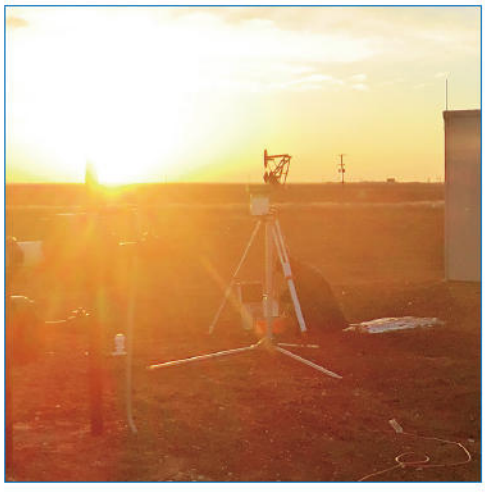
地圏資源環境研究部門 研究成果報告会

CO_2地中貯留の実用化に向けて
－技術課題と産総研の役割－



GREEN Report 2016

まえがき

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15回目となります．

本年度は，第４期中長期計画（５カ年）の２年目に当たります．第４期の研究面での特色は，産業技術政策の中核的実施機関として最先端研究・革新的技術シーズを事業化（民間企業による事業化）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ミッションとなっていることです．

産総研の７研究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とともに，GSJ 傘下の研究ユニットとして，「地圏の資源と環境に関する研究と技術開発」に取り組み，社会生活の改善と向上，さらには人類の持続可能な発展に貢献することをミッションとしています．第４期における当部門の具体的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ます．

①地下資源評価として，燃料資源，鉱物資源ならびに地熱・地中熱に関するポテンシャル評価と調査の実施．

②地下環境利用評価として，二酸化炭素地中貯留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．そのような流れの中で，気候変動対策である CO_2地中貯留技術に関して，これまでの研究成果を一元化し，民間企業への展開促進を狙いとして，2016年４月に当所は公益財団法人地球環境産業技術研究機構や民間４社とともに，「二酸化炭素地中貯留技術研究組合」を設立しました．そこで，今回の報告会テーマを「CO_2地中貯留の実用化に向けて ―技術課題と産総研の役割―」としました．招待講演として経済産業省産業技術環境局地球環境連携室長の松村亘氏をお迎えし，気候変動対策としての CCS 政策，並びに CO_2地中貯留実用化に向けた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，CO_2地中貯留実用化に向けた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も考えております．土壌汚染や地下水環境，鉱物資源，燃料資源，微生物，新材料・新技術の開発など，様々な研究成果の紹介を用意しています．

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います．今後とも変わらないご高配を賜りますよう，心からお願い申し上げます．

目　次

講演題目

13：30-13：35	開会のあいさつ		
13：35-14：00	地圏資源環境研究部門　研究紹介	研究部門長　中尾　信典	
14：00-14：40	【招待講演】 我が国の CCS 政策について	経済産業省　産業技術環境局 地球環境連携室長　松村　亘	8
14：40-15：10	産総研における CO_2 地中貯留技術開発 －地化学影響を考慮した長期評価－	CO2 地中貯留研究グループ長　徂徠　正夫	10
15：10-15：50	休憩・ポスターセッション		
15：50-16：20	CO_2 地中貯留のための 受動的モニタリング手法開発	CO2 地中貯留研究グループ　西　祐司	12
16：20-16：50	CO_2 地中貯留におけるジオメカニックモデリング	地圏メカニクス研究グループ長　雷　興林	16
16：50-17：20	CO2 地中貯留（CCS）のリスク評価と社会受容	CO2 地中貯留研究グループ　田中　敦子	18
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	22
鉱物資源研究グループの紹介	鉱物資源研究グループ長	高木　哲一	24
燃料資源地質研究グループの紹介	燃料資源地質研究グループ長	森田　澄人	26
地圏微生物研究グループの紹介	地圏微生物研究グループ長	坂田　将	28
地圏化学研究グループの研究紹介	地圏化学研究グループ長	鈴木　正哉	32
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	34
CO2 地中貯留研究グループの紹介	CO2 地中貯留研究グループ長	徂徠　正夫	38
地圏環境リスク研究グループの紹介	地圏メカニクス研究グループ長	張　銘	40
地圏メカニクス研究グループの紹介	地圏環境リスク研究グループ長	雷　興林	42

ポスター概要

^{17}O-excess の水文地質学への応用可能性　町田　功，小野昌彦，井川怜欧，松浦綾子，丸井敦尚　46

レーザーアブレーション ICP 質量分析計を用いた元素濃度イメージング　昆　慶明，横山隆臣　46

高精度 Mg 安定同位体分析手法の開発とその応用例　荒岡大輔，吉村寿紘，昆　慶明　47

世界の風化型希土類鉱床の品位と資源量　実松健造　47

ミャンマー DGSE の鉱物資源情報公開に対する技術協力について　大野哲二，Joel Bandibas　48

日本海表層型メタンハイドレートを対象とした AUV 音響探査　森田澄人，棚橋　学　48

最上トラフ冷湧水域における海底下温度計測　後藤秀作，沼波秀樹，佐藤幹夫，松林　修，石田直人，松本　良　49

表層型メタンハイドレート広域調査で得られた日本海及び北海道周辺海盆域の海底地形と後方散乱強度分布　佐藤幹夫，大井剛志，松本　良，弘松峰男　49

火山噴気中の水蒸気の遠隔同位体比測定法の開発　高橋幸士，角　皆潤，栗田直幸，中川書子　50

深部地下油層環境における生物的原油分解メタン生成メカニズムの解明　眞弓大介，玉澤　聡，玉木秀幸，鎌形洋一，坂田　将，五十嵐雅之，若山　樹，前田治男，米林英治，飯田剛史，大阪典子　50

石炭を天然ガスに変えるメタン生成菌を発見　眞弓大介，持丸華子，玉木秀幸，山本京祐，吉岡秀佳，鈴木祐一郎，鎌形洋一，坂田　将　51

無機多孔質材料における水蒸気の吸着速度　鈴木正哉，万福和子，星野谷亜衣，森本和也　51

水蒸気吸着性に優れた非晶質アルミニウムケイ酸塩の開発　森本和也，万福和子，星野谷亜衣，鈴木正哉　52

ベントナイトの性能評価手法の標準化研究　三好陽子，鈴木正哉，森本和也，高木哲一，月村勝宏，宮腰久美子　52

海底掘削試料の即時 IP 特性計測技術の開発　小森省吾，光畑裕司，高倉伸一　53

苫小牧沿岸域における電磁探査法適用調査　光畑裕司，上田　匠，小森省吾　53

日本海表層型メタンハイドレート分布域における海洋電磁探査法の適用　上田　匠，光畑裕司，横田俊之，小森省吾，森田澄人　54

Arsenic Removal from Arsenic Contaminated Water using Calcium Oxide and Hydroxide
（カルシウム酸化物及び水酸化物によるヒ素汚染水からのヒ素除去）
H. Sugita, T. Oguma, M. Zhang, J. Hara, Y. Kawabe, N. Yanagisawa　54

How Reliable Is the Laboratory Analysis of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Soil?
（土壌中 PCB の室内分析はどこまで信頼できるか？）
M. Zhang，M. Yoshikawa，J. Hara，Y. Kawabe，H. Sugita

アメリカにおけるグリーナー・クリーンアップの枠組み・標準ガイド化及び改正動向
張　銘，保高徹生，高畑　陽，古川靖英，川端淳一

湿潤及び乾燥建設発生土からの重金属類溶出特性比較　張　銘，山野辺純一，内田真理子

Stable Isotope Probing によるベンゼン，トルエン，ジクロロメタン複合汚染分解微生物の同定
吉川美穂，張　銘，栗栖　太，豊田剛己

環境微生物群の作用による土壌中重金属類の動態変化　川辺能成，須藤孝一　55

二酸化炭素吸着に伴う石炭の破壊強度の変化　竹原　孝，及川寧己，藤井孝志，雷　興林　55

富山城石垣と高岡城石垣の採石地を推定する　長　秋雄　56

FREA 地熱チームでの研究開発　浅沼　宏　56

地中熱ポテンシャル評価の高度化研究　吉岡真弓，内田洋平，シュレスタ・ガウラブ，石原武志，藤井　光，山谷　睦　57

会津盆地における地中熱利用ポテンシャル評価　シュレスタ・ガウラブ，内田洋平，吉岡真弓，金子翔平，藤井　光　57

知財・ソフトウェア紹介

高性能水蒸気吸着剤の開発　森本和也，万福和子，星野谷亜衣，鈴木正哉　*60*

施設園芸における二酸化炭素回収施用装置の開発　鈴木正哉　*60*

土壌中に存在するナノチューブおよびナノカプセルの合成と応用　鈴木正哉　*61*

論文リスト

64

講演題目

我が国の CCS 政策について

CCS Policy in Japan

経済産業省産業技術環境局地球環境連携室長：松村　亘
Director, Global Environment Partnership Office
Ministry of Economy, Trade and Industry:
Wataru Matsumura
e-mail: matsumura-wataru@meti.go.jp

1．地球温暖化対策としての CCS

（1）気候変動問題と気候変動枠組条約

IPCC 第 5 次評価報告書では，1950年代以降に観測された変化の多くは数十年から数千年間にわたり前例のないこと，20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因は人為起源の温室効果ガスの排出であった可能性が極めて高いこと等が示された[1)]．気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼさない水準で，大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させるためには，温室効果ガスの削減につながる具体的な行動を世界規模で速やかに開始することが必要である．

2015年にパリで開催された COP21では，全ての国が参加する公平で実効的な2020年以降の枠組みである「パリ協定」が採択された．パリ協定では，世界共通の長期目標として 2℃目標の設定，温度上昇を1.5℃までに抑える努力を追求することへの言及，主要排出国を含む全ての国が自国の決定する貢献（NDC; Nationally Determined Contribution）を 5 年ごとに提出・更新すること，市場メカニズムの活用等が規定されるなど，気候変動問題への大きな前進が期待されている．

（2）我が国の CCS 政策

CO_2の大規模な排出削減を可能とする CCS は，地球温暖化対策の重要な手段として世界的に期待されている．IEA（International Energy Agency）によると，2℃目標の達成するための CO_2削減量の13% を CCS が占めることが見込まれている[2)]．IPCC 第 5 次評価報告書においても，CCS無くして温度上昇を 2 度程度に抑えるためには，土地利用部門にて相当量の CO_2削減が必要である旨が示される等，CCS の必要性に言及している．

我が国では，エネルギー基本計画（平成26年 4 月）において，化石燃料の効率的・安定的な利用のための環境整備に向けて2020年頃の CCS 技術の実用化を目指した研究開発を進める方針が示されるなど，CCS 技術を重要な気候変動対策の一つとして位置づけている．経済産業省では，2020年頃の CCS 技術の実用化を目指し，CCS の大規模実証事業，CO_2貯留適地の調査，コスト低減や操業技術の向上を目指した研究開発を進めている．

2．我が国の CCS 事業について

（1）苫小牧 CCS 大規模実証試験事業

事業概要：本事業は，CCS のトータルシステムを実用規模で実証すること，各要素技術の有効性や商業化へ向けた課題を確認すること等を目的とし，商業運転中の製油所の排出ガスから，年間10万トン規模で CO_2を回収貯留するものである．

実証試験ガイドライン：2009年10月に，経済産業省 二酸化炭素回収・貯留研究会より「CCS 実証事業の安全な実施にあたって」が公表された．本事業は，当ガイドラインに示された，安全面・環境面に係る遵守すべき事項の基準に従っている．

実証試験計画：2008年度から2011年度にかけ，地質調査等により，実証候補地を国内115箇所から苫小牧地点に選定した．2012年度から2015年度に，CO_2圧入の準備作業として，CO_2回収設備の建設・試運転，海底下貯留層への高傾斜圧入井の掘削，モニタリングシステムの構築等を実施した．2016年度から2018年度まで，年間10万トン規模での CO_2回収貯留を実施すると共に，弾性波探査及び海洋環境調査等により CO_2挙動をモニタリングする．CO_2圧入停止後は，2020年度まで，引き続き CO_2挙動を監視する．

社会受容性の向上に向けた取組：海外において，地域の理解が得られずにCCS事業が中止となった事例は少なくなく，地元のステークホルダーをはじめとした社会受容性の向上に向けた活動は不可欠である．本事業では，CCS 講演会，パネル展，大学での講演，実証現場の見学会，子供向け実験教室の開催など，地域の理解を得るための様々な活動を通して，事業を円滑に進めてきた．これらの広報活動については，海外からの関心も高い．

（2）CO_2貯留適地の調査事業

これまで，既存の地質・坑井に係る公表データ等を用いて，CO_2貯留に適した堆積層の分布が検討され（図 2），

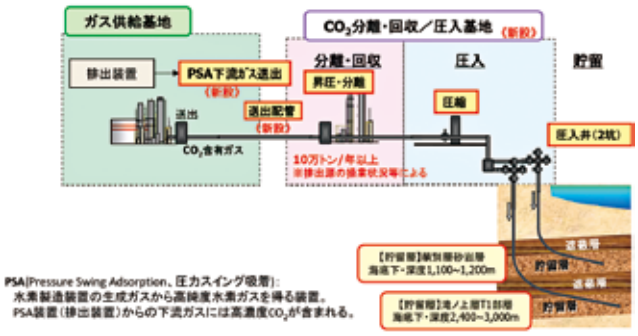


図 1　苫小牧 CCS 実証事業の全体像

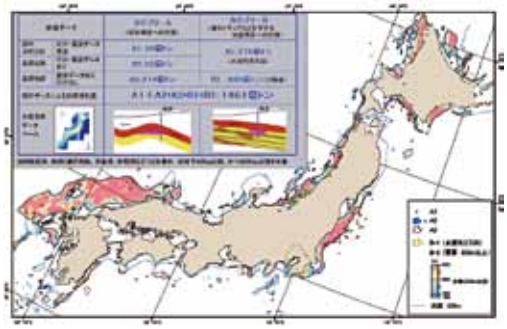


図２　我が国沿岸の CO_2 貯留適地の分布

我が国の沿岸域の貯留ポテンシャルは1,461億トンと推定されている[3)]．しかし，各地点の地質構造や物性値に係る基礎データが不足しているため，個々の貯留地点のポテンシャルには大きな不確実性がある．

そのため，経済産業省と環境省は，CO_2 貯留適地の特定を行うべく，有望な貯留地点を対象に，弾性波探査，調査井掘削による地下情報の取得，貯留層総合評価を計画している．

（３）CCS に係る研究開発事業

①分離回収のコスト低減を目指した研究開発

CCS による CO_2 処理コストは，7,300円 /t-CO_2 程度と見積もられているが[3)]，その約６割を占める CO_2 回収コストの低減が，CCS の広範な普及に大きな役割を果たすと考えられる．経済産業省では，CO_2 回収技術について，大気圧の燃焼排ガスからの CO_2 回収に有利な化学吸収法，および石炭ガス化発電等で発生する高圧ガスからの CO_2 回収に有利な膜分離法に係る分離回収法の研究開発を進めている．

これまでの研究開発の結果，ラボレベルの回収試験において，化学吸収法については2,000円 /t-CO_2，膜分離法については1,500円 /t-CO_2 の回収コストを達成している．

② CO_2 貯留の安全性確保を目指した研究開発

CCS 事業では，CO_2 圧入開始時から，圧入終了後の長期に亘り，安全に CO_2 を貯留する必要がある．経済産業省では，地下に圧入された CO_2 のモニタリング技術や，CO_2 圧入事業の安全性を担保するための安全管理システムの構築に向けた試験研究を行っている．

本研究では，光ファイバーを用いた地層安定性の評価，重力測定による長期モニタリング，地化学反応を考慮した貯留層シミュレーション等の CO_2 挙動解析技術に加え，CO_2 溶解促進技術など，地層の貯留能力を最大限に活用するための研究開発も進めている．

３．CCS 分野の国際連携

（１）CCS 国際機関との連携

我が国は，CCS に係る国際協調を促す CSLF や IEAGHG などの国際機関との連携を通じ，CCS の国際的な普及に係る議論を先導している．また，CCS の国際規格に係る専門委員会 ISO/TC265において，CCS の規格化に我が国が主体的に関与することで，我が国の企業の国際展開の促進に努めると共に，CCS の国際的な推進に貢献している．

（２）米国との協調

経済産業省は，2015年に米国エネルギー省と，CCS に係る MOC（Memorandum of Cooperation）を締結した．この MOC のもと，CCS 技術に係るワークショップの開催や，CCS 事業への両国間の人材派遣，共同実証等の協力が計画されている．

（３）二国間クレジット制度

二国間クレジット制度（JCM；Joint Crediting Mechanism）は，我が国の優れた低炭素技術の普及等を通じ，地球規模で温室効果ガスの削減に貢献するものである（図３）．我が国は2016年10月までに16カ国とパートナーシップを築いている．

JCM に基づく CCS 事業の例として，経済産業省は，メキシコでの CO_2EOR 事業の実現可能性調査を行っている．この事業では，原油の増進回収技術としての CCS への期待が大きいメキシコにおいて，CO_2 挙動モニタリング等の我が国の優れた技術を通じた CO_2 排出削減を目指している．

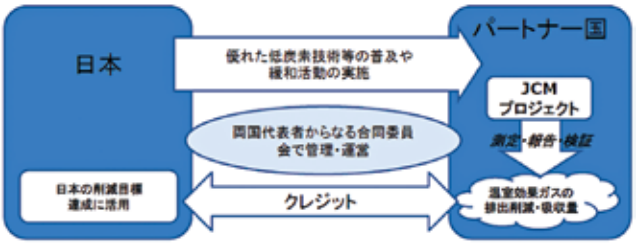


図３　二国間クレジット制度の基本概念

４．今後の政策的課題

地球温暖化問題への対応に特化した CCS は，外部不経済であるため，市場原理による導入が見込めない．従って，民間事業者の参入を促進するためには，クレジット制度や炭素税，補助金等の経済的なインセンティブや CO_2 排出規制の導入により，CCS事業の枠組を構築する必要がある．さらに，貯留地点や貯留量の把握，法規制の整備，国民理解の増進に向けた取組が必要である．

参考文献

１）IPCC：IPCC 第５次評価報告書，（2014）

２）International Energy Agency (IEA)：Energy Technology Perspective 2015, (2015)

３）RITE：平成17年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書，（2006）

産総研における CO_2 地中貯留技術開発 －地化学影響を考慮した長期評価－

Development of technology for the geological CO_2 storage in AIST — Long-term assessment considering geochemical impacts —

CO2地中貯留研究グループ長：徂徠正夫
Leader, CO2 Geological Storage Research Group: Masao Sorai
e-mail: m.sorai@aist.go.jp

1．はじめに

CO_2 地中貯留は，産総研第４期中期計画の中で地球温暖化対策の重要研究課題の一つとして，また地圏資源環境研究部門の戦略課題としてそれぞれ位置づけられており，一層の研究の促進が求められている．このような状況に鑑み，当部門では CO_2 地中貯留に資する研究を全面的に推進している．本稿では，今年度発足の二酸化炭素地中貯留技術研究組合（以下，CO_2 技組）の中での産総研の役割に加えて，研究課題の一例として地化学影響を考慮した長期評価について紹介する．

2．CO_2技組における産総研の役割

安全かつ大規模・効率的な CO_2 地中貯留技術の実現に向けて，我が国の貯留層に適した実用化規模（100万トン/年）での CO_2 地中貯留技術を開発するとともに，CCSの社会受容性の獲得を志向した研究開発を行うために，平成28年４月に CO_2 技組が発足した．CO_2 技組には，（公財）地球環境産業技術研究機構を始めとして，応用地質（株），国際石油開発帝石（株），石油資源開発（株），大成建設（株），および産総研の計４社・２機関が参画している．

CO_2 技組では，経済産業省「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」の中で，「CO_2 圧入・貯留の安全管理技術の開発」，「大規模貯留層の有効圧入・利用技術」，および「CCS 普及条件の整備，基準の整備」の３課題に取り組んでいる．産総研は，特に「CO_2 圧入・貯留の安全管理技術の開発」の中で，貯留した CO_2 の低コストでのモニタリング技術や，水理－力学連成解析技術，地化学反応速度測定技術など，産総研が独自に有する優位性のあるコア技術を基にプロジェクトを推進している．具体的には，「CO_2 長期モニタリング技術の開発」において高精度重力モニタリング技術の開発，「光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視システムの開発」において熱－水理－力学連成解析手法の開発を行っている．各課題の詳細については，本誌他の講演要旨を参照されたい．本稿では，産総研のもう一つ大きな課題である，貯留層内での流体の挙動と地化学の関係を調べる研究について紹介する．

3．地化学影響を考慮した長期評価

3.1.　鉱物反応速度の計測

一般的に，CO_2 地中貯留に伴われる地化学プロセスは時間スケールが長いため，最終的な評価は数値シミュレーションに頼らざるを得ない．しかしながら，現行のシミュレーションには，種々の仮定や未知のパラメータが多数設定されているため，これらの不確定性を排除することが急務とされている．本研究では，最も重要な地化学プロセスの一つとして炭酸塩の反応に注目し，種々の炭酸塩鉱物の反応速度の計測と生成条件の検討を行っている．

CO_2 地中貯留のナチュラル・アナログとみなせる含 CO_2 泉において，炭酸塩鉱物の成長速度を計測した．温泉流水中に浸漬させた種結晶表面をナノスケールで解析する筆者らのアプローチは，その場に存在しない鉱物までを含めて，短時間に精度の高い反応速度の測定を可能とする（図１）．

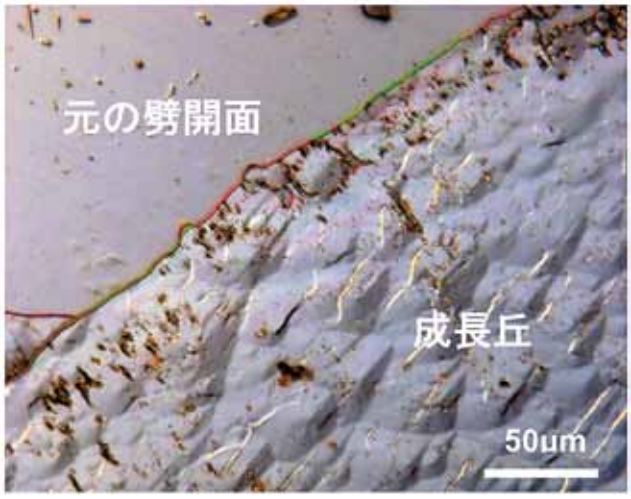


図１　カルサイト種結晶面上での成長速度測定

本研究では，特に Mg^{2+} が炭酸塩の反応キネティクスに及ぼす影響に注目した．そのため，温泉水そのままに加えて，温泉水に CO_2 あるいは Mg^{2+} をさらに追加することにより，Ca－Mg 系での炭酸塩鉱物の成長速度および生成相の評価を行った．その結果，Mg/Ca 比を約５に増加させることにより，成長速度が最大で元の4% にまで減少した．

しかしながら，上述の効果を考慮に入れても，温泉水中で得られた成長速度と，室内実験をベースとした既存のデータベース値との乖離を説明するには不十分であった．したがって，これらの因子の複合的な影響に加えて，結晶表面状態や流速，微生物活動など他の因子についても検証することが課題である．いずれにしろ，今回の結果は，CO_2 地中貯留の地化学シミュレーションにみられる鉱物トラップ

速度の過大評価に対する重要な制約条件になり得ると考えられる．

3.2.　長期遮蔽性能評価技術の開発

CO_2地中貯留では，CO_2が地表に漏洩することなく安定に隔離され続けることが前提となる．このような地下の遮蔽性能を決める要素の一つが，対象とする流体が試料内部で浸透を開始する際の毛管圧であるスレッショルド圧 P_c^{th}（$= 2\sigma\cos\theta/r$，σ：水－CO_2間の界面張力，θ：水の固体表面に対する接触角，r：岩石のスロート径）である．これまで貯留サイトの岩石に対する浸透実験から P_c^{th} の計測が行われてきたが，長期にわたる地化学プロセスを経た後も，同様の遮蔽性能が保証されるかどうかは確認されていなかった．本研究では，キャップロックの遮蔽性能および貯留層の圧入性の両方の観点から，岩石が反応する際の水理特性の変化の定量的な評価を試みている．

各種堆積岩を超臨界 CO_2－水系で１ヶ月間反応させ，反応前後における P_c^{th} を測定したところ，P_c^{th} に及ぼす地化学的な影響が岩石によって全く異なることが確認された（図２）．一般的に炭酸塩鉱物は溶解速度が速いため，これを含有することは CO_2の漏洩経路の形成につながることが予想される．しかしながら，炭酸塩含有量と水理特性の変化には必ずしも相関性が認められなかった．これは，地化学反応の進行が地層水中での炭酸塩鉱物の飽和度に規定されていることによる．

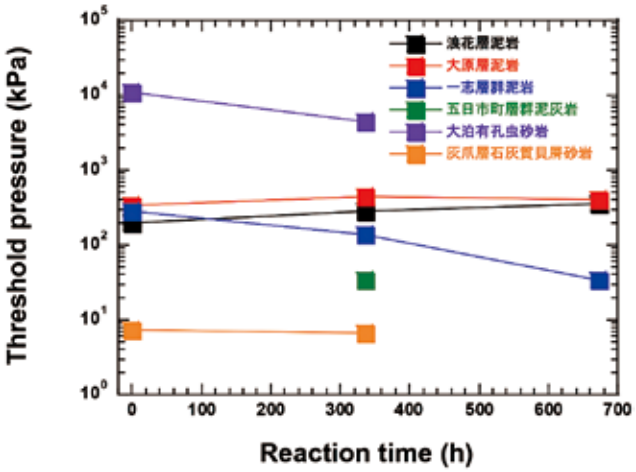


図２　各種堆積岩での地化学反応に伴う P_c^{th} の変化

これに対して，地化学反応に伴う鉱物表面の変化が遮蔽性能に影響する可能性がある．すなわち，P_c^{th} は cos θ の関数であるため，45° 以上ではθのわずかな増加により P_c^{th} が敏感に低下することが予想される．実際に，最近の研究からは超臨界 CO_2－水系での鉱物表面の θ は必ずしも0°ではなく，45°を超えるケースもたびたび報告されている[1)]．したがって，鉱物表面がわずかに溶解して別の表面が現れる，あるいは二次鉱物が既存の表面を覆うことにより，θが変化することが想定される．さらに長期にわたる反応実験に加えて，岩石内部のスロート構造や鉱物表面の濡れ性変化が遮蔽性能に及ぼす影響について，よりミクロな視点でのモデル化も重要な課題である．

3.3.　地化学プロセスの活用

本稿では，CO_2地中貯留における地化学プロセスの影響について述べてきたが，今後はより積極的な立場での地化学プロセスの活用も重要な視点となる[2)]．地化学プロセスの最大の特徴は，漏洩に対してより安全な溶存態や固体などの形態に CO_2を移行させる，あるいは貯留層そのものの水理特性を変化させる点にある．例えば，浸透率の低い貯留層において鉱物の溶解を促進させることができれば，孔隙率の増加に伴って CO_2の圧入性が改善することが予想される．また，急速な CO_2のゲル化や鉱物化の技術が実用化されれば，万が一坑井周辺から CO_2が漏洩した場合でも，緊急の漏洩停止の手段になり得る．さらに，圧入した CO_2全体の鉱物化が促進できれば，安全性の確保のみならず，コストのかかる圧入終了後のモニタリングの早期終了にもつなげることができる．したがって，CO_2地中貯留の安全性，経済性，環境影響など，地化学プロセスが関与する多様な課題について，新たな視点でその活用の検討を行っていくことが重要であろう．

4．まとめ

CO_2地中貯留の安全性評価に関する研究開発は，今年度から CO_2技組にバトンタッチされた．最終的な CCS の実施者は民間企業であることから，CO_2技組の誕生により我が国の CO_2地中貯留は実用化に向けて画期的な一歩を踏み出したと言える．これに合わせて，産総研も国立研究機関としての役割を踏まえつつ，実用化に向けてこれから何をすべきかを見極めていくことが重要である．また，限られた人員で最大の成果を挙げるためには，国内外の他の機関と連携をとりつつ，それぞれの持ち味を生かした効率的な研究開発が必要であろう．

参考文献

１）Iglauer, S., Pentland, C.H. and Busch, A. (2014) CO_2 wettability of seal and reservoir rocks and the implications for carbon geo-sequestration. *Water Resour. Res.*, 51, 729-774.

