

2025
Vol. 90

石油技術協会誌

Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology



石油技術協会

石油技術協会役員・委員長・幹事

会 長 高 橋 利 宏

副会長 島 本 辰 夫

副会長 吉 良 仁 秀

理 事

狩 野 彰 宏	亀 尾 浩 司	城 戸 大 作	国 末 彰 司	倉 本 真 一
栗 原 敏 之	小 林 修	佐 藤 光 三	菅 井 裕 一	杉 村 有 三
土 屋 範 芳	長 縄 成 実	中 西 健 史	畠 山 厚 志	林 田 泰 行
原 崇 二	日 野 智 之	福 田 豊 彦	藤 井 哲 哉	船 津 邦 浩
古 井 健 晃	松 島 潤 伸	村 田 澄 彦	山 田 泰 広	山 本 浩 士

監 事

市 川 真 樋 口 朋 之 横 井 悟

幹 事

石 下 洋 平	市 江 康 高	今 井 素 直	内 山 亮 二	後 藤 彩 恵
近 藤 秀 樹	今 野 義 浩	草 宮 尚 隆	佐 々 木 祐 樹	鈴 木 清 史
高 原 一 峰	知 識 源 由	土 田 邦 博	藤 田 和 宏	山 口 明

会 誌 編 集 委 員 長	小 林 肇
探 鉱 技 術 委 員 長	佐 藤 雅 紀
作 井 技 術 委 員 長	北 村 龍 太
生 産 技 術 委 員 長	村 上 貴 浩
C C S 委 員 長	長 縄 成 実
H S E 委 員 長	吉 田 剛
国 際 委 員 長	山 本 晃 司
資 源 経 済 委 員 長	岩 間 剛 一
ホ ー ム ペ ー ジ 委 員 長	島 本 辰 夫

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

令和 7 年度 新潟大会（概要版）

新潟大会は、令和 7 年度 6 月 10 日（火）から 6 月 13 日（金）にかけて、新潟市にて開催されます。初日は第 90 回定時総会、特別講演会、懇親会を、続く 2 日目～3 日目は令和 7 年度春季講演会を、そして 4 日目は見学会を開催いたします。7 年ぶりの新潟開催となりますので、多数の皆様のご参加をお願いいたします。

開 催 日：令和 7 年 6 月 10 日（火）第 90 回定時総会、特別講演、懇親会
6 月 11 日（水）～ 12 日（木）令和 7 年度春季講演会
6 月 13 日（金）見学会

開催場所：新潟県新潟市 朱鷺メッセ

開催方式：ハイブリット開催

1) 6 月 10 日（火）：総会、特別講演会、懇親会の時程（案）

- ・総 会：13:00 ～ 15:00
- ・特別講演：15:10 ～ 17:25（質疑応答 5 分含め各 45 分）
 - 特別講演 1. 15:10 ～ 15:55 新潟の石油・CCS 地質（仮題）
新潟大学 栗田 裕司氏
 - 特別講演 2. 15:55 ～ 16:40 新潟県のエネルギー政策（仮題）
新潟県庁
 - 特別講演 3. 16:40 ～ 17:25 日本酒学について（仮題）
新潟日本酒学センター 副センター長 / 新潟大学 経済学部 岸 保行氏
- ・懇 親 会：18:00 ～ 20:00 ホテル日航新潟 30 階

2) 6 月 11 日（水）～ 13 日（金）令和 7 年度春季講演会・見学会

令和 7 年度 春季講演会 受付：3 階ホワイエ、春季講演会会場：朱鷺メッセ 3 階、4 階、

6 月 11 日（水）9:00 ～ 17:30（予定）

- ・地質探鉱シンポジウム 4 階国際会議場
- ・作井・CCS シンポジウム 3 階 302 会場
- ・生産開発個人講演（口頭発表）3 階 301A, 301B 会場、（ポスター発表）3 階ホワイエ
- ・HSE 個人講演 3 階 303 + 304 会場

6 月 12 日（木）9:00 ～ 17:30（予定）

- ・生産開発シンポジウム 4 階国際会議場
- ・地質探鉱個人講演（口頭発表）3 階 301A, 301B 会場、（ポスター発表）3 階ホワイエ
- ・作井個人講演（口頭発表）3 階 302A 会場、（ポスター発表）3 階ホワイエ

見 学 会 集合・解散場所：JR 新潟駅、行先：弥彦・出雲崎、胎内・新潟、長岡・上越

6 月 13 日（金）

A. 地質巡検コース

- A-1. 火山岩・砂岩貯留層と堆積盆地外観
(弥彦・出雲崎の海岸方面：定員 40 名)

主要見学先：

- ・角田浜（中新世の中性～塩基性水中火山岩の側方変化観察）

- ・弥彦山パノラマタワー（インバージョンテクトニクスによる地形形成と堆積盆地のスケール感見学）
- ・落水落水砂岩貯留岩その1（西山層縁辺層（薄層砂岩観察）
- ・道の駅天領の里出雲崎（天ヶ瀬油田跡，日石発祥地，出雲崎石油記念館）
- ・椎谷岬砂岩貯留岩その2（椎谷層中心相（厚層砂岩観察）

B. 施設見学コース

B-1. 水溶性ガス鉱床と新潟でのカーボンニュートラルへの取組

（胎内，新潟コース：定員 30 名）

主要見学先：

- ・胎内関沢の採石場（鍬江層：西山層相当層の露頭観察）
- ・シンクルトン記念館と油湧出手堀井戸（見学）
- ・岩船沖 PF および水溶性基地眺望
- ・ENEOS Xplora ㈱中条共創の森オープンイノベーションラボ（見学）
- ・三菱ガス化学㈱新潟工場（工場全体と CN 関係（メタノール含む）見学
- ・三菱ガス化学㈱水溶性ガス基地（加治川 K1 南基地）見学

B-2. 石油ガス施設見学コース

（長岡・上越コース：定員 40 名）

主要見学先：

- ・㈱ INPEX 南長岡ガス田（越路原プラント，メタネーションプラントなど見学）
- ・㈱ INPEX 平井ブルー水素・アンモニア実証プラント（通過時に外から説明）
- ・㈱ INPEX 直江津 LNG 基地（見学）

3) その他

参加費

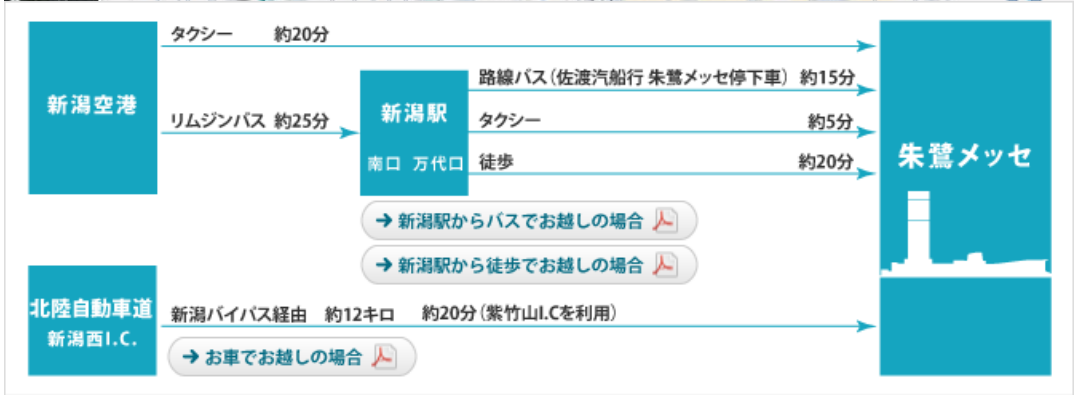
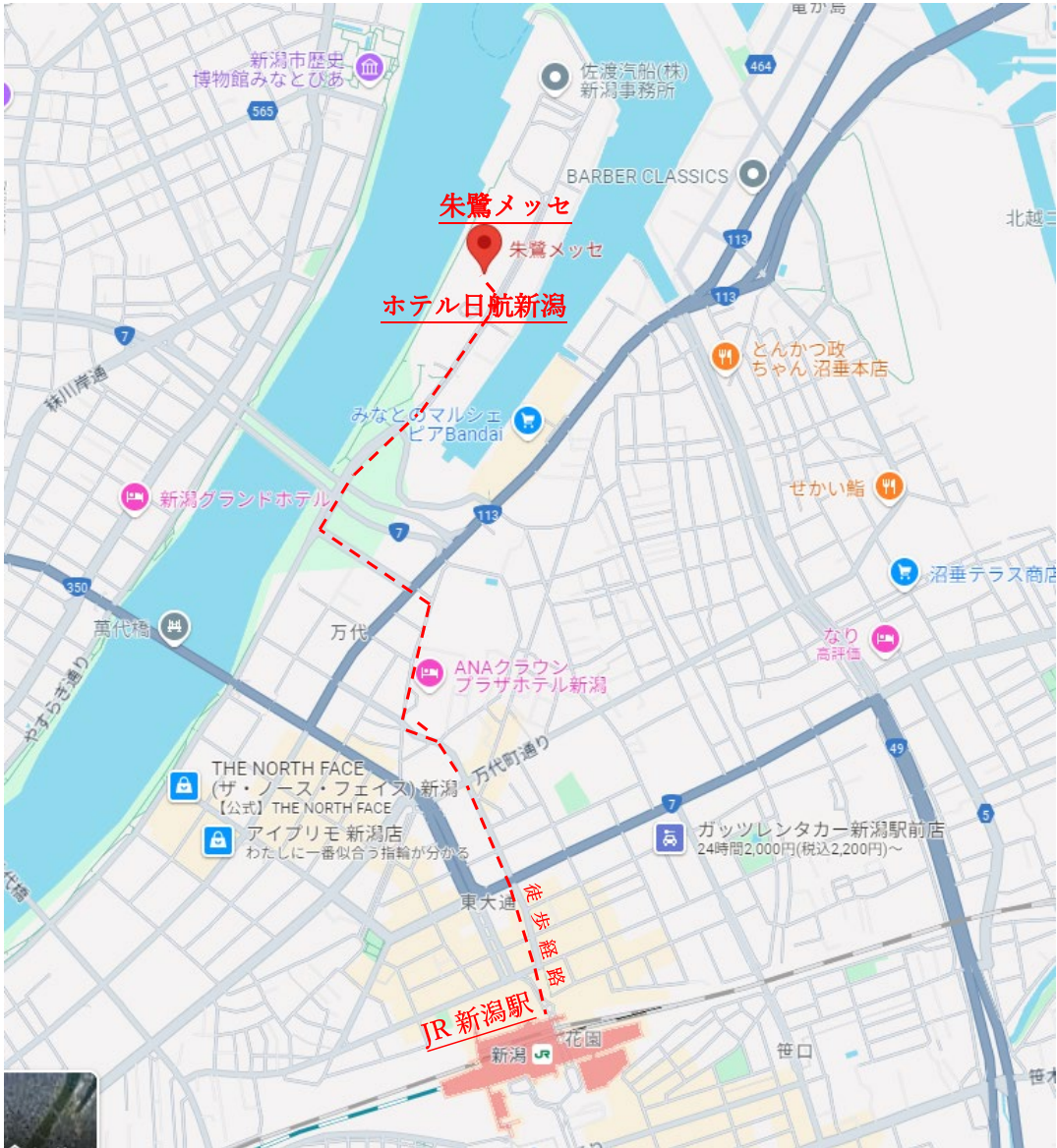
項 目	正会員・特別会員	名誉会員	賛助会員	一般	会員学生	一般学生
総 会	○：無料	傍聴可：無料		—	傍聴可：無料	—
特別講演会	無 料					
懇 親 会	8,000 円				1,000 円	
春季講演会	5,000 円			7,000 円	1,000 円	1,500 円
コーヒー/ 懇親の場	無 料					
見学会：A-1.	3,500 円（昼食各自負担）					
B-1.	4,800 円（昼食込み）					
B-2.	4,800 円（昼食込み）					

配信関係

開催日	項 目	オンライン配信	オンデマンド配信
6/10	総 会	会員限定	—
	特別講演会	◎	◎
6/11～12	春季講演会：シンポジウム	◎	◎
	同：個人講演	×	×
6/13	見 学 会	×	×

アクセス

朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター
〒950-0078 新潟市中央区万代島6番1号 TEL. 025-246-8400 FAX. 025-246-8411



バスは、新潟駅バスターミナルにて17番線（朱鷺メッセ・佐渡汽船線）にご乗車下さい。

以上



石油技術協会誌

第 90 巻 第 1 号 (令和 7 年 1 月)

— 目 次 —

会 告 令和 7 年度 新潟大会 (概要版)	i
巻頭言～協会誌第 90 巻第 1 号発刊にあたり～	高橋 利宏 ... 1
地質・探鉱部門シンポジウム「岩石物理学－E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開－」	
開会の辞.....	佐野 徹 ... 2
弾性波速度測定実験データを活用した岩石物理に係る取り組み	毛利 拓治・石鍋 祥平・三木 翼・小野塚 重信 ... 4
シェール層の岩石物理：ジオメカニクス分野での役割 (英文)	浅香 充慶 ... 13
E&P 案件評価ならびに CCS 地下評価の実務における岩石物理の活用	高梨 将 ... 21
パネルディスカッション.....	真田 佳典 ... 26
閉会の辞.....	真田 佳典 ... 27
ニュース	
石油技術協会記事.....	28
令和 5 年度特別見学会 (物理探査編) 実施報告.....	31
坑井掘削状況.....	36
編集後記.....	36
石油技術協会誌投稿規定.....	i
石油技術協会誌投稿要領.....	iii



— Contents —

ANNOUNCEMENT

PREFATORY NOTE	President Toshihiro Takahashi ...	1
----------------------	-----------------------------------	---

SYMPOSIUM

“Geophysical Frontiers — Transforming Exploration & Production for Global Sustainability —”

Opening remarks	Toru Sano ...	2
Rock physics studies based on laboratory core velocity measurement	Takuji Mouri, Shohei Ishinabe, Tsubasa Miki and Shigenobu Onozuka ...	4
Rock physics of shales: applications in geomechanics	Michinori Asaka ...	13
Application of Rock Physics in E&P and CCS Subsurface Evaluation	Mamoru Takanashi ...	21
Panel Discussion	Yoshinori Sanada ...	26
Closing address	Yoshinori Sanada ...	27

NEWS

Proceedings of the JAPT	28
Drilling activities in Japan	36
Postscript	36

左 : 山形県酒田市玉簾の滝 青沢層玄武岩の柱状節理 (提供 : JAPEX)

右 上 : 北海道厚岸郡浜中町 根室層群厚岸層 海底チャネルを埋積する塊状タービダイト (提供 : JAPEX)

右 下 : 秋田県男鹿半島生鼻崎に露出する更新統北浦層露頭における地質巡検風景 (提供 : INPEX)

left : Columnar jointing in the basalt of the Aosawa Formation at the fall of Tamasudare, Sakata city, Yamagata prefecture (provided by JAPEX)

Upper right : Massive turbidite filling the submarine channel in the Akkeshi Formation in the Nemuro Group, Hamanaka Town, Hokkaido prefecture (provided by JAPEX)

Lower right : Geological field trip at the Pleistocene Kitaura Formation outcrop, exposed at Oibanasaki, Oga Peninsula, Akita Prefecture (provided by INPEX)

巻 頭 言

～協会誌第 90 巻第 1 号発刊にあたり～



新年明けましておめでとうございます。まずは、協会員ならびに関係者のみなさまには、日頃より協会活動にご理解とご支援を賜り、心から御礼申し上げます。

さて昨年を振り返りますと、長引くロシアによるウクライナへの軍事侵攻、中東情勢の緊迫化など、世界の分断がさらに進んでいます。米国では大統領選でのトランプ氏の勝利、中国経済の行方など、不安定な要素が多い予測困難な状況にあることから、世界各国におけるエネルギー安全保障の重要性が再認識されています。

一方、国内に目を向けると、エネルギー安定供給と脱炭素を一体的に取り組むことで、経済成長を同時に成し遂げることを目指して、昨年 12 月に「GX2040 ビジョン」案と「第 7 次エネルギー基本計画」案が政府によってとりまとめられました。

エネルギー基本計画案の中では、DX や GX の進展に伴う電力需要の増加が見込まれる中、石油・天然ガスの自主開発比率を 2030 年に 50% 以上、2040 年に 60% 以上に引き上げる目標が示されました。同時に低炭素化が期待される LNG の安定供給確保の重要性が挙げられています。また、CCS（二酸化炭素の回収・貯留）については、非化石転換だけでは脱炭素化が困難な分野において不可欠な技術として取り上げられ、CCS 事業への投資を促す支援制度の検討、コスト低減に向けた技術開発、貯留地開発等に取り組むことが明記されています。

国内 CCS の具体的な動きとして、昨年 5 月に「二酸化炭素の貯留事業に関する法律」（CCS 事業法）が施行されるとともに、先進的 CCS 支援事業となる JOGMEC の「先進的 CCS 事業の実施に係る調査」に関する委託調査業務として、現状国内外において 9 つの調査事業が採択され、2030 年までの CCS 事業開始に向けた事業環境の整備が着実に進められています。

私たち石油技術協会としても、エネルギー資源開発業界の一員として、LNG を中心とする天然ガスの安定供給と資源開発による石油・天然ガス資源の確保に貢献していきたいと思います。また、カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組み、特に石油・天然ガス開発で培った技術・ノウハウを生かして、CCS の社会実装に貢献していきたいと考えています。

さて、今年の干支は「乙巳（きのとみ）」。「再生や変化を繰り返しながら柔軟に発展していく年」と言われています。特に巳（ヘビ）は、神様の使いとして大切にされてきた動物で、十二支の中で唯一脱皮する実在する生き物として不老不死のシンボルともされています。2025 年は一体どんなことが待ち受けているのでしょうか。どんな状況にあっても「ヘビに睨まれたカエル」にならないように、協会内外において人的・技術的交流を積極的に深めることで情報感応度を向上させ、この変化の時代を乗り越えていきたいと思います。

最後になりましたが、会員の皆様には今後とも当協会へ一層のご支援を賜りますようお願い申し上げます。そして本年が、石油技術協会にとって、また会員の皆様にとって実りある躍進の年となるよう心より祈念し、新年のご挨拶とさせていただきます。

2025 年元旦 石油技術協会 会長 高橋 利宏

資 料
Note

地質・探鉱部門シンポジウム
岩石物理学－ E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開－*

SYMPOSIUM

“Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –”

開 会 の 辞**

佐 野 徹***

Opening remarks by Toru Sano

皆様、おはようございます。ENEOS Xplora の佐野でございます。本日はご多忙のおり、令和 6 年度石油技術協会春季講演会の地質・探鉱部門シンポジウム「岩石物理学－ E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開－」にご参加いただきありがとうございます。開会にあたり探鉱技術委員会を代表しまして一言ご挨拶申し上げます。(今から 3 年前の) 2021 年 6 月に「改正地球温暖化対策推進法」が公布され、カーボンニュートラル・脱炭素社会への移行が方向づけられました。さらに本年 5 月には「CCS 事業法案」および「水素供給利用促進法案」が国会で可決・成立し、脱炭素社会へ向けた経済・事業環境の整備が進みつつあります。

さて、本年度のテーマである岩石物理学は、過去にも本部門シンポジウムで 2012 年に「岩石物性の理解は進んだか？－最近のペトロフィジックスの現状と課題－」というテーマで取り上げられています。この時は E&P 事業を対象として、ペトロフィジックスに焦点を当てて議論がなされております。これまで岩石物理学は、コア・検層データといった坑井データを扱うペトロフィジックスと、地震探査データを扱うジオフィジックスをリンク・統合させて、地質・堆積環境モデルを適切に内挿・外挿するための理論・モデルを提供してきたと思います。これによって初めて地震探査データから、(弾性波速度、密度といった)弾性パラメータや、さらに(岩相、孔隙率、浸透率といった)貯留岩性状および(飽和率など)流体性状の逆解析・推定が可能となり、E&P 事業において探鉱から開発・生産まであらゆる事業段階で貢献・成果を挙げてきました。

特に開発・生産段階では、一般に坑井数が多く地質・生産挙動の情報が豊富なため、岩石物理モデルを補正することで、信頼性の高い貯留層パラメータ評価が可能となります。例えば 4D 地震探査による応答変化から、炭化水素胚胎状況の変化を評価・把握することで、開発・生産計画の最適化に貢献してきました。この際従来では、岩石物理モデルを静的地質モデルにリンクさせるだけでしたが、この 10 年間ほどで、孔隙流体の動的挙動・シミュレーションとのリンクも工程に組み込まれるようになってきています。今後 CCS、地熱など環境対応事業を推進するに当たり、孔隙内流体の動的挙動に関する事項は岩石物理学にとっても 1 つのかぎとなるのではないのでしょうか。ここでは浸透率が中心的な物性であることはいまでもありませんが、岩石の異方性も弾性パラメータと浸透率の関係性を考察するうえで重要な事項となってきます。

岩石物理学とは、岩石を多孔質媒質としてとらえ、その物理特性を理解するものと言え、マトリックス鉱物組成のほか、孔隙構造・孔隙内流体の影響を受けます。従来 E & P 事業での探鉱段階では、静的な孔隙内流体の分布予測(いわゆる DHI 評価)に岩石物理学理論が適用されてきました。すでに 80 年代から岩石物性という視点が探鉱に導入され始めておりましたが、特に 90 年代以降は AVO とともに岩石物理学に基づく評価・検討が広く行われるようになりました。当時は地震探査データが示す振幅値と炭化水素存在の関係性につき、議論がなされる傾向があったかと思います。しかし探鉱段階においては、既存坑井データが少なく、地質モデルの外挿が必要となる場合が多く、その評価結果には大きな不確実性が伴うも

* 佐野 徹† (ENEOS Xplora)、真田 佳典 (大成建設)、中村 圭助・佐野 成哉 (ENEOS Xplora)、高井 克己 (石油資源開発)

† 世話人代表

** 令和 6 年 6 月 4 日 令和 6 年度石油技術協会春季講演会 地質・探鉱部門シンポジウム「岩石物理学－ E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開－」での開会の辞 Opening remarks at the 2024 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –” held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

*** ENEOS Xplora ㈱ ENEOS Xplora Inc.

のと思います。また坑井-地震探査データ間のスケール・周波数の違いや、適切なアナロジーや理論モデルの適用が困難であるなど、課題も多く指摘されてきました。今後例えば CCS 事業においても、深部塩水層を対象とする場合は同様の状況も予想されることから、E&P 事業での知見・経験を十分検証しておくことは必要かと思います。

岩石物理学は物理探査技術者の領域だと思われがちですが、上述のとおり、地質・貯留層の知見が必須であり同分野の技術者と協働していくことが大切です。今後脱炭素社会へ向けて、我々 E&P 業界で注力していくことになるであろう CCS 事業において、圧入した CO₂ 流動挙動の把握、トラップメカニズムの理解、モニタリング応答の評価といった課題に対して、弾性、孔隙流体、力学・ジオメカニクス、熱、電気などマルチフィジックスを、マルチスケールで扱う岩石物理学の果たす役割は非常に大きく重要であると考えています。さらに CO₂ 地中貯留では、孔隙流体-マトリクス鉱物間の化学反応による弾性波特性への影響や CO₂ 鉱物化、といった化学分野との関係性についても検証が進みつつあります。また岩石物理学は、CCS に限らず地熱、セメント、材料工学など脱炭素社会に貢献する周辺分野を相互にリンクさせる役割も担っているといえます。

岩石物理学はこれまで実験と理論モデルの両面から発展してきました。それらは相互にリンクし、実験による新たな観察が新たな理論モデル・概念を創造し、さらに新たな実験アイデア・ニーズを生み出していきます。特に超臨界 CO₂ の圧入を伴う実験事例はまだそれほど多くなく、新たな観察・知見が創成される可能性もあります。この際、DX 技術の適用も実験を効率的に行うために重要な要素となってきました。デジタルロックフィジックスは 2000 年代後半から提唱されていましたが、当時の計算機能力の限界から実際の粒子-孔隙構造モデルを扱うことができませんでした。近年の計算機能力の向上、デジタル関連測定機器の精度向上さらに機械・深層学習アルゴリズムの発展により、実際の実験を最小限に抑えて、数多くの感度分析を疑似実験にて行うことも可能となりつつあります。

これまで小職の限られた見識から本テーマについてふかんしてまいりましたが、我々 E&P 業界の G&G 技術者は、まだ岩石物理学の一部に触れているに過ぎないと思います。今後脱炭素社会が実現される過程で、G&G 技術者が周辺分野の技術者・研究者と協働しながら、岩石物理学の可能性を主導的に開拓・拡張していければ、と思います。

