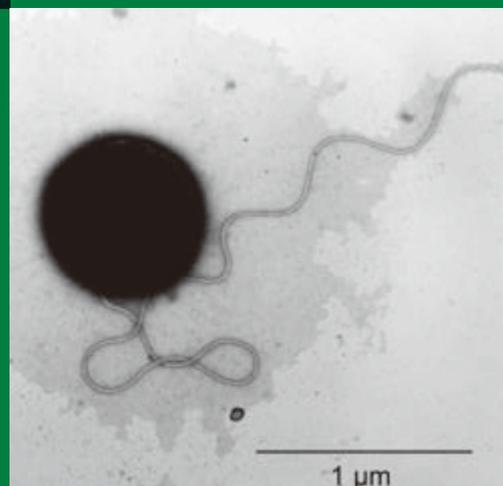


# GREEN Report 2024

## 脱炭素と社会・経済が調和した トランジションに向けて

エネルギー・環境・資源制約へ対応する  
燃料資源地質研究



## はじめに



地圏資源環境研究部門長  
相馬 宣和

Director of the Research  
Institute for  
Geo-resources and  
Environment, GSJ, AIST  
Dr. Nobukazu Soma

地圏資源環境研究部門の発足二年目から継続している研究成果報告会は、お陰さまで今回で23回目を迎え、本日も第42回地質調査総合センター（GSJ）シンポジウムとして開催いたします。まさに“継続は力なり”ではありますが、同時に、単に続けることだけが目的になってしまうと慢心や保守的傾向に繋がりがかねず、我々の研究活動の社会的価値等が低下していくリスクがあることも自覚しております。ぜひ、本報告会にご参加いただいた皆様には、忌憚なく、鋭く厳しいご意見やご教示を頂ければ幸いです。

本年度は、産業技術総合研究所（以下、産総研）の第5期中長期計画（5カ年）の最終年度です。第5期の当研究部門は、“持続可能な地圏の利用と保全のための調査と研究”をミッションに、

- 1) 地圏資源 (Geo-Resource) の調査・研究および活用、
- 2) 地圏環境 (Geo-Environment) の利用と保全のための調査・研究、
- 3) 地圏の調査 (Geo-Exploration) および分析 (Geo-Analysis) 技術の開発と展開、

の3つを重点課題としています。産総研第5期の特色である「社会課題への解決」や「橋渡しの拡充」などを意識し、“資源”と“環境”という第4期までの伝統的な柱に加えて、それらの基盤たる“技術”の面にも重きを置いた3つの柱で多様な研究活動を推進してきました。これらの中で、メタンハイドレートや在来・非在来型燃料資源、希土類等の鉱物資源、地下水資源、高レベル放射性廃棄物地層処分、二酸化炭素の地中貯留、表層土壌評価、休廃止鉱山廃水処理、などの社会的課題に資する研究活動を展開しています。また、第5期の全所的取り組みである領域融合プロジェクトにも積極的に参加し、GSJが代表領域である環境調和型産業技術研究ラボ（E-code）をはじめ、ゼロエミッション、資源循環、インフラ、感染症リスクなどに関する融合的研究にも貢献しています。本日は、本報告会のメインテーマに関連する口頭発表に加えて、例年同様にポスターセッションを設けて当部門における研究成果を幅広くご紹介します。

今回のメインテーマは、「脱炭素と社会・経済が調和したトランジションに向けて～エネルギー・環境・資源制約へ対応する燃料資源地質研究」です。久しぶりに、“資源”に真正面から立ち向かう内容としております。最近の、特にエネルギー・資源を巡る社会的ムードは、長期化するロシア・ウクライナ紛争や緊迫化する中東情勢などの国際動向の激変を受けて、これまでになく大きく変化してきていると感じます。長期的な流れとしては、カーボンニュートラルを進めてGX（グリーントランスフォーメーション）に着実に向かうことが、未来の社会のために不可欠であることには変わりありません。しかし、そのプロセスにおいて、日本国民の豊かさの礎たる経済を維持することは不可欠であり、燃料資源等の安定供給確保や鉱物等材料のサプライチェーンの強靭さを高めながらGXに向かう、いわゆる「現実的なトランジション」が求められるようになってきました。国のGX実行会議や第7次エネルギー基本計画に向けた議論の場では、二酸化炭素の回収・貯留（CCS）の実施を大前提にしなが、天然ガス等の燃料資源の確保がこれまでになく明確に重要視されており、まさに地圏資源環境研究部門が研究開発の“ハブ”として社会に貢献すべき状況になってきていると自認しています。

このようなことを踏まえ、本日のプログラムでは初めに二酸化炭素の地中貯留に関する講演を行い、それを受けてCCS全般との有機的連携によって未来のGX社会を切り拓く燃料資源地質の研究講演を行います。さらに招待講演として石油資源開発株式会社の高野フェローをお迎えし、「石油・ガス開発とカーボンニュートラルに資する燃料資源地質研究の役割」に関してご講演を頂きます。プログラム半ばのポスターセッションでは、メインテーマに限定せず幅広い研究活動をご紹介します。

現在、当部門内を含め、第6期に向けた議論が産総研の各所で進められております。すでに本年8月には、経済産業省のWebページにおいて、産総研が第6期に特に注力すべき社会課題は、「エネルギー・環境・資源制約への対応」、「人口減少・高齢化社会への対応」、「レジリエントな社会の実現」の3つであることが公開されています（経産省Web [https://www.meti.go.jp/intro/koueki\\_houjin/a\\_index\\_04.html](https://www.meti.go.jp/intro/koueki_houjin/a_index_04.html)）。それらのうち特に一番目の課題は、“資源”と“環境”の両面に取り組む当部門のレゾナントルそのものです。本年度の残りの時間を有効に使い、本報告会を含む皆様方からのフィードバックを踏まえながら、様々な切り口でこれらの社会課題に貢献することを検討し、当部門の第6期の“あり方”や研究実施体制を詰めていく予定です。第5期最終盤と第6期のスタートダッシュに向けて、当部門は皆様のお力添えも頂きながら一層努力して参ります。今後とも変わらぬご高配を賜りますよう、心よりお願い申し上げます。

令和6年12月6日



## 目次

### 講演題目

13:30 ~ 13:35	開会の挨拶	副研究部門長	鈴木 正哉	
13:35 ~ 13:50	地圏資源環境研究部門の概要	研究部門長	相馬 宣和	
13:50 ~ 14:10	カーボンニュートラル実現のための CCS の現状とさらなる発展に向けた課題	首席研究員	徂徠 正夫	8
14:10 ~ 14:50	石油・ガス開発とカーボンニュートラルに資する燃料資源地質研究の役割	招待講演：石油資源開発株式会社 技術本部 技術研究所 フェロー	高野 修 氏	10
14:50 ~ 15:20	グループ長によるショートプレゼン 各グループの研究トピックス, ポスター紹介			
15:20 ~ 16:10	ポスターセッション			
16:10 ~ 16:35	日本海側堆積盆における石油・天然ガス鉱床形成へのテクトニクスとの役割	燃料資源地質研究グループ キャリアリサーチャー	中嶋 健	12
16:35 ~ 17:00	日本海の表層型メタンハイドレート：特徴的な地質学的背景におけるその生成シナリオ	物理探査研究グループ 主任研究員	浅田 美穂	14
17:00 ~ 17:25	国内の新規微生物起源天然ガス田の可能性	燃料資源地質研究グループ グループ長	吉岡 秀佳	18
17:25 ~ 17:30	閉会の挨拶	地質調査総合センター長	中尾 信典	
18:00 ~	懇親会			

### 研究グループ紹介

地下水研究グループの紹介	地下水研究グループ長	吉岡 真弓	22
鉱物資源研究グループの紹介	鉱物資源研究グループ長	星野 美保子	24
燃料資源地質研究グループの紹介	燃料資源地質研究グループ長	吉岡 秀佳	28
地圏微生物研究グループの紹介	地圏微生物研究グループ長	鈴木 正哉	30
地圏環境評価研究グループの紹介	地圏環境評価研究グループ長	保高 徹生	34
物理探査研究グループの紹介	物理探査研究グループ長	神宮司 元治	36
CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループの紹介	CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループ長	相馬 宣和	40
地圏環境リスク研究グループの紹介	地圏環境リスク研究グループ長	原 淳子	44
地圏メカニクス研究グループの紹介	地圏メカニクス研究グループ長	坂本 靖英	48

**部門付き**

協創型の資源開発に向けた地域便益評価システムの検討 (地熱)	相馬 宣和	54
※粘土系吸着剤 (ハスクレイ) を用いた施設園芸栽培における除湿効果	鈴木 正哉, 宮原 英隆, ○万福 和子	54
玄武岩の CO <sub>2</sub> 貯留および風化促進への適用性評価	徂徠 正夫	55
地中熱システムの社会実装を目指して - タジキスタン共和国における地中熱ポテンシャル評価 (SATREPS 事業) -	内田 洋平	55
土壌・地下水汚染の長期挙動予測のための数値解析技術の高度化	坂本 靖英	56
ガスハイドレートの安定性に関する熱力学的研究	前川 竜男	56

**地下水研究グループ**

浅層～深層地下環境における熱環境評価に資する技術開発	吉岡 真弓	57
地下水の経済的価値の算出方法の検討	井川 怜欧	57
※水文環境図「大井川下流域」の出版	○小野 昌彦	58
国内の休廃止鉱山における坑廃水管理に向けた水文・水質データの収集と解析	松本 親樹	58
崩壊堆積物は酸化還元反応のホットスポットになりうるか?	吉原 直志	59
陸域負荷による沿岸域への影響評価法の確立を目指して	飯島 真理子	59
※磁気共鳴検層による水みちの検出のこころみ	○中島 善人, 井川 怜欧	60

**鉱物資源研究グループ**

リン鉱石からの副成分としてのレアアースの回収法の研究	星野 美保子	60
近赤外分光法による岩石中の鉱物含有量推定手法の開発	児玉 信介	61
鉱床の成因研究: 特に希土類鉱床の開発に向けて	実松 健造	61
※ LA-ICPMS による2次元元素イメージングと単体分離分析	○昆 慶明, 綱澤 有輝	62
金属元素の安定同位体比分析法の開発と鉱床探査への応用	荒岡 大輔	62
選鉱プロセスの高効率化のための粉体シミュレーション技術の開発	綱澤 有輝	63
※火成岩の局所微量元素組成に基づく銅鉱床探査法の開発	○左部 翔大, 昆 慶明, 実松 健造	63
初生花崗岩質メルト包有物を用いた銅鉱床形成ポテンシャル評価手法の開発	天谷 宇志	64

**燃料資源地質研究グループ**

※メタンセンサーを用いた上越沖メタンハイドレート分布域における溶存メタン濃度の測定	○吉岡 秀佳, 青木 伸輔 (香川大学), 浅田 美穂, 佐藤 幹夫	64
燃料資源への応用を目指した堆積盆テクトニクス・根源岩・貯留岩の研究	中嶋 健	65
表層型メタンハイドレート胚胎域での海底長期モニタリング	後藤 秀作	65
※ LA-ICP-MS による石炭マセラルの希土類元素濃度測定	○高橋 幸士, 昆 慶明 (鉱物資源 RG), 野田 篤 (地質情報 RI)	66
化石クロロフィルを用いた古海洋表層の酸化還元指標の開発	朝比奈 健太	66
補酵素 F <sub>420</sub> の電極反応系の開発	風呂田 郷史	67
未固結堆積物固化技術を用いた地下マイクロ空間の3次元可視化	久保田 彩	67
※日本海東縁 (上越沖・酒田沖) のガスハイドレート胚胎域の土質特性	○青木 伸輔 (香川大学), 鈴木 清史 (エネルギープロセス研究部門), 佐藤 幹夫, 吉岡 秀佳, PS21乗船研究者一同, CK22-03C 乗船研究者一同, CK23-02C 乗船研究者一同	68

**地圏微生物研究グループ**

※マンガン酸化微生物を利用した鉱山廃水処理システムの開発	○片山 泰樹, 渡邊 美穂, Gotore Obey, 岡野 邦宏, Tum Sereyroith, 保高 徹生, 宮田 直幸	68
------------------------------	---	----

天然ガス田由来微生物による嫌氣的リグニン分解機構の解明	持丸 華子	69
油田から獲得したトルエン分解メタン生成微生物群集のメタオミクス解析	眞弓 大介	69
水溶液中の酢酸とギ酸の新しい <sup>13</sup> C トレーサー濃度定量法	須田 好	70
※メタンハイドレート分布域で共存する好気性・嫌気性微生物がメタンフラックスへ与える影響を解明	○宮嶋 佑典, 青柳 智 (環境創生研究部門), 吉岡 秀佳, 堀 知行 (環境創生研究部門), 高橋 浩 (活断層・火山研究部門), 田中 美菜子 (株式会社 KANSO テクノス), 塚崎 あゆみ (環境創生研究部門), 後藤 秀作, 鈴木 昌弘 (株式会社 AIST Solutions)	70
<b>地圏環境評価研究グループ</b>		
※環境情報の可視化の試み	○保高 徹生, 金井 裕美子, 高田 モモ	71
地圏化学の基礎的研究 (温泉の利用性の検討)	佐々木 宗建	71
※下水処理過程において排出される未利用リン資源のアップサイクルに向けた技術開発	○森本 和也, 鈴木 正哉, 保高 徹生	72
地化学からみた地震, 社会からみた地熱エネルギー	最首 花恵	72
除去土壌等の最終処分の社会受容性への影響因子 - 高レベル放射性廃棄物と産業廃棄物との比較	高田 モモ	73
吸着層工法に用いられる吸着材の性能評価試験の標準化に向けた検討 - 溶液中の共存イオンの影響	西方 美羽, 保高 徹生	73
※ Mn 酸化菌を用いた坑廃水処理リアクターに影響を及ぼす環境要因の推定	○小村 悠人, 保高 徹生, TUM Sereyroith, 片山 泰樹	74
<b>物理探査研究グループ</b>		
非破壊電気探査を用いた水道管の予防安全管理	神宮司 元治	74
表層型メタンハイドレート賦存海域 (上越沖) における各種弾性波探査データ取得	横田 俊之	75
※ IP 法電気探査の高度化に関する技術開発	○小森 省吾	75
※水位変化による試験堤防の S 波速度構造モニタリング	○湊 翔平	76
日本海の表層型メタンハイドレート賦存域の音響マッピング及び海底状況把握調査	浅田 美穂	76
河川堤防における無人地上車両を利用した牽引型電磁探査	梅澤 良介	77
宇宙線ミュオンと弾性波の統合解析による地下の力学特性および孔隙内充填物推定手法に関する研究	児玉 匡史, 横田 俊之, 松島 潤 (東京大学)	77
<b>CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ</b>		
室内実験によるジオメカニクスモデリングの高度化	藤井 孝志	78
CO <sub>2</sub> 地中貯留における坑井電位モニタリング適用性の数値的検討	加野 友紀	78
超伝導重力計を用いた CO <sub>2</sub> 挙動モニタリング技術の開発	後藤 宏樹	79
※地化学反応に伴う玄武岩の水理特性変化の評価: CO <sub>2</sub> 地熱発電技術の開発に向けて	○西山 直毅, 徂徠 正夫	79
CO <sub>2</sub> 地中貯留における漏洩リスク把握のための坑井電位モニタリング	堀川 卓哉	80
※風化促進実験における CO <sub>2</sub> 固定量の評価	○西木 悠人	80
※機械学習による多孔質岩石構造の特徴抽出と分類	○志賀 正茂	81
<b>地圏環境リスク研究グループ</b>		
岩石溶解促進による大気中 CO <sub>2</sub> 吸収量の試算	原 淳子	81
※ヒ素吸着後の使用済 Mg 系及び Ca 系吸着材の環境安定性に及ぼす土壌の影響	○杉田 創, 森本 和也 (地圏環境評価 RG), 斎藤 健志, 原 淳子	82
※メンブレンフィルターの粒子通過性能評価	○井本 由香利	82
※微生物によるクロロエチレン類浄化への“土壌”の影響評価	○吉川 美穂, 原 淳子, 川邊 能成 (早稲田大学)	83

紫外線によるマイクロプラスチックの劣化が鉛吸着量に及ぼす影響	斎藤 健志	83
土壌中のナノプラスチック濃度の測定技術を開発	土田 恭平	84

#### 地圏メカニクス研究グループ

高時間分解能の放射光その場観察変形実験で探る深部断層形成と地震発生のメカニズム	雷 興林	84
泥岩を用いた室内岩石実験と多孔質弾性パラメータ	及川 寧己	85
三軸圧縮応力下における珪藻土の時間依存性挙動	竹原 孝	85
PDC ビットの掘進速度の低下に影響する摩耗状態の定量的評価	宮崎 晋行	86
※最大主応力に対する断層の角度が注水時の断層運動に及ぼす影響	○北村 真奈美	86
※ PDC ビットの掘進速度モデルの適用可能範囲に関する実験的検証	○金木 俊也, 宮崎 晋行	87

 論文リスト	89
---	----



講演題目

# カーボンニュートラル実現のための CCS の現状とさらなる発展に向けた課題

Current status of CCS for achieving carbon neutrality and challenges for further development

首席研究員：徂徠 正夫  
Principal Researcher: Masao Sorai  
Phone: 050-3521-1415, e-mail: m.sorai@aist.go.jp  
<https://unit.aist.go.jp/georeserv/geostorage/index.html/>

## 1. はじめに

近年の国際的な CO<sub>2</sub> 排出量削減の流れを受け、二酸化炭素回収・貯留 (CCS: Carbon dioxide Capture and Storage) の社会実装に向けての動きが加速している。国内では昨年度の長期ロードマップの策定に続いて、今年度は事業法が成立するとともに、2030 年までに合計で年間 600 ~ 1,200 万トンの CO<sub>2</sub> 貯留を目標とする、JOGMEC 先進的 CCS 事業 9 件 (5 件が国内での貯留、残り 2 件がアジア大洋州での貯留を想定) が選定された。2050 年のカーボンニュートラル社会の実現に向けては、これら CCS 事業の円滑な遂行に加え、さらなる拡大が求められるところである。一方、産総研地圏資源環境研究部門は、経済産業省の推進する CCS プロジェクトの下、CO<sub>2</sub> 地中貯留の低コスト化や安全性評価に資する研究開発に 20 年以上従事してきた。本講演では、産総研の取り組みをベースとして、従来型の CCS のみならず、将来的なオプションへの発展に向けた各種課題を紹介する。

## 2. 従来型 CCS に関する産総研の取り組みと課題

### (1) ジオメカニクスモデリング

産総研は、二酸化炭素地中貯留技術研究組合の一員として、NEDO「CCUS 研究開発・実証関連事業／安全な CCS 実施のための CO<sub>2</sub> 貯留技術の研究開発」の中で、重力や自然電位等の低コストモニタリング技術や遮蔽性能評価に関わる研究開発を実施してきた。これらの成果については、適切な検証の機会を模索している段階にある。

これに対して、現在注力しているのが断層ジオメカニクスモデリング技術の開発であり、CO<sub>2</sub> 圧入に伴う断層安定性への影響や断層からの CO<sub>2</sub> の漏洩の課題に取り組んでいる。具体的には、豪州サイトで当技組が実施する断層への流体圧入試験に関して、現場計測データとのヒストリーマッチングにより、流体圧入に伴う断層の挙動 (漏洩特性、安定性) の評価を行う計画である。断層問題への懸念の解消は CCS の社会的受容性確保の鍵であることから、最終的には、地質や応力条件の異なる国内にも適用できる断層ジオメカニクスモデリング手法を確立することが課題である。

### (2) 最適圧入法の検討

一般的に圧入した CO<sub>2</sub> は浮力により上方に移動し、キャップロックに到達後はその下面に沿って水平に広がる

傾向を持つ。結果として、貯留層下部の 1 点からの圧入では、貯留層の下部に CO<sub>2</sub> が充填されない状態となり、かつ CO<sub>2</sub> プルームが水平方向に拡大することとなる。このことは、貯留量の未達や貯留権域外への移動にもつながり得ることから、個々の貯留層が必ずしも大きくない我が国において圧入法の検討は重要である。

産総研では、貯留層への CO<sub>2</sub> の最適な圧入法を検討するため、垂直井、傾斜井、水平井の異なる井戸形状について、貯留層内での CO<sub>2</sub> の広がりを計算している。垂直井では貯留層上部および下部の 1 点圧入に加え、傾斜井および水平井と同様に貯留層全域にわたって吹き出し口を開けた場合の合計 5 ケースを想定した (図 1)。シミュレーションでは、圧入井を中心に半径 3,000m を貯留域として、深度が 950 ~ 1,050m (層厚 100m) の貯留層に、年間 100 万トンの CO<sub>2</sub> を 20 年間を圧入するとした。この際には、貯留層内の浸透率の異方性にも注目し、水平浸透率  $k_h$  と鉛直浸透率  $k_v$  の比 ( $k_h/k_v$ ) を 1, 10, 100 と変動させた場合の影響も調べた。本講演では、どの方法が最も効率的に CO<sub>2</sub> を圧入できるかを予察的に考察する<sup>1)</sup>。なお、今回の試算では均質な貯留層を仮定しているが、実際には不均質性も考慮しなければならず、圧入深度の順次変更や複数井の掘削などを含め、コストとリスクの兼ね合いから最善の判断を行う必要がある。

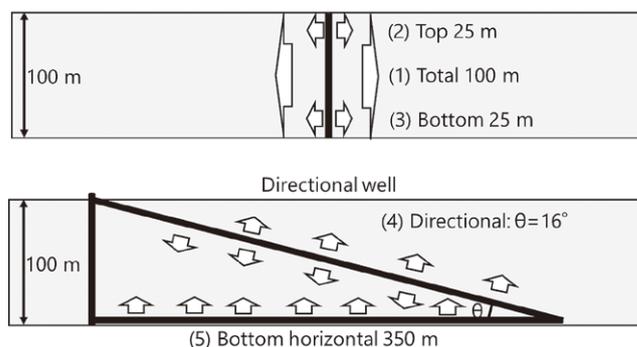


図 1 圧入方法の違い：上図)垂直井，下図)傾斜井および水平井

## 3. 将来的な CCS オプション拡大の方策

### (1) 貯留ポテンシャル拡大に向けた玄武岩への貯留

産総研では、従来の帯水層貯留に留まらず、将来的なオプションとして玄武岩等の火成岩貯留層を対象とした CCS 技術の開発にも携わっている。その一例が、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 3 期課題

「海洋安全保障プラットフォームの構築」のサブ課題「海洋玄武岩層を活用した大規模 CO<sub>2</sub> 貯留・固定化技術に関する基礎調査研究」であり、この中で「玄武岩海山中での CO<sub>2</sub> 挙動の解析」や「玄武岩海山の水理-力学特性評価」に取り組んでいる。

玄武岩への貯留では、CO<sub>2</sub> が鉱物化することによる早期のモニタリング終了や社会に与える安心感の増大、さらには貯留ポテンシャルの拡大などが期待されている。しかしながら、玄武岩の浸透率や遮蔽層の有無、鉱物化に至る時間などは未だ不明である。加えて、海山の場合は貯留層の温度が低く、CO<sub>2</sub> が一般的な CCS における超臨界状態とは異なり、液体状態になり得る点は留意すべきである。液体の CO<sub>2</sub> は超臨界状態と比較して密度が高く、限られた空隙中に貯留できる CO<sub>2</sub> 量は多くなる利点がある（例えば、圧力が 10MPa のとき、20℃の液体は 40℃の超臨界と比較して密度は 1.4 倍）。一方で、粘性も 1.7 倍に増加するため、同量の CO<sub>2</sub> を貯留するためにはより高い圧力が必要となるのみならず、注入圧が低い場合はむしろ貯留量が減る可能性もある。低温環境下では CO<sub>2</sub> ハイドレートの生成や鉱物化速度の低下など、他にも懸念点はあるものの、最適な貯留条件を選定していくことで、我が国に無尽蔵に存在する海洋玄武岩を活用した CCS の実現性が増すことになるであろう。

## (2) 低コスト化に資する混合ガスの圧入

直接空気回収技術 (DAC: Direct Air Capture) による CO<sub>2</sub> を地下に貯留する DACCS は、究極のネガティブエミッション技術である。本来 400ppm の CO<sub>2</sub> を 100% 近くまで濃縮分離するには相応のエネルギーを要するが、CO<sub>2</sub> 純度を抑制し、他の大気成分である窒素 (N<sub>2</sub>) や酸素 (O<sub>2</sub>) とともに貯留すれば、分離に要するエネルギーの節減につながることを期待される。ただし、混合ガスで貯留する場合は、CO<sub>2</sub> 以外のガスも貯留層空隙を占有するため、100%CO<sub>2</sub> の場合より多量のガスを圧入する必要が生じる。したがって、混合ガス貯留が成立するかどうかを判断するためには、必要となる混合ガス量、すなわち CO<sub>2</sub> の密度を知ることが不可欠である。

ここでは、深度 1,500m (温度 52.5℃, 圧力 15MPa) の貯留層への混合ガスの圧入を想定し、分子動力学シミュレーションにより混合ガス中の各成分の密度を算出した (図 2)。この際には、N<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> の比率を大気中の 4 : 1 に維持しながら、CO<sub>2</sub> の比率を種々に変動させた。CO<sub>2</sub> 密度の量比に対する変化は N<sub>2</sub> や O<sub>2</sub> と比較して非常に大きく、例えば CO<sub>2</sub> のモル比を 100% から 80% まで低下させると密度は半減する。この場合、同量の CO<sub>2</sub> を貯留するためには全量で 2 倍の混合ガスを圧入する必要が生じ、ガス 1 モル当たりの貯留コストがすべてのガス成分で同じであると仮定すると、2 倍のコストがかかることとなる。しかしながら、DAC は場所の制約がない利点があるため、

貯留サイト近傍で CO<sub>2</sub> を回収することで輸送コストを抑制することが可能である。結果として、80% CO<sub>2</sub> の回収コストが 100% CO<sub>2</sub> の半分以下に抑えられれば、DACCS は経済的に競争力を持つことになる<sup>2)</sup>。現時点では、混合ガスの水理特性等は考慮に入れておらず、また貯留層サイズとの兼ね合いの問題はあるものの、今後の検討結果次第では DACCS の実現のための一つのオプションになり得るものと考えられる。

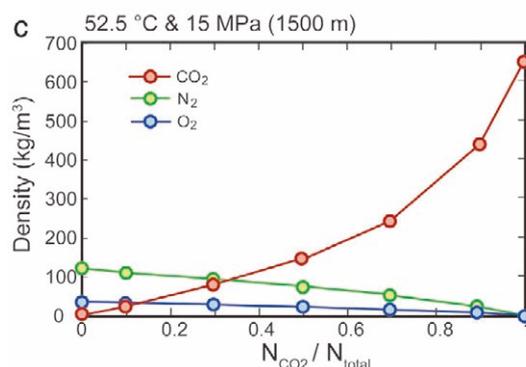


図 2 CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 系の各ガス成分の密度<sup>2)</sup>

## 4. まとめ

カーボンニュートラルの流れの中で、化石燃料資源の継続的な利用に対する CCS の併用は不可欠である。現行の帯水層貯留は技術的にはほぼ確立されており、今後は低コスト化を中心とした社会実装への対応が課題である。一方で、CCS にはよりグローバルな視点でのネガティブエミッション技術としての貢献も求められている。このような CCS の拡大に向けては、従来の CCS に留まらないオプションの多様化が不可欠であり、個々のオプションの評価を進めておくことが重要である。

## 参考文献

- 1) 加野友紀, 石戸経土, 中尾信典 (2020) 遮蔽層の不均質性が深部互層系に圧入された CO<sub>2</sub> 長期挙動にもたらす影響に関する数値シミュレーション, *Journal of MMIJ*, 136, 140-150.
- 2) Tsuji, T., Sorai, M., Shiga, M., Fujikawa, S., Kunitake, T. (2021) Geological storage of CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixtures produced by membrane-based direct air capture (DAC), *Greenh. Gases Sci. Technol.* 2021, 11, 610-618 doi:10.1002/ghg.2099.

# 石油・天然ガス開発とカーボンニュートラルに資する燃料資源地質研究の役割

Role of the fuel resource geology researches in recent oil and gas development and carbon neutral management

石油資源開発株式会社 技術本部 技術研究所  
フェロー：高野 修  
Fellow, JAPEx Research Center, Japan Petroleum  
Exploration: Osamu Takano  
e-mail: osamu.takano@japex.co.jp

## 1. はじめに

近年の石油・天然ガス探鉱開発対象は、在来型の石油・天然ガス鉱床に加えて、非在来型（シェールオイル・ガス、微生物起源ガス、メタンハイドレート、コールベッドメタンなど）の探鉱開発の比重が格段に大きくなってきている。これに加えて、地球温暖化ガス抑制の必要性や再生可能エネルギーの台頭により、二酸化炭素地中貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）や水素開発などのカーボンニュートラル（炭素中立）・脱炭素・エネルギー転換関連プロジェクトへの石油探鉱開発業界の取り組みが盛んになってきている。本講演では、これら在来型探鉱開発、非在来型探鉱開発、カーボンニュートラル・脱炭素・エネルギー転換関連プロジェクトへの取り組みのそれぞれにおける、燃料資源地質を中心とした地圏資源環境研究の役割と期待したいポイントを取り上げて議論する。

## 2. 在来型探鉱開発

### 2.1. 根源岩能力評価によるポテンシャル堆積盆のスクリーニング

石油・天然ガス探鉱の戦略は企業各社によって異なるが、ほぼ共通の認識となりつつあるのが、有能な根源岩が存在して熟成に達しているかどうかのスクリーニングを探鉱の初歩ステップとして行うべきと言う点である。関連する有機地化学データの有用性が高まっているとともに、ポテンシャルが高い堆積盆か否かの根源岩能力評価を行う地化学的手法の最適化が求められている。

### 2.2. 地化学および移動集積堆積盆モデリングの精緻化

根源岩で生成した炭化水素がどのようにキャリアベッドを通じてトラップまで移動して集積するか、生成・移動とトラップ構造形成のタイミングは適切か、炭化水素生成量および集積した石油・天然ガスの資源量はどのくらいかなどの点をシミュレートするモデリングソフトウェアが常態的に利用されるようになってきている。モデリングの精緻化のために、モデリングパラメータである地化学データ、地質構造データ、年代データなどをいかに正確に取得して入力するかが重要な鍵となっている。

### 2.3. 貯留層分布性状解析の精緻化

貯留層の分布や性状を正確に予測することは、石油・天然ガス発見成功率の向上や正確な埋蔵量の算定上、重要な

ポイントとなる。三次元震探技術と堆積学の融合である三次元震探地形学手法では、三次元震探データのスライス、層準面属性三次元表示、ポリウム属性三次元表示、震探相三次元表示などにより堆積体を表示し、堆積学的解釈を施して、分布・性状を明らかにする。これと、既存坑井データの堆積学的・岩石物理学的解析との統合により、精緻な分布解析が可能である。これに加えて、堆積フォワードモデリングや地球統計学モデリングとの組み合わせにより、さらに正確な貯留層分布と性状の解明を目指した手法の開発が望まれている。

## 3. 非在来型探鉱開発

### 3.1. シェールの詳細タイプ区分とジオメカニクス

一般にシェール（頁岩）といっても、珪質岩や炭酸塩岩優勢頁岩など様々なタイプがあるため、それぞれのタイプの堆積岩石学的な詳細を解析するとともに、フラクチャーの形成しやすさなど、ジオメカニクスの性状との関連を明らかにする研究の推進が求められている。

### 3.2. 微生物起源ガスの生成・集積条件の詳細解明

従来開発対象とされていた天然ガスは、堆積盆深部埋没に伴う有機物の熱分解による熱分解ガス（thermogenic gas）が主体であったが、近年、比較的浅層部において微生物活動によって発生する微生物起源ガス（biogenic gas）鉱床が世界各地（東地中海、東南アジアなど）で発見されつつある。東部南海トラフにおいて発達するメタンハイドレートも微生物起源ガスがハイドレート化したものであり、日本近海でも今後の新たなガス田の発見につながる可能性がある。微生物起源ガスは、堆積速度が速く、地殻熱流量が低い環境において生成されやすいとされ、日本近海では、メタンハイドレート賦存指標である震探データ上の海底疑似反射面（BSR：Bottom Simulating Reflector）の分布域が、一部を除き微生物起源ガスの生成域を示唆している。新たに微生物起源ガス鉱床を発見して開発に進めるためには、好適条件の明確化とともに、堆積盆セッティングや堆積盆構造、堆積システムとの関連などのさらなる検討が必要となっている。

### 3.3. メタンハイドレート開発にかかる地質学的諸問題の解決

メタンハイドレートは、資源小国である日本の近海にも

豊富に分布し、次世代エネルギー源との期待が高い状態となっている。しかしながら、おもに海底扇状地タービダイト砂岩に胚胎する砂層型では、メタンハイドレートの分解気化が順調に進まない場合や、未固結砂～半固結砂岩であるがための生産時の出砂現象、メタンハイドレートの不均質性に関連した地層水の産出などの問題点が浮上している。一方の表層型メタンハイドレートについても、生産方法の検討が続けられている。これらの諸問題について、さらなる今後の検討が必要とされている。

#### 4. カーボンニュートラル・脱炭素・エネルギー転換関連プロジェクト

##### 4.1. CCS適地と適性貯留層の分布性状把握評価技術の最適化

CCSを実施するにあたっては、CCSを行う深度帯における十分な貯留層の発達、および遮蔽層の発達などの条件が揃った適地を認定する必要がある。貯留層および遮蔽層の発達分布解析技術として、在来型石油・天然ガス鉱床の貯留層と同様な手法によって分布・性状の評価を行い、その規模や遮蔽層との組み合わせによって、適地を認定するとともに詳細な性状の評価を行う必要がある。CCS適地としては浅海部が対象となることが多いと考えられるが、これまで浅海部の三次元震探調査は、取得技術の問題や漁業問題から容易には行われてこなかった。以上の諸問題点解決や必要性対処のため、手法技術の最適化やケーススタディの実施が望まれている。

##### 4.2. CCS圧入性と貯留層性状分布の関係の解明

CCSの実施においては、貯留層への二酸化炭素の圧入性が重要な鍵となる。貯留層工学的な手法の検討のほか、貯留層の性状を規制するファシス(堆積相)分布との関連を検討する必要があり、関連する研究の進展が望まれる。

##### 4.3. CCS遮蔽層評価技術の確立

CCSは、コストや効率性を考えた場合、比較的浅い層準を対象として行われることが頻繁にありうる。この場合、遮蔽層の固結度が十分でなく、遮蔽能力の評価が重要な鍵となることが想定される。遮蔽層は通常は泥質岩であることから、泥質岩の遮蔽能力を評価する手法や基準の確立が待たれる。

##### 4.4. 二酸化炭素鉱物固定にかかる諸問題の解決

二酸化炭素を地中に貯留すると同時に鉱物固定する手法

が注目されている。とくに玄武岩質岩石中の炭酸塩鉱物固定は反応速度の面でも着目されている。関連研究はまだ途上にあり、鉱物化の効率性を高めるための各種手法などを検討する必要性が生じている。

##### 4.5. 天然水素・ヘリウム探鉱にかかる諸課題の検討

脱炭素・エネルギー転換の動向において、代替エネルギー源としての水素やヘリウムが注目されている。水素は、製造時に炭素を排出するグレー水素、排出された炭素を地中貯留するブルー水素、再生可能エネルギーによる電気分解で製造されるグリーン水素など、製造方法によって色分けされているが、それぞれコストがかかるため、コストの低減が課題となっている。これに対して、天然水素は、地中より取り出すことができれば、合成・製造などの必要はなく、そのまま利用できるため、コストの面においても有利である。実際に、すでにアフリカのマリヤオーストラリアでは産出が認められている。天然水素の成因にはいくつか異なるプロセスが存在することが明らかになりつつあることから、天然水素探鉱を進めるには、プロセスタイプごとの特質を捉え、それぞれにおける集積メカニズムを検討する必要がある。

##### 4.6. 褐炭水素製造にかかる諸課題の検討

オーストラリアでは、表層部に分布し採掘コストが低く抑えられる褐炭を採掘し、燃焼と水蒸気改質によって水素を製造する大規模なプロジェクトが進められている。この過程で排出される二酸化炭素については、CCSにより地中に貯留することが企図されている。この褐炭による水素製造においては、褐炭の質や量に関係する有機地化学的・堆積学的・層序学的検討が重要なポイントを占める。関連して、石炭(褐炭)の堆積環境・シーケンズ層序学的位置づけや、石炭化度と水素の排出量との関係の研究などを進める必要がある。

##### 4.7. 地層水中の有用元素利用にかかる諸課題の検討

地層水中にはヨウ素、ホウ素、リチウムなどの有用元素が含まれることが知られている。石油・天然ガスの坑井から産出する地層水から、これらの有用元素を取り出して生産できれば、通常は再圧入などの処理を施している鉱廃水の有効利用となり、一挙両得となりうる。このため、地質学的観点から、どのような条件であると地層水中に有用な元素が含まれるのかを解明することが求められている。

# 日本海側堆積盆における石油・天然ガス鉱床形成へのテクトニクス役割

A roll of tectonics for the formation of oil and natural gas fields in sedimentary basins along the eastern coast of the Sea of Japan

燃料資源地質研究グループ：中嶋 健  
 Fuel Resource Geology Research Group: Takeshi Nakajima  
 Phone: 050-3521-0991, e-mail: takeshi.nakajima@aist.go.jp  
 http://unit.aist.go.jp/georesenv/fuelgeo/

## 1. はじめに

石油・天然ガス鉱床の成立のためには、大きく分けて(1)石油・天然ガスを育む器となる堆積盆の形成、(2)石油・天然ガスの素になる根源岩の堆積、(3)石油・天然ガスを蓄える貯留岩の堆積（とそれをシールする帽岩の堆積）、(4)背斜構造などのトラップ構造（油田構造）の形成、(5)根源岩の熱熟成による石油・天然ガスの生成と移動・集積と言う要素が揃う必要がある（図1）。

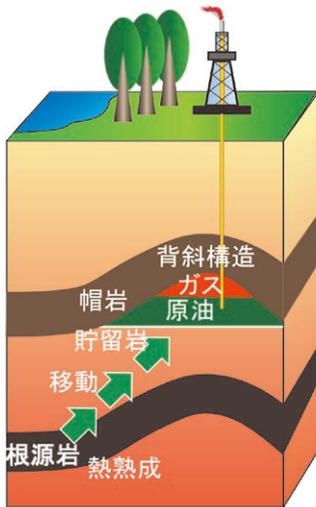


図1 石油・天然ガス鉱床の成立要素

日本の石油・天然ガス田は、ほとんどが日本海側の秋田・山形・新潟県に集中している。その理由は、日本海には約1,000万年前に珪藻遺骸が降り積もり堆積した、有機物に富む良好な根源岩があるためである。しかし、同時代の太平洋側でも珪藻質の堆積物は分布するにも関わらず、何故日本海側でだけ石油・天然ガス鉱床が成立したのか、既存のモデルは明確に説明できなかった。本講演では、新しい根源岩形成モデルを含め、テクトニクスの観点から、古くて新しい謎、日本海側石油・天然ガス鉱床の成立過程を统一的に解説する。

## 2. 日本海の拡大（器の形成）

日本海は、日本海盆、大和海盆、対馬海盆など複数の海盆と、その間の堆からなる複雑な背弧海盆である。日本海の形成に先立ち、大陸では4,000万年前頃から、地殻が引っ張られて薄くなるリフティングが始まった。地殻が割れた地溝には、やがて海洋底ができて拡大した。これが日本海拡大である。日本海拡大は、2,400万年前頃に始ま

り、日本海盆拡大、大和海盆第1期拡大、大和海盆第2期拡大を経て1,300万年前頃まで続き、各拡大期に対応して日本列島には多段階のリフト堆積盆が形成された。秋田・新潟の油田堆積盆は、この最終段階で1,800～1,300万年前に形成された<sup>1)</sup>。

## 3. 根源岩の形成

秋田堆積盆の女川層根源岩の精密年代測定<sup>2)</sup>とバイオマーカー分析<sup>3)</sup>の結果、1,250万年前頃を境に、酸化的海底環境で堆積した有機炭素に乏しい砂質泥岩から、還元的海底環境で堆積した珪藻質で有機炭素に富む硬質頁岩に変化し、堆積速度が増加することが判明した（図2）。

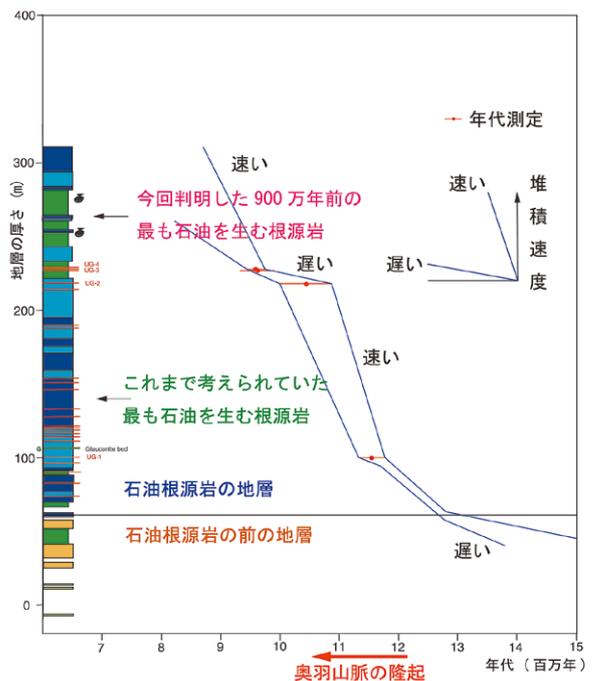


図2 秋田堆積盆女川層根源岩の堆積速度曲線<sup>2)</sup>

この変化のタイミングは、秋田・岩手県境の奥羽山脈が、一時的な圧縮場の中で海底から隆起して陸化したタイミング<sup>4)</sup>に一致する。このことから、1,300万年前以前には開放的縁海で、外洋表層水が自由に流入し、海水の鉛直循環が行われていた日本海が、奥羽山脈陸化による東北日本孤の成立により、半閉鎖的海盆へと変わり、海水鉛直循環の停止により海底環境が還元的に変わったと推定される。その結果、海底で有機物が保存され、良好な根源岩が形成された（図3）。

1,000万年前頃から海底環境は徐々に有機物の保存に

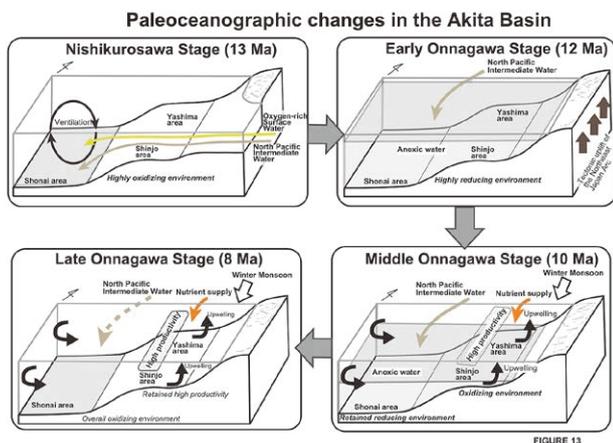


図3 秋田堆積盆における海洋環境の変化<sup>3)</sup>

適さない酸化環境になったが、冬季モンスーンの強化により沿岸湧昇が活発になり、栄養塩に富んだ深層水が表層にもたらされることで珪藻が大繁殖し、最も有機物に富んだ根源岩が形成された(図2, 3)。これはシェールオイルを作る根源岩としても注目されている<sup>2)</sup>。

#### 4. 貯留岩の形成

650 万年前頃から東北日本孤は、圧縮場に転換し、奥羽山脈では本格的にインバージョンが始まり隆起した<sup>4)</sup>。引き続き出羽丘陵が500 万年前頃から隆起を始め<sup>5)</sup>、秋田堆積盆では北由利衝上断層の活動により由利丘陵が隆起し、下盤の断層で区切られた狭長なトラフに桂根相貯留岩が堆積した<sup>6)</sup>。桂根相は堆積同時性断層活動で生じた凝灰質の高密度混濁流堆積物からなる<sup>1)7)</sup>。

新潟堆積盆でも650 万年前頃から隆起に転じ、日本海沿岸でもインバージョンが始まった。その結果、褶曲でできた島弧方向のトラフに、越後山脈の隆起によりもたらされた粗粒堆積物が、トラフ充填タービダイトとして堆積し、椎谷層等の貯留岩が形成された<sup>8)</sup>。

#### 5. 油田構造の形成と石油の生成・移動

後期鮮新世(350 万年前以降)に入ると、インバージョンは日本海東縁にまで及び、圧縮場がさらに強まったことを示唆している<sup>1)</sup>。秋田八橋油田では、170 万年前頃から逆断層の活動に伴って背斜構造が形成されるとともに、断層下盤の秋田沖は沈降して女川層根源岩が熟成域に達し、石油が生成・排出された<sup>9)</sup>。石油は背斜構造に移動し、桂根相貯留岩に蓄えられ、油田が成立した。秋田平野は隆起・陸化し、堆積場は沖合に移動して、男鹿半島の北浦層の海底扇状地貯留岩を形成した。

上越海盆での石油システムモデリング<sup>10)</sup>によると、石油の生成は、鮮新世から深部の七谷層・寺泊層根源岩で開始されたが、より高温で熟成するガスの生成は200 万年前以降で、背斜部の海鷹海脚や上越海丘には最近になって海底面にまで到達し、微生物起源ガスと一部混じりながら表層型メタンハイドレートを形成したと考えられる。

## 6. おわりに

古くて新しい謎、日本海側の石油・天然ガスの成因は、テクトニクスが主要因であった。「奥羽変動」とも言える最初の隆起が、まさに日本海側と太平洋側を分けるイベントであり、日本海側だけに有機物の保存に適した還元環境と、冬季季節風による湧昇により良好な根源岩ができ、石油・天然ガス鉱床の成立要素を満たした。こうして出来た石油はシェールオイルとして、ガスは表層型メタンハイドレートとして、新しい燃料資源ともなりうることを期待され、日本海側の貯留岩はCCSの貯留層としてもポテンシャルが期待されている。

#### 参考文献

- 1) 中嶋 健 (2018) 日本海拡大以来の日本列島の堆積盆テクトニクス. 地質学雑誌, **124**, 693-722.
- 2) Nakajima, T. et al. (2023) U-Pb and fission-track dating of Miocene hydrocarbon source rocks in the Akita Basin, Northeast Japan, and implications for the timing of paleoceanographic changes in the Sea of Japan. *Island Arc*, **32**, e12490.
- 3) Asahina, K., Nakajima, T., Takahashi, K.U. et al. (2022) Spatio-temporal changes in the depositional environment of Miocene petroleum source rocks in the Akita Basin deduced from biomarker analysis. *Geochem. Jour.* **56**, 1-15.
- 4) Nakajima, T. et al. (2006) Uplift of the Ou Backbone Range in Northeast Japan at around 10 Ma and its implication for the tectonic evolution of the eastern margin of Asia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **241**, 28-48.
- 5) 守屋俊治・鎮西清高・中嶋 健ほか (2008) 山形県新庄盆地西縁部の鮮新世古地理の変遷—出羽丘陵の隆起時期と隆起過程—. 地質学雑誌, **114**, 389-404.
- 6) 佐藤時幸ほか (2012) 石灰質ナンノ化石からみた秋田地域の第三紀末～第四紀環境変動. 地質学雑誌, **118**, 62-73.
- 7) 中嶋 健ほか (2003) 秋田市羽川の天徳寺層桂根相のフィッシュン・トラック年代. 地質学雑誌, **109**, 252-255.
- 8) Takano, O. (2002) Changes in depositional systems and sequences in response to basin evolution in a rifted and inverted basin: an example from the Neogene Niigata-Shin'etsu basin, Northern Fossa Magna, central Japan. *Sedimentary Geology*, **152**, 79-97.
- 9) 佐藤時幸 (2017) 12.2石油資源 日本地質学会編「日本地方地質誌東北地方」, 朝倉書店, 552-563.
- 10) Okui, A. et al. (2008) An integrated approach to understanding the petroleum system of a frontier deep-water area, offshore Japan. *Petrol. Geosci.* **14**, 223-233.

