきました。また、会計など庶務を扱う形で石油技術協会の事務局から参加された事務局長の後藤さんからは、石油技術協会入会のお誘いなどもありました。バスは、大多喜街道、圏央道、館山自動車道経由で、途中、市原サービスエリアでトイレ休憩などを取りながら北上し、千葉駅には午後 6 時 15 分頃に到着・解散しました。当初予定の午後 6 時よりは少し遅れての到着となりましたが、事故もなく無事の到着・解散となりました。

9) おわりに

これまで述べてきたように、当日はほぼ予定どおり進行し事故もなく無事終了することができました。会社をあげての歓迎と懇切な現場案内と質疑応答をしていただいた株式会社合同資源千葉事業所の山ノ井敏夫所長および樋口康則鉱業部長を初めとする関係者の皆様、地層の見学をいつも快く許していただいているいすみ市文化とスポーツの森を管理する夷隅文化会館の関係者の皆様、今回も事前に沢山林道沿いの草刈りなどをして歩きやすくなるように便宜を図っていただいた大多喜町の役場の関係者の皆様、別動車とサポーターを毎年出していただいている側面から支援していただいている関東天然瓦斯開発 (株) の関係者の皆様には大変お世話になりました。厚くお礼を申し上げます。サポーターとして参加していただき、別動車の運転やねじりガマの運搬、見学地点での交通事故などの事故防止のための見守り、記録写真の撮影などでご協力いただいた関東天然瓦斯開発 (株) の国末彰司氏、河野憲二郎氏、檜山学良氏の皆様に厚くお礼を申し上げます。最後に、本見学会の最初の段階から常にお世話になっている石油技術協会事務局の皆様にも厚くお礼を申し上げます。特に、10 年前の第 1 回目の見学会から今回の第 10 回目の見学会の実施直前までの準備に多大な尽力をされてきた元事務局員の西陽子さんには、心からお礼を申し上げます。

このあと、参加者の中の何人かの方に依頼して書いていただいた感想文を掲載します。大変お忙しいなかで執筆していただき、心からお礼を申し上げます。

世話人・案内人一同：徳橋秀一 (産総研客員研究員)、

岩本広志（関東天然瓦斯開発株）、池田秀史（同左）

＜参加者からの感想文＞

○平成 29 年度特別見学会（地質編）に参加して
新潟大学理学部理学科 1 年 小倉 誠也

この度、見学会に参加させていただいてとても勉強になりました。

はじめに、株式会社合同資源様で見学させていただきましたが、資源開発に興味がある私にとっては改めて将来を見つめるきっかけとなりました。水溶性天然ガスの採集方法など具体的に学ぶことが出来、心が躍りました。

次に、デブライト層、クライミングリップルやいわゆるスランプもどきが見られるタービダイト層など、私のようなまだまだ地質学的な目の肥えていない者にとってはとても興味が湧くものでした。そして、元々学んでいた堆積構造を実際に見て復習できたのも大きかったです。

また、特にいすみ市文化とスポーツの森の露頭の観察は興味深く、クロボーズなどの鍵層が混在する露頭を見ることができ、また学べたことがとても有意義でした。また、この度観察できた火山灰層にはあまり見られない黒いものがあり、地質学的知見を広めることが出来ました。

徳橋先生のご説明によってそれぞれの地層の特徴や成因などに対する理解の手がかりを与えていただき、これからの大学生活で学びたいこと、学ぶべきことを垣間見ることができました。

○H29 年度特別見学会（地質編）に参加して
秋田大学国際資源学部 資源地球科学コース 4 年次
渡部 叡

私は、秋田県の中新世の地層を対象として卒業研究を行っています。フィールドを歩き、地層をこの目で見られる機会は貴重で、さらに徳橋先生の解説があるとのことで参加しました。野外の見学では、露頭が素晴らしく、タービダイトの流向方向に垂直な断面と平行な断面を見ることができ、その中でタービダイトがデブライトへ、デブライトがタービダイトへと変化していく様子が印象的でした。また自分のフィールドでは見られないさまざまな堆積構造やタービダイトをみることができました。地質を勉強する上で見る経験はとても大切だと思うので、この見学会で見た経験は今後の自分の研究で大きな財産になると思います。

