

GREEN Report 2023

海と陸をつなぐ地下水の動き

—地層処分研究における地圏資源環境研究部門の取り組み—

第40回GSJシンポジウム 地圏資源環境研究部門 研究成果報告会
〈共催〉産業技術連携推進会議 環境エネルギー部会・地圏環境分科会、
知的基盤部会・地質地盤情報分科会

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研究成果報告会はお陰様で今回 22 回目を迎え、第 40 回の地質調査総合センター (GSJ) シンポジウムとしても位置付けられています。コロナ禍を経て対面開催を再開してから 2 回目になりますが、過去の成果報告会と同様に、ご参加頂いた皆様から多くのご意見やご教示を頂き、今後の当部門の活動の糧とさせて頂ければ幸いです。

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 力年) の 4 年目に当たります。当部門では、“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、重点研究課題として、

- 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 つの方向性を定めて研究活動を推進しています。社会生活のみならずイノベーションの基盤でもある各種地下資源の安定供給への貢献、地圏の開発を持続可能なものとするために不可欠な環境の保全や適正な活用、さらに、これらを基盤的に支える各種技術の向上にも注目し、これら 3 つの方向から横断的・分野融合的に、“研究成果の社会実装”も念頭において活動をしています。今回の成果報告会では、特に上記の 2) に関連し、「海と陸をつなぐ地下水の動き－地層処分研究における地圏資源研究部門の取り組み－」を中心テーマとしました。

高レベル放射性廃棄物等の地層処分 (以下、地層処分) に関する研究は、当部門発足時の産総研第 1 期 (2001～2005 年度) から既に産総研の中期計画に記載されており、現在の第 5 期においても当部門が重点的に取り組む課題の一つとして位置付けています。本課題には大きな社会的重要性があり、長きに渡って様々な観点での研究活動を進めておりますが、現在の当部門は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として「地層処分技術調査等事業 (地層処分共通技術調査：沿岸部処分システム評価確証技術開発)」を (一財) 電力中央研究所ならびに (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センターと共同で受託し、沿岸部における地層処分技術の信頼性と安全性の向上を目的に、概要調査段階等で必要となる各種技術の開発・高度化に取り組んでいます。前述の当部門の方向性を反映し、社会課題の一つとして地層処分事業の実現に向け、将来的に安全に実施することが可能となる地質環境特性を見極めることに資する研究活動を行っています。

一方、GSJ は「日本唯一の地質調査のナショナルセンター」です。そのため GSJ 内の別の研究部門である活断層・火山研究部門は原子力規制庁からの各種委託研究を受託し、国として基盤的に整備すべき長期地質変動や地下水環境等に関する知見の整備を行う形で、地層処分の安全規制への支援を行っています。地層処分の実現には「事業として実施する立場」と「安全面の規制をつかさどる立場」の両方が必要ですが、GSJ では 2 つの立場に関する研究活動の主体を研究部門単位で分離させております。そして不必要な利益相反等が生じないよう、研究のコンタミネーションが生じないように十分に配慮しております (図 1)。地圏資源環境研究部門では、地下水研究グループと物理探査研究グループが「事業として実施する立場」に係る研究を担当しています。

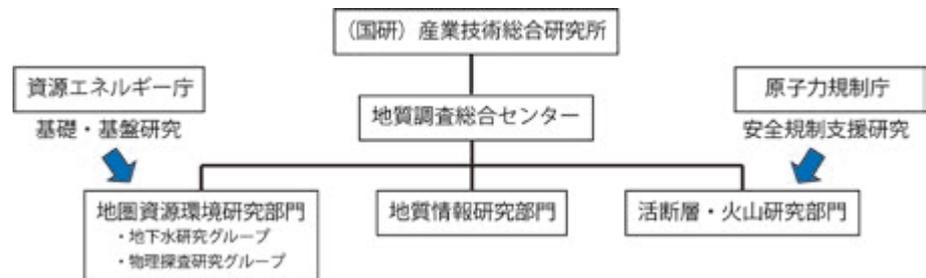


図 1 産業技術総合研究所 地質調査総合センターにおける地層処分に関連する研究実施体制

本日の報告会では、当部門で進めている地層処分技術調査等事業が令和 5 年度をもって 5 年間の実施期間を終了し、一区切りとなることから、これまでの沿岸域における研究活動を総括してご報告いたします。本事業の概要の他、静岡県東部の駿河湾で行ってきた沿岸域地下水に関する諸研究について、ボーリング調査や海底湧出地下水の調査、地下水流動シミュレーションなどに基づく最新の研究成果をご紹介します。さらに招待講演として、資源エネルギー庁北村課長補佐から「我が国における地層処分の事業および研究開発の取組」のご講演を頂きます。本事業における当部門の取り組みの位置付けの他に、GSJ 全般も含めて今後のご期待なども頂ければと考えております。ご来場の皆様には、質疑応答の時間に限らず、ぜひお気軽に各講演者とコミュニケーションをして頂きまして、本課題の更なる発展の参考にさせて頂くとともに、当部門研究員との今後の連携などもご検討頂ければと思います。

本報告会では、今回の中心テーマに限定しない地圏資源環境研究部門の全体のご報告として、9 つある各研究グループや研究者個人の研究成果を広く知って頂く目的でポスターセッションも設けております。若手研究員を中心に、フレッシュな研究内容も少なからずございますので、ぜひ御来場頂いた方には研究者との交流や質疑応答などを時間の許す限りして頂ければと思います。

コロナ禍を経まして、私どもも対面開催の価値を今一度考え直しました。常に研究や調査から新しい成果を創出するのが我々の仕事であるがゆえ、正直、“Web カメラの下”では情報発信に制約があることは事実です。しかし、ポスターセッションでは本当にフレッシュな研究内容のお話も可能ですので、ぜひ個別にご議論いただければと思います。また、口頭発表後の休憩や隙間のお時間も、研究者との対面での交流にご利用頂ければと思います。

本報告会は、当部門の研究成果を広く皆様に発信する機会であると同時に、ご来場の皆様から直接、学術・技術分野の枠を超えた貴重なご意見を伺うことができる重要な機会であると考えており、当部門発足 2 年目から一度も途絶えず継続して開催しています。皆様におかれましては、今後とも変わらずご高配を賜りますようお願い申し上げます。

令和 5 年 12 月 8 日

目次

講演題目

13:30 ~ 13:35	開会のあいさつ	副研究部門長	鈴木 正哉	
13:35 ~ 14:00	地圏資源環境研究部門の概要	研究部門長	相馬 宣和	
14:00 ~ 14:40	【招待講演】我が国における地層処分の事業 および研究開発の取組	資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課	課長補佐 北村 暁	6
14:40 ~ 15:10	海と陸をつなぐ研究 ～沿岸部プロジェクトの概要～	地下水研究グループ	井川 怜欧	12
15:10 ~ 16:00	ポスターセッション			
16:00 ~ 16:25	沿岸部深層ボーリング調査からみえたもの	地下水研究グループ	町田 功	16
16:25 ~ 16:50	数値シミュレーションで見る沿岸部における 地下水の流れ	地下水研究グループ グループ長	吉岡 真弓	20
16:50 ~ 17:15	沿岸部の地質環境を海底湧出地下水で探る	地下水研究グループ	小野 昌彦	24
17:15 ~ 17:20	閉会のあいさつ	地質調査総合センター長	中尾 信典	

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	28
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	30
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	34
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	36
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	40
物理探査研究グループの紹介	物理探査研究グループ長	横田 俊之	42
CO ₂ 地中貯留研究グループの紹介	CO ₂ 地中貯留研究グループ長	徂徠 正夫	46
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	50
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	54

ポスター概要

表層崩壊跡地に残存する災害リスクの可視化－2018年北海道胆振東部地震における事例－	吉原 直志, 梅澤 良介	60
核磁気共鳴検層による体積含水率の原位置計測	中島 善人, 井川 怜欧, 町田 功 越谷 賢 (サンコーコンサルタント(株))	60
金属元素の安定同位体比分析法の開発状況	荒岡 大輔	61
選鉱プロセスの高効率化を目的とした粉体シミュレーション技術の開発	綱澤 有輝	61
熱・二酸化炭素・除湿を1台で行える施設園芸用システムの構築	鈴木 正哉, 万福 和子	62
ビニールハウスにおけるハスクレイを用いた熱供給型除湿装置	万福 和子, 鈴木 正哉	62
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	63
上越海盆の冷湧水域における長期モニタリング機器の設置	後藤 秀作, 青木 伸輔 (香川大学) 齋藤 直輝 (地質情報研究部門) 長尾 正之	63
日本海上越沖で採取された堆積物の土質特性	佐藤 幹夫, 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) CK22-03C 乗船研究者一同	64
マンガン酸化菌を用いたパッシブトリートメントの処理のモデル化	TUM Sereyroith, 保高 徹生	64
社会調査による地熱の市民ニーズと新しい価値の探索	最首 花恵, 高田 モモ, 保高 徹生, 相馬 宣和	65
休廃止鉱山のズリ堆積場に含まれる亜鉛の化学形態および溶出機構の推定	西方 美羽, 保高 徹生	65
宇宙線ミュオンと弾性波の融合利用による弾性定数推定の室内実験	児玉 匡史, 横田 俊之, 松島 潤	66
最上トラフ酒田海丘 (仮称) における表層型メタンハイドレートの形成, 成長, 欠損史考察	浅田 美穂, 横田 俊之, 佐藤 幹夫, 棚橋 学, 後藤 秀作	66
CO ₂ 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, 徂徠 正夫	67
地熱条件下における CO ₂ -水-岩石反応が浸透率に及ぼす影響	西山 直毅, 徂徠 正夫	67
豪州 CO ₂ 圧入現場岩石を用いた断層の摩擦・透水特性に関する実験的研究	藤井 孝志	68
石油系炭化水素を対象とした発光バクテリアを用いた土壌汚染評価手法の開発－アルカン混合成分の複合毒性影響について－	杉田 創, 駒井 武	68
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	斎藤 健志, 土田 恭平, 井本 由香利, 原 淳子	69
土壌中マイクロプラスチックの移動性評価	土田 恭平, 井本 由香利, 斎藤 健志	69
地震時の滑り挙動推定における掘削坑での温度測定の有効性	金木 俊也	70
水が関与する誘発地震発生のメカニズム解明に向けて	北村 真奈美, 宮崎 晋行, 竹原 孝, 雷 興林	70
地熱発電において注水に伴う有効圧の変化が断層の挙動に及ぼす影響	Garam KIM, 北村 真奈美, 澤井 みち代 (千葉大学)	71

論文リスト



講演題目

我が国における地層処分の事業及び研究開発の取組

Status on Implementation, Research and Development of Geological Disposal of High-level Radioactive Waste and TRU Waste.

経済産業省資源エネルギー庁・電力・ガス事業部放射性廃棄物対策課 課長補佐：北村 暁
 Deputy Director, Radioactive Waste Management Policy Division, Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry
 Akira Kitamura
 e-mail: kitamura-akira@meti.go.jp

1. はじめに

我が国において、廃棄体を地下 300 m 以上の深い地層に埋設処分する「地層処分」の対象となる放射性廃棄物は、原子炉で燃焼させた使用済核燃料の再処理に伴い発生する高レベル放射性廃棄物 (HLW) 及び一部 (地層処分相当) の TRU 廃棄物である (図 1)。法令では、これらを総称して「特定放射性廃棄物」と呼び、その処分に関する法律を「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律 (平成十二年法律第百十七号)」という。これらの廃棄物については、生活環境における放射線被ばくの影響を受けないよう、複数のバリア機能を用いて閉じ込めと隔離を行うこととしている。本報告では、我が国における地層処分の事業及び研究開発の取組状況について概説する。

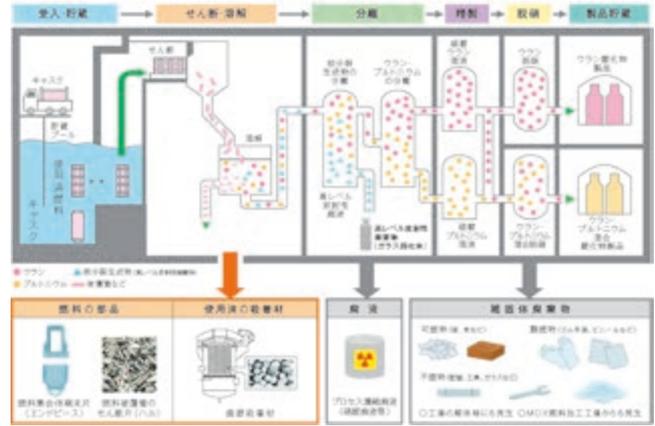


図 1 再処理施設の操業により発生する放射性廃棄物 (「対話型全国説明会 説明参考資料」¹⁾ より転載)

2. 地層処分システムの概要

極めて放射能レベルの高い廃棄物の処分にあたっては、極力放射性物質を閉じ込めることが最優先であり、それでも地下水等の接触による溶出漏えいのおそれを想定して、なるべく生活環境から隔離することが重要である。HLW の処分方法については、当初は海洋処分なども考えられていたものの、国際条約による規制などを踏まえ、深地層中に埋設処分するのが現時点では最も実現性の高い処分方法であると国際的に認識されている。

我が国において、地層処分に関する研究開発は、1976 年に開始された²⁾。HLW を①ホウケイ酸ガラスと溶融させキャニスタ内で固化したものを (国によっては使用済核燃料そのもの) を②金属製の容器 (オーバーパック) に封入し、さらに③その周りを緩衝材で覆い、深地層中に埋設処分するシステム (我が国のシステムを図 2 に示す) は、欧米

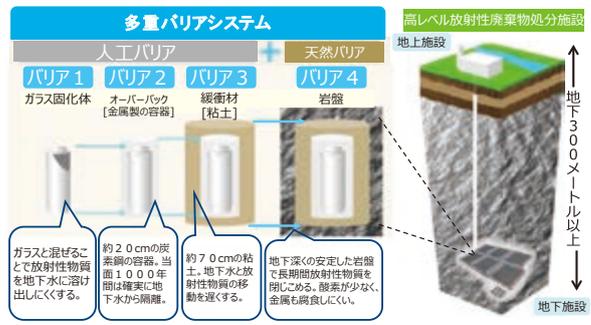


図 2 我が国における地層処分システム (エネルギー白書³⁾ より転載)

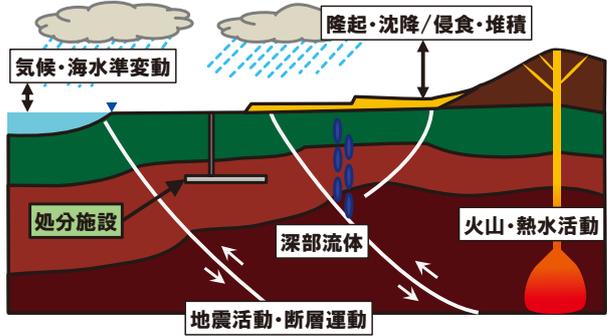


図 3 処分場周辺の地層の安定に影響を及ぼす自然事象 (「対話型全国説明会 説明参考資料」¹⁾ より転載)

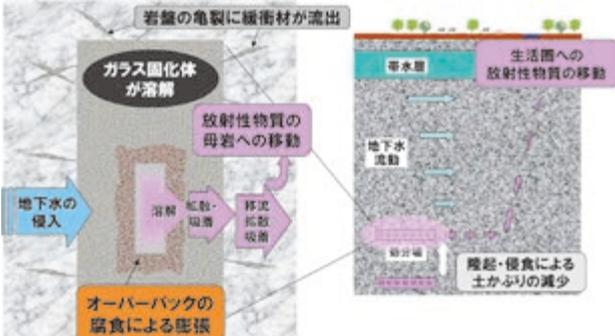


図 4 地下水の侵入による放射性物質の移行のイメージ (「対話型全国説明会 説明参考資料」¹⁾ より転載)

諸国を中心に 1990 年前後に確立された。廃棄体に含まれる放射性物質による人体への被ばくが想定されるシナリオとして、処分場周辺の地層が動くことにより廃棄体が地上付近に移動する可能性 (図 3) と、ガラス固化体と地下水が接触することで放射性核種がガラス固化体から溶出する (図 4) ことが考えられる。したがって、処分場周辺の地下水流動や化学的性質を評価することが、より安全な地層処分システムの確立に重要な役割を果たす。

3. 地層処分事業の現状

1999年に公表された「地層処分研究開発第2次取りまとめ」⁴⁾において、我が国においても地層処分を事業化の段階に進めるための、信頼性のある技術的基盤が整備された。これを受け、2000年に特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）が制定されるとともに、実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立され、地層処分が事業化された。処分地の選定にあたっては、市町村からの応募もしくは国の申入れを市町村が受諾することでプロセスが開始され、段階的な調査を経て最終処分施設建設地が選定されることとなっている（図5）⁵⁾。各市町村に自らのおおまかな地質環境特性を把握していただくことを目的として、2017年には資源エネルギー庁が科学的特性マップ（図6；好ましくない・好ましい範囲の要件・基準を図7に示す）を公表している⁶⁾。各段階の調査終了時には、当該都道府県知事及び市町村長の意見を聴くことになっており、その意見に反して先に進めることはない。2020年からは、北海道の寿都町及び神恵内村において、処分地選定プロセスの最初の段階である文献調査が開始されている⁷⁾。



図5 特定放射性廃棄物の最終処分における段階的な調査（資源エネルギー庁 Web サイト⁵⁾より転載）



図6 科学的特性マップ（資源エネルギー庁 Web サイト⁶⁾より転載）

4. 地層処分研究開発に関する計画策定

地層処分研究開発に関する計画策定の経緯を図8に示す。高レベル放射性廃棄物（HLW）の地層処分に関する国の基盤研究については、平成11年に公表された第2次取りまとめ⁴⁾以降に包括的な計画を策定するようになった⁸⁾。その後、平成17年の原子力政策大綱を受け、国の地層処分研究開発を実施する関係機関が一堂に会し、研究開発項目の網羅的な設定や重複の排除を目的とした「地層処分基盤研究開発調整会議」（以下、基盤調整会議）が設立された。この基盤調整会議における議論に基づいて、フェーズ1が「平成17年度ごろまで」と定義されるとともに、フェーズ2～3の全体計画が策定された。また、TRU廃棄物に対しても、平成17年の「TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－」（第2次TRUレポート）⁹⁾の公表後、HLW地層処分と時期を合わせる形でフェーズ1～3が設定され、HLWと同じく基盤調整会議における議論に基づいて全体的な計画が策定された。なお、地圏資源環境研究部門の方々には、基盤調整会議発足の段階から議論に参加いただいている。

一方、NUMOでは、国の基盤研究に相対する形で、実用・実践的な位置づけとなる技術開発計画¹⁰⁾が策定され

●好ましくない範囲の要件・基準

	要件	基準
火山・火成活動	火山の周囲（マグマが処分場を貫くことを防止）	火山の中心から半径15km以内等
断層活動	活断層の影響が大きいところ（断層のずれによる処分場の破壊等を防止）	主な活断層（断層長10km以上の両側一定距離（断層長×0.01）以内）
隆起・侵食	隆起と海水面の低下により将来大きな侵食量が想定される場所（処分場が地表に接近することを防止）	10万年間に300mを超える隆起の可能性のある、過去の隆起量が大きな沿岸部
地熱活動	地熱の大きいところ（人工バリアの機能低下を防止）	15℃/100mより大きな地温勾配
火山性熱水・深部流体	高い酸性の地下水があるところ（人工バリアの機能低下を防止）	pH 4.8未満等
軟弱な地盤	処分場の地層が軟弱なところ（建設・操業時の地下施設の崩落事故を防止）	約78万年前以降の地層が300m以深に分布
火砕流等の影響	火砕流などが及びうる場所（建設・操業時の地下施設の崩落事故を防止）	約1万年前の火砕流等が分布
鉱物資源	鉱物資源が分布する場所（資源の採掘に伴う人間侵入を防止）	石炭・石油・天然ガス・金属鉱物が賦存

●好ましい範囲の要件・基準

	要件	基準
輸送	海上からの陸上輸送が容易な場所	海岸からの距離が20km以内目安

図7 科学的特性マップにおける好ましくない・好ましい範囲の要件及び基準（資源エネルギー庁 Web サイト⁶⁾より転載）

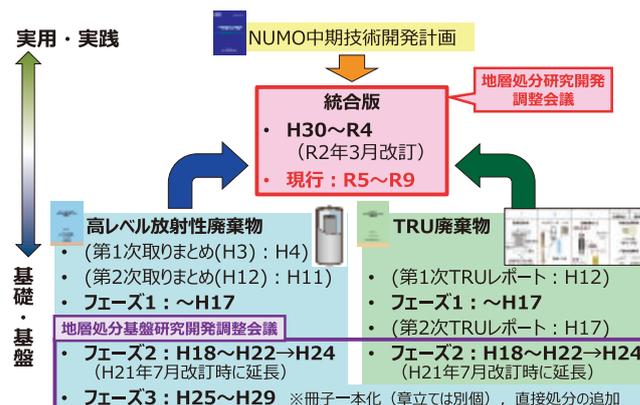


図8 地層処分研究開発に関する計画策定の経緯

てきた。このような経緯のもと、原子力委員会放射性廃棄物専門部会が平成 28 年秋にとりまとめた評価報告書¹¹⁾において、研究開発等における関係行政機関等の一層の連携強化が望まれるとともに、NUMO は一層のリーダーシップを発揮し、実施主体・基盤研究開発機関一体で「真の全体計画」を策定すること等が必要とされた。このことを受け、平成 29 年度に「地層処分研究開発調整会議」（以下、調整会議¹²⁾）を設置し、NUMO の中期技術開発計画¹⁰⁾を含める形で、平成 30 年度からの 5 年間における「地層処分研究開発に関する全体計画」（以下、全体計画）を取りまとめた（令和 2 年 3 月に改訂¹³⁾）。現行の全体計画では、令和 5 年度～令和 9 年度の 5 年間における研究開発計画が設定されている¹⁴⁾。

5. 地層処分研究開発の現状

地層処分研究については、昭和 55 年の原子力委員会決定¹⁵⁾以来、下記 3 つの研究開発分野が相互に連携しつつ進められてきている。

- ・地質環境評価
- ・処分場の設計・工学技術
- ・閉鎖後長期の安全性評価

以下、令和 4 年度まで資源エネルギー庁で実施していた研究開発成果のうち、地質環境調査を中心に概要を紹介する。詳細については、資源エネルギー庁 Web サイト¹⁶⁾に掲載されている各事業の報告書を参照されたい。

5.1. 地質環境評価関係

地質環境を適切に評価するための調査・評価技術を中心に、3 事業を実施した。

地質環境長期安定性評価技術高度化開発では、火山・火成活動、深部流体の移動・流入、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象に対して示された個別の研究開発課題に対し、各学術分野における最新の研究を踏まえた技術の適用による事例研究を通じて、課題の解決に必要な知見の蓄積や調査・評価技術の高度化を進めた。電磁探査や地震波解析（S 波スプリッティング解析、地震波トモグラフィ等）などの地球物理学的手法、小断層解析などの地質学的手法、地下水・ガスの同位体分析などの地球化学的手法を適切に組み合わせることにより、地下深部のマグマの活動範囲（図 9）や、深部流体の化学・熱的特徴及び移行経路、地下に伏在する活構造の分布などを高精度に把握しうる手法を提示した。また、幅広い時空間スケールでの隆起・侵食速度の評価手法として、熱年代法や宇宙線生成核種法、ルミネッセンス法等の個別要素技術の適用性を検討し、これまで年代測定が困難であった堆積物に対しても堆積年代の推定を可能とすることなどにより、隆起・侵食に係る調査・評価技術の拡充を図った。

岩盤中地下水流動評価技術高度化開発では、概要調査において重要となる涵養域から流出域までの広域的な地下水

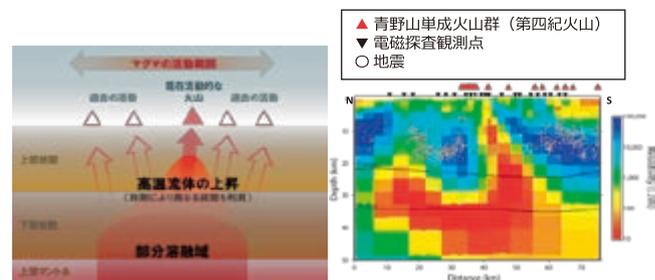


図 9 マグマの活動範囲に関する概念モデル（左）と電磁探査の例（右）
（資源エネルギー庁 Web サイト¹⁶⁾より転載）

流動（移流場）や地下水が長期にわたり滞留する領域（拡散場）の三次元分布に係る調査・評価の信頼性向上に向け、これまでに整備された水理・物質移動場の特性に係る調査・評価技術の妥当性の確認を通じて、それぞれの水理・物質移動場のスケールや特徴に応じた方法論として整備した。瑞浪地域（移流場）を事例として、スケールに応じた最適な水理・物質移行パラメータ設定の手法を提示するとともに、地下水年代を考慮して広域地下水モデルで使用するパラメータ（透水係数や間隙率など）を校正する方法を例示し、地下水年代の考慮が効果的であることを確認した。また、幌延地域（拡散場）を事例として、物理探査とボーリング調査を組み合わせ、広域スケールの範囲から長期的に安定な水理場・化学環境が存在する施設スケールを絞り込み、その三次元分布を調査・評価する方法を例示した（図 10）。さらに、塩素濃度と塩素-37 同位体比を用いて場の物質移行が拡散支配か移流支配かを判別する方法や、クリプトン-81 による地下水年代測定の採取・分析方法を整備し、その有効性を確認した。

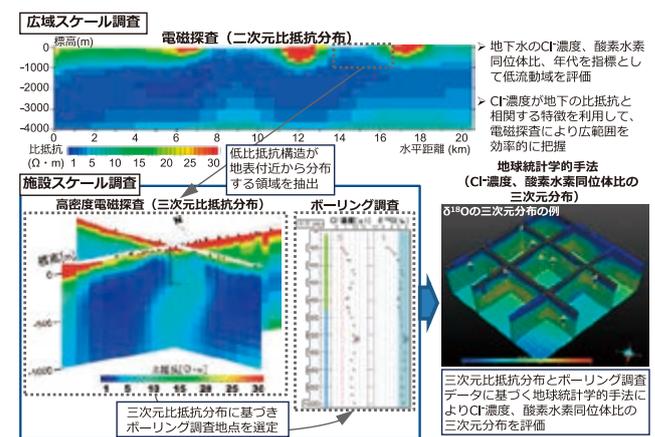


図 10 電磁探査とボーリング調査を組み合わせた低流動域の三次元分布評価の例
（資源エネルギー庁 Web サイト¹⁶⁾より転載）

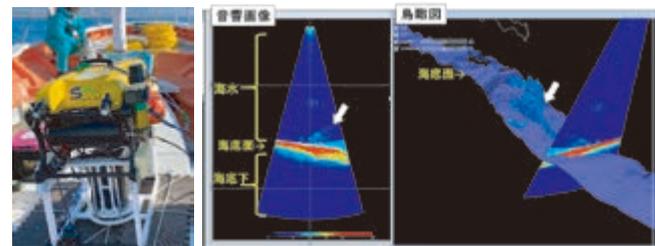


図 11 駿河湾沿岸部でのボーリング掘削と流向流速計の調整
（資源エネルギー庁 Web サイト¹⁶⁾より転載）

沿岸部処分システム評価確証技術開発では、沿岸部特有の地質環境特性と、それを調査するための手法について、体系化も含めて更なる知見の集積を進めている。これまでに、文献調査から概要調査を想定した海陸連続三次元地質環境モデルについて構築手法の検討と不確実性の低減に向けた評価を実施した。また、沿岸部特有の地質環境特性把握に向けた新たな調査技術を含むボーリング調査の体系化(図 11)や、海底湧出地下水調査ならびに浅海域における三次元音波探査など沿岸部海域を対象とした調査手法について技術開発と体系化に向けた検討を行った。なお、本事業では地圏資源環境研究部門に 3 者連名契約の幹事者を務めていただいている。

5.2. 処分場の設計・工学技術及び閉鎖後長期の安全性評価関係

工学規模の施工試験、人工バリアの性能を評価する試験研究や、閉鎖後長期の安全性の評価のための試験研究やモデル化などについて、5 事業を実施した。特に、(国研)日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター等を活用した地層処分施設の閉鎖(図 12)及び回収技術、地下施設及びその近傍(ニアフィールド)における人工バリアとその周辺の岩盤の性能評価並びに放射性核種等の移行挙動評価(図 13)、TRU 廃棄物処理・処分特有の現象理解のための技術開発に注力した。また、将来に向けて幅広い選択肢を確保し、柔軟な対応を可能とする観点から、使用済燃料の直接処分など代替処分オプションに特有の課題について、人工バリアの成立性の評価の高度化や、地質環境条件及び使用済燃料の多様性への対応等の研究開発を進めた。

5.3. 技術マネジメント関係

放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務では、主に若手研究者の育成を目指して複数のプログラムを実施した。地層処分に関する若手研究者が参加する人材育成セミナーについては、内容や形式を見直しつつ平成 30 年度から 5 回開催し、参加者が異分野の専門家との相互理解を図るとともに協働の重要性等を学ぶことが可能なセミナープログラムを作成した。このうち、令和 2 年度に実施したセミナーでは、沿岸部処分システム評価確証技術開発で使用しているボーリングサイトの見学や、周辺地域での試料採取・分析の実施など、地圏資源環境研究部門の方々にも多大なご尽力をいただいた。¹⁷⁾

5.4. 令和 5 年度の研究開発の実施状況

令和 5 年度の研究開発事業を表 1 に示す。令和 5 年度以降の全体計画策定に伴い、処分場の設計・工学技術関係と人工バリアの性能評価及び閉鎖後長期の安全性評価関係については、類似の研究開発項目の整理等を目的に、事業の構成を見直した。なお、沿岸部処分システム評価確証



図12 坑道側壁部におけるベントナイト吹付け試験の状況(資源エネルギー庁 Web サイト¹⁶⁾より転載)

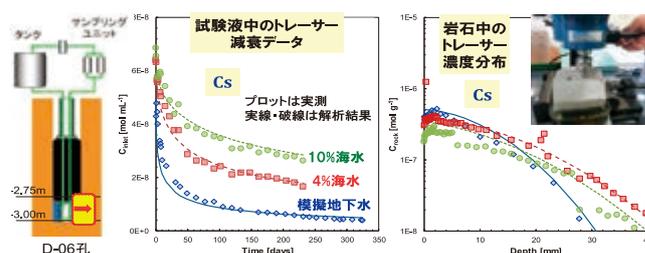


図13 幌延URLにおける堆積岩マトリクス中の原位置拡散試験の結果の例(資源エネルギー庁 Web サイト¹⁶⁾より転載)

技術開発に限り、令和 5 年度がとりまとめの年度にあたることから、次期事業は令和 6 年度から開始される見込みである。

6. おわりに

当面の地層処分事業においては、地質環境の調査評価技術が鍵となる。陸域に対する評価については、NUMO がとりまとめた「包括的技術報告書」¹⁸⁾に詳しい一方で、沿岸海底下における処分を念頭に置いた地質環境の評価・処分場の設計・安全性に関する調査・評価技術を一連の方法論として体系的に整備することには課題が残っていると認識している。また、先進第三紀堆積岩については、地質環境データが十分ではないため、データの拡充が必要である。

地圏資源環境研究部門を含む産業技術総合研究所地質調査総合センターは、日本の地質に関する調査研究を行う唯一の公的・総合的機関であり、技術レベルも社会的な信頼度も高い。特に上記の課題を対象とした研究開発において、リーダーシップを発揮されることを期待する。

参考文献

- 1) https://www.numo.or.jp/setsumeikai/data/sankou_taiwa_2023may.pdf.
- 2) 原子力委員会放射性廃棄物対策技術専門委員会：放射性廃棄物対策に関する研究開発計画(中間報告)(1976)。
- 3) 資源エネルギー庁：平成30年度エネルギーに関する年

- 次報告 (2019).
- 4) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ, JNC-TN1400 99-020~99-023 (1999).
 - 5) https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html
 - 6) https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/
 - 7) https://www.numo.or.jp/chisoushobun/survey_status/
 - 8) 核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会（廃棄物処理処分課題評価委員会）：平成13年度研究開発課題評価（中間評価）報告書：課題評価「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」, JNC TN1440 2001-008 (2001).
 - 9) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013 / FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
 - 10) 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の技術開発計画（2018年度～2022年度）改訂版, NUMO-TR-20-05 (2020).
 - 11) 原子力委員会放射性廃棄物専門部会：最終処分関係行政機関等の活動状況に関する評価報告書 (2016).
 - 12) https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/
 - 13) 地層処分研究開発調整会議：地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度；令和2年3月改訂）(2020).
 - 14) 地層処分研究開発調整会議：地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度）(2023).
 - 15) 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会：高レベル放射性廃棄物処理に関する研究開発の推進について (1980).
 - 16) https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/library06.html
 - 17) (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務）(国庫債務負担行為に係るもの) 報告書 (2020年度分) (2021).
 - 18) 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－要約, NUMO-TR-20-01 (2021).