# 日本海の表層型メタンハイドレート：特徴的な地質学的背景におけるその生成シナリオ

Shallow Methane Hydrate in the Sea of Japan;  
its formation scenario in a characteristic geological setting

物理探査研究グループ：浅田 美穂  
Exploration Geophysics Research Group, Miho Asada  
Phone: 050-3522-3890, e-mail: asada.miho@aist.go.jp  
http://unit.aist.go.jp/georeserv/explogeol/

## 1. はじめに

昨今の国際情勢不安を受けて燃料資源価格が高騰している。燃料資源の多くを輸入に頼る日本では、国外産燃料輸入の停滞があれば日本国内の発電に必要な量が確保されなくなる危機も囁かれる。今後も増加するとみられる電力消費を賄い、一方で2050年までに二酸化炭素排出量の実質ゼロを目指す世界では、持続可能な新しいエネルギー源の模索がされている。それでも燃焼資源を全く使わない近未来を想像することは現時点では難しく、かつエネルギー資源の移行期である現在では、二酸化炭素排出量が石油や石炭よりも少ない天然ガスへの燃料資源の置き換えが急ぎ求められている。日本にとって天然ガスを自国で確保することは、エネルギー安全保障問題と環境問題を同時に解決する鍵となる。

次世代の天然ガス資源として注目されているメタンハイドレートは、天然ガスの一つであるメタンガスの水和物であり、低温高圧環境下で安定して存在する。その体積の約160倍ものメタンガスを含み、世界各地の永久凍土や、湖底、海底などに賦存している。日本周辺では海域に賦存がある。常温常圧下で分解し放出されるメタンガスが燃える様子は「燃える氷」とも呼ばれる(図1<sup>1)</sup>。

## 2. メタンハイドレートの賦存形態

世界中の様々な場所から報告があるメタンハイドレート(図2<sup>2)</sup>)は、堆積物の孔隙を充填するタイプと、地層中の亀裂等を充填するタイプ、周辺の堆積物を排除しながら成長するタイプにおよそ大別される<sup>3, 4)</sup>。メタンハイドレートを燃料資源としたときに、日本ではそれらをいかに探査し回収するかという立場から、「砂層型」と「表層型」に分類して研究技術開発を進めている。砂層型は堆積物の孔隙を充填するタイプに対応する。表層型は海底面から海



図1 「燃える氷」<sup>1)</sup>

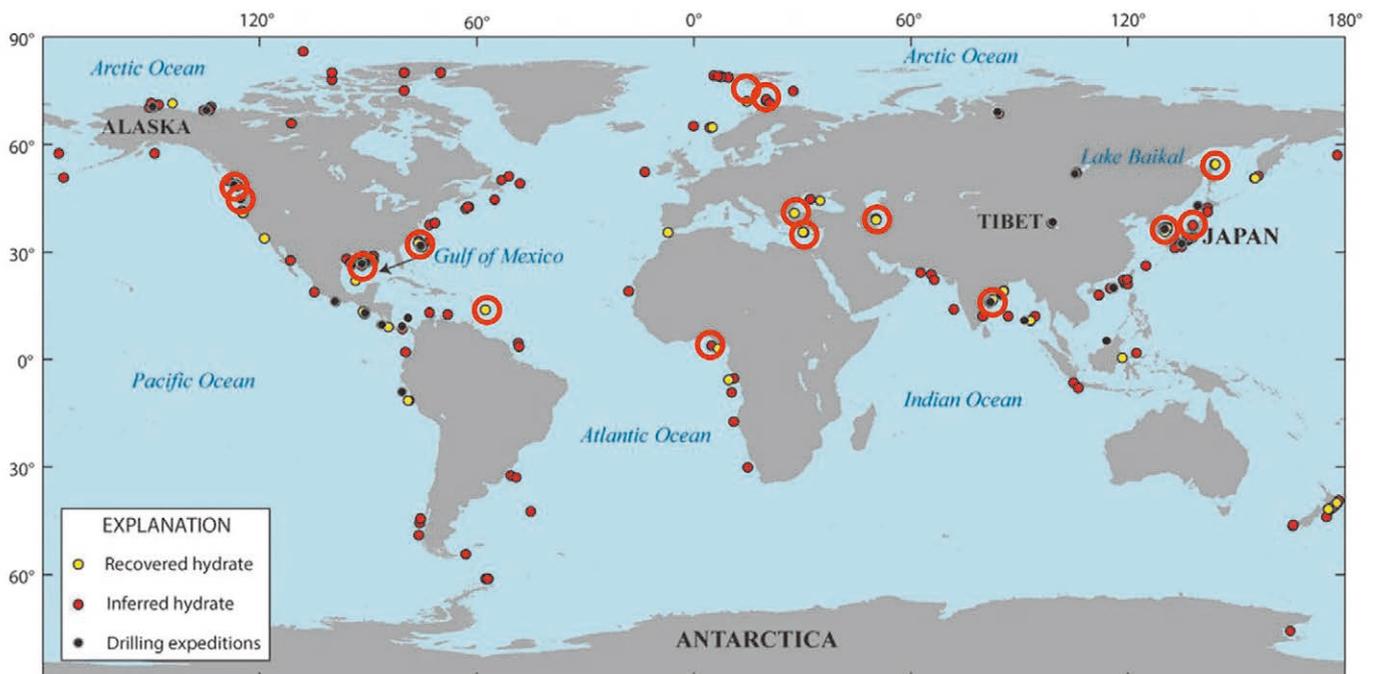


図2 世界のガスハイドレート分布<sup>2)</sup>。赤枠で You et al. (2019) による Type-4位置を示す。

底下浅部に塊状・粒状・板状などメタンハイドレート自体が集積している状態で、浅い海底下から見つかる傾向があるので、深さの情報を除けば、亀裂を充填するタイプおよび堆積物を排除しながら成長するタイプにおよそ対応すると考えられる。You et al. (2019)<sup>4)</sup>による分類の一つである「Type-4, concentrated hydrate at vent site」は日本で分類している表層型に近く、その分布は世界中にある(図2)。砂層型はBSR (bottom simulating reflector, 海底擬似反射面)を指標としてその水平方向の分布が推定され、濃淡ありながら一つの堆積盆をおよそ覆う程度に広く一定の深度に賦存する傾向が示されている<sup>5)</sup>。一方で表層型はごく小規模～数百mスケールの局地的分布が、ある海域に複数集中して、海底下浅部に見つかる傾向がある(図3)。

### 3. 日本海の表層型メタンハイドレートを形成する地質学的背景についての考察

日本において表層型メタンハイドレートは、日本海や北海道周辺などの沿岸域にあることが分かっている<sup>6)</sup>。表層型メタンハイドレートが賦存する海域は、海底面が細粒堆積物で覆われている傾向が見られる(地質図Navi<sup>7)</sup>参照)。つまりタービダイトなど粗粒の堆積物をもたらす貯留岩として機能する堆積物の流入が「限定される場所」に表層型が確認されやすい。ここに表層型と砂層型の賦存環境の差別化をはかることができる。すなわち、メタンを含む流体が堆積物粒子の孔隙を埋めハイドレート化することで形成される砂層型に対して、表層型は供給されるガスの量に比して十分な孔隙が存在しにくい環境で、メタンを含む流体が海底下浅部まで到達し、既存の亀裂を埋める、またはハイドレートが堆積物の隙間を広げるようにして成長し形成されていると考えることができる。

この場合、砂層型と表層型は同じ海域に共存できる。すなわち地質学的条件に支配されてメタンを含む流体の供給がある海域で、メタンは堆積物中あるいは断層など移動できる経路を選択して上昇し、地層中に堆積物の孔隙があれば埋めて砂層型を形成する。この時に余剰のメタンがある場合には上昇を続けて海底面近くまで到達し、表層型を形成していると考えられる。こうした表層型は海底下に断続的に賦存していることが掘削同時検層により示されている<sup>8)</sup>。上越沖は私たちが表層型メタンハイドレートの研究開発で重点研究対象としている海域の一つだが、BSRがあることが報告されており<sup>9)</sup>、すなわち砂層型と表層型が同じ海域に共存している。

次に、メタンハイドレートが、どのような環境で堆積物を排除しながら成長するかを考える。海底面から海底下浅部で粒状・板状・塊状のメタンハイドレートを形成する傾向にある表層型は、既存の空隙を埋めるか、未固結である深さでは堆積物を排除するように動かして成長している可能性がある。表層型の賦存を確認している上越沖で、AUV

(Autonomous Underwater Vehicle, 自律型海中探査ロボット)に搭載したSBP(Sub-bottom Profiler)が取得した海底下浅部構造は、表層堆積物が上方へ凸に変形する様子を示している(図4)。断層などを通して上昇するメタンが、堆積物が未固結である深さにある微細な孔隙などに滞留して(海中へ放出されることなく)メタンハイドレートの形成がはじまると、供給され続ける流体を受けて未固結堆積物を押し除けながら、その場で成長している可能性がある。

### 4. 表層型メタンハイドレート形成シナリオ

日本海における観測事実に基づき、表層型の形成シナリオの描画を試みる。表層型メタンハイドレートの形成は、その海域のメタン供給量が、メタンハイドレートが形成される堆積物粒子の孔隙を埋めても余剰がある場所に絞られる。流体の通路となりうる断層や堆積層を通じて移動するメタンは、砂層など堆積物の孔隙を充填するが、メタンの量に比して孔隙の量が十分ではない場合には余剰メタンが移動を続ける。移動中のメタンが滞留する環境に出会えば、そこに最初のメタンハイドレートの形成が始まり、その場の堆積物が未固結である深さで継続するガス供給があれば、メタンハイドレートは堆積物を押し除けて成長するだろう。メタンの上昇経路上に形成されたメタンハイドレートはそれ自身がキャップロックとして機能し、一時的に流体の上昇を阻害しながら、環境に水がある限り成長するだろう。供給され続ける流体の圧力が高まった時、あるいは周辺に新たな流路が形成された場合には、メタンを含む流体が移動して次の滞留先で次の表層型を形成するだろう。こうして地層中には断続的な表層型メタンハイドレート濃集部が形成される。地層中で滞留する機会がないメタ

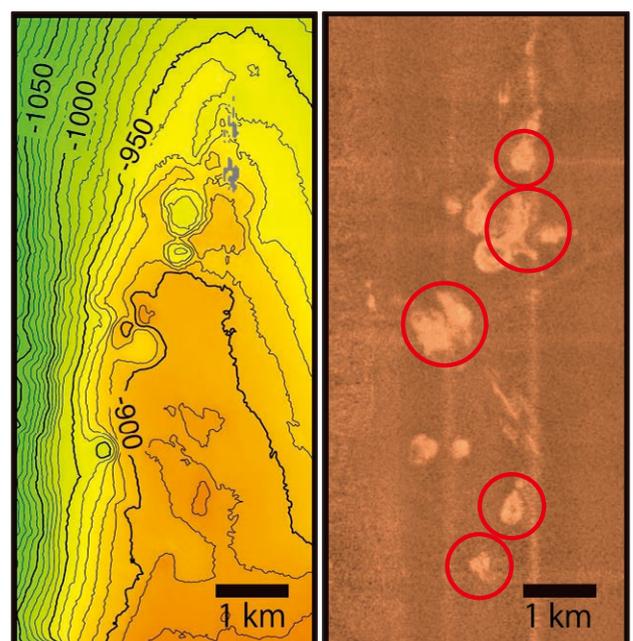


図3 上越沖の地形(左)および同じ範囲の後方散乱強度分布図(右)。表層型メタンハイドレートが海底面付近に賦存している箇所(丸印で確認)は後方散乱強度が高い値(明色)で示される。

ンは海中に放出されるだろう。海中に放出されてなお、海底面上にオーバーハングする崖などメタンが滞留する環境があれば、その場が安定領域内であるかぎりメタンハイドレートが形成し成長するだろう(図5)。濃集部は地質時代を経て埋没し、環境の温度上昇を受けて安定領域外に移動することで、分解し再びメタンとして移動を始め、バックグラウンドで供給され続けるメタンと共に次の滞留先で新たな表層型メタンハイドレートを形成するだろう。地下深部から供給される比較的温度の高い流体も、それが濃集部を通過する際に安定領域から外すよう働くかも知れない。メタンハイドレートが堆積物を押し除けて成長する深さの限界は、その場の有効応力で決定されるものと考えられる<sup>10)</sup>。

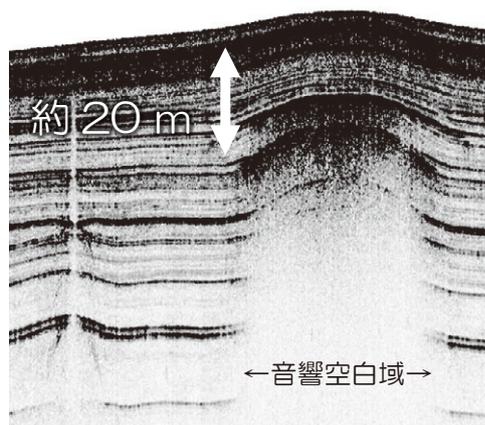


図4 SBPによる海底下浅部構造。凸に変形した堆積層が音響空白域の上位にある。

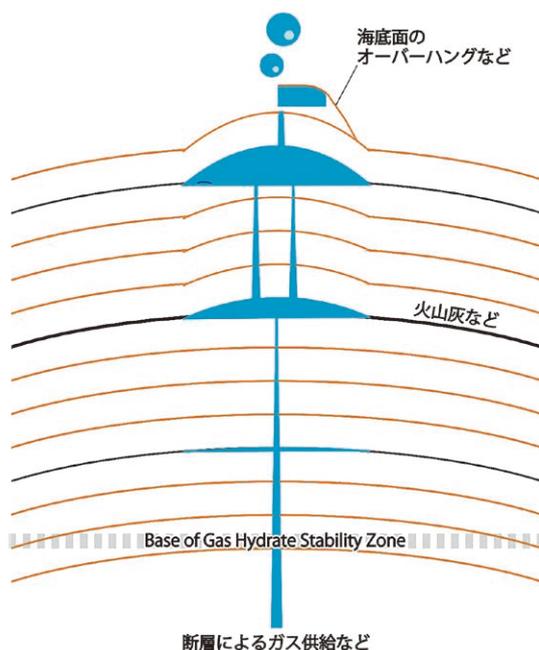


図5 表層型メタンハイドレートの形成モデル。断層がメタンを含む流体の流路として機能し、表層型メタンハイドレート濃集部が流路に沿って断続的に形成されている状態を示す。安定領域内に水とメタンがあれば成長し、濃集部の拡大に伴って未固結堆積層が変形する。濃集部はガスの上昇を妨げるが、流体圧が上昇すると突破して、または新しい流路を選択し移動して、次の滞留先で別の濃集部を形成する。地層中で滞留しなかったメタンは海中へ放出されるが、海底面にある崖などに捉えられた場合には海水中で濃集部を形成することもある。

## 5. 今後の課題

エネルギー安全保障と二酸化炭素排出実質ゼロに貢献する国産メタンハイドレートのうち、海底下浅部に賦存する表層型は、「今、そこにある燃料資源」として回収できれば利用でき、メタンの流路に沿って深部へとアクセスすることで現在までの見通しよりは回収量が増えることが期待できる。表層型メタンハイドレートの回収に向けて、どのような地質構造における、どのような特徴を探索対象として考え、どのような規模や深さでどのような特徴を抽出すべき調査仕様を決定するかという課題に物理探査からコミットし、研究技術開発に適切な情報を提供する。これまでのところ日本周辺の海底面の特徴について情報が整いつつあるが、表層型の賦存形態や分布など、根本理解に基づく適切な理解をさらに深化させる必要があると考える。上述のようにして表層型メタンハイドレート濃集部がメタンを含む流体の流路に沿って断続的に賦存すると理解すれば、取得すべきデータの性質や、探査仕様、回収方法に関する検討すべき事柄も見えてくる。

海底面から海底下浅部に賦存している表層型メタンハイドレートは、採掘しようとする場合にアクセスがしやすいが、これを回収するとすれば短期的には海底面付近の環境変化が避けられない。私たちは、ターゲットの性質や、規模、深さを決め、どのような採掘手段で海底環境の擾乱を最小限に抑えるか、海底の環境変化が社会にむしろ好ましい影響をもたらす可能性も視野に、地質学、生物学、地球化学、海洋物理学、工学的知見を集結して検討を進めている。

## 謝辞

本研究は経済産業省「国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発(メタンハイドレートの研究開発)」の一環として実施された。本稿は講演者が作成したもので、プロジェクトの総意によるものではないことにご注意願いたい。ここに至るまでにプロジェクト内関係者から日々賜ったご指導に厚く感謝を申し上げる。また全てのデータ取得から、解析、議論など、多岐に渡る連携を実現される関係各位に対して心からの謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 産業技術総合研究所, 表層型メタンハイドレートの研究開発. <https://unit.aist.go.jp/georesenv/topic/SMH/index.html> (2024年10月1日確認)
- 2) USGS, Where are gas hydrate found?, <https://www.usgs.gov/faqs/where-are-gas-hydratesfound> (2024年10月1日確認)
- 3) Sloan, E.D. and Koh, Jr. C.A. (2007) Clathrate Hydrates of Natural Gasses. Third Edition. CRC Press
- 4) You, K., Flemings, P.B., Malinverno, A., et al.

(2019) Mechanisms of methane hydrate formation in geological systems. *Reviews of Geophysics*, 57, 1146-1196

- 5) メタンハイドレート資源開発コンソーシアム, 日本海周辺におけるメタンハイドレート起源BSR分布図.  
[https://www.mh21japan.gr.jp/pdf/BSR\\_2009.pdf](https://www.mh21japan.gr.jp/pdf/BSR_2009.pdf) (2024年10月1日確認)
- 6) 松本 良・蛭田 明宏・大井 剛志ほか (2024) 日本海周辺におけるメタンハイドレートの分布, 産状と起源. *地学雑誌*, 133(2), 63-89
- 7) 地質図Navi. <https://gbank.gsj.jp/geonavi/> (2024年10月1日確認)
- 8) Tanahashi, M., Matsumoto, R., and Morita, S.

(2017) Quantitative estimation of massive gas hydrate in gas chimney structures, the eastern margin of Japan Sea, from the physical property anomalies obtained by LWD. AGU fall meet. Abst., OS53C-2134, (New Orleans, USA).

- 9) 古川 稔子・高野 修 (2021) 富山トラフ南東部, 上越埋没海底谷群および海鷹海脚周辺のチャンネル・斜面 崩壊堆積物の三次元サイスミック地形学的解析. *地質学雑誌*, 127, 3, 133-143.
- 10) Dai, S., Santamarina, J.C., Waite, W.F., et al. (2012) Hydrate morphology: Physical properties of sand with patchy hydrate saturation. *Journal of Geophysical Research*, 117, B11205



夏の日本海の日没

# 国内の新規微生物起源天然ガス田の可能性

Possibility of new microbial natural gas deposits in Japan

燃料資源地質研究グループ長：吉岡 秀佳  
 Leader, Fuel Resource Geology Research Group:  
 Hideyoshi Yoshioka  
 e-mail: hi-yoshioka@aist.go.jp

## 1. はじめに

2020年当時の菅首相が、2050年までに日本がカーボンニュートラルを目指すことを宣言して以来、燃料資源に関する社会状況が急速に変化している。CO<sub>2</sub>削減のために、脱炭素エネルギーの使用を拡大し、化石燃料の割合を低くする必要がある一方で、国際情勢の不安定化によりエネルギー問題が顕在化し、エネルギーの安定供給や確保が重視され、その方途として国内の燃料資源開発の重要性は高まっている。

## 2. 微生物起源ガス田における微生物研究

産業技術総合研究所では、旧地質調査所の時代から燃料資源の研究を行ってきた。2007年には地圏微生物研究グループが発足し、微生物起源天然ガス田に注目して微生物研究を実施してきた。従来は、天然ガスの起源や成因を推定するのにガス成分の化学分析が行われてきたが、我々は、天然ガス田の貯留層の堆積物や地層水の微生物研究を行うことによって、地下の微生物メタン生成機構を明らかにして、燃料資源の開発に資することを目的としてきた。

代謝物としてメタンを生成するのは、メタン生成菌であることは分かっているので、我々は、国内の微生物起源水溶性天然ガス田の貯留層や、国内外の微生物起源メタンハイドレート (MH) の分布域から地下試料を採取して、メタン生成菌の分布やメタン生成活性について調べた (図1)。その結果、水溶性ガス田の貯留層や MH 分布域の堆積層には、メタン生成菌が広く分布し、生きているメタン

生成菌の活動によってメタンが作られていることが示された<sup>1), 2), 3)</sup>。

メタン生成菌の遺伝子解析や培養実験により、メタンの生成経路 (何を材料としてメタンを作っているか) や至適生育温度が推定された。メタン生成活性は、ラジオアイソトープを用いたトレーサー実験によって、生成経路別にメタンの生成速度が評価された<sup>3)</sup> (図2)。メタンの材料 (根源物質) として、表層環境ならば、糖類や炭水化物等が考えられるが、地質時代の堆積物には、そのような物質は残っていない。水溶性ガス田のかん水と更新世のコア堆積物を用いた培養実験を行った結果、かん水中に含まれる微生物によってケロジェンのような難分解性巨大有機分子が根源物質として分解されてメタンが作られることが示された<sup>4)</sup>。

## 3. 微生物起源ガス田のできる条件

微生物によるメタン生成は、湖沼や水田でも起こる。酸素のない地下環境では、似たような堆積環境であれば、微生物によるメタン生成が起こっている可能性は高いと考えられる。従って、ガスが溜まる地質構造があれば、天然ガス田が形成されると考えられる。Clayton は、微生物起源ガス田の成立条件として、微生物活動に適切な温度 (75℃以下) とメタン生成の継続時間が必要であると、地温勾配と堆積速度の合条件を提案した<sup>5)</sup> (図3)。しかし、実際の微生物起源天然ガス田の条件が適切な範囲から外れてしまうことがあり、有効な指標とは考えられない。

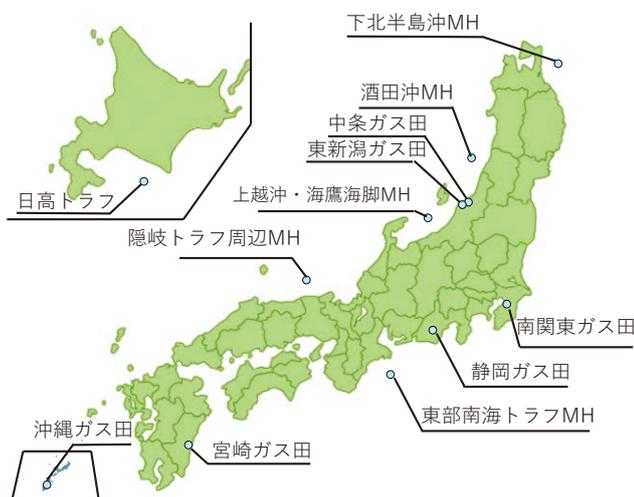


図1 国内の微生物起源天然ガス田とメタンハイドレート分布域

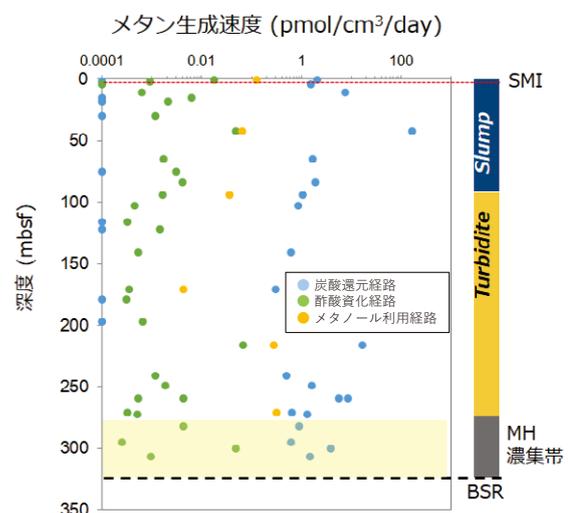


図2 東部南海トラフのメタンハイドレート分布域における海底堆積物の微生物メタン生成速度<sup>3)</sup>

微生物によるメタン生成活動の許容範囲は、従来考えられていた条件より広く、また、生成された微生物ガスを散逸させない条件を考慮する必要があると考えられる。微生物起源ガス田が成立するためには、下記のような微生物活動に関する条件 A と、地下で生成したメタンが散逸せずに集積してガス田を形成するための条件 B を考える必要がある。

#### □条件 A

- ・硫酸イオン濃度
- ・温度範囲（地温勾配）
- ・孔隙（サイズ、浸透率）
- ・根源岩有機物の濃度
- ・根源岩有機物の起源（陸由来／海由来）
- ・根源岩有機物の熱熟成度

#### □条件 B

- ・堆積速度
- ・貯留層の岩相、層厚
- ・シール・トラップ層

2000年代以降、地中海や中国、東南アジア等で巨大な微生物起源ガス田が次々と発見され、世界的に注目されている<sup>6), 7), 8)</sup>。それらの産状をみると、これまで国内の微生物起源ガス田では見られなかったタイプがある。例えば、貯留層が主に炭酸塩岩からなるものや<sup>6)</sup>、貯留層の温度が80℃を超えるもの<sup>7)</sup>、根源岩がデボン紀や白亜紀のようにとても古い年代のものがあり<sup>8)</sup>、ガス田の成立条件として注目したいところである。

## 4. 深部流体との関係

微生物起源ガス田の報告例が増えて微生物メタン生成について理解が深まる一方で、改めて国内の微生物起源ガス田の分布をみると、偏在しているように見える（図1）。つまり、類似した堆積環境であるにもかかわらず微生物起源ガス田が広がっていない。見つからないだけかもしれないが、微生物起源ガス田の成立条件で、捉えられていない条件があるように思われる。そのひとつとして、深部

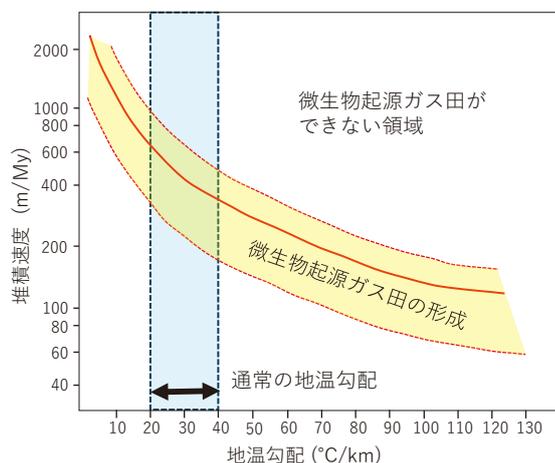


図3 Claytonによる微生物起源天然ガス田の形成される条件<sup>5)</sup>

からの流体供給が微生物起源ガス田の形成に関与している可能性がある。日本海の表層型MHの分布域には、その下部にガスフラックスや断層構造が発達していることがあり、その一例と考えられる（本シンポジウム、浅田氏講演参照）。

最近、南海トラフの沈み込み帯において、スラスト堆積物中の有機物が変成作用によって熱分解されメタンや水素が生成され、浅層の微生物起源ガス生成に寄与している可能性が提案された<sup>9)</sup>。地下深部で熱分解により生成されたメタンが泥火山等によって表層に運ばれMHが形成されていることは知られているが<sup>10)</sup>、深部から水素が供給されると、微生物の餌になるのでメタン生成が促進される。同様に、背弧海盆においても、埋没した堆積有機物が熱熟成を受けて、熱分解ガスが生成すると考えられるので（本シンポジウム、中嶋氏講演参照）、深部の高温条件で水素ガスが発生して断層を通して浅層に供給されれば、微生物メタン生成活動を活性化すると考えられる。近年、海域で超高分解能三次元地震探査が行われるようになり、海底深部の地質構造が詳細に見えるようになってきた。調査が進めば、微生物起源ガス田の分布と深部流体の供給との関連性が見えてくるのではないかと考えられる。

## 5. 最後に

我々は、20年近く微生物起源ガス田を対象とした微生物研究を実施してきた。今般の社会情勢の変化を受けて一時的に先行きが見えなくなったが、共同研究や受託研究等を通して微生物起源ガス田に対する社会的期待度は依然高いと感じている。カーボンニュートラルを目指す社会の中でCCS等の対策を取りつつ、企業や他機関と協力して新規微生物起源ガス田の発見に繋がりたいと考える。

## 6. 参考文献

- 1) Yoshioka, H. et al. (2009) *Geochem J.* 43, 315.
- 2) Katayama, T. et al. (2015) *ISMEj.* 9, 436.
- 3) Katayama, T. et al. (2022) *ISMEj.* 16, 1464.
- 4) Yoshioka, H. et al. (2015) *Chem Geol.* 419, 92.
- 5) Clayton, C. (1992): In Vially R, ed.; *Bacterial Gas*. Editions Technip, Paris, 191.
- 6) Lottaroli, F. & Meciani, L. (2022) *Petroleum Geoscience* 28, petgeo2021-018
- 7) Macgregor, D. (2018) *Geol Society Eastern Mediterranean Conference*, London 2018.
- 8) Adeyilola, A. (2022) *Coal Geol* 249, 103905
- 9) Suzuki, N. et al. (2024) *Commun Earth Environ* 5, 97.
- 10) Ijiri, A. et al. (2018) *Sci. Adv.* 4, eaao4631



## 研究グループ紹介

## 地下水研究グループの紹介

### Introduction of the Groundwater Research Group

研究グループ長：吉岡 真弓

Leader, Groundwater Research Group: Maymi Yoshioka

Phone: 050-3521-1786, e-mail: yoshioka-mayumi@aist.go.jp

<https://unit.aist.go.jp/georeserv/gwrg/index.html>

#### 1. グループの研究目的

地下水研究グループでは、社会への貢献や研究成果の反映先を意識した地下水の保全と開発・利用に関する研究を実施している。主な業務には「水文環境図」の作成があり、これを基軸に、地下水の資源・環境に関する情報を取りまとめている。また、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る沿岸域の深層地下水研究や、環境調和型産業技術ラボ(E-code)などの領域融合研究にも力を入れている。これらの経常的な研究課題を通して、看板性の強化、知的基盤整備の加速化、研究シーズの創出に関わる研究などを担当している。研究対象地域は、日本国内のみならず、JICA, CCOP(東・東南アジア地球科学計画調整委員会)活動などを通じて海外にも広がっている。また、産総研福島再生可能エネルギー研究所(FREA)の地中熱チームとも強く連携し、地下水資源の多角的な活用に資する研究開発を行っている。

#### 2. 各研究項目の内容

##### 2.1. 地下水のマップの作成

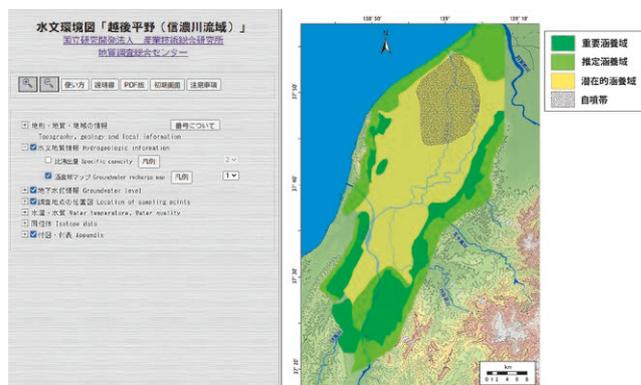
産業技術総合研究所法第三章において定められている業務、「地質の調査」の1つである知的基盤情報整備の一環として、「水文環境図」を作成している。水文環境図は、町田ほか(2010)の編集指針に沿った、全地域で調査・掲載する統一情報に加え、地域ごとのユーザーが必要とするローカル情報を分かりやすく盛り込んだ、「地下水の地図」である。地下水流動(巨視的な地下水の動き)や地下水質は目に見えないが、その特徴には地域性がある。そのため、地下水に関連する過去のデータや水理地質、その地域の経済発展(土地利用など)を丹念に調べ、また、不足する地下水のデータに関しては新たな調査を行うことで、その全体像を解釈・把握し、水文環境図としてWeb上で誰もがアクセスできる形で公開している。

現在公開している水文環境図は、2024年9月末の段階で11地域である。最近では、2023年3月にNo.14「越後平野(信濃川流域)」が公開された。なお、2024年度には、No.15「大井川下流域」が公開予定である。また、その他の地域についても、「仙台平野(第2版)」の取りまとめが行われていると共に、「沖縄」「京都盆地」「北九州」に関しても引き続き調査を継続している。

水文環境図は、2001年に産業技術総合研究所地質調査総合センターとなって以降、20年以上に渡り作成・公開さ

れてきた。その前身の旧地質調査所時代には「日本水理地質図」が作成されており、その成果は紙媒体(一部はラスターデータ)として、GSJのWebページから販売・公開されている。2021年以降、これら紙媒体の水理地質図のベクトルデータ化(Keyhole Markup Language: KML, KMZ化およびシェープファイル化)を進めてきた。現在、約80%のベクトルデータ化が完了しており、今年度~次年度にかけて公開を予定している。

また、水文環境図と共に、当グループでは「全国水文環境データデータベース」を公開している。このデータベースでは、水文環境図を中心に、これまでに収集された地下水、湧水、河川水の水質・水温等のデータを、全国統一の凡例で比較できるデータベースである。現在、このデータベースのデータ更新および同位体データの拡充を行っている。更新版のデータベースについては今年度中の公開を目指している。



「水文環境図 No.14 越後平野(信濃川流域)」。

##### 2.2. 沿岸域の深層地下水研究

原子力発電所から出た放射性廃棄物の有効な処分方法の1つとして、廃棄物を地下深部の地層中に閉じ込めてしまう「地層処分」がある。地層処分においては、廃棄体近傍の人工バリアと周辺地盤の天然バリアから複合的に多重バリアが形成されると考えられている。2017年には国から「科学的特性マップ」が公開され、好ましい範囲の要件・基準として沿岸部(海岸からの距離が20km以内目安)が挙げられており、沿岸部における深層地下水研究のさらなる進展が求められている。

本件にかかる研究として、地下水研究グループは約20年前から九十九里海岸や茨城県東海村などの沿岸部にて調査を行ってきた。そして、平成19年度からは物理探査グ

グループと連携し、北海道天塩郡幌延町にて、ボーリング調査と物理探査の両面から陸海接合部の深層地下水の実態把握に係る研究を実施し、その結果、沿岸海域の地下深部には氷河期を越えた長期的に安定した地下水塊が存在することを発見した。平成31年度～令和5年度には、電力中央研究所ならびに原子力環境整備促進・資金センターと共同で「沿岸部処分システム評価確証技術開発」事業に取り組んだ。本事業では、陸域地下水の流れが速い富士山地域、特に駿河湾沿岸において、塩淡水境界（沿岸部の地下に形成される淡水系地下水と塩水系地下水の境界帯）とその深部での塩水系地下水の挙動に焦点を当てた研究を行い、沿岸部での大深度ボーリング調査技術の体系化や沿岸部深部の地下水年代分布を明らかにした。令和6年度からは、電力中央研究所、原子力環境整備促進・資金センターおよび日本原子力研究開発機構と共同で「沿岸部地質環境調査・処分システム評価統合化技術開発」事業を受託している。本事業では、沿岸海底下特有の地質環境を含めた施設設計と安全評価技術を統合しうる処分システム構築に向けた研究の高度化を行う。当グループでは、日本全国の沿岸域地下水環境の類型化や塩淡水境界深部における塩水系地下水の流動評価および海底湧水調査技術の高度化に取り組んでいる。

### 2.3. 環境調和型産業技術研究ラボ (E-code)

人口と経済が集中する沿岸域は、企業立地・産業基盤の中核であり、持続的な産業利用が求められている一方、それらの人間活動が環境・生態系に与える影響は小さくない。さらに近年の地球温暖化や海洋酸性化・海洋貧酸素化、河岸・海岸の後退による立地面積の減少等、地圏-沿岸-海洋を通じた各種の環境問題に関して、中長期的かつ分野横断的な評価・研究が求められている。これらの理由から、当グループでは沖縄本島などの島嶼の沿岸域をモデルケースに、現地での地下水・地表水サンプリングや分析を行い、地下水質・流動と地形地質の関係や、人間活動由来の硝酸態窒素やリンなどの起源追跡に関する調査・研究を実施している。

### 2.4. その他の地下水に関する研究

上記の主要な研究テーマ以外においても、研究員は個人および小グループにて様々な研究に取り組んでいる。豪雨や地震等によって発生する斜面崩壊による地形改変が地下水水質に与える影響評価に関する研究、地中熱利用評価のための地盤の熱物性に関する研究、地下水の経済価値の評価方法に関する研究、坑廃水問題の解決に資するための鉱山地域での水文調査、などがある。

これらの他にも、水循環基本法の制定を受け地下水のガバナンスに取り組もうとしている自治体関係者との協働や、内閣府水循環政策本部事務局との共同セミナーなど、地下水資源の持続的な利用や保全・管理に資する講演を行っている。

## 3. グループの研究体制

- 吉岡 真弓 (グループ長)
- 井川 怜欧 (上級主任研究員)
- 小野 昌彦 (主任研究員)
- 松本 親樹 (主任研究員)
- 吉原 直志 (研究員)
- 飯島 真理子 (研究員)
- 丸井 敦尚 (招聘研究員)
- 鶴 哲郎 (招聘研究員)
- 町田 功 (併任) \*
- 富樫 聡 (併任) \*\*
- シュレスタ ガウラヴ (併任) \*\*
- 石原 武志 (併任) \*\*
- アリフ ウディアトモジヨ (併任) \*\*
- 島田 佑太郎 (併任) \*\*
- 中島 善人 (テクニカルスタッフ)
- 菅谷 裕行 (テクニカルスタッフ)
- 松浦 綾子 (テクニカルスタッフ)
- 宮崎 桂子 (テクニカルスタッフ)
- 木方 建造 (産学官制度来所者)

\* 企画本部

\*\*FREA 地中熱チーム

## 鉱物資源研究グループの紹介

### Introduction of the Mineral Research Group

研究グループ長：星野 美保子  
Leader, Mineral Research Group: Mihoko Hoshino  
Phone 029-861-2474, e-mail: hoshino-m@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

本グループでは、社会の動きに応じた各種鉱物資源のクリティシティを考慮しながら、資源の安定確保に貢献する鉱床学的研究、資源開発や素材製造に資する技術の開発や提供、精緻な分析・評価を実現する有用性の高い研究、国内外の鉱物資源情報を知的基盤として整備する目的で、データベース作成に係る鉱物資源情報の収集などを行っている。内外の研究機関や行政、民間企業とも連携し、それぞれの役割分担に応じた適切な“橋渡し”を行うことで、国全体としての鉱物資源の安定確保に資することが活動目的である。具体的には、カーボンニュートラル社会実現のために必要不可欠かつ需要が増加している希土類（レアアース）、リチウム、ニッケル、コバルト、銅などの鉱種を中心に調査・研究を行っている。

#### 2. 研究活動の概要

経済産業省「鉱物資源開発の推進のための探査等事業（資源開発可能性調査）」を活動の柱としつつ、他事業や共同研究等も積極的に行っている。地理的にも相対的に有利で鉱物資源を含む経済的関係強化を期待できる東南アジアを近年は重要視しており、調査研究を行っている。一方このような社会情勢の下で国内資源の重要性を再認識し、探査技術開発の国内での展開や鉱物情報整備の他、多様な鉱物資源の可能性を念頭においた現地調査にも力を入れている。また、各研究・技術の波及的展開を含めた基礎／応用研究や、各員のネットワークを生かした学術的な研究活動も進めており、未知の社会変化にも対応出来るよう研究能力の維持発展に努めている。

##### 2.1. 鉱床の成因理解と探査のための研究

###### (1) 火成岩を対象とした銅鉱床探査手法の開発

銅は世界規模の脱炭素化と新興国の電線需要増大によって、世界中で必要とされているが、資源量の減少による枯渇が懸念されている。そのため、銅資源の安定供給維持に不可欠な鉱床探査の効率向上に貢献することを目標として、火成岩を対象とした地化学探査法の開発に取り組んでいる。本研究では、銅鉱床を形成したマグマが結晶化した火成岩と銅以外の鉱床を形成したマグマが結晶化した火成岩を判別する指針の導出を目的として、試料収集や元素分析を行った。

2024年度は、花崗岩や花崗閃緑岩の独立岩体とそれら

に伴われる銅鉱床や金鉱床、モリブデン鉱床が多数分布する北上山地から得られた火成岩試料を対象として、全岩元素分析や造岩鉱物の局所微量元素分析を実施した。分析の結果、銅鉱床を形成したマグマが結晶化した火成岩と、金やモリブデンの鉱床を形成したマグマが結晶化した火成岩は、普遍的な造岩鉱物である斜長石の銅含有量で判別されることが明らかになった（図1）。この成果は、類似した地質時代や地質環境で形成された火成岩体群から銅鉱床を形成した履歴をもつ火成岩体を選出することで、鉱床探査の効率向上に貢献できる可能性がある。

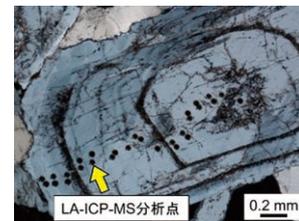


図1 LA-ICP-MSによって分析された斜長石

###### (2) 初生花崗岩質メルト包有物を用いた銅鉱床形成ポテンシャル評価手法の開発

銅鉱床の形成には、花崗岩質マグマから放出される熱水の寄与が重要であり、花崗岩が探査の鍵とされてきた。しかし、花崗岩は鉱床の形成により本来含まれていた金属・硫黄・水含有量等の初生的情報を消失している。そこで、玄武岩が花崗岩質マグマと地下深部で接すれば、玄武岩の斑晶に初生的な情報を保持した花崗岩質マグマがメルト包有物として捕獲されると考えた。本研究では、花崗岩質メルト包有物の銅含有量を解明、地表の花崗岩と比較することで、花崗岩質マグマの銅鉱床の形成ポテンシャルを評価することを目的に研究を行っている。

現在、神奈川県北部丹沢地域の玄武岩に含まれる単斜輝石中に初生的な花崗岩質メルト包有物を発見し（図2）、その化学組成を明らかにしている。今後はナノスケール解像度のX線CTによる銅鉱物の精密な体積測定を実施し、

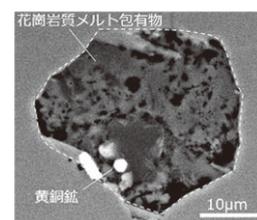


図2 単斜輝石斑晶に含まれる花崗岩質メルト包有物

花崗岩質マグマの銅含有量の復元を進める。

### (3) リモートセンシングによる鉱床探査技術および広域資源評価に関する研究

鉱床探査の初期段階において調査範囲を絞り込むことを目的として、リモートセンシングによる広域資源評価の研究を行っている。主に ASTER などの衛星画像データを用いて熱水変質鉱物や粘土鉱物の分布を推定する手法の開発を行っている。現在は、植生の多い地域における鉱物識別手法の検討を行っている。また、ハイパースペクトルカメラを用いた鉱物マッピング技術開発に取り組んでいる(図 3)。

野外分光放射計を用いた熱水変質鉱物・粘土鉱物推定手法の開発と現地調査への活用に関する研究に取り組んでいる。現在は、反射スペクトルと鉱物量比との関係理解にむけて、岩石試料の反射スペクトル測定や化学分析を行っている。

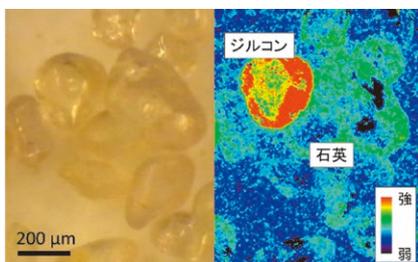


図 3 ハイパースペクトルカメラによるジルコン分布 (左: ジルコン砂鉱の顕微鏡写真, 右: 解析結果)

## 2.2. 鉱石および素材製品の価値向上のための選鉱技術および分析・品位に関する研究

### (1) 微小域元素・同位体分析を用いた資源研究

鉱物中の元素・同位体組成とその分布は、鉱石評価や鉱床成因研究において重要である。我々はレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計 (LA-ICP-MS) を用い、野外調査で採取した試料や、外部から依頼された試料のマイクロメートルスケールの元素組成や、その 2 次元分布を分析している (図 4)。鉱石中の目的元素や阻害元素の分布は、目的元素を鉱石から分離・抽出法の最適化を行う上での指針となる。

LA-ICP-MS 分析は、ケイ酸塩鉱物や硫化物等の鉱物試料だけではなく、ガラス、金属や植物等、あらゆる種類の固体試料に対して可能であり、工業製品評価の為の分析も行っている。現在は、数マイクロメートルへの微細集光フェムト秒レーザーアブレーションによる、高空間分解能元素・同位体イメージング法の開発を進めており、深さ方

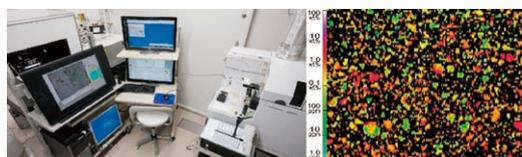


図 4 レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計 (LA-ICP-MS) の様子 (左) と銅鉱石中の銀分布 (右)

向で 500 nm 以下の薄層中の微量元素分布を測定することが可能となった。

### (2) 安定同位体比分析技術の高度化とその応用

鉱床成因や探査のための新しい研究手法を開発すべく、金属元素の安定同位体比分析技術の高度化とレアメタル鉱床への応用に取り組んでいる。特に、今まではほとんど用いられていないリチウムやマグネシウムなどの金属元素の安定同位体比に着目し、分析環境の整備と実試料への応用を行ってきた。分析環境の整備として、イオンクロマトグラフにフラクションコレクタを接続させた自動元素分離装置 (IC-FC) を導入し、分析のルーチン化や、対象とする元素の拡張、高速度化・高効率化のための手法開発を進めている (図 5)。IC-FC を用いた所内外との連携にも積極的に取り組んでおり、秋田大学や JAMSTEC 等と科研費などを通じた共同研究を実施している。実試料への応用としては、鉱物資源のみに留まらず、惑星科学、古生物学、生化学等の幅広い分野を対象として共同研究を展開し、成果を挙げている (荒岡ほか 2024; Yoshimura et al., 2024 など)。



図 5 自動元素分離装置 (IC-FC)

### (3) 選鉱技術の高精度・高効率化に関する研究

選鉱プロセスの高精度・高効率化に関する研究に取り組んでいる。低品位風化花崗岩 (青サバ, マサ土) からの石英分の分離回収を目的とした粉砕プロセスの最適化に取り組んでいる。また、LA-ICP-MS 分析から得られる微小域元素組成に基づいた粒子解析技術を開発し、鉱石中の鉱物等の存在形態の評価に取り組んでいる (特願 2020-139452)。

また、粉体シミュレーションの選鉱プロセスへの適用に関する研究にも取り組んでいる。粉体シミュレーションは、実験で直接観察することが難しい粉体装置内部の粒子挙動を自在に可視化できるため、分離機構解明や運転条件の最適化に有用なツールである。様々な粉体プロセスの機構解明や最適化に加え、粉体シミュレーションの要素技術



図 6 湿式ビーズミル内の粒子挙動の可視化

の高度化(図6)にも取り組み、東京大学や早稲田大学と共同研究を実施し、成果を挙げている(Tsunazawa et al., 2024 など)。

#### (4) リン鉱石からの副成分としてのレアアースの回収法の研究

リン鉱床は、堆積性、火成作用、グアノなどの海洋島鉱床に分けられ、世界各地に分布しており、その資源量は3000億トンと膨大である。肥料用リン酸の主原料であるアパタイトは、非常に結晶構造の許容性が高く、レアアース(REE)を数百から数千ppm程度含有するため、REE資源としての側面も有する。そのため、リン鉱石から肥料用リン酸の副成分としてレアアースを効率的に回収できれば、コスト削減や新規鉱山の開発に伴う環境負荷の軽減などREE資源問題のブレイクスルーとなる可能性がある。そこで、リン鉱石に着目し、リン酸の製造過程で生成されるリン酸石膏からのREEを効率的に回収する方法の研究を進めている(図7)。



図7 レアアースを含有するリン酸石膏(左)回収されたレアアース精鉱(右)

### 2.3. 鉱物資源情報の研究

#### (1) 鉱物資源データベースの整備

近年の各種資源の価格高騰や供給をふまえ、日本の鉱物資源データベースの整備も取り組んでいる。日本は比較的銅、鉛・亜鉛鉱床が多い国であり、それらのほとんどは火山性塊状硫化物鉱床(黒鉛鉱床や別子型鉱床など)、熱水性鉱脈型鉱床、スカルン鉱床に分類される。銅、鉛・亜鉛鉱床の総数は、大規模なものであれば数百程度であるが、小規模なものも含めると数千に登ると推定される。過去には、「日本産銅誌」、「日本の鉛床総覧」、「日本地方鉛床誌」といった文献によって各鉱床の分布や特徴が記録されていたが、鉱床の位置を特定するのが困難なものも多く、また、これらの資料にも含まれていない鉱床も存在する。一方で、明治期の地質図や地方土地地質図にも銅、鉛・亜鉛鉱床の位置が記されているが、位置情報が曖昧なものも少なくなく、また鉱床名が不明なものも多い。これらの鉱床の分布域は前述した日本産銅誌による分布域とほぼ一致しているため、重複している情報が多いものと考えられる。近年、このような鉱床の情報を網羅した資料は公表されておらず、本研究に置いて銅、鉛・亜鉛鉱床の位置、鉱床名、鉱種などの情報を含めたデータベースの作成を行って

いる。本データベースは将来の国内鉱床探査や自然由来の土壌汚染の判断などに活用できる。

### 3. グループの研究体制

鉱物資源研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

- 星野 美保子 (研究グループ長)
- 実松 健造 (上級主任研究員)
- 児玉 信介 (主任研究員)
- 昆 慶明 (主任研究員)
- 荒岡 大輔 (主任研究員)
- 綱澤 有輝 (主任研究員)
- 左部 翔大 (研究員)
- 天谷 宇志 (研究員)
- 長澤 真 (産総研特別研究員)
- 生田目 千鶴 (リサーチアシスタント)
- 徳本 明子 (リサーチアシスタント)
- 宮腰 久美子 (リサーチアシスタント)
- 阿川 友紀子 (リサーチアシスタント)
- 佐野 綾子 (リサーチアシスタント)
- 高橋 真弓 (リサーチアシスタント)
- 松井 恵子 (リサーチアシスタント)

### 4. 最近の主な研究成果(2022年以降)

- Amagai, T., and Kurosawa, M. (2023). Granitic - melt and carbonic - fluid inclusions in diopside megacrysts from ankaramitic basalt dikes at Kamisano, Yamanashi prefecture, northeastern Japan. *Resource Geology*, 73(1), e12324.
- Araoka, D., Simandl, G.J., Paradis, S., Yoshimura, T., Hoshino, M. and Kon, Y. (2022) Formation of the Rock Canyon Creek carbonate-hosted REE-F-Ba deposit, British Columbia, Canada: constraints from Mg-Sr isotopes of dolomite, calcite, and fluorite, *Journal of Geochemical Exploration*, 240, 107045.
- 荒岡大輔, 吉村寿紘, 中島 礼 (2024) パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本産地から産出した具化石のストロンチウム同位体年代(予察), 瑞浪市化石博物館研究報告, 50, 13-16.
- 安藤佑介, 荒岡大輔, 吉村寿紘, 西本昌司, 中島 礼 (2022) 瑞浪層群明世層産貝類におけるストロンチウム同位体年代の追加記録, 瑞浪市化石博物館研究報告, 49, 119-122.
- Dekov, V., Yasuda, K., Kamenov, G., Yasukawa, K., Guéguen, B., Kano, A., Yoshimura, T., Yamanaka, T., Bindi, L., Okumura, T., Asael, D., Araoka, D., and Kato Y. (2023) Mn-carbonate deposition in a seafloor hydrothermal system (CLAM field, Iheya Ridge, Okinawa Trough): Insights from mineralogy, geochemistry and isotope studies,

- Marine Geology, 460, 107055.
- Furusho, A. et al. (2024) Enantioselective three-dimensional high-performance liquid chromatographic determination of amino acids in the Hayabusa2 returned samples from the asteroid Ryugu, *Journal of Chromatography Open*, 5, 100134.
- Hassan, H., Kaavera, J., Imai, A., Yonezu, K., Tindell, T., Sanematsu, K. and Watanabe, K. (2024) Cu-Au-Platinum Group Element Mineralization in the Mbesa Prospect, Southern Tanzania: Unconventional Magmatic Sulfides. *Economic Geology*, 119(3), 643-664.
- Kosaku, Y., Tsunazawa, Y., and Tokoro, C. (2023) A coarse grain model with parameter scaling of adhesion forces from liquid bridge forces and JKR theory in the discrete element method, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 268, 118428.
- Miyajima, Y., Araoka, D. et al. (2023) Lithium isotope systematics of methane-seep carbonates as an archive of fluid origins and flow rates, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 361, 152-170.
- Moshi, M. C., Watanabe, Y., Boniface, N., Tsujimori, T., Tupaz, C., Araoka, D., Aoki, S., and Mshiu, E. E. (2024) Petrological, geochemical and mineralogical characteristics of Wigu Hill Carbonatite, Uluguru Mountains, Tanzania: insights into carbonatite evolution and REE mineralization, *Mineralium Deposita*.
- Nagasawa M., Shimizu Y., Yamaguchi A., Tokunaga K., Mukai H., Aoyagi N., Mei H., and Takahashi Y. (in press) Interpretation of vertical migration and enrichment processes of rare earth elements (REEs) in ion-adsorption-type mineralization in Japan based on REE speciation analyses, *Chemical Geology*.
- Nitzsche, K. N., Yoshimura, T., Ishikawa, N. F., Kawahata, H., Ogawa, N. O., Suzuki, K., Araoka, D., and Ohkouchi, N. (2024) Zinc isotope fractionation during the sorption of Zn to minerals and organic matter in sediment cores affected by anthropogenic pollution, *Applied Geochemistry*, 169, 106047.
- Rivai, T.A., Kon, Y., Sanematsu, K., Syafrizal (2022) Pb-isotope systematics at the Sopokomil shale-hosted massive sulfide deposit, North Sumatra, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 234, 105275.
- Satori, S. Watanabe, Y., Ogata, T. and Hayasaka, Y. (2022) Late Miocene magmatic-hydrothermal system and related Cu mineralization of the Arakawa area, Akita, Japan, *Resource Geology*, 72:e12284, doi.org/10.1111/rge.12284
- Sone, S. P., Yonezu, K., Imai, A., Watanabe, K., Tindell, T. and Sanematsu, K. (2022) Geological, mineralogical and ore fluid characteristics of the Tagun-Khin-Dan gold mineralization in Mogok-Mandalay-Mergui Belt, Central Myanmar. *Resource Geology*, 72(1), e12298.
- Takaya, Y, Xiao, Y, Tsunazawa, Y, Cordova, M, and Tokoro, C (2022) Mechanochemical degradation treatment of TBBPA: A kinetic approach for predicting the degradation rate constant, *Adv. Powder Technol.* vol. 33, 103469.
- 網澤有輝, 古作吉宏, 坂入義隆, 塚田浩二, 斎藤瑞稀, 蛭子陽介, 三髯幸平, 陳友晴, 所千晴 (2022) *Journal of MMIJ*, vol. 138(6), p.95-102.
- Tsunazawa, Y., Tokoro, C., Ando, Y., Nakamura, T., Tsukimi, R., and Miyatake, N. (2023) Applicability of gravity separation to recycling biodegradable plastics, *J. Chem. Eng. J.* 56(1), 2215269.
- Tsunazawa, Y., Kosaku, Y., Kamo, R., Miyazawa, R., Nishina, Y., Tokoro, C., DEM study on investigation of wet particle conveying efficiency in an inclined belt conveyor system, *Advanced Powder Technology* 35 (2024) 104555
- Tsunazawa, Y., Soma, N., Iijima, M., Tatami, J., Mori, T., Sakai, M., Validation study on a coarse-grained DEM-CFD simulation in a bead mill, *Powder Technology* 440 (2024) 119743.
- Yoshimura, T., Araoka, D., Naraoka, H. et al. (2024) Breunnerite grain and magnesium isotope chemistry reveal cation partitioning during aqueous alteration of asteroid Ryugu, *Nature Communications*, 15, 6809.
- Yoshimura, T., Takano, Y., Naraoka, H., Koga, T., Araoka, D. et al. (2023) Chemical evolution of primordial salts and organic sulfur molecules in the asteroid 162173 Ryugu, *Nature Communications*, 14, 5284.
- Hossain, H. M. Z., Kamei, A., and Araoka, D. (2022) Geochemical characteristics of shoreline sediments from the Bay of Bengal, Bangladesh: Implications for provenance and source-rock weathering, *Geological Journal*, 57, 3431-3446, <https://doi.org/10.1002/gj.4484>
- Xiao, J., Zhao, Z., Bouchez, J., Ma, X., Pogge von Strandmann, P. A. E., Araoka, D., Yoshimura, T., Hossain, H. M. Z., Kawahata, H., and Jin, Z. (2023) Geothermal input significantly influences riverine and oceanic boron budgets, *Earth and Planetary Science Letters*, 621, 118397.
- Zeichner, S. S. et al. (2023) Polycyclic aromatic hydrocarbons in samples of Ryugu formed in the interstellar medium, *Science*, 382, 1411-1416.

