

まえがき



地圏資源環境研究部門長
Director, the Institute for Geo-Resources and Environment, AIST
矢野雄策
Dr. Yusaku Yano

地圏資源環境研究部門の成果報告会は、今年で第9回目を迎えました。今回の報告会のテーマは「地圏に関する基盤情報の整備と提供」です。当部門は地圏に眠る天然資源の探査・評価・開発、地圏を構成する地層を利用した地層処分や地中貯留の可能性と安全性の評価、土壌汚染等に関する地圏の環境の保全等を研究対象としています。これらの研究を通じて、新たな資源の発見や環境に関する知見の獲得を行うと同時に、地圏の資源や環境についての基本的な調査図類やデータを社会に提供してゆくことも当部門の大きなミッションの一つです。当部門ではこのような基盤的研究を通じて、鉱物資源図、燃料資源地質図、日本の熱水系アトラス、水文環境図、表層土壌環境評価基本図など、基盤情報の整備を着実に実施しております。今回の成果報告会はこのような側面から当部門の研究をご紹介します。

平成22年度から独立行政法人産業技術総合研究所は第3期中期目標期間（5年間）に入りました。第3期における当部門の重点研究課題（ユニット戦略課題）は、以下の7つです。

- 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) 地質環境の隔離性能に関する評価技術の開発
- 7) 地圏の資源環境に関する知的基盤の構築

重点課題の1)は地圏環境の保全、2)、3)は地圏環境の利用、4)、5)は地圏資源の探査・評価・開発、6)は地層処分の安全規制支援研究、そして7)は1)から6)までの研究に基づいた基盤情報の整備です。今回の成果報告会でご紹介する内容はこの7)の成果を中心に、関連する1)から6)までの成果も含んでおります。

地圏の資源と環境に関する社会のニーズは、迅速な対応を迫られる喫緊の課題から、大きく長期的な課題や体制の問題までがあると研究部門として認識し、対応を進めていると

ころです。例えばレアメタル資源探査の問題は、現在の先端産業を支える資源の問題であり、喫緊の課題と認識して、研究の推進、予算の確保、人員体制の増強を進めているところです。社会問題として深刻化しつつある土壤汚染の問題、あるいは地下水確保の問題等も喫緊の課題です。また一方では、資源全般、地層処分や地中貯留などの研究は主として国の要請に沿って、長期的に取り組んでいるところです。

このような研究に関して、当部門では常勤研究職員約80名、客員研究員や契約職員を含めて総人員約180名の体制で研究を進めています。限られた研究ポテンシャルですが、大きな成果を得るためには社会のニーズを良く把握し、外部との連携・協力を進めてゆくことが重要と考えています。

部門成果報告会では、メインテーマに関する講演以外に、各研究グループや個人の研究成果をより詳しく知っていただくために、ポスターセッションも例年同様設け、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思います。この報告会は、部門の成果をお知りいただくと同時に、皆様から直接、貴重なお意見を伺う重要な機会と位置づけており、毎年定期的を開催しております。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。

第 7 回 (2008 年) 地圏資源環境研究部門研究成果報告会 プログラム

	頁
13:00-13:20 : 地圏資源環境研究部門研究紹介 矢野 雄策 (研究部門長)	1
研究発表	
特集：持続可能な社会を目指す地圏資源研究	
- 環境を意識したアプローチ -	
13:20-13:50 : 持続可能な地下水利用と環境の維持	
丸井敦尚 (地下水研究グループ)	7
13:50-14:20 : 地下微生物の天然ガス生成ポテンシャル	
坂田将・吉岡秀佳・持丸華子 (地圏微生物研究グループ)	9
14:20-14:50 : 再評価されつつある地熱開発ニーズに応じて	
村岡洋文 (地熱資源研究グループ)	13
14:50-15:30 : ポスターセッション	
(発表：各研究グループ，個別研究課題)	
15:30-16:20 : 招待講演「持続型炭素循環システム」	
佐藤光三 (東京大学 エネルギー・資源フロンティアセンター)	17
16:20-16:50 : 鉱物資源研究グループの希土類資源調査の現状	
渡辺寧・実松健造・守山武 (鉱物資源研究グループ)	19
16:50-17:15 : ポスターセッション	
(発表：各研究グループ，個別研究課題)	
17:15-19:00 : 懇親会 (ポスター会場)	

ポスターセッション

(研究グループ発表)

地下水研究グループの紹介	丸井 敦尚	25
地圏環境評価研究グループの紹介	駒井 武	27
CO ₂ 地中貯留研究グループの紹介	當舎 利行	29
地圏環境システム研究グループの紹介	高倉 伸一	33
物理探査研究グループの紹介	内田 利弘	37
地圏化学研究グループの紹介	佐脇 貴幸	41
地圏微生物研究グループの紹介	坂田 将	45
燃料資源地質研究グループの紹介	棚橋 学	47
地熱資源研究グループの紹介	村岡 洋文	51
鉱物資源研究グループの紹介	渡辺 寧	55
地質特性研究グループの紹介	伊藤 一誠	59
地下環境機能研究グループの紹介	竹野 直人	61

(個人発表)

大気を水資源とした造水技術の開発に関する取り組み *		
駒井 武・杉田 創・大石昭二(環境管理技術研究部門)・山崎淳司(早稲田大学・理工学術院)		
鉱物油に起因する土壤汚染のリスク評価を目的とした油-水混相流動挙動に関する研究 *		
坂本靖英・西脇淳子・川辺能成・駒井 武		

Natural microbial attenuation of tetrachloroethylene(TCE) trapped in clayey sediments*

Mio TAKEUCHI · Yoshishige KAWABE · Eiji WATANABE · Toshio OIWA ·
Manabu TAKAHASHI · Kenji NANBA · Yoichi KAMAGATA · Satoshi HANADA ·
Maki · SUGIHARA · Takeshi KOMAI

高密度3次元電気探査とダイレクトプッシュ技術を用いた油汚染地区の探査*

神宮寺元治 · 横田俊之 · 光畑裕司 · 内田利弘

石油関連施設跡地における三次元地中レーダ探査適用研究*

横田俊之 · 神宮寺元治 · 中島善人 · 光畑裕司 · 内田利弘 · 駒井武 (産総研)

自然エネルギーを用いた重金属汚染浄化に関する研究*

張銘 · 小野暁 (ニュージェック) · 澤田章 (エヌエス環境 (株)) ·
駒井武 · 丸茂克美 (地質情報) · 杉田創

Potential methane production in sediments from the Cascadia Margin, IODP.Expedition 311*

吉岡秀佳 · 東陽介 (生物機能工学研究部門) ·

中村孝道 (生物機能工学研究部門) · 丸山明彦 (生物機能工学研究部門) · 坂田将

Methanogenic archaeal diversity and isolation in natural gas field*

持丸華子 · 吉岡秀佳 · 玉木秀幸 (生物機能工学研究部門) ·

坂田将 · 鎌田洋一 (ゲノムファクトリー研究部門)

関東平野下に賦存する可粘性天然ガスについて*

金子信行 · 佐脇貴幸 · 棚橋学

南関東ガス田の鉱床成因モデル

– 前弧域での微生物起源メタンとヨウ素の濃集に関する地質学的・地球化学的制約 –

金子信行

土壌中に存在するナノ物質をもとにした吸着式エネルギーシステム用高性能吸着剤の開発*

鈴木正哉 · 月村勝宏

TRU 廃棄物処理における放射性ヨウ素の固定化*

鈴木正哉 · 月村勝宏

Geochemical reaction modeling for ferrihydrite nano-particles in the Lake Karachai area, Russia*

Katsuhiko Tsukimura, Masaya Suzuki, Yohei Suzuki

熱-水-応力-化学-微生物統合連成解析：地層処分から地中貯留まで*

李琦 · 伊藤一誠

海底電気・電磁探査法モデリング技術の開発*

光畑裕司 · 上田匠 · 内田利弘

幌延沿岸域における物理探査研究プロジェクトについて*

内田利弘 · 光畑裕司 · 上田匠 · 安藤誠 · 丸井敦尚 · 楠瀬勤一郎

地盤振動特性を考慮した戸建て住宅の環境振動評価*

国松直

一般帯水層 CO₂ 地中貯留での地化学トラッピング：東京湾岸モデルの検討

奥山康子 · 徂徠正夫 · 柳澤教雄 · 佐々木宗建 · 戸高法文 (J-Power)

東京湾周辺地域における地下水の流動ならびに環境の変化*

宮越昭暢 · 林 武司 (秋田大学)

X線CTを用いた多孔質帯水層の拡散特性の異方性の評価*

中島善人 · 紙谷進 · 中野司 (地質情報研究部門)

地熱井セメントの物性試験とケーシングセメントの接着強度試験*

唐澤廣和 · 及川寧己 · 天満則夫 · 竹原孝 · 林一夫 · 須藤祐子 (東北大) ·

佐久間澄夫 (地熱エンジニアリング)

海洋プレート斜め沈み込みの簡易モデル化と数値シミュレーション：手法と応用

茂野博

炭酸カルシウムスケール処理における高周波電気分解装置の適用

柳澤教雄・松村高宏（株式会社レイケン）

「濁川型カルデラ」の再検討*

水垣桂子・萬年一剛（神奈川県温泉地学研究所）

都市部における地中熱ヒートポンプシステムの導入に係る環境評価*

今泉博之・天満則夫・安川香澄・内田洋平・高橋保盛

ラオス南部、玄武岩ラテライトの希土類資源*

実松健造・守山武・渡辺寧

インド東部ベルディ燐灰石鉱床の Ta-Nb 鉱化作用

守山武・石原舜三・Panigrahi, M.K.・Pandit, D.・渡辺寧

* 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

持続可能な地下水利用と環境の維持 Sustainable Groundwater Use and Retaining Environment

丸井 敦尚 (地下水研究 RG グループ長)

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

1. はじめに

エコに関する意識の高まりは、今や老若男女すべてに浸透している。この中で“水”に対する意識は最強で、「水のリサイクル」や「水の安全」は今や経済性を超えて担保されなくてはならないものの一つである。さらに、最近では食物の産地を確定するために水の同位体組成までも使われるようになってきた。「エコで安心・安全なライフライン資源」というのが“水”に求められる姿なのであろう。

2. 持続可能な地下水利用

かつて、持続可能な地下水利用とは、地下水障害を起こさない地下水の利用と考えられてきた。高度経済成長期より、地盤沈下・地下水塩水化・地下水汚染が3大地下水障害とされてきた。揚水を規制する工業用水法や水質を守る水質汚濁防止法など数々の法律や条令で規制され、地下水が維持されてきた。

近年になって、“持続可能”の意味が少しずつ変化している。単に地下水障害を起こさなければ良いのではなく、積極的に地下水涵養を助けその状態を健全に保つこと、いわば「迷惑をかけなければ良い」から「保護する」へグレード・アップしている。具体的には、植林活動を通して二酸化炭素を減少させながら、同時に地下水の“水育”を実践している団体も出てきた。排出権取引などを利用し、さらにはバーチャル・ウォーター消費さえも減らすことで“エコ”する動きが盛んである。

地下水の管理技術はさらに先を進んでいる。CCOP(2008)にもわかるとおり、“地下水管理”

という言葉の意味する技術には、先進国と途上国の間でかなりの差異がある。例えば PNG では「地下水管理とは地下水資源を発見すること」であり、ベトナムやカンボジアでは「浅層の水質汚染」、インドネシアでは「地盤沈下のための観測」、中国では「地盤沈下の防止に向けた地下水利用規制」、韓国では「リアルタイムの地下水モニタリング」のように少しずつ変化している。一方、わが国では茨城県において、大規模工事の際に安全性確保のため地下水の流れをコントロールする(一時的に流れの方向を変化させる)管理までもが行われるようになってきた。

近代的な大規模工場では地下水や河川水を利用するが 95%以上は元に戻して(リサイクルして)いる。まさにこれと同様に、これからの地下水利用には、地下水のうち必要な要素のみを利用し、残りを自然に戻す(例えば地中熱利用に代表される使い方)が求められよう。さらに、地下水を水資源として利用する場合には、気候の変化や流域の水循環を考慮してうえで、地下水涵養を促進させ(自分の造った)水を使う方向になろう。この意味で、求める水質や水量が何処に位置するかを三次元的に捉え、保護・開発する技術を確保しなくてはならない。現状で行われている“流域規模の地下水分布に対する理解と流動量を超えない地下水開発”をさらに進化させ、持続可能な地下水利用する方策を確保しなくてはならない。本報告では東海村などの好例を紹介する。

3. 環境因子としての地下水

温暖化に代表される地球環境の変化は各所に

現れている。例えば公園の湧き水が枯渇したり、一方ではトンネルからの流出水が止められないほどに増えてみたりしている。まるで降水の分布が局所化し、水のバランス変化に対応しているようでもある。さらに、地下水環境に関する変化は、人口密集地からより広域へ、より深部へと三次元的に拡大していつているように見える。

環境を阻害しない地下水の利活用には、先に述べた“造水”に加えて地域環境が必要とする“水のあり方”が問われる。例えば「山葵田には冷清水」である。環境が求める水を涵養してあげることが肝要である。そのためには、帯水層の管理が重要である。地質から見た平野の歴史や都市発達の歴史と同様に地下水にも歴史(水質変化)が存在する。水文学的に言えば、地下水質が帯水層内の水質形成メカニズムを超えない範囲の涵養と管理をすることである。

本報告では、産総研が実施してきた地下水情報の集積や過去の帯水層情報、さらには全国規模の地下水賦存量情報などを例示して紹介する。これにより、今後必要とされる地域の地下水のあり方や抜け落ち情報などが明確化されると考える。

4. おわりに

環境を維持できる範囲での地下水の利用、利用した地下水相当量の涵養と造水、これが今後の健全な地下水利用になろう。そのためには地球規模の環境変化を考慮した、換言すれば時間変化を考慮した、地下水(帯水層)管理が求められる。現状では地下水を物理的にコントロールして流動方向を変えるところまでは可能であるが、健全な管理のため更なる帯水層の理解と安全性の確保が必要である。

参考文献

A. Marui(Editor):Groundwater Assessment and Control in the CCOP Region, Geological Survey of Japan Interim Report No. 45, pp42, 2008. Oct.,

地下微生物の天然ガス生成ポテンシャル

Natural gas production potential of subsurface microbes

地圏微生物研究グループ: 坂田 将 (グループ長), 吉岡秀佳, 持丸華子

Geomicrobiology Research Group: Susumu Sakata (Leader), Hideyoshi Yoshioka and Hanako Mochimaru

Phone: 029-861-3898, e-mail: su-sakata@aist.go.jp

1. はじめに

地下微生物は堆積物や堆積岩中の有機物を嫌氣的に分解して、二酸化炭素とともにメタンを生成する。このプロセスは天然ガス資源の形成に重要な役割を果たしている。世界の天然ガス資源の少なくとも2割は地下微生物が生成したものと考えられており、国産天然ガスの約18%を占める水溶性天然ガス、将来の資源化が期待される南海トラフの海底ガスハイドレートも微生物起源である。このような天然ガス資源の探鉱、開発を効率的に進めるためには、地下微生物のメタン生成の実態（どこで、どの位の速度でメタンを生成しているのか）とその支配因子を解明することが必要である。地圏資源環境研究部門では部門重点研究課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」に関する研究の一環で、地球化学的、微生物学的手法によって地下微生物の天然ガス生成ポテンシャルを評価する研究を進めており、これまでの研究成果について概説する。

2. 天然ガス生成ポテンシャルの評価手法

地下微生物の天然ガス生成ポテンシャルを評価する直接的な方法は培養である。培養法は、地下から採取される試料を窒素雰囲気中で容器内に密閉してから、恒温装置で原位置の温度に保ち、ヘッドスペースのメタン濃度の経時変化を測定することによって、メタン生成量（積算量）や生成速度を評価する方法である。試料は陸海域において掘削されるコア（堆積物・堆積岩）や油ガス田の坑井から採取される地層水、スラッジ（砂質沈殿物）などが用いられる。当研究部門では、長期培養法とラジオトレーサー法という異なる培養法を用いている。

長期培養法は、バルクの試料をメタン生成が停止するまで（多くの場合100日以上）培養し、

ヘッドスペースのガス分析によってメタンの積算生成量を測定する方法である。堆積物・堆積岩試料の場合は現地の地層水や人工海水を添加し、スラリー状にする。生成されるメタンの安定同位体比を測定することや、培養に伴う有機物組成の変化を調べることも可能である。

ラジオトレーサー法は、微生物が特定の原料物質からメタンを生成するプロセスを高感度に検出するため、 ^{14}C でラベル化した基質を試料に添加して培養する方法である。堆積物や未固結の堆積岩試料の場合は、スラリー状にせず、非破壊（約 5cm^3 のサブコア）で培養する。 ^{14}C 基質をシリンジでサブコアの中心部に注入し、嫌気バッグに封入した状態で恒温培養する。比較的短期間（通常、数日から2週間）、検体ごとに異なる期間培養したのち、水酸化ナトリウム水溶液を含むバイアル中に封入して培養を停止する。ヘッドスペースガスをメタン酸化ライン（図1）に導入して、生成したメタンを二酸化炭素に変換し、これをアミン溶液にトラップして、液体シンチレーションカウンターで放射能を測定する。一日あたり生成されるメタンの放射能を評価し、最初に添加した基質の放射能に対す



図1 ヘッドスペースガス中の CH_4 を CO_2 に変換しトラップするためのメタン酸化ライン

る割合（回転率）を求める。これに試料中の基質濃度を乗じることで、この基質からのメタン生成速度を評価できる。ラジオトレーサー法は、添加する基質濃度が低く、短期間に非破壊の培養で評価されるため、自然条件下のメタン生成速度を推定する方法として極めて優れている。

培養を行わず、試料中に生息するメタン生成古細菌に特徴的な分子を検出、定量することも天然ガス生成ポテンシャルを評価する方法として有効である。これまでの研究では、原核生物の分類に適した 16S rRNA 遺伝子やメタン生成古細菌に特徴的な機能遺伝子である *mcrA* (Methyl-Coenzyme M Reductase Alpha-subunit) などの核酸や、メタン生成古細菌に特徴的な補酵素である F₄₂₀ などがターゲットとなっている。当研究部門では、特に地下から採取される堆積物・堆積岩試料中のメタン生成古細菌を高感度で検出するために、特徴的なエーテル脂質成分であるヒドロキシアキオールを測定することが有効と考えた。分析法の検討を進めた結果、生息中のメタン生成古細菌に特徴的な非修飾極性ヒドロキシアキオールをガスクロマトグラフで分析する方法を確立した（図 2）。

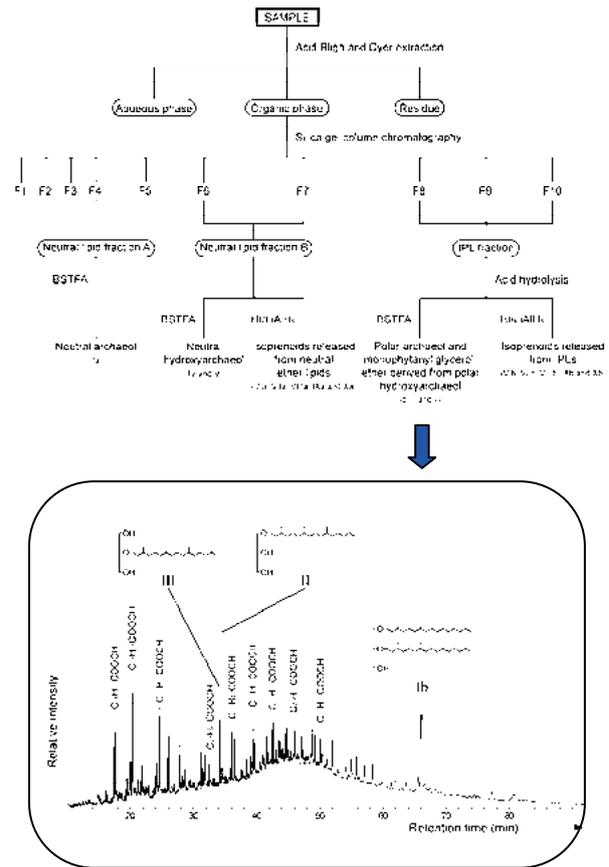


図 2 非修飾極性ヒドロキシアキオールを、定量的にモノフィタニルグリセロールエーテルに変換しガスクロマトグラフで分析する方法 (Oba et al., 2006)

3. 天然ガス生成ポテンシャルの評価結果

3. 1. 海底微生物

海底微生物の天然ガス生成ポテンシャルについては、特にガスハイドレートの成因を解明する目的で、国内外で研究が進められている。当部門でも MH21 の一環で東部南海トラフから採取されたコア試料を対象として、また IODP の Exp. 311 においてカスカディアマージンから採取されたコア試料を対象として、地下微生物の天然ガス生成ポテンシャルを評価する研究を進めている。

カスカディアマージンでは、ハイドレートが分布するサイトから採取された深度 0~300m のコア試料について、ラジオトレーサー法、長期培養法で天然ガス生成ポテンシャルを評価した。ラジオトレーサー法では、二酸化炭素と酢酸からのメタン生成活性が検出され、二酸化炭素還元経路のメタン生成速度が酢酸分解経路のメタン生成速度より大きく、また表層近くよりもガスハイドレートの分布している深部においてメタン生成速度が大きい傾向が認められた（図 3）。地下微生物の分布に関しては、一般に地表付近で多く、深度とともに急減に減少すると考えられているが、カスカディアマージンの

海底におけるメタン生成微生物の深度分布の傾向はこれとは異なるものと推定された。長期培養法では、66 試料中 47 試料でメタン生成を確認できた。500 日経過してもメタン生成が継続している試料があり、現在も培養を継続している。

東部南海トラフでは、平成 15 年度基礎試錐「東海沖-熊野灘」で得られたコア堆積物中の非修飾極性ヒドロキシアキオール（生息中のメタン生成古細菌に特徴的な脂質成分）を測定し、深度を問わずほとんどの試料（最深 381m）からこの物質を検出した。ヒドロキシアキオールはこれまでメタン冷湧水サイトの表層堆積物から検出されているものの、深部堆積物から検出された例はない。データ解析の結果、堆積物中のメタン生成古細菌の分布が深度よりも有機物の総量に強く支配されることが推定され、ガスハイドレートのメタン生成の場が浅部堆積物に限定されない可能性が示された。ラジオトレー

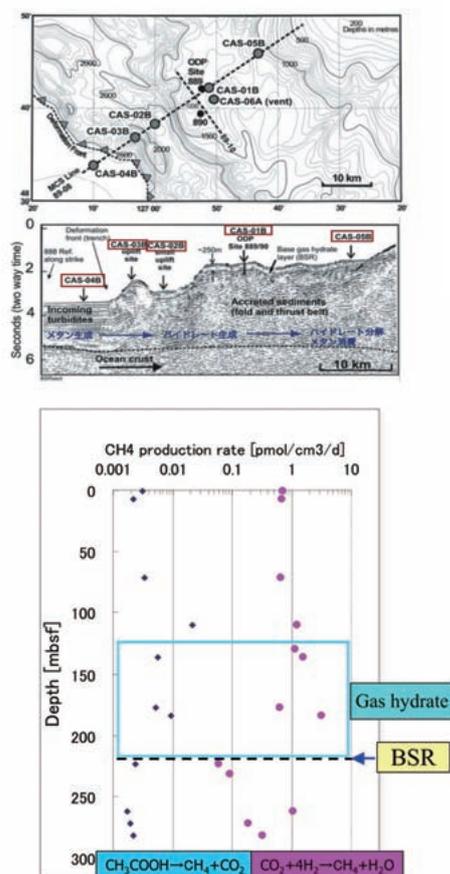


図3 カスカディアマージンの海底掘削 (CAS-01B) で採取されたコア堆積物のメタン生成速度 (ラジオトレーサー法で評価した値) の深度分布

ラジオトレーサー法で評価されたメタン生成速度は、表層付近の堆積物で低く、ガスハイドレートを含む層とそれ以深で高い傾向が見いだされた。メタン生成速度の深度分布はヒドロキシアークオーラの深度分布と整合的であった。

3. 2. 水溶性ガス田微生物

当研究部門では日本各地の水溶性ガス田のガスと地層水 (ガス付随水) の地化学分析を行っており、そのデータから千葉県や新潟県の水溶性天然ガスを微生物起源と評価している (金子ら, 2002)。またこれらのガス田のガス付随水中にメタン生成古細菌が生息していることを見だし、その詳細を解明する研究を進めている。これまでに、新潟県のガス付随水には多様性の低い好熱性の水素利用メタン生成古細菌が全菌数の 10% を占めて存在していることや、千葉県の水溶性天然ガス付随水には菌数が少ないながらも、基質利用性、菌種とも非常に多様なメタン生成古細菌が存在していることを見いだした (Mochimaru et al., 2007a,b)。また集積培養の結果、

メチル化合物を基質とする新種のメタン生成古細菌の分離にも成功している (Mochimaru et al., 2008)。天然ガス生成ポテンシャルについては、水溶性ガス田のコア堆積岩やスラッジを培養してポテンシャルを評価する研究を進めており、これまで以下の知見を得ている。

長期培養法では、コア堆積岩やスラッジを同じガス田の付随水とともにバイアルに封入し、スラリー状にして培養を行った。図4は千葉県の水溶性ガス田のコア試料の長期培養の結果を示しており、100日から300日経過してからメタン生成が急激に起こり、その後100日以内でメタン生成が停止している。コアやスラッジの培養で生成するメタンの積算量は、炭素量換算で試料中の全有機物の6%から20%にも相当する。このことは、地質時代 (新第三紀) の堆積岩であっても微生物の天然ガス生成ポテンシャルが高い可能性を示しており、微生物が利用しうる有機物が多く残されていることを意味している。ロックエバル分析の結果、この試料に含まれる有機物はタイプ III に分類され、高等植物由来のケロジェンを多く含むと推定された。また脂質分析の結果、*n*-アルカンと脂肪酸が多く検出された。これらの一部がメタン生成に利用された可能性がある。

ラジオトレーサー法では水溶性ガス田のスラッジ、コアとも高いメタン生成速度が検出され、特にスラッジでは $10^4 \text{ pmol cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$ という高いメタン生成速度 (二酸化炭素還元経路) が得られた。コアのメタン生成速度は、深度や岩相によって大きな差があるものの、すべての試料で二酸化炭素還元経路によるメタン生成速度が酢酸分解経路によるメタン生成速度よりも高い傾向が認められた。このことは、水溶性天然ガス中のメタンの安定炭素・水素同位体比から推定される生成経路 (金子ら, 2002) と調和的である。

3. 3. 油層微生物

原油が油層内で生分解を受けることは古くから知られており、近年その分解産物としてメタンができる可能性も示唆されている (Head et al., 2003)。また汽水環境の堆積物など、非油層環境の堆積物から採取された微生物が、アルカン等の石油炭化水素を分解してメタンを生成することも報告されている (Jones et al., 2007)。このような研究は、微生物を利用して枯渇油田の地下に残留する原油を原位置で天然ガスに変換し、

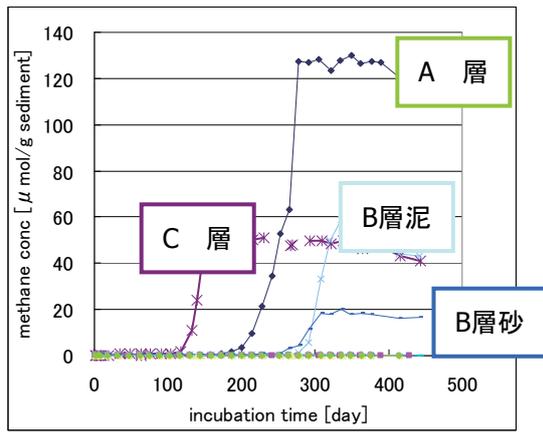


図4 千葉県水溶性ガス田のコア堆積岩+ガス付随水の長期培養に伴うメタン生成

クリーンなエネルギー資源として回収する革新的技術開発の可能性を示すものとして注目されている。しかしながら、油層中の微生物が石油炭化水素を分解しメタンを生成するポテンシャルを有することを培養で実証した例はなく、微生物の活動の実態はほとんど未解明である。当研究部門では国内油田の原油、ガス、油層水の地化学的パラメーターを測定して微生物活動に関する情報を抽出するとともに、ラジオトレーサー法で油層水のメタン生成活性を評価した。また油層水中に生息する微生物、特にメタン生成古細菌のバイオマスの評価と種の特特定を試みた。

研究用のサンプルは山形県の油田から採取した。油層深度は約 1000 m、油層温度は約 55°C である。原油の炭化水素組成は、イソプレノイドアルカンが *n*-アルカンより多く（例えば $i\text{-C}_{19}/n\text{-C}_{17} = 1.74$ ）、*n*-アルカンが生分解によって部分的に消費されている形跡が認められた（図5）。ガス成分の炭素同位体比は、メタンがエタンに比べて顕著に ^{13}C に欠乏し、二酸化炭素が顕著に ^{13}C に富んでおり、微生物によるメタン生成の形跡も認められた。油層水の溶存イオン濃度は、硫酸塩と硝酸塩が検出限界以下であり、基質利用性においてメタン生成古細菌と競合する硫酸還元菌、硝酸還元菌の生息に不利な環境と推定された。油層水中の全菌数を顕微鏡でカウントした結果、 10^5 cells/ml という比較的多くの微生物が検出された。メタン生成古細菌用の培地で油層水を順次希釈して培養可能なメタン生成古細菌のバイオマスを評価した結果、 10^3 cells/ml のオーダーで生存していることが確認された。基質利用性に関しては水素-

二酸化炭素利用メタン生成古細菌およびメチル化合物利用のメタン生成古細菌が検出された。ラジオトレーサー法でメタン生成ポテンシャルを評価した結果、水素-二酸化炭素、酢酸、メタノールのいずれの基質を用いてもメタン生成活性が検出された。

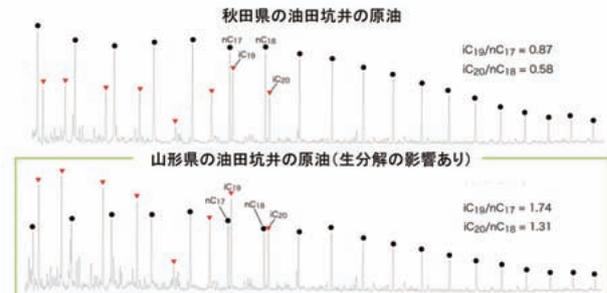


図5 山形県と秋田県の油田坑井から採取した原油の炭化水素画分のガスクロマトグラム。●はノルマルアルカン、▼はイソプレノイドアルカンのピーク

引用文献

- Head I. M., Jones D. M., Larter S. R. (2003) *Nature* **426**, 344-352.
- Jones D. M., Head I. M., Gray N. D., Adams J. J., Rowan A. K., Aitken C. M., Bennett B., Huang H., Brown A., Bowler B. F. J., Oldenburg T., Erdmann M., Larter S. R. (2007) *Nature* **451**, 176-180.
- 金子信行, 前川竜男, 猪狩俊一郎 (2002) *石油技術協会誌* **67**, 97-110.
- Mochimaru H., Yoshioka H., Tamaki H., Nakamura K., Kaneko N., Sakata S., Imachi H., Sekiguchi Y., Hoaki T., Uchiyama H., Kamagata Y. (2007a) *Extremophiles* **11**, 453-461.
- Mochimaru H., Yoshioka H., Tamaki H., Nakamura K., Imachi H., Sekiguchi Y., Hoaki T., Uchiyama H., Kamagata Y. (2007b) *Geomicrobiology Journal* **24**, 93-100.
- Mochimaru H., Tamaki H., Hanada S., Imachi H., Nakamura K., Sakata S., Kamagata Y. (2008) *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* (in press).
- Oba M., Sakata, S., Tsunogai S. (2006) *Organic Geochemistry* **37**, 1643-1654.