表1 令和5年度における地層処分関係の委託事業及び実施者

事業名	実施事業者
【高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発委託費】	
地質環境長期安定性総合評価技術高度化開発	(国研) 日本原子力研究開発機構, (一財) 電力中央研究所
沿岸部処分システム評価検証技術開発	(国研) 産業技術総合研究所, (一財) 電力中央研究所, (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター
地層処分施設施工・操業技術検証試験	(公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター, (国研) 日本原子力研究開発機構
地層処分安全評価技術開発	(国研) 日本原子力研究開発機構, (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター,
(ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発)	(一財) 電力中央研究所
地層処分安全評価技術開発	(国研) 日本原子力研究開発機構, (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター,
(核種移行総合評価技術開発)	(一財) 電力中央研究所, (国研) 量子科学技術研究開発機構
直接処分等代替処分総合評価技術開発	(国研) 日本原子力研究開発機構
【放射性廃棄物共通技術調査等委託費】	
放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務	(公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター



海と陸をつなぐ研究

～沿岸部プロジェクトの概要～

Study for Connecting Land and Ocean area- Coastal Research Project Overview-

地下水研究グループ：井川 怜欧

Project Leader, Groundwater Research Group:
REO IKAWA

Phone: 029-861-3692, e-mail: reo-ikawa@aist.go.jp

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

1. はじめに

地下水は、水循環を構成する一つの要素であり、陸域で涵養され、地下に潜ったあと、河川や海底湧水として海へと流れ出る。いわば、陸と海を連続的につなぐ重要なファクターの一つである。このような視点でみると、沿岸部は、陸と海をつなぐ遷移帯であり、そこでは、陸域の淡水と海域の塩水が複雑に混ざり合い、特有の地下水環境が形成されている。また沿岸部は、人間活動の中心でもあり。そこでは地下水利用を含む大小様々な経済活動が行われており、自然状態に対する人為的影響が表れやすい環境でもある。

1966年に日本国内で原子力発電の商業利用が開始されて以降、発電所から出る放射性廃棄物のうち、とくに放射線量の高い高レベル放射性廃棄物の管理手法については長い期間、議論がなされ、現在では、人間の生活環境から十分に離れた場所に長期的に安全に隔離するという視点から“地層処分”が最も有効な手段だと位置づけられている。一方で、10万年という超長期にわたる隔離期間は、我々、人類が体験したことのないものであり、その間の安全性を担保するためには、同じ時間スケールで流体や個体などの様々な物質を地下に保存してきた地層がもつ隔離機能にいくつかの工学的対策を組み合わせ、それらの相乗効果を利用し、隔離機能を高めていく、いわゆる多重バリアシステムを構築する必要がある。

1999年11月に公表された“地層処分研究開発第二次とりまとめ”、通称2000年レポートでは、日本国内における地層処分事業の技術的信頼性が評価され、地下水に関しては、地下深部は地表と比べて動水勾配や透水係数が小さく、人工バリアに対する浸透や腐食などの影響も小さい

ことが示された(核燃料サイクル開発機構, 1999)。沿岸部は、内陸部と比較して動水勾配や隆起速度の小さな場所が存在する可能性が高いことから候補地の一つとして考えられるようになった。沿岸部の範囲については、平成28年に開催された「沿岸部海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」において、図1に示すように輸送の観点から海岸線から陸域に20km、工学的対応の観点から海岸線から海域に15kmの範囲と定義された(経済産業省, 2016)。2017年7月に経済産業省より公開された科学的特性マップにおいても沿岸部は、好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域であり、かつ輸送面でも好ましい地域とされている。このような背景をもつ一方で、先述したように沿岸部は、地下水を含む特有の地質環境特性を有しており、沿岸部において地層処分を安全に実施するためには、地下水の挙動を正確に把握し、評価することが必要不可欠である。本講演では、これまで産業技術総合研究所(以下、産総研)が過実施してきた沿岸部に関する地下水研究の概要とその成果、そして、そこから見えきた課題について紹介する。

2. これまでの研究プロジェクトの概要とその成果

2000年以降、産総研では、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、北海道の利尻島、千葉県の上総九十九里、茨城県の東海村などで沿岸部の地下水に関する研究を実施してきたが、沿岸域における地質環境特性に関する更なる知見の収集のため、沿岸域に焦点を充てた研究開発事業「沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発」が2007年4月から開始された。本事業は2012年度まで6か年にわたって実施され、地下深部において地下水を

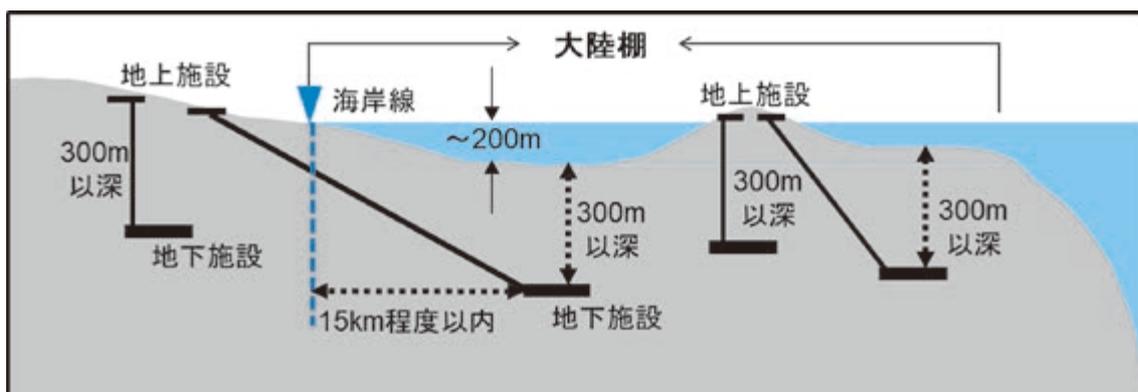


図1 沿岸部における地下施設設置のイメージ図(経済産業省, 2016から抜粋)

介した放射性核種の移行経路となる得る可能性がある塩淡境界と断層（とくに浅海域）の調査手法について検討ならびに実証が行われた。

本事業では、海岸線から約 300m 内陸に位置する北海道幌延町浜里小学校跡地において深度 1200 m の調査孔を含む複数のオールコアボーリング掘削を行い、各種物理検層や地下水の採水を実施するとともに、コアから抽出した間隙水から、浅層から深層に至るまで連続的に地下水流動系を評価した。また、陸域における反射法探査ならびに、海陸連続の電磁探査を実施し、地下深部における塩水と淡水の空間分布を評価した。これらの成果の詳細については、Ikawa et al. (2014) や Ueda et al. (2014) において報告されているため、本稿では割愛するが、図 2 に示されているように、国内において沿岸海底下の広範囲（当該地域においては、少なくとも海岸線から 5km 以上）にわたり、氷期の海退時に涵養された淡水性地下水が保存されている可能性が高いことを初めて実証した。また、これまで地下水の流動場だと考えられてきた第四紀堆積物内においても、過去の地層堆積時に貯留された化石海水が残存することが証明された。

本プロジェクトにより、沿岸部、とくに浅海域を含む沿岸海底下における地下水研究の重要性が示されたことから、2011 年度と 2012 年度において、海域における地質調査手法の検討を主眼とした「海域地質環境調査技術高度化開発」が実施され、既存データや過去の文献調査、なら

びに数値解析などを中心に、浅海域における地質構造評価技術（反射法探査）や海上掘削調査技術の高度化開発にかかる検討が行われた。

2013 年度からは研究フィールドを静岡県富士市の沿岸部（駿河湾）へと移した。静岡県富士市を次の研究フィールドとして選定した理由は、該当地域は、後背地に富士山を有し、おそらく国内において最も動水勾配が大きく、また火山性堆積物から構成される帯水層は非常に大きな透水性を有することから、地下水の視点からは、北海道の幌延町沿岸部とは対極の地質環境特性を有していると考えられ、両地域の地下水流動特性を把握することで、国内における沿岸部地下水の流動に関する一般性と地域性を評価できると考えたためである。さらに富士山を含む駿河湾地域では 2013 年から 2015 年にかけて水文環境図「富士山」や海陸シームレス地質情報集「駿河湾北部沿岸域」といった地質調査総合センターが発行する地球科学図に関する調査が別途実施されており、これらの成果を取り込むことにより、本地域における地質環境特性を広範囲にわたり把握することが可能となった。

2013 年度から 2015 年度まで実施した「海域地質環境調査評価確証技術開発」では、静岡県の公設試である静岡県環境衛生科学研究所と連携し、国内の既存調査では、比較的狭い範囲かつ水深の浅い場所に限定されてきた海底湧出地下水の大規模な調査に取り組んだ。海域は地下水の出口である一方で、陸域と比較してその情報量は非常に限定

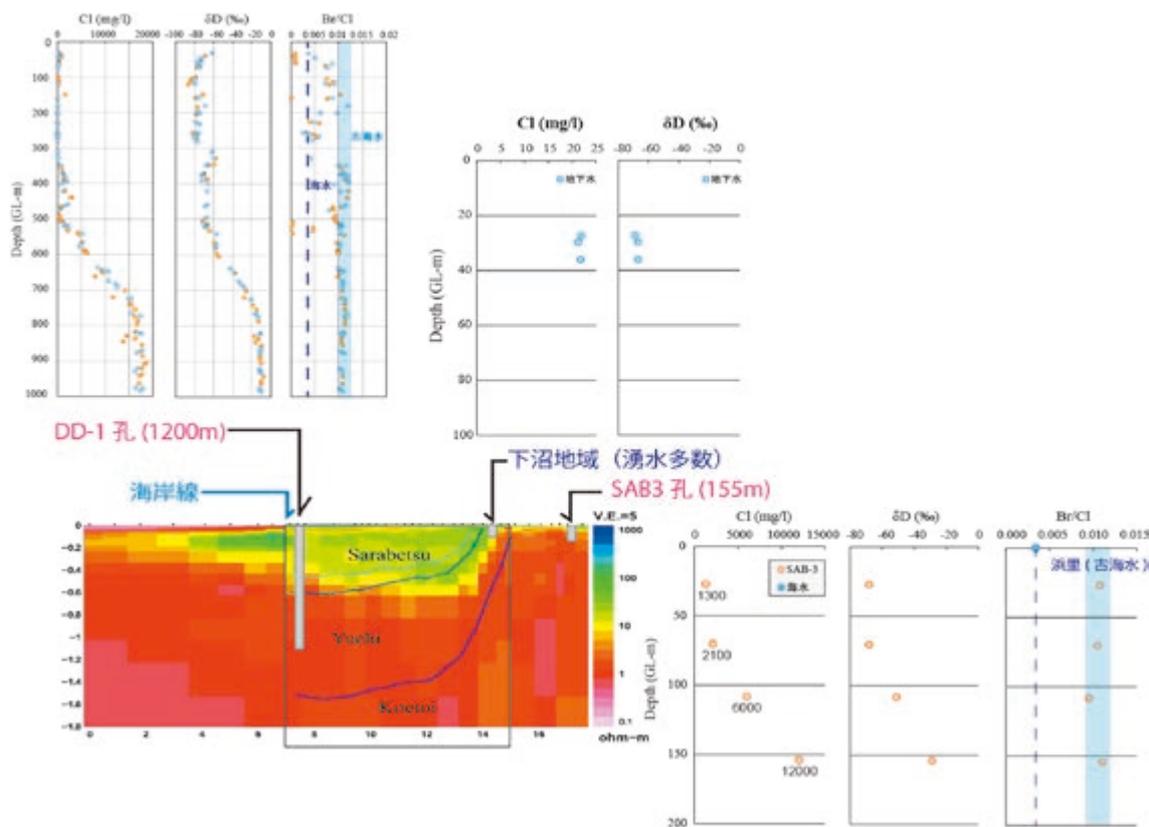


図 2 ボーリング調査（間隙水の水質）と電磁探査により明らかとなった北海道幌延町沿岸部における地下水の賦存状態。本地域では、幌延背斜の西に位置する下沼地域において淡水性地下水が涵養され、淡水領域（高比抵抗分布域）は海岸線より西側、すなわち沿岸海底下まで達していることがわかる。また深度にかかわらず、湧知層よりも下位の地層（声間層）には、塩分濃度の高い地下水（塩水領域：低比抵抗分布域）が保存されていることがわかる。これらの塩水は Br/Cl 比から化石海水であることが示唆される。

されていることから、海底湧出地下水を正確に評価することで、沿岸部における地下水流動をより正確に把握することが可能となる。図 3 に示すように、ラドン濃度測定器を用いた曳航調査により、駿河湾の富士川河口部から田子の浦にかけて強い海底湧出地下水のシグナルが確認された。

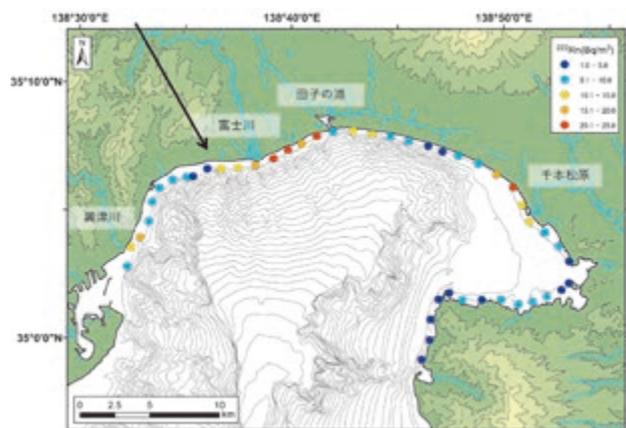


図 3 駿河湾における海中のラドン濃度分布. 本調査では海岸線から1.2kmの離れた位置の海中ラドン濃度を測定した。ラドンは地下水中に多く含まれ、海水には含まれないことから、海底湧出地下水のシグナルとなる（小野ほか、2014）。

そのため、以後、本地域を対象として、海底湧出地下水の調査手法の高度化研究が進められている。調査の詳細については小野ほか（2014）を参照されたい。2016年度から始まった「沿岸部処分システム高度開発」では、2015年5月に閣議決定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針に沿う形で、より実際の地層処分事業への研究成果の還元を意識した複数の研究機関によるコンソーシアム型の共同受託研究となった。本事業において産総研があげた特徴的な成果としては、共同受託先である電力中央研究所（以下、電中研）と協働し、日本全国の沿岸域において採取した深部地下水の地下水年代と地下地質データから、原子力発電環境整備機構（NUMO）が2021年に公開した包括的技術報告で検討した3つの地質環境（先新第

三紀系堆積岩類、新第三系堆積岩類、および花崗岩類）における深部地下水の貯留特性を明らかにしたことである。（図 4）。この成果により、同じ沿岸域深部であっても地質環境の違いにより、保損される地下水の特性は大きく異なることが示された。

本成果を引き継ぐ形で2019年度からスタートした「沿岸部処分システム評価確証技術開発」では、電中研と協働で主に概要調査をターゲットとした海陸3次元地質環境モデルの構築手法に関する高度化と、モデルの妥当性を検証するための調査手法の高度化を実施している。具体的には広域の地下水流動解析、塩淡境界付近に着目した局所的な流動解析、ならびにこれらのモデルの検証のための深度800mのボーリング調査、海底湧出地下水調査、海上音波探査である。本報告会では、このうち、駿河湾を対象に産総研が実施している、塩淡境界付近の局所的流動解析、ボーリング調査、海底湧出地下水調査について紹介する。詳細な成果については、この後に続く、町田、吉岡、小野による発表資料を参照されたい。

3. 今後の課題

これまでの地下水研究を通して、これまで明らかとなっていなかった国内における沿岸部における深部地下水の賦存状況や挙動に関する知見を収集することができた。一方で、現状では図 4 の研究成果を含めて沿岸部における深部地下水の特性を把握するための井戸は、温泉水や水溶性天然ガスの採取などを目的とした商業的なものが大半であり、地層処分において求められている高精度の地質環境調査に適応できる井戸はほとんどない。本稿で紹介した北海道幌延町ならびに静岡県富士市の沿岸部は深度1000mを超える厚い第四紀層堆積物に覆われており、地層処分の対象岩盤である新第三紀以前の火山岩や堆積岩、あるいは花崗岩中の地下水流動に関するデータは十分に取得できていない。また、これまでの研究開発により、個々の調査手法については高度化が進んでいるものの、概要調査の期間内に、最も効率よく、必要な情報を得られるように、これらの調査手法を体系化していく必要もある。とくに海域については、陸域と比較して天候や漁期など様々な条件により調査期間が制限されるため、対象地域ごとに最適な手法の組み合わせが異なる可能性も示唆される。その他にも地下水は施設設計や安全評価など他分野にも関与することから、今後も課題解決に向けて地下水研究にかかる期待はより大きくなるものと予想される。

4. おわりに

本稿では、これまでの国の地層処分研究開発事業における産総研地圏資源環境研究部門の取り組みを、地下水研究を中心に紹介してきたが、より広い視点で見た時にも、地下水研究にはより多くの期待が寄せられている。例えば、2021年6月に水循環基本法が改定され、地下水に関す

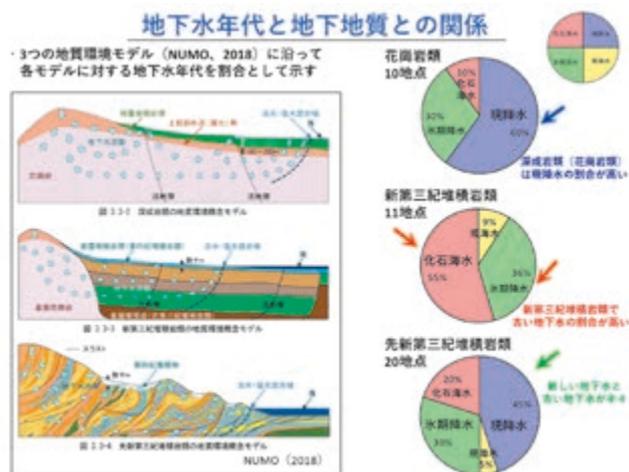


図 4 3つの地層モデルにおける地下水年代にもとづく地下水の貯留特性。化石海水はどの地層においても存在が確認されるが、相対的に、新第三紀堆積岩類に残りやすい特徴が示されている。

る情報整備やマネジメントが強く求められ、さらに国としてこれまで未利用であった地下水資源の持続的な利活用にむけた取り組みの一環として自治体や民間企業への積極的な後押しも実施されつつある。さらに TNFD や ESG 投資などの観点から民間企業も自然資源の可視化や保護活動に関する自社の取り組みを積極的に情報公開していく必要が出てきている。このような社会的背景において、世界で最も利用されている資源である地下水に対する注目は国内外において高まることが予想され、将来的に地層処分の実施の際の PA などにも大きくかかわるものと考えられる。以前から「森が海を作る」という言葉があるとおり、地下水は陸と海を結ぶ重要な架け橋であり、地下水研究を通じてこれらを明らかにしていくことにより、本研究の成果が地層処分にとどまらず、日本国内で大きな役割を果たすことにつながると信じている。

謝辞

本稿で紹介した成果の一部は経済産業省資源エネルギー庁委託事業（「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）」等で得られたものです。

参考文献

1) 核燃料サイクル開発機構 (1999) : わが国における高

レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—。

<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JNC-TN1400-99-020.pdf>

- 2) 経済産業省(2016): 沿岸部海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ。 https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/report01_01.pdf
- 3) Reo Ikawa, I. Machida, M. Koshigai, S. Nishizaki, and A. Marui(2014): Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan. *Hydrogeology Journal*, 22, 987-1002p.
- 4) Takumi Ueda, Y. Mitsuhata, T. Uchida, A. Marui, and K. Ohsawa(2014): A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study. *Journal of Applied Geophysics*, 100, 23-31p.
- 5) 小野昌彦, 村中康秀, 神谷貴文, 渡邊雅之, 井川怜欧, 丸井敦尚 (2014) 駿河湾沿岸域の水文環境—海底地下水湧出—, *地下水技術*, 56 (1-4), 13-18p.

沿岸部深層ボーリング調査からみえたもの

What we can see by a deep drilling near coastal line

地下水研究グループ：町田 功

Groundwater Research Group: Isao Machida

Phone: 029-861-3680, e-mail: i-machida@aist.go.jp

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

1. 海岸線付近でのボーリング調査の意義

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律に基づく概要調査は4年程度とされており¹⁾、この期間に地表からの調査を実施し、次に続く精密調査地区を決定する必要がある。ボーリング調査は地表からの調査のうち、最も正しく地下情報を把握できる方法であるが、反面、調査に時間を要することから、なるべく少ない本数で、効果的な調査を行う必要がある。この条件を考えると、地下水に主眼を置いた場合、海岸線付近にてボーリング調査を実施すれば、陸域から海に向かって流動する淡水系地下水と、海域から流動してくる塩水系地下水の情報を一度に取得することができる(図1)。

沿岸部の地下水流動に関しては、特に国外にて数多くの研究がなされているが²⁾、これらは主に沿岸都市部での地下水資源の評価のために行われているもので、塩水侵入防止という課題解決を目指したものである。ゆえに焦点が当てられているのは、塩淡境界の位置の予測であり、塩水そのものの挙動についてはほとんど注意が払われていない。しかし、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究では、塩水領域に処分を行うことも考慮し、塩淡境界から塩水領域の地下水の動態を知ることが極めて重要である。

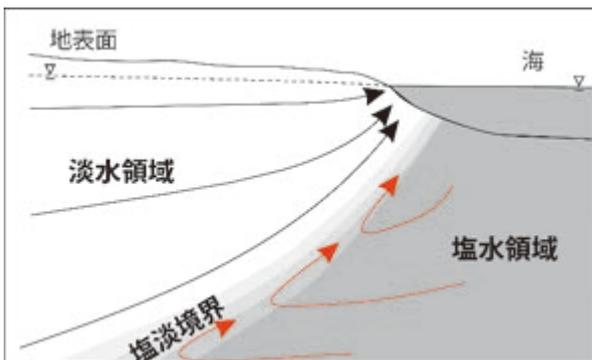


図1 塩水くさびと想定されている地下水流動

2. 研究の構成

現場調査を通じて、我々が念頭においていることは、高レベル放射性廃棄物処分において、超長期的に安全な領域とはどこか、それをどのように評価するのか、という課題である。淡水系地下水だけでなく塩水系地下水の動きまで視野を広げてこの課題を眺めた場合、最も重要なツールの1つが、放射性同位体を用いた地下水年代(滞留時間)評価法である。例えば、地層中にて極めて古い年代の塩水系地下水が得られた場合は、当該領域の地下水は停滞してい

ると考えることができる。よって、その領域に処分をおこなえば、その後、人工バリアから天然バリア中に核種が移行してきても、(地下水が動いていないため)核種はその場所に長期間に留まる可能性が高い。

一方、同じ塩水系地下水であっても、¹⁴C年代が得られるような地下水は(～2万年程度)³⁾、超長期的には流動していると考えられるべきである。このような流動性の塩水系地下水は、一般には浅層、地域によってはかなり深層にまで分布しているだろう。このようなケースでは、地下水年代法と、もう1つの重要なツールである流動解析(地下水流動シミュレーション)を組み合わせることにより、塩水系地下水流動を評価することができ、より安全な領域を検討することもできるだろう。本研究で扱うのは、このケースである。

陸域の淡水系地下水の流動解析は、今までにも多くの地域で適用されており、主に水理水頭によるキャリブレーションによって、現場データとの整合性が確認されている。しかし、塩淡境界以下の地下水の動きに関しては、室内実験によって塩淡境界の位置を比較する研究がほとんどであり、特に深層の塩淡境界以深の地下水に関しては、現場データと解析結果を比較する試みは行われていない。そのため、特に塩水系地下水流動に関しては、そもそも現場データが一般的な密度流解析モデルで表現されるのか、表現できる(あるいはできない)とすれば、何が原因なのかを考察する必要がある。この理由で、本研究で紹介するボーリング調査結果と次の(吉岡真弓研究グループ長による)密度流解析を用いた研究は密接に関連している。具体的には、本研究では現場ボーリング調査について述べ、次のトピックの密度流解析によって想定されたモデルを検証する。

3. 調査の概要

ボーリング調査をおこなったのは、静岡県駿河湾富士川河口部付近の海岸線から距離約300m内陸側である。海岸線付近は、一般に、陸域から流動してきた淡水系地下水が収束し、海に流出する場とされている(図1)。本研究では、ここで複数のボーリング調査を実施したが(写真1)、それぞれのボーリング孔では調査深度が異なるため、以下では簡単のため、1本のボーリング孔としてデータを表示した。ボーリング調査では地質(写真2)および水理特性の確認とともに、表1に示す淡水領域～塩淡境

界～塩水領域を含む領域で採水を実施し、特に地下水年代測定法により、その実態把握をおこなった。また、このうちの 5 深度で流向流速測定を実施した。



写真 1 ポーリング調査風景



写真 2 ポーリングコア

表 1 採水および流向流速調査深度

調査項目	実施深度 (m)
採水	22, 43, 83, 97, 113, 170, 218, 283, 343, 404, 566, 704, 794
流向流速測定	42, 82, 111, 160, 220

4. 結果

4.1. 水理水頭・透水係数・水質

調査結果を図 2 に示す。地下水中の Cl⁻ 濃度から換算した淡水系地下水と塩水系地下水の混合率より (図 2 の一番左側の図)、本地域では淡水系地下水は地表付近～深度 75m、塩淡境界は深度 75～200m、塩水系地下水は深度 200m 以深に分布することが明らかになった。また、塩淡境界内の塩分濃度は、塩水領域の上面 (深度 200m) からわずかに離れると大きく低下し、塩水と淡水が半分ずつ混合する境界面 (Interface) は深度約 180m に位置する。塩水濃度は、塩淡境界内で下に凸の形状を示しているが、このような分布は稀であり⁴⁾、今後、原因を検討する予定である。

水理水頭については、深度ごとに孔内水の密度が異なることから、実測された水頭を淡水水頭に換算したものを示した (図 2 の左から 2 番目の図)。深度 22 m および 43m では EL=+1.5m 前後であったが、塩淡境界となる 83m 以深の 3 深度では水位が約 3 m 上昇し +4.5m 程

度となった。ただし、深度 83m での塩水混入率はわずかに 2%程度であることから、塩淡境界で水理水頭が高くなると考えるよりも、深度 43m と 83m の間に難透水層が存在しているためと解釈した方が良いだろう。深度 200 m 以深では淡水水頭は徐々に高くなるが、これは海水密度による影響である。

また、 δD は深度 22m および 43m までは -56%以上であるが、深度 83～113m では同位体的に軽くなり、-64～-66%となった (図 2 の右から 3 番目の図)。深度 170m 以深は塩水系地下水の影響が大きく表れることにより同位体は重くなる。一般に降水の δD は標高が高い領域では軽くなることから、深度 83m 以深の塩淡境界最上部の地下水は、市街地よりも標高の高い領域 (富士山体に近い領域) で涵養されたことを示唆している。すなわち、遠方を涵養域とする地下水が塩淡境界の最上部にもたらされているということである。なお、地質は砂礫が卓越しており (写真 2)、透水係数は地表から深度 80 m までは 5.0×10^{-5} m/s に近い値で、それ以深には変化傾向は認められず、深度 83 m 以深は、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ m/s オーダーであった。

4.2. 流向流速測定結果

図 1 では、塩淡境界のうちの一部の地下水は陸域から海に向かって上昇していること、そして淡水系地下水と塩水系地下水の流動方向は逆向きとなっていることが示されている。これを現場データによって検証するために、単項式地下水流向流速測定装置の中から精度が高く、再現性が期待できる流向流速計 Type-LD60 (沿岸部仕様) を用いた調査を実施した。調査深度は表 1 で示す 5 深度である。その結果、5 深度のうち、最も流速が速いと考えられる深度 42m ではダルシー流速は 1.9×10^{-6} m/s、淡水領域と塩淡境界の境界となる深度 82m では 1.5×10^{-7} m/s と著しく小さくなり、塩淡境界の最上部の深度 111m よりも深い領域では 10^{-7} (m/s) 以下という、定量下限以下となった。このように、物理的な方法では、塩淡境界の大部分およびそれ以深の地下水の流向流速を確認することはできなかった。しかし、この課題に関しては次節で述べる水温プロファイル (温度場の乱れ) から、そのうちの一部を明らかにすることができた。

4.3. 水温鉛直プロファイル

地下水温の鉛直プロファイルの測定結果を図 2 (右から 2 番目) に示す。深度 400m までの水温プロファイル測定では、孔内水が周囲の地温と平衡になるように掘削深度までケーシングを入れるとともにポーリング中の孔底をセメンチングし、約 4 カ月間、孔内水を静置させた。深度 400m 以深の水温は揚水時の原位置温度である。水温測定は近傍の観測井を含めて過去 2 回行っているが、ほぼ同じ結果が得られており、データの再現性は確認されてい

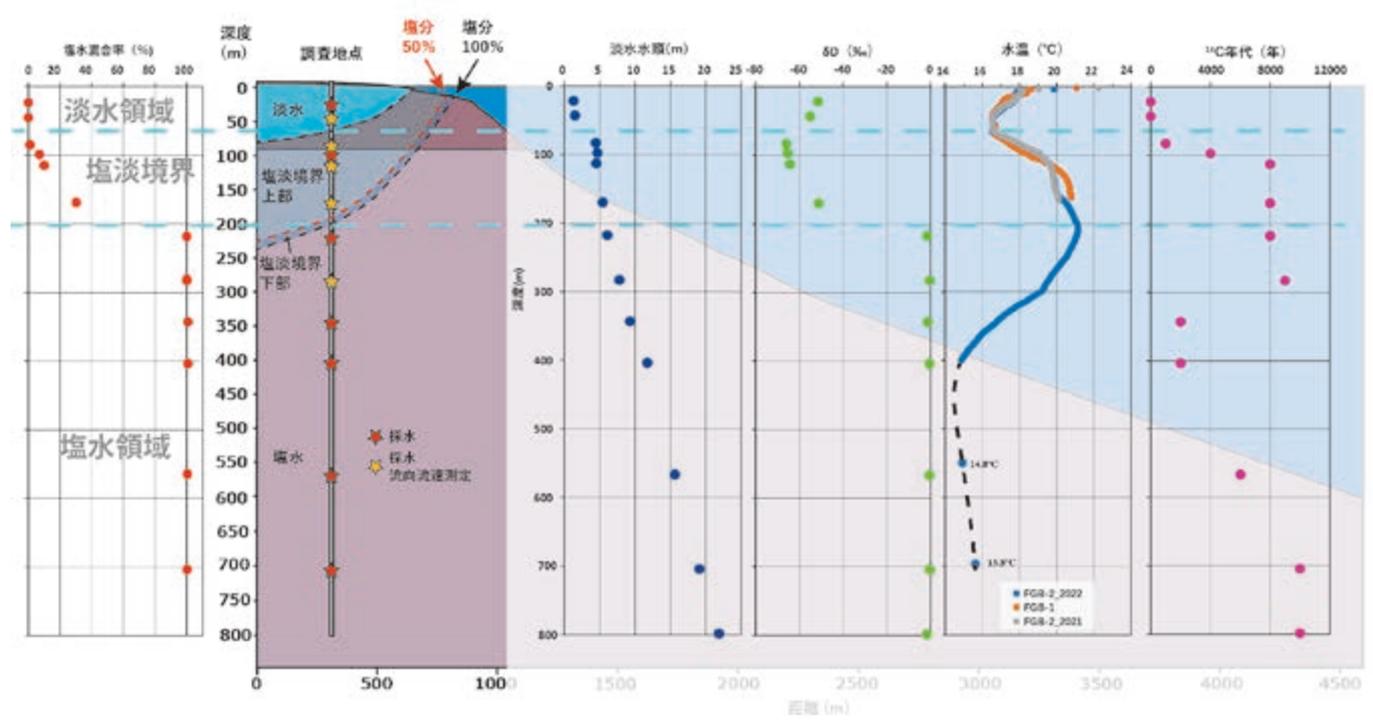


図2 ボーリング調査によって明らかになった淡水領域～塩淡境界～塩水領域の分布および、水理水頭・地下水の化学的性質。背景に描かれているのは、陸域から駿河湾海底にかけての地形断面（小野研究員の調査による）と、淡水系地下水から塩水系地下水までの推定分布図である。

る。我が国の一般的な地温勾配である 3℃/100m という関係を基準にすると、図 2 の水温プロファイルにはいくつかの特徴がある。まず、流向流速測定で最も流速が速かった淡水領域の深度 42m は、最低温度（約 16.5℃）を示す深度 40～66m と一致した。その下位の塩淡境界からは水温は上昇し、その上昇は塩水領域との境界の深度 200m まで続いた。そして、塩水領域では水温は深度方向に再び低下し、深度 400m 付近で極小となった。深度 200m にて水温の極大点が生じるためには水温の高い地下水が（鉛直下方からではなく）横向きの流れによって、この深度に運ばれてくる必要があるだろう。これは、図 1 に示すような塩淡境界に沿った上昇流が塩淡境界内でも存在し、その移流によって深層から温度の高い地下水が運ばれていると考えることによって説明が可能である。一方、塩水領域では深度 400m 付近に向かって再び水温が低下しており、これは地温勾配と反している。小野昌彦研究員による海域調査によれば、駿河湾の海水温は海面から水深 150m までは 13～15℃程度、それ以深になると低下し、水深 300m では 10℃以下となる。そのため、塩水領域で水温が低下する可能性として海底を涵養域とする塩水が移流によって低温の塩水が陸域にもたらされているか、あるいは海底からの熱伝導（海底の海水温が低い）が考えられる。この 2 つの可能性は、塩水系地下水が流動しているかどうか、という評価に大きく関係しているが、次節で述べる地下水年代評価によって前者の可能性が高いと考えられる。

4.4. 地下水年代

表 1 の採水深度にて地下水を採取し、地下水中の各種放射性同位体比を測定して、地下水年代を求めたものが図 2 の一番右の図である。淡水系地下水（深度 22m と 43m）についてはトリチウム (^3H) が検出されており、地下水年代は約 50 年未満 (^{14}C 年代では 0 年とした) であると評価できる。深度 80m 以深の地下水は ^3H が検出されなかったため、炭素 14 (^{14}C) を用いて地下水年代を決定した。詳細は割愛するが、地下水の ^{14}C 年代は分析結果から直接得られるものではなく、分析値に対してあるモデルに基づいた計算をおこなった値（調整年代）である。計算の結果、地下水年代は塩淡境界～塩水領域上部の深度約 113～283m で最も古い 8000 年となり、深度 343m、404m の塩水系地下水は約 2000 年、それ以深は深さ方向に古くなった。塩淡境界の年代が古いという結果は、(δD によって示されたように) これらの地下水の涵養域が遠方であることと整合している。また、深度 340～400m の深度領域では、塩水系地下水は比較的活発に流動しているように見える。上述したように、この年代値はモデルに基づくものであるから、無条件で信頼はできないにしても、これらの塩水系地下水は少なくとも数万年間地下に滞留していたような、いわゆる化石海水ではなく、過去に海底面から侵入した海水が陸側に向かって流動したものである。

5. 今後の課題

海岸線付近にて実施した 1 本のボーリング調査から、

何が明らかになり、何が明らかにならないのだろうか。本研究では、塩淡水境界や塩水系地下水の動きは物理的な手法（流向流速測定）では測定が困難なほど遅いことが明らかになった。一方、化学的な調査（水温プロファイルや地下水年代）から得られた結果は、塩水系地下水が超長期的な視野では流動している可能性を示した。しかし、ここで得られた結果は定性的なものであるし、各観測データ間の整合性も確認がなされていない。そのため、これらの結果を密度流解析の条件として用いることにより、ここで述べた塩水系地下水流動が説明できるかどうかを確認する必要がある。

謝辞

本稿で紹介した成果は経済産業省「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業（JPJ00797）」において実施されたものである。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁 (2023) : 高レベル放射性廃棄物の最終処分の実現に向けた今後の取り組みについて.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kankeikaigi/20230522siryou2.pdf
- 2) Jasechko, S. et al.(2020) : Groundwater level observations in 250,000 coastal US wells reveal scope of potential seawater intrusion. Nature communication,doi.org/10.1038/s41467-020-17038-2
- 3) Kazemi et al.(2006): Groundwater age. John Willy & Sons.
- 4) Abarca, E.C. (2006): Seawater intrusion in complex geological environments. PhD Thesis, Department of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences(ETCG), Technical University of Catalonia, UPC, March 2006.

