# 2021 GREEN Report

ゼロエミッション社会実現に向けた CCSにおける産総研の取り組み





#### はじめに



地圈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 20 回目となります. そして, 第 35 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.

昨年の東京オリンピック・パラリンピック以降,国内における新型コロナウイルスワクチン接種が進み感染拡大に歯止めがかかったため、一時的に社会経済活動が落ち着きを取り戻したのも束の間、新たな変異株が認められ世界中で感染が広がりつつあり、再び警戒が高まっています。今年度は皆様と実際にお会いし対面形式でのシンポジウムを模索しましたが、先行きが見通せないことを鑑みつつ、時間と場所に制約されにくい特徴を重視して、今年度もオンライン形式での開催としました。

本年度は、産業技術総合研究所の第 5 期中長期計画 (5 カ年)の 2 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、これを通し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。加えて、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参画します。また②については、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に関しては、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ます。

今回のシンポジウムでは、「ゼロエミッション社会実現に向けた CCS における産総研の取り組 み」というテーマを設定しました、重点研究課題 2)の中心的な研究テーマに位置付けられます。 世界的な脱炭素という潮流の中で、当研究部門は2006年度から二酸化炭素地中貯留に係る研 究を本格的に推進し、これから先は一層の役割を果たさなければならない状況となっています. このような背景を踏まえ、当研究部門で実施している二酸化炭素地中貯留に係る研究動向を紹介 し,ご参加いただいた皆様に「知っていただきたい」と考えました.加えて,日本CCS調査株式 会社 取締役貯留技術部長 萩原利幸様より、 苫小牧 CCS 実証試験を通じた CO。 貯留技術に関す る招待講演をいただきます. そして, 昨年度は取りやめたポスターセッションを再開し, テーマ 以外で当研究部門内の研究成果も紹介できればと考えています. 当シンポジウムの予稿集として 発行した GREEN Report 2021 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」 ために役立てばと考えました. 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/) から問い合わせてい ただければ幸甚です. "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

13:00 ~ 13:05	開会挨拶	副研究部門長	相馬 宣和	
13:05 ~ 13:30	地圈資源環境研究部門 部門紹介	研究部門長	今泉 博之	
13:30 ~ 14:10	産総研における CO2の地中貯留および鉱物化に 関する研究開発の課題と展望	CO2地中貯留 研究グループ長	徂徠 正夫	6
14:10 ~ 14:55	【招待講演】苫小牧 CCS 実証試験を通じた CO <sub>2</sub> 貯留技術に関する考察	日本CCS調査株式会社取締役貯留技術部長	萩原 利幸	8
14:55 ~ 15:40	ポスターセッション			
15:40 ~ 16:10	$CO_2$ 地中貯留における水理 / 力学的視点からの軟岩の特性評価	CO2地中貯留研究グループ	藤井 孝志	12
16:10 ~ 16:40	重力・自然電位を用いた低コストモニタリング 技術の開発	CO2地中貯留研究グループ	堀川 卓哉	14
16:40 ~ 17:10	地球物理シミュレーションと貯留層モニタリン グ設計	CO2地中貯留研究グループ	加野 友紀	16
17:10 ~ 17:15	閉会挨拶	地質調査総合センター長	中尾 信典	

#### ■ 研究グループ紹介

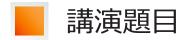
地下水研究グループの紹介	地下水研究グループ長	町田 功	20
鉱物資源研究グループの紹介	鉱物資源研究グループ長	星野 美保子	22
燃料資源地質研究グループの紹介	燃料資源地質研究グループ長	中嶋 健	26
地圏微生物研究グループの紹介	地圏微生物研究グループ長	吉岡 秀佳	30
地圏化学研究グループの紹介	地圏化学研究グループ長	保高 徹生	34
物理探査研究グループの紹介	物理探査研究グループ長	横田 俊之	36
CO2地中貯留研究グループの紹介	CO2地中貯留研究グループ長	徂徠 正夫	40
地圏環境リスク研究グループの紹介	地圏環境リスク研究グループ長	川辺 能成	44
地圏メカニクス研究グループの紹介	地圏メカニクス研究グループ長	雷 興林	48

#### ポスター概要

d-excess と <sup>17</sup> O-excess を用いた地下水の涵養域推定法について	町田 功, 小野 昌彦, 神谷 貴文, 村中 康秀	54
京都盆地における浅層地下熱伝導率に関する検討	吉岡 真弓, 内田 洋平, 冨樫 聡, シュレスタ・ガウラブ, 石原 武志	54
蛇紋岩を母岩とする強アルカリ性白馬八方温泉のメタンの起源	須田 好	55
シリカ鉱物析出反応と地震発生周期との相関性の定量評価	最首 花恵, 大坪 誠, 岡本 敦	55
除染廃棄物の最終処分に対する社会受容性に関する研究	高田 モモ, 保高 徹生, 白井 浩介, 大沼 進, 村上 道夫, 中谷 隼	56
山形県酒田市沖における表層型メタンハイドレート賦存域の海底状況把握 調査	浅田 美穂, 佐藤 幹夫	56
ミュオントモグラフィによる密度推定における空間・時間・密度分解能の 相互関係の実用性重視評価	児玉 匡史, 横田 俊之, 松島 潤	57
粘土鉱物表面への二酸化炭素・ メタンの競合吸着に関する分子動力学的 検討	志賀 正茂, 徂徠 正夫, 愛知 正温	57
地圏における重金属類の動態に関わる温度依存性評価	斎藤 健志, 川辺 能成, 小口 千明	58
微小地震観測に基づいた地熱地域における地下流動・構造の把握手法	岡本 京祐, 浅沼 宏, 青柳 直樹	58
地熱地域における地表水の pH 分布特性評価	鈴木 陽大, 浅沼 宏	59
上向きの地下水流れ発生地域における原位置地下水注水実験	金子 翔平,冨樫 聡,シュレスタ・ガウラブ, アリフ・ウィディアトモジョ,内田 洋平	59
地中熱利用のための島嶼における水文地質・地下水流動モデルの構築	シュレスタ・ガウラブ, 冨樫 聡, 内田 洋平	60

論文リスト

61



#### 産総研における CO<sub>2</sub> の地中貯留および 鉱物化に関する研究開発の課題と展望

Research and Development on CO<sub>2</sub> Geological Storage and Mineralization in AIST: Challenges and Prospects CO2地中貯留研究グループ長: 徂徠 正夫

Leader, CO2 Geological Storage Research Group:

Masao Sorai

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

#### 1. はじめに

近年の国際的な  $CO_2$ 排出量削減の流れを受け、二酸化炭素回収・貯留(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)への期待がより一層高まっている。例えば、建設・開発段階を含めた世界の商用 CCS 施設数は2020年に65であったのに対して、2021年には135に急増しており、特に米国や欧州を中心としてCCSへの流れが加速していることが伺われる。このように、CCSの商用化は一部でかなり進んできているものの、CCSの社会実装に向けては、貯留適地の確保、トータルコストの削減、ステークホルダーとの連携が不可欠であることが示されている。産総研地圏資源環境研究部門では、これらの課題解決に向け、特に  $CO_2$ 地中貯留の安全性評価をはじめ様々な研究開発に取り組んでいる。

#### 2. CO。地中貯留の安全性評価に関する研究開発

 $CO_2$ 地中貯留の安全性評価に関して、当部門では20年近くにわたり経済産業省主導の国家プロジェクトに従事してきた。この中では、特に貯留した $CO_2$ 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、当部門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きている。直近では、平成28年発足の二酸化炭素地中貯留技術研究組合に参加し、NEDO「CCUS研究開発・実証関連事業/安全なCCS実施のための $CO_2$ 貯留技術の研究開発」事業のもと、安全かつ大規模・効率的な $CO_2$ 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 $CO_2$ 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っている。

ここで当部門は、苫小牧実証サイトにおいて超伝導重力計により重力連続測定を実施した高精度重力モニタリング技術の開発、キャップロックの浸透率と毛管圧の関係をモデル化した長期遮蔽性能評価技術、剪断透水実験とモデルを組み合わせたジオメカニクスモデリング手法の開発、さらには国際動向を踏まえた社会受容性向上策の検討等に取り組んできた。一方で、これらの課題については実用化に向け一定の目途が得られたことから、今年度より一部の課題の統廃合を進め、新たな課題に挑戦している。具体的には、観測井への CO2の到達検知や圧入井の健全性評価等を意図した「自然電位による漏洩リスク検知技術の開発」と、岩石物性と断層すべりの関係を考慮したジオメカニクスモデリングを対象とする「断層安定性ジオメカニクス解析」が

挙げられるが,各課題の詳細については,本誌他の講演要旨を参照されたい.

#### 3. 高温貯留層での CO。挙動評価

高温貯留層に  $CO_2$ を圧入して地熱発電を行うと同時に、 $CO_2$ 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  $CO_2$ 地熱発電技術」が今年度より開始した。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、当部門では高温下での  $CO_2$ の挙動に焦点を当てた研究に取り組んでいる。

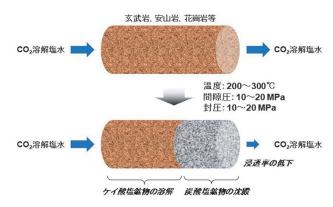


図1 流通試験による貯留層水理特性変化の検証

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(図1). 本研究では, この過程を再現するため, 岩石のコア試料を用いて種々の流速条件において流通試験を行い, 浸透率の経時変化や反応前後のX線CT観察等に基づいて, 高温高圧下での地化学反応が水理特性に及ぼす影響を評価する.

一般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 CO₂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。本研究では、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の取得を目指している。また、室内実験での再現が困難な時間・空間スケールでの反応メカニズムの理解促進の観点から、安山岩や玄武岩、花崗岩等の各種母材に関係する炭酸塩鉱物脈の産状を調査し、炭酸塩鉱物の反応と泉質の関係を

解明することも計画している.

これらの課題に関連して、地熱貯留層における  $CO_2$ の挙動は、濡れ性など $CO_2$  – 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: Molecular Dynamics)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も行う予定である。

4. 次世代大規模CCSに向けた玄武岩の適用性評価アイスランド CarbFix プロジェクトにおける CO₂の早期鉱物化の成功を起点として,近年,安全性の観点からの切り札として,玄武岩 CO₂貯留への関心が高まっている. 陸上の玄武岩は,アイスランドに加えて,米国・コロンビア川台地やインド・デカン高原など世界各地にみられるが,国内では主として日本海側を中心とした山間部に偏在しており,必ずしも CCS に対して適切な貯留層とは考えられていない.一方で,海洋底は基本的に玄武岩で構成されていることから,海底下の玄武岩を有効に活用することができれば,我が国は CO₂の貯留大国になる可能性を秘めている.

当部門では、産総研ゼロエミッション国際共同研究センター主導の融合領域研究「ネガティブエミッション技術の開発」において、「次世代大規模 CCS に向けた玄武岩の適用性評価」についても研究を開始した。本研究は、玄武岩への貯留に進む前の基礎検討の段階として、玄武岩そのものの CO₂貯留への適用性についての知見を取得することを目的としている。このために、過去に海底で形成されその後地表に露出した火山体や、比較的新しい玄武岩火山を対象と

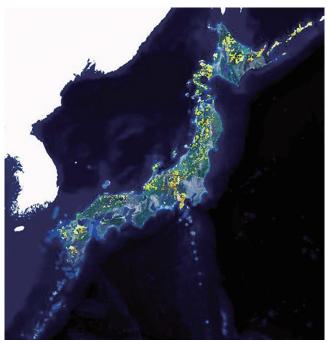


図2 日本における玄武岩を含む苦鉄質岩の分布 (産総研シームレス地質図)

し,玄武岩の地質学的性状を明らかにするとともに,採取した玄武岩試料の分析結果に基づいて海底火山体モデルを構築することを目指している(図 2 ). 併せて,玄武岩試料を用いた室内実験により,貯留層条件下での CO2固定能力を含めた水理・化学・力学特性等に関するデータを取得している.また,玄武岩中には金属元素が豊富に含まれることに注目し,貯留層内での触媒化学反応による CO2の炭化水素への転換の可能性についても検討を行っている.

#### 5. 風化促進技術評価への展開

究極のネガティブエミッション技術として、玄武岩等を 粉砕して農地等に散布し、風化により  $CO_2$ を鉱物化する風 化促進も最近注目されている。これは豊富な原料岩石を用 いて低コストで行える点が魅力であるが、机上の議論が先 行しており、実際の  $CO_2$ の鉱物化速度に加えて、散布後の挙 動や鉱害についての知見が不足している。当部門では岩石 の反応速度と  $CO_2$ 固定量の定量化を図るため、事業所屋上 での各種岩石試料の曝露研究に着手したところである。

#### 6. まとめ

当部門では CO<sub>2</sub>地中貯留に関する研究開発に長年従事してきた. CO<sub>2</sub>地中貯留は一部で商用化が進んでいるものの、どこでも誰でもできるという状況には程遠く, 貯留ポテンシャル, コスト, 社会的受容性, それぞれの観点から課題が残されている. これに対して, 玄武岩は CO<sub>2</sub>の鉱物化を通して,漏洩に対する懸念の払拭や, モニタリングの早期終了による低コスト化, さらには貯留ポテンシャルの拡大にもつながる可能性を秘めている. 今後は, 従来型の帯水層貯留に留まらず, 鉱物化を促進する玄武岩や高温岩体への貯留, 地表での風化促進まで, 天然のメカニズムを最大限に活用した技術を検討することで, 地域に見合った CO<sub>2</sub>削減に貢献していくことが重要であろう.

#### 参考文献

- 1) GCCSI: Global Status of CCS Report 2020, Final Report Volume1, (2020)
- 2) GCCSI: Global Status of CCS Report 2021, Final Report Volume1, (2021)

#### 【招待講演】 苫小牧 CCS 実証試験を 通じた CO。 貯留技術に関する考察

Discussion regarding Storage Technology of CO<sub>2</sub> through Tomakomai CCS Demonstration Project

#### 1. はじめに

地球温暖化について、 $CO_2$ の累積総排出量と世界平均地上気温の応答はほぼ比例関係にあり、温暖化抑制のためには人為的な  $CO_2$ 排出量を制限する必要があると指摘されている $^{1)}$ .2015年の COP21パリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて  $2^{\circ}$ より十分低く保ち、 $1.5^{\circ}$ に抑える努力をすること、そのため、できるかぎり早く世界の温室効果ガス排出量をピークアウトし、21世紀後半には、温室効果ガス排出量と(森林などによる)吸収量のバランスをとることなどが目標として掲げられた $^{2)}$ .

CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) とは、火力発電所や工場等で発生する $CO_2$ を大気中に排出せずに回収して地中へ貯留する技術であり、 $CO_2$ を利用する技術と合わせて CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) と呼ばれている。再生可能エネルギーの利用拡大やエネルギー利用の効率化等とともに地球温暖化対策の一つとして世界的に期待されており、IEAの見通しでは、2070年までの累積 $CO_2$ 削減量の15%を担うことが期待されている<sup>3)</sup>

#### 2. 苫小牧大規模実証試験概要

当社は、経済産業省、国立研究開発法人新工ネルギー・産業技術総合開発機構(以下、「NEDO」)の事業を受託して苫小牧における CCS 大規模実証試験(以下、「本事業」と称する。)を実施している。2012年度から2015年度にかけて設備の設計・建設・坑井掘削等の準備を行い、2016年4月から年間10万t規模の $CO_2$ の圧入を開始し、2019年11月に目標としていた累計  $CO_2$ 圧入量30万tを達成して圧入を中断し、現在モニタリング中である<sup>4)</sup>. 本事業の工程を図1に示す。



図 1 苫小牧大規模実証試験工程

本事業の全体フロー図を図 2 に示す. 近隣製油所の水素 製造設備から発生する,約52% 濃度の $CO_2$ を含む PSA (Pressure Swing Adsorption) オフガスの一部は1.4km の長さのパイプラインによりCCS実証試験センターの分離 回収設備まで輸送されて $CO_2$ 回収後,遠心式圧縮機で超臨 日本 C C S 調査株式会社 取締役貯留技術部長 萩原 利幸 Director, General Manager, Storage Engineering Dept. Japan CCS Co., Ltd. Toshiyuki Hagiwara Phone: 03-6268-7384, e-mail: toshiyuki.hagiwara@iapanccs.com

界状態 (7.38 MPa, 31.1℃以上) まで圧縮されて, 2 坑の 圧入井によって, 陸上から 3 ~4 km離れた海底下の異なる 深度の 2 層の貯留層である萌別層および滝ノ上層に圧入さ れる.

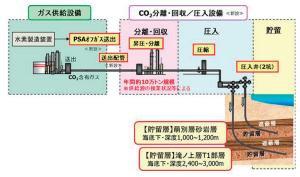


図 2 事業全体フロー図

本事業はロンドン条約1996年議定書を反映した国内法 (海洋汚染防止法) に基づく海底下  $CO_2$ 貯留であり、大都市 近郊において、地上から海底下に  $CO_2$ を圧入する CCS は世 界的にも初めての試みであり、この実証の成果は国際的に も注目が高い、ここでは圧入・ 貯留を中心に以下ご紹介 する.

#### 3. 圧入・貯留・モニタリング

圧入井は陸上沿岸部の坑口地点から高傾斜にて沖合の海底下へ向けて掘削された. 図 3 に示す萌別層圧入井は,掘削長3,650 m,鉛直深度1,188 m,最大傾斜角約83°で,坑口位置から坑底までの水平距離が3,058 mの大偏距井である

 $CO_2$ は、ケーシング(坑井を保護する鋼管)内に設置したチュービングと呼ばれる鋼管を通して貯留層に圧入される。 萌別層圧入井 IW-2の仕上げ区間として, $CO_2$ が貯留層全体の孔隙に浸透可能となるように,全区間1,194 m にわたり図3に示すような孔明管を設置する仕上げとした。

なお萌別層は固結度が比較的低く,砂岩粒子の坑内流入による閉塞が懸念されたため,仕上げ区間の孔明管を砂粒よりも目が細かいワイヤーラップスクリーンで覆い出砂対策とした. $CO_2$ の圧入は2016年4月に開始され,2019年11月には目標である累計30万tを達成し,圧入を停止した.萌別層の圧入実績を図4に示す.主圧入層である萌別層の圧入レート(図で赤)は $6.7\sim22万t/$ 年,坑底圧力計における最大圧入圧力(以下単に坑底圧入圧力,図では薄紫)は10.07MPaであった.

図3 萌別層圧入井 IW-2の形状(模式図)

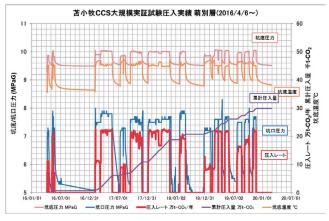


図 4 萌別層圧入実績

本事業では、モニタリングとして貯留層地点周辺における圧力温度および微小振動観測や海洋環境調査、圧入した $CO_2$ の挙動(移動、広がり)等のモニタリングを実施して $CO_2$ が貯留層内に安全に貯留されていることを確認している.関連設備配置図を図 5 に示す.

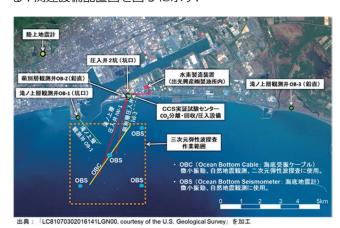


図5 モニタリング関連設備配置図(苫小牧西港)

圧入中の2018年9月6日に北海道胆振東部地震が発生した. 気象庁発表では地震の規模は M6.7, 震源は胆振地方中東部の深さ37 km が震源とされた. CCS 実証試験センターにおいても震度5弱相当の揺れを観測したが, 当該地震による設備への被害や異常は認められなかった. 地層の圧力と温度の値の連続観測では, CO2の漏洩を示唆するデータは確認されず, 地震発生後に開催した第三者専門家を含む検討会においてもCO2圧入と当該地震の因果関係があるとは考えられないとの共通認識が得られた50.

圧入した  $CO_2$ の挙動把握には石油探査で一般的な弾性波による反射法地震探査が応用されている。海上にてエアガン人工震源により弾性波を発生させて地下から反射してきた信号を水中の受振器で観測し、この観測記録からデータ処理により反射記録断面を作成して、地層の構造変化や地層の性質を連続的に把握する。本事業では、圧入前のベースラインデータと圧入中および圧入後の観測データとを比較してその差分を得ることにより、圧入した  $CO_2$ に起因すると推定される反射波の振幅から地下での貯留領域を把握している。図 6 に反射法による地下での貯留領域解析図の例を示す。図の右上の暖色領域が累計30万 t 圧入時の弾性波探査による  $CO_2$ 貯留領域,右下が貯留層シミュレーションにより計算された  $CO_3$ 貯留領域である。

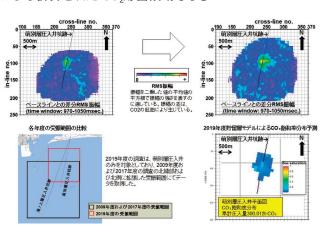


図 6 弾性波探査による CO<sub>2</sub>貯留状態評価 (左が2017年度, 右が2019年度)

#### 4. 貯留能力

CCS による  $CO_2$ 削減目標は排出量の  $1\sim 2$  割が見込まれており $^6$ ), 日本の場合は年間排出量が10億 t 程度なので,  $1\sim 2$  億t/年のCCSが見込まれる. 現在別途経済産業省・環境省から受託して実施している二酸化炭素貯留適地調査事業においても,安定的に地中貯留するための地質条件を満たしたうえで,貯留レート(年間何万t 圧入可能か)及び貯留可能量(累計何億t 圧入可能か)が重要な評価項目となっている.

#### 4.1. 貯留レート

貯留可能レートを決める要因として、図2の全体フロー において図7の各節点ごとに考える.

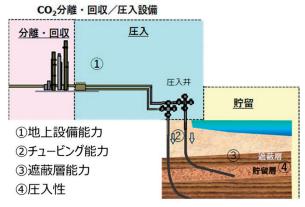


図7 節点解析による貯留レート評価概念図

#### ①地上設備能力

CO<sub>2</sub>圧縮機の能力として、最大吐出圧力及び流量が十分であることが必要である。本事業では、後述の最大圧入圧力を可能とする最大吐出圧力とし、流量はオフガス供給量に従い22万 t/年とした。

#### ②チュービング能力

チュービング内流速を機械的な摩耗作用が起きる流速以下にする必要がある. 一般的に使用されている式<sup>7)</sup> を用いて萌別層の場合について計算すると,チュービング径3.5インチ,4.5インチの場合でそれぞれ50万 t/年,100万 t/年程度となる. 本実証試験では最大圧入レートを22万 t/年と見込んでいたため,十分な能力を持つ3.5インチとした.

#### ③遮蔽層能力

遮蔽層を破壊しない圧力を坑底圧入圧力上限とする. 萌別層の場合は圧入井掘削時のリークオフテストの結果から12.63MPa とした. 本実証試験では, 萌別層の初期圧力9.3MPa に対して, 最大圧入圧力は10MPa 程度にとどまった.

#### ④圧入性

流体の圧入レートと必要圧入圧力を関係づけた圧入指数 にて表される.

$$(E \lambda 指数) = \frac{(E \lambda \nu - h)}{(E \lambda E \Delta) - (地層E \Delta)}$$

圧入指数は貯留層性状に依存し,高浸透性であるほど大きな値を示す.萌別層の場合は大変貯留層性状が良好であり最大4,000m³/d/MPa に達した.

貯留可能レートを決めるのは③遮蔽層能力と④圧入性であり、あらかじめ得られた評価と貯留計画に従い、それに応じた①地上設備及び②チュービングを設置すればよいので、 貯留適地として遮蔽層の強度と貯留層の浸透性が重要である.

#### 4.2. 貯留可能量

圧入された  $CO_2$ が安定的に貯留されるために以下のような制約がある.

- 貯留した CO₂が断層から十分離れていること.
- 貯留範囲として、あらかじめ承認された範囲内に収める 必要があり、現法に基づく場合は鉱業法での CO<sub>2</sub>-EOR であれば鉱区内、海洋汚染防止法に基づく場合は海域が 対象となる。
- 密度が大きく粘性が小さい超臨界での貯留が最も効率 的で挙動予測も確実なため、臨界点7.38MPa,温度 31.1℃以上での貯留が望ましい。

これらの制約条件のもと, 地層の不均質性や不確実性も加味した貯留層モデルを用いた流動シミュレーションによる将来予測により貯留可能量を評価する. 苫小牧においては萌別層圧入井 IW-2での坑井当り貯留可能量評価として約600万tが可能と評価されているが, それは図8に示すよ

うに圧入した CO<sub>2</sub>が陸域に到達するのを制約としているためである.

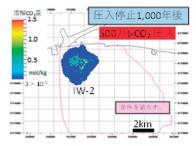


図 8 IW-2 累計圧入量600万 t 時の CO<sub>2</sub>分布

図8で示される広がりは圧入されたCO<sub>2</sub>が最上部の高浸透性の層に沿って広がった結果であり、下部には更なる貯留量が期待される。図9に圧入されたCO<sub>2</sub>の鉛直方向の広がりを断面図として示す。今回は累計圧入量30万tが目標であったため全区間仕上げとしたことから図9左側に示すように高浸透性の上部のみに圧入されたが、貯留層下部にはまだ十分に貯留可能と考えられ、あらかじめ坑井仕上げ時に上下選択的に圧入可能とすることで右側に示すように下部にも圧入した場合には1,200万t圧入可能と試算されている。

なお評価に際しては岩相の不確実性を表現するため複数の具現像を作成し、地球統計学を利用した確率論的評価を行い10%以上、50%以上、90%以上の確率で達成される圧入可能量を、それぞれ P10、P50、P90の最大圧入可能量とする統計的手法が推奨されている。概念図を図10に示す、上述は P50に相当するモデルについて述べている。

実際の構造単位の貯留可能量を評価する際には、複数の 圧入井の数と配置により貯留可能量が異なるため、コスト 見合いで圧入レートと圧入期間の最適化、圧入基地におけ る輸送 CO<sub>2</sub>受入港湾の稼働率や受入貯槽から要求される圧 入レート、実際の稼働期間を考慮した維持管理計画などを 検討したうえで、コスト、許認可、契約他、全て実現可能な圧 入貯留計画を策定することで実際の貯留可能量が評価される<sup>8)</sup>.

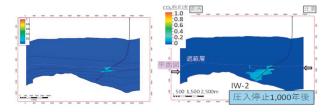


図 9 IW-2 最大累計圧入時の断面図(左 全区間圧入 右 上部 下部選択圧入)

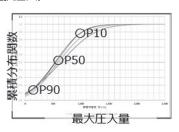


図10 地球統計学による圧入可能量評価

#### 5. 国内の貯留適地

安定的に地中貯留するためには以下の地質的条件が必要である.

- 貯留層が圧力上昇を吸収する十分な広がり・連続性を持つこと
- 遮蔽層が CO₂が漏出しない十分な遮蔽能力を持ち貯留層を覆っており,圧入により破壊されない十分な強度を持つこと
- 背斜構造や緩傾斜の同斜構造で圧入した CO₂が地下に 留まる地質構造となっていること
- 二酸化炭素の漏洩経路となりうる断層などが存在しないこと
- 過去に周辺で地震が集中して発生していないこと またこれら以外にも社会的受容性, 地理的条件や事業環 境などの外的要因も考慮する必要がある.

日本海域における貯留可能量推定調査は1990年代から行われており、2005年に地球環境産業技術研究機構 (RITE) が行った調査では、日本周辺の水深200m以浅の海域および陸域において約 1,460 億トンの  $CO_2$ 貯留能力が、2008年~2012年に NEDO が行った調査では、日本周辺の水深200m~1000mの海域において約900億トンの  $CO_2$ 貯留能力があると推定された $^{9)}$ . 図11に適地候補領域を堆積層厚毎に異なる色で示す.

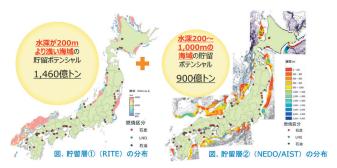


図 11 日本における貯留ポテンシャル評価 (左 RITE(2005) 右 NEDO/AIST(2012))

これらの結果はデータ密度の粗い2D 弾性波探査(概査) データを用いた簡易地質解析に基づくもので,石油開発業 界でいう容積法に近いものであり,前述のような貯留能力 を評価したものでないことから,今後3D 弾性波探査に加え て調査井の掘削及び追加データを用いた評価が望まれる.

