

# Green Report 2014

December 9, 2014



地圏資源環境研究部門  
研究成果報告

進化する地圏研究

－第三期の成果と第四期への展開－

はじめに



地圏資源環境研究部門長

Director of the Institute for Geo-resources and Environment, AIST

中尾 信典

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13回目となります。当部門では持続発展可能な社会の実現に貢献するため、地圏の鉱物・燃料・地下水などの天然資源の安定供給，地圏の場と機能の利用，および地圏環境の保全を実現するための研究開発と知的基盤の整備をミッションとしています。

当部門は、産総研創立の2001年と同時に設立された研究部門です。産総研第一期中期計画（FY2001～2004年の4年間）、第二期（FY2005年～2009年の5年間）、第三期（FY2010年～2014年の5年間）を経て、来年度から第四期がスタートします。第三期においては、以下のユニット戦略課題を掲げて研究を推進してきました。

- 1) 土壌汚染評価技術の開発
- 2) 二酸化炭素地中貯留評価技術の開発
- 3) 地層処分にかかわる評価技術の開発
- 4) 鉱物・燃料資源のポテンシャル評価
- 5) 地下水・地熱資源のポテンシャル評価
- 6) 地圏の資源環境に関する知的基盤の構築

さらに、東日本大震災からの復興・復旧に資するため、津波堆積物、液状化、地下水などの複合地質リスクの評価、原発事故による放射性物質土壌の対策に関する研究、福島第一原子力発電所敷地内の汚染水が海へ流出することを防止するための政府による対策検討に参画するなど、他分野と連携して復旧・復興支援に係る研究業務に積極的に取り組んできました。2014年4月には、福島県郡山市に「福島再生可能エネルギー研究所（FREA）」が設立されました。当部門から地熱・地中熱研究者7名が地熱チームおよび地中熱チームとしてFREAに異動し、地熱・地中熱の看板研究（地熱・地中熱の適正利用のための研究）を遂行しています。

本年度が第三期中期計画の最終年度であることから、今回の報告会テーマを「進化する地圏研究－第三期の成果と第四期への展開－」としました。招待講演として東京大学の徳永朋祥先生をお迎えし、地圏の利用と保全の今後目指すべき研究の方向性についてご講演いただきます。また、当部門で培ってきた各戦略課題の研究成果や最近の話題などを取り混ぜて、来年度以降の第四期における研究展開および課題などを議論していただきたいと考えております。

当部門の研究には、地球科学の知的基盤として普遍的な研究テーマもあれば、日々刻々と変化する社会情勢を見ながら社会ニーズを的確にとらえて推進していく研究テーマ、学際的・萌芽的な研究テーマなどもあります。本報告会では、各研究グループや個人の研究成果も詳しく知っていただくために、例年同様にポスターセッションの場を設け、ご参加いただいた方との研究交流を深めてまいりたいと考えております。土壌汚染や地下水環境、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おります。

本報告会は、部門の研究成果を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貴重な機会と位置づけており、毎年定期的で開催しております。今後とも変わらないご高配を賜りますよう、心からお願い申し上げます。



## 目 次

### 【プログラム】

13：35-13：55	はじめに－地圏資源環境研究部門研究紹介－	研究部門長	中尾信典	1
13：55-14：35	【招待講演】地圏の利用と保全－今後目指すべき研究の方向－			
	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻		徳永朋祥	6
14：35-14：55	土壌・地下水汚染対策技術の現状と課題			
		地圏環境リスク研究グループ長	張 銘	10
14：55-15：15	CO <sub>2</sub> 地中貯留の研究開発の現状と今後の展開			
		CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループ長	西 祐司	12
15：15-16：00	ポスターセッション			
16：00-16：20	メタンハイドレートの資源調査			
		燃料資源地質研究グループ	森田澄人	16
16：20-16：40	レアメタル資源に関する国際共同研究			
		鉱物資源研究グループ長	高木哲一	18
16：40-17：00	地下水資源の利用と管理技術			
		地下水研究グループ長	丸井敦尚	20
17：20	懇親会			

## 【ポスターセッションの内容】

### (研究グループ発表)

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	鈴木祐一郎	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	30
地圏化学研究グループの紹介	地圏化学研究グループ長	佐脇貴幸	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	36
CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループの紹介	CO <sub>2</sub> 地中貯留研究グループ長	西 祐司	40
地圏環境リスク研究グループの紹介	地圏環境リスク研究グループ長	張 銘	44
地圏環境システム研究グループの紹介	地圏環境システム研究グループ長	雷 興林	48

## (個人発表)

GC-MS 及び GC-ECD による PCB 分析の比較検討\*

張 銘, 原 淳子, 吉川美穂, 川辺能成

LA-ICP-MS による自然由来重金属類土壌汚染の評価\*

張 銘, 昆 慶明, 星野美保子, 原 淳子, 杉田 創

Leaching Properties of Naturally Occurring Heavy Metals from Soils\*

M. Zhang, M. Hoshino, M. Yoshikawa, J. Hara and H. Sugita

新規ヒ素除去材開発のための基礎的研究 - Mg 塩によるヒ素除去効果について - \*

杉田 創, 張 銘, 原 淳子, 小熊輝美, 柳澤教雄

高濃度クロロエチレン類が微生物分解および微生物相へ与える影響\*

吉川美穂 (元 ケミカルグラウト (株), 現 当部門),

山野辺純一 (ケミカルグラウト (株)), 竹内美緒, 張 銘

福島県相馬郡飯舘村ため池底泥における放射性セシウムの分布\*

鈴木正哉, 万福和子, 星野谷亜衣, 森本和也, 平林恵理 (地質標本館), 大和田朗 (〃),

佐藤卓見 (〃), 横山信吾 (電中研), 伊藤健一 (宮崎大), 八田珠郎 (国際農研),

万福裕造 (〃), 北澤英明 (物材機構), 末原 茂 (〃), 山田裕久 (〃)

非晶質アルミニウムケイ酸塩複合体の塩担持効果による水蒸気吸着特性\*

鈴木正哉, 星野谷亜衣, 万福和子, 森本和也, 平林恵理 (地質標本館), 佐藤卓見 (〃),

大和田朗 (〃), 犬飼恵一 (サステナブルマテリアル研究部門), 前田雅喜 (〃)

1/500万アジア鉱物資源図の紹介\*

大野哲二, 神谷雅晴, 奥村公男, 寺岡易司, 渡辺 寧 (秋田大)

レアメタル鉱石分析法の開発\*

昆 慶明, 江島輝美, 森田沙綾香, 荒岡大輔, 高木哲一

宮崎層群高鍋層に発達する含礫泥岩を伴う海底地滑り堆積物\*

鈴木祐一郎

表層型メタンハイドレート2013年度 METI 調査の概要\*

棚橋 学 (現 明治大)

詳細地形地質調査: AUV によるガスチムニー精査\*

棚橋 学 (現 明治大)

広域地形地質調査: ガスチムニーの広域マッピング\*

松本 良 (明治大), 弘松峰男 (元 明治大), 青木伸輔 (明治大),

柳本 裕 (〃), 佐藤幹夫, 中嶋 健

表層型ガスハイドレート胚胎域の地形的特徴 - 日本海の例 - \*

弘松峰男 (元 明治大), 佐藤幹夫, 中嶋 健, 青木伸輔 (明治大),

大井剛志 (〃), 福田朱里 (〃), 柳本 裕 (〃), 松本 良 (〃)

上越海丘での熱流量計測と海鷹海脚への長期モニタリング装置の設置\*

後藤秀作, 佐藤幹夫, 稲垣史生 (海洋研究開発機構), 町山栄章 (〃),

棚橋 学 (現 明治大), 森田澄人, 松本 良 (明治大)

日本海の形成と石油天然ガスシステムの成り立ち\*

中嶋 健

鹿児島湾海底堆積物中に生息するメタンを基盤とする新規中温性微生物群の生理学的・遺伝学的特徴の解明\*

竹内美緒, 丸茂克美 (富山大), 前田広人 (鹿児島大), 根建心具 (〃),

大島健志朗 (東京大), 片山泰樹, 山岸昂夫, 岩崎 渉 (東京大),

鎌形洋一 (産総研北海道センター), 花田 智 (生物プロセス研究部門), 玉木秀幸 (〃),

服部正平 (東京大), 諏訪裕一 (中央大), 坂田 将

かん水の分析に基づく南関東天然ガス田の地下微生物の分布及びメタン生成速度の評価\*

片山泰樹, 吉岡秀佳, 坂田 将, 村本良幸 (関東天然瓦斯開発 (株)), 宇佐美潤 (〃)

水溶性天然ガス鉱床の形成と破壊

一南関東ガス田地化学データの解析による微生物起源メタンの生成・濃集・移動と天水による希釈一\*

金子信行, 前川竜男, 猪狩俊一郎

地熱井の掘削コスト削減を目指すパーカッション掘削技術の提案

一坑底駆動型パーカッションドリルと PDC パーカッションビット一\*

唐澤廣和, 大野哲二, 宮崎晋行, 高倉伸一, アフマディエコ (三菱マテリアル (株))

X 線 CT 画像のビームハードニング偽像を抑制できるタングステン系造影剤の提案\*

中島善人

金沢城石垣 (戸室石) の帯磁率調査

長 秋雄

54

\* の発表は別途要旨発表済み等の理由により本報告書には未収録

## 地圏の利用と保全 —今後目指すべき研究の方向— Conservation and Sustainable Usage of Geosphere Environment

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻：徳永朋祥  
Department of Environment Systems, Graduate School of Frontier Sciences,  
The University of Tokyo; Tomochika Tokunaga  
Phone: 04-7136-4708, e-mail: tokunaga@k.u-tokyo.ac.jp

### 1. はじめに

人間社会は、地圏から様々な恩恵を受けている。現在の我々の生活にとって不可欠なエネルギー資源である化石燃料（石油・天然ガス・石炭）や金属・非金属資源のほとんどすべては、地下から採取され、利用されている。最近では、リサイクルの概念が普及することにより、資源の再利用が積極的に進められるようになってきているが、依然として資源開発を行うことは不可欠である。特に、エネルギー資源として利用している化石燃料は、一般には再利用ができないために、継続的な開発が必要となる。また、地球は水の惑星とも呼ばれるが、地球上に存在する水のうち、液体として存在する淡水の大部分は地下水として地圏に賦存している。その開発と利用は、人口が爆発的に増加している状況を鑑みると、今後とも継続されていくことが予想される。さらに、最近の人間の活動域の広がりに伴い、地下空間利用も進んできている。地下鉄や地下街といった、我々が直接利用する空間がその代表であるが、それ以外にも、地下の特性を生かした地圏利用が行われたり、検討されたりしている。たとえば、石油や液化石油ガス（LPG）といったエネルギー資源の岩盤内空間への備蓄、原子力発電所の使用済み燃料を再処理したのちに発生する高レベル放射性廃棄物に代表される放射性廃棄物の地層処分、二酸化炭素の地中貯留（CCS）などがその例である。放射性廃棄物処分の分野では、地下水の流れが極めて遅い領域が地下に存在することに着目し、その領域において、さらに適切な工学的対処をすることにより、人間の生活圏から長期間にわたって放射性核種を隔離する検討が進められている。また、自然由来の材料である粘土鉱物が放射性核種を吸着する高い能力を持っていることや、地下の還元的な環境においては核種の移行速度が小さくなることが積極的に利用される。一方、CCSでは、地下にもともと石油・天然ガスといった流体が地質時間にわたって安定に存在していたことから、適切な条件を満たせば、長期にわたり二酸化炭素を地下に貯留することも期待できると考えられる。これらは、地圏のもつ特徴を生かした利用方策であろう。

ところで、このような地圏利用の結果として、我々は様々な問題を発生させてきている。よく知られた例は、地下水・地下資源の開発に伴う地盤沈下

であろう。地盤沈下は環境基本法により典型七公害の一つとして認定されており、都市域に限らず様々な地域で発生している。東京都東部の低地では、第二次世界大戦後の高度経済成長期に大量の地下水利用を行うとともに、地下に存在する水溶性天然ガスの生産を行ったために、最大で4mを超える地盤沈下を発生させ、低地の中央部に、標高が海拔ゼロメートル以下のいわゆる「ゼロメートル地帯」を発生させている。この問題に対して、国内では様々な対策が講じられてきているが、いまだ完全な解決を見ているわけではない。開発途上国においても、都市域の発展に伴い、地盤沈下は深刻な問題となってきた。特に、日本と同様に沿岸域の比較的新しい地盤の上に都市が形成されているバンコク（タイ）やマニラ（フィリピン）などでは、大規模な地盤沈下が発生している。

また、人間活動の結果として発生した汚染物質を地下に放出することによる土壌・地下水汚染は、深刻な問題である。地下での物質挙動は複雑である上に、その移動速度は小さい。そのため、一度汚染された土壌・地下水環境を修復することは大変に困難である。農業活動に伴う施肥・農薬散布等による汚染や、工場などから排出される重金属や油による汚染などの問題も多くなってきている。また最近では、下水道からの漏水に含まれる医薬品類による汚染も問題となってきた。

地表開発の進展に伴い、地盤沈下以外にもさまざまな災害が発生していることはよく知られているところである。このように地圏の利用・開発においては、常に災害の問題が付きまとうことになる。特に、我々の活動に応じて災害の発生様式や規模が変化していくことが多く、また、開発の結果として現れる環境変化も予測と違ってくることが少なくない。これは、地球システムを構成する主要な要素の一つである地圏というサブシステム内で起こっている現象および、地圏と人間圏の相互作用として発生する現象を十分に理解できていないことに起因するものと考えられる。地圏環境は、主に自然のプロセスによって絶えず変化しており、その過程は極めて複雑であるため、我々はその理解のために日々努力をしているものの、いまだ十分な理解には至っていないことであろう。さらに、現代では、人間活動そのものが地圏環境とその変遷に影響を与えるよう

になっており、問題をさらに複雑にしている。

## 2. 地圏環境の保全と利用に向けて学ぶべきこと —遅い地下の流れの科学—

地圏環境の問題を考えるに当たっては、地圏を構成する物質の特徴とその空間分布・時間変遷を理解するという作業が不可欠である。それに加え、地圏を移動する流体挙動について知ることが重要になると考えられる。地下における流体挙動の調査・研究は、内陸部での飲料水・農業用水の確保等の目的で始まり、エネルギー資源としての石油開発、より大規模な水資源としての地下水開発にかかわる問題として、150年以上にわたって継続されている（例えば、Landa and Ince, 1987）。Henry Darcy が1856年に発表したいわゆる Darcy の法則（Darcy, 1856）に基づく浸透流の考えが、これらの問題を取り扱う上での基本になっている。この式を持つ意味については、Hubbert（1956）が包括的なレビューを行っており、Darcy の法則は、経験則として提示されたものであるが、物理的にはミクロな流れ場の運動方程式の解をマクロスケールに平均化したものとして位置づけられることが示されている。また、Darcy の法則が成立する条件は、流れのモードが層流であるだけでは不十分で、粘性抵抗が慣性抵抗に対して十分に支配的であることが必要と述べられている。多孔質材料中の流れでは、レイノルズ数が600~700程度未満では層流であることが実験的に分かっているが、Hubbert（1956）の議論では、多孔質媒体を構成している固体粒子の平均径を代表寸法とした場合、レイノルズ数が1よりも大きな場合には、Darcy の法則が成り立たないとされている。この値は、代表寸法が $10^{-2}$ cmである砂岩中を水が流れる場合、Darcy 流束の値が $q=Q/A=1$  ( $\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}^2$ ) にほぼ対応する。また、Bear（1972）も同様な結果をまとめており、レイノルズ数が1ないし10よりも小さい場合には、Darcy の法則が成り立つことを示している。

このように、地下においては、そもそも多くの場合、流体流動は「遅い」ことが知られてきている。一方、前節にも述べたように、地下における流体挙動にかかわる問題は極めて広範になってきており、そのことが、「遅い」地下流体を考えるという観点をさらに重要なものとしている。

社会的に大きな問題となっている廃棄物処分対策として、地下環境が持つ機能への期待は極めて大きい。そもそも、放射性廃棄物の地層処分や CCS などは、地下における流体挙動が「極めて遅い」場所が存在すること、もしくは、適切にデザインを行うことができれば、地下環境が持つ物質移行が「極めて遅い」という性質に期待することができるという点に基づいている。石油・天然ガスといったエネルギー資源鉱床の存在やその破壊に関する議論は、地質時間にわたって石油・天然ガスが濃集し、保持さ

れるという環境の存在が主要なテーマとなる。ここにも、「極めて遅い」もしくは、実質的には「動かない」流体の地下での存在がその主題となる。

地盤沈下も、「遅い」動きを示す水に関する理解が不十分であったことによる問題という捉え方も可能である。すなわち、帯水層と呼ばれる比較的流動性の高い地層から揚水をすることにより、その上下に存在する泥層からの地層水の排出とそれに伴う（弾）塑性的な地盤変形が、地盤沈下の主要な原因であり、「遅い」地下水挙動が重要な点となってくる。

地表から数100km ぐらいのスケールの水の挙動に関しても、多くの知見が得られ、議論が深められてきている。これは、マグマの発生に対する水相の寄与、地震発生に対する流体挙動と過剰間隙水圧発生、温泉水の挙動などに100km よりも深いところで放出された水が主要な役割を果たしているという研究が多くなされているところに現れている（例えば岩森・中村, 2012; 長谷川ほか, 2012）。特に、沈み込み帯では、沈み込んだスラブ由来の水の排出とその後の挙動が、活発な火山活動・地震活動とその空間偏在性に重要な役割を果たしているようである。ここでも、浸透流的な水の移動がモデルとして考えられるが、その移動速度は、極めて遅いものであることが予想される。さらに、このような場では、固相側も容易に変形することが考えられ、古典的な浸透流の議論を超えて、固相液相両方の体積・形状変化を反映させた議論の展開を必要とする領域とも捉えられる。また、極めて広い圧力・温度条件での流れを議論することになるが、このような場における流体物性に関する丁寧な計測・評価も必要とされている。

「遅い」流れのレジームにおいては、流れに対して他の物理過程との連成現象が相対的に重要な意味を持つ場合が発生しうる。地震に伴う間隙流体圧の変化とその後の消散過程は、流れと変形の連成現象として適切に説明することができる場合がままある。また、前述の地盤沈下の問題も、変形と流動との連成現象の代表的なものである。さらに、ある種の岩石においては、濃度勾配に伴う化学的浸透（chemical osmosis）による水の移動が起こることも知られており（例えば Neuzil, 2000）、ポテンシャル勾配による水移動との連成過程としてとらえることが必要となってくる。このような現象は、条件がそろえば、淡水と塩水が接する沿岸域の地下で発生しているのかもしれない。

## 3. 地圏の保全と高度利用に向けてありうる技術の 展開—モデリングとモニタリングの融合—

今後の地圏の保全・高度利用をどのように進めていくかを考えるに当たっては、科学・技術のみで解決できない問題があることを十分に理解する必要がある。一方、このような問題に対して、科学・技術がどのように貢献できるかという観点からの技術の

展開も我々に課された課題であろう。

「地下水利用のあり方について」という問題を事例として以下では考えてみたい。この場合、技術的な観点から重要なことは、以下のように整理することが可能であろう。つまり、地下水利用やそれに関わる地域を対象とした地圏利用や開発に当たり、実際にどのようなことが起こってきているのかを知る努力をすること、今後地下水利用に対して何らかのアクションをしたときにどのようなことが発生し得るかをできる限り正確に予測すること、さらには、実際に起こる現象を精度良く監視すること、それらを有機的につなぐことを通した社会的な議論を可能にすること、である。最初の観点である歴史的な経緯やそこで注目すべき点のいくつかについては、我々が今までに多くの努力を払ってきた部分である。ここでは、予測と監視という2つの点について、現在我々が行っている研究を紹介してみたい。

まず一つめは、地下水挙動とそれに伴う地盤変動の再現・予測を可能にする数値解析技術の開発である。地下水挙動と地盤変形との関係については今までに多くの研究がなされており、要素過程をかなり正確に表現することが可能なレベルに達しているといえる。しかし、比較的大きな領域を対象とする実問題に適用するためには、広域的に連続する地下水流動と、地盤沈下にかかわる変形が主に発生するスケールである難透水性層内の変形現象を同時に解析する必要がある。そのために、我々は、広域の地下水流動と局所で発生する地下水流動・地盤変動を連結して解析する手法の開発を行っている(愛知, 2009)。図1はその結果の一例であるが、観測結果を計算結果が良く再現しているにとらえている。

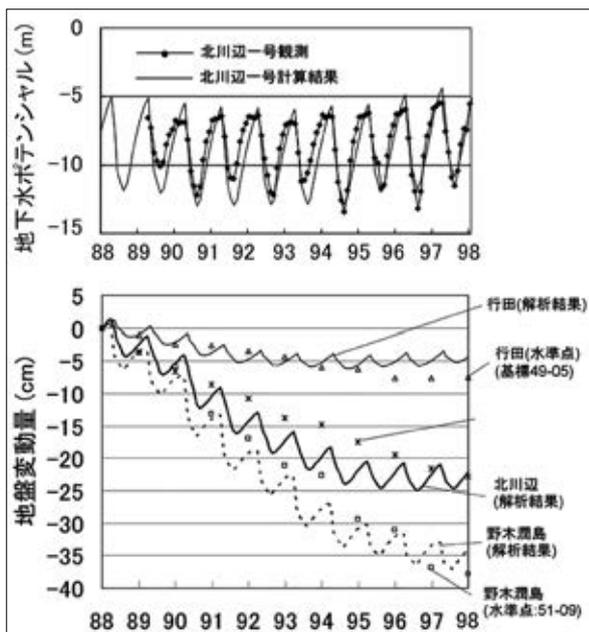


図1 広域地下水流動と局所地下水流動・地盤変動の連結解析による解析結果の例。井戸水位観測結果と計算結果(上図)と、3つの水準点の水準測量結果と地盤変動量計算結果(下図)(愛知, 2009)。

なお、この結果は、帯水層の水理ポテンシャルが1年間程度の時間で平均すれば大きな変化がなく、季節的な利用のみをするような場合であっても地盤沈下が発生しうることを示している。

もう一つは、衛星情報の一つである合成開口レーダを用いて地表面変動を広域的に精度良く知るという方法である。図2の上図は関東地域を対象とした観測結果の例、図2の下図は、九十九里平野周辺での例であるが、現地での水準測量結果と合成開口レーダに基づく地盤変動監視結果は整合性が高いことがわかる(出口ほか, 2009)。我々は、予測のためのモデリング技術と観測・監視技術とを組み合わせ、さらにGISによるデータ統合をすることにより、今後の適切な地下水管理に必要な技術的な観点からの貢献が可能になると考えている(Obanawa et al., 2010)。このようなアプローチを取り込んだうえで、社会の要請に対応する技術情報を丁寧に提供していくことがより合理性の高い地下水管理に向かう

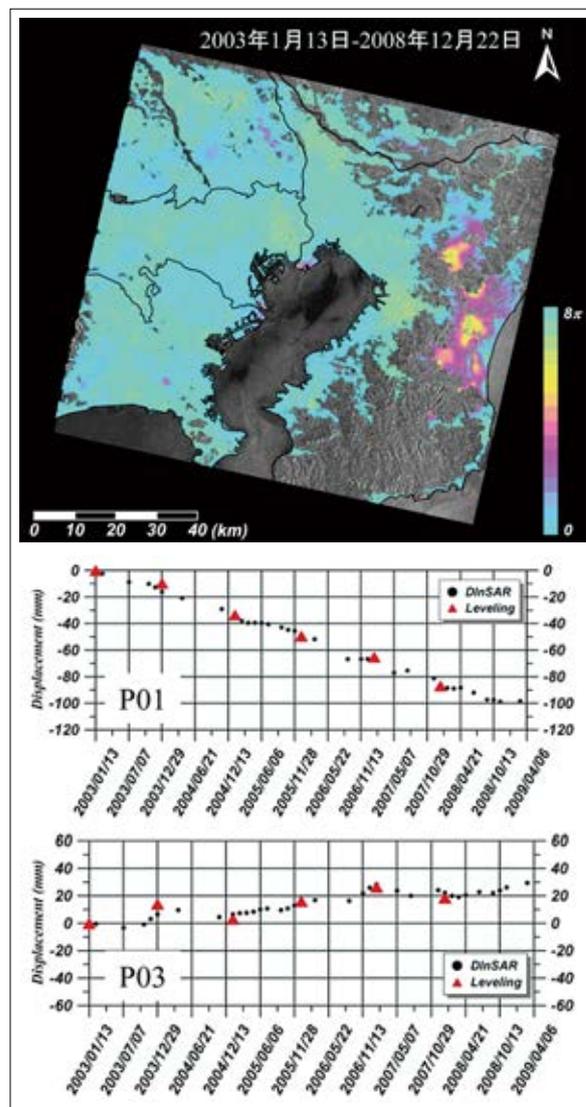


図2 合成開口レーダを用いた地盤変動観測の例。上図は関東地域における観測結果を示す。下図は2点での水準測量と合成開口レーダ観測結果の比較を示す。出口ほか(2009)に基づき作成。

方向性の一つであろう（図3）。

#### 4. まとめに代えて

地圏の最大の特徴は、我々が簡単にはアプローチできない「地下」であるということであろう。地下は地質学的な時間にわたる地球の営みの結果として形成された自然環境であり、その領域を構成する物質の空間分布や、そこで起こっている現象のすべてを理解することは、我々には極めて困難であるということも重要な点である。

人間は、その活動範囲を広げる過程で、地圏の高度利用を行い、一定の成功を収めてきた。しかしその一方で、人間の利用に伴う地圏環境の反応が我々の予想とは大きく違っていることにより、様々な災害を経験することとなった。今後の地圏の高度利用に向けて、我々は、今まで以上に地圏環境に関する理解を深めていく必要がある。具体的には、地圏環境の形成プロセスに基づく物性分布評価、地圏内を移動する地下水等の地下流体挙動の理解、地下で起きている地球化学現象の把握、これらを統合した上での地圏環境と人間社会との相互作用に関する研究の更なる進展が望まれる。その結果として、我々が課題としているエネルギー・資源開発、地圏環境保全、持続可能な地圏の開発を適切に実行するという

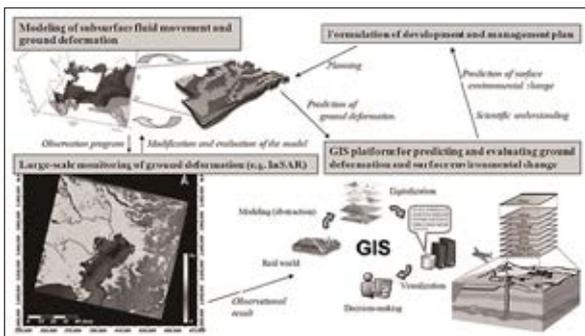


図3 数値モデリングと観測技術、GISを統合した地下水管理のあり方の一例 (Obanawa et al., 2010)。



図4 地圏の利用と保全に向けたありうる研究アプローチと対象となりうる研究テーマ群のイメージ

目標に近づいていけるものと考えている（図4）。また、今までの開発における成功例や失敗例（災害）から得られた経験を活かすことにより、今後の人間活動における無駄な失敗を避けることがきわめて重要である。特に、開発が高度に進んできた日本での経験は、今後の開発途上国での活動に適切に還元されることが望ましい。そのためにも、システム論的なアプローチに基づきながら、地圏の特性をより良く理解するための努力が必要である。これらの成果の社会的実装という観点からは、科学・技術的な観点に基づく情報を適切に提示することを通して、社会の要請に答えていくことも期待されている。

#### 参考文献

愛知正温, 2009, 広域地下水流動を考慮した地盤変動モデリング: 関東平野を対象として. 一般社団法人日本応用地質学会平成21年シンポジウム予稿集, 60-63.

Bear, J., 1972, Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Pub., New York, 764pp.

Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris,; 647pp.

出口知敬・六川修一・松島 潤, 2009, 干渉 SAR の時系列解析による長期地盤変動計測. 日本リモートセンシング学会誌, 29, 418-428.

長谷川昭・中島淳一・内田直希・梁田高広・岡田知己・趙 大鵬・松澤 暢・海野徳仁, 2012, 沈み込み帯の地震の発生機構 - 地殻流体に規定されて発生する沈み込み帯の地震 -. 地学雑誌, 121, 128-160.

Hubbert, M. K., 1956, Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids. Petroleum Transactions, AIME, 207, 222-239.

岩森 光・中村仁美, 2012, 沈み込み帯での地殻流体の発生と移動のダイナミクス. 地学雑誌, 121, 118-127.