数値シミュレーションで見る沿岸部における地下水の流れ

Exploring groundwater flow in the coastal area by using numerical simulation

地下水研究グループ：吉岡 真弓
 Groundwater Research Group: 地下水研究グループ
 Phone: 029-862-6649, e-mail: yoshioka-mayumi@aist.go.jp
<https://unit.aist.go.jp/georesenv/gwrg/index.html>

1. はじめに

沿岸部の地下では、塩水（海水）系地下水と淡水地下水が存在しているが、その密度差の違いにより、塩水系地下水が陸地側に潜り込む形状となる（図 1）。この塩水系地下水と淡水系地下水の接触部は塩淡境界と呼ばれ、この塩淡境界の下位に分布すると考えられる化石海水を含んだ領域は、超長期的に地下水が流動していない領域と見なせるため、処分場として好ましい領域と考えられる。

このような塩淡境界を有する沿岸部の地下水環境の評価技術開発は、主に次の 2 点において重要である。1 つ目は、地表から流動していない塩水系地下水の存在する領域までの地下坑道などのコンクリート建設物の安定性評価には塩分が大きく関係し、その存在範囲・挙動を把握することは建設時の安全向上につながる。2 つ目は、海底下の塩水系地下水は緩慢ながらも流動している可能性があり、そのような場合、その塩水系地下水の流れは海域から陸域へ向かい、塩淡境界を通り再び海に流出することになる。これは超長期の隔離過程における処分システムの安全評価に影響を及ぼす可能性がある。このような淡水系地下水と塩水系地下水の挙動を評価するため、数値シミュレーションによる沿岸部の地下水環境の検討を行った。

沿岸部において、塩水系地下水と淡水系地下水の挙動を数値シミュレーションにより評価した例は少なくない^{1),2)}など。しかしながら、その多くは、陸域での淡水資源評価を目的としているため、対象とする深度が浅く、また、淡水系地下水の挙動に着目されており、本研究のような大深度での塩水系地下水の流動を対象にしたものは非常に少ない。また、今回対象としている海底下の塩水系地下水で想定されるような非常に遅い流れにおいては、通常の地下水流動シミュレーションで適用される前提条件（例えばダル

シー則の適用範囲など）が成り立たないことも考えられ、現場での実測値によるシミュレーションモデルの検証も求められる。

本事業では、駿河湾沿岸部での深度 800m までの電気伝導度、水質、同位体年代などの分布を精度よく取得することに成功している。本研究では、塩水・淡水の密度差を考慮した地下水流動シミュレーションにより塩淡境界およびその下位の地下水環境の感度解析を実施し、それらの計算結果と現地データとの整合性の検証および各種水理パラメータが計算結果に与える影響などの評価を行った。

2. モデルの構築

本研究では、本地域で採取したボーリングコアの岩相や地質調査結果を元に、水理地質境界として完新統、上部更新統、中・下部更新統の 3 層を設定した。本研究では、2 次元断面モデルによる解析と 3 次元モデルによる解析を実施したが、本稿では 2 次元断面モデルの結果について説明する。

2 次元断面モデルは、ボーリング調査を実施した FGB-2 孔を通る、水平 7.8km、深度 2km の範囲である。図 1 として断面位置と地質分布を、表 1 として基本とした水理パラメータを示す。計算に用いた水理パラメータは、既存文献^{3),4)}や過年度に近傍で実施した揚水試験結果⁵⁾を元に決定した。境界条件として、上端境界は塩分濃度 0 の涵養フラックス一定 (1000 mm/y)、下端は非流動境界、陸域の側面は既存研究⁵⁾の定常解析結果を用いた定水位境界とした。海側については、清水港の平均的な海水面標高に対する海水密度を考慮した静水圧分布を海

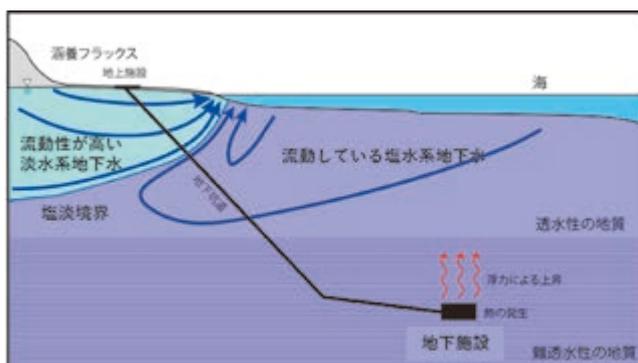


図 1 沿岸部周辺の淡水系地下水（水色）と塩水系地下水（紫）の流動イメージ

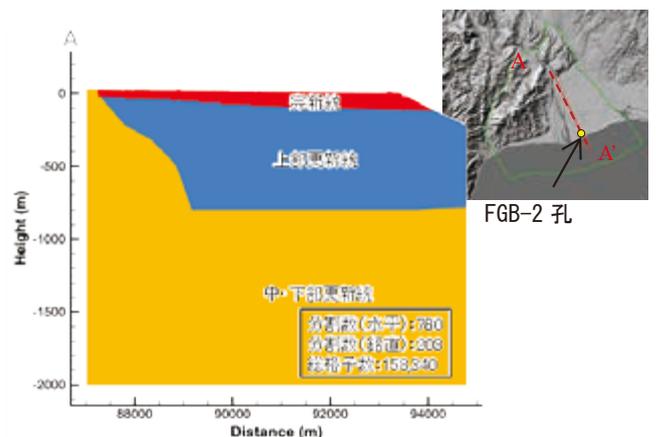


図 2 断面モデル位置（右上）と 2 次元地質モデル（縦：横 = 3:1）

底面に与えた。塩分濃度に関しては海水濃度による濃度固定境界とした。初期条件としては陸域がすべて塩水で満たされている状態とした。この初期状態から、地表面から淡水が涵養されることで徐々に塩水の洗い流しが行われ、塩水と淡水が安定状態に達するまで計算を行い、その状態を定常状態とした。計算には、地圏流体シミュレーター GETFLOWS ((株) 地圏環境テクノロジー) を用いた。計算格子数は X:Z = 780:203, 総格子数 158,340 とした。

本研究では、基本ケースに対し、透水係数、透水係数の異方性、分散長のそれぞれのパラメータに対し感度解析を実施した。本稿ではその結果の一部を述べる。

表 1 計算に用いた水理パラメータ

地層区分	透水係数 (m/s)
完新統	1.0×10^{-4}
上部更新統	1.0×10^{-5}
中・下部更新統	1.0×10^{-7}

全層：有効間隙率：0.2、縦分散長：30m、横分散長：縦分散長の 1/10

3. 結果と考察

3.1. 基本ケース

図 3 として、基本ケースにおけるボーリング調査孔近傍の塩分濃度結果から求めた塩水混合率の分布を示す。計算結果より、海側の塩水系地下水が海底より浸透し、塩淡水境界に沿って流出している流動が確認できる。計算の結果、FGB-2 孔地点で塩水と淡水が半々で混合している深度は 120 ~ 130m であり、深度 250m 以深では塩水系地下水となる。現場で採取した地下水の分析結果では、塩淡水境界は深度 75m 付近 ~ 深度 200m 程度であり、計算結果と概ね一致する。図 3 中段は地下水年代の計算結果である。深度 110m 付近の塩淡水境界の上部で年代の古い地下水が、塩淡水境界下部付近の深度 220m 付近で新しい地下水が現れる結果となった。現場で測定された ^{14}C 年代では、塩淡水境界の GL-168 m にて 2000 ~ 8000 年、塩水系地下水である GL-282m で 9000 年程度の値が得られており、計算結果（どちらの深度も 1000 年程度）とは隔たりがあるが、塩水系地下水の年代は塩淡水境界の地下水よりも若いことがありうる。実測及び数値解析からも示された。また、図 3 下段に地下水流速の分布より塩淡水境界の下限付近において、その深部の塩水系地下水よりも地下水流速が遅い領域があることが示された。地下水年代と比較すると、FGB-2 孔地点においては地下水年代が最も新しい深度帯の上部に、地下水流速が最も遅い領域が出現することになる。

3.2. 透水係数

次に、各層の透水係数の違いが塩淡水境界およびその周辺の地下水年代に与える影響を検討するため、完新統の透水係数を 8 倍にしたケース（図 4）と、上部更新統の透水

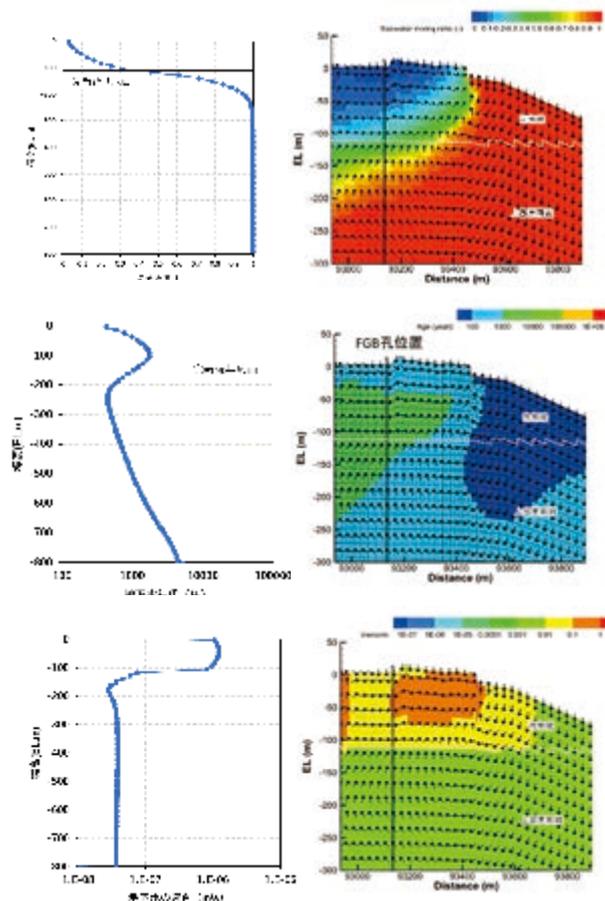


図 3 基本ケースにおける FGB-2 孔周辺の塩分混合率分布（上段）、地下水年代（中段）および地下水流速（下段）。それぞれ左が FGB-2 孔地点における深度分布、右はその周辺における 2 次元分布。左グラフと右分布図で深度が異なることに注意。

係数を 5 倍にしたケース（図 5）の計算を行った。完新統の透水係数を大きくした場合、FGB-2 孔地点では、完新統の塩分混合率がやや低下し、混合率の低い領域が広がる傾向が見られた。透水係数を大きくしているため、完新統の地下水流速は大きくなるが、それにより上部更新統の上部（深度 100 ~ 400m 付近）に関しても基本ケースに比べ流速が増加する結果となった。

一方で、上部更新統の透水係数を大きくした場合（図 5）、上部更新統内の流速が速くなることで、濃度拡散が促進され、特に FGB-2 孔付近での淡水と塩水の混合が進む様子が見られた。また、透水係数を大きくしたことにより、上部更新統全体で地下水流速は増加しているが、基本ケースにおいて見られた、相対的な地下水流速の低下がさらに顕著に現れる結果となった。どちらのケースでも塩淡水境界の下限深度（海水濃度の塩水が出現する深度）は、基本ケースと同じく GL-250m 付近であり、FGB-2 孔で実際に測定された電気伝導度や Cl⁻ 濃度分布から推定される塩淡水境界下限とほぼ同じ深度であった。

3.3. 透水係数の異方性

次に、透水係数の異方性が計算結果に与える影響を検討するため、完新統および上部更新統それぞれについて、鉛直成分の透水係数を水平成分の透水係数の 1/10 とした

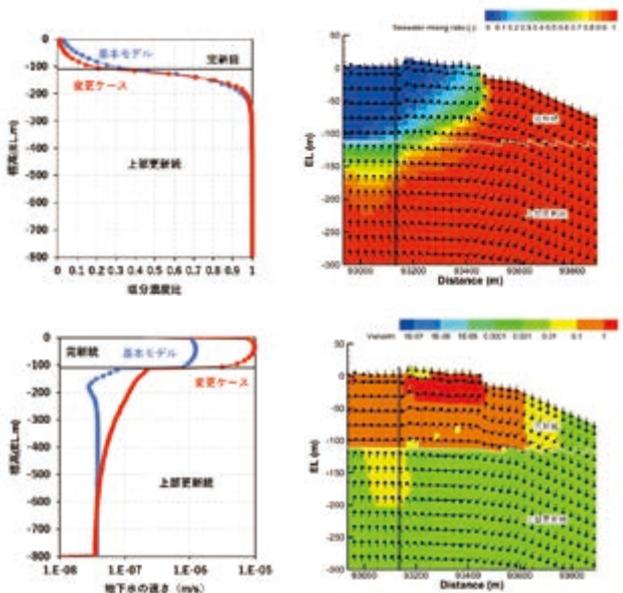


図4 完新統の透水係数を8倍にしたケース. FGB-2孔周辺の塩水混合率分布(上)および流速分布(下). 左はFGB-2孔地点の鉛直分布, 右はその周辺の深度300mまでの分布図.

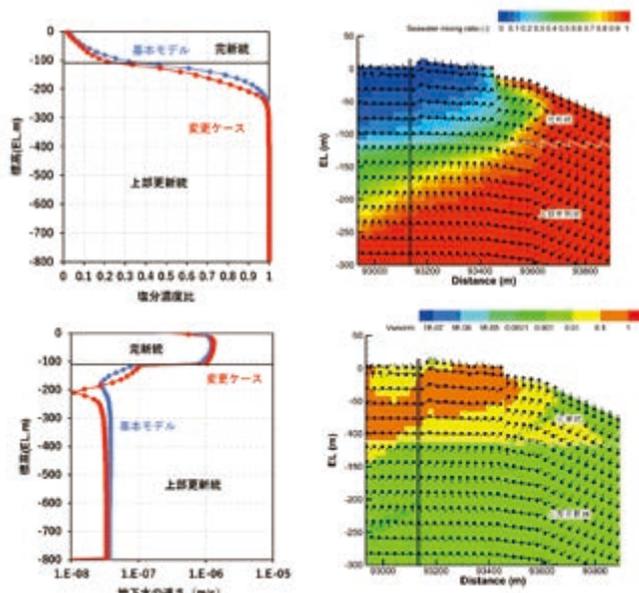


図6 完新統の透水係数鉛直成分を1/10にしたケース. FGB-2孔周辺の塩水混合率分布(上)および流速分布(下). 左はFGB-2孔地点の鉛直分布, 右はその周辺の深度300mまでの分布図.

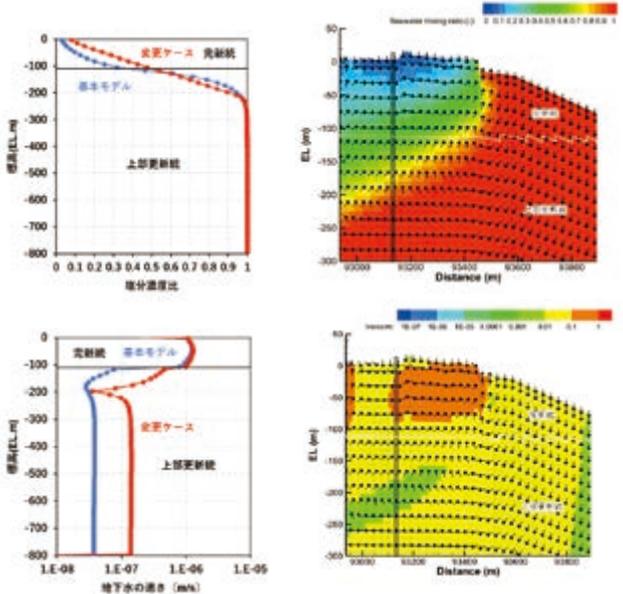


図5 上部更新統の透水係数を5倍にしたケース. FGB-2孔周辺の塩水混合率分布(上)および流速分布(下). 左はFGB-2孔地点の鉛直分布, 右はその周辺の深度300mまでの分布図.

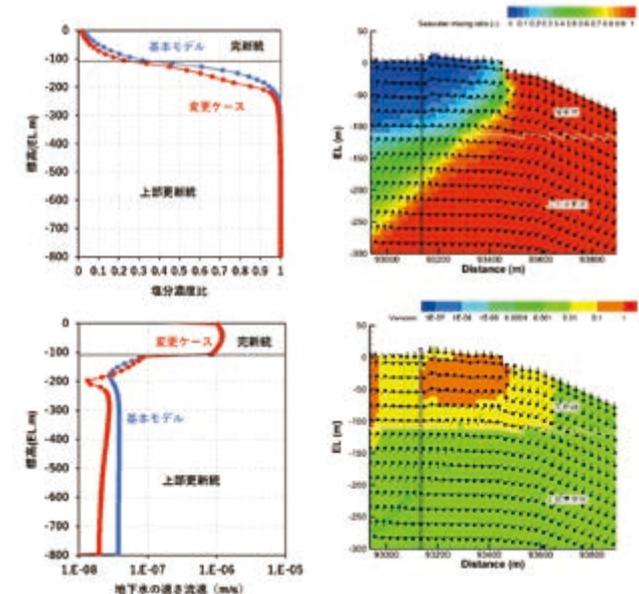


図7 上部更新統の透水係数鉛直成分を1/10にしたケース. FGB-2孔周辺の塩水混合率分布(上)および流速分布(下). 左はFGB-2孔地点の鉛直分布, 右はその周辺深度300mまでの分布図.

ケースの計算結果を図5に示す. なお, 水平方向の透水係数については表1の値を用いている.

図6には, 完新統の鉛直方向の透水係数を1オーダー下げたケースの結果を示しているが, 海岸近傍での塩淡水境界が海側へ張り出し, 海底面における上昇流の範囲が広がる様子が表れている. 興味深いことに, 地下水流速の分布において, 深度200m付近の遅い流速域が, 基本ケースよりも顕著に表れている. なお, 図6には示していないが, 地下水年代に関しては, 完新統~上部更新統にかけて全体的に年代が古くなる結果となったが, 深度5~600m以深では基本ケースと同程度となった.

上部更新統の透水係数について同様に鉛直成分を1/10

としたケースの結果を図7に示す. 上部更新統内の塩淡水境界が海側にややせり出し, 上部更新統内の塩淡水境界以深の地下水流速が小さくなる結果となった. これは, FGB-2孔近傍の塩水系地下水は上向き流れが主流となっているため, 鉛直方向の透水係数が小さくなることで, 平均流速も小さくなったものと考えられる. これらの結果は, 透水係数の異方向性が塩淡水境界の幅や形状に影響を与えることを示唆している.

4. まとめ

以上の結果を整理すると, 本研究地域のFGB-2孔付近では以下のことが示唆された.

① 透水係数およびその異方性が異なると、塩淡境界の幅や形状、地下水流速や地下水年代に違いが生じるが、FGB-2 孔における塩淡境界の下端深度はほぼ変わらず、その深度はボーリング調査により得られた結果と概ね一致した。

② 塩淡境界の最下部（塩分濃度が海水と同等になる深度）のやや上部において、地下水流速が顕著に小さくなる層が存在しうることが示唆された。

③ 完新統の透水係数やその異方性は、上部更新統の地下水流速や地下水年代にも影響を与えるが、深度 500m 程度以深ではその影響は見られなくなった。

これらの知見は、沿岸部の陸域のある地点の塩分濃度の鉛直分布のみでは塩淡境界およびそれ以深の地下水流速や塩分濃度分布を推定することが困難であることや、ある特定深度以深は、浅層（完新統）の地下水流動の状況によらず、流速や年代が決まる可能性があることを示唆しており、今後の調査研究に役立つものである。

沿岸部、特に海底下の地下水の流れを実測により把握することは、技術的にもコスト的にも容易ではない。今回のような数値シミュレーションにより、沿岸部の地下の概念モデルを形成し、陸域での水質、同位体年代等の現場データと合わせて総合的に解釈することで、海底下の塩水系地下水の流動－特に動く地下水と動かない地下水の評価－に繋がるものと考えている。

なお、本研究課題では、その他のパラメータに関する感度解析および 3 次元モデルによっても同様の感度解析を実施している。詳細については令和 4 年度の本事業報告

書⁶⁾をご参照いただきたい。

謝辞

本稿で紹介した成果は、経済産業省「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る研究開発事業（JPJ007597）」において実施されたものである。

引用文献

- 1) Michael et al. (2005) Nature, 436, p.1145-1148.
- 2) Qu, et al. (2014) Advances in Water Resources 74 318-328.
- 3) 村下・岸 (1967) 地調月報 18 (6), 1-14.
- 4) Neuman (1990) Water Resources research, 26, 1749-1758.
- 5) 産業技術総合研究所ほか (2022) 令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書。
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2021/3fy_coast.pdf
- 6) 産業技術総合研究所ほか (2023) 令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発（沿岸部処分システム評価確証技術開発）成果報告書。
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2022/4fy_coast.pdf

沿岸部の地質環境を海底湧出地下水で探る

Investigation of the geological environment of coastal areas with submarine groundwater discharge

地下水研究グループ：小野 昌彦

Senior Researcher, Groundwater Research Group:
Masahiko Ono

Phone: 029-861-2664, e-mail: masa.ono@aist.go.jp

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

1. はじめに

地下水は地球上の水循環の一部を構成する要素であり、大気・陸域・海域をつないでいる。陸域と海域が接する沿岸部は、陸域地下水流動の末端に位置しており、その場を象徴するものとして海底湧出地下水 (Submarine Groundwater Discharge: SGD) がある (図 1)。SGD は古くはローマ時代からその存在が認識され、神秘的な現象として捉えられていた¹⁾。近年では世界各地で調査が進み、沿岸部における普遍的な現象と考えられている。SGD は、沿岸部の地下を流れた地下水であるため、陸から海に至る流動の過程における温度や帯水層の地質などを反映した様々な情報を含むと考えられる。

沿岸部を想定した地層処分においては、地下水が放射性核種の移行経路となる可能性もあり、沿岸部の地下水流動や帯水層などの地質環境の把握が重要である。この観点から考えると、地下水流動の出口側に位置するSGDの実態を解明することは、沿岸部の地質環境を評価することにもつながる。以上のような背景の中で、産業技術総合研究所地下水研究グループは、静岡県環境衛生科学研究所と連携して、駿河湾を対象にSGDに関する調査技術の開発や高度化に取り組んできた。本発表ではこれまでの取組を紹介する。

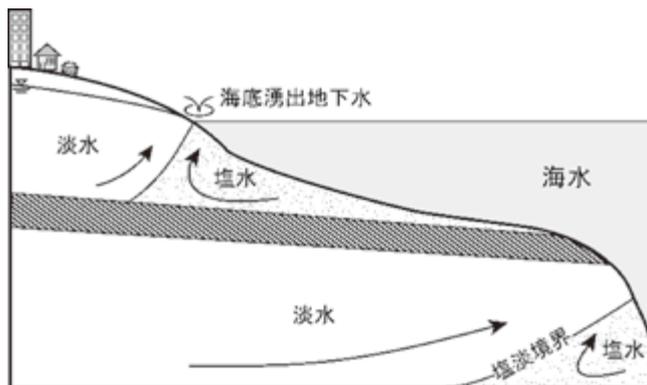


図 1 沿岸部地下水の模式図

2. SGD の調査

沿岸部の地質環境調査は、その初期段階で陸域や海域の地質調査が行われ、陸から海にかけての地質や水理構造のモデルが検討される。その中で、沿岸部帯水層の連続性や陸域の水収支等の検討結果に基づき、SGD の存在が推定される場合にはその調査が必要と考えられる²⁾。

SGD の調査手法として、例えば流域単位の湧出量を推定する水収支法や、水温・水質・湧出量を観測できるシー

ページメータ、湧出地点の分布を把握できる自然由来の地化学トレーサーなどが挙げられる。また潮間帯を含む浅海域においては、ダイバーの目視による湧出水の探査や採水、ドローンとサーモカメラを組み合わせる水温異常から湧出水を検出する手法、淡水と塩水の分布を電気探査で検出して湧出域を推定する手法なども適用されている。それぞれの手法は、対象とする観測内容や取得データの空間スケールが異なるため、様々な手法を組み合わせる SGD を調査することが一般的である。

3. 駿河湾のSGD

駿河湾におけるSGD調査として、最初は駿河湾奥部を対象に、地化学トレーサーであるラドン (^{222}Rn) を用いた広域調査を実施した。一般的に ^{222}Rn 濃度は地下水で高く、海水や河川水で低いという性質があるため、地下水が湧出する場所では周囲に比べて濃度が高くなる。駿河湾においては富士川～田子の浦周辺や千本松原周辺などで相対的に高い ^{222}Rn 濃度が検出され、SGD の存在が示唆された³⁾。そこで、富士川～田子の浦付近に焦点を当てて、音波探査による海底地形・底質状況の調査や ^{222}Rn 等による地化学調査、遠隔無人探査機 (ROV) を用いた海底面の探査等を実施した。また海域での各種調査と並行して、陸域における掘削調査を実施した。

富士川～田子の浦周辺で実施した各種調査を踏まえて ROV 探査を行った結果、水深約 130m 地点で SGD を発見した (図 2)。ROV で撮影した画像では中央に陽炎のような揺らぎが確認され、水質センサーで塩分濃度の低下を捉えた。このような SGD は同程度の水深帯に複数点にしていた。

SGD 発見の一方で課題もあり、例えば水深 100m を超える海底は暗く、広範囲の探査は困難であった。また、現場の気象や海象、構造物や船舶等の様々な条件を踏まえて探査を実施する必要があるため、日中に作業可能な時間も限られる。そこで ROV と高精度音響カメラを組み合わせ、4 ~ 5m 離れた場所から海底面の湧出水を高精度に検出する探査手法を構築した。これにより「点」として探査していた SGD を「面」として探査可能となった。このように広域と狭域の間を補完できる手法は、沿岸部海域における効率的な調査の実施につながると考えられる。現在はこの手法を応用し、SGD 湧出量の定量化についても検討を進めている。



図2 発見されたSGD⁴⁾

4. SGD から分かる陸と海のつながり

ROV 探査で発見した SGD を対象に採水を行い、化学分析によってその性状を調べた。SGD の周囲は海水であり、ダイバーによる採水作業が不可能な水深帯でもあったことから、いかに湧出水と海水が混合させずに採水するかが課題であった。本事業では、ROV とシリンダー型の採水器（容量 2 l）を組み合わせて、SGD の直上で採水するシステムを構築した。サンプルの採水時には、ROV が潮流に流されないように制御するとともに、周囲の海水を引き込まないようにシリンダーを低速で動作させて採水した。これにより駿河湾沿岸部の条件においても、淡水と海水が最大で 9 : 1 の割合となるサンプルの採水に成功した。採水したサンプルは、酸素・水素安定同位体比、無機溶存イオン、微量元素、炭素同位体比等について分析した。

分析結果に基づいて陸域地下水と SGD の化学組成を対比し、SGD の起源を解析した。駿河湾に隣接する富士山周辺では、これまでに数多くの地下水調査が行われており、富士山から駿河湾沿岸に至る地下水流動が存在することが分かっている⁵⁾。また富士山で涵養された地下水は、富士川や愛鷹山周辺で涵養された地下水とは異なる化学組成を示すことが知られており、例えば V（バナジウム）や Sr

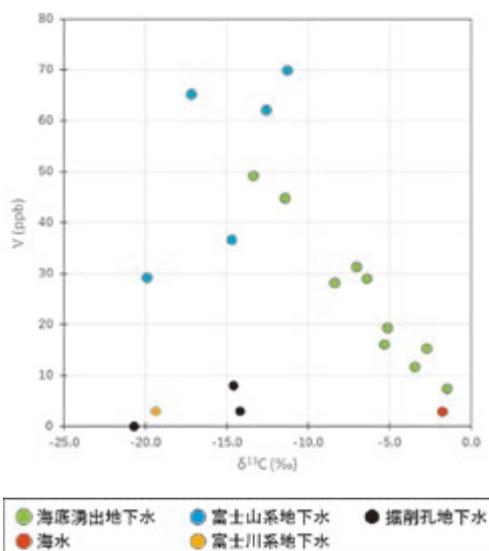


図3 V と $\delta^{13}\text{C}$ の関係⁶⁾

(ストロンチウム) に特徴がみられる。これらの先行研究の知見や、掘削孔から採水した地下水および SGD の分析結果を踏まえて検討した（図 3）。発見された SGD は、掘削孔の淡水地下水とは異なり、富士山由来の地下水と同様の組成を示すことが分かる。そのため、SGD は富士山で涵養された地下水を起源とするものであり、富士山と駿河湾が地下水を介して繋がっていることを意味している。

5. おわりに

本稿で紹介した SGD 調査の知見は、沿岸部の地質環境評価に資するものであるが、同時に目に見えない地下水への理解を深める材料にもなる。地下水研究グループは、駿河湾で得られた知見を各種の講演会や展示施設で紹介し、専門家以外の方にも地下水に対する興味を持っていただけるように取り組んできた。今後も沿岸部地下水に関わる知見の拡充や実態解明に取り組むとともに、得られた成果の情報発信にも努める。

謝辞

本稿で紹介した成果は、産総研と静岡県環境衛生科学研究所の共同で得られたものである。また海底湧出地下水の調査は、経済産業省「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業 (JPJ007597)」において実施されたものである。

参考文献

- 1) Taniguchi et al. (2002) Hydrological Processes, 16, 2115-2129.
- 2) 産業技術総合研究所ほか (2016) 沿岸部処分システム高度化開発 成果報告書.
- 3) 小野ほか (2014) 地下水技術, 56(1-4), 13-18.
- 4) 産業技術総合研究所 (2016) 海域地質環境調査確証技術開発 成果報告書.
- 5) Ono et al. (2019) Hydrogeology Journal, 27, 717-730.
- 6) 産業技術総合研究所ほか (2022) 沿岸部処分システム評価確証技術開発 成果報告書.