地熱資源に関する情報整備と資源評価

Preparation and Provision of Information Concerning Geothermal Resources and Resource Assessment

地熱資源研究グループ長： 阪口 圭一

Leader, Geothermal Resources Research Group: Keiichi Sakaguchi

Phone: 029-861-3897, e-mail: k-sakaguchi@aist.go.jp

1. はじめに

各種資源の賦存分布や賦存量を全国に渡って統一的な基準により把握することは、国立の調査研究機関としての責務であり、それは工業技術院地質調査所から産業技術総合研究所に移行した後も同様である。

地熱が資源として捉えられるようになったのは鉱物資源や他のエネルギー資源に比べると最近であるが、その短い期間にも、地質調査所・産総研は、地熱資源の賦存の把握や評価のためにその時々の工夫を凝らしてきた。ここでは、主に広域—全国レベルの地熱資源の把握と評価という観点から、これまでの地熱資源に関する情報整備について概観し、今後の方向を考える。

2. 地熱資源賦存図の系譜

まず、以下に地質調査所・産総研がこれまでに全国—広域レベルでまとめた地熱資源の情報をレビューする。

1974年にサンシャイン計画がスタートした後、1970年代後半から1980年代初めにかけて、全国を対象とした一連の地熱資源図類が公表された。

「日本地熱資源賦存地域索引図」(資源エネルギー庁・工業技術院地質調査所, 1976), 「日本温泉分布図(第2版)」(角, 1975), 「日本の熱水変質帯分布図」(角ほか, 1980), 「日本地熱資源賦存地域分布図」(角, 1980), 「日本温泉放熱量分布図」(角, 1980)等である(第1図)。このうち、「日本地熱資源賦存地域分布図」(角, 1980)は、日本の地熱資源を熱水対流系資源と深層熱水資源に大別し、それぞれを調査・探査段階で細分した分布を200万分の1全国図上に示したもので、地熱資源の賦存形態をモデル化した最初の例として注目される。

資源賦存図という形ではないが、1980年代前半には、多様な地熱情報を扱う地熱情報データベースの研究が実施された(たとえば、花岡ほか, 1986)。システム開発と共に、サンシャイン計画等で得られたデータのバンキングも実施された。データの社会への提供という観点で言うと、当時はCD-ROM出版等による電子情報配布やインターネットによるオンライン・サービスの手段が整

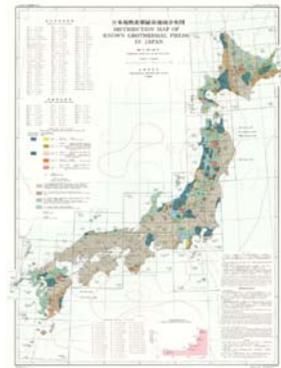
っておらず、収集・解析した情報を、地質調査所報告として印刷出版する方法が執られ、以下の報告書が出版された。「日本の主要地熱地域の熱水に適用した地球化学温度計」(地調報告 No.267)

(比留川ほか, 1988), 「日本の地熱調査における坑井データ その1」(地調報告 No.271)(矢野ほか, 1989), 「日本の地熱調査における坑井データ その2」(地調報告 No.273)(須田ほか, 1991)。

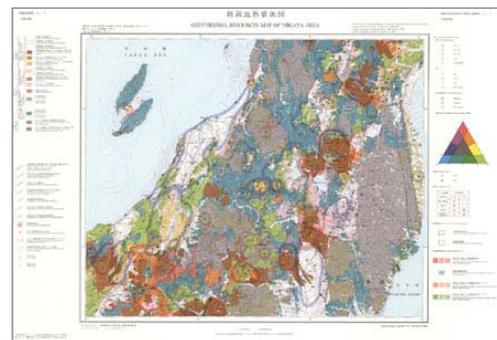
a)



b)



第1図 1970年代後半から1980年代初めに公表された地熱資源図類の例。a) 日本温泉分布図(第2版), b) 日本地熱資源賦存地域分布図。

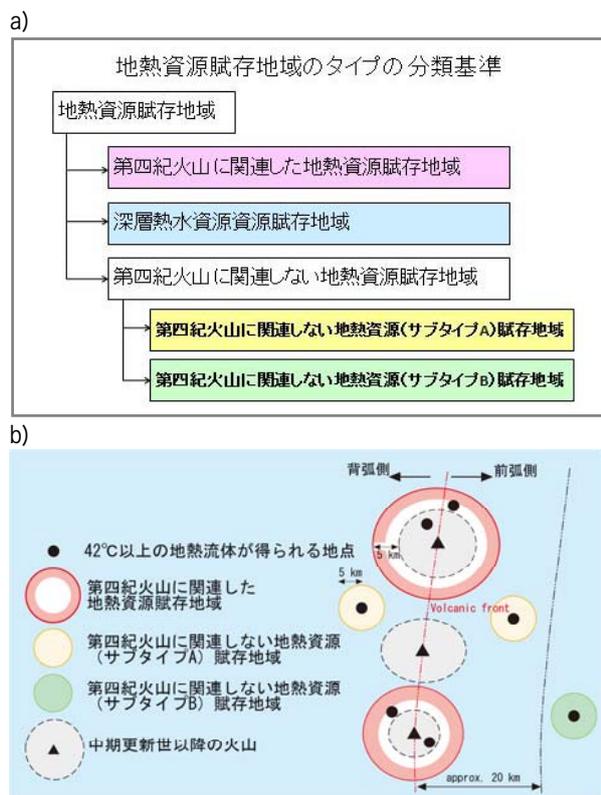


第2図 50万分の1地熱資源図「新潟」。

次に広域の地熱資源図類が作成されたのは、1990年代から2000年代初めにかけてである。「日本地熱資源賦存地域分布図」(角, 1980)で用いられた地熱資源の分類を発展させた地熱資源の区

分が検討され(山口ほか, 1992a), 縮尺 300 万分の 1 の「日本地熱資源図」(山口ほか, 1992b)が作成された。その後, 5 枚の縮尺 50 万分の 1 の地熱資源図(発行順に, 「新潟」, 「秋田」, 「九州」, 「青森」, 「札幌」), 及びそれらのデータをまとめた数値地質図 CD-ROM が作成された(第 2 図)。

縮尺 50 万分の 1 地熱資源図では, 「日本地熱資源賦存地域分布図」での熱水対流系資源を, 中期第四紀火山との関係に基づいて, 第四紀火山に関連する地熱資源, 第四紀火山に関連しない地熱資源(タイプ A), 同(タイプ B)に細分した。また, 地熱資源の賦存地域と地質構造, 重力構造及び温泉(地理的分布及び化学成分)との関連性をできる限り明瞭に表示することを目標にした。そのため, 初代の「日本地熱資源賦存地域分布図」に比較して, 多種多様な情報が盛り込まれたものとなった。それらは, 地質(活火山, 活断層, 酸性変質帯を含む), 重力異常, 温泉, 自然噴気, 地熱井, 地熱資源賦存地域, 国による地熱調査区域である。温泉以下の情報は, 表示記号の形, 線・塗りの色, 線の幅などによって, それぞれの属性(温泉ならば温度, pH, 化学組成など)を表現する仕様となっている(第 3 図)。



第 3 図 50 万分の 1 地熱資源図で用いた, a) 地熱資源のタイプ分けと, b) 深層熱水資源以外の地熱資源の地理関係の表現。

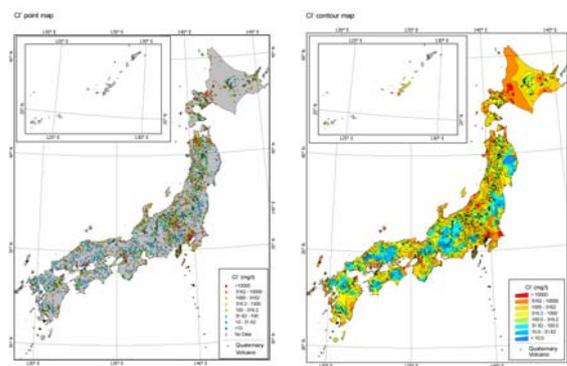
5 枚の地熱資源図は, 紙印刷の図面と説明書という従来の印刷出版物の形で発行されたが, 重力異常以外のデータの編集は GIS (Arc/INFO 及び ArcView) を用いて行ったことが特徴である。上

述の複雑で多様な情報を GIS で編集したことにより, データの更新や追加, 新たなデータとの比較や重ね合わせに際してのデータの再利用が容易になった。

「東北・九州地熱資源図(CD-ROM 版)」(阪口・高橋, 2002)は, そのような編集データを活かして, 出版済みの 5 枚の地熱資源図の電子情報をまとめて提供しようとしたものである。この CD-ROM では, それらの情報を数値化された GIS データとして提供することで, 利用者が GIS ソフトウェア上で任意の組み合わせのデータを重ね合わせたり目的に合った表示方法を選択したりすることを可能にしている。また, 温泉・自然噴気・地熱井の温度, 化学分析値等をデータ・ファイルとして収録しており, 利用者の利便性の向上を図っている。例えば, 紙面に印刷された地熱資源図では, 多くの情報が重ねて印刷されるため, 皮肉なことに優勢な地熱地域ほど多数の地熱徴候が集中し, 情報の読み取りが困難になるきらいがあった。そのため, 印刷図では温泉, 噴気, 地熱井が混み合う地域で代表的なものだけを表示した場合もあったが, この CD-ROM では編集したすべてのデータを収録しており, より正確な情報の提供を実現した。

3. 「日本の熱水系アトラス」と「全国地熱ポテンシャルマップ」

産総研第 2 期(2005-2009 年度)の地熱資源研究グループでは, 主要な研究課題の一つに地熱資源データベースの研究を取り上げ, その成果を「日本の熱水系アトラス」(村岡ほか, 2007)と「全国地熱ポテンシャルマップ」(地質調査総合センター, 2009)として公表した。

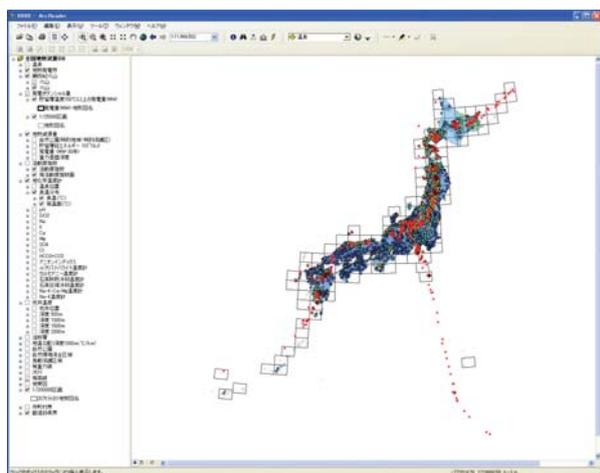


第 4 図 「日本の熱水系アトラス」でのマップ表示例 (CI 濃度分布)

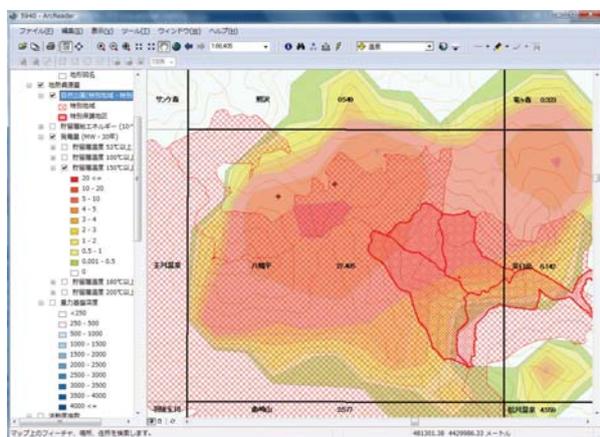
これらの作成の最も基礎になるデータは, 全国から収集した約 7,200 個の温泉化学分析値データと約 3,000 個の坑井地温データである。「日本の熱水系アトラス」は, 収集した温泉と坑井の温度, pH, 代表的な化学成分, 化学組成や温度・深度から計算される地化学温度計温度や各種の指数という要素的なデータを, 全国マップとして地理情報システムによって表示したものである(第 4 図)。

熱水系の化学成分や地化学温度計温度は、以前から個々の地域の地熱資源の探査や開発に頻りに利用されてきたものの、その全国マップは公表されたことが無く、「日本の熱水系アトラス」は日本の熱水系に関する様々な巨視的特徴を系統的に示した最初の例となった。

「全国地熱ポテンシャルマップ」ではこの研究をさらに進め、GIS データ・ビューアーを利用して、様々な要素的なデータを閲覧できるようにした（第5図）。



第5図 「全国地熱ポテンシャルマップ」の起動画面（全国マップ表示）。



第6図 「全国地熱ポテンシャルマップ」の小縮尺表示例。地熱資源量分布と自然公園を重ね合わせたもの。

「日本の熱水系アトラス」で編集した温泉・坑井情報に加えて、地質、等重力線、地表面からの重力基盤深度等の地熱資源評価に有用な情報や、自然公園、自然環境保全区域、鳥獣保護区域等の地熱開発の条件を検討するにあたって有用な情報も閲覧できる（第6図）。また、容積法 (Brook *et al.*, 1979) を用いて全国を 1km メッシュに分けて計算した熱水系資源量も付加してある。本システムで点データまたはコンターマップとして表示できる要素的な情報は、以下の多種類に上る。熱水湧出温度、熱水 pH、熱水主要化学成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SiO_2)、アニオンインデックス、主要熱水地化学温度計 (α -クリスト

バライト、カルセドニー、石英断熱冷却、石英伝導冷却、Na-K, Na-K-Ca, Na-K-Ca-Mg)、坑井地温 (500m, 1000m, 1500m, 2000m)、活動度指数、火山位置、地熱発電所位置、坑井位置、地質図、活断層、等高線、等地温線、等重力線、河川、都道府県界、市町村界、自然公園、自然環境保全区域、鳥獣保護区域、地表面からの重力基盤深度、1/2.5 万図幅地域ごとの熱水系資源量。各々の情報は GIS データのレイヤーとなっており、用途に応じて、これらから必要な情報を選び出し、重ね合わせることによって、熱水系資源の開発や利用のための、様々な地域的評価を行うことができるようにデザインされた。

「全国地熱ポテンシャルマップ」で実施した容積法による地熱資源評価では、全国を 1km メッシュの単位区画に区切って、各单位区画の地熱資源量 (熱エネルギー: q_R) を次式により計算した。

$$q_R = \rho_c \cdot a \int_{LD}^{UD} (t(z) - t_{ef}) dz$$

LD : 貯留層底部の深度 (m)

UD : 貯留層下限温度の深度 (m)

$t(z)$: 深度の関数としての貯留層温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t_{ef} : 基準温度 (15°C)

地熱貯留層の底面深度は、駒澤(2003)による重力基盤深度を採用した。地下温度構造は、活動度指数 (林, 1982) から与えられる各深度での最高温度を利用した。貯留層下限温度は、 53°C , 100°C , 150°C , 180°C , 及び、 200°C の 5 種類について計算を行った。このような温度 (構造)、貯留層下底深度の見積もり法を用いた全国に渡る容積法資源量計算は、これが初めての試みである。

4. 今後の課題と方向

これまで見たように、1970 年代から、その時点の地熱資源の賦存形態と賦存量のモデルに応じて、各種の資源図や資源情報が整備・公表されてきた。産総研第 2 期には、GIS を用いた情報整備と資源評価のあり方として、「日本の熱水系アトラス」と「全国地熱ポテンシャルマップ」という成果を公表した。

資源評価は、その時点での、経済性等も含む資源の定義によって変化するものである。加えて、地熱資源は温度、賦存形態、賦存深度などが多様であり、従前より地熱資源の評価には多様な情報が用いられ、評価手法もまだ確立したものとはいえない。第 3 期の研究においても、資源開発の手法の進展にも伴って、資源の定義や評価手法を進展させていく必要がある。例えば、今後は EGS (Enhanced Geothermal System) や温泉発電資源などの新しい地熱資源を視野に入れた資源評価手法の開発が課題であろう。EGS の対象となる地熱資源では、不透水性基盤岩によって境される貯留層という単純な容積法モデルが適用されにくく

なり、中間的な透水性を持つ領域の適切な評価法が求められるであろう。また、温泉発電資源は、一般に賦存深度は浅く、より局所的な条件の影響が大きくなると考えられる。より浅く、より低温の資源であることは、開発（試行）の容易さにも結び付くので、この種の資源評価を全国に渡って行う場合には、算出する資源量の意味づけに注意することも必要であろう。

地熱資源評価に用いる多様なデータ全てを、評価者が自ら取得・整備することは困難であり、公表されたデータ（電子化されたものが望ましい）を利用することになるが、各種の電子データを資源評価のためにいかに利用するかについては、茂野（2010：本発表会での発表、および地質調査総合センター、2007）による一連の研究と実践がある。また、産総研が行うべき「情報整備」は適切な手段による社会への「提供」を常に含むものなので、データや手法の提供のより良いあり方の検討や実現も引き続き行っていく必要がある。

文献

- Brook, C.A., mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffaniti, M. and Muffler, L.J.P. (1979) Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures $\geq 90^{\circ}$ C. In: Muffler, L.J.P. ed., Assessment of geothermal resources of the United States - 1978, U.S. Geol. Surv. Circular, no.790, 18-85.
- 地質調査総合センター (2007) 九州-大分-豊肥地域の地熱データ処理集 「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源評価の研究(2001-2005 年度)」のまとめと簡易統合処理データ・プログラム集(CD-ROM). 数値地質図 GT-3, 産総研地質調査総合センター.
- 地質調査総合センター (2009) 全国地熱ポテンシャルマップ CD-ROM 版. 数値地質図 GT-4, 産総研地質調査総合センター.
- 花岡尚之・矢野雄策・津 宏治・西 祐司・浦井 稔・村田泰章・小川克郎 (1986) 地熱情報データベース・システム SIGMA '83 について. 地調報告, no. 265, 1-18.
- 林 正雄 (1982) 深部高温地熱貯留層のターゲット. 日本地熱学会誌, 4, 81-90.
- 比留川 貴・高橋正明・茂野 博(1988) 日本の主要地熱地域の熱水の適用した地球科学温度計. 地調報告, no. 267, 754p.
- 駒澤正夫 (2003) 日本の重力探査事情-地下構造とのかかわり. 石油技術協会誌, 68, 21-30.
- 村岡洋文・阪口圭一・玉生志郎・佐々木宗建・茂野 博・水垣桂子 (2007) 日本の熱水系アトラス. 産総研地質調査総合センター, 110p.
- 宮崎芳徳・津 宏治・浦井 稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克郎 (1991) 全国規模地熱資源評価の研究. 地調報告, no.275, 17-43.
- 阪口圭一・野田徹郎・高橋正明・駒澤正夫 (2000) 50 万分の 1 九州地熱資源図および同説明書. 特殊地質図(31-3), 地質調査所, 88p.
- 阪口圭一・高橋正明 (2002) 東北・九州地熱資源図(CD-ROM 版). 数値地質図 GT-1, 産総研地質調査総合センター.
- 資源エネルギー庁・工業技術院地質調査所 (1976) 日本地熱資源賦存地域索引図. 65p.
- 茂野 博 (2010) 電子地球科学情報を利用した地熱資源評価手法の発展的研究：第 2 期成果の概要. Green Report (本号), 産総研地質調査環境研究部門.
- 須田芳郎・矢野雄策 (編) (1991) 日本の地熱調査における坑井データ その 2 検層データおよび地質柱状図データ. 地調報告, no. 273, 842p.
- 角 清愛・金原啓司・高島勲 (1980) 日本の熱水変質帯分布図, 1. 鮮新世後期-完新世, 200 万分の 1 地質編集図 19-1, 地質調査所.
- 角 清愛・高島 勲 (1980) 日本地熱資源賦存地域分布図. 200 万分の 1 地質編集図 20, 地質調査所.
- 角 清愛 (1980) 日本温泉放熱量分布図. 地質編集図, 200 万分の 1 地質編集図 21, 地質調査所.
- 高橋正明・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎 (1996) 50 万分の 1 秋田地熱資源図および同説明書. 特殊地質図(31-2), 地質調査所, 162p.
- 高橋正明・玉生志郎・駒澤正夫 (2001) 50 万分の 1 青森地熱資源図および同説明書. 特殊地質図(31-5), 地質調査所, 126p.
- 高橋正明・山口靖・野田徹郎・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎 (1993) 50 万分の 1 新潟地熱資源図および同説明書. 特殊地質図(31-1), 地質調査所, 116p.
- 玉生志郎・松波武雄・金原啓司・川村政和・駒澤正夫・高橋正明・阪口圭一 (2001) 50 万分の 1 札幌地熱資源図および同説明書. 特殊地質図(31-4), 地質調査所, 65p.
- 山口 靖・金原啓司・玉生志郎 (1992a) 日本地熱資源図の作成. 平成 2 年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書国土地熱資源評価技術に関する研究, 59-99.
- 山口 靖・金原啓司・玉生志郎・角 清愛・田中啓策 (1992b) 日本地熱資源図. 日本地質アトラス(第 2 版), 朝倉書店.
- 矢野雄策・須田芳郎・玉生志郎(編) (1989) 日本の地熱調査における坑井データ その 1 コア測定データ -物性, 地質層序, 年代, 化学組成-. 地調報告, no. 271, 832p.

再評価されつつある地熱開発ニーズに応じて

In response to reviving demands for geothermal development

地熱資源研究グループ長：村岡洋文

Leader, Geothermal Resources Research Group: Hirofumi Muraoka

Phone: 029-861-2403, e-mail address: hiro-muraoka@aist.go.jp

1. はじめに

地球温暖化や原油ピークアウトを受けて、世界ではエネルギーのパラダイムシフトが急速に進んでいる。ウランでさえ、2050年ピーク説の存在を考えると、究極の持続的エネルギーが再生可能エネルギーであることについては多言を要しない。再生可能エネルギーへの投資は低炭素社会と恒久的エネルギー需給構造への投資である。この世界的潮流の中で、主要地熱資源国は急速に地熱発電や地熱直接利用の開発を伸ばしている。そればかりか、最近の注目すべき傾向は、ドイツやオーストラリアといった火山性地熱資源に恵まれない諸国までが、深度3.0～4.5 kmもの大深度掘削を行って、地熱発電開発を推進していることである。

わが国は世界の三大地熱資源大国であり、1990年代前半までは、地熱開発に関して、先進的・組織的な取り組みを行い、1990年代前半に地熱発電設備容量を一挙に倍増させた。しかし、わが国は1997年に地熱を新エネルギーから除外し、これ以降、極端なまでに地熱開発へのインセンティブを後退させた。その結果、わが国は主要地熱資源国の中で、この10年間、地熱発電開発が停滞した唯一の国になってしまった。

このことが2008年6月6日の上智大学講演会で、地球環境研究者レスター・ブラウンをして、『日本は何故地熱発電を使わないのか』と発言させた(6月23日東京新聞・中日新聞)。

2008年4月から、地熱はバイナリー発電のみながら、新エネルギー特措法上の新エネルギーに復活した。火力発電の高騰や活況を呈する世界の地熱開発の影響により、いま少しづつ、わが国の地熱開発を再評価する気運が広がりつつある。わが国の地熱開発は失われた10年を経て、いま10年ぶりに再浮上の機会を迎えている。

本講演では、世界と日本の地熱開発動向、日本の地熱開発の課題、地熱資源研究グループの研究について紹介する。

2. 世界と日本の地熱開発動向

世界第8位までの地熱発電国の1999年から2006年にかけての地熱発電設備容量は、米国が27.1%増、フィリピンが3.7%増、メキシコが26.2%増、インドネシアが45.3%増、イタリアが3.3%増、日本が2.4%減、ニュージーランドが3.0%増、アイスランドが148.2%増である(図1)。

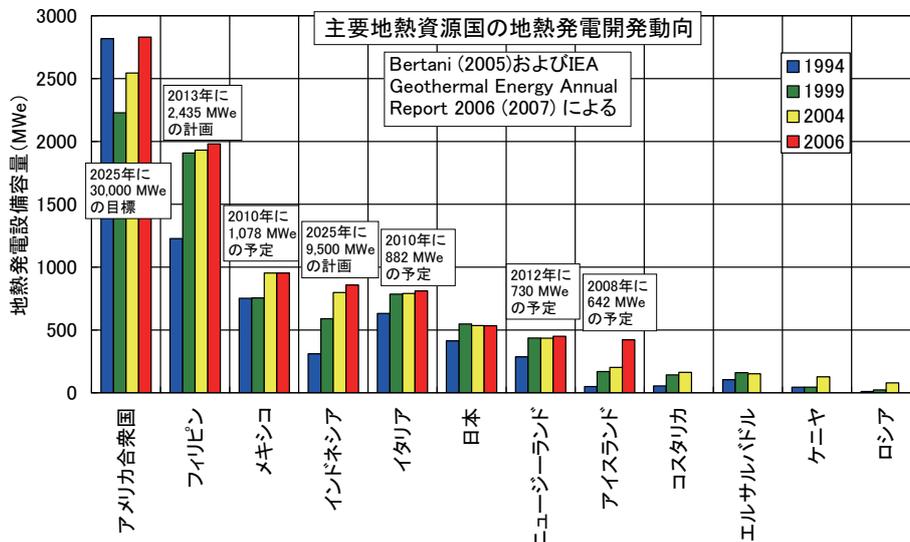


図1 主要地熱資源国の地熱発電開発動向 (Bertani, 2005; IEA - Geothermal Implementing Agreement, 2007)

2.1 米国

トップランナーの米国は、1980年代後半から世界最大の地熱開発地域ザ・ガイザーズにおいて、過剰開発と流体の地下非還元の結果、生産流体の劇的な減衰を経験した。しかし、これを地下還元の実施により克服し、瞬く間に地熱発電急増の現状を回復している(図1)。2006年にはエネルギー省地熱研究開発の一環として、マサチューセッツ工科大学が18名の専門家を集め、EGS(Enhanced or Engineered Geothermal System)発電(高温岩体発電の発展形であり、人工造成した亀裂に人工的に水を注入して発電する方式)の将来性を検討した。その結果、EGS発電は非火山地域を含めて全土で利用でき、この方法により地下深度10kmまでを開発すれば、2050年には全米で少なくとも1億kWの発電が可能であるとした(Tester and a panel, 2006)。

2.2 アイスランド

アイスランドは地熱立国を具現した国である。2007年現在、一次エネルギー需要の81%を再生可能エネルギーで賄っており、このシェアは世界最大である。これには地熱の貢献が大きく、2007年現在、一次エネルギー需要の66%を地熱で賄っている。とくに地熱直接利用の貢献が大きく、2007年現在、全家庭の約88%に熱水を供給し、地熱暖房を実現している。同国は地熱発電開発についても、2004-2006年の2年間に倍増させており(図1)、2007年末には485MWに達し、2008年末には575MWに達する見込みである。つまり、2008年内に発電設備容量でニュージーランドと日本を抜く趨勢にある。これは同国の人口がわずかに31万人であることを考えると、驚異的なことといえる。

2.3 オーストラリア

オーストラリアには火山性の熱水系はほとんど賦存しない。しかし、オーストラリアの花崗岩は日本の花崗岩に比べて、10倍もウラン、トリウム、カリウムなどの放射性同位元素に富み(石原瞬三、談話)、花崗岩体分布域では放射性同位元素の崩壊熱によって、地下温度がかなり高い。現在、33社が地熱開発ライセンスを取得し、各地の花崗岩分布地域でEGS発電の開発を進めている。先頭を走っているCooper盆地では、Geodynamics社がEGS発電開発を進めており、深度4.4kmまで掘削して、すでに地下温度250°Cに達している。ごく近い時期に1,000kWのパイロット発電プラントの運転を開始し、2015年には50万kWの発電を目指している。

2.4 欧州連合(EU)

最近、世界最初のEGS発電が2008年6月に運転開始された。これはEUが中心となって開発してきたライン地溝帯のSoultz(フランス側)のパイロット発電プラント1,500kWである。

2.5 ドイツ

ドイツには火山性の熱水系もなければ、放射



図2 Unterhaching 3,500 kW カーリーナサイクル地熱発電所(2008年8月8日村岡撮影)

性同位元素に富んだ花崗岩体もない。それにもかかわらず、ドイツは地下浸透率の比較的高い北部堆積盆地、ライン地溝帯、アルプス北部モラッセ堆積帯のそれぞれに、深層熱水を利用した地熱発電所を1個ずつ稼働させている。このうち、2007年11月から運転を開始したライン地溝帯Landauの2,500kWとモラッセ堆積帯Unterhachingの3,500kW(図2)はそれぞれ、深度3.3kmと3.4kmの坑底で、熱水温度が150°Cと120°Cに過ぎない。これはほぼ平均的地温勾配に近く、わが国に比べて、はるかに厳しい条件下で開発している。しかし、両者とも、ほぼ4年という短い期間で開発された。その原動力はひとえに1kWh当たり15ユーロセント(約23円)という固定買取価格制度にある。ドイツはこれでも飽き足らず、2009年1月からは、この価格を20ユーロセント(約31円)に引き上げる予定である。ドイツは、国を挙げて開発すれば、資源の乏しさという究極の障壁さえ、乗り越えられることを実証している。

2.6 日本

主要地熱資源国の中で、地熱発電開発が停滞しているのはわが国のみである(図1)。2006年度末のわが国の地熱発電所は事業用と自家用とを合わせて18地点であり、その認可出力は合計535.26MWである(火力原子力発電技術協会、2008)。認可出力は1990年代後半以降、ほとんど停滞している。地熱は2008年4月からバイナリーサイクル発電方式のみながら、新エネルギーに復帰することとなった。しかし、わが国の地熱業界は基本的には守り一方の状況にあり、人的資源の分散により存亡の危機にある。

たとえば、2001年の産総研発足当時、地圏資源環境研究部門では約25名が地熱研究に従事していた。現在、地熱研究を主要業務としているのは地熱資源研究グループの4名に過ぎない。同じことは、新エネルギー・産業技術総合機構(NEDO)や新エネルギー財団(NEF)でも起こっており、業界でも地熱関係部署を整理した企業が少なくない。ニューサンシャイン計画等で蓄積された地熱技術はいま急速に失われつつある。

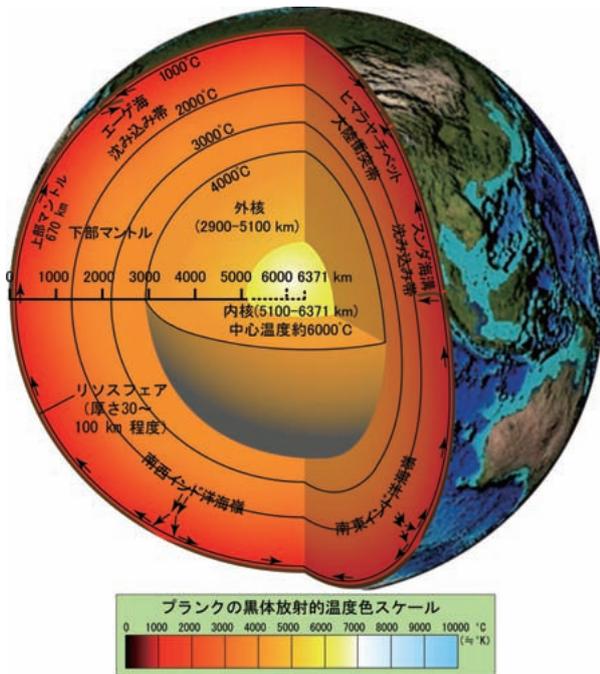


図 3 地球内部の温度構造

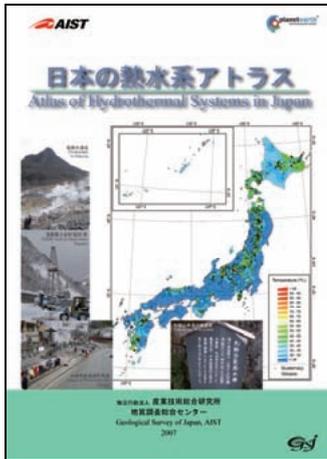


図 4 日本の熱水系アトラス(村岡ほか, 2007)

