

GREENReport 2019



地下水、土壌、地中熱の
基盤データ整備と利活用



はじめに



地圏資源環境研究部門長
光畑 裕司

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

地圏資源環境研究部門の研究成果報告会は、おかげさまで今回18回目となります。本成果報告会は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ております。本年度は、産業技術総合研究所の第4期中長期計画（5カ年）の最終年度に当たります。第4期の特色は、産業技術政策の中核的実施機関として最先端研究・革新的技術シーズを事業化（民間企業による商業化）につなぐ「橋渡し」機能と目的基礎研究の強化、地域イノベーションの推進がミッションとなっていることです。当部門はGSJ傘下の研究ユニットとして、「地圏の資源と環境に関する研究と技術開発」に取り組み、社会生活の改善と向上、さらには人類の持続可能な発展に貢献することをミッションに掲げております。第4期における当部門の研究課題は以下のとおりです。これら課題の中で地熱・地中熱に関する研究は、産総研再生可能研究センターの地熱チームおよび地中熱チームと連携し推進しております。

- ① 地下資源評価として、燃料資源、鉱物資源ならびに地熱・地中熱に関するポテンシャル評価と調査の実施。
- ② 地下環境利用評価として、二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物の地層処分等に関する地質モデリング技術の開発と調査の実施。
- ③ 地下環境保全評価として、資源開発や各種産業活動等に起因する土壌・地下水に関する評価手法の開発と調査を実施。

上記課題に対して、政策ニーズに対応した国家研究プロジェクトの牽引、産業ニーズに対応した民間企業との共同研究や技術コンサルティングの推進、また地域のニーズに対応した自治体等との連携を行っております。さらに将来的な展開を見据えて新たなシーズを創出する目的基礎研究、およびGSJが進める知的基盤整備事業の一環として地下資源・環境に関する基盤情報の整備を推進しております。

今回の報告会は「地下水・土壌・地中熱の基盤データ整備と利活用」というテーマで開催します。古代ギリシャ哲学では、世界を構成する四大元素として風・土・水・火が提唱されてきました。今回テーマとしてあげている地下水は水に、土壌は土に、そして地中熱は火に、それぞれ結びつけると、地圏を構成する三大要素と考えることができるかも知れません。当部門では、地下水については水文環境図、土壌については表層土壌評価基本図、地中熱に関しては地中熱ポテンシャルマップを作成し、ウェブサイトやCD媒体として公表しております。今年度、水文環境図に関しては、これまでに出版した4地域（関東平野、熊本地域、石狩平野、富士山）に加えて、国が進める知的基盤整備事業の一環として、新たに3地域（筑紫平野、勇払平野、大阪平野）の水文環境図を作成・公表、さらにこれらの情報を統合的に取扱可能な全国水文環境データベースを公表しました。また、大阪平野については、水文環境図の情報をもとに地中熱ポテンシャルマップを作成・公表しました。地中熱に関して、NEDOプロジェクトのもとで作成した東北地方のポテンシャルマップの公表を行いました。

これらの地圏の資源・環境に関わる情報整備は、地道で派手さの少ない事業ですが、地下水に関しては2014年7月に施行された「水循環基本法」において地下水を含む循環する水が国民の共有財産であると位置づけられ、土壌に関しては、2003年2月に施行され、2010、2018、2019年に改正された「土壌汚染対策法」においては自然由来土壌汚染の把握が必要とされ、さらに地中熱については、2010年の第3次「エネルギー基本計画」によって初めて明記され、2014年の第4次計画で、再生可能エネルギー熱という用語が定義され、その一部に位置付けられました。また2018年4月に閣議決定された環境基本計画では、地産地消の再生可能エネルギー熱として地中熱の活用が謳われています。

加えて当部門では、これらの地圏に関する情報整備の技術や知見について、東・東南アジア地球科学計画調整委員会（CCOP）を通じた国際プロジェクトを通じて東南アジアの国々を対象に展開を図っています。まさに2015年9月に国連サミットで採択された17の持続可能な開発目標SDGsの内、目標6（Clean water and sanitation）、目標7（Affordable and clean energy）、目標9（Industry, innovation and infrastructure）、目標11（Sustainable cities and communities）、目標12（Responsible consumption and production）、目標13（Climate action）、目標17（Partnerships for the goals）に資する事業と考えております。

本報告会では、各研究グループや個人の研究成果も詳しく知って頂くために、例年同様にポスターセッションの場を設け、ご参加頂いた方との研究交流を深めてまいりたいとも考えております。鉱物・燃料資源、微生物、鉱物材料、岩石物性、新調査・分析技術の開発など、様々な研究成果の紹介を用意しております。

私どもは本報告会を、部門の研究成果を皆様にお知り頂くと同時に、皆様から直接、貴重なご意見を伺う絶好の機会と位置づけ、毎年定期的に開催しています。今後とも変わらないご高配を賜りますよう、心からお願い申し上げます。



目次

講演題目

13:30～13:35	開会のあいさつ			
13:35～13:55	地圏資源環境研究部門 研究紹介	研究部門長	光畑 裕司	
13:55～14:25	ビックデータ時代における環境施策と ビジネス ～オープンデータとIoTの融合による 展開の可能性～	地圏資源環境研究部門 地圏環境リスク研究グループ長	張 銘	6
14:25～15:10	〔招待講演〕 土壌汚染対策における土壌・地下水環境に 関わる基盤データの利活用について	国際航業（株） フェロー 防災環境事業部（地盤環境研究）	中島 誠	10
15:10～15:50	ポスターセッション			
15:50～16:35	〔招待講演〕 企業が意識し始めたウォーターセキュリティ	八千代エンジニアリング（株） 事業開発本部本部長	高橋 努	16
16:35～17:05	地下水の情報がビジネスに？ ～将来のビジョンと地下水の地図～	地圏資源環境研究部門 地下水研究グループ長	町田 功	18
17:05～17:35	もっと身近な地中熱の利活用のために ～地下水情報を活用した地中熱ポテンシャル 評価～	再生可能エネルギー研究センター 地中熱チーム長	内田 洋平	20
17:35～17:40	閉会のあいさつ			
18:00～	懇親会			

研究グループ紹介

地下水研究グループの紹介	地下水研究グループ長	町田 功	24
鉱物資源研究グループの紹介	鉱物資源研究グループ長	相馬 宣和	26
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	30
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	34
地圏化学研究グループの紹介	地圏化学研究グループ長	鈴木 正哉	38
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	40
CO ₂ 地中貯留研究グループの紹介	CO ₂ 地中貯留研究グループ長	徂徠 正夫	44
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	張 銘	48
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	52

地熱の調査・開発の社会的受容性を向上させる総合設計の検討	相馬宣和	58
大阪の地下水資源を「見える化」 —水文環境図と地中熱ポテンシャルマップ—	吉岡真弓, 井川怜欧, 内田洋平	58
LA-ICPMS を用いた有機物中の微量重金属元素イメージング	昆 慶明	59
選鉱・分離プロセスの高度化のための粉体シミュレーション開発	綱澤有輝	59
蛙目粘土鉱床での鉄の酸化・溶脱に伴う鉄同位体分別	高木哲一, 申 基澈, 地下まゆみ, 星野美保子, 月村勝宏	60
水・油・ゴム・樹脂を壊さずその場で測る 片側開放型プロトン核磁気共鳴スキャナー	中島善人	60
石炭の物理的性質に着目した低コスト・簡易な石炭熟成度評価法の開発	小森省吾, 高橋幸士, 金子雅紀	61
無人地上車両を用いたマルチコイル型電磁探査システムの応答特性	佐竹 海, 万沢かりん, 上田匠, 神宮司元治, 横田俊之	61
Origin of methane in Hakuba Happo serpentinite-hosted hot spring: ¹⁴ C and noble gas study	須田 好, 阿瀬貴博, 宮入陽介, 横山祐典, 松井洋平, 上田修裕, 齋藤拓也, 佐藤友彦, 澤木佑介, 中井亮佑, 玉木秀幸, 高橋 浩, 森川徳敏	62
海洋堆積物から検出した新規ハプト藻バイオマーカー	風呂田郷史, 中村英人, 沢田 健	62
低温再生型粘土系吸着剤を用いた熱輸送システム	鈴木正哉, 森本和也, 万福和子	63
地熱発電プラントのリスク評価（材料腐食等）について	柳澤教雄	63
水溶性天然ガス中のネオペンタン	猪狩俊一郎	64
流体岩石反応に関わる溶解度と錯体の関係の整理	佐々木宗建	64
オキシ水酸化鉄の合成と有害物質の吸着	森本和也, 鈴木正哉	65
ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法の JIS 制定	三好陽子, 鈴木正哉, 森本和也, 高木哲一	65
CO ₂ 地中貯留における接触角変化に伴う毛管トラップの低下と 共存メタンの影響に関する数値的解析	加野友紀, 石戸恒雄, 徂徠正夫	66
地層触媒環境活用型 CO ₂ 転換技術の開発	藤井孝志, 朝比奈健太, 西岡将輝	66
バックグラウンド値の決定に関する新しい国際的指針について	張 銘, 中島 誠, 田本修一, 肴倉宏史, ISO/TC190検討部会	67
塩素化エタン類の分解経路と分解速度について	張 銘, 吉川美穂	67
カルシウム系吸着材のヒ素吸着能に及ぼすケイ酸の影響	杉田 創, 小熊輝美, 張 銘, 原 淳子, 川辺能成	68
油圧式三軸圧縮試験装置の改良：堆積物の浸透率測定を目指して	竹原 孝, 北村真奈美	68
超臨界条件下における亀裂を含む花崗岩の水理学的特性	北村真奈美, 高橋美紀	69
亀裂を含む花崗岩の三軸圧縮変形時における AE 発生と b 値変化	末吉和公, 雷 興林, 北村真奈美, 片山郁夫	69
地下水と地表水を用いた地熱資源探査の可能性検討	鈴木陽大	70
微小地震観測による地熱貯留層内の流動モニタリングとその利活用	岡本京祐, 田中勇希, 水崎雄二郎, 桑名栄司, 石橋琢也, 浅沼 宏	70
東南アジアにおける水平埋設型熱交換器を利用した 地中熱ヒートポンプシステム評価	Arif Widiatmojo, 内田洋平, 安川香澄, 高島 勲	71
最適化手法を用いた地中熱交換量の推定手法の開発	金子翔平, 富樫 聡, 石原武志, シュレスタ ガウラブ, 吉岡真弓, 内田洋平	71
加賀平野北部の深度別有効熱伝導率分布	石原武志, 佐野星河, 富樫 聡, 内田洋平	72
加賀平野の水文地質構造と地中熱ポテンシャルの簡易評価	佐野星河, 石原武志, 富樫 聡, 内田洋平	72
地下空間貯留水の低温化に関する実験的考察	富樫 聡, 霜山 竣, 内田洋平	73
地下空間貯留水の冷熱利用可能量評価に向けた大谷石物性値の検証	霜山 竣, 富樫 聡, 内田洋平	73



講演題目

ビッグデータ時代における環境施策とビジネス ～オープンデータとIoTの融合による展開の可能性～

Environmental Policy Measures and Business in the
Big Data Era

~Possibility of Future Development through
Integration of Open Data and IoT~

地圏環境リスク研究グループ長：張 銘

Leader, Geo-Environment Risk Research Group:
Ming Zhang

e-mail: m.zhang@aist.go.jp

1. はじめに

データのデジタル化とコンピュータの高速化、そしてインターネットの急速な発展に伴ってビッグデータの時代が到来した。ビッグデータとは、単なる大量のデータではなく、様々な種類若しくは形式が含まれるものであり、また日々膨大に生成される時系列性或いはリアルタイム性のあるものでもある（図1）。

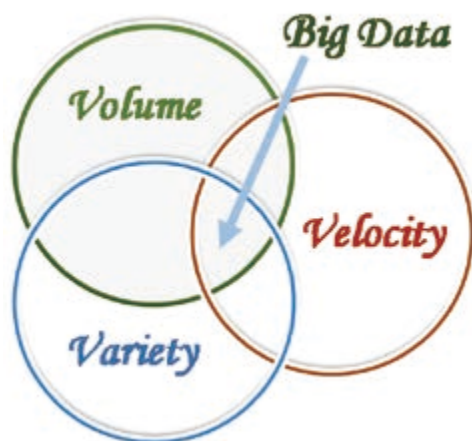


図1 ビッグデータの三つのV要素*)

オープンデータとはその名の通り「公開されたデータ」であり、「無償で利用できること」、「誰も利用（加工・編集・再配布等）できること」、「機械判別ができること」、「営利・非営利に関わらず二次利用ができること」といった条件が定められている。わが国では、官民データ活用推進基本法（平成28年法律第103号）が制定されており、国及び地方公共団体はオープンデータに取り組むことが義務付けられている。オープンデータへの取組により、国民参加・官民協働の推進を通じた諸課題の解決、経済活性化、行政の高度化・効率化が期待されている。現在では、オープンデータ取組自治体の一覧や地方公共団体におけるオープンデータの取組状況等情報は内閣官房情報通信技術総合戦略室によって公表されている¹⁾。

ビッグデータとオープンデータを組み合わせることにより、様々な応用が可能となる。例えば、静岡県が立ち上げた「ふじのくにオープンデータカタログ」では、2,195個のデータセットが公表されており、「国土・気象」、「人口・世帯」、「労働・賃金」、「農林水産業」、「鉱工業」、「商業・サービス業」、「企業・家計・経済」、「住宅・土地・建築」、「エネルギー・水」、「運輸・観光」、「教育・文化・スポーツ・生活」、

「社会保障・衛生」、「司法・安全・環境」、「行財政」、「情報通信・科学技術」、「国際」及び「その他」多くの分野にわたっている（図2）²⁾。



図2 静岡県が公表したオープンデータの分野

IoT: Internet of Things とは、コンピュータ等の情報・通信機器だけでなく、世の中に存在する様々な物体（モノ）に通信機能を持たせ、インターネットに接続したり相互に通信したりすることにより、自動認識や自動制御、遠隔計測等を行うことである³⁾。既に実用化されつつある車の自動運転システムはIoT技術に係る一つの分かりやすい適用例として挙げられる。

このように、近年ではビッグデータやオープンデータ及びIoT等の分野が飛躍的に発展しており、かつてない社会変革をもたらしつつある。本稿では、ビッグデータ時代における環境施策とビジネスにおいてオープンデータとIoTの融合による展開の可能性を提起し、議論を行うとともに、実際の応用に向けて解決する必要のある課題について私見を述べる。

2. 様々な環境問題

人類の活動によって引き起した環境問題は様々であり、大気汚染や水質汚濁、土壌汚染、気候変動・地球温暖化、酸性雨、森林破壊、生態系の破壊、放射性物質汚染及び光害・日照障害等多種にわたる。日本では、近年「観光公害」という問題も注目されるようになってきている。また、環境問題と関連の深いものとして、海洋プラスチックごみ問題や人口爆発、大都市化によるごみ問題及び集中豪雨等による自然災害の深刻化等も例として挙げられる。

これらの環境問題は非常に複雑であり、地域及び国際社会に大きな影響を及ぼしている。生物多様性の保全や持続可能な発展のためには改善・解決しなければならない喫緊の課題でもある。これら複雑な環境問題に関わるメカニズムの解明や予測・予防及び改善・対策政策の決定等においては、関連のデータを統合的に解析する必要があり、また、現状をリアルタイムに把握するためには、IoT技術との融合も必要不可欠であると考えられる。

3. 気象データがもたらしたビジネスの事例

IoTやAI等の技術の進化により、気象データを利活用したビジネスに変革が起きており、筆者にとってはこれがオープンデータとIoTを融合した実用性の高い成功事例と考えている。

気象は人間の生活と生産活動等に密接に関連しており、日常生活や旅行、損害保険、農林漁業の一次産業における品質管理や生産量の予測、工業・製造業等の二次産業における材料の調達や製品品質と製造量の管理等、販売業・サービス業等の三次産業における集客数や売れ筋商品の変化の予測等多くのことに関連している。例えば、我々の身近なところでは、「今日は肌寒そうだから何を着ようかな?」、「今日の天気ですっきりしないので、傘を持って出かける必要はあるかな?」、「洗濯物は干しっぱなしにしても大丈夫かしら?」等の情報は常に気になると思う。衣服類を販売する店では、「いつ季節の商品に入れ替えたが一番よいか?」、コンビニでは、「冷麺やおでん等の商品をいつ、どの位仕入するか?」等の多くの決定は気温変化に対する正確な予測が必要不可欠である。

わが国では、1993年の気象業務法の改正により、許可事業者が気象庁の観測データを利用し、独自の予報を行えるようになり、ビジネス創出の機会が生み出された。気象庁では、気象データ高度利用ポータルサイトが開設されており、気象庁が発表する気象データや気象データの取得方法及び気象データの利活用事例等が公表されている⁴⁾。例えば、気象庁が公表した気象データの利活用事例では、ホットコーヒーの販売指数と平均気温の関係を明らかに示されている(図3)。

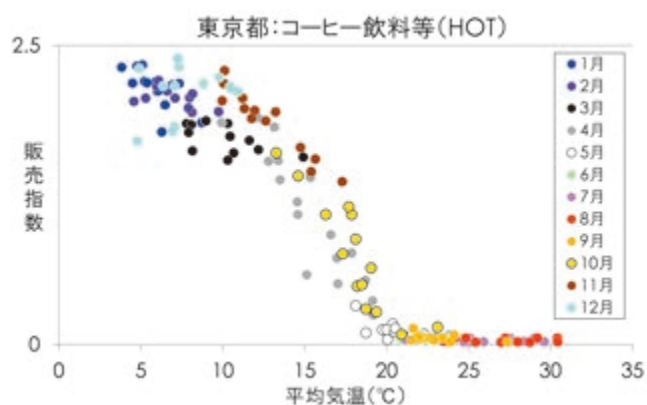


図3 東京都におけるホットコーヒーと平均気温の相関性⁴⁾

また、身近な例として、夏の高校野球(甲子園)では、炎天下で「かち割り氷」の売り上げは、1日120万円にものぼると言われているが、気温が低ければ、当然売れなくなる。森永製菓の「チョコモナカジャンボ」は、アイスクリームの中に板チョコを挟み、モナカで包んだ同社の定番商品であり、年間1億8,000万個を売り上げる。モナカの皮はアイスを覆う商品の形になってから一定期間が経過するとアイスの水分を吸収してしまい、パリパリの食感が損なわれる。このため、森永製菓は製造から消費者の手元に届くまで2週間以内を目指し、手持ちの在庫を極端に少なくして運用している。しかし、アイスの売れ行きは気温の変化に非常に敏感に反応する。気温上昇によって需要が前週の1.5倍になる場合もあり、適切な在庫を保有していなければすぐに欠品になり、商機を逃れてしまう。2017年夏から森永製菓は日本気象協会(JWA)が提供した気象情報で需要を高精度に予測し、欠品の問題を解決したと報道されている⁵⁾。



図4 パリパリとした「チョコモナカジャンボ」⁵⁾

株式会社ウェザーニューズが出した「2019年5月期 第1四半期決算短信」によれば、気象サービスの市場規模は全世界で6,000億円以上と想定されている。気象リスクへの関心の高まりとインターネット技術の発展に伴い、気象サービスの市場は今後も成長を続けると予測されている⁶⁾。

4. 地球科学に係るビッグデータ利用の可能性

今年の2月に、Nature誌に掲載された一つの論文が筆者にとってはとても興味深かった⁷⁾。タイトルは、「Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science」である。この論文では、ビッグデータの三つの基本V要素に、データの不確実性を加え、四つのV要素で観測とシミュレーションしたビッグデータ利用可能性を議論した(図5)。

同論文では、著者のReichsteinらがデータ駆動型地球システム科学のための深度学習とプロセス理解について従来の機械学習手法の限界を指摘し、時空間変動特性の解析に深度学習の適用を提案した。また、物理学的プロセスモデルとデータ駆動型機械学習の汎用性をカップリングしたハイブリッドモデリング手法の適用を提案した。図6に深度学

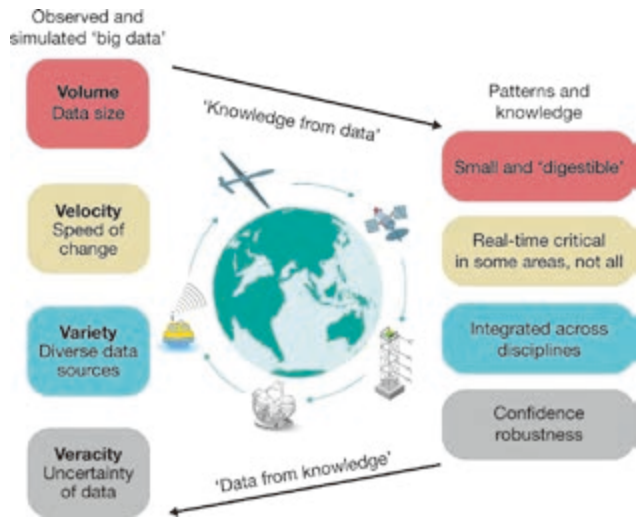


図5 地球科学分野におけるビッグデータの特性と特質⁷⁾

習の典型的応用（左側）と対応した地球科学問題への適用可能性（右側）を示す。

深度学習の目的物（物体）の分類と位置特定手法を地球科学分野における（事象の）パターン分類に、機械学習のスーパー解像度と融合手法を地球科学分野における統計学的ダウンスケーリングと混合に、機械学習のビデオ予測手法を地球科学分野の短期的予報に、機械学習の言語翻訳手法を地球科学分野のダイナミックな時間的シリーズのモデリングに、それぞれ適用可能であると述べられている。

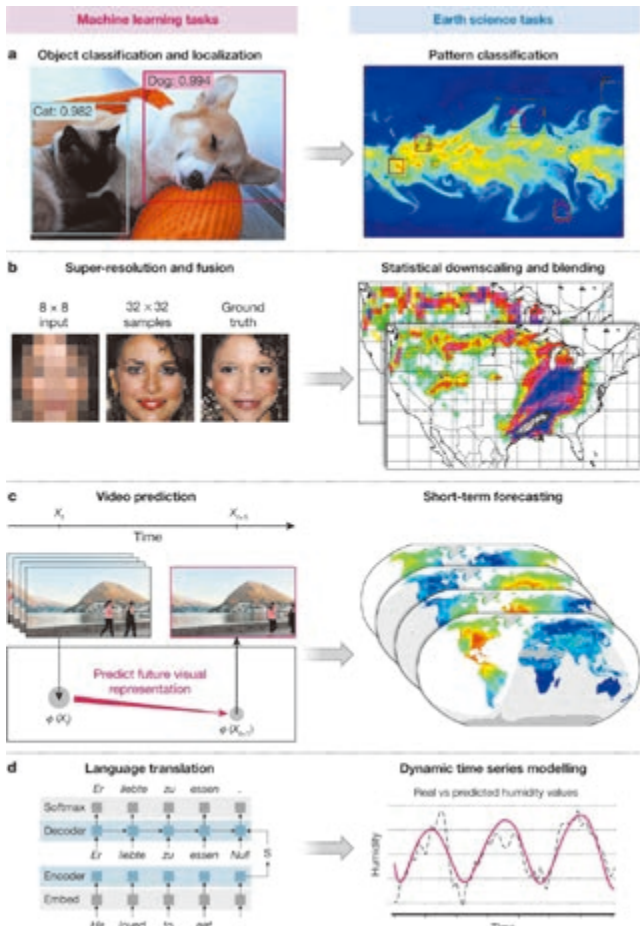


図6 深度学習手法の地球科学問題への適用⁷⁾

この論文によれば、機械学習はその他の分野でよく利用されているが、地球科学分野においてはまだ応用の初期段階にあり、深度学習で時空間の変動特性を抽出することで、予測に利用できると謳っている。但し、原理的にできると言っても、地球科学分野においては、データ不足の問題がある。例えば、コンピュータが“訓練したサンプル”によって、多くの“犬”と“猫”を識別することが可能であるが、地球科学分野においてはこのような“訓練したサンプル”はまだない。機械学習を地球科学分野に応用する場合、データの解釈やデータの複雑性と不確実性、データの不足、サンプルの不足及び計算技術自身等において挑戦的な課題が残されている。

このように地球科学分野においてビッグデータの利用は有望であるものの、本格的な利用はまだできていないのが現状である。

5. 環境分野におけるビッグデータ利用の課題

気象は環境との関連があるものの、環境に係る一つの事象に過ぎない。筆者が広範囲にわたって調査してみたところ、環境分野においては、オープンデータとIoTの融合によるビッグデータを利活用した本格的ビジネス事業の創出事例はまだないようである⁸⁾。様々な要因が環境分野におけるビッグデータの有効利用とビジネスへの展開に影響を与えていると考えられる。

- (1) 技術的問題 環境問題は非常に複雑であり、多岐にわたる影響要因や関連事象に対する的確な理解、事象間の相関性を適切に記述するための概念モデルの確立、ビッグデータの管理及び処理等において、何れも熟知かつ高度な技術が必要不可欠である。このような技術開発に必要な人材は不足していると思われる。また、情報セキュリティの確保に高い技術力も必要とされる。加えて、益々増加していく膨大なデータの保管や解析速度の限界等の問題も顕在化していく可能性が高いと思われる。
- (2) ステークホルダーの関心不足 2019年9月23日アメリカのニューヨークで開催された国連気候行動サミットでのスウェーデンの環境活動家であるグレタ・トゥンベリさん（16）の講演が一時的に注目されたが、結果的には深い議論に繋がらなかったと思う。世界経済が低迷している中、気候変動への対策や環境保護よりも経済優先になりがちな傾向にあるのではないかとと思われる。大気汚染や水質汚濁及び土壌汚染等について、新興国は先進国がかつて歩いた同じ道を行っているとケースが多く見受けられるのが事実である。
- (3) 前例と予算の欠乏 環境は“公共の財産”であり、環境問題を改善・解決するためには、各国の政府が必要な投資を行うべきであると考えられる。環境問題は消費問題と違って、直接ビジネスに繋がる可能性は比較的低い。しかし、減災や防災、国民生活レベルの向上及

び地域社会経済の発展等には密接に関連するため、長期的な視点から戦略的な投資が必要不可欠であると考えられる。例えば、気候変動の予測や人口の減少、住宅やインフラの老朽化、産業構造の変革及び防災等を統合的に考慮した街づくりや次世代土地利用計画の策定等について政府が関連研究開発に戦略的に投資する価値はあると少なくとも筆者はそう思っている。また、重金属類のバックグラウンド値に関する全国版のマップを整備するためには数億円を要するが、自然由来汚染の対策に一つの大きいサイトだけでもそれ以上のコストが掛かってしまう可能性もある。本来なら、バックグラウンド値よりも低い自然由来汚染には過剰な対策を実施する必要がなく、海外では、法令によってそのように規制されている国もある。

- (4) 普及したオープンアクセスデータの不足と利用の困難さ 現在地球観測（文部科学省/JAXA）や大気汚染物質広域監視システム（環境省）、水文地質データベース（国土交通省）、地質情報データベース（産総研地質調査総合センター）及び表層土壌における主要元素とリスク情報のデータベース / 表層土壌評価基本図（一部の県のみ整備済、産総研地質調査総合センター）等のデータベースがそれぞれの機関で整備・公表されている。データの形式や整備の目的は異なっているため、統合解析等に利用する際には、変換や莫大な労力を費やす必要もあると思われる。

以上のほか、既存データの測定精度や信頼性、適用条件と範囲の精査、必要であるがまだ整備されていないデータベースの拡充、また受益の公平性及び倫理的問題等についても議論がまだ不十分であると思われる。

6. あとがき

ビッグデータやオープンデータ、IoT 及び AI はいずれも近年急速に発展してきた新しい技術分野であり、環境分野におけるオープンデータと IoT の融合による本格的なビジネス創出の事例は未だに皆無に近い。しかし、環境問題は持続可能な発展と密接に関連しており、今後公的資金の投資によるオープンデータの整備や技術の融合に係る研究開発及び企業等による新しいビジネスモデルの創出に期待したい。

誌面と時間等の制限や筆者の浅学菲才により記述の不十分な部分や、場合によっては誤解もあるかもしれないが、今後更なる議論を深め、環境問題に係る戦略的研究開発の実施や施策決定等に少しでも貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) <https://cio.go.jp/policy-opendata>, 2019年11月10日閲覧
- 2) <https://opendata.pref.shizuoka.jp/>, 2019年11月10日閲覧
- 3) <http://e-words.jp/w/IoT.html>, 2019年11月10日閲覧
- 4) <https://www.data.jma.go.jp/developer/index.html>, 2019年11月10日閲覧
- 5) <https://newswitch.jp/p/14076>, 2019年11月10日閲覧
- 6) <https://www.nikkei.com/nkd/disclosure/tdnr/bbs2qz/>, 2019年11月10日閲覧
- 7) <https://www.nature.com/articles/s41586-019-0912-1>, 2019年11月10日閲覧
- 8) <https://www.smithschool.ox.ac.uk/publications/wpapers/workingpaper14-04.pdf>, 2019年11月10日閲覧

土壌汚染対策における 土壌・地下水環境に関わる 基盤データの利活用について

Utilization of Basic Data Related to Soil and
Groundwater Environment in Soil Contamination
Countermeasures

国際航業株式会社 フェロー 防災環境事業部
(地盤環境研究)：中島 誠
Fellow, Kokusai Kogyo Co., Ltd.: Makoto Nakashima
e-mail: makoto-nakashima@kk-grp.jp

1. はじめに

2019年4月に土壌汚染対策法の2回目の一部改正が完全施行され、わが国の土壌汚染対策は新たなフェーズに入ったといえる。改正された土壌汚染対策法（以下「法」という。）では、土壌汚染に関する適切なリスク管理を推進し、改正前の土壌汚染対策法（以下「旧法」という。）における課題を解決するため、土壌汚染状況調査の実施対象となる土地の拡大、汚染の除去等の措置内容に関する計画提出命令の創設等、リスクに応じた規制の強化、その他の措置が講じられた。

本稿では、法に基づき土壌汚染の調査・対策を進める上での土壌・地下水環境に関わる基盤データの必要性を整理し、これまでに発行されている土壌・地下水環境に関わる基盤データの適用性と将来に向けての課題・要望について、土壌汚染調査・対策の実務に携わる者の視点で述べる。

2. 土壌汚染状況調査における基盤データの活用

(1) 自然由来および水面埋立て土砂由来の土壌汚染のおそれの把握の重要性

図1に、法の土壌汚染状況調査の流れを示す。土壌汚染状況調査では、“土壌汚染のおそれの把握（地歴調査）”で把握された土壌汚染のおそれを自然由来、水面埋立て土砂由来、およびそれら以外（人為等由来）の三つに区分し、それらの由来ごとに人為等由来汚染調査、自然由来汚染調査、水面埋立て土砂由来汚染調査のいずれか又は複数を行うことになる。

このとき、人為等由来の汚染のおそれについては、土壌汚染状況調査の対象地および周辺の土地における基準不適合（土壌溶出量基準または土壌含有量基準に不適合）を示す既

存のデータが存在している場合のほか、特定有害物質の埋設等、使用等および埋設等の履歴がある場合も汚染のおそれありと判断される。これに対して、自然由来および水面埋立て土砂由来の汚染のおそれについては、それらに由来して基準不適合を示すデータが存在している場合にのみ、汚染のおそれありと判断されることになっている。そのため、自然地層や水面埋立て土砂の種類や地域特性から基準不適合となっていることが疑われる特定有害物質の場合であっても、過去に調査されたデータがないなど、実際にその物質が基準不適合であることを示すデータがなければ汚染のおそれなしと判断されているのが現状であり、法に基づく土壌汚染状況調査が行われた土地に隠れた土壌汚染が存在している可能性がある場合がある。

自然由来または水面埋立て土砂由来の土壌汚染が見逃された特定有害物質のある土地がある場合には、見逃された汚染のある土壌が自由に他の土地に移動して利用されることが考えられ、汚染ありと判断された土地についても汚染物質の見逃しがある状態で汚染土壌が区域外へ搬出されることが考えられる。

区域指定された土地からの土壌の搬出について、旧法では、すべて汚染土壌処理施設へ搬出し処理することとなっていたが、今回の法改正により幾つかの搬出方法が新たに認められた（図2）。新たに認められたのは、“自然由来等形質変更時要届出区域間での自然由来等土壌の移動（区域間移動）”、“一の（同一の契機による）土壌汚染状況調査で区域指定された要措置区域間または形質変更時要届出区域間での土壌の移動（飛び地間移動）”および“自然由来等土壌利用施設（自然由来等土壌構造物利用施設、自然由来等土壌海面埋立施設）での自然由来等土壌の利用”である。こ

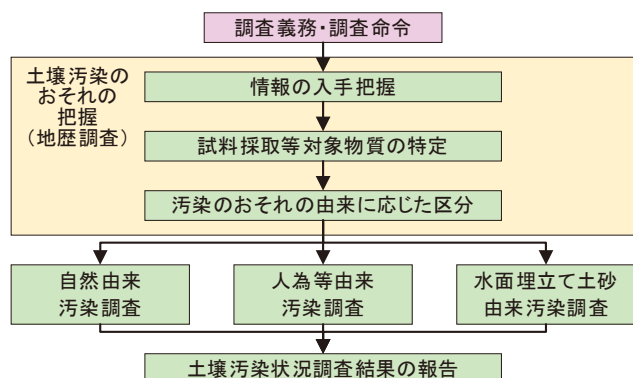


図1 土壌汚染状況調査の流れ

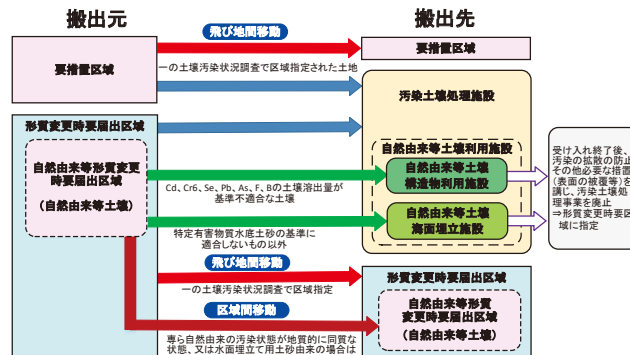


図2 要措置区域等外への土壌の搬出の種類

これらの制度は、いずれも区域内の土壤汚染の状態が正しく把握されていることをもって成り立つものであり、土壤汚染状況調査の段階で自然由来や水面埋立て土砂由来の土壤汚染の見逃しがあった場合には、法に則ったかたちでこれらの移動や利用を行うことが土壤汚染の拡散につながってしまう危険性があると考えられる。

このような事態を招かないためには、法の土壤汚染状況調査において、地歴調査の段階で自然由来および水面埋立て土砂由来の土壤汚染のおそれを確実に把握することが必要になってくる。

(2) 活用可能な基盤データと適用性について

自然由来および水面埋立て土砂由来の土壤汚染のおそれの判断の精度を上げるため、また、自主調査等で把握された土壤汚染の由来を推定するための判断材料の一つとするためには、これらの由来による土壤汚染状況に係る情報を読み取ることが可能な基盤データの整備・公表が望まれる。現状においてそれに該当するものとして、産業技術総合研究所より公開されている地球化学図、土壤・地質汚染評価基本図および表層土壤評価基本図が考えられる。これらにおける土壤試料の種類、試料採取位置および分析内容は表1に示すとおりとなっている。

法の土壤汚染状況調査における自然由来の汚染のおそれの判断では、土壤溶出量基準または土壤含有量基準に不適合である土壤溶出量と土壤含有量の分析データが必要である。この用途に合うものとしては、土壤溶出量及び土壤含有量の分析データが含まれている土壤・地質汚染評価図と表層土壤評価基本図が考えられる。

1) 土壤・地質汚染評価図および表層土壤評価基本図の活用について

土壤・地質汚染評価図は、千葉県姉崎地域と宮城県仙台地域について発行されており、4～8 km²に1地点以上設定された試料採取位置ごとに深さ方向に分布している地層ごとの土壤溶出量、土壤含有量及び土壤全含有量の値等が、幾つかの特定有害物質（重金属等）について示されている。これらの情報は、地域ごと、地層ごとの自然由来の土壤汚染状況を推定する上で有効であり、他の物質との共存状況等の情報も既存の基準不適合データが自然由来かどうかを推定する際に参考にできる可能性がある。また、姉崎地域については各地点の分析データが Excel ファイルのかたちで添付されており、ユーザーが地層ごとの土壤汚染状況の特徴を統計解析すること等も可能である。

表層土壤評価基本図は、4 km²に1地点以上の割合で設定された試料採取位置ごとに深さ50 cm までの表層土壤（表層の腐葉土層、植生、大礫を除く）の土壤溶出量、土壤含有量および土壤全含有量の値が幾つかの特定有害物質（重金属等）についてエリアごと、土壤分類ごとの値として示されるとともに、それらの値の平面分布図が示されている。これらの情報は表層部の土壤が造成等で改変されていない

表1 土壤汚染状況に関わる基盤データの概要

項目	内容
地球化学図（全国） ^{1),2)}	
試料	<ul style="list-style-type: none"> ■河川堆積物（現・旧河床に堆積した碎屑物） ■海底堆積物（海底表層堆積物）
試料採取位置	<ul style="list-style-type: none"> ■河川堆積物：10km×10kmに1試料程度 3,024箇所 ■海底堆積物：4905箇所
分析内容	<ul style="list-style-type: none"> ・元素濃度（全含有量）：53元素 ・0.1N塩酸浸出法による可溶性元素濃度：主成分元素、微量元素
地球化学図（関東） ³⁾	
試料	<ul style="list-style-type: none"> ■河川堆積物（現・旧河床に堆積した碎屑物） ■海底堆積物
試料採取位置	<ul style="list-style-type: none"> ■河川堆積物：全国版の約10倍の精度 1,457箇所 ■海底堆積物：東京湾内29箇所（コア試料）
分析内容	<ul style="list-style-type: none"> ・元素濃度（全含有量）：53元素 ・0.1N塩酸浸出法による可溶性元素濃度：主成分元素、微量元素
土壤・地質汚染評価基本図（姉崎地域） ⁴⁾	
試料	<ul style="list-style-type: none"> ■表層土壤（関東ローム層、沖積層）：深さ15, 50, 100, 150cmで採取 ■堆積物（上総層群、下総層群）：露頭面を削った新洗面から採取（露頭の状況によってはその一部のみを採取）
試料採取位置	<ul style="list-style-type: none"> ■表層土壤：4km²に最低1地点 ■堆積物：4～8km²に対して1地点の割合でボーリング調査（深度別試料採取）
分析内容	含有量分析（全量）、土壤含有量試験、土壤溶出量試験、検液のpH変化、鉍物分析（X線回折法、熱分析、透過型分析（電子顕微鏡による）、鉛の存在形態分析（分別抽出量）、鉛同位体比測定
土壤・地質汚染評価基本図（仙台地域） ⁵⁾	
試料	<ul style="list-style-type: none"> ■表層土壤 ■深さ別土壤試料
試料採取位置	<ul style="list-style-type: none"> ■表層土壤（堆積物等）：4km²に最低1地点 ■深さ別土壤：4～8km²に対して1地点の割合でボーリング調査
分析内容	鉍物同定、含有量分析（全量）、土壤含有量試験、土壤溶出量試験、電子顕微鏡分析
表層土壤評価基本図 ⁶⁾	
試料	表層土壤（深さ50cmまでの土壤）
試料採取位置	4km ² に対して1地点の割合
分析内容	水溶出量（土壤溶出量）、塩酸溶出値（土壤含有量）、含有量（全量） ※その他、ヒトの健康リスク評価

地域における自然由来の土壤汚染状況を推定するためには有効である。一方、東京や大阪等の都市部においては、深さ50 cmまでの土壤はほとんどが造成等により自然状態から入れ替わっている可能性があるため、表層土壤の汚染状況のから試料採取地点周辺の土地の土壤汚染状況を推定することが妥当かどうかの検証が必要であると考えられる。また、東京都区部の有楽町層や大阪市の大坂層群沖積層Ma13層上部等、海成層の自然由来の土壤汚染については深部までのボーリング調査の結果がないと評価できない場合が多く、海成の堆積層における自然由来の土壤汚染のおそれの把握に課題が残されている。

さらに、表層土壌評価基本図では地点ごとの分析データは公開されておらず、土壌汚染状況調査を行う土地の近傍の個別の調査地点のデータをユーザーが確認することができない。資産価値を有している土地の汚染状態を示す詳細なデータを公表することは難しいのかもしれないが、調査地点の位置と分析データが Excel ファイル等のかたちで提供されると、法の土壌汚染状況調査を行う土地の周辺の表層土壌の状況を詳細に確認できるなど、基盤データとしての有効性が増すと思われる。