## 燃料資源地質研究グループの紹介

### Introduction of the Fuel Resource Geology Research Group

研究グループ長：吉岡 秀佳

Leader, Fuel Resource Geology Research Group:

Hideyoshi Yoshioka

e-mail: hi-yoshioka@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

在来型の石油、天然ガスおよび石炭資源ならびに、メタンハイドレートやコールベッドメタン (CBM)、シェールガス・オイル等の非在来型燃料資源に関する探査手法・資源評価技術の高度化を目指し、その基礎となる鉱床成因モデルの構築、資源探査法の改良、資源ポテンシャル評価技術の研究開発を行う。

特に当研究部門の重点研究課題である「燃料資源に関する評価技術の開発」を遂行するため、地圏微生物、鉱物資源および物理探査研究グループと連携しながら研究を進める。

#### 2. グループの研究体制, 研究資金

##### 2.1. 構成メンバー (令和6年度)

吉岡 秀佳	(研究グループ長)
中嶋 健	(キャリアリサーチャー)
後藤 秀作	(主任研究員)
高橋 幸士	(主任研究員)
朝比奈 健太	(主任研究員)
風呂田 郷史	(主任研究員)
久保田 彩	(研究員)
佐藤 幹夫	(契約職員)
鈴木 祐一郎	(契約職員)
棚橋 学	(契約職員)
中根 由美子	(契約職員)
仁道 純子	(契約職員)
小林 みゆき	(契約職員)
勝村 寛子	(契約職員)
戸塚 由季	(契約職員)
深谷 千恵	(契約職員)
石塚 寿恵	(派遣職員)
井尻 暁	(招聘研究員)
青木 伸輔	(協力研究員)
高野 修	(産学官制度来所者)

##### 2.2. 主な公的研究資金

運営費交付金

「燃料資源地質の研究」

「石炭のレアメタルポテンシャル評価に向けた微量元素測定環境の整備」(GSJ 戦略的課題推進費)

受託研究・補助事業研究(経産省)

国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発事業(メタンハイドレートの研究開発) 科研費

「希土類元素に富む石炭の形成機構：石炭マセラルの微量元素分析によるアプローチ」

「2.5 億年前の大量絶滅期、古太平洋遠洋域の海洋最上部は無酸素化したか？」

「メカノケミカル反応を用いた常温・常圧条件での石炭の低分子化技術の開発」

「地下生命圏における炭素循環研究の深化—微生物代謝速度の定量化—」

「生体・環境・地質試料に汎用可能な包括的分子骨格組成解析による分子化石研究の新展開」

#### 3. 主な研究成果および研究進捗状況等

##### 3.1. メタンハイドレート資源に関わる鉱床成因, 資源評価等に関する研究

・表層型メタンハイドレート賦存域で2022年に上越海丘、2023年に酒田海丘で実施した掘削による周辺海底への影響を把握するため、ROV「はくよう3000」及びホバリング型AUV「YOUZAN」を用いた海底画像撮影と試料採取及び海底直上海水のメタンセンサー観測を、地圏微生物研究グループ及び地質情報研究部門と協力して実施した(佐藤, 吉岡, 青木)。

・表層型メタンハイドレート賦存域である上越沖3海域(北鳥ヶ首海脚, 海鷹海脚, 上越海丘)の海底及び海底下浅部地質構造把握のため、航走型AUV「Deep1」を用いた詳細地形地質調査を、物理探査研究グループと協力して実施した(佐藤)。また同海域のうち北鳥ヶ首海脚と海鷹海脚で海底下の詳細地質構造を把握するために、物理探査研究グループを中心に実施した高分解能反射法三次元地震探査に協力した(棚橋, 佐藤, 後藤)。

##### 3.2. 在来型資源の鉱床成因等に関する地質学的研究

・ファンデルタを構成する礫質堆積物には、サイクリックステップと呼ばれる、高速の混濁流から堆積した波長数10 mで、上流に進行する波状堆積地形が発達することがあり、貯留岩性状が良いため注目されている。富山県の黒部川扇状地のサイクリックステップと、1,500万年前に同じ富山湾の扇状地で堆積した地層中のサイクリッ

クステップ堆積物断面の比較を行った結果、以下のことが判明した(図1)。**①**現世の黒部川扇状地では、サイクリックステップ地形の形成と消滅が毎年起こり、洪水が増える夏季に主に地形変化が生じている。**②**サイクリックステップを形成する混濁流には、洪水起源混濁流と地滑り起源混濁流とがあり、前者は堆積が卓越して波状地形の全長にわたり、平行層理や上流に傾斜する斜交層理の発達する礫岩・砂岩が堆積する。地滑り起源混濁流は、侵食力が強く、波状地形の下流斜面では侵食が生じることから、上流斜面で堆積したトラフ状の礫岩・砂岩が癒着した堆積物が残される。大きな地滑りで発生するより強力な混濁流は、すでに堆積したサイクリックステップ堆積物を完全に削剥して、フラットな侵食面を残す。**③**これまでの礫質サイクリックステップの堆積相モデルは、波状地形の上流側斜面でのみ堆積が生じることを前提としたものしかなかった。本研究では、下流側斜面で堆積する場合があることを示し、サイクリックステップの下流側斜面の堆積相モデルを初めて示した(Nakajima and Saito, in press)。

本研究結果により、地層中からサイクリックステップ堆積物を認定するクライテリアがより確立され、石油・天然ガス探鉱において、地下の良好な貯留岩を探し当てるのに役立つことが期待される。

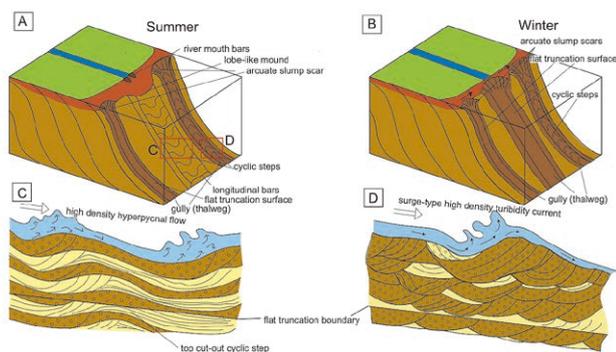


図1 ファンデルタにおける地形の季節変動と、洪水起源及び海底地滑り起源混濁流から堆積するサイクリックステップの堆積相モデル (Nakajima and Saito, in press)

### 3.3. 燃料資源に関する地質等試資料の整備, その他の非在来型資源の鉱床成因, 資源評価に関する研究

・石炭は、**①**燃料・製鉄、**②**石油・天然ガスの根源岩、**③**コールベッドガスの非在来型天然ガス鉱床の母岩等、燃料資源の側面を持つと共に、近年は石炭や副産物中の希土類元素や Ge 等の鉱物資源的な側面にも国際的な関心が高まっている。石炭の利活用が多角的に広がる中、石炭の特性に合わせた利活用の選択は、CNの実現に向けた第一歩であるが、1970年代のエネルギー革命の影響

により、国内炭の再評価は遅れている。当研究グループは、過去の国内外の炭田調査で採取された試料を数多く保管している(図2)。これらの試料の多くは、既に閉山した炭田地域の貴重な試料であり、その基礎データや、レアメタル濃度に関する追加分析は、石炭のポテンシャルを再評価する上で必要不可欠である。そこで、上記の数多くの石炭試料や油母頁岩、過去の層序試錐事業等で得られた掘削試料の試料量や保管状況の確認を進めると共に、石炭試料に関しては発熱量や工業分析値等の基礎データの紐付け作業、関連資料の電子化を進めた(高橋, 鈴木, 中嶋, 吉岡)。



図2 整理した試料の一部 約300個の試料箱に入っている

### 4. 主要な研究成果 (令和5年度後半以降) [誌上発表]

Miyajima, Y., Aoyagi, T., Yoshioka, H., Hori, T., Takahashi, H.A., Tanaka, M., Tsukasaki, A., Goto, S., Suzumura, M. (2024) Impact of concurrent aerobic anaerobic methanotrophy on methane emission from marine sediments in gas hydrate area, *Environmental Science & Technology*, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09484>

Nakajima, T., Saito, Y. (in press) Facies variations in gravelly cyclic steps deposited from turbidity currents: Miocene fan delta front deposits compared with modern active fan delta, central Japan. *The Depositional Record*, DOI:10.1002/dep2.315

Ota Y., Iguchi A., Nishijima M., Mukai R., Suzumura M., Yoshioka H., Suzuki A., Tsukasaki A., Aoyagi T., Hori T. (2024) Methane diffusion affects characteristics of benthic communities in and around microbial mat-covered sediments in the northeastern Japan sea, *Chemosphere* 349, 140964.

## 地圏微生物研究グループの紹介

### Introduction of the Geomicrobiology Research Group

研究グループ長（兼務）：鈴木 正哉

Leader, Geomicrobiology Research Group: Masaya Suzuki

Phone 050-3521-1933, e-mail: masaya-suzuki@aist.go.jp

<http://unit.aist.go.jp/georesenv/geomicrob/>

#### 1. グループの研究目的

地圏における微生物の分布と多様性、機能、活性を評価することにより、元素の生物地球化学的循環に関する基盤的情報を提供するとともに、資源開発、環境保全や地圏の利用に資する研究を行う。産業利用に資する地圏の評価として、地下資源に関する情報整備と評価技術の開発に取り組み、油ガス層や炭層、海底堆積物等に生息する微生物の活動（メタン生成・消費、石油・石炭・ケロジェン分解等）の実態解明を目指す。

#### 2. グループの特色

有機・生物地球化学、微生物生態学を専門とする研究者で構成され、坑井等からの各種地下試料（堆積物、岩石、水、ガス、油等）の採取と、化学・同位体分析、培養、遺伝子解析、同位体トレーサー実験等を通じて、地圏微生物の活動に関する基盤的情報を提供する。部門内では、燃料資源地質グループ、地圏環境評価研究グループと、産総研内では、生物プロセス研究部門、環境創生研究部門と連携し、水溶性天然ガス、コールベッドメタン、メタンハイドレートの成因解明や効率的開発、未回収燃料資源からの天然ガス創成技術の検討を重点的に進めている。

#### 3. 令和5年度後期～6年度前期の研究進捗状況

##### 3.1. 在来型天然ガス資源の効率的開発のための生物地球化学的研究

天然ガスは他の化石燃料の石油・石炭に比べ環境負荷が低いことから、脱炭素にシフトする現在の社会情勢にあっても需要は高まっている。ガス組成や同位体比等の化学的性質に基づくと、日本近海に埋蔵するメタンハイドレートや、近年相次いで見つかった大規模な天然ガス鉱床などは生物起源と推定されており、その資源開発が高い関心を集めている。天然ガスの主成分メタンが生物起源であるならば、その生成にはメタン生成菌の存在が不可欠である。深部地下環境でのメタン生成菌の性質を理解することは、生物起源ガスの探査や資源量の正確な評価に貢献する。我々は、JX 石油開発株式会社と共同で、生物起源天然ガスが賦存する新潟県中条ガス田におけるメタン生成菌の研究を進めている。中条ガス田地域は地温勾配が高く、ヒトの体温付近（35℃）から堆積物環境に生息する微生物の上限温度（80℃）まで非常に幅広い温度帯を有する。そこで、このような温度の大きな変化に対してメタン生成菌のバイオマ

スと活性がどう影響受けるかに着目して研究を進めた。

その結果、温度帯によって主要なメタン生成の経路が異なり、特に、70℃以上の高温域では未知のメタン生成菌による酢酸からのメタン生成が重要であることが示唆された（図1）<sup>1)</sup>。

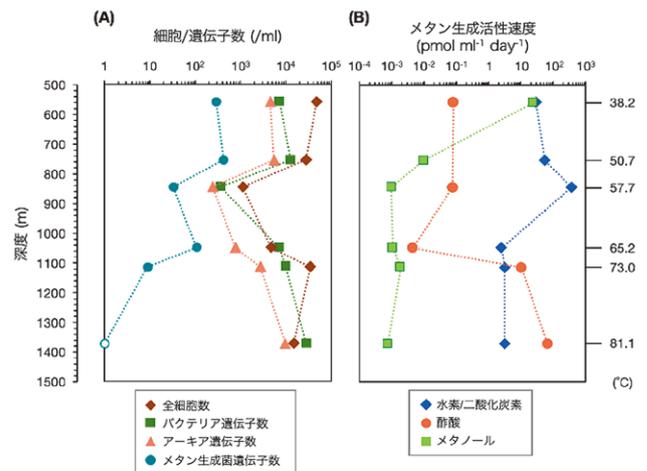


図1 中条ガス田帯水層における微生物バイオマス (A), 及び、メタン生成活性 (B) の深度分布。高温環境ではメタン生成遺伝子数が減っているにもかかわらず (A), 酢酸からのメタン生成活性が高いこと (B) から、未知のメタン生成菌の存在が示唆された。

このような性質が明らかとなっていない未知の（未培養）微生物は深部地下環境に多いことが知られている。我々は、上記のフィールド調査に加え、より基盤的な研究として深部地下環境に生息する未知微生物群を実験室で培養化することによって性質を明らかにする取り組みも行っている。

生物起源天然ガスが賦存する千葉県南関東ガス田の地層水及び堆積物試料を用い、4年かけて培養を行った結果、新しい門に分類される新種の細菌、IA91株を分離、培養した。一般的に細菌は細胞の形状を維持する細胞壁を有する、増殖するためにエネルギーを消費して細胞壁を新たに合成するとともに、細胞壁の一部を分解して再利用する。IA91株は、他の細菌がリサイクルする成分を取り込んで自分自身の細胞壁の合成に利用する。細胞壁合成にかかるエネルギーの消費を大幅に削減できるが、その供給がなければ細胞壁を合成できず、桿状の細胞の形（図2左）が崩れて球状となり（図2右）死に至る。この多種の相互作用は、エネルギー源の乏しい深部地下環境での生存に有効な性質であることが示唆された<sup>2)</sup>。

- 1) Katayama et al. (2024) Biogosciences, 21, 4273-4283.
- 2) Katayama et al. (2024) Nature Microbiology, 9, 1954-1963.

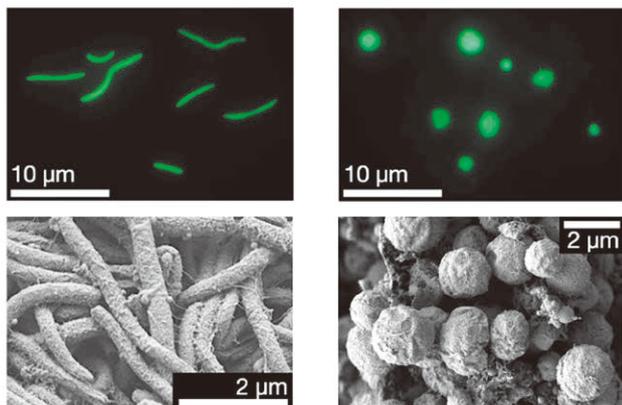


図2 南関東ガス田から培養した新門細菌 IA91株の細胞。

### 3.2. メタンハイドレートが分布する海底のメタン動態評価

メタンハイドレートの分布する山形県酒田市沖の海底堆積物を対象に、地化学分析と微生物分析、培養試験を複合的に用いて、メタンを酸化する微生物の活性や分布、メタン消費効率を定量的に明らかにした。堆積物はメタンに富み、海底直下 5 mm 以深は溶存酸素の乏しい環境であるにもかかわらず、好気性メタン酸化バクテリアと嫌気性メタン酸化アーキアの 16S rRNA や脂質がどちらも検出された。堆積物に  $^{13}\text{C}$  濃縮メタンを添加して培養試験を実施したところ、酸素のある条件と無酸素の条件ともにメタン酸化活性が認められた。培養後の堆積物中の 16S rRNA や脂質への  $^{13}\text{C}$  取り込みと、それらの現場堆積物中での分布を評価した結果、活性のある好気性・嫌気性メタン酸化微生物が少なくとも海底下 6 cm まで共存していることがわかった。培養試験で推定したメタン酸化速度と、活性種の分布を組み合わせた結果、これら好気性・嫌気性微生物は総計でメタンの 40% を酸化していると思われた。本研究の成果は、メタンハイドレートの分布する海底の生態系における物質循環特性の把握や、資源開発に伴う生態系への環境影響評価に役立つと期待できる。

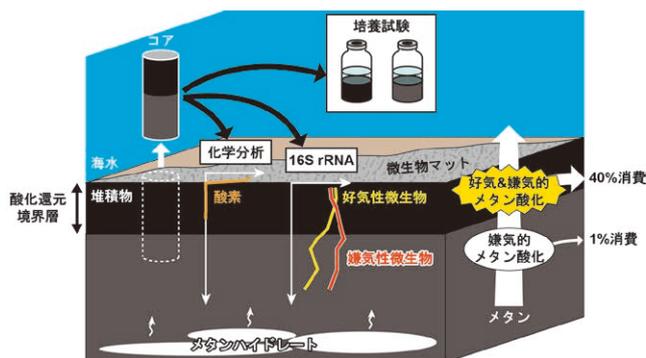


図3 メタンハイドレートの分布する海底下のメタン酸化効率評価の概要。2024年3月11日産総研プレスリリースより転載。

### 3.3. 油田から獲得したトルエン分解メタン生成微生物群集のメタオミクス解析

油層環境におけるメタン生成を伴う原油の生分解反応は微生物によるエネルギー増進回収 (MEER) 技術として注目されている。これまで行ってきた我々の研究ではラボで培養した原油分解メタン生成微生物群集を油層に注入することにより、原油からのメタン生成反応を誘発できる可能性を示した。しかし、当該微生物群集における原油分解の主要な担い手や代謝経路は依然として不明である。本研究では、原油の主成分の一つであるトルエンを分解する微生物群集について、その機能や代謝経路を明らかにするためにメタオミクス解析を実施した。

16S rRNA 遺伝子に基づく菌叢解析の結果、既知のメタン生成菌 2 種、*Peptococcaceae* 科に属する未培養細菌 (以下, PPT) および *Atribacterota* 門に属する未培養細菌 (以下, JS1) が優占していた。そこで、メタトランスクリプトーム解析を用い、原油分解に関わる遺伝子の発現解析を行なった。その結果、PPT はトルエン分解の初発酵素であるベンジルコハク酸合成酵素をコードする遺伝子と、その下流の分解に関与する一連の遺伝子を高発現した。また、JS1 も同様の遺伝子を高発現しており、これらの細菌がトルエンの分解に主要な役割を担うことが示唆された。一方で、JS1 はベンジルコハク酸分解に関わる下流の遺伝子を有しておらず、このことから JS1 はトルエン分解に関わる未知の代謝経路を有する可能性が示唆された。

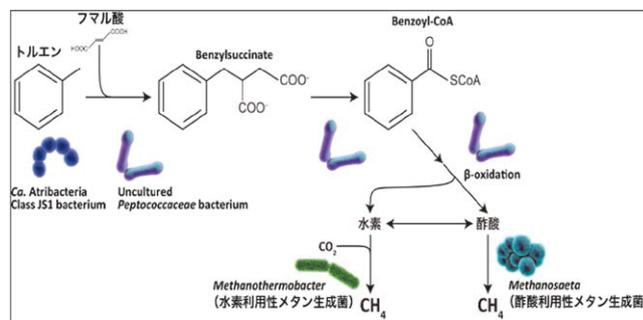


図4 油田から獲得したトルエン分解メタン生成微生物群集によるトルエン分解代謝経路

### 3.4. 天然ガス田における微生物起源メタンの根源有機物の探索

微生物起源のメタンを産出するガス田において、どのような有機物が微生物により分解され、メタンへと変換されるのかを明らかにすることを目的とした。陸源有機物が含まれる堆積有機物においては、リグニンがメタン生成の根源物質となっている可能性に着目し、メタンが生成した試料について地球化学解析技術および遺伝子解析法を用いて、その嫌気的な分解経路の探索を行った。その結果、現地試料で優占した微生物および新規細菌を検出した。これにより、これらの物質は堆積有機物中のメタン生成に寄与する化合物であることが示唆された。

### 3.5. 簡便かつ迅速な有機酸の<sup>13</sup>Cトレーサー濃度定量法の開発と適用例

安定炭素同位体 (<sup>13</sup>C) を用いたトレーサー法は、複雑な化学反応における炭素の流れを調べる上で必要不可欠な技術である。本研究では、嫌気性微生物の代謝反応で重要な化合物である酢酸とギ酸に焦点を当て、それら化合物中の<sup>13</sup>Cトレーサー位置を識別した上で簡便かつ迅速に<sup>13</sup>Cトレーサー濃度を定量する手法を開発した。分析にはガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) を用い、水溶液試料を直接装置に導入する手法 (Mulat & Feilberg, 2015) を一部改良してギ酸の分析にも対応できるようにした。煩雑な前処理は不要で、分析にかかる時間は 1 試料あたり 15 分未満である。本手法の最大の特徴は、得られたマススペクトルデータの解析に最小二乗法を導入したことである。これにより、これまでそれぞれを区別して定量するのに多大な時間と労力を要した<sup>13</sup>Cトレーサー位置の異なる 4 種類の酢酸同位体異性体を、簡便かつ迅速に定量することが可能になった。

本分析手法の代謝経路研究への有用性を検証するために、よく研究されている酢酸生成菌を用いて<sup>13</sup>Cトレーサー培養実験を実施し、酢酸生成における炭素の流れを定量的に議論できる例を示した。本研究成果は国際学術誌 [Suda et al., 2023 *Talanta*] で発表している。

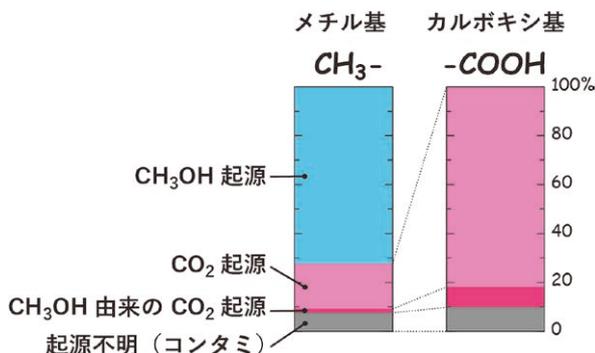


図5 メタノールと重炭酸塩で培養した酢酸生成菌 (*A. woodii*) が生成した酢酸中に固定された炭素源の割合。一連の<sup>13</sup>Cトレーサー実験の結果を組み合わせると、酢酸の各官能基に固定された炭素源の割合を算出することができる。

## 4. グループの研究体制 (令和6年度)

### 4.1. 人員体制

地圏微生物グループでは、以下の20人体制で研究を実施している。

鈴木正哉	(研究グループ長, 兼務)
片山泰樹	(上級主任研究員)
持丸華子	(主任研究員)
眞弓大介	(主任研究員)
金子雅紀	(主任研究員)
須田好	(研究員)
宮嶋佑典	(研究員)
石川理美	(テクニカルスタッフ)
篠塚由美	(テクニカルスタッフ)

竹之内美佐	(テクニカルスタッフ)
星裕貴子	(テクニカルスタッフ)
岩波理恵子	(テクニカルスタッフ)
大原真理	(テクニカルスタッフ)
濱崎聡志	(テクニカルスタッフ)
万福和子	(テクニカルスタッフ)
前田治男	(客員研究員)
辻村清也	(客員研究員)
坂田将	(客員研究員)
橋本梨香子	(客員研究員)
大隅優太郎	(リサーチアシスタント)

### 4.2. 研究予算 (公的外部資金)

- 令和6年度国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発等事業 (メタンハイドレートの研究開発) (資源エネルギー庁)
- 科研費 (若手研究): 蛇紋岩に関連する炭化水素の成因解明: 岩石内分布を考慮した化学形態別の炭素分析
- 科研費 (挑戦的研究 (萌芽)): 新規メタン・アルキル代謝菌をターゲットとした補酵素 F430 亜種の網羅的分析法開発
- 科研費 (若手研究): 生体金属ニッケルの安定同位体比を用いたメタン生成菌探査への挑戦
- 科研費 (挑戦的研究 (萌芽)): 新門細菌 Atribacterota は何故ゲノムを包む細胞内膜を有するのか?
- 科研費 (基盤研究 (A)): 枯渇油田の再生化のための油層微生物による原油分解メタン生成メカニズムの解明
- 科研費 (基盤研究 (A)): 炭層環境における微生物起源 CBM 形成メカニズムの解明および CBM 増産技術の開発
- 科研費基盤研究 (B): メタン生成と共役するリグニン分解: 深部ガス田から探る新たな微生物機能
- 科研費基盤研究 (B): メタン生成アーキアの生物学的・代謝的多様性解明と地下炭素循環の再構築
- 科研費 (基盤研究 (A)): 蛇紋岩熱水系深部-無水マントル境界における非生物的炭化水素合成に関する実験的研究
- 科研費 (国際共同研究加速基金 (A)): 深部油ガス田に生息する新規微生物の生態解明と海洋における機能の解明

## 5. 最近の主な研究成果

Yusuke Miyajima, Daisuke Araoka, Toshihiro Yoshimura, Yuki Ota, Atsushi Suzuki, Hideyoshi Yoshioka, Masahiro Suzumura, Daniel Smrzka, Jorn Peckmann, Gerhard Bohrmann. (2023) Lithium isotope systematics of methane-seep carbonates as an archive of fluid origins and flow rates, *GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA*, **361**, 152-170

Taiki Katayama, Reo Ikawa, Masaru Koshigai, Susumu Sakata. (2023) Microbial methane formation in deep aquifers associated with the sediment burial history at a coastal site, *Biogeosciences*, **20**, 5199-5210

Yusuke Miyajima, Tomo Aoyagi, Hideyoshi Yoshioka, Tomoyuki Hori, Hiroshi Takahashi, Minako Tanaka, Ayumi Tsukasaki, Shusaku Goto, Masahiro Suzumura. (2024) Impact of concurrent aerobic-anaerobic methanotrophy on methane emission from marine sediments in gas hydrate area, *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, **58**, 11

Obey Gotore, Miho Watanabe, Kunihiro Okano, Naoyuki Miyata, Taiki Katayama, Tetsuo Yasutaka, Yuki Semoto, Takaya Hamai (2024) Effects of batch and continuous-flow operation on biotreatment of Mn(II)-containing mine drainage, *Journal of Environmental Sciences*, **152**, 401-415

Shinji Matsumoto, Taiki Katayama, Tetsuo Yasutaka, Shingo Tomiyama, Saburo Yamagata. (2024), Component Separation and Origin Estimation of Mining-Influenced Water Based on Fluoride Ions and Water Isotopes in Underground Legacy Mine, Central Japan, *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 54, 101856

Taiki Katayama, Masaru K. Nobu, Hiroyuki Imachi, Naoki Hosogi, Xian-Ying Meng, Kana Morinaga, Hideyoshi Yoshioka, Hiroshi A. Takahashi, Yoichi Kamagata, Hideyuki Tamaki (2024) A Marine Group A isolate relies on other growing bacteria for cell wall formation, *Nature Microbiology*, **9**, 1954-1963.

Taiki Katayama, Hideyoshi Yoshioka, Toshiro Yamanaka, Susumu Sakata, Yasuaki Hanamura (2024) The geothermal gradient shapes microbial diversity and processes in natural-gas-bearing sedimentary aquifers, *Biogeosciences*, **21**, 4273-4283.

## 地圏環境評価研究グループの紹介

Introduction of the Geo-Environmental Evaluation Research Group

研究グループ長：保高 徹生

Leader, Geo-Environmental Evaluation Research Group: Tetsuo Yasutaka

Phone: 029-849-1545, e-mail: t.yasutaka@aist.go.jp

<https://unit.aist.go.jp/georesenv/geoevaluation/>

### 1. はじめに

本グループでは、「鉱物資源・材料」、「地球化学」、「地熱」、「持続可能な開発と環境管理に関する研究」を推進し、「橋渡し」につながる技術シーズの創出や目的基礎研究の課題開拓等について戦略的に取り組んでいる。

天然ガス・石油等のエネルギー燃料資源、非金属鉱物資源・材料、地圏流体・岩石・鉱物や地圏環境汚染等を研究対象とし、資源の成因解明・開発、地圏環境保全・評価・修復の研究を推進し、標準化や社会実装に資する研究を進める。

さらに、産総研第5期中長期目標に沿った研究業務として、2020年から取り組んできた「環境調和型産業技術研究ラボ」、「土壌汚染等に関する標準化研究」に加えて、新たな領域融合ラボとして「新型コロナウイルス感染リスク計測評価研究ラボ」を設立し、社会課題解決に向けた研究に取り組んでいる。

研究テーマは以下に示す5つである。

- (1) 燃料資源や地熱エネルギーに関わる地質学的・地化学的調査研究
- (2) 機能性鉱物資源・材料に関わる化学的・鉱物学的・材料学的研究
- (3) 持続可能な開発と環境管理に関する研究
- (4) 土壌汚染等に関する標準化研究
- (5) 新型コロナウイルス感染リスク計測評価研究

### 2. 研究活動の概要

#### (1) 地熱に関わる地質学的・地化学的調査研究

デジタル地熱データベースの整備とAIによる地熱システム評価プラットフォームの開発の研究では、異なる分野の科学情報を統合的に取扱い可能なビッグデータ処理体系の構築と、高精度な地熱システムの評価手法の整備を目標とし、ビッグデータに取り込むべき情報の検討に協力した。また、オンラインアンケート調査により地熱発電を含む発電方式の潜在ニーズを解析し、その手法の有効性を論文として発表した(Saishu et al.(2025))。

#### (2) 機能性鉱物資源・材料に関わる化学的・鉱物学的・材料学的研究

元素循環や環境浄化技術への利用を目的として、未利用資源からの効率的な元素回収や機能性鉱物材料を使った元素吸着の技術開発を行った。特に、リン含有廃棄物である

下水汚泥焼却灰等から、酸抽出法によって夾雑元素の少ないリン酸水溶液を回収した。また、低濃度の二酸化炭素に対して親和性を有する有機-無機複合吸着材の性能評価を行った。

放射性廃棄物処分場にて遮蔽材として使用予定のベントナイト混合土の均質性評価についても研究を実施中である。

#### (3) 持続可能な開発と環境管理に関する研究

福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムによる除去土壌・廃棄物等の県外最終処分に関する研究を推進していた。具体的には、オンラインアンケート調査により県外最終処分の社会受容性に影響する要素について解析し、論文を発表した(Takada et al. (2024))。また、県外最終処分の技術的な要素に関する社会受容性についても解析した(高田ら(2024))ほか、放射線防護に関する国際ガイドライン等のレビューや、放射線の耐用性を議論するうえで必要なベンチマークを整理した(Canet et al. (2024); Takada et al. (2024); Hirouchi et al. (2024))。

また、休廃止鉱山に関係する研究として、マンガン酸化菌を用いたパッシブトリートメント技術の開発を進め、現場実証プラントを継続し、メカニズム解明を実施した。休廃止鉱山における遠隔モニタリング技術の開発と適用を進め、発生源対策の一環としての休廃止鉱山のズリ堆積場における遮水検討を行った。

#### (4) 土壌汚染等に関する標準化研究

吸着層工法に用いられる吸着材の性能評価方法の標準化を推進し、JSAの公募に採択された後、JIS原案作成委員会を組織し、標準化に関する議論を進め、JIS原案をJSAに提出した。

### 3. グループの研究体制

#### 1) 研究グループ員(令和6年9月1日現在)

保高徹生	リスク評価
佐々木宗建	資源開発
森本和也	粘土鉱物学
最首花恵	地球化学
三好陽子	粘土鉱物学, 無機地球化学
西方美羽	無機地球化学

高田モモ            リスク評価  
小村悠人            地下水・微生物  
Tum Sereyiroith    特別研究員  
土山紘平            特別研究員

リサーチアシスタント

佐々木大記, 高橋裕太郎, 出原 渉

テクニカルスタッフ

五十嵐順子, 片山寛子, 金井裕美子, 肝付宏実,

鈴木寿一, 鈴木 薫, 金子信行

藤井和美, 藤井新子, 藤田 司

派遣職員

中村洋行, 黒澤暁彦, 山本誠也

#### 4. 最近の主な研究成果

##### 【主な査読付き論文】

Hanae Saishu, Momo Takada, Tetsuo Yasutaka, Nobukazu Soma(2024) Understanding the latent needs of diverse stakeholders unfamiliar with geothermal energy, *Geothermics* Volume 125, 103154

Miho Watanabe, Sereyiroith Tum, Taiki Katayama, Obey Gotore, Kunihiro Okano, Shinji Matsumoto, Tetsuo Yasutaka, Naoyuki Miyata(2024), Accelerated manganese(II) removal by in situ mine drainage treatment system without organic substrate amendment: Metagenomic insights into chemolithoautotrophic manganese oxidation via extracellular electron transfer, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 12, Issue 5,

Alton Cao, Mami Ueta, Manae Uchibori, Michio Murakami, Hiroyuki Kunishima, Rauniyar Santosh Kumar, Prapichaya Prommas, Hana Tomoi, Stuart Gilmou, Haruka Sakamoto, Masahiro Hashizume, Wataru Naito, Tetsuo Yasutaka, Keiko Maruyama-Sakurai, Hiroaki Miyata, Shuhei Nomura(2024) Trust in governments, public health institutions, and other information sources as determinants of COVID-19 vaccine uptake behavior in Japan, *Vaccine* Volume 42 2024 3684-3692,

Shinji Matsumoto, Taiki Katayama, Tetsuo Yasutaka, Shingo Tomiyama, Saburou Yamagata(2024) Component separation and origin estimation of mining-influenced water based on fluoride ions and water isotopes in underground legacy mine, Central Japan, *Journal of Hydrology: Regional Studies* Volume 54 2024

Obey Gotore, Miho Watanabe, Kunihiro Okano, Naoyuki Miyata, Taiki Katayama, Tetsuo Yasutaka, Yuki Semoto, Takaya Hamai(2024) Effects of batch and continuous-flow operation

on biotreatment of Mn(II)-containing mine drainage, *Journal of Environmental Sciences*, Available online 31 May 2024

L. Canet, M. Takada, T. Yasutaka(2024) Comparative qualitative and quantitative analysis of guidelines for nuclear accident recovery, *Radioprotection* 2024, 59(2), 69-79

Kohei Doyama, Keiko Yamaji, Toshikatsu Haruma, Yu Ichihara, Kenji Tamura, Qi Jiang, Yasumichi Tsunashima, Kenjin Fukuyama, Tetsuo Yasutaka(2024) Vegetation at the former open-pit Ningyo-toge mine, 36 years after closure treatment: Impact of soil cover on woody plant establishment and dominance of the perennial herb *Miscanthus sinensis*, *Journal of Environmental Management*, Volume 362, 2024, 121292]

高田 モモ, 三成 映理子, 松本 親樹, 岩崎 雄一, 鈴木 薫, 保高 徹生 (2024) 除去土壌等の減容化に関する社会受容における重要要素, *環境放射能除染学会誌*, Vol.12, No.1, pp.3-13, 2024

Momo Takada, Jun Hirouchi, Ikuo Kujiraoka, Shogo Takahara, Thierry Schneider and Michiaki Kai(2024) Temporal changes in cumulative mortality risks of cancer, by occupation, in the working population of Japan from 1995 to 2020: a benchmark for radiation risk comparison, *Journal of Radiological Protection*, Volume 44, Number 1, 011514]

Jun Hirouchi, Ikuo Kujiraoka, Shogo Takahara, Momo Takada, Thierry Schneider and Michiaki Kai(2024) Comparison of lifetime mortality risk, incidence risk, and DALYs of baseline cancer rates among countries as a benchmark for radiation-related cancer risk, *Journal of Radiological Protection*, Volume 44, Number 2, 021510]

Takada, M., M. Murakami, S. Ohnuma, Y. Shibata, and T. Yasutaka. 2024. Public Attitudes toward the Final Disposal of Radioactively Contaminated Soil Resulting from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. *Environmental Management* **73**: 962-972.

##### 【受賞】

・2023年度日本土壌肥料学会関東支部大会 優秀ポスター賞

受賞者: 高橋 裕太郎

・2023年度日本リスク学会「奨励賞」

受賞者: 高田 モモ

・第12回環境放射能除染研究発表会 優秀ポスター賞「県外最終処分政策への賛否(2)インタビュー調査」

受賞者: 高田 モモ, 保高 徹生, 村上 道夫, 大沼 進, 柴田 侑秀

## 物理探査研究グループの紹介

### Introduction of the Exploration Geophysics Research Group

研究グループ長：神宮司 元治

Leader, Exploration Geophysics Research Group:  
Motoharu Jinguuji

E-mail: m.jinguuji@aist.go.jp

<http://unit.aist.go.jp/georesenv/exploge/>

#### 1. グループの研究目的と課題

本研究グループでは、強靱な国土と社会の構築に資する研究開発成果を創出するため、水道・堤防・原子力発電所および HLW（高レベル放射性廃棄物）・CCS（二酸化炭素貯留）などの重要インフラの保全、立地評価、防災対策に資する効率的な地質評価技術の開発や、エネルギーや鉱物などの資源探査技術の開発を行っている。急激に変化する昨今の世界情勢、気候変動、人口減少などの社会課題のもとで進む社会の DX 化や環境・資源的制約の増大に対して、人工知能や宇宙線利用など進展する技術を取り入れ、未開拓・未利用資源を開発するなどして、レジリエントな社会の実現に貢献する。2024 年度は、以下の 7 項目を中心に研究を推進している。

##### ➤ 地圏資源の調査・研究として

- 1) 海底熱水鉱床やメタンハイドレート等を念頭に置いた海域での音響探査、地震探査、電磁探査、陸域における AMT 法、強制分極 (IP) 法による鉱物資源探査に関する研究。
- 2) 地中熱利用における事前評価技術の研究および地熱地域における、広域熱水系把握調査および空中電磁探査のデータ解析に関する基礎的技術開発。

##### ➤ 地圏環境の利用と保全のための調査・研究として

- 3) 地層処分場選定における地質環境評価に資する、2次元および3次元弾性波探査反射法探査技術の開発。
- 4) 二酸化炭素地中貯留プロジェクトにおける、CO<sub>2</sub> モニタリングを前提とした探査手法開発。
- 5) 地下水等の浅層地質環境評価のための物理探査・原位計測技術の開発。

##### ➤ 地圏の調査及び分析に関する新しい技術開発として

- 6) 活動的火山の地下構造解明や物理モニタリングに関する技術開発。
- 7) インフラ維持管理目的や災害ロボット技術等との連携のため、無人機物理探査技術などの新規物理探査技術開発を領域間融合研究として行い、民間企業への技術移転やその後の技術の普及を目指した研究連携活動も積極的に行っている。

#### 2. 各研究項目の内容

##### 2.1. 海底下の国産資源探査：表層型メタンハイドレートの研究開発

表層型メタンハイドレートは、日本周辺の海底面から海底浅部に塊状・板状・粒状で賦存する傾向がある非在来型燃料資源である。これを次世代資源と目して探査し回収するための研究技術開発を進めている。物理探査研究グループでは、比較的高い周波数を用いる音響調査（地形、底質、海底下浅部構造）、地震探査（海底下地質構造探査）、電磁探査（堆積物の電気伝導度）を用いて、表層型メタンハイドレートの賦存位置と形態を高い精度で推定することを目指している。

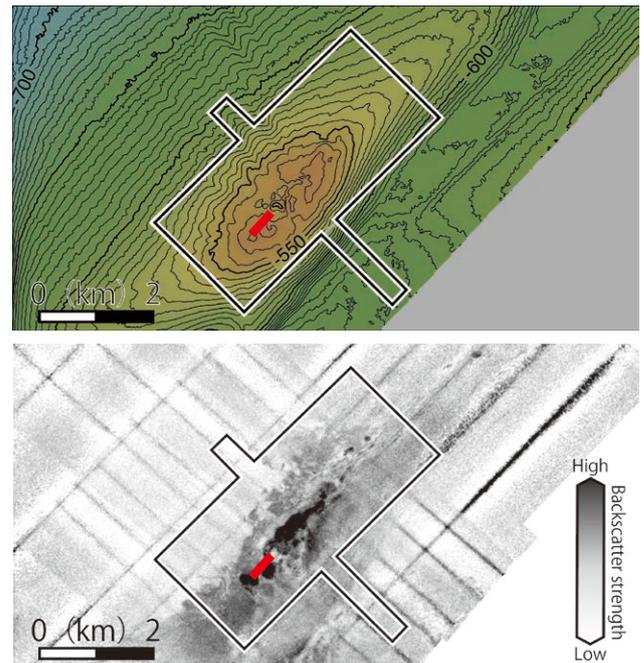


図1 上：酒田海丘（仮）頂部付近の地形図，下：同範囲の後方散乱強度分布図。矩形：AUV 観測位置，赤線：SBP 測線（図 2）位置

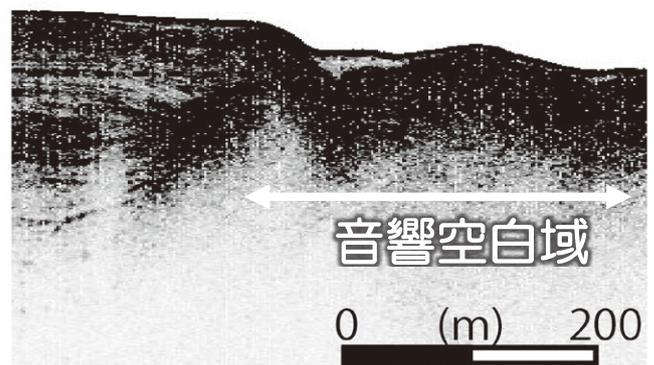


図2 酒田海丘頂部付近の海底下浅部構造 (SBP)。

これら総合的な調査と統合解析の結果、山形県酒田市沖にある海丘（以下「酒田海丘」（仮称）と呼ぶ）では以下のことを明らかにした：頂部に凹地を持つ酒田海丘は、なだらかな背斜構造の頂部付近に表層型メタンハイドレートが賦存している。この表層型メタンハイドレートは、背斜構造の形成に伴い成長した高角断層と、海丘麓部から深部へ繋がる大規模な逆断層に沿って上昇してくるガスに依存して形成されたと見られる。海底下浅部構造探査プロファイルに見られる音響空白域（図 2）が海丘頂部と南東側斜面の海底下に広く認められた。音響空白域が示唆するのは、①音響信号が減衰または吸収され戻らない、②音響信号が透過していない、③その領域が無構造である、のいずれかであると考えられるが、酒田海丘の場合には、ガスが存在し音響信号を減衰させた、またはガスが信号を吸収したために音響シグナルを得られなかったと考えられる結果が、広範囲で認められた。酒田海丘頂部の凹地は、かつて海丘頂部に沿ってメタンハイドレート胚胎領域が存在していたが海水準が低下した時代に大きく欠損し形成された可能性がある (Asada et al., 2022)。現在の海丘頂部では局地的なメタン湧出がある。当グループではケーススタディを積み重ねて表層型メタンハイドレートの形成から消失までの全像を描き出し、探査と回収に貢献する研究成果を発信していく。

## 2.2. 河川堤防における無人地上車両による牽引型電磁探査の繰り返し実験

河川堤防の健全性を評価するには、堤防内部の土質構成を正確に把握することが必要である。従来はボーリング調査や貫入試験が用いられてきたが、堤防を傷つけることなく、かつ長大な構造物である河川堤防の内部を効率的に調査する技術開発が求められている。

スリングラム法は、送信コイルが作る磁場により地中で発生する二次磁場を受信コイルで検出することで、非破壊で地下浅部の比抵抗情報を取得する電磁探査の一手法である。スリングラム法のうち、複数の受信コイルを用いるマ

ルチコイル型電磁探査システムは、送受信コイル間の距離に応じて異なる深度からの情報を得ることができる。さらにシステムを移動させながら測定を繰り返すことで多数の観測データを取得できるので、長大な堤体内部の構造把握に適している。これを UGV（無人地上車両）と組み合わせ、非破壊かつ効率的な堤体内部の土質構成把握のための調査技術開発に取り組んでいる（図 3）。

本研究では堤防の脆弱部を特定することを目指し、無人地上車両とスリングラム法電磁探査を組み合わせることで繰り返し実験を行った。具体的には茨城県古河市を流れる西仁連川の左岸堤防を対象とし、水田への水の染み出しが確認された箇所周辺において、河川水位が異なる複数の時期にわたり測定を実施した。調査の速度は毎時 1 km で、従来取られてきた手法よりも効率良く実施できたと言える。