国内 CCS 目標を 1 億 t/ 年とすると,概査とはいえポテンシャルはあるものと期待される一方で,1 坑当たりの圧入レートを最大50万t/年とすると圧入井は200坑以上必要となり,坑井掘削や圧入施設, $CO_2$ 海上輸送に伴う船舶及び港湾施設などの準備も考慮すると,今後の同調査事業の速やかな進捗が期待される.

#### 6. CCS 社会実装にあたっての課題

本稿では触れないが、国内で早期に CCS を実用化する際の大きな課題として以下が挙げられる.

- 安全性確保のための最適なモニタリング手法や貯留技 術の適用に向けた検証
- 排出源と貯留適地が離れている場合における船舶,パイプラインによる長距離輸送の検討及び実証
- CCS の実施に際する事業法となる関係法令の整備と適切な保安管理体制の構築
- インセンティブを含む導入促進施策の整備
- ステイクホルダーとの社会的合意に基づく事業実施体制 の構築と責任主体の明確化
- 地域社会の理解と協力を得た良好な関係のもとでの事業実施体制の構築

当社は、今回ご紹介した苫小牧実証事業のほか、CO<sub>2</sub>船舶輸送実証試験を共同にて経済産業省から、貯留適地調査事業を経済産業省と環境省から、二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進(カーボンリサイクル)事業を共同にて環境省からそれぞれ受託している。当社は、こうした国等による実証試験の実施部隊としての役割を担い、今後とも CCUS の早期社会実装促進に貢献する所存であり、引き続きご指導をよろしくお願いしたい。

#### 参考文献

- 1) IPCC Fifth Assessment Report (AR5)
- 2) 21th Conference of the Parties to the United Nations Conventionon Climate Change (COP21)
- 3) IEA 2020, Energy Technology Perspectives 2020
- 4) 苫小牧における CCS 大規模実証試験30万トン圧入時 点報告書;2020年5月,経済産業省,国立研究開発 法人新エネルギー・産業技術総合開発機構,日本 CCS調査株式会社
- 5) 北海道胆振東部地震の  $CO_2$ 貯留層への影響等に関する 検討報告書; 2018 年 11月,日本CCS調査株式 会社
- 6) IEA(2021) Net Zero by 2050; a Roadmap for the Global Energy Sector
- 7) API RP14E erosional velocity equation
- 8) CO<sub>2</sub> Storage Resources Management System; SPE July 2017
- 9) 環境配慮型 CCS 実証事業貯留技術について ; 平成31 年3月5日 CCUS の早期社会実装会議

# CO<sub>2</sub> 地中貯留における水理/力学的視点からの軟岩の特性評価

Assessment of hydromechanical response of soft rocks for CO₂ geological storage

CO2地中貯留研究グループ:藤井 孝志 CO2 Geological Storage Research Group:

Takashi Fujii

e-mail: takashi.fujii@aist.go.jp

#### 1. はじめに

安全な地下利用(CO2回収・貯留(CCS),地熱利用,地層 処分等) において, 地中への流体圧入に伴う岩盤の力学変 形と透水の関係を理解することは必要不可欠である. とく に本講演で対象となるCO<sub>2</sub>地中貯留においては,貯留層(主 に砂岩層) への CO,流体の圧入に伴い,岩盤内で流体圧が 上昇することで岩盤の変形を引き起こし, CO<sub>2</sub>隔離の要の キャップロック(主に泥岩,または頁岩で構成)を変形さ せる可能性がある. CO2地中貯留層を構成する岩石には,無 数のき裂や微小断層(複数き裂の連結体)が存在する. そ のため,圧入に伴う岩盤の変形は,同時にき裂の進展や微小 断層のすべりを生じさせ、やがては CO<sub>2</sub>の漏洩を引き起こ す可能性が示唆されている. [1] これまで, スレイプナー(ノ ルウェー) やインサラ (アルジェリア) をはじめ, 数多く の CCS 技術の基礎および実証試験が行われてきた. また, 近年,日本では初のCCS実証試験が北海道苫小牧で実施さ れ,約30万トンのCO<sub>2</sub>貯留を達成している.このような,世 界各地域における CO<sub>2</sub>地中貯留サイトの地質年代は, 古い ものではカンブリア紀から,新しいものでは新第三紀のも のまでと幅広い分布をもっている. このことは, 岩盤の力学 特性(強度, 脆性度等), および水理特性(間隙率, 浸透率) も,サイトごとで様々な特色をもつことを意味している.海 外の場合には、主にカンブリア紀、石炭紀、ジュラ紀等とか なり古い地質年代のものが多く、それらの岩盤は、固結度が 高く,間隙率が小さいのが特徴的である.一方で,日本の場 合には苫小牧サイトの例で見られるような,新第三紀を主 とするかなり新しい岩盤であり、固結度が低く、間隙率が大 きい特徴をもつ.(以後,前者のような岩石を硬岩,後者を軟 岩と呼ぶ.) これまで海外の CCS サイトを想定した硬岩に おける力学, 水理の関係を調べた研究例が数多く存在する なかで、日本のサイトで見られるような軟岩については、未 だに研究例が少ないのが現状である.

本研究では、日本の様々な軟岩を対象に、まずは、 $CO_2$ 地中貯留条件下での力学物性と透水の関係を把握の上で、貯留層への  $CO_2$ 圧入過程で想定される応力場の変化が、微小断層を含む岩石の透水性に与える影響を調べることを目的とする.

#### 2. 実験方法

本研究では、苫小牧CCS実証試験サイトの現場掘削コア、および日本のCO2地中貯留候補地の選定事業に関連した基

礎試錐コア, ならびに CO₂地中貯留層のモデルとなる日本各地の露頭岩を対象に、キャップロックの泥岩、 頁岩、および貯留岩の砂岩、 凝灰岩を用いた. 用いたすべての岩石試料は、 円柱状(直径50mm 長さ20mm)に成形した上で、 実験に供した. 本実験は、岩石試料の変形、 せん断破壊、 すべりの一連の挙動を調べることが可能な、 鉛直方向に対して30度の角度にプレカットされた特殊金属治具を用いて直接せん断・透水実験手法を採用している. [2]

本実験における載荷プロセスは,まずは,(i) 有効圧(封圧から,間隙圧を除いた圧力)一定条件下で,一定割合の荷重と変位を与え,岩石試料に変形,破壊,すべりを生じさせながら浸透率を測定する.(ii) つぎに,応力緩和(変位一定)後に,CO2圧入を想定するため,間隙圧一定で,封圧を変化させ,有効圧を変化させながら浸透率を測定する.

実験後には、マイクロ X 線 CT を用いて、形成された各種 岩石におけるせん断帯の形態を把握した。

# 3. CO<sub>2</sub>地中貯留条件下での軟岩の力学挙動(変形・せん断・すべり)と透水の関係

プロセス i)において、各種軟岩(BM, WS, OM)における初期浸透率 $k_0$ で規格化した浸透率 $k/k_0$ と軸変位の関係を図 1 に示す. なお、 $k_0$ を、体積ひずみ0.1% 以内の最小値とした. また、図中の矢印は、試料の破壊に伴う最大の応力低

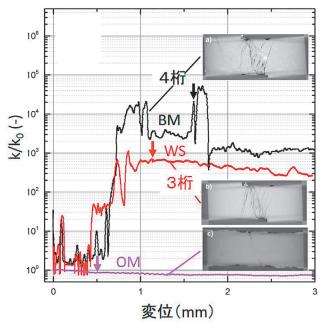


図 1 キャップロック(BM, WS, OM)における軸変位と $k/k_0$ の関係

下が見られた時点を示す.図1に示すように,すべての岩石において,変形,破壊前におけるk/koの値は,一部に大小の変動が見られるが,ほとんど変化しないことがわかった.一方で,破壊後は,BM,およびWSともに,破壊時点よりも手前でk/k0の急峻な変化が見られたものの,OMの場合には,破壊前後で変化がほとんど見られないことが明らかとなった.BMにおける破壊後のすべり挙動の間,その他の試料にはないk/koの変化傾向については,実験後のX線CTの結果とほぼ一致することがわかった.急激なk/koの変化が見られたBMとWSにおいては,想定するせん断帯の形成が明確に見られた(図1a,b)が,OMの場合には,不明瞭であり,透水パスがほとんど発達していないことが明らかとなった.(図1c)

#### 4. CO<sub>2</sub>圧入過程による応力場の変化が透水挙動に 及ぼす影響について

プロセス ii)では、応力緩和後に間隙圧一定で有効圧を 10→15→2 MPa の順に変化させた際の k の変化を図 2 に示す。有効圧の増加過程では、BM のみが開始と同時に一旦 k の急激な低下が見られたあとに一定値を示した。一方で、WS、OM ともに有効圧の増加に伴い若干の減少傾向が見られた。これは、有効圧の増加に伴う断層のシーリングが生じることで、浸透可能な空間が小さくなることによるものである。有効圧の減少過程では、各種岩石ごとに異なる k の変化パターンが観測された。とくに、有効圧減少中の k の増加パターンについては、微小地震(AE)法を用いて有効圧と岩石の関係を調べた研究によると、せん断した断層面を開閉する有効応力条件は、せん断破壊時の条件が基準になることが確認 [3] されている。すなわち、図 2 に示すように、有効圧が、せん断破壊時(10MPa)を下回ったことで、断層

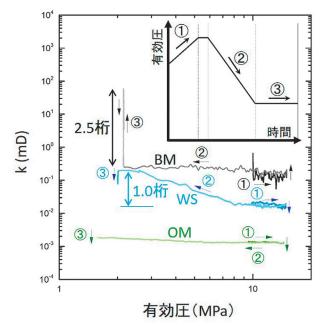


図 2 せん断実験後のキャップロックの有効圧変化過程に 対するkの変化

が開口したため, k が徐々に増加したものと推測される. し かしながら, BM については, 有効圧が最小値に到達後に, 急激に k が増加した. 一方で, OM の場合には, 本過程を通 じ,他の岩石に比べ,kの変化がほとんど見られないことが わかった. ここで,実験後の試料の断層面におけるラフネス 評価 (JRC; [4]) を行った結果, すべての過程を通じて kが 大きく変動する傾向が見られた BM が, 最も粗い破断面を もつことがわかり、対照的に、ほとんどkの変化が見られな かった OM の場合には、最も滑らか面をもつことがわかっ た. 本実験の結果から見ると, 各種岩石ごとの有効圧に対す る k の変化の違いは、形成された破断面のラフネスの違い に依存する可能性が考えられる. 実際には, Phillips ら [5] の結果に基づくと、平滑な面をもつ試料は、粗い面の場合よ りも有効圧に対する浸透率の変化が小さくなる傾向が確認 され、また、最小の有効圧条件下では、粗い面ほど、平滑な面 の場合に比べ浸透率の変化が大きくなる傾向が確認されて いる. すなわち, ラフネスの解析結果を本実験のせん断・透 水の実験結果に照らし合わせてみると、Phillips らの結果と 調和的であったといえる.

#### 5. まとめ

本研究の結果から、せん断に伴うkの変化量、その後のすべりに伴うkの変化挙動、ならびに有効圧変化とkの関係については、各種軟岩ごとで違いが見られることが明らかとなった。そのような違いは、各種岩石の破断面におけるラフネスの違いが要因の一つになったと推察された。また、すべての岩石のなかで、kの値がほとんど変化しなかったOMは、CO2地中貯留に対し、キャップロックの健全性がきわめて高いことがわかった。

#### 参考文献

- 1. Zoback, M.D., Gorelick., S.M. PNAS 109 (26) (2012) 10164-10168.
- 2. Fujii, T. et al. Mat. Trans. 56 (5) (2015) 679-686.
- 3. Holcomb, D.J. Geophys. Res. Lett. 20 (19) (1993) 2119-2122.
- 4. Barton, N.R. et al. Rock Mech. 10 (1977) 1-54.
- 5. Phillips, T. et al. Water Resour. Res. 57, e 2020WR028671 (2021) 1-23.

#### 重力・自然電位を用いた低コストモニタ リング技術の開発

Gravity and Self-Potential Methods for Low-cost CO<sub>2</sub> geological Storage Monitoring

CO2地中貯留研究グループ:堀川 卓哉 CO2 Geological Storage Research Group:

Takuya Horikawa

Phone: 029-862-6445, e-mail: t.horikawa@aist.go.jp

#### 1. はじめに

地下に圧入した  $CO_2$ の挙動を探知し監視するモニタリングは、 $CO_2$ 圧入の安全管理と最適化、そして漏洩等の予期せぬ事態の検知を目的とし、CCS 事業の実施だけでなく社会的受容性確保のためにも不可欠である。 $CO_2$ 地中貯留におけるモニタリングは、圧入井・観測井における温度、圧力測定といった直接的なものに加えて、陸上・海上から $CO_2$ プルームの広がりを把握する弾性波探査が標準的に実施されている。一方で、弾性波探査は定期的に行うにはコスト、地元負担等が大きく、特に事業収入が無くなる圧入終了後のモニタリングについては安全性の確保とともに、その総コストを抑えることが非常に重要となる。

産総研では、弾性波探査を補完するモニタリング手法として、比較的コスト面で有利な受動的物理探査手法に注目し、 $CO_2$ 地中貯留への適用性の検討を実施してきた。本項では、その中でも2015年以降、当グループで中心的に取り組んできた重力探査・自然電位探査を用いたモニタリング手法について紹介する。

#### 2. 高精度重力モニタリング

#### 2.1. 原理・概要

万有引力の法則で示される通り、地表で観測される重力の値は、その地下にある物質の密度の大小に依存する。地下に圧入した  $CO_2$ は周囲の流体と異なる密度を持つため、地表では  $CO_2$ の圧入量やプルームの広がりに応じた重力変化が観測される。実際にノルウェー沖のスライプナーでは、8年間で580万トン超の $CO_2$ 圧入に伴う重力変化を捉え、また定期的な重力観測から圧入した  $CO_2$ が周囲の水に溶解していく速度を見積もる試みもなされた (Alnes et al., 2011).

スライプナーで用いられた海底重力計はいわば精密なバネ秤であり、重力の違いによるバネの伸びの微小な変化を測定する。本方式は古くから相対重力計に用いられてきた手法であるが、測定精度が数マイクロガル (1ガル =1cm/s²)であり、さらに年間数ミリガル程度のドリフトが生じる。一方、我が国において、CO2圧入に適した貯留層は主に海底下に賦存すると考えられるが、諸条件から推定される重力変化量は貯留層直上においても年間数マイクロガルであり、従来の相対重力計を用いた連続観測で重力変化を検出するのは困難である。

これに対して超伝導重力計は、液体ヘリウム中の極低温 状態において、ニオブ製中空球を磁場中に浮上させる力を バネによる弾性力の替わりに用いることによって,マイクロガル以下の高分解能を持つ相対重力計となっている. 超伝導重力計は測地観測所などの学術的用途に限定されて使用されることが多かったが,微小な重力変化を検出できることから近年地熱など貯留層モニタリングへの活用が期待されている. この流れを受け,これまで産総研は世界に先駆けて, CCS サイトにおける超伝導重力計を用いた高精度重力モニタリング技術の開発に取り組んできている.

#### 2.2. 苫小牧サイトにおける重力モニタリング

産総研では、二酸化炭素地中貯留技術研究組合(以下、技組)の中で「 $CO_2$ 長期モニタリング技術の開発」として、苫小牧の国内実証試験圧入基地近くに観測点を設置し、超伝導重力計 iGrav による重力モニタリングを2015年 3 月以降実施してきた(図 1).



図 1 苫小牧における産総研の重力観測点 手前の白いドーム内に超伝導重力計が収められている.

本観測点は海岸近傍にあるため, 風雪・波浪・塩害等が観測システムへダメージを与えるとともに, 観測データにも大きなノイズを生じさせる. そこで重力計を格納するエンクロージャに加え, 防風柵等を設置することで, 海岸沿いの悪条件に耐えうる観測システムを確立し, 6年以上にわたる重力の連続観測を達成している. また, 沿岸域に適したノイズ除去手法を開発・適用することで, 従来の相対重力計では難しかった 1 マイクロガル程度の変化が検知可能になった (Goto et al., 2019). 本事業ではさらに, CO₂の圧入や移動に伴う重力変化の検知可能性の検討, 複数の超伝導重力計を用いたより高精度な重力モニタリング手法の提

案等, 苫小牧以外の貯留サイトへの展開を見据えた検討を 実施し, 沿岸域 CCS における高精度重力モニタリング技術 を確立した.

#### 3. 自然電位 (SP) モニタリング

#### 3.1. 原理・概要

自然電位(Self Potential,以下,SP)とは、地面に自然発生的に存在している電位差のことを指し、界面動電現象(流動電位),酸化還元電位,拡散電位など様々な要因から生じる。一般に、SP モニタリングでは複数の非分極性電極を地表,または坑内等に設置し、電極間の電位を測定する。 $CO_2$ 地中貯留によって地表に発生する SP 変化の要因として流動電位と酸化還元電位が考えられ、前者は  $CO_2$ 圧入に伴う貯留層内の流体流動を,後者は坑井周囲への  $CO_2$ 到達や漏洩を検知できる可能性がある。

産総研では、坑井周囲における  $CO_2$ の存在を地表から検知するセンサーとしての役割に着目し、夕張や米国 Anethテストサイトでの  $CO_2$ 圧入実験において坑口近傍の SP 変化を観測してきた(Nishi and Ishido, in press). その結果,圧入開始とともに圧入井近傍に設置した電極の電位増加が観測された。一方、これらの観測,及びシミュレーションによる検討から、地表に埋設した電極間の電位差を測定する従来の SP モニタリングは,降水など地面表層付近の流動や電極の接地状態に影響を受けやすく,ケーシングの電位変化を直接測定した方がより安定的なモニタリングが可能であることが分かってきた。

#### 3.2. 実サイトにおける SP モニタリング

産総研では、2021年12月より実サイトの坑井(圧入井2坑、観測井2坑)を用いて、ケーシング電位のモニタリングを開始した。各坑井のケーシング電位は、坑口から10m程度離れた場所に埋設した電極の電位を基準として、圧入井で約-400mV、観測井で-650~-750mVを示し、その値は

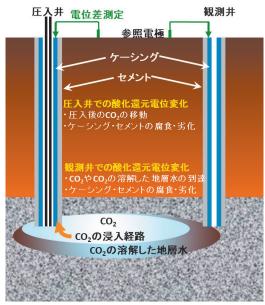


図 2 SP モニタリングの概念図

今のところ安定している. 一方で, 観測データからは降水に伴う短周期ノイズや, 複数埋設した地表電極の内の一部では電位のドリフトが見られ, 今後モニタリングの継続とともに, 長期連続データの中から CO₂起源の信号を抽出するデータ処理方法の開発を予定している.

#### 4. まとめ

CCS 事業の実施に当たっては CO<sub>2</sub>圧入中だけでなく, 圧入終了後においても長期間のモニタリングが必要とされる. 産総研では, 弾性波探査を補完するデータを取得し, モニタリングコストの低減を目的として重力, 及び自然電位を用いたモニタリング手法の研究開発を実施してきた. どちらも国内・国外のサイトでの観測を実施し, 重力モニタリングについては苫小牧の実証試験サイトにおいて長期間の連続観測を達成, ハード・ソフトの両面において運用手法を確立した. 一方, 自然電位については今年度よりフィールドでの観測が始まり, 今後データの蓄積と処理手法の開発が期待される.

なお、これらのモニタリングにより得られた重力・自然電位の変化を解釈し、CO<sub>2</sub>地中貯留に活用するためには適切な貯留層モデルを用いた数値シミュレーションとの比較が非常に重要となる。 産総研では CO<sub>2</sub>地中貯留に伴う重力等の変化を計算する地球物理シミュレーションについても研究開発を実施しており、詳細は本誌の加野の項を参照いただきたい。

#### 参考文献

- 1) Alnes et al. (2011) Results from Sleipner gravity monitoring: updated density and temperature distribution of the CO<sub>2</sub> plume. Energy Procedia 4, 5504-5511.
- 2) Goto et al. (2019) Continuous gravity observation with a superconducting gravimeter at the Tomakomai CCS demonstration site, Japan: applicability to ground-based monitoring of offshore CO2 geological storage. Greenhouse Gas Sci. Technol. 0, 1-14.
- Nishi and Ishido (in press): Self-Potential Monitoring for Geologic Carbon Dioxide Storage.
   In Geophysical Monitoring for Geologic Carbon Storage (eds Huang, L.).

#### 地球物理シミュレーションと貯留層モニ タリング設計

Geophysical simulation and design of reservoir monitoring

CO2地中貯留研究グループ 主任研究員:加野 友紀 Senior researcher, CO2 Geological Storage

Research Group: Yuki Kano

Phone: 029-861-3774, e-mail: y.kano@aist.go.jp

#### 1. はじめに

CCS においては $CO_2$ が安全に貯留されていることを確認 し、もし貯留層からの漏洩が起こった時には早期に検知するためのモニタリングが不可欠である。このモニタリングは圧入中のみならず圧入停止後も長期に渡って必要とされるため、 $CO_2$ の挙動を確実に捉えると共に効率的な手法であることが望ましい。地下の $CO_2$ 挙動を捉える代表的な手法に弾性波探査が挙げられるが、それに加え重力、地表変動、自然電位、比抵抗など様々な地球物理学的手法が効率的モニタリングの手段として挙げられる。各手法の有用性を評価するためには、想定される挙動において観測可能な変化が生じるかを定量的に予測する必要がある。

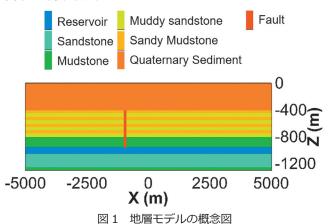
産総研では  $CO_2$ 地中貯留における低コスト地球物理学的手法の適用に関し、フィールドにおける観測等を通じた技術開発を行うと共に、貯留層の流体流動およびそれに伴う地球物理学的データの変化に関する数値モデリング・シミュレーション技術を開発し、貯留層モニタリングの設計に資することを目指している。本稿では圧入された  $CO_2$ の漏洩を含む長期挙動およびそれに伴う地球物理学的データの変化について数値シミュレーションを行い、どのようなモニタリング手法の組み合わせや配置が想定シナリオに対し有効かを検討した事例について紹介する。

#### 2. 数値モデル

シミュレーションのため、水平10 km × 10 kmおよび鉛直方向1.3 km の 3 次元モデルを構築した(図 1 ). 地下約 1 km に厚さ100 m の貯留層、その上部に厚さ150 m の遮蔽層を配置している。 遮蔽層の上部には副次貯留層・遮蔽層となる400 m 厚に渡る砂泥互層、さらに最上部には厚さ400 m の第四紀堆積層が存在する。  $CO_2$ は100万トン/年のレートで50年間圧入されるものとした。シミュレーションは圧入期間の50年と停止後の50年、計100年間について行い、漏洩が起こらないベースケースと、圧力が最も高まる圧入停止直後の t=50年に鉛直断層が開口し漏洩が起こるケースを設けた。

流動シミュレーションは汎用貯留層シミュレータSTAR<sup>1)</sup> および  $H_2O$ ,  $CO_2$ , NaCl の三成分を扱う状態方程式  $SQSCO2^2$ ) を用いた. また, 弾性波, 重力, 自然電位, 地表変動等の地球物理データの計算には STAR の地球物理ポストプロセッサ<sup>3)</sup> を用いた. ポストプロセッサは流動シミュレーションの結果を基に各種地球物理学的物性値を計算し、そ

の分布から物理探査における観測量を計算する.流動シ ミュレーションとのカップリングは行われていない点には 留意が必要である.



#### 3. 流動シミュレーション

図 2 に漏洩ケースの圧入停止直後(断層開口時, t=50年)および断層開口後50年(t=100年)時点の $CO_2$ プルーム分布を示す。断層が開口すると  $CO_2$ は断層を通じて上昇し、やがて第四紀層に到達(断層開口後約1.1年後)し、その後副次帯水層にも一部広がりながら地表まで到達した(断層開口後約14.5年後)。ベースケース(無漏洩時)では t=100年においても  $CO_2$ は遮蔽層下に留まり浅層に漏洩してくることはない。

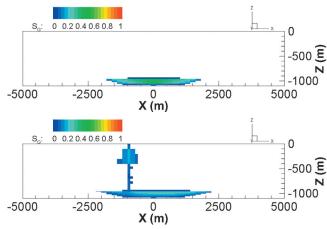


図 2 漏洩ケースの (上) t = 50年および (下) t = 100年 における CO₂プルーム分布

#### 4. 地球物理シミュレーション

図3-7にそれぞれ繰り返し弾性波探査,超伝導重力計による定点連続観測,繰り返し二次元重力測定,繰り返し地表

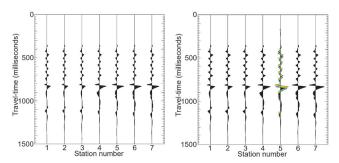


図 3 漏洩ケースの(左)t=51年および(右)t=55年 (青)におけるP波振幅のt=50年(黄)との差.測 点は500m間隔でStation5が漏洩点直上.

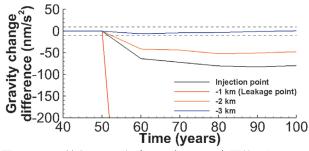


図 4 Y = 0軸上の圧入点 (X = 0) からの各距離における 無漏洩時と漏洩時の重力経時変化の差異.

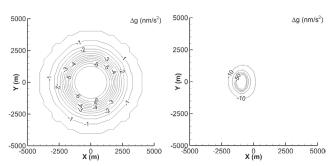


図 5 (左) 無漏洩時および(右) 漏洩時における t = 50 年と t = 51年間の二次元重力変化分布.

変動計測,坑井電位の坑口連続観測を想定した,地球物理学的データの変化について示す.

弾性波探査では漏洩開始後から5年以内に漏洩点直上では検知が可能と見られるが,漏洩点から500 m離れた位置では変化が見られない.超伝導重力計による定点連続観測では,漏洩点直上であれば漏洩開始後 CO₂が浅部第四紀堆積層に到達するより早く検知可能となると考えられる.また,1 km離れた地点でも数年以内には検知可能となった.特に圧入点直上では漏洩による変化が大きい.繰り返し二次元重力探査では漏洩が起こらない場合の変化はほとんどないが,漏洩が起こると漏洩点近傍での変化が早期から顕著に顕れ,検知可能な変化が漏洩点から半径約500 mに渡って生じる.

地表変動でも同様で、圧入停止後、無漏洩時は圧力緩和によりわずかな沈降を見せるが、漏洩が起こると漏洩点近傍で検知可能な隆起を見せている。 坑井電位は  $CO_2$ が坑井沿いに上昇する観測井で大きな上昇を見せると共に、圧入井でも  $CO_2$ の移行に伴い検知可能な低下が見られた。

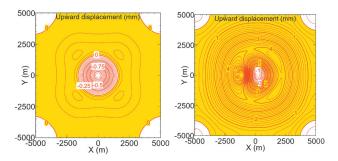


図 6 (左) 無漏洩時および(右) 漏洩時における t = 50 年と t = 51年間の地表変動分布.

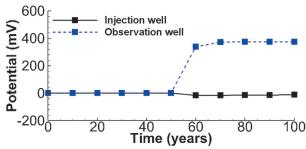


図 7 圧入井 (X = 0) および観測井 (X = -1 km) における無漏洩時と漏洩時の坑井電位経時変化の差異

#### 5. 貯留層モニタリング設計

弾性波探査は3次元のプルーム分布を把握するための情報量が多く得られ、また多様なサイト条件に適用可能である.一方、定点重力や坑井電位の連続観測は配置に制限があるが、漏洩の可能性を非常に早期に検知できる.また、連続観測による漏洩可能性を検知した場合、二次元の重力や地表変動計測は漏洩箇所を早期に特定できる可能性がある.圧入停止後の CO<sub>2</sub>は異常が発生しなければ移動は限定的で、詳細な情報をこまめに得る必要は少ない.低コストで連続的な観測手法により異常を検知した際に、漏洩箇所の特定等のためより詳細な情報を得られる手法を適用するなどの計画が考えられる.

