

# GREEN Report 2015

地圏資源環境研究部門  
研究成果報告

強い技術シーズの創出と展開



# 目次

## 講演題目

13 : 30-13 : 35	開会のあいさつ		
13 : 35-14 : 05	[はじめに] 地圏資源環境研究部門 研究紹介	研究部門長 中尾 信典	7
14 : 05-14 : 30	多様な対象へ挑む物理探査技術 - 最近の技術動向と課題 -	物理探査研究グループ長 光畑 裕司	8
14 : 30-14 : 55	地球表層物質を用いた革新的吸着材の開発	地圏化学研究グループ長 鈴木 正哉	12
14 : 55-15 : 35	休憩・ポスターセッション		
15 : 35-16 : 15	【招待講演】 石油開発の視点からの地圏研究への期待	石油資源開発株式会社 中東・アフリカ・欧州事業本部 本部長補佐 星 一良	14
16 : 15-16 : 40	地下微生物のメタン生成ポテンシャルを 評価する技術	地圏微生物研究グループ長 坂田 将	16
16 : 40-17 : 05	マルチスケールにおけるジオメカニクスモデリング	地圏メカニクス研究グループ長 雷 興林	20
17 : 05-17 : 20	社会構造の変化と水科学への期待 - 第四期研究のはじまりと基盤情報整備 -	地下水研究グループ長 丸井 敦尚	24
17 : 20-17 : 25	閉会のあいさつ		
17 : 45-	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	丸井 敦尚	30
鉱物資源研究グループの紹介	鉱物資源研究グループ長	高木 哲一	32
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	森田 澄人	34
地圏微生物研究グループの紹介	地圏微生物研究グループ長	坂田 将	36
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	光畑 裕司	40
CO2 地中貯留研究グループの紹介	CO2 地中貯留研究グループ長	西 祐司	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	46
地圏メカニクス研究グループの紹介	地圏メカニクス研究グループ長	雷 興林	48

## 研究シーズ紹介

貯留層評価・管理のための坑井テスト解析ツールの開発・整備	中尾信典	54
マルチプルリスク評価のための環境騒音への個人曝露の長期観測	今泉博之	54
MacCormack 法を用いた地形と任意形状の不連続面を含むモデルの弾性波伝播シミュレーション - 座標変換および linear slip interface による -	菊地恒夫	55
文化地質学	長 秋雄	56
地下水研究グループ		
地下水の研究	丸井敦尚	57
温泉 / 地下水の深部環境における熱・物質移行過程の解明	佐々木宗建	57
温泉発電地域における温泉化学モニタリング	柳澤教雄	58
地下水保全を念頭においた水文地質学	町田 功	58
富士山から駿河湾に至る地下水の研究	小野昌彦	59
沿岸域の地下水流動に関する研究	井川怜欧	59
鉱物資源研究グループ		
レアメタル資源研究の国際展開	高木哲一	60
アジア地域の広域地質図, 鉱物資源図の整備	大野哲二	60
リモートセンシングによる岩石・鉱物識別	児玉信介	61
重希土類に富む風化花崗岩の研究: 特にイオン吸着型鉱床について	実松健造	61
新規重希土類資源の鉱物学研究	星野美保子	62
鉱物資源ポテンシャル評価 LA-ICPMS による元素・同位体分析法の開発	昆 慶明	62
MC-ICP-MS による同位体分析手法の確立と高度化	荒岡大輔	63
粘土鉱物資源の 1 つであるベントナイトに関する研究	三好陽子	63
燃料資源地質研究グループ		
堆積盆発達過程における炭化水素の役割とその影響	森田澄人	64
シェールガス・シェールオイルの根源岩能力に関する研究	鈴木祐一郎	65
メタンハイドレートの産状・分布の把握と資源量評価	佐藤幹夫	66
地質学・堆積学的手法による燃料資源研究の推進	中嶋 健	67
海底堆積物の熱物性計測技術の確立	後藤秀作	68
メタンハイドレート形成に関わる流体移動と背景地質の研究	大塚宏徳	69
地圏微生物研究グループ		
脂質バイオマーカーの分析によって海底下メタン生成菌の深度分布を評価	坂田 将	70
水溶性天然ガス鉱床における地下微生物メタン生成機構の解明	片山泰樹	70
メタン生成補酵素 F430 の超高感度分析法の開発とメタン生成ポテンシャル評価法への応用	金子雅紀	71
水溶性天然ガス田における微生物によるメタン生成ポテンシャルの評価	吉岡秀佳	72
油ガス田鉱床を形成するメタン生成微生物群の分離培養と生態解明	持丸華子	72
枯渇油田に棲息する微生物を利活用した原油増進回収技術の開発	眞弓大介	73
地圏化学研究グループ		
粘土系吸着剤による低温再生型蓄熱剤の開発	鈴木正哉	74
水道水等から発生する軽質非メタン炭化水素とその除去法	猪狩俊一郎	74
微生物起源の天然ガス鉱床の地質学的, 地球化学的成因研究	金子信行	75
ガスハイドレート安定条件の実験的測定と統計熱力学モデルの構築	前川竜男	75
粘土鉱物の機能性評価と利用に関する研究	森本和也	76
ESR 年代測定による熱履歴解析	水垣桂子	76

## 物理探査研究グループ

浅海および深海域適用に向けた電気・電磁探査法の開発・適用研究	光畑裕司	77
コンクリート中の水を原位置で非破壊計測できる磁気共鳴スキャン技術	中島善人	77
岩石・土壌の複素比抵抗測定	高倉伸一	78
液状化地盤の原位置評価技術パイプロコーンを用いた利根川下流域の液状化被災地調査	神宮司元治	79
静岡県富士川河口域における小規模三次元反射法地震探査	横田俊之	79
大屯火山群における VLF-MT 表層比抵抗データの地球統計学的検討	小森省吾	80

## CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループ

自然電位法による CO <sub>2</sub> 挙動のモニタリング	西 祐司	81
超伝導重力計による高感度重力モニタリング手法	杉原光彦	81
CO <sub>2</sub> 地中貯留における砂泥互層の遮蔽性能評価	徂徠正夫	82
CO <sub>2</sub> 地中貯留研究—貯留層や堆積物層中における二相・三相流動シミュレーション—	加野友紀	82
CO <sub>2</sub> 地中貯留における岩石の水理と力学の関係解明	藤井孝志	83

## 地圏環境リスク研究グループ

現場条件に適合した複合汚染対策技術の開発	張 銘	84
人力小規模採掘のリスク管理に関する研究	村尾 智	84
CO <sub>2</sub> 地中貯留 (CCS) およびその応用技術 (Bio-CCS) のリスクと便益の評価	田中敦子, 坂本靖英	85
地圏環境リスク評価に関する研究—自然由来重金属類汚染の生物・化学的要因の検討—	川辺能成	86
地圏環境中有害重金属の移行におよぼす土壌中腐植物質の役割	原 淳子	86
新規ヒ素除去材開発のための基礎的研究 —使用済マグネシウム系吸着材の環境安定性評価—	杉田 創	87
地圏環境リスク評価システム (GERAS) の社会実装に向けた取り組み	坂本靖英	88
水中の放射性 Cs のモニタリング技術の開発・標準化など	保高徹生	88
土壌汚染評価のためのカラム試験法の高度化—非平衡ガス交換の検出—	井本由香利	89

## 地圏メカニクス研究グループ

流体作用下岩石物性と変形・破壊に関する総合研究	雷 興林	90
泥岩の三軸クリープ試験	及川寧己	91
多段階三軸圧縮試験の試み	成田 孝	91
高レベル放射性廃棄物地層処分における岩盤の長期変形挙動に関する研究	竹原 孝	92
ビット摩耗状態の検知による坑井掘削技術の高度化	唐澤廣和	92
PDC チップを有するパーカッションビットの掘削性能評価	宮崎晋行	93

## ポスター発表題目

水文環境図「富士山」の整備	小野昌彦, 井川怜欧, 町田 功, 丸井敦尚
アジア鉱物資源図の発行	大野哲二, 神谷雅晴, 奥村公男, 寺岡易司, 渡辺 寧 (秋田大)
中国南部のイオン吸着型希土類鉱床の特徴	実松健造
重希土類資源としてのアパタイトの可能性: 南アフリカのアルカリ岩鉱床を例として	星野美保子, 実松健造, 渡辺 寧 (秋田大), 高木哲一
鉱物資源探査のための反射スペクトル計測	児玉信介, 古宇田亮一, 猪川洋子
LA-ICPMS を用いた粉末試料直接分析	昆 慶明
MC-ICP-MS による同位体分析手法の確立と高度化	荒岡大輔, 吉村寿紘 (東大・大気海洋研), 昆 慶明
ベントナイト資源の探査および性能評価に関する研究	三好陽子, 高木哲一, 雨宮 清 ((株)安藤・間)
表層型メタンハイドレート H26 年度 AUV 調査	森田澄人
表層型メタンハイドレート H26 年度広域地形地質調査	佐藤幹夫, 松本 良 (明治大)
表層型メタンハイドレート H26 年度調査: 最上トラフ海域のシングルチャンネル地震探査	佐藤幹夫
表層型メタンハイドレート HR14 航海試料の砂粒組成分析結果	中嶋 健
東部南海トラフにみられる「折り返し反射面」の特徴とその地質学的背景	大塚宏徳, 芦寿一郎 (東大), 森田澄人
燃料資源図「関東地方」の出版	佐脇貴幸, 金子信行, 前川竜男, 猪狩俊一郎
Methanogenic archaeal diversity and characterization of a novel methanol utilizing methanogen in a natural gas field	持丸華子, 吉岡秀佳, 玉木秀幸 (生物プロセス RI), 坂田 将, 鎌形洋一 (生物プロセス RI)
メタン生成補酵素 F430 を用いたメタン生成・消費プロセスの新しい評価法	金子雅紀, 高野淑識 (JAMSTEC), 大河内直彦 (JAMSTEC)
燃料資源図「関東地方」の出版	佐脇貴幸, 金子信行, 前川竜男, 猪狩俊一郎
水道水から放出される非メタン炭化水素	猪狩俊一郎
Adsorption mechanisms of inorganic anions on hydrotalcite-like compounds	Kazuya Morimoto, Tsutomu Sato (Hokkaido Univ.), Masaya Suzuki
表層型メタンハイドレート H26 年度海洋電磁探査	光畑裕司, 上田 匠, 森田澄人
コンクリート中の水を原位置で非破壊計測できる磁気共鳴スキャン技術	中島善人
液状化発生地域における弾性波探査	横田俊之, 神宮司元治
苫小牧 CO <sub>2</sub> 地中貯留テストサイトでの高感度重力計による連続測定	杉原光彦, 池田 博 (筑波大), 西 祐司
Impact of effective confining stress on fluid flow and capillary sealing properties of Kazusa group mudstones	藤井孝志, 徂徠正夫
PCB 汚染土壌の分析法に関する比較検討	張 銘, 吉川美穂, 原 淳子, 川辺能成, 内田真理子 (ケミカルグラウト (株))
自然由来重金属類の長期溶出特性評価	張 銘, 吉川美穂, 杉田 創, 井本由香利, 原 淳子
ジクロロメタンを含む複合汚染の好氣的微生物分解機構	吉川美穂, 張 銘, 豊田剛己 (農工大)
土壌ガス分散・遅延係数の測定: デッドボリュームの影響	井本由香利
Arsenic Equilibrium Concentration and Adsorption Rate for Arsenic Removal using Magnesium Compounds	杉田 創, 張 銘, 小熊輝美, 原 淳子, 柳澤教雄
地熱チームの研究紹介	再生可能エネルギー研究センター・地熱チーム
地中熱チームの研究紹介 — 水文地質環境を活用した地中熱研究 —	内田洋平, 吉岡真弓, シュレスト・ガウラヴ, 高橋保盛, 石原武志, 金子翔平 (再生可能エネルギー RC 地中熱チーム)
奥会津地熱地域における比抵抗および弾性波モニタリング	山谷祐介 (再エネ RC), 相馬宣和 (再エネ RC), 浅沼 宏 (再エネ RC), 高倉伸一

## 講演題目



## はじめに



地圏資源環境研究部門長  
中尾 信典

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

地圏資源環境研究部門の研究成果報告会は、今年で14回目となります。

本年4月から産総研は国立研究開発法人として、第4期中長期計画（5カ年）をスタートさせました。コア技術を束ねそれらの総合力を発揮するため、産総研は7領域（5研究領域と2総合センター）となる、エネルギー・環境領域、生命工学領域、情報・人間工学領域、材料・化学領域、エレクトロニクス・製造領域、地質調査総合センター、計量標準総合センターに再編されています。第4期の研究面での特色は、産業技術政策の中核の実施機関として最先端研究・革新的技術シーズを事業化（民間企業による事業化）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主なミッションとなっていることです。

7領域のひとつである地質調査総合センター（GSJ）は、日本で唯一の「地質の調査」のナショナルセンターとして地質情報の整備に今後も取り組むことが任務となっています。当部門も地質情報研究部門、活断層・火山研究部門、地質情報基盤センター（研究支援ユニット）とともに、GSJ傘下の研究ユニットとして、今後も「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としていきます。第4期における当部門の具体的なミッションは以下のとおりで、政策ニーズ対応の研究を中心に進めていく所存です。

- 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。

地熱・地中熱研究に関しては、2014年4月に福島県郡山市に設立された「福島再生可能エネルギー研究所（FREA）」において、当部門などに兼務する地熱・地中熱研究者が地熱チームおよび地中熱チームとして、看板研究（地熱・地中熱の適正利用のための研究）を引き続き遂行していきます。

先に述べたように、産総研第4期では技術シーズを実用化に結び付ける「橋渡し」機能の強化を最重要課題として掲げています。そこで、今回の報告会テーマを「強い技術シーズの創出と展開」としました。招待講演として石油資源開発株式会社の星一良氏をお迎えし、石油開発の視点から地圏研究への期待などについてご講演いただきます。さらに、当部門で培ってきた技術シーズや最近の研究開発動向などをご紹介し、第4期における研究展開および課題などを議論していただきたいと考えております。

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いただくために、例年同様にポスターセッションの場を設け、ご参加いただいた方との研究交流を深めてまいりたいと考えております。土壌汚染評価や燃料資源など、様々な研究成果の紹介を用意しております。また、GREEN Report に所属研究者全員の紹介を掲載することも試みています。

私どもは本報告会を、部門の研究成果を皆様にお知りいただくと同時に、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おります。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。

# 多様な対象へ挑む物理探査技術

## － 最近の技術動向と課題 －

Exploration Geophysics Challenging to Various Targets  
－Recent Technical Trend and Tasks－

副研究部門長・物理探査研究グループ長：光畑裕司  
Deputy Director and Leader, Exploration  
Geophysics Research Group: Yuji Mitsuhashi  
e-mail: y.mitsuhashi@aist.go.jp

### 1. はじめに

2011年3月の東日本大震災以降、我が国はエネルギー政策に関する再検討、再生可能エネルギーや新たなエネルギー資源の模索等、現状で非常に混沌とした時代に陥っている。またかねてより懸念されていた地球温暖化や、それに起因すると思われる最近のゲリラ豪雨あるいは竜巻等の異常気象の発生。これらの困難は、正に我々が真剣に取り組むべき課題となっている。そして、持続可能で強靱な社会を構築するための、新たな資源の開発や二酸化炭素の地中貯留のような温暖化対策あるいは地盤を対象とした防災対策において、やはり地下の探査がその第一段階でまず必要になる。

物理探査とは、光の届かない地下を、物理現象（重力・磁力・弾性波・電磁気等々）を利用して、間接的に可視化する技術である。上記のような状況の中で、現在、物理探査は地下資源探査、地下環境利用・保全、インフラ整備・維持、防災等の様々な分野で活用され、さらなる技術開発、適用範囲拡大が期待されている（図1）。本稿では、物理探査技術の内、筆者の専門分野である電気・電磁気探査法を主に、産業活動に関連した各分野についての現状や当部門の適用事例の紹介、そして課題について報告する。

### 2. 地下資源探査分野への適用

東日本大震災以来、再生可能エネルギーの開発・利用促進が謳われ、昨年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」の中で安定した地熱エネルギーはベースロード電源として位置づけられ、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）を中心に、全国的な調査が実施されている。その中で新規に適用されている方法の一つに、時間領域空中電磁探査法がある。地熱貯留層の探査に関して、MT法

の適用実績により地下比抵抗情報の把握が有力であることは認識されている。一方でこれまで、鉱物資源探査主目的に開発されてきた空中電磁探査はヘリコプターを利用した高空間分解能探査を可能とするものであったが、周波数領域の電磁探査法であったため、探査可能な深度が100m程度までの浅いものであった。しかし、近年、直径30m程度の巨大な送信ループを地表から30m程度の高度にヘリコプターで吊り下げて、航行しながら探査を続ける時間領域空中電磁探査法が実現し、高空間分解能かつ深部探査が可能となり、鉱物資源や地下水探査に利用されてきた（図2）。最近では、送信源の大きさ（モーメント）の増大化が図られ、さらなる深部への探査に力が注がれている（図3）。本手法を地熱探査に適用することで、地熱貯留層探査の指標となるキャップロックの3次元分布に貢献

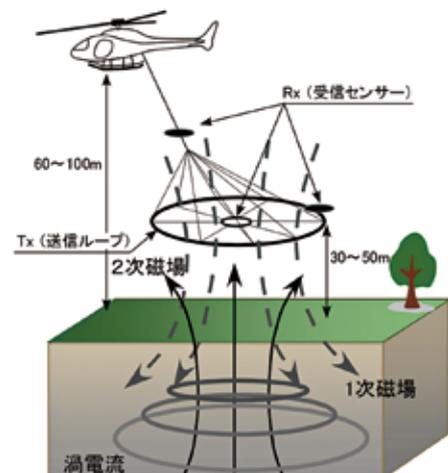


図2 空中時間領域電磁探査法の概念図。



図1 物理探査の適用が期待される地圏の地下資源評価、地下環境利用・保全の各種地質対象。

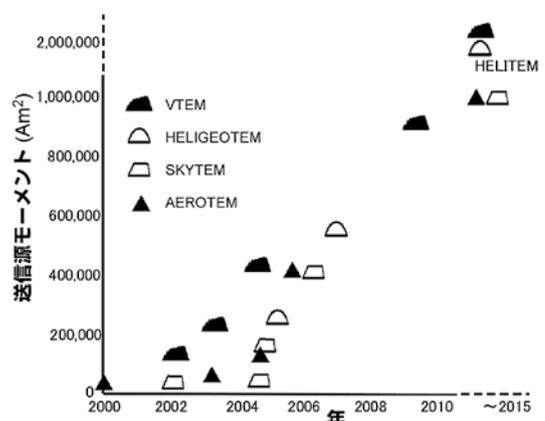


図3 空中時間領域電磁探査法の送信源モーメントの変遷。シンボルの形は電流波形を表現。

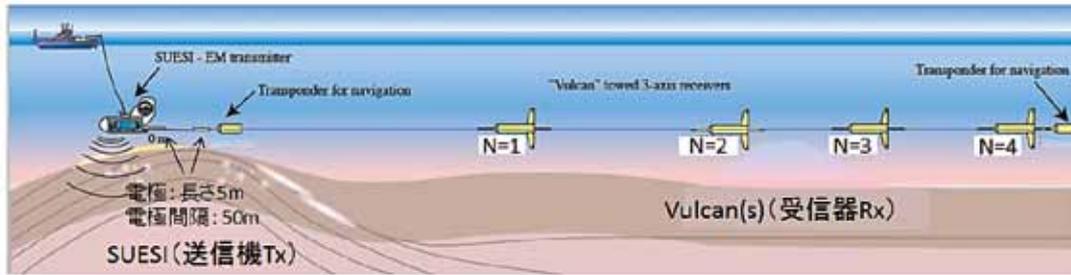


図4 曳航型海洋 CSEM 法探査システムの配置図 (The Marine EM laboratory at Scripps Institution of Oceanography ( <http://marineemlab.ucsd.edu/> ) の画像に加筆).



図5 曳航型海洋 CSEM 法探査システムの電流送信機 (左) と電場信号受信器 (右).

するものと考えられる。

またメタンハイドレートに関しては、「エネルギー基本計画」の中で非在来型資源とし、表層型メタンハイドレートが従来の砂層型に加えて位置付けられている。

表層型について、資源エネルギー庁委託事業のもと産総研では2014年より、日本海のいくつかの海域で、曳航型の人工信号源電磁探査 (CSEM) 法を用いた調査を実施している。本手法は、米国のスクリプス海洋研究所が開発した CSEM 探査システムを利用したもので、水深1000m程度の海底で、約50mの高さを保って、電流送信源と4台の電場受信器を曳航しながら電磁探査を実施するものである (図4, 図5)。電流源は長さ5mの金属製電極二つを50m離してつなげたダイポールで、いくつかの周波数成分からなる波形の電流を海中で送信する。そして、送信源から200m程度後方に100m間隔で順次配置された4台の受信器で電場を計測し、その計測データから海底下の比抵抗分布を推定する仕組みである。本手法の適用結果として、表層型メタンハイドレートの存在を示唆するサブボトムプロファイルの異常と非常に調和的な高比抵抗異常の分布が把握できることがわかった。

また、当研究グループでは、より容易に海底下表層の地盤が探査可能な手法として鉛直電極配置型電気探査法 (図6) を考案し、理論研究<sup>1) 2)</sup> や現場実験<sup>3)</sup> を行い、海底下表層の資源や海底地盤調査等への適用可能性を探っている。

### 3. 地下環境利用分野への適用

福島第一原発事故を受けて全国の原発が停止し、順次再稼働に向けた安全審査が実施されている。経産省が取りまとめた「長期エネルギー需給見通し (エネルギーミックス)」では、2030年の総発電量のうち火力発電の比率を6割以下へ引き下げ一方で、原子力は22~20%程度、

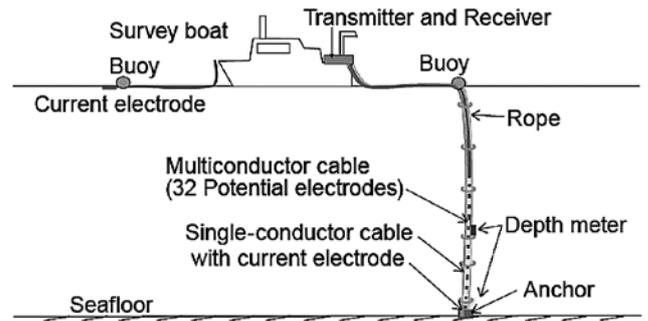


図6 多電極ケーブルを用いた鉛直電極配置電気探査法の概念図。

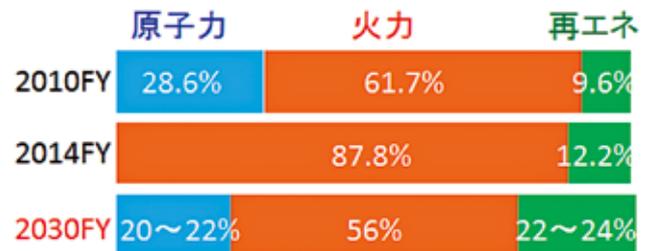


図7 エネルギーミックス (電源構成比) (資源エネルギー庁「電源開発の概要」および <http://www.sankeibiz.jp/pdf/151015.pdf> をもとに作成。

再生可能エネルギーは22~24%程度に拡大する方向で当面の施策を推進していくとされている (図7)。いずれにせよ原子力発電は「出口のないトイレ」と揶揄されるように高レベル放射性廃棄物の処分問題の見通しが困難となっている。

経産省委託事業のもとで、当部門は地層処分の候補地となり得る沿岸域において地下水環境の状況把握調査を実施してきた。その中で当研究グループは浅海用電磁探査システムの開発を行ってきた (図8)。そして本探査システムを北海道幌延沿岸海域で適用し、沖合10kmまで海底下に淡水性帯水層が伸びていることを見出し (図9)、その下の化石海水で満たされた地層が、地下水流動の点で安定であることを推測した<sup>4)</sup>。現在、本手法を二酸化炭素の地中貯留の実証フィールドである苫小牧沿岸海域で適用し、海底下の地下水環境の把握調査を実施しているところである。

### 4. 地下環境保全分野への適用

近年、地下水資源の探査・環境保全を目的に、様々な物理探査手法の開発・適用研究が世界的に実施されており、



図8 浅海用海底電磁探査装置.

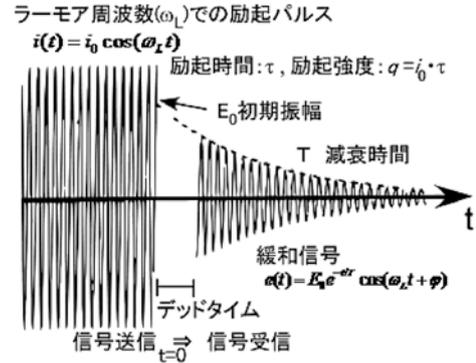


図11 電流通電状態と遮断後の緩和による受信信号減衰の様子。E<sub>0</sub>から水分量が、Tから孔隙サイズすなわち透水性が推定される<sup>6)</sup>。

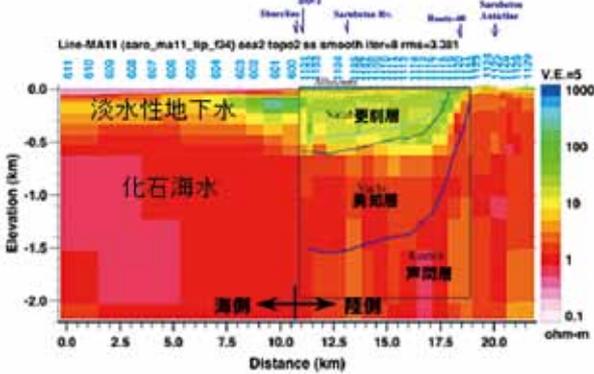


図9 幌延沿岸域(陸域-浅海域)の地下比抵抗分布.

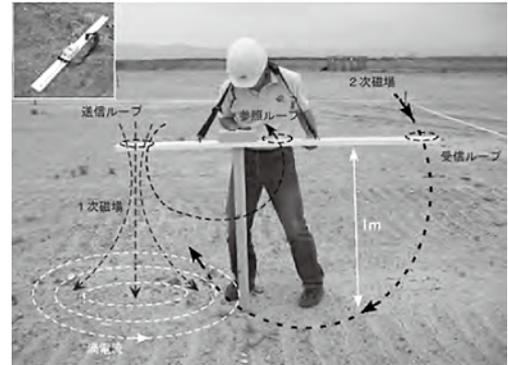


図12 Geopex社 GEM-2システム.

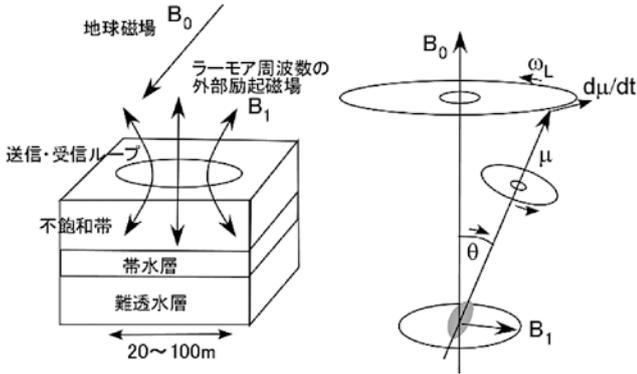


図10 地表NMR探査の配置図(左)と水素原子核の歳差運動(右)<sup>6)</sup>。

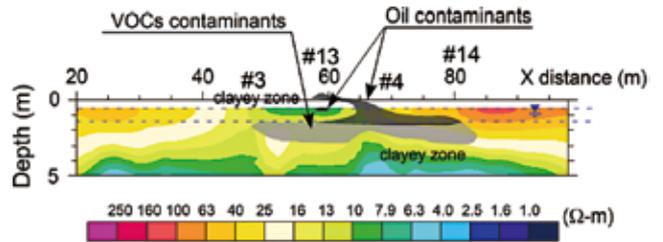


図13 地下比抵抗断面図と汚染物質浸透経路の関係.

その分野は Hydrogeophysics<sup>5)</sup> と呼ばれている。この分野での最近の進歩として、地球磁場を利用した地表NMR (SNMR, surface nuclear magnetic resonance) 探査法がある。本手法は地球磁場の方向を軸にして特定の周波数で歳差運動をしている水素原子核に対して、地表に設置した送信ループで人工的にその周波数の外部磁場を発生させ、それによる水素原子核の核磁気共鳴現象を利用して、地層の水飽和度や透水性の地下分布を推定する手法である(図10・図11)。送信ループの電流値と流電時間の積である励起強度を増加させると、影響範囲が増加することを利用し、深度方向の探査を行う。現在、100mから150m程度の深度までの探査が可能である。周辺環境の電磁ノイズに弱いため、リファレンス信号処理等のノイズ除去法が研究されており、地下水そのものの分布を探査可能な有力な手法と考えられる。

また、以前より土木・農業分野への適用も含めた浅層物理探査法の開発・適用研究分野は Near-Surface

Geophysics<sup>7)</sup> と呼ばれ、継続して研究が行われている。最近の技術開発として多数の周波数信号を同時送受信し、移動しながらプロファイリングおよびサウンディングを行うマルチ周波数固定式小型ループ電磁探査法がある。図12に本手法の探査システムの一つである米国 Geopex 社の GEM-2システムを示す。本装置は48kHz ~ 330Hz の範囲で、最大15周波数の電磁場信号を送受信できる<sup>8)</sup>。

図13に港湾地域の工場跡地で、本装置を用いて調査して得られた地下比抵抗断面図と地表からの汚染物質の浸透経路との関係を示す。この事例研究では、汚染物質を直接検知するプローブを地中に貫入させるダイレクトブッシュ式原位計測を併用し、低比抵抗を示す粘土質なゾーンの周辺から汚染物質が地表から地中へと浸透して行くことを推測した<sup>9)</sup>。

## 5. インフラ整備・維持および防災分野

東日本大震災の教訓を踏まえ、また近年多発する局所的

な集中豪雨の発生による地滑りや洪水被害に対処するため、国を挙げて強靱な社会の構築計画が進められている。さらに老朽化するインフラの対策も従来から重要な課題となっている。当グループでは、物理探査に加えて、対象物の特性を原位置で計測できるプローブの開発や、非破壊で評価する計測システムの開発を進めている。

東日本大震災では、関東でも利根川下流域や浦安地域で大規模な地盤液状化が発生した。当グループではプローブ内の振動機構で、人工的に地盤に振動を与え、地盤内の液状化の発生を確認するパイプロコーン（図14）を開発し、液状化被災地で、適用実験を行い、その有効性を確認した<sup>10)</sup>。

また当グループでは、対象物表面から内部の水分の分布を把握する小型のNMR計測装置のプロトタイプを開発している<sup>11)</sup>。本装置を用いれば、コンクリート内部の空洞や亀裂に溜まった水を検出することが可能となる（図15）。

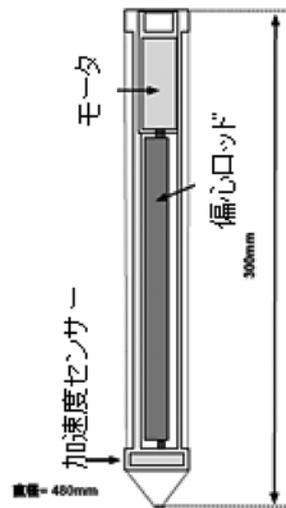


図14 パイプロコーンの模式図。

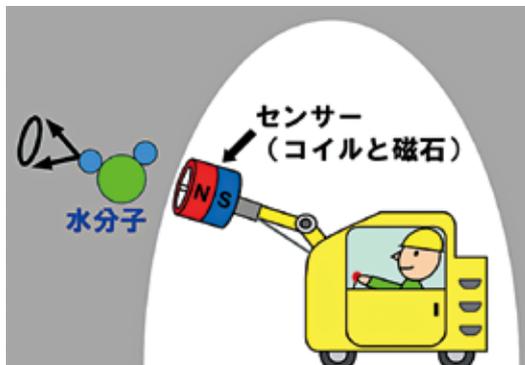


図15 小型NMRスキャン技術によるコンクリート非破壊検査のイメージ図。

## 6. おわりに

本報告では、物理探査（特に電気・電磁探査）に最近の技術開発と、当研究グループの技術開発・事例研究についての一部を報告した。その他、最近の話題として無人搬送車（AGV）や自律型無人潜水機（AUV）あるいは無人航空機（UAV）を活用した物理探査技術の開発も進みつつある。

地下に関する全ての人為的活動において、地下の可視化技術である物理探査は、常に必要とされる技術であり、今後も様々な局面で、その適用が要望され、試されて行くに違いない。そして、そのための技術開発は常に継続されなくてはならない。加えて、物理探査で得られる地下の画像は、

必要対象とする地下物性を間接的に映し出した画像に過ぎない場合がほとんどで、その画像が示す意味を解釈するためには、周辺の関連分野の知識が要求され、その知識の集積も怠ってはならない。

現在、物理探査への期待が高まる一方で、専門として教育する大学の研究室が減少し、専門とする人材が欠乏しつつある状況となっている。人員不足により、取得データの品質管理、新規技術の開発あるいは導入が停滞してしまうことが懸念される。今後の関係機関との連携の強化や、研究成果の効率的で魅力的な情報発信が今まで以上に必要と感じている。

## 参考文献

- 1) 光畑裕司・上田 匠（2010）水平多層構造中の任意電極配置による直流電位応答－点電流源に対する理論電位漸化式の導出－, 物理探査, 63, 197-208.
- 2) 上田匠・光畑裕司・内田弘弘（2010）水平多層構造中の任意電極配置による直流電位応答 - 数値計算手法と海底電気探査シミュレーション -, 物理探査, 63, 229-238.
- 3) Ueda, T, Mitsuhata, Y., Jinguji, M, and Baba, H. (2014) Sub-seafloor resistivity sensing using a vertical electrode configuration, EARTH PLANETS AND SPACE. 66, 31.
- 4) Ueda, T., Mitsuhata, Y., Uchida, T., Marui, A. and Ohsawa, K. (2014) A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, Journal of Applied Geophysics, 100, 23-31.
- 5) Rubin, Y. and Hubbard, S. S. (2005) Hydrogeophysics, Springer, pp.523.
- 6) Yaramanchi, U., Kemna, A. and Vereecken, H (2005) Emerging technologies hydrogeophysics, in Rubin, Y. and Hubbard, S. S. (eds.) Hydrogeophysics, Springer, 467-486. ,
- 7) Everett, M.E. (2013) Near-Surface Applied Geophysics, Cambridge Univ. Press, pp.403.
- 8) 光畑裕司・稲崎富士（2008）電気・電磁探査法による浅層地盤の非破壊プロファイリング調査技術, 地質ニュース, No.644, 14-24.
- 9) Mitsuhata, Y., Ando, D., Imasato, T. and Takagi, K. (2014) Characterization of organic-contaminated ground by a combination of electromagnetic mapping and direct-push in situ measurements, Near Surface Geophysics, 12, 613 - 621.
- 10) 神宮司元治・光畑裕司・横田俊之・中島善人（2013）利根川下流域における液状化被害地域の物理探査・原位置試験調査－液状化調査技術の新展開－, GSJ 地質ニュース, 2, 380-384.
- 11) 中島善人・宇津澤慎（2008）核磁気共鳴表面スキャナーの農業土木への応用にむけて, 農業農村工学会誌, 76, 795-799.

## 地球表層物質を用いた 革新的吸着材の開発

Development of Innovative Adsorbent Using Earth  
Surface Materials

地圏化学研究グループ長：鈴木正哉  
Leader, Resource Geochemistry Research Group:  
Masaya Suzuki  
e-mail: masaya-suzuki@aist.go.jp

### 1. はじめに

1980年代後半より二酸化炭素による地球温暖化の問題が取り上げられるようになって以来、二酸化炭素排出量削減の重要な解決策の一つとして、省エネルギー技術および新しいエネルギーの利用法の開発が進められている。

国内のエネルギー消費を特徴付けるため、エネルギーの消費量に関する検討は、産業部門・運輸部門・民生部門に大別して行われているが、民生部門は1973年度比で約2.1倍とエネルギー消費量が他の2つの部門に比べて著しく増加している。民生部門の構成比は、家庭部門約4割、業務部門（事務所やビル・ホテルや百貨店・サービス業など）約6割であるが、中でも空調における効果的な省エネルギー技術の開発・実用化が望まれている。

空調における省エネ技術も含め、効率的な熱利用の観点から100℃以下の廃熱を効率的に利用できる吸着式熱エネルギーシステムが注目されている。その一つが太陽熱から氷を作るというコンセプトで開発された吸着式ヒートポンプシステム（吸着式冷凍機）であり、もう一つがエネルギー効率も含め除湿を効果的に行えるデシカント空調システムである。

これらの吸着式熱エネルギーシステムを効率的に稼働させるにあたっては、各システムに合った吸着材の開発が求められ、100℃以下の低温で水蒸気の再生が可能な吸着材の開発が行われた。このような背景の中、吸着材として検討を行った土壤中に存在するナノ物質であるアロフェンおよびイモゴライトについて紹介するとともに、アロフェン・イモゴライトを基に開発を行った低温での再生性に優れかつ吸着量にも優れた粘土系吸着材「ハスクレイ®」について紹介する。

### 2. 天然土壤中のナノマテリアル

ナノカプセルあるいはナノチューブという言葉からすぐに連想されるのは、C60やカーボンナノチューブなどの物質であるが、天然にも無機物質からなるナノカプセルやナノチューブが存在する。それらは、アロフェンおよびイモゴライトという物質であり、軽石や火山灰など火山噴出物に由来する土壤中の風化生成物として存在する非晶質アルミニウムケイ酸塩および低結晶性アルミニウムケイ酸塩である。

アロフェンは、ナノカプセル状で直径3.5~5nmの中空球状の形態をしており、その壁には水分子が入り出ることができる。

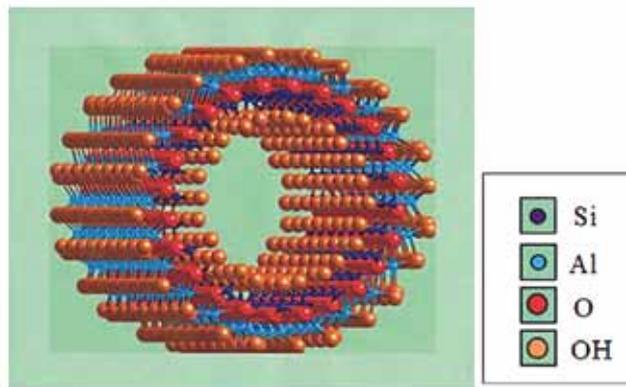


図1 イモゴライトの構造模式図

大きさの細孔を持つ。一方イモゴライトは図1に示すようなナノチューブ状で、その外径は2.2~2.8nm、内径約1nm、長さは数十nm~数μmである。またイモゴライトは日本で発見された鉱物であり、熊本県人吉地方の“イモゴ”とよばれる火山ガラスに富む火山灰土壌に特に多く含まれていたため、イモゴ (imogo) と石 (lite) の合成語としてイモゴライト (imogolite) と命名された鉱物である。

元来アロフェン・イモゴライトは土壌学の分野において、土壌内での養分や水分の移動およびそれらの植物への供給、有害な汚染物質の集積や残留などに対して重要な役割を担うという観点から研究が進められてきた。しかし近年、アロフェン・イモゴライトはナノマテリアル粘土としての側面から注目されている。これらはナノサイズの特異な形状と、ナノマテリアルが故の高い比表面積を有しているばかりでなく、水との親和性や吸着能力にも非常に優れている。それゆえ、天然ガスの燃料貯蔵媒体、生活環境の湿度を自律的に制御する調湿材料、水処理やダム湖などの濁水処理用凝集剤、有害汚染物質吸着剤、さらに触媒としての機能やポリマーナノコンポジット、細胞培養への展開が図られており、さまざまな工業的応用が期待されている。以下においては、イモゴライトの水蒸気吸着性能を用いた応用例として、結露防止材と吸着式ヒートポンプ熱交換材について紹介する。

### 3. イモゴライトの水蒸気吸着性能を用いた応用

#### 3-1. 結露防止材

イモゴライトの水蒸気吸着性能の特筆すべき点は、相対湿度90%以上の高湿度領域における急激な立ち上がり

示す吸脱着挙動である。相対湿度90%以上での吸着量は185wt%と、自重の約2倍の水蒸気吸着量を有している。イモゴライトはナノサイズのチューブ状物質であるが、フレキシビリティが非常に高いため、チューブは曲がりながら成長することが多く、従ってその外側に空間を形成することができる。イモゴライトを含む分散溶液を乾燥したものは、毛糸の玉のようになっていると推測されており、この毛糸の玉の隙間に対応する、イモゴライトチューブの外側に形成される空間を利用することにより、自発的な結露防止機能が発生する。ゼオライトやシリカゲルなどを用いた結露防止材では、使い捨てタイプが主流であるが、イモゴライトは相対湿度が90%以下になると、水蒸気として放出する。それゆえエネルギー的なものを加える必要がなく、吸着・脱着が繰り返し行われることも、イモゴライトを用いた結露防止材としての特徴である。

### 3-2. ヒートポンプ用熱交換材

ヒートポンプ用の熱交換材として求められる性質としては、(1)含水量が多い、(2)使用熱源温度領域で脱水量が多い、(3)脱水・吸水過程で構造が壊れない、(4)水和温度領域で水蒸気圧が低い(水和エンタルピーの絶対値が大きい)ことが挙げられる。そのような性能を有する熱交換材としてイモゴライトがある。イモゴライトは水和エンタルピーの絶対値が大きいゼオライトと同等なマイクロな細孔を持ち、その上熱交換可能性を大きく支配する脱水・吸水量は40℃程度の低温領域においても非常に大きい。脱水温度40℃における脱水率は、イモゴライトが24.9wt%であり、Mg-A型ゼオライトの8.6wt%やシリカゲル7.3wt%に比べて非常に高い脱水率を有している。脱水処理温度40℃における熱交換可能性は、イモゴライトは405kJ/kgであり、Mg-A型ゼオライトの182kJ/kgと比較しても、イモゴライトは2.2倍の熱交換能力を有する。このように低温熱源を利用する場合には、イモゴライトは最適なヒートポンプ用熱交換材であるといえる。

### 4. デシカント空調用吸着材ハスクレイの開発

イモゴライトを用いた結露防止材やヒートポンプ熱交換材の検討を行ってきたが、イモゴライトは中湿度領域における吸着量が少ないため、デシカント空調用吸着材には向いていなかった。デシカント空調用吸着材としては、様々な外気条件に対応することが必要であるため、幅広い相対湿度条件で吸脱着が行えるよう、吸着材における水蒸気吸着等温線は直線的に近いものが理想とされる。

このような背景に基づき、直線的に近い水蒸気吸着等温線を有する性能に加え、実用化の観点から合成時にテンプレート等を用いず低コストかつ大量に合成が可能で、無機多孔質材料の開発を行なった。その結果、生成物のX線

粉末回折図形において、非晶質アルミニウムケイ酸塩(Hydroxyl Aluminum Silicate)と低結晶性粘土(Clay)の2種類のピークが見られることから、Hydroxyl Aluminum Silicateの頭文字3文字(HAS)とClayを合わせた造語としてHAS-Clay(ハスクレイ)と称する無機多孔質材料が、水蒸気吸着性能において優れていることが明らかとなった(図2)。

