



# 2022 GREEN Report

## はじめに



地圏資源環境研究部門長  
今泉 博之

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

地圏資源環境研究部門の研究成果報告会はおかげさまで今回 21 回目となります。そして、第 37 回地質調査総合センター (GSJ) シンポジウムとして位置づけて開催します。

国内の新型コロナウイルス感染状況を鑑み過去 2 年間はオンライン形式による開催としましたが、国内外が共に“ウィズコロナ”を基本とした社会経済活動に大きく舵を切り始めたこと、また現時点 (10 月中旬) で感染状況が一定の落ち着きを見せていることを踏まえ、今年度は対面形式による開催で準備を進めることにしました。過去 2 年間のオンライン形式による開催は、時間と場所に制約されにくいという“便利さ”がありましたが、Face to Face の密な情報交換には必ずしも十分とは言えず、むしろ物足りなさが残ったと考え、今回の判断となりました。

今年度は、産業技術総合研究所の第 5 期中長期計画 (5 カ年) の 3 年度目に当たります。第 5 期に臨んで当研究部門では、“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、

という 3 つの課題を定めています。特に 3) を掲げている背景は、民間ニーズに対応した技術開発とその適用が今後も重要であり、これを通じた技術の橋渡しを継続したいと考えているためです。

さらに、産総研全体の第 5 期における目標として、①産総研の総合力を活かした社会課題の解決、②経済成長・産業競争力の強化に向けた橋渡しの拡充、③イノベーション・エコシステムを支える基盤整備が掲げられています。これらの目標の中で当研究部門は、①に関する領域横断的な融合研究テーマとして、地質調査総合センター (GSJ) が代表領域を担う“環境保全と開発・利用の調和を実現する環境評価・修復・管理技術の開発 (環境調和型産業技術研究ラボ, Research laboratory on environmentally-conscious developments and technologies, 略して E-code)”に大きなエフォートを割いて参画しています。また昨年度設立された新型コロナウイルス感染リスク計測評価研究ラボにも新たに参画し、人が多く集まるマスコガザリングイベントから日常生活までを対象に、新型コロナウイルス感染リスクに関する科学的知見を蓄積・公開しています。他研究領域が主体となる融合課題：ゼロエミッション、資源循環、インフラに関するテーマにも関与しています。②について、GSJ として推進する課題“産業利用に資する地圏の評価”に、上記の部門重点研究課題の 3 つをそれぞれ位置づけています。③について、標準化の推進として土壌汚染等評価・措置に関する試験方法の標準化に取り組み、知的基盤の整備では、GSJ の一員として地下水等の情報の着実な整備と利活用促進を推進しています。

今回のシンポジウムでは、昨今の国際情勢の急速な変化や不安定化が顕著に進む中、エネルギー・資源等の安定供給や環境制約への対応がこれまで以上に喫緊の社会課題になっていることを踏まえ、これらの社会課題の解決にも関連する当研究部門の最新の研究活動を口頭発表と共にポスターセッションで広く深く皆様にお伝えし、ご参加いただいた皆様に当研究部門を「知っていただきたい」と考えました。当シンポジウムの予稿集として発行した GREEN Report 2022 には、講演予稿と共に当研究部門内の 9 研究グループにおける研究成果、ポスター発表の概要に加え、我々が最も重視する学術論文等の公表リストを盛り込み、我々を「知っていただく」ために役立てていただければと考えています。記載の内容に関してご質問等ありましたら、当研究部門のウェブサイト (<https://unit.aist.go.jp/georesenv/>) から問い合わせただければ幸いです。“アフターコロナ”あるいは“ウィズコロナ”において、これまでよりも強靱で持続可能な社会の構築に向け、当研究部門は皆様と共に一層努力していく所存です。今後とも変わらないご高配を賜りますよう、心からお願い申し上げます。





## 目次

### 講演題目

13:30 ~ 13:35	開会のあいさつ			
13:35 ~ 14:00	地圏資源環境研究部門の概要 - 社会との接点を目指して -	研究部門長	今泉 博之	
14:00 ~ 14:25	微生物を培養して社会実装につなげる - 深海底堆積物と休廃止鉱山での取組み -	地圏微生物研究グループ	片山 泰樹	6
14:25 ~ 14:50	メタンハイドレート形成に関与した流体の起源 推定：炭酸塩岩のリチウムに着目して	地圏微生物研究グループ 鉱物資源研究グループ	宮嶋 佑典 荒岡 大輔	8
14:50 ~ 16:00	ポスターセッション			
16:00 ~ 16:25	金属元素の安定同位体比分析手法の開発と 資源・環境への応用	鉱物資源研究グループ	荒岡 大輔	10
16:25 ~ 16:50	地熱井掘削用の PDC ビットの開発	地圏メカニクス研究グループ	宮崎 晋行	12
16:50 ~ 17:15	微生物の自然浄化能を活用した地圏環境汚染の 修復	地圏環境リスク研究グループ	川辺 能成 吉川 美穂	16
17:15 ~ 17:20	閉会のあいさつ			

### 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	町田 功	22
鉱物資源研究グループの紹介	鉱物資源研究グループ長	星野 美保子	24
燃料資源地質研究グループの紹介	燃料資源地質研究グループ長	中嶋 健	28
地圏微生物研究グループの紹介	地圏微生物研究グループ長	吉岡 秀佳	32
地圏化学研究グループの紹介	地圏化学研究グループ長	保高 徹生	34
物理探査研究グループの紹介	物理探査研究グループ長	横田 俊之	38
CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループの紹介	CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループ長	徂徠 正夫	42
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	川辺 能成	46
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	雷 興林	50

## ポスター概要

越後平野 G1層の広域地下水流動モデル	町田 功	54
山地流域の河川水質に対する表層崩壊のインパクト	吉原 直志, 松本 親樹, 町田 功, 梅澤 良介	54
微小域元素組成に基づく鉱物の存在形態の評価技術の開発	綱澤 有輝, 昆 慶明	55
日本海東縁酒田沖のメタンハイドレート胚胎域における海底堆積物の地盤強度調査	青木 伸輔, 佐藤 幹夫, エネルギープロセス研究部門 鈴木 清史	55
山形県酒田沖海域での海底長期温度計測による熱流量測定	後藤 秀作	56
ビニールハウスにおける省エネ型結露防止システム	鈴木 正哉, 万福 和子	56
アルミニウムケイ酸塩による二酸化炭素吸着剤の開発	万福 和子, 宮原 英隆, 鈴木 正哉	57
CO <sub>2</sub> の回収に向けた有機/無機複合吸着材の開発	森本 和也, 朝比奈 健太, 保高 徹生	57
新型コロナウイルス感染リスク計測評価研究ラボの取り組み	保高 徹生	58
休廃止鉱山の利水点管理ガイダンス	保高 徹生	58
地熱利用促進のための酸性熱水への最適材料の選定ツールについて	柳澤 教雄, 地熱技術開発株式会社 佐藤 真丈, 大里 和己, 京都大学 三ヶ田 均	59
河川堤防における非打設電気探査	梅澤 良介, 神宮司 元治, 横田 俊之	59
多様な設置環境に対応可能な広帯域MT法電磁探査システムの開発	小森 省吾, 高倉 伸一	60
トリプルX線CTによる鉛土壌汚染サンプルの非破壊分析	中島 善人	60
分子動力学法による二酸化炭素-水界面張力の温度依存性の推定	志賀 正茂, 徂徠 正夫	61
地化学反応と水理特性変化の評価に向けた高温超臨界CO <sub>2</sub> 流通試験装置の開発	西山 直毅, 徂徠 正夫	61
ヒ素吸着後の使用済Ca系吸着材の環境安定性に及ぼすケイ酸の影響	杉田 創, 小熊 輝美, 原 淳子, 川辺 能成	62
環境中に放出されたジエン系合成ゴムの分解と副生成物の発生リスク	原 淳子	62

## 論文リスト

63



## 講演題目

# 微生物を培養して社会実装につなげる - 深海底堆積物と休廃止鉱山での取組み - Solving social issues by cultivation of microorganisms -studies at deep seafloor sediments and abandoned mine-

地圏微生物研究グループ：片山 泰樹  
Geomicrobiology Research Group: Taiki Katayama  
Phone: 029-849-1537, e-mail: katayama.t@aist.  
go.jp  
<https://unit.aist.go.jp/georesenv/geomicrob/>

## 1. はじめに

自然界には多種多様な微生物（ここでは原核生物の真正細菌と古細菌を指す）が存在し、地球の物質循環や環境・生態系の維持に極めて重要な役割を担っている。我々人間は、様々な環境から微生物を培養することによって有用性を見出し、産業にて活用してきた。例えば、乳酸菌の一部は腸内環境で悪玉菌の繁殖を抑制する、ヒトの免疫機能を高めるといった働きがあるため、機能性ヨーグルトとして利用されている。この効果は乳酸菌を実験室で培養し人間が制御できるようになったことで明らかとなった性質である。このように微生物を社会で有効活用する、あるいは、自然環境での微生物の役割を知るためには培養することが基本となる。ところが、環境微生物の大多数は実験室で培養することができない未知・未培養の微生物種によって占められている。培養を介さず、環境から微生物由来のDNA塩基配列を直接解読すると、既に培養され性質が記載された種と一致しない塩基配列、即ち、未培養微生物種由来の配列が多数存在する。原核生物を最も大まかに分類すると、約100門（「門」は分類学上の単位（階級））となるが、その中で培養種が存在する門は3割に満たず、残りは上記のような塩基配列だけの存在となる<sup>1)</sup>。培養種が存在する門にも未培養の菌種は多数含まれている。地球上には実態を把握できていない多様な未培養の微生物が、環境によっては優占種として存在し、その可培養化は環境保全のための研究や、有用微生物の探索といった応用研究における課題となっている。

産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門では、地下環境に棲息する未培養微生物を対象として、培養技術の開発と性質の解明に取り組んできた<sup>2)</sup>。本稿では、微生物の培養が社会課題解決の一端を担う研究例として、深海底堆積物、及び、休廃止鉱山の微生物学的研究について、その社会的背景とこれまでの研究内容を紹介する。

## 2. 深海底堆積物での微生物研究

天然ガスは他の化石燃料の石油・石炭に比べ環境負荷が低いことから、脱炭素にシフトする現在の社会情勢にあっても需要は高まっている。天然ガスの起源は深部地下圏において地熱による根源有機物の熱化学的分解に伴う生成、あるいは、根源有機物もしくはそれに由来する有機物の生物的分解に伴う生成、の2つの可能性が示唆されている。両者の化学的な違い、例えば、生物起源メタンは安定炭素同位体比が小さい、即ち、<sup>13</sup>Cが相対的に少ない特徴などに基

づく、日本近海に埋蔵するメタンハイドレート（以下MH）や、近年相次いで見つかった大規模な天然ガス鉱床（例えば、地中海Zohrガス田）などは生物起源と推定されており、その資源開発が高い関心を集めている。全球規模では天然ガス埋蔵量の20%は生物起源と見積もられている<sup>3)</sup>。天然ガスの主成分メタンが生物起源であるならば、その生成にはメタン生成菌の存在が不可欠である。

我々は生物起源のMHが賦存する東部南海トラフ海域の海底堆積物におけるメタン生成菌の研究を進めている。その振る舞い（生理・生態学的な性質）を理解し、微生物の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生物起源ガスの探鉱や資源量の正確な評価に貢献する。微生物メタン生成モデルの確立においては、温度などの環境因子がメタン生成菌のメタン生成速度にどう影響するかを明らかにすることが肝要となる。我々は堆積物の深度によって大きく変動し、かつ、微生物の生育に強く影響する環境因子として温度、圧力、堆積物の空隙率に着目した。現場環境ではこれらの環境因子が複合的に作用するため、各々の因子の影響を正確に評価するためには、実験室でモデルとなるメタン生成菌を培養することが必要と考えた。水深1キロに及ぶ深海底の堆積物試料を採取する機会は限られるため、実験室での培養による研究アプローチは妥当である。しかし、これまでMHを埋蔵する海底堆積物からメタン生成菌の培養株はほとんど得られていなかった。

そこで、東部南海トラフ第二渥美海丘から採取した堆積物コア試料を用いて、メタン生成菌の分離・培養を行った。その結果、計10株（7属8種）のメタン生成菌を得ることに成功し（図）、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堆積物の中で生きて存在することが示された<sup>4)</sup>。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温度特性を調べたところ、メタン生成の限界温度は45℃と認定された。この限界温度は、モデル培養株ではなく、堆積物試料から直接メタン生成速度を評価した報告<sup>5)</sup>と整合しており、中温付近でのメタン生成の大幅な減少は、微生物自体の生育温度に規定されることが明らかとなった。

今後はこのモデルメタン生成菌株を用いて、圧力などによるメタン生成速度の影響を評価し、より正確なメタン生成モデルの構築を目指す。なお、本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。

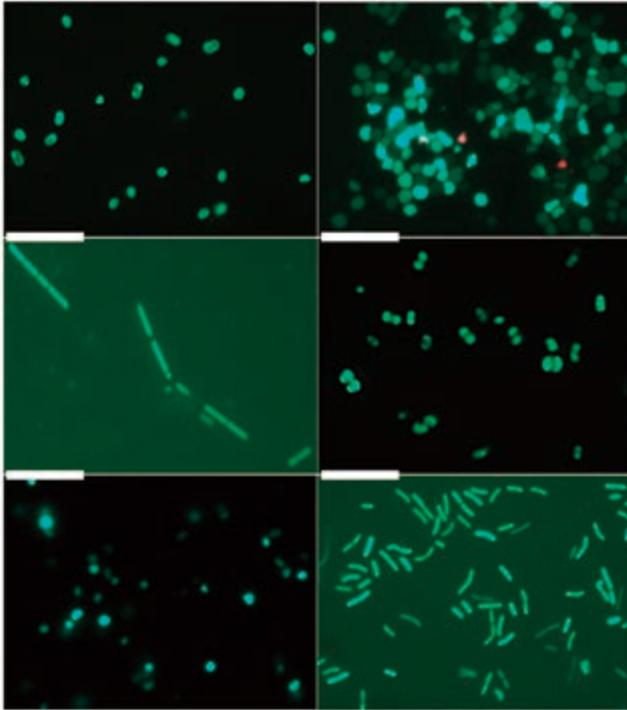


図 1 東部南海トラフ海底堆積物から培養されたメタン生成菌株の顕微鏡写真。メタン生成菌は細胞に紫外線を当てると蛍光色を発する。左上がモデルとなった1H1Hc7株。

### 3. 休廃止鉱山での微生物研究

日本では古くから鉱山から鉱物を採掘して産業に利用する鉱業が盛んに行われてきた。鉱山によっては閉山した後になっても、残存する硫化鉱物が地下水や空気中の酸素と反応し、重金属を含む酸性の坑廃水が発生している。坑廃水がそのまま河川に流出すると水質汚染を引き起こし生態系に有害な影響をもたらす、所謂、鉱害が発生する。そのため、鉱害を未然に防止する事業の一環として、坑廃水中の重金属等の濃度を排水基準値以下となるように処理している。標準的な坑廃水処理では、酸性の坑廃水をアルカリ薬剤で中和した後、水酸化物として析出あるいは他金属の水酸化物に吸着したものを、凝集剤を用いて沈殿させることで除去している。坑廃水中に含まれる重金属の内、マンガン(Mn)等は水酸化鉄などに対する吸着能が低く、沈殿除去

するためには多くのアルカリ剤を添加し高アルカリ(～pH12)条件にしなければならない。加えて、河川に放流する前に硫酸等を加えて中性に戻すため更に多くの沈殿物が発生し、産業廃棄物としての処理量も増加する。

自然界にはMnイオンを酸化してMn酸化物を形成するMn酸化微生物が存在する。この微生物によるMn酸化機能の利用は、Mnを含む坑廃水処理の低環境負荷・低コスト化技術として期待されている。微生物によるMn酸化は中性付近のpHで生じるため、多量の中和剤を必要としないだけでなく、処理によって発生する沈殿物量も少ない。その実用化に向けては、微生物のMn酸化能を制御しMn処理の効率化を図ることが肝要となる。しかし、どのような種類の微生物がMn酸化を担うのかや、Mnを酸化する生物学的な意義はよく分かっておらず<sup>6)</sup>、未だ謎が多い。微生物のMn酸化能を制御するためには、Mn酸化機能の生理・生態学的な仕組みを理解する必要があると考えた。

我々は秋田県立大学と連携して、坑廃水中のMn濃度が高い国内休廃止鉱山にてMn処理試験を実施した。坑内にMn処理槽を設置し、Mn処理試験を実施することで槽内に坑廃水(地下水)由来のMn酸化菌を定着させた。更に、槽内のバイオフィルムを採取し、人工培地を用いてMn酸化菌の分離培養を行った。その結果、新規なMn酸化菌6株の培養に成功し、いくつかの株は処理槽でのMn処理に関与することが明らかとなった。

今後は、分離株を用いてMn酸化能を効果的に発現する条件を明らかにし、Mn酸化処理の効率化を目指す。

### 参考文献

- 1) Lewis et al. (2021) Nature Reviews Microbiology 19, 225-240.
- 2) Katayama et al. (2020) Nature Communications 11, 6381.
- 3) Katz. (2011) The Open Geology Journal, 5, 75-83.
- 4) Katayama et al. (2022) The ISME Journal, 16, 1464-1472.
- 5) Heuer et al. (2020) Science, 370, 1230-1234.
- 6) 宮田直幸ら. (2020) 化学と生物 58, 562-569.

## メタンハイドレート形成に関与した流体の起源推定：炭酸塩岩のリチウムに着目して

Origin of fluids involved in the formation of methane hydrates: an approach using the stable isotopic composition of Li in carbonate rocks

地圏微生物研究グループ：宮嶋 佑典  
 鉱物資源研究グループ：荒岡 大輔  
 Geomicrobiology Research Group: Yusuke Miyajima  
 Mineral Resources Research Group: Daisuke Araoka  
 Phone: 029-861-6838, e-mail: yusuke.miyajima@aist.go.jp

### 1. はじめに

地殻内に存在する流体は、地下の微生物活動や燃料資源生成に重要な役割を果たすほか、地震の発生メカニズムへの関与からも注目されている [1]。海底からメタンを含む流体が湧出するメタン冷湧水は、地殻内の流体にアクセスできる「窓」として重要である。冷湧水はメタンハイドレート胚胎域に見られることから、冷湧水に含まれるメタン・流体の起源を知ることは、メタンハイドレートの成因を解明する手がかりを与える (図 1)。

メタンハイドレートは日本近海に多く胚胎しており、日本の天然ガス資源自給率を高めるものと期待され、研究開発が進められている。メタンハイドレートが資源として発達するうえで、材料であるメタンに加え、地下深部の断層などを通じて移動してきた流体の供給が重要と考えられる。しかしながら、メタンハイドレート形成に関与した流体が、地下のどこから来たのか、その起源はよくわかっていない。

本研究では、メタンハイドレートの胚胎する海底から湧出する冷湧水、および湧水から沈殿した炭酸塩岩の化学分析によって、地下を流れる流体の起源を明らかにすることを試みた。特に炭酸塩岩は、サンプリング時に海水による汚染を受けないことや、過去に湧出した流体の情報を与える点で、流体の化学組成の優れた記録媒体として期待できる。

### 2. 流体の起源指標：Li 安定同位体比

流体の起源を明らかにするため、本研究では炭酸塩岩および水試料に微量に含まれるリチウム (Li) の安定同位体比に着目した。Li は流体と地下の堆積物・岩石との反応過程で大きな同位体分別を示し、その同位体比は  $\delta^7\text{Li}$  値) で 60% に及ぶバリエーションを示す [2]。流体と岩石との Li 同位体分別の程度 (同位体分別係数) は温度に依存することが実験的によく調べられており、Li 同位体比は流体の経験した温度の指標としても重要である [3]。また、地下で岩石との反応を経験した流体は海水と比べて Li に富むことから、地下から海底へ移動してきた流体の Li 同位体比は地下深部の情報を保持しやすいことも特徴である [4]。

### 3. 試料と方法

研究試料には、黒海と日本海酒田沖のメタンハイドレート賦存域で採取された炭酸塩岩を用いた (図 2)。水試料として、酒田沖の堆積物間隙水も分析を行った。

冷湧水成の炭酸塩岩には、砕屑性粒子や粘土鉱物などが

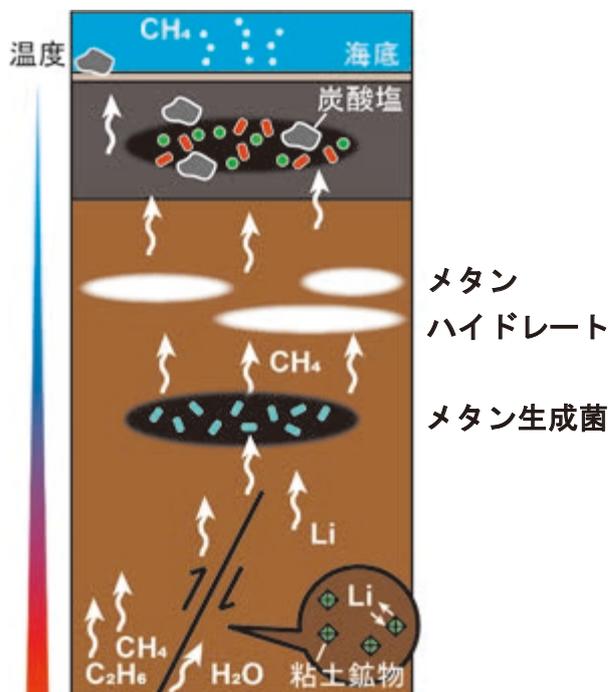


図 1 冷湧水の地下断面の概念図



図 2 分析に用いた日本海酒田沖の炭酸塩岩

多く含まれ、これらは Li のコンタミネーションの元になる。そこで本研究では、希塩酸を用いて炭酸塩岩を段階的にリーチングする処理を行い、粘土鉱物や砕屑性粒子からの Li 溶出を低減させた。また、炭酸塩岩に多量に含まれる Ca をはじめとする他の元素から Li を分離・精製するため、2 段階のイオンクロマトグラフィーを用いた。まず陽イオン交換樹脂を用いて Ca など主要な元素から Li と Na のみを

分離し、次に鉱物資源研究グループ所有のイオンクロマトグラフ装置による自動精製システム [5] によって Na から Li を分離した。Li 同位体比の分析には、鉱物資源研究グループ所有の多重検出器型 ICP 質量分析装置 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific 社製) を用いた。

#### 4. 結果と議論

弱酸リーチングと 2 段階のイオンクロマトグラフィーにより、炭酸塩岩から 10 µg/g 未満のごく微量な Li を分離精製し、同位体比を分析することに成功した。分析の結果、炭酸塩岩の Li 濃度と同位体比は、リーチング時に粘土鉱物からわずかに溶出した Li の混合と、鉱物組成の違い（カルサイトまたはアラゴナイト）によって説明できることがわかった。

カルサイトおよびアラゴナイトが沈殿する際、母液との間で Li の同位体分別が起こり、その分別係数は実験的に求められている [6]。本研究で分析した炭酸塩岩の Li 同位体比について、粘土由来の Li の影響を補正し、炭酸塩と母液の同位体分別係数に基づき元の流体の Li 同位体比を推定した。その結果、炭酸塩を沈殿させた流体の Li 同位体比は、海水とほぼ同じか、最大で 14% ほど軽い同位体 ( $^6\text{Li}$ ) に富む値を示した。また酒田沖の試料について推定された Li 同位体比は、現在の間隙水試料と同じか、より  $^6\text{Li}$  に富んだ値を示した。

黒海では先行研究によって、地下深部の高温環境 (150°C 以上) に由来し、 $^6\text{Li}$  に富む深部流体の存在が報告されている [2]。今回炭酸塩岩から推定した流体の Li 同位体比は、黒海で報告されているような深部流体と海水の混合で説明できると考えられる。酒田沖では炭酸塩岩は数万年前に形成

したと考えられるため、炭酸塩の沈殿流体と現在の間隙水との同位体比の違いは、過去に酒田沖において地下深部流体の湧出があった可能性を示している。

#### 5. まとめ

本研究の成果は、炭酸塩岩の Li 同位体比が、過去から現在に湧出した流体の起源を推定する有用な指標であることを初めて示すものである。今回得られたデータと数値計算等を組み合わせることで、今後は流体の経験した温度や移流速度について考察を進め、メタンハイドレート形成に関連した流体の起源やフラックスを定量的に解明していく。本研究のように水・炭酸塩岩試料を両方用いることで、流体の起源やフラックスについて時系列変化を明らかにできれば、メタンハイドレート発達過程の総合的な理解につながると考えられる。

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。

#### 参考文献

1. 川口・土岐 (2010) 地球化学 44, 137-154
2. Scholz, F. et al. (2010) Geochim. Cosmochim. Acta 74, 3459-3475
3. Hindshaw, R.S. et al. (2019) Geochim. Cosmochim. Acta 250, 219-237
4. You, C.-F. et al. (1996) Earth Planet. Sci. Lett. 140, 41-52
5. Yoshimura, T. et al. (2018) J. Chromatogr. A 1531, 157-162
6. Marriott, C.S. et al. (2004) Chem. Geol. 212, 5-15



伴い多くのレアアース鉱床が見出されている。その中で、最も有望な Rock Canyon Creek 鉱床の成因を明らかにすべく、鉱化作用を受けたドロマイト中のマグネシウム同位体比の分析を行った。その結果、低温熱水によるドロマイト化の後に、遠位性のカーボナタイト（あるいはアルカリ岩）の貫入・定置に関連したレアアースに富む熱水が鉱化作用を引き起こした可能性が示唆された。また、ドロマイトのマグネシウム同位体比や元素組成が鉱床の探査指針として有用となる可能性があることが示された (Araoka et al., 2022)。

#### 4. その他の分野への応用例

他にも様々な資源・環境に関わる分野への応用を進めている。例えば、本発表の前に講演を行う宮嶋博士の研究では、メタンハイドレードの成因解明を目指すべく、海底下の冷湧水と炭酸塩を対象にリチウム同位体比の分析を行っている。また、河川水や熱水中のリチウム同位体比の測定により、河川での化学風化や水-岩石反応をトレースすることが可能であることを明らかにしている（例えば Araoka et al., 2016など）。地層の年代決定にも同位体比は有効で、地層から産出した海成の貝化石のストロンチウム同位体比を測定し、海水のストロンチウム同位体年代曲線と比較することで、浅海域で堆積した地層の年代決定を行うことが可能である（安藤・荒岡ほか, 2022）。さらには、ククロフィルに配位するマグネシウムや、縄文人の歯化石中のマグネシウムの同位体比から、ククロフィルのマグネシウム獲得機構や、当時の食性解析を復元する試みを行ってきた（例えば Isaji et al., 2019など）。坑廃水の発生源解析等にも各種安定同位体比が応用できないか、検討を進めているところである。