さて、今回のシンポジウムでは G&G 各論・技術を対象として、まず基調講演では、E&P 業界で主対象となる地殻浅部岩石について、その構成要素と関連するメカニズムの紹介、および物性研究に必要なアプローチに関する各種手法が西澤様から紹介されています。さらに 6 編の講演の中で、CO₂-水二相流体挙動を、実験による弾性波速度、比抵抗、ひずみなど物性値変化推定と CO₂ 挙動モニタリング手法の検討（九大北村氏）、砂岩コア試料に対する超臨界 CO₂ 圧入前後における弾性波速度変化と圧力、岩相、孔隙率、孔隙流体飽和率に対する関係性の考察（ENEOS Xplora 青野氏）、砂泥薄互層での CO₂ 地下圧入に伴う力学的変動挙動の検討におけるジオメカニクスモデル不確実性低減のための岩石物理モデル構築（JAPEX 柏原氏）、三軸圧縮試験による砂岩コア試料の弾性波速度データを用いた応力起因の速度異方性に関する検討（JOGMEC 毛利氏）、頁岩における異方性弾性特性の評価とジオメカニクス分野における影響・課題（INPEX 浅香氏）、最後に、E&P 案件評価および CCS 地下評価の実務における岩石物理学の活用事例の紹介（伊藤忠石開高梨氏）、について紹介されます。E&P 事業での実績・成果報告と CCS 事業での CO₂ 地下モニタリング実装を見据えた実験まで、多様で内容の濃い発表となっています。本日の限られた講演で本テーマの全容をカバーすることはできませんが、岩石物理学という切り口を通じて、今後の G&G 技術さらには E&P 業界について議論を深めていく契機となれば幸いです。特に最後のパネルディスカッションでは、真田副委員長を中心に活発な議論を促す仕掛けもなされており、この会場におられる皆様も含めた活発な議論を楽しみにしております。

最後に本シンポジウムは副委員長・事務局はじめ、探鉱技術委員全員が、1 年間かけて議論し企画したものです。これまで本来業務が多忙な中、時間を割いてご協力いただきありがとうございました。

講 演
 Lecture

弾性波速度測定実験データを活用した岩石物理に係る取り組み*

毛利 拓治^{**,†}・石鍋 祥平^{**}・三木 翼^{**}・小野塚 重信^{**}

(Received November 10, 2024 ; accepted January 9, 2025)

Rock physics studies based on laboratory core velocity measurement

Takuji Mouri, Shohei Ishinabe, Tsubasa Miki and Shigenobu Onozuka

Abstract : Reservoir characterization using seismic data serves large contributions to oil and gas development projects and CO₂ sequestration projects. Rock physics analysis has been one of pivotal disciplines in such reservoir characterization because it plays a role in connecting physical properties of rocks and reservoir properties. Laboratory experiment is the central part in a rock physics analysis because it reveals various physical properties on a single rock sample. In this paper, we introduce two rock physics case studies using results of core velocity measurements conducted at Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC) Technology and Research Center (TRC)'s lab. The first study is the estimation of velocity anisotropy at a gas field offshore Australia. We measured elastic propagation velocities of rock samples from the field with a tri-axial compression test apparatus and estimated both intrinsic anisotropy and stress-induced anisotropy. With synthesized CMP gathers, it was revealed that the estimated stress-induced anisotropy would affect seismic inversion and subsequent reservoir characterization. The second case is the interpretation of time-lapse walkaway VSP (Vertical Seismic Profile) conducted in a CO₂-EOR pilot at an oil field onshore Abu Dhabi. Based on the results of velocity measurements performed on rock samples from carbonate reservoirs and dynamic reservoir models, we modeled changes in elastic properties associated with the CO₂-EOR pilot between the time of the baseline and monitoring VSP. The modeling of elastic property changes allowed us to deepen the understanding about 4D response obtained through time-lapse full waveform inversion applied to the walkaway VSP data. JOGMEC TRC offers continuous supports for improving reservoir characterization in E&P and CCS projects.

Keywords : rock physics, velocity measurement, anisotropy, 4D seismic, monitoring, reservoir characterization, laboratory

1. はじめに

石油開発事業では、探鉱および開発段階において三次元の地震探査データを用いた貯留層の定量的な評価およびその更新が行われ、生産段階においては、貯留層マネジメントの最適化のため、貯留層内の流体挙動のモニタリングとして 4D 地震探査が利用されてきた。近年、日本でも 2023 年に CCS 長期ロードマップが政府により策定されるなど、CCS 事業への取り組みが業界全体で活発化している。CO₂ 地中貯留事業では、特に帯水層を対象とする場合には、石油や天然ガスといった生産物がないため、極力コストを抑えた操業が求められる。そのため、掘削される坑井の数も

最低限に抑えられると予想されることから、貯留層評価において地震探査データを用いたアプローチが相対的に重要になる。さらに、CO₂ 地中貯留事業では、地下に圧入した CO₂ の空間的な挙動のモニタリングが必須となっており、近年、地震探査による貯留層評価への貢献に対する期待がますます高まっている。

岩石物理は、これまで地震探査データを用いた貯留層評価において、弾性特性 (P 波速度や S 波速度、密度など) と貯留層特性 (岩相や孔隙率、飽和率、貯留層圧力など) を結びつける役割を果たしており、ますます重要なスタディ領域である。その中で、分析装置を用いて、同一の岩石試料のさまざまな物性値などが得られる実験室での測定・分析は、中核的な役割を果たしてきた。また、実験室ではさまざまな条件で測定を行うことができるため、コアが取得された実際の地下の環境における物性だけではなく、時空間的な変化の予測も可能という利点がある。貯留層内の有効圧力を例に取れば、貯留層圧力は流体の圧入 / 生産に伴い時間的に変化し、同じ層準であっても深く埋没

* 令和 6 年 6 月 4 日、令和 6 年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「岩石物理学－E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開」にて講演－This paper was presented at the 2024 “Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –” held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

** 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 Japan Organization for Metals and Energy Security

† Corresponding author : E-Mail : mouri-takuji@jogmec.go.jp

する位置では、より高い圧力を受けるようになるなど、有効圧力は時空間的に変化する。実験室では、そのような状態を再現して、測定・分析を行うことができる。

JOGMECの技術センター（TRC）には、岩石試料や間隙流体に対し、さまざまな測定・分析を行うことができる設備が整っている。コアプラグとなった岩石試料を用いた孔隙率・浸透率測定、弾性波速度測定、X線CTの撮像など、対象とする岩石試料の基礎的な物性値を得るための測定・分析から、QEMSCANやXRD分析による鉱物の配置や量比の分析、FIB-SEMを利用した粘土鉱物などのミクロな観察も行うことができる。また、X線CTを用いたコアフラッキングの観察など、動的な実験も行うことが可能である。これらの実験装置を利用し、機構はこれまで、さまざまな貯留層の岩石試料を用いて、岩石物理に関する共同スタディを実施してきた。例えば、4D地震探査による貯留層モニタリングを目的として、砂岩性状のP波速度への影響（福成ほか、2016；Knapp *et al.*, 2017）やオイルサンド貯留層の弾性特性の温度変化（加藤・ステュアート、2012）について検討が行われたほか、炭酸塩岩の貯留層性状の評価のため、実験で明らかとなった孔隙タイプと弾性特性（ V_p/V_s など）の関係を利用し、三次元地震探査データの解析から孔隙率や浸透率の分布の評価（Tsuneyama *et al.*, 2003）などが行われた。本稿では、これまでに実施された共同スタディの内、岩石試料の弾性波速度測定結果を利用した最近の岩石物理スタディ事例を2つ紹介する。

2. 貯留層評価の向上に向けた速度異方性の推定

1つめのスタディ事例は、豪州北西大陸棚ガス田を対象にした弾性波の伝播速度異方性の推定である。速度異方性とは、弾性波の伝播速度が伝播方向によって異なる現象であり、その大きさの指標として、Thomsenの異方性パラメータ（Thomsen, 1986）がよく用いられる。Thomsen (1986)は、横等方性あるいは水平等方性（transverse isotropy (TI)）媒質における弱い異方性を仮定し、対称軸に対する任意の方向（ θ ）に伝播するP波伝播速度を異方性パラメータ δ と ε を導入して表現している。速度異方性のある地域では、当該地域で行われた反射法地震探査のイメージング結果やAVO（amplitude variation with offset）インバージョンなどの結果がその影響を受けるため、対象地域における速度異方性について理解しておくことは重要である。速度異方性をもたらす原因には、岩石に内在する原因と外部環境による原因がある。前者は、特定方向のマイクロクラックの卓越や粘土鉱物の選択的配列、層構造の形成などが挙げられ（例えば Ong *et al.*, 2015）、特に泥岩層において顕著である。一方、岩石自体は等方的であっても、岩石にかかる応力に起因して岩石が速度異方性を示すようになる場合がある。Nur and Simmons (1969)による一軸圧縮試験時の弾性波速度測定結果からは、応力の異方性の増大に伴い、速度異方性が大きくなることが示されている。応力起因の速度異方性は、砂岩などの多孔質媒質に顕著に観察される（Mavko *et al.*, 2009）。

本対象ガス田周辺の貯留層においても、頁岩の速度異方性がAVOインバージョンに基づく岩相推定結果に影響を及ぼす可能性があることが報告されている（Asaka, 2018）。Asaka (2018)では、頁岩層に15%程度の速度異方性がある場合の頁岩層と火山岩層の境界のAVOレスポンスが、速度異方性がない場合の頁岩層と砂岩層の境界のそれと同じような挙動を示すため、速度異方性を考慮せず解析を行うことで、火山岩層を砂岩層と誤って解釈してしまう恐れが指摘されている。さらに本地域の応力場は、東西方向、鉛直方向、南北方向の順に圧縮が小さくなるなど、それぞれの方向の応力の大きさが異なるため、これに起因する速度異方性の影響も無視できない。

そこで、これら両者の速度異方性の大きさを求めるために、本対象ガス田のコアから採取された岩石試料を用いて弾性波速度測定を行った。地表地震探査や音波検層では、通常、弾性波の入射角の範囲が限られる傾向があるが、実験室では、岩石試料の任意の位置に圧電素子を配置してさまざまな方向の弾性波速度を超音波で測定できるため、より正確に速度異方性を測定できる利点がある。本対象貯留層の主要な岩相は、砂岩、頁岩、火山岩であり、それぞれの岩相からバランスよく採取された岩石試料を用いて今回の測定を行った。砂岩試料と火山岩試料はそれぞれ4～14%程度、4%以下の孔隙率を有する。なお、火山岩試料は変質や風化の程度に応じて3種類（変質・風化なし、変質・風化あり、著しい風化あり）に分けられ、その程度が大きい試料ほど相対的に大きな孔隙率を有する傾向がある。弾性波速度測定は、TRCの三軸圧縮試験機を用いて行った（図1）。この三軸圧縮試験機では、軸圧の加重に加えて、側圧を油圧で独立に調節することができる。また、岩石試料の上下端面を挟むスチール製のペDESTALと側面を被覆するゴムスリーブには圧電素子が内蔵されており、圧力容器内で圧力をかけた状態で弾性波速度測定を行うことができる。測定は、室温・乾燥条件で行ったが、頁岩試料のみ乾燥させずに測定した。層理面が水平であることを仮定し、鉛直方向に対し、0度・90度・45度の入射角の測定を周波数500 kHzの超音波を用いて行った。岩石試料に与える応力については、表1のとおり、静水圧条件と三軸圧縮条件（異方応力条件）両方の条件で測定を行った。なお、孔隙圧は無視できるほど小さい。静水圧条件での測定は岩石に内在する速度異方性を、異方応力条件での測定は応力に起因する速度異方性を求めることを狙った。静水圧条件と異方応力条件において、軸圧は両方の条件で同じとしているが、異方応力条件でのみ側圧が軸圧よりも小さくなるように設定した。南北方向の地震探査を模擬した測定では、鉛直方向に採取された試料に対し、鉛直方向の応力を軸圧として、南北方向の応力を側圧として与えた。一方、東西方向の地震探査を模擬した測定では、水平方向に採取された試料に対し、東西方向の応力を軸圧として、鉛直方向の応力を側圧として与えた。なお、弾性波速度測定で得られる速度は群速度であるため、速度異方性がある場合には、群速度から位相速度へ変換する必要があることが知られて

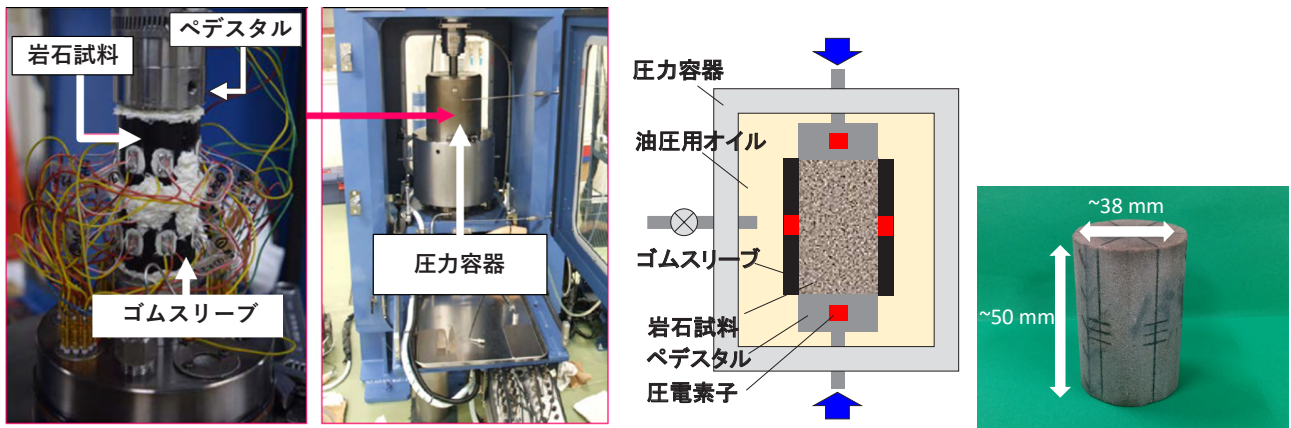


図1 本スタディの弾性波速度測定に用いた JOGMEC TRC の三軸圧縮試験機と砂岩試料の例

表1 弾性波速度測定における静水圧条件及び三軸圧縮条件（異方応力条件）

静水圧 / 軸圧 (psi)	側圧 (psi)	差応力 (psi)
3900	3500	400
4900	3700	1200
5900	3900	2000
6900	4100	2800
7900	4300	3600
8900	4500	4400
9900	4700	5200
10900	4900	6000
11900	5100	6800

いる（例えば Yan *et al.*, 2018）。本実験でも精度良く速度異方性を求めるため、測定された群速度から位相速度を推定しているが、今回の試料においては、両者に大きな差はなかった。

10900 psi の静水圧条件で測定された弾性波速度から推定された速度異方性を図2に示す。この結果から、推定された δ と ϵ の大きさは共に $-5\% \sim 15\%$ であり、岩相の違

いに着目すると、頁岩試料は砂岩や火山岩試料よりもやや強い速度異方性を示す傾向があることが分かった。岩石試料にかかる静水圧の大きさによる ϵ への影響に着目すると（図3左図）、相対的に孔隙率の小さい頁岩試料と変質・風化のない火山岩試料は静水圧の大きさの影響を受けにくい。孔隙率の大きい砂岩試料と変質・風化の程度が著しい火山岩試料は静水圧の増加とともに ϵ がゼロに漸近していく傾向がある。これは、静水圧の増加とともに、選択的に配列していたクラックが閉じ、その影響が小さくなったためと考えた。次に、図3右図は、異方応力条件下での差応力（軸圧と側圧の差）の大きさによる ϵ への影響を表している。相対的に孔隙率の大きい岩相の試料については、差応力の増加とともに ϵ の値がマイナス方向にシフトする傾向がある。これは、差応力の増加に伴い、軸圧に対して側圧が小さくなることで、相対的に水平方向の速度が鉛直方向の速度よりも小さくなるためと考えられる。静水圧条件と異方応力条件の結果を比べると、最も差応力が大きい差応力 7000 psi の ϵ の推定値は、軸圧と同じ大きさの静水圧条件のそれよりも 5% 程度マイナス方向にシフトしている。これらの結果から、応力異方性の影響により、最大 5% 程度の速度異方性が生じることが明らかとなった。

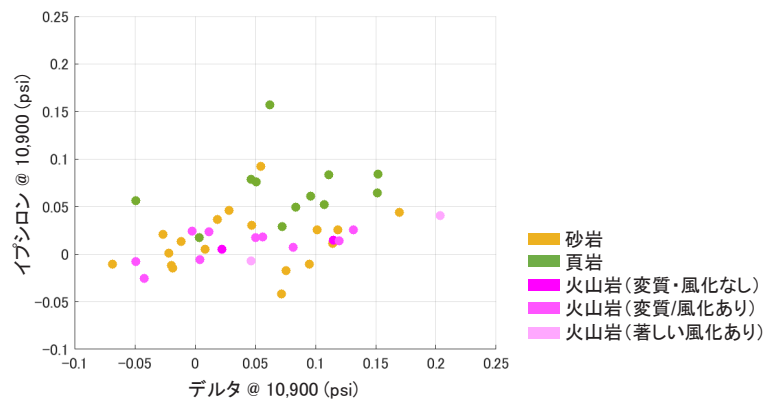


図2 10900 psi の静水圧条件での測定結果から推定された各岩石試料の速度異方性

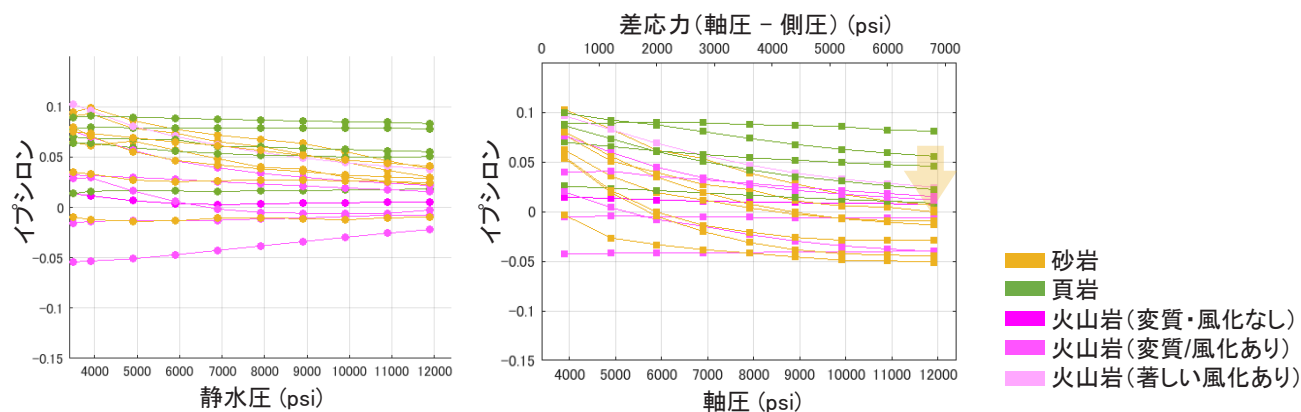


図3 岩石試料にかかる応力と異方性パラメータ ε の関係
(左図) 静水圧条件での測定 (右図) 異方応力条件での測定

本対象貯留層では、これまで岩石試料を用いた速度異方性の評価が行われていなかったが、今回の弾性波速度測定により、その基礎データが得られた。今後、速度異方性を考慮した AVO インバージョンなどに今回の結果が利用され、貯留層評価の高精度化、ひいては、評価井の掘削位置の最適化など天然ガス開発事業への貢献につながるものと期待される。

3. タイムラプス地震探査の解釈に向けた取り組み

2つめのスタディ事例は、アブダビの陸上油田での CO_2 EOR 事業で貯留層モニタリングのために行われた繰り返し地震探査（4D 地震探査）の解釈である。EOR を含む石油・天然ガス開発事業において、貯留層マネジメントを最適化するためには、対象とする貯留層内の流体などの挙動を把握することが重要である。そのため、坑井において温度・圧力ゲージや飽和率検層を含む各種検層、トレーサーなどによるモニタリングが実施されるが、坑井間のモニタリングには、北海を中心に、多くの石油・天然ガス事業において繰り返し地震探査が行われてきた（例えば Jack, 2017）。 CO_2 貯留事業においても、地下に圧入した CO_2 の挙動のモニタリングが求められるため、近年、より一層 4D 地震探査によるモニタリングの重要性が認識されている。しかし、4D 地震探査を実施して得られる弾性特性の時間変化（4D レスポンス）の解釈には不確実性が存在し、これが 4D 地震探査の課題の 1 つになっている。例えば、流体圧入 / 生産後に行われるモニタリング調査の結果、ベースライン調査時よりも音響インピーダンスが小さくなる原因として、 CO_2 などのガス圧入や遊離ガスの発生によるガス飽和率の増加のほか、貯留層圧力の上昇なども考えられる。さらに、ベースライン調査とモニタリング調査で受発振点の位置がずれるなど、意図しない 4D ノイズの影響も存在し、4D レスポンスをもたらす要因が複数存在するため、その解釈には不確実性が存在する。これに対し、動的貯留層モデルに基づく弾性特性モデリングが 4D レス

ポンスの解釈の一助となる可能性がある。動的貯留層モデルからベースライン調査とモニタリング調査の間に生じた各流体の飽和率変化および圧力変化が得られ、さらに弾性特性モデリングにより、これに対応する弾性特性変化が得られれば、両者の関係についての理解が進み、実際に 4D 地震探査で得られる 4D レスポンスの解釈に活用できるものと期待される。そこで、貯留層モデルから正確に弾性特性モデリングを行う必要があり、室内実験などに基づく岩石物理が重要である。

本対象地域であるアブダビの陸上油田では、炭酸塩岩貯留層を対象に、塩水と CO_2 を交互に圧入する WAG (water alternating gas injection) による EOR のパイロット試験が行われている。この試験には 3 本の水平井が用いられ、この内両端の 2 本が圧入井で中央の 1 本が生産井である。この地域は、陸上油田の油-水遷移領域内にあることから、試験地がある場所では、貯留層の上部は油層で下部は水層になっている。このパイロット試験における貯留層モニタリングのため、二次元の time-lapse walkaway VSP が実施されており（図 4）、ベースライン調査の約 3 年後にモニタリング調査が行われた。これらベースライン調査とモニタリング調査の VSP データを用いて FWI (full waveform inversion) 解析を行った結果、貯留層内の東側圧入井近傍に、生産井に向かって広がるタイムラプスの P 波速度低下領域が確認された (Yamada *et al.*, 2023)。そこで、この 4D レスポンスをより正しく解釈するために、パイロット試験の WAG オペレーションを模擬した動的貯留層モデルに基づいて、対象貯留層の弾性特性モデル（P 波および S 波速度、密度モデル）を作成した。

炭酸塩岩の貯留層特性と弾性特性の関係を調べるため、過去に TRC では、多数のアブダビの炭酸塩岩貯留層の岩石試料を用いて弾性波速度測定を行っており、今回はこれらの測定の内、対象貯留層と同じ層準の岩石試料を用いた測定結果を利用した。Kato *et al.* (2013) は、これらの測定結果から、乾燥状態の炭酸塩岩の孔隙率と弾性特性の関係、有効圧力と弾性特性の関係に対する経験式を求めている。