3. 日本の地熱開発の課題

世界の主要地熱資源国の中で、日本の地熱発電開発のみが停滞している理由は、①国の政策的導入目標が 0 となっていること、②初期投資リスクに対する国のコスト優遇策が他国に比べて低いこと（たとえば、蒸気フラッシュ発電を RPS 法の対象から除外しているのはわが国のみ）、③許認可優遇策が低いこと（ドイツの再生可能エネルギー法やインドネシアの地熱法のような一括法がなく、多数の縦割り法の適用を受けるため、長い開発リードタイムを要する）、④国立公園の開発規制区域がほとんどの火山地熱地域を網羅していること、⑤地熱研究開発が 2002 年度に停止され、将来技術の研究機会がないこと（主要地熱資源国ではわが国のみ）、等々による。これらの政策的課題については、政策当局に根気強く訴えて行くほかない（村岡, 2007）。

わが国が地熱研究開発を停止していた間に、世界の地熱開発が将来に向かって一つの飛躍を

Electricity (150°C≦Reservoir Temperature)
[Reservoir Bottom Depth = Gravity Basement Depth]

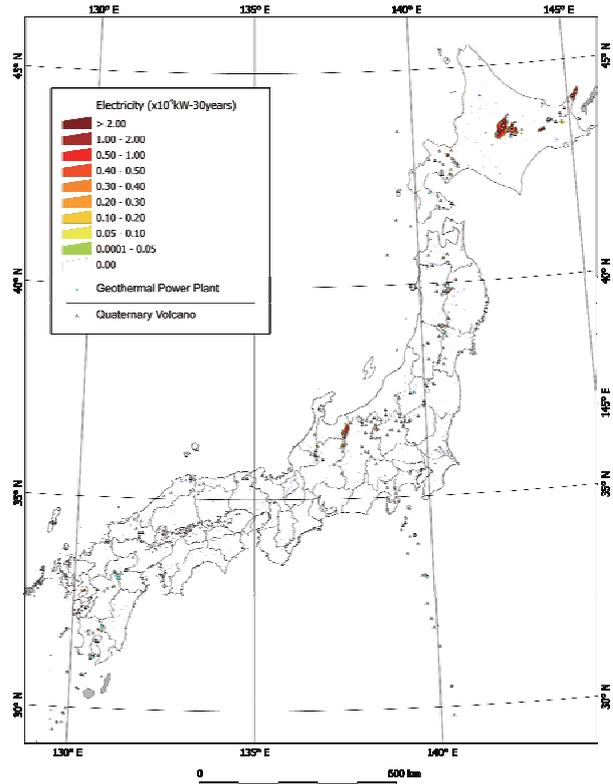


図 5 150°C以上の熱水系資源の分布。

遂げた。それは非火山地域でも、大深度掘削によって地熱発電が可能であることを実証したことである。その方法には深層熱水発電と EGS 発電とがあるが、いずれも地熱研究開発の結果、実現されたものである。しかも、その重要性は地中熱ヒートポンプと同様に、いまや地熱発電がほとんどの陸域で利用可能になったことにある。我々人類は大部分が 1000 °C 以上の温度にある地球の、表層冷却部に棲んでいる訳であり（図 3）、概念的には大深度掘削により地熱発電がほとんどの陸域で利用できる可能性はあった。しかし、これは掘削コストにも関係しており、その商業的な採算性は自明ではなかった。これが固定買取価格制度のもとで、商業的に実証されたのである。わが国が地熱研究開発を停止しつづけることは、このような技術革新に遅れを取ることであり、地熱市場をますます閉塞状態に追い込むこととなる。小規模にせよ、地熱研究開発は持続させる必要があるように思われる。

他方、わが国特有の障壁として、2007 年 3 月現在 28,154 個も存在する温泉泉源との摩擦の問題がある。これは法令にも関係しているが、単純な政策だけの問題とは言えず、日本の地熱開発にとって根の深い問題である。

4. 地熱資源研究グループの研究課題

地熱資源研究グループの研究の詳細は、本誌「グループの研究紹介」に報告した。ここでは地熱資源研究グループの「日本の地熱開発の課

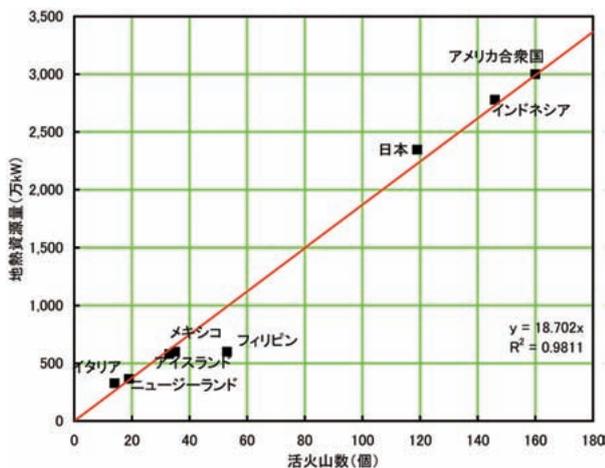


図 6 世界の活火山数と浅部地熱資源量の相関 (Stefansson, 2005 を改変)。

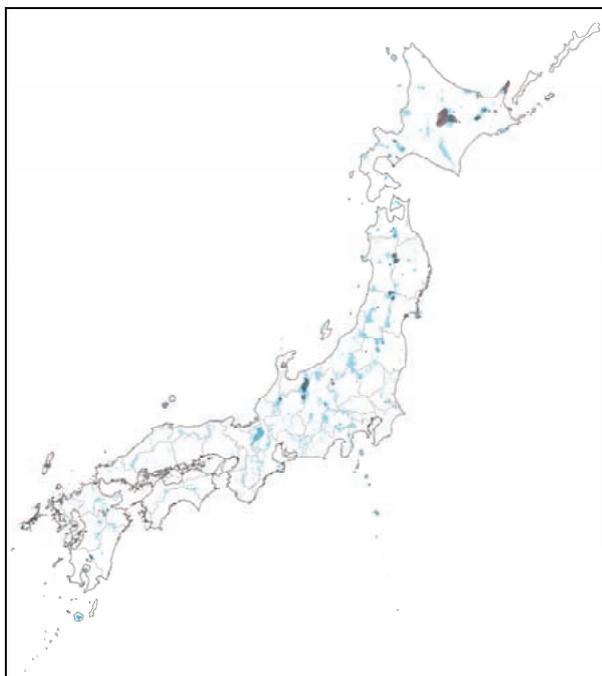


図 7 国立公園特別保護地区および特別地域(水色)の熱水系資源分布域包含状況。

題」に関連した研究を中心に述べる。

1) 地熱資源量評価

わが国の地熱資源の分布や量を把握することは地熱資源研究グループの中心的課題である。地熱資源研究グループでは GIS (地理情報システム) を利用した全国の地熱資源評価を進めており、2007 年には「日本の熱水系アトラス」を出版し (図 4)、2008 年度には「全国地熱ポテンシャルマップ (CD-ROM)」を出版する予定である。このデータと容積法を用いて、最近、わが国の 1 km グリッド GIS 地熱資源量を行った。一例として、150℃以上の熱水系資源の分布を示す (図 5)。その結果、大雪・十勝岳火山群がわが国最大の地熱地域であることが判明した。また、全国の資源量は 2,347 万 kW (×30 年間) と見積られる。この資源量は活火山の数との相関関係からみても整合的であり、わが国が世界の三大地

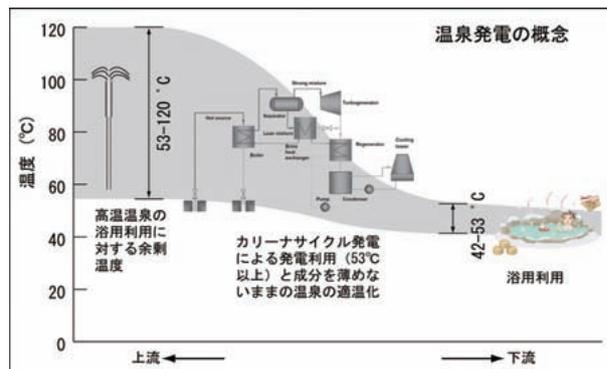


図 8 温泉発電ビジネスモデル (村岡, 2007)。

熱資源大国であることを示している (図 6)。

2) 国立公園開発規制の課題

各課題の深刻さの程度は一般市民のみならず、政策当局にとっても必ずしも自明ではない。これを明確にすることは産総研が果たすべき任務の一つであろう。そこで、図 5 で抽出された 150℃以上の熱水系資源分布域に国立公園の特別保護地区と特別地域を重ねてみた (図 7)。その結果、150℃以上の熱水系資源分布域の 81.9% が国立公園のこれら開発規制区域に含まれることが判明した。つまり、この開発規制がある限り、わが国は世界の三大地熱資源国の名に値しないことになる。この事実は声を大にして訴えて行く必要がある。

3) 温泉の問題

地熱資源研究グループは地熱技術開発株式会社とともに、これまで、多数がゆえに地熱開発の障壁であった温泉を、地熱発電に転化すべく温泉発電の研究を進めているところである (図 8)。この開発計画は各界から反響を得ている。

文献

- Bertani, R. (2005) World geothermal power generation in the period 2001-2005. *Geothermics*, 34, 651-690.
- IEA - Geothermal Implementing Agreement (2007) IEA Geothermal Energy Annual Report 2006. 234p.
- 火力原子力発電技術協会 (2008) 地熱発電の現状と動向 2007 年, 99 p.
- 村岡洋文 (2007) 日本の地熱エネルギー開発凋落の現状と将来復活の可能性. *日本エネルギー学会誌*, 86, 153-160.
- 村岡洋文・阪口圭一・玉生志郎・佐々木宗建・茂野博・水垣桂子 (2007) 日本の熱水系アトラス. 産総研地質調査総合センター, 110p.
- Stefansson, V. (2005) World geothermal assessment. *Proceedings of the World Geothermal, Congress 2005 (CD-ROM)*, Antalya, Turkey, 6p.
- Tester, J.W. and an MIT-led interdisciplinary panel (2006) *The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, USA. 358 p.

鉱物資源研究における産総研の役割 –レアメタル・非金属–

Role of AIST for mineral resources research: rare-metal and industrial minerals

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. 鉱物資源を巡る状況と産総研の役割

BRICs (ブラジル、ロシア、インド、中国) をはじめとする新興工業国の著しい経済成長により、それらの国々の鉱物資源消費量が加速度的に増大し、金属資源の価格が2004年以降に急激な上昇を開始した。2008年のリーマンショックにより一時的に価格が下落したが、2009年以降価格はすぐに回復し現在も上昇を続けている。このような状況を受けて、中国、韓国、欧米諸国は金属資源の権益確保を世界各地で積極的に進めている。金属資源のほとんどを輸入に頼る日本にとって、海外資源の供給安定性は産業活動の生命線である。2010年9月の中国によるレアアース対日輸出制限が、日本の産業界に深刻な不安をもたらしたことは記憶に新しいが、レアメタルを中心とする資源安全保障体制の確立は喫緊の課題であり、官民を挙げてこの問題に取り組む必要がある。

一方、珪石、粘土、石灰石、碎石・骨材などの非金属資源(工業原料鉱物)は、その大部分を国内で生産しており、現在も約400カ所の国内鉱山が稼働している。非金属資源の用途は建材、窯業・セラミック、自動車など多岐にわたっており、金属資源と同様、産業活動や国民生活に一時も欠かすことができない。しかし、国内の非金属鉱業は、鉱量枯渇、鉱山の環境問題、後継者不足など様々な問題に直面しており、その供給安定性が危ぶまれている。非金属鉱業の多くは地方の中小企業からなるため、資源探査や環境対策などに独力では十分に対応できない場合が多く、国・独法や大学の専門家の技術的支援を必要としている。

産総研・地圏資源環境研究部門は、地質・鉱床学の専門家集団として世界各地で基礎的な鉱床調査を実施し、科学的知見を得ると同時に、その成果を独立行政法人石油・天然ガス金属物資源機構(JOGMEC)や民間企業による開発フェーズに連結する役割を担っている。特に、各国地質調査所とのネットワークを生かした海外での機動力のある調査研究、自前の機器による迅速な分析・解析ができることなどが強みである。非金属資源については、JOGMECが所掌していないこと、大学・地方自治体にも専門家が少ないことから、産総研が日本ではほぼ唯一の公的研究機関であり、技術支

援に関する関連業界からの期待が大きい。

2. レアメタル資源探査への取り組み

2004年から始まるレアメタルの急激な価格上昇は「レアメタルショック」とも呼ばれるが、それ以降、地圏資源環境研究部門では、長らく続けてきたベースメタル(銅・鉛・亜鉛)鉱床や金銀鉱床の研究を休止し、希土類(レアアース)に代表されるレアメタル鉱床の研究を本格的に開始した。ここでは、最近の研究成果の一部を紹介したい。

希土類鉱床: 希土類は、La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu (軽希土), Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu (重希土) および Y, Sc の16元素からなり、軽希土はガラス研磨剤、ニッケル水素電池、蛍光体、永久磁石などに、重希土は永久磁石、光磁気ディスクなどに使用される。特に、ハイブリッド車モーターや風力発電タービンなどに用いられる高性能磁石の製造には希土類が必須である。

産総研では、2007年から南アフリカ共和国にて、同国地質調査所および JOGMEC と共同で希土類資源に関する研究を進めている。これまでの調査で、南アフリカ北東部の複数の蛍石鉱床に高濃度の希土類が付随することが明らかになった。これ

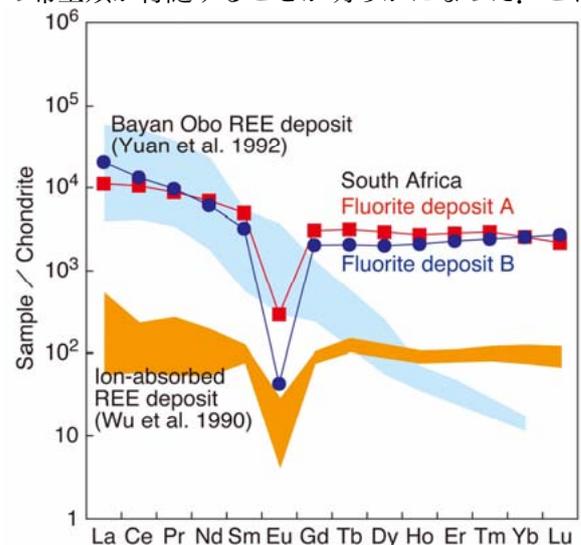


図1 南アフリカ北東部に分布する蛍石鉱床の希土類パターン(鉱床名非公表)。

らの鉱床は、比較的重希土類に富む特徴があること(図1)、一部廃滓からの利用が可能であることなどから、開発フェーズへの移行を見据えた詳細な検討が行われている。



図2 南アフリカでの希土類鉱床調査。放射能計を用いて鉱微地を探していく。

一方、東南アジア(ラオス、タイ、ベトナム、マレーシアなど)では、イオン吸着型希土類鉱床の調査が継続的に進められている。イオン吸着型鉱床とは、高温多雨気候下の風化作用により岩石から溶出した希土類が、風化殻中の粘土鉱物などに化学的に吸着・濃集している鉱床で、電解質溶液によって容易に抽出できる特徴がある。これまで中国南部にしか知られていなかったが、最近、タイのプーケット付近に発達する花崗岩風化殻から有望なイオン吸着型鉱床を発見した。希土類含有量は174~1084ppmと比較的高く、そのうち40~80%の希土類が吸着されている。特に深度5m以深に高品位イオン吸着鉱が存在する(図3)。

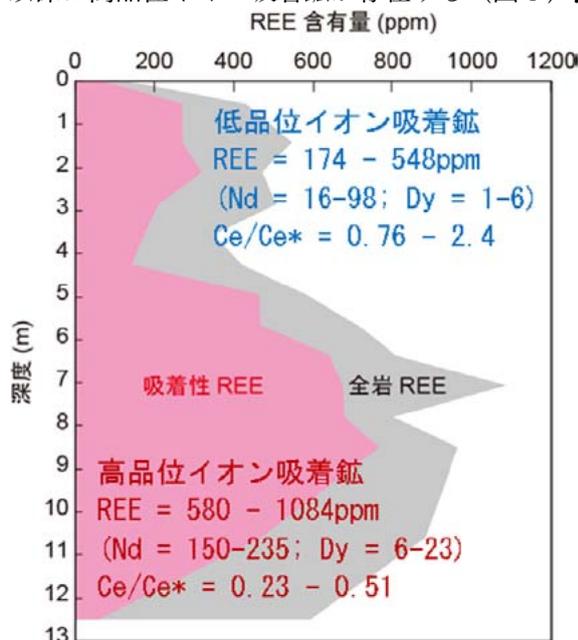


図3 タイ・プーケット付近の花崗岩風化殻に発達するイオン吸着型希土類鉱床の希土類含有量の深度変化。

現在は基礎研究の段階であるが、事業化等に向けた今後の展開が注目される。

モンゴルは、豊富なレアメタル資源が期待される地域であり、中国・韓国・欧米諸国などが積極的な鉱床探査を展開している。産総研も、2010年7月にJOGMECと共同でモンゴル鉱物資源・エネルギー省と研究協力覚書を交わし、本格的なレアメタル資源に関する共同研究を開始した。モンゴルでは2009年から希土類資源に関する予察的調査を開始しており、南ゴビ地域で有望な希土類鉱床(ムシュガイハダッグ鉱床)を確認した。同鉱床は主にリン灰石-磁鉄鉱からなり、希土類は平均1.1%(REO)含有される。比較的重希土にも富む特徴があること(図4)、肥料用リンが同時に生産できる可能性があることなどから、今後、開発フェーズに向けた詳細な調査が行われる予定である。

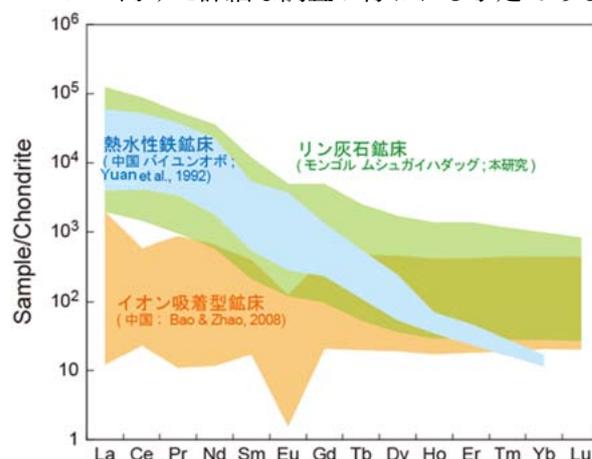


図4 モンゴル・ムシュガイハダッグ鉱床の希土類パターン。

一方、ジルコンの希土類資源としての可能性に関する基礎研究も推進している。ジルコンは希土類含有鉱物の1つであるが、一般に難溶性であり、同資源の対象にはなり難かった。最近の当部門の研究により、結晶度の解析を用いて希土類に富みかつ分解・抽出し易いジルコンを見分けることが可能となった(図5)。今後、カナダやアフリカ東

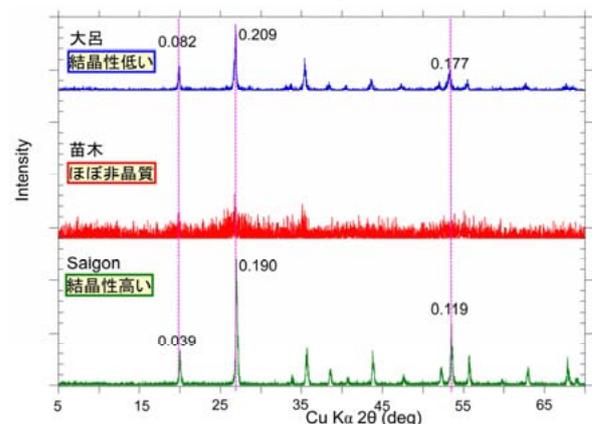


図5 結晶度の異なるジルコンのX線回折パターン。苗木のジルコンには希土類が約3.2%含まれ、1N塩酸(250°C)による処理でほぼ全量が抽出される。

部のジルコン鉱床などに同手法を適用し、希土類資源としての可能性を検討する予定である。

リモートセンシング利用資源探査:産総研では、人工衛星や航空機から各種センサーを使って地表を観測し(リモートセンシング)、レアメタル資源を探査する手法の開発を行っている。この手法は、地表踏査が困難な地域を探査したり、広範囲から有望地域を絞り込むには非常に有効な手段である。日本は、ASTER/PALSAR プロジェクト等による高精度な衛星データを所有しており、これらを利用した資源探査技術の開発が急がれている。

リモートセンシング利用資源探査を実施するには、モデル地域において、あらかじめ地表地質と上空からの情報を比較検証し、信頼性を確認しておく必要がある。地圏資源環境研究部門では、2010年より情報技術研究部門と共同でこの研究を開始した。今年度は、米国ネバダ州中部およびチリアルゼンチン国境地帯をモデル地域として調査を実施している(図6)。



図6 ネバダ中部キューブライト地域での地質調査。衛星・航空機による画像の検証は、砂漠地帯など裸地で実施する必要がある。

3. 非金属資源探査への取り組み

地圏資源環境研究部門では、2009年以降、社会的要請の強い珪石およびベントナイト資源に関する研究に取り組んでいる。

珪石・珪砂:珪石・珪砂はガラス、建材、セラミック、鋳物、セメントなど多様な分野に利用される重要な工業原料鉱物である。珪石・珪砂は、シリカ成分の純度によって価格や用途が異なる。光学ガラス用などの高品位な珪石は、価格が高いため、オーストラリアや中国などから輸入されているが、建材用、鋳物用などの中品位な珪石・珪砂は主に国内鉱山から供給されている。しかし、鉱量枯渇等により鉱山の閉山が相次ぎ、供給量が不足しつつある。国内に新規鉱山を開発することは、高コスト、環境問題などで容易ではなく、海外に供給元を求めざるを得ない状況にある。そこで、地圏資源環境研究部門では、民間企業と共同で東アジア地域の珪石鉱床調査を実施している。



図7 愛知珪石(愛知県犬山市)の採石場。花崗岩による熱変成作用を受けた層状チャートで、建材用珪石として利用されている。

ベントナイト:ベントナイトはスメクタイトを主体とする粘土で、水を吸って膨潤する、懸濁液(ゲル)が高い粘性を持つ、イオン交換能を持つ、などの特性から、土木用止水剤、掘削泥、鋳物砂粘結剤、猫のトイレ砂、農業キャリヤなど多岐に渡る用途に利用されている。国内消費量の7割程度が国内から、残りが米国、中国などから供給されている。国内ベントナイト鉱床の埋蔵量は十分にあるものの、採掘・輸送コストの増大、環境問題による新規開発の困難さ、熟練技術者の減少などにより、中～長期的な供給安定性は必ずしも十分とは言えない。

ベントナイトは、近い将来建設される低レベル放射性廃棄物処分場の緩衝材としての役割が期待されている。この緩衝材は、廃棄体周囲に充填し、廃棄体への地下水の侵入を制限すると共に、万が一放射性物質が廃棄体から漏出した場合ベントナイトに吸着・固定させ、生活圈への移動を防止する役割がある。同処分場の建設が開始されると、多量の緩衝材用ベントナイトが継続的に必要となることから、国内のみならず海外にも十分な鉱量と性能を持つベントナイトの供給元を確保することが望ましい。



図8 ワイオミング州コベル地区でのベントナイト調査。広大な乾燥地域に十数層のベントナイト層が分布する。

地圏資源環境研究部門では、2010年より民間企業と共同で、ベントナイトの鉱物学的分析技術の確立および米国ワイオミングベントナイトの調査研究を実施している(図8)。ワイオミングベントナイトとは、ワイオミング・サウスダコタ・モンタナ各州にまたがって分布する世界最大のベントナイト鉱床の総称である。海外鉱としては緩衝材に最も有力な候補の1つであり、その賦存状況や性質を国内鉱と同様に把握することは、供給安定性や性能を確認する上で重要である。

4. まとめ

レアメタルショック以降、鉱物資源はお金を出せばいくらかでも買える、という時代は終わり、資源探査・開発はもとより資源国のインフラ整備や環境問題にまで輸入国が一定の責任を持たなければ手に入れることが難しい時代に入った。また、諸外国との激しい資源獲得競争の中で日本が権益を得るには、資源探査の迅速性・正確性のみならず政治力をも駆使しなければならない。資源問題は、正に産学官の総力を挙げて取り組まなければならない課題である。

目下の課題は、中国以外の地域で有望な希土類鉱床を探査・開発し、中国への希土類の依存度を少しでも減らすことである。また、中国への集中度が高いタングステン、アンチモン、チリへの集中度が高いリチウムなど、不安定要因を持った他の重要元素の供給対策も早急に開始しなければならない。今ほど産総研の活動が国民から期待されている時はないと言える。

文献

Bao, Z-W. and Zhao, Z-H. (2008) Ore Geology Reviews, 33, 519-535.

Yuan, Z., Bai, G., Wu, C., Zhang, Z., Ye, X., (1992) Applied Geochemistry, 7, 429-442.

Wu C, Huang D, Guo Z (1990) Acta Geol. Sinica 3, 193-210.

持続型炭素循環システム Sustainable Carbon-Cycle System

佐藤光三（東京大学 エネルギー・資源フロンティアセンター）

Kozo Sato

Frontier Research Center for Energy and Resources, The U. of Tokyo

e-mail address: sato@frcer.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化の主要因と考えられる二酸化炭素の過剰排出、ならびに人類の継続的発展を妨げかねない化石エネルギー資源枯渇の問題は、今世紀の科学・工学にとって大きな課題である。ここで論じる持続型炭素循環システムとは、「大気圏に過剰排出されている二酸化炭素を産生源である地圏に封じ、従前の形態である炭化水素に変換する」ことを目的とした自然調和的の行為であり、環境とエネルギーのジレンマに対する相補的解決策として捉えられる。このシステムにおいては、大規模排出源より分離・回収された二酸化炭素を地中貯留層に隔離し、微生物群を活用してメタンに変換することによって、再びエネルギー源として利用する。

2. 持続型炭素循環システム

持続型炭素循環システムは、エネルギー資源開発、二酸化炭素地中貯留、ならびに炭素変換の三つのエレメントからなる(図1)。これらは、それぞれの技術開発の歴史の長短に応じて異なる進化段階にある。本稿では、成熟した技術に関してはこれを概観し、発展過程にあるものについては、今後重要となるであろうコア技術に関する研究の一例を紹介する。

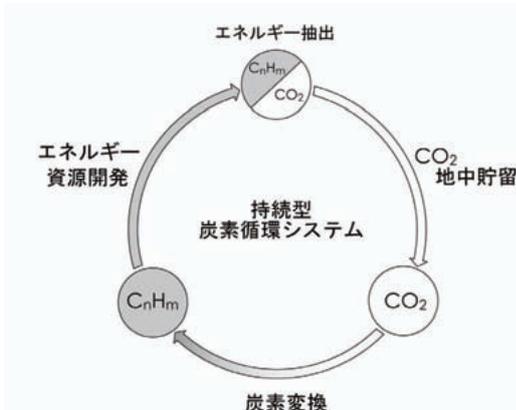


図1. 持続型炭素循環システムの概念図

2.1. CO₂-EOR

エネルギー資源開発の中でも、特に二酸化炭素を用いた石油増進回収(CO₂-EOR)に対する関心が高まっている。CO₂-EORの歴史は古く、二

酸化炭素の高圧圧入による回収率増進について既に1940年代から議論され、1970年頃からは実際の油田に対する適用が米国で開始された。1984年に大規模な二酸化炭素ガス田からのパイプライン網がPermian Basin向けに完成したことを機に適用例が増え、CO₂-EORは商業ベースの採油技術として認知されるに至った。現在(2008年)もPermian BasinはCO₂-EORの中心地であり、その生産量は世界のCO₂-EOR生産量の8割程度を占める。図2に示すように米国内のCO₂-EOR適用数は100を超え、その日産量は250,000バレルに上る。

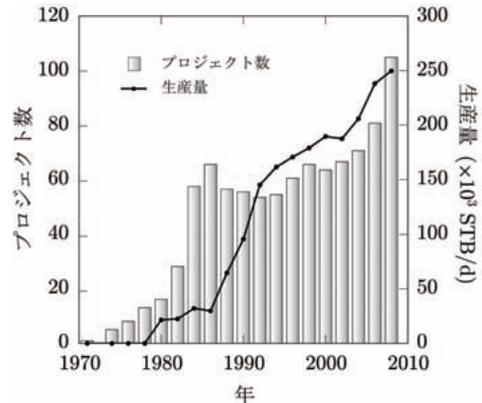


図2. 米国におけるCO₂-EORの推移

CO₂-EORは、基本的には置換効率の向上を意図したものであり、主に以下の効果による。

- ・石油との間にミシビリティーを達成し界面張力を消失させる。
- ・石油に溶解込み粘度を低下させる。
- ・石油に溶解込み膨潤させる。

これらの中でも、ミシビリティーの達成による回収率増進の効果は特に大きい。図3に温度40~60℃における二酸化炭素の密度と圧力の関係を示す。いずれの温度においても、圧力が約7MPaを超えるあたりから密度の急激な増加が認められる。これは、臨界温度(31.1℃)より若干高い温度域での圧力の増加に伴って二酸化炭素が液体に近い密度を呈する超臨界状態になるためであり、急激な増加が始まる圧力は二酸化炭素の臨界圧力(7.39MPa)に対応している。多くの

油層で想定される温度・圧力領域での密度 (600 ~ 900kg/m³) は石油の密度に近くなり、石油の成分を抽出してミシビリティーを達成し易くしている。比較のために示した窒素とメタン (臨界温度は氷点下) の密度は小さく、石油との混和性が低い。二酸化炭素が EOR に用いられるのは、その臨界温度が油層温度に近いという物理化学的な要因によるところが大きく、他の物質による代替は、容易には望めないのである。

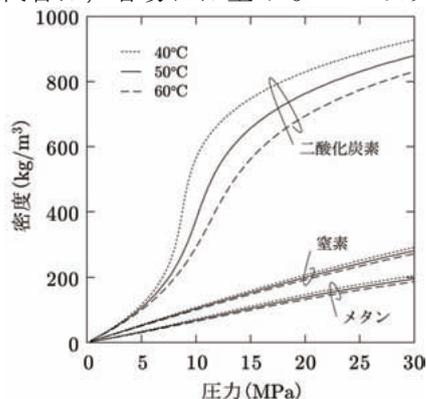


図 3. 油層温度域における密度と圧力の関係

2.2. CO₂ 地中貯留におけるモニタリング

地中に流体を圧入するノウハウは油ガス田開発に関連して蓄積されており、二酸化炭素の「地中圧入」は完成された技術である。しかしながら、油ガス田の開発期間は一般に数十年の単位であり、開発終了後に地中に残る流体に対して特段の注意が払われることはない。一方、二酸化炭素の地中貯留においては、圧入中は勿論のこと、圧入終了後も (少なくとも) 一定期間は二酸化炭素の貯留層内挙動や漏洩に関する監視を続ける必要がある。二酸化炭素の処理を「地中圧入」から「地中貯留」に展開するには、モニタリングによる貯留の安全性の確認が必須であり、万一漏洩が発生した場合に備えて補修技術を確立することも重要な研究課題である。

モニタリング技術に関しては、油ガス田の探鉱から開発・生産の種々の場面で用いられているもの (坑内物理検層、坑井間弾性波トモグラフィ、4D地震探査など) が応用できるが、コストの削減は重要な課題であり、既存技術の組み合わせによるモニタリングの効率化、ならびに新規モニタリング技術の研究開発に取り組む必要がある。安価で簡便な新規技術の開発例として、地球潮汐を利用したモニタリング技術がある。これは、坑井で観測される潮汐起因信号 (図 4) の経時変化を利用して、流体地中移動に伴う貯留層内二酸化炭素の飽和率変化を検知するものである。モニタリングのために必要なデータは圧力のみであり、常設型圧力計を用いれば特別な作業を伴うことなく、データ取得が可能であり、安価なモニタリングが可能となる。図 5 に解析結果 (χ は二酸化炭素の飽和率に関連する指標) を示す。物理検層 (グレースケール) による結果との整合性が確認できる。

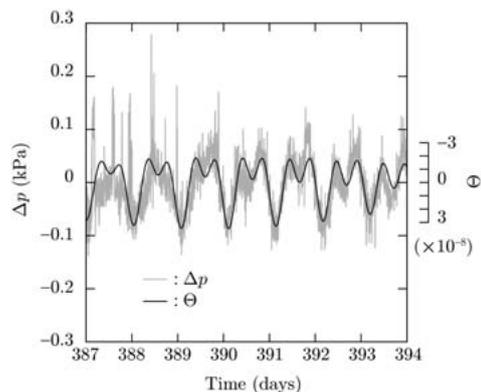


図 4. 地球潮汐起因の圧力変動

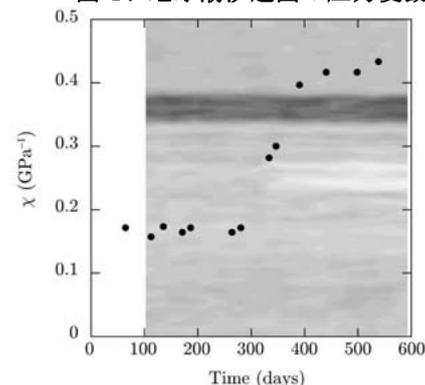


図 5. 地球潮汐を利用した二酸化炭素移動の検知

2.3. 微生物による炭素変換

地中貯留された二酸化炭素のメタン変換技術として、微生物の工学的利用を考える (図 6)。この種の研究は緒に就いたばかりであるが、以下の項目が喫緊の研究課題として考えられる。

- ① 二酸化炭素濃度がメタン生成に与える影響の解明
- ② メタン生成菌・水素生成菌混在環境下における有用ガス産生挙動の解明
- ③ メタン生成菌の代謝活性制御機構に関する遺伝子レベル解析
- ④ 微生物混合培養系の利用によるメタン生成促進効果の解析
- ⑤ 固体表面吸着が微生物の代謝活性と層内流動に与える影響の評価

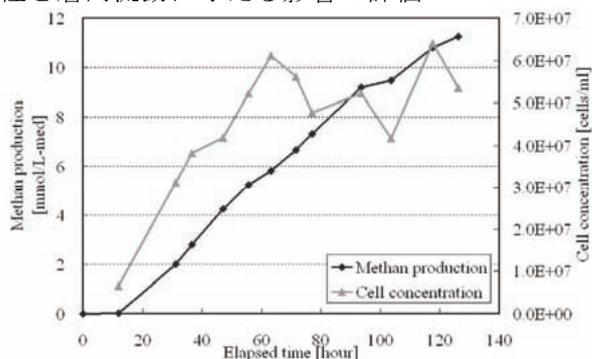


図 6. *M. thermolithotrophicus* によるメタン生成

3. 結語

持続型炭素循環システムを構成する三つのエレメントは、それ自体が巨大な技術群から成る。そのため、研究は還元主義的になりがちであるが、システム構築のためにはこれを排し、エレメント間の有機的関連に配慮した学際的アプローチが必要となる。

鉱物資源研究グループの希土類資源調査 Investigation of Rare Earth Resource Potential

渡辺 寧・実松健造・守山 武 (鉱物資源 RG)

Yasushi Watanabe, Kenzo Sanematsu, Takeru Moriyama
 Mineral Resources R.G.