２）徂徠正夫（2013）CO_2地中貯留における長期地化学プロセス．地質学雑誌，119, 139-152.

CO_2 地中貯留のための受動的モニタリング手法開発

Study on Passive Geophysical Monitoring of CO_2 Geological Storage

CO2地中貯留研究グループ：西　祐司
CO2 Geological Storage Research Group:
Yuji Nishi
e-mail: y.nishi@aist.go.jp

1．はじめに

地下に圧入した CO_2 の貯留層内での挙動を探知し監視するモニタリングは，CO_2 圧入の安全管理と最適化，地中貯留量の確認，そして漏洩等の予期せぬ事態の検知のために，CCS 事業自体の実施のためにも，また CCS 事業が社会的受容性を獲得するためにも不可欠である．

CO_2 地中貯留におけるモニタリングは，圧入坑・観測坑の坑内の温度・圧力の直接計測，反射法・VSP 法・弾性波トモグラフィ等の弾性波探査，大気・海中の CO_2 等を監視する環境モニタリング等が主に実施されている．地下の状況を直接かつ高精度で知ることができる坑内センサは，計測位置が限定され，設置・交換も一般的に高コストとなる．CO_2 プルームの広がりを追跡するために有効で標準的な手法として使われる弾性波探査は，定期的に実施するにはコスト，地元負担等の負担が大きい．特に事業収入がなくなる CO_2 圧入終了後も含めて長期間実施が求められるモニタリングについては，安全性の確保と同時に適切な費用対効果を得ることが不可欠となる．医療に例えれば，これらの探査手法は体内を詳細に知ることができる内視鏡検査や MRI・CT 等の画像検診に相当し，身体及び経済的負担を考慮すると毎日の体調管理には他の手法が適している．産総研では現状を補完するモニタリング技術が重要と考え，コスト面で比較的有利な受動的（自然信号を利用した）物理探査方法に注目し，大規模な CO_2 地中貯留サイトにおいて適用性や最適利用法の検討を行ってきた．

本報告では，産総研が平成22～27年度まで経済産業省からの受託研究開発において実施してきたこのような受動的モニタリング手法開発について，主に高精度重力モニタリングを中心に紹介する．

2．高精度重力モニタリング

2.1.　原理・概要

地下の様々な深度で密度変化があると，地表では重力変化が生じる．地下に圧入した CO_2 は周囲の流体とは違う密度を持つことから，CO_2 の圧入位置・深度と圧入量に応じた質量変化が生じ，これが地表にも重力変化を生じさせる．このため，重力モニタリングは質量分布という反射法地震探査と別の側面から CO_2 の地中貯留状況を見ることができる．ノルウェー沖のスライプナーにおいては，海底重力計によるモニタリングが実施され，反射法探査だけでは決められない CO_2 の密度の推定に貢献している（Alnes et al., 2011など）．また，米国の Cranfield テストサイトでは繰返し孔内重力計測も行われている（Dodds et al., 2013）．

これらのモニタリングで使用された可搬型相対重力計はいわば精密なバネ秤であり，重力の変化によるバネの「伸び」の微小な変化を測定する．一時代を築いた LaCoste & Romberg 重力計はエリンバー系合金製のバネ，近年主流のデジタル化された Scintrex 重力計は溶融水晶のバネを用いており，分解能数マイクロガル，ドリフトレートは年間でミリガルオーダーである．

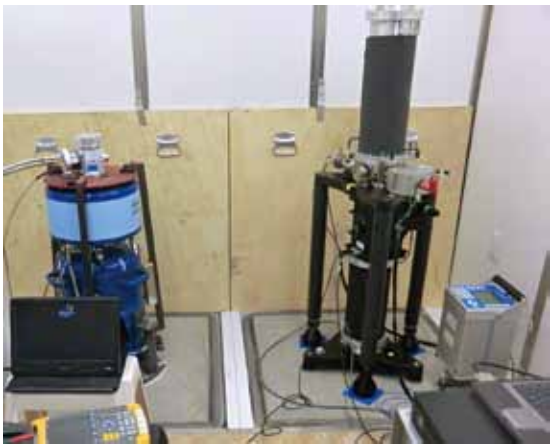


図１　様々な重力計
左から可搬型超伝導重力計 iGrav，絶対重力計 FG5 及び可搬型相対重力計 CG5.

我が国においては，CO_2 圧入に適した貯留層は主に海岸沿いの浅海の海底下に賦存すると考えられ，諸条件から推定される地表・海底における重力変化量は貯留層直上でもたかだか年間数マイクロガル程度と考えられるため，これらの通常の可搬型重力計でその重力変化をモニタリングすることは難しいと推定される．重錘落下を追跡することで重力の絶対値を測定できる絶対重力計は，原理的にはドリフトせず年～数年単位の長期変化を追跡するには適しているが，海底下での測定には向かず分解能もせいぜい１～２マイクロガルのため，CO_2 地中貯留のモニタリングに使用するには制約が大きい．

超伝導重力計は，液体ヘリウム中の極低温状態の安定性と低ノイズの中で，ニオブ製中空球を磁場中に浮かせる際のマイスナー効果による磁気浮上力をこのバネによる弾性力の替わりに用いることによって，極めて高感度で安定な重力計となっている．初期の超伝導重力計は，大型である

上に定期的な液体ヘリウムの補充が必要で稼動コストが非常に高かったため，測地観測所などの学術的用途に限定されて使用されたが，時間領域でマイクロガル以下，周波数領域でナノガル・オーダーの高分解能を持ち，長期連続計測が可能なことを実証した. 本研究開発を開始した時期に，稼働後の液体ヘリウム補充がほぼ不要かつ小型な可搬型モデルが開発されて応用領域が拡大されたため, 産総研では，この可搬型超伝導重力計 iGrav の CO_2 地中貯留モニタリングへの適用評価と関連した研究開発を実施してきた.

2.2.　テストサイトにおけるモニタリング

我が国の実証調査に先駆けて研究を進めるために，米国ロスアラモス国立研究所との連携の下に米国の Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration が実施している CO_2 大規模圧入テストに参加し，ノイズの少ない大陸中央部における CO_2 圧入テストサイトに2011年11月～2015年12月にかけて超伝導重力計を設置して計測を行い，CO_2 圧入サイトにおける超伝導重力計の実用性能の評価，時間領域分解能の確認，並行観測の有効性確認等の成果を得た.

図２　苫小牧における産総研の重力観測基点
背景の照明付き塔は実証試験 CO_2 分離回収設備.

2015年３月より苫小牧の国内実証試験圧入基地近くに観測点を設置し，ベースライン測定を兼ねて，国内貯留サイトのモニタリングで想定される海岸近傍における測定の評価と，設置が簡単な測定設備であるエンクロージャの評価を目的とした測定を開始し，2016年４月からの圧入開始後も現在に至るまでモニタリングを継続している．この観測点は，世界一海岸に近い超伝導重力計による観測点であり，多少のトラブルはあったが１年以上の観測を達成することによって,それまでの測地研究等で想定されなかった環境下において超伝導重力計を使用したモニタリングが可能なことを実証できた．重力変化の短周期成分の評価から，低気圧が通過する荒天時の短周期ノイズ，苫小牧西港のセイシュ（副振動）により励起された重力変動成分，地震によるステップ変化等が抽出され，またエンクロージャに対する塩害状況の把握など今後に繋がる成果を得ている.

2.3.　今後の研究方向

今後の研究課題としては，長期モニタリング時に課題となってくる複数機器間での測定データの連続性確保，並行測定の利用によるノイズ除去及び高精度観測法，CO_2 起源の信号探知にとってはノイズ要因となる浅部での土壌水分・地下水等による質量変化，気象等による影響の除去等が考えられる．これらのうち基礎的な部分については産総研交付金による基礎研究として（図３），CO_2 地中貯留に直結する部分については，二酸化炭素地中貯留技術研究組合による経済産業省受託研究「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」の一部である「CO2 長期モニタリング技術の開発」として研究を継続していく予定である.

図３　超伝導重力計の鉛直配置並行測定実験

３．その他のモニタリング手法

3.1.　自然電位（SP）モニタリング

自然電位とは，地面に自然に発生している時間的に安定して存在する電位差のことを指し，界面動電効果（流動電位），熱電気，拡散電位などの電気化学的過程が発生原因と考えられている（例えば Corwin and Hoover, 1979）. CO_2 地中貯留モニタリングにおいて想定される発生メカニズムは，流動電位と酸化還元電位とがあり，前者は地下の圧力変化を検出するための,後者は坑井深部へのCO_2 プルーム到達検出に利用できる可能性が示されている．後者については，夕張における小規模 CO_2 圧入実験や米国 Aneth

テスト・サイトにおける CO_2 圧入試験において，CO_2 圧入井の坑口近傍で圧入開始時の緩やかな電位増加が検知されている（Tosha et al., 2008；西ほか，2010）.

現在，貯留層内における CO_2 プルーム到達による電位変化の検知を目的に，米国テストサイトにおける測定を，また，苫小牧においては，寒冷地・海浜部観測における問題点抽出のための観測を継続中である．研究開始当初は地表浅く埋設した非分極性電極による測定が中心であったが，ケーシング電位の直接計測により安定した電位が測定可能なこと等が判ってきている（図４）.

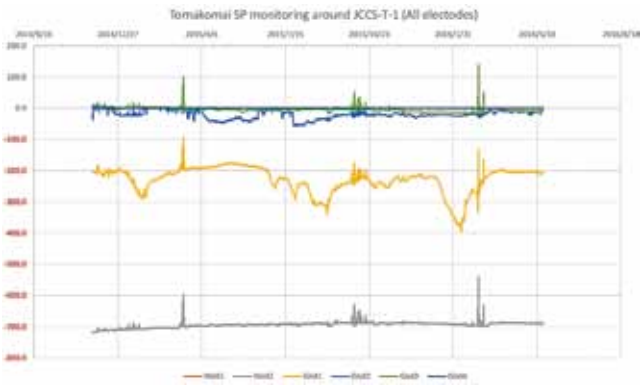


図４　苫小牧テストサイトにおける自然電位変化

3.2.　AE，測地，InSAR 等によるモニタリング

圧入した CO_2 により，貯留層内の空隙圧と温度が変化することによって，CO_2 貯留に起因した応力・歪の変化が生じる．このような変化により生じる地盤変動・AE 等をモニタリングすることによって，貯留層内の情報を得ることが出来る．これらは，ジオメカニック・モデリング（詳しくは本誌の雷の報告を参照）に有益な情報を与えるモニタリング手法である.

受動的に観測できる弾性波を幅広く工学的に活用することがAE法の特徴であり，本研究においては「AE」(Acoustic Emission）を広く捉え，CO_2 地中貯留サイトで受動的な観測によって得られる可能性のある比較的高い周波数の弾性波全てに注目し，それぞれの性質に応じた信号処理法を開発，適用して，地下情報を抽出することを検討した．米国テストサイトにおいて，SWP が実施する坑内アレイ観測を補完する地表観測網を展開し，坑内センサの高感度と地表観測網の機動性を活かした観測手法の開発に挑んだ.

地盤変動をモニタリングするためには，測量・傾斜測定・GPS 測定等々の測定方法があるが，広範囲を効率的かつ低コストでモニタリングするためには，干渉 SAR 解析が有効である．2004年～2008年に300万トンの CO_2 が圧入された In Salah 地域においては，３本の圧入井周辺で5 mm/yr 程度の隆起が捕らえられている（Vasco et al., 2008）．海底下貯留が主流と考えられる国内で InSAR を利用することは難しいが，米国テストサイトにおいて試行してみたところ，EOR サイトで圧入・生産が並行して実施され，地表の多くは農地であるためか，CO_2 貯留に伴う地表変動を捉えることはできなかった.

3.3.　比抵抗モニタリング

比抵抗モニタリングは，弾性波探査では難しい CO_2 飽和度20% 超のプルーム内での物性推定や溶解 CO_2 の検知を担う手法として期待されたが，地表探査では貯留層深度で粗い分解能しか持たないため，独 Ketzin のような坑環部電極を設置することなく貯留層モニタリングに使用することは難しい．しかし，数値計算によるケース・スタディによると，浅部に移行した CO_2 の検出には有効である可能性が残り，また，海岸から海底下に拡がる地下水の賦存状況把握に貢献できる.

本研究開発では，国内 CO_2 貯留候補地として見込まれる浅海域で計測が可能な MT 法計測システムの適用実験を進め，苫小牧において陸域５測点，海底７測点のデータを取得して，海陸連続した比抵抗構造の抽出を行った.

４．地下モデリングによるデータの予測・解釈

弾性波探査のような地下イメージングが難しい重力変動等の受動的モニタリング手法によるデータを CO_2 地中貯留のモニタリングに役立てるためには，地下モデルを基にした貯留層内の流体流動シミュレーションによる結果と取得したデータをリンクすることが非常に重要になる.

産総研は，数値シミュレーションにより計算される温度，圧力，CO_2 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（地球物理ポスト・プロセッサ）の開発・整備を行ってきた．これにより，坑井（点）データのみならず，物理探査（面）データを活用したシミュレーションモデル更新を可能とし，長期 CO_2 挙動予測の精度向上，すなわち，シミュレーションモデルの高精度化に寄与することができる．これまでに，CO_2 の臨界点近傍を高精度に扱える状態方程式パッケージと反射法，重力，測地，自然電位，MT 法等の比抵抗探査等の地球物理ポストプロセッサを開発してきた.

CO_2 地中貯留においては，流動シミュレーションと地球物理学的ポストプロセッサは以下のような目的で活用できる.

（i）適切なモニタリング・システムの選択・配置の検討：想定した地下モデル・潜在リスク・圧入計画に対する地表における物理探査データの分布及び変化を予測し，適切なモニタリング手法選択と測定点配置などを検討する.

（ii）地下状態の迅速な把握：モニタリングによる実データを予測された計算値と比較することにより，CO_2 圧入が予測通り進んでいるか確かめる.

（iii）予測と異なる実測値が得られた場合，差異が生じた原因の究明に利用し，早期のリスク検知，地下モデル改良に資する.

（iv）貯留モデルの検証・高精度化：ヒストリー・マッ

チングの拘束条件として使用し，より精度の高い貯留層パラメータ推定，地下モデル改良等を通じて将来挙動予測の精度向上が期待できる．

開発したポストプロセッサを前記（i）の目的にて利用したケース・スタディを図 5 に示す．貯留層内への CO_2 貯留によって生じる重力変動は年間 1 マイクロガル程度の減少である．これに対して，このケースにおける潜在リスクとして想定した圧入地点近くの断層開口により CO_2 が地下浅部へ移行した場合，想定以上の重力減少が起こると予想され，この変化の差異は適切に配置された超伝導重力計ならば十分に判別可能と考えられる．実際の圧入時には,高精度重力モニタリングとこのようなポスト・プロセッサの計算結果を組み合わせることにより，前記（ii）の想定外の CO_2 浅部移行等に対する連続監視手段として有望と考えられる．さらに，浅部の地下水などのモデリング，ノイズ・リダクションを進めて高精度・高分解能で CO_2 起源の信号が抽出できれば，重力モニタリングの結果を地下モデルの水理パラメータに対する制約条件としての利用も可能となろう．

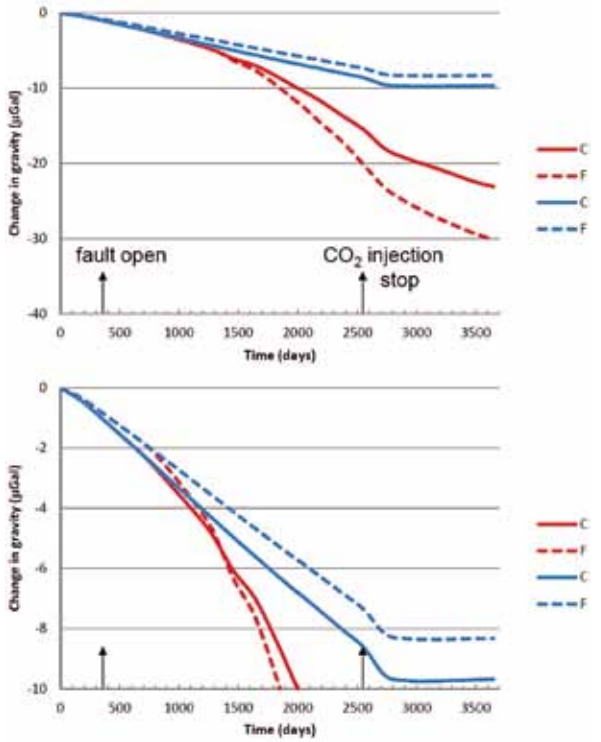


図 5　GC モデルにおける重力の時間変化.
貯留層内に想定通り貯留した結果（青色）及び断層が開口していた場合の結果（赤色）.
下図は上図の縦軸スケールを拡大.

5．まとめ

安全な CO_2 地中貯留の実現のために，産総研は弾性波モニタリングを補完する高精度重力モニタリングを中心として，自然電位・AE 等々の受動的モニタリング手法の開発に取り組んできた．モニタリング研究では，十分なデータの蓄積までに多年の年月を必要とし，モニタリング・システムの設置と維持には多大な労力がかかるが，必ずしも顕著な変化が出るデータを得られることは少なく，色々と研究上の難しさが多いが，米国・苫小牧におけるモニタリングを通じて一定の成果が得られた．今後は，新しく設立された二酸化炭素地中貯留技術研究組合の下に CCS 実用化に向けてこれらの研究を継続・発展させ，安全な CO_2 地中貯留の推進に貢献していきたい．

謝辞

苫小牧における観測は, 日本CCS調査（株）・苫小牧市・苫小牧港管理組合・北海道開発局 苫小牧港湾事務所にサポートしていただいた．また，米国における実証調査プロジェクト自体は，米国エネルギー省 NETL 予算によって実施されており，産総研のモニタリングは，米国ロスアラモス国立研究所の協力の下，SWP と Chaparral Energy 社にサポートしていただきました．

本研究開発の多くは，経済産業省からの受託研究「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 CO2挙動評価技術の開発）」（平成23～27年度）及びその前身の「二酸化炭素挙動予測手法開発事業（低コストなモニタリング技術及び断層モデリング手法の開発）」（平成22年度）により実施し，経済産業省産業技術環境局環境政策課及び二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業研究推進委員会委員の皆様に色々ご指導をいただきました．また，プロジェクト実施に当たってはRITE にサポートしていただきました．本報告は，重力は杉原を中心に名和・宮川, 自然電位とポストプロセッサは石戸, AEは相馬, 比抵抗は光畑と上田，InSAR 解析は田中（明）の研究成果（産総研，2016）を引用しています．これらの研究は，産総研が参加する二酸化炭素地中貯留技術研究組合が経済産業省より受託した「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」の一部として引き継がれています．

参考文献

Alnes et al. : Results from Sleipner gravity monitoring: updated density and temperature distribution of the CO_2 plume. Energy Procedia 4, 5504-5511 (2011).

Dodge et al. : Evaluating time-lapse borehole gravity for CO_2 plume detection at SECARB Cranfield. Int. J. of Greenhouse Gas Control 18, 421-429 (2013).

産業技術総合研究所：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 CO2挙動評価技術の開発 成果報告書，470p. (2016).

Vasco et al.: Satellite-based measurements of surface deformation reveal fluid flow associated with the geological storage of carbon dioxide, Geophys.Res.Lett., 37, DOI: 10.1029/2009GL041544 (2010).

CO_2 地中貯留における ジオメカニックモデリング

Geomechanic modelling for CO_2 Geological storage

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

1．はじめに

地下の含水地層（帯水層）に高圧流体である超臨界 CO_2 を圧入することで，貯留層およびその周囲の地層の空隙に存在する間隙水の圧力（間隙圧），地層の変形，浸透率などの水理特性などが連動的に変化し，岩盤の応力分布を変え，潜在する断層の再活動をきたす恐れがある．このような要素を考慮した「熱 - 水理 - 岩石力学（THM）連成シミュレーション」を基本とするジオメカニックモデリング技術は，CO_2 地中貯留にける岩盤の応答を予測しつつ，地盤変形や断層活動等に関連するリスクを制御した最適圧入条件を求めることができるため，大規模な CO_2 地中貯留事業に取り込むべきである．

2．ジオメカニックモデリングの概要

日本において，CO_2 地中貯留サイトと想定されるのは，若い地質時代（おおむね後期新生代）の，岩石力学的に強度が低い「軟岩」からなる地層・岩盤である．また「軟岩」応力変化に対する変形－浸透率関係は，硬岩より複雑であることが考えられ，THM 連成解析を軟岩岩盤に適用できるように最適化する研究開発が必要である．また，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不確定さを持つ．つまり不確定さを十分に評価する必要がある．このような要素を考慮して，図 1 に示す“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ックモデリングフレームワーク”を構築した．このフレームワークにはジオメカニックモデリングの一般的な手順と精度向上のために取り込むべき岩石試験等の要素が示されている．このフレームワークをベースに，岩石物性の蓄積，解析ツールの開発及び技術手順の作成を行っている．

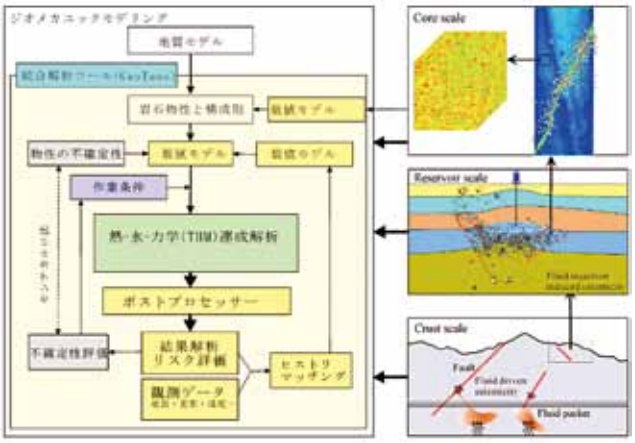


図 1　熱伝播－流体流動－岩石力学（THM）連成シミュレーション及びマルチスケールアプローチを中心としたジオメカニックモデリングフレームワーク概念図

3．マルチスケールアプローチ

3.1.　室内岩石試験

当グループには様々な室内岩石試験装置と物性計測システムを有する．岩石試料を用いて，三軸クリープ試験・透水試験等を行い，流体及び流体圧の拡散に伴う岩石変形・微小破壊・岩石物性値を稠密にモニタリングすることにより，地圏メカニックモデリングに関する実験研究を系統的に実施している．図 2 に示す例では，数種類の軟岩のせん断破壊前後のせん断ひずみ・滑り変位に対する浸透率の変化である．図 3 はせん断破断面の摩擦係数の変化を示すもので，滑り量の増加に伴い摩擦係数が減少し，一定値に収束することがわかる．このような結果を体系化し，構成測としてシミュレーションに取り込む．

3.2.　アップスケーリング

岩石には様々なスケールにおいて，不均質構造を持つ．ジオメカニックモデリングの数値モデルではコアスケールの不均質を入れることは不可能で，必要もない．一方で物性値のアップスケーリングは不可欠である．アップスケーリングには様々な手法があるが，我々はマルチスケールシミュレーションと光ファイバーセンサーを活用する原位置試験の手法を検証している．

マルチスケールシミュレーション手法はコアスケールの

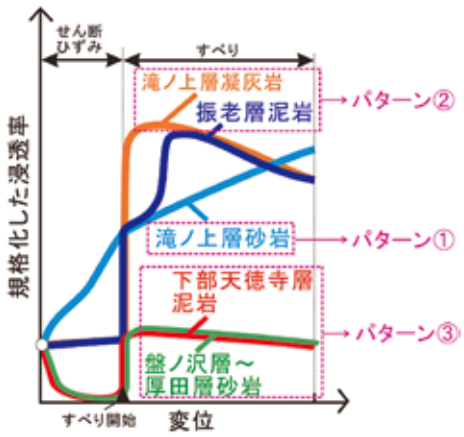


図 2　軟岩の浸透率変化の概念モデルの分類化

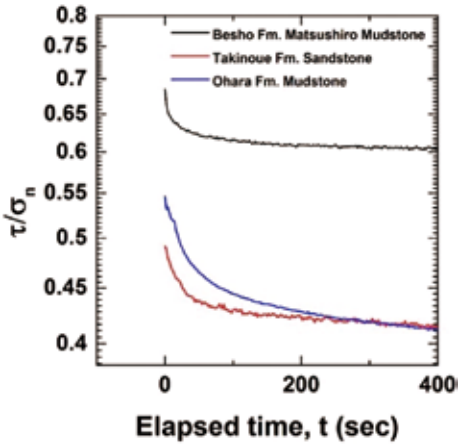


図３　松代泥岩，滝ノ上層砂岩，大原層泥岩の摩擦係数の時間変化曲線

室内実験データを元に，地質情報を考慮し数値モデルの基本セルのサイズのスケールモデルを統計的に構築してシミュレーションを行い，基本セルの等価的な物性値とその不確定さを推測する．これを実スケールジオメカニックモデリングに取り込み，実データとのヒストリ・マッチングにより更なる精査を行う．

現地試験手法は実スケールモデルの対応する物性データを得ることが可能である．特に，光ファイバーセンサーを用いることで，時間空間上の連続的なひずみのモニタリングが可能である．特に未膠着軟岩の場合，コアリングや整形が難しく，室内実験でも精度良い物性値を得ることが難しい．しかし，間隙圧の変化に対するひずみ変化が大きいため，原位置試験が有効である．図４では，２次元放射流モデルでの，排水テストの間隙圧の時間変化を示す．最も重要な岩石物性値である浸透率と空隙の圧縮率を評価できると考えられる．またひずみデータを加えれば，岩石の弾性係数を簡単に推測できる．岩石の基本物性が良く設定されれば，ヒストリ・マッチングを行う際，空間的な不均質性に絞ることができる．