またヨウ素の生産工場では、普段の学んでいる分野とは全く異なる内容でとても有意義な時間を過ごすことができました。

最後になりましたが、この場をお借りして講師の方々や見学会でお世話になった皆様に心より御礼申し上げます。

○平成 29 年度特別見学会（地質編）に参加して
東京大学大学院新領域創成科学研究科 自然環境学専攻
博士課程 3 年 高橋 尚志

私は以前、房総半島の河川地形の研究に取り組んでいたことがあり、上総丘陵域を流下する諸河川の地盤を構成する上総層群の堆積相やテフラ層に興味を持っていたことから、今回の見学会に参加させて頂いた。今回の見学会では、

徳橋先生の案内・解説のもと、上総層群の大田代層および梅ヶ瀬層の露頭を巡った。露頭において、側方へとタービダイトを追跡し、層相変化や変形構造を観察したことや、タービダイトによる侵食面を認定・観察したことが特に印象的であり、非常に勉強になった。普段、陸成堆積物を扱っている私にとっては、通常自分の目で直接観察できない海底での侵食・運搬・堆積プロセスを、堆積物から推定・復元する作業は興味深い一方で、複雑で難しくも感じられた。しかし、地層を丹念に観察することで、それらを解釈するヒントが必ず得られることを今回の巡検で実感し、今後の自分の研究でも、より一層注意深く観察を行っていきいたいと思った。

今回の見学会では、株合同資源のご厚意により、天然ガスおよびヨウ素の採掘・製造過程も見学させて頂いた。また、関東天然瓦斯開発株のご協力で、非常に貴重な戦前の天然ガス採掘の映像を拝見させて頂いた。徳橋先生をはじめとする、今回の見学会を企画してくださった関係者の皆様に、心より御礼申し上げます。

○平成 29 年度特別見学会（地質編）に参加して
東京海洋大学・海洋資源環境学部教員・鶴 哲郎

海洋大の学生 3 名と一緒に初めて参加させて頂きました。海の中の生物や環境については詳しい彼らも海底の下となると土地勘がなく、私の下手な講義では十分な理解に至らないのではないかと思います、なるべく一緒に海に出て海底下の構造を音波で観察したり、山に行って昔の海底の様子を自分の目で観察したりという時間を作ろうと思っています。そんな思いで朝 5 時半に家を出たのですが、あいにくの雨。昼には止むはずが、午後もしまだ降っている。これはマズイと思って 3 名を振り返ると、意外にもまじめな顔で説明を聞いていたり、ねじり鎌なる道具で楽しそうに新鮮な露頭を削り出している様子が忘れられません。こんなことならタービダイトとは何かくらいは事前に講義して置くべきだったと（後で）思ったのですが、露頭を前にするとねじり鎌を持って露頭に向かう無責任な自分がおりました。今回、学生 3 名は天然ガスの湧出現場やタービダイトの露頭をはじめ観察したのですが、驚きや疑問、目から鱗の納得などなど、最後まで楽しんでいたようです。貴重な時間を割いてこの機会を作って戴いた講師の徳橋先生とご関係者の皆様に心から感謝申し上げます。

○H29 特別見学会（地質編）に参加して
国際石油開発帝石株式会社国内エネルギー事業本部ガス事業企画 U 企画 G 深山 遼

入社して以来、千葉県の水溶性ガス生産も含む国内ガス事業の企画部門に所属しております。これまで実際の水溶性ガス採掘現場を見る機会がなかったところ、水溶性ガス生産施設などを見学させていただけるということで、今回の特別見学会に参加させていただきました。

実際に現場で詳細な説明を受けながら施設を見学する中で、千葉県における水溶性ガスおよびヨードの生産・供給フローについての知見を深めることができ、大変有意義な経験となりました。

また、地層の見学も今回が初めてだったのですが、徳橋先生や参加者の皆様の分かりやすい解説を頂きながら地層を見てみますと、葉理等の特徴から当時の状況が伺われ、自然作用のスケールの大きさを感じ、一層興味が湧いてきました。今後も、このような地層見学の機会がありましたら是非参加させていただきたく存じます。

最後に、徳橋先生をはじめとする世話人・案内者の皆様、事業所を見学させていただきました株式会社合同資源様、その他関係者の皆様にこの場をお借りしてお礼申し上げます。ありがとうございました。