こうした検討は、CCS プロジェクトにおいて有効かつ効率的なモニタリングネットワーク・プランを設計するに際し、非常に有用である.

#### 参考文献

- 1) Pritchett, J.W. STAR User's Manual Version 9.0. SAIC Report Number 02/1055, (2002)
- 2) Pritchett: New "SQSCO2" equation of state for the "STAR" code. SAIC, (2008)
- 3) Pritchett: Verification and Validation Calculations Using the STAR Geophysical Postprocessor Suite. SAIC Report Number 03/1040 (2003)



#### 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体系的に取りまとめている。同じく地層処分に係る沿岸域の深層地下水流動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(Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia: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拡げている。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と発信強化

「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。近年では2021年3月にNo.12「紀の川平野」が出版された。現在も複数地域での調査が行われており、「越後平野」「静清地域」「仙台平野(第2版)」は次年度の公開を目指してとりまとめが行われているとともに、「京都盆地」「沖縄」に関しても調査が始まっている。

また、これら地下水情報に関しては、2019年度より発信の強化を目指した取り組みが行われている。2019年度には水文環境図のウェブ発信を開始するともに、全国水文環境データベースのプラットフォームを公開した。また、地質調査総合センターの前身である旧地質調査所時代に公開された日本水理地質図(1961~1998)は、これまで紙媒体あるいはウェブにてラスターデータとして公開されてきたが、近年、関連業界より、これらをGIS(地理情報システム)やGoogle Earth等で閲覧可能にしてほしいという要望が寄せられている。そこで本年度より、これらのベクトルデータ化(Keyhole Markup Language(KML)形式化およびシェープファイル形式化)を行うこととした。日本水理地質図は合計41地域が公開されており、その内容は多岐にわたる。そこで今年度は日本水理地質図のベクトルデータ化

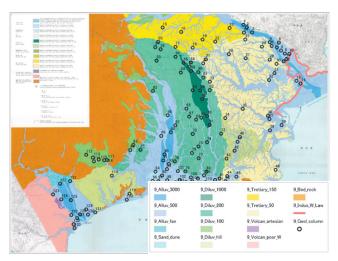


図1 ベクトルデータ化した日本水理地質図9 多摩川右岸,相模川および酒匂川流域

にかかる作業方針および仕様を決定することを目標とした。この目標を効率的に達成するためには、実際に作業を行い、その過程で生じる様々な課題を抽出しつつ、解決していくことが早道である。そこでまずは関東平野および周辺の以下の5地域に関して試作を行うこととした(図1)。成果は本年度中に公開する予定である。

- ·日本水理地質図 2 関東平野中央部
- ·日本水理地質図3 関東平野西南部
- ·日本水理地質図7 千葉県西部
- ・日本水理地質図 9 多摩川右岸, 相模川および酒句 川流域
- ・日本水理地質図10 関東平野北西部(赤城山・榛名山を中心として)

#### 2.2. 高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する 研究

現在,社会的な関心を集めている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検討されている.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月に国から科学的有望地マップが公開され,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



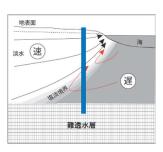


図 2 ボーリングの風景(左)と調査地点の概念図(右) 沿岸部の地下水は,浅層から深層に向かって淡水,塩淡境 界,塩水へと移りかわる.ボーリングはこの領域を横断し たものである.特に深層の塩水領域の地下水の挙動を調 査した例は皆無である.

を行なってきた、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、ボーリング調査結果と物理探査の両面から陸海接合部の深層地下水の実態把握を行い、その結果、沿岸海域の地下深部には、氷河期を越えた長期的に安定した地下水塊が存在することを発見した。

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行なっている。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調査を行い、塩淡境界付近の地下水流動に関する知見の蓄積を行なっている。

現在行なっているボーリング調査は深度400m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(図2)。

#### 2.3. 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.日本の企業がアジア諸国へ展開する場合,「水」の安定供給は必要不可欠であり,そのためにも国の研究機関である産総研は,長期的展望に基づ

いて, アジア地域における貢献を積極的に行っていく.

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。一例としては、地下水のd-excessと<sup>17</sup>O-excessに注目しこれら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、平野部地下深層に分布する古い地下水年代を持つ地下水の地球化学的研究、我が国の地下水管理のトップランナーの1つである神奈川県秦野市において深層地下水資源の評価を念頭においた広域地下水流動研究、再生可能エネルギーの1つである地中熱利用に資するための熱応答試験の解析技術の高度化や効率的な適地選定方法を求めるための現地調査、永続的に低pH、高金属イオン濃度の廃水が発生する坑廃水問題に資するための鉱山地域での水文調査、地震による崩壊が地下水や渓流水に与える影響を評価するための水文調査、などがある。

これらの他にも、水循環基本法の制定によって地下水のガバナンスに取り組もうとしている自治体関係者や、近年盛んになっている地下水の水処理関連の企業関係者に対して、地下水の適切な利活用や管理法などに関する講演をおこなっている.

#### 3. グループの研究体制

町田 功 (グループ長)

井川 怜欧 (主任研究員)

吉岡 真弓 (主任研究員)

小野 昌彦 (研究員) \*出向中

松本 親樹 (研究員)

吉原 直志 (研究員)

丸井 敦尚 (招聘研究員)

内田 洋平 (併任)

冨樫 聡 (併任) \*出向中

シュレスタ ・ ガウラブ (併任)

石原 武志 (併任)

アリフ・ ウィディアトモジョ (併任)

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)

菅谷 裕行 (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 Resources Research Group 研究グループ長:星野 美保子

Leader, Mineral Resources 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. メンバー構成と主な担当

研究グループ長

星野美保子(鉱石評価,鉱床成因研究)

主任研究員・研究員

児玉信介(広域資源評価,遠隔探知技術)

実松健造(鉱床成因研究,探査法開発)

昆 慶明(微小域元素・同位体分析)

荒岡大輔(元素・同位体分析,鉱石評価)

綱澤有輝(選鉱,粉体工学)

大野哲二([兼務] 基盤情報の整備・発信)

高木哲一([兼務] 非金属鉱物資源調查)

産総研特別研究員 PD

Tomy Alvin Rivai(鉱床成因研究)

テクニカルスタッフ

生田目千鶴

徳本明子

杉山貴子

阿川友紀子

佐野綾子

リサーチアシスタント

左部翔大([秋田大]鉱床成因研究)

客員研究員 4 名, 国際制度来所者等 5 名.

#### 3. 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いるが、本年はWeb会議等も活用した現地への協力が主であった。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。

#### 3.1. 鉱床の成因理解と探査のための研究

#### (1) 新たな地化学探査法の開発

世界中で確認されている金属鉱床のほとんどは、その一部または変質帯が地表に露出している。河川が発達している場合、鉱床から削剥された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鉱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。2021年度は茨城県日立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 茨城県日立鉱山周辺川砂試料採取の様子

# (2) 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。本年度は、昨年度に引き続き ASTER などの衛星画像データを用いた鉱物分布推定において植生の影響を軽減する手法の開発を行っている(図 2 ).

また,野外分光放射計を用いた熱水変質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も取り組んでいる。本年度は,昨年度に引き続き反射スペクトルと鉱物量比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。

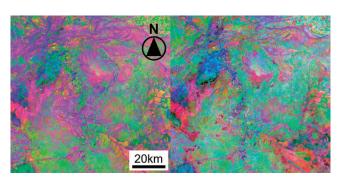


図 2 Landsat-8バンド比カラー合成画像(左:元画像 右:植生の影響を軽減した画像)

#### 3.2. 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・評価に関する研究

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

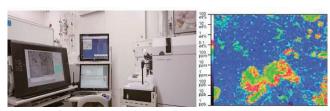


図 3 レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析 計(LA-ICP-MS)の様子(左)と希土類元素鉱石中 のルテチウム分布(右)

#### (2) 安定同位体比分析技術の高度化とその応用

新しい鉱床成因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、科研費等により分析環境の整備と実試料への応用を行ってきた。今年度は、イオンクロマトグラフにフラクションコレクタを接続させた自動元素分離装置(IC-FC)を導入し(図4)、安定同位体比分析を行う対象元素の拡大と、研究の加速化を進めている。また、秋田大学やブリティッシュコロンビア地質調査所等と、白金族鉱床やレアアース鉱床を対象とした共同研究を推進している(Simandletal.、2021)。さらに、河川水中や熱水中での水ー岩石反応や元素の挙動解析など、地球科学分野で複数の共同研究を展開し、成果を挙げている(Dekovetal.、2021; Yoshimuraetal.、2021など).



図4 自動元素分離装置(IC-FC)

#### (3) 選鉱技術の高度化

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化に取り組んでいる。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 を用いた微小域元素分析から得られた元素組成に基づく粒子解析技術を開発した(特願2020-139452). この技術を活用すれば, 従来の主成分のみを対象とする開発だけではなく, 銀などの一定の経済的価値を有する副成分を含めた開発の可否を判断することができ, 必ずしも高品位ではない鉱石であっても開発全体としての採算を確保し, 資源を有効活用できる可能性がある(図5).

また、選鉱プロセスの最適化を目的として、粉体シミュレーション技術開発にも取り組んでいる。粉体シミュレー

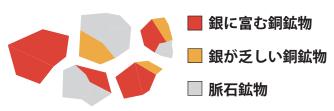


図 5 微量成分を考慮した鉱物の解析例

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粒子挙動を可視化できるため,選別機構解明や運転条件の最適化に有用である.磁選や比重選別の選別機構解明や,粒子の混合・偏析などの現象解明に粉体シミュレーションを応用している.

# (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、レアアースを数百から数千 ppm 程度含有するため、レアアース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。

#### 3.3. 鉱物資源情報の研究

#### (1) 鉱物資源データベースの整備

海外鉱物資源情報の把握を目的として, アジア地域の地質図・鉱物資源図, 鉱物資源データベースなどの作成に継続的に取り組んでいる. これまでに300万分の 1 東アジア・中央アジア地質図及び鉱物資源図を出版した. これらデータについては, 国内外のデータベースプロジェクト等でも活用されている. また, 国内企業による海外鉱山開発の一助になることも目的として, 東南アジアを対象とした精度の高い鉱物資源データベースの整備も進めている.

一方で,近年の各種資源価格の高騰等を受け,日本の鉱物 資源データベースの整備にも取り組んでいる.本年度から

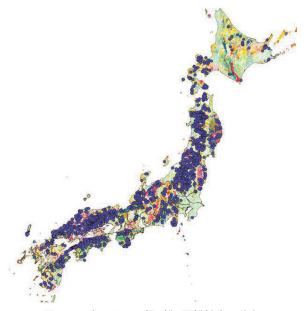


図6 日本における銅,鉛,亜鉛鉱床の分布

は銅,鉛,亜鉛等のベースメタルを中心に情報整備を進めている(図6).これら資源のポテンシャルはいずれも高く,過去には世界有数の生産量を誇っていた.本情報整備は,科学的価値のみならず本邦における再開発可能性の判断にも利用できるものと考える.

#### 4. 主な研究成果

#### [誌上発表]

- 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
- 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.
- 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.
- 丸山 亮, 児玉信介, 川畑陽平 (2019) 高波長分解能衛星 データによる酸化銅および酸化鉄(赤鉄鉱) の検出 法と探査への応用, 資源地質, 69, 1, 1-12.
- Maulana, A., Van Leeuwen, T. M., Takahashi, R., Chung, S.-L., Sanematsu, K., Li H. and Irfan U. R. (2019) Geochemistry and geochronology of VHMS mineralization in the Sangkaropi district, central-West Sulawesi, Indonesia: Constraints on its tectono-magmatic setting. Ore Geology Reviews, 144, doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103134.
- Mukai, H., Kon, Y., Sanematsu, K., Takahashi, Y., and Ito, M. (2020) Microscopic analyses of weathered granite in ion-adsorption rare earth deposit of Jianxi 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.
- Rivai, T. A., Yonezu, K., Sanematsu, K., Kusumanto, D., Imai, A., and Watanabe, K. (2019) A Low-Sulfidation Epithermal Mineralization in the River Reef Zone, the Poboya Prospect, Central

- Sulawesi, Indonesia: Vein Textures, Ore Mineralogy, and Fluid Inclusions. Resource Geology, v. 69, No. 4, p. 358-401.
- 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-F-Ba Deposit, British Columbia, Canada, (2021), Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 21, geochem2019-082, doi:10.1144/geochem2020-010
- Tsunazawa, Y., Hisatomi, S., Murakami, S., and Tokoro C. (2018) Investigation and evaluation of the detachment of printed circuit boards from waste appliances for effective recycling. *Waste Management*, Vol. 78, pp. 474-482.
- Tsunazawa, Y., Liu, C., Toi, R., Okura, T., and Tokoro C. (2018) Crystal formation and growth by slow cooling for recovery of magnetite particles from copper smelting slag. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*.
- 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. (in press).
- 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 River system 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

#### 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3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

髙橋 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

産学官制度来所者

徳橋 秀一

高野 修

#### 2.2. 主な研究資金(令和2~3年度)

・運営費交付金

「燃料資源地質の研究」

「CO2回収・利用に向けた有機/無機複合吸着材の開発」 「戦略予算:国内石油産業を復興する Oil to Gas (O2G) 革命 |

「炭質物を利用した効率的な岩石被熱温度推定法の確立」

「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~)

・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」

「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」

「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」

#### 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 して酒田沖最上トラフ海域及び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, 酒田沖最上トラフ海域において海底状況の長期モニタリング調査を実施した. また, 同海域におい

て, 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)

・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,環境創生研究部門及び当部門地圏微生物研究グループと協力して,酒田沖最上トラフ海域において海底地盤強度調査を実施した[図1]. また採取したコアを用いた海底下環境解析を,地質情報研究部門も加えた4研究部門で実施中である.(佐藤・青木)



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)

# 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

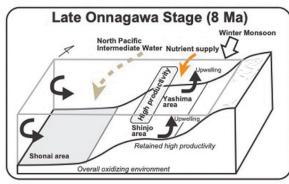
・昨年開発したメトキシ基の定量分析法を用いて石炭中のメトキシ基の定量分析を実施した。それを参考に、メトキシ基量の異なる石炭を基質とした微生物培養実験を開始した。今後の成果次第では、基質ポテンシャルの高いメトキシ基の保存形態が解明できる可能性がある。(風呂田)

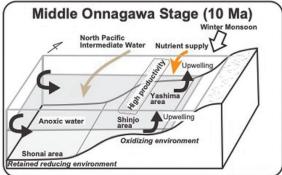
#### 3.3. 在来型資源の鉱床成因等に関する地質学的研究

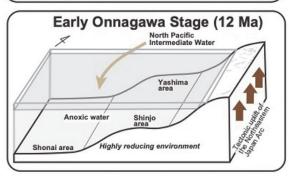
- ・北陸地方の油・ガス構造の形成に関わるテクトニクスについて,海域震探データのコンパイルを行い,論説 1 編を公表した.(中嶋)
- ・新生代石炭からの石油排出温度や新生代地質体の最大埋 没深度を推定するため、水素分に富む新生代石炭中のビ トリナイト抑圧現象に対応した反応速度論の構築と、反 射率の温度換算法に関する実験的研究を進めた.(高橋)
- ・熟成に伴う石炭の化学構造変化に着目し,主に国内の新生代石炭の石油生成タイミングやオイル指向性の評価を進めた.(高橋)
- ・新生代石炭の石炭組織の組成比を検討し,石油生成能力 の高い石炭が形成される環境を解明するための基礎研究 を進めた.(高橋)
- ・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・髙橋)

# Paleoceanographic changes in the Akita Basin







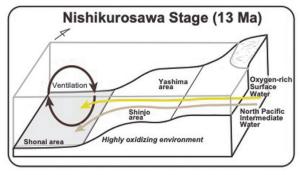


図 2 秋田堆積盆の女川層堆積時の古環境変遷 (Asahina et al., 2022)

- ・粘土鉱物がメチル化ナフタレンの異性化速度に与える影響とそのメカニズムを実験的に明らかにし、ナフタレン組成を用いた熟成指標を再構築するための基礎データを収集した.本研究成果を国際誌で公表した[図3].(朝比奈・中嶋)
- ・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4]. (朝比奈・髙橋・中嶋・鈴木)

#### メチル化ナフタレンの異性化反応における 粘土鉱物の影響を実験的に解明

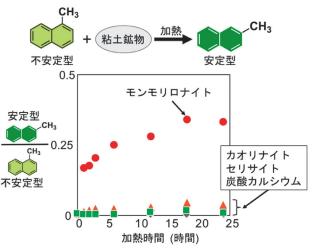


図3 メチル化ナフタレンの異性化反応速度に影響を与える粘土鉱物を特定

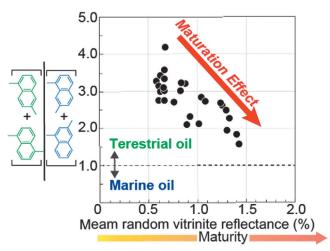


図 4 ナフタレン組成を用いた原油の起源有機物の推定指標と熱熟成の関係

・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,炭田に分布する古第三紀夾炭層,及び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・髙橋・朝比奈・風呂田)
- ・国内探鉱地域の砂岩鉱物組成および粒度組成の検討を 行った.(中嶋)

#### 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)
- ・深い坑井で得られた地下温度データから地下熱伝導率分

- 布および熱流量を推定する方法を考案し,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( $\delta^{15}N$ )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)
- ・東京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.また高精度 な分析に必要な標準物質の整備も行った.その結果,ク ロム酸による反応処理をする堆積物粉末の必要量,反応 温度及び時間の最適条件を確立した[図 5].(朝比奈)

#### 原油・堆積岩中のクロロフィル由来ポルフィリン類の定性・定量用標準物資

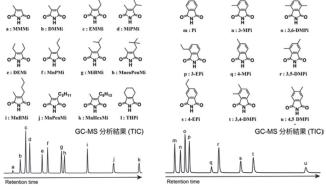


図 5 化石クロロフィルの標準物質

#### 4. 主要な研究成果(2020年以降)

#### [誌上発表]

Takahashi, K.U., Nakajima, T., Suzuki, Y., Morita, S., Sawaki, T. and Hanamura, Y. (2020) Hydrocarbon generation potential and Thermal maturity of coal and coaly mudstones from the Eocene Urahoro Group in the Kushiro Coalfield, eastern Hokkaido, Japan. *Int. Jour. Coal Geol.*, **217**, 103322.

Hideyuki Nakano, Naoki Hirakawa, Yasuhiro Matsubara, Shigeru Yamashita, Takuo Okuchi, <u>Kenta Asahina</u>, Ryo Tanaka, Noriyuki Suzuki, Hiroshi Naraoka, Yoshinori Takano, Shogo Tachibana, Tetsuya Hama, Yasuhiro Oba, Yuki Kimura, Naoki Watanabe, Akira Kouchi (2020) Interstellar organic matter: a hidden reservoir of water inside the snow line. *Scientific Reports*, **10**, 7755, 2020.05

Goto, S., Yamano, M. (2020): Inversion of thermal conductivity and heat flow from borehole temperature data affected by recent variation in ground surface temperature, *Geothermics*, **86**, 101862.

- Asahina, K., Nakajima, T., Morimoto, K., Hanamura, Y., Kobayashi, M.(2020) The effects of clay minerals on methylated naphthalenes as maturity indicators of sedimentary organic matter. *Chem. Lett.*, 49, 728-731
- <u>Furota, S.</u>, 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.*

https://doi.org/10.2343/geochemj.GJ22001.

#### [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 2021年度日本地質学会論文賞
  - 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.

#### 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

#### 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3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

天野千尋,石川理美,氏家知美,勝村寛子,篠塚由美, 竹之内美佐,野澤富美江,星裕貴子,三朝千稚

#### 2.2. 予算

#### 運営費交付金

「地圏微生物の研究」

「メタン生成補酵素を用いた革新的バイオガス生産シス テムの創製」

「生物・地球化学調査に基づく休廃止鉱山の坑廃水の起源探索. 坑廃水処理の最適化に向けて」

「海底冷湧水域における水,炭酸塩試料を用いた深部流体フラックス」

#### 委託研究費・研究助成金

「枯渇油田の再生化のための油層微生物による原油分解 メタン生成メカニズムの解明」(科研費)

「炭層環境における微生物起源 CBM 形成メカニズムの解明および CBM 増産技術の開発」(科研費)

「機能特異分子で描く新しいメタン生成観」(科研費)

「深部油ガス田に生息する新規微生物の生態解明と海洋における機能の解明」(科研費)

「蛇紋岩に関連する炭化水素の成因解明:岩石内分布を 考慮した化学形態別の炭素分析」(科研費) 「取得コア試料の微生物学的分析」(受託研究)

「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)」 (受託研究)

#### 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,㈱INPEX,JX石油開発㈱,三菱ガス化学㈱,石油資源開発㈱,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2年度後期~3年度前期の研究進捗状況

# 4.1. 油層内微生物のメタン生成ポテンシャルに関する研究

微生物による原油分解とメタン生成の組み合わせは,微 生物によるエネルギー回収促進(MEER)技術の基盤とし て注目されている. 本研究では, 深部地下油層の温度・圧力 条件を模擬した実験室での培養実験を行い,MEER のため のバイオオーグメンテーション技術およびバイオスティ ミュレーション技術の有効性を評価した. その結果, 高温高 圧の培養装置を用いて,日本の山形油田からメタン生成原 油を分解できる微生物群を得ることに成功した. バイオ オーグメンテーション技術の可能性を評価するために,獲 得した山形油田の微生物培養物を,現場の微生物群集では 原油を分解できない秋田油田の生産水に接種した. その結 果,トルエンの分解に伴うメタンの生成が確認され,バイオ オーグメンテーション技術が成功する可能性が示された(図 1). また, 山形県の油層サンプルを用いて, バイオスティ ミュレーション技術の可能性, すなわち異なる栄養素を補 充することによる原油分解への影響を評価した. 興味深い ことに,特定の酵母エキスを添加すると,トルエンだけでな く,より長鎖のn-アルカンの分解に伴うメタン生成が顕著 に促進された、さらに、バイオオーグメンテーション技術と

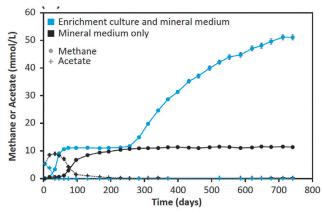


図 1 原油分解メタン生成微生物コミュニティーを用いた バイオオーグメンテーション技術、培養物を添加した 培養系(青)で顕著なメタン生成を観察、(Suda et al., 2021)

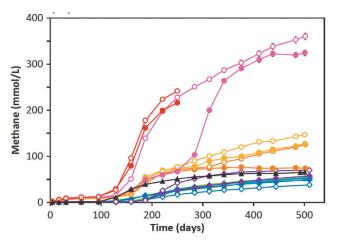


図 2 酵母エキスを用いたバイオスティミュレーション技術. 酵母エキスを添加した培養系(赤およびピンク)で顕著なメタン生成を観察. (Suda et al., 2021)

バイオスティミュレーション技術を組み合わせた効果を評価するために、山形油田の微生物培養物と効果的な酵母エキスを秋田油田の生産水に接種したところ、培養中にトルエンや n- アルカンの分解に伴う大量のメタン生成が確認された(図 2 ). これらの結果から、今回実証されたバイオ

オーグメンテーションとバイオスティミュレーション戦略は、現場油層環境の原油分解ポテンシャルの有無にかかわらず、石油貯留層からのエネルギー回収のための強力なツールとなり得ることが示唆された。

# 4.2. 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

メタン生成菌が共通して持っているメチルコエンザイム M リダクターゼ (MCR) の活性部位である補酵素 F430は, メタン代謝の鍵となる化合物である. 我々は, メタン生成の 機能特異的バイオマーカーとして補酵素 F430を硫酸還元 領域以深で採取した海底堆積物に応用し, メタン生成菌の 分布と活性を調べた. さらに,本研究で使用した掘削堆積物 の原位置条件をカバーする様々な温度(4, 15, 34, 60℃) とpH (5, 7, 9) の条件で,細胞死後の分解過程の最初の段 階である補酵素 F430のエピ化の速度論を定量的に決定し た. 分解実験の結果, エピ化の速度論は熱力学的法則によく 従っており、補酵素 F430の半減期は原位置の温度上昇に 伴って減少し,304日から11時間に減少した.これは,堆積 物中に検出される Native F430は生きたメタン生成菌由来 であることを強く示している. なぜなら, この F430の非生 物学的分解は堆積速度よりはるかに速く, 堆積物中では速 やかにエピ化して化石化して残らないからである(図3).

上記分解実験を考慮すると、下北半島沖の海底下堆積物に検出された Native F430は生きたメタン菌細胞に由来するものであり、海底下におけるメタン生成菌の定量的分布を始めて明らかにした。原位置でのF430濃度と培養可能なメタン生成菌の F430含量から算出したメタン生成菌のバイオマスは、堆積物の深さ2.5km まで2桁減少し、海底下約70mで最大値を示した(図4).一方、原核細胞全体の存在量に占めるメタン生成菌の割合は、深さが増すにつれて増加し、従来の予想よりも1~2桁高い値を示した。この結果は、従来の技術では検出できなかったメタン生成菌の存在を示している.

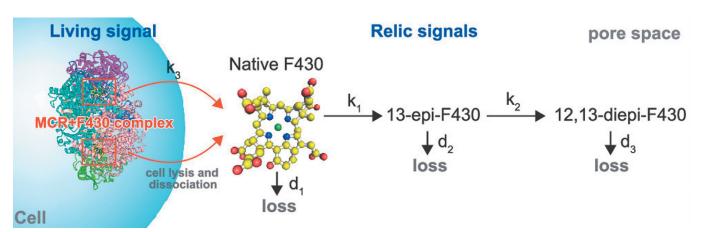


図3 堆積物中における補酵素 F430の分解と保存のモデル (Kaneko et al., 2021)

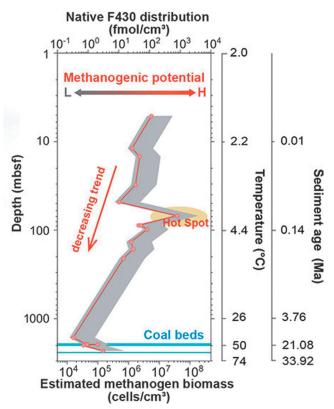


図 4 下北半島沖の海底下堆積物中の Native F430濃度と 推定されるメタン生成菌のバイオマス量 (Kaneko *et al.*, 2021)

#### 4.3. 地圏微生物の基礎的研究

メタン酸化細菌(メタノトロフ)は, エネルギーを生産 するためにメタンを主要な炭素源として酸化する微生物で ある. メタンは温室効果ガスなので, それら微生物は海洋か ら大気へのメタン放出に関して重要な役割を持っていると 考えられる. 一般的にメタノトロフは, メタンをメタノール に変換し、排出されたメタノールを利用するメチロトロフ (メチル栄養細菌) と共存していることが多い. 最近我々は, 通性メチル栄養細菌であるMethyloceanibacter caenitepidi Gela4が、メタン酸化細菌であるMethylocaldum marinum S8との共生培養において、メタノールではなく酢酸を利用 している可能性を見出した (Takeuchi et al., 2014). そこ で, M. marinum S8の純粋培養と M. caenitepidi Gela4<sup>T</sup> との共生培養において、酸素濃度がM. marinum S8の増殖 と酢酸の排出に及ぼす影響を調べた. その結果, M. marinum S8 は,対数期に微好気的条件(酸素濃度 3.5~ 6%) だけでなく, 好気的条件(酸素濃度 20~31%) で も酢酸を排出した(図5). 好気的条件で培養した M. marinum S8細胞のRNA-Seg解析では、ホスホケトラーゼ とアセテートキナーゼが酢酸生成に関わる遺伝子であるこ とが示唆された(図6). また, 非メチロトロフである Cupriavidus necator NBRC 102504は, M. marinum S8 と共生培養して生育することができ, 好気的条件下で M. marinum S8とメタノールに依存しないクロスフィーディ ングが存在することが裏付けられた(Takeuchi & Yoshioka, 2021).