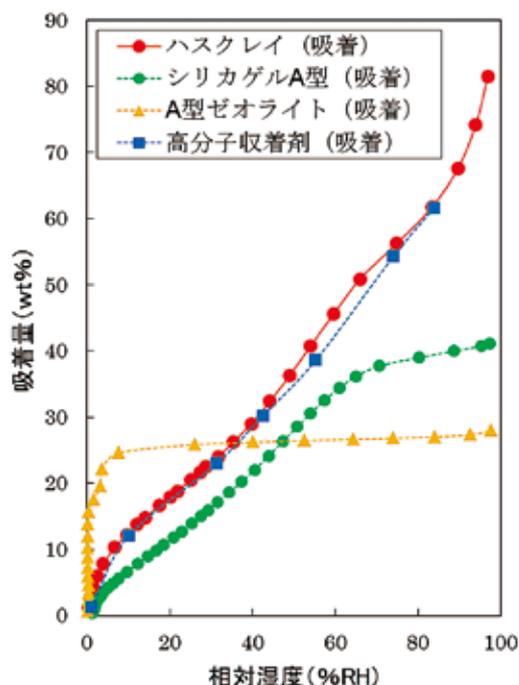


図2 ハスクレイおよび各種吸着材の水蒸気吸着等温線

### 5. おわりに

現在低温廃熱の利用は80~100℃において行われているが、さらに熱利用温度を下げ、最終的には40~60℃程度の低温廃熱を利用することが求められている。優れた熱利用システムはすでに開発されていることから、それらの熱利用システムを低温で稼働させることのできる吸着材の開発は、コストの低減とともにこれからも求め続けられる。低温廃熱を利用した省エネシステムに貢献できる吸着材の開発を成し遂げたい。

### 参考文献

- 1) 鈴木正哉：天然ナノ物質の合成とそれらを用いたエネルギー有効利用への応用, 岩石鉱物科学38(1), 19-24, (2009)
- 2) 鈴木正哉：アロフェン・イモゴライトの合成と応用, 粘土科学50(2), 81-87, (2011)
- 3) 鈴木正哉, 前田雅喜：粘土系無機多孔質材料によるデシカント空調用吸着材の開発, 日本冷凍空調学会論文集 29(1), 89-96, (2012)

## 【招待講演】

# 石油開発の視点からの 地圏研究への期待

Expectations for Geosphere Research from a  
Petroleum Geologist

石油資源開発株式会社

中東・アフリカ・欧州事業本部 本部長補佐：星 一良  
Middle East, Africa & Europe Project Division,  
JAPEX: Kazuyoshi Hoshi  
e-mail: kazuyoshi.hoshi@japex.co.jp

石油の探鉱開発に携わる地質技術者の視点から、産総研での地圏研究に期待する点を列記させていただきます。石油探鉱で得られた知見が地圏の利用と保全に活用されると同時に、日本発の地圏の研究が世界の石油探鉱に貢献する相乗効果を期待します。

### 1. 地圏内の物質移動の解明

石油天然ガスの探鉱開発では、深度およそ1,000mから5,000mの範囲での油ガスの生成と移動集積を主に扱うが、地圏の研究はこれより幅広い深度範囲での天水から地下水、温泉や熱水、CO<sub>2</sub>などを含めてより多くの物資移動を対象とする。地層流体の移動過程の解明の鍵として、メタンと塩分濃度、地層圧力、溶脱孔隙が指標となる例を提示する。

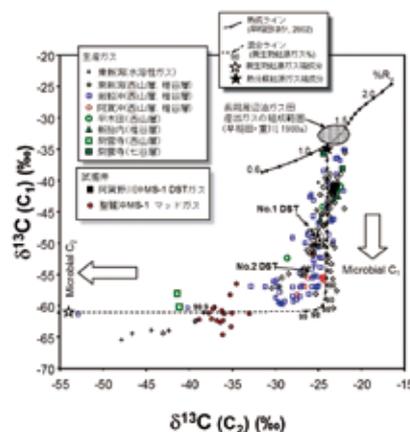
#### ・微生物起源ガス

天然ガスの起源は微生物起源ガスと熱分解起源ガスに大きく分かれる。近年開発技術の進歩により海洋での未固結砂岩からのガス生産が可能となり、微生物起源ガスへの注目が高まっている。東インドネシアのバリ島北方90kmに位置する Terang ガス田では、大量の微生物起源ガスが水深約90m 海面下約600mの鮮新統の固結度の弱い砂岩に集積している。石油資源開発(株)と三菱商事はパートナーのEMP社と共同で、水平坑井と出砂を防ぐグラベルパック仕上げを用い、2012年より海底生産施設から日産約800万 m<sup>3</sup>の天然ガスを生産している。21世紀に入りベンガル湾(ミャンマー沖)やナイルデルタ沖(エジプト)、イスラエル沖などで主に微生物起源とされる巨大ガス田が発見されている。これらの海域では熱分解起源ガスもあるが、微生物起源と熱分解起源ガスは地下で如何に移動し混ざるののだろうか?炭化水素組成と炭素同位体組成を用いた解析によると新潟県中越の油ガス田は熱分解起源ガスのみからなるが、下越の北蒲原地域の油ガス田では両者が混合しており、浅部の水溶性ガス田は純粋な微生物起源であるが、深い層ほど熱分解起源ガスの割合が高い傾向がある<sup>1)</sup>。

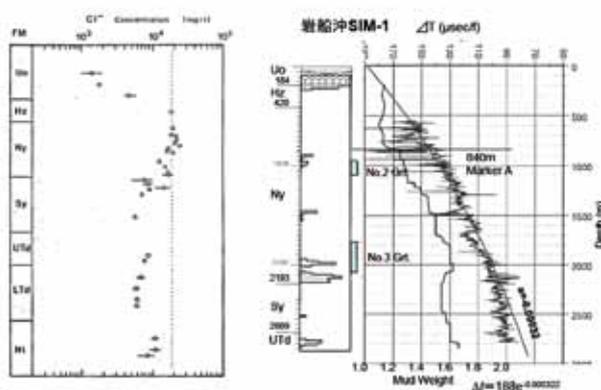
#### ・地層水塩分濃度

新潟下越の海成層の地層水の塩分濃度は概ね海水より低く、深度と地質層準に応じて変化し、特に異常高圧が生じる寺泊層では約10,000ppmと低くなる<sup>2) 3)</sup>。埋没過程で堆積物から移動する間隙水の量を直接測定することは困難だが、測定より簡単な孔隙率の増減の観察から地層流体

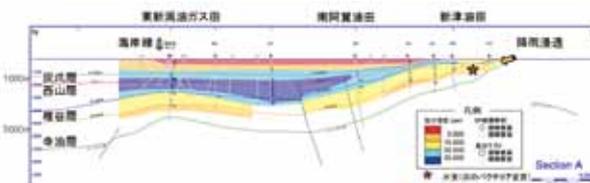
量の増減を見積もることができる。音波検層を用いた孔隙率測定は事例も多く圧密過程の検討に適し、地層圧力や削剥量の推定に有用である<sup>4)</sup>。これらガス、塩分濃度、孔隙率と地層圧力の指標を用いることにより、堆積岩の埋没過程での海水の排出と天水の浸入、その過程での地下微生物の役割と、ケロジェンの熱分解による炭化水素の生成と移動の過程が解明され、地圏内の地層流体移動のモデル構築が可能と考える。また新潟の水溶性ガスや関東天然ガス田の知見が、地下水研究と合わさって、世界の微生物起源ガス資源開発に貢献する余地大と信じる。



北蒲原油ガス田のガス組成 (早稲田ほか 2011)



左:新潟の地層水 Cl- 変化 (加藤 1988)  
右:新潟下越・岩船沖油田の音波検層柱状図と地層圧力 (星 2013)



新潟下越の化石塩水の塩分濃度分布 (吉村ほか2004)

### ・泥質岩中の流体移動

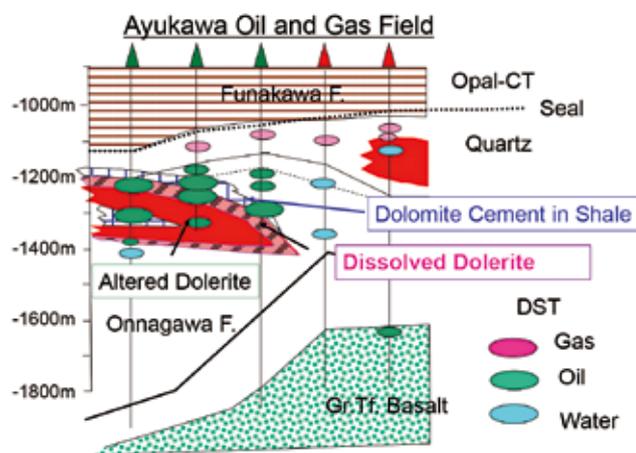
砂岩中の流体移動については従来から多くの研究や測定が行われてきたが、近年のシェールオイル/ガスの探鉱開発を通じて、泥質岩の微細孔隙内での流体移動に注目集まり多くのデータが集積されつつある。泥質岩のマトリックスからフラクチャーへの流体移動、砂泥互層での泥岩から砂岩への流体移動、砂岩から上位シール層を通過する流体移動の解明が、地圏研究と石油探鉱のシナジーによって躍進し、地圏利用に貢献することを期待する。

### ・地層流体による鉱物の溶脱と沈殿

秋田県の鮎川ガス田では中新世女川層の珪質頁岩がシェールオイル・ガス貯留岩であり、そこに同時代のドレライトが貫入している。ドレライトの一部では輝石の溶脱により二次孔隙が形成され孔隙率は20%に達する一方、ドレライトに接する女川層珪質頁岩にはCaとMgが沈殿してドロマイセメントとフラクチャーが発達し、いずれも生産性良い油貯留岩となっている<sup>5)</sup>。

新潟県中越の片貝ガス田の下部寺泊層（中新世）2,700m層砂岩では長石溶脱による二次孔隙が観察される。長石を溶脱させた要因については有機物の熱分解によって生じた有機酸や火山活動に起因する熱水などの説があるが、いずれ埋没後の地層流体の活発な移動の産物と考えられる。

世界の天然ガス田開発は条件の良いものから進んできたが、今後はCO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>S成分に富むサワーガスの開発に重点が移ると予想され、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Sの地層圧入の必要性が高まる。また油田での二次回収技術としてCO<sub>2</sub>-EORへの期待が高い。CCSのみならず石油開発分野でも、CO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>Sの地層内挙動のモニタリングと、地層水、鉱物との地化学反応の予測、安定性の評価研究への期待が益々高まる。



鮎川油ガス田の断面図 (Hoshi 2010)

## 2. 地下流体の汲み上げや地下圧入の地表環境に及ぼす影響の定量的評価

地下水利用に始まり、石油ガスの生産、油ガス田への水圧入、シェール開発でのフラクチャリング、CO<sub>2</sub>の地下圧入などいずれの産業活動でも、地層にはなんらかの変形が伴う。地層の変形と地表への影響のモデリング・シミュレーションとモニタリングは今後益々重要となる。モニタリング技術を活用した貯留層変動評価技術の開発は、CCSや地中熱利用のみならず、未固結砂岩ガス層やオイルサンド、フラクチャー貯留岩の開発にとって火急の課題となっている。モニタリング技術としての物理探査については反射法地震探鉱以外に、屈折法、自然地震の利用や、電磁探鉱、重磁力測定と組み合わせた費用対効果の高い取得・解析技術の進歩に期待する。

## 3. 地下地質データのアーカイブ

産総研の地質情報データベースにより多くのボーリングデータや物理探査データが集積されることを期待する。石油坑井データのアーカイブ構築が世界的に進められており、特に米国や豪州、英国などでは坑井データは原則公開され、サービス会社から使い易いGISデータベースとして提供されている。米国の坑井はAPI番号で整理され、世界の石油坑井については近年IHS社がID番号をつけるGlobal Well Identifier Serviceを提唱している。国内のボーリングデータについてもアーカイブ構築がいつそう進むことを期待する。また国内の物理探査データについても石油会社、研究機関、大学が取得した震探が近い将来に使い易い形式で整理・公開されて、多目的に用いられることを期待する。

## 参考文献

- 1) 早稲田周, 岩野裕継, 浅利康介: ガス炭素同位体組成からみた北蒲原地域における炭化水素の移動・集積, 石油技術協会誌, v.76, 43-51. (2011)
- 2) 加藤 進: グリーンタフ貯留岩の地層流体, 石油技術協会誌, v.52, 5,33-42 (1987)
- 3) 吉村公孝, 山本修一, 桑原 徹, 正本美佳, 横井 悟, 高橋利宏: ナチュラル・アナログ的見地による我が国の化石塩水の特徴, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 129-132, (2004)
- 4) 星 一良: 音波検層を用いた新潟堆積盆の圧密トレンドの検討とその構造発達史解析への応用—削剥量の推定, 荒谷背斜の隆起と中越地震—, 地学雑誌 v.122, 90-115, (2013)
- 5) Hoshi, Kazuyoshi: Hydrothermally Dissolved Dolomite Reservoir in the Akita Basin, Japan, AAPG Search and Discovery #50370 (2010)

# 地下微生物のメタン生成 ポテンシャルを評価する技術

Technologies to Assess the Methane Production  
Potential of Subsurface Microbes

地圏微生物研究グループ長：坂田 将  
Leader, Geomicrobiology Research Group:  
Susumu Sakata  
e-mail: su-sakata@aist.go.jp

## 1. はじめに

地下微生物は堆積物や堆積岩中の有機物を嫌氣的に分解して、二酸化炭素とともにメタンを生成する。このプロセスは天然ガス資源の形成に重要な役割を果たしている。世界の天然ガス資源の少なくとも2割は地下微生物が生成したものであり、国産天然ガスの約18%を占める水溶性天然ガス、将来の資源化が期待される南海トラフの海底ガスハイドレートも微生物起源である。このような天然ガス資源の探査、開発を効率的に進めるためには、地下微生物のメタン生成ポテンシャルを理解することが必要である。地圏微生物研究グループ（以下、当グループと略記）では部門重点研究課題「燃料資源に関する評価技術の開発」に取り組むため、国内の油ガス田や海洋メタンハイドレート賦存域を対象として、地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価する研究を進めてきた。その結果、メタンを生成する微生物であるメタン生成菌（メタン生成アーキア）がこれらの地下環境に広く分布し、メタン生成活性を有することを見出してきた。本講演では、当グループがこれまで適用してきたメタン生成ポテンシャルの評価技術について、概要を紹介する。

## 2. メタン生成ポテンシャルの評価技術

メタン生成ポテンシャルを評価する技術は多様でそれぞれ特徴があり、得られる情報も異なるため、相補的な関係にある。区分としては、培養する／しないというアプローチによって、培養依存的評価技術と培養非依存的評価技術に2分することができる。

### 2.1. 培養依存的評価技術

地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価する直接的な方法は培養である。培養依存的評価技術は、地下から採取される試料を嫌気条件で容器内に密閉してから、恒温装置で原位置の温度に保ち、ヘッドスペースのメタン濃度のモニタリングによって、メタン生成量（積算量）や生成速度を測定する方法である。

#### 2.1.1. 集積培養

他の環境と同じように、地下環境においても、メタンを生成する微生物はメタン生成菌であり、限られた化合物（ $H_2+CO_2$ 、酢酸、メタノール、メチルアミン、ジメチルアミン、トリメチルアミンなど）を基質として利用する。集積培養は、地下から採取した堆積物や地層水等の試料に基質を過剰に添加して、メタン生成を経時的にモニタリング

する方法である。メタン生成が検出されれば、その基質を利用するメタン生成菌が試料中に生息していたことがわかる。また添加した基質とメタンの生成量を比較することによってメタンの収率が計算され、メタン生成ポテンシャルの指標となる。これまで当グループでは水溶性ガス田のかん水の集積培養を行ない、高い収率を得ている<sup>3,7,8)</sup>。メタンの収率が低い場合、基質供給以外の規制要因が示唆され、ミネラル、ビタミン等の添加で収率の変化を調べることによってその詳細を調べることも可能である。このような情報は、バイオスティミュレーションによって天然ガスを増産する資源技術の可能性を判断する手がかりとなる。集積培養は実際の地下の環境よりも過剰な基質を添加するため、必ずしも原位置メタン生成プロセスを再現するものではない点を留意する必要がある。集積培養は基質を利用できる微生物を環境から分離する方法でもある。地下環境からメタン生成菌を分離して、その進化系統や生態を明らかにすることも、天然ガス資源の成因解明のための有効なアプローチである。これまで当グループでは、水溶性ガス田のかん水から新種のメチル資化性メタン生成菌を2種分離している<sup>4,9)</sup>。

#### 2.1.2. 環境模擬培養

天然ガス資源の成因解明や効率的開発のためには、地下微生物の原位置でのメタン生成ポテンシャルを評価することが必要である。そのため、当グループでは地下から採取したかん水、堆積物、原油等を用いてマイクロコズムを構築し、メタン生成を経時的にモニターする実験を行っている。深部の地下環境は温度に加え圧力も高い。その環境を模擬する場合、恒温槽で加熱するほか、耐圧容器に試料を入れて、ヘッドスペースに不活性ガスを充填するかポンプで水を圧入することによって加圧する（図1）。地下環境において、微生物は主に砂や粘土の粒子の隙間に生息している。この孔隙環境を模擬するために、粒度を調整した砂をマイクロコズムに加えることも試みている。

これまで当グループでは、常圧で水溶性ガス田の堆積物<sup>15)</sup>、メタンハイドレート分布域の海底堆積物<sup>14)</sup>、高压条件下で油田かん水<sup>5,6)</sup>のメタン生成ポテンシャルを評価している。特に水溶性ガス田の堆積物のメタン生成ポテンシャルが大きく、最大で堆積物中の全有機炭素の18%に相当するメタン生成を観察している<sup>15)</sup>。

#### 2.1.3. $^{14}C$ -トレーサー添加培養

環境模擬培養では、基質や栄養塩を添加しないため、メ



図1 当研究グループで構築した高静水圧培養システム。砂を充填して孔隙環境を模擬することもできる。

タン生成が遅く、培養が長期に渡ることが多い。実験室で地下の環境を完全に模擬することは不可能であり、培養期間が長くなることは、原位置のメタン生成ポテンシャルを評価する上で好ましくない。

$^{14}\text{C}$ -トレーサー添加培養は、この問題を解消するために短時間の培養でメタン生成ポテンシャルを評価する方法である。 $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ または $^{14}\text{CH}_3\text{COO}^-$ を測定試料に添加して、比較的短期間（通常、数日から2週間）、検体ごとに異なる期間培養したのち、水酸化ナトリウム水溶液を含むバイアル中に封入して培養を停止する。ヘッドスペース中のメタンを $\text{CO}_2$ に変換してアミン溶液にトラップし、液体シンチレーションカウンターで放射能を検出する。最初に基質として添加した $^{14}\text{C}$ が単位時間あたり $^{14}\text{CH}_4$ に変換される割合を求め、これに試料中の基質濃度を乗じることで、この基質からのメタン生成速度を計算できる。 $^{14}\text{C}$ -トレーサー法は、添加する基質が極微量であり、環境模擬ながらも短期間の培養で評価可能なため、原位置のメタン生成ポテンシャルを推定する方法として優れている。しかも添加する基質ごと、つまり $\text{CO}_2$ 還元と酢酸分解の経路ごとのメタン生成ポテンシャルを評価できる。

これまで当グループでは、水溶性ガス田の堆積物<sup>15)</sup>とかん水<sup>3)</sup>、油田かん水<sup>5)</sup>、メタンハイドレート分布域の海底堆積物<sup>13,14)</sup>のメタン生成ポテンシャルを評価しており、海底堆積物では深部メタンハイドレート濃集帯でメタン生成活性が高い傾向を見出している<sup>13,14)</sup>。

## 2.2. 培養非依存的評価技術

培養に依らず、メタン生成菌のマーカーとなる分子を同定・定量することによってメタン生成ポテンシャルを評価することが可能である。対象となる分子は、核酸、脂質、補酵素などである。

### 2.2.1. 核酸 (DNA, RNA) 分析

核酸によるメタン生成ポテンシャルを評価する方法とし

ては、DNAの塩基配列の解読によってメタン生成菌の系統解析・優占度を評価するシーケンス解析と、(特定の)メタン生成菌の塩基配列を計数するリアルタイムPCRが挙げられる。

シーケンス解析では、16S rRNA遺伝子と*mcrA*遺伝子が対象となる。16S rRNA遺伝子は原核生物全般の進化系統を解析するために有効である。一方*mcrA*遺伝子はメタンの代謝に関係するメチル補酵素M還元酵素の $\alpha$ サブユニットを符号化したものであり、メタン生成菌と嫌氣的メタン酸化古細菌 (ANME) の系統分類に有効である。これまで当グループでは、水溶性ガス田のかん水<sup>3,7,8)</sup>、油田かん水<sup>5,6)</sup>の16S rRNA遺伝子、メタンハイドレート分布域の海底堆積物<sup>14)</sup>の*mcrA*遺伝子のシーケンス解析を行っている。

リアルタイムPCRは、特定の塩基配列を有するDNAを対象としてポリメラーゼ連鎖反応による増幅を経時的に測定し、レファレンスと比較することで初期のコピー数を計測する方法である。当グループでは、八橋油田のかん水中の全アーキアとメタン生成菌 (メタノバクテリウム目、メタノミクロピウム目、メタノサルシナ目) を定量し、メタノバクテリウム目が優占していることを明らかにしている<sup>5,6)</sup>。

DNAは地下環境において長期間保存される可能性があり、原位置の地下微生物の情報を反映するか、必ずしも明らかではない。この問題を検討するために、DNAより不安定で寿命が短いRNAの塩基配列を解読することが試みられている。RNAはDNAからタンパク質が作られる際に、DNAを鋳型として合成 (転写) される。そのため、RNAの塩基配列を解読すれば、生息している生物の存在とともに、その機能 (代謝) に関する情報が得られる。RNAの塩基配列は、逆転写によってDNAに変換してその塩基配列を解読することによる。当グループではRNAベースのシーケンス解析で陸域地下堆積物 (沖積層) 中のメタン生成菌やANMEの生存を実証している<sup>12)</sup> (図2)。

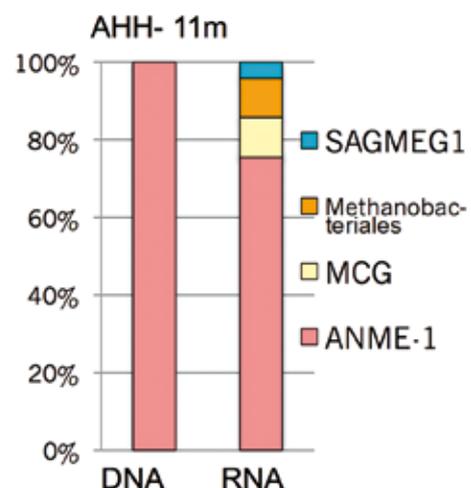


図2 DNAベースとRNAベースのシーケンス解析による沖積層コア試料 (深度11m, 海成粘土層) 中のアーキアの群集構造。

### 2.2.2. 脂質バイオマーカー分析

メタン生成菌に特徴的な脂質バイオマーカーを分析することによってメタン生成ポテンシャルを評価することが可能であり、アーキオール、ヒドロキシアーキオール (HA)、カルドアーキオール、2,6,10,15,19-ペンタメチルイコサンなどが対象とされている。脂質は溶媒抽出、誘導体化、ガスクロ分析という手順で測定され、PCRによる増幅を行う核酸の測定に比べて定量分析の精度が高い。一方、メタン生成菌に対する特異性が脂質成分によって異なっており、メタン生成菌以外の微生物にも由来する可能性や、一部のメタン生成菌にしか由来しない可能性を考慮する必要がある。例えばアーキオールやカルドアーキオールはメタン生成菌以外の多様な古細菌も作る一方、HAはメタノサルシナ目とメタノコッカス目に属するメタン生成菌に限定される。またANMEはメタン生成菌と共通の脂質成分を作ることが知られており、炭素同位体比を測定することなどによって識別することが必要となる。核酸と同様、脂質の寿命(安定性)も地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価する上で重要である。当グループでは極性頭部が脱離しやすくコア脂質が分解しやすいという理由から、極性HAが原位置のメタン生成菌の指標として有効と考え、これをモノフィタニルグリセロールエーテルに変換(図3)してGCで分析する方法を確立するとともに、東部南海トラフの海底堆積物中の同成分を測定し、メタン生成菌の深度分布を評価している<sup>10, 11)</sup>。

### 2.2.3. 補酵素(F<sub>430</sub>)分析

すべてのメタン生成菌はメチル補酵素M還元酵素を有しており、他の微生物でこれを有するのはANMEに限定される。補酵素F<sub>430</sub>はこの酵素の活性部位であり、テトラピロール環の中心にニッケルを含む有機金属化合物である。近年、LC-MS/MSによる分析法の開発によって、0.1×10<sup>-15</sup> mol (fmol)のF<sub>430</sub>を定量することが可能となった<sup>2)</sup>。これは10<sup>2</sup>-10<sup>4</sup>細胞(メタン生成菌)に相当する。実際、八戸沖海底掘削で海底下2500mの堆積物からF<sub>430</sub>が検出されている<sup>1)</sup>。メタン生成菌マーカーとしての普遍性と特異性において上記の脂質バイオマーカーより優れており、定量性において上記の*mcrA*遺伝子より優れていると期待される。

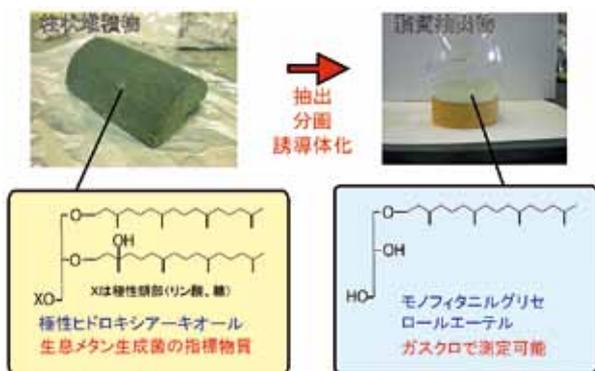


図3 極性ヒドロキシアーキオールからモノフィタニルグリセロールエーテルへ変換。

### 2.3. 培養依存的・非依存的評価技術の融合

培養による方法は、現在試料中に生息するメタン生成菌のシグナルである一方、地下の環境を完全に模擬することは不可能であり、培養によるバイアスを避けることは困難である。一方、培養非依存的評価技術は、地下試料をそのまま分析するので、その場の情報が直接得られる一方、死んだメタン生成菌や他の菌のシグナルも拾っている可能性がある。このように、培養依存的評価技術と非依存的評価技術は、メタン生成ポテンシャルに関して異なる情報を提供するもので、相補的である、両者を組み合わせることによってより信頼性の高い評価を行えるものと期待される。

例えば、メタンハイドレートが分布するカスカディア縁辺域の海底コア試料について、メタン生成ポテンシャルの深度分布を培養依存的評価技術(<sup>14</sup>C-トレーサー法)と非依存的評価技術(*mcrA*遺伝子)を適用した結果、整合的なデータが得られている(図4)。

油田の地下微生物のメタン生成ポテンシャルに関しても、かん水と原油を用いた油層環境を模擬する培養実験によって、メタン生成ポテンシャルを見出すとともに、CO<sub>2</sub>分圧によって優占するメタン生成菌の基質利用性が変化することをリアルタイムPCR法によって見出し、CO<sub>2</sub>分圧の高い条件で酢酸からのメタン生成速度が高くなる原因を解明した<sup>6)</sup>。この発見は枯渇油田を対象としたCCSと天然ガス再生の両立の可能性を示す技術シーズとして注目されている。水溶性ガス田のマイクロコズム(堆積物コア+かん水)の実験でも、大きなメタン生成ポテンシャルを見出したが、培養後に優占しているメタン生成菌(酢酸資化性)がもともとかん水に優占しているもの(水素資化性)と相違しており、培養で生成したメタンの炭素同位体比が実際の天然ガス中のメタンの値と異なる理由が合理的に説明された<sup>15)</sup>。このように、地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価する技術は多様で、それを融合することによって

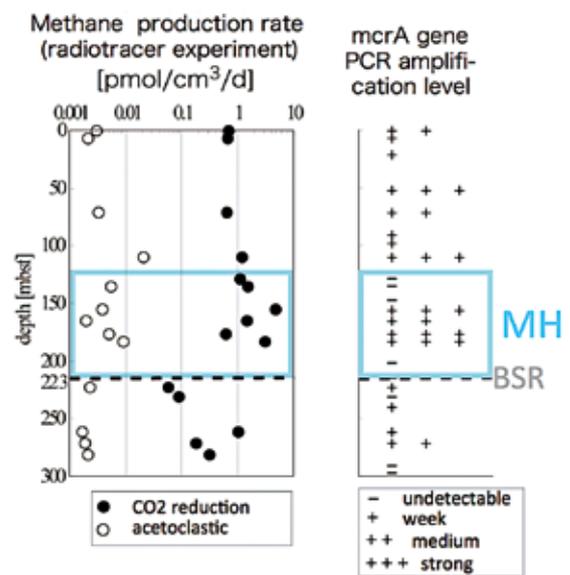


図4 カスカディア縁辺域の海底堆積物のメタン生成速度と*mcrA*遺伝子増幅度。

現象の解明が進展し、資源評価や効率的な資源開発に有用な情報を獲得することができる。

#### 参考文献

- 1) Inagaki F, 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.
- 2) Kaneko M., et al. (2014) Quantitative analysis of coenzyme F430 in environmental samples: a new diagnostic tool for methanogenesis and anaerobic methane oxidation. *Analytical Chemistry* 86, 3633-3638.
- 3) Katayama T, Yoshioka H., Sakata S., et al. (2015) Physicochemical impacts associated with natural gas development on methanogenesis in deep sand aquifers. *The ISME Journal* 9, 436-446.
- 4) Katayama T, Yoshioka H., Mochimaru Y., Sakata S., et al. (2014) *Methanohalophilus levihalodurans* sp. nov., a slightly halophilic, methylotrophic methanogen isolated from natural gas-bearing deep aquifers, and emended description of the genus *Methanohalophilus*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 64, 2089-2093.
- 5) Mayumi D., Mochimaru H., Yoshioka H., Sakata S., Takeuchi M., et al. (2011) Evidence for syntrophic acetate oxidation coupled to hydrogenotrophic methanogenesis in the high-temperature petroleum reservoir of Yabase oil field (Japan). *Environmental Microbiology* 13, 1995-2006.
- 6) Mayumi D., Sakata S., Takeuchi M., et al. (2013) Carbon dioxide concentration dictates alternative methanogenic pathways in oil reservoirs. *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms2998.
- 7) Mochimaru H., Yoshioka H., Sakata S., et al. (2007) Microbial diversity and methanogenic potential in high temperature natural gas associated water in Japan. *Extremophiles* 11, 453-461.
- 8) Mochimaru H., Yoshioka H., et al. (2007) Methanogen diversity in deep subsurface gas-associated water at the Minami-Kanto gas field in Japan. *Geomicrobiology Journal* 24, 93-100.
- 9) Mochimaru H., Sakata S., et al. (2009) *Methanobolus profundus* sp. nov., a new methylotrophic methanogen isolated from deep subsurface sediments in a natural gas field. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 59, 714-718.
- 10) Oba M., Sakata S., Tsunogai U. (2006) Polar and neutral isopranyl glycerol ether lipids as biomarkers of archaea in near-surface sediments from the Nankai Trough. *Organic Geochemistry* 37, 1643-1654.
- 11) Oba M., Sakata S., Fujii T. (2015) Archaeal polar lipids in deep marine sediments from the Nankai Trough. Archaeal polar lipids in subseafloor sediments from the Nankai Trough: Implications for the distribution of methanogens in the deep marine subsurface. *Organic Geochemistry* 78, 153-160.
- 12) Takeuchi M., Yoshioka H., Mayumi D., Sakata S., et al. (2011) A distinct freshwater-adapted subgroup of ANME-1 dominates active archaeal communities in terrestrial subsurfaces in Japan. *Environmental Microbiology* 13, 3206-3218.
- 13) Yoshioka H., Sakata S., et al. (2009) Microbial methane production rates in gas hydrate-bearing sediments from the eastern Nankai Trough, off central Japan. *Geochemical Journal* 43, 315-321.
- 14) Yoshioka H., Sakata S., et al. (2010) Activities and distribution of methanogenic and methane-oxidizing microbes in marine sediments from the Cascadia Margin. *Geobiology* 8, 223-233.
- 15) Yoshioka H., Mochimaru H., Sakata S., et al. (2015) Methane production potential of subsurface microbes in Pleistocene sediments from a natural gas field of the dissolved-in-water type, central Japan. *Chemical Geology* 419, 92-101.

# マルチスケールにおける ジオメカニクモデリング

A multiscale approach for geomechanics modelling

地圏メカニクス研究グループ長：雷 興林  
Leader, Geomechanics Research Group: Xinglin Lei  
e-mail: xinglin-lei@aist.go.jp

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub>地下貯留・シェールガスフラッキング・油田及びガス田廃水処分・地熱開発・石油天然ガスのEOR等の分野において、地下深部に高圧流体を圧入する必要がある。これにより、貯留層およびその周囲の地層・岩石の空隙に存在する間隙水の圧力（間隙圧）を上昇させることが予測される。この変化は地下岩盤での応力分布を変え、その変形、潜在する亀裂や断層の再活動、場合により被害性誘発地震をきたす恐れもありうる。CO<sub>2</sub>地下貯留の場合では、既知の一定規模以上の断層を避けて貯留サイトを選定することができるが、ほかのアプリケーションでは注水サイトを自由に選ぶことは制限される。また、弾性波探査の分解能には限界があり、貯留層および周辺の岩盤に亀裂や小断層が認知されていない可能性は排除できない。近年、地熱開発・シェールガス開発・廃水地中貯蔵など地下貯留層に流体を圧入することに起因と見られる誘発地震が急増し [1-4]、被害性誘発地震の発生により事業が中止されたケースも発生した [5]。

以上のような事情を背景に、地下注水関連事業を社会が受け入れたうえで実施するためには、岩盤破壊・被害性誘発地震及びこれらの変動に関連する漏洩等の現象が起きないように事業者が何らかの対策をあらかじめ講じる必要がある。

地下深部にCO<sub>2</sub>の流体を圧入することにより、間隙圧力上昇・地層の変形・亀裂の進展・断層活動・浸透率やシール圧力などの水理特性の変化などが連動的に発生することが予想されている。このような現象を総括したジオメカニクモデリング技術として注目されている。この技術は、多孔質媒体である含水地層・岩盤中の流体流動と熱伝播に関する数値シミュレーションと、地層・岩盤の力学的応答に対する数値シミュレーションを、岩石ひずみに対する浸透率の変化を媒介して連成解析するシミュレーション手法である。

ジオメカニクモデリングにおいて、まず、貯留システムの地質モデルを構築する。そして、地質モデルを数値化して数値モデルを作成する。そのため、地層の力学・水理学物性値、変形破壊を支配する構成則、物性と変形のカップリングを定義する関係式を与えなければならない。これらの物性値と構成則は一般的に室内岩石実験により得られるが、スケールアップが必要である。しかし、貯留層及び帽岩からなる貯留システムには対する情報には限界が

あり、最初に作れるモデルは妥当である保障はない。モデル予測値と観測値を用いてヒストリー・マッチングを行い、モデルを改良していくことが現実的なアプローチである。さらに、貯留層及び帽岩からなる貯留システムのスケールにおいて、様々な大きさの地層本来の不均質構造があり、あらゆる物性パラメータにはある程度の固有的な不確定さを持つ。これにより、解析結果にも不確定さが生じる。その不確定さを評価するため、物性値の不確定さの統計的な特徴を把握するモンテカルロ手法を用いる確率論的な評価手法を採用する必要がある。

地圏メカニクス研究グループの中心的な研究の一つは、マルチスケールにおいてジオメカニクモデリング手法を開発することを目的とし、下記包括的な研究内容を含む。

1) 岩石力学実験により、岩石物性についての実パラメータを取得し、特に岩石の変形と浸透率変化との関係に関するデータ蓄積して構成則を作成する。データと構成則をモデリングに組み込む。

2) 断層安定性評価などを行うための室内実験を行い、連成解析のポストプロセッサを開発する。

3) モンテカルロ手法を用いる確率論的な評価手法開発し、モデリングに適用する。

4) 注水誘発地震実例解析及び地下流体が関与する自然地震の研究を通して関連現象の特徴とメカニズムを解明する。

5) 様々なスケールの試験モデルに対し、ジオメカニクモデリングを行い、スケールアップやヒストリーマッチングなどを含むモデリング手法を検証する。

6) ジオメカニクモデリングのための一般的なフレームワークを構築し、データ解析等の研究ツール群を融合・集積した統合プログラム (GeoTaos) を開発する。

室内実験研究では、多チャンネル弾性物性・水理特性・AE震源等を同時計測システムの開発と整備を行い、これを駆使して様々な岩石試料を用いて、様々な条件下での岩石実験を系統的に実施している。注水誘発地震の研究では、特に中国四川盆地の天然ガス田やシェールガス開発現場での注水誘発地震を着目し、被害性地震の発生条件・誘発地震予測モデルなどの研究と技術開発に取り込んでいる。大スケールの自然地震の研究は地熱活動地域の地震に集中し、地球潮汐・近辺及び遠隔の大地震への反応などを研究し、地下流体が地震に及ぼす影響の究明に努めている。

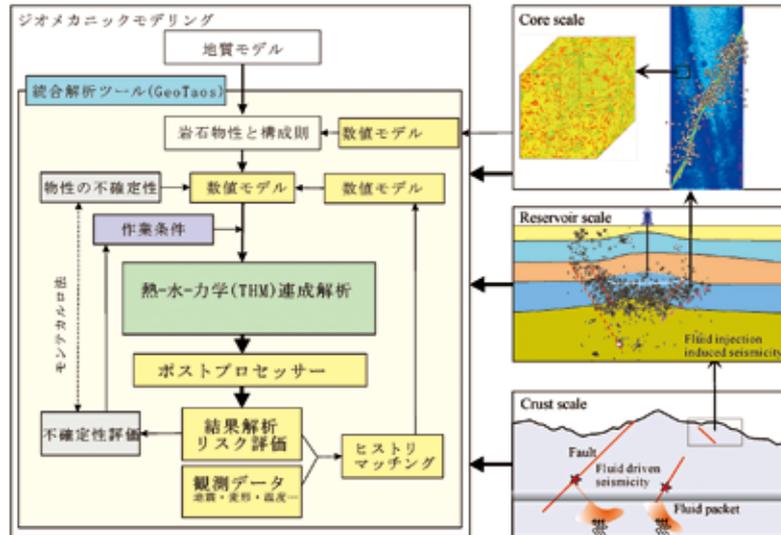


図1 マルチスケール・マルチアプローチを統合したジオメカニクモデリングフレームワーク

## 2. 室内岩石実験研究

地圏メカニクス研究グループでは、1) 三軸岩石透水(気)実験システム、2) 三軸岩石クリープ実験システム、と3) 弾性特性・水理特性・AE震源等同時計測システム等の実験装置が稼働している。これらの装置を用いて様々な条件において、1) 岩石の浸透率・ひずみ・弾性波速度等を同時に測定すること [6]、と2) 水圧破壊を含む岩石破壊実験において静的変形から動的な破壊までの過程に微小破壊震源の時空間分布と弾性・水理物性値の変化を時空間において密に計測することが可能である。以下の図面は主要実験装置の写真と最近の代表的な実験成果を示す。各システムを活用した研究内容と成果の詳細は当グループメンバーのページに譲る。



図2 三軸岩石透水(気)実験システム差圧下、岩石の浸透率・ひずみ・弾性波速度等を同時に測定

## 3. コアスケールにおけるジオメカニクモデリング

室内では、よく制御した条件下での岩石注水実験を行うことができる。また、岩石試料の物性などを密に測定することにより、現場より優れたデータセットを収録できる。従って、実験データを用いてジオメカニクモデリング手法を開発・検証することが有効なアプローチである。

ここに、石英の脈を含有する花崗岩の三軸(封圧下)圧縮破壊実験の結果を用いて連成解析した結果 [8] を紹介する。実験の条件は封圧80MPaで、軸応力を一定速度で上げて、破壊させた。その際、歪ゲージ6個、AEセンサー32個を設けて破壊に至る過程の変形と微小破壊の時空間分布を調べた。また、複数のセンサーに電圧パルスを与え振動させて弾性波速度計測も実施した。トモグラフィ解析により岩石変形や流体による速度構造の変化を求めることができた。

軸応力が400MPaを超えた時、AE、つまり微小破壊が急増し始め、破壊に強度接近していることが示される(図6-A)。軸応力が420MPaになったとき、一旦180MPaまで軸圧を減少させ、2時間後再び軸圧を上げることにし



図3 三軸岩石クリープ実験システム

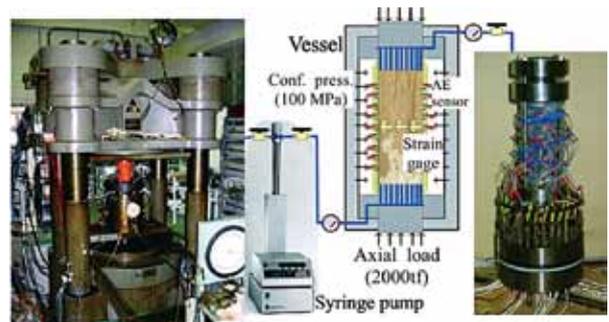


図4 弾性特性・水理特性・AE震源等同時計測システム

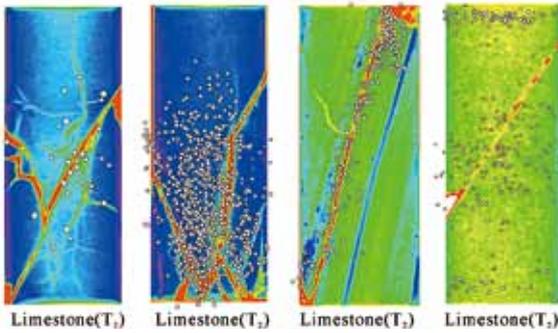


図5 四川盆地注水誘発地震代表岩石試料の破壊実験結果。破壊過程に発生したAEの震源と試料(実験後)のX線CT画像 [7]

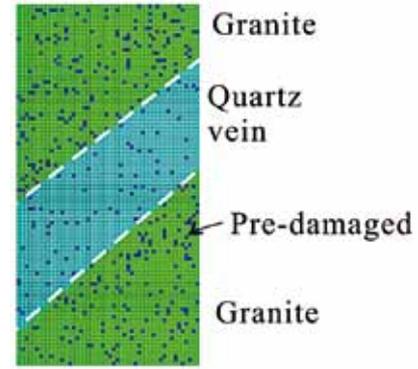


図7 数値モデル

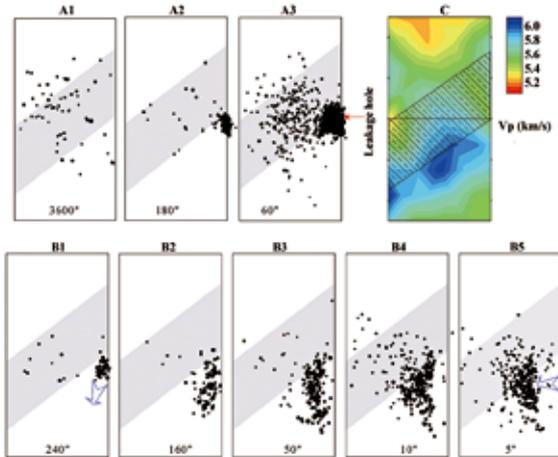


図6 三軸圧縮加水圧破碎実験でのAE震源分布と弾性波速度トモグラフィ結果

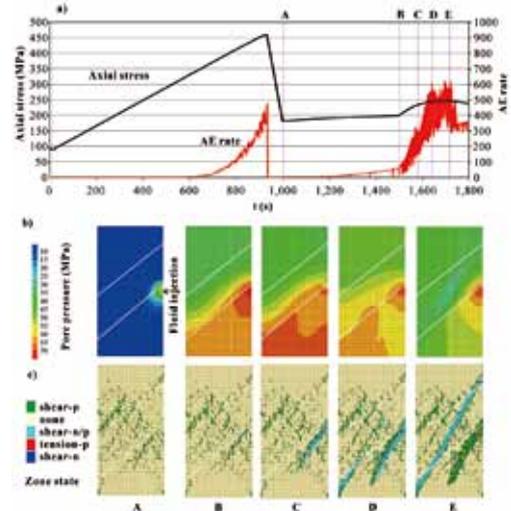


図8 連成解析結果

た。通常であれば、応力記憶効果により、一回目の最大応力を超えるとき、AEが再び活発化し、最終破壊に至ることが期待されるが、今回の場合、既存脈の影響により、一回目のロードの最後段階でAEが岩石表面に集中して発生したため、シリコンジャケットに穴ができてしまい、80MPaの封圧オイルが試料内にリークする現象が発生した。試料内のオイル拡散はこの弾性波速度トモグラフィ画像(図6-C)やAE震源の空間的な広がり様子に見て取れた(図6-B)。空隙にオイルが入るとP波速度が大きくなるため、試料下部の青色で示した高速度領域はオイルに飽和(あるいは部分飽和)されていることは明らかである。