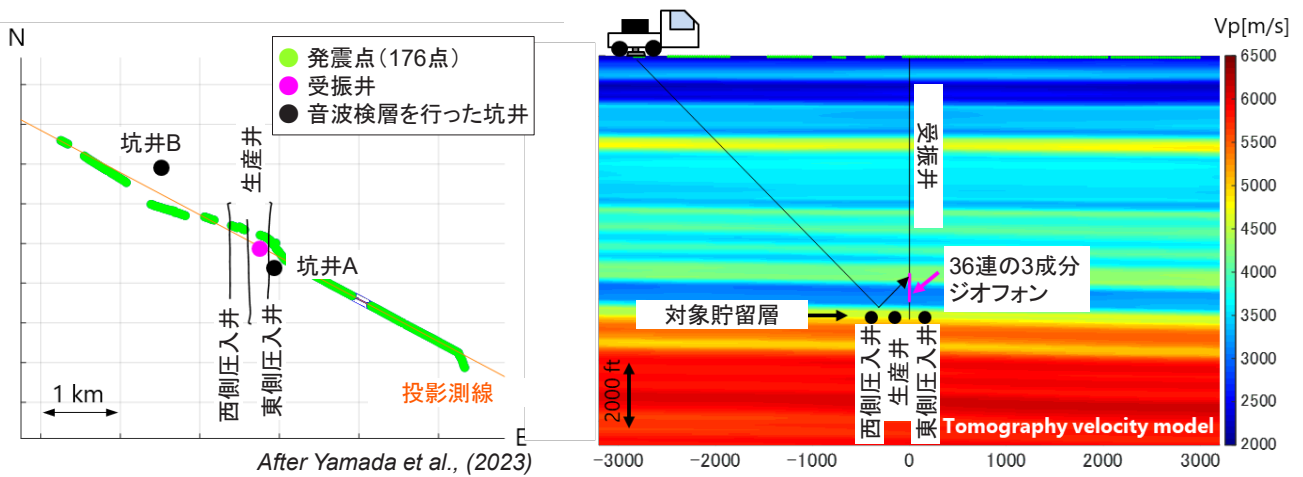


図4 2D walkaway VSPの調査ジオメトリ
(左図) 平面図. (右図) 断面図

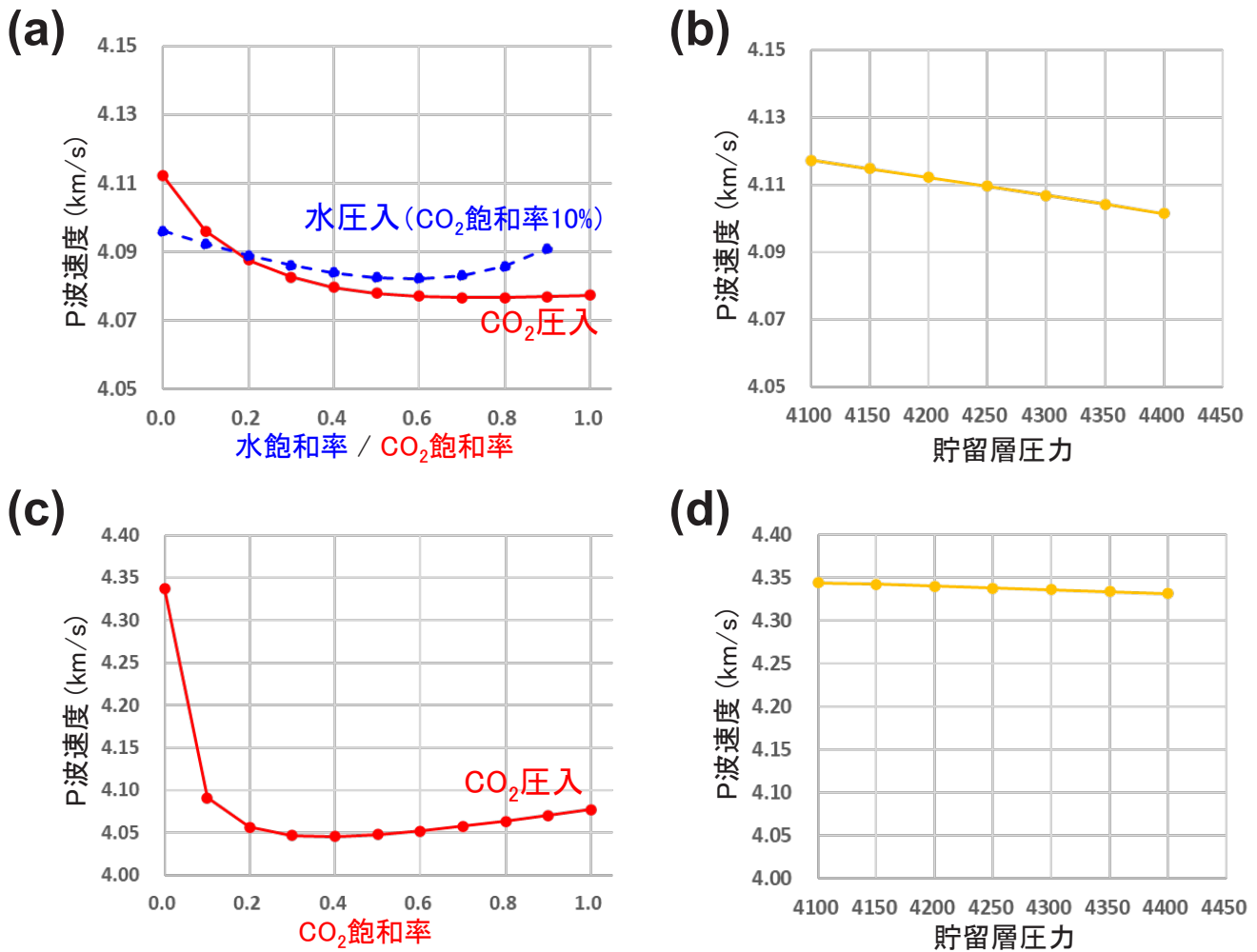


図5 P波速度に対する飽和率と貯留層圧力の影響

(a) 油層における飽和率変化。本対象地域のWAGでは、先にCO₂を圧入していることから、水圧入のケースでは、油飽和率90%・CO₂飽和率10%の状態から油を水に置換。(b) 油層における貯留層圧力変化。(c) 水層における飽和率変化。(d) 水層における貯留層圧力変化

これらの岩石骨格に関する経験式と Gassmann (1951) の流体置換の式などを用いて、動的貯留層モデルに含まれる孔隙率や貯留層圧力、飽和率の貯留層特性モデルから対象貯留層の弾性特性モデルを作成した。しかし、今回利用した弾性波速度測定結果が海洋フィールド由来の岩石試料を用いた測定の結果であったためか、得られた P 波および S 波速度モデルと本対象地域で取得された音波検層の速度には多少の差が見られた。そこで、この音波検層の速度に合うように作成したモデルに係数をかけて補正した。ところで、両者のモデルの関係づけを行うことで、弾性特性モデ

リングの感度分析を行うことができる。図 5 は油層および水層それぞれにおける飽和率と貯留層圧力の P 波速度への影響を示しており、油層と水層いずれにおいても、P 波速度は貯留層圧力よりも飽和率に対する感度が高いことが分かる。

図 6 は、ベースライン調査時およびモニタリング調査時における弾性特性モデリング結果の差分である。P 波速度変化 (ΔV_p) モデルに着目すると、その変化領域の分布は、おおむね CO_2 飽和率変化 (ΔS_{CO_2}) と整合的であり、本対象地域における P 波速度変化は CO_2 飽和率変化の影響を

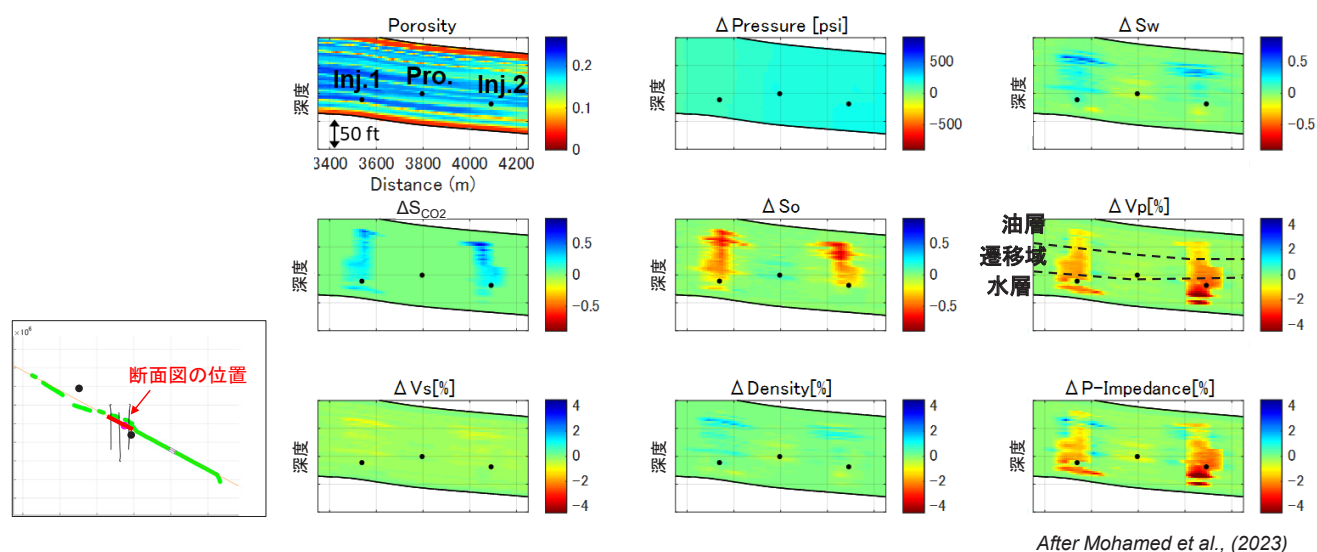


図 6 貯留層特性と弾性特性のベースライン調査とモニタリング調査時の差

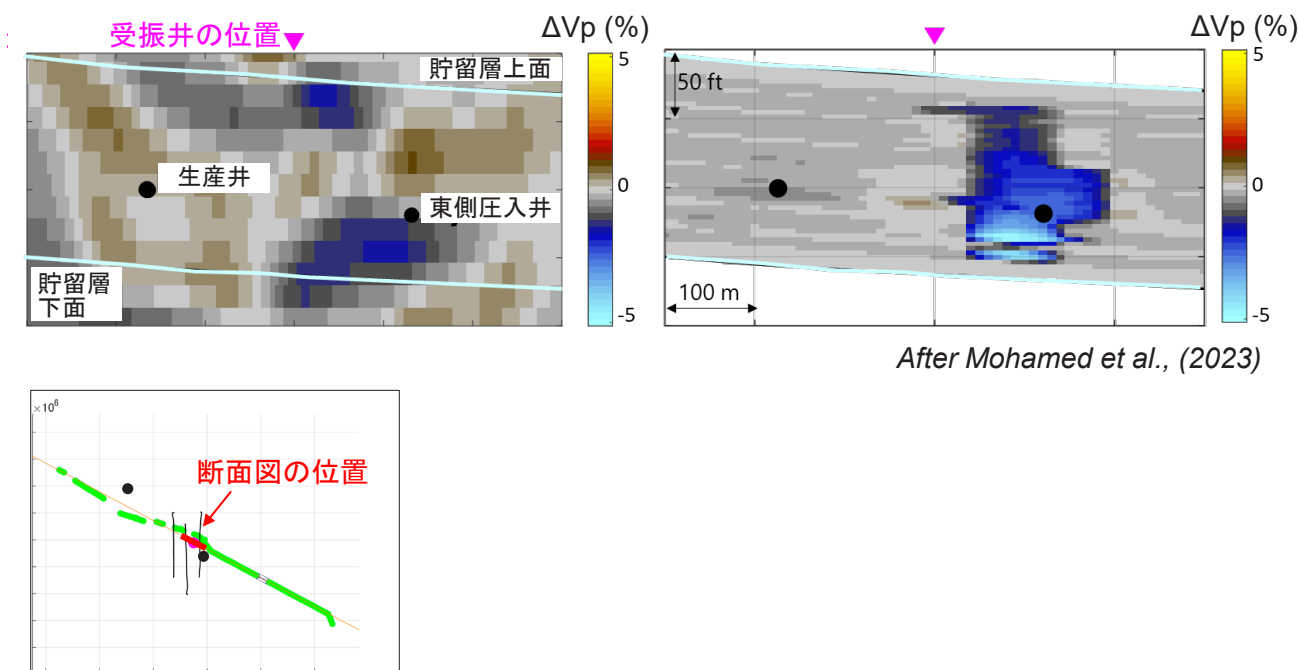


図 7 タイムラプス FWI 解析 (左上図) と弾性特性モデリング (右上図) で得られた P 波速度変化モデルの比較

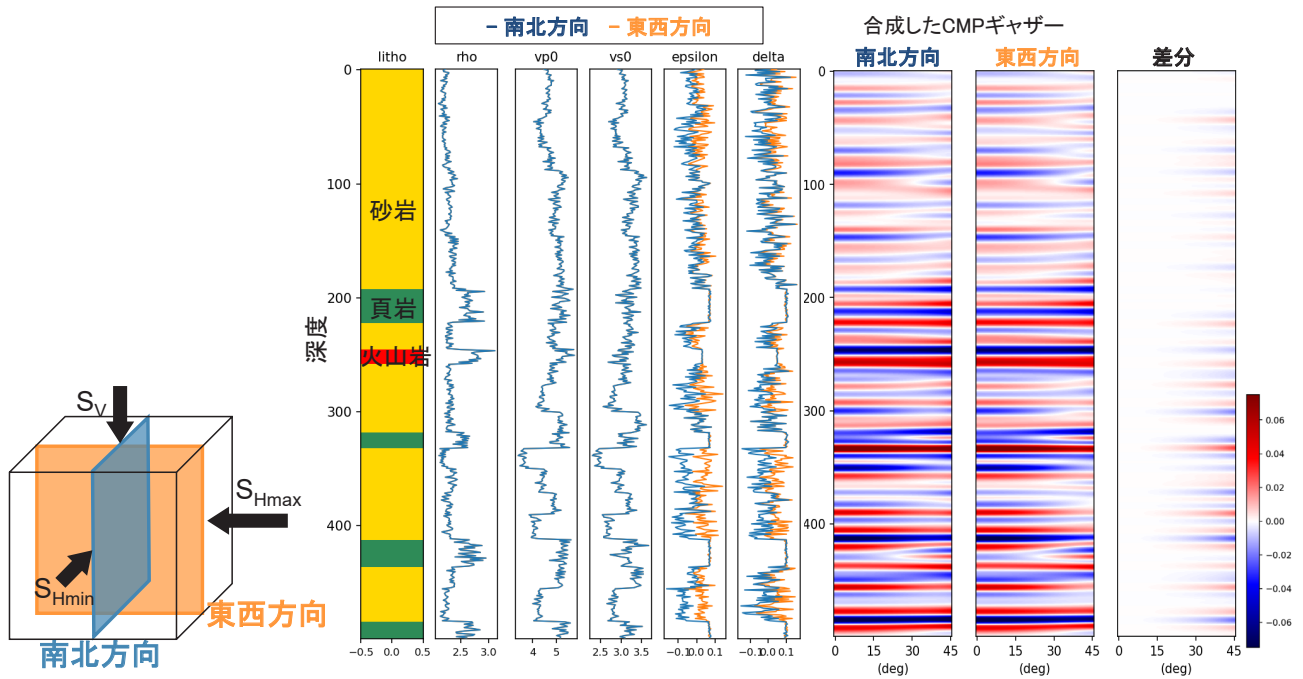


図8 応力に起因する速度異方性を考慮した東西方向と南北方向の CMP ギャザーの比較

大きく受けることが分かる。ただし、P波速度変化の大きさは貯留層の上部で小さく、下部で大きい傾向があり、 CO_2 飽和率の変化量と整合的ではない。これは、各流体の体積弾性率の違いから、 CO_2 を油層に圧入するよりも、水層に圧入した方がP波速度の変化が大きいためである(図5a, c)。弾性特性モデリングによって得られたP波速度変化とtime-lapse walkaway VSPデータのFWI解析によって得られたP波速度変化のモデルの比較を図7に示す。まず、両方のモデルにおいて、東側圧入井(Injector 2)から生産井に向かって伸びるP波速度の低下領域が確認されており、大局的に整合的である。そして、上述の弾性特性モデリングの結果に基づくと、このP波速度変化は圧入された CO_2 による飽和率変化の影響と解釈される。しかし、中央部分では両者に差があり、FWI解析から得られたモデルにはP波速度の低下が確認されない。この要因として、貯留層シミュレーションでは想定されていない CO_2 の上方への移動が起きた可能性が考えられる。 CO_2 を圧入した後の塩水の圧入や CO_2 のgravity overrideなどの影響により圧入された CO_2 が予期せず上方に移動し、中央部分の CO_2 飽和率およびそれに伴うP波速度低下がモデリング結果よりも小さくなっている可能性がある。なお、VSPの受振井では定期的に飽和率検層が行われており、中央部分では CO_2 よりも水飽和率が上昇していることが確認されており、この解釈結果と整合的である。

ここで紹介したように、今回の弾性特性モデリングにより、time-lapse walkaway VSPデータのFWI解析で確認された東側圧入井近傍のP波速度低下はWAGオペレーションにより圧入された CO_2 の影響を受けたものである

と解釈された。また、両者の結果が大局的に整合することから、弾性特性モデリングに利用した動的貯留層モデルの信頼性を確認することができた。さらに、この動的貯留層モデルでは想定されていなかった圧入 CO_2 の貯留層上方への移動が、東側圧入井と生産井の間で生じている可能性が示唆され、同モデルの更なる高精度化に寄与する情報が得られた。一方で、今回の弾性特性モデリングは、同じ層準ではあるものの、海洋フィールド由来の岩石試料を用いた弾性波速度測定結果に基づいており、その妥当性には一部疑問が残る。今後、陸上の本調査フィールドで採取された岩石試料を利用した弾性波速度測定を行うことができれば、より信頼性の高い弾性特性モデルが得られる。

4. 議 論

弾性波速度測定による速度異方性の推定のスタディ事例では、岩石に内在する速度異方性に加え、外部の応力異方性に起因する速度異方性の大きさを見積もった。そこで、この応力起因の速度異方性の影響によって、CMPギャザーが方位によってどの程度異なるかを簡易的なモデルを用いて調べた(図8)。本対象地域で想定される最大主応力方向(東西方向)と最小主応力方向(南北方向)それぞれの方向について、主応力条件に対応する速度異方性を、今回の実験結果に基づいて砂岩層に与えてCMPギャザーを合成した。具体的には、それぞれの応力条件と同じ条件で測定した実験結果から、イプシロンとデルタの平均値と標準偏差をそれぞれ計算し、正規分布を仮定した上で独立に乱数を発生させて各深度のイプシロンとデルタを与えている。なお、ここでは検討を単純にするため、鉛直二次元の

岩石変形を仮定し、これに直交する水平主応力の影響は無視している。それぞれの方向の CMP ギャザーの差を取ると、特に、応力異方性の影響を受けやすい far angle のトレースにおいて差が生じることが分かった。これらの結果から、応力異方性が強い地域においては、岩石に内在する速度異方性に加え、地震探査データの取得方向の応力場に起因する速度異方性を考慮して、AVO インバージョンを行うことで、インバージョン結果の精度が向上する可能性がある。

アブダビ陸上油田における CO₂-EOR モニタリングの事例においては、動的貯留層モデルに基づく弾性特性モデリングの結果を 4D レスポンスの解釈に利用したが、より定量的な解釈を目的とした研究が現在も活発に行われており、例えば、機械学習や Bayesian inversion を利用する方法が提案されている (Côrte *et al.*, 2020, 2022)。Côrte *et al.* (2022) では、北海のタービダイト成砂岩の油田を対象に、4D 地震探査データの near, middle, far angle stack データから水・ガス飽和率と貯留層圧力の変化を Bayesian inversion の手法により求めている。また、それぞれのインバージョン結果の不確実性も併せて示している。石油・天然ガス開発事業における貯留層マネジメントの最適化や CO₂ 地中貯留事業における安全な操業のためには、当初構築した動的貯留層モデルと実際のモニタリング結果に大きな乖離がある場合、静的あるいは動的貯留層モデルの更新が必要になる。そのような場合に、4D 地震探査の定量解釈により、坑井間の空間的な貯留層特性の情報を追加することで、これらのモデルの更新に大きく寄与するものと考えられる。

5. ま と め

岩石物理は、地震探査データを用いた貯留層評価において、弾性特性と貯留層特性を結びつける役割を果たし、同一の岩石試料のさまざまな物性値などが得られる実験室での測定・分析はその中でも中核的な役割を果たしてきた。機構においても、これまで、TRC ラボでの岩石・流体実験に基づき、さまざまなフィールドを対象に、岩石物理に関する共同スタディを実施してきた。本稿では、最近の事例として、岩石試料の弾性波速度測定結果を利用した速度異方性の推定と 4D 地震探査の解釈の事例を紹介した。これらの事例で示したように、石油・天然ガス事業の探鉱や開発・生産段階における、坑井や地震探査などのデータを用いた貯留層評価において、ラボ分析に基づく岩石物理の評価を組み込むことによって、より整合的・定量的な解釈結果やモデルが得られることが期待される。今後、CO₂ 地中貯留事業が活発化し、坑井情報が限られる状況で貯留層評価を行う機会が増え、地震探査からのアプローチがこれまでよりも一層重要になると予想される。機構は今後も、TRC のラボを活用し、石油・天然ガス開発事業や CO₂ 地中貯留事業における貯留層評価の高精度化に貢献していく。

謝 辞

本稿の 1 つめのスタディ事例は、INPEX Operations

Australia Pty. Ltd と JOGMEC の共同研究の一部として実施したものである。本稿の発表を許可いただき、同社とイクシス LNG 事業の共同事業参加者である TotalEnergies, CPC, 大阪ガス, 関西電力, JERA, 東邦ガスに謝意を表する。また、本稿の 2 つめのスタディ事例について、発表を許可頂き、JODCO Onshore Limited および ADNOC グループに謝意を表する。

参 考 文 献

- Asaka, M., 2018: Anisotropic AVO: Implications for reservoir characterization. *The Leading Edge*, **37** (12), 916–923, doi: 10.1190/tle37120916.1.
- Côrte, G., Dramsch, J., Amini, H. and MacBeth, C., 2020: Deep neural network application for 4D seismic inversion to changes in pressure and saturation: Optimizing the use of synthetic training datasets. *Geophysical Prospecting*, **68** (7), 2164–2185, doi: 10.1111/1365-2478.13304.
- Côrte, G., Amini, H. and MacBeth, C., 2022: Bayesian inversion of 4D seismic data to pressure and saturation changes: Application to a west of Shetlands field. *Geophysical Prospecting*, **71** (2), 292–321. doi: 10.1111/1365-2478.13304.
- 福成徹三・Levi Knapp・吉松圭太・鈴木正義・服部達也, 2016: INPEX イクシスフィールドにおける繰り返し地震探査によるモニタリング有効性評価: パート 1. 平成 28 年 JOGMEC 石油開発技術本部年報, 82–85.
- Gassmann, F., 1951: Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics*, **16** (4), 673–685. doi: 10.1190/1.1437718.
- Jack, I., 2017: 4D seismic - Past, present, and future. *The Leading Edge*. **36** (5). 386–392, doi: 10.1190/tle36050386.1.
- Kato, A., Watanabe, K., Kono, F., Obara, H., Takanashi, M., Takahashi, S. and Al-Kaabi, A., 2013: Screening study on crosswell monitoring methods toward offshore Abu Dhabi CO₂-EOR project – Part 1: Rock physics model building. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference (ADIPEC), Abu Dhabi, UAE, November 10–13.
- 加藤文人・ステュアートロバート, 2012: AVO インバージョンによるオイルサンド貯留層の砂岩分布予測. 石技誌, **77** (1), 28–41, doi: 10.3720/japt.77.28.
- Knapp, L., Fukunari, T., Yoshimatsu, K., Suzuki, M., Hattori, T., Furuya, K. and Matsui, R., 2017: Feasibility of reservoir monitoring using 4D seismic in the Ichthys gas condensate field, NW Australia: velocity-geology-pressure relationships defined in core. Proc. The 23rd Formation Evaluation Symposium, Japan, October 11–12.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin J., 2009: The Rock physics handbook, 2nd edition. Cambridge University Press.
- Mohamed, M., Ahmed, J., Mahmood, H., Aljaberi, A., Waqas, M., Alhamed, A., Mouri, T., Shimizu, H., Yamada, Y., and

- Mochizuki M, 2023: Estimating the Effects of Wag-EOR on Elastic Properties for Seismic Reservoir Monitoring in Abu Dhabi. Proc. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference (ADIPEC), Abu Dhabi, UAE, October 2, doi: 10.2118/216355-MS.
- Nur, A., and Simmons, G., 1969: Stress-induced velocity anisotropy in rock: An experimental study. *Journal of Geophysical Research*, **74** (27), 6667–6674, doi: 10.1029/JB074i027p06667.
- Ong, O.N., Meléndez-Martínez, J., Schmitt, D.R., and Kofman, R., 2015: Study of elastic anisotropy on an unconventional ‘shale’ rock using ultrasonic waves and static strain measurements. *CSEG Recorder*, **40** (5), 30–35.
- Thomsen, L., 1986: Weak elastic anisotropy. *GEOPHYSICS*, **51** (10), 1954–1966, doi: 10.1190/1.1442051.
- Tsuneyama, F., Takahashi, I., Nishida, A. and Okamura, H., 2003: Vp/Vs ratio as a rock frame indicator for a carbonate reservoir. *First Break*, **21** (7), 53–58, doi: 10.3997/1365-2397.2003011.
- Yamada, Y., Nakayama, S., Ishiyama, T., Mochizuki, M., Mouri, T., Shimizu, H., Al Hamed, A. M. and Aljaberi, A., 2023: CO₂-EOR monitoring using time-lapse FWI with walkaway VSP datasets in a carbonate field onshore Abu Dhabi. Expanded Abstract, Third International Meeting for Applied Geoscience & Energy (IMAGE), USA, August 28 – September 1, doi: 10.1190/image2023-3899915.1.
- Yan, F., Han, D.-H. and Chen, X.-L., 2018: Practical and robust experimental determination of c_{13} and Thomsen parameter δ . *Geophysical Prospecting*, **66** (2), 354–365, doi: 10.1111/1365-2478.12514.