Landa, E. R., and Ince, S., (Eds.), 1987, History of Geophysics: Volume 3—The History of Hydrology, Hist. Geophys. Ser., 3, 122 pp., AGU, Washington, D. C., doi:10.1029/HG003.

Neuzil, C. E., 2000, Osmotic generation of 'anomalous' fluid pressures in geological environments, Nature, 403, 182-184.

Obanawa, H., Tokunaga, T., Rokugawa, S., Decughi, T. and Nakamura, T., 2010, Land subsidence at the Kujukuri Plain in Chiba Prefecture, Japan: Evaluation and monitoring environmental impacts. IAHS Publ., 339, 293-298.

## 土壌・地下水汚染対策技術の現状と課題

### Current Status and Challenges Associated with Soil and Groundwater Contamination

地図環境リスク研究グループ長：張 銘

Leader, Geo-Environmental Risk Research Group: Ming Zhang

Phone: 029-861-3943, e-mail: m.zhang@aist.go.jp

#### 1. はじめに

土壌・地下水汚染は、古くて新しい環境問題であり、人間活動に伴う種々の環境負荷が土壌・地下水に蓄積された負の遺産である。古くから、足尾鉍毒やイタイイタイ病などに代表される重金属類の汚染が深刻な社会問題となっていたが、近年では、六価クロムや鉛及びヒ素などに代表される重金属類汚染に加え、トリクロロエチレン（TCE）やテトラクロロエチレン（PCE）などに代表される揮発性有機化合物（VOCs）ならびにダイオキシン類などによる土壌・地下水汚染も表面化して、大きな社会問題となっている。

土壌汚染は典型七公害（大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下及び異臭）の一つである。ほかの公害に関連する法律に比べ（例えば、水質汚濁防止法、1970年12月に公布）、土壌汚染に関連した「土壌汚染対策法」が制定されたのは2002年であり、一番歴史の浅いものである。また、欧米諸国と比較して、日本における土壌汚染対策の制度化も数年～20年以上遅れていたのが事実である<sup>1)</sup>（表1）。

表1 欧米における土壌汚染対策関連制度

国名	土壌汚染対策に関連した制度
米国	1980年：包括的環境対策・補償・責任法、通称スーパーファンド法
オランダ	1983年：暫定土壌浄化法 1987年：土壌保全法
イギリス	1990年：環境保護法
ドイツ	1998年：ドイツ連邦土壌保護法
デンマーク	1999年：汚染地法

本講演では、日本における土壌・地下水汚染、特に、土壌・地下水汚染対策技術の現状をレビューするとともに、土壌・地下水汚染分野において直面している主要な課題を整理・抽出する。また、今後の展望についても私見を述べさせて頂く。

#### 2. 日本における土壌・地下水汚染の現状

一般に「土壌」とは、地球上の陸地表面を覆っている生物活動の影響を受けた物質層のことを指しており、「土」とも呼ばれるが、土壌汚染と言うと、単に汚染された土だけでなく、汚染された土地、または地層という意味にも使われている。これは不動

産の取引において、汚染状態が土地の価値に直結し、またトンネル掘削などのインフラ整備においては、環境基準値を超過する重金属類を含有する地層（自然由来汚染）に遭遇することもあるためである。また、土壌には間隙水が存在し、土壌汚染と地下水汚染が同時に発生するケースが多く、土壌・地下水汚染との表現もよく利用されている。

1970年に東京都の工場跡地で六価クロム鉍滓の埋立による汚染の発覚をきっかけに土壌汚染問題が表面化し始めたが、深刻さが表面化したのは、主に1990年以降であった。まだ法制化まで至っていなかったものの、土地の再開発・販売などに伴う土壌調査や事業者がISO14000に関連する環境管理の一環として実施する自主調査で土壌汚染の判明事例が多発し、関心が高まるとともに土壌汚染対策が喫緊の課題となっていた<sup>2)</sup>。

土壌汚染調査・対策事例及び対応状況を把握するために、環境省では平成9年より関連の調査を毎年実施し、その結果を同省のWebsiteより公表してきた<sup>3)</sup>。同調査結果によれば、土壌汚染の判明件数が年々増加し、調査事例の約半数が超過事例、即ち汚染事例となり、また、（法律上で第二種特定有害物質と称される）重金属類による汚染が6割以上、複合汚染を含む（第一種特定有害物質と称される）VOCs汚染が3割以上占めることも判明された。

さらに、土壌環境センターが実施・公表した「我が国における土壌汚染対策費用の推定」によれば、土壌汚染の実施が望まれる全産業事業所数は約93万ヶ所、調査費用約2兆円、汚染浄化費用約11兆円が必要と推定された<sup>4)</sup>。

#### 3. 土壌・地下水汚染対策技術の現状

土壌・地下水汚染対策の目的は汚染によるヒトへの健康リスクを低減させることにある。対策方法として、理論的には多くの手法が存在し、また分類方法も複数存在する<sup>5)</sup>。しかし、現実においては、土壌汚染対策法、または都道府県・土壌汚染対策法政令市が定めている条例や要綱などが制定されたにも係らず、法に基づく調査と対策は自主調査と対策に比べ、極僅かなものであり、平成19年度においては、何れも2%しか占めていなかった<sup>6)</sup>。また、対策措置の殆どが掘削除去であった。これは、自主的な調査・対策は環境リスクを低減するよりも、資産リスクを回避するために、汚染物質を完全かつ早く取り

除きたいとの意図が背後にあると言えるであろう。

上述したような法に基づかない土壌汚染の発見の増加や、掘削除去への偏重ならびに汚染土壌の不適切処理による汚染の拡散などの背景を踏まえ、平成22年に土壌汚染対策法が改正された。主な改正ポイントは土壌汚染状況の把握のための制度の拡充、規制対象区域の分類等による講ずべき措置の内容の明確化、搬出土壌の適正処理の確保ならびに指定調査機関の信頼性向上であった。法改正後、法律に基づく調査と対策の割合が増加する傾向にはあるが、平成25年時点では、それぞれ7%と17%に留まっていた<sup>7)</sup>。

#### 4. 土壌・地下水汚染対策に係る研究課題

土壌・地下水汚染の拡大を防止し、汚染された土壌及び地下水を効率よく浄化するためには、種々の課題が残されていると考えられる。

- (1) 法律を含むシステム面の整備：現状の土壌汚染対策法は土壌及び地下水汚染の調査と対策に係るものであり、汚染の防止法ではない。汚染の拡大や既知または新規物質などによる土壌・地下水汚染を防ぐためには、関連法律の改正または新しい法律の整備が必要であると思われる。
- (2) 安価かつ迅速な分析技術の確立：公定法による調査・分析は比較的煩雑であり、必要な時間が長く、また分析費用も比較的に高い。公定法との整合性がよく、また現場で迅速かつ簡易に分析できる技術の開発が必要であると考えられる。
- (3) 汚染物質の存在形態の解明：汚染物質は多種にわたり、また土壌の種類も千差万別である。汚染した土壌を効率的に浄化するためには、汚染物質の存在形態や土壌における汚染物質の吸・脱着メカニズムの解明に関する体系的な研究が肝要であると考えられる。
- (4) 実用化可能な低コスト・低環境負荷浄化技術の確立：掘削除去への偏重を抑制し、現場・原位置での浄化対策を促進、または本格的に実施するためには、実用化可能な低コスト・低環境負荷浄化技術の確立が必要不可欠である。環境共生との観点から、自然エネルギーや鉱物、自生植物及び環境微生物を利活用した浄化技術に関する更なる研究開発が非常に重要であると考えられる。
- (5) 技術の融合：汚染サイトの条件は千差万別であり、また万能な浄化手法も存在しない。このため、必要最小限の調査を実施し、汚染物質の存在状態を的確に評価し、複数の浄化手法を柔軟に融合できる浄化・対策技術の確立

が必要不可欠であると考えられる。

- (6) リスクコミュニケーションとリスクガバナンス：土壌・地下水汚染問題は非常に複雑であり、環境基準値だけでは説明・解決できない現実的な問題が多数存在する。欧米では、リスクを管理するとの考え方が根ざしつつあるが、日本ではゼロリスク文化が未だ根付いている。複雑で多様化する土壌・地下水汚染問題を社会全体で管理・解決していくためには、リスクの知識やリスク評価技術に関する啓蒙・普及が強化すべきと考えられる。

#### 5. 終わりに

土壌・地下水汚染は発展途中国だけの問題だけでなく、日本を含む先進国においても依然として大きな社会問題として直面している。

複雑で多様化する土壌・地下水汚染問題を効率よく解決するためには、単なる分析や浄化技術の開発だけでなく、社会の実情に適合したシステム面の整備やリスク文化の形成なども必要不可欠であると考えられる。また、新進国である日本において、関連技術の開発とノウハウを蓄積し、発展途中国への技術支援や海外での事業展開に発展できれば国際社会への貢献も実現できると確信している。これを私の研究者としての使命として、またこの使命感を原動力として日々の研究活動に邁進していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人産業環境管理協会：平成25年度地球温暖化問題等対策調査事業（土壌環境の保全に関する動向調査）報告書、149pp, (2014)
- 2) 宮本和明：汚染された土壌環境の対策技術の動向、科学技術動向、No.12, (2002)
- 3) 環境省：土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果について、<http://www.env.go.jp/water/dojo/chosa.html>
- 4) 社団法人土壌環境センター：我が国における土壌汚染対策費用の推定－土壌汚染調査費用の推定－、土壌汚染浄化費用の推定－、(2000)
- 5) 社団法人土壌環境センター：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説、(2003)
- 6) 社団法人土壌環境センター：土壌汚染状況調査・対策に関する実態調査結果（平成20年度）、(2009)
- 7) 社団法人土壌環境センター：土壌汚染状況調査・対策に関する実態調査結果（平成25年度）、(2014)

## CO<sub>2</sub>地中貯留の研究開発の現状と今後の展開 CO<sub>2</sub> Geological Storage Research in AIST

CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ長：西 祐司

Leader, CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group: Yuji Nishi  
Phone: 029-861-3969, e-mail: y.nishi@aist.go.jp

### 1. はじめに

環境省の最新（2014年4月）の確定値によると、日本の温室効果ガス排出量は、2012年に13億4,300万トン（CO<sub>2</sub>換算）と前年度比で2.8%（3,660万トン）、京都議定書基準年比で6.5%（8,180万トン）の増加となっている。森林吸収量増加や京都メカニズムクレジットを加味して5カ年平均では基準年比8.4%減と京都議定書目標の基準年比6%減を達成はしているものの、2008年度後半の金融危機の影響に伴い2009年度に減少した総排出量は、2010年度以降、景気回復及び東日本大震災を契機とした火力発電の増加により3年連続の増加となっている<sup>1)</sup>。温暖化対策の中心に据えられていた原子力の積極的利用が難しくなった昨今の状況から、低炭素社会への移行までは主要なエネルギー源として化石燃料を使い続ける必要があり、温暖化抑制のためには排出されるCO<sub>2</sub>の大气中への拡散量を抑制する二酸化炭素回収・貯留（CCS: Carbon-dioxide Capture and Storage）技術の重要度は増加している。

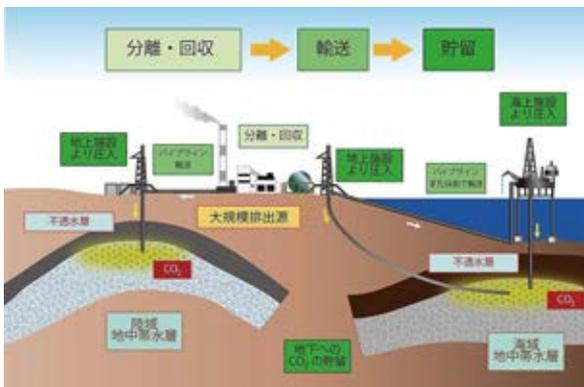


図1 CCSの一連の流れ

### 2. 産総研におけるCO<sub>2</sub>地中貯留の研究

CCSは、分離回収・輸送・貯留の3つのプロセスから構成される（図1）。地圏資源環境研究部門は、このようなCCSの3つのプロセスのうちCO<sub>2</sub>を地下に貯留するCO<sub>2</sub>地中貯留のための技術開発を、他研究部門の協力の下に進めている（図2）。

現在、わが国におけるCO<sub>2</sub>地中貯留の大規模実証調査等では、反射法地震探査などの能動的な弾性波探査がモニタリング手法の中心に据えられている。弾性波探査は、高い分解能で地下のCO<sub>2</sub>の拡がりをつまえることができるが、その実施に伴うコストや漁業者との調整等の負担が大きく、商用化段階で想定

されるわが国沿岸部におけるCO<sub>2</sub>貯留サイトにおいて頻繁に実施できるモニタリング手法とは言い難い。また、検知対象が使用する弾性波の波長程度の空間的スケールで平均化された弾性物性であるため、検知できる対象にも限界がある。経済産業省から受託している「弾性波を補完するCO<sub>2</sub>挙動評価技術の開発」は、同省の二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業の一部として、このような弾性波探査の特性を補完するための技術開発を目指しているプロジェクトであり、弾性波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の2つの研究開発を実施している。本稿では、主にこれらの研究開発内容について、次章以降で詳しく紹介していく。

CCSで地下に貯留したCO<sub>2</sub>は、地下貯留層に生息するメタン生成菌等に影響を与える。このような地下の微生物活動に関するバイオCCSの研究と、メタン生成促進などで得られる便益までも含んだリスク管理手法を開発する研究が、産総研交付金、融合・連携推進予算による「地下微生物を利用したメタンガス合成技術」の研究である。このプロジェクトでは、地球科学に留まらずに研究分野を横断した協力体制の下、研究が進められている。

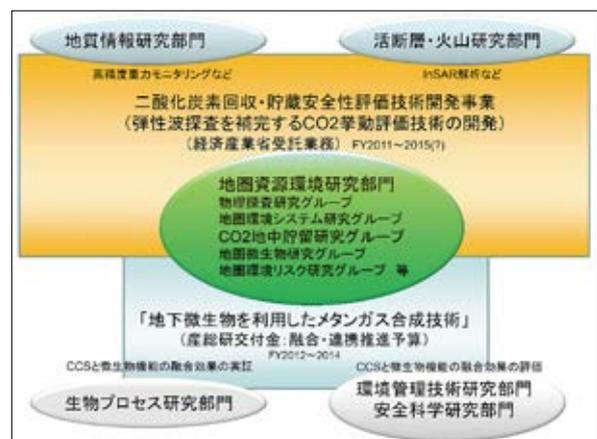


図2 産業技術総合研究所におけるCO<sub>2</sub>地中貯留関連の主要な予算及び研究体制（H26年度現在）

### 3. 弾性波補完モニタリング技術の開発

地下に圧入したCO<sub>2</sub>がどのように拡がっているかを予測・確認・検証していくことは、地中貯留の計画・圧入・圧入停止後管理の全ての段階において重要な課題であり、地下の貯留層等における物性の変化を監視するモニタリング技術と地下の数値モデルを作成して、流体流動等の直接見ることができない

地下の状態を計算するモデリング技術はこのために用いられる重要な技術となる。

わが国においては、発電所・工場等の大規模 CO<sub>2</sub> 排出源の立地、社会的受容性等から、CO<sub>2</sub>貯留サイトは主に海域となることが想定される。海底下の CO<sub>2</sub>貯留層の監視において、反射法地震探査等の弾性波探査は非常に有用な手法であるが、前述のように定期的には実施するには負担が大きく、探知できる物性・地質構造には限界がある。より多くの地下情報を得るためにも、また、CCS の総コストを低減するためにも、弾性波探査以外の有効な探査手法が必要である。特に、圧入終了後に事業者によって監視については、すでに圧入自体が終了して収入が期待できない期間であることから、極力低コストで費用対効果の高いモニタリング技術が求められる。そこで、弾性波探査を補完するモニタリング技術として比較的实施コストの低い受動的探査手法を使用し、弾性波探査とこれらのモニタリング技術及び貯留層モデリング技術を効率的に組み合わせることにより、CO<sub>2</sub>地中貯留の地下モデルの不確実性を低減させて安全性評価に資するモニタリング/モデリング技術の確立を目指すことが「弾性波補完モニタリング技術の開発」の目標である。この研究では、受動的モニタリング手法として、重力、自然電位 (SP)、AE (Acoustic Emission: 極微小地震等を用いた受動的地震探査)、比抵抗法等の物理探査技術の CCS への活用を検討し、また、各種モニタリング観測データを拘束条件としてモデル改良を系統的に実施して CO<sub>2</sub>挙動予測に用いることによりシミュレーション用地質モデルの信頼性を向上させる最適モデリング技術の開発を行っている。

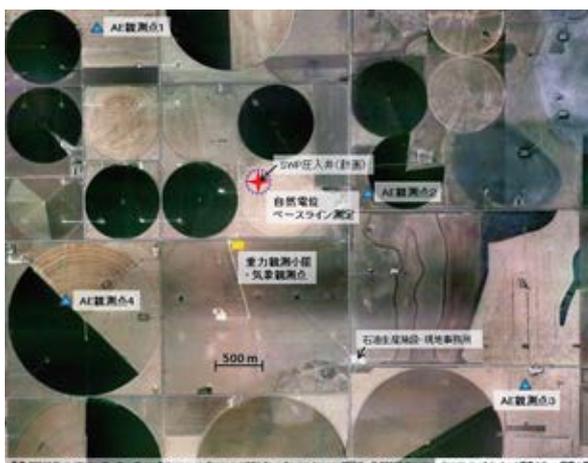


図3 FWUにおける産総研の観測基点<sup>2)</sup>

本研究では、わが国の実証調査 (2016年度から CO<sub>2</sub>圧入予定) 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 (LANL) との連携の下に米国の SWP (Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration: 炭素隔離のための南西部パートナーシップ) が実施している CO<sub>2</sub>大規模圧入テストに参加している。実際の大規模圧入サイトにお

けるモニタリングを通して原位置観測の経験とデータを蓄積するとともに、観測手法やデータ解析方法の検討を行い、SWPの実施する各種モニタリングの結果も参照しながら、総合的に CO<sub>2</sub>貯留モデルの構築に適用可能な多面的モニタリング技術の構築を目指している。

SWP の CO<sub>2</sub>大規模圧入テストは、米国テキサス州北西部のファーンズワース・ユニット (FWU: Farnsworth Unit) において実施中で、CO<sub>2</sub>-EOR をベースにした複数の抗井からの圧入によって総量 100万トンクラスの CO<sub>2</sub>圧入が計画されている。SWP は、CO<sub>2</sub>圧入井の一つである 13-10A 坑を中心に、抗井計測、3次元反射法探査、繰り返し VSP 調査、13-10A 坑近傍の観測井 13-10 坑に坑内地震計アレイを設置しての微小地震観測、採取流体・土壤ガスのモニタリング等々の様々な調査を実施している。産総研は、重力・SP・AE の 3 手法の受動的探査手法とベース・データとしての気象及び土壌水分については、現地に連続モニタリング・システムを設置して圧入時モニタリングを継続中である (図 3, 写真 1)。また、これらの連続モニタリングに加え、13-10A 坑近傍の観測井 13-10 坑を中心とする NW-SE 方向測線における MT 法 / AMT 法による比抵抗調査と SP プロファイル調査、FWU のユニット全域にわたる重力調査、テストサイトを含む地域の圧入前の測地的変化の InSAR による解析等も実施している。超伝導重力計による高感度連続重力記録の取得と初期ドリフトの把握など、弾性波探査を補完するモニタリング技術開発にとって重要なデータ・経験を蓄積中である。FWU におけるモニタリングの経験を、国内の実証調査やその先の商用化段階に適用していくためには沿岸部におけるモニタリング実施に伴う海洋起源のノイズ等の把握が重要であるため、今年度から国内においても苫小牧の実証調査実施サイト近傍において補助的なデータ取得を始める。



写真1 FWU に設置した重力計測小屋<sup>3)</sup>

これらの成果を基に、高精度重力モニタリング等の本研究の成果が実証調査の中で利用され、さらに商用化段階にも役立つことを目指して研究を進めている。

このような CO<sub>2</sub>圧入に係る物理探査モニタリングデータ (地震探査、重力調査、電気・磁気探査等) を最大限利用したヒストリーマッチングにより、

CO<sub>2</sub>挙動予測に用いるシミュレーション用地質モデルの信頼性向上を図るために、数値シミュレーションにより計算される温度、圧力、CO<sub>2</sub>飽和度等の変化量から、物理探査によって観測可能な物理量（理論計算値）に変換するプログラムの開発も進めている（図4）。このプログラムを利用することにより、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が可能となり、長期CO<sub>2</sub>挙動予測の精度向上を目指すことが可能となる。また、適切なモニタリング・システムの検討やCO<sub>2</sub>圧入に伴う変動抽出のための解析方法の検討のために、このようにして開発したポストプロセッサとSWPによる米国テストサイトの地質モデルを利用して、圧入に伴うジオバッテリー効果や潜在リスクを想定したCO<sub>2</sub>圧入時の変動予測計算も実施しており、高精度重力モニタリングの利用方法の検討などに有益な結果を得ている。

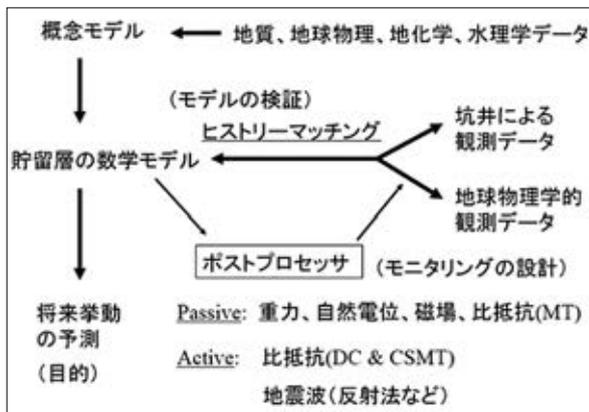


図4 地球物理ポストプロセッサを用いた履歴・マッチング<sup>4)</sup>

#### 4. 遮蔽性能評価技術の開発

プレート沈み込み帯に位置するわが国は、プレート運動に伴う応力蓄積や沈降・堆積、地震・火山活動等によって、世界でも有数の地震・火山国であり、このような地質学的に非常に活動的な立地はCO<sub>2</sub>貯留サイトの地質にも大きく影響を与えている。CO<sub>2</sub>貯留サイト選定に際しては、大規模な活断層や火山を避けているが、CO<sub>2</sub>圧入による地下圧力の変化に伴い弾性波探査では検知できない小規模な断層等が変形し、それらの透水性も変化することで貯留したCO<sub>2</sub>の挙動や遮蔽性能に影響を及ぼすことが考えられる。また、わが国の一般的な帯水層の貯留サイトでは、弾性波探査の分解能以下の薄い砂岩層と泥岩層が互層を形成していることが想定される。このような互層システムでは、各岩層で鉱物組成や粒径分布等の違いに依存してシール性能やCO<sub>2</sub>の流動性、さらには地化学プロセスまでが変化するため、単一の岩層の場合と比較してCO<sub>2</sub>の挙動がより複雑になることが予想され、互層システム全体についての体系的な解析を行うことが必要となる。一方で、互層を有する貯留層では、重厚なキャップロックが存在しない地質条件下でもCO<sub>2</sub>の上方への

移動が抑制される可能性が期待される。これらの影響を考慮していくために、産総研では「遮蔽性能評価技術の開発」として、ジオメカニクス（岩石力学）等を考慮したモデリング手法と砂岩泥岩互層システムにおけるCO<sub>2</sub>挙動に関する研究を進めている。

ジオメカニクスを考慮したモデリング手法の研究では、国内において地層・断層の変形が測定可能なレベルまでCO<sub>2</sub>を圧入する実験の実施は困難なため、類似の自然現象を用いるナチュラル・アナログ手法を利用した、ナチュラル・アナログとしたのは、過去にCO<sub>2</sub>が断層沿いに自然に上昇して地盤変形を起こした松代事象であり、この事例から得られた各種のデータを詳しく調べた。この事例における地中流体の活動と断層の関係を米国ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)が開発したTOUGH-FLACというジオメカニクス（岩石力学）等を考慮した貯留層シミュレータを用いて計算上で再現することによって較正されたモデルとして、CO<sub>2</sub>地中貯留にとって考慮すべきパラメータ等を判別するために各種パラメータの感度解析を実施している（図5）。また、わが国のCO<sub>2</sub>地中貯留の対象となる軟岩地層や断層を構成する岩石に対する力学試験により岩石物性の実データを取得して、軟岩岩盤における断層挙動のモデル化を進めている。

これらの研究成果を基に、松代ほどのデータ蓄積が無いCO<sub>2</sub>地中貯留を検討しているサイトにおいてもジオメカニクスを考慮したモデリングを実施し、CO<sub>2</sub>圧入圧力及び圧入レートを適切に設定するための技術手順策定を目指している。

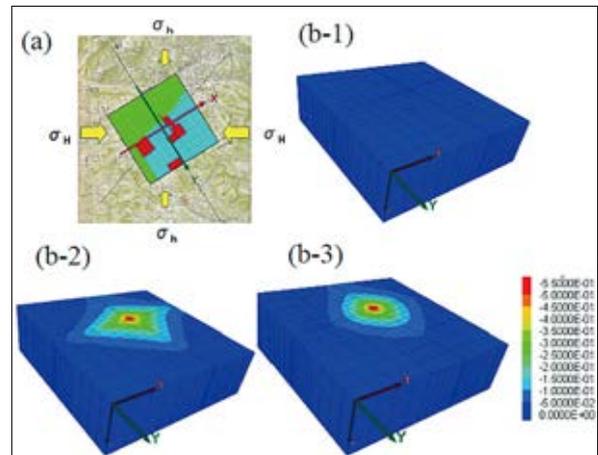


図5 ジオメカニクスを考慮したモデリング：ナチュラル・アナログ再現のための試験的シミュレーションの結果<sup>5)</sup>

砂岩・泥岩の互層システムの研究では、砂泥互層を特徴付けるパラメータとして各岩層の毛管圧（シール圧）に注目し、地中貯留を模擬した温度・圧力条件下において、粒径を制御した人工試料に対する浸透実験を実施してきた。この実験結果に基づき、シール圧と岩石内部の粒子構造、浸透率の関係をモデル化し、さらに種々の泥岩試料について同様の実験を行うことでこのモデルの天然系への拡張を図っ

てきた(図6)。さらに、試料に対する有効応力を変動させて様々な圧密(深度)条件を設定したり、間隙水として塩水を適用する等の実験も行い、より天然に合致した環境下でのデータの取得も試みている。



図6 CO<sub>2</sub>の浸透実験における試料表面からのCO<sub>2</sub>のブレイクスルーの様子：a) ブレイクスルー前、b) 試料表面上1点からのCO<sub>2</sub>のブレイクスルー、c) 試料全面からブレイクスルー<sup>6)</sup>

また、長期的な地化学プロセスが岩層のシール性能に及ぼす影響の評価に向けて、CO<sub>2</sub>地中貯留のナチュラル・アナログとみなされる含CO<sub>2</sub>泉において種結晶を用いた現場反応実験を行い、地化学プロセスで最も重要となる炭酸塩鉱物について反応速度の計測と生成条件の検討を行っている(図7)。最終的に、これらの室内試験等で得られた各種パラメータを用いて砂岩・泥岩の互層システムを対象とした数値シミュレーションにより、各種パラメータの感度および妥当性の検証を行っている。

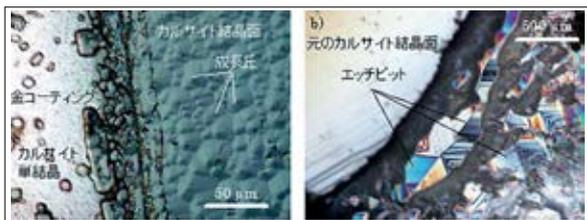


図7 含CO<sub>2</sub>泉現場反応実験におけるカルサイト劈開面の微分干渉顕微鏡像：a) 増富温泉での成長実験(反応開始30分後)、b) 七里田温泉での溶解実験(反応開始336時間後)<sup>6)</sup>

## 5. 今後の研究の展開

産総研が現在実施している「弾性波探査補完モニタリング技術の開発」においては、弾性波とは異なる地下情報を利用した受動的モニタリングによる連続的な補助的監視手段の開発、モデリングと一体となったモニタリング手法の開発により、多面的モニタリング手法のテストサイトでのケーススタディ結果の評価と多面的モニタリングの実施指針の取りまとめを目指している。また、「遮蔽性評価技術の開発」においては、ジオメカニクスを考慮した断層の取り扱い、砂岩泥岩互層システムにおけるCO<sub>2</sub>移行特性の評価を行い、軟岩・亀裂系および砂岩泥岩互層システムの地質モデリング手法のマニュアル化と確率論的な圧入条件予測手法の技術手順取りまとめを行っていく。