#### 5. まとめ

本発表で紹介した開発した安定同位体比手法を使って、ありがたいことに多くの研究者に声をかけていただいて、多方面での共同研究を展開している。まだまだ黎明期の研究手法であるため、安定同位体比が未適用の分野や、有用と思われるような応用先の候補が多数あると思われる。もし、測ってみたい試料や安定同位体比の候補があれば、ぜひ気軽にお声がけいただければありがたい。

#### 参考文献

1. Yoshimura, T. et al. (2018) *J. Chromatogr. A* 1531, 157-162.  
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.11.052>
2. Araoka, D. and Yoshimura, T. (2019) *Anal. Sci.* 35, 751-757.  
<https://doi.org/10.2116/analsci.18P509>
3. Araoka, D. et al. (2022) *J. Geochem. Explor.* 240, 107045.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107045>
4. Araoka, D. et al. (2016) *Geochem. Geophys. Geosyst.* 17, 3835-3853.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107045>
5. 安藤・荒岡ほか (2022) 瑞浪市化石博物館研究報告 49, 119-122.  
[https://doi.org/10.50897/bmf.49.0\\_119](https://doi.org/10.50897/bmf.49.0_119)
6. Isaji, Y. et al. (2019) *ACS Earth Space Chem.* 3, 1073-1079.  
<https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.9b00013>

# 地熱井掘削用の PDC ビットの開発

Development of PDC bits for geothermal well drilling

地圏メカニクス研究グループ：宮崎 晋行  
Senior Researcher, Geomechanics Research Group:  
Kuniyuki Miyazaki  
Phone: 029-861-8753, e-mail: miyazaki-kuniyuki@aist.go.jp  
<https://unit.aist.go.jp/georesenv/geomec/>

## 1. はじめに

地熱は再生可能エネルギーに分類され、二酸化炭素の排出量が少ないエネルギー源とされている。推計によれば、我が国全体の地熱資源量は2,300万 kW であり、アメリカ、インドネシアに次いで世界第 3 位であるものの、全国の発電設備容量は約54万 kW であり、日本の電力需要の約0.2%を賄っているに過ぎない（2019年度）<sup>1)</sup>。地熱開発に限ったことではないが、岩盤の掘削を伴う事業において、掘削コストが高いことが事業の促進を妨げる要因の一つであることは少なくない。例えば 3 万 kW の地熱発電所を建設する場合のモデルケースでは、その総額に占める調査・開発費は28%、その97% が坑井掘削に係るコストである<sup>2)</sup>。掘削コスト低減のため、岩盤を効率的に掘削し、耐久性の高いビットの開発が重要な課題の一つである。

石油・天然ガス開発分野では、従来多く使われていたローラコーンビットに代わり、近年では PDC (Polycrystalline Diamond Compact, 多結晶ダイヤモンド焼結体) ビットが主流となりつつある (図 1)<sup>3)</sup>。その理由は、PDC ビットの寿命 (1 丁当たりの掘削長) が、1990年以降急速に延びたためと考えられている。PDC ビットは、フィクストカタビットに分類され、ダイヤモンド層と超硬合金層からなる PDC カッタ (図 2) がビットボディに固定されている。

石油井掘削では泥岩や頁岩等の均質な軟岩から中硬岩を掘削することが多いのに比べ、地熱井掘削では硬質で研磨性の高い安山岩等を掘削することや、フラクチャが発達した地層や不均質な地層を掘削することが多い。このようにビットに対して大きな負荷が作用する地熱井掘削においても、十分な掘削性能を有する PDC カッタと PDC ビットを

開発し、室内試験や現場実証試験によりその性能を評価することを目的として、産総研 (以下、AIST) は、三菱マテリアル株式会社 (以下、MMC)、株式会社クリステンセン・マイカイ (以下、KM) と共同で、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (以下、JOGMEC) の地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層掘削技術」を受託した。

本稿では、本委託研究の概要と PDC ビットに関する今後の研究課題について述べる。

## 2. 委託研究「地熱貯留層掘削技術」の概要

### 2.1. 数値目標

本委託研究では、ローラコーンビットによる掘削期間を約 2 割短縮させることを想定しつつ、武佐岳地域における海外製 PDC ビットの使用実績を基に、① 掘削速度 120 m/日 (ローラコーンビットの 2 倍) 以上、② ビット寿命 750 m (同 5 倍) 以上、③ 掘削後のビット外径変化 (ゲージ落ち) 1/16インチ以下、という 3 つの数値目標が掲げられた。いずれも8-1/2インチ孔、岩石の一軸圧縮強度 100 MPa での地熱井の掘削を想定している。

### 2.2. PDC カッタの開発

本委託研究で MMC により開発された代表的な 4 種類の PDC カッタについて、ダイヤモンド層の SEM 像を図 3 に、それらの耐摩耗性と耐衝撃性の評価結果を図 4 に、それぞれ示す。PDC カッタの製造方法 (ダイヤモンドとコバルトの焼結、加工、研磨等) の詳細は、既報<sup>4)</sup> を参照されたい。一般に PDC の耐摩耗性と耐衝撃性は相反関係にあり、焼結体中のダイヤモンドが微粒であるほど耐摩耗性が高く、ダイヤモンドが粗粒であるほど耐衝撃性が高いとされる<sup>5)</sup>。カッ

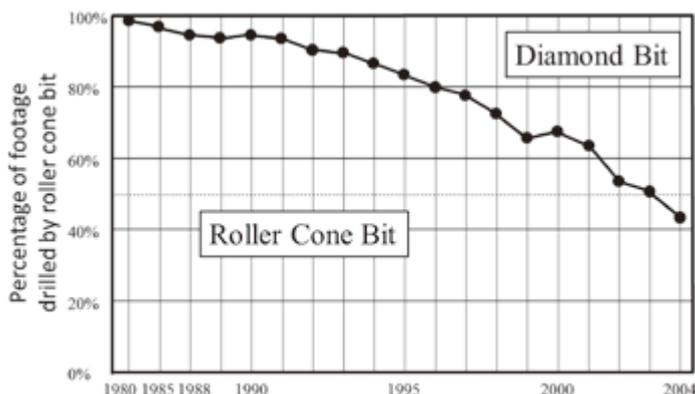


図 1 ローラコーンビットと PDC ビットの石油井掘削長の推移



図 2 PDC カッタの外観

タ A を基準として、カッタ B とカッタ C ではそれぞれ耐衝撃性と耐摩耗性を強化している。カッタ D はカッタ B に対して微粒のダイヤモンド粉を加え耐摩耗性を大幅に強化し、結果的にカッタ C に比べ耐摩耗性・耐衝撃性の両面で優れた性能を有していた。

### 2.3. PDC ビットの開発

本委託研究で KM により設計開発・製造され、地熱井の掘削現場における実証試験に使用した 7 丁の PDC ビット 1 ～ 7 の仕様を表 1 に示す。一例としてビット 7 の外観を図 5 に示す。

ビットは全て 8 ブレードを有する。各ブレードの前列に配置される PDC カッタをプライマリカッタと呼ぶ。バックアップカッタは、プライマリカッタの後列に配置され、岩盤に対するカッタの食い込みすぎを防ぐ。バックアップカッタを有しないビット 2 と 4 については、プライマリカッタの後列に衝撃緩和アレスタを配置し、ビットの耐衝撃性の向上が図られた。ビット 7 では、耐摩耗性に優れるが、耐衝撃性の面ではカッタ A や B に劣るカッタ D が使用されている。そこで、ビットデザインの面で耐衝撃性を高めるため、ビット 7 はバックアップカッタを有するデザインでありながら、ショルダ部の 7 個のプライマリカッタの後部にアレスタを配置した。

バックレーキ角は、小さい角度では掘進速度を重視し、大きい角度では耐久性を重視した設計を意図している。ビット 7 では、ビット 1 ～ 6 での経験から、カッタ負荷の少ない領域（コーン部からショルダ部の一部まで）では、切削性能を高めるためバックレーキ角 15° に設定された。

坑底において効率的に掘屑を排除するため、流体シミュレーションによる検討により、ビット 2 以降は、16/32 インチノズル 6 個と 10 mm ウォーターホール 2 個を備え、PDC カッタのサイドレーキ角は、ビット半径方向のカッタ位置に応じて 0°、5°、10° と設定された。このほか、ビット 4 以降では、ビットの直進安定性の向上を図るため、ビットのゲージ部は長く設定された。

### 2.4. 室内試験による掘削性能評価

#### (1) ビット 1 ～ 7 の掘削性能評価

産総研の所有する室内掘削試験装置（図 6）を用いて、ビット 1 ～ 7 を用いた室内掘削試験（岩石：江持安山岩、回転数：75～100 rpm）を行った。図 7 (a) に、掘進速度 ROP を回転数 RPM で除したビット 1 回転当たりの掘進長 ROP/RPM とビット荷重 WOB との関係を示す。いずれのビットでも WOB が増加するほど ROP/RPM は増加する。ビット間の相違は、2.3. で述べた設計（特にバックレーキ角）の意図がよく反映されている。

#### (2) ビットの摩耗速度と UCS の関係

2.1. で述べた数値目標は、被削岩石の一軸圧縮強度（以下、UCS）100 MPa を想定しているが、必ずしも UCS が

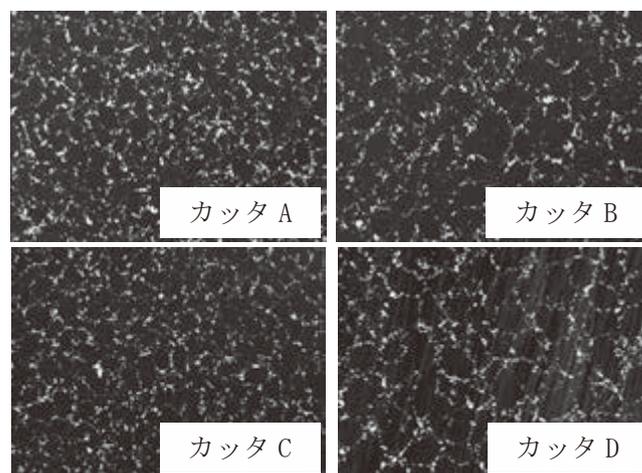


図 3 カッタのダイヤモンド層の SEM 像（黒：ダイヤモンド、白：コバルト、画像の横辺の長さ 200 μm）

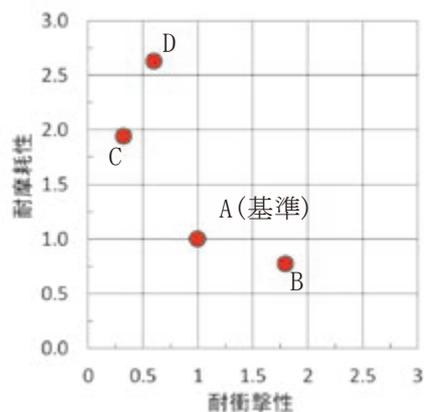


図 4 開発したカッタの耐摩耗性と耐衝撃性（カッタ A を基準として正規化）



図 5 PDC ビット（ビット 7）の外観



図 6 産総研所有の室内掘削試験装置

100 MPa に近い現場で実証試験を行えるとは限らなかった。そこで、室内掘削試験によりカッタの摩耗速度と UCS との関係調べ、対象を安山岩に限定すれば、次の関係が見られることがわかった (図 8)。

$$(\text{カッタの摩耗速度}) = 3.0 \times 10^{-5} \text{ UCS}^{1.4} \quad (1)$$

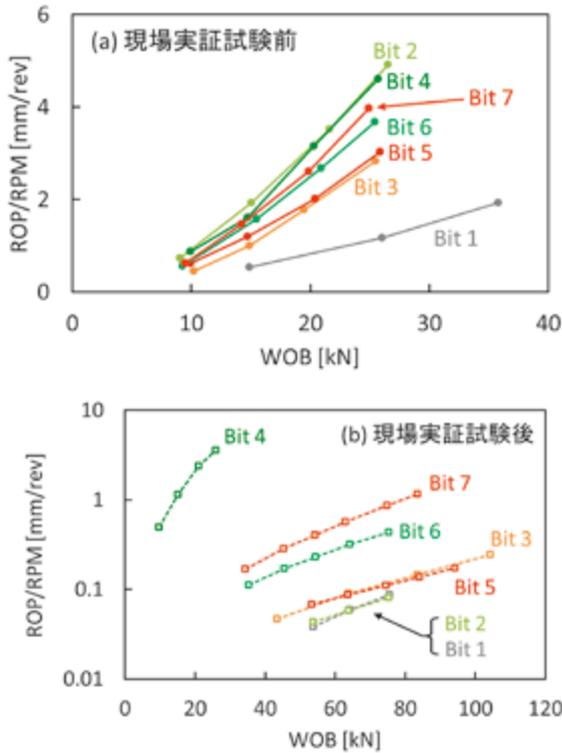


図 7 ビット 1～7 の室内掘削試験結果

## 2.5. 現場実証試験による掘削性能評価

ビット 1～7 の現場実証試験の主な条件と結果を表 2 に示す。詳細については既報<sup>6,8)</sup> を参照されたい。表からわかるように、掘削現場によって地層やビットの摩耗状態等は大きく異なっている。そのため、現場実証試験後のビット 1～7 を用いた室内掘削試験結果 (図 7 (b)) において、ROP/RPM の図 7 (a) からの減少幅はビットによって大きく異なっていた。

表 2 から、2.1. で述べた数値目標のうち①と③は、ビット 7 で達成されたことがわかる。数値目標②について、以下のように検討した。カッタの摩耗速度とビット寿命とが反比例すると考えれば、式 (1) より、ビット寿命は UCS の 1.4 乗に反比例することになる。ビット 7 で掘削した岩石の UCS が 138-182 MPa と推定されたことから、実際の掘

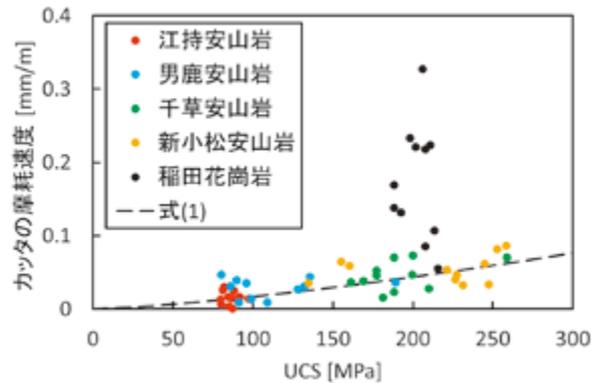


図 8 カッタの摩耗速度と UCS との関係

表 1 開発したビットの主な仕様 (都築他<sup>6)</sup> の Table 1 と Table 2 を改編

ビット No.		ビット 1	ビット 2	ビット 3	ビット 4	ビット 5	ビット 6	ビット 7
ブレード数		8						
カッタ径 (mm)		13.44						
ゲージ部の長さ (mm)		75			105			
カッタの種類	ショルダー部のプライマリカッタ	B		C				D
	ゲージカッタ	A						
	上記以外	A		B				A と C
カッタの個数	プライマリカッタ	39	50					
	バックアップカッタ	21	0	25	0	25		
	ゲージカッタ	14	8					
	合計	74	58	83	58	83		
バックレーキ角	プライマリカッタ	20°	15°	20°	15°	20°	15°	15° / 20° <sup>※1</sup>
	バックアップカッタ		-		-			20°
	ゲージカッタ	30°	25°					
サイドレーキ角		0°	0, 5, 10°					
カッタのエクスポージャ	プライマリカッタ (mm)	1.5-6.7	5.4	4.9-5.4	5.4	4.9-5.4		
	バックアップカッタ (mm)	5.5-6.2	-	4.9	-	4.9		
アレスタ	個数	0	24	0	24	0		7 <sup>※2</sup>
	エクスポージャ (mm)	-	4.9	-	4.9	-		4.9-5.4

※1 コーン部・ノーズ部・ショルダー部内側は 15°、ショルダー部外側 20°。配置。

※2 バックアップカッタを配置していないショルダー部 7 箇所

削長 477 m を UCS 100 MPa の場合に換算すると、掘削長は 743-1088 m となる。さらに、ビット 7 は現場実証試験後も継続して使用可能であったことから、それ以上のビット寿命を有していたと評価できる。これらのことから、数値目標②も達成されたと考えている。

### 3. PDC ビットに関する今後の研究課題

学術的な観点では、岩盤の掘削に伴う PDC ビットの摩耗の進行と、それによる掘進速度の低下について、未だ不明な点が多い。極めて基本的な特性についてすら、室内実験等により取得された信頼性の高いデータはほとんど見られない。

本委託研究の一環で、ビット 1 ～ 7 の試験とは別に実施した PDC ビットの室内掘削試験<sup>7,9)</sup>により、PDC ビットの摩耗とそれによる掘進速度の低下について、新たな知見を得た。詳細は本稿では割愛するが、ビット 1 回転当たりの掘進長 ROP/RPM が、ダイヤモンド層の摩耗体積  $V_{wd}$ 、WOB、UCS および定数  $p_0$ 、 $\gamma$  を用いて、次式で表せることを示した<sup>7)</sup>。

$$ROP/RPM = p_0 \exp(-\gamma V_{wd}) (WOB/UCS)^2 \quad (2)$$

式 (2) は室内試験結果を基に構築されているが、その導出過程において、例えば、PDC カッタの摩耗速度に及ぼす被削岩石の諸特性の影響や、PDC カッタのダイヤモンド層の摩耗量と掘進速度との関係等々、種々の知見を得ているが、それらが他のタイプやデザインのビットに対して適用可能かどうかは不明であり、今後、さまざまなビットを用いた室内掘削試験によって、必要に応じて式 (2) に改良を施していく必要があると考えている。

### 4. まとめ

本稿では、JOGMEC 委託研究による地熱井掘削用の PDC ビットの研究開発において、設定した 3 つの数値目標を達成したことを述べた。また、その一環で実施した室内掘削試験により、PDC ビットの摩耗に関して得られた知見と今後の課題について述べた。

### 謝辞

本稿で述べた研究成果の一部は、JOGMEC 委託研究「地熱貯留層掘削技術」によるものである。また、MMC および KM とは、さまざまな議論や協力を通じて、本委託研究を推進することができた。ここに関係各位に感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) 「日本の地熱発電」, JOGMEC, [https://geothermal.jogmec.go.jp/information/plant\\_japan/index.html](https://geothermal.jogmec.go.jp/information/plant_japan/index.html)
- 2) 「2050年カーボンニュートラルに向けた地熱をとりまく現状について」, 経済産業省資源エネルギー庁 (2020)
- 3) Roller Cones VS. Diamonds: A Reversal of Roles, Market Focus Supplement, pp.10-12. (2006).
- 4) 地熱井掘削のための PDC ビットの開発, 今泉他, 日本地熱学会誌, 39, pp.217-227 (2017) .
- 5) On the cutting edge, Besson et al., Oilfield Review, 12, pp.36-57 (2000).
- 6) 地熱井における新規開発 PDC ビットの掘削性能評価, 都築他, 日本地熱学会誌, 44, pp. 123-135 (2022).
- 7) Wear and Degradation of Drilling Performance of Polycrystalline Diamond Compact Bit in Laboratory Test, Miyazaki et al., Mater Trans, 63, pp.294-303 (2022)
- 8) Drilling performance of PDC bits for geothermal well development in field experiments, Imaizumi et al.. Proc of WS Geotherm Res Eng, pp.11-13 (2019).
- 9) Performance of polycrystalline diamond compact bit based on laboratory tests assuming geothermal well drilling, Miyazaki et al., Geothermics, 80, pp.185-194 (2019).

表 2 実証試験の現場条件および結果<sup>6,8)</sup>

ビット		ビット 1	ビット 2	ビット 3	ビット 4	ビット 5	ビット 6	ビット 7	
現場条件	地域	磐梯		木地山	岩木山嶽	小安	木地山	奥会津	
	掘削した主な岩石	石英閃緑岩礫, デイサイト等を含む凝灰岩		デイサイト, 玄武岩, 安山岩溶岩	シルト, 砂質シルト	緑色片岩, デイサイト, 安山岩	安山岩, デイサイト, 玄武岩	緑色凝灰岩	
	UCS (MPa)	122		150-200	54	220-400	150-367	138-182	
結果	平均掘進速度 (m/day) <sup>*1</sup>	58	104	38	66	30	44	134	
	掘削長 (m)	123	161	108	309 <sup>*2</sup>	21	20	477 <sup>*2</sup>	
	IADC 損耗評価	in	2	3	1	0	2	1	2
		out	2	3	3	0	5	2	3
ゲージ落ち		< 1/32 インチ							

※ 1 1 日を 20 時間として算出。 ※ 2 現場および室内での掘進速度からビット寿命には達していないと判断。

# 微生物の自然浄化能を活用した地圏環境汚染の修復

Remediation of geo-environmental contamination using the natural purification ability of microorganisms

地圏環境リスク研究グループ：川辺 能成, 吉川 美穂  
 Geo-Environmental Risk Research Group:  
 Yoshishige KAWABE, Miho YOSHIKAWA  
 Phone: 029-861-3102, e-mail: y-kawabe@aist.go.jp  
<https://unit.aist.go.jp/georesenv/georisk/>

## 1. はじめに

わが国における土壌・地下水など地圏環境における汚染問題は、有害化学物質を扱う市街地の人為的な汚染をはじめとして、それを扱わない地域や山間部などにおける自然起源の汚染など多岐にわたっている。これら有害化学物質が地圏環境に負荷された場合、ヒトの健康影響や生態系への影響が懸念されるため、適切に環境修復を行う必要がある。土壌・地下水汚染の浄化・修復手法には、土壌掘削や地下水揚水などの物理的な手法、薬剤を使用した化学的浄化、微生物や植物を活用した生物的浄化など、さまざまな手法があり、対象物質や汚染規模、汚染深度などにより決定される。

本稿では、生物的浄化のうち微生物を活用した土壌・地下水汚染の修復技術について、地圏環境リスク研究グループで取り組んできた事例を紹介する。

## 2. 微生物を活用した地圏環境汚染修復

一般的に、周辺環境への影響が大きく浄化に急を要する場合の土壌・地下水汚染には物理・化学的手法が適用されることが多いが、図 1 に示すように浄化開始からある程度の期間は効率よく浄化が進行するものの、濃度の低下とともに効率が悪くなり、費用対効果が見込めなくなる場合がある。一方、生物的手法の場合、コストが比較的かからないものの、高濃度の汚染では、微生物などの活動が阻害され、浄化反応が進行しないことがある。したがって、図 1 に示すように物理化学的浄化がある程度進行し、汚染が低濃度になった場合に適用されることが多い。

微生物を用いた土壌・地下水汚染の対象物質としては、ベンゼンやトルエンなどの芳香族炭化水素、ガソリンなど脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素を含む鉱物油、テトラク

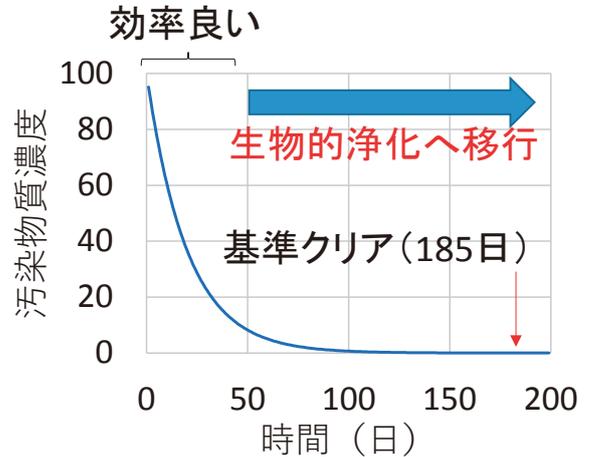


図 1 一般的な積極的浄化対策による汚染物質の濃度推移

クロロエチレンなどに代表される揮発性有機塩素化合物などの有機化合物が多いが、重金属類についてもそれ自体は分解されないものの、クロム (VI) からクロム (III) への還元反応のように微生物により毒性の低い形態に変換するのに利用される場合もある。これら汚染物質が土壌・地下水に存在する場合、栄養塩類や酸素 (好氣的), 水素 (嫌氣的) などを供給して、元々棲息している微生物の活性を上昇させて分解を促進させるバイオスティミュレーション、汚染を分解する微生物を直接的に栄養塩類などと一緒に供給して分解を促進させるバイオオーグメンテーションなどの手法により浄化が実施される。また、自然界に生息する微生物などの持つ自然浄化能 (Natural Attenuation) のみを利用し、適切な管理・監視のもとに汚染物質の濃度をヒトの健康や環境に影響のないレベルまで低下させる浄化手である科学的自然減衰 (MNA : Monitored Natural Attenuation)

### 脱塩素分解経路

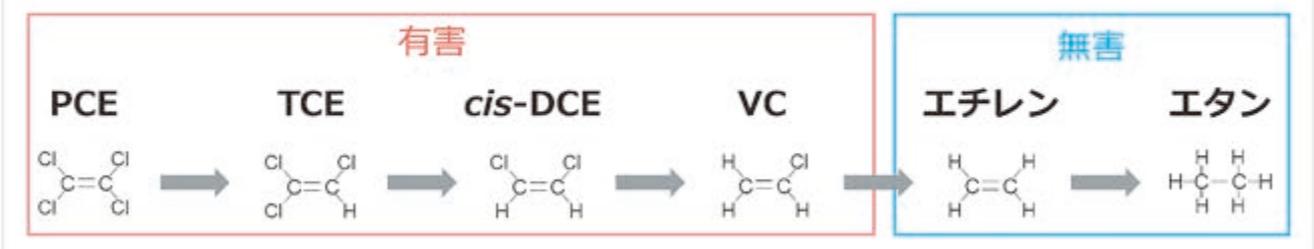


図 2 嫌氣的条件下における揮発性有機塩素化合物の脱塩素反応による分解経路, PCE: テトラクロロエチレン, TCE: トリクロロエチレン, DCE: ジクロロエチレン, VC: 塩化ビニル