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, Exploration Geophysics Research Group:
Mayumi Yoshioka

Phone: 029-862-6649, e-mail: yoshioka-mayumi@
aist.go.jp

<https://unit.aist.go.jp/georesenv/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ド(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)活動などを通し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を推進している。

2. 各研究項目の内容

2.1. 地下水のマップの作成

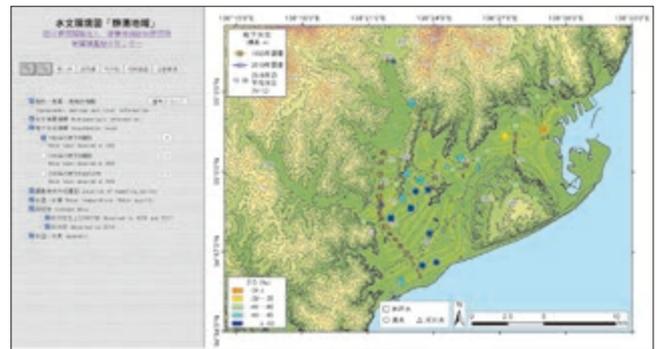
「地質の調査」ミッションの1つである知的基盤情報整備の一環として、「水文環境図」を作成している。水文環境図は、町田ほか(2010)の編集指針に沿った、全地域で調査・掲載する統一情報に加え、地域ごとのユーザーが必要とするローカル情報を分かり易く盛り込んだ、地下水の地図である。地下水流動(巨視的な地下水の動き)や水質は目に見えないが、その特徴には地域性がある。そのため、地下水に関連する過去のデータや水理地質、その地域の経済発展(土地利用など)を丹念に調べ、また、不足する地下水のデータに関しては新たな調査を行うことで、その全体像を解釈・把握し、水文環境図としてWeb上で誰もがアクセスできる形で公開し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

現在公開している水文環境図は、2023年9月末の段階で10地域である。最近では、2022年3月にNo.13「静清地域」が公開された。なお、2023年度末までにはNo.14「越後平野(信濃川流域)」が公開予定である。なお、「越後平野(信濃川流域)」については、すでにその成果の一部を論文として公開している(町田ほか, 2023)。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「京都盆地」「沖縄」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ページに公開されている。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。今年度新たに10地域のベクトルデータ化を進めており、次年度にはこれまでベクトル化が完了した地域の公開を予定している。

また、2023年9月より、水文環境図および全国水文環境データベースに利用者アンケートを実装している。このアンケートの結果は、水文環境図の成果の活用および効果的な社会発信のために、必要とされる地下水データの拡充や発信方法の検討に利用される。ご利用される方にはご不便をおかけすることになるが、ぜひ積極的にご記入いただきたい。



「水文環境図 No.13 静清地域」の一例

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を形成することになっている。近年では、2017年7月に国から「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20 km以内目安)が挙げられ、地層処分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年度からは北海道天塩群幌延町にて物理探査グループと連携し、ボーリング調査結果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を行い、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年度からは、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検証技術開発」事業に取り組んでいる。今年度は、静岡県駿河湾の沿岸部において、塩淡水境界（沿岸部の地下に形成させる淡水地下水と塩水地下水の境界）と、その深部での塩水の挙動に焦点を当てた研究を行っている。塩淡水境界に関しては、多くの研究結果から、様々なスケールで概念図が描かれているが、その空間分布の決定要因やその深部での塩水の挙動など、解明されていない点も多い。また、海底から湧出する地下水との関係も不明瞭である。これらの課題解明のために、駿河湾沿岸部において昨年度までに深度800mまでのボーリング調査を実施し、地下水試料の採取や地下水流行流速測定などを実施した。さらに、駿河湾海底下での海底湧水調査も併せて実施し、陸域から沿岸そして海底下の地下水流動の解明に取り組んできた。また、物理探査グループと協力し、神奈川県横須賀市、北海道幌延町および静岡県駿河湾において海上音波探査を行資、沿岸部での地下構造の把握に向けた物理探査技術の高度化・体系化を進めている。各研究課題の詳細においては、本Green Reportの前半、講演要旨を参照いただきたい。

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起源の追跡などに関する調査・研究を実施した（Yoshihara et al., 2023）。

2.4. その他の地下水研究

今年度に入り、COVID-19の感染拡大予防のための対策が大幅に緩和され、海外機関との交流も徐々に再開されつつある。今年5月にはタイのDGRがGSJを訪問するのに合わせ、当グループとのミーティングが開催され、地下水管理・利用やデータベースに関する意見交換を行った。

また、上記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下地質の熱物性に関する評価研究、地下水の経済的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によって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や、近年盛んになっている地下水の水処理関連企業者に対して、地下水の適切な利活用や管理方法などに関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	（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）
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）**
金子 翔平	（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	

引用文献

- 町田ほか（2023）越後平野G1層中の地下水流動と水質形成。地下水学会誌, 65, 3, p.221-254.
- Yoshihara et al. (2023) Deciphering natural and anthropogenic effects on the groundwater chemistry of Nago City, Okinawa Island, Japan. Environmental Pollution 318, 129017.

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オリ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、鉱物資源開発に寄与する各種情報の収集と質の高い発信などを行っている。国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、銅などの鉱種を対象に調査・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) 新たな地化学探査法の開発

世界中で確認されている金属鉱床のほとんどは、その一部または変質帯が地表に露出している。河川が発達している場合、鉱床から削剥された碎屑物は下流へと流されて地化学異常として認識されるため、川砂を対象にした地化学探査は最も有効な方法の一つであると言える。効率良くコストを抑えて探査するために川砂の全岩化学分析を行うのが従来の方法であるが、本研究では、川砂の特定の鉱物に着目した局所分析により、鉱物中の化学組成や元素比を求めることに挑戦する。局所分析には主に LA-ICP-MS（後述）を用いるため現状では高コストとなるが、従来法では見つからなかった地化学異常を発見し、鉱床探査に応用するこ

とが本研究の目的である。金及び銅鉱床近傍を流れる河川より採取した堆積物試料（図1）について、鉱徴の検出感度や再現性の検証を進めている。



図1 栃木県足尾鉱山周辺川砂試料採取の様子

(2) 火成岩を利用した新規銅鉱床探査手法の開発

銅は、カーボンニュートラルの実現に向けた電気自動車の生産拡大や、新興国の電線需要の増大のため、近年世界中で必要とされている資源である。しかし、主要鉱山の寿命減少と鉱床発見率の低下によって、資源の枯渇が懸念されている。本研究は、実際の探査フィールドに応用し、探査効率の向上や、地表兆候に乏しい潜頭性鉱床の探査に貢献することを目的としている。具体的には、資源的価値が大きい斑岩銅鉱床などの熱水性銅鉱床を形成しうるマグマが冷却・結晶化して形成された火成岩体ごとの鉱床形成ポテンシャルを評価するための指針導出を目指して研究を行って



図2 北上山地の銅鉱山における地質調査の様子

いる。

2023年度は火成岩体と熱水性金属鉱床のペアが多数分布すると共に、斑岩銅鉱床が存在する中国大陸縁辺部と対比される北上山地を研究対象地域に選定し、地質及び鉱床の調査を実施した(図2)。特に、鉱床と火成岩体の位置関係や火成岩体中の岩相分布を把握しつつ、火成岩試料を収集した。本地域に特徴的な銅、金、モリブデンの各鉱床の形成に関与した火成岩の観察と記載を実施すると共に、鉱物及び岩石の元素組成分析を進めている。

(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(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や鉱物組成との関係を理解するため、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。

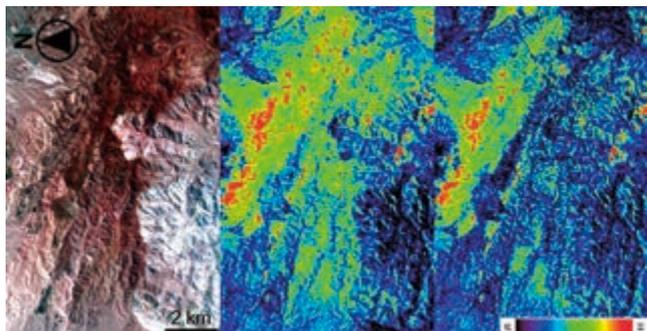


図3 ASTER 炭酸塩鉱物指標(左:疑似カラー画像(赤色が植生多い)。中:鉱物指標元画像。右:植生の影響を軽減した鉱物指標画像)

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う

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。



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)

(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(Dekov et al., 2023; Yoshimura et al., 2023など)。

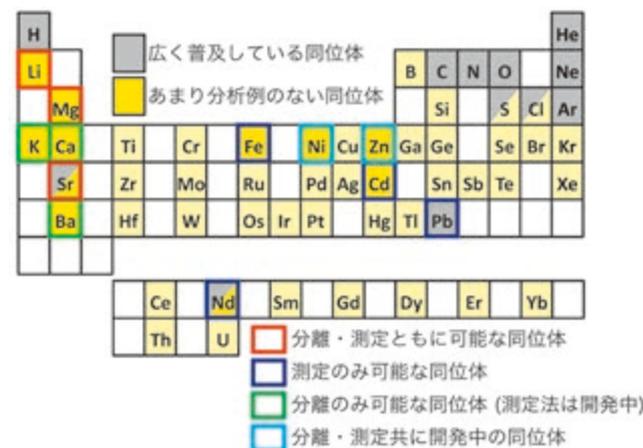


図5 当ラボで対象にしている金属元素の安定同位体比とその開発状況

(3) 選鉱技術の高精度・高効率化に関する研究

未利用資源の選鉱・分離技術の高精度・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選鉱プロセスの構築に取り組んでいる。また、鉱石中の鉱物の存在形態の解析する新たな技術として、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ている（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困難である装置内部の粉体挙動を自在に可視化することができるため、選別機構解明や運転条件の最適化に有用なツールである（図6）。科研費等により様々な粉体プロセスの機構解明や最適化にも取り組み、成果を挙げている（Tsunazawa et al., 2023など）。

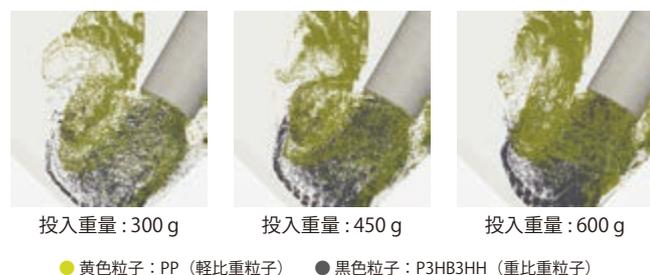


図6 比重分離装置内部の粒子挙動の可視化例

(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開発

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、アパタイトに着目し、REE 含有量の評価およびリン酸の生成過程でREEを効率的に回収する方法の開発を進めている。

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（黒鉱鉱床や別子型鉱床など）、熱水性鉱脈型鉱床、スカレ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、「日本鉱産誌」、「日本の鉱床総覧」、「日本地方鉱床誌」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木地質図にも銅、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鉱産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)
- 児玉 信介 (主任研究員)
- 実松 健造 (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)
- 生田目 千鶴 (契約社員)
- 徳本 明子 (契約社員)
- 宮腰 久美子 (契約社員)
- 阿川 友紀子 (契約社員)
- 佐野 綾子 (契約社員)
- 高橋 真弓 (契約社員)

4. 最近の主な研究成果 (2021年以降)

- 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.
- 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.
- Damak, F., Bougi, M. S. M., Araoka, D., Baba, K., Furuya, M., Ksibi, M., and Tamura, K. (2021) Soil Geochemistry, edaphic and climatic characteristics as components of Tunisian olive terroirs: Relationship with the multielemental composition of olive oils for their geographical traceability, *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6, 37, doi:10.1007/s41207-021-00241-y
- Dekov, V., Guéguen, B., Yamanaka, T., Moussa, N., Okumura, T., Bayon, G., Liebetrau, V., Yoshimura, T., Kamenov, G., Araoka, D., Makita, H., and Sutton, J. (2021) When a mid-ocean ridge encroaches a continent: seafloor-type hydrothermal activity in Lake Asal (Afar Rift),

- Chemical Geology, 568, 120126, doi:10.1016/j.chemgeo. 2021.120126
- 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.
- Ito, A., Otake, T., Maulana, A., Sanematsu, K., & Sato, T. (2021). Geochemical constraints on the mobilization of Ni and critical metals in laterite deposits, Sulawesi, Indonesia: A mass - balance approach. *Resource Geology*. *Resource Geology*, 71, 255-282.
- Iwasaki I., Fukaya, K., Fuchida, S., Matsumoto, S., Araoka, D., Tokoro, C., and Yasutaka, T. (2021) Projecting future changes in element concentrations of approximately 100 untreated discharges from legacy mines in Japan by a hierarchical log-linear model, *Science of the Total Environment*, 786, 147500, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147500
- Kosaku, Y., Tsunazawa, Y., and Tokoro, C. (2021) Investigating the upper limit for applying the coarse grain model in a discrete element method examining mixing processes in a rolling drum, *Adv. Powder Technol.* vol. 32, p.3980-3989.
- 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.
- 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
- Simandl, G. J., Paradis, S., Savard, J., Miller, D., D' Souza, R., Araoka, D., Akam, C., Hoshino, M., and Kon, Y (2021) Mineral control on the geochemistry of the Rock Canyon Creek REE-FBa Deposit, British Columbia, Canada, (2021), *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 21, geochem2019-082, doi:10.1144/geochem2020-010
- Takagi, T., Shin, K.-C., Jige, M. Hoshino, M. and Tsukimura, K. (2021) Microbial Nitrification and Acidification of Lacustrine Sediments Deduced from the Nature of a Sedimentary Kaolin Deposit in Central Japan, *Scientific Reports*, 11, 1-17
- 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, 三觜幸平, 陳 友晴, 所 千晴 (2022) *Journal of MMIJ*, vol. 138(6), p.95-102.
- Tsunazawa, Y., and Kon, Y. (2021) Numerical investigation of density segregation on a shaking table using the discrete element method, *Mater. Trans.*, vol. 62(6), p.892-898.
- Tsunazawa, Y., Soma, N., and Sakai, M. (2021) DEM study on identification of mixing mechanisms in a pot blender, *Adv. Powder Technol.* 33(1), 103337.
- 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.
- Tupaz, C. A. J., Watanabe, Y., Sanematsu, K., & Echigo, T. (2021) Spectral and chemical studies of iron and manganese oxyhydroxides in laterite developed on ultramafic rocks . *Resource Geology*, 71, 377-391.
- Yoshimura, T., Araoka, D., Kawahata, H., Hossain, H. M. Z., and Ohkouchi, N. (2021) The influence of weathering, water sources, and hydrological cycles on lithium isotopic compositions in river water and groundwater of the Ganges-Brahmaputra-Meghna Riversystem in Bangladesh, *Frontiers in Earth Science*, 9, 668757, doi: 10.3389/feart.2021.668757
- 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.

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,地圏環境評価,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5年度)

吉岡 秀佳	(研究グループ長)
中嶋 健	(上級主任研究員)
後藤 秀作	(主任研究員)
高橋 幸士	(主任研究員)
朝比奈 健太	(研究員)
風呂田 郷史	(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)
柴崎 美子	(契約職員)
深谷 千恵	(契約職員)
石塚 寿恵	(派遣職員)
青木 伸輔	(協力研究員)
高野 修	(産学官制度来所者)

2.2. 主な研究資金

運営費交付金

「燃料資源地質の研究」

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)

共同研究費

「堆積盆の炭化水素ポテンシャル評価手法に関する研究」
(令和2年度～)

「在来型・非在来型炭化水素砂岩貯留岩の堆積・形成プロセスに関する研究」(令和2年度～)

「電極表面修飾による微生物CCUの反応速度向上」

科研費

「新生代ビトリナイトの反射率変化：新生代地質体の最高被熱温度推定」

「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」

「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—」

「史上最大の大量絶滅事件と海洋無酸素事変を境に変化した海水化学組成の実態解明」

「混濁流による高流砂階のベッドフォームの堆積構造解明と堆積モデルの構築」

助成金

「堆積岩中のクロロフィル由来物質の分析と古環境解析への適用」

「水素ガス製造に適した石炭の水素生成能力評価法の開発」

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

・熱流量は地温勾配と熱伝導率の積で表される物理量で,地下温度構造推定に利用される。海底水温が安定している深海域では,複数の温度計を取り付けた長さ数mのプロープを堆積物にさし込む方法で地温勾配を計測する。沿岸域等の浅海域では海底水温変動が堆積物温度を時間変化させるため,この方法で信頼性の高い地温勾配の計測は困難である。海底水温変動による堆積物の温度変化は海底下深度の増加によって減衰する性質を利用し,長さ15mの長尺プロープを使用して海底水温変動の影響が減衰した海底下深度で地温勾配を計測する方法を考案した。この方法を上越海盆に適用し,信頼性の高い熱流量の決定に成功した。計測した熱流量を使用して上越海盆の海底下温度構造を推定した [図1]。

3.2. 在来型資源の鉱床成因等に関する地質学的研究

・秋田油田の根源岩として知られる中新統女川層は,日本海古海洋環境を復元する上でも,秋田堆積盆の根源岩ポテンシャルを評価する上でも重要であるが,堆積盆中心

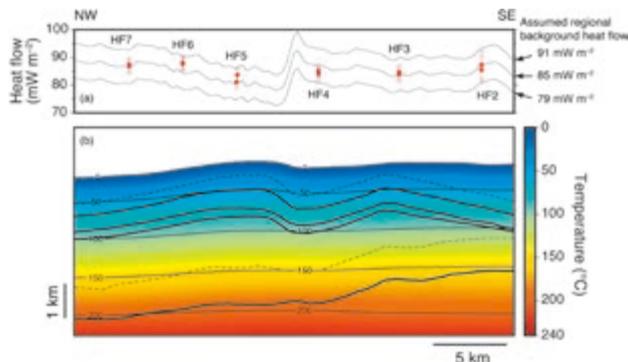


図1 海底で計測した熱流量を使用して推定した海底下温度構造 (Goto et al., 2003). 温度構造の推定には海底下深部からの熱流量が85 mW/m²であると仮定

とが判明した。①矢島地域の女川層最下部は、その前の西黒沢層の時代にまたがる。②堆積速度は、女川層の時期に入る1,200万年前頃に急増し、その後、千万年前頃に一次的に急減したのち再び増加する。このような堆積速度変化は佐渡島でも認められ、日本海東縁で同時に生じた過去の生物生産量変化を反映していると考えられる。③今回の年代測定結果により、従来の古海洋環境変遷史の年代が約百万年古く見直された結果、日本海古海洋環境が有機物の保存に適した還元環境に変化したタイミングが奥羽山脈隆起開始と同時期であったことや、近隣の油ガス田で900万年前頃に生じた熱水活動に関連して化学合成生物群集が当地域で活動したことがわかった。本研究の結果は、女川層の時代の古海洋環境が東北日本のテクトニクスや火山活動と密接に関係していたことを示している [図2][図3]。

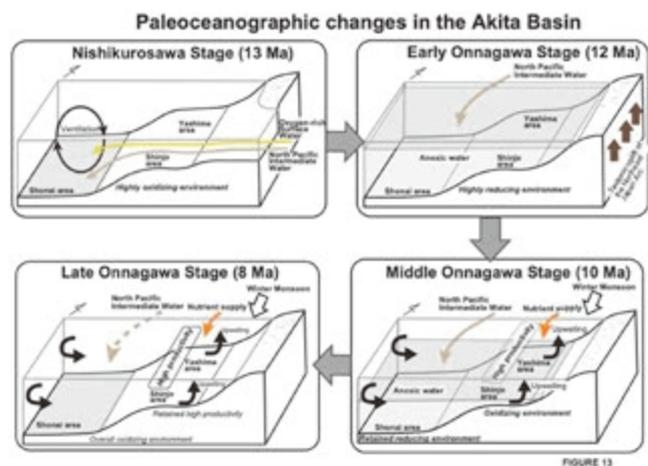


図2 秋田堆積盆の古海洋環境変遷

4. 主要な研究成果 (令和4年度後半以降)

[誌上発表]

Goto, S., Yamano, M., Tanahashi, M., Matsubayashi, O., Kinoshita, M., Machiyama, H., Morita, S., Kanamatsu, T., Hachikubo, A., Kataoka, S., Matsumoto, R. (2023) Surface heat flow measurements in the eastern margin of the Japan Sea using a 15 m long geothermal probe to overcome large bottom-water temperature fluctuations, *Marine Geophysical Research*, 44, 2.

Nakajima, T., Iwano, H., Danhara, T., Hirata, T., Asahina, K., Takahashi, U.K., Hanamura, Y. (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, <https://doi.org/10.1111/iar.12490>

Noda, A., Morimoto, K., Takahashi, U.K., Danhara, T., Iwano, H., and Hirata, T. (2023) Late Cretaceous–Paleogene terrestrial sequence in the northern Kitakami Mountains, Northeast Japan: Depositional ages, clay mineral contents, and vitrinite reflectance, *Island Arc*, 32, 12500, <https://doi.org/10.1111/iar.12500>

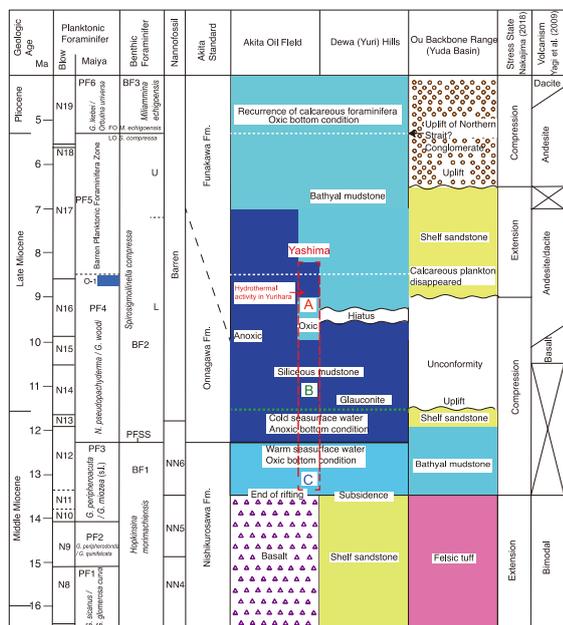


図3 秋田堆積盆の古海洋環境変遷史と奥羽山脈の隆起、応力場、火成活動との関係

の女川層は微化石の産出に乏しいため、高精度の年代データが得られて居らず、広域の古海洋環境変遷史の復元に問題が残されていた。

本研究では、秋田県矢島地域の女川層のU-Pb及びフィッション・トラック年代測定を4層準で行い、既存年代値を加えて女川層の年代モデルを作成したところ、次のこ

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：鈴木 正哉

Leader, Geomicrobiology Research Group:

Masaya Suzuki

Phone 029-861-2475,

e-mail: masaya-suzuki@aist.go.jp

http://unit.aist.go.jp/georeserv/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4年度後期～5年度前期の研究進捗状況

3.1. メタンハイドレート成因解明のための生物地球化学的研究

日本近海に賦存するメタンハイドレート（MH）の主成分メタンは有機物の微生物的分解に伴って生成されたもの、即ち、生物起源と考えられている。深海底堆積物において、メタンを生成する微生物（メタン生成菌）の生理・生態学的な役割を理解し、微生物メタン生成モデルとしてMH形成シミュレーションに導入することでその埋蔵量の評価や探鉱に貢献する。微生物の生育か機能に影響する環境因子によって現場に生息するメタン生成菌の活性がどのように影響を受けるかを明らかにするために、モデルとなるメタン生成菌の培養を行った。その結果、計10株ものメタン生成菌を得ることに成功し、系統的・代謝機能的にみて、従来考えられていたよりも多様なメタン生成菌がMH分布域の堆積物の中で生きて存在することが示された。また、いくつか培養株は、現場の深海底堆積物環境において優占して生息するメタン生成菌種であった。この優占株を深海底堆積物のメタン生成菌モデルとして用い、高圧環境下にある現場を

模擬して高圧培養システムを用いて、高圧によるメタン生成への影響を評価したところ、現場環境にて想定される圧力13 MPaや25 MPaでのメタン生成速度は大気圧とほぼ同じであった（図1）。ところが、遺伝子発現解析を行ったところ、高圧条件では大気圧よりもメタン生成に関与する遺伝子を強く発現しており、高圧環境に適応するための生理機構が働いていることが示唆された。

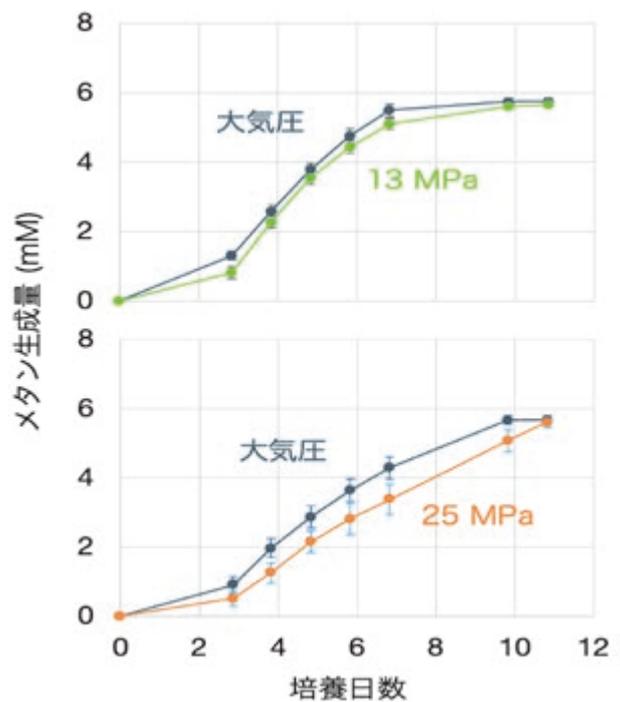


図1 優占メタン生成菌1H1Hc7株における大気圧と高圧条件におけるメタン生成量の経時変化。メタン生成量は4反復の平均値、エラーバーは標準偏差を示す。

また海底下深部からの流体移動は、メタンハイドレート（MH）の分布や資源量に影響する。MH分布域における海底下流体循環を知るため、日本海酒田沖および黒海のメタン湧水域で形成した炭酸塩岩を採取し、微量金属の分析を行った。特に、流体移動性元素として知られるリチウム（Li）を炭酸塩から分離・精製し、安定同位体比を測定した。炭酸塩のLi同位体組成から元の流体の組成を推定したところ、軽い安定同位体⁶Liに富み、海水とは明らかに異なる流体が混合していることが明らかになった。このことは、過去に少なくとも海底下250 m以深に由来する深部流体が湧出したことを示唆する。また、流体の上昇過程におけるLi同位体の分別を数値シミュレーションし、流速を推定した。以上の結果は、メタン湧水域に見られる炭酸塩岩のLi同位体比

が、流体のトレーサーとして有用であることを初めて示したものであり、推定された流体の起源や流速は、MH 形成プロセスの解明に貢献できると期待される。

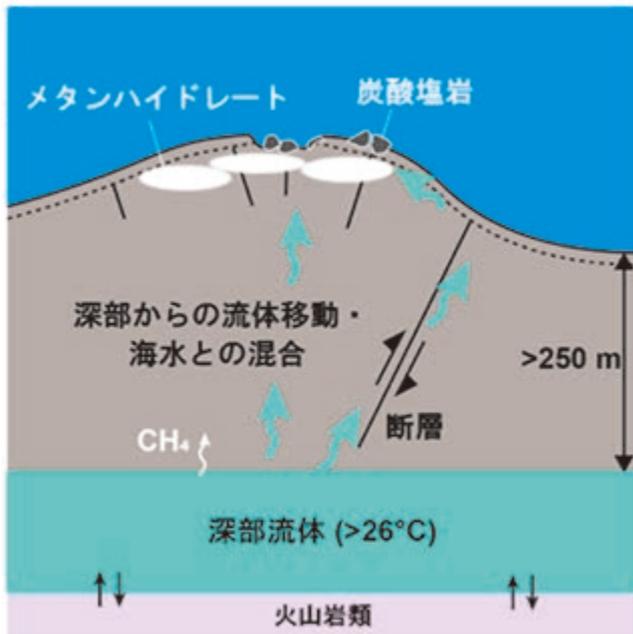


図2 炭酸塩岩のリチウム同位体比から明らかにした日本海油田沖のメタンハイドレート分布域における海底下流体循環 (Miyajima et al.,(2023) を改変)

(上記 2 つの研究は、経済産業省の委託により実施しているメタンハイドレート研究開発事業において得られた成果に基づいている。)

3.2. 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。

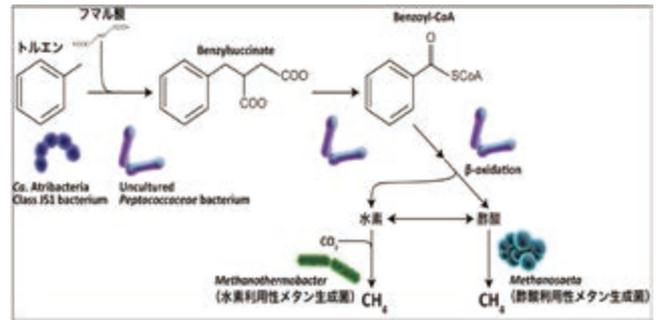


図3 油田から獲得したトルエン分解メタン生成微生物群集によるトルエン分解代謝経路

3.3. 天然ガス田における微生物起源メタンの根源自有機物の探索

微生物起源のガス田において、微生物に利用される堆積有機物の成分を推定することを目的として微生物の培養を行った。陸源有機物に含まれているリグニンにはメトキシ基とヒドロキシ基が存在する。単量体の芳香族メトキシ基は微生物に分解され、ヒドロキシ基にかわることから堆積後百数十万年という時間の経過の中で現在残っているのはヒドロキシ基であると仮説を立て、その利用性を評価した。基質として、ポリフェノールの一種であるタンニン酸 (C76H52O46) を選定し、水溶性天然ガス田試料を用いて培養を行ったところ、メタン生成が確認された。集積された微生物の遺伝子の解析により、別の地域の水溶性天然ガス田で優占していた未培養の新規古細菌の系統が集積されていることが明らかとなった。このことから、タンニン酸のようなヒドロキシ化合物が地下で重要な働きをしている可能性が示唆された。

3.4. ¹³C トレーサー実験のための同位体異性体を区別した有機酸の新しい定量法開発

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。安定炭素同位体 (¹³C) を用いたトレーサー法は特定の経路の存在を直接証明できるため、炭素固定機構の解明に利用されてきた。酢酸の場合は¹³C 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；CH₃COOH, CH₃¹³COOH, ¹³CH₃COOH および¹³CH₃¹³COOH。しかし従来の分析法では、これら 4 つの酢酸同位体異性体を区別して定量するためには少なくとも 2 種類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、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) を用いて 4 つの酢酸同位体異性体を区別して簡便かつ迅速に定量する手法を開発した。またこれまで確立されてこなかった

ギ酸の分析にも対応できるよう工夫した。

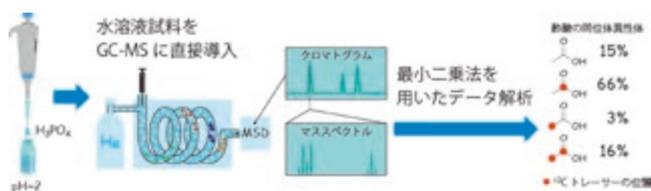


図4 分析手法の概要. 煩雑な前処理は不要で, 水溶液試料を直接 GC-MS に導入する. 分析時間は15分未満. 得られたマススペクトルデータの解析に最小二乗法を用いることで, 酢酸の4つの同位体異性体を区別して定量することに成功.