講演
Lecture

Rock physics of shales: applications in geomechanics*

Michinori Asaka^{**,†}

(Received October 16, 2024 ; accepted January 5, 2025)

Abstract : Shale formations act as barriers in carbon capture and storage (CCS) and serve as seal rocks in conventional oil and gas fields. Understanding their elastic properties is essential for effective subsurface evaluation and drilling. One of the notable elastic properties of shale formation is strong anisotropy, which is influenced by the anisotropy and arrangement of clay minerals. The impact of this anisotropy on seismic response has been widely discussed, highlighting the importance of considering anisotropy in seismic data analysis. However, the influence of anisotropy in the field of geomechanics has received less attention, and the pitfalls of assuming isotropy in analysis have not been adequately addressed. In this presentation, I first introduce the elastic properties and rock physics of shales. Subsequently, I discuss the effects of anisotropy on geomechanical analysis and emphasize the issues associated with assuming isotropy in such analysis. Lastly, I address the challenges of implementing geomechanical analysis that considers anisotropy in real-field contexts, and I discuss the role of rock physics in this setting.

Keywords : shale, rock physics, anisotropy, wellbore stability, reservoir geomechanics

1. Introduction

Shales are pervasive and represent the most common lithology. Shale formations act as barrier in carbon capture and storage (CCS) and serve as seal rocks in conventional oil and gas fields. It is crucial to understand their rock properties for effective subsurface evaluation and drilling. However, due to the complexity of shales, which includes small grain size, anisotropic minerals, internal structures, and the presence of bound water, characterizing their properties can be challenging. In particular, it is difficult to characterize the strong elastic anisotropy caused by the anisotropy and arrangement of clay minerals in field settings. Although the impact of anisotropy on seismic response has been extensively discussed, underscoring the importance of incorporating anisotropy into seismic data analysis, its influence in the realm of geomechanics has received less scrutiny. The pitfalls of assuming isotropy in such analyses have not been adequately highlighted. In this presentation, I will initially introduce the elastic properties and rock physics of shales to underscore the anisotropic characteristics of shales. I will then discuss the impacts of anisotropy on geomechanical analyses and highlight the issues related to assuming isotropy in such evaluations.

I'll focus on two main areas: (1) stress concentration around the borehole due to drilling, and (2) surface deformation due to changes in reservoir pore pressure. Lastly, I'll address the challenges of implementing geomechanical analyses that consider anisotropy in real field contexts, and discuss the role that rock physics plays in these settings.

2. Elastic properties and rock physics of shales

The internal structure of shale formations has been observed through methods such as scanning electron microscopy, revealing that they are assemblies of the local arrangement of clay mineral particles (*e.g.*, Sayers and den Boer, 2019). The local arrangement is a key source of the elastic anisotropy of shales, and it can be approximated as vertical transversely isotropy (VTI). Using Voigt notation, the relationship between the applied stress and the resulting strain for VTI rock can be described by five independent elastic constants:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{11}-2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11}-2C_{66} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (1)$$

stress Five independent elastic constants strain

* 令和 6 年 6 月 4 日, 令和 6 年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「岩石物理学—E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開」にて講演— This paper was presented at the 2024 “Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –” held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

** 株式会社 INPEX INPEX CORPORATION

† Corresponding author : E-Mail : michinori.asaka@inpec.co.jp

In Geophysics, the vertical P-wave velocity, the vertical S-wave

velocity, and Thomsen's anisotropy parameters (Thomsen, 1986) are commonly used to characterize VTI anisotropy:

$$V_{PV} = \sqrt{C_{33}/\rho} \quad (2)$$

$$V_{SV} = \sqrt{C_{44}/\rho} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \quad (6)$$

In Geomechanics, the vertical Young's modulus, the horizontal Young's modulus, the vertical Poisson's ratio, the horizontal Poisson's ratio and the vertical shear modulus are commonly used:

$$E_V = C_{33} - \frac{C_{13}^2}{C_{11} - C_{66}} \quad (7)$$

$$E_H = 4C_{66} \left(1 - \frac{C_{66}C_{33}}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \right) \quad (8)$$

$$\nu_{VH} = \frac{C_{13}}{2(C_{11} - C_{66})} \quad (9)$$

$$\nu_{HH} = 1 - \frac{2C_{66} + C_{13}}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \quad (10)$$

$$G_V = C_{44} \quad (11)$$

A rock physics model of shales must accurately provide the five independent elastic constants. Here are the key

observations needed to construct a realistic model:

- Shales can be considered as assemblages of locally arranged clay mineral particles.
- The local arrangement of clay particles is referred to as a domain, and its alignment is significantly affected by mechanical compaction. The mechanical compaction causes partial alignment of the domain.
- Elastic moduli for single crystals of clay minerals have not been measured experimentally due to technical difficulties associated with their small grain size (Sayers and den Boer, 2020). However, muscovite's elastic moduli, which is structurally and compositionally similar to the clay mineral illite (Katahara, 1996; Tosaya, 1982), have been measured. Its transversely isotropic approximation is provided by Sayers and den Boer (2016) (Table 1).
- Existing measurements (*e.g.*, Antognozzi *et al.*, 2021) suggest the shear modulus of clay bound water is nonzero.

Asaka *et al.* (2021) proposed a rock physics model that considers the above observations and demonstrated that it yields elastic constants consistent with existing core velocity measurement results (Fig. 1). In this model, the local arrangement of clay particles (*i.e.*, domain) is accounted

Table 1 Transversely isotropic approximation of dry muscovite provided by Sayers and den Boer (2016)

C_{11} [GPa]	181.3
C_{13} [GPa]	24.8
C_{33} [GPa]	60.1
C_{44} [GPa]	20.3
C_{66} [GPa]	66.3
δ	0.0941
ε	1.0083
γ	1.1330

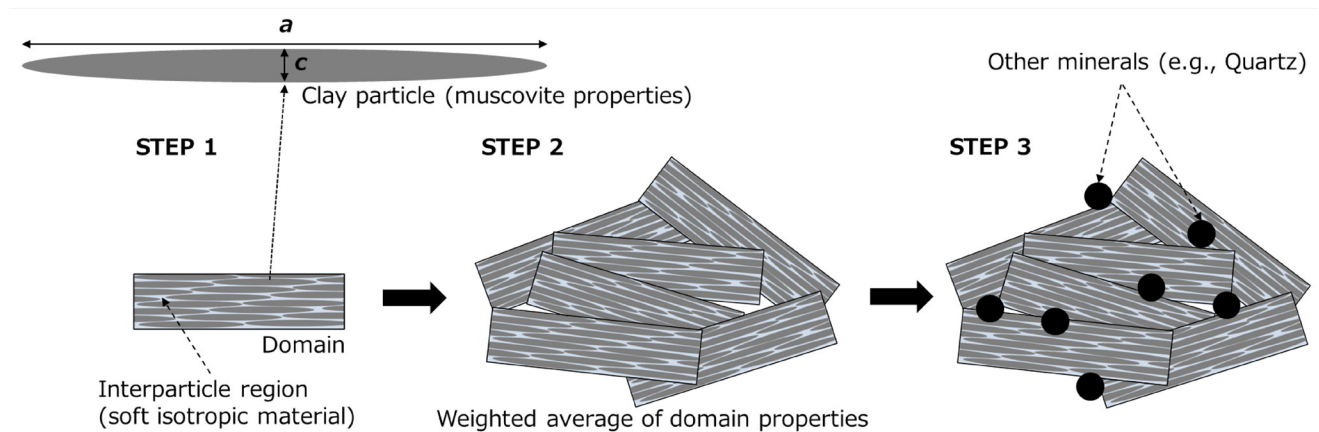


Fig. 1 Rock physics modeling workflow proposed by Asaka *et al.* (2021). After Asaka (2024)

for by the Sayers-den Boer approach (Sayers and den Boer, 2018). The elastic moduli of muscovite (Table 1) are used as a clay particle parameter and nonzero bulk/shear moduli are required as interparticle region parameters in this approach.

Furthermore, it has been found that in shale formations exhibiting strong anisotropy in elastic constants, generalized Skempton's B parameters also display pronounced anisotropy (*e.g.*, Holt *et al.*, 2018). Skempton's B parameters describe undrained induced pore pressure, with dependency on the fluid bulk modulus. In VTI materials, the undrained induced pore pressure can be written as:

$$\begin{aligned}\Delta p_f &= \frac{1}{3} \{B_{33} \Delta \sigma_{33} + B_{11} (\Delta \sigma_{11} + \Delta \sigma_{22})\} \\ &= \frac{1}{3} \{B_V \Delta \sigma_{33} + B_H (\Delta \sigma_{11} + \Delta \sigma_{22})\}\end{aligned}\quad (12)$$

where B_V represents the vertical component of Skempton's B , while B_H indicates the horizontal component. $\Delta \sigma_{33}$ represents the stress change in the direction parallel to the symmetry axis (*i.e.*, the direction perpendicular to the bedding). Similarly, $\Delta \sigma_{11}$ and $\Delta \sigma_{22}$ represent the stress changes in the direction perpendicular to the symmetry axis (*i.e.*, the direction parallel to the bedding). In shales, B_V is typically greater than B_H (*e.g.*, Asaka and Holt, 2021). For core plug measurements, this results in the undrained induced pore pressure being dependent on the core plug orientation. If we apply axial stress $\Delta \sigma_a$ and confining stress $\Delta \sigma_r$ to the core plug at an orientation angle of θ (Fig. 2), we can express the stress change in the directions parallel and perpendicular to bedding as follows:

$$\Delta \sigma_{11} = \Delta \sigma_r + (\Delta \sigma_a - \Delta \sigma_r) \sin^2 \theta \quad (13)$$

$$\Delta \sigma_{22} = \Delta \sigma_r \quad (14)$$

$$\Delta \sigma_{33} = \Delta \sigma_r + (\Delta \sigma_a - \Delta \sigma_r) \cos^2 \theta \quad (15)$$

Substituting these expressions into Eq. (12) leads to:

$$\Delta p_f = B_S \{ \Delta \sigma_r + A_S(\theta) (\Delta \sigma_a - \Delta \sigma_r) \} \quad (16)$$

where,

$$B_S = \frac{B_V + 2B_H}{3} \quad (17)$$

$$A_S(\theta) = \frac{B_V \cos^2 \theta + B_H \sin^2 \theta}{B_V + 2B_H} \quad (18)$$

Consequently, the dependency of the undrained induced pore pressure on the core plug orientation is described by $A_S(\theta)$. By measuring the dependency of the undrained induced pore pressure on the core plug orientation, one can estimate B_V and B_H (*e.g.*, Holt *et al.*, 2018). Fig. 3 showcases

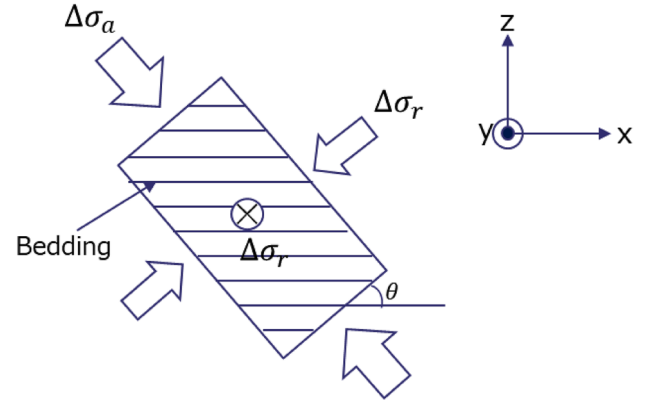


Fig. 2 Application of axial stress $\Delta \sigma_a$ and confining stress $\Delta \sigma_r$ to the core plug with the orientation angle of θ .

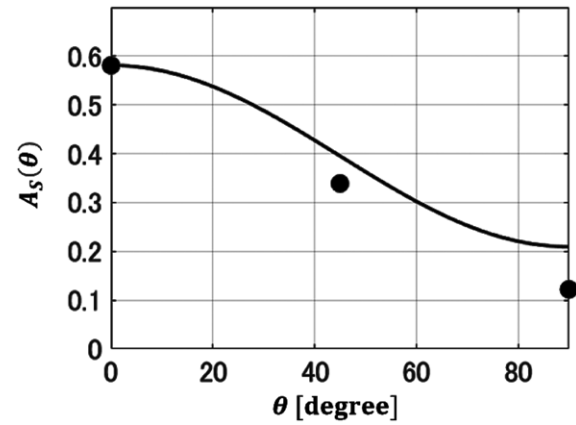


Fig. 3 $A_S(\theta)$ versus core plug inclination for laboratory tests conducted on three differently oriented core plugs obtained from the brine-saturated Shaly Facies 3 of Opalinus Clay (Lozovyi and Bauer, 2019) (circles). The solid line is drawn according to Eq. (18) using B_V and B_H values that offer the best fit to the laboratory test results.

$A_S(\theta)$ versus core plug inclination for laboratory tests conducted on three differently oriented core plugs obtained from the brine-saturated Shaly Facies 3 of Opalinus Clay (Lozovyi and Bauer, 2019). The curve is plotted according to Eq. (18) using B_V and B_H values that offer the best fit to the laboratory test results. It should be noted that A_S is always 1/3 in isotropic poroelasticity (*i.e.*, undrained induced pore pressure does not depend on the orientation of the core plug in isotropic rocks).

3. The impact of elastic anisotropy on geomechanical analysis

As an example of geomechanical analysis, I will discuss the analysis of 1) stress concentration around the borehole due to drilling, and 2) surface deformation due to changes

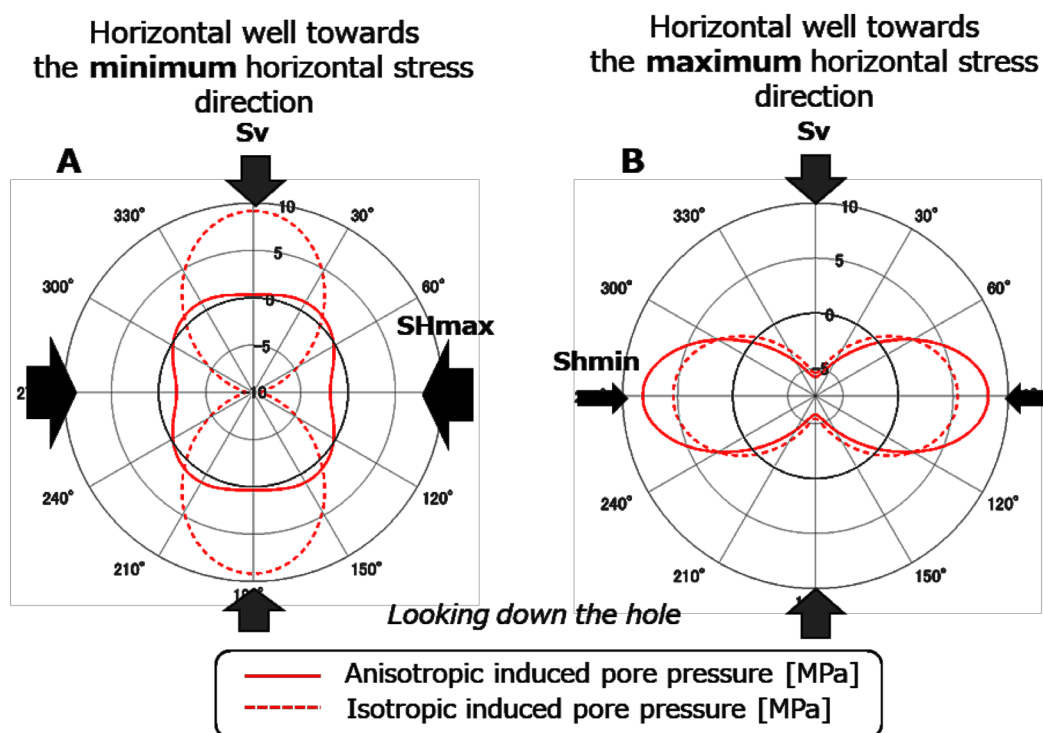


Fig. 4 Undrained induced pore pressure at a circular borehole wall for a horizontal well oriented in the directions of minimum (left) and maximum (right) horizontal stresses. The anisotropic case is shown by a solid line, while the isotropic case is represented by a dashed line.

Table 2 Parameters used to calculate the undrained induced pore pressure at a circular borehole wall

Overburden stress [sg]	2.00
Maximum horizontal stress [sg]	2.39
Minimum horizontal stress [sg]	1.77
Pore pressure [sg]	1.50
Mud weight [sg]	1.63
Skempton B_V	1.14
Skempton B_H	0.41
Skempton B (for isotropic case)	0.85

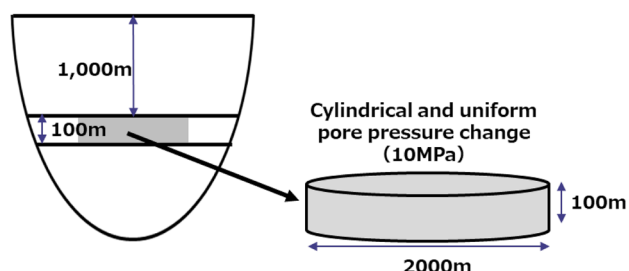


Fig. 5 A simple three-layer model used to calculate the surface deformation

in reservoir pore pressure. First, regarding the stress concentration around the borehole resulting from drilling, the immediate post-drill stress change can be evaluated using the equation proposed by Amadei (1983), and the consequential pore pressure change (*i.e.*, undrained induced pore pressure) can be assessed using anisotropic poroelasticity. Asaka and Holt (2021) evaluated stress concentration around the borehole using this method and demonstrated that the analysis results considering anisotropy differed significantly from those assuming isotropy. Fig. 4 depicts the undrained induced pore pressure at a circular borehole wall due to drilling of horizontal wells oriented in the directions of maximum and minimum horizontal stresses. The stress condition is a strike-slip stress condition. Both isotropic and

anisotropic cases are presented. The parameters used in this calculation are provided in Table 2. As Asaka and Holt (2021) have shown, the undrained induced pore pressure in an anisotropic formation differs significantly from that in an isotropic formation.

The influence of changes in reservoir pore pressure on surface deformation was evaluated using a semi-analytical generalized Geertsma solution extended to the anisotropic formations (Yan *et al.*, 2023). A simple three-layer model (as shown in Fig. 5) was employed, and an increase in reservoir pore pressure of 10 MPa was assumed. Other parameters used in this simulation are detailed in Table 3. Note that the C_{33} and C_{44} values are not changed from the isotropic to the anisotropic case; only the anisotropy parameters are altered.

Table 3 Parameters used to calculate the surface deformation

Overburden and Underburden				Reservoir (isotropic)	
(Isotropic case)		(Anisotropic case)			
C_{33} [GPa] : 13.18	E_V [GPa] : 6.03	C_{33} [GPa] : 13.18	E_V [GPa] : 8.04	C_{33} [GPa] : 5.72	E_V [GPa] : 5.27
C_{44} [GPa] : 2.15	E_H [GPa] : 6.03	C_{44} [GPa] : 2.15	E_H [GPa] : 10.43	C_{44} [GPa] : 2.23	E_H [GPa] : 5.27
δ : 0	G_V [GPa] : 2.15	δ : 0.05	G_V [GPa] : 2.15	δ : 0	G_V [GPa] : 2.23
ε : 0	ν_{VH} : 0.40	ε : 0.3	ν_{VH} : 0.27	ε : 0	ν_{VH} : 0.18
γ : 0	ν_{HH} : 0.40	γ : 0.3	ν_{HH} : 0.52	γ : 0	ν_{HH} : 0.18

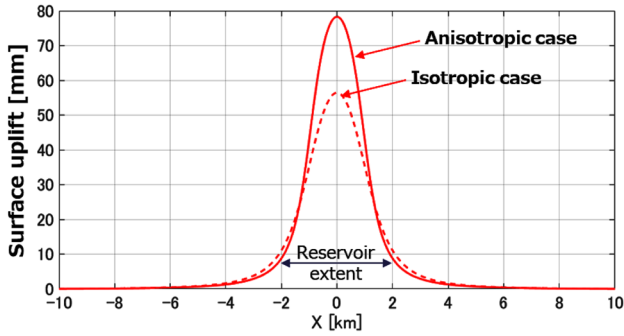
**Fig. 6** A comparison of surface deformation between the anisotropic (solid line) and isotropic (dashed line) cases

Fig. 6 provides a comparison of surface deformation for the anisotropic and isotropic cases. Significantly larger surface deformation is observed in the anisotropic case compared to the isotropic case. Therefore, failing to account for elastic anisotropy in the geomechanical simulation can result in unexpectedly large surface deformations.

4. The role of rock physics in geomechanical analysis in field applications

The previous section discussed the importance of conducting geomechanical analysis that accounts for anisotropy. However, when performing such analyses in field applications for shale layers, a key challenge is obtaining the data necessary for determining anisotropy parameters. Anisotropy measurement requires complex core testing, and both core sampling and testing are costly, making the assessment of anisotropy in barrier layers and sealing rocks in the actual field difficult. Within such contexts, rock physics becomes significantly relevant. Asaka *et al.* (2021) have proposed a method to estimate anisotropy parameters by utilizing rock physics model (the model introduced in section 2) with limited information, producing results that align with measured values. Fig. 7 illustrates the outcome of anisotropy parameter estimation for Marcellus Shale using log data obtained from a vertical well (Asaka, 2024). The parameters for the rock physics model were optimized according to the measured values of C_{33} , C_{44} , and C_{66} , resulting

in excellent agreement between the measured and modeled stiffness parameters. The optimized interparticle medium bulk modulus aligns with the bulk modulus of gas, a point of significance as Marcellus Shale is gas shale. Furthermore, the optimized interparticle shear modulus aligns with prior studies on bound water properties, such as those indicated by Holt and Kolsto (2017). These points suggest the correctness of the rock physics model.

Additionally, anisotropy in the generalized Skempton's B tensor can be estimated using anisotropic poroelasticity. Assuming the skeleton of the porous materials is homogeneous at the pore (microscopic) scale, the generalized Skempton's B tensor can be calculated using undrained stiffness, porosity, fluid bulk modulus, and grain bulk modulus (Cheng, 1997):

$$B_{ij} = \frac{3(s_{ijk}^d - s_{ijk}^g)}{A} \quad (19)$$

with

$$A = (s_{ijj}^d - s_{ijj}^g) + \phi(c_f - s_{ikk}^g) \quad (20)$$

where s_{ijk}^d is the compliance of the drained skeleton, s_{ijk}^g is the compliance of the grain, c_f is the fluid compressibility, and ϕ represents porosity. Note that the compliance of the drained skeleton can be calculated from the compliance of undrained stiffness, porosity, fluid bulk modulus, and grain bulk modulus according to anisotropic poroelasticity. The estimation of the generalized Skempton's B tensor was performed targeting the shaly facies of Opalinus Clay (Lozovyi and Bauer, 2019) (Table 4). The following fit error, Err , was calculated and used to evaluate the quality of the estimation:

$$Err = (B_V^{mes} - B_V^{est})^2 + (B_H^{mes} - B_H^{est})^2 \quad (21)$$

where B_V^{mes} and B_V^{est} represent the measured and estimated B_V , respectively. Fig. 8 illustrates the fit error as a function of the assumed grain bulk modulus within anisotropic poroelasticity. It was found that the bulk modulus of randomly oriented muscovite (69 GPa), based on the Voigt average, yields small errors and provides reasonable estimates. Table 5 shows a comparison between measured B_V and B_H , and those estimated using a grain bulk modulus of 69 GPa (the bulk

modulus of randomly oriented muscovite). This finding is significant since muscovite is structurally and compositionally similar to the clay mineral illite, whose elastic moduli have not

been experimentally measured. Therefore, rock physics plays a pivotal role in estimating anisotropy to ensure more precise geomechanical analysis.