また、将来的には、日本全国の土壌について、表層から深部までの土壌の汚染状況を示す分析データが地層分布との関係もわかるようなかたちで三次元的な土壌評価図として整備され、自然由来および水面埋立て材料由来の土壌汚染の状況を読み取ることができるようなものが整備されるのが理想的である。

2) 地球化学図の活用について

日本の地球化学図は、約10 km×10 km に1点の割合で陸域において採取された河床堆積物試料の元素濃度（全含有量）の分布が日本全国について図示されたものであり、岩石の風化や試料採取位置よりも上流側に分布する岩石や堆積物、土壌等の情報を持っていると考えられている¹⁾。関東の地球化学図では、さらにその約10倍の密度で試料採取位置が設定され、より詳細な全含有量の分布が図示されている³⁾。地球化学図は陸域だけでなく、沿岸海域についても作成されており²⁾、陸域から供給された化学物質および化学物質を含む土壌等が移動・拡散し、海底堆積物となっている状況を読み取ることができる。

地球化学図では、法の特定有害物質である砒素（As）、カドミウム（Cd）、水銀（Hg）、鉛（Pb）について全含有量の分布図が示されており、六価クロムについてはクロム（Cr）としての土壌全含有量の分布図が示されている。また、全含有量の他に、0.1N 塩酸浸出法による可溶性元素濃度の分布図も示されており、法の特定有害物質についてはCd、Cr、Pbの可溶性元素濃度の分布図が示されている。地球化学図では土壌汚染の指標となる土壌溶出量、土壌含有量の値を直接得ることはできず、法の土壌汚染状況調査では自然由来および水面埋立て土砂由来の土壌汚染のおそれがあると判断する材料には直接はならない。しかしながら、土壌全含有量の分布から土壌含有量について、可溶性元素濃度の分布から土壌溶出量について、それぞれ潜在的に高い値を示す可能性がある地域を大まかに推定することにはつながることから、流域単位での自然由来の土壌汚染の可能性を示す基礎情報として参考にするにはできると考えられる。法の土壌汚染状況調査や自主調査での利用においては、調査対象とする土地とその周辺地域のデータを利用することになるが、調査の対象となる土地の土壌汚染のおそれを検討するためには、10 km×10 km に1点の密度で取得されたデータを利用するには無理がある場合が多いと考えられる。そのため、その約10倍の密度でデータが取得されている

関東の地球化学図レベルの精度で他の地方についてもデータが整備されると活用されるケースが増えると予想される。

沿岸地域の地球化学図における海底堆積物の元素濃度の分布図については、その土壌が浚渫土として用いられた公有水面埋立地の水面埋立て土砂由来の土壌汚染の可能性を推定するための基礎情報として参考になると考えられる。

3. 掘削土の再利用における基盤データの活用

(1) 掘削土の再利用におけるバックグラウンド値に係る基盤データ整備の有効性

オランダやフランスでは、土木工事等による掘削土の再利用について、土壌中に含まれる有害物質の濃度に応じた管理の方法や基準が定められており、汚染されていない土壌であってもバックグラウンド値を超える濃度かどうかで再利用できる範囲が規定されている。

図3はオランダの土壌の基準であり、土壌に介入値を超える濃度で有害物質が含有されている場合には浄化対象となるが、浄化対象とならない土壌であっても有害物質の濃度に応じて、再利用可能な土地の用途が分けられている。その中で、自然または農業用の土地で再利用が可能な土壌はオランダ全国のバックグラウンド濃度の研究から導き出されたバックグラウンド値以下の濃度である場合のみとされており、バックグラウンド値には原則として比較的乱されていない地域の表層土壌のバックグラウンド濃度の分布の95パーセンタイル値が設定されている⁷⁾。

図4はフランスの掘削土のオフサイト管理オプションである。汚染土壌については有害性の有無や処理の可能性、再利用の機会の有無により再利用のオプションや搬出先として認められる埋立地が指定されており、非汚染土壌についてはおなじ科学的なバックグラウンドである30 km 圏内のオフサイトでの再利用が認められている⁸⁾。

このように、オランダやフランスでは土壌中に含まれる有害物質がバックグラウンド値を超えて存在する場合に何らかの形で再利用が制限されるようになっており、このことが土壌中の有害物質のバックグラウンド濃度やその分布を基盤データとして整備することにつながっていると考えられる。

これに対して、わが国では、掘削土の再利用について自治体が残土条例を制定して掘削土を搬出して埋立て等に再利

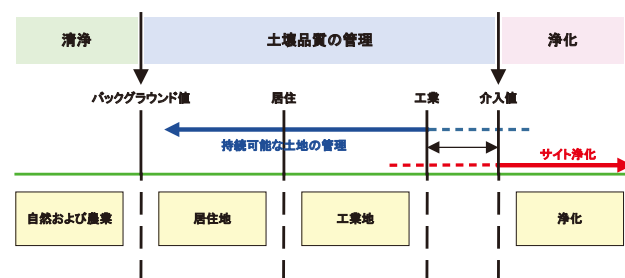
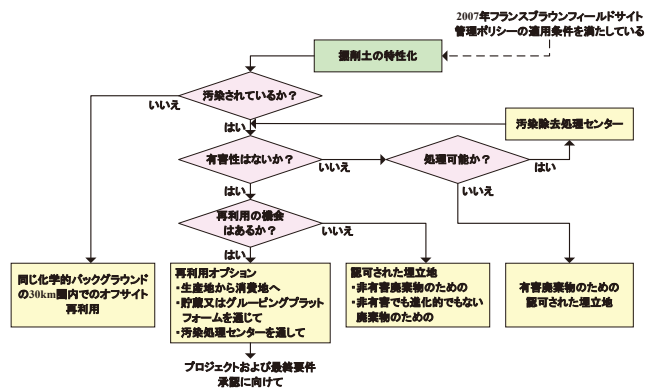


図3 オランダの土壌の基準⁷⁾

表2 土壌全含有量による自然的レベルの範囲の目安値とバックグラウンド値の比較

		As	Cd	Cr	Pb
自然的レベルの範囲の目安値（法施行通知）		39	1.4	—	140
全国	平均値+3σ	32	0.43	200	59
	95パーセンタイル値	34	0.61	210	65
関東	平均値+3σ	25	0.52	170	71
	95パーセンタイル値	24	0.54	190	83

(単位：mg/kg)

図4 フランスの掘削土のオフサイト管理オプション⁸⁾

用できる場合を制限している場合がある。これらの自治体では、残土条例で定められている有害物質の濃度等の安全基準（土壌環境基準や法の土壌溶出量基準が流用されている場合が多い）に適合しない場合に、その汚染土壌を埋立て等に再利用することが認められていない。このような残土条例はあるものの、非汚染土壌の再利用については特に制限されておらず、非汚染土壌を再利用することで再利用先の土地の土壌に含まれる有害物質のバックグラウンド濃度が上昇する可能性があるということについては特に問題視されていない。

今後、わが国における掘削土の再利用について、汚染土壌であるかどうかだけでなく、非汚染土壌に含まれる有害物質の濃度がバックグラウンド値を超えるかどうかということ等も考慮していく方向になった場合には、わが国の土壌に含まれる有害物質のバックグラウンド濃度およびその分布に関わる基盤データの整備が必要になってくると考えられる。

(2) 掘削土の再利用における活用について

わが国と海外の国では土壌の汚染状態を判断する指標が異なっており、オランダやフランスと同じように土壌全含有量の値に基づき掘削土の再利用を考えるようになる可能性は低いかもしれないが、土壌全含有量を指標として掘削土の再利用先を考える場合を想定し、日本の地球化学図および関東の地球化学図に用いられている元素濃度（全含有量）データをもとにバックグラウンド値を求めてみた。

表2は、全国の地球化学図および関東の地球化学図に添付されている各地点の分析結果をもとに土壌全含有量のバックグラウンド値を算定してみた結果を法の施行通知で自然的レベルの範囲の目安値として示されている値とともに示したものである。バックグラウンド値については、わが国で自然由来の判断の目安値の算定等に用いられている平均値+3σと、オランダ等で用いられている95パーセンタイル値の2種類の方法で求めてみた。法で自然的レベルの範囲にあると判断された場合でもバックグラウンド値を超える土壌全含有量である場合があること、全国のバックグラウンド値と関東のバックグラウンド値で差があること、平

均値+3σの値の方が95パーセンタイル値よりも少し低めの値になっている場合が多いことがわかる。掘削土の再利用先を考える場合には、全国を一律のバックグラウンド値で考えるか、地域ごとのバックグラウンド値の違いを考慮するかは論点の一つであり、それらのことを検討する際には地球化学図のデータが整理・公表されていることの意義は大きく、より高密度にデータが整備されること、および河床堆積物における値と上流域の土壌における値の関係を把握が把握されることが期待される。

なお、このバックグラウンド値に関する検討は、地球化学図に用いられた各試料採取地点の分析データがファイルとして公開されていたため、著者でも実施することが可能であった。今後整備・公開される基盤データについても、ユーザーが様々な検討に使用することができるよう、データファイルとして公開されることを強く希望する。

4. 土壌汚染対策における基盤データの活用

(1) 区域指定時の人の健康被害のおそれの判断

法では、土壌汚染状況調査により基準不適合（土壌溶出量基準不適合、土壌含有量基準不適合）であることが把握された場合、土壌汚染による人の健康被害のおそれの有無に応じて要措置区域または形質変更時要届出区域に指定される。ここで、土壌溶出量基準に不適合な土地については、土壌汚染に起因して地下水汚染が生じているとすれば地下水汚染が拡大すると認められる区域内に飲用井戸等が存在しているかどうかで、都道府県知事が人の健康被害のおそれの有無を判断する。

特定有害物質を含む地下水汚染が到達し得る範囲については、環境省より場所ごとの条件に応じて地下水汚染が到達する可能性がある距離（到達距離）を計算するためのツールが公開されている（<http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html>：確認日2019年11月13日）。

このツールでは、地下水の移流分散による三次元解析解を求める Domenico (1987) の式⁹⁾を平面二次元解析解を求めるかたちに変形した式が用いられている。汚染源としては、第一種特定有害物質（揮発性有機化合物）については10m×10mの範囲に地下水汚染濃度100 mg/Lの汚

染源が、第二種特定有害物質（重金属等）については5m×5mの範囲に地下水汚染濃度100 mg/L（シアン）、30 mg/L（六価クロム、ふっ素、ほう素）または10mg/L（砒素、セレン、鉛、カドミウム、水銀）の汚染源が、第三種特定有害物質（農薬等）については5 m×5 mの範囲に地下水汚染濃度10 mg/Lの汚染源がそれぞれ存在していると仮定されており、第一種特定有害物質および第三種特定有害物質（PCBを除く）は液相中でのみ分解するものとされている。

このツールによる計算では、場所ごとの条件として、対象とする特定有害物質の種類、帯水層の土質、地下水の動水勾配を入力する必要があるが、これらのパラメーターの値を入力すれば土壌の物理化学特性、特定有害物質の汚染状況（濃度・範囲）および帯水層の土壌物理特性が自動的に設定され、到達距離が算定されるようになっている。

帯水層の土質については、土壌汚染状況調査の対象地内でのボーリング調査等による地質情報のデータ等が入手可能であればそれを用いることになるが、入手できない場合は公開情報から周辺の地質情報を入手し、判断することが必要になる。地質情報に係る公開情報の例としては、表3に示すものが紹介されている¹⁰⁾。

地下水の動水勾配については、土壌汚染状況調査の対象地内の観測井での地下水位測定結果から決定するのが基本となるが、不圧地下水の動水勾配は概ね地形の最大勾配に近似されることが多いことから、地形図等を用いて土壌汚染状況調査の対象地および周辺の土地の最大勾配を把握し、その値と同じとする方法も示されている。地形および地下水位に係る公開情報の例としては、表4に示すものが紹介されている¹⁰⁾。

地下水位に係る公開情報として例示されている日本水理地質図からは広域的な帯水層の構造や地質についての情報を得ることが可能であり、水文環境図からは広域的な帯水層の構造や地質とともに帯水層ごとの地下水頭分布についての情報も得ることが可能である。

(2) 措置完了条件の設定

法により土壌溶出量基準に不適合な土地として要措置区域に指定され、汚染の除去等の措置を講ずることとなった場合、旧法では土壌溶出量基準に適合しない土壌の範囲を対象に、要措置区域内またはその周縁の地下水の汚染物質濃度を地下水基準に適合させることが求められていた。それに対して、法では、要措置区域より地下水流動の下流側に

表3 地質情報に係る公開情報の例
(環境省^{10),11)}に基づく)

公開情報	公開元
Geo-Station	(国研) 防災科学研究所
国土地盤情報検索サイト KuniJiban	(国研) 土木研究所, (国研) 港湾空港技術研究所
「土地分類基本調査（垂直調査）」による主要平野部の地質断面図集	国土交通省

表4 地形図および地下水位に係る公開情報の例
(環境省^{10),11)}に基づく)

	公開情報	公開元
地形図	数値地図 25000	国土地理院, (一財) 日本地図センター
	地理院地図 (電子国土 Web)	国土地理院
地下水位	地下水マップ	国土交通省
	日本水理地質図	(国研) 産業技術総合研究所
	水文環境図	(国研) 産業技術総合研究所

あり、かつ、要措置区域に指定される事由となった飲用井戸等よりも上流側にある任意の位置に土地の所有者等が評価地点を設定し、その評価地点で地下水中の汚染物質の濃度が地下水基準を満たすときの要措置区域内の地下水濃度および土壌溶出量をそれぞれ目標土壌溶出量、目標地下水濃度として土地の所有者等が設定するかたちに変更された。

この目標土壌溶出量および目標地下水濃度の設定においても、環境省より計算ツールが公開されている (<http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009.html> : 確認日2019年11月13日)。この計算ツールにおいても、到達距離の算定と同じく、Domenico の式⁹⁾ を平面二次元解析解を求めるかたちに変形した式が用いられている。

このツールによる計算では、場所ごとの条件として、対象とする特定有害物質の種類、帯水層の土質、地下水の動水勾配、地下水流動方向に対する基準不適合土壌の幅、評価地点までの距離を入力する必要があるが、これらのパラメーター値を入力すれば土壌の物理化学特性、帯水層の土壌物理特性が自動的に設定され、目標地下水濃度および目標土壌溶出量が算定されるようになっている（目標土壌溶出量は第二溶出量基準を超えないこととなっている）。

帯水層の土質や地下水の動水勾配について、この段階では、表1や表2に例示したような公開情報から情報を得ることが可能であり、詳細調査により得られたデータも踏まえて設定することも可能である。

5. おわりに

法に基づき土壌汚染対策を行う上で土壌・地下水環境に関わる基盤データの利活用は有効であり、実務で関わる者は何らかのかたちでそれらの基盤データに触れてきていると思われる。しかしながら、一方で、有効に活用できているのかと問われると、活用する上での課題や問題点に直面することも多く、うまく活用できているとは言い切れないのが実態である。

掘削土の再利用等、持続可能な土壌管理の観点からの検討については、わが国においても今後必要になってくることが予想され、土壌環境に関わる基盤データを充実させることが今まで以上に求められるようになる可能性が高い。今後、土壌環境に関わる基盤データがより充実されることが要望されると、それらの基盤データのユーザーとしては、整備が進む基盤データを実務的に有効なかたちで活用する方法を検討していきたい。

参考文献

- 1) 今井 登ほか：日本の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 209p. (2004)
- 2) 今井 登：日本全土の元素分布の調査とその活用－陸と海を統合した地球化学図の作成－. シンセシオロジ, 3(4), 281-291 (2010)
- 3) 今井 登ほか：関東の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 217p. (2015)
- 4) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編：土壌・地質汚染評価基本図 ～5万分の1 姉崎～. 産業総合研究所地質調査総合センター (2003)
- 5) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編：土壌・地質汚染評価基本図 ～5万分の1 仙台地域～. 産業総合研究所地質調査総合センター (2006)
- 6) 例えば, 産業技術総合研究所地質調査総合センター編：表層土壌評価基本図 ～茨城県地域～. 産業総合研究所地質調査総合センター (2014)
- 7) Rijkswaterstaat, Ministry of Infrastructure and the Environment: Into Dutch soils. 79p., (2014)
- 8) Blanc,C., Darmendrail,D., Rouvreau,L., Scamps,M. and Boissard,G: Excavated soil reuse tools developed as part of the French soil management framework. Hal-00794146, 3p. (2013)
- 9) Domenico,P.A.: An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species. J. Hydrol., 91, 49-58 (1987)
- 10) 環境省：土壌汚染対策法ガイドライン第1章：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン. (2019)
- 11) 環境省：地下水汚染が到達し得る距離の計算ツールの操作マニュアル, 措置完了条件（目標土壌溶出量, 目標地下水濃度の計算）の計算ツールの操作マニュアル. 36p., (2019)

企業が意識し始めた ウォーターセキュリティ

Water Security Gaining Attention from Private Sector

八千代エンジニアリング株式会社
事業開発本部：高橋 努
Director General of Business Planning and
Development Division,
Yachiyo Engineering Co., Ltd. : Tsutomu Takahashi
e-mail: tt-takahashi@yachiyo-eng.co.jp

1. はじめに

世界的な水の需要量は、人口の増加、都市化の進展、経済活動の拡大に伴い増加している。一方で、水資源量は気候変動に伴う降水量の変化や融雪時期の変化等によって不安定化が顕著となっており、水の確保は人類にとって重要な課題の一つといえる。水の確保は、生活や農業に留まらず、企業活動においても同様に極めて重要な位置づけとして捉えられている。近年ではサプライチェーンが複雑化しており、影響の発現は企業活動へのダメージが広範囲に及ぶため、内在する水に関わる課題やリスクを抽出して、事前に備える動きが進められている。

企業には、操業に対する物理的なリスクへの備えに加え、水リスク対策に取り組むもう一つの理由がある。それが ESG投資やTCFD（気候変動関連財務情報開示タスクフォース）への対応という投資的側面からの必然性にある。中でも水に関しては、企業に対し操業に関わる水のリスクやその対策、戦略等の開示を求める CDP 水セキュリティと呼ばれるプログラムがその存在感を高めている。CDP 水セキュリティは、2010年に情報開示が開始されたプログラムであり、図 1 に示すように企業に水利用等に関するアンケートを実施し、その回答をスコアリングし、機関投資家向けに情報を開示するものである。日本においてもその回答企業は年々増加し、2018年は309社にアンケートが送付され、約 60% の企業が回答している。



図 1 CDP と企業、投資家の関係

2. 水リスク管理における企業の課題と対応例

持続的な企業の成長に向け、企業が抱える水リスクを把握するためには、利用している水資源の実態的確な分析が基本となる。水は地形や地質、気象、人工的な取水等の影響を受け、地域によってその資源量や分布・流動特性が大きく異なる。このような偏在性を明らかにするためには、科学的なアプローチによる調査や解析が必須となる。特に、地下水に関わる実態把握においては、専門的な知識が必要な

ため、企業内の独自調査のみでは自ずと限界がある。

このようなことから、近年企業から寄せられる水に関する要望は以下のようなものがある。

- ・ 自社事業所周辺の地下水の実態把握
- ・ 地下水の流れや水質の可視化
- ・ 気候変動に伴う取水の持続可能性評価
- ・ 自社林の水源涵養能力の定量化
- ・ 水害を見込んだ BCP 策定支援

企業における水利用の目的は、業種によって様々であることから、水に対するリスク管理項目や調査内容も自ずと異なっている。また、水資源の実態やリスク把握に際しては、WRI による AQUEDUCT や WWF による The Water Risk Filter のようなオープンツールを用いて、事業所の流域における水量や水質、規制等の動向を情報収集し、自社の操業に影響を与える課題を洗い出すケースが多い。一方で、持続的に安定した水量や水質を確保することが製造活動において不可欠となる企業においては、独自調査の追加や複数の調査方法を組み合わせるなど、コストや時間をかけて詳細なリスク分析を行っている。特に、地下水を取水する企業においては、事業所周辺の水文地質構造や地下水流動機構を踏まえ、地下水賦存量や水質特性の定量化、図 2 に示すような地下水の流れの見える化など、多面的なリスク評価が求められる場合もある。

企業は水資源のリスクを把握するだけでなく、それを投資家やステークホルダーに適切に発信していく必要がある。最近では企業が資源の効率利用をアピールするだけでな

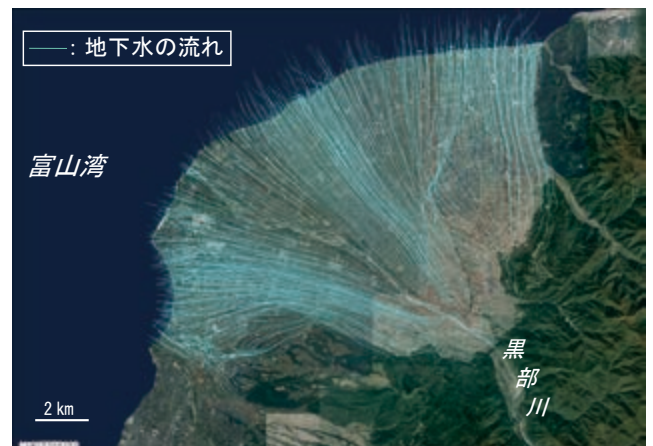


図 2 事業所周辺における地下水流動解析の例¹⁾

く、自社で行う森林保全活動による効果としての水源涵養量を定量評価することで、企業ブランディングに繋げる動きも増えている（図3参照）。この活動は、適切な間伐や管理により森林を健全な状態に維持することになるので、水質浄化や水の貯留効果、豪雨時の流出抑制効果等の水源涵養機能の向上が期待でき、事業所流域におけるリスク低減にも寄与する。

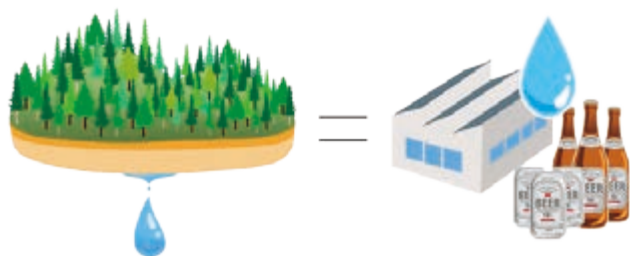


図3 飲料メーカーが進めるウォーターニュートラルの概念図

3. 水文環境図の活用

地下水を利用する企業が自社の水リスクを把握するためには、その起源の把握が基本となる。しかしながら、前述したような広域の地下水流動解析を独自に実施するにはコストが高む。このため、できる限りコストを押さえつつ、自社で利用している地下水の起源と流動経路を的確に把握したいとの要望も多い。

リスクを適切かつ低コストで把握するためには、信頼性の高い情報が不可欠であり、このようなニーズに対して、地域毎に井戸の地下水位や地下水面等高線、水温、イオン等の水質分析結果等の貴重な情報が格納されている「水文環境図」や「水理地質図」「全国水環境データベース」にその有用性を見出すことができる。

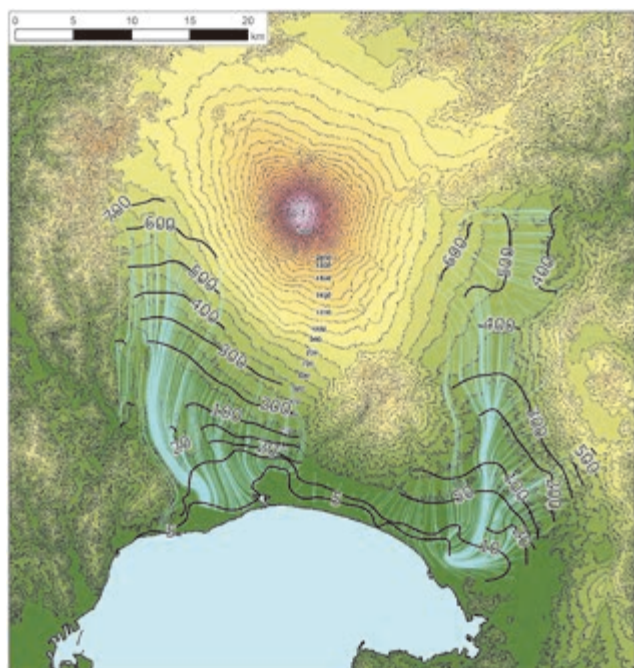


図4 水文環境図に基づいて流線を描写した例²⁾

地下水の専門家であれば、「水文環境図」に格納されている地下水面等高線や水理ポテンシャル分布図を見れば、概略的な地下水流動経路を容易に想定することができる。しかし、専門知識を持たない企業担当者に、それと同レベルの理解を求めるには少々無理がある。このような実情を踏まえ、当社では、地下水面等高線を用いて地下水の流れを直感的にイメージできる地下水流線を描写するシステムを開発し、図4のように水文環境図に適用した。また、「水文環境図」に格納されている主要イオン分析結果と、事業所が取水している地下水のイオン分析結果をシュティフダイアグラムにて比較することで、両者の水質の関係性を検討することが可能となる。このように企業担当者が地下水の流れや水質特性を視覚的に把握できれば、事業所で利用している地下水の起源やそのリスクの把握、保全すべき地域等の理解が促進され、地下水利用者の環境リテラシー向上に寄与できることから、「水文環境図」のより一層の整備拡大に期待したい。

4. おわりに

近年、自然資本に対する企業の捉え方が大きく変化しており、持続的な企業成長を目指して様々な環境リスクへの対応が活発化している。そのような中で、企業はようやく「水リスクへの対応」、すなわちウォーターセキュリティの重要性に気づき始めたと言える。

水は循環する資源であり、様々な外部環境の変化や課題に合わせ、流域を一つの単位として柔軟に対応をしていくことが望まれる。そのうえで流域の水資源の実態把握が極めて重要となり、前述のような技術を用いて可視化することは、利用者に通じる理解を促し、ステークホルダー間の協働を促進することにも一翼を担うと考える。

2014年に施行された水循環基本法では、水循環の健全化施策の展開において、行政、事業者、民間の団体、その他の関係者の相互連携の必要性が謳われている。同時に事業者に対しては、「事業活動に際して水の適正利用と行政が実施する水循環に関する施策に協力する責務を有する」と明記されている。この点を鑑みると、国内で水を利用する企業の役割や貢献が今後さらにクローズアップされ、流域を単位とした地域行政や市民、NPO、NGOといったステークホルダーとの協働、加えて学識経験者との連携が強く求められることになると思われる。

参考文献

- 1) 井浪 祐二：黒部事業所の地下水保全と有効活用，環境管理,52(5)，(2016)
- 2) 全国水文環境データベース：<https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/main.html>，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2019年10月26日閲覧

地下水の情報がビジネスに？ ～将来のビジョンと地下水の地図～

Business using groundwater information?
~ Future vision of groundwater management and
the role of map of groundwater ~

地下水研究グループ長：町田 功
Groundwater Research Group: Isao Machida
e-mail: i-machida@aist.go.jp

1. はじめに

我が国では、古くより地下水の開発・利用が盛んに行われてきた。地下水の過剰揚水に伴う地盤沈下や臨海部の地下水塩水化、そして1980年頃には有機塩素系化合物による地下水汚染などを経験しつつも、地下水は多くの地域で上水道の水源等として井戸から汲み上げられて利用され、地域社会の生活、インフラ、経済を支えてきた。しかし、近年、地下水には需要の増大と利用の制限という、相反する2つの動きがでてきている。

需要の面では、例えば、2000年～2018年までにミネラルウォーターの国内生産量は4倍にもなっている¹⁾。また、地震後の断水に備え、今まで防災井戸の設置等が行われてきたが²⁾、最近は病院などの公共性の高い施設では、大地震後に多くの住民が長期間滞在することなどを考慮し、地下水利用システムを有する給水設備の強化に対する補助金事業も始まっている³⁾。この地下水利用システムは、近年広がっている水質改善濾過技術を用いたものである⁴⁾。今日、水道料金には従量制と呼ばれる方式を採用している自治体が多く、使用量が増えるほど(1m³あたりの)単価が増える。そのため、大口の水利用者は上記のシステムを自前で構築した方が、長期的には水使用量が安くなることがある。このように、今日、安全安心の社会、経済性、健康ブームといったキーワードの下で、地下水の需要が伸びている。

一方、2014年に制定された水循環基本法では、地下水は公共性の高いものと法律で定められた。従来、井戸所有者は気兼ねなく地下水を利用できていたが、今後は本法律により利用に制限がかかりうる。水循環基本法によって定められた水循環基本計画では、自治体を中心となって、流域水循環協議会を組織し、利害関係者と情報共有や協議を行い、地下水の利用と保全を推進するよう努めることとされている⁵⁾。特に流域が複数の自治体で構成される場合は、流域内の自治体が連携する必要があるが、これは簡単なことではない。

以上より、水循環基本法の制定によって、今後は流域内で工夫しながら、増大する地下水利用をマネジメントしていく必要が生じている。

2. 地下水マネジメントの将来ビジョン

前節では水循環基本計画について、自治体を中心となる地下水マネジメントについて述べた。この部分で、なぜ国ではなく自治体を中心なのか、という疑問を持つ方がおられるかもしれない。その理由は、地下水の性質や関連する社会

環境が多様性を持つため、国が地域の地下水利用を細部にわたり決定することが難しいためである。事実、飲料用水源の70%を地下水に依存しているドイツでは、国は管理指針を定めるものの、地域への適用は、各州に所属する専門家によっておこなわれている⁶⁾。

このような国外の体制を考えても分かる通り、水循環基本計画で自治体を中心となって地下水を管理するという方針があったとしても、自治体に専門的な判断をゆだねることは通常困難が伴う。つまり、この体制では地下水専門家の存在が必要不可欠なのである。しかし、我が国の地方自治体にはそのような人材はほとんどいないため、現実的に専門家として考えられるのは、大学および研究機関の関係者、そして大部分は地下水コンサルタントになると思われる(図1)。

3. 地下水の地図“水文環境図”

前置きが長くなったが、本日筆者が紹介するのは、産総研が出版している水文環境図という地下水の地図である。水文環境図は、リスト画面、マップ画面、そして説明書からなる。リスト画面を操作することにより、マップ画面にデータが表れる(図2)。これらは一般の方でも気軽に操作できるが、一方で説明書では専門用語を用いた解説がなされている。水文環境図は地下水の管理・保全を念頭に編集されているが、その説明書を一般向けにしない理由は、地下水に関する計画立案、判断、評価は、専門家のもとでなされることが必要と考えているためである。

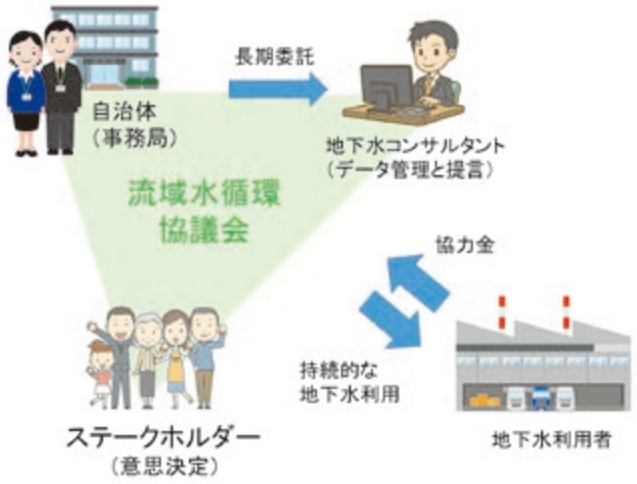


図1 筆者が考える水循環基本計画にかかる持続的な地下水の利用と保全に向けた体制



図2 水文環境図の構成

現在、7地域がウェブで公開中である。

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

地下水は目にみえないため、任意の地点で地下水が得られる深度や水質を知ることが難しい。しかし、これらには地域性があり、丹念にデータを調べていけば推定が可能である。ところが、地下水に関するデータは散在しており、データを探し出すことすら容易でないことがある。これらの調査結果を整理・編集し、必要に応じて現地調査を実施した結果をとりまとめたものが水文環境図である。水文環境図には、地域の地下水に関する基本的な情報が取りまとめられており、地下水利用を考える際の地図のような役割を果たす。

念のため述べるが、水文環境図を使えば、どこにどのような地下水があるかが分かるわけではない。ジャストポイントの地下水の情報は、やはり、その地点で調査を行う必要がある。しかし、水文環境図を使えば、程度の差こそあれ、その地点の地下水の情報を予測するための手がかりが得られるし、調査した結果を吟味する際にも役立つだろう。特に、地下水のデータは周辺のデータとの比較によって、その特徴を理解できることが多いため、周辺データを多数掲載している水文環境図が大いに役に立つ。

特に水循環基本法の関連については、水文環境図を関係者への説明資料としてご利用いただきたいと考えている。図3は、地下水位の分布図であるが、この図によって地下水の流れの方向、地下水の流れが活発な領域などが分かる。特に注目すべき点は、自治体を横切る地下水の流れである。例えば、上流側の自治体で地下水が汚染されると、下流側の自治体に何の非がなくても、いずれはその汚染された地下水が流れてきてしまう。また、上流側で地下水を大量に揚水すると、下流側の自治体では水位が下がり、井戸枯れなどの障害が生じうる。このような関係があるため、水循環基本計画では流域水循環協議会の推進が記されているのである。地下水が地域の共有の財産であり、適切な管理が必要であることは、従来、地下水利用者や自治体関係者にはほとんど意識されてこなかったこともあり、今後はその説明資料として、水文環境図を役立てていただきたいと考えている。



図3 地下水位の等高線

地下水は水位の高いところから低い方へ流れる。

また、水文環境図には過去のデータあるいは文献が収録されている。これは地下水の特性が時間変化するためである。持続的な地下水利用と保全を考える場合は、過去からの変化を確認し（モニタリング）、今後の変化を予測することも重要である。

4. 今後の水文環境図

水文環境図は、2019年5月にウェブ公開した後、6月に「大阪平野」を公開した。12月には「山形盆地（第2版）」が出版予定である。水文環境図の作成地域については、日本の人口の70%をカバーするように選定していくという基本方針があるが、一方、近年は外部研究機関や民間企業からの依頼も増えてきている。外部機関との連携を積極的に行うことにより、費用面や人的な負担を抑えることができるため、現在ではその時々々に臨機応変に対応するようにしている。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本ミネラルウォーター協会：統計資料“ミネラルウォーター類 国際、輸入の推移”，<https://minekyo.net/publics/index/5/> (2019年9月20日閲覧)。
- 2) 国土交通省：震災時地下水利用指針(案)，国土交通省，42p，2009。
- 3) 沖 大幹：災害時の水の確保から国土強靱化を考える，2019年5月16日付，病院新聞，2019。
- 4) 第10回救急・災害医療提供体制の在り方に関する検討会，資料1 重要インフラの緊急点検の結果および対策について，2018。
- 5) 内閣官房水循環政策本部：地下水マネジメントのススメ，2017。
- 6) 町田ほか：ドイツ・ヘッセン州の地下水管理，地下水学会誌，57(3)，307-315。2015。

もっと身近な地中熱の利活用のために ～地下水情報を活用した 地中熱ポテンシャル評価～

For Better Utilization of Ground Source Heat (GSH)
～ Evaluation of GSH Potential using Groundwater
Information ~

1. はじめに

地中熱利用システムは、太陽光や風力、地熱発電とは異なり、発電する技術ではなくエネルギーを賢く使う省エネ技術である。全体の消費電力量を削減することはもちろん、エネルギーの最大需要量を削減することにより、ピークカットや発電設備の最大出力低減にも貢献できるものとされている。この技術は、もともと世界オイルショックを契機として1980年代から欧米諸国で広まった技術である。

そのような中で、再生可能エネルギー研究センター・地中熱チームでは地域の地質・地下水環境を活用した地中熱の研究を実施しており、「地中熱ポテンシャル評価」と「地中熱システムの最適化技術開発」を主要な研究テーマとして掲げている。日本における地中熱システムの普及を考えた場合、その導入コストを下げ、システム効率の向上が重要である。そのためには地域毎の地中熱システムに関わる地下水情報をまとめ、そのポテンシャルを評価する必要がある。

2. 地中熱ポテンシャルとは

地中熱利用システムのエネルギー源となる地下地質について、日本と欧米諸国とは大きな違いがある。欧米諸国はその多くが安定地域に位置し、地質は主に岩盤からなる。その熱伝導率は、たとえば花崗岩の場合は $3.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 程度である。一方、我が国の地質構造は欧米諸国よりも複雑であり、特に都市の立地する平野・盆地では第四系が厚く堆積している。地質は未固結の砂・礫・泥などで構成されており、軟弱地盤を形成する一方で地下水の流れは活発である。第四系の熱伝導率は $1.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 程度で、岩盤に比べて4割から5割程度の値となっており、熱伝導率から見ると地中熱システムには不利な地質条件と言える。ところが、第四系の透水係数は高く、優良な帯水層を形成している場合が多い。地下水の流れが活発であれば、熱の移流効果により見かけの熱伝導率が高くなり、地中熱利用に適してくる。つまり、日本で地中熱システムの普及を考える場合、地域の地下水流動を考慮することにより、効率の良いシステム設計が可能になると思われる¹⁾。

地中熱チームでは、平成25年度から平成30年度の5年間で実施されたNEDO委託事業の中で、東北主要地域における地中熱ポテンシャル評価を実施し、そのマップを作成した²⁾。具体的には、既存の地質・地下水情報の収集、オールコアボーリング試料を用いた地質の熱物性分布の測定、地質調査孔を用いた熱応答試験の実施により、見かけ熱伝導

再生可能エネルギー研究センター：内田 洋平
Renewable Energy Research Center: Youhei Uchida
e-mail: uchida-y@aist.go.jp

率と地質分布、地下水流れの関係を明らかにし、各対象地域における地中熱ポテンシャルを評価した。以下に、マップの作成手順について述べる。

3. 地中熱ポテンシャルマップの作成手順

ポテンシャルマップについては、ボアホール型熱交換器の地中熱利用システムを想定し、各地域の標準的な冷暖房負荷を想定した際に必要となる地中熱交換器の長さをコンターマップ（長さ分布図）によって表現した。作成したマップの地域は、青森県津軽平野、秋田県秋田平野、宮城県仙台平野、福島県郡山盆地、山形県山形盆地の5地域である。

図1にポテンシャル評価の解析手法についてのフロー図を示す²⁾。ポテンシャルの評価には、3次元地下水流動・熱輸送モデルを利用した。同モデルを用いた各地域の計算には、既存の水文地質資料を活用しているほか、独自に地質調査及び熱応答試験を行い、計算結果と実測結果を比較することで、モデルに用いるパラメータを調整し精度を高めている。

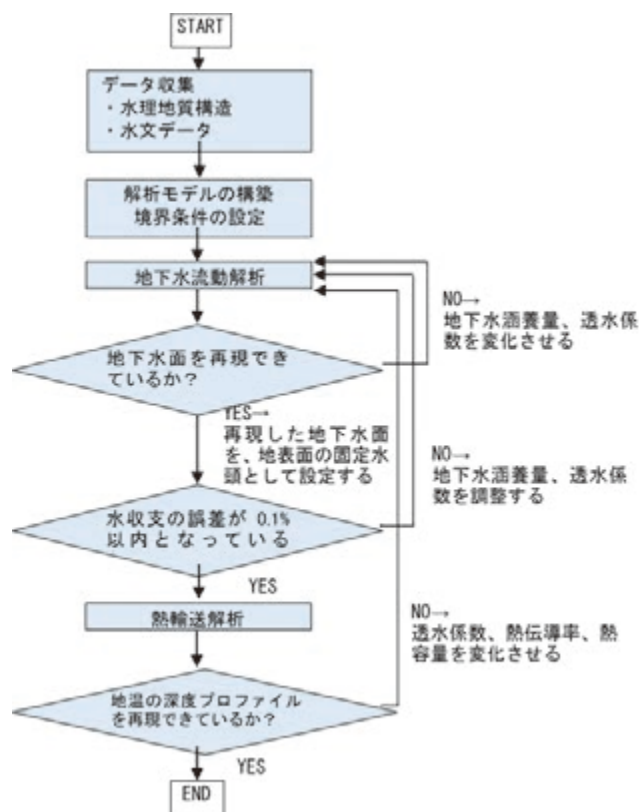


図1 解析手順のフロー図

3次元地下水流動・熱輸送モデルでは、解析コードとしてFEFLOW (DHI製, ver.7.0以上)³⁾を使用した。

解析手順としては、まず水理地質構造、水文データをもとに解析モデルの構築と境界条件の設定を行い、地下水流動解析を行う。この際、現地で測定された水位データと比較して、地下水流動を再現する。熱輸送解析では、現地で測定された地中温度の深度プロファイルと比較して、地下の温度分布を再現する。このように実測結果を用いてモデルを検証することにより、その精度の向上に努めている。解析領域についても、地中熱ポテンシャル評価の対象地域は人間活動の活発である市街地であるが、市街地へ流れ込む地下水や熱量を推定することは不可能である。そこで、分水嶺で区切られる地下水盆単位でモデルの領域を決定した。

4. 地中熱ポテンシャル評価

本稿では、我が国で普及の進みつつあるクローズドループシステムのポテンシャル評価手法について解説する。

地中熱ポテンシャル評価では、戸建住宅における地中熱利用システムの導入を想定し、各対象地域の気象条件に応じた冷暖房負荷を推定し、その熱負荷量に対応できる熱交換器の必要長さを求めた。この「対象地域の冷暖房負荷を賅うことができる必要熱交換器の長さ」を、ここでは「クローズドループの地中熱ポテンシャル」と表現する。つまり、(必要)熱交換器の長さが短いほど地中熱ポテンシャルが高いことを意味する。

地中熱利用システムの運転開始条件については暖房運転では外気温度が14℃を下回った時刻、冷房運転では26℃を上回った時刻にそれぞれ運転を開始するとした。また、室内設定温度を暖房運転時に22℃、冷房運転時に26℃とした。そして、使用する地中熱ヒートポンプの成績係数(COP)を暖房時は3.5、冷房時は5.5と想定し、冷暖房時の必要熱交換量を求めた。

次に、単一熱交換器モデルを用いて、前述した必要熱交換量を与え、3年間の稼働シミュレーションを実施し、熱交換器の入口・出口温度の平均が指定温度を下回らない最短の熱交換井の長さ(熱交換器必要長)を求めた。図2に山形盆地における地中熱ポテンシャル(熱交換器必要長の分布図)を示す。本マップより、同じ地域においても熱交換器必要長が大きく異なることが明らかとなった。

5. おわりに

地域ごとの地中熱の利用可能性(地中熱ポテンシャル)を評価することは、計画的かつ高効率のシステムの設計や開発に大いに貢献する。そのためにも、評価手法の確立と共に必要な地質や地下水情報の整備・データベース化が急がれるべきである。これらのデータベースは、地中熱ポテンシャルの評価のみならず、地域の水文環境と調和した地中熱システムの開発にも活用できると考えられ、将来に渡って環境に負荷を与えない、持続可能な地中熱システムの確立に資するものである。

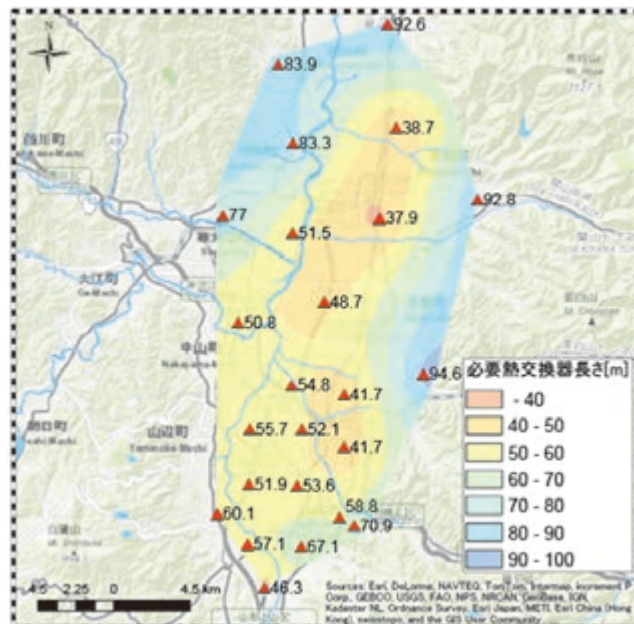


図2 山形盆地における地中熱ポテンシャル

参考文献

- 1) 内田洋平：地中熱利用のための広域における地下水流動と熱輸送解析. 太陽エネルギー 40, 25-34(2014).
- 2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合機構：平成26年度～平成30年度成果報告書 再生可能エネルギー熱利用技術研究開発/地中熱利用トータルシステムの高効率化技術開発及び規格化、および再生可能エネルギー熱利用のポテンシャル評価技術の開発/地下水を活用した高効率地中熱利用システムの開発とその普及を目的としたポテンシャルマップの高度化, 20190000000346 (2019) .
- 3) Diersch, H.J.G.: FEFLOW – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media, Springer, Berlin, Germany, 996p (2014).