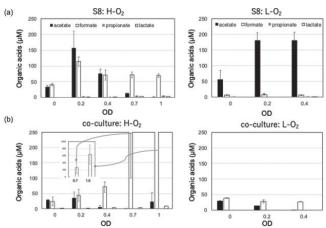


図 5 好気的条件および微好気的条件で培養した (a) *M. marinum* S8および (b) 共培養物の培養上澄中の有機酸濃度 (Takeuchi & Yoshioka, 2021)

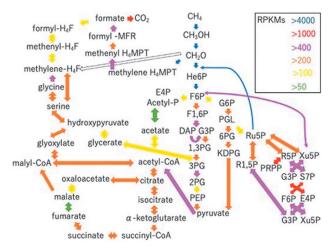


図 6 好気的条件下で生育したM. marinum S8の中心的な 代謝経路の概要. ゲノムおよびトランスクリプトーム データから予測した (Takeuchi & Yoshioka, 2021)

#### 5. 令和2年後半~令和3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)】

Heuer V. B., <u>Kaneko M.</u> et al. (2020) Temperature limits to deep subseafloor life in the Nankai Trough subduction zone. Science, Vol. 370 (No. 6521), pp. 1230-1234.

Hryniewicz K., Miyajima Y., Amano K., Georgieva M. N., Jakubowicz M., Jenkins R. G., Kaim A. (2020) Formation, diagenesis and fauna of cold seep carbonates from the Miocene Taishu Group of Tsushima (Japan). Geological Magazine, Vol. 158 (No. 6), pp. 964-984.

Kaneko M., Takano Y., Kamo M., Morimoto K., Nunoura T., Ohkouchi N. (2021) Insights into the Methanogenic Population and Potential in Subsurface Marine Sediments Based on Coenzyme F430 as a Function-Specific Biomarker. JACS Au 2021, Vol. 1 (No. 10), pp. 1743–1751.

Miyajima Y., Saito A., Kagi H., Yokoyama T., Taka-

hashi Y., Hirata T. (2020) Incorporation of U, Pb, and rare earth elements in calcite through crystallization from amorphous calcium carbonate: simple preparation of reference materials for microanalysis. Geostandards and Geoanalytical Research, Vol. 45, pp. 189-205.

<u>坂田 将</u> (2021) 地圏微生物によるメタン生成プロセスの 解明. Synthesiology 2021, pp. 1-13

Suda K., Ikarashi M., Tamaki H., Tamazawa S., Sakata S., Maeda H., Kamagata Y., Kaneko M., Ujiie T., Shinotsuka Y., Wakayama T., Iwama H., Osaka N., Mayumi D., Yonebayashi H. (2021) Methanogenic crude oil degradation induced by an exogenous microbial community and nutrient injections. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol.201 (No. 108458).

Takeuchi M., Fujiwara-Nagata E., <u>Katayama T.</u> et al. (2021) Skin bacteria of rainbow trout antagonistic to the fish pathogen Flavobacterium psychrophilum. Scientific Reports, Vol. 11 (No.

7518).

Takeuchi M.and <u>Yoshioka H</u>. (2021) Acetate excretion by a methanotroph, Methylocaldum marinum S8, under aerobic conditions. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, Vol. 85 (No. 11), pp. 2326–2333.

Urai A., Matsushita M., Park H.-D, Imachi H., Ogawara M., Iwata H., <u>Kaneko M.</u>, Ogawa, N. O., Ohkouchi N. and Takano Y. (2021) Detection of planktonic coenzyme factor 430 in a freshwater lake: smallscale analysis for probing archaeal methanogenesis. Progress in Earth and Planetary Science, Vol. 8 (No. 62).

Yoshikawa M., Zhang M., Kawabe Y., <u>Katayama T.</u> (2021) Effects of ferrous iron supplementation on reductive dechlorination of tetrachloroethene and on methanogenic microbial community. FEMS Microbiology Ecology, Vol. 97 (No. 5).



#### 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. グループの研究体制・研究方針

産総研第5期中長期目標および部門ポリシーステートメントと研究グループの目標に沿った研究業務として、「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」を新たに開始するとともに、「燃料資源や地熱」、「鉱物資源・材料」、「地圏化学」、「持続可能な環境汚染対策に関する研究」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課題の開拓等についても戦略的に取り組む。そのために、地圏内の物質(流体、岩石、鉱物等)の分布・挙動や地圏環境の評価・持続可能性を、地化学的・地質学的・鉱物学的手法や環境科学・リスク学の手法により明らかにすることを目指す。この方向性を踏まえ、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、標準化および社会実装に資する研究を進める。

#### 2. 研究グループ員及び研究項目等

#### 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 地球化学 最首花恵 三好陽子 粘土鉱物学,無機地球化学 無機地球化学 西方美羽 高田モモ リスク評価 鉱物学,地球化学 柳澤教雄 鈴木正哉 鉱物学,材料化学 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 テクニカルスタッフ 佐々木尚子 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 坂原桜子 リサーチアシスタント 黒澤暁彦 派遣職員 リヒンキ 派遣職員 中村洋行 派遣職員

岸本楓莉 派遣職員 月村勝宏 産学官制度来所者 産学官制度来所者 山田裕久 宮原英隆 産学官制度来所者 白井浩介 産学官制度来所者 小室りさ 産学官制度来所者 松本萌恵 産学官制度来所者 砂川優樹 産学官制度来所者 石本帆乃 産学官制度来所者

#### 2)主な研究資金(令和2年度,令和3年度)

・運営費交付金(代表的なもののみ掲載)

「工場および農業用ビニールハウスでの低コストな除湿機の試作」

「土壌汚染等評価・措置に関する標準化活動費」

「環境調和型浄化技術」

「CNP 融合循環技術に向けたリン循環技術」

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

「大規模イベント・集客施設に向けた効果的な対策や制限緩和に対するエビデンスと技術/評価の社会実装に向けた研究」

・受託研究(代表的なもののみ掲載)

「高濃度の放射性セシウム汚染土壌に適応可能な微粉 砕による高度減容化」

「未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発(在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発)」

「農林水産・食品産業の情報化と生産システムの革新を 推進するアジアモンスーンモデル植物工場システムの 開発」

「小麦クズ燃焼排熱利用の豆類等の低湿・非高温乾燥 システムの実証」

「土壌・水系における有機フッ素化合物類に関する挙動 予測手法と効率的除去技術の開発(環境総合推進費)」

・科研費(代表的なもののみ掲載)

「汚染土壌中の吸着セシウムイオンのミクロ構造の 解明!

「二酸化炭素の回収に向けた有機/無機複合吸着材の 開発」

「大規模環境汚染に対する合理性・持続可能を包括し た環境修復フレームワークの構築」 ・共同研究・技術コンサルティング 20件以上あるが,紙面の関係で割愛

#### 3)主な研究設備

- ・イオンクロマトグラフ
- ·二酸化炭素吸着量評価装置
- ・水蒸気吸着量測定装置 など

#### 3. 令和2年度後半~令和3年度前半の研究進捗

# 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(猪狩・佐々木・最首)

燃料資源に関する微量炭化水素の分析技術の高度化を進めた. 空気中微量炭化水素測定の場合, 濃縮が必要となるが, 窒素ベースの場合には回収率が100%でも, 空気ベースにすると回収率が低下する場合があることを発見した. カラム充填剤の増量により, 空気ベースの場合でも100%近くまで,回収率を上げることができることを明らかにした.

地熱開発において、地熱貯留層の存在や地熱発電開発の成功に関連が深いと経験的に考えられている「熱水変質帯」に注目して、地熱発電可能資源量の推計法の実現性を調査した。文献から得られる熱水変質帯の分布面積等を推計の基礎となるデータと位置付け、地熱発電所のある地域における実際の地熱発電実績と熱水変質帯データとの関係式の構築を目指した。本手法の妥当性を検討するため現地調査を行った。

# 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(森本・鈴木・三好)

元素回収や環境浄化技術など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、材料の開発と有用元素および有害元素の吸着特性について評価を行った。低結晶性のβ-FeOOH型鉱物材料の合成法の開発を行い、吸着試験の結果からリン酸イオンの効率的な回収やフッ化物イオン・ヒ酸イオンなどの吸着除去が可能であることを明らかにした。

また,地球温暖化対策や省エネルギー技術の開発に資する研究として,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.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,合成材料の二酸化炭素吸着性評価と機能化のための技術開発に取り組んだ.鉱物材料への水蒸気吸着においては,同時に得られる熱を食品乾燥に利用する乾燥システムの設計と実証試験を行った.

# 3) 持続可能な環境汚染対策に関する研究(保高・高田・ 西方)

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ついて,アンケート 調査により社会受容性の高いシナリオの検討を行った.

休廃止鉱山のズリ堆積場において複数本のボーリング調

査を実施した.調査により得られたズリに対して溶出試験を実施し,pH,ECの深度プロファイルの作成や重金属元素の溶出量を測定した.

4) 土壌汚染等に関する標準化研究(西方・保高・森本・高田)

地盤材料の溶出特性を求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. 令和 3 年度は,JIS 原案作成員会および分科会を開催し,対応する国際規格である ISO の翻訳と JIS 規格への様式の変更,附属書,国際規格との対比表および解説の作成を行った.

昨年度に引き続き,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進めるため,様々な条件での吸着試験を実施した.特に今年度はJISの素案を作成するため,より細かい試験手順について検討を行った.

# 5) 大規模イベント・集客施設に向けた効果的な対策や制限緩和に対するエビデンスと技術 / 評価の社会実装に向けた研究(保高・高田)

新型コロナウイルスによる影響が続く中,安全なイベント開催に向けて,スタジアムのような大規模施設で開催するマスギャザリングイベントにおけるマスク着用率や感染リスクについて,Jリーグ等と連携して調査を実施し,結果を公表してきた.

# 4. 令和2年度後半~令和3年度前半の研究成果と 受賞(主なもの,下線部が研究グループ員) 【誌上発表】

- M Murakami, F Miura, M Kitajima, K Fujii, <u>T Yasutaka</u>, Y Iwasaki, K Ono, et al., (2021) Microbial risk analysis, 100162
- T Kato, Lincoln W Gathuka, T Okada, A Takai, T Katsumi, Y Imoto, <u>K Morimoto</u>, <u>M Nishikata</u>, <u>T Yasutaka</u> (2021) Soils and Foundations, 61, 1112-1122,
- Y Iwasaki, K Fukaya, S Fuchida, S Matsumoto, D Araoka, C Tokoro, <u>T Yasutaka</u> (2021) Science of The Total Environment 786, 147500
- N Yanagisawa, Y Masuda, H Asanuma, K Osato, K Sakura (2021) Geothermics 96, 102149
- 加藤智大, 井本由香利, <u>保高徹生</u>, 勝見 武 (2021) 地盤 エ学ジャーナル 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

<u>三好陽子</u>, <u>鈴木正哉</u>, 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

# 物理探査研究グループの紹介

Introduction of the Exploration Geophysics Research Group

#### 1. グループの研究目的と課題

本研究グループでは、地熱・地中熱、鉱物資源、メタンハイドレート、地下水等の地圏資源の調査・研究、放射性廃棄物地層処分、CO2地中貯留等の地圏環境の利用と保全のための調査・研究、さらに加えて地盤液状化、地滑り、断層、火山等の防災分野等、広範囲な適用対象に対して、地圏の調査及び分析技術の開発の一環として、物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査法の適用研究を行っている。また、強靱な国土・防災への貢献のためにサステナブルインフラ研究ラボに参画し、インフラ関係の社会課題の領域間融合での解決に積極的に貢献することを心掛けている。2021年度においては、以下の7項目を中心にした研究を実施している。

- ▶ 地圏資源の調査・研究として,
- 1) 海底熱水鉱床やメタンハイドレート等の探査を念頭に 置いた海域での各種物理探査法や, 陸域における AMT 法, 強制分極 (IP) 法等による鉱物資源探査等に関す る研究.
- 2)地中熱利用における事前評価手法の研究および地熱地域における広域熱水系把握調査および空中電磁探査のデータ解析に関する基礎的技術開発.
- ▶ 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、 $CO_2$ 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)土壌汚染に関連して,過去に実施した物理探査適用結果の取りまとめ.
- ▶ 地圏の調査及び分析技術の開発として,
- 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.

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/explogeo/

#### 2. 各研究項目の内容

# 2.1. 空間・時間・密度を考慮したミュオントモグラフィでの密度異常検出可能性

ミュオグラフィは宇宙線ミュオンを利用した密度推定手法である. 物体を透過するミュオンの個数を測定することで透過経路の平均密度が推定でき、レントゲン写真のように密度分布を推定できる. 近年は複数の地点からミュオンを観測し、3次元密度推定をトモグラフィックに行う事例が増えている. 今回は、ある大きさ・密度を持つ物体を検出するのに必要な観測時間、その時の物体の大きさ・密度を指標としてミュオントモグラフィの検出能力評価を考えた. 特定の観測条件下で密度異常が検出可能かどうかについて評価するためには観測条件を考慮して数値計算を行う必要がある. 多次元数値計算結果により検出能力を評価し、検出能力を基準にインバージョン手法の比較を行った.

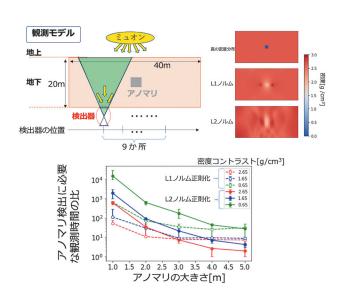


図 1 左上: 観測モデル (深さ20m, 横幅40m, バックグラウンド密度2.65g/cm³). 右上: L1および L2ノルム正則化最小二乗法を用いたミュオントモグラフィによる推定密度分布. 下: L1および L2ノルム正則化最小二乗法を用いたミュオントモグラフィの検出能力評価結果.

今回は図1(左上)のように,地下20mにおいて検出器を2.5m間隔の9か所において密度推定を行い,その推定結果を用いてモデル中央部の密度異常体(アノマリ)を検出する2次元モデルを仮定した.図1(右上)はL1ノルムとL2ノルムの異なる正則化項を用いた最小二乗法による推定密度分布の結果を示している.L1ノルム正則化ではス

パースな解が選択されやすく、L2ノルムと比べた際により空間的な変化が小さな密度分布となっている。図1(下)はアノマリの密度・大きさを変えた場合に検出に必要な観測時間を計算したものである。アノマリの大きさおよびアノマリとバックグラウンドとの密度コントラストが大きくなるほどに観測時間が単調に減少しており、またアノマリの密度や大きさに応じて2つのインバージョン手法による異常検出に必要な観測時間の違いが見られた。このように検出すべきターゲットに応じてインバージョン手法を比較し、より最適な手法を決定できると考えられる。

## 2.2. 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

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、容器を開封せずに原子番号と濃度を3次元スキャンできる手法が望まれている. X 線管球の加速電圧を2種類用いたデュアル X 線 Computed Tomography(CT)は、3次元元素マッピングに多用されてはいるが、原子番号(Z)がおおむね40を超えるような重元素に対してはZを一意的に決定することが困難になり、信頼性が落ちる. そこで、我々は鉛(Z=82)などの高いZ値の物質に対しても信頼できるCT分析法を開発するため、3種類の加速電圧を用いたトリプルX線CT法の可能性をCTの計算機シミュレーションで評価した. 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つの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画像を数値的に画像再構成した(図2).

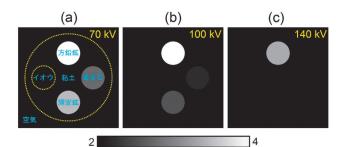


図 2 3種類のX線管球の加速電圧に対応する, 仮想的な土壌サンプルの二次元 CT シミュレーション結果. 直径 270  $\mu$ m の円形領域の粘土のなかに, 直径72  $\mu$ m の4つの小さい円形領域を確保し, そこに6 $\nu$ 00分 鉱 (PbS), 毒重石 (BaCO $_3$ ), 輝安鉱 (Sb $_2$ S $_3$ ), 自然イオウ (S $_8$ ) をそれぞれ埋め込んだ. 黄色い点線で輪郭を示した粘土とイオウの領域は, このグレースケールでは, サンプルを取り囲む空気と識別できないくらい暗い.

線吸収係数としての画素値 (1/cm)

一般に加速電圧が上がると物質のX線吸収係数が低下するのでCT画像が全体的に暗くなるが,その暗くなり方がZに敏感に依存することを利用するのがポイントである.そ

の結果,図2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 Z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ができた.なお,このシミュレーションでは Zの決定だけではなく,粘土中の鉛の濃度の推定にも成功している.このように仮想的なサンプルを用いて,トリプル X線 CTの土壌汚染分野への有効性・将来性を確認できた.最後に,このトリプル X線 CT は,土壌汚染以外の分野にも適用しうることを強調したい.たとえば,金・白金・ランタノイド(レアアースの一種)の3次元選鉱にも使える可能性がある.今後とも,社会ニーズへのマッチングを強く意識しながらトリプル X線 CT の可能性を追求していきたい.

# 2.3. 金属鉱床探査支援のための岩石物性データベースの作成

金属鉱床探査の対象は地下深部の潜頭性鉱床に移りつつ あり、物理探査への期待が高まっている.物理探査からは地 下の物性分布の情報が得られるが, その情報を用いて地質 構造を解釈するとなると不十分なことが多い. その原因の 一つとして、岩石物性に関する知識の不足があげられる. 金 属鉱床地域にある岩石や鉱石の物性を記録したデータベー スが構築されれば、物理探査データの解釈の基準ができ、探 鉱支援者を大いに支援できると期待される. そこで, 2019 年度から一般財団法人日本鉱業振興会の助成を受け、日本 鉱業協会からの受託研究「金属鉱床探査を支援する岩石物 性データベースの作成」を開始し、昨年度までに岩石物性 データベースの設計とプロトタイプの作成を行った. 今年 度はプロトタイプに岩石物性データの追加・登録を行い, それを日本鉱業協会資源部会物探委員会で紹介し,会員の 企業で使用していただいた. そして, 会員から寄せられたコ メントや指摘を集約・検討して, ユーザーが利用しやすい データベースにするために以下の改修を行った.

まず、データベースの初期画面を地理院地図(電子国土Web)にして、登録されている岩石試料の位置を表示し、ユーザーがそこから岩石物性データを検索して閲覧できるようにした(図3)。また、検索画面では鉱床タイプ、試料区分、鉱山名の項目をプルダウン方式で選べるほか、岩石・鉱物名、鉱床タイプ、鉱山名については文字入力で曖昧検索ができるようにした。さらに、検索した岩石試料の情報や物性データを一覧表示した個票をA4サイズで印刷する機能を設けた(図4)。そして、各種物性の数値データについてはCSVファイルとしてダウンロード可能とした。今後も岩石物性データベースの改修を行うとともに、データの収集・登録を増やし、多くの人々に利用されるデータベースとなるように努力していきたい。

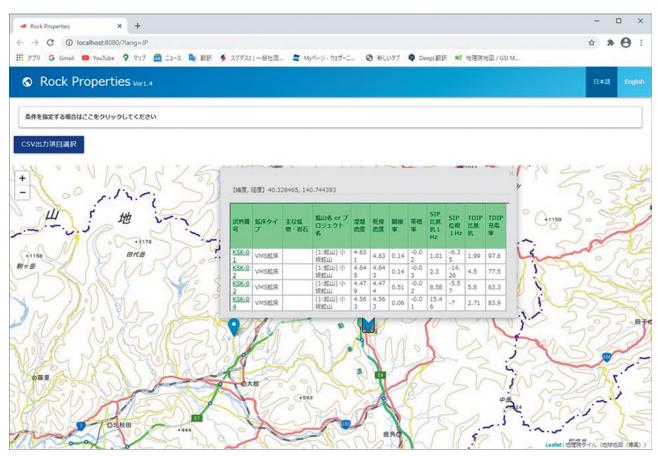


図 3 登録されている岩石試料の地理院地図(電子国土 Web)上での表示例.表示位置をクリックすると, 試料に関する基本的な情報や代表的な物性値を見ることができる.

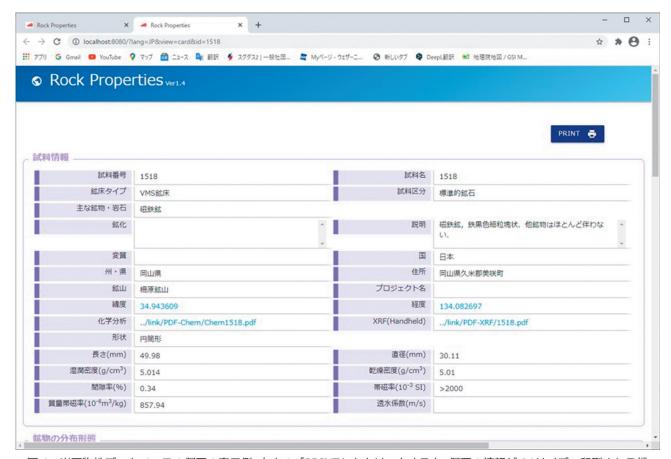


図 4 岩石物性データベースの個票の表示例. 右上の「PRINT」をクリックすると, 個票の情報が A4サイズで印刷される機能を追加した.

#### 3. グループの体制

#### 3.1. 人員体制(2021.10.1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)

高倉伸一(上級主任研究員)

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)

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、CO2地中貯留研究グループ、鉱物資源研究グループ、燃料資源地質研究グループ等、産総研内では、再生可能エネルギー研究センター、活断層・火山研究部門、地質情報研究部門、知能システム研究部門等と、さらに、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構等と連携して研究を推進している。

#### 3.2. 研究予算

研究予算としては,産総研運営費交付金に加えて,以下のような公的外部予算プロジェクトに従事している.

- ・令和2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 2 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

- <u>Umezawa, R.</u>, 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., <u>Yokota, T.</u> 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.

https://doi.org/10.1007/s11001-020-09425-7

Seki, K., Kanda, W., Mannen, K., <u>Takakura, S.</u>, 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., <u>Takakura S.</u>, 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., <u>Takakura, S.</u>, 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
- Kanda, W., Utsugi, M., <u>Takakura, S.</u>, and Inoue, H. (2019) Hydrothermal system of the active crater of Aso volcano (Japan) inferred from a threedimensional resistivity structure model. *Earth Planets Space* **71**, 37. https://doi.org/10.1186/ s40623-019-1017-7

# CO2 地中貯留研究グループの紹介

Introduction of the CO2 Geological Storage Research Group 研究グループ長: 徂徠正夫

Leader, CO2 Geological Storage Research Group:

Masao Sorai

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

#### 1. グループの研究目的

CO2地中貯留は,産総研第5期中期計画における「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」 の中の「産業利用に資する地圏の評価」, ならびに令和3年 度地質調査総合センターのポリシーステートメントの「社 会課題の解決に向けた橋渡しの拡充」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 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. 各研究項目の内容

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,産総研を含む2機関と民間企業4社(令和3年12月現在,民間企業は計9社)により二酸化炭素地中貯留技術研究組合を設立した.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. CO<sub>2</sub>長期モニタリング技術の開発

苫小牧サイトでの超伝導重力計による高精度重力モニタリングを継続して実施し、特に地震発生時等におけるノイズの低減を目的として測定感度調整の効果を確認するとともに、その適用性の検討を行った。その結果、現状の重力残差データのノイズレベルに鑑みれば、我が国では低い測定分解能(Mediumモード)での運用が有効であることがわかった。また、圧入後のCO₂の漏洩等によって生じる重力変化の異常を検知する手法を検討し、当該サイトで取得され

る重力データに漏洩に際して生じうる重力変化を重ねた模擬データを用いて当該手法を試行した。最も簡便な時系列解析手法の一つである移動平均により、ノイズ除去後の重力残差データの標準偏差より小さい重力変化量を早期かつ明瞭に検出できることが明らかとなった。検知のタイミングとその精度はトレードオフの関係にあり、それらは平均の計算区間の長さに依存することが示された。

一方, これまでに開発したノイズ除去手法の長期データに対する適用性を検討するために,800日以上のデータに対するノイズ除去を実施した. その結果, これまでと同等の標準偏差0.88µGal が得られ, ノイズ除去手法の長期データに対する適用性が確認された(図1). さらに, 自然電位測定に基づき降雨の影響評価を行ったところ, 自然電位測定の並行実施による重力のノイズ除去の高度化の可能性が示唆された. 最後に, 重力変動に影響を与えうる因子の一つである地表面変動について, 地表面変動の解析方法を改良した結果, 前年度と比較してより正確な結果の取得に成功した.

上記と並行し,前年度に提示した試案を踏まえて,沿岸域での重力計の設置方法やノイズ除去方法等を考慮しつつ,沿岸域での重力モニタリングの運用方策を策定した. 観測方法に関する運用方策としては,重力測定,補助データ取得,観測設備の準備,保守に関して,具体的な運用方策を整理した. また,データ解析に関する運用方策としては,具体的なデータ処理手順を整理した.



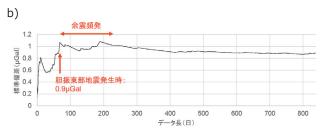


図 1 2018年 7月以降837日間に苫小牧サイトで取得した 重力データから潮汐, 極運動, 気圧応答成分, 不規則 ノイズおよび地下水位変動に基づく補正値を除去し て得られた, a) 重力残差, および b) 重力残差の標準 偏差の時間変化

#### 2.2. 長期遮蔽性能評価技術の開発

 $CO_2$ 地中貯留におけるキャップロックの長期遮蔽性能評価を目的として、地化学反応プロセスが岩石の水理特性に及ぼす影響について検討を行った。間隙をカルサイトで充填したシリカ焼結体試料による前年度までの実験で、カルサイトの溶出量に基づいて、孔隙率中の変化と浸透率kの変化の関係の導出に成功している。一方で、反応前と反応後のkの測定をそれぞれ異なる試料で行っていたため、kの変化が試料のばらつきではなく真に反応によるものかの確証が得られていなかった。そこで今回は、あらかじめ浸透率 $k_0$ を測定した試料を反応させ、反応後に再度kを測定することで、 $k/k_0$ に基づいた評価を行った。結果として、溶解および再沈殿による $k/k_0$ の変化をより明瞭に捉えることができた(図 2)。今回の結果は、前年度に導出した $\phi-k$ の関係が、試料の個体差による影響を加味した上でも成り立つことを支持している。

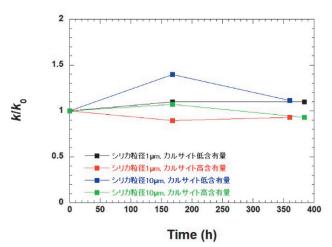


図 2 炭酸塩含有焼結体試料における k/koの経時変化

一方, CO<sub>2</sub>地中貯留の安全性向上に地化学プロセスを有効に活用する方策として, CO<sub>2</sub>の固化による坑井周囲からの漏洩防止を検討した. 前年度は, 特に水ガラスにおいて反応開始直後に流動の停止が確認されたが, その効果が強力ゆえに, 岩石試料に到達する前の配管内で固化してしまう問題が生じた. そこで, 今回は, 実用化時の取り扱いの容易さも考慮して, 水ガラスの適正濃度を探索するとともに, 新たな溶媒として水酸化ストロンチウムの適用性の検討を行った. 結果として, 水酸化ストロンチウムでは必ずしも炭酸塩の生成が効果的でなかったものの, 水ガラスについては0.001~0.01 mol/L の濃度条件まで薄めても十分に遮蔽効果があることが確認された.

地化学反応のキャップロックカ学特性への影響評価に関しては、各種泥岩を10 MPa, 40°Cの超臨界 CO2-水系で最長2週間反応させ、反応前後におけるカ学-水理特性への影響を調べた。その結果、地化学反応は泥岩の鉱物組成に依存して、カ学・水理特性に少なからず影響を及ぼすことが明らかとなった。最も顕著な影響を及ぼす反応としては、粘土鉱物の膨潤が挙げられるが、それ以外にも炭酸塩鉱物のような反応性の高い鉱物が含まれる場合には、その溶解

- 沈殿プロセスも無視できない. 一般的にキャップロックの遮蔽性能は, 試料を採取した時点での力学・水理特性のみから評価されるが, 長期的な健全性を保証するためには, 地化学反応が水理特性のみならず力学特性に及ぼす影響までを考慮することが重要である. 具体的には, 評価対象となる試料を地下条件下において一定時間反応させた上で, 反応前後の比較を行うことが重要であろう.