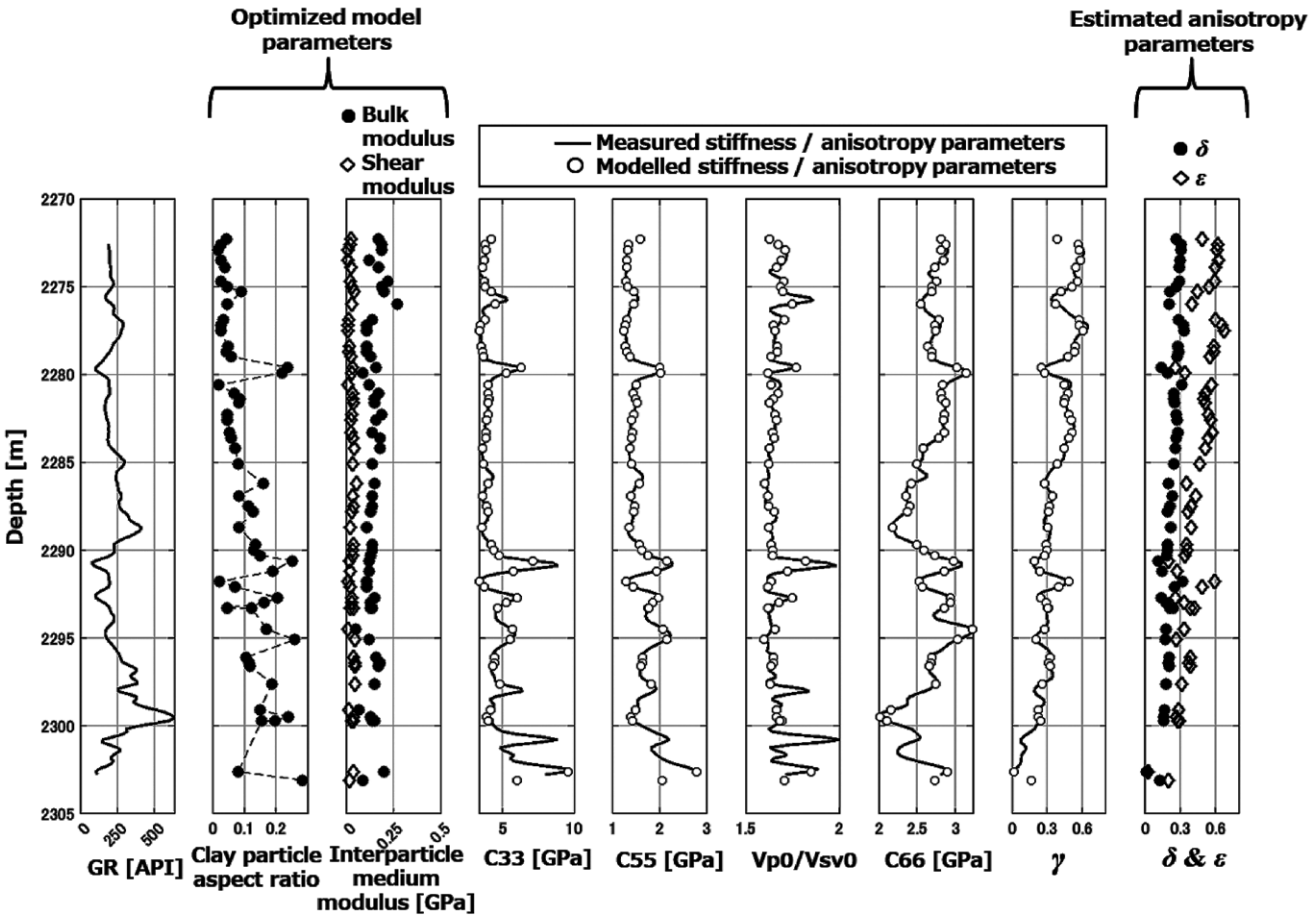


Fig. 7 Results of rock physics-based anisotropy parameters estimation of Marcellus Shale using log data acquired in a vertical well (after Asaka (2024)).

Table 4 Anisotropic poroelasticity parameters of Shaly Facies 3 and Shaly Facies 4.

	Shaly Facies 3	Shaly Facies 4
$A_S (0^\circ)$	0.54	0.58
$A_S (45^\circ)$	0.36	0.34
$A_S (90^\circ)$	0.13	0.12
$B_S (0^\circ)$	0.89	0.90
$B_S (45^\circ)$	0.92	0.89
$B_S (90^\circ)$	0.91	0.89
B_V (derived from A_S and B_S)	1.47	1.56
B_H (derived from A_S and B_S)	0.62	0.56
C_{11} [GPa]	26.6	25.8
C_{13} [GPa]	8.2	9.7
C_{33} [GPa]	17.7	17.2
C_{44} [GPa]	2.7	2.9
C_{66} [GPa]	7.3	7.1
K_f [GPa] (estimated fluid bulk modulus)	2.24	2.24
Porosity	0.16	0.16

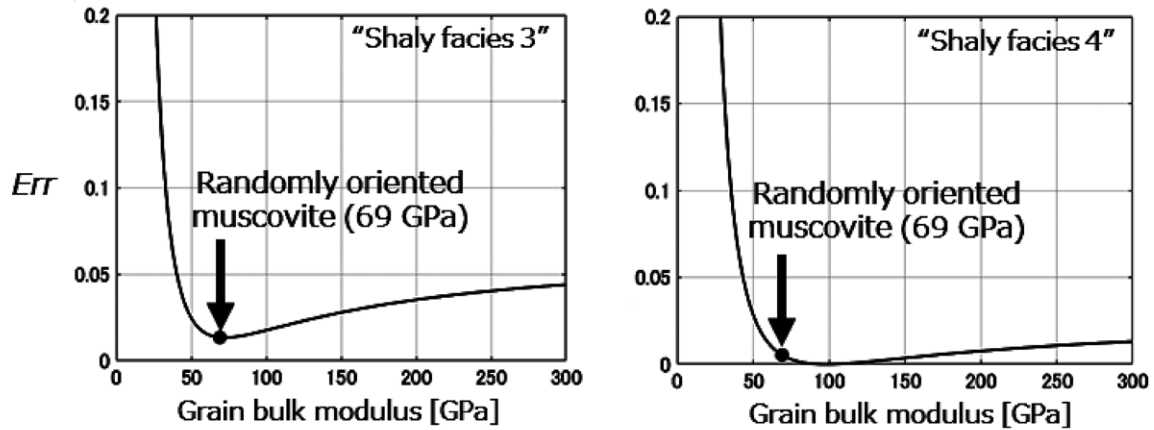


Fig. 8 The fit error, Err , as a function of the assumed grain bulk modulus

Table 5 A comparison between measured B_V and B_H and those estimated using the grain bulk modulus of 69 GPa

	B_V^{mes}	B_V^{est}	B_H^{mes}	B_H^{est}
Shaly facies 3	1.47	1.55	0.62	0.54
Shaly facies 4	1.56	1.51	0.56	0.51

Moreover, rock physics is crucial not only for anisotropy estimation but also for validating and interpreting measured values, as well as modeling potential scenarios related to fluid in shale formations, among other factors.

5. Conclusion

Shale formations serve as barriers in CCS and function as seal rocks in conventional oil and gas fields. Understanding their elastic properties is crucial for effective subsurface evaluation and drilling. Shale formation exhibits strong elastic anisotropy due to the anisotropy of the clay mineral and its alignment. Anisotropy in both stiffness and the generalized Skempton's B tensor significantly impact geomechanical responses such as drilling-induced undrained pore pressure and surface deformation caused by changes in reservoir pore pressure. However, measuring anisotropy requires complex core testing, and both core sampling and testing are costly, generally making it challenging to measure the anisotropy of barrier layers and seal rocks in the actual field. In such situations, rock physics plays a pivotal role in estimating anisotropy for more accurate geomechanical analysis. Moreover, rock physics is essential not only for anisotropy estimation but also for validating and interpreting measured values and modeling potential scenarios related to fluid in shale, among other factors.

References

- Amadei, B., 1983: Rock anisotropy and the theory of stress measurements. Springer Science and Business Media, Berlin.
- Antognozzi, M., Humphris, A. D. L., and Miles, M. J., 2001: Observation of molecular layering in a confined water film and study of the layers viscoelastic properties. *Applied Physics Letters*, **78**, 300–302.
- Asaka, M., 2024: Rock physics-based anisotropy parameters estimation of Marcellus Shale using log data acquired in a vertical well. *The Leading Edge*, **43** (5), 272–277.
- Asaka, M., and Holt, R. M., 2021: Anisotropic wellbore stability analysis: Impact on failure prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **54**, 583–605.
- Asaka, M., Holt, R. M., and Bakk, A., 2021: Rock physics model of shale: Predictive aspect. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **126**, e2021JB021993.
- Cheng, A. H.-D., 1997: Material coefficients of anisotropic poroelasticity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **34**, 199–205.
- Holt, R. M., Bauer, A., and Bakk, A., 2018: Stress-path-dependent velocities in shales: Impact on 4D seismic interpretation. *Geophysics*, **83**, MR353-MR367.
- Holt, R. M., and Kolsto, M. I., 2017: How does water near clay mineral surfaces influence the rock physics of shale?. *Geophysical Prospecting*, **65** (6), 1615–1629.
- Katahara, K. W., 1996: Clay mineral elastic properties: 66th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1691–1694.
- Lozovyi, S., and Bauer, A., 2019: Static and dynamic stiffness measurements with Opalinus Clay. *Geophysical Prospecting*, **67**, 997–1019.
- Sayers, C. M., and den Boer, L. D., 2016: The elastic anisotropy of clay minerals. *Geophysics*, **81** (5), C193-C203.
- Sayers, C. M., and den Boer, L. D., 2018: The elastic properties

of clay in shales. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123** (7), 5965–5974.

Sayers, C. M., and den Boer, L. D., 2019: The impact of different clay minerals on the anisotropy of clay matrix in shale. *Geophysical Prospecting*, **67**, 2298–2318.

Sayers, C. M., and den Boer, L. D., 2020: Effect of variations in microstructure on clay elastic anisotropy. *Geophysics*, **85** (2), MR73–MR82.

Thomsen, L., 1986: Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, **51** (10), 1954–1966.

Tosaya, C. A., 1982: Acoustical properties of clay-bearing rocks. PhD thesis, Stanford University.

Yan, H., Park, J., Holt, R. M., and Bakk, A., 2023: An analytical solution for linear elastic geomechanical responses in a layered vertical transversely isotropic medium. 57th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.

シェール層の岩石物理： ジオメカニクス分野での役割

浅香 充慶

シェール層は、二酸化炭素の地中貯留（CCS）においては遮蔽層、在来型油ガス田においてはシール岩の役割を果たし、効果的な地下評価や掘削を行うためにその弾性的特性を理解する必要がある。シェール層の弾性的特性として強い異方性が挙げられるが、これは粘土鉱物の異方性やその配列によるものである。この異方性が地震探査データに及ぼす影響についてはこれまで多く議論されてきており、異方性を考慮したデータ解析を行うことの重要性が示されてきた。一方で、ジオメカニクス分野における異方性の影響についてはあまり議論されておらず、等方性を仮定した解析のピットフォールについて十分に整理されていない。本講演では、まずシェール層の弾性特性的特徴や岩石物理について述べる。次に、シェール層の異方性がジオメカニクス解析に及ぼす影響について議論し、等方性を仮定した解析の問題点を挙げる。最後に、実フィールドで異方性を考慮したジオメカニクス解析を適用する際の課題について述べ、岩石物理が果たす役割について議論する。

講 演
Lecture

E&P 案件評価ならびに CCS 地下評価の実務における岩石物理の活用*

高 梨 将**†

(Received November 6, 2024 ; accepted December 6, 2024)

Application of Rock Physics in E&P and CCS Subsurface Evaluation

Mamoru Takanashi

Abstract : In oil and gas industry, 3D seismic techniques and rock physics analysis have enabled integrated reservoir evaluations. These evaluations have played a crucial role in optimizing development strategies and guiding investment decisions. Similar analytical methods are now being explored for subsurface evaluations and monitoring in Carbon Capture and Storage (CCS) projects.

Despite the extensive experience in applying rock physics-based analysis and evaluation technologies within Exploration and Production (E&P) industry, there has been little public discussion about practice and misunderstandings in reality. In this talk, I presented practical examples of subsurface evaluations based on rock physics in E&P operations. I also discussed key factors towards effective subsurface assessments in CCS projects.

Keywords : E&P practical evaluations, amplitude, velocity, anisotropy, depth structure, 4D, CCS

1. はじめに

石油ガス上流事業では三次元地震探査解析手法の発展に応じ、弾性論、岩石物理を組み込んだ統合的な貯留層評価が行われ開発最適化や投資判断に活用されてきた。岩石物理、弾性論は地震探査データや坑井データと貯留層評価をつなぐ重要技術であることは共通認識となっている。

岩石物理に基づく解析評価技術の実務への適用においては長年の石油ガス上流事業にて蓄積があるものの、どういった解析結果が最終的に判断のベースとして使用され、あるいは時として誤解を招いたかについては議論があまり公にされていないと感じられる。そこで、本講演では新手法の開発や高度な物理探査技術を啓蒙する目線ではなく、タイムリーな判断や評価が必要となる実案件への対応を主眼とした議論を行う。上流事業の実案件におけるデータ特性、岩石物性を統合的に考慮した事例を紹介するとともに、石油業界での経験を踏まえた CCS 地下評価で重要となる岩石物性評価のポイントについて議論する。

2. 構造評価の実例

三次元地震探査データを用いた貯留層構造評価に関しては実務上、時間構造解釈や速度モデルの不確実性のほか、表層付近などの速度不均質に伴う地震探査速度誤差、坑井データと震探データとの対比エラー、速度マッピング（外挿）手法が重要な問題として注視されてきたが、ここでは異方性速度モデルのエラーに伴う傾斜反射面の位置がずれる実例について紹介する。

北海のとあるプロジェクトにおいて、傾斜した油発見井 1 本と三次元地震探査データにて時間構造解釈を行ったところ、震探データのビンテージによって集油範囲が鞍部（あんぶ）を超えた隣接構造まで広がるか否かに影響し埋蔵量評価に大きく影響した（図 1）。震探データは一方は prestack time migration (PSTM)、もう一方は prestack depth migration (PSDM) の時間軸ボリュームであり、前者は被覆層を VTI（vertical transverse isotropy）水平多層、後者は構造や速度の側方変化や TTI（tilted transverse isotropy, 対称軸が傾いたモデル）異方性に対応した処理を行っている。

地震探査イメージング手法は対象構造の複雑化に応じて著しく発展し、full waveform inversion (FWI)・TTI-PSDM が実務にて一般的となり地下評価精度の向上に大きく貢献している。ただし、被覆層が水平多層構造に近い場合、PSTM と PSDM による時間構造の差異は十分小さいと認

* 令和 6 年 6 月 4 日、令和 6 年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「岩石物理学ー E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開」にて講演ー This paper was presented at the 2024 “Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –” held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

** 伊藤忠石油開発㈱ Itochu Oil Exploration Co., Ltd.

† Corresponding author : E-Mail : m.takanashi@itochuoi.co.jp

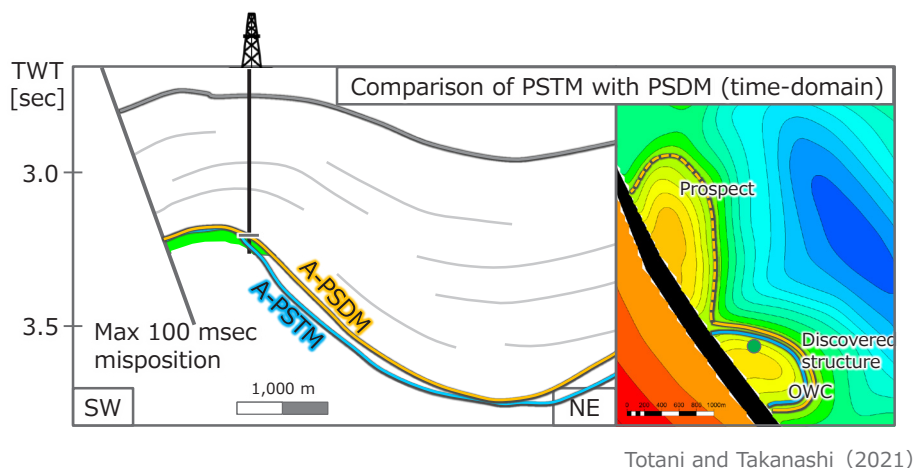


図1 傾斜反射面位置のずれによるスパイルポイントならびに集油範囲が異なる例
左は時間断面上の対象構造と掘削位置、右は構造図。

	PSTM (時間領域)	PSDM (深度領域)
	被覆層を水平多層 (VTI) とした手法	側方変化TTIモデル (Tilted Transverse Isotropy) に対応
異方性 パラメータ	Effective V_{nmo} Effective η Two-way time [m/s]	Interval v_0 Interval δ Interval ϵ Depth [m/s] $v_{nmo} = v_0 \sqrt{1 + 2\delta}$ $\eta_{int} = \frac{\epsilon - \delta}{1 + 2\delta}$

図2 重合前時間マイグレーション (PSTM) と重合前深度マイグレーション (PSDM) に必要な異方性速度パラメータ

識される。PSTM と PSDM とで必要な速度パラメータは図2のように整理され、水平多層構造の場合は Dix の式によって effective V_{nmo} , effective η から interval V_{nmo} , interval η が推定される (Tsvankin, 2005)。また interval V_{nmo} , interval η と PSDM にて必要なパラメータである V_0 , ϵ , δ とは以下の関係がある。

$$v_{nmo} = v_0 \sqrt{1 + 2\delta}$$

$$\eta = \frac{\epsilon - \delta}{1 + 2\delta}$$

PSDM が一般的となった昨今でも時間構造解釈が実施されることも多いが、これは、PSDM に伴う速度解析において垂直速度 (V_0) の決定精度が良くなく、深度構造解釈に与える影響が大きいため時間構造と垂直速度モデルを別々に評価するためである。

本実例における PSTM と TTI-PSDM の時間領域震探デー

タを比較すると、水平構造の時間構造の差異は十分小さいが、傾斜面での差異が顕著となっていた。問題理解のために実施された対象フィールドを模した異方性速度モデルに対し弾性差分シミュレータによるフォワードモデリング結果を紹介する (Totani and Takanashi, 2021, 図3)。水平 VTI 三層モデルにおいて傾斜反射面における時間イメージの感度分析が行われた。結果、傾斜が大きいくほど、 δ (あるいは NMO 速度) の正解モデルからの差異が大きいくほど、時間軸上の傾斜反射面のずれが大きくなることが示された。例えば、第三層の正解モデル $V_0 = 3000$ m/s, $\epsilon = 0.2$, $\delta = 0.07$ のところを $\epsilon = 0.4$, $\delta = 0.4$ とした場合、30度の傾斜面にて 32 ms, 水平方向に 105 m のずれが生じた。これらのパラメータは effective V_{nmo} の正解値 2600 m/s からの +7, effective η 正解値 0.12 からの -0.04 の差異に相当し、時間マイグレーション速度解析で生じる誤差範囲といえる。なお、傾斜反射面では一般に入射角の範囲が狭くなり

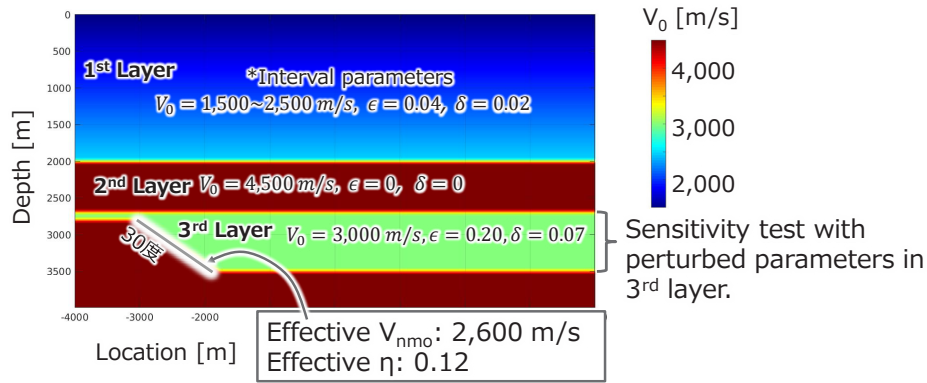


図3 Totani and Takanashi (2021) にて異方性パラメータのエラーと傾斜反射面位置のずれの関係を検討したモデル
3層目の異方性パラメータと対象反射面の傾斜を変えて感度評価を行った。

moveout 速度解析（オフセットに伴う走時変化より速度を求める手法）によるパラメータ推定はより難しくなる。

一方、岩石物性の知見からは、VTI 異方性では一般に $\varepsilon > 0$, $\varepsilon > \delta$ とされ、特に水平薄層互層の場合は δ が 0 に近いあるいは負になり得ることが知られている。こうした知見を参考にすることで異方性パラメータならびに effective V_{nmo} , effective η の妥当な範囲を狭め、より確からしい時間構造イメージの作成や構造評価に貢献した。

なお、本事例にて PSTM に用いられた effective パラメータの Dix 変換を行い interval η を確認したところ、その値が 0 ($\varepsilon = \delta$) となっていたことが判明した。岩石物理の知見からは支持されない interval η の過小値は、non-hyperbolic moveout インバージョンにおける V_{nmo} - η トレードオフを通じて effective V_{nmo} の過大値が導かれ、傾斜反射面位置のズレにつながったと考えられた。本事例においては TTI-PSDM による時間構造評価結果がより確からしいと結論づけられた。

この事例は、傾斜構造の位置精度は時間領域においても異方性パラメータの精度に大きく影響を受け、実務における構造評価へのインパクトが大きいことを示す。岩石物性の知見も活用した重要パラメータの最適化は本件のような鞍部をまたぐ構造評価のほか、傾斜反射面（フラクチャー帯など）をターゲットとした掘削位置や傾斜構造を含む油ガス埋蔵量評価にて非常に重要となる。

3. 振幅解釈の実例

続いて、振幅解釈について議論する。振幅あるいは AVO (amplitude versus offset) は岩相変化やガスの分布評価に応用されてきた一方、AVO や振幅評価にて“サポート”された失敗案件（掘削して油ガス発見に至らない）が少なくなかった。例えば Mathieu (2015) は北海における失敗井の要因分析を通じ、41%は AVO 評価で“サポート”されたとのことである。実務においては振幅あるいは AVO による炭化水素の示唆、あるいは貯留層特性の示唆が過剰に強調されてきたと感じられる。

振幅の大きさは intercept 項と gradient 項で近似した以

下の AVO 基本式がベースとなる。

$$R(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \frac{\Delta\beta}{\beta} - 2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{1}{2} \Delta\delta \right) \sin^2 \theta$$

ここで、 α は垂直 P 波速度、 ρ は密度、 β は垂直 S 波速度、 θ は入射角、 Δ は上下層の各パラメータの差分であり、第一項 intercept は音響インピーダンスの差、第二項 gradient は垂直 P 波速度、垂直 S 波速度ならびに密度と異方性パラメータ δ の差の関数である。例えば、音響インピーダンスの差が小さい場合はニアオフセットの振幅は小さいが、 $\Delta(Vp/Vs)$, $\Delta\delta$ によってファーオフセットの振幅が大きくなる場合がある。

図4は、Alp と Vp/Vs の岩相と流体による傾向を模式的に表したものであり、rock physics template と呼ばれる。一般的な傾向としては、固結度が増すと砂岩の Alp が大きく、孔隙流体感度は小さくなる。一方、固結度の小さい岩石では孔隙流体が岩石の体積弾性率に与える影響が大きくなる一方、剛性率に影響を与えないことからガス飽和砂岩では Alp, Vp/Vs がともに小さくなる。泥岩とガス層砂岩の Alp の差が小さい場合、 Vp/Vs のコントラストによって入射角にともなう振幅（絶対値）が増加するため、AVO によるガス層示唆の根拠とされた。ただし、生産性が期待できない residual gas 飽和砂岩と高ガス飽和砂岩の物性差は小さく、residual gas リスクを振幅から判断するのは困難とされる。実際は対象層のコアデータや検層データを用い、ガスマン置換など適切なモデルに基づいた流体感度を案件に応じて評価する必要がある。炭化水素の直接的な示唆 (direct hydrocarbon indicator, DHI) の評価にあたっては、集油ガス構造と振幅分布の一致性や断層シール破壊などにもなう residual gas リスクを含めた統合的な評価が必要となる。