これらの研究成果を苫小牧における大規模実証試験で適用・検証することにより、CO<sub>2</sub>貯蔵安全性評価における精度の向上とコスト低減に貢献していきたい。

現在実施中の研究開発に加えて今後の研究技術開発を推進すべき課題としては、苫小牧における実証調査の進行に伴い明らかになるであろう新たな課題に加え、実用化に向けて、浅部におけるCO<sub>2</sub>の挙動や地震活動との関係等の社会的受容性獲得のための課題やリスク評価、サイト選定のための貯留ポテンシャル評価手法の高度化、CO<sub>2</sub>圧入停止後を見越した長期挙動評価、商用化に向けた最適スキームの検討等が重要と考えられる。また、海外展開を見据えたCCUS(Carbon Capture, Utilization, and Storage: CO<sub>2</sub>利用貯留)の推進に伴う課題や、地熱開発、シェールガス/オイル開発との連携のための課題、CCS環境下での微生物によるメタン生成等の地下生物圏への影響評価等も重要であろう。

CCSは低炭素社会への移行までの過渡的な技術ではあろうが、化石燃料を主要エネルギー源として使い続ける限り不可欠な温暖化対策である。この技術を安全かつ効果的に使用していくために、産総研の持つ技術力と経験を有効に役立てつつ研究を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) 環境省：日本の温室効果ガス排出量の算定結果、<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/>, (2014)。
- 2) 相馬宣和, 杉原光彦, 石戸経士, 名和一成, 西祐司：CO<sub>2</sub>地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討, GSI地質ニュース, 3, 5, 137-142, (2014)
- 3) 杉原光彦, 名和一成, 相馬宣和, 石戸経士, 西祐司：テキサス州ファンズワースCO<sub>2</sub>地中貯留調査サイトでの超伝導重力計の導入, GSI地質ニュース, 3, 5, 129-132, (2014)
- 4) 石戸恒雄, 杉原光彦, 西祐司：ポストプロセッサによる地球物理観測の変動予測, GSI地質ニュース, 3, 5, 143-148, (2014)
- 5) 奥山康子, 船津貴弘, 藤井孝志：CO<sub>2</sub>地中貯留での地盤変化を予測する—岩石力学・流体流動シミュレーション研究—, GSI地質ニュース, 3, 5, 149-152, (2014)
- 6) 徂徠正夫, 佐々木宗建, 藤井孝志, 加野友紀, 上原真一：CO<sub>2</sub>地中貯留における砂泥互層の遮蔽性能評価, GSI地質ニュース, 3, 5, 153-156, (2014)

## メタンハイドレートの資源調査 Researches of Methane Hydrate Resources

燃料資源地質研究グループ 主任研究員：森田澄人  
Senior Research Scientist, Fuel Resources Geology Research Group: Sumito Morita  
Phone: 029-861-2490, e-mail: morita-s@aist.go.jp

### 1. はじめに

化石燃料資源に乏しく、エネルギー革命以降一次エネルギーの自給率が数%にまで下がったわが国にとって、本邦陸棚斜面に存在するメタンハイドレートは将来のエネルギー資源の一役を担うものとして期待されている。国のメタンハイドレート資源開発は、平成7年度から5年間の特別研究（10社共同研究）に始まった。この間様々な技術開発を進めるとともに、東海沖で実施された基礎試錐「南海トラフ」（平成11年度）では海洋メタンハイドレートの採取に成功した。これは海底下の砂質層の粒子間隙を充填するタイプのメタンハイドレートであり、以降、平成13年度に始まった現行の資源開発プロジェクトは、砂質層型のメタンハイドレートを主たる開発の対象として推進され、数々の海洋調査や技術開発、陸上産出試験等を経た後、平成24年度、第二渥美海丘において世界で始めて海洋メタンハイドレートから天然ガスの産出に成功している。

これに対し、日本海側では海底のごく浅層部に集積するメタンハイドレートが認められるようになった。これを表層型メタンハイドレートと呼び、砂質層型に10年余りの遅れをとりながら、資源量の評価に向けた新たな研究が進められている。現在、産総研の地圏資源環境研究部門は、主にこの表層型メタンハイドレートの調査研究の推進に携わる。

### 2. 表層型メタンハイドレート

日本海側における表層型メタンハイドレートの研究は、平成15年に実施された基礎試錐「佐渡南西沖」の事前調査の際、現場海底において塊状のメタンハイドレートが採取されたことに始まる。その翌年の平成16年度以降、東京大学のメタンハイドレート研究チーム（代表：現明治大学 松本良特任教授）が採泥調査や地形調査を継続的に実施したことにより、上越沖などの表層付近にメタンハイドレートが分布することが明らかとなってきた。

上述のとおり、表層型メタンハイドレートはそれまで国のプロジェクトが先導してきた砂質層型メタンハイドレートとは明らかに産状が異なる。また、砂質層型はその地層の分布にしたがい、温度・圧力条件によるメタンハイドレート安定領域内において、ある程度側方への連続的分布が期待される一方、表層型は泥質の海底表層付近や浅層部に塊状または泥層中に脈状となって産することが多く、ほと

んど側方への連続性は期待されず、マウンドやポックマークと呼ぶ局所的な異常地形部に集積を示すことが分かってきた。

### 3. 国による表層型メタンハイドレート研究調査の開始

経済産業省が表層型メタンハイドレートの調査に着手したのは、平成21年度に始まった、国のメタンハイドレート資源開発研究のフェーズ2からである。その実行計画において砂層濃集帯以外の賦存様態のメタンハイドレートの検討が加えられ、表層型メタンハイドレートの賦存面積や賦存状況などを科学的な調査によって明らかにすることの必要性が示された。

これを受け、平成22年6月、当研究部門は東京大学の研究チームと協力して、フランス極地研究所（IPEV）の Marion Dufresne 号を用いた長尺柱状採泥を実施した（MD179航海）。主に上越沖の異常地形部を中心にピストンコアリングおよびグラビティコアリングを実施し、最長40mの柱状コアを回収するとともに、多数のメタンハイドレートの採取に成功した。

### 4. 表層型メタンハイドレートの広域分布調査

平成25年4月の新たな海洋基本計画の閣議決定を受け、経済産業省は日本海側に賦存が確認された表層型メタンハイドレートについて、平成25年度から3年程度をかけて、資源量把握に向けた本格的な広域分布調査等を実施することを発表した。

#### 4.1. 平成25年度調査

経済産業省の受託研究として、当研究部門は表層型メタンハイドレートの資源量評価を担うこととなった。平成25年度の主な調査項目としては、1) 広域地質調査、2) 詳細地質調査および3) 環境調査を実施した。ただし、1) および3) の調査実施は明治大学に再委託している。

##### 1) 広域地質調査

6月から7月の6週間にわたり、上越沖および能登半島西方沖において第七開洋丸（芙蓉海洋開発（株））による船底の音響機器を用いた広域地質調査を実施した。MBES（Multi-beam Echo Sounder：マルチビーム測深器）は詳細な地形データを広域に得る機器であり、メタンハイドレートの分布の可能性を示す海底の異常地形（マウンドやポックマーク）

を多数認定した。SBP (Sub-bottom Profiler: 表層地層探査機) は海底下浅層部の詳細構造探査を行う機器であり、反射イメージングにより音響学的地質構造の特徴を明らかにした。特に異常地形部の海底下では、しばしば音響学的ブランクが観測されており、メタンハイドレートの濃集やそれを伴うフリーガスの集積、または炭酸塩岩の沈殿を示していると考えられる。また同時に、MBES 探査ではごく表層付近の底質の状態を判断する海底音響反射強度分布データが得られており、これらのデータを総合的に解析した結果として、広域地質調査を実施した全海域の海底において、表層型メタンハイドレートの存在の可能性を示す構造を計225箇所を確認した。

## 2) 詳細地質調査

7月には上越沖において新海丸(深田サルベージ建設(株))を用いたAUV(Autonomous Underwater Vehicle: 自律型海中探査機)「Deep1」による詳細地質調査を実施した。Deep1はMBES, SBPおよびSSS(Side-scan Sonar: サイドスキャンソナー)を搭載しており、海底から高度50m(通常調査時)または25m(精密調査時)の深海を自律巡行するため、ある程度焦点を絞った海域を対象として広域地質調査よりも高精度なデータ取得が可能である。異常地形に焦点を当てた探査を11海域で実施し、MBESによるマウンドやポックマークの精密な地形や、SBPによるこれらの異常地形を含む海底下浅層部の詳細な音響学的特徴をとらえ、SSSでは主にマウンドにおける強反射部の分布を捉えることができた。SSSによる海底での強反射は、周囲の底質に比べ著しく密度が高い物質が海底に分布していることを意味する。これは表層型メタンハイドレートの存在の可能性を示唆するものであり、過去の採泥記録からも、メタンハイドレートが採取された部分との一致が認められる。

## 3) 環境調査

9月下旬から10月初頭にかけては、海洋環境と生物環境のバックグラウンド調査を目的とした環境調査を実施した。海洋研究開発機構の調査船「なつしま」を用いて、ROV(Remotely Operated Vehicle)「Hyper Dolphin」による海底潜航調査や環境モニタリングシステムの設置等を行った。上越沖の5海域において11回のROV潜航が実施され、海底での観察、各種採水、CTD観測、MBARI式柱状採泥、SAHF地殻熱流量測定、生物採集、TDR電気伝導度測定を行った。さらに、なつしまのMBESシステムや計量魚群探査機によるメタンブルームの確認や、船上では大気中のメタン濃度測定を実施した。環境モニタリングシステムは長期観測用のモニタリング装置群であり、スチルカメラ、音響ロガー、CTD、オスモサンプラー(海水・間隙水採取)、セジメントトラップ、SAHF、海底湧出量計を含み、海鷹海脚の2点に設置された。これらは約1年後となる平成26年10月の調査航海で回収し、データおよ

び試料の解析を開始したところである。

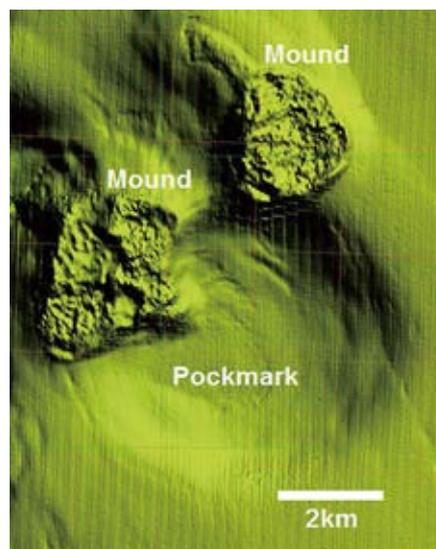


図 AUVによるMBES探査でとらえた詳細海底地形の例。

## 4.2. 平成26年度調査

広域分布調査の2年目となる平成26年度調査では、1) 広域地質調査、2) 詳細地質調査、3) 掘削同時検層、4) 掘削コアリング、5) 海洋電磁探査および6) 環境調査を実施した。1)、3)、4)および6)の調査実施については明治大学に再委託している。

1) 広域地質調査および2) 詳細地質調査は、基本的に平成25年度研究の手法を踏襲するかたちがとられ、調査海域をさらに隠岐周辺、最上トラフおよび日高沖(1)広域地質調査のみ)へ拡張して実施された。3) 掘削同時検層および4) 掘削コアリングは上越沖と最上トラフを対象としており、先行して実施された広域地質調査および詳細地質調査の結果から、あらかじめ表層型メタンハイドレートが期待される地点やその周辺を選定して掘削が実施された。5) 海洋電磁探査は比抵抗の高い海底下のメタンハイドレート層分布の広がりを検知する調査であり、上越沖を対象に実施された。これについても、先行して実施された詳細地質調査AUVのMBESデータを基に精密な海底地形図を準備したため、電気伝導率の高い海水柱のボリュームを正確に把握することが可能となり、精度の高い海底下の比抵抗値評価が実現できることとなった。6) 環境調査も基本的に平成25年度研究の手法を踏襲するものであり、前年に設置した環境モニタリングシステムの回収と新たなシステムの設置等を実施した。

以上の研究成果については解析後に順次公表していく予定である。

## 参考資料

明治大学(2014)表層メタンハイドレートフォーラム: 表層メタンハイドレートの資源化を目指して。明治大・産総研主催。

## レアメタル資源に関する国際共同研究 International Joint Studies on Critical Metal Resources

鉱物資源研究グループ長：高木哲一

Leader, Mineral Resources Research Group: Tetsuichi Takagi  
Phone 029-861-3926, e-mail: takagi-t@aist.go.jp

### 1. レアメタル資源研究の背景

日本は金属鉱物資源のほとんどを海外からの輸入に頼っている。鉄、アルミニウムなどの汎用金属やベースメタル（銅、鉛、亜鉛）は需要・供給共に規模が大きく、大手鉱山会社や総合商社の重要な収益源となっている。ところが、レアメタルは、先端産業には必須な元素であるにもかかわらず、市場規模が小さく、価格や需要動向が大きく変動するリスクがある。また、大部分の鉱種で国際市場が確立されていない。したがって、大手鉱山会社では扱いにくく、主な取り扱いは中小の鉱山会社やベンチャー企業などである。新規のレアメタル鉱床開発を積極的に進めるには、特に開発の初期段階において、公的研究機関や大学などが資源国と協力して調査研究を行い、企業の投資リスクを少しでも軽減する必要がある。

このような背景の下、地圏資源環境研究部門ではレアメタル資源の国際共同研究を積極的に推進している。

### 2. 国際共同研究の目的

国際共同研究の第一の目的は、信頼性の高い情報の収集や現地調査時の安全確保である。レアメタル資源の調査にあたっては、当該国の資源開発状況やインフラ整備など総合的情報を収集する必要がある。また、地理的状況や治安の観点から、日本人が単独で調査することが難しい地域も多い。そのため、当該国の公的地質調査機関等をカウンターパートとして、国際共同研究の形で調査を進めることが望ましい。そこで、地圏資源環境研究部門では、資源国の公的地質調査機関と研究協力覚書を交わし、国際共同研究を推進している。

第二の目的は、日本の資源外交への貢献である。鉱業に豊富な経験を持つ資源国においても、レアメタルのような非在来型資源の開発には新たな技術や知識が必要である。産総研が資源国と研究交流をすることにより、日本が資源情報を入手する一方で、質の高いデータや知見を供給することができれば、双方にメリットがあり、資源外交が円滑に進むことが期待される。さらに、産総研と資源国が共同研究を行うことを通じて、日本が資源供給元の多角化を推進していることを対外的に明示することにより、一部の資源強国が極端な資源政策を取ることを抑制する効果もある。そのために、産総研では日米欧レ

アメタル三極会議など国際会議の場において、国際共同研究の実施を度々アピールしている。

### 3. 国際共同研究の実施状況

産総研では、過去数年間、レアメタルの中でも最も危機性が高いレアアースに焦点を絞り、国際共同研究を実施してきた。以下に、その状況を紹介する。なお、具体的な資源情報の公開は、本稿では差し控えることをご了承いただきたい。

#### 3.1. 南アフリカ共和国

南アフリカ共和国は、白金・クロムを始めとする鉱物資源大国であり、レアアース資源の賦存も期待される。そこで、地圏資源環境研究部門は、2007年に南アフリカ地球科学審議会（Council for Geoscience: CGS）と研究協力覚書を交わし、共同研究を開始した。まず、マンガン鉱床付随のレアアース鉱床から調査を開始し、その後、螢石鉱床付随の鉱床に焦点を移して調査を実施している。特に、2010年にCGSと共同で発見したレアアース鉱徴地（螢石旧鉱）は、小規模ながらも重レアアースに富み有望なことから、両国共同で探鉱、鉱石の解析、選鉱試験を進めている。2013～14年には計8本の探鉱ボーリングを実施し（写真1）、地表部におけるレアアース鉱体の分布や品位を確認した。



写真1 南アにおける探鉱ボーリング

その他、CGSからは研究者短期招聘を行うなど、同国との人材交流を積極的に実施している。本共同研究は、両国資源担当大臣会合でも取り上げられ、その推進が合意されるなど資源外交にも貢献している。

### 3.2. 米国

米国は、1990年代まで世界のレアアース主要生産国であり、現在も開発中・未開発なレアアース鉱床が多数存在する。また、米国地質調査所（United States Geological Survey: USGS）は、工業技術院時代より研究・人材交流を活発に進めてきたパートナーである。そこで、2011年にUSGSと研究協力覚書を交わし、共同研究を開始した。まず、アラスカ州南端にて、カナダの企業により探査中のレアアース鉱床から共同調査を開始した。同鉱床は、重レアアースの割合が全レアアースの40%を占める特異な鉱床で、早期の開発が期待される。また、ミズーリ州の鉄鉱床尾鉱に付随するレアアース鉱床の予察的調査も実施中である。2014年からは、カリフォルニア州南部（写真2）、ジョージア州中部でもUSGSとの共同調査を開始した。これらの鉱床調査と平行して、世界的レアアース資源データベースの改訂やマテリアルフロー解析なども実施しており、2015年には共同の出版物が刊行される予定である。



写真2 カリフォルニア州南部モハビ砂漠での現地調査

### 3.3. ブラジル連邦共和国

ブラジル公的調査機関とは、2009年にリオデジャネイロのブラジル地質調査所で開催された日-ブラジル共同セミナーにて研究協力の大枠に合意した。その後、2011年にブラジル鉱産局（National Department of Mineral Production: DNPM）とレアメタル資源および土壌汚染に関する研究協力覚書を交わし、正式に共同研究が開始された。2012年には、ブラジル議会上院公聴会にて日本のレアアース資源政策に関する講演を実施。その後、同国南部ミナスジェライス州のレアアース鉱床・鉱徴地の共同調査を実施した。また、2013年には同国中部ゴイアス州北部の鉱徴地調査を実施すると共に（写真3）、

DNPM から3名を日本に招聘し、日-ブラジル鉱業セミナーを東京にて開催した。



写真3 ブラジル・ゴイアス州での掘削コアの観察

### 3.4. その他の国際共同研究

上記の各国のほか、モンゴル鉱物資源局（MRAM）、韓国地質資源研究院（KIGAM）、ミャンマー地質調査所（DGSE）などと研究協力覚書を交わし、共同研究を実施している。また、フィンランド地質調査所（GTK）とも研究交流を実施中である（写真4）。



写真4 フィンランド地質調査所訪問

## 4. まとめ

資源小国である日本が海外の鉱物資源を安定的に確保するには、資源国と研究・技術面のみならず人間同士の信頼関係を構築する必要があり、国際共同研究の位置づけは重要である。一方、国際共同研究の実施は、研究グループに多大な労力と時間を要求するため、適切な規模で実施しなければならない。今後も、多くの国々からの研究協力要請が産総研に来ると予想されるが、協力可能な内容や国の方針との整合性を精査しつつ、着実に推進していきたい。

## 地下水資源の利用と管理技術 Technology of Management and Use for Groundwater Resources

総括研究主幹・地下水研究グループ長：丸井敦尚  
Principal Scientist and Head at Groundwater Research Group: Atsunao Marui  
Phone: 029-861-2382, e-mail: marui.01@aist.go.jp

### 1. はじめに

2014年4月水循環基本法が成立し、7月に施行された。当該法律は、水の大循環を基本に、人間活動と環境保全に果たす水の役割が大きいことを述べ、健全な水循環を維持（回復）することの重要性を説いている。健全な水循環は、わが国経済社会の健全な発展や国民生活の安定向上に貢献するものであり、水の公共性ならびに国民が協力して守る必要があることも謳っている。そのために、我々は学習し、水循環の原理を踏まえた調査を行う必要があることも強調されている。この法律に沿って、国は2015年の夏を目処に、水循環基本計画を策定する予定である。現在は、水に関係した各省庁間で、有識者を交えた調整が始まっている（2015年3月ごろにはパブリックコメントの募集が開始される予定）。

地球上の水の97%は海水であり、淡水は非常に貴重である（榎根、1980など）。地下水は表流水の10倍～50倍あるといわれており、また平均的な滞留時間も、地表水のそれが数十日であるのに対し、地下水は100年程度かそれ以上と見積もられている。資源を守り、有効に活用するためにも地下水に対する理解を深めなくてはならない。

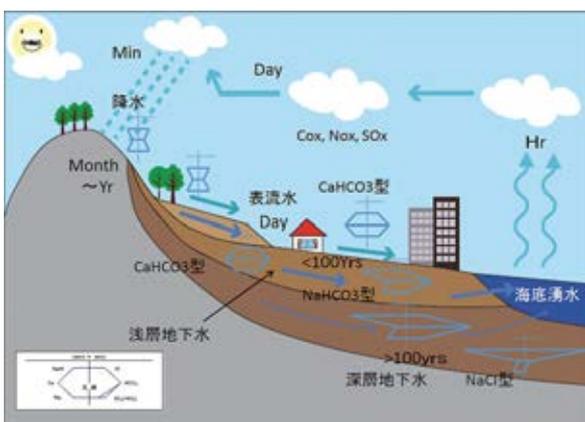


図1 水の大循環（淡水が最も大量にあり、最も長い時間滞留するのは地下水である。丸井（2012）を一部改編）

また、最近では東日本大震災の復興事業や福島第一原発事故対策などで、これまでに見たことも無いような技術が多用されている。地下水の分野でも、計測やモニタリングに始まり、解析技術、汚染対策や汚染水処理、地下水管理、地下水開発、地下水環境の利用に関する最新の技術が導入されているので、これらについても議論したい。

### 2. 資源としての地下水

もちろん地下水は安心して飲むことができる水（資源）としての価値が高い。しかし、水循環基本法で言うような「経済社会の健全な発展や国民生活の安定向上に貢献するもの」と考えた場合、地下水は多面性を持つ資源ととらえることができる。“経済社会の発展”のためには、農業や工業のための水資源として利用できる。さらに、観光資源にもなるであろう。また、“生活の安定向上”のためには、ウォーター・セキュリティの範疇になるが、飲んで安全、（材料として）食の安全、河川や山岳斜面などでの防災が、安全という課題の真っ先に挙げられる。続いて、汚染やその拡大、（地盤沈下や塩水化など）地下水障害なども考慮しなくてはならない事項に含まれよう。そして最近では、地中熱を利用した省エネや小水力発電などのエネルギー資源としての貢献も考えられる。このように地下水は技術の進歩に支えられ、多面的な資源と位置づけられるようになってきた。

それではこの多面的な資源である地下水を利用、管理するためにどう評価すべきであろうか？産総研では、水文環境図や全国堆積層データベースなどを整備している。当該研究室ではこれらを用いて、全国の地下水ポテンシャルを推定したり（越谷・丸井、2011）、列島の地下水量を推定し13兆トンと発表するなどしてきた（丸井、2010）。さらに、1940年代まで遡って全国の水質をデータベース化し、これを水文環境図のデータに反映することや、最新の水文環境図では温度データを加え、地中熱利用の可能性を諮るなど、先に述べた多面的な資源としての有用性を評価できる指標を取り込んできている。

### 3. 求められる技術

多面性を持つ地下水資源を管理し、適切に利用するためには、地下水の動きや量、水質などを的確にとらえ、評価する必要がある。地下水は資源として2000年以上の昔から開発されてきているが、まずは量（ボリューム）が重視されてきた。そのため、どこで何m掘削すれば地下水が掘り当てられ、どのくらいの水があるか？という調査から始まっている。我が国に水文学を伝えた山本莊毅先生は、全国の地下水面図を描くことをライフワークの一つにしていたことからそれがわかる。

1970年代からは、公害に代表される汚染問題が重

視されはじめ、水質の観測が始まった。さらに、1980年代半ば以降には水質が環境の評価因子として使われ始め、蛍のいる公園などがもてはやされるようになった。量を把握できるようになった後、人々の目が質（水質）に向かったことを歴史が教えてくれる。

モニタリング（観測）についても、古くは地下水の水位測定であったものが、水質の観測や分析になり、深部掘削ができるようになるにつれ、単孔式試験方法の開発（流向・流速などの孔内試験）など様々な試験方法が開発されてきた。水質に関しても高度な原位置試験に加え、同位体の測定、フッ素や微量元素の測定なども目覚ましい進化を遂げている。

先にも述べたように、地下水は多面的な資源と位置づけられる。量から質へと進化してきているのは事実であり、これからはエネルギー資源としての利用が期待されている。ならば、我々は何をモニターすべきであろうか。温度・圧力・滞留時間などが有力視されるのは間違いない。さらに、現存するデータベースや解析技術と合わせ、地域を概観できるようにする技術も必要であろう。わが国では、第2次世界大戦前から国力の把握のため、全国3700の地点で、毎年の水質を観測し続けており（地質調査所1957）、現在では4400のポイントにまで拡大している。これらの地下水に付随する歴史的・科学的な資源と合わせ、これからの地下水を利用し、管理して

ゆかなくてはならないと感じている。

## おわりに

地下水を資源としてとらえた場合、これまでは、量から質へと利用法を変化させてきている。今後はエネルギーとしての利用が必須となることが明らかであり、さらに我々は国土の歴史的なデータを科学的資源と位置づけられるほどに整備してきている。地下水資源を有効に利用してゆくために、適切な管理方法を確立しなくてはならない。そのための技術や教育の重要性を忘れてはならない。

## 参考文献

- 榎根 勇：水文学，大明堂，東京，270p，1980  
 越谷 賢・丸井敦尚：日本全国の地盤調査ボーリングデータを用いた地形・地質条件に基づく地下水面の推定，日本地下水学会誌53（2），179-191，2011  
 地質調査所：地質調査所化学分析成果表，1957  
 丸井敦尚：水の未来～産業技術総合研究所 地下水研究グループの歩みとこれから～，地下水技術54-3，pp1-14，2012  
 丸井敦尚・越谷 賢・吉澤拓也・伊藤成輝：日本列島の地下水賦存量と流動量に関する研究，日本地下水学会2010秋季学術大会

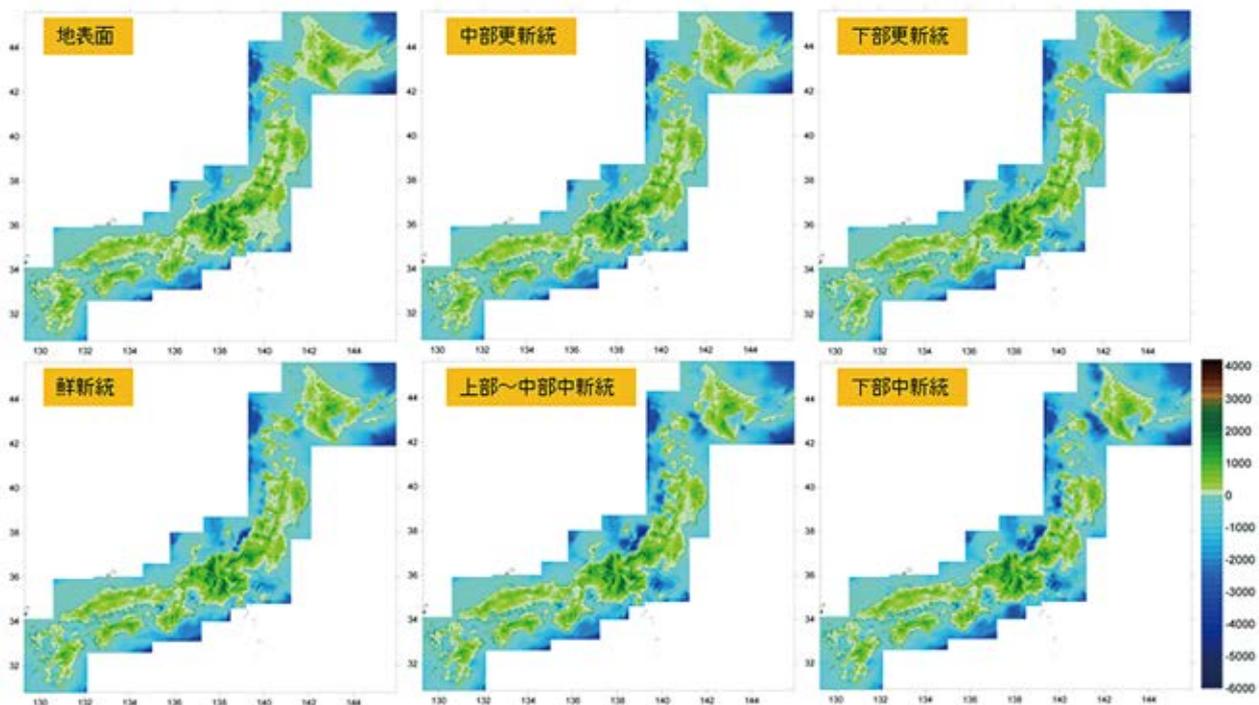


図2 全国堆積層分布図（新第三紀層からの各時代の地質面形状を表している。これを基に全国の地下水位や地下水量の推定が実施された）

## 地下水研究グループの紹介 Introduction of the Groundwater Research Group

地下水研究グループ長：丸井敦尚

Head at Groundwater Research Group: Atsunao Marui  
Phone 029-861-2382, e-mail: marui.01@aist.go.jp