二回目のロードはこの影響を受けて、軸圧280MPaで破壊した。当初の目的という意味では失敗した実験であるが、自然界においても高圧油田やガス田などで類似現象が観測され、実験結果は無意味ではないと思われる。ここで、この実験データを用いてジオメカニクモデリング手法を検証することを考えた。

数値モデル作成に当たり、1)モデル及び構成則はなるべく簡単なものにする、2)不確定性の少ない物性をモデルの基本的な物性とする、3)実験結果の細かいところではなく、本質な実験データを重視することを基本方針とした。AEに着目する時、今回の試料の場合、インタクトな結晶質岩石であるため、既存の微小割れ目の

密度がキーファクターであることが分かっており、これを如何にモデルに取り込むかについて様々な検討を行った。

様々な検討の末、最終的に、次に示すモデルにたどり着いた。まず、単純化のため、2次元モデルとした。サンプルは試料と同様に花崗岩に石英脈を入れる形にした。既存のクラックの扱いとして、個々のクラックを考慮することは不可能なため、欠陥セルをランダムに配置する方法を選んだ。欠陥セルの割合は脈では5%、他は10%とした。欠陥セルに対し、構成則として、Mohr-Coulombの破壊則とStrain softeningモデルを用いた(図7)。

石英脈、花崗岩、欠陥セルの引っ張り強度はそれぞれ20、10、0.5MPaとした。Cohesionは引っ張り強度の倍とした。これは基本モデル、モデル-1とした。さらに、欠陥セル以外部分の弾性率に約15%と25%のガウス型ランダムな揺らぎを付加したモデルをモデル-2とモデル-3とした。この三つのモデルに対する数値シミュレーションを行った。

実験結果と数値シミュレーション結果を対比してみると、モデル-2は岩石の破壊強度、応力-歪関係、AEの全体の時空間特徴など基本的な実験データを良く再現できていることが分かった(図8)。

結論として、マクロな不均質構造+欠陥セル+歪ソフトリング+ランダム物性分布+Strain softeningを有する数

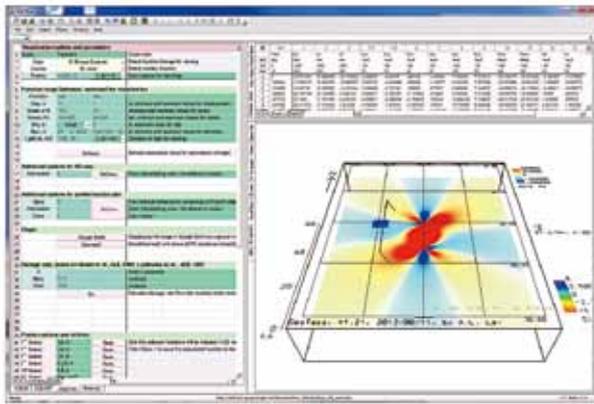


図9 統合解析ソフトウェア GeoTaos クローン応力解析画面

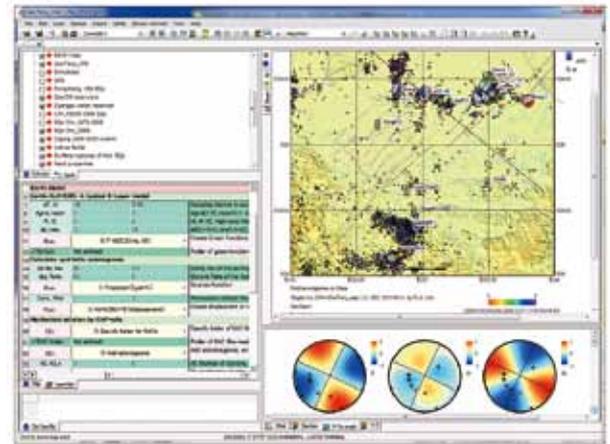


図10 統合解析ソフトウェア GeoTaos 総合地震解析画面

値モデルにより岩石試料の強度・流体圧の影響・AE 発生  
の主な特徴を再現できた。このようなモデルと準静的な解  
析は健全性評価、リスク回避、AE あるいは微小地震を利用  
するモニタリング等において十分適用できると思う。また、  
ダイナミック破壊と破壊後の振る舞いは良く再現できな  
かったが、動的な解析を導入すれば改善できると考えら  
れる。

#### 4. ナチュラル・アナログ研究

ナチュラル・アナログの研究例として、長野県松代地域  
にて1965-67年に発生した深層水湧出に伴う群発地震及  
び関連する事象に対する研究を行った。その詳細につい  
て、“地圏メカニクス研究グループの紹介”を参考してほ  
しい。

#### 5. 統合解析プログラム (GeoTaos) の開発

ジオメカニクスモデリングの一般的なフレームワークを  
ベースに、熱 - 水理 - 岩石力学連成解析・ポストプロセッ  
サー・ヒストリマッピング・不確定評価・観測データ解析  
等、関連する解析・処理プロセスを統合したプログラムで  
ある GeoTaos を開発している。インターフェイス・計  
算・統計解析・可視化を融合したソフトウェアを、研究の  
副製品として開発・集積したもので、日々成長しているこ  
とが特徴である (図9-10)。

#### 6. まとめ

地下深部に高圧流体の圧入を必要とする CO<sub>2</sub> 地下貯留・  
シェールガスフラッキング・ガス田廃水処分・地熱開  
発・石油天然ガス EOR 等の分野において、マルチスケ  
ールを統合したジオメカニクスモデリングが合理的である。  
本稿では、室内実験・スケールアップ・ヒストリー  
マッピング・不確定性評価のあり方について、異なるス  
ケールにケーススタディを通して議論した。このようなア  
プローチを基本とし、関連事業においてリスク評価とリス  
ク低減方法へ発展させたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) Ellsworth, W.L., Injection-induced earthquakes. *Science*, 2013. 341 (6142) : p. 1225-942.
- 2) Lei, X., et al., A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, southwestern Sichuan Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013. 118 (8) : p. 4296-4311.
- 3) Lei, X., et al., Earthquakes induced by water injection at ~3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China. *Journal of Geophysical Research*, 2008. 113 (B10310).
- 4) Zoback, M.D. and S.M. Gorelick, Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2012. 109 (26) : p. 10164-8.
- 5) Deichmann, N. and D. Giardini, Earthquakes Induced by the Stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland). *Seismological Research Letters*, 2009. 80 (5) : p. 784-798.
- 6) Fujii, T., et al., Evolution of Permeability during Fracturing Processes in Rocks under Conditions of Geological Storage of CO<sub>2</sub>. *Materials Transactions*, 2015. 56 (5) : p. 679-686.
- 7) Lei, X., X. Li, and Q. Li. Insights on Injection-induced Seismicity Gained from Laboratory AE Study—Fracture Behavior of Sedimentary Rocks. in 8th Asian Rock Mechanics Symposium. 2014. Sapporo, Japan: Japanese Committee for Rock Mechanics.
- 8) Lei, X., et al., A laboratory acoustic emission experiment and numerical simulation of rock fracture driven by a high-pressure fluid source. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015: p. 1-8.

## 社会構造の変化と水科学への期待

### —第四期研究のはじまりと基盤情報整備—

Expectation to the Water Science Based on the Change of Social Structure

—Start of Phase IV and Preparation of Fundamental Information about Water.—

総括研究主幹・地下水研究グループ長：丸井敦尚  
Principal Research Scientist and Leader of  
Groundwater Research Group: Atsunao Marui  
e-mail: marui.01@aist.go.jp

#### 1. はじめに

東日本大震災を乗り越え、我々は多くを学び、数々の選択をしてきた。理想と文句だけを語るときは既に過ぎたと考えるべきであり、(一部の人には不本意かもしれないが)実現可能な選択を議論する時期に来ている。水は生命の根源であり、最も重要なライフラインでもある。水を科学し、その技術を伝承するために、現状を的確に把握し、我々のスタンスを見極めなければならない。その一端として水文学・地下水学を念頭においた水科学を取り巻く状況について考えたい。その上で、現在我々が持ち合わせている基盤情報を確認し、今後の展開について議論したい。

#### 2. 地球温暖化と水バランスの変化

気象庁(2013)は、地球温暖化ガスによる世界的な気候変動(温暖化)を予測し、警告を促している。本来の地球は、(地質学的にみれば氷河期に向かっている)気温が低下する傾向にあるはずであるにもかかわらず、この100年間で地球全体では約1℃の気温上昇しか認められていない(昨今の夏は刺激的に暑いのに、それでも1℃しか上昇していない)。さらに、今後100年においては、3℃以上のさらなる気温上昇が見込まれている(図1, 2)。すなわち、30年後には1℃上がる計算である。

今後我が国では、全体的に年間降水量が数十ミリから140ミリの間で増加するが、一般的に我が国では秋季の降水量が減り、冬から夏の降水量が増加する。特に悲劇的なのは西南日本であり、台風時期の雨は減るもののその他の季節においては、降水量が増加し、しかもゲリラ豪雨の形

でもたらされることが多くなると予想されている(気象庁, 2015)。これは、地球全体の気温が1℃上がると、赤道付近の海水温は2℃程度上昇し、蒸発量が1割程度増加することに起因する。大気中の水蒸気量が全体的に多くなっても、これが降水としてもたらされる地域や時間は限定的であるため、ゲリラ豪雨が急増する。

この原因はもちろん経済活動に伴う排出ガスであるが、仮に時代や環境が変わっても発展途上にある国が更なる飛躍を遂げるためには、市場の失敗(ミクロ経済的に利得を追求するあまり環境問題対策を忘れ、陥ってしまった環境問題:入門経済学(2015))と言われようと同様の過程を経ることが見込まれる(人口比で見ればこちらが主流派)。よって、この傾向はしばらく続くと考えざるを得ない状況にある。乾燥地域が広がる一方、集中的な豪雨や大雪等の異常気象に見舞われる地域も拡大することを念頭において今後の対応策を練る必要がある。

水には連続の法則があり、多少の温度変化や圧力変化で早々に体積を変えるものでもないことから、降水量がわかればその配分を追跡することもできる。幸い降水量は、気象要素の中で比較的正確に捉えられている。一方で、河川水量や地下水量など不確実なものも多いが、ポイントを絞り込むことで、まずは変化量から確実に把握し、いずれは(理論的だが)完全に水量をとらえることができる。我が国の水文学教室が水収支講座として始まったように、もう一度原点に立ち返り、水バランスを把握しなければならない。さらに、ゲリラ豪雨が多くなることも推測されているのだから、雨水の浸透システムや遊水設備、堤防などを今

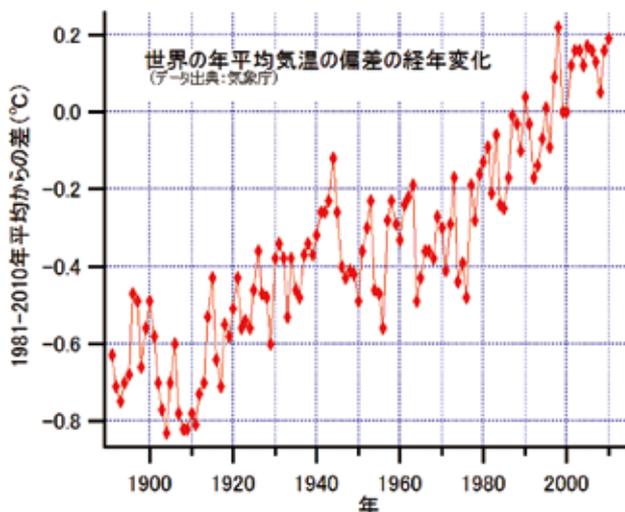


図1 過去100年間の気温上昇(気象庁)

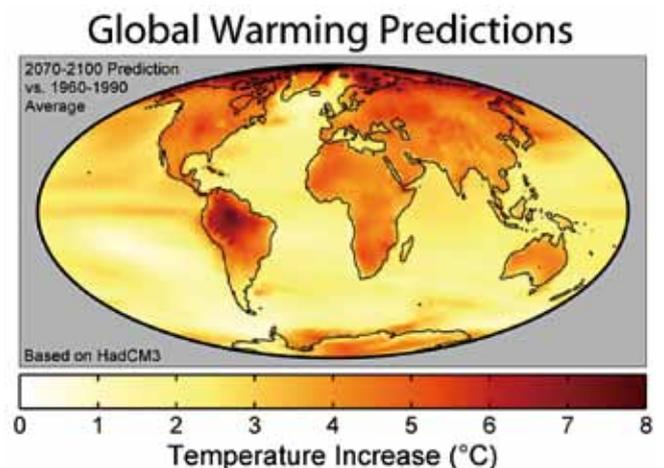


図2 今後100年の地球規模の温暖化予測(IPCC)

から準備しなくてはならない。

その一方で、後述するように、人口が減少すれば大規模インフラの維持が難しくなることもあるので、小規模な水利用が活発にならざるを得ない。このとき、合成の誤謬（個々に見れば経済的で効率的な使い方でも総合すると障害を招くことになる使い方、例えば防災上の弱点を作ってしまうことなど）を起こさないための規範作りや教育が重要な役割を果たす。

### 3. 人口動態からみた社会構造の変化

総務省統計局（2015）によれば、我が国の人口は2011年に1億2,800万人のピークを迎え、今後は減少する傾向にあると報告している。計算上の幅はあるものの、2020年には1億2,000万人を切り、2050年には1億人を切ることが予想されている。また、高齢化率も増加の一途をたどると考えられ、高齢者（65歳以上）の人口は、2020年には約3,000万人、2050年には約4,000万人にも上ると推計されている（図3）。すなわち、2050年頃（現在の若手世代は十分に活躍している時代）には、64歳以下の人口が6,000万人程度であり、これは昭和初期のころに匹敵する数である（図4）。

我が国の地方では過疎化が進み、限界集落が多発すると言われているが（総理府、2015）、もう一度、都市がどのように発達してきたかを考えてみたい。江戸時代の終わりごろには、3万以上の数の村があったと記録されているが、明治期に入り統合化が進み、昭和初期には16,000の市町村があった。それが世界大戦や高度経済成長を経て、平成になる頃には3,000まで減少し、現在（平成27年：2015）では、1,700余りにまで整理・統合が進んできた。すなわち、社会の高度化が進行することにより、市町村が巨大化し、運営システムやインフラ等が変化してきている（スケールメリットを生かしている）。

話は変わるが、各戸へのライフラインとしては、電気→水道→都市ガスの順で整備が進んだが、差し止めなどの法的評価としては、水道が最も重要なライフラインとされて

いる（最後まで止められない）。また、人口が増加するときには、同時多発的に各地に村が発生するが、人口が減少するとき、大都市を残して地方から一気に消滅する傾向にある。

だとすれば、労働力の減少や税収の減少が必至であり、ライフラインやインフラの選択的な整備・維持が余儀なくされる時が来ると考えなければならない。

### 4. 水循環基本法と同基本計画

2014年7月に水循環基本法が施行され、2015年7月には水循環基本計画が閣議決定された。この基本法においては、我々は健全な水循環を維持又は回復させ、産業活動ならびに生命維持活動に貢献しなければならない。さらに、水循環のプロセスを「海に至るまでの蒸発→降下→流下→浸透」と定義し、河川流域の単位で管理することが謳われている。これを受けて成立した基本計画は、調査・教育・人材育成の重要性とともに、民間活力・国際貢献・流域連携を意識しつつ、流域の一体的な管理や貯留・涵養機能の維持向上を考慮した施策を講じることとされている。

基本計画が成立する過程においては、同時に地下水保全に関する法律も作られようとしていたが、インフラ工事等に伴う湧出水の問題・水に関する財産権（公水/私水）・涵養林の先買権などが大きな問題となり、既存法との調整ができなかったこともあり、基本計画ができる時点での成立には至らなかった。内部の議論としては、法的な齟齬もあったが、経済的な議論もあったようで、経済学的な公共財の定義には非融和性といい、（例えばNHKの電波のように）いくら使っても減らないものと言う考え方があるが、地下水の場合、この非融和性が一部でしか成立しないことや、欧米の先進国でも公水という定義はごく一部（ドイツが有名）でしか通用しないことがあげられた。

筆者も論理的には、地下水を公水として取り扱うべきと考えているが、伝統的に財産権や先住権を認めているわが国では、現状なじめない（わかりづらい）概念であると考ええる。ただ、先に述べたように人口の減少が進み、インフラの選択的な整備が始まれば公水論は再燃するに違いない

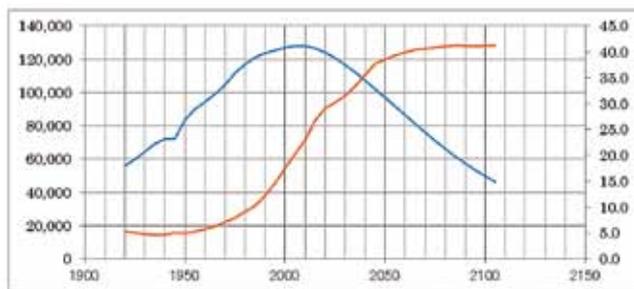


図3 我が国の総人口（単位：千人、青線）と高齢化率（65歳以上の人口比率（%）、赤線）、総務省統計局（2015）



図4 我が国の64歳以下の人口の推移（単位：千人、横軸は西暦）

と考える。

であるならば、法律を先取りして（深度に応じて流動する地下水の状況は異なるので）、流動性や滞留時間に応じて、呼び名を変えるなどの学術的な定義づけも必要になるのではないだろうか。さらに、今後必要とされる小規模水利用や涵養支援策なども視野に入れた水学の普及を考えたいかななくてはならない。

## 5. 基盤情報の整備状況

地球上にある水の97.5%は海水であり、残りの淡水のうち1.8%は氷床である。地球上に0.7%しかない水のほとんどが地下水であり、地表水はわずかに0.01%しかない。0.01%しかないのだから地表水の価値は計り知れないと考える人もいれば、地下水を使うほうがより効率的と考える人もいるだろう。地表水を利用する際の最大の利点はどこにどれだけあるか見てわかることである。これに対し、地下水は水質的にも量的にも安定的に採取できることがわかっていても、どこにあるか見てわからないことが弱点として挙げられてきた。また、一部には地下水が循環（流動）することさえ認知されていないこともあった。

地下水が水資源として有用であると評価されるには“見える化”が必要であり、そのためには近年のIT技術に頼ることも必要であろう。水循環基本法ならびにその基本計画に関しては様々な評価があるが、水循環を定義し、さらにその健全な水循環を維持または回復しなければならないと定めた意義は大きい。この法律においては、水循環と健全な水循環を定義している。この定義によれば、水循環には蒸発、降下、流下、浸透という4つのプロセスがあり、地表水又は地下水が河川の流域を中心に循環し海域に達する過程と謳われている。すなわち、ここで目的とするデー

タベースは、健全な水循環を維持するために、これら4つのプロセスに関して、表流水や地下水のデータを流域ごとに取りまとめればよいことになる。

水に関連の大きなデータベースとしては、以下があり、その多くは国土交通省と地質調査総合センターが公開している。これを表1にまとめた。

- ・水基本調査（国土交通省）
- ・地下水調査（国土交通省）
- ・地下水マップ（国土交通省）
- ・地震に関連する地下水観測データベース

Well Web（地質調査総合センター）

- ・深層地下水データベース（地質調査総合センター）
- ・水文環境図／水理地質図（地質調査総合センター）
- ・いどじびき（地質調査総合センター：非公開）

## 6. 水科学への期待

近未来の我が国は、高齢化率が40%まで上がりそのままであるのに、総人口は減少する。当然のことであるがGDP（国民総生産）は減少し、インフラやライフラインの選択的な維持が始まる。降水量は全体的に増えるが、東北・北海道の台風・降雪は減少する。さらに、西南日本におけるゲリラ豪雨は増加の一途をたどる。

このような状況で水の科学技術に携わる者としては、先ず雨水の浸透率を上げるべきであろうと考える。地表の被覆を減らし、浸透性のアスファルトを使うことや雨水浸透マスの設置である。さらにゲリラ豪雨に対応するための遊水施設を整備しなくてはならない。そうすることで、地下水量は格段に増量するので、地中熱利用などが有利になる。

しかし、著者が本心から望んでいるのは、麦や米のような穀物を工場生産できないかということである。人口が

	表流水	地下水
蒸発・降下	<ul style="list-style-type: none"> <li>・過去の気象データ検索(国土交通省 気象庁)</li> <li>・気象データベース地上観測version3.10(気象業務支援センター)</li> <li>・気象データベース・アメダス:フルセット版version 3.20(気象業務支援センター)</li> <li>・全国酸性雨データベース(国立環境研究所)</li> </ul>	
浸透・流下	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水質測定結果(環境省)</li> <li>・水調査(国土交通省)</li> <li>・主要水系調査(一級水系)(国土交通省)</li> <li>・都道府県水調査(二級水系)(国土交通省)</li> <li>・水文水質データベース(国土交通省)</li> <li>・ダム誌量データベース(国土交通省)</li> <li>・河川環境データベース(国土交通省)</li> <li>・日本の重要湿地500(環境省)</li> <li>・摩周湖データベース(国立環境研究所)</li> <li>・霞ヶ浦データベース(国立環境研究所)</li> <li>・地質環境関連データベース(千葉県)</li> <li>・給水装置データベース(厚生労働省)</li> <li>・水運水質データベース(日本水運協会)</li> <li>・森林降水溪流水質データベース(森林総合研究所)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水基本調査(国土交通省)</li> <li>・地下水調査(国土交通省)</li> <li>・地下水(深井戸)資料台帳(国土交通省)</li> <li>・地下水マップ(国土交通省)</li> <li>・水文環境図／水理地質図(地質調査総合センター)</li> <li>・全国堆積層データベース(地質調査総合センター)</li> <li>・地震に関連する地下水観測データベースWell Web(地質調査総合センター)</li> <li>・深層地下水データベース(地質調査総合センター)</li> <li>・いどじびき(地質調査総合センター:非公開)</li> <li>・造水技術データベース(造水促進センター)</li> </ul>
海岸等(沿岸)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・伊勢湾環境データベース(国土交通省)</li> <li>・大阪湾環境情報クリアリングハウス(国土交通省近畿地方整備局)</li> </ul>	

表1 水循環基本計画の定義にもとづく国の基盤情報整備の状況

減った我が国でかつてのような農耕は無理であり、しかも水が多いので、この水を海外に輸出すべきである。しかし、水のままでは重いので、穀物の姿を借りたバーチャルウォーターとしてはどうだろう。穀物であれば砂漠化の進む途上国でも有用であるし、これを我が国で工場生産することができれば、労働力不足も補えると考え。また、乾燥地での貴重な水は人々が生きるために使っていただきたい。

地下水は一般には知られていないが、層をなして存在している。地表に近い部分は流れやすく地下深くでは流れが遅い、使いすぎた時に地盤沈下を起こす浅層の地下水が流れやすい地下水である。また、1,000m級の深部には温泉などがあり、これが層をなしているエビデンスといえる。だとすれば、各地域の地下水がどんな深さで層をなしてい

るか調査し、地下環境を有効に使うことを考えてはどうだろう。流れる水は飲用や経済的な生産活動に、温泉は保養と健康のために、さらに化石地下水は動かさず封じ込め機能があるので二酸化炭素の地中貯留や核廃棄物の地層処分に、という使い分けである。

#### 参考文献

- 1) 総務省統計局 (2015) : 日本の人口 <http://www.stat.go.jp/> 最終確認2015.10.15
- 2) 伊藤元重 (2015) : 入門経済学 (第4版) 日本評論社, 508p
- 3) 気象庁 (2015) : 地球温暖化予測情報 第8巻
- 4) IPCC : <http://www.ipcc.ch/> 最終確認2015.08.06



## ■ 研究グループ紹介

## 地下水研究グループの紹介

### Introduction of Groundwater Research Group

地下水研究グループ長：丸井敦尚  
Leader, Groundwater Research Group:  
Atsunao Marui  
e-mail: marui.01@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

地下水研究グループは、地下水の保全と開発・利用に関する課題を研究している。社会への貢献や研究成果の反映先を意識しつつ、外部研究機関との連携も保ち、体系的な研究を実施している。水文環境図の作成を基軸に、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。部門の重点課題でもある放射性廃棄物地層処分、CO<sub>2</sub>地中貯留プロジェクトに関しても知識や成果を共有し、積極的に協力し研究を推進している。さらに、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、部門のミッション達成に貢献する。研究対象地域は日本国内のみならず、CCOP 活動などを通して海外にも進出している。

#### 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

「地質の調査」ミッションの一つである知的基盤情報整備の一環として、水文環境図を作成している。水文環境図は既存の全国統一情報に加え、ユーザーが必要とする個別の地域情報を分かりやすく盛り込むよう作られている。図には地形、地質、地下水位、水質、地下温度などの情報が掲載されており、最新の水文地質情報を見ることができる。2013年3月にはNo.6「熊本地域」、2014年3月にはNo.7「石狩平野（札幌地域）」が出版された。札幌地域では浅層地下水や深層地下水に加えて温泉水も編集対象とし、地下水盆の解明を意識した内容になっている。これによりシリーズでは、秋田・仙台・山形・関東・濃尾・筑紫とラインナップを整えた。

水文環境図を作成するに当たり、地下水研究グループではその作成指針を発表している（町田ほか、2010）。これに基づき、地形、地質、地下水位、水質、地下温度などの基礎情報が掲載されており、地下水の流動や起源など最新の水文地質情報を見ることができる。また、最新の「札幌地域」では浅層地下水や深層地下水の基礎情報に加えて地下水温情報も編集対象とし、再生可能エネルギーの可能性評価にも資するように設計している。さらに地域の固有情報にも配慮し、それぞれを掲載している。地球科学情報としてこの図を使っていただくために、また本年7月に閣議決定された水循環基本計画を念頭に置き、流域の概念に基づきながら、地下水盆の解明を意識した内容になっている。



最新の水文環境図（札幌地域）

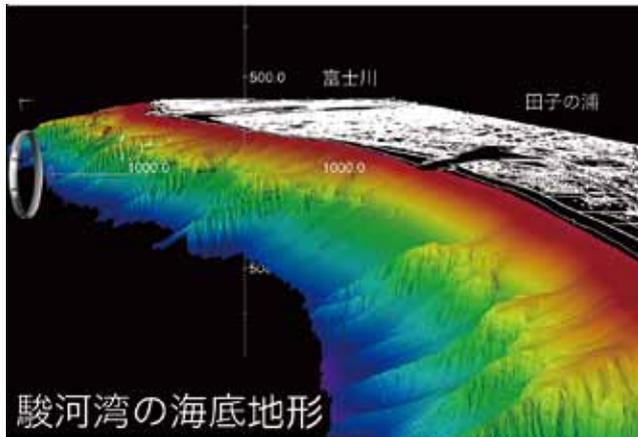
地下水研究グループでは、当該研究を支援する地下水データベースを構築しており、東日本大震災後のインフラ復興や水循環基本法・同基本計画の策定などに貢献してきた。さらに、土壤汚染対策法や環境保護基本計画に係る地下水流動シミュレーションを実施し、各地の自治体における地下水管理を支援している。

##### 2.2. 高レベル廃棄物の地層処分に関する研究

現在、社会的な関心を集めている原子力発電所から出た放射性廃棄物の有効な処分方法の一つとして、廃棄物を地下深部の地層中に閉じ込めてしまう地層処分が検討されている。地層処分では安全性の確保が最も重要な課題の一つとして挙げられており、廃棄物に直接影響を及ぼす可能性のある地下水の性質や流動状況の把握が急務である。我が国においては、深部地下研究として、北海道の幌延において堆積岩を対象とした研究、岐阜県の瑞浪においては結晶質岩を対象とした研究が実施されており、産総研は幌延ならびに駿河湾において、沿岸域における地下水影響を勘案したプロジェクトを実施している。これは、我が国の原子力発電所がすべて沿岸域に立地していることに起因している。実際には、海陸を貫通した探査技術の開発や、地下1,200mに達するボーリングを行うことで、深部地下水環境や地質環境を把握することを目的としてきた。

さらに国は、科学的有望地を近々に選定し、処分地調査を申し入れる予定である。地層処分においては廃棄体近傍の人工バリアと周辺地盤の地質バリアから複合的に多重バリアを形成することになっているが、当該研究は地下水シナリオを考慮したうえで、地質バリアの健全性を評価することが責務である。

産総研はこれまでに幌延で深部地下水の水質や年代測定



駿河湾の海底地形（左）と田子の浦東部海底の亀裂とゆらぎ（海底湧出地下水：右）の状況、陸域地下水の湧出ポイントの同定や地下水の分析・解析から地下水流動の経路把握し地質バリアの安全性評価に資する。

などを実施してきた。その結果、沿岸海域の地下深部には、氷河期を越え長期的に安定した地下水塊があることを発見した。また、駿河湾においては、海底に湧き出す地下水をとらえ、陸域の地下水が流動するルートを解明することにより、地下水の流動範囲を3次元的に明らかにし、将来的に安定した地下水領域を明らかにする予定である。これによって、地質バリアの安全性評価に資すると考える。

### 2.3. 海外での地下水（CCOP）研究

地下水研究グループは、旧地質調査所時代からCCOP（東・東南アジア地球科学計画調整委員会）のプロジェクトに対して積極的に参加・サポートを行ってきた。日本は、地下水の管理技術について最先端のテクノロジーを有しており、その技術をCCOP加盟国へ移転することは、アジア地域における適切な水循環の管理・利用のみならず、我が国のアジア戦略に資するものである。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。また、本年度からは水道協会が実施しているJICA水道コースにも地下水講座が取り入れられ、広く海外に貢献している。



CCOP地下水プロジェクト会議（中国・西安）

### 3. グループの研究体制

- 丸井 敦尚（グループ長、総括研究主幹）
- 井川 怜欧（主任研究員）
- 佐々木 宗建（主任研究員）
- 町田 功（主任研究員）
- 柳澤 教雄（主任研究員）
- 小野 昌彦（研究員）
- 内田 洋平（併任）
- 吉岡 真弓（併任）
- シュレスタ・ガウラブ（併任）
- 石原 武志（併任）
- 樽沢 春菜（テクニカルスタッフ）
- 古澤 みどり（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）
- 荒金 寛子（派遣）
- 菅谷 裕行（派遣）
- 楠瀬 勤一郎（産学官制度来所者）
- 田瀬 則雄（産学官制度来所者）
- 田中 正（産学官制度来所者）
- 三宅 紀治（産学官制度来所者）

### 4. 参考文献

- 1) 町田 功ほか、地質調査研究報告 61, 75-83, 2010.

## 鉱物資源研究グループの紹介

### Introduction of the Mineral Resources Research Group

鉱物資源研究グループ長：高木哲一  
Leader, Mineral Resources Research Group:  
Tetsuichi Takagi  
e-mail: takagi-t@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的と構成

鉱物資源研究グループは、陸域の鉱物資源を対象とした資源探査・評価、選鉱試験など資源上流部に関わる研究を実施しており、現在8名の職員、20名の契約職員・客員研究員等が所属している。ここでは当グループの研究内容を、レアメタル資源、非金属資源、鉱物資源情報、分析・選鉱技術開発の4つに分けて紹介する。

##### 研究メンバー構成

高木哲一（グループ長）  
大野哲二  
児玉信介  
実松健造（研究戦略部出向中）  
星野美保子（研究戦略部出向中）  
昆 慶明  
荒岡大輔  
森本慎一郎（主務イノベーション推進本部）  
三好陽子（産総研特別研究員，PD）  
江島輝美（産総研特別研究員，PD）  
古宇田亮一（招聘研究員）  
徐 維那（テクニカルスタッフ）  
須藤定久（テクニカルスタッフ）  
月村勝宏（テクニカルスタッフ）  
Buenaventulada Calabia（テクニカルスタッフ）  
猪川洋子（テクニカルスタッフ）  
宮腰久美子（テクニカルスタッフ）  
生田目千鶴（テクニカルスタッフ）  
ほか客員研究員8名，リサーチアシスタント1名，派遣研究者1名

#### 2. レアメタル資源の研究

レアメタルとは、鉄やアルミニウムなどの汎用金属と金・銀などを除いた希少な金属資源で、現在31鉱種が経済産業省によって指定されている。レアメタルは、新興工業国の急成長による価格の急激な上昇、少数国やメジャー企業による資源の寡占化などにより、供給構造が不安定であるため、日本では官民を挙げて海外での資源開発や既存鉱山の権益確保など供給源の多角化を進めている。鉱物資源研究グループは、2009～12年に深刻な供給不足が生じたレアアース（ランタノイド、Sc、Y）を中心としたレアメタル資源の調査研究に注力している。当グループでは、特に供給リスクが高い重レアアースを求めて、資源国の地

質調査所、政府機関、民間企業などと共同で調査研究を実施している。

2015年度は、経産省委託事業により、南アフリカ共和国地質調査所（CGS）、同国鉱物処理研究所（MINTEK）と共同で重レアアース鉱石の選鉱技術開発を実施している（写真1）。MINTEKは、ヨハネスブルグ市北隣のランドバーグ市に所在する国立研究機関であり、鉱業大国である南アの選鉱・製錬技術を支える高度な技術開発を推進している。今年度は、現在産総研が資源評価に取り組んでいるプレトリア市北方のレアアース鉱床の鉱石について、産総研とMINTEKが並行して選鉱実験を実施し、両者の結果やノウハウを比較検討することにより、最適な選鉱技術の開発を目指している。また、中国に替わる海外レアアース資源探査の一環として、米国のレアアース鉱床の研究を米国地質調査所（USGS）と共同で実施している（写真2）。2014年度後半から南部カリフォルニア州およびジョージア州中部のレアアース鉱微地について現地調査を実施し、採取した鉱石の鉱物学的解析を行った。これらの調査・解析は2015年度も継続して実施中である。



写真1 南アフリカ・MINTEKでの会議（上）、MINTEK入口（下）厳しい持ち物検査が行われる。



写真2 米国地質調査所との共同研究による南部カリフォルニア州現地調査（上），ジョージア州中部現地調査（下）

### 3. 非金属鉱物資源の研究

非金属鉱物資源（工業原料鉱物）は、現在でも主に国内鉱山から供給されている。鉱物資源研究グループでは、これらの中で、特に粘土資源に注目し研究を行っている。2015年度は、昨年度に引き続き、ベントナイトの品質評価の示標であるメチレンブルー吸着量の測定方法に関する標準化研究を進めている。また、今年度より瀬戸・東濃地方に分布する陶磁器原料の研究を開始した（写真3）。同地域は、日本の飲食器生産の8割を占める一大窯業地帯であるが、長年の採掘による鉱量枯渇が深刻であり、新たな資源の開発が喫緊の課題となっている。産総研では、今年度より2カ年計画で、未開発資源の窯業原料化に関する研究を現地の組合・企業と共同で実施中である。

### 4. 鉱物資源情報の研究

鉱物資源研究グループでは、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



写真3 瀬戸市丸藤鉱山における中部経済産業局との合同視察

組んでいる。これまでに、300万分の1東アジア・中央アジア鉱物資源図、500万分の1アジア地質図などを出版し、2014年度にこれらの集大成である500万分の1アジア鉱物資源図を出版した。また、地質図幅における鉱物資源情報の記載も担当しており、5万分の1「豊田」、20万分の1「高知」などを調査・編集集中である。

### 5. 分析・選鉱技術開発

鉱物資源の研究を進める上で、鉱石や鉱物の精度の高い分析や選鉱実験は不可欠である。そのために、鉱物資源研究グループでは、2012～14年度に国の補正予算により導入した鉱物・鉱石分析施設、選鉱実験施設の高度化を実施している。特に、LA-ICPMSにLIBS（Laser-Induced Breakdown Spectroscopy）装置を組み込むことによる全元素同時分析の新技术を開発中である。また、SHRIMP（Sensitive High-Resolution Ion Micro Probe）による安定同位体局所分析のルーチンも整備している。

### 6. 今後の展望

中国の景気減速を主因とする資源安により、現在レアメタルの需給状況は世界的に安定している。しかし、レアメタル資源供給国の偏在性には変化がなく、既存鉱山の鉱石品位の低下傾向は顕著になっている。国際情勢の変化により、レアメタル危機が再び勃発する可能性は高い。鉱物資源研究グループは、経済産業省、JOGMEC、民間企業などと連携し、確実な資源情報の収集と技術開発を実施すると共に、若手資源研究者の育成にも注入する所存である。

## 燃料資源地質研究グループの紹介

### Introduction of the Fuel Resource Geology Research Group

燃料資源地質研究グループ長：森田澄人  
Leader, Fuel Resource Geology Research Group:  
Sumito Morita  
e-mail: morita-s@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めざし、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についての研究開発を行う。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 (平成27年11月現在)

当研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

森田 澄人 (研究グループ長)  
鈴木祐一郎 (主任研究員)  
中嶋 健 (上級主任研究員)  
佐藤 幹夫 (主任研究員)  
後藤 秀作 (主任研究員)  
大塚 宏徳 (産総研特別研究員, PD)  
徳橋 秀一 (客員研究員)  
棚橋 学 (客員研究員, 名誉リサーチャー)  
松林 修 (テクニカルスタッフ)  
中根由美子 (テクニカルスタッフ)  
仁道 純子 (テクニカルスタッフ)  
佐々木 進 (派遣職員)  
高野 修 (産学官制度来所者)

##### 2.2. 主な研究資金 (平成25年度以降)

- ・運営費交付金「燃料資源地質の研究 (地質およびエネルギー)」(継続中)
- ・運営費交付金「天然ガス鉱床の分布・成因に関する調査研究」(~平成26年度)
- ・受託研究 (経産省)「メタンハイドレート開発促進事業」の一部「資源量評価に関する研究開発」(継続中)
- ・受託研究 (経産省)「国内資源開発基礎情報取得等事業」(分担, ~平成25年度)
- ・受託研究 (海洋研究開発機構)「海底地すべりメカニズム解明のための三陸沖科学掘削に向けた海域データ整備」(~平成25年度)
- ・補助事業研究 (経産省)「表層型メタンハイドレートの資源量把握に向けた広域地質調査, 詳細地質調査および

地質サンプル取得」(平成27年度)

- ・共同研究 (JX 日鉱日石開発 (株))「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」等 (平成24年度~継続中)
- ・共同研究 (石油資源開発 (株))「砂岩貯留岩の堆積分布様式に関する研究」(平成25年度~継続中)
- ・科研費「鉄堆積作用: 鬼界カルデラの熱水活動場から紐解く太古代海洋環境への制約条件」(分担, ~平成25年度)
- ・科研費 (新学術領域研究)「巨大地震断層の三次元高精度構造と物性の解明」(分担, ~平成25年度)

#### 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

- ・平成25年の新たな海洋基本法の閣議決定を受け、表層型メタンハイドレートの資源量評価を目的とした受託研究として日本海等の集中的な調査を実施中である。AUV音響探査 [写真 1] や海洋電磁探査の実施により、高精度なデータ取得と解析を進めている。明治大学に掘削調査、海底環境調査 [写真 2] 等を再委託し、総合的な地層性状と資源量評価を目指している。創エネルギー研究部門やメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) とも連携し、プロジェクトの遂行に尽力している。
- ・マルチビーム測深器とサブボトムプロファイラを用いた音響探査による広域マッピングでは、表層型メタンハイドレートの分布が期待されるマウンド等の特異点の搜索を実施し、その分布と地域的特性の解析を進めている。(佐藤)
- ・平成22年に実施したフランス極地研究所 Marion Dufresne 号による長尺ピストンコアリング解析と3D震探解析により、上越海丘のポックマークと海底谷の成因を考察し、海水準低下期のメタンハイドレート分解による機構を提案し国際誌に公表した。(中嶋)
- ・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)
- ・南海トラフの3D震探データを用い、メタンハイドレート分布域に発現する折り返し反射面 (FBR) の分布とその形態様式等を解析してガスを含む流体挙動を示唆し、

国際誌に公表した。(大塚)

### 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

- ・CBM に関して既存の地化学データを再検討し, 北海道における CBM 鉱床の成因について検討を進めている。(鈴木)
- ・シェールガス・オイルについて, 米国やカナダ等の文献調査を進めるとともに, 本邦炭田堆積盆でのシェール資源の可能性について検討を進めている。また 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うとともにアジア各国への国際協力に努めている。(鈴木・森田)
- ・科研費研究として, 弱酸性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)

### 3.3. 在来型天然ガス資源の鉱床成因等に関する地質学的研究

- ・東北日本の油・ガス構造の形成に関わる脊梁部のテクトニクスについて, 地形・地質調査を行い, 東北日本の後期新生代テクトニックイベントと内陸堆積盆の発達史についての論文を公表した。(中嶋)
- ・3D 震探記録の解析から, 海底自然堤防の貯留岩形態に関して, 斜面傾斜によりその形態が変化することを英国 Aberdeen 大学と共同で研究を進め, 国際誌に公表した。(中嶋)
- ・高メタンフラックスが期待される三陸沖堆積盆で発見した, 脱水構造を伴う大規模海底地すべり群の論文が評価され, 日本地質学会小藤文次郎賞を受賞した。(森田・中嶋)
- ・受託研究の一環として, 海底地すべりの代表的露頭が分布する宮崎県日南市で現地検討会および研究集会を実施した [写真 3]。(森田)
- ・IODP 下北沖石炭層掘削に参加し, 堆積物試料の物性測定を担うとともに, 地下生命圏の限界の指標を得る等の研究に貢献し Science 誌に公表した。(森田)

### 3.4. 共同研究

- ・JX 日鉱日石開発(株)と共同地質調査および勉強会を継続的に実施しており, これまでに釧路炭田や久慈層群, 新潟地域等の調査および巡検を実施した [写真 4]。一部は GSJ 地質ニュース特集号として公表した。(中嶋・鈴木)
- ・石油資源開発(株)技術研究所との共同研究では, 砂岩層厚分布から貯留岩総体積を推定する定量的手法の開発と評価を進めている。(中嶋)

### 3.5. 燃料資源地質図の編集・出版

- ・国内燃料資源関連情報の整備を進め, 燃料資源地質図の公表や燃料資源関連データベース作成等を通じた情報供給を進めている。
- ・GSJ 研究資料集として筑豊炭田図の作成に向けた情報

収集と編集を進めている。(鈴木)

### 3.6. その他

- ・日本学術振興会(JSPS)若手研究者海外派遣事業に採択され, California 大学 Santa Cruz 校で短期滞在研究を行った。(後藤)

## 4. 近年の主な研究成果

各研究グループメンバーのページに記載。



写真 1. AUV (自律式探査機) による海底音響探査



写真 2. ROV 潜航調査による海底地殻熱流量測定



写真 3. 海底地すべり層現地検討会の開催(日南市)



写真 4. 白亜系久慈層群の露頭調査

## 地圏微生物研究グループの紹介

### Introduction of the Geomicrobiology Research Group

地圏微生物研究グループ長：坂田 将  
Leader, Geomicrobiology Research Group:  
Susumu Sakata  
e-mail: su-sakata@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・土壌汚染・CO<sub>2</sub>地中貯留に関する評価技術の開発に取り組み、油ガス田や炭田、地下水汚染サイト等に生息する微生物の活動（メタン生成、消費、石油炭化水素・揮発性有機物分解）の実態解明を目指す。

#### 2. グループの研究資源（平成27年度）

##### 2.1. グループ員

###### 研究スタッフ

坂田 将（リーダー）、片山泰樹、竹内美緒、眞弓大介、持丸華子、吉岡秀佳、金子雅紀

###### テクニカルスタッフ

氏家知美、篠塚由美、執印訓子、野澤富美江、三朝千稚

##### 2.2. 予算

###### 運営費交付金

「地下微生物を利活用した生物的天然ガス変換技術の開発」

「リグニン由来有機物分解に関与する新規微生物の培養と機能解明」

「地圏微生物の研究」

###### 委託研究費・研究助成金

「平成27年度メタンハイドレート開発促進事業」(METI)

「平成27年度メタンハイドレート開発促進事業に関する委託研究-新規取得試料の微生物学的研究」(JOGMEC)

「CO<sub>2</sub>地中貯留と生物的原油分解メタン生成反応を両立する資源創成型 CCS 技術の開発」(科研費)

「生物的原油分解メタン生成ポテンシャルとメカニズムに着目した油層特性評価」(科研費)

「ゲノム解析と培養試験による海洋のメタン酸化微生物群の共生機構の解明」(科研費)

###### 共同研究費

「枯渇油田の油層微生物機能活用による原油のメタン変換技術に関する研究」(国際石油開発帝石(株)・東京ガス(株))

「かん水中微生物の高メタン生成活動域の調査及びメタン生成促進技術の開発」(関東天然瓦斯開発(株))

「メタン溶存天然水を用いた有機塩素化合物による汚染地下水の浄化工法の実用化に関する研究」(関東建設(株))

「地下微生物の研究」(北海道科学技術総合振興センター)

#### 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、好気・嫌気微生物培養、同位体トレーサー実験、遺伝子解析等を通じて、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、JOGMEC、国際石油開発帝石(株)、東京ガス(株)、関東建設(株)、関東天然瓦斯開発(株)、放射線医学総合研究所、北海道科学技術総合振興センター等と連携し、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有効利用、枯渇油田の天然ガス再生技術とCCS・CO<sub>2</sub>-EORの影響、汚染地下水浄化技術の検討を重点的に進める。

#### 4. 26年度後期-27年度前期の研究進捗状況

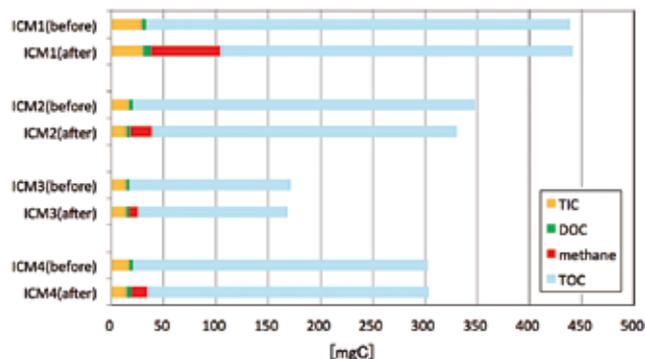
##### 4.1. メタンハイドレート成因解明のための生物地球化学的研究

・MH21の研究の一部として、東部南海トラフにおける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から低温性のメタン生成菌の集積培養・分離を行い、単離されたメタン生成菌を用いて、メタン生成活性の温度依存性を評価した。また、間隙水中のメタン濃度の測定と<sup>14</sup>C-トレーサーを用いた培養実験を行い、コア堆積物にメタンールを利用したメタン生成活性が有ることが分かった。

##### 4.2. 在来型天然ガス資源の成因解明のための生物地球化学的研究

南関東ガス田の地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価するために、茂原ガス田の堆積物コア試料とガス付随水の混合物を長期間培養した。培養開始後100日から300日経過してから、メタン生成が開始し、数ヶ月間継続した。培養前後の炭素のマスバランスに基づく検討から、堆積物の培養で生成したメタンのほとんどがケロジェンに由来するものと推定された。本研究の結果、難分解性と思われて

いた堆積有機物の相当部分が微生物によって分解されメタン生成に利用可能であることが明らかになった。



茂原ガス田コア（4 試料）+ ガス付随水の長期培養前後の画分別炭素量. TIC= 全無機炭素, DOC= 溶存有機炭素, TOC= 堆積物中の全有機炭素.