の普及も進んでいる。

いずれの場合でも、生物反応を活用した浄化であるため、気温、水温、好氣的・嫌氣的雰囲気、水質などといった周辺環境の影響により浄化の効率は変動する。したがって、微生物反応に及ぼす各種環境因子の影響を検討し、できるだけ反応効率を上昇させる条件を見出すことが重要である。また、一般的な環境に棲息する微生物は多種類存在しているため、これら微生物と浄化の目的となる微生物との共存関係や反応に及ぼす影響についても検討する必要がある。

### 3. 微生物による地圏環境汚染の修復事例（テトラクロロエチレン汚染サイトの例）

わが国における土壌・地下水汚染の事例は増加傾向にあるが、そのうち有機化合物については、ドライクリーニングや金属洗浄などで使用されるテトラクロロエチレン（PCE）やトリクロロエチレン（TCE）などの揮発性有機塩素化合物の汚染超過件数が非常に多くなっている<sup>1)</sup>。

一方、これらの物質は嫌氣的条件下において、ある特定の微生物（*Dehalococcoides sp.*）により、図 2 に示すような脱塩素反応を経て、最終的にエチレンやエタンまで分解され無害化されることが知られている<sup>2)</sup>。しかし、実汚染現場では、PCE や TCE よりも毒性の高いジクロロエチレン（DCE）や塩化ビニル（VC）で反応が止まってしまうことも多く、DCE や VC から無害であるエチレンやエタンへの反応を促進させることが極めて重要である。また、エチレンやエタンまで分解される環境においても、DCE や VC の分解速度は遅いことが多い。図 3<sup>3)</sup> は著者らが調査した地下水中の cis-1,2-ジクロロエチレン（cisDCE）の濃度推移

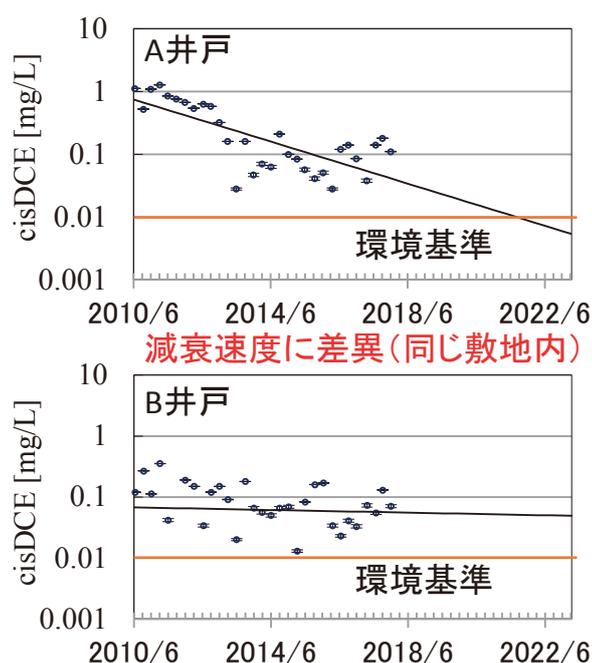


図 3 山形県高島町内の PCE 汚染サイトにおける地下水中の cis-1,2-ジクロロエチレン (cisDCE) の濃度推移 (Kawabe et.al(2019) を元に作成)

表 1 A 井戸および B 井戸の水質 (2017.6)

項目	単位	A井戸	B井戸
水温	°C	16.1	16.7
pH		6.46	6.49
EC	uS/cm	314	374
ORP	mV	-53	-53
重炭酸	mg/L	118	97.2
Na+	mg/L	19	29
NH4+	mg/L	1.4	1.3
Mg2+	mg/L	0.46	0.74
Ca2+	mg/L	6.9	8.5
K+	mg/L	8.4	14
F-	mg/L	0.51	0.53
Cl-	mg/L	14	44
NO3-	mg/L	11	9.9
SO42-	mg/L	4.1	4.9
Fe2+	mg/L	11	0
TFe	mg/L	43	29
メタン	mg/L	3.7	0.68
エタン	mg/L	0.36	0.0041
エチレン	mg/L	0.0035	0

を示したものである。これら地下水は同じ敷地内の同じ帯水層中のものであるが、A 井戸と B 井戸でその減衰速度に大きな差があることが分かる。したがって、B 井戸の減衰速度も A 井戸と同様まで上昇できれば浄化の効率はよくなるといえる。

これら減衰速度に差が生じる理由としては、周辺環境（特に地下水質）の相違によるものと推測される。一般的に PCE や TCE の脱塩素反応は還元的雰囲気で行われるため、地下水の酸化還元電位（ORP）が小さいほど反応速度が大きくなるものと考えられる。また、水温や pH も微生物反応速度に影響する因子である。しかし、表 1 に示した両井戸の ORP はほぼ同じであり、水温や pH も両井戸にほとんど差異が認められなかった。そこで、その他の成分について検討してみると、A 井戸では PCE の最終分解生成物であるエタンやエチレンが存在していることや、それ以外の成分でも鉄（特に二価鉄）やメタンの量が多いことが明らかになった。吉川ら<sup>4)</sup>による別のサイトにおける調査でも、同じ敷地内において完全分解が進行している井戸とそうでない井戸でメタンや二価鉄が多くなっていることが分かっており、これらの物質が完全分解に大きく関与している可能性が見いだされた。

そこで、吉川らが採取した地下水を用いて、室内でテトラクロロエチレンの脱塩素反応に及ぼす二価鉄ならびにメタンの影響について検討した<sup>4)</sup>。試験はバイアル瓶を用いた閉鎖系で行い、二価鉄について塩化第一鉄で供与した。一方、

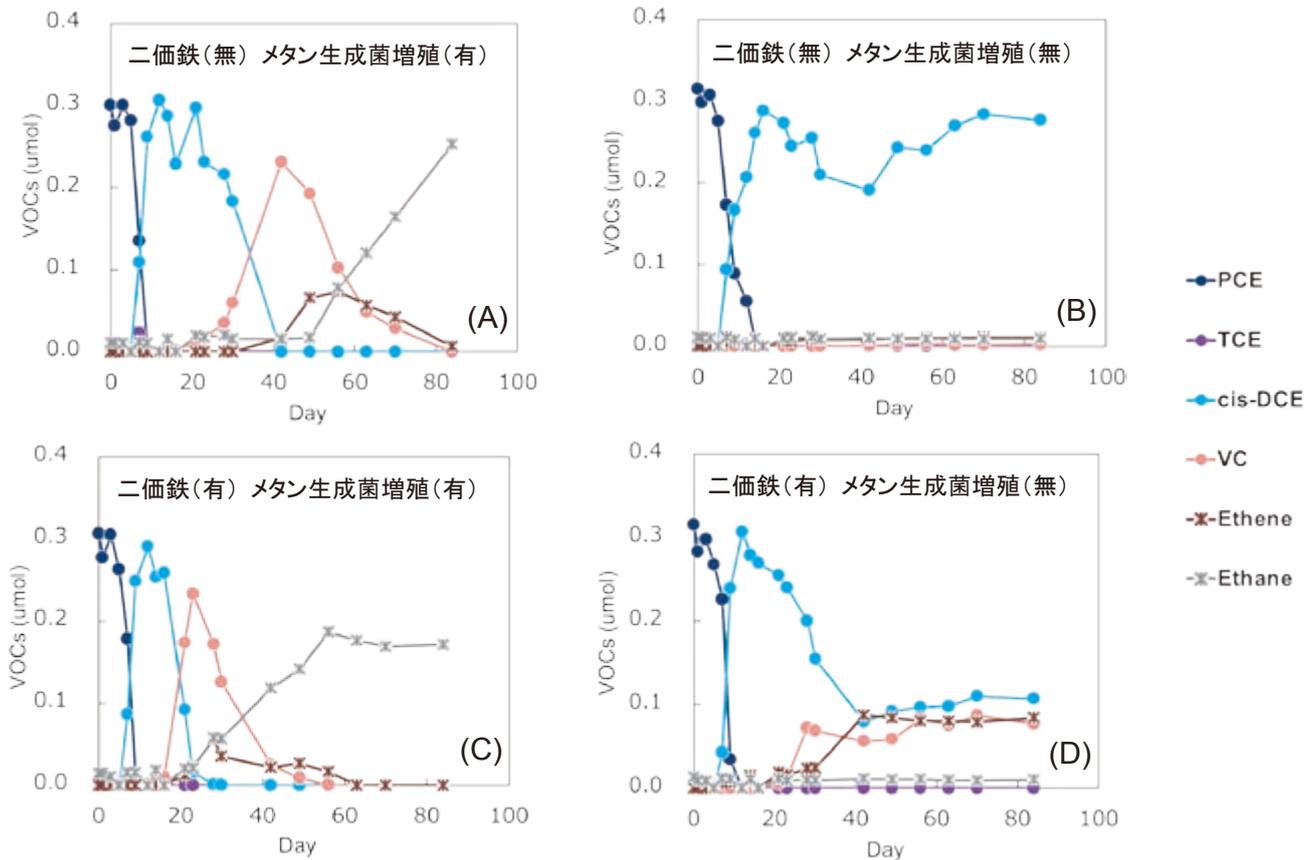


図4 クロロエチレン類およびエチレン，エタン濃度の経時変化に及ぼす二価鉄ならびにメタン生成菌増殖の影響 (Yoshikawa et.al(2021) を元で作成)

メタンについては一般的に地下環境ではメタン生成菌が活動することにより生成されるため共存するメタン生成菌が完全分解に重要な役割を果たしているものと推測し、メタン生成菌の活動を阻害するプロモエタンスルホンサンナトリウム (BES) を添加した場合としない場合と比較した。図4<sup>4)</sup>に試験結果を示す。まず、メタンの影響についてみると、二価鉄を添加せずにメタン生成菌が増殖できる環境 (図4(A)) では、PCEがおおよそ9日間程度で分解され、副生成物であるcisDCEが増加している。そして、cisDCEの減少が始まる25日後にVCの生成が認められ、VCの減少と同時にエチレンおよびエタンの生成が始まり、おおよそ70-80日で無害化 (エチレンとエタンのみ存在) されることが分かる。一方、メタン生成菌が増殖しない条件 (図4(B)) では、PCEはおおよそ15日後に完全になくなるものの、副生成物であるcisDCEで分解が止まってしまい、その後の反応が進行しないことが分かる。すなわち、メタン生成菌の活動があることにより、テトラクロロエチレンがエチレンやエタンまで無害化される。次に二価鉄の影響についてみると、図4(C)に示した二価鉄添加、メタン生成菌が増殖する条件では、図4(A)と同様にPCEがエチレンやエタンまで無害化されていることが分かる。しかも、その時間は二価鉄を添加しない場合よりも短く、おおよそ40-50日で無害化された。一方、二価鉄を添加し、メタン生成菌が増殖しない条件下 (図4(D)) では、二価鉄を添加しない場

合 ((図4(B))より分解は進行して無害であるエチレンまで分解されるものの、最終的に毒性の高いcisDCEやVCが残存してしまい、完全無害化されなかった。

以上のことから様々な微生物が存在する環境においてPCE等を完全無害化するためには、二価鉄の存在とメタン生成菌の存在が重要であるといえる。今のところテトラクロロエチレンを完全分解できる微生物は*Dehalococcoides sp.*が主であり、無害化のためにはこの菌存在が不可欠であるが、この微生物自体もメタン生成菌と共生関係にないと無害化が難しいことが示唆された。また、二価鉄が存在することでそれらの分解速度が上昇することが明らかになった。したがって、実汚染現場において揮発性有機塩素化合物の分解が毒性の高い副生成物で止まってしまう場合には、例えば二価鉄を微量添加することや、メタン生成菌の増殖を促進させるなどの処置を行うことで無害化を達成できる可能性がある。

#### 4. おわりに

本稿では、地圏環境リスク研究グループで実施している微生物による環境修復の研究として、微生物による揮発性有機塩素化合物の無害化に及ぼす周辺環境の影響に関する研究例を紹介した。今後はそのメカニズムや関与する微生物群の同定をさらに検討し、実際の汚染現場における適用性を検証していきたいと考えている。また、揮発性有機塩素

化合物以外の物質についても微生物を用いた浄化の可能性について検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 環境省 水・大気環境局 (2022) : 令和 2 年度 土壤汚染対策法の施行状況及び土壤汚染調査・対策事例等に関する調査結果
- 2) Maymó-Gatell X, Anguish T, Zinder SH (1999): Reductive dechlorination of chlorinated ethenes and 1,2-dichloro- ethane by “Dehalococcoides etheno- genes” 195. Applied Environmental Microbiolgy 65, pp.3108-3113
- 3) Kawabe, Y., Komai, T. (2019): A case study of natural attenuation of chlorinated solvents under unstable groundwater conditions in Takahata, Japan, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 102-2, pp.280-286
- 4) Yoshikawa, M., Zhang, M., Kawabe, Y., Katayama, Y. (2021): Effects of ferrous iron supplementation on reductive dechlorination of tetrachloroethene and on methanogenic microbial community, FEMS Microbiology Ecology, 97-5, fiab069.



## 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：町田 功

Leader, Groundwater Research Group:

Isao Machida

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

#### 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研究ラボ(E-code)などの領域融合研究にも力を入れている。これら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ひろげている。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利活用を推進している。

#### 2. 各研究項目の内容

##### 2.1. 地下水のマップ作成

「地質の調査」ミッションの一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。水文環境図は既存の全国統一情報に加え、地域ごとに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り、丹念に過去データを調べ、新たな調査を行うことにより、その全体像を把握することができる。

地域全体の地下水を俯瞰することは、地域の水資源を考える上で重要である。地下水は雨によって補充されるため、適切に保全し、利用することができれば、持続的な理由が可能である。しかし、そのためには、地下水流動を明らかにし、地下水の涵養域(主に補充される地域)を知ることが必要である。地下水流動の把握が重要なことは、硝酸態窒素による地下水汚染を考えても明らかである。その起源は畑地などでの過剰な施肥であることが多いことから、特に浅層地下水を水源として利用している地域では、地下水流動方向と畑地の位置関係に注意を払うべきである。また、涵養域が特定されれば、涵養促進のための保護区域を効率的かつ正しく決定することができるだろう。一方、地下水に関する情報は、省エネや災害への備えという面でも重要である。例えば鉄イオン濃度が高い地下水が得られる地域では、地下水は飲用に対しては不適かもしれないが、これらの地下水は

消雪用地下水として、あるいは災害時の雑用水として有用であるし、(地下水流動速度が遅いため)帯水層蓄熱型の地中熱利用ができる地域としても考えることができるだろう。このように水質情報は地下水の飲用可否を判断するだけでなく、地下利用を考える際にも重要である。

水文環境図の作成地域は、2022年9月現在、12地域である。近年では2021年3月にNo.12「紀の川平野」が公開された。現在も複数地域での編集が行われており、本年度から次年度にかけての公開を目指し、「静清地域」「越後平野」「仙台平野(第2版)」のとりまとめが行われているとともに「京都盆地」「沖縄」に関しても調査を継続している。これらはウェブで閲覧可能である。

(<https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/main.html>)

##### 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が、当該事業では地下水シナリオを考慮したうえで、天然バリアの健全性を評価することが責務となっている。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、地層処分研究の更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域にて調査をおこなってきた。そして、平成19年度からは北海道天塩郡幌延町にて物理探査研究グループと連携し、ボーリング調査と物理探査の両面から陸海接合部の深層地下水の実態把握を行い、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・資金管理センターと共同で、「沿岸部処分システム評価確証技術開発」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境界と深部の塩水の挙動に焦点を当てた研究をおこなっている。塩淡境界に関しては、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、塩淡境界より深部の塩水の流向・流速など、確認されていない点も多い。また、海底湧出地下水との関係も不明瞭である。このために、陸域

と海域における観測結果を用い、塩淡境界付近の地下水流動に関する知見の蓄積をおこなっている。現在行っているボーリング調査は深度800 mを目指したものであり、良質の地下水試料の採取、塩淡境界と塩水領域の流向流速測定、ボーリング調査に係る新技術の適用など様々な調査、研究が行われている。

その他、物理探査グループと協力し、神奈川県横須賀市や北海道幌延町沿岸部において浅海域を対象とした3次元海上音波探査手法の高度化にも取り組んでいる。



ボーリングの風景（左）、分析装置の調整（右上）と現場での作業風景（右下）。

### 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るが、沿岸域の環境を守ることも重要である。特に、気候変動が進行する現代では、地球温暖化や海洋酸性化・海洋貧酸素化、河岸・海岸の後退による立地面積の減少等、各種環境問題の中長期的な評価が求められている。この理由から現在、沖縄本島等の沿岸域をモデルケースに、気候変動を考慮した信頼性の高い環境モニタリング・評価技術を開発し、環境保全・修復・管理技術への展開を目的とした調査を行っている。地下水研究グループは、海生サンゴへの陸域環境負荷を定量化することを目的として、2020年度より陸域地下水の調査・分析を実施してきた。2022年度は約80地点の調査を完了した。

#### その他の地下水研究

今年度はコロナ禍の中、国際関連の活動は著しく制限

されたものの、そのような中でもCCOP加盟国に対し、我が国の地下水問題などを紹介し、アジア地域における適切な水資源の管理・利用に貢献した。また、上記以外に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。例えば、地下水のd-excessと<sup>17</sup>O-excessを新たな環境トレーサーとして利用するための基礎研究や平野部地下深層に分布する非常に古い地下水年代を持つ地下水の地球化学的研究を実施した。また、我が国の地下水管理の推進にむけた地下水の流動や質ならびに文化的価値を考慮した経済的価値の評価研究、再生可能エネルギーの1つである地中熱利用において地下水流動の季節変化が熱交換効率に与える影響を評価するための数値解析、半永久的に継続する坑廃水の問題解決に資する鉱山地域での水文調査、地震に伴う斜面崩壊が地下水や渓流水の水質に与える影響評価などがある。

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、地下水の膜処理関連企業などに対して、地下水の適切な活用や管理法などに関する講演を行うとともに、大学での講義などをおこなっている。

### 3. グループの研究体制

町田 功（グループ長）  
井川 怜欧（上級主任研究員）  
吉岡 真弓（主任研究員）  
小野 昌彦（研究員）  
松本 親樹（研究員）\* 出向中  
吉原 直志（研究員）  
丸井 敦尚（招聘研究員）  
内田 洋平（併任）  
富樫 聡（併任）  
シュレスタ・ガウラブ（併任）  
石原 武志（併任）  
アリフウィディアトモジヨ（併任）  
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）  
新堂 淳（派遣）  
木方 建造（産学官制度来所者）  
橋本 拓弥（産学官制度来所者）

## 鉱物資源研究グループの紹介

### Introduction of the Mineral Research Group

研究グループ長：星野 美保子

Leader, Mineral Research Group: Mihoko Hoshino  
Phone 029-861-2474, e-mail: hoshino-m@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

本グループでは、社会の動きに応じた各種鉱物資源のクリティカル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、鉱床から削り取られた砕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。2022年度は栃木県足尾鉱山を流域に持つ河川での試料採取を行い（図 1）、本手法の銅鉱床への適用可能性を進めている。



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社会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ため、近年世界中で需要が増大している資源である。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、火成岩体ごとの鉱床形成ポテンシャルを広域的に可視化し、鉱床の賦存可能性を評価するための指針導出を目指して研究を行っている。具体的な研究手法としては、銅鉱床の形成に適する磁鉄鉱系花崗岩の分布地域を対象として、鉱床を形成した火成岩や不毛な火成岩を収集し、造岩鉱物を対象とした高精度な局所元素分析と解析を行う。得られた結果から、マグマが結晶化して岩石になる際に放出された銅量を算出し、比較を行うことで、鉱床形成ポテンシャルの高い火成岩体を選別出来る可能性がある。現在は、試料採取のために、山陰地方や北上山地における地質調査と分析準備を行っている。

###### (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 2）。

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。このほか、取得した反射スペクトルをスペクトルデータベースとしても整備している。

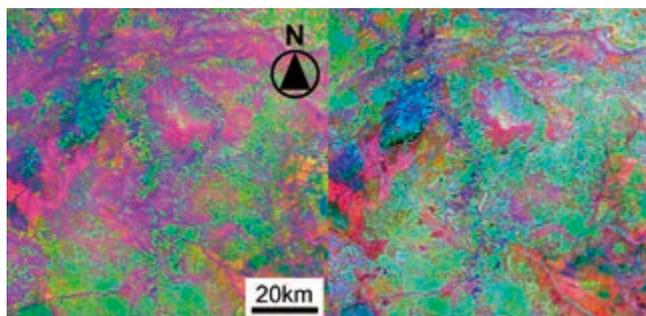


図2 Landsat-8バンド比カラー合成画像（左：元画像、右：植生の影響を軽減した画像）

## 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3）。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なく、ガラス、金属や植物等、あらゆる種類の固体試料に対して可能であり、工業製品評価の為の分析も行っている。現在は、数マイクロメートルへの微細集光フェムト秒レーザーアブレーションによる、高空間分解能元素・同位体イメージング法の開発を進めている。



図3 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）と希土類元素鉱石中のルテチウム分布（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。中でも、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）を昨年度に導入し（図4）、分析のルーチン化や、IC-FCを用いた

共同研究を推進してきた。ブリティッシュコロンビア地質調査所等との共同研究では、炭酸塩に胚胎するレアアース鉱床を対象に、炭酸塩のマグネシウム同位体比組成から鉱床の成因を明らかにした（Araoka et al., 2022）。また、秋田大学やJAMSTECと科研費等を通じた共同研究を実施するなど、地球科学における幅広い分野で複数の共同研究を展開し、成果を挙げている（Hossain et al., 2022など）。



図4 自動元素分離装置（IC-FC）

### (3) 選鉱技術の高精度・高効率化に関する研究

難処理鉱石や未利用資源の選鉱技術開発を目的として、従来の選鉱技術の高精度に関する研究に取り組んでいる。未利用資源である低品位風化花崗岩（青サバ、マサ土）からの石英成分の分離回収プロセスの検討として、風化花崗岩中に含まれる鉱石鉱物の物性の差を利用して、不純分だけを選択的に粉砕する条件を調査している。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）。この解析技術を用いれば、例えば銅鉱石の評価として、副産物となり得る銀や不純物であるヒ素がどの鉱物に含まれていて、鉱石中の銅鉱物とどのような関係にあるかを明らかで、分離プロセスを決める指針となり得る。

さらに、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5）。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 and Kon, 2021; Tsunazawa et al., 2021など）。

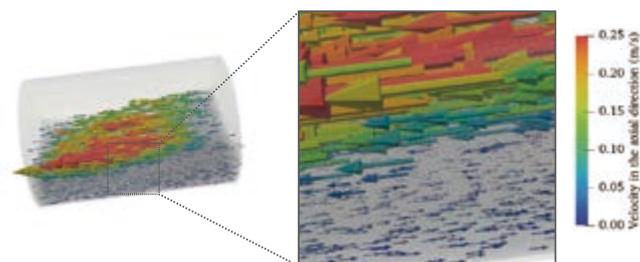


図5 混合装置内部の粒子速度分布の可視化例

#### (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、アパタイト鉱石に着目し、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（黒鉛鉱床や別子型鉱床など）、熱水性鉱脈型鉱床、スカルン鉱床に分類される。銅、鉛・亜鉛鉱床の総数は、大規模なものであれば数百程度であるが、小規模なものも含めると数千に登ると推定される。過去には、「日本鉱産誌」、「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壤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（上級主任研究員）  
 昆 慶明（主任研究員）  
 荒岡大輔（主任研究員）  
 綱澤有輝（研究員）  
 左部翔大（研究員）  
 生田目千鶴（テクニカルスタッフ）

徳本明子（テクニカルスタッフ）  
 杉山貴子（テクニカルスタッフ）  
 宮腰久美子（テクニカルスタッフ）  
 阿川友紀子（テクニカルスタッフ）  
 佐野綾子（テクニカルスタッフ）

### 4. 最近の主な研究成果（2020年以降）

- Araoka, D. (2020) Radiocarbon and U/Th dating of tsunami-and storm-transported coarse clasts, In: Engel M., Pilarczyk, J., May S. M., Brill D. and Garrett E., (Eds.), Geological records of tsunamis and other extreme waves. Elsevier, 687-703, doi:10.1016/B978-0-12-815686-5.00031-6
- Araoka, D., Simandl, G.J., Paradis, S., Yoshimura, T., Hoshino, M. and Kon, Y. 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, (2022), Journal of Geochemical Exploration, vol. 240, 107045 (15pp), <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107045>
- 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
- Hoshino, M., Zhang, M., Suzuki, M., Tsukimura, K., and Ohta, M. (2020) Characterization of Pb-Bearing Minerals in Polluted Soils from Closed Mine Sites. Water, Air, & Soil Pollution, 231, doi: 10.1007/s11270-020-04548-4.
- Ichimura, K., Sanematsu, K., Kon, Y., Takagi, T., and Murakami, T. (2020) REE redistributions during granite weathering: Implications for Ce anomaly as a proxy for paleoredox states. American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials, 105, 848-859.
- 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
- Kaavera, J., Imai, A., Yonezu, K., Tindell, T., Sanematsu, K., and Watanabe, K. (2020) Controls on the disseminated Ni-Cu-PGE sulfide mineralization at the Tubane section, northern Molopo Farms Complex, Botswana: Implications for the formation of conduit style magmatic sulfide ores. *Ore Geology Reviews*, 126, 103731.
- Kon, Y., Yokoyama, T.D., Ohata, M. (2020) Analytical Efficacy of a Gas Mixer and Stabilizer for Laser Ablation ICP Mass Spectrometry. *ACS Omega* 5, 28073–28079.
- 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.
- Kurihara, Y., Takahata, N., Yokoyama, T.D., Miura, H., Kon, Y., Takagi, T., Higaki, S., Yamaguchi, N., Sano, Y., Takahashi, Y. (2020) Isotopic ratios of uranium and caesium in spherical radioactive caesium-bearing microparticles derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Scientific Reports*, 10, 3281.
- Mukai, H., Kon, Y., Sanematsu, K., Takahashi, Y., and Ito, M. (2020) Microscopic analyses of weathered granite in ion-adsorption rare earth deposit of Ji-anxi Province, China. *Scientific Reports*, 10, doi: 10.1038/s41598-020-76981-8.
- Qin, H.-B. Yang, S., Tanaka, M., Sanematsu, K., Arcilla, C., and Takahashi, Y. (2020) Chemical speciation of scandium and yttrium in laterites: New insights into the control of their partitioning behaviors. *Chemical Geology*, 552, 119771.
- Rivai, T. A., Syafrizal, Yonezu, K., Tindell, T., Boyce, A. J., Sanematsu, K., Satori, S., and Watanabe, K. (2020) The Dairi SEDEX Zn + Pb + Ag deposit (North Sumatra, Indonesia): Insights from mineralogy and sulfur isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 122, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103510.
- 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
- Takaya, Y, Xiao, Y, Tsunazawa, Y, Cordova, M, and Tokoro, C. Mechanochemical degradation treatment of TBBPA: A kinetic approach for predicting the degradation rate constant, *Adv. Powder Technol.* vol. 33, 103469.
- Tokoro, C., Ishii, Y., Tsunazawa, Y., Jiang, X., Okuyama, K, Iwamoto, Y., and Sekine, Y. (2020) Optimum design of agitator geometry for a dry stirred media mill by the discrete element method, *Adv. Powder Technol.*, vol.32 p.850-859.
- Tokoro, C., Nishi, M., and Tsunazawa, Y. (2020) Selective grinding of glass to remove resin for silicon-based photovoltaic panel recycling, *Adv. Powder Technol.*, vol.32 p.841-849.
- 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.
- 綱澤有輝, 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.
- Tupaz, C. A. J., Watanabe, Y., Sanematsu, K., Echigo, T., Arcilla, C., and Ferrer, C. (2020) Mineralogy and geochemistry of the Berong Ni-Co laterite deposit, Palawan, Philippines. *Ore Geology Reviews*, 125, 103686.
- 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., Wakaki, S., Ishikawa, T., Gamo, T., Araoka, D., Ohkouchi, N., and Kawahata, H. (2020) A systematic assessment of stable Sr isotopic compositions of vent fluids in arc/backarc hydrothermal systems: effects of host rock type, phase separation, and overlying sediment, *Frontiers in Earth Science*, 9, 591711, doi: 10.3389/feart.2020.591711
- Zakir Hossain, H. M., Kamei, A., and Araoka, D. Geochemical characteristics of shoreline sediments from the Bay of Bengal, Bangladesh: Implications for provenance and source-rock weathering, (2022), *Geological Journal*, vol. 57, p. 3431-3446, https://doi.org/10.1002/gj.4484