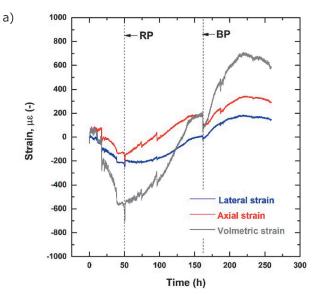
#### 2.3. ジオメカニクスモデリング技術の開発

二相流動・変形連成過程の検討を目的として, 水で飽和 した円柱形岩石試料に対して下端から空気を浸入させる実 験を実施し, 空気が試料上端に到達して以降も含めたひず みデータを取得した. 二相流動と変形を連成させた数値シ ミュレーションにより, ひずみの実験結果の再現を試みた ところ,一般によく用いられる線形なBishopの有効応力係 数の飽和度依存性を仮定すると,実験結果が再現できな かった. そこで,非線形な関係を許容して実験結果を再現す る Bishop の有効応力係数の飽和度依存性を試行錯誤的に 推定したところ,実験結果は数値シミュレーションにより 再現された. この結果は, 二相流動・変形連成現象が, 一般 によく用いられる線形な Bishop の有効応力係数の飽和度 依存性で説明されない場合があることを示している. 今後, Bishop の有効応力係数の飽和度依存性を実測し,パラメー タフィッティングにより得られた関係の妥当性を検証する とともに, サイトスケールでの岩盤の力学的挙動に対する Bishop の有効応力係数の飽和度依存性の影響を検討する 必要がある.

もう一つの課題として、キャップロックを含む貯留層全体に対する評価のために、二相流水理力学特性試験装置を用いて、模擬 $CO_2$ 地中貯留条件下(温度 $40^{\circ}C$ 、封圧20MPa、間隙圧10MPa)で $CO_2$ 掃攻過程における岩石の力学的性質(ひずみ、応力等)の変化を調べた。前年度の泥岩では有効圧下での浸透性に問題が生じたことから、有効圧10MPa下においても十分な浸透性がある上総層群の大田代層泥岩を岩石試料として使用した。

実験の結果、CO2の掃攻に伴って体積ひずみが変化する様子が観測された(図3). しかしながら、これらのほとんどは CO2-水の差圧による有効応力の変化に相当し、膨潤はほとんど生じていないことが結論付けられた. スメクタイト、イライト等の粘土鉱物を含有する大田代層泥岩中にCO2が浸透したにもかかわらず、膨潤が起こらなかったという事実は、地下1kmの帯水層条件下では、泥岩の膨潤性はきわめて低い、あるいは泥岩は膨潤しないことを示唆している. この原因として、キャップロックに相当する泥岩や頁岩には粘土鉱物が含まれているが、もともと空隙率が低いため、流体移動が貯留層に比べて困難な状況にあることが予想される. このため、岩石内の粘土鉱物への CO2 到達が十分とはならず、結果的に CO2吸着が生じず、膨潤に至らなかった可能性がある. これに対して、ワッケ等の膨潤性物質

を含んだ砂岩等の貯留層の場合には、比較的短期間に  $CO_2$  が岩石内を浸透するとともに、キャップロックに比べ容易に粘土鉱物に到達し、それに伴い  $CO_2$  吸着が生じることで、貯留層全体が膨潤するものと考えられる.



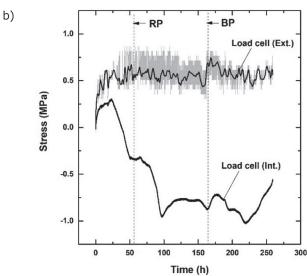


図 3 大田代層泥岩への CO₂掃攻挙動に伴う, a) 体積ひず み, および b) 軸応力の変化

#### 2.4. その他の研究グループの活動

令和3年7月より新たにJOGMECの地熱発電技術研究開発事業「カーボンリサイクルCO<sub>2</sub>地熱発電技術」に参画し、「流通試験による貯留層水理特性変化の検証」、「分子動力学計算による界面相互作用の解析」、および「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」の諸課題に取り組んでいる。また、科研費補助金でのCO<sub>2</sub>挙動に関わる基礎的研究に加えて、CO<sub>2</sub>地中貯留ならびに地熱関連での民間共同研究および技術コンサルティング等を実施している。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参画し、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.

#### 3. グループの研究体制

CO2地中貯留研究グループは,以下の体制で研究を実施している.

徂徠正夫 (研究グループ長)

藤井孝志

加野友紀

後藤宏樹

堀川卓哉

西 祐司 (招聘研究員)

杉原光彦(テクニカルスタッフ)

志賀正茂 (産総研特別研究員)

上原真一(産学官制度来所者)

池田 博(産学官制度来所者)

楠瀬勤一郎 (産学官制度来所者)

#### 4. 最近の主な研究成果(2019年以降)

Goto, H., Sugihara, M., Ikeda, H., Nishi, Y., Ishido, T. and Sorai, M. (2019) Continuous gravity observation with a superconducting gravimeter at the Tomakomai CCS demonstration site, Japan: Applicability to ground-based monitoring of offshore CO<sub>2</sub> geological storage, Greenh. Gases, 9, 934-947.

Kano, Y., Sato, T., Oyama, H. (2019) Numerical study on the formations of gas channels and subsequent bubbles in unconsolidated sandy seabed sediment using a coupled LBM-DEM method, J. Natural Gas Sci. Eng., 74, 103101.

Goto, H., Sugihara, M., Ikeda, H. and Ishido, T. (2020) Laboratory test of a superconducting gravimeter without a cryogenic refrigerator: implications for noise surveys in geothermal fields, Explor. Geophys., 51, 494-505.

Goto, H., Ishido, T. and Sorai, M. (2020) Numerical study of reservoir permeability effects on gravity changes associated with CO₂ geological storage: implications for gravimetric monitoring feasibility, Greenh. Gases, 10, 557-566.

Shiga, M., Aichi, M., Sorai, M. (2020) Quantitative investigation on the contributing factors to the contact angle of the 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 $CO_2$ 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運用方策,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/s2 level: ocean tide loading differences at different distances from the coast, Geopysical 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, 斉藤晃生,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.

# 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

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一般的に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。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。したがって、物理・化学・生物学等の総合的な理解に基づき、地圏環境中の化学物質の動態や化学物質のヒトや生態系への影響を定量的に評価することが極めて重要である。

当グループでは、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するとともに、知的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。

#### 2. 各研究項目の内容

2021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.

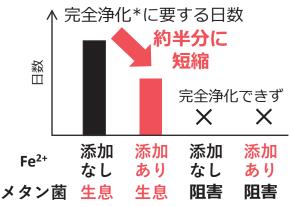
#### 2.1. 土壌・地下水汚染の修復技術に関する研究

土壌・地下水汚染の修復技術の研究では、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-ジオキサンの分解挙動や、複合汚染下における浄化技術の検討も進めている。成果の

一例としてクロロエチレン類の完全分解に及ぼす共存イオンや共生微生物の影響を検討したものを写真 1 および図1 に示す. 図1 から分かるようにクロロエチレンの完全分解の効率を高めるためには, 鉄イオンやメタン菌の共生が有効であることが明らかになった (Yoshikawa ら, 2021).



写真1 クロロエチレン類浄化試験の様子



\*完全浄化は下記の反応が進み、クロロエチレン類がすべて エチレンまたはエタンに脱塩素化され完全無害化すること テトラクロロエチレン(PCE)→トリクロロエチレン(TCE)→cis-ジクロロ エチレン(cis-DCE)→クロロエチレン(VC)→エチレンorエタン

図1 クロロエチレン類の完全分解に及ぼす第一鉄イオン およびメタン菌の影響

また, 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 等の環境条件の変化により, 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.

#### 2.2. 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、発光バクテリア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。

#### 2.3. 表層土壌評価基本図の整備

表層土壌は農業や生活環境に与える影響が大きく,表層 土壌における鉛やヒ素及びカドミウム等に代表される重金 属類の含有量や溶出量, そして調査地域の産業構造と地域 住民のライフスタイルを考慮したリスクを定量的に評価す ることは,土地の有効利用や産業用地の立地リスク診断,自 然起源と人為起源汚染の判別, また自治体等におけるリス クコミュニケーション等に非常に有用である. 当研究グルー プでは、わが国を対象として表層土壌中の重金属類などの 分布特性や重金属類のヒトへの健康リスクを評価した表層 土壌評価基本図の整備を実施している、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(四国地域)を公開した(図2).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,2022年度の公開を目指している.

# 2.4. 代表的な研究トピック (表層土壌評価基本図 (四 国地域)の公開)

今回公開した表層土壌評価基本図(四国地域)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5km 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に発生する土砂等に含まれる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。表層土壌評価基本図は、現在九州地方の調査を開始しており、最終的には全国の整備を目指している。

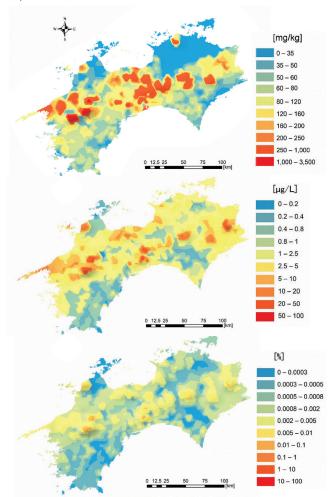


図 2 表層土壌評価基本図四国地域(クロム)

### 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

吉川美穂

張 銘(グループ付)

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)

渡邊真理子(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)

柿原結香(技術研修員)

#### 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)
- ・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)



写真 2 液体クロマトグラフ質量分析計



写真 3 誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS)

- ・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
- ・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

Feng, Y., Du, Y., Zhou, A., Zhang, M., Li, J., Zhou, S., Xia, W. (2020) 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.

Pujiwati, A., Wang, J., Nakamura, K., Kawabe, Y., Watanabe, N., Komai, T. (2020) Data-driven analysis for source apportionment and geochemical backgrounds establishment of toxic elements and REEs in the Tohoku region, Japan. *Chemosphere*, 263, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020. 128268

Imoto, Y., Yasutaka, T. (2020) Comparison of the impacts of the experimental parameters and soil properties on the prediction of the soil sorption of Cd and Pb. *Geodermas*, 376, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114538.

Zhang, M., Hao, Y., Zhao, Z., Wang, T., Yang, L. (2020) Estimation of coastal aquifer properties: A review of the tidal method based on theoretical solutions. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water*, https://doi.org/10.1002/wat2.1498.

Yang, L., Zhang, M., Hao, Y., Wang, T., Zhao, Z. (2020) Determining the hydraulic properties of coastal aquifer systems using groundwater response to

- tidal fluctuations: Applicability and limitations. *Coastal Engineering Journal*, https://doi.org/0.1080/21664250.2020.1775948.
- Li, C., Zhang, H., Hao, Y., Zhang, M. (2020) Characterizing the heterogeneous correlations between the landscape patterns and seasonal variations of total nitrogen and total phosphorus in a peri-urban watershed. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 34067-34077.
- Yoshikawa, M. and Zhang, M. (2020) Constraints in anaerobic microbial dechlorination, fermentation, and sulfate-reduction induced by high concentrations of tetrachloroethylene. *Water Air* & *Soil Pollution*, 231, https://doi.org/10.1007/s11270-020-04752-2.
- Zhang, Z., Wenke, W., Gong, C., Zhang, M. (2020) A comparison of methods to estimate groundwater recharge from bare soil based on data observed by a large-scale lysimeter. *Hydrological Processes*, 231, https://doi.org/10.1002/hyp.13769.
- Guo, Y., Dong, S., Hao, Y., Liu, Z., Yeh, T. J., Wang, W., Gao, Y., Li, P., Zhang, M (2020) Risk assessments of water inrush from coal seam floor during deep mining using a data fusion approach based on grey system theory. *Complexity*, https://doi.org/10.1155/2020/8205370.

- 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 layerusing soil amended with a stabilising agent. *Soils and Foundations*, https://doi.org/10.1016/ j.sandf.2021. 05.004.
- 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.

# 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、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。令和3年度の具体的ミッションは、1)ジオメカニクスモデルの実装に向けた連続岩盤強度プロフィル推測技術の開発と整備;2)超臨界地熱開発のための誘発地震評価・制御技術開発において、原位置条件での高温高圧岩石実験を実施し、その成果をジオメカニックモデリングに取り込む;3)掘削技術の発展を目的として、ビットの性能評価手法を改良する;4)廃水処分・非在来型資源開発等による誘発地震リスクの低減に関する包括研究を行う;5)技術コンサルティング及び国際連携などを通して、民間資金を獲得し、外部人材の受入や技術指導等を通して当グループの技術を社会に還元する

当グループ員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,地下利用のための効率的な掘削,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, CO2等の地中貯留・廃棄 物処分・非在来型資源の有効かつ安全的利用などに役立っ 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 と保全ある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. また, 技術研修や外部人材の受け入れを積極的に取 り組み,人材育成にも貢献する.

#### 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る。マルチスケール(カッティングスからテクトニックススケール)・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と幅広く、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 (併任)

坂本靖英(出向中)

宮崎晋行

北村真奈美

RA 受け入れ研究員不定数

#### 2.2. グループの主な実験装置

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)等を活用し、岩石試料を用いる三軸岩石破壊試験・透水試験・断層滑り実験・水圧破砕実験等を行い、流体及び流体圧の拡散に伴う岩石変形・微小破壊・岩石物性値を稠密にモニタリングするにより地圏メカニックモデリングに資する実験研究を系統的に実施している.

これらの実験研究は地震素過程の解明や,最近では被害性誘発地震リスク評価に資するもので,様々な分野に役立っている.

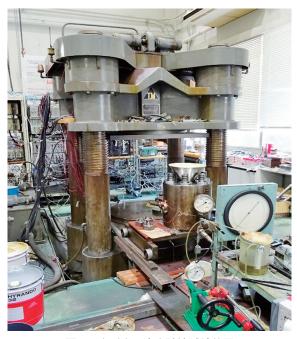


図 1 大型岩石注水破壊試験装置



図 2 岩石透水・透気試験装置



図 3 大型室内掘削試験装置

#### 3.2021年主な研究内容と成果

#### 3.1. 岩石掘削技術に関する研究開発

地圏の開発・利用・調査などの様々な事業において、一般に掘削コストが高いと言われている. 掘削コストを削減し、事業を促進するためには、高性能(高掘進速度、高耐久性)な掘削ビットを開発することが重要な課題である. 当グループでは、室内掘削試験装置(図3)を利用する室内掘削試験、大型岩石注水破壊試験装置(図1)を用いる圧子・チップ押込み試験を実施し、石油・天然ガス開発、地熱資源開発、鉱物資源開発など、多岐にわたる応用先をターゲットとして、それぞれの地層・鉱床の特徴を踏まえた掘削ビットの開発に関する研究開発を行っている.

#### 3.2. 超臨界地熱開発に関連する実験研究

減圧破砕や熱処理により亀裂が生じた花崗岩について、 超臨界流体・高温・高圧条件下において三軸変形実験・断 層の滑り実験・浸透率測定を実施し、X線CTやSEMを用 いて微細組織観察をおこない、物理特性(弾性特性・破壊 強度・浸透率等)の温度依存性および亀裂量と物理特性の 相関関係、変形・断層の滑りメカニズムを解明する.

#### 3.3. 連続的岩盤強度推定に関する研究開発

沈み込み帯の地震がどのように発生するかを理解するには、沈み込み帯の応力状態を知る必要がある。地下深部の応力を推定するには、P波速度と岩石強度の関係を使用できる。このように、南海付加体と呼ばれる南海トラフの地層から科学的な海洋掘削プロジェクト中に海底から約3.2 kmの深さまで収集された、ドリルカッティングと呼ばれる小さな岩や堆積物チップのP波速度と岩石強度を測定し、付加体堆積物中のP波速度と岩石強度の関係を決定した(Kitamura et al., 2021).

同様な手法をジオメカニクスモデリングに基づくCO2地 中貯留における安全性・ 有効性の評価にも適用できる. CO2の地中貯留に伴う貯留層・遮蔽層・上位岩盤の変形・ 変位が社会的受容上の懸念事項の1つである.また,岩盤の 重大な変形・変位はその破断とCO2の漏洩につながる可能 性があり,重要な事業リスクの1つでもある.これら懸念と リスクに対処するため、貯留の事前評価段階から、岩盤の力 学的挙動を数値シミュレーションすることが普通である. また事業展開中も、CO2圧入に伴う岩盤の力学的応答は継 続的にモニタリングされ,流体流動 - 岩石力学シミュレー ションによる安全性確認が繰り返される. そこで掘削時の 泥水循環とともに連続的に採取することができる掘削カッ ティング試料を用いた実験が有用である. そのため目的の 岩盤強度データを取得するために, 掘削カッティングスに 対するインデンテーション試験による岩盤強度の取得法の 開発と実験研究を行っている.

#### 3.4. 注水誘発地震に関する研究

地熱開発・シェールガス生産・CO2地下貯留・工業廃水の地下処分などの分野において、注水による誘発地震に関するリスク評価及び対策を重要かつ緊急な課題に着目し、マルチスケール・マルチアプローチ手法を駆使し、室内実験研究・海外現場の代表的事例(中国四川盆地の注水誘発地震)研究・数値シミュレーションを通して注水誘発地震の特徴、識別、発生条件の解明とリスク低減に関する技術の開発に資する研究を実施し、数多くの成果を国際誌に公表した。また、一連の研究を通して相対震源決定・テンプレートマッチングによる微小地震検出・モメントテンソル解・応力場インバージョン・潮汐計算等を含め、様々な手法を統括する総合地震データ処理ソフトウェア GeoTaos を開発し、公開した・

# 5. 2018年以降主な研究論文

Hashiba, K., K. Fukui, K. Miyazaki, and K. Watanabe (2020), Mechanical and cutting characteristics of cobalt-rich ferromanganese crusts, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(6), 2929-2934.

Huang, Y., X. Lei, and S. Ma (2021), Numerical study

- of the role of localized stress perturbations on fault slip: Insights for injection-induced fault reactivation, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j. tecto.2021.229105.
- Kondo, M., Y. Sakamoto, Y. Kawabe, K. Nakamura, N. Watanabe, and T. Komai (2021), Development of a model for predicting the volatilization flux from unsaturated soil contaminated by volatile chemical substances, *Environmental Modeling & Assessment*, 1-23.
- Kitamura, M., H. Kitajima, H. Sone, Y. Hamada, and T. Hirose (2019), Strength profile of the inner Nankai accretionary prism at IODP site C0002, *Geophysical Research Letters*, 46(19), 10791-10799.
- Kitamura, M., T. Hirose, and X. Lei (2021), Mechanical weakness of the Nankai Accretionary Prism: Insights from Vp measurements of drill cuttings, *Geochemistry*, *Geophysics*, *Geosystems*, 22(5), e2020GC009536.
- Lai, G., X. Lei, C. Jiang, W. Wang, and H. Gong (2021), Multiple mechanisms of coseismic water level changes at the Rongchang well in a seismically active area in China, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2021.229083.
- Lei, X. (2019), Evolution of b-value and fractal dimension of acoustic emission events during shear rupture of an immature fault in granite, *Applied Sciences*, 9(12), doi:10.3390/app9122498.
- Lei, X., S. Li, and L. Liu (2018), Seismic b-Value for foreshock AE events preceding repeated stickslips of pre-cut faults in granite, *Applied Sciences*, 8(12), 2361.
- Lei, X., J. Su, and Z. Wang (2020), Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities, *Science China Earth Sciences*, doi: 10.1007/s11430-020-9646-x.
- Lei, X., J. Sun, and J. Su (2021), Fluid-driven seismicity in relatively stable continental regions: Insights from the February 3rd, 2020 MS5.1 Qingbaijiang isolated earthquake, Earthquake Research Advances, 1(1), doi:10.1016/j. eqrea.2021.100007.
- Lei, X., Z. Wang, and J. Su (2019), The December 2018 ML 5.7 and January 2019 ML 5.3 earthquakes in south Sichuan basin induced by shale gas hydraulic fracturing, *Seismological Research Letters*, 90(3), doi:10.1785/0220190029.
- Lei, X., Z. Wang, and S. Ma (2021), A preliminary study on the characteristics and mechanism of the May 2021 M S 6.4, Yangbi earthquake

- sequence, Yunnan, China, *Acta Seismologica Sinica*, 43(3), 1-24.
- Lei, X., Z. Xue, and T. J. A. S. Hashimoto (2019), Fiber optic sensing for geomechanical monitoring:(2)-Distributed strain measurements at a pumping test and geomechanical modeling of deformation of reservoir rocks, *Applied Sciences*, 9(3), 417, doi:10.3390/app9030417.
- Li, X., X. Lei, and Q. Li (2021), Fault nucleation of tight sandstone by investigation of mechanical, acoustic, and hydraulic responses, *Engineering Geology*, doi:10.1016/j.enggeo.2021.106254.
- Li, X., X. Lei, Q. Li, and D. Chen (2021), Influence of bedding structure on stress-induced elastic wave anisotropy in tight sandstones, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(1), 98-113, doi:10.1016/j.jrmge.2020.06.003.
- Miyazaki, K., T. Ohno, H. Karasawa, and H. Imaizumi (2019), Performance of polycrystalline diamond compact bit based on laboratory tests assuming geothermal well drilling, *Geothermics*, 80, 185-194.
- Ohuchi, T., X. Lei, Y. Higo, Y. Tange, T. Sakai, and K. Fujino (2018), Semi-brittle behavior of wet olivine aggregates: the role of aqueous fluid in faulting at upper mantle pressures, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(10), doi:10.1007/s00410-018-1515-9.
- Peng, G., X. Lei, G. Wang, and F. Jiang (2021), Precursory tidal triggering and b value variation before the 2011 M 5.1 and 5.0 Tengchong, China earthquakes, *Earth and Planetary Science Letters*, 574, doi:10.1016/j.epsl.2021.117167.
- Sakamoto, Y., F. Kaneko, Y. Nakano, K. Nakamura and T. Komai (2019), Numerical study on enhanced gas recovery from methane hydrate reservoir during in-situ heating process by acid injection, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 29(3), 347-358, doi:10.17736/ijope.2019.jc744
- Sakamoto, Y., F. Kaneko, Y. Nakano, K. Nakamura and T. Komai (2020), Numerical study on the application of in-situ low-temperature oxidation for enhanced recovery from methane hydrate reservoir, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 30(2), 228-239, doi:10.17736/ijope.2020.jc760
- Sakamoto, Y., Y. Nakano, F. Kaneko, K. Nakamura, and T. Komai (2020), Numerical simulation of a laboratory-scale experiment for the hydrate dissociation process in porous media by acid injection, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 30(04), 501-512.

- Sakamoto, Y., Y. Nakano, F. Kaneko, K. Nakamura, and T. Komai (2021), Experimental and numerical studies on dissociation of methane hydrate by simultaneous injection of nitrogen and hot water, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 31(02), 186-198.
- Wang, X., X. Lei, S. Ma, Y. Zhang, Z. Guo, and X. Wen (2020), Phase velocity structure and azimuthal anisotropy beneath Sichuan Basin and surrounding areas from Rayleigh wave, CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS-CHINESE EDITION, 63(2), 445-459, doi: 10.6038/cjg2020M0700.
- Wang, Z., X. Lei, S. Ma, X. Wang, and Y. Wan (2020), Induced earthquakes before and after cessation of long - term injections in Rongchang gas field, Geophysical Research Letters, e2020GL089569.
- Xie, C., X. Lei, X. Zhao, Q. Ma, S. Yang, and Y. Wang (2017), Tidal triggering of earthquakes in the Ning' er area of Yunnan Province, China, *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 477-483.
- Zhai, H., X. Chang, W. Zhu, X. Lei, and Z. Xue (2021), Study on anisotropy of Longmaxi shale using hydraulic fracturing experiment, Science China Earth Sciences, 1-18.

- Zhang, L., X. Lei, W. Liao, J. Li, and Y. Yao (2019), Statistical parameters of seismicity induced by the impoundment of the Three Gorges Reservoir, Central China, *Tectonophysics*, 751, 13-22, doi:10.1016/j.tecto.2018.12.022.
- 及川寧己, 竹原 孝, 雷 興林, 深沢洋規, 山口 勉 (2020), CO2を圧入した泥岩の三軸圧縮実験における付加的 なスレショルド圧力計測の試み, Journal of MMIJ, 136 (10), 110-116.
- 覺本真代, 坂本靖英, 宮崎晋行, 青木一男, 瀧口 晃, 安井 彩, 森 二郎 (2018), メタンハイドレート生産井における異種材料間接触面摩擦挙動のモデル化ーメタンハイドレート貯留層の地層変形挙動予測に関する研究(第3報)-, Journal of MMIJ, 134(9), 117-130.
- 駒井 武, 坂本靖英 (2018), 有害化学物質の地下水中で の移動シミュレーション, 安全工学, 57(6), 442-450.
- 竹原 孝 (2019), 真壁小目花崗岩の破壊靭性値に関する実験的研究, 第46回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.304-309.
- 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(11), 134-139.





### d-excess と<sup>17</sup>O-excess を用いた地下水の涵養域推定法について

地下水研究グループ 町田 功, 小野 昌彦, 静岡環衛研 神谷 貴文, 村中 康秀 [連絡先] i-machida@aist.go.jp

#### 成果概要

富士山麓の約160地点にて採取した地下水の d-excess と<sup>17</sup>O-excess を高精度分析によって明らかにし、環境トレーサーとしての有効性を検討した. 結果として d-excess には明らかに高度効果が認められ、新たな環境トレーサーとして利用可能であることが示された. 一方、<sup>17</sup>O-excess に関しては分析精度が十分ではなく、現時点では有効なトレーサーとはなりにくいことが明らかになった.

#### 研究内容

我が国には山麓にて豊富な地下水が得られる地域が数多く存在する.これらの地下水の源は山地に降った雨であるが,地下水の動きは目に見えないため,標高何 m に降った雨なのかは分からない.この答えを見出すのに従来用いられてきたのが雨水の酸素18と重水素濃度の標高依存性であるが(高度効果),この手法で求めた涵養域を検証する方法が必要とされていた.そこで本研究では、富士山麓の約160地点で地下水を採取し、それらのd-excessと<sup>17</sup>O-excess を高精度に測定して,d-excess に高度効果が現れることを明らかにした.高度効果が表れる理由は,雨滴落下時あるいは涵養時の蒸発のためである.従来,湿潤地域における蒸発効果については幾つかの報告があったものの,本研究ではこれをトレーサーとして利用可能としたことに意味がある.

#### 研究成果はどう使われるか

 $\delta D$  もしくは $\delta^{18}O$  で求められる涵養域に d-excess によるクロスチェックが加わることにより、より高い精度で涵養域の推定が可能となる。涵養域の推定は地下水資源管理の上で、保全すべきエリアを決定する際に重要である.

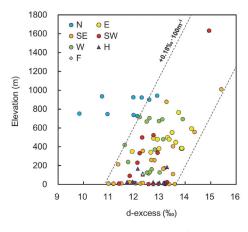


図 1 地下水の d-excess の標高依存性. 凡 例は斜面方向を意味する. 高精度に 分析することにより,わずかな標高依 存性を検出した.



#### 京都盆地における浅層地下熱伝導率に関する検討

地下水研究グループ 吉岡 真弓, 再生可能エネルギー研究センター地中熱チーム 内田 洋平, 冨樫 聡, シュレスタ・ガウラブ, 石原 武志 [連絡先] yoshioka-mayumi@asit.go.jp

#### 成果概要

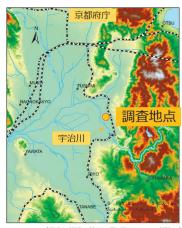
地中熱利用の熱源となる地下浅層での熱挙動の解明のため、本研究では、京都盆地にて実施された100mのオールコアボーリング試料の熱伝導率を測定すると共に、同地点にて実施された熱応答試験(TRT)の結果との比較検討を実施した。その結果、コアの熱伝導率よりもTRTによる見かけ熱伝導率が1.3~1.4倍大きいことが明らかとなり、地下水流動の存在が示唆された。

#### 研究内容

京都盆地の東部(宇治市内)において、深度100mのオールコアボーリング掘削によりコアを採取し、66深度での熱伝導率の測定を実施した、熱伝導率測定には、Decagon 社製(現 METER Group、Inc.)の KD2Pro を使用した。また、ボーリングを実施した同地点において熱交換器(BHE)を設置し、内部の温度測定と熱応答試験(TRT)を実施した。それらの結果、採取されたコア(100m)は粗粒砂・砂礫層が 7割を占め、コア全体の平均熱伝導率は2.09 W/(mK)、同地点で実施した TRT による見かけ熱伝導率は、2.85~3.05 W/(mK)であり、コアの平均熱伝導率よりも1.35~1.46倍高いことが示された。TRT 加熱後の BHE 内温度変化より、本地点では地下水流動の存在が示唆され、TRTでは地下水流動による熱移流効果により、見かけ熱伝導率が向上したことが示唆された。

#### 研究成果はどう使われるか

地中熱利用の熱源である地下浅層の熱伝導率や, 地下水流動による熱交換効率の向上を定量的に評価するための基礎研究成果となる. なお, 本研究は「NEDO 再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト削減技術開発/高度化・低コスト化のための共通基板技術開発」の一環として実施された.