○平成 29 年度特別見学会（地質編）に参加して

日本エヌ・ユー・エス株式会社 環境管理ユニット

篠原 千晶

「貯留層」「キャップロック」「生産井」*etc.* 一環境コンサルタントとして、海洋資源開発に伴う環境影響評価や CO₂ 回収・貯留（CCS）関連業務に携わる中で、これらの少々マニアックな単語にも慣れ、堂々と知ったかぶり（コンサルの専売特許？）ができるようにはなりました。今回の見学会に参加を希望したのは、そんな私の「やはり真実を語るには現場を知らなければ！」という使命感によるもの…では（残念ながら）なく、「デスクワークから脱出してツルハシ持って登山（注：イメージです）、楽しそう！」という若干不純な動機でした。

実際参加してみると、最初から最後まで大変勉強になる 1 日でした。初めに水溶性天然ガス・ヨウ素の生産施設の見学がありましたが、個人的にはこれが後の地層観察に“効き”ました。地層の成り立ちに関する説明を興味深く聞く傍ら、「先ほど見た施設はこれに連なる層を生産層として商業運転している」と思うと、自然と“前のめり”になって見てしまいます。地質に関するアカデミックな情報（かなり専門的な内容もありましたが）と、それに関連する産業活動が一連で体感できる大変貴重な機会だったと思います。

今回の見学を経て、今後の仕事に少しは自信と実感を持って取り組めるようになったと思っています。そしてなにより、学生の方をはじめ、多くの参加者がビジネスから

離れて純粋な知的好奇心から学び、楽しんでいるこの時間を素敵だと感じました。もちろん私も大変楽しんだ一人です。この楽しく興味深い機会を提供してくださった、徳橋先生をはじめとする世話人・案内人の皆様、本当にありがとうございました。

○平成 29 年年度特別見学会（地質編）に参加して

NPO 地球科学者ユニオン（出光興産 OB）石川 厚

私は会社退職後青柳宏一様が主宰している地球科学者ユニオンに所属し、このユニオンが行っている談話会、地質巡検に毎回参加して学生時代学んだ地科学の知識を思い出しながら老後生活を楽しんでおります。このユニオンの地質巡検は関東甲信越圏が主体で青柳様が現役時代の地質調査で印象に残った面白い露頭を紹介していただいておりますが、私は千葉の天然ガス・ヨウ素の地質については経験がなく、今回参加の機会にめぐまれ楽しみにしておりました。

大多喜地区の上総層群のタービタイト貯留岩の大規模な露頭の見学は大変素晴らしかったです。平成 24 年の石油技術協会秋田男鹿半島の地質見学会で船川層群のタービタイト層の露頭を見せていただきましたが、我々学生時代の頃はタービタイトの概念はなく砂岩と習得しておりタービタイトの成因などがよく理解できませんでした。今回の見学で具体的に説明して頂きその解説書で詳しくタービタイトのことが書かれており十分理解できました。私のタービタイトに対する疑問点が払拭された感じがしました。

（株）合同資源様においては水溶性天然ガス・ヨウ素の生産施設を見せていただきました。私も石油・ガス会社に勤務しておりましたが、このような施設の見学は初めてで貴重な経験になりました。ヨウ素の製品については粉体なのかと思っておりましたが、黒い球形の粒子を見せていただき今までイメージが一新されました。40%がリサイクルとは初耳でした。

最後になりますが、このような特別見学会を企画、案内された皆様に深く感謝する次第です。

（以上）

【石油技術協会 賛助会員リスト】

IHS Energy Group

旭硝子(株) 大網白里鉱業所
 伊勢化学工業(株)
 伊藤忠テクノソリューションズ(株)
 (一財)宇宙システム開発利用推進機構
 (株)海洋工学研究所
 (株)合同資源
 コスモエネルギー開発(株)
 JX 金属探開(株)
 (株)ジオシス
 シュルンベルジェ(株) 長岡支店
 新日鉄住金エンジニアリング(株)
 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構
 (株)地球科学総合研究所
 (株)テルナイト
 日揮(株)
 日本オイルエンジニアリング(株)
 日本天然ガス(株)
 パリノ・サーヴェイ(株)
 深田サルベージ建設(株)
 (株)ベッツ
 三井石油開発(株)