実務での振幅・AVO 評価にて見受けられる注意点として、AVO インバージョンによる過適合が挙げられる。数値モデリングにて生成されたノイズフリーデータに対す

る AVO インバージョンでは理論に基づく Alp , Vp/Vs の推定が一般に容易であるが、実データのインバージョンではコヒーレントノイズや限られた入射角分布、被覆層の不均質などによるモデル式からの著しい乖離が生じることがある。乖離を含む入力データのインバージョンでは特に $gradient$ 項で不安定となり、複数パラメータのトレードオフによってエラー値が大きくなり得るため要注意である。一般的な逆問題と同様、観測データの品質レビューとインバージョン結果との比較、誤差関数の減少度合いをレビューするなどで、特に $gradient$ 項に関わる Vp/Vs など

の信頼度を注意深く確認する必要がある。

昨今では実務経験（失敗経験）を経て AVO インバージョンによるパラメータ推定の難易度が認知されてきたこと、ならびに適切なゼロ位相データ処理が可能となったことから、relative acoustic impedance (relative AI) あるいは relative elastic impedance (relative EI) の使用が好まれている。これらのアトリビュートは震探シグナルの周波数帯の音響インピーダンス、あるいは弾性インピーダンスに相当し、ゼロ位相震探データの積分（あるいは 90 度位相変換、colored inversion）にて解釈ソフトで容易に作成すること

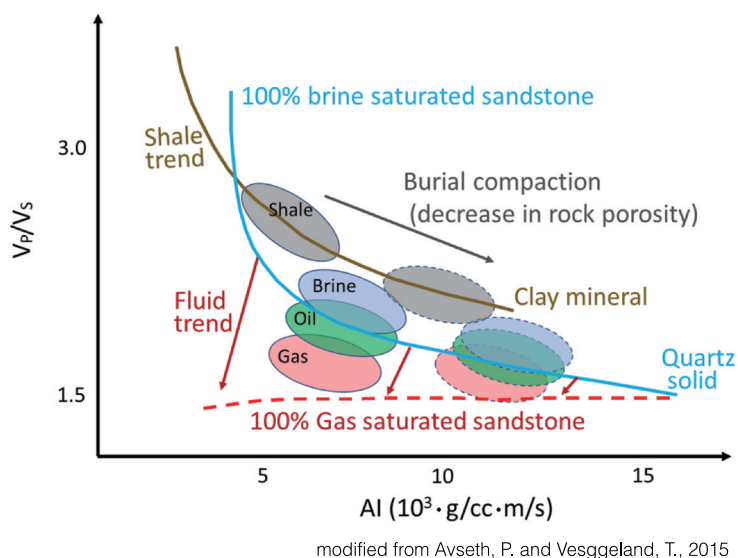


図 4 Rock Physics Template の例

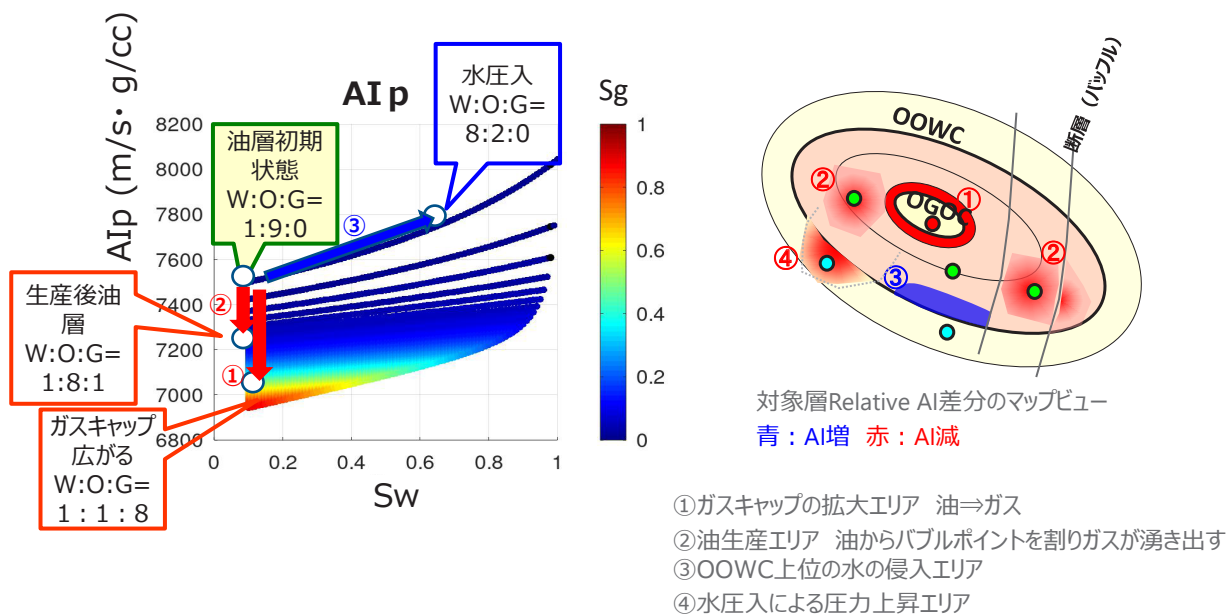


図 5 ガスキャップのある油層に応じた物性変化（左）と 4D 応答（右）の例
ただし W:O:G は水、油、ガスの比率を表す。

が可能である。岩相境界を示す通常の震探データから岩相特性を示すアトリビュートを作成することで、貯留層パラメータの分布推定に活用されている。

生産段階の油ガス田では4D震探（繰り返し地震探査）が活用される。岩石物性の知見を導入し、relative AI 変化または relative EI 変化から生産や圧入に伴う飽和率変化域や圧力変化域の空間分布を評価するのが一般的である。近年の4D震探データの高品質化によって、これまで難しいとされた固結度が高い古い地質年代の貯留層を対象とした4Dや、より微小な飽和率・圧力変化、より短い時間スパン（例えば1年～数年ごと）での流体移動や圧力挙動の評価が行われるようになりつつある。4D震探の品質向上はデータ取得時の発震受振位置の制御、処理フローやパラメータの同一化などの4D処理技術の進展によって支えられている。

ガスキャップを伴う油層における4D応答の例を図5に示す。ガスキャップの拡大によるAIP減エリアの進展や圧入水の油層域への侵入によるAIP増エリア、水圧入井周辺の圧力増加や生産に伴いバブルポイント圧を割ったガス発生エリアを明確に示す事例も存在する。こうした4D結果はOOWC（初期状態の油水界面）の妥当性や断層を介したパネル間の圧力導通性評価にも活用される。断層を介した未試掘パネルのAIP減は初期状態における油層の空間分布と圧力導通性を強く示唆するものである。また、4D震探によってマッチングされたダイナミックモデルにより生産井、圧入井デザインの最適化に活用され生産フィールドの経済性最大化を支えている。こうした評価は飽和率ならびに圧力の変化に伴うAIP変化の評価がベースとなっており、岩石物性評価技術に支えられている。

4. CCSにおける地下評価

CCSにおける地下評価に当たっては、圧入性の高い貯留層の広がり、圧入に伴うCO₂分布や地盤安定性の評価などが求められる。長年の石油ガス上流事業にて実データに適用されてきたさまざまな評価手法や岩石物理モデル、経験やノウハウは、CCSにおける地下評価にて参考になる。貯留層の構造、性状の推定にあたっては、石油業界にて用いられてきたイメージング手法や振幅解析がベースとなり得る。

また、一般的な圧入対象深度におけるCO₂の音響インピーダンスは、水が1500 m/s・g/ccに対して200～400 m/s・

g/cc程度と小さく、ノルウェー Sleipner で見られるように、固結度の低い貯留岩への圧入CO₂ プルーム範囲は4D震探にて把握可能である。

一方で、CO₂では帯水層でのCO₂到達範囲の把握に加え、遮蔽層の遮蔽能力、地盤の安定性評価が求められ、地震探査などによるモニタリング、ジオメカニクスモデリング、CO₂飽和岩石の物理モデルが重要な役割を担っている。CCSの事業検討が進む中、貯留層評価、ならびに圧入に伴う物性変化の検討とともに、国内貯留地においては固結度の低い貯留層、遮蔽層を対象としたCO₂流動特性ならびに岩石物性の理解促進が期待されている。

5. ま と め

石油ガス上流事業においては、岩石物性に関する知見の蓄積とともに、構造不確実性の低減（速度・異方性パラメータや傾斜反射面評価など）、振幅評価手法（relative AI, relative EI など）、そして4D評価技術が大きく発展してきた。CCS事業推進においてはこれらの知見を活用するとともに、CO₂飽和率、相対浸透率、キャピラリ圧、温度圧力変化に伴う岩石物性変化、軟砂泥岩の挙動および破壊特性の理解促進が期待される。今後、岩石物性の知見がCCS事業においても重要な役割を果たすものと期待される。

引 用 文 献

- Avseth, P., and Veggeland, T., 2015: Seismic screening of hydrocarbon prospects using rock-physics attribute. AAPG geoscience technology workshop, sixth annual deepwater and shelf reservoir.
- Mathieu, C., 2015: Moray Firth – Central North Sea post well analysis. oil & gas authority.
- Ruger, A., 2002: Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media. Society of Exploration Geophysicists, doi:10.1190/1.9781560801764.fm.
- Totani, M. and Takanashi, M., 2021: Investigation of the influence of anisotropic velocity errors on dipping reflector imaging. SEGJ international symposium abstracts, doi:10.1190/segj2021-070.1.
- Tsvankin, I., 2005: Seismic signature and analysis of reflection data in anisotropic media. 2nd ed. Elsevier Science Publishing Company, Inc.

資 料
Note

地質・探鉱部門シンポジウム
岩石物理学－ E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開－

SYMPOSIUM

“Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –”

パネルディスカッション*

Panel Discussion

真 田 佳 典**

Yoshinori Sanada

西澤修氏，青野哲雄氏，浅香充慶氏，柏原功治氏，北村圭吾氏，高梨将氏，毛利拓治氏の講演の後，講演者の皆様に登壇いただき，真田佳典がファシリテータとして 60 分間のパネルディスカッションを行った。最初に西澤氏がスライドを示しながら岩石物性の基礎概念についての課題を提起し，以下のように，課題，可能性，将来の方向性など多岐にわたる話題について，登壇者と会場を巻き込んだ熱心な議論が行われた。主な話題と概要は以下である。講演者と会場からディスカッションに参加いただいた方々，最後まで参加頂いた会場およびオンラインの参加者に感謝いたします。

・岩石物性の基本概念と課題

岩石を物質としてではなく，固体部分，空隙部分，流体を含む複合的な「構造物」とし捉える必要性が議論された。この視点は，従来の研究では十分に扱われておらず，日本におけるサイエンティフィックな研究の基盤強化が課題となる。

・応用分野と研究課題

CCS（二酸化炭素回収・貯留）技術の進展に伴い，二相流動態や漏洩リスクの評価が重要視されている。また，実験スケールの研究成果をフィールドスケールへ拡張する際のスケールアップ問題が顕在化しており，解決のための方法論の確立が求められている。

・日本における研究の現状と課題

日本人の高い実験技術が十分に活用されていない現状が指摘された。大学教育や学会活動を通じて研究テーマの裾野を広げる必要がある。また，産業界と大学の連携強化が重要であり，特に学生を対象とした研究環境の整備が求められている。

・技術革新と新しい可能性

CT スキャナ，AI，4D 技術などの進歩が岩石物性研究に新たな可能性を提供している。特に，コンピューティング能力の向上により，実験の効率化や精度向上が期待されている。デジタルロック技術の普及が研究方法の多様化を促進している。

・他分野との協業の可能性

石油業界，土木業界，地下水学会との協力が必要であると指摘された。データ共有の促進や国主導によるオープンデータ化が，研究を支える基盤となることが期待されている。他分野との共同研究が新たな発見を生む可能性がある。

・将来の方向性

実験的手法や理論的知見をフィールドで実践する環境整備が求められている。また，国際学会や産業界との連携を深め，課題解決のための協力体制を強化する必要がある。これにより，より実践的で応用可能な知見の蓄積が期待できる。

*令和 6 年 6 月 4 日 令和 6 年度石油技術協会春季講演会 地質・探鉱部門シンポジウム「岩石物理学－ E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開－」にて講演 This paper was presented at the 2024 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –” held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

**大成建設㈱ Taisei Corporation

資 料
Note

地質・探鉱部門シンポジウム
岩石物理学－ E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開－

SYMPOSIUM

“Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –”

閉 会 の 辞*

真 田 佳 典**

Closing address by Yoshinori Sanada

本日は長時間にわたりお付き合いいただき、誠にありがとうございました。閉会に際しまして、私から簡単にご挨拶申し上げます。

昨年のシンポジウムが終了した後、委員会におきまして次回のテーマについて検討を始めました。その際、佐野委員長から「岩石物理」をテーマにしてはどうかというご提案がございました。私自身も関心がありましたが、果たして多くの方々にご興味を持っていただけるのかという点で少々懸念しておりました。しかしながら、副題を巧みに設定していただいたことで、これまでの知識の蓄積や実験成果の報告、情報の共有、さらには脱炭素社会に向けた新たな展開といった観点が盛り込まれ、非常に意義深いテーマとなりました。パネリストの皆さまには、それぞれのお立場から非常に有益なご意見をお話しいただき、内容をうまくまとめていただけたと感じております。

本日は、多岐にわたるご講演を通じて、私自身も多くの学びを得ることができました。西澤氏からは背景となる基礎理論について丁寧に講演いただきました。北村氏、青野氏、毛利氏からの理論と実験に関するお話では、多くの方々に現状の課題や成果について詳しく教えていただきました。また、臨界状態における挙動についての現状報告も非常に興味深いものでした。柏原氏と浅香氏にジオメカニクスの視点からの講演をいただきました。異方性に関する議論では、予防的な対策が必要と認識しつつも、具体的な事例をこれほど詳細に知る機会はまだありませんでした。異方性を考慮しなければ、正しい構造や解釈が難しくなることを改めて実感し、今後の課題としてとらえております。高梨氏には、これまでの案件評価を通じて岩石物理の実際の活用状況や課題を非常に分かりやすくまとめていただきました。これから、この分野をいかに活用し、我々のフィールドにどのようにアプローチしていくのかが、重要な課題であると感じております。

最後のパネルディスカッションでは、私の進行に至らない点多々ございましたが、パネリストの皆さまが巧みに話題をつないでくださり、大変有意義な議論ができたと思っております。本シンポジウムを通じて、岩石物理に関する知識を深めるとともに、他分野との連携の必要性を改めて実感いたしました。今後もこの分野のさらなる発展に寄与できるよう、引き続き努力してまいりたいと存じます。

最後になりますが、講演を担当していただいたパネリストの皆さまには心より感謝申し上げます。また、本企画および運営に携わっていただいた探鉱技術委員会の皆さまにも、多大なるご尽力に深く感謝いたします。そして、本日まで参加いただいた皆さま、オンラインを含め多くの方々にお集まりいただき、活発な議論が行われたことを大変うれしく思います。改めて感謝申し上げます。

なお、明日も個別講演が予定されておりますので、ぜひご参加いただき、引き続き活発な議論を行っていただければ幸いです。以上をもちまして、私からの閉会のご挨拶とさせていただきます。本日は誠にありがとうございました。

* 令和 6 年 6 月 4 日 令和 6 年度石油技術協会春季講演会 地質・探鉱部門シンポジウム「岩石物理学－ E&P 事業における成果と脱炭素社会へ向けた新展開－」での閉会の辞 Closing address at the 2024 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –” held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

** 大成建設㈱ Taisei Corporation

石油技術協会記事

I. 理事会

第89期 第4回 理事会議事録

開催日時：令和6年10月24日（木）15:30～18:00

開催場所：ハイブリット会議（Microsoft Teams）

出席者：（敬称略）高橋会長、島本副会長、吉良副会長
 [理事] 城戸、国末、小林（修）、栗原、杉村
 中西、原、畠山、日野、藤井、古井、長縄
 松島、山本（晃）、山本（浩）、吉岡
 [監事] 市川、樋口、横井、[委員長] 小林（肇）
 佐藤、北村、村上、永岡、[事務局] 山口（合計28名）

次回第5回理事会

令和6年12月18日（水）15:30～Web開催

議題：

- 【確認事項】1. 第89期第3回理事会議事録（案）の確認
 【審議事項】1. 会員の異動（令和6年8月1日～9月30日）
 【審議事項】2. 秋季講演会開催の件
 【審議事項】3. 第90回総会・令和7年度春季講演会について
 【審議事項】4. 日本地下水学会 次年度合同セッションについて
 【審議事項】5. 会誌関係（刊行構成の変更、第90巻会誌表紙）
 【審議事項】6. 懸案事項
 【報告事項】1. 令和6年度8月次・9月次一般会計収支報告および第2四半期監査結果報告
 【報告事項】2. 各委員会の活動状況報告
 その他

【確認事項】1. 第3回理事会議事録の確認

〈質疑なし、確認。〉

【審議事項】1. 会員の異動（令和6年8月1日～9月30日）

	名誉会員	特別会員	正会員	学生会員	賛助会員	合計
令和6年9月30日	73	182	1,176	125	61	1,617

〈質疑なし、承認。〉

【審議事項】2. 秋季講演会開催の件

〈11月12日に東大小柴ホールにて「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて～水素・アンモニア～」のテーマで開催。当日の段取りと収支見込を説明。継続審議〉

【審議事項】3. 第90回総会・令和7年度春季講演会について

〈10/3新潟にて第1回準備委員会を開催。大会はR7.6/10第90回定期総会、懇親会。6/11-12春季講演会。6/13見学会を予定。会場は朱鷺メッセで会場割り・スケ

ジュールを説明。見学会は新潟準備委員会にて施設見学2コース、地質見学1コースに集約見込。懇親会場候補はホテルとメッセの2択だが、ホテル側は2部屋を接合し完全開放ではないが、眺望とメッセより料金が安いことからホテル開催としたい。Q：今年度の大会の反省点を踏まえて見直す必要はないか？技術委員会毎の実施で良いか？また特別講演会に若手や学生が来ないことも懸念、他学会では初日懇親会にもっと多くの参加者が集う。やり方の検討が必要か？Q：大会初日は総会・特別講演会・懇親会で、2日目から出ればよいと考える会員もいる。初日から出ようと思わせる仕掛け、特別講演会が魅力的なのは大事。懇親会に学生が多数参加し、業界関係者や学生同士でも知り合える場を作る必要がある。C：秋田大会では多くの学生が懇親会に参加した。C：作井技術委員会の例を紹介：最初はシンポジウム講演者と関係者で懇親会を実施したが、現在は希望者全員に参加できる懇親会となり、多くの関係者の顔合わせ・情報交換の場となっている。このような場は重要。A：秋田大会の懇親会費は学生参加費を安くし学生参加者を多数得た。新潟大会も同様とする。また、大会2日目、3日目のシンポジウム終了後（夕方）から日没にかけて、4階マリンホールホワイエで有償立ち飲み交流会を企画している。初日から参加する魅力的な特別講演、懇親会企画は次回までの課題とし継続審議。会場割りおよびスケジュール、初日の懇親会場については了承。〉

【審議事項】4. 日本地下水学会 次年度合同セッションについて

〈地下水学会は実施の有無の検討もあり、もしコラボをやるとしても1日ではなく、個人講演の一部の小企画の規模と説明。Q：（審議事項3での議論を記載）：日本地下水学会と委員会とのコラボ先が決まらない場合、ジオメカなら「岩の力学研究会」に繋ぐことは可能。A：他の団体と手上げ制でコラボ企画をやる手はある。コラボ企画募集を事務局から出すので提案があればお知らせいただきたい。継続審議〉

【審議事項】5. 会誌関係（刊行構成の変更、第90巻会誌表紙）

〈刊行構成の経緯と次期会誌表紙の件について説明。刊行構成変更：前回までの経緯を説明、未だ承認に至っていない旨報告。A：編集委員長：提案は委員会間での不公平感の解消に焦点を当てたもの。不定期刊行に対する外部評価の低下懸念は想定してなかった。C：シンポジウム原稿の順番を現在：作井⇒生産⇒探鉱を、次年度：生産⇒探鉱⇒作井、その次：探鉱⇒作井⇒生産とローテーションするのはどうか？A：毎年変わるのはいきついと思う。以前は9月号を11月に発刊したこともあったが何とか廻っていた

ので遅らせる手はある。C:通常号の2号(3月)～4号(7月)の後、シンポジウム号となる5号(11月)まで少し間をあけて、その後は2ヶ月毎に出すのはどうか? C:海外誌は2月, 4月, 6月, 8月等偶数月が多い。若干遅れても許容範囲であれば良く、以前は合併号もあった。委員会の順番はどの時点で決まったか不明。じっくり議論した方が良い。C:学生の論文投稿先は、博士号取得時に定期刊行物への投稿を評価。オンライン時代となり、その評価も変化しつつある。C:学術誌には学会発行、出版社発行のものがあるが、後者は定期的に刊行。SPEや資源・素材学会は論文誌と情報誌を分けて出している。C:石油技術協会誌はシンポジウムに重きを置いており、ユニークで講演誌の要素も強い。シンポジウム原稿の負担をできるだけ少なくする工夫が必要。C:法人化した時に定期刊行が指摘される場合がある。議論は集約に至らず再度幹事会で検討し再提案するか判断する。審議保留)

【審議事項】6. 懸案事項

①. 法人化に係る説明の後、C:監事の立場で一言:法人化を総会に提案するまでに、ここに記載の適切な判断材料を準備すること。それを理事会⇒総会へと適切な審議プロセスにかけ、判断者が善管注意義務を果たせるようお願いする。A:承知した。3. 天然水素に関するイベントについて JOGMEC 山本氏より説明、HASEKOH-KUMA ホールでの配信はどうか? A:東大辻先生に依頼済み。継続審議)

【報告事項】1. 令和6年度8月次・9月次一般会計収支報告および第2四半期監査結果報告

(質疑なく。承認)

【報告事項】2. 各委員会の活動状況報告

- ・編集委員会:(小林委員長)第89巻5号を10月1日に発刊。6号は11月末発刊予定し進める。また90巻1号は、1月末を目標に進めている。
- ・探鉱技術委員会:(佐藤委員長)9月26日第3回探鉱技術委員会内容について報告。
- ・作井技術委員会:(北村委員長)9月30日開催の第1回作井技術委員会について報告。特別講演会「気候変動リスクと適応」(株)ウエザーニュース社に30名(オンライン12名)参加
- ・生産技術委員会:(村上委員長)9月5日の第3回生産技術委員会について報告。春季講演会テーマはE & P 既存技術が重要との意見も多く、じっくり決めたい。
- ・CCS委員会:(長縄委員長)10月2日第2回運営幹事会について報告。春季講演会のシンポジウムについて作井技術委員会との共催の可能性について協議する。
- ・HSE委員会:(吉田委員長)(報告事項なし)
- ・国際委員会:(山本委員長)9月12-13日 SPWLA-JAPAN の The 29th Formation Evaluation Symposium of Japan を開催。
- ・HP委員会:(島本委員長)第89巻5号掲載、令和6

年度秋季講演会開催のお知らせ掲載、メルマガ127～128号配信。

- ・資源経済委員会:(岩間委員長)(報告事項なし)

その他

- 1) SPE/JAPT 共催 CCUS and Low Carbon Fuels に関する Workshop に向けた準備作業の進捗状況報告(市川氏)。
- 2)「第62回アイソトープ・放射線研究発表会」:後援。
- 3) JAMSTEC 中西賞候補推薦のお願い:日本海洋工学会
- 4)「海洋調査技術学会 第36回研究成果発表会」への協賛。

以上

II. 幹事会

第89期第8回

開催日時:令和6年11月13日(水) 15:30～17:26

開催場所:ハイブリット会議(Microsoft Teams)

出欠状況:会長、副会長:高橋・島本・吉良

(敬称略)編集委員長:小林

幹事:市江、石下、今井、後藤、近藤、高原
知識、草宮、佐々木、山口(事務局:記)

議 題

- 議題1. 第89期第7回幹事会議事録の確認
議題2. 会員の異動(令和6年10月1日～10月31日)
議題3. 令和6年度10月次一般会計収支報告
議題4. 秋季講演会開催の件
議題5. 第90回定時総会・令和7年度春季講演会
議題6. 会誌刊行構成の変更について
議題7. 令和7年度春季講演会の個人講演申し込み受付と講演要旨の発行について会告(案)
議題8. 石油技術協会賞候補者推薦について会告(案)
議題9. 特別見学会(物理探査編)会告(案)

その他

第89期第9回

開催日時:令和6年度12月11日(水) 15:30～17:45

開催場所:ハイブリット会議(Microsoft Teams)

出欠状況:会長、副会長:高橋・島本

(敬称略)編集委員長:小林

幹事:市江、石下、今井(記)、内山、草宮
後藤、佐々木、鈴木、知識、藤田、山口(事務局)