(国土地理院 数値地図5万分の1に一部追加)

図1 オールコアサンプリング地点



図 2 砂礫層の例(深度79m付近)



#### 蛇紋岩を母岩とする強アルカリ性白馬八方温泉のメタンの起源

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

#### 成果概要

蛇紋岩が関連するサイトで観測される $CH_4$ は、 $CO_2$ などの無機炭素から非生物的に合成されている可能性が高いと考えられている。本研究は放射性炭素( $^{14}C$ )、メタンのクランプト同位体、希ガス同位体といった複数の地球化学的指標を組み合わせ、蛇紋岩温泉に含まれる $CH_4$ が地下深部の蛇紋岩化反応に伴って生成され、その後浅部へ移送されて天水循環システムに付加したことを示唆した。

#### 研究内容

本研究では、蛇紋岩に関連した  $CH_4$ 生成における炭素源の起源や生成場所(温度・深度)を制約するために、長野県白馬八方にある強アルカリ性温泉の掘削井戸から採取した試料の放射性炭素( $^{14}$ C)濃度、 $CH_4$ の安定同位体比( $\delta$ D、 $\delta$  $^{13}$ C)およびクランプト同位体存在度( $\Delta$  $^{13}$ CH $_3$ D),希ガス同位体組成を測定した。 $CH_4$ が $^{14}$ Cに枯渇していること、 $CH_4$ のクランプト同位体から推定される生成温度が高温であること、そして希ガス同位体組成は $CH_4$ が付加的な成分だとして矛盾しないことから,地下深部で生成した  $CH_4$ が天水循環システムに付加した可能性が高いと考えられる。また,低い $\delta$  $^{13}$ C- $CH_4$ 値は炭素源がマントル起源でないことを暗示した。同地域に点在する他の温泉に比べて,白馬八方温泉の特異的に高い  $CH_4$ 濃度は蛇紋岩に関連した  $CH_4$ 生成反応によるものと推測される。

#### 研究成果はどう使われるか

蛇紋岩化反応系は  $CO_2$ を  $CH_4$ に変換しうる天然の潜在的なメタネーションシステムである. このシステムにおける炭素循環を理解することで, 蛇紋岩化反応系を利用した  $CO_2$ の再資源化といった研究の発展につながることが期待される.

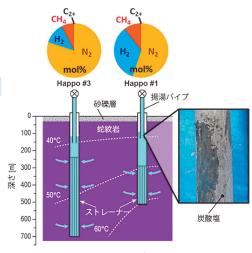


図1 白馬八方温泉の掘削井戸



#### シリカ鉱物析出反応と地震発生周期との相関性の定量評価

地圏化学研究グループ 最首 花恵,活断層・火山研究部門 大坪 誠,東北大学 岡本 敦 [連絡先] saishu.h@aist.go.jp

#### 成果概要

プレート境界付近の巨大分岐断層沿いに形成される岩石き裂中の石英析 出時間の計算モデルを新たに提案し、石英脈の形成時間と地震発生周期と の相関性を定量的に評価した. 今後, 相関性の普遍性が示されれば, 地震の 活動周期の予測や, 地熱エネルギーの持続的な利用にも応用できる可能性 がある.

#### 研究内容

地震が起こると地殻岩石に引張き裂が生じ、その中で水 - 岩石相互作用 (鉱物の溶解析出反応) が起こり得る. 特にシリカ (Si) は大陸地殻に広く 分布し、地震発生場には岩石き裂を石英 (SiO₂) が埋めた「石英脈」(図1) も多い. 地震の発生には水圧の上昇が影響すると考えられており、析出した 石英による岩石き裂の閉塞も水圧を上げる要因のひとつである. そこで本研究では、地震発生→引張き裂の形成→水圧降下→石英の析出→石英脈の形成→引張き裂の閉塞→水圧上昇→地震発生、というサイクルを仮定し、過去に巨大地震が発生したとされる延岡衝上断層 (宮崎県) を例に、石英脈が形成する時間の計算モデルを構築した. そして、石英脈が形成する時間と、巨大地震の繰り返し周期の時間スケールに相関性があることを示した. 今後、評価対象を広げて相関性の普遍性を検討するため、室内実験や新規フィールド調査を予定している.

#### 研究成果はどう使われるか

地震の活動周期の予測につながる可能性がある.また,地下の熱と水を資源とする地熱エネルギーの持続的な利用にも,本研究における水ー岩石相互作用やき裂閉塞時間の知見は有用と考える.



図1 引張き裂を石英が埋めた石英脈

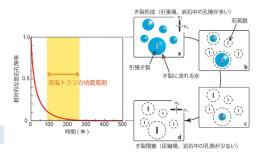


図 2 地震後の岩石孔隙率の時間変化と石 英脈形成過程のモデル,巨大地震(ここでは南海トラフ)の地震周期は約 ~300年.

#### 除染廃棄物の最終処分に対する社会受容性に関する研究

地圏化学研究グループ 高田 モモ, 保高 徹生, 白井 浩介, 北海道大学 大沼 進, 福島県立医科大学 大阪大学 (現所属) 村上 道夫, 東京大学 中谷 隼

[連絡先] momo.takada@aist.go.jp

#### 成果概要

2011年の福島第一原発事故により広範囲に環境除染が行われ,福島県で約1400万 m³の除染廃棄物が発生した.現在福島第一原発周辺の中間貯蔵施設に保管されている除染廃棄物は,2045年までに福島県外で最終処分される.本研究ではウェブアンケートを実施し,最終処分の合意形成において,いくつかの社会的および技術的要素について国民の相対的な重要性を明らかにした.

#### 研究内容

アンケート調査では、福島県を除く46都道府県に住む20~69歳,2000人を対象とした(北海道大学研究倫理審査判定:承認,受付番号:2年度-08).先行研究を参考に、社会受容性に影響を与えると予想される4要素(自分の住んでいる場所と処分場との距離、受け入れが決められた経緯、全国に設置される処分場の数、処分される物質の量と濃度)を選び、各属性に対しそれぞれ3水準の選択肢を作成した.アンケートで回答者は、図1に示すように2つの最終処分場の設置条件案からより好ましい方を選択した.コンジョイント法を用いて分析した結果、受け入れの経緯や、全国に設置される処分場の数といった、合意形成における公正さの重要性が高いことがわかった.一方で、廃棄物の量と濃度の重要性は小さかった.

#### 研究成果はどう使われるか

県外最終処分に向け、廃棄物の減容化などに関する研究・技術開発だけではなく、国民の理解など社会的な条件が整う必要がある。国民がより重要視する要素を明らかにすることで、より社会受容性が高い最終処分の実施につながる。本研究の一部は、JSPS 科研費18H04141の助成および(株)太平洋コンサルタントから提供を受けた。

AQ9.1 あなたの住んでいる場所の近ぐで除去土壌等が最終処分されることになった場合、次のニ つのケースのどちらの方がより受け入れても良いと思いますか。
なお、いずれのケースにおいても、最終処分場立地においては、周辺の空間線量および地下水、飲か水等の飲料性物質濃度のモニタリング等を行い、周辺環境への影響がないことを設場、才達成、土木

	ケースA	ケースB
受け入れが決め られた経緯	②意見収集型 住民の意見を収集したうえで 決定	<ul><li>①トップダウン型</li><li>住民の意見を収集せず、</li><li>首長が決定</li></ul>
処分される物質 の量と濃度	② 減酸化適用 処分物:中量・高濃度 130万t (50メートルブール 430個 分) 7.6万 ペクレル/キログラム (約3290年で100ペクレル/ キログラム*を下回る)	(3減層化適用なし 処分物:大量・中濃度 約1,300万トン (50メートルブール 4,300個 分) 8000 ペクレル/キログラム (約190年で100ペクレル/キ ログラムを下回る)
自分の住んでい る場所と処分場 との位置関係	①処分場が自分が住んでいる地域内(近所)に立地	②処分場が自分が住んでいる 市町村内に立地
全国に 設置される 処分場の数	①全国で1か所	①全国で1か所

黄色網掛けがケースA,Bの異なる部分 \*100 ベクレル/キログラムを下回れば、何に使用してもよい。



図1 アンケートの回答選択画面例



#### 山形県酒田市沖における表層型メタンハイドレート賦存域の海底状況把握調査

物理探査研究グループ 浅田 美穂, 燃料資源地質研究グループ 佐藤 幹夫 [連絡先] asada.miho@aist.go.jp

#### 成果概要

経済産業省「国内石油天然ガスに係る地質調査・メタンハイドレートの研究開発等事業(メタンハイドレートの研究開発)」の一環として、表層型メタンハイドレート(MH)賦存域の海底状況把握のための高分解能海底三次元画像マッピングが、日本海東縁酒田沖にて実施された。観測は、海底面の微細な地形変化や、生物・岩石露頭分布を、広域に、目視観察に匹敵する高い分解能で明らかにした。

#### 研究内容

メタンハイドレート (MH) は日本国内で生産が期待される天然ガス資源のひとつである. 賦存形態のひとつに, 海底面のごく近傍に形成される「表層型 MH」がある. 表層型 MH は日本海東縁に広く断続的に存在することが指摘されてきた. このうち山形県酒田市の沖合にある酒田海丘(仮称)頂部付近で, レーザー測量と静止画撮影を組み合わせる観測「高分解能海底三次元画像マッピング」により, 海底面の地形・色・位置情報を持つ3D 画像を作成し, 表層型 MH 賦存域の海底状況把握と, MH に関連するガス浸み出しの影響を受けて存在する生物群および岩石露頭分布を定量的に求めた. 現在の酒田海丘は, 海底面は広く泥質堆積物に覆われており, MH 露出はなく, 生物群および岩石露頭が海丘頂部のごく一部に限定されていることを示した.

#### 研究成果はどう使われるか

本研究で得られた底質・岩石分布・微細地形情報などを含む海底面の定量的データや画像は,将来予定されている表層型 MH の海洋産出試験の実施場所特定や,採掘技術開発,環境影響評価の実施に必要不可欠である.



図 1 ROV「Kaiyo3000」に「SeaXerocks1」 を装着して高分解能海底三次元画像 マッピングを実施した

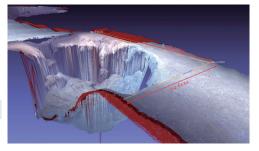


図2 酒田海丘で取得した高分解能海底三次元画像による海底面の凹み



ミュオントモグラフィによる密度推定における空間・時間・密度分解能の相互関係の実用性重視評価

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

#### 成果概要

ミュオンラジオグラフィは宇宙線ミュオンが透過した経路の平均密度を推定する手法である.近年では複数の地点からミュオンラジオグラフィを行い,トモグラフィックに物体内部の3次元密度推定を行う事例が増えている.本研究ではミュオントモグラフィにおける空間・時間・密度分解能評価を行う手法の提案を目的とし,それに加えて分解能評価に基づくインバージョン手法の比較を行った.

#### 研究内容

本研究では、ミュオントモグラフィを利用して様々な大きさ・密度をもつ密度異常検出を行った際に必要な観測時間を数値計算によって評価した。得られる密度異常体の大きさ・密度、そして検出に必要な観測時間をそれぞれ空間・密度・時間分解能の指標として扱い、相互関係評価を行った。ミュオン観測のフォワード計算から密度分布推定を行う際に、スパースモデリングの一種である L1ノルム正則化および L2ノルム正則化最小二乗法を適用した。得られる推定密度分布では前者の方がより一様な分布を与えた。(図1)また検出したいアノマリの大きさ・密度に応じて、分解能評価結果が用いるべき逆解析手法の指標となりうることが示唆された。(図2)今回の結果は特定の観測状況に基づく結果であり、より一般的な分解能特性の評価に関しては検討中である。

#### 研究成果はどう使われるか

弾性波探査や重力探査など他の物理探査手法とジョイント解析することで、ミュオントモグラフィの劣決定性の緩和や異なる物性値推定への寄与が期待でき、ジョイント解析と既存手法とを分解能の観点から比較できると考えられる.

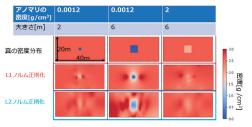


図 1 L1ノルム正則化およびL2ノルム正則 化最小二乗法による逆解析結果

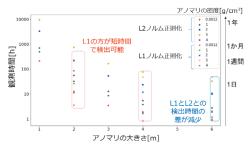


図2 L1ノルム正則化およびL2ノルム正則 化最小二乗法を用いたミュオントモ グラフィの分解能評価結果



粘土鉱物表面への二酸化炭素・メタンの競合吸着に関する分子動力学的検討

CO2地中貯留研究グループ 志賀 正茂, 徂徠 正夫, 東大新領域 愛知 正温 [連絡先] m.shiga@aist.go.jp

### 成果概要

 $CO_2$ -Enhanced Gas Recovery ではシェール層の鉱物表面への  $CO_2$ ・ $CH_4$ の吸着性能が重要だと考えられている。一方,分子間相互作用に起因する競合吸着は一般的な貯留層シミュレータに実装されている拡張ラングミュア (EL) モデルでは扱うことができない。そこで,本研究では分子動力学 (MD) 計算により粘土鉱物表面上での  $CO_2$ ・  $CH_4$ 吸着性能に対する圧力・温度・界面水の影響を評価した。

#### 研究内容

本研究では  $CO_2 \cdot CH_4 \cdot$  白雲母系 (図1) での MD シミュレーションを実施した。その結果, $CO_2$ 圧入初期段階に相当する  $CO_2$ 分圧の低い条件では, $CO_2$ は EL モデルでの推定値以上に高い吸着優位性を持つことが示され, $CO_2$ 分圧の高い条件では EL モデルでの推定値を下回ることが示された。また,特に313K から343K へ温度が増加すると, $CO_2$ による  $CH_4$ の置換性能が大きく低下することが分かった。さらに,温度影響は $CO_2$ 分圧が低い条件で特に顕著であった。各条件下での吸着構造を解析することで,MD と EL モデルの乖離は吸着サイトでの競合吸着に起因することを明らかにした。また,水分量の増加によって  $CO_2 \cdot CH_4$ の吸着量は減少し,そのメカニズムが白雲母表面上の水分子の吸着膜の形成によることを密度分布(図2)・自由エネルギー計算から数値的に示した。

#### 研究成果はどう使われるか

既存の吸着性能評価モデルの拡張に繋がり、より高精度かつ解釈性の高い貯留層シミュレータの開発が期待される。また、今後の展開によりナノ粒子や界面活性剤の圧入等、新しい $CO_2$ 圧入方法の開発指針の提案が期待できる。

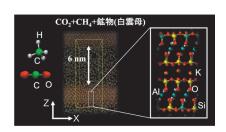


図1 シミュレーションに用いたスリット系

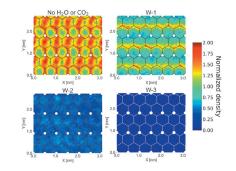


図 2 白雲母表面から1nm 以内の領域での CH<sub>4</sub>分子の密度分布 (CH<sub>4</sub>のバルク密度 によって正規化した値.格子点はSiイ オン,○はAlイオンを示す.W-1:水 分子密度100kg/m³; W-2:水分子密 度200kg/m³; W-3:水分子密度 300kg/m³)



#### 地圏における重金属類の動態に関わる温度依存性評価

地圏環境リスク研究グループ 斎藤 健志, 川辺 能成, 埼玉大学 小口 千明 [連絡先] take-saitou@aist.go.jp

#### 成果概要

近年, 地圏の温度上昇により, ホウ素やヒ素など, 重金属類が地下水中に溶出する可能性が報告されている. 本研究では, 重金属類の動態メカニズムのうち, 土壌や地質への吸着現象を対象に, その温度依存性を評価した. 基本的には,大きな温度依存性は認められなかったが, 土壌や地質によっては,特にヒ素で最大30%程度, 20℃よりも40℃で吸着量が上昇することが示唆された.

#### 研究内容

本研究では、有害な重金属類であるホウ素やヒ素、鉛を対象とし、異なる複数の土壌や地質に対する吸着特性について、その温度依存性(20℃ならびに40℃)を検討した。土壌は、黒ボク土と褐色森林土、地質は、沖積粘土層(完新統)と海成シルト層(中新統)を対象とした。まずは、夾雑イオンが存在しない条件下を対象に、純水にホウ素やヒ素(いずれも、100 mg/L)、鉛(500 mg/L)を溶解させ、各重金属類溶液を作成した。pHの影響も検討するため、初期 pHを3~11程度の範囲で複数に調整した。土壌や地質と各重金属類溶液は、固液比1:10の比率で混合し、20℃もしくは40℃の条件下で24時間振とうした。その後、遠心分離機にかけ、0.20 μm フィルターで濾過し、ICP-AESで各重金属類濃度を定量した。ここでは、各試料ともに、3回の繰り返し試験を実施した。

#### 研究成果はどう使われるか

都市化等に伴う地圏熱環境変化に際し,地下水中の重金属類動態を予測する上で,本結果の活用が期待される.また,継続研究の結果によっては,重金属類による土壌・地下水汚染の原位置加熱浄化手法開発にも繋がる可能性がある.

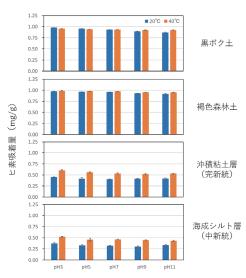


図 1 対象とした土壌・地質に対する20℃ および40℃の各 pH におけるヒ素の 吸着量 (mg/g) (各データは 3回の繰 り返し試験による平均値であり,標準 偏差をバーで示している)



#### 微小地震観測に基づいた地熱地域における地下流動・構造の把握手法

再生可能エネルギー研究センター地熱チーム 岡本 京祐, 浅沼 宏, 青柳 直樹 [連絡先] okamoto.kyosuke@aist.go.jp

#### 成果概要

高感度微小地震観測網を用いた,高精度な微小地震震源位置の推定,微小地震への流体流動の寄与を判定する手法の確立を通して,地熱貯留層内の流体挙動予測手法の開発を行った.また,機械学習を用いた自動震源決定手法の開発を行い,手動震源決定に準ずる結果を即時的に得られることを示した.これらの手法により,効率的で安定した地熱地域の開発・維持に貢献可能である.

#### 研究内容

ローカルマグニチュード -2程度までの微小地震を捉えられる観測網の構築・維持を行った.この微小地震観測網で捉えられたデータに対して,機械学習を用いたソフトウェアにより,即時的に震源決定が可能なことを示した.更に,検出された微小地震群に対して,波形相関により得られた相対時間差情報を用いることで,10m オーダーの分解能で位置を推定できることを可能とした.更には,地震波形に含まれる散乱波情報,反射波情報,極性情報を総合的に利用することにより,微小地震観測から地下の流動を推定することを可能とした.また,微小地震の発生に依存せず,常時微動成分の変化からも流体流動の有無を判断できることを示した(図1).従来法と相補的に利用することで,より高度なモニタリングシステムを構築できることを示した.

#### 研究成果はどう使われるか

新規開発予定の地熱地域や,既開発地域における地熱貯留層挙動のモニタリング・評価ができる.石油・シェール開発分野や,二酸化炭素地中貯留,地震・火山モニタリング等の他分野への展開も考えられる.

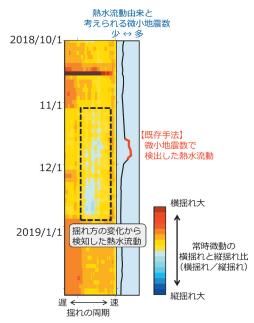


図1 常時微動の揺れ方の変化と,流動由 来と考えられる微小地震数の変化を 比較した図



#### 地熱地域における地表水の pH 分布特性評価

再生可能エネルギー研究センター地熱チーム 鈴木 陽大, 浅沼 宏 [連絡先] yt-suzuki@aist.go.jp

#### 成果概要

地熱地域において地表水のpHマップを作成することは,中性型熱水貯留層位置の推定に有効である可能性が示されているが,有益な推定結果を得るためには,適切なデータスクリーニングが必要である.本研究では,データスクリーニング法としてのEC-pHグラフについて,全国の地熱地域における適用可能性を検討し,本手法の汎用性を評価した.

#### 研究内容

多くの地熱資源が賦存する北海道,東北,九州地方に位置する複数の主要地熱地域(図1)において地表水データ2,131件を収集し,デジタル化した.収集したデータから各地熱地域におけるpHマップとEC-pHグラフを作成し,データスクリーニング法としてのEC-pHグラフの適用可能性を検討した.図2は収集した全データを使用して作成されたEC-pHグラフである.多くのデータは混合曲線付近にプロットされているが,pH7前後で比較的EC値が高い一部のデータは混合曲線から外れてプロットされている(青点線領域).この傾向が全ての地熱地域において見られたことから,EC-pHグラフによるデータスクリーニングは,地域特性に依存しない汎用性の高い手法である可能性が示された.

#### 研究成果はどう使われるか

本研究結果は、地熱地域における地表水のpHマップ作成が中性型熱水貯留層位置の迅速な推定に有効である可能性を示唆している、将来的には、迅速地熱資源探査法として、地熱開発促進への貢献が期待される.



図1 本研究で検討した主要地熱地域

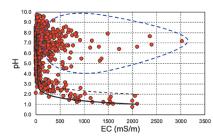


図 2 主要地熱地域における EC-pH グラフ. 赤丸は地表水データ, 黒実線は混合曲線, 黒点線は季節変動を考慮した混合曲線を示す.



#### 上向きの地下水流れ発生地域における原位置地下水注水実験

再生可能エネルギー研究センター地中熱チーム 金子 翔平, 冨樫 聡, シュレスタ・ガウラブ, アリフ・ウィディアトモジョ, 内田 洋平 [連絡先] shohei-kaneko@aist.go.jp

#### 成果概要

オープンループ方式地中熱利用システム(OLシステム)の地下水還元に関する適地判定指標の高度化のためには、原位置での実証データに基づく検討が必要となる。そこで本研究では、水理水頭に着目したOLシステム導入判断のための判定技術開発を目的として、同一孔において地下水位の異なる2時期(降雪期・非降雪期)の注水実験を福島県会津坂下町で実施した。

#### 研究内容

調査地域では、消雪用として地下水を揚水しており、降雪期には広域地下水流動系の水頭低下が発生している。そのため非降雪期は、上向きの地下水流れが発生するが、降雪期では周囲の揚水により、上向き地下水流れが小さくなる。注水実験では、降雪期・非降雪期の2時期に、段階揚水・注水試験、連続揚水・注水試験を実施した。2時期の結果を比較すると、揚水試験では非降雪期の水位降下量は、降雪期よりも小さく、注水試験では非降雪期の水位上昇量は、降雪期よりも大きいことが確認された(図1、図2)。すなわち、冬の方が注水しやすいことが確認されたが、この原因を解明するためには更なる調査・解析が必要である。今後は、更なる実証実験と数値解析による現況再現・感度解析により、水理水頭が地下水注水に与える影響を検討する

### 研究成果はどう使われるか

本研究は、OLシステム導入判断のための判定技術開発を目的として実施している.本成果を発展させることで、OLシステム導入判断のための判定指標の高度化が可能となり、地中熱利用システムの更なる普及に繋がると期待される.



図 1 揚水量150 L/minにおける井戸ロス・ 帯水層ロス評価

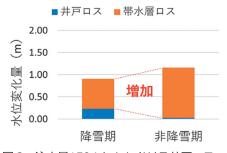


図 2 注水量150 L/minにおける井戸ロス・ 帯水層ロス評価



#### 地中熱利用のための島嶼における水文地質・地下水流動モデルの構築

再生可能エネルギー研究センター 地中熱チーム シュレスタ・ガウラブ, 冨樫 聡, 内田 洋平 [連絡先] shrestha-g@aist.go.jp

#### 成果概要

地中熱利用(GSHP)システムは地下浅部の熱を利用し冷房・給湯などを行う省エネルギー技術である。本システムの普及とポテンシャル評価のためには、広域規模の水文地質と地下水流動系を把握する必要である。本研究では、島嶼である沖縄県・名護平野に着目し、地中熱ポテンシャル評価のために三次元水文地質・地下水流動モデルを構築することを目的とする。

#### 研究内容

地中熱利用ポテンシャル評価のために対象地域における水文地質および 地下水流動系を把握する必要がある。本研究では、名護平野のボーリング資料、地質情報と地下水データを収集した。収集した地質データを基に三次元 水文地質・地下水流動モデルを構築し、地下水流動系を把握した。モデルの 検証には、収集した地下水位の観測データと比較して、計算結果の再現性を 確認した。今後は、塩水侵入現象も考慮してモデルを更新し、地下水流速へ の影響を把握する。

#### 研究成果はどう使われるか

本研究の成果は、対象地域における地中熱ポテンシャル評価、そして、ポテンシャルマップの作成に繋がる.また、見かけ熱伝導率の推定手法の開発にも役立ち、地中熱の普及促進に貢献する.