# 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：中嶋 健

Leader, Fuel Resource Geology Research Group:

Takeshi Nakajima

e-mail: takeshi.nakajima@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, 地圏化学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, 研究資源

#### 2.1. 構成メンバー (令和4年度)

##### 研究グループ長

中嶋 健 堆積学, 海洋地質学, 燃料地質学

##### 研究スタッフ

佐藤 幹夫 海洋地質学, 燃料地質学

後藤 秀作 地球熱学

高橋 幸士 石炭地質学, 有機地球化学

朝比奈 健太 有機化学, 有機地球化学

風呂田 郷史 有機地球化学, 堆積学

##### 産総研特別研究員 PD

青木 伸輔 土壌物理学, 海洋化学

##### テクニカルスタッフ

鈴木 祐一郎

棚橋 学

中根 由美子

仁道 純子

小林 みゆき

##### 派遣職員

深谷 千恵

石塚 寿恵

##### 産学官制度来所者

高野 修

#### 2.2. 主な研究資金 (令和3~4年度)

##### ・運営費交付金

「燃料資源地質の研究」

「CO<sub>2</sub>回収・利用に向けた有機/無機複合吸着材の開発」

「炭質物を利用した効率的な岩石被熱温度推定法の確立」

「EM アルゴリズムを用いた岩石被熱温度推定の完全自動化」

「官能基の定量分析法開発で導く微生物メタン生成機構の解明」

「微生物代謝活性センサデバイス開発に向けた調査研究 (TIA かけはし)」

「地下生命圏との以心“電”心~リアルタイム観測で捉える地下生命圏の代謝活性~」

##### ・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」

「アミノ酸の窒素同位体比分析で解明する陸源有機物供給の沿岸生態系への重要性」

「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」 (分担)

「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」 (分担)

##### ・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

・表層型メタンハイドレート賦存域の海底の現場状況及び海底環境の把握を目的に, 物理探査研究グループと協力

して上越沖海域において高分解能海底画像マッピング調査を実施した。また同海域で引き続いて行われた海域環境調査（環境創生研究部門，地質情報研究部門，及び当部門地圏微生物研究グループが実施）での潜航調査に必要なデータを提供した。（佐藤・青木）

- ・表層型メタンハイドレート賦存域の海底の現場状況の把握等を目的に，酒田沖海域及び上越沖海域において海底状況の長期モニタリング調査を実施するとともに，同海域において，エネルギープロセス研究部門，環境創生研究部門，地質情報研究部門と協力して海域環境調査を実施した。（後藤・青木）
- ・表層型メタンハイドレート賦存域の海底状況の把握を目的に，エネルギープロセス研究部門，環境創生研究部門，地質情報研究部門及び当部門地圏微生物研究グループと協力して，酒田沖海域及び上越沖海域において海底地盤強度調査及び採取したコアを用いた海底下環境解析を実施した [図 1]。（佐藤・青木・朝比奈・風呂田）。

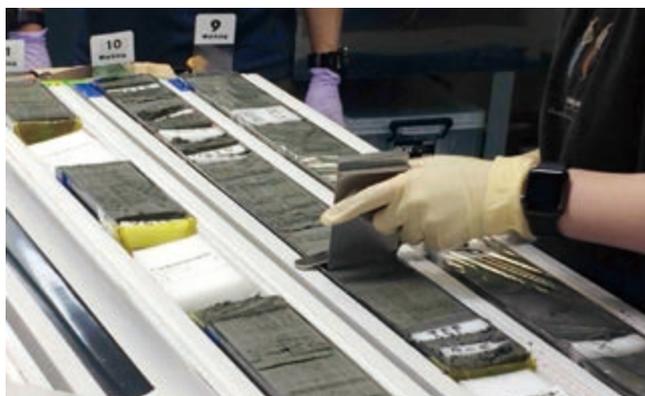


図 1 海底地盤強度調査で採取された地質試料

- ・堆積物中における微生物活動のセンシング技術の開発を目的に，メタン生成菌の培養実験と代謝活性のモニタリングを開始した。また，センサで利用する修飾電極開発に向けた有益な有機化合物の探索を開始した（風呂田）
- ・炭質物の顕微ラマンデータに基づき，迅速かつ的確な岩石の被熱温度推定法開発を進め，一部の成果を国際誌上で公表した。（高橋）

### 3.2. その他の非在来型資源に関わる鉱床成因，資源評価等に関する研究

- ・昨年開発したメトキシ基の定量分析法を用いて石炭および堆積物中のメトキシ基の定量分析を実施した。それを参考に，メトキシ基を含む有機物の堆積プロセスや石炭を基質とした微生物代謝に関する知見を深めている。今後の成果次第では，基質ポテンシャルの高いメトキシ基の保存形態が解明できる可能性がある（風呂田）

### 3.3. 在来型資源の鉱床成因等に関する地質学的研究

- ・北陸地方の油・ガス構造の形成に関わるテクトニクスについて，海域震探データのコンパイルを行い，論説 1 編

を公表した。（中嶋）

- ・新生代石炭からの石油排出温度や新生代地質体の最大埋没深度を推定するため，水素分に富む新生代石炭中のピトリナイト抑圧現象に対応した反応速度論の構築と，反射率の温度換算法に関する実験的研究を進めた。（高橋）
- ・希土類元素に富む石炭の形成機構を解明するため，石炭組織（マセラル）レベルの微量元素分布データを取得した。（高橋）
- ・熟成に伴う石炭の化学構造変化に着目し，主に国内の新生代石炭の石油生成タイミングやオイル指向性の評価を進めた。（高橋）
- ・新生代石炭の石炭組織の組成比を検討し，石油生成能力の高い石炭が形成される環境を解明するための基礎研究を進めた。（高橋）
- ・国内を代表する中新世石油根源岩の形成機構を解明するため，秋田堆積盆の堆積岩試料の有機化学分析と地質学的考察を基に，堆積環境を復元し，国際誌で公表した [図 2]（朝比奈・中嶋・高橋）。

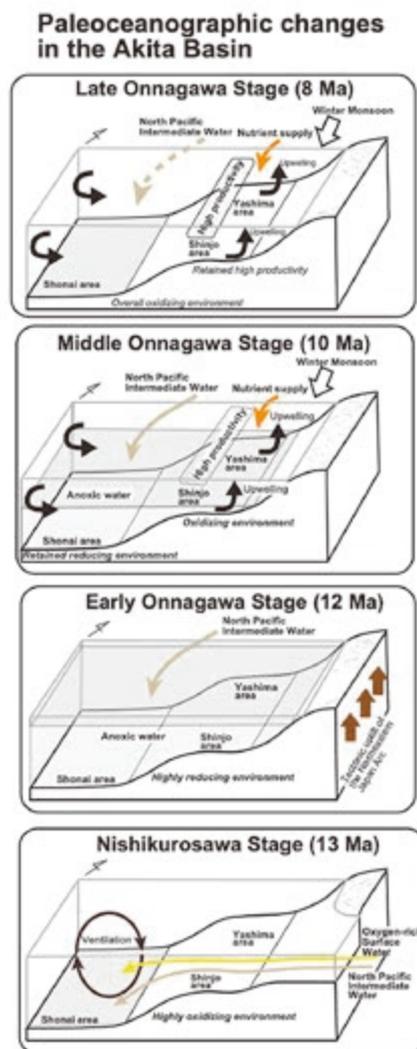


図 2 秋田堆積盆の女川層堆積時の古環境変遷

- ・熱熟成がナフタレン組成を用いた原油の起源有機物の推定指標に与える影響を検証し，国際誌で公表した [図 3]（朝比奈・高橋・中嶋・鈴木）。

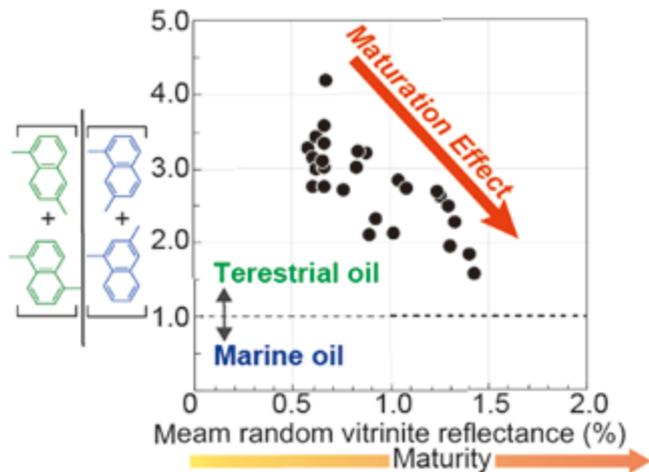


図3 ナフタレン組成を用いた原油の起源有機物の推定指標と熟成の関係

- ・これまでの研究成果を取りまとめ、陸域から深海への有機物供給プロセスに関する知見をレビューし、国内学会で講演を行った（風呂田）

### 3.4. 共同研究

- ・国内堆積盆の調査および巡検を実施した。そのうち、東北日本の珪質岩の石油根源岩能力評価に関する成果をまとめ、論文発表と国内外の学会で講演を行った（中嶋・高橋・朝比奈・風呂田）。
- ・国内探鉱地域の調査を実施し、砂岩鉱物組成および粒度組成の検討を行った。（中嶋・風呂田・朝比奈）

### 3.5. 地球環境に関する基礎的調査研究

- ・低温熱水が湧出する薩摩硫黄島の長浜湾において、熱水の湧出速度と温度変化の長期モニタリングを実施した結果を国際学術誌 1 編で公表した。（後藤）
- ・干潟環境生物のアミノ酸安定窒素同位体比 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) を測定し食物網解析を実施した。現在、国際誌上での発表に向けて成果のとりまとめを行っている。（風呂田）
- ・都市部の流出水に含まれる新規有害物質の毒性試験を行うために、試験物質を合成した。毒性試験の結果は、国際誌（共著）で公表した。（朝比奈）
- ・名古屋大学、山口大学、東北大学、北海道大学との共同研究において、大量絶滅期の貧酸素海洋と一次生物生産の変化の関係性を明らかにするために、化石クロロフィルの分析条件を検討した。まず分析条件の最適化を目的として、本研究は、堆積物粉末の必要量、クロム酸酸化の反応温度及び時間を検討した。さらに我々は、全クロ

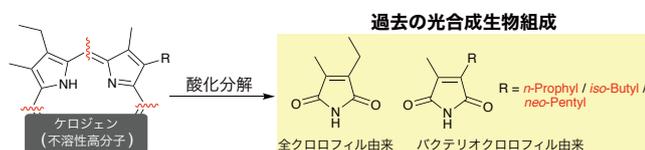


図4 堆積岩中のクロロフィル由来物質の分析に基づく過去の光合成生物組成の評価法

ロフィルに対するバクテリオクロロフィルの比を古海洋表層の酸化還元指標として、国際誌で提案した [図4]. (朝比奈)

## 4. 主要な研究成果（2021年以降）

[誌上発表]

Furota, S., Sawada, K., Kawakami, G. (2021), Depositional processes of plant fragment-concentrated sandstones in turbiditic sequences recorded by plant biomarkers (Miocene Kawabata Formation, Japan). *Int. Jour. Coal. Geol.*, **233**, 103643.

Takano, T., Oba, Y., Furota, S., Naraoka, H., Ogawa, N., Blattmann, T., Ohkouchi, N. (2021) Analytical development of seamless procedures on cation-exchange chromatography and ion-pair chromatography with high-precision mass spectrometry for short-chain peptides, *Int. Jour. Mass Spectrometry*, **463**, 116529.

中嶋 健・吉川幸佑・興津 修 (2021) 富山トラフと周辺日本海の地質構造と堆積盆形成テクトニクス. *地質学雑誌*. **127**, 165-188.

Kiyokawa, S., Kuratomi, T., Hoshino, T., Goto, S., Ikehara, M. (2021) Hydrothermal formation of iron-oxyhydroxide chimney mounds in a shallow semi-enclosed bay at Satsuma Iwo-Jima Island, Kagoshima, Japan. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **133**, 1890-1908.

Hiki, K., Asahina, K., Kato, K., Yamagishi, T., Omagari, R., Iwasaki, Y., Watanabe, H., Yamamoto, H. (2021) Acute toxicity of a tire-rubber derived chemical, 6PPD quinone, to freshwater fish and crustacean species. *Environmental Sci. & Technol. Lett.*, **8**, 779-784.

Asahina, K., Takahashi, U. K., Suzuki, Y., Nakajima, T., Kobayashi, M. (2021) Naphthalene Indicator Use to Evaluate the Source Organic Type of Crude Oil, *Chem. Lett.*, **50**, 1718-1721.

Asahina, K., Nakajima, T., Takahashi, U. K., Kobayashi, M., Hanamura, Y. (2022) Spatio-temporal changes in the depositional environment of Miocene organic rich mudstones in the Akita Basin deduced from biomarker analysis. *Geochem. Jour.*, **56**, 1-15.

Nakamura, Y., Takahashi, U.K., Hosoi, J., 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.

Asada, M., Satoh, M., Tanahashi, M., Yokota, T., 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. *Mar. Geophys. Res.*, **43**, 34.

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*, **14**(13), 1995.

Glen Tritch Snyder, Andrey Yatsuk, Naoto Takahata, Renat Shakirov, Hitoshi Tomaru, Kentaro Tanaka, Anatoly Obzhirov, 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. *Front. Earth Sci.*, **10**: 825679.

Asahina, K., Takahashi, S., Saito, R., Kaiho, K., Oba, Y. (2022) Maleimide index: a paleo-redox index based on fragmented fossil-chlorophylls obtained by chromic acid oxidation, *RSC Adv.*, **12**, 31061-31067.

#### [受賞]

風呂田郷史 日本有機地球化学会 2021年度 研究奨励賞 (田口賞)

研究題目：各種クロマトグラフィーの改良と堆積学・生物地球化学研究への応用。

中嶋 健 日本地質学会論文賞 2021年度

対象論文：中嶋 健 (2018) 日本海拡大以来の日本列島の堆積盆テクトニクス. *地質学雑誌*, **124**, 693-722.

高橋幸士 日本有機地球化学会 2022年度 研究奨励賞 (田口賞)

研究題目：堆積岩有機物の熟成と天然ガスに関する研究

## 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：吉岡 秀佳

Leader, Geomicrobiology Research Group:

Hideyoshi Yoshioka

Phone 029-861-3810, e-mail: hi-yoshioka@aist.go.jp

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

#### 1. グループの研究目的

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

#### 2. グループの研究資源（令和4年度）

##### 2.1. グループ員

###### 研究スタッフ

吉岡秀佳（リーダー）、片山泰樹、金子雅紀、須田好、眞弓大介、宮嶋佑典、持丸華子

###### 招聘研究員

坂田将

###### テクニカルスタッフ

石川理美、岩波理恵子、勝村寛子、篠塚由美、宅間真弓、竹之内美佐、野澤富美江、星裕貴子、山岡早苗、山本慶輔

##### 2.2. 予算

産業技術総合研究所運営費交付金

科研費、経済産業省の受託研究費、民間企業との共同研究費等

#### 3. 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。燃料資源地質・地圏化学研究グループ、生物プロセス研究部門、環境創生研究部門、石油天然ガス・金属鉱物資源機構、JX石油開発(株)、三菱ガス化学(株)、石油資源開発(株)、日本製鉄株式会社、日鉄ケミカル&マテリアル株式会社、北海道科学技術総合振興センター、量子科学技術研究開発機構等と連携し、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る。

#### 4. 令和3年度後期～4年度前期の研究進捗状況

##### 4.1. 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資源量の評価や探鉱に貢献する。微生物の生育に強く影響する環境因子として温度に着目し、温度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（7属8種）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（図1）。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温度特性を調べたところ、メタン生成の限

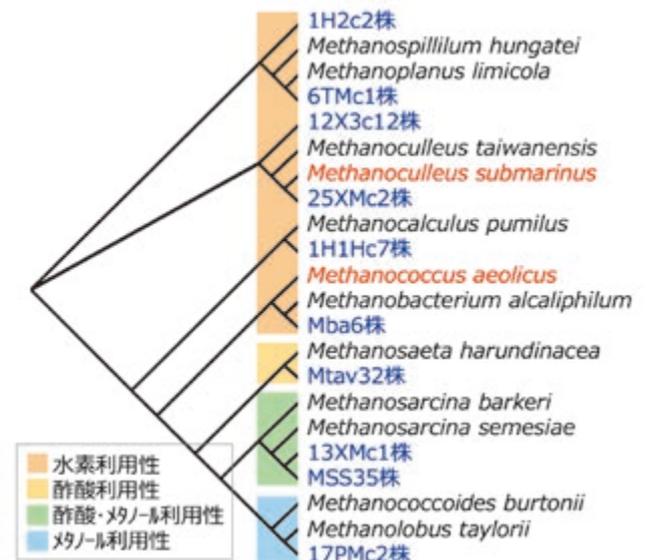


図1 培養されたメタン生成菌の系統分布と基質（エサ）の利用性。MH分布域海底堆積物から培養された既知のメタン生成菌を赤字、本研究にて培養されたメタン生成菌を青字、それ以外を黒字で示した。系統樹上の色分けは、各菌株の基質利用性を示す。これまでMH分布域堆積物から培養されたメタン生成菌は水素からメタンを生成する2種のみであったが、それらとは系統的に異なり、水素以外に酢酸やメタノールを利用するメタン生成菌が生息することを新たに発見した。

界温度は45℃と認定された。この限界温度は、モデル培養株ではなく、堆積物試料から直接メタン生成速度を評価した報告と整合しており、中温付近でのメタン生成の大幅な減少は、微生物自体の生育温度に規定されることが明らかとなった。本研究は、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。

#### 4.2. 地圏微生物の基礎的研究

蛇紋岩に伴う主要なメタンは非生物起源であると提唱されているが、メタン生成における炭素源の起源や深度・温度については未だ不明な点が多い。そこで本研究では、八方尾根の蛇紋岩体に位置する白馬八方温泉試料の放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 濃度、メタンの安定同位体比 ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) およびクランプ同位体存在度 ( $\Delta^{13}\text{CH}_3\text{D}$ )、希ガス同位体組成を測定し、メタンの起源制約を行った。メタンが $^{14}\text{C}$ に枯渇していることと、 $\Delta^{13}\text{CH}_3\text{D}$ 値から推定される高い生成温度 (200℃以上) に相当) は、メタン生成が天水の循環する深度よりも深い場所で起きたことを示した。高いヘリウム同位体比はマントルからの揮発性成分の供給を示唆したが、メタンの炭素同位体比が典型的なマントル炭素の値よりも著しく低かったため、マントル起源  $\text{CO}_2$  はメタン生成には関与していないものと考えられた。複数の地球化学的観測結果を総合的に考察することで、(1) 地下の高温環境 (200℃以上) で生じる蛇紋岩化反応に伴って $\delta^{13}\text{C}$ 値の低い炭素源からメタンが生成し、(2) その後メタンは浅部の天水循環システムに取り込まれた、と結論づけた。

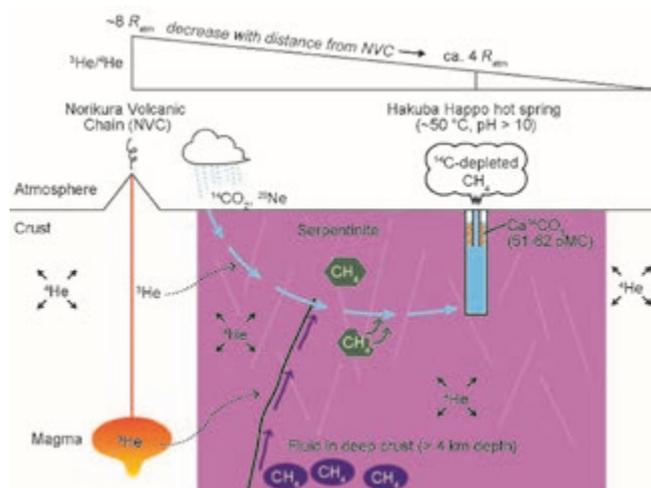


図2 白馬八方温泉システムの概念図。メタンは深部の蛇紋岩化反応に伴って生成され、断層や亀裂系を通じて天水循環系に運ばれるかまたは流体包有物によって地表にもたらされる (Suda et al., 2022の図を一部改編)

#### 5. 令和3年後半～令和4年度前半の研究成果 (主なもの、下線部がグループ員)

##### 【発表 (論文, 著書)】

Katayama T., Yoshioka H., Kaneko M., Amo M., Fujii T., Takahashi H. A., Yoshida S., Sakata S. (2022) Cultivation and biogeochemical analyses reveal

insights into methanogenesis in deep subsurface sediment at a biogenic gas hydrate site. *The ISME Journal*, <https://doi.org/10.1038/s41396-021-01175-7>. 産総研プレス発表 (2022年2月2日)

Kato S., Ogasawara A., Itoh T., Sakai H.D., Shimizu M., Yuki M., Kaneko M., Takashina T., Ohkuma M. (2022) *Nanobdella aerobiophila* gen. nov. sp. nov., a thermoacidophilic, obligate ectosymbiotic archaeon, and proposal of *Nanobdellaceae* fam. nov., *Annabelle's* ord. nov., and *Nanobdellia* class. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 10.1099/ijsem.0.005489.

Miyajima Y., Jenkins R.G. (2022) Chapter 2. Biomarkers in Ancient Hydrocarbon Seep Carbonates. In Kaim, A., Cochran, J.K., and Landman, N.H. (eds.). *Ancient Hydrocarbon Seeps. Topics in Geobiology* vol. 50, Springer, Cham, Switzerland, 47-77.

Suda K., Aze T., Miyairi, Y., Yokoyama Y., Matsui Y., Ueda H., Saito T., Sato T., Sawaki Y., Nakai R., Tamaki H., Takahashi H., Morikawa N., Ono S. (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*, vol.585, 117510.