3. 3.　ナチュラル・アナログ研究

パイロット試験では，明瞭な断層再活動や大規模漏洩が許されないので，ジオメカニックモデリングの有効性を検証する際に限界がある．ナチュラル・アナログでは，自然界に発生した類似事象を対象とするため，容易にジオメカニックモデリングの有効性を検証することが可能である．日本では，長野県松代地域にて1965-67年にわたって，深層水湧出に伴い，群発地震及び地盤隆起が観測された．松代事象を用いてナチュラル・アナログ研究を実施した．断層沿い震源域の拡大の様子，地表隆起パターンなどを再現できて，ジオメカニックモデリング手法の有効性を検証できたと考えられる．

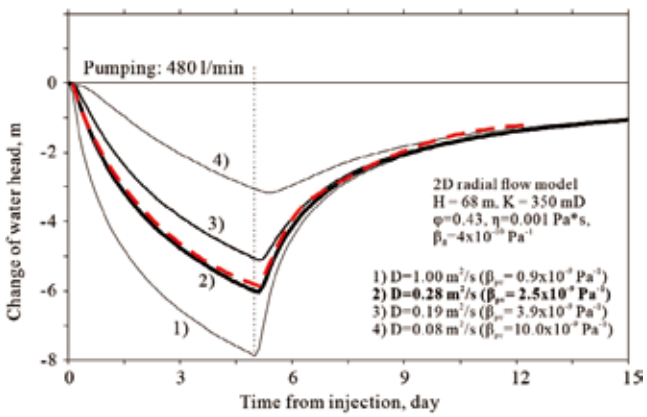


図４　２次元放射流モデルにおける間隙圧変化（赤線は実データ）

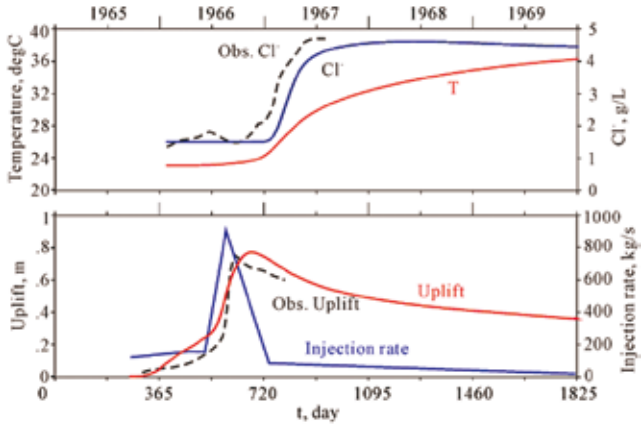


図５　松代群発地震ナチュラル・アナログ研究結果．観測された最大地表隆起量と Cl^- 濃度とジオメカニックモデリング結果との対比

CO_2 地中貯留（CCS）の リスク評価と社会受容

Outcomes of Soil Environment Risk Research and Advanced Risk Governance

CO2地中貯留 RG，地圏環境リスク RG
田中敦子，坂本靖英，徂徠正夫
Atsuko Tanaka, Yasuhide Sakamoto and Sorai Masao
e-mail: a.tanaka@aist.go.jp

1．はじめに

地球温暖化対策を目的として CO_2を回収し地中に貯留する CCS（CO_2 capture and geological storage）の最初の試みは1996年に Sleipner 油田で実施された．2005年には新潟県長岡で世界初の陸上 CCS 実験がスタートした．その後，豪・北米・EU の各国が CCS プロジェクトを立ち上げ，最近ではアジア・南米の国々も加わり，完了・計画中をあわせて大小約130件の CCS プロジェクトが存在する．国際条約や各国地域の CCS に関する法規や制度の整備も進んでいる．UNFCCC は CDM に CCS を取り込むことを2010年に決定[1]し，また同じ頃に日本や EU を含む OECD 加盟国は CCS 法規やガイドラインを整備した．2013年には ISO/TC265が設置されて CCS の国際規格の準備も進みつつある．

IPCC 環境評価報告書 AR5（2014）は，産業革命以降の人間活動で大気中に排出された CO_2 累積量と地球の平均表面平均の温度上昇とはほぼ正比例の関係にあることを示した[2]．CO_2排出削減の追加的努力をしない場合，21世紀末までに2.6-4.8℃上昇する可能性が高く，気象現象の激化や食糧危機，病害リスクの増大が危惧される．大気中の温暖化物質を CO_2換算で430-480ppm レベルに維持できれば，気温上昇を 2℃前後に留めて温暖化リスクの増大を回避できる可能性がある（2℃シナリオ，2DS）．AR5 はさらに，2DS は CCS 無しでは達成できない数字であると指摘している．

国際エネルギー機関 IEA は，2DS の実現には化石燃料およびバイオ発電，鉄鋼，製紙等の産業に CCS を導入し，2050年時点の CO_2削減量の17% を CCS が担い，累積排出削減量の14% を CCS によって達成する必要があると試算した（図１）[3]．

このような中で昨年11月に開催された COP21[4] には195カ国が参加し，先進国が新興国や発展途上国の CO_2排出削減を支援しながら，21世紀末までの地球表面平均気温の上昇を 2℃以内（産業化以前との比較）に押さえることを合意するパリ協定を採択した．

2．CCS におけるリスクマネジメントの役割

上に見てきたように2DS の実現のために CCS は大きな役割を担うことが期待されている．計算によると年間100万トン規模の CO_2地中貯留サイトが地球上に5,600ヵ所必要と言われている．CCS は計画から閉孔まで数年～数十年の時間にわたって CO_2を回収・輸送・貯留する過程である．必要十分な CCS 事業の実現には良好な貯留層だけではなく，CO_2源と回収・輸送を含めた全システムを包括するリスク評価とステークホルダーとのコミュニケーションを含むリスクマネジメントプロセスの実施と，それにもとづく社会受容の形成が求められている．

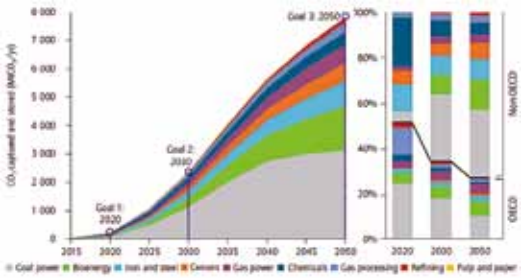


図１　2℃削減シナリオの産業別 CCS シェア（IEA）

カテゴリ	ステージ			
	計画 サイト選定	注入	閉孔	閉孔後
回収輸送貯留のシステム	高圧ガス周辺および外来インパクト			
	ミティゲーション手法			
	注入 CO_2の物性 短期・長期の CO_2の挙動 貯留層の安定と地化学的変化			
社会	環境・安全 / コスト / 経済的インセンティブ / 法規 / 社会的受容			

表1 CO_2地中貯留の考慮の範囲

リスクマネジメントとは，システム全体のリスクを同定して大きさを評価して，害のないリスクは保持し，影響の大きなリスクは対応可能なレベルにコントロールするプロセスである[5]．プロセスには内外の関係者，すなわちステークホルダーとの相互理解の形成[6] も含まれている．このような方法論は科学的・社会的な側面を加味したマネジメント手法として確立されており，北米およびヨーロッパでは当然の手法となっている．前述の IPCC や UNFCCC の判断には，漏洩率や死亡率評価を含めた CCS リスク評価が寄与している．また，北米やノルウェーの個別の CCS プロジェクトでは，最大レベルのリスクは何何であり，これこれの緩和策をとってリスクレベルを許容できる程度に落とした．といった説明が論理的に行なわれている．

日本では鉱山保安や道路事業などの個別の行政領域ではリスクマネジメントのプロセスが採用されている．しかし，リスクマネジメントを求めるアンブレラ的な法規体系がないため，リスクを論じることをはばかる傾向があることは否定できない．リスクを網羅的に考慮しないのは，マネジ

メントの考慮の中に空白域が存在しうることを意味しており，極めて危険と言える．

3．産総研の CCS に関係するリスク評価研究

産総研で実施した直接的に CCS に関連するリスク評価や社会受容の構築にかかる研究の最近の例を紹介する．

CO_2地中貯留の対象となる枯渇油ガス田の貯留層内に自然に存在するメタン菌の一部は CO_2を与えられるとメタンガス産出の速度を上げる[7]．この現象は CCS の CO_2排出量削減と天然ガス生産が同時に達成できる可能性を示唆するものと言える．そこで，この過程を Bio-CCS と名付けて，その基礎的なフィージビリティスタディをリスク評価手法に基づいて実施した[8]．

まず，CCS の操作と近縁の油ガス坑井と CO_2製造業の事故データベースを用いてリスクシナリオを構築した．また，表地層モデルに地下微生物の働きを組み込み，Bio-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を評価した（図２）．リスクシナリオにメタン産出ポテンシャルを適用して，CO_2地中貯留にかかわるサイト周辺の海洋と大気についての環境インパクト評価（図３）および坑井事故率に基づくシナリオ評価（図４）を行った．あわせて，社会理解形成を目的として Bio-CCS サイト評価デモツールを開発・公開した（図５）．さらに温暖化対策効果の評価としてGWPの収支評価を行った（図６）．以上の結果，CCS と天然ガス生産を同時におこなう Bio-CCS のリスクが小さいこと，温暖化対策上有用でありうるとの結果を確認した．

おわりに

地球温暖化を防ぐため2050年までのCO_2地中貯留（CCS）事業を世界に急速に拡大することが求められている．評価対象が個別プロジェクトか地域や国規模かを問わず，CCS のリスク評価手法の確立は急務であり，社会受容の形成をふくむリスクマネジメントのプロセスの確立の重要性が増していることは明らかである．われわれのポテンシャルでさらなる貢献が可能と考えている．

参考文献

1）UNFCCC（気候変動枠組条約）：CDM（クリーン開発メカニズム）についてのカンクン合意（2010）．
2）IPCC（気候変動に関する政府間パネル）：第５次評価報告書 AR5.
3）国際エネルギー機関（IEA）：Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage, (2013).
4）UNFCCC COP21 国連気候変動枠組条約 第21回締約国会議（2015.11）．
5）ISO 31000リスクマネジメントプロセス.
6）ISO 26000 社会的責任.
7）D.Mayumi,et.al.: Nat. Commun., 4, 1-6. (2013).
8）田中，坂本，眞弓，東野，坂田：CCS と微生物機能の融合技術（Bio-CCS） リスク評価の試み，J of MMIJ, Vol.131, 524-532（2015）．

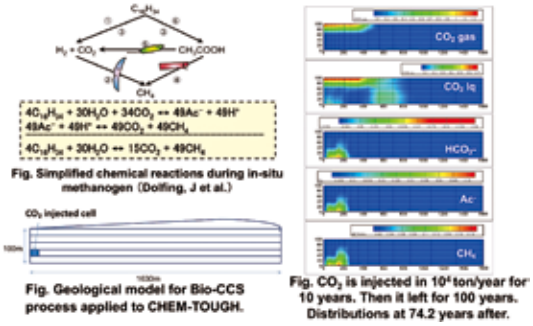


図２　貯留層内物質挙動とメタン産出ポテンシャル

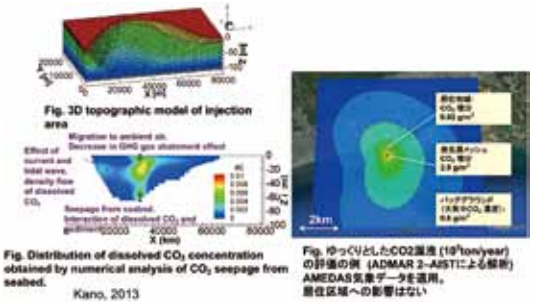


図３　環境インパクト評価

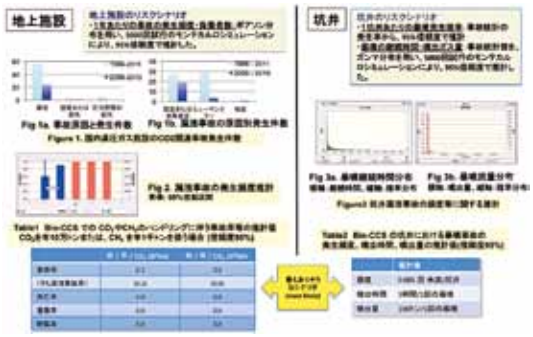


図４　坑井事故率に基づくリスクシナリオの評価

図５　Bio-CCS サイト評価 デモツール

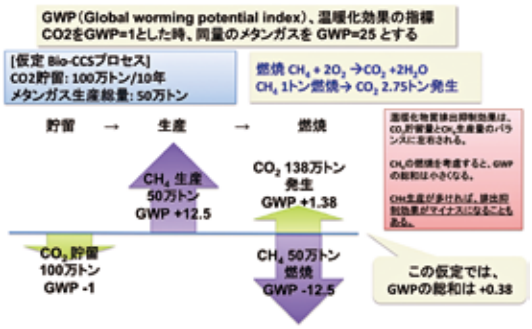


図６　Bio-CCS の温暖化物質排出抑制効果の概念評価中貯留の考慮の範囲

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_2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心掛けている．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．近年では No.6「熊本地域」，No.7「石狩平野（札幌地域）」No.8「富士山」が出版された．

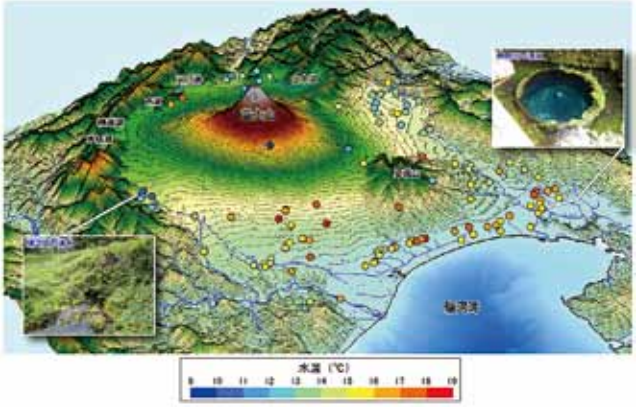
水文環境図を作成するに当たり，地下水研究グループではその作成指針を発表している（町田ほか，2010）．これに基づき，地形，地質，地下水位，水質，地下温度などの基礎情報が掲載されており，地下水の流動や起源など最新の水文地質情報を見ることができる．また，最新の「富士山」では浅層地下水や深層地下水の基礎情報に加えて地下水温情報も編集対象とし，再生利用可能エネルギーの可能性評価にも資するように設計している．さらに地域の固有情報にも配慮し，それぞれを掲載している．地球科学情報としてこの図を使っていただくために，また水循環基本計画を念頭に置き，流域の水循環を念頭に置き，地下水盆の解明を意識した内容になって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

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，土壌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．

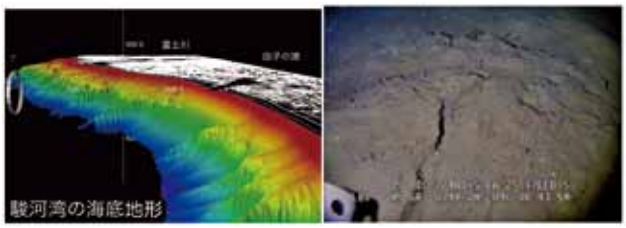
2.2.　高レベル廃棄物の地層処分に関する研究

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であり，地下水の水質や流動状況の把握が急務である．産総研は北海道の幌延ならびに駿河湾において，沿岸域における地下水プロジェクトを実施している．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研究してきた．

最新の水文環境図（富士山）



富士山地域の湧水と水温の鳥瞰図
（水文環境図からの 3 次元化）



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大循環が分かってきた．

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天然バリアから複合的に多重バリアを形成することになっているが，当該研究は地下水シナリオを考慮したうえで，天然バリアの健全性を評価することが責務である．

産総研はこれまでに九十九里海岸や茨城県東海村などで研究を重ねてきた．とりわけ北海道幌延では，沿岸域において深部地下水の水質調査や年代測定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（海底湧出地下水）をとらえ，陸域の地下水が流動し海域に流出するルートを解明することに成功した．これにより，地下水の流動経路や滞留している領域を３次元的に明らかにした． 将来的には長期的に安定した地下水領域を発見する手法を開発し，処分研究の安全性評価に資する予定である．

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 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．

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）
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）
菅谷　裕行（派遣）
楠瀬　勤一郎（産学官制度来所者）

４．最近の研究成果（H28.Apr ～）

（論文）

小野昌彦，井川怜欧，町田　功，丸井敦尚「富士山南西麓における地下水の222Rn 濃度分布」RADIOISOTOPES, 65, 1-9（2016）doi: 10.3769/radioisotopes.65.

丸井敦尚：「水循環基本計画ならびに地下水保全のためのデータ整備状況」（論説） 日本地下水学会誌，56-3, 289-299，2016Aug.

町田　功，小野昌彦，丸井敦尚：「熊本地震による地下水資源への影響について」 地質ニュース，5-5，147-148（2016）.

ほか４編

（特許）

採水装置　特許第5997121号：丸井敦尚ほか

（招待講演）

８件：丸井敦尚，町田　功　ほか

（学会発表）

６件：丸井敦尚，町田　功，小野昌彦　ほか

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，19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
星野美保子
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）
江島輝美（産総研特別研究員，PD）
綱澤有輝（産総研特別研究員，PD）
横山隆臣（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 C. Segwaben（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）
松永いづみ（テクニカルスタッフ）
ほか客員研究員６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，31鉱種が経済産業省によって指定されている．現在，中国の成長減速などにより金属資源は全般に安値が続いているが，レアメタルは供給構造が不安定であるため，産総研では将来の危機に備えて基礎情報の収集や既存鉱山の権益確保などを進めている．鉱物資源研究グループは，省エネルギーに資するレアメタル資源（重レアアース，リチウムなど）を中心に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．

2016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．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選鉱実験を実施し，鉱物資源研究グループからも研究者を短期間派遣し，最適な選鉱技術の開発を目指している．

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．2016年度からミズーリ州に分布する IOCG 型鉱床に付随するレアアース資源の研究に参画し，特に鉱物学的研究や安定同位体を用いた地球化学的研究を通じて鉱床成因の研究および資源ポテンシャル評価を実施中である（写真１）．

写真１　米国地質調査所 Denver 支所でのコア調査（上），同ラボ訪問（下）

また，2016年度からカナダ・ブリティッシュコロンビア地質調査所との共同研究を開始した．ブリティッシュコロンビア州は豊富なレアメタル資源を有し，同地質調査所は高い研究ポテンシャルを有する．年度は同州東部のレアアース鉱徴を有するカーボナタイト岩体の現地調査を共同で実施した（写真２）．

写真２　カナダ・British Columbia 州東部での掘削コア調査（上），ヘリコプターでの移動風景（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．2016年度は，昨年度に開始した瀬戸・東濃地方に分布する未開発資源の窯業原料化に関する研究を継続している（写真３）． 本研究は， 同地域に分布する「青サバ」 と呼ばれる低品位鉱の賦存状況調査および選鉱による利用技術の開発を目的としている．また，海外産タルク鉱石の研究，国内ベントナイト・珪石鉱床の賦存状況に関する研究なども実施中である．

写真３　青サバ水簸物の湿式高磁力磁選による脱鉄実験

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「野辺地」「宮津」 などを調査・編集中である．

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 やレーザーラマン分光分析装置のの高機能化，MC-ICPMS や SHRIMP による安定同位体組成の分析ルーチンの開発を継続中である．

６．今後の展望

現在，レアメタルの需給状況は世界的にほぼ安定している．しかし，リチウムなど一部の元素は需給が逼迫して急激に値上がりしており，レアアースも今後中国国内の環境問題により生産が制限されれば値上がりに転じる可能性は高い．したがって，今後も予断を許さず，動向を注視する必要がある．国内の非金属資源も，カオリンや珪石など窯業に必須な鉱物資源が枯渇しつつあり，政策的・技術的に早急な対策が必要な状況にある．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貢献する所存である．

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28年度，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）
中嶋　健　（上級主任研究員）
鈴木祐一郎（主任研究員）
後藤　秀作（主任研究員）
佐藤　幹夫（主任研究員）
髙橋　幸士（研究員）
棚橋　学　（客員研究員，名誉リサーチャー）
徳橋　秀一（客員研究員）
松林　修　（テクニカルスタッフ）
中村　祐貴（テクニカルスタッフ，10月から）
潮崎　翔一（テクニカルスタッフ，９月まで）
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26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）
・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 石油開発（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）
・共同研究（西部ガス（株））「天然ガスに関する九州 CBM ポテンシャルを評価する FS 研究」（平成28年度）（地圏微生物研究グループの分担）
・科研費（研究活動スタート支援）「水蒸気爆発とマグマ爆発：噴煙中の水蒸気の同位体組成を利用した遠隔推定法開発」（平成28年度）
・研究部門グラント「国内における新たな炭化水素ガス資源の評価」（平成28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年度から３年間，表層型メタンハイドレートの資源量評価を目的とする経産省受託研究として，日本海等の集中的な調査を実施した．（全員）
・同プロジェクトでは，広域音響調査によるマウンド等の特異点の捜索（佐藤），AUV 深海音響探査による地形・地質構造調査や海洋電磁探査による比抵抗分布調査（森田・棚橋），ROV 潜航調査による海底観測と長期モニタリング等（佐藤・後藤）を実施し［写真 1］，再委託先の明治大学と協力しながら総合的な地層性状と資源量評価を行った．また，表層型メタンハイドレートフォーラム（明治大と共催）を開催して調査報告を行った［写真 2］．さらに，外部有識者による表層型メタンハイドレート資源量調査結果検討委員会を開催し，研究成果の妥当性が承認された．（全員）
・長尺 PC コア解析と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）
・繰り返す隆起によって堆積物中のガスハイドレートが分解する過程を数値シミュレーションで明らかにし，国際誌に公表した．（後藤）
・メタンハイドレート安定領域下限深度を推定することを目的に，上越沖海域で計測した地殻熱流量に基づき，温度構造モデルの構築を進めている．（後藤）

・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．（森田・他）

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 形成にも寄与しうる，石炭から直接メタンを生成するメタン菌の発見に至る研究に貢献し，Science 誌に公表した．（鈴木）
・CBM に関する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）
・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）
・シェールガス・オイルについて，北米等の文献調査とともに，本邦炭田堆積盆で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い，アジアへの国際協力に努めている［写真 3］．（鈴木・森田）

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テクトニクスについて，地形・地質調査を行い，地質学会で招待講演２件を行った．また，秋田堆積盆地の発達史について，The Geology of Japan の分担執筆を行った．（中嶋）
・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）
・深海チャネル－自然堤防－海底扇状地システムの貯留岩形態・根源岩ポテンシャルに関する最近の知見について石油技術協会シンポジウムで招待講演し，新潟頸城型原油の新たな形成モデルを提案するとともに同協会誌に公表した．（中嶋）
・科研費研究において，同位体平衡温度計を利用した地殻熱流量整備の基礎研究として，水蒸気の安定同位体組成を測定する新手法の開発を進め，学会発表等を行った．（髙橋）

3.4.　共同研究

・JX 石油開発（株）との共同研究として，野外調査や勉強会を継続的に実施しており，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］．（中嶋・鈴木・他）
・石油資源開発（株）との共同研究で，三陸や日高地域の調査および巡検を実施した．（中嶋）
・西部ガス（株）との共同研究として，九州地方の炭鉱跡の視察を行うとともに，石炭試料について総有機炭素量測定やロックエバル分析等による評価を実施した．（髙橋・鈴木・他）

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した情報供給を進めるとともに，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）

写真 1　ROV による海底地殻熱流量調査

写真 2　表層型メタンハイドレートフォーラムの開催

写真 3　CCOP-KIGAM 非在来型燃料資源会議（カンボジア，シェムリアップ市）

写真 4　北海道釧路市阿寒地域での露頭調査

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_2地中貯留に関する情報整備と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・揮発性有機物分解等）の実態解明を目指す．

2．グループの研究資源（平成28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

「地圏微生物の研究」
「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」
「深部未利用石炭の生物的天然ガス変換技術の開発」
「メタン生成補酵素 F430の分解プロセス解明」

委託研究費・研究助成金

「平成28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委託研究費）
「CO_2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）
「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）
「光合成とメタン生成のリンケージ：機能特異分子補酵素 F430分析という新手法の展開」（科研費）

共同研究費

「原油分解メタン生成微生物の探索と賦活化・導入条件に関する研究」（国際石油開発帝石（株）・東京ガス（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」（JX 石油開発（株））
「天然ガスに関する研究」（西部ガス（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），JX 石油開発（株），西部ガス（株），北海道科学技術総合振興センター，放射線医学総合研究所等と連携し，水溶性天然ガス・コールベッドメタン，メタンハイドレートの成因解明や有効利用，　枯渇油田の天然ガス再生技術と CCS・CO_2-EOR の影響，汚染地下水浄化技術の検討を重点的に進める．

4．27年度後期−28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，16S rRNA 及び *mcrA* 遺伝子の塩基配列に基づいて微生物の群集構造を解析した結果，炭素循環に関与する微生物の分布がハイドレートの有無，ならびに，深度と関係していることが示唆された．特にメタンハイドレート飽和率の高い堆積物から嫌気的メタン酸化アーキアに近縁の塩基配列が特異的に検出され，同堆積物の培養でメタン酸化活性が認められた．メタン酸化活性は塩分濃度が高い（海水の塩分濃度の）条件と低い条件の両方で検出されたため，過去にハイドレートが分解し間隙水の塩分濃度が低下したイベントが微生物の分布に影響を与えている可能性が明らかになった．

・MH21の研究の一部として，前項の東部南海トラフコア堆積物試料から，メタン生成アーキアの集積及び純粋培養を行った．様々な深度のコア堆積物から水素利用性・酢酸利用性・メチル化合物利用性のメタン生成アーキアが分離された．16S rRNA 遺伝子に基づく分子系統解析では，*Methanobacteriales*, *Methanomicrobiales*,

Methanosarcinales に帰属し，多くは，これまでにハイドレート胚胎海底堆積物から分離されたメタン生成アーキアとは異なる種であった．また，いくつかの純粋培養菌株の遺伝子配列は，コア堆積物試料から直接解析したアーキア遺伝子と一致し，アーキア群集の優占種であった．温度の違いによるメタン生成活性を評価したところ，分離された深度に相当する温度においてメタン生成が認められたことから，原位置のメタン生成において重要な役割を担っていることが示唆された．

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

・水溶性天然ガス田における堆積有機物の微生物分解メタン生成過程を明らかにすることを目的とし，千葉県の水溶性天然ガス田から採取されたサンプルを用いてメタン生成アーキアに着目した分子遺伝学的解析を行い，検出された新規メタン生成アーキア（図１）の分離同定を行った．本研究で分離したメタン生成アーキアの生育至適温度・pH・塩濃度がいずれも帯水層の環境に一致したため，このアーキアが現在も地下でメタンを生成しており，天然ガス資源の形成に寄与している可能性が明らかになった．

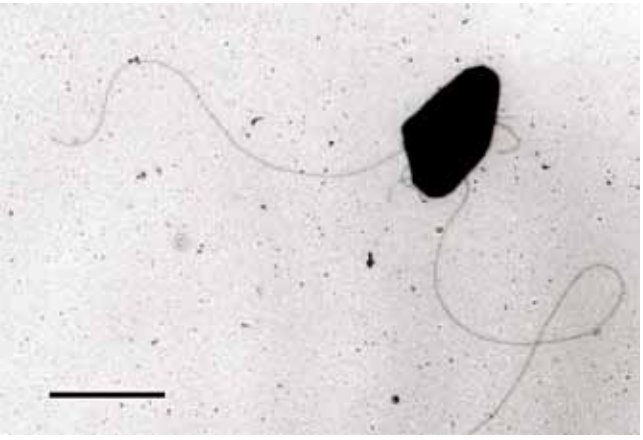


図１　千葉県の水溶性ガス田のガス付随水から分離された新種のメタン生成アーキア．スケールは1μm.