#### 4.3. 油層内微生物のメタン生成ポテンシャルに関する研究

・国内の油田から獲得した原油分解微生物コミュニティを用いて、原油分解ポテンシャルが存在しない油田を賦活化させるバイオオーグメンテーション技術と CCS 技術の融合を目指し、原油分解微生物コミュニティに与える CO<sub>2</sub> 圧入の影響を評価するため、原油分解微生物コミュニティを添加した油層水の CCS 環境を模擬する高温高圧培養実験を開始した。

#### 4.4. CO<sub>2</sub> 地中貯留と生物的原油分解メタン生成反応を両立する資源創成型 CCS 技術の開発

・CO<sub>2</sub>-EOR が実施されているテキサス州の Farnsworth 油田を対象として、現地情報の収集ならびに微生物学的調査を行った結果、当該油田におけるメタン生成菌の生息が確認され、CCS 後の油層微生物による天然ガス生成を実現する資源創成型 CCS 技術のモデルフィールドとして適している可能性が見出された。一方で、油田かん水中の微生物の採取・処理の際の人為的汚染を最小限に抑えるための簡易ファシリティーの整備が必要不可欠であることが判明した。今後の本格的な調査に備え、無菌操作用クリーンブース、及び高性能でかつ携帯可能な過システムを導入し、国内油田かん水試料の分析試験を通じてその有効性を検証した。

#### 4.5. 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

・深部地下油層環境から分離したメタン生成菌が石炭を構成するある種の化合物を直接分解しメタンを生成することを発見した。その化合物について約30種類の類似物質からメタンを生成できることを明らかにし、そのメタン生成代謝経路が既存の代謝経路とは全く異なる新規のメタン生成経路であることを明らかにした。さらに、本菌の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。

#### 4.6. 基礎的研究

・地下水の塩分濃度が帯水層中のメタン生成菌に与える影響を調査する目的で、北海道北部勇知層・更別層から採取された地下水試料の地化学的・分子生物学的分析を行った。メタンの炭素・水素同位体分析の結果、深層塩水中の溶存メタンの生成経路は CO<sub>2</sub>還元、浅層淡水中の溶存メタンの生成経路は CO<sub>2</sub>還元と酢酸分解の混合と推定された。一方、16S rRNA 遺伝子と mcrA 遺伝子に基づく菌相解析の結果、水素資化性メタン菌は塩水～淡水のすべてで優占、酢酸資化性メタン菌は淡水でのみ優占しており、地化学分析の結果と整合的であった。

#### 5. 主な論文成果・受賞（2014年10月以降）

- Katayama T., Yoshioka H., Sakata S. et al. (2015) Physicochemical impacts associated with natural gas development on methanogenesis in deep sand aquifers. *The ISME Journal* 9, 436-446.
- Oba M., Sakata S., Fujii T. (2015) Archaeal polar lipids in deep marine sediments from the Nankai Trough. Archaeal polar lipids in subseafloor sediments from the Nankai Trough: Implications for the distribution of methanogens in the deep marine subsurface. *Organic Geochemistry* 78, 153-160.
- Takeuchi M., Katayama T., Sakata S. et al. (2015) *Tepidicaulis marinum* gen. nov., sp. nov., a novel strictly microaerobic denitrifying bacterium isolated from marine sediment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 65, 1749-1754.
- 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.
- Yoshioka H., Mochimaru H., Sakata S., et al. (2015) Methane production potential of subsurface microbes in Pleistocene sediments from a natural gas field of the dissolved-in-water type, central Japan. *Chemical Geology* 419, 92-101.
- 玉澤 聡, 眞弓大介, 持丸華子, 坂田 将ほか : 深部地下油層環境から分離した新規 Deferritribacteres 門鉄還元細菌の機能解析. 日本農芸化学会2015年度大会トピックス賞.

## 地圏化学研究グループの紹介

### Introduction of the Resource Geochemistry Research Group

地圏化学研究グループ長：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（平成27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
前川竜男	地球化学
水垣桂子	地熱地質層序学，構造地質学
森本和也	鉱物学，地球化学
万福和子	テクニカルスタッフ
星野谷亜衣	テクニカルスタッフ

##### 2) 主な研究資金（平成26年度，平成27年度）

- ・運営費交付金  
「地圏化学の研究」  
「低コスト粘土系吸着剤を用いた低温熱源利用デシカントモジュールの設計と開発」
- ・委託研究・研究助成  
「革新的蓄熱材を用いた大規模地域熱ネットワーク（メガストック）の開発」（NEDO 再委託）  
「施設園芸における熱エネルギーの効率的利技術の開発」（農林水産省）  
「低結晶質粘土鉱物・非晶質物質における Cs 吸着特性脱着挙動の検討」（JAEA 再委託）  
「粘土鉱物に吸着したセシウムイオンの構造解明と脱離法の探索」（科研費）  
「機能性粘土鉱物の成因調査と利用に関する国際共同研究に向けた事前協議」（助成金）
- ・共同研究  
「高分子ガス吸着材料の評価とその技術の確立に関する研究」  
「工業用アルミニウムケイ酸塩の構造制御技術に関する

研究」

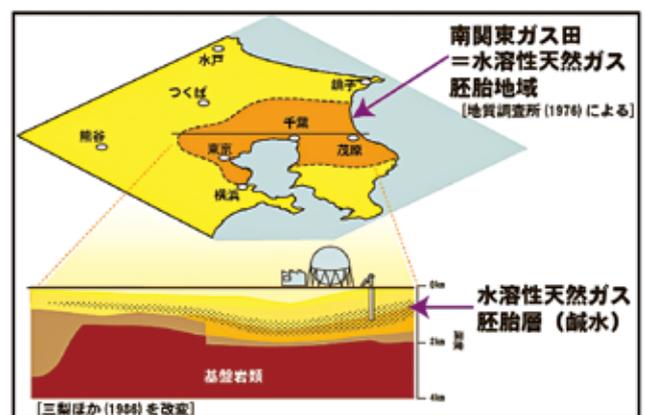
##### 3) 主な研究設備

- ・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 など

#### 3. 平成26年度～27年度前期までの研究進捗状況

##### 1) 燃料資源に関わる地化学的成因研究，資源評価

関東平野南部に分布する南関東ガス田（第1図）は、日本最大の水溶性天然ガス（主成分はメタン）資源の賦存地域である。日本国内での燃料資源情報の把握，及びアウトカムとして深層熱水型温泉の開発・坑井掘削の指針策定，利用されず排気/廃棄されている温泉のメタンガスの有効利用等に資するため，南関東ガス田を含めた関東平野全域における水溶性天然ガスの賦存状況に関わる地質学的情報を整備してきた。



第1図 南関東ガス田の概念図

平成26年度は南関東ガス田の地化学データから得られたメタン生成反応に関連する指標を解析し，気相でのメタンの移動が起きていることを明らかにした。また，茂原型鉱床に天水が浸入することによる鉱床破壊過程での地化学指標の変化について考察を行った。

これまでの関東地方における水溶性天然ガスの賦存状況について，地質学および地球化学的な面からの検討を行い，成果物として燃料資源地質図「関東地方」を出版した（第2図）。

また，南関東ガス田以外のガスハイドレート，水溶性天然ガス，石炭起源天然ガス等の燃料資源についても，地



第2図 燃料資源地質図「関東地方」

質学的解析及び地球化学的実験・分析に基づく研究を進め、それらの成因、資源評価、賦存状況の把握等を行った。

沖縄の水溶性天然ガスの研究として、その熱分解ガスの起源とされる基盤岩が名護層か嘉陽層かを検討するため、入手した沖縄本島南部で掘削されたボーリングコア試料により年代測定を行った。

また通常の油田ガスと、高温で生成した地熱ガスの炭化水素組成の違いを調べた結果、地熱ガスの方がネオペンタン/イソブタン比が大ききことが明らかになった。この比は油田ガス間でも生成温度が高いほど大きくなることをこれまでの研究により明らかにしており、生成温度の指標として有効であることが示された。

メタンハイドレートにかかわる研究として、ハイドレート生成促進剤として知られる tert-ブタノール水溶液を用いてメタン及び二酸化炭素のハイドレート相平衡条件を実験的に測定した。その結果、tert-ブタノールを添加するとメタンハイドレートの生成が促進されたのに対し、二酸化炭素ではその効果が得られず、ガス種の違いによって挙動が異なることが示された。

## 2) 機能性鉱物材料に関わる化学的・鉱物学的・材料学的研究

非金属鉱物資源の産状、分布、成因、及びその工業的利用（材料）等にかかわる現地調査・実験を行い、資源の安定供給と製品化に資する研究開発を実施すること、また、岩石・鉱物と地圏流体との関係を地球化学・地質学・鉱物学的手法により明らかにすることを目的としている。

国内の未利用非金属鉱物資源について文献等の調査を行った結果、陽イオン交換能と特異な結晶構造を併せ持つハロイサイトについて今後の利用価値が見込まれると判断した。ナノチューブ状やナノカプセル状の形態を持ったハロイサイトの国内産地について情報を収集した結果、特に南関東ローム層に幅広く分布していることから、その賦存量から見ても開発と利用の可能性が示唆された。

## 3) 低結晶質粘土鉱物・非晶質物質におけるCs吸着特性脱着挙動の検討

福島原発事故による除染作業が進められているが、今後の課題として剥ぎ取った土壌等の減容化が大きな問題と

なっている。本研究では、表層土壌におけるアモルファス系吸着剤（アロフェン・イモゴライトなど）のCs吸脱着機構についての検討を行い、その吸脱着機構を基に減容化の開発に向けた検討を行うことを目的としている。本研究の実施に当たっては、原子力開発研究機構と物質材料研究機構を中心とし、複数の研究機関による連携体制をとっている。

平成26年度は、非晶質および低結晶性アルミニウムケイ酸塩におけるCs吸着特性・脱着挙動の検討を行うため、天然アロフェン、合成アロフェン、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩における、塩化セシウムを用いた吸着試験および、吸着後に純水を用いた脱着試験を行った。

Cs吸着量としては、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩>合成アロフェン>合成イモゴライト>天然アロフェンの順であり、合成品においてはSi/Alモル比が高いほど吸着量が多いことが示された。

次にCsを吸着させた後に、純水を加えて脱離試験を行ったところ、1,000ppmの濃度でのCsを吸着させた試料では、天然アロフェンおよび合成イモゴライトはそれぞれ61%、22%の割合のCsを脱離していたが、合成アロフェンおよび合成非晶質アルミニウムケイ酸塩では、ほとんどCsを脱離していなかった。この結果より非晶質物質においてもCsを相当量吸着し、純水では溶け出さないほどの吸着力を有していることが明らかとなった。

## 4. 平成26年度後半～平成27年度前半の研究成果（主なもの、波線部がグループ員）

### 【誌上発表（論文）】

Maekawa, T. (2014) Equilibrium conditions for clathrate hydrates formed from carbon dioxide or ethane in the presence of aqueous solutions of 1,4-dioxane and 1,3-dioxolane. *FLUID PHASE EQUILIBRIA*, 384, 95-99.

Morimoto, K., Tamura, K., Anraku, S., Sato, T., Suzuki, M and Yamada, H. (2015) Synthesis of Zn-Fe layered double hydroxides via an oxidation process and structural analysis of products. *JOURNAL OF SOLID STATE CHEMISTRY*, 228, 221-225.



## 物理探査研究グループの紹介

### Introduction of the Exploration Geophysics Research Group

物理探査研究グループ長：光畑裕司  
Leader, Exploration Geophysics Research Group:  
Yuji Mitsuhata  
e-mail: y.mitsuhata@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、CO<sub>2</sub>地中貯留等の地下環境利用分野、そして土壤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。平成27年度においては、以下の7項目を中心に研究を行う。

▶ 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。そして地下坑道施設を活用した研究開発課題の整理を行う。

4) 二酸化炭素地中貯留プロジェクトでは、苫小牧実証フィールドの浅海域において海底MT法のデータ取得予備実験を行い、陸域から海域にかけての地下水分布・性状把握に貢献し、これら地下水に関する情報がCCS事業の安全性評価に与える影響について検討する。

▶ さらに地下環境保全分野として、

5) 土壤汚染に関連して、油分土壤汚染評価への各種物理探査適用結果の取りまとめを行う。

▶ 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. グループの体制

##### 2.1. 人員体制 (2015.10.1現在)

以下の8人体制で研究を実施している。

光畑裕司 (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)

横田俊之 (主任研究員)

神宮司元治 (主任研究員)

小森省吾 (研究員)

中山京子 (テクニカルスタッフ)

紙谷 進 (派遣職員)

部門内では、地下水研究グループ、CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ、鉱物資源研究グループ、燃料資源地質研究グループ等、産総研内では、再生可能エネルギー研究センター、活断層・火山研究部門、地質情報研究部門、知能システム研究部門等と、さらに、独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構や一般財団法人 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。

##### 2.2. 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。

「受託研究」

・平成27年度地層処分技術調査等事業 (海域地質環境調査確証技術開発) (資源エネルギー庁)

・平成27年度二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 (弾性波探査を補完するCO<sub>2</sub>挙動評価技術の開発) (経済産業省)

・平成26年度メタンハイドレート開発促進事業 (資源エネルギー庁)

・平成27年度希少金属資源開発推進基盤整備事業 (探査基盤技術高度化支援事業) (資源エネルギー庁再委託)

・平成27年度地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層評価・管理技術」(JOGMEC委託研究、民間企業、再エネ研究センターとの連携)

・災害調査用地上/空中複合型ロボットシステムの研究開発 (NEDO委託研究、民間企業、産総研他部門との連携)

・戦略的イノベーションプログラム「次世代海洋資源調査技術 海洋資源の成因に関する科学研究」(JAMSTEC委託研究、地質情報研究部門等との連携) 等々。

### 3. 最近の主な研究成果

#### 3.1. 公表論文等

Nakashima, Y. (2015) Development of a Single-Sided Nuclear Magnetic Resonance Scanner for the In Vivo Quantification of Live Cattle Marbling. *Applied Magnetic Resonance*, **46**, 593-606.

中島善人 (2015) 牛の霜降り状態を計測できる核磁気共鳴スキャナーを開発：生きている牛の計測が可能に，産総研ウェブサイト「研究成果」[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/new\\_research/2015/nr20150518/nr20150518.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2015/nr20150518/nr20150518.html).

高倉伸一・佐々木裕・高橋武春・松隈勇太 (2014) 黄鉄鉱粒子と磁鉄鉱粒子を含む人工試料の複素比抵抗測定，物理探査，**67**，267-275.

Uchida, T., Takakura, S., Ueda, T., Sato, T. and Abe, Y. (2015) Three-Dimensional Resistivity Structure of the Yanaizu-Nishiyama Geothermal Reservoir, Northern Japan, *Proceedings of World Geothermal Congress 2015*, 13116, pp.7.

Yokota, T., Kawasaki, S., Tanaka, Y. and Noda, K.

(2014) : A seismic survey at the region near the mouth of Fuji River, Shizuoka Pref., Japan, *Abstract of ASEG-PESA 2015*, pp5.

Yoshioka, M., Takakura, S., Ishizawa, T. and Sakai, N. (2015) Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments, *JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS*, **114**, 134-145.

#### 3.2. 「巨大地震・津波災害に伴う複合地質リスク評価」プロジェクト報告書

産総研では，平成23年3月11日に発生した東日本大震災を受けて，平成23年度第三次補正予算「巨大地震・津波災害に伴う複合地質リスク評価」プロジェクトを実施した。その中で当研究グループは地質情報研究部門平野地質研究グループと連携した地盤液状化リスク調査・評価研究（図1），そして当部門地下水研究グループと連携した地下水汚染調査・評価研究（図2）を担当した。これらの調査・評価研究結果が平成26年12月に地質調査総合センター - 速報 No.66「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書」としてまとめられた。本報告書の中で，



図1 利根川下流域における噴砂等液状化分布と各種現地調査の位置図（光畑ほか，2014）.



図2 津波被害による地下水汚染把握のために実施した電気・電磁法調査地域広域図。各測線はアルファベット（W：亶理，Y：山元，S：新地，M：松川浦（相馬市））と数字により測線番号として識別する。（国土地理院10万分1浸水範囲概況図14より，薄赤色が津波浸水範囲を示す）（上田ほか，2014）.

当研究グループが担当または関連した報告は以下の通りである。

光畑裕司・水野清秀・神宮司元治・松岡昌志（2014）東日本大震災に関連した地盤液化リスク調査・評価研究の概要。地質分野研究企画室編，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，No.66，239-244。

神宮司元治・中島善人（2014）利根川下流域液状化工リアにおける各種液状化ポテンシャル調査とその評価。地質分野研究企画室編，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，No.66，319-342。

横田俊之（2014）利根川下流域液状化工リアにおける弾性波探査による地盤構造調査と液状化。地質分野研究企画室編，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，No.66，343-358。

横田俊之・神宮司元治・光畑裕司（2014）利根川下流域液状化工リアにおける車載型 GPR による路面下調査。

地質分野研究企画室編，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，No.66，359-372。

大熊茂雄・上田 匠・光畑裕司・神宮司元治・内田利弘・中塚 正（2014）仙台平野南部沿岸地域における空中電磁・磁気探査。地質分野研究企画室編，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，No.66，469-478。

上田 匠・神宮司元治・井川怜央・大熊茂雄・光畑裕司・内田利弘・丸井敦尚（2014）仙台平野南部沿岸地域における陸上電気・電磁探査およびボーリング調査。地質分野研究企画室編，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，No.66，479-485。

内田利弘・上田 匠（2014）福島県いわき市 mp 井戸沢断層・湯ノ岳断層地域における電磁探査法調査。地質分野研究企画室編，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，No.66，103-112。



図3 地質調査総合センター速報「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書」（地質分野研究企画室編）の表紙。

尚，本報告書は以下のサイトよりダウンロード可能である。

<https://www.gsj.jp/researches/project/multiple-geohazards/index.html>



## CO<sub>2</sub> 地中貯留研究グループの紹介

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

CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ長：西 祐司  
Leader, CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group:  
Yuji Nishi  
e-mail: y.nishi@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

当研究グループでは、CO<sub>2</sub>地中貯留の実用化に向けて、1) CO<sub>2</sub>がどのように帯水層内に貯留されるか（貯留メカニズムの解明）、2) CO<sub>2</sub>の挙動をどのように監視・予測していくか（モニタリング・モデリング技術）、3) 安全性をどのように評価し確保していくか（安全性評価、影響評価）、という3つの問題意識に基づいた研究を推進している。また、地圏環境の利用と保全、資源の安定供給という観点へのこれらの研究の応用も目指している。

我が国による CCS 実証事業として北海道苫小牧地点において2016年 CO<sub>2</sub>圧入開始に向けた準備が進められており、CO<sub>2</sub>地中貯留の2020年実用化に寄与する研究が必要とされている。CO<sub>2</sub>地中貯留は2015年度からの産総研第4期においても重点課題に指定されており、中期計画として“CO<sub>2</sub>地中貯留において、CO<sub>2</sub>の安全かつ長期間にわたる貯留を保証するための技術を開発し、早期の実用化に寄与すること”をまさに目標としている。

#### 2. 各研究項目の内容

産総研では、当研究グループを中心として経済産業省受託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO<sub>2</sub>挙動評価技術の開発）」において、CO<sub>2</sub>地中貯留における探査手法の中心となる弾性波探査（反射法）を補完して CO<sub>2</sub>挙動評価精度の向上とモニタリング・コストの低減を図ることを目的に、①「弾性波探査補完モニタリング技術の開発」と②「遮蔽性能評価技術の開発」に関する研究を実施している。以下に CO<sub>2</sub>地中貯留研究の主な進捗状況を紹介する。

##### 2.1. 弾性波探査補完モニタリング技術の開発

本研究では、重力、自然電位 (SP)、AE (Acoustic Emission) などの多面的なモニタリング技術を CO<sub>2</sub>地中貯留に適用し、弾性波探査（反射法など）を補完できるモニタリング技術を構築することで、連続監視手段を提供すると共にトータルでのモニタリング・コストの低減を目指している。今年度は、我が国に先行して大規模な CO<sub>2</sub>圧入が実施されている国内のテストサイトにおける CO<sub>2</sub>圧入開始時データ取得を継続するとともに、高感度重力連続記録のドリフト評価・信号分離に有用な並行測定を短期間試行した。また、我が国への適用に欠かせない沿岸部での重力・自然電位の補助データ取得を苫小牧の実証試験サイト内において開始するとともに、比抵抗調査のための予



苫小牧事象試験サイトにおける  
重力モニタリング・データ取得

備調査も実施した。

また、最適モデリング技術の開発では、数値シミュレーションにより計算される温度、圧力、CO<sub>2</sub>飽和度等の変化量を、観測可能な物理量（理論計算値）に変換するプログラムの開発・整備を行い、長期 CO<sub>2</sub>挙動予測の精度向上に寄与することを目指している。今年度は、地盤変位ポストプロセッサ改良と機能追加を行った。さらに、米国テストサイトの地質モデルを用いて、潜在リスクを想定した CO<sub>2</sub>圧入時の圧力・地表変位・重力・反射法の変動予測計算を行ない、浅部帯水層へ上昇する CO<sub>2</sub>の検知に高精度の連続重力測定が有効であることを示した。

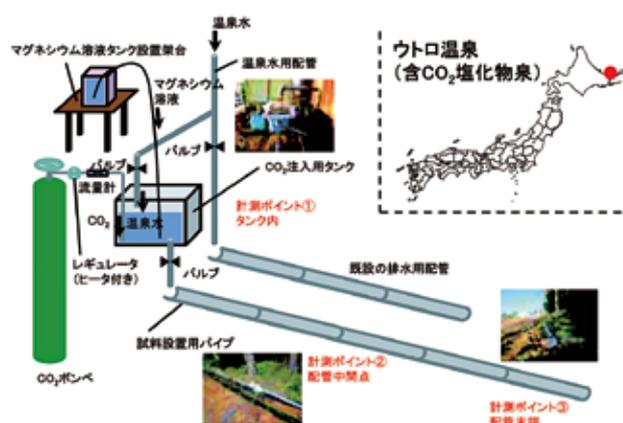
##### 2.2. 遮蔽性能評価技術の開発

弾性波探査で検知が困難と考えられる小規模な断層や薄い砂泥互層など、我が国特有の複雑な地質構造の遮蔽性能を評価する技術に関する研究を実施している。

断層等を考慮したジオメカニクスモデリング手法の開発としては、地圏メカニクス研究グループの紹介に詳述されているナチュラル・アナログ研究手法による断層のモデル化に加え、改良したせん断・透水試験システムにより別所層松代泥岩、苫小牧の滝ノ上層岩石のせん断・透水試験を実施し、既取得データと統合して新規構成則を構築して数値解析に取り込んでいる。

CO<sub>2</sub>移行性能評価技術の開発では、地中貯留用の地層となる薄い砂泥互層に関して CO<sub>2</sub>長期挙動シミュレーションに資する地質モデリング手法の開発を目的としており、シール圧の評価手法の検討・化学的反応プロセスの評価・感度解析シミュレーション等を実施している。シール圧の評価手法の検討では、地中貯留を模擬した温度、圧力

条件下において、内部構造を制御した焼結体試料に対する浸透実験を実施しており、今年度は、粉碎シリカ、平板状シリカおよび平板状マイカからなる焼結体をそれぞれ作製し、スレッシュホールド圧と浸透率の相関性に及ぼす粒子形状および鉱物組成の効果の検証を行った。その結果、これらの試料の測定値は、本研究課題でこれまでに取得してきた岩石の測定値に対する近似直線、および最密充填直線のいずれとも異なるトレンドを有することが示唆された。これに対して、泥岩を対象とした同様の浸透実験からは、岩石の载荷過程において、塑性変形領域ではスレッシュホールド圧と浸透率に明瞭な相関性が認められるのに対して、弾性変形領域では相関性の有無に違いがあることが明らかとなった。化学的反応プロセスの評価では、昨年度に続いてCO<sub>2</sub>地中貯留のナチュラル・アナログとみなされる炭酸泉および炭酸水素塩泉において現場反応実験を行った。今回は、さらにCO<sub>2</sub>地中貯留に近い条件とするために温泉水にCO<sub>2</sub>を追加で注入した結果、温泉水の飽和度低下と炭酸塩成長速度の減少が計測されたが、本結果は地化学シミュレーションにおいて重要なデータセットになり得る。



含CO<sub>2</sub>泉での炭酸塩鉱物の反応速度計測

さらに、砂泥互層内でのCO<sub>2</sub>挙動に関する感度解析シミュレーションからは、砂泥互層を地質モデルに反映する際には一般的な浸透率、毛管圧等のパラメータに加えて、堆積層の内部構造に十分留意する必要があることが示唆された。これらの結果に基づき、細分互層構造等の効率的なモデリング方法を検討する必要性を提示した。

### 2.3. その他の研究グループの活動

これら受託研究の他に、産総研戦略予算「地下微生物を利用したメタンガス合成」、FREAの地熱関連プロジェクト



韓国 KIGAM との合同ワークショップ

ト等のCO<sub>2</sub>地中貯留研究を応用した研究への参加、韓国KIGAMとの共同主催によるCO<sub>2</sub>地中貯留に関する合同ワークショップ等の国際的な連携も進めている。

### 3. グループの研究体制

CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

西 祐司 (グループ長)

杉原光彦

徂徠正夫

加野有紀

藤井孝志

石戸恒雄 (テクニカルスタッフ)

佐藤久代 (テクニカルスタッフ)

相馬宣和 (FREA 地熱チーム兼務)

上原真一 (産学官制度来所者)

池田 博 (産学官制度来所者)

部門内では、地圏メカニクス研究グループ、物理探査グループ、地下水研究グループ等、産総研内では、地質情報研究部門、活断層・火山研究部門、再生可能エネルギー研究センター等と、さらに、公益財団法人地球環境産業技術研究機構等と連携して研究を推進している。経済産業省の二酸化炭素削減技術実証試験を実施している日本CCS調査(株)からは実証試験サイトの試料を提供していただいている。また、米国テストサイトにおける実証試験は、米国エネルギー省NETLの予算にてSouthwest Partnership on Carbon Sequestration (SWP) が実施している。

## 地圏環境リスク研究グループの紹介

### Introduction of Geo-Environmental Risk Research Group

地圏環境リスク研究グループ長：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

持続可能な社会や環境の創生に貢献することを目標に、土壌・地下水汚染、CO<sub>2</sub>地中貯留及び放射性物質をも含む各種廃棄物の管理などに係る多様な環境リスク問題を合理的に解決するための研究開発を行う。また、研究成果を広く社会へ還元するために、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）の製品化と普及、表層土壌評価基本図の整備と出版、ならびに浄化技術の実用化を実施する。さらに、技術研修や技術支援、国際協カプロジェクトへの参加及び国際規格制定への参画などによって、国際社会への貢献にも努める。図1に研究グループのミッション及び理念を示す。



図1 研究グループのミッションと理念

#### 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及び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及び経験・実績を有する人材の確保、または必要な人材との連携・協力、内外研究資金の獲得及び研究ファシリティの整備に努力・邁進している。

#### 2.1. グループメンバー構成 (H27.10時点)

張 銘 (グループ長)  
田中敦子  
村尾 智  
川辺能成  
原 淳子  
坂本靖英  
保高徹生  
杉田 創  
井本由香利  
高田貞江 (テクニカルスタッフ)  
渡邊真理子 (テクニカルスタッフ)  
張 紅 (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)  
吉川美穂 (テクニカルスタッフ)  
小熊輝美 (テクニカルスタッフ)  
駒井 武 (客員研究員)  
山崎哲生 (客員研究員)  
西脇淳子 (協力研究員)  
山野辺純一 (産学官来所者)  
内田真理子 (産学官来所者)  
中村謙吾 (産学官来所者)  
稲毛孝章 (産学官来所者)  
小川翔平 (産学官来所者)  
黒澤暁彦 (派遣)

また、部門内では、鉱物資源研究グループや地圏微生物研究グループ、地圏化学研究グループ、所内では、安全科学研究部門やナノシステム研究部門、所外では、国立環境研究所や農業環境技術研究所、東北大学及びその他の大学と企業と連携・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

多種多岐にわたる汚染物質を精度よく分析し、地圏環境における存在形態や移動・移行、物質間の相互作用、並びに浄化のメカニズムなどを解明するために、地圏環境リスク研究グループでは、研究ファシリティの整備、研究環境の改善及び安全管理にも力を注いでいる。重金属類や揮発性有機化合物 (VOCs) 及び放射性物質、或いは、気体、液体及び固体物質の何れ種類の汚染対象物質も分析・評価するために、以下に示す主要機器の整備、または研究目的に応じた試験システムの開発ができた。

- ・ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS)
- ・ガスクロマトグラフ (GC, 有機, 無機対応)
- ・高速液体クロマトグラフィー / 質量分析 (HPLC/MS)
- ・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)
- ・原子吸光分析装置 (AA)
- ・全自動元素分析装置 (CHNS/O)
- ・全有機炭素分析装置 (TOC/TC, 液体, 固体)
- ・蛍光 X 線分析装置 (XRF, 携帯型, 卓上型)
- ・紫外可視分光光度計
- ・X 線回折装置 (XRD, 携帯型, 卓上型)
- ・フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR)
- ・比表面積・細孔分布測定装置 (BET 法)
- ・微生物・遺伝子分析・定量装置 (PCR, リアルタイム PCR)
- ・冷却遠心分離機
- ・携帯型放射線量・成分測定装置
- ・可搬型放射能測定装置
- ・多項目水質計 (溶存酸素, 電気伝導率, pH, 酸化還元電位ほか, 10項目同時測定可能)
- ・高精度全自動透水試験装置 (難透水性試料にも対応)
- ・動電学的浄化試験システム
- ・カラム試験装置
- ・拡散試験装置ほか

### 2.3. 主な研究資金

産総研「運営交付金」のほか、複数の「受託研究」, 「共同研究」及び「科研費・補助金・助成金」などで実施している。

### 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。

- ・水中低濃度放射性 Cs の迅速計測技術
- ・低コスト・低環境負荷型汚染対策技術, 特に複合汚染の浄化対策技術
- ・汚染浄化に有用な微生物コンソーシアムと集積培養技術
- ・3次元多相流物質移行解析及びリスク評価技術
- ・CO<sub>2</sub>地中貯留及び Bio-CCS に係るリスクと便益の評価技術
- ・重金属類の濃集または溶出に係る化学・生物的反応機

構の評価技術

- ・土壤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
- ・自然由来汚染の判別技術
- ・ヒ素汚染水の浄化・処理技術
- ・重金属類の不溶化技術
- ・発光微生物を用いた汚染物質の毒性および濃度評価技術
- ・非平衡ガス交換を考慮した物質移行評価技術
- ・重金属類のスクリーニング調査および迅速マッピング技術
- ・人力小規模採掘のリスク評価と管理技術
- ・地下深部環境を再現した難透水性材料の高精度透水試験技術
- ・地盤および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 (溶出) 試験技術
- ・鉛ガラスの溶出試験技術
- ・ジオインフォマテックスなど

### 4. 代表的なトピック

個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。各グループ員による報告があるため、ここでの紹介を割愛させて頂く。

また、主要研究課題については、グループのホームページにも掲載しており、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」をキーワードとして検索することが可能である。

### 5. 主な論文成果 (平成26年10月以降)

Yasutaka, T. et al. (2015) Rapid quantification of radiocesium dissolved in water by using nonwoven fabric cartridge filters impregnated with potassium zinc ferrocyanide, *Journal of Nuclear Science and Technology*, DOI:10.1080/00223131.2015.1013071.

Tanaka, A. et al. (2015) Schematic Feasibility Study of Bio-CCS Technology, *Energy Procedia*, Vol. 63, 8062-8068.

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篇以上の誌上発表及び年間50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 Geomechanics Research Group

地圏メカニクス研究グループ長：雷 興林  
Leader, Geomechanics Research Group: Xinglin Lei  
e-mail: xinglin-lei@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

当研究グループは、「環境との調和を考えた地圏の開発・利用を図ること」を基本理念とし、CO<sub>2</sub>地中貯留、地層処分、地熱開発などに必要な技術開発を主たるミッションとする研究を行っている。メンバーは、岩石力学、地震学、掘削工学、岩盤工学などの専門家である。マルチスケール（室内からフィールド）においてマルチアプローチ（実験、物理探査、数値シミュレーション）を用いて、基盤研究及び技術の開発に取り組んでいる。研究対象は環境評価・資源開発・災害低減等を含めて多岐にわたり、研究内容も基礎研究から応用研究まで幅広く、プロジェクトは複数にまたがっている。

#### 2. 研究内容

2014年度、地圏メカニクス研究グループは主に以下の4項目で研究を実施している。

##### 2.1. CO<sub>2</sub>地下貯留における断層モデリング

地下の含水地層（帯水層）に高圧流体である超臨界CO<sub>2</sub>を圧入することで、貯留層およびその周囲の地層・岩石の空隙に存在する間隙水の圧力（間隙圧）を上昇させることが予測される。この変化は地下岩盤での応力分布を変え、その変形、潜在する亀裂や断層の再活動、そして極端な場合は誘発地震を起こす恐れを排除しきれない。現在進行中のCCS大規模実証試験では、これらの変化が顕著に発生することを避けるために、反射法探査等で探知できる一定規模以上の断層を避けてCO<sub>2</sub>貯留サイトを選定しているが、貯留層および周辺の岩盤に亀裂や小断層が存在する可能性は排除することはできない。この種の亀裂と断層は、無傷な岩盤の破断に至らない軽微な間隙圧上昇でも再活動する可能性がある。近年、地下流体圧入と関連する地震活動が急増している。このような事情を背景に、CCS事業を社会が受け入れたうえで実施するためには、岩盤破壊・誘発地震及びこれらの変動に関連する現象が起きないように事業者が何らかの策をあらかじめ講じる必要がある。CCS事業が安全に実施できることを説明し、社会的受容のもと事業者が安心して事業を進められるためにも、地盤・岩盤に懸念されるような現象が起きないような最適な実施条件を導く技術を開発する必要がある。

帯水層へのCO<sub>2</sub>等の流体の圧入に起因する貯留層内の間隙圧力上昇が地層の変形・亀裂の進展・断層活動を引き起こし、その結果、浸透率やシール圧力などの水理特性も

連動的に変化することが予想されている。このような要素を考慮したジオメカニクスモデリング技術として最近注目されるのが、「熱-水理-岩石力学連成シミュレーション」である。この技術は、多孔質媒体である含水地層・岩盤中の流体流動と熱伝播に関する数値シミュレーションと、地層・岩盤の力学的応答に対する数値シミュレーションを、岩石ひずみに対する浸透率の変化を媒介して連成解析するシミュレーション手法である。

ジオメカニクスモデリングにおいては、米国Lawrence Berkeley国立研究所（LBNL）の流体流動シミュレータTOUGH2とジオメカニクス・シミュレータFLAC3Dを連成させた「TOUGH-FLAC」アプローチを基本技術とする。この技術の有効性を立証するため、ナチュラル・アナログ等を通して断層モデルを組み込んだ実地質モデル上でTOUGH-FLACシミュレーションを行い、スケールアップやヒストリー・マッチングなどを含むモデリング手法を検証する必要がある。

ここで、CO<sub>2</sub>地中貯留にともなうジオメカニクス変化に対応した天然現象（ナチュラル・アナログ現象）が起きたと考えられる研究対象地域を選び、地質モデル作成とシミュレーションを行う。本研究におけるナチュラル・アナログ事例は、長野県松代地域にて1965-67年に発生した深層水湧出に伴う群発地震及び関連する現象である。

昨年度までの研究で、長野県松代地域における群発地震発生初期の震源分布と時間的変遷や、坑井水・自然湧水・表流水の地球化学的特性の整理・検討を行い、流体流動-岩石力学連成シミュレーションでの適切な流体圧入条件を決めることができた。また、松代地域および同じ地質時代の堆積岩類について岩石物性値、変形特性等の実データを蓄積するとともに、封圧下での一軸圧縮のもとで岩石の浸透率を計測するシステムを開発した。そして、2016年度以降に実施されるCO<sub>2</sub>地中貯留の実証試験サイトの一つである苫小牧の滝ノ上層の遮蔽層、貯留層、別所層の松代泥岩を用いてせん断に伴うひずみ量増加に対する浸透率を計測して、硬岩と異なる軟岩特有の変形-浸透性関係を確認するとともに、TOUGH-FLACシミュレータに取り込める形での実験式を求めた。またTOUGH-FLACによる力学-水理の連成解析で対象となった、松代事象を流体流動-岩石力学連成シミュレーションで再現するための地質モデルを精緻化し、初年度の初期モデルでは考慮できなかった地形等の要素をモデルに取り込み、モデルの改良を行った。

今年度は、まず、最終目的である技術手順化をにらみ、今までの成果を集成分析し、連成解析によるジオメカニクモデリングのフレームワークを作成した(図1)。それに従い、今まで構築した地質モデル(図2)に初期応力の臨界性と注水履歴等を変えてシミュレータの作動状況と観測データの再現性を検討した。まず、深度依存する地殻応力を導入し、群発地震の空間分布パターンを再現できるモデルを構築した。そして、地表最大隆起量に着目し、そのヒストリー・マッチングにより注水レートの履歴を調整し、主要観測データと調和した計算結果が得られた(図3-4)。

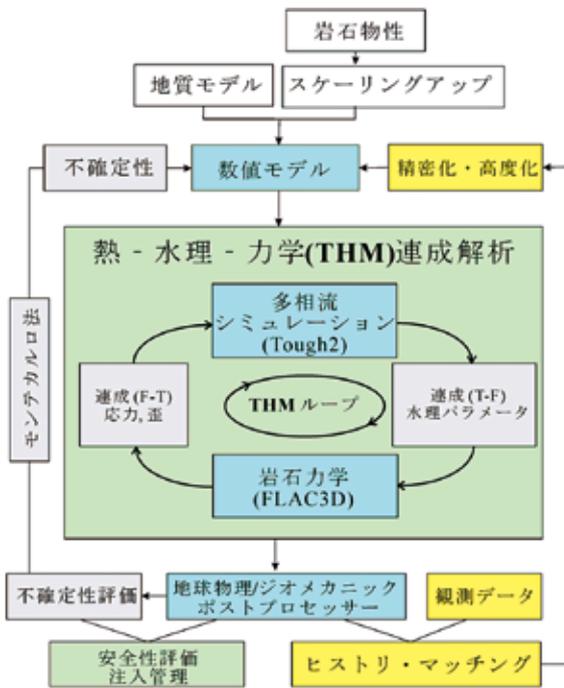


図1 熱伝播 - 流体流動 - 岩石力学連成シミュレーションを中心としたジオメカニクモデリングフレームワークの概念図

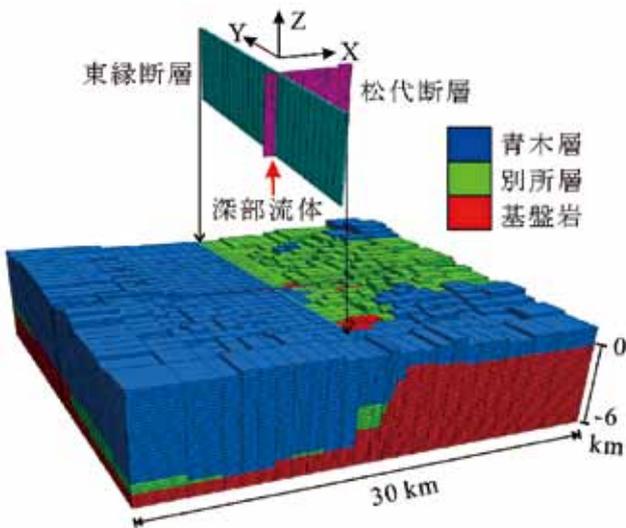


図2 松代湧水群発地震地域の数値化地質モデル(産業技術総合研究所, 2014より)

## 2.2. 地圏の安全・有効利用に関する研究

### 2.2.1. 模擬き裂の透水性に関する研究

CO<sub>2</sub>の地中貯留においては長期間に渡り、地下に圧入したCO<sub>2</sub>をそこに保持しなければならない。地下水との密度差で地表に向かって上昇するCO<sub>2</sub>を抑え込む必要がある。そのため、CO<sub>2</sub>圧入領域の上部にキャップロックという低透水性の地層が存在するところを適地として選ぶ。また、このキャップロックの遮蔽性能の評価は、CO<sub>2</sub>の地中貯留を実施する上で非常に重要である。