*Corresponding Author, e-mail address: y-watanabe@aist.go.jp

1. はじめに

希土類を構成する元素の1つであるジスプロシウム(Dy)は、高温での保磁力維持のためにNdFeB磁石に添加される。この磁石はハイブリッド車や電気自動車のエンジン中のモータに搭載されるが、2003年以降のハイブリッド車の普及(図1)とともに需要が急増している。

現在、希土類の大部分は中国が供給している。中国国内の需要の増加のために、輸出に向けられる希土類資源量に制限が加えられ、希土類(特に磁石材料のNdやDy)の価格が高騰している(図1)。わが国の磁石業界や自動車業界からの希土類資源調査の要請を受け、中国外での新たな資源確保を目指して、鉱物資源研究グループは、2005年度に重希土類元素(特にDy)の濃集機構と資源ポテンシャル評価の研究を開始した。このプロジェクトは、2006年度からは地圏資源環境研究部門の重点研究課題の1つに取り上げられ、3年計画で研究を進めてきた。

私達の行ってきた希土類資源調査は1)希土類元素別資源データベースの作成と2)各種の希土類鉱床・鉱徴地の資源ポテンシャル調査からなる。データベースは2008年3月に完成したが、民間企業との共同研究として実施しておりここでは紹介しない。2)の各種の希土類資源ポテンシャル調査は現在進行中で途中経過を報告する。

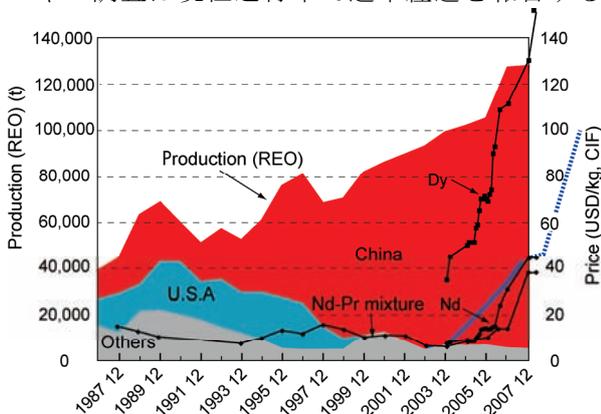


図1 希土類の生産量と価格(黒実線)の変遷。青実線はトヨタ自動車のハイブリッド車販売台数(右目盛り,単位万台)(毎日新聞2008年8月29日朝刊より)。青破線は将来見込み。

2. Dyの需要と供給：現状と将来予測

Dyは中国南部に位置する「イオン吸着型鉱床」(後述)と呼ばれる鉱床でほぼ全量生産されている。2005年度には中国で採掘されたDyの量は1,450tと見積もられ、回収量は1,160tと計算される(中国稀土情報中心資料)。日本のDy消費量は生産された希土類磁石の量から440tと見積もられている(工業レアメタル, 123)。Dyの消費量は年々増加し、2007年には700-800tに達したと見積もられている(工業レアメタル 124)。従って中国で生産されたDyの1/3以上は日本での希土類磁石の生産に消費されていることになる。

Dyの価格は2008年1月の142ドル/kgから7月の158ドル/kgへと11%値上がりしている(レアメタルニュース No.2363)。Dy酸化物でみると、中国から輸出された100tのうち日本が88tと88%を輸入しているが、これは世界向けの価格(112.61ドル/kg)よりも高価格(113.29ドル/kg)で日本企業が購入しているためである(レアメタルニュース No.2361)。

このように日本は中国から輸出されたDyを独占的に買い占めかろうじて希土類磁石の生産に向けているのが現状である。しかしながら中国での需要の伸びは著しく、2012年には中国国内の需要が供給量に追いつき、希土類の輸出が止まる可能性も指摘されている(図2; Roskill, 2007)。たとえ現状どおり希土類の輸出が行われても、日本を始め欧米での希土類磁石を使用したハイブリッド車や電気自動車の生産量が急増するため(例えば図1)、近い将来のDy資源の供給不足が予想され、中国外で新たな資源を確保する必要が生じることは間違いない。

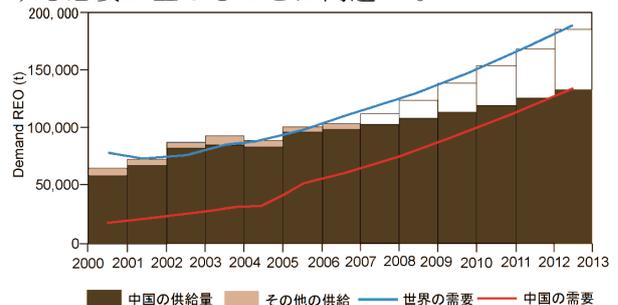


図2 希土類元素の需要と供給予測(Roskill, 2007)。

3. Dy の供給源：中国のイオン吸着鉱

中国外で Dy を含む重希土類資源の探査を行うためには、中国での重希土類鉱床の実態把握が必要である。鉱物資源研究グループでは中国江西省のイオン吸着型鉱床の文献調査および実地調査を行い、イオン吸着型鉱床を生成するための条件を検討した。

イオン吸着鉱床は希土類元素に富む花崗岩や火山岩の風化殻からなる(図 3)。地表付近での花崗岩構成鉱物の分解に伴って放出された希土類イオンが粘土鉱物に濃縮したもので、鉱石の希土類品位は低い(<0.2wt.%)が希土類の抽出が容易なため鉱床として採掘されている。現在生産されている Dy がすべてイオン鉱からもたらされたと仮定するとイオン鉱の希土類中の Dy 平均含有量は 3.8%と計算される。現在年間 4-5 万トンの鉱石(酸化物換算)が採掘されている。



図 3 江西省の花崗岩風化殻の産状。

中国のイオン鉱は江西省をはじめとする華南地域に約 90,000km²にわたり分布する(図 4)。148 万トンの埋蔵量が 1992 年に計上され(表 1)、2002-2003 年には江西省で 30 万トンの新規鉱体が発見されている(池汝安・田君, 2006)。これに基づくと、約 180 万トンの埋蔵量があり、Dy の埋蔵量は 59,000t と計算される。この量は現在の生産量(=需要)のほぼ 30 年分に相当する。南部 7 省全体では 5,000 万トンもの鉱量があるという見積もりもあるが詳細データは未公表である。イオン吸着鉱は地表部を広く開発するため環境問題の克服が課題である。

表 1 中国のイオン鉱埋蔵量(国务院稀土办, 1992)。Dy 金属量は筆者等の計算結果。

省	埋蔵量(REO t)
江西	547,000
広東	445,000
広西	336,000
湖南	111,000
福建	44,000
江西(新規鉱量)	300,000
合計	1,783,000
Dy	59,000

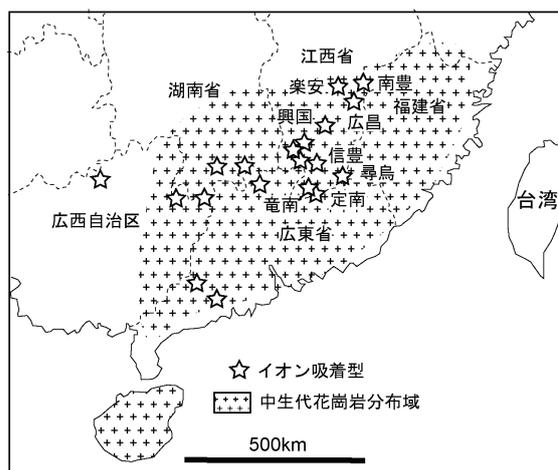


図 4 中国南部のイオン吸着鉱床の分布。

イオン吸着鉱の希土類組成は母岩である花崗岩の組成を反映する。そのため重希土類の多いものから軽希土類に卓越するものまで幅広く存在する。また鉱石の希土類含有量も母岩の希土類含有量を反映して 0.2%を超える「高品位鉱」から 0.05%以下の「低品位鉱」まで幅広い(表 2)。

表 2 イオン鉱の希土類含有量と組成比(Wu et al., 1990; Murakami & Ishihara, 2008; Bao & Zhao, 2008)

	竜南 (ppm)	定南 (ppm)	Heling (ppm)
La	19.5	80.4	881.0
Ce	38.5	196.5	237.4
Pr	7.3	16.1	168.9
Nd	35.0	63.0	641.1
Sm	18.7	12.9	86.2
Eu	0.3	1.8	10.2
Gd	29.9	11.9	40.8
Tb	7.7	1.9	5.0
Dy	43.3	10.8	19.1
Ho	8.1	2.0	4.1
Er	23.8	5.7	9.4
Tm	3.8	0.9	1.4
Yb	26.2	5.4	8.0
Lu	3.8	0.8	1.2
Y	235.1	59.0	86.5
REE 合計	265.9	410.1	2113.5
REE+Y 合計	501	469	2200

最大の重希土類の供給源である竜南鉱床は、約 35km²にわたり地表に露出する Zudong 花崗岩風化殻からなる(図 5)。Zudong 花崗岩は 148Ma の S タイプ花崗岩で重希土類に富むことを特徴とする。岩体はわずかな黒雲母花崗岩と大部分を占める白雲母花崗岩からなり、それぞれ熱水変質を蒙っているが白雲母花崗岩の方がより強い熱水変質を蒙っている(図 5)。花崗岩は、斜長石、石英、カリ長石、雲母からなり、白雲母花崗岩には副鉱物として Y シンキサイト Ca(Y,Ce)(CO₃)₂F が含まれるが、黒雲母花崗岩には含まれない。そのほかの副鉱物は微量の螢石、ゼノタイム、モナザイト、ジルコン、アパタイトである。

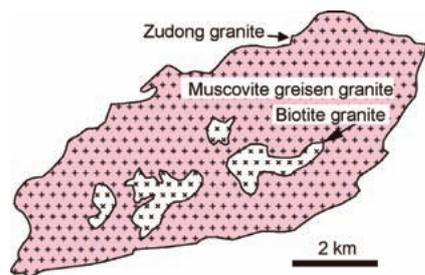


図 5 Zudong 花崗岩岩相図.

風化殻の平均層厚は 10m であるが部分的に 30m に達する．風化殻の主要構成鉱物はカオリナイトとハロイサイトであり，上部にはギブサイトを含む．そのほかモンモリロナイト，パーミキュライト，緑泥石，もともとの造岩鉱物(雲母，長石，石英)を含む(図 6)．

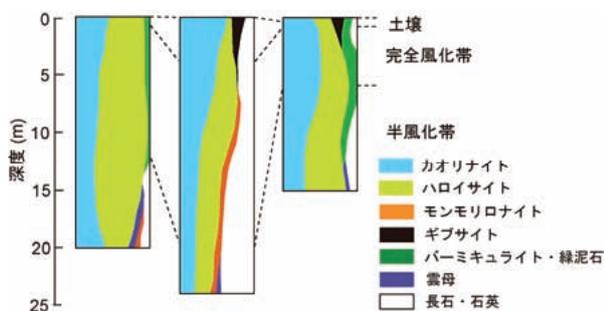


図 6 竜南鉱床の風化殻の粘土鉱物組成(Wu et al., 1990).

Wu et al. (1990)に公表されたデータに基づく，白雲母花崗岩風化殻には 517ppm の希土類(酸化物換算)が含まれ，Dy 量は 46ppm であるのに対し，黒雲母花崗岩風化殻は 371ppm の希土類含有量であり Dy も 21ppm と低い．それぞれの花崗岩風化殻の吸着分希土類と鉱物相に含まれる希土類の割合をみると(表 3)，白雲母花崗岩風化殻の吸着比率が高く，希土類含有量とあわせて良好な鉱石といえる．以上のデータから希土類資源量を産出すると 0.22Mt (REO) (Y 除く)となり，そのうち Dy 量は 25,600t と計算される．

表 3 竜南鉱床の希土類含有比率(Bao & Zhao, 2008)

	吸着分%	鉱物相%
白雲母花崗岩	85	15
黒雲母花崗岩	46	54

江西省南東部の Heling 鉱床は Heling 花崗斑岩の風化殻からなる．この花崗斑岩の分布は 32km² におよび風化殻での希土類濃縮率は 2.7 倍に達する．風化殻の平均層厚は 8.5m で希土類含有量は 2114ppm (REE, Y 除く)である(Bao and Zhao, 2008)．軽希土類に富み，Dy 含有量は 19ppm である．吸着性希土類の比率は 92%であり，希土類資源量は 0.62Mt (酸化物換算)と大きい．Dy 資源量は 4,760t と計算される．

Google Earth の画像では，これまでに Heling 鉱床の約半分の鉱体が採掘された，または採掘中と判断される(図 7)．



図 7 Heling 鉱床の Google Earth 画像．赤線で囲まれた部分が花崗斑岩分布地域．

江西省南部定南鉱床では解像度の高い Google Earth 画像を見ることが出来る．ここでは花崗岩風化殻中の希土類含有量が低く，しかも軽希土類に富む鉱石(表 2)であるにも関わらず現在盛んに採掘が行われている(図 8)．



図 8 定南鉱床の Google Earth 画像・数 100m x 数 100m 大の採掘場が多数分布する．

定南鉱床での希土類採掘は，これまでの風化殻を掘り出す工法ではなく，風化殻に孔をあけ硫酸アンモニウムを注入し，希土類を抽出する in situ leaching 法が用いられていることが分かる(図 9，図 10)．



図 9 画像中央部の白斑点部が風化殻に開けられた孔．中央左の青いプールが希土類沈殿槽．

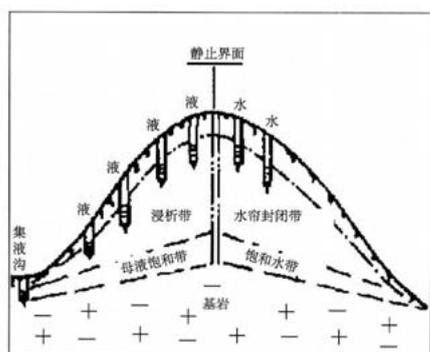


図 10 in situ leaching の模式断面図。硫酸アンモニウムを山の斜面から注入し、浸出帯で希土類の抽出を行う。溶液は浸出帯と基盤である花崗岩との間の母液飽和帯を流れ集液溝で回収される。一般に溶液回収率は 95%、希土類回収率は 75%とされる(池汝安・田君, 2006)。

以上の調査の結果は、イオン吸着鉱床の形成には 1)(重)希土類に富む花崗岩の存在, 2)厚い風化殻の形成, 3)熱水変質による物理的・化学的に分解しやすい鉱物の形成が重要であることを示す。

4. 中国外での希土類資源調査

当研究グループは、中国外の希土類供給源の調査として、層状マンガン鉱床、イオン吸着鉱、マグマ・熱水起源の燐灰石、アルカリ玄武岩起源ラテライト・ボーキサイト、Ta-Nb 鉱床の調査を行っているが、ここではイオン吸着型鉱化作用の研究経過を紹介する。

4.1 層状マンガン鉱床

守山ほか(2006)は日本での層状マンガン鉱床の鉄マンガン鉱石に重希土類が濃集していることを報告した。層状マンガン鉱床の形成場では、海底下で熱水活動の影響を受けてマンガンや鉄とともに希土類が沈殿しており、鉱石に含まれる希土類は鉄水酸化物に吸着されたと考えられる。従ってこの種の鉱床は、「海のイオン吸着型」鉱床と呼ぶことが出来る(渡辺ほか, 2007)。

規模の大きな同タイプの鉱床の希土類ポテンシャル評価を行うために、南アフリカ共和国(図 11)およびインドの鉱床調査(図 12)を行った。



図 11 南アフリカ共和国の層状マンガン鉱床。



図 12 インド、オリッサ州バメバリ鉱床の露天採掘場(守山・石原, 2008)。

層状マンガン鉱床のこれまでの調査結果によると、南アフリカ共和国の層状マンガン鉱石にはほとんど希土類の濃集が認められなかった(図 13)。インド北東部オリッサ県の鉱床には、日本の場合とは異なり、鉄をほとんど含まないマンガン鉱石にも希土類の濃集が認められたが、日本のものと比較すると含有量は少なく、資源としてのポテンシャルは極めて低いことが判明した。これらの鉱床は日本の層状鉄マンガン鉱床の成因とは異なり、広域的な海水組成の酸化還元状態の変化が鉱床形成に寄与しており、希土類を供給する熱水系が鉱床近傍に存在しなかったことが希土類に乏しい鉱石を形成した原因と推定される。

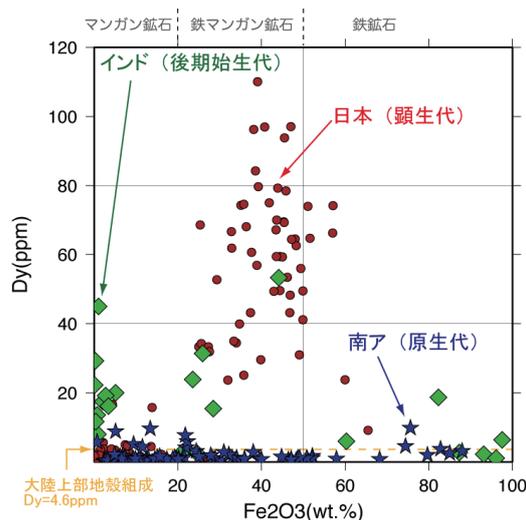


図 13 日本、南アフリカ共和国、インドの層状マンガン鉱床中のジスプロシウム(Dy)含有量。

4.2 中国外でのイオン吸着鉱

韓国や日本でのイオン吸着鉱の調査結果は既に報告している(渡辺, 2006; 村上・石原, 2006)。これらの地域では希土類に富む花崗岩は存在するが、風化殻の発達が悪いため鉱床を形成しないことが判明している。これは新第三紀以降もプレートの沈み込み域に位置し隆起が続いた日本と大陸内陸部に取り込まれ地殻が隆起しなかった中国南部との差異と解釈している。

2007年度はラオス、ベトナム、タイの花崗岩風化殻の調査を実施した。これらの地域では風化殻の発達は良好である(図 14)。ラオスでは、ラオス南部から中部地域に分布する 4 地域の花崗岩風化殻の調査を実施した。これらの地域では風化殻が十分な厚さまで発達しているものの、

一部の例外を除いて希土類含有量は岩体毎の平均で 100-300ppm とあまり高くなく(図 15), また花崗岩の組成と比較しても希土類の濃縮率は 20%と小さいことが判明した. これらの地域の希土類分析結果をみると, 重希土類に富んだ花崗岩や風化殻は発見されず, 軽希土類に富むものが多いことが判明した. しかしベトナム北部で優良なイオン吸着鉱が見つかっており, 今後の調査結果の進展が待たれる.



図 14 ベトナム Nui Phao 地域の花崗岩風化殻

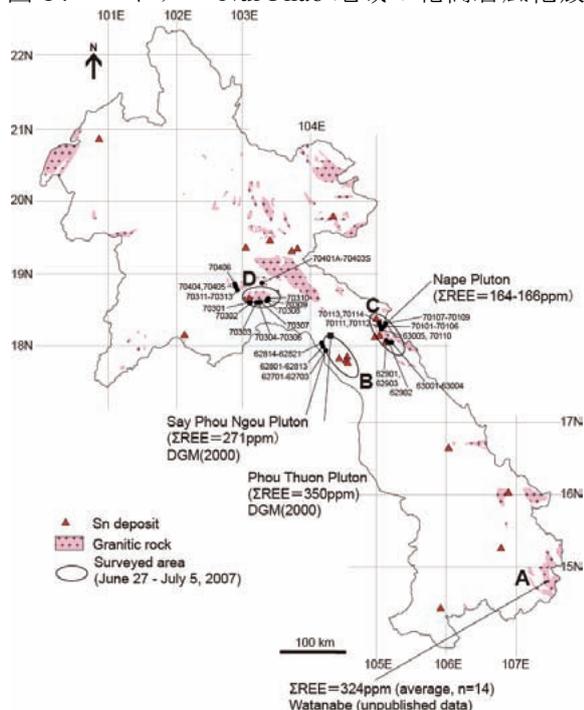


図 15 ラオスでの花崗岩分布と希土類調査地域 (A-D)と風化殻中の希土類含有量.

4.3 アルカリ玄武岩起源ラテライト

ラオス南部のアタプ市北西側に広がる Bolaven 台地には中生代の堆積岩類の上位に第四紀のアルカリ玄武岩溶岩が東西 50km, 南北 100km にわたり広く分布している(図 16). 現在この地域では国際協力機構(JICA)による「ラオス鉱業分野投資促進のための地質・鉱物資源情報整備計画調査」(Geological Mapping and Mineral Information Service Project) (2006-2008)により 20 万分の 1 地質図の作成および鉱物資源の調査が実施されている.

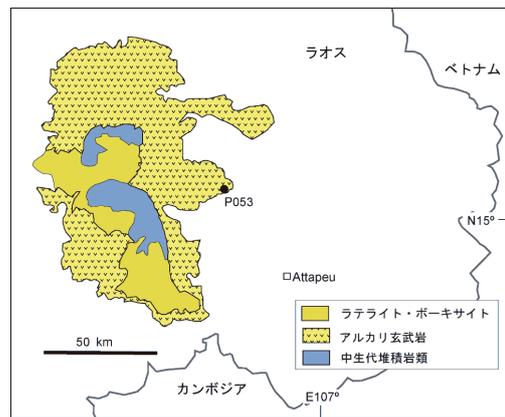


図 16 ラオス南部ボローベン台地のアルカリ玄武岩およびラテライト・ボーキサイトの分布.

この玄武岩溶岩は高温多湿の気候のためラテライト風化を蒙っている. JICA の行った調査の化学分析の結果, Bolaven 台地のラテライトの一部には, Al_2O_3 が 33.1%, Fe_2O_3 が 37.9%, TiO_2 が 7.22% 含有され, 希土類元素の濃集(約 1000ppm)が認められた. 追加調査および分析の結果は, ラテライト試料が, ギブサイト, 針鉄鉱, 磁鉄鉱から構成され, 希土類が 900-1000ppm 含有されることを示した. 先に分析された試料と合わせて希土類組成構成は極めて類似している. 下部の緻密なラテライトの希土類含有量は 225ppm であり, 希土類は風化帯上部に濃集している. これらのラテライトにはスカンジウムも 20-40ppm 含まれている.

このようなラテライトは Bolaven 台地に広く分布しており, 層厚も 4-5m 見込むことができる. 仮に $100km^2$ の地域の厚さ 5m のラテライトに 900ppm の希土類が含有されていると仮定すると, 約 100 万トンの希土類量(REO 換算, Dy: >20,000t)が見込まれる. この量は先に述べた中国の大型イオン吸着型鉱床(竜南)に相当する.



図 16 ボローベンラテライトの産状

ラテライト中の希土類の存在形態を EPMA で観察した結果, 希土類(Ce)は P と挙動をとともにしており, 燐酸塩[lörcenite; $CeAl_3(PO_4)_2(OH)_4$]して存在することが確認された(図 18). このことは希土類の溶出の容易なイオン吸着型鉱床と希土類品位を直接比較できないことを示す. し

かし、Nasraoui et al. (2000)はコンゴのカーボナタイトの風化殻の研究から、軽希土類は磷酸塩鉱物として沈殿、重希土類は鉄水酸化物に吸着することを明らかにしており、(重)希土類の一部は針鉄鉱に吸着されている可能性も残される。ラテライトが希土類資源として利用できるかどうかはイオン吸着量を明らかにする今後の溶出実験の結果にかかっている。

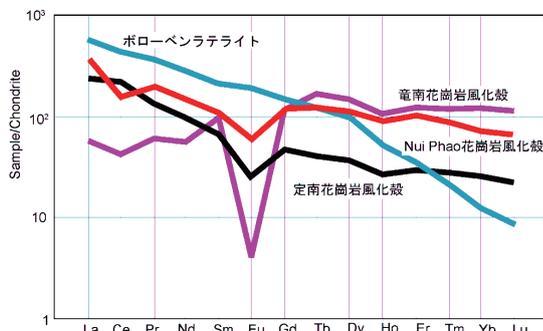


図 17 ボローベンラテライトの希土類組成。中国、ベトナムのイオン吸着鉱との比較。

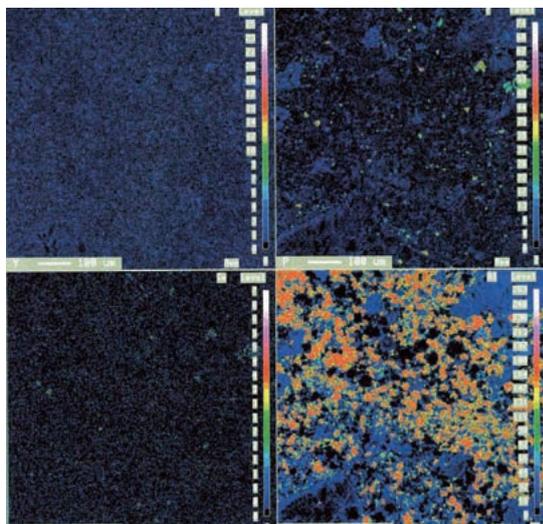


図 18 EPMA によるラテライト中の元素マッピング結果。左上(Y), 右上(P), 左下(Ce), 右下(Al)。

4.4 ボーキサイト

ボローベン台地のラテライトの風化が進むとシリカが完全に溶脱してボーキサイトとなる。このボーキサイトは、イタリアータイの共同プロジェクトとして調査が行われ、現在中国の公社である China Non-ferrous Metals International Mining Co. Ltd. (CNMIM)がこの地域に 138km²の鉱区を確保し、オーストラリアの Ord River Resources と共同で鉱床開発に向けた探鉱を行っている。Ord River Resources は 2006 年に、この地域で 200m x 100m 間隔で 65 本の試錐を行い、27%のカットオフ品位で、平均 6.7m のボーキサイト層の厚さ、平均品位 35%の鉱石を確認した。世界の一般的なボーキサイト鉱石(50-60 重量%)より低い、この地域の豊富で安価な電力をもとに中国-オーストラリアによる鉱山開発、選

鉱、アルミニウム精錬が現地で行われる予定である。

このボーキサイト層の下部にはカオリナイトを主体とする粘土層、さらにその下部には粘土化した砂岩層が認められる(図 19)。



図 19 ハンマー位置より上の赤茶けた部分がボーキサイト、ハンマーの位置が粘土層、ハンマーの下の部分は粘土化砂岩。

ボーキサイト層の希土類含有量は 212ppm (Dy: 4ppm)ともとの玄武岩の希土類含有量と大差がないが、下部の粘土層には 2430ppm (Dy: 54ppm), 粘土化砂岩層でも 745ppm (Dy: 29ppm) の希土類が含まれる。これらの希土類はもともとラテライトに含まれていたものが、風化の進行とともに溶脱され、下部のカオリナイトに吸着され濃縮したと推定される。希土類含有層の厚さの見積もり等の調査が今後必要となるが、ボーキサイト開発時に下部の粘土層から希土類を副産物として抽出・回収することが出来るかもしれない。

文献

- Bao, Z. and Zhao, Z. (2008) Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China. *Ore Geology Review*, 33, 519-535.
- 工業レアメタル 124(2008)レアアース. アルム出版社.
- 守山 武・石原舜三(2008) インド東部, オリッサ州の後期始生代マンガン鉱床. *地質ニュース* 第 647 号口絵, p.1-2.
- 守山 武・渡辺 寧・村上浩康(2006) 層状鉄マンガン鉱床の重希土類鉱床としての可能性. *Green Report 2006*, p. 65-66.
- 村上浩康・石原舜三 (2006) 足摺岬深成岩類風化土壌の希土類地球科学: 希土類資源としての蓋然性について. *地球化学*, 40 巻, p.147-165.
- 渡辺 寧・守山 武・村上浩康(2007) 第 3 章 レアメタルを探す. *レアメタル 技術開発で供給不安に備える. 独立行政法人産業技術総合研究所レアメタルタスクフォース編. 工業調査会*, p. 50-90.