研究グループ紹介

地下水研究グループの紹介

Introduction of the Groundwater Research Group

研究グループ長：町田 功
 Leader, Groundwater Research Group:
 Isao Machida
 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・利用等に関する研究を実施している。主な業務の一つに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展開している。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、地下水ポテンシャルマップにかかる共同作業など、地下水資源の多角的な利活用を推進している。

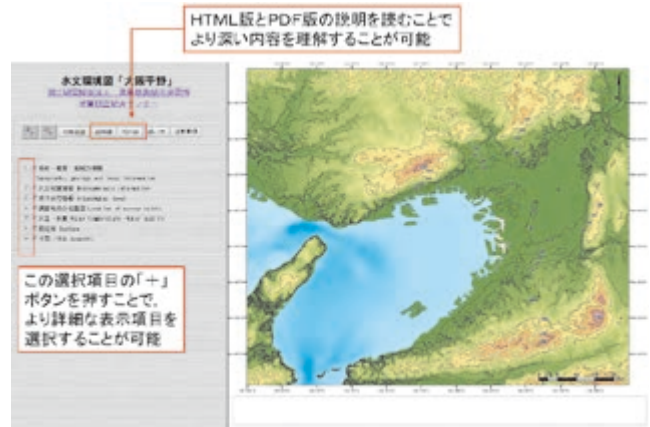
2. 各研究項目の内容

2.1. 水文環境図の作成に関する研究

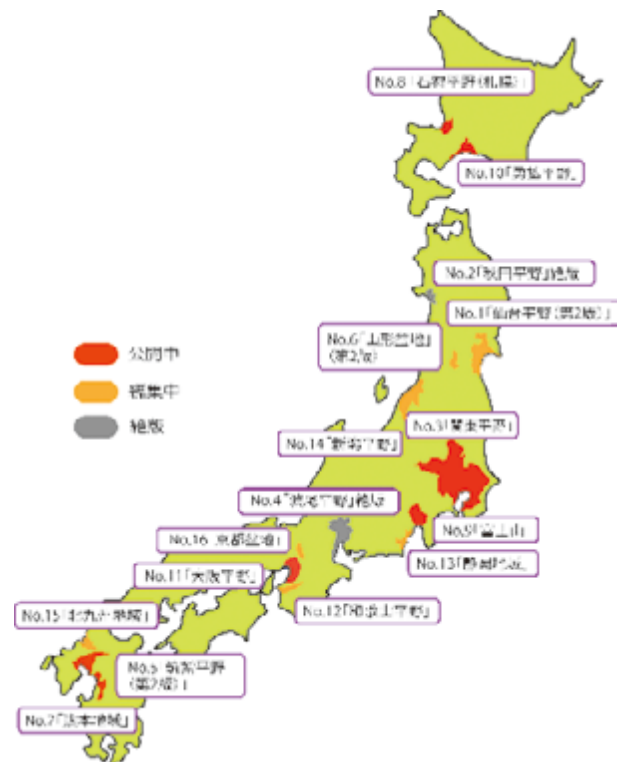
地下水研究グループでは経済産業省が進める知的基盤情報整備の一環として、水文環境図を作成している。水文環境図は既存の全国統一情報に加え、地域ごとにユーザーが必要とするローカル情報を分かりやすく盛り込んだ、地下水の地図である。水文環境図は独自に定めた作成指針^{1,2)}に基づき作成されており、地形、地質、地下水位、水質、地下温度など地下水の流動や起源などに関する最新の水文地質情報を見ることができる。今年度は、5月から6月にかけて「勇払平野」、「筑紫平野 (第2版)」、「大阪平野」を相次いで出版し、またこれまで有償で公開していたデータを含む7地域についてweb上での無償公開を開始した。また大阪平野については、地中熱チームと連携し、大阪平野の地中熱ポテンシャルマップも同時公開し、それぞれについてプレスリリースも実施している。平成30年度末までに新たに「山形盆地 (第2版)」を新たに出版予定である。

2.2. 高レベル廃棄物の地層処分にに関する研究

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



水文環境図の例 (No.10「大阪平野」).
 左が操作パネル、右が地図である。

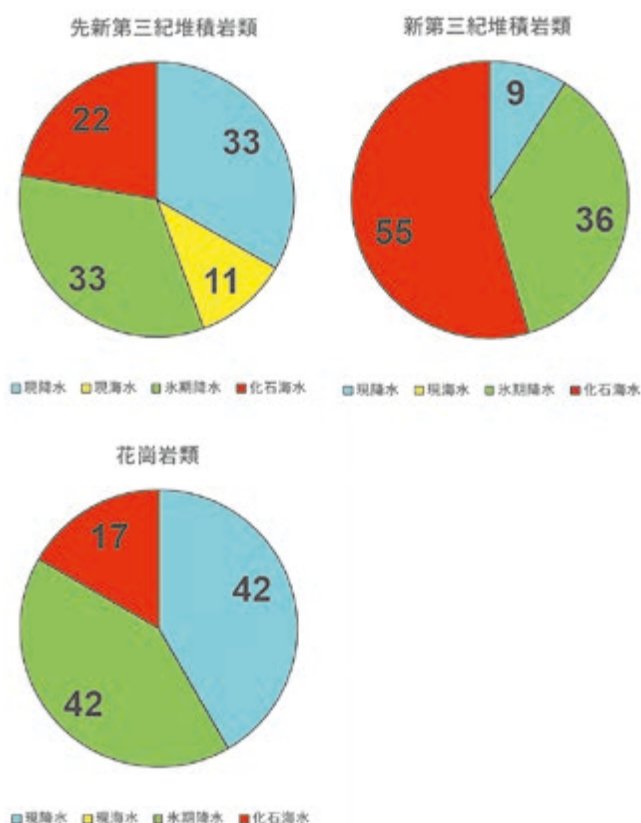


水文環境図の編集地域と編集予定地域。
 赤色が出版済み、橙色が編集中、灰色が絶版

ているが、当該事業では地下水シナリオを考慮した上で、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。

地下水研究グループは15年程前から九十九里海岸や茨城県東海村などで沿岸域の地下水研究を重ねてきた。そして、平成19年度からは北海道天塩郡幌延にて当研究部門・

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あることを発見した。平成25年度からは静岡県駿河湾周辺においても沿岸域における地下水プロジェクトを実施している。この調査でも陸海接合部に注目して海底についても調査を実施し、地下水流動系の流出域の実態を解明した。実際の作業としては波打ちぎわにて多深度ボーリングを実施し、合計11深度にて良質の地下水試料を採取し、沿岸部帯水層の地下水年代の鉛直分布の解明に成功した。さらに、船上の調査により、海底に湧き出す地下水（海底湧出地下水）を捉え、陸域の地下水が流動し海域に流出していることを示した。これは陸から海までの深層地下水の流動経路を一貫して扱った国内外初の成果である。その他にも昨年度には電力中央研究所と協力し、これまでに実施した全国の深部地下水の採水調査の結果に基づき、地質と地下水年代と水質の関係を明らかにした。これについても大局的に広範囲の地下水の分布状況を解明した国内初の成果である。



全国深部地下水調査の解析結果。
地質に関わらず、サンプル採取地点の50%以上で氷期（2万年前）よりも古い地下水が存在していることが明らかとなった。

2.3. 海外での地下水研究

地下水研究グループは、旧地質調査所時代から海外の調査研究を積極的に行ってきた。近年はJICAからの要請にてモンゴル国ゴビ砂漠における深層地下水流動解明のための現地調査、九州大学との共同でインドネシア・カリマンタ

島の露天掘り石炭鉱山における酸性鉱山廃水に関する現地調査などを実施した。また、CCOP加盟国への技術移転などを実施し、アジア地域における適切な水資源の管理・利用に貢献している。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地下水資源の知的基盤整備が求められている。



CCOP 総会での発表風景

3. グループの研究体制

- 町田 功（研究グループ長）
- 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）
- 松本 親樹（研究員）
- 内田 洋平（兼務）
- 富樫 聡（兼務）
- シュレスト・ガウラブ（兼務）
- 石原 武志（兼務）
- アリフウィディアトモジヨ（兼務）
- 丸井 敦尚（招へい研究員）
- 樽沢 春菜（テクニカルスタッフ）
- 松浦 綾子（テクニカルスタッフ）
- 宮崎 桂子（テクニカルスタッフ）
- 菅谷 裕行（テクニカルスタッフ）
- 木方 建造（産学官制度来所者）

参考文献

- 1) 町田 功・井川怜欧・小野昌彦・丸井敦尚（2015）地下水の地図「水文環境図」. 地下水技術, 11-12.
- 2) 町田 功・伊藤成輝・内田洋平・井川怜欧・丸井敦尚・田口雄作（2010）水文環境図の編集指針－ユーザーが求める情報を提供するために－. 地質調査研究報告, 61, 75-83.

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：相馬宣和
Leader, Mineral Resources Research Group:
Nobukazu Soma
e-mail: n.soma@aist.go.jp

1. グループの研究目的

各種鉱物資源の安定供給は国民生活の維持に不可欠かつナショナルセキュリティに関わる重要課題である。また、特定の重要元素や化合物レベルで、近年の需要側の技術革新を睨んだ上で戦略的確保に資することは、今後のイノベーションを支える上で重要な観点になりつつある。

本グループでは、社会の動きに応じた各種鉱物資源のクリティカルリティを考慮しながら、資源の早期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等を行っている。内外の研究機関や行政、民間企業とも連携し、それぞれの役割分担に応じて適切に“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、グループ総体の活動目的である。

2. メンバー構成と主な担当

研究グループ長 相馬宣和（〔兼務〕RG 総括）

主任研究員 / 研究員

大野哲二（基盤情報の整備・分析・発信）

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）

星野美保子（鉱石評価、鉱床成因研究）

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）

高木哲一（〔兼務〕非金属鉱物資源調査）

産総研特別研究員 PD

向井広樹（電子顕微鏡）

Tomy Alvin Rivai（鉱床成因研究）

テクニカルスタッフ

Calabia Buenaventurada（選鉱技術）

生田目千鶴（分析評価技術）

徳本明子（分析評価技術）

杉山貴子（基盤情報の収集・整理）

藤井和美（分析評価技術）

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 5 名、技術研修員 7 名。

3. 研究活動の概要

各専門性を生かし、鉱徴地の調査から素材製造に係る鉱石評価に至るまで、鉱物資源を巡る幅広いフェーズに対応する活動を行っている。

経産省委託事業「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）」を活動の柱とするが、他の事業や共同研究等も積極的に行っている。日本への直接 / 間接の橋渡しが想定し易い東南アジアを重点的な場と捉えているが、技術開発や将来的な潜在力の掘起こしなどの観点から、国内を対象にする活動にも注力している。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) 東南アジア地域における鉱物資源開発可能性調査

ミャンマーは錫、タングステン、銅、亜鉛 - 鉛、アンチモン、金 - 銀、宝石などの鉱物資源が豊富であり、2010年11月の民政移管以降、同国の天然資源は各国から注目されている。しかし、十分に探鉱されていない地域や、詳細が不明な鉱床も多いことから、ミャンマー全土の情報収集を含めた鉱物資源の開発可能性調査を行っている。本年度からは、現在日本企業が概査権を有しているサガイン管区の 2 か所の鉱区に立ち入り、主に銅や金鉱床の発見を目標にした調査を開始した。

また、東南アジアで操業中の鉱山や選鉱プラントには、精鉱の更なる高品位化や、副産物としての有用鉱物回収の余地が残されており、グループの知識や技術を活用して鉱石や精鉱の特徴を詳細に調べることで、選鉱フローの改善等

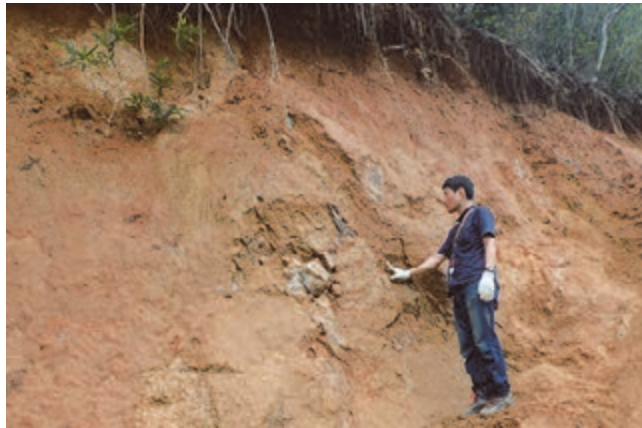


ミャンマー共和国 Ainggy 鉱区でのサンプリング作業の様子

に繋がる可能性がある。錫鉱山の尾鉱からの有用重鉱物の回収を目標とする研究に着手し、タイの錫鉱床地域において予察調査を行った。

(2) 国内の希土類資源の評価

日本の風化花崗岩にも、多少の希土類元素が吸着している可能性があることが知られている。日本国内における希土類資源の賦存量評価の端緒として、本年度から現地調査を開始した。中国地方の花崗岩地域におけるイオン吸着型重希土類資源に注目し、風化花崗岩類の存在状況の現地調査、試料採取、全岩化学分析を行った。



中国地方の風化花崗岩露出の例

(3) 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、鉱床から剝された碎屑物は下流へと流されて地化学異常として認識されるため、川砂を対象にした地化学探査は最も有効な方法の一つであると言える。効率良くコストを抑えて探査するために川砂の全岩化学分析を行うのが従来の方法であるが、本研究では、川砂の特定の鉱物に着目した局所分析により、鉱物中の化学組成や元素比を求めることに挑戦する。局所分析には主にLA-ICP-MS（後述）を用いるため現状では高コストとなるが、従来法では見つからなかった地化学異常を発見し、鉱床探査に応用することが本研究の目的である。2019年度は鹿児島県の北薩・南薩地域の金鉱床を流域に持つ河川での試料採取を行い、試

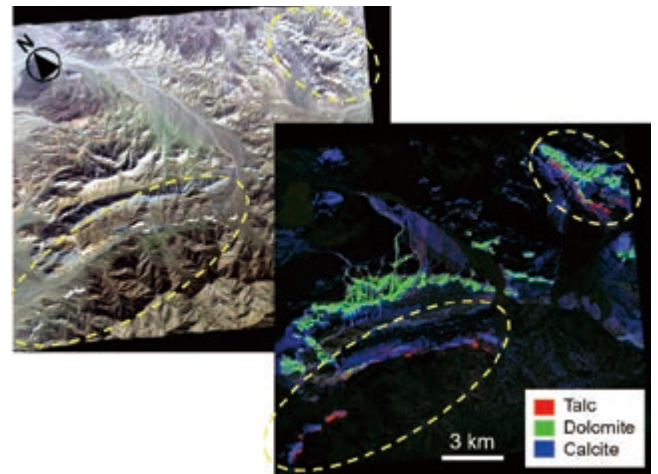


鹿児島県北薩地域金鉱床周辺での川砂試料採取の様子

料の分析を進めている。

(4) 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。人工衛星や航空機で取得されたリモートセンシングデータを用いて鉱床形成に関係の深い鉱物を識別する手法を開発する。また、地形特徴を利用した地質解析手法の開発なども行っている。このほか、小型分光器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を行っている。



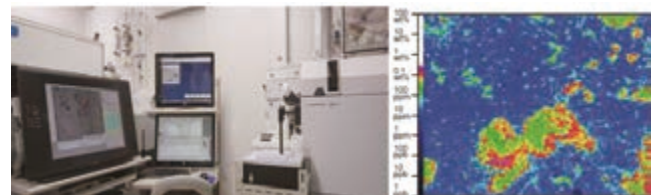
航空機搭載ハイパースペクトルセンサによるタルク抽出結果

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。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、工業製品評価のための分析も行っている。



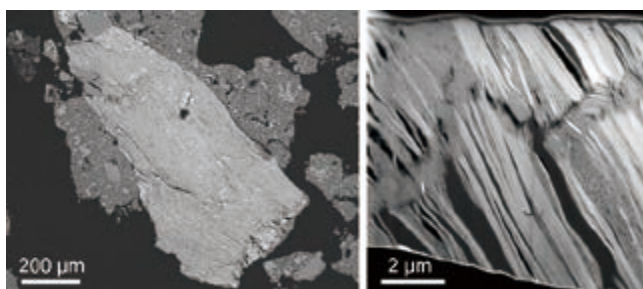
レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計(LA-ICP-MS)の様子(左、撮影 安友康博氏)と希土類元素鉱石中のルテチウム分布(右)

(2) 安定同位体比分析技術の高度化

新しい鉱床成因研究手法を開発すべく、安定同位体比分析技術の高度化とレアメタル鉱床への応用に取り組んでいる。特に、今まではほとんど用いられていないリチウムやマグネシウムなどの金属元素の安定同位体比に着目し、分析環境の整備を行ってきた。現在、固体試料からの簡便な同位体前処理手法の開発などを通じて(Araoka and Yoshimura, 2019)、新たな同位体比分析法の開発にも取り組んでいる。また、重要度の高いリチウムやレアアースといったレアメタルの鉱床を対象として開発した手法を応用し、鉱床成因に関する最先端の研究をカナダ・ブリティッシュコロンビア州地質調査所などの研究機関と共同で行っている。鉱床成因研究だけでなく、地球表層での物質循環など幅広い分野にも共同研究を多数展開し、成果を挙げている(Isaji et al., 2019, Maeda et al., 2019)。

(3) イオン吸着型希土類鉱床についての微小領域での分析・評価

イオン吸着型希土類鉱床はイオン交換によって比較的容易に希土類を回収することができ、しかも特に価値の高い重希土類の主要供給源であることなどから重要な鉱床の型である。イオン吸着型鉱床は母岩である花崗岩が風化を受け希土類が濃集することによって形成されると考えられている。しかし、一般に比較的濃度が低く(数百 ppm 程度)、風化花崗岩の鉱物組成の複雑さから、実際にどのような鉱物に希土類が含まれているのかは解明されていない。そこで、走査型電子顕微鏡(SEM)又は透過型電子顕微鏡(TEM)に加え、LA-ICP-MSといった微量元素の検出が可能となる装置を組み合わせることで、希土類含有鉱物の特定を試みている。この手法は、鉱石中で有用元素が微小領域かつ極微量しか存在しない場合においても適用することが可能であることから、多種多様な鉱石についての分析・評価が可能となっている。



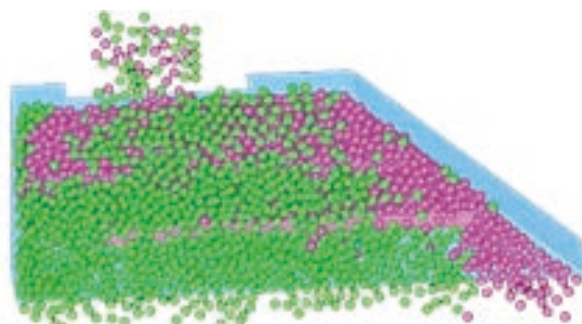
希土類元素を含む雲母鉱物のSEM像(左)およびTEM像(右)

(4) 選鉱技術の高度化

選鉱技術の高度化を目的として、錫、タングステン、銅、希土類元素などの金属資源や珪砂などの非金属資源を対象とした選鉱技術の開発や基礎研究に取り組んでいる。とくに、選鉱の前処理である粉碎や粒度調整は、精鉱の回収率や品位など選鉱プロセス全体の効率を決定づける重要なプロセス

と位置づけられる。対象原鉱の粒度毎の化学組成や単体分離度に応じた、粉碎や選鉱の最適条件の解明に取り組んでいる。

また、選鉱プロセスの最適化を目的とした粉体シミュレーション技術の開発にも取り組んでいる。シミュレーションは、実験では観察することが難しい粉碎機や選別機内部の粒子挙動を可視化できる利点があるため、装置の最適な運転条件の検討に有用なツールである。民間企業との共同研究や受託研究において、付着力や磁力などの物理モデルの新規開発や、高効率な比重選別機の装置設計への粉体シミュレーションの応用などを進めている。



テーブル選別機内の粒子分離挙動解析結果
(桃色：重比重粒子，緑色：軽比重粒子)

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、500万分の1 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。



九州地方の代表的な金鉱床(地質図は1:20万シームレス地質図(GSJ)、鉱床位置は日本金山誌(資源・素材学会, 1989)による)

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。

日本の鉱物資源データベースの整備にも取り組んでおり、本年度は日本の金鉱床についての情報整備を進めている。日本の金鉱床開発は、昭和20年代の金山整備令によって特に中小鉱区については開発途上のまま中断した形になっているものもあり、将来的な再開発の可能性も有り得ると考えられる。近年の外資による国内金鉱床開発への興味もそれを裏付けている。

(2) 鉱物資源に関する地質図幅

産総研では地下情報把握のための基図として地質図幅を整備しているが、当グループでは必要に応じて同図における鉱物資源情報の記載を担当している。本年度は20万分の1「輪島（第二版）」の記載に協力し、出版に至った。また、5万分の1「豊田」、20万分の1「野辺地」「宮津」などを調査・編集中である。

4. 主な研究成果

[誌上発表]

- Araoka, D. and Yoshimura, T., (2019) Rapid purification of alkali and alkaline-earth elements for isotope analysis ($\delta^7\text{Li}$, $\delta^{26}\text{Mg}$, $87\text{Sr}/86\text{Sr}$, and $\delta^{88}\text{Sr}$) of rock samples using borate fusion followed by ion chromatography with a fraction collector system. *Analytical Sciences*, 35, 751-757.
- Ejima, T., Kon, Y., Kawano, S., Araoka, D. (2018). Zircon U-Pb dating of gabbro and diorite from the Bato pluton, northeast Japan. *Island Arc*, 27, e12222.
- Hoshino, M., Watanabe, Y. and Kon, Y. (2017) Implication of apatite and anhydrite for formation of an Iron-Oxide-apatite (IOA) rare earth element prospect, Benjamin River, Canada. *Resource Geology*, 67, 361-383.
- Isaji, Y., Yoshimura, T., Araoka, D., Kuroda, J., Oga-
wa, N. O., Kawahata, H. and Ohkouchi, N. (2019) Magnesium isotope fractionation during synthesis of chlorophyll a and bacteriochlorophyll a of benthic phototrophs in hypersaline environments. *ACS Earth and Space Chemistry*, 3, 1073-1079.
- Kato, T., Tsunazawa, Y., Liu, W., Tokoro, C. (2019) Structural Change Analysis of Cerianite in Weathered Residual Rare Earth Ore by Mechanochemical Reduction Using X-ray Absorption Fine Structure, *Minerals*, 9(5), 267.
- Maeda, A., Yoshimura, T., Araoka, D., Suzuki, A.,

Tamenori, Y., Fujita, K., Toyofuku, T., Ohkouchi, N. and Kawahata, H. (2019) Magnesium isotopic composition of tests of large benthic foraminifers: implications for biomineralization. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, doi: 10.1029/2019GC008314

- 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*, in press.
- Mukai H., Tamura K., Kikuchi R., Takahashi Y., Yaita T., and Kogure T. (2018) Cesium desorption behavior of weathered biotite in Fukushima considering the actual radioactive contamination level of soil, *Journal of environmental radioactivity*, 190-191, 81-88.
- 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.
- 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*.
- Yamashita, S., Mukai, H., Tomioka, N., Kagi, H., Suzuki, Y. (2019) Iron-rich Smectite Formation in Subseafloor Basaltic Lava in Aged Oceanic Crust, *Scientific Reports*, 9, 11306.

[口頭発表]

- 荒岡大輔 (2019) リチウム資源の概要 ―現状と将来―. 資源地質学会第69回年会講演会, 2019.6.
- 向井広樹, 昆慶明, 実松健造, 高橋嘉夫, 伊藤元雄 (2019) 中国イオン吸着型鉱床における希土類元素についての微視的研究, 地球惑星連合大会, 2019.5.29.

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 (令和元年度)

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, 燃料資源地質

後藤 秀作 地球熱学

高橋 幸士 石炭地質学, 有機地球化学

朝比奈健太 有機化学, 有機地球化学

テクニカルスタッフ

鈴木祐一郎

松林 修

中根由美子

仁道 純子

中村 祐貴

産学官制度来所者

徳橋 秀一

高野 修

2.2. 主な研究資金 (平成29~令和元年度)

・運営費交付金

「燃料資源地質の研究」

「国内における新たな炭化水素ガス資源の評価」

「新生代石炭からの石油炭化水素排出温度の解明」

「ナフタレン組成を用いた新たな石油熟成指標の開発」

「腐植有機物の分子構造解明に向けた予察的研究」

「石炭の物理性質に着目した低コスト・簡易な石炭熟成

度評価法の開発」

「有機地化学標準物質ライブラリー拠点の基盤整備」

「戦略予算：国内石油産業を復興する Oil to Gas (O2G) 革命」

・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

「国内堆積盆の炭化水素ポテンシャル評価手法に関する研究」

「砂岩貯留岩の堆積分布様式に関する研究」

・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」

「史上最大大量絶滅期の無酸素海洋の要因としての火山活動と高一次生産の評価」(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

(公財) 新井科学技術振興財団 平成29年度研究助成「原油中のナフタレン組成を指標に用いた地下深部の石油根源岩評価法の確立」

(公財) 新井科学技術振興財団 平成30年度研究助成「新生代石炭の石油生成タイミング評価法の確立」

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

・繰り返す隆起によって堆積物中のガスハイドレートが分解する過程を数値シミュレーションで明らかにし, 国際誌で公表した [図 1]. (後藤)

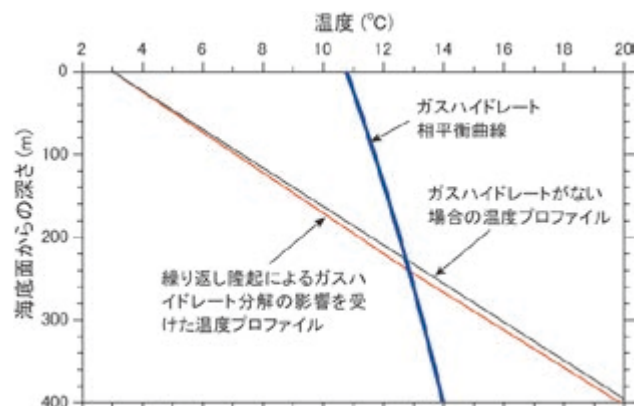


図 1 隆起によるガスハイドレートの吸熱分解が地層温度に与える影響

- ・上越沖海域の海底堆積物の熱物性（熱伝導率，熱容量および熱拡散率）を計測し，その特性を明らかにし，国際誌で公表した。（後藤）
- ・メタンハイドレート安定領域下限深度を推定することを目的に，上越沖海域で計測した地殻熱流量に基づき，温度構造モデルの構築を進めている。（後藤）
- ・表層型メタンハイドレートの賦存状況を把握することを目的に，オホーツク海網走沖海域，日本海の最上トラフおよび隠岐トラフ海域の表層型メタンハイドレート存在域において海洋電磁探査を実施した。（後藤）[図 2]
- ・オホーツク海網走沖海域の表層型メタンハイドレート存在域において，自律型無人潜水機を使用した詳細海底地形・表層堆積層探査を実施した。（佐藤，後藤）



図 2 海洋電磁探査（送信機）の投入

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

- ・CCOPを通じて韓国 KIGAM と協力しながら女川層等のシェール評価を行い，アジアへの国際協力に努めている [図 3]。（鈴木・高橋・朝比奈）



図 3 CCOP-KIGAM 非在来型燃料資源会議（タイ，バンコク市）

3.3. 在来型資源の鉱床成因等に関する地質学的研究

- ・東北日本及び北陸地方の油・ガス構造の形成に関わるテクトニクスについて，地質調査を行い，総説 1 編，論説 1 編を公表した [図 4]。（中嶋）

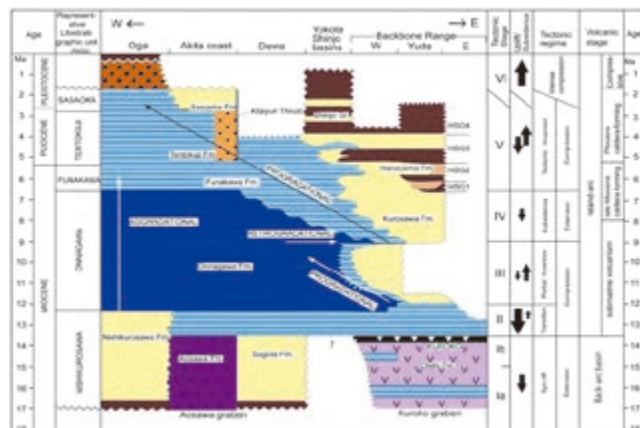


図 4 秋田油田堆積盆のテクトニクス

- ・深海システムの貯留岩形態・根源岩ポテンシャルについての論文により日本堆積学会2017年論文賞および石油技術協会賞（論説賞）を受賞した [図 5]。学会のセッションコンベンナーを勤め，海外研究者の招聘を行った（中嶋）。



図 5 石油技術協会賞（論説賞）の受賞式

- ・炭化水素ガスの安定同位体組成を指標とした新生代石炭からの天然ガス排出タイミング推定法を提案し，招待講演を 1 件，国際学術誌において論文 1 編を公表した [図 6]。（高橋）
- ・新生代石炭からの石油排出温度や新生代地質体の最大埋没深度を推定するため，水素分に富む新生代石炭中のピトリナイト抑圧現象に対応した反応速度論の構築と，反射率の温度換算法に関する実験的研究を進めた。また，成果の応用先の候補である南房総地域において，野外地質調査を行い，堆積岩中の木片のピトリナイト反射率を測定した。（高橋）
- ・熟成に伴う石炭の化学構造変化に着目し，新生代石炭の石油生成能力やオイル - ガス指向型の評価手法に関する基礎研究を進めた。（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）

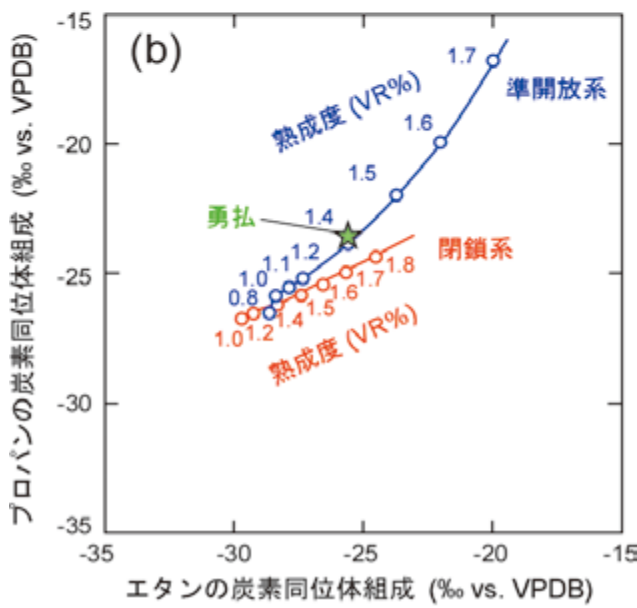
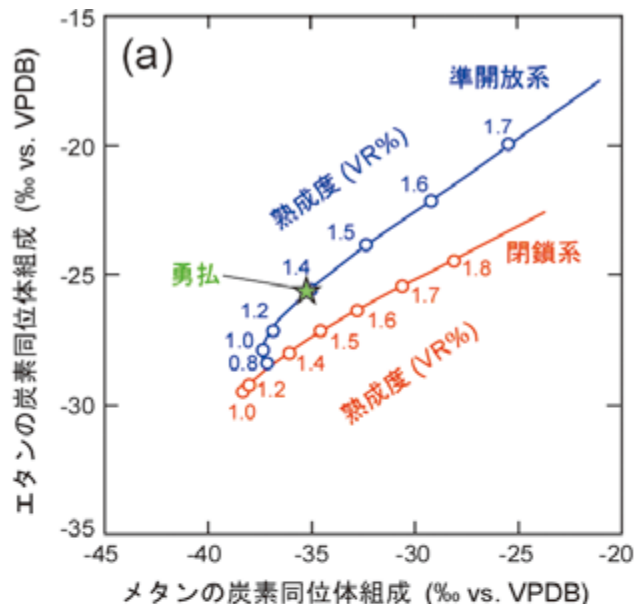


図6 新生代石炭起源炭化水素ガスの炭素同位体比と石炭の熟成度 (VR %) の関係

- ・ナフタレン組成を用いた石油の起源有機物と根源岩の岩相評価法を開発し、微生物分解により劣化したオイルの根源岩評価に有用な方法として、国際学術誌1編で公表した [図7]. (朝比奈)
- ・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を実験的に明らかにし、根源岩の特徴とナフタレン組成との関係を明らかにした。(朝比奈)
- ・石炭化に伴う空隙構造など物理的性質の変化に着目し、低コスト・簡易な石炭熟成度評価法の開発を進めた。(高橋)
- ・オイルや堆積岩中の芳香族化合物を用いた起源有機物の推定法を検討するために、裸子植物に由来する生体有機分子の加熱分解実験を実施した。裸子植物特有の熱分解生成物と分解メカニズムについて、国際学会で公表した。(朝比奈)

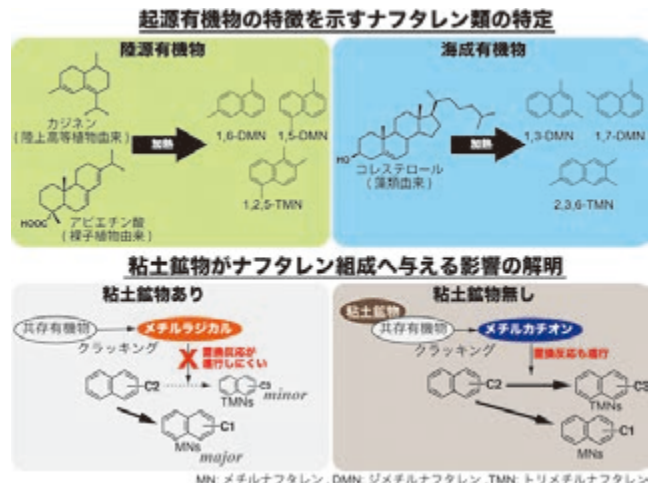


図7 起源物質や根源岩の岩相の特徴を示すナフタレン類

- ・従来のバイオマーカー分析は、分離精製が必須であり、測定時間も長いという問題があった。そこでプロトン NMR を用いたオイルの迅速な特徴把握として、NMR petroleum profiling 法を確立し、国際学会及び国内学会で講演を行った。(朝比奈)
- ・堆積岩試料の加熱分解生成物の評価に NMR petroleum profiling 法を適用し、熟成に伴い排出される有機物の特徴把握を試みた。(朝比奈)
- ・原油試料は、光や温度、湿度による分解や揮発性成分損失により、有機物組成が変化するため、原油成分情報を記録し、長期的に比較検討できる普遍的「デジタル標本技術」の開発が必要である。そこで、高精度かつ堅牢なデジタル標本技術として、NMR スペクトルに着目し、デジタル標本として適切な NMR スペクトルの取得と標準化プロトコルの確立を進め、研究成果を国内学会で公表した。(朝比奈)

3.4. 共同研究

- ・国内堆積盆の調査および巡検を実施した。(中嶋・高橋・朝比奈) そのうち、炭田に分布する古第三紀夾炭層の炭化水素ポテンシャルや熟成度分布の成果をまとめ、国内外の学会で講演を行った。
- ・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

- ・科研費研究において、火山噴火タイプの推定や同位体平衡温度計を利用した地殻熱流量整備に向けた基礎研究として、水蒸気の安定同位体組成を簡便に測定可能な新手法を開発し、国際学術誌1編で公表した。(高橋)
- ・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ている。(後藤)
- ・海底堆積物中の有機炭素と花粉の輸送からみた、重力流による深海への輸送過程について国際シンポジウムで発

表した。(中嶋)

- ・東京大学との科研費研究(分担)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8]。(朝比奈)

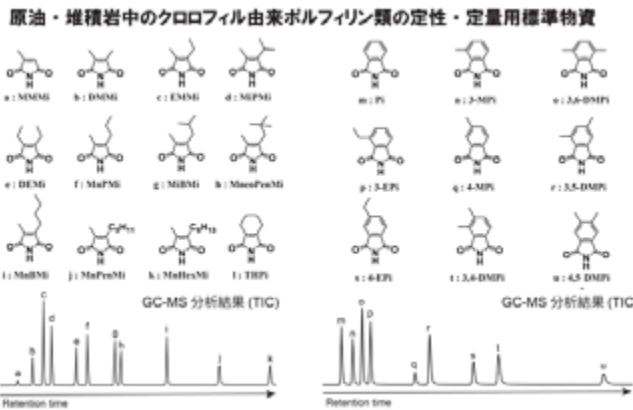


図8 化石クロロフィルの標準物質

- ・工業排水処理技術の開発を目的として,電気化学的手法を用いた処理技術の開発およびその基礎的実験を実施した。(朝比奈)
- ・腐植物質の分子構造解明に向けた予察的研究として,官能基の検出と精密質量(分子量)の測定を試みた。その過程で,腐植物質のモデル化合物のアミノ基への蛍光ラベリングを試みた結果,首尾良く反応が進行し,固体蛍光分光光度計により検出することができた。今後は,国内外学会で販売されている腐植物質の標準物質を用いた蛍光ラベリングを試みる。さらに,イオン源にDART(Direct Analysis in Real Time)を用いて,腐植物質の精密質量分析を行った。(朝比奈)

4. アウトリーチ活動

- ・産総研一般公開への出展「黒い石がいっぱい!どれが石炭?」(高橋,朝比奈,佐藤,中嶋)
- ・地質情報展(北海道,山口)への協力(高橋,朝比奈)
- ・出前実験教室等(朝比奈)

5. 主要な研究成果(2016年以降)

[受賞及び対象論文]

- ・日本堆積学会2017年論文賞 中嶋 健

Nakajima T. and Kneller B. (2013) Quantitative analysis of the geometry of submarine external levees. *Sedimentology*, 60, 877-910.