4. グループの研究体制 (令和5年度)

4.1. 人員体制

地圏微生物グループでは, 以下の22人体制で研究を実施している.

- 鈴木 正哉 (研究グループ長)
- 持丸 華子 (主任研究員)
- 眞弓 大介 (主任研究員)
- 片山 泰樹 (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)
- 坂田 将 (招聘研究員)
- 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)
- 宮原 英隆 (テクニカルスタッフ)
- 万福 和子 (テクニカルスタッフ)
- 佐々木 尚子 (テクニカルスタッフ)
- 山岡 早苗 (派遣職員)
- 前田 治男 (客員研究員)
- 辻村 清也 (客員研究員)
- 井尻 暁 (客員研究員)

4.2. 研究予算 (公的外部資金)

- ・令和5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

5. 最近の主な研究成果

- Yusuke Miyajima, Michal Jakubowicz, Jolanta Dopieralska, Akihiro Kano, Robert G. Jenkins, Zdzislaw Belka, Takafumi Hirata. (2023) Discharge timing and origin of fluids at methane seeps in the late Cretaceous subduction zone of Hokkaido, Japan: coupling U-Pb calcite dating with Sr-Nd isotope analysis, *CHEMICAL GEOLOGY*, **632**, 20. 121553
- Konomi Suda, Sachiko Sakamoto, Akira Iguchi, Hideyuki Tamaki. (2023) Novel quantitative method for individual isotopomer of organic acids from ^{13}C tracer experiment determines carbon flow in acetogenesis, *TALANTA*, **257**, 15, 124328



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

1. グループの研究方針

本グループでは、「燃料資源や地熱」、「鉱物資源・材料」、「地圏化学」、「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」、「土壤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) 土壤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) 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

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一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。

(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

持続可能な資源循環型社会の構築を目指して、肥料や化学品製造に不可欠なリン資源を廃棄物から選択的に回収する技術開発を行った。未利用リン資源である下水污泥焼却灰から陽イオン交換樹脂を使用した抽出法により、夾雑元素の少ないリン酸水溶液を精製した。

また、地球温暖化対策や省エネルギー技術の開発に資する研究として、植物性の残渣を高速分解する技術を基盤とし、そこから発生する二酸化炭素および無機元素を全量回収して養液栽培に利用する手法の確立を目的として、低濃度の二酸化炭素回収に適した吸着材の性能評価と二酸化炭素回収ユニットの設計を行った。

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、民間企業との共同研究を実施中である。2019年に当グループが中心となってJIS化したメチレンブルー吸着量の測定方法（JIS Z 2451; 2019）を、評価手法として利用することを目指す。また、クレイナノプレート製品の品質認証制度の構築に向けて所内連携を実施中である。

(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、論文として発表した（Shirai et al.(2023)）。また、聞き取り調査による事故後の環境修復政策における多面的な効果の整理や（Takada et al. (2023)）、事故後の環境影響評価を整理した（Takada and Schneider (2023)）。

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、現場実証プラントの設置を実施、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、休廃止鉱山のズリ堆積場におけるボーリングコア試料へのXRD分析やXAFS測定等の高度分析に基づく溶出メカニズムの解明に関する研究を進めた。

(4) 土壤汚染等に関する標準化研究

地盤材料の溶出特性を求めめるための上向流カラム通水試験方法の標準化を進め、JIS A1231として公開された。また、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ている。

3. グループの研究体制

1) 研究グループ員（令和5年6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
柳澤 教雄	鉱物学, 地球化学
Tum Sereyroith	特別研究員
土山 紘平	特別研究員
佐々木 大記	リサーチアシスタント
高橋 裕太郎	リサーチアシスタント
中川 達哉	リサーチアシスタント
川添 唯香	リサーチアシスタント
寺尾 美咲	リサーチアシスタント
Louis Carnet	リサーチアシスタント
勝又 新	リサーチアシスタント
須摩 令雄	リサーチアシスタント
松田 裕之	産学官制度来所者
白井 浩介	産学官制度来所者
粟谷 しのぶ	産学官制度来所者
村上 道夫	産学官制度来所者
加藤 智大	産学官制度来所者
五十嵐 順子	テクニカルスタッフ
片山 寛子	テクニカルスタッフ
金井 裕美子	テクニカルスタッフ
金子 信行	テクニカルスタッフ
軽部 京子	テクニカルスタッフ
肝付 宏実	テクニカルスタッフ
鈴木 寿一	テクニカルスタッフ
鈴木 薫	テクニカルスタッフ
藤井 和美	テクニカルスタッフ
藤井 新子	テクニカルスタッフ
藤田 司	テクニカルスタッフ
黒澤 暁彦	派遣職員
リヒンキ	派遣職員
中村 洋行	派遣職員

4. 最近の主な研究成果

【査読付き論文】

Momo Takada, T. Schneider(2023) Radiation doses to non-human species after the Fukushima accident and comparison with ICRP's DCRLs: A systematic qualitative review, Radioprotection Volume 58, Number 3, July - September 2023

Momo Takada, Yujiro Kuroda, Yumiko Kanai and Tetsuo Yasutaka (2023) Impacts of environmental decontamination on the rebuilding of return-

ees' lives after the Fukushima accident, Journal of Radiological Protection, Volume 43, Number 3

Moe Kawashima, Michio Murakami, Tomoyuki Kobayashi, Yoshitake Takebayashia, Masaharu Tsubokur, Tetsuo Yasutaka, Tomoaki Tamaki (2023) Post-traumatic growth caused by the Great East Japan Earthquake and response to coronavirus disease 2019, International Journal of Disaster Risk Reduction Volume 95, September 2023

Kosuke Shirai, Momo Takada, Michio Murakami, Susumu Ohnuma, Kazuo Yamada, Masahiro Osako, Tetsuo Yasutaka (2023) Factors influencing acceptability of final disposal of incinerated ash and decontaminated soil from TEPCO's Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Journal of Environmental Management Volume 345, 1 November 2023

Jun-ichi Takeshita, Michio Murakami, Masashi Kamo, Wataru Naito, Tetsuo Yasutaka & Seiya Imoto (2023) Quantifying the effect of isolation and negative certification on COVID-19 transmission, Scientific Reports volume 13, Article number: 11264

高畑 修, 宮口 新治, 原田 拓也, 桑原 充, 宗像 誠也, 秋山 嘉文, 門間 聖子, 保高 徹生, 小峯 秀雄 (2023) 黄鉄鉱を含む新第三紀層砂岩を用いた道路盛土内部における酸性化機構の推論, 地盤工学ジャーナル, 2023年 18巻 2号 p.123-138

Sereyroith Tum, Shinji Matsumoto, Miu Nishikata, Tetsuo Yasutaka (2023) Assessment of seasonal changes in groundwater quality of waste rock dump in temperate continental climate, northern Japan, Chemosphere, Volume 327, 2023, 138482, ISSN 0045-6535

Michio Murakami, Kenkichi Fujii, Wataru Naito, Masashi Kamo, Masaaki Kitajima, Tetsuo Yasutaka, Seiya Imoto (2023) COVID-19 infection risk assessment and management at the Tokyo 2020 Olympic and Paralympic Games: A scoping review, Journal of Infection and Public Health, 2023,, ISSN 1876-0341

【受賞】

令和 5 年度文部科学大臣表彰 (科学技術賞 科学技術振興部門) 「MAss gathering Risk COntrol and Communication (MARCO)」受賞者: 井元 清哉, 村上 道夫, 保高 徹生, 奥田 知明, 藤井 健吉

2022年度 産総研 理事長賞 保高 徹生

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：横田俊之

Leader, Exploration Geophysics Research Group:
Toshiyuki Yokota

Phone: 029-861-2464, e-mail: yokota-t@aist.go.jp

http://unit.aist.go.jp/georesenv/explogeol/

1. グループの研究目的と課題

本研究グループでは、地熱・地中熱、鉱物資源、メタンハイドレート、地下水等の地圏資源の調査・研究、放射性廃棄物地層処分、CO₂地中貯留等の地圏環境の利用と保全のための調査・研究、さらに加えて地盤液状化、地滑り、断層、火山等の防災分野等、広範囲な適用対象に対して、地圏の調査及び分析技術の開発の一環として、物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査法の適用研究を行っている。また、強靱な国土・防災への貢献のためにサステナブルインフラ研究ラボに参画し、インフラ関係の社会課題の領域間融合での解決に積極的に貢献することを心掛けている。2023年度においては、以下の7項目を中心とした研究を実施している。

➤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の探査を念頭に置いた海域での各種物理探査法や、陸域におけるAMT法、強制分極(IP)法等による鉱物資源探査等に関する研究。

2) 地中熱利用における事前評価手法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。

➤また、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のため、沿岸域モデルフィールドにおける2次元および3次元弾性波探査反射法適用試験の取りまとめ。

4) 二酸化炭素地中貯留プロジェクトでは、CO₂モニタリングを前提とした探査手法に関する基礎的研究。

5) 地下水等の浅層地質環境評価のための物理探査・原位置計測技術の開発。

➤さらに、地圏の調査及び分析に関する新しい技術開発として、

6) 断層評価のための各種物理探査法の適用結果についての取りまとめ、活動的火山の地下構造解明や物理モニタリングに関して、データ取得・解析に関する研究。

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に、NMR法や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. 3次元比抵抗構造の推定精度向上を目的としたMT法電磁探査に関する技術開発

火山活動、特にカルデラを形成するような大規模噴火においては、火砕流・火砕サージ及び大量の火山灰の降灰が広範囲に及び、人命だけでなく社会インフラにも大きなダメージを与える可能性があり、重要インフラ施設の稼働期間内に近隣の火山で大規模噴火が発生する可能性の有無や想定被害に関する評価が求められている。そのためには、マグマだまりの位置・規模等を正確に把握する必要があり、メルトや熱水の多寡に敏感な物理量である比抵抗の空間分布は、火山活動の現状把握に重要な制約を与えることが期待されている。

本研究グループでは、北海道電力(株)の泊発電所における火山影響評価の一環として、「洞爺カルデラの地下構造探査に関する研究」を株式会社阪神コンサルタンツと共同で実施した。本研究では、洞爺カルデラ・有珠火山を中心とした地域を例に、3次元比抵抗構造の推定精度の向上を目的としてMT(Magnetotellurics)法に基づく技術開発・適用を進めてきた。調査対象の洞爺カルデラ地域は、淡水湖域(洞爺湖)や浅海域(内浦湾)が存在するため、通常の陸上観測のみでは観測点を均等かつ稠密に配置することが困難であり、比抵抗構造の推定精度に問題が生じる可能性がある。



図1 洞爺湖周辺における、広帯域MT法電磁探査の3領域(陸上・淡水湖底・浅海底)展開

本研究では探査装置を陸上のみならず淡水湖底・浅海底での観測に最適化することで、設置条件の異なる3領域にまたがって観測することに世界で初めて成功した(図1)他、3領域で得られたMTデータを用いた3次元構造解析を実施し、洞爺カルデラ・有珠火山地域の火山活動評価に十分資する比抵抗イメージングに成功した(図2)。洞爺

カルデラの他にも、淡水湖を持つカルデラ火山や海に迫っている火山は国内外に多数存在しており、設置環境に依存しない広帯域 MT 法電磁探査及び構造解析技術のさらなる適用が期待される。

2.2. 牽引型高周波交流電気探査による詳細浅部比抵抗構造検出に関する研究

高周波交流電気探査は、水道の腐食性土壌調査を念頭に開発された測定方式で、舗装路面上からの調査が可能なので都市域における調査に適している。他にも、土木調査や堤防調査に適用可能であり、将来的にはインフラのデジタル設計につながる、詳細な 3 次元地質構造データの提供が期待できる。本研究では、広域を簡易かつ低コストで計測できる無人地上車両 (UGV) を用いた牽引型の高周波交流電気探査装置の開発を進めている。牽引型の高周波交流電気探査装置は、送信器と複数の受信器を相互接続配置し、それらを牽引して測定を行うが、電極の位置関係が固定されているため通常では、電極隔離係数が奇数もしくは偶数のどちらか一方のデータしか取得できず、浅部の分解能の低下につながる。この問題を解決するため、高周波交流電気探査技術を技術移転した民間企業と共同研究を行い、送信電極を切り替える方式 (図 3) と、複数の送信器からの同時に送信する方式の、2 つの方式の研究を進めた。送信電極を切り

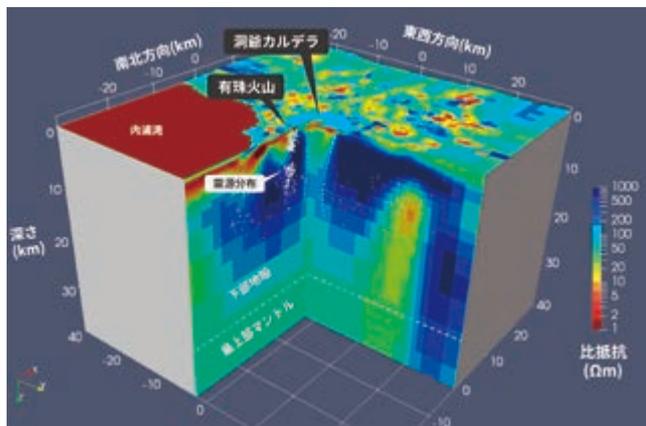


図 2 3 領域展開データの逆解析による、洞爺湖周辺 3 次元比抵抗イメージング結果。



図 3 複数送信器を用いた、高周波交流電気探査 (送信電極切り替え方式) の様子。

替える方式は、一時停止を行い電極の切り替えを行うため時間がかかるものの、実用的な運用ができることが明らかになった。同時送信方式では、電極の切り替えが不要なため、連続的な測定が可能であるが、データの集約に無線送信を行う点でデータのリアルタイム送受信に問題があることが判明したため、現在更なるシステムの改良を行っているところである。

2.3. 河川堤防における無人地上車両を用いた牽引型電磁探査実験

河川堤防の健全性を評価するために、堤防土質構成の把握が求められる。その目的で、電気探査が良く用いられてきたが、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。無人地上車両 (UGV) を用いた牽引型の電磁探査は、電磁探査装置を手で持ち運びながら測定する従来法よりも、簡易かつ効率的に調査できると期待されている。また、地表面を傷つけない非破壊の調査手法であるため、河川堤防の調査に適している。そこで本研究では、茨城県古河市を流れる西仁連川の堤防約 2 km の測線において、1 つの送信コイルと 3 つの受信コイルからなる電磁探査装置 CMD Explorer (GF Instruments) を用いて、UGV を用いて時速 2-3 km で牽引させながら測定を行った (図 4)。コイル面の地表面に対する向きを変更した 2 つのモードで測定することで、探査深度の異なる 6 つのデータを取得した。

取得されたデータを 1 次元解析することにより、図 5 に示す比抵抗構造を得ることができた。図 5 を見ると、表層は高比抵抗で、深部が低比抵抗という傾向が見て取れる。このことから、堤体盛土は高比抵抗、自然地盤は低比抵抗の傾向があり、自然地盤内での比抵抗変化は、砂質・粘土質等の土質の違いを反映していることが示唆された。

3. グループの体制

3.1. 人員体制 (2023.10.1現在)

以下の14人体制で研究を実施している。

- 横田 俊之 (グループ長)
- 神宮司 元治 (主任研究員)
- 浅田 美穂 (主任研究員)
- 小森 省吾 (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)
- 篠原 純弥 (リサーチアシスタント)
- 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)
- 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)

部門内では、地下水研究グループ、CO₂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

研究予算としては、産総研運営費交付金に加えて、以下のような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CO₂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。

また、民間企業とも積極的に共同研究を実施し、ニーズの把握と成果の橋渡しの促進に努めている。

4. 最近の主な研究成果

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.
<https://doi.org/10.1007/s10921-023-00998-y>
 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104920>
 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.
<https://doi.org/10.1007/s11001-022-09495-9>
 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.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153970>
 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.



図4 UGV牽引による電磁探査測定の様子。

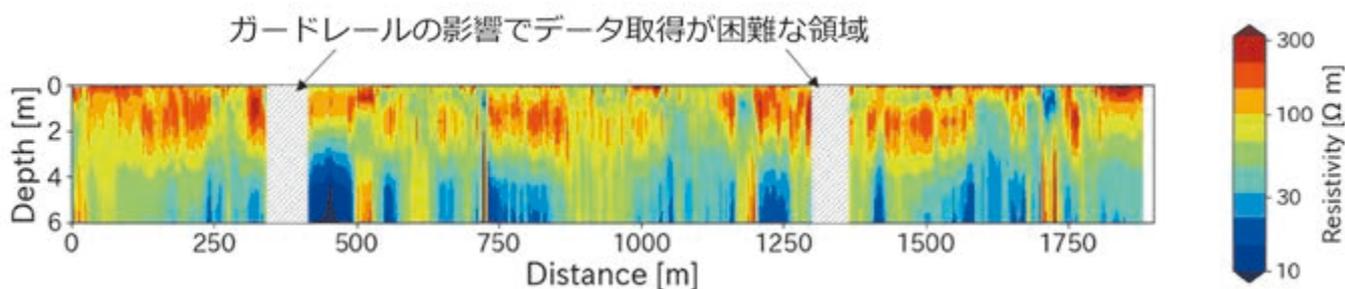


図5 牽引型電磁探査により得られた比抵抗断面図。

- <https://doi.org/10.1002/nsg.12202>
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.
<https://doi.org/10.1002/nsg.12191>
- 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.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggab368>
- Mitsuhata, 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.
<https://doi.org/10.1002/nsg.12189>
- Nakashima, Y., and Shiba, N. (2021) Nondestructive measurement of intramuscular fat content of fresh beef meat by a hand-held magnetic resonance sensor. *International Journal of Food Properties*, **24**, 1722–1736.
<https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1999261>
- Nakashima, Y. (2021) Use of Triple-Exposure X-ray Computed Tomography for Nondestructive Identification of Heavy Elements in Soil Samples. *Soil and Sediment Contamination*, **30**, 978–997.
<https://doi.org/10.1080/15320383.2021.1900068>
- Kodama, M., and Matsushima, J. (2021), Utilization-focused evaluation of relationship among spatial, temporal, and density resolutions of muography, *Journal of Applied Geophysics*, **192**, 104404.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104404>
- Umezawa, R., Katsura M., and Nakashima, S. (2021), Effect of Water Saturation on the Electrical Conductivity of Microporous Silica Glass, *Transport in Porous Media*, **138**, 225–243.
<https://doi.org/10.1007/s11242-021-01601-6>
- Horikawa, T., Katsura, M., Yokota, T. and Nakashima, S. (2021) Effects of pore water distributions on P-wave velocity–water saturation relations in partially saturated sandstones, *Geophysical Journal International*, **226**, 1558–1573.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggab143>
- Asada, M., Moore, G. F., Kawamura, K., and Noguchi, T. (2021) Mud volcano possibly linked to seismogenic faults in the Kumano Basin, Nankai Trough, Japan, *Marine Geophysical Research*, **42**, 4.
<https://doi.org/10.1007/s11001-020-09425-7>
- Seki, K., Kanda, W., Mannen, K., Takakura, S., Koyama, T., Noguchi, R., Yukutake, Y., Ishikawa, M., Fukai, M., Harada, M., and Abe, Y. (2021) Imaging the Source Region of the 2015 Phreatic Eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, Using High-Density Audio-Frequency Magnetotellurics, *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL091568.
<https://doi.org/10.1029/2020GL091568>
- Aizawa, K., Takakura S., et al. (2021) Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, *Kyushu Island, Japan, Earth Planets and Space*, **73**:12.

CO₂ 地中貯留研究グループの紹介

Introduction of the CO₂ Geological Storage Research Group

研究グループ長：徂徠 正夫

Leader, CO₂ Geological Storage Research Group:
Masao Sorai

Phone 029-861-3531, e-mail: m.sorai@aist.go.jp

1. グループの研究目的

CO₂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」に含まれる「産業利用に資する地圏の評価」、ならびに令和5年度地圏資源環境研究部門ポリシーステートメントにおいて、それぞれ重要課題の一つとして位置づけられており、一層の研究開発の促進が求められている。このような状況に鑑み、当グループでは、CO₂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。加えて、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兼務の形で参画し、第5期の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CO₂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. 安全な CCS 実施のための CO₂貯留技術の研究開発

安全かつ大規模・効率的なCO₂地中貯留技術の実現に向け、我が国の貯留層に適した実用化規模（100万トン/年）でのCO₂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4月に、二酸化炭素地中貯留技術研究組合（令和5年10月現在、産総研を含む2機関と民間企業9社）を設立した。この中で当グループは、貯留したCO₂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、産総研が独自に有する優位性のあるコア技術を基にプロジェクトを推進している。

2.1. 自然電位による漏洩リスク検知技術の開発

CO₂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。そのためには低コストかつ簡便な地表からの連続モニタリングシステムが求められる。本課題では、最も漏洩リスクの高い坑井近傍におけるCO₂の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。苫小牧サイトを初めとして、我が国では主に海底下の貯留層へのCO₂地中貯留が想定されていることから、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、CO₂圧入サイトにおける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。

本年度は、前年度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連続観測を引き続き実施するとともに、オフセット電位を把握する目的でSPの地表分布を測定し、データ解析・運用課題の検討を行った。また、新潟水溶性ガス田におけるCO₂溶解水圧入試験に先立ち、検知システムの仕様を策定した上で新潟サイトへ設置し、現場でのベースライン測定を開始した。また、鉄棒を挿入した水槽内にCO₂溶解水を流通させ坑井を模擬した金属棒および周辺の電位変化を評価する室内実験を行った（図1）。数値シミュレーションでは新潟CO₂溶解水圧入試験を模擬し（図2）、電位の変化とマッチングパラメータの検討を行った。

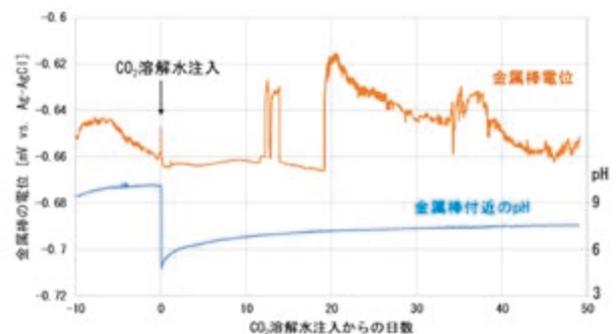


図1 模擬実験による金属棒の電位変化

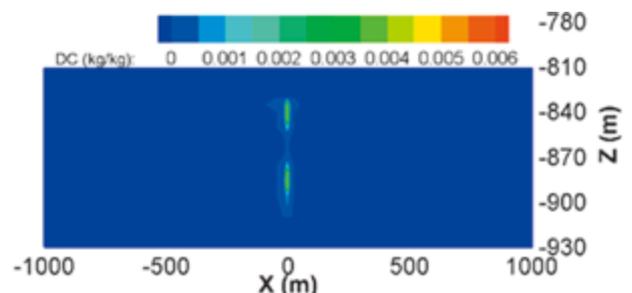


図2 CO₂溶解水圧入停止時のCO₂濃度分布

2.2. 断層安定性ジオメカニクス解析

豪州 Perth 近傍のCO₂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している。

本年度は、既存の文献データから母岩や断層ゾーンにおける応力状態に関連する岩石力学的パラメータを取り上げ、現場サイトのモデル（ベースモデル）として完成させた。一方で、本モデリングの高度化に不可欠な室内実験パラメータを取得するため、断層ゾーンのモデル化に関連する摩擦・透水の室内実験を実施した（図3）。ここでは、頁岩の模擬断層面における摩擦と透水特性、ならびにAE発生それぞれの関係性を調べ、摩擦構成則の導出や、AE波形からき裂の種類を推定した。

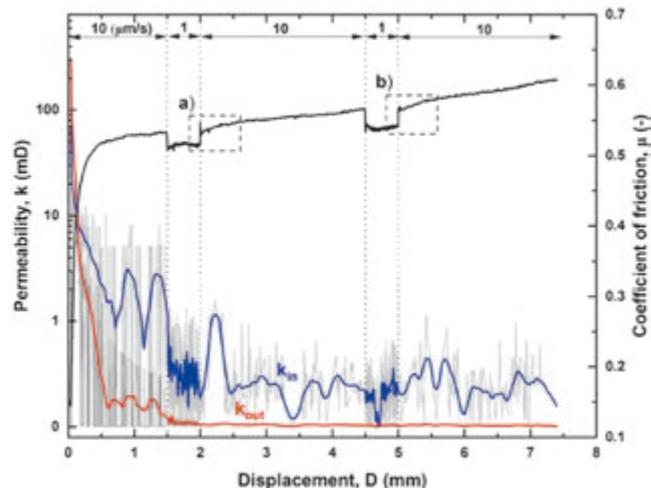


図3 頁岩の変位に対する摩擦係数(μ)と浸透率(k)の関係

3. 地熱条件下でのCO₂流動反応連成挙動の検討

高温貯留層にCO₂を圧入して地熱発電を行うと同時に、CO₂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CO₂地熱発電技術」が令和3年7月より開始した。本プロジェクトは地熱発電を主眼としているが、CCSの一つの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CO₂の挙動に焦点を当てた研究に取り組んでいる。

3.1. 流通試験による貯留層水理特性変化の検証

流通試験による貯留層水理特性変化の検証では、本年度はまず、CO₂圧入前の貯留層水理特性の予備検討として、高温水のみが流通する際に地化学反応が浸透率に及ぼす影響を評価した。流通試験を実施するにあたって、前年度に作製した高温水流通試験装置の操作手順と方法を確立した。次に、貯留層の模擬岩石として北海道利尻島玄武岩コアを用いて、250℃で高温水のみを流す流通試験を実施した。その結果、当該試料が $4 \times 10^{-20} \text{m}^2$ の浸透率を持つことが判明したが、約25日の実験中、浸透率には顕著な変化が見られず、高温水のみが流通時は地化学反応が浸透率に及ぼす影響は小さいことが確認された。また、余熱混合器とCO₂圧入機構を流通試験装置に増設し、超臨界CO₂やCO₂溶解水を流す高温超臨界CO₂流通試験装置として完成させた（図4）。増設部分は300℃、22MPaで良好に動作することを確認した。

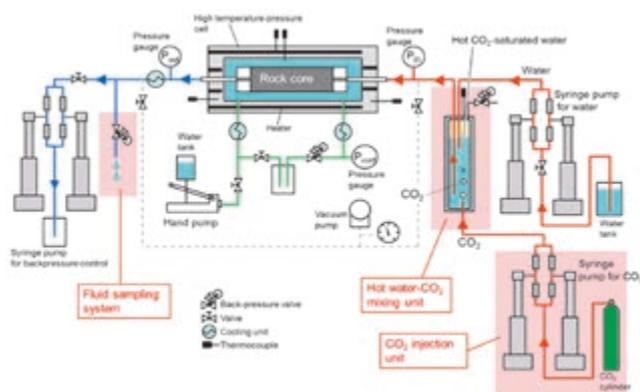


図4 高温超臨界CO₂流通試験装置の模式図（赤色ハッチ部分が本年度増設箇所）

3.2. 分子動力学計算による界面相互作用の解析

CO₂-水-石英・炭酸塩鉱物三相界面系の分子動力学シミュレーションを行い、濡れ性の温度依存性を評価した。また、昨年度のCO₂-水二相系の計算条件を拡張して、幅広い温度・圧力・塩濃度条件で界面張力を計算した。三相界面系の計算では、いずれの鉱物表面・温度でも水濡れであるという結果が得られた。200℃を超えると接触角の値の不確実性が大きくなる点には留意する必要がある。CO₂-水二相系については、幅広い貯留層条件に対応した計算データを揃えた（図5）。塩濃度に対して界面張力は線形に増加し、先行研究で提案されている実験式が200℃まで適用可能であることが示された。しかしながら、3mol/kg以上の高塩濃度領域については定性的な予測にとどまる。これらの二相系と三相系の計算結果をもとに、界面張力と接触角の値から $\gamma \cos \theta$ の値を推定した。 $\cos \theta$ の値は温度増加に伴ってやや増加する傾向があるものの、 γ の減少幅が大きいため、300℃では40℃に比べて $\gamma \cos \theta$ が60%程度減少し、毛管圧力の大幅な低下を示す結果が得られた。

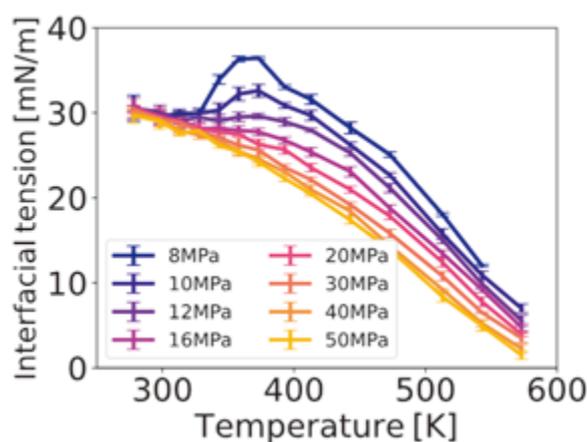


図5 CO₂-水二相系の界面張力

3.3. 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、北海道ウト口温泉において、岩石溶解-炭酸塩鉱物沈殿を再現するための現場流通反応試験を行った。各種岩石の粉碎試料の下流側に炭酸塩鉱物を設置した結果、玄武岩の存在により、CO₂を付加しない条件下ではカ

ルサイトの成長速度が大幅に増加する一方、CO₂を付加すると溶解速度が低下する様子が確認された。本年度は、高温環境下での高精度の炭酸塩反応速度データを取得することを目的として、伊豆半島に位置する高温泉において炭酸塩鉱物の成長実験も行い、過飽和度の異なる条件下での成長速度の測定に成功した。さらに、地熱系に一般的な熱水変質鉱物の概要の整理と、代表例としての八丈島地熱地域に産する脈鉱物を含む変質鉱物の文献調査を実施し、その産状について熱力学的な解釈を行った。

4. 風化促進に係る研究開発

玄武岩等の苦鉄質岩を粉砕して地上に散布し、大気中のCO₂との反応により鉱物化させることでCO₂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」が令和4年10月より開始した。本プロジェクトはゼロエミッション国際共同研究センター主導で他領域や他部門と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CO₂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。

4.1. 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、活動時期が3百万年前から現世に相当する1)兵庫県神鍋地域の玄武岩単成火山群、および2)沖縄県久米島の宇江城層の火山岩類、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⁴⁰Ar/³⁹Ar年代測定、水銀圧入法による空隙率測定等を進めている。

4.2. CO₂の炭酸塩化速度および固定量評価技術の開発

事業所屋上において、国内外で初となる定点での岩石風化実験を開始した。ここでは、粒径1~2mmに粉砕した各種玄武岩、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、CO₂の炭酸塩化速度や固定量の評価を行う計画である。実験開始後3カ月の段階では明瞭な炭酸塩化は確認されていないが、一度の降雨に曝露しただけでも岩石からイオンが溶脱することが明らかとなった。雨水と比較したpHの最大増加幅は、MgO：2.7、蛇紋岩：1.6、玄武岩：0.7となったが、このようなpHの差は、岩石種により溶脱速度、すなわち炭酸塩化速度に大

きな違いがあることを示唆している。

5. 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、CO₂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CO₂貯留・固定化技術に関する基礎調査研究」について、フィージビリティスタディに参画し、研究開発課題設定に資する情報および知見を取得した。

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。

6. グループの研究体制

CO₂地中貯留研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

徂徠 正夫（研究グループ長）
藤井 孝志
加野 友紀
後藤 宏樹
西山 直毅
堀川 卓哉
志賀 正茂（産総研特別研究員）
西木 悠人（産総研特別研究員）
池田 博（産学官制度来所者）
上原 真一（産学官制度来所者）

7. 最近の主な研究成果（2020年以降）

- Goto, H., Sugihara, M., Ikeda, H. and Ishido, T. (2020) Laboratory test of a superconducting gravimeter without a cryogenic refrigerator: implications for noise surveys in geothermal fields, *Explor. Geophys.*, 51, 494-505.
- Goto, H., Ishido, T. and Sorai, M. (2020) Numerical study of reservoir permeability effects on gravity changes associated with CO₂ geological storage: implications for gravimetric monitoring feasibility, *Greenh. Gases*, 10, 557-566.
- Shiga, M., Aichi, M., Sorai, M. (2020) Quantitative investigation on the contributing factors to the contact angle of the CO₂/H₂O/muscovite systems using the Frumkin-Derjaguin equation, *Geofluids*, Article ID 6656460, 1-11.
- 田中敦子 (2020) CCSにおける社会受容性の課題 - 国際

- 動向との関係からの整理 -, *Journal of MMIJ*, 136, 127-133.
- 竹原 孝, 及川寧己, 藤井孝志, 宮崎晋行 (2020) 二酸化炭素吸着に伴う石炭の三軸圧縮強度の変化, *Journal of MMIJ*, 136, 134-139.
- 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 CO₂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.
- Sorai, M. (2021) Effects of calcite dissolution on caprock' s sealing performance under geologic CO₂ storage, *Transport in Porous Media*, DOI:10.1007/s11242-020-01525-7.
- Horikawa, T., Katsura, M., Yokota, T., Nakashima, S. (2021) Effects of pore water distributions on P-wave velocity – water saturation relations in partially saturated sandstones, *Geophysical Journal International*, 226, 1558–1573.
- 徂徠正夫, 後藤宏樹, 杉原光彦, 西 祐司, 中尾信典 (2021) CO₂地中貯留における反射法探査の補完としての重力連続測定の利用方策, *Journal of MMIJ*, 137, 46-50.
- Shiga, M., Aichi, M., Sorai, M., Morishita, T. (2021) Structure and dynamics of interfacial water on muscovite surface under different temperature conditions (298 K to 673 K): molecular dynamics investigation, *Water*, 13, 1320.
- Tsuji, T., Sorai, M., Shiga, M., Fujikawa, S., Kunitake, T. (2021) Geological storage of CO₂-N₂-O₂ mixtures produced by membrane-based direct air capture (DAC), *Greenhouse Gases: Science and Technology*, DOI:10.1002/ghg.2099.
- Goto, H., Sugihara, M., Nishi, Y., Ikeda, H. (2021) Simultaneous gravity measurements using two superconducting gravimeters to observe temporal gravity changes below the nm/s² level: ocean tide loading differences at different distances from the coast, *Geophysical Journal International*, DOI:10.1093/gji/ggab300.
- 加藤孝幸, 水落幸広, 二ノ宮淳, 岡本征雄, 矢島達哉, 齊藤晃生, 徂徠正夫 (2021) 神居古潭帯周辺における蛇紋石の沈澱現象と低温蛇紋岩化作用, *総合地質*, 5, 25-48.
- Shiga, M., Morishita, T., Aichi, M., Sorai, M. (2021) Effect of surface coverage of water molecules on methane adsorption on muscovite and pyrophyllite: molecular dynamics study, *Energy and Fuels*, 13, 1320.
- Shiga, M., Morishita, T., Sorai, M. (2022) Interfacial tension of carbon dioxide - water under conditions of CO₂ geological storage and enhanced geothermal systems: a molecular dynamics study on the effect of temperature, *Fuel*, 337, 127219.
- 加野友紀, 藤井孝志, 徂徠正夫 (2022) 安全・安心な CO₂ 地中貯留に向けた取り組みの現況, *安全工学*, 61, 441-447.
- 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., Aichi, M., Nishiyama, N., Sorai, M. (2023) Correlation between contact angle and water film energetics in carbon dioxide (CO₂) -water (H₂O) -clay mineral interfacial systems: a molecular dynamics study, *Energy & Fuels*, accepted.