### 1. グループの研究目的

地下水グループは、地下水の保全と開発・利用に関する課題を研究している。社会への貢献や研究成果の反映先を意識しつつ、外部研究機関との連携も保ち、体系的な研究を実施している。水文環境図の作成を基軸に地下水の資源・環境に関する情報を体系的に取りまとめている。部門の重点課題でもある放射性廃棄物地層処分、CO<sub>2</sub>地中貯留プロジェクトに関しても知識や成果を共有できる部分が多いので、積極的に協力し研究を推進している。さらに、経常的な研究課題を通して、看板性の強化、知的基盤整備の加速化、研究シーズの創出に関わる研究などを担当し、部門のミッション達成に貢献する。研究対象地域は日本国内のみならず、CCOP 活動などを通して海外にも進出している。

### 2. 各研究項目の内容

#### 2.1. 水文環境図の作成に関する研究

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

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「石狩地域」では浅層地下水や深層地下水の基礎情報に加えて地下水温情報も編集対象とし、さらに地域の固有情報を掲載している。地球科学情報としてこの図を使っていただくために、流域の概念を念頭におき、地下水盆の解明を意識した内容になっている。

#### 2.2. 高レベル廃棄物の地層処分に関する研究

現在、社会的な関心を集めている原子力発電所から出た放射性廃棄物の有効な処分方法の一つとして、廃棄物を地下深部の地層中に閉じ込めてしまう

地層処分が検討されている。地層処分では安全性の確保が最も重要な課題の一つとして挙げられており、廃棄物に直接影響を及ぼす可能性のある地下水の性質や流動状況の把握を実施している。我が国においては、北海道の幌延において堆積岩を対象とした研究が、岐阜県の瑞浪においては結晶質岩を対象とした研究が実施されており、産総研は幌延ならびに駿河湾において、沿岸域における地下水影響を勘案したプロジェクトを実施している。これは、我が国の原子力発電所がすべて沿岸域に立地していることに起因している。実際には、海陸を貫通した探査技術の開発や、地下1200m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いる。

#### 2.3. 海外での地下水（CCOP）研究

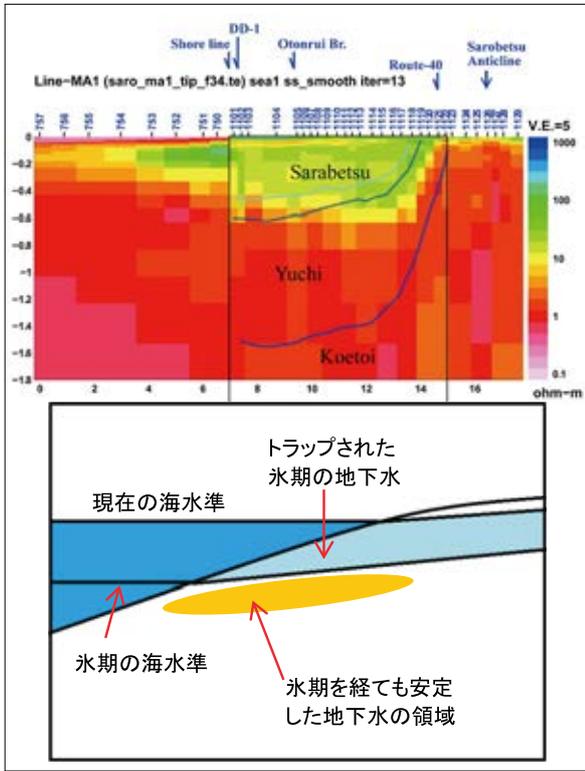
地下水研究グループは、旧地質調査所時代からCCOPのプロジェクトに対して積極的に参加・サ



水文環境図の整備状況（予定を含む）



水文環境図（熊本地域の水質）



幌延地区での観測事例（黄緑色の淡水領域の下に長期的に安定した地下水が存在する）下の図に示すように海水準変動に起因する地下水が形成した淡水領域の下に長期的に安定した地下水が存在すると思われる。

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



CCOP 地下水プロジェクト会議（中国・西安）

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。

### 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）
- 町田 功（主任研究員）
- 井川 怜欧（研究員）
- 小野 昌彦（産総研特別研究員）
- クラウディア ハートヴィック（同上）
- 楠瀬勤一郎（招聘研究員）
- 樽沢 春菜（テクニカルスタッフ）
- 宮崎 桂子（テクニカルスタッフ）
- 松浦 綾子（テクニカルスタッフ）
- 菅谷 裕行（派遣）
- 荒金 寛子（派遣）
- 南部 真夕（派遣）
- 越谷 賢（産学官制度来所者）
- 内田 洋平（兼務）
- 吉岡 真弓（兼務）

## 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  
Phone 029-861-3926, 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いる。現在8名の職員、16名の契約職員・客員研究員が所属している。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（イノベーション推進室出向中）
- 実松健造（豪州留学中）
- 星野美保子（スイス留学中）
- 昆 慶明
- 荒岡大輔
- 森本慎一郎（主務国際部）
- Jacqueline Satur（産総研特別研究員, PD）
- 徐 維那（産総研特別研究員, PD）
- 三好陽子（産総研特別研究員, PD）
- 江島輝美（産総研特別研究員, PD）
- 古宇田亮一（招聘研究員）
- 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）
- 森田沙綾香（テクニカルスタッフ）
- Buenaventulada Calabia（テクニカルスタッフ）
- 猪川洋子（テクニカルスタッフ）
- 宮腰久美子（テクニカルスタッフ）

ほか客員研究員5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・銀などの貴金属を除いた希少な金属資源で、現在31鉱種が経済産業省によって指定されている。レアメタルは、中国など新興国の急成長による価格の急激な上昇、少数国やメジャー企業による資源の寡占化などにより、公正な価格で自由に輸入できない状況が継続している。そこで、日本では官民の総力を挙げて海外金属資源の権益確保に乗り出している。鉱物資源研究グループは、供給不足が深刻なレアアース（ランタノイド, Sc, Y）を中心としたレアメタル資源の調査に注力している。2009年に生じたレアアース危機で日本の産業界は打撃を受けたが、2011年8月を境に価格が暴落し、2014年現在、

ほぼ中国一極集中の供給構造に逆戻りしている。そのため、当グループでは、中国に替わるレアアース鉱床、特に重レアアースを求めて、資源国の地質調査所、政府機関、民間企業などと共同で調査研究を実施している。

2014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）、米国地質調査所（USGS）、ブラジル鉱産局（DNPM）などと共同で重レアアース鉱床・鉱徴地の探査・評価を実施している（写真1上下）。



写真1 南アフリカ・重レアアース鉱床におけるトレンチ掘削（上）、トレンチ壁の記載・試料採取（下）

レアアース資源の世界的賦存状況の再評価およびマテリアルフローの解析事業を2013年度に引き続き、米国地質調査所（USGS）と共同で実施している（写真2上）。また、海外研究機関の研究者に対する研修を通じた、人的交流を行っている（写真2下）。さらに、2014年度は、JICAによる鉱物資源デー

タベース研修が東南アジア 6 カ国で実施され、 鉱物資源研究グループからも講師を派遣した。



写真 2 米国地質調査所での資源情報に関する会合（上）、タイ鉱物資源局研究者の研修風景（宮城県川崎鉱山、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、特に粘土と珪石に注目し研究を行っている。粘土資源の一種であるベントナイトは、低レベル放射性廃棄物処分場等において緩衝材として用いられる。しかし、品質評価のための示標であるメチレンブルー吸着量や陽イオン交換容量の測定方法がメーカー毎に異なるため、その標準化が求められている。そこで、2013年度から2年間で、所内国際標準推進部の予算により、メチレンブルー吸着量測定方法標準化の研究を実施中である。

珪石は、低品位なものはセメントに、中品位なものはガラス、建材、金属製錬に、高品位なものは金属シリコンや炭化ケイ素の製造に用いられるなど、工業的用途が幅広いが、資源の安定確保が年々難しくなっている。当グループでは、珪石鉱床の供給安定性向上に資する調査研究を国内外で実施している。

### 4. 鉱物資源情報の研究

鉱物資源研究グループでは、アジア地域の地質

図・鉱物資源図、鉱物資源データベースなどの作成に継続的に取り組んでいる。これまでに、300万分の1東アジア・中央アジア地質図、300万分の1東アジア・中央アジア鉱物資源図、500万分の1アジア地質図を出版した。2014年度には、これらの集大成であるアジア全域の鉱物資源図を出版予定である（図1）。



図1 500万分の1アジア鉱物資源図

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「播州赤穂」「豊田」、20万分の1「松山」などを調査・編集集中である。

### 5. 分析・選鉱技術開発

鉱物資源の研究を進める上で、鉱石や鉱物の精度の高い分析や選鉱実験は不可欠である。そのために、鉱物資源研究グループでは、2012～14年度に国の補正予算により、鉱物・鉱石分析施設、選鉱実験施設を導入した。現在、これらの稼働に注力すると共に、超微粉末ペレットを用いたLA-ICPMSによる全岩組成分析の新技術開発を行っている。これにより、2015年度中に軽元素・ハロゲンを含めたほぼ全元素の組成同時定量分析が可能となる見通しである。

### 6. 今後の展望

日本を巡る外交関係や資源ナショナリズムの台頭、新興工業国の資源消費量の増大、良質な資源の枯渇などにより、鉱物資源の供給安定性に対する産業界の不安は増大している。鉱物資源研究グループは、経済産業省、JOGMEC、民間企業などの要請に基づき、各国の地質調査所と連携した機動的な現地調査や迅速な鉱床・鉱石の分析評価を推進していきたい。

また、研究所として期待される高い学術研究レベルを維持し発展させるために、鉱床成因研究や若手研究員・産総研特別研究員PDの育成にも注力していく所存である。

## 燃料資源地質研究グループの紹介

### Introduction of the Fuel Resource Geology Research Group

研究グループ長：鈴木祐一郎

Leader, Fuel Resource Geology Research Group: Yuichiro Suzuki

Phone 029-861-3919, e-mail: yu-suzuki@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

石油、天然ガス、石炭等の燃料資源鉱床に関する探査手法・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、当部門の地圏化学研究グループ、地圏微生物研究グループと協力し、重点研究課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」を実施する。

#### 2. グループの研究体制、研究資源

##### 2.1. 研究員（平成26年10月1日現在）

鈴木祐一郎	石炭地質、有機地球化学
中嶋 健	海洋地質、堆積地質
佐藤幹夫	海洋地質、構造地質
森田澄人	構造地質、海洋地質
後藤秀作	(併任、企画本部) 地球熱学、物理探査
小田 浩	石炭地質、堆積地質
徳橋秀一	(客員研究員)、堆積地質
棚橋 学	(客員研究員、明治大学) 海洋地質
高野 修	(客員研究員、石油資源開発(株)) 堆積地質、石油地質
仁道純子	(テクニカルスタッフ)
中根由美子	(テクニカルスタッフ)
佐々木進	(派遣職員)

##### 2.2. 主な研究資金（平成25年度、平成26年度）

- ・運営費交付金「燃料資源地質の研究」(地質)及び同(エネルギー)
- ・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」
- ・受託費(資源エネルギー庁)「メタンハイドレート開発促進事業」(メタンハイドレート研究センターとの共同受託)の一部「非砂層メタンハイドレート賦存層の科学的調査研究」
- ・共同研究(JX日鉱日石開発株式会社)「国内堆積盆の炭化水素ポテンシャル評価に関する総合的研究」
- ・共同研究(石油資源開発(株)技術研究所)「砂岩貯留岩の堆積分布様式の研究」
- ・受託調査(資源エネルギー庁)「国内資源開発基礎情報取得等事業」(分担)
- ・受託研究(JAMSTEC)「海底地すべりメカニズム解明のための三陸沖科学掘削に向けた海域データ

整備」(平成25年度)

- ・科研費「鉄堆積作用：鬼界カルデラの熱水活動場から紐解く太古代海洋環境への制約条件」(分担)
- ・科研費(新学術領域研究)「巨大地震断層の三次元高精度構造と物性の解明」(分担、平成25年度)

#### 2.3. 主な研究ファシリティ

- ・ペーズンモデリングソフトウェア(PetroMod, Petrel)
- ・地質構造解析ソフトウェア(Move)
- ・数値シミュレーションソフトウェア(COMSOL)
- ・震探解釈ソフトウェア(Kingdom)
- ・ビトリナイト反射率測定用石炭顕微鏡
- ・熱分解GC/MS用キュリーポイントインジェクター
- ・恒温槽

#### 3. 平成25年～平成26年の研究成果および研究進捗状況

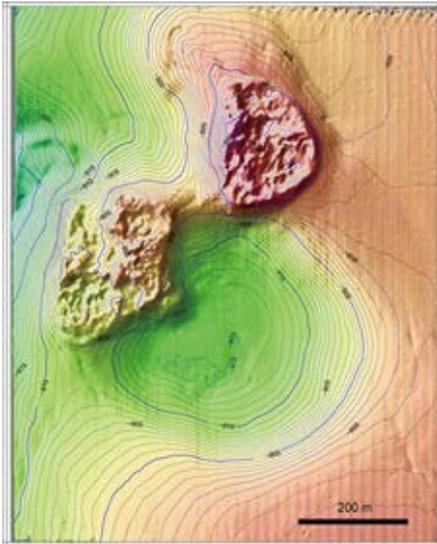
##### 3.1. ガスハイドレート資源の鉱床成因、形成機構、および資源ポテンシャル評価技術に関する地質学的研究

〈日本海および日高沖〉

- ・表層型メタンハイドレートは、マウンドやポックマークと呼ばれる局所的な異常地形に分布することがこれまでの研究から明らかになっており、平成25年4月の閣議決定を受け、日本海側に賦存が期待される表層型メタンハイドレートについて、平成25年度から3年間程度かけて、資源量把握に向けた本格的な広域分布調査を実施している。
- ・平成25年度は能登半島西方沖海域および上越沖海域を対象に、広域地質調査としてMBES探査(マルチビームエコーサウンダー)による広域地形調査およびSBP探査(サブボトムプロファイリング)による浅層部詳細構造探査を実施した。また、詳細地質調査として上越沖海域を対象にAUV(自律式海中探査機)を用いたMBES探査、SBP探査およびSSS(サイドスキャンソナー)探査を実施した。これらのデータ解析により、表層型メタンハイドレートの存在の可能性を示す構造を225箇所確認した。また、環境調査としてROV潜航調査を実施し、同時に各種測定機器やサンプリング機器、撮影機器などが搭載された長期モニタリングシステムの設置などを実施した。
- ・平成26年度は隠岐周辺海域、最上トラフ海域およ



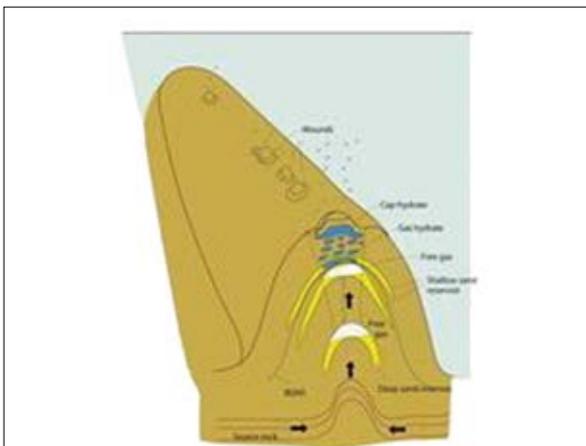
詳細地質調査を実施した AUV「Deep1」



Deep1の MBES 探査で得られたマウンドおよびポックマークの例.

び、日高沖海域に調査海域を拡大し、前年度調査を踏襲する形で広域地質調査、詳細地質調査および環境調査を実施した。また、LWD（掘削同時検層）および地質サンプル取得のための掘削コアリング調査を実施した。さらに、CSEM 法の海洋電磁探査を上越沖において実施した。

- ・コアの解析と3D震探の解析を基に、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



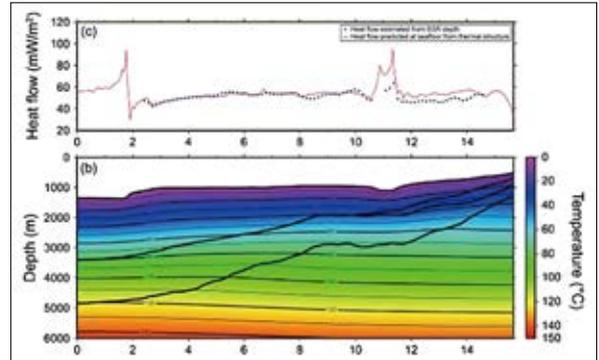
上越海丘における熱分解起源メタンハイドレートの形成モデル (Nakajima et al. を修正)

下期におけるメタンハイドレートの分解による機構を提案し、論文としてまとめた (Nakajima et al.).

- ・上越沖海域の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、本海域で計測した熱流量に基づき、後述の南海トラフと同様な手法で本海域の温度構造モデルの構築を進めている。

#### 〈南海トラフ〉

- ・南海トラフ域の熱流量データの収集と再解析を行った。これらの熱流量データに基づき、海底下の温度構造モデルの構築を進めている。また、海底堆積物の現場法による熱伝導率の計測方法の開発を進めている。



東部南海トラフの温度構造モデルの例 (後藤ほか, 2010)

- ・2012年6月29日～7月4日に“ちきゅう”によりおこなわれた第二渥美海丘のMH層のコアサンプルに参加した。高知コアセンターでコア試料の分析などを実施した。

#### 3.2. 燃料資源地質図の編集・出版

- ・東部南海トラフのメタンハイドレート資源ポテンシャルを評価するための基礎情報を提供することを目的に、50万分の1縮尺の地質図 (本図) 及び100万分の1縮尺の付図7枚の燃料資源地質図「東部南海トラフ」として出版した。

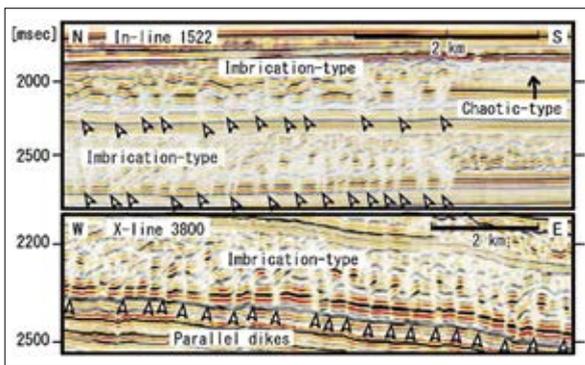


燃料資源地質図「東部南海トラフ」本図

- ・燃料資源図「筑豊炭田図」の編集や「上越沖・日本海」のメタンハイドレートに関する燃料資源図へ向けたデータ収集を進めている。

### 3.3. 在来型天然ガス資源の鉱床成因，形成機構に関する地質学的研究

- ・燃料資源全般に関する生成機構・探査法・燃料資源評価法などについての基礎的ないし萌芽的な研究を実施した。根源岩評価法，資源評価技術，海洋地質調査法，物理探査法，地質構造発達史，堆積構造解析，地球環境論，等々広汎な課題について地球科学的考察を行い，学会誌，出版物，口頭発表等で公表をおこなった。
- ・JAMSTEC 受託研究（IODP 掘削フィジビリティ研究）では，海底地すべりメカニズム解明のための三陸沖科学掘削に向けた海域データ整備をおこない，海底地すべり層とすべり面の認定，また科学掘削に適した候補地選定作業を行うため，三陸沖堆積盆の既存地震探査データの解析を進めた。
- ・堆積盆評価として，三陸沖堆積盆で実施された IODP Exp.337 の掘削コア試料の有機堆積物分析を実施した。
- ・ガスに関連した海底地すべりの発生条件が重要なキーである。2012年秋に，熱流量調査の基礎データ取得のため，三陸沖に海底温度計を設置した。



北下半島東方沖の地震探査データで認められる海底地すべり堆積層

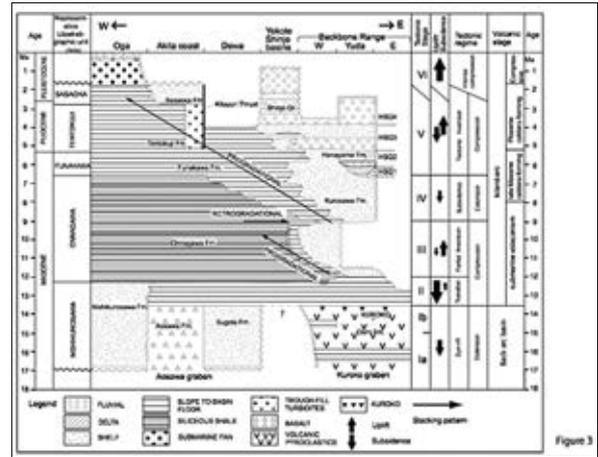
- ・海底地すべり層が分布する日南層群において地質巡検を行った。各方面の研究機関から計22名の参加があった。
- ・シンポジウム「海底地すべり：その発生する環境と今後の課題」を山口大学で開催し，活発な議論が交わされた。



日南市での現地討論会，猪崎鼻での地質巡検

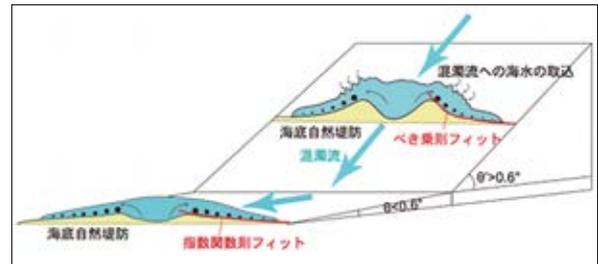
- ・東北日本の油・ガス構造の形成に関わる脊梁部のテクトニクスについて，地形・地質調査を行い，

東北日本の後期新生代テクトニックイベントと内陸堆積盆の発達史についての論文を出版した（Nakajima, 2013）



秋田堆積盆地の発達史（Nakajima, 2013）

- ・3D 地震探査記録の解析から，海底自然堤防の貯留岩形態に関して，斜面傾斜によりその形態が変化することを英国 Aberdeen 大学と共同で研究を進め，国際誌に出版した（Nakajima & Kneller, 2013）。



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

- ・鹿児島県薩摩硫黄島の南東部に位置する長浜湾では，海底から  $\text{Fe}^{2+}$  イオンに富む弱酸性の低温熱水が湧出している。この長浜湾における低温熱水の湧出速度を長期にわたって計測することを目的に，海底下長期温度モニタリングを実施している。



鹿児島県薩摩硫黄島長浜湾

- ・今，話題のシェールガス・シェールオイルについて

ても、米国やカナダなどのシェールガスに関する文献調査を進めると共に、本邦でシェールオイルの可能性が検討されている女川層などについて層序試錐“能代”，“遊佐”のコア試料について地化学分析をおこなった。全有機炭素量（TOC）が2%を超える試料があり、有機物タイプも Type II でシェールオイルのソースとしては良好であった。

### 3.4. 共同研究

#### 〈JX 日鉱日石開発（株）との共同研究〉

- ・釧路炭田地域において共同で採取した、白亜系から第三系までの凝灰岩の U-Ub/FT 年代測定とトラック長解析を行い、熱史の解析を行った。
- ・新潟、富山、能登の陸上露頭で共同で採取した試料について凝灰岩の U-Ub/FT 年代測定を行って標準層序の改訂を行った。

#### 〈石油資源開発（株）技術研究所との共同研究〉

- ・新しい深海成砂岩貯留岩として注目を浴びている深海チャネルの混濁流起源の Counter-point bar の研究についてレビューを行った。

## 4. 受賞

森田澄人，中嶋健は，地質学雑誌に掲載された論文（JX 日鉱日石開発（株）花村泰明氏と共著）により，日本地質学会2013年仙台大会で「日本地質学会小藤文次郎賞」を受賞。

## 5. 最近の主な研究成果（2012年 -2014年）

### 〈紙上等発表〉

- 中嶋 健；岩手県湯田盆地に分布する不整合と火砕岩鍵層：その奥羽山脈発達史上の意義について。地球科学，66，69-83，2012。
- Goto, S. et al.: Variations in the thermal conductivities of surface sediments in the Nankai subduction zone off Tokai, central Japan. Marine Geophysical Research, 33, 269-283, 2013.
- Morita, S., Yamada, Y., Strasser, M. & Kawamura, K.: Shimokita slum mechanism. Chikyū+10 International Workshop Report, 177-179, 2013.
- Nakajima, T.: Late Cenozoic tectonic events and intra-arc basin development in Northeast Japan. In: Itoh Y. (ed.) Mechanism of Sedimentary Basin Formation – Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins. InTech, Rijeka, 153-189, 2013.

Nakajima, T. & Kneller, B.C.: Quantitative Analysis of the Geometry of Submarine External Levees. SEDIMENTOLOGY, 60, 877-910, 2013.

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

鈴木祐一郎，佐藤幹夫：第3章. 非在来型天然ガスの成因. 日本エネルギー学会天然ガス部会資源分科会（編）「非在来型天然ガスのすべて」，日本工業出版，2014.

### 〈国際研究集会発表〉

Morita, S. et al.: Shimokita-oki submarine landslides and feasibility studies for future scientific drilling. International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences (ISSMMTC), Kiel, Germany, 2013.

Nakajima, T. and Kneller, B.C.: Quantitative analysis of the geometry of submarine external levees; exponential or power-law? Joint PSAAPG/SPE/PSSEPM Conference, AAPG/SPE/SEPM, Monterey, 2013.

Morita, S. et al.: Shimokita-oki submarine landslides and feasibility studies for future scientific drilling. International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences (ISSMMTC), Kiel, Germany, 2013.

Morita, S. et al.: Research activities on submarine landslides in gentle continental slope. AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, 2013.

Morita, S., Goto, S. et al.: Sanriku-oki large slump deposits and feasibility studies for future scientific drilling accounting for submarine landslide mechanism. 2nd G-Ever International Symposium, Sendai, Japan, 2013.

Nakamura, Y., Morita, S. and Ashi, J.: Structural characteristics of large-scale submarine landslide on a very gentle continental slope off Shimokita Peninsula, Northeast Japan. International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences (ISSMMTC), Kiel, Germany, 2013.