- ・2018年石油技術協会賞(論説賞) 中嶋 健

中嶋 健(2016) 深海チャネル-自然堤防-海底扇状地システムの貯留岩形態・根源岩ポテンシャルに関する最近の知見. 石油技術協会誌, 81, 33-45

[誌上発表]

Goto, S., Matsubayashi, O., Nagakubo, S. (2016) Simulation of gas hydrate dissociation caused by repeated tectonic uplift events, *J. Geophys. Res.*, 121, 3200-3219.

中嶋 健(2016) 深海チャネル-自然堤防-海底扇状地システムの貯留岩形態・根源岩ポテンシャルに関する最近の知見. 石油技術協会誌, 81, 33-45

Takahashi, K. and Suzuki, N. (2017) Semi-open and closed system pyrolysis of Paleogene coal for evaluating the timing of hydrocarbon gas expulsion. *Int. Jour. Coal Geol.*, 178, 100-109.

Goto, S., Morita, S., Tanahashi, M. et al. (2017) Physical and thermal properties of mud-dominant sediment from the Joetsu Basin in the eastern margin of the Japan Sea, *Mar. Geophys. Res.*, 38, 393-407.

Asahina, K., and Suzuki, N. (2018) Methylated naphthalenes as indicators for evaluating the source and source rock lithology of degraded oils, *Organic Geochemistry*, 124, 46-62.

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. 地質雑, 124, 693-722.

Takahashi, K.U., Tsunogai, U., Nakagawa, F. and Sukigara, C. (2019) Stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of water vapor in volcanic plumes sampled in glass bottles using cavity ring-down spectroscopy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 384, 232-240.

中嶋 健・岸本清行(2019) 日本海南東部の海底地形アナグリフ. 地質雑, 125, IV.

中嶋 健ほか(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. 地質雑, 125, 483-516.

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
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。当研究部門の戦略課題である燃料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（平成30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、竹内美緒、眞弓大介、持丸華子、
坂田 将、風呂田郷史、松下 慎

テクニカルスタッフ

天野千尋、石川理美、氏家知美、小林みゆき、
篠塚由美、竹之内美佐、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」
「腐植有機物の分子構造解明に向けた予察的研究」
「比抵抗異方性に着目した低コスト・簡易な石炭熟成度評価法の開発」
「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」

委託研究費・研究助成金

「油層の地球化学的・微生物学的特性に合わせたテラーメード型枯渇油田再生技術の開発」(科研費)
「生物的石炭分解メタン生成ポテンシャルとメカニズムに着目した炭層特性評価技術の開発」(科研費)
「資源創成型 CCS 技術の開発に向けた国際共同研究」(科研費)
「枯渇油田再生化技術開発を志向した原油分解メタン生成機構の解明と新規微生物の獲得」(科研費)
「堆積物環境に優占する未培養アーキアの分離培養と生

理生態機能の解明」(科研費)

「初期地球解読に向けた陸上蛇紋岩温泉の炭素循環研究」(科研費)

「ガスクロマトグラフィーによる低濃度試料中の揮発性脂肪酸分析法の確立」(科研費)

「メタン生成触媒を用いた革新的バイオガス生産システムの創製」(科研費)

「深部地圏における根源有機物からの生物的メタン生成機構の解明」(科研費)

「悠久の時間を生き抜く謎を解くー地下微生物が作る新規物質の同定と測定法の開発ー」(科研費)

「機能特異分子で描く新しいメタン生成観」(科研費)

「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」(科研費)

共同研究費

「油層微生物の原油分解メタン生成メカニズムと現場適用技術に関する研究」(国際石油開発帝石㈱)

「国内堆積盆の炭化水素ポテンシャル評価手法に関する研究」

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、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、国際石油開発帝石㈱、JX石油開発㈱、北海道科学技術総合振興センター、放射線医学総合研究所等と連携し、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. 第4期（平成27年度－30年度）の研究成果

4.1. メタンハイドレート成因解明のための生物地球化学的研究

・経済産業省の委託により実施しているMH21の研究の一部として、MH胚胎海底堆積物における生物的メタン生成の研究を進めている。東部南海トラフ地盤調査及び海洋産出試験事前掘削において採取されたコア堆積物試料が

ら、16S rRNA 及び mcrA 遺伝子の塩基配列に基づいて微生物の群集構造を解析した結果、炭素循環に関する微生物の分布がMHの有無、ならびに、深度と関係していることが示唆された。特にMH飽和率の高い堆積物から嫌氣的メタン酸化アーキアに近縁の塩基配列が特異的に検出され、同堆積物の培養でメタン酸化活性が認められた。メタン酸化活性は塩分濃度が高い(海水の塩分濃度の)条件と低い条件の両方で検出されたため、過去にMHが分解し間隙水の塩分濃度が低下したイベントが微生物の分布に影響を与えている可能性が明らかになった(図1)。

・前項の東部南海トラフコア堆積物試料から、メタン生成アーキアの集積及び純粋培養を行った。様々な深度のコア堆積物から水素利用性・酢酸利用性・メチル化合物利用性のメタン生成アーキアが分離された。16S rRNA 遺伝子に基づく分子系統解析では、*Methanobacteriales*, *Methanomicrobiales*, *Methanosarcinales*に帰属し、多くは、これまでにハイドレート胚胎海底堆積物から分離されたメタン生成アーキアとは異なる種であった。また、いくつかの純粋培養菌株の遺伝子配列は、コア堆積物試料から直接解析したアーキア遺伝子と一致し、アーキア群集の優占種であった。温度の違いによるメタン生成活性を評価したところ、分離された深度に相当する温度においてメタン生成が認められたことから、原位置のメタン生成において重要な役割を担っていることが示唆された。

析によって5種類の中核的微生物(*Firmicutes*門細菌, *Ca. Atribacteria*門細菌, *Ca. Cloacimonetes*門細菌, 水素資化性 *Methanothermobacter* 属古細菌, 酢酸資化性 *Methanosaeta* 属古細菌)を特定した。深部地下油層環境ではこれらの細菌とメタン生成古細菌の syntrophic network を介した原油分解メタン生成反応が進行していることが示唆された。

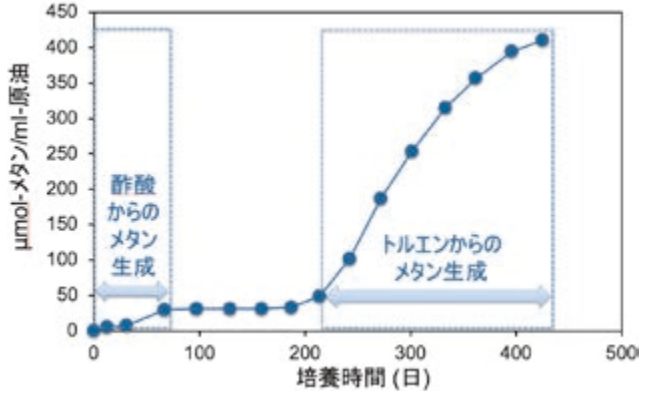


図2 山形県の油田の油層環境を模擬する培養実験におけるメタン生成。

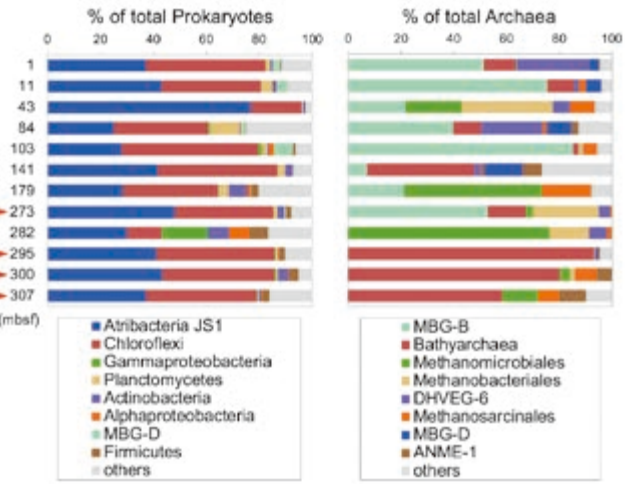


図1 深度別の微生物系統群の相対分布。矢印はMH飽和率の高いコア堆積物を示す。

4.3. 在来型・非在来型天然ガスの生物地球化学的研究

・ガス田地域の地下微生物によるメタン生成ポテンシャルを評価する目的で、千葉県の水溶性ガス田で採取されたコア堆積物を用いて¹⁴Cでラベル化した基質を添加してトレーサー実験を行い、微生物によるメタン生成速度を評価した。その結果、活発なメタン生成活性を検出し炭酸還元反応が主要なメタン生成経路であることが分かった。

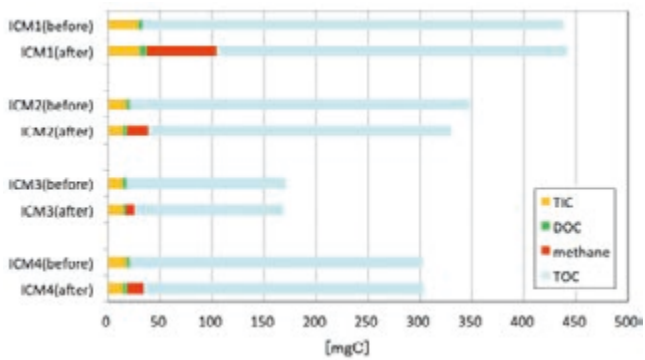
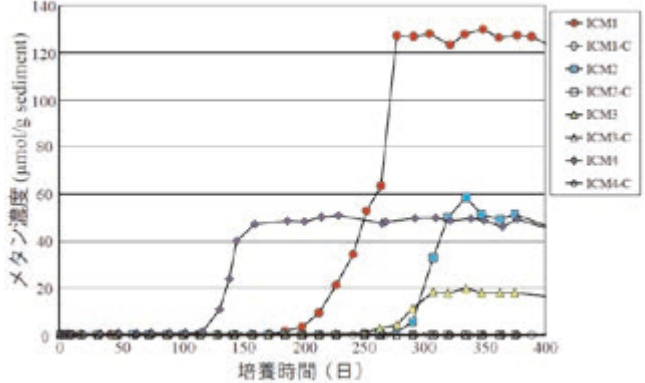


図3 水溶性ガス田のコア堆積物と地層水の長期培養におけるメタン生成(上). 培養前後の形態別炭素量(下). 堆積物中の全有機炭素が微生物によりメタンに変換された。

4.2. 未回収燃料資源からの天然ガス創成技術の開発

・深部地下油層微生物の原油分解メタン生成ポテンシャルを活用して枯渇油田の残留原油を天然ガスに変換・回収する新たな資源技術の開発を目的として、山形県の油田から採取した生産水を接種源とし原油・無機塩培地とともに油層を模擬する温度・圧力条件(55℃・5MPa)で培養する室内実験を行った。その結果、炭化水素(トルエン)をメタンに変換する微生物プロセスの再現に成功するとともに(図2)、培養後の水中微生物のメタゲノム解

また、コア堆積物と地層水を混ぜてスラリーにして、嫌気条件を保ち原位置に近い温度で長期間培養すると、活発なメタン生成が起こった。最大で堆積物中の全有機炭素量の17%に相当するメタン量を生成し、地下微生物による高いメタン生成ポテンシャルを示した(図3)。

4.4. 地下圏メタン生成菌の新たな代謝経路の解明と石炭利用メタン生成ポテンシャルの評価

・深部地下環境から分離した *Methermiccoccus* 属のメタン生成菌が、これまでメタン生成菌の基質として利用が知られていなかった30種類以上の多様なメトキシ芳香族化合物を直接利用してメタンを生成することを発見した。メトキシ芳香族化合物を利用できるメタン生成菌は約160種のうちの1種みであった。また、安定同位体トレーサー法でその代謝経路を解析した結果、これまで知られている3種のメタン生成経路とは全く異なる第4のメタン生成経路であることを明らかにした。その経路の詳細を決定するためには更なる研究が必要であるが、今のところ④脱メチル反応の後、①二酸化炭素還元と②酢酸分解を両方経由する可能性が見出された(図4)。さらに、石炭からのメタン生成ポテンシャルを評価した結果、本菌は単独で石炭から直接メタンを生成する事が明らかになり、深部未回収石炭資源の天然ガス化回収技術の可能性が示された。以上の研究成果に関して、平成29年度産総研論文賞を受賞、「石炭を食べて天然ガスを作る孝行者の菌がいた」講談社ブルーバックスWEB配信した(図5)。

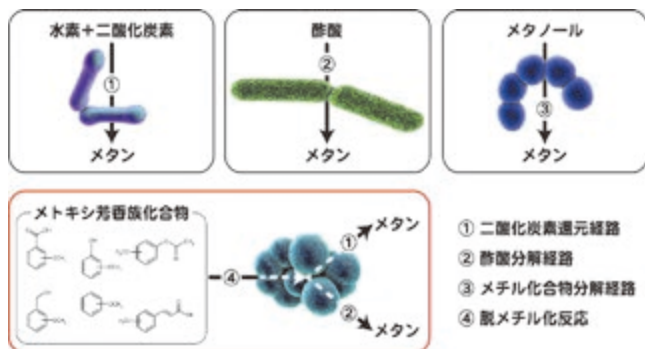


図4 既知のメタン生成経路(上)と今回発見したメトキシ芳香族化合物からのメタン生成経路(下)。



図5 平成29年度産総研論文賞受賞と講談社ブルーバックスWEB配信。

4.5. 基礎的研究

・メタン酸化菌が濃集する黒海の微生物マット中の F430 定量分析と同位体分析を行った。その結果、世界で初めて天然環境中の補酵素 F430の炭素同位体比の測定に成功した。未培養である嫌氣的メタン酸化アーキア由来の補酵素 F430の炭素同位体比は、基質であるメタンの同位体比を反映し、補酵素 F430の安定同位体比が2つの潜在的な起源生物であるメタン生成アーキアと嫌氣的メタン酸化アーキアを識別する指標となることを明らかにした。また、補酵素 F430の同位体分析のために新しく開発した夾雑物除去法を応用し、下北半島沖の海底下2,000 mの石炭層において、補酵素 F430を検出する事に成功し、科学史上最も深部の海底堆積物中から生きたメタン生成アーキアのシグナルを得ることに成功した(図6)。

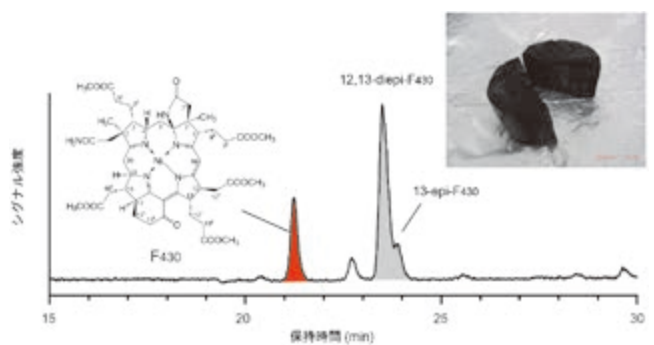


図6 IODPの第337次航海で採取された下北半島沖海底下約2,000 mの石炭層中から検出された補酵素 F430のクロマトグラム (Inagaki et al., 2015, Scienceを改変)。

5. 第4期(平成27年度~平成30年度)の研究成果(主なもの、下線部がグループ員)

【紙上発表(論文)】

- Inagaki F., Hinrichs K.-U., Kaneko M. et al. (2015) Exploring deep microbial life in coal-bearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor. *Science* 349, 420-424.
- Jiang N., Yoshioka H., Yamamoto K., Soga K. (2016) Ureolytic activities of a urease-producing bacterium and purified urease enzyme in the anoxic condition: Implication for seafloor sand production control by microbially induced carbonate precipitation (MICP), *Ecological Engineering* 90, 96-104.
- Katayama T., Yoshioka H., Takahashi H., Amo M., Fujii T., Sakata S. (2016) Changes in microbial community structures associated with gas hydrates in seafloor sediments from the Nankai Trough. *FEMS Microbiology Ecology* 92, fiw093.
- 金子雅紀 (2016) 海底下メタンサイクルにおける有機地球化学的研究. 日本地球化学会奨励賞.
- Kaneko M., Takano Y., Ogawa N., Sato Y., Yoshida N., Ohkouchi N. (2016) Estimation of methanogen-

esis by quantification of coenzyme F430 in marine sediments. *Geochemical Journal* 50, 453-460.

Katayama T., Yoshioka H., Yamanaka T., Mio Takeuchi, Muramoto Y., Usami J., Ikeda H. and Sakata S. Microbial community structure in deep natural gas-bearing aquifers subjected to sulfate-containing fluid injection. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 127, 45-51, 2019.

Komatsu T., Takashima R., Shigeta Y., Maekawa T., Tran H.D., Cong T.D., Sakata S., Dinh H.D., Takahashi O. (2016) Carbon isotopic excursions and detailed ammonoid and conodont biostratigraphies around Smithian–Spathian boundary in the Bac Thuy Formation, Vietnam. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 454, 65-74.

Mayumi D., Mochimaru H., Tamaki H., Yamamoto K., Yoshioka H., Suzuki Y., Kamagata Y., Sakata S. (2016) Methane production from coal by a single methanogen. *Science* 354, 222-225.

Mayumi D., Mochimaru H., Yoshioka H., Sakata S. et al. (2016) Novel mode of methanogenesis by a methanogen isolated from a deep subsurface oil reservoir. Poster Award, 6th International Symposium on Applied Microbiology and Molecular Biology in Oils Systems.

Mochimaru H., Katayama T. Sakata S. et al. (2016) *Methanomicrobium antiquum* sp. nov., a hydrogenotrophic methanogen isolated from deep sedimentary aquifers in a natural gas field. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 66, 4873-4877.

Sano Y., Sakata S. et al. (2017) Origin of methane-rich natural gas at the West Pacific convergent plate boundary. *Scientific Reports* 67, Article number 15646.

Takano Y, Chikaraishi Y., Imachi H., Miyairi Y., Ogawa N.O., Kaneko M., Yokoyama Y., Krüger M., Ohkouchi N. (2018) Insight into anaerobic methanotrophy from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -amino acids and $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -ANME cells in seafloor microbial ecology. *Scientific reports* 8:14070, DOI:10.1038/s41598-018-31004-5.

Tamazawa S., Mayumi D., Mochimaru H., Sakata S. et al. (2017) *Petrothermobacter organivorans* gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic, strictly anaerobic bacterium of the phylum *Deferribacteres* isolated from a deep subsurface oil reservoir. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 67, 3982-3986.



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：鈴木正哉
Leader, Resource Geochemistry Research Group:
Masaya Suzuki
e-mail: masaya-suzuki@aist.go.jp

1. グループの研究体制・研究方針

地圏化学研究グループは、石油・天然ガス・温泉水等の地殻流体、粘土等の非金属鉱物資源・材料を研究対象とし、地球化学的・地質学的・鉱物学的手法により、資源の成因解明・開発、環境保全、製品化、標準化等に資する研究を進めていくことをグループの目標としている。また、これらの研究課題に関して、研究機関としての価値ある研究成果を上げるだけでなく、産総研外部要請への対応、精度の高い情報の発信、研究成果の普及等を推進することを基本理念としている。

2. グループ員及び研究項目等

1) グループ員（令和元年10月1日現在）

鈴木正哉	鉱物学, 材料化学
金子信行	地球化学, 石油鉱床学
猪狩俊一郎	有機地球化学
柳澤教雄	鉱物学, 地球化学
佐々木宗建	資源開発
森本和也	地球化学, 鉱物学
三好陽子	粘土鉱物学, 無機地球化学
西片美羽	地球化学
月村勝宏	産学官制度来所者
古澤みどり	テクニカルスタッフ
万福和子	テクニカルスタッフ
佐々木尚子	テクニカルスタッフ

2) 主な研究資金（平成30年度, 令和元年度）

- ・ 運営費交付金
「地圏化学の研究」
「ガスバリアフィルム用ナノクレイ規格」
「GR プラットフォームの発展と社会実装」
「未利用希薄物質の高付加価値化を実現する分離・変換技術」
「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」
- ・ 委託研究
「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」(NEDO 再委託)
「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」
「乾燥に不向きな湿度の高い沖縄を変える。ハスクレイを

利用した低コスト型乾燥機の開発」

- ・ 科研費
「ナノトンネル構造を有する鉄鉱物を用いたヒ素・フッ素複合汚染土壌の不溶化」
- ・ 共同研究
「ベントナイトのメチレンブルー吸着量測定方法」
「吸着層工法に関係する吸着材の性能評価試験の標準化」
「蓄熱材ハスクレイの性能実証に関する研究」
「天草陶石の新たな利用方法の開発」

3) 主な研究設備

- ・ ガスハイドレート合成実験装置
- ・ ガスクロマトグラフ
- ・ イオンクロマトグラフ
- ・ ESR（電子スピン共鳴）装置
- ・ 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. 平成30年度～令和元年度前期の研究進捗状況

1) 燃料資源に関わる地化学的成因研究, 資源評価

世界の天然ガス埋蔵量の大部分を占める熱分解ガスと、国産の重要な資源である水溶性天然ガスなどの炭化水素の起源・成因に関する研究を行い、国内外の燃料資源情報の把握と、微量炭化水素の分析技術の高度化を進めた。

微生物起源とされる構造性ガスやメタンハイドレート、混合ガスの成因について、熱分解ガスの移動過程で間隙水中に溶存する微生物起源メタンとの交換反応によるメタン炭素同位体比の低下と、圧力降下に伴う遊離ガス/コンデンセート、遊離ガス/間隙水溶存ガス間での組成分別によるウェットネスの減少で説明可能であることを示した。天然ガスを胚胎する沖縄本島南部地下の基盤岩は、ジルコンのU-Pb年代パターンから名護層であることを確認した。高温鹹水からのヨウ素生産の阻害要因について、検討を行った。

産総研第七事業所で2015年に行われた水道管改修工事による水道水の汚染を調べるため、水流離脱法で得られた軽質非メタン炭化水素濃度を解析し、結果が地質調査研究報告に掲載された。また、都市化が進むつくば市の非メタン炭化水素（光化学オキシダントの原料物質）濃度の経年変化を調べるため、今年度も産総研内大気の測定を行った。また、バブリングによる水中の軽質非メタン炭化水素測定法

の開発を行い、水中の非メタン炭化水素濃度の絶対値の決定を試みた。

2) ベントナイトのメチレンブルー吸着量試験法の検討

ベントナイト中の粘土（スメクタイト）含有量の指標となるメチレンブルー吸着量試験法には、スポット法と比色法の2つの試験法があるが、メチレンブルー吸着量において、スポット法と比色法の整合性について検討を行った。またメチレンブルー吸着量試験における、分散溶液・分散方法・メチレンブルー溶液添加量・スポット作成器具・ろ紙による影響をまとめ、スポット法と比色法の2つの試験法を含めた JIS 原案作成を行い、平成31年3月に JIS 規格（JIS Z2451として制定された。なおこの JIS 規格は経済産業省のウェブサイトにて特に重要な JIS として取り上げられた。

3) 機能性鉱物材料に関わる化学的・鉱物学的・材料学的研究

自然由来の重金属等による汚染土壌の不溶化対策技術に資する研究開発を行うことを目的として、ナノトンネル構造を有する陰イオン交換性鉄鉱物であるアカガネアイトを用いたヒ素やフッ素の陰イオン吸着挙動についての評価を実施した。

アカガネアイトの合成条件のさらなる最適化に向けた検討と、アカガネアイトに対するヒ酸イオンとフッ化物イオンの吸着特性および吸着形態の評価を行った。アカガネアイトの合成条件の検討では、原料である塩化第二鉄の水溶液からより高効率でアカガネアイトを生成させることを目指して、沈殿を生じるさせる pH を調整した系で検討を行い、固体の収量を増加させることができた。また、得られた沈殿物については鉱物学的キャラクタリゼーションによりアカガネアイトの生成を確認した。アカガネアイトに対するヒ酸イオン・フッ化物イオンの吸着特性の評価では、地球化学モデリングソフトを用いた化学平衡計算により液相中の陰イオンの化学種を考察し、次に、それぞれの陰イオンの吸着試験から得られた吸着等温線の型から、アカガネアイトに対する高い親和性が解釈できた。ヒ酸イオンの吸着形態の検討では、粉末 X 線回折測定や赤外分光分析、またゼータ電位測定を行い、アカガネアイトに対するヒ酸イオンの特異的な吸着形態の形成が示唆された。

また非晶質アルミニウムケイ酸塩によるホウ素回収についての検討を行った。ケイ酸ナトリウム水溶液とホウ酸を添加した硫酸アルミニウム水溶液を混合させることにより、非晶質アルミニウムケイ酸塩が生成する際にホウ素を共沈させるホウ素回収法について調べた結果、ホウ素吸着時の pH の影響に関しては、Si/Al モル比によらず、pH が 5 から 9 へと上昇するに伴い、吸着量は増加すること、また共沈法におけるホウ素の回収において、硫酸アルミニウム水溶液とケイ酸水溶液を混合した時点で、ホウ素の回収は終

了しており、短時間の反応でホウ素回収が可能であることが明らかとなった。

NEDO再委託事業では、2019年7月に共同研究先である高砂熱学工業(株)、石原産業(株)、東京電力エナジーパートナー(株)、森松工業(株)、日野自動車(株)、羽村市とともにプレスリリースを行った。産総研が開発した「ハスクレイ」をベースに、さらに高性能化した蓄熱材の量産製造技術を確認するとともに、蓄熱材ハスクレイを組み込んだ、従来型より2倍以上の蓄熱を可能とする蓄熱システムを共同で開発した。2019年度は、オフライン熱輸送型と定置型での通年実証を行い、オフライン熱輸送型では、日野自動車(株)羽村工場のコージェネレーションシステム（CGS）設備で発生した廃熱を蓄熱材に蓄熱し、工場内の産業空調設備で利用することに加えて、約2 km 離れた羽村市スイミングセンターへ大型トレーラーで輸送し、温水プールの熱源として利用することに取り組んだ。

4. 平成30年度後半～令和元年度前半の研究成果と受賞（主なもの、下線部がグループ員）

【受賞】

平成29年度日本鉱物科学会応用鉱物科学賞
森本和也「機能性層状複水酸化物の合成とその機能性材料への応用」

【JIS 制定】

JIS Z2451「ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法」(平成31年3月20日制定)

【プレスリリース等】

鈴木正哉, 森本和也, 100℃ 以下の廃熱を利用可能な蓄熱システムの本格実証試験を開始 (2019.7.25)

三好陽子, 鈴木正哉, 高木哲一, 森本和也, 粘土資源「ベントナイト」の性能評価法の JIS 規格制定に貢献 (2019.8.13)

【誌上発表】

Y. Seo, M. Suzuki, T. Takagi, K. Dowaki (2019), Life-Cycle Assessment of Adsorbents for Biohydrogen Production, Resources, 8, 52.



物理探査研究グループの紹介

Introduction of the Exploration Geophysics Research Group

研究グループ長：横田俊之

Leader, Exploration Geophysics Research Group:

Toshiyuki Yokota

e-mail: yokota-t@aist.go.jp

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

1. グループの研究目的と課題

本研究グループでは、地熱・地中熱、鉱物資源、メタンハイドレート等の地下資源分野、放射性廃棄物地層処分、CO₂地中貯留等の地下環境利用分野、そして土壌汚染等の地下環境保全分野、さらに加えて地盤液化、地滑り、断層、火山等の防災分野やインフラ維持管理の土木分野等、広範囲な適用対象に対して、地質・地盤構造調査や岩盤評価、モニタリングに不可欠な物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査法の技術開発と適用研究を行っている。2019年度においては、以下の7項目を中心にしている。

- 地下資源評価として、
 - 1) 海底熱水鉱床やメタンハイドレート等の探査を目指した海底電気・電磁探査法や、陸域における強制分極法による鉱物資源探査、坑井利用探査技術等の基礎研究、現場調査を行う。
 - 2) 地中熱利用における事前評価手法の研究、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処理・解析に関する基礎的技術開発を行う。
- また、地下環境の利用分野として、
 - 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や海底電磁探査の取りまとめを行う。
 - 4) 二酸化炭素地中貯留プロジェクトでは、CO₂モニタリングを前提とした重力探査に関する基礎的研究を行う。
- さらに地下環境保全分野として、
 - 5) 土壌汚染に関連して、油分および鉱滓土壌汚染評価への各種物理探査適用結果の取りまとめ、および汚染現場での各種物理探査法適用実験を行う。
- 加えて、防災・土木分野への展開も視野に入れた基礎研究・技術開発としては、
 - 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する基礎的研究を行う。
 - 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の新規物理探査技術開発や民間企業への技術移転を目指した研究連携活動を行う。

2. 各研究項目の内容

2.1. 磁気共鳴物理探査装置の開発

老朽化したインフラの内部にたまった水の原位置非破壊検出や、打設したコンクリートの養生過程（水和反応によ

る水の消費過程）のモニタリングへの適用を目指して、水の定量能力に優れたプロトン磁気共鳴物理探査装置の開発を行っている。

昨年度のGREEN Report 2018では、探査深度（センサーコイルから感度領域の中心部分までの距離）が約3 mmのシステムを紹介した。しかしながら、その探査深度は現場のニーズを必ずしも満たしておらず、探査深度の増大が望まれた。そこで、希土類磁気回路を若干大型化し、コイルもそれに適合するように再設計・製作を行った。その結果、探査深度を約9 mmに向上することができた（図1）。

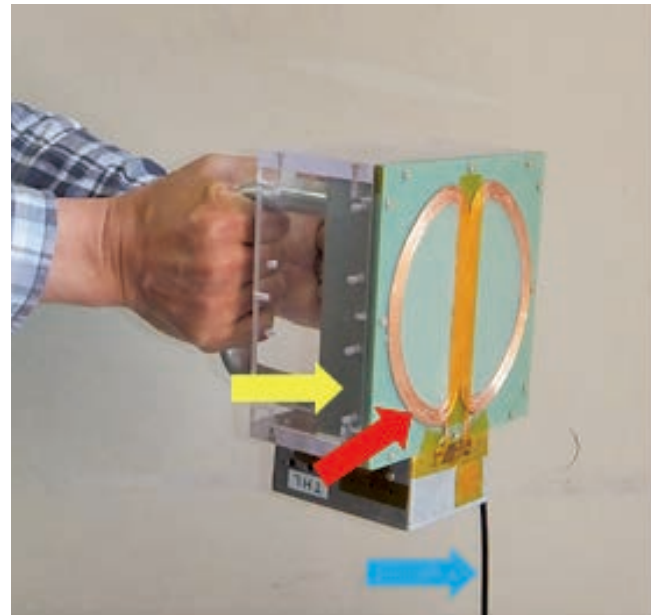


図1 開発中の磁気共鳴物理探査装置のセンサーユニット。永久磁石からなる磁気回路（黄色矢印）と、2つの半円形の高周波コイル（赤矢印）から構成されている。水色矢印は、BNCケーブル（装置本体に接続）。

今後更なる性能向上を目指すとともに、装置の性能・実用性の確認などを実施するため、以下の項目を実施する予定である。

- (1) コイルの再設計および制作を実施する。現有モデルの磁気回路の構造上、コイルを最適化することで探査深度を約12 mmまで改善できることが期待される。
- (2) 土木現場を提供いただける外部機関と連携して、当該装置の実地テストを実施する。その結果を分析し、装置の性能・実用性の確認を行う。

2.2. 工業用水用埋設管周辺地盤探査に対する高周波交流電気探査の適用実験

当該研究室で開発を行ってきた、高周波交流電気探査装置は、地表面に打設する通常のスチレン棒電極や舗装路面を傷つけずに調査が可能なローラー電極など、様々な種類の電極を用いた電気探査計測が可能である。これまではその優位性を利用して、アスファルト舗装が施された路面上から地下の埋設管周囲の比抵抗構造を調査することにより、埋設管腐食リスクを調査する技術の開発を行ってきた。

これまでは上水道管周囲の腐食性土壌調査を実施してきたが、今回はその技術を工業用水配管にも適用可能かを確かめる目的で、静岡県企業局の協力を得て、静岡県富士市内において高周波交流電気探査を実施した。

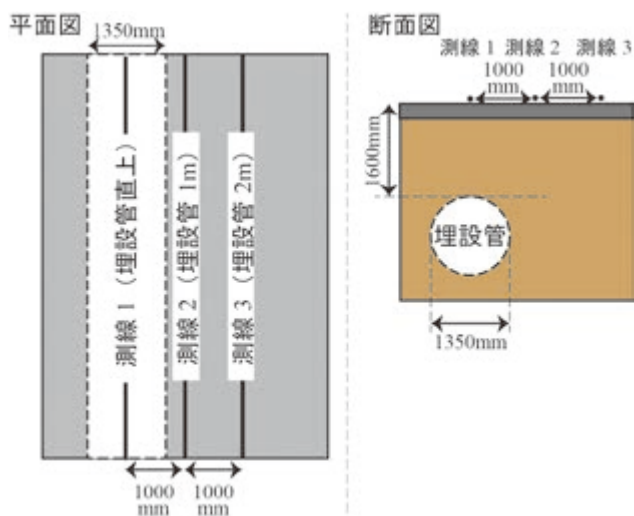


図2 埋設水道管と測線の位置関係の概念図。平面図(左)と断面図(右)。測線1は埋設水道管の直上、測線2および3は埋設水道管からの距離1 mおよび2 mにそれぞれ設定した。

上水道管は通常管径100~300 mmのものが路面下約1.5 mに埋設されている。それに比較して、工業用水管は管径500 mm以上の太い管が比較的浅い場所に埋設されているケースが多く、そのような場合の適用性についての確認を主眼とした実験を実施した。

埋設管腐食リスク調査を実施するにあたっては、街中での調査が必須であるため、調査速度を優先し、送信ダイポールの位置を固定し、受信ダイポールのみを移動させることにより送受信電極間隔を変更する、変則的なダイポール・ダイポール法電極配置により1次元探査を実施することを基本とした。今回は適用可能性の把握を目的としたため、埋設管の埋設位置・埋設深度、埋設管周囲の地盤の比抵抗値などの情報が多い位置での実験を実施し、埋設管が電気探査結果に与える影響の見積もりなども同時に実施した。

径1,350 mmの水道管が埋設深度の頂部が約1.6 mに埋設されている地点において、測線3本を埋設水道管と平行に、管からの距離を0 m(測線1), 1 m(測線2), 2 m(測線3)と変更しながら設定した(図2)。それぞれの測線で

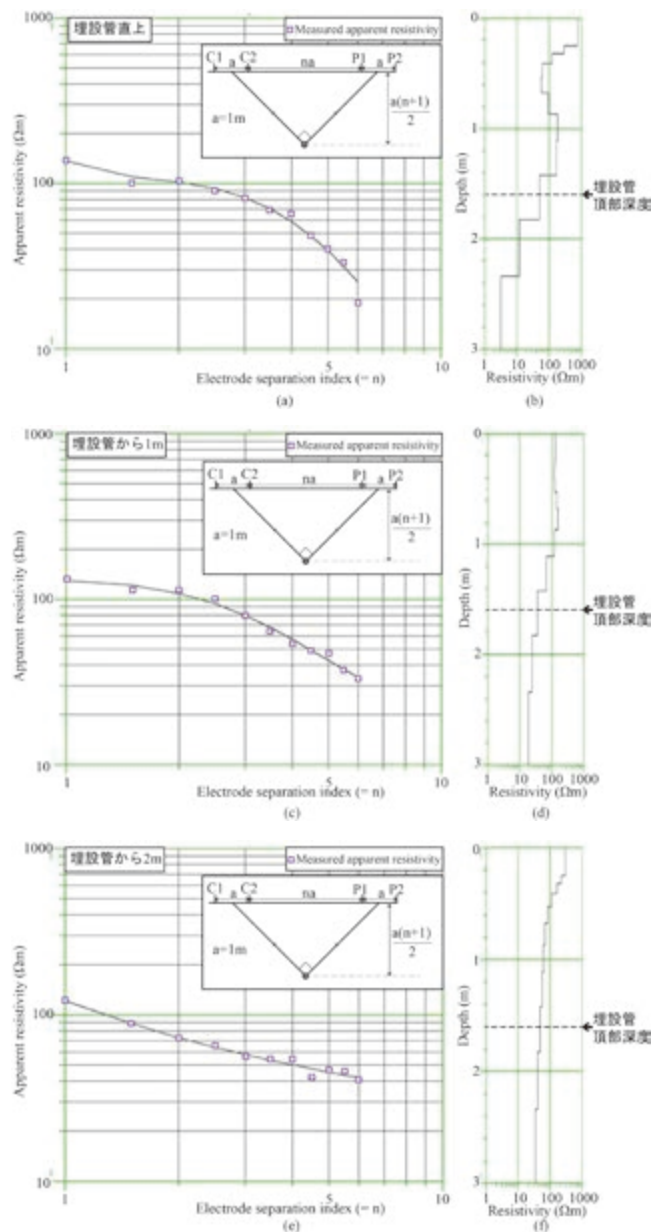


図3 比抵抗測定結果および1次元解析結果。(a), (b)は埋設管直上の測線1での結果, (c), (d)は埋設管から1 m離れた測線2での結果, (e), (f)は埋設管から2 m離れた測線3での結果をそれぞれ示す。

の比抵抗測定結果および1次元解析結果を図3に示す。

図3より、水道管埋設位置からそれぞれ、0 m, 1 mの距離にある測線1, 測線2の1次元解析結果では、埋設水道管の頂部深度に近い深度約1.4 mから比抵抗値が急激に低下していることがわかり、埋設水道管の影響(鉄の低比抵抗異常)が考えられる。一方で、水道管埋設位置から2 m離れた測線3の比抵抗解析結果中には、このような急激な比抵抗の低下は見られず、比抵抗値が緩やかに低下している。

さらに詳細に見ると、水道管の埋設深度に近い、深度1.4~1.6 mの深度区間における比抵抗値は、測線1が47 Ωm, 測線2が36 Ωm, 測線3が48 Ωmであり、一方で、水道管の影響が比較的少ないと思われる、深度1.2~1.4 mの深度区間における比抵抗値は、測線1が170 Ωm, 測線2が67 Ωm, 測線3が55 Ωmであることがわかる。両深度区間の結果を比較すると、全ての測線で水道管埋設深度に近い

深度区間 (1.4~1.6 m) での比抵抗値に低下がみられる。すなわち、比抵抗計測値は埋設水道管の影響を受けることを示唆している。その中でも、水道管から最も離れた (2 m) 測線 3 では、両深度区間での比抵抗値の差が最も小さく、埋設水道管の影響が小さい。

事前調査の結果より、本地点の比抵抗値は、49~144 Ω m であることがわかっている。すなわち、全ての測線において、深度区間1.2~1.4 mの比抵抗値は事前調査の結果と整合的であるということが出来る。本結果から考察するに、大口径の水道管周囲の腐食土壌調査に、地上からの比抵抗測定を適用する場合には、(1) 水道管埋設位置から2 m 以上測線をずらす、(2) 水道管の影響を受けて比抵抗が急激に低下する深度より浅い深度区間の比抵抗値を代替とする、などの工夫が必要である。

他の地点において、2次元探査を実施した。この地点の埋設水道管の径は500 mm、埋設管の頂部は0.83 m である。この地点においては、

- (1) 送信ダイポールの位置を固定し、受信ダイポールを移動させ、1次元データを取得する。
- (2) 送信ダイポールの位置を一地点分移動させて固定し、受信ダイポールを移動させ、1次元データを取得する。
- (3) 以上のデータを組み合わせ、通常のダイポール・ダイポール法電極配置による2次元比抵抗探査相当のデータとする。