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

・山形県の油田（以下，Y 油田と略記）と秋田県の油田（以下，A 油田と略記）の坑井から採取した油層水と原油に WS 培地を添加後，油層環境を模擬する温度・圧力条件で長期間培養し，原油分解メタン生成ポテンシャルの有無を調査した．培養開始30～60日後の間に，全ての培養系で油層水に元々含まれる酢酸などの有機酸からのメタン生成反応を観察した．その後，A 油田の培養系からはメタン生成が観察されなかったのに対し，Y 油田の培養系からは350日以上経過後に顕著なメタン生成が観察された．Y 油田の培養系は同じ培養条件での継代が可能で原油分解メタン生成プロセスが継続的に観察されたため，当該微生物コミュニティの集積が可能となった（図２）．集積培養後にメタゲノム解析を行った結果，Y 油田由来の原油分解メタン生成微生物コミュニティを構成する４種の微生物ゲノムを決定することに成功し，原油分解反応に中核的な役割を担う微生物群を明らかにした．

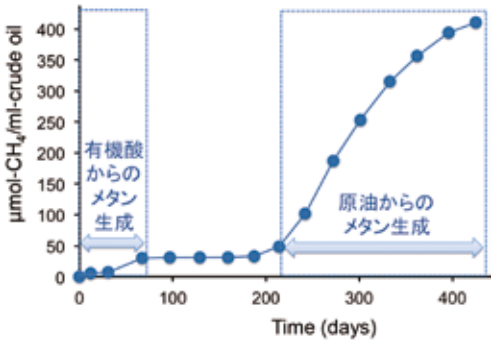


図２　山形県の油田（Y油田）の油層微生物の継代培養（３代目）におけるメタン生成．

4.4. CO_2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

・枯渇油田を対象とした CO_2 地中貯留の影響を評価するため，国内油田の３カ所の生産井から採取した油層水と原油を用いて，現場油層環境を模擬する高温高圧培養実験と CCS 後の高濃度 CO_2 環境を模擬する高温高圧培養実験を進めた．その結果，ある１カ所の油田の現場油層環境の培養条件において生物的原油分解反応が観察された．一方，CCS 環境を模擬する培養条件ではいずれの油田においても，培養27ヶ月で未だ原油分解反応は観察されていない．

・一方，原油分解のポテンシャルが存在しない油田に原油分解微生物コミュニティを添加するバイオオーグメンテーションに対して，CO_2 地中貯留の影響を評価するため，上記の原油分解微生物コミュニティを用いた高 CO_2 濃度の高圧培養実験を進め，原油分解メタン生成のモニタリングを継続している．

4.5. 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

・深部地下油層環境から分離したメタン生成菌の石炭利用メタン生成ポテンシャルをより詳細に検討するために，多様な石炭試料を用いて培養試験を行った結果，石炭化度の低い褐炭に限らず，亜瀝青炭や瀝青炭の場合でも，本菌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広がった．また，新規石炭分解メタン生成微生物群の獲得を目指し，北海道の地下サンプルにおける石炭分解ポテンシャルの評価を行った．その結果，道北地方の炭田の地下水試料において高いメタン生成ポテンシャルを見出した．

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

・ 深部地下環境から分離した *Methermicoccus* 属のメタン生成菌が，30種類以上の多様なメトキシ芳香族化合物を直接利用してメタンを生成することを発見した．安定同位体トレーサー法でその代謝経路を解析した結果，これまで知られている３種のメタン生成経路とは全く異なる第４のメタン生成経路であることを明らかにした． その経路の詳細を決定するためには更なる研究が必要であるが，今のところ①二酸化炭素還元と②酢酸分解をパラレルに経由する可能性が見出された（図３）．さらに，石炭からのメタン生成ポテンシャルを評価した結果，本菌は単独で石炭から直接メタンを生成する事が明らかになり，深部未回収石炭資源の天然ガス化回収技術の可能性が示された．

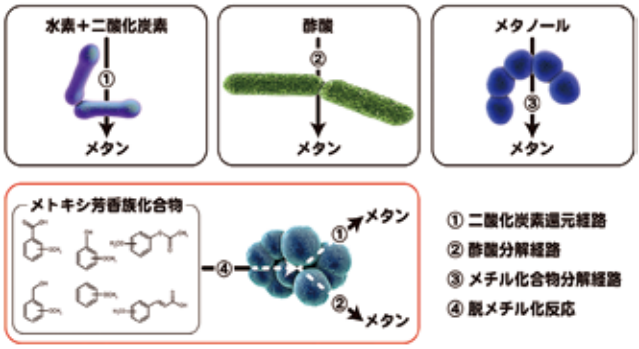


図３　既知のメタン生成経路（上）と今回発見したメトキシ芳香族化合物からのメタン生成経路（下）．

4.7. 基礎的研究

・メタン酸化菌が濃集する黒海の微生物マット中の F430定量分析と同位体分析を行った． その結果，世界で初めて天然環境中の補酵素 F430の炭素同位体比の測定に成功した． 未培養である嫌気的メタン酸化アーキア由来の補酵素 F430の炭素同位体比は，基質であるメタンの同位体比を反映し， 補酵素 F430の安定同位体比が２つの潜在的な起源生物であるメタン生成アーキアと嫌気的メタン酸化アーキアを識別する指標となることを明らかにした．また，補酵素 F430の同位体分析のために新しく開発した夾雑物除去法を応用し， 下北半島沖の海底下2000 m の石炭層において，補酵素 F430を検出する事に成功し，科学史上最も深部の海底堆積物中から生きたメタン生成アーキアのシグナルを得ることに成功した（図４）．

・堆積環境の変化が帯水層中の生物的メタン生成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．16S rRNA 遺伝子と *mcrA* 遺伝子に基づく遺伝子解析の結果，メタン生成菌を含む微生物群集構造は堆積後の地層水塩分濃度の変化よりも堆積環境の違いにより強く影響されることが示唆された．また，CO_2還元メタン生成経路が優占した地層においてメタン水素同位体変化が地層水の水素同位体変化に相関しなかったことから，現在起こりうるメタン生成は地層に含まれるメタン貯蔵量に大きく寄与していないことが示唆された．

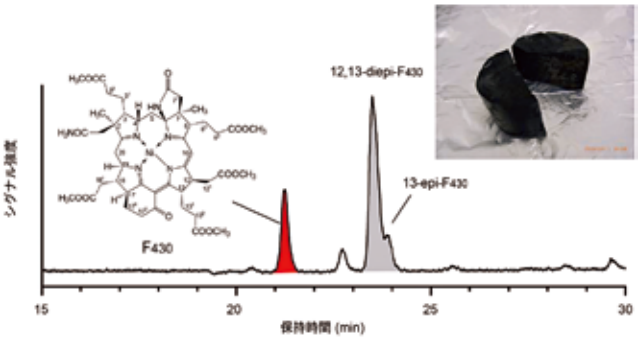


図４　IODP の第337次航海で採取された下北半島沖海底下約2000m の石炭層中から検出された補酵素 F430のクロマトグラム（Inagaki et al., 2015, Science を改変）．

5．主な論文成果（2015年10月以降）

Yoshioka H., Mochimaru H., Sakata S., Takeda H., Yoshida S. (2015) Methane production potential of subsurface microbes in Pleistocene sediments from a naural gas field of the dissolved-in-water type, central Japan. Chemical Geology **419**, 92-101.

Jiang N.-J., Yoshioka H., Yamamoto K., Soga K. (2016) Ureolytic activities of a urease-producing bacterium and purified urease enzyme in the anoxic condition: Implication for subseafloor sand production control by microbially induced carbonate precipitation (MICP). Ecological Engineering **90**, 96-104.

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

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

Katayama T., Yoshioka H., Takahashi H., Amo M., Fujii T., Sakata S. (2016) Changes in microbial community structures associated with gas hydrates in subseafloor sediments from the Nankai Trough. FEMS Microbiology Ecology, in press.

Kaneko M., Takano Y., Ogawa N., Sato Y., Yoshida N., Ohkouchi N. (2016) Estimation of methanogenesis by quantification of coenzyme F430 in marine sediments. Geochemical Journal, in press.

MochimaruH., Tamaki H., Katayama T., Imachi H.,

Sakata S., Kamagata Y. (2016) *Methanomicrobium antiquum* sp. nov., a hydrogenotrophic methanogen isolated from deep sedimentary aquifers in a natural gas field. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, in press.

地圏化学研究グループの研究紹介

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28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
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
三好陽子	粘土鉱物学，無機地球化学
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
カウナン春奈	テクニカルスタッフ

2）主な研究資金（平成27年度，平成28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」
「非金属鉱物資源の探査～改質～機能性材料創成プロジェクト」
・委託研究・研究助成
「80℃以上の低温廃熱を用いる革新的蓄熱材及びシステムの開発の開発」（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）
・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」

3）主な研究設備

・ガスハイドレート合成実験装置
・ガスクロマトグラフ
・イオンクロマトグラフ
・ESR（電子スピン共鳴）装置
・二酸化炭素吸着量評価装置
・水蒸気吸着量測定装置　　など

3．平成27年度～28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．

平成27年度は，天水の浸入による地化学データへの影響を排除するために，南関東ガス田の塩素濃度の高い試料のみを対象として，堆積盆地スケールでの坑井の仕上げ層準毎の地化学指標の変化を識別した．梅ヶ瀬もしくは梅ヶ瀬・大田代層仕上げと大田代・黄和田層以下仕上げの坑井で有機物分解／メタン生成に関連する地化学指標に明瞭な違いが認められた．前者のトレンドは，有機物分解／メタン生成の素反応が比例的に進行したことを示すと解釈した．圧密に関連して，微生物が活動する深度帯に長く留まった浅層の鹹水でメタン生成指標はピークを示し，深層では低くなることを確認した．

また日本国内での石油・天然ガス資源情報については，Geology of Japan に Hydrocarbon and iodineresources in Japan としてまとめたものが出版された．

北海道東部の温泉ガスの測定を行った結果，ネオペンタン濃度の高い試料の存在が確認された．同試料のイソブタン／n- ブタン比（微生物による分解の指標）は低いことから，高いネオペンタン濃度は微生物による分解には起因しないことが推定された．

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．

層状珪酸塩の有機 - 無機コンポジット材料としての利用を目的に，天然に産する 2 八面体型層状珪酸塩であるセリサイトを加熱により脱水酸基化した試料を用いて，アルキルアンモニウム溶液と反応させることで有機複合体の合成を行った．生成物の分析を行った結果，ゲスト分子がセリサイト層間に 1 層おきに挿入（ステージング構造を形成）する現象を見出し，セリサイトの剥離層シーケンスの制御が可能となった．また高湿度領域での優れた吸着性能を有するイモゴライトにおいて，工業的な利用に向けた合成法を検討した．加熱前の前駆体調整において，pH を従来より酸性側にすることにより，これまでより10倍濃い濃度からの合成が可能となった．

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，日本原子力研究開発機構と物質・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27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，福島県の放射性 Cs 汚染地域において花崗岩の風化生成物として普遍的に認められるカオリン鉱物に着目し，カオリナイトおよびハロイサイトに対するセシウムの吸着実験および脱離実験を実施した．

カオリナイトは，関白産（JCSS-1101，日本粘土学会参考試料）と Georgia 産 (KGa-1b，The Clay Minerals Society 標準試料）を用いた．ハロイサイトは，Utah 産（Halloysite nanoclay，Sigma-Aldrich 製）を用い，層間水を保持した加水ハロイサイトと層間水を除いた脱水ハロイサイトを調製した．

Cs 吸着量の序列は，加水ハロイサイト＞脱水ハロイサイト≫カオリナイト G（Georgia 産）＞カオリナイト K（関白産）の順であり，ハロイサイトがカオリナイトよりも高い Cs 吸着能を有することが明らかとなった．

Cs 吸着量の大きかった加水ハロイサイトと脱水ハロイサイトについて，1 mol/L 硝酸アンモニウム水溶液を用いた脱離試験を行った．その結果，加水ハロイサイトと脱水ハロイサイトの両者とも Cs の脱離率は約65% 程度であった．

このことから，天然におけるような Cs 存在量が非常に低濃度の条件下では，カオリン鉱物への Cs イオンの吸着と保持の可能性は十分にあることが明らかとなった．

4．平成27年度後半～平成28年度前半の研究成果と受賞（主なもの，波線部がグループ員）

【受賞】

日本粘土学会　平成28年度奨励賞　三好陽子

「ベントナイトのメチレンブルー吸着量標準測定法の研究」

【誌上発表（論文）】

K. Morimoto, K. Tamura, H. Yamada, T. Sato and M. Suzuki. (2016) Determination and reduction of Fe(III) incorporated into Mg-Fe layered double hydroxide structures, *Applied Clay Science*, 121-122, pp.71-76

K. Morimoto, K. Tamura and H. Sakuma (2016) Generation of second-stage structure in the alkylammonium cation and potassium sericite mica system, *Chemistry Letters*, 45, pp.336-338.

三好陽子，宮腰久美子，高木哲一（2016），ベントナイトのメチレンブルー吸着量試験－試験方法による結果の相違について－，粘土科学，54（２），pp.65-73.

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

1．グループの研究目的と課題

本研究グループでは，地熱・地中熱，鉱物資源，メタンハイドレート等の地下資源分野，放射性廃棄物地層処分，CO2地中貯留等の地下環境利用分野，そして土壌汚染等の地下環境保全分野，さらに加えて地盤液状化，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28年度においては，以下の７項目を中心にしている．

➢ 地下資源評価として，

１）海底熱水鉱床やメタンハイドレート等の探査を目指した海底電気・電磁探査法や，陸域における強制分極法による鉱物資源探査，坑井利用探査技術等の基礎研究，現場調査を行う．

２）地中熱利用における事前評価手法の研究，地熱地域における広域熱水系把握調査および空中電磁探査のデータ処理・解析に関する基礎的技術開発を行う．

➢ また，地下環境の利用分野として，

３）地層処分場選定における地質環境評価のため，沿岸域モデルフィールドにおける２次元および３次元弾性波探査反射法適用試験や海底電磁探査の取りまとめを行う．

４）二酸化炭素地中貯留プロジェクトでは，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や米国テキサス州ファーンズワーズ実証フィールドでの実験調査の取りまとめを行い，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）土壌汚染に関連して，油分土壌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．また鉱滓ダム周辺域での汚染調査への物理探査の適用研究を行う．

➢ 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（2016.10.1現在）

以下の11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）
上田　匠（主任研究員）
小森省吾（研究員）
吉田　聖（リサーチアシスタント）
中山京子（テクニカルスタッフ）
木村夕子（テクニカルスタッフ）
紙谷　進（派遣職員）

部門内では，地下水研究グループ，CO2地中貯留研究グループ，鉱物資源研究グループ，燃料資源地質研究グループ等，産総研内では，再生可能エネルギー研究センター，活断層・火山研究部門，地質情報研究部門，知能システム研究部門等と，さらに，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．

・平成27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28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28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・補助事業，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的研究」（JAMSTEC 委託研究，地質情報研究部門等との連携）

等々.

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

3．最近の主な研究内容と成果

3.1.　公表論文等

中島善人（2017）画像セグメンテーション用アルゴリズム GrowCut の解説：液状化画像を例題にして．地学雑誌，（印刷中）.

檀上　徹・高倉伸一・有光悠紀・藤本将光・石澤友浩・深川良一（2015）重要文化財後背斜面における比抵抗法電気探査を用いた地下水帯の把握，歴史都市防災論文集，**9**, 9-16.

高倉伸一（2016）調査地の特性や探査の目的に応じた多チャンネル電気探査装置の開発，物理探査，**69**, 117-126.

光畑裕司（2016）マルチ周波数電磁探査法による浅層地盤調査および埋設物探査，No-Dig Today, **96**, 8-11.

Seki, K., Kanda, W., Tanbo, T., Ohba, T., Ogawa, Y., Takakura, S., Nogami, K., Ushioda, M., Suzuki, A., Saito, Z., Matsunaga, Y. (2016) Resistivity structure and geochemistry of the Jigokudani Valley hydrothermal system, Mt. Tateyama, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res*. **325**, 15-26.

Nakashima, Y. and Komatsubara, J. (2016) Seismically induced soft-sediment deformation structures revealed by X-ray computed tomography of boring cores. *Tectonophysics*, **683**, 138-147.

Yokota, T., Jinguuji, M., Yamanaka, Y. and Murata, K. (2015) Seismic subsurface structure surveys of the liquefaction occurred areas - A case study at the Hinode district, Itako, Ibaraki, Japan, Proceedings of 2015 SEG Conference Near-Surface Asia Pacific Conference.

3.2.　熱伝導率プロファイリング法の実用化研究

熱伝導率プロファイリング法（TCP：Thermal Conductivity Profiling）は，標準貫入試験等の小口径ボーリングロッドを用いて実施できる簡易な地盤熱伝導率の調査法である．現在，地中熱交換機の設計に必要な地盤の熱伝導率の計測には，熱交換機の熱応答を計測するサーマルレスポンステスト（TRT）が主流であるが，コストと時間がかかる．地中熱の利用拡大のためには，なるべく調査にコストをかけず，また，調査機会を増やしていくことが重要である． TCP 法は，土木調査で一般的に使われる標準貫入試験の小口径ボーリング孔を用いて調査ができるため，地中熱目的のボーリング調査だけでなく，一般的な土木建設・住宅建築の調査における実施も容易である．しかしながら，TCP 法の適用例は，多いとは言えず，しかも既に標準手法となっている TRT との比較を行った例も少ない．本研究では，平成27年度，福島県より受託した福島県産総研連携再生可能エネルギー等研究開発補助事業の一環として，福島市・郡山市・いわき市の 3 点において TCP法およびTRTの比較実験を行った. 本実験においては，標準貫入試験で用いるボーリングロッドおよび U チューブでの TCP 法を行い，同時に，同じ U チューブで TRT を行った．さらに，掘削時に採取したボーリングコアサンプルの熱伝導率を測定した． これらの結果を図 1 に示す．サンプルの熱伝導率の値は，TCP，TRT に比べて若干低いが，TCP および TRT の結果は，ほぼ同じ結果となった．サンプルの結果が低くなった原因としては，試料採取後の含水率の低下や間隙率の変化が考えられる. TCP法は, サーマルレスポンス法と比べて，コストの低下や調査機会の増大が見込まれるため，今後の発展が期待される.

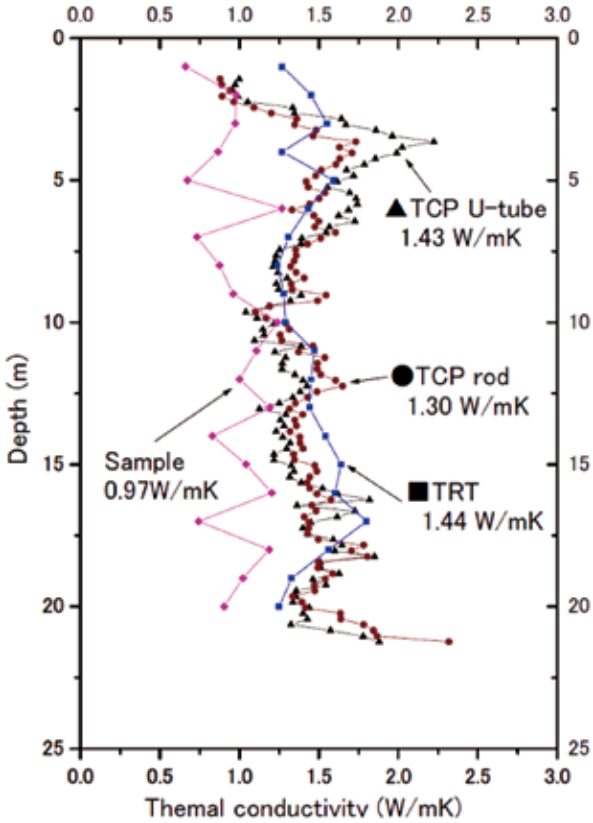


図 1　産総研再生可能エネルギー研究所における比較検証試験の例.

3.3.　比抵抗モニタリングによる斜面内部の水分量変化の可視化

産総研と国立研究開発法人防災科学技術研究所は，斜面内の土壌水分量の空間的変化を可視化する技術の確立を目指した共同研究を実施している．その一環として，電気探査による比抵抗モニタリングの有効性を検討するため，大型降雨実験装置を用いて降雨量や降雨強度を制御した人工降雨を盛土に降らせる実験を実施し，その間の盛土斜面内の比抵抗変化を連続的に観測した． 図 2 は実験に用いた盛土と電気探査を実施した測線を示す． 測線上には37本の電極が50cm 間隔に設置されている．今回の実験では，高速な電気探査計測が可能な装置を用いて，1 分あるいは 2 分間隔で比抵抗モニタリングを実施し，盛土斜面内

の比抵抗断面を求めた．時間雨量120 mm/h の降雨を60分間継続させた場合の，降雨開始直前の比抵抗構造に対する降雨開始後20分，40分，60分（降雨終了時），80分（降雨終了後20分）の比抵抗変化率を図 3 に示す．これを見ると，比抵抗の下がる領域が降雨開始から徐々に深部に広がっていく傾向がわかる．本研究によって，比抵抗モニタリングは短時間降雨によって起こる斜面内の土壌水分変化をリアルタイムで観察する方法として有効であることが実証された．

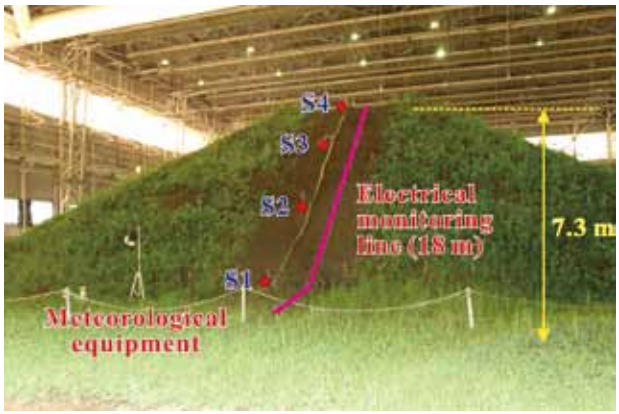


図 2　大型降雨実験装置内の盛土と電気探査測線．

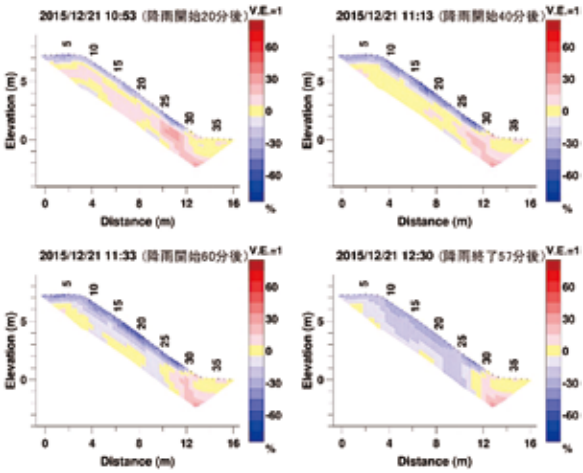


図 3　時間雨量120 mm/h の降雨を60分間継続させた場合の，降雨開始直前の比抵抗構造に対する降雨開始後20分，40分，60分，80分の比抵抗変化率．た場合の，降雨開始直前の比抵抗構造に対する降雨開始後20分，40分，60分，80分の比抵抗変化率．

3. 4.　X 線 CT による液状化コアの非破壊観察法の高度化研究

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て地盤液状化リスク調査・評価研究を担当した．その成果のひとつとして，X 線 CT を用いた液状化コアの非破壊観察法の高度化を紹介する．

ボーリングコアを調べて過去の液状化の痕跡（砂脈など）を探すことは，液状化リスク評価作業にとって重要である．しかし，従来のようにコアの半裁面を 2 次元的に観察するだけでは，砂脈のような局在化する地質構造を見落とす場合があり，結果としてそのサイトの液状化リスクの過小評価につながるおそれがある．そこで，我々は医療用 X 線 CT 装置でコアをフル 3 次元非破壊スキャンして，コアに埋め込まれているすべての砂脈を抽出する研究を行った（Nakashima and Komatsubara, 2016; 中島，2017）．

東日本大震災時に地表で噴砂が確認された利根川下流域で採取したボーリングコア（直径約6cm）の CT 撮影結果を図 4 に示す．板状の薄い砂脈がほぼ垂直に下位の砂層から上位のシルト層に貫入している様子が明瞭に確認できる．砂脈はコアの端に位置しているので，コアの半裁面の取り方によってはこの砂脈を外してカットしてしまうリスクを容易に想像でき，したがって CT によるフル 3 次元スキャンの有効性を例証できた．

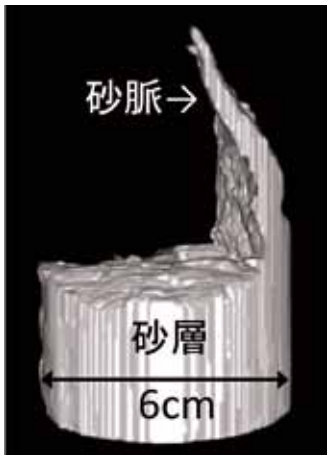


図 4　液状化したボーリングコアの 3 次元 CT 画像．砂層からシルトに砂脈が貫入している様子が確認できる．ただし，砂脈の 3 次元形状がわかりやすいように，シルト部分の画素は透明に処理してある．

3. 5.　液状化発生地域における表面波探査の実施

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震時に大規模な液状化被害にあった利根川下流部にある，千葉県香取市北部の利根川北岸部の香北地区（北佐原地区）で，表面波探査を実施し，S波速度分布を求めた．その結果，実験フィールドは，約10m 以深の高速度を示す砂質基盤層，深度約 3 ～10m に存在する低速度を示すシルト質層および比較的高速度の表層砂層に三つに区分された．

全測線の深度2.5m の *Vs* 値を抜き出し，水平方向に平滑化した．図 5 中，平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の際に当該地域の砂質地盤が液状化を起こすかどうかの領域の境界を示す速度範囲165～170m/s をピンクの網掛けで示した．表層が砂層の領域で，ピンクの網掛けより *Vs* が大きい領域では液状化が発生しない．また，表層が砂質と解釈された領域を測線開始位置から近いものより順に砂質区間 1，2，3 とした．また，砂質領域以外の表層はグレーで網掛けし，液状化の考察からは除外した．この結果より，当該領域での液状化発生は砂質領域 3 の

一部（図中の矢印部）のみに限定されることが推測された．この結果は，液状化に伴う噴砂発生の領域とよく一致し，*Vs* の値を用いた液状化発生の検討は十分に現実的であるということができる．