##### 【受賞】

宮嶋 佑典 2022年度有機地球化学会研究奨励賞 (田口賞)  
受賞題目「メタン冷湧水成の炭酸塩岩に着目した堆積学的・有機地球化学的研究」

吉岡 秀佳 2022年度有機地球化学会賞 (学術賞)  
受賞題目「地下圏微生物によるメタン生成ポテンシャル、メカニズム、および根源有機物に関する研究」

## 地圏化学研究グループの紹介

Introduction of the Resource Geochemistry Research Group

研究グループ長：保高徹生

Leader, Resource Geochemistry 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」、「土壌汚染等に関する標準化研究」に加えて、新たな領域融合ラボとして「新型コロナウイルス感染リスク計測評価研究ラボ」を設立し、社会課題解決に向けた研究に取り組んでいる。

研究テーマは以下に示す5つである。

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

### 2. 研究活動の概要

#### (1) 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

地熱発電可能資源量の推計法を構築するために、地熱貯留層の有無と関連が深いと経験的に考えられている地表兆候の「熱水変質」と「温泉」を変数として着目し、これら地表兆候について現地調査を事例的に行うことにより、推計結果に対するこれらの寄与を検討した。

また、地熱利用技術導入による地域経済効果の影響評価において、地化学データを用いて地熱ポテンシャルや地熱スケール対策の影響を検討した。

#### (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

元素循環や環境浄化技術への利用を目的として、非金属鉱物材料が持つイオン吸着能に着目し、材料の開発と元素

の吸着性能の評価を行った。特に、リン酸イオンに対して吸着性を示す $\beta$ -FeOOH型鉱物材料の合成方法の改良を図り、加熱を行わずに室温合成で低結晶性の吸着材が得られる方法を確立した。

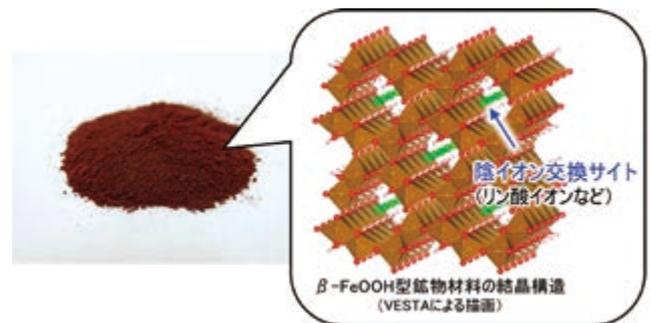


図1 室温合成した $\beta$ -FeOOH型鉱物材料

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、二酸化炭素や水蒸気などのガス吸着能を持った非金属鉱物材料の合成やシステム設計を試行した。特に、二酸化炭素の回収では有機/無機複合吸着材の開発を行い、CO<sub>2</sub>に対して選択性が高い化学吸着性を示すアミン系有機分子を鉱物材料に担持してCO<sub>2</sub>の吸着性能を評価し、鉱物材料の種類とアミンの担持方法の最適化を図った。

放射性廃棄物処分場にて遮蔽材として使用予定のペ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。



図2 メチレンブルー吸着量の測定方法

#### (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 (Takada et al(2022), 産総研主な研究成果)。また、県外最終処分に関わる制度設計に関する整理 (粟谷・保高 (2022)) や中間貯蔵施設立地地域における過去の記憶と記録から浮かび上がる社会景観の整理を試みた。

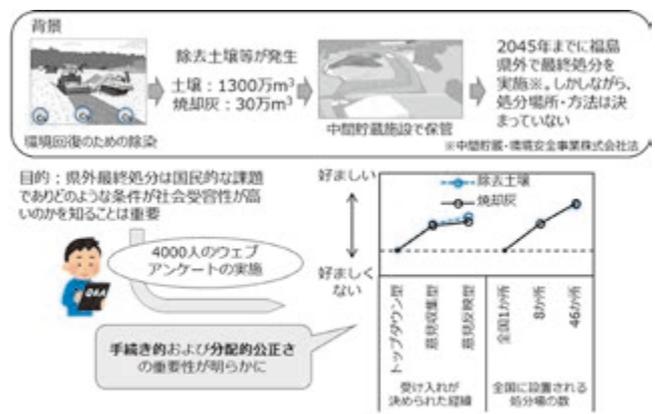


図3 除去土壌の最終処分に関わるアンケート調査概要

また、休廃止鉱山に関係する研究として、①経済産業省と連携して「休廃止鉱山の坑廃水が流入する河川における生態影響評価ガイドンス」および「休廃止鉱山における坑廃水の利水点等管理ガイドンス」の公開 (経済産業省 HP, 2022年4月)、②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、③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、④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。

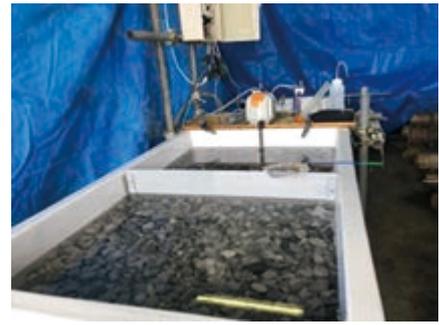


図4 マンガン酸化菌を用いたパッシブトリートメントプラント

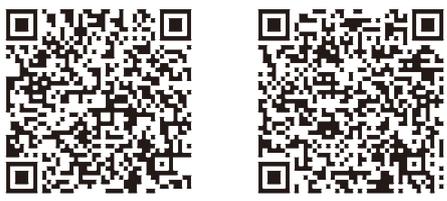


図5 休廃止鉱山における利水点管理ガイドンスおよび生態影響評価ガイドンスのQRコード

(4) 土壌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た。JIS原案作成委員会および分科会を開催し、JIS原案を提出した。

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、吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化検討委員会としての試験法素案を構築するとともに、報告書の取りまとめを推進した。また、JIS原案作成公募に応募した。



図6 上向流カラム通水試験方法

(5) 新型コロナウイルス感染リスク計測評価研究

新型コロナウイルスへの対応として、安全な空間の確保やイベント開催やに向けて、スタジアムのような大規模施設で開催されるマスコギャザリングイベントにおけるマスク着用率や音声解析を含めた感染リスク評価の研究を進めている。2021年12月には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、内閣官房コロナ室や経産省、J league等と産学官の連携した取り組みを続けている。直近では、イベントにおける声出し応援再開に向け、J leagueと連携して声出し応援のリスク評価を実施し、当該リスク評価に基づく、J leagueの声出しガイドンスの作成をすることで、声出し応援再開の道筋を整えた (結果的に6月から運営検証のための声出し応援が認められた)。

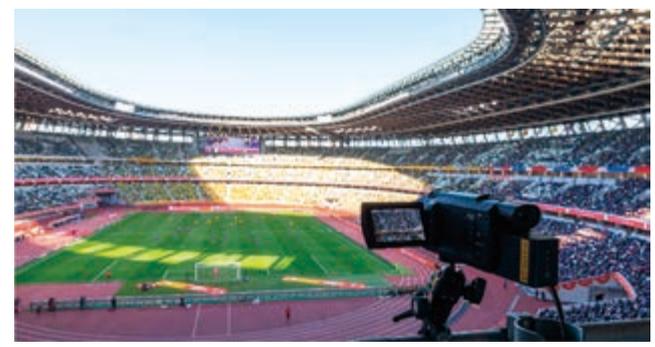


図7 国立競技場でのAIを用いたマスク着用率の測定風景

### 3. グループの研究体制

#### 1) 研究グループ員 (令和4年1月1日現在)

保高徹生	リスク評価
猪狩俊一郎	有機地球化学
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
柳澤教雄	鉱物学, 地球化学
鈴木正哉	鉱物学, 材料化学
Tum Sereyroith	特別研究員
坂原桜子	リサーチアシスタント
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
宮原英隆	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
石本帆乃	産学官制度来所者
出原渉	産学官制度来所者
江城静順	産学官制度来所者
寺田美咲	産学官制度来所者
小林聖弥	産学官制度来所者
小村悠人	産学官制度来所者
中野里彩	産学官制度来所者
金子信行	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
軽部京子	テクニカルスタッフ
金井裕美子	テクニカルスタッフ
藤田司	テクニカルスタッフ
片山寛子	テクニカルスタッフ
藤井和美	テクニカルスタッフ
鈴木寿一	テクニカルスタッフ
藤井新子	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
肝付宏実	派遣職員

#### 4. 最近の主な研究成果

##### 【査読付き論文】

粟谷しのぶ, 保高 徹生 (2022) 除去土壌の県外最終処分  
に係る制度設計とリスク学的考察, リスク学研究,

32(1) pp.5-10

Ghaznavi, C., Yoneoka, D., Kawashima, T., Eguchi, A., Murakami, M., Gilmour, S., ... Yasutaka, T. & Nomura, S. (2022). Factors associated with reversals of COVID-19 vaccination willingness: Results from two longitudinal, national surveys in Japan 2021-2022. *The Lancet Regional Health-Western Pacific*, 100540.

Nomura, S., Eguchi, A., Yoneoka, D., Murakami, M., Ghaznavi, C., Gilmour, S., ... Yasutaka, T. & Miyata, H. (2022). Characterising reasons for reversals of COVID-19 vaccination hesitancy among Japanese people: One-year follow-up survey. *The Lancet Regional Health-Western Pacific*, 100541.

Takada, M., Shirai, K., Murakami, M., Ohnuma, S., Nakatani, J., Yamada, K., ... & Yasutaka, T. (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*, 17(6), e0269702.

Takada, M., Yasutaka, T., Hayashi, S., Takagi, M., & Tagami, K. (2022). Aggregated transfer factor of 137Cs in edible wild plants and its time dependence after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident. *Scientific Reports*, 12(1), 1-11.

Murakami, M., Fujita, T., Li, P., Imoto, S., & Yasutaka, T. (2022). Development of a COVID-19 risk assessment model for participants at outdoor music festivals: evaluation of the validity and control measure effectiveness based on two actual events in Japan and Spain. *PeerJ*, 10, e13846.

Yasutaka, T., Murakami, M., Iwasaki, Y., Naito, W., Onishi, M., Fujita, T., & Imoto, S. (2022). Assessment of COVID-19 risk and prevention effectiveness among spectators of mass gathering events. *Microbial risk analysis*, 100215.

Tagami, K., Yasutaka, T., Takada, M., & Uchida, S. (2021). Aggregated transfer factor of 137Cs in wild edible mushrooms collected in 2016-2020 for long-term internal dose assessment use. *Journal of Environmental Radioactivity*, 237, 106664.

坂原桜子, 長野宇規, 保高徹生, 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, 2(1) pp.1-6,

西方美羽, 保高徹生, 森本和也, 井本由香利 (2021) 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17(2) pp.195-204

高畑 修, 原田拓也, 宮口新治, 桑原 充, 門間聖子,

保高徹生, 小峯秀雄 (2022), 道路盛土構造が有する酸性化抑制機能の評価, 土木学会論文集 C (地圏工学) 78 (2) pp.83-95

M Murakami, F Miura, M Kitajima, K Fujii, T Yasutaka, Y Iwasaki, K Ono, et al., (2021) Microbial risk analysis, 100162

T Kato, Lincoln W Gathuka, T Okada, A Takai, T Katsumi, Y Imoto, K Morimoto, M Nishikata, T Yasutaka (2021) Soils and Foundations, 61, 1112-1122,

Y Iwasaki, K Fukaya, S Fuchida, S Matsumoto, D Araoka, C Tokoro, T Yasutaka (2021) Science of The Total Environment 786, 147500

N Yanagisawa, Y Masuda, H Asanuma, K Osato, Koji Sakura (2021) Geothermics 96, 102149

加藤智大, 井本由香利, 保高徹生, 勝見 武 (2021) 地盤工学ジャーナル 2021年 16 巻 3 号 p. 209-220

#### 【受賞】

2021年度 日本粘土学会 論文賞受賞

三好陽子, 鈴木正哉, 宮腰久美子, 高木哲一 (2020). 粘土科学, 59, 2, 33-45.

2021年度 環境放射能除染学会 奨励賞 保高徹生

第10回 環境放射能除染研究発表会 優秀口頭発表賞 保高徹生, 高田モモ, 他 5 名

2021年度 産総研 理事長賞 保高徹生

2021年度 一般社団法人 人工知能学会 2021年度 現場イノベーション賞 保高徹生

2022年度 環境放射能除染学会 奨励賞 高田モモ

## 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/exploge/>

#### 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、CO<sub>2</sub>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。2022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)法など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、CO<sub>2</sub>モニタリングを前提とした重力探査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. クラスタリング制約を導入した弾性波—ミュオングラフィジョイントインバージョン解析手法の開発

弾性波探査や弾性波トモグラフィで推定される弾性波速度は、密度と弾性定数との複合パラメータであり、それらの物性値は不確実性を有している。これに対して、宇宙線ミュオンによって推定される密度情報を用いて密度と弾性定数とを分離し、不確実性を低減することが提案されている。宇宙線に含まれる素粒子ミュオンは、毎秒手のひらに一個程度の割合で地上に飛来しており、密度が高い物体ほど透過しにくいという性質を持つ。その性質を利用して、火山や遺跡等の巨大構造物内部の密度推定がこれまで行われている。弾性波とミュオンとを統合利用するにあたり、それぞれのデータを利用して逆解析を独立に実施し、最終的な解釈段階で統合するよりも、統合的に逆解析することで、逆解析結果における解釈のしやすさなどの向上が期待できる。

今回は「地下が複数の地質体の組み合わせから構成される」と仮定したFuzzy C-Means (FCM) クラスタリング制約の適用性検証のために、図1(左上, 左下)に示す地下モデルを用いた数値計算を試みた。その結果として、適切な地質体の候補を逆解析の事前情報として与えることで、事前情報を与えずに独立に逆解析を行った場合と比較して、密度・弾性波速度の推定結果がより整合的になることがわかった(図1右上)。この要因として、図1(右下)に示す散布図によると、FCM クラスタリング制約の影響で各セルの物性値がいずれかの地質体の物性値に引き寄せられていることが考えられる。実利用においては、地下を構成する地質体の候補の一部は坑井データ等から推定可能と思われるが、アノマリなどの偏在する地質体に関する情報がわからない場合もあると考えられる。地質体の事前情報が事実とは異なる場合や地質体に関する情報を与えない場合などについて検討を行う必要がある。

##### 2.2. 無人地上車両(UGV)を用いた電磁・電気探査調査技術の研究

地下インフラ整備に伴うモニタリング需要の増加や老朽化への対応、台風やゲリラ豪雨の多発に伴う災害対応調査など、都市域における地下の探査需要が高まっている。特に水道ネットワークの老朽化や堤防の健全性調査に対応するには、長距離をカバーできる、より効率的で低コストの調査

法が求められている。

無人地上車両 (UGV) は、空中を飛ぶ UAV 技術と同様に、近年急速に発達してきた技術であるが、この UGV に地下を探索できるセンサ類を搭載あるいは牽引することで、低コストで広域の調査が可能になる。物理探査研究グループでは、UGV に市販のマルチコイル電磁探査装置や産総研が開発した高周波交流電気探査装置を牽引させ (図 2)、高効率で低コストの探査が可能になる調査法や技術開発を行っており、特に水道ネットワークの老朽化や堤防の健全性調査等に応用する研究を行っている。UGV 牽引型高周波交流電気探査装置は、非破壊で深度10mレベルの土质地質調査にも適用できる可能性を持ち、都市域の土质地質調査法として今後の応用が期待できる。

### 2.3. コンクリート壁原位置計測のための核磁気共鳴表面スキャナー開発

コンクリート中の水分を現場で計測することへの社会的ニーズがある。たとえば、フレッシュコンクリートの硬化速度 (水分子が消費される反応速度) は外気温に敏感なので、寒冷地で打設したコンクリート中の水分の時間変化を現場で非破壊モニタリングすれば施工管理に貢献できる。あるいは、老朽化したコンクリート建造物中にできた空洞に水がたまると、鉄筋がさびたり凍結膨張で亀裂進展が起こしたりするリスクがあるので、原位置でコンクリート壁の表面をスキャンして空洞を検出することが望ましい。それらの用途に使える、原位置・非破壊・非侵襲計測ツールとして、図 3 に示す、プロトン磁気共鳴表面スキャナーを開発した。センサーユニットは片側開放型といわれる特殊なデ

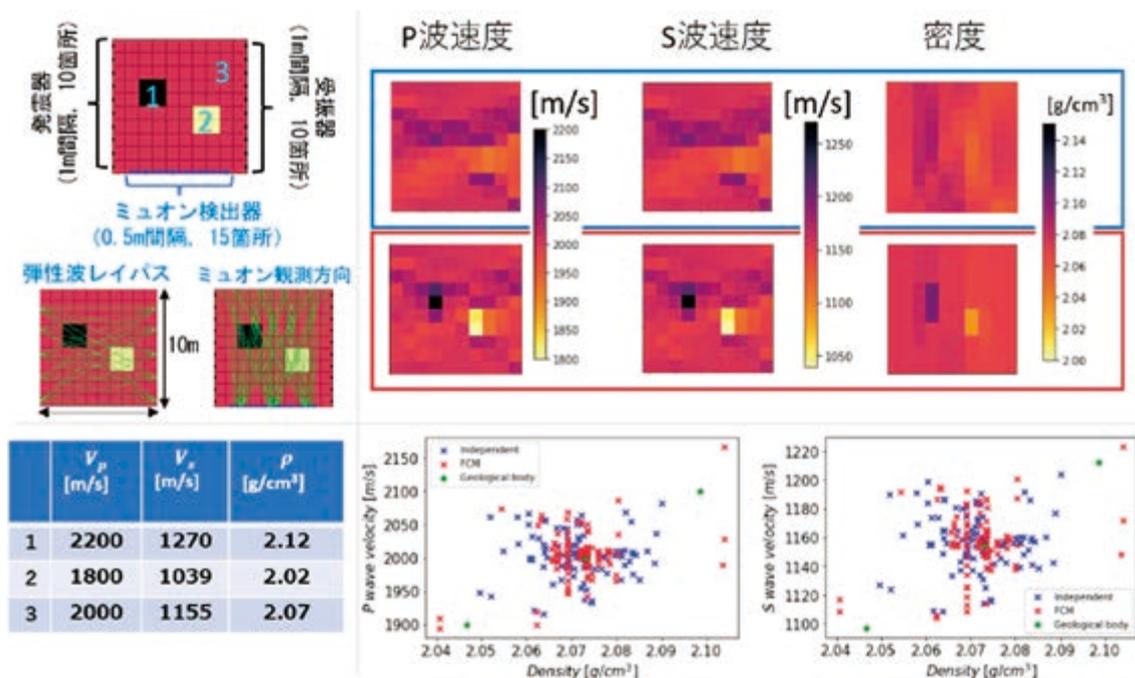


図 1 クラスタリング制約を用いた、ミュオグラフィ弾性波ジョイントインバージョン解析. 左上図：弾性波およびミュオグラフィ解析の地下モデル・観測ジオメトリ. 左下表：モデルの物性値. 右上図：逆解析結果 (上段青枠：FCM 制約なし, 下段赤枠：FCM 制約あり). 右下図：P 波速度・密度の散布図 (左), S 波速度・密度の散布図 (右) (独立に逆解析した場合の結果 (青), FCM を使用した場合の結果 (赤), FCM の際に用いた地質体の物性値 (緑))

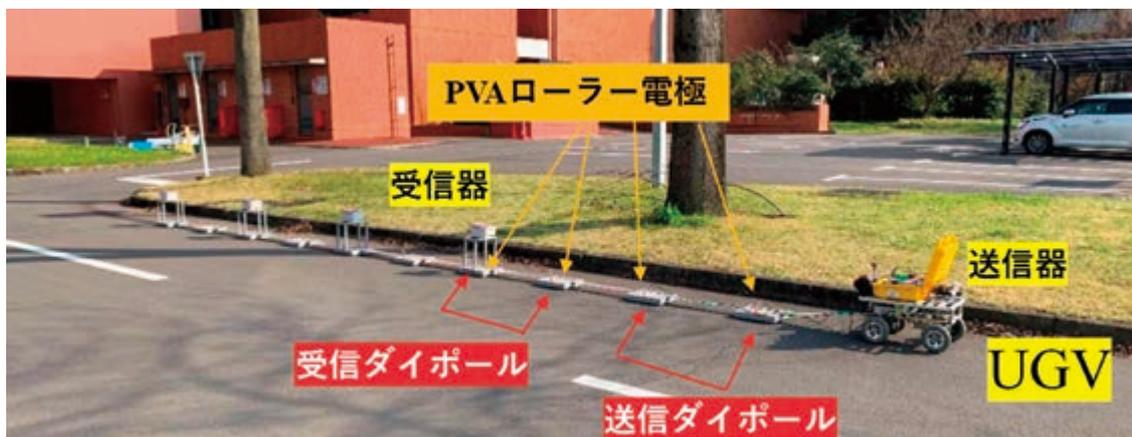


図 2 UGV 牽引型高周波交流電気探査装置：UGV (無人地上車両) により PVA (ポリビニルアルコール) ローラー電極および受信器を牽引し地下を非破壊で探査する。



図3 開発した磁気共鳴表面スキャナーの屋外試運転風景。

ザインの磁気回路と平面型の高周波コイルからなり（重量約4kg）、コンクリート壁に押し当てた場合、表面から2～14mmの深部区間にある水を検出できる。

既に室内実験での計測誤差の確認、屋外での環境ノイズ状況の確認などの基本的な性能確認は終了し、現在は屋外での計測に向けて準備中である。

### 3. グループの体制

#### 3.1. 人員体制（2022.10.1現在）

以下の13人体制で研究を実施している。

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

### 3.2. 研究予算

研究予算としては、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CO<sub>2</sub>貯留技術の研究開発に係る再委託（二酸化炭素地中貯留技術研究組合）等々。

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

Asada, M., Satoh, M., Tanahashi, M., Yokota, T., and Goto, S. (2022) Visualization of shallow subsea-floor 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.

<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 Geo-*

*physics*, **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 Noguch, 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.

Nakashima, Y. (2020) Development of a hand-held magnetic resonance sensor for the nondestructive quantification of fat and lean meat of fresh tuna. *Journal of Food Measurement and Characterization*, **14**, 2947-2955.

Nakashima, Y. and Nakano, T. (2020) Nondestructive quantification of heavy elements through the analysis of beam hardening artifacts using double-exposure X-ray computed tomography: A Theoretical Consideration. *Chemistry Africa*, **3**, 363-370.

Matsunaga, Y., Kanda, W., Takakura, S., Koyama, T., Saito, Z., Seki, K., Suzuki, A., Kishita, T., Kinoshita, Y., and Ogawa, Y. (2020) Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **390**, 106742.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106742>

# CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループの紹介

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

研究グループ長：徂徠 正夫

Leader, CO<sub>2</sub> 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

CO<sub>2</sub>地中貯留は、産総研第 5 期中期計画の「産業競争力の強化に向けて各領域で重点的に取り組む研究開発」に含まれる「産業利用に資する地圏の評価」ならびに令和 4 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、CO<sub>2</sub>地中貯留全般に資する研究開発を全面的に推進している。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 CO<sub>2</sub>地中貯留以外の分野においても必要な技術であり、地圏環境の利用と保全の観点から社会のニーズにあった研究を進めている。

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

安全かつ大規模・効率的な CO<sub>2</sub>地中貯留技術の実現に向け、我が国の貯留層に適した実用化規模（100万トン/年）での CO<sub>2</sub>地中貯留技術を開発するとともに、CCS の社会受容性の獲得を志向した研究開発を行うために、平成28年 4 月に、二酸化炭素地中貯留技術研究組合（令和 4 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 CO<sub>2</sub>の低コストでのモニタリング技術や、水理-力学連成解析技術、地化学反応速度測定技術など、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

CO<sub>2</sub>圧入サイトでは、漏洩可能性を早期に検知し対策を講じる必要があるが、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 CO<sub>2</sub>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、適用性を検証する。北海道苫小牧市における CCS 大規模実証試験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 CO<sub>2</sub>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、苫小牧サイトの圧入井・観測井を利用し、CO<sub>2</sub>圧入後の 2 年程度にわたる SP データを取得する。SP モニタリングでは、過去に産総研が米国・南西部炭素隔離地域パートナーシップの CO<sub>2</sub>地中貯留テストサイト Aneth および Farnsworth Unit において、陸域の鉛直井を用いた単独の貯留層への CO<sub>2</sub>圧入に伴う SP 変化を観測した例はあるが、沿岸域、複数深度の貯留層、傾斜井という条件下での観測事例はない。本課題では既存技術を利用しつつ沿岸域貯留特有の課題を抽出し、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、苫小牧サイトでの SP モニタリングのシステム設計・構築を行うとともに、現場での測定を開始した。4 坑の坑井近傍における電位の現状を確認するとともに、良好な並行観測が維持されている。一方、室内実験については、事前検討および予備実験の結果を受けて模擬実験のための実験装置を製作し、実験条件を検討するためのテスト測定を行った（図 1）。さらに、数値シミュレーションでは沿岸域地中貯留モデルの構築を行い、低比抵抗の海域・塩

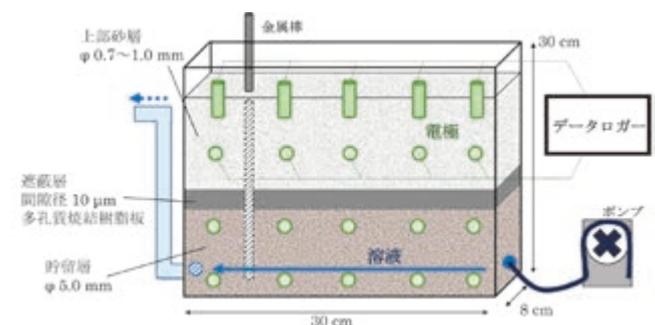


図 1 模擬実験装置概要図

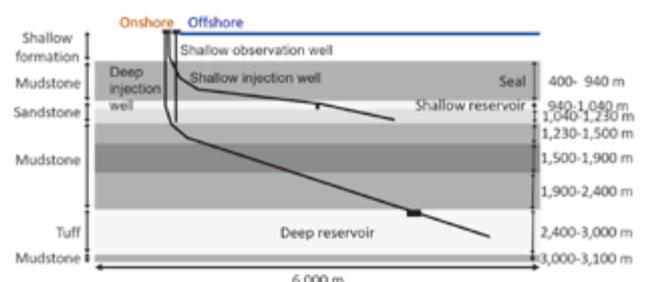


図 2 沿岸域地中貯留モデルの概念図

水層、および鉛直井・傾斜井のSPに対する影響を検討し、また主要パラメータとして貯留層比抵抗の影響検討を行った(図2)。これらの成果は、現場観測および室内実験のデータとの比較解析に向けて有益な情報となる。

## 2.2. 断層安定性ジオメカニクス解析

豪州 Perth 近傍のCO<sub>2</sub>圧入現場サイトの深部地層において、光ファイバー等による断層安定性監視実証試験が計画されている。本研究は、当該試験で取得される現場データを解析するためのジオメカニクスモデリングを検討し、断層安定性の監視・健全性評価を行うことを目的としている。

深度1000 mの地層へのCO<sub>2</sub>圧入に際して考慮すべき現象として、地表付近の浅部から孔底近傍の深部に至る地層の連続的変形が挙げられる。一方、圧入サイトには、浅層から深部貯留層までの広範囲にわたり幅200~300 mの断層が存在するが、圧入井は断層を直交するように掘削される予定である。このような条件下では、断層へのCO<sub>2</sub>の浸透により、断層のすべりの発生やそれに伴う微小地震(AE)が生じる可能性が予想される。

本年度は、現場サイトの地質情報やジオメカニクスに関連した断層の物性データに基づき、ジオメカニクスモデリングのための初期モデルを構築した。また、モデリングに必要な取得データの分析および整理を行い、ジオメカニクスモデルおよび基礎データ取得法の知見を習得した。併せて、モデリングに必要なデータを取得するため、室内実験の立ち上げを行うとともに、現場サイトに類似した砂岩を用いて一面せん断・透水実験を行い、実験データの取得および解析方法までの一連の流れを習得した。多少の試料アセンブリの改良が必要であったが、本実験システムを用いることで、先行研究と同様に、すべり速度に応じた摩擦係数と変位の関係の変化を把握可能であることが示された(図3)。

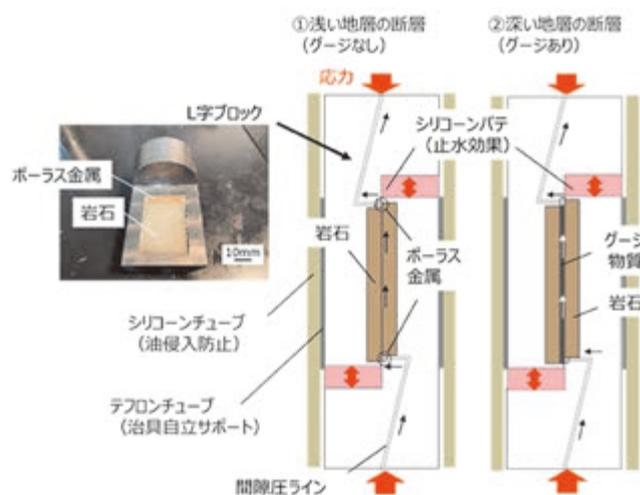


図3 試料アセンブリの概念図

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

高温貯留層にCO<sub>2</sub>を圧入して地熱発電を行うと同時に、

CO<sub>2</sub>の一部を地熱貯留層中で炭酸塩鉱物として固定することを意図した、JOGMEC 事業「カーボンリサイクルCO<sub>2</sub>地熱発電技術」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CO<sub>2</sub>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