という手順でデータ取得を行った。

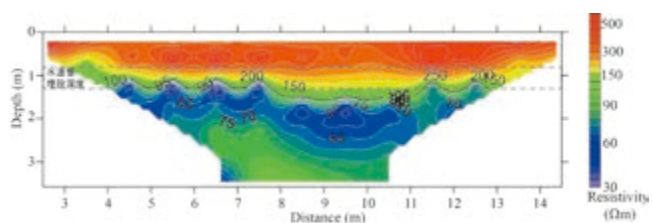


図4 2次元探査結果.水道管から約4 m離れた測線での比抵抗断面図

測線は埋設水道管と平行方向に設定し、前述の1次元探査探査結果を踏まえて、埋設水道管から4 m 離れた位置とした。

2次元解析結果を図4に示す。

埋設管の腐食リスクという観点から調査結果を見る。ANSI規格における比抵抗値による埋設管の腐食リスクを考慮すると、埋設管周辺土壌の比抵抗値が30 Ω m未滿となると腐食リスクを考慮する必要がある。今回の調査では、両地点とも30 Ω mより高比抵抗の土壌中に水道管が埋設されていることがわかり、埋設管の腐食リスクは小さいと結論することができる。

2.3. IP法を用いた灌水実験のモニタリング

気候変動リスクへの備えや、多発する豪雨に伴う地すべ

り等の土砂災害発生予測の高度化という点において、地下水賦存域や浸透現象に関連する物性値を高精度に可視化する技術の開発が求められている。本研究では上記現象の把握に土壌の誘導分極 (IP) 特性が有効であるかどうか検証することを目的として、灌水実験を実施中の圃場を模した実験場において、時間領域IP (TDIP) 法電気探査を国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構と共同で実施した。計測は、灌水開始前と灌水開始から約2時間後の合計2回実施された。図5に、灌水前・後の解析比抵抗・充電率分布をそれぞれ示す。

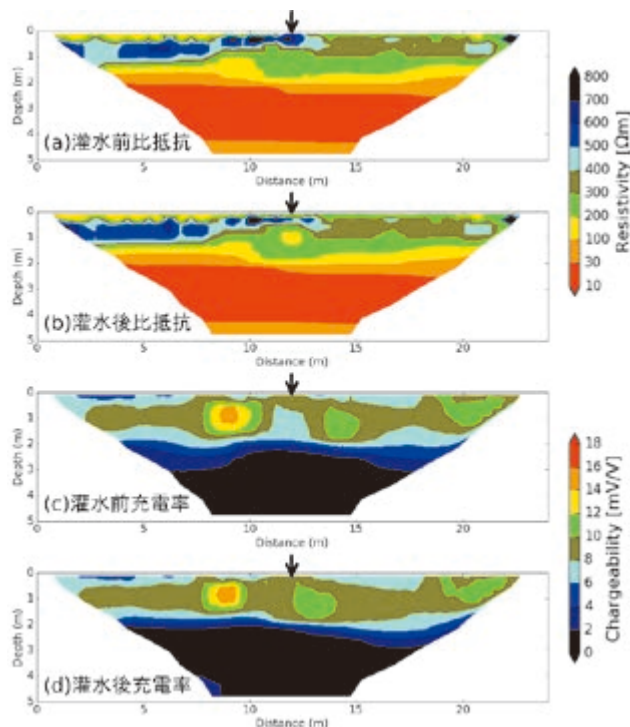


図5 灌水実験に伴う地下比抵抗・IP特性分布の時間変化. 矢印が灌水地点を表す。(a),(b)は灌水実験前後における比抵抗値の分布を示す。(c),(d)は灌水実験前後における充電率の分布を示す。

灌水前後の地下の電気的物性の変化に注目すると、矢印で表される灌水地点直下の領域で比抵抗が低下し、充電率は高くなっている。一方で、灌水地点から離れた場所の比抵抗・充電率分布は、灌水前後で大きな変化は見られない。灌水に伴う土壌の水飽和度の変化に対応して、比抵抗のみならず充電率及にも有意な時間変化があることを把握した。

3. グループの体制

3.1. 人員体制 (2019.10.1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)
- 小森省吾 (研究員)
- 梅澤良介 (研究員)

上田匠 (客員研究員)
 山口和雄 (テクニカルスタッフ)
 浅田美穂 (テクニカルスタッフ)
 中山京子 (テクニカルスタッフ)
 木村夕子 (テクニカルスタッフ)
 万沢かりん (リサーチアシスタント)
 佐竹海 (リサーチアシスタント)

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、一般財団法人宇宙システム開発利用推進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。

- ・平成31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)
- ・平成31年度鉱物資源開発の推進のための探査等事業 (資源開発可能性調査) (資源エネルギー庁)
- ・安全な CCS 実施のための CO₂貯留技術の研究開発事業 (経済産業省再委託) 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

Hata, M., Matsushima, N., Takakura, S., Utsugi, M., Hashimoto T., and Uyeshima M. (2018) Three-dimensional electrical resistivity modeling to elucidate the crustal magma supply system beneath Aso caldera, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 6334–6346. <https://doi.org/10.1029/2018JB015951>

Yoshimura, R., Ogawa, Y., Yukutake, Y., Kanda, W., Komori, S., Hase, H., Goto, T., Honda, R., Harada, M., Yamazaki, T., Kamo, M., Kawasaki, S., Higa, T., Suzuki, T., Yasuda, Y., Tani, M., Usui, Y. (2018) Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion. *Earth, Planets and Space*, 70, 66. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0848-y>

Nakashima, Y. (2019) Non-Destructive quantification of lipid and water in fresh tuna meat by a single-sided Nuclear Magnetic Resonance scanner. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 28, 241–252. <https://doi.org/10.1080/10498850.2019.1569742>

Nakano, T., and Nakashima, Y. (2019) Analytical expressions for the reconstructed image of a homogeneous cylindrical sample exhibiting a beam hardening artifact in X-ray computed tomography. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 26, 691–705. <https://doi.org/10.3233/XST-18378>

Ikeda, S., Nakashima, Y., and Nakano, T. (2019) Three-dimensional observation of the boundary region between massive feldspar and graphic granite by X-ray computed tomography. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 114, 1–17. <https://doi.org/10.2465/jmps.180114>

山谷 祐介・高倉 伸一・浅沼 宏 (2018) AMT 法電磁探査による奥会津地域地熱貯留層の比抵抗モニタリング, 日本地熱学会誌, 40, 159-173.

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

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4期中期計画の中で「持続可能な社会発展に資する地圏の資源および環境の利用と保全のための基盤情報整備と評価技術の開発」における地球温暖化対策の重要研究課題の一つとして、また令和元年度当部門のポリシーステートメントにおける地下環境利用評価のためのユニット戦略課題として、それぞれ位置づけられており、一層の研究の促進が求められている。このような状況に鑑み、当グループでは、CO₂地中貯留全般に資する研究を全面的に推進している。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、地化学研究、岩石実験等は、資源の安定供給に貢献する地熱資源開発などCO₂地中貯留以外の分野においても必要な技術であり、地圏環境の利用と保全の観点から社会のニーズにあった研究を進めている。

2. 各研究項目の内容

安全かつ大規模・効率的なCO₂地中貯留技術の実現に向けて、我が国の貯留層に適した実用化規模(100万トン/年)でのCO₂地中貯留技術を開発するとともに、CCSの社会受容性の獲得を志向した研究開発を行うために、平成28年4月に、産総研を含む2機関と民間企業4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CO₂の低コストでのモニタリング技術や、水理-力学連成解析技術、地化学反応速度測定技術など、産総研が独自に有する優位性のあるコア技術を基にプロジェクトを推進している。

2.1. CO₂長期モニタリング技術の開発

(1) 苫小牧サイトにおける高精度重力連続観測

苫小牧サイトでこれまで実施してきた高精度重力モニタリングに関して、データを途切れさせることなく後継の超伝導重力計への引継ぎを完了させ、結果的に4年半以上にわたる重力データの取得を達成した(図1)。2018年9月には北海道胆振東部地震による震度5弱の本震と多数の余震を受け、この地震に伴い発生したブラックアウトによる約40時間近い外部電源の停止があったものの、観測データの連続性は維持された。

後継の2台の超伝導重力計による並行測定からは、重力計1台が停止してもモニタリングが中断しない点に加えて、データの相互比較により小さな異常でも速やかに発見



図1 苫小牧重力観測点の外観(手前および奥にある上部が半球状のエンクロージャ内に超伝導重力計を設置)

して対策できる点において、並行測定技術が有効であることが確認された。また、既設および新設の重力計から得られるデータの整合性の確認に加えて、速やかなドリフト評価・トラブル発見とデータの補正処理の実施が可能であることが示された。並行測定データの同相ノイズ成分が除去できれば、重力観測点近傍における質量分布の変化の詳細な把握に貢献するとともに、データ解析の分解能をさらに向上させることも可能であると考えられる。

約3年半の連続観測を継続してきた初代の超伝導重力計は、塩害対策をしていない初期型のエンクロージャのもと、沿岸域の強風・波浪・塩害腐食環境に曝されてきたが、移設時点検ではエンクロージャ内部の本体には腐食等は認められなかった。塩害対策を施した他の2台の運用経験と併せて、適切な材料選択と定期的な再塗装・部品交換等により、エンクロージャを用いた長期観測も沿岸域における実用的な観測形態の選択肢になり得ると判断される。なお、防風柵開口部等において一部改良の余地はあるが、現在の観測設備は沿岸域の観測にほぼ十分なものと考えられる。

(2) 地下水位変動影響評価手法の確立

地下水位変動が重力データに与える影響を評価するために、苫小牧サイトの重力観測点近傍において、地下水位の連続データの取得を開始した。当初、単一の不圧地下水が存在する単純な系を想定していたものの、観測井の掘削により、重力観測点周辺に不圧地下水以外に宙水が分布することが明らかとなった(図2)。このため、より簡便かつ直接的な経験的手法により、地下水位変動の影響を評価することを試みた。具体的には、地下水位変動に伴う重力変化を不圧地下水と宙水の水位の線形な関数の重ね合わせとして表現

し、モデル中に現れる2つのパラメータを観測値と推定値の二乗平均平方根誤差が最小となるように決定した。その結果、重力変化の観測値が、地下水位変動に伴う重力変化の推定値により良好に再現された。また、重力変化の観測値から推定値を除いて得られた残差について安定的な結果が得られ、残差の標準偏差は $0.75\mu\text{Gal}$ となった。なお、宙水の水位変動に伴う重力変化は不圧地下水の水位変動に伴うものよりも大きかった。

今回の手法は簡便であるため、将来的な事業者にとっても実用性が高いと言える。今後は積雪・融雪期間を含む1年以上の長期データに対して同様の検討を実施し、当該手法の適用性を検証する必要がある。また、降雨浸透・地下水流動シミュレーション等を用いた解析を併せて実施し、両手法を用いて得られた結果を比較することにより、当該手法の物理的な妥当性を確認することも重要である。

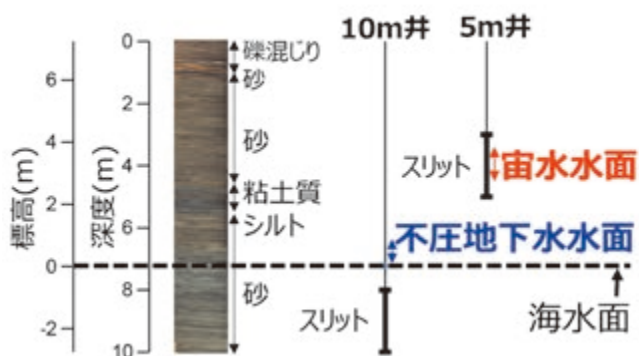


図2 地下水位観測井の構造

一方、降雨浸透シミュレーションによる重力データ解析のためには高精度の地下構造モデルが必要となるが、当該モデル構築の制約条件になり得る観測データの取得を目的として、重力観測点周辺で自然電位の連続計測を開始した。その結果、降雨浸透に伴い発生する流動電位が主要因と考えられる自然電位変化を捉えることに成功した。今後、降雨浸透シミュレーションを実施し、計算結果と観測データを比較することにより、観測データを説明する地下構造モデルを構築する予定である。

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。地化学プロセスが関与する遮蔽性能パラメータとして、岩石内部のスロート径(空隙構造)と接触角(界面状態)の2種類が想定されることから、それぞれのパラメータの評価に適した研究手法の適用を図った。

空隙構造の変化に関しては、炭酸塩を含有する焼結体を 10 MPa 、 40°C の超臨界 CO_2 -水系で反応させ、反応に伴う遮蔽性能の変化を解析した。溶液分析からは、炭酸塩が初期に溶解してCa濃度が増加し、その後再沈殿してCa濃度

が低下する様子が示されたが、これに対応して予想される、浸透率が初期に増加しその後低下するという一般的な傾向は概ね確認できた。一方、炭酸塩の再沈殿が不均一に起こり得る結果が示され、遮蔽性能の変化が炭酸塩の含有量や表面積だけでは必ずしも説明できないことが明らかとなった。これに対して、同様の条件下で実施した炭酸塩脈含有岩石(石質ワッケ)の実験では、岩石中の炭酸塩の産状が反応性に影響を及ぼすが、少なくとも炭酸塩脈の境界以外では連続的な流路の形成は起こりにくいことが示唆された(図3)。以上の結果を踏まえると、キャップロック中に反応性の高い炭酸塩が含まれていても、最終的な遮蔽性能は維持あるいは強化されることから、漏洩リスクは低いと言える。



図3 炭酸塩脈を有する石質ワッケ

界面状態の変化に関しては、これまでに考案した接触角をスレッショルド圧から算出する手法に基づいて、各種岩石・鉱物の接触角の計測を行った。今年度はマイクロドリルを適用し、穴径を $20\sim 30\mu\text{m}$ 程度まで増加させるとともに、1つの試料に多数の穴を開けることを試みた(図4)。その結果、本手法が新たな接触角導出法として有効であることが示された。今後は、測定時の試料の損傷を防ぐための試料強度の確保に加えて、算出に必要な界面張力の最適値についての検討が必要である。

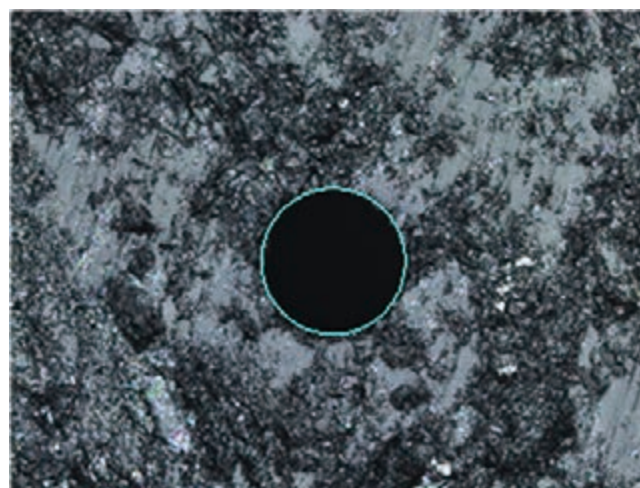


図4 微細穴加工(穴径 $20\mu\text{m}$)を施した長石試料表面のレーザー顕微鏡画像

一方、鉱物沈殿の圧入性への影響に関連して、高塩分濃度の帯水層へのCO₂圧入に伴うNaClの沈殿とその浸透率・相対浸透率への影響についてHTCM (Hydro-Thermal-Chemical-Mechanical) 数値シミュレーションを行った。今回の計算では、空隙の10%程度の沈殿で間隙のスロート部分が目詰まりを起こし、ガス・水の流動相の相対浸透率を大きく低下させるというモデルを仮定した。地化学反応による鉱物沈殿の圧入性への影響を検討する際には、ミクロな視点での実験的な研究が特に重要と考えられる。

さらに、CO₂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、CO₂の炭酸塩化による坑井周囲からの漏洩防止を検討した。Ca(OH)₂を溶解させた温泉水とCO₂を反応させた結果、CaCO₃の最適な生成条件を選定することで、貯留岩の遮蔽性能が強化できる可能性が示された。しかしながら、多くのケースで一旦生成したCaCO₃が最終的に溶解することが判明した。本手法の実用化に向けては、Ca(OH)₂濃度を溶解度付近まで増加させ、より多量のCaCO₃を沈殿させることが必須であると考えられる。

2.3. ジオメカニクスモデリング技術の開発

CO₂地中貯留で想定される様々なキャップロックと比較対象としての砂岩を用いて、せん断・透水実験を実施した。また、得られた実験データにより、水理-力学連成解析に必要な体積ひずみと浸透率の岩種による体系化を図り、それらに基づいた定式化を行った。その結果、体積ひずみと浸透率の関係については、キャップロックと砂岩とで2つのパターンに分類できることが示された(図5)。さらに、両者の関係の定式化を試みたところ、従来のモデルに、せん断・すべり挙動で起点となった浸透率とひずみを新たなパラメータとして取り入れることで、簡易的な数式でモデル化が可能であることが明らかとなった。今後は、提案した軟岩き裂・断層モデルのプロトタイプに基づいて、水理-力学系に膨潤等の効果までを考慮した、水理-力学-地化学連成解析用の構成則の開発を行う予定である。

一方、二相流動-変形連成過程を理解することを目的として、室内実験と数値シミュレーションを組み合わせた検討も開始した。具体的には、水で飽和した円柱状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、試料上端から空気が排出される状況を压力容器外部から直接観察するとともに、空気の浸入開始後の試料中央部分のひずみのデータを取得した。その結果、空気が試料上端に到達以降もひずみデータの取得が可能であることが確認された。今後、得られた実験結果を二相流動-変形連成過程に基づき定量的に説明することを予定している。

2.4. 国際標準に準拠したリスクコミュニケーション手法の要件整理

CCSに関する国際標準およびCCSに特化したリスクコミュニケーション手法を調査し、国際動向を踏まえた上で

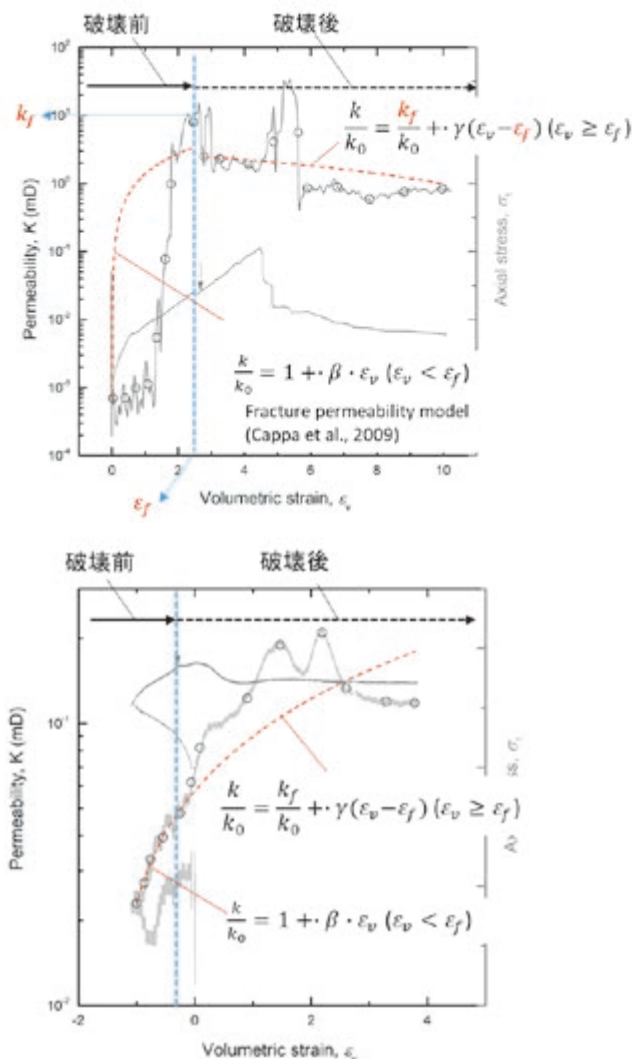


図5 体積ひずみと浸透率の関係 (上: 泥岩, 下: 凝灰岩)

の日本のCCSにおけるリスクコミュニケーションの要件について検討した。この中で、リスクコミュニケーションの手引書が重要であることが示唆された。すなわち、複数のCCSプロジェクトが存在する米国や豪州では、CCSに特化したエンゲージメントやリスクコミュニケーションに関する知見を共有するために手引書が発表されている。日本においても、エンゲージメントの複雑なプロセスを漏れなく行うために、実情に合わせた手引書が必要である。CCS国際標準の要求と推奨に対応し、日本の国内法規を加味した手引書を開発すれば、近い将来の日本で複数のCO₂地中貯留プロジェクトのスムーズな稼働とCCS事業の進展に貢献することが期待される。

2.5. その他の研究グループの活動

NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラム予算や科研費補助金でのCCUSやCO₂挙動に関わる基礎的研究、CO₂地中貯留ならびに地熱関連での民間共同研究等を実施している。また、韓国KIGAMとのCO₂地中貯留に関するワークショップの共同開催など、国際的な連携も進めている。

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）

石戸恒雄（テクニカルスタッフ）

田中敦子（テクニカルスタッフ）

杉原光彦（テクニカルスタッフ）

志賀正茂（リサーチアシスタント）

その他 産学官制度来所者 4名

4. 最近の主な研究成果（2015年以降）

Sorai, M., Kano, Y. and Honda, K. (2015) Experimental study of sealing performance: 2. Effects of particle size distribution on threshold pressure of sintered compacts. *J. Geophys. Res.*, 10.1002/2015JB011958.

藤井 孝志, 上原 真一, 林 敬太, 徂徠 正夫, 高橋 美紀, 中尾 信典 (2015) CO₂地中貯留における泥岩の遮蔽性能に及ぼす有効圧変化の影響. *資源・素材学会誌*, 131, 509-517.

Fujii, T., Uehara, S. and Sorai, M. (2015) Impact of effective pressure on threshold pressure of Kazusa Group mudstones for CO₂ geological sequestration. *Mat. Trans.*, 56, 519-528.

Fujii, T., Funatsu, T., Oikawa, Y., Sorai, M. and Lei, X. (2015) Evolution of Permeability during Fracturing Processes in Rocks under Conditions of Geological Storage of CO₂. *Mat. Trans.*, 56, 679-686.

Sorai, M., Sasaki, M. and Kuribayashi, T. (2018) Field reaction experiments of carbonate minerals in spring waters: natural analogue of geologic CO₂ storage, *Geofluids*, Article ID 2141878, 1-11.

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 CO₂ geological storage, *Greenh. Gases*, <https://doi.org/10.1002/ghg.1911>.

Goto, H., Sugihara, M., Ikeda, H. and Ishido, T. Laboratory test of a superconducting gravimeter without a cryogenic refrigerator: implication for noise survey in geothermal fields, *Explor. Geophys.*, (submitted).

地圏環境リスク研究グループの紹介

Introduction of the Geo-Environmental Risk Research Group

研究グループ長：張 銘

Leader, Geo-Environmental Risk Research Group:

Ming Zhang

e-mail: m.zhang@aist.go.jp

1. グループの研究目的

土壌・地下水汚染に代表される環境問題は各種産業活動の“負の遺産”とも言え、産業と経済が急速に成長する発展途上国においてはその深刻さが増加しているが、日本を含む先進国においても依然として解決しなければならない社会問題の一つとなっている。地圏環境リスク研究グループでは土壌・地下水汚染に係る調査・評価技術、浄化・対策技術及びリスク評価・管理技術の開発を精力的に推進するとともに、知的基盤としての「表層土壌評価基本図」の整備と出版や多様なリスクを定量的に評価可能な地圏環境リスク評価システム（GERAS）の改良と普及及び関連試験法の標準化活動等も積極的に実施している。また、関連技術を二酸化炭素の地中貯留や放射性廃棄物の地層処分等への応用・拡張も戦略的に展開している（図1）。さらに、共同研究や技術研修、技術支援及び技術コンサルティング等を介して、国内外社会への貢献にも努めている。

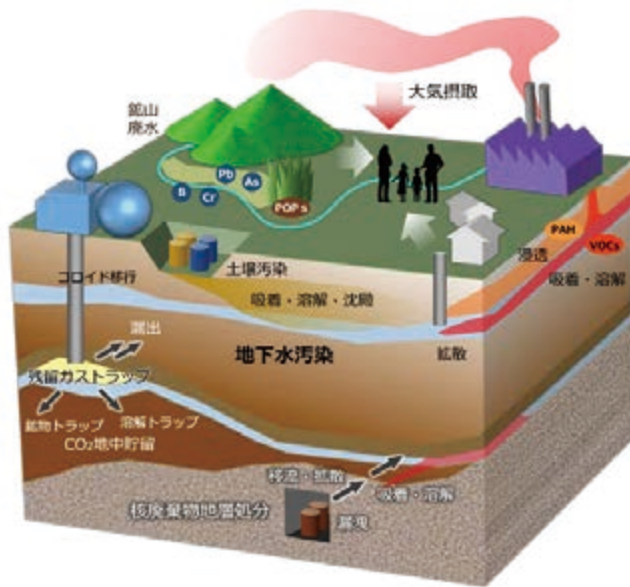


図1 地圏環境リスクに関わる主要研究課題

2. グループの研究資源

地圏環境リスク研究グループでは、複雑化・多様化する地圏環境リスク問題を的確かつ効率的に解決するために、多様なバックグラウンド、スキル及び豊富な実績・経験を有する人材の確保、または必要な人材との連携・協力、内外部研究資金の獲得及び研究ファシリティの整備に注力している。

2.1. グループメンバー構成（R1.10時点）

張 銘（研究グループ長）

川辺能成

原 淳子

保高徹生

杉田 創

井本由香利

吉川美穂

黒田佑次郎（産総研特別研究員）

渡邊真理子（テクニカルスタッフ）

軽部京子（テクニカルスタッフ）

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）

金井裕美子（テクニカルスタッフ）

黒澤暁彦（派遣）

小松智代（派遣）

松下恒輝（RA・産学官制度来所者）

西脇淳子（研究協力員・産学官制度来所者）

中村謙吾（研究協力員・産学官制度来所者）

栗原モモ（研究協力員・産学官制度来所者）

宋 然然（技術研修・産学官制度来所者）

馮 亜松（技術研修・産学官制度来所者）

渡邊茉莉（技術研修・産学官制度来所者）

He Fangxin（技術研修・産学官制度来所者）

また、研究部門内では、鉱物資源研究グループや地圏化学研究グループ等のほか、所内では、エネルギー・環境領域、所外では、東北大学や国立環境研究所及びその他の大学と企業、海外では、米国、イギリス及び中国の複数大学並びに中国科学院傘下の研究所と連携・協力し、研究開発を進めている。

2.2. 主な研究ファシリティ

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注力している。重金属類や揮発性有機化合物（VOCs）及び放射性物質の何れ種類の汚染対象物質も分析・評価可能である。例えば、

気体物質を分析する装置：

- ・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)

液体物質を分析する装置:

- ・高速液体クロマトグラフィー / 質量分析 (HPLC/MS)
- ・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) (図 2)



図 2 重金属類の高精度分析が可能な ICP-MS

固体物質を分析する装置:

- ・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)
- ・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)

微生物を分析する装置:

- ・冷却遠心分離機
- ・微生物・遺伝子分析・定量装置 (PCR リアルタイム PCR) (図 3)

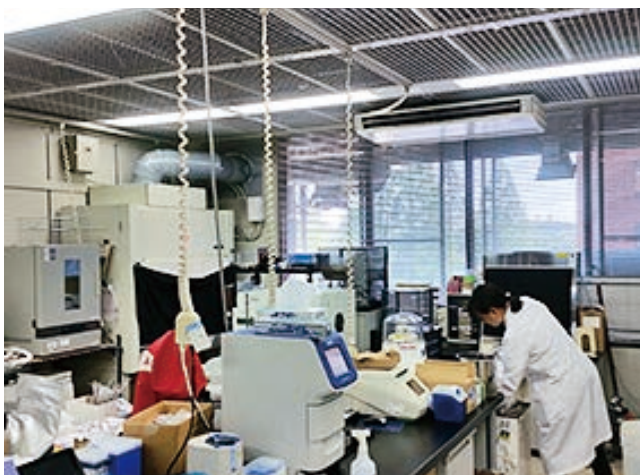


図 3 微生物解析と汚染物質分解実験室

地盤材料や地下水の物性を測定する装置:

- ・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)

- ・カラム試験装置 (図 4)

- ・拡散試験装置ほか



図 4 上向流カラム試験装置

浄化試験装置:

- ・動電学的浄化試験システム (図 5)



図 5 動電学的浄化試験システム (左: 制御部, 右: 土槽)

放射能を測定する装置:

- ・携帯型放射線量・成分測定装置
- ・可搬型放射能測定装置

2.3. 主な研究資金

産総研「運営交付金」のほか、環境研究総合推進費等の「受託研究」費、複数の民間企業との「共同研究」費及び「科研費・補助金・助成金」などを有効に利用し、目的基礎研究と応用研究の両方を実施している。

3. 連携可能な技術

地圏環境リスク研究グループでは、実用化可能な種々な技術を有しており、連携による利用促進や新たな技術開発を効率よく実施することが可能である。

- ・重金属類含有建設残土の評価・管理技術: この技術により、トンネル掘削やその他の建設現場で発生する建設残土の長期的溶出特性や管理と利用条件を明確にすることが可能である。
- ・VOCs による複合汚染の浄化対策技術: この技術では、環境微生物の酸化及び還元環境に対する耐性を制御し、クロロエチレン類やベンゼン、トルエン及びジクロロメタン等の物質による複合汚染を完全に分解することが可能となる。

- ・重金属類汚染の浄化及び不溶化対策技術：鉱物系吸着及び不溶材を利用し、特にヒ素等自然由来でも発生する汚染物質の除去または不溶化に有効である。

これら技術のほか、土壌・地下水汚染及び廃棄物の評価、対策等に必要な技術を有しており、その一部を以下にリストアップする。

- ・有用微生物コンソーシアムと集積培養技術
- ・坑廃水処理と鉱山跡地の有効利用技術
- ・水中低濃度放射性 Cs の迅速計測技術
- ・吸着材の性能評価技術
- ・多相流物質移行解析及びリスク評価技術
- ・重金属類の濃集と溶出反応機構の評価技術
- ・土壌中腐植物質が有害重金属の移行に及ぼす影響の評価技術
- ・発光微生物による汚染物質の毒性と濃度評価技術
- ・ガス交換を考慮した物質移行評価技術
- ・重金属類のオンサイト・高精度調査技術
- ・難透水性材料の高精度透水試験技術
- ・地盤と岩盤材料を対象とした拡散試験技術
- ・酸化・還元条件を制御したカラム試験技術
- ・鉛ガラスの溶出試験技術
- ・焼却灰や建設残土等の産廃処理技術
- ・ジオインフォマックスなど

4. 代表的なトピック

地圏環境リスク研究グループでは、地圏環境リスクの研究、先進的計測評価技術の開発と基準化、環境調和型土壌汚染対策・浄化技術の開発と実用化、土壌汚染リスク評価技術の開発と社会実装及び土壌汚染に係る基盤情報の整備と公開という複数研究課題を戦略的に展開している。各々の研究課題において、研究計画の通り、研究を進めており、着実な成果が得られている。

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が、ここでは、いくつかのトピックを紹介する。

4.1. 建設残岩の体系的なリスク評価手法の検討

本研究課題では、物理的風化（スレーキング）とヒ素等の溶出特性を同時に評価可能なシステム（図 6）を開発し、硫酸酸性岩を重視した従来法の評価手法を見直し、建設残岩の実態に即したアルカリ環境下での溶出特性評価や風化堆積岩に関するスレーキング影響の評価や、地球化学的手法による有害元素の溶出・沈殿・吸着効果の検証及び長期溶出特性の評価手法の確立等を目指して研究を進めている。同技術はリニア中央新幹線沿線岩石のリスク評価と管

理技術の開発にも適用可能である。

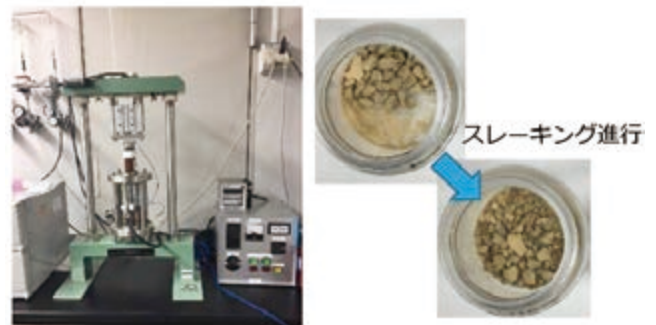


図 6 物理的風化と溶出特性の同時評価装置

4.2. 塩素化エチレン・エタン類の分解挙動に関する研究

本研究は、新規法規制物質であるクロロエチレン（VC）のほか、塩素化エタン類の分解経路及び分解速度等の見解も獲得するために文献調査及び室内分解実験の両方を実施している。室内分解実験には、実汚染サイト（図 7）から採取した地下水を微生物接種源として用いた。室内分解実験と実汚染サイトの環境データを併せて解析することで、阻害・促進メカニズムの解明や室内実験における微生物分解速度の幅を明らかとした。特に、 Fe^{2+} 濃度が高い条件やメタン生成菌が生息する条件では、*cis*-DCE 及び VC の分解が促進されることを明らかとした。また、1,1,1-トリクロロエタンもしくは1,1-ジクロロエタンとクロロエチレン類による複合汚染では、VC の分解が遅延することを室内実験によって明らかにした。



図 7 実汚染サイトでの調査風景

4.3. 「表層土壌評価基本図」の継続的整備

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と考えられる。地圏環境リスク研究グループでは、これまでに宮城県地域、鳥取県地域、富山県地域、茨城県地域及び高知県地域の「表層土壌評価基本図」を県単位で整備・公表したが、今後は地方単位での整備・公表へ変更する予定である。現在、一年以内に四国地方表層土壌評価基本図の公表に向けて、土壌調査、試料分析及びリスク評価等を精力的に実施している（図8）。

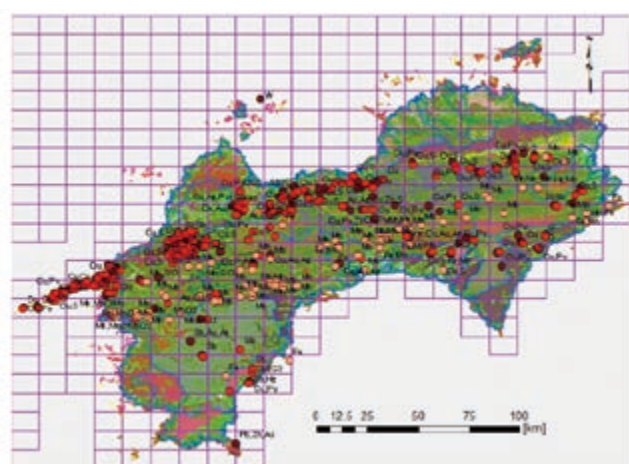


図8 四国地方の土壌分布及び試料採取グリッド

4.4. 使用済Ca系及びMg系ヒ素吸着材からのヒ酸と亜ヒ酸溶出挙動に及ぼすケイ酸の影響

Ca系及びMg系化合物は安価かつ効率的なヒ素吸着材として利用可能であるが、使用済吸着材自体がヒ素を含んだ廃棄物となる。そのため、適切な処理を行わずに環境中に廃棄された場合、使用済ヒ素吸着材からのヒ素溶出による二次的な環境汚染を引き起こす懸念がある。また、使用済吸着材は廃棄処分後に、土壌やセメント系固化材等から溶出したケイ酸成分が接触する可能性もあるため、使用済吸着材に及ぼすケイ酸の影響を評価することは重要である。本研究では、使用済Ca系及びMg系ヒ素吸着材からのヒ酸と亜ヒ酸溶出挙動について体系的に調査し、有用な知見が得られている。

4.5. 上向流カラム試験の国際標準化及び公定法46号土壌溶出試験法改正提案に向けた研究

汚染土壌のカラム試験法の標準化研究として、ISO-

TS-21268-3のアップグレードにおいてリーダー的な役割を果たし、日本国内およびドイツと連携してオランダ、デンマーク等と交渉を実施し、改定案の作成・提案を進めDISがISOを通過した。2019FYにはFDISを通過しISOになる見込みである。また、46号土壌溶出試験法改正提案に向けた知見の蓄積を戦略的に進めている。

5. 主な論文成果

- Yoshikawa S., Yasutaka T., Igura M., Ohkoshi, S., Fujiwara, H., Saito, T., Yagasaki, Y., Yamaguchi N., Eguchi S. (2019): Relationship between Radiocesium Absorbed by Paddy Rice and Trapped by Zinc-Substituted Prussian Blue Sheet Buried in Soil, *Soil Science and Plant Nutrition*, 65(3):1-9.
- Zhao Z. X., Wang X. G., Hao Y. H., Wang T. K., Jardani A., Jourde H., Yeh T.-C. J., Zhang M. (2019): Groundwater Response to Tidal Fluctuations in A Leaky Confined Coastal Aquifer with A Finite Length, *Hydrogeological Processes*, 33, 2551-2560.
- Kawabe Y., Komai T. (2019): A Case Study of Natural Attenuation of Chlorinated Solvents Under Unstable Groundwater Conditions in Takahata, Japan, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 102(2), 280-286.
- Zhang M. (2019): Challenges of Solving the Problem of Soil and Groundwater Contamination – An Interdisciplinary Approach-, *Synthesiology-English Edition*, 12(1), 41-50.
- Kurihara M., Tsuji H., Onda Y., Suzuki H., Iwasaki Y., Yasutaka T. (2018): Spatial and Temporal Variation in Vertical Migration of Dissolved ¹³⁷Cs Passed Through the Litter Layer in Fukushima Forests, *Journal of Environmental Radioactivity*, 192, 1-9.
- Chang X. Y., Wang B. B., Yan Y., Hao Y. Y., Zhang M. (2018): Characterizing the Effects of Monsoons and Climate Teleconnections on Precipitation in China Using Wavelet Coherence and Global Coherence, *Climate Dynamics*, 52 (9-10), 5213-5228.