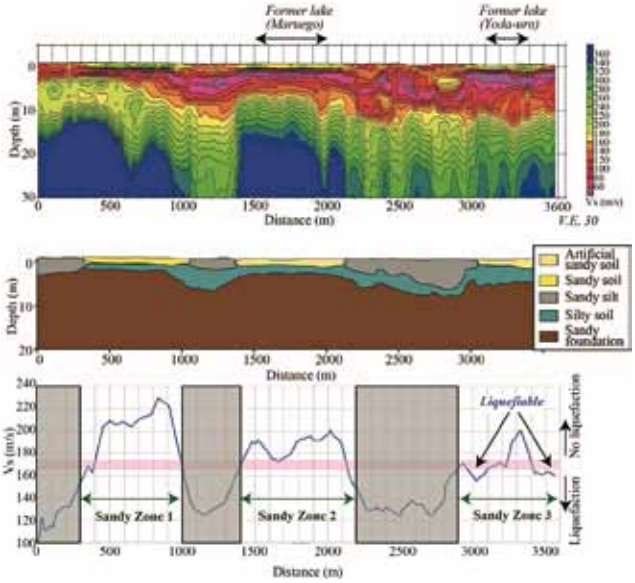


図 5　千葉県香取市における表面波探査結果およびその解釈．

3. 6.　災害ロボットプロジェクトへの参画

近年の度重なる各地での地震・火山・土砂災害では，航空撮影や地形測量等に加え，迅速かつ確実な地下・地中の情報取得に対する期待や要請が高まっている．当グループでは，無人機の研究を専門とする知能システム研究部門フィールドロボティクス研究グループ（情報・人間工学領域）と連携し，既存電磁探査法を無人空中機（以下 UAV: Unmanned Aerial Vehicle）に搭載するための技術開発に取り組んでいる．具体的にはNEDOプロジェクト（2014～2015年度）及びNEDO補助事業（2016年度）において，火山災害と土砂災害における無人機を利用した総合的な対応手法の構築を目指す中で，立ち入り困難地域での埋没物の発見や土壌状況の把握のために電磁探査の適用を図っている．探査目標は，地下数 m までの埋設物の検出や比抵抗構造の推定であり，UAV への安定搭載と自動データ取得の確立を目指し，（１）安定した吊下げ，（２）自動飛行と位置情報の取得，（３）迅速なデータ解析の研究開発を進めている．（１）については２点吊りと尾翼の装着により安定飛行を実現し解析可能な品質のデータを取得が可能となった．また（２）のために新たに GPS と高度計を併せた小型装置を作製し，位置情報を取得可能とし，（３）については電磁応答データと位置情報を同時に表示するソフトウェアを開発した．機器及びソフトウェア開発に加えて，2014年度には桜島火山（鹿児島県），2015年度には赤谷地滑り地域（奈良県）で，それぞれ火山災害，土砂災害を想定した現場試験に臨み，得られた成果や問題点を踏まえ，より低空での自動飛行やリアルタイムでの統合データ表示を目指した研究開発を実施中である．

図 6　災害ロボットプロジェクトにおける各種技術開発項目．

3. 7.　海底掘削試料の即時 IP 特性計測技術の開発

次世代の海底熱水鉱床探査技術として，海底 IP 探査への期待が高まっている．IP とは誘導分極（Induced Polarization）の略称で，硫化鉱物を含んだ岩石に印加された電圧の変動により，硫化鉱物界面に電荷の蓄積・開放が生じる現象である．IP 探査では，上記の現象を電圧・電流の位相差や充電率として計測する．当グループでは，未だ開発途上の技術である海底 IP 探査に先駆け，海底下の掘削岩石試料を用いた IP 特性の船上即時計測に関する技術開発を行っている．IP 特性の船上測定装置として，小型・軽量で携帯性に優れる高性能電気化学測定器を導入し，さらに，試料の形状や固結の状態に応じ，使用するサンプルホルダーやプローブを簡易に切り替えられる計測システムを開発した（図７）．本システムにより，海底掘削試料で想定される 0.1-1Ωm の低比抵抗試料の IP 特性を広周波数帯域（0.01Hz-100kHz）で計測することが可能となった．今後実施が予定されている海底熱水鉱床掘削調査で本システムを適用し，海底下鉱床の IP 特性の把握と解明を目指す予定である．

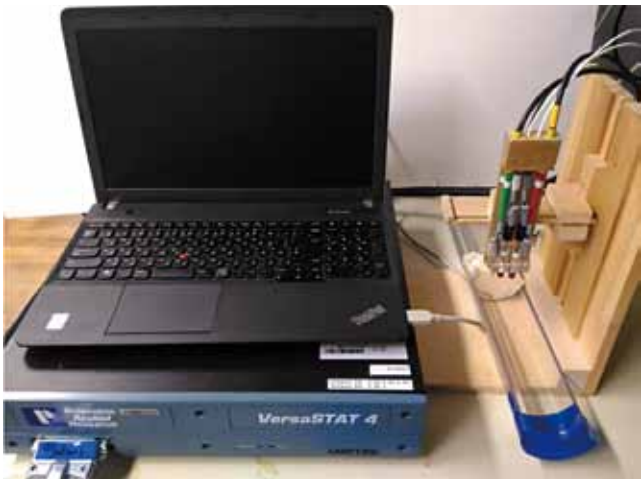


図 7　船上即時 IP 特性計測システム．
電気化学測定器は PC により制御され，右側の計測部に掘削試料をセットして IP 特性計測を行う．

CO2 地中貯留研究グループの紹介

Introduction of the CO2 Geological Storage Research Group

CO2地中貯留研究グループ長：徂徠正夫
Leader, CO2 Geological Storage Research Group: Masao Sorai
e-mail: m.sorai@aist.go.jp

1．グループの研究目的

地球温暖化対策として CO_2 の排出削減が求められる中，CCS 技術への期待が高まっている．国際エネルギー機関（IEA）の分析では，全球平均気温上昇を 2℃ 以内に抑制するためには，2050年時点で CCS により17%の削減が必要との見積りもなされている．このような状況に鑑み，当グループでは，安全に管理された CO_2 地中貯留技術の確立を念頭に，低コストのモニタリング技術の開発や，地化学および力学等を考慮に入れた CO_2 の挙動解析などに取り組んでいる．一方，これらの研究開発成果は，CO_2 地中貯留以外の分野においても適用可能であり，地圏環境の利用と保全に関わる研究や，資源の安定供給に貢献する地熱資源等の再生可能エネルギーの研究にも取り組んでいる．

2．各研究項目の内容

平成27年度までの 5 年にわたり，当研究グループを中心として，経済産業省からの受託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業」において，「弾性波探査補完モニタリング技術の開発」と「遮蔽性能評価技術の開発」に関する研究開発を実施してきた．以下に主な研究成果を紹介する．なお，これらの課題は，今年度から「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発事業」において，二酸化炭素地中貯留技術研究組合の中で，実用化に向けてさらに加速させる方向で実施中である．

2.1.　弾性波探査補完モニタリング技術の開発

本課題では，重力，自然電位，AE（Acoustic Emission）などの多面的なモニタリング技術を CO_2 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，長期的なモニタリングコストの低減を目指している．特に，重力モニタリングに関しては，苫小牧の観測点において超伝導重力計による1年半以上の観測を成功させ，これまでの測地研究等で想定されなかった海岸近傍環境において超伝導重力計の使用が可能であることを実証した（図１）．また，取得したデータに対してノイズ等の評価を行い，数μGal のトレンド成分の検出に成功した．これまで継続して観測を行ってきた米国・南西部炭素隔離地域パートナーシップの CO_2 大規模圧入テストサイトであるファーンズワース（米国テキサス州）での成果や，ポストプロセッサを用いたケース・スタディ結果等を考慮した結果，重力が CO_2 地中貯留の長期間モニタリングに使える監視手段として有望であることが示された．

図１　苫小牧実証試験サイトにおける重力測定

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_2 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（ポストプロセッサ）の開発・整備を行い，長期 CO_2 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，遮蔽層がポーラス媒体である場合とフラクチャー岩体である場合を比較するために，開発したポストプロセッサを用いて反射法の変動予測計算を実施した．CO_2 圧入後の潜在リスクとして想定される大きな断層の開口に比べて反射法等で確認しづらいより小さなフラクチャーがあった場合，等価なポーラス媒体よりも漏洩速度が速まる可能性があることが明らかとなった．

2.2.　遮蔽性能評価技術の開発

ジオメカニクスを考慮した断層モデリング手法の開発では，流体流動－岩石力学（ジオメカニクス）連成シミュレーション手法をわが国の地質条件に適した形にカスタマイズすることで，CO_2 圧入に伴う地層・岩盤の動的応答を事前評価し，その発生を避けることのできる圧入条件を導くことを目指している．モデリングの詳細は地圏メカニクス研究グループの紹介に記載されているが，当グループでは各種堆積岩についてせん断－透水実験を行い，変形に伴う浸透率の挙動が硬岩と軟岩で異なることを示すとともに，浸透率の構成則を構築した．ここで得られた知見は数値シ

ミュレーションの精度を支配する重要な要素の一つとなる．

CO_2移行性能評価技術の開発では，我が国の一般的な地質構造としての砂泥互層に関して,CO_2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，砂泥互層に対応したシール圧の評価手法の検討，砂泥互層内での化学的反応プロセスの評価，および砂泥互層内でのCO_2挙動シミュレーションを行った．シール圧の評価手法の検討では，地下1,000 m の温度・圧力条件において，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た．最終的な知見として，スレッショルド圧－浸透率の相関性に対しては，構成粒子のサイズ分布が均一か分散かが重要な因子であり，形状や組成の効果は必ずしも大きくないことが明らかとなった．また，各種堆積岩のスレッショルド圧は，混合粒径の球状シリカに対する近似直線と，全焼結体のスレッショルド圧の下限値に相当する近似直線で挟まれた範囲に含まれることが示された．次に，化学的反応プロセスの評価では，CO_2地中貯留のナチュラル・アナログとみなせる炭酸水素塩泉において現場反応実験を行った（図２）．今年度はステンレス製配管を設置して大気圧よりも高い圧力で CO_2を注入することで，CO_2圧入井近傍で予想されるような炭酸塩鉱物の溶解を実現し，その際の溶解速度を計測することに成功した．さらに，砂泥互層内でのCO_2挙動に関する感度解析シミュレーションからは，泥勝ち層と砂勝ち層の互層系に関して，互層とするか均一層とするかでは圧入後の CO_2の挙動に大きな違いが生じるため，CO_2地中貯留の予測をする上では互層構造の識別が重要であることが示された．

図２　含 CO_2泉での鉱物反応実験

2.3.　その他の研究グループの活動

科研費補助金での CO_2地中貯留に関わる基礎的研究や地熱関連での民間共同研究の実施に加えて，韓国 KIGAM とのCO$_2$地中貯留に関するワークショップの共同開催など，国際的な連携も進めている．

３．グループの研究体制

CO2地中貯留研究グループは，以下の体制で研究を実施している．

徂徠正夫（研究グループ長）
西　祐司
杉原光彦
藤井孝志
加野友紀
後藤宏樹
石戸恒雄（テクニカルスタッフ）
田中敦子（テクニカルスタッフ）
當舎利行（産学官制度来所者）
上原真一（産学官制度来所者）
池田　博（産学官制度来所者）

４．最近の主な研究成果（2014年以降）

Sorai, M., Fujii, T., Kano, Y., Uehara, S. and Honda, K. (2014) Experimental study of sealing performance: Effects of particle size and particle-packing state on threshold pressure of sintered compacts. *J. Geophys. Res.*, 10.1002/2014JB 011177.

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

藤井孝志，上原真一，林　敬太，徂徠正夫，高橋美紀，中尾信典（2015）CO_2地中貯留における泥岩の遮蔽性能に及ぼす有効圧変化の影響．資源・素材学会誌，131, 509-517.

Fujii, T., Uehara, S. and Sorai, M. (2015) Impact of effective pressure on threshold pressure of Kazusa Group mudstones for CO_2 geological sequestration. Mat. Trans., 56, 519-528.

Fujii, T., Funatsu, T., Oikawa, Y., Sorai, M. and Lei, X. (2015) Evolution of Permeability during Fracturing Processes in Rocks under Conditions of Geological Storage of CO_2. Mat. Trans., 56, 679-686.

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

土壌・地下水汚染，地球温暖化及び放射性物質を含む各種廃棄物の管理など実社会が直面している種々の課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，国際協力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，多様なバックグランド，スキル及び豊富な実績・経験を有する人材の確保，または必要な人材との連携・協力，内外部研究資金の獲得及び研究ファシリティの整備に努力・邁進している．

2.1.　グループメンバー構成（H28.10時点）

張　銘（グループ長）
村尾　智
川辺能成
原　淳子
坂本靖英（兼務）
保高徹生
杉田　創
井本由香利
栗原モモ（産総研特別研究員）
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）
野呂田 晋（産学官制度来所者）
山野辺純一（産学官制度来所者）
内田真理子（産学官制度来所者）
中村謙吾（産学官制度来所者）
稲毛孝章（産学官制度来所者）
堀　睦（産学官制度来所者）
黒澤暁彦（派遣）

また，部門内では，鉱物資源研究グループや物理探査研究グループ，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，海外では，米国EPA や複数の中国の大学及び中国科学院傘下の研究所と連携・協力し，研究開発を進めている．

2.2.　主な研究ファシリティ

多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．

・自然由来汚染の調査とリスク評価技術
・VOCs による複合汚染の浄化対策技術
・水中低濃度放射性 Cs の迅速計測技術
・重金属類汚染の浄化及び不溶化対策技術
・有用微生物コンソーシアムと集積培養技術
・多相流物質移行解析及びリスク評価技術
・CO_2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
・土壌中腐植物質が有害重金属の移行に及ぼす影響の評価技術
・自然由来汚染の判別技術
・吸着材の性能評価技術
・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
・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
・難透水性材料の高精度透水試験技術
・地盤と岩盤材料を対象とした拡散試験技術
・酸化・還元条件を制御したカラム試験技術
・鉛ガラスの溶出試験技術
・ジオインフォマッチクスなど

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．

主要研究課題については，グループのホームページに掲載しており，下記 URL : https://unit.aist.go.jp/georesenv/georisk/japanese/home/index.html

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

5．主な論文成果（平成27年10月以降）

Yoshikawa, M., Zhang, M. and Toyota, K. (2016): Enhancement and Biological Characteristics Related to Aerobic Biodegradation of Toluene with Co-existence of Benzene, *Water, Air, & Soil Pollution*, DOI 10.1007/s11270-016-3050-5.

Hara, J., Sakamoto, Y. and Kawabe, Y. (2016): Evaluation of Natural Degradation of Persistent Organic Chemicals in Acid Sulfate Soils Distributed in a Coastal Area, *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(6), 441-444.

Yasutaka, T. et al. (2016): Measurement and Estimation of Radiocesium Discharge Rate from Paddy Field during Land Preparation and Mid- Summer Drainage, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vols.155-156, 23-30.

Zhang, M. and Yoshikawa, M. (2016): An Overview of Remediation Technologies for the Sites Contaminated with Volatile Organic Compounds, *Sustainability, Energy, and the Environment, ASCE Geotechnical Special Publication*, No. 273, 295-301.

上記論文のほか，地圏環境リスク研究グループとしては年間20編以上の誌上発表及び年間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 Geo-Mechanics Research Group

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

1．グループの研究目的

地圏環境システム研究グループでは，環境に調和した地圏の開発・利用を図るため，岩盤応力測定や岩石コア実験による地下構造の評価技術，地球物理手法を利用したモニタリング技術，数値シミュレーションによる地下環境とリスク評価のモデリング技術などの基盤研究を進めている．また，CO_2 地中貯留研究や放射性廃棄物地層処分研究などへの適用研究を行っている．当研究グループ員が長年にわたり研究を進めてきた各種技術は，浅部から深部に至る地圏環境の解明，廃棄物地下処分や地下資源開発等に伴う誘発地震の解明，地圏の流体や熱の変動予測，地熱等資源の継続的利用などに役立ってきた．今後ますます高度化・多様化する社会のニーズに的確に応えられるよう，技術ポテンシャルの維持・向上に努めている．さらに，これらの技術を地下資源の安定的確保や継続的利用あるいは地質災害や地質汚染の防止を図る研究などへも積極的に応用して，安全で安心できる社会の実現に貢献することを目指している．このため，他のグループ・ユニット間の連携による研究，外部研究機関や企業との共同研究を積極的に進めるとともに，研究成果を迅速に発信し，社会への技術の普及と振興に取り組む．

2．グループの特徴

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_2地中貯留，地層処分，地熱開発， 地下利用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ます．メンバーは，地震学，岩石力学，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，環境に調和した地下の有効利用及び資源開発に必要な技術開発に取り組んでいる．研究対象は環境評価から災害低減までと多岐にわたり，研究内容も基礎研究から応用研究までと幅広く，予算項目は複数にまたがっている．

2.1.　グループの研究体制

地圏環境メカニクス研究グループは，以下の体制で研究を実施している．

雷　興林（研究グループ長）
及川寧己
宮崎晋行
唐澤廣和
竹原　孝
成田　孝
奥山康子（テクニカルスタッフ）
片岡みなみ（テクニカルスタッフ）

3．主要実験装置と計測システム

1）掘削試験装置（図 1）
2）三軸圧縮装置（図 2）
3）クリープ試験装置（図 3）
4）多チャンネル高速 AE 波形収録システム
5）室内多チャンネル弾性波計測システム

4．主な研究内容

4.1.　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

バリスティックタイプおよびラウンドタイプのチップを取り付けたパーカッションビットを用いて，３種類の花崗岩（沢入花崗岩，稲田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．試験結果の一例として，図 4 に掘削速度と掘削距離との関係を示す．PDC パーカッションビット（PDC-BT および PDC-

図 1

図 2

図 3

RD）の方が WC-Co パーカッションビット（WC-Co-BT およびWC-Co-RD）よりも，掘削速度の低下が小さく，ビットライフが長いことは既に知られている．チップ先端の形状の違いの影響は，図 4 において，掘削開始直後の掘削速度に現れた．すなわち，PDC パーカッションビットで

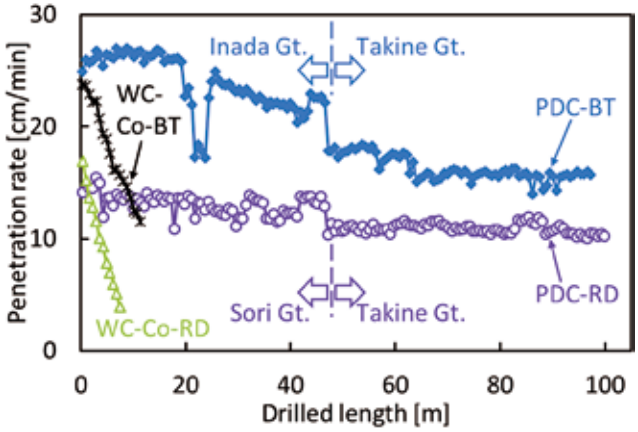


図 4　掘削速度と掘削距離との関係

も WC-Co パーカッションビットでも，バリスティックタイプ（PDC-BT および WC-Co-BT）の方が，ラウンドタイプ（PDC-RD および WC-Co-RD）よりも，掘削開始直後の掘削速度が大きいことがわかった．バリスティックタイプの PDC パーカッションビットは，ビットライフや掘削速度の点で優れており，掘削工期の短縮ならびに掘削コストの低減に大きく寄与するものと考えられる．

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．

4. 2.　地圏メカニクスに関する実験研究

当グループでは様々な室内岩石試験装置と物性計測システムを駆使し，岩石試料を用いる三軸クリープ試験・透水試験等を行い，流体及び流体圧の拡散に伴う岩石変形・微小破壊・岩石物性値を稠密にモニタリングすることにより地圏メカニックモデリングに資する実験研究を系統的に実施している．

4. 3.　注水誘発地震に関する研究

地熱開発・シェールガス生産・CO_2地下貯留・工業廃水の地下処分などの分野で，地下深部に流体を圧入する必要がある．注水による誘発地震に関するリスク評価及び対策が，重要かつ緊急な課題となっている．当グループでは，マルチスケール・マルチアプローチ手法を駆使し，室内実験研究・事例研究・数値シミュレーションを通して注水誘発地震発生条件の解明と低減する技術の開発に資する研究を実施している．

ポスター概要

^{17}O-excess の水文地質学への応用可能性

地下水研究グループ　町田　功*　小野昌彦　井川怜欧　松浦綾子　丸井敦尚
［連絡先］i-machida@aist.go.jp

成果概要

環境トレーサーは，地下水の挙動を知るためのツールである．このうち，水分子を構成する酸素と水素の安定同位体は特に重要である．これに関して，従来は^{18}O と^{2}H が用いられてきたが，近年，^{17}O の高精度分析が簡単に行えるようになった．現在^{17}O が環境トレーサーとして利用できるかどうかは不明であるため，その可能性を探るための調査研究をおこなった．

研究内容

水の^{17}O 分析装置（Piccaro 社 L2140-i）の立ち上げを行い，分析をルーチン化した．富士山，北海道幌延，山形盆地等にて採取された200以上の地下水試料を分析し，日本の地下水についてδ^{17}O-δ^{18}O の関係を求めた．また，地下水のδ^{18}O，d-excess，^{17}O-excess の地理的な変化，温度効果，高度効果について明らかにした．理論的には d-excess と^{17}O-excess には正の相関があると予想されるが，逆相関の地域も認められた．

研究成果はどう使われるか

本研究は^{17}O が地下水の環境トレーサーとなりうるかどうかを検証している．その成果は地下水流動の実態把握に直接用いられる．

	海洋	相変化（蒸発および拡散）	水蒸気	相変化（レイリー過程）	降水
d-excess	0 ‰		相対湿度 水温 により変化		水温 により変化
^{17}O-excess	-5 per meg		相対湿度 により変化		変化なし

表 1　d-excess と^{17}O-excess の違い

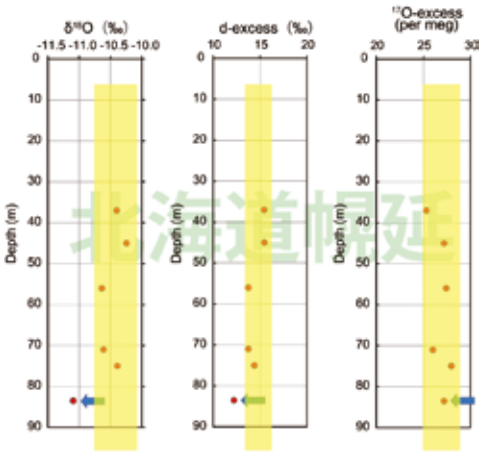


図 1　北海道天塩郡幌延町における、地下水のδ^{18}O、d-excess、^{17}O-excess のプロファイル

レーザーアブレーション ICP 質量分析計を用いた元素濃度イメージング

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

成果概要

レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計（LA-ICP-MS）を用いた，微量元素濃度イメージング法を開発しました．本分析法は，平滑な面を有する固体試料について，10 cm ～500 μm 領域の，元素濃度分布を大気中で測定できます．Li ～ U までのほぼ全元素（希ガス・ハロゲン・大気成分を除く）を，主成分元素（dg/g）～微量元素（ng/g）までの幅広い濃度範囲にわたり，一度に測定できます．

研究内容

LA-ICP-MS は，試料表面に集光したレーザーにより試料を溶発，プラズマでイオン化した後に高感度質量分析を行う装置です．本分析法は，従来の主成分元素濃度イメージングを行う SEM-EDS，EPMA，μXRF 等とは異なり，ng/g オーダーまでの微量元素濃度分析が可能です（図 1）．しかし一般の LA-ICP-MS には，イメージング用の測定・データ解析ツールが備えられておらず，本分析法は一般的な普及には至っていません．そこで，我々は独自のツールを開発し，分析の迅速・高精度化を行うだけでなく，様々な固体試料を用いた精度検証を進めています．

研究成果はどう使われるか

本分析法は，あらゆる固体試料表面の元素濃度分布を可視化する事が可能です．その為，天然の鉱物のみならず，各種素材・工業製品等幅広い試料への応用が期待されます．

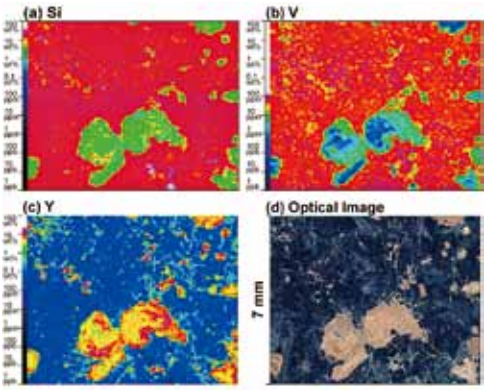


図 1　レアメタル鉱石（アパタイト）中の元素濃度分布

高精度 Mg 安定同位体分析手法の開発とその応用例

鉱物資源研究グループ　荒岡大輔*，東京大学大気海洋研究所　吉村寿紘，鉱物資源研究グループ　昆　慶明
［連絡先］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）を用いたマグネシウム（Mg）安定同位体分析手法を確立させた．国内の大学や海外研究機関と連携し，鉱石などの様々な地質試料への応用を進めている．

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）を用いて，国内はもちろん，海外でも報告例の少ない Mg 安定同位体比について，分析条件の設定やその最適化を行い，分析手法を確立させた．その結果，標準試料に対する未知試料の^{26}Mg/^{24}Mg の千分率（δ^{26}Mg）で，0.15‰（2SD）以下という高精度での分析を達成している．なお現在は，外部補正を用いたさらなる高精度化に取り組んでいる．また，今回分析手法を確立した Mg 安定同位体比を用いて，アメリカ地質調査所(USGS)や,ブリティッシュコロンビア州立地質調査所(BCGS)と，レアアース鉱石試料に対する共同研究を実施している．さらに，蒸発岩やクロロフィル等の，今まで報告例がほとんどない試料についても，国内の大学等と共同研究を進めている．

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Mg安定同位体比分析は,現在国内でルーチン化している研究機関はなく，地球科学だけに留まらない幅広い共同研究が期待される．また，鉱石試料に応用した例もほとんどなく，鉱床成因に関する新しい研究へと発展が期待できる．

写真 1　鉱物資源研究グループの元素・同位体分析システム

写真 2　アメリカ地質調査所での共同研究打ち合わせ

世界の風化型希土類鉱床の品位と資源量

鉱物資源研究グループ　実松健造*
［連絡先］k-sanematsu@aist.go.jp

成果概要

世界に様々な希土類鉱床が存在しており，品位，資源量，有用鉱物はそれぞれ異なる．本発表では，風化型希土類鉱床であるイオン吸着型鉱床, 砂鉱床, 風化カーボナタイト鉱床の鉱石の品位及び鉱物資源量（一部の鉱床では鉱石埋蔵量）を比較した．鉱物資源量が 1 億トンを超える鉱床は限られるが，イオン吸着型鉱床が資源として貴重な重希土類に富み，放射性元素にも乏しいことが分かった．

研究内容

イオン吸着型鉱床，砂鉱床，風化カーボナタイト鉱床の平均希土類品位及び鉱物資源量（一部の鉱床では鉱石埋蔵量）について，文献や各社のwebsiteの情報等をコンパイルした．イオン吸着型鉱床は鉱床ごとの品位のばらつきは少なかった．中国国内，中国以外の鉱床において，鉱物資源量が 1 億トンを超える鉱床は少なかったが，他の鉱床よりも重希土類に富む特徴が顕著であった．砂鉱床は鉱物資源量が 1 億トンを超えることは珍しくないが，一般的に低品位であり，Th を多く含み，軽希土類に富み，希土類はあくまで副産物としか考慮されないという特徴がある．風化カーボナタイト鉱床は高品位であるが，これも Th や軽希土類に富み，実際に開発されている鉱床は一カ所しか存在しない．これらの鉱床が開発されるかどうかは，今後の希土類の需要や価格に大きく影響を受けるはずである．

Sanematsu, K., and Watanabe, Y. (2016) Reviews in Economic Geology, v. 18, p. 55-79.
Sanematsu, K. et al. (2016) Mineralogical Magazine, v. 80, p. 77-102.
Hoshino, M., Sanematsu, K., and Watanabe, Y. (2016) Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, v. 49, p. 129-291.
Sanematsu, K. et al. (2015) Journal of Asian Earth Sciences, v. 111, p. 14-30.