地下水に関する基盤情報 —水文環境図のねらいと今後の展望—

Basic information for Groundwater

—The aim of Water Environment Map and the prospects—

地下水研究グループ： 町田 功

Groundwater Research Group : Isao Machida

Phone: 029-861-3736, e-mail: i-machida@aist.go.jp

1. はじめに

2007年度における日本の水使用総量は808億 m^3 、そのうち地下水への依存率は11.7%である¹⁾。地下水は河川水と比較して水質や恒温性、経済性に優れているが、その利用は重大な地下水障害を引き起こすことがある。そのうち最も深刻なもの1つが、戦後から高度経済成長期に進行した地盤沈下であろう。地盤沈下は地下水の過剰揚水が原因であり、これによって発生・拡大した0m地帯は高潮や洪水などによる被害を受けやすくなる。さらに、地球温暖化が進むと海面が上昇したり、暴風雨の規模が増大したりすることが予測されているため、この被害はさらに拡大する恐れがある²⁾。今日では地盤沈下対策として工業用水法などの法令によって揚水規制が行われており、特に都市域においては事実上地下水が採取できない環境が一般化した感がある³⁾。その結果、70年代から徐々に地盤沈下速度は緩やかになり、地下水の水位は上昇しつつある。近年では逆に地下水位が回復・上昇し、東京駅や上野駅の地下部分が浮力によって浮き上がる等の新たな問題が生じており、大阪市では地下街や地下鉄のトンネルへの湧水増等の事例が出てきている²⁾。

このような背景の中、従来になかった視点からより積極的に地下水を利用しようとする動きがある。例えば、今後の地下水利用のあり方に関する懇親会⁴⁾では地下に存在するダムとしての機能を強調し、緊急水源としての地下水の役割を述べている。1995年の阪神淡路大震災など大きな震災時には、消火用や医療活動(病院)、洗濯やトイレなど各用途に応じた緊急的な水の確保が問題となった。地下水は井戸とポンプがあれば容易に得ることができるため、大規模震災でインフラが破壊されてしまった時の緊急水源として大いに役立つであろう。

また、近年は少雨年と多雨年の変動幅が次第に増加し、渇水年の年降水量が減少傾向にあるのみならず、年最大連続無降雨日数(降水のない日が連続する最も長い期間)も長くなる傾向が認められている。こうした現象によりダム等の水資源開発施設が計画された当時の開発水量を安定して供

給できないなど、水供給の利水安全度(実力)が低下している。そのため、河川水と地下水の総合的な利用方法を考えることが重要な検討課題となっている。

一方、省エネルギーという側面からも地下水に注目が集まっている。地表水温は気温と比較して年変動が小さいことは良く知られているが、最近はこの地下水の恒温性を利用した地中熱ヒートポンプシステムが注目を浴びている。地中熱ヒートポンプを利用したエアコンは初期投資を必要とするものの、消費電力が小さいため長期でみれば経済的であるといわれており、さらに地下にて排熱をおこなうためヒートアイランドの抑制にもつながる。地中熱ヒートポンプシステムは2005年時点で欧米では既に計100万台以上が普及しているが⁵⁾、わが国においても広く認知されはじめており、将来的に急速に普及する可能性がある。

このようにいくつか魅力的なアイデアが生まれているが、これらを実現するためにも地域の地下水の現況や水文地質を明らかにし、地下水障害を引き起こさないよう適切な管理を行う必要がある。さらに今日では地下水を使うだけでなく、涵養についても積極的に関与していこうという「育水」という概念も広がりつつあり、地下水を含めた水循環に関する情報を広く発信することが重要になっている。

2. 地下水関連図幅と水文環境図

(独)産業技術総合研究所の前身の一部である地質調査所は1951年から日本の各地において工業用水源の確保と保全に関する調査・研究をおこなっている。この調査結果をとりまとめ、将来の地下水源利用に資する目的で、1961年より日本水理地質図が発行された⁶⁾。このシリーズは、以降、第41号の鹿児島県奄美諸島水理地質図⁷⁾まで37年間発行されているが、その多くが1枚紙の地図上に地下水産出量分布や水質を中心としたデータを記載するスタイルである。

一方、このような地下水関連図幅は他の省庁からも出版されている。地下水の流動を意識した例としては農水省地方農政局による水理地質図があり、地形・地質や地下水ポテンシャル分布、水質

等が描かれている。国交省では 1990 年から地表水と地下水の適正な利用を目的とし、全国 10 地域で地下水マップを作成している。また、一部の都道府県の研究機関でも同様の図幅を出版しているところもある。ただし、農水省の水理地質図は現在作成が行われておらず、地下水マップも 2001 年以降は出版されていない。

2001 年に産総研が発足すると、日本水理地質図の後継として水文環境図が考案され、2002 年から 2008 年までに 5 つの地域で出版された。水文環境図は地下水資源の保全と有効利用に資することを目的としているが、特に将来的な地中熱利用を見越し、地下水温情報を重点的に編集していることが特徴である。地下水関連図幅内で地下水温データを併記する理由は地中熱ヒートポンプシステムの効率が地下水の存在や地下水の流速にも影響されるためである。以上の理由から、水文環境図では複数の地盤沈下観測井を用いた地下水温鉛直プロフィールの実測結果を編集している。

なお、このような温度データは地下水流動を把握するためにも役立つ。一般に地下水の温度は地域の平均気温とほぼ等しいといわれているが、この調査によって深度方向の変化が明確になっただけでなく、盆地の中央部や流域の下流部で地下水温は高く、山地部では低くなることが明確に示された(図 1)。これは地下水の流動によって、熱の輸送が行われたためと考えられている⁸⁾。

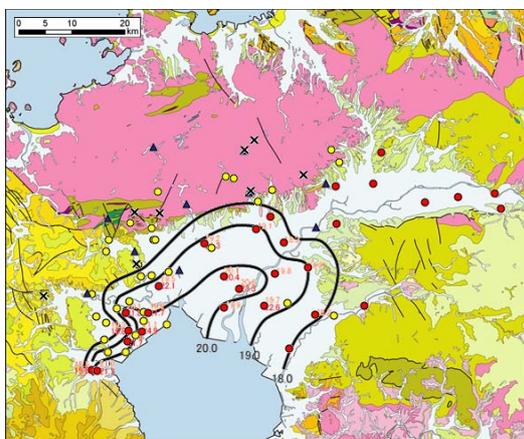


図 1 水文環境図 No.5「筑紫平野」(内田ほか, 2007)⁹⁾
標高-50m における等水温分布。地下水涵養域である山地周辺では 18°C以下であるのに対し、流出域の平野中央部では 20°C以上となっている。

一方、日本水理地質図からの体裁面での大きな変化として、コンピューターの普及を背景とした電子媒体 (CD) による収録が挙げられる。従来の 1 枚紙の図幅は持ち運びや利用が容易であった半面、紙面が限られているために多種の情報を掲載することが困難であった。図幅を電子媒体に収録したことにより、大量の空間情報を比較検討できるようになり、例えば地下地質、地下水水質、地下水温の関係をより視覚的に表現することができ

るようになった。

3. 水文環境図の編集指針

このように水文環境図は 2008 年までに 5 つの地域で出版されてきたが、地圏資源環境研究部門・地下水研究グループではその間にもデータの編集項目や記載方法についての議論があがっていた。そこで水文環境図 No.5 の出版を終えた 2008 年度末から、水文環境図の発展のための複数回にわたる討論をおこなった。討論の目的は No.6 以降の編集項目の決定である。

実はわが国において地下水関連図幅の編集項目に関する議論は古くからあり、その代表的なものは 1970 年代の水文地図作業グループによるものである。同グループ代表の高村は“地表面下における水文要素の地図化”の議論にて図幅に記載すべき項目を複数リストアップする一方、これらを全て網羅するのではなく、図幅の作成目的のために必要にして最小限の情報を収容することを考えるべきと述べている¹⁰⁾。このスタンスは図幅が紙ベースの場合、すなわち記載できる情報に制限がある場合を前提としているものの、電子媒体での図幅作成においても傾聴すべき意見であると思われる。すなわち、電子媒体は膨大なデータを収録可能であるが、内容の統一性を失うことなく限られた人資で質の高い図幅を作成するためには、編集すべき内容を絞り焦点を定めておくべきである。

そこで地下水グループは昨今の地下水関連図幅やデータベースの現状、近年の社会情勢、所内外からいただいた水文環境図へのリクエスト、当グループの作業体制、地質調査総合センターの強みなどを考慮し、今後の水文環境図の中心的な編集項目とそれに係る指針(編集指針)を決定した¹¹⁾。このうち編集項目は図 2 のようにまとめられる。

	地下水	地中熱
現況	一般水質・無機汚染項目	現況の地下水水面図
	透水係数分布	
	水文地質断面	
過去	水理地質基盤	地下水水位変化
	過去の水質分布	過去の水温分布
その他	地質図	地形図
	地質断面	線路・国道

図 2 水文環境図の中心的な編集項目

これには地域の水文地質を理解する上で重要な地下水位、透水係数、一般水質などの情報が含まれているが、特に環境変化を考慮して、過去の水位、水質データを加えていることを強調したい。また、今まで中心的な編集項目であった地下水温に関する情報は、ヒートポンプシステムの認知度が徐々に高まりつつあることから、今後も編集項目に加えることにした。なお、図 2 は水文環境図にて編集すべき最低限を示したものであるため、実際にはこれに加えて図幅の作成者がその地域で

重要と思われる水文情報を判断し、編集項目を加えることになる。例えば、降水量分布や河川流量分布は掲載項目からは外れているが、これらの情報が地下水を理解する上で重要な地域においては図幅作成者の判断により、編集が行われることもある。このような付加情報の例については次章で述べる。

4. 水文環境図 No.6「山形盆地」¹²⁾のねらい

編集指針では編集対象としている面積によって、帯水層構造か水理地質基盤の把握を行うことを定めている。山形盆地の第四系内の帯水層構造については現在議論がおこなわれており、統一された見解は示されていない。そこで水文環境図 No.6では水理地質基盤の把握を試みた。これはいわゆる地下水盆の形状を把握することと同じである。地下水盆は難透水性の水理地質基盤の中に充填された地層の集合体からなっており、一般に地質学がいうところの「堆積盆」そのものであることが多い(図3)¹³⁾。普段、我々が利用している地下水は地下水盆中の地下水であり、これは自然の水循環の一部を構成する。地下水の持続的な採取可能量とは、この地下水盆内に涵養される水から流出する水を引いた収支から導かれる。このような理由で、地下水盆の把握は適切な地下水利用のために欠かせないものである。一方、水理地質基盤中に存在する地下水は極めて流れにくく、化石水のようなものが含まれる。このような地下水は一度使用したらなくなってしまう、石油と同じような性質をもつ。難しいのは、水理地質基盤は必ずしも地質区分と一致していないことである。

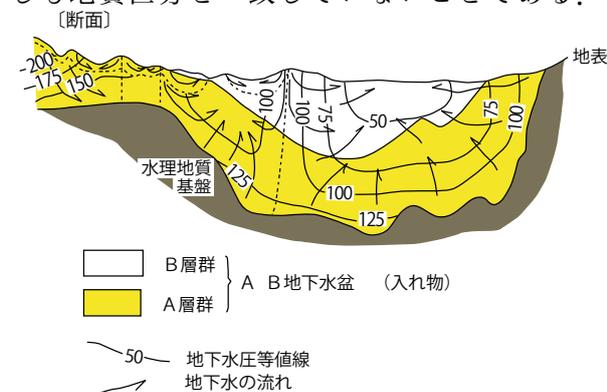


図3 地下水盆のイメージ図
(柴崎, 2004¹³⁾を一部修正)

従来、山形盆地の地下水盆は第四系からなり、水理地質基盤は第三系からなると考えられてきたが¹⁴⁾、その根拠は明らかではなかった。そこで、山形盆地 No.6では地下水の水質・同位体に関する詳細な調査を実施し、その特性や地下水年代を推定することにより流動性の判断を試みた。このように図幅作成に研究の要素を取り入れることは、研究者が直接現地調査に携わる地質調査総合センターの強みである。実際の作業としては、個人所

有の浅井戸、農業用井戸、工業用井戸だけでなく、温泉水の調査を実施し、各種のイオン濃度や酸素・水素安定同位体比に加え、必要に応じてトリチウム(水素放射性同位体比)や¹⁴C(炭素放射性同位体比)を分析した。

これにより、地下水盆の実態にせまっただけでなく、どこに(位置、深度)、どのような性質の地下水が存在するのかが示すことができた。結果例を図4に示す。

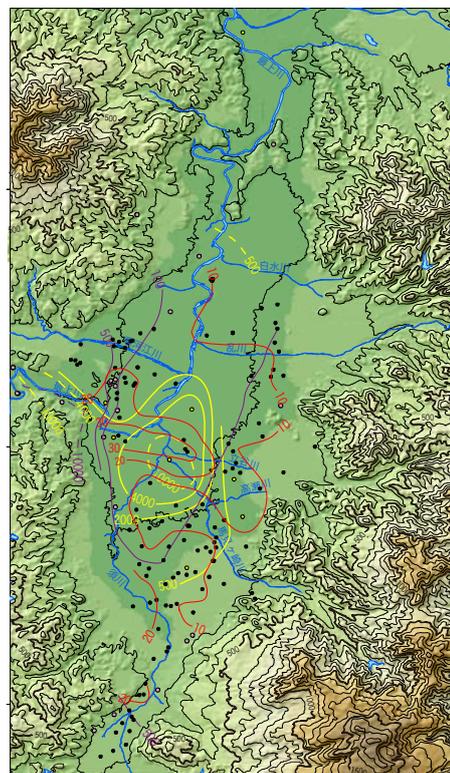


図4 山形盆地における地下水中のCl濃度。地下水および温泉の現地調査結果に既存データを加えた。第四系内の濃度コンターは赤色、第三系浅層の地下水(400m以浅)は紫色、第三系深層の地下水(400m以深)は黄色で示されている。第三系深層では盆地全域にてCl濃度が高い。これらの地下水にはNaも多く含まれており、化石水などと呼ばれている。第三系浅層ではCl濃度が高く、地下水が非流動性になりつつあることが示されている。

詳細は省略するが、水質面ではさらに幾つかの試みをおこなっている。例えば、環境省の概況調査¹⁵⁾によって、最も環境基準超過数が多いとされている硝酸態窒素について分析をおこなった。その結果、昭和60年に選定された名水百選の1つ、“どんこ水”(写真1左)においても10ppmを超える硝酸イオンが検出されており、上流地区の施肥利用が下流側に影響を及ぼしていることが明らかになった。また、山形盆地では古くから鉄気水(かなげみず)と呼ばれる鉄分を多く含む地下水が存在することが知られている(写真1右)。鉄のような自然由来の重金属イオンが地下水中に存在できるか否かは、地層の性質と地下水の酸化

還元状態に大きく影響される¹⁶⁾。そこで、地下水の酸化還元電位や溶存酸素などの調査をおこない、鉄濃度分布との関係を求めた。このとき、同時に地下水環境基準項目や要監視項目のうち、自然由来による汚染が多いとされる重金属イオン（砒素、クロム、マンガンなど）¹⁵⁾についても調査した。



写真1 どんこ水（左）。生活用水や養魚などに利用されているだけでなく、この地下水が流入する小見川上流部は県指定天然記念物イバラトミヨが生息する。右は鉄気水を消雪用に散水したことにより、赤茶色に変色した路面。

一方、操作性という面でも改善を試みた。図が100枚を超えるような出版物では、図をながめつつ（別のページに掲載されている）説明文を読む場合があるが、読者にとってこれはしばしば面倒な作業である。このような不便性はCDによる編集によって解決できると考え、説明書と図面のリンクを強化した（図5）。

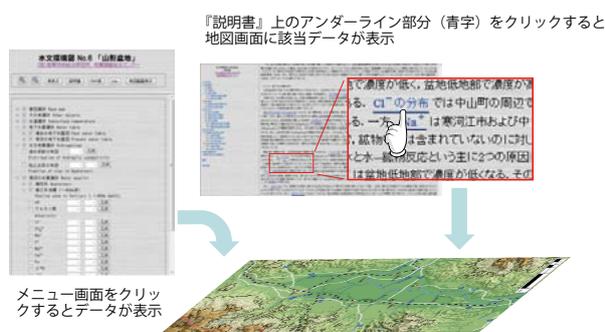


図5 説明書と図面のリンク強化

5. さらなる発展に向けて

前章までに述べてきたように、水文環境図では幾つかの試みをおこなっている。現在では「石狩平野」および「熊本平野」の編集をおこなっているが、今後は水文環境図 No.6「山形盆地」では対応しきれなかった、様々な改良を加えていく予定である。例えば地下水盆の形状、広域地下水流動、地下水位、地下水流速情報に関しては、地下水研究グループが平成19年度より実施中の地下水賦存量調査結果を積極的に利用する予定である。この調査では日本全国のボーリング柱状図を収集、

解析することにより、平野や盆地スケールでの地下地質構造を明らかにし、さらに地下水流動シミュレーションをおこなっている。これらのデータを加えることによって、地域の水文地質情報をより詳細に検討できると考えられる。

参考文献

- 1) 地下水対策の概況 平成21年度：経済産業省，(2009)
- 2) 見えない巨大水脈 地下水の科学：日本地下水学会・井田徹治，講談社，(2009)
- 3) 都市における地下水利用の基本的考え方：共生型地下水技術活用研究会，(2007)
- 4) 健全な地下水の保全・利用に向けて－「今後の地下水利用のあり方に関する懇親会」報告－：今後の地下水利用のあり方に関する懇親会（代表：佐藤邦明），(2007)
- 5) 地中熱ヒートポンプシステムとは？：地中熱促進協会，(2007)
- 6) 村下敏夫・武居由之：日本水理地質図1 木曾川左岸・矢作川および豊川流域水理地質図説明書，地質調査所，(1961)
- 7) 野間泰二・後藤隼次：日本水理地質図41 鹿児島県奄美諸島水理地質図，地質調査所，(1998)
- 8) Dominico, P.A. and Palciauskas, V.V.: Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow. Geol. Soc. Amer. Bull., 84, 3803-3814. (1973)
- 9) 内田洋平・稲富忠将・藤井光・町田功：水文環境図 No.5「筑紫平野」，地質調査総合センター，(2007)
- 10) 高村弘毅：水文環境の地図化とその問題点－水文環境地図特集号に寄せて－，地理学評論，54-12, 683-690.
- 11) 町田功・伊藤成輝・内田洋平・井川怜欧・丸井敦尚・田口雄作：水文環境図の編集指針－ユーザーが求める情報を提供するために－，地質調査研究報告，61(1/2), 75-83, (2010)
- 12) 町田功・内田洋平・石井武政：水文環境図 No.6「山形盆地」，産総研地質調査総合センター，(2010)
- 13) 農を守って水を守る 新しい地下水の社会学：柴崎達雄編著，築地書館，(2004)
- 14) 内田洋平・佐倉保夫・荒川隆嗣：山形盆地の地下の温度分布から推定される地下水流動，ハイドロロジー，23(4), 169-179, (1993)
- 15) 平成20年度地下水質測定結果：環境省，(2009)
- 16) Soil chemistry (土壌の化学)：Bolts and Bruggenwert (岩田進午，三輪睿太郎・井上隆弘・陽捷行訳)，学会出版センター，(1976)

地下水研究グループ Groundwater Research Group

地下水研究グループ長：丸井 敦尚

Leader, groundwater Research Group: Atsunao Marui

Phone: 029-861-2382, e-mail: marui.01@aist.go.jp

1. ご挨拶

本研究グループは、昨年 12 月 1 日付けで発足したばかりの当部門で最も新しい研究グループです。地下水の環境や資源についての評価・解析を実施しています。深部地下水の研究や塩淡水境界研究にも力を入れています。

具体的には；

- ・ 水文環境図の作成
- ・ CCOP 地下水プロジェクト
- ・ 全国工業用水道水資源調査
- ・ 沿岸域調査図（帯水層・断層・湧水）
- ・ 地中熱利用（蓄熱システム）研究
- ・ 地下温度分布調査と地下水流動解析
- ・ 広域地下水流動研究（関東平野）
- ・ 大都市圏プロジェクト
- ・ 海底湧出地下水分布研究
- ・ 地下水流動解析新手法の開発
- ・ 全国帯水層分布調査研究
- ・ 地層処分に係る地下水流動研究
- ・ 地中貯留に係る地下水流動研究
- ・ 地下水の長期安定性モニタリング研究などが挙げられます。

2. グループメンバー

丸井敦尚(グループ長)

内田洋平、安川香澄、宮越昭暢、町田功、井川怜欧、小玉浩、菅野真紀、中山京子、潮田みどり、樽沢春菜、伊藤成輝、吉澤拓也、越谷賢、細谷真一

3. 具体的な調査・研究事例の紹介

3-1 全国工業用地下水資源量調査

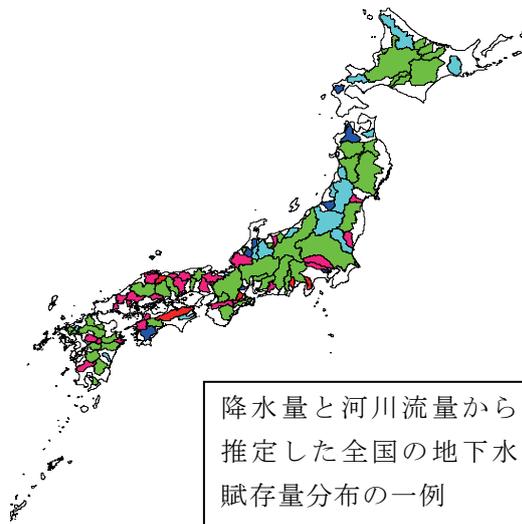
○安全で安心できる地下水資源の量的評価と確保について：地下水は平野や盆地など、地下水盆と呼ばれる帯水層の集まりの中に貯留され、山から海へとゆっくり流動しています。量的に見れば、年間の流動量を超える揚水をするとう地下水の枯渇を招くこととなります。一方、質的に見れば浅い地下水は農業や牧畜に利用されていますし、深すぎる地下水は温泉のように溶存物質が多すぎて工業利用に耐えません。このようなバランスのなかで地下水障害を起こさない

工業利用可能な地下水資源を量的・質的に評価します。本調査を実施することにより、〇〇平野では×m 程度の帯水層から工業用地下水を年間△万 t 揚水可能というようなソリューションが得られます。

○全国を対象とした概要調査：全国の地下水盆を対象とした地下水の総量を調査します。帯水層の広がり（国土数値情報）や帯水層の深さ（地質調査所データベース）をもとに全体量を先ず算出し、降水量や河川流出量などから地下水としての流動量を計算します。これで、利用可能な地下水の利用可能総量（この時点では過大評価している）が分かります。

*かつてはこれを地下水の利用可能量としてこれに 0.8 を掛けた値を適正量としていました。

○地下水盆ごとの資源量（量的評価と質的評価）：可能性の高い地下水盆を対象に詳細な調査を行います。地下水の温度分布などの既存資料から流動している地下水とそうでないところ、水質的につかえなさそうなところを判定します。これにより、工業用地下水の存在している深度などが分かるだけでなく、地下水障害を起こさない資源量を正確に判断することができます。全国の一級河川が 104 本あることを考えると、全国一斉調査をするのに 3～5 年程度必要かもしれません。



降水量と河川流量から推定した全国の地下水賦存量分布の一例

3-2 水文環境図の作成

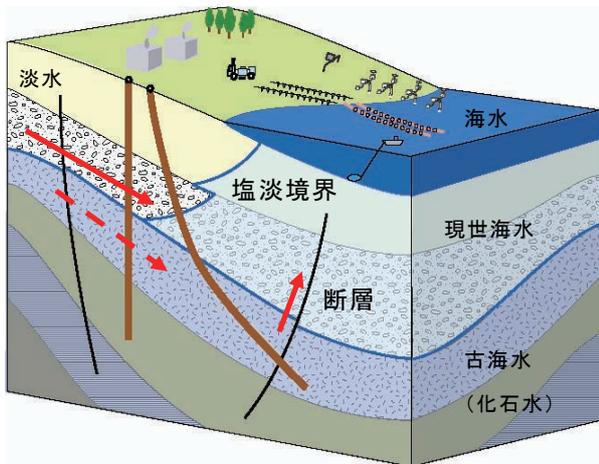
全国の平野や盆地など、地下水の賦存量が大きく人口の集中している場所を中心にその水文環境を表した水文環境図を制作しています。かつては水理地質図や地下水資源図として表現されていたものですが、時代の要請と共にその呼び名も変化し、現在では環境情報の発信源としての役割を担っています。



水文環境図の一例（仙台平野）

3-3 地層処分に係る地下水流動研究

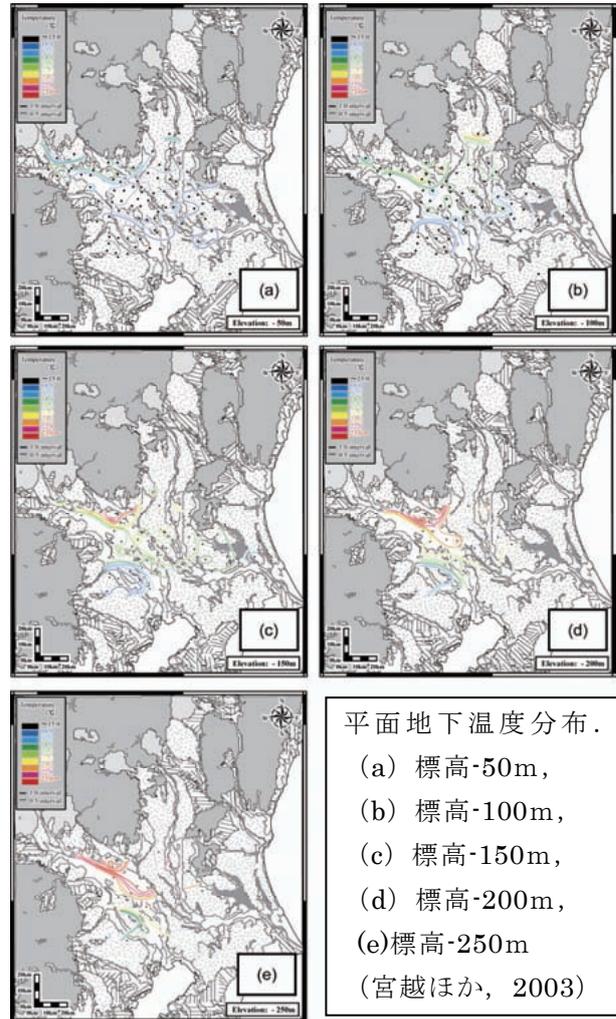
高レベル放射性廃棄物の安全な地層処分など、地圏の持つ隔離性能を利用した環境課題の解決に必要な、水文学や岩盤力学に関する調査・研究を実施しています。本研究グループでは特に、沿岸域の深部地下水環境の安定性について、集中的に研究を実施しています。



この研究課題は深部地下水の安定性に関する研究として開始されましたが、現在では二酸化炭素の地中貯留のための不動地下水領域の研究や海域の活断層調査のための基礎データベース

としても利用されています。

3-4 地下温度分布を基礎とした広域地下水流動ならびに蓄熱システムに関する研究



平面地下温度分布。
 (a) 標高-50m,
 (b) 標高-100m,
 (c) 標高-150m,
 (d) 標高-200m,
 (e) 標高-250m
 (宮越ほか, 2003)

上図は関東平野における深度ごとの地下温度分布を表したものです。涵養域では降水の浸透などで地下温度(地下水温)が低く、逆に平野中央出口付近の流出域では深部地下で熱を受けた地下水が流出するために温度が高くなっていることが分かりました。これを利用して大規模な地下水流動の範囲や速度を推定して環境・資源問題に貢献したり、蓄熱システムとしての利活用を検討するなどエコな研究を進めています。

地圏環境評価研究グループの紹介 Introduction of the Geo-analysis Research Group

地圏環境評価研究グループ長： 駒井 武

Leader, Geo-analysis Research Group: Takeshi Komai
Phone: 029-861-8294, e-mail: takeshi-komai@aist.go.jp

1. グループの研究目的

近年、土壌・地下水汚染問題が顕在化し、特に市街地や産業用地においては深刻な状況となっている。2003年に土壌汚染対策法が施行され、事業所や工場などにおける地圏環境リスク管理が急務の課題となっている。また、鉱山・温泉地帯や海域に接する地域では、有害化学物質の存在量が多く、自然的な起源による地質汚染の問題も発生している。これらに対処するためには、汚染物質の種類、存在量、形態に関する科学的な解明を基礎にして、人への健康影響や生態系への環境影響を定量的に評価することが重要である。また、土壌・地下水の汚染評価およびリスク管理を実施するため、地圏環境の調査・評価・管理に関する方法論の確立と実汚染サイトへの適用が不可欠である。このほか、土壌・地質環境における地圏環境情報の整備やデータベースの構築は、安全かつ豊かな国民生活のために必須である。さらに、地圏と大気との境界における音響環境の保全や騒音の防止などの研究開発は火急の課題である。

当研究グループでは、土壌・地下水環境における汚染評価、環境影響評価および対策技術に関わる理学的、工学的な研究開発を実施する。また、これまでの地圏環境における解析・評価技術の研究を発展させて、重金属や有機塩素化合物等のリスク評価・管理手法、環境汚染物質の将来予測に関するシミュレーション、地層中における水とガスの混相流体の解析、多孔質体における流動性・反応性連成解析手法の開発、天然物等を用いた環境低負荷の浄化技術の開発、二酸化炭素の地中貯留の漏洩リスク評価などの検討を行っている。さらに、産業活動や人間活動に伴い、音響環境の評価手法に関する研究開発も重要になっている。そのため、地理情報システムなどを活用した音響環境の予測および評価技術の開発に関する研究を行っている。一方、近年新しいエネルギー資源としてメタンハイドレートが注目されている。当研究グループではメタンハイドレート研究ラボと共同で、メタンハイドレートを含む海底堆積物の浸透特性を明らかにするとともに、産出挙動を予測するための生産シミュレータの開発研究を行っている。

本年度は、新たに電子機器用ガラス廃棄時の有害元素の長期浸出評価の研究を開始させた。

このような分野の研究を効率的に進めるため、産総研内の研究部門をはじめ、環境省（国立環境研究所）、都道府県などの自治体、浄化企業などと多数の共同研究を行っている。また、国際共同研究を通じて、米国ロスアラモス国立研究所、英国王立大学、韓国科学技術大学などと密接な協力関係にある。

2. グループの研究資源

1) グループ員

駒井 武（リーダー）

田中敦子、成田 孝、張 銘

今泉博之、杉田 創、竹内美緒

川辺能成、原 淳子、坂本靖英

井本由香利

羽田博憲 *メタンハイドレート研究ラボ（兼務）

高橋保盛 *評価部（兼務）

丸茂克美 *地質情報研究部門（協力）

西脇淳子 産総研特別研究員（PD）

テクニカルスタッフ 大野孝雄、小川桂子、高田貞江、

杉原麻生、小神野良美、渡邊真理子

2) 研究課題

運営費交付金「地圏環境評価の研究（地質）」

運営費交付金「地圏環境評価の研究（エネルギー）」

運営費交付金「地下微生物を活用した地圏環境リスク評価技術」（部門重点化予算）

委託費「都市環境騒音対策の最適選択手法と数値地図を活用した騒音場の簡易推計技術に関する研究」（環境省）

委託費「地下水汚染の科学的自然減衰（MNA）に関する研究」（環境省）

委託費「電子機器用ガラス廃棄時における有害元素の長期浸出評価」（環境省）

委託費「メタンハイドレート資源開發生産手法開発」（経済産業省）

委託費「鉱物油に起因する複合的な土壌汚染の環境リスク評価手法」（環境省）

委託費「音波-動電ハイブリッド原位置方式による汚染浄化技術の研究開発」（環境省）

3. 平成 20 年度の研究計画及び進捗状況

1) 地圏環境評価の研究（地質・エネルギー）

地下環境の微生物の生態についての基礎研究を行うとともに、主要な地質汚染物質であるヒ素について、濃集メカニズムの解明や、浄化手法の開発を行う。また、残留性有機塩素化合物に関する新規浄化手法の開発および自然減衰能評価を行う。土壌・地下水汚染に関わる知的基盤整備に資するため、特定の地域を対象とした土壌・地質調査を行い、地圏環境評価基本図を作成する。

汚染土壌・地下水からのふっ素・ほう素除去法を確立するために、鉍物等への吸着挙動の解明を行う。また、発光バクテリアによる毒性評価手法を用い、汚染土壌に起因する生態影響の評価技術を開発する。環境影響評価のため風雑音の特性を解明し、種々の環境要因の変動特性を考慮可能な騒音伝搬予測及び評価手法の開発を目指す。