上記論文のほか、地圏環境リスク研究グループとしては年間20編以上の誌上発表及び年間60件以上の口頭発表を行っており、グループのホームページで公表している。

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
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、環境に調和した地圏の開発・利用を図るため、地圏メカニクスを中心とする基礎研究と橋渡し研究を展開している。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・データ処理技術・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、誘発地震の発生メカニズムの理解と関連災害の低減・防止、CO₂等の地中貯留・廃棄物処分・シェルガス・地熱等資源の継続的利用などに役立ってきた。今後も高度化・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と技術開発を展開し、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遂行する。

2. 研究グループの特徴

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（カッピングズからテクトニクススケール）・マルチ分野（資源・環境・地震）・マルチアプローチ（実験岩石力学、地球物理学、構造地質学、数値計算）を包括・融合して研究開発に取り組んでいる。研究対象は環境評価・災害低減・環境回復を含め多岐にわたる。研究内容も基礎研究から応用研究まで幅広く、予算は科研費、官民委託費、技術コンサルティング等にまたがっている。

2.1. グループの研究体制

地圏環境システム研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

雷 興林（研究グループ長）
及川寧己
竹原 孝
坂本靖英
宮崎晋行
北村真奈美

奥山康子
その他、受け入れ研究員など

3. 主要試験・計測・解析ツール

- 1) 掘削試験装置（図1）
- 2) 三軸圧縮透水実験装置（図2）
- 3) 大型三軸圧縮・水圧破碎 AE 実験装置（図3）
- 4) 精密微小試料圧入試験装置（図4）
- 5) 貫入試験装置（図5）
- 6) 多チャンネル高速 AE 波形収録・弾性波計測システム、3) 及び5) と併用
- 7) 地圏環境シミュレーション（GERAS）
- 8) マルチスケール（AE・微小地震・地震）マルチアプローチを融合したデータ解析システム（GeoTaos）

4. 主な研究内容

4.1. 地圏メカニクスに関する実験研究

当研究グループには様々な室内岩石試験装置と物性計測システムを駆使し、岩石試料を用いる三軸クリープ試験・透水試験・断層滑り実験・水圧破碎実験等を行い、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クスモデリングに資する実験研究を系統的に実施する。



図1

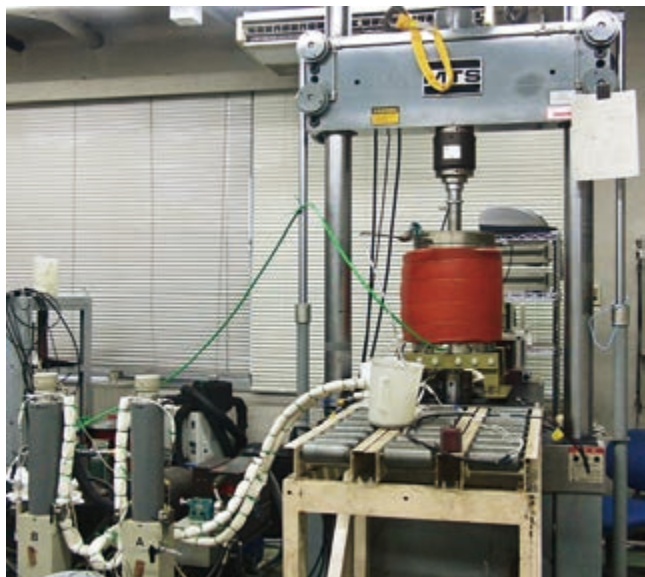


図 2

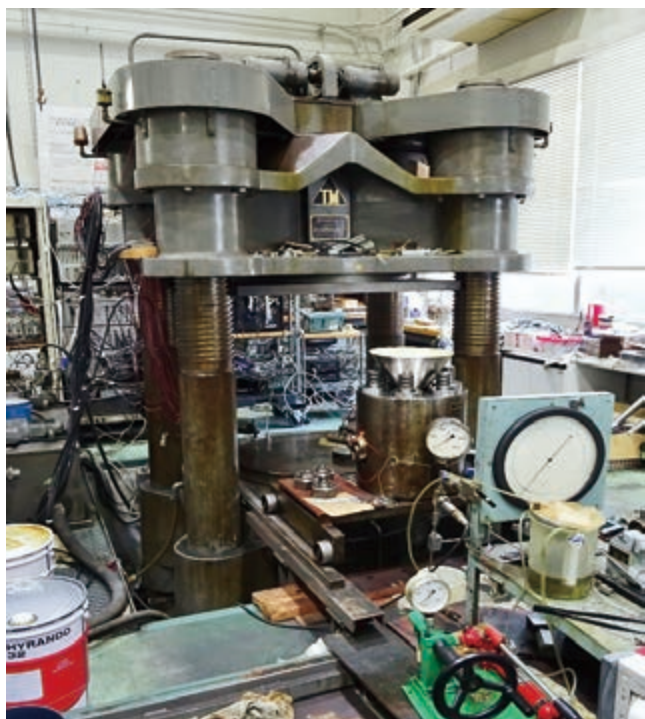


図 3

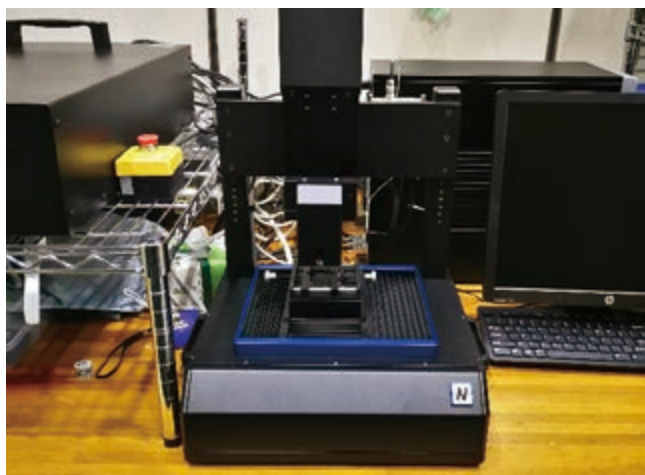


図 4

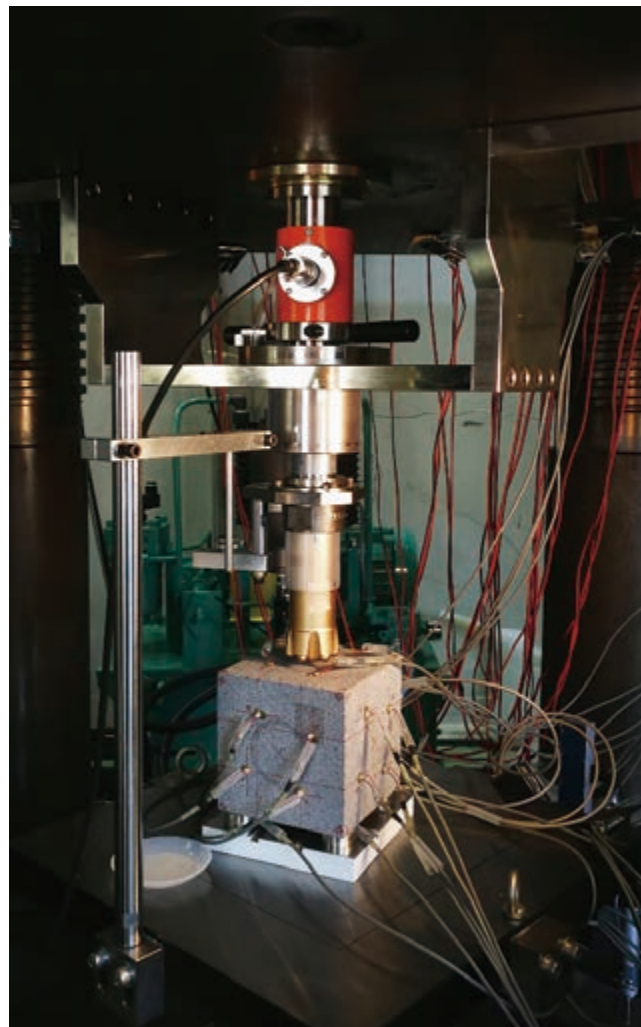


図 5

4.2. 岩石掘削用ビットに関する研究

民間企業や大学との共同研究, 受託研究等により, 鉱山開発, 海底鉱物資源開発, 地熱資源開発等, 多岐にわたる応用先をターゲットとして, 地層・鉱床の特徴を踏まえた岩石掘削用ビットの室内掘削試験やチップの貫入試験を実施し, 実用化のための掘削性能評価と改良点の抽出等を行う。

貫入試験中, 岩石供試体内部のクラックの発生・成長の様子を把握するため, AE (Acoustic Emission) の計測システムを導入した。図 6 は, AE 計測を組み込んだ最新の貫入試験システムの概略図で, 図 7 は貫入試験データ解析の画面を示す。

4.3. 超臨界地熱開発に関連する高温高压岩石実験

減圧破砕や熱処理等により亀裂が生じた花崗岩について, 超臨界流体・高温・高压条件下において破壊実験・水圧破砕実験・浸透率測定・X線CTやSEMを用いて微細組織観察をおこない, 破壊強度・浸透率の温度依存性および亀裂量と強度の相関関係, 変形メカニズムを解明する。

4.4. CO₂を圧入した岩石の力学特性に関する研究

CO₂の地中貯留における, 貯留対象岩盤の短期的・長期的力学挙動の予測に資する基礎データを得るため, 実験室内

にCO₂の地中貯留を想定した地下条件（温度・圧力）を模擬し、水飽和した岩石試験片にCO₂を圧入した場合とそうで無い場合との変形特性の違いについて実験的に明らかにするための三軸載荷試験を実施している。

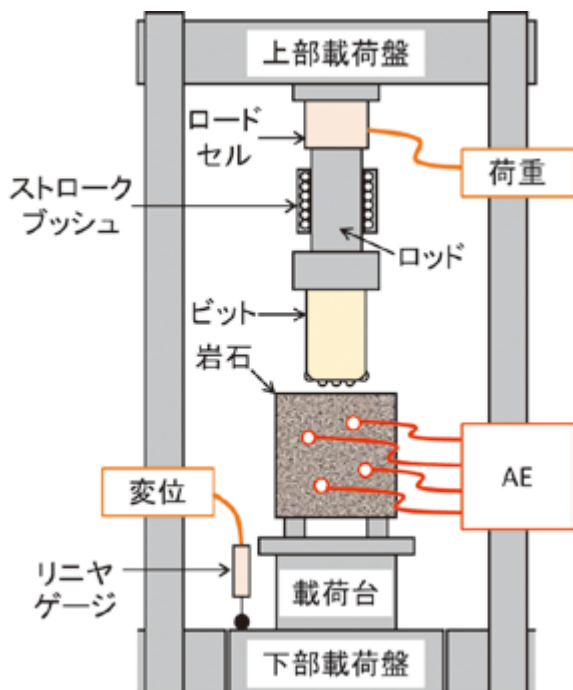


図6 貫入試験システムの概略図

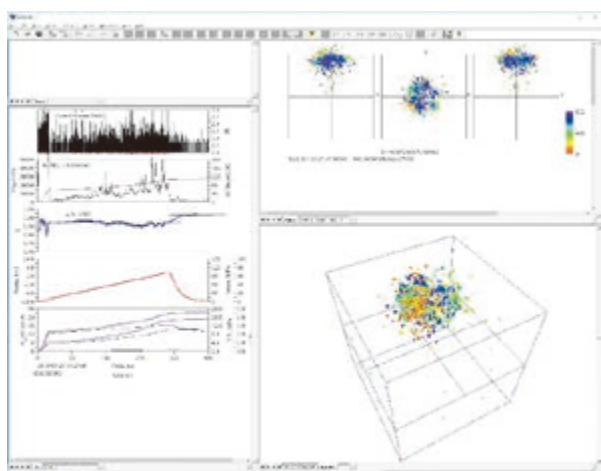


図7 貫入試験データ解析の画面

4.5. カッティングスを用いた連続的岩盤強度推定法の開発

CO₂地中貯留では、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。

現況の流体流動-岩石力学シミュレーションは、単純化された地質モデルにて行われ、モデルの精緻さは貯留層地質モデルなどに比べると著しく劣る。理由の一つは、岩盤の物理特性に関する岩石力学的パラメータの絶対的不足である。岩石力学的諸パラメータは、貯留サイトで掘削された坑井より試料（例：岩石コア）を回収し、実験することで求めることができるが、コストの問題で多数のコアを採集することは非現実的である。通常の掘削にて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（図4）による岩盤強度の取得法の開発と実験研究を行う。

4.6. 地圏環境シミュレーションおよびリスク評価手法に関する研究

地圏における水理-物質輸送-力学連成系等に関するシミュレーションおよびリスク評価技術に関する研究開発を行う。具体的には、地圏環境リスク評価システム（GERAS）の数値解析モデルの高精度化と社会実装に向けた取り組みを推進する。

4.7. 注水誘発地震に関する研究

地熱開発・シェルガス生産・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ている。

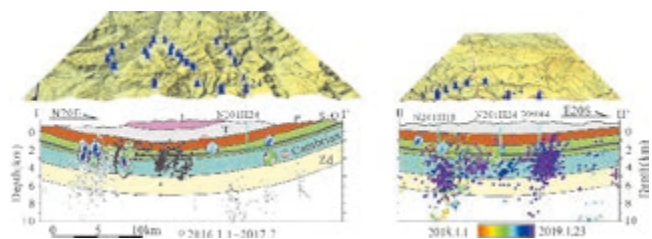


図8 中国四川盆地シェルガス開発現場の水圧破碎による誘発した地震事例、最大M5.7の誘発地震地震が発生した



図9 図8の現場で発生したM5.7の誘発地震による大規模な山崩れ

5. 2017年以降主な研究論文

- 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*.
- 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. 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.
- 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.
- 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.
- Lei, X., S. Li, and L. Liu (2018), Seismic b-Value for Foreshock AE Events Preceding Repeated Stick-Slips of Pre-Cut Faults in Granite, *Applied Sciences*, 8(12), 2361.
- 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.
- Lei, X., D. Huang, J. Su, G. Jiang, X. Wang, H. Wang, X. Guo, and H. Fu (2017), Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to Mw4. 7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China, *Scientific Reports*, 7(1), 7971: 7971-7912, doi:10.1038/s41598-017-08557-y.
- Lei, X., S. Ma, X. Wang, and J. Su (2017), Fault-valve behaviour and episodic gas flow in overpressured aquifers-evidence from the 2010 Ms5. 1 isolated shallow earthquake in Sichuan Basin, China, *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 17(1), 2-12.
- Li, X., X. Lei, Q. Li, and X. Li (2017), Experimental investigation of Sinian shale rock under triaxial stress monitored by ultrasonic transmission and acoustic emission, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 43, 110-123.
- Li, X., X. Lei, and Q. Li (2017), Response of Velocity Anisotropy of Shale Under Isotropic and Anisotropic Stress Fields, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, doi:10.1007/s00603-017-1356-2.
- Miyazaki, K., N. Tenma, and T. Yamaguchi (2017), Relationship between creep property and loading-rate dependence of strength of artificial methane-hydrate-bearing Toyoura sand under triaxial compression, *Energies*, 10(10), 1466.
- Ohuchi, T., X. Lei, H. Ohfuji, Y. Higo, Y. Tange, T. Sakai, K. Fujino, and T. Irifune (2017), Intermediate-depth earthquakes linked to localized heating in dunite and harzburgite, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo3011.
- 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.

■ ポスター概要

地熱の調査・開発の社会的受容性を向上させる総合設計の検討

総括研究主幹 相馬宣和
[連絡先] n.soma@aist.go.jp

成果概要

地熱エネルギー利用の促進に不可欠な、調査・開発に対する社会的受容性の向上を目的にして、その最適な利用を司る“地下資源の適切な利用及び自然環境の保全”、“社会や地域との調和”、“経済的実現性と持続性”などについて、全方位的にバランスの取れた地熱エネルギー利用を実現する総合フレームワークを目指し、地熱の総合設計法 (Overall System Design) を検討している。

研究内容

社会的受容性の地熱特有の構成要素を定め、総合設計の概念を取りまとめた。開発全体において情報の乏しい初期段階から総合設計の適用は有用であり、調査・開発の進展に伴い step-by-step で設計仕様が変更されること、開発 step 毎の最適ステークホルダーを踏まえて柔軟性・順応性を生かすことなどの基本方針をまとめた。開発の実現性は最終段階まで不明であるため、社会的受容性も開発 step に沿って段階的、順応的に判断する方がトータルの社会受容は効率的に高まると考えられる。総合設計の評価には、資源及び技術的実現性の他、事業実現性や地域に対するリスクと便益などの観点が必要である。地域への便益評価の一例として、地域経済の循環構造への地熱の参入がどのような効果を齎すかについて、地域産業連関分析を用いた調査段階の評価手法を検討した。

研究成果はどう使われるか

地熱発電に関する目標155万 kW 増を達成する上で必要と考えられる300地点以上の調査を円滑かつ早期に実行していくために、プロジェクトマネジメントへの適用を通じて、調査・開発の段階毎の社会的受容性の拡大に努める。

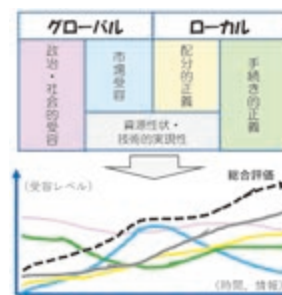


図1 能動的かつ時变的な社会的受容性モデル（時間と情報の増加に応じて変化する様々な領域の受容の総合評価によって社会的受容が決まる）



図2 地域経済循環モデル内での地熱の影響の概念（地域産業連関分析により地域経済面の得失が推計できる）

大阪の地下水資源を見える化－水文環境図と地中熱ポテンシャルマップ－

地下水研究グループ 吉岡真弓* 井川怜欧, 地中熱チーム 内田洋平
[連絡先] yoshioka-mayumi@aist.go.jp

成果概要

西日本最大の経済都市域である大阪平野の地下水資源および地中熱資源を「見える化」した。地下水資源は「水文環境図」としてGSJのWebサイトで公開された。また、地中熱資源は「地中熱ポテンシャルマップ」として公表され、大阪府の再エネ普及促進に貢献すると期待される（大阪府との共同研究）。

研究内容

大阪平野に対し“地下水の地図”である「水文環境図」を作成した。その成果の一部を利用して平野全域の3次元地下水流動熱輸送モデルを構築し、「地中熱ポテンシャルマップ」を作成した。

「水文環境図」では、過去から現在にかけての地下水位や水質、温度データなどから大阪平野の帯水層を水文学的に分類し、各々の水質や水位、地域の揚水能力（比湧出量）などの特徴を取りまとめた。本成果は、Webサイトで公開され、誰でも自由に閲覧可能である。この「水文環境図」の情報を元に、再エネ技術として評価の高い地中熱利用システムのエネルギー源である地下環境を数値モデリングにより総合的に評価し、「地中熱の潜在的利用能力分布（＝ポテンシャルマップ）」を作成した。

研究成果はどう使われるか

大阪府は「おおさかエネルギー地産地消推進プラン」に基づき、再生可能エネルギーの普及推進に努めている。水文環境図をベースとした地中熱ポテンシャルマップの公開により、個人や事業者への地中熱利用システムの普及促進が期待される。

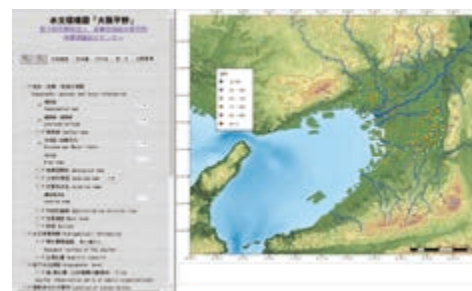


図1 水文環境図「大阪平野」(Web公開)

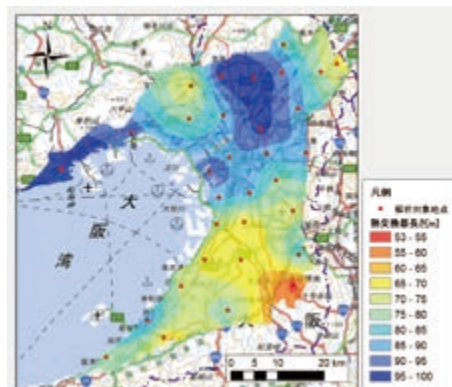


図2 大阪平野の地中熱ポテンシャルマップ (クローズドビュー)



LA-ICPMS を用いた有機物中の微量重金属元素イメージング

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

成果概要

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) を用いた、微量元素濃度イメージング法を開発しました。本分析法は、平滑な面を有する固体について、10 cm (1 mm/pixel) ~ 500 μm (5 μm/pixel) 領域の元素濃度分布を測定できます。大気・希ガス・ハロゲンを除く、Li ~ U までのほぼ全元素を、100% ~ ng/g オーダーまでの幅広い濃度範囲にわたり、一度に測定することが可能です。

研究内容

LA-ICP-MS は、試料表面に集光したレーザーにより試料を溶発、プラズマでイオン化した後に高感度質量分析を行う装置です。本分析法は、従来の主成分元素濃度イメージングを行う SEM-EDS や EPMA, μXRF 等とは異なり、ng/g オーダーまでの微量元素濃度分析が可能です。しかし一般の LA-ICP-MS には、イメージング用の測定・データ解析ツールが備えられておらず、本分析法は一般的な普及には至っていません。そこで、我々は独自のツールを開発し、分析の迅速・高精度化を行うだけでなく、様々な固体試料を用いた精度検証を進めています。

研究成果はどう使われるか

天然の鉱物のみならず、各種素材・工業製品や食品等、あらゆる固体物質を対象とした、微小域・微量元素濃度分布の新たな評価技術として期待されます。

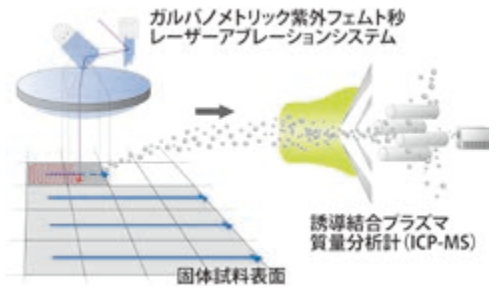


図1 LA-ICPMS 装置概要

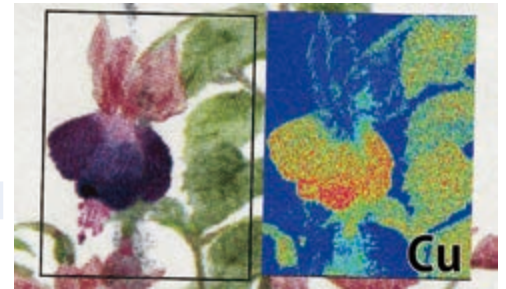


図2 印刷物中の微量濃度分布 (銅)



選鉱・分離プロセスの高度化のための粉体シミュレーション開発

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

成果概要

離散要素法を用いた粉体シミュレーションの技術開発に取り組んでいる。本研究では、粒子流体間の相互作用力や付着力、磁力などの物理モデルの新規開発や、選別機内の粒子挙動解析を行なっている。これらの解析結果をもとに、装置内の分離機構の解明、最適な運転条件や装置設計の検討を行なっている。

研究内容

鉱物資源の選鉱において、コストやエネルギー消費を抑えて、高精度な濃縮や選択的分離を達成するためには、その高度な操作設計が求められている。そこで、選鉱・分離プロセスの高度化を目的として、粉体挙動の解析手法である離散要素法を用いたシミュレーション技術の開発を行っている。シミュレーションの要素技術開発として、粒子に複数の成分が混在する片刃粒子に作用する磁力をモデル化し、磁選機内の粒子挙動解析への応用に取り組んでいる。また、装置内の分離機構の解明や最適な運転条件の検討として、比重分離機の1つである揺動テーブルにおける粒子挙動解析に取り組み、テーブルの傾斜角や揺動モードなどの装置条件および試料の供給量、混合比、粒径分布などのパラメータが分離に与える影響の系統的な評価に取り組んでいる。

研究成果はどう使われるか

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

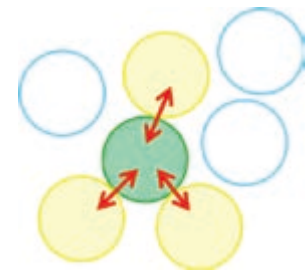


図1 粒子の接触力の計算モデル (Voigt model)

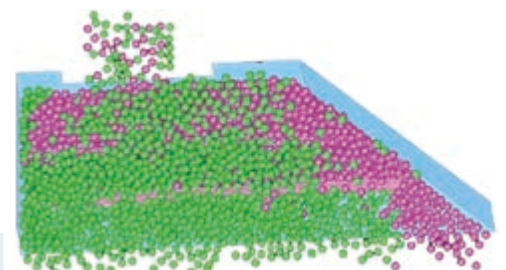


図2 揺動テーブルの粒子分離挙動解析

蛙目粘土鉱床での鉄の酸化・溶脱に伴う鉄同位体分別

鉱物資源研究グループ 高木哲一* 星野美保子, 総合地球環境学研究所 申 基澈, 大阪大谷大学 地下まゆみ,
地圏化学研究グループ 月村勝宏 [連絡先] takagi-t@aist.go.jp

成果概要

蛙目・木節粘土鉱床に含まれる微量の鉄含有鉱物および蛙目粘土下部の褐鉄鉱殻に着目し、鉱床の成因を検討した。その結果、同粘土に含まれる鉄は酸化・溶脱され、褐鉄鉱殻として沈殿したことが、鉄含有鉱物、原岩花崗岩などの $\delta^{56}\text{Fe}$ は+0.2%前後の値を示すのに対し、褐鉄鉱殻は-0.5~+0.9%の範囲で分別しており、鉄の酸化・溶脱に微生物活動が関与したことが示された。

研究内容

瀬戸焼の原料である蛙目粘土(図1)および付随する木節粘土の成因を、鉄の挙動に着目して検討した。蛙目・木節粘土中には、ilmenite-hematite系列とその変質物である ilmenite-pseudorutile 系列の Fe-Ti 酸化物および単独の anatase, magnetite, Fe-hydroxide が微量に含有される。これら鉱物の特徴は、鉄が酸化・溶脱される過程を示す。また、蛙目粘土と基盤花崗岩との不整合面には褐鉄鉱殻(鬼板)が形成されており(図2)、その産状から蛙目・木節粘土から溶脱された鉄が沈殿したものと判断される。上述の鉄含有鉱物、褐鉄鉱殻および原岩花崗岩などの $\delta^{56}\text{Fe}$ 値は概ね+0.2%前後を示すのに対し、褐鉄鉱殻の値は-0.5~+0.9%の範囲に分散しており、同位体分別が確認される。これらの結果から、蛙目粘土鉱床は鉄酸化細菌が活動する硝酸酸性の条件下で、長石・雲母類が強いカオリン化作用を被って形成されたと推測される。

研究成果はどう使われるか

本研究成果は、クリティカルゾーン(地表から岩盤に至る生物圏の総称)の物質循環機構の解明に寄与し、ひいては風化作用、地下水環境、生態系などの理解に資すると期待される。



図1 瀬戸市暁鉱山の蛙目粘土鉱床



図2 瀬戸市暁鉱山の褐鉄鉱殻(鬼板)

水・油・ゴム・樹脂を壊さずその場で測る片側開放型プロトン核磁気共鳴スキャナー

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

成果概要

土木建造物の新規建設やメンテナンスの現場では、流体や樹脂材料等の原位置非破壊センシングに対するニーズがある。プロトン核磁気共鳴法(NMR)は、水や有機物分子の物理化学的な状態を計測できる手法として広く知られているが、対象を切り取って試料管に装填する必要があった。我々は、センサーユニット(磁石と高周波コイル)を片側開放型という特殊な構造にすることで、対象を切り取らずに、表面から数mm~数cm深部にある部位をスキャンできるようにした。これによって、水や有機物等のNMRセンシングを原位置・非破壊で行う道が開けた。

研究内容

図1は、開発に成功した探査深度約1cmの計測システムである。土木現場で打設したグラウトや接着剤の固化状況の非破壊センシングをイメージし、ゴム系ボンド試料の固化過程のモニタリングを行った。図2のように、センサーユニットの上にボンドを放置して、固化に伴うボンドの分子の運動性の低下過程を、プロトン横緩和時間(減衰の時定数)の低下という形で定量的に計測することに成功した。

研究成果はどう使われるか

図2のボンドに限定せず、水・油・ゴム・樹脂の物理化学的な状態の非破壊原位置計測に適用できる可能性がある。たとえば、打設したセメントの養生過程(水の消費過程)のモニタリングや寒冷地での凍害の検査、非金属製パイプ中を流れる流体の流速計測が候補である。



図1 探査深度約1cmのセンサーユニットを用いた実験風景

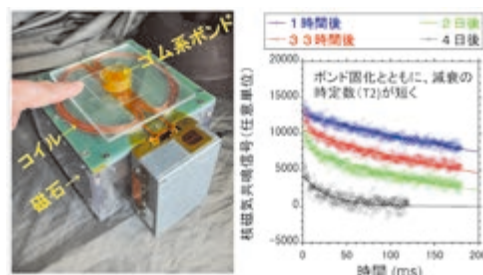


図2 図1のズーム(左)とボンドの横緩和波形の経時変化(右)



石炭の物理的性質に着目した低コスト・簡易な石炭熟成度評価法の開発

物理探査研究グループ 小森省吾*, 燃料資源地質研究グループ 高橋幸士, 地圏微生物研究グループ 金子雅紀
[連絡先] komori.shogo@aist.go.jp

成果概要

本研究では、石炭の熟成度評価手法のコスト低減・効率化を目的とし、比較的計測が容易で低コストな石炭の物性と熟成度との関係性を把握するための手法を考案した。X線CTにより石炭の微細構造を観察し、クリートと呼ばれる亀裂構造の発達と熟成度との関係を把握した。クリートの発達は比抵抗をはじめとした石炭の物性値に大きな影響を与えるものと考えられる。

研究内容

石炭熟成度の評価指標の1つであるビトリナイト反射率測定はコストの高さと効率性の低さが課題である。石炭はクリートと呼ばれる亀裂システムを内部に有しており、熟成の進行に伴って一定方向に連続して発達する傾向があることが知られている。このことは、熟成や圧密による亀裂構造の変化に対応して石炭の物理的性質に違いが生じる可能性があることを示唆する。本研究では物理的性質として石炭の比抵抗に注目するとともに、石炭内部の亀裂構造をX線CTで把握することで、比抵抗特性と亀裂構造との関係を検討している。X線CTでは、石炭内部に一定方向に発達する亀裂が認められた(図1)他、亀裂の発達の程度・状況が石炭試料により異なることを把握した。現在、様々な熟成度を有する石炭試料の比抵抗計測を実施している(図2)。

研究成果はどう使われるか

将来的に、比抵抗特性が石炭熟成度評価のパラメータの1つとして利用できれば、高価な反射率測定器やノウハウを有していない事業者でも容易に、およその石炭品質を簡便に評価可能になることが期待される。

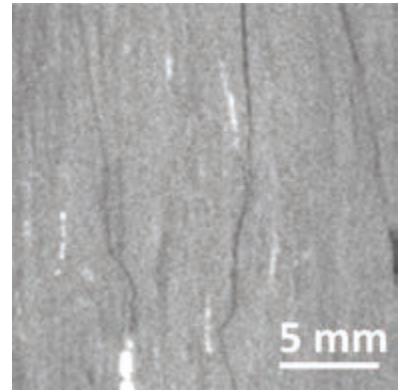


図1 X線CTによる石炭内部の亀裂構造の一例

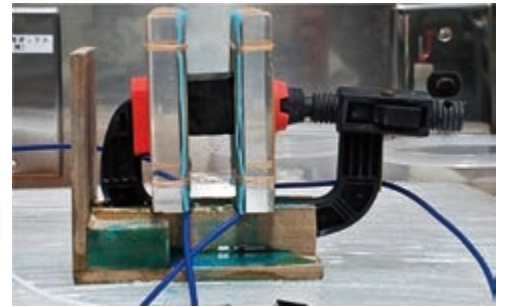


図2 石炭試料の比抵抗計測の様子



無人地上車両を用いたマルチコイル型電磁探査システムの応答特性

物理探査研究グループ 佐竹 海* 万沢かりん 上田 匠 神宮司元治 横田俊之
[連絡先] satake-kai@aist.go.jp

成果概要

本研究では、電磁探査装置と無人地上車両(UGV)を用いた新しい電磁探査システム的确立を目指し、基礎的な運用実験とデータ取得実験を実施している。UGVによる自律走行測定と、最も安定した測定が可能と考えられる地表設置測定との比較を行い、システムの実用化を想定できる品質のデータを取得できることを確認した。また、測定データや計測方法の評価検討を行い、今後の課題を明らかにした。

研究内容

近年ドローンをはじめとした無人機は、様々な分野において応用研究が進められ、社会的に期待が高まっている。一方、地圏環境や地圏利用分野においては、地表から深度数十メートルまでの浅層領域を対象とし、広範囲なエリアを非破壊で調査できる浅部探査技術の必要性が高まっている。このような背景を踏まえ、本研究では、単一周波数・マルチコイル型電磁探査装置CMD-EXPLORERとUGV(BERG-400)を組み合わせた新しい浅部探査用の電磁探査システムの開発を実施している。通常、人が携行し移動しながら測定するCMD-EXPLORERにより、手持ち・地表設置・人力牽引・(手動)操縦牽引・自律走行牽引など様々な方法でデータ取得し、それぞれの結果を比較することにより基礎的な特性の把握をおこなった。

研究成果はどう使われるか

本システムは最終的に、UGVを自律走行させ電磁探査装置を牽引する形で測定することを想定している。そのため、低コスト・省力化を実現するとともに、工場跡地における土壌・地下水の汚染調査など、広範囲かつ効率的な地下浅部探査への応用が期待できる。



図1 UGVEMシステム(右:UGV,左:CMD)

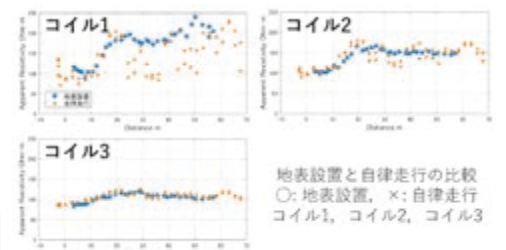


図2 CMDの地表設置測定および無人地上車両の牽引による自律走行測定結果

成果概要

蛇紋岩化反応が関与する水循環システムで観測される炭化水素ガスは、非生物起源であることが示唆されているが、その成因については明らかでない。本研究では、蛇紋岩に関連したメタンの炭素源の起源について、時間的・空間的な制約を与えることを目的として、放射性炭素同位体 (^{14}C) および希ガス同位体の分析を行った。その結果、主要なメタンの炭素源は浅部地下水でなく深部地殻由来である可能性が高いことが明らかになった。

研究内容

まず、メタンガスおよび揚湯パイプ表面に沈殿した炭酸塩の ^{14}C 含有量を測定した。 ^{14}C は大気中で生成され、大気 CO_2 との交換が遮断される地下圏では放射壊変により濃度が徐々に減少する。測定の結果、メタン中の ^{14}C 含有量が検出限界付近であるのに対して、炭酸塩中には検出可能な量の ^{14}C が含まれていた。このことは、蛇紋岩メタンが ^{14}C を有意に含む地表由来の炭素から短い時間スケールで生成・循環したものでないことを示す。次に深部起源ガスの寄与を調べる目的で希ガス同位体の測定を行った。ヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$)が高いことから、マントル起源ガスの寄与があると考えられる。しかし一方で、本試料の $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 比が典型的なマントル起源ガスのよりも2桁以上高いことから、マントル起源メタンだけでは蛇紋岩メタンをうまく説明できない。マントル CO_2 や地殻内の炭素がメタンに変換されるプロセスが必要と思われる。

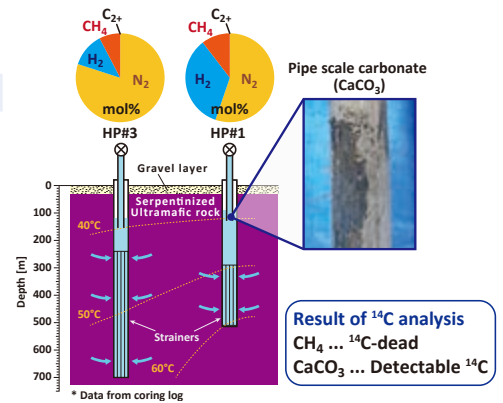


図1 蛇紋岩温泉の掘削井戸の概略図

研究成果はどう使われるか

非生物起源の炭化水素ガスの成因を明らかにすることは、新たなエネルギー資源を評価する上で重要である。また本研究で利用したメタンの ^{14}C 測定技術は、天然ガスの起源を読み解く上で非常に有用である。

海洋堆積物から検出された新規ハプト藻バイオマーカー

成果概要

海洋堆積物中の C_{38} アルケンジオン組成の変化を世界で初めて評価した。 C_{38} アルケンジオンの分子構造や組成変化は、ハプト藻に特徴的な有機分子(バイオマーカー)である長鎖アルケンと極めてよく似ていた。そのため、 C_{38} アルケンジオンは新規ハプト藻バイオマーカーである可能性が高く、今後の古海洋研究や藻類進化の謎を解明するための「鍵分子」の一つとなると期待される。

研究内容

長鎖アルケンとはハプト藻だけが合成できる特徴的な有機分子(バイオマーカー)である。特に、分子に含まれる二重結合数の比(不飽和比)が表層水温と高い相関関係を示すため、堆積物中の長鎖アルケンは古水温指標として古環境復元に広く利用されてきた。Furota et al. (2016) では、長鎖アルケンと分子構造がよく似た C_{38} アルケンジオンを海洋堆積物から初めて検出し、新規のハプト藻バイオマーカーとして報告した(図1)。しかしながら、その起源や機能は十分に検討されていない。本研究で C_{38} アルケンジオンの詳細な組成変化を検討した結果、(1) C_{38} アルケンジオンの不飽和比が長鎖アルケンと同様に古水温変化に相関すること、(2) C_{38} アルケンジオンは過去のハプト藻だけが合成できた可能性があることが明らかとなった。

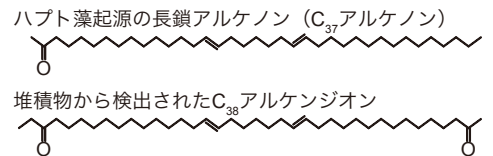


図1 長鎖アルケンと C_{38} アルケンジオンの分子構造

研究成果はどう使われるか

新規バイオマーカーである C_{38} アルケンジオンは、藻類の生合成進化を考える上で非常に興味深い有機分子である。また、石油根源岩形成の背景にある古環境を復元する上でも新たな指標として利用できる可能性がある。



低温再生型粘土系吸着剤を用いた熱輸送システム

地圏化学研究グループ 鈴木正哉* 森本和也 万福和子
[連絡先] masaya-suzuki@aist.go.jp

成果概要

省エネシステムとして、100℃以下の低温排熱を利用したシステムが検討されており、中でもモバイル型の熱輸送システムが注目されている。現在NEDOの戦略的省エネルギー技術革新プログラムにおいて研究が進められており、5.5トンのハスクレイをトラックに搭載し、工場での低温廃熱を用いて乾燥させた後、羽村市スイミングプールにて熱として利用する実証試験が行われた。

研究内容

吸着剤を用いて効率的に熱を利用するには、細孔の大きさが小さい方が有利であるが、100℃以下の低温排熱にて再生を行うには細孔半径が0.5nm以上であることが必要である。このような観点から、今回の実証試験では、吸着剤としてハスクレイ高性能版（グレードI）を用いた。また今回の実証試験では、モバイル型熱輸送と定置型の2通りの熱利用システムを通年で検証している。モバイル型熱輸送においては、工場のコージェネレーションシステム（CGS）設備で発生した排熱を用いて吸着剤を乾燥させ、工場内の産業空調設備で利用するシステムと、約2km離れた羽村市スイミングセンターへ大型トレーラーで輸送し、温水プールの熱源として利用する2つのシステムにて行った。また、定置型では、工場の製品を乾燥させる工程で、加熱用蒸気の消費量を削減するシステムにて行った。

研究成果はどう使われるか

低温再生型粘土系吸着剤を用いた熱輸送システムの開発により、これまで使用されずに捨てられていた100℃以下の低温排熱を利用できることになる。また熱の利用先として乾燥工程、温水、冷暖房等に利用が可能である。



図1 蓄熱サイト外観（日野自動車株式会社羽村工場）



図2 熱利用サイト外観（羽村市スイミングセンター）



地熱発電プラントのリスク評価（材料腐食等）について

地圏資源化学研究グループ 柳澤教雄
[連絡先] n-yanagisawa@aist.go.jp

成果概要

本研究は、NEDO「地熱発電技術研究開発」において、地熱発電プラントの地上配管やケーシングなどにおけるリスク評価、寿命予測を行うために、特に材料の腐食が occur やりやすい酸性熱水環境下での材料腐食速度予測式を構築し、材料選定に役立てるものである。本研究は、地熱技術開発株式会社、NKK シームレス鋼管株式会社、京都大学との共同実施である。

研究内容

地熱の配管で用いられるクロム鋼や炭素鋼などの腐食速度については、2000年までの工業技術院サンシャイン計画の中で実施された腐食試験から、流体の温度、pH および材料のCr 当量に依存することが示されていた。2014年度から実施している本研究では、短時間で材料腐食試験が可能な小型ループ式の試験装置（図1）を地熱配管に接続して、二相流体で気相が腐食速度に及ぼす影響、現地で硫酸等を添加することによるpH 変化の影響、さらに腐食速度の経時変化を調べるとともに、上記の材料腐食速度の予測式との比較検討を行った。その結果、図2に示すように二相流の試験では、平均腐食速度が4日目以後にほぼ一定となり、その腐食速度は気相補正を実施することによって従来の予測式での値とほぼ一致することが示された。またpH 変化による腐食速度の変化も示された。

研究成果はどう使われるか

国内外で、高ポテンシャルで有りながら、pH が低いために利用されていない地熱資源は多い。本研究で酸性熱水環境下の材料腐食の予測精度を向上させることによって、適切な材料選択による開発促進に寄与することが期待される。



図1 小型ループ式材料腐食試験装置

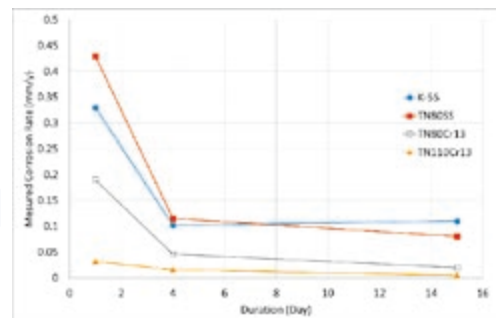


図2 二相流での各種配管材料の腐食速度

水溶性天然ガス中のネオペンタン

地圏化学研究グループ 猪狩俊一郎
[連絡先] s-igari@aist.go.jp

成果概要

炭化水素組成は天然ガスの基本的測定項目であり、測定例は多い。油田ガスの場合、ペンタン（C5）に関しては、3種の異性体のうち n-C5・i-C5は一般に測定されているが、neo-C5に関してはほとんど測定例がない。また水溶性天然ガスの場合、C5炭化水素は微量のため測定されないことが多く、neo-C5の測定例もほとんど無い。我々は日本各地の水溶性天然ガスの neo-C5を含むC1-C5全構造異性体を測定し、その支配因子に関する考察を行った。