本研究では、CO<sub>2</sub>地中貯留におけるキャップロックに相当する岩石である硬質泥岩を用いて、人工的に製作した模

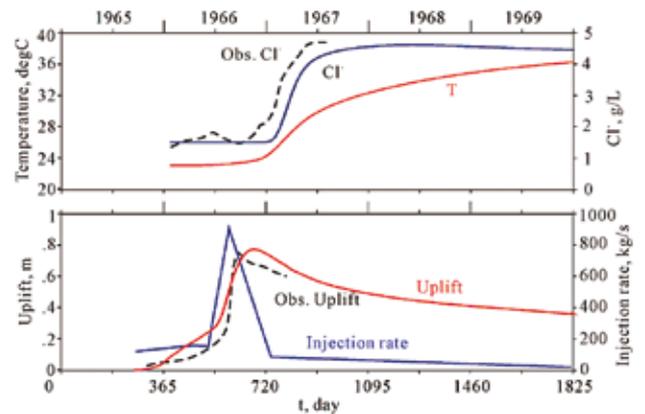


図3 最大隆起量・CI濃度の観測値と計算値対比(産業技術総合研究所, 2014より)

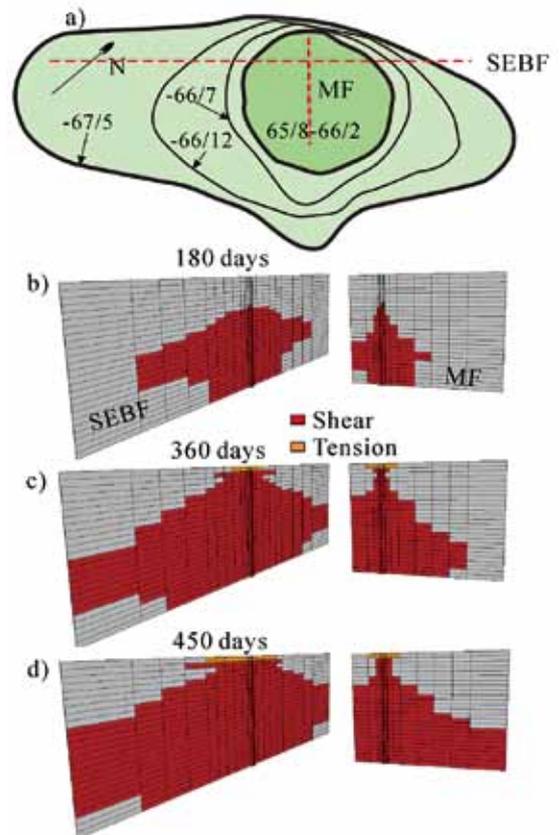


図4 断層上破壊領域の広がり模様(産業技術総合研究所, 2014より)

擬き裂面の透水性を、幾つかの拘束圧下で実験的に調べた。模擬き裂面の粗さを拘束するため、指定粒径（今回は#80）の研磨粉を用いて研磨した。透水性の計測には、差圧を一定に保持して透過流速を計測する定差圧法と、透過流速を一定に保持して差圧を計測する定流量法を用いた（図5）。模擬き裂面の透水性が高いため、設定できる差圧の範囲はごく狭かった。そのため模擬き裂面まわりに設置した変位・ひずみのセンサによる、模擬き裂面の開閉口挙動の検知は困難であった。一方、水理学的方法により模擬き裂面の透水性を評価したところ、模擬き裂面の透水性は拘束圧の上昇により低下し、また拘束圧上昇後の時間経過によっても低下した。

き裂の透水係数は開口幅を用いて定式化することが一般的である。本実験において模擬き裂幅を評価する際には、力学的方法と水理学的方法の2通りが考えられる。力学的方法では、主に模擬き裂が開閉したときの周変位計の伸びから開口幅を求め、水理学的方法ではいわゆる平行平板流れの式から見かけの開口幅を求める。本来は双方の結果を比較検討することが望ましいが、模擬き裂内の平均圧力上昇値が0.1MPa以下と小さかったために、試験中の供試体の変形が小さく、測定誤差の影響もあり、明瞭ではなかった。そのため力学的方法は用いず、水理学的方法のみで模擬き裂幅の評価を行うこととした。その結果、模擬き裂幅の絶対値は15.7（周圧5MPa）～9.3（周圧25MPa） $\mu\text{m}$ と評価された（図6）。#80の研磨剤で整えた面の表面粗

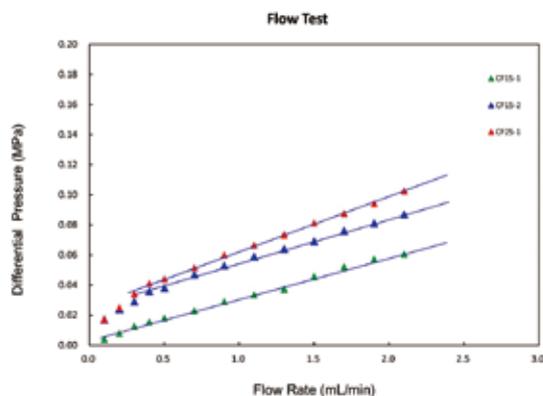


図5 定流量法による流量と差圧の関係（産業技術総合研究所，2014より）

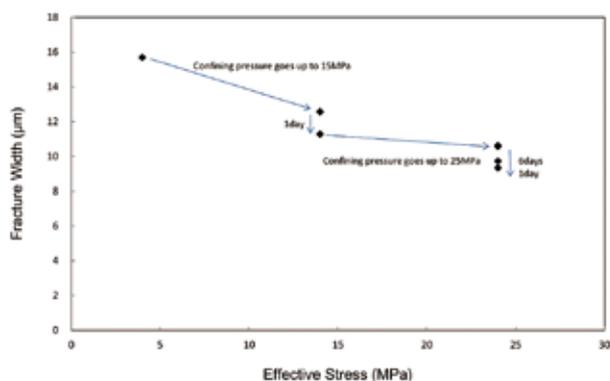


図6 模擬き裂に直交する方向の有効応力と模擬き裂幅（定差圧法）（産業技術総合研究所，2014より）

さは24～30 $\mu\text{m}$ （RMS）と言われており、評価された模擬き裂幅よりもやや大きい値となるが、5～25MPaの周圧が载荷されていることを考慮すると、本試験で計測・評価した模擬き裂幅は妥当な値と考えられる。模擬き裂面の透水性として、単純な状態を仮定した理論値に近い値が得られていることから、実験システムは有効と考えられる。

## 2.2.2. 循環抽熱システムに関する実験研究

工学的地熱開発（EGS）の観点から、完全クローズドループ型の循環抽熱システム（プッシュプル型地熱利用）における、生産条件と坑井の透水性やその稼働中に生ずるAEの発生に関する基礎的知見を得るため、岩石内部のき裂を流路として用いる水の圧入回収システムを室内実験規模で構築し、生産側孔井の圧力変化による生産状況の変化とAEの発生状況について検討した。各試験中における生産側孔井の圧力を変化させてもき裂の流動抵抗はほぼ一定であった。またAE発生状況については、試験の進行に伴ってAEが一時的に増加する場合も、そうでない場合もあり、AE発生状況からみたき裂の開閉口についても判然としなかった。なおAEの発生数自体は各チャンネル数十個と各試験中はあまり多くなく不活発であったと考えられる。

## 2.2.3. 岩石の破壊靱性に関する実験研究

岩石の破壊靱性の封圧依存性について検討するために、0～10MPaの封圧下において来待砂岩を用いた Semi-Circular Bend (SCB) 試験を実施し、モード I 破壊靱性の評価を行った。本試験の結果より、来待砂岩の見かけ破壊靱性は封圧依存性を示し、封圧が上昇するとともに見かけ破壊靱性が増加することを確認した。

## 2.3. 注水誘発地震発生条件に関する研究

近年、地熱・シェールガス・CO<sub>2</sub>地下貯留・廃水処分等の分野において地下注水に伴う被害性地震を含む注水誘発地震の発生が顕著な増加傾向を示している。被害性地震の発生予測と回避技術の開発が重要かつ緊急な課題となっている。間隙圧拡散、熱応力、岩盤や既存断層の破壊強度の低下等が注水誘発地震の発生を支配することが指摘されているが、詳細な震源過程がまだ解明されていない。

当研究グループでは、中国四川盆地での注水誘発地震を例として注水誘発地震の発生条件の究明及び予測モデルの開発を取り込んでいる。これまでに、統合解析ソフトウェア GeoTaos を用いて、代表的な注水誘発地震の実例を詳しく解析し、誘発地震の特徴・発生モデルを開発し、国際誌に成果を公表した。その過程を通して統合ソフトウェアも発展されている。また、現地から代表的な岩石試料を採集し、室内注水破壊地震を系統的に実施し、誘発地震発生条件の解明に資する成果が得られ、関連研究を国際誌等に発表或いは投稿した。中国四川盆地において、注水誘発地震が極めて顕著である要因の一つは、貯留層及びその下の堆積層が脆性的な破壊振る舞いを示すことであることを明らかにした（図7）。

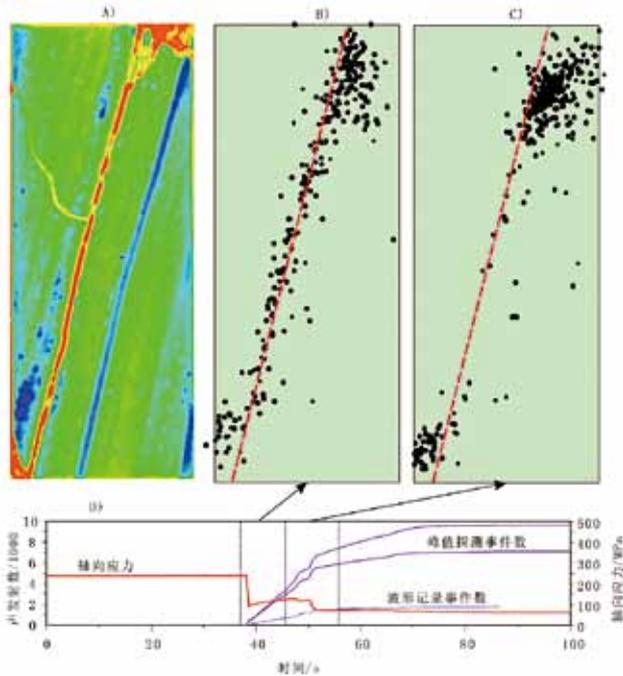


図7 頁岩破壊過程に伴う微小破壊の震央分布と試料破壊後のX線CT画像(雷・他, 2014より)

#### 2.4. 坑井掘削技術の高度化に関する研究

詳しい紹介はグループメンバー宮崎晋行と唐澤廣和のページを参考されたい。

### 3. グループの研究体制

地圏メカニクス研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

雷 興林 (研究グループ長)

成田 孝

及川寧己

竹原 孝

宮崎晋行

唐澤廣和 (招聘研究員)

李 霞穎 (外来研究員)

### 4. 最近の主な研究成果

Lei, X., Li, X., Li, Q. (2014) Insights on Injection-induced Seismicity Gained from Laboratory AE Study—Fracture Behavior of Sedimentary Rocks.

In: Shimizu, N., Kaneko, K., Kodama, J. (eds.) 8th Asian Rock Mechanics Symposium. Sapporo, Japan: Japanese Committee for Rock Mechanics, 947-953.

Lei, X., and Ma, S. (2014) Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process, *Earthquake Science*, 27 (6), 627-646, doi:10.1007/s11589-014-0103-y.

Lei, X., Ma, S., Chen, W., Pang, C., Zeng, J., Jiang B. (2013) A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, Southwestern Sichuan Basin, China, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, doi:10.1002/jgrb.50310.

Li, X., Lei, X., Li, Q., Cui, Y. (2015) Characteristics of acoustic emission during deformation and failure of typical reservoir rocks under triaxial compression: An example of Sinian dolomite and shale in the Sichuan Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) 58, 982-992.

Miyazaki, K., Funatsu, T., Endo, Y., Tenma, N., and Yamaguchi, T. (2014) Development of Triaxial Compression Test Method for Sandy Soil Containing Supercritical CO<sub>2</sub>, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 24 (01), 75-80.

Miyazaki, K., Funatsu, T., Endo, Y., Tenma, N., and Yamaguchi, T. (2015) Effects of Particle Size Distribution on Viscoelasticity of Artificial Methane-Hydrate-Bearing Sand, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 25 (06), 112-119.

産業技術総合研究所. (2014) 平成25年度二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 - 弾性波探査を補完するCO<sub>2</sub>挙動評価技術の開発. 264.

竹原 孝 (2015) 湿潤珪藻土を用いたクリープ試験時の含水比の影響, 資源・素材2015 (松山) 発表要旨, p.3406, 一般社団法人資源・素材学会

宮崎晋行, 遠藤義宏, 天満則夫, 山口 勉 (2015) 模擬メタンハイドレート含有砂質土の三軸圧縮クリープを表す構成方程式, *Journal of MMIJ*, 131 (2,3), 47-55.



## ■ 研究シーズ紹介

成果概要

坑井テスト（圧力遷移テスト）は、帯水層・貯留層の現位置での浸透率、貯留係数、水理的境界の情報を求めるのに必要不可欠な試験方法である。これまでに坑井テストの解析を客観的に実施するためのツール（インバージョン解析ソフトウェア）の開発や、フラクチャー水理特性を解明するためのテスト（データ取得）方法・データ解析方法の研究を進めてきた。

研究内容

貯留層評価・管理の各段階において、坑井テストの解析を精度良く実施して適切な水理パラメータを取得することが求められる。日本の地熱貯留層に対応し、かつ、現場技術者のニーズに対応するため、最小二乗法によるインバージョン解析法（DIAGNS）の整備と、多孔質媒体とフラクチャー岩体の混在が可能な確率論的サーチ方法を用いたインバージョン・プログラム開発を行った。

日本の地熱地域において新たに取得した圧力干渉データや既存データに当該ツールを適用し、1) 貯留層の水平及び垂直方向浸透率の推定、2) 媒質がポーラ姿かフラクチャー型かの判定、3) フラクチャー平均分布間隔の推定、などの知見を得た。これらの知見は、生産・還元の将来予測をする貯留層モデルの精緻化に役立つものである。

研究成果はどう使われるか

現場技術者が適切に解析可能な坑井テスト解析ソフトウェアを普及させることで、既存地点のみならず新規開発地点の貯留層評価・管理におけるロード及びコスト軽減の一助としたい。CO<sub>2</sub>地中貯留における貯留層評価や坑内圧力モニタリングにも応用可能である。

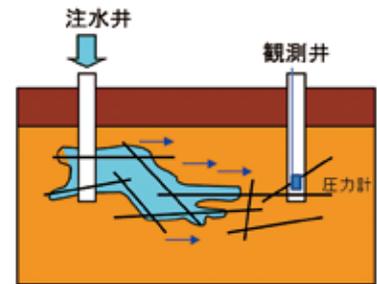


図1 地熱貯留層における坑井テスト（圧力干渉テスト）

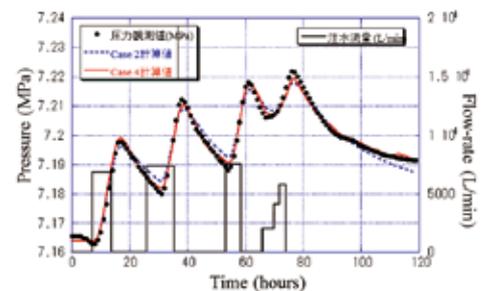


図2 坑井テスト（圧力干渉）のインバージョン解析例

成果概要

個々人の騒音曝露量を位置情報とともに長期間にわたって計測できるシステム（HIKE:Health effect Investigation by measuring Kits for noise Exposure）を開発した。HIKEは、騒音曝露量、位置情報および環境情報を計測する装置から構成され、騒音レベルや環境情報は位置情報の計測を兼ねるモバイル型情報通信端末に無線通信を介して逐次蓄積される仕様である。

研究内容

近年、新たな騒音源の顕在化やライフスタイルの多様化によって環境騒音に関する苦情が再び増加傾向にある。環境騒音の人への影響は聴力障害、不快感、会話妨害、睡眠妨害など様々で、世界保健機関（WHO）は近年騒音への長期間曝露が種々の疾患を誘発すると警鐘を鳴らし、健康リスクの観点から騒音規制や調査研究の必要性を訴えている。HIKEは、1秒毎の騒音レベルの連続計測や最大値とその発生回数等のほか、睡眠妨害による健康影響を考慮し、就寝時に騒音レベル、照度、温度、湿度も収集し、簡便な操作でデータベースを構築可能である。ある1日の騒音レベルの計測例では、日中に90dBに迫る値に曝露されることが頻繁にあり、就寝中であっても50dBを超える騒音に曝露される場合があることが判明した。

研究成果はどう使われるか

騒音への曝露状況と、主観的な“睡眠の質”や就寝中の環境条件、性別、年齢別、職業（業種）別などを幅広く長期間調査することで、様々な角度から環境騒音への曝露による影響を解明することにつながり、マルチプルリスク評価の糸口となる。



図1 環境騒音の実測例



図2 環境騒音への曝露状況の可視化

### 成果概要

波動伝播シミュレーションを行うために、従来の差分法では、地形を表すには格子を階段状に配置することが一般的であった。しかし、一般座標変換を用いると不規則な地形を直交等間隔格子に変換できる。また断層などの不連続面を含むモデルでは、差分格子の配置に規制され、ごく限られた走向・傾斜（例えば傾斜が45ないし90°）以外の不連続面の取扱は容易ではなかった。しかし、linear slip interface という完全には結合していない2つの弾性媒質の境界を表すモデルを組み込むことにより、任意の走向・傾斜の不連続面を設定することができる。

そこで、MacCormack 法と呼ばれる一種の差分法に一般座標変換と linear slip interface を組み込んだ、シミュレーションプログラムの開発を行った。MacCormack 法は、方向分離による計算手法に分類され、staggered-finite difference 法と違って同一の格子点に、密度、弾性定数などの物性値を与え、速度、応力を計算する。計算には、複数の格子点を用い、局所的に波動方程式を満たす速度、応力各成分を求める。また、各座標軸に対して正方向と負方向に前述の計算を行う。

### 研究内容

開発したシミュレーションプログラムを用いて、幅、奥行き、高さの格子点数が175x175x175の半無限モデルで、波動伝播シミュレーションを行った。計算のパラメータは、格子点間隔  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10\text{m}$ 、計算の時間刻み  $\Delta t = 0.5\text{ms}$  とし、第1層のP波速度、S波速度、密度はそれぞれ2100 m/s、1212 m/s、2099 kg/m<sup>3</sup>で、地表面の密度は第1層の1/2とした。第2層のP波速度、S波速度、密度はそれぞれ3600 m/s、2078 m/s、2401 kg/m<sup>3</sup>とした。第1層の層厚は650mである。ソースの位置 (Fig. 2参照) は  $(x_0, y_0, z_0) = (870\text{m}, 870\text{m}, 304\text{m})$  で、ソースはその大きさが、ソース位置からの距離に反比例するように3方向に事前に与えた。Fig. 1に、モデルの等高線と地表面における不連続面（赤の実線）の位置を示した。不連続面の走向はN80E、傾斜は80°（北落ち）とし、その開口幅は1cm程度、流体で満たされていると想定している。なお、地形は特定の地域ではなく、仮想のものである。Fig. 2には、Fig. 1のA-B断面の鉛直速度分布 ( $t=0.35\text{s}$ ) を示した。不連続面（赤の実線）によって波動の反射などが発生しており、第1層と2層の地層境界上下で波形の振幅の違いが見られる。また、従来の差分法では格子の配置が階段状になるので、階段の角の部分から偽反射が起きる場合があるが、この結果からはそのような反射は見られないようである。

### 研究成果はどう使われるか

開発したシミュレーションプログラムは、格子間隔、時間間隔を適正に設定すれば、不安定現象を起こさず計算を行えることが判明した。今回は elastic 媒質の例であるが、MacCormack 法は微分方程式から容易に差分形式にすることが可能であり、poroelastic 媒質にも適用可能である（すでにシミュレーションプログラムは開発済）。また、浅層部分の波動伝播状況を正確に計算できること、断層などの不連続面の走向・傾斜を自由に設定できることなどから、応用分野としては CCS、地熱モデリングなどで、反射法のシミュレーションや地質構造の解明などに適用可能である。

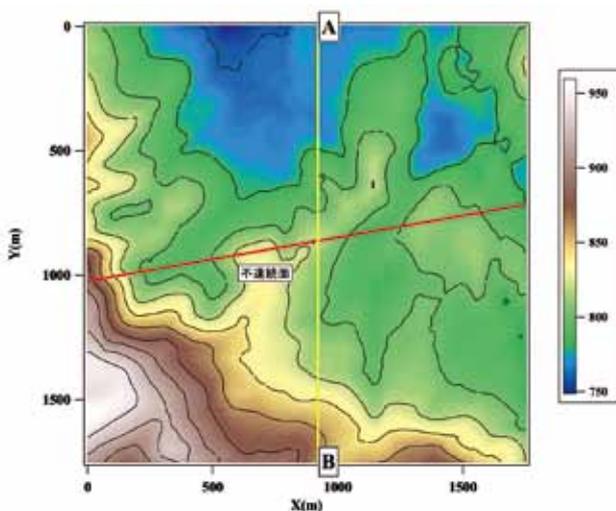


Fig.1 モデルの等高線と地表面における不連続面（赤の実線）。A-BはFig.2に示す断面の位置。

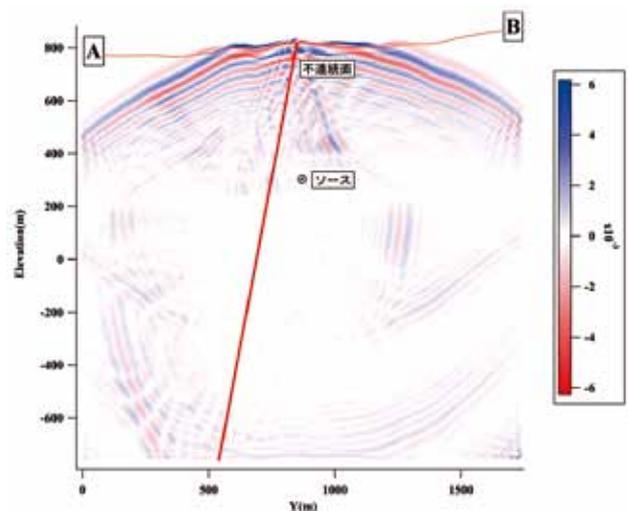


Fig.2 A-B断面の鉛直速度分布 ( $t=0.35\text{S}$ )。

## 成果概要

2006年から、“人・社会の営みと花崗岩”をテーマに、“文化地質学”と国産石材の研究を行っています。帯磁率を指標として、歴史的石造物に使われた石材の採石地推定も試みています。“文化地質学”の研究成果を広く社会に普及するために、地質調査総合センターがWeb出版する「GSJ地質ニュース」と「地質調査研究報告」に報告しています。

## 研究内容

## 1. 文化地質学による地方創生・活性化(☆:Web閲覧可)

“文化地質学”(私の定義:それぞれの地方・地域に分布する地質資源に依拠して、それぞれの地方・地域が育ててきた産業・文化などの調査研究)は、地方創生と地方活性化を目的としています。次は、これまでの成果物です。

- ☆長・浅賀・菱沼・国谷・宮地・青木・酒井・内田・千葉・目代・手代木中学校科学部・手代木中学校美術部, 2007年度つくば市立手代木中学校サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト「花崗岩を通して、地域を考える」(10回の科学講座と石彫制作), 地質ニュース(特集:楽しみながら学ぶ-地学教育支援の取り組み-), 643, 32-67.
- 長(2012)古事記を地学で読み解く, 古代史サミット in 高天原資料集, 古事記編纂1300年記念事業による山陰・真庭広域観光連携事業推進委員会ほか, 真庭市, 17-22.
- 長(2013)第5章第2節 戸室石の帯磁率測定, 金沢城史料叢書18「戸室石切丁場確認調査報告書Ⅱ」, 石川県金沢城調査研究所, 216-228.
- ☆長(2014)筑波花こう岩と旧筑波町の歴史—筑波花こう岩と人の営み—, GSJ地質ニュース, 3, 161-163(口絵)と183-189(本文).
- ☆長(2014)筑波花崗岩と旧筑波町に残る石造物の帯磁率, 地質調査研究報告, 65, 37-43.
- ☆長(2015)金沢城石垣(戸室石)の帯磁率—自然石積石垣・割石積石垣・粗加工石積石垣—, 地質調査研究報告, 66, 25-40.
- 長(2015)富山城石垣・高岡城石垣・金沢城石垣の帯磁率(アウトリーチセッションでのポスター発表), 日本地質学会第122年学術大会講演要旨集, 192.
- ☆長(2015)「新治花崗岩」と新治台地に残る石造文化財, GSJ地質ニュース, 4, 249-250(口絵)と267-277(本文).

## 2. 国産石材に関する研究(☆:Web閲覧可)

国産石材のブランド化(外国石材との差別化)による国内石材産業の振興を目的として、石材の物性研究(茨城県中小企業振興公社委託事業産・学・官共同研究, 2007年度~2009年度)と、国産石材を対象に“文化地質学”を行いました。

- ☆Cho, Matsubayashi and Hasegawa (2008) Visualization of water permeation into granite by neutron radiography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 605, 197-199.
- 河野・長・茨城県石材業協同組合連合会(2013)石材学, 茨城県石材業協同組合連合会, 66p.
- ☆長・樽沢(2007)地質情報展2006こうち 生活の中の花崗岩, 地質ニュース, 637, 25-32.
- ☆長・藤田・横山・能美・鈴木・郷津・竹下(2010)地質情報展2009おかやま 瀬戸内の花こう岩, 地質ニュース, 672, 6-7(口絵)と18-25(本文).
- ☆長(2012)地質情報展2011みと ふるさとの石 茨城の花こう岩—日本の近代化を築いた石たち—, GSJ地質ニュース, 1, 98-99(口絵)と111-114(本文).

## 研究成果はどう使われるか

地方都市や中山間過疎地域では、世界遺産登録・日本遺産登録(伝える文化・伝統)・ジオパークなど、文化財や地域地質を核とした“まちおこし”や“まちづくり”が取り組まれています。「文化地質学」は、その地に分布する地質資源に依拠してその地が育ててきた地域産業・地域文化・石造文化財などについて、地球科学情報を加えた学際的な物語(ストーリー)を提供します。

成果概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中貯留に資するため、沿岸域の深部地下水環境研究を実施してきた。これまで、千葉県九十九里、茨城県東海村、北海道幌延町、静岡県駿河湾などで研究を行っている。また、わが国の地下水研究の基礎情報となる地下水データベースや水文環境図の構築に努めた。最近では東日本大震災に関わる研究や水循環基本法に係る執筆が多い。

研究内容

安定的な地下の深部環境についての研究を実施してきた。特に沿岸域のそれは、地層処分研究や地中貯留研究に応用されている。また、個人的にはわが国の地下水データベースの構築に力を注いできた。生活用の井戸から工業用水、温泉井、調査井など多くの情報を収集した。この成果は国の基盤情報として使われるほか、水文環境図の作成などにも使われている。また、近年では水の大循環に係る体系的な研究から、水循環基本法に基づく水循環基本計画において、健全な水循環を維持した上での工業用水の利用法に関する提言などを行ってきた。土対法に係る地下水流動解析も全国レベルで実施している。さらに、洞穴研究においては、山体内部の地下水の挙動を捉え、新洞発見に貢献するなど大きな成果を挙げてきた。

研究成果はどう使われるか

地層処分において国が始める段階的調査の申し入れにおける方針決定や科学的有望地の選定、また工業用水の利用に係る健全な水循環評価などに使われている。一方、過去には富士山の世界遺産登録にも貢献した。

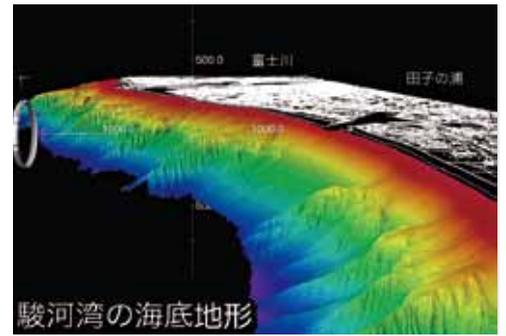


図1 駿河湾の海底地形  
(従来の精度を超えた見える化に成功)

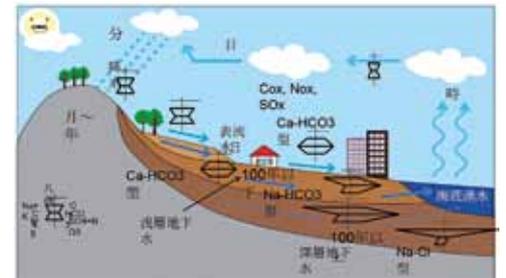


図2 水の大循環

温泉 / 地下水の深部環境における熱・物質移行過程の解明

成果概要

高温泉を文献調査で抽出し、そのうちの幾つかの温泉地で温泉水の温度圧力を情報収集し、泉質・沈殿物（スケール）の地化学的調査を実施した。また、浴用以外に殆ど未利用である酸性泉を対象に熱利用と溶存成分の資源化の可能性を検討した。

研究内容

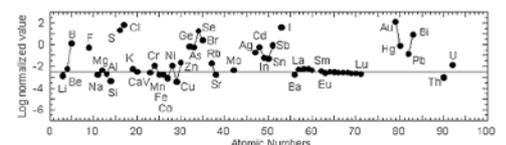
温泉は熱と物質を深部から浅部へと効率的に運搬する場であり、観光保養資源、熱・エネルギー資源、鉱産物資源を育み、人々に恩恵をもたらす場でもある。本研究では温泉の利用性向上に資するため次のような調査を実施している。熱水を湧出する高温泉では泉質とスケールを地化学的に調査し、成因を含む地域特性や利用形態とスケール発生の難易性との関係を整理・体系化する。飽和～加熱蒸気を噴出する高温泉では噴出時の温度圧力を調査し、蒸気/熱水比の規定要因を整理する。これら調査を通じて温泉のスケール生成要因を明確にし、各種スケール対策技術の実効性を評価する手法を構築する。また、観光保養資源の他は殆ど未利用である酸性泉では泉質形成に関わる物理化学的要因を整理すると共に、酸性環境下での熱利用と溶存成分の資源化の可能性を評価する。

研究成果はどう使われるか

本研究結果は、温泉の維持管理、発電利用、多目的利用に際し、基盤情報として役立つと思われる。



温泉貯湯槽のスケール



酸性泉の溶存成分組成の  
安山岩組成に対する比率

## 温泉発電地域における温泉化学モニタリング

地下水研究グループ  
柳澤教雄  
n-yanagisawa@aist.go.jp

### 成果概要

新潟県十日町市松之山温泉地域において温泉バイナリー発電試験が2012年より行われているが、それにあわせて2010年10月より当該温泉および周辺源泉のモニタリングを実施した。その結果、温泉の流量やNaなどの主要化学成分はおおむね安定したが、 $\text{HCO}_3^-$ など近隣地域の地震の影響を受ける成分もあった。この成果を、日本地熱学会誌に掲載した。

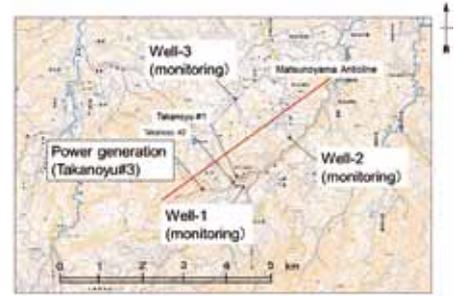
### 研究内容

モニタリングは、温泉発電を行っている鷹の湯3号井(97°C)および周辺1kmの源泉で実施した。発電試験のために使用した温泉水量の変化にかかわらず、周辺温泉の生産量は安定していた。また、2014年までのEC、pH、温度や各成分の濃度はおおむね安定しており変動係数も0.01~0.05程度であった。しかし、一部の源泉で、2011年3月前後でCaや $\text{HCO}_3^-$ 濃度が急変する事例があり、その変化は松之山温泉地域で発生した長野県北部地震(M6.7, 最大震度6強)などに関連したと考えられる。また、1937年や1964年の分析結果と比較しても、Naなどの濃度が長期的に安定していることが示された。

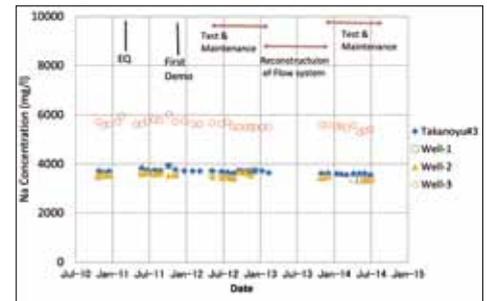
- Yanagisawa, N., Sasaki, M., Sugita, H., Sato, M. and Osato, K. (2015) Geochemical monitoring of hot spring surrounding the Matsunoyama binary power plant., J. Geotherm. Res. Soc. Japan. Vol.37, p.87-94.

### 研究成果はどう使われるか

地熱発電や温泉発電に伴う周囲の温泉への影響調査は今後ますます重要になってくるが、本研究は今後の温泉調査にむけて検討すべき事例となってくる。また、FREAで実施している自動温泉モニタリング装置開発などを支援するものとなってくる。



松之山温泉地域における発電試験箇所(鷹の湯3号井)およびモニタリング井の関係図



松之山温泉地域における温泉化学モニタリングの一例(Na分析結果)

## 地下水保全を念頭においた水文地質学

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

### 成果概要

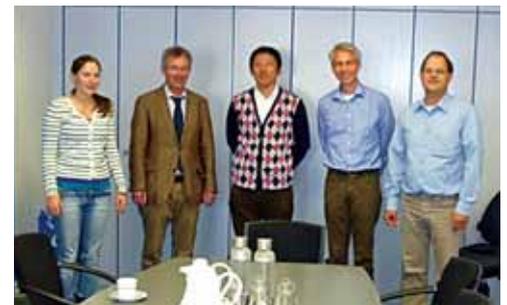
社会のための地下水研究をおこなうためには、幅広い調査手法に関する知識の取得や異なる場での調査経験が必要である。この考えから、研究内容に多様性をもたせることを心掛けている。最近では地下水保全に係る研究、地下水の地図の作成、帯水層試験法の開発、トレーサー法の有効性の検討などに従事した。

### 研究内容

近年の研究内容としては以下のものがある:(1)ドイツ在外研究(ベルリン工科大学)にて、地下水管理の関係機関であるヘッセン地質環境研究所に滞在し、得られた成果を公表した(日本地下水学会誌, 2015)。(2)地下水研究グループの継続的なミッションである地下水の地図(水文環境図)の作成に携っており、水文環境図 No.8「石狩平野(札幌)」を出版した(産総研地質調査総合センター, 2014)。(3)技術開発として帯水層試験法であるプッシュプル試験の繰り返し精度評価や試験法の工夫をおこない成果を公開した(Geothermics, 2015)。(4)トレーサー法の現地応用として $^{14}\text{C}$ を用いた解析や(Hydrogeology Journal, 2012)、沿岸域の深層地下水研究をおこない、成果を公開した(IAH, 2015)。その他、トレーサー法に関する新技術の開発にも取り組んでいる。

### 研究成果はどう使われるか

水循環基本法の制定によって、地下水に対する理解や、それをわかりやすく表示するニーズはますます高まることが予想される。上記の研究はいずれも、地下水資源量の評価や地下水流動の理解につながる。



ヘッセン地質環境研究所(ドイツ・ヘッセン州)の調査にご協力いただいたメンバー



水文環境図 No.8「石狩平野(札幌)」

### 成果概要

富士山周辺地域および駿河湾沿岸域を対象とした陸域および海域の地下水研究を行った。陸域における地下水研究の成果は水文環境図「富士山」としてとりまとめて平成27年度中に出版する。陸域から海域に至る沿岸域地下水研究では、得られた知見をとりまとめると共に調査・研究手法の体系化を図る。

### 研究内容

GSJが発行する水文環境図の事業および資工ネ庁の地層処分関連の委託事業として、富士山から駿河湾に至る一連の地下水に着目し、研究を行ってきた。現地調査として陸域の200箇所程度の湧水、地下水、河川水の採水調査や海域における各種物理探査や化学トレーサーによる調査、沿岸域における掘削調査などを行ってきた。本研究には、富士山地域の地下水流動特性や断層周辺の地下水水質、地下水温の空間分布、沿岸域の深部地下水の性状、海底湧水の実態把握など、多くのテーマが含まれている。いずれのテーマにおいても個々の独立した成果が得られていることに加え、それらの成果が相互に強く結びついている点が本研究の特徴である。また、涵養域から海を含めた流出域までの一連の地下水を同時期に追跡した貴重な成果事例になり得るものである。

### 研究成果はどう使われるか

水文環境図でとりまとめた地下水情報は、対象地域における地下水や地中熱等の資源を利用するための基盤情報となる。また駿河湾沿岸域における地下水研究の成果は、地層処分事業に関わる深部地下水環境の評価に活用される。



富士山周辺地域の採水地点分布図



駿河湾から富士山を望む

## 沿岸域の地下水流動に関する研究

### 成果概要

社会における沿岸域地下水に対する関心の高まりから国内外の沿岸域地下水に関する文献収集・現地調査・サンプル分析などを行い、学会発表、論文、ならびに水文環境図などを通して外部へ情報を発信するとともに、CCOP活動を通して海外への技術移転にも努めている。

### 研究内容

近年の研究内容としては、1)「沿岸域の地質・活断層調査」の一環として駿河湾沿岸域における地下水調査を行い、成果を海陸シームレス情報集として来年度出版予定である。2)北海道幌延町における1,200mボーリング孔から得た地下水や間隙水を用いて沿岸域深部における帯水層構造を明らかにした(Hydrogeology Journal, 2014)。3)北海道の石狩低地帯を対象にCl濃度をトレーサーとした新たな地下水評価手法を提案した(日本地下水学会誌, 2014) 4)熊本地域における水文地質データを使い「水文環境図 No.7熊本地域」を出版した。5) CCOP活動の一環として、現地での技術移転やCCOP版の水文環境図の作成も尽力した。また2015年3月よりカリフォルニア州サンディエゴにて、沿岸域地下水のモニタリングや保全について学んでいる。

### 研究成果はどう使われるか

上記の研究成果はHLWやCCSなどの日本国内における地下水問題だけでなく、水資源確保や地盤沈下・塩水化など多くの地下水問題を抱える途上国における将来の適切な地下水管理とそれに基づく地域発展への貢献にもつながる。



北海道幌延町浜里の1,200m  
ボーリングサイト



サンディエゴのUSGSにて  
Danskin 博士とともに

成果概要

2009年4月に、渡辺寧前グループ長（現秋田大教授）を引き継いでグループ長に就任して以来、資源エネルギー庁委託事業を中心とするレアメタル資源研究の国際展開を推進してきた。南ア、米国、ブラジル、ミャンマーを軸に、韓国、タイ、フィンランドなどを含めた当該国地調と研究協力を進め、重要な知見・情報を政府や民間企業に提供すると共に、多くの学術的成果を挙げた。

研究内容

レアメタル資源研究の国際展開におけるグループ長としての役割は、当該国地質調査所との連絡、交渉、研究計画の立案と実施などのマネジメントである。南アについては、前グループ長時代からの蓄積があり問題が少なかったが、米国とブラジル案件は最初から立ち上げたため、人脈形成や基礎情報の収集から始める必要があった。幸い両国とも経産省・外務省主催の会議への参加等を通じて、研究協力の合意を形成することができた。しかし、現実には相手国の予算措置に依存する部分が多く、またブラジルはポルトガル語の制約で意思疎通が難しく、研究立案は容易ではなかった。レアアース危機が終息し、資源安の時代となった現在、対象国の資源研究に対するモチベーションには温度差があるため、対象国の入替えや産総研側の研究体制の再構築を迫られている。

研究成果はどう使われるか

資源エネルギー庁委託事業の成果は、基本的に政府への情報提供が目的であり、日本の資源戦略の策定に活用される。また、有望鉱床案件については、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構等に引き継ぎ、権益の獲得を目指す。



図1 2014年9月 南ア・MINTEKにて



図2 2011年3月、USGS レストン本部にて

アジア地域の広域地質図、鉱物資源図の整備

成果概要

筆者らはこれまでにアジア地域の広域地質図、鉱物資源図を整備してきているが、その集大成として2011年に500万分の1 アジア地質図（寺岡，奥村）を、そして2014年に500万分の1 アジア鉱物資源図（神谷，大野ほか）を発行した。これらは、アジア地域を総括した詳細な地質図、鉱物資源図として他に類のないものであり、その活用が期待される。

研究内容

筆者らがこれまでに発行してきたアジア地域の広域図には、

- ・300万分の1 東アジア地質図（GSJ，2003）および鉱物資源図（GSJ，2007）
- ・300万分の1 中央アジア地質図（GSJ，2007）および鉱物資源図（GSJ，2012）
- ・500万分の1 アジア地質図（GSJ，2011）および鉱物資源図（GSJ，2014）

がある。一般に多国間にまたがる広域図では各国の地質図、資源図の整備状況の相違に基づく統合の困難さが伴い、網羅的、あるいは簡略的なものになりがちである。しかし当該図幅は少数の筆者により多くの資料を再解釈することにより、統一的な凡例、情報を持つものに仕上がっている。

なお、1:500万図についてはデータ利用者の利便性を考え、GSJ サイトでの公開が予定されている。

[掲載] <https://www.gsj.jp/Map/JP/asia-area-geoscience.html>

研究成果はどう使われるか

世界の鉱物資源の需要は、新興国の台頭や科学技術の発展により増大し、また多様化が進んでいる。本図は、資源探査に必要な資源ポテンシャル地域を広域的に把握し、抽出するための基礎資料として重要である。



Fig.1 アジア鉱物資源図（GSJ,2014）

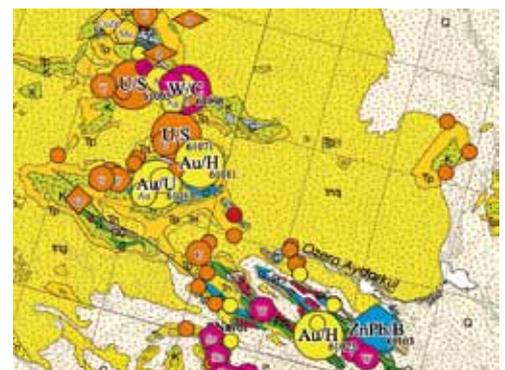


Fig.2 同拡大図（ウズベキスタンの一部）

成果概要

リモートセンシングを用いたレアアース鉱物や滑石等の資源鉱物の識別に関する研究を行った。また、リモートセンシングによる岩石・鉱物識別の際に参照データとして用いられる反射スペクトルを取得した。

研究内容

短波長赤外域において同一波長帯で特徴的な吸収を示す滑石、ドロマイトやマグネサイト等の炭酸塩鉱物、緑泥石を識別する手法を開発し、ハイパースペクトルセンサ (Hyperion) のデータに適用した。また、一度に広範囲を観測することができる衛星搭載型多バンドセンサ (ASTER) の短波長赤外データおよび熱赤外データを用いた滑石有望地の抽出方法について検討を行った。ASTERの熱赤外データを利用した地質マッピング手法開発のため現地調査を行った。このほか、レアメタル・レアアース鉱物や熱水変質帯に分布する岩石・鉱物について、リモートセンシングによる岩石・鉱物識別で用いる参照データとして使用される可視～短波長赤外域の反射スペクトルを取得した。

研究成果はどう使われるか

開発した手法は、衛星データに適用することで鉱物資源探査における有望地の絞り込みに利用可能である。また、調査現場における携帯型センサを使ったターゲット鉱物の識別への利用が期待できる。



米国ネバダ州における現地調査



鉱石の反射スペクトル測定

重希土類に富む風化花崗岩の研究：  
特にイオン吸着型鉱床について

成果概要

重希土類に富むイオン吸着型鉱床の成因を研究するために、中国南部や東南アジアの風化花崗岩について研究した。希土類の粘土への吸着に適した、花崗岩の化学組成と鉱物組み合わせ、風化過程における地球化学的条件、地形や気候などについてまとめた。重希土類に富む鉱体は、特に結晶分化作用の進行した花崗岩の風化殻にほぼ限定されることを示した。

研究内容

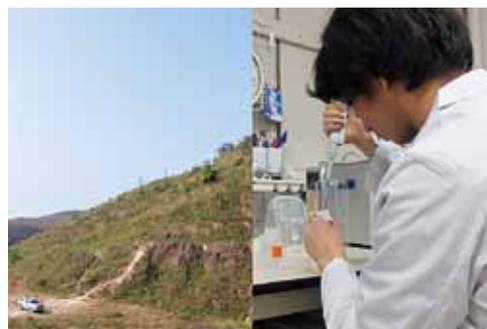
重希土類の大部分は中国南部のイオン吸着型鉱床から生産されており、その成因の解明と中国国外での資源ポテンシャルを評価する研究を行った。文献調査に加え、各地域の花崗岩や風化花崗岩の化学分析および鉱物記載によって、以下のことが明らかになった。1) 著しく分化した花崗岩が重希土類に富む。2) 希土類含有鉱物としてフッ素炭酸塩や珪酸塩の産出が希土類の吸着に望ましい。3) 風化過程におけるCeの枯渇は希土類の吸着を示唆する。4) 希土類が多く吸着されている風化岩はリン酸に乏しい。東南アジアの国々(ミャンマー、タイ、マレーシアなど)でセミナーを行うとともに、いくつかの国では共同研究を進めている。

Sanematsu, K. and Watanabe, Y. (2015) Reviews in Economic Geology, 印刷中。

Sanematsu, K. et al. (2015) Journal of Asian Earth Sciences, v. 111, p. 14-30.