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、重金属類や揮発性有機化合物など様々の汚染問題が発生している。近年では、マイクロプラスチックやPFOS・PFASによる汚染問題など有害物質が多岐にわたっており、汚染物質の輸送経路や環境中での蓄積性について新たに解明すべき課題が顕在化している。

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ため、それらの現象を定量的に把握することが重要となる。また、それら化学物質は土壌から地下水、河川、海あるいは農作物など移行することにより、生態系やヒトと関わり合いを持つこととなるため、ヒトや生態系への影響を定量的に評価することも必須である。さらに、自然由来重金属類の汚染問題については、地域ごとのバックグラウンド情報に関する知見を蓄積していく必要がある。

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

2022年度、地圏環境リスク研究グループは以下の研究を実施しており、その研究成果については学術誌や学会発表などで公表している。また、主要研究課題については、グループのホームページに掲載しており、下記 URL : <https://unit.aist.go.jp/georesenv/georisk/japanese/home/index.html>

または、ネットの検索エンジンを利用し、「地圏環境リスク研究グループ」名をキーワードとして検索することが可能である。

2.1. 地圏環境リスクの研究

2.1.1. 土壌・地下水における有害物質の移動挙動

土壌・地下水における有害物質の挙動予測には、移流分散方程式をはじめとする種々の物質輸送モデルが利用される。モデルに含まれるパラメーターは、カラム通水試験等

の破過曲線を用いてモデルを逆解析することにより特定される。しかし、複数のパラメーターセットによって破過曲線が同様に再現されることが報告されており、これは等結果性の問題と呼ばれる。多孔媒体中の溶質輸送モデルを対象に、一般化尤度不確実性推定法を用いて等結果性の問題が生じるパラメーターの範囲や組み合わせを調査した。その結果、破過曲線の形状に同様の変化をもたらすパラメーターを同時に推定した場合などにおいて等結果性が示され、逆解析によるパラメーター推定の不確実性が高まることが確認された。

2.1.2. 土壌中マイクロプラスチック (MPs) の分散・凝集性の評価と新規検出手法の開発

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、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。

2.1.3. 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事例に乏しく、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。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と地下水質に及ぼす影響を定量的に評価すると同時に、温度変化が地下水質変化を引き起こすメカニズムの解明を試みた。計2年間ほど、通常の稼働条件に近い冷暖房運転を行った結果、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、最大2~3℃程度の温度上昇ならびに温度低下が認められた。これらの温度変化による地下水質への影響は、特になかったことが示唆された。

2.1.4. 氾濫原堆積物中の自然由来重金属類の由来探査手法の開発

昨今の異常気象により、経験のない集中豪雨や土砂災害

のリスクが高まっており、災害土砂に含まれる自然由来重金属類の存在が迅速な復興の妨げとなる事例が相次いでいる。そこで、氾濫原堆積物中の有害金属類の由来解析手法の開発を目的とし、四国地域の特定流域における土砂移行解析を実施した。その結果、解析対象とした、ヒ素、クロム、銅のうち、下流域への運搬が顕著でなかったクロムに関して、運搬量と土壌成分濃度分布が良い相関を示した。一方、銅、ヒ素に関しては下流域の不一致が顕著となり、移動距離、傾斜角、平均雨量等の影響因子による差が大きいが明らかになり、さらなる解析手法の開発を進めている。

2.2. 環境調和型土壌汚染対策・浄化技術の開発

2.2.1. Mg系及びCa系吸着材による汚染水からのヒ素除去およびヒ素-フッ素土壌時除去

ヒ素吸着材としてMg系吸着材及びCa系吸着材がしばしば利用されるが、それぞれ長所と短所がある。そこで、複数の種類の異なる吸着材を併用使用することによって相乗効果が得られる可能性がある。Mg及びCaの酸化物、水酸化物及び炭酸塩を系統的にそれぞれ組み合わせヒ素除去試験を実施した結果、MgCO₃をCaOまたはCa(OH)₂と組み合わせたとき、ヒ素除去率が大幅に向上するとともに、吸着材母材成分(Mg成分及びCa成分)の溶出を大幅に低下させることができることが見出された。

さらに、Mg系吸着材によるヒ素-フッ素同時除去試験を実施し、その結果について検討した。ヒ素の価数に拘わらず、ヒ素及びフッ素ともに除去性能(吸着性能)はMgCO₃ < Mg(OH)₂ < MgOであった。

2.2.2. 鉄鋼スラグを中心としたアルカリ系再生資材による酸性廃水・酸性土壌の中和処理と環境影響評価

酸性鉱山・温泉廃水や酸性土壌の中和には、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。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、酸性廃水や酸性土壌の中和に有効である可能性が高い。そこで、強酸性の温泉廃水、また、pH4.8~5.5程度の酸性土壌(3種類)に対し、鉄鋼スラグを中心としたアルカリ系再生資材、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、酸性廃水・酸性土壌ともに、特に鉄鋼スラグの中和性能は炭酸カルシウムと同程度であり、鉄鋼スラグが炭酸カルシウムの代替となる可能性が示唆された(酸性土壌の結果は、右記の図1を参照)。

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

自然由来重金属類の現位置不溶化処理技術として、廃棄物や廃棄物をベースとした低コスト再生資材を用いた手法の開発を実施した。今年度は、自然由来の重金属類(計12種

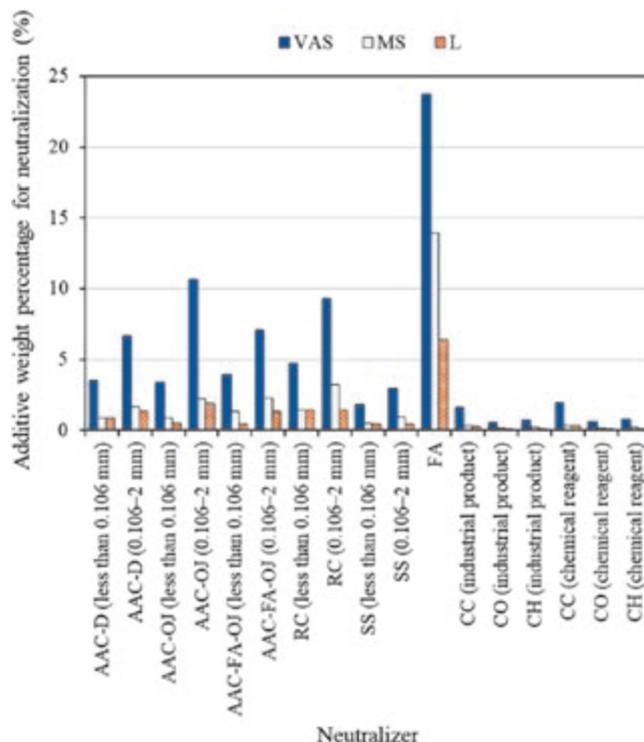


図1 種類の酸性土壌を中和(pH7とする)するために必要な各中和剤の添加量(土壌に対する添加率(%)で表記)。(Nagasinghe et al., 2023より引用)

類)を高濃度に含むことが予想された土壌・地質試料を採取し、それらの溶出試験結果に基づき、ヒ素と鉛、カドミウムを含む土壌・地質、2種類について不溶化試験を行った。本研究で対象とした廃棄物・再生資材のうち、特に再生コンクリートについては、いずれの土壌・地質、どの重金属類に対しても、その添加により、極めて大きく溶出量が減少する傾向が認められた。鉛の不溶化率は80%以上、また、カドミウムのそれも100%と、高い不溶化効果が得られることを明らかにした。

2.2.4. 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壌・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二価鉄とメタン菌の共存が重要であることを明らかとしていたが、今年度は先の研究の実用化に向けた試験をおこなった。浄化試験による二価鉄濃度の最適化と次世代シーケンサーによる遺伝子解析で二価鉄添加が微生物叢の点から環境影響の低い浄化手法であることを確認した。また、微生物による汚染浄化の研究は地下水や栄養培地など溶液中で行われるものがほとんどであるが、実際の汚染現場では土壌粒子が存在する。そのため、土壌が存在する条件下での浄化試験や有機物による土壌粒子からの汚染物質の溶出促進効果の検討を行った。土壌粒子存在下において、特定の有機物により浄化が促進することを見出した。さらに微生物RNAに基づく遺伝子解析を行い、浄化が促進したいずれの条件においてもDehalococcoidesが脱塩素化を担う主要な微生物であることを確認した。

2.2.5. ジェン系合成ゴムの分解性評価

環境中のマイクロプラスチックの排出源として、車の走行で発生するタイヤ摩耗物の占める割合は多く、環境中での分解性と分解過程で発生する有害物質の有無の解明が求められている。本年度は、タイヤ原料として用いられており、天然ゴムよりも分解性に劣るジェン系合成ゴムに着目し、合成手法の違いによる各種ゴム成分の分解性を実施した。同じ材料からなる合成ゴムでも、重合法の違いによって分解速度が大きく異なることが明らかになった。また、環境中に放出される水溶性の分解生成物を LC-MS で検証を行い、ヒトへの健康影響を指標とした安全性評価を実施した。その結果、道路周辺での発生しうる副生成物について更なる検討が必要であることが確認された。

2.3. 表層土壌評価基本図の整備

表層土壌は農業や生活環境に与える影響が大きく、表層土壌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壌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壌評価基本図の整備を実施している。2022年度は、地方単位に出版を開始した四国地方に引き続き、九州地方を出版し、プレス発表を行った（図2）。

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
- 土田 恭平
- 吉川 美穂（育児休暇中）

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：小熊 輝美

- 花田 順子
- 野島 彩友美
- 深井 沙英子

リサーチアシスタント：工藤 優津樹

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」および「科研費・補助金・助成金」などで実施している。

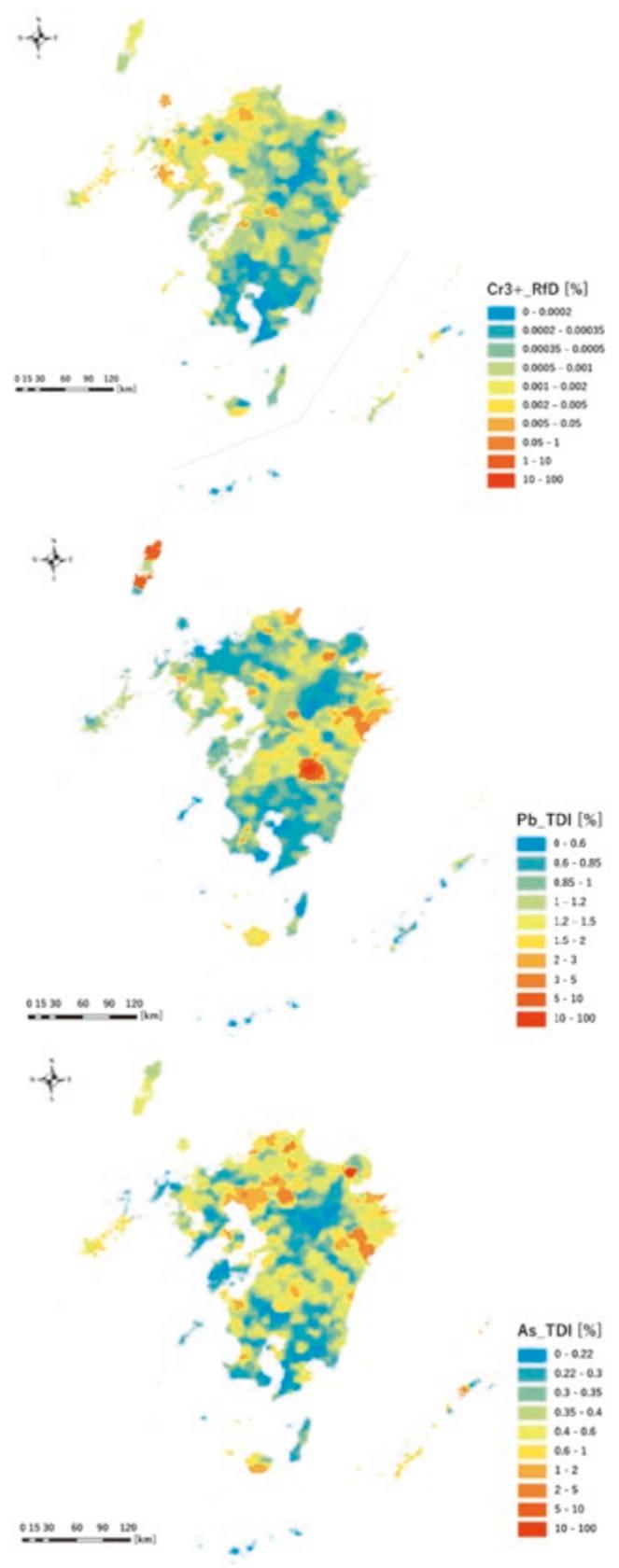


図2 九州・沖縄地方におけるヒ素、鉛、クロムのヒトの健康に対するリスク評価図（原ら、2023より引用）

5. 2022年度の主な研究成果

Hajime Sugita, Terumi Oguma, Junko Hara, Ming Zhang, Yoshishige Kawabe (2023) Removal of Arsenate from Contaminated Water via Combined Addition of Magnesium-Based and

Calcium-Based Adsorbents Sustainability, Vol.15, No. 5, 4689.

<https://doi.org/10.3390/su15054689>

Junko Hara and Yoshishige Kawabe (2023) Geochemical characteristics and risk assessment of minor elements in subsurface soils of abandoned mine-rich Shikoku region, Japan. *Journal of Soils and Sediments*. 23, 718-730. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03369-8>

Kyouhei Tsuchida, Kengo Nakamura, Noriaki Watanabe, Takeshi Komai(2022), Influence of non-uniform flow on toxic elements transport in soil column percolation test, *Heliyon*, Volume 8, Issue 11, e11541.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11541>

Isiri Upeksha Nagasinghe, Takeshi Saito, Takato Takemura, Ken Kawamoto, Toshiko Komatsu, Naoki Watanabe and Yoshishige Kawabe (2022), Applicability of alkaline waste and by-products as low cost alternative neutralizers for acidic

soils. *ISIJ International*.

<https://doi.org/10.2355/>

Hajime Sugita, Terumi Oguma, Junko Hara, Ming Zhang and Yoshishige Kawabe (2022) Effects of Silicic Acid on Leaching Behavior of Arsenic from Spent Magnesium-Based Adsorbents Containing Arsenite, *Sustainability*, 14, 4236.

<https://doi.org/10.3390/su14074236>

Hajime SUGITA, Takeshi KOMAI (2022) Development of simplified soil pollution evaluation method using luminous bacteria for petroleum hydrocarbons 5, *Journal of Groundwater Hydrology* 65(1) 53-66.

<https://doi.org/10.5917/jagh.63.119>

Junko Hara and Yoshishige Kawabe (2023) Geochemical and risk assessment map of subsurface soils of the Kyushu and Okinawa Region. *Geological Survey of Japan, AIST.*, 129p. 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：坂本 靖英
Leader, Geo-Mechanics Research Group:
Yasuhide Sakamoto
Phone 029-861-3101, 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トニクススケール）・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) 超臨界地熱開発・CO₂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、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）
雷 興林 （上級主任研究員）
及川 寧己 （主任研究員）

竹原 孝 （主任研究員）
宮崎 晋行 （主任研究員）
北村 真奈美 （研究員）
金木 俊也 （研究員）
KIM Garam （リサーチアシスタント）

2.2. 研究予算

- ・地圏メカニクスの研究（運営費交付金）
- ・水が関連する誘発地震発生メカニズムの解明（運営費交付金、部門内部競争グラント）
- ・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）
- ・掘削井と既存断層の距離が誘発地震の発生に及ぼす影響（科研費（若手））
- ・地震観測網に係る情報収集・整理を含めた技術コンサルティング（技術コンサル）
- ・安全なCCS実施のためのCO₂貯留技術の研究開発に係る再委託（委託費）
- ・地熱発電導入拡大研究開発／超臨界地熱資源技術開発／資源量評価（葛根田地域）（委託費）

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）、掘削カッピング試料試験装置（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（EGS, 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

ンに反映

- ・ CCUS・EGS・シエ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

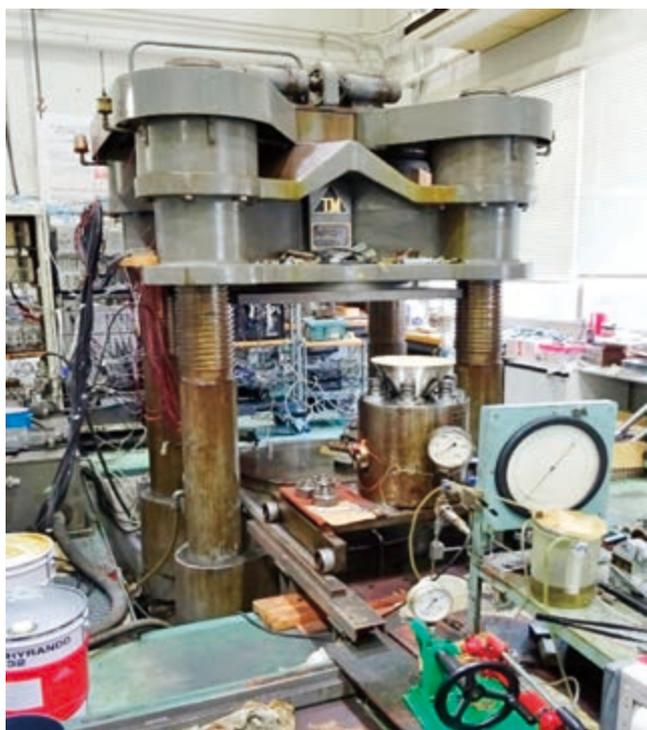


図1 大型岩石注水破壊試験装置



図2 岩石透水・透気試験装置



図3 大型室内掘削試験装置

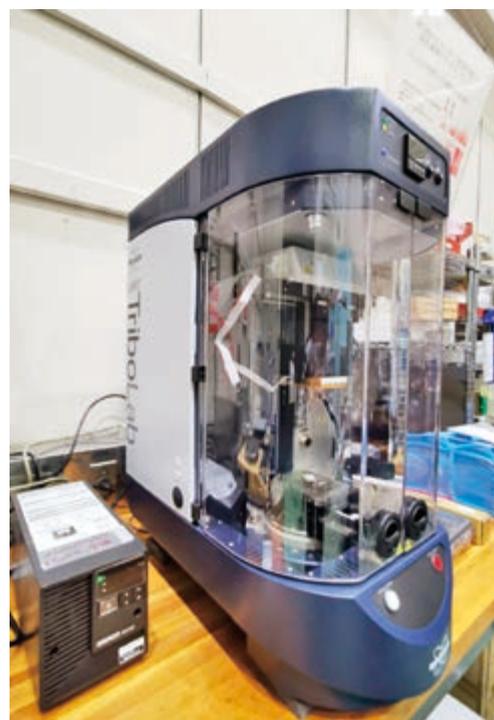


図4 掘削カッティング試料試験装置

3. 2023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、注水時の有効圧が断層すべり特性に与える影響や、注水による断層すべり時の弾性波速度構造やAE発生について調べている。その結果、注水時の有効圧が低い場合の方が、有効圧が高い場合に比べて、大きな応力降下を伴う断層すべりを示す可能性がわかってきた。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

石の強度の載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検討・理解が必要である。そこで、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を行い、強度の載荷速度依存性やクリープ特性について検討した。さらに、試験結果に基づいて時間依存性を考慮した構成方程式の適用を試みたうえで、珪藻土の力学的挙動をよりよく表現する構成方程式の構築に向けた考察を行った。得られた結果は和文誌に投稿中である。

また、二酸化炭素の地中貯留におけるキャップロックに相当する低透水性の泥岩に対するクリープ変形挙動に及ぼすCO₂の圧入による影響を明らかにするために、水飽和状態と水飽和状態に対し十分にCO₂を圧入した状態の2通りの条件で実施した。解析した結果、変形挙動はいわゆる階乗則がよく当てはまることが分かり、またCO₂の圧入によりクリープ破壊しやすくなる傾向は見られていない。今後は階乗則以外の構成則の適用についても検討を予定している。

(3) 岩石掘削条件の最適化に向けた研究開発

図3に示した大型室内掘削試験装置を用いた室内試験結果をベースに、掘削パラメータ（荷重、回転速度等）、岩石パラメータ（圧縮強度等）、ビットパラメータ（耐久性、切削性能等）からPDCビットの掘進速度を推定するモデルを構築した。地熱井の掘削現場で取得されたデータを用いた検証により、カッティングス（岩石の掘りくず）の張り付きや過大な坑内摩擦の発生といった事態が起きず、ビットの掘削性能が発揮されている限りにおいては、当該モデルが現場データにも概ね適用可能であることを示した。

(4) 沈み込み帯における有効垂直応力の水理学的モデルの高度化

鉛直横ずれ断層を対象とした既存の水理学モデルを高度化し、沈み込み帯に特徴的な機構を考慮することで、岩石強度を支配する有効垂直応力の深度分布を推定した。得られた結果は、国際誌に掲載された。本モデルをさらに拡張することで（例えば時間軸の導入）、ジオメカニクスモデリングを高精度化し、地圏で発生する誘発地震のより詳細な知見を得られると期待される。

(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

2022年6月9日、最大Mw 5.8の地震を含む群発地震が、Bayan Harという大陸プレートの内部で発生した。震源の再決定、Mw > 4の地震の震源メカニズムの逆解析、応力場の逆解析、潮汐ひずみの計算、および地震活動の統計を行った結果、この地震群は一連の未知の断層の連続的な活動によるものであることが分かった。また、連鎖的なトリガリング、アフタースリップ、および深部流体が共同して役割を果たした可能性も示された。この研究の成果として、Q1

雑誌に公表するとともに、さらなる深化研究の基礎となる検証可能なデータセットが提供されている。この他、深部流体が深く関与した今まで唯一の予知成功と評価された海城地震、四川盆地シエルガス田注水誘発地震に関する研究も中国語の共同研究者と数編の論文を国際誌に公表した。

4. 成果公表

- 1) Chuang, L. Y., Z. Peng, X. Lei, B. Wang, J. Liu, Q. Zhai, and H. Tu, Foreshocks of the 2010 Mw6.7 Yushu, China earthquake occurred near an extensional step-over, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128-1, 2023/01. <https://doi.org/10.1029/2022JB025176>
- 2) Li, X., X. Lei, H. Shen, and Q. Li, Fracturing Around Dry/Wet Boundary in Tight Sandstones Monitored by Micro-seismicity in Laboratory, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56, 3693-3708, 2023/02. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03241-2>
- 3) Thatthep Pongritsakda, 坂本靖英, Jiajie Wang, 川辺能成, Sanya Sirivithayapakorn, 駒井武, 渡邊則昭, Prediction of 1,4-Dioxane Migration in Groundwater and Evaluation of Remediation Measures in an Illegal Dumping Site Using a 2D-Numerical Model, *Sustainability*, 15-5, 2023/02. <https://doi.org/10.3390/su15053930>
- 4) 金木俊也, 野田博之, Steady-State Effective Normal Stress in Subduction Zones Based on Hydraulic Models and Implications for Shallow Slow Earthquakes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128-2, 2023/02. <https://doi.org/10.1029/2022JB025995>
- 5) 末吉和公, 北村真奈美, 雷興林, 片山郁夫, Identification of fracturing behavior in thermally cracked granite using the frequency spectral characteristics of acoustic emission, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 118 2023/04. <https://doi.org/10.2465/jmps.221014>
- 6) Lai, G., C. Jiang, W. Wang, X. Lei, L. Zhang, G. Cai, H. Gong, X. Guo, and M. Chen, Spatial-temporal distribution and focal mechanisms for the shallow earthquakes in the ongchang-Luxian region in southern Sichuan Basin, China, *Seismological Research Letters*, 94-4, 160-1876, 2023/04. <https://doi.org/10.1785/0220220339>
- 7) Li, X., X. Lei, and Q. Li, Laboratory hydraulic fracturing in layered tight sandstones using acoustic emission monitoring, *Geoenergy Science and Engineering*, 223, 2023/04. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211510>
- 8) Liu, M., L. Li, M. Zhang, X. Lei, M. R. Nedimović, A. P. Plourde, R. Guo, W. Wang, and H. Li, Complexity of initiation and evolution of the

2013 Yunlong earthquake swarm, *Earth and Planetary Science Letters*, 612, 118168, 2023/04.

<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118168>

- 9) Zhao, Y., G. Jiang, X. Lei, C. Xu, B. Zhao, and X. Qiao, The 2021 Ms 6.0 Luxian (China) earthquake: blind reverse-fault rupture in deep sedimentary formations likely induced by pressure perturbation from hydraulic fracturing, *Geophysical Research Letters*, 50, 2023/04. <https://doi.org/10.1029/2023GL103209>
- 10) 川辺能成, 原 淳子, 宮崎晋行, 駒井 武, 東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の堆積域の推定と重金属類の分布特性評価, *地学雑誌*, 132-4, 327-340, 2023/04. <https://doi.org/10.5026/jgeography.132.327>
- 11) Su, J., X. Lei, J. Li, and C. Huang, Detailed View of the Seismogenic Structures and Processes of the 2022 Bayan Har Intraplate Earthquake Swarm on the East Margin of the Qinghai-Tibet Plateau, *Seismological Research Letters*, 94-5, 2167-2180, 2023/06. <https://doi.org/10.1785/0220220336>.
- 12) 近藤萌波, 坂本靖英, 川辺能成, 駒井 武, 渡邊則昭, Numerical Analysis on the Effect of Soil Properties on the Generation of Volatilization Flux from Unsaturated Soil Contaminated by Volatile Chemical Substances. *ENVIRONMENTAL MODELING & ASSESSMENT*, 2023/07. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09914-0>
- 13) 宮崎晋行, 竹原 孝, 都築雅年, Application of Laboratory-Based Rate of Penetration Model for Polycrystalline Diamond Compact Bit to Geothermal Well Drilling, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 9, 103, 2023/08. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00644-x>
- 14) 奥田花也, 北村真奈美, 高橋美紀, 山口飛鳥, Frictional properties of the décollement in the shallow Nankai Trough: constraints from friction experiments simulating in-situ conditions and implications for the seismogenic zone, *Earth and Planetary Science Letters*, 621, 2023/09. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118357>
- 15) Lei, X., Z. Wang, S. Ma, and C. He, Step-over of strike-slip faults and overpressure fluid favor occurrence of foreshocks: Insights from Haicheng fore-main-aftershock sequence, China, *Earthquake Research Advances* (In press).
- 16) 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* (投稿中).