ブラジル Serra Verge イオン吸着型希土類鉱床の露頭．鉱床は未開発．風化殻は一様に薄い．

研究成果はどう使われるか

風化型希土類鉱床の品位と資源量の定量的評価，特に重希土類に富む鉱床を選定するために使われる．今後は，風化型以外の希土類鉱床のデータも加え，鉱床タイプによる品位と資源量の違いを定量的に評価する．

ミャンマー DGSE の鉱物資源情報公開に対する技術協力について

鉱物資源研究グループ　大野哲二*，活断層・火山研究部門　Joel Bandibas
［連絡先］t-ohno@aist.go.jp

成果概要

地質調査総合センターでは，JICA 事業である「ASEAN 鉱物資源データベース運用能力向上」研修（2015-2017）への協力を行なっている．本年度はミャンマー国 DGSE（地質調査鉱物探鉱局）と協力して，日本国内研修およびミャンマーでの技術研修と現地研修を行なった．本稿では技術研修のうちOpen Sourceを利用したWMSサーバの構築について報告する．（ASEAN: 東南アジア諸国連合）

研究内容

ASEAN では，自国の研究成果の公表等を目的にインドネシアを中心として鉱物資源情報の公開を行なっている．また最近ではサーバコストの減少やネット環境の向上により，自国で独自のサーバを運用したいとの動きもでてきている．上記 JICA 研修では，それらを支援するための研修を行なっているところである．同研修の一環として著者等は本年度 6 月にミャンマーに渡航し，DGSE の用意したサーバに対し，WMS（Web Map Service）サーバ運用のための支援を行ない，また管理者を対象とした運用の研修を行なった．使用したソフトウェアは Linux OS および OSGeo（The Open Source Geospatial Foundation）で利用を推奨している Open Source プログラムである．Open Source プログラムを利用しているのは，比較的予算の問題の多い国においても容易に国際標準に準じたサービスを運用できるメリットがあるためである．

研究成果はどう使われるか

DGSE においては，外部に向けて情報発信の可能な環境を構築できた．しかし発信情報の整備と運用管理者のスキルについてはまだ途上である．GSJ として今後ともDGSEの要請に応じて協力を行なっていく予定である．

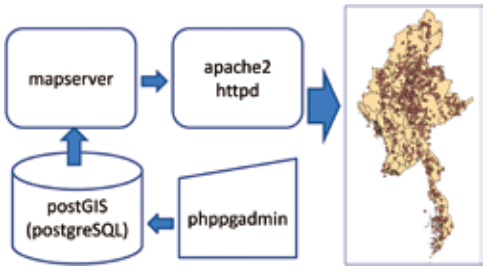


図 1　OSGeo を用いた WMS システムの概略

図 2　DGSE で運用されているサーバシステム

日本海表層型メタンハイドレートを対象とした AUV 音響探査

燃料資源地質研究グループ　森田澄人*　棚橋　学
［連絡先］morita-s@aist.go.jp

成果概要

表層型メタンハイドレート調査の一環として自律型海中探査機（AUV）を用いた深海音響探査を実施し，詳細な地形や底質の変化，海底下の地質構造等を明らかにした．調査対象エリアにおいて，特に表層型メタンハイドレートの分布指標となる地形学的特異点のマウンドやポックマークの様相を詳細に捉えるとともに音響基盤となる海底下の音響ブランキング等の特徴を明らかにした．

研究内容

本研究は，平成25年度から 3 年間集中して遂行した経産省受託研究の表層型メタンハイドレート資源量評価の一部として実施された．使用したAUVには 3 種の音響探査機器が搭載されており，それぞれMBES（Multi-beam Echo Sounder）による精密海底地形，SBP（Sub-bottom Profiler）による海底下浅層部断面，SSS（Side-scan Sonar）による海底反射強度の音響情報が得られた．探査対象とするエリアは，先行して実施した広域探査による地形マッピングとメタンハイドレート分布の指標となる特異点の音響学的特徴から選択された．およそ20時間の潜航で数 km 四方のエリアの走査が可能であり，3 年間の調査で，最上トラフ，上越沖，隠岐トラフの 3 海域に渡って計36回の潜航調査を実施し，メタンハイドレートの分布と集積過程を知る上で極めて重要なデータを取得した．

研究成果はどう使われるか

AUV 探査で得られたデータは，地形や地質構造等の海底環境に関する基礎情報を提供するとともに，その音響学的な解析により，底質や地下浅層部の物理特性変化の評価を可能にし，炭化水素の予測等，様々な形で利用が見込まれる．

図 1　探査に使用した AUV「Deep1」

図 2　船内オペレーション室でのモニタリング

最上トラフ冷湧水域における海底下温度計測

燃料資源地質研究グループ　後藤秀作*，東京家政学院大学　沼波秀樹，燃料資源地質研究グループ　佐藤幹夫　松林　修，
鳥取大学　石田直人，明治大学　松本　良　　［連絡先］s.gotou@aist.go.jp

成果概要

表層型メタンハイドレートがどのような環境下で発達しているかを調べるため，最上トラフ冷湧水域の海底水温と海底下温度を長期間モニタリングした．また，最上トラフ冷湧水域内のバクテリアマット及びその周辺の海底下の流体移動様式を調べるため，地中温度計を用いて海底下温度を計測した．得られた温度データから最上トラフ冷湧水域における海底下流体移動様式を推定した．

海底下温度を計測するための地中温度計

研究内容

表層型メタンハイドレートの存在が確認されている最上トラフ冷湧水域において，海底水温と海底下温度を11ヶ月にわたってモニタリングした．海底下温度については，表面が黒く変色した堆積物（黒色変色域）とその近傍の堆積物でモニタリングした．得られた温度データを解析した結果，黒色変色域で上向きの移流の存在を検出し，さらに周辺よりも高い熱流量が見積もられた．最上トラフ冷湧水域内のバクテリアマット内部とその周辺の海底下の流体移動様式を調べるため，複数の地点で海底下温度を計測した．その結果，バクテリアマット内部では冷湧水湧出を示す高い熱流量を計測した．一方，バクテリアマット近傍では海水の流入を示唆する低い熱流量を計測した．また，バクテリアマットから離れると熱の移動は熱伝導優勢になることが示唆された．

研究成果はどう使われるか

本研究では温度計測により海底下の流体移動様式を推定する新しい手法を提案した．推定された海底下の流体移動様式は表層型メタンハイドレートの分布や生成メカニズムを明らかにするための基礎情報として利用される．

表層型メタンハイドレート広域調査で得られた日本海及び北海道周辺海盆域の海底地形と後方散乱強度分布

燃料資源地質研究グループ　佐藤幹夫*，明治大学　大井剛志　松本　良，海洋研究開発機構　弘松峰男
［連絡先］mikio-satoh@aist.go.jp

成果概要

表層型メタンハイドレートの資源量把握のための調査の一環として，日本海及び北海道周辺の表層型メタンハイドレートの賦存が期待される海盆域で，マルチビーム測深器（MBES）及び表層構造探査装置（SBP）を用いた広域地形地質調査を実施した．取得データより各海域の海底地形と海底面反射強度分布の特徴を把握し，そこから読み取れる海盆埋積作用について推定を行った．

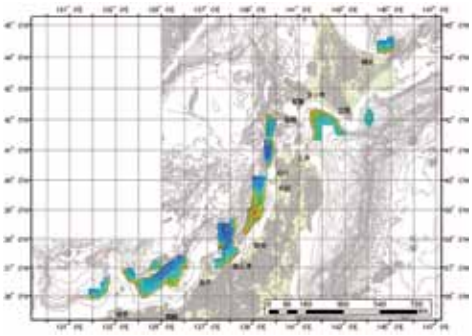


図１　広域地形地質調査の全調査海域

研究内容

本研究は経済産業省メタンハイドレート開発促進事業の一環として実施された．海域調査は再委託先である明治大学により，隠岐西方，隠岐トラフ，隠岐北東方，富山トラフ（上越沖を含む），最上トラフ，西津軽海盆，奥尻海盆，日高トラフ，十勝沖，網走沖の計10海域において，2013年から３年間に３航海計180日実施された．取得されたデータから海底地形陰影図と後方散乱強度分布図を作成し，各海域について崩落崖，地滑りシート，海底谷などの海底地形の特徴を整理し，そこから読み取れる海盆埋積作用について推定を行った．

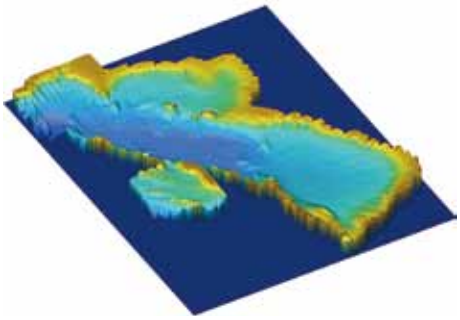


図２　海底地形データ（隠岐トラフ）

研究成果はどう使われるか

広域地形地質調査で取得された海底地形及び表層地質構造データは，表層型メタンハイドレートの資源量推定のための基礎資料として，表層型メタンハイドレートの存在指標となる可能性がある「ガスチムニー構造」（音響探査記録上での「音響的ブランキング」現象）の認定に用いられるが，海盆埋積作用についての解析結果は，地質学的・堆積学的バックグラウンドデータとなる．

火山噴気中の水蒸気の遠隔同位体比測定法の開発

燃料資源地質研究グループ　高橋幸士*，名古屋大学大学院　角皆　潤　栗田直幸　中川書子
［連絡先］koji-takahashi@aist.go.jp

成果概要

本研究では，火山の噴火様式を噴気中の水蒸気の水素・酸素安定同位体比（δ^2H・δ^{18}O 値）を用いて判別する新手法の確立を目指し，大気試料中の水蒸気濃度やδ^2H・δ^{18}O 値を簡便に測定可能な『真空捕集法』の開発を進めた．真空捕集法を神奈川県箱根 - 上湯場噴気地帯へ応用した結果，火山噴気中の水蒸気のδ^2H・δ^{18}O 値を遠隔測定出来ることを確認した．

神奈川県箱根 上湯場噴気地帯

研究内容

本研究では，火山の噴火様式を判別する新手法を確立するため，火山噴煙試料を真空捕集瓶に採取し，試料中の水蒸気濃度や δ^2H・δ^{18}O 値を Cavity Ring-Down Spectroscopy（CRDS）で分析する『真空捕集法』の開発を進めた．本研究で開発した真空捕集法を箱根 - 上湯場噴煙地帯に応用し，噴気孔から放出される水蒸気の遠隔同位体比測定が可能であるかを検証した．その結果，噴煙中の水蒸気の濃度と δ^2H・δ^{18}O 値は，極めて明瞭な混合線を示した．混合線から推定された噴気孔由来の水蒸気のδ^2H・δ^{18}O 値は，噴気孔より直接採取した水蒸気（凝縮水）の値と誤差の範囲で一致した．以上の結果から，真空捕集法により，火山噴気孔から放出される水蒸気のδ^2H・δ^{18}O 値を遠隔測定出来ることが確認された．

研究成果はどう使われるか

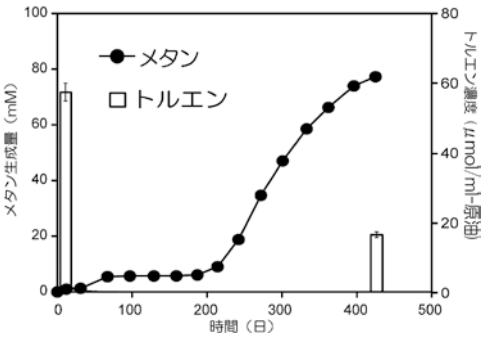
本研究は，火山の噴火様式を判別する新手法を提案すると共に，気体成分の同位体平衡温度をより的確に見積もることを可能にした．これにより，地殻熱流量に関する基礎データを提供出来るものと期待される．

深部地下油層環境における生物的原油分解メタン生成メカニズムの解明

地圏微生物研究グループ　眞弓大介*，生物プロセス研究部門　玉澤　聡　玉木秀幸　鎌形洋一，地圏微生物研究グループ　坂田　将，
INPEX　五十嵐雅之　若山　樹　前田治男　米林英治，東京ガス　飯田剛史　大阪典子　［連絡先］mayumi-daisuke@aist.go.jp

成果概要

革新的原油増進回収技術として注目される枯渇油田の油層微生物を活用した原油 - メタン変換回収技術の開発を目指し，国内油田の原油分解メタン生成ポテンシャルの評価を実施した．本研究独自の現場油層環境を模擬する高温高圧培養実験によって，国内では初めて原油分解メタン生成微生物群を獲得することに成功し，原油分解メタン生成反応に関与する微生物群を明らかにした．



高温高圧培養実験における原油分解メタン生成反応

研究内容

原油の炭化水素組成やガス状炭化水素の同位体分析によって原油分解メタン生成ポテンシャルが観察された国内深部油田の油層水と原油を用いて，高温高圧培養実験を約 3 年間に渡って実施した結果，原油中のトルエンをほぼ完全分解しメタンを生成する微生物群を獲得した（図参照）．微生物学的解析の結果，獲得した微生物群は複数種の未培養細菌と水素利用性や酢酸利用性のメタン生成菌で構成されており，深部地下油層環境ではこれらの細菌とメタン生成菌が密接な共生関係を構築することによって，原油からのメタン生成反応が円滑に進行することが明らかになった．

研究成果はどう使われるか

獲得した原油分解メタン生成微生物群を用いることで，油層微生物のメタン生成促進法の開発や原油分解ポテンシャルが存在しない油層に当該微生物を導入することで原油分解メタン生成反応を誘起するエネルギー回収技術の開発が期待される．

石炭を天然ガスに変えるメタン生成菌を発見

地圏微生物研究グループ　眞弓大介*　持丸華子，生物プロセス研究部門　玉木秀幸　山本京祐，地圏微生物研究グループ　吉岡秀佳，燃料資源地質研究グループ　鈴木祐一郎，生物プロセス研究部門　鎌形洋一，地圏微生物研究グループ　坂田　将
［連絡先］mayumi-daisuke@aist.go.jp

成果概要

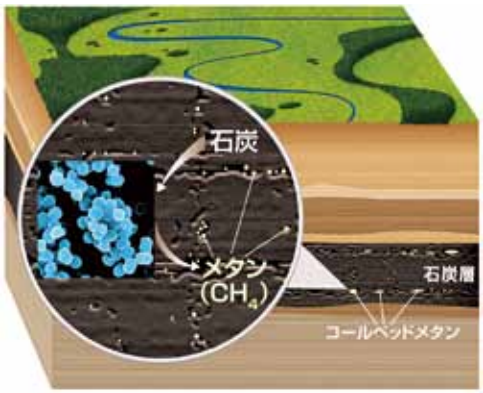
石炭中のメトキシ芳香族化合物から直接メタン（CH_4）を生成するメタン生成菌を深部地下環境から発見し，石炭層に広く分布するコールベッドメタンの形成にこのメタン生成菌が重要な役割を担っている可能性を明らかにした．

研究内容

コールベッドメタンは近年，石炭層中の非在来型天然ガス資源として世界各国で開発が進められている．コールベッドメタンの形成については，石炭層に生息する微生物の活動がその成因の１つと考えられているが，その詳しいメタン生成メカニズムは不明であった．今回，深部地下環境に生息するメタン生成菌が従来知られていた３種のメタン生成経路とは全く異なる第４のメタン生成経路を介して，多様なメトキシ芳香族化合物からメタンを生成することを発見した．さらに，このメタン生成菌が単独で，メトキシ芳香族化合物を含む石炭から直接メタンを生成できることを実証し，この新たなメタン生成機構をもつメタン生成菌がコールベッドメタンを含む地下の天然ガス資源の形成に地球規模で貢献している可能性を明らかにした．

研究成果はどう使われるか

コールベッドメタンの形成メカニズムの一端を明らかにしたことで，石炭資源として回収が困難な深部未回収石炭をメタンに変換しコールベッドメタンとして増進回収する技術の開発が期待される．



石炭層のコールベッドメタンと石炭をメタンに変えるメタン生成菌

無機多孔質材料における水蒸気の吸着速度

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

成果概要

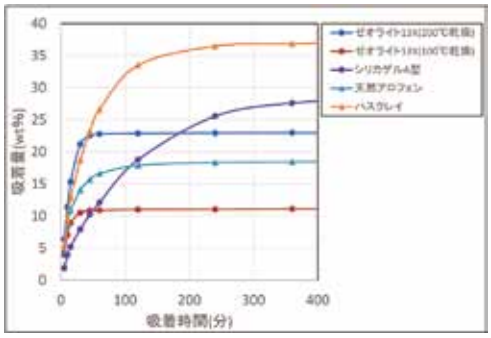
省エネシステムとして，デシカント空調や吸着式ヒートポンプシステムなどが開発されたが，上記システムに用いる吸着剤の検討においては，水蒸気吸着等温線を用いている．しかし水蒸気吸着等温線は，水蒸気の平衡吸着量を測定しており，システム設計に必要な吸着速度についての情報はない．本研究では無機多孔質材料の吸着速度を測定し，細孔サイズと速度との関係を検討した．

研究内容

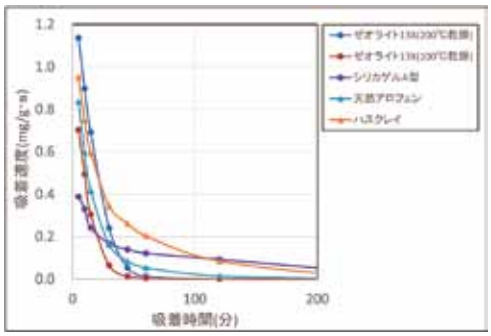
合成ゼオライト (13X)，シリカゲル A 型，アロフェン，ハスクレイの造粒体を用い，100℃にて24時間乾燥後（ゼオライトのみ100℃と200℃），25℃湿度60%の条件で水蒸気を所定時間吸着させ，吸着速度の測定を行った．その結果，ゼオライトは，短時間で吸着が終了するのに対し，シリカゲルやハスクレイは吸着が終了するのに時間がかかる結果が得られた．ゼオライト13X の細孔径は1nm 程度であり，ゼオライトの細孔に水蒸気が吸着され吸着熱により温度が上昇しても影響を受けていない．一方シリカゲルやハスクレイの細孔直径は0.3～5nm と広く分布しており，細孔に水蒸気が吸着された際，その吸着熱により吸着剤の温度が上昇し，供給される水蒸気の相対湿度が下がることから，水蒸気を吸着しにくくなることが明らかとなった．

研究成果はどう使われるか

デシカント空調や吸着式ヒートポンプシステムなどの省エネシステムにおいて，最適な吸着剤を選定することができ，従来の水蒸気吸着等温線からでは評価できなかった観点からのシステム検討が可能となる．



各種吸着剤の水蒸気吸着量



各種吸着剤の水蒸気吸着速度

水蒸気吸着性に優れた非晶質アルミニウムケイ酸塩の開発

地圏化学研究グループ　森本和也*　万福和子　星野谷亜衣　鈴木正哉
［連絡先］kazuya.morimoto@aist.go.jp

成果概要

地球表層環境において生成する粘土鉱物の機能性に倣い，省エネルギー社会の実現に資する鉱物材料の開発に取り組んでいる．今回，水ガラスと硫酸アルミニウムを原料とした水蒸気吸着剤の開発に取り組み，生成時の Si/Al モル比や混合 pH などの条件を精査することによって，優れた水蒸気吸着性を示す非晶質アルミニウムケイ酸塩を開発することに成功した．

研究内容

非晶質アルミニウムケイ酸塩からなる水蒸気吸着剤は，100℃以下の低温で合成を行うことから，安価で大量に合成が可能であるという利点がある．従来よりも優れた水蒸気吸着性を示す吸着剤の開発を目指して，非晶質アルミニウムケイ酸塩の製造条件の詳細な検討を行った．水ガラスと硫酸アルミニウム水溶液を用い，Si/Al モル比・混合時の pH・アルカリ添加後の pH および脱塩処理後の加熱処理において詳細な検討を行った（図１）．加熱することで得た生成物について水蒸気吸着性の評価を行った．その結果，各条件を制御・最適化することにより，高性能な水蒸気吸着剤を開発することに成功した（図２）．以上の知見について特許出願するに至った．

研究成果はどう使われるか

開発に成功した環境親和的で安価な水蒸気吸着剤を用いることで，除湿材料としての利用だけでなく，低温再生型の蓄熱システムの創出など，省エネルギー社会の実現に役立つ技術への応用が期待できる．

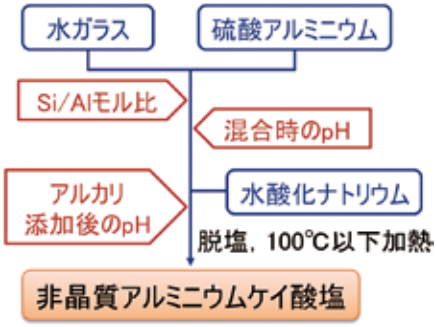


図１　水蒸気吸着剤の合成手順

図２　開発した非晶質アルミニウムケイ酸塩

ベントナイトの性能評価手法の標準化研究

地圏化学研究グループ　三好陽子*　鈴木正哉　森本和也，鉱物資源研究グループ　高木哲一　月村勝宏　宮腰久美子
［連絡先］youko-miyoshi@aist.go.jp

成果概要

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方法の標準化を進めている．本研究では，従来型の試験方法について国内での現状を明らかにし，試験方法の相違が結果に与える影響を検討した．そして，より精度の高い測定を目指して，従来型の方法を改良した吸光光度計を用いる測定方法を開発中である．

研究内容

ベントナイトはモンモリロナイトを主成分とする粘土鉱物資源であり，土木分野，鋳物分野，農業分野などで利用されている．ベントナイトはメチレンブルーを吸着できる量によって，その性能を評価されることが多いが，メチレンブルー吸着量の測定手法は国内で統一されていない．本研究は，メチレンブルー吸着量測定方法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．メチレンブルー吸着量はろ紙を用いた簡便な方法によって，国内の多くの関連企業で測定されてきた（写真参照）．本研究では，この従来法について国内での現状を明らかにし，方法の相違が結果に与える影響について検討した．そして，より精度の高い測定を目指して，従来型の方法を改良した吸光光度計を用いる測定方法を開発中である．

研究成果はどう使われるか

天然のベントナイトは，産地ごとに特性が異なる．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．

従来型のメチレンブルー吸着量測定の様子

海底掘削試料の即時 IP 特性計測技術の開発

物理探査研究グループ　小森省吾*　光畑裕司　高倉伸一
［連絡先］komori.shogo@aist.go.jp

成果概要

次世代の鉱床探査技術として期待されている海底 IP 探査に先駆け，海底下の鉱床を構成する岩石の IP 特性把握の有効性を検討するため，海底掘削で得られる試料の IP 特性の即時計測技術の開発を行っている．これまでに，高性能電気化学測定器の導入・サンプルホルダー及びプローブの開発を行い，計測システムの整備を進めてきた．本システムは現在，海底熱水鉱床掘削で運用中である．

研究内容

IP（Induced Polarization）計測では，黄銅鉱・方鉛鉱のような硫化鉱物を含む岩石に電圧を印加し強制的に分極させることで，硫化鉱物界面の電荷蓄積・放出過程を電圧・電流の位相差や充電率として計測する．海底 IP 探査は次世代の鉱床探査技術として期待されているが，未だ開発途上であるため，海底下の鉱床が持つ IP 特性についての知見は殆ど無い．本研究ではこうした現状を打開するため，海底下の鉱床で掘削された試料の IP 特性を船上で即時に計測するためのシステム開発を行っている．小型・軽量で携帯性に優れた電気化学測定器を導入した他，個々の試料の形状・固結状態に応じて切り替えが可能なサンプルホルダー・プローブを開発した（図１）．海底熱水鉱床掘削での運用の結果，掘削試料の IP 特性は硫化鉱物の存在を敏感に捉えられることが分かってきた．

研究成果はどう使われるか

長期的な視点において，本成果は，今後の海底 IP 探査技術の開発にあたり，探査機器の性能を決定する上で重要な制約条件になる他，鉱床探査・開発にかかるリスク・コストの低減に寄与すると期待される．

図１　船上 IP 特性システム．（a）高性能電気化学測定器（下部）は PC により制御される．（b）プローブを用いた IP 計測の様子．

苫小牧沿岸域における電磁探査法適用調査

物理探査研究グループ　光畑裕司*　上田　匠　小森省吾
［連絡先］y.mitsuhata@aist.go.jp

成果概要

二酸化炭素地中圧入実証試験が実施されている苫小牧沿岸域において，陸域の勇払平野で５測点と浅海域の海底２測点で地磁気地電流（Magnetotelluric,MT）法探査を実施した．結果として，深度1km より浅い深度で，陸域から海底下へと比較的高比抵抗を示す領域が連続して存在することが把握された．この高比抵抗領域は低塩分濃度の地層水を胚胎する鵡川層に相当すると考えられる．

研究内容

苫小牧実証フィールドにおいて，海底下深度1,100m ～1,200m および2,400m ～3,000m の二つの地層が貯留層と見なされ，それらは粘土層に覆われ，漏洩は遮蔽されていると考えられている．周辺地質構造は，弾性波反射法探査によりに詳細に求められているが，深部電磁探査法の一種である MT 法を適用すれば，地下比抵抗分布を推定可能であり，それから地下水の塩分濃度や粘土鉱物の存在についての知見を得ることができる．すなわち遮蔽層の遮蔽能力や，貯留層内の塩水性地下水の分布形態を把握できる可能性がある．我々は，平成26年に陸域，27年に海域で MT 法探査を実施した．測点は，海岸線をほぼ南北に直交する全長約10km の測線に沿った全７測点である（図１）．陸域浅部に存在する高比抵抗領域は，海底下へと連続しており（図２），それは坑井調査によって確認されている低塩分濃度地層水帯の分布と調和的であった．

研究成果はどう使われるか

浅海域 MT 法探査技術は，二酸化炭素地中貯留事業において，沿岸域における低塩分濃度地層水の分布把握に有効なツールであり，低塩分濃度地層水の分布把握は，その上下の地層間の地下水流動の評価に重要な指標と成り得る．