地熱貯留層へのCO<sub>2</sub>圧入では、圧入点近傍で鉱物が溶解する一方、圧入点から離れるにしたがい溶出成分が二次鉱物として沈殿することで、貯留層の浸透率や毛管圧等の水理特性が時間的、空間的に変化していくことが予想される。この過程を再現し、地熱貯留層がCO<sub>2</sub>圧入に伴って反応する際の水理特性変化を定量的に評価することを目的として、文献調査等に基づいて、高温高圧下での流通試験に関するこれまでの知見を抽出するとともに、新たに高温超臨界CO<sub>2</sub>流通試験装置の設計と一部製作を行った(図4)。当該装置は、岩石コア試料に対して、高温高圧下で塩水および超臨界CO<sub>2</sub>、あるいは両者の混合水を流通させ、岩石中の鉱物の反応に伴う水理特性の変化を測定するものである。現在、その完成に向け、超臨界CO<sub>2</sub>の圧入機構の増設を進めているところである。

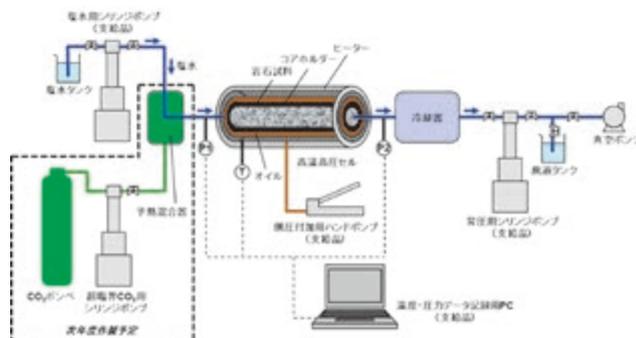


図4 高温超臨界CO<sub>2</sub>流通試験装置の模式図

### 3.2. 分子動力学計算による界面相互作用の解析

上述の課題に関連して、地熱貯留層におけるCO<sub>2</sub>の挙動は、濡れ性などCO<sub>2</sub>-地層水-鉱物系での界面物性、すなわち究極的には原子レベルでのミクロな界面相互作用に支配される。このような界面相互作用に関して、常温常圧下では原子レベルでの理解が進みつつあるが、高温高圧下では測定が困難なこともあり情報が限定されている。そこで、個々の原子挙動の解析を可能とする分子動力学(MD)シミュレーションを導入し、地熱条件下での界面相互作用に関するデータおよび知見の取得を試みた。本年度は、実験データが豊富に存在する水-粘土鉱物系を代表としてMD計算を実施することにより、界面構造および界面エネルギー解析手法について、妥当性の検証と最適化を図った(図5)。

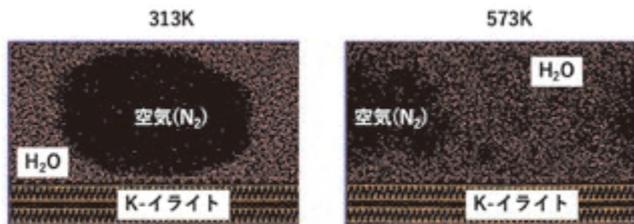


図5 空気-水-イライト界面系のスナップショット

### 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

一般的に高温泉の湧出口には炭酸塩鉱物が析出するが、温泉水へのCO<sub>2</sub>ガスの注入によりその発生が抑制されることが知られている。このような地熱システムのナチュラルアナログとみなすことのできる高温泉に注目し、天然下での炭酸塩鉱物の核形成、成長および溶解速度に関する知見を取得することを旨とする研究も開始した。本年度は、地熱貯留層のナチュラルアナログとしての要件を整理した上で、文献やデータベース、現地調査等に基づいて、研究サイトになり得る高温泉および炭酸塩鉱物脈の産出地域を抽出した。併せて、予備的な玄武岩コア試料を用いた現場流通反応試験を行い、炭酸塩鉱物の反応速度データを一部取得した。

### 4. その他の研究グループの活動

上述のプロジェクトに加えて、CO<sub>2</sub>地中貯留ならびに地熱関連での技術コンサルティングおよび民間共同研究等を実施している。また、内閣府次期戦略的イノベーション創造プログラム課題候補「海洋安全保障プラットフォームの構築」におけるサブ課題候補「玄武岩海山を利用した大規模CO<sub>2</sub>貯留・固定化技術」について、今年度実施される当該サブ課題候補に係るフェジビリティスタディに参画し、海洋玄武岩地層を利用した大規模CO<sub>2</sub>貯留・固定化に係る基礎調査研究の計画策定を所内外と連携しつつ進めている。

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。その一環として、今年度採択の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」でも、風化促進用岩石選定に資する苦鉄質岩データベースの構築、ならびにCO<sub>2</sub>の炭酸塩化速度および固定量の定量化技術開発の観点で中核的な役割を担っている。

### 5. グループの研究体制

CO<sub>2</sub>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  
西山直毅  
後藤宏樹  
堀川卓哉  
西 祐司（招聘研究員）  
志賀正茂（産総研特別研究員）  
西木悠人（リサーチアシスタント）  
上原真一（産学官制度来所者）  
池田 博（産学官制度来所者）

### 6. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/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, 石戸経士, 中尾信典（2020）遮蔽層の不均質性が深部互層系に圧入されたCO<sub>2</sub>長期挙動にもたらす影響に関する数値シミュレーション, *Journal of MMIJ*, 136, 140-150.
- Sorai, M. (2021) Effects of calcite dissolution on caprock's sealing performance under geologic CO<sub>2</sub> 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）CO<sub>2</sub>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実用方策, *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 CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 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/s<sup>2</sup> 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., Interfacial Tension of Carbon Dioxide - Water from 278 K to 573 K at 8 MPa to 50 MPa: Molecular Dynamics Study on the Effect of Temperature, submitted.

Fujii, T., Oikawa, Y., Lei, X., Sorai, M. Experimental investigation of hydro-mechanical response of soft rocks in CO<sub>2</sub> injection process: Impacts of fracture roughness and brittleness index on evolution of permeability behavior, submitted.

Nishiyama, N., Ujiie, K., Noro, K., Mori, Y., Masuyama, H. The role of metasomatic reactions on slip localization in subduction mélange near the mantle wedge corner, submitted.

## 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：川辺能成

Leader, Geo-Environmental Risk Research Group:

Yoshishige Kawabe

E-mail: y-kawabe@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

近年、重金属類や揮発性有機化合物など地圏環境における様々の汚染問題が発生している。それら汚染は人為的なものあれば、元々その地域の特徴として自然的に重金属類の濃度が高い自然由来重金属類による汚染、近年ではマイクロプラスチックによる汚染問題など多岐にわたっている(図1)。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、自然由来重金属類評価のための基盤情報として表層土壌評価基本図の整備を実施している。また、地圏環境に存在する有害化学物質のヒトへのリスクを評価

できる地圏環境リスク評価システム(GERAS)の開発、微生物や機能性材料を活用した有害化学物質の浄化挙動の解明および浄化手法の開発、土壌汚染評価のための各種試験手法の開発などの研究を実施している。

#### 2. 各研究項目の内容

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. 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

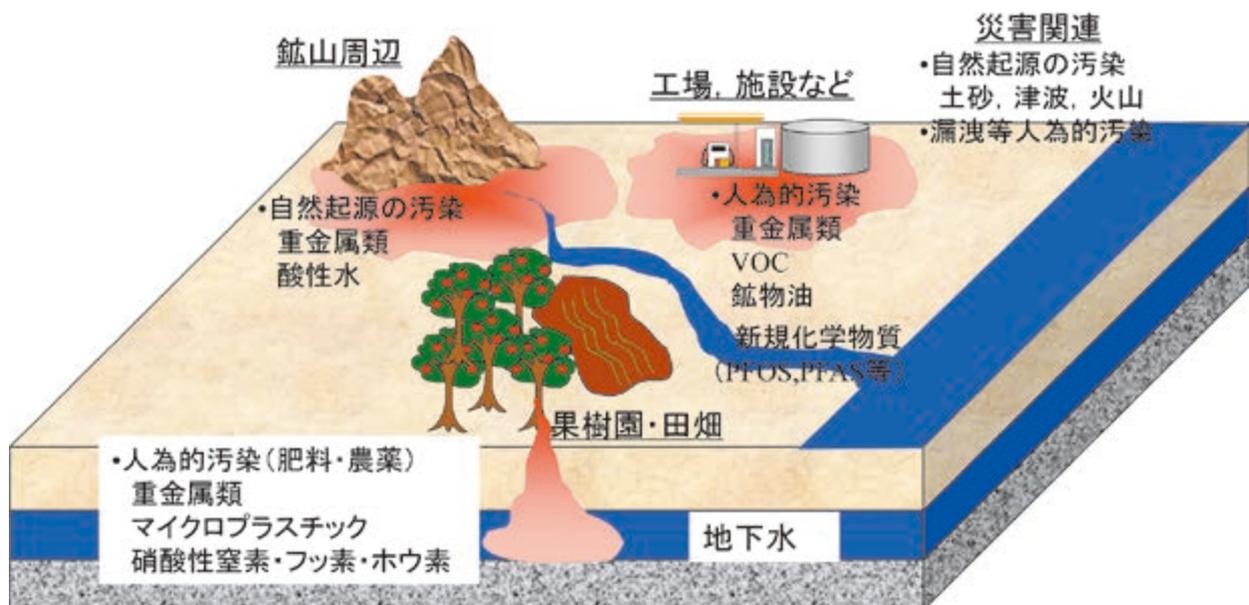


図1 地圏環境におけるさまざまな汚染問題

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（図2）を実施している。2005年より宮城県の表層土壌調査に着手し、2008年に宮城県版および鳥取県版、2012年に富山県版、2014年に茨城県版、2017年に高知県版を公開した。そして2021年3月に地方版の第1弾として表層土壌基本図（四国地方）を完成・公開した。表層土壌評価基本図（四国地方）では、これまで県単位としていた調査範囲を地域に拡大するために試料採取・分析地点の選定方法を大幅に改良した。具体的には、これまで一律5 kmメッシュ毎としていた採取地点について、表層地質と河川流域、土壌・地歴情報などをもとに分析地点を選定することで、これまでの精度と同等の地化学情報を得ることが可能となった。本図では表層土壌中に存在するクロムやヒ素など12元素の含有量や水溶出量などの濃度分布を容易に表示することができる。また濃度の表示だけでなく、重金属類の人体への影響についてリスク評価を実施しており、その結果を知ることができるのも一つの特徴である。図2は四国地域の表層土壌中のクロムの含有量、

水溶出量およびリスク評価の結果を示したものである。図2から分かるように四国地域のクロム含有量や水溶出量は比較的濃度の高い（図中の赤色表示）地域も認められるものの、リスク評価を実施すると健康影響が懸念される地域はなかった。

このように表層土壌評価基本図は、われわれの健康な社会生活を持続する上でのリスクコミュニケーションツールとしての利用が可能である。また、わが国では鉄道などのインフラ整備や自然災害時の自然由来重金属類も法的な規制対象になっており、本図は建設発生土や災害土砂に含まれる有害元素の管理や、人体への影響を判断する際の基盤情報としての活用も期待される。現在は九州地域の整備・公開に向け、試料の採取および分析・解析を実施しており、今年度中の公開を目指している。

## 2.2. 土壌・地下水汚染の修復技術に関する研究

土壌・地下水汚染の修復技術の研究では、重金属類の汚染を対象として、安価かつ効果的なマグネシウム及びカルシウム化合物に代表される無機鉱物系吸着材によるヒ素汚染水の浄化に関する研究を行っている。この研究では、吸着剤のヒ素の吸着能を評価するだけでなく、リン酸などの共存イオンの影響や使用済吸着材がpHやケイ酸などの共存物質が、どのような影響を及ぼすか検討することで安全性の評価を実施している。図3は使用済みヒ素吸着剤からのヒ素溶出に及ぼすケイ酸の影響を示したものである。酸化マグネシウムを用いた場合では、ケイ酸の影響によるヒ素の再溶出はそれほど多くないものの、水酸化マグネシウムを用いた場合では、ヒ素の再溶出が認められ、特に五価のヒ素ではケイ酸濃度が高くなるほど、再溶出量が大きくなることが明らかになった（Sugitaら、2022）。

また、地中熱が土壌中の重金属類溶出量に及ぼす影響や有機化合物汚染対策に関して、トリクロロエチレンなどに代表される揮発性有機化合物の微生物を利用した原位置分解に関する研究を実施したほか、難分解性化合物についても酸性硫酸塩土壌や酸化剤を用いた原位置利用を目指した研究を行っている。これらの研究では、速度論的解析モデルによる分解挙動の解明や共生微生物がターゲットとなる分解微生物に及ぼす影響について評価を実施している。また、新規法規制物質であるクロロエチレンや1,4-ジオキサン分解挙動や、複合汚染下における浄化技術の検討も進めている。

## 2.3. 土壌・地下水汚染の評価技術に関する研究

土壌汚染リスク評価に関する研究では、地圏環境リスク評価システム（GERAS）について環境基準および発がん性などの毒性データの更新を実施したほか、発光細菌を利用した石油系炭化水素の簡易土壌汚染手法について、アルカン類の急性毒性評価ならびにアルコール類に関する急性毒性の評価を行った。また、今年度よりマイクロプラス

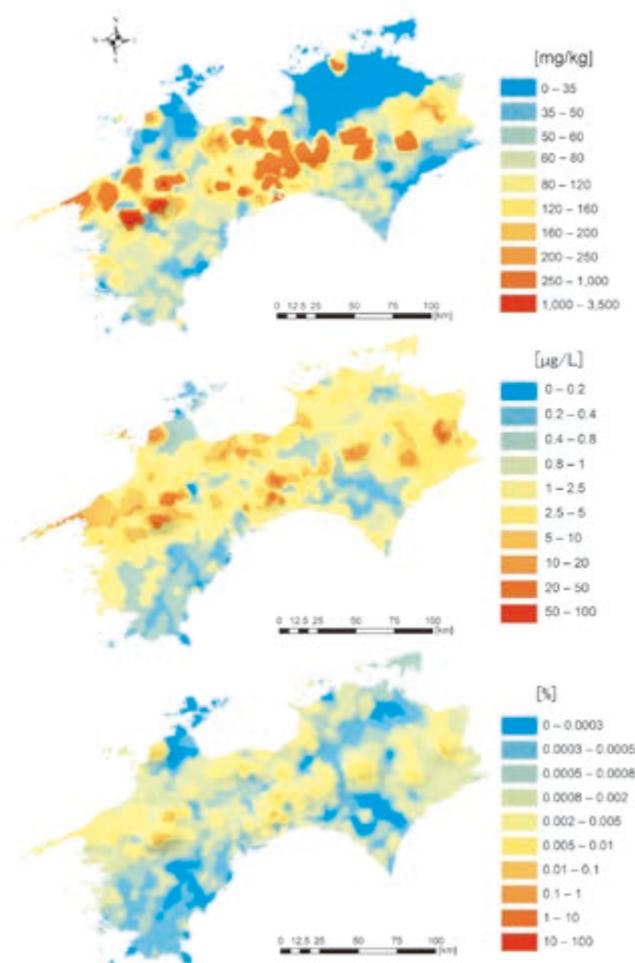


図2 表層土壌評価基本図四国地域（クロム）

チックへの有害化学物質の吸着やそれらのリスクを評価するための研究に着手した。さらに、土壌溶出試験の評価手法については、溶出させた懸濁液から土壌粒子を取り除く、フィルターろ過の影響について材質による影響などの評価を行っている。

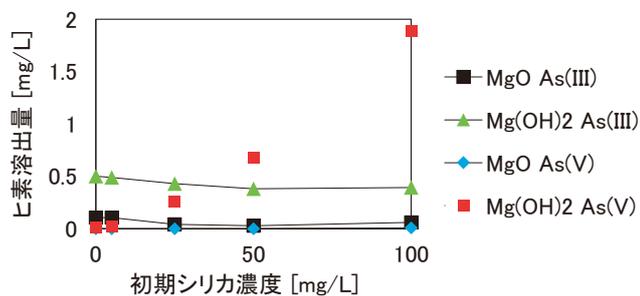


図 3 使用済みヒ素吸着剤（マグネシウム系）からのヒ素溶出に及ぼすケイ酸の影響（Sugita et.al.,2022をもとに作成）

### 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。

川辺能成（グループ長）

杉田 創

原 淳子

井本由香利

斎藤健志

土田恭平

吉川美穂（兼務）、研究企画室（主務）

小神野良美（テクニカルスタッフ）

小熊輝美（テクニカルスタッフ）

駒井 武（名誉リサーチャー）

西脇淳子（協力研究員）

中村謙吾（協力研究員）

栗田圭吾（リサーチアシスタント）

### 4. 主な研究ファシリティ

多種多岐にわたる汚染物質を精度よく分析し、地圏環境における存在形態や移動・移行、物質間の相互作用、並びに浄化のメカニズムなどを解明するために、地圏環境リスク研究グループでは、研究ファシリティの整備、研究環境の改善及び安全管理にも力を注いでいる。重金属類や揮発性有機化合物（VOCs）及び放射性物質、あるいは、気体、液体及び固体物質のいずれの種類かの汚染対象物質の分析・評価に対応するために、以下に示す主要機器を整備している。

- ・ガスクロマトグラフ質量分析計（GC-MS）
- ・ガスクロマトグラフ（GC、有機、無機対応）
- ・高速液体クロマトグラフィー / 質量分析（HPLC/MS）（写真 2）
- ・イオンクロマトグラフ（IC）



写真 2 液体クロマトグラフ質量分析計

- ・誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP, ICP-AES）
- ・誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS）（写真 3）
- ・全自動元素分析装置（CHNS/O）
- ・全有機炭素分析装置（TOC/TC、液体、固体）
- ・蛍光 X 線分析装置（XRF、携帯型、卓上型）
- ・紫外可視分光光度計
- ・X 線回折装置（XRD、携帯型、卓上型）
- ・フーリエ変換赤外分光光度計（FT-IR）
- ・比表面積・細孔分布測定装置（BET 法）
- ・微生物・遺伝子分析・定量装置（PCR、リアルタイム PCR）
- ・冷却遠心分離機
- ・携帯型放射線量・成分測定装置
- ・可搬型放射能測定装置



写真 3 誘導結合プラズマ質量分析計（ICP-MS）

- ・多項目水質計（溶存酸素、電気伝導率、pH、酸化還元電位ほか、10項目同時測定可能）
- ・高精度全自動透水試験装置（難透水性試料にも対応）
- ・動電学的浄化試験システム
- ・カラム試験装置
- ・拡散試験装置ほか

## 5. 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。

## 6. 最近の主な研究成果

- Yoshikawa, M., Zhang, M., Kawabe, Y., Katayama, Y. (2021) Effects of ferrous iron supplementation on reductive dechlorination of tetrachloroethene and on methanogenic microbial community. *FEMS Microbiology Ecology*, <https://doi.org/10.1093/femsec/fiab069>.
- Kato, T., Gathuka, L. W., Okada, T., Takai, A., Katsumi, T., Imoto, Y., Morimoto, K., Nishikata, M., Yasutaka, T. (2021) Sorption-desorption column tests to evaluate the attenuation layer using soil amended with a stabilising agent. *Soils and Foundations*, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.05.004>.
- Langa, C., Hara, J., Wang, J., Nakamura, K., Watanabe, N., Komai, T. (2021) Dynamic evaluation method for planning sustainable landfills using GIS and multi-criteria in areas of urban sprawl with land-use conflicts, *PLoS One*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254441>.
- Feng, Y., Du, Y., Zhou, A., Zhang, M., Li, J., Zhou, S., Xia, W. (2021) Geoenvironmental properties of industrially contaminated site soil solidified/stabilized with a sustainable by-product-based binder. *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142778>.
- Kondo, M., Sakamoto, Y., Kawabe, Y., Nakamura, K., Watanabe, N., Komai, T. (2021) Development of

a Model for Predicting the Volatilization Flux from Unsaturated Soil Contaminated by Volatile Chemical Substances. *Environmental Modeling & Assessment*, <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09796-0>.

- Sugita, H., Oguma, T., Hara, J., Zhang, M., Kawabe, Y. (2021) Effects of Silicic Acid on Leaching Behavior of Arsenic from Spent Calcium-based Adsorbents with Arsenite, *Sustainability*, 13-12937, pp.1-18.
- Sugita, H., Oguma, T., Hara, J., Zhang, M., Kawabe, Y. (2022) Effects of Silicic Acid on Leaching Behavior of Arsenic from Spent Magnesium-Based Adsorbents Containing Arsenite, *Sustainability*, 14, 4236.
- Pujiwati, A., Nakamura, K., Wang, J., Kawabe, Y., Watanabe, N., Komai, T. (2022) Potentially toxic elements pose significant and long-term human health risks in river basin districts with abandoned gold mines, *ENVIRONMENTAL GEO-CHEMISTRY AND HEALTH*, <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01229-5>, 2022.3.
- Hao, H., Hao, Y., Liu, Y., Yeh, T. J., Zhang, M., Wang, Q., Fan, Y. (2022) Anomaly of glacier mass balance in different vertical zones and responses to climate modes: Urumqi Glacier No. 1, China, *CLIMATE DYNAMICS*, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06318-w>.
- Zhao, Y., Cao, J., Zhang, X., Zhang, M. (2022) Analyzing the characteristics of land use distribution in typical village transects at Chinese Loess Plateau based on topographical factors, *Open Geosciences*, <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0370>.

# 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：雷 興林

Leader, Geo-Mechanics Research Group:

Xinglin Lei

Phone 029-861-2468, e-mail: xinglin-lei@aist.go.jp

### 1. グループの研究目的

地圏メカニクス研究グループは、マルチスケール（カッティング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行う。

当グループが長年にわたり研究を進めてきた実験技術と数値解析技術は、脱炭素社会の実現に向けて、浅部から深部に至る地圏メカニクス環境の解明、地圏の流体が地震発生過程に果たす役割の理解、地熱開発やCO<sub>2</sub>地中貯留などの地下利用の安全性と有効性評価・地下利用のための効率的な掘削技術の開発などに役立ってきた。高度化・多様化する社会のニーズに的確に応えられるように、理・工学出身研究員の協力による相乗効果を最大限発揮し、研究・技術ポテンシャルの維持・向上に努める。

そして、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展開し、安全で安心できる社会の実現に貢献することを目指す。

さらに、研究成果を迅速に発信し、社会の持続発展に努める。このため、グループ内研究ツールの統合と融合及び他のグループ・ユニット間の連携による相乗効果を最大限に促進するとともに、国内外での研究機関や企業との共同研究を企画・実践する。

### 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。

雷 興林（研究グループ長）

及川寧己

竹原 孝

坂本靖英（併任）

宮崎晋行

北村真奈美

RA 受け入れ研究員不定数

#### 2.2. 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）、掘削カッティング試料試験装置（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

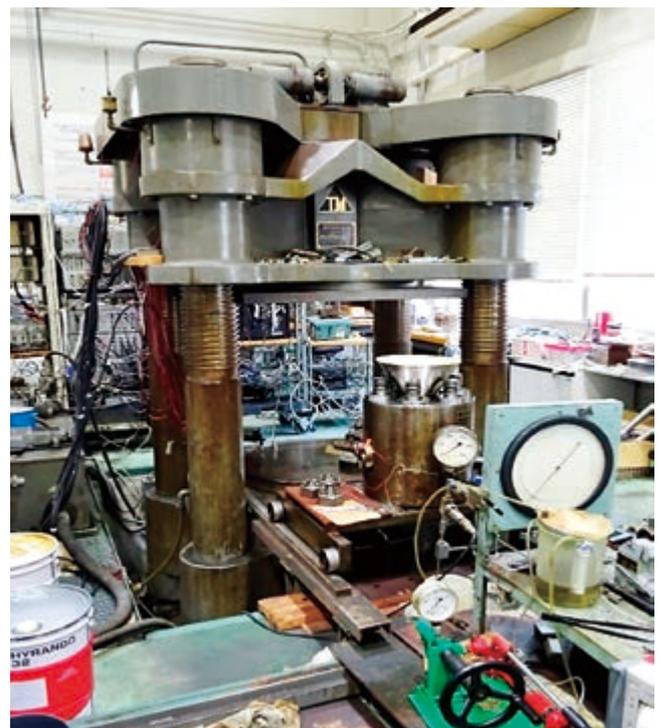


図1 大型岩石注水破壊試験装置

- ・更新した構成則と化学要素をジオメカシミュレーションに反映
- ・CCUS・EGS・シェ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

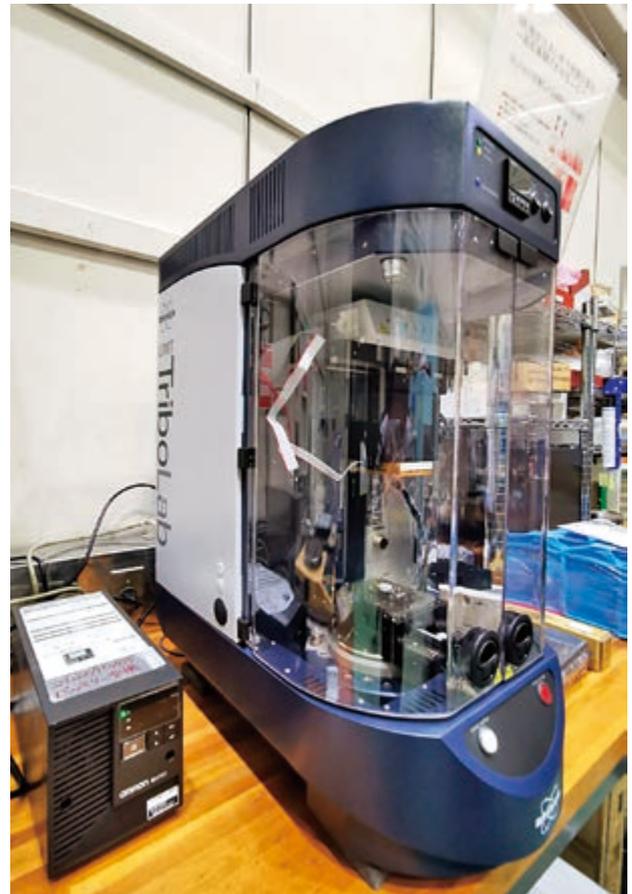


図4 掘削カッティング試料試験装置

### 3. 2022年研究成果例

CCUS・EGS・シェルガス開発等の安全性関連課題の解決に資する成果として、

1) 熱亀裂を入れた花崗岩について注水試験を実施し、貯留層に明瞭な流路があるケースでは注水速度によらず短時間で大きな応力降下を示す地震性断層すべりが起き、貯留層と断層は近いが明瞭な流路がないケースでは注水速度が速い場合は地震性断層すべりが起き、注水速度が遅い場合にはゆっくりと応力が降下することを明らかにした。