## 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  
Phone: 029-861-3898, 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「鉱物・燃料資源のポテンシャル評価」、「土壌汚染評価技術の開発」、「CO<sub>2</sub>地中貯留評価技術の開発」に取り組み、油ガス田や地下水汚染サイト等に生息する微生物の活動（メタン生成、消費、石油炭化水素・揮発性有機物分解）の実態解明を目指す。

#### 2. グループの研究資源（26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、原 英里

###### 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、山岸昂夫

##### 2.2. 予算

###### 運営費交付金

「地下微生物を利用したメタンガス合成技術」

「新たな生物的メタン生成経路の実証と燃料資源ポテンシャルの評価」

「地圏微生物の研究（地質）」

「地圏微生物の研究（エネルギー）」

###### 委託研究費・研究助成金

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

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

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

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

「環境生物集団における未知微生物群の探索」（科研費）

###### 共同研究費

「油層環境の原油分解メタン生成過程に関与する中核的微生物群の特定とその機能の促進化に関する研究」（国際石油開発帝石(株)・東京ガス(株)）

「かん水中微生物の高メタン生成活動域の調査及

びメタン生成促進技術の開発」（関東天然瓦斯開発(株)）

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

#### 3. グループの特色

有機・生物地球化学、微生物生態学を専門とする研究者で構成され、坑井等からの各種地下試料（堆積物、岩石、水、ガス、油等）の採取と、化学・同位体分析、好気・嫌気微生物培養、同位体トレーサー実験、遺伝子解析等を通じて、地圏微生物の活動に関する基盤的情報を提供する。燃料資源地質・地圏化学研究グループ、生物プロセス研究部門、JOGMEC、国際石油開発帝石(株)、東京ガス(株)、関東建設(株)、関東天然瓦斯開発(株)、放射線医学総合研究所等と連携し、水溶性天然ガス・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、汚染地下水浄化技術の検討を重点的に進める。

#### 4. 25年度後期－26年度前期の研究進捗状況

##### 4.1. メタンハイドレート成因解明のための生物地球化学的研究

・MH21の研究の一部として、東部南海トラフにおける海洋産出試験事前掘削において採取されたMH濃集帯コア堆積物試料について、アーキア群集構造解析を行った。その結果、メタン生成菌に帰属する配列の中では、水素資化性に帰属する配列が優占し、CO<sub>2</sub>還元経路が主要であった<sup>14</sup>C-トレーサーを用いた培養実験結果と調和的であった。また、堆積物コア試料中のハイドレートの有無によって微生物群集構造が有意に異なることが明らかとなり、過去のハイドレート分解による水質の変化が微生物叢に影響したと考えられた。

##### 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

・水素資化性メタン生成菌を、異なる圧力条件で、単独（水素・CO<sub>2</sub>基質）または酢酸酸化細菌と共生（酢酸基質）で培養し、生成するメタンと炭素源（培地の溶存無機炭素）、水素源（水）との同位体比の関係（＝同位体分別）を測定する研究を進めた。その結果、炭素の同位体分別と水素の同位体分別のいずれも、培養条件によって大きく変化し、高圧条件で酢酸酸化細菌との共生系で培養

した場合の同位体分別が、海洋メタンハイドレートや水溶性ガス田のメタンと水の水素同位体比の関係と整合的であることを見出した。

#### 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

・油層微生物の原油分解メタン生成過程に関与する中核的微生物群を特定するため、油層水+原油試料の高圧培養実験(55℃, 5MPa)を継続するとともに、新たに秋田県と山形県の油田より油層試料を採取した。高圧培養系の中で、<sup>13</sup>Cでラベル化したトルエンを添加した系から、<sup>13</sup>Cに富むメタンが検出され、原油成分がメタンに変換されたことが実証された。

#### 4.4. 地下微生物を利用したメタンガス合成技術

・CCS実施サイトにおけるフィジビリティスタディ(FS)として、CO<sub>2</sub>-EOR後のCO<sub>2</sub>モニタリング調査(METI受託研究)が進められている米国テキサス州のFarnsworth油田を対象として、情報収集と予備的な微生物学的調査を行った。その結果、当該油田が資源創成型CCS技術のモデルフィールドの一つとして適当である可能性が示された。

#### 4.5. 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

・海洋のメタン酸化群集から3種類の新規微生物の分離培養に成功したことから次世代シーケンズ解析を活用し、これらのゲノム解読を行った。その結果、Gela4株については完全ゲノム情報の取得に成功し、S8株、MA2株についてもドラフトゲノム情報が得られた。まずはこれら個々のゲノム情報についての情報をまとめ、各微生物の代謝経路(メタン酸化、メタノール酸化、脱窒等)を明らかにした。また、メタノール資化細菌(Gela4株)について新属新種提案を、メタン酸化細菌(S8株)について新種提案を行った。

#### 4.6. 基礎的研究

・国内油田の油層水から分離したメタン生成菌が、既存のメタン生成菌には知られていない、比較的高分子の有機物を利用してメタンを生産する機能を有することを発見した。類似の化合物の利用性も調べたところ、新たに20種類以上の化合物を利用できることが分かった。他の既知のメタン生成菌についても同様の試験を行ったところ、分離株に系統的に近い1株のみが共通の基質利用性を示した。現在約130種のメタン生成菌が知られているが、利用基質は15種類と限られている。この中

で特定の系統のメタン生成菌が比較的高分子の有機化合物を利用できるという発見は、微生物学的に重要であるとともに、地下圏からのメタン生成機構を解明する上で新たな可能性を示すものである。

#### 5. 主な論文成果・受賞(2013年10月以降)

- Kanno M., Katayama T. et al. (2013) Isolation of butanol- and isobutanol-tolerant bacteria and physiological characterization of their butanol tolerance. *Applied and Environmental Microbiology* 79, 6998-7005.
- Elsaied H., Yoshioka H. et al. (2014) Novel integrons and gene cassettes from a Cascadian submarine gas hydrate-bearing core. *FEMS Microbiology Ecology*.
- Katayama T. et al. (2014) A oleaginous bacterium that intrinsically accumulates long-chain free fatty acids in its cytoplasm. *Applied and Environmental Microbiology* 80, 1126-1131.
- Takeuchi M., Katayama T., Sakata S. et al. (2014) *Methyloceanus cenitepidus* gen. nov., sp. nov., a novel restricted facultatively methylotrophic bacterium isolated from methane-utilizing mixed culture originated from marine sediments near the methane-seep area. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 64, 462-468.
- Katayama, T., Yoshioka, H., Mochimaru, H., Sakata, S. et al. (2014) *Methanohalophilus levihalodurans* sp. nov., a slightly halophilic, methylotrophic methanogen isolated from natural gas-bearing deep aquifers, and emended description of the genus *Methanohalophilus*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v.64, 2089-2093.
- Komatsu T., Sakata S. et al. (2014) Devonian-Carboniferous transition containing a Hangenberg Black Shale equivalent in the Pho Han Formation on Cat Ba Island, northeastern Vietnam. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 404, 30-43.
- Aoki M., Yoshioka H. et al. (2014) A long-term cultivation of an anaerobic methane-oxidizing microbial community from deep-sea methane-seep sediment using a continuous-flow bioreactor. *PLOS ONE*, DOI: 10.1371/journal.pone.0105356.
- Takeuchi M., Sakata S. et al. (2014) *Methylocaldum marinum* sp. nov., a novel marine thermotolerant methane oxidizing bacterium isolated from marine sediments, and emended description of the genus *Methylocaldum*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 64, 3240-3246.
- Katayama T., Yoshioka H., Sakata S. et al. (2014) Physicochemical impacts associated with natural gas development on methanogenesis in deep sand aquifers. *The ISME Journal*, doi:10.1038/ismej.2014.140.



## 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：佐脇貴幸  
Leader, Resource Geochemistry Research Group: Takayuki Sawaki  
Phone: 029-861-3707, e-mail: res\_geo\_x-ml@aist.go.jp

### 1. グループの研究体制・研究方針

当グループは、地球化学、地質学、有機化学、岩石・鉱物学等を専門とする研究者で構成されている。この体制により、地圏の資源（例えば燃料資源）、非金属鉱物資源・材料及びこれらに関連する地圏流体についての地球化学的・地質学的・鉱物学的解析を通して、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（論文、学会発表、特許等）のみならず、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

佐脇貴幸（グループ長）、猪狩俊一郎、金子信行、鈴木正哉、前川竜男、柳澤教雄、水垣桂子、森本和也（2014/4/1から）および契約職員

#### 2) 主な研究項目

- ・燃料資源に関わる地質学的・地化学的調査研究
- ・機能性鉱物材料に関わる化学的・鉱物学的・材料学的研究
- ・地圏流体・鉱物化学の研究
- ・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等

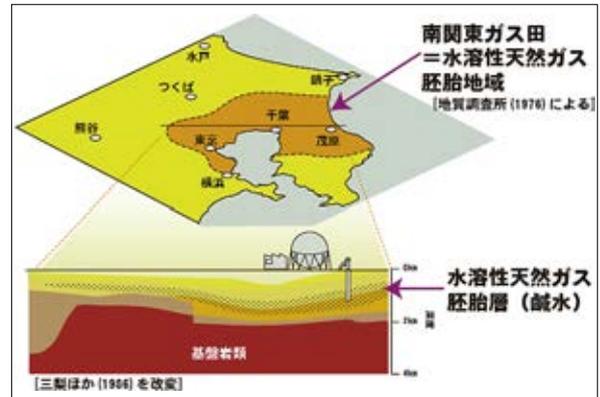
#### 3) 主な研究設備

- ・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
- ・流体包有物温度測定装置
- ・ハスクレイ合成装置
- ・ESR（電子スピン共鳴）装置等

### 3. 平成25年度～26年度前期までの研究進捗状況

#### 1) 燃料資源に関わる地化学的成因研究、資源評価

関東平野南部に分布する南関東ガス田（第1図）は、日本最大の水溶性天然ガス（主成分はメタンガス）の賦存地域である。日本国内での燃料資源の資源情報の把握、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



第1図 南関東ガス田の概念図

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研究を進めてきた。これまでに明らかになった点は以下のとおりである。

関東地方では、房総半島中央部を中心とする南関東ガス田が水溶性天然ガスの巨大な貯留層であるが、この地域以外の様々な地域にも水溶性天然ガスが賦存している。それらは南関東ガス田の主要胚胎層となっている上総層群だけではなく、その下位層である安房層群・三浦層群等相当層にも存在する。また、成因は異なると推定されるが、沖積層・埋立地などの浅部の地層中にも存在している。南関東ガス田の範囲は上総層群基底深度が1,000m（房総半島）～千数百m（東京・神奈川）より深い範囲に一致する。一方、南関東ガス田の範囲外である埼玉県、群馬県等では、上総層群より下位の安房層群・三浦層群相当層から揚湯する温泉に、鉱床規模ではないものの、水溶性天然ガスがしばしば付随する。特に、利根川沿いの地域（埼玉～群馬）の基盤（先新第三系）深度の大きな地域（ハーフグレーベン等）が地下に存在し、その上に新第三系が厚く堆積した堆積盆地地域にも、水溶性天然ガスを含む温泉が多数分布している。このことは、このような堆積盆地には、水溶性天然ガスを溶存する深層熱水が普遍的に滞留していることを示している。

関東地方の水溶性天然ガス中のメタンガスは、炭素同位体比と共存する炭化水素の組成から見て大部分が微生物起源と判断されるが、北関東では熱分解性のメタンガスも認められ、窒素ガスの割合が多くなる傾向がある。資源量の計算には、従来の単純な容積法ではなく、深度（圧力）に相当する飽和ガス

水比と、塩素濃度から求められる希釈率を反映した計算法を用いることを検討した。また、関東地方の温泉水の酸素・水素同位体比の再分析を行ったところ、分析機関によるトレンドの乖離がなくなり、誤分析の影響を排除することができた。

南関東ガス田については、水溶性ガス中のイソブタン/n-ブタン比が高いことから、微生物によるn-ブタンの分解が普遍的に起きていることが明らかになった。通常型と茂原型の鹹水とガスの地化学データを再解析したところ、微生物によるメタン生成反応に伴って変化したと考えられる指標を捉える事ができた。具体的には、 $\text{HCO}_3^-$ 量、溶存炭酸およびメタンの炭素同位体比の増加が認められ、鹹水からのメタン生成量の大小を表していると考えられる。メタン生成反応と並行して、鹹水中の $\text{NH}_4^+$ や $\text{I}^-$ 濃度が増加することも確認した。さらに、水溶性天然ガス鉱床への天水の浸入による地化学指標への影響について検討した。

以上のように、関東地方における水溶性天然ガスの賦存状況について、地質学および地球化学的な面からの検討を行った。最終的な成果物として、これらの点を盛り込んだ燃料資源図を出版することとしている。

また、南関東ガス田以外のガスハイドレート、水溶性天然ガス、石炭起源天然ガス等の燃料資源についても、地質学的解析及び地球化学的実験・分析に基づく研究を進め、それらの成因、資源評価、賦存状況の把握等を行った。

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

天然ガスのイソブタン/n-ブタン比はガスの対比のための重要な指標である。今回、天然ガスのイソブタン/n-ブタン比とイソブタン・n-ブタンの炭素同位体比に関して解析を行った結果、n-C4の一部が生成後、地層中でi-C4に変化していることが推定された。

メタンハイドレートにかかわる研究として、メタンハイドレートの生成阻害剤として利用されているメタノール、エチレングリコール等水溶性有機物と共存するガスハイドレートの相平衡条件を実験的に測定しており、平成25年度はキセノンのハイドレート相平衡条件を決定した。実験結果から、メタン、エタン等と同様、キセノンのガスハイドレートも、アルコール等の濃度が増加するに従って相平衡条件は低温側へシフトすることがわかった。これらの実験値を用いてガスハイドレート相平衡を推定する統計熱力学モデルを構築しており、アルコール水溶液等と共存するガスハイドレートの相平衡条件推定の高精度化を行った。



第2図

## 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

機能性鉱物材料である高性能無機系吸着材「ハスクレイ（第2図）」やその他の機能性鉱物材料に関して、化学的・鉱物学的・材料学的観点から、その工業的生産・利用にかかわる研究開発を行っている。

ハスクレイについて、蓄熱材としての利用の観点から、塩を担持させることによりその水蒸気吸着性能を向上させる検討を行なった。その結果、塩の種類としては、塩化カルシウム・塩化マグネシウム・塩化リチウムが水蒸気吸着性能向上に優れた効果を有することが明らかとなった。これまでのところ、塩化マグネシウムを担持させることにより、温度 $25^\circ\text{C}$ ・相対湿度60%、脱水温度 $100^\circ\text{C}$ の吸脱着実験において、水蒸気吸脱着量を1.8倍に向上させることが可能となっている。

## 3) 地圏流体・鉱物化学の研究

地圏流体（熱水、ガス等）、岩石、鉱物等について、地化学的・地質学的・鉱物学的手法により明らかにすること、及び地圏資源・環境に関する新規研究課題の探索、新しい地化学的技術の開発等、萌芽的・共通基盤的研究を行うことを目的とする。

地熱流体にかかわる研究として、温泉発電システムの開発と実証では、現地実証試験にともなったモニタリングおよびメカニズムの解析などを行った。モニタリングについては、温泉発電を実施する温泉井戸ならびに周辺1 kmの源泉について毎月温泉水を採取し、昨年度に引き続き水質等が安定していることを確認した。また、メカニズムの解析では初期生産量（624 L/min）の60%程度の約400 L/minの生産は数十年可能と推定され、この流量での生産試験は可能であることを示した。

毎年冬季に産総研敷地内の空気を採取し、その中の非メタン炭化水素の濃度を測定し、経年変化の調査を行っている。2013年度も継続的に測定を行った。その結果、非メタン炭化水素濃度は減少の後、ほぼ一定濃度を維持している傾向が示された。

地化学分析技術の研究としては、ガス分析の際に使用する水から炭化水素を除去する方法を開発し

た。さらに、水を使用しない空気中非メタン炭化水素測定システムの開発を行っているが、試料瓶内の空気を完全に濃縮管に送ることが困難であり、水を使用したシステムのほうが確実であることが明らかになってきた。

ハイドレートにかかわる研究としては、ジオキソラン等ハイドレート化させる物質（生成促進剤）を用いた二酸化炭素およびエタンのハイドレート生成実験を行い、その相平衡条件を測定した。ジオキソランの添加により二酸化炭素ハイドレートは安定化し、ハイドレート結晶構造が構造Ⅰ型からⅡ型へ変化したことが推測されたが、エタンについては生成促進効果が観測されなかった。

鉱物化学的な研究としては、イモゴライトの生成において、X線回折的には非晶質であるが、チューブの長さは短いもののイモゴライトの構造を有しているとされる非晶質イモゴライトの存在がある。平成25年度には、その非晶質イモゴライトの生成条件についての検討を行なった。その結果、イモゴライト生成における加熱時において、塩酸添加および塩化ナトリウムを添加させ塩化物イオン濃度を変化させて生成物の検討を行なったところ、塩化物イオン濃度として $8.0 \times 10^{-3} \text{mol}$ 以上にて非晶質イモゴライトが生成されるとともに、合成時のpHは大きな影響を与えないことが明らかとなった。

#### 4) 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（独）日本原子力開発研究機構と（独）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25年度は、福島県浪江町の花崗岩の風化土壌と天然品および合成品の低結晶質粘土鉱物・非晶質物質を用いて、塩化セシウムを用いた吸着試験および、吸着後に純水を用いた脱離試験を行った。花崗岩風化土壌を用いた吸脱着試験では、0.01ppmの塩化セシウム濃度にて83~93%の吸着率を示していたが、塩化セシウム濃度が高くなるにつれ、Cs吸着率は減少していくものの、塩化セシウム濃度が1000ppmでも、14~24%の吸着率を示しており、天然の土壌においても相当量のCsを吸着することが可能であることが明らかとなった。また各塩化セシウム濃度における分配係数は塩化セシウム濃度が高くなるにつれ、減少していく傾向が確認された。そして吸着試験後に純水を添加して行った脱離試験の結果では、ほとんどCsは脱離しないことが明らかとなった。

次に非晶質物質におけるCs吸脱着試験を行ったところ、天然アロフェンは90%程度の吸着率であったが、合成品および天然ゼオライトにおいては、いずれも98%以上の吸着率を示していた。そして純水における脱離試験においては、天然アロフェンが5%程度の脱離率を示したが、合成品および天然ゼオライトは2%以下の脱離率を示す結果となった。以上の結果から、非晶質物質においてもCsを相当量吸着し、純水では溶出しにくいほどの吸着力を有していることが明らかとなった。

#### 4. 成果普及活動

得られた研究成果を、広く社会に還元する活動をグループの柱としている。その一環として、「地質情報展2014かごしま」（2014年9月13-15日）において、再生可能エネルギー研究センターと協同し、地熱資源にかかわる説明パネルとペーパークラフトを出展した。それらを用いて、多数の来場者に対して、地熱発電の特長、産総研における研究開発の説明を行った（第3図）。



第3図 「地質情報展2014かごしま」での地熱資源の展示

#### 5. 平成25年度後半～平成26年前半の研究成果（主なもの、下線部がグループ員）

##### 【誌上発表（論文、著書等）】

片元 勉・鈴木正哉・前田雅喜（2014）新規調湿材料の開発と調湿建材への応用。太陽エネルギー，**40**，No. 2，21-26。

宮川歩夢・堀口桂香・藤井孝志・住田達哉・高橋美江・七山 太・竹内圭史・高橋美紀・伊藤忍・佐藤卓見・長 郁夫・堀川晴央・高橋雅紀・水垣桂子・兼子尚知・吉川秀樹・古川竜太・竹原淳一・川辺能成・目代邦康・芝原暁彦・重野聖之・佐藤大介・尾崎正紀・松浦浩久・高橋 浩・工藤 崇・康 義英・花島裕樹・佐藤隆司・北島弘子・重松紀生・武田直人・山谷祐介・入谷良平・山口和雄・名和一成・大和田朗・福田和幸・平林恵理・今西和俊・内出崇彦・落 唯史・黒坂朗子・桑原保人・高橋 誠・行谷佑一・大坪 誠・城谷和

- 代・勝部亜矢・吉岡真弓・古澤みどり・吉田清香・山崎誠子・高田 亮 (2013) 2013年産総研一般公開・チャレンジコーナー「ジオドクトル2013」実施報告. *GSJ 地質ニュース*, **2**, No. 11, 325-328.
- Nakano S., Sawaki, T. and Sasaki, M. (2014) Microtexture and compositional variation of alkali feldspars from the Kakkonda granitic pluton, northeast Japan: Implications to the formation processes of granitic texture. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **109**, No. 3, 138-150.
- 大久保墨・末益 匠・鈴木正哉・亀山光男・小井土賢二・堂脇清志 (2013) ブルータワープロセスを想定した CO<sub>2</sub>吸着剤の実験及びプロセス設計. *エネルギー・資源*, **34**, No. 6, 1-9.
- Yamada, H., Yokoyama, S., Tamura, K., Watanabe, Y., Morimoto, K., Hatta, T. and Watanabe, T. (2014) Synthesis and phase relations in montmorillonite-stevensite series under hydrothermal conditions. *Clay Science*, **18**, No. 1, 11-18.
- Yanagisawa, N. (2013) Geothermal development progress in Japan after earthquake, 2011. *Proceedings Australian Geothermal Energy Conference 2013*, 155-158.
- Yanagisawa, N., Muraoka, H., Sasaki, M., Sugita, H., Sato, M. and Osato, K. (2013) Production test of Kalina system using hot spring fluid at geopressure field in Japan. *Proceedings of New Zealand Geothermal Workshop 2013*, 1-5.

## 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 Mitsuhashi

Phone: 029-861-2387, e-mail: y.mitsuhashi@aist.go.jp

<http://unit.aist.go.jp/georesenv/exploge/>

#### 1. グループの研究目的と課題

本研究グループでは、放射性廃棄物地層処分、土壌・地下水汚染、CO<sub>2</sub>地中貯留等の地圏環境分野における地盤・岩盤の評価やモニタリング及び、地熱・地中熱、メタンハイドレート、鉍物資源等の資源・エネルギー分野、地盤液状化、断層、火山等の等の防災分野における地質・地盤構造調査に不可欠な物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査手法の技術開発と適用研究を行う。平成26年度においては、以下の7項目を中心に研究を行う。

##### ▶ 地圏の環境分野として、

- 1) 放射性廃棄物地層処分場選定における沿岸域および海域の地質環境評価のため、沿岸域モデルフィールドにおける3次元弾性波探査反射法の適用試験の実施や海底電磁探査システム開発の取りまとめを行う。
- 2) 土壌汚染、地下水環境分野等における浅部地質環境評価のため、東日本大震災に対応した東北地方沿岸域における電磁探査法等の適用による地下水塩水化領域の把握調査の取りまとめ、NMR 表面スキャナーの工業製品・農業への適用、物理探査による油分土壌汚染評価等を行う。
- 3) CO<sub>2</sub>地中貯留における岩石物性評価や実証フィールドでの物理探査法適用による地質構造・地下水環境評価を実施する。

##### ▶ また、地圏の資源・エネルギー分野として、

- 4) 地中熱利用における地下物性のモニタリング法および事前評価手法の研究、地熱地域における温泉帯水層から地熱貯留層の熱水系把握のための実証調査、貯留層探査に向けた基礎的技術開発を行う。
- 5) 海底熱水鉍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、陸域における電気探査強制分極法による鉍物資源探査の基礎研究を行う。

##### ▶ さらに地圏の防災分野への適用として、

- 6) 東日本大震災への対応として、弾性波探査等の物理探査やCPT技術を用いた液状化調査およびCT画像による液状化判定に関する研究の取りまとめを行う。
- 7) 断層評価のための各種物理探査法の適用結果について、取りまとめを行うとともに、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。

#### 2. グループの体制

##### 2.1. 人員体制

以下の8人体制で研究を実施している。

- 光畑裕司（グループ長）
- 高倉伸一（上級主任研究員）
- 中島善人（上級主任研究員）
- 横田俊之（主任研究員）
- 神宮司元治（主任研究員）
- 上田 匠（主任研究員）
- 中山京子（テクニカルスタッフ）
- 紙谷 進（派遣職員）

そして部門内では、地下水研究グループ、CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ、鉍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・金属鉍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

「運営費交付金」

- ・物理探査の研究

「受託研究」

- ・平成26年度地層処分技術調査等事業（海域地質環境調査確証技術開発）（資源エネルギー庁）
- ・平成26年度二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完するCO<sub>2</sub>挙動評価技術の開発）（経済産業省）
- ・平成25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26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26年度地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層評価・管理技術」（JOGMEC 委託研究、民間企業、再エネ研究センターとの連携）
- ・災害調査用地上/空中複合型ロボットシステムの研究開発（NEDO 委託研究、民間企業、産総研他部門との連携）

等々。

### 3. 最近の主な研究成果

Nakashima, Y. (2013) The use of sodium polytungstate as an X-ray contrast agent to reduce the beam hardening artifact in hydrological laboratory experiments. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, **61**, 347-351.

中島善人 (2014) X線 CT 画像のビームハードニング偽像を抑制できるタングステン系造影剤の提案. 日本地球惑星科学連合2014年大会.

Mitsuhashi, Y., Ando, D., Imasato, T. and Takagi, K. (2014) Characterization of organic-contaminated ground by a combination of electromagnetic mapping and direct-push in situ measurements, *Near Surface Geophysics*, **12**, 613-621.

高倉伸一 (2014a) : 地熱探査における AMT 法の有効性の検証 - 鹿児島県大霧地熱地での実証実験を例にして -, 日本地熱学会誌, **36**, 21-32.

高倉伸一 (2014b) : 電磁探査から推定される広域的な地熱系の構造, 物理探査, **67**, 195-203.

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

Ueda, T., Mitsuhashi, Y., Uchida, T., Marui, A. and Ohsawa K. (2014) A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, *Journal of Applied Geophysics*, **100**, 23-31.

Ueda, T., Mitsuhashi, Y., Jinguji, M. and Baba H. (2014) Sub-seafloor resistivity sensing using a vertical electrode configuration, *EARTH PLANETS AND SPAC*, **66**, pp.8.

横田俊之 (2014) : 利根川下流域液状化エリアにおける弾性波探査による地盤構造調査と液状化, 巨大地震による複合地質災害に関する調査・研究報告 (印刷準備中).