秋田県産業労働部 資源エネルギー産業課
 アブダビ石油(株)
 出光興産(株)
 インペックスエンジニアリング(株)
 エスケイエンジニアリング(株)
 関東天然瓦斯開発(株)
 合同石油開発(株)
 サウル石油(株)
 JX 石油開発(株)
 ジャパン石油開発(株)
 (株)昌新
 石油鉱業連盟
 第一実業(株)
 帝石コンゴ石油(株)
 天然ガス鉱業会
 日宝化学(株)
 日本海洋掘削(株)
 日本バルカー工業(株)
 ハリバートン・オーバーシーズ・リミテッド
 (株)フグロジャパン
 ペトロサミット石油開発(株)
 三菱ガス化学(株)

秋田県天然瓦斯輸送(株)
 アンゴラ石油(株)
 伊藤忠石油開発(株)
 インペックス南西カスピ海石油(株)
 (株)オフショア・オペレーション
 極東貿易(株)
 国際石油開発帝石(株)
 サハリン石油ガス開発(株)
 JFE スチール(株)
 シュルンベルジェ(株)
 新日鐵住金(株)
 石油資源開発(株)
 (株)達磨鉄工
 帝石削井工業(株)
 東洋エンジニアリング(株)
 日本アペリーローレンス(株)
 日本海洋石油資源開発(株)
 日本マントル・クエスト(株)
 (株)ピージーエス・ジャパン
 (株)物理計測コンサルタント
 三井海洋開発(株)
 三菱商事石油開発(株)

(平成 30 年 3 月現在)

石油技術協会 会議・行事開催予定

会 議	開 催 日	会 場	備 考
評 議 員 会	16:00 ~ 17:00		
第 82 期第 1 回	2017 年 8 月 29 日 (火)	経団連会館	
第 82 期第 2 回	2017 年 12 月 19 日 (火)	経団連会館	
理 事 会	15:30 ~ 17:00		
第 82 期第 1 回	2017 年 4 月 25 日 (火)	石油鉱業連盟	
第 82 期第 2 回	2017 年 6 月 28 日 (水)	石油鉱業連盟	
第 82 期第 3 回	2017 年 8 月 22 日 (火)	石油鉱業連盟	
第 82 期第 4 回	2017 年 10 月 17 日 (火)	石油鉱業連盟	
第 82 期第 5 回	2017 年 12 月 13 日 (水)	石油鉱業連盟	
第 82 期第 6 回	2018 年 2 月 20 日 (火)	石油鉱業連盟	
幹 事 会	15:30 ~ 17:00		
第 82 期第 1 回	2017 年 4 月 18 日 (火)	国際石油開発帝石(株)	
第 82 期第 2 回	2017 年 5 月 16 日 (火)	JX 石油開発(株)	
第 82 期第 3 回	2017 年 6 月 22 日 (木)	石油資源開発(株)	
第 82 期第 4 回	2017 年 7 月 11 日 (火)	出光興産(株)	
第 82 期第 5 回	2017 年 8 月 15 日 (火)	石油鉱業連盟	
第 82 期第 6 回	2017 年 9 月 13 日 (水)	石油鉱業連盟	
第 82 期第 7 回	2017 年 10 月 11 日 (水)	日本海洋掘削(株)	
第 82 期第 8 回	2017 年 11 月 14 日 (火)	三井石油開発(株)	
第 82 期第 9 回	2017 年 12 月 6 日 (水)	石油鉱業連盟	
第 82 期第 10 回	2018 年 1 月 16 日 (火)	JOGMEC	
第 82 期第 11 回	2018 年 2 月 15 日 (木)	石油資源開発(株)	
第 82 期第 12 回	2018 年 3 月 13 日 (火)	伊藤忠石油開発(株)	
行 事	開 催 日	会 場	
第 82 回定時総会	2017 年 6 月 13 日 (火)	国立オリンピック記念青少年総合センター	
平成 29 年度春季講演会	2017 年 6 月 14 日 (水) 15 日 (木)	同 上	
平成 29 年度見学会	2017 年 6 月 16 日 (金)	千葉 (A コース), 神奈川 (B コース)	A コース: 地質巡検 B コース: 施設見学
平成 29 年度秋季講演会	2017 年 10 月 24 日 (火)	東京大学小柴ホール	