2) 土壌・地質環境リスク評価技術の開発

わが国の地圏環境における環境リスクを評価するための詳細モデル GERAS-3（図 1 を参照）を開発し、そのデータベースを作成している。これまでに、土壌の不飽和層から地下水の飽和層に至る汚染物質の移動モデルを作成し、吸着や反応などのプロセスを反映させた。また、土壌・地質汚染基本調査や地化学詳細調査などに基づいて、代表的な地域（鳥取県）における表層土壌評価基本図の作成に必要な各種解析を行う。さらに、土壌・地質環境評価のための現場調査を行い、必要なデータ類を集積する。

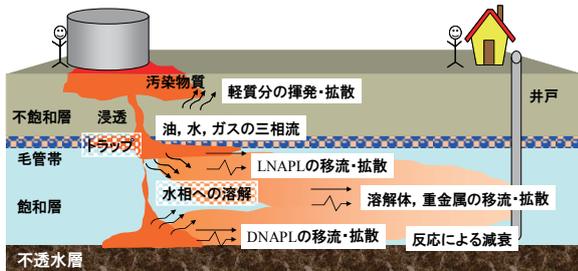


図 1 土壌汚染リスク評価手法の開発

3) 鉍物油に起因する複合的な土壌汚染の環境リスク評価手法に関する研究

鉍物油等に起因する土壌汚染の環境リスクを科学的かつ客観的に評価するための地圏環境リスク評価システムを開発し、石油系炭化水素による複合的な土壌汚染に起因する環境リスクを定量的に把握するための評価手法を確立する。また、このリスク評価システムの運用に必要な様々なデータベースを整備し、汚染現場におけるリスク評価を可能にする。さらに、リスク評価に必要な各種データを現場で取得するための汚染調査手法の開発、現場の環境条件における鉍物油の微生物分解特性を検討する。

4) 地圏環境インフォマティクスシステムの開発と普及

地圏環境情報を GIS 上に統合化し、地圏環境の環境リスク評価、土壌・地質の自然汚染と人為汚染の相互評価などを行い、土壌汚染対策、環境政策立案の基礎情報、環境リスクの長期管理などが可能な評価システムを開発した。これまでに、東北大学および DOWA エコシステムと共同で日本全域の地圏情報の解析を完了し、地圏情報活用システムとして公開・普及させた。

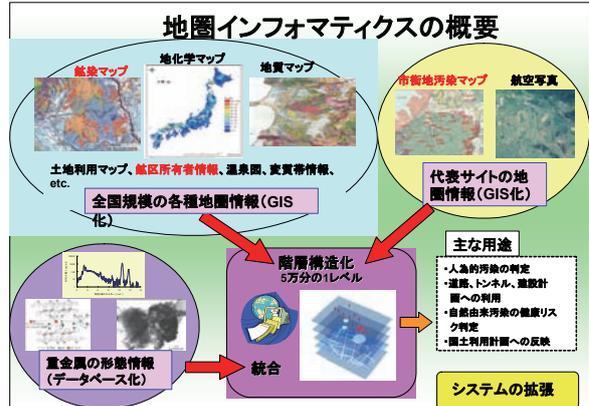


図 2 地圏環境インフォマティクスシステム

4) 都市環境騒音対策の最適選択手法と数値地図を活用した騒音場の簡易推計技術

個々の騒音低減対策による効果を都市域で広域的に考慮しながら最適な騒音対策を選択するためにソフトコンピューティング手法を開発する。併せて、GIS と数値地図を活用し都市広域の環境騒音を面的に推計する技術を構築し、騒音対策立案の支援を目指す。今年度は、GIS 上に構築した簡易推計システムおよび最適騒音低減対策選択システムについて個々の動作検証を行うとともに、全システムの連携動作を確認し、環境騒音 GIS システムを確立する。

5) メタンハイドレート資源開發生産手法開発

ガスハイドレートを含む堆積層におけるメタンガスおよび水の浸透率特性を把握するための実験的検討を行い、生産性評価のための解析手法の開発に反映させる。また、汎用シミュレータを用いて、絶対浸透率および相対浸透率の評価モジュールの開発を行い、シミュレータの実用化をはかる。

4. 今後の方針

当グループは、グループ員の緊密な連携を図りながら、地圏環境評価に関する学術的成果を論文等で公表するとともに、積極的な対外活動を実施する。特に、地圏環境評価システム、新規浄化手法、リスク評価手法および地圏環境評価図などの成果物を一般に普及させ、研究のアウトリーチを意識して土壌・地下水汚染、生態系影響、都市環境などの問題解決に寄与することを目指す。

CO₂ 地中貯留研究グループの紹介

Introduction to CO₂ Geological Storage Research Group

當舎利行*・奥山康子・雷 興林・杉原光彦・西 祐司・相馬宣和・柳澤教雄・徂徠正夫・加野友紀
 Toshiyuki TOSHA*, Yasuko OKIYAMA, Xinling LEI, Mituhiko SUGIHARA,
 Yuji NISHI, Norikazu SOMA, Norio YANAGISAWA, Masao SORAI, Yuki KANO

*Phone: 029-861-3518, e-mail: toshi-tosha@aist.go.jp
 URL: http://unit.aist.go.jp/georesenv/geostorage/

1. はじめに

各地での異常気象や海面の上昇などが報告されており、これらの多くが大気中のCO₂濃度の上昇に伴う気候変動が原因ではないかと言われている。我が国では、「世界全体の温室効果ガス排出量を現状と比較して 2050 年までに半減する」という「Cool Earth50」が政府により提唱された。経済の発展を抑制することなくこのような高い CO₂ 削減目標を達成するためには、省エネルギーや CO₂ 負荷の小さいエネルギーへの転換、再生可能エネルギーの導入、原子力発電の導入等だけでは限界があり、CO₂ の分離・回収・貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage, CCS) も視野に入れた革新的な技術開発が必要と指摘がされている。地圏資源環境研究部門 CO₂ 地中貯留研究グループでは、H17-H19 年度にかけて、一般帯水層を対象とした CO₂ 地中貯留の研究を実施してきた。この研究では、一般帯水層貯留成立の科学的立脚点とすることを目標としており、その他の CO₂ 地中貯留の研究をとりまとめた「二酸化炭素地中貯留に関する報告書」を発刊した(グループホームページにて申込を受け付けている)。H20 は、CCS を実用化に近づける研究として、モニタリング技術、漏洩シナリオの作成、安全性評価技術の開発を主体に研究を行っている。本報告は、CO₂ 地中貯留ならびに部門のテーマである地圏の開発に資する研究について最近の成果を記述する。

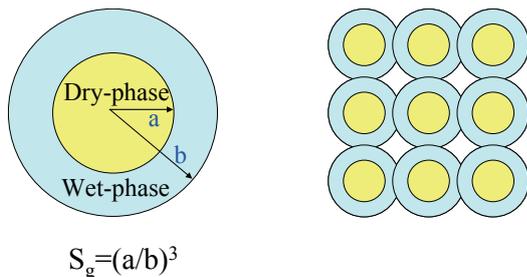


図1 WDO モデルの基本ユニット (左図) と岩石空隙の表現 (右図)

2. モニタリングに関する基礎研究

(1) サイスマックデータによるガス飽和度の推定

室内実験により CO₂ 圧入による弾性波の伝播特性の測定を実施し、速度と減衰のモデル (White & Dutta-Ode (WDO) model; 図1) による理論的な解析を進めている。この WDO モデルの導入により弾性波の速度と減衰がガス飽和度、弾性波の周波数及びパッチの大きさに依存することがわかった(図2)。すなわち、特定な周波数の弾性波は特定なサイズのパッチに支配される。これらの成果を統合すると、実験室での超音波帯域で得られたモデルをそのまま音波領域に適用可能であり、サイスマックモニタリングにより注入後 CO₂ の飽和度を精度良く推測できることを示唆している。また、ガスの不飽和領域の観察のため X 線 CT による観察をすすめており、フラクタル的なサイズ分布を示す垂れ下がり(Fingering)が観察された。

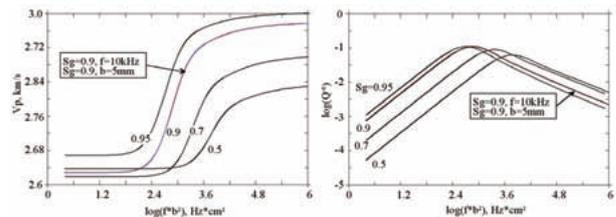


図2 WDO のスケール (周波数) 依存性 ある指定のガスの飽和率(S_g)に対し速度と減衰は fb^2 により一意に決められる。(Lei and Xue, 2008)

(2) 重力モニタリング技術の開発

地下の流体の挙動予測に重力モニタリングを適用する試みを続けてきた。可能性のある複数のモデルについて数値シミュレーションによる重力変動予測を計算し、それを観測データと比較することでモデルを評価選択できる。図3は側方からの流体供給が異なる2つのモデルの重力変動パターンを観測された絶対重力変化と比較した結果である。この場合は Model B が選択される。観測方法

としては絶対重力計を導入することで経年変動の基準が定まり全体の精度が向上する効果が大きかった。この重力モニタリングの手法は、地熱流体やCO₂地中貯留、放射性廃棄物地層処分の現場の地下流体の挙動予測において有効な手法と考えられる。

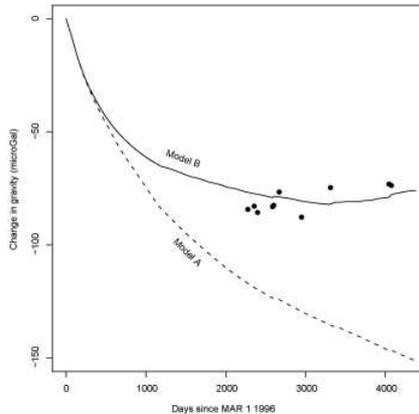


図3 2つのモデルから計算される重力変動(実線と点線)と観測された絶対重力変化(点)と比較 (Sugihara and Ishido, 2008)

(3) モニタリング技術の現場実験

米国 SWP (Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration) の実施する Aneth Oil Field における大規模 CO₂ 地中貯留実験に参加し、自然電位モニタリングを実施している。この実験は、年間 15 万 ton 以上の CO₂ を 3 年以上にわたって地下に注入する日本国内では未実施の大規模 CO₂ 地中貯留実験であり、自然電位モニタリングの経験蓄積・改良を図るとともに、米国の CCS 研究開発に関する情報収集を目的としている。2007 年 11 月に、観測井 C313SE を中心に 8 箇所計 16 個の電極を設置し、モニタリングを開始した(写真1)。実フィールドにおける観測に対応した観測システム・データ取得方法の改良を加えつつ、数年間のモニタリング継続を予定している。

また、釜石鉱山内においては、フラクチャー岩体の水理特性把握のための新しいアプローチとし



写真1 Aneth の観測現場風景 中央は米国ロスアラモス研究所の地震波観測車。

ての坑井内自然電位観測法及び坑井設置用電極の開発のための基礎実験を継続中である。

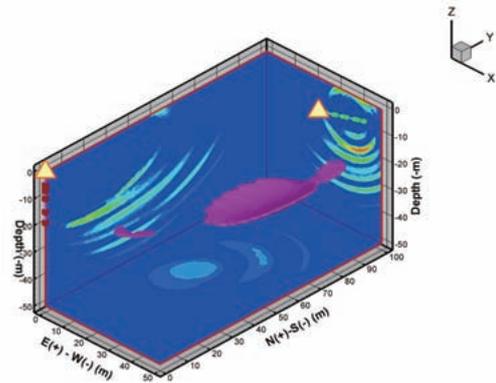


図4 掘削振動による反射イメージング結果 コンターマップは暖色系が高反射率を意味し、紫の等値表面は高反射率を抽出した箇所である。右上△は掘削孔、左上△は観測孔を表す。

(4) 受動振動の相互相関解析に基づく地下情報抽出手法

近年、地震波干渉法のように、観測される波形データ間の相互相関解析を活用した地下情報抽出手法が、送受信点数を抑えて低コストを実現したり、従来手法が適用困難なケースに対応できる場合があるなどから注目されている。CO₂ 地中貯留時の弾性波モニタリングに関しても、最も信頼性の高い3次元反射法地震探査を補完する手法として、同様のアプローチの検討を行っている。また、地圏環境システム研究グループと協力して実施している原子力試験研究においては、受動的に低コストで記録される掘削振動を利用した相互相関解析により、地下空洞周りの地層構造評価を行う手法の開発を検討している。

図4は、地下空洞内で3次元ベクトル的に観測された掘削振動を、時間と空間の関数として相互

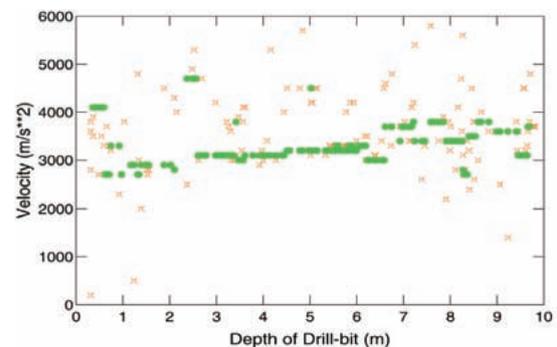


図5 掘削振動に基づく地下空洞周辺の弾性波伝播速度の推定結果 横軸は空洞壁面から掘った掘削ビットの深度である。赤点が推定結果であり、緑点は深度範囲5区間内での最頻値を抽出して、全体の分布傾向を強調したものである。

相関解析し、反射イメージングを試みた結果である。深度 30m 付近に、何らかの不連続構造が抽出されている。図 5 は、掘削装置自体の振動と約 93m 離れた観測点での受信振動との相互相関解析を行い、伝播経路での弾性波速度を推定し、空洞底面からの掘削深度によって整理した結果である。試験サイトにおいて S 波として妥当な速度が推定されていると共に、空洞壁面より奥に行くに従って弾性波速度が速くなる傾向や、壁面近くで速度が乱れる傾向などが得られており、空洞周辺の緩み域と関連性があるのではないかと考えている。

3. 漏洩シナリオ作成のための CO₂ 挙動予測技術

(1) 深部地下水の研究

一般帯水層への CO₂ 地中貯留では、貯留層を満たす深部地下水（地層水）-CO₂-貯留層岩石の間の地化学的相互作用が、貯留の安定化のために重要と考えられている。地層水は、注入 CO₂ を溶かし込む（溶解トラップ）とともに、最終的な CO₂ 鉱物固定に向け、貯留層岩石との反応を媒介する。この一連のプロセスが効果的に機能するために、地層水の地化学特性は重要な要素となりうる。当研究ループを中心とする CO₂ 地中貯留の地化学プロセス研究者は、わが国の貯留深度の深部地下水の地化学特性を把握する目的で、「地層水データベース」の構築研究を続けてきた。国内主要 10 地域について現在までに集積したデータ数は約 2,600 件にのぼり、うち 1,200 件以上が地中貯留深度とされる地下 800m 以深の水のデータである。

地層水の塩分濃度は、胚胎する地層が主として海成層であるか汽水-淡水成層であるかによって系統的に異なる。海成層中の地層水は、汽水-淡水成層中のものに比べはるかに塩分濃度が高い（図 6）。しかし溶存固形成分量は、平均的には海水の 6-7 割程度である。汽水-淡水成層の地層水は非常に希薄で、地域によっては地下 800m 以深でも溶存固形成分量が 200mg/l 以下の物が頻繁に

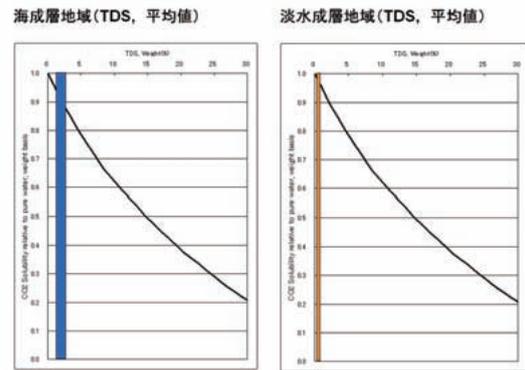


図7 平均塩分濃度にもとづくわが国の深部地下水の CO₂ 溶解度（左）海成層地域、（右）汽水-淡水成層地域。

認められることがある。塩分濃度の違いにもかかわらず、両タイプの地層水は地化学的性質が互いに似ている。共通する性質として、(1)ともに(Na,K)塩化物型ないしは(Na,K)塩化物-(Na,K)重炭酸型の水質である、(2)海水に比べ Mg, Na, K, Br, SO₄ に乏しく、(3)HCO₃, I のほか地化学モデリングで重要な Fe, Al, SiO₂ に濃集している。

CO₂ の水に対する溶解度は、水の塩分濃度増加とともに急激に減少することが知られている（図 7）。Enick and Klara(1991)による溶解度曲線からは、わが国の貯留深度の地層水は濃厚な海成層中のものでも真水の 90%前後と評価される。わが国の深部地下水は、CO₂ 溶解トラップに関して高いポテンシャルを有するといつて差し支えないであろう。

(2) CO₂ 地中貯留長期安定性評価のための鉱物溶解速度の計測

帯水層への CO₂ 貯留のリスク評価においては、酸性化した地層水中での貯留岩鉱物の溶解速度が重要なパラメータとなる。これまで、帯水層中で最も普遍的かつ難溶性の鉱物である長石について、ナノスケールでの表面観察に基づいて、溶解速度データの取得を行ってきた。本研究では、より現

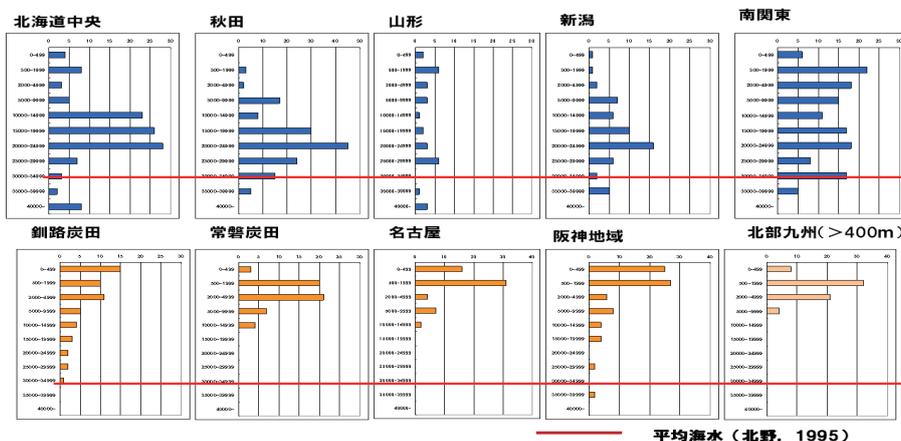


図6 国内主要 10 地域の貯留深度（地下 800m 以深）にある地層水の塩分濃度ヒストグラム。赤線は平均海水（北野，1995）。（※北部九州については深度 400m 以深をとった。）

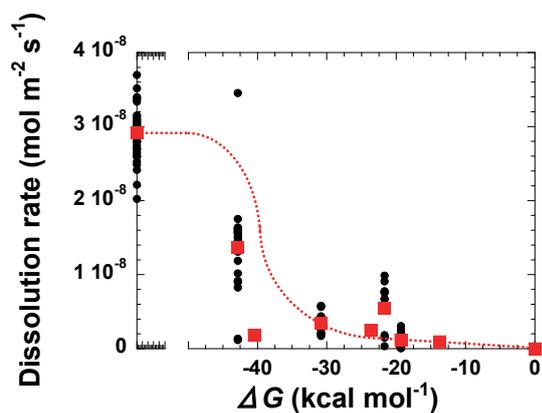


図8 灰長石溶解速度の ΔG 依存性

実的な評価を行うためのデータの蓄積を目的として、溶解速度に及ぼす飽和度（ギブス自由エネルギー変化： ΔG ）の効果について検討を行った。

今回の実験では、同一の ΔG 条件においても、溶解過程の表面状態の違いに依存して、灰長石の溶解速度に顕著な差がみられた。このような溶解速度の違いが生じる要因としては、結晶表面上での欠陥密度の違いや化学組成の不均質性などが想定される。いずれにしても、定常溶解表面での溶解速度のみを考慮に入れると、溶解速度の ΔG 依存性の関数は、直線形よりもむしろシグモイド曲線に従うことが示された（図8）。一方、帯水層への CO_2 地中貯留を模した数値シミュレーションからは、長石の溶解速度の関数形の違いにより溶液組成の変化に顕著な違いが生じ、その結果、二次鉱物の生成速度（核形成速度および成長速度）にも影響が及ぼされる様子が示された。このことは、 CO_2 挙動の予測においては、長石溶解速度の飽和度依存性の関数形を明らかにすることが重要であることを意味している。

4. 地圏の開発に資する研究

(1) カルシウムスケール処理に関する共同研究

工場等の熱交換システムにおいて問題となる炭酸カルシウムスケール処理に関して、(株)レイケンおよび茨城県中小企業振興公社と共同研究を実施している。これまでに電気分解によるスケール回収速度の溶液濃度および温度依存性を解明し、

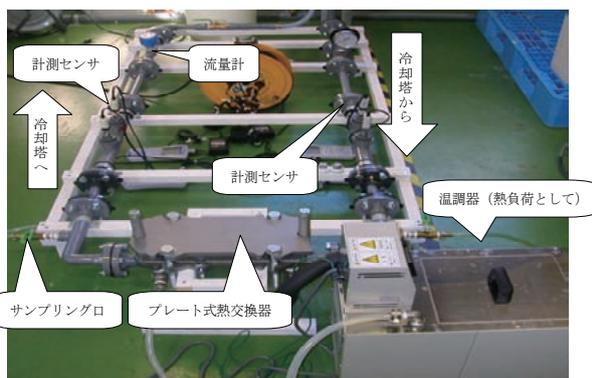


写真2 実験装置の外観

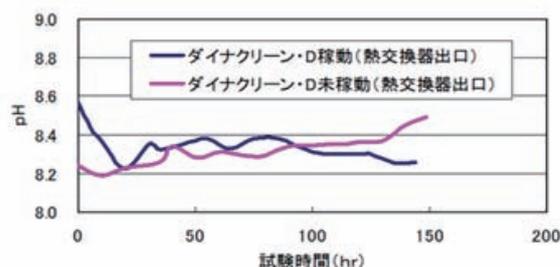


図9: 熱交換機出口における溶液中のpH 濃度変化

現在は装置のサイズや材質による依存性を調査している。

また、電気分解装置（ダイナクリーン・D）を使用することで、すでに配管に付着していたスケールを溶解・剥離する効果を確認するため、写真2に示すような装置で実験を行い、電気分解装置稼働時には約 $0.007\text{mg/m}^2/\text{s}$ の速度でスケールが剥離されるが、稼働させないときは逆に約 $0.001\text{mg/m}^2/\text{s}$ でさらにスケールが付着すること、また、図9に示すように稼働時には pH は低下、未稼働時は上昇することから、電気分解装置稼働時の pH 変化が配管に付着しているスケールに影響を及ぼしていることが示された。

(2) 高温岩体発電技術開発

南オーストラリア州クーパーベースン(Cooper basin)で実施中の高温岩体プロジェクトにおいて、6週間の循環試験が近日中に実施される予定である。その循環試験にあわせてトレーサー試験が実施されるが、その際図10に示すような装置系においてトレーサーの連続測定を行う予定である。

このシステムは、山形肘折で実施された高温岩体プロジェクトでも適用したもので、光ファイバーを流動系に接続し、流体中に溶存するフルオレセイン（ウラン）の濃度（発光強度）を連続測定するものである。現地で数分毎にリアルタイムで測定できる。ただし、ウランは熱分解による減衰の可能性があるため、熱に強い 1,3,5NTS も同時使用し、米国ユタ大学で定量分析する予定である。最終的には、両方のデータを照合し、トレーサー応答曲線の特徴や回収率などをまとめる。

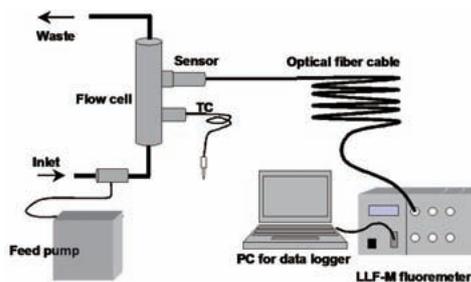


図10 トレーサー連続測定装置概念図

CO₂ 地中貯留研究グループの紹介

Introduction to CO₂ Geological Storage Research Group

CO₂ 地中貯留研究グループ長: 中尾 信典

Leader, CO₂ Geological Storage Research Group: Shinsuke Nakao

Phone: 029-861-3955, e-mail: sh-nakao@aist.go.jp

1. グループの研究目的

当研究グループでは、CO₂ 地中貯留の実用化に向けて、1) CO₂ 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) CO₂ 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) どのように安全性を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、これらの研究を地圏環境の利用と保全、資源の安定供給という観点への研究・技術開発にも応用することを目指している。

2010年度からの産総研第3期においてもCO₂ 地中貯留は重点課題に指定されており、中期計画として、“CO₂ 地中貯留において、CO₂ 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

中尾信典 (グループ長)
 雷 興林, 杉原光彦, 西 祐司,
 相馬宣和 (2009年10月~2010年10月, 米国
 ロスアラモス国立研にて在外研究),
 徂徠正夫, 加野有紀, 船津貴弘, 上原真一,
 石戸恒雄, 佐藤久代, 当部門他研究グループ
 等より研究分担者 20名

2) 予算

- 運営費交付金「CO₂ 地中貯留の研究」, 「沿岸域海底下CO₂ 地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」他
- 経済産業省受託研究「二酸化炭素挙動予測手法開発事業 (低コストなモニタリング技術及び断層モデリング手法の開発)」
- 地球環境産業技術研究機構受託研究「CCS モニタリング技術高度化等の研究」
- 共同研究費等。

3. 平成22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CO₂ 地中貯留研究の主な進捗状況を紹介する。

1) サイスマック・データによるガス飽和度の推定

室内注入実験データの解析を行い、弾性波探査によるCO₂ 注入後挙動モニタリングの基礎となる多孔質弾性論モデルの高度化を進めている。図1は、ガス注入後弾性波の分散の影響を受け、弾性波波形が大きく変化したことを示す。ピークのマッチングにより得た速度低下は初動のマッチングにより得たものよりも大きいことが分かる。現場データの場合P波初動が不明瞭であるため、一般的に波のピークを追跡して速度の変化を求める。その結果を用いてガス飽和度を推測する場合、過大評価しないよう分散を考慮したモデルを利用する必要がある。室内実験では現場より良いデータが得られるため、現場データ解析に適用できるモデルの構築が可能であり、更なる研究を進める予定である。

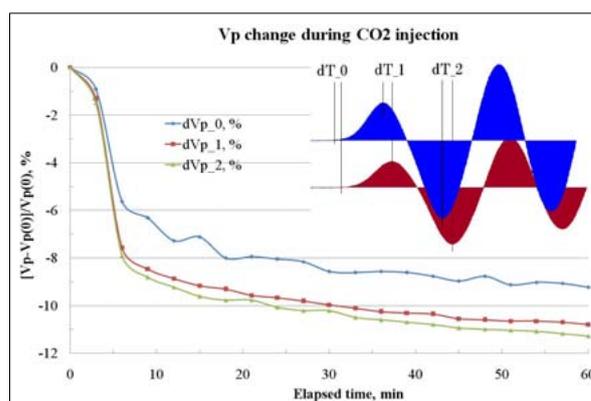


図1: CO₂ 注入実験においてP波速度変化を求めた例。初動と最初のピークのマッチによるP波走時差が計算されるが、分散の影響でピークのマッチングにより得た速度低下は初動のマッチングにより得たものよりも大きい。

2) 重力モニタリング技術

重力モニタリングは質量分布という反射法地震探査と別の側面から CO₂ の地中貯留状況を見られるので、反射法を補完するモニタリング手法と考えられる。反射法地震探査のように地中に注入した CO₂ の貯留領域の形を細かく描き出すことはできないが、重力では貯留域と測定点の間の物質で遮蔽されることなく質量分布の積分効果が測定される。分解能の点では鈍いが堅実なモニタリング手法であり、経済性の面でも、反射法地震探査に比べ十分安価な手法といえる。

CO₂ 生産源に近い東京湾岸において既存データに基づいて地下構造を数値モデル化し、CO₂ 地中貯留の数値シミュレーションにより適用性を評価した。年間 1000 万トンの CO₂ を 1400m の深度を中心に注入し、計測井が注入井とほぼ同位置の場合の坑内重力計で計測される重力変化を計算した (図 2)。注入深度を境に重力変化の極性が逆転しており、注入深度では重力変化量はゼロに近い。重力は引力の鉛直成分なので大きい質量変化があっても真横には影響が出ないためである。それでも通常、重力計測が行われる地表に比べれば、信号源に近い効果で地下での信号レベルは大きい。従って信号レベルが大きい坑内で計測を行うことは、より明確に地下の状態を把握できることになる。また、地上での測定では深度方向の状態変化に対して鈍感になるが、坑内重力計で計測される深度方向の変化のコントラストは明瞭であるため、CO₂ 地中貯留のモニタリング手法として極めて魅力的である。他にも坑内重力計を想定したシミュレーション評価例は蓄積されており、また利用可能な坑内重力計の種類も増え、今や実際に坑内重力計測を行う段階にきている。

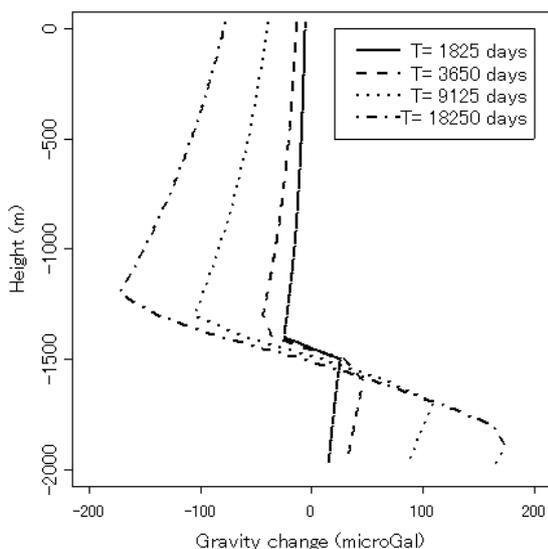


図 2：坑内重力測定を行う計測井が注入井とほぼ同位置の場合の計算結果例。

3) モニタリング技術の現場実験

米国 SWP (Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration) の実施する Aneth Oil Field における大規模 CO₂ 地中貯留実験は、年間 15 万 ton 以上の CO₂ を 3 年以上にわたって注入する陸域での大規模 CO₂ 地中貯留実験である。自然電位モニタリングの経験蓄積・改良を図るとともに、米国の CCS 研究開発に関する情報収集を目的として、2007 年 11 月から自然電位モニタリングを継続してきたが、SWP による Phase II 実験の終了と Phase III への移行に伴い、現地測定を終了した。およそ 3 年間にわたる長期無人測定に成功し、取得したデータには、注入開始時に圧入した地下の CO₂ に起因すると考えられる注入井周辺の電位上昇が認められた。それ以外では地表付近にソースを持つと考えられるイベントが認められた (図 3)。なお、本研究は米ロスアラモス国立研と産総研との MOU に基づき実施しており、Phase III への参加は経産省からの受託研究として実施する。

また、貯留層深度における比抵抗探査精度の向上が期待できる坑井利用比抵抗モニタリングの基礎的実験を釜石鉱山において実施した。坑内の KF-1 及び KF-3 孔を用いて、空気を圧入した際に生じる比抵抗変化を、地表 (坑道) - 坑井間の電極配置で観測した。その結果、比抵抗の変化は小さく、変化率も概ね 10% 以内であったが、空気圧入を開始時に KF-3 孔を横切る割れ目の部分を中心に圧入された空気の層を反映したと考えられる比抵抗上昇を観測している。