### 4. 主な研究項目の内容

#### 4.1. 土壌汚染現場における物理探査・原位置計測手法の適用実験

港湾埋立地の工場跡地で以前取得した電磁マッピング及び原位置計測結果の再評価を実施した。電磁マッピングデータは、南北約70m、東西約170mの検証サイトで、総2943測点で計測されたものである(図1)。結果として、表層の低比抵抗を示す粘土質土壌、両側のやや比抵抗の高い砂質土壌の分布が推定された。また、原位置計測手法としては、土壌中の揮発性有機物化合物(VOC)を検出可能なメンブレン・インターフェース・プローブ(MIP)を用いたダイレクトプッシュ型貫入プローブ計測が適用されており、サイト内18地点で深度5m~7mに至るVOCの汚染状況が把握されている。

調査結果の最終的な解釈として、表層の粘土質層が汚染物質の浸透のバリアの役割をしており、油分

は地下水位周辺の浅部に滞留し、有機溶剤系の汚染物質はさらに深部に浸透、より下部の海底泥の上側にある砂層で滞留していることが推定された(図2)。



図1 米国 Geopex 社製 GEM-2電磁探査装置による電磁マッピング調査の様子。

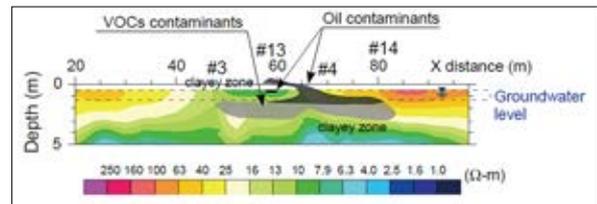


図2 地下比抵抗分布と油分・VOC 汚染の関係。

#### 4.2. CO<sub>2</sub>地中貯留 (CCS) における岩石物性評価

X線 computed tomography (CT) は、試料を非破壊でイメージングできるので、室内実験のモニタリングツールとして地球科学で汎用されている。たとえばCO<sub>2</sub>地中貯留に関する室内実験では、コア試料の相対浸透率曲線の流体置換率や残留CO<sub>2</sub>飽和度の高精度計測を目的として、多孔質なコア試料内部の複雑なダグリー流れをX線CTを用いて可視化している。その際、高濃度のヨウ素造影剤を水にドープするのが一般的であるが、ヨウ素を使うとビームハードニング偽像(多色性X線が原因で、均一試料にもかかわらず試料表面から内部に行くほど画像が暗くなる現象)が強くなり、定量的なCT画像解析が困難になる恐れがある。様々な造影剤を想定したCT画像計算機シミュレーション研究は、ヨウ素よりK吸収端のエネルギーが大きい造影剤が、ビームハードニングを抑制するという意味で優秀であることを示唆している。そこで今研究では、タングステンを含む造影剤(ポリタングステン酸ナトリウム, Na<sub>6</sub>H<sub>2</sub>W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>)を実験的に試してみた。内径56mmのプラスチック円筒容器に粒径約200ミクロンの豊浦標準砂を空隙率39vol.%で充填し、その空隙をヨウ素系(KI 9.16 wt%)とタングステン系(Na<sub>6</sub>H<sub>2</sub>W<sub>12</sub>O<sub>40</sub> 8.80 wt.%)の2種類の造影剤を含む水溶液で満たし、医療用CTで2次元スライス撮

影した（加速電圧130kV，スライス厚10mm，ビームハードニング補正処理なし）。結果は，期待通り，タングステン系造影剤の方がビームハードニングをより抑制していることが確認できた。ポリタングステン酸ナトリウムは，ヨウ素同様に重元素が陰イオンである（粘土鉱物表面に吸着されない）上に，重元素化合物には珍しく比較的化学的に安定で人体に無害であり，鉱物分離用重液としてすでに商品化されているので，ヨウ素よりビームハードニング偽像を抑制できる造影剤として今後期待できる。

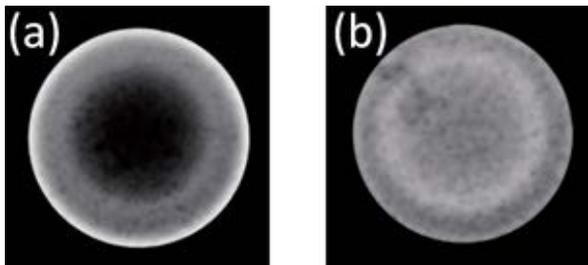


図3 内径56mmの容器に充填した砂質堆積物の間隙に，(a) KI 9.16 wt. %，(b)  $\text{Na}_6\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}$  8.80 wt. %の水溶液をそれぞれ注入したCT画像。(b)では，ビームハードニング偽像が抑制されている。

#### 4.3. 原位置地盤プロファイラシステムの開発

浅層地盤の間隙率・飽和度・地下水流速の把握は，地盤利用や地下水・地盤の汚染予測などの環境評価にとって重要である。地盤の有効熱伝導率は，これらの間隙率や飽和度，地下水流速と密接な関係があり，これらの関係を調べることで，有効熱伝導率からの推定が可能になること考えられる。また，地盤の熱伝導率は，地中熱開発にとっても重要な採熱量の予測にも必要であり，地中熱のポテンシャルマップに必要である。本研究では，これまで開発を進めてきた熱伝導率プロファイラ（Thermal conductivity profiler: TCP）を応用することで，これらの地盤パラメータや地下水流速の推定が可能かの検証を行う。本研究では，熱伝導率と間隙率・飽和度の関係については，バルク混合体の考えに基づいた三相成分混合モデルを提案している。ここで，ボーリングサンプルから得られた間隙率・飽和度を上記の三相成分混合モデルによってあてはめた熱伝導率とTCPで実測された結果の比較を以下に示すが，調和的な結果が得られた。

#### 4.4. 地熱資源探査のための物理探査法の研究

北海道豊羽地熱地域では，2010年から地熱開発が進められている。熱源はその南西に位置する無意根山の周辺にあると考えられているが，豊羽地域での地熱開発が約8km東方に位置する定山溪温泉に影響を与えるのではという懸念が生じている。そこで，その可能性を探るため，定山溪温泉周辺でMT法調査を実施した。そして，産総研が1999年～2000年に無意根山～豊羽地域周辺で取得したMT法データと合わせ，広域の深部比抵抗構造を求め，地質的解釈

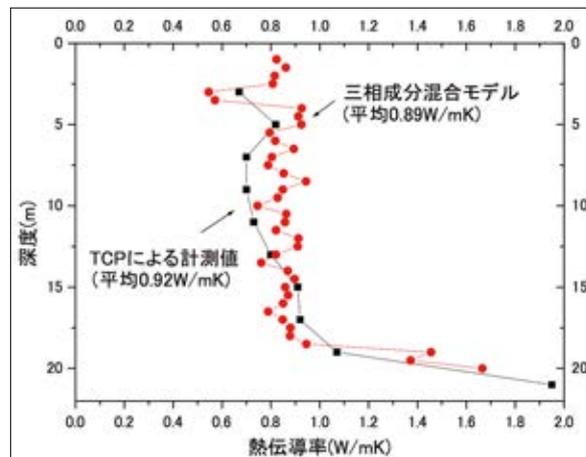


図4 栃木県芳賀台で計測したTCPによる熱伝導率分布とボーリングサンプルで得られた間隙率・飽和度の結果を三相成分混合モデルに当てはめた結果との比較。

を加えた（図5）。無意根山直下の地熱貯留層に対応する低比抵抗層と定山溪温泉直下の温泉帯水層に対応する低比抵抗層とは，先第三系基盤岩である薄別層に対応する高比抵抗体でさえぎられている。このことから，無意根火山～豊羽地域の地熱系と札幌岳～定山溪温泉の地熱系とは独立しており，互いに干渉する可能性は小さいと判断できる。

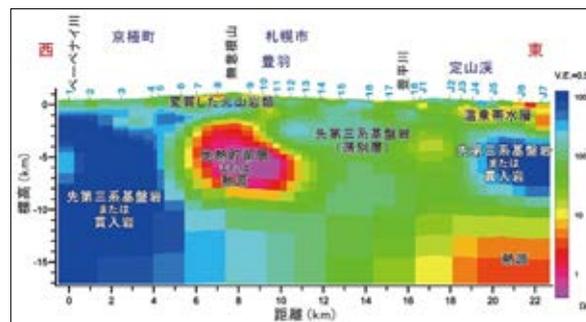


図5 無意根～豊羽～定山溪地熱地域の2次元比抵抗断面とその地質的解釈（高倉，2014b）。

#### 4.5. 東日本大震災に関連した地盤液状化リスク調査・研究

東日本大震災時に広範囲で液状化被害が発生した利根川下流域において，各種の液状化調査を実施した。調査手法は，三成分コーン貫入試験等の原位置貫入試験および表面波探査や電気探査等の物理探査法である。

表面波探査結果より，茨城県潮来市の日の出地区およびその周辺の地下構造が明らかになった。日の出地区は，比較的高速度な表層，その下位の低速度層および最下位の高速度層で特徴付けられることがわかった。比較的高速度な表層は砂質の浚渫土，低速度層は日の出泥層，高速度層は，佐原砂泥互層の砂質部分と解釈することができる。この地区の土地利用履歴および他の調査結果から考えると，最浅部層の砂質浚渫土の分布を捉えることができたことは大きな意味を持つという事ができる。表面波探査結

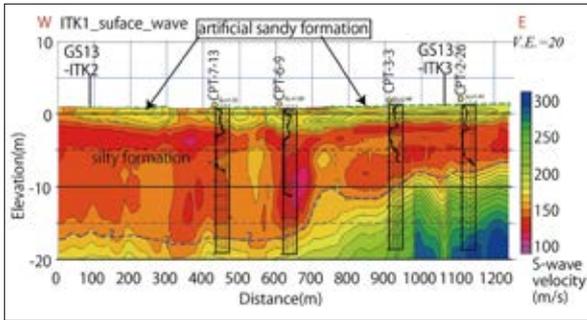


図6 茨城県潮来市日の出地区で実施した表面波探査による地盤中のS波の速度分布(横田, 2014)。地表下約3mまでの比較的高速な層が液状化したと考えられる砂質浚渫土である。

果のS波分布は地盤強度と密接な関係を持つため、液状化予測に資する。

### 5. 今後の物理探査研究の展開

物理探査技術は、地圏の資源開発、地下空間・機能利用、地下環境保全あるいは防災に関する多くの分野で適用されるものであることから、研究対象を直接に担当する他の研究グループあるいは他部門と連携して、国のプロジェクトに参画して行く体制が

重要である。基本的には、グループ独自の研究テーマにおいて測定システム・解析ソフトウェア開発や岩石物性試験・物性解釈などの基盤的かつ先端的な研究を中心に行い、グループ間あるいは部門間共同研究テーマにおいて、対象とする地質ターゲットに対して探査・解析手法の適用研究を実施するものとする。

来年度から産総研では、第4期計画が開始される。最近の資源・エネルギー問題への関心の高まり、地球規模の温暖化への対応、さらにそれに起因すると思われる地盤・地質災害の顕在化、東日本大震災以来、国としての対応が推進されている国土強靱化等、今後の物理探査の活躍の場は多く、期待も大きい。

具体的には、資源に関して、鉱物資源への物理探査手法や岩石物理の基礎研究、メタンハイドレート探査への海洋電磁探査法の適用、地熱・温泉貯留層構造評価のための広域地熱系探査、地層処分や二酸化炭素の地中貯留に関連した沿岸域での地下構造調査や地下施設周辺での水理構造・地下環境評価、土砂災害等の災害現場での物理探査技術の適用等の研究開発を推進・展開する計画である。

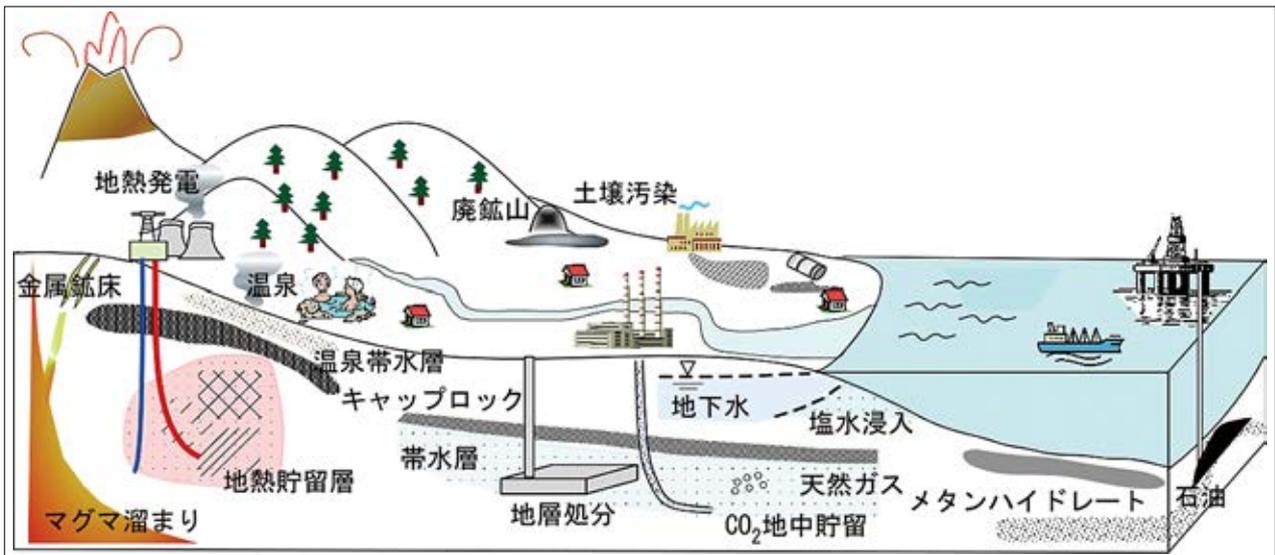


図7 物理探査の適用が期待される地圏の資源評価、環境利用、環境保全の各種地質対象。

## CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループの紹介 Introduction to CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group

CO<sub>2</sub>地中貯留研究グループ長：西 祐司  
Leader, CO<sub>2</sub> Geological Storage Research Group: Yuji Nishi  
Phone: 029-861-3969, e-mail: y.nishi@aist.go.jp

### 1. グループの研究目的

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

国によるCCS実証事業として北海道苫小牧地点において2016年CO<sub>2</sub>圧入開始に向けた準備が進められており、CO<sub>2</sub>地中貯留の2020年実用化に寄与する研究が必要とされている。CO<sub>2</sub>地中貯留は2010年度からの産総研第3期においても重点課題に指定されており、中期計画として“CO<sub>2</sub>地中貯留において、CO<sub>2</sub>の安全かつ長期間にわたる貯留を保証するための技術を開発し、早期の実用化に寄与すること”をまさに目標としている。

### 2. グループの研究資源

#### 1) グループメンバー(平成26年10月1日現在)

西 祐司(グループ長)  
杉原光彦, 徂徠正夫, 佐々木宗建, 加野有紀,  
藤井孝志, 船津貴弘, 石戸恒雄, 佐藤久代,  
相馬宣和(FREA地熱チーム兼務),  
上原真一(産学官制度来所者)

当部門他研究グループ等より研究分担者15名

#### 2) 予算

- 運営費交付金:「CO<sub>2</sub>地中貯留の研究」,「沿岸域海底下CO<sub>2</sub>地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」,「高感度重力モニタリングのための超伝導重力計の導入」他
- 経済産業省受託研究:「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業(弾性波探査を補完するCO<sub>2</sub>挙動評価技術の開発)」

### 3. 平成26年度上期までの進捗状況

ここでは、当グループメンバーが実施しているCO<sub>2</sub>地中貯留研究の主な進捗状況を紹介する。

#### 1) 弾性波探査補完モニタリング技術の開発

経済産業省受託研究の一環として、米国SWP(Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration)が実施する大規模CO<sub>2</sub>地中貯留プロ

ジェクトに参加し、反射法地震探査を補完するモニタリング手法として、重力・SP(自然電位)・AE(岩盤の微小破壊による高周波振動)等のモニタリング手法の研究開発を進めている。テキサス州ファーンズワース(FWU)テストサイトにおいて、昨年度からのベースライン測定(CO<sub>2</sub>圧入開始前のバックグラウンド調査)を継続し、平成26年からはCO<sub>2</sub>圧入時モニタリングを開始した。



写真1 FWUにおける超伝導重力計による高感度連続測定。平成26年5月末より新たに導入した超伝導重力計を追加して、並行測定を開始した。

平成25年度は、年度内に4回の絶対重力測定の実施、6回の基点周辺での可搬型相対重力計による測定、SWPの観測坑13-10周辺の自然電位ベースライン測定、4地点のAE地表観測点と気象・土壌水分モニタリング・システムのデータ取得等を実施した。重力モニタリング(写真1, 図1)においては、主たる解析対象とみなしている振幅2-3 $\mu$ Galのトレンド成分を高感度連続重力記録から分離抽出する上で月間ドリフトは1 $\mu$ Gal以下と想定していたが、設置初期において大きなドリフトが生じる場合があることを認識した。そのような初期ドリフトの把握・改善方法を試行して、今後の圧入時モニタリング実施のために重要なベースラインデータを得ることが出来た。

2013年12月からCO<sub>2</sub>圧入開始時点を跨ぐ期間を設定したCO<sub>2</sub>圧入開始時のデータ取得として、AWT3基地の重力観測小屋において超伝導重力計による高感度連続測定を開始した。また、観測坑13-10坑においては、SWP側工事が一段落した2014年3月に観測坑近傍への自然電位モニタリング・システム(図2)の設置を行い、CO<sub>2</sub>圧入開始時のデータ取得を開始した。AE地表観測点と気象・土壌水分モ

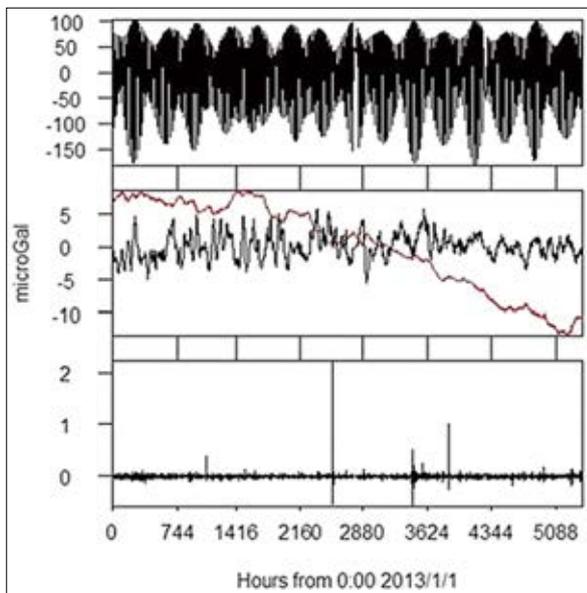


図1 超伝導重力計による225日間の連続記録に対するBAYTAP-Gを用いた成分分離結果。潮汐成分(上)、気圧応答(中・黒)、トレンド成分(中・赤)、不規則成分(下)。

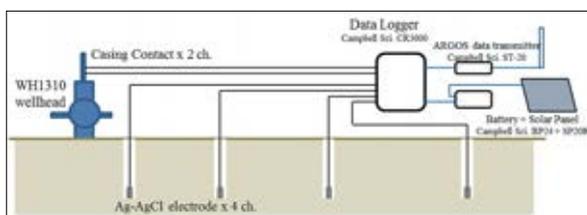


図2 FWUに設置した自然電位モニタリング・システムの構成

ニタリング・システムでは、ベースライン測定から連続してCO<sub>2</sub>圧入開始時のデータ取得を開始した。

さらに、平成25年度理事予算にて新たに導入した超伝導重力計を2014年5月末に米国サイトに設置し、同一サイト及び近接サイトに設置しての超伝導重力計並行測定の試行を始めた。同一サイトに設置しての並行測定結果からは、初期ドリフトの把握等に有益な結果が得られている(図3)。

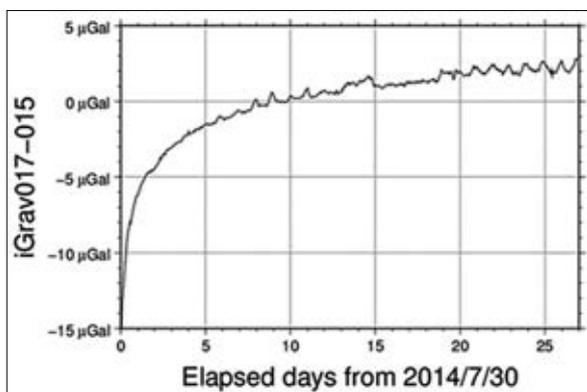


図3 並置した2台の超伝導重力計の差(2014/7/30~8/25)。設置後約1か月でドリフト差は月間2マイクロガルで室温が適正に制御されている時間帯の器差は100ナノガル相当

また、ゴードンクリーク・テストサイトのモデル

を利用し、ポストプロセッサを用いた例題計算も実施した。潜在リスクとして断層開口を想定したCO<sub>2</sub>圧入の変動予測計算では、断層を通して浅部帯水層へ上昇するCO<sub>2</sub>を捉えるのに高精度の連続重力測定が有効であるとの結果を得た(図4)。深度500m程度までの上昇を示唆する重力変化は比較的広範囲に現れ、観測点位置を断層付近に限定する必要がないため開口する断層位置が未知の場合にも1、2点での高精度連続観測が繰り返し反射法の適用頻度低減に有効な補完手法として機能すると期待される。

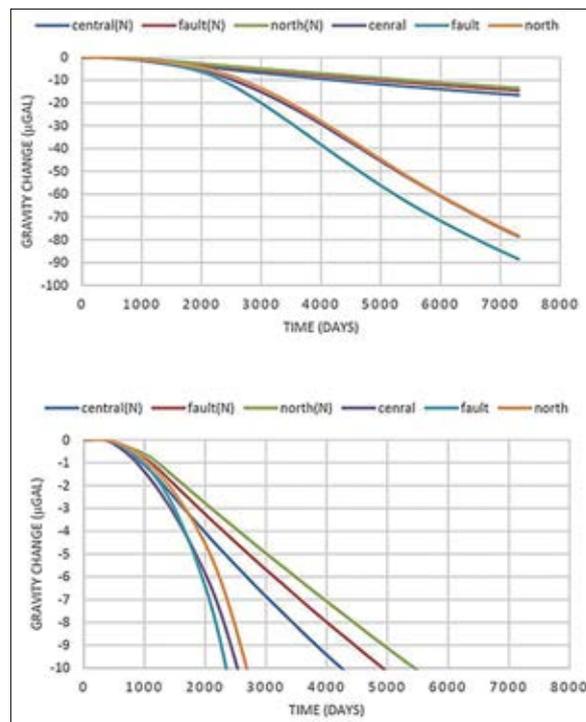


図4 例題計算におけるCO<sub>2</sub>圧入に伴う重力の時間変化。観測点は圧入点直上(central)、想定断層直上(fault)及び圧入点800m北(north)に設定。観測点名に(N)の付いている曲線は断層なしの場合の結果。下図は上図の縦軸スケールを拡大。

電気・電磁気ポストプロセッサのうち自然電位ポストプロセッサについては、モニタリング研究のテストサイトへの適用にあたって必要となるジオバッテリー効果に関わる改良、および沿岸域への適用にあたって必要となる海洋領域の取り込みのための機能追加を行い、ジオバッテリー効果について、坑口付近の自然電位の負異常の再現に加えてCO<sub>2</sub>プルーム到達による変化が鋼管ケーシングの電位自体に大きく現れるとの予測結果を得た(図5)。

## 2) 砂泥互層人工試料によるシール圧測定

CO<sub>2</sub>地中貯留の安全サイドからの評価において、スレッシュホールド圧低下の変動幅を把握することは非常に重要である。本研究では、キャップロックのシール性能評価の一環として、地中貯留を模擬した温度、圧力条件下において、泥岩試料に対して種々の有効圧において超臨界CO<sub>2</sub>の浸透実験を実施した。その結果、有効圧の増加により泥岩の浸透率が

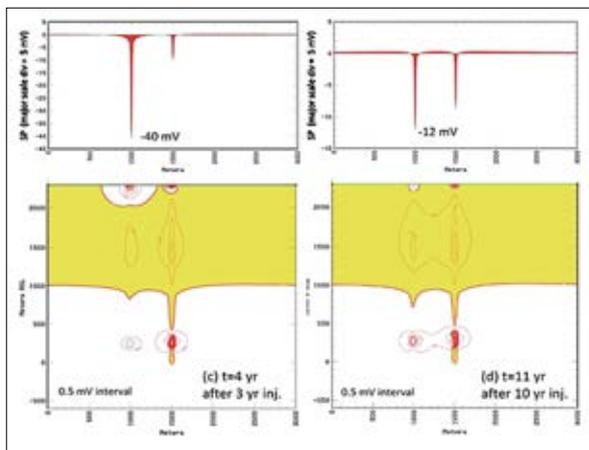


図5 圧入井と観測井の坑口を通過する測線に沿うSPのプロファイルと地下断面上の電位分布(圧入開始後3年と10年の結果)。圧入井は横軸の1500 m, 観測井は1000 mに位置し, CO<sub>2</sub>ブルーム到達に伴い観測井の負異常が変化する。地下の断面で黄色部分は正電位領域を示す。

減少し、逆にスレッシュホールド圧が増加する様子が観測された。これらの水理特性の有効圧依存性は、泥岩の種類のみならず個体差により大きく異なっていたが、スレッシュホールド圧-浸透率の相関性は一つのトレンド上で変化することが示された(図6)。また、スレッシュホールド圧に及ぼす界面張力の効果を検証するために差圧付加方法や間隙水組成を変化させた実験からは、基準となるケースに対して、界面張力の補正だけでは同じ値を再現できないことが示された。実験誤差の検証が必要であるが、接触角が変動していることが原因となっている可能性もある。

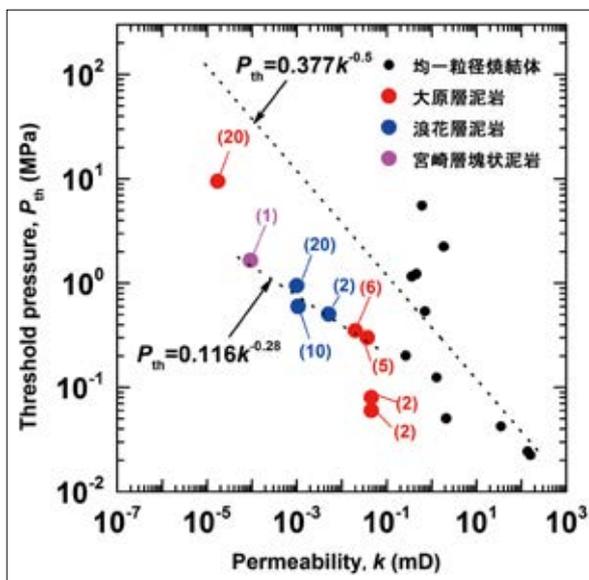


図6 スレッシュホールド圧と浸透率の関係における天然泥岩と均一粒径シリカ粒子焼結体の比較結果

### 3) 砂泥互層内での化学的反應プロセスの評価

本研究の目的は、CO<sub>2</sub>地中貯留における長期地化学プロセスについて、シミュレーションによる予測精度の向上を図るために、信頼性の高いパラメータおよび知見を取得することである。昨年度までに引

き続いてCO<sub>2</sub>地中貯留を模擬した炭酸泉および炭酸水素塩泉において現場反応実験を行い、種々の炭酸塩鉱物の反応速度の計測とCO<sub>2</sub>の固定化に至る炭酸塩鉱物の生成条件の検討を行った。今年度は、簡易数値モデル解析も実施し、この結果から流動が関係するモデルにおいてカルサイトの成長速度の相違が炭酸塩沈殿量の将来予測に大きく影響する可能性が示唆された。

### 4) CO<sub>2</sub>長期挙動シミュレーション

本研究では地中に圧入されたCO<sub>2</sub>とそれに伴う地層の長期挙動シミュレーションを行っている。地層構造やシール特性によるCO<sub>2</sub>貯留性の違いや、圧入に伴う力学的な影響を検討する。ここではシール圧の実験結果を用いたCO<sub>2</sub>圧入による地層の力学安定性に対する影響を検討した結果を紹介する。

苫小牧サイトを模擬し、シール層の物性パラメータのみに泥岩の実験結果を適用した感度解析シミュレーションからは、年間1 Mt、50年間のCO<sub>2</sub>の注入において、シール層下部の有効圧が9.9 MPaから1.4 MPaまで低下し得ることが示された。しかしながら、これに対応して浸透率とスレッシュホールド圧を変化させたとしても毛管圧が依然として高い効果を保ち、シール層の機能はほぼ維持されることが明らかとなった(図7)。

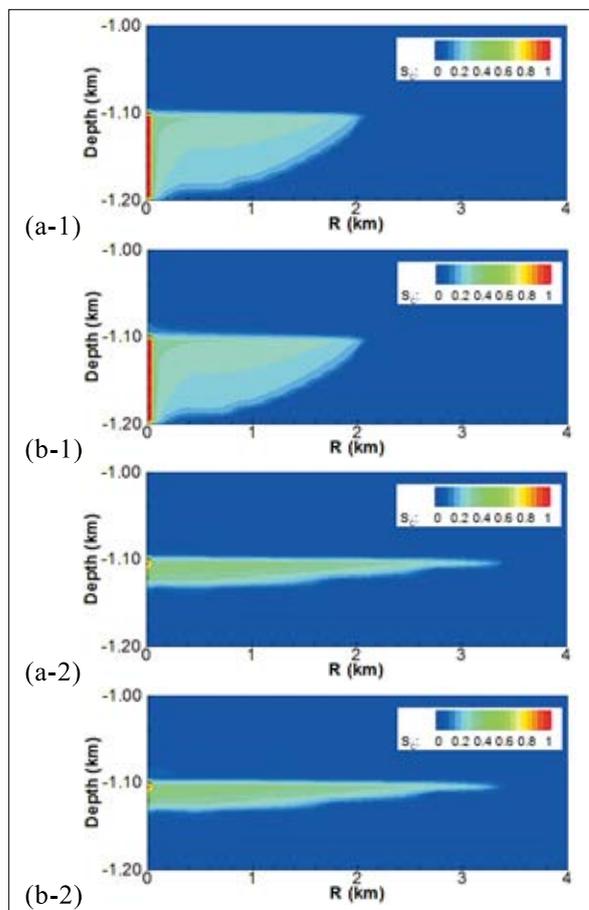


図7 浪花泥岩の(a)初期有効圧(9.9 MPa)パラメータ, (b)低下有効圧(1.4 MPa)パラメータにおける(1)50年後(圧入停止時), (2)500年後のCO<sub>2</sub>分布。深度-1.10 kmが砂岩貯留層と泥岩シール層の境界

## 5) ジオメカニクスを考慮した断層モデリング手法の開発

経済産業省受託研究の一環として、CO<sub>2</sub>地中貯留において間隙圧の変化が地層の安定性やCO<sub>2</sub>流動に及ぼす影響を取り入れるためのモデリング技術の研究を実施している。これまでに、ジオメカニクスと流体流動の連成解析、室内試験による力学パラメータの取得等を実施した。

力学-流体流動連成解析においては、流体流動-力学連成シミュレータ TOUGH-FLAC の日本の地質への適用性を評価することを目的として、1960年代に長野県松代地域で観測された事象を対象にシミュレーションを実施した。昨年度作成した地質モデルを基に、松代群発地震の震源位置経時変化と整合的な断層挙動パターンを得るためのパラメータのチューニングを行った。この結果決定したパラメータを基本ケースとして、TOUGH-FLAC を用いて各種パラメータの感度解析を行った (図8)。この結

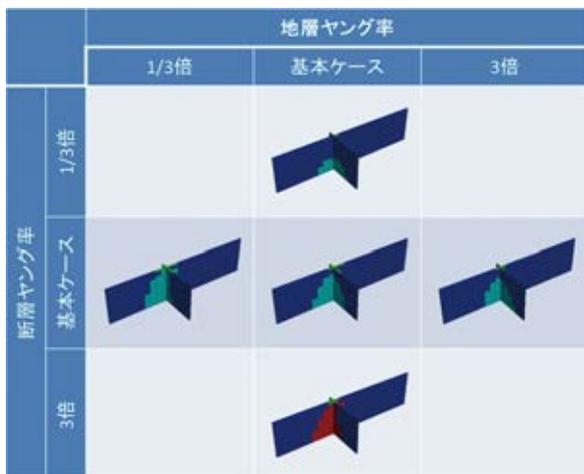


図8 地層と断層のヤング率変化に対する感度解析結果 (流体流入1年後の破壊領域の分布)。青=非破壊領域、緑・水色・赤=破壊領域

果、地層部分のヤング率が小さいほど、また断層のヤング率が大きいほど、それぞれ断層の破壊領域が拡大することや、その効果は断層ヤング率の方が大きいことなどが確認された。同時に、シミュレータが計算可能なパラメータの制約もいくつか明らかになった。