取得したデータを基に逆解析を行い、比抵抗構造を求めたところ、堤体内浅部に特徴的な比抵抗の増加が、比較的深部には比抵抗の低下が見られることを確認した。今後は水位の変化が非抵抗構造にどの程度影響しているのか検討を進め、調査対象において確認されている水田への水の染み出しと堤体内比抵抗構造の関係を求めるとともに、本調査手法の有効性を検討していく。

## 2.3. 宇宙線ミュオンと弾性波の融合利用

素粒子ミュオン ( $\mu$ 粒子) は、密度長 (平均密度×透過距離) が大きいほど透過しにくい性質をもつ宇宙線の一つである。ミュオンの透過個数を検証することで物質の密度を直接推定できる。火山、遺跡、溶鉱炉、原子炉など適用事例が増えている。

一方で弾性波探査は地下構造推定の主要な方法の一つだが、P 波・S 波の速度は地下を等方線型弾性体と仮定すると、弾性定数 (体積弾性率  $K$ 、剛性率  $G$ ) と密度  $\rho$  で表せる。P 波・S 波速度の 2 式から 3 つの未知数の推定は困難であるが、ミュオンの観測データの追加によりその未知数が推定可能になると考えられる。

宇宙線ミュオンと、P 波・S 波を実験室で観測し、推定



図 3 UGV 牽引によるマルチコイル型電磁探査システムを用いる測定の様子。

される密度・弾性定数の精度や分解能を観測条件に応じて評価することを目的として、宇宙線ミュオン測定システムを構築し、密度長と観測個数の関係の推定に必要な参照データを集めている。実験は3枚の検出器を重ねるよう設置し、同一のミュオンが通過した際にエネルギースペクトルが一致するよう調整している(図4)。取得されるデータは、イベント発生時間、シンチレータのCH番号、波高値で、これまでのところ3枚の検出器を1μ秒以内に通過したイベントをトリプルコインシデンスイベントとして抽出している。水槽(縦40cm×横60cm×高さ50cm)内の水深を10cmずつ増やし、水深0~40cmにおいて24時間以上の連続測定を行ってトリプルコインシデンスと水深(密度長)との相関を調べたところ、大気圧および水深と観測個数との相関を確認できた。今後はミュオンと弾性波の観測データの統合解析の実用性の検証を目指し室内実験データを用いて推定される物性値の精度や分解能の評価を進める。

このほか本稿75・76頁にて、IP法電気探査の高度化に関する技術開発や、水位変化による試験堤防のS波速度構造モニタリング等、当グループの取り組みを紹介しているので参照されたい。表層型メタンハイドレートについては講演(14~17頁)でも紹介する。

### 3. グループの体制

#### 3.1. 人員体制(2024.10.1現在)

以下の15人体制で研究を実施している。

- 神宮司 元治 (研究グループ長)
- 横田 俊之 (上級主任研究員)
- 浅田 美穂 (主任研究員)
- 小森 省吾 (主任研究員)
- 湊 翔平 (主任研究員)
- 梅澤 良介 (研究員)
- 児玉 匡史 (研究員)
- 高倉 伸一 (招聘研究員)
- 上田 匠 (客員研究員)

- 松島 潤 (客員研究員)
- 上村 建人 (リサーチアシスタント)
- 渡部 蒼 (リサーチアシスタント)
- 市川 雅之 (リサーチアシスタント)
- 山口 和雄 (テクニカルスタッフ)
- 木村 夕子 (テクニカルスタッフ)

部門内地下水研究グループ、CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ、鉱物資源研究グループ、燃料資源地質研究グループ等、産総研内では、再生可能エネルギー研究センター、活断層・火山研究部門、地質情報研究部門、知能システム研究部門等と、さらに、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構等と連携して研究を推進している。

#### 3.2. 研究予算

研究予算として、産総研運営費交付金に加えて、以下の公的外部予算プロジェクトに従事している。

- ・令和4年度国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発等事業(メタンハイドレートの研究開発)(資源エネルギー庁)
- ・令和4年度鉱物資源開発の推進のための探査等事業(資源開発可能性調査)(資源エネルギー庁)
- ・安全なCCS実施のためのCO<sub>2</sub>貯留技術の研究開発に係る再委託(二酸化炭素地中貯留技術研究組合)等々。
- ・民間企業と共同研究を積極的に実施しており、ニーズの把握と成果の橋渡し促進に努めている。

### 4. 最近の主な研究成果

- [Komori, S., Takakura, S., Mitsuhashi, Y., Yokota, T., Uchida, T., Makino, M., Kato, Y., and Yamamoto, K. \(2024\) Three-dimensional resistivity structure in Toya caldera region, Southwest Hokkaido, Japan -Constraints on magmatic and geothermal activities. \*Geophysics\*, \*\*89\*\*, 1.](#)
- [Kawasaki, Y., Minato, S., and Gohse, R. \(2024\) Subsoil density field reconstruction through 3D](#)

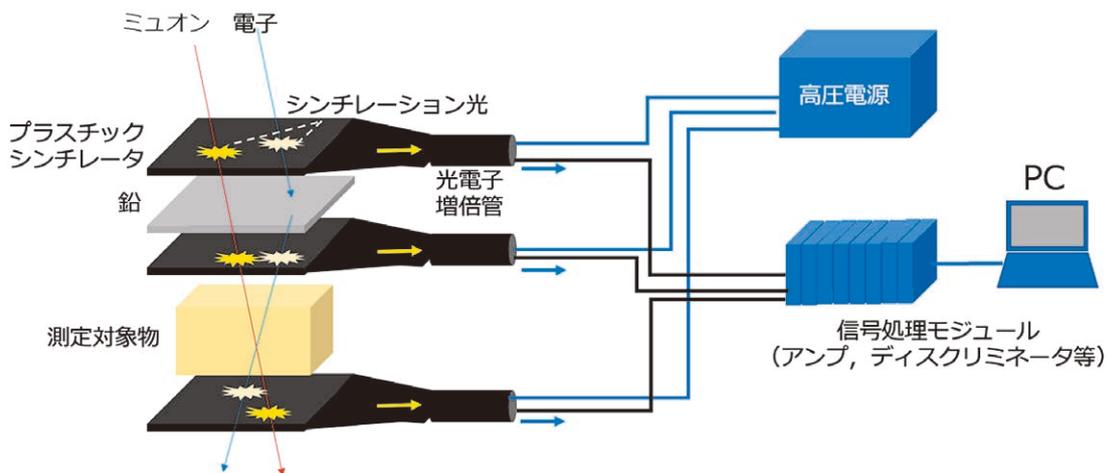


図4 ミュオン測定システム。

- FWI: a systematic comparison between vertical- and horizontal-force seismic sources. *Geophysical Journal International*, **236**, 2.
- Usui, Y., Uyeshima, M., Hase, H., Ichihara, H., Aizawa, K., Koyama, T., Sakanaka, S., Ogawa, T., Yamaya, Y., Nishitani, T., Asamori, K., Ogawa, Y., Yoshimura, Takakura, S., Mishina, M., and Morita Y. (2024) Three-dimensional electrical resistivity structure beneath a strain concentration area in the back-arc side of the northeastern Japan arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **129**, e2023JB028522.
- Asada, M., Yamashita, M., Fukuchi, R., Yokota, T., Toki, T., Ijiri, A., and Kawamura, K. (2023) A Large Mud Volcano Field in the Hyuga-nada, Northern end of the Ryukyu Trench. *Frontiers in Earth Science*.
- Honda, A., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Matsunaga, Y., Nishizawa, T., and Ikezawa S. (2023) Shallow resistivity structure around the 2018 craters of Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by audio-frequency magnetotellurics. *Earth, Planets and Space*, **75**, 43.
- Kodama, M., Yokota, T., Matsushima J., Tanaka, H.K.M., Kin, T., Okamoto, N., and Shiba, H. (2023) Anomaly detectability in multidimensional muon tomography under a trade-off relationship between anomaly size, density contrast, and exposure time. *Journal of Applied Geophysics*, **209**, 104920.
- Nakashima, Y. (2023) Development of a Single-Sided Magnetic Resonance Surface Scanner: Towards Non-Destructive Quantification of Moisture in Slaked Lime Plaster for Maintenance and Remediation of Heritage Architecture. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **42**, 90.
- Yoshihara, N., and Umezawa, R. (2023) Combining portable cone penetration test and electrical resistivity tomography to assess residual risks after shallow landslides: a case at the Hokkaido Eastern Iburi earthquake in 2018 in Japan. *Landslides*, **20**, 2171-2185
- Asada, M., Satoh, M., Tanahashi, M., Yokota, T., and Goto, S. (2022) Visualization of shallow subseafloor fluid migration in a shallow gas hydrate field using high-resolution acoustic mapping and ground-truthing and their implications on the formation process: a case study of the Sakata Knoll on the eastern margin of the Sea of Japan, *Marine Geophysical Research*, **43**, 34.
- Yoshihara, N., Matsumoto, S., Umezawa, R. Machida, I. (2022) Catchment-scale impacts of shallow landslides on stream water chemistry, *Science of The Total Environment*, **825**, 153970.
- Umezawa, R., Jinguuji, M., and Yokota, T. (2022) Characterization of a river embankment using a non-destructive direct current electrical survey, *Near Surface Geophysics*, **20**, 238-252.
- Jinguuji, M., and Yokota, T. (2022) Investigating soil conditions around buried water pipelines using very-low-frequency band alternating current electrical resistivity survey, *Near Surface Geophysics*, **20**, 192-207.
- Aizawa, K., Utsugi, M., Kitamura, K., Koyama, T., Uyeshima, M., Matsushima, N., Takakura, S., Inagaki, H., Saito H., and Fujimitsu Y. (2022) Magmatic fluid pathways in the upper crust: insights from dense magnetotelluric observations around the Kuju Volcanoes, Japan, *Geophysical Journal International*, **228**, 755-772.
- Mitsuhashi, Y., Ueda, T., Kamimura, A, Kato, S., Takeuchi, A., Aduma C., and Yokota, T. (2022) Development of a drone-borne electromagnetic survey system for searching for buried vehicles and soil resistivity mapping, *Near Surface Geophysics*, **20**, 16-29.



## CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループの紹介

### Introduction of the CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group

研究グループ長（兼務）：相馬 宣和

Leader, CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group:  
Nobukazu SOMA

Phone: 050-3521-1606, e-mail: n.soma@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

CO<sub>2</sub> 地中貯留は、産総研第 5 期中期計画の「産業競争力の強化に向けて各領域で重点的に取り組む研究開発」において、「産業利用に資する地圏の評価」の中での重要課題として位置づけられており、当グループでは、CO<sub>2</sub> 地中貯留全般に資する研究開発を全面的に推進している。さらに、ゼロエミッション国際共同研究センターの環境・社会評価研究チームにも多くのメンバーが兼務で参画し、全所的な重点推進課題である「温室効果ガス大幅削減のための基盤技術開発」に対しても CCUS や鉱物化の観点から課題解決に尽力している。一方、地圏流体の挙動解析、挙動予測のためのシミュレーション技術、モニタリング技術、屋内外での実験技術等は、資源の安定供給に貢献する地熱資源開発など CO<sub>2</sub> 地中貯留以外の分野においても必要な技術であり、地圏環境の利用と保全の観点から社会のニーズにあった研究を進めている。

#### 2. グループの研究体制

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループは、主に以下のメンバーで研究開発を推進している。

相馬宣和（研究グループ長：兼務）

徂徠正夫（首席研究員：兼務）

藤井孝志

加野友紀

後藤宏樹

西山直毅

堀川卓哉

西木悠人

志賀正茂（産総研特別研究員）

池田 博，上原真一（客員研究員）

#### 3. 安全な CCS 実施のための CO<sub>2</sub>貯留技術の研究開発

安全かつ大規模・効率的な CO<sub>2</sub> 地中貯留の実現に向け、我が国の貯留層に適した実用化規模（100 万 t/年）での CO<sub>2</sub> 地中貯留技術を開発するとともに、CCS の社会受容性の獲得を志向した研究開発を行うために、平成 28 年に二酸化炭素地中貯留技術研究組合（現在、産総研を含む 2 機関と民間企業 10 社）が設立された。この中で当グループは、貯留した CO<sub>2</sub> の低コストでのモニタリング技術や、水理-力学連成解析技術、地化学反応速度測定技術など、

優位性のあるコア技術を基に研究開発を推進している。

#### 3.1. 自然電位による漏洩リスク検知技術の開発

CO<sub>2</sub> 圧入サイトでは、漏洩可能性を早期に検知し対策を取る必要があるため、低コストかつ簡便な地表からの連続モニタリングが求められる。本課題では、漏洩リスクの最も高い坑井近傍の CO<sub>2</sub> 賦存状況を地表から監視するため、自然電位（SP）法を用いたモニタリングシステムを開発し有効性を検証する。苫小牧サイトなど、我が国では主に海底下の貯留層への CO<sub>2</sub> 地中貯留が想定されており、特に沿岸域における SP データ取得・解析技術の開発を目的とする。

具体的には、CO<sub>2</sub> 圧入サイトにおいて SP の連続データを取得し、各環境下における課題を抽出しその対処方法の検討を行う。また、限られた観測期間を補完するため、室内実験や数値シミュレーションを行い SP 変化に係るパラメータ依存性の解明および長期挙動の推定を行う。

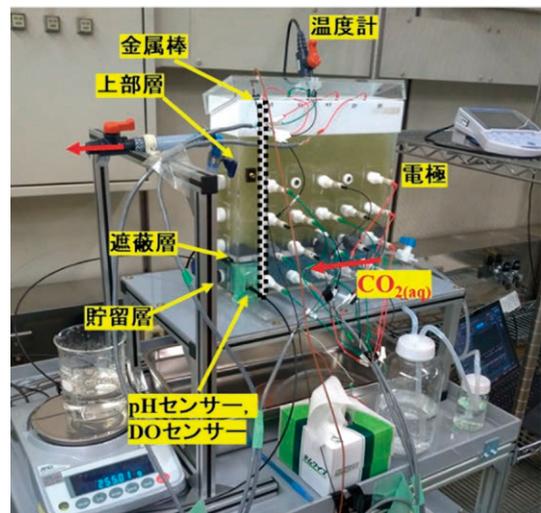


図 1 SP 室内実験装置

本年度は、2021 年度に開始した北海道苫小牧市における CCS 大規模実証試験の圧入井・観測井を利用した SP 連続観測、および新潟水溶性ガス田において予定されている CO<sub>2</sub> 溶解水圧入試験に先立ち 2022 年度から開始したベースライン SP の連続観測を継続し、観測システムの構築手法、データ処理、漏洩などに伴う SP 変化検知手法を確立した。室内実験では CO<sub>2</sub> と坑井の接触による SP 変化のメカニズムを解明するとともに、セメント・鋼材などが SP 変化に及ぼす影響を評価した。併せて電気化学シ

ミュレーションでのマッチングを通して SP 変化予測に必要なパラメータを推測し、SP モニタリングで検知可能な CO<sub>2</sub> 接触域の増加量を評価すると共に、現場スケールでのパラメタスタディや現場を模擬したケーススタディを行い、CO<sub>2</sub> 接触域の増加による坑井の SP 変化が室内実験や現場観測と整合的であることを確認した。併せて堀川および加野の研究紹介もご参照されたい。

### 3.2. 断層安定性ジオメカニクス解析

豪州パース近傍の CO<sub>2</sub> 圧入現場サイトの深部地層において、光ファイバー等による断層安定性監視実証試験が計画されている。本研究は、当該試験で取得される現場データを解析するためのジオメカニクスモデリングを検討し、断層安定性の監視・健全性評価を行うことを目的とする。本年度は、パース南部の現場岩石を用いて各種室内実験を実施し、取得した摩擦、強度等のパラメータに基づきモデリングを行った。具体的には、室内実験から乾燥と湿潤の現場岩石の密度、間隙率、弾性率 ( $V_p$ ,  $V_s$ ) を測り、得られた値からヤング率と剛性率の推定、および深度に対する間隙率と弾性率の関係を示した。また、一面せん断実験を通じて同じく豪州現場岩石の摩擦係数も求めた。以上の取得パラメータを既存の水理-力学解析モデルに取り込み、注水シミュレーションを行った。解析の結果、注水場所を中心に地層が上下方向に圧縮されるゾーンが存在し、光ファイバーの数 100 倍に相当する深度方向のひずみが観測されることが予測された。今後予定の流体圧入の現場で、流体圧入に伴う間隙率の変化と断層の動きの関係を調べるにあたり、光ファイバーによる計測が有効な手段の一つになることを示唆している。

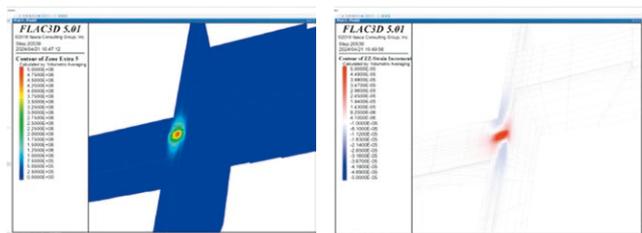


図 2 断層および母岩における注水解析結果：(左図) 間隙率の増加、(右図) 深度方向ひずみ。

## 4. 地熱条件下での CO<sub>2</sub> 流動反応連成挙動の検討

高温貯留層に CO<sub>2</sub> を圧入して地熱発電を行うと同時に、CO<sub>2</sub> の一部を地熱貯留層中で炭酸塩鉱物として固定することを意図した、JOGMEC 事業「カーボンリサイクル CO<sub>2</sub> 地熱発電技術」に参画している。本事業は地熱発電を主眼とするが、CCS の一形態として捉えることもでき、当グループでは高温下での CO<sub>2</sub> の挙動に焦点を当てた研究に取り組んでいる。

### 4.1. 流通試験による貯留層水理特性変化の検証

地化学反応が貯留層水理特性に与える影響の評価を目的

に、温度 200℃、間隙圧 10MPa の条件下で CO<sub>2</sub> 溶解水を岩石コアに流す流通実験を実施した。本年度は、地化学反応と浸透率の関係に対する (1) 流速、(2) 亀裂の有無、(3) 岩相の効果について検証を行った。

流速の影響の検証では、貯留層の模擬岩石として多孔質玄武岩コア (島根県大根島) を用いた。15-21 日間の流通によって、全ての流速条件で浸透率は継続的に減少し、最大で約 2 桁減少した (図 3)。一方、間隙率変化は 1% 以下であった。SEM-EDS 分析から、斜長石、ガラス、かんらん石に微小間隙とエッチピット形成が認められ、CO<sub>2</sub> 溶解水の流通による溶解促進が確認された。また、コアのほぼ全体において繊維状の粘土鉱物が沈殿し、間隙径の減少を引き起こしていた (図 3)。浸透率は主に間隙率と間隙径に支配されるが、流通前後の間隙率変化が小なることを踏まえると、粘土鉱物沈殿に伴う間隙径減少が浸透率減少の主要因と考えられる。

次に、半割した玄武岩コア (島根県大根島) に対する CO<sub>2</sub> 溶解水流通試験を実施した。その結果、半割前の玄武岩と比べて浸透率は約 2 桁大きいことが判明し、地化学反応に伴う浸透率の減少が緩やかであることが確認された。

最後に、岩相の違いが浸透率変化に及ぼす影響を評価するため、玄武岩と比べて Si に富み Ca や Mg に乏しい流紋岩コア (東京都新島) を用いた流通試験を行った。その結果、流紋岩を CO<sub>2</sub> 溶解水が流通すると浸透率は一定または増加することが確認され、岩相の違いが貯留層浸透率変化に対して影響を与える可能性が示唆された。

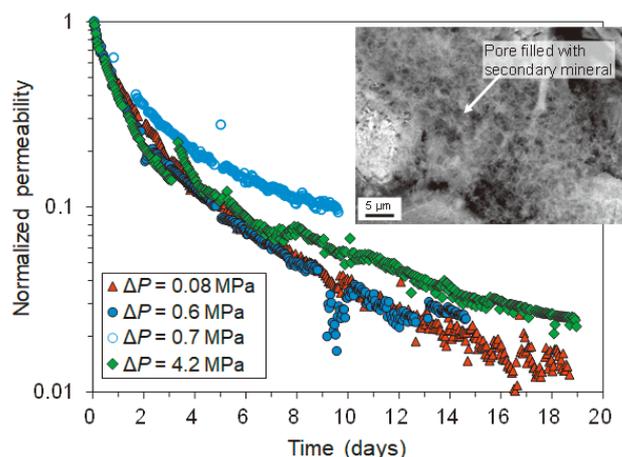


図 3 地化学反応に伴う玄武岩の浸透率変化

### 4.2. 分子動力学計算による界面相互作用の解析

石英および粘土鉱物表面における CO<sub>2</sub> 分子と水分子の挙動について分子動力学シミュレーションを行い、水理特性や地化学反応のモデリングにおいて重要な、鉱物表面の吸着水の安定性を評価した (図 4)。その結果、500K 以上の高温条件下で、水の CO<sub>2</sub> への溶解度が急激に増加することに伴い、吸着水の乾燥速度が顕著に大きくなることが確認された。この結果から、従来の貯留層シミュレーショ

ンでは不動態飽和率を経験的に決定していたが、より高精度なモデリングのためには温度依存性を考慮すべきであると考えられる。同様のシミュレーションで鉱物表面の違いによる影響を検討したところ、表面が親水性か疎水性かが非常に重要であった一方、親水性であれば表面電荷や構造による相違は顕著には見られなかった。さらに、CO<sub>2</sub>と水の混合流体に関して、貯留層での水理特性に大きく影響する拡散性および粘性の計算を行った。その結果、CO<sub>2</sub>と水の相互溶解が拡散性や粘性に及ぼす影響は小さく、これらはストークス・アインシュタインの関係式によって整理できることが示された。これにより、地熱貯留層における拡散性やモビリティが従来の経験式よりも少ない変数で精度良くモデル化できる可能性が示唆された。最後に、CO<sub>2</sub>-水-鉱物系やCO<sub>2</sub>-水混合系におけるCO<sub>2</sub>分子および水分子の挙動を原子レベルで理解するための指標として、配位数、水素結合数、四面体性といった記述子が有用であることを明らかにした。これらの記述子を用いた解析により、広範囲の温度・圧力条件下での系の挙動をより詳細に評価することが可能となり、さらなる応用が期待される。

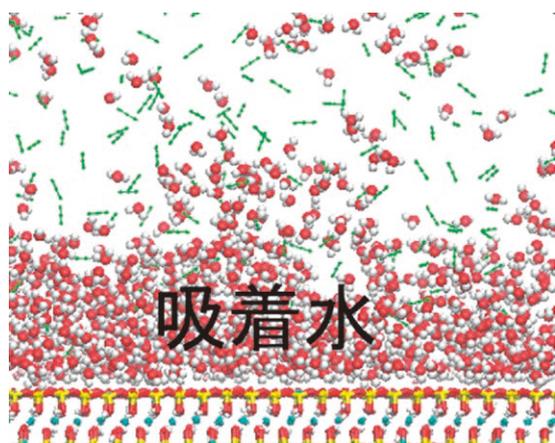


図4 分子動力学計算によるCO<sub>2</sub>存在下での鉱物表面上の吸着水のスナップショット：CO<sub>2</sub>分子、酸素原子、水素原子はそれぞれ緑色、赤色、白色で表示。この計算例ではイライトモデルを使用。

#### 4.3. ナチュラルアナログからの炭酸塩鉱物反応メカニズムの検討

昨年度に続き、北海道ウトロ温泉において岩石溶解-炭酸塩沈殿試験を行った。今回は岩石の溶解プロセスを短縮する観点から、岩石試料の代わりにCa供給源として石膏を適用した結果、CO<sub>2</sub>の圧入に伴う石膏の溶解と炭酸塩鉱物の成長を再現することに成功した。また、羅臼温泉、弟子屈温泉、有馬温泉にて追加の成長実験も行い、昨年度の伊豆半島各温泉での結果と併せることで、高温現場環境下における炭酸塩鉱物の成長速度の飽和度依存性として提示した。これらの実験からは、炭酸塩鉱物の成長速度が必ずしも飽和度だけの関数として決まらず、少なくとも溶存炭酸種濃度やCaとの量比の影響を含めて評価する必要があることが示唆された。

## 5. 風化促進に係る研究開発

玄武岩等の苦鉄質岩を粉碎して地上に散布し、大気中のCO<sub>2</sub>との反応により鉱物化させることでCO<sub>2</sub>削減を図る風化促進に関して、NEDO ムーンショット型研究開発事業「LCA/TEAの評価基盤構築による風化促進システムの研究開発」を進めている。本課題はゼロエミッション国際共同研究センター主導で連携して取り組んでいるが、当グループは、風化促進用岩石選定に資する苦鉄質岩データベースの構築、ならびにCO<sub>2</sub>の炭酸塩化速度および固定量の定量化技術開発の観点で中核的な役割を担っている。

### 5.1. 風化促進用岩石選定に資する苦鉄質岩データベースの構築

国内の玄武岩産地の中から、活動時期、化学組成および産状の異なる玄武岩質噴出物が採取可能な地域を抽出し、地質調査と岩石採取を行った。本年度は、1)長崎県五島列島、および2)東京都八丈島の2地域を対象とし、溶岩やスコリア質降下火砕物試料を採取した。採取した試料について、全岩化学組成分析、薄片観察による鉱物組成(モード)分析、粉末X線回折による鉱物種同定、活動時期を明らかにするための<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代測定、水銀圧入法による空隙率測定等を進めている。

### 5.2. CO<sub>2</sub>の炭酸塩化速度および固定量評価技術の開発

産総研つくばセンター中央事業所の屋上で、国内外で初となる定点での岩石風化実験を1年以上の長期間実施している。ここでは、粒径1-2mmおよび125-250μmに粉碎した各種玄武岩、橄欖岩、蛇紋岩に加えて、試薬のMgOを併せた合計9種類の岩石を選定した。岩石試料は所定期間ごと、溶液試料は降雨のたびに回収・分析することで、気温、湿度、降水量等の気象データと照合しつつ、CO<sub>2</sub>の炭酸塩化速度や固定量の評価を行う計画である。一度の降雨に曝露しただけでも岩石からのイオンの溶脱やpHの上昇が確認され、それとともに大気中のCO<sub>2</sub>が吸収されることが実証できた。また、MgOを使った実験ではCO<sub>2</sub>の炭酸塩化が顕著に確認され、熱重量測定や赤外分光分析を通して炭酸塩固定量の評価を行った。

## 6. CO<sub>2</sub>長期モニタリング技術の開発

CO<sub>2</sub>地中貯留におけるモニタリングコストの低減を目的として、超伝導重力計を用いた重力連続測定によるCO<sub>2</sub>長期モニタリング技術を開発した。具体的には、北海道苫小牧市沿岸の重力測定サイトにおける測定システムを維持・管理し、長期重力データを蓄積しつつ、これまでに開発してきた重力ノイズ除去手法をデータ解析に適用することによって、世界で初めて9年間にも及ぶ沿岸域での長期重力データ取得に成功した。この結果は、本技術のCO<sub>2</sub>長期モニタリングに対する適用可能性を示している。

本技術は、最も有効な CO<sub>2</sub> 挙動モニタリング技術の一つとされる繰り返し反射法地震探査と併用することで、地震探査の実施回数を低減し、その結果、CCSにおけるCO<sub>2</sub>モニタリングコストの削減に寄与すると考えられる。

## 7. その他の研究グループの活動

上述のプロジェクトに加えて、CO<sub>2</sub> 地中貯留ならびに地熱関連での技術コンサルティングおよび民間共同研究等を実施している。また、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム第3期課題「海洋安全保障プラットフォームの構築」におけるサブ課題「海洋玄武岩層を活用した大規模CO<sub>2</sub>貯留・固定化技術に関する基礎調査研究」に参画し、玄武岩海山中でのCO<sub>2</sub>挙動の解析、および玄武岩海山の水理-力学特性評価を実施した。

一方、当グループは令和2年1月に創設されたゼロエミッション国際共同研究センターにも所属し、特に同センター主導の融合領域研究「ゼロエミッション国際融合研究プロジェクト」の中の「ネガティブエミッション技術の開発」の一環として、「次世代大規模CCSに向けた玄武岩の適用性評価」について、地質領域他部門と連携して取り組んでいる。

## 8. 主な研究成果

Ando, R., Ujiie, K., Nishiyama, N., and Mori, Y. (2023) Depth-Dependent Slow earthquakes controlled by temperature dependence of brittle-ductile transitional rheology, *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101388.

Nishiyama, N. (2023) Reply to comment by Williams on "spatial changes in inclusion band spacing as an indicator of temporal changes in slow slip and tremor recurrence intervals", *Earth, Planets and Space*, 75, Article number: 3.

Nishiyama, N., Ujiie, K., Noro, K., Mori, Y., and Masuyama, H. (2023) Megathrust slip enhanced by metasomatic actinolite in the source region of deep slow slip. *Lithos*, 446-447, 107115. doi: 10.1016/j.lithos.2023. 107115

Shiga, M., Morishita, T., Sorai, M. (2023) Interfacial tension of carbon dioxide - water under conditions of CO<sub>2</sub> geological storage and enhanced geothermal systems: a molecular dynamics study on the effect of temperature,

*Fuel*, 337, 127219.

Shiga, M., Morishita, T., Aichi, M., Nishiyama, N., & Sorai, M. (2023). Correlation between contact angle and water film energetics in carbon dioxide-water-clay mineral interfacial systems: A molecular dynamics study. *Energy & Fuels*, 37(21), 16688-16700.

Yokoyama, T., Nomura, R., and Nishiyama, N. (2023) Size distributions of water and air in rock pores Induced by capillary rise: Experiments and modeling, *Transport in Porous Media*, 148, 1-27.

Fujii, T., Oikawa, Y., Xinglin, L., Sorai, M. (2024) Experimental investigation of the hydro-mechanical response of soft rocks in the CO<sub>2</sub> injection process - Impacts of fracture roughness and brittleness index on the evolution of permeability behavior, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 177, 105742. doi: 10.1016/j.ijrmms. 2024.105742

Horikawa, T., Katsura, M., Nakashima, S. (2024) Evaluation of drying shrinkage effects on the elastic properties of porous sandstones using a modified micromechanical model. *Geophysical Journal International*, 237, 1222-1234.

Morishita, T., & Shiga, M. (2024). Ab Initio Characterization of the CO<sub>2</sub>-Water Interface Using Unsupervised Machine Learning for Dimensionality Reduction. *The Journal of Physical Chemistry B*. 128, 23, 5781-5791.

西山直毅 (2024) 地質媒体における物質移動と岩石-水相互作用に関する研究, *岩石鉱物科学*, 53, gkk. 240123.

Shiga, M., Morishita, T., Nishiyama, N., Sorai, M., Aichi, M., & Abe, A. (2024). Atomic-scale insights into the phase behavior of carbon dioxide and water from 313 to 573 K and 8 to 30 MPa. *ACS omega*, 9(19), 20976-20987.

Ujiie, K., Nishiyama, N., Yamamoto, H., Yamashita, M., Nagaya, T., Sano, T., and Kouketsu, Y. (2024) Duplex underplating, sediment dehydration and quartz vein mineralization in the deep tremor source region, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2023JB027901.

## 地圏環境リスク研究グループの紹介

### Introduction of the Geo-Environmental Risk Research Group

研究グループ長：原 淳子

Leader, Geo-Environmental Risk Research Group:

Junko Hara

E-mail: j.hara@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

地圏環境においては、我々人間活動に伴い、重金属類や難分解性有機化合物、マイクロプラスチックなど多岐にわたる汚染問題が発生している。一般的に、土壌・地下水汚染など地圏環境における化学物質の挙動は目に見えるものではなく、土壌への吸脱着、自然触媒機能や微生物による分解、雨水涵養による希釈など様々な現象が複合的に作用しながら変動している。そのため、汚染物質の輸送経路や環境中での蓄積性について、様々な現象を定量的に把握し、評価していくことが重要となる。さらに、土壌・地下水環境中へ放出されたこれらの化学物質が生態系やヒトへ及ぼす影響はリスク管理の観点から化学物質の動態と共に取り組むべき課題である。

また、わが国の土壌汚染の7-8割を占める重金属類に関しては、汚染源の特定や汚染発覚時において、地域ごとの自然由来重金属類のバックグラウンド情報が不可欠となっている。

このような背景から、当グループでは、

- ① 地圏環境リスクの研究
  - ② 環境調和型汚染土壌対策・浄化技術の開発
  - ③ 土壌汚染にかかわる基盤情報の整備と公開
- の3つの研究課題を柱に、各種調査・研究活動を実施している。

#### 2. 各研究項目の概要

2023年度末-2024年度にかけて、地圏環境リスク研究グループは当部門ミッション、外部研究助成金、技術コンサル等を含め、上記3つの研究課題に対して各要素研究に取り組んできた。以下では、要素研究の実施概要および成果を報告する。

##### 2.1. 地圏環境リスクの研究

###### 2.1.1. 自然環境中におけるプラスチックの劣化および粉砕化時間に関する定量的評価

海洋プラスチック問題は、1970年代頃から認識され始め、近年、世界的な問題に発展している。5 mm以下の微細なプラスチック粒子はマイクロプラスチック (MPs) と定義され、現在ではあらゆる環境中で検出され、完全に食物連鎖網に取り込まれてしまっている。このプラスチックの劣化を引き起こす要因の一つに紫外線があり、本研究では、紫外線によるプラスチックの劣化や粉砕化、すなわ

ち、MPs化に関わる時間的情報を得ることを目的とした。

主要なプラスチックであるポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE)、ポリエチレンテレフタレート (PET)、ポリ塩化ビニル (PVC) について、人工的な紫外線を照射する室内実験に供した。例えば、25日間程度の照射により、PPとPEには、外観上、明らかに劣化している様子が認められた一方、PETやPVCでは、外観上の変化は特に認められず、相対的に紫外線への耐性が高いことが考えられた。

###### 2.1.2. 海水中のマイクロプラスチックにおける環境汚染物質の吸着・脱離特性評価

マイクロプラスチック (MPs) は、生物体を含む、あらゆる環境中で検出され、近年、地球規模の環境問題に発展している。人間活動で排出されるMPsは、海洋に流出するまでの長い滞留時間において、環境汚染物質を高濃度に吸着・濃縮するという報告もある。近年、環境汚染物質のMPsに対する吸着・脱離特性に関する研究例も増えつつあるが、まだ事例に乏しいこともあり、本研究では、異なる複数材質のMPsに対する重金属類 (ヒ素や鉛など) を中心とした環境汚染物質の吸着・脱離特性を評価した。

MPsに対する重金属類の吸着特性について、ヒ素では有意な吸着が生じなかった一方で、鉛は明らかな吸着が認められた。このことは、基本的にはMPs表面が負に帯電しているという結果に基づくものであり、陽イオンとして存在しやすい鉛が相対的に多く吸着されやすいことが推察された。また、MPsに吸着された鉛について、その脱離特性を評価したところ、MPsの材質にもよるが、鉛の大部分は脱離せずMPsに保持される傾向が認められた。

###### 2.1.3. 土壌中ナノプラスチック (NPs) の測定技術開発

土壌中でのMPsの分散/凝集性は土壌間隙水のpHや土壌粒子の影響を受けて変化すると予測される。そこで、土壌試料をレーザ回折式粒子径分布測定装置で測定し、MPsおよび土粒子の見かけの粒径分布を解析し、MPs粒子同士やMPs粒子の土粒子への凝集による粒径の変化をとらえることに成功した。また、MPsと土粒子のゼータ電位の測定を行うことで、土壌中のpHの違いによるMPsの分散/凝集メカニズムはMPsや土粒子のゼータ電位の影響を受けていることを明らかにした。

### 2.1.4. 持続的な地中熱利用の長期運用を目指した地下熱・地下水環境影響評価

近年、注目されている地中熱利用において、その持続的な利用と発展が強く望まれているが、詳細なモニタリングに基づく原位置での観測例に乏しく、その運用に伴う地下環境への影響は、十分に明らかにされていない。本研究では、特に地中熱利用ヒートポンプシステムの稼働が、地下温度・地下水質に及ぼす影響を評価することを目的としている。

これまで、3年間ほど、通常の稼働条件に近い冷暖房運転を行ってきた。その結果、システムの熱源となる地中熱交換器から最も近い、水平距離で1mの地点において、継続して最大2～3℃程度の温度上昇ならびに温度低下が認められている。これらの温度変化による地下水質への影響は、特にないと考えられる。

### 2.1.4. トンネル掘削岩からの有害成分漏洩リスクの関する地質的原因の解明

海成堆積物や火成活動による金属濃集の分布が山間部の多い我が国では、トンネル工事により自然由来の有害成分を含む地層を掘削する機会に直面する機会がある。本研究では、土木事に伴う事前の環境調査コアを用いた地質学的、環境工学的な分析・解析を実施することにより、有害成分の溶出起源を特定し、要処理岩の削減に貢献した。

## 2.2. 環境調和型土壌汚染対策・浄化技術の開発

### 2.2.1. ヒ素吸着後の使用済 Mg 系及び Ca 系吸着材の土壌共存下での環境安定性評価

ヒ素 (As) の浄化に利用された吸着材は、それ自体が多量の As を含有することになるため、適切な処理を行わずに環境中に廃棄された場合、As の再溶出による二次的な環境汚染を引き起こす懸念がある。そこで本研究では、ヒ素 As(V) 及び亜ヒ素 As(III) を吸着させた使用済吸着材の土壌共存下での環境安定性を実験的に評価した。吸着材として MgO, Mg(OH)<sub>2</sub>, CaO 及び Ca(OH)<sub>2</sub> を用い、それぞれに As(V) または As(III) を吸着させた計 8 種類の使用済吸着材を準備した。溶媒として約 pH7 及び pH4 に調整したイオン交換水を用い、土壌試料として黒ボク土 (Ku), 黄褐色森林土 (YF), 鹿沼土 (Ka), 川砂 (RS) 及び山砂 (MS) を各使用済吸着材とともにそれぞれ加えた溶出試験を実施した。使用済吸着材の土壌共存下における環境安定性は、溶媒 pH の違いによる差はわずかであったが、吸着材及び土壌の種類によって大きく異なった。全体的に環境安定性は、Mg 系の方が Ca 系吸着材よりも高く、また砂質土壌 (Ka, RS 及び MS) で低くなる傾向が認められた。加えて、土壌共存下における環境安定性は、As(V) 含有使用済吸着材の方が As(III) 含有使用済吸着材よりも明らかに高くなることが示された。さらに、使用済吸着材と土壌の組み合わせによって溶出する成分の構成比が変わることも

明らかになった。

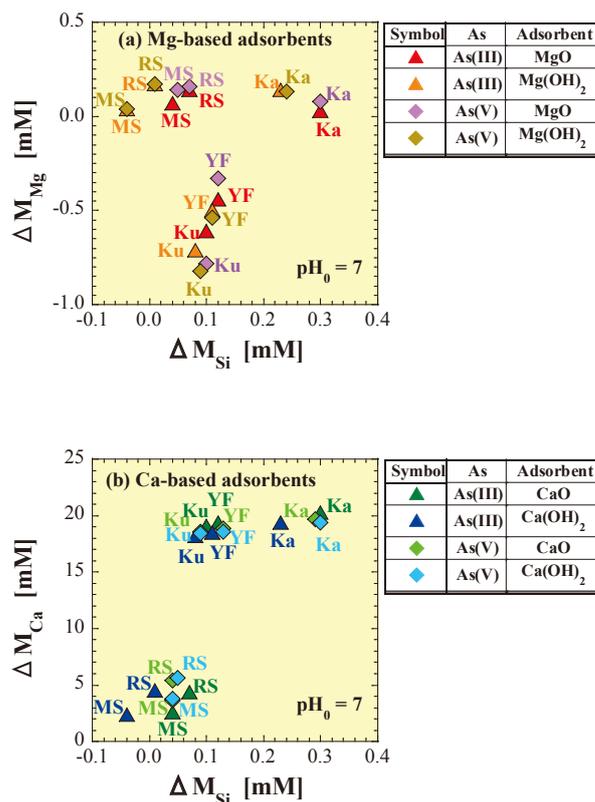


図 ΔM<sub>Si</sub> に対する (a)ΔM<sub>Mg</sub> 及び (b)ΔM<sub>Ca</sub> のプロット  
X: Ca, Mg, As, or Si  
M<sub>X</sub>: 溶出液中の X のモル濃度 [mM]  
M<sub>X(Blank)</sub>: Blank (土壌のみ) での X の値 [mM]  
M<sub>X(NS)</sub>: NS (土壌なし) での X の値 [mM]  
M<sub>X0</sub>: M<sub>X(NS)</sub> + M<sub>X(Blank)</sub> [mM]  
ΔM<sub>X</sub>: M<sub>X0</sub> - M<sub>X</sub> [mM]

### 2.2.2. 層状複水酸化物のふっ素吸着特性の評価

自然由来の重金属類に対する原位置対策として、対象物質に化学的に作用する鉱物が土木資材などに活用されている。本研究では、高い陰イオン交換性を持つ層状複水酸化物を主成分とする吸着材を対象に、吸着層工法などの通水環境での使用を想定して、ふっ素の吸着特性を評価した。層状複水酸化物/砂質土混合カラムを用いた吸着-脱着試験の結果から、ふっ素の反応モデルを推定した。吸着過程のデータからはモデルの同定が困難であったが、吸着-脱着過程のデータより、本材料のふっ素吸着はラングミュア型の特性を持つ可能性が示唆された。この結果は、対象物質の濃度が経時変化する際は、脱着過程の考慮が材料の吸着特性評価に有効であることを示している。

### 2.2.3. アルカリ系廃材の酸性坑廃水中和処理における代替性評価

酸性坑廃水 (酸性鉱山・温泉廃水) の中和には、石灰石 (炭酸カルシウムが主成分) などの天然資材が広く用いられてきたが、近年、廃棄物・再生資材などの代替資材が求められている。例えば、鉄鋼スラグは鉄鋼産業で大量に生成され、強アルカリ性を示すことから、酸性坑廃水の中和

に有効である可能性が高く、本研究では、それら廃棄物・再生資材の代替性を評価した。廃棄物処分場の残余年数問題、循環型社会の構築やSDGsの推進なども強く求められていることから、廃棄物・再生資材の有効活用は社会的な意義が高い。

ここでは、複数の酸性坑廃水に対し、鉄鋼スラグを中心としたアルカリ系廃材、また、卵殻や牡蠣殻など、そして、コントロールとしての炭酸カルシウムなどを活用し、室内中和試験を行った。その結果、炭酸カルシウムと比較しても、鉄鋼スラグの中和性能は相対的に高く、同時に、卵殻や牡蠣殻についても、その相対的に高い中和性能が示唆された。



図2 酸性坑廃水流入河川の現況写真

#### 2.2.4. 鉄鋼スラグを中心した低コスト再生資材による土壤・地質中の自然由来重金属類不溶化技術の開発

トンネルや道路など土木工事に由来する建設発生土は、自然由来の重金属類（ヒ素や鉛など）が溶出しやすい化学形態で高濃度に含まれていることがしばしばあり、近年、問題となるケースが増えている。その対策として、コストなど種々の理由から、原位置での処理が推奨されており、例えば、その技術の一つである重金属類を固定化する吸着処理を含む、不溶化処理技術が注目されている。一方、人間活動の増大に伴い、廃棄物の排出量が爆発的に増えており、その有効活用も近年、強く求められている。本研究では、自然由来の重金属類を高濃度に含む土壤・地質に対し、複数の廃棄物やそれらをベースにした低コスト再生資材を用い、不溶化処理技術を開発するための基礎的な室内試験を実施した。

自然由来の重金属類を高濃度に含むと予想される複数の土壤・地質に対して、溶出試験を適用した結果、ヒ素、鉛、カドミウムなどの溶出量が相対的に高い土壤・地質（2種類）を選定し、複数の廃棄物・再生資材を活用した不溶化試験に供した。その結果、特にコンクリート系の廃材は、ヒ素、鉛、カドミウムを同時に不溶化する効果が高い可能性が示唆された。

#### 2.2.5. 有機塩素化合物による汚染土の微生物浄化技術の開発

発がん性の有機塩素化合物による土壤・地下水汚染を微生物により浄化するための研究を行った。昨年度までの研究で浄化期間の短縮化にはメタン生成菌が重要であることを明らかとしてきた。一方で、汚染サイトを浄化する事業者からはメタン生成菌の存在により浄化が阻害されるとの声も聞かれる。この不一致を解消するため、どの種のメタン生成菌がこの浄化促進を担っているかを次世代シーケンサーによる遺伝子解析および定量PCR解析により明らかとした。また、当該メタン生成菌の単離に向けた培養を行い、全細菌・古細菌に対し50%近い占有率を占めるまでに集積することができた。今後単離に成功すれば、汚染サイトへのメタン菌添加による浄化促進技術の開発やそのメカニズム解明となる研究に繋げることができる。また、揮発性有機化合物の微生物浄化において土壤環境が与える影響評価も行った。接種源として同一の微生物コミュニティを使用しても浄化速度は土壤により大きく異なった。浄化が速い土壤の水溶性成分が浄化を担う微生物の機能遺伝子の発現を促していることが一因であることが明らかとなった。

#### 2.3. 表層土壤評価基本図の整備

表層土壤は農業や生活環境に与える影響が大きく、表層土壤における鉛やヒ素及びカドミウム等に代表される重金属類の含有量や溶出量、そして調査地域の産業構造と地域住民のライフスタイルを考慮したリスクを定量的に評価することは、土地の有効利用や産業用地の立地リスク診断、自然起源と人為起源汚染の判別、また自治体等におけるリスクコミュニケーション等に非常に有用である。当研究グループでは、わが国を対象として表層土壤中の重金属類などの分布特性や重金属類のヒトへの健康リスクを評価した表層土壤評価基本図の整備を実施している。2024年度は、地方単位に出版を開始した四国地方に引き続き、中国地方を出版し、プレス発表を行った（図3）。

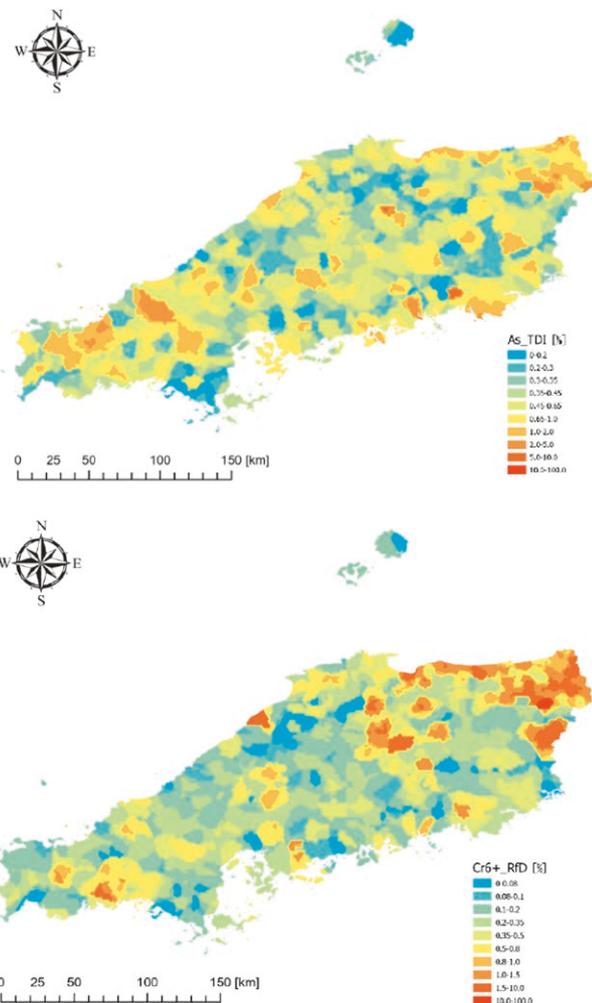


図3 中国地方におけるヒ素、クロムのヒトの健康に対するリスク評価図（原ら，2024より引用）

### 3. グループの研究体制

地圏環境リスク研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

研究スタッフ：原 淳子（グループ長）

杉田 創

井本由香利

斎藤健志

吉川美穂

土田恭平

名誉リサーチャー：駒井 武

客員研究員：川邊能成

テクニカルスタッフ：花田順子

野島彩友美

深井沙英子

山口亜矢子

### 4. 主な研究資金

産総研「運営交付金」のほか、複数の「受託研究」、「共同研究」、「技術コンサルタント」および「科研費・補助金・助成金」などで実施している。

### 5. 2024年度の主な研究成果

Kyohei Tsuchida, Yukari Imoto, Takeshi Saito, Junko Hara, Yoshishige Kawabe (2024) A novel and simple method for measuring nano/microplastic concentrations in soil using UV-Vis Spectroscopy with optimal wavelength selection. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol.280, 116366. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116366>.