研究内容

水溶性天然ガスの場合、C2/C3比と neo-C5/i-C5比の対数間には直線関係があり、これは OH ラジカルによる分解直線と一致する。このことから OH ラジカルによる水素引き抜き分解が炭化水素組成に影響を与えていることが推定される。また、i-C4/n-C4比が 1 よりも大きく、微生物による分解を受けていると考えられる試料が多数存在した。これらのことから、OH ラジカルによる分解や微生物による分解のような二次的な作用が水溶性天然ガスの C2+ 組成に大きな影響を与えていることが推定された。このように neo-C5の測定により様々な情報が得られる。neo-C5は測定が容易であることから、天然ガスの測定項目に加えることが望ましいものと考えられる。

研究成果はどう使われるか

本研究により水溶性天然ガスの C2+ 炭化水素組成が OH ラジカルによる分解に大きく影響されることが推定された。neo-C5/i-C5比等を用いることにより、水溶性天然ガスの、OH ラジカルによる化学的分解の進行度を知ることができる。



図1 非メタン炭化水素濃縮測定装置

流体岩石反応に関わる溶解度と錯体の関係の整理

地圏化学研究グループ 佐々木宗建
[連絡先] sasaki-munetake@aist.go.jp

成果概要

流体岩石相互作用を解明するには流体・鉱物・これら界面における物理化学的な諸性質の理解が必要である。本研究では文献の熱力学的データを参考に、単純な化合物の水に対する溶解度と、これに対する錯体生成の効果を、元素毎に比較し、バルク溶液化学的な諸性質の今後の整理・検討のための基礎情報とした。

研究内容

一般に物質の溶液化学的性質は酸・塩基反応を基本とし、バルク溶液中での性質は、酸化物の溶解度に代表的に観察することができる。溶液に Cl⁻、SO₄²⁻、HS⁻等の溶質成分が加わると、酸化物は塩化物、硫酸塩鉱物、硫化物等へと変化し、溶存種はヒドロキソ錯体から溶質成分を配位子とする錯体へと変化する。このような鉱物種の変化は溶解度を減少する一方で（図1）、錯体の生成は溶解度を増加する（図2）。これらの効果は溶質成分の濃度と pH に応じた酸解離状態によって変化し、また、HSAB 則に整理されている陰陽イオン間における錯体の生成のしやすさも関係する。本研究では文献の熱力学的データを参考に、幾つかの元素について、溶解度への錯体生成の効果を確認し整理を試みた。

研究成果はどう使われるか

本研究は予察段階であるが、今後物質の溶液化学的性質に関わる種々の熱力学的パラメータについて特性を検討・整理することで、熱水系における物質移行過程の理解や地化学的モデリングの精緻化に役立つことが期待される。

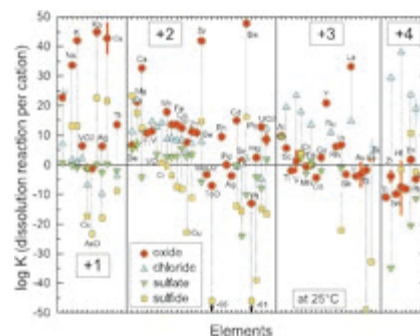


図1 単純な化合物のイオンへの溶解反応の平衡定数の比較

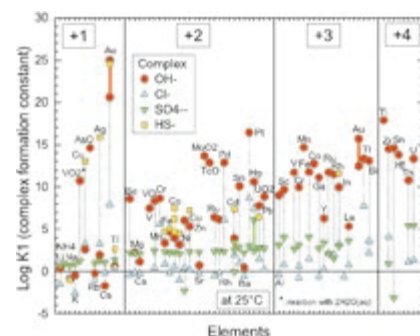


図2 イオンから錯体生成の第一段逐次安定度定数の比較



オキシ水酸化鉄の合成と有害物質の吸着

地圏化学研究グループ 森本和也* 鈴木正哉
[連絡先] kazuya.morimoto@aist.go.jp

成果概要

自然由来の重金属等による汚染土壌処理のための対策技術に資する研究開発を行うことを目的として、ナノトンネル構造を有する陰イオン交換性鉄鉱物であるアカガネアイトについて合成条件の最適化に向けた検討と、アカガネアイトに対するフッ化物イオンやヒ酸イオンの陰イオン吸着特性について評価を行った。

研究内容

アカガネアイトの合成条件の検討では、原料とする塩化第二鉄の水溶液からより高効率でアカガネアイトを生成させることを目指して、沈殿を生じるさせる温度やpHを調整した系で検討を行い、固体の収量を増加させることができた。また、得られた沈殿物については鉱物学的キャラクタリゼーションによりアカガネアイトの生成を確認した。アカガネアイトに対するフッ化物イオンやヒ酸イオンの吸着特性の評価では、地球化学モデリングソフトを用いた化学平衡計算により液相中の陰イオンの化学種を考察し、それぞれの陰イオンの吸着試験から得られた結果からアカガネアイトに対する高い親和性が解釈できた。イオンの吸着形態を検討するために、粉末X線回折測定や赤外分光分析、ゼータ電位測定を行った。

研究成果はどう使われるか

鉱物資材を用いて重金属を吸着・不溶化する技術の開発は、自然由来の重金属等による汚染土壌処理のための対策に活かされる。イオンの吸着特性と吸着形態の評価から得られる情報は、イオンの安定性を予測する上で有益な知見となる。

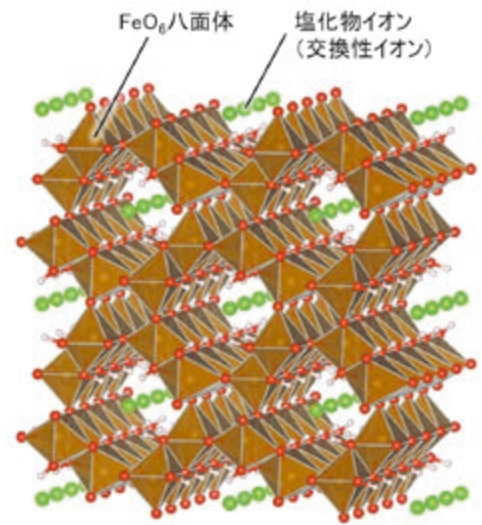


図1 トンネル構造を持つアカガネアイトの結晶構造。結晶構造描画ソフトVESTA(Momma and Izumi, 2011) による。



ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法のJIS 制定

地圏化学研究グループ 三好陽子
[連絡先] youko-miyoshi@aist.go.jp

成果概要

メチレンブルー吸着量測定は、粘土資源「ベントナイト」の代表的な性能評価手法である。この測定方法をJIS化するために、日本規格協会のJIS原案作成支援制度に応募して採択され、同協会支援下でJIS原案作成委員会を立ち上げた。JIS原案作成委員会での議論を元にJIS原案を完成させ、経済産業省での審議を経て、2019年3月にJIS制定に至った。

研究内容

ベントナイトは「1,000の用途を持つ粘土」と称されるほど様々な用途に利用されるが、産地ごとに性能が異なるため、利用するには性能評価を適切に行うことが重要である。性能評価の手法の中でも特にメチレンブルー吸着量測定は測定値の個人差が大きいため、標準化の必要性が認識されていた。当部門ではメチレンブルー吸着量測定のJIS化を目指して研究を進めるとともに、ベントナイト関連企業と連携してJIS化準備委員会を開催して議論してきた。日本規格協会の支援下で準備委員会を前身とするJIS原案作成委員会を立ち上げ、約1年かけてJIS原案を完成させた。JIS原案作成委員会ではラウンドロビテスト（複数の機関が同一試料を同一方法によって測定する作業）を実施し、測定方法の信頼性を検証した。

研究成果はどう使われるか

このJIS制定により、測定値の個人差が最小化され、ベントナイトの正確な性能評価が期待できる。これにより各用途に見合ったベントナイトを効率的に選定できるようになり、ベントナイト資源の有効利用につながると期待される。

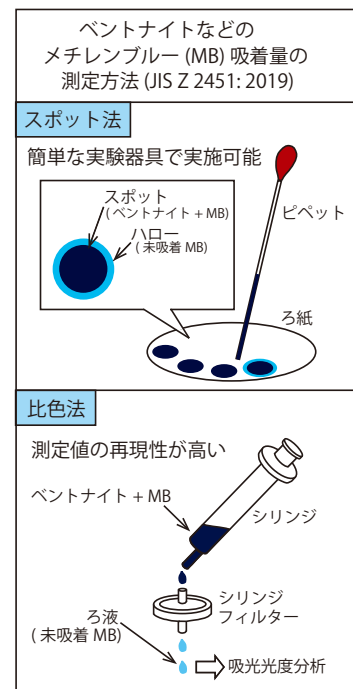


図1 「ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法」(JIS Z 2451:2019) スポット法と比色法から成る。

成果概要

地球温室効果ガスであるCO₂の分離回収・貯留(CCS)の安全かつ経済的な実用化規模のCO₂地中貯留技術を確立するため、圧入されたCO₂の長期挙動予測手法を開発する。地化学反応による接触角変化に伴うシール層の毛管トラップの低下および枯渇ガス田などの貯留層における共存メタンが、圧入CO₂の長期挙動に及ぼす影響を数値シミュレーションによって解析した。

研究内容

本研究では、CO₂地中貯留における遮蔽層の接触角の変化が圧入したCO₂の遮蔽性にどのような影響を及ぼすかを数値シミュレーションにより検討した。また、貯留層として海底下の塩水帯水層に加えて枯渇ガス田を想定し、共存メタンの影響についても検討を行った。シミュレーションの結果、遮蔽層の低浸透率や残留ガストラップにより、CO₂が二次貯留層へ進入することはなかった。一方、接触角の変化により毛管圧が低下すると、圧入停止後も遮蔽層へのCO₂進入が続くケースがあった。これらの結果から、地化学反応による接触角の変化が、長期的な遮蔽性に影響を及ぼす可能性が示唆された。また、メタンが存在するケースでは、低溶解度・低密度のメタンとの共存により気相の飽和度・圧力が高く保たれ、長期の流動性に無視できない影響を与えることが分かった。

研究成果はどう使われるか

CO₂地中貯留の安全かつ経済的な実施のためには長期挙動予測が不可欠であるが、本研究により、予測を行う際には、地化学反応による接触角の変化や、共存メタンの存在を考慮に入れる必要性が示唆された。

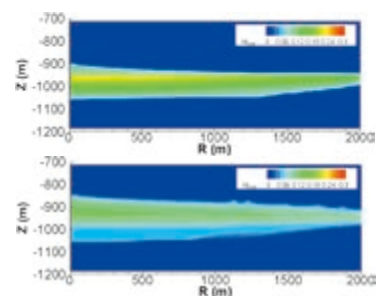


図1 (a)接触角(0°)変化なし、および(b)接触角が圧入開始から25年後に75°に変化したケースにおける、500年後のCO₂質量分布。遮蔽層下端(z = -950 m)を白線で示す。

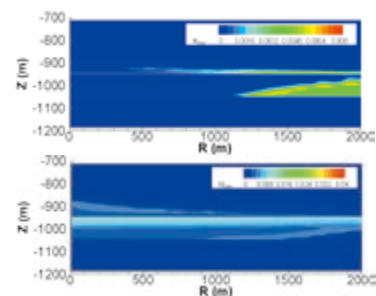


図2 (a)貯留層にメタンが残留しているケース、および(b)メタンを同時圧入したケースにおける、500年後のメタン質量分布。遮蔽層下端(z = -950 m)を白線で示す。

地層触媒環境活用型CO₂転換技術の開発

成果概要

CO₂転換技術とは、CO₂を水素、CO、炭化水素化合物に転換する技術である。しかしながら、転換プロセス中の反応に伴うエネルギー消費が膨大なCO₂排出につながる。そのため、技術そのものがCO₂削減に貢献できているとはいえないのが現状である。本研究では、既存CO₂地中貯留技術を応用し、CO₂とナノ金属触媒を圧入することで、地層条件を活用した大規模なCO₂転換技術の開発を目的としている。(図1)

研究内容

これまでに、CO₂地中貯留条件下で標準触媒(Ni-γAl₂O₃)と水を反応させることで、CO₂の一部が長鎖状の飽和炭化水素に転換することを明らかにした。サンプリングした溶液の中には、固体状の炭化水素も存在することがわかった。また、岩石の微細な孔隙への金属触媒の圧入を想定し、マイクロ液を用いたコアシェル状ナノ金属触媒を開発した。実際、CO₂と開発したナノ触媒を圧入した砂岩コア試料をX線CTで分析した結果、触媒が岩石コア全体に均一に分布していることが明らかとなり、コアシェル型触媒は、本技術における圧入用触媒の一つとして適していることがわかった。

研究成果はどう使われるか

本研究の成果は、CO₂を短期間で固体化できることから、CO₂漏出へのリスク低減と、CO₂地中貯留の技術展開に一層の期待がもてる。また、地中貯留条件下でCO₂の炭化水素化が可能なることから、未来の資源貯蔵化の手法の一つとして提案できる。

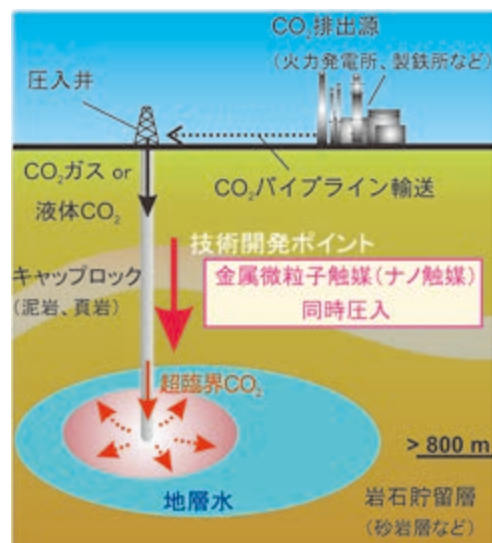


図1 本技術における開発ポイント



バックグラウンド値の決定に関する新しい国際的指針について

地圏環境リスク研究グループ 張 銘*, 土壤環境センター 中島 誠, ISO/TC190検討部会 土木研究所 田本修一, 国立環境研究所 肴倉宏史 [連絡先] m.zhang@aist.go.jp

成果概要

バックグラウンド値を決定することは、現状の地盤環境を適切に把握し、今後の環境規制やリスクコミュニケーション等において非常に重要である。本調査研究では、バックグラウンド値の決定に関する新しい国際的指針の目的や調査対象物質、バックグラウンド値の決定方法と特徴、データの提示と報告等のエッセンスを抜粋し、一般的な考え方との違いや留意点等についても議論した。

研究内容

国際標準化機構 ISO では、「バックグラウンド値の測定に関する指針」が改訂され、2018年に発行された (ISO 19258:2018)。バックグラウンド値を知ることにより、現状の地盤環境を適切に把握でき、今後の土地利用や政策決定及びリスクコミュニケーション等において非常に重要である。特に、我が国においては、自然由来土壤汚染も多く、今後、汚染土壤の再利用を含め、より合理的かつ効率的な浄化対策を実施するためには、対象地域のバックグラウンド値を決定し、対策措置または環境管理の一つの重要な指標として利用することも考えられる。このため、ISO で発行した新しい国際的指針に関する技術的調査と取りまとめを実施し、調査対象、調査方法、バックグラウンド値の決定方法、日本の事情との違いなどを整理し、関連学会において情報提供を行うことにした。

物質	化学形態	抽出/分離方法	抽出処理	定 量
半金属: 銅、鉛、亜鉛、セレン	全量	アルカリ/酸解 + 蛍光X線、HF + HClO ₄	ISO 14869-1	ISO 14869-1 ISO 11047
金属: バリウム、ビスマス、カドミウム、クロム、コバルト、銅、鉄、鉛、マンガン、水銀、モリブデン、ニッケル、チタン、バリウム、亜鉛	溶全量 固 体	王水 EDTA DTPA	ISO 11466 ISO 14870	ISO 11047
シアン化物	水溶性	H ₂ O、溶出試験	注)を参照	注)を参照 ISO 11262 ISO 11380

注) 水質関連国際規格シリーズの中で水・土壌からの抽出と分析方法が多数存在し、利用できる可能性がある。ただし、特定の土壌材料から抽出したものに限定する必要がある。

図 1 無機物質分析の例と利用可能な国際規格

研究成果はどう使われるか

我が国では、自然的な要因で鉛や砒素、ふっ素及びほう素等が環境基準値を超過する地域が多数存在する。バックグラウンド値の決定は、自然由来汚染の判断や合理的な浄化対策の目標値の設定等に非常に有用と考えられる。



塩素化エタン類の分解経路と分解速度について

地圏環境リスク研究グループ 張 銘* 吉川美穂 [連絡先] m.zhang@aist.go.jp

成果概要

塩素化エタン類による土壌・地下水汚染は塩素化エチレン類による汚染より少ないものの、わが国では汚染の報告事例もある。これまでの研究報告は塩素化エチレン類に関するものが圧倒的に多く、塩素化エタン類に関するものが極めて少なかった。本調査研究では、1,1,1-トリクロロエタンと1,2-ジクロロエタンの分解経路と分解速度について調査したものを整理し、取りまとめた。

研究内容

1,1,1-トリクロロエタン及び1,2-ジクロロエタンに代表される塩素化エタン類は、1,1,2-トリクロロエタンとともに、「土壌汚染対策法」で指定された第一種特定有害物質である。1,1,2-トリクロロエタンの性質は1,1,1-トリクロロエタンに類似しているため、本研究では、前者の2物質を中心にそれぞれの分解経路と分解速度を調査した。1,1,1-トリクロロエタンの分解メカニズムとして加水分解、脱ハロゲン水素及び還元的脱塩素分解という三つの分解が発生しうる(図1)。また、1,2-ジクロロエタンは異化分解、脱ハロゲン酵素による分解と還元分解が発生しうる。両物質の分解速度は温度に依存し、数十倍に及んで変動するが、1,1,1-トリクロロエタン(半減期0.5~9.9年)に比べ、1,2-ジクロロエタンの分解速度(半減期0.04~2.1年)が比較的大きいことが分かった。

研究成果はどう使われるか

塩素化エタン類は複数の分解経路が存在し、分解速度も条件によって大幅に変動する。実際の汚染現場において、どの経路で分解しうるか、またどの位の速度で浄化可能かなどの検討に活用することが可能である。

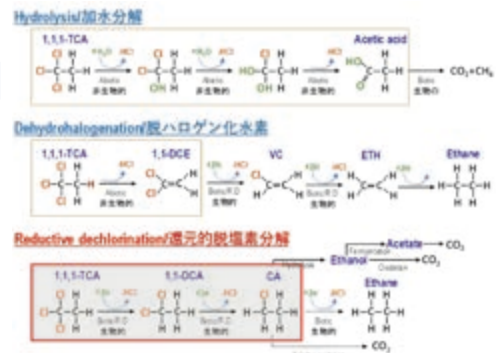


図 1 塩素化エタンの分解経路(1,1,1-トリクロロエタンを例として)

カルシウム系吸着材のヒ素吸着能に及ぼすケイ酸の影響

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

成果概要

汚染水からのヒ素除去やヒ素汚染土壌の不溶化を目的としたヒ素吸着材として、マグネシウム (Mg) 系及びカルシウム (Ca) 系吸着材が期待されている。一方、Mg 系吸着材のヒ素吸着能は、ケイ酸の存在下において低下することが報告されている。そこで、本研究では、Ca 系吸着材を対象とし、模擬ヒ素汚染水としてケイ酸を共存させたヒ酸溶液を用いたヒ素除去試験を実施し、Ca 系吸着材のヒ素吸着能に及ぼすケイ酸の影響を実験的に検討した。

研究内容

ヒ素吸着材として2種類のカルシウム化合物 (CaO 及び $\text{Ca}(\text{OH})_2$) を用い、ケイ酸 - ヒ酸混合溶液を模擬ヒ素汚染水としたヒ素除去試験 (振とう試験) を実施し、ヒ素除去性能に及ぼすケイ酸の影響を調べた。その結果、CaO 及び $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ともにケイ酸濃度が高いほどヒ素除去率が增加することが明らかになった。このケイ酸の存在によるヒ素除去率の向上は、吸着材母材から溶出した Ca 成分がケイ酸と結合することによりケイ酸カルシウム種を生成・析出する過程において、一部ケイ酸の代わりにヒ酸成分を取り込むためと推測される。また、処理溶液中の Ca 濃度は、ケイ酸の存在により低下した。これは、前述のケイ酸カルシウムの生成に加えて、吸着材表面へのケイ酸の吸着による被覆効果のためと推測される。

研究成果はどう使われるか

懸念されていたケイ酸成分による吸着材へのヒ素の吸着阻害の影響がCa系吸着材では生じず、むしろ浄化能力及び母材の安定性の向上が確認されたことから、Ca系吸着材の積極的な運用の提案、さらに吸着材改良のための基礎データとして役立てられることが期待される。

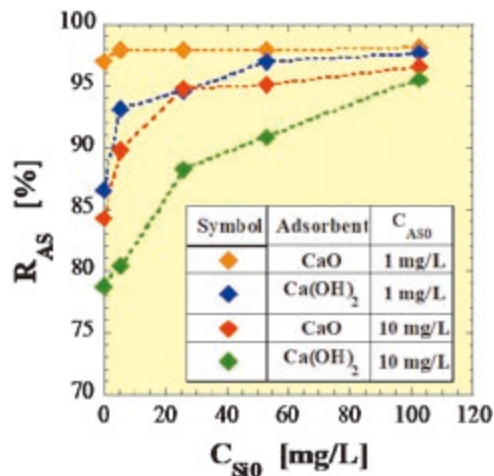


図1 Ca系吸着材のヒ素除去性能に及ぼすケイ酸の影響

注釈)

C_{ASO} : 初期ヒ素濃度 [mg/L], C_{SiO} : 初期ケイ酸濃度 (Si 換算値) [mg/L], R_{AS} : ヒ素除去率 [%]

油圧式三軸圧縮試験装置の改良：堆積物の浸透率測定を目指して

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

成果概要

地下から掘削・採取された高い間隙率を示す堆積物の力学・水理学的特性を正確に計測するためには、高圧・排水条件下において実験をおこなう必要がある。本研究では、本グループ所有の油圧式三軸圧縮試験装置について、排水条件下で力学・水理学的特性を測定可能とするため、アセンブリや計測機構の一部を改良・検討中である。

研究内容

産総研設置の油圧式三軸圧縮試験装置では、非排水条件下の変形実験が実施されてきた。しかし高い空隙率かつ低い浸透率を示す堆積物・軟岩の力学・水理学的特性を調べるためには、排水条件下において変形・浸透率測定試験をおこなう必要がある。そのためには、既存の装置について試料アセンブリの大幅な改良および試料の上・下端の圧力差を計測するための機構を追加するなど様々な工夫が必要となる。本研究ではこれまでに、精度良い浸透率測定を実施するために均一に間隙流体を分散させる機構を追加した。現在は、試料の上・下端の圧力差を計測するための機構を追加するため、ペダスタルとキャップの設計改良を検討中である。

研究成果はどう使われるか

二酸化炭素地中貯留、シェールガス等の様々な掘削プロジェクトにおいて採取されている堆積物・軟岩について、力学・水理学的特性を調べることができるようになり、様々な掘削プロジェクトへの貢献が期待できる。



図1 直径20 mm の試料アセンブリ



超臨界条件下における亀裂を含む花崗岩の水理学的特性

地圏メカニクス研究グループ 北村真奈美*, 活断層火山研究部門 高橋美紀
[連絡先] kitamura.m@aist.go.jp

成果概要

近年, より効率的な地熱エネルギー回収を目的として, マグマ近傍の高温岩体をターゲットとし, 超臨界流体が存在する領域で人工貯留層を利用する地熱開発が計画されている. そして, 地熱開発には岩石の浸透性が重要な情報である. 本研究では, 人工的に亀裂を入れた花崗岩について超臨界流体が存在する環境において, 様々な温度・圧力における浸透率変化を調べた.

研究内容

本研究では, 急減圧急冷実験により人工的に亀裂を入れた花崗岩を用いて, 超臨界流体が存在する高温高压条件下における浸透率測定を実施した. その結果, 超臨界流体条件下の亀裂を含む花崗岩は, 室温条件下に比べて浸透率が1桁以上高いことがわかった. また, 亀裂を含む花崗岩は圧力が増加するにつれて低下し, 静水圧条件下において浸透率 10^{-18} m^2 程度を示すことがわかった.

研究成果はどう使われるか

花崗岩は日本の地熱地域に分布する主要な岩石の1つである. 本研究から亀裂を含む花崗岩の浸透率が明らかになれば, 超臨界地熱開発における貯留層ポテンシャル評価へと役立つと考えられる.

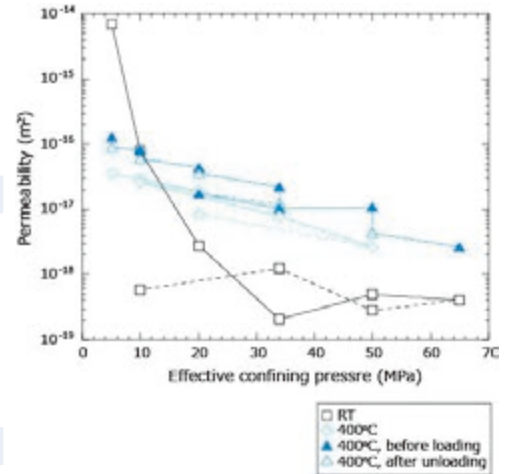


図1 亀裂を含む花崗岩の浸透率



亀裂を含む花崗岩の三軸圧縮変形時におけるAE発生とb値変化

地圏メカニクス研究グループ 末吉和公*, 雷 興林 北村真奈美, 広島大学 片山郁夫
[連絡先] sueyoshi.k@aist.go.jp

成果概要

既存の研究により, 地熱開発などの様々な分野で, 流体によって誘発される地震活動が観察されている. しかし, 誘発地震発生メカニズム解明に資する, 流体注入による岩石中の破壊伝播は明らかにされていない. そこで本研究では, 熱処理により亀裂を生じた花崗岩を用いて三軸圧縮変形中のアコースティックエミッション (AE) 計測をおこない, 亀裂の伝播過程を調べた.

研究内容

AEとは変形中に岩石内部に生じる微小破壊から発生する波であり, AEの規模を表すマグニチュードと発生回数の相関式の傾きをb値としてあらわす. 岩石の亀裂分布と密度の時空間変化は, 変形中のAEの時空間分布とb値から推定することができる. 本研究では, 産総研設置の油圧式三軸圧縮変形装置を使用し, 熱亀裂を含む花崗岩を用いて三軸圧縮変形中のAE及び弾性波 (P波) 速度を測定した. その結果, 熱亀裂を含む花崗岩のb値の変化は, インタクト試料のb値変化と類似していることがわかった. ただし亜臨界亀裂成長期 (二次相) の初期b値はインタクト試料よりも大きい値を示し, 応力の増加とともに急激に減少した. 二次相の初期b値は既存の亀裂の密度とサイズに依存するとされることから, これらの結果は熱亀裂の亜臨界成長を示していると考えられる.

研究成果はどう使われるか

b値は地震の短期的な予測を行う上で重要な情報である. 本研究の結果から, 例えば地熱地域における岩体中の熱亀裂の成長過程を推定し, 巨視的破壊を予測するための基礎として活用されることが期待できる.

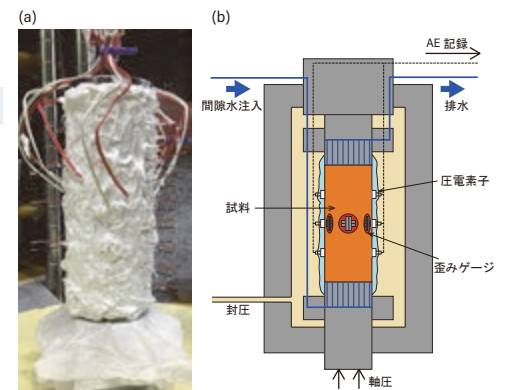


図1 (a) シリコン塗布後の試料 (b) 試験機概略図

地下水と地表水を用いた地熱資源探査の可能性検討

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

成果概要

地下水と地表水のpH値の空間分布の把握が、地熱貯留層の早期発見に有効である可能性が示唆されている。地熱資源探査へ活用できれば、地熱開発促進への貢献が期待されるが、実証事例に乏しいことから、概念の提唱にとどまっている。本研究では、地下水と地表水のpH値の空間分布と地下構造との関連性を評価する目的で、青森県八甲田地熱地域における調査結果を報告する。

研究内容

我が国の地熱資源探査においては、掘削ターゲットとなりうる、成熟した中性熱水を胚胎する断裂型地熱貯留層の早期発見が重要である。近年、地下水と地表水のpH値の空間分布の把握が、そのような地熱貯留層を形成する断層の早期発見に有効である可能性が示唆されている。しかしながら、実証事例に乏しいことから、概念の提唱にとどまり、実用化には至っていない。そこで本研究では、過去に地熱開発調査が行われ、高い地熱ポテンシャルが見込まれている、青森県八甲田地熱地域において調査を実施し、地下水と地表水のpH値の空間分布を示した。また、過去の地熱開発調査の結果と比較、検討することで、地下水と地表水のpH値の空間分布と地下構造との関係を評価した。

研究成果はどう使われるか

本研究は予察段階ではあるが、地下水と地表水のpH値の空間分布の把握が、地熱資源探査に有効である可能性を示唆しており、将来的には、地熱開発促進への貢献が期待される。

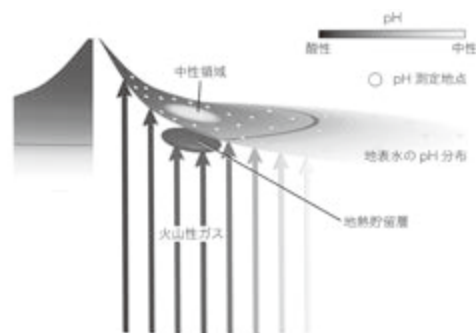


図1 地表水のpH値の空間分布と地熱貯留層の関係を示した概念モデル図

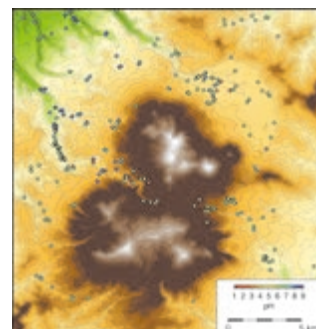


図2 八甲田地熱地域における地下水と地表水のpH値の空間分布

微小地震観測による地熱貯留層内の流動モニタリングとその利活用

再生可能エネルギー研究センター地熱チーム 岡本京祐* 田中勇希 水崎雄二郎 桑名栄司 石橋琢也 浅沼 宏
[連絡先] okamoto.kyosuke@aist.go.jp

成果概要

高感度微小地震観測網による準リアルタイム貯留層監視システムの安定的運用、高精度な微小地震震源位置の特定、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の把握を行う手法開発を行った。本手法は、効率的で安定した地熱地域の開発・維持に貢献することができる。

研究内容

地表型センサに加えて、坑内型高感度センサ(図1)を利用することにより、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は、リアルタイムで産総研サーバに転送され、随時の解析が可能となっている。検出された微小地震群に対して、波形相関情報を用いた震源決定を行うことで、10 m オーダーの精度で位置を推定することを可能とした(図2)。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。

研究成果はどう使われるか

ある程度の地震活動(自然地震・操業由来の微小地震何れでも可)がある地域においては、本手法を適用することで地下の流動を把握することが可能となる。地熱貯留層の新規開発や、既に運用中の貯留層の評価、石油・シェール分野への展開が考えられる。



図1 坑内型微小地震計設置状況

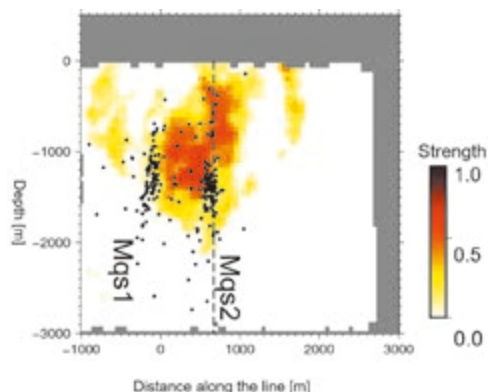


図2 微小地震震源の高精度決定とS波散乱波を利用した破砕帯イメージング結果



成果概要

Based on the medium-term performance evaluation (October 2017-April 2018), two Ground Source Heat Pumps achieved significant reduction of electricity consumption, compared to an Air Source Heat Pump (ASHP). The results point out toward possibility of low-cost GSHP application in Southeast Asian region.

研究内容

The medium-term (5.5 month) space cooling by using three different heat pumps (2 GSHPs and 1 ASHP) installed in Saraburi Campus, Chulalongkorn Univ., Thailand has been evaluated. Two GSHPs are connected to a system of shallow/horizontal Ground Heat Exchanger (GHE). Experiments were carried out by intermittent cycle for each heat-pump. The outdoor, indoor, GHE fluid inlet & outlet temperatures were continuously recorded, together with the electricity consumption. The recorded data were then analyzed to find the performance of each GSHP. The electricity consumption of the GSHPs were found to be 39 % and 24.8 % less than the ASHP. This finding are very essential, especially, bearing in mind that in a hot-tropical climate, shallow ground temperature is relatively high.

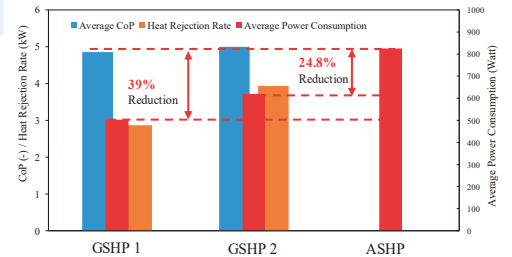


図1 Medium-term performance (Oct 2017-April 2018) of two GSHPs and an ASHP

研究成果はどう使われるか

The results highlight that the shallow heat exchangers can still provide significant electricity reduction. This is crucial as the performance and financial consideration are two important aspects to introduce GSHP technology in Southeast Asia and other tropical countries.



最適化手法を用いた地中熱交換量の推定手法の開発

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* 富樫 聡 石原武志 シュレスト ガウラブ 吉岡真弓 内田洋平 [連絡先] shohei-kaneko@aist.go.jp

成果概要

地中熱ポテンシャルマップの全国展開に向けた課題として、ポテンシャルマップ作成に時間がかかることが挙げられる。本研究では簡便な方法で地中熱交換量を推定できる手法を開発することを目的とする。そのため、最適化手法を用いた水文地質情報にもとづく熱交換量推定式を作成し、3次元の水文地質情報を2次元のマップに表すための鉛直方向に関する平均方法を評価した。

研究内容

本研究は仙台平野を対象として各種解析を行った。統計分析により地中熱交換量は地下水流速、地下温度および熱伝導率が主要な要因となっていることが確認された。このことから、2次多項式を用いた応答曲面法を用いて上記3つの主要因を変数とする関数で熱交換量を近似的に表すことにした。深度方向で変化する3変数の平均化の手法を検討したところ、平均地下温度と平均熱伝導率は単純平均で表すことができるが、平均地下水流速は速度を変数とした重み係数と単純平均と調和平均の組み合わせで表されることが確認された。推計式による熱交換量は熱交換器モデルに基づく計算値とよく一致した。広域地下水流動・熱輸送モデルのパラメータを抽出し、推計式を適用することで簡便に熱交換量を推定し、ポテンシャルマップの空間解像度を向上することができた。

研究成果はどう使われるか

最適化手法を用いることで従来のポテンシャル評価で行われていた熱交換シミュレーションを行わずに熱交換量を推計できることが確認できた。教師データの拡充により全国の地中熱ポテンシャル情報整備への貢献が期待される。

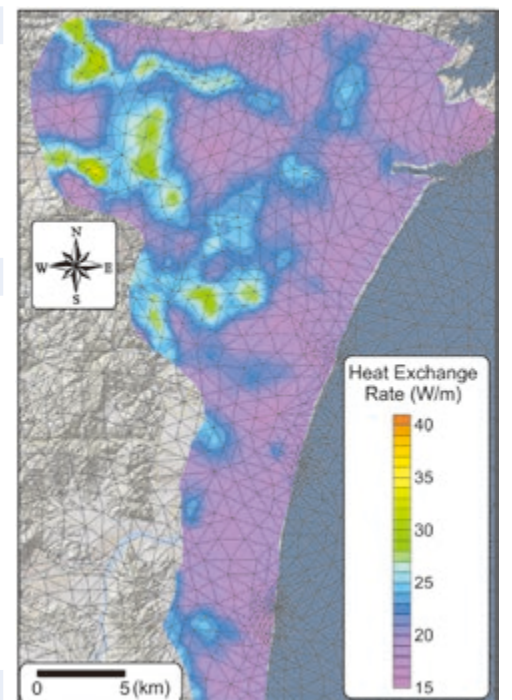


図1 最適化手法により推定した仙台平野の地中熱交換量分布

加賀平野北部の深度別有効熱伝導率分布

再生可能エネルギー研究センター地中熱チーム 石原武志* 佐野星河 富樫 聡 内田洋平
[連絡先] t84-ishihara@aist.go.jp

成果概要

石川県の加賀平野北部(金沢市とその周辺)を対象に、オールコア試料と既存ボーリング資料の解析にもとづき、地下地質構造および深度別の地盤の有効熱伝導率分布を明らかにした。地質条件からは、礫層の卓越する南東部が地中熱利用により適している可能性が示唆された。また、地質と有効熱伝導率の深度別分布図は地中熱利用の概略検討に活用できることを示した。

研究内容

平野内で掘削されたオールコア試料と、ボーリング柱状図資料・深井戸柱状図資料併せて約1,500本を用いて加賀平野北部の地質断面図を多数作成し、地下地質構造を推定した。また、深度50 m以上の柱状図資料を用いて、出現する地層(礫層、砂層、泥層など)の分類と各層の合計層厚を読み取り、深度別(0-10 m, 0-20 m, , 0-50 m)の出現割合を算出して分布図に表した。地盤の有効熱伝導率に関しては、各地層の有効熱伝導率の文献値をもとに、柱状図資料の各地層の鉛直分布に応じて層厚加重平均法により算出し、その深度別(0-10 m, 0-20 m, , 0-50 m)分布を作図した(図1)。

加賀平野北部の地下地質構造は、南東・南西部で礫層、北東部で泥層がそれぞれ卓越する傾向が認められた。また、礫層を主体とする南東・南西部では平均有効熱伝導率の値も相対的に高い傾向が見られた。

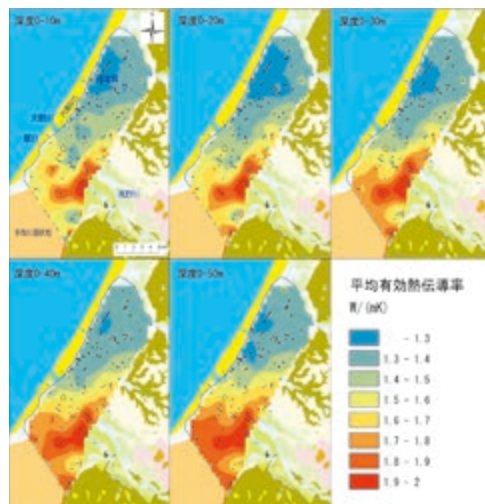


図1 加賀平野北部の深度別有効熱伝導率分布

研究成果はどう使われるか

本研究の成果と、地下水・地下温度データを組み合わせて加賀平野における地中熱ポテンシャルマップの整備へつなげる。また、深度別有効熱伝導率分布図は、地中熱システムの導入を検討する際の判断資料としても活用できる。

加賀平野の水文地質構造と地中熱ポテンシャルの簡易評価

再生可能エネルギー研究センター地中熱チーム 佐野星河* 石原武志 富樫 聡 内田洋平
[連絡先] seiga-sano@aist.go.jp

成果概要

石川県に位置する加賀平野の3地域(河北平野・手取川扇状地・小松平野)の水文地質構造について検討し、地中熱利用ポテンシャルについて予察的に考察した。河北平野南東部の扇状地エリアと手取川扇状地では、第四系の礫層が卓越し厚い帯水層が分布している。これらの地域では地下水流れが活発であると予想され、地中熱ポテンシャルも高いと考えられる。

研究内容

加賀平野内のボーリング資料と深井戸資料併せて約2,300本を収集し、河北平野、手取川扇状地、小松平野の各区域において複数の地質断面図を作成した。帯水層の三次元的分布を把握するため、第四系の礫層(G)・砂層(S)・泥層(M)の水平方向の連続性に着目し、それぞれの断面図の水文地質構造を検討した。さらに、水文地質の特徴をもとに地中熱利用ポテンシャルに関して考察した。手取川扇状地と河北平野南東部の扇状地エリアでは層厚50~100 mの礫層が分布し、厚い帯水層を形成している。他方、河北平野北西部や小松平野低地部の氾濫原・デルタエリアでは、泥層によって帯水層(砂層、礫層)が複数に分かれるように見える。一般に礫層の厚い扇状地では地下水流れが活発であることから、手取川扇状地と河北平野南東部では地中熱利用のポテンシャルが特に高いと考えられる。