研究成果はどう使われるか

イオン吸着型希土類鉱床の探査の指標として使われる。風化花崗岩の化学組成は希土類がより多く吸着されているかを示唆する。原岩花崗岩の化学組成が重希土類に富むかどうかを示唆する。



野外調査と化学実験の様子



タイ鉱物資源局 (DMR) でのセミナーの様子

成果概要

イオン吸着型鉱床以外の新規重希土類 (HREE) 資源を確保するために、南アフリカや北米などのHREEアルカリ岩鉱床に産出する鉱物の資源ポテンシャル評価を行っている。有望な新規 HREE 資源としては (1) ジルコンなどの高濃度の HREE を含有する難溶性鉱物、(2) アパタイト・蛍石からのリン酸やフッ素の副産物としての HREE の生産、の2つが挙げられる。

研究内容

これまで、南アフリカ共和国やカナダなど世界各地のアルカリ岩鉱床の調査・研究を行い、同一の鉱物でも生成環境の違いによって、その HREE 含有量に多様性があることを明らかにした。その過程で、世界で最も HREE に富むジルコン、アパタイト、蛍石などを発見してきた。その成因を解明するとともに、これらの鉱物から HREE を効率よく抽出・回収する方法の開発にも取り組んでいる。これらの成果は、レアメタルの主要な研究集会である Critical Metals Meeting など数多くの会議で講演している。また、共同研究の一環で、南アフリカ地球科学審議会 (CGS) などの研究者を受け入れ、レアメタル資源評価法や分析技術の指導を行っている。

研究成果はどう使われるか

重希土類資源の安定供給のために、資源探査や選鉱・精錬の研究など上流から下流まで貢献できることが期待される。



南アフリカの HREE アルカリ岩鉱床の調査



レアメタル鉱石の分析手法を学ぶ CGS 研究者

鉱物資源ポテンシャル評価  
LA-ICPMS による元素・同位体分析法の開発

成果概要

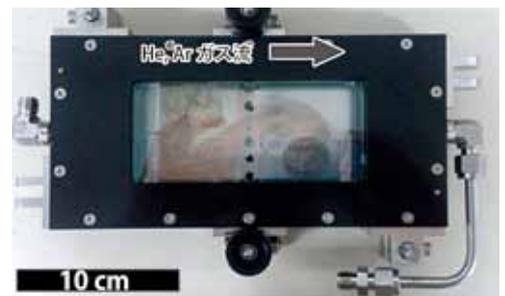
レアメタル鉱石をはじめとする鉱物資源安定供給の為に資源ポテンシャル評価を推進した。また、レーザーアブレーション ICP 質量分析計 (LA-ICPMS) を用いた固体試料の元素・同位体分析法 (ガラスビード全岩分析法, 粉末ペレット全岩分析法, ジルコン U-Pb 分析法, 元素・同位体マッピング) の開発・高度化を進め、研究機関・民間企業との受託・共同研究を推進した。

研究内容

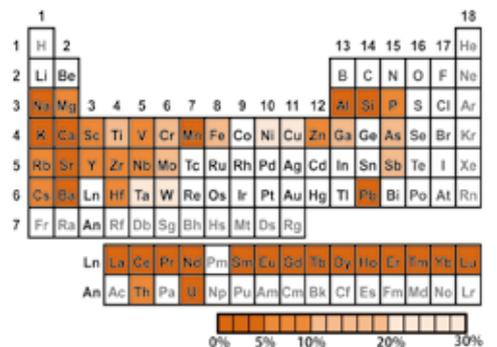
レアメタル鉱石をはじめとする鉱物資源安定供給の為に資源ポテンシャル評価を、受託・共同研究に基づき推進した。また、岩石試料のアルカリ熔融により作成したガラスビードに対し、LA-ICPMS により主成分・微量元素分析を行うことで、迅速かつ精確に岩石試料の全岩元素分析を行うことが可能となった。その他、Geochemical Journal 誌 (Vol.49 No.4) 及び、Journal of Mineralogical and Petrological Sciences (Vol.110 No.3) への報告、地球化学系の国際会議 (Goldschmidt2015) や国内学会での研究発表 5 件、プラズマ分光分析研究会第94回講演会での講演など、成果発信に努めた。また、「微小領域分析に基づく上部地殻およびレアアース鉱床の形成過程に関する研究」で2015年資源地質学会研究奨励賞を受賞した。

研究成果はどう使われるか

LA-ICPMS による岩石試料の全岩・微小領域元素濃度分析、ジルコンの U-Pb 年代分析法等、各種鉱床の資源ポテンシャル評価や成因研究の為に基礎的な分析技術の高度化を進め、鉱物資源の安定供給に貢献することが期待される。



新たに開発した LA-ICP-MS 大型試料室



ガラスビード法による全岩元素組成分析精度

## MC-ICP-MS による同位体分析手法の確立と高度化

鉱物資源研究グループ  
荒岡大輔  
d-araoka@aist.go.jp

### 成果概要

鉱物資源研究グループ所有の多重検出型 ICP 質量分析計 (MC-ICP-MS) を用いた同位体分析手法を確立させた。また、測定が困難な軽元素や、過去の研究例のほとんどない新しい元素について、同位体分析手法の確立と高度化を推進した。

### 研究内容

鉱物資源研究グループに導入された同位体比測定用装置である MC-ICP-MS (NEPTUNE plus) の実用化のため、様々な元素について同位体分析手法を確立させた。まず、MC-ICP-MS による一般的な測定対象元素であるストロンチウム (Sr)、ネオジム (Nd)、鉛 (Pb) の各同位体比について、分析条件の設定や最適化などの検討を行った後、各標準試料を用いて繰り返し精度の評価を実施した。その結果、これらの元素について本装置によって高精度かつ正確な分析が行えることが確かめられた。また、報告例のほとんどないリチウム (Li)、マグネシウム (Mg)、カルシウム (Ca) といった軽元素の安定同位体比についても、分析条件の設定や最適化を行い、本装置による分析手法を確立させた。現在は、分析精度向上のための新しい補正法を用いた分析手法の開発や、さらなる新しい元素の分析手法の確立、レーザーによる試料導入など、より一層の同位体分析手法の高度化を進めている。

### 研究成果はどう使われるか

本装置で今回新しく確立させた元素の同位体比は、鉱床に応用した研究例がほとんどなく、鉱床成因に関する新しい研究を進展させることが期待できる。また、今回確立した手法は所内外でのニーズも大きいとため、地球科学に関連した幅広い共同研究が期待される。



鉱物資源研究グループの  
元素・同位体分析システム



同位体分析用の試料調整 (元素分離)  
システム

## 粘土鉱物資源の 1 つであるベントナイトに関する研究

鉱物資源研究グループ  
三好陽子  
youko-miyoshi@aist.go.jp

### 成果概要

ベントナイトの標準的な性能評価技術の確立を目指して、産総研の標準化基盤研究「ベントナイトの性能標準試験法の開発」を実施している。この研究は、ベントナイトの代表的な性能評価手法であるメチレンブルー吸着量試験の標準化を目指している。また、性能評価手法を天然ベントナイト試料に適用する研究も実施している。

### 研究内容

ベントナイトは膨潤性や吸着性などの性質をもち、土木用、農業用などの多様な用途に利用される。ベントナイトの標準的な性能評価技術の確立を目指して、産総研の標準化基盤研究「ベントナイトの性能標準試験法の開発」を実施している。この研究は代表的な性能評価手法であるメチレンブルー吸着量試験の標準化を目指しており、大学や企業の研究者と連携をとって進めている。これまでにベントナイトに関連する企業の現行の試験法を調査し、国内の試験法の実態を明らかにした。この研究と並行して、ベントナイトの性能評価手法を天然の岩石試料に適用する研究も行っている。福島県内で採取した試料が良質なベントナイトの性質を示したことから、有用なベントナイト資源が存在する可能性を提案した。

### 研究成果はどう使われるか

天然ベントナイトは、産地ごとに特性が異なると考えられる。性能標準試験法を用いて、産地ごとのベントナイトの特性と用途への適性を整理することで、ベントナイト資源の有効活用につなげることができると期待できる。



ベントナイトのメチレンブルー  
吸着量試験の様子



福島県内で発見した良質な  
ベントナイトの写真

### 成果概要

私の研究は海洋地質学を基盤としており、調査航海で取得した底質試料や掘削コア、また物理探査データを用いながら、海底または海底下における地球科学的現象のより良い理解を目指している。その代表的対象は、メタンハイドレート、海底地すべり、泥火山、巨大地震発生帯、CO<sub>2</sub>地中貯留などであり、いずれも堆積盆の構造発達やそこにおける流体の挙動とその作用が関係している。地層水に天然ガスが含まれると燃料資源の集積はもちろん、様々な碎屑物流動を伴い、ガスの相変化はさらに物性を変化させ地層性状をより複雑化する。このような特性を逆に探査に利用する方法も検討している。近年は、主に日本海側に賦存が期待される表層型メタンハイドレートの経産省受託研究の代表を務め、他の大学や研究機関とも協力しながら集中的な海洋調査を推進している。ここでは主に、各種ソナーを用いた音響探査や海洋電磁探査に携わっている。

### 研究内容

近年、論文として公表した代表的な研究を以下に示す。

#### ○メタンハイドレート分布と流体の関与

南海トラフのメタンハイドレート BSR 分布域において、地層水の界面と考えられる折り返し反射面 (FBR) を初めて認定し、その分布と形態のパターンなどを記載するとともに造構運動に関わるガスを含む流体の挙動について議論した [1]。

#### ○海底地すべりメカニズムと流体の関与

下北半島沖において大規模海底地すべり群の痕跡を発見し、すべり面から平行岩脈状の脱水構造を伴う構造を世界で初めて報告した [2]。また、同海底地すべり群の構造解析から、高メタンフラックス海域では天然ガスがすべり面形成に寄与し得ることを示した [3]。さらに、現在の海底下や陸上露頭の例を挙げながら、将来の海底地すべり科学掘削の計画には層面すべりを対象とすることが重要であり、すべり面相当層の特性と観測の必要性を訴えた [4]。

#### ○石炭層と微生物活性

IODP Exp.337の科学掘削航海により、微生物活性に関わる挟炭層の重要性、地下環境における微生物活性の限界などの新たな指標を示した。微生物活性に重要な堆積物の孔隙率や含水率など、掘削コアの物理特性の測定を担当した [5]。

#### ○CO<sub>2</sub>地中貯留を想定したポテンシャル評価

枯渇油ガス田を対象とした CO<sub>2</sub>地中貯留の可能性を示すため、マレー堆積盆を例に数値シミュレーションによる地層の CO<sub>2</sub>貯留ポテンシャル評価を実施した [6]。

[1] Otsuka et al. (2015) ISLAND ARC, 24, 145-158.

[2] 森田ほか (2011) 地質学雑誌, 117, 95-98. (日本地質学会小藤文次郎賞受賞 (2013年))

[3] Morita et al., (2011) Advances in Natural and Technological Hazards Research, 31, Springer, 311-320.

[4] 森田 (2014) 月刊地球, 号外65, 275-281.

[5] Inagaki et al. (2015) SCIENCE, 349, 420-424.

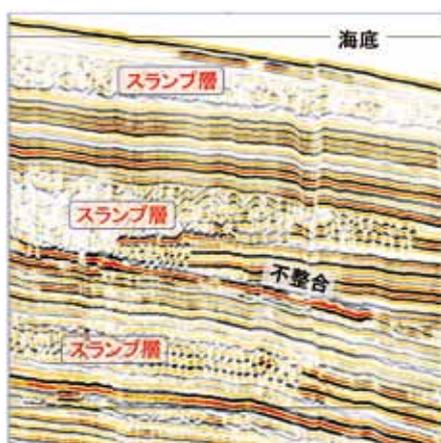
[6] 森田ほか (2010) 地質調査研究報告, 61, 245-270.

### 研究成果はどう使われるか

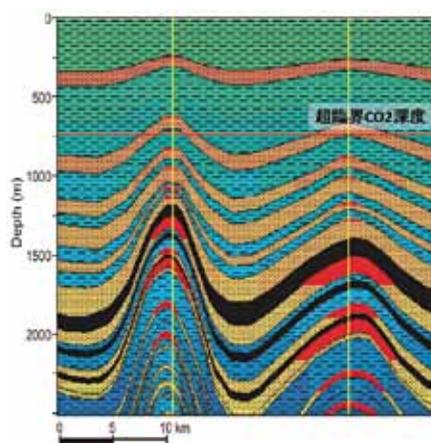
いずれの研究においても地質学および地球物理学的アプローチにより、堆積盆の現状と過去の経緯に関わる情報の提供が可能となる。現在進めている表層型メタンハイドレート研究では各種音響探査、掘削調査、電磁探査、環境調査など多種にわたる調査を実施しており、このような集中的かつ緻密な調査の統合的評価は、現在のメタンハイドレート集積の把握のみでなく、それらが集積に至ったプロセスや堆積盆発達史、またその環境変動の理解に大いにつながる。



表層型メタンハイドレート調査における  
海洋電磁探査の実施



下北半島沖、海底地すべり群の  
地震探査断面



数値シミュレーションによる  
CO<sub>2</sub>地中貯留ポテンシャル評価

成果概要

広く関心を集めているシェールガス・シェールオイルに対して、国内で可能性が高いとされている硬質珪質頁岩や、根源岩能力があるのか不明の炭田堆積盆の頁岩などの分析を進めた。これらの研究はシェール資源の評価への貢献を目指している。対外的には CCOP の Unconventional Oil & Gas Project (UnCon) に参加し、評価手法や各国の状況についての情報の収集を進めている。

研究内容

過去に秋田 - 山形堆積盆で地質調査所が掘削した層序試錐遊佐 GS-1、能代 GS-1 のコア試料の根源岩能力をロックエバル分析でおこなった。能代 GS-1 では最深部 (3,514m) の女川層でも全有機炭素量 (TOC) は 1.3% 程度で、水素指標 (H. I.) も 100 以下で能力は高くない。遊佐 GS-1 の 2,815m ~ 2,818m 間の草薙層 (女川層相当) で TOC が 2% 以上、H. I. が 350 程度と高い能力を示したが、熟成度が石油生成帯に達していない。釧路炭田西部の北陽地域で掘削されたコアの Rock-Eval 分析では、未熟成であるが一部でコアは高い水素指数を示し、炭田堆積盆のシェールの可能性が確認できた (図 1)。

CCOP の UnCon プロジェクトの会合に参加し、東南アジア各国の状況や資源評価法に関する情報収集をおこなった (図 2)。

研究成果はどう使われるか

炭田堆積盆のシェールについては、排出メカニズム等の検証は必要であるが、将来炭田堆積盆のシェールについて資源評価が可能となるであろう。CCOP で得られた情報は、国内関係機関や企業の資源探査等へ貢献できると考えられる。

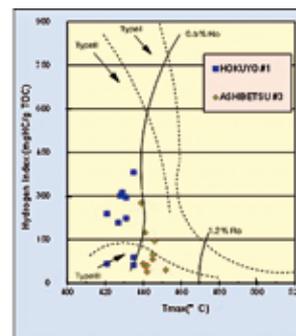


図 1 北陽コア、芦別コアのロックエバル分析結果



図 2 CCOP UnCon Project 第 2 回会議 (韓国・慶州)

## 成果概要

1990年代よりメタンハイドレートの産状・分布の把握と資源量評価に関する研究を行ってきたが、1996年に公表した日本周辺海域での分布と資源量試算結果は、その後の基礎物理探査・基礎試錐、及び2001年7月に公表された「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」とこれに基づき開始され現在も進行中の国による開発プロジェクトの実施根拠のひとつとなった。2005年より主として日本海に分布する表層型メタンハイドレートの実態解明の研究に参加し、マウンド及びポックマーク地形と表層型メタンハイドレートの間に関連があることを示すなど上越沖海域での分布・産状の解明に貢献した。2013年から国のプロジェクトとして表層型メタンハイドレートの資源量評価のための本格的な調査が開始されたが、その中で広域地形地質調査及び環境モニタリング調査にコアメンバーとして参加し、プロジェクトの推進に貢献している。

## 研究内容

日本周辺海域の資源量試算の現時点で最新の結果は2001年に公表したもので、日本周辺海域の原始資源量を4.13~20.64兆 $m^3$  (145.9~729.3Tcf) と試算し、このうち80~90%以上が南海トラフ周辺にあるとした。なお、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(通称「MH21」)では、3次元地震探査及び基礎試錐の結果を踏まえた東部南海トラフ海域での精度の高い資源量試算値、及び日本周辺海域でのBSR分布図を2009年に公表しており、さらにその他の海域での最新の3次元地震探査データの解析と資源量評価が進行中であるが、現時点では日本周辺海域全体の資源量試算結果は公表されていない。

一方、主として日本海側に分布する表層型メタンハイドレートの調査は、2004年から上越沖海域で開始され、海底面に露出したメタンハイドレートの観察と試料採取、ピストンコアによる多数の表層型メタンハイドレート試料の採取と分析、マルチビーム測深機(MBES)による詳細海底地形調査や音波探査・地震探査による地質構造探査などが実施された。その結果、海底に径数100m程の大きさのポックマークと呼ばれる凹地形とマウンドと呼ばれる凸地形が多数観察され、表層型メタンハイドレートは主としてマウンド部に分布し、泥層中に層状・塊状または脈状の産状を示すこと、及びポックマーク及びマウンドの地下には「ガスチムニー構造」と呼ばれる海底下数100mにまで続く周囲に比べて白く抜けた柱状の構造が地震探査記録上で認められ、海底下深部から流体が移動する経路になっていることなどが明らかになった。

これらの成果を踏まえ、経済産業省は2013年度から3年間程度で表層型メタンハイドレートの資源ポテンシャルを探る本格的な調査を開始した。本調査では、広域地形地質調査、詳細地形地質調査、掘削調査(LWD及びコアリング)、高分解能3次元地震探査、電磁探査、環境モニタリング調査などを実施している。このうち広域地形地質調査では、隠岐西方海域から北海道周辺海域の間の主な海盆においてマルチビーム測深機(MBES)による海底地形調査及び表層構造探査機(SBP)による詳細地質構造探査を実施し、マウンドやポックマークなどの特異点の抽出とその下部の「ガスチムニー構造」の確認を行い、2014年までの2年間の調査で971箇所「ガスチムニー構造」を確認した。また環境モニタリング調査では、主要な「ガスチムニー構造」を伴うマウンドでROVを用いた潜航調査により、海底観察・試料採取、長期モニタリング装置の海底設置・回収などを実施し、海底に露出する表層型メタンハイドレート及びこれに伴って分布する炭酸塩岩やバクテリアマットの産状確認、海底からのメタン湧出の確認、ベニズワイガニなどの底生生物の生態把握などの成果があった。

## 研究成果はどう使われるか

国による「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」では、表層型メタンハイドレートについて平成25年度から3年間程度で資源量把握に向けた調査を集中的に実施し、その結果を踏まえ今後の方向性を議論し資源回収技術の調査・研究開発に着手することになっている。広域地形地質調査は資源量把握に対して、また環境モニタリング調査は資源回収技術の検討に対して、根幹的で重要なデータを提供することになる。

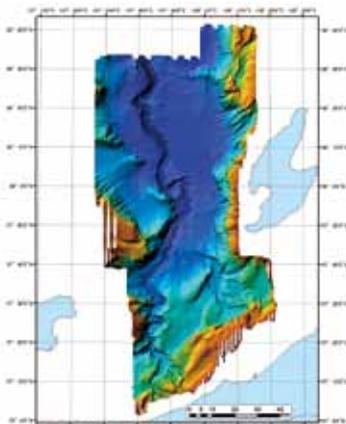


図1 上越沖海域の海底地形

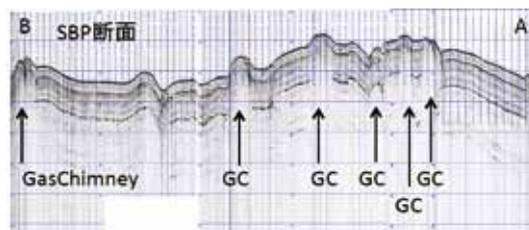


図2 SBP断面上の「ガスチムニー構造」

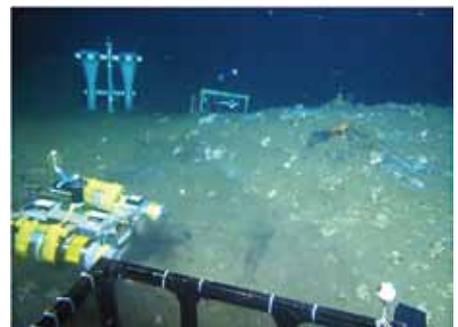


図3 海底に設置した長期モニタリング装置

成果概要

国のメタンハイドレート研究への貢献。日本海の表層型メタンハイドレートプロジェクトにより、上越沖上越海丘のポックマークと海底谷の成因の新たなモデルを提案し、国際誌に出版した。

民間共同研究の推進。研究代表者としてJX日鉱日石開発(株)と石油資源開発(株)との共同研究をそれぞれ主導。共同研究の成果はGSJ地質ニュースの「釧路」特集号の出版や地質学会小藤文次郎の受賞として結実した。

国際共同研究や国内堆積盆発達史研究への貢献。海底自然堤防形態に関する英国アバディーン大学との共同研究の成果が国際誌に出版された。また、統合国際深海掘削計画IODP試料を用いた研究を口頭発表。東北日本を中心とした堆積盆発達史の研究で英文論文を出版し、日本地質学会で2件の招待講演を行った。

研究内容

経済産業省からの、日本海等の表層型メタンハイドレートに関する受託研究の中心メンバーの一人として、航海乗船をはじめ研究面での貢献を行ってきた。特に日本海上越沖の上越海丘での長尺ピストンコアと3次元地震探査記録の解析を組み合わせて行われた、ポックマークと海底谷の成因の新たなモデルを提案した研究は国際誌特集号に掲載された。

・Nakajima, T. et al. (2014) Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan. Journal of Asian Earth Sciences, 90, 228-242.

民間共同研究により、釧路、三陸、新潟、北陸等、国内鉱区企業の探鉱活動をサポートする研究を行ってきた。その成果として、釧路炭田で行った地質巡検の様子をGSJ地質ニュースに特集号を組んで出版した。

・中嶋 健・小笠原正継・佐脇貴幸・鈴木祐一郎・棚橋 学・金子光好・門澤伸昭・中西 敏 (2012) 特集：釧路の地質を巡る。GSJ地質ニュース, 1 (12), 353-375.

また、共同研究の論文成果が日本地質学会の小藤文次郎賞を受賞した。

・森田澄人・中嶋 健, 2013年9月14日 日本地質学会小藤文次郎賞 第2号「海底スランプ堆積層とそれに関わる脱水構造：下北沖陸棚斜面の三次元地震探査データから」。

英国で行った在外研究のうち、アバディーン大学との海底自然堤防形態の定量的解析についての共同研究の成果が、2013年に国際堆積学会の権威ある国際誌に掲載された。

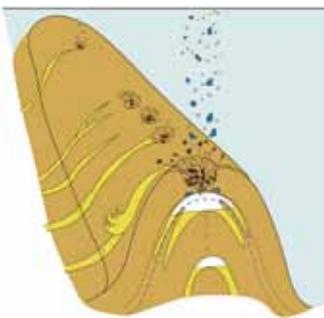
・Nakajima, T. and Kneller, B. (2013) Quantitative Analysis of the Geometry of Submarine External Levees. Sedimentology, 60, 877-910.

主として東北日本において長年継続してきた堆積盆発達史とテクトニクスの研究の成果が、2013年に総括的英文論文として出版された。また、これを契機に、2015年地質学会長野大会において2件の招待講演を行った。

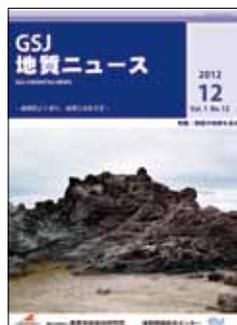
・Nakajima, T. (2013) Late Cenozoic tectonic events and intra-arc basin development in Northwest Japan. In: Itoh, Y. (ed) Mechanism of Sedimentary Basin Formation – Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins. InTech, Rijeka, 153-189. dx.doi.org/10.5772/56706

研究成果はどう使われるか

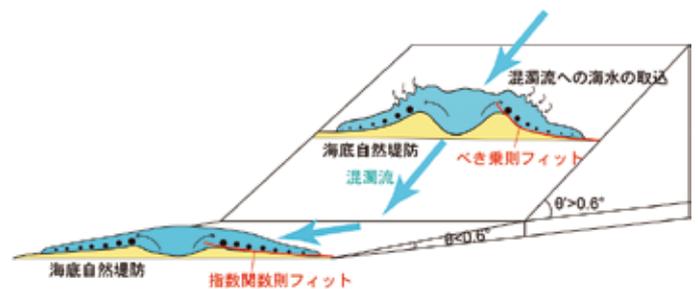
海丘上の海底谷の発達過程を調べることで、表層型メタンハイドレートの生成史を推定することができ、今後の資源量評価につながる。海底自然堤防の形態を地震探査記録で調べることで、坑井を掘らなくても自然堤防が石油貯留岩として良好な砂質かどうか推定することができ、企業の探鉱効率の向上に貢献することができる。国内堆積盆の発達過程の解明により、日本周辺の石油・天然ガス資源の鉱床成因と資源量の評価に今後繋げていくことができる。



上越海丘におけるポックマークと海底谷の形成モデル (Nakajima et al., 2014を修正)



GSJ地質ニュース Vol.1 No.12 釧路特集号



海底自然堤防形態の斜面傾斜による変化 (中嶋, 2013 Green News No. 40より)

### 成果概要

未固結の海底堆積物の熱伝導率を計測する方法として広く利用されている「ニードルプローブ法」を用いて3種類の熱物性(熱伝導率, 熱容量および熱拡散率)を同時に推定する方法を開発した。この方法を統合国際深海掘削計画(IODP)第301航海で採取された海底堆積物に適用し, 3種類の熱物性を同時に計測することに成功した。また, ひとつの熱物性から他の熱物性を推定するための経験式を提案した。

海底環境(高圧・低温)下において未固結の海底堆積物の熱伝導率を計測するためのセンサーを開発し, 東部南海トラフ海域の海底堆積物の現場熱伝導率の計測に成功した。

### 研究内容

燃料資源探査において, 堆積盆評価は燃料資源ポテンシャルの推定や探鉱候補域の選定のために重要である。堆積盆評価では, 堆積物中の有機物の熟成時期やその広がりを温度構造モデリングによって推定する。また, ガスハイドレートは高圧・低温で安定であるが, 海底下においてガスハイドレートが安定的に存在できる下限深度の推定に温度構造モデリングが利用される。

温度構造モデリングでは, 海底面での地殻熱流量とともに岩石・堆積物の熱物性が重要な計算条件になる。海底堆積物の熱伝導率の測定は, サーミスターとヒーター線を封入した針(ニードルプローブ)を試料にさし込み, 一定の熱量で加熱したときのニードルプローブの温度変化から試料の熱伝導率を決定する「ニードルプローブ法」が広く利用されている。この方法によって計測された海底堆積物の熱伝導率は数多く報告されている。しかし, 海底堆積物の熱容量と熱拡散率についてはその測定が困難であるため報告例がほとんどない。そこで, 「ニードルプローブ法」によって得られた温度データから逆解析によって熱伝導率, 熱容量および熱拡散率を同時に推定する方法を開発した。この方法を統合国際深海掘削計画(IODP)第301航海において採取された海底堆積物に対して適用し, 3種類の熱物性を同時に推定することに成功した。さらに得られた3種類の熱物性間の関係(熱伝導率 - 熱容量および熱伝導率 - 熱拡散率)を調べ, ひとつの熱物性から他の熱物性を推定するための経験式を提案した。

海底堆積物の熱伝導率計測に関する多くの研究において, 熱伝導率の計測は実験室(大気圧・室温)環境下で行われている。しかし, 実際の海底環境は高圧・低温であるため, 現場環境下での熱伝導率計測の必要性が指摘されている。そこで, 海底堆積物の熱伝導率を現場で計測するためのセンサーを開発した。これにより海底堆積物を採取することなく現場で熱伝導率の計測が可能になった。このセンサーを用いて東部南海トラフ海域の海底堆積物の現場熱伝導率の計測に成功するとともに, 海底堆積物の熱伝導率が海底地形, 堆積環境および付加体発達に伴う間隙率の変化に強く影響を受けていることを明らかにした。

#### 参考文献

- Goto, S., and O. Matsubayashi (2008), Inversion of needle-probe data for sediment thermal properties of the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge, *J Geophys Res*, 113, B08105, doi:10.1029/2007JB005119.
- Goto, S., T. Mizoguchi, R. Kimura, M. Kinoshita, M. Yamano, and H. Hamamoto (2012), Variations in the thermal conductivities of surface sediments in the Nankai subduction zone off Tokai, central Japan, *Mar Geophys Res*, 33, 269-283.

### 研究成果はどう使われるか

3種類の海底堆積物の熱物性計測については, 温度構造モデリング(特に温度の時間変化を対象にする場合)において, より信頼性の高い温度構造の推定を可能にするものである。また, 現場熱伝導率の計測については, 地殻熱流量の計測精度の向上に繋がるものである。これらの研究成果は日本周辺海域における石油・天然ガスやガスハイドレートの燃料資源ポテンシャル推定への貢献が期待される。



ニードルプローブを用いた  
海底堆積物の熱物性計測



現場熱伝導率計測センサーを  
搭載した計測装置の投入



熱物性計測用の海底堆積物採取

## 成果概要

私はメタンハイドレートの形成に関わる海底下のガス分布や流体の移動に注目した研究を行っている。これまでの研究で、東部南海トラフ海域の三次元反射法地震探査記録に認められた特異な音響反射面「折り返し反射面」に注目し、海底下のガスを含んだ流体分布を推定した。折り返し反射面が、メタンハイドレートの下底を示す反射面より連続して発達し、断層・褶曲等の地質構造、現在進行中の地殻変動、岩相に大きく規制されて発達することから、層理面に沿った流体移動がその形成に関与していることを明らかにした。この成果は地層中の流体移動の理解を大きく進めるものであり、石油天然ガス資源開発や二酸化炭素の地中貯留評価への貢献も期待できる。

## 研究内容

地下の流体移動を解明することは燃料資源の集積を理解することに加え、開発に伴うリスクを評価するために重要である。また二酸化炭素の地中貯留や放射性廃棄物の地層処分、あるいは地熱利用など近い将来に必要な環境技術の研究・開発にも直結する。特に、海底下浅部における流体移動は、ガス（メタン）ハイドレートの形成や全球的な炭素循環を考えるうえでも重要である。

メタンハイドレートは非在来型天然ガス資源として注目され、日本近海での開発が期待されている。一方でその分解と全球的な気候変動との関連も指摘されており、環境面への影響も注目される。メタンハイドレートは背景となる地質学的な諸条件により産状が異なるため、資源化に向けてはメタンハイドレートの形成過程を良く理解し、適切な採掘技術を開発する必要がある。これまでの研究で、東部南海トラフの三次元反射法地震探査記録に認められる「折り返し反射面 (Foldback Reflector, FBR)」に着目してきた [1]。FBR は、メタンハイドレート安定領域下限 (Base of gas hydrate stability, BGHS) に対応するとされる海底疑似反射面 (Bottom Simulating Reflector, BSR) の縁辺から下方に向けて折り返すことを繰り返した形状をしており、全体として地層に平行な「折り目」を持つ蛇腹状の特異な反射面である。FBR は既往研究での報告例が無かったため、記載および詳細なマッピングを行い、反射面の特性や形状を解析した。その結果、FBR はガスの空間分布に対応していると考えられ、BSR の縁辺部におけるガスの分布形態についてこれまでに無い具体的な制約を与えた。また FBR が発達する地層は、その傾斜の上方でメタンハイドレートが賦存する層準を含むことを示した。加えて、砂層分布と FBR の形状との対応関係を明らかにし、岩相に規制された層理面沿いの流体移動との関連を指摘した。これらは対象海域で従来から研究が進められてきた、「砂層型」と呼ばれるメタンハイドレートの産状を良く説明する。東部南海トラフでは地域的な隆起がガスの集積、およびメタンハイドレートの分解・再形成のサイクルを生み出し、FBR の形成を促進していると考えられる。今後は FBR の分布・形状とメタンハイドレート資源量の関連性や、異なる海域においても分布するか詳細に検討を進める必要がある。その他にニュージーランド沖陸棚における掘削試料の透水性から、巨大な淡水レンズの形成過程についての議論も行っている [2] [3]。

参考文献：

- [1] Otsuka et al. (2015) Island Arc, 24 (2), 145-158.  
[2] Lofi et al. (2013) Geosphere, 9 (4), 1009-1024.  
[3] 安藤ほか (2014) 月刊地球, 号外, 64, 96-103.

## 研究成果はどう使われるか

FBR は南海トラフで典型的に見られる「砂層型」メタンハイドレートの形成過程と密接に関連していると考えられ、今後さらに詳細な研究により、メタンハイドレート濃集帯周辺における流体移動の全体像の理解に繋がると期待できる。資源量の把握や産状の推定にあたり、基礎的な情報として寄与できる可能性がある。地下流体の挙動に関する知見は、燃料資源ポテンシャルの把握に加え、二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物の地層処分への貢献も期待できる。

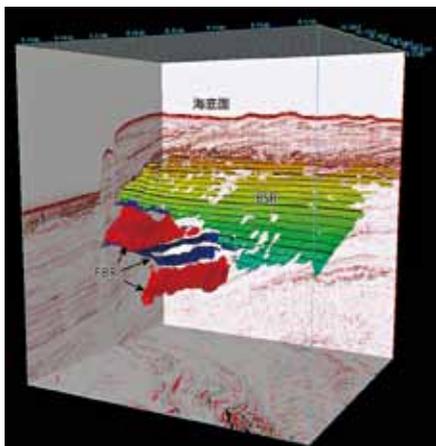


図1 3D 反射断面における「折り返し反射面 (FBR)」の解釈作業

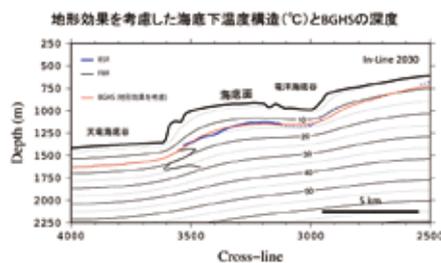


図2 海底下の推定温度構造および BGHS と FBR の発達深度の関係

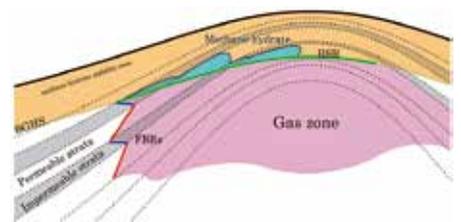


図3 FBR とガス分布、メタンハイドレート分布の概念図

成果概要

東部南海トラフ海底堆積物コア試料より、極性ヒドロキシアーキオール (HA) を検出した。その濃度の深度分布と炭素同位体比から、HA がメタン生成菌のマーカーとして有効と判断された。HA と全有機炭素 (TOC) の濃度が強く相関しており、有機物を多く含む堆積物中にはメタン生成菌も多いと推定された。

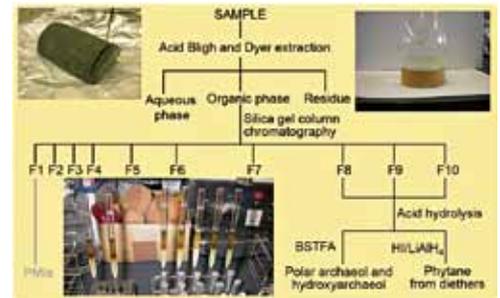
研究内容

メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムの一員として、平成15年度基礎試錐「東海沖～熊野灘」で採取された海底堆積物コア試料中の極性脂質成分を分析した結果、すべての試料 (深度1.5～381m) からHA を検出した。HA 濃度の深度分布は同一坑井におけるメタン生成活性の深度分布と整合的であった。またHA のフィタニル基の炭素同位体比はメタンハイドレート中のメタンの値より高かった。以上から、当該試料中のHA は嫌氣的メタン酸化古細菌ではなくメタン生成菌に由来すると判断された。HA 濃度と全有機炭素 (TOC) 濃度の相関性が高かったことから、堆積物中の有機物の含有量がメタン生成菌の分布を支配する主要な要因であると示唆された。以上の成果を2015年に国際学術誌に原著論文\*として発表した。

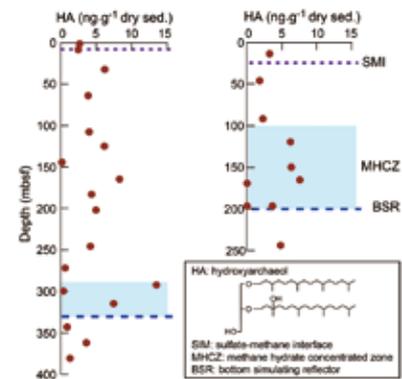
\*Organic Geochemistry 78, 153-160

研究成果はどう使われるか

海底下のメタン生成菌の深度分布に関する本研究の知見は、海洋メタンハイドレート濃集体の形成プロセスを解明するための基盤的情報として利用され、メタンハイドレートの探鉱・資源ポテンシャル評価技術の向上に貢献する。



脂質バイオマーカーの分析手順



2坑井における極性 HA 濃度の深度分布\*

水溶性天然ガス鉱床における地下微生物メタン生成機構の解明

成果概要

微生物を活用して地下堆積有機物から天然ガスに転換する技術開発するための基礎調査として (JOGMEC 委託研究)、水溶性天然ガス鉱床・南関東ガス田帯水層の微生物によるメタン生成機構を解明した。これらの成果を国際学術誌 2 報に発表した。現在、関東天然瓦斯開発株式会社と共同研究を進めている。

研究内容

南関東ガス田の様々な地域のガス生産井から地層水を採取し、そこに含まれるメタン生成微生物の培養、遺伝子解読による系統分布の調査、ラジオトレーサーを用いたメタン生成活性評価を行った。ガス帯水層には多様なメタン生成微生物が存在し (図1及び2)、原位置において主に水素と二酸化炭素からメタンを生成している可能性が強く示唆された。また、メタン生成基質 (栄養源) の供給がボトルネックとなっていることが明らかとなった。国際学術誌 Int. J. Syst. Evol. Microbiol. (Katayama et al., 2014, 64:2089-2093) と ISME J. (Katayama et al., 2015, 9:436-446) に発表した。

研究成果はどう使われるか

調査で得られた生物地球化学的データは、微生物を活用した天然ガス効率的転換技術の開発、並びに、試験サイトの選定に利用する。

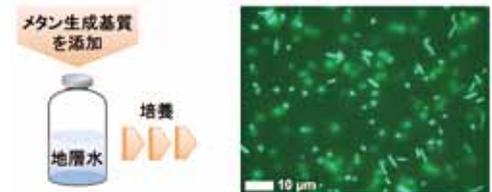


図1 地層水の培養実験で観察された様々なメタン生成微生物 (蛍光緑が細胞)。

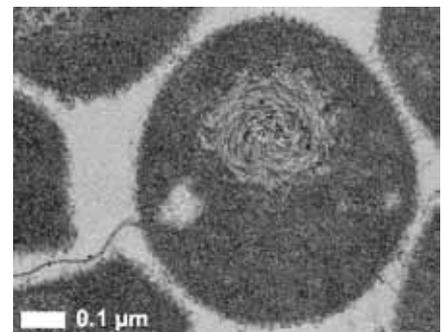


図2 ガス田から発見された新種メタン生成微生物の電子顕微鏡写真。

### 成果概要

環境中のメタン菌のバイオマスや活性を定量的に見積もるバイオマーカー分子としての利用を目指して、メタン生成補酵素 F430の超高感度定量分析法を開発した。質量分析計による分析法を開発したことにより、従来の検出法の10万倍の高感度化を実現し、海洋堆積物など、様々な環境試料中から補酵素 F430を検出することを可能にした。

開発した手法を海洋掘削堆積物に応用し、下北半島沖の海底下約2,000mの石炭層から補酵素 F430の検出に成功し、最も深い地下生命圏にメタン菌が存在することを示した。

### 研究内容

メタン (CH<sub>4</sub>) は二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の20倍以上の温室効果ガスであると同時に、メタンハイドレートや、天然ガスの主成分でもある。つまり、メタンは地球温暖化やエネルギー資源に直結する物質であり、メタンの循環を定量的に明らかにすることは、人類社会の持続的発展に極めて重要な問題である。海洋は地球上で最も大きなメタンの生成場であると同時に最大の濃集場である。海洋堆積物では、海洋表層の光合成を起源とする有機物の分解によりメタンが生成され、10<sup>13</sup>トンものメタンがメタンハイドレートとして蓄積している。

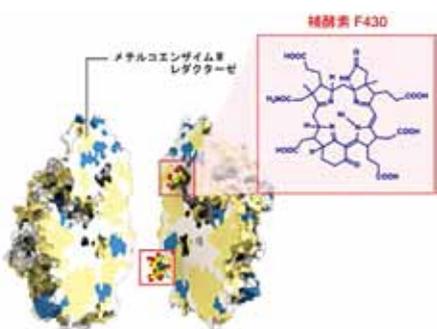
このメタン生成にはメタン生成アーキア (メタン菌) が大きく関与しているため、海洋環境におけるメタン循環を解明するには、メタン菌の分布や活性を定量的に明らかにすることが肝要である。従来、分子生物学的手法や膜脂質バイオマーカー分析などのアプローチにより研究が進められてきたが、海底堆積物中のメタン菌のバイオマスや活動を定量的に調べることはおろか、生きたメタン菌を検出することさえ極めて難しい状況であった。

そこで、環境中のメタン菌のバイオマスや活動を定量するための画期的なバイオマーカー分子としての利用を目指して、メタン生成の鍵酵素であるメチルコエンザイム M レダクターゼの補酵素 F430の超高感度定量分析法を開発した。高速液体クロマトグラフィー / 質量分析法により従来の吸光光度計による検出感度に対し、約10万倍の高感度化を実現し、0.1フェムトモルの定量検出を可能にした。これにより、海洋堆積物など、様々な環境試料中から補酵素 F430を定量的に検出することを可能にした。本成果は誌上发表により公表した。

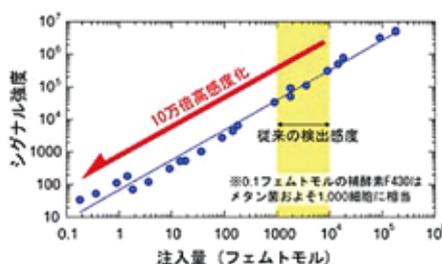
統合国際深海掘削計画 (IODP) の第337次航海で調査された下北半島沖の海底下約2,000m に位置する石炭層における微生物活動を解明する目的で、開発した補酵素 F430の超高感度定量分析法を応用し、石炭層に現在活動中のメタン菌が存在することを明らかにした。これにより、約2,000万年前に形成された石炭層中の有機物に支えられた生態系が海底下 2 km という科学掘削史上最も深い海洋堆積物中に存在することが示された。この成果はサイエンス誌上にて公表した。

### 研究成果はどう使われるか

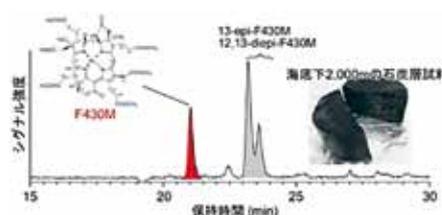
直接的なアプローチが困難な海洋堆積物のような環境におけるメタン菌のバイオマス分布や活性に関する一次情報を提供し、次世代エネルギー資源であるメタンハイドレートの形成プロセスの解明や、海底下の炭素循環、地下生物圏におけるメタン菌の役割の理解への貢献が期待される。また、地球外の天体におけるメタン菌の探査にも有効な手段になると期待できる。



メタン生成の鍵酵素とその活性部位として2カ所に組み込まれている補酵素 F430



高速液体クロマトグラフィー / 質量分析法における補酵素 F430の検出感度



統合国際深海掘削計画第337次航海により下北半島沖の海底下約2,000mから採取された石炭試料中の補酵素 F430

## 水溶性天然ガス田における微生物によるメタン生成ポテンシャルの評価

地圏微生物研究グループ  
吉岡秀佳  
hi-yoshioka@aist.go.jp

### 成果概要

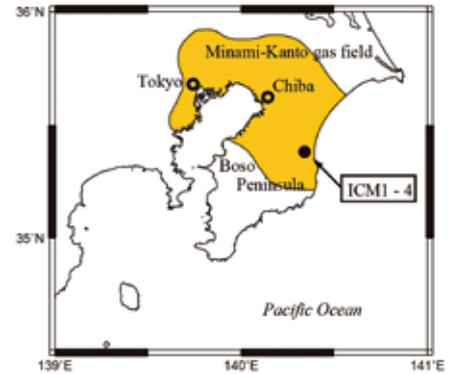
水溶性ガス田における微生物によるメタン生成活性を評価する目的で、ガス田地域のコア堆積物を用いてトレーサー実験を行い、活発なメタン生成速度を検出した。コア堆積物と地層水を混ぜたスラリー試料を、嫌気条件で長期間培養することにより、最大で堆積物中の全有機炭素の18%に相当するメタンが生成した。

### 研究内容

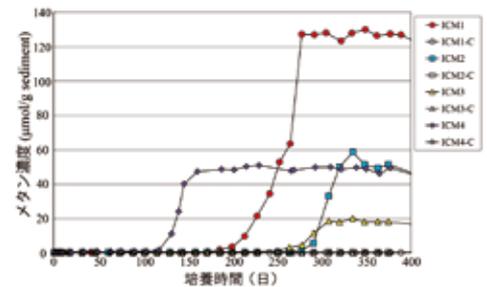
東京から千葉県にかけて分布する水溶性ガス田（南関東ガス田）には微生物起源のメタンが含まれている。ガス田地域の地下微生物によるメタン生成ポテンシャルを評価する目的で、千葉県で採取されたコア堆積物を用いて<sup>14</sup>Cでラベル化した基質を添加してトレーサー実験を行い、微生物によるメタン生成速度を評価した。その結果、活発なメタン生成活性を検出し炭酸還元反応が主要なメタン生成経路であることが分かった。また、コア堆積物と地層水を混ぜてスラリーにして、嫌気条件を保ち原位置に近い温度で長期間培養すると、活発なメタン生成が起った。最大で堆積物中の全有機炭素量の18%に相当するメタン量を生成し、地下微生物による高いメタン生成ポテンシャルを示した。以上の成果を、2015年に国際学術誌に原著論文\*として発表した。  
\* Chemical Geology 419, 92-101.