Hajime Sugita, Kazuya Morimoto, Takeshi Saito, Junko Hara (2024) Effects of Soils on Environmental Stability of Spent Mg-based and Ca-based Adsorbents Containing Arsenite. *Sustainability*. Vol.16(10), 4008. <https://doi.org/10.3390/su16104008>

Hajime Sugita, Kazuya Morimoto, Takeshi Saito, Junko Hara (2024) Removal performance and adsorption behavior on Mg-based adsorbents in As(III) and F simultaneous removal as in comparison with As(V). *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. <https://doi.org/10.1144/geochem2024-022>

Junko Hara, Kazuhiro Sayama (2024) Accounting of weathering enhancement by mafic mineral spreading for CO<sub>2</sub> storage. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. <https://doi.org/10.1144/geochem2024-036>

Junko Hara, Yoshishige Kawabe, Kyohei Tsuchida (2024) Geochemical and risk assessment map of subsurface soils of the Chugoku Region. Geological Survey of Japan, AIST., 111p. [https://www.gsj.jp/Map/EN/soils\\_assessment.html](https://www.gsj.jp/Map/EN/soils_assessment.html)

# 地圏メカニクス研究グループの紹介

## Introduction of the Geo-Mechanics Research Group

研究グループ長（兼務）：坂本 靖英  
Leader, Geo-Mechanics Research Group: Yasuhide Sakamoto  
Phone 050-3521-3075, e-mail: sakamoto-yasuhide@aist.go.jp

### 1. グループの研究目的

当グループでは、マルチスケール（コアスケールからテクニックスケール）・マルチ分野（資源・環境・地震）・マルチアプローチ（実験岩石力学、地球物理学、構造地質学、数値計算）を包括・融合した地圏メカニクスに関する基礎研究と応用技術開発を推進する。具体的には、1) 地熱開発・CO<sub>2</sub> 地中貯留のための誘発地震予測・制御技術開発において、原位置条件下での岩石実験を通じた断層再活動と誘発地震発生メカニズムの解明、2) 掘削技術の発展を目的として、室内試験によるビット性能評価および掘削条件最適化のためのモデルの高度化、3) 沈み込み帯における水理学的モデルの発展による誘発地震予測モデル構築への展開や、誘発地震の事例研究を通じたジオメカニクスモデリングの最適化、さらにこれらの研究開発を通じ、4) 地下開発・利用技術の最適化と安全性評価に関わる新たな技術シーズの創出や、技術の社会実装への展開を念頭に置き、岩石の力学挙動の解析や物性評価に対する当グループの基盤技術の強化の4点を具体的なミッションとする。これらのミッションの下、高度化・多様化する社会のニーズに的確に応えるべく、地下資源の安定供給や地圏環境の継続的利用と保全或いはリスク低減のための研究を積極的に展開し、安心・安全な社会の実現に貢献することを目指す。また、国内外での研究機関や民間企業との共同研究を積極的に推進することで、当グループの研究成果や技術を社会に還元する。

### 2. グループの特徴

当研究グループのメンバーは、岩石力学、掘削工学、岩盤工学、貯留層工学、構造地質学、地震学などの専門家であり、上記のマルチスケール・マルチ分野・マルチアプローチを包括・融合して研究開発に取り組んでいる。研究対象は環境評価・災害低減・環境回復を含め多岐にわたる。研究内容も基礎研究から応用研究まで幅広く、予算は科研費、官民委託費、技術コンサルティング等にまたがっている。

#### 2.1. グループの研究体制

地圏メカニクス研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

坂本靖英（研究グループ長、兼務）  
雷 興林

及川寧己（部門付）

竹原 孝

宮崎晋行

北村真奈美

金木俊也

阿部彩歌

#### 2.2. 研究予算

- ・地圏メカニクスの研究（運営費交付金）
- ・岩盤の掘削効率評価システムの開発（運営費交付金、部門内部競争グラント）
- ・インデンテーション試験による一軸圧縮強度の簡便な測定手法の開発（運営費交付金、部門内部競争グラント）
- ・断層岩中の脱水反応の痕跡から地震時の滑り挙動を推定するための新たなモデルの構築（科研費（若手））
- ・母岩の浸透率が注水誘発地震の規模に及ぼす影響（科研費（基盤 B））
- ・生分解性キレート剤を利用した玄武岩層への CO<sub>2</sub> 地中貯留・鉱物固定促進法（科研費（基盤 B））
- ・誘発地震に対する技術的対処方法の整理とりまとめに関する技術コンサルティング（技術コンサル）

#### 2.3. ジオメカニクス包括技術

地圏メカニクス研究グループでは、大型岩石注水破壊試験装置（図 1）、岩石透水・透気試験装置（図 2）、大型室内掘削試験装置（図 3）、掘削カッティングス試験装置（図 4）等に加え、データ解析と数値シミュレーションを統合したジオメカニクス包括技術を有する。

特徴：

- ・マルチ分野（地熱開発、CCUS、廃水処分、非在来型資源開発）の課題を融合
- ・マルチスケール（室内、フィールド）の包括
- ・マルチアプローチ（岩石試験、フィールド実証・検証、数値シミュレーション）の統合
- ・マルチ専門（岩盤工学・構造地質学・地球物理学）研究者チーム
- ・基礎研究と技術開発を展開し、企業との連携を強化

将来への技術展開：

- ・室内実験結果に基づき、亀裂や断層の力学・水理特性に関する各種構成則をアップデート
- ・化学要素の考慮

- ・更新した構成則と化学要素をジオメカシミュレーションに反映
- ・CCUS・地熱開発・シェールガス開発等の性能及びリスク(誘発地震等)評価技術の精緻化と社会実装を進めるベンチマーク:
- ・多様な岩石試料を用いて、押し込み試験・破壊試験・注水試験に伴い、物性・力学・水理特性及び微小地震(AE)等を高精度に同時測定可能
- ・熱・岩力・水理連成解析や大規模亀裂モデルを用いたジオメカシミュレーションが可能

### 3. 2024年度研究成果

#### (1) 地熱開発などの注水に伴う誘発地震の発生メカニズムの解明に資する実験的研究

地圏の利用・開発, 特に地熱開発における注水に伴う誘発地震発生メカニズムの解明を目指し, 注水時の有効圧や最大主応力に対する断層の角度が断層すべり特性に与える影響について調べている。その結果, 注水速度に関係なく有効圧によって断層すべり様式が異なることや, 断層の角度が大きいほど注水開始から応力降下までにかかる時間が短いことがわかった。これまで得られた結果の一部は, 国内学会で公表した。

#### (2) 岩石の破壊強度やクリープ変形挙動に及ぼす各種パラメータの影響評価

岩石の長期的な力学挙動を予測・評価するためには, 岩石の強度の荷速度依存性やクリープに代表される時間依存性挙動についての検討・理解が必要である。そこで, 堆積岩である珪藻土を用いた三軸圧縮応力下における定ひずみ速度試験とクリープ試験結果に及ぼす温度環境や含水比の影響を精査し, 強度の荷速度依存性やクリープ特性に



図2 岩石透水・透気試験装置



図3 大型室内掘削試験装置

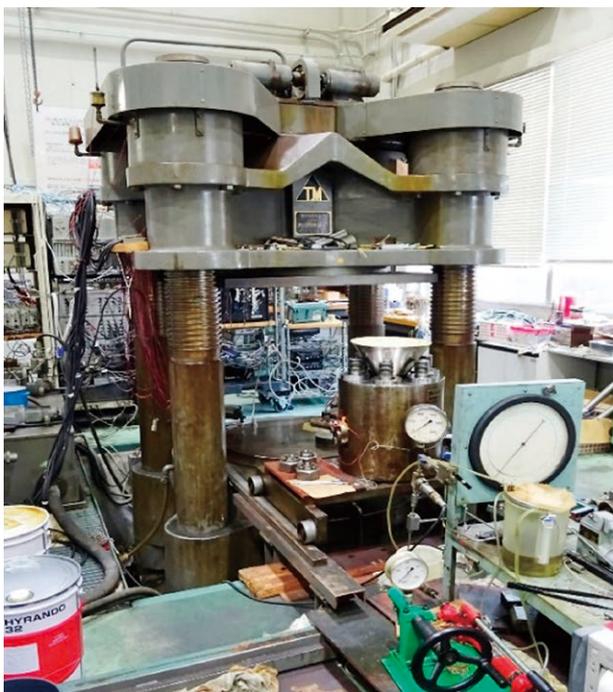


図1 大型岩石注水破壊試験装置

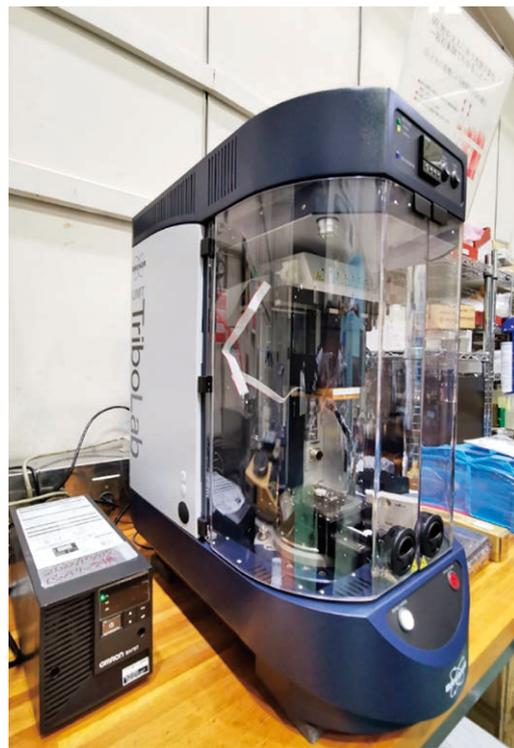


図4 掘削カッティングス試料試験装置

ついて検討した。さらに、試験結果に岩石の時間依存性を考慮した構成方程式を適用し、試験結果の傾向をおおむね再現できることがわかった。得られた結果は和文誌に公表した。

これまで CO<sub>2</sub> の圧入により岩盤を構成する岩石の力学の性質がどのように変化するかを明らかにするために、国内産の海成泥岩を対象にした三軸載荷試験・三軸クリープ試験を実施してきた。得られたデータを用いて CO<sub>2</sub> の圧入量に応じた力学特性変化の定式化に取り組み、岩石を多孔質弾性体と見なした場合の力学パラメータ変化に関して検討した結果、圧入量が比較的少ない段階から見かけの弾性係数が 1/4 に低下するという影響が認められた。孔隙率や孔隙相互の連結性によってこの関係が変化すると考えられるため、今後そのメカニズムに関して検討を進める予定である。

### (3) 岩石掘削条件の最適化に向けた研究開発

地圏の開発事業における掘削コストを低減させるため、岩盤の掘削を効率化し工期を短縮することは重要な課題である。掘削パラメータ・ビットパラメータ・岩盤パラメータの諸要因が、掘進速度に及ぼす影響について実験的に調べ、過去に提案した掘進速度を予測するモデルを高度化した。改良した掘進速度モデルを用いて、掘削効率評価システムの基礎を構築している。本システムにより、より良いビットの選定やビット交換の判断を可能とし、掘削工期の短縮に繋げることを目指している。

### (4) 炭質物に着目した地質温度計の開発

基本的な地質情報の一つである、岩石の最高被熱温度をより簡便に推定するため、炭質物ラマンスペクトルの自動解析コードを作成した。これにより、従来手法と比べて少ない労力で数百倍の速度の解析を行うことが可能となり、炭質物ラマン温度計の普及およびそれらを用いた研究の促進につながることを期待される。得られた成果については、国内学会での口頭発表および国際誌での公表を行った。

### (5) 深部流体関与自然地震及び注水誘発地震に関する実例研究

まず、室内岩石注水破壊試験を用いて、花崗岩試料内断層の核生成および破壊過程を、微小破壊音 (AE) のモニタリングを通じて調査した。応力による破壊では異なる拘束圧下で、流体による破壊では異なる注水条件下で、それぞれ AE 震源の時空間分布、P 波速度、応力 - ひずみ、およびその他の実験観測データを詳細に分析した結果、流体には次のような効果があることが判明した：1) 断層核生成過程の複雑化、2) 断層の分岐と複数断層の形成に対応する断続的な AE 活動、3) 核生成過程やプリスリップの時空間スケールの拡大、4) 動的破壊速度と応力降下の低下、5)

動的破壊後に流体拡散係数は破壊前の初期値である 0.1 m<sup>2</sup>/s から徐々に 10 ~ 100 m<sup>2</sup>/s へ増加。これらの結果は、動的破壊前に水圧破砕がせん断すべりを促進することを示す合理的な断層プリスリップモデルを提供へとつながり、シェールガスや地熱の開発に関連する水圧破砕作業の安全性と効果の確保や、水注入による地震リスクの評価、深部での流体駆動や流体を伴う自然地震の前兆準備過程のさらなる研究に対して、実験室規模の知見が得られた。

また、深部流体関与自然地震及び注水誘発地震に関する実例研究では、海内外の研究者と共同で、能登半島地震・地熱流体活動が活発な地域での群発地震・シェールガス開発サイトの注水誘発地震の実例研究を実施した。その結果、2024年1月1日に発生した能登半島 M7.6 地震について、その震源域において 2020年11月以来続いていた群発地震との複雑な関係が明らかになった。本研究は、ジョージア工科大学の彭志剛教授他数名を含む国際的な専門家チームによって実施され、能登半島での M7.6 地震前に起こった群発地震活動、主震の数秒から数分前に発生した 3 つの顕著な前震活動、主震の破壊過程、そして初期の余震活動の詳細解析を通じ、主震前に短時間で集中して発生した前震活動では、長期間続いた群発地震活動から主震前の突然の前震活動への複雑な進化が示唆された。

## 4. 成果公表

- 1) Liu, M., Y. J. Tan, X. Lei, H. Li, Y. Zhang, and W. Wang. Intersection between tectonic faults and magmatic systems promotes swarms with large-magnitude earthquakes around the Tengchong volcanic field, southeastern Tibetan Plateau. *Geology*, 52-4, 302-307, 2024/02. <https://doi.org/10.1130/G51796.1>
- 2) 近藤萌波, 坂本靖英, 原 淳子, 駒井 武, 渡邊則昭, Clarification of Generation Mechanism of Volatilization Flux based on Detailed Analysis of Transport Phenomena near the Ground Surface and Quantitative Evaluation of Influencing Factors. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS*, 465, 2024/03. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133356>
- 3) 志賀正茂, 森下徹也, 西山直毅, 徂徠正夫, 愛知正温, 阿部彩歌, Atomic-scale insights into phase behavior of carbon dioxide and water from 313 to 573 K and 8 to 30 MPa. *ACS Omega*, 9-19, 20976-20987, 2024/05.10.1021/acsomega.4c00133 <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00133>
- 4) Wang, Z., X. Lei, S. Ma, H. Fu, X. Hu, K. Wang, Y. Mukuhira, and C. He, Dynamic triggering of earthquakes and the role of overpressure fluids in active geothermal areas in Yunnan, China.

- Tectonophysics*, 882, 2024/05.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230361>
- 5) 金木俊也, 瀨瀬佑衣, 青矢睦月, 中村佳博, ウオリスサイモン, 志村侑亮, 山岡 健, An automatic peak deconvolution code for Raman spectra of carbonaceous material and a revised geothermometer for intermediate- to moderately high-grade metamorphism. *Progress in Earth and Planetary Science*, 11:35, 2024/06.  
<https://doi.org/10.1186/s40645-024-00637-8>
- 6) 北村真奈美, 高橋美紀, 重松紀生, Slow failure during faulting and formation of a porous framework under hydrothermal conditions: Role of feldspar sintering in granitoids. *GEO THERMICS*, 120 (2024) 102995, 2024/06.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102995>
- 7) 宮崎晋行, 竹原 孝, 矢野雅大, 宮本哲臣, 都築雅年, 地熱井掘削用PDCビットの研究開発. *Journal of MMIJ*, 140, 76-85, 2024/06.  
<https://doi.org/10.2473/journalofmmij.140.76>
- 8) 竹原 孝, 宮崎晋行, 坂本靖英, 三軸圧縮応力下における珪藻土の時間依存性挙動とそのモデル化. *Journal of MMIJ*, 140, 94-100, 2024/06.  
<https://doi.org/10.2473/journalofmmij.140.94>
- 9) Lei, X., Fluid-driven fault nucleation, rupture processes, and permeability evolution in Oshima granite - Preliminary results and acoustic emission datasets. *Geohazard Mechanics*, 2-3, 164-180, 2024/09.  
<https://doi.org/10.1016/j.ghm.2024.04.003>
- 10) Peng, Z., X. Lei, Q.-Y. Wang, D. Wang, P. Mach, D. Yao, A. Kato, K. Obara, and M. Campillo, The Evolution Process between the Earthquake Swarm Beneath the Noto Peninsula, Central Japan and the 2024 M 7.6 Noto Hanto Earthquake Sequence. *Earthquake Research Advances*, 2024/09.  
<https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2024.100332>



## ■ 研究紹介及びポスター概要

## 協創型の資源開発に向けた地域便益評価システムの検討（地熱）

部門付 相馬 宜和  
[連絡先] n.soma@aist.go.jp

### 成果概要

昨年度まで、「地熱開発の円滑化に資する地域経済波及効果の分析手法に関する調査（NEDO 調査事業）」を行い、地域経済波及効果のような便益情報を各地域の開発可否の評価・判断に適切に利用できる方法を検討した。筆者は、電力完全自由化後に情報が減っている地熱開発のコストの最新状況を調査してアップデートした。

### 研究内容

地熱開発に要するコスト情報は、調達価格等算定委員会の初期に利用された2012年頃以前の情報が大半であり、10年以上経過した後の物価上昇や最近の技術選択を反映することが出来ていなかった。また、地域便益の議論も当時の大枠的なものがほとんどで、場所を想定し地域の地熱資源や社会特性を反映した評価を行うことは出来ていなかった。筆者は、地熱に関わる各種事業者等の協力を得てコスト情報を最近の物価情勢に適合するよう修正する作業を行うとともに、電力中央研究所と協力して、より詳細かつオンデマンド的に地熱利用システムの仕様を反映して評価できる経済波及効果分析のためのシステムを検討した。

### 研究成果はどう使われるか

本成果に基づき当該評価システムの作成・公開ができれば、より現実感のある地域便益評価を幅広いユーザー層が行えるので、より適切な地熱調査の着手および地熱エネルギー利用が進むと期待される。

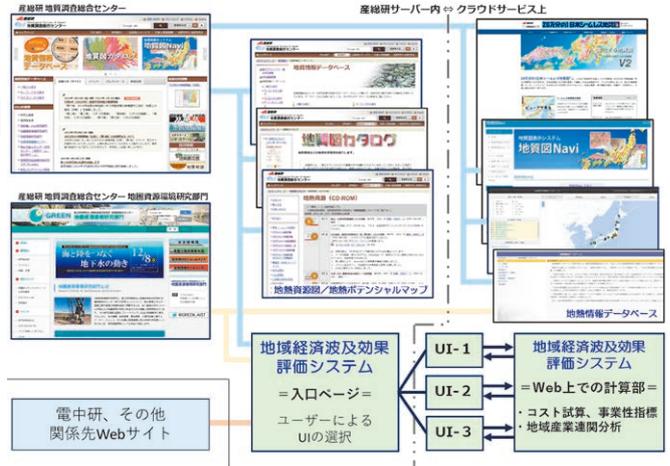


図 様々な地質情報と連携した地域経済波及効果評価システムのイメージ

## ポスター発表

### 粘土系吸着剤（ハスクレイ）を用いた施設園芸栽培における除湿効果

部門付 鈴木 正哉, 宮原 英隆  
地圏微生物研究グループ 万福 和子  
[連絡先] masaya-suzuki@aist.go.jp

### 成果概要

冬季のビニールハウスでの結露を防止するにあたり、粘土系吸着剤ハスクレイ 50～150kg 程度を除湿剤用として、900m<sup>2</sup> 程度のハウスに用いた。その結果、昼夜問わずハウス内の相対湿度を 95% RH 以下に抑えることができた。生成時にはヒーターを用いなくても、昼間のハウス内の 40～70% RH 程度の中湿度の空気を用いることで、再生が十分に行えることが明らかとなった。

### 研究内容

除湿工程では、夜間のハウス内の高湿度な空気を送風用ファンにて取り込み、除湿塔内に高湿度の空気が通過することによりハスクレイに水蒸気が吸着され、乾燥した空気がハウス内に放出される。再生工程では、除湿塔内に昼間のハウス内の暖かく相対湿度の低い空気が通過することによりハスクレイを乾燥させるが、今回はヒーターを用いた再生効果を示すため、ヒーターを用いなかった場合も併せて検討を行った。除湿は、夜中の 2 時～7 時の 5 時間行い、再生は昼間の 9 時～16 時の 7 時間行った。その結果、昼夜問わずハウス内の相対湿度を 95% RH 以下に抑えることが示された。生成時にはヒーターを用いなくても、昼間のハウス内の 40～70% RH 程度の中湿度の空気を用いることで、再生が十分に行えることが明らかとなった。

### 研究成果はどう使われるか

冬季のビニールハウスでの施設園芸栽培において、夜間の気温低下により生じるハウス内の結露を止め、カビによって発生する灰色カビ病やべト病などを発生しないようにする結露対策用除湿器として用いられる。



図 施設園芸用除湿装置

## 玄武岩の CO<sub>2</sub>貯留および風化促進への適用性評価

部門付 徂徠 正夫  
[連絡先] m.sorai@aist.go.jp

### 成果概要

アイスランド CarbFix プロジェクトや米国 Wallura プロジェクトにおける CO<sub>2</sub> の早期鉱物化の成功を起点として、近年、玄武岩を活用した CO<sub>2</sub> の鉱物化への関心が高まっている。本研究では、玄武岩の地質学的性状を明らかにするとともに、採取した試料の分析結果に基づいて、日本の玄武岩の CO<sub>2</sub> 貯留および風化促進への適用性について評価を進めている。

### 研究内容

日本の陸上の玄武岩は主として山間部に偏在しており、CO<sub>2</sub> 貯留に適した貯留層は必ずしも多くない。一方で海洋底は玄武岩で構成されているため、その性状を知ることができれば、貯留ポテンシャルも飛躍的に増大し得る。そこで、過去に海底で形成されその後地表に露出した火山体や、比較的新しい陸上の玄武岩火山を対象として、露頭での地質調査と岩石採取を実施している。この際には、日本の玄武岩産地の中から、活動時期、化学組成および産状の異なる玄武岩質噴出物が採取可能な地域を抽出した。これまでに完了したのは右図の 9 地域である。採取した岩石について、水銀圧入法による空隙率測定、全岩化学組成分析、薄片観察による鉱物組成分析、粉末 X 線回折による鉱物種同定、活動時期を明らかにするための <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年代測定等を進めている。

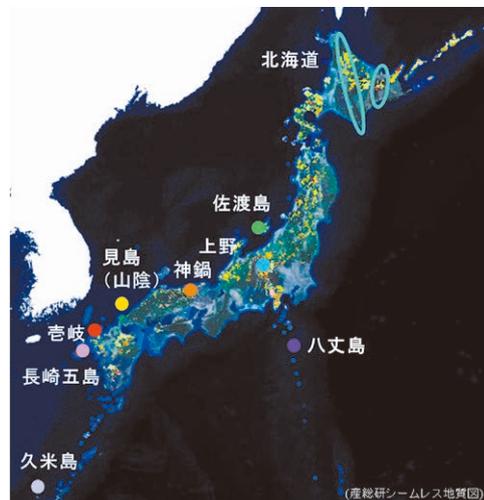


図 玄武岩適用性評価の実施地域

### 研究成果はどう使われるか

本研究では、最終的に国内広域にわたる玄武岩の適用性評価結果が得られる計画である。これらは、CO<sub>2</sub> 地中貯留や風化促進に関わる事業者が、将来的に最適な貯留層や岩石を選定する際の一つの指標になり得るものと期待される。

## 地中熱システムの社会実装を目指して

### －タジキスタン共和国における地中熱ポテンシャル評価（SATREPS 事業）－

部門付 内田 洋平  
[連絡先] uchida-y@aist.go.jp

### 成果概要

タジキスタンでは冬期は寒冷かつ夏期は高温となり、しかも化石燃料に恵まれないため、持続可能な産業振興および国民の生活の質向上には、低コストの冷暖房システム普及が不可欠である。本研究では、タジキスタンにおける地形・水文地質データを収集・データベース化を行い、構築したデータベースを用いて地中熱システムのポテンシャル評価を実施中である。

### 研究内容

タジキスタン共和国（以下、タジキスタン）は、中央アジアに位置する内陸国である。タジキスタンでは冬期は寒冷かつ夏期は高温となり、しかも化石燃料に恵まれないため、持続可能な産業振興および国民の生活の質向上には、低コストの冷暖房システム普及が不可欠である。そこで本 SATREPS 事業では、その豊富な地下水資源を基盤として、先進乾燥地帯対応型地中熱ヒートポンプシステム（タジキスタンモデル）の構築と普及を通じて、エネルギー事情改善および温暖化対策への貢献を目指す。その一環として、タジキスタンの首都であるドゥシャンベへの地中熱システムの普及を目指し、同地における地質・水文地質情報の収集・コンパイル、現地における地下水調査、および 3 次元地下水流動・熱輸送モデルを用いた地中熱ポテンシャル評価を実施中である。

### 研究成果はどう使われるか

本研究で構築した水文地質データベース、および地中熱ポテンシャルマップを参照することにより、地中熱システム導入時における適切なシステム選定や施工方法が明確となり、同国における地中熱システムの社会実装を促進させる。

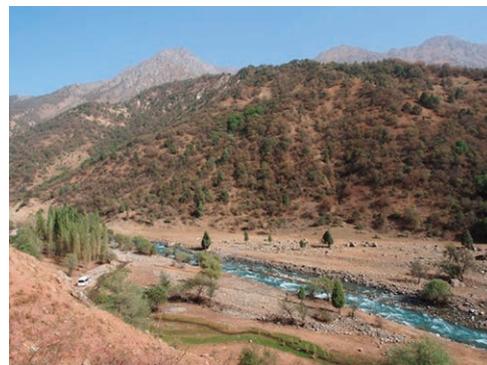


写真 1 タジキスタン・ドゥシャンベ郊外の様子。山肌は乾燥しているが、豊富な雪解け水により河川の水量は豊富（2022 年 9 月撮影 4a）。

## 土壌・地下水汚染の長期挙動予測のための数値解析技術の高度化

部門付 坂本 靖英

[連絡先] sakamoto-yasuhide@aist.go.jp

### 成果概要

我が国において顕在化する土壌・地下水汚染を対象として、土壌・地下水環境中における汚染物質の移動現象論に基づき、汚染物質の暴露によるヒトへの健康リスクの評価を可能とする地圏環境リスク評価システム (Geo-Environment Risk Assessment System, GERAS) を開発し、事業所等における汚染の自主管理を目指して、社会への地圏環境リスク評価技術の普及を推進している。

### 研究内容

不飽和条件における反応を伴う物質移動モデルの高精度化として、ベンゼン、水銀等の揮発性物質の地表面での揮発フラックスの時間変化の予測に基づくリスク評価を可能とする数値解析モデルを構築し、地表面での移流・分散に起因した揮発フラックスの発生メカニズムを解明するとともに、その発生量と土壌種や含水率等との相関を明らかにした。また、不法投棄現場における1,4-ジオキサンによる土壌・地下水汚染へのリスク評価への適用では、地下水中の汚染濃度変化のヒストリーマッチングを通じて現在の汚染状況を数値解析上再現するとともに、浄化対策によるリスクの低減効果を定量的に評価した。

T. Pongritsakda et al. (2023), Sustainability, 15-03930

M. Kondo et al. (2024), J HAZARD MATER, 465

### 研究成果はどう使われるか

汚染現場に即したリスク管理ツールとして、汚染の長期挙動予測や、予測結果に基づく事業所等における自主的なリスク管理や土壌汚染対策の実施によるリスク低減効果の把握等への活用が期待される。

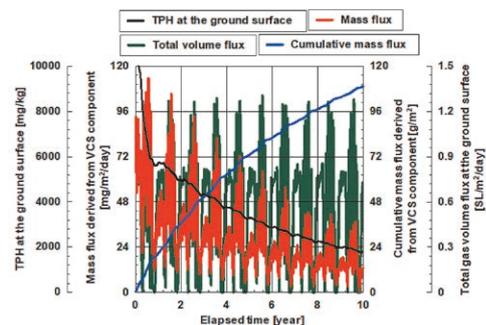


図1 ベンゼンの揮発フラックス発生挙動

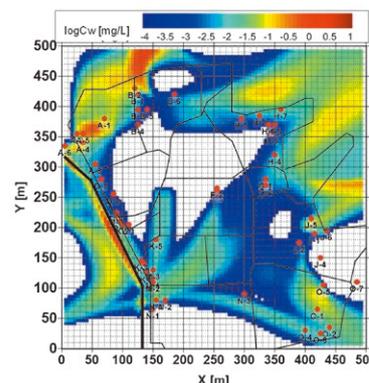


図2 再現された1,4-ジオキサンによる帯水層の汚染状況

## ガスハイドレートの安定性に関する熱力学的研究

部門付 前川 竜男

[連絡先] tatsu-maekawa@aist.go.jp

### 成果概要

次世代の天然ガス資源として期待されるメタンハイドレート等のガスハイドレート (ガス水和物) について、さまざまな気相・液相の組成におけるそれらの安定性を実験的に決定している。また、得られた実験結果を用いて、高精度なガスハイドレートの統計熱力学モデルを構築することを目指している。

### 研究内容

近年、日本近海等の深海底で大量に存在すると推定され、次世代の天然ガス資源として注目されているメタンハイドレート等のガスハイドレート (ガス水和物) は、水分子の形成する籠状の結晶格子にメタン等 (二酸化炭素や窒素等) の比較的小さなガス分子が取り込まれた結晶構造をもつ包接化合物である。これらのガスハイドレートの安定性は、共存する水の液組成 (塩類・アルコール類等の添加) によって変化するため、当部門ではさまざまなガス組成・液組成におけるガスハイドレートの安定性を実験的に決定してきた。これらの実験結果を用いてガスハイドレートの統計熱力学モデルの高精度化を行い、安定性予測精度の向上を目指している。

### 研究成果はどう使われるか

水への化学成分の添加等によって安定性が変化することを利用した、メタンハイドレートの分解促進や天然ガスの貯蔵・運搬、二酸化炭素の分離等の工学的利用に資する基礎データを提供する。

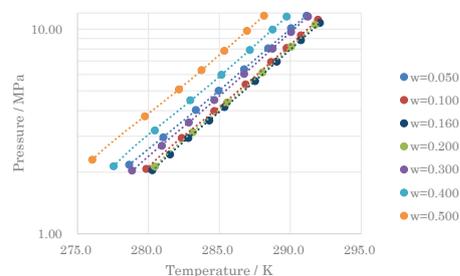


図 アセトン水溶液と共存するメタンハイドレートの安定条件

## 浅層～深層地下環境における熱環境評価に資する技術開発

地下水研究グループ 吉岡 真弓  
[連絡先] yoshioka-mayumi@aist.go.jp

### 成果概要

地下浅層～深層における地下水流動と熱環境評価のため、ボーリングコアの熱物性測定や野外モニタリング、地下水流動熱輸送解析等を実施している。それらの成果は、浅層の未固結層における熱環境評価の精度向上や沿岸域での深部塩水流動評価に貢献するものである。

### 研究内容

浅層～深層（ここでは地表面から深度数 100m 程度を想定）の地下熱環境は、熱資源として地中熱や地下水熱に利用することが可能である。また、地下の温度測定は比較的簡便かつ精度よく測定することができるため、環境評価指標として沿岸部地下の複雑な地下水環境評価や都市の熱環境評価などに利用できる可能性がある。前者に関しては、これまでに地中熱のポテンシャル評価に向けた未固結層や岩盤の熱物性測定を実施している（図 1）。後者については、沿岸域の深部塩水の流動評価において、塩分濃度および温度による密度差を考慮した地下水流動解析を実施している（図 2）。

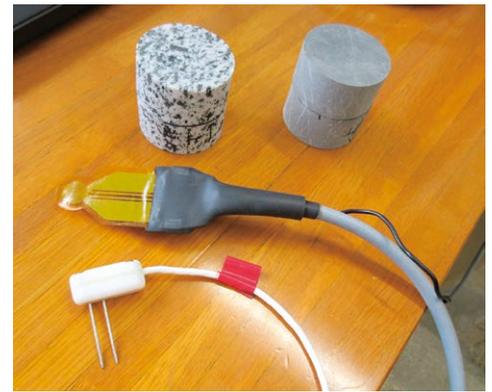


図 1 岩石試料の熱物性測定

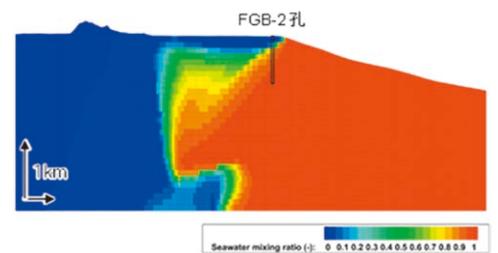


図 2 沿岸域での海水混合率分布の計算結果。赤色が塩水、青色が淡水を示す。（2023年日本地下水学会春季講演会にて発表）

### 研究成果はどう使われるか

これらの研究の成果は、地中熱利用のポテンシャル評価や設計時の採熱量評価などに役立つと共に、沿岸域での深部地下利用（高レベル放射性廃棄物等の地層処分や CCS など）に関する技術開発にも貢献するものと考えられる。

## 地下水の経済的価値の算出方法の検討

地下水研究グループ 井川 怜欧  
[連絡先] reo-ikawa@aist.go.jp

### 成果概要

地下水を利用用途に応じて、その機能・役割を分類し、3つの評価手法を適用することにより、地下水の用途別の経済的価値を算出することができた。さらに、コンジョイント分析によって、地下水を利用する住民の支払意思額を計測することもできた。これまで抽象的であった地下水の恩恵を全国的に適用可能な手法で可視化することができた。

### 研究内容

地下水の持つ多面的機能が着目される中、地下水が私的財の側面が強い日本において、公共財としての地下水管理の在り方が課題となっている。そこで、ステークホルダーが地下水から受けている恩恵を可視化するために地下水の経済的価値について測定した。本研究では、(1)地下水の機能・役割を整理した上で、(2)非市場材として経済的価値の算出方法の検討を行い、(3)地下水管理のトップランナーである秦野市と熊本地域においてケーススタディを実施した。代替法を用いて用途別に価値を算出した結果、表 1 に示すとおり、秦野市では、住宅用、化学製品、露地栽培が大きな恩恵を受けていることがわかり、熊本地域では、涵養域では 1 次産業と 2 次産業が大きな恩恵を受ける一方で、流出域では都市施設用の用途が多くの恩恵を受けていることがわかった。

### 研究成果はどう使われるか

本研究の成果は、グリーンインフラとしての地下水の価値や、ネイチャーポジティブを取り込んだ地下水の保全を含む利活用に対する議論のための一つの材料となることが期待される。

表 1 代替法による用途別の経済的価値の算出結果

用途	No	経済的価値 (百万円/年)		
		秦野市	熊本地域 流出域	熊本地域 涵養域
生活用 住宅用	1	931	5,871	2,313
業務用 事務所用	2	25	314	136
	3	35	512	135
	4	8	131	53
	5	9	77	20
	6	25	161	81
	7	2	10	4
	8	16	70	74
工業用 飲料・食品	9	81	988	565
	10	490	1,219	1,463
	11	64	148	740
	12	0	1,314	985
	13	0	17	17
	14	11	123	429
	15	11	6	12
農林用 露地栽培	16	183	7,310	12,178
	17	0	580	362
養殖場用	18	0	1,711	489
消費用	19	0	0	0
合計		1,891	20,561	20,055

## 水文環境図「大井川下流域」の出版

地下水研究グループ 小野 昌彦  
[連絡先] masa.ono@aist.go.jp

### 成果概要

産総研地質調査総合センターでは、令和 6 年度に水文環境図「大井川下流域」を出版予定である。本地域の地下水は、大井川の河川水によって涵養されており、透水性の高い砂礫から成る河床が、地域の地下水涵養に大きな役割を果たしている。また地下水は、内陸では不圧帯水層を流れるが、沿岸域では浅層の不圧帯水層と深層の被圧帯水層に分かれ、駿河湾に向かって流れている。

### 研究内容

水文環境図は、水資源の利用や保全に係る様々な情報を、1 枚の地図上で表示できる地球科学図であり、人口が多い地域や地下水利用が盛んな地域を中心に、国内各地で整備を進めている。今回、No.15 として「大井川下流域」を令和 6 年度に出版する予定である。大井川は、南アルプスに源を發する 1 級河川であり、下流域には大井川によって形成された扇状地が広がる。本地域には焼津市や島田市、藤枝市などの市街地があり、日量 26 ~ 39 万 m<sup>3</sup> 程度の地下水が利用されている。このような地域において、地下水の流動方向や不圧・被圧帯水層の分布、地下水温や水質の現況など、地下水に関する様々な情報を水文環境図としてとりまとめた。現在、産総研のウェブサイト\* での公開準備を進めている (\* <https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/main.html>)。

### 研究成果はどう使われるか

目に見えない地下水の情報を 1 枚の図面上で閲覧できるツールとして活用するとともに、過去の観測結果を参照できる地下水データベースとして利用することで、持続的な水利用の実現に必要な地域の水資源への理解を助ける。

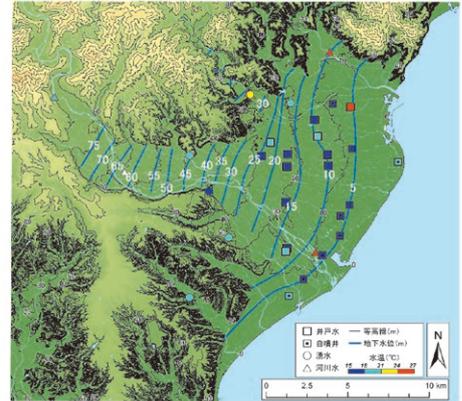


図 地下水水面図と水温の分布 (2021 年夏季の不圧帯水層の地下水位 (国際航業, 2022) に、現地調査で測定した水温を重ねて表示した。) 国際航業株式会社 (2022) : 令和 3 年度中部地域地下水流動量解析調査業務委託報告書。

## 国内の休廃止鉱山における坑廃水管理に向けた水文・水質データの収集と解析

地下水研究グループ 松本 親樹  
[連絡先] shin.matsumoto@aist.go.jp

### 成果概要

国内の休廃止鉱山における坑廃水の処理や対策に有用な水文・水質データを集めるため、鉱山跡地における調査を実施した。採掘跡である地下坑道や堆積場に流入する地表水や地下水等の経路を水文学的視点から明らかにした。

### 研究内容

鉱山の採掘活動が休止又は廃止された鉱山を「休廃止鉱山」と呼び、(坑道や堆積場を含む) 鉱山跡地より重金属を含んだ坑廃水が生じることがある。坑廃水は鉱山開発に伴い発生する水汚染問題であり、硫化鉱物の酸化により発生し、処理には膨大な費用と時間を要する。坑廃水や鉱山周辺の地表水や地下水の水質や流動経路等の水文・水質データは、坑廃水の水量や水質、それらの季節変動や発生機構を理解するために必要な情報であり、坑廃水処理や対策を実施するための基礎情報となる。本研究では、国内の休廃止鉱山における採水調査や継続的な水位・水質モニタリング等を実施することで、それらの基礎データを収集し、水試料の酸素・水素安定同位体比や年代トレーサーを利用して鉱山の地下坑道や堆積場への流入水や坑廃水の流動経路を明らかにした。

### 研究成果はどう使われるか

本研究で得られた坑廃水や鉱山周辺の地表水や地下水の水文・水質データは、坑廃水の中和処理や湿地処理、発生源対策等を実施するための基礎情報として利用される。

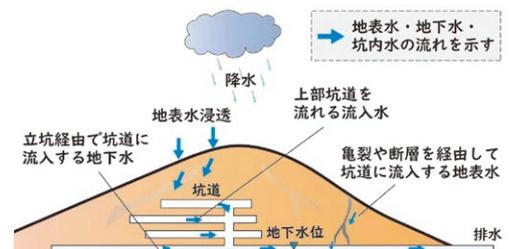


図 1 鉱山跡地の地下坑道における坑廃水や流入水の流動経路のイメージ図

## 崩壊堆積物は酸化還元反応のホットスポットになりうるか？

地下水研究グループ 吉原 直志  
[連絡先] n.yoshihara@aist.go.jp

### 成果概要

本研究では、2018年北海道胆振東部地震災害地を対象として、表層崩壊によって形成された崩壊堆積物の内部で様々な酸化還元反応が活発化する可能性を見出した。さらに、そのようなプロセスが、表層崩壊をトリガーとする河川水質変化を引き起こす一要素であることが調査結果から示唆された。

### 研究内容

酸化還元反応は陸水の水質を規定する生物地球化学的プロセスの一つである。現状、表層崩壊をトリガーとして河川水質が変化する可能性が指摘されているものの、その具体的な水質変化のメカニズムは十分に明らかにされていない。本研究では、崩壊規模の異なる山地流域群（2018年北海道胆振東部地震災害地）で河川水・湧水の水質および微生物群集を解析し、さらにその結果をt-SNEやNMDSによる次元削減に供することで、対象地域の河川水質特性に対する酸化還元反応のインパクトを議論した。得られた結果から、崩壊堆積物の内部で進行する酸化還元反応が、表層崩壊をトリガーとする山地流域スケールの河川水質変化に寄与している可能性が示唆された。

### 研究成果はどう使われるか

本研究の成果は、斜面崩壊と生物地球化学的循環の関連性を示唆するものである。今後も調査を続けることで、山地やその周辺地域における水資源管理の高度化に資する知見を獲得できると期待される。



図 調査地域で見られる崩壊地および崩壊堆積物の例

## 陸域負荷による沿岸域への影響評価法の確立を目指して

地下水研究グループ 飯島真理子  
[連絡先] m.iijima@aist.go.jp

### 成果概要

陸域負荷が沿岸域に及ぼす影響評価のための新たな指標作りに取り組んだ。石灰質の底質に蓄積したリン酸塩を蓄積リンと定義し、サンゴの白化や被度低下と有意な相関があることを見出した。また、リン酸塩の骨格形成阻害は濃度だけでなく、負荷量（濃度×飼育海水量）が影響することが分かった。またメタゲノム解析を行い、陸域から沿岸域の連結性を明らかにすることも試みた。

### 研究内容

表層海水の水質分析では陸域からの影響評価が困難であり、科学的根拠に基づく対策が進んでいなかった。蓄積リンを陸域影響評価の新指標として提唱し、環境省のサンゴ群集モニタリング事業の3年間の共同調査により、蓄積リンの値とサンゴの白化および密度低下との間に有意な相関関係が確認され、蓄積リンの統計的閾値を算出した。また、稚サンゴを同じリン酸濃度で異なる飼育海水量で飼育したところ、低濃度でも飼育海水量を増やし、負荷量が増加することで有意な骨格阻害が見られた。これまでの研究では、濃度を議論することが多かったが、海水環境中ではリン酸は低濃度であり、室内実験との比較が難しかった。環境中では陸域から流入する負荷量を検証する必要があることが明らかになった。また陸水のメタゲノム解析を行い、細菌群集類似度で陸水流入の程度が定性的に明らかとなった。

### 研究成果はどう使われるか

新たな環境負荷指標として蓄積型リンや細菌組成が用いられること、およびどの程度のリン酸塩負荷量により沿岸生態系が影響を受けるのかを把握することで、陸域負荷対策の一助となることが期待される。

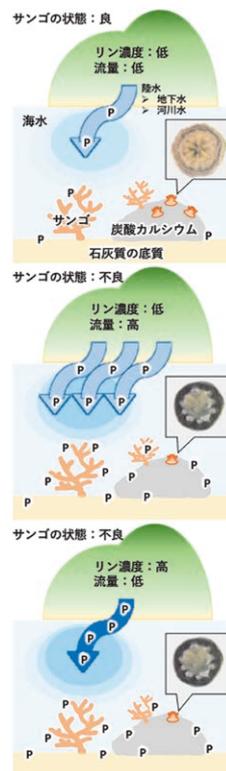


図 陸域負荷量の変化がサンゴに及ぼす影響の模式図

磁気共鳴検層による水みちの検出のこころみ

地下水研究グループ 中島 善人, 井川 怜歌  
 [連絡先] nakashima.yoshito@aist.go.jp

成果概要

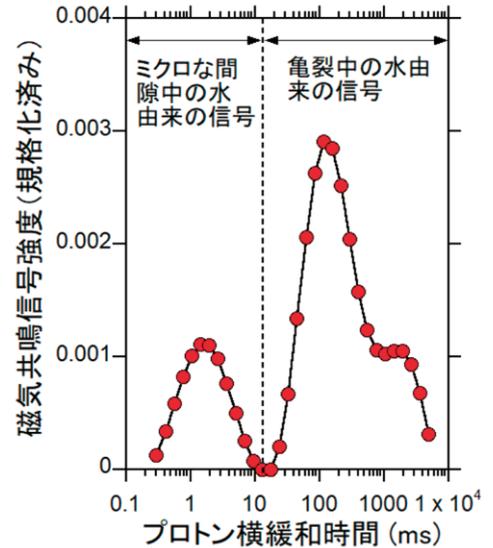
開口した亀裂はしばしば広域地下水流動を支配する水みち(透水性の高いゾーン)を形成するが、透水係数を定量評価するのに必要な亀裂開口量を地下深部の原位置で計測するのはこれまで困難であった。我々は、磁気共鳴検層を国内のボーリング孔で実施した結果、溶岩層中の亀裂の開口幅を定量できた。

研究内容

磁気共鳴検層は、地層中の間隙水の水素原子核(プロトン)を計測対象としており、ラジオ波で励起されたプロトンの横緩和波形が生データになる。特筆すべきは、横緩和信号の減衰の時定数(横緩和時間)を間隙サイズに換算できる点であり、このおかげでマクロな開口亀裂とミクロな間隙中の水分子からの信号を識別定量できる。国内の沿岸部にある亀裂を胚胎する溶岩層で磁気共鳴検層を実施した結果、図のように13msの閾値で両者を識別できた。亀裂由来の信号強度を平面亀裂モデルで解析することで、開口幅を13mmと定量できた。その結果、この平面亀裂を胚胎する厚さ7mの溶岩層の透水係数は0.22 m/sと推定され、溶岩層の上位にある厚さ約140mの砂礫層(透水係数は約 $10^{-5}$  m/s)にくらべてけた違いの水輸送能力があること(水みちであること)が示唆された。

研究成果はどう使われるか

- ・ 広域地下水流動を支配する亀裂タイプの水みちの定量的な評価
  - ・ 解析モデルを変更すれば、亀裂のない多孔質な地層の透水係数も定量可能
- 本研究には、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和2年度～令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(JPJ007597)(沿岸部処分システム評価確証技術開発)」の成果の一部を利用した。



深度約150 m から回収したコア(直径63 mm)の写真と、黄色矢印の亀裂を含む深度で取得したプロトン横緩和時間のヒストグラム。13 ms(点線)の閾値で、マクロな亀裂中の水分子からの信号とミクロな間隙中の水分子からの信号の分離ができています。

リン鉱石からの副成分としてのレアアースの回収法の研究

鉱物資源研究グループ 星野 美保子  
 [連絡先] hoshino-m@aist.go.jp

成果概要

本研究では、リン鉱石からリン酸の製造過程で副成分として生産されるリン酸石膏からの効率的なレアアースの回収法の技術開発を進めている。リン酸の製造過程でレアアースを回収するには、既存のプロセスをできる限り変えない簡便な方法である必要があり、様々な条件でレアアースの沈殿実験を行いリン酸石膏からのレアアース回収の最適な条件を検討している。

研究内容

リン鉱床は、世界各地に分布しており、その資源量は3000億トンと膨大である。リン鉱石は、レアアース(REE)を数百から数千ppm程度含有するため、REE資源としての側面も有する。そのため、リン鉱石からリン酸の製造過程の副成分としてレアアースを効率的に回収できれば、コスト削減や新規鉱山の開発に伴う環境負荷の軽減などREE資源問題のブレイクスルーとなる可能性がある。リン鉱石中のレアアースの80%以上がリン酸の製造過程で副産物として生産されるリン酸石膏に分配されており、本研究ではリン酸石膏からレアアースを効率的に回収する方法を検討している。リン酸石膏を1%硫酸と反応させることでレアアースの80%以上が溶液に浸出され、43%以上のレアアースを含有する精鉱も作成できている。今後は、レアアース精鉱の不純物の除去が課題となっており、研究を進めている。

研究成果はどう使われるか

世界には、10億トン以上のレアアース含有リン酸石膏残渣が未利用のまま放置されている。本研究成果は、それらの未利用資源のレアアース資源化へ貢献できる。



図 レアアースを含有するリン酸石膏(左) 回収されたレアアース精鉱(右)

## 近赤外分光法による岩石中の鉍物含有量推定手法の開発

鉍物資源研究グループ 児玉 信介  
[連絡先] s.kodama@aist.go.jp

### 成果概要

ミョウバン石、モンモリロナイトが近赤外領域において特徴的な吸収パターンを示す特性を利用し、岩石の反射スペクトルと岩石中の鉍物含有量とを対応付けることで、反射スペクトルから直接、鉍物含有量を推定する手法を開発した。

### 研究内容

カオリナイト、モンモリロナイトなどの粘土鉍物やミョウバン石は、近赤外領域において特徴的な吸収パターンを示し、鉍物量が多いほどその吸収は深くなる。このことを利用し、本研究では、岩石の近赤外反射スペクトルからこれらの鉍物の含有量を推定する手法の開発に取り組んでいる。これまでに、ミョウバン石を含む珪質岩の近赤外反射スペクトルを取得し、鉍物による吸収の深さを測定した。別途、示差熱分析により求めた鉍物含有量と吸収深さとの関係を明らかにした(図1)。また、ベントナイトについても同様に測定を行い、ベントナイト中のモンモリロナイト含有量(メチレンブルー吸着量)と吸収深さとの関係を明らかにすることで、反射スペクトルから直接、鉍物含有量を推定できるようになった。確立した手法の有効性を検証するため、野外可視・近赤外分光計を導入した。

### 研究成果はどう使われるか

本研究で確立した手法と野外分光計による現場測定(図2)を組み合わせることで、珪石鉍山やベントナイト鉍山の採鉍現場で鉍物含有量を推定できるようになり、鉍山の品位評価の効率化が期待できる。

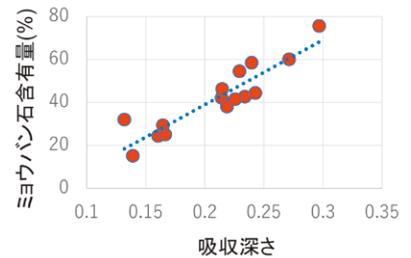


図1 ミョウバン石の近赤外スペクトル吸収深さと鉍物含有量の関係



図2 野外分光計を用いた反射スペクトル測定の様子

## 鉍床の成因研究：特に希土類鉍床の開発に向けて

鉍物資源研究グループ 実松 健造  
[連絡先] k-sanematsu@aist.go.jp

### 成果概要

近年でのNd-Fe-B磁石の需要増加により需給のひっ迫が継続している希土類(レアアース)鉍床の成因研究、探査法の考案、開発可能性調査を実施した。特にイオン吸着型鉍床、海外の機関や企業と連携して資源ポテンシャル評価を行い有望地域を複数発見した。