ポスター概要

表層崩壊跡地に残存する災害リスクの可視化 – 2018年北海道胆振東部地震における事例 –

地下水研究グループ 吉原 直志, 物理探査研究グループ 梅澤 良介
[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、表層崩壊の跡地に残存する災害リスクの評価を試みた。簡易貫入試験・比抵抗探査による人力かつ非破壊の地下構造調査の結果から、表層崩壊跡地における再崩壊のリスクや、土砂ダム空間分布などに関する情報を得ることができた。

研究内容

表層崩壊は、豪雨や地震をトリガーとして斜面表層の土壌が不安定化・流動する現象であり、様々な災害の誘因となる。表層崩壊の発生により、再崩壊や河道閉塞、土砂ダムの形成・決壊などのリスクが生じうる。しかし、崩壊跡地の災害リスクに関する研究例は限られており、リスク評価のための方法論も確立されていない。本研究では、2018年北海道胆振東部地震で発生した表層崩壊の跡地で簡易貫入試験と比抵抗探査を実施することで、崩壊跡地に残存する災害リスクの可視化を試みた。地盤硬度および比抵抗の空間分布に基づき、火砕降下物由来の脆弱土層と、その下位の堆積岩（風化岩盤）の分布が推定された。調査地点では、斜面に残存する土壌の層厚は0.3~3.2m、谷底の崩壊堆積物の層厚は2.0m以上であった。斜面安定解析から、豪雨型崩壊は発生しにくいものの、崩壊発生時よりも低加速度の地震動で再崩壊が生じる可能性が示唆された。

研究成果はどう使われるか

表層崩壊が短期間で再発する可能性はゼロではない。簡易貫入試験と比抵抗探査を併用すれば、崩壊跡地に残存する災害リスクを可視化できる。迅速かつ簡便に残存リスクを評価するために、本研究のアプローチは有用と考えられる。

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

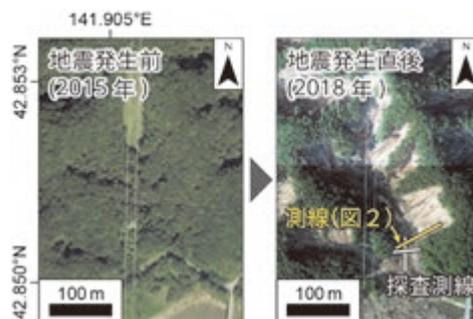


図1 崩壊前後の調査地域の空撮画像(左：国土地理院撮影, 右：北海道水産林務部撮影)。

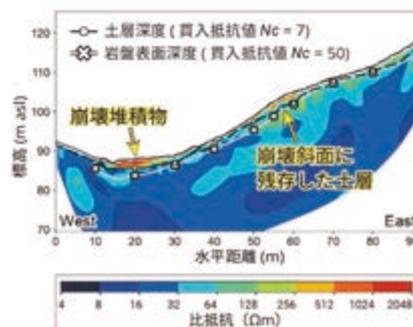


図2 崩壊跡地における地盤硬度 (Nc) と比抵抗分布. Yoshihara and Umezawa (2023) をもとに作成。

核磁気共鳴検層による体積含水率の原位置計測

地下水研究グループ 中島 善人, 井川 怜欧, 町田 功, サンコーコンサルタント(株) 越谷 賢
[連絡先] nakashima.yoshito@aist.go.jp

成果概要

地層の体積含水率の深度分布は、帯水層の検出に貢献できる重要な情報であり、高レベル放射性廃棄物の地層処分など、地下水の広域流動を評価する分野でも観測が望まれている。今回、駿河湾沿岸部の調査孔において核磁気共鳴 (NMR) を計測原理にした物理検層を実施し、体積含水率の原位置計測可能性を確認できた。

研究内容

NMR 検層では、センサー部分に永久磁石と高周波コイルを採用し、孔壁から数 cm 奥の地層に設定した感度領域にある間隙水の分子中の軽水素原子核の緩和過程を非破壊・非接触計測する。緩和の信号強度は感度領域中の水の量 (体積含水率) の情報を持っているので、ワイヤーでセンサーを秒速数 cm で調査孔に沿って引き上げることで、体積含水率の深度分布が計測可能になる。

NMR 検層の実施場所は、駿河湾富士川河口付近で掘削した調査孔である。検層結果の一部を図に示す。3個のコア分析値との良好な一致は NMR 検層の信頼性を示唆している。今後は、コア分析の追加ならびに並行して実施した中性子検層やガンマ線密度検層による体積含水率との比較を実施予定である。

研究成果はどう使われるか

- ・地下水資源の量を地層の体積含水率という明示的な物理量で計測
- ・NMR 緩和データを加工すれば地層の透水系数も推定できる可能性

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4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認技術開発)」の成果の一部を利用した。

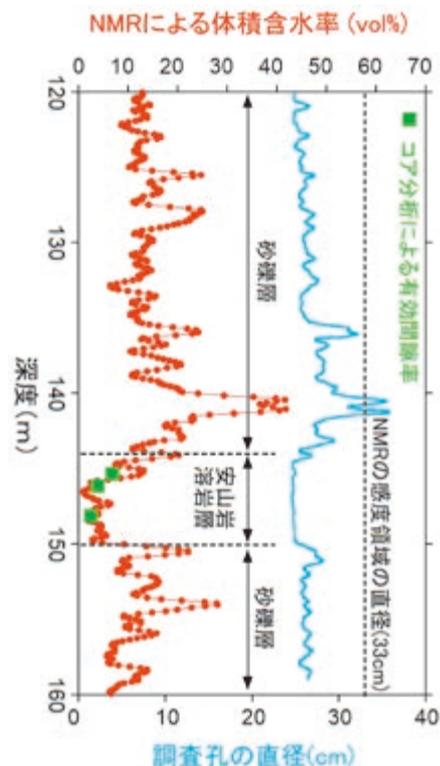


図 検層結果の一部 (120~160m 区間)。

熱・二酸化炭素・除湿を1台で行える施設園芸用システムの構築

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

成果概要

施設園芸栽培においては、熱および二酸化炭素の供給と除湿の3つの要素が、必要とされている。これまで熱の供給と除湿、二酸化炭素の回収と供給については、それぞれの装置が開発されていたが、今回、加温機の排ガスと排熱を適宜利用することにより、熱および二酸化炭素の供給と除湿を一つのシステムで行うことを可能とした。

研究内容

施設園芸栽培において、光合成を促進させるための二酸化炭素の供給、昨今の燃料費高騰による燃料費の削減、夜間に結露が生じることによる灰色カビ病など病気の抑制、この上記の3つの要素が必要とされている。これまでに二酸化炭素回収供給装置（図1）、除湿および加温装置（図2）は開発されているが、これらを一つにまとめたシステムはない。そこで本研究では、二酸化炭素回収供給において必要な除湿工程での吸着材の乾燥と、除湿および加温装置に用いられる吸着材の乾燥の二つの乾燥工程において、一つの加温機の排熱を適宜利用することで乾燥を可能としたシステムを設計した。上記システムに、加温機の排ガスから二酸化炭素を回収・供給工程も組み込むことで、二酸化炭素の供給、熱の供給、除湿を一つのシステムで行うことが可能となった。

研究成果はどう使われるか

施設園芸栽培において必要とされている、熱の供給、二酸化炭素の回収と施用、除湿の3項目に関し、加温機の排ガスと排熱を適宜利用することにより、一つのシステムにて行えることから、農業を支援するシステムとなる。



図1 二酸化炭素回収供給装置



図2 ハウス栽培用除湿装置

ビニールハウスにおけるハスクレイを用いた熱供給型除湿装置

地圏微生物研究グループ 万福 和子, 鈴木 正哉
[連絡先] kazuko-manpuku@aist.go.jp

成果概要

ビニールハウスにおける栽培においては、燃料費の削減と灰色カビ病などの病気防止が求められている。上記課題に対し、ハスクレイを用い、除湿をしながら、水蒸気を吸着した際の発熱を利用する、熱供給除湿装置による試験を行った。その結果、燃料費を40%削減するとともに、昼夜を問わず、相対湿度が80%RH以下を維持できることが明らかとなった。

研究内容

ビニールハウスにおける栽培において、昨今の燃料費高騰による燃料費の削減が求められるとともに、夜間結露が生じることによる病気の発生を抑えることが求められている。本研究では、300m²のハウスに80kgのハスクレイを用いた熱供給除湿装置を設置した（図1）。夜間ハウス内の高湿度な空気を、熱供給除湿装置に送り込むことにより除湿を行うとともに、水蒸気を吸着した際の熱をハウス内に供給することにより、除湿と加温を同時に行った。その結果、加温機の稼働時間が4割削減されるとともに、ハウス内の装置湿度が80%RH以下であることが示された（図2）。今回は、乾燥機において乾燥させたハスクレイを用いているが、今後としては、加温機の排熱を用いてハスクレイを乾燥させるシステムにてシステムを構築し、試験を行うことが必要である。

研究成果はどう使われるか

ビニールハウスにおける栽培において、熱供給型除湿装置を用いることによって、燃料費削減の効果と、結露防止の効果の両方が確認されたことから、コスト削減と病気防止が可能となった。



図1 熱供給型除湿装置

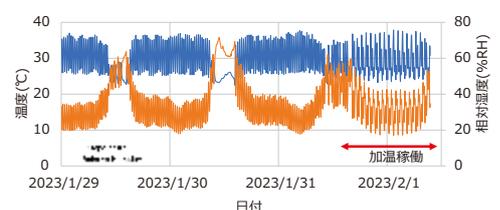


図2 加温および除湿試験結果（ハウス内温度）

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

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。

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。

上越海盆の冷湧水域における長期モニタリング機器の設置

燃料資源地質研究グループ 後藤 秀作, 香川大学 青木 伸輔, 地質情報研究部門 齋藤 直輝、長尾 正之
[連絡先] s.gotou@aist.go.jp

成果概要

新潟県上越市沖の上越海盆は表層型メタンハイドレート (MH) 調査が精力的に行われている海域の 1 つである。上越海盆の上越海丘及び海鷹海脚 (仮称) の表層型 MH 賦存域内の冷湧水域の海底環境及び冷湧水活動を調べるため、複数の長期モニタリング装置を設置した。

研究内容

上越海丘及び海鷹海脚の頂部には表層型 MH の存在に関連した地形と考えられるマウンド (地形的高まり) やポックマーク (地形的へこみ) が存在する。これらの地形で得られた反射法地震探査記録には海底下に上向きの流体移動の存在を示唆する音響ブランキングが観察され、掘削により MH の存在が確認されている。マウンド海底面では流体湧出 (冷湧水) の場所を示すバクテリアマットが多数確認されている。2022年 6 月～7 月、上越海丘及び海鷹海脚の表層型 MH 賦存域内の冷湧水域の海底環境及び冷湧水活動を調べるため、超音波ドップラー多層流向流速計 (ADCP)、CTD ロガー、濁度ロガー、溶存酸素ロガー、オスモサンプラー、シーページメーター、地中温度計、水温計等の長期モニタリング装置を設置した。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 賦存域内の冷湧水域の海底環境及び冷湧水活動の時間変化を調べるために使用されるとともに、海底環境ベースラインデータや表層型 MH 生産技術開発のための基礎データとなる。



図 1 海底に設置した観測装置システム。複数の観測装置から構成される

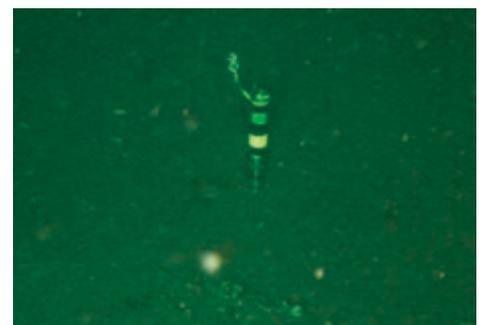


図 2 海底に設置した地中温度計

日本海上越沖で採取された堆積物の土質特性

燃料資源地質研究グループ 佐藤 幹夫, 香川大学 (前燃料資源地質研究グループ) 青木 伸輔,
エネルギープロセス研究部門 鈴木 清史, CK22-03C 乗船研究者一同
[連絡先] mikio-satoh@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、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の上越沖 (上越海丘と海鷹海脚) にて実施した。採取した堆積物の物理性試験は調査地点による差異がほとんど認められなかったが、力学試験では海域による堆積物深度方向への変化を示した。

研究内容

将来のエネルギー資源としての可能性から関心を集めているメタンハイドレートは日本周辺海域の分布が指摘されている。しかし、採掘・回収手法が確立されておらず、メタンハイドレート胚胎層の地盤工学的な検討が必要である。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で海底堆積物の地盤強度調査を実施した。海鷹海脚と上越海丘に設定した 2 地点 (胚胎地点と参照地点) から計 4 地点で堆積物試料を採取した。堆積物試料の物理試験結果は調査地点による差異はほとんど認められなかったが、力学試験結果では海鷹海脚と上越海丘で異なる深度方向への変化が認められた。調査地点による堆積速度の違いが要因の 1 つと考えられる。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、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なる。

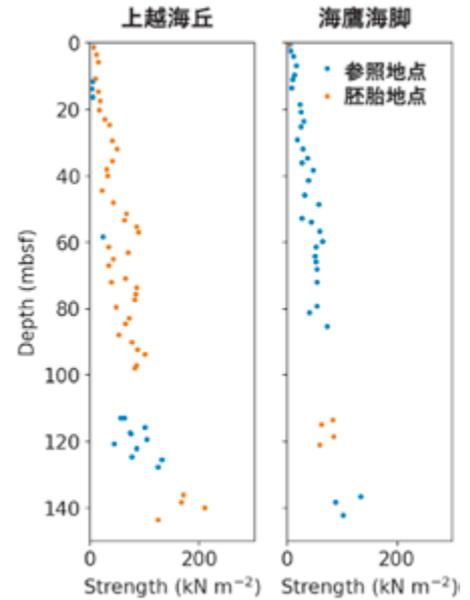


図 1 簡易力学試験結果の深度プロファイル (左: 上越海丘, 右: 海鷹海脚)。

マンガン酸化菌を用いたパッシブトリートメントの処理のモデル化

地圏環境評価研究グループ TUM Sereyiroith, 保高 徹生
[連絡先] s.tum@aist.go.jp

成果概要

現在、産総研では、秋田県立大学と連携して、Mn と Zn を含む坑廃水をもつ X 鉱山において Mn 酸化菌を用いたパッシブトリートメントの研究に取り組んでいる。本研究では、石灰石が Mn 酸化細菌の増殖を促進し、Mn の酸化を触媒してバイオバーナサイトを迅速に形成すること、また Zn の除去は、主に MnO₂ との共沈、吸着、バイオバーナサイト表面でのイオン交換によって行われることを明らかにした。

研究内容

パイロットスケールのパッシブトリートメントのプロセスモデルを開発し、鉱山水からの Mn と Zn の除去に対する速度論的効果を評価した。また、スラッジの鉱物組成等を測定し、WATEQ4F データベースとともに PHREEQC を使用し、パラメータ推定 (PEST) コンピュータコードと統合して酸化速度定数を最適化した。パイロット処理で得られた Mn と Zn 濃度は、逆モデリングとモデルの検証に使用した。Mn 酸化速度定数は、鉱物表面積とバクテリア濃度の両方に影響されるが、バクテリアの方が酸化速度に大きな影響を与えることが観察された。Mn 酸化の速度論モデルから、周中性の pH 条件下では、ビルネサイトの生成速度は主に生物学的要因に支配されることが示唆された。

研究成果はどう使われるか

本研究の成果は、パッシブトリートメントの実用化に向けて必要となる反応速度に対する除去性能や除去メカニズムに関する基礎的な知見を提供する。

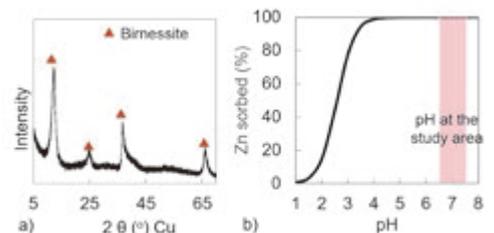


図 a). XRD pattern of sludge from the pilot treatment plant, b). Zn adsorption capacity (%) using surface complexation model.

社会調査による地熱の市民ニーズと新しい価値の探索

地圏環境評価研究グループ 最首 花恵, 高田 モモ, 保高 徹生, 部門付き 相馬 宣和
[連絡先] saishu.h@aist.go.jp

成果概要

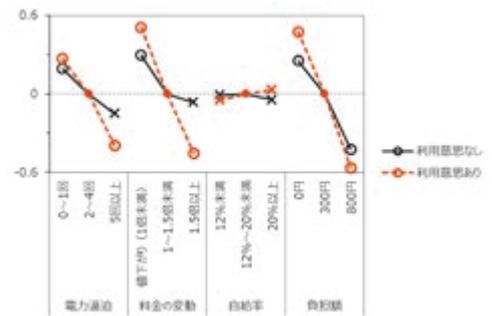
Web アンケート調査により、一般市民の発電方式の認知度や利用意思、電力供給条件の許容度の傾向を整理した。また、電力供給条件のうち、電力逼迫の回数、電力料金の変動、負担額、に優位な選好があり、エネルギー自給率には選好度がないことを明らかにした(図)。さらに、電力供給条件の結果から、地熱の潜在ニーズを導出する手法を提案した。

研究内容

地熱は、発電、温泉、融雪等の多段階利用が可能なエネルギー資源である。特に地熱発電は、継続的に電力を供給できるベースロード電源に分類される。地熱エネルギーの利用促進には社会的受容が必要である。しかし、再生可能エネルギーの中で地熱エネルギーの認知度は相対的に低めであることがわかっており、一般市民の理解促進や社会的受容の獲得には様々な課題がある。本研究では、地熱を含む発電方式と日常生活における電力供給条件に関して、一般市民を対象とした web アンケート調査により、地熱エネルギーの潜在ニーズの導出と新しい価値の創出の可能性について考察を試みた。

研究成果はどう使われるか

地熱プロジェクト初期からの社会的な潜在ニーズと価値の認識、市民と地熱関係者の双方向コミュニケーションの場の設計、に役立つと考える。将来的には地熱分野の技術発展、人材育成、市場活性化への貢献を目指す。



電力供給条件に係るコンジョイント分析結果：地熱発電に対して、利用意思なし（黒）、利用意思あり（赤）

休廃止鉱山のズリ堆積場に含まれる亜鉛の化学形態および溶出機構の推定

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

坑廃水の低コスト、低環境負荷な対策には、坑廃水の生成メカニズムの理解が不可欠である。亜鉛や鉛を含む浸出水が生成する、休廃止鉱山のズリ堆積場においてボーリング調査を実施し、溶出試験による重金属類の溶出挙動の把握およびエックス線吸収微細構造の測定（XAFS 測定）による亜鉛の化学形態の推定を行った。

研究内容

本研究では、ズリ堆積場において採取されたボーリングコア試料を用いて、バッチ溶出試験、カラム溶出試験、XAFS 測定をおこなった。溶出試験の結果、堆積場の下部部の試料において重金属類の高濃度の溶出が確認された。また、地下水面以下からの亜鉛の溶出が少なく、カラム試験初期において多くの亜鉛が溶出していたことから、堆積場においてズリと雨水または地下水が接触した瞬間に多くの亜鉛が溶出しうることが推測された。さらに、XAFS 測定の結果、亜鉛の溶出量が多い試料において、硫酸塩態の亜鉛が多く同定されたことから、堆積場における亜鉛のホスト鉱物は硫酸塩態の亜鉛であると明らかになった。

研究成果はどう使われるか

ズリと水が接触した瞬間に重金属類が放出されうるため、高負荷な下流側において遮水シート等を用いてズリと水の接触を防ぐことで坑廃水への重金属類の負荷が低減可能であると期待される。



図1 ズリ堆積場の様子



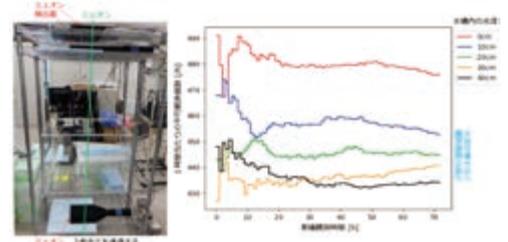
図2 採取されたコア試料

宇宙線ミュオンと弾性波の融合利用による弾性定数推定の室内実験

物理探査研究グループ 児玉 匡史, 横田 俊之, 東大・院・新領域 松島 潤
[連絡先] kodama-ms996@aist.go.jp

成果概要

素粒子ミュオンを用いて推定される密度と弾性波探査によって推定される弾性波速度との統合解析によって弾性定数が推定され、岩石の変形特性の評価に繋がる可能性がある。その検証実験を実施するために実験室内に素粒子ミュオンと超音波の観測環境の構築を進めている。構築したミュオン観測システムを用いて水槽の連続観測を実施し、ミュオン透過個数から平均密度を推定する実験式が得られた。



左：ミュオン検出の様子
右：水槽を透過するミュオンの1時間当たりの観測個数

研究内容

宇宙線に含まれる素粒子ミュオンは毎秒手のひらに一つほどの割合で地上に常時飛来しており、透過する物体内部の密度が高いほど透過個数が減少する。この性質は火山や遺跡等の探査に活用されている。近年では小型化が進むミュオン検出器を坑井内に挿入した地下密度推定が実用化されつつある。弾性波探査から推定される弾性波速度との統合解析により弾性定数が推定され、岩石の変形特性の評価に繋がる可能性がある。制御された室内環境での検証実験を実施するために、実験室内に超音波およびミュオン観測環境を構築している。今回構築したミュオン検出システムの動作検証およびミュオン透過個数を密度へと変換する実験式推定を目的として、10cmごとに水深を変化させた水槽を対象にミュオンの連続観測を実施した。

研究成果はどう使われるか

宇宙線ミュオンと弾性波の融合利用によって推定される密度、弾性定数といったパラメータは岩石の変形特性に関連しており、例えば高压流体圧入に伴う地下の応力場変化に対して、岩石の変形・破壊の予測モデル構築などに資することが期待される。

最上トラフ酒田海丘（仮称）における表層型メタンハイドレートの形成、成長、欠損史考察

物理探査研究グループ 浅田 美穂, 横田 俊之, 燃料資源研究グループ 佐藤 幹夫, 棚橋 学, 後藤 秀作
[連絡先] asada.miho@aist.go.jp

成果概要

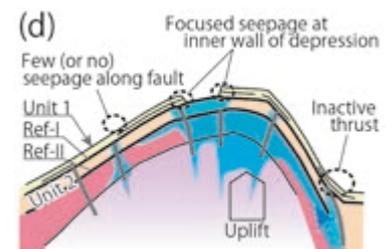
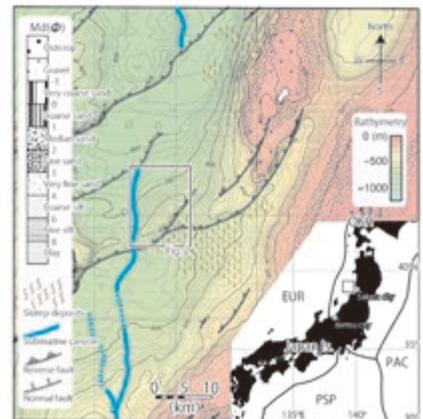
表層型メタンハイドレート（MH）が賦存している酒田海丘では、断層または地層面に沿うガスの存在が認められる。頂部凹地縁辺で地層面が切れることから、凹地が海丘形成後にできたと考えられる (Asada et al., 2022; MarGeophysRes, open access)。現在の海底下には、数 m 以下の大きさの表層型 MH が、空間的に緩やかな分布密度をもち賦存している可能性がある。

研究内容

産業技術総合研究所では、MHの生産技術開発と、重点調査3海域（酒田沖、上越沖、丹後半島北方）における賦存状況調査、海底状況調査、および海域環境調査を含む総合調査を進めている。表層型MHは、その安定条件下では、ガス供給量が細粒堆積物中の間隙に比して多く、十分な水がある場合に形成される。安定条件よりも高温または低圧力では水とガスに分解され、流出または海中に放出されるなどして欠損すると考えられる。本研究では地下を可視化する唯一のツールである物理探査の複数の手法を用いて、重点三海域の様々な物性値を明らかにすることにより、それぞれの条件下での表層型MHの形成、成長、欠損史の理解に関する活動を進めている。本研究は経済産業省による「メタンハイドレートの研究開発事業」の一部として実施した。

研究成果はどう使われるか

日本国内で生産が期待される天然ガス資源のひとつである表層型MHの、現在の賦存状況を明らかにし、将来予定されている海洋産出試験実施場所特定や採掘技術開発、環境影響評価の実施に資する情報を提出する。



(上) 酒田海丘（仮称）周辺の海底地質図、
(下) 現在の酒田海丘の様子の模式図
(Asada et al., 2022)

CO₂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

CO₂地中貯留研究グループ 堀川 卓哉, 徂徠 正夫
[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CO₂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CO₂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CO₂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CO₂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、CO₂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、CO₂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で100mV以上の電位差が検出されたが、これは坑底におけるCO₂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、CO₂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。

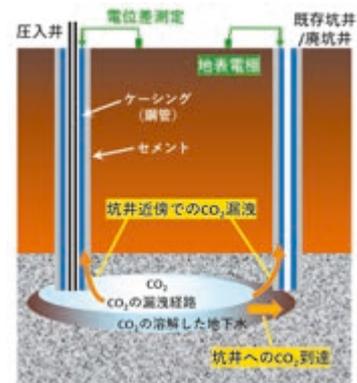


図1 漏洩検知技術の概要図



図2 電位観測システムの設置イメージ

地熱条件下におけるCO₂-水-岩石反応が浸透率に及ぼす影響

CO₂地中貯留研究グループ 西山 直毅, 徂徠 正夫
[連絡先] n-nishiyama@aist.go.jp

成果概要

CO₂-Enhanced Geothermal System (CO₂-EGS)において、高温岩体へのCO₂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下で玄武岩コアに対するCO₂溶解水流通試験を実施した(図1,2)。高温CO₂溶解水を10日間流通した結果、コア上流では溶解によって間隙が増加する一方、コア全体で二次鉱物の沈殿が起こっていた。浸透率には継続的な減少が認められた。

研究内容

著者らは、高温岩体に対してCO₂を圧入して採熱・発電を行うCO₂-EGSプロジェクトの一環として、CO₂圧入に伴う地化学反応(鉱物溶解と沈殿)に伴う水理特性変化の検証を進めている。本研究では、岩石コアに対して温度200℃、間隙圧10 MPa下でCO₂溶解水を10日間流通させ、浸透率の経時変化を評価した。

試料には、本CO₂-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の長尺コア(直径3cm、長さ20cm)を用いた。玄武岩コアに高温CO₂溶解水を流通させた結果、上流ではガラスや斜長石の溶解によって間隙が増加する一方、コア全体で二次鉱物の沈殿が認められた。浸透率は継続的に減少し、最大で約1桁低下した。今後は、流速と岩相が浸透率変化に及ぼす影響を評価する予定である。

研究成果はどう使われるか

得られた成果は、地熱貯留層におけるCO₂圧入に伴う地化学反応がCO₂循環の継続性や採熱効率にどのような影響を及ぼす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。

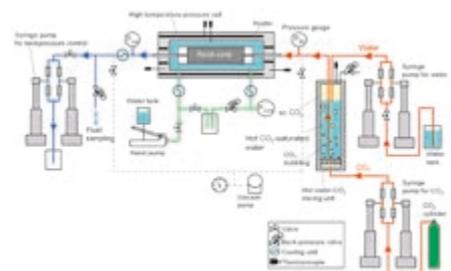


図1 高温超臨界CO₂流通試験装置の概略図

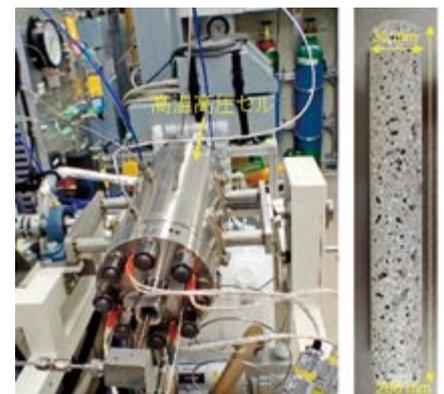


図2 高温超臨界CO₂流通試験装置の外観と試料コア

成果概要

一面せん断・透水実験を通じて、流体の違いが、断層面の摩擦や水理特性の変化に及ぼす影響を調べたところ、地中貯留で想定される超臨界 CO₂と水の共存雰囲気下では、水のみでは観測されない、岩石の体積変形を引き起こすことがわかり、その結果、せん断面のすべりに伴う摩擦特性、および岩石マトリックスの透水特性が変化することが明らかとなった。

研究内容

即効かつ大規模な CO₂削減を可能にする CO₂回収・貯留 (CCS) 技術は、地中貯留層への CO₂圧入に伴い岩盤が変形する可能性が予想されている。そのため、貯留層内に安定に CO₂を封じ込めるかが、本技術の展開において重要な鍵を握っているのが現状である。CO₂貯留に対して、遮蔽能力を決めるのがキャップロックであるが、そこには無数のき裂や微小断層が存在することが知られている。これらの要素は、圧入に伴い、き裂の進展やせん断帯の形成に寄与し、やがては貯留層からの漏出の要因となりうる。現在、産総研が参画する日豪プロジェクトでは、CO₂圧入と断層の動きの関係を解明するため、断層への直接的な CO₂圧入現場試験が豪州パースで実施されている。本発表では、日豪プロジェクトに関連し、流体の違いが、断層面の摩擦・水理特性に及ぼす影響を室内実験で調べた結果を報告する。

研究成果はどう使われるか

本成果は、キャップロックまたは貯留層内に断層が存在する場合、CO₂圧入に伴う断層のすべり挙動や透水特性の変化を正確に予測するための重要な知見であり、得られた摩擦構成則を用いることで既存の数値モデルの高度化に貢献。

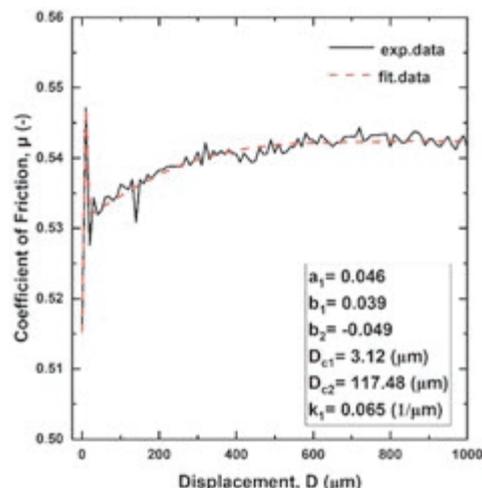


図 2 室内実験で求めた摩擦曲線とフィッティングによる摩擦構成則の導出のための各種パラメータの決定

石油系炭化水素を対象とした発光細菌を用いた土壌汚染評価手法の開発
 - アルカン混合成分の複合毒性影響について -

成果概要

ガソリン等石油系燃料等は多種類の石油系炭化水素の混合物であることから、発光細菌によるガソリン等の土壌汚染評価は、種類の異なる石油系炭化水素の複合毒性を評価することとほぼ同義である。そこで、本研究では炭素数の異なるアルカン類を任意に組み合わせた 2 成分系及び 3 成分系のアルカン混合物について発光細菌による急性毒性試験を実施し、その結果を既往の研究で取得されているアルカン単成分の急性毒性データを用いて複合毒性影響に関する検討を行った。

研究内容

油類による土壌汚染の調査・分析において TPH (全石油計炭化水素) の値が同じであっても、油類を構成する石油系炭化水素の種類や濃度及び構成成分間の濃度比が異なると生態毒性影響もまた異なる可能性がある。そこで、本研究では炭素数の異なるアルカン類を任意に組み合わせた 2 成分系及び 3 成分系のアルカン混合物について発光細菌による急性毒性試験を実施し、アルカン単成分の急性毒性データを用いて複合毒性影響に関する検討を行った。反応時間60分を基準として得られた実測の複合毒性値と個々のアルカンの単一毒性値を用いて推測した複合毒性値の比較から、二乗和平方根式を適用すると、単純な相加式よりも再現性が高いことが明らかになった。加えて、50% 効果濃度を基準とした複合毒性値の対数値と反応時間60分を基準として求めた実測の複合毒性値の間に良好な相関関係を見出した。

研究成果はどう使われるか

通常の土壌汚染調査・汚染評価では、高額な装置と熟練した分析技術及び試料の搬送・分析に時間を要するが、本研究で提案する発光細菌を用いた汚染評価手法は、現場での迅速かつ安価なスクリーニング及びモニタリング技術として大いに期待される。

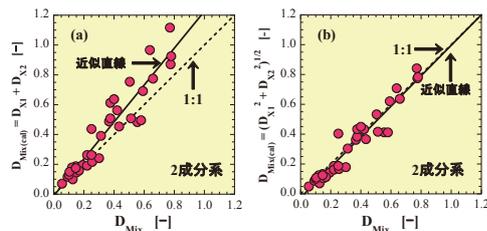


図 3 実測値 D_{Mix} と (a) 相加式及び (b) 二乗和平方根式を用いて求めた推算値 $D_{Mix(cal)}$ との適合性の比較

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

地圏環境リスク研究グループ 齋藤 健志, 土田 恭平, 井本 由香利, 原 淳子
[連絡先] take-saitou@aist.go.jp

成果概要

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、地球規模の課題に発展している。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。ヒ素は有意な吸着が生じなかったのに対し、鉛は明らかな吸着が確認された。吸着された鉛は、その大部分は脱離せず、MPs に保持される傾向が認められた。

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)、ポリプロピレン (PP)、ポリ塩化ビニル (PVC) の 3 種類である。それぞれ、市販製品を粉碎して粒度調整した MPs (300~2,000 μm) と、汎用の市販試薬から入手した MPs (粒度は同程度) を用いた。吸着試験では、MPs と人工汚染水 (超純水ベース) を重量体積比 1 : 10 (1 g : 10 mL) で混合し、20°C で 24 時間振とうした。その後、遠心分離に供し、上澄み液を 0.45 μm フィルターで濾過を行い、その溶液中の重金属類濃度を定量した。脱離試験は吸着試験に連続して、その上澄み液の 7 mL を採取すると同時に、超純水 7 mL を加えた。その後、20°C で 24 時間の振とうを行った。この一連のプロセスは、3 回ほど繰り返した。採取した上澄み液は、吸着試験と同様、0.45 μm フィルターで濾過した後、重金属類濃度を定量した。

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、ごく微量な環境汚染物質を高濃度に吸着・濃縮する可能性がある。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。

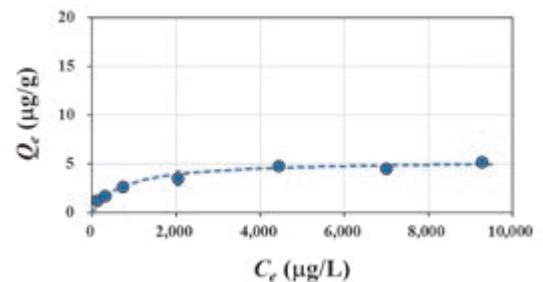


図 鉛の PE に対する吸着等温線の一例 (図の点線は、Langmuir 式を適用) (Saito et al., 2023 を改変)

Saito, T., Tsuchida, K., Imoto, Y., and Kawabe, Y. (2023): Adsorption and desorption characteristics of environmental pollutants on microplastics in water. Proceedings WRI-17 & AIG-14, 4p.