議 題

- 議題1. 第89期第8回幹事会議事録の確認
議題2. 会員の異動(令和6年11月1日～11月30日)
議題3. 令和6年度11月次一般会計収支報告
議題4. 秋季講演会アンケート集計結果(途中経過)
議題5. 第90回定期総会、令和7年度春季講演会開催の件
その他

以上

【石油技術協会 賛助会員リスト】

秋田県天然瓦斯輸送(株)
 伊勢化学工業(株)
 伊藤忠テクノソリューションズ(株)
 (株) INPEX ドリリング
 ENEOS Xplora (株)
 (株) オフショア・オペレーション
 (株) クリステンセン・マイカイ
 コスモエネルギー開発(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) 長岡支店
 第一実業(株)
 (株) 地球科学総合研究所
 電源開発(株)
 日揮ホールディングス(株)
 日本オイルエンジニアリング(株)
 日本 CCS 調査(株)
 ハリバートン・オーバーシーズ・リミテッド
 深田サルベージ建設(株)
 三井海洋開発(株)

AGC (株)
 出光興産(株)
 (株) INPEX
 エスケイエンジニアリング(株)
 エネルギー資源開発連盟
 関東天然瓦斯開発(株)
 (株) 合同資源
 コスモス商事(株)
 サミットエネルギー開発(株)
 JX 金属探開(株)
 (株) 昌新
 大成建設(株)
 千代田化工建設(株)
 天然ガス鉱業会
 日鉄エンジニアリング(株)
 日本海洋掘削(株)
 日本製鉄(株)
 (株) バルカー
 (株) 物理計測コンサルタント
 三井エネルギー資源開発(株)

アブダビ石油(株)
 伊藤忠石油開発(株)
 (株) INPEX エンジニアリング
 (独) エネルギー・金属鉱物資源機構
 (株) オーシャン・ジオフロンティア
 極東貿易(株)
 合同石油開発(株)
 コンピューター・モデリング・グループ・リミテッド
 (株) ジオシス
 シュルンベルジェ(株)
 石油資源開発(株)
 (株) 達磨鉄工
 (株) テルナイト
 (株) 東邦アーステック
 日宝化学(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) ベッツ
 三菱ガス化学(株)

(令和7年1月現在)

令和 5 年度特別見学会（物理探査編）実施報告

報告者 探鉱技術委員会 特別見学会（物理探査編）

担当 河合 展夫（地球科学総合研究所）

1. はじめに

令和 6 年 3 月 5 日（火）に令和 5 年度特別見学会（物理探査編）を実施したので、その概要を報告する。なお令和 5 年 5 月の新型コロナウィルス感染症の 5 類移行後の開催ではあったが、過去の参加学生からの要望を踏まえて、首都圏外からの学生の参加を容易とすべくオンライン形式により実施した。

2. 参 加 者

参加者募集は令和 6 年 1 月 24 日に石油技術協会 HP に会告を掲載し、合わせて石油開発事業に関係のある理学系・工学系および文系を含めた大学教員を通じ、広く参加学生を募集した。

最終的に 12 名の参加申し込みがあり、その内訳は以下のとおり。

学科・専攻別：理学系 4 名（地球物理学系 2 名、地質学系 2 名）、工学系 6 名（資源地質学系 3 名、資源開発工学系 3 名）、文系 2 名（資源政策系 1 名、海洋政策系 1 名）

課程別：学部生 2 名、大学院修士課程 8 名、大学院博士課程 2 名

国籍：日本 8 名、韓国 1 名、中国 1 名、インドネシア 2 名

地域別：首都圏から 5 名（千葉県 4 名、東京都 1 名）
首都圏外から 7 名（秋田県 1 名、宮城県 1 名、愛知県 1 名、京都府 1 名、福岡県 3 名）

なお 3 名がこの日時に不都合となり、実参加者は 9 名であった。

本特別見学会における説明は、探鉱技術委員会・特別見学会（物理探査編）担当者（河合展夫）が実施した。

3. スケジュール

以下のスケジュールで特別見学会は進められた。

14:00 ～ 14:30 インTRODakション（参加者紹介を含む）
14:30 ～ 15:00 石油開発の流れ
15:00 ～ 15:30 物理探査データ取得（質疑応答を含む）
15:30 ～ 15:40 休憩
15:40 ～ 16:50 物理探査データ処理・解釈評価技術および関連技術（質疑応答を含む）
16:50 ～ 17:00 まとめ（質疑応答を含む）

4. 参加者レポート

前回までと同様に事前と事後の 2 回のレポート提出を依頼した。事後レポート（9 名分）の抜粋を以下に記す（原文が英語の場合は翻訳ソフトによる和訳）。

(1)【地質学系学部生】

大学における構造地質学、堆積学の授業を通して、褶曲した地層の背斜部分にキャップロックがあると根源岩で形成された石油・天然ガスがトラップされるので、そこを掘削すれば石油・天然ガスが見つかるということを教科書的に理解していたが、石油開発事業としては、掘削作業や生産作業のコストや、地震探査作業に要する労力の問題など地質的な部分以外で多くの苦勞をされていることが理解でき、石油開発事業についての理解が浅い私のような学生にとって新しい知見が得られた。

国内の天然ガス輸送パイプラインがかなり長距離であることに驚いた。日本は地震が多いことから、パイプライン建設の裏にもさまざまな苦勞や工夫があると思われ、いずれ勉強できたらと考える。またパイプラインによる天然ガス輸送の仕組みについても興味を持った。

地震探査を用いた地下構造解釈に関する説明は、地震探査の原理からデータ処理・解析まで理解が難しかったが、各受振点での発振記録を並べ、さらに複数の補正を加えていくことによって地下構造が可視化されていくのが興味深かった。

(2)【地質学系大学院生（留学生）】

大学院のカリキュラムとして石油地質学という授業を受け、石油開発技術に関する知識は少し持っていたが、今回の見学会を通じて、授業であまり理解できなかった部分が理解でき、かつ新たな技術も勉強できた。また、物理探査の原理や実際使われている装置、物理探査を行う様子などが、図、画像、動画で示されてとても分かりやすかった。初心者にとっては、反射法地震探査断面だけを見ても実際の地下を想像しがたいこともあるが、露頭断面の例も一緒に示されて、非常にイメージしやすかった。本見学会後に大学で就職説明会がありさまざまな資源関係企業の説明を聞く機会があったが、本見学会に参加したことにより内容がスムーズに理解できた。また興味を持っていた非在来型石油・天然ガスに関しても説明を受けることができたが、もう少し詳しく学びたかった。今回はオンライン形式であったが、機会があれば対面参加で探査機器などの見学を

希望する。

また石油・天然ガスあるいは地下資源を我々が利用するためには沢山の時間、労働力、資金が使われていることに驚いた。特に時間と資金をなるべく節約するためには、掘削位置選定の前に地質調査をしっかりと実施し、失敗を可能な限り減らすことが重要ではないかと考える。そういう意味でも物理探査は地下資源開発においてとても大事な1つのステップであると理解した。

(3) 【資源地質学系大学院生】

物理探査データには馴染みがあったが、実際にどのように測定しているのか具体的なイメージが難しい部分があった。しかし地震探査で使われる発振機、受振機、車両類の画像を見ることで、現場の様子がより明確に理解できた。さらに海上と陸上では使用機器が大きく異なることも興味深かった。石油・天然ガスが存在するための地質学的条件については、ある程度理解しているつもりであったが、改めて生成過程を復習することで知識の補完ができ、より理解が深まった。特にシェールガスと従来の生産プロセスの違いには興味を引かれた。

またビジネス面を絡めながら、石油開発全体の流れについて知ることができた。技術的な内容のみでなく、鉦区取得から探鉱、開発に至るプロセスの経済的側面について学ぶことができ、これまで考えたことのなかった視点からの新たな発見があった。

地震探査データ処理に関しては、その専門性と数学的な複雑さのため、詳細が省略されていたが、どれくらい難しいのかということに触れる意味でも、より具体的な処理プロセスについて、知りたいと感じた。石油・天然ガスだけでなく、メタンハイドレート、地熱、CCSなどの事業に関する内容も取り上げたが、特に今後の増加が見込まれるCCS/CCUSに関して、より詳細な内容に興味があった。また、日本の国産資源として期待される海底資源の調査における物理探査の関わり方にも興味があった。

本見学会では、基礎知識の復習から専門的な内容、そして実際の現場作業に至るまで幅広く学ぶことができ、非常に貴重な体験となった。

(4) 【資源地質学系大学院生（留学生）】

物理探査は、地質構造をはじめとした、石油・天然ガス鉦床など潜在的な炭化水素の埋蔵量など、地下データに関する情報を提供可能とする。また地質学、物理学、数学、工学などさまざまな分野の原理を統合した技術であると理解した。

そこで地震探査データや坑井データなどの物理学的データの分析方法、解釈方法について今後詳しく知りたいと考えており、特に物理探査技術についてもっと学びたいと考える。

専門家の方から物理探査について学ぶことができ、大変うれしく感じた。

(5) 【資源開発工学系大学院生】

本見学会において、探鉱の中で反射法地震探査がどのような役割を果たしていることが理解でき、また海域と陸域

の受振点を連結した観測を行う事例をはじめ、物理探査データ取得の拡張性が理解できたことが良かった。

陸域地震探査ではケーブルレスシステムの導入が始まっているとあり、これは能登半島のような自然地震がアクティブなフィールドで運用しやすく、また運用すれば効果的であるが、具体的にそのようなアクティブなフィールドでの活動に参加したいと感じた。

また時間が許せば以下の点について説明を受けたかった。

- ・浅海域では船を運行すること自体も難しい中でケーブルを引くことになるが、その際の測線設定などの工夫
- ・探鉱段階の掘削作業において採取された岩石サンプル、特に貯留層より浅い地層の岩石サンプルを分析するようなことはあるのか、あるとすれば、何を見ているのか
- ・陸域地震探査におけるダイナマイト発振の際に発破孔内の泥水が吹き出すと地震エネルギーが失われそうであるが、この場合はやり直すのか
- ・浅海域では、エアガン発振では放出するエネルギーが大きすぎ、例えば高周波成分を用いる観測のほうが効果的と感じるが、双方のメリット、デメリットを知りたい。

これまで反射法地震探査そのものについてはさまざまな学ぶ機会があったが、本見学会のように物理探査を専門としていない人に向けての切り口では触れたことがなく、探鉱・開発の一部として相対化された視点が大変良かった。同時に普段触れていない事例・フィールドを学ぶことができ、物理探査の領域の広さを感じることができ、実りある時間であった。

(6) 【資源開発工学系大学院生（社会人経験あり）】

実際の物理探査装置、調査船の画像をみながら調査の様子を知ることができ、また社会人時代には業務で経験を積みながら知識を得たが、しっかり学ぶ機会はなかなかないため、今回は非常に勉強になった。

地震探査データ処理が概念的に説明されている点。勉強を始めるきっかけとして非常に有用であった。石油・天然ガスだけでなく、メタンハイドレードやCCSなど他の関連技術についても紹介があり、広く物理探査が活用されていることを理解した。数少ない貴重な経験を積まれている講師の言葉での説明であったため、説得力があった。

石油・天然ガス探査が中心だったため、講義の内容が深部を対象とする地震探査が中心であったが、浅部を対象とする他の調査機器による海上探査技術も知れたかった。

地下資源の少ない日本であるが、海域の自然地震調査技術は他国よりも進んでいるのではないかと考える。今後、さらに洋上風力など日本近海での海洋開発が進むことになれば、自然地震をどのように調査し、評価するかについても、今後学びたい。

社会人時代に業務で地震探査データを見ることはあったが、今回解釈されたものを見ることができ、今後は地震探査データからどのように地質構造や浅層ガスの存在などを解釈していくかを学びたい。

石油・天然ガス探査全体についての講義であり、化石燃料資源に乏しい日本において、石油・天然ガス生成や探査技術について学ぶ機会はほとんどなく、本見学会は貴重な機会である。講師の方がキャリアを通して経験し、学んだことを分かりやすい言葉で説明していただくなど、後進育成への真摯な取り組みに深謝する。

(7)【資源開発工学系大学院生（留学生）】

本見学会で最も価値があったのは、特に探鉱分野における地震探査の役割について理解を深めたことであり、参加者は調査機器および処理された地震探査データ解釈に関する貴重な知識を得ることができた。この見学会を通じて、陸上および海上の地震探査についての理解が深まり、視点が広がった。

この見学会では物理探査の基本を紹介しているが、もっと深く掘り下げたい領域として衛星リモートセンシング技術の適用に興味がある。使用される衛星画像の種類、解像度、およびリモートセンシングデータを地震探査データと統合して地下断面図を構築する方法に関する包括的な知識を得たい。このような深い理解は、物理探査に対する理解を向上させ、この技術の適用範囲を広げられると考える。

本見学会は物理探査以外の専門の学生が地下の複雑さを理解するための重要な導入機会となり、理論的知識と実適用の間の隔たりを効果的に埋め、参加者に物理探査技術の包括的な理解を与える。さらに物理探査が地熱など他の資源探査への適用の可能性に結びつき、さらなる技術開発と研究のモチベーションとなる。

本見学会は地下探査技術に関する知識を普及させるうえで立派な試みであり、参加者には、地震探査データ取得と解釈についての貴重な知見が提供され、深い理解が促される。さらなる技術開発と研究の余地がある一方で、本見学会は物理探査の魅力的な世界に足を踏み入れようとする学生にとって重要な機会となる。

(8)【資源開発工学系大学院生（留学生）】

本見学会は本当にすばらしく、資源探査に関する先端技術を理解するだけでなく、資源探査に興味を持つきっかけにもなり、地下資源についての理解が深まった。金属鉱物資源、石油・天然ガス資源、水資源など、地球上のさまざまな資源を探査・開発するためのさまざまな技術、手法、ツールがあることを理解した。

石油開発には、地質調査、掘削、生産といった一連の複雑なプロセスが含まれ、高度に専門化された技術や設備が必要となり、これらの技術には地質学的な探査技術だけでなく、掘削、各種分析、坑井仕上げ、生産処理など、幅広い分野の専門知識が含まれる。特に地震探査で使用される高度な技術と機器について学んだ。地震探査は、石油・天然ガスなど地下資源の探査・開発に役立ち、異なる種類の地層における地震波の伝播特性を分析することで、石油鉱床の分布を推測することができ、資源探査の重要な指針となることを理解した。その技術は複雑で高度であるため、地震学、地球物理学、地質学など多くの分野の知識と技術が関わっており、地震探査技術の継続的な研究と改善

を通じて、科学研究の進歩を促進し、技術革新と発展を推し進めることができると感じた。

また資源探査が環境に与える影響や持続可能な開発の重要性について理解を深めることができ、探鉱および開発プロセスでは、資源の利用が環境に不可逆的な損害を与えないよう、環境保護と生態系のバランスを考慮する必要があることも理解した。

さらに、将来の地球資源の需給動向についても、より明確に理解できたかもしれない。人口増加や経済発展に伴い、地球資源に対する需要は増加の一途をたどるため、人類のニーズを満たすための新たな探査技術や資源開発方法の継続的な開発が必要となると考える。

全体として、本見学会は地球資源探査の重要性、課題、将来の方向性をよりよく理解するのに役立ち、地球資源のより効果的な利用のための有益な参考資料や指針を提供するものとなる。将来、またこのような機会があれば参加したい。

(9)【文系学部生】

本見学会と同じ講師による大学での講義において、地震探査の現場の動画を見た際は地質学にあまり触れておらず、漠然としたイメージを持っていたが、本見学会の冒頭の石油地質学の説明により、何のための地震探査なのか、何を知りたいのかという物理探査の目的をイメージできるようになり、地震探査は石油・天然ガスの存在場所を効率的な方法で推定し、試掘位置を確定させるためであると理解した。

以上から石油探査においては地球規模での視点と地質に対する知見が必要であるということを理解した。資源政策では国、法律、文化など人間が主語になる話が多い一方で、資源探査では地球が主語となり、それに手を加える主体が人間であると理解した。

地震断面図の具体的な解釈の仕方、またその解釈に必要な知識や学問についてもっと理解し、断層や振幅異常などが解釈できるようになりたいと考える。なぜならそのような定量的な解析力が資源学を学ぶもの、それは文系にも求められると考える。さらに地震探査データ処理に関しても興味を持った。以上のようなデータ解析および総合解釈評価作業を学ぶことで、文系であっても石油探査への理解をより一層深めることができると感じた。

文系の参加者である私にも分かるような構成、説明であったため、大変学びやすかった。以前は持ち合わせていなかった石油地質学の視点から物理探査を見直すことができた。そのため、石油探査、石油開発全体の理解を深めることができた。

物理探査と石油政策は空間および視点が全く異なっており、私の当初の目標であった資源政策学への活用というより、資源政策決定に占める最も重要な判断材料として石油探査があると思う方が正しいと感じた。

5. ま と め

昨年度はオンライン方式の採用により参加者9名中8名

が首都圏以外の大学からとなり，明らかにオンライン開催の効果が得られたことから，今年度からは特別見学会という名称ながら基本的にオンライン開催とした。

オンライン開催として昨年度は初めて2名の留学生の参加があったが大きな支障はなく実施できた。しかし今年度の参加留学生4名の内の2名は日本語でのコミュニケーションに支障があることが事前に判明したことから，見学会で使用するプレゼン資料の全てを日英併記とし，かつ見学会では日本語の後で英語の説明を繰り返す対応をとった。これにより予定された時間内に全ての説明を完了できず，最後に「脱炭素化社会への対応」の説明ができなかつ

たことが残念であった。

上記のとおりの問題により参加学生から何らかの指摘を覚悟していたが，事後レポートでこの点の指摘はなく，逆に日英で説明を繰り返すことで，専門用語を含め十分な理解が得られたのではないかと感じた。

6. 謝 辞

本特別見学会は，石油技術協会事務局によるサポートなしには実現できていない。改めて事務局の皆様へ感謝を伝えたい。

石油技術協会 会議・行事開催予定

会 議	開 催 日	開 催 会 場 (予定) (オンライン開催は都度判断とする)	備 考
理 事 会	15:30 ～ 17:00	エネルギー資源開発連盟 (またはオンライン)	
第 1 回	令和 6 年 4 月 17 日 (水)		
第 2 回	令和 6 年 6 月 20 日 (木)		
第 3 回	令和 6 年 8 月 20 日 (火)		
第 4 回	令和 6 年 10 月 24 日 (木)		
第 5 回	令和 6 年 12 月 18 日 (水)		
第 6 回	令和 7 年 2 月 20 日 (木)		
幹 事 会	15:30 ～ 17:00		
第 1 回	令和 6 年 4 月 11 日 (木)	(株) INPEX (またはオンライン)	
第 2 回	令和 6 年 5 月 16 日 (木)	JX 石油開発(株) (またはオンライン)	
第 3 回	令和 6 年 6 月 13 日 (木)	石油資源開発(株) (またはオンライン)	
第 4 回	令和 6 年 7 月 11 日 (木)	出光興産(株) (またはオンライン)	
第 5 回	令和 6 年 8 月 8 日 (木)	エネルギー資源開発連盟 (またはオンライン)	
第 6 回	令和 6 年 9 月 11 日 (水)	天然ガス鉱業会 (またはオンライン)	
第 7 回	令和 6 年 10 月 17 日 (木)	エネルギー資源開発連盟 (またはオンライン)	
第 8 回	令和 6 年 11 月 13 日 (水)	三井石油開発(株) (またはオンライン)	
第 9 回	令和 6 年 12 月 11 日 (水)	エネルギー資源開発連盟 (またはオンライン)	
第 10 回	令和 7 年 1 月 16 日 (木)	JOGMEC (またはオンライン)	
第 11 回	令和 7 年 2 月 13 日 (木)	エネルギー資源開発連盟 (またはオンライン)	
第 12 回	令和 7 年 3 月 13 日 (木)	伊藤忠石油開発(株) (またはオンライン)	
評 議 員 会	16:00 ～ 17:00		
3 月	令和 7 年 3 月 19 日 (水)	石油資源開発(株)	
行 事	開 催 日	会 場	
第 89 回定時総会	令和 6 年 6 月 3 日 (月)	東京大学 (本郷キャンパス) 伊藤国際学術研究センター	
90 周年記念式典・ 特別講演会			
懇 親 会			
春季講演会	令和 6 年 6 月 4 日 (火) 5 日 (水)	東京大学 (本郷キャンパス) 伊藤国際学術研究センター, 山上会館, 小柴ホール他	
見 学 会	令和 6 年 6 月 6 日 (木)	施設見学会	
秋季講演会	令和 6 年 11 月 12 日 (火)	東京大学小柴ホール	
特別見学会 (地質編)	令和 6 年 9 月 12 日 (木)	千葉県茂原市, いすみ市, 大多喜市, 長生村	
特別見学会 (物探編)	令和 7 年 2 月 26 日 (水)	オンライン開催	

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	SPE/JAPT	CCUS and Low Carbon Fuels に関する Workshop	令和 7 年 3 月 11 日 (火), 12 日 (水) ウェスティンホテル東京 (参加登録: SPE Website)	共催
2	公益社団法人化学工学会	第 90 回大会 CCUS 検討委員会 シンポジウム	令和 7 年 3 月 14 日 (金) 東京理科大学葛飾キャンパス D 会場	協賛

坑井掘削状況

特記事項なし

自：令和6年11月1日
至：令和6年12月31日

編集後記

2024年8月より編集委員を拝命いたしました JAPEX の長谷川と申します。十数年前に私が学生だったころに石油技術協会さんにお世話になって以来、石油技術協会の活動に参加する機会があまりありませんでしたが、最近私のキャリアの中で技術の仕事に特化する方向性へシフトチェンジしたことをきっかけに、学会での発表や論文の執筆、運營業務などを通じて石油業界に貢献していきたいという気持ちが芽生え、このタイミングで編集委員として参画させていただきました。

「頑張るぞ!」という気持ちとは裏腹にアラフォーの体はなかなかいいことを聞いてくれず、ここ数年は気温が冷えてくると腰が張って痛みがあるなど感じるものがあったのですが、先日とうとう本格的なぎっくり腰を発症してしまいました。発症直後の急しゅん期は痛みのため床をはいつくばって移動するか、何とか立ち上がれたとしてもペンギンのように小股でひょこひょこ歩くことしかできず大変苦しい思いをしました。整形外科の先生のすすめもあり本格的なリハビリを開始し、週に1度の理学療法士によるガチガチに凝り固まったアラフォー男性への容赦のないマッサージとストレッチに耐え、私専用にアレンジされた日々のリハビリメニューをコツコツとこなし、ようやく症状が改善してきたと思った矢先に同程度のぎっくり腰を再び発症させてしまい、絶望に暮れています。

再度コツコツとリハビリメニューをこなしながら、なる

べく腰に負担のかからない生活環境の構築を進めています。寝具を見直してみたり、在宅ワーク時の椅子をクッション性やリクライニング機能のあるオフィスチェアに更新したり、スタンディングポジションも取れる昇降機能付きのデスクも導入しました。これで何とかぶり返すことなく腰の症状が安定するといいいのですが、在宅環境が充実した分、仕事にのめり込んでしまい再度体調を悪化させそうです（笑）。

振り返ってみれば、ここ数年で出社でも在宅でも問題なく働ける環境・文化が整ったおかげで、時間があれば平日夜間・休日関係なくシームレスに働く癖がついていたようです。無理をすれば無理をただけ働けた若いころはそれでもよかったのかもしれませんが、「もう無理だよ」と直近のぎっくり腰2連発で体が警鐘を鳴らしてくれたと真摯に受け止めたいと思います。今後の働き方や単位時間で出せる仕事の量・質に対して一部あきらめることも認めて、いろいろと模索していこうと思いました。健康第一。みなさまお体にご自愛して充実したワークライフをお送りください。

（会誌編集委員会委員 長谷川智紀）

現在の編集状況：受理4編，委員長預かり4編，継続審議6編，新規受付7編

石油技術協会誌投稿規定

平成 19 年 08 月 28 日 施行
平成 21 年 12 月 15 日 一部改定
平成 23 年 12 月 14 日 一部改定
平成 24 年 12 月 18 日 一部改定
平成 27 年 12 月 09 日 一部改定
平成 29 年 12 月 13 日 一部改訂
令和 02 年 09 月 01 日 一部改訂

1. 総 則

- 1.1 石油技術協会誌（以下、本協会誌という）への投稿は、本規定の定めるところによる。
- 1.2 本協会誌に投稿できる者は石油技術協会（以下、本協会という）の会員、もしくは入会手続き中の者とする。共著の場合は、共著者の一人は会員（入会手続き中の者を含む）でなければならない。ただし、依頼原稿はこの限りでない。
- 1.3 投稿された原稿の内容についての一切の責任は著者にある。