開催日・会場については変更されることがあります。

関係学協会・団体 行事開催予定

No.	学協会・団体名	行 事 名	期 日・会 場	備 考
1	日本アイソトープ協会	第 55 回アイソトープ・放射線研究 発表会	2018 年 7 月 4 日～ 6 日 東京大学弥生講堂	後援
2	物理探査学会 http://www.segi.org/is/13th	第 13 回 SEGJ 国際シンポジウム	2018 年 11 月 12 日～ 14 日 国立オリンピック記念青少年 総合センター	協賛

海外学会情報ソース

国際委員会

学会・セミナー・シンポジウム等スケジュール掲載情報

1. WEB サイト

No.	分野	組織名	URL	備 考	情報量
1	物探	SEG	www.seg.org	一般 meeting calendar	多
2	地質	AAPG	www.aapg.org	AAPG 関連 meeting	普通
3	地質	AGI	www.agiweb.org	関連団体のリンクのみ	一
4	地質・物探	EAGE	www.eage.org	EAG E 中心	少
5	地質	The GS (UK)	www.geolsoc.org.uk	GS 関連のみ	多
6	検層	SPWLA	www.spwla.org	SPWLA 関連のみ	少
7	石油工学	SPE	www.spe.org	SPE の event/forum calendar	普通
8	地質・物探 石油工学	SCA	www.scaweb.org	コア分析・油層評価技術関連	普通
9	海洋	Offshore Tech.	www.offshore-technology.com	海洋関連 exhibition & conference calendar	充実
10	腐食	UMIST NACE Intl.	www.cp.umist.ac.uk www.nace.org	マンチェスター科学技術大学 腐食関連情報, 会議, 雑誌	一 充実
11	掘削	DEA	www.dea-europe.com	DEA 関連のみ	少
12	掘削	IADC	www.iadc.org	IADC (International Association of Drilling Contractors) 関連のみ	少
13	鉱山	Mining Tech.	www.mining-technology.com	mining 関連 exhibition & conference calendar	充実
14	一般	OGJ	www.ogjonline.com	一般 /offshore exhibition & conference calendar	充実
15	一般	World Oil	www.worldoil.com	World Oil のみ	一
16	一般	—	www.slb.com	石油産業全般にかかわるインターネット情報	充実

2. 雑誌・学会誌等

No.	分野	雑誌名	出版元	ページ
1	地質・物探	The Leading Edge	Society of Exploration Geophysicists (SEG)	Calendar Announcements
2	地質	AAPG Bulletin	AAPG	Meetings calendar Education calendar
3	地質	Geotimes	AGI	Calendar
4	地質	Journal of Sedimentary Research	Society for Sedimentary Geology (SEPM)	Announcements
5	検層	Petrophysics	SPWLA	Calendar of coming events
6	石油工学	JPT	SPE	Meetings
7	石油工学	Hart's E&P	Hart Energy Publications	Meetings and events
8	海洋	Offshore Engineer	Atlantic Communications	Diary
9	海洋	Offshore	PennWell Corporation	Calendar
10	パイプライン／ガス	Pipeline & Gas Journal	Oildom Publishing	Meetings
11	一般	Oil and Gas Journal	PennWell Corporation	Calendar
12	一般	World Oil	Gulf Publishing Company	Meetings
13	一般	Petroleum Review	The Institute of Petroleum	Forthcoming events

3. その他

特になし

坑井掘削状況

特記事項なし

自：平成30年1月1日
至：平成30年2月28日

編集後記

昨年末まで長年に渡り重責を務めて来られました竹内輝義氏（元日本海洋掘削株）を引き継ぎ、本年から会誌編集委員会の運営幹事世話役となりました。縁あって編集委員会の運営委員を始め未だ3年目ですが、石の上にも3年、それなりに担当した原稿数だけはこなしましたが、いまだ前任者の足元にも及びません。この職務は、投稿の担当者割り振りから委員会の議事資料準備、委員会での議事進行と議事録の作成、各原稿の処理進捗状況の把握、大和印刷との入稿状況確認など、委員会の前後だけでなく日常的な手間を要する内容が多いため、ボランティアとは言え実負担が大きい仕事です。私も前任者のように、これだけの仕事を平然と捌けるような人物になればと思うのですが、道は長く遠いようです。