## 6) せん断・透水試験

砂泥互層、キャップロック内には大小様々なき裂や断層が存在し、CO<sub>2</sub>注入により岩盤の安定性に強い影響を及ぼすとともに、水理特性も変化することが予想される。本研究では、三軸圧縮試験により、泥岩および砂岩の供試体内にせん断帯を発達させながら透水試験を行っている。今年度構築したせん断・透水試験システムにより別所層松代泥岩、実証試験サイトとなる苫小牧の滝ノ上層岩石を対象にせん断・透水試験を実施した (図9)。その結果、岩石試料中にほぼ決まった角度でせん断面の形成が可能となり、岩石のすべりに必要なおおよその応力条件の予測が可能であることがわかった。また、せん断帯の簡易的なモデルに基づきすべり面の摩擦係数を求めた結果、形成されるせん断帯の挙動は、各々の岩石種で大きな違いが見られることがわかった。

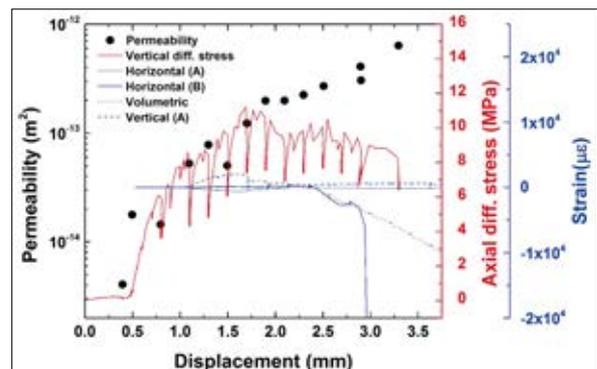


図9 変位に対する軸差応力、ひずみ、ならびに浸透率の変化 (滝ノ上層泥岩)

## 地圏環境リスク研究グループの紹介

### Introduction of the 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  
 Phone 029-861-3943, e-mail: m.zhang@aist.go.jp

#### 1. グループの研究目的

持続可能な社会や環境の創生に貢献することを目標に、土壌・地下水汚染、CO<sub>2</sub>地中貯留及び放射性物質をも含む各種廃棄物の管理などに係る多様な環境リスク問題を合理的に解決するための研究開発を行う。また、研究成果を広く社会へ還元するために、多様なリスクを定量的に評価可能な地圏環境リスク評価システム（GERAS）の製品化と普及、表層土壌評価基本図の整備と出版、ならびに浄化技術の実用化を実施する。さらに、技術研修や技術支援、国際協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に地圏環境リスク評価関連の主要な研究課題を示す。

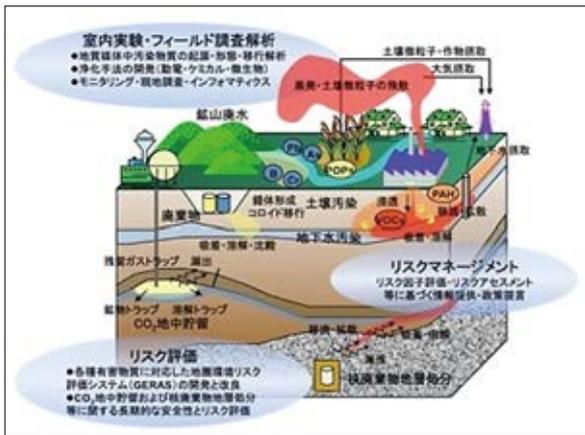


図1 地圏環境とリスク評価関連の主要な研究課題

#### 2. グループの研究資源

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

##### 2.1. グループメンバー構成（H26.10時点）

- 張 銘（グループ長）
- 田中敦子
- 村尾 智
- 川辺能成
- 原 淳子（地質分野企画室出向中、兼務）
- 坂本靖英
- 保高徹生
- 杉田 創

井本由香利

- 宮津 進（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）
- 山野辺純一（産学官来所者）
- 内田 真理子（産学官来所者）
- 黒澤暁彦（派遣）

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

##### 2.2. 主な研究資金

「運営交付金」

- ・地圏環境リスクの研究
- ・土壌汚染評価技術の開発
- ・重金属類土壌汚染調査評価及びリスク低減方策に関する技術開発「重点研究加速予算（戦略予算）」
- ・放射性セシウム廃棄物等の管理に関する安全性評価技術「融合・連携推進予算（戦略予算）」
- ・セシウム汚染物除染・減容事業の本格稼働に向けた要素技術開発「その他緊急経費（戦略予算）」

「受託研究」

- ・新規廃棄物処分場の適地選定手法の構築
- ・「食料生産地域再生のための先端技術展開事業」野菜栽培による農業経営を可能とする生産技術の実証研究

「共同研究」

- ・バイオレメディエーションによる効率的な土壌汚染の原位置浄化技術に関する研究
- ・土壌汚染対策における環境負荷評価手法に係る共同研究
- ・無機凝集剤によるヒ素汚染飲料水の処理評価に

関する研究

- ・汚染物質の浸透拡散に関する解析，評価手法の研究
- ・合理的な土壤汚染措置推進に向けた地域特性に応じた環境リスク評価手法の構築に関する研究
- ・メタン溶存天然水を用いた有機塩素化合物による汚染地下水の浄化工法の実用化に関する研究(分担)

「科研費・補助金・助成金」

- ・シビアな環境汚染除染以降のブラウンフィールド問題とリスクコミュニケーションの課題
- ・丘陵地森林の放射性物質の流出・循環の景観生態学的分析と里山の生態的再生の検討
- ・除染・帰還を見据えた地域別の放射性 Cs 流出特性評価とリスク管理戦略の構築
- ・市場経済移行国における資源開発に関するガバナンス

### 2.3. 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, 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

### 3. 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，研究を進めているが，紙面制限のため，ここでは代表的なトピックのみ紹介させて頂く．

#### 3.1. 茨城県地域表層土壌評価基本図の整備

表層土壌は農業や生活環境に与える影響が大きく，ヒトによる土壌粒子の直接・間接摂取，間隙水への溶出に伴う農作物・地下水への移行等による曝露の可能性がある．このため，表層土壌に関して，特定有害物質(鉛やヒ素などに代表される重金属類)によって発生しうるリスクを定量的に評価することが非常に重要である．

宮城県地域，鳥取県地域および富山県地域の整備・出版に続き，今年度では茨城県地域の整備を完了し，年度内に出版することが可能となった．図2に茨城県地域におけるヒ素の溶出量及びリスク分布を例として示す．

このような表層土壌評価基本図は産業立地のリスク診断や自然由来汚染の判断，ならびに地方自治体などにおけるリスクコミュニケーションツールまたは基礎資料として活用することが可能である．

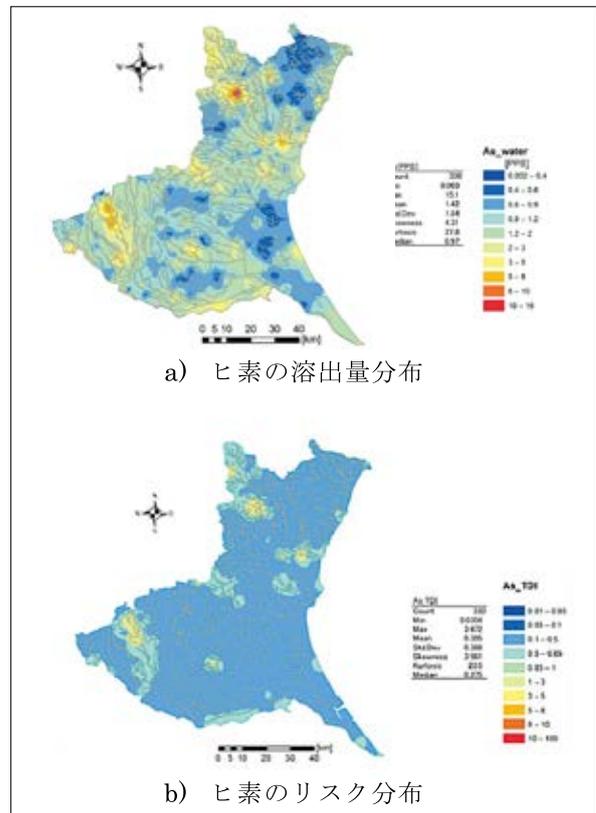


図2 茨城県におけるヒ素の溶出量とリスク分布

#### 3.2. 放射性セシウム廃棄物等の管理に関する安全性評価技術の開発

本研究では，除染土壌等の放射性セシウム廃棄物の保管施設(仮置き場)とその周辺環境における総合的な環境管理及びリスク評価の基盤情報整備・技

術開発を行い、中立的・公共的な立場による保管施設の設計・環境管理に関する基盤情報を整備・公開をすることを目的とする。

福島県に代表的な土壌を対象とした非放射性セシウムを用いた吸着試験や保管施設の下部地盤の圧密と透水性実験などを行い、福島県内の2自治体に設置された仮置き場周辺の河川水および仮置き場からの排出水のセシウム濃度のモニタリングを実施した。これらを通じて、保管施設その周辺環境における環境リスク評価のためのパラメータを整備した。

放射性セシウムの土壌・地下水環境での拡散に関する数値解析モデルの構築では、保管施設より浸出したセシウムの土壌・地下水環境での拡散の評価が可能な数値解析モデルを構築した。放射性セシウムの河川での濃度変化を予測する数値解析モデルの構築では、人々の生活圏に対応した小流域レベル(10km×10km)での環境影響評価を目的として、表層および土壌・地下水を經由して河川へ移行した放射性セシウムについて、バックグラウンドの影響を考慮した時空間的な濃度変化の予測を可能とする数値解析モデルを構築した。また、構築された環境中でのセシウムの拡散に関する数値解析モデルを地圏環境リスク評価システム(GERAS)、安全科学研究部門が所有する水系暴露評価システム(AIST-SHANEL)に組み込み、放射性セシウムの土壌-地下水-河川-農地への移行に伴う環境影響評価を可能とする安全性評価統合システムとして整備した。セシウム濃度のモニタリング結果との比較によりシステムの信頼性を検証するとともに、複数のリスクシナリオに基づく環境影響評価を実施した。その結果、仮置き場の設置が周辺環境に及ぼす影響は小さく、環境中でのセシウムの拡散には、土壌等に沈着したセシウムの寄与が著しく大きいことを明らかにした。図3に放射性セシウム廃棄物等の管理評価技術の体系を示す。

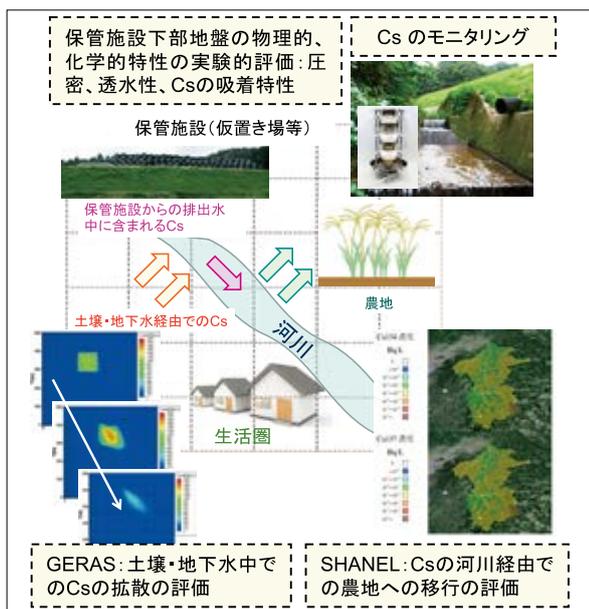


図3 放射性セシウム廃棄物等の管理評価技術

### 3.3. 環境水中の低濃度放射性セシウムの迅速計測技術の開発

環境水中の低濃度放射性セシウムの迅速測定及び存在形態別のモニタリングは長期に亘る水の利用や環境中における放射性セシウムの移動動態の解明において非常に重要である。本研究では、環境水中における低濃度放射性Cs濃度の形態別測定を簡便かつ迅速に行うために、プルシアンブルー担持不織布および懸濁物質回収不織布の2種類のカートリッジ型不織布フィルタからなる、固液分離・溶存態放射性Cs濃縮を同時に行う装置を開発した(図4)。本方法は、20Lの環境水を対象として、8分~40分程度で懸濁態と溶存態の分離およびカートリッジへの濃縮が可能となり、従来法と比較して極めて短時間での分離/濃縮が可能となる。また、分析用標準を準備することで、カートリッジをゲルマニウム半導体検出器で直接測定が可能である。

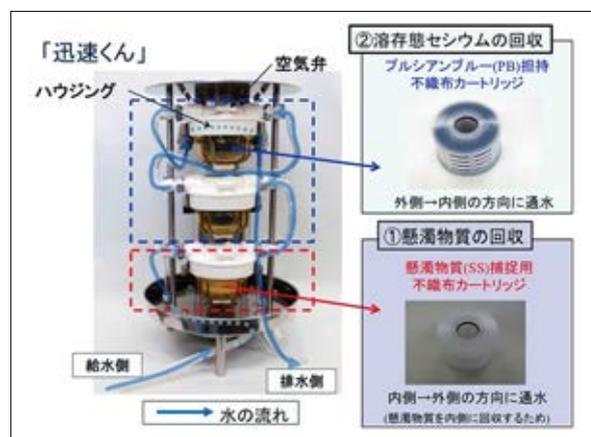


図4 環境水中の低濃度放射性セシウムの迅速測定装置(迅速くん)

### 3.4. 高性能低コストヒ素吸着材の開発

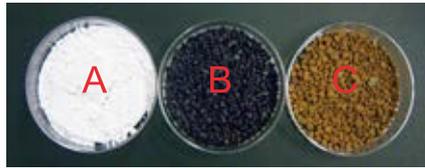
東南アジアや南アジア及び南アフリカなどの一部の地域では、ヒ素によって汚染された地下水を井戸から飲料水として直接的に摂取しているため、健康被害をもたらす可能性が高い。本研究ではヒ素汚染水からヒ素を効率的に除去でき、発展途中国で実用可能な安価な吸着材を開発することを目的とする。

ヒ素の除去方法として、複数の方法を利用可能であるが、経済性及び利便性などの観点から吸着材による除去は発展途中国において最も利用されやすいと考えられる。このため、本研究では、種々の吸着材や試薬を利用し、吸着の効率や処理水の水質並びに資材のコストなど体系的に調査し、研究を進めている。

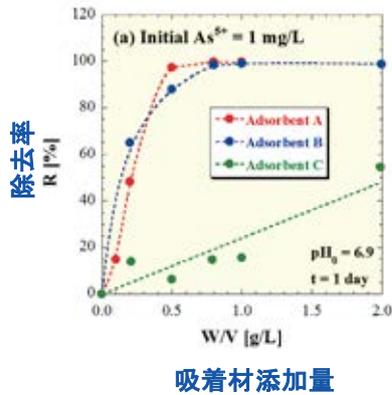
図5に開発した吸着材とヒ素汚染水の浄化試験(吸着試験)結果の例を示す。

### 3.5. 微生物によるVOCs汚染浄化技術の開発

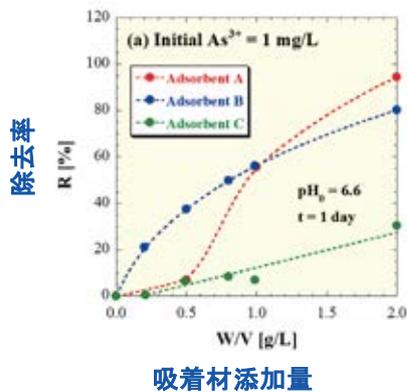
微生物を利活用した浄化技術、すなわちバイオレメディエーション技術は、環境に優しく、またコスト的にも安価なため、近年注目されている。我々はバイオレメディエーション技術の実用化、特に難透



a) 開発した吸着材の例



吸着材添加量



吸着材添加量

b) 3価及び5価ヒ素汚染水の浄化試験結果の例

図5 吸着材及びヒ素汚染水浄化試験の結果例

水性汚染地盤への適用に向けて、関連企業と連携し、共同研究によって研究開発を進めてきている。

数年にわたる研究開発によって、嫌気的微生物によるテトラクロロエチレン (PCE) やトリクロロエチレン (TCE) などのクロロエチレン類の還元分解

に必要な微生物群 (コンソーシアム) の確立や、分解の最適条件および適用限界などの設計条件の取得ができた。また、好気的微生物を利用し、酸化条件におけるベンゼンと cis-DCE などの複合汚染の分解実験にも成功を収めた。図6に cis-DCE とベンゼンによる複合汚染の酸化分解例を示す。

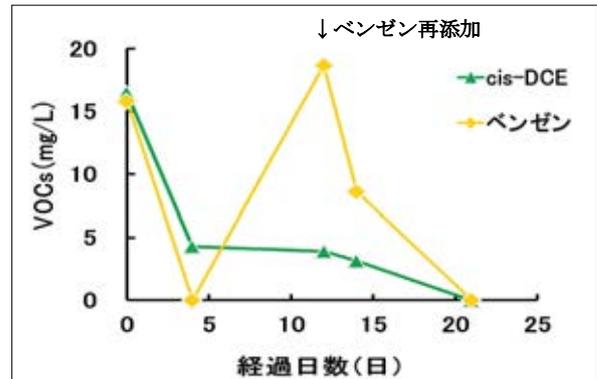


図6 cis-DCE とベンゼンによる複合汚染の酸化分解例

#### 4. 最近の主な研究成果

1. 駒井 武・川辺能成・坂本靖英：地圏環境リスク評価システムの開発，平成26年度「環境賞」優良賞受賞，2014.6.11.
2. 原 淳子・野呂田晋・垣原康之・川辺能成・張 銘：Identification of Arsenic Speciation and Accumulated Organic Species in Environment of Organic Sedimentation, 第20回国際土壌科学会議 Best Poster Award, 2014.6.13.
3. 橋本 禅・有田博之・保高徹生・岩崎有美：放射性物質に起因する避難生活の長期化による福島県農村地域復興への潜在的影響，農業農村工学会賞優秀論文賞，2014.8.

上記受賞のほか、地圏環境リスク研究グループでは年間20篇以上の誌上发表及び年間50件以上の口頭発表を行っている。詳細はグループホームページのリンク先 <https://unit.aist.go.jp/georesenv/georisk/japanese/publications/index.html> より確認可能である。

## 地圏環境システム研究グループの紹介

### Introduction of the Geo-Environmental Systems Research Group

地圏環境システム研究グループ長：雷 興林

Leader, Geo-Environmental Systems Research Group: Xinglin Lei

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

#### 1. グループの研究目的

地圏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<sub>2</sub>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. グループの概要

当研究グループは、「環境との調和を考えた地圏の開発・利用を図ること」を基本理念としCO<sub>2</sub>地中貯留、地層処分、地熱開発、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

地圏環境システム研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

雷 興林（研究グループ長）

唐澤廣和

成田 孝

及川寧己

竹原 孝

宮崎晋行

#### 3. 研究の進捗状況

##### 3.1. CO<sub>2</sub>を圧入した泥岩の三軸クリープ試験

CO<sub>2</sub>地中貯留は、高濃度のCO<sub>2</sub>を地下深部の帯水層等に圧入して貯え、地表環境から直接的に当分の間隔離する方法である。高濃度のCO<sub>2</sub>が地下岩盤に大量に貯留されることは天然には稀で、隔離期間は百～数百年と長期間に及ぶため、CO<sub>2</sub>圧入時の貯留層周りの岩盤の長期的変形挙動についてあらかじめ良く研究してデータを蓄積しておくことは重要である。ここでは陸域の地下深度1000m程度の地層環境を想定して、CO<sub>2</sub>を圧入した国内産の泥岩を用いた三軸クリープ試験を実施して得られた知見について示す。

試料岩石は容易に入手可能な、地表採取の千葉県産第四紀泥岩を用いた。これはCO<sub>2</sub>の地中隔離に係わる幾つかの基礎研究でも、キャップロックに相当する堆積軟岩として用いられたことがある。密度は含水状態で約2.0g/cm<sup>3</sup>、孔隙率は含水重量と乾燥重量の差から36%程度と見積もられる。試験片は、採取した岩石ブロックを加工して、概寸で直径50mm高さ100mmの円柱状に作成した。

軸載荷にはMTS社製材料試験機（油圧サーボ式、容量50tまたは100t）を用いた。三軸試験時の容器内部の圧力制御は動特性の良い油圧サーボ式の載荷装置を用い、周圧載荷流体には機械油を用いた。圧力容器には加温ヒーターを胴体外周に巻き、容器内部に設置した温度センサの計測値を基に、油で満たされた試験中の容器内部温度を一定に保持した。試験片の孔隙圧は、温調ジャケットを装着した2台の高精度ギアポンプを用いて試験片の上下端から制御し、必要に応じて上下端に差圧を生じさせて孔隙流体を圧入・回収できるようにした。ポンプとベッセルの間の孔隙圧制御配管にはケーブルヒーターを巻いて圧入・回収時の孔隙流体の温度低下を抑制した。

三軸クリープ試験における想定地下深度は陸域の1000mとして、周圧19.4MPa、孔隙圧9.8MPa、温度40℃と設定した。孔隙流体は比較のため、水のみで飽和させた試験片と水飽和させた試験片にCO<sub>2</sub>を圧入した試験片の2通りの孔隙状態の試験を行っているが、ここではCO<sub>2</sub>を圧入した試験片についてののみ

表1 三軸クリープ試験結果

Sample ID	Creep Stress (MPa)	Creep Strain (%)	Pore Fluid	Creep Life (Day)	End Status	Max. Total Strain (10 <sup>-3</sup> )	Max. Creep Strain Rate (10 <sup>-7</sup> /h)	Creep C.L. * MCR (10 <sup>-7</sup> )
A-5	13.7	88%	BromCCO2	12231*	Broken	89.722*	81.562*	3
B-4	13.7	88%	BromCCO2	8945*	Broken	90.136*	82.191*	8
K-7	13.8	86%	WaterCCO2	6.8*	Unbroken	94.158*	82.728*	1.080*
K-8	14.0	87%	WaterCCO2	0.07219*	Broken	100.226*	100.309*	741.600
K-6	14.0	87%	WaterCCO2	0.01190	Broken	79.219*	81.305*	2.027.200
K-5	14.1	88%	WaterCCO2	0.00614	Broken	37.256*	78.424*	4.204.400
K-1	14.2	88%	WaterCCO2	28.6*	1.2* Unbroken	93.042*	82.562*	241
H-3	14.5	90%	WaterCCO2	0.00669	Broken	62.775	52.038	5.162.400
K-4	14.5	89%	WaterCCO2	0.00384	Broken	87.092*	75.151*	5.448.800

示す。CO<sub>2</sub>の圧入は試験片の上端と下端に圧力差を生じさせることにより行った。孔隙流体の圧入置換終了後は、試験片上下端の圧力を所定圧9.8MPaに保持する。この状態で試験片は、周圧による時間依存の圧縮変形を生じ徐々に縮んでゆく。この後に実施するクリープ試験で、軸方向への差応力を生じさせたことによるクリープ変形となるべく区別するために、この周圧による圧縮変形速度が十分に小さく、もしくはこれ以上の圧縮変形速度の低下が見込めないような、ほぼ一定値に収束した状態になるまで待機したのちにクリープ試験を行った。試験片のセットアップからクリープ応力載荷までの準備期間は3~4週間を要した。

三軸クリープ試験では荷重速度一定で所定の軸荷重まで3秒で載荷し、その後軸荷重一定で保持した。なお、試験片が3次クリープを発現し破断に至らない場合でも、載荷ラム変位がみかけ上+10mmに達した段階で、十分な変形量に達したと見なして試験終了とした。孔隙流体の移動に関しては、孔隙率が30数%とそれなりに大きいことを考慮し、上下端からの排水条件として見かけ孔隙圧を試験中一定に保持した。載荷クリープ応力の設定は、CO<sub>2</sub>を圧入した三軸圧縮試験において得られた応力-ひずみ関係を基に設定した。CO<sub>2</sub>圧入試験片の最大差応力を16.1MPaとし、90%のクリープ差応力を14.5MPa、85%のクリープ差応力を13.7MPaとした。前年度までの実験で90%のクリープ差応力である14.5MPaにおいて、ごく短時間でクリープ破壊に至る例が得られたため、今年度は差応力を少しずつ減らしながら、より長いクリープ寿命のデータを得ることを目指した。また85%のクリープ差応力となる13.7MPaでは、破壊まで非常に長い時間を要することが分かっている。

表1に三軸クリープ試験結果を示す。CO<sub>2</sub>圧入試験片において、87~90%クリープ応力(+14.0~+14.5MPa)の試験で、10分未満の短時間の寿命ではあるがクリープ破壊に至るものが5例得られた。図1にクリープひずみ速度の経時変化を示す。このように両対数プロットを行うと、破断に至らない試験片も含めて1次クリープ領域でいわゆる対数則が見られる。またクリープ試験中に破断に至らない場合は、試験の途中からひずみ速度低下が速まるような、ある時点を経境にして2通りの対数則で構成されるような挙動が見られた。岩の場合に1次クリープ領域で対数則を示すことは多くの報告があり、この場合も岩盤材料として扱うことは妥当と考えられる。

長期の寿命評価は、相対的に短時間の力学試験結果を外挿して行うため、なるべく長時間で破断に至るクリープ試験データを得ることが望ましいが、これまでに10分を超えるようなクリープ寿命は得られていない。今後はより長寿命で破断に至る条件を検討しながら実験を継続する予定である。

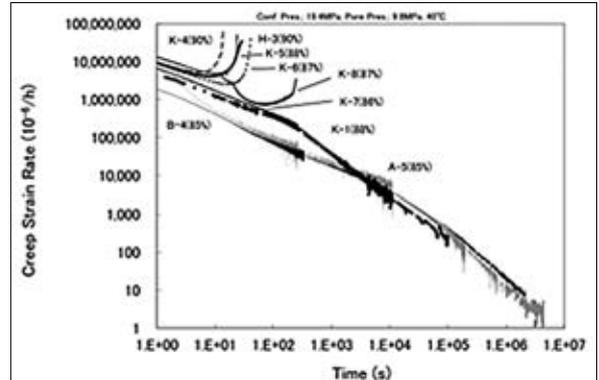


図1 クリープひずみ速度と経過時間

### 3.2. CO<sub>2</sub>地中貯留時における未固結堆積層の力学挙動評価に関する研究

超臨界状態のCO<sub>2</sub>を海底下の地層に圧入する場合、数値シミュレーション等により海底地盤内における流体の挙動を予測する必要がある。そのため、CO<sub>2</sub>貯留層の浸透率特性に関する知見は重要であるが、地層の浸透率は地盤の変形や圧密の影響を受けることが予測される。そこで、海底下のCO<sub>2</sub>貯留の対象として考えられている萌別層のコアサンプルを用いて周圧下における浸透率を測定した。

使用したコアサンプルは、シルト岩を主体とし、局部的に砂岩を伴う萌別層(深度1053.3 m付近)から採取したものである。供試体を圧力容器内に設置し、供試体および管内を水で飽和した後、供試体上端側の圧力は大気開放にした状態で供試体下端から水を圧入し、通水を行った。通水中、供試体下端側の管内水圧は一定に保ち、背圧シリンダのピストン変位および供試体の軸変位を測定した。背圧シリンダのピストン変位にシリンダ断面積を乗じることによって、圧入した水の体積が求まり、流速を計算できる。また、供試体の軸変位を供試体の初期高さで除すことにより、軸ひずみを計算できる。通水中の実験温度は20℃で一定に保った。供試体および管内の水飽和は、周圧0.3 MPaにて行った。その後の通水は周圧2 MPa、5 MPa、10 MPaにて行い、各周圧下における軸ひずみと浸透率を求めた。

図2に、実験により得られた浸透率と周圧との関係を示す。周圧の増加に伴って、浸透率は低下した。コアサンプルの原位置での有効応力に近いと思われる周圧10 MPaの場合では、浸透率は0.067 md (0.67 × 10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup>)であった。萌別層砂岩層の中では非常に浸透率が低く、初期間隙率の小さいサンプルであったと推測される。周圧の増加に伴い、供試体は等方圧縮され、軸ひずみが生じた。図2には、軸ひ