2) 深部流体関与自然地震及び注水誘発地震に関する研究の実例研究を展開し、関連成果をとりまとめた論文を国際誌に公表・投稿した。



## ポスター概要

## 越後平野 G1層の広域地下水流動モデル

地下水研究グループ 町田 功  
[連絡先] i-machida@aist.go.jp

### 成果概要

長岡から新潟市にかけて分布する、G1層と呼ばれる被圧帯水層を中心に、地下水位、水質、同位体などを調査し、特に、燕、三条、吉田にて知られていた高  $\text{Cl}^-$  濃度地下水の起源について考察をおこなった。また、これらの情報をもとに、G1層の広域地下水流動と地下水の涵養域を考察した。

### 研究内容

越後平野全域に分布する G1層は、長岡では地表付近に分布し、新潟市内では深度160mに達する。2016~2022年にかけて、高品質の地下水試料約100地点分を採取し、水質、同位体分析に供した。調査の結果、長岡では地下水流動は活発で、深層地下水が G1層を涵養することが明らかになった。また、従来、平野北部で認められていた高  $\text{Cl}^-$  濃度の地下水には、氷期降水と年代が70年未満の若い地下水の2種類があり、これは  $\text{Cl}^-$  の起源が海成層であることを示唆する。今日まで G1層中に古い地下水が残留している理由は、最終氷期終了後の海進に伴う動水勾配の減少と G1層が難透水性の地層によって覆われたことが原因と考えられる。

### 研究成果はどう使われるか

- ・越後平野の適正な地下水利用をおこなうための基礎データ
- ・地中熱ポテンシャルの評価、帯水層蓄熱の基礎データ
- ・地盤沈下緩和を目的とした帯水層への注水のための基礎データ

町田 功ほか（投稿中）越後平野 G1層中の地下水流動と水質形成

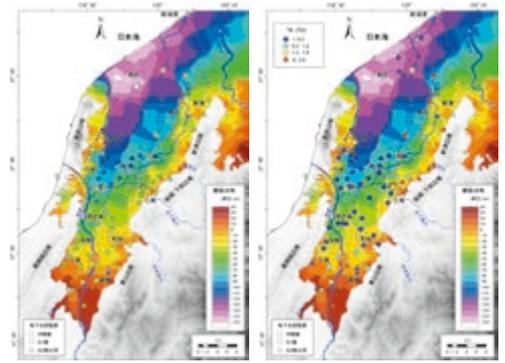


図1 調査結果の一例 採水標高（左）と地下水中の $^3\text{H}$ 濃度の分布図。沖積層の基底面深度分布（船引ほか、2011）と重ねあわせた。

## 山地流域の河川水質に対する表層崩壊のインパクト

地下水研究グループ 吉原 直志, 松本 親樹, 町田 功, 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

近年、斜面崩壊をトリガーとする河川水質汚染が確認されているが、表層崩壊（斜面表層の土壌の崩落）による河川水質変化の実態に着目した研究はほとんどない。本研究では、2018年の北海道胆振東部地震により表層崩壊が多発した37流域を対象として地形解析と河川水質分析を実施することで、表層崩壊の発生規模が河川水中の  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  などの複数の溶存元素濃度と高い相関を示すことを明らかにした。

### 研究内容

2018年に発生した北海道胆振東部地震により表層崩壊が多発した山地流域群を対象として、崩壊地判読、空間解析、河川水質分析を実施することで、表層崩壊が山地河川の水質にどのような影響を与えるのか検討した。対象流域の面積は0.09~2.6 $\text{km}^2$ 、崩壊面積は0~0.7 $\text{km}^2$ 、崩壊面積率は0~66%である。崩壊面積率の高い流域では、河川水の  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  濃度が高かった（図1）。このような水質変化は、表層崩壊による地形改変が地表付近の土-水相互作用を促進させた結果であると推定される。さらにフォワードモデル（Galy and France-Lanord, 1999）を用いて化学風化特性を検討したところ、表層崩壊の発生による炭酸塩風化の活性化が示唆された。調査対象の地域では水質汚染のシグナルは検出されなかったものの、土質・地質条件によっては表層崩壊をトリガーとする河川水質の低下が生じると予想される。

### 研究成果はどう使われるか

表層崩壊に伴う水質変化や水質汚染の評価指標としての崩壊面積率の有効性が示された。将来的に、本研究で得た知見と崩壊発生場予測モデルを組み合わせることで、表層崩壊をトリガーとする水質汚染を予測できると期待される。

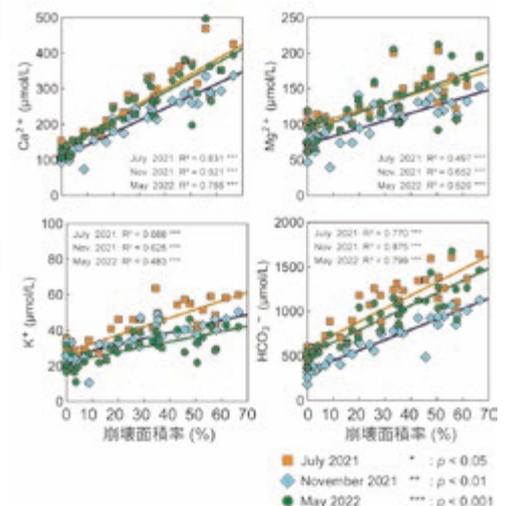


図1 流域の崩壊面積率と河川水質の関係

## 微小域元素組成に基づく鉱物の存在形態の評価技術の開発

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

### 成果概要

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

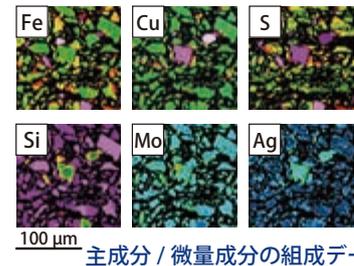
### 研究内容

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

### 研究成果はどう使われるか

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

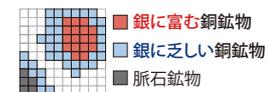
### ● 銅鉱石の元素マッピングデータ



主成分 / 微量成分の組成データ

### ● 銅鉱石の粒子解析

#### ① 元素組成から分析点の鉱物種を同定



#### ② 画像データから粒子を抽出・解析

- 粒子数 - サイズ分布 - 形状評価
- 単体分離性 - 鉱物組合せ など

### 粒子解析プログラムを独自開発

図 微小域元素組成に基づく鉱物の存在形態の評価技術の概要

## 日本海東縁酒田沖のメタンハイドレート胚胎域における海底堆積物の地盤強度調査

燃料資源地質研究グループ 青木 伸輔, 佐藤 幹夫, エネルギープロセス研究部門 鈴木 清史  
[連絡先] shinsuke-aoki@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貯存域の海底地盤強度調査が日本海東縁酒田沖にて実施された。船上からの原位置 CPT は調査地点で採取した堆積物の力学試験結果をよく再現し、酒田海丘では PS 検層による堆積物強度の推定が可能であることが示された。

### 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酒田海丘 (仮称) で海底堆積物の地盤強度調査を実施した。酒田海丘で設定した 2 地点 (胚胎地点と参照地点) で原位置 CPT 試験, PS 検層と堆積物試料採取を実施した。堆積物試料から得た室内試験結果と CPT 試験による換算値は比較できた範囲では傾向がよく一致し、PS 検層による堆積物強度の推定も CPT 試験結果と概ね一致する傾向が認められた。酒田海丘においては船上からの試験・計測が地盤強度の把握に有効であり、室内試験との組み合わせにより効率的な把握につながりうる。

### 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 MH の海洋算出試験の実施場所の選定や、掘削技術開発の基礎的なデータとして利用される。

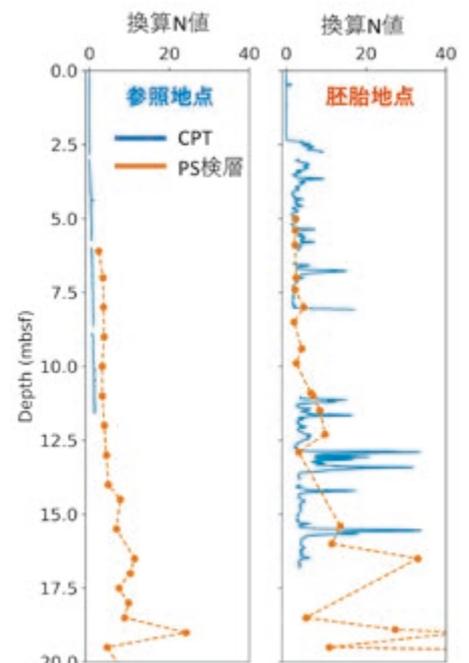


図 CPT 試験と PS 検層から求めた換算 N 値の深度プロファイル

## 山形県酒田沖海域での海底長期温度計測による熱流量測定

燃料資源地質研究グループ 後藤 秀作  
[連絡先] s.gotou@aist.go.jp

### 成果概要

浅海域では海底水温変動が堆積物の温度を時間変化させるため、温度プローブを海底にさし込む方法による熱流量計測は困難である。本研究では海底水温と堆積物温度を長期間計測し、堆積物温度から海底水温変動の影響を除去する方法を適用して熱流量を決定した。得られた熱流量を制約条件に海底下温度構造を推定した。

### 研究内容

熱流量は地球内部から地表面に向かって単位時間に単位面積を通過する熱量で、地下温度構造推定の制約条件として使用される。海底水温が安定している深海域では、長さ数メートルの温度プローブを堆積物にさし込み、複数の深度で堆積物温度を15分程度計測する方法で熱流量を決定する。一方、沿岸域等の浅海域では海底水温が時間変化しているため、海底水温と堆積物温度を長期間計測し、堆積物温度から海底水温変動成分を除去する方法を適用して熱流量を決定する。本研究では山形県酒田市沖の表層型メタンハイドレート（MH）胚胎域及びその周辺の9地点で海底水温と堆積物温度を7ヶ月間計測し、各地点の熱流量を決定した。この熱流量を制約条件に海底下温度構造を推定した。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

海底下でMHが存在することができるMH安定領域は温度と圧力に強く依存する。本研究結果は山形県酒田市沖表層型MH胚胎域のMH安定領域の推定に利用されるとともに、当該海域の表層型MH形成メカニズムを調べるための基礎データとなる。



図1 堆積物の温度を計測するための地中温度計

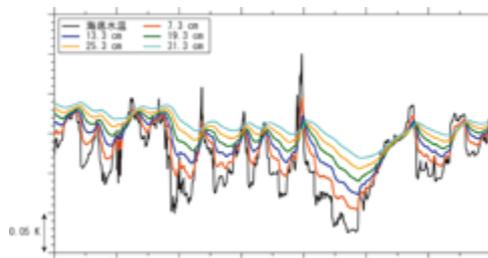


図2 海底水温及び堆積物温度の計測例。凡例の数字は海底面からの深さを示す。

## ビニールハウスにおける省エネ型結露防止システム

地圏化学研究グループ 鈴木 正哉, 万福 和子  
[連絡先] masaya-suzuki@aist.go.jp

### 成果概要

ビニールハウスにおける栽培においては、夜間結露が生じることにより、灰色かび病などの病気が発生し、大きな被害となることがある。結露防止のため、除湿剤ハスクレイを用いた除湿システムを製作した。夜間はハウス内の高湿度な空気を流し除湿を行い、昼間はハウス内の低湿度な空気を流し再生を行うことにより、一日中相対湿度90%以下にすることが可能となった。

### 研究内容

ビニールハウスにおける栽培において、結露が生じることによる病気の発生が問題となっている。本研究では、900m<sup>2</sup>のハウスに200kgのハスクレイを用いた除湿システムを設置した（図1）。夜間ハウス内の高湿度な空気を送りこむことにより除湿を行い、昼間ハウス内の比較的低い湿度の空気を送り込むことにより再生を行った。このハスクレイ除湿システムを設置したハウスでは、夜間でも相対湿度が90%以下になっており結露が生じていないのに対し、ハスクレイ除湿システムを設置していないハウスでは結露が生じていた。再生時にヒーターを用いることもなく、ファンによる風を送るだけで、除湿・再生が可能であることから、省エネ型システムの構築が可能となった。

### 研究成果はどう使われるか

ビニールハウス栽培における除湿を行うにより、結露を防止することができ、結露による灰色かび病などの病気から植物を守ることが可能となった。この技術は他の除湿にも適用が可能である。



図1 ハスクレイ除湿装置

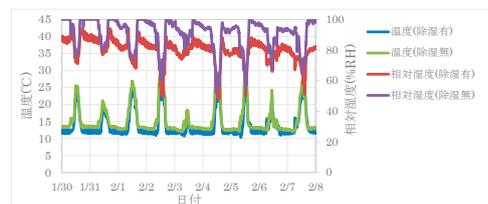


図2 実証試験結果

## アルミニウムケイ酸塩による二酸化炭素吸着剤の開発

地圏化学研究グループ 万福 和子, 宮原 英隆, 鈴木 正哉  
[連絡先] kazuko-manpuku@aist.go.jp

### 成果概要

二酸化炭素回収において、物理吸着法では一般的にゼオライトが用いられている。一方でランニングコストの観点から、ハスクレイを用い、加圧して二酸化炭素を吸着させ、大気圧で回収する方法が検討されている。今回ハスクレイを二酸化炭素用に改良した結果、排ガスの濃度が18vol%以上において、ゼオライトよりも二酸化炭素の吸脱着量が多いことが示された。

### 研究内容

小中規模発生源からの二酸化炭素回収においては、物理吸着法による回収が有効であるとされている。物理吸着法においては、一般的にゼオライトが用いられており、ゼオライトは低圧領域での二酸化炭素吸脱着量が多いことから、大気圧において二酸化炭素を吸着させ、真空に引いて二酸化炭素を脱離回収している。しかしこの方法では、真空に引くエネルギーが大きいため問題となっていることから、加圧して二酸化炭素を吸着させ、大気圧に戻すことにより二酸化炭素を脱離回収するハスクレイを用いたシステムが提案されている。本研究では、水蒸気吸着用のハスクレイを二酸化炭素用に改良することにより、排ガスの濃度が18vol%以上において、ゼオライトよりも二酸化炭素の吸脱着量が多いことが示された。

### 研究成果はどう使われるか

排ガスの二酸化炭素濃度が18vol%以上の際に、従来のゼオライトを用いた二酸化炭素回収法よりも、ランニングコストを抑えた回収が可能であり、小中規模の二酸化炭素発生源からの回収にて有効である。

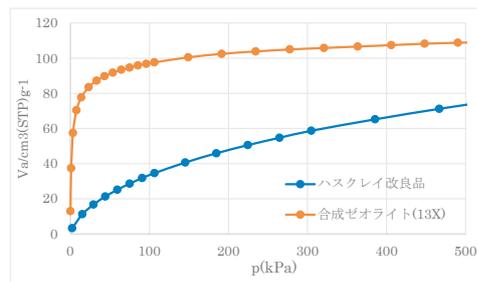


図1 ハスクレイ改良品およびゼオライト13Xの二酸化炭素吸着等温線

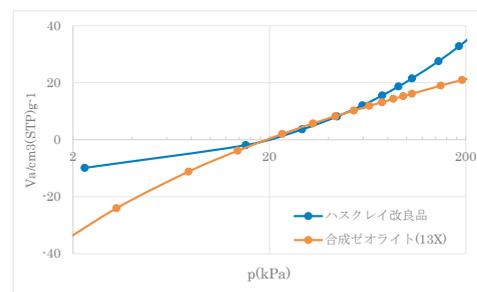


図2 二酸化炭素濃度20vol%におけるハスクレイ改良品およびゼオライトの二酸化炭素回収量

## CO<sub>2</sub>の回収に向けた有機/無機複合吸着材の開発

地圏化学研究グループ 森本 和也, 燃料資源地質研究グループ 朝比奈 健太, 地圏化学研究グループ 保高 徹生  
[連絡先] kazuya.morimoto@aist.go.jp

### 成果概要

既往のCO<sub>2</sub>回収技術で化学吸収液として用いられている有機物質あるいは固体吸着材として使用される無機多孔質材料の、いずれも単独では発揮できない選択的CO<sub>2</sub>吸着特性および脱離効率を有する有機/無機複合吸着材の開発を目指して検討を行った。鉱物材料にアミン化合物を担持した試料の評価において、低濃度のCO<sub>2</sub>に対して選択的な吸着性能を示すことが明らかとなった。

### 研究内容

温室効果ガスの排出量削減の必要性が国際的に叫ばれており、中でも人為的に排出されている温室効果ガスとしてCO<sub>2</sub>の影響量が最も大きいと見積もられている。こうした背景から、CO<sub>2</sub>に対して選択性が高い化学吸着性を示すアミン化合物と、その担持に適した表面特性を持つ鉱物材料を有機/無機複合化することで固体として取り扱えるCO<sub>2</sub>吸着材(図1)の開発を目指し、安定で安価な無機担体(鉱物材料)の検討と担持させるアミン化合物の検討、複合化方法の最適化と複合吸着材のCO<sub>2</sub>吸着性能評価を行った。アミン化合物の担持量に影響する表面特性と比表面積を有する鉱物材料の探索においては、天然に産する様々な三次元構造を有する各種粘土鉱物や産総研が開発した比表面積の大きいアルミノケイ酸塩からなるハスクレイ(図2)を候補として用いた。

### 研究成果はどう使われるか

燃焼排ガス中に含まれる比較的低濃度のCO<sub>2</sub>を対象にした実用的な吸着材料の開発と分離・回収プロセスの提案を行うことで、社会的課題であるCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献することが期待される。今後、開発した材料のCO<sub>2</sub>脱離条件の精査や競合ガスの影響評価などが課題である。

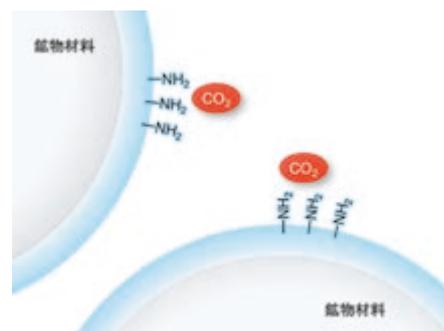


図1 鉱物材料表面にアミン化合物を担持したCO<sub>2</sub>固体吸着材の模式図



図2 比表面積の大きいアルミノケイ酸塩からなる人工の鉱物材料(ハスクレイ)

## 新型コロナウイルス感染リスク計測評価研究ラボの取り組み

新型コロナウイルス感染リスク計測評価研究ラボ 地圏化学研究グループ 保高 徹生  
[連絡先] t.yasutaka@aist.go.jp

### 成果概要

産総研の5領域（地質調査総合センター、情報・人間工学領域、エネルギー・環境領域、材料・化学領域、エレクトロニクス・製造領域）に蓄積された各種計測・可視化技術やAI、リスク評価技術を融合し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、マスギャザリングイベントを中心に感染リスクに関する研究を進め、科学的知見を蓄積・公開している。

### 研究内容

- ①スタジアム等におけるマスク着用率や音声解析のリアルタイム処理、並びに観客の観戦行動等に関するAI認識に関する研究。
- ②実験室や実環境において、各種計測器を用いた様々なシナリオにおける飛沫・飛沫核等の拡散挙動及び感染対策効果の定量化・可視化に関する研究。
- ③スポーツ大会等におけるクラスター発生防止に向けた検査頻度・検査方法の数理モデルを用いた最適化に関する研究
- ④スタジアム等で開催される様々なイベントにおいて、主催者等と連携した感染予防のための調査及びリスク評価に関する研究。
- ⑤これまで開発してきたスポーツイベント等において感染者や環境から人への曝露を評価するモデルを拡張する、日常生活等の感染リスク評価モデルの構築。

### 研究成果はどう使われるか

連携関係にある政府、公益財団法人日本サッカー協会、公益社団法人日本プロサッカーリーグ、一般社団法人日本野球機構、公益社団法人ジャパン・プロフェッショナル・バスケットボールリーグ等との連携した計測やリスク評価の実施、ガイダンスへの反映、社会への科学的知見の情報発信。

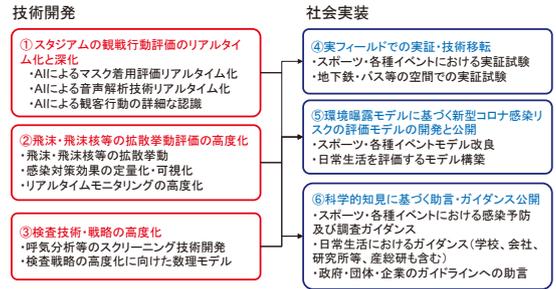
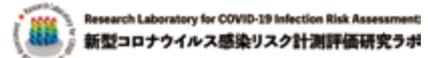


図1 コロナラボでの研究内容



図2 現地調査の様子

## 休廃止鉱山の利水点管理ガイダンス

地圏化学研究グループ 保高 徹生  
[連絡先] t.yasutaka@aist.go.jp

### 成果概要

地圏資源環境研究部門、安全科学研究部門、経済産業省 産業保安グループと共同で、坑廃水の合理的な水質管理の概念である利水点等管理の適用を広げて行く上で礎となるガイダンス文書「休廃止鉱山における坑廃水の利水点等管理ガイダンス」及び「休廃止鉱山の坑廃水が流入する河川における生態影響評価ガイダンス」を作成し、公開した。

### 研究内容

利水点等管理とは、下流の利水点や環境基準点等で当該地域が設定した管理目標を満足できる鉱山において、公共用水域へ排出する地点での排水基準の遵守による管理ではなく、下流の利水点等における水質の安全性を確保した上で、坑廃水を管理・監視する管理方法である。

ガイダンスで提供をしている利水点等管理の適用フレームワークは、①サイトアセスメント（環境・利水地点）、②利水点・水質監視点の検討、③管理・モニタリング、④管理基準等の見直しの検討、の4項目で構成される。また、利水点等管理を関係者の合意を得ながら進める上では、関係する自治体、利水者や住民、経済産業省産業保安監督部等の利害関係者への説明および対話を実施することが重要であることにも言及している。

### 研究成果はどう使われるか

公開されたガイダンスを基に、経済産業省等とも引き続き連携して、休廃止鉱山における利水点等管理の適用や実践を支援・推進し、関連した調査研究を継続していく。



図1 利水点管理の考え方



図2 利水点管理ガイダンス・生態影響ガイダンスのQRコード

## 地熱利用促進のための酸性熱水への最適材料の選定ツールについて

地圏化学研究グループ 柳澤 教雄, 地熱技術開発株式会社 佐藤 真丈, 大里 和己, 京都大学 三ヶ田 均  
[連絡先] n-yanagisawa@aist.go.jp

### 成果概要

高温酸性熱水 (pH5以下を想定) では, 地熱配管やケーシングの腐食損傷が想定される。酸性熱水を利用した地熱発電を促進するため, NEDO の「地熱発電技術研究開発」事業の成果として, 地熱技術開発(株) 等と共同で最適な発電設備の材料の検討に役立つシステム「地熱発電プラントリスク評価システム (酸性熱水対応版)」を開発した。

### 研究内容

350℃ までの高温での酸性熱水での室内実験による材料腐食を検証した。熱水の温度, pH および材料の Cr 当量から, その金属配管材料の腐食速度を予測する式を確立し, 次の機能をもつ「地熱発電プラントリスク評価システム (酸性熱水対応版)」を開発した。(1) 目的とする材料の腐食速度を計算する「金属材料腐食速度試算」, (2) 使用可能な金属材料を示す「金属材料選定チャート」, (3) 1 kW 当たりの掘削単価を計算する「金属材料による経済性評価」, (4) 材料腐食試験を基にグラフ化した「材料腐食速度データベース」, (5) 文献検索用の「腐食に係る文献データベース」

### 研究成果はどう使われるか

耐腐食性能やコスト面を含めた最適な材料を選定することで酸性熱水資源の活用が進み, 地熱発電所の利用率の向上および設備容量の増加が期待できる。

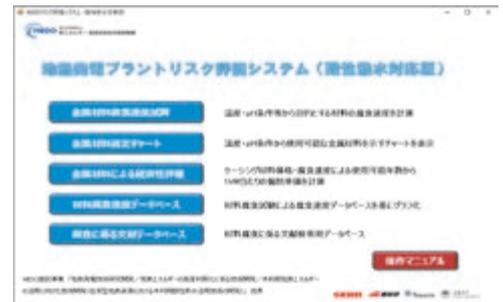


図 1 「地熱発電プラントリスク評価システム (酸性熱水対応版)」基本画面

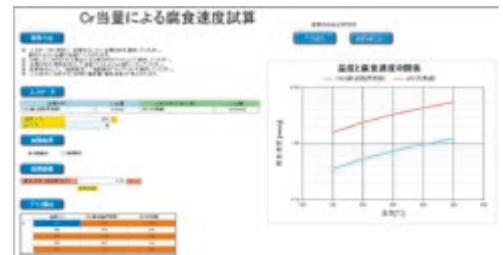


図 2 材料の Cr 当量を用いた腐食速度予測式の適用例 (150~350℃)

## 河川堤防における非打設電気探査

物理探査研究グループ 梅澤 良介, 神宮司 元治, 横田 俊之  
[連絡先] r.umezawa@aist.go.jp

### 成果概要

地表面に電極を打設しない非打設電気探査は, 簡便かつ効率的に調査できるという特徴があり, これまで多くの技術開発が行われてきた。本研究では, 吸水性・保水性の高いポリビニルアルコール (PVA) で作られたスポンジ電極を無人地上車両で牽引させながら直流電気探査を行い, 従来法と比較することで, その有効性を明らかにした。