さて、時代の流れとは言え、革命的なデジタル会誌化から2号目を迎え、皆さまにはもう既に違和感なくご覧になっているのでしょうか？もはや世の中にはエコブームが浸透し、オフィスでのペーパーレス化は常識になりつつありますし、Kindleなどに代表される電子書籍が新しいメディアとして定着しているのが現状です。有形物を所有する満足感はハードカバーのような印刷物でしか満たせません

が、特に私のように老眼鏡が不可欠な年代にとっては、電子書籍のようなデジタルメディアの方が、ディスプレイでの拡大が可能であることなど有利な面もあります。本会誌もデジタル化に伴い、図面や写真類が以前のような自己負担なくカラーで表現が可能となったことから、直感的でビジュアルな理解度が格段に向上し、また文献そのものの検索や孫引き機能など、今後その利便性やスピードも改善されて行くことと思います。

折しも、本号は昨年の秋季講演会「次世代技術への挑戦－X年後の石油ガス開発に向けて」の特集号でしたが、まさに石油技術協会誌もデジタル会誌という次世代スタイルへの移行を遂げました。今後も持続的な品質向上を目指し、会員にとってフレンドリーで柔軟性の高い会誌の編集を心掛けて行きたいと思います。皆さまの一層のご理解ご協力の程、宜しくお願い致します。

（会誌編集委員会 運営幹事 一丸 裕二）

現在の編集状況：受理11編，継続審議5編，新規受付1編

< 論 説 >

空間分解能劣化を抑制した地震探査データの構造ステアリング処理.....岡田 信

石 油 技 術 協 会 会 誌 編 集 委 員 会

委 員 長 島本 辰夫（国際石油開発帝石）

副委員長 長縄 成実（秋田大学）

運営幹事 一丸 裕二（石油資源開発）

大竹 真由（国際石油開発帝石）

橋本 直明（三井石油開発）

松井 耕二（国際石油開発帝石）

運 営 委 員

稲場土誌典（国際石油開発帝石）

岡野 祥之（石油資源開発）

畔田慎太郎（国際石油開発帝石）

中野晋太郎（国際石油開発帝石）

馬場 敬（石油資源開発）

牟田 邦宏（石油資源開発）

委 員

青木 直史（地球科学総合研究所）

阿部 一徳（秋田大学）

五十嵐 哲（JX 石油開発）

岩本 広志（関東天然瓦斯開発）

岡田 信（三菱商事石油開発）

奥田 義久（技術研究組合）

加藤 隆明（JOGMEC）

栗田 裕司（新潟大学）

三瓶 良和（島根大学）

辻 隆司（石油資源開発）

徳永 朋祥（東京大学）

中嶋 健（産業技術総合研究所）

新堀 雄一（東北大学）

長谷川孝宗（出光興産）

藤井 哲哉（JOGMEC）

古井 健二（早稲田大学）

松井 良一（国際石油開発帝石）

松本 行弘（日本オイルエンジニアリング）

山崎 誠（秋田大学）

山本 正伸（北海道大学）

吉岡 秀佳（産業技術総合研究所）

事務幹事 後藤 博史

©The Japanese Association for Petroleum Technology 2018

Keidanren-kaikan 17F, 3-2, Ohtemachi 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan

PHONE 03-3214-1701 FAX 03-3214-1703

HOME PAGE <http://www.japt.org/>

石油技術協会誌（JAPT）Vol.83, No.2

2018 年 3 月発行（隔月刊） 会員頒布

編集兼発行者：石油技術協会

発行者所在地：〒100-0004 東京都千代田区大手町 1-3-2 経団連会館 17 階（石油鉱業連盟内）

電話 03-3214-1701 ファックス 03-3214-1703 振替口座 00120-8-63168

ホームページ <http://www.japt.org/> E-mail office@japt.org

印刷所：〒121-0072 東京都足立区保塚町 8-20（株大和印刷）

表紙デザイン 電話 03-5831-0051 ファックス 03-5831-0052



The Japanese Association for Petroleum Technology