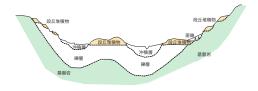


図1 名護平野における模式地質断面図

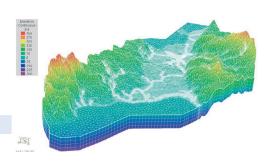


図 2 三次元広域モデル



# **論** 文リスト 2019 ~ 2021 年

- 加藤 達也, <u>網澤 有輝</u>, Wenying Liu, 所 千晴(2019) Structural Change Analysis of Cerianite in Weathered Residual Rare Earth Ore by Mechanochemical Reduction Using X-Ray Absorption Fine Structure, Minerals.
- Xiyang Dong, Chris Greening, Jayne E. Rattray, Anirban Chakraborty, Maria Chuvochina, 眞弓 大介, Jan Dolfing, Carmen Li, James M. Brooks, Bernie B. Bernard, Ryan A. Groves, Ian A. Lewis, Casey R. J. Hubert (2019) Metabolic potential of uncultured bacteria and archaea associated with petroleum seepage in deep-sea sediments, Nature Communications.
- 神田 径, 宇津木 充, <u>高倉 伸一</u>, 井上 寛之(2019)Hydrothermal system of the active crater of Aso volcano (Japan) inferred from a three-dimensional resistivity structure model, EARTH PLANETS AND SPACE.
- 吉川 省子, 保高 徹生, 井倉 将人, 大越 聡, 藤原 英司, 斉藤隆, 矢ヶ崎 泰海, 山口 紀子, 江口 定夫(2019)Relationship between radiocesium absorbed by paddy rice and trapped by zinc-substituted Prussian blue sheet buried in soil, SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION.
- Yaser Nikpeyman, 細野 高啓, <u>小野 昌彦</u>, Heejun Yang, 一柳 錦平, 嶋田 純, 滝川 清(2019)Sea surficial waves as a driving force that enhances the fresh shallow coastal groundwater flux into the oceans, Environmental Earth Sciences.
- Tatsuya Kato, Giuseppe Granata, Yuki Tsunazawa, Tetsuichi Takagi, Chiharu Tokoro (2019) Mechanism and kinetics of enhancement of cerium dissolution from weathered residual rare earth ore by planetary ball milling, MINERALS ENGINEERING.
- 境澤 亮祐, 佐藤 徹, 森 千秋, 大山 裕之, 津旨 大輔, 坪野 考樹, 加野 友紀 (2019) Position and flux estimation of the unexpected seepage of CO2 purposefully stored in a subseabed geological formation, International Journal of Greenhouse Gas Control.
- Akam, C., George J. Simandle, Ray Lett, Suzanne Paradis, <u>星野美保子</u>, <u>昆慶明</u>, <u>荒岡大輔</u>, Craig Green, <u>児玉信介</u>, <u>高木哲一</u>, Manzur Chaudhry (2019) Comparison of methods for the geochemical determination of rare earth elements:

- Rock Canyon Creek REE-F-Ba deposit case study, SE British Columbia, Canada, GEOCHEM-ISTRY-EXPLORATION ENVIRONMENT ANALYSIS.
- 松本 親樹, 町田 功 (2019) Investigation of Groundwater Flow using  $\delta^{18}$ O and  $\delta$ D in the A Sulphur Mine in Japan, Proc. of 23rd International Conference on Environment and Mineral Processing and workshop Waste Secondary Raw Materials.
- <u>雷 興林</u>, 王 志偉, 蘇 金蓉(2019)The December 2018 ML 5.7 and January 2019 ML 5.3 earthquakes in south Sichuan basin induced by shale gas hydraulic fracturing, SEISMOLOGICAL RESEARCH LETTERS.
- 太田 雄貴, 黒田 潤一郎, 山口 飛鳥, 鈴木 淳, <u>荒岡 大輔</u>, 石村 豊穂, NGHP Expedition 02 JAMSTEC Science Team, 川幡 穂高(2019)Monsoon-influenced variations in plankton community structure and upper-water column stratification in the western Bay of Bengal during the past 80 ky, PALAEOGE-OGRAPHY PALAEOCLIMATOLOGY PALAEOECOLOGY.
- K. Nakata, T. Hasegawa, D. K. Solomon, K. Miyakawa, Y. Tomioka, T. Ohta, T. Matsumoto, K. Hama, T. Iwatsuki, M. Ono, A. Marui (2019) Degassing behavior of noble gases from groundwater during groundwater sampling, Applied Geochemistry.
- Yu Nagata, Masaya Minagawa, Shosei Hisatomi, <u>Yuki Tsunazawa</u>, Kyoko Okuyama, Motonori Iwamoto, Yasuyoshi Sekine, Chiharu Tokoro (2019) Investigation of optimum design for nanoparticle dispersion in centrifugal bead mill using DEM-CFD simulation, Advanced Powder Technology.
- 雷興林, Shinian Li, 劉力強 (2019) Evolution of b-Value and Fractal Dimension of Acoustic Emission Events During Shear Rupture of an Immature Fault in Granite, Applied Sciences-Basel.
- 松本 親樹, 濱中 晃弘, 村上 海人, 島田 英樹, 笹岡 孝司 (2019) SECURING TOPSOIL FOR REHABILITATION USING FLY ASH IN OPEN-CAST COAL MINES: EFFECTS OF FLY ASH ON PLANT GROWTH, Journal of the Polish Mineral Engineering Society.
- 伊左治 雄太, 吉村 寿紘, <u>荒岡 大輔,</u> 黒田 潤一郎, 小川 奈々子, 川幡 穂高, 大河内 直彦(2019) Magnesium

- isotope fractionation during synthesis of chlorophyll a and bacteriochlorophyll a of benthic phototrophs in hypersaline environments, ACS Earth and Space Chemistry.
- 濱中 晃弘, 山崎 寛人, 笹岡 孝司, 島田 英樹, <u>松本 親樹</u> (2019) Application of Fly Ash to Acidic Soil to Improve Plant Growth in Disturbed Land of Open-cut Mining, Proc. of 18th Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production.
- 前川 竜男(2019)Equilibrium conditions of xenon hydrates in the presence of water-soluble additives of dimethyl sulfoxide, amides and amines, FLUID PHASE EQUILIBRIA.
- Damak Fadwa, 浅野 眞希, 馬場 浩司, 須田 碧海, <u>荒岡 大輔</u>, Ahmed Wali, 礒田 博子, 中嶋 光敏, Mohamed Ksibi, 田村 憲司(2019)Interregional traceability of Tunisian olive oils to the provenance soil by multielemental fingerprinting and chemometrics, FOOD CHEMISTRY.
- Kyoko Ono, <u>Tetsuo Yasutaka</u>, Takehiko I. Hayashi, Masashi Kamo, Yuichi Iwasaki, Taizo Nakamori, Yoshikazu Fujii, Takafumi Kamitani (2019) Model construction for estimating potential vulnerability of Japanese soils to cadmium pollution based on intact soil properties, PloS one.
- Shuhei Nomura, Michio Murakami Wataru Naito, <u>Tetsuo Yasutaka</u>, Toyoaki Sawano and Masaharu Tsubokura (2019) Low dose of external exposure among returnees to former evacuation areas: a cross-sectional all-municipality joint study following the 2011 Fukushima Daiichi nuclear power plant incident, Journal of Radiological Protection.
- <u>川辺能成</u>, 原 淳子 (2019) Chemical Properties of Tsunami Deposits Caused by the Great East Japan Earthquake, Proceedings of AOGS2019.
- 宮崎 晋行, 大野 哲二, 唐澤 廣和, 今泉 博之 (2019) Performance of Polycrystalline Diamond Compact Bit based on Laboratory Tests Assuming Geothermal Well Drilling, GEOTHERMICS.
- 中嶋健,岸本清行(2019)日本海南東部の海底地形アナグリフ,地質学雑誌.
- 荒岡 大輔, 吉村 寿紘(2019)Rapid purification of alkali and alkaline-earth elements for isotope analysis (delta Li-7, delta Mg-26, Sr-87/Sr-86, and delta Sr-88) of rock samples using borate fusion followed by ion chromatography with a fraction collector system, ANALYTICAL SCIENCES.
- 中嶋健,岩野 英樹,檀原 徹,山下 透,柳沢 幸夫,谷村 好弘,渡辺 真人,佐脇 貴幸,中西 敏,三石 裕之,山科 起行,今堀 誠一(2019)富山県八尾地域の新生界年代層序

- の再検討とテクトニクス, 地質学雑誌.
- 高野 修,中嶋健(2019)富山深海長谷への砕屑物供給系としての北部フォッサマグナ信越堆積盆:後期新生代深海堆積システム・堆積テクトニクスの変遷,地質学雑誌.
- Momo Kurihara, 保高 徹生, Tatsuo Aono, Nobuo Ashikawa, Hiroyuki Ebina, Takeshi Iijima, Kei Ishimaru, Ramon Kanai, Zin' ichi Karube, Yae Konnai, Tomijiro Kubota, Yuji Maehar, Takeshi Maeyama, Yusuke Okizawa, Hiroaki Ota, Shigeyoshi Otosaka, Aya Sakaguchi, Hisaya Tagomori, Keisuke Taniguchi, Masatoshi Tomita, Hirofumi Tsukada, Seiji Hayashi, Sangyoon Lee, Susumu Miyazu, Moono Shin, Takahiro Nakanishi, Tatsuhiro Nishikiori, Yuichi Onda, Takuro Shinano, Hideki Tsuji (2019) Repeatability and reproducibility of measurements of low dissolved radiocesium concentrations in freshwater using different concentration methods, JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY.
- 杉田 創, 小熊 輝美, 張 銘, 原 淳子, 川辺 能成 (2019) 使用済 Ca 系ヒ素吸着材に及ぼす溶液 pH の影響 亜ヒ酸及びヒ酸の溶出挙動について, 第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集.
- <u>張銘</u> (2019) Challenges of solving the problem of soil and groundwater contamination -An interdisciplinary approach-, Syhthesiology-English edition.
- Zhixue Zhao, Xiaoguang Wang, Yonghong Hao, Tongke Wang, Abderrahim Jardani, Herve Jourde, Tian-Chyi Jim Yeh, 張銘 (2019) Groundwater response to tidal fluctuations in a leaky confined coastal aquifer with a finite length, HYDROLOGICAL PROCESSES.
- 井伊 博行, Kitagawa Hiroki, Kubohara Takuma, <u>町田</u> <u>功</u> (2019) OXYGEN AND HYDROGEN STABLE ISOTOPIC RATIOS AND SOLUBLE SUBSTANCES OF GROUNDWATER IN THE KINOKAWA RIVER CATCHMENT, KII PENINSULA, JAPAN, International Journal of GEOMATE.
- 前田 歩,吉村 寿紘, 荒岡 大輔, 鈴木 淳, 為則 雄祐, 藤田 和彦,豊福 高志, 大河内 直彦,川幡 穂高 (2019) Magnesium Isotopic Composition of Tests of Large Benthic Foraminifers: Implications for Biomineralization, GEOCHEMISTRY GEOPHYSICS GEOSYSTEMS.
- 新谷 毅 , 益田 晴恵 , 岡崎 香生里 , Emilie EVEN , <u>小野 昌</u> <u>彦 , 丸井 敦尚</u> (2019) Characterization of groundwater based on  $\delta^2$ H,  $\delta^{18}$ O and Cl- concentration beneath the Osaka Plain , Southwest Japan , GEOCHEMICAL JOURNAL.
- Seiya Yamashita, <u>Hiroki Mukai</u>, Naotaka Tomioka, Hiroyuki Kagi, Yohey Suzuki (2019) Iron-

- richSmectite Formation in Subseafloor Basaltic Lava in Aged OceanicCrust, Scientific report.
- 上沢 進,<u>張銘</u>, Robert C. Borden, 駒井 武 (2019) 難透水性地盤におけるバイオレメディエーションの ための浄化促進剤投入方式に関する研究 - ウォー タージェットを用いた現場実証試験 - , 地盤工学 ジャーナル.
- 上沢 進,<u>張</u>銘,駒井 武(2019)難透水性地盤における バイオレメディエーションのための浄化促進剤投入 方式に関する研究 –基本性能に関する理論的検討一, 地盤工学ジャーナル.
- Adi Maulana, Theo van Leeuwen, 高橋 亮平, Sun-Lin Chung, <u>実松 健造</u>, Huan Li, Ulva Ria Ifran (2019) Geochemistry and geochronology of VHMS mineralization in the Sangkaropi district, central-West Sulawesi, Indonesia: Constraints on its tectono-magmatic setting, ORE GEOLOGY REVIEWS.
- 井本 由香利, 保高 徹生 (2019) バッチ型土壌溶出試験における試験条件の影響比較, 第13回環境地盤工学シンポジウム論文集.
- 保高 徹生, 江種 伸之(2019) テトラクロロエチレン及び その分解生成物の分解定数が到達距離に与える影響 の基礎的検討, 第13回環境地盤工学シンポジウム論 文集.
- 井岡 聖一郎, <u>町田功</u> (2019) 青森県藤崎町における深度10m 以浅地下水の硫酸還元反応に関連した化学種の水質調査,日本水文科学会誌.
- 片山 泰樹, 鎌形 洋一 (2019) Genus Methanomicrobium Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria.
- 坂本 靖英, 金子 冬生,中野 裕介,中村 謙吾,駒井 武 (2019) Numerical Study on Enhanced Gas Recovery from Methane Hydrate Reservoir during In Situ Heating Process by Acid Injection, INTERNATIONAL JOURNAL OF OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING.
- Manami Kitamura, Hiroko Kitajima, Hiroki Sone, Yohei Hamada, Takehiro Hirose (2019) Strength profile of the inner Nankai accretionary prism at IODP Site C0002, Geophysical Research Letters.
- 木村 志照, 三浦 俊彦, 鈴木 和明, <u>保高 徹生</u>, 野田 泰史, 足立 とう子, 橋 宏和(2019) 気泡シールド工事で 発生する気泡混合土の環境影響評価, 材料.
- Jae Hoon Kim, Jin-Han Ree, Jeong-Heon Choi, Naveen Chauhan, 廣瀬 丈洋, <u>北村 真奈美</u> (2019) Experimental Investigations on Dating the Last Earthquake Event using OSL Signals of Quartz from Fault Gouges, TECTONOPHYSICS.
- 三好 陽子, 石橋 純一郎, 上原 誠一郎, 島田 和彦, Kevin Faure (2019) The subseafloor thermal gradient at Iheya North Knoll, Okinawa Trough, based on oxygen and hydrogen isotope ratios of clay min-

- erals, JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH.
- 髙橋 幸士, 角皆 潤, 中川 書子, 鋤柄 千穂 (2019) Stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of water vapor in volcanic plumes sampled in glass bottles using cavity ring-down spectroscopy, JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH.
- 原 淳子, 川辺 能成, 永瀬 弘喜, 友口 勝, 張 銘 (2019) 建設残岩からの有害元素溶出特性の評価, 第24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.
- 後藤 宏樹, 杉原 光彦, 池田 博, 西 祐司, 石戸 恒雄, 徂徠 正夫 (2019) Continuous gravity observation with a superconducting gravimeter at the Tomakomai CCS demonstration site, Japan: Applicability to ground-based monitoring of offshore CO2 geological storage, Greenhouse Gases-Science and Technology.
- 北村 真奈美, 北島 弘子, 曽根 大貴, 濱田 洋平, 廣瀬 丈洋 (2019) Strength profile of the inner Nankai accretionary prism at IODP Site C0002, GEO-PHYSICAL RESEARCH LETTERS.
- Rivai Alvin Tomy, 米津 幸太郎, Syafrizal, <u>実松 健造</u>, Damar Kusumanto, 今井 亮, 渡邊 公一郎(2019) A low-sulfidation epithermal mineralization in the River Reef Zone, the Poboya prospect, Central Sulawesi, Indonesia: Vein textures, ore mineralogy, and fluid inclusions, RESOURCE GEOLOGY.
- 申 文浩, 久保田 富次郎, 万福 裕造, 鈴木 幸雄, <u>保高 徹生</u>, 松波 寿弥, 太田 健(2019)Behavior of radiocesium in decontaminated paddy fields in Fukushima Prefecture, Japan, PADDY AND WATER EN-VIRONMENT.
- Tomohiko Itabashi, 保高 徹生, Jining Li, Yohey Hashimoto, Masato Ueshima, Hirofumi Sakanakura, 井本 由香利, Masaaki Hosomi (2019) Speciation and Fractionation of Soil Arsenic from Natural and Anthropogenic Sources: Chemical Extraction, Scanning Electron Microscopy, and Micro-XRF/XAFS Investigation, ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY.
- 川辺能成(2019)Kinetic parameters of Pseudonocardia dioxanivorans in the presence of heavy metals, Proceedings of MEWE2019.
- <u>雷興林</u>, 王 志偉, 蘇 金蓉(2019) Possible link between long-term and short-term water injections and earthquakes in salt mine and shale gas site in Changning, south Sichuan Basin, China, Earth and Planetary Physics.
- 柳澤 教雄, 增田 善雄, 佐藤 真丈, 笠井 加一郎, 大里 和己, 佐倉 弘持 (2019) The material corrosion test on

- pH adjustment condition by acid at geothermal field in Japan, Proceedings of 41th New Zealand Geothermal Workshop.
- 松本 親樹, 小野 昌彦, 町田 功 (2019) Application of Isotope Methods for Identifying Groundwater Flow Paths into Closed Mine Sites in Japan, Proc. of International Symposium on Earth Science and Technology 2019.
- Yankun Sun, 薛 自求, Tsutomu Hashimoto, <u>雷 興林</u>, Y. Zhang(2019)Distributed Fiber Optic Sensing System for Well-based Monitoring Water Injection Tests—A Geomechanical Responses Perspective, WATER RESOURCES RESEARCH.
- 有馬 謙一,山田 一夫,大迫 政浩,保高 徹生, 芳賀 和子(2019) 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汚染物の処理・処分方法の総合的比較(第1報)焼却残渣の熱処理・灰洗浄を含む減容化プロセスの定量的評価方法の開発,環境放射能除染学会誌.
- Thierry SCHNEIDER, Mélanie MAÎTRE, Jacques LO-CHARD, Sylvie CHARRON, Jean-François LECOM-TE, Ryoko ANDO, Yumiko KANAÏ, Momo KURI-HARA, Yujiro KURODA, Makoto MIYAZAKI, Wataru NAITO, Makiko ORITA, Noboru TAKAMU-RA, Koichi TANIGAWA, Masaharu TSUBOKURA, Tetsuo YASUTAKA (2019) The role of radiological protection experts in stakeholder involvement in the recovery phase of post-nuclear accident situations: Some lessons from the Fukushima-Daichi NPP accident, RADIOPROTECTION.
- Hideki Tsuji , Yumiko Ishii, Moono Shin, Keisuke Taniguchi, Hirotsugu Arai, Momo Kurihara, 保高 徹生, Takayuki Kuramoto, Takahiro Nakanishi, Sangyoon Lee, Takuro Shinano, Yuichi Onda, Seiji Hayashi (2019) Factors controlling dissolved Cs-137 concentrations in east Japanese Rivers, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT.
- Ling Yang, 張銘, Yonghong Hao (2019) Identification of hydraulic diffusivity of aquifer using the response of groundwater level to multi-frequency tides, Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition).
- Hongyu Zhai, Xu Chang, Yibo Wang, <u>雷 興林</u>, 薛 自求 (2019) Analysis of acoustic emission events induced during stress unloading of a hydraulic fractured Longmaxi shale sample, JOURNAL OF PETROLEUM SCIENCE AND ENGINEERING.
- Yaru Guo, Shuning Dong, Yonghong Hao, Zaibin Liu, Tian-Chyi Jim Yeh, Wenke Wang, Yaoquan Gao, Pei Li, 張銘 (2019) Risk Assessments of Water Inrush from Coal Seam Floor during Deep Mining Using a Data Fusion Approach Based on

- Grey System Theory, COMPLEXITY.
- 金子 信行, 猪狩 俊一郎 (2019) 天然ガスの生成・移動・ 集積過程における炭素同位体・化学組成の変化,石 油技術協会誌.
- 髙橋 幸士,中嶋 健,鈴木 祐一郎,森田 澄人,佐脇 貴幸, 花村泰明(2019)Hydrocarbon generation potential and thermal maturity of coal and coaly mudstones from the Eocene Urahoro Group in the Kushiro Coalfield, eastern Hokkaido, Japan, INTERNATIONAL JOURNAL OF COAL GEOLOGY.
- Makoto Matsushita, Shugo Ishikawa, Kenta Magara, Yu Sato, Hiroyuki Kimura (2019) The potential for CH4production by syntrophic microbial communities in diverse deep aquifers associated with an accretionary prism and its overlying sedimentary layers, Microbes and Environments.
- Y. Nakashima, T. Sawatsubashi, S. Fujii (2019) Nondestructive quantification of moisture in powdered low-rank coal by a unilateral nuclear magnetic resonance scanner, International Journal of Coal Preparation and Utilization.
- Yasuo Matsunaga, Wataru Kanda, Shinichi Takakura, Takao Koyama, Zenshiro Saito, Kaori Seki, Atsushi Suzuki, Takahiro Kishita, Yusuke Kinoshita, Yasuo Ogawa (2019) Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, Journal of Volcanology and Geothermal Research.
- Kyaw Zay Ya, 大竹 翼, 小出 葵, <u>実松 健造</u>, 佐藤 努 (2019) Geochemical characteristics of ores and surface waters for environmental risk assessment in the Pinpet iron deposit, southern Shan State, Myanmar, RESOURCE GEOLOGY.
- 栗原 雄一,高畑 直人,横山 隆臣,三浦 輝,<u>昆 慶明</u>,高 <u>木 哲一</u>, 桧垣 正吾,山口 紀子,佐野 有司,高橋 嘉 夫 (2019) Isotopic ratios of uranium and caesium in spherical radioactive caesium-bearing microparticles derived from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant, Scientific Reports.
- 王 小龍, <u>雷 興林</u>, 馬 勝利, Ye Zhang, 郭 志, 聞 学澤 (2019) Phase velocity structure and azimuthal anisotropy beneath Sichuan Basin and surrounding areas from Rayleigh wave, CHINESE JOURNAL OF PHYSICS.
- 月村 勝宏, 鈴木 正哉 (2019) Quantifying nanoparticles in clays and soils with a small-angle x-ray scattering method, JOURNAL OF APPLIED CRYSTALLOGRAPHY.
- 加野 友紀, 佐藤 徹, 大山 裕之 (2019) Numerical Study on the Formations of Gas Channels and Subsequent Bubbles in Unconsolidated Sandy Seabed Sediment Using a Coupled LBM-DEM Method, Journal of Natural Gas Science and Engineering.

- H. M. Zakir Hossain, Quazi Hasna Hossain, 亀井 淳志, 荒岡 大輔, Muhammad Sultan-Ul-Islam (2019) Geochemical characteristics of Gondwana shales from the Barapukuria basin, Bangladesh: implications for source-area weathering and provenance, Arabian Journal of Geosciences.
- 杉田 創, 駒井 武 (2019) 石油系炭化水素を対象とした発光バクテリアを用いた簡易土壌汚染評価手法の開発2 -メタン系炭化水素 (アルカン類) に関する急性毒性評価 - , 地下水学会誌.
- 杉田 創, 小熊 輝美, 張 銘, 原 淳子, 川辺 能成 (2019) 陰 イオン交換樹脂を用いた亜ヒ酸 - ヒ酸分離手法につ いて, 地下水学会誌.
- Tomy Alvin Rivai, Syafrizal, Kotaro Yonezu, Thomas Tindell, Adrian J. Boyce, <u>Kenzo Sanematsu</u>, Shota Satori, Koichiro Watanabe (2019) The Dairi SEDEX Zn + Pb + Ag deposit (North Sumatra, Indonesia): Insights from mineralogy and sulfur isotope systematics, Ore Geology Reviews.
- Hiroto Kajita, Yuki Ota, Toshihiro Yoshimura, <u>Daisuke</u>
  <u>Araoka</u>, Takuya Manaka, Ouyang Ziyu, Shinya
  Iwasaki, Akihiko Inamura, Etsuo Uchida, Hongbo
  Zheng, Qing Yang, Ke Wang, Takuya Yanase, Atsushi Suzuki, Hodaka Kawahata (2020) Seasonal and spatial variations of chemical weathering in the Mekong basin: From the headwaters to the lower reaches, Aquatic Geochemistry.
- Mihoko Hoshino, Ming Zhang, Masaya Suzuki, Katsuhiro Tsukimura, Masaki Ohta (2020) Characterization of Pb-Bearing Minerals in Polluted Soils from Closed Mine Sites, Water, Air, & Soil Pollution.
- Hiroki Goto, Tsuneo Ishido, Masao Sorai (2020) Numerical study of reservoir permeability effects on gravity changes associated with CO2 geological storage: implications for gravimetric monitoring feasibility, Greenhouse Gases-Science and Technology.
- Zaiyong Zhang, Wenke Wang, Chengcheng Gong, Ming Zhang (2020) A comparison of methods to estimate groundwater recharge from bare soil based on data observed by a large scale lysimeter, Hydrological Processes.
- Yu Nagata, <u>Yuki Tsunazawa</u>, Kouji Tsukada, Yuichi Yaguchi, Yosuke Ebisu, Kohei Mitsuhashi, Chiharu Tokoro (2020) Effect of the roll stud diameter on the capacity of a high-pressure grinding roll using the discrete element method, MINER-ALS ENGINEERING.
- Hideyuki Nakano, Naoki Hirakawa, Yasuhiro Matsubara, Shigeru Yamashita, Takuo Okuchi, <u>Kenta Asahina</u>, Ryo Tanaka, Noriyuki Suzuki, Hiroshi Naraoka, Yoshinori Takano, Shogo Tachibana,

- Tetsuya Hama, Yasuhiro Oba, Yuki Kimura, Nao-ki Watanabe, Akira Kouchi (2020) Interstellar organic matter: a hidden reservoir of water inside the snow line, Scientific Reports.
- Nobuo Matsushima, Mitsuru Utsugi, Shinichi Takakura, Tadashi Yamasaki, Maki Hata, Takeshi Hashimoto, Makoto Uyeshima (2020) Magmatic-hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical resistivity structures, Earth, Planets and Space.
- Koji Ichimura, <u>Kenzo Sanematsu</u>, <u>Yoshiaki Kon</u>, <u>Tetsuichi Takagi</u>, Takashi Murakami (2020) REE redistribution during granite weathering: Implications for Ce anomaly as a proxy for paleoredox states, American Mineralogist.
- Kenta Asahina, Takeshi Nakajima, Kazuya Morimoto, Yasuaki Hanamura, Miyuki Kobayashi (2020) The effects of clay minerals on methylated naphthtalenes as maturity indicators of sedimentary organic matter, Chemistry Letters.
- <u>Yukari Imoto</u>, <u>Tetsuo Yasutaka</u> (2020) Comparison of the impacts of the experimental parameters and soil properties on the prediction of the soil sorption of Cd and Pb, Geoderma.
- Kimihiro Hashiba, Katsunori Fukui, <u>Kuniyuki Miyazaki</u> and Kazuo Watanabe (2020) Mechanical and Cutting Characteristics of Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts, Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Tupaz, C. A. J., Watanabe, Y., <u>Sanematsu, K.</u>, Echigo, T., Arcilla, C., Ferrer, C. (2020) Ni-Co Mineralization in the Intex Laterite Deposit, Mindoro, Philippines, Minerals.
- Aoyagi T., Inaba T., Aizawa H., Mayumi D., Sakata S., Charfi A., Suh C., Lee J., Sato Y., Ogata A., Habe H., Hori T. (2020) Unexpected diversity of acetate degraders in anaerobic membrane bioreactor treating organic solid waste revealed by high-sensitivity stable isotope probing, Water Research.
- Chongwei Li, Haiyan Zhang, Yonghong Hao, Ming Zhang (CA) (2020) Characterizing the heterogeneous correlations between the landscape patterns and seasonal variations of total nitrogen and total phosphorus in a peri-urban watershed, Environmental Science and Pollution Research.
- Shusaku Goto, Makoto Yamano (2020) Inversion of thermal conductivity and heat flow from borehole temperature data affected by recent variation in ground surface temperature, Geothermics.
- Yoshikawa, Seiko; Igura, Masato; <u>Yasutaka, Tetsuo;</u> Eguchi, Sadao (2020) Physicochemical and time

- factors affecting 137Cs transfer through a paddy soil–rice system, Soil Science and Plant Nutrition.
- <u>Nakashima, Y.</u> (2020) Development of a hand-held magnetic resonance sensor for the nondestructive quantification of fat and lean meat for fresh tuna, Journal of Food Measurement and Characterization.
- <u>Yoshikawa, M.</u> and <u>Zhang, M.</u> (2020) Constraints in anaerobic microbial dechlorination, fermentation, and sulfate-reduction induced by high concentrations of tetrachloroethylene, Water Air & Soil Pollution.
- Ling Yang, Ming Zhang (CA), Yonghong Hao, Tongke Wang and Zhixue Zhao (2020) Determining the hydraulic properties of coastal aquifer systems using groundwater response to tidal fluctuations: Applicability and limitations, Coastal Engineering Journal.
- Xiaying Li, Xinglin Lei, Qi Li (2020) Influence of bedding structure on stress-induced elastic wave anisotropy in a tight sandstone, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Hideyoshi Yoshioka, Mio Takeuchi, Susumu Sakata, Hiroshi A. Takahashi, Manabu Takahashi, Susumu Tanabe, Takeshi Hayashi, Akihiko Inamura, and Masaya Yasuhara (2020) Microbial methane production and oxidation in the Holocene mud beneath the Kanto Plain of central Japan, Geochemical Journal.
- Tetsuo Yasutaka, Yumiko Kanai, Momo Kurihara, Tatsuaki Kobayashi, Akihiko Kondo, Terumasa Takahashi (2020) Dialogue, radiation measurements and other collaborative practices by experts and residents in the former evacuation areas of Fukushima: A Case Study in Yamakiya District, Kawamata Town, Radioprotection.
- XingLin Lei, Jin Rong Su, Zhi Wei Wang (2020) Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities, SCIENCE CHINA Earth Sciences.
- Jiwon Eom, Toshihiro Yoshimura, <u>Daisuke Araoka</u>, Toshitaka Gamo, Hodaka Kawahata (2020) Mg Isotopic Composition of Submarine Vent Fluids from Arc and Back-arc Hydrothermal Systems in the Western Pacific, Chemical Geology.
- Momo Kurihara, Yuichi Onda, <u>Tetsuo Yasutaka</u> (2020)
  Difference in leaching characteristics and capacities of dissolved radiocaesium and potassium from litter layer in Japanese cedar and broadleaf forests in Fukushima, Japan, Journal of Environmental Radioactivity.
- Arie Pujiwati, Jiajie Wang, Kengo Nakamura, <u>Yosh</u>ishige Kawabe, Noriaki Watanabe, Takeshi Komai