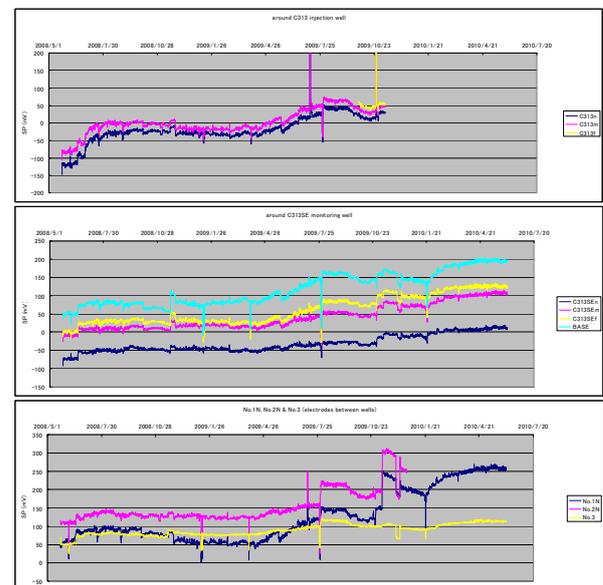


図 3：2008 年 5 月から 2010 年 5 月までの Aneth テット・サイトにおける自然電位変化。C313 圧入井 (上) では、注入開始時に圧入した地下の CO₂ に起因すると考えられる電位上昇が認められる。C313SE モニタ井周辺 (中) 及び坑井間の電極 (下) に見られる電位変化は、地表付近にソースを持つと考えられるイベント。

4) Aneth サイトの微小地震の再解析

ロスアラモス国立研究所(LANL)が1観測井のみで観測した Aneth サイトの CO₂ 圧入時の微小地震について、特に震源位置決定深度の曖昧さを低減することを目的に再解析を行った。波形初動部の詳細観察とレイトレーシングの組み合わせによるフォワードモデリング的な解析を行い、取得微小地震が CO₂ に関係するものとそれ以外に分けられることを推察した (図 4)。さらに、低速度岩塩層前後で多重反射が発生していると仮定して、それを利用した高 SN イベントの位置決定 (マスターロケーション) と低 SN イベントの相対位置決定の組み合わせによる全体の震源分布の評価手法を検討した (図 5)。その結果、従来法よりも Aneth サイトの CO₂ および廃塩水の注入深度に近い深度に震源位置は移動し、より面構造的な震源分布が得られるようになった。検討手法により 1 観測井だけでも信頼性のある震源位置が得られることが分かった。

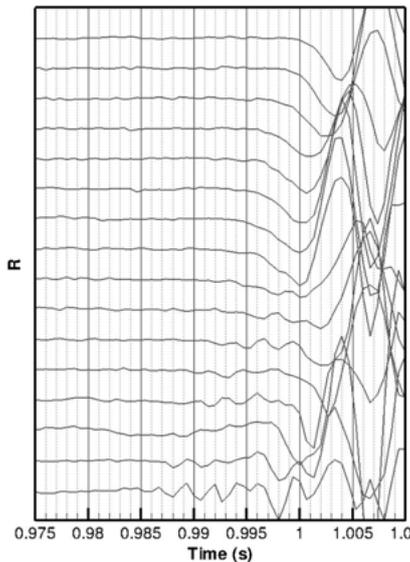


図 4 : Aneth 微小地震初動部の拡大例。R 成分, 下から坑井内アレイのセンサ 1~18 番目。相互相関による初動は 1.005 付近のピークを追っているが, 拡大すると, 実際には屈折の影響がアレイ下部に現れている。

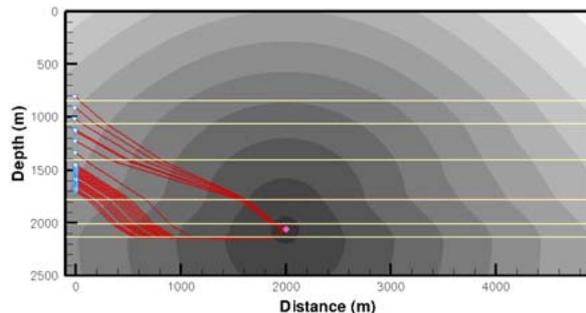


図 5 : レイトレーシングモデリング例。震源位置深度を岩塩層(第 5 層)の下と仮定し, 震央位置が 2000m の場合。Aneth サイトの南側に発生した微小地震と調和的である。

5) CO₂ 長期挙動シミュレーション

地中に圧入された CO₂ 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。地中貯留においてシール層の浸透率と毛管圧は共に CO₂ プルームの遮蔽性に大きな影響を示すが, そのメカニズムにより地層内の圧力上昇に関しては異なる効果が働く。シール層の浸透率が低い場合地層水とプルームの双方を遮蔽するため著しい地層内の圧力上昇を招くが, 高毛管圧のシールはプルームのみを遮蔽するため, 地層内の圧力上昇に関しては低毛管圧のシール層と比較して大きな違いを示さない (図 6)。CO₂ の圧入に伴う地層内の圧力変化の範囲はプルームの延伸範囲より更に広く, プルーム自体が貯留層内に留まる場合においても, 上部塩水の浅部移行を引き起こす可能性がある (図 7)。この現象は圧入停止後の圧力緩和に伴い同じく緩和される傾向にある。

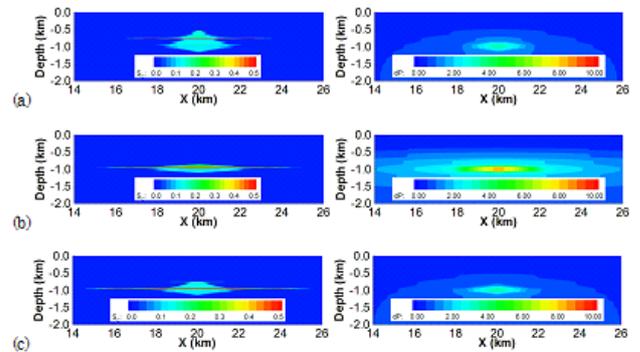


図 6 : 1.0Mt/yr/km²×50 yrs の CO₂ 圧入を行った時のシール層の鉛直浸透率と毛管圧 (Sw=0.8) が (a) 1 md/62 kPa, (b) 0.1 md/62 kPa, (c) 1 md/500 kPa の各ケースにおける (左) CO₂ プルーム分布 (圧入停止後 1000 年経過時) と (右) 圧力変化 (圧入停止時) の違い。

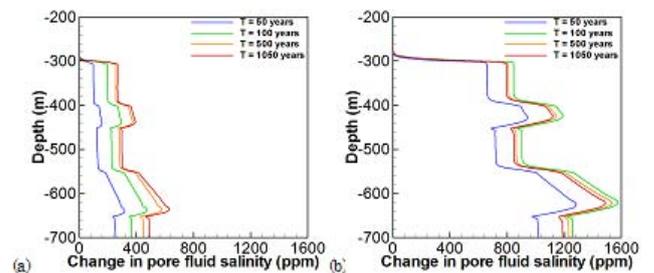


図 7 : 図 6(b) 0.1 md/62 kPa, (c) 1 md/500 kPa の各ケースにおける間隙水の塩分変化の鉛直プロファイル。

6) 砂泥互層人工試料によるシール圧測定

本研究では、CO₂ 地中貯留におけるキャップロックのシール性能評価に関連して、地中貯留の環境条件下（10 MPa, 40°C）において、超臨界 CO₂ に対するスレッシュホールド圧の測定を行った（図 8）。本研究の目的は、岩石のスレッシュホールド圧の変動に及ぼす各種因子の効果を定量的に明らかにし、キャップロックが取り得るスレッシュホールド圧の範囲を推定するモデルを構築することである。このために、粒径を制御したシリカビーズ焼結体試料を作製し、種々の粒径についてスレッシュホールド圧と浸透率の関係を求めた。その結果、均一粒径（0.2~10 μm）の焼結体のスレッシュホールド圧は、粒径の減少と共に増加することが確認された。また、両対数プロット上でスレッシュホールド圧と浸透率の間に良好な直線関係が得られたが、これは、安全性の観点から特に重要となる、均質岩石におけるスレッシュホールド圧の下限値に相当するものと考えられる。



図 8：超臨界 CO₂ のブレイクスルーの観察画像

7) 砂岩鉱物の化学的反応プロセスの評価

本研究では、砂泥互層における CO₂ 挙動に及ぼす地化学プロセスの影響を検証するために、特に砂岩層内での鉱物の溶解-沈殿プロセスに関してデータの高精度化を図った。そのために、超臨界 CO₂-水系において代表的な砂岩鉱物の反応過程の“その場観察実験”を行い、ナノレベルでの鉱物表面形状の変化に基づいて溶解-沈殿プロセスを解析した。また、室内実験と天然環境の乖離を是正する観点から、炭酸泉現場サイトにおいて、直接、鉱物の反応速度計測実験

も行った。最終的に、モデル系での地化学反応シミュレーションにより、孔隙率変化に基づいた砂岩層のシール性能変化の評価までを行った。今後は、温度、pH や CO₂ 濃度のみならず、種々の溶存化学種濃度の効果も踏まえて、系統的に天然での反応速度の解析を行う予定である。

8) 深部条件下での新第三紀泥質岩中の亀裂透水性の推定

新第三紀泥質岩中の亀裂が、どの程度の深さまで流路として機能するかを推定する手法の確立を目的に、上総層群新第三紀泥質岩について、拘束圧条件下での泥質岩中の亀裂の浸透率を測定する実験と、その数値シミュレーションを進めている。図 9 は、上総層大原層泥質岩については、有効拘束圧が 10~14MPa の範囲で、泥質岩中の亀裂が流路として有効に働かなくなることがわかった。岩石の密度から、この圧力条件は深さ 1~1.4km に相当する。また、数値シミュレーションの結果から、非弾性接触モデルを考慮することによって、岩石の力学特性から、亀裂が流路として有効に働かなくなる応力条件を推定できる可能性が示された。

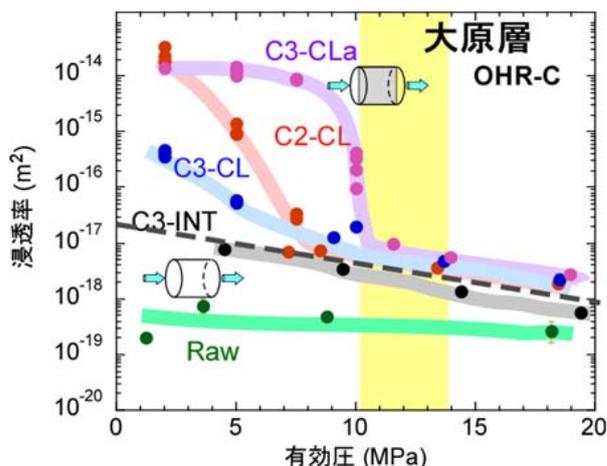


図 9：上総層大原層泥質岩を対象とした、単一亀裂の入った供試体の浸透率の有効圧依存性についての室内実験結果。C3-INT, Raw は亀裂の入っていない供試体の結果、それ以外は単一亀裂の入った供試体の結果を示す。

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：高倉伸一

Leader, Geo-Environmental Systems Research Group: Shinichi TAKAKURA

Corresponding Author, e-mail address: takakura-s@aist.go.jp

1. グループの研究目標

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、物理探査を利用した非破壊モニタリング技術、数値シミュレーションによる地下環境のモデリング技術などの基盤研究を進めている。また、CO₂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、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、CO₂地中貯留研究、地層処分安全研究、地熱等資源研究、地下利用技術研究を主たるミッションにかかげ、平成19年7月に新しく組織された。メンバーは、地球物理学、岩石力学、掘削工学、岩盤工学、貯留層工学の専門家からなる。物理学的実験およびフィールドワークの手法を用いて、環境に調和した地下の有効利用、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資源探査までと多岐にわたり、予算項目は複数にまたがっている。いずれの研究においても、「環境との調和を考えた地圏の開発・利用を図ること」を基本理念としている。研究内容も基礎研究から応用研究まで幅広いが、技術的に重なる部分も多い。そこで、研究テーマを便宜的に以下の4つに分類し、

個々の研究テーマの管理し、研究の効率化を図っている。

- ・CO₂地中貯留技術に関する研究
- ・放射性廃棄物地層処分に関する研究
- ・地圏の継続的利用に関する研究
- ・地圏環境システムの解明に関する研究

1) グループ員

高倉 伸一 (リーダー)

及川 寧己

唐澤 廣和

竹原 孝

天満 則夫

相馬 宣和 (CO₂地中貯留 RG より分担)

坂本 靖英 (地圏環境評価 RG より分担)

羽田 博憲 (メタンハイドレート研究ラボより分担)

2) 予算

文部科学省試験研究「放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究」

運営費交付金「地圏環境システムの研究」

運営費交付金「沿岸域海底下 CO₂地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」

日本鉱業協会研究委託費「坑内精密電気探査技術に関する研究」等

3. 平成19年度までの研究進捗状況

以下では、主な研究について平成19年度までの進捗状況の一例を紹介する。

1) 放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究

原子力発電所から排出される高レベル放射性廃棄物は、地層中にて超長期間保存され、放射性物質の減衰を待つことになる。高レベル放射性廃棄物の輸送や貯留を行うためには、安定した地下に空洞を掘削することが必要となる。しかし、この岩盤空洞周りでは、応力が解放されることにより変形などの変化の生ずる領域が発生する。この領域は応力の緩み域とよばれ、ここでは潜在き裂等の開口により天然バリアの遮蔽性能が低下することが考えられる。この緩み域を経時的に評価することが、空洞の長期安定性評価の観点から重要とされている。このよう

な背景から、天然バリアの長期安定性に関するフィールドデータを得るとともに、緩み域を含む空洞周りの地層環境で想定される温度、圧力条件における岩石のクリープ特性のデータを蓄積し、長期安定性予測のためのシミュレーションやモデル解析の基礎データとすることを目的とする研究を実施している。

a) 深部岩盤空洞周り緩み域における 3 次元応力計測

深部岩盤空洞周り緩み域における 3 次元応力計測では、現場コアを用いて緩み領域から堅牢領域までの連続的な 3 次元応力評価を行うための予備実験として、花崗岩質岩盤中に開削された小トンネル（直径 3m 前後）壁面隅からボーリングで採取された岩石コア試料を用いて AE/DRA 法による応力計測を実施した。なお、応力決定用リファレンス試験では応力 14.3MPa を 2 時間程一軸載荷して記憶させたものを計測できるように計測基準値（閾値）を設定した。

AE 法では 1 回目載荷時に最も多く AE が発生するが、その急増点は不明瞭であった。2~4 回目載荷でも AE は活発に発生したが、ある応力から AE が発生し始めその後単調に増加するような典型的な発生状況とは異なっていたため、この AE 累積増加の特徴にあわせた解析方法を検討した。今後、発生位置や波形特徴による選別で載荷応力に無関係な AE を無視する等の対策を検討する必要がある。また、実験時には無載荷の状態でも自然発生する AE が少なからず観察された。コア試料を採取して少なくとも 1 ヶ月以上は経過しており、このような AE が多数発生していることは、応力計測精度の低下をもたらす要因になる可能性もある。今後は、緩み域特有の現象かどうかの検討等も必要である。

DRA では差ひずみ挙動の応力の大きさによる変化を原位置応力評価に用いる。今回の試料では全体的に差ひずみの絶対値が小さく差ひずみ曲線上の単調増加領域もやや不明瞭で傾きが小さいという特徴があった。図 1 に坑道壁面近傍の試験片の応力計測結果例を示す。全体に応力の増加にともなって単調減少する差ひずみ曲線が得られており、低応力側にやや傾きの小さい単調減少がみられるものの明瞭な極値が観察されず、計測応力は低応力側の計測限界である 0.7MPa 以下であった。図 2 に坑道壁面から 19m ほど奥の試験片の応力計測結果例を示す。こちらは単調増加領域が観察され、評価応力値は 10MPa 前後と坑道壁面近傍の試験片とは異なる性質の差ひずみ挙動が得られた。坑道壁面近傍で採取されたコアの評価応力はゼロに近いはずであり、妥当な結果であると考えられる。一方、坑道壁面から奥の試験片でも坑道壁面近傍の試験片と同様に、応力評価が難しい試験片が比較的多く見られた。AE の発生の様子と合わ

せて考えると、今回実験した岩石は原位置応力が AE の発生や差ひずみの増減に及ぼす影響が小さかったものとも考えられる。

b) 空洞周り緩み域における岩盤長期変形挙動に関する研究

空洞周り緩み域における岩盤長期変形挙動に関する研究においては、常温・室乾状態の珪藻土を用いた応力レベル 90% と 95% でのクリープ試験を実施した。一軸圧縮試験における破壊時の全体ひずみ量と、クリープ試験における破壊時のひずみ量より、クリープ試験時の破壊は全体ひずみがある限界値に達すると生ずると考えられる。試験機および初期載荷速条件による破壊形態の違いは確認できず、載荷条件が試験に与える影響については、今後検討する必要があると考えられる。1 次クリープ領域では経過時間に対してクリープひずみ速度は対数的に減少し、対数クリープ則がよく当てはまる傾向が認められた（図 3）。本試験では、最小ひずみ速度点以降のクリープひずみとひずみ速度の関係が、これまでの比較的強度の大きな岩石や、堆積岩の研究とは異なっていた。これは、破壊に至るメカニズムがそれらとは異なることを示唆しているとも考えられる。また、荷重の制御やひずみの計測結果の解析より、特に荷重に関して精度の良い試験手法の検討も必要であることがわかった。

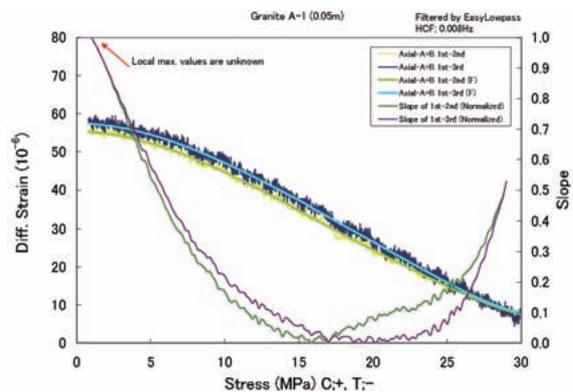


図 1. DRA による応力計測データの例 (坑道壁面近傍)

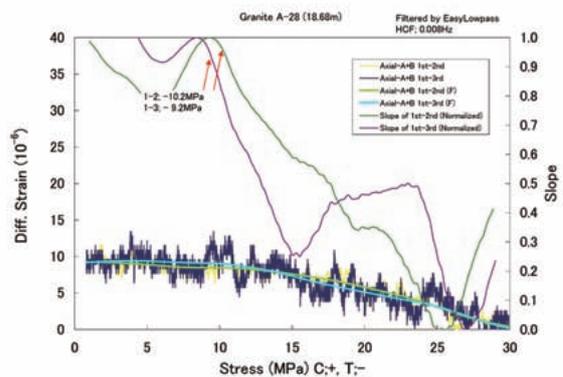


図 2. DRA による応力計測データの例 (坑道壁面から 19m 奥)

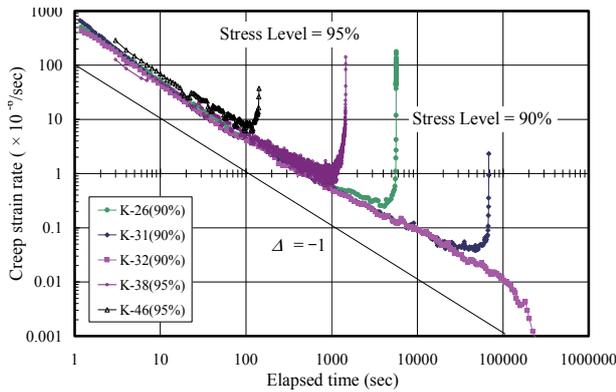


図 3. 珪藻土のクリープひずみ速度の経時変化

2) 地圏環境システムの研究

a) 坑井掘削の効率化

パーカッション（打撃）掘削は現在普及しているロータリ（回転）掘削に比べて掘削速度が極めて大きく、鉱山や土木分野では掘削能率の向上や掘削コストの低減に寄与している。しかし、パーカッション掘削は一般に掘削中におけるデータ（例えば打撃エネルギー）の計測が困難で、岩石の掘削に関して未解明の点も多い。

そこで、掘削中に打撃エネルギーを推定する方法を検討するため、油圧作動のパーカッション装置への入力エネルギーを計測するとともに、ひずみゲージを用いて打撃エネルギーを測定した。両者の関係を求めたところ直線関係が得られ、入力エネルギーから岩石掘削中の打撃エネルギーを推定できることがわかった（図 4）。

図 5 は、上記の両方式により硬質な沢入花崗岩（一軸圧縮強度：223MPa）をビット回転数が 25rpm で掘削したときのビット荷重と掘削速度との関係である。パーカッション掘削の速度はロータリ掘削に比べてかなり大きいことがわかる。両者の掘削速度の相違は、ビット荷重が小さい範囲において顕著であることが特徴として挙げられる。図 6 に、両掘削方式により沢入花崗岩を掘削して得られた 1 分間当りの掘削体積と掘削エネルギー（パーカッション掘削の場合は打撃エネルギーも含む）との関係を示す。パーカッション掘削（青色印）とロータリ掘削（朱色印）とも大雑把には比例的な相関性が強いという結果を得た。

b) 地中熱利用技術の研究

地球環境保護の観点から CO₂ 等の温室効果ガスの排出が少ない自然エネルギーを利用する機運が盛り上がってきており、その一つとして、地中熱利用にも関心が高まっている。特に、地中の熱と電気を利用して暖房・冷房および給湯等が可能な地中熱利用ヒートポンプシステムに注目が集まっている。本システムに関しては様々な研究が進められているが、その普及による地下環境への影響については研究報告が少ない。そこで、今年度は、地下水利用型システムでの地下温度環境下に対する影響について数値シミュレーションによる検討を行った。

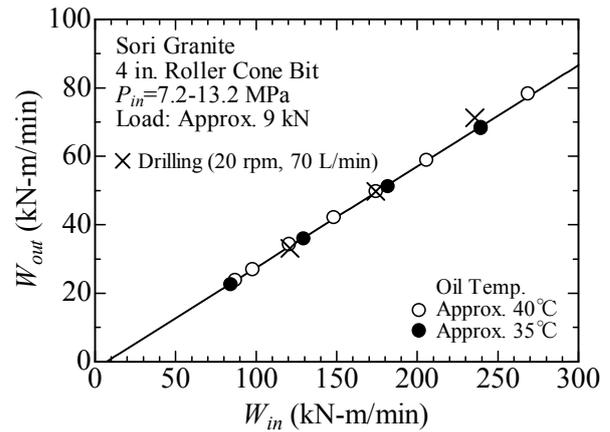


図 4. 入力と打撃エネルギー (W_{in} - W_{out})

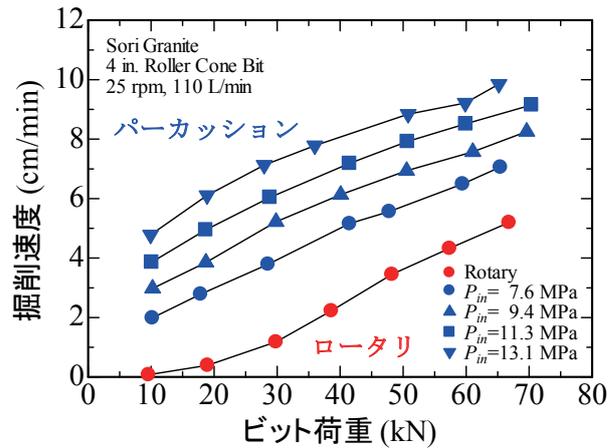


図 5. 実験結果の一例

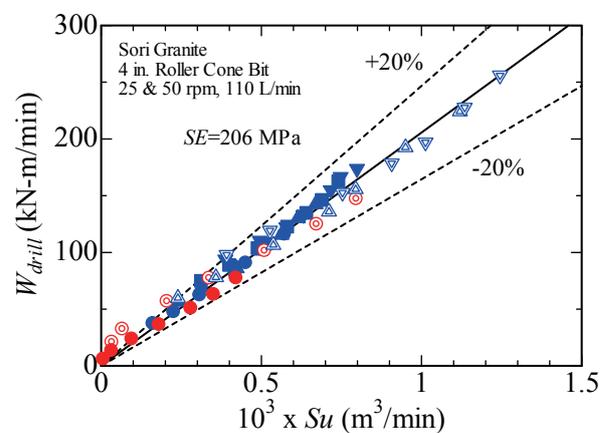


図 6. 掘削体積(S_u)と掘削エネルギー(W_{drill})

地下水利用型システムは図 7 に示すように格子状の配置とした。システム全体の範囲は水平方向に 300m×300m、深度方向に 50m とした。また、システムを格子状の配置としたのでシステム構成の最小ユニットは、注入井と生産井を含む 2 孔井となる。そこで、2 孔井モデルを環境影響用の数値モデルとして用いることにした。2 孔井モデルでは注入井と生産井の間の孔井間距離は 50m とした。地下水位面は垂直深度 6m に設定し、上面を不飽和領域とした。なお、モ

デルの要素分割では、孔井周辺から徐々に分割を大きくしており、水平方向はそれぞれ 15 分割ずつで 256 節点、深度方向は 33 分割で 34 節点としている。モデルの総節点数は 8704、要素数は 7425 である。

夏季や冬季にシステムを動作させて 10 年間の運転を行った計算結果の一例を図 8 に示す。地下水の循環量と温度低下量は、地上での利用に対応させており、ここでは地下から 1~3 度程度の温度差が与えられるものとしている。図 8(a) は、注入井と生産井を固定しているが、図 8(b) では注入井と生産井の役割を 1 年毎に変えている。上図から注入井、注入井と生産井の間地点、生産井の各深度(6m, 10m, 12m, 20m 及び 28m)の温度変化を示している。図より、孔井の役割を変えた場合の方が、中間地点の地下環境への温度影響が少ないことがわかる。

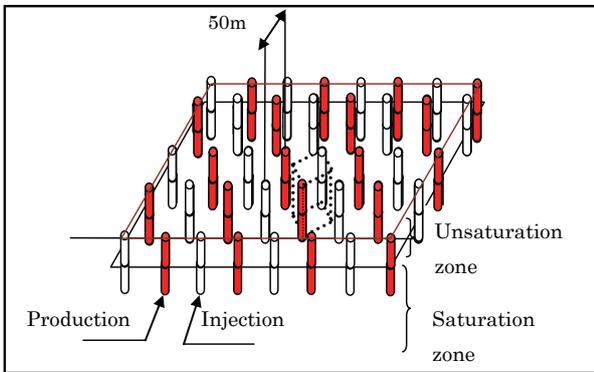
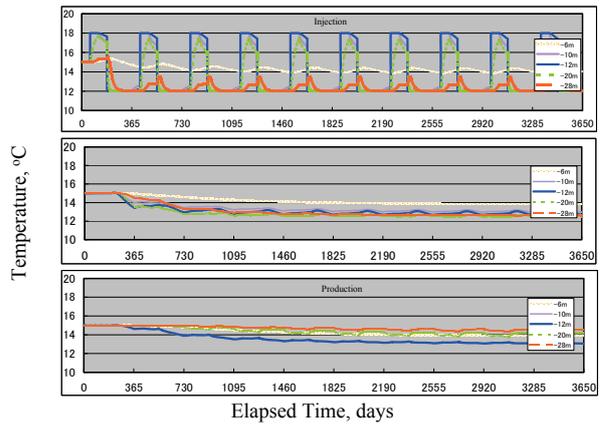


図 7. 地下水利用型システムの配置図

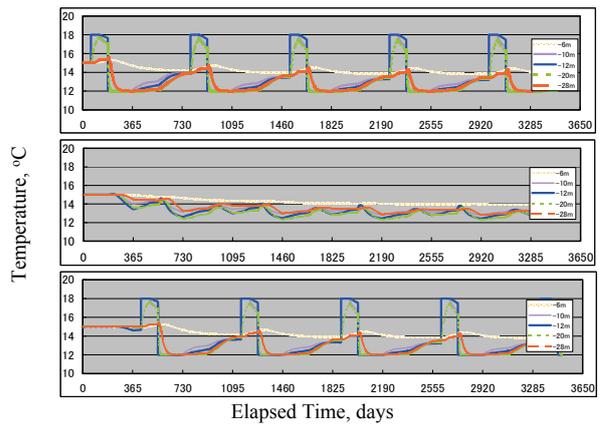
c) 岩石・土壌の電気物性の研究

潜頭性金属鉱床、ベントナイトやセリサイトなどの粘土鉱床、伊豆大島や桜島などの火山を対象に、電気・電磁探査の適用研究を進めている。電気・電磁探査の結果を解釈するためには、地下構造を形成する岩石や土壌の電気物性の知識が必須である。地温勾配により地下深部は温度が高いため、高温下の岩石の電気物性を理解することは特に重要と考えられる。そこで、当研究室が所有している誘電体から良導体までの複素比抵抗を計測するインピーダンスアナライザーと約 300℃までの高温測定が可能なオートクレーブを利用して、高温下の岩石の複素比抵抗の測定を継続的に実施している。

図 9 は、稲田花崗岩の室温から約 200℃までの複素比抵抗の測定結果である。この図より、温度が上がると、比抵抗が低くなることがわかる。また、臨界周波数(位相差が極大となる周波数)が高くなることがわかる。このことより、温度が比抵抗や分極率などの電気物性に影響を与えていることは明らかである。電気物性には間隙水の塩濃度や変質の程度が反映されるので、今後も様々な測定条件下で、岩石や土壌サンプルの複素比抵抗測定を進め、電気物性のデータの蓄積を進める予定である。



(a) 注入井と生産井は固定



(b) 注入井と生産井を 1 年毎に交代

図 8. 注入井、注入井と生産井の間地点、生産井の各深度の温度変化

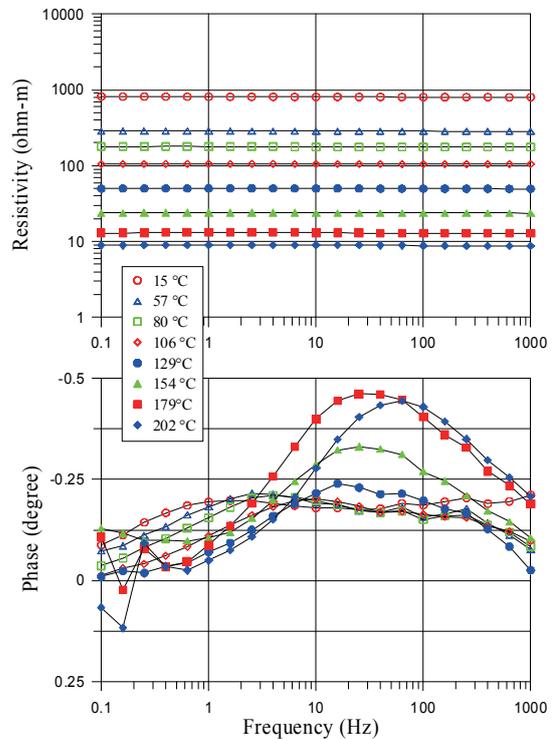


図 9. 温度の違いによる花崗岩の比抵抗(上)と位相差(下)の周波数変化

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：高倉伸一

Leader, Geo-Environmental Systems Research Group: Shinichi Takakura

e-mail: takakura-s@aist.go.jp

1. グループの研究目標

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、物理探査を利用した非破壊モニタリング技術、数値シミュレーションによる地下環境のモデリング技術などの基盤研究を進めている。また、CO₂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、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、CO₂地中貯留研究、地層処分安全研究、地熱等資源研究、地下利用技術研究を主たるミッションにかかげ、平成19年7月に新しく組織された。メンバーは、地球物理学、岩石力学、掘削工学、岩盤工学の専門家からなる。物理学的実験およびフィールドワークの手法を用いて、環境に調和した地下の有効利用、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資源探査までと多岐にわたり、予算項目は複数にまたがっている。いずれの研究においても、「環境との調和を考えた地圏の開発・利用を図ること」を基本理念としている。研究内容も基礎研究から応用研究まで幅広いが、技術的に重なる部分も多い。そこで、研究テーマを便宜的に以下の4つに分類し、