### 研究成果はどう使われるか

天然ガス田の成因を解明するための基盤情報として利用される。地下微生物のガス田への影響評価や、天然ガスの生産技術の開発に役立つ。



水溶性ガス田の分布



コア堆積物を用いた培養試験のメタン濃度変化

## 油ガス田鉱床を形成するメタン生成微生物群の分離培養と生態解明

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

### 成果概要

微生物起源のメタンの寄与が大きいと地球化学的に推定される水溶性天然ガス田や油ガス田の貯留層中に、現在も活性を保持した多様なメタン生成古細菌が存在していることを明らかにした。さらに、新種のメタン生成古細菌やメタン生成古細菌が利用する水素や酢酸などを供給する新種の細菌についても分離同定を行った。これにより、環境中における微生物の生態を推定した。

### 研究内容

油ガス田を形成した微生物によるメタン生成プロセスの解明を目的として、細菌および古細菌の遺伝子による群集構造解析、マイクロコズムを用いた長期嫌気培養、メタン生成古細菌などの新規嫌気性微生物の分離同定を行っている。対象としている油ガス田は地下1,000m前後にあり、数万~百数十万年地表から隔絶された特殊な環境である。そのような油ガス田には地表の微生物とは系統的に異なる様々な微生物が存在していることをこれまで明らかにしている。

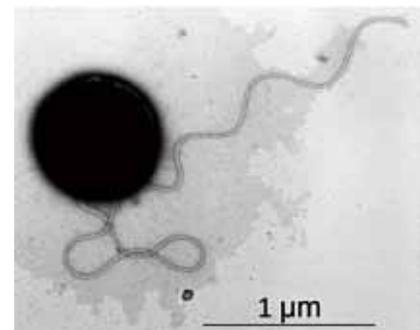
微生物の分離同定を行い、性質を明らかにすることにより、地下深部油ガス貯留層環境における新たな物質循環経路が推定可能となる。分離培養した微生物同士の共生による新たな物質利用可能性も含め、微生物の生態を解明している。

### 研究成果はどう使われるか

油ガス田の地下環境における生物学的メタン生成プロセスに関する情報は、油ガス田の成因解明や資源ポテンシャル評価に活用される。貯留層中の微生物を活性化してメタンガスを増産する技術や原油をメタンに変換し回収する技術の開発にも利用される。



寒天培地上のメタン生成古細菌のコロニーとガス



水溶性天然ガス田から分離したメタン生成古細菌

### 成果概要

全く新しい原油増進回収法として注目される油層微生物を利用した原油のメタン変換回収法を開発するために、油層環境におけるメタン生成メカニズムの解明を行った。深部地下油層環境においては酢酸からのメタン生成反応が卓越していることや、そのメタン生成経路はCO<sub>2</sub>地中貯留技術によるCO<sub>2</sub>圧入によって変化することを明らかにした。

### 研究内容

油層環境におけるメタン生成メカニズムを明らかにするために、独自に開発した高温高圧培養システムを用いて油層試料の培養実験を行った。その結果、油層水に含まれる酢酸からのメタン生成反応が観察され、その反応に関与する微生物群を特定した。また、この油層環境における酢酸からのメタン生成反応にCO<sub>2</sub>地中貯留技術によるCO<sub>2</sub>の圧入が及ぼす影響を調査した結果、酢酸からのメタン生成活性が2倍以上に促進されることを明らかにした。その時、酢酸からのメタン生成に関与する微生物群は劇的に様相を変化させることを明らかにした。

### 研究成果はどう使われるか

この研究の成果は、油層環境に限らずこれまで未知であった深部地下環境のメタン生成メカニズムを理解する1つの重要な知見である。地下環境におけるメタン生成メカニズムを明らかにすることで、地圏微生物を活用するエネルギー資源開発に貢献する。



八橋油田における油層試料のサンプリング



CO<sub>2</sub>地中貯留が及ぼす油層環境のメタン生成経路への影響

## 粘土系吸着剤による低温再生型蓄熱剤の開発

地圏化学研究グループ  
鈴木正哉  
masaya-suzuki@aist.go.jp

### 成果概要

様々な省エネシステムが開発されている中、さらなる低温での廃熱を利用したシステムの開発が求められている。そのような状況の中、粘土系吸着剤（ハスクレイ®）を用いた100℃以下の低温廃熱の利用に適応可能な熱利用技術の確立に向けた実証試験を、NEDO 事業にて平成26年12月より開始した。現在企業 5 社を含む 6 社での共同研究にて、実証試験を進めている。

### 研究内容

低コストで100℃以下の低温再生性に優れた水蒸気吸着剤が求められている中、非晶質アルミニウムケイ酸塩からなるハスクレイ前駆体に塩類を担持させ、ハスクレイと同等の吸着性能を有する吸着剤の開発に成功した。このことによりコスト的に1,000円/kg以下での提供が可能となり、実用化に向け大きく前進した。またこれまででは粉体での検討しか行っていなかったが、造粒体での製造方法の開発も行い、蓄熱槽での利用を可能とした。実証試験では、今年度100kgの吸着剤を用いたシステムを、来年度前半には2tonの吸着剤を用いたシステムでの検討を行う予定で進めている。今後は吸着速度の向上を検討するとともに、60～80℃程度のさらなる低温排熱の利用に向けた吸着剤の開発を進めていく。

### 研究成果はどう使われるか

低温で再生可能な優れた水蒸気吸着剤を低コストでの提供を可能とすることで、100℃以下の低温廃熱を利用した省エネルギーシステムの開発に貢献することが期待される。



ハスクレイ造粒体



ハスクレイの合成 (10L)

## 水道水等から発生する軽質非メタン炭化水素とその除去法

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

### 成果概要

現在、高分子の有機物を分解するため紫外線発生装置等を装着した市販の純水製造装置はあるものの、軽質の非メタン炭化水素を除去できる装置は、ほとんど無い。そこで、通常の蒸留水や水道水を用いた場合、どの程度の非メタン炭化水素が発生するか、また、どのような処理をすれば非メタン炭化水素を除去できるか調査を行ったので、結果を報告する。

### 研究内容

水道水・イオン交換水をそのまま使用した場合には明瞭に非メタン炭化水素の放出が観察された (ppb オーダー)。蒸留水を使用した場合には低濃度ながら非メタン炭化水素の放出が観察された。水道水・蒸留水を市販のポットで沸騰後数時間保温しそれをステンレス製容器に移して一晩おいたものでは、ほとんど軽質炭化水素の放出は観察されなかった。蒸留水で軽質炭化水素の放出が観察されたのは、蒸留後に蒸留水がたまるポリタンクに原因あるためと推定される。

このように、ポットでの加熱が非メタン炭化水素の除去に有効であることが明らかになった。このような方法は簡便であり、脱軽質炭化水素水の生成方法として有効であるものと考えられる。

### 研究成果はどう使われるか

軽質炭化水素を含まない水が必要な場合に、簡便に脱軽質炭化水素水を生成できる。また、炭化水素のみではなく一般的な脱ガス水の生成にも有効であることが予想される。



水から放出される  
非メタン炭化水素測定に用いた、  
空気中非メタン炭化水素測定システム

成果概要

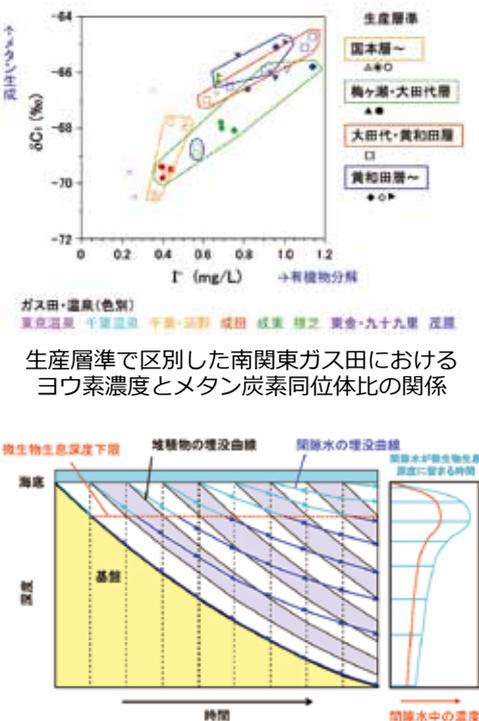
微生物起源の水溶性天然ガス鉱床の形成には、微生物の活動場が時間・空間的に保持されることが重要である。地質学的には長期間に渡る堆積と圧密が大きな役割を果たし、濃集には貯留層年代の数倍～十倍以上の時間が必要となる。濃集後の広域的な隆起による減圧がガス相での移動を誘導し、堆積盆地内でのガスの集積に影響を与える。

研究内容

南関東ガス田を対象とした研究では、メタンはCO<sub>2</sub>還元経路で生成し、その炭素同位体比が茂原周辺では-66～-65‰に集中することが明らかとなった。これは有機物分解に伴って供給されるCO<sub>2</sub>量と微生物が生成するメタンの量の割合がほぼ一定の下で、同位体分別を受けたものと解釈できる。上総層群中の主要貯留層の年代は約200～60万年前であるが、鹹水のヨウ素129年代として約5千万年前の値が報告されている。後者の値は過大と考えられるが、堆積物より間隙水の年代が古いという説は否定できない。圧密により間隙水は浅い堆積物中に留まり続け、長い地質時間をかけて少しずつメタンやヨウ素を濃集したと考えられ、水溶性天然ガス鉱床には特定の根源岩は存在しない。通常型でも飽和ガス水比を超える坑井が存在することは、隆起による減圧で生成したガス相が、現在も移動していることを現している。

研究成果はどう使われるか

水溶性天然ガス鉱床を対象とした研究は、海底下のガスハイドレートの成因解明に応用される。また近年、海外では微生物起源の構造的ガス田が海底下で発見されており、新たな探鉱ブレイの基礎資料として利用される。



生産層準で区別した南関東ガス田におけるヨウ素濃度とメタン炭素同位体比の関係

堆積盆地の進化と圧密に伴う浅層堆積物へのメタン、ヨウ素濃集モデル

研究シリーズ紹介

ガスハイドレート安定条件の実験的測定と統計熱力学モデルの構築

成果概要

次世代の天然ガス資源と期待されるメタンハイドレート等のガスハイドレート(ガス水和物)について、その生成温度・圧力条件を実験的に測定している。さらに実験結果に基づき、様々な化学組成のガスハイドレートの安定条件を予測するガスハイドレートの統計熱力学的モデルを構築している。

研究内容

ガスハイドレートは、メタン等の比較的小さなガス分子と水分子から構成される化合物で、水分子の形成する籠状の結晶格子にガス分子が取り込まれた構造をもつ包接化合物である。近年、日本近海等の大陸縁辺部の海域でメタンのガスハイドレートが大量に存在することが推定され、次世代の天然ガス資源として注目されている。ガスハイドレートの安定条件は、ガス組成や水の溶存成分により変化することが知られており、当グループではこれまで、メタン、エタン、プロパン等の炭化水素や二酸化炭素等のガスと、塩類やアルコール等を添加した水溶液から生成したガスハイドレート安定条件を実験的に測定した。一方、実験結果に基づいて、それらの安定条件を予測するガスハイドレート統計熱力学モデルの構築も行っている。

研究成果はどう使われるか

ガス混合や水への化学成分の添加によって安定条件が変化することを利用して、メタンハイドレートの分解促進や、天然ガスの貯蔵・運搬、二酸化炭素の分離等の工学的利用に資する基礎データを提供します。

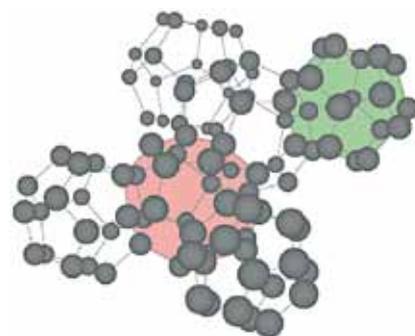


図1 ガスハイドレートの結晶構造(構造I型)

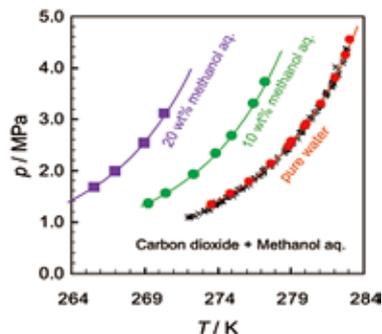


図2 ガスハイドレートの安定条件(二酸化炭素+メタノール水溶液)

成果概要

イオン交換能を有する粘土鉱物に着目し、有害元素の吸着性や還元特性、耐酸性などの機能性評価を行うとともに、機能性粘土鉱物の新たな合成法の開発にも取り組んだ。陽イオン吸着能を持つハロイサイトによるセシウムイオンの吸着性評価や、耐酸性に優れた陰イオン交換性ハイドロタルサイトの合成に関して成果を得ることができた。

研究内容

陽イオン交換能を有するハロイサイトは、ナノチューブ状の特異な形態を持つことから機能性粘土鉱物として注目される。ハロイサイトは花崗岩や火山灰の風化などによって生成し、環境中には広域に存在する鉱物であることから、福島県の放射性物質汚染の現状把握に関連する研究として、ハロイサイトに対するセシウムイオンの吸着性と吸着サイトの評価を実験的に行った。

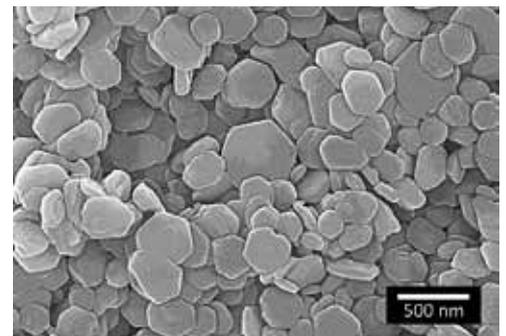
陰イオン交換能を有するハイドロタルサイトは複数の金属元素の水酸化物からなる層状粘土鉱物であり、金属元素の組み合わせを設計することで合成を行うことが可能である。幅広い環境条件下で陰イオン吸着材として利用することを目的に、溶解性を抑えた安定性の高いハイドロタルサイトの合成を試み、結晶構造中に鉄を含有するハイドロタルサイトの合成法の確立に至った。

研究成果はどう使われるか

粘土鉱物の新たな機能性を評価する研究を通して、粘土鉱物の環境浄化資材や省エネルギーに資する材料としての利用分野の開拓を行い、さらに国内の未利用資源の活用にも貢献していくことが期待される。



天然におけるハイドロタルサイトの生成



合成した鉄含有ハイドロタルサイトのSEM像

ESR 年代測定による熱履歴解析

成果概要

地熱変質帯や石英脈など、過去の熱水活動の痕跡がある場所で、多数の試料について ESR 年代測定を実施した。複数回の熱水活動があったこと、外側ほど見かけ年代値が古いことなどが明らかになった。また、破碎帯と推定される狭い通路を熱水が通っていたらしい痕跡を検出した。

研究内容

ESR (電子スピン共鳴) 法を用いた放射年代測定は、普遍的に存在する鉱物である石英を直接測定できること、比較的低温の加熱でリセットされる (他手法の閉鎖温度に相当) ため熱水活動の解析に適用しやすいこと、などの利点がある。得られる年代値は、リセット温度以上に加熱された場合は冷却年代、加熱が十分でない場合は見かけ上それより古い年代を示す。広い範囲から多数の試料を採取して系統的に測定することにより、冷却年代の分布を明らかにし、熱水系の規模や形状、冷却速度などを評価することが可能となる。

研究成果はどう使われるか

過去の熱水系の特徴に基づいて現在の熱水系の状態を推定し、地熱開発の初期段階におけるターゲット選定および資源量・貯留層評価、また放射性廃棄物地層処分における影響評価などへの応用が期待される。



Fig.1 複数回の熱水活動を示す石英脈

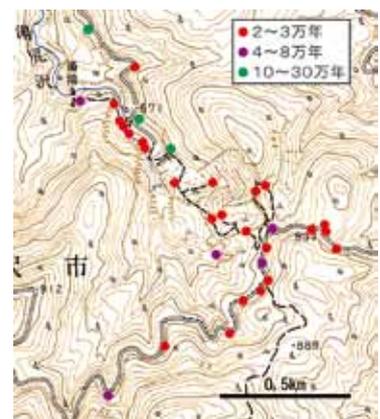


Fig.2 地熱変質帯の冷却年代分布

### 成果概要

経産省委託事業や当部門競争 Grant 予算で、当グループでは海洋の様々な対象に適した電気・電磁探査法の開発や適用研究を実施している。シーズ研究としての鉛直電極配置型電気探査法の基礎研究、放射性廃棄物地層処分に係わる地質環境評価のための浅海域電磁探査法の開発と適用、日本海での表層型メタンハイドレート分布把握のための人工信号源電磁探査調査を実施してきた。

### 研究内容

当部門地下水研究グループと連携し、波浪による揺動の影響を受けにくく、小型作業船でも運搬可能な浅海域電磁探査システムを開発し、北海道幌延沿岸域で適用実験を行い、海底下50m から250m 程度の深度に比較的高比抵抗を示す淡水性帯水層が沖合10km にまで延びていることを発見。また当部門燃料資源地質研究グループとの連携で、近年石油探査を目的に利用されている曳航型人工信号源電磁探査法を日本海で適用し、マウンドやポックマークという特異的な海底地形の周辺で厚さ100m 程度の高比抵抗層の存在を特定。それらがサブボトムプロファイラによる音響学的プランキング発生箇所と整合しており、メタンハイドレートの存在を示唆していることを示した。さらにグループ内で新規に鉛直電極配置型探査法を考案し、その理論研究や駿河湾における現場実験を実施し、海底下表層探査への適用可能性を見出した。

### 研究成果はどう使われるか

浅海域電磁探査システムは、地層処分に關する適地選定の概要調査のツールとして、さらには沿岸海域における二酸化炭素の地中貯留に關連した地下深部帯水層調査に貢献できると考えている。また他の手法も海底熱水鉱床調査や海底地盤調査に適用可能となるよう研究を継続する予定である。



苫小牧沿岸域における浅海域電磁探査システムの中投下の様子。



曳航型人工信号源電磁探査法の電流送信源。

### コンクリート中の水を原位置で 非破壊計測できる磁気共鳴スキャン技術

### 成果概要

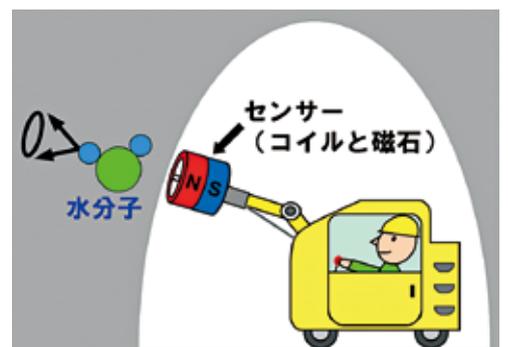
老朽化したコンクリート中の空洞や亀裂にたまった水は、鉄筋を腐食させたり凍結で亀裂進展を引き起こす危険があることから、インフラ診断では水の検出が重要になる。プロトン磁気共鳴は水の特異的に検出できるユニークな計測技術であり、それを土木現場で使用することができるならば、インフラ診断ツールとして期待できる(イラスト参照)。われわれは、トンネルのような巨大な物体の表面から数 cm 深部を原位置・非破壊でスキャンするため、磁気共鳴センサーを搭載したプロトタイプを開発した。

### 研究内容

開発したプロトタイプ(写真参照)のセンサー部分は、片側開放型という珍しいタイプの磁気回路と平面型の高周波コイルから構成され、探査深度は約3cmで、1回の計測にかかる時間は数十秒である。現在、探査深度を向上させるべく、磁気回路のデザインを改良中である。この装置の特徴は、①どんなに大きい物体でも、切断せずにその表面から数 cm 深部を原位置で計測できること、②水や油やゴムであれば検出・計測可能であり、用途は土木建築物等のインフラ診断にとどまらず、水素を含む流体分子・ゴム分子の物理化学的環境に着目した食品や農産物の品質管理、ヒトや家畜の診断にも幅広く応用できる点である。

### 研究成果はどう使われるか

- ・トンネルや道路の内部にたまった水の原位置・非破壊定量計測
- ・食品や生きた家畜・魚の脂肪および水分含有量の非侵襲分析(たとえば肉用牛の霜降りの計測)



実用機のイメージ(トンネルで使用)



開発したプロトタイプ

成果概要

従来の IP 法電気探査より正確に地質や鉱床タイプの識別が可能な SIP 法電気探査の実用化を目的として、岩石や土壌の複素比抵抗の周波数依存性を高精度に測定するシステムを構築した。そして、金属鉱山や粘土鉱山などから採取した種々の岩石・土壌の複素比抵抗や、金属鉱物や粘土鉱物を混合させた人工試料の複素比抵抗を測定し、SIP 法電気探査から岩石や土壌を識別するためのデータを蓄積中である。

高倉伸一・中田孝二・村上浩康 (2013) セリサイトの複素比抵抗測定, 物理探査, 66,119-125.

高倉伸一・佐々木裕・高橋武春・松隈勇太 (2014) 黄鉄鉱粒子と磁鉄鉱粒子を含む人工試料の複素比抵抗測定, 物理探査, 67,267-275.

研究内容

SIP 法電気探査は複数の周波数の交流電流を用いて、地下の複素比抵抗（比抵抗と位相）の分布を求める手法である。そのデータを解釈するためには、岩石や土壌の複素比抵抗の周波数依存性を知ることが必要である。そこで、実際の岩石や土壌のサンプルの複素比抵抗を高精度に計測するシステムを構築した。計測装置には、英国ソーラトロン社のインピーダンスアナライザ1260とガルバノ/ポテンシオスタット1287を使用している。本装置は4電極法により $10^2\Omega$ から $10^6\Omega$ までという広範囲の交流抵抗（インピーダンス）が測定できるので、導電鉱物を多く含む良導体の鉱石や含水粘土鉱物から絶縁体に近い未変質母岩や乾燥岩石まで適用できる。また、測定周波数範囲は $10^{-5}\text{Hz}$  から $10^6\text{Hz}$  までと広帯域なので、SIP 法の一般的な周波数範囲 ( $10^{-2}\text{Hz} \sim 10^3\text{Hz}$ ) を十分にカバーする。さらに、Zplot という専用の計測ソフトウェアを使用することにより、定電圧や定電流で精密な複素比抵抗の自動測定ができるという特長を有している。

岩石や土壌の複素比抵抗測定では、電流電極や電位電極の試料への設置方法が重要であることから、図1のような岩石コア用のサンプルホルダーや図2のような土壌用のサンプルホルダーを製作した。また、電位電極の分極の影響を抑制するため、銅-硫酸銅水溶液を含ませた濾紙を組み合わせた銅網電極、KCl 水溶液で飽和させた濾紙でくんだ銀-塩化銀線電極、直径2~5mm程度の銀-塩化銀電極などを作成している。しかし、測定する試料は大きさや形が様々であり、ポーリングコアは半割あるいは1/4割で保存されているものも多いので、実際の測定では試料に合わせて、サンプルホルダーや電極は使い分けられている。

経済的に価値のある金属鉱物や粘土鉱物の量が岩石の複素比抵抗に及ぼす影響を定量的に評価するため、各種鉱物を含有させた人工サンプルの複素比抵抗を計測している。これまで、銅、鉛、亜鉛などの金属精鉱、黄鉄鉱や磁鉄鉱などの金属鉱物粒子、セリサイトやスメクタイトなどの粘土鉱物の粉末を、適当な大きさのガラスビーズと決められた濃度の塩水に混合させ、含有量による複素比抵抗の変化を測定してきた。一例として、銅精鉱を混合させた人工試料の比抵抗と位相の周波数依存性を図3に示す。ここで、ガラスビーズは直径0.1mmのものを、間隙水には濃度0.01mol/lのKCl水溶液を用いた。この図より、1kHz以上の周波数帯で、含有量が増えるにつれて高周波数側で比抵抗が下がり、位相が大きくなるのがわかる。また、位相が極大になる周波数があることがわかる。これらの特徴を正確に知ることにより、SIP 法電気探査によって銅を含む鉱物の識別が可能になると判断される。

研究成果はどう使われるか

本研究の成果によって、各種岩石がもつ複素比抵抗の周波数依存性が明らかになれば、地表探査である SIP 法電気探査によって、地下構造を構成する岩石や土壌を識別する可能性が高まる。特に鉱床探査においては、目的とする鉱物の存在量を推定できるようになると期待され、結果として試錐成功率の向上そして探査費用の軽減に貢献する。また、岩石や土壌の比抵抗のデータは電気・電磁探査データが求める比抵抗構造の解釈にも利用することができ、電気・電磁探査の多くの分野への有効利用に寄与すると期待される。

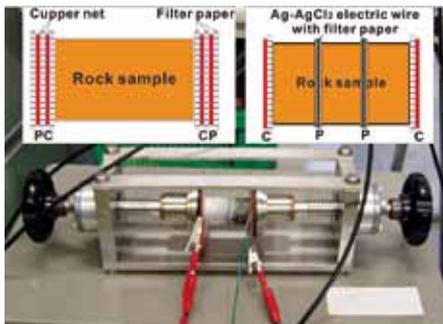


図1 岩石コア用サンプルホルダー

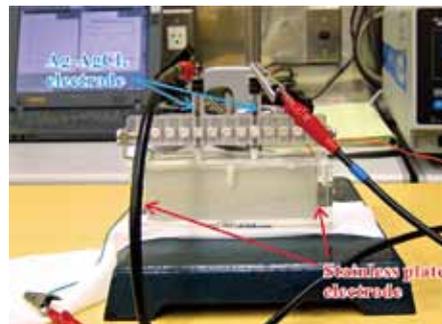


図2 土壌用サンプルホルダー

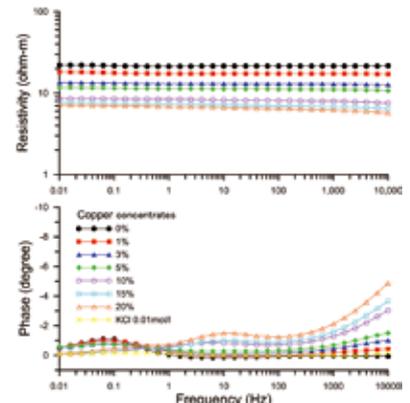


図3 銅精鉱を混合させた人工試料の複素比抵抗測定結果（上：比抵抗，下：位相差）。

成果概要

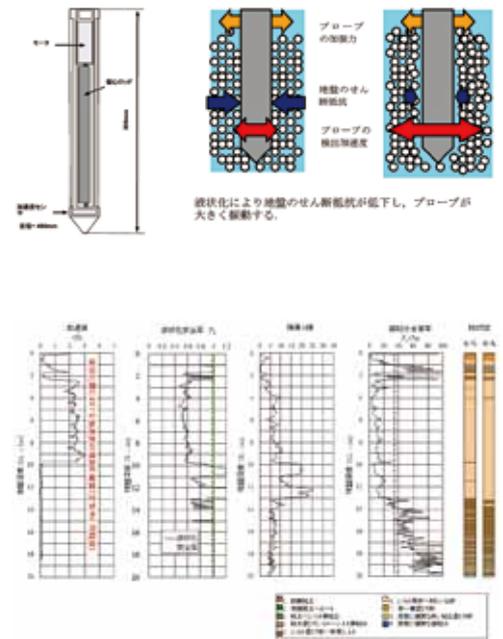
バイプロコーン貫入試験は、標準貫入試験や三成分コーン貫入試験のような静的な試験法と異なり、プローブ内の振動機構で、地盤に人工的な振動を加えることによって、地盤が液状化するかを確認する原位置動的試験法である。本研究では、バイプロコーン貫入試験を利根川下流域の液状化被災地で実施し、液状化層の地盤剛性の消失に伴うプローブ加速度の増加を確認した。

研究内容

液状化現象は、地盤が繰り返しせん断応力を受けることで、緩い砂層がせん断変形を起こすことに起因する。バイプロコーンの周囲の液状化地盤は、繰り返しせん断応力を受けることで、間隙水圧の上昇によって有効応力が喪失し、せん断抵抗が大幅に低下する。この場合、地盤の剛性が喪失（液状化する）ことから、プローブが大きく振動し、その加速度から地盤が液状化するかどうかを判断することができる。本研究では、東日本大震災で多大な液状化被害を受けた利根川下流域の被災地および地質的な特徴のある地点において、一般的な液状化調査に使われる三成分コーン貫入試験と同時に、バイプロコーン貫入試験を実施した。その結果、液状化層と考えられる深度において、明確なプローブ加速度の増加を確認した。

研究成果はどう使われるか

従来の液状化評価手法（地盤の強度や細粒分含有率によって液状化判定を行う）に加え、原位置において地盤液状化の発生の有無を直接確認することができるため、より詳細で確実な液状化判定を行えるようになる。



成果概要

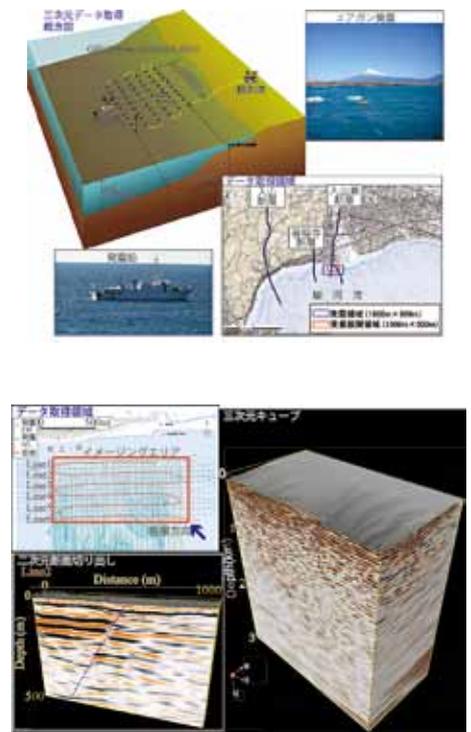
沿岸域～浅海域の地下構造および堆積環境を知る事は、地下水流動を考える上で非常に重要である。しかしながら、物理探査データの取得を考えた場合、沿岸域～浅海域は陸域、海域双方からのデータ取得が困難である。本研究では、富士川河口浅海域において、小規模な三次元反射法適用実験を実施し、地下構造を三次元的に捉えることができた。

研究内容

資源エネルギー庁委託研究「地層処分共通技術調査：海域地質環境調査確証技術開発」の下、沿岸域での調査評価技術に着目して、沿岸域海底下の特徴的な地質環境の調査確証手法の開発を行うことを目的とした研究を実施している。本研究では、静岡県静岡市の富士川河口浅海域において、OBC (Ocean Bottom Cable: 海底設置型受振器ケーブル) 受振器を面的に設置し、エアガン震源で面的に発震し対象領域の海底下を三次元的に捉えることを目的とした、小規模な三次元反射法適用実験を実施した。その結果、地下の三次元イメージを得ることができた。その結果、地震調査研究推進本部(2010)で推定された入山瀬断層走向位置に西傾斜約60度の東落ち逆断層が捉えられた。その走向傾斜や地質構造を三次元的に把握することが可能となった。

研究成果はどう使われるか

沿岸域～浅海域における三次元的な地質構造モデルおよび水理地質モデルの構築に使用可能であり、沿岸域に建設予定の放射性廃棄物地層処分場などの施設周辺の水理特性を知るためのシミュレーションの入力データを提供される。



### 成果概要

活発な噴気・温泉を有する台湾北部・大屯 (Tatun) 火山群における広域地熱系の把握の一環として、表層比抵抗分布の推定を目的とした VLF-MT 調査を行った。得られたデータを地球統計学的視点から検討した結果、地熱異常に対応する低比抵抗領域・新鮮な溶岩ドームに対応する高比抵抗領域・それ以外の領域で、データの連続性に有意な違いがあることが明らかになった。

### 研究内容

大屯火山群は歴史時代の噴火記録が無い一方で、地表には高<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He を有する噴気・高<sup>34</sup>S の硫酸酸性泉が広く分布しており、地下のマグマの関与が指摘されている。本研究では、深部から供給される高温流体の放出経路を把握するため、VLF-MT (22.2kHz) による表層比抵抗調査を行った。調査は、本火山群を中心におおよそ15km×15kmの領域に渡り、比抵抗データ数は約300である(図1)。データ間距離に対するデータ値の相関性(図2)を検討するツールの1つである Indicator variogram を用いて解析し、得られた比抵抗データの地球統計学的特徴の抽出を試みた。variogram の形状的特徴から、比抵抗データは、連続性 (range) の小さい順に10Ωm 以下の領域(地熱異常域に対応)、1,000Ωm 以上の領域(溶岩ドームに対応)、10-1,000Ωm の領域に大別されることが分かった。

### 研究成果はどのように使われるか

これらの情報を利用することで今後、地球統計学的視点に基づく大屯火山群の表層比抵抗分布が得ることが可能となる。この分布は、本火山群の広域地熱系の発達過程を考察する上で重要な拘束条件になることが期待される。

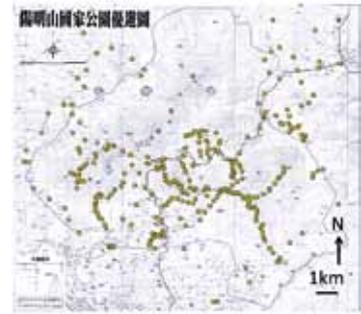


図1 VLF-MT 観測点 (黄色丸印)

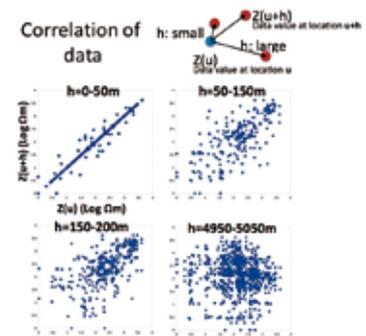


図2 データ間距離に対するデータ値の相関性のイメージ

## 自然電位法による CO<sub>2</sub>挙動のモニタリング

CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ  
西 祐司  
y.nishi@aist.go.jp

### 成果概要

地下に圧入した CO<sub>2</sub>の監視技術として現存の手法を補完する受動的モニタリング手法の研究を進めてきた。特に、自然電位 (SP) モニタリングの研究を分担し、米国の大規模 CO<sub>2</sub>圧入テストサイトにおいては CO<sub>2</sub>圧入時モニタリングを継続中している。さらに、SP モニタリングを国内 CCS サイトへ適用していくために必要な沿岸域でのノイズ観測を苫小牧において開始した。

### 研究内容

CO<sub>2</sub>の分離回収・貯留(CCS)において地下に圧入した CO<sub>2</sub>のモニタリング(監視)技術の一つとして、自然電位 (SP) モニタリングの研究を分担してきた。CO<sub>2</sub>地中貯留に伴い、地下の CO<sub>2</sub>の流動に伴う流動電位と、坑底近傍の酸化還元電位の変化によって抗井周囲に発生するジオバッテリー効果により、地表における SP の変化が期待される。後者をターゲットとして、米国の大規模 CO<sub>2</sub>圧入テストサイトにおいて圧入された CO<sub>2</sub>が実際に到達すると予測される観測井の近傍においてモニタリングを実施している。さらに、沿岸域への展開が推測される国内 CCS サイトへこの SP モニタリングを適用していくために、沿岸域でのノイズ特性の把握を目的とした観測を苫小牧において開始した。

### 研究成果はどう使われるか

CCS のモニタリング手法の一つとして、常時監視の実現とトータル・コストの低減のために併用されるモニタリング手法となり、CCS の普及に役立ち、最終的には地球温暖化抑制に貢献することを目指している。



米国大規模 CO<sub>2</sub>圧入テストサイトにおける SP モニタリング



苫小牧における SP モニタリング：  
抗井電位測定部分とデータロガー収納部

## 超伝導重力計による高感度重力モニタリング手法

CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ  
杉原光彦  
m.sugihara@aist.go.jp

### 成果概要

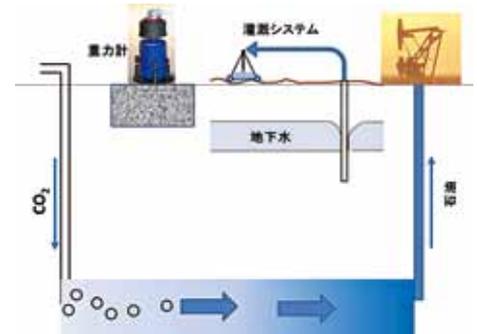
地下に圧入する CO<sub>2</sub>のモニタリング (監視) 技術として、超伝導重力計を用いた高精度重力連続計測の適用を試行した。米国テストサイトでの実績に基づいて、苫小牧のテストサイトでの適用も開始した。CO<sub>2</sub>地中貯留モニタリング法として、また地熱貯留層評価等への適用可能性の研究成果を国際研究集会で発表した。

### 研究内容

米国 DOE/NETL の下に SWP (炭素隔離のための南西部パートナーシップ) が実証事業を実施中の EOR テストサイトで、超伝導重力計 (SG) による高感度重力連続観測を試行した。SG を CCS に実際に適用したのは世界初であるが、2 台の SG による並行測定が効果的であることも確認した。この実績に基づいて、苫小牧の CCS サイトでも SG を導入して連続観測を試行中である。苫小牧では海岸近傍という厳しい環境下での安定な観測維持とノイズレベルの大きいデータの解析が課題であるが、ポータブルな観測システムの評価も行っている。一方で、地熱貯留層の変動探査への適用可能性も検討している。SG や、その評価にも使用する絶対重力計 (AG) の計測技術については、国内関連機関との共同観測も行っている。国際研究集会等で研究成果を発表した。

### 研究成果はどう使われるか

超伝導重力計による高感度連続重力観測は、CO<sub>2</sub>の安全かつ長期間にわたる貯留を保障するためのモニタリング技術として適用されることが期待できる。また地熱貯留層変動探査や地下水モニタリングへの適用も期待できる。



米国テストサイトにおける  
重力モニタリングの概念図



苫小牧テストサイトに設置した  
超伝導重力計 (右端)。  
左端は圧入井掘削リグ。

成果概要

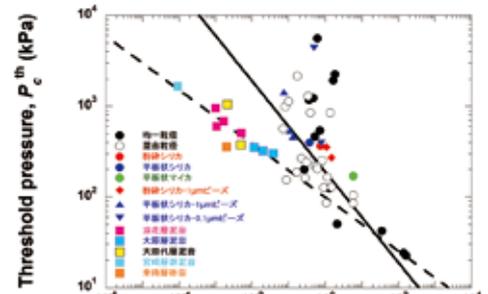
CO<sub>2</sub>地中貯留の安全性評価に関連して、砂泥互層におけるCO<sub>2</sub>挙動シミュレーションのための地質モデリング技術の構築を目指し、互層システム全体での遮蔽性能に関する検討を行った。ここでは、砂泥互層を特徴づけるパラメータとして各岩層の毛管圧(スレッシュホールド圧)に注目し、スレッシュホールド圧と試料内部の粒子構造および浸透率の関係のモデル化を図った。

研究内容

CO<sub>2</sub>地中貯留における砂泥互層の遮蔽性能を評価するために、地下1,000mを模擬した温度、圧力条件(10MPa, 40℃)において、超臨界CO<sub>2</sub>に対するスレッシュホールド圧 $P_c^{th}$ の測定を行った。この際に、岩石の $P_c^{th}$ のばらつきに対して経験的な制約を与えるために、内部構造を制御した焼結体を作製し、種々の試料について $P_c^{th}$ と浸透率 $k$ の関係を求めた。今回は特に、粉碎シリカ、平板状シリカおよび平板状マイカからなる焼結体を対象として、 $P_c^{th}$ - $k$ の相関性に対する粒子形状および鉱物組成の効果を検証した。その結果、これらの試料は、これまでに取得してきた岩石の測定値に対する近似直線、および最密充填直線のいずれとも異なるトレンドを有することが示された。このことは、粒子形状が $P_c^{th}$ - $k$ の相関性に影響を及ぼし得ることを意味している。



マイカ焼結体の走査電子顕微鏡観察像



焼結体および岩石における $P_c^{th}$ - $k$ の相関性

研究成果はどう使われるか

各種岩石に対応した $P_c^{th}$ - $k$ の相関関係は、限られたコア試料から得られた現場の $P_c^{th}$ の妥当性の検証のみならず、CO<sub>2</sub>地中貯留の数値シミュレーションに際しての地質モデルの構築において有用なデータセットとなる。