2. 原稿の投稿

- 2.1 本協会誌に投稿できる原稿は、石油・天然ガス鉱業、およびこれに関連する分野の学問・技術を内容とし、以下に記す種別ごとにそれぞれ次の要件を満たしたものであるものとする。

論 文 (Original Article)

新規性、もしくは創意工夫がある研究をまとめたもので、著者の意見が加味され、価値ある結論または事実を含むもの。

報 告 (Technical Report)

価値ある内容を含み、著者の意見が加味されたもの。既存の手法の実用性、もしくは要素技術の実証性を示したものも含む。

短 報 (Short Article)

新事実の報告、または速報的な短論文。

総 説 (Review)

特定テーマに関する論文、学説などを総括し、解説、紹介したもの。

資 料 (Note)

既存データを客観的にまとめたもの。議事録なども含まれる。

解 説 (Glossary, Explanation)

特定専門事項を紹介・説明したもの。

討 論 (Discussion)

本協会誌に掲載された内容に関する質疑応答。掲載後 1 年以内とする。

口 絵 (Pictorial)

カラー画像を中心とした解説・紹介が効果的なもの。

講 演 (Lecture)

本協会主催の講演会の内容。

新刊紹介 (Book Review)

新刊の学術単行本などを紹介したもの。

会員の声

石油・天然ガス鉱業に関連した会員の意見。

参加報告

関連学会への参加報告など。

- 2.2 原稿は以下の条件に適合するものでなければならない。

- 2.2.1 原稿は平明な日本語または英語で、石油技術協会誌投稿要領に基づき執筆されたものであること。

原稿の種別にかかわらず、本文は簡潔・明瞭で平素な表現を用いて、冗長にならないよう、かつ論理の飛躍や流れの省略がないようにすること。

- 2.2.2 一般に公表されている他の刊行物に未発表のものであること。

この「公表」とは、販売または配布をいい、「刊行物」とは、著者による特許を除く、言語や形態にかかわらないすべての出版物（電子出版、ウェブサイトを含む）とする。ただし、以下のものは未発表とみなす。

- (イ) 本協会が主催、または共催する講演会、集会において発行された予稿集、資料に掲載されたもの。
- (ロ) 著者の所属する機関において発行する刊行物に、速報的抄録を投稿したもの。

- 2.3 原稿掲載時の各種別の最大ページ数は、別表のとおりとする。

- 2.4 一連の成果を連続した「論文・報告」として投稿する場合は、各論文・報告には独立の表題を付けることとし、全体を統一する表題は副題とする。

- 2.5 原稿の受付日は、原稿が会誌編集委員会事務局に到着した日、または原稿が編集委員に託された日とする。

3. 査 読

- 3.1 投稿された原稿に対し、会誌編集委員会（以下、本委員会という）は石油技術協会誌編集委員会内規

に基づき、原稿の種別、要件に応じ査読を行う。

- 3.2 本委員会は査読の結果によって、種別の変更、内容・字句の加除、訂正、その他の修正の依頼を行うことがある。
- 3.3 査読者の意見を参考に、本委員会が本協会誌への掲載の可否を判定する。
- 3.4 掲載不可と判断された原稿は理由を付して著者に返送される。著者は判定に対し意見がある場合は、文書をもって本委員会に申し出ることができる。
- 3.5 本委員会からの内容の照会および修正を依頼された原稿について、本委員会からの依頼日より3か月以内に著者の回答、または返信がないときは、原則として、この原稿は撤回されたものとする。

4. 著作権

- 4.1 本協会誌に掲載された著作物の著作権は最終原稿が受理された時点から本協会に属する。
- 4.2 著作権の取り扱い詳細に関しては、石油技術協会著作権規定に定める。
- 4.3 いずれの著作物も他の著作権を侵害するものであってはならない。
- 4.4 投稿された原稿の内容が第三者の了解を必要とする判断される場合、および引用の許諾等にかかわる必要な手続きはあらかじめ著者の責任において行い、図表を転載する場合は原則として投稿時に許諾の写しを添付する。ホームページ、ウェブサイトの引用についても同様とする。

5. 校正と正誤表

- 5.1 原則として、著者校正は初校のみとする。版組の際に生じた誤り以外の字句の修正、挿入、削除および図表の修正は原則として認めない。なお、初校時には文法、および現代国語表記について著者の責任で確認するものとする。
- 5.2 著者が本協会誌に正誤表の掲載を希望する場合は、公表後1か月以内に本委員会に文書で申し出る。ただし、正誤表掲載の必要性は本委員会が判断する。

6. 投稿に関する問合せ先

石油技術協会誌編集委員会事務局
〒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）
Tel：03-3214-1701 Fax：03-3214-1703
E-Mail：office@japt.org

付 則

本規定は石油技術協会誌編集委員会運営規定第8条に従って定めるものである。

本規定の改廃は本委員会の発議により、理事会の議決によって行う。

本規定は令和2年9月1日より施行する（第85期第3回理事会承認）。

別 表 原稿の種別と最大ページ数の規定

種 別	要 件	最大ページ数 ^(注)
論 文	新規性、もしくは創意工夫がある研究をまとめたもので、著者の意見が加味され、価値ある結論または事実を含むもの。	20
報 告	価値ある内容を含み、著者の意見が加味されたもの。既存の手法の実用性、もしくは要素技術の実証性を示したものも含む。	20
短 報	新事実の報告、または速報的な短論文。	10
総 説	特定テーマに関する論文、学説などを総括し、解説、紹介したもの。	20
資 料	既存データを客観的にまとめたもの。議事録なども含まれる。	20
解 説	特定専門事項を紹介・説明したもの。	20
討 論	本協会誌に掲載された内容に関する質疑応答。掲載後1年以内とする。	20
口 絵	カラー画像を中心とした解説・説明が効果的なもの。	2
講 演	本協会主催の講演会の内容。	20
新刊紹介	新刊の学術単行本などを紹介したもの。	2
会員の声	石油・天然ガス鉱業に関連した会員の意見。	2
参加報告	関連学会への参加報告など。	4

注：本委員会が認めた場合には、上記に規定されている最大ページ数を超過することができる。

石油技術協会誌投稿要領

平成 08 年 01 月 16 日	全面改定
平成 19 年 08 月 28 日	全面改定
平成 21 年 12 月 15 日	一部改定
平成 23 年 12 月 14 日	一部改定
平成 24 年 12 月 18 日	一部改定
平成 26 年 06 月 18 日	一部改定
平成 29 年 12 月 13 日	一部改定
令和 02 年 09 月 01 日	一部改定
令和 04 年 12 月 14 日	一部改定

1. 総 則

石油技術協会誌（以下、本協会誌という）への投稿に関しては、本投稿要領に従う。

2. 原稿の提出

2.1 投稿時の提出原稿

- (1) 本文等（表紙、英文要旨、キーワード、本文、図の説明文の一覧表）および図表（写真は図とする）。
- (2) 提出方法

投稿、受付、査読、原稿の再提出、審査結果の判定および最終原稿の提出はすべて本協会のホームページ (<https://www.japt.org/>) からオンライン投稿・査読システムによって行う。

投稿する際は、オンライン投稿・査読システムの指示に従って、投稿に必要な情報を登録するとともに、投稿原稿の電子ファイルをアップロードする。ファイルの容量の合計は 50 MB 以内とする。

2.2 投稿時の図

図は、査読上支障のないよう鮮明な画像とする。

2.3 再提出時の注意

原稿投稿後修正が生じた場合、または査読者の指示により再提出する原稿においては、例えば修正履歴を残すなど修正箇所がわかるよう明示して提出する。

2.4 受理後の提出原稿

本委員会から原稿受理の通知があった場合には、その指示に従い最終原稿本文等と図表を提出する。受理された原稿は原則として著者に返却しない。

- (1) 最終原稿本文等
表紙、英文要旨、キーワード、本文、図の説明文の一覧表をデジタルデータで提出する。
- (2) 掲載用図表
図表のデジタルデータの形式は PDF、Tif、GIF、JPG その他の一般的なものとし、原稿とは別ファイルとする（原稿本文中に図表を組み込まない）。投稿時の審査用図面ではなく、解像度劣化のない鮮明な原図、写真等を提出するよう注意すること。
- (3) 電子メールまたは電子媒体にて提出する場合には、

使用ソフトウェア名およびそのバージョンを明記する。投稿原稿のアップロード前に、あらかじめウィルスチェックを行うものとする。

3. 原稿の長さ

3.1 最大ページ数

原稿の種別ごとの最大ページ数は、石油技術協会誌投稿規定の別表に従う。次項 3.2～3.3 を踏まえ、最大ページ数を勘案して原稿を作成する。

3.2 1 ページの文字数

1 ページには、和文では 2,600 字、英文では 5,800 字が掲載される。

3.3 表紙および図表に必要なページの目安

3.3.1 表 紙

表題（和文、英文）、著者名、英文要旨と英文キーワード（論文、報告、短報、総説、資料、解説および講演のみ）および脚注には、一般に 0.8～0.9 ページを要する。

3.3.2 図 表

各図表の大きさを、①片段（ページ片方の段にのみ掲載）、②両段（ページ両方の段に亘って掲載）、③全ページのいずれかで指定する（4.6 (6) を参照）。

4. 和文原稿の書き方

4.1 用 紙

原稿はすべて A4 判縦置き横書きとし、パソコンによるものを標準とする。パソコンによる原稿は、カタカナは全角（2 バイト）、数字とアルファベットは半角（1 バイト）を使用し、10～12 ポイント、ダブルスペース相当の行間を空けて、また、上下左右 3 cm 程度の余白をもって印字する。図表を含みすべてのページに連続的なページ番号を記すこと。

4.2 原稿の表紙

原稿の第 1 ページ（表紙）に、以下に記す原稿の種別、表題、著者名などを順に記し、必要に応じて脚注にてその他情報を補足する。

- (1) 論文、報告、総説、資料などの原稿の種別（投稿

規定第2条原稿の投稿を参照)。

- (2) 和文表題
表題は簡潔にかつ主題を明確にすることが望ましい。
- (3) 和文著者名
- (4) 原稿の受付日と受理日 (英文) (原稿受理の通知を受けてから最終原稿に加筆する)。
- (5) 英文表題
表題は簡潔にかつ主題を明確にすることが望ましい。
- (6) ローマ字著者名 (省略せず完記する)。
- (7) 口頭もしくはポスター発表がしてある場合は、その年月日と発表した発表会の名称を和文および英文で脚注に記す。
- (8) 著者の所属機関名を和文および英文で脚注に記す。
著者の現在の所属機関が原稿の研究を行った機関と異なる場合は、研究を行った際の所属機関を主とし、併せて現在の所属機関を記す。
共著者の所属機関が異なる場合は著者と所属機関をアスタリスクで対応させること。
著者の e-mail アドレスを脚注に記す。
共著の場合はコレスポンディングオーサーを脚注記号で指定し、その e-mail アドレスを記す。

4.3 英文要旨とキーワード

- (1) 論文、報告、短報、総説、資料、解説および講演には 300 語以内の英文要旨 (Abstract) を添える。
- (2) 英文要旨の下に英語のキーワードを付ける。キーワードは 3 以上、12 以下とし、著者が付け本委員会が補う。

4.4 本 文

- (1) 章・節および項の区分はポイントシステムとする。
章・節には副題をつける。
章番号は「1., 2., 3., ...」, 節番号は「1.1, 1.2, 1.3 ...」, 項番号は「1.1.1, 1.1.2, 1.1.3 ...」とする。
(例) 1. 石油システムの概念と評価法
1.1 「石油システム」とは
1.2 「石油システム」評価法
- (2) 新かな遣いおよび常用漢字の使用を原則とする。
ただし、特殊な術語はその限りではない。
- (3) 一般的な用語を用い、俗語や特殊用語の使用は避ける。略語の使用は最小限にとどめ、使用する場合は初出箇所に正式名を書き、略語を括弧に入れる。
- (4) 外国の人名、地名などの固有名詞は、外国語で表記することを妨げないが、その際、日本語または英文を併記する。
- (5) 術語と物質名は、日本工業規格 (JIS) に準拠するほか、文部省学術用語集および石油技術協会 (以下、本協会という) が出版する「石油鉱業便覧」, 「石油地質・探鉱用語集」, 「油井・パイプライン用鋼管ハンドブック」, 「石油生産技術用語集」など

を参考にする。

- (6) 生物名の属以下の名称 (学名)、変数名などはイタリック字体 (または下線) を用いる。
- (7) 数量、序数を示す数字はアラビア数字とし、漢字と結合して名称や概数を表す場合は漢数字を使用する (例: 三角州, 四隅)。
- (8) 単位は原則として国際単位系 (SI) を用いる。やむを得ず従来単位を用いる場合は、各数量ひとつの単位に限定し、脚注または末尾に SI との換算係数を一括して付記する。また、数量単位記号には国際的に慣用されているものを用いる。
- (9) 量記号は原則として JISZ8202 (量記号および単位記号)、数学記号は JISZ8201 (数学記号)、化学記号は万国化学記号による。また、質量数は元素記号の左肩に付ける。
- (10) 本文または数式に用いる記号は、原則として本協会編「石油鉱業便覧」および SPE の「SPE Symbols Standard」を参照する。記号の説明は、必要に応じて、本文中か末尾の引用文献の前に一括して記載する。記号とその説明文の間は「:」を用いる。
- (11) 数式は行を替えて記し、括弧内に通し番号を付ける。文中で使用する場合には特殊な記号を用いず、「a/b」, “exp (a/b)” などの記法を用いること。また、あいまいな表現を避け (特に分子、分母の区別)、他の記号と混同しないよう注意すること。本文中で引用する場合は、式 (1) のようにする。
Appendix で数式や方程式は、式 1, 式 2 ... 等で記す。

4.5 引用文献

私信、未公表・未刊行物、準備中・投稿中あるいは審査中の原稿などの外部に公表されていないもの、およびホームページの URL は、原則として「引用文献」として認めない。

- (1) 本文中で引用文献を示す場合は以下の様式に従う。
著者が 1 人の場合: 著者 (1991) または (著者, 1991)
著者が 2 人の場合: 著者 1・著者 2 (1999) または (著者 1・著者 2, 1999)、欧文の場合は Author1 and Author2 (1999) または (Author1 and Author2, 1999) 著者が 3 人以上の場合: 著者ほか (1991) または (著者ほか, 1991)、欧文の場合は Author1 *et al.* (1991) または (Author1 *et al.*, 1991)。
著者が 7 名を超える文献は、最初の 6 名を列挙し、省略記号 (日本語部分は……, 英語部分は…) を付したあと、最後尾の著者名を記す。
例) 加瀬善洋・仁科健二・川上源太郎・林 圭一・清水康博・廣瀬 亘……石丸 聡 [Kase, Y., Nishina, K., Kawakami, G., Hayashi, K., Takashimizu, Y., Hirose, W., ..., Ishimaru, S., 2016, Tsunami deposits recognized in Okushiri Island, southwestern Hokkaido, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, 122, 587–602.]

ただし、同一著者による同一出版年の文献を2件以上引用する場合には、出版年の後に a, b, c, … を付して区別する。

- (2) 引用文献リストの書き方は以下の例に従うことを原則とする。

引用文献は本文末に著者名のアルファベット順に一括する。同一著者の文献が2件以上あるときは出版年順に、さらに同一出版年に2件以上あるときは出版年の後に a, b, c, … を付して並べる。書体は著者が指定し、巻数を示す数字には太字体（校正記号で示す場合は波形下線）を、欧文の雑誌名と書名にはイタリック字体（校正記号で示す場合は1本下線）を用いる。

(a) 雑誌論文

著者名, 出版年, 論文名, 誌名, 巻, 号, ページ, DOI, の順とする。

(例) 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, doi: 10.3720/japt.55.37.

(例) Takahashi, M. and Hayashi, M., 1991b: Zircon crystal morphology of the Miocene tuffs in the Kamogawa area, Boso Peninsula, central Japan. *J. Japan Assoc. Petrol Technol.*, 56(6), 477–481, doi: 10.3720/japt.56.477.

(b) 予稿集論文・会議録論文

著者名, 出版年, 論文名, 会議名, 開催地, 開催日, 論文番号またはページ, DOI, の順とする。

(例) Naganawa, S., Kudo, H. and Matsubuchi, H., 2016: Simulation Study on Influences of Wellbore Tortuosity on Hole Cleaning in Extended-Reach Drilling. Proc. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference (ADIPEC), Abu Dhabi, UAE, November 7–10, SPE-183409-MS, doi: 10.2118/183409-MS.

(c) 単行本

著者名, 出版年, 書名, ページ, 出版社, の順とする。

(例) 日本アイソトープ協会編, 1970: 新版アイソトープ便覧, 丸善。

(例) Tissot, B. P. and Welte, D. H., 1978: *Petroleum Formation and Occurrence*, 500–508, Springer-Verlag.

(d) 単行本や編著本の一部

著者名, 出版年, 表題, 書名, 編著名, ページ, 出版社, の順とする。

(例) 渡辺武男, 1961: 鉱床。地球の構成, 坪井忠二編, 269–290, 岩波書店。

(例) Magoon, L. B. and Dow, W. G., 1994: The petroleum system. *In The Petroleum System From*

Source to Trap, Magoon, L. B. and Dow, W. G. eds., 3–24, American Association of Petroleum Geologists.

(e) 電子文献, ウェブサイト

著者名, 掲載年, 表題, URL, アクセス日, の順とする。

(例) 経済産業省, 2015: 長期エネルギー需給見通し. http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf (accessed 2016/05/13).

(例) 経済産業省, 2017: 第2回メタンハイドレート海洋産出試験を終了しました. <http://www.meti.go.jp/press/2017/06/20170629004/20170629004.html> (accessed 2017/07/03).

4.6 図表

投稿原稿中の図, 写真, 表などを次の2種類に分け, 全てに通し番号を付け, 標記は英語とする。但し, 論文, 報告, 短報以外の種別の投稿では日本語を用いてよい。

- a. Fig (図): 本文中に挿入する図および写真などの画像
- b. Table (表): 本文中に挿入する記号・文字・罫線からなるもの

- (1) 図表には番号と表題, 必要に応じて説明文(キャプション)を付ける。
- (2) 説明文がある場合, 本文とは別に図番と表題および説明文の一覧表を作成し, 原稿に添付する。説明文は英語で記述する。但し, 論文, 報告, 短報以外の種別の投稿では日本語を用いてもよい。英語の説明文に加えて, 必要に応じて日本語の説明文を付加してもよい。英語以外の外国語の使用は, 固有名詞以外は認めない。図中の地名などの固有名詞には, 必要に応じて日本語を付す。
- (3) 文献の図表を引用する場合は, 当該表題の後にその著者名と西暦出版年を記す。
- (4) 図表は別紙あるいは別ファイルにまとめて作成し, 本文原稿中にそれらの挿入位置と大きさを指定する。
- (5) 図表の画像データは, そのまま拡大または縮小して掲載できるように解像度の高いものとする。原稿受理の通知があった場合には, 可能な限りオリジナルの画像データを提出する。
- (6) 顕微鏡写真にはスケールバーまたは凡例で大きさを示す。
- (7) 図表の大きさは掲載時の1ページ分を最大限とする。各図表の大きさの指定については, 3.3.2による。ページ数の制約などで必要な場合, 本委員会は大きさを変更できる。

4.7 図 表

- (1) 全体としての題目を付ける。
- (2) 著者、撮影者を明示する。
- (3) 原則としてカラー写真 2 ～ 6 枚程度で、相互関係を明確にする。
- (4) それぞれに数行の説明文を付ける。

5. 英文原稿の書き方

英文原稿の書き方については英文投稿要領 “Guide for Author” を参照のこと。なお、英文原稿の場合は、

和文表題・著者氏名とともに、1,200 字以内の和文要旨を添える。

付 則

本要領は石油技術協会誌編集委員会運営規定第 8 条に従って定めるものである。

本要領の改廃は本委員会の発議により、理事会の議決によって行う。

本要領は令和 4 年 12 月 14 日より施行する（第 87 期第 5 回理事会承認）。

SI 単位換算係数 (SPE 表示形式)

inch	×	2.54*	E - 02	= m
ft	×	3.048*	E - 01	= m
ft ³	×	2.831685	E - 02	= m ³
bbl	×	1.589874	E - 01	= m ³
kgf	×	9.80665*	E + 00	= N
kgf / cm ²	×	9.80665*	E + 04	= Pa
atm	×	1.01325*	E + 05	= Pa
lbm	×	4.5359237*	E - 01	= kg
lbf	×	4.448222	E + 00	= N
psi	×	6.894757	E + 03	= Pa
darcy	×	9.86923	E - 13	= m ²
			E - 01	= μm ²
md	×	9.86923	E - 16	= m ²
			E - 04	= μm ²
cP	×	1.0*	E - 03	= Pa · s
cSt	×	1.0*	E - 06	= m ² / s
cal	×	4.186	E + 00	= J
Btu	×	1.055056	E + 03	= J
Å	×	1.0*	E - 10	= m
HP(メトリック)	×	7.35499	E - 01	= kW
hp(英・米)	×	7.46043	E - 01	= kW
US gallon	×	3.785412	E - 03	= m ³
US short ton	×	9.071847	E + 02	= kg
rpm				= 1 / min
(°F - 32) / 1.8				= °C
mile	×	1.609344*	E + 00	= km
acre	×	4.046873	E + 03	= m ²
knot	×	5.144444	E - 01	= m / s
海里	×	1.852	E + 03	= m
141.5 / (131.5 + °API)				= g / cm ³
mm Hg	×	1.33322	E + 02	= Pa
mm H ₂ O	×	9.80665	E + 00	= Pa
ft H ₂ O	×	2.98898	E + 03	= Pa

*は正確な値

<令和 6 年度秋季講演会>

「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて～水素・アンモニア～」

開会の辞	高橋 利宏
水素を巡る最近の動きについて～水素社会推進法～	廣田 大輔
水素・アンモニアプロジェクトに対する JOGMEC 支援	
～グリーン水素を原料とする合成燃料製造事業の事業評価の紹介～	本橋 貴行
ゼロエミッション火力の導入に向けた取り組み	高橋 賢司
新潟県柏崎市でのブルー水素・アンモニア製造・利用一貫実証試験の概要	古座野 洋志
天然水素の動向～クリーンエネルギー資源としての可能性と課題～	小杉 安由美
カーボンニュートラルに向けたアンモニアの役割	村木 茂
まとめ・閉会の辞	島本 辰夫

<論 文>

東柏崎ガス田における CCUS 貯留層モデルの最適化に向けた火山岩貯留岩のロックタイピング	
上野 健太・江川 浩輔・小島 啓太郎・松井 良一	
単一の常設震源 ACROSS を用いたタイムラプス地震探査の取り組み	
清水 英彦・下田 直之・田中 宏明・小西 祐作・ドン ホワイト・エリック ニッケル	

<解 説>

BP/ EI 統計から見た中国における再生可能エネルギー事業の現状	鍋谷 淳
-----------------------------------	------

石 油 技 術 協 会 会 誌 編 集 委 員 会

委 員 長 小林 肇（東京大学）

副委員長 石瀬 康浩（INPEX）

運営幹事 岡野 祥之（石油資源開発）

芦田 彬久（INPEX） 橋本 直明（三井石油開発） 松渕 仁（INPEX）

運 営 委 員

安達 陽介（石油資源開発） 石川 正紀（INPEX） 石崎 理（石油資源開発）
堀内 侑樹（INPEX） 松井 良一（INPEX） 渡部 哲子（石油資源開発）

委 員

青木 直史（石油資源開発） 阿部 一徳（秋田大学） 石川 和明（出光興産）
岩本 広志 大内 久尚（早稲田大学） 大槻 敏（JOGMEC）
栗田 裕司（新潟大学） 三瓶 良和（島根大学） 谷 和幸（JX 石油開発）
玉置真知子（日本オイルエンジニアリング） 長縄 成実（秋田大学） 新堀 雄一（東北大学）
荷福 洸（INPEX） 野中 美雪（石油資源開発） 長谷川智紀（石油資源開発）
福田 真人（JOGMEC） 風呂田郷史（産業技術総合研究所） 山本 正伸（北海道大学）
山崎 誠（秋田大学） 吉岡 秀佳（産業技術総合研究所）

事務幹事 山口 明

©The Japanese Association for Petroleum Technology 2025

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

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

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

石油技術協会誌（JAPT）Vol.90, No.1

2025 年 1 月発行 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
（エネルギー資源開発連盟内）

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 <https://www.japt.org/> E-mail office@japt.org

印 刷 所：〒121-0072 東京都足立区保塚町 8-20 榎大和印刷

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