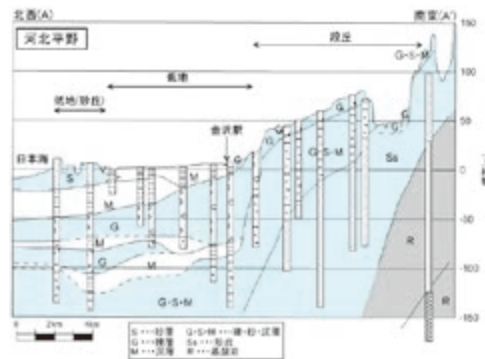


図1 河北平野の地質断面図

研究成果はどう使われるか

研究成果より加賀平野の水文地質モデルを構築する。本モデルは、地下水データとともに三次元の地下水流動・熱輸送解析を実施するための基礎的なデータである。また、地中熱利用システムの導入を検討するための資料としても有用である。



地下空間貯留水の低温化に関する実験的考察

再生可能エネルギー研究センター地中熱チーム 富樫 聡* 霜山 竣 内田洋平
[連絡先] akira-tomigashi@aist.go.jp

成果概要

大谷石採掘跡地内の貯留水をハウス栽培等の冷熱源として利用する取り組みがすすめられている。持続可能な冷熱源として貯留水を利用するための技術開発の一環で、地下空間を模した室内模型実験を実施した。地下空間内の空気を循環させると、蒸発潜熱の効果で貯留水温度が低下した。本実験結果から、貯留水の低温化機構の理解に基づいた人為的な冷熱源化技術開発が期待できる。

研究内容

実験装置はアクリル水槽（幅700mm、奥行550mm、高さ600mm）、水槽を覆う断熱材、排気用ファン、各種センサー類等からなる。水槽上面の断熱材には2カ所の通気孔を作成し、そのひとつ（排気孔）に排気用ファンを取り付けた。ファンを稼働すると水槽内の空気が強制排出され、これに伴いもうひとつの通気孔（吸気孔）より空気を取り込まれる。実験シナリオは貯留水位の違う2ケースを設定しており、貯留水位200mmをケース1、貯留水位100mmをケース2と呼ぶ。実験期間は1ケース240時間であり、ファン稼働による貯留水温の変化を確認した。実験中の各種状態量は、吸気孔上部50mmの空気温度、排気孔上部60~80mmの空気温度と相対湿度、水槽内部3地点の温度（水槽底部より50、150、250mm）、室内湿度をそれぞれ計測した。

研究成果はどう使われるか

貯留水の低温化は、顕熱と潜熱の両プロセスにより生じると推測される。地下空間内空気を循環させることで潜熱プロセスによる低温化促進が期待できるため、本研究成果を冷熱源の人為管理と持続可能な事業確立につなげたい。

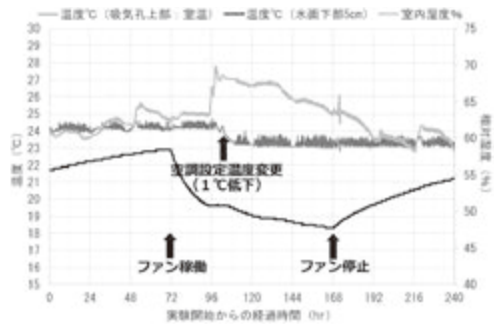


図1 室内模型実験結果（空気循環による地下空間貯留水の低温化状況）



地下空間貯留水の冷熱利用可能量評価に向けた大谷石物性値の検証

再生可能エネルギー研究センター地中熱チーム 霜山 竣* 富樫 聡 内田洋平
[連絡先] shun-shimoyama@aist.go.jp

成果概要

大谷石採掘跡地の地下空間には、年間を通して約10℃以下と非常に低温な貯留水が賦存している。この貯留水の冷熱利用可能量評価には、貯留水と大谷石岩体を含む広域な熱移動解析を行う必要がある。熱移動解析では大谷石の物性値が大きく影響する。本研究では熱移動解析の基礎資料収集を目的として、原位置伝熱実験及び数値解析をもとに大谷石の物性値を検証した。

研究内容

伝熱実験は地下空間の岩体壁面と直交する奥行方向に対して、1 m 削孔し壁表面（0.0 m）から0.2 m 間隔で温度を計測した。実験条件は壁表面を加熱するケース（加熱実験）と外気を遮断して地下空間内の空気を循環させるケース（送風実験）の2ケースで実施した。この伝熱実験の再現と物性値評価を目的として、数値解析を行った。数値解析には一次元非定常熱伝導方程式を有限体積法によって空間離散化した解析モデルを使用した。壁の表面（0.0 m）の温度は地下空間気温を含むため、モデルの境界は壁表面から0.2 m 離れた地点を境界条件として、観測値を入力した。解析に用いた物性値は、先行研究で行った室内試験の結果と複数の文献値を用いて解析を行い、より観測値に一致した物性値を原位置での物性値と推測した。

研究成果はどう使われるか

熱伝導率と体積熱容量はスケール依存性がない。そのため、研究地域を含む広域な三次元熱移動解析に用いることができ、岩体の低温維持期間や冷熱エネルギーの潜在量・利用可能量の適切な評価につながる。

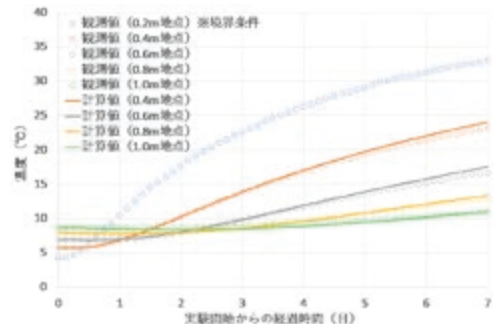


図1 伝熱実験の再現計算結果

論文リスト

- 安楽 総太郎, 松原 勇武, 森本 和也, 佐藤 努 (2017) オマーンオフィオライトに湧出する高アルカリ泉周辺における二次鉱物の生成とその要因, 粘土科学 55, 17-30.
- 横田 俊之, 神宮司 元治, 山中 義彰, 村田 和則 (2017) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による液状化発生領域での表面波探査 - 千葉県香取市利根川北岸地区の例 -, 物理探査 70, 25-34.
- 村尾 智, 五十公野 裕也, 児玉 敬義, 中島 和夫 (2017) 茨城県高取地域より産した二オプ・タンタル含有鉄マンガン重石, 社会地質学会誌 13, 6-8.
- 坂本 靖英, 中垣 匡司, 藤原 和弘, 小谷 忠明, 井上 英明, 谷口 彩華 (2017) シロアリ防除剤としてのクロチアニジンの土壌処理におけるリスク評価 - 土壌・地下水環境下での多相・多成分流動モデルに基づく処理薬剤の土壌吸着特性評価 -, 土木学会論文集 G (環境) 73, 20-38.
- 坂本 靖英, 保高 徹生, 白川 俊明, 山村 正樹 (2017) 六価クロムに起因した土壌・地下水汚染の長期挙動予測に関する研究 - 地下水濃度のモニタリング結果および揚水による回収量のヒストリーマッチングによる汚染状況の再現とリスク評価 -, 土木学会論文集 G (環境) 73, 81-100.
- T. Chuenpee, 西川 治, 昆 慶明, 蛭川 清隆, 豊田 新, 緒方 武幸, 内田 隆, 高島 勲 (2017) Gamma radiation-induced thermoluminescence, trace element and paramagnetic defect of quartz from the Sambagawa metamorphic belt, Central Shikoku, Japan, APPLIED RADIATION AND ISOTOPES 120, 30-39.
- 渡辺 寧, 昆 慶明, 越後 拓也, 亀井 淳志 (2017) Differential Fractionation of Rare Earth Elements in Oxidized and Reduced Granitic Rocks: Implication for Heavy Rare Earth Enriched Ion Adsorption Mineralization, RESOURCE GEOLOGY 67, 35-52.
- Craig Green, George J. Simandle, Suzanne Paradis, Fiona Katay, 星野 美保子, 昆 慶明, 児玉 信介, Chris Graf (2017) Geological setting of the Rock Canyon Creek REE-fluorite deposit, British Columbia, Canada, Geological Fieldwork 2016 2017, 195-203.
- 星野 美保子, 昆 慶明, 児玉 信介, George J. Simandle, Suzanne Paradis, Craig Green, 生田目 千鶴, 松永 いづみ, 高木 哲一 (2017) Mineralogy of the Rock Canyon Creek REE-fluorite deposit, British Columbia, Canada, Geological Fieldwork 2016 2017, 195-203.
- 相澤 広記, 麻植 久史, 小池 克明, 高倉 伸一ほか (2017) Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan, EARTH PLANETS AND SPACE 69:4.
- 柳川 勝紀, 井尻 暁, Anja Breuker, 酒井 早苗, 三好 陽子ほか (2017) Defining boundaries for the distribution of microbial communities beneath the sediment-buried, hydrothermally active seafloor, ISME Journal 11, 529-542.
- 羽柴 公博, 岡田 哲実, 谷 和夫, 白鷺 卓, 早野 公敏, 中村 敏明, 及川 寧己ほか (2017) Literature Review and Experimental Study on the Factors Affecting the Direct Tension Test on Rocks, GEOTECHNICAL TESTING JOURNAL 40, 335-344.
- 林 誠二, 辻 英樹, 伊藤 祥子, 錦織 達啓, 保高 徹生 (2017) 平成27年関東・東北豪雨時における河川流域スケールでの放射性 Cs の流出実態, 土木学会論文集 72, 37-43.
- 雷 興林, 馬 勝利, 王 小龍, 蘇 金蓉 (2017) Fault-valve behaviour and episodic gas flow in overpressured aquifers - evidence from the 2010 Ms5.1 isolated shallow earthquake in Sichuan Basin, China, PROGRESS IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS 17, 2-12.
- 神宮司 元治, Selcuk Toprak (2017) A CASE STUDY OF LIQUEFACTION RISK ANALYSIS BASED ON THE THICKNESS AND DEPTH OF THE LIQUEFACTION LAYER USING CPT AND ELECTRIC RESISTIVITY DATA IN THE HINODE AREA, ITAKO CITY, IBARAKI PREFECTURE, JAPAN, Exploration Geophysics 48, 28-36.
- 横田 俊之, 神宮司 元治, 山中 義彰, 村田 和則 (2017) S-wave reflection and surface wave surveys in liquefaction affected areas: A case study of the Hinode area, Itako, Ibaraki, Japan, Exploration Geophysics 48, 1-15.
- 中村 友梨江, 栗林 貴弘, 長瀬 敏郎, 今井 裕之 (2017) Cation ordering in iridescent garnet from Tenkawa village, Nara prefecture, Japan, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 112, 97-101.
- 保高 徹生ほか (2017) 陸水中における微量溶存態放射性セシウム濃縮法の比較, 分析化学 66, 299-307.

- 久富 渉生, 福井 将, 松岡 光昭, 綱澤 有輝ほか (2017) DEM シミュレーションによるビーズミルの媒体分離に適した装置設計, 粉体工学会誌 54, 377-383.
- Minami Kataoka, Eqlima Mahdavi, Takahiro Funatsu, 竹原 孝ほか (2017) Estimation of Mode I Fracture Toughness of Rock by Semi-Circular Bend Test under Confining Pressure Condition, Procedia Engineering 191, 886-893.
- C. Xie, 雷 興林, Xiaoyan Zhao, QingBo Ma, ZiYao Xiong (2017) Tidal triggering of earthquakes in the Ning'er area of Yunnan Province, China, JOURNAL OF ASIAN EARTH SCIENCES 138, 477-483.
- 吉川 美穂, 張 銘, Koki Toyota (2017) Integrated Anaerobic-Aerobic Biodegradation of Multiple Contaminants Including Chlorinated Ethylenes, Benzene, Toluene, and Dichloromethane, WATER AIR AND SOIL POLLUTION 228, 25-13.
- 宮崎 晋行, 天満 則夫, 山口 勉 (2017) Relationship between Creep Property and Loading-Rate Dependence of Strength of Artificial Methane-Hydrate-Bearing Toyoura Sand under Triaxial Compression, Energies 2017, 10, 1466.
- Hongyu Zhai, Xu Chang, Yibo Wang, 薛 自求, 雷 興林, Yi Zhang (2017) The sensitivity analysis of seismic velocity and attenuation variations for Longmaxi shale during hydraulic fracturing test in laboratory, Energies 2017, 10, 1393.
- Kengo Nakamura, 保高 徹生, Tatsu Kuwatani, Takeshi Komai (2017) Development of a predictive model for lead, cadmium and fluorine soil water partition coefficients using sparse multiple linear regression analysis, CHEMOSPHERE 186, 501-509.
- Michio Murakami, Mahua Saha, Yuichi Iwasaki, Rei Yamashita, Yukio Koibuchi, 塚田 祥文, Keisuke Sueki, 保高 徹生 (2017) Source analysis of radiocesium in river waters using road dust tracers, CHEMOSPHERE 187, 212-220.
- 小森 省吾, 正木 裕香, 谷川 亘, 鳥本 淳司ほか (2017) Depth profiles of resistivity and spectral IP for active modern submarine hydrothermal deposits: a case study from the Iheya North Knoll and the Iheya Minor Ridge in Okinawa Trough, Japan, EARTH PLANETS AND SPACE 69, 114.
- 江島 輝美, 米田 まり, 赤坂 正秀, 大藤 弘明, 昆 慶明, 永 島 真理子, 中牟田 義博 (2017) Precipitates within olivine phenocrysts in oxidized andesitic scoria from Kasayama volcano, Hagi, Japan, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 112, 116-126.
- 吉川 美穂, 竹内 美緒, 張 銘 (2017) Spatial Distribution of Dehalococcoides 16S rRNA and Dehalogenase Genes at Sites Contaminated with Chlorinated Ethylenes, Environment and Natural Resources Research 7, 37-46.
- 保高 徹生, Angelica Naka, 肴倉 宏史, 黒澤 暁彦ほか (2017) Reproducibility of Up-flow Column percolation tests for contaminated soils, PLoS One 12, 6.
- 松本 親樹, 島田 英樹, 笹岡 孝司 (2017) Interaction between physical and chemical weathering of argillaceous rocks and the effects on the occurrence of Acid Mine Drainage (AMD), GEOSCIENCES JOURNAL 21, 397-406.
- Tomohiro Ohuchi, 雷 興林, Hiroaki Ohfuji, Yuji Higo, Yoshinori Tange, Takeshi Sakai, Kiyoshi Fujino, Tetsuo Irifune (2017) Intermediate-depth earthquakes linked to localized heating in dunite and harzburgite, Nature Geoscience 10, 771-776.
- Udayagee Kumarasinghe, 井上 弦, 斎藤 健志, 長森 正尚, 坂本 靖英, M.I.M. Mowjood, 川本 健 (2017) TEMPORAL VARIATIONS IN PERCHED WATER AND GROUNDWATER QUALITIES AT AN OPEN SOLID WASTE DUMPSITE IN SRI LANKA, International Journal of GEOMATE 13, 1-8.
- Xiaying Li, 雷 興林, Qi Li (2017) Experimental Investigation of Sinian Shale Rock under Triaxial Stress Monitored by Ultrasonic Transmission and Acoustic Emission, Journal of Natural Gas Science and Engineering 43, 110-123.
- 高橋 幸士, 鈴木 徳行 (2017) Semi-open and closed system pyrolysis of Paleogene coal for evaluating the timing of hydrocarbon gas expulsion, INTERNATIONAL JOURNAL OF COAL GEOLOGY 178, 100-109.
- 雷 興林, 王 小龍, 蘇 金蓉, Hong Fu, Guosheng Qu (2017) Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to Mw4.6 induced by shale gas fracking in the Sichuan Basin, China, Scientific Reports 7, 7971.
- 池田 進, 中野 司, 土山 明, 上杉 健太郎, 中島 善人, 中村 光一, 吉田 英人, 鈴木 芳生 (2017) Three-dimensional study by synchrotron radiation computed tomography of melt distribution in samples doped to enhance contrast, MINERALOGICAL MAGAZINE 81, 1203-1222.
- 原 淳子 (2017) Oxidative degradation of benzene rings using iron sulfide activated by hydrogen peroxide/ozone, CHEMOSPHERE 189, 382-389.
- 吉川 美穂, 張 銘, Koki Toyota (2017) Biodegradation of Volatile Organic Compounds and Their Effects on Biodegradability under Co-Existing Conditions, MICROBES AND ENVIRONMENTS 32, 188-200.

- 柏谷 公希, 武藤 雄太, 久保 大樹, 井川 怜欧, 中屋 眞司, 小池 克明, 丸井 敦尚 (2017) Spatial variations of tritium concentrations in groundwater collected in the southern coastal region of Fukushima, Japan, after the nuclear accident, Scientific Reports 7.
- Y. Zhang, 西澤 修, Hyuck Park, 木山 保, 雷 興林, 薛 自求 (2017) Pathway-flow relative permeability of CO₂: measurement by lowering pressure drop, WATER RESOURCES RESEARCH 53, 8626-8638.
- 保高 徹生, 井本 由香利, 黒澤 暁彦ほか (2017) Effects of colloidal particles on the results and reproducibility of batch leaching tests for heavy metal-contaminated soil, SOILS AND FOUNDATIONS 57, 861-871.
- 吉川 美穂, 張 銘, Futoshi Kurisu, Koki Toyota (2017) Bacterial Degradation of Coexisting Dichloromethane, Benzene, and Toluene, Identified by Stable-Isotope Probing, WATER AIR AND SOIL POLLUTION 228, 1-10.
- 杉田 創, 小熊 輝美, 張 銘, 原 淳子, 川辺 能成 (2017) Mg 系使用済ヒ素吸着材の環境安定性に及ぼすケイ酸の影響, 土木学会論文集 G (環境) 73, III_407- III_418.
- 佐野 有司, 木下 尚也, 鹿児島 涉悟, 高畑 直人, 坂田 将ほか (2017) Origin of methane-rich natural gas at the West Pacific convergent plate boundary, Scientific Reports 7.
- Xiaying Li, 雷 興林, Qi Li (2017) Response of Velocity Anisotropy of Shale under Isotropic and Anisotropic Stress Fields, ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING.
- 今泉 博之, 大野 哲二, 唐澤 廣和, 宮崎 晋行ほか (2017) 地熱井掘削のための PDC ビットの開発, 日本地熱学会誌 39, 217-227.
- 村中 康秀, 神谷 貴文, 伊藤 彰, 大山 康一, 渡邊 雅之, 小野 昌彦, 丸井 敦尚 (2017) 駿河湾奥部 (富士川河口～田子の浦港) の海底地形と海底面状況, 富士山研究 11, 23-33.
- 森 千秋, 佐藤 徹, 大山 裕之, 加野 友紀 (2017) 海底漏出物質の漏出位置と漏出量の数値推定法の開発, 日本船舶海洋工学学会論文集 26, 203-212.
- 小森 省吾, 宇津木 充, 鍵山 恒臣, 吉川 慎, 陳 中華ほか (2017) Resistivity mapping in the Tatun Volcano Group, Northern Taiwan, revealed by VLF-MT surveys, TERRESTRIAL ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCES 28, 833-842.
- 吉岡 真弓, 高倉 伸一, 内田 洋平 (2017) Estimation of groundwater flow from temperature monitoring in a borehole heat exchanger during a thermal response test, HYDROGEOLOGY JOURNAL 26, 853-867.
- 三好 陽子, 島田 和彦, 佐藤 暢, 上原 誠一郎, 石橋 純一郎 (2017) Convenient analysis of chemical composition of clay fraction of sediment by electron probe microanalyzer, GEOCHEMICAL JOURNAL 51, 583-588.
- 後藤 秀作, 山野 誠, 森田 澄人ほか (2017) Physical and thermal properties of mud-dominant sediment from the Joetsu Basin in the eastern margin of the Japan Sea, MARINE GEOPHYSICAL RESEARCH 38, 393-407.
- Michio Murakami, Yoshitake Takebayashi, Yoshihito Takeda, Akiko Sato, Yasumasa Igarashi, Kazumi Sano, 保高 徹生ほか (2018) Effect of Radiological Countermeasures on Subjective Well-Being and Radiation Anxiety after the 2011 Disaster: The Fukushima Health Management Survey, International Journal of Environmental Research and Public Health 15.
- 吉村 寿紘, 荒岡 大輔, 為則 雄祐, 黒田 潤一郎, 川幡 穂高, 大河内 直彦 (2018) Lithium, magnesium, and sulfur purification from seawater using an ion chromatograph with a fraction collector system for stable isotope measurements, JOURNAL OF CHROMATOGRAPHY A 1531, 157-162.
- Junko Nishiwaki, 川辺 能成, Takeshi Komai, 張 銘 (2018) Decomposition of Gasoline Hydrocarbons by Natural Microorganisms in Japanese Soils, Geosciences 8, 1-9.
- 江島 輝美, 昆 慶明, 河野 重範, 荒岡 大輔 (2018) Zircon U-Pb dating of gabbro and diorite from the Bato pluton, northeast Japan, ISLAND ARC 27, 1-15.
- Wenjing Qiao, Shujun Ye, Jichun Wu, 張 銘 (2018) Surfactant-Enhanced Electroosmotic Flushing in a Trichlorobenzene Contaminated Clayey Soil, Groundwater 56, 673-679.
- 三好 陽子, 月村 勝宏, 森本 和也, 鈴木 正哉, 高木 哲一 (2018) Comparison of methylene blue adsorption on bentonite measured using the spot and colorimetric methods, APPLIED CLAY SCIENCE 151, 140-147.
- 高橋 幸祐, 高倉 伸一, 松島 喜雄, 藤井 郁子 (2018) Relationship between volcanic activity and shallow hydrothermal system at Meakandake volcano, Japan, inferred from geomagnetic and audio-frequency magnetotelluric measurements, JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH 349, 351-369.
- 福井 将, 綱澤 有輝ほか (2018) Effect of Agitator Shaft Direction on Grinding Performance in Media Stirred Mill: Investigation Using DEM Simulation, MATERIALS TRANSACTIONS 59, 488-493.
- 栗原 毛毛, 恩田 裕一, 加藤 弘亮, Nicolas Loffredo, 保高 徹生, Frederic Coppin (2018) Radiocesium migration in the litter layer of different forest types

- in Fukushima, Japan, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY 187, 81-89.
- 徂徠 正夫, 佐々木 宗建, 栗林 貴弘 (2018) Field reaction experiments of carbonate minerals in spring waters: natural analogue of geologic CO₂ storage, GEOFLUIDS 2018.
- 中島 善人, 小松原 純子 (2018) MULTIFRACTAL ANALYSIS OF SEISMICALLY INDUCED SOFT-SEDIMENT DEFORMATION STRUCTURES IMAGED BY X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY, FRACTALS-COMPLEX GEOMETRY PATTERNS AND SCALING IN NATURE AND SOCIETY 26.
- Kiyoshi Shizuma, Yoko Fujikawa, 栗原 毛毛, Yushi Sakurai (2018) Identification and temporal decrease of Cs-137 and Cs-134 in groundwater in Minami-Soma City following the accident at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, ENVIRONMENTAL POLLUTION 234, 1-8.
- 原 淳子, 野呂 田 晋, 川辺 能成, 杉田 創, 張 銘 (2018) Characteristics of arsenic in humic substances extracted from natural organic sediments, ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH 25, 15680-15694.
- 吉村 令慧, 小川 康雄, 行竹 洋平, 神田 径, 小森 省吾ほか (2018) Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion, EARTH PLANETS AND SPACE.
- 松本 親樹, 緒方 俊太, 島田 英樹, 笹岡 孝司, 濱中 晃弘, Ginting Jalu Kusuma (2018) Effects of pH-Induced Changes in Soil Physical Characteristics on the Development of Soil Water Erosion, Geosciences 8, 1-13.
- 板野 敬太, 飯塚 毅, 星野 美保子 (2018) REE-Th-U and Nd isotope systematics of monazites in magnetite- and ilmenite-series granitic rocks of the Japan arc: Implications for its use as a tracer of magma evolution and detrital provenance, CHEMICAL GEOLOGY 484, 69-80.
- 井本 由香利, 保高 徹生, 染矢 雅之, 東野 和雄 (2018) Influence of solid-liquid separation method parameters employed in soil leaching tests on apparent metal concentration, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 624, 96-105.
- 綱澤 有輝, 久富 渉生, 村上 進亮, 所 千晴 (2018) Investigation and evaluation of the detachment of printed circuit boards from waste appliances for effective recycling, WASTE MANAGEMENT 78, 474-482.
- 綱澤 有輝, 劉 暢之, 戸井 龍太郎, 大蔵 隆彦, 所 千晴 (2018) Crystal formation and growth by slow cooling for recovery of magnetite particles from copper smelting slag, Mineral Processing and Extractive Metallurgy.
- 地下 まゆみ, 高木 哲一, 高橋 嘉夫, 栗栖 美菜子, 綱澤 有輝, 森本 和也, 星野 美保子, 月村 勝宏 (2018) Fe-kaolinite in granite saprolite beneath sedimentary kaolin deposits: a mode of Fe substitution for Al in kaolinite, AMERICAN MINERALOGIST 103, 1126-1135.
- 松本 親樹, 石松 紘宇, 島田 英樹, 笹岡 孝司, Ginting Jalu Kusuma (2018) Characterization of Mine Waste and Acid Mine Drainage Prediction by Simple Testing Methods in Terms of the Effects of Sulfate-Sulfur and Carbonate Minerals, Minerals 8, 403.
- 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 -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, 117-130.
- 中野 司, 中島 善人 (2018) Analytical expressions for the reconstructed image of a homogeneous cylindrical sample exhibiting a beam hardening artifact in X-ray computed tomography, Journal of X-Ray Science and Technology 26, 691-705.
- Udayagee Kumarasinghe, 川本 健, 斎藤 健志, 坂本 靖英, M.I.M. Mowjood (2018) Evaluation of applicability of filling materials in Permeable Reactive Barrier (PRB) system to remediate groundwater contaminated with Cd and Pb at open solid waste dump sites, PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION 120, 118-127.
- 朝比 奈健太, 鈴木 徳行 (2018) Methylated naphthalenes as indicators for evaluating the source and source rock lithology of degraded oils, ORGANIC GEOCHEMISTRY 124, 46-62.
- Udayagee Kumarasinghe, 坂本 靖英ほか (2018) EFFECTIVENESS OF PERMEABLE REACTIVE BARRIER (PRB) ON HEAVY METAL TRAP IN AQUIFER AT SOLID WASTE DUMPSITE: A SIMULATION STUDY, International Journal of GEOMATE 15, 225-232.
- Tomohiro Ohuchi, 雷 興林, Yuji Higo, Yoshinori Tange, Takeshi Sakai, Kiyoshi 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.
- H. M. Zakir Hossain, Quazi Hasna Hossain, 亀井 淳志, 荒岡 大輔 (2018) Compositional variations, chemical weathering, and provenance of sands from the Cox's Bazar and Kuakata beach areas, Bangladesh, Arabian Journal of Geosciences 11, 749-1 - 749-17.
- 岩間 弘樹, 五十嵐 雅之, 若山 樹, 米林 英治, 眞弓 大介, 前

田 治男, 須田 好, 玉木 秀幸, 坂田 将, 鎌形 洋一(2018) 微生物原油分解 EOR フィールドパイロットに向けて ~微生物培養実験からパイロット計画策定まで~, 石油技術協会誌 83, 455-460.

Yohei Hamada, Takehiro Hirose, Akira Ijiri, Yasuhiro Yamada, Yoshinori Sanada, Saneatsu Saito, Noriaki Sakurai, Takamitsu Sugihara, Takahiro Yokoyama, Saruhashi Tomokazu, Tatsuhiko Hoshino, Nana Kamiya, Stephen Bowden, Margaret Cramm, Susann Henkel, Kira Homola, Hiroyuki Imachi, 金子 雅紀, Lorenzo Lagostina, Hayley Manners, Harry-Luke McClelland, Kyle Metcalfe, Natsumi Okutsu, Donald Pan, Maija Jocelyn Raudsepp, Justine Sauvage, Florence Schubotz, Arthur Spivack, Satoshi Tonai, Tina Treude, Man-Yin Tsang, Bernhard Viehweger, David T. Wang, Emily Whitaker, Yuzuru Yamamoto, Kiho Yang, Masataka Kinoshita, Lena Maeda, Yusuke Kubo, Yuki Morono, Fumio Inagaki, Verena B. Heuer (2018) In-situ mechanical weakness of subducting sediments beneath a plate boundary decollement in the Nankai Trough, Progress in Earth and Planetary Science 5.

松本 親樹 (2018) 資源開発と地下水汚染, 地下水技術 60, 25-30.

古川 靖英, 小林 剛, 保高 徹生, 本藤 祐樹, 藤江 幸一(2018) 揮発性有機塩素化合物汚染における土壌汚染対策技術選定時のサステナブルアプローチの有効性検討と従来手法との比較, 土木学会論文集 74, 152-164.

杉田 創, 駒井 武 (2018) 発光バクテリアに及ぼす液中ナノ粒子の急性毒性影響について - ナノ粒子分散液を用いた急性毒性評価試験による検討 -, 地下水学会誌 60, 435-459.

小野 昌彦, 町田 功, 井川 怜欧, 神谷 貴文, 大山 康一, 村中 康秀, 伊藤 彰, 丸井 敦尚 (2018) Regional groundwater flow system in a stratovolcano adjacent to a coastal area: a case study of Mt. Fuji and Suruga Bay, Japan, HYDROGEOLOGY JOURNAL.

雷 興林, Shinian Li, 劉 力強 (2018) Seismic b-value for Foreshock AE Events Preceding Repeated Stick-slips of Pre-cut Faults in Granite, Applied Sciences-Basel 8, 1-10.

中野 裕介, 中村 謙吾, 坂本 靖英, 駒井 武 (2018) 酸注入による原位置発熱を利用したメタンハイドレート貯留層からのガス増進回収効果の評価, 石油技術協会誌 83, 461-472.

杉田 創, 小熊 輝美, 張 銘, 原 淳子, 川辺 能成 (2018) 使用済 Ca 系ヒ素吸着材の環境安定性に及ぼすケイ酸の影響, 土木学会論文集 G (環境) 74, III_493-III_502.

栗原 毛毛, 恩田 裕一, 鈴木 弘行, 岩崎 雄一, 保高 徹生 (2018) Spatial and temporal variation in vertical migration of dissolved Cs-137 passed through the litter layer in Fukushima forests, JOURNAL OF EN-

VIRONMENTAL RADIOACTIVITY 192, 1-9.

西山 依里, 東 光一, 森 宙史, 須田 好, 中村 仁美, 大森 聡一, 丸山 茂徳, 本郷 裕一, 黒川 顕 (2018) The Relationship Between Microbial Community Structures and Environmental Parameters Revealed by Metagenomic Analysis of Hot Spring Water in the Kirishima Area, Japan, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 6, 1-11.

坂田 将 (2018) 天然ガス・石油の成因と微生物の寄与に関する有機地球化学的研究, RESEARCHES IN ORGANIC GEOCHEMISTRY 34, 1-13.

原 えり, 吉本 拓也, 茂野 俊也, 眞弓 大介, 鈴木 利廣, 三ツ橋 恭平, 阿部 章浩, 中島 敏明 (2018) Ecological impact evaluation by constructing in situ microcosm with porous ceramic arrowhead, CHEMOSPHERE 219, 202-208.

Barbara Mco, Paul Bardos, Frederic Coulon, Emerald Efickson-Mulanax, Lara J. Hansen, Melissa Harclerode, Deyi Hou, Eric Mielbrecht, Haruko M. Wainwright, 保高 徹生, William D. Wick (2018) Resilient Remediation: Addressing Extreme Weather and Climate Change, Creating Community Value, REMEDIATION 29, 7-18.

川辺 能成, 駒井 武 (2018) A case study of natural attenuation of chlorinated solvents under unstable groundwater conditions in Takahata, Japan, BULLETIN OF ENVIRONMENTAL CONTAMINATION AND TOXICOLOGY 102, 280-286.

Nergui Sarangua, 渡辺 寧, 越後 拓也, 星野 美保子 (2019) Chemical Characteristics of Zircon from Khaldzan Burgedei Peralkaline Complex, Western Mongolia, Minerals 9, 1-20.

Y. Zhang, 薛 自求, Hyuck Park, Jiquan Shi, 木山 保, 雷 興林, Yankun Sun, Yunfeng Liang (2019) Tracking CO₂ plumes in clay-rich rock by distributed fiber optic strain sensing (DFOSS): a laboratory demonstration, WATER RESOURCES RESEARCH 55, 856-867.

Lifen Zhang, 雷 興林, Liao Wulin, Jinggang Li, Yunsheng Yao (2019) Statistical parameters of seismicity induced by the impoundment of the Three Gorges Reservoir, Central China, TECTONOPHYSICS 751, 13-22.

片山 泰樹, 吉岡 秀佳, 山中 寿朗, 竹内 美緒, 村本 良幸, 宇佐美 潤, 池田 秀史, 坂田 将 (2019) Microbial community structure in deep natural gas-bearing aquifers subjected to sulfate-containing fluid injection, JOURNAL OF BIOSCIENCE AND BIOENGINEERING 127, 45-51.

雷 興林, 薛 自求, 橋本 励 (2019) Fiber optic sensing for geomechanical monitoring: (2)- Distributed strain measurements at a pumping test and geomechanical modeling of deformation of res-

- ervoir rocks, Applied Sciences-Basel 9, 417-1 - 417-14.
- 錦織 達啓, 林 誠二, 渡邊 未来, 保高 徹生 (2019) Impact of clearcutting on radiocesium export from a Japanese forested catchment following the Fukushima nuclear accident, PLoS One 14.
- 加藤 達也, Giuseppe Granata, 綱澤 有輝, 高木 哲一, 所 千晴 (2019) Mechanism and kinetics of enhancement of cerium dissolution from weathered residual rare earth ore by planetary ball milling, MINERALS ENGINEERING 134, 365-371.
- 太田 雄貴, 川幡 穂高, 黒田 潤一郎, 山口 飛鳥, 鈴木 淳, 荒岡 大輔, 阿部 彩子, JAMSTEC NGHP-02 scientist team (2019) Indian monsoonal variations during the past 80 kyr recorded in NGHP-02 Hole 19B, western Bay of Bengal: Implications from chemical and mineral properties, GEOCHEMISTRY GEOPHYSICS GEOSYSTEMS 20, 148-165.
- 濱中 晃弘, 笹岡 孝司, 島田 英樹, 松本 親樹 (2019) Experimental study on soil erosion under different soil composition using rainfall simulator, PLANT SOIL AND ENVIRONMENT 65, 181-188.
- 長田 悠, 久富 渉生, 皆川 真也, 綱澤 有輝, 奥山 杏子, 岩本 玄德, 関根 靖由, 所 千晴 (2019) Investigation of optimum design for nanoparticle dispersion in centrifugal bead mill using DEM-CFD simulation, ADVANCED POWDER TECHNOLOGY 30, 1034-1042.
- 徐 維那, 鈴木 正哉, 高木 哲一, 堂脇 清志 (2019) Life cycle assessment of adsorbents for biohydrogen production, Resources 8, 2-11.
- 上野 あきお, 玉澤 聡, Shuji Tamamura, Noritaka Aramaki, Badrul Alam, Takuma Murakami, Shinji Yamaguchi, Junya Yamahishi, 玉木 秀幸, 眞弓 大介, Takeshi Naganuma, Katsuhiko Kaneko (2019) Improvement of terrestrial groundwater sampling method affects microbial community analysis, GEOMICROBIOLOGY JOURNAL, 303-316.
- Bayanzul Batdemberel, 中村 謙吾, 町田 功, 渡辺 憲明, 駒井 武 (2019) Construction of conceptual model for confined groundwater flow in the Gunii Khooloi Basin, Southern Gobi Desert, Mongolia, HYDROGEOLOGY JOURNAL 27, 1581-1596.
- Nakata K, Hasegawa T, Solomon D.K, Miyakawa K, Tomioka Y, Ohta T, Matsumoto T, Hama K, Iwatsuki T, 小野 昌彦, 丸井 敦尚 (2019) Degassing behavior of noble gases from groundwater during groundwater sampling, APPLIED GEOCHEMISTRY 104, 60-70.
- 中島 善人 (2019) Non-Destructive Quantification of Lipid and Water in Fresh Tuna Meat by a Single-Sided Nuclear Magnetic Resonance Scanner, Journal of Aquatic Food Product Technology 28, 241-252.
- 池田 進, 中島 善人, 中野 司 (2019) Three-dimensional observation of the boundary region between massive feldspar and graphic granite by X-ray computed tomography, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 114, 1-17.
- Xiyang Dong, Chris Greening, Jayne E. Rattray, Anirban Chakraborty, Maria Chuvochina, 眞弓 大介, Jan Dolfig, 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 10
- 神田 径, 宇津木 充, 高倉 伸一, 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 71.
- Yaser Nikpeyman, 細野 高啓, 小野 昌彦, 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.
- 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 84, 131-146.
- Akam, C., George J. Simandle, Ray Lett, Suzanne Paradis, 星野 美保子, 昆 慶明, 荒岡 大輔, Craig Green, 児玉 信介, 高木 哲一, Manzur Chaudhry (2019) Comparison of methods for the geochemical determination of rare earth elements: Rock Canyon Creek REE-F-Ba deposit case study, southeastern British Columbia, Canada, GEOCHEMISTRY-EXPLORATION ENVIRONMENT ANALYSIS.
- 松本 親樹, 町田 功 (2019) Investigation of Groundwater Flow using $\delta^{18}\text{O}$ and δD in the A Sulphur Mine in Japan, Proc. of 23rd International Conference on Environment and Mineral Processing and workshop Waste - Secondary Raw Materials 100, 151-158.
- 雷 興林, 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 90, 3.
- 太田 雄貴, 黒田 潤一郎, 山口 飛鳥, 鈴木 淳, 荒岡 大輔, 石村 豊穂, NGHP Expedition 02 JAMSTEC Science Team, 川幡 穂高 (2019) Monsoon-influenced variations in plankton community structure and up-

per-water column stratification in the western Bay of Bengal during the past 80 ky, PALAEOGEOGRAPHY PALAEOCLIMATOLOGY PALAEOECOLOGICAL 521, 138-150.

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 1, 43, 13-18.

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 9, 2498, 1-12.

伊左治 雄太, 吉村 寿紘, 荒岡 大輔, 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 3, 6, 1073-1079.

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 488, 99-103.

Damak Fadwa, 浅野 眞希, 馬場 浩司, 須田 碧海, 荒岡 大輔, Ahmed Wali, 磯田 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 283, 656-664.

荒岡 大輔, 吉村 寿紘 (2019) Rapid purification of alkali and alkaline-earth elements for isotope analysis ($\delta^{7}\text{Li}$, $\delta^{26}\text{Mg}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and $\delta^{88}\text{Sr}$) of rock samples using borate fusion followed by ion chromatography with a fraction collector system, ANALYTICAL SCIENCES 35, 7, 751-757.

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 80, 185-194.

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 125, 7, 483-516.

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 125, 7, 467-481.

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 33, 2551-2560.

井伊 博行, Kitagawa Hiroki, Kubohara Takuma, 町田 功 (2019) OXYGEN AND HYDROGEN STABLE ISOTOPIC RATIOS AND SOLUBLE SUBSTANCES OF GROUNDWATER IN THE KINOKAWA RIVER CATCHMENT, KII PENINSULA, JAPAN, International Journal of GEOMATE 17, 62, 158-166.

上沢 進, 張 銘, 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 14, 2, 149-159.

上沢 進, 張 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-, 地盤工学ジャーナル 14, 2, 141-148.

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 29, 3, 347-358.

Jae Hoon Kim, Jin-Han Ree, Jeong-Heon Choi, Naveen Chauhan, 廣瀬 丈洋, 北村 真奈美 (2019) Experimental Investigations on Dating the Last Earthquake Event using OSL Signals of Quartz from Fault Gouges, TECTONOPHYSICS 769.

高橋 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 384, 232-240.

Hideki Tsuji, 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 ^{137}Cs Concentration in the East Japanese Rivers, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 697.

令和元年12月4日発行

■編集・発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門
〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 (中央第7)
TEL 029-861-3633

地圏資源環境研究部門 研究成果報告会2019
GREEN Report 2019
AIST04-C00014-18

本誌記事写真等の無断転載を禁じます。