CO<sub>2</sub>地中貯留研究

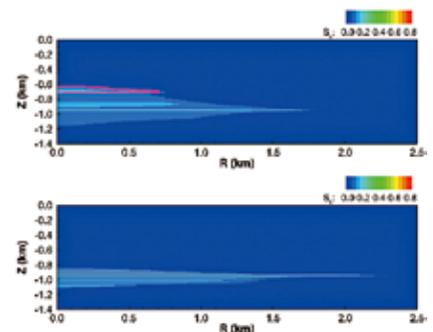
一貯留層や堆積物層中における二相・三相流動シミュレーション

成果概要

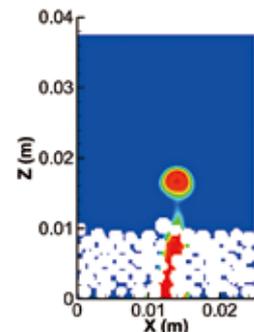
CO<sub>2</sub>の分離回収・貯留(CCS)における安全性評価研究として、長期挙動シミュレーションを行い、CO<sub>2</sub>の地中圧入に伴う砂泥互層特有の挙動やその予測に重要なパラメータを評価した。シール層の特性について実験データに基づいた長期挙動への評価を行うと共に、層の内部構造による影響を解析した。また、海中への漏出について、海底堆積物中の固気液三相流動モデルの開発を進めた。

研究内容

CO<sub>2</sub>の圧入に伴う浸透率や毛管圧と言ったシール層の遮蔽特性変化について、実験データに基づいた数値モデルを構築しシミュレーションによって長期挙動に与える影響を評価した。また国内の貯留層候補となる砂泥互層について、層の内部構造(細分互層・二重孔隙構造など)による移行特性への影響を解析した。更に国内の主要な地中貯留の対象が海底下地中貯留であることを踏まえ、海中漏出におけるCO<sub>2</sub>の溶解・拡散に大きく影響する気泡形成について、未固結の海底堆積物中におけるCO<sub>2</sub>-水-砂礫粒子の固気液三相流動シミュレーターの開発を進めた。また CCS や地球科学の大規模国際研究集会である GHGT-12 (10月米国) や AGU Fall meeting (12月米国) での研究発表など、成果発信に努めた。



砂泥互層の細分互層構造によるCO<sub>2</sub>移行特性の差異



未固結層中におけるガスみち・気泡形成

研究成果はどう使われるか

CO<sub>2</sub>地中貯留における長期的な安全性を確保するための評価技術・情報を提供し、CO<sub>2</sub>地中貯留の実用化による地球温暖化の緩和に貢献することが期待される。

## 成果概要

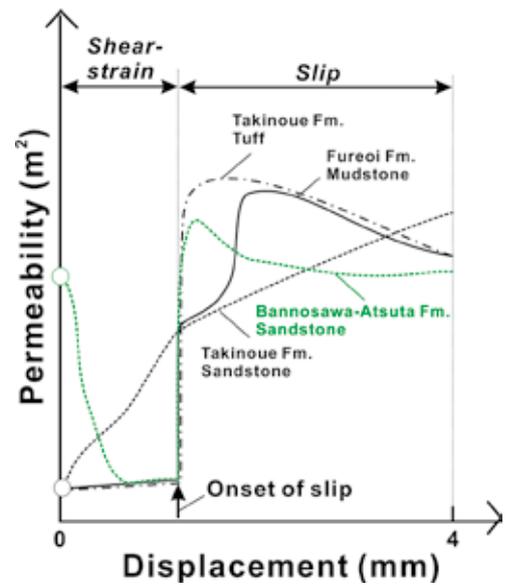
本研究で対象とした泥岩や砂岩のような軟岩の場合には、岩石の変形と浸透率変化の関係に対し、必ずしも花崗岩等の硬岩で報告されてきた直線性が認められる場合のみではなく、より複雑な傾向も見られることが明らかとなった。それらの違いは、形成されたせん断面上の凹凸に依存したスムージング挙動の違いによるものと推測された。

## 研究内容

本研究では、岩石の三軸圧縮試験により、せん断帯を発達させながら浸透率の測定を実施した。また、実際の貯留層へのCO<sub>2</sub>圧入に伴う地圧変化を想定し、せん断帯形成後には、応力緩和過程、および有効圧変化過程が、岩石の浸透性に及ぼす影響を調べた。本研究の特徴としては、せん断帯を発達させるため、プレカット入りの金属スペーサで試験片を挟み込んだことである。このことにより、岩石内に一枚のせん断帯を確実に発達させることが可能となり、それに伴いき裂や断層を有する地質モデリングの簡便化を図ることも可能となった。

## 研究成果はどう使われるか

本研究で明らかとなった軟岩の変形と浸透率変化の関係を定式化することで、水理-力学連成解析に関連したCO<sub>2</sub>地中貯留のための軟岩の精緻な地質モデリング手法の構築が期待できる。



成果概要

実汚染現場の地質環境特性及び汚染物質の物理・化学的特性を考慮し、低コスト・低環境負荷といった観点から複合汚染対策技術の開発を重ねてきた。特にケミカルフリーまたは極微量の無機電解質を利用した電気化学的手法による重金属類の浄化、自然由来汚染を含む重金属類の不溶化ならびに環境微生物を利活用した多種揮発性有機化合物 (VOCs) の同時・完全分解技術を確立した。

研究内容

土壌汚染の殆どが重金属類と VOCs で占めていることを念頭に、どの種類の汚染物質による汚染に対しても適用できるように体系的に研究開発を実施してきた。また、「土壌汚染対策法」の改正やリニア中央新幹線及びオリンピック開催に向けたインフラ整備などに伴う自然由来汚染の対策ニーズを背景に、自然由来重金属類の存在形態及び長期的溶出特性を日本各地から採取してきた70地点以上の試料で評価し、有用な知見を取得した。重金属類に対しては、ケミカルフリーまたは極微量の無機電解質を利用した電気化学的手法による原位浄化、オンサイト洗浄または不溶化技術を確立した。VOCs に関しては、微生物による PCE, TCE, cis-DCE, 塩化ビニルモノマー (VC), ジクロロメタン (DCM), ベンゼン及びトルエンによる複合汚染の完全分解技術を確立した。

研究成果はどう使われるか

実汚染サイトの条件に応じた最適な浄化、または対策手法の選定ならびに施工条件の設計に適用可能である。とりわけ、土壌汚染の殆どを占める重金属類と VOCs の両方の対策技術を有し、任意のサイトに柔軟に適用可能である。



図1 電気化学的手法による洗浄水（泥水）の処理技術

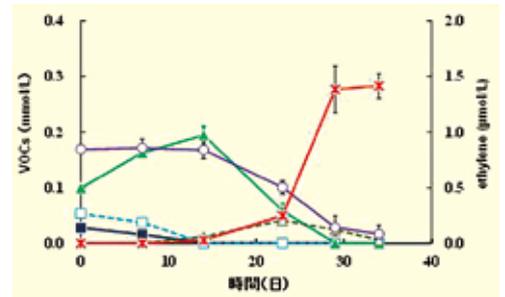


図2 微生物による複合汚染物質の分解事例

人力小規模採掘のリスク管理に関する研究

成果概要

「人力小規模採掘」とは、発展途上国の貧困層が、稚拙な道具を持って鉱産地帯に入り込み、個人的に鉱物を採掘する現象を指す。対象となる鉱物は様々だが、金を採る場合、英語では“Artisanal/small-scale gold mining”と呼び、“ASGM”と省略する。その実態は場所ごとに異なる上、水銀汚染の拡大、児童労働、事故、密輸など、さまざまな問題が複雑に絡み合っており、各国政府はその対策に苦慮している。本研究は、リスクマネジメントの方法論を中心に据え、多岐にわたる問題群を、ハザードとリスクに整理して、解決のためのシナリオを見出す事を目的としている。

研究内容

具体的には、タイ、フィリピンおよびモンゴルをフィールドとして、人力小規模採掘および小規模鉱業による負の側面を調査し、リスク科学の観点から、解決に向けた提案を行っている。タイの鉛鉱山跡地では、尾鉱の量が多いにもかかわらず、水系の鉛汚染が進んでいない事を確認し、国際誌に報告した。フィリピンでは、ASGM と農地の接点で、農作物が受ける被害の記載を行うため、岩手医科大学および日本アイソトープ協会と、分析法の技術開発を行っている。モンゴルでは、ASGM による環境汚染全般を調査し、井戸水が汚染されているが他に水源がない村については、リスク評価の結果を応用して、使用に耐える井戸の同定を行った。

研究成果はどう使われるか

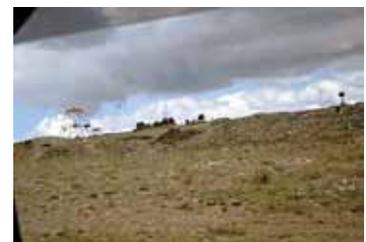
2013年に熊本県で外交会議が開催され、「水銀に関する水俣条約」が採択・署名されたが、これに呼応して、各国は、今後の水銀の流通や使用について、管理体制を強化する。わが国はこの動きをリードする事になるが、本研究はその基礎情報を与えるものである。



タイの鉛鉱山跡における調査



フィリピンにおける調査



モンゴルにおける人力小規模採掘

### 成果概要

CO<sub>2</sub>地中貯留技術 (CCS, Carbon Capture Storage) の応用技術である「枯渇油ガス貯留層に自然に存在するメタン菌を利用した資源創成型 CCS (Bio-CCS)」のリスクと便益の評価を明らかにする目的で次の研究を行った。CCS サイトおよび Bio-CCS サイトにおける漏洩事故の環境インパクトおよび産業安全面のリスクの評価を行った。また、CCS と Bio-CCS の温暖化防止技術としての便益に基本的な考察を加えた。その結果、CCS 技術と比較の上での Bio-CCS 技術の基本的な安全性と有用性を確認した。研究成果を取り込み、CO<sub>2</sub>地中貯留 (CCS) やその応用技術 (Bio-CCS) のサイト評価プログラムを開発し、公開した。

### 研究内容

石炭火力発電所で燃焼によって発生する CO<sub>2</sub>や、天然ガス・石油等の精製所から精製の工程で発生する CO<sub>2</sub>を処理して温暖化ガス排出を削減する手段として、CO<sub>2</sub>地中貯留技術 (CCS, Carbon Capture Storage) が期待されている。地下深部のかん水層や枯渇したガス油田が主な CO<sub>2</sub>貯留層と想定されている。近年、眞弓らは国内の油ガス貯留層内に自然に存在する嫌気性の特定の微生物のメタン生成能力が、CO<sub>2</sub>分圧の上昇によって活性化されることを見出した。これは枯渇油ガス田を対象とした CCS サイトにおける、原位置でのメタンガスの生産、すなわち天然ガス資源創成の可能性を示唆するものと言える。このような地下環境における微生物活動を考慮した新たな資源創成型の CCS 技術を我々は「Bio-CCS 技術」と名付けた。

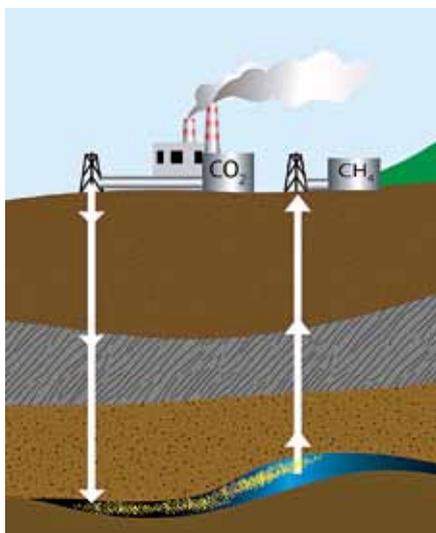
Bio-CCS 技術の基本的な有用性を把握するには、微生物によるメタン生産量と CO<sub>2</sub>固定量をはじめとする諸元を定量的に評価し、そのリスクと便益とを把握する必要がある。そこで、我々は次の取り組みを実施した。まず、地層モデルに地下微生物の働きを組み込み、CCS プロセスにおける地層モデルの挙動とメタン産出ポテンシャルの評価を行った。その結果を基に、CO<sub>2</sub>地中貯留にかかわるサイト周辺の環境インパクト評価および産業安全面のリスクアセスメントを行った。さらに、CO<sub>2</sub>地中貯留サイトの地下の貯留層・地表・注入井坑口周辺の大気環境をとりあげて、大気拡散シミュレーションから CO<sub>2</sub>漏洩のリスクの評価を進めるとともに、CO<sub>2</sub>地中貯留サイト評価プログラムを開発した。

### 研究成果はどう使われるか

現代文明の維持には CO<sub>2</sub>の排出が不可避であると言っても過言ではない。人間生活に不可欠な電力の相当部分は化石燃料の燃焼による火力発電でまかなわれ、大量の CO<sub>2</sub>が発生している。また、社会建設に必須の材料であるセメント製造においても、大量の CO<sub>2</sub>が発生している。地球上の市民社会の拡大に伴って CO<sub>2</sub>排出量は増加傾向にあり、地球温暖化が一層加速するのではないかと危惧されている。

このような中で、「CO<sub>2</sub>地中貯留 CCS」は現代文明が必要とするエネルギーと材料を生産しながら地球温暖化を防止する、持続可能な温暖化対策となりうると目されている。「CO<sub>2</sub>地中貯留」は、発電所やセメント工場等の CO<sub>2</sub>の発生源で CO<sub>2</sub>を捕集・回収し、地中深くの貯留層に注入する技術で、CO<sub>2</sub>は岩石の組成に取り込まれて次第に固定されていくからである。しかし、現実には「CO<sub>2</sub>地中貯留」なかなか普及・浸透していかない。社会の一人ひとりがステークホルダーである環境問題は、一部の専門家だけの理解では解決できないためである。新たな技術概念のリスクと便益を定量的に評価し、リスクと便益のバランスが合理的な範囲に収まっていること、リスクはコントロールできる性質のものであることを明らかにすることは、社会に対する明瞭な説明の構築に不可欠である。

本研究は直接的には Bio-CCS の基本的な有効性を CCS との比較の上で定量的に示したものである。また、本研究の方法論は、温暖化対策技術と社会的な理解の形成に資する定量的な説明と、合理的な温暖化対策の構築に貢献しうるものであると言える。



Bio-CCS 技術のコンセプト



CO<sub>2</sub>地中貯留サイト評価プログラムの一画面  
メタン生成量の計算

成果概要

近年問題となっているヒ素やカドミウムなどの自然由来重金属類による汚染問題について、土壌からの重金属類の溶出機構について生物・化学的検討を実施した。その結果、酸化還元雰囲気や棲息する微生物群の相違により、土壌からの重金属類の溶出は異なっており、土壌汚染対策では棲息する微生物群の活動を適切に見極めることが重要であると考えられた。

研究内容

日本全国の鉱山周辺地域や温泉地帯などより採取した土壌や河川堆積物試料を用いた重金属類の溶出試験を実施した。その結果、ヒ素については嫌気的条件下、鉛については好気的条件下の場合の溶出量が多い傾向が認められた。また、土壌中に棲息する微生物反応を考慮した2ヶ月程度の長期溶出試験を行ったところ、土壌からの重金属類の溶出は微生物群の活動により促進される場合もあれば、逆に溶出させずに土壌中に留める場合もあり、土壌汚染対策では棲息する微生物群の活動を適切に見極めることが重要であると考えられた。また、土壌からの重金属類の溶出促進や不溶化促進に関与する微生物群の機能を適切に活用することにより、土壌からの重金属類の溶出挙動を制御できる可能性が見出された。



図1 採取した土壌試料

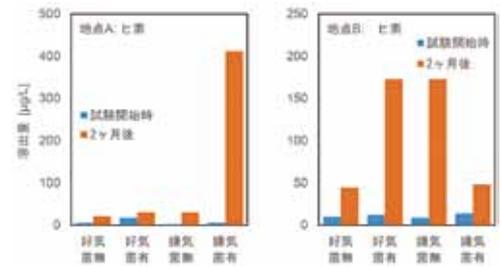


図2 微生物反応を考慮した土壌からのヒ素の溶出挙動

研究成果はどう使われるか

土壌中の微生物群を管理することにより農作物への重金属類の移行を抑制させることや、溶出促進を利用した土壌洗浄による重金属類の浄化など、新たな土壌汚染対策手法への展開が期待される。

地圏環境中有害重金属の移行におよぼす土壌中腐植物質の役割

成果概要

地圏環境中の有害重金属類の取り扱いにおいて、自然由来のものも含め、過剰な対策は緩和されることが望ましい。そこで、地質的な堆積環境の違いによる有害物質の保持特性を明らかにすることを目的とし、有機質堆積物に生じる砒素汚染を例に土壌中の腐植物質が土壌への砒素の保持および環境水中への移行にどのような役割を担っているかを明らかにした。

研究内容

有機質堆積物は、北海道立総合研究機構地質研究所の協力により、道内の有機質沖積層を提供頂いた。堆積物中の砒素存在形態は、堆積環境による違いが明確であり、氾濫源堆積物では平均3割ほどの砒素が有機結合態として保持されていた。さらに、腐植物質を主要成分ごとに抽出・分離し、保有する官能基と砒素の保持特性を調べたところ、不溶性のヒューミン、ホロセルロース・αセルロースを主体とする植物由来の腐植物質は、酸・アルカリ抽出後も砒素を強く保持し、砒素不溶化の役割を果たしていることが明らかとなった。一方、海成堆積物のように堆積時に海水影響を強く受けた堆積物ではフミン酸および親水性フルボ酸中の砒素濃度が高く、存在割合は微量であるが、環境水中への砒素の移行において大きな役割を果たしていることが示唆された。



図1 海成後浜湿地現場写真

研究成果はどう使われるか

腐植物質が有害物質の移行に及ぼす影響は、汚染物質の地圏環境リスク評価において重要な因子となるほか、不溶化媒体・運搬媒体としての役割を有することが明らかとなった各々の腐植成分は、今後環境調和型の環境修復材料への展開が期待できる。

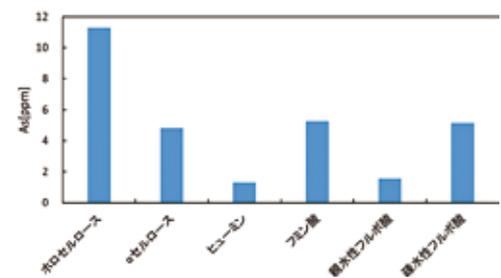


図2 海成堆積物中各有機成分の砒素含有量

### 成果概要

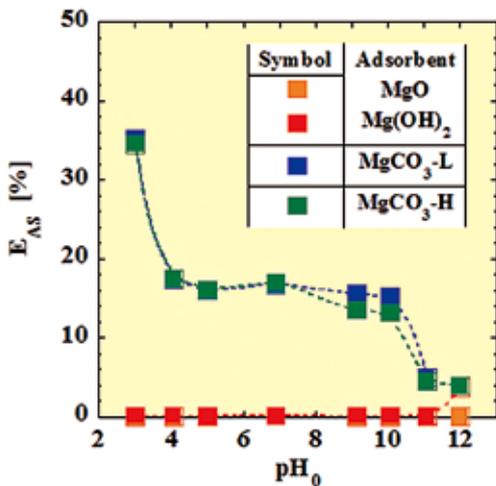
開発途上国の一部の地域では、ヒ素によって汚染された地下水を井戸から飲料水として直接的に摂取しているため、健康被害をもたらす可能性が高く大きな社会問題となっている。これまでの研究によって、ヒ素吸着材としてマグネシウム化合物が非常に有効であることが示されているが、ヒ素除去処理を行った後に残存する高濃度のヒ素を含んだ使用済吸着材は適切な回収処理が行われず、住居近辺に廃棄放置（不法投棄）される場合も多いと思われ、使用済吸着材からのヒ素の溶出による二次的な環境汚染等の懸念がある。そこで、使用済マグネシウム系吸着材を用いた溶出試験等を実施し、その結果に基づいて、“使用済マグネシウム系吸着材の環境安定性”の評価を行った。

### 研究内容

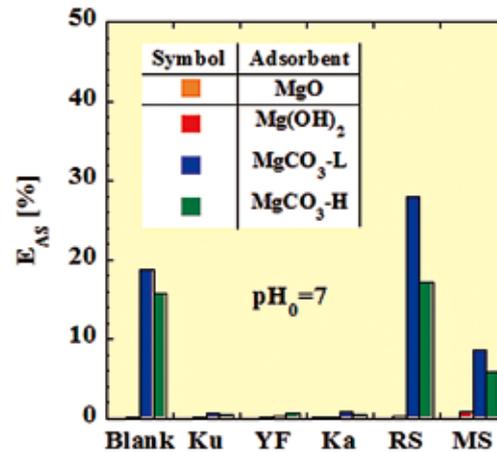
雨水や様々な pH を持つ土壌間隙水に曝された場合における使用済吸着材からのヒ素の溶出挙動について把握するために、広範囲な pH 領域の溶液を用いた溶出試験を実施した。さらに、土壌存在下におけるヒ素溶出挙動やヒ素汚染の拡大の可能性を検討するために、使用済吸着材と各種土壌を用いた混合振とう試験を実施し、“使用済マグネシウム系吸着材の環境安定性”を評価した。その結果、母材となるマグネシウム化合物の化学組成・形態によって吸着材に吸着したヒ素の安定性が大きく異なることが明らかになった。MgO 並びに Mg(OH)<sub>2</sub> に関しては、吸着したヒ素の安定性は極めて高く、酸性雨や河川水及び一般的な pH 範囲の地下水に曝された場合でもヒ素はほとんど溶出しないと考えられる一方、MgCO<sub>3</sub> に関しては、酸性雨に達しない中性付近の pH の雨水や、河川水あるいは地下水に曝された場合でさえ、容易にヒ素が溶出する可能性が極めて高いことが明らかされた。しかしながら、土壌の pH 干渉能が高いため、環境中で使用済吸着材と接触する一般的な溶液の初期 pH の影響は比較的小さいと考えられ、加えて、仮に不法投棄された場合でも使用済マグネシウム系吸着材からのヒ素溶出による土壌汚染の拡大リスクは、砂地を除けば極めて低いと予想される結果が示された。

### 研究成果はどう使われるか

ヒ素吸着材の選定にはヒ素除去能力のみならず、使用済廃棄物となった後のことも考慮に入れた環境安定性評価も極めて重要である。本研究の結果から、埋立廃棄処分や不法投棄リスクを考慮に入れたヒ素汚染水浄化用のマグネシウム系吸着材の母材としては、MgO 並びに Mg(OH)<sub>2</sub> が極めて優れていることが明確に示された。また、埋立廃棄処分の候補地として砂地を除くべきであることも提示された。今後、本研究成果に基づいた MgO 並びに Mg(OH)<sub>2</sub> を核とした新規ヒ素除去材の開発が大いに期待される。



使用済吸着材からのヒ素溶出に  
 及ぼす溶液 pH の影響



使用済吸着材からのヒ素溶出に  
 及ぼす土壌の影響

$pH_0$ : 初期 pH

$E_{AS}$ : ヒ素溶出率

Blank: 土壌なし

Ku: 黒ボク土

YF: 黄褐色森林土

Ka: 鹿沼土

RS: 川砂

MS: 山砂

成果概要

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

研究内容

開発した地圏環境リスク評価システム (GERAS) の社会実装に向けた取り組みとして、ある事業所において過去のメッキ作業工程において発生したカドミウム、クロムによる重金属汚染を対象として、当時の操業条件に基づき汚染物質の排出シナリオを構築するとともに、地下水濃度の長期モニタリング結果ならびに揚水による汚染物質の回収量を指標としたヒストリーマッチングを実施し、現在の汚染状況を数値シミュレーションにより再現することを可能とした。さらに、再現された汚染状況に基づく汚染の将来予測、揚水計画の策定や揚水井の適切な配置による浄化対策の効果の定量化を図ることで、当該事業所における汚染の自主管理に貢献している。

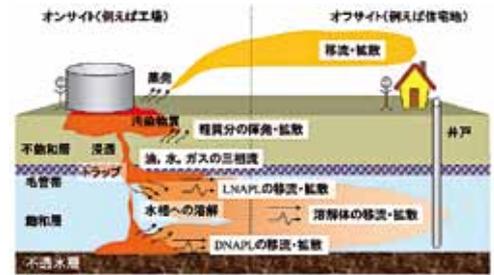


図1 土壌・地下水汚染の概念図

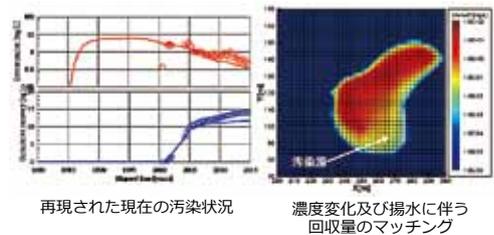


図2 ヒストリーマッチングによる現在の汚染状況の再現

研究成果はどう使われるか

地圏環境リスク評価システムの普及を通じて、汚染現場に即したリスク管理ツールとして、事業所等における自主的なリスク管理や土壌汚染対策のリスク低減効果の把握等への活用が期待される。

水中の放射性 Cs のモニタリング技術の開発・標準化など

成果概要

環境水中における放射性セシウムの動態及び長期にわたる移行特性を適切に測定・モニタリングするために、環境水中における低濃度の放射性セシウムを簡便かつ迅速に測定可能なプルシアンプルー通水・濃縮カラムの開発に成功を収めた。また、これらの技術を用いた福島県内の環境モニタリング、さらには各種水中の放射性 Cs モニタリングの標準化活動を行い、精度評価試験の実施および技術資料を作成した。

研究内容

環境水中の懸濁態放射性セシウムを回収する SS カートリッジ、水中の溶存態放射性セシウムを回収する亜鉛置換体プルシアンプルーカートリッジを開発し、20Lの水の固液分離・濃縮の前処理工程を8分でできる技術を開発した。従来、この前処理工程は6時間から1週間程度必要であり、大幅な前処理時間の短縮を可能とした。

また、本技術を用いて福島県内の阿武隈川等で水中の放射性セシウム濃度の環境モニタリングを行うとともに、多くの研究機関と本技術に関わる共同研究を実施し、本技術の普及に努めた。

さらには、本技術を含めた各種水中の放射性 Cs モニタリングの標準化活動として、産総研を事務局とする水中の放射性セシウムモニタリング技術資料検討委員会を組織し、国内外17機関が参加する精度評価試験の実施および技術資料の作成・公開を行った。

研究成果はどう使われるか

環境水中の放射性セシウムのモニタリングに使用されている。また、技術資料は、水中の放射性セシウムのモニタリングを実施している企業、研究所、大学等で参考資料としての活用が想定される。



写真1 亜鉛置換体プルシアンプルーカートリッジ



写真2 モニタリング装置 迅速くん

### 成果概要

土壌中汚染物質等の輸送・反応係数を評価する実験的手法では、理想的な試験系の構築と解析モデルの選択に十分な試験情報の把握が不可欠である。試験系の平衡・非平衡状態の把握を目的として、土壌ガスカラム試験を模擬した数値実験を実施し、間隙間ガス交換に起因する非平衡状態を検出するための試験条件を解析した。

### 研究内容

土壌汚染物質等の放出・吸着速度や間隙中の輸送係数を評価するための室内試験法の一つに土壌カラム試験がある。輸送・反応係数はカラム出口で観測された物質濃度の時間変化の解析により得られる。しかし、試験情報が不十分な場合、例えば試験系が平衡か非平衡か不明な時においては、解析に用いる輸送・反応モデルの選択を誤り、不正確な解析結果をもたらす。本研究では、土壌ガスカラム試験を模擬した数値モデルを使い、カラム長、間隙率、ガス流速、分散長、等の感度解析を実施し、土壌間隙間のガス交換に起因する試験系の平衡・非平衡状態を評価した。従来から注目されている反応時間スケールと移流時間スケールの比以外に、カラム内濃度分布や分子拡散係数が非平衡ガス交換の検出に対して影響があることが定量的に評価された。

### 研究成果はどう使われるか

本研究の成果は、土壌カラム試験の最適化や解析モデル選択時に要する事前情報として使われる。土壌汚染評価のための正確な輸送・反応係数の取得が期待される。

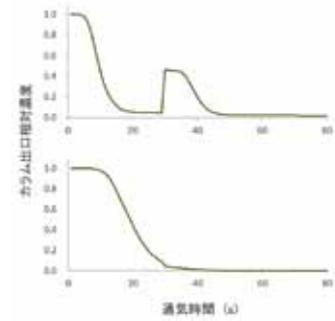


図1 カラム出口の濃度変化 (Flow-interruption法)。上：非平衡条件，下：平衡条件

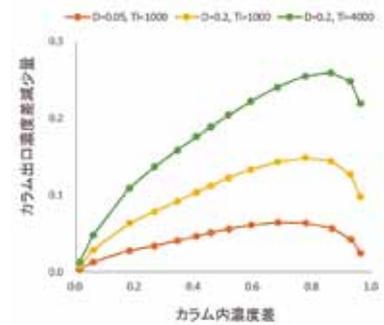


図2 分子拡散係数の影響。D: 分子拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、TI: 中断時間 (s)

### 成果概要

流体及び排水条件が岩石変形破壊に及ぼす影響を解明するための室内実験や、地下流体注入、ダムサイト、地熱地域における誘発地震の事例研究などにより、異なるスケールにおいて流体が関与する岩石物性、岩石破壊あるいは地震の発生メカニズム等の解明に資する研究成果が得られ、一連の論文として公表された。また、研究副製品として、ジオメカニクスモデリングにおいて一般的なフレームワークを構築し、さらに、それを実現するためのデータ解析等の研究ツール群を融合・集積した統合プログラムである GeoTaos を公表し、最新の研究成果を取り込み日々の改良と発展を行っている。

### 研究内容

室内実験、誘発地震・自然地震解析、数値シミュレーションなどを統合したマルチスケールアプローチにより、地下流体作用下岩盤の変形及び岩石破壊のメカニズム、その過程に伴う岩石物性の変化などに関する研究を遂行しています。室内実験研究では、多チャンネル弾性物性・水理特性・AE 震源等を同時計測システムの開発と整備を行い、これを駆使して様々な岩石試料を用いて、様々な条件下での岩石実験を系統的に実施している。注水誘発地震の研究では、特に中国四川盆地の天然ガス田やシェールガス開発現場での注水誘発地震に着目し、被害性地震の発生条件・誘発地震予測モデルなどの研究と技術開発を展開している。大スケールの自然地震の研究では、地熱活動地域の地震活動に集中し、地球潮汐・近辺及び遠隔の大地震への反応などを研究し、地下流体が地震発生に及ぼす影響の究明に努めている。

### 研究成果はどう使われるか

地下熱利用の高度化や CO<sub>2</sub> 地中貯留の実用化・安全性評価のための基礎的な成果とアプローチであり、関連技術開発に貢献することが期待される。室内岩石に実験に関する研究は、様々な研究プロジェクトに重要な役割を果たすとともに、国際共同研究などを通して外部研究者にも利用されている。統合プログラムである GeoTaos は、実験成果と力学 - 水理 - 熱連成解析の融合による岩石・断層の物性・水理・力学のモデル高度化に使用され、汎用的な地震データ解析及び断層シミュレーション等の研究ツールとして海内外の研究者にも使われている。



図1 野外調査において“大観”する様子



図2 GeoTaos 実行中画面

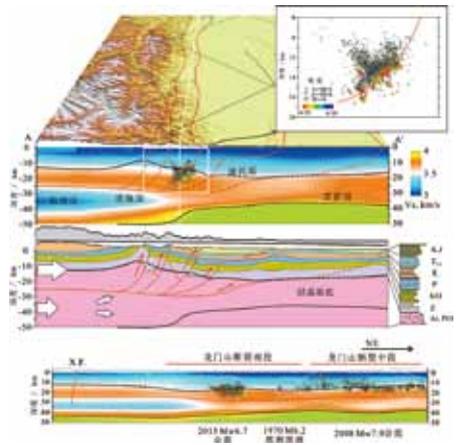


図3 GeoTaos による得た解析結果と図面 (Lei et al., 2013)

成果概要

CO<sub>2</sub>地中貯留の国内における実施に備え、CO<sub>2</sub>の圧入により岩盤を構成する岩石の力学的性質がどのように変化するかを、長期安定性評価の観点から明らかにするための室内岩石実験（三軸クリープ試験）を行っている。

研究内容

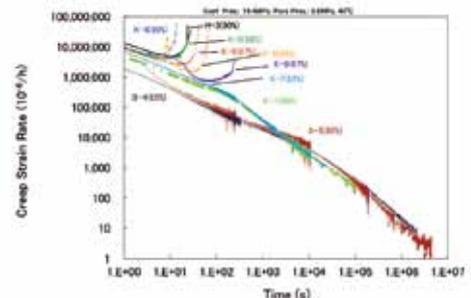
CO<sub>2</sub>の地中貯留における隔離期間は百～数百年と長期間に及ぶため、CO<sub>2</sub>圧入時の岩盤の長期的変形挙動について良く研究しておくことは重要である。そこでCO<sub>2</sub>の地中貯留においてシール岩としての役割が想定される泥岩を用いて、応力の変化に応じて経時的に生ずる変形の性質を調べる三軸クリープ試験を、地下環境を模擬した条件下で実施し、CO<sub>2</sub>圧入が長期変形特性に及ぼす影響について調べた。三軸圧縮強度の87～90%のクリープ応力の試験で、短時間でクリープ破壊に至るものが数例得られた。一方で86%以下のクリープ応力では相当長時間保持しても破壊する例がなかった。また破壊に至らなかった試料ではいずれも試験の途中から変形速度の低下率が大きくなる。わずかの載荷応力の違いでクリープ破壊するかしないかが遷移することが特徴的である。

研究成果はどう使われるか

CO<sub>2</sub>の地中貯留における貯留岩盤の長期的安定性を評価する上での基礎データとしての活用が期待される。



三軸載荷試験機



クリープひずみ速度の経時変化

多段階三軸圧縮試験の試み

成果概要

今回試みた多段階三軸圧縮試験は、封圧を5段階に変化させて載荷し、その大きさを5, 10, 15, 20, 25MPaとした。写真1に軸方向伸び計と周方向伸び計がセットされた供試体がMTS社製岩石コンクリート試験機にセットされた状態を示す。図1からは各封圧でのピーク強度に達するまでの時間にはばらつきが見られるものの、段階的な封圧の増加とピーク強度の検出、その後の封圧の増加とそれに続く軸荷重の載荷がスムーズに行われていることが分かる。

研究内容

今回、当研究室では、MTS社製の岩石コンクリート試験機 Model815を用いて、試験機付属の試験制御データ収集ソフトウェア「TestStar II」を用いた試験制御法のみで多段階三軸試験を試みてみた。

今回試みた多段階三軸圧縮試験は、各封圧での荷重載荷に際して、ある封圧でのピーク強度の判定方法は、試験中、ある一定の時間間隔で荷重データを収集して行く訳であるが、ある時間での荷重に対して次の時間での荷重が、今回の三軸圧縮試験に用いた荷重変換器（ロードセル）の測定容量である500kNの0.1%に当たる0.5kNを下回った時点でピーク強度を超えたと判断して、次の封圧に上げて、次の段階の荷重載荷を行うという方法で行った。なお軸方向荷重の増加の制御方法としては、比較的多くの試験で使用されていて実績がある、周方向ひずみ速度一定制御方法を採用した。試験に用いた岩石は、来待砂岩と呼ばれて流通している岩石を用いた。

研究成果はどう使われるか

本実験手法により得られる、岩石の内部摩擦角φや粘着力cを用いることで、岩石試験を行うための均一な岩石試験片を多数取得することが難しい露天掘り鉱山等の、超大残壁の安定性解析の計算に用いる事が考えられる他、やはり岩石試験に供するための円柱岩石試験片の取得が難しい、山岳トンネルの安定解析計算時などにも用いることができ、少ない試験回数で、有用な物理特性指標を得ることができる。



写真1 軸方向伸び計と周方向伸び計が装着された供試体がMTS社製岩石コンクリート試験機にセットされた状態

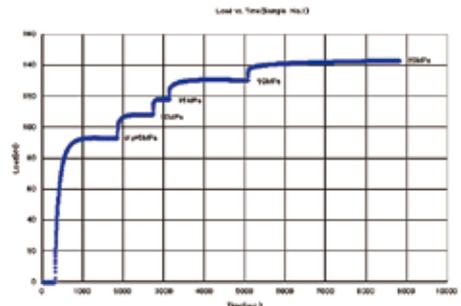


図1 多段階封圧試験時の軸方向荷重の時間変化

成果概要

強制湿潤状態の珪藻土を用いてニアフィールド環境を模した条件下で非排水条件の強度試験とクリープ試験を実施した。温度による载荷速度依存性の対比と強度特性・破壊挙動を検証し、クリープ試験におけるクリープ荷重の検討を行った。さらに、クリープ挙動における含水比が破壊にもたらす影響を明らかにした。

研究内容

強制湿潤状態の珪藻土を用いてニアフィールド環境（封圧10MPa，温度80℃）を模した条件下で非排水条件の強度試験とクリープ試験を実施した。また、比較のため常温（封圧10MPa，温度25℃）での試験も実施した。強度試験では、温度の上昇に伴い破壊強度は低下する事（図1）、破壊形態は延性破壊を示す事、変形係数は温度と载荷速度で差異が認められる事、クリープ試験では対数クリープ側が当てはまる事（図2）、破壊しない試験ではクリープひずみ速度がある一定値で留まりクリープひずみは増加し続ける傾向を示す事。クリープ試験における破壊寿命は含水比と相関関係にある事が明らかになった。

研究成果はどう使われるか

高レベル放射性廃棄物の地層処分においてシミュレーションに資する岩盤の力学的特性を提供し、クリープ特性のモデル化を行うことにより物質移動や地下水の影響などを加味したシミュレーションの高度化に貢献することが期待される。

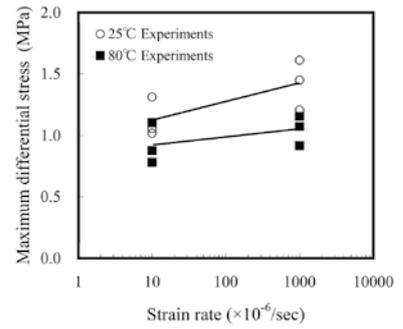


図1 三軸圧縮試験結果（温度25℃，80℃，封圧10MPa）

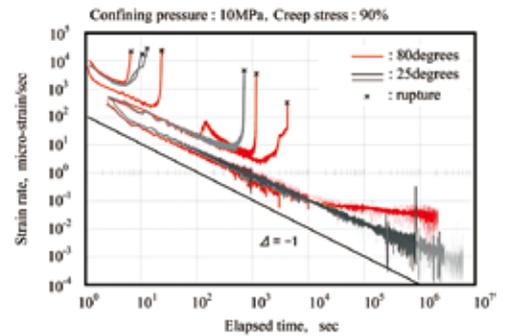


図2 クリープひずみ速度の経時変化

ビット摩耗状態の検知による坑井掘削技術の高度化

成果概要

坑井の掘削中にビットの摩耗状態をリアルタイムで評価できる技術を開発するため、パーカッションビット、PDCビットおよびローラコーンビットを用いて岩石の掘削試験を行った。これらの試験から得られたデータを解析した結果、トルクを計測することによりビットの摩耗状態を定量的に評価できることが解明された。研究成果は、International Journal of Rock Mechanics and Mining Science に投稿中である。

研究内容

研究内容の一例として、外径が66.0mmのPDCコアビットと沢入花崗岩（一軸圧縮強度：219MPa）を用いて行った掘削試験結果を図1に示す。この試験においては掘削速度を7cm/min一定とした。図から、掘削長の進展につれてPDCカッターの摩耗（逃げ面摩耗幅の最大値）が増大することがわかる。また、掘削長と逃げ面摩耗幅の最大値との関係は、三つの直線で近似できることもわかった。このような結果が得られる原因を検討するためにいろいろな関係を調べた結果、図2に示すようにトルクがビットの摩耗状態を定量的に評価できるパラメータであることが解明できた。

研究成果はどう使われるか

研究成果については、坑井の掘削中に坑底状況（ビット摩耗状態や岩石強度）をリアルタイムで検知できる評価システムの開発に貢献できると考えられる。このような評価システムは、坑井掘削の自動化にも寄与できると考える。

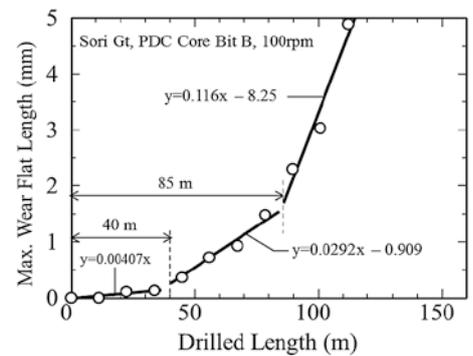


図1 掘削長とビット摩耗量との関係

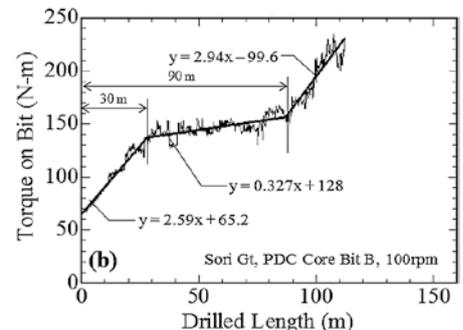


図2 掘削長とトルクとの関係

成果概要

PDC チップを有するパーカッションビットの掘削性能を室内試験によって評価し、従来、使用されている WC-Co パーカッションビットとの比較を行った。さらに試験結果を基に、掘削コストの試算を行い、PDC パーカッションビットの優位性を検討した。研究成果は、International Journal of Rock Mechanics and Mining Science に投稿中である。

研究内容

PDC チップおよび WC-Co チップを取り付けたパーカッションビットを用いて、2種類の花崗岩（沢入花崗岩および滝根花崗岩）を室内で掘削し、それらのビットの掘削性能を評価した。PDC パーカッションビットはチップのハイトロス（図1）とゲージロスがほとんどなく、WC-Co パーカッションビットと比べて耐久性や掘削速度に関して格段に優れていることが明らかとなった（図2）。また、ビットコストが高額な PDC パーカッションビットの場合でも、掘削長が大きくなると、ビットの交換回数が WC-Co パーカッションビットよりも大幅に削減できるため、工期の短縮が可能となり、掘削コストの削減が図れる可能性が見出された。

研究成果はどう使われるか

パーカッション掘削は、道路や鉄道などのトンネル掘削における前方探査や水抜き等を目的とした先進ボーリング、鉱山開発などにおける発破孔の削孔、土木工事等で使用される。本研究成果は、これらの掘削コストの削減に寄与すると考えられる。

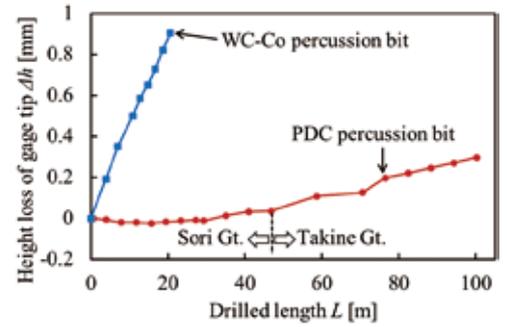


図1 ゲージチップのハイトロスと掘削長の関係

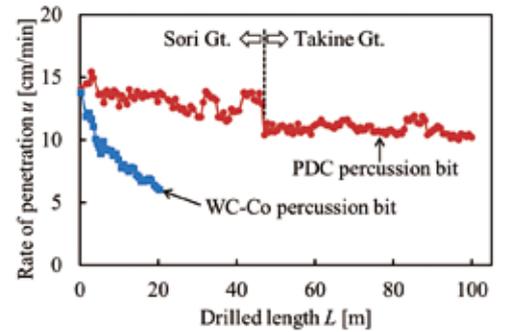


図2 掘削速度と掘削長の関係



平成27年12月10日発行

■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2015  
GREEN Report 2015  
AIST04-C00014-14