土壌中マイクロプラスチックの移動性評価

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

成果概要

マイクロプラスチック (MPs) 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。地下水を經由した MPs 摂取リスクを評価するには、土壌中での MPs の移動性および地下水への移行量を把握する必要がある。本研究は MPs の移動性に影響する要因として MPs の分散 / 凝集による粒子径の変化に着目した研究を行った。

研究内容

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考えられる。そこで本研究では、pH を調整した MPs 懸濁液および MPs が混在する土壌懸濁液をレーザー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た。その結果、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。

研究成果はどう使われるか

土壌中での MPs の移動性を明らかにすることにより、土壌中 MPs の分布や MPs の地下水への移行量を把握することができ、MPs のリスク評価につながることを期待される。

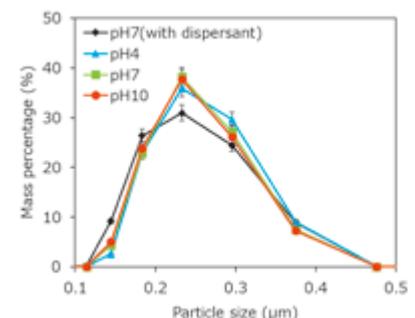


図 1 様々な pH 条件下での MPs の粒径分布

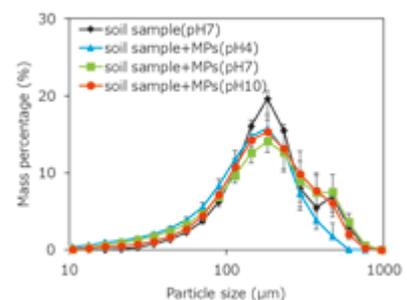


図 2 様々な pH 条件下での MPs と土壌の粒径分布

地震時の滑り挙動推定における掘削坑での温度測定の有効性

地圏メカニクス研究グループ 金木 俊也
[連絡先] kaneki.shunya@aist.go.jp

成果概要

地震時の断層帯における摩擦熱の発生・拡散モデルから、剪断強度の現実的な変化を考慮した温度の時空間分布の解析解を導出した。得られた解を用いた解析から、地震直後の断層の掘削坑における温度測定から地震時の滑り挙動を推定する試みにおいては、発生した摩擦熱の総量が直接制約されるパラメータであることがわかった。

研究内容

厚みをもつ断層帯が剪断変形し、発生する摩擦熱が断層帯に対して垂直方向のみに拡散する系を考える。ラプラス変換から解析解（厚い解）を導出した後、無次元化した断層帯の厚みをゼロに近づけると、平面断層が滑った場合の解析解（平面解）に漸近し、さらに無次元化した滑り時間をゼロに近づけると、平面熱源が瞬間的に貫入した場合の解析解（ソース解）に漸近することがわかった。既存の掘削事業における近似誤差は1%未満であり、ソース解を用いた滑り挙動の推定は妥当である一方、掘削坑での温度測定データからは断層帯の厚みと滑り時間の情報が失われており、それらに依存しない摩擦熱の総量が直接制約されるパラメータであることが理論的に示された。

研究成果はどう使われるか

将来実施される断層帯での掘削事業において、掘削坑での温度測定データが地震時に発生した摩擦熱の総量の推定に有効であることの理論的な根拠として用いられる。

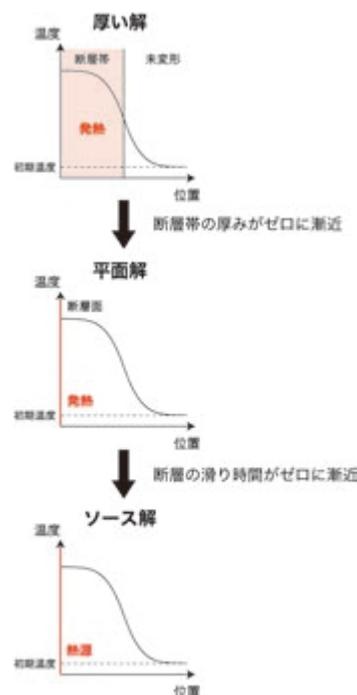


図1 摩擦熱の発生・拡散モデルの問題設定とそれぞれの解析解の近似条件

参考 URL: <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00457-0>

水が関与する誘発地震発生のメカニズム解明に向けて

地圏メカニクス研究グループ 北村 真奈美, 宮崎 晋行, 竹原 孝, 雷 興林
[連絡先] kitamura.m@aist.go.jp

成果概要

地熱資源開発、CO₂地中貯留などの地下開発では、水などの流体の圧入が必要不可欠である。近年、それらの流体圧入が既存断層の再活動や水圧破碎による誘発地震を引き起こすことがわかってきた。そのため本研究では、水が関与する誘発地震の発生メカニズム解明を目指し、実験室において地震発生のメカニズムを調べるために有用なアコースティックエミッション(AE)計測システムの改良を実施している。

研究内容

固体材料に大きな力を加えると破壊する。その際、固体内部で発生する微小破壊音がAEである。つまりAEを計測することでいつ・どこで・どのような破壊が発生しているのかがわかる。当グループ所有のAE計測システムを統合すると室内変形試験において震源決定や相対マグニチュードを決定することができる。しかし、近年装置の老朽化により、十分なデータが取得できなくなってきていた。そこで本研究では、従来よりも精度よくAE計測が実施可能となるように計測システムの改良を実施している。

研究成果はどう使われるか

AE計測に基づく物質の破壊メカニズムの解明は、地質学分野においては地震発生メカニズム解明や掘削に用いるビット性能評価、他分野においてはコンクリートやセラミクス等の岩石以外の固体物質の開発・性能評価等のために役立つことが期待できる。

地熱発電において注水に伴う有効圧の変化が断層の挙動に及ぼす影響

地圏メカニクス研究グループ Garam KIM, 北村 真奈美, 千葉大学 澤井 みち代
[連絡先] garam.kim@aist.go.jp, kitamura.m@aist.go.jp

成果概要

近年再生可能エネルギーの一つとして注目されている地熱発電において、地熱貯留層への注水が既存断層に影響を与えて注水誘発地震を引き起こすことが報告されている。より安全に地下環境を利用・開発するためには、注水誘発地震の発生メカニズムを理解することが求められる。本研究では、地下の有効圧と断層運動の関係に着目して岩石注水実験を行った。

研究内容

本研究では、30°の模擬断層面を有する稲田花崗岩を使用し、産総研設置の油圧式三軸圧縮装置を用いて注水試験を実施した。地熱貯留層への注水は、地下の圧力状態を変化させる。そこで本研究では、注水による有効圧 (= 封圧 - 間隙水圧) 変化に着目し、間隙水圧を増圧させることで試料にかかる有効圧を約31 MPaから24 MPa, 17 MPa, 10 MPa, 3MPaと段階的に下げ、各注水での断層の応力降下の特徴を調べた。その結果、有効圧が低くなるほど断層の応力降下量が小さくなることがわかってきた。

研究成果はどう使われるか

本研究成果は、地熱発電をはじめとする、注水を伴う地下環境利用・開発における誘発地震発生リスクを軽減へと貢献することが期待される。

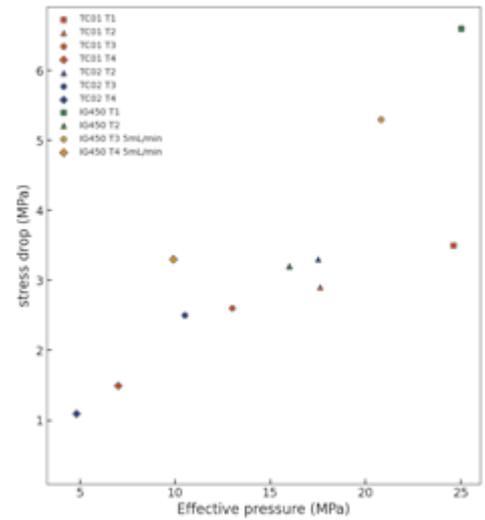


図1 有効圧と応力降下量の関係

論文リスト

Minghui Sun, Xiaoguang Wang, Yi Li, Honghui Pan, Muthu Murugananthan, Yidong Han, Jie Wu, Ming Zhang, Yanrong Zhang, Zhenhui Kang (2022) Bifunctional Pd-Ox Center at the Liquid-Solid-Gas Triphase Interface for H₂O₂ Photosynthesis, ACS Catalysis.

保高 徹生 (2022) 土壌汚染とリスクコミュニケーション, 化学物質と環境～化学物質と環境との調和をめざす情報誌～.

保高 徹生, 内藤 航, 大西 正輝, 篠原 直秀, 坂東 宜昭 (2022) 政府の技術実証による大規模イベントでの感染予防対策の調査 (第二報) B リーグの試合における調査結果, 産総研ホームページ.

Taiki Katayama, Hideyoshi Yoshioka, Masanori Kaneko, Miki Amo, Tetsuya Fujii, Hiroshi A. Takahashi, Satoshi Yoshida, Susumu Sakata (2022) Cultivation and biogeochemical analyses reveal insights into methanogenesis in deep subseafloor sediment at a biogenic gas hydrate site, The ISME Journal.

Naoyuki Yoshihara, Shinji Matsumoto, Ryosuke Umezawa, Isao Machida (2022) Catchment-scale impacts of shallow landslides on stream water chemistry, Science of The Total Environment.

実松 健造 (2022) 希土類鉱床の特徴と開発の課題, 金属.

荒岡 大輔 (2022) かん水に伴うリチウム資源, 金属.

Tatsuo Maekawa (2022) Equilibrium conditions of methane, nitrogen and argon hydrates in the presence of propan-2-one and 1,3-dioxolane, JOURNAL OF CHEMICAL AND ENGINEERING DATA.

Mayumi Yoshioka, Gaurav Shrestha, Arif Widiatmojo, Youhei Uchida (2022) Seasonal changes in thermal process based on thermal response test of borehole heat exchanger, Geothermics.

Ryosuke Umezawa, Motoharu Jinguuji, Toshiyuki Yokota (2022) Characterisation of a river embankment using a non-destructive DC electrical survey, Near Surface Geophysics.

保高 徹生, 長野 宇規, 坂原 桜子, 金井 裕美子, 高田 モモ (2022) 原子力災害の旧避難地区における放射線学習を伴った地域交流活動の意義と効果, 農村計画学会誌.

保高 徹生, 内藤 航, 大西 正輝, 坂東 宜昭, 篠原 直秀, 高田 モモ (2022) 天皇杯 JFA 第101回全日本サッカー選手権大会準決勝および決勝における感染予防

のための調査, 産総研ホームページ.

Hajime Sugita, Terumi Oguma, Junko Hara, Ming Zhang, Yoshishige Kawabe (2022) Effects of Silicic Acid on Leaching Behavior of Arsenic from Spent Magnesium-Based Adsorbents Containing Arsenite, Sustainability.

Zhixue Zhao, Yonghong Hao, Tongke Wang, Tian-Chyi Jim Yeh, Ming Zhang (2022) A generalized analytical solution of groundwater head response to dual tide in a multilayered island leaky aquifer system, HYDROLOGICAL PROCESSES.

Konomi Suda, Takahiro Aze, Yosuke Miyairi, Yusuke Yokoyama, Yohei Matsui, Hisahiro Ueda, Takuya Saito, Tomohiko Sato, Yusuke Sawaki, Ryosuke Nakai, Hideyuki Tamaki, Hiroshi Takahashi, Noritoshi Morikawa, Shuhei Onoi (2022) The origin of methane in serpentinite-hosted hyperalkaline hot spring at Hakuba Happo, Japan: Radiocarbon, methane isotopologue and noble gas isotope approaches, EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS .

Huiqing Hao, Yonghong Hao, Yan Liu, Tian-Chyi Jim Yeh, Ming Zhang, Qi Wang, Yonghui Fan (2022) Anomaly of glacier mass balance in different vertical zones and responses to climate modes: Urumqi Glacier No. 1, China, Climate Dynamics.

Yizhen Zhao, Jiannong Cao, Xiaodong Zhang, Ming Zhang (2022) Analyzing the characteristics of land use distribution in typical village transects at Chinese Loess Plateau based on topographical factors, Open Geosciences.

Akihiro Hamanaka, Takashi Sasaoka, Hideki Shimada, Shinji Matsumoto (2022) Amelioration of Acidic Soil using Fly Ash for Mine Rehabilitation in Post-Mining Land, INTERNATIONAL JOURNAL OF COAL SCIENCE & TECHNOLOGY.

猪狩 俊一郎 (2022) 空气中軽質非メタン炭化水素の濃縮測定における, 空气中酸素の妨害による回収率の低下, RESEARCHES IN ORGANIC GEOCHEMISTRY.

Kenta Asahina, Takeshi Nakajima, Koji U. Takahashi, Miyuki Kobayashi, Yasuaki Hanamura (2022) Spatio-temporal changes in the depositional environment of Miocene organic rich mudstones in the Akita Basin deduced from biomarker analysis, Geochemical Journal.

- Yuichi Maruo, Naoto Sato, Kento Nogawa, Shinsuke Aoki, Kosuke Noborio (2022) Pore-Scale Wetting Process of Capillary-Driven Flow in Unsaturated Porous Media under Micro- and Earth-Gravities, Water.
- Riho Fujioka, Ikuo Katayama, Manami Kitamura, Hanaya Okuda, Takehiro Hirose (2022) Depth profile of frictional properties in the inner Nankai accretionary prism using cuttings from IODP Site C0002, Progress in Earth and Planetary Science.
- Momo Takada, Kosuke Shirai, Michio Murakami, Susumu Ohnuma, Jun Nakatani, Kazuo Yamada, Masahiro Osako, Tetsuo Yasutaka (2022) Important factors for public acceptance of the final disposal of contaminated soil and wastes resulting from the Fukushima Daiichi nuclear power station accident, PLoS One.
- Naoyuki Yoshihara, Shinji Matsumoto, Ryosuke Umezawa, Isao Machida (2022) Catchment-scale impacts of shallow landslides on stream water chemistry, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT.
- Ryosuke Umezawa, Motoharu Jinguuji, Toshiyuki Yokota (2022) Characterization of a river embankment using a non-destructive direct current electrical survey, Near Surface Geophysics.
- Mayumi Yoshioka, Gaurav Shrestha, Arif Widiatmojo, Youhei Uchida (2022) Seasonal changes in thermal process based on thermal response test of borehole heat exchanger, GEOTHERMICS.
- Yoshito Nakashima, Tetsuya Sawatsubashi, Shuji Fujii (2022) Nondestructive quantification of moisture in powdered low-rank coal by a unilateral nuclear magnetic resonance scanner, International Journal of Coal Preparation and Utilization.
- 網澤 有輝, 古作 吉宏, 坂入 義隆, 塚田 浩二, 斉藤 瑞稀, 蛭子 陽介, 三嵩 幸平, 陳 友晴, 所 千晴 (2022) High Pressure Grinding Roll 粉碎における銅鉱石の単体分離促進効果の定量的評価, Journal of MMIJ.
- 西方 美羽, 保高 徹生, 森本 和也, 井本 由香利 (2022) 浸水前処理およびシリアルバッチ吸着試験による吸着材への水接触の影響評価, 地盤工学ジャーナル.
- 浅田 美穂, 木戸ゆかり (2022) 海中観測成果が含む実効的な音響測位誤差についての検討, 情報地質.
- Honghui Pan, Minghui Sun, Xiaoguang Wang, Ming Zhang, Muthu Murugananthan, Yanrong Zhang (2022) A novel electric-assisted photocatalytic technique using self-doped TiO₂ nanotube films, Applied Catalysis B: Environmental.
- Yoshihiro Nakamura, Koji Takahashi, Jun Hosoi, Hidetoshi Hara (2022) Determination of the laser-induced damage threshold for graphite and coal with deep-UV micro-Raman spectroscopy, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences.
- Katsuaki Koike, Oak Yono, Vitor Ribeiro de Sá, Shohei Albert Tomita, Tatsuo Nozaki, Yutaro Takaya, Shogo Komori (2022) Effectiveness of Neural Kriging for Three-Dimensional Modeling of Sparse and Strongly Biased Distribution of Geological Data with Application to Seafloor Hydrothermal Mineralization, Mathematical Geosciences.
- 吉川 美穂, 片山 泰樹, 川辺 能成, 張 銘 (2022) クロロエチレン類の嫌氣的脱塩素化における二価鉄添加条件の最適化, 第27回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 講演集.
- 越田 湊子, 仲井 亮平, 佐藤 颯哉, 喜多村 陽, 高倉 伸一 (2022) 鹿児島県岩戸鉱山西方岩戸山地区における含金珪酸鉱の探鉱活動, 資源地質.
- Glen Tritch Snyder, Andrey Yatsuk, Naoto Takahata, Renat Shakirov, Hitoshi Tomaru, Kentaro Tanaka, Anatoly Obzhurov, Aleksandr Salomatin, Shinsuke Aoki, Elena Khazanova, Evgeniya Maryina, Yuji Sano, Ryo Matsumoto (2022) Ocean dynamics and methane plume activity in Tatar Strait, Far Eastern Federal District, Russia as revealed by seawater chemistry, hydroacoustics, and noble gas isotopes, Frontiers in Earth Science.
- 近藤 萌波, 坂本 靖英, 川辺 能成, 中村 謙吾, 渡邊 則昭, 駒井 武 (2022) 不飽和土壌からの揮発性化合物の揮発フラックスの定量的予測モデルの開発 —土壌カラム試験のヒストリーマッチングによる関連パラメータの検証—, 土木学会論文集 G (環境).
- 都築 雅年, 宮本 哲臣, 山田 直登, 田中 洋, 矢野 雅大, エコ アフマディ, 宮下 庸介, 宮崎 晋行, 大野 哲二, 今泉 博之 (2022) 地熱井における新規開発PDCビットの掘削性能評価, 日本地熱学会誌.
- Yoko Ohtomo, Jeehyun Yang, Miu Nishikata, Daisuke Kawamoto, Yuki Kimura, Tsubasa Otake, Tsutomu Sato (2022) Low-temperature hydrothermal synthesis of chromian spinel from Fe-Cr hydroxides using a flow-through reactor, minerals.
- H. M. Zakir Hossain, Atsushi Kamei, Daisuke Araoka (2022) Geochemical characteristics of shoreline sediments from the Bay of Bengal, Bangladesh: Implications for provenance and source-rock weathering, GEOLOGICAL JOURNAL.
- Miho Asada, Mikio Satoh, Manabu Tanahashi, Toshiyuki Yokota, Shusaku Goto (2022) Visualization of shallow subseafloor fluid migration in shallow gas hydrate field using high-resolution acoustic mapping and ground truthing, and their implications on the formation process: A case study of a knoll off Sakata, eastern margin of the Sea of

Japan, Marine Geophysical Research .

Sai Pyae Sone, Kotaro Yonezu, Akira Imai, Koichiro Watanabe, Thomas Tindell, Kenzo Sanematsu (2022) Geological, mineralogical and ore fluid characteristics of the Tagun-Khin-Dan gold mineralization in Mogok-Mandalay-Mergui Belt, Central Myanmar, RESOURCE GEOLOGY.

Isao Machida, Masahiko Ono, Takafumi Kamitani, Yasuhide Muranaka (2022) Applicability of d-excess and 17O-excess as groundwater tracers for determination of recharge area, HYDROGEOLOGY JOURNAL.

Naoyuki Yoshihara, Tsuyoshi Hattanji (2022) Estimation of shallow subsurface structures on granitic hillslopes based on electrical resistivity distribution, JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS.

Yasuo Matsunaga, Wataru Kanda, Takao Koyama, Shinichi Takakura, Tatsuji Nishizawa (2022) Large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by broadband magnetotellurics, JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH.

Xinglin Lei, Tomohiro Ohuchi, Manami Kitamura, Xiaying Li, Qi Li (2022) An Effective Method for Laboratory Acoustic Emission Detection and Location Using Template Matching, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.

Daisuke Araoka, George J. Simandl, Suzanne Paradis, Toshihiro Yoshimura, Mihoko Hoshino, Yoshiaki Kon (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.

森本 和也 (2022) 鉱物材料でガスを回収 - CO₂を月面農場で利用 -, 日刊工業新聞.

安藤 佑介, 荒岡 大輔, 吉村 寿紘, 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.

浅田 美穂, 横田 俊之, 佐藤 幹夫, 棚橋 学 (2022) 音響マッピングによる海底下浅部に埋積する物質境界の可視化 - 山形県酒田市沖表層型メタンハイドレート賦存域の例, 物理探査.

Kenta Asahina, Satoshi Takahashi, Ryosuke Saito, Kunio Kaihoe, Yasuhiro Obaf (2022) Maleimide index: a paleo-redox index based on fragmented fossil-chlorophylls obtained by chromic acid oxidation, RSC Advances.

Yoshihiro Kosaku, Yuki Tsunazawa, Kyoko Okuyama, Motonori Iwamoto, Yasuyoshi Sekine, Chiharu Tokoro (2022) Investigation of optimum scale-up of media stirred mill using the discrete element method, MATERIALS TRANSACTIONS.

Nakamura.Y, Takahashi, U.K., Hosoi, J., H Hara, H. (2022) Determination of the laser-induced damage threshold for graphite and coal with deep-UV micro-Raman spectroscopy. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **117**, 220316.

Kyouhei Tsuchida, Kengo Nakamura Noriaki Watanabe, Takeshi Komai (2022) Influence of non-uniform flow on toxic elements transport in soil column percolation test, Heliyon.

高田 モモ, 保高 徹生 (2022) 旧避難区域における山菜の自家消費による長期的な内部被ばく線量の推定, 日本リスク研究学会誌.

Chenzuo Ye, Yutaro Takaya, Yuki Tsunazawa, Kazuhiro Mochidzuki, Chiharu Tokoro (2022) Influence of Agitator Shape on Characteristics and Grinding Efficiency of Attritor Mill, International Journal of Automation Technology.

Naoki Nishiyama (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.

杉田 創, 駒井 武 (2023) 石油系炭化水素を対象とした発光バクテリアを用いた簡易土壌汚染評価手法の開発5 - アルカン混合成分に関する急性毒性評価 -, 地下水学会誌.

Yuki Kojima, Kenta Okumura, Shinsuke Aoki, Kosuke Noborio, Kohji Kamiya, Robert Horton (2023) A four-parameter-based thermo-time domain reflectometry approach to estimate water content and non-aqueous phase liquid content of soil, GEODERMA.

Masashige Shiga, Tetsuya Morishita, Masao Sorai (2023) Interfacial tension of carbon dioxide - water under conditions of CO₂ geological storage and enhanced geothermal systems: A molecular dynamics study on the effect of temperature, FUEL.

Shusaku Goto, Makoto Yamano, Manabu Tanahashi, Osamu Matsubayashi, Masataka Kinoshita, Hideaki Machiyama, Sumito Morita, Toshiya Kanamatsu, Akihiro Hachikubo, Satsuki Kataoka, Ryo Matsumoto (2023) Surface heat flow measurements in the eastern margin of the Japan Sea using a 15 m long geothermal probe to overcome large bottom-water temperature fluctuations, Marine Geophysical Research.

Naoyuki Yoshihara, Shinji Matsumoto, Isao Machida, Youhei Uchida (2023) Deciphering natural and anthropogenic effects on the groundwater chemistry of Nago City, Okinawa Island, Japan, ENVIRONMENTAL POLLUTION.

Yukie Asano, Yasushi Yamaguchi, Shinsuke Kodama

- (2023) Geological mapping by thermal inertia derived from long-term maximum and minimum temperatures of ASTER data, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.
- Naoyuki Yoshihara (2023) ArcGIS-based protocol to calculate the area fraction of landslide for multiple catchments, MethodsX.
- Isiri Upeksha Nagasinghe, Takeshi Saito, Takato Takemura, Ken Kawamoto, Toshiko Komatsu, Naoki Watanabe, Yoshishige Kawabe (2023) Applicability of alkaline waste and by-products as low cost alternative neutralizers for acidic soils, ISIJ INTERNATIONAL.
- Yoshihiro Kosaku, Yuki Tsunazawa, Chiharu Tokoro (2023) A coarse grain model with parameter scaling of adhesion forces from liquid bridge forces and JKR theory in the discrete element method, Earth, Planets and Space.
- Thatthep Pongritsakda, Yasuhide Sakamoto, Jiajie Wang, Yoshishige Kawabe, Sanya Sirivithayapakorn, Takeshi Komai, Noriaki Watanabe (2023) Prediction of 1,4-Dioxane Migration in Groundwater and Evaluation of Remediation Measures in an Illegal Dumping Site Using a 2D-Numerical Model, Sustainability.
- Hajime Sugita, Terumi Oguma, Junko Hara, Ming Zhang, Yoshishige Kawabe (2023) Removal of Arsenate from Contaminated Water via Combined Addition of Magnesium-Based and Calcium-Based Adsorbents, Sustainability.
- Masashi Kodama, Toshiyuki Yokota, Jun Matsushima, Hiroyuki K.M. Tanaka, Tadahiro Kin, Naoya Okamoto, Hiroto Shiba (2023) Anomaly detectability in multidimensional muon tomography under a trade-off relationship between anomaly size, density contrast, and exposure time, JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS.
- Ryosuke Ando, Kohtaro Ujiie, Naoki Nishiyama, Yasushi Mori (2023) Seismogenic Inversion Layer: Depth-dependent Slow Earthquakes Controlled by Temperature Dependence of Brittle-ductile Transitional Rheology, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS.
- Naoki Nishiyama, Tadashi Yokoyama, Ryoto Nomura (2023) Size Distributions of Water and Air in Rock Pores Induced by Capillary Rise: Experiments and Modeling, TRANSPORT IN POROUS MEDIA.
- Tadashi Yokoyama, Satoki Shintaku, Naoki Nishiyama (2023) Change in size distribution of porewater and entrapped air with progression of water infiltration in sandstone, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences.
- Naoki Nishiyama, Kohtaro Ujiie, Kazuya Noro, Haruna Masuyama, Yasushi Mori (2023) Megathrust slip enhanced by metasomatic actinolite in the source region of deep slow slip, LITHOS.
- 川辺 能成, 原 淳子, 宮崎 晋行, 駒井 武 (2023) 東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の堆積域の推定と重金属類の分布特性評価, 地学雑誌.
- V.M.Dekov, K.Yasuda, G.Kamenov, K.Yasukawa, B.Guéguen, A.Kano, T.Yoshimura, T.Yamanaka, L.Bindi, T.Okumura, D.Asaël, D.Araoka, Y.Kato (2023) Mn-carbonate deposition in a seafloor hydrothermal system (CLAM field, Iheya Ridge, Okinawa Trough): Insights from mineralogy, geochemistry and isotope studies, MARINE GEOLOGY.
- Yoshito Nakashima, Daisuke Hashimoto (2023) Proton transverse relaxation times depending on the unsaturated fatty acids: a magnetic resonance relaxometric study on beef fat samples, INTERNATIONAL JOURNAL OF FOOD PROPERTIES.
- Konomi Suda, Sachiko Sakamoto, Akira Iguchi, Hideyuki Tamaki (2023) Novel quantitative method for individual isotopomer of organic acids from ¹³C tracer experiment determines carbon flow in acetogenesis, TALANTA.
- Monami Kondo, Yasuhide Sakamoto, Yoshishige Kawabe, Takeshi Komai, Noriaki Watanabe (2023) Numerical Analysis on the Effect of Soil Properties on the Generation of Volatilization Flux from Unsaturated Soil Contaminated by Volatile Chemical Substances, ENVIRONMENTAL MODELING & ASSESSMENT.
- 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 Iburu earthquake in 2018 in Japan, Landslides.
- Toshihiro Yoshimura, Yoshinori Takano, Hiroshi Naraoka, Toshiki Koga, Daisuke Araoka, Nanako O. Ogawa, Philippe Schmitt-Kopplin, Norbert Hertkorn, Yasuhiro Oba, Jason P. Dworkin, José C. Aponte, Takaaki Yoshikawa, Satoru Tanaka, Naohiko Ohkouchi, Minako Hashiguchi, Hannah McLain, Eric T. Parker, Saburo Sakai, Mihoko Yamaguchi, Takahiro Suzuki, Tetsuya Yokoyama, 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, Shogo Tachibana, Hayabusa2-initial-analysis SOM team (2023) Chemical evolution of primordial salts and organic sulfur molecules in the asteroid (162173) Ryugu, Nature Communications.

Kazumasa Sueyoshi, Manami Kitamura, Xinglin Lei, Ikuo Katayama (2023) Identification of fracturing behavior in thermally cracked granite using the frequency spectral characteristics of acoustic emission, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences.

Kuniyuki Miyazaki, Takashi Takehara, Masatoshi Tsuduki (2023) Application of Laboratory-Based Rate of Penetration Model for Polycrystalline Diamond Compact Bit to Geothermal Well Drilling, Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources.

Takeshi Nakajima, Hideki Iwano, Tohru Danhara, Takafumi Hirata, Kenta Asahina, Koji U. Takahashi, Yasuaki Hanamura (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.

Sereyroith Tum, Shinji Matsumoto, Miu Nishikata, Tetsuo Yasutaka (2023) Assessment of seasonal changes in groundwater quality of waste rock dump in temperate continental climate, northern Japan, CHEMOSPHERE.

Yuki Tsunazawa, Chiharu Tokoro, Yuji Ando, Tomoki Nakamura, Ryosuke Tsukimi, Nobuo Miyatake (2023) Applicability of gravity separation to

recycling biodegradable plastics, JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN.

Yusuke Miyajima, Michal Jakubowicz, Jolanta Dopieralska, Akihiro Kano, Robert G. Jenkins, Zdzislaw Belka, Takafumi Hirata (2023) Discharge timing and origin of fluids at methane seeps in the late Cretaceous subduction zone of Hokkaido, Japan: coupling U-Pb calcite dating with Sr-Nd isotope analysis, CHEMICAL GEOLOGY.

Seiji Hayashi, Mirai Watanabe, Masami Kanao, Koshikawa, Momo Takada, Seiichi Takechi, Mai Takagi, Masaru Sakai, Masanori Tamaoki (2023) Explaining the variation in ¹³⁷Cs aggregated transfer factor for wild edible plants as a case study on Koshiabura (*Eleutherococcus sciadophylloides*) buds, Scientific Reports.

Momo Takada, Yujiro Kuroda, Yumiko Kanai, Tetsuo Yasutaka (2023) Impacts of environmental decontamination on the rebuilding of returnees' lives after the Fukushima accident, JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION.

Junko Hara, Yoshishige Kawabe (2023) Geochemical characteristics and risk assessment of minor elements in subsurface soils of abandoned mine-rich Shikoku region, Japan, Journal of Soils and Sediments.

原 淳子, 川辺 能成 (2023) 自然由来重金属類の濃度分布とそれに関わる環境因子の情報を公開 九州地方における表層土壌の環境が人に及ぼすリスクを見える化, 地質ニュース.

原 淳子, 川辺 能成 (2023) 九州地方の自然由来重金属類の分布とそれにかかわる環境因子, 環境と測定技術.

令和5年12月8日発行 地圏資源環境研究部門 研究成果報告会 2023
GREEN Report 2023 AIST04-C00014-22 (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/>