### 研究内容

希土類鉍床の多くは、放射性元素濃度が高い、採掘から製錬までのコストが高すぎて利益が見込めないとした理由で、開発が難航している。イオン吸着型鉍床と呼ばれる、風化花崗岩などを鉍石とする鉍床タイプでは、低コストで比較的簡単な方法で放射性元素濃度が低い混合希土類製品までを生産可能である。このタイプの鉍床の成因研究を実施し、著しく分化した花崗岩が重希土類に富む傾向があること、そして温帯・熱帯性気候により化学風化を伴って、溶出した希土類イオンが特定の層において粘土鉍物表面に静電的に吸着して鉍床を形成することを明らかにした。また、有望地域から採取したイオン吸着鉍から硫酸アンモニウム水溶液を用いて希土類をイオン交換し、pH調整などによって不純物を効率的に除去し、より高品質な混合希土類シュウ酸塩を作ることに成功した(図1)。

### 研究成果はどう使われるか

本研究成果はNd-Fe-B磁石に必須な希土類を供給可能なイオン吸着型鉍床を効率よく発見し、低コスト・低環境負荷で鉍山開発するために使われる。国内への希土類の安定供給に貢献できる。ただし一部の情報は非公開である。



図1 イオン吸着型希土類鉍山開発のイメージ

LA-ICP-MS による 2 次元元素イメージングと単体分離分析

鉱物資源研究グループ 昆 慶明, 網澤 有輝  
[連絡先] yoshiaki-kon@aist.go.jp

成果概要

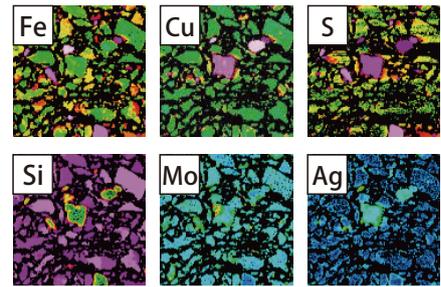
鉱床の開発可能性を判断するためには、鉱石品位だけでなく、不純物となり得る忌避元素や副産物となり得る有用元素が鉱石中にどのような存在形態であるかを評価することが重要である。微小域元素分析の分析点の鉱物種を元素組成に基づいて分類できる画像処理のアルゴリズムを組み合わせることで、微量元素の定量と分析領域中の粒子抽出や解析を同時に実現する手法を開発した。

研究内容

従来の分析手法では別々にしか行えなかった個々の鉱石粒子中の鉱物種の同定と、各分析点における微量成分まで含めた元素組成の評価を同時に行う新たな粒子解析技術を開発した。本解析技術では、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計 (LA-ICP-MS) による微小域組成分析から得られるデータから、鉱石中の鉱物の存在形態を評価する。具体的には、理想的な鉱物組成をリファレンスとして、主成分の濃度の閾値を設定し、分析点の主成分の元素組成から分析点の鉱物種を同定し、鉱物内の微量元素の量に差に応じて詳細に分析点を分類する。また、画像処理のアルゴリズム等を応用して、個々の分析点の位置情報から粒子を抽出することで、各粒子の元素濃度に加えてサイズや単体分離等の粒子情報を得る。

研究成果はどう使われるか

本解析技術は、副産物も考慮した鉱床の開発可能性の判断、不純分低減プロセスや分離技術の高精度化に利用が期待される。また、微量元素とその存在形態の同時評価は、材料やデバイス開発などにも展開できる可能性がある。



100 μm 主成分 / 微量成分の組成データ

図 1 LA-ICPMSにより得られた微小域元素組成分布

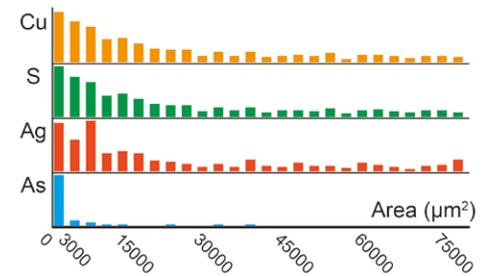


図 2 粒子解析により得られた鉱物粒子サイズと元素含有量との相関

金属元素の安定同位体比分析法の開発と鉱床探査への応用

鉱物資源研究グループ 荒岡 大輔  
[連絡先] d-araoka@aist.go.jp

成果概要

鉱床の成因や探査のための新しい研究手法を開発すべく、金属元素の安定同位体比分析法の開発に取り組んできた。具体的には、自動元素分離装置の導入とルーチン化、高速化・高効率化、分析対象元素の拡張を進めてきた。また、開発した手法を炭酸塩の地層に胚胎するレアメタル鉱床に適用することで、鉱床の成因解明や探査指針ツールの開発を進めている。

研究内容

安定同位体比は物質の起源やトレーサーとして鉱床成因などの地球科学分野で広く利用されてきた。近年では分析装置の発展により、水素、酸素、炭素などの従来から利用されてきた安定同位体比だけでなく、アルカリ金属・アルカリ土類金属元素や遷移金属元素の安定同位体比も高精度測定が可能になってきた。そこで鉱物資源研究グループでは、Li, Mg, Fe, Ni, Sr といった研究例のほとんどない新しい安定同位体の測定手法の開発を進めるとともに、自動元素分離装置をラボに導入して前処理手法のルーチン化、高速化・高効率化のための手法開発も並行して進めてきた(図 1)。また鉱床への応用として、Mg 同位体比を炭酸塩の地層に胚胎するカナダのレアメタル関連鉱床に適用することで、鉱床の成因解明や、鉱床探査に資するツールの開発を進めている(図 2)。

研究成果はどう使われるか

本手法を用いることで、物質の起源や、元素を介した反応に関わる各種プロセス、年代情報などを多角的に得ることができる。そのため、地質分野のみならず、惑星科学、生態学、材料分野など幅広い分野との共同研究が期待される。

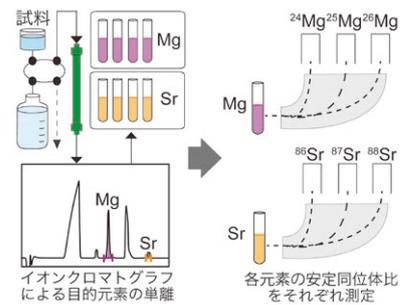


図 1 開発した金属元素の安定同位体比分析法

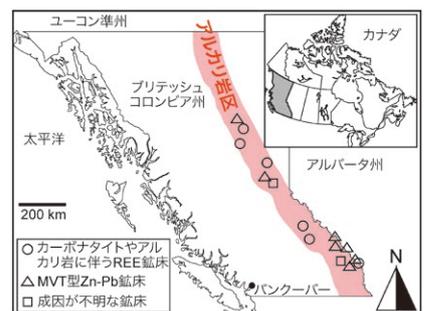


図 2 カナダ・ブリテッシュコロンビア州における研究対象の鉱床

## 選鉱プロセスの効率化のための粉体シミュレーション技術の開発

鉱物資源研究グループ 綱澤 有輝  
[連絡先] tsunazawa-y@aist.go.jp

### 成果概要

本研究では、離散要素法を用いた粉体シミュレーションの技術開発を進めている。大規模体系の解析のための粗視化モデルや、付着力や回転抵抗力などの新規物理モデルの開発に取り組むとともに、各種粉体装置における粒子挙動の解析から、運転条件や装置形状の最適化を検討している。

### 研究内容

鉱物資源の選鉱では、コストやエネルギー消費を抑えて、有価物を高効率かつ高精度に分離回収する必要があり、分離回収プロセスの高度な操作設計が必要である。本研究では、各種分離回収プロセスの効率化を目的として、離散要素法を用いたシミュレーション技術の開発に取り組んでいる。また、粉体シミュレーションの要素技術開発として、大規模体系の解析のための粗視化モデル(図1)や、付着力や回転抵抗力などの新規物理モデルの開発に取り組んでいる。さらに、装置内の選別機構の解明や最適な運転条件の検討として、比重分離機の1つである揺動テーブルを対象とした粒子挙動解析から、粒子の偏析過程を可視化するとともに、装置条件や試料の供給条件などのパラメータが偏析過程に与える影響の系統的な評価に取り組んでいる。

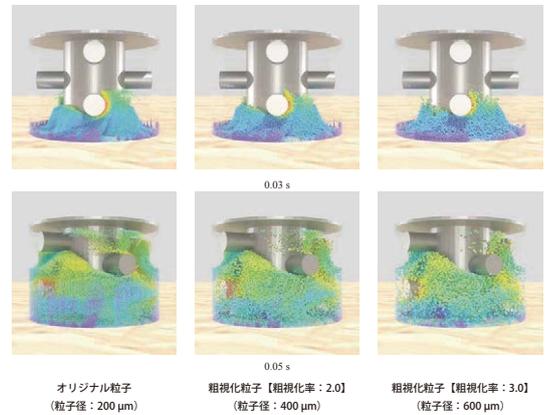


図1 湿式ビーズミルにおける粒子挙動の可視化結果

### 研究成果はどう使われるか

本研究で開発した粉体シミュレーションによって、実験では観察が困難な選別機内の粒子挙動をあらゆる角度から可視化することができる。また、装置の最適条件や装置設計を提案することができる。

## ポスター発表

### 火成岩の局所微量元素組成に基づく銅鉱床探査法の開発

鉱物資源研究グループ 左部 翔大・昆 慶明・実松 健造  
[連絡先] s.satori@aist.go.jp

### 成果概要

銅は世界規模の脱炭素化と新興国の電線需要増大によって、世界中で必要とされているが、資源量の減少による枯渇が懸念されている。そのため、銅鉱床を対象とした地化学探査法の開発を目的として、地質調査や造岩鉱物の元素分析を行った。その結果、造岩鉱物の元素組成を用いて、複数の火成岩体が分布する地域から銅鉱床を形成した履歴をもつ岩体を選出できる可能性を見出した。

### 研究内容

銅の供給源として重要な熱水性銅鉱床を形成した履歴をもつ火成岩体を簡便かつ安価に選出可能な地化学探査法の開発に取り組んでいる。類似した条件下で形成された花崗岩及び花崗閃緑岩の独立岩体と、それらに伴われる熱水性の銅鉱床、モリブデン鉱床、金鉱床が多数分布している北上山地を対象として、岩石試料の収集を行った。試料の観察及び全岩元素分析を行うと共に、金属元素を含む流体が分離する以前のマグマと平衡状態にあったと想定される斜長石の局所微量元素分析を行った。その結果、銅鉱床を形成したマグマが結晶化した火成岩と、金やモリブデンの鉱床を形成したマグマが結晶化した火成岩には斜長石の銅含有量に差が認められた。このことから、成因が類似する火成岩体群から、銅鉱床を形成した可能性がある火成岩体を選出できる可能性が見出された。

### 研究成果はどう使われるか

火成岩の分布地域を対象とすることが多い銅資源の探査において、銅鉱床を形成した履歴をもつ火成岩体を選出できれば、鉱床の賦存が期待される地域の絞り込みを通じて、鉱床探査の効率向上に貢献できる可能性がある。

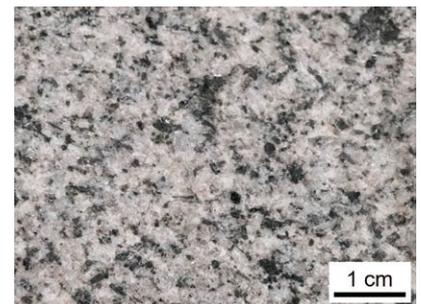


図1 銅鉱床を形成したマグマが結晶化した花崗閃緑岩

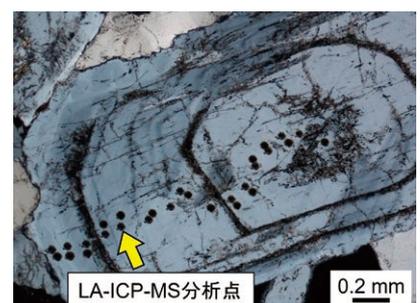


図2 レーザーアブレーションICP質量分析装置(LA-ICP-MS)で分析された斜長石

# 初生花崗岩質メルト包有物を用いた銅鉛床形成ポテンシャル評価手法の開発

鉱物資源研究グループ 天谷 宇志  
[連絡先] amagai-takashi@aist.go.jp

## 成果概要

本研究では、地下深部の初生的な花崗岩質マグマの化学組成（銅・硫黄・水含有量等）を玄武岩の鉱物斑晶に捕獲された花崗岩質メルト包有物から解明するため、神奈川県北部丹沢地域の玄武岩を調査し、含まれる単斜輝石斑晶中に初生的な花崗岩質メルト包有物を発見、その化学組成を明らかにした。

## 研究内容

銅資源の需要が増す中、鉛床探査の効率化が求められている。銅鉛床の形成には、花崗岩質マグマから放出される熱水が重要なため、花崗岩が探査の鍵とされてきた。しかし、花崗岩は鉛床の形成により本来含まれていた金属・硫黄・水含有量等の初生的情報が消失、探査指標とできない。本研究では、玄武岩に着目、玄武岩質マグマが花崗岩質マグマと接すれば、初生的な情報を保持した花崗岩質マグマがメルト包有物として玄武岩の単斜輝石斑晶に捕獲されると考えた。これまで神奈川県北部丹沢地域の玄武岩を調査し、初生的な花崗岩質メルト包有物を発見、その化学組成を予察的に明らかにした。今後は、X線ナノCTを用いて、花崗岩質メルト包有物の銅鉛物の体積を正確に測定することで、銅含有量を推定、銅鉛床の形成ポテンシャルを評価する指針の導出を目指す。

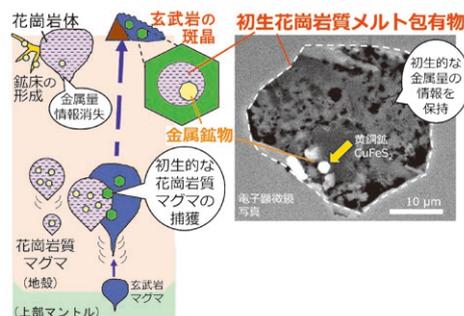


図1 玄武岩質マグマによる初生的な花崗岩質マグマのメルト包有物としての捕獲概念図

## 研究成果はどう使われるか

本研究で得られた花崗岩質メルト包有物の銅含有量と地表の花崗岩の化学組成を比較することで、地表の花崗岩が銅鉛床を付随するか判断する指標となり、将来的には新たな鉛床探査ツールとして利用が期待される。

## ポスター発表

### メタンセンサーを用いた上越沖メタンハイドレート分布域における溶存メタン濃度の測定

燃料資源地質研究グループ 吉岡 秀佳, 香川大学 青木 伸輔, 物理探査研究グループ 浅田 美穂,  
燃料資源地質研究グループ 佐藤 幹夫  
[連絡先] hi-yoshioka@aist.go.jp

## 成果概要

上越沖メタンハイドレート分布域における海底付近の溶存メタン濃度の2次元分布を明らかにする目的で、ROVにメタンセンサー3機種を設置して高分解能海底三次元画像マッピング調査中に測定を行った。メタン濃度分布は各センサーによって異なっており、メタン検出器の応答時間の違いを反映していると考えられる。

## 研究内容

ROV Kaiyo3000（海洋エンジニアリング株式会社）にメタンセンサーを設置して上越沖の高分解能海底三次元画像マッピング調査中（2022年6月実施）に溶存メタンの測定を行った。メタンセンサーは、METSセンサー（Franatech GmbH）およびメタンセンサータイプLMS、サブオーシャンMILS（A2 Photonic Sensors）の3種類を用いた。メタン濃度の比較のために、ニスキン採水器をROVに設置して、潜航途中で適宜海水を採取した。メタン濃度のピーク時間は、共通していたが、ピーク値は各センサーによって値が異なっており、サブオーシャンMILSが最も高い値を示した。他のセンサー2機は、ピークの後に緩やかに値が減少する傾向があり、検出器の応答時間がサブオーシャンMILSに比べて長いことが示唆された。

本研究は、経済産業省のメタンハイドレート研究開発事業の一部として実施した。

## 研究成果はどう使われるか

海底付近の溶存メタン濃度は、海底下のメタンハイドレートの分布や深部から供給される冷湧水のフラックスを反映していると考えられるため、資源開発や開発に伴う生態系の環境影響評価に資する基本的なデータとなる。

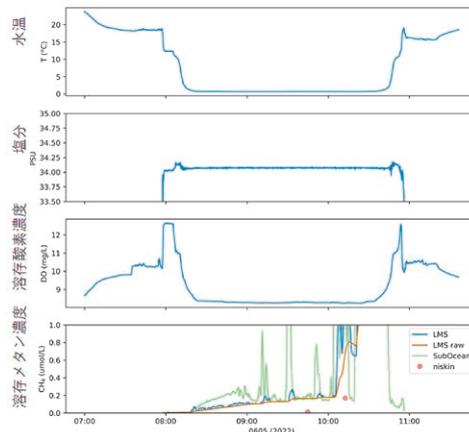


図 水温、塩分、溶存酸素濃度、溶存メタン濃度の時間変化 ニスキン採水器で採取した試料の濃度を示す。

成果概要

北陸地方において日本海拡大以降の堆積盆の形成過程を海域と陸域の対比からまとめた。また、礫質サイクリックステップ地形の堆積相モデルを、黒部川扇状地と富山の地層の比較から提案した。秋田堆積盆における中新世根源岩の年代測定により、根源岩生成タイミングを明らかにし、テクトニクスと根源岩成因の関係を解明した。

研究内容

東西日本の地質構造境界がある富山トラフは、多段階のリフティングで形成され、その後の地質構造はリフト期の構造に規制されたことを解明した<sup>1)</sup>。黒部川扇状地と1,500万年前の扇状地の礫質サイクリックステップの比較を行い、洪水起源と海底地滑り起源の混濁流では異なる様々な貯留岩堆積相が形成されることを明らかにした<sup>2)</sup>。秋田堆積盆の女川層根源岩の堆積が、奥羽山脈隆起のテクトニクスや湧昇による生物生産の増加に起因したことを明らかにした<sup>3)</sup>

- 1) 中嶋 健ほか (2021) 地質学雑誌, 127, 165-188.
- 2) Nakajima & Saito (in press) The Depositional Record, doi:10.1002/dep2.315
- 3) Nakajima et al. (2023) Island Arc, 32, e12490

研究成果はどう使われるか

油田堆積盆の形成過程や根源岩成因の解明は、石油・天然ガスポテンシャルを評価する上の基礎となる。貯留岩の堆積機構や堆積相の解明は、石油・天然ガスや CCS の貯留層評価に役立てられる。

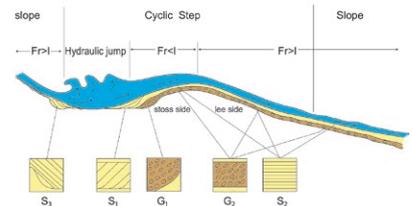


図1 混濁流による礫質サイクリックステップの堆積相モデル<sup>2)</sup>

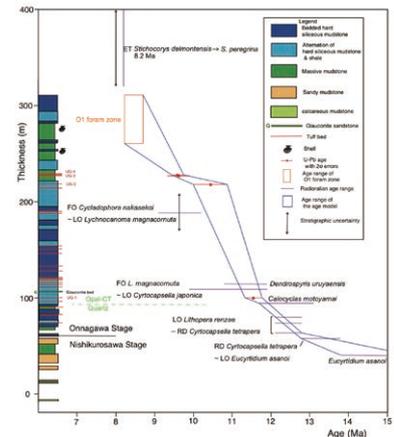


図2 女川層根源岩の年代モデルと堆積速度変化<sup>3)</sup>

表層型メタンハイドレート胚胎域での海底長期モニタリング

成果概要

経済産業省が推進している表層型メタンハイドレート (MH) 研究開発の一環として、日本海の表層型 MH 胚胎域の地下温度構造及び海底環境を調べるため、自動計測可能な観測機器を長期間にわたって海底に設置し、長期モニタリングを実施した。

研究内容

表層型 MH は水深 300-500m 以深の泥質の海底堆積物に存在している。本研究では、表層型 MH が確認されている日本海の 2 海域 (酒田沖及び上越沖) の表層型 MH 胚胎域の地下温度構造及び海底環境を調べることを目的に海底長期モニタリングを実施した。地下温度構造推定には熱流量 (地温勾配と熱伝導率の積で決定) データが必要である。これらの海域では海底水温変動の振幅が大きいので、長さ数メートルの温度計測プローブを堆積物にさし込む方法で信頼性の高い地温勾配の計測は困難であった。本研究では海底水温と堆積物温度を同時に長期間計測し、堆積物温度から海底水温変動の影響を除去する方法で熱流量を決定した。また、超音波ドップラー多層流向流速計, CTD ロガー, 濁度ロガー, 溶存酸素ロガー等を設置し、海底環境に関わる長期データを取得した。本研究は、経済産業省の MH 研究開発事業の一部として実施した。

研究成果はどう使われるか

長期モニタリングで得られたデータは表層型 MH 胚胎域の地下温度構造及び海底環境を把握するために使用されるとともに、表層型 MH 生産技術開発のための基礎データとして利用される。



図1 海底に設置した地中温度計



図2 遠隔操作型無人探査機を使用した観測装置の回収作業

LA-ICP-MS による石炭マセラルの希土類元素濃度測定

燃料資源地質研究グループ 高橋 幸士, 昆 慶明(鉱物資源 RG), 野田 篤(地質情報 RI)  
[連絡先] koji-takahashi@aist.go.jp

成果概要

石炭を構成する μm スケールの有機物は“マセラル”と呼ばれ、起源や物理・化学特性が明らかであるため、その組成は炭質評価や形成環境の指標に用いられている。本研究では、希土類元素が濃集する石炭の特徴解明を目指し、木質や柔組織に由来するマセラルと、タンニン由来の成分やフミン酸等の沈殿によって形成されるマセラルに対し、LA-ICP-MS による微量元素分析を行った。

研究内容

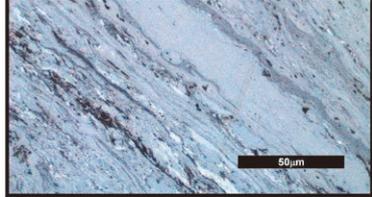
近年、石炭や石炭灰の希土類元素 (REE) ポテンシャルに注目が集まっているが、REE 濃度が高い石炭の特徴や形成機構には不明な点が多い。マセラル毎の REE ポテンシャルが明らかになれば、マセラル組成に基づいて、REE が濃集する石炭の特徴や形成機構を検討可能である。そこで本研究では、LA-ICP-MS を用いて、大型木片中の木質や柔組織に由来する telohuminite (TH) と、タンニン由来の成分やフミン酸等の沈殿物を起源とする corpohuminite (CH) の 2 つのマセラルの微量元素分析を行った。その結果、TH 単独の測定点に比べ、一部 TH を含む CH の測定点では、REE 濃度が高い傾向を示した。CH の起源は REE と親和性の強いカルボキシル基等の官能基に富む有機物であるため、相対的に REE 濃集が生じやすかったものと推測される。

研究成果はどう使われるか

国内やアジアの大陸縁辺域に分布する石炭層の REE 濃度に関する報告は限定的である。本研究結果は、石炭のマセラル組成に基づく REE ポテンシャルや濃集機構の検討に向けた基礎データとして利用可能であると期待される。

石炭評価の基盤となるマセラル組成に希土類元素に関する知見を付加!!

地球化学分析  
元素分析工業分析  
有機岩石学  
(マセラル組成の測定)



到達目標  
マセラル組成から  
⇒希土類元素ポテンシャルを評価  
⇒濃集する石炭の特徴  
& 形成機構を解明

図 本研究のアプローチと到達目標

化石クロロフィルを用いた古海洋表層の酸化還元指標の開発

燃料資源地質研究グループ 朝比奈 健太  
[連絡先] kenta-asahina@aist.go.jp

成果概要

堆積岩や原油中には様々なポルフィリン類が存在し、それらは過去の光合成生物が保有していたクロロフィル類が起源と考えられている(図 1a)。嫌気環境でのみ生息可能な緑色硫黄細菌は、バクテリオクロロフィルを有することから、堆積岩中のバクテリオクロロフィルを分析することで、過去の海洋表層が無酸素環境であったことを示すことができる。

研究内容

堆積岩中のポルフィリン類は、ケロジェンと呼ばれる不溶性高分子に結合しており、直接分析できない。本研究は、バクテリオクロロフィル分子の B 環ピロール部位が特徴的な分子構造を有することに着目し、ケロジェン中からポルフィリンのピロール部位を酸化分解により切り出し、分析した(図 1b)。全クロロフィルが持つピロールに由来する生成物とバクテリオクロロフィル固有のピロールに由来する生成物の比は、過去の緑色硫黄細菌量の増減を反映している。クロロフィル由来物質の組成比と、緑色硫黄細菌に由来する他の色素化石の分析値を比較した結果、調和的な結果を得た。本研究では、全クロロフィルに対するバクテリオクロロフィルの比を古海洋表層の酸化還元指標として提案した。

研究成果はどう使われるか

本研究の手法は、難分解性のケロジェンに取込まれたクロロフィル由来物質を対象とするため、従来法で分析できなかった地質年代試料にも利用できる。本研究成果は、石油根源岩が形成した要因となった古環境の復元に役立つ。

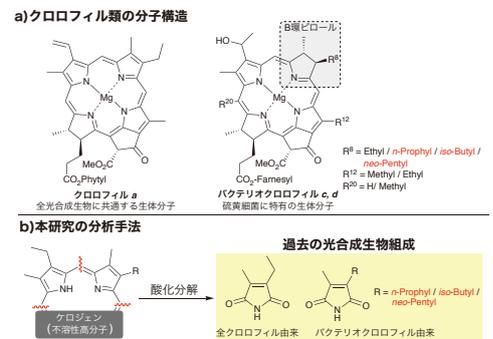


図 1 クロロフィル組成を用いた光合成生物組成の評価法

## 補酵素 F<sub>420</sub>の電極反応系の開発

燃料資源地質研究グループ 風呂田 郷史  
[連絡先] sato.furota@aist.go.jp

### 成果概要

補酵素 F<sub>420</sub> は、様々な微生物（例えば、メタン生成菌や放線菌）が利用する電子運搬体の 1 つである。F<sub>420</sub> の電気化学反応系は、(1) F<sub>420</sub>H<sub>2</sub> を効率的に得る簡便な手法 (F<sub>420</sub> の還元) や、(2) F<sub>420</sub> バイオセンサー開発の基盤技術として高いポテンシャルを有する。本研究では酵素の触媒特性を応用し、F<sub>420</sub> の電極反応系を構築した。

### 研究内容

補酵素 F<sub>420</sub> の電極反応を実現するために、各種酵素とメディエーターの選定を行った。酵素の存在下で金 (Au) 作用電極を用いた F<sub>420</sub> の電気化学実験を行った。実験に必要な各種酵素は大腸菌での異種発現と、その後の精製で入手した。F<sub>420</sub> の電気化学反応は、金メッシュ電極と光化学セルを用いた分光電気化学分析で確認した。F<sub>420</sub> は酸化型のみ 420 nm に強い吸光度を示すため、420 nm の吸光度をモニターすることで F<sub>420</sub> の電気化学反応の進行が確認できる。これらの結果から、補酵素 F<sub>420</sub> を電極反応させるための酵素とメディエーターの組み合わせを選定し、補酵素 F<sub>420</sub> の電極反応系を構築した。

### 研究成果はどう使われるか

本研究成果は、(1) F<sub>420</sub>H<sub>2</sub> を効率的に得る簡便な手法 (F<sub>420</sub> の還元)、(2) F<sub>420</sub> バイオセンサー開発の基盤技術として利用できる可能性がある。

## 未固結堆積物固化技術を用いた地下ミクロ空間の 3 次元可視化

燃料資源地質研究グループ 久保田 彩  
[連絡先] a.kubota@aist.go.jp

### 成果概要

未固結堆積物は、地球表層において現在地下燃料資源の移動・集積が進行している場であり、これらの性状の理解は燃料資源探鉱・開発に重要である。本研究では、未固結堆積物を対象とした固化技術の開発を行い、粒子分布、孔げき構造といった岩石内部構造の 3 次元構造可視化を目指している。本研究は本年度に開始したプロジェクトのため、成果は次年度以降を予定している。

### 研究内容

地球表層の最上部を覆う堆積物は、その多く（海底堆積物では 1000 m 厚以上）が未固結から半固結の状態であり、天然ガスや原油などの地下燃料資源の生成や移動、集積の場となっている。また、近年では、堆積物に賦存する天然ガスやメタンハイドレートの一部は生物起源（微生物活動によって生成されたメタン）と考えられ、注目されている。地下燃料資源の高効率な探鉱・開発のため、地質・物理探査、地球化学分析等の多角的なアプローチによる地下生命圏の実態の理解が求められている。未固結堆積物の 3 次元構造の理解は、資源のミクロスケールな移動や堆積物中の微生物の分布を理解するうえで極めて重要である。しかし、未固結堆積物は加工時に崩れてしまうため、切片等によって堆積構造を観察・解析することは難しい。このため、内部構造の観察は、X 線 CT によって密度差を可視化するという手法に限られ、観察対象も限定的であった。本研究では主に、貯留岩や海底堆積物をはじめとした未固結堆積物を対象に堆積物内部構造の 3 次元可視化を試みる。まず試料候補地である国内各地の地質調査、堆積相記載と試料採集をおこなう。次に、試料の固化・染色法の検討を行い、既存技術との比較・評価を行う。

### 研究成果はどう使われるか

本研究が達成されれば、加工が困難な未固結貯留岩等各種堆積物の 3 次元的理解への貢献できる。また、未固結時変形構造等を示す各種材料の評価など様々なターゲットへの応用も期待される。

ポスター発表

日本海東縁（上越沖・酒田沖）のガスハイドレート胚胎域の土質特性

香川大学 青木 伸輔, エネルギープロセス研究部門 鈴木 清史, 燃料資源地質研究グループ 佐藤 幹夫, 吉岡 秀佳, PS21 乗船研究者一同, CK22-03C 乗船研究者一同, CK23-02C 乗船研究者一同 [連絡先] aoki.shinsuke@kagawa-u.ac.jp

成果概要

経済産業省のメタンハイドレート研究開発事業の一環として、表層型ガスハイドレート賦存域の海底地盤強度調査を日本海東縁にて実施した。簡易試験と室内土質力学試験の深度プロファイルの傾向、及び検層による堆積物の物性・力学特性の推定はよく一致した。堆積物の含水比が低くなると、強度は高くなる傾向が認められた。

研究内容

将来のエネルギー資源として期待されるメタンハイドレートのうち、表層型の採掘・回収手法の確立のためには、胚胎層の地盤工学的検討が必要である。本研究では、表層型メタンハイドレートの胚胎が推定される日本海東縁の上越沖と酒田沖で海底堆積物の地盤強度調査を実施した。上越沖 2 海域（海鷹海脚と上越海丘）及び酒田沖（酒田海丘）の計 3 海域でそれぞれ 2 地点（胚胎地点と参照地点）から堆積物試料の採取とワイヤライン検層を実施した。堆積物試料に対して物理試験と土質力学試験を実施し、それぞれの深度プロファイルの比較、及び検層結果との比較を行った。本研究は、経済産業省のメタンハイドレート研究開発事業の一部として実施した。

研究成果はどう使われるか

本研究で得られた測定結果や海底堆積物の分析結果は、計画されている表層型メタンハイドレートの海洋産出試験の実施場所の選定や、掘削技術開発の基礎的データとして利用される。

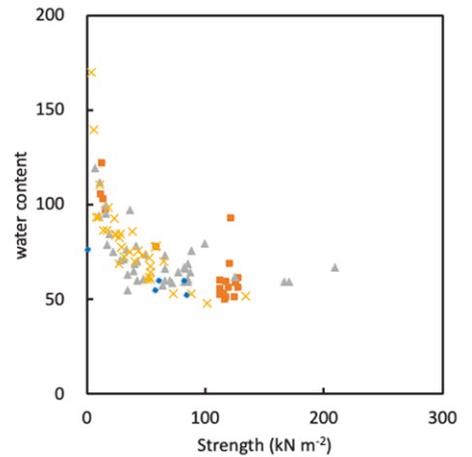


図 堆積物の含水比と堆積物強度の関係

ポスター発表

マンガン酸化微生物を利用した鉱山廃水処理システムの開発

地圏微生物研究グループ 片山 泰樹, 渡邊 美穂, Gotore Obey, 岡野 邦宏, Tum Sereyiroith, 保高 徹生, 宮田 直幸 [連絡先] katayama.t@aist.go.jp

成果概要

休廃止鉱山で発生する坑廃水は有害金属を含むため、鉱害防止対策が求められている。本研究では、微生物を活用した坑廃水処理システムをパイロットスケールで開発し、微生物の栄養源となる有機物を添加せずに廃水中のマンガンを 98% 以上除去することに成功した。また、細胞外電子を利用して炭酸固定を行う細菌群がマンガン酸化に関与することを発見した。

研究内容

休廃止鉱山で発生する坑廃水は有害金属を含むため、鉱害防止対策として一般的に中和剤を用いた処理が行われている。しかし、多くの薬剤やエネルギーの投入を必要とするため、低環境負荷・低コストの処理技術の開発が求められている。マンガン (Mn) は坑廃水に含まれる主要な有害金属の一つであり、Mn 酸化細菌と呼ばれる微生物は Mn(II) イオンを酸化して Mn(IV) 酸化物にすることで不溶化させるため、坑廃水処理への活用が期待されてきた。

秋田県立大学と産業技術総合研究所は、有機物を必要としない Mn 酸化細菌を活用した坑廃水処理システムを開発し、パイロットスケールで現地試験を実施してきた。その結果、有機物無供給、処理時間 12 時間の運転条件において、20 mg/L の Mn(II) イオンに対して 98 % 以上の除去率を達成した。また、この処理システム内には、マンガンから電子を取り込んでエネルギー代謝や炭酸固定を行うとみられる細菌群が優占していることが判明した。

研究成果はどう使われるか

これまで Mn 酸化細菌を利用した廃水処理では有機物供給が必要と考えられてきたが、本研究により、有機物を供給しなくても坑廃水を高効率で処理する微生物生態系の新しいしくみが明らかとなった。今後は、この研究成果をもとに低環境負荷で低コストの新しい坑廃水処理技術を開発する。

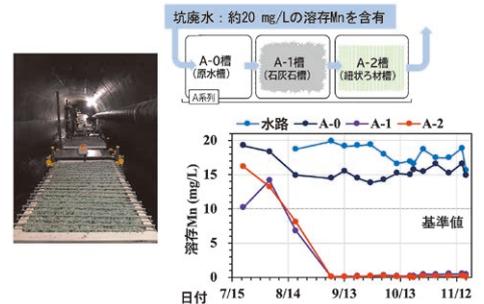


図 坑道内に設置した Mn 酸化処理装置の概要と処理パフォーマンス。坑内水路から廃水を A-0 槽にくみ上げた後、A-1 槽、A-2 槽に順次通水。A-1 槽、A-2 槽にはそれぞれ、石灰石、ポリプロピレン製の紐状材が充填され、それらに Mn 酸化細菌が付着して増殖することで Mn(II) 酸化反応が進行する。右下のグラフは各槽における溶存 Mn(II) 濃度と除去率の経時変化を示す。

研究紹介及びポスター概要

## 天然ガス田由来微生物によるリグニン関連物質分解経路の解明

地圏微生物研究グループ 持丸 華子  
[連絡先] h-mochimaru@aist.go.jp

### 成果概要

リグニンの分解過程で生成するとされる芳香族化合物およびそれから変換が推定される化合物とガス田試料をそれぞれ培養したところ、メタンが生成した。現地で優占した微生物がこれらの化合物で培養できたことから、堆積有機物からのメタン生成の一部にリグニン分解で生成する化合物が含まれている可能性が示唆された。

### 研究内容

微生物起源のガス田において、堆積有機物の最大 17% が分解されメタンへと変換された。しかし、重合縮合し、巨大分子となっているとされる堆積有機物の中の、どのような成分がメタンになったのかは明らかではない。そこで、堆積有機物の中のどの分子構造が微生物により分解され、メタンへと変換されるのかを明らかにすることを目的とした。陸源有機物が含まれる堆積有機物においては、難分解性とされているリグニンが生物分解を免れ、堆積有機物として地下に存在し、メタン生成の根源物質となっていると仮説を立てた。本研究では、リグニン分解過程で生成することが知られている複数の芳香族化合物を基質として選出した。これらの基質と微生物起源のメタンを産出するガス田の試料を用いて培養を行い、メタンの生成を評価した。さらにメタン生成が見られた培養物について遺伝子解析を行った。その結果、継代培養を数代行っても、現地試料で優占した微生物が存在した。これは、直接的にリグニン関連物質が現地のメタン生成の一端を担っていることを証明するものではないが、その反応経路と同様のことが起きている可能性を支持するものである。今後、現地で優占する微生物を単離し、これらの物質を直接与えることで、その利用性を評価する。

### 研究成果はどう使われるか

天然ガス田に今も生息している微生物が、どのような有機物からメタンを生成しているのかを明らかにすることは、ガス田鉱床の形成メカニズムの解明、メタン生成促進条件の検討、探鉱に役立つ。

## 油田から獲得したトルエン分解メタン生成微生物群集のメタオミクス解析

地圏微生物研究グループ 眞弓 大介  
[連絡先] mayumi-daisuke@aist.go.jp

### 成果概要

油層環境におけるメタン生成を伴う原油の生分解反応は微生物によるエネルギー増進回収 (MEER) 技術として注目されている。これまで行ってきた我々の研究ではラボで培養した原油分解メタン生成微生物群集を油層に注入することにより、原油からのメタン生成反応を誘発できること可能性を示した。しかし、当該微生物群集における原油分解の主要な担い手や代謝経路は依然として不明である。本研究では、原油の主成分の一つであるトルエンを分解する微生物群集について、その機能や代謝経路を明らかにするためにメタオミクス解析を実施した。

### 研究内容

国内油田から採取した地下水を微生物接種源として用い、油層環境を模擬する高温高圧培養実験を行った結果、培養開始から 1 年を経過して顕著なメタン生成反応を観察した。生成したメタンの起源を調査するため、培養系に添加した原油の炭化水素の成分分析を行った結果、芳香族炭化水素であるトルエンの減少が観察された。このことから、生成したメタンは原油成分中のトルエンの微生物分解によることが明らかになった。本培養系の培養液から全微生物の DNA を抽出し、16S rRNA 遺伝子に基づく菌叢解析の結果、既知のメタン生成菌 2 種、*Peptococcaceae* 科に属する未培養細菌 (以下、PPT) および *Atribacterota* 門に属する未培養細菌 (以下、JS1) が優占していた。このことから、これらの微生物集団がトルエンを分解し、最終的にメタンを生成していることが示唆された。そこで、メタトランスクリプトーム解析を用い、原油分解に関わる遺伝子の発現解析を行なった。その結果、PPT はトルエン分解の初発酵素であるベンジルコハク酸合成酵素をコードする遺伝子と、その下流の分解に関与する一連の遺伝子を高発現した。また、JS1 も同様の遺伝子を高発現しており、これらの細菌がトルエンの分解に主要な役割を担うことが示唆された。一方で、JS1 はベンジルコハク酸分解に関わる下流の遺伝子を有しておらず、このことから JS1 はトルエン分解に関わる未知の代謝経路を有する可能性が示唆された。

### 研究成果はどう使われるか

微生物による枯渇油田からのエネルギー増進回収 (MEER) 技術の開発に役立てられる。

## 水溶液中の酢酸とギ酸の新しい<sup>13</sup>C トレーサー濃度定量法

地圏微生物研究グループ 須田 好  
[連絡先] suda-konomi@aist.go.jp

### 成果概要

安定炭素同位体 (<sup>13</sup>C) を用いたトレーサー法は特定の反応経路の存在を直接証明できるため、微生物による炭素固定機構の解明に利用されてきた。本研究では水溶液試料中の酢酸とギ酸について、化合物中の <sup>13</sup>C トレーサー位置を識別した上で、簡便かつ迅速に定量する手法を開発した。本研究成果は、下記の国際学術誌で発表している。  
Suda et al. (2023) "Novel quantitative method for individual isotope of organic acids from <sup>13</sup>C tracer experiments determines carbon flow in acetogenesis" *Talanta* 257.

### 研究内容

酢酸は嫌気性微生物によるメタン生成プロセスの重要な中間代謝産物であり、酢酸の動態に関する代謝機構を理解することは地球最大級の生態系である地下微生物圏の炭素循環の一端を解明することにつながる。そのため、効率的かつ迅速な酢酸生成の評価方法の確立が求められる。酢酸の場合は <sup>13</sup>C トレーサーの位置が異なる 4 種類の同位体異性体が存在する；CH<sub>3</sub>COOH, CH<sub>3</sub><sup>13</sup>COOH, <sup>13</sup>CH<sub>3</sub>COOH および <sup>13</sup>CH<sub>3</sub><sup>13</sup>COOH。しかし従来の分析法では、これら 4 種類を区別して定量するためには少なくとも 2 つの独立した分析が必要であり、時間と労力を要した (Wood & Harris, 1952)。そこで本研究では、Mulat & Feilberg (2015) のガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) を用いた水溶性有機酸分析法を改良し、得られたマススペクトルデータの解析に最小二乗法を導入することで <sup>13</sup>C トレーサー位置を識別した定量を可能にした。

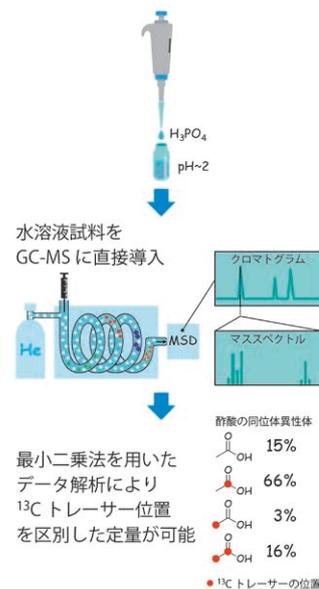


図 分析手法の概要。煩雑な前処理は不要で、水溶液試料を直接 GC-MS に導入する。分析時間は15分未満。得られたマススペクトルデータの解析に最小二乗法を用いることで、酢酸の 4 つの同位体異性体を区別して定量することが可能。

### 研究成果はどう使われるか

油層内微生物の代謝経路研究に利用されている。また、試料中の酢酸が 50 μmol/kg と低濃度であっても 4% 以内の不確実性で <sup>13</sup>C トレーサー濃度を定量できるため、岩石-熱水反応実験で生成される少量の有機酸の <sup>13</sup>C トレーサー分析にも本手法が使われている。

## ポスター発表

### メタンハイドレート分布域で共存する好気性・嫌気性微生物がメタンフラックスへ与える影響を解明

地圏微生物研究グループ 宮嶋 佑典, 環境創生研究部門 青柳 智, 燃料資源地質研究グループ 吉岡 秀佳, 環境創生研究部門 堀 知行, 活断層・火山研究部門 高橋 浩, KANSO テクノス 田中 美菜子, 環境創生研究部門 塚崎 あゆみ, 燃料資源地質研究グループ 後藤 秀作, AIST Solutions 室付 鈴木 昌弘 [連絡先] yusuke.miyajima@aist.go.jp

### 成果概要

微生物によるメタン酸化は、海底からのメタン放出を抑制するはたらきがある。本研究では、メタンハイドレートの分布する日本海の海底堆積物を対象に、地化学分析と微生物分析、培養試験を複合的に用いて、メタンを酸化する微生物の活性や分布、メタン消費効率を定量的に明らかにした。本研究は、経済産業省のメタンハイドレート研究開発事業の一部として実施した。

### 研究内容

山形県酒田市沖において海底堆積物を採取し、間隙水の溶存成分を分析した。その結果、高濃度のメタンが検出された一方で、海底直下 5 mm 以深では溶存酸素が検出されなかった。にもかかわらず、堆積物からは好気性メタン酸化バクテリア (Methylococcaceae) と嫌気性メタン酸化アーキア (ANME-1, ANME-2) の 16S rRNA および脂質がどちらも検出された。また、堆積物に <sup>13</sup>C 濃縮メタンを添加して培養試験を実施したところ、酸素のある条件と無酸素の条件ともにメタン酸化活性が認められた。培養後の堆積物中の 16S rRNA や脂質への <sup>13</sup>C 取り込みを追跡し、活性のある微生物種とそれらの現場堆積物中での分布を明らかにしたところ、Methylococcaceae と ANME-1, ANME-2 が少なくとも海底下 6 cm まで共存していることがわかった。培養試験で推定したメタン酸化速度と、活性種の分布を組み合わせた結果、これら好気性・嫌気性微生物は総計でメタンの 40% を酸化していることを見積もられた。

### 研究成果はどう使われるか

メタンハイドレートの分布する海底には、化学合成を基盤とする特殊な生態系が成立している。メタン酸化をはじめ、このような生態系における物質循環の定量的な理解を進めることは、資源開発に伴う生態系への環境影響評価に役立つと期待できる。

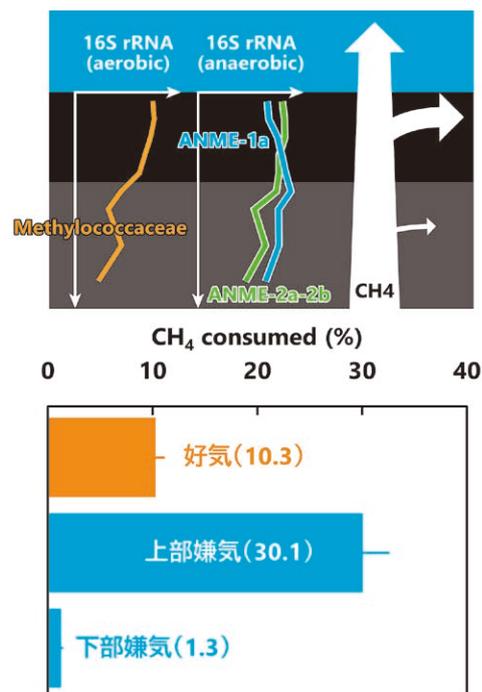


図 酒田市沖海底堆積物中の好気性・嫌気性メタン酸化微生物の16S rRNA 分布とメタン消費効率 (Miyajima et al., 2024ES&T を改変)。



### 環境情報の可視化の試み

地圏環境評価研究グループ 保高 徹生, 金井 裕美子, 高田 モモ  
 [連絡先] t.yasutaka@aist.go.jp

#### 成果概要

福島第一原発事故で発生した放射性セシウムを含む除去土壌等の中間貯蔵施設が立地する福島県双葉町細谷地区において、元住民の方々へのインタビュー等を通じて記憶や歴史等の情報を整理し、記憶地図として整理した。得られたデータについては、地域住民の要望を聞きながら、デジタルコンテンツ化、3次元立体模型図、冊子化、と3種類の方法で可視化を試みた。

#### 研究内容

福島第一原発事故で発生した放射性セシウムを含む除去土壌等の中間貯蔵施設が立地する福島県双葉町細谷地区において、元住民の方々に記憶・歴史について航空写真や現地踏査に基づく聞き取り調査を実施し、KH Coderを用いたテキスト分析により、地域住民にとって重要な地域ストックの整理、社会景観を抽出した。更に得られた社会景観を配した記憶地図のデジタルコンテンツ化として①WEB-3次元地理空間情報ソフトウェアを用いた整理、②3次元立体模型図とプロジェクションマッピング構築、地域住民の要望を踏まえた③地域の記録を残すための大字誌作成(デジタル版及びアナログ版)を実施し公開した。

#### 研究成果はどう使われるか

大字誌は地域の記憶を残すために地域住民や双葉町等の寄贈した。また、3次元立体模型図とプロジェクションマッピングについては、原子力災害だけでなく、休廃止鉱山の環境情報の可視化等で活用中である。

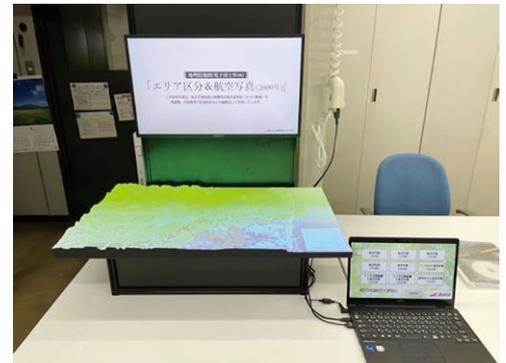


図 3次元立体模型図とプロジェクションマッピング



### 地圏化学の基礎的研究(温泉の利用性の検討)

地圏環境評価研究グループ 佐々木 宗建  
 [連絡先] sasaki-munetake@aist.go.jp

#### 成果概要

温泉利用は浴用が主であり、その他に湯の華の入浴剤化や特定成分の回収副産物化、食材等の加熱や乾燥、熱交換による温水供給や温泉バイナリ発電等も行われている。温泉は泉質型が多数あり、溶存成分や沈殿物も様々である。これら温泉の分布、溶存成分の多寡、沈殿物の特徴を把握することは資源開発、地熱エネルギー開発、地域活性化等に役立つと考えられる。

#### 研究内容

温泉の利用性の研究は泉質型毎に各論的に進めている。

- 酸性泉の温泉水は低pHで岩石溶解能が高い。そこで温泉水の溶存成分濃度について多変量解析を行い、岩石構成成分の溶出特性を整理中である。
- 中性泉でカルシウムに富む炭酸水素塩泉には炭酸カルシウムが析出し酸化水酸化鉄が付随する。それら沈殿物の色調(図1)、テクスチャ、化学組成を基に沈殿物の生成特性を評価中である。
- アルカリ性泉の温泉水は天水が岩石と反応して形成され溶存成分濃度は低い。各種岩石が純水と反応した際のpH範囲を文献調査と室内実験にて検討中である(図2)。
- 高温の沸騰泉にはシリカ鉱物が析出し様々な形態を呈する。それら産状を参考にシリカ微粒子の効率的な育成方法を検討中である。