- (2020) Data-driven analysis for source apportionment and geochemical backgrounds establishment of toxic elements and REEs in the Tohoku region, Japan, Chemosphere.
- Shinji Matsumotoa, Isao Machida, Klaus Hebig-Schubert, Sarah Zeilfelder, Narimitsu Ito(2020) Estimation of Very Slow Groundwater Movement Using a Single-Well Push-Pull Test, Journal of Hydrology.
- Hai-Bo Qin, Shitong Yang, Masato Tanaka, <u>Kenzo Sanematsu</u>, Carlo Arcilla, Yoshio Takahashi (2020) Chemical speciation of scandium and yttrium in laterites: New insights into the control of their partitioning behaviors, Chemical Geology.
- Tupaz, C. A. J., Watanabe, Y., <u>Sanematsu, K.</u>, Echigo, T., Arcilla, C., & Ferrer, C. (2020) Mineralogy and geochemistry of the Berong Ni-Co laterite deposit, Palawan, Philippines, Ore Geology Reviews.
- Krzysztof Hryniewicz, <u>Yusuke Miyajima</u>, Kazutaka Amano, Magdalena N. Georgieva, Michal Jakubowicz, Robert G. Jenkins, Andrzej Kaim (2020) Formation, diagenesis and fauna of cold seep carbonates from the Miocene Taishu Group of Tsushima (Japan), Geological Magazine.
- Yasong Feng, Yanjun Du, Annan Zhou, Ming Zhang, Jiangshan Li, Shiji Zhou, Weiyi Xia (2020) Geoenvironmental properties of industrially contaminated site soil solidified/stabilized with a sustainable by-product-based binder, Science of the Total Environment.
- Ying-Hui Yang, Jyr-Ching Hu, Qiang Chen, Xinglin Lei, Jingjing Zhao, Weile Li, Rui Xu, Chun-Ying Chiu (2020) Shallow slip of blind fault associated with the 2019 Ms 6.0 changning earthquake in fold-and-thrust belt in salt mines of Southeast Sichuan, China, Geophysical Journal International
- Zhiwei Wang, Xinglin Lei, Shengli Ma, Xiaolong Wang, Yongge Wan (2020) Induced earth-quakes before and after cessation of long-term injections in Rongchang gas field, Geographical Research Letter.
- Hiroki Mukai, <u>Yoshiaki Kon</u>, <u>Kenzo Sanematsu</u>, Yoshio Takahashi, Motoo Ito (2020) Microscopic analyses of weathered granite in ion-adsorption rare earth deposit of Jianxi Province, China, Scientific Reports.
- Satoshi Furota, Ken Sawada, Gentaro Kawakami (2020) Depositional processes of plant fragment-concentrated sandstones in turbiditic sequences evaluated using terrestrial plant biomarkers in the Miocene Kawabata Formation

- (Yubari, Hokkaido), Japan, International Journal of Coal Geology.
- Yusuke Miyajima, Ayaka Saito, Hiroyuki Kagi, Tatsunori Yokoyama, Yoshio Takahashi, Takafumi Hirata (2020) Incorporation of U, Pb, and rare earth elements in calcite through crystallization from amorphous calcium carbonate: simple preparation of reference materials for microanalysis, Geostandards and Geoanalytical Research.
- Masashige Shiga, Masaatsu Aichi, Masao Sorai (2020)

  Quantitative Investigation on the Contributing
  Factors to the Contact Angle of the CO2/H2O/
  Muscovite Systems Using the Frumkin-Derjaguin
  Equation, Geofluids.
- Toshihiro Yoshimura, Shigeyuki Wakaki, Tsuyoshi Ishikawa, Toshitaka Gamo, <u>Daisuke Araoka</u>, Naohiko Ohkouchi, Hodaka Kawahata (2020) A systematic assessment of stable Sr isotopic compositions of vent fluids in arc/back-arc hydrothermal systems: effects of host rock type, phase separation, and overlying sediment, Frontiers in Earth Science.
- 及川 寧己, 竹原 孝, 雷 興林, 深沢 洋規, 山口 勉 (2020) CO2を圧入した泥岩の三軸圧縮実験における付加的 なスレショルド圧力計測の試み, Journal of MMIJ.
- Ying-Hui Yang, Jyr-Ching Hu, Qiang Chen, 雷 興林, Jingjing Zhao, Weile Li, Rui Xu, Chun-Ying Chiu (2020) Triggered Shallow Slip of Blind Fault by the 2019 1 Ms 6.0 Changning Earthquake in Fold-and-Thrust Belt in Salt Mines of Southeast Sichuan, China, GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL.
- 昆 慶明,横山 隆臣,大畑 昌輝 (2020) Analytical efficacy of gas-mixer and stabilizer for laser ablation-ICP mass spectrometry, ACS Omega.
- 井本 由香利, 保高 徹生 (2020) Comparison of the impacts of the experimental parameters and soil properties on the prediction of the soil sorption of Cd and Pb, GEODERMA.
- 保高 徹生 (2020) 旧避難区域における住民とのコミュニケーションの変遷と果たした役割, 日本リスク学会第33回年次大会講演論文集.
- Xiyang Dong, 眞弓 大介, Casey Hubert (2020) Thermogenic hydrocarbon biodegradation by diverse depth-stratified microbial populations at a Scotian Basin cold seep, Nature Communications.
- Hai-Bo Qin, Shitong Yang, Masato Tanaka, 実松健造, Carlo Arcilla, 高橋 嘉夫 (2020) Scandium immobilization by goethite: Surface adsorption versus structural incorporation, GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA.
- 安藤 佑介, 荒岡 大輔, 吉村 寿紘, 西本 昌司, 中島 礼 (2020) 下部中新統瑞浪層群明世層産二枚貝 Creno-

- mytilus grayanus (エゾイガイ) のストロンチウム 同位体年代, 瑞浪市化石博物館研究報告.
- Keith Lichti, Rosalind Julian, Cole Davies, Bruno Fletcher, 柳澤 教雄, 大里 和己, 佐藤 真丈, 笠井 加一郎, 佐倉 弘持 (2020) CFD Modelling Of Corrosion Test Loops for Geothermal Fluid Applications, Proceedings of 42nd New Zealand Geothermal Workshop.
- 西澤 学,松井 洋平,須田 好,齋藤 拓也,渋谷 岳造,高井 研,長谷川 直,矢野 創 (2020) Experimental Simulations of Hypervelocity Impact Penetration of Asteroids into the Terrestrial Ocean and Benthic Cratering, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH.
- 有馬 謙一, 大迫 政浩, 保高 徹生, 篠崎 剛史 (2020) 福島第一原発事故由来の放射性物質に汚染された焼却残渣の減容化プロセス5 CASE の比較, 第26回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム要旨集.
- 高倉 伸一 (2020) 熱水系の比抵抗構造に関する考察, 日本地熱学会令和 2 年学術講演会講演要旨集.
- 杉田 創, 駒井 武 (2020) 石油系炭化水素を対象とした発 光バクテリアを用いた簡易土壌汚染評価手法の開発3 -アルカン構造異性体に関する急性毒性評価-, 地 下水学会誌.
- 竹原 孝, 及川 寧己, 藤井 孝志, 宮崎 晋行 (2020) 石炭 の CO2および N2ガス圧入に伴う挙動および三軸圧 縮強度の変化, Journal of MMIJ.
- Verena B. Heuer, 稲垣 史生, Yuki Morono, 金子 雅紀 (2020) Temperature limits to deep subseafloor life in the Nankai Trough subduction zone, SCI-ENCE.
- 保高 徹生 (2020) 環境調査活動への住民参加: 山木屋地区の教訓, Involving residents in environmental research activities: lessons from the Yamakiya district, Proceedings of ICRP International Conference on Recovery After Nuclear Accidents "Radiological Protection Lessons from Fukushima and Beyond".
- 川辺 能成 (2020) 曝露評価モデルを用いた土壌中総水銀のリスク評価, 第56回環境工学研究フォーラム講演要旨集.
- 宮原 英隆, 鈴木 正哉, 松田 聡, 森本 和也, 万福 和子, 川上 理亮, 名和 博之, 山内 一正, 松永 克也, 谷野 正幸 (2020) ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄 熱ヒートポンプシステムの開発, 空気調和・ 衛生 工学.
- 今泉博之,橘秀樹,山田一郎,大屋正晴,篠原直明, 長倉清,福島昭則,横島潤紀(2020)日本産業規格JIS Z 8731:2019「環境騒音の表示・測定方法」の概要,騒音制御.
- 朝比奈 健太, 根本 直 (2020) Non-targeted 1H NMR profiling: A novel methodology for multiple-approaches to characteristic analysis of crude oil,

- Proceedings of the 55th CCOP Annual Session.
- 片山 泰樹, NOBU MASARU KONISHI, 草田 裕之, 孟 憲英, 細木 直樹, 植松 勝之, 吉岡 秀佳, 鎌形 洋一, 玉木 秀幸 (2020) Isolation of a member of the candidate phylum 'Atribacteria' reveals a unique cell membrane structure, Nature Communications.
- 張 銘 (2020) Soil and groundwater contamination-An old and new issue needs to be solved-,Research Outreach.
- Y. Zhang, 雷 興林, 橋本 勉, 薛自求 (2020) In situ hydromechanical responses during well drilling recorded by distributed fiber-optic strain sensing, Solid Earth.
- 丸山 茂徳, 佐藤 友彦, 澤木 佑介, 須田 好 (2020) 最古 型生命が生息する白馬地域の温泉水の分類と生命の 起源の解明における冥王代疑似環境生態系の重要 性, 地学雑誌.
- 有馬 謙一, 大迫 政浩, 保高 徹生, 篠崎 剛史 (2020) 福島第一原発事故由来の放射性セシウムによる汚染物の処理・処分方法の総合比較 (第2報) 焼却残渣に対する減容化プロセス5CASE の比較-, 環境放射能除染学会.
- 吉原 直志, 八反 地剛 (2020) Geomorphological features of shallow landslides in hillslopes underlain by mixed rock of sandstone and mudstone: A case of heavy rainfall on August 20, 2014 in Hiroshima City, Japan, Tsukuba geoenvironmental sciences.
- 張銘, Yonghong Hao, Zhixue Zho, Tongke Wang, Ling Yang (2020) Article Title: Estimation of coastal aquifer properties: A review of the tidal method based on theoretical solutions, Wiley Interdisciplinary Reviews-Water.
- 加野 友紀,石戸 恒雄,中尾 信典 (2020) 遮蔽層の不均 質性が深部互層系に圧入された CO2長期挙動にもた らす影響に関する数値シミュレーション, Journal of MMIJ.
- 髙橋 幸士,中嶋 健,鈴木 祐一郎,森田 澄人,佐脇 貴幸, 花村 泰明 (2020) Source rock potential of coal and coaly mudstones from the Eocene Urahoro Group in the Kushiro Basin, eastern Hokkaido, Japan, Proceedings of the Thematic Session "Geoscience for sustainable Development", 55th CCOP Annual Session.
- 松本 親樹,濱中 晃弘,Thant Swe Win,山崎 寬人, 笹岡 孝司,島田 英樹 (2020) Investigation of acid mine drainage (AMD) with long-term release of As at Kyaukpahto gold mine, Myanmar, Proc. of Thematic Session "Geosciences for Sustainable Development",55th CCOP Annual Session.
- 坂本 靖英, 中野 裕介, 金子 冬生, 中村 謙吾, 駒井 武 (2020) Numerical Simulation of Laboratory-Scale

- Experiment for Hydrate Dissociation Process in Porous Media by Acid Injection, INTERNATIONAL JOURNAL OF OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING.
- 吉岡 真弓,石原 武志,内田 洋平 (2020) 地中熱利用に おける地下浅層の熱伝導率分布に関する検討,日本 地熱学会誌.
- 柳澤 教雄, 佐々木 宗建, 杉田 創, 宮越 昭暢, 佐藤 真丈, 大里 和己, 井岡 聖一郎, 村岡 洋文 (2020) Geological and geochemical approach for the binary power generation experiment at Matsunoyama hot spring area, Niigata, Japan, Proceedings of the Thematic Session "Geosciences for the Sustainable Development", 55th CCOP Annual session.
- 中島 善人 (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.
- 丸井 敦尚, 町田 功, 井川 怜欧 (2021) 沿岸域における 深層地下水の研究とその社会的な役割, Synthesiology.
- 高野 淑識, 風呂田 郷史 (2021) Analytical development of seamless procedures on cation-exchange chromatography and ion-pair chromatography with high-precision mass spectrometry for short-chain peptides, INTERNATIONAL JOURNAL OF MASS SPECTROMETRY.
- 徂徠 正夫 (2021) Effects of calcite dissolution on caprock's sealing performance under geologic CO2 storage, TRANSPORT IN POROUS MEDIA.
- 浅田 美穂, Gregory F. Moore, Kiichiro Kawamura, Takuroh Noguchi (2021) Mud volcano possibly linked to seismogenic faults in the Kumano Basin, Nankai Trough, Japan, MARINE GEOPHYSI-CAL RESEARCH.
- Y. Zhang, 雷興 林, 橋本 勉, 薛自求 (2021) Towards retrieving distributed aquifer hydraulic parameters from distributed strain sensing, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH.
- Hongyu Zhai, Xu Chang, Yibo Wang, 雷 興林, 薛自求 (2021) Study on Anisotropy of Longmaxi Shale Based on Hydraulic Fracturing Experiment, Science China-Earth Sciences.
- M. Takada, 保高 徹生, 金井 裕美子, Y. Kuroda (2021) Factors affecting resumption of forest or satoyama usage by former evacuees following their return after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, RADIOPROTECTION.
- 関香織,神田径,萬年一剛,高倉伸一,小山崇夫, 野口里奈,行竹洋平,石川将暉,深井雅斗,原田 昌武,安部 祐希(2021) Imaging the source re-

- gion of the 2015 phreatic eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, using high-density audio-frequency magnetotellurics, GEOPHYSI-CAL RESEARCH LETTERS.
- 相澤 広記,高倉 伸一,麻植 久史,小池 克明,吉村 令慧,山崎 健一,小松 信太郎,宇津木 充,井上 寛之,塚本 果織,上嶋 誠,小山 崇夫,神田 径,吉永 徹,松島 喜雄,内田 和也,塚島 祐子,松島 健,市原 寛,村松 弾,手操 佳子,志藤 あずさ,松本 聡,清水 洋(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.
- 須田 好,五十嵐 雅之,玉木 秀幸,玉澤 聡,坂田 将,前田 治男,鎌形 洋一,金子 雅紀,氏家 知美,篠塚 由美,若山 樹,岩間 弘樹,大坂 典子,眞弓 大介,米林英治 (2021) Methanogenic crude oil degradation induced by an exogenous microbial community and nutrient injections, JOURNAL OF PETROLEUM SCIENCE AND ENGINEERING.
- 昆 慶明 (2021) 技術で未来拓く 産総研の挑戦157 微 量元素分布の可視化,日刊工業新聞.
- Masayuki Someya, Kazuo Higashino, 井本由香利, Hirofumi Sakanakura, 保高 徹生 (2021) Effects of membrane filter material and pore size on turbidity and hazardous element concentrations in soil batch leaching tests, CHEMOSPHERE.
- 川辺 能成, 保高 徹生, 黒澤 忠弘 (2021) 環境調和型産 業技術研究ラボ 地圏環境研究チームの紹介 〜地圏 環境リスク課題の環境調和型管理および対策に資す る基盤情報整備〜, GSJ 地質ニュース.
- 鈴木 陽一, 倉片 憲治, 今泉 博之, 佐藤 洋, 山田 一郎, 吉村 純一, 杉江 聡, 横田 考俊, 小林 知尋, 藤坂洋一, 山崎 隆志, 高橋 幸雄, 下田 康平, 古賀 貴士, 平光 厚雄, 平川 侑, 鈴木 航輔 (2021) ISO/TC43・ ISO/TC43/SC1・ISO/TC43/SC2総会 音響に関する国際規格の審議状況: 2020パリ会議(オンライン開催) -, 日本音響学会誌.
- 鈴木 陽一, 倉片 憲治, 今泉 博之, 佐藤 洋, 山田 一郎, 吉村 純一, 杉江 聡, 横田 考俊, 小林 知尋, 藤坂洋一, 山崎 隆志, 高橋 幸雄, 下田 康平, 古賀 貴士, 平光 厚雄, 平川 侑, 鈴木 航輔(2021) ISO/TC43・ISO/TC43/SC2総会 -音響に関する国際規格の審議状況: 2020パリ会議(オンライン開催) -, 騒音制御.
- 高木 哲一, 申 基澈, 地下 まゆみ, 星野 美保子, 月村 勝宏 (2021) Microbial nitrification and acidification of lacustrine sediments deduced from the nature of a sedimentary kaolin deposit in central Japan, Scientific Reports.
- 柳澤 教雄, 佐藤 真丈, 大里 和己, 山本 佑, Keith Lichti,

- Bruce Mountain, Lucjan Sajkowski (2021) Material Corrosion Test for Developing Cr Casing Steel at High Temperature Acid Condition, Proceedings of 46th Stanford geothermal workshop.
- 中島 善人 (2021) 磁気共鳴物理探査を用いたセンシング 技術の農水分野へのスピンオフ, 地圏資源環境研究 部門 十大二ュース 2020.
- 月村 勝宏, 三好 陽子, 高木 哲一, 鈴木 正哉, 和田 信一郎 (2021) Amorphous nanoparticles in clays, soils and marine sediments analyzed with a small angle X-ray scattering (SAXS) method, Scientific Reports.
- 高畑 修,原田 拓也,保高 徹生,熊田 正次郎,安藤 淳也, 小峰 秀雄 (2021) 土壌洗浄処理を施した放射性物質 含有土の社会的受容性評価と検証,土木学会論文集 G(環境).
- 加野 友紀, 石戸 恒雄 (2021) Numerical Investigation of Geophysical Monitoring based upon CO2 Geological Storage and Leakage, Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference 15-18 March 2021.
- 本田 明紗海,神田 径,小山 崇夫,高倉 伸一,松永 康生, 西澤 達治,池澤 賢志 (2021)本白根山2018年火口 周辺における AMT 法比抵抗構造調査, Conductivity Anomaly 研究会2021年論文集.
- 江種 伸之,小林 剛,杉田 創,張 銘,保高 徹生 (2021) 土壌地下水汚染に関する最近の研究動向2021,水環 境学会誌.
- Xiaying Li, 雷 興林, Qi Li (2021) Influence of bedding structure on stress-induced elastic wave anisotropy in a tight sandstone, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
- 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.
- 徂徠 正夫,後藤 宏樹,杉原 光彦,西 祐司,中尾 信典 (2021) CO2地中貯留における反射法探査の補完とし ての重力連続測定の運用方策, Journal of MMIJ.
- Ya-song Feng, Yan-Jun Du, Annan Zhou, 張銘, Jiang-Shan Li, Shi-Ji Zhou, Wei-Yi Xia (2021) Geoenvironmental Properties of Industrially Contaminated Site Soil Solidified/Stabilized with a Sustainable By-product-based Binder, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT.
- Damak Fadwa, Mohamed Seddik Mahmoud Bougi, 荒岡 大輔, 馬場 浩司, 古屋 愛珠, Mohamed Ksibi, 田村 憲司 (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.

- George J. Simandle, Suzanne Paradis, Johnathan Savard, Deanna Miller, Rameses D'Souza, 荒岡 大輔, Akam, C., 星野 美保子, 昆 慶明 (2021) Mineral Control on the Geochemistry of the Rock Canyon Creek REE-F-Ba Deposit, British Columbia, Canada, GEOCHEMISTRY-EXPLORATION ENVIRONMENT ANALYSIS.
- 綱澤 有輝, 昆 慶明 (2021) Numerical investigation of density segregation on a shaking table using the discrete element method, MATERIALS TRANS-ACTIONS.
- 雷 興林, 王 志偉, 馬 勝利, 何 昌栄 (2021) A preliminary study on the Ms 6.4, May 2021 Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China, Acta Seismologica Sinic.
- 中村 謙吾, 川辺 能成, 駒井 武 (2021) Using data-driven analysis of geochemical environmental information to infer the environmental impact of closed mines, HELIYON.
- 志賀 正茂,愛知 正温,徂徠 正夫,森下 徹也 (2021) Structure and Dynamics of Interfacial Water on Muscovite Surface under Different Temperature Conditions (298 K to 673 K): Molecular Dynamics Investigation, Water.
- 梅澤 良介,桂 誠,中嶋 悟 (2021) Effect of Water Saturation on the Electrical Conductivity of Microporous Silica Glass, TRANSPORT IN POROUS MEDIA.
- 伊藤 茜,大竹 翼,Adi Maulana,実松 健造, Sufriadin, 佐藤 努 (2021) Geochemical constraints on the mobilization of Ni and critical metals in laterite deposits, Sulawesi, Indonesia: A mass-balance approach, RESOURCE GEOLOGY.
- 北村 真奈美,廣瀬 丈洋,雷 興林 (2021) Mechanical Weakness of the Nankai Accretionary Prism: Insights from Vp Measurements of Drill Cuttings, GEOCHEMISTRY GEOPHYSICS GEOSYSTEMS.
- Krzysztof Hryniewicz, 宮嶋 佑典, 天野 和孝, Magdalena N. Georgieva, Michal Jakubowicz, ジェンキンズロバート, Andrzej Kaim (2021) Formation, diagenesis and fauna of cold seep carbonates from the Miocene Taishu Group of Tsushima (Japan), GEOLOGICAL MAGAZINE.
- Vesselin Dekov, Bleuenn Gueguen, 山中 寿朗, Nima Mussa, 奥村 知世, Germain Bayon, Volker Liebetrau, 吉村 寿紘, George Kamenov, 荒岡 大輔, 牧田 寛子, Jill Sutton (2021) When a mid-ocean ridge encroaches a continent: Seafloor-type hydrothermal activity in Lake Asal (Afar Rift), CHEMICAL GEOLOGY.
- Soroor Ghaziof, Keith Lichti, 大里 和己, 佐藤 真丈, 笠井 加一郎, 柳澤 教雄, 佐倉 弘持, Logan Muller, Michael Todd (2021) Screening of an Environ-

- mentally Friendly Corrosion Inhibitor for Mildly Acidic Geothermal Fluid Applications, Proceedings of World Geothermal Congress 2020+1.
- 柳澤 教雄, 增田 善雄, 佐藤 真丈, 笠井 加一郎, 大里和己, 福井 俊彦, 佐倉 弘持, Keith Lichti (2021) Corrosion Testing of Casing Steels in Acidic Two-Phase Production Fluid and the Field Testing at Yanaizu-Nishiyama Geothermal Field, Japan, Proceedings of World Geothermal Congress 2020.
- 佐藤 真丈,笠井 加一郎,大里 和己,柳澤 教雄,山本 佑,福井 俊彦, 佐倉 弘持,Bruce Mountain,Keith Lichti (2021) Laboratory Corrosion Testing of Casing Steels in Acidic Brine and the Field Testing at Kakkonda Geothermal Field,Proceedings of World Geothermal Congress 2020+1.
- Xiaying Li, 雷 興林, Qi Li (2021) Fault nucleation of tight sandstone by investigation of mechanical, acoustic, and hydraulic responses, ENGINEER-ING GEOLOGY.
- 柳澤 教雄, 增田 善雄, 浅沼 宏 (2021) Survey of the Casing Material Corrosion Problem for Supercritical Geothermal Development, Proceedings of World Geothermal Congress 2020+1.
- 吉村 寿紘, 荒岡 大輔, 川幡 穂高, ザキール ホサイン, 大河内 直彦 (2021) The Influence of Weathering, Water Sources, and Hydrological Cycles on Lithium Isotopic Compositions in River Water and Groundwater of the Ganges ? Brahmaputra ? Meghna River System in Bangladesh, Frontiers in Earth Science.
- 杉田 創, 小熊 輝美, 原 淳子, 川辺 能成, 張 銘 (2021) Mg 系吸着材 (MgO, Mg(OH)2及び MgCO3)のヒ 酸及び亜ヒ酸除去性能の比較, 第14回環境地盤工学 シンポジウム発表論文集.
- 杉田 創, 駒井 武 (2021) 石油系炭化水素を対象とした発 光バクテリアを用いた簡易土壌汚染評価手法の開発4 -アルコール類に関する急性毒性評価-, 地下水学 会誌.
- 後藤 宏樹, 杉原 光彦, 西 祐司, 池田 博 (2021) Simultaneous gravity measurements using two superconducting gravimeters to observe temporal gravity changes below the nm ? s-2 level: ocean tide loading differences at different distances from the coast, GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL.
- 田口 春那, 折橋 裕二, 佐々木 実, 宮嶋 佑典, 岩野 英樹, 平田 岳史 (2021) 青森県南部, 湯ノ沢カルデラ噴出物である尾開山凝灰岩の高精度 ・ 高確度噴出年代の決定: 同一ジルコン U-Pb 年代とフィッション・トラック年代のダブル年代測定, 地質学雑誌.
- 児玉 匡史, 松島 潤 (2021) Utilization-focused evaluation of relationship among spatial, temporal, and

- density resolutions of muography, JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS.
- 日置 恭史郎, 朝比奈 健太, 加藤 晃汰, 山岸 隆博, 大曲 遼, 岩﨑 雄一, 渡部 春奈, 山本 裕史 (2021) Acute Toxicity of a Tire Rubber-Derived Chemical, 6PPD Quinone, to Freshwater Fish and Crustacean Species, Environmental Science & Technology Letters.
- 朝比奈 健太, 髙橋 幸士, 鈴木 祐一郎, 中嶋 健, 小林 みゆき (2021) Effect of maturation on the dimethyl naphthalene indicator used to evaluate the source organic type of crude oil, CHEMISTRY LETTERS.
- 堀川 卓哉, 桂 誠, 横田 俊之, 中嶋 悟 (2021) Effects of pore water distribution on P-wave velocity water saturation relations in partially saturated sandstones, GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL.
- 清川 昌一, 倉富 隆, 星野 辰彦, 後藤 秀作, 池原 実 (2021) Hydrothermal formation of iron-oxyhydroxide chimney mounds in a shallow semi-enclosed bay at Satsuma Iwo-Jima Island, Kagoshima, Japan, GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA BULLETIN.
- 近藤 萌波, 坂本 靖英, 川辺 能成, 中村 謙吾, 渡邉 則昭, 駒井 武 (2021) Development of a Model for Predicting the Volatilization Flux from Unsaturated Soil Contaminated by Volatile Chemical Substances, ENVIRONMENTAL MODELING & AS-SESSMENT.
- 中島 善人 (2021) 磁気共鳴表面スキャナーによる原位 置・非破壊センシング, GREEN NEWS.

- 浅田 美穂,横田 俊之 (2021) A case study on difference of penetration of acoustic signals into sediment due to frequency, based on backscatter strength distribution obtained along the Kumano Basin Edge Fault Zone, The 14th SEGJ international symposium.
- 中島 善人 (2021) 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, GREEN NEWS.
- Carmela Alen Tupaz, 渡辺 寧, 実松 健造, 越後 拓也 (2021) Spectral and chemical studies of iron and manganese oxyhydroxides in laterite, RESOURCE GEOLOGY.
- 中島 善人 (2021) Use of triple-exposure X-ray computed tomography for the nondestructive detection of lead in polluted soil samples, SOIL & SEDIMENT CONTAMINATION.
- 中島 善人, 柴 伸弥 (2021) 牛枝肉のモモ抜けの非破壊検 査用磁気共鳴スキャナーの開発, 食肉に関する助成 研究調査成果報告書.
- 杉田 創,小熊 輝美,原 淳子,張 銘,川辺 能成 (2021) Effects of Silicic Acid on Leaching Behavior of Arsenic from Spent Calcium-based Adsorbents with Arsenite, Sustainability.
- 中島 善人, 柴 伸弥 (2021) Nondestructive measurement of intramuscular fat content of fresh beef meat by a hand-held magnetic resonance sensor ,INTERNATIONAL JOURNAL OF FOOD PROPERTIES.
- 柳澤 教雄, 浅沼 宏, 増田 善雄, 大里 和己, 佐倉 弘持 (2021) Estimation of Casing Material Corrosion Rates in Supercritical Geothermal Development, GEOTHERMICS.