ずみと周圧との関係も示した。等方圧縮状態であるため、周圧の増加によって供試体内部の間隙が閉塞し、浸透率が低下したものと考えられる。

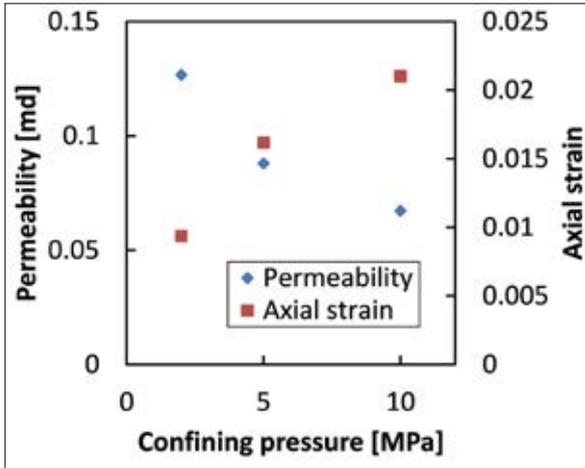


図2 浸透率および軸ひずみと周圧との関係

### 3.3. 坑井掘削の高効率化に関する研究

坑井掘削の高効率化を目的として、パーカッションビットの掘削性能評価試験を行っている。現在、パーカッションビットのチップ材料として、多結晶ダイヤモンド焼結体 (Polycrystalline Diamond Compact: PDC) が実用化されつつある (以下、PDCチップという)。図3にPDCチップの断面図を模式的に示す。PDCチップは、打撃による坑井掘削に対応すべく、耐衝撃性を向上させる多層構造 (チップ表面の多結晶ダイヤモンド層から内部の超硬合金基体に向かって、多結晶ダイヤモンドの配合量が段階的に減少する構造) となっている。PDCチップを有するパーカッションビット (以下、PDCパーカッションビットという)、ならびに、超硬合金 (WC-Co) チップを有する同形状・同寸法のパーカッションビット (以下、WC-Coパーカッションビットという) を用いて、沢入花崗岩 (一軸圧縮強度: 203 MPa (平均値)) および滝根花崗岩 (一軸圧縮強度: 253 MPa (参考値)) のロータリ・パーカッション掘削実験を行い、掘削性能を評価した。

ビットの直径は65 mmであり、図4に示すように、チップはフェース部に3個、ゲージ部に5個、合計8個配置した。チップは、根元の直径11 mm、先端部の曲率半径約6 mmのボタンタイプである。掘削条件は、ビット回転数75 rpm、ビット荷重約6.5 kN、掘削流量60 L/min (清水)、パーカッションドリルへの入力油圧約15.3 MPaとした。

図5に、掘削速度と掘削長との関係を示す。掘削開始時 (掘削長0 m) における掘削速度は、両パーカッションビットとも約14 cm/minであったが、掘削に伴う掘削速度の減少はWC-Coパーカッションビットの方が大きかった。WC-Coパーカッションビットは、掘削長20 m程度において、掘削速度が約6 cm/minまで低下し、ビットライフに達したのに対し、PDCパーカッションビットは、掘削長100

m程度に至っても、掘削速度が約10 cm/minであった。図6に、ゲージチップのハイトロス (高さの減少量) と掘削長との関係を示す。PDCパーカッションビットのチップの摩耗は、WC-Coパーカッションビットに比べて非常に小さいことがわかった。以上から、PDCパーカッションビットはWC-Coパーカッションビットに比べて、耐久性の面において格段に優れていることがわかった。

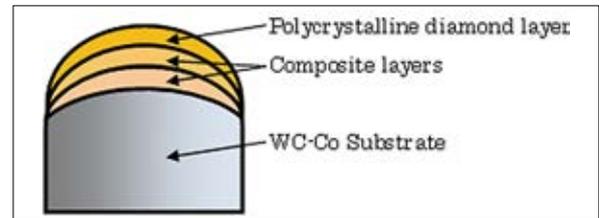


図3 PDCチップの断面図 (模式図)



図4 ビット上面図

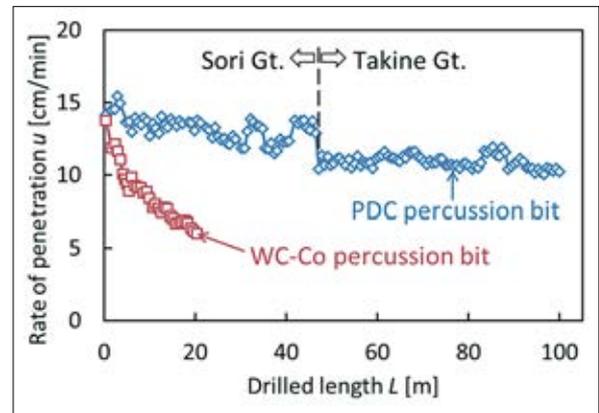


図5 掘削速度と掘削長との関係

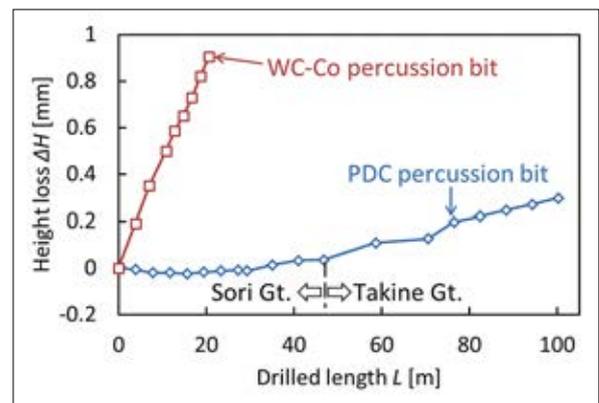


図6 ゲージチップのハイトロスと掘削長との関係

### 3.4. 多段階三軸圧縮試験

一般に岩石の内部摩擦角 $\phi$ や粘着力 $c$ を求めるには、封圧を変化させた複数回の三軸圧縮試験を行う必要がある。しかし、従来の試験方法に従った場合には1本の供試体を用いた1回の三軸圧縮試験では1個のピーク強度のデータしか得られない。そのため複数個のピーク強度のデータを得るためには、比較的に物理的性質が揃った複数個の供試体を準備し複数回の三軸圧縮試験を実行しなければならない。しかし、各種の建設現場工事等に先立つ、原位置調査ボーリング等から得られるボーリングコアから、供試体を作成する場合、地層が複雑な構造を有している現場から得られるボーリングコア等では、複数個の均質供試体を準備することは難しい。

そこで1本の供試体を用いた一回の試験で複数個のピーク強度を得る多段階三軸試験法と呼ばれる試験方法が有効であれば、非常に都合がよいと思われる。今年度、MTS社製岩石コンクリート試験機 Model815を用いて、試験機付属の試験制御データ収集ソフトウェア「TestStar II」のみを用いた試験制御で多段階三軸試験を試みた。図7は軸方向伸び計と周方向伸び計がセットされた供試体がMTS社製岩石コンクリート試験機にセットされた状態を示す写真である。

**試験方法** 今年度、Berea 砂岩試料 ( $\phi 50 \times L100 \text{mm}$ ) を用いて多段階三軸圧縮試験を実施した。封圧を5MPaから、10、15、20、25MPaまで5段階に変化させて载荷した。各封圧での荷重载荷に際して、その封圧でのピーク強度の判定は、ある時間での荷重に対して次の時間での荷重が、今回の三軸圧縮試験に用いた荷重変換器（ロードセル）の測定容量である500kNの0.1%に当たる0.5kNを下回った時点でピーク強度を超えたと判断して、次の封圧に上げて、次の段階の荷重载荷を行うという方法で行った。なお軸方向荷重の増加の制御方法としては、比較的多くの試験で使用されていて実績がある、周方向ひずみ速度一定制御方法を採用した。

**試験結果** 図8に示す荷重の時間変化のとおり、各封圧での载荷時間、いわゆるピーク強度に達するまでの時間にはばらつきが見られるものの、段階的な封圧の増加とピーク強度の検出、その後の封圧の増加とそれに続く軸荷重の载荷がスムーズに行われていることが分かる。図9に差応力と軸・周方向ひずみとの関係を示し、各封圧での载荷とピーク強度付近での供試体の挙動に不安定な挙動は見られず、周方向ひずみ速度一定制御による制御は成功していると考えられる。

ピーク強度と封圧との関係から一軸圧縮強度UCSが80.9MPaと求まる(図10)。モル円上でデータを示すと内部摩擦角 $\phi$ と粘着力 $c$ がそれぞれ $38^\circ$ と18MPaであることが分かる(図11)。

### 3.5. 注水誘発地震に関する研究

流体の地下深部圧入は地熱開発・シェールガス生

産・CO<sub>2</sub>地下貯留・工業廃水の地下処分などの分野で利用されている。近年、これらの産業アプリケー

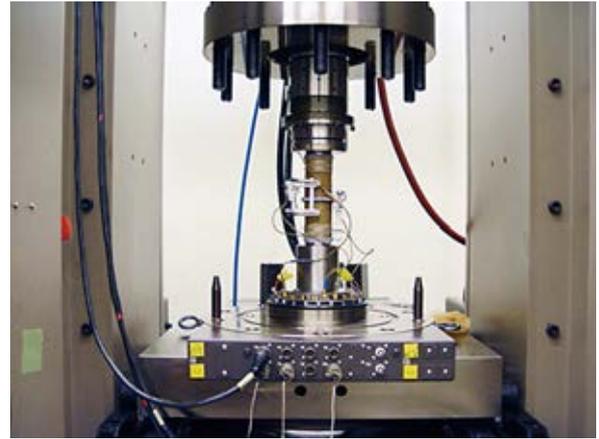


図7 軸方向伸び計と周方向伸び計がセットされた供試体がMTS社製岩石コンクリート試験機にセットされた状態。

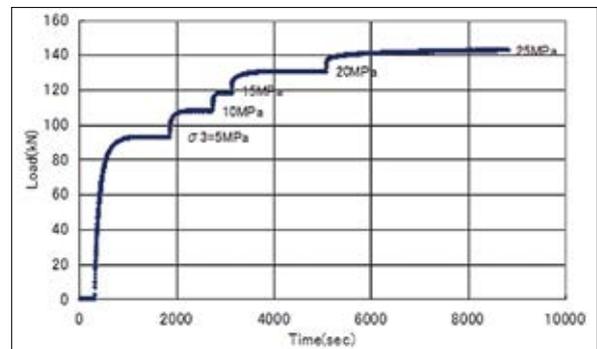


図8 差応力 vs. 時間

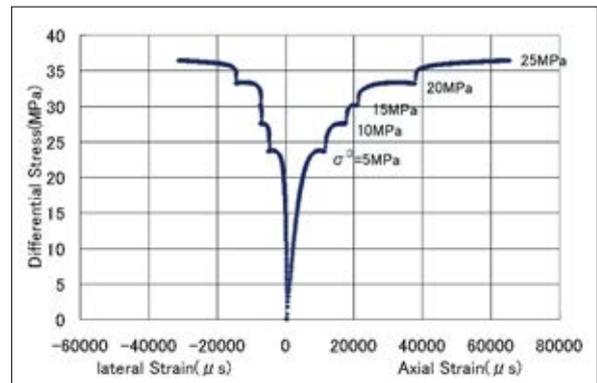


図9 差応力 vs. 軸・周方向ひずみ

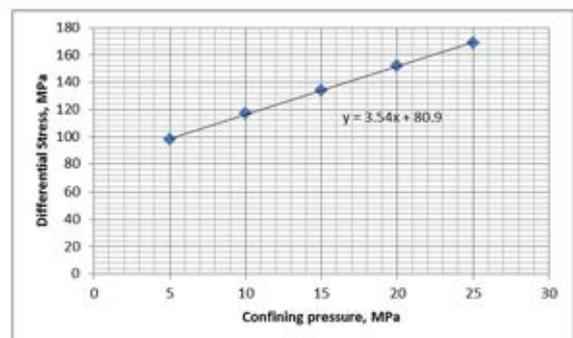


図10 多段階三軸試験結果

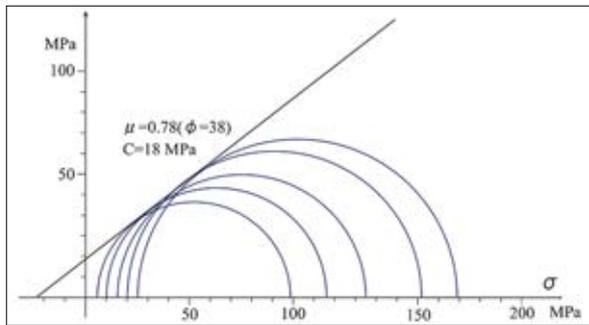


図11 多段階三軸試験で得るピーク強度による内部摩擦角 $\phi$ と粘着力 $c$ を求める

シヨンの促進に伴い注水と関連した誘発地震活動が顕著な増加傾向を示し、重要かつ緊急な課題となっている。マグニチュード5クラスの被害性誘発地震の例も数件報告された。熱応力、間隙圧拡散、岩盤や既存の亀裂・断層の破壊強度の低下等が注水誘発地震を支配する主要要素とされているが、注水誘発地震の発生メカニズムと被害性地震の発生条件がまだ解明されていないのが現状である。

中国内陸の中心部に位置する四川盆地は世界においても天然ガスの埋蔵量で有名であり、1千億トン以上の大規模ガス田を含め、多数の天然ガス田が発見された。1970年代から、ガス生産に伴う汚染水を断続的に枯渇ガス田に圧入した。四川盆地の西境界は有名な地震帯であるが、盆地の内部は天然地震活動が低く安定的な地域である。しかし、ガス田の注水活動に伴い、地震活動が多発し始めた。これまで、M5クラスの地震は3回、M4クラスは50回以上も観測され、世界でも有名なケースとなり、注水誘発地震の解明に重要なデータが蓄積されている (Lei et al. 2013c)。

本年度では、四川盆地から採集した砂岩・頁岩・石灰岩・苦灰岩等代表的な貯留システムの岩石試料を用いて三軸圧縮破壊・断層摩擦実験を実施した。四川盆地ガス田注水誘発地震の解明に資する実験結果を得た。例として、図12に三畳紀の石灰岩の実験結果を示す。全体に延性的な破壊挙動を示すが、その破壊過程に急な応力低下とそれに伴う微小破壊(AE)も観測された。一方、プレカンブリア紀の苦灰岩は多数の微小破壊と急な応力低下を示し、より脆性的な破壊挙動を有することが分かる(図13)。砂岩(ジュラ紀)の場合は、間隙率などに強く依存し延性から脆性まで様々な破壊挙動を示す。頁岩(プレカンブリア紀)の場合、堆積構造面の影響が強く、脆性的な破壊挙動を示す。

これらの実験結果は、四川盆地に注水誘発地震が多発することを理解するために重要である。ドロマイト、頁岩、およびドロマイト石灰岩などの主要なプリ三畳紀の堆積岩は、強度が高くて脆的な破壊挙動を示す。このような特性は、高レベルのリザーバ応力を維持し、地震発生に必要な条件である。

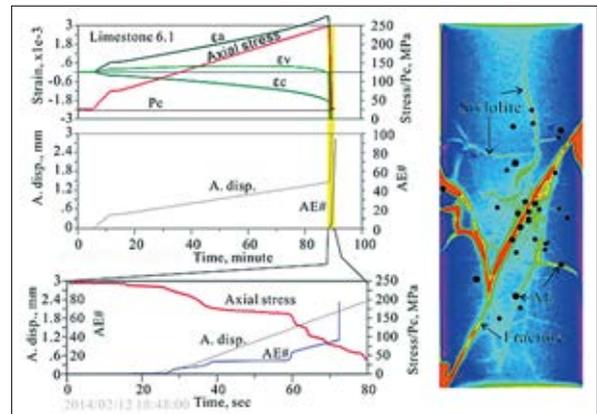


図12 石灰岩三軸圧縮破壊結果 軸応力・軸方向歪・周方向歪・体積歪・軸変位・AE(微小破壊)数の時間変化、破壊試料のCT画像とAE震源分布 (Lei 他2014)

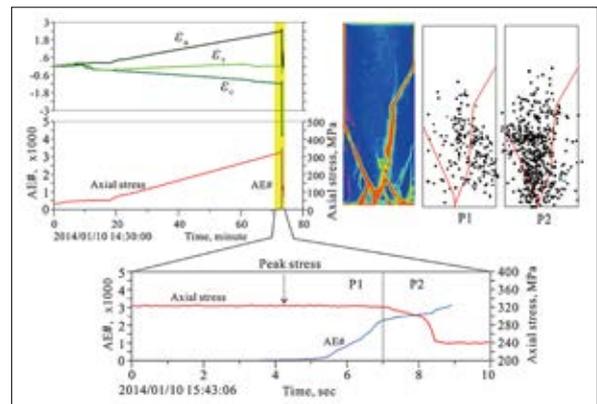


図13 苦灰岩三軸圧縮破壊結果 軸応力・軸方向歪・周方向歪・体積歪・軸変位・AE(微小破壊)数の時間変化、破壊試料のCT画像とAE震源分布 (Lei 他2014)

#### 4. 最近の主な研究成果

- 中村竹博・及川寧己・竹原 孝・高倉伸一・山口 勉 (2013) 三軸圧縮応力下でのCO<sub>2</sub>圧入による太田代層泥岩の力学特性の評価。Journal of MMIJ, 129, 440-446.
- Lei, X., et al. (2014). Role of immature faults in injection-induced seismicity in oil/gas reservoirs--A case study of the Sichuan Basin, China. Seismology and Geology (in Chinese) 36(3): 1-19.
- Lei, X., et al. (2013a). Inelastic triggering of the 2013 Mw6.6 Lushan earthquake by the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake. Seismology and Geology 35(2): 411-422.
- Lei, X., et al. (2013b). Fault formation in foliated rock – insights gained from a laboratory study. In Proc 8th Int Symp on Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSim8) (ed. Malovichko A, Malovichko D), Russia Saint-Peterburg-Moscow: 41-49.
- Lei, X., et al. (2013c). A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, southwestern Sichuan Basin, China. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 118(8):

4296-4311.

大野哲二・宮崎晋行・唐澤廣和・高倉伸一・Eko  
Akhmadi・松尾俊彦・寺倉稚晃・大橋忠一

(2014) PDC パーカッションビットの性能評価  
と掘削コストの試算. *Journal of MMIJ*, 130,  
465-472.

## 金沢城石垣（戸室石）の帯磁率調査 Magnetic susceptibility of stone walls of Kanazawa castle

長 秋雄（研究部門付き主任研究員）  
Akio Cho, Senior Researcher  
e-mail: akio.cho@aist.go.jp

### 1. はじめに

石川県金沢城調査研究所が2003年度から行ってきた金沢城石垣に使われた戸室石の石切丁場の調査研究では、遺構の実態把握とともに石切丁場に関する文献調査・民俗学的調査・地質調査等が行われた（富田，2013b）。筆者は、第2次調査（2008～2012年度）で、戸室石の帯磁率測定を分担し（長，2013）、2013年度以降も金沢城石垣の帯磁率調査を継続している。本報では、これまでの調査結果の概要を述べる。

### 2. 金沢城とその遺産群の価値

石川県と金沢市は2006年11月に世界遺産候補暫定リストの候補に「城下町金沢の文化遺産群と文化的景観」を共同提案し、戸室石石切丁場はその価値を構成する資産の一つと位置づけられている（富田，2013a）。

金沢城では今、北陸新幹線金沢開業の2015年春（3月14日）の完成を目指して、現存する「石川門」・2010年に復元整備された「河北門」とともに「金沢城三御門」と呼ばれた「橋爪門」の復元工事が行われている。二代藩主利長の正室（織田信長娘の永姫）が利長没後に居を構えた玉泉院丸跡では、地中に埋蔵されている庭園遺構を保存し、その上に絵図等を参考にした池や島などを再現し、あわせて背後にある意匠性に富んだ石垣群の修景や、庭園を回遊できる園路の整備、庭園の全景を眺められる休憩施設の建設などが行われている（石川県 HP より）。

### 3. 戸室石石切丁場跡

金沢城石垣に使われた戸室石の石切丁場跡は、金沢城から東南東約9kmに位置する戸室山とキゴ山（50万年前頃にできた安山岩溶岩ドーム）の周辺に、東西約3.5km・南北約3.0km、面積約660haの範囲に分布する。これまでの遺構調査で、丁場跡としてのまとまりは大小を含めて48ヵ所、確認した採掘地点は約1,500地点に達している（富田，2013c）。

### 4. 戸室石の色と帯磁率

戸室石は、その色調が青灰色のものは「青戸室石」、赤褐色のものは「赤戸室石」、これらの中間色のものは「ニタリ」と呼び分けられている（富田，2013b）。写真1に示すように、戸室石での青から赤までの色の違いは石基の色の違いによるものであ

る。金沢市湯谷原町の大きな露頭では、円頂丘の表面近くには赤戸室が、内部には青戸室が分布しており、赤戸室は溶岩の表面が空気に触れて鉄分が高温酸化した部分と考えられている（石渡，2001）。

現在、多くの石垣表面は地衣類で覆われているために、石垣創建時の戸室石本来の色を見ることは難しい。本丸附段に残る三十間長屋の石垣では、その色調が残り、創建時の色彩を用いた意匠を見ることがができる。

三十間長屋石垣での帯磁率測定結果では、赤褐色のものの帯磁率は $8 \times 10^{-3} \text{SI}$ 以下であり、青灰色のものの帯磁率は $12 \times 10^{-3} \text{SI}$ 以上であった（長，2013）。

帯磁率 $2 \times 10^{-3} \text{SI}$

帯磁率 $16 \times 10^{-3} \text{SI}$



写真1 戸室石の色と帯磁率の一例

### 5. 各期石垣での帯磁率の頻度分布

金沢城では、天正11年（1583）の前田利家入城以降、二代利長、三代利常の頃まで大規模な石垣整備が行われた。その後も、地震・火災等の災害からの修復で、新たな様式を創出しつつ近世後半まで石垣普請は継続した（滝川・富田，2012）。全7期に分類される多種多様な石垣が残り、「石垣の博物館」と呼ばれている。

各期石垣の特徴を、滝川・富田（2012）から抜粋する。

#### 1期（文禄年間1592年頃，利家）

隅角：算木積みは控えの長短がそろわないものがあり、割石主体。

築石：乱積み傾向，自然石主体。

#### 2期古段階（慶長年間前半頃，利長）

隅角：算木積みは控えの長短の振り分けが明確になり、ノミ調整加工が増える。

築石：乱積み傾向，割石主体。

#### 2期新段階（慶長年間後半1610年頃，利常）

隅角：形状の方形化進み，角脇石が定着する。粗加

工石.

築石：乱積み傾向，割石主体，刻印が増加.

3期（元和年間1620年頃，利常）

隅角：築石部と明瞭に乖離，切石.

築石：乱積み傾向，粗加工石（自然面・割面の残るもの多い），小型刻印が多い.

4期（寛永年間頃1624～1644，利常）

隅角：切石（やや粗い調整のものもあり）

築石：明瞭な布積みが出現する．粗加工石．大型刻印が多い.

切石積みが出現する.

5期（寛文～元禄，1661～1704，綱紀）

隅角：角尻石伴う．稜線の縁取り加工，切石（精緻）.

築石：布積みが一般的となる．粗加工石（規格化進む）.

切石積みの様式が多様化する（四方積，布築積，乱積，色紙短冊積，金場取残積など）.

右図は各期石垣での帯磁率の頻度分布の一例である．頻度分布の違いは，採石場所の変遷や意匠を示していると考えられる.

1期では低帯磁率（赤戸室石）の比率が多い．これは，戸室山西部の岩屑なだれ堆積物分布域で，強度が小さいために石垣用材に適した大きさまでに破碎した（破碎し易かった）赤戸室石の自然石が採集されたためであろう.

割石や粗加工石を使用する2期以降では，赤戸室石の比率が低下し，青戸室石の比率が多くなる．石切丁場は戸室山の山麓や山腹とキゴ山へと移動した（富田，2013c）.

切石積みの三十間長屋石垣では，比率がほぼ同様であることから，意識的に赤から青までの色彩を振り分けた意匠性を認めることができる．玉泉院丸の色紙短冊積み石垣の周りでは，裾の石垣では比率はほぼ同様であったが，その上の三段をなす3石垣では帯磁率 $3 \times 10^{-3}$ SI以下の赤戸室石が多用（約半数）されていた（長，2013）.

## 引用文献

長 秋雄（2013），金沢城史料叢書18「戸室石切丁場確認調査報告書」，216-228.

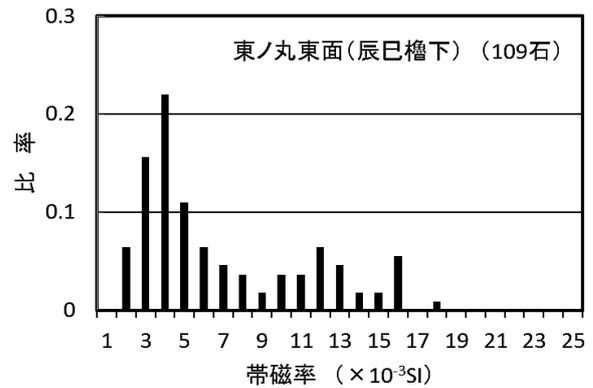
石渡 明（2001），日曜の地学6，築地書館，92-97.

滝川重徳・富田和気夫（2012），金沢城史料叢書16「城郭石垣の技術と組織」，237-314.

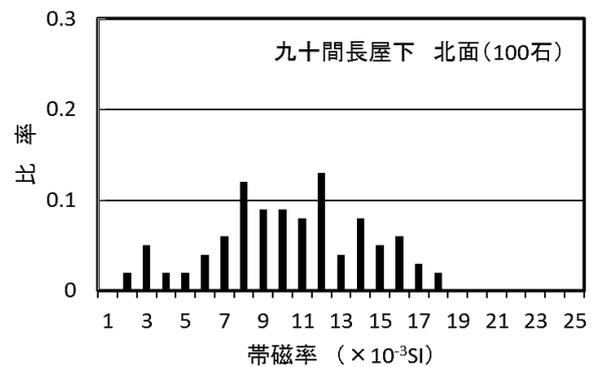
富田和気夫（2013a），金沢城史料叢書18「戸室石切丁場確認調査報告書Ⅱ」，1-4.

富田和気夫（2013b），金沢城史料叢書18「戸室石切丁場確認調査報告書Ⅱ」5-12.

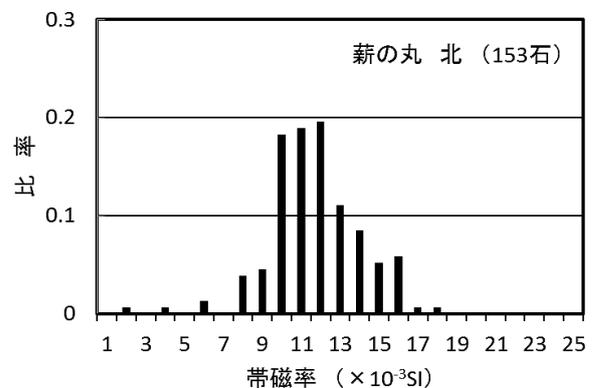
富田和気夫（2013c）金沢城史料叢書18「戸室石切丁場確認調査報告書Ⅱ」，20-36.



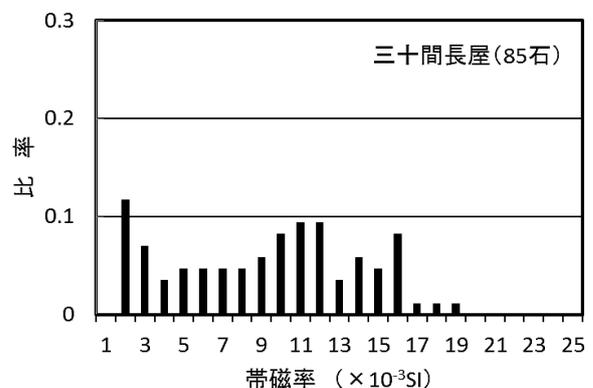
1期石垣での帯磁率の頻度分布の例



2期新段階石垣での帯磁率の頻度分布の例



4期石垣での帯磁率の頻度分布の例



切石積み石垣での帯磁率の頻度分布の例

地圏資源環境研究部門成果報告 2014  
(GREEN REPORT 2014)  
AIST04-C00014-13

---

平成 26 年 12 月 9 日発行

編集：独立行政法人産業技術総合研究所  
地圏資源環境研究部門

発行者：中尾信典

〒305-8567 つくば市東 1-1-1 (第七事業所) TEL 029-861-3633

---



Progress of the Geosphere Researches:  
Fruits in the 3rd Period and Evolution for the 4th Period of the Institute.