### 研究内容

河川堤防の安全性を評価するために, 土質構成の把握が求められる。その目的で, 電気探査がよ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。そこで本研究では, 非打設電極である PVA スポンジ電極を無人地上車両 (UGV) で牽引させて直流電気探査を行った。調査は茨城県を流れる宮戸川の堤防約 500 m において PVA 電極を用いた実験を行い, 測線の一部において従来から用いられている打設電極による比較実験を行った。その結果, 従来の打設電極による実験の倍の速さで調査可能であることがわかり, ほぼ同様の探査結果を得ることができた。一方, 堤体盛土は高比抵抗, 自然地盤は低比抵抗の傾向が見られ, 自然地盤について比抵抗の違いは, 砂質・粘土質等土質の違いを反映していると示唆された。

### 研究成果はどう使われるか

河川堤防のように長大な測線以外にも, 農地など広大な調査地域において面的で効率的な調査が期待される。直流電気探査は, 一般によく用いられている手法であるため, 普及につながると期待される。



図 1 UGV+PVA 電極を用いた測定システム

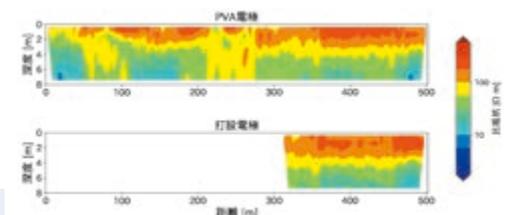


図 2 河川堤防における比抵抗断面図。上図は PVA 電極, 下図は打設 (ステンレス) 電極による結果を示す。

## 多様な設置環境に対応可能な広帯域MT法電磁探査システムの開発

物理探査研究グループ 小森 省吾, 高倉 伸一  
[連絡先] komori.shogo@aist.go.jp

### 成果概要

本研究では、陸上・浅海底における従来のMT法観測体制に加え、従来型装置では対応の困難であった淡水湖底のような環境でも観測が可能となるよう、システム開発を進めてきた。北海道洞爺カルデラ地域において実施した広帯域MT法実証試験では、陸・湖・海の3域にまたがり空間的に均一な観測点配置を実現できた他、高精度な3次元比抵抗構造を推定することに成功した。

### 研究内容

MT法観測により高精度な3次元比抵抗構造を得るためには、高精度計測に加え、偏った感度分布にならないよう観測点を空間的に均一に配置することも重要である。産総研ではこれまでに、陸上観測用MTシステム、及び浅海用MTシステムによる陸・海観測体制を整えてきた。今回新たに、淡水湖底においてもMT法観測が可能となるよう、浅海用システムを改良して観測可能なフィールド条件を拡張することに成功した。淡水環境下では塩分濃度が低く、海中利用向けの非分極電極では接地抵抗を十分に下げることが困難であった。そのため、非分極電極、及びデータロガーの改良を行い、ロガーの入力抵抗・接地抵抗のバランスの問題に対処した。構築したMT観測体制を洞爺カルデラ（北海道）に適用し、本システムの有効性を確認した。

### 研究成果はどう使われるか

設置条件に制約を受けない3次元MT法調査の実施により、比抵抗構造の分解能向上に繋がる。本研究は株式会社阪神コンサルタンツとの共同研究「洞爺カルデラの地下構造探査に関する研究」の一環として実施された。



図1 陸域・海域・湖域調査に対応可能な広帯域MT法電磁探査システム

## トリプルX線CTによる鉛土壌汚染サンプルの非破壊分析

物理探査研究グループ 中島 善人  
[連絡先] nakashima.yoshito@aist.go.jp

### 成果概要

鉛や水銀など人体に有毒な重元素で汚染された土壌サンプルは、容器を開封せずに重元素の原子番号と濃度を3次元スキャンできる分析手法が望まれている。そこで我々は、3種類の加速電圧を用いたトリプルX線CT法を採用すれば、鉛などの高い原子番号の元素について原子番号と濃度を非破壊分析できることを計算機シミュレーションで確認した。

### 研究内容

直径270 $\mu$ mの円形領域の粘土の中に、鉛、バリウム、アンチモン、イオウを含む鉱物が濃集した4領域を計算機上で構築し、この仮想的な系に対して70, 100, 140kVで電子を加速して得たX線源で3枚のCT画像を画像再構成した(図)。一般に加速電圧が上がるとX線の透過力が上がるのでCT画像が全体的に暗くなるが、その暗くなり方が原子番号に敏感に依存することを利用した。その結果、図の一番明るい円形領域に埋め込まれている重元素の原子番号が82であること(つまりバリウムやアンチモンやイオウではなく鉛であること)を正しく言い当てることのできた。さらに、粘土中の鉛の濃度の推定にも成功した。

### 研究成果はどう使われるか

- 鉛・水銀などの重元素で汚染された土壌サンプルの非破壊元素分析
- 金・白金・レアアースなどの3次元選鉱
- 空港でのウラン検出などのセキュリティチェック

Y. Nakashima (2021) Soil and Sediment Contamination 30, 978-997.

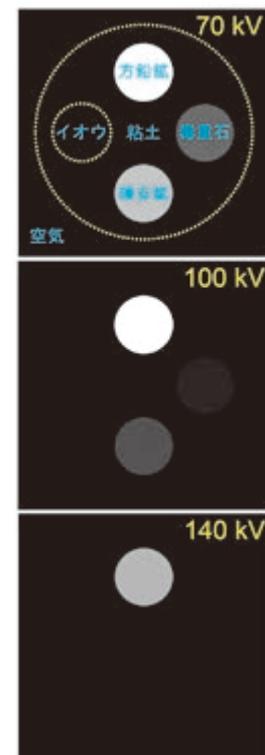


図 仮想的な土壌サンプルの二次元CTシミュレーション結果。粘土のなかに、4つの小さい円形領域を確保し、そこに6 vol%の方鉛鉱(PbS)、毒重石(BaCO<sub>3</sub>)、輝安鉱(Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)、自然イオウ(S<sub>8</sub>)をそれぞれ埋め込んだ。

## 分子動力学法による二酸化炭素-水界面張力の温度依存性の推定

CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ 志賀 正茂, 徂徠 正夫  
[連絡先] m.shiga@aist.go.jp

### 成果概要

分子動力学法による計算の結果、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)- 水界面張力は、300℃、10MPa では従来の CCS での条件 (例: 地下 1 km, 40℃, 10MPa) での値に比べて80% 程度小さく、高温地熱貯留層では CO<sub>2</sub>- 水の二相流動に対する毛細管現象の影響は顕著に減少し、流れのモードが従来 CCS と異なる可能性が示唆された。多くの圧力条件では温度増加に対して界面張力は減少したが、CO<sub>2</sub>の臨界点近傍では増加傾向が見られた。

### 研究内容

近年 CCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) に注目が集まっている。そのうちの一つに、CO<sub>2</sub> 圧入による地熱エネルギーの回収技術が挙げられる。地熱貯留層には非表面積の高い多孔質構造が多く含まれ、CO<sub>2</sub>、地層水の流動に対して界面現象が大きな影響を及ぼす。そのため、CO<sub>2</sub>と水の流動を予測し、効果的なCO<sub>2</sub>圧入シナリオを決定するためには界面張力の評価は重要である。CO<sub>2</sub>- 水界面張力の圧力依存性は従来の CO<sub>2</sub>地中貯留での重要性から数多くの実験とシミュレーションが行われてきた。しかし、温度依存性については報告例が限られており、205℃以上の条件での測定データは報告されていない。そこで、本研究では分子動力学シミュレーションを実施し、5℃から300℃、8 MPa から50 MPa での界面張力を評価した。

### 研究成果はどう使われるか

本研究で得られた界面張力の推定値は、5℃から300℃まで多様な温度条件への CO<sub>2</sub> 圧入プロジェクトでの貯留層シミュレーションのインプットパラメータのキャリブレーションや、岩石コアを用いた流動試験の解釈に対して活用される。

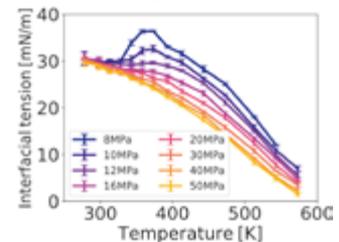
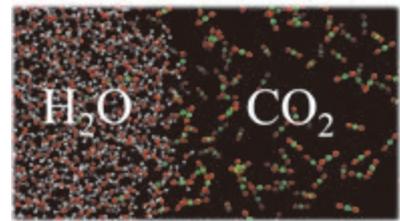


図 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 界面張力の温度依存性 (下) と界面近傍のスナップショット (上: 酸素原子 (赤), 水素原子 (白), 炭素原子 (緑))

## 地化学反応と水理特性変化の評価に向けた高温超臨界 CO<sub>2</sub> 流通試験装置の開発

CO<sub>2</sub>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

地熱貯留層に対して CO<sub>2</sub> を循環させて発電を行う CO<sub>2</sub>-Enhanced Geothermal System (CO<sub>2</sub>-EGS) では、CO<sub>2</sub> 圧入に伴う地化学反応 (鉱物溶解と沈殿) が起こり、圧入した CO<sub>2</sub> の一部が炭酸塩として地下固定されることが期待されている。一方で、炭酸塩の生成は浸透率や毛管圧といった水理特性を変化させ、CO<sub>2</sub> 循環に影響を及ぼす可能性が懸念される。本研究では、高温下での CO<sub>2</sub> 圧入に伴う地化学反応と水理特性変化を評価するために、高温超臨界 CO<sub>2</sub> 流通試験装置の開発を行った。

### 研究内容

本研究で設計・作製した高温超臨界 CO<sub>2</sub> 流通試験装置は主に、サンプルホルダー、シリンジポンプ、封圧付加機構、圧力計、温度計、ヒーター、冷却器から構成され、現在は熱水の流通システムまで完成している。今後、CO<sub>2</sub> 圧入システムと CO<sub>2</sub> と水の加熱混合器を増設することで、高温下での超臨界 CO<sub>2</sub> や CO<sub>2</sub>- 水混合流体の流通が可能となる。装置の安定性と浸透率の測定精度を評価するために、CO<sub>2</sub>-EGS において地熱貯留層を構成する岩石の一種として想定される玄武岩 (間隙率: 約 8%) を用いて温度 25-250℃、間隙水圧 2-10 MPa、封圧 4-20 MPa の条件下で透水実験を行った。その結果、250℃、間隙水圧 10 MPa の条件下において安定的に透水できることが確認できた。本発表では、玄武岩を用いた高温透水実験の予察的な結果について紹介する。

### 研究成果はどう使われるか

今回作製した高温超臨界 CO<sub>2</sub> 流通試験装置は、岩石の種類や条件 (流速、温度、間隙水圧) を変えながら、CO<sub>2</sub> を圧入した岩石コア内でどのような水理特性の変化や地化学反応が起こるかを調べることができる。得られた結果は、地熱貯留層内の CO<sub>2</sub> 循環の継続性や CO<sub>2</sub> 鉱物固定量を予測する上で基礎情報として利用される。

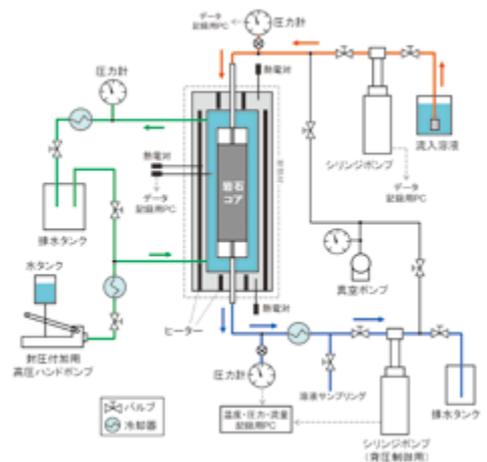


図 高温超臨界 CO<sub>2</sub> 流通試験装置の概略図。ここでは熱水流通部のみ示した。

## ヒ素吸着後の使用済 Ca 系吸着材の環境安定性に及ぼすケイ酸の影響

地圏環境リスク研究グループ 杉田 創, 小熊 輝美, 原 淳子, 川辺 能成  
[連絡先] hajime.sugita@aist.go.jp

### 成果概要

ヒ素吸着材としてカルシウム系吸着材が期待されているが、汚染水中のヒ素を除去した吸着材は、それ自体が多量のヒ素を含有するため、適切な処理を行わずに環境中に廃棄された場合、ヒ素の再溶出による二次的な環境汚染を引き起こす懸念がある。本研究では、土壌やセメント系固化材等から溶出する可能性のあるケイ酸成分がヒ酸及び亜ヒ酸を含んだ使用済 Ca 系吸着材の環境安定性に及ぼす影響を評価した。

### 研究内容

2 種類のカルシウム化合物 (CaO 及び Ca(OH)<sub>2</sub>) にそれぞれヒ酸または亜ヒ酸を吸着させた計 4 種類の使用済 Ca 系吸着材を準備した。ケイ酸溶液 (Si として 5 ~ 100 mg/L) を溶媒として使用済 Ca 系吸着材に関する溶出試験を実施した。使用済 Ca 系吸着材のヒ素溶出率は、液体中のケイ酸の初期濃度の増加とともに減少した。ケイ酸によるヒ素溶出抑制の主なメカニズムは、ケイ酸カルシウムの形成中のヒ酸及び亜ヒ酸の取り込みによる再不溶化であると結論付けられた。ケイ酸の存在下では、亜ヒ酸を含む使用済 Ca 系吸着材は、ヒ酸を含むものよりもヒ素溶出率が低かったことから、亜ヒ酸を含む使用済 Ca 系吸着材は、ヒ酸を含むものよりも環境安定性が高いと評価された。

### 研究成果はどう使われるか

ヒ素吸着材の選定にはヒ素除去能力のみならず、環境安定性を考慮することも極めて重要である。廃棄環境中で使用済吸着材が接触する可能性が高いケイ酸成分が、ヒ素の溶出抑制効果を発揮することは Ca 系吸着材の利用を推奨する大きな理由となり得る。

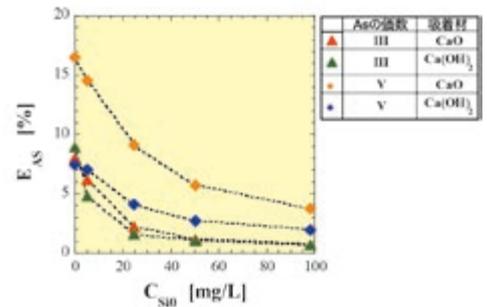


図 1 使用済吸着材のヒ素溶出率に及ぼす溶液中のケイ酸の影響  
E<sub>AS</sub>: ヒ素溶出率, C<sub>Si0</sub>: 初期 Si 濃度

参考 URL: <https://doi.org/10.3390/su132312937>. [https://doi.org/10.2208/jscejer.74.III\\_493](https://doi.org/10.2208/jscejer.74.III_493).

## 環境中に放出されたジエン系合成ゴムの分解と副生成物の発生リスク

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

### 成果概要

工業製品として広く使用されるジエン系合成ゴムの各種化学的分解促進試験を実施し、反応副生成物の同定およびその蓄積性について定量的な評価を実施した。さらに環境中に放出される合成ゴムの負荷量から有害性を有する副生成物の発がん性についてリスク評価を行い、人体への健康リスクの試算から対策の必要性について検討した。

### 研究内容

合成ゴムとしてタイヤや履物、工業用のベルトに広く使用されているジエン系合成ゴムはポリマーの主鎖に不飽和二重結合を持ち、化学的に反応性に富む。これら製品のゴム摩耗物は環境中に多く放出されているが、放出後の分解・移行過程について、特に有害物質発生リスクについては検証されていない。

本研究は、土壌環境中に存在しえ、ゴムを浸食しうる有機酸や無機成分、UV 反応について室内模擬分解試験を実施することで、各種ゴムについて、分解経路および反応中間副生成物の蓄積性について検証した。反応系・重合法・材料成分の違いによって発生する副生成物種の有意差はあるものの、いずれの分解においても水溶性のアルデヒド・ケトン類、ブタノールの検出が顕著であることが明らかになった。

### 研究成果はどう使われるか

環境中に放出される合成ゴムは、大部分が表層水および土壌に放出され、表層土壌に沈着する。また、その一部は河川を介して海洋へと流出し、海洋マイクロプラスチックの 3 割程を占めると試算されている。本研究は環境中に大量に放出される未評価物質について新たな知見を示し、安全で安心な合成材料の評価へつなげると期待する。

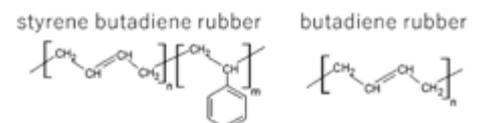


図 1 ブタジエン系合成ゴム (評価物質)

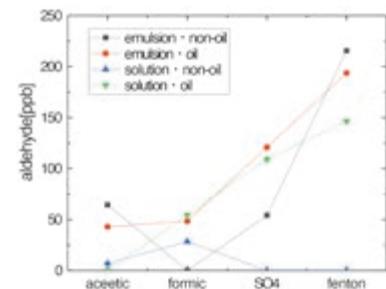


図 2 アルデヒドの発生量

## 論文リスト

- Hiroki Namba, Yuichi Iwasaki, Kentaro Morita, Tagiru Ogino, Hiroyuki Mano, Naohide Shinohara, Tetsuo Yasutaka, Hiroyuki Matsuda, Masashi Kamo (2021) Comparing impacts of metal contamination on macroinvertebrate and fish assemblages in a northern Japanese river, *PeerJ*.
- Tatsuo Nozaki, Toshiro Nagase, Yutaro Takaya, Toru Yamasaki, Tsubasa Otake, Kotaro Yonezu, Kei Ikehata, Shuhei Totsuka, Kazuya Kitada, Yoshinori Sanada, Yasuhiro Yamada, Jun-ichiro Ishibashi, Hidenori Kumagai, Lena Maeda & D/V Chikyū Expedition 909 Scientists (2021) Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralisation, *Scientific Reports*.
- Miho Yoshikawa, Ming Zhang, Yoshishige Kawabe, Taiki Katayama (2021) Effects of ferrous iron supplementation on reductive dechlorination of tetrachloroethene and on methanogenic microbial community, *FEMS Microbiology Ecology*.
- Akane Ito, Tsubasa Otake, Adi Maulana, Kenzo Sanematsu, Sufriadin, Tsutomu Sato (2021) Geochemical and mineralogical characteristics of Ni laterite deposits in Sulawesi, Indonesia: Implications for Ni supergene enrichment processes and distribution of critical metals, *Resource Geology*.
- Keiko Tagami, Tetsuo Yasutaka, Momo Takada, Shigeo Uchida (2021) Aggregated transfer factor of <sup>137</sup>Cs in wild edible mushrooms collected in 2016–2020 for long-term internal dose assessment use, *Journal of Environmental Radioactivity*.
- Takeshi Tsuji, Masao Sorai, Masashige Shiga, M., Shigenori Fujikawa, Toyoki Kunitake (2021) Geological storage of CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixtures produced by membrane-based direct air capture (DAC), *Greenhouse Gases: Science and Technology*.
- M Murakami, T Yasutaka, M Onishi, W Naito, N Shinohara, T Okuda, K Fujii, K Katayama, S Imoto (2021) Living with COVID-19: mass gatherings and minimizing risk, *QJM: An International Journal of Medicine*.
- Mio Takeuchi, Hideyoshi Yoshioka (2021) Acetate excretion by a methanotroph, *Methylocaldum marinum*S8, under aerobic conditions, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*.
- Tomohiro Kato, Lincoln W. Gathuka, Takaomi Okada, Atsushi Takai, Takeshi Katsumi, Yukari Imoto, Kazuya Morimoto, Miu Nishikata, Tetsuo Yasutaka (2021) Sorption-desorption column tests to evaluate the attenuation layer using soil amended with a stabilising agent, *Soils and Foundations*.
- Kyoshiro Hikia, Kenta Asahina, Kota Kato, Takahiro Yamagishi, Ryo Omagari, Yuichi Iwasaki, Haruna Watanabe, Hiroshi Yamamoto (2021) Acute toxicity of a tire-rubber derived chemical 6PPD quinone to freshwater fish and crustacean species, *Environmental Science & Technology Letters*.
- Guanlin Peng, Xinglin Lei, Guangming Wang, Feiru Jiang (2021) Precursory tidal triggering and b value to the 2011 Tengchong MW5.0 and 5.1 inland earthquakes, *EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS*.
- Masanori Kaneko, Yoshinori Takano, Masashi Kamo, Kazuya Morimoto, Takuro Nunoura, Naohiko Ohkouchi (2021) Insights into the Methanogenic Population and Potential in Subsurface Marine Sediments Based on Coenzyme F430 as a Function-Specific Biomarker, *Journal of the American Chemical Society*.
- Yuichi Iwasaki, Keiichi Fukaya, Shigeshi Fuchida, Shinji Matsumoto, Daisuke Araoka, Chiharu Tokoro, Tetsuo Yasutaka (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*.
- Koki Aizawa, Mitsuru Utsugi, Keigo Kitamura, Takao Koyama, Makoto Uyeshima, Nobuo Matsushima, Shinichi Takakura, Haruhisa Inagaki, Hiroki Saito, Yasuhiro Fujimitsu (2021) Magmatic fluid pathways in the upper crust: Insights from dense magnetotelluric observations around the Kuju Volcanoes, Japan, *Geophysical Journal International*.
- Guijuan Lai, Xinglin Lei, Changsheng Jiang, Weilai Wang, Haobo Gong (2021) Multiple mechanisms of coseismic water level changes at the Rongc-

- hang well in a seismically active area in China, Tectonophysics.
- Atsushi Urai, Makoto Matsushita, Ho-Dong Park, Hiroyuki Imachi, Miyuki Ogawara, Hiroki Iwata, Masanori Kaneko, Nanako O. Ogawa, Naohiko Ohkouchi, Yoshinori Takano (2021) Detection of planktonic coenzyme factor 430 in a freshwater lake: small-scale analysis for probing archaeal methanogenesis, Progress in Earth and Planetary Science.
- 川辺 能成, 坂本 靖英, 原 淳子 (2021) 洪水土砂中の重金属類とそのリスクについて, 第58回環境工学研究フォーラム講演要旨集.
- 保高 徹生, 仲村 健太郎, 内藤 航, 大西 正輝, 坂東 宜昭, 篠原 直秀, 藤田 司, 岩崎 雄一 (2021) サッカースタジアムにおける観戦時の感染予防の調査とリスク評価, 第34回日本リスク学会年次大会 要旨集.
- 保高 徹生, 内藤 航, 大西 正輝, 坂東 宜昭, 篠原 直秀, 岩崎 雄一 (2021) 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 (第一報), 産総研ホームページ
- 川島 萌, 村上 道夫, 竹林 由武, 小林 智之, 坪倉 正治, 保高 徹生, 田巻 倫明 (2021) 震災によって生じた外傷後成長体験と新型コロナウイルスへの対応, 日本リスク学会講演要旨集.
- 鈴木 正哉, 万福 和子 (2021) 粘土系吸着剤ハスクレイを用いた熱利用, CERAMICS JAPAN.
- 佐竹 海, 井手 健斗, 万沢 かりん, 上田 匠, 神宮司 元治, 横田 俊之, 小森 省吾 (2021) 無人地上車両 (UGV) を用いたマルチコイル型電磁探査システムの開発, 物理探査.
- 有馬 謙一, 大迫 政浩, 保高 徹生, 篠崎 剛史 (2021) 放射性物質で汚染された焼却残渣の減容化プロセスの経済性の試算, 第27回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム要旨集.
- 井川 怜欧, 町田 功 (2021) 同位体水文学を用いた秦野盆地の地下水流動系に関する考察, 2021年秋季講演会予稿集.
- Michio Murakami, Fuminari Miura, Masaaki Kitajima, Kenkichi Fujii, Tetsuo Yasutaka, Yuichi Iwasaki, Kyoko Ono, Yuzo Shimazu, Sumire Sorano, Tomoaki Okuda, Akihiko Ozaki, Kotoe Katayama, Yoshitaka Nishikawa, Yurie Kobashi, Toyoaki Sawano, Toshiki Abe, Masaya M Saito, Masaharu Tsubokura, Wataru Naito, Seiya Imoto (2021) COVID-19 risk assessment at the opening ceremony of the Tokyo 2020 Olympic Games, Microbial risk analysis.
- Motoharu Jinguuji, Toshiyuki Yokota (2021) Investigating soil conditions around buried water pipelines using very-low-frequency band alternating current electrical resistivity survey, Near Surface Geophysics.
- Furota, S., Sawada, K., Kawakami, G. (2021), Depositional processes of plant fragment-concentrated sandstones in turbiditic sequences recorded by plant biomarkers (Miocene Kawabata Formation, Japan). *Int. Jour. Coal. Geol.*, **233**, 103643.
- Takano, T., Oba, Y., Furota, S., Naraoka, H., Ogawa, N., Blattmann, T., Ohkouchi, N. (2021) Analytical development of seamless procedures on cation-exchange chromatography and ion-pair chromatography with high-precision mass spectrometry for short-chain peptides, *Int. Jour. Mass Spectrometry*, **463**, 116529.
- 中嶋 健・吉川 幸佑・興津 修 (2021) 富山トラフと周辺日本海の地質構造と堆積盆形成テクトニクス. 地質学雑誌. **127**, 165-188.
- Kiyokawa, S., Kuratomi, T., Hoshino, T., Goto, S., Ikehara, M. (2021) Hydrothermal formation of iron-oxyhydroxide chimney mounds in a shallow semi-enclosed bay at Satsuma Iwo-Jima Island, Kagoshima, Japan. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **133**, 1890-1908.
- Asahina, K., Takahashi, U. K., Suzuki, Y., Nakajima, T., Kobayashi, M. (2021) Naphthalene Indicator Use to Evaluate the Source Organic Type of Crude Oil, *Chem. Lett.*, **50**, 1718-1721.
- 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 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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 seafloor 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.

綱澤 有輝, 古作 吉宏, 坂入 義隆, 塚田 浩二, 斉藤 瑞稀, 蛭子 陽介, 三觜 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 TiO<sub>2</sub> 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 Obzhirov, 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—CO<sub>2</sub>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.



令和4年12月7日発行

■編集・発行 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  
〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 (中央第7)  
<https://unit.aist.go.jp/georesenv/>

地圏資源環境研究部門 研究成果報告会2022  
GREEN Report 2022  
AIST04-C00014-21

本誌記事写真等の無断転載を禁じます。