#### 研究成果はどう使われるか

温泉の分布と溶存成分濃度の把握は資源可能性評価の、沈殿物の生成条件の理解はそれらの効率的な副産物化の基礎資料となると思われる。

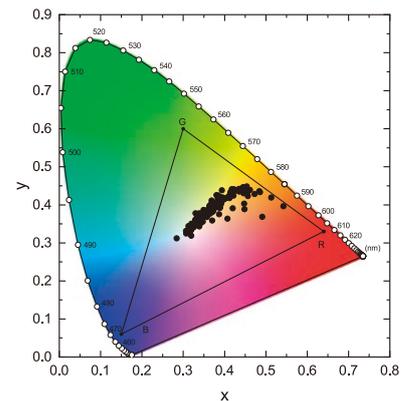


図1 炭酸塩沈殿物の色度

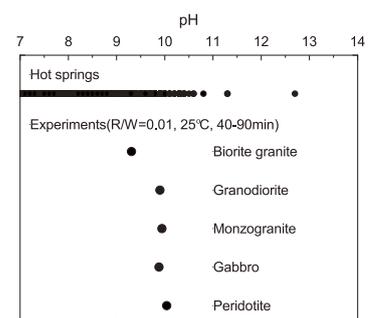


図2 岩石粉末を純水に添加した際のpH

下水処理過程において排出される未利用リン資源のアップサイクルに向けた技術開発

地圏環境評価研究グループ 森本 和也, 地圏資源環境研究部門 鈴木 正哉, 地圏環境評価研究グループ 保高 徹生  
 [連絡先] kazuya.morimoto@aist.go.jp

成果概要

製造業分野で不可欠なリン資源の循環利用を目指して、未利用リン資源からリンを夾雑元素の少ないリン酸溶液として回収する技術開発に取り組んだ。下水処理過程において排出される未利用リン資源を想定し、排水を模擬した希薄な濃度のリン酸イオンを選択的に回収する無機系吸着材の合成と性能評価、下水汚泥焼却灰からの効率的なリン酸抽出方法の検討を行った。

研究内容

排水を模擬した希薄な濃度のリン酸イオンに対して選択性を有する環境親和的な鉄系吸着材の合成条件の検討を行った。合成した吸着材により除去したリン酸イオンを脱離液で処理することによって回収し、吸着材は繰り返し使用可能となる再生方法を示すことができた。

下水汚泥焼却灰からのリン酸抽出方法の検討では、下水汚泥焼却灰に陽イオン交換樹脂を混合して懸濁させる反応を用いた(図)。これにより、下水汚泥焼却灰に含まれるカルシウムやマグネシウムのリン酸塩は酸性条件で溶解し、溶出したカルシウムやマグネシウム、またアルミニウムや鉄といった陽イオンも陽イオン交換樹脂に吸着することで溶液には陰イオンであるリン酸イオンが高い濃度で抽出されることを示した。

研究成果はどう使われるか

未利用資源からリン素材の原料となるリン酸溶液を精製する試みを通して、リン素材製造の一部原料自給が可能となれば、国内におけるリン資源循環とサプライチェーンの構築に貢献することが期待される。

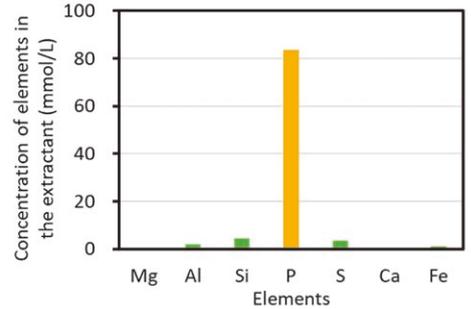
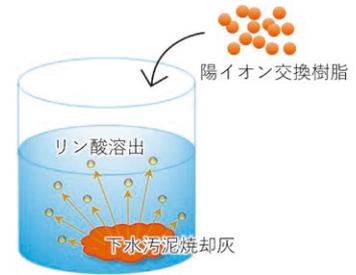


図 陽イオン交換樹脂を用いた下水汚泥焼却灰からのリン酸抽出方法(上)と抽出液の組成(下)

地化学からみた地震, 社会からみた地熱エネルギー

地圏環境評価研究グループ 最首 花恵  
 [連絡先] saishu.h@aist.go.jp

成果概要

地震の発生において、地球物理学や地質学だけでなく、地化学反応も重要な役割を果たすため、シリカ鉱物析出反応速度の計算を行い、石英脈形成と地震発生周期の相関性を議論する考え方についてまとめた。成果は、2024年のSlow-to-Fast 地震学の国際研究集会で発表した。また、地熱エネルギーに関して、オンラインアンケート調査を実施し、地熱発電を含む様々な発電方式に対する一般市民の潜在ニーズと調査手法の有効性に関する論文を発表した。

研究内容

水-岩石相互作用は、地殻内部環境の理解に必要な反応のひとつである。本研究では、地殻内部の高温高圧下における鉱物と水の地化学反応の理解を軸に、地殻内部の岩石や流体の挙動や性質の解明、それらが影響する地震や地熱エネルギーの理解、関連する技術開発と社会課題の解決を目指す。シリカは地殻の主成分であるため、地震発生メカニズムに関与することが示唆されている鉱物脈、とりわけ石英脈の形成と、地震発生周期の時間スケールの相関性について実験や計算により検討を進めている。また、地熱エネルギーに関しては、深部地熱資源システムにおけるシリカ鉱物の地化学反応の役割の検討や、地熱エネルギーに関する社会調査を実施し、地熱エネルギーの社会ニーズの抽出と社会的価値の再定義に取り組んでいる。

研究成果はどう使われるか

地化学を軸とした地震の発生メカニズムや発生周期の議論は、これらにより深い理解の一助となり得る。また、地熱エネルギーの科学的、技術的、社会的な研究を将来的に組み合わせることで地熱エネルギー利活用の推進に寄与したい。

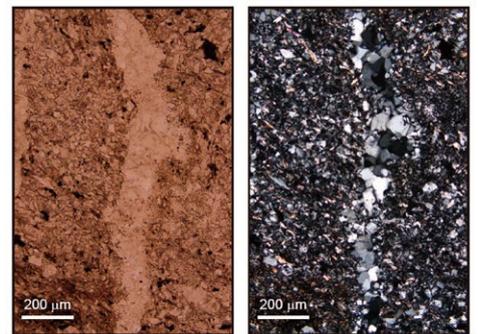


図 1 石英脈の顕微鏡写真 (Saishu et al., 2017)

### 成果概要

福島第一原子力発電所事故後の環境除染で発生した放射性物質を含む除去土壌等の最終処分には、処分方法などの技術的な検討だけでなく、社会受容性に関する知見が不可欠である。そのため、国民の最終処分に対する認識をウェブアンケート調査により調べた。処分物の内容が社会受容性に与える影響を確認するため、高レベル放射性廃棄物および産業廃棄物についても同様に調査した。

### 研究内容

アンケートは関東地域に住む 20 歳から 69 歳の 4500 人を対象とし、除去土壌等あるいは高レベル放射性廃棄物/産業廃棄物処分場の受容について尋ね、処分場の種類による認識の違いを調べた。同時に、社会受容性に影響を与えることが知られている、リスク認知、処分の実施主体への信頼、処分場受入による社会への便益認識等も調べた。さらに、もし近隣へ処分場が建設されることになった場合の印象について尋ねた。その結果、社会受容性は、高レベル放射性廃棄物よりも除去土壌等の方が高く、産業廃棄物とは差が無かった。社会受容性の影響因子であるリスク認知については、高レベル放射性廃棄物は、除去土壌等および産業廃棄物より高かった。処分の実施主体への信頼については、高レベル放射性廃棄物と除去土壌等と同程度であり、産業廃棄物よりも低かった。処分場受入による社会への便益認識については、産業廃棄物で高く、除去土壌等と高レベル放射性廃棄物は低かった。さらに、近隣へ処分場が建設されることになった場合について、除去土壌等と高レベル放射性廃棄物については「危険」や「引っ越しの可能性」への言及が特徴的であったが、産業廃棄物では「環境汚染」を懸念する傾向が見られ、処分場の種類によって人々が抱く認識は異なることが明らかになった。

### 研究成果はどう使われるか

除去土壌等の最終処分は、先行事例も参考にされ進められるだろう。本結果は、人々の除去土壌等への認識は、高レベル放射性廃棄物と産業廃棄物の両方の特徴を持つことを示しており、この特徴に配慮した合意形成が望まれる。

## 吸着層工法に用いられる吸着材の性能評価試験の標準化に向けた検討 - 溶液中の共存イオンの影響

地圏環境評価研究グループ 西方 美羽, 保高 徹生  
[連絡先] m.nishikata@aist.go.jp

### 成果概要

トンネル工事等で発生する建設発生土にはしばしば重金属類が含まれ対策が必要になる場合がある。吸着層工法は建設発生土の低コスト・低環境負荷な対策のひとつであるが、用いられる吸着材について、求められる性能要件を評価可能な性能評価試験法が確立されていないという課題があり、試験法の標準化に向けた検討が行われている。

### 研究内容

本研究ではフッ化物イオンを対象としたバッチ吸着試験を行った。試験にはLDH系材料を用いた。また、試験に用いるフッ化物イオン溶液を水または土壌抽出液によるフッ化物イオン標準液の希釈により調製した。土壌抽出液は実際の建設発生土に対して、水を用いたバッチ溶出試験を実施することで得た。土壌抽出液および土壌抽出液を用いて調製したフッ化物イオン溶液にはフッ化物イオンに加えて硫酸イオンが確認された。バッチ吸着試験の結果、土壌抽出液を用いた吸着試験では、水を用いた吸着試験と比較してフッ化物イオンの吸着率が低いことが確認された。また、吸着材の性能評価指標のひとつである分配係数も、土壌抽出液を用いた試験の方が低い値であり、土壌抽出液中の共存イオンにより吸着材の性能が低下している様子が確認された。



図 吸着層工法の模式図

### 研究成果はどう使われるか

本検討をはじめとしたバッチ吸着試験およびカラム吸着試験の検討結果を参考に、吸着層工法に用いられる吸着材の性能評価試験法が規格化される。規格案はJSAに提出済みである。

Mn 酸化菌を用いた坑廃水処理リアクターに影響を及ぼす環境要因の推定

地圏環境評価研究グループ 小村 悠人, 保高 徹生, TUM Sereyroith, 片山 泰樹  
 [連絡先] kazuya.morimoto@aist.go.jp

成果概要

化学薬品による坑廃水中の有毒な重金属処理には多大の費用がかかっている。本研究チームでは、薬剤による坑廃水処理の代替手段として Mn 酸化菌を利用した坑廃水処理プラントを開発し、有機物の投与なしで 98% 以上の Mn 除去を達成した。本坑廃水処理システムの適用範囲の拡大のため、室内の小型 Mn 処理リアクターを用いて、温度や pH がリアクターの Mn 除去率に及ぼす影響を調査した。

研究内容

坑廃水処理において、pH の上昇により重金属を沈殿させる手法が広く使われるが、アルカリ薬品の投入により多大な費用がかかっている。本研究チームが開発した Mn 酸化菌を活用した坑廃水処理リアクターは、休廃止鉱山坑廃水から有機物の投与なしで 98% 以上の Mn 除去を達成した。本研究では、室内の Mn 酸化リアクターに、中性 pH、酸性 pH の 2 種類の坑廃水を通水することで、温度や pH がリアクターの Mn 除去に与える影響を評価した。

温度に関しては、6 度の低水温においても 80% を超える Mn 除去を示した。また、リアクター内の pH と Mn 除去率には高い相関があり、pH が低下するほど Mn 除去率も低下した。pH2.7 の酸性坑廃水であっても、低流速での通水においては、坑廃水とリアクター内の石灰石が反応することで、pH が中性付近まで上昇し 90% を超える高い Mn 除去を達成した。

研究成果はどう使われるか

Mn 酸化菌を用いた坑廃水処理リアクターは低コストかつ低環境負荷であり、休廃止鉱山の坑廃水処理に有効である。さらに、本試験結果から、低 pH で有機物に乏しいことが想定される坑廃水への広い適用可能性を示した。

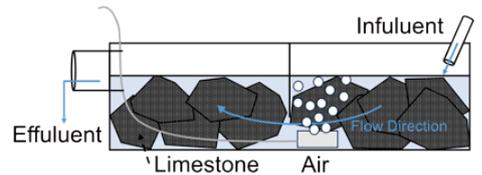
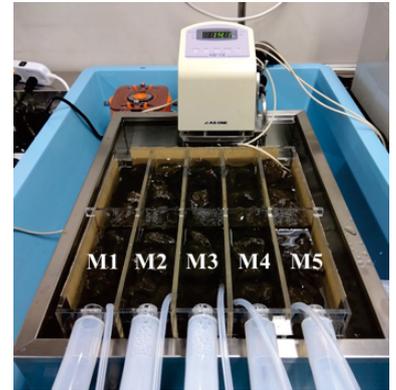


図 室内 Mn 酸化リアクター  
 正面写真 (上), 断面の模式図 (下)

非破壊電気探査を用いた水道管の予防安全管理

物理探査研究グループ 神宮司 元治  
 [連絡先] m.jinguuji@aist.go.jp

成果概要

本研究の目的は、水道管路の予防保全技術の開発と実装である。高度成長期に整備された水道管は老朽化し、鋳鉄製水道管の漏水や破裂リスクが問題となっている。非破壊探査技術と管路マネジメント技術を融合し、劣化状況と更新優先度を評価し、予防保全技術を開発する。

研究内容

主な研究内容は、非破壊探査システムの開発・改良と実装である。まず、腐食土壌調査を効率化し、地盤比抵抗と土質を迅速に測定するシステムを開発した。次に、この技術を地質コンサル企業に移転し、独立したサービス提供が可能となった。現在、SIP で企業や自治体と協力し、モデル地区を選定して実証実験を進めている。

研究成果はどう使われるか

水道コンサルタント企業は、非破壊電気探査技術で得た比抵抗・土質データを用いて水道管の腐食リスクを評価し、長期的な維持管理計画の基盤データを取得する。このデータをもとに、自治体水道局は水道管路の予防保全管理を効率化し、コスト削減を図ることで、持続的な水道サービスを市民に提供する。



図 1 非破壊電気探査の様子: UGV により測定器と電極を牽引し、非破壊で地下を探査する

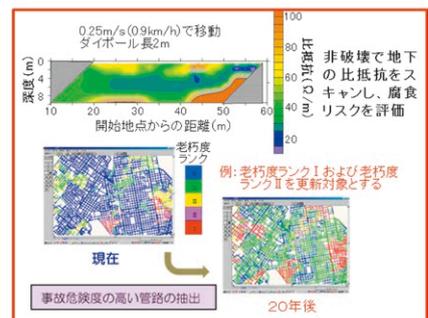


図 2 水道管路マネジメント技術による劣化リスク管理

## 表層型メタンハイドレート賦存海域（上越沖）における各種弾性波探査データ取得

物理探査研究グループ 横田 俊之  
[連絡先] yokota-t@aist.go.jp

### 成果概要

新潟県上越市沖合海域において、高密度三次元反射法、深海曳航方式反射法、海底設置型ノード受振器 (OBN) による弾性波探査を実施した。反射法探査は、調査船より発震器と受振器を曳航し、海底下浅層 200m 程度までの地層内の反射波の分布に関するデータを取得する。深海曳航方式では、海底面付近からデータを取得することにより、海底面下をより詳細に探査することを目指す。

### 研究内容

新潟県上越市沖合の海鷹海脚（水深約 900m）および北鳥ヶ首海脚（水深約 550m）という二つの海域において、海底面下約 200m までの地下構造を詳細に把握するために、三種類の弾性波探査を実施した。発震器と受振器を海面付近で曳航する高密度三次元反射法では、広範囲に網羅的な海底面下画像を取得可能である。発震器・受振器ともに海底面近傍を曳航する、深海曳航方式では、海水中を波動が伝播する距離が短いため、波の減衰が少ないという特徴を持ち、高い周波数の波動を用いた、高分解能な調査が可能となる。海底設置型ノードを用いた探査では、揺動などの影響を受けにくくより高品質なデータの取得が期待される。本研究は、経済産業省のメタンハイドレート研究開発事業の一部として実施いたしました。関係各位に対し、謝意を表します。

### 研究成果はどう使われるか

高分解能な反射断面は、表層型メタンハイドレートの開発段階において、海底下での a メタンハイドレート賦存状況を示す貴重な資料となる。また、高分解能な速度情報は、メタンハイドレートの存在を直接示す指標となり得る。

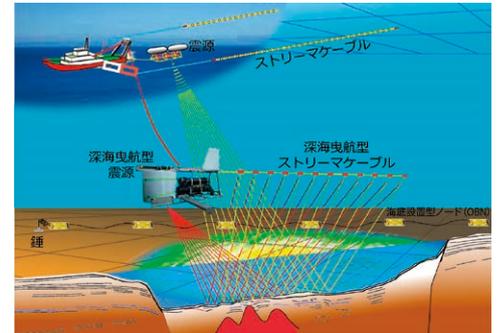


図 1 詳細地下構造探査のための各種弾性波探査の概要

## ポスター発表

### IP 法電気探査の高度化に関する技術開発

物理探査研究グループ 小森 省吾  
[連絡先] komori.shogo@aist.go.jp

### 成果概要

地下構造解釈の高精度化を目的とした IP 法電気探査技術の高度化をソフト・ハードの両面から行っている。時間領域データから広帯域の周波数成分（スペクトル）を抽出する手法を新たに考案し、従来よりも安定したスペクトルを取得することに成功した。また、広帯域のスペクトルを取得可能な時間領域 I P 測定システムを構築し、鉱床探査・地下水資源探査への適用を開始している。

### 研究内容

IP（誘導分極）効果は、金属硫化物や粘土鉱物のような容量成分の大きな物質に電流を印加すると電圧変動に位相遅れが生じる現象である。位相遅れの特性の空間分布を幅広い周波数帯域で明らかにする（スペクトル IP: SIP）ことで地下の鉱物資源の多寡や透水性を把握することが可能であるが、従来の SIP 法電気探査では効率性に欠ける他、送信源由来のノイズが高周波数帯域のデータに大きな影響を与える。また時間領域 IP 法電気探査ではスペクトルを精度よく推定することが難しい。本研究では時間領域 IP 法電気探査を軸に、高サンプリングレートでの多チャンネル時系列データ取得システムの構築、及び、SIP 特性を逆問題として時系列データから推定する手法を考案し、従来よりも高効率かつ安定的に SIP 特性を取得することが可能となった。

### 研究成果はどう使われるか

従来の SIP 法電気探査よりもはるかに高効率な測定により地下の SIP 特性の空間分布を高い空間解像度で把握することが可能であり、火山性塊状硫化物 (VMS) 鉱床や地下水流動フィールド等への適用が期待される。

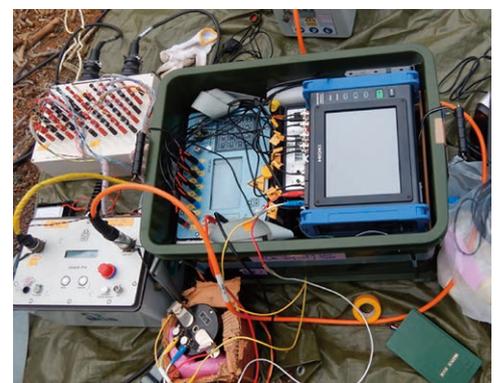


図 1 時間領域 IP データ取得システムの高サンプリングレート・多チャンネル化

## 水位変化による試験堤防のS波速度構造モニタリング

物理探査研究グループ 湊 翔平  
[連絡先] s.minato@aist.go.jp

### 成果概要

実体せん断(S)波を利用した初動走時トモグラフィーにより、試験用堤防における地下水位の変化に伴うS波速度( $V_s$ )の時間変化を高解像に可視化した。この結果、水位の上昇に伴って $V_s$ が低下し、さらに表層の粘土層よりも堤防内部の砂層で大きな変化が発生することを発見した。また、 $V_s$ 変化と地下水分布の変化に対する密度および有効応力の影響を評価した。

### 研究内容

同一周波数帯域ではS波はP波より波長が短く、高解像度で地下構造をイメージできる可能性がある。浅層における地下水分布とその変動は斜面の安定性や地下空間利用に重要であり、S波速度は水の分布に対して感度を持つ。そこで、水位調整が可能な試験用堤防を対象にS波トモグラフィーを用いたモニタリングを実施し、砂層と粘土層における水位変動下の $V_s$ の空間分布とその変動を詳細に調査した。実験初期で不飽和の領域では水位上昇に伴う浸透で $V_s$ が変動し、完全飽和時には大きな $V_s$ の低下を示した。また、水位上昇に伴い河川側斜面から $V_s$ の低下が始まり、最終的には堤防全体で $V_s$ の低下が確認された。 $V_s$ 変化に与える剛性率・密度の変化の影響を議論したほか、飽和状態の領域では過剰間隙水圧がS波速度の変化に寄与する可能性が示唆された。

### 研究成果はどう使われるか

堤防の安定性評価や地下水管理、斜面災害の予測に活用できる。地下構造の高解像度モニタリングに基づく新たな防災対策の指針となり、効果的な水資源管理やインフラ整備に寄与する。

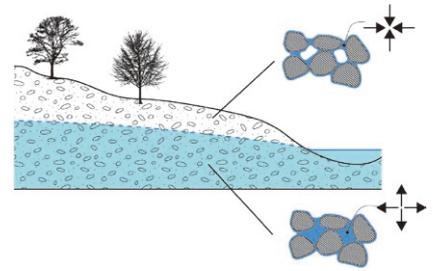


図1 水分と有効応力の関係の模式図

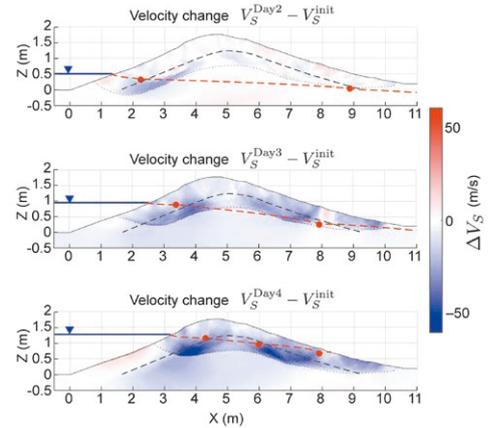


図2 S波トモグラフィーによる $V_s$ モニタリング結果

## 日本海の表層型メタンハイドレート賦存域の音響マッピング及び海底状況把握調査

物理探査研究グループ 浅田 美穂  
[連絡先] asada.miho@aist.go.jp

### 成果概要

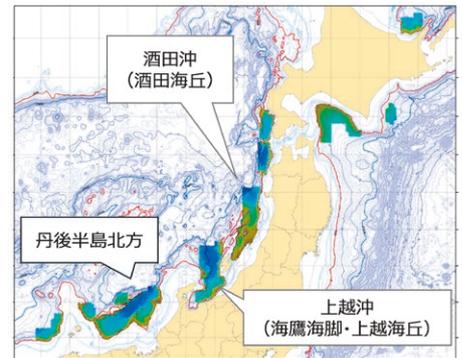
経済産業省「国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレート(MH)の研究開発等事業(メタンハイドレートの研究開発)」の一環として、信頼度高い高精度音響データ取得と海底状況の把握を進め、海域ごとの地質学的背景に基づく違いと共通点を見出して、日本海における表層型MHの形成から消失にかかる挙動の根本理解を目指し研究を進めている。

### 研究内容

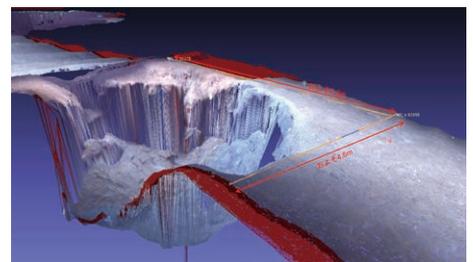
表層型メタンハイドレート(MH)はMHの賦存形態のひとつで、海底面から海底下浅部に塊状・板状・粒状で見つかる傾向がある。表層型MHは最大直径が数百m規模のスケールで、ある海域に集中して見られる事が多い。現フェーズにおける重点調査対象海域である、酒田沖、上越沖、丹後半島北方では、水深や地質学的背景が異なるそれぞれの海域に特徴ある表層型MH賦存形態と、その中に普遍的な性質が見えてきた。

### 研究成果はどう使われるか

表層型MH賦存域の地形、底質、海底下浅部構造、海底状況の情報を高精度で把握して採掘技術開発と環境影響評価に直接貢献する。これにより得られる優れた情報基盤は、採掘または地震など地殻変動によって海底面に変化が発生した際には速やかな検出を可能にする。本研究は経済産業省メタンハイドレート研究開発事業の一部として実施している。



表層型メタンハイドレートの研究開発の重点調査対象三海域(上越沖、酒田沖、丹後半島北方)



海底状況調査による海底の画像の一部。

## 河川堤防における無人地上車両を利用した牽引型電磁探査

物理探査研究グループ 梅澤 良介  
[連絡先] r.umezawa@aist.go.jp

### 成果概要

スリングラム法電磁探査は、非破壊で比較的浅部の比抵抗情報を得ることができる手法であり、無人地上車両 (UGV) と組み合わせた電磁探査システムについて、調査技術開発を行っている。本研究では、河川堤防において弱部の把握が可能か検討するため、河川水位の異なる時期に複数回測定を行った。

### 研究内容

河川堤防の安全性を評価するために、土質構成の把握が求められる。その目的で、従来はボーリング調査や貫入試験が用いられてきたが、河川堤防を傷つけないこと、長大な構造物であることから、非破壊で効率的な調査が求められている。そこで本研究では、UGV とスリングラム法電磁探査を組み合わせた手法を用いて、茨城県を流れる西仁連川の堤防において、異なる時期において繰り返し実験を行った。調査は、時速約 1 km で、電磁探査装置を手持ちで測定する従来手法よりも、効率よく省力化して調査を実施できた。各時期の比抵抗構造を求めたところ、浅部に特徴的な比抵抗の増加が、比較的深部では比抵抗の低下が見られることを確認した。

### 研究成果はどう使われるか

河川堤防における、漏水箇所など弱部の特定に使用できることが期待される。また、河川堤防のように長大な測線以外にも、農地など広大な調査地域において面的で効率的な調査が期待される。

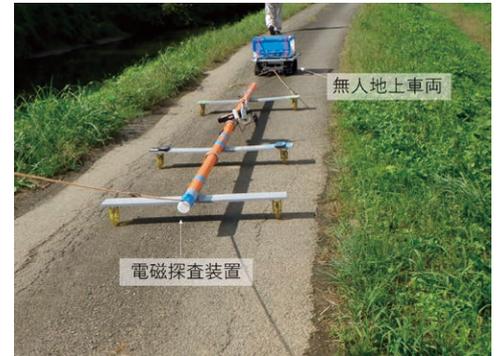


図 1 UGV+ 電磁探査装置を用いた測定システム

## 宇宙線ミュオンと弾性波の統合解析による地下の力学特性および孔隙内充填物推定手法に関する研究

物理探査研究グループ 児玉 匡史, 横田 俊之, 東京大学 松島 潤  
[連絡先] kodama-ms996@aist.go.jp

### 成果概要

代表的な物理探査手法の一つである弾性波探査では地下の力学特性および孔隙内充填物の推定が困難とされている。弾性波速度が弾性定数と密度で表されることが一因と考え、宇宙線ミュオンと弾性波の統合解析による密度と弾性定数への分離手法を検討している。既存手法に対してベイズ推定を適用し数値計算で検証したところ、弾性定数推定値が改善する可能性が示された。

### 研究内容

地下構造を可視化する物理探査手法の一つである弾性波探査では地下の力学特性、孔隙内充填物の推定には不確実性が伴う。等方均質線型な岩石を仮定すると、弾性波探査によって推定可能な P および S 波速度は、二つの弾性定数 (体積弾性率、剛性率) と密度で表される。密度が推定可能な場合には、地下の力学特性に関わる弾性定数が推定でき、密度と弾性定数から孔隙内充填物の推定が可能になる。宇宙線ミュオンはその透過力の高さを利用して近年火山や遺跡等の密度推定に用いられている。そこでミュオンと弾性波から弾性定数の推定を行う確率的統合解析手法を提示した。数値計算を用いて既存手法と比較したところ、密度、弾性波速度の推定値が改善し、それに伴い特に体積弾性率の推定値が改善された。

### 研究成果はどう使われるか

CCS/CCUS などにおける、流体の生産や圧入に伴う岩盤の変形や破壊の評価を通じた貯留層管理、流体分布の把握によるモニタリングへの適用が期待される。

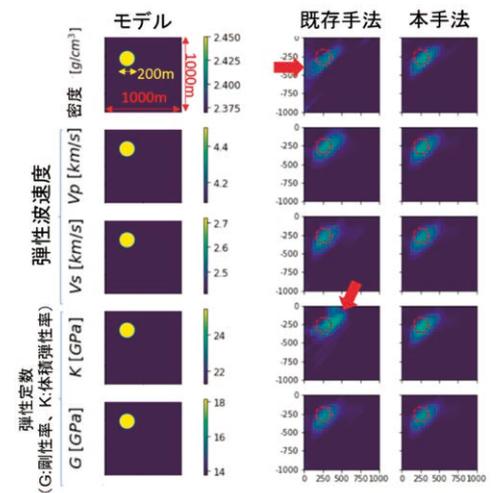


図 2 宇宙線ミュオン、弾性波の統合解析の数値シミュレーション結果

## 室内実験によるジオメカニクスモデリングの高度化

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ 藤井 孝志  
[連絡先] takashi.fujii@aist.go.jp

### 成果概要

CO<sub>2</sub> 地中貯留技術の確立にむけて、地中貯留層への CO<sub>2</sub> 圧入に伴う様々な水理-力学反応を想定した室内実験を行い、得られた知見に基づき、水理・力学連成解析のためのモデリングの高度化に資する知見の提供をめざしている。

### 研究内容

CO<sub>2</sub> 地中貯留の安全な操業において、地中貯留に適した CO<sub>2</sub> 圧入圧や貯留層全体の設計には、水理-力学反応を考慮したジオメカニクスモデリングが必要不可欠である。そこで、CO<sub>2</sub> 地中貯留グループでは、地中貯留に関連した基礎試錐コア、苫小牧 CCS 実証試験サイトから入手した現場コア、ならびに露頭岩を用いて、以下の室内実験を行っている。(i) キャップロックの遮蔽性能を決めるスレッシュホールド圧と浸透率の関係解明や、変形に伴う漏洩挙動に関連し、有効応力条件下での岩石の変形に伴う透水性の変化(漏洩に関連)を調べている。さらに(ii) 粘土等の膨潤性物質を含む貯留岩への CO<sub>2</sub> 圧入に伴い体積変化が生じる。そこで、CO<sub>2</sub> 圧入中および圧入後の数週間の短期貯留を対象に、地化学反応を含めた超臨界 CO<sub>2</sub>/水/岩石の相互作用が岩石の体積変化に及ぼす影響を調べている。

### 研究成果はどう使われるか

- ・水理・力学連成解析のためのジオメカニクスモデリングの高度化。
- ・今後の CCS 展開において地中貯留に適したサイト選定のツールとして提供。

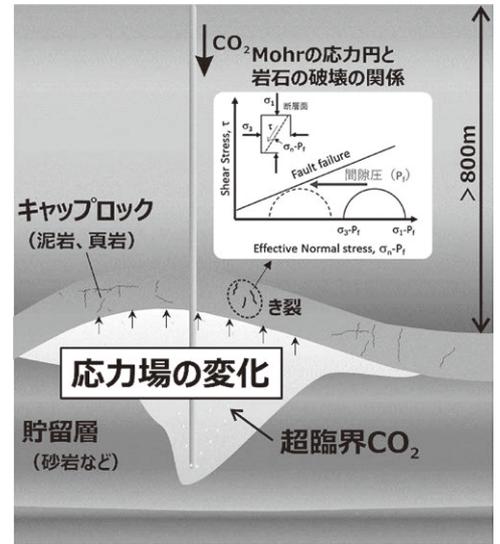


図 CO<sub>2</sub>圧入に伴う水理-力学挙動の概念図

## CO<sub>2</sub>地中貯留における坑井電位モニタリング適用性の数値的検討

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ 加野 友紀  
[連絡先] y.kano@aist.go.jp

### 成果概要

CO<sub>2</sub> 地中貯留や地熱開発における貯留層および周辺領域の多成分多相流動の長期挙動を予測すると共に、力学や地化学との連成、およびそれに伴う地球物理学的応答の解析に取り組んでいる。CO<sub>2</sub> 地中貯留における坑井周囲の CO<sub>2</sub> 移行および漏洩検知を目的とし、フィールドスケールでの CO<sub>2</sub> 圧入や漏洩に伴う自然電位変化の数値解析を行いその適用性を検討した。

### 研究内容

坑口における自然電位は、CO<sub>2</sub> との接触による変化を捉えることで最も漏洩リスクの高い坑井近傍における CO<sub>2</sub> の賦存・移行状況を地表から連続的に監視できると考えられる。本研究では塩水層に圧入され漏洩する CO<sub>2</sub> の長期挙動およびそれに伴う坑口における自然電位変化のシミュレーションを行い、室内実験や現場試験、サイトモニタリングの結果と比較検討を行った。その結果、圧入井近傍の CO<sub>2</sub> 厚や観測井への到達状況、また坑井沿いの漏洩進捗が検知可能なレベルで自然電位の変化に現れることが示唆された。坑井近傍に限定されるが、海域の傾斜井沿いなど、他の手法では捉え難い CO<sub>2</sub> の移行を地表から早期に検知できることが期待される。

### 研究成果はどう使われるか

坑口の自然電位モニタリングにより、海域の傾斜井を管理・保守が容易な地表から、また枯渇油ガス田などの高リスクな既存井・廃坑井に対し、簡便かつ低コストに取付・連続監視を行えることが示唆される。

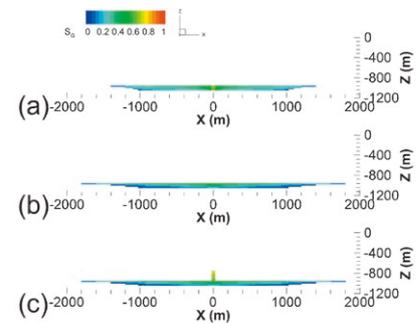


図 1 CO<sub>2</sub>プルームの広がり (a) 圧入停止時 (t= 20 years) (b) 漏洩無し (t= 50 years) (c) 圧入井沿いの漏洩 (t= 50 years)

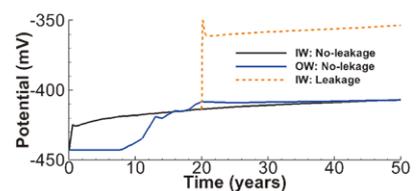


図 2 坑口自然電位の経時変化  
黒実線：漏洩の無い圧入井 (x=0)  
青実線：漏洩の無い観測井 (x=-1,000 m) 橙波線：漏洩が起こった圧入井

## 超伝導重力計を用いた CO<sub>2</sub>挙動モニタリング技術の開発

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ 後藤 宏樹  
[連絡先] h.goto@aist.go.jp

### 成果概要

CO<sub>2</sub> 地中貯留における CO<sub>2</sub> 挙動モニタリングコストの低減を目的として、超伝導重力計を用いた重力連続測定によるモニタリング技術を開発した。北海道苫小牧市沿岸の重力測定サイトでの観測を通じて、この技術が大規模 CO<sub>2</sub> 地中貯留に適用可能な技術であることを示すと同時に、今後の国内 CCS サイトでの適用を見据えた具体的な運用方策も策定した。

### 研究内容

北海道苫小牧市沿岸の重力測定サイトにおいて、極めて高感度な重力計である超伝導重力計を用いた重力連続測定による CO<sub>2</sub> 挙動モニタリング技術を開発した。具体的には、塩害や強風が卓越する過酷な測定環境である沿岸域における超伝導重力計の運用手法を開発した。これにより、世界で初めて 9 年間にもわたる沿岸域での連続測定に成功した。また、CO<sub>2</sub> 挙動以外のさまざまな自然現象に由来する重力ノイズを取り除く解析方法を開発・適用した。さらには、CO<sub>2</sub> 流動シミュレーションに基づく重力変化の予測値と測定値との比較から、本技術が長期 CO<sub>2</sub> 挙動モニタリングに適用可能であることを示した。

### 研究成果はどう使われるか

本技術を、最も有効な CO<sub>2</sub> 挙動モニタリング技術の一つとされる繰り返し反射地震探査と併用することで、地震探査の実施回数を低減し、その結果、CCS における CO<sub>2</sub> モニタリングコストを削減できると考えられる。



図 北海道苫小牧市沿岸の重力測定サイトの外観

## ポスター発表

### 地化学反応に伴う玄武岩の水理特性変化の評価：CO<sub>2</sub>地熱発電技術の開発に向けて

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ 西山 直毅, 祖徠 正夫  
[連絡先] n-nishiyama@aist.go.jp

### 成果概要

CO<sub>2</sub> 地熱発電技術において、地熱貯留層への CO<sub>2</sub> 圧入に伴う地化学反応が浸透率に及ぼす影響を評価するために、温度 200℃、間隙圧 10 MPa の条件下で玄武岩コアに対して CO<sub>2</sub> 溶解水を流通させた。その結果、地化学反応に伴う粘土鉱物の沈殿によって間隙が閉塞され、浸透率が継続的に減少することが明らかとなった。さらに、温度増加に伴い浸透率の減少が速くなる可能性が示唆された。

### 研究内容

著者らは、地熱貯留層に対して CO<sub>2</sub> を圧入して採熱および発電を行う CO<sub>2</sub>-EGS プロジェクトの一環として、CO<sub>2</sub> 圧入に伴う地化学反応（鉱物溶解と沈殿）が貯留層水理特性に及ぼす影響の評価を進めている。本研究では、温度 200℃、間隙圧 10 MPa の条件下で岩石コアに対して様々な流速で CO<sub>2</sub> 溶解水を流通させ、浸透率の変化を調べた（図 1）。試料には、本 CO<sub>2</sub>-EGS プロジェクトにおいて貯留層を構成する岩石の一つとして想定される玄武岩を用いた。地化学反応の進行に伴い浸透率は継続的に減少し、最大で約 1 桁低下した（図 2）。玄武岩の上流側でのみ、各種鉱物の顕著な溶解によって間隙が増加した一方、玄武岩全体で粘土鉱物の沈殿が認められた。粘土鉱物の沈殿によって間隙サイズが減少しており、これが浸透率減少の主な原因と考えられる。100-150℃における浸透率変化と比較したところ、地化学反応による浸透率の減少は温度上昇に伴い速くなることが示唆された。

### 研究成果はどう使われるか

得られた成果は、地熱貯留層において地化学反応が生じた際に、CO<sub>2</sub> 循環の継続性や採熱効率がどのような影響を受けるのかを予測する上での基礎情報としての利用が期待できる。

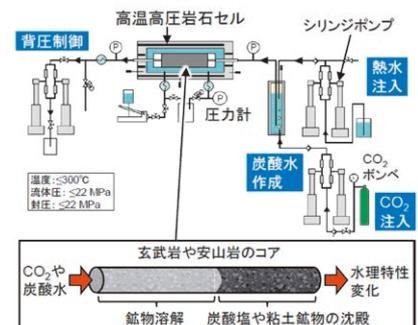


図 1 高温超臨界 CO<sub>2</sub> 流通試験装置の概略図。

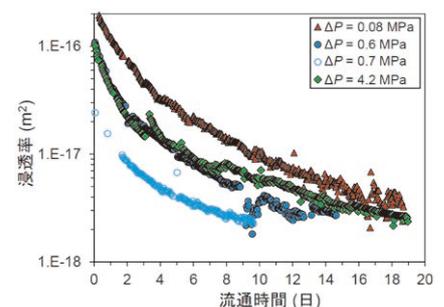


図 2 CO<sub>2</sub>-水-玄武岩反応に伴う浸透率の変化。

## CO<sub>2</sub>地中貯留における漏洩リスク把握のための坑井電位モニタリング

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ 堀川 卓哉  
[連絡先] t.horikawa@aist.go.jp

### 成果概要

坑井の電位が近接する地下水の組成に応じて変化することに着目し、坑井電位の連続観測によって坑井へのCO<sub>2</sub>の到達や漏洩を検知するモニタリング技術を開発した(図1)。本技術を実際のCCSサイトに適用しCO<sub>2</sub>の有無に起因する電位差を捉えたほか、室内実験を通じてCO<sub>2</sub>による鋼材の腐食反応が坑井電位変化の原因であることを明らかにした。

### 研究内容

CCSにおいてCO<sub>2</sub>の漏洩が懸念される経路として坑井近傍が想定されており、CO<sub>2</sub>圧入終了後も長期にわたって坑井の漏洩リスクを監視する必要がある。過去の観測から、CO<sub>2</sub>の圧入に伴って坑井近傍の地表電位が変化することは報告されていたが、坑井自体の電位変化を捉えた例はなく、また具体的な変化メカニズムも分かっていなかった。そこで本研究では、坑井とその周囲の電位を連続観測するシステムを開発し、実際のCCSサイトに適用した(図2)。その結果、圧入井と観測井の間に100mV以上の電位差が検出されたが、これは坑底におけるCO<sub>2</sub>の有無に起因すると考えられる。また、CCSサイトの電気化学的環境を再現した室内模擬実験を行った結果、CO<sub>2</sub>と鋼材(坑井)の間で腐食反応が進行し、腐食生成物が坑井表面を覆う不動態化によって坑井電位の変化が引き起こされることを解明した。

### 研究成果はどう使われるか

坑井の一部に電極を取り付ける簡便な手法であるため、廃坑井がある既存油ガス田をCCSに転用する際などの漏洩監視技術としても期待される。また、コスト面に加え保守が容易であることも、圧入後の長期モニタリングにおいて有用であると考えられる。

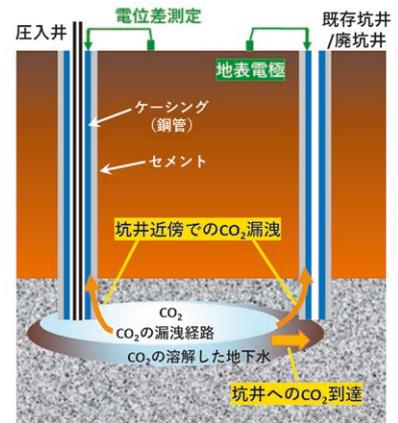


図1 漏洩検知技術の概要図



図2 電位観測システムの設置イメージ

## ポスター発表

### 風化促進実験におけるCO<sub>2</sub>固定量の評価

CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ 西木 悠人  
[連絡先] y.nishiki@aist.go.jp

### 成果概要

岩石風化促進の屋外実験場を産総研つくばセンターの屋上で作製し(図1・図2)、風化モニタリングを開始した。岩石と接触した雨水試料を採取しその水質を分析することで、溶存炭酸種濃度が上昇する(大気中のCO<sub>2</sub>が吸収される)ことを実際に屋外にて確認した。また様々な苦鉄質岩・超苦鉄質岩試料を扱い、岩石種ごとの風化挙動の違いを明らかにした。

### 研究内容

大気中のCO<sub>2</sub>を地表で吸収・固定させるための手法として岩石風化促進法が期待されている。CO<sub>2</sub>地中貯留における地化学トラップと同様に、CO<sub>2</sub>が岩石との反応によって溶解し、最終的には鉱物化されることを想定している。一方で風化促進の特徴として、CO<sub>2</sub>を吸収させるための岩石を選定しやすいこと、またその岩石を粉砕することで表面積が大きくなり化学反応が促進されやすいことが挙げられる。本研究では、様々な苦鉄質岩・超苦鉄質岩と酸化マグネシウムを用いて、屋外にて1年以上の風化モニタリングを実施した。これらの出発物質と雨水が接触することで、pHや溶存イオン濃度の上昇を確認し、CO<sub>2</sub>が溶解によって大気から吸収されていることを実証した。本研究で用いた岩石試料のうち、蛇紋岩(北海道空知-エゾ帯)によるCO<sub>2</sub>吸収量が最大である結果が得られ、蛇紋岩中に含まれる水酸化マグネシウム鉱物の溶解が要因であることが示唆された。

### 研究成果はどう使われるか

屋外で風化促進事業を開始する際、どの岩石をどのように使えば年間どの程度のCO<sub>2</sub>が吸収されるのかを推定することができる。CO<sub>2</sub>吸収量が極めて期待できる岩石が予め理解できている場合は、その産地付近のサイトで事業展開を目指すことができる。



図1 風化促進実験場



図2 反応容器中で風化進行中の岩石試料

機械学習による多孔質岩石構造の特徴抽出と分類

CO2 地中貯留研究グループ 志賀 正茂  
[連絡先] m.shiga@aist.go.jp

成果概要

訓練済みの深層学習モデルと教師なし機械学習手法を用い、マイクロCTで得られた多孔質岩石の構造的な特徴を抽出し分類することに成功した。特に DenseNet と t-SNE の併用によって高い分類スコアを安定して得られることが分かった。さらに、その分類結果の解釈手法を開発し、天然の砂岩のデータセットに対して有用性を示した。

研究内容

本手法では、まず多孔質岩石の二値化されたCT画像(図1(a))から学習済み畳み込みニューラルネットワーク(CNN)モデルによって特徴ベクトルを抽出する。このベクトルはCNNのアーキテクチャによる数千×1の次元を持ち(図1(b))、これを教師なし機械学習によって次元削減することで二次元平面上にプロットする。複数の手法を比較した結果、DenseNet と t-SNE の併用により図1(c)に示すように類似構造を持つ岩石のデータは二次元平面上で互いに近くに、そうでないデータは遠くに配置され、空隙率や比表面積、オイラー特徴量といったグローバルな指標では分類困難な多孔質岩石に対しても高いスコア(3種類の指標で評価)で分類することに成功した。

研究成果はどう使われるか

マイクロCT画像を入力データとし地層中の水理特性を予測する手法が多数開発されているが、提案手法により、出力結果に対する重要な多孔質構造のパターン抽出など、新しい知見の獲得が期待される。

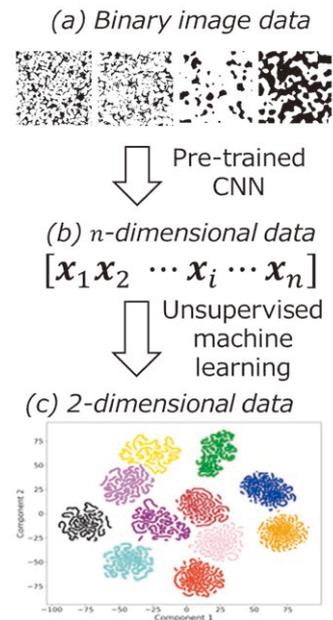


図1 本手法の概略図：(c)は天然の砂岩11種類のデータセットに対してDenseNetとt-SNEを用いた二次元平面上へのマッピング結果。各色は試料の種類に対応し、本手法では試料のラベルを参照することなくクラスターに分類することに成功している。

岩石溶解促進による大気中CO<sub>2</sub>吸収量の試算

地圏環境リスク研究グループ 原 淳子  
[連絡先] j.hara@aist.go.jp

成果概要

地球温暖化対策として、大気中のCO<sub>2</sub>削減は喫緊の地球規模の課題となっている。現在、様々なCO<sub>2</sub>削減手法が評価される中、風化促進法は低コストなアプローチとして期待されている。本研究では、アルカリ成分に富む岩石・鉱物を用いた風化促進試験を行い、アルカリ浸出速度から炭酸塩の沈殿ポテンシャルと溶解速度の推定を行った。

研究内容

炭酸塩は地球表層での炭素吸収源として機能しており、陸域のケイ酸塩風化と海洋域の炭酸カルシウムおよび有機物の沈着は、地質学的時間スケールでの炭素循環を担っている。陸域での炭酸塩固定のポテンシャルとしては、アルカリカチオンの溶出とpHの上昇により浸出液中に大気中のCO<sub>2</sub>を多く吸収することが可能となる。本研究では、アルカリ溶出量の合計値と浸出液中の無機溶存炭素濃度が比例関係にあることを明らかにした。さらに、日本の気象条件下における温度、水質、散布岩石・鉱物の粒子径影響を定量的に評価し、日本の年間平均降水量に基づいて、かんらん石鉱物や玄武岩の岩粉を40トン/haに散布した場合、その場における炭酸吸収量のポテンシャルは10<sup>-3</sup>トン/年/トンのオーダーであることが実験的な裏付けにより試算された。

研究成果はどう使われるか

大気中のCO<sub>2</sub>削減に関わる技術の効率性、実効可能性は、経済的なエネルギー収支を含め議論する必要がある。本研究は、大気CO<sub>2</sub>吸収量を定量的に求めており、エネルギー収支計算において有益なデータとなる。

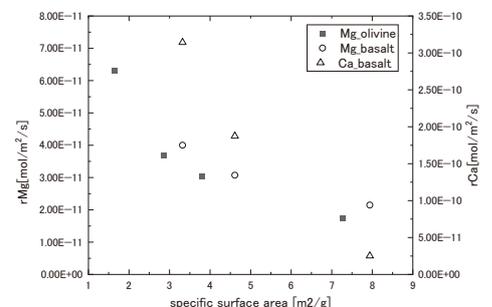


図 Specific area effect of Ca and Mg dissolution from olivine and basalt

ヒ素吸着後の使用済 Mg 系及び Ca 系吸着材の環境安定性に及ぼす土壌の影響

地圏環境リスク研究グループ 杉田 創, 森本 和也(地圏環境評価 RG), 斎藤 健志, 原 淳子  
[連絡先] hajime.sugita@aist.go.jp

成果概要

ヒ素吸着材としてマグネシウム (Mg) 系及びカルシウム (Ca) 系吸着材が期待されているが、汚染水中のヒ素 (As) を除去した吸着材は、それ自体が多量の As を含有するため、適切な処理を行わずに環境中に廃棄された場合、As の再溶出による二次的な環境汚染を引き起こす懸念がある。本研究では、ヒ酸 As(V) 及び亜ヒ酸 As(III) を吸着させた使用済吸着材の土壌中での環境安定性を実験的に評価した。