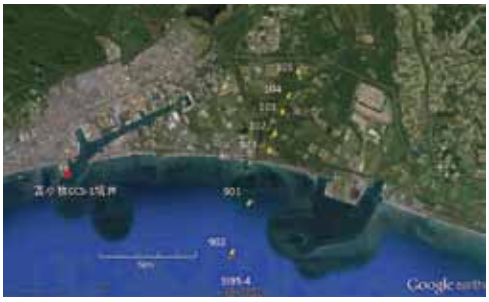


図１　苫小牧沿岸域における MT 法探査の測点配置図．陸域５測点（101～105）と海域２測点（901と902）の配置．

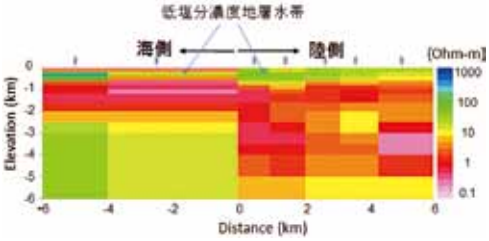


図２　海域２測点および陸域５測点の MT 法データを統合し，推定された地下比抵抗モデル．0km より左側が海域で，右側が陸域．

日本海表層型メタンハイドレート分布域における海洋電磁探査法の適用

物理探査研究グループ　上田　匠*　光畑裕司　横田俊之　小森省吾，燃料資源地質研究グループ　森田澄人
［連絡先］takumi.ueda@aist.go.jp

成果概要

表層型メタンハイドレート調査の一環として曳航型の電磁場送受信機を用いた海洋電磁探査を実施した．AUV によって得られた高精度の海底地形情報の利用や安定した調査船の運用により高品質なデータ取得が可能となり，海底下300m程度までの比抵抗構造の推定により，メタンハイドレートと関連づけられる高比抵抗領域の抽出に成功した．

研究内容

燃料資源地質研究グループが先行実施した AUV 探査の MBES 詳細海底地形データを元に，精密な曳航型海洋電磁探査を実施した．複数の曳航型受信機と多周波数送信電磁場を用い，高密度測線を設定することで表層型メタンハイドレート探査に適した探査仕様（深度，解像度）を実現し，低比抵抗の海底下における高比抵抗領域を見掛比抵抗分布及びインバージョン解析による 3 次元構造として推定した． 2 年間の調査で，日本海表層型メタンハイドレートの存在が推定される 6 海域でデータ取得と解析を行い，メタンハイドレートの腑存状況調査としてだけではなく，曳航型海洋電磁探査法の適用事例としても世界的に見て極めて重要なデータを取得した．

図 1　調査船新日丸（深田サルベージ建設）および調査作業

研究成果はどう使われるか

他の探査手法結果も含めた統合的な表層型メタンハイドレートの腑存状況・資源量の推定に資する．さらには，メタンハイドレートに限らず，様々な海底資源や環境，地球科学的調査において重要な探査手法となることが期待される．

Arsenic Removal from Arsenic Contaminated Water using Calcium Oxide and Hydroxide（カルシウム酸化物及び水酸化物によるヒ素汚染水からのヒ素除去）

地圏環境リスク研究グループ　H. Sugita*　T. Oguma　M. Zhang　J. Hara　Y. Kawabe　N. Yanagisawa
［連絡先］hajime.sugita@aist.go.jp

成果概要

開発途上国などで飲料水として利用されている地下水の一部は，しばしばヒ素によって汚染されている．効果的かつ安価なヒ素除去用の吸着材を開発するためには，ヒ素除去に関する基礎データの蓄積は極めて重要である．本研究では，カルシウム化合物を用いたヒ素除去試験を実施し，ヒ素除去能に優れたカルシウムの形態（化合物の種類）とヒ素除去メカニズムに関する知見を得た．

研究内容

5 種類のカルシウム化合物（酸化物，水酸化物，炭酸塩，硫酸塩及び塩化物）について，模擬ヒ素汚染水を用いたヒ素除去試験（振とう試験）を実施し，　ヒ素除去能の有無を確認した．　その結果，CaO 並びに $Ca(OH)_2$が高いヒ素除去能を持つことが明らかにされた．さらに，初期ヒ素濃度及び初期吸着材添加濃度をパラメータとしたヒ素除去試験を実施し，詳細なデータを取得した．この得られたデータを用い，溶出による固相の減少分を考慮した Freundlich 吸着等温式に基づいた解析によって，CaO 並びに $Ca(OH)_2$によるヒ素除去の主メカニズムは，液相中のヒ酸イオンがカルシウム化合物から溶出したカルシウムイオンと結合する析出反応ではなく，ヒ酸イオンが固相として残存している各カルシウム化合物表面に結合する吸着反応によるものであると結論付けられた．

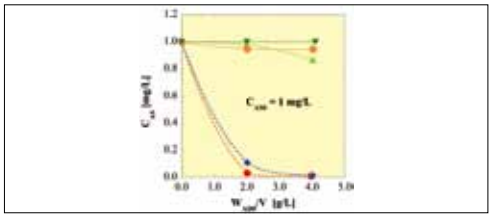


図 1　カルシウム化合物によるヒ素除去に関する性能比較
● CaO，◆ $Ca(OH)_2$，▲ $CaCO_3$，● $CaSO_4$，▼ $CaCl_2$

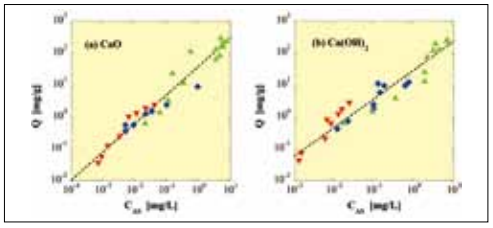


図 2　Freundlich 吸着等温線：（a）CaO（b）$Ca(OH)_2$
▼0.1 mg/L，◆1 mg/L，▲10 mg/L

注釈）
W_{AD0}/V：初期吸着材添加濃度，C_{AS0}：初期ヒ素濃度，C_{AS}：残存ヒ素濃度，
Q：固相として残存している吸着材の単位重量当たりのヒ素吸着量

研究成果はどう使われるか

本研究でヒ素吸着材として提案されたカルシウム化合物は比較的安価で，開発途上国でも用意に入手できることから，飲料水として利用される地下水（井戸水）のヒ素浄化法のひとつとして広く普及することが期待される．

環境微生物群の作用による土壌中重金属類の動態変化

地圏環境リスク研究グループ　川辺能成*，東北大学　須藤孝一
［連絡先］y-kawabe@aist.go.jp

成果概要

近年問題となっているヒ素などの自然由来重金属類による汚染問題について，土壌中重金属類の動態に及ぼす微生物群の影響について検討した．その結果，土壌中重金属類の溶出挙動は，棲息する微生物群の変動に伴い，促進される場合，逆に不溶化が促進される場合もあり，土壌中重金属類の動態変化への微生物関与に関する基礎的知見が得られた．

研究内容

さまざまな場所で採取した自然由来の重金属類を含む土壌について微生物の影響を考慮した溶出特性評価試験を行い，重金属類の溶出促進あるいは不溶化に関与する微生物群の影響について検討した．

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，逆に不溶化が促進される場合もあった（図１）．試験前後の土壌試料について微生物群集解析を実施したところ，土壌中に棲息する微生物群は長期溶出試験後にその割合が大きく変動しており，また好気的条件下，嫌気的条件下の相違によりその傾向が異なっていた（図２）．好気的条件下では硫黄や窒素の酸化に関与し酸生成する微生物群，嫌気的条件下では硫酸還元菌や鉄還元菌など重金属類の不溶化に関与する微生物群ならびに有機酸を生成し溶出を促進する微生物群の関与が推定された．

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．

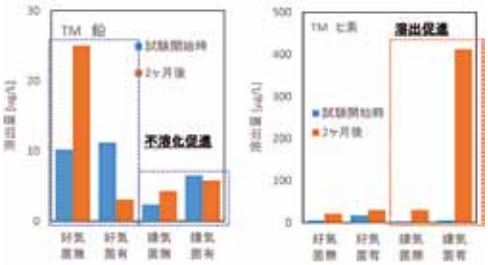


図１　微生物反応を考慮した土壌からの重金属類の溶出挙動

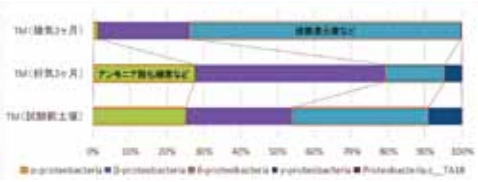


図２　長期溶出試験前後におけるプロテアバクテリア門の菌叢変化

二酸化炭素吸着に伴う石炭の破壊強度の変化

地圏メカニクス研究グループ　竹原　孝*　及川寧己，CO2地中貯留研究グループ　藤井孝志，地圏メカニクス研究グループ　雷　興林
［連絡先］t-takehara@aist.go.jp

成果概要

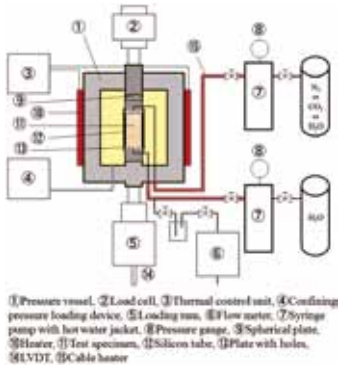
炭鉱から得られた石炭を用いて，CO_2ガス吸着に伴う石炭マトリックスの膨潤現象および N_2ガス圧入による浸透率回復に着目し，それらの現象が石炭の力学的構造に及ぼす影響を検討するため三軸圧縮強度試験を実施した．その結果，石炭の破壊強度は，原位置状態（水飽和状態），CO_2吸着状態，N_2置換状態のうち CO_2吸着状態での破壊強度は16.7% 低下したことが観測された．

研究内容

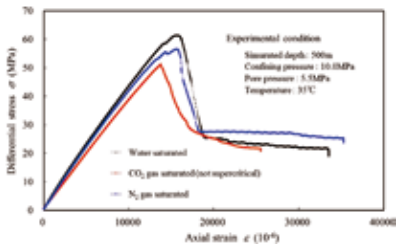
石狩炭田（北海道夕張市）で実施された地表から炭層への坑井を用いた CO_2圧入試験の報告によると，圧入された CO_2が石炭層に吸着されると，石炭マトリックスの膨潤による炭層の浸透率に影響を及ぼす可能性があることが指摘されている．炭層の浸透率低下については，石炭マトリックスの空隙変形及びクリートの閉塞により浸透率の減少が生じている可能性が高い．そこで，炭鉱から得られた石炭試料を用いて，原位置の状態を模擬した周圧10.0MPa，空隙圧5.5MPa，温度35℃の環境下において空隙内部流体を水，CO_2，N_2にそれぞれ置換した条件での三軸強度試験を実施した．原位置における石炭への CO_2吸着によるマトリックスの膨潤は，石炭内のクリートの閉塞をもたらすのみでなく，石炭強度の低下とヤング率の減少をもたらす一因になる可能性がある．

研究成果はどう使われるか

CO_2地中貯留として ECBM の一環である石炭層への CO_2圧入に関して，圧入時の現象を室内実験にて再現できたことから，シミュレーションに資するための，原位置を模擬した環境下での力学試験が可能であることを示した．



Schematic diagram of loading system and pore fluid control device.（三軸圧縮試験装置と孔隙流体制御装置の概略図）



Triaxial compressive strength test results of the coal test specimen of three types.（石炭試験片の三軸圧縮試験結果）

富山城石垣と高岡城石垣の採石地を推定する

地圏資源環境研究部門　長　秋雄*
［連絡先］akio.cho@aist.go.jp

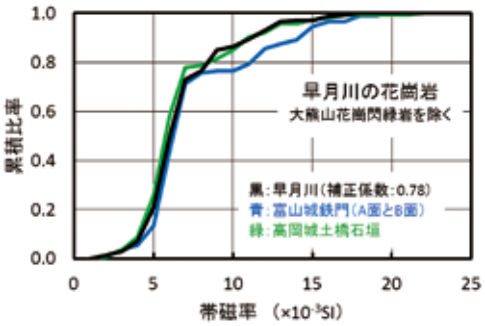
成果概要

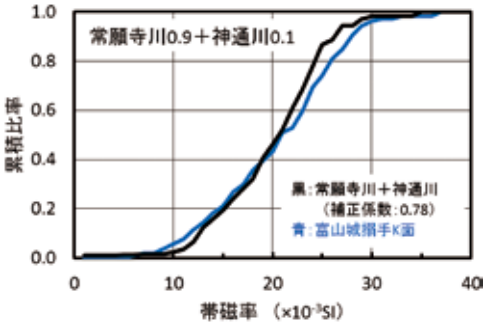
富山城石垣（鉄門石垣と搦手石垣）と高岡城石垣（本丸土橋石垣），ならびに推定採石地である早月川・片貝川・常願寺川・神通川・宇波川の川原石の帯磁率測定を行い，帯磁率ヒストグラムを比較した．

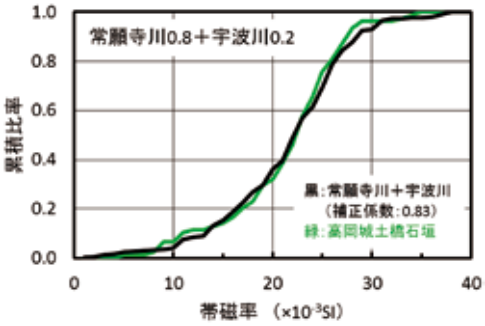
結果 1：富山城石垣と高岡城石垣に使われた花崗岩の帯磁率ヒストグラムがともに早月川の花崗岩川原石での帯磁率ヒストグラムと良く一致したことから（右上の図），二城の石垣に使われた花崗岩の採石地は早月川のみであったと推定する．

結果 2：富山城石垣に使われた安山岩での帯磁率ヒストグラムは，常願寺川の安山岩質川原石での帯磁率被ヒストグラムと似た．違いは，神通川の安山岩質川原石の 1 割ほどの混在で説明できる．（下の左図）

結果 3：高岡城石垣に使われた安山岩での帯磁率ヒストグラムは，常願寺川の安山岩質川原石での帯磁率被ヒストグラムと似た．違いは，宇波川の安山岩質川原石の 2 割ほどの混在で説明できる．（下の右図）







FREA 地熱チームでの研究開発

福島再生可能エネルギー研究所　浅沼　宏*
［連絡先］h.asanuma@aist.go.jp

成果概要

福島再生可能エネルギー研究所（FREA）再生可能エネルギー研究センター，地熱チームでは「地熱の適正利用」をキーワードに研究開発を行っている．当チームは，今後数年間の達成目標として天然熱水系を利用した地熱発電量の増大，被災地企業の技術シーズ実用化を目指しており，また，2050年以降の発電量の飛躍的増大を目指して超臨界地熱資源開発の FS を行っている．

研究内容

地熱チームで現在行っている主な研究開発の概要は以下の通りである．

＊涵養型 EGS のモニタリング：福島県奥会津地熱地域での涵養注水時に微小地震計測，MT 法繰り返し探査を行い，流体挙動をモニタリングしている．

＊温泉モニタリング装置の開発：温泉泉質を連続的に遠隔モニタリング可能なシステムのプロトタイプを開発し,国内の温泉地域で実証試験を行っている．

＊EGS シミュレータの開発：地下への加圧注水時に発生する熱－水－応力－化学連成挙動に関する室内実験と，シミュレータの開発を行っている．

＊超臨界地熱開発の FS：沈み込み帯に起源を有する超臨界地熱資源の開発に関して国内研究者のリーダーシップを取り，科学的，技術的視点から FS を行っている．

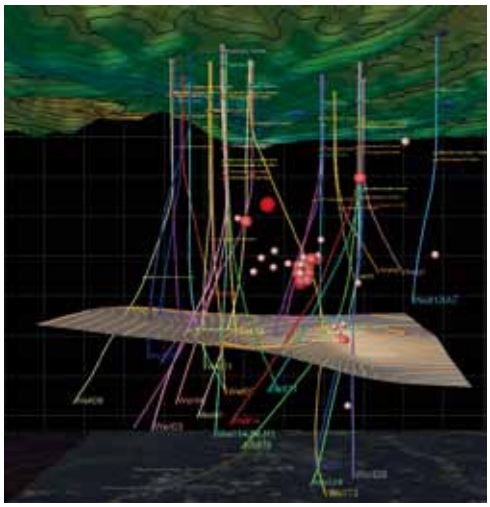


図　地熱貯留層可視化技術の開発

研究成果はどう使われるか

地熱チームでの研究成果は地下条件・社会条件に適合した適切かつ持続的な地熱開発に結び付く．また，超臨界地熱資源の開発が実現すれば数億トン規模の CO_2排出量削減やエネルギーの安定供給に結び付く．

地中熱ポテンシャル評価の高度化研究

福島再生可能エネルギー研究所　吉岡真弓*　内田洋平　シュレスタ・ガウラブ　石原武志，秋田大学　藤井　光，
日本地下水開発（株）　山谷　睦　　［連絡先］yoshioka-mayumi@aist.go.jp

成果概要

本研究は，NEDO「再生可能エネルギー熱利用技術開発」(日本地下水開発（株），秋田大学，産総研の共同受託）のうち，地中熱ポテンシャル評価研究のために実施されたものである．この研究では，地中熱ポテンシャル評価の基礎となる地下の熱物性情報を収集すると共に，それらの地下情報と見かけ熱伝導率と関係を評価することで，地中熱ポテンシャルマップの高度化を目指している．

研究内容

本研究では，地中熱利用の対象と考えらえる地下100m までのコア試料を採取し，熱物性を計測するとともに，同地点に設置した熱交換器（BHE）により熱応答試験（TRT）を実施し，熱交換器周囲の熱的挙動と地質の熱物性との比較検討を行った．本報告会では，秋田県での調査結果について報告する．

本地域では，未固結のシルト～砂礫層をサンプリングすることができ，それらのコア試料の熱物性計測を行った．　その結果，　平均熱伝導率は約1.5W/(mK）であった．一方，ほぼ同地点において，同深度（100m）までの熱交換器による熱応答試験（TRT）を実施した結果，見かけ熱伝導率は2.0 W/(mK）と推定された．この見かけ熱伝導率の向上は，現地の地下水流動の影響によるものと考えられる．

研究成果はどう使われるか

研究成果を活用し，より信頼性の高い地中熱ポテンシャルマップの構築に繋がる．ポテンシャルマップにより，地中熱利用の「見える化」を推進し，地中熱の普及促進に貢献する．

図１　ボーリングによるコア試料採取

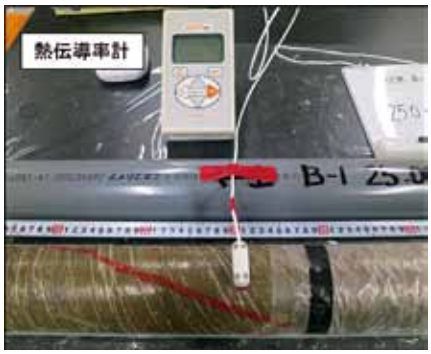


図２　コア試料の熱伝導率測定風景

会津盆地における地中熱利用ポテンシャル評価

福島再生可能エネルギー研究所　シュレスタ・ガウラブ*　内田洋平　吉岡真弓　金子翔平，秋田大学　藤井　光
［連絡先］shrestha-g@aist.go.jp

成果概要

地中熱利用（GSHP）システムは地下浅部の熱を利用し冷房・給湯などを行う省エネルギー技術である．本システムの持続可能な利用と普及のためには，広域規模のポテンシャル評価が必要である．本研究では，会津盆地を対象にGSHPシステムの導入可能性のためのポテンシャル評価を行い，ポテンシャルマップを作成することを目的とする．

研究内容

地中熱利用ポテンシャル評価のために地下水流動系・地下温度分布を把握する必要がある．そのために水文地質調査を実施し，広域地下水流動・熱輸送モデルを構築した．ポテンシャルマップを作成するため，盆地内20地点で地中熱交換井（GHE）モデルを構築した．各地点における地層の厚さ，水理・熱物性は広域モデルと一致するように設定した．

本研究では，戸建住宅へのGSHPシステムの導入を想定し，経済産業省・国土交通省の平成25年省エネルギー基準に基づいて冷暖房熱熱負荷を計算した．その熱負荷を用いて熱交換シミュレーションを行い，各地点におけるGHEの必要長さを求めた．そして，GISで空間補間を行い，ポテンシャルマップとして GHE の必要長さの分布図を作成した．

研究成果はどう使われるか

ポテンシャルマップは地中熱利用の適地選定や最適なシステムの導入に基盤情報として重要であり，経済性の評価にも役立つと考えられる．本研究で実施した広域的ポテンシャル評価とその手法は他の地域でも適用が可能である．

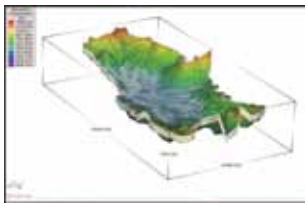


図１　会津盆地における３次元地下水流動・熱輸送モデル

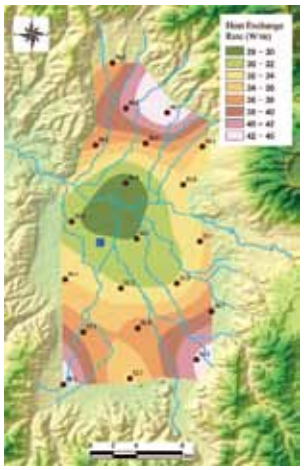


図２　会津盆地における地中熱ポテンシャルマップ（熱交換量：W/m）

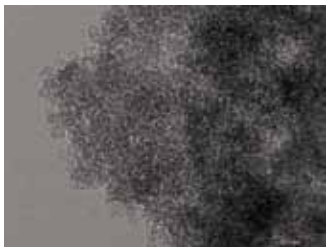
知財・ソフトウエア紹介

高性能水蒸気吸着剤の開発

地圏化学研究グループ　森本和也*　万福和子　星野谷亜衣　鈴木正哉
［連絡先］kazuya.morimoto@aist.go.jp

成果概要

火山灰の風化土壌生成物として知られるアロフェン・イモゴライトの合成法を基に，優れた水蒸気吸着性能を有するハスクレイを開発した．ハスクレイは，低結晶性の粘土と非晶質物質の複合体からなるアルミニウムケイ酸塩であり，低湿度から高湿度まで幅広い湿度帯にて水蒸気を吸着することができることから，60～80℃の低温熱源を利用した省エネ用吸着剤として適した材料である．

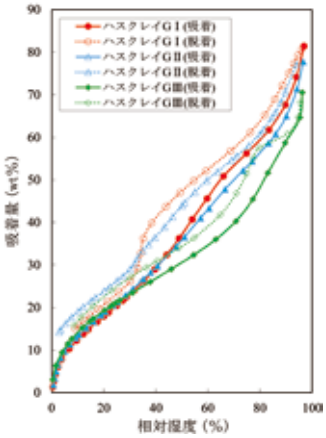


ハスクレイの透過型電子顕微鏡写真

研究内容

アルミニウムケイ酸塩からなるハスクレイの合成には，大きく分け２種類あり，150℃以上の高温での水熱合成が必要なハスクレイ（ハスクレイ高性能版：ＧＩ）と，80～100℃での水熱合成が可能なハスクレイ前駆体（ハスクレイ工業的合成版：ＧⅡとＧⅢ）があり，それぞれに関して，産総研では特許を出願している．以下に主なものを掲載する．

- 非晶質アルミニウムケイ酸塩の製造方法（特願2016-005396）
- アルミニウムケイ酸塩複合体及び該複合体からなる高性能吸着剤（特許第5212992号，米国8865020号，中国 ZL200880122792.2）
- 中湿度領域において優れた吸放湿特性を有する非晶質アルミニウムケイ酸塩及び吸着剤（特許第4576616号，米国7887770号）



ハスクレイの水蒸気吸着等温線

研究成果はどう使われるか

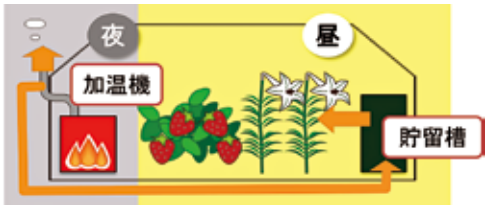
ハスクレイは，幅広い湿度帯にて水蒸気を吸着できることから，デシカント空調機や家庭用除湿機などの吸着剤として使用することができ，60～80℃程度の低温廃熱を利用した省エネシステム用吸着剤としての利用が期待されている．

施設園芸における二酸化炭素回収施用装置の開発

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

成果概要

施設園芸における作物の栽培において，光合成促進のために二酸化炭素の施用が必要とされている．施設園芸栽培では，冬季に加温が必要であることから，夜間加温機から排出される排ガスから二酸化炭素を回収貯留し，翌朝以降貯留した二酸化炭素を園芸作物へ施用するシステムの開発を行った．このことにより，作物の収率向上に加え，二酸化炭素排出総量と燃料費の削減が可能となる．

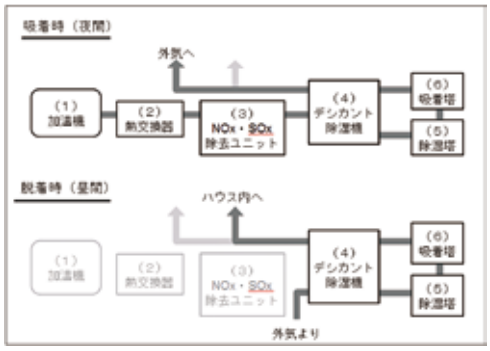


二酸化炭素貯留・施用装置概要

研究内容

加温機の排ガスから二酸化炭素を回収・貯留し，翌朝以降に二酸化炭素をビニールハウスに施用する装置を開発した．装置には，圧力スイング法により大気圧より高い圧力にて回収・施用する方法と，温度および圧力を用いずに二酸化炭素の濃度差を用いて回収・施用する方法の２種類の装置の開発を行った．

- 燃焼排ガス中の二酸化炭素を利用した圧力スイング法による園芸用施設への二酸化炭素供給装置（特許第5578469号：産総研・奈良県・大阪瓦斯（株）・日本軽金属（株）共同出願）
- 燃焼排ガス中の二酸化炭素を利用した園芸用施設への二酸化炭素供給装置（特願2012-200204：産総研・奈良県・農研機構・大阪瓦斯（株）・日本軽金属（株）共同出願）



濃度差法による二酸化炭素回収・施用装置概要

研究成果はどう使われるか

ビニールハウスでの施設園芸栽培において，排ガスから回収した二酸化炭素を施用することにより，作物の品質および収率の向上が見込まれ，二酸化炭素排出総量と燃料費の削減による温暖化対策と省エネへの貢献も期待される．

土壌中に存在するナノチューブおよびナノカプセルの合成と応用

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

成果概要

火山灰の風化土壌中には，ナノチューブ状のイモゴライトやナノカプセル状のアロフェンが生成されており，これらのナノ物質は比表面積が大きく，高い反応性を有している物質である．また水蒸気吸着性能も優れており，調湿材料や結露防止剤として利用することが可能である．これらの天然に存在するナノ材料に関して，純度の高い合成方法を確立し，試料提供が可能な体制を整えた．

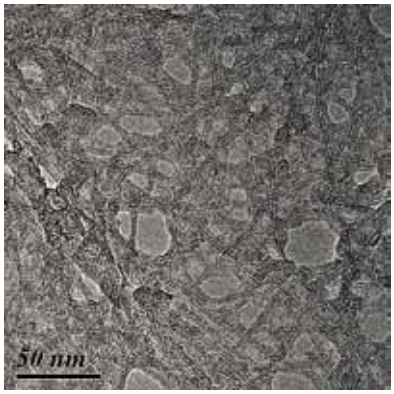
研究内容

アルミニウムケイ酸塩からなるイモゴライト，アロフェンの合成法および用途に関して，産総研では特許を出願している．以下に主なものを掲載する．

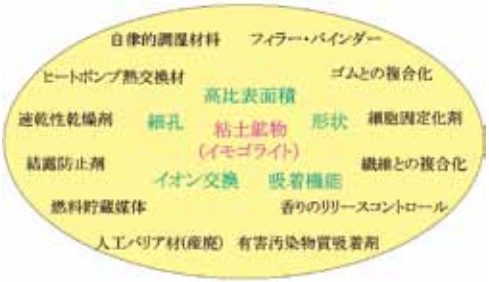
・微細孔を有するチューブ状アルミニウムケイ酸塩の製造方法（特許第4538626号）
・ヒートポンプ用熱交換材（特許3785455号）
・高湿度条件下において優れた吸水挙動を示す調湿材料(特許第3398761号)
・前駆体連続添加によるチューブ状アルミニウムケイ酸塩の高濃度合成法（特許3163360号）
・高濃度な無機溶液からのチューブ状アルミニウムケイ酸塩の合成法（特許第3146360号）

研究成果はどう使われるか

アルミニウムケイ酸塩からなるナノ物質は，比表面積が大きく，水蒸気吸着性能にも優れていることから，熱交換剤，調湿剤，結露防止剤，燃料貯蔵媒体，二酸化炭素吸着剤，有害物質吸着剤など様々な応用に用いることが可能である．



合成イモゴライトの透過型電子顕微鏡写真



イモゴライトの応用

論文リスト

論文リスト
2015～2016年

安川 香澄，野田 徹郎，鴇田 洋行，内山 明記，松林 修，阪口 圭一（2015）Advanced Software for Harmonious Geothermal Development with Nearby Hot Spring. Proceedings of World Geothermal Congress 2015.