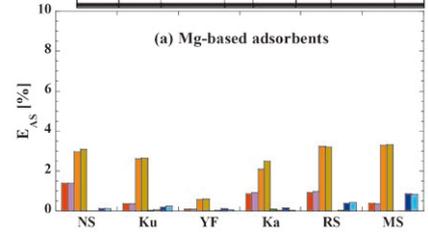
研究内容

吸着材として MgO, Mg(OH)<sub>2</sub>, CaO 及び Ca(OH)<sub>2</sub> を用い、それぞれにヒ酸または亜ヒ酸を吸着させた計 8 種類の使用済吸着材を準備した。溶媒として約 pH7 及び pH4 に調整したイオン交換水を用い、土壌試料として黒ボク土 (Ku), 黄褐色森林土 (YF), 鹿沼土 (Ka), 川砂 (RS) 及び山砂 (MS) をそれぞれ使用済吸着材と共存下で溶出試験を実施した。As 溶出率 (E<sub>AS</sub>) の溶媒 pH の違いによる差はわずかであったが、吸着材及び土壌の種類によって E<sub>AS</sub> は大きく異なった。全体的には、Mg 系よりも Ca 系吸着材の E<sub>AS</sub> が高く、また砂質土壌 (Ka, RS 及び MS) で高くなる傾向が認められた。加えて、As(V) 含有使用済吸着材の E<sub>AS</sub> よりも As(III) 含有使用済吸着材の方が明らかに高くなることが示された。

研究成果はどう使われるか

本研究の結果から、As 除去処理から廃棄及びその後の管理までを考慮すると、(i) 吸着材としては MgO を選択し、(ii) As を吸着材に吸着させる工程の前に As(III) を As(V) に酸化処理することが推奨される。

Symbol	As	Adsorbent	pH <sub>0</sub>	Symbol	As	Adsorbent	pH <sub>0</sub>
■	As(III)	MgO	7	■	As(V)	MgO	7
■	As(III)	MgO	4	■	As(V)	MgO	4
■	As(III)	Mg(OH) <sub>2</sub>	7	■	As(V)	Mg(OH) <sub>2</sub>	7
■	As(III)	Mg(OH) <sub>2</sub>	4	■	As(V)	Mg(OH) <sub>2</sub>	4



Symbol	As	Adsorbent	pH <sub>0</sub>	Symbol	As	Adsorbent	pH <sub>0</sub>
■	As(III)	CaO	7	■	As(V)	CaO	7
■	As(III)	CaO	4	■	As(V)	CaO	4
■	As(III)	Ca(OH) <sub>2</sub>	7	■	As(V)	Ca(OH) <sub>2</sub>	7
■	As(III)	Ca(OH) <sub>2</sub>	4	■	As(V)	Ca(OH) <sub>2</sub>	4

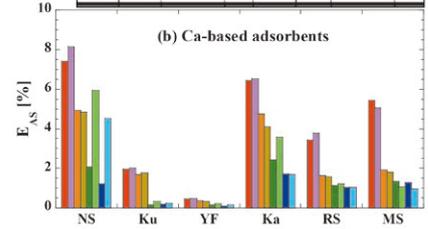


図 土壌に対する As 溶出率の比較 : (a) 使用済 Mg 系吸着材, (b) 使用済 Ca 系吸着材 NS: 土壌無し, Ku: 黒ボク土, YF: 黄褐色森林土, Ka: 鹿沼土, RS: 川砂, MS: 山砂

メンブレンフィルターの粒子通過性能評価

地圏環境リスク研究グループ 井本 由香利  
[連絡先] y-imoto@aist.go.jp

成果概要

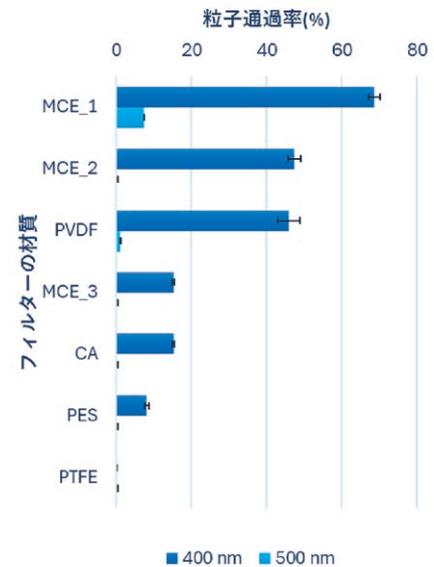
土壌の汚染状態を判定する土壌溶出量試験では、孔径 0.45 μm のメンブレンフィルターが使われる。その材質等の違いにより試験結果に差が生じることが報告されており、粒子の捕捉性の違いが要因であると考えられている。本研究では、孔径未満の大きさの粒子に着目して、材質やメーカーの異なるフィルターの粒子通過性能を比較した。

研究内容

土壌溶出量試験の試験操作が結果の再現性に与える影響については、多くの調査が実施されている。産総研でも、振とう方向やフィルターの交換頻度に関する研究を関連機関と協力して進めてきた。本研究では、ろ過操作に関連する課題解決のため、環境分野で求められるフィルターの性能評価方法の開発に取り組んでいる。フィルターの表示孔径は、この孔径より大きな粒子は除去されることを示している。一方、現状では、孔径未満の粒子の除去率や通過率を把握するための情報は不足している。本研究では、粒径標準粒子や標準粉体を用いたろ過試験を実施した。フィルターの種類により孔径未満の粒子通過率が有意に異なること、ならびに目詰まり等がない条件下では粒子通過率がフィルターの平均流量孔径と関連性があることを確認した。

研究成果はどう使われるか

適切なフィルター選定が促進され、これにより土壌溶出量試験の再現性向上に寄与する。さらに、この成果は新規フィルター規格の開発につながる、より信頼性の高い環境評価が実現される。



孔径 0.45 μm メンブレンフィルターにおけるポリスチレン粒子通過率の比較例 (MCE: セルロース混合エステル, PVDF: ポリビニリデンフロライド, CA: セルロースアセテート, PES: ポリエーテルスルホン, PTFE: ポリテトラフルオロエチレン, MCE\_1~3 はメーカーの違い)



### 微生物によるクロロエチレン類浄化への“土壌”の影響評価

地圏環境リスク研究グループ 吉川 美穂, 原 淳子, 早稲田大学(現所属) 川辺 能成  
 [連絡先] m.yoshikawa@aist.go.jp

#### 成果概要

微生物による地下水・土壌汚染の浄化に関して、大部分の研究は地下水や液体培地を媒体として行われてきており土壌の違いには着目されてこなかった。このことが、実用化の進展を妨げていると考えられる。本研究では汚染サイト由来の土壌を用いた室内浄化試験を行い、土壌種の違いがクロロエチレン類の浄化速度に与える影響を評価した。

#### 研究内容

土壌を用いた浄化試験を行いその速度を評価するため、あらかじめ滅菌した豊浦砂および汚染サイトの土壌 2 種と塩類培地、炭素源、土壌の水抽出液、汚染物質であるテトラクロロエチレン (PCE) をバイアル瓶内で混合した。さらにクロロエチレン類を浄化可能な微生物の培養液を添加して浄化試験を開始し、クロロエチレン類およびエチレンを GC で経時分析した。同じ微生物培養液を使用して浄化試験を行ったが、PCE をエチレンへ完全浄化するのに要する日数は土壌によって大きく異なり、その差は最大で 2.3 倍となった。最も浄化が速く進んだ土壌の水抽出液を添加すると、浄化が遅延していた土壌での浄化が促進された。土壌種により浄化速度は大きく異なり、土壌中の水溶性物質が浄化に与える微生物の活性を高め浄化を促進していることが推察された。

#### 研究成果はどう使われるか

微生物による浄化、バイオレメディエーションの施工可否を判断する上でサイトの土壌を使用して浄化試験を実施することが重要であることを示した。本研究の一部は科研費 19K15131 の助成を受けて実施した。

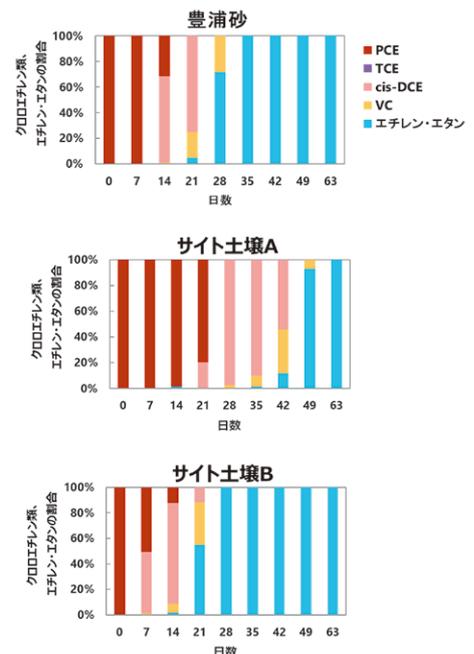


図 各土壌を使用した浄化試験におけるクロロエチレン類およびエチレン, エタンの割合変化  
 PCE は cis-ジクロロエチレン (DCE), クロロエチレン (VC) を経て無害なエチレン, エタンへ脱塩素化された。



### 紫外線によるマイクロプラスチックの劣化が鉛吸着量に及ぼす影響

地圏環境リスク研究グループ 齋藤 健志  
 [連絡先] take-saitou@aist.go.jp

#### 成果概要

マイクロプラスチック (MPs) は、自然環境中だけではなく、植物や魚類、人体などの生物体を含む、あらゆる環境中で検出され、近年、地球規模の課題に発展している。本研究では、異なる材質の MPs, また、紫外線劣化させた MPs に対する重金属類、特に鉛の吸着特性を評価した。紫外線による物理的な劣化により、MPs への鉛吸着量は数十倍程度の範囲で、上昇することが分かった。

#### 研究内容

対象とした MPs は、主要なプラスチックであるポリエチレン (PE) ならびにポリプロピレン (PP) である。いずれも、市販製品である樹脂版材料を粉砕し、粒度調整して作成した MPs (粒径: 300 ~ 2,000 μm) である。吸着試験は、MPs と鉛溶液 (超純水ベースで作成) を重量体積比 1 : 10 (1 g : 10 mL) で混合し、20℃で 24 時間、200 rpm で水平振とうした。その後、3,000 × g で 20 分間の遠心分離に供し、上澄み液を 0.45 μm のフィルターで濾過を行い、その溶液中の鉛濃度を ICP-MS により定量した。加えて、本研究では、室内で人工的に紫外線を長期間照射し (自然の太陽光換算で 4 ~ 6 年程度)、MPs を物理的に劣化させた MPs についても、同程度の粒度に調整後、同様の吸着試験に供した。

#### 研究成果はどう使われるか

MPs は、水環境中などを移動する過程で、ごく微量な鉛等の環境汚染物質を高濃度に吸着する可能性がある。しかし、現状、その知見に限られることから、本成果は、MPs のリスク評価に関わる基礎的知見としての活用が期待される。

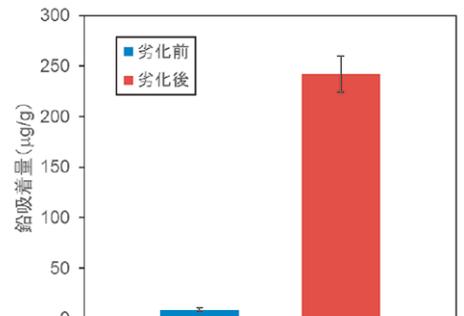


図 紫外線劣化前後の PP に対する鉛吸着量の比較

## 土壌中のナノプラスチック濃度の測定技術を開発

地圏環境リスク研究グループ 土田 恭平  
[連絡先] k.tsuchida@aist.go.jp

### 成果概要

ナノプラスチック (NPs) は、ごみの不法投棄や河川の氾濫、農耕地でのプラスチックの利用などに起因して地圏環境中へ流出し、ヒトへの健康影響をおよぼすことが懸念されている。しかしながら、土壌中 NPs 濃度測定手法は確立されていないことが問題である。よって本研究では、ヒトへの NPs 暴露量評価を詳細に行うために、土壌中の NPs 濃度測定技術を開発した。

### 研究内容

本研究では、粒度分布や有機物の含有量など特性の異なる 6 種類の土壌から作成した懸濁液と 203 nm のポリスチレン NPs を混合して 6 種類の土壌懸濁液 (NPs 濃度 5 mg/L) を用意した。土壌粒子と NPs の吸光度スペクトルは図のように異なるため、土壌懸濁液に対して 2 つの波長の吸光度を測定することで、懸濁液中の NPs 濃度を定量できる。本研究では、6 種類の土壌懸濁液に対して 200 nm から 500 nm までの範囲で 20 nm 間隔で異なる 2 つの波長の組み合わせを試行した。その結果、波長 220 ~ 260 nm および波長 280 ~ 340 nm の吸光度での組み合わせで算出される NPs 濃度が実際の NPs 濃度である 5 mg/L との差が最小になることが明らかになった。よって、これら 2 つの範囲の波長の組み合わせがさまざまな性質の土壌懸濁液中の NPs 濃度を算定するのに適していると考えられる。

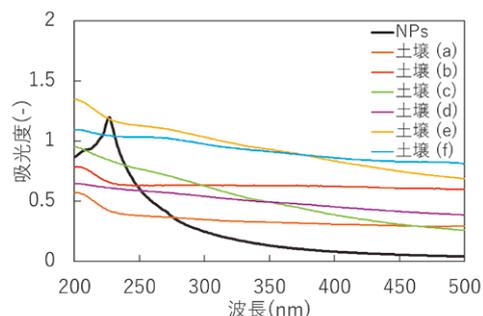


図 NPs と土壌の吸光度スペクトル

### 研究成果はどう使われるか

土壌中の NPs 濃度測定手法を開発することにより、地圏環境中での NPs の分布や NPs の移動挙動を把握することができ、ヒトへの NPs 暴露量評価につながることを期待される。

## 高時間分解能の放射光その場観察変形実験で探る深部断層形成と地震発生のメカニズム

地圏メカニクス研究グループ 雷 興林  
[連絡先] xinglin-lei@aist.go.jp

### 成果概要

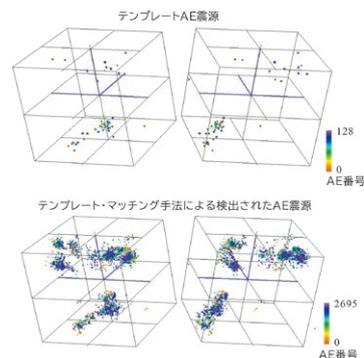
本研究は、『地下 400 ~ 600km に沈み込むプレートの内部での深発地震発生に至っている』謎を解明することを目的とし、プレート内において準安定カンラン石からなる Metastable Olivine Wedge (MOW) という領域が存在することが深発地震発生の原因となっているかを検証する。

### 研究内容

本研究では、室内実験と地震学的観測の両面からこれを証明することを目指す。特に実験では、D-DIA 6 面圧縮試験を行い、変形に伴う微小破壊のモニタリングにより、以下の 2 点を証明していく：① 準安定カンラン石が存在する深さ 600km より浅い環境下では、カンラン石のナノ粒子化によって断層すべりと深発地震発生に至る。② 600km 以深では、準安定カンラン石が存在しえないために深発地震が起こりえない。今年度では、AIST の分担内容として、高感度記録装置の立ち上げ、多チャンネル (16) ・高速 (250MHz) 連続破壊音 (AE) 波形データ収録・AE 震源決定を中心とするソフトウェアの改良を実施する。

### 研究成果はどう使われるか

本研究の予想が証明されることで、世界各地の沈み込み帯の深部における深発地震発生のリスク評価が可能となっていくことものと期待される。



Lei, X., T. Ohuchi, M. Kitamura, X. Li, and Q. Li (2022). An effective method for laboratory acoustic emission detection and location using template matching, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 14, 1642-1651.

図 1 岩石試料実験結果実例 震源が精度良く決められた128個の AE 波形と震源情報を用いて、テンプレート・マッチング手法の適用により計 2695個の AE 震源を相対的に決めることができた。震源分布は実験後の試料の SEM 画像から確認できる断層と亀裂との対比を行い、主な断層の形成タイミングを AE の時空間分布から推測することが可能。

## 泥岩を用いた室内岩石実験と多孔質弾性パラメータ

地圏メカニクス研究グループ 及川 寧己(現部門付)  
[連絡先] y.oikawa@aist.go.jp

### 成果概要

CO<sub>2</sub>の圧入により岩盤を構成する岩石の力学的性質がどのように変化するかを明らかにするための室内岩石載荷試験を実施してきた。CO<sub>2</sub>の圧入量に応じた力学特性変化の定式化に取り組み、岩石を多孔質弾性体と見なした時の力学パラメータの変化に関する検討を行ったところ、圧入量が比較的少ない段階から見かけの弾性係数が1/4に低下するという影響が見られた。

### 研究内容

CO<sub>2</sub>の地中貯留は、直接的にCO<sub>2</sub>を地表から減少させる方法として期待されている。国内における実施に備え、CO<sub>2</sub>の圧入時に地下でシール岩(キャップロック)としての役割が想定される泥岩の力学的性質がどのように変化するかを明らかにするための室内岩石載荷試験をこれまで実施してきた。そこで得られたデータを用いてCO<sub>2</sub>の圧入量に応じた力学特性変化の定式化に取り組み、岩石を多孔質弾性体と見なした場合の力学パラメータの変化に関する検討を行ったところ、CO<sub>2</sub>の圧入により見かけの弾性係数が1/4に低下するという影響が圧入の初期段階からでも生じる可能性があることが分かった。孔隙率や孔隙相互の連結性によってこの関係は変化すると考えられ、そのメカニズムに関して今後の検討が必要である。

### 研究成果はどう使われるか

CO<sub>2</sub>の地中貯留における貯留岩盤の基礎データとしての活用が期待される。

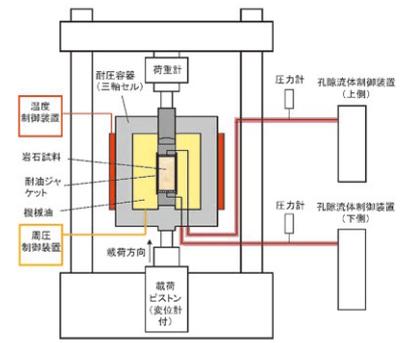


図1 岩石載荷試験装置の構成概念図

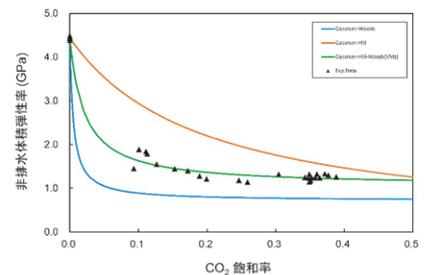


図2 多孔質弾性パラメータとCO<sub>2</sub>飽和率の関係の例

## 三軸圧縮応力下における珪藻土の時間依存性挙動

地圏メカニクス研究グループ 竹原 孝  
[連絡先] t-takehara@aist.go.jp

### 成果概要

岩石の長期的な変形挙動を予測するために、様々な種類の岩石の時間依存性挙動に関する数多くの調査が実施されている。しかし、珪藻土の強度のひずみ速度依存性やクリープ挙動など、時間依存性挙動については不明な点が多い。本研究では、非排水条件での定ひずみ速度試験およびクリープ試験結果に温度環境と含水比の影響を考慮したモデル化を検討した。

### 研究内容

本研究では、温度環境を常温(25℃)と高温(80℃)の両方で、非排水条件および10 MPaの拘束圧力下で、珪藻土試験片の定ひずみ速度およびクリープ試験を実施した。異なる温度で強度の違い(最大応力差)が観察され、強度の違いは含水比と温度条件の相互作用によって引き起こされる可能性が考えられた。また、珪藻土の強度のひずみ速度依存性とクリープ挙動を求め、実験結果に岩石の時間依存性挙動を考慮したコンプライアンス可変型構成方程式を適用し、試験結果の傾向をおおむね再現することがわかった。今後の課題としては、さらなる三軸圧縮試験を通じて改良された構成方程式を策定することが挙げられる。

### 研究成果はどう使われるか

特定放射性廃棄物の地層処分では、周辺岩盤の遮蔽効果と力学的安定性を長期的に評価することが不可欠である。長期安定性挙動のシミュレーション実施にあたり、岩盤物性値の決定に資すると考えられる。

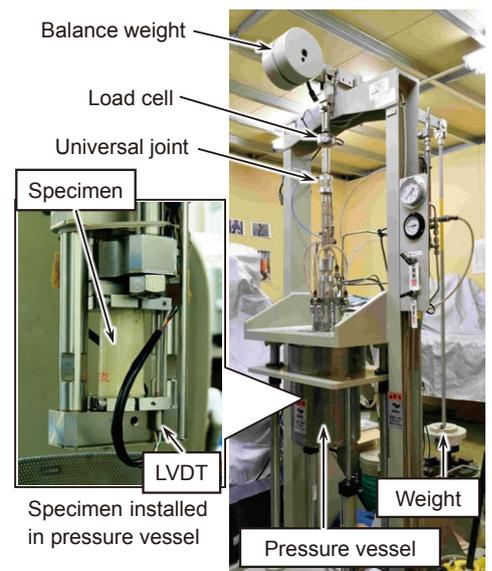


図1 てこ式長期高温高圧クリープ試験装置

## PDC ビットの掘進速度の低下に影響する摩耗状態の定量的評価

地圏メカニクス研究グループ 宮崎 晋行  
[連絡先] miyazaki-kuniyuki@aist.go.jp

### 成果概要

岩盤の掘削によるビットの摩耗に伴い、掘進速度は低下する。石油井や地熱井の掘削に使用される PDC ビットに関して、その摩耗の進み方は明らかにされていない。本研究では、PDC ビットの摩耗状態を表す定量的な指標について、室内での掘削試験結果に基づき、工学的な観点から検討した。

### 研究内容

寸法の異なる 2 丁の PDC ビットを用いて実施した室内掘削試験の結果に基づいて、PDC ビットの摩耗状態を表す定量的な指標について、①掘削距離との関係性、②掘削する岩石の物理的・化学的特性との関係性、③掘進速度の低下との関係性、の 3 つの観点から検討した。その結果、PDC カッターのダイヤ層の摩耗体積を  $V_{wd}$  とすると、①  $V_{wd}$  は掘削距離に概ね比例し、② 単位掘削長当たりの  $V_{wd}$  の増分が岩石の摩耗能を表す指標と良い相関を示し、かつ、③ 掘進速度が  $V_{wd}$  に対し指数関数的に低下することを見出した。この 3 つの性質は、 $V_{wd}$  が PDC ビットの摩耗状態を表す定量的な指標として利便性・実用性が高いことを示しており、工学的に重要な知見といえる。

### 研究成果はどう使われるか

本研究成果を基に、PDC ビットの摩耗による掘進速度の低下を考慮した掘進速度モデルを提案している。本モデルを用いることにより、より現実的な坑井の掘削計画の策定が可能になると考えている。



図 室内掘削試験で使用した PDC ビット (ビット径216 mm)

## ポスター発表

### 最大主応力に対する断層の角度が注水時の断層運動に及ぼす影響

地圏メカニクス研究グループ 北村 真奈美  
[連絡先] kitamura.m@aist.go.jp

### 成果概要

地熱開発や  $\text{CO}_2$  地中貯留をはじめとする様々な地圏利用では、地下へ流体を圧入し、流体圧入に起因する誘発地震が世界各地の地下利用現場で観測されている。本研究では、その中でも、最大主応力に対する断層の角度が注水時の断層運動に及ぼす影響を調べるため、主応力軸に対して異なる角度の試料を用いて室内注水試験を実施した。

### 研究内容

本研究では、最大主応力に対する断層面の角度が注水時の断層運動に及ぼす影響を調べることを目的に、主応力軸に対して 3 種類の異なる角度 ( $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ) の模擬断層面を有する稲田花崗岩を用いて注水実験をおこなった。現時点では予察的な段階ではあるが、本研究の結果、圧力条件が同じであれば断層の角度によらず、応力降下後の剪断応力値や摩擦係数が同程度であることが確認できた。そして断層の角度の増加に伴い、応力降下直前の剪断応力は大きな値を示し、それが応力降下量の増加をもたらす傾向が認められた。また、断層面の角度が大きいくほど、注水後、応力降下が発生するまでの時間が短くなる傾向がみられた。

### 研究成果はどう使われるか

本研究の成果は、広域応力場の最大主応力に対して動きづらい姿勢の断層が震源となる誘発地震の観測事例の解釈や、そのような断層が分布する地域での注水計画のモデル策定の一助となる可能性がある。



図 1 室内注水試験に用いた産総研設置の油圧式三軸圧縮装置



### 成果概要

PDC ビットを用いた室内掘削試験の結果から, Miyazaki et al. (2022) の掘進速度モデルの適用可能範囲を検証した。既往研究の結果と併せると, 掘削現場で想定される様々な岩石種・回転速度・ビット径に対して, 掘削の初期を除き, Miyazaki モデルが広く適用可能であることが確認された。一方, ローラーコーンビットの試験結果とは調和的でなく, 異なるビットタイプには適用できないことが示唆された。

### 研究内容

Miyazaki et al. (2022) は, 一軸圧縮強度 80-115 MPa の岩石と直径 216 mm の PDC ビット (掘削現場での使用前後) を用いた室内掘削試験の結果から, 掘進速度がビット荷重の二乗に比例するモデルを提案した。本研究では, Miyazaki モデルが他の掘削条件においても適用可能かを検証すべく, 一軸圧縮強度 82-228 MPa の岩石と直径 159 mm の PDC ビット (異なる四種類の摩耗度) を用いた室内掘削試験を実施した (図)。その結果, 掘削の初期に対応する摩耗度を持つビットを除き, 岩石強度・回転速度によらず二乗則が概ね成り立つことがわかった。一方で, ローラーコーンビットを用いた試験結果 (Karasawa et al., 2002a, b) は二乗則と調和的でないことがわかった。よって, Miyazaki モデルは, 掘削現場で想定される様々な岩石種・回転速度・ビット径・摩耗度に対し, PDC ビットを用いる限りは広く適用可能であると言える。

### 研究成果はどう使われるか

岩盤掘削を伴う地圏産業において, 掘削計画の最適化を通じた工期の短縮を目指す際, 事業現場において Miyazaki モデルを採用することの根拠として用いられる。



図 室内試験で掘削された岩石試料



## 論文リスト

安藤 佑介, 荒岡 大輔, 吉村 寿紘, 中島 礼 (2023) 瑞浪層群明世層産貝類におけるストロンチウム同位体年代の再計算結果, 瑞浪市化石博物館研究報告.

[https://doi.org/10.50897/bmfm.50.2\\_7](https://doi.org/10.50897/bmfm.50.2_7)

Masahiko Ono, Isao Machida, Masaru Koshigai, Reo Ikawa, Atsunao Marui (2023) Vertical distribution of groundwater age in and around the freshwater-saltwater transition zone determined using noble gases and carbon isotopes, *Journal of Hydrology*.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130353>

Naoyuki Yoshihara, Ryosuke Umezawa (2023) Combining portable cone penetration test and electrical resistivity tomography to assess residual risks after shallow landslides: a case at the Hokkaido Eastern Iburi earthquake in 2018 in Japan, *Landslides*.

<https://doi.org/10.1007/s10346-023-02098-4>

Yusuke Miyajima, Daisuke Araoka, Toshihiro Yoshimura, Yuki Ota, Atsushi Suzuki, Hideyoshi Yoshioka, Masahiro Suzumura, Daniel Smrzka, Jörn Peckmann, Gerhard Bohrmann (2024) Lithium isotope systematics of methane-seep carbonates as an archive of fluid origins and flow rates, *GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA*.

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.10.022>

Miho Asada, Mikiya Yamashita, Rina Fukuchi, Toshiyuki Yokota, Tomohiro Toki, Akira Ijiri, Kiichiro Kawamura (2023) Identification of a large mud volcano field in the Hyuganada, northern end of the Ryukyu trench, offshore Japan, *Frontiers in Earth Science*.

<https://doi.org/10.3389/feart.2023.1232302>

Masashige Shiga, Tetsuya Morishita, Masaatsu Aichi, Naoki Nishiyama, Masao Sorai (2023) Correlation between Contact Angle and Water Film of Carbon Dioxide - Water - Clay Mineral Interfacial Systems, *ENERGY & FUELS*.

<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c02471>

Jun Xiao, Zhiqi Zhao, Julien Bouchez, Xiaolin Ma, Philip A.E. Pogge von Strandmann, Daisuke Araoka, Toshihiro Yoshimura, H.M. Zakir Hossain, Hodaka Kawahata, Zhangdong Jin (2023) Geothermal input significantly

influences riverine and oceanic boron budgets, *EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS*.

<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118397>

Kosuke Inoue, Yuto Nishiki, Keisuke Fukushi, Reo Suma, Tsutomu Sato, Hiroshi Sakuma, Kenji Tamura, Shingo Yokoyama, Misato Shimbashi, Tomoyuki Mizukami, Kensuke Unami, Yohei Noji, Takuma Kitajima, So Fukaya, Yasuo Takeichi, Shohei Yamashita, Hiroki Suga, Yoshio Takahashi (2023) Systematic comparison of Mg K-edge XANES spectra of magnesium-bearing clay minerals and magnesium silicate hydrates: A promising tool for identifying magnesium silicate hydrate in natural samples, *APPLIED CLAY SCIENCE*.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107152>

Ryuto Kamo, Yuki Tsunazawa, Taketoshi Koita, Kyoko Okuyama, Motonori Iwamoto, Yasuyoshi Sekine, Chiharu Tokoro (2023) Evaluating the grinding performance of cutter-type disk mills using DEM-CFD simulations with a breakage model, *ADVANCED POWDER TECHNOLOGY*.

<https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104303>

辰本 拓也, 綱澤 有輝, 小坂 丈敏, 高谷 雄太郎, 小山 恵史, 所 千晴 (2023) 衝撃試験とDEMシミュレーションによる電子スクラップの単体分離機構の考察, *Journal of MMIJ*.

<https://doi.org/10.2473/journalofmmij.139.52>

Taiki Katayama, Reo Ikawa, Masaru Koshigai, Susumu Sakata (2023) Microbial methane formation in deep aquifers associated with the sediment burial history at a coastal site, *Biogeosciences*.

<https://doi.org/10.5194/bg-20-5199-2023>

Naoyuki Yoshihara, Naoya Hiramoto, Tsuyoshi Hattanji (2023) Subsurface structures of solution dolines inferred from electrical resistivity tomography: a hypothesis on the evolutionary process of solution dolines at the Akiyoshi-dai Plateau, southwest Japan, *GEOMORPHOLOGY*.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108921>

Shuan Zhang, GuoYan Jiang, CaiJun Xu, XingLin Lei, JinRong Su, XueKai Lin (2024) Activity characteristics of the 2019 two Ms > 5.0 earthquake sequences in eastern Weiyuan

- (Sichuan) and body-wave velocity structure of the source region, CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS-CHINESE EDITION.  
<https://doi.org/10.6038/cjg2023Q0932>
- Xinglin Lei, Zhiwei Wang, Shengli Ma, Changrong He (2024) Step-over of strike-slip faults and overpressure fluid favor occurrence of foreshocks: Insights from the 1975 Haicheng fore-main-aftershock sequence, China, *Earthquake Research Advances*.  
<https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2023.100237>
- Shogo Komori, Shinichi Takakura, Yuji Mitsuhata, Toshiyuki Yokota, Toshihiro Uchida, Masahiko Makino, Yosuke Kato, Kazuya Yamamoto (2024) Three-dimensional resistivity structure in Toya caldera region, Southwest Hokkaido, Japan — Constraints on magmatic and geothermal activities, *Geophysics*.  
<https://doi.org/10.1190/geo2022-0558.1>
- Min Liu, Yen Joe Tan, Xinglin Lei, Hongyi Li, Yunpeng Zhang, Weitao Wang (2024) Intersection between tectonic faults and magmatic systems promotes swarms with large-magnitude earthquakes around the Tengchong volcanic field, southeastern Tibetan Plateau, *GEOLOGY*.  
<https://doi.org/10.1130/G51796.1>
- Takuma Hasegawa, Kotaro Nakata, Yuichi Tomioka, Tomoko Ohta, Shunichi Okamoto, Atsunao Marui, Isao Machida, Reo Ikawa, Masahiko Ono, Shinji Matsumoto (2024) Identification of modern meteoric water, glacial meteoric water, and fossil seawater in a deep borehole at the coastal area of Horonobe, north Japan, using groundwater dating and paleoclimatic proxy methods, *CHEMICAL GEOLOGY*.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121826>
- Hajime Sugita, Kazuya Morimoto, Takeshi Saito, Junko Hara (2024) Simultaneous Removal of Arsenate and Fluoride Using Magnesium-Based Adsorbents, *Sustainability*.  
<https://doi.org/10.3390/su16051774>
- Kohtaro Ujiie, Naoki Nishiyama, Hisaki Yamamoto, Minoru Yamashita, Takayoshi Nagaya, Takashi Sano, Yui Kouketsu (2024) Duplex Underplating, Sediment Dehydration and Quartz Vein Mineralization in the Deep Tremor Source Region, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SOLID EARTH*.  
<https://doi.org/10.1029/2023JB027901>
- Momo Takada, Michio Murakami, Susumu Ohnuma, Yukihide Shibata, Tetsuo Yasutaka (2024) Public attitudes toward the final disposal of radioactively contaminated soil resulting from the Fukushima Daiichi nuclear power station accident, *ENVIRONMENTAL MANAGEMENT*.  
<https://doi.org/10.1007/s00267-024-01938-w>
- Sarah S Zeichner, José C Aponte, Surjyendu Bhattacharjee, Guannan Dong, Amy E. Hofmann, Jason P. Dworkin, Daniel P. Glavin, Jamie E. Elsila, Heather V. Graham, Hiroshi Naraoka, Yoshinori Takano, Shogo Tachibana, Allison T. Karp, Kliti Grice, Alex I Holman, Katherine H. Freeman, Hisayoshi Yurimoto, Tomoki Nakamura, Takaaki Noguchi, Ryuji Okazaki, Hikaru Yabuta, Kanako Sakamoto, Toru Yada, Masahiro Nishimura, Aiko Nakato, Akiko Miyazaki, Kasumi Yogata, Masanao Abe, Tatsuaki Okada, Tomohiro Usui, Makoto Yoshikawa, Takanao Saiki, Satoshi Tanaka, Fuyuto Terui, Satoru Nakazawa, Sei-Ichiro Watanabe, Yuichi Tsuda, Kenji Hamase, Kazuhiko Fukushima, Dan Aoki, Minako Hashiguchi, Hajime Mita, Yoshito Chikaraishi, Naohiko Ohkouchi, Nanako O Ogawa, Saburo Sakai, Eric T. Parker, Hannah L McLain, Francois-Regis Orthous-Daunay, Véronique Vuitton, Cédric Wolters, Philippe Schmitt-Kopplin, Norbert Hertkorn, Roland Thissen, Alexander Ruf, Junko Isa, Yasuhiro Oba, Toshiki Koga, Toshihiro Yoshimura, Daisuke Araoka, Haruna Sugahara, Aogu Furusho, Yoshihiro Furukawa, Junken Aoki, Kuniyuki Kano, Shin-Ichiro M Nomura, Kazunori Sasaki, Hajime Sato, Takaaki Yoshikawa, Satoru Tanaka, Mayu Morita, Morihiko Onose, Fumie Kabashima, Kosuke Fujishima, Tomoya Yamazaki, Yuki Kimura, John M. Eiler (2023) Polycyclic aromatic hydrocarbons in samples of Ryugu formed in the interstellar medium, *SCIENCE*.  
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adg6304>
- Oktanius Richard Hermawan, Takahiro Hosono, Jun Yasumoto, Ko Yasumoto, Ke-Han Song, Rio Maruyama, Mariko Iijima, Mina Yasumoto-Hirose, Ryogo Takada, Kento Hijikawa, Ryuichi Shinjo, Effective use of farmland soil samples for N and O isotopic source fingerprinting of groundwater nitrate contamination in the subsurface dammed limestone aquifer, Southern Okinawa Island, Japan, *JOURNAL OF HYDROLOGY*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129364>
- Yusuke Kawasaki, Shohei Minato, Ranajit Ghose (2024) Subsoil density field reconstruction through 3D FWI: a systematic comparison between vertical- and horizontal-force seismic sources,

GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL.

<https://doi.org/10.1093/gji/ggad445>

西山 直毅 (2024) 地質媒体における物質移動と岩石 - 水相互作用に関する研究, 岩石鉱物科学.

<https://doi.org/10.2465/gkk.240123>

保高 徹生, 藤田 司, 内藤 航, 大西 正輝, 村上 道夫, 井元 清哉, 奥田 知明 (2024) 卒業式や入学式等における新型コロナウイルスの感染リスク評価, リスク学研究.

<https://doi.org/10.11447/jjra.O-23-001>

荒岡 大輔, 吉村 寿紘, 中島 礼 (2024) パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本産地から産出した貝化石のストロンチウム同位体年代 (予察), 瑞浪市化石博物館研究報告.

[https://doi.org/10.50897/bmfm.50.3\\_13](https://doi.org/10.50897/bmfm.50.3_13)

Momo Takada, Jun Hirouchi, Ikuo Kujiraoka, Shogo Takahara, Thierry Schneider, Michiaki Kai (2024) Temporal Changes in Cumulative Mortality Risks of Cancer, by Occupation, in the Working Population of Japan from 1995 to 2020: A Benchmark for Radiation Risk Comparison, JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION.

<https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad2ebc>

Monami Kondo, Yasuhide Sakamoto, Junko Hara, Takeshi Komai, Noriaki Watanabe (2024) Clarification of Generation Mechanism of Volatilization Flux based on Detailed Analysis of Transport Phenomena near the Ground Surface and Quantitative Evaluation of Influencing Factors, JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133356>

Louis Canet, Momo Takada, Tetsuo Yasutaka (2024) Comparative Qualitative and Quantitative Analysis of Guidelines for Nuclear Accident Recovery, RADIOPROTECTION.

<https://doi.org/10.1051/radiopro/2023043>

町田 功, 坂東 和郎, 藤野 丈志, 小西 雄二, 五十石 浩介, 井川 怜欧 (2024) 新潟県阿賀野市・五泉市の被圧地下水の流動について, 地下水学会誌.

<https://doi.org/10.5917/jagh.66.19>

Yusuke Miyajima, Tomo Aoyagi, Hideyoshi Yoshioka, Tomoyuki Hori, Hiroshi A. Takahashi, Minako Tanaka, Ayumi Tsukasaki, Shusaku Goto, Masahiro Suzumura (2024) Impact of concurrent aerobic-anaerobic methanotrophy on methane emission from marine sediments in gas hydrate area, ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09484>

Jun Hirouchi, Ikuo Kujiraoka, Shogo Takahara, Momo Takada, Thierry Schneider, Michiaki Kai (2024) Comparison of lifetime mortality risk, incidence risk, and DALYs of baseline cancer rates among countries as a benchmark for radiation-related cancer risk, JOURNAL OF

RADIOLOGICAL PROTECTION.

<https://doi.org/10.1088/1361-6498/ad4043>

Yuki Tsunazawa, Nobukazu Soma, Motoyuki Iijima, Junich Tatami, Takamasa Mori, Mikio Sakai (2024) Validation study on a coarse-grained DEM-CFD simulation in a bead mill, POWDER TECHNOLOGY.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119743>

Katsuhiko Tsukimura, Kazuko Manpuku, Youko Miyoshi, Masaya Suzuki, Tetsuich Takagi, Shin-ichiro Wada (2024) Amorphous Nanoparticles in Clays, Soils and Sediments: Their Relation to Specific Surface Area and Plasticity, CLAY SCIENCE.

<https://doi.org/10.11362/jcssjclayscience.MS-23-7>

Takashi Fujii, Yasuki Oikawa, Xinglin Lei, Masao Sorai (2024) Experimental investigation of the hydro-mechanical response of soft rocks in the CO<sub>2</sub> injection process - Impacts of fracture roughness and brittleness index on the evolution of permeability behavior, INTERNATIONAL JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND MINING SCIENCES.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105742>

Hidaya Hassan, Jacob Kaavera, Akira Imai, Kotaro Yonezu, Thomas Tindell, Kenzo Sanematsu, Koichiro Watanabe (2024) Cu-Au-Platinum Group Element Mineralization in the Mbesa Prospect, Southern Tanzania: Unconventional Magmatic Sulfides, ECONOMIC GEOLOGY.

<https://doi.org/10.5382/econgeo.5068>

Zhiwei Wang, Xinglin Lei, Shengli Ma, Hong Fu, Xiaojing Hu, Kaiying Wang, Yusuke Mukuhira, Changrong He (2024) Dynamic triggering of earthquakes and the role of overpressure fluids in active geothermal areas in Yunnan, China, TECTONOPHYSICS.

<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230361>

Aogu Furusho, Chiharu Ishii, Takeyuki Akita, Mai Oyaide, Masashi Mita, Hiroshi Naraoka, Yoshinori Takano, Jason P. Dworkin, Yasuhiro Oba, Toshiki Koga, Kazuhiko Fukushima, Dan Aoki, Minako Hashiguchi, Hajime Mita, Yoshito Chikaraishi, Naohiko Ohkouchi, Nanako O. Ogawa, Saburo Sakai, Daniel P. Glavin, Jamie E. Elsila, Eric T. Parker, Jos'e C. Aponte, Hannah L. McLain, Francois-Regis Orthous-Daunay, V'eronique Vuitton, Roland Thissen, C'edric Wolters, Philippe Schmitt-Kopplin, Alexander Ruf, Junko Isao, Norbert Hertkorn, John M. Eiler, Toshihiro Yoshimura, Haruna Sugahara, Heather V. Graham, Yoshihiro Furukawa, Daisuke Araoka,

- Satoru Tanaka, Takaaki Yoshikawa, Fumie Kabashima, Kazunori Sasaki, Hajime Sato, Tomoya Yamazaki, Morihiko Onose, Mayu Morita, Yuki Kimura, Kuniyuki Kano, Junken Aoki, Kosuke Fujishima, Shin-ichiro Nomura, Shogo Tachibana, Tomoki Nakamura, Takaaki Noguchi, Ryuji Okazaki, Hikaru Yabuta, Hisayoshi Yurimoto, Kanako Sakamoto, Toru Yada, Masahiro Nishimura, Aiko Nakato, Akiko Miyazaki, Kasumi Yogata, Masanao Abe, Tomohiro Usui, Makoto Yoshikawa, Takanao Saiki, Satoshi Tanaka, Fuyuto Terui, Satoru Nakazawa, Tatsuaki Okada, Sei-ichiro Watanabe, Yuichi Tsuda, Kenji Hamase (2024) Enantioselective three-dimensional high-performance liquid chromatographic determination of amino acids in the Hayabusa2 returned samples from the asteroid Ryugu, *Journal of Chromatography Open*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcoa.2024.100134>
- Masashige Shiga, Tetsuya Morishita, Naoki Nishiyama, Masao Sorai, Masaatsu Aichi, Ayaka Abe (2024) Atomic-Scale Insights into the Phase Behavior of Carbon Dioxide and Water from 313 to 573 K and 8 to 30 MPa, *ACS Omega*.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00133>
- Hajime Sugita, Kazuya Morimoto, Takeshi Saito, Junko Hara (2024) Effects of Soils on Environmental Stability of Spent Mg-based and Ca-based Adsorbents Containing Arsenite, *Sustainability*.  
<https://doi.org/10.3390/su16104008>
- Takuya Horikawa, Makoto Katsura, Satoru Nakashima (2024) Evaluation of drying shrinkage effects on the elastic properties of porous sandstones using a modified micromechanical model, *GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL*.  
<https://doi.org/10.1093/gji/ggae110>
- 高田 モモ, 三成 映理子, 松本 親樹, 岩崎 雄一, 鈴木 薫, 保高 徹生 (2024) 除去土壌等の減容化に関する社会受容における重要要素, *環境放射能除染学会誌*.
- Obey Gotore, Miho Watanabe, Kunihiro Okano, Naoyuki Miyata, Taiki Katayama, Tetsuo Yasutaka, Yuki Semoto, Takaya Hamai (2024) Effects of batch and continuous-flow operation on biotreatment of Mn(II)-containing mine drainage, *Journal of Environmental Sciences*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.05.038>
- Shinji Matsumoto, Taiki Katayama, Tetsuo Yasutaka, Shingo Tomiyama, Saburou Yamagata (2024) Component Separation and Origin Estimation of Mining-Influenced Water Based on Fluoride Ions and Water Isotopes in Underground Legacy Mine, Central Japan, *Journal of Hydrology-Regional Studies*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101856>
- 竹原 孝, 宮崎 晋行, 坂本 靖英 (2024) 三軸圧縮応力下における珪藻土の時間依存性挙動とそのモデル化, *Journal of MMIJ*.  
<https://doi.org/10.2473/journalofmmij.140.94>
- Taiki Katayama, Masaru K. Nobu, Hiroyuki Imachi, Naoki Hosogi, Xian-Ying Meng, Kana Morinaga, Hideyoshi Yoshioka, Hiroshi A. Takahashi, Yoichi Kamagata, Hideyuki Tamaki (2024) A Marine Group A isolate relies on other growing bacteria for cell wall formation, *Nature Microbiology*.  
<https://doi.org/10.1038/s41564-024-01717-7>
- Shunya Kaneki, Yui Kouketsu, Mutsuki Aoya, Yoshihiro Nakamura, Simon R. Wallis, Yusuke Shimura, Ken Yamaoka (2024) An automatic peak deconvolution code for Raman spectra of carbonaceous material and a revised geothermometer for intermediate-to moderately high-grade metamorphism, *Progress in Earth and Planetary Science*.  
<https://doi.org/10.1186/s40645-024-00637-8>
- 宮崎 晋行, 竹原 孝, 矢野 雅大, 宮本 哲臣, 都築 雅年 (2024) 地熱井掘削用 PDC ビットの研究開発, *Journal of MMIJ*.  
<https://doi.org/10.2473/journalofmmij.140.76>
- Manami Kitamura, Miki Takahashi, Norio Shigematsu (2024) low failure during faulting and formation of a porous framework under hydrothermal conditions: Role of feldspar sintering in granitoids, *GEO THERMICS*.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102995>
- Kyouhei Tsuchida, Yukari Imoto, Takeshi Saito, Junko Hara, Yoshishige Kawabe (2024) A novel and simple method for measuring nano/microplastic concentrations in soil using UV-Vis spectroscopy with optimal wavelength selection, *Ecotoxicology and Environmental Safety*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116366>
- Yuki Tsunazawa, Yoshihiro Kosaku, Ryuto Kamo, Ryo Miyazawa, Yoshiaki Nishina, Chiharu Tokoro (2024) DEM study on investigation of wet particle conveying efficiency in an inclined belt conveyor system, *ADVANCED POWDER TECHNOLOGY*.  
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2024.104555>
- Miho Watanabe, Sereyroith Tum, Taiki Katayama, Obey Gotore, Kunihiro Okano, Shinji Matsumoto, Tetsuo Yasutaka, Naoyuki Miyata (2024) Accelerated manganese(II) removal by in situ mine drainage treatment system without organic substrate amendment: Metagenomic insights into chemolithoautotrophic manganese

oxidation via extracellular electron transfer, *Journal of Environmental Chemical Engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113314>

Kai Nils Nitzsche, Toshihiro Yoshimura, Naoto F. Ishikawa, Hodaka Kawahata, Nanako O. Ogawa, Katsuhiko Suzuki, Daisuke Araoka, Naohiko Ohkouchi (2024) Zinc isotope fractionation during the sorption of Zn to minerals and organic matter in sediment cores affected by anthropogenic pollution, *APPLIED GEOCHEMISTRY*.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106047>

Toshihiro Yoshimura, Daisuke Araoka, Hiroshi Naraoka, Saburo Sakai, Nanako O. Ogawa, Hisayoshi Yurimoto, Mayu Morita, Morihiko Onose, Tetsuya Yokoyama, Martin Bizzarro, Satoru Tanaka, Naohiko Ohkouchi, Toshiki Koga, Jason P. Dworkin, Tomoki Nakamura, Takaaki Noguchi, Ryuji Okazaki, Hikaru Yabuta, Kanako Sakamoto, Toru Yada, Masahiro Nishimura, Aiko Nakato, Akiko Miyazaki, Kasumi Yogata, Masanao Abe, Tatsuaki Okada, Tomohiro Usui, Makoto Yoshikawa, Takanao Saiki, Satoshi Tanaka, Fuyuto Terui, Satoru Nakazawa, Sei-ichiro Watanabe, Yuichi Tsuda, Shogo Tachibana, Yoshinori Takano (2024) Breunnerite grain and magnesium isotope chemistry reveal

cation partitioning during aqueous alteration of asteroid Ryugu, *Nature Communications*.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-50814-y>

Hajime Sugita, Kazuya Morimoto, Takeshi Saito, Junko Hara (2024) Removal performance and adsorption behavior on Mg-based adsorbents in As(III) and F simultaneous removal as in comparison with As(V), *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*.  
<https://doi.org/10.1144/geochem2024-022>

Junko Hara, Kazuhiro Sayama (2024) Accounting of weathering enhancement by mafic mineral spreading for CO<sub>2</sub> storage, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*.  
<https://doi.org/10.1144/geochem2024-036>

Taiki Katayama, Hideyoshi Yoshioka, Toshiro Yamanaka, Susumu Sakata, Yasuaki Hanamura (2024) The geothermal gradient shapes microbial diversity and processes in natural-gas-bearing sedimentary aquifers, *Biogeosciences*.  
<https://doi.org/10.5194/bg-21-4273-2024>

Hanae Saishu, Momo Takada, Tetsuo Yasutaka, Nobukazu Soma (2025) Understanding the latent needs of diverse stakeholders unfamiliar with geothermal energy, *GEO THERMICS*.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103154>

令和6年12月2日発行 地圏資源環境研究部門 研究成果報告会 2024  
GREEN Report 2024 AIST04-C00014-23 (本誌記事写真等の無断転載を禁じます。)

■編集・発行

〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 つくばセンター 中央事業所7群  
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門  
<https://unit.aist.go.jp/georesenv/>