石戸 恒雄，J.W. Pritchett，西 祐司，杉原 光彦，S.K. Garg，J.L. Stevens，當舎 利行，中西 繁隆，中尾 信典（2015）Application of Various Geophysical Techniques to Reservoir Monitoring and Modeling. Proceedings of World Geothermal Congress 2015.

柳澤 教雄（2015）Case Study of Calcium Carbonate Scale at EGS and Hot Spring Binary System. Proceedings of World Geothermal Congress 2015. 1-10.

Keith Lichti，柳澤 教雄（2015）Geothermal Energy Materials and Process Issues. Proceedings of World Geothermal Congress 2015. 1-8.

佐藤 真丈，小原 功司，小野 和昭，森 豊，大里 和己，岡部 高志，中田 晴弥，柳澤 教雄，村岡 洋文（2015）Development of Micro Grid Kalina Cycle System - The First Demonstration Plant in Hot Spring Area in Japan. Proceedings of World Geothermal Congress 2015. 1-9.

内田 利弘,高倉 伸一,上田 匠,佐藤 龍也,阿部 泰行(2015) Three-Dimensional Resistivity Structure of the Yanaizu-Nishiyama Geothermal Reservoir, Northern Japan. Proceedings of World Geothermal Congress 2015. 1-7.

藤井 孝志,船津 貴弘,及川 寧己,徂徠 正夫,雷 興林(2015) Evolution of Permeability during Fracturing Processes in Rocks under Conditions of Geological Storage of CO_2. Materials Transactions 56 (5). 679-686.

安川 香澄，笹田 政克（2015）Country Update of Japan: Renewed Opportunities. Proceedings of World Geothermal Congress 2015.

Ono Kenji，Hiradate Syuntaro，森田 沙綾香，Hiraide Masakazu，Hirata Yasumasa，Fujimoto Kiyoshi，Tabuchi Ryuichi，Saimon Lihpai (2015) Assessing the carbon compositions and sources of mangrove peat in a tropical mangrove forest on Pohnpei Island，Federated States of Micronesia. Geoderma 245. 11-20.

川辺 能成，駒井 武（2015）Insolubilizing Effect of Heavy Metals in Soil by Calcium Polysulfide. Program of SETAC Europe 25th Annual Meeting 413-414.

田村 亨，澤井 祐紀，池原 研，中島 礼，原 淳子，金井 豊（2015）Shallow-marine deposits associated with the 2011 Tohoku-oki tsunami in Sendai Bay，Japan. Journal of Quaternary Science 30 (4). 293-297.

中島 善人（2015）Development of a Single-Sided Nuclear Magnetic Resonance Scanner for the In Vivo Quantification of Live Cattle Marbling. Applied Magnetic Resonance 46 (5). 593-606.

昆 慶明，江島 輝美，森田 沙綾香，高木 哲一（2015）Spatial U-Pb age distribution of plutonic rocks in the central Abukuma Plateau，northeastern Japan Arc. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 110 (3). 145-149.

Daniel Atencio，Artur C. Bastos Neto，Vitor P. Pereira，Jose T. M. M. Ferron，星野 美保子，守山 武，渡辺 寧，宮脇 律郎，Jose M.V. Coutinho，Marcelo B. Andrade，Kenneth Domanik，Nikita V. Chukanov，門馬 綱一，平野 英雄，恒松 麻衣子（2015）Waimirite-（Y），orthorhombic YF3，a new mineral from the Pitinga mine，Presidente Figueiredo，Amazonas，Brazil and from Jabal Tawlah，Saudi Arabia: Description and crystal structure. Mineralogical Magazine 79 (3). 767-780.

保高 徹生，内藤 航（2015）Assessing cost and effectiveness of radiation decontamination in Fukushima Prefecture，Japan. Journal of Environmental Radioactivity 151. 512-520.

竹内 美緒，山岸 昂夫，鎌形 洋一，大島 健志朗，服部 正平，片山 泰樹，花田 智，玉木 秀幸，丸茂 克美，前田 広人，根建 心具，岩崎 渉，諏訪 裕一，坂田 将（2015）Tepidicaulis marinus gen. nov.，sp nov.，a marine bacterium that reduces nitrate to nitrous oxide under strictly microaerobic conditions. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology 65. 1749-1754.

実松 健造，昆 慶明，今井 亮（2015）Influence of phosphate on mobility and adsorption of REEs during weathering of granites in Thailand. Journal of Asian Earth Sciences 111. 14-30.

船津 貴弘，竹原 孝，笹岡 孝司，島田 英樹，マヒンダ・クルップ（2015）来待砂岩および諫早砂岩を用いた

SCB 試験片によるモードⅠ破壊靭性と試験片寸法との関係．応用地質 56（２）．46-55.

宮崎 晋行，遠藤 義宏，天満 則夫，山口 勉（2015）Effects of Particle-Size Distribution on the Viscoelasticity of Artificial Methane-Hydrate-Bearing Sand. International Journal of Offshore and Polar Engineering 25 (2). 112-119.

丸井 敦尚，Adrian H. Gallardo (2015) Managing Groundwater Radioactive Contamination at the Daiichi Nuclear Plant. International Journal of Environmental Research and Public Health 12 (7). 8498-8503.

檀上 徹，高倉 伸一，有光 悠紀，藤本 将光，石澤 友浩，深川 良一（2015）重要文化財後背斜面における比抵抗法電気探査を用いた地下水帯の把握． 歴史都市防災論文集 9. 9-16.

徂徠 正夫，加野 友紀，本多 克也（2015）Experimental study of sealing performance:2. Effects of particle size distribution on threshold pressure of sintered compacts. Journal of Geophysical Research120. 4931-4945.

稲垣 史生，Kai-Uwe Hinrichs，久保 雄介，Marshall W. Bowles，Verena B. Heuer，Wei-Li Hong，星野 辰彦，井尻 暁，井町 寛之，伊藤 元雄，金子 雅紀，Mark A. Lever，Yu-Shih Lin，Barbara A. Methé;，森田 澄人，諸野 祐樹，谷川 亘，Monika Bihan，Stephen A. Bowden，Marcus Elvert，Clemens Glombitza，Doris Gross，Guy J. Harrington，堀知行，Kelvin Li，David Limmer，Chang-Hong Liu，村山 雅史，大河内 直彦，小野 周平，Young-Soo Park，Stephen C. Phillips，Xavier Prieto-Mollar，Marcella Purkey，Natascha Riedinger，真田 佳典，Justine Sauvage，Glen Snyder，Rita Susilawati，高野 淑識，田角 英二，寺田 武志，戸丸 仁，Elizabeth Trembath-Reichert，David T. Wang，山田 泰広（2015）Exploring deep microbial life in coal-bearing sediment down to similar to 2.5 km below the ocean floor. Science 349. 420-424.

杉田 創，小熊 輝美，張 銘，原 淳子，柳澤 教雄（2015）使用済みマグネシウム塩ヒ素吸着材に関する安定性評価． 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集 185. 355-362.

柳澤 教雄，佐々木 宗建，杉田 創，佐藤 真丈，大里 和己（2015）Geochemical Monitoring of Hot springs surrounding Matsunoyama binary power plant. 日本地熱学会誌 37（３）．87-94.

森 千秋， 佐藤 徹，加野 友紀， 大山 裕之，Dmitry Aleynik，津旨 大輔，前田 義明（2015）Numerical study of the fate of CO2 purposefully injected into the sediment and seeping from seafloor in Ardmucknish Bay. International Journal of Greenhouse Gas Control 38. 153-161.

大塚 宏徳， 森田 澄人， 棚橋 学， 芦 寿一郎（2015）Foldback reflectors near methane hydrate bottom-simulating reflectors: Indicators of gas distribution from 3D seismic images in the eastern Nankai Trough. Island Arc 24 (2). 145-158.

三好 陽子，堀内 悠，須藤 定久，宮腰 久美子，雨宮 清，高木 哲一（2015）福島県に分布するベントナイト廃止鉱山周辺域の調査．粘土科学 53（３）．85-93.

堀内 悠，大野 哲二，星野 美保子，Ki-cheol Shin，村上 浩康，恒松 麻衣子，渡辺 寧（2015）南アフリカ共和国における希土類資源地化学探査としてのアリ塚調査報告．大分地質学会誌20. 38-45.

昆 慶明，平田 岳史（2015）Determination of 10 major and 34 trace elements in 34 GSJ geochemical reference samples using femtosecond laser ablation ICP-MS. Geochemical Journal 49 (4). 351-375.

森本 和也，田村 堅志，安楽 総太郎，佐藤 努，鈴木 正哉，山田 裕久（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.

町田 功，Sven Rumohr，Claudia Hartwig，Kirsten Orth，Traugott Schyett（2015）ドイツ・ヘッセン州の地下水管理．日本地下水学会誌 57（３）．307-316.

藤井 孝志，上原 真一，林 敬太，徂徠 正夫，高橋 美紀，中尾 信典（2015）CO_2地中貯留における泥岩の遮蔽性能に及ぼす有効圧変化の影響． 資源・素材学会誌 131. 509-517.

田中 敦子，坂本 靖英，眞弓 大介， 東野 晴行，坂田 将，中尾 信典（2015）CCS と微生物機能の融合技術（Bio-CCS） リスク評価の試み．Journal of MMIJ 131（８），（９）．524-532.

柳澤 教雄（2015）Case study of the Change of Scale with production. GRC Transactions 39. 1029-1032.

杉原 光彦，名和 一成，石戸 恒雄，相馬 宣和，西 祐司（2015）Potentiality of continuous measurements using a small-sized superconducting gravimeter for geothermal reservoir monitoring. GRC transactions 9. 635-642.

荒岡 大輔（2015）リチウム資源－各鉱床タイプの概要とリチウム同位体による成因論－． 岩石鉱物科学 44（５）．259-270.

眞中 卓也，牛江 裕行，荒岡 大輔，大谷 壮矢，稲村 明彦，鈴木 淳，H. M. Zakir Hossain，川幡 穂高（2015）Spatial and Seasonal Variation in Surface Water pCO_2 in the Ganges，Brahmaputra，and Meghna Rivers on the Indian Subcontinent. Aquatic Geochemistry 21 (5). 437-458.

三好 陽子，石橋 純一郎，島田 和彦，井上 博靖，上原 誠一郎，月村 勝宏（2015）Clay Minerals in an Ac-

tive Hydrothermal Field at Iheya-North-Knoll, Okinawa Trough. Resource Geology 65 (4). 346-360.

吉岡 秀佳, 持丸 華子, 坂田 将, 武田 洋, 吉田 聡（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.

徐 維那, 森本 慎一郎（2015）Domestic Yttrium Consumption Trends in Japan. Journal of Industrial Ecology 1-8.

昆 慶明, 荒岡 大輔, 江島 輝美, 平田 岳史, 高木 哲一（2015）Rapid and precise determination of major and trace elements in CCRMP and USGS geochemical reference samples using femtosecond laser ablation ICP-MS. Symposium on critical and strategic materials. British Columbia Geological Survey Paper 2015-3.

杉原 光彦（2015）A re-evaluation of gravity changes in the early stages of exploitation at the Yanaizu-Nishiyama geothermal field, Japan. Proceeding of New Zealand geothermal workshop 2015.

ヤーサーニクピーマン, 細野 高啓, 小野 昌彦, ヤンヒージュン, 嶋田 純, 滝川 清（2015）Assessment of the spatial distribution of submarine groundwater discharge（SGD）along the Yatsushiro Inland Sea coastline, SW Japan, using Rn-222 method. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 307 (3). 2123-2132.

高畑 修, 熊田 正次郎, 安藤 淳也, 宮口 新治, 石山 宏二, 保高 徹生, 小峯 秀雄（2015）道路維持管理に伴い発生する放射性物質含有土への土壌洗浄工法の適用性評価．地盤工学ジャーナル 10（４）．489-502.

川辺 能成, 原 淳子, 保高 徹生, 坂本 靖英, 張 銘, 駒井 武（2015）Risk Evaluation for Heavy Metals in Tsunami Deposits after the Great East Japan Earthquake. WECC2015 proceedings.

江島 輝美, 赤坂 正秀, 永尾 隆志, 大藤 弘明（2015）Occurrence of Fe^{3+} and formation process of precipitates within oxidized olivine phenocrysts in basalt lava from Kuroshima volcano, Goto islands, Nagasaki, Japan. Mineralogical Magazine 79 (7). 1833-1848.

大木 達也, 西須 佳宏, 星野 美保子（2015）海底熱水鉱床の選鉱性に影響を及ぼす鉱物相の形態的特徴. Journal of MMIJ 131（12）．619-626.

中村 謙吾, 佐藤 海里, 川辺 能成, 桑谷 立, 駒井 武（2016）名取川水系の重金属類の環境評価に関する調査及び数理統計解析．Journal of MMIJ 132（１）．22-30.

羽柴 公博, 谷 和夫, 岡田 哲実, 白鷺 卓, 及川 寧己, 若林 成樹（2016）岩石の一軸引張試験の方法と留意点. Journal of MMIJ 132（１）．7-13.

雷 興林, 船津 貴弘, 馬 勝利, 劉 力強（2016）A laboratory acoustic emission experiment and numerical simulation of rock fracture driven by a high-pressure fluid source.Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engeneering 8. 27-34.

中嶋 健（2016）深海チャネル－自然堤防－海底扇状地システムの貯留岩形態・根源岩ポテンシャルに関する最近の知見．石油技術協会誌 81（１）．33-45.

前川 竜男（2016）Equilibrium Conditions of Xenon Hydrates in the Presence of Aqueous Solutions of Alcohols, Glycols, and Glycerol. Journal of Chemical and Engineering Data 61 (1). 662-665.

保高 徹生, 張 紅, 村山 康樹, 濱 芳人, 塚田 泰久, 古川 靖英（2016）Development of a green remediation tool for sustainable remediation in Japan. Science of the Total Environment 563-564. 813-821.

保高 徹生, 宮津 進, 今藤 好彦, 辻 英樹, 有田 康一, 林 誠二, 川本 徹, 髙橋 顕（2016）Development of a rapid measurement method for radiocesium in seawater using copper- substituted Prussian blue impregnated nonwoven cartridge filter. Journal of Nuclear Science and Technology 53. 1243-1250.

高木 哲一（2016）レアメタル資源の安定供給を目指して. Synthesiology 9（１）．15-25.

中村 謙吾, 桑谷 立, 川辺 能成, 駒井 武（2016）Extraction of heavy metals characteristics of the 2011 Tohoku tsunami deposits using multiple classification analysis. Chemosphere 144. 1241-1248.

Ning-Jun Jiang, 吉岡 秀佳, 山本 晃司, 曽我 健一（2016）Ureolytic activities of a urease-producing bacterium and purified urease enzyme in the anoxic condition: Implication for subseafloor sand production control by microbially induced carbonate precipitation (MICP). Ecological Engineering 90. 96-104.

宮津 進, 保高 徹生, 吉川 夏樹, 田巻 翔平, 中島 浩正, 佐藤 郁, 野中 昌法, 原田 直樹（2016）Measurement and estimation of radiocesium discharge rate from paddy field during land preparation and mid-summer drainage. Journal of Environmental Radioactivity 155-156. 23-30.

尾形 剛志, 成田 弘一, 田中 幹也, 星野 美保子, 昆 慶明, 渡辺 寧（2016）Selective recovery of heavy rare earth elements from apatite with an adsorbent bearing immobilized tridentate amido ligands. Separation and Purification Technology 159. 157-160.

C. Xie, 雷 興林, 呉 小平, Hong Fu, Ziyao Xiong, Qingbo Ma, Xionglin Hu (2016) Effect of tidal stress on fault nucleation and failure of the 2007 M (s) 6.4 Ning'er earthquake. Science China Earth Sciences 59 (2). 397-407.

実松 健造，江島 輝美，昆 慶明，間中 崇行，Khin Zaw，森田 沙綾香，徐 維那（2016）Fractionation of rare-earth elements during magmatic differentiation and weathering of calc-alkaline granites in southern Myanmar. Mineralogical Magazine 80 (1). 77-102.

Adrian H. Gallardo，丸井 敦尚（2016）The aftermath of the Fukushima nuclear accident: Measures to contain groundwater contamination. Science of the Total Environment 547. 261-268.

田中 敦子（2016）CO_2地中貯留（CCS）とコミュニケーション．セーフティダイジェスト 62（３）．2-8.

森本 和也，田村 堅志，佐久間 博（2016）Generation of Second-Stage Structure in the Alkyl-ammonium Cation and Potassium Sericite Mica System. Chemistry Letters 45 (3). 336-338.

森本 和也,田村 堅志,山田 裕久,佐藤 努,鈴木 正哉(2016) Determination and reduction of Fe（III）incorporated into Mg-Fe layered double hydroxide structures. Applied Clay Science 121-122. 71-76.

谷川 亘，多田井 修，森田 澄人，Lin Weiren，山田 泰広，真田 佳典，Moe Kyaw，久保 雄介，稲垣 史生（2016）Thermal properties and thermal structure in the deep-water coalbed basin off the Shimokita Peninsula, Japan. Marine and Petroleum Geology 73. 445-461.

小松 俊文，高嶋 礼詩，重田 康成，前川 匠，Huyen Dang Tran，Tien Dinh Cong，坂田 将，Hung Doan Dinh，高橋 修（2016）Carbon isotopic excursions and detailed ammonoid and conodont biostratigraphies around Smithian-Spathian boundary in the Bac Thuy Formation, Vietnam. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 454. 65-74.

伊藤 慎，亀尾 浩司，里口 保文，増田 富士雄，廣木 義久，高野 修，中嶋 健，鈴木 徳行（2016）Neogene-Quaternary sedimentary successions. The Geology of Japan 309-337.

高倉 伸一（2016）調査地の特性や探査の目的に応じた多チャンネル電気探査装置の開発．物理探査 69（２）．117-126.

唐澤 廣和，大野 哲二，宮崎 晋行，エコ アフマディ（2016）Experimental results on the effect of bit wear on torque response. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 84. 1-9.

Satur Jacqueline，Calabia Buenaventurada，星野 美保子，Sayaka Morita，徐 維那，昆 慶明，高木 哲一，Yasushi Watanabe，Litshedzani Mutele，Stewart Foya (2016) Flotation of rare earth minerals from silicate-hematite ore using tall oil fatty acid collector. Minerals Engineering 89. 52-62.

実松 健造，渡辺 寧（2016）Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits. Reviews in Economic Geology 18. 55-79.

後藤 秀作，松林 修，長久保 定雄（2016）Simulation of gas hydrate dissociation caused by repeated tectonic uplift events. Journal of Geophysical Research 121 (5). 3200-3219.

原 淳子，川辺 能成，坂本 靖英（2016）Evaluation of natural degradation of persistent organic chemicals in acid sulfate soils distributed in a coastal area. International Journal of Environmental Science and Development 7 (6). 441-444.

稲垣 史生，Kai-Uwe Hinrichs，久保 雄介，金子 雅紀，森田 澄人，堀 知行，IODP Exp.337乗船研究者一同（2016）IODP Expedition 337: Exploring Limits of Life in the Deep Coalbed Biosphere off Shimokita, Japan. Scientific Drilling 21. 17-28.

中島 善人，小松原 純子（2016）Seismically induced soft-sediment deformation structures revealed by X-ray computed tomography of boring cores. Tectonophysics 683. 138-147.

永井 孝志，藤井 健吉，平井 祐介，村上 道夫，小野 恭子，保高 徹生，河野 真貴子，井上 知也，岸本 充生（2016）化学物質のリスクを中心としたレギュラトリーサイエンスの事例解析―日本リスク研究学会レギュラトリーサイエンスタスクグループ活動報告―．日本リスク研究学会誌 26（１）．13-21.

宮坂 亜由美，木股 三善，星野 美保子，越後 拓也，西田 憲正（2016）Manganese contents in volcanic pyroxenes in island arcs: case study from the South 2 Yatsugatake Volcanic area, Japan. Neues Jahrbuch fur Mineralogie-Abhandlungen 193（３）．311-323.

内藤 航，保高 徹生，黒澤 忠弘，上坂 元紀，山田 千恵，石井 秀樹（2016）Relationship between Individual External Doses, Ambient Dose Rates and Individuals' Activity-Patterns in Affected Areas in Fukushima following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. PLoS One11 (8).

張 銘，吉川 美穂（2016）An Overview of Remediation Technologies for the Sites Contaminated with Volatile Organic Compounds. Geo-Chicago 2016 Sustainability, Energy, and the Environment, ASCE Geotechnical Special Publication Nos. 273. 295-301.

宮崎 晋行，大野 哲二，唐澤 廣和，高倉 伸一，エコ アフマディ（2016）Performance Evaluation of PDC Percussion Bits through Laboratory Drilling Tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 87. 1-7.

Wataru Tanikawa, Osamu Tadai, Sumito Morita, Weiren Lin, Yasuhiro Yamada, Yoshinori Sanada, Kyaw Moe, Yu'suke Kubo, Fumio Inaga-

ki(2016) Thermal properties and thermal structure in the coalbed basin off Shimokita. Journal of Geophysical Research 73. 445-461.

Taiki Katayama, Hideyoshi Yoshioka, Hiroshi A. Takahashi, Miki Amo, Tetsuya Fujii, Susumu Sakata (2016) Changes in microbial communities associated with gas hydrates in subseafloor sediments from the Nankai Trough. FEMS Microbiology Ecology 92.

Masanori Kaneko, Yoshinori Takano, Nanako O. Ogawa, Yuki Sato, Naohiro Yoshida, Naohiko Ohkouchi (2016) Estimation of methanogenesis by quantification of coenzyme F_{430} in marine sediments. Geochemical Journal 50.

Miho Yoshikawa, Ming Zhang, Koki Toyota (2016) Enhancement and Biological Characteristics Related to Aerobic Biodegradation of Toluene with Coexistence of Benzene. Water, Air, & Soil Pollution.

Junko Hara, Yasuhide Sakamoto, Yoshishige Kawabe (2016) Evaluation of natural degradation of persistent organic chemicals in acid sulfate soils distributed in a coastal area. International Journal of Environmental Science and Development 7. 441-444.

Kaori Seki, Wataru Kanda, Toshiya Tanbo, Takeshi Ohba, Yasuo Ogawa, Shinichi Takakura, Kenji Nogami, Masashi Ushioda, Atsushi Suzuki, Zenshiro Saito, Yasuo Matsunaga (2016) Resistivity structure and geochemistry of the Jigokudani Valley hydrothermal system, Mt. Tateyama, Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research 325. 15-26.

Toshifumi Komatsu, Reishi Takashima, Yasunari Shigeta, Takumi Maekawa, Huyen Dang Tran, Tien Dinh Cong, Susumu Sakata, Hung Doan Dinh, Osamu Takahashi (2016) Carbon isotopic excursions and detailed ammonoid and conodont biostratigraphies around Smithian-Spathian boundary in the Bac Thuy Formation, Vietnam. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 454. 65-74.

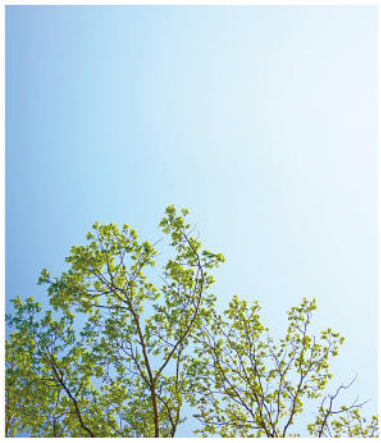
Hanako Mochimaru, Hideyuki Tamaki, Satoshi Hanada, Hiroyuki Imachi, Kohei Nakamura, Susumu Sakata, Yoichi Kamagata (2016) Methanomicrobium antiquum sp. nov., a hydrogenotrophic methanogen isolated from deep sedimentary aquifers in a natural gas field. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.

Takada M, Yasutaka T, Okuda T (2016) Simplified measurement method for dissolved radio-Cs in litter and soil seepage water using nonwoven fabrics impregnated with copper-substituted Prussian blue. Chemosphere 163. 234-241.

Naka A, Yasutaka T, Sakanakura H, Kalbe U, Watanabe Y, Inoba S, Takeo M, Inui T, Katsumi T, Fujikawa T, Sato K, Higashino K, Someya M (2016) Column percolation test for contaminated soils: Key factors for standardization. Journal of Hazardous Materials 20. 326-340.

Daisuke Mayumi, Hanako Mochimaru, Hideyoshi Yoshioka, Yuichiro Suzuki, Susumu Sakata(ほか(2016) Methane production from coal by a single methanogen. Science 354, 222-225.

Daisuke Araoka, Yoshiro Nishio, Toshitaka Gamo, Kyoko Yamaoka, Hodaka Kawahata (2016) Lithium isotopic systematics of submarine vent fluids from arc and back-arc hydrothermal systems in the western Pacific. Geochemistry Geophysics Geosystems. DOI: 10.1002/2016GC006355.



平成28年12月9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
中尾　信典
〒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2016
GREEN Report 2016
AIST04-C00014-15