個々の研究テーマの管理し、研究の効率化を図っている。

- ・CO₂地中貯留技術に関する研究
- ・放射性廃棄物地層処分に関する研究
- ・地圏の継続的利用に関する研究
- ・地圏環境システムの解明に関する研究

1) グループ員

高倉 伸一 (リーダー)

及川 寧己

唐澤 廣和

竹原 孝

相馬 宣和 (CO₂地中貯留 RG より分担)

船津 貴弘 (CO₂地中貯留 RG より分担)

2) 予算

文部科学省試験研究「放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究」

運営費交付金「沿岸域海底下 CO₂地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」

運営費交付金「地圏環境システムの研究」

日本鉱業協会研究委託費「坑内精密電気探査技術に関する研究」(平成21年度まで)

「磁鉄鉱と硫化鉄物を含有する岩石の電気的特性に関する研究」(平成22年度から)

共同研究費「ナトリウム型ベントナイト鉱床を形成する地質環境の解明に関する研究」

等

3. 平成21年度までの研究進捗状況

以下では、主な研究について平成21年度までの進捗状況の一例を紹介する。

3.1. 放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究

原子力発電所から排出される高レベル放射性廃棄物は、地層中にて超長期間保存され、放射性物質の減衰を待つことになる。高レベル放射性廃棄物の輸送や貯留を行うためには、安定した地下に空洞を掘削することが必要である。しかし、この岩盤空洞周りでは、応力が解放されることにより変形などの変化の生ずる領域が発生する。この領域は応力の緩み域とよばれ、ここでは潜在き裂等の開口により天然バリアの遮蔽性能が低下することが考えられる。空洞の長

期安定性評価の観点から、この緩み域を経時的に評価することが重要である。このようなことから、天然バリアの長期安定性に関するフィールドデータを得るとともに、緩み域を含む空洞周りの地層環境で想定される温度、圧力条件における岩石のクリープ特性のデータを蓄積し、長期安定性予測のためのシミュレーションやモデル解析の基礎データとすることを目的とする研究を実施している。

a) 深部岩盤空洞周り緩み域における 3 次元応力計測

瑞浪超深地層研究所の研究坑道深度 200m レベルの試験用横坑からのボーリングで採取された花こう岩コアを用いて、AE/DRA 法による応力計測実験とその解析を昨年度分もあわせ行った。異なる方向に掘削された 3 本の孔から得られた、各 3 深度、合計 9 地点分の岩石試料を計測に供した。なお、コア採取時のボーリング機材を設置した試験用横坑は開削後 1 年半弱経過している。

AE 法では前々年度の地点での実験と同様に、繰返し載荷時に AE の発生率が増減を繰り返すような単純でない挙動が見られ、幾つかの AE 急増点の中から変化率の大きいものを候補応力値として 2 つ選んだ。DRA は屈曲点が明瞭ではない試験片もいくつか見られ、特に壁面との距離が近くなるにつれて、屈曲点が読み取れなかったり、飛び抜けて大きいまたは小さい応力値が得られる場合が多く見られた。

堅牢域に相当すると考えられる各孔で壁面から最も離れたコアを用いた DRA による応力計測結果を図 1 に示す。3 次元応力場は孔ごとにばらつくものの、2 孔で水平面内では北西-南東方向の応力が大きいという傾向が見られた。当該試験地点近くでの地表からの深層ボーリング調査で得られた原位置初期応力では、深度 200m 付近の水平面内最大主応力は N-S から NW-SE 方向にあり、水平面内ではそれと調和的な応力場が得られた。

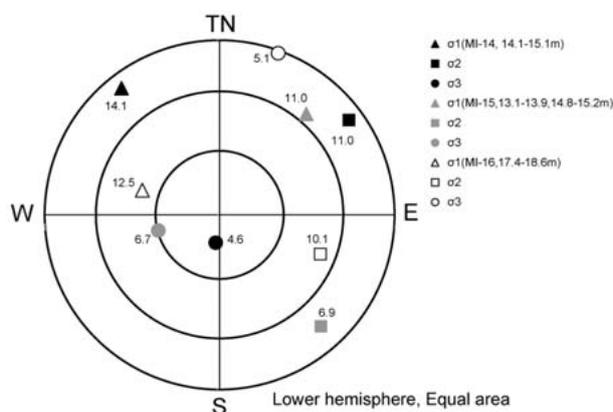


図 1 3次元解析例 (各孔奥部試料)

b) 空洞周り緩み域における岩盤長期変形挙動に関する研究

常温・室乾状態で養生した珪藻土を用いて、温度環境 80°C、大気圧下でのクリープ試験を実施し、高温域におけるひずみ計測の安定性を検討した。市販のひずみゲージが利用できないため、変位計測用の高温用 LDT を適用した。高温環境下において、1 次クリープと 2 次クリープに相当する変位の挙動の確認が出来たが(図 2)、3 次クリープに関しては破壊に至らないケースがあり良質なデータが取れていない。これは、強度のバラツキに対するクリープ荷重が要因と考えられ、実際に湿潤状態の珪藻土の常温状態での強度試験では、無封圧下での強度にはバラツキがあることが確認された。また、長期クリープ試験(約 1 ヶ月)では試験後半に本来では有り得ないひずみ計の伸びが観察された。これは変位出力値のドリフトが原因であり、今後の封圧下での試験手法を工夫する必要があることもわかった。

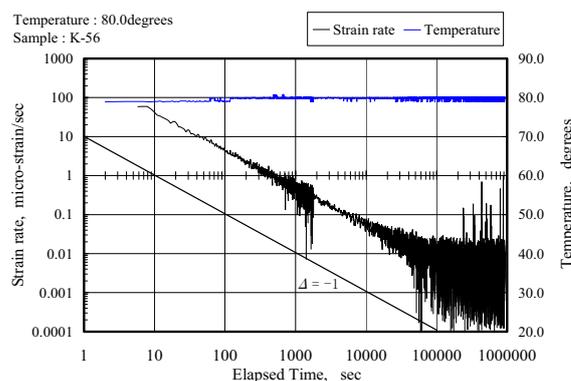


図 2 クリープひずみ速度の経時変化

3.2. 地層環境システムの研究：坑井掘削の高効率化

パーカッション(打撃)掘削はロータリ(回転)掘削に比べて掘削速度が極めて大きく、鉦山分野などでは能率向上やコスト低減に寄与している。しかし、高速現象を取り扱うパーカッション掘削では未解明の点も多く、パーカッションドリルの設計などに不可欠な基礎データが極めて少ない。

本掘削方式における岩石の掘削特性の解明を目的に、先年度までに基礎データの一つとしてビットに伝わる打撃エネルギーを評価してきた。本年度は、図 3 に示すロッドの S 部に二点計測法と呼ばれるひずみ計測法を適用して、ビットに伝わる打撃エネルギーを評価した。この方法では、ロッドの A 点と B 点から得られたひずみ信号の解析によって E 点のひずみ(入射波)を求める。

図 4 に、E 点における時間と応力との関係を

示す。A, B 点において妥当なひずみが計測できた場合、E 点の応力波形は $350\mu\text{s}$ 付近で 0MPa を通過する。しかし、本波形は 0MPa を通過せず、打撃エネルギーの評価には至らなかった。そこで、S 部でのひずみ計測の一助として図 3 の F 部にも二点計測法を適用して E' 点の応力波形を求めた (図 4)。E' 点の応力波形も 0MPa を通過していないが、一部のデータでは 0MPa を通過した。両データの検討から、E' 点の応力波形 ($0\sim 320\mu\text{s}$) から求めた打撃エネルギーは、 0MPa を通過する応力波形から求めた打撃エネルギーの約 99% に達しており、前者は E' 点の打撃エネルギーであると看做して差支えがないことがわかった。また、E' 点の応力を 1.72 倍した波形 ($E'\times 1.72$) と、E 点の波形は $0\sim 240\mu\text{s}$ の範囲においてよく一致しており、この範囲では妥当な応力波形が得られていることもわかった。詳細については省略するが、E 点と E' 点の応力波形から、 0MPa を通過する E 点の打撃エネルギーが推定できた。

図 5 は推定結果などから作成した、パーカッションドリルへの一分間当りの入力エネルギー W_{in} と出力 (打撃) エネルギー W_{out} との関係である。本校正曲線は、本ロッドを用いた岩石の掘削実験中の打撃エネルギーを評価するために用いる。

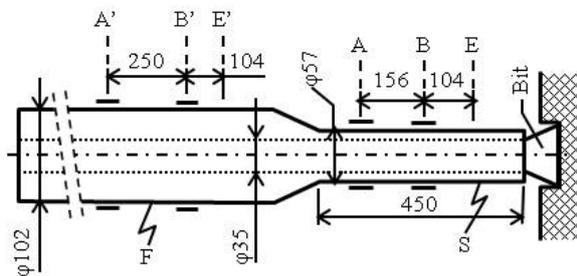


図 3 掘削ロッド 2

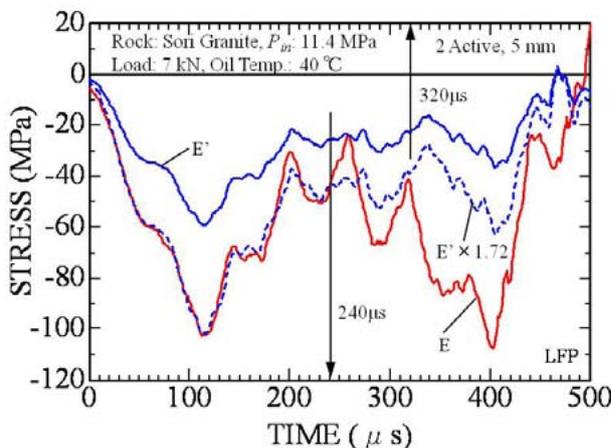


図 4 E 点と E' 点の応力波形

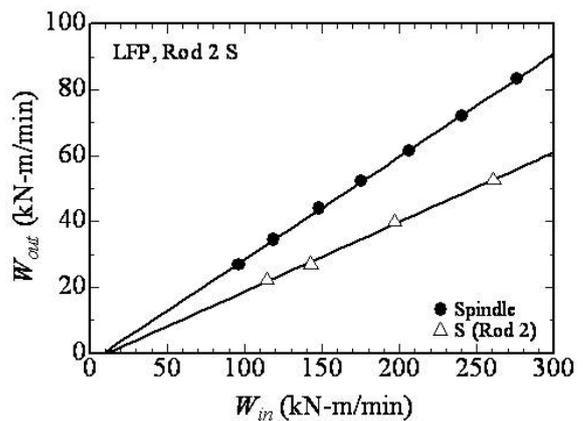


図 5 W_{in} と W_{out} との関係 (ロッド 2 の S 部)

3.3. 坑内精密電気探査技術に関する研究

地下の比抵抗分布を把握する電気探査は、金属鉱床探査における最も有効な物理探査法の一つであり、多くのフィールド調査で利用されている。地下深部を高精度に調査するためには、地下に電極を直接設置することが有効な手段となる。その方法の一つとして坑道 (トンネル) を利用することがあげられる。このようなことから、坑内に適用する精密電気探査技術の開発を実施している。ここでは、平成 21 年に愛知県北設楽郡東栄町振草地区にあるセリサイト鉱山の坑道において実施した比抵抗法、IP 法、帯磁率測定の結果について紹介する。

比抵抗法探査では、図 6 に示すように、坑壁 (岩盤) に沿って 3 本の測線 (H-1, H-2, H-3) を設定した。電極間隔は、H-1 と H-3 は 1m で、H-2 は 2m である。まず、光波測量で決めた坑壁の所定の位置にドリルで穿孔し、ベントナイトを付けた鉄電極を差し込んだ。測定はダイポール・ダイポール配置とウェンナー配置で行った。測定装置には多チャンネル電気探査装置 AES-6L を使用し、 100mA の電流を通電した。

IP 法測定は測線 H-3 で実施した。坑壁に直径約 31mm の穴をドリルで穿孔し、そこに外径 30mm の鉛-塩化鉛非分極性電極を設置した。この際、電極で使用されている塩を混合させた石膏を接着剤として流し込み、電極を坑壁に密着させた。測定装置には SYSCAL-R2 を使用し、約 $50\sim 100\text{mA}$ の電流を通電して、ダイポール・ダイポール配置による時間領域 IP 法のデータを取得した。

帯磁率測定は、ZH-instrument 社のポータブル帯磁率計 SM30 を使用し、それぞれの電極の位置で実施した。測定は平成 21 年度に実施したため、測定場所の坑壁の崩壊により測定できなかった場所もあった。一般に熱水変質の程度が大きいほど帯磁率が低い傾向があり、当該鉱山では熱水変質帯を受けている場所の帯磁率は、概ね $0.1(10^{-3}\text{SI})$ 以下となる。

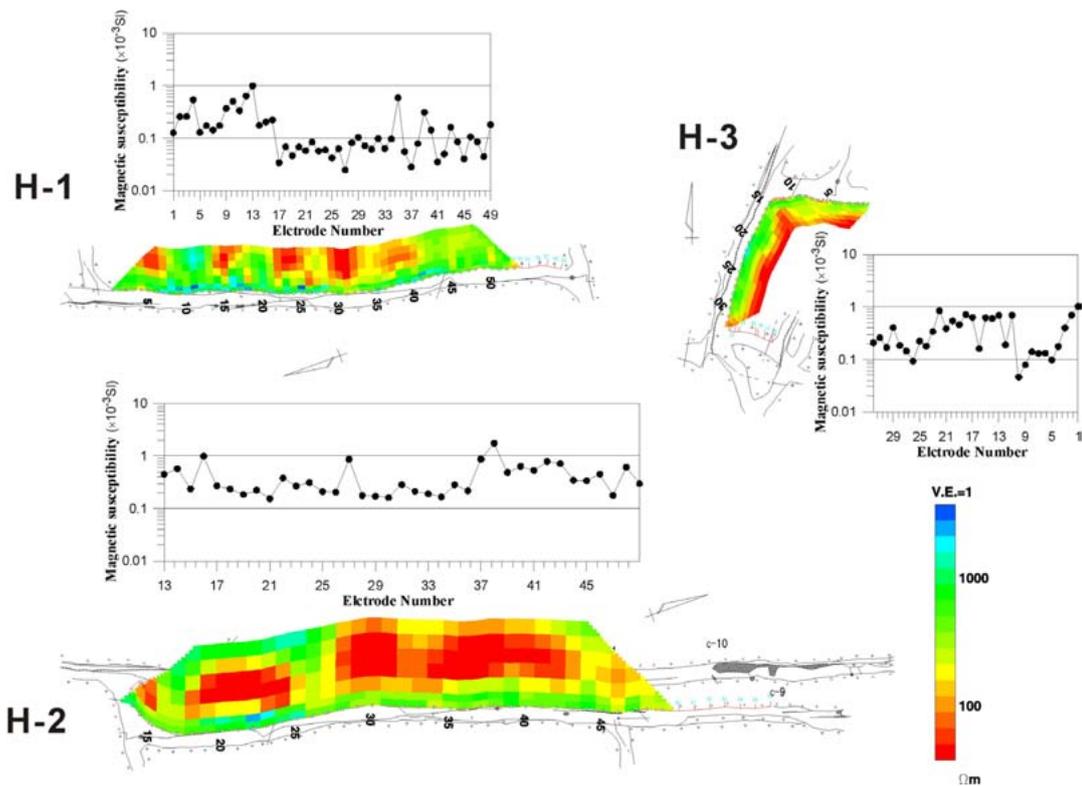


図 6 坑内比抵抗法電気探査の測線と解析比抵抗断面および帯磁率測定の結果

高密度比抵抗法のデータに 2 次元解析を適用し、探査深度に応じた精密な比抵抗構造を求めた。その結果を帯磁率の測定結果とともに図 6 に示す。低比抵抗の領域と低帯磁率の領域が重なる傾向が認められるが、これは熱水変質により、岩石の比抵抗と帯磁率が低下したからと考えられる。

また、IP 法データの解析から求めた比抵抗断面、充電率断面、正規化充電率断面を図 7 に示す。この測線では、電極番号 11 番付近に熱水変質を伴った粘土脈が認められる。正規化充電率断面では、この粘土脈に沿って高い異常値が求まっており、比抵抗断面や比抵抗断面より明瞭に地質構造の特徴を表していることがわかる。

「坑内精密電気探査技術の研究」は平成 21 年度で終了したが、平成 22 年度からは「磁鉄鉱と硫化鉱物を含有する岩石の電気的特性に関する研究」を開始した。IP 法電気探査は斑岩銅鉱床や酸化鉄銅金鉱床などの非鉄金属鉱床探査でよく利用される。これは硫化鉱物が IP 効果を持つことを利用しているが、IP 異常が観測されたところで試錐をしても、硫化鉱物が見つからないことがしばしばある。その原因の一つとして、磁鉄鉱の存在があげられる。そこで、磁鉄鉱と硫化鉱物を含有する岩石の電気的特性を調べ、それぞれの鉱物が電気的特性に及ぼす影響を解明することにより、IP 法によって磁鉄鉱と硫化鉱物を識別可能とすることを目的とした研究を開始した。

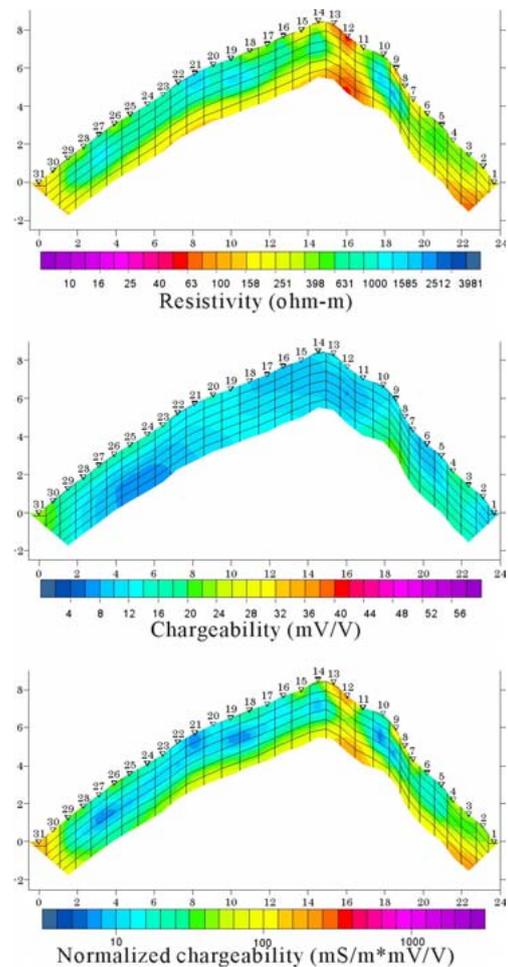


図 7 坑内 IP 法の解析結果

物理探査研究グループの紹介 -2008 年度-

Exploration Geophysics Research Group, FY2008 Update

物理探査研究グループ長： 内田利弘

Leader, Exploration Geophysics Research Group: Toshihiro Uchida

Phone: 029-861-3840, e-mail: uchida-toshihiro@aist.go.jp

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

1. グループの研究目的

放射性廃棄物地層処分、土壌・地下水汚染、CO₂ 地中貯留、土木分野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、鉱物資源等の資源分野における地質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 20 年度においては、放射性廃棄物地層処分場選定における地質構造評価、土壌汚染・地下水環境・土木分野等における浅部地質環境評価、および、CO₂ 地中貯留・断層評価等の沿岸域における物理探査適用法の検討を中心に研究を行うとともに、技術シーズ開拓のための基盤的研究を進める。

2. グループの概要

1) グループ員

内田利弘 (リーダー)
上田 匠
神宮司元治
中島善人
光畑裕司
横田俊之
西澤 修
安藤 誠 (産学官制度)
松島 潤 (産学官制度)

2) 平成 20 年度の研究テーマ

環境省委託費「鉱物油等に起因する複合的な土壌汚染の環境リスク評価手法に関する研究」
運営費交付金「沿岸域地質・活断層調査」
JNES 委託費「震源断層評価に係る地質構造調査の高度化に関する研究」
ほか

3) 研究の概要

a) 地層処分場の地質構造評価

放射性廃棄物地層処分場の岩盤評価のため、人工信号源電磁探査 (CSEM) 法について、2.5 次元・3 次元データ解析法の改良を継続し、昨年度までに取得した実証試験データへ適用する。沿岸域の断層や塩淡水境界把握のための物理探査技術開発として、浅海域を対象とする電磁探査法のデータ解析手法の

研究を行う。昨年度、北海道幌延地域で取得した電磁探査データ等の解析を継続し、地質構造、塩淡水界面分布、地質特性等を解釈する。

b) 土壌汚染評価

油汚染サイトにおいて比抵抗法等の補足調査を実施し、昨年度取得したデータと合わせた解析を行い、得られた比抵抗構造、電磁波反射面分布と地盤構造及び油汚染との相関を検討する。油汚染サイトで取得した土壌サンプルの物性や内部構造の計測を行い、油汚染と電磁気物性の関係について調べ、汚染評価のための基礎情報を取得する。

c) 浅部地質環境評価

地下水環境、土木分野等における浅部地質環境評価のため、以下の研究開発を行う。コンクリート等の土木建造物中の微小な空隙の検出を目指した核磁気共鳴 (NMR) 表面スキャナー装置の改良を継続し、成果をとりまとめる。マルチ送信比抵抗探査装置について、これまでに開発したプロトタイプ装置の実証実験を行う。地盤液状化評価のため、地盤空気注入やマイクロバブル砂層注入におけるモニタリング技術について検討する。河川堤防の健全性評価のため、物性計測実験を行い、これまでの物理探査結果と合わせ、堤体の構造や地下水流動のモデル化を行う。

d) 海域における物理探査適用

沿岸域の物理探査データ空白域の補間、CO₂ 地中貯留等における地質構造把握やモニタリング、海底熱水鉱床開発に向けた探査技術開発等、海域における物理探査について基礎的な検討を行う。

e) 物理探査技術の基盤的研究

地圏における資源開発及び地質環境評価のため、物理探査による地下構造の高精度イメージングのための技術開発を行う。今年度は、豪州 Monash 大学等との共同研究による同国ビクトリア州における地殻構造調査を実施する。

3. 平成 20 年度の主な進捗状況

1) 地層処分場の地質構造評価

a) 岩盤評価のための物理探査法開発

深度約 2km までの地下比抵抗の 3 次元分布を高精度にイメージングするための、人工信号源を利用し

た電磁探査法の研究開発を実施した。開発した GPS 時刻同期の信号送信・受信システム (図 1) を用いての筑波山西方の平野部で、面的なデータ取得実験を実施した。この地域では、南北に流れる小貝川周辺を境界として、筑波山周辺から伸びる花崗岩質基盤が深度 400m 付近から急傾斜に西側で深くなっていることが反射法地震探査で確認されている。図 2 に南側の送信源からの信号を使った 0.5Hz の見掛比抵抗分布を示す。小貝川周辺を境に、東側で基盤が浅いため高比抵抗を、西側では堆積層が厚くなるために低比抵抗を示している。

また、測定データの 3次元解析のため、磁気ベクトルポテンシャル A と電気スカラーポテンシャル ϕ を用いた差分法による 3次元モデリング計算コードを開発した。 A と ϕ はそれぞれ、直方体計算要素の辺と節に配置したスタガード要素である。図 3 に計算例を示す。



図 1: 開発した送受信システム。(a) GPS 時刻同期送信システム、(b) GPS 時刻同期 24 ビット A/D 受信システム。

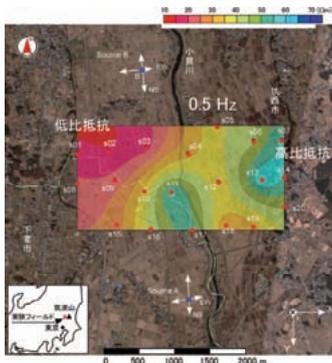


図 2: 送信源 A から送信した周波数 0.5Hz の信号を 20 測点 (赤丸) で受信して、計算した見掛比抵抗平面図

b) 沿岸域における物理探査適用研究

沿岸域の地質構造と地下水環境 (塩分濃度等) を評価する物理探査手法の開発が必要とされている。特に、浅海域に適用できる電気・電磁探査手法は開発が急がれる。そのようなニーズに応える基礎研究として、2007 年度に、北海道幌延地域の沿岸域をモデルフィールドとし、物理探査の適用研究を実施した。まず、陸域において MT 法、TEM 法による地質調査を実施した (図 4)。また、既存坑井調査データを用い、物理探査や検層データから水理学的物性を導出する手法について検討した。さらに、次年度以降の現地調査に向けて、浅海用の海底電磁探査装置を製作した。MT 法によって得られた比抵抗モデル (図 5) は、浅部に高比抵抗の第四紀堆積物が分布し、

その下位には、新第三紀から第四紀の堆積岩に相当する厚い低比抵抗層が分布することがわかった。低比抵抗層には高濃度の化石塩水が含まれているものと解釈される。

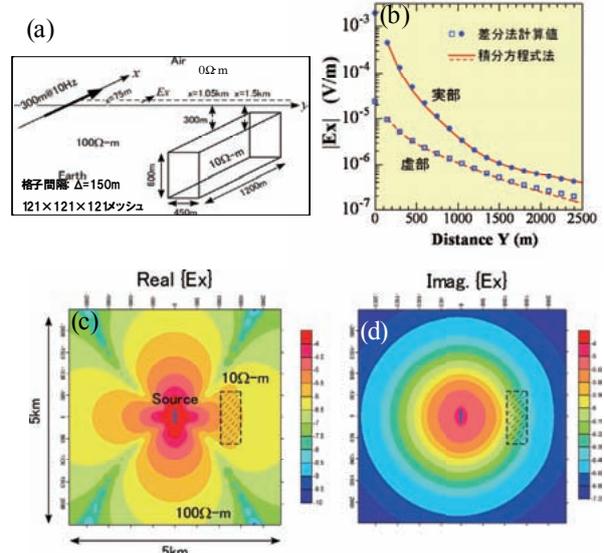


図 3: スタガード差分法による人工信号源電磁探査法 3次元モデリングの例。(a) 想定したモデル、(b) y 軸上の電場 E_x の計算結果と積分方程式法による数値解との比較。10Hz 送信の場合の E_x の計算結果: (c) 実部と (d) 虚部の地表での分布図。

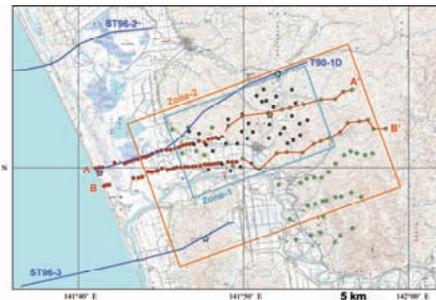


図 4: 幌延沿岸域における MT 法調査測点 (赤丸) と黒丸は既存 MT 測点。赤線は 2次元解析を行った測線。

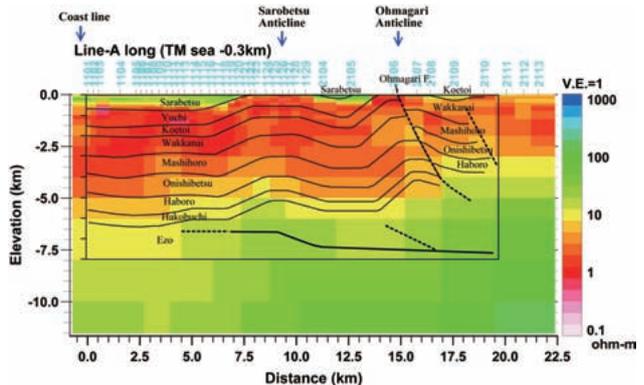


図 5: 測線 AA' の 2次元比抵抗モデル。反射法解釈断面を重ねて表示。

2) 土壌汚染評価

電気的物性の分布から油分汚染土壌を評価する手法について検討するため、電気・電磁探査および地中レーダ法による地表からの 3次元探査、貫入

式比抵抗計測・サンプリング装置を用いた地層比抵抗の原位置計測と間隙水サンプリングなどの計測法を油汚染されたモデルフィールドに適用し、地表調査結果と原位置計測データの比較、及び、既存の採取土壌サンプル調査による油分分析データとの比較検討を行い、油分汚染に起因する物性異常の抽出を試みた。

現地調査においては、70m×80mのエリアにおいて、電極間隔2mピッチの27測線を使った3次元高密度電気探査を実施した。探査深度は約10mである。その結果、タンク跡地内部を含む各点の表層付近(1m~3m)で明瞭な低比抵抗異常を確認した(図6、図7)。また、タンク跡地内部において、ボーリング調査や貫入試験調査を行ったところ、低比抵抗異常を示す地点で油の存在を確認した。

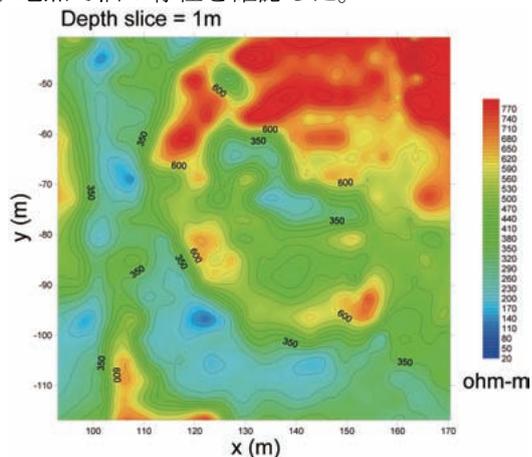


図6：3次元比抵抗構造の深度スライス(深度1m)

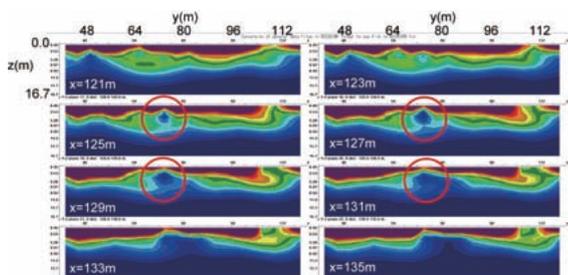


図7：タンク中央部分のyz断面図。赤丸は低比抵抗異常。

3) 浅部地質環境評価

a) NMR計測による土木構造物メンテナンス

コンクリートなどの水を含む土木構造物の品質管理を現場で迅速に非破壊で行える計測技術が求められている。そのニーズに応えるため、水の定量計測に定評のあるプロトン核磁気共鳴の原理を応用した物理探査装置(核磁気共鳴表面スキャナー)のプロトタイプを開発した。この装置は、計測対象物中の水分子の水素原子の核スピンの緩和過程を計測することで水の量や分子運動特性を推定するものである。土木建造物のような巨大な物体の表面を非破壊でスキャンできるようセンサー部分に片側開放型という特殊な構造を採用した。通常の核磁気共鳴装置と比べて静磁場と高周波磁場は著しく弱く不均一になり、緩和波形のS/N比が悪くなると

いう技術的困難がある。そこで、高周波パルスを工夫することによってこの問題の解決を試みた。

装置の適用実験として、寒冷地におけるコンクリート壁の凍結状態の非破壊検査への応用を念頭において、凍結した含水モルタル試料が融解する過程をモニタリングした。モルタル試料(有効空隙率17 vol.%)を水に浸したあと-20°Cの冷凍庫で凍結させ、センサー上に室温で放置し、空隙の氷が水に変化する様子をPAPS-CPMGというパルス系列で時間をおいて横緩和波形を5回計測した(図8)。1つの波形データの取得に要した時間は4分であった。緩和波形は、センサーの感度領域(コイルから1cm弱離れた空間)にある液体状の水分子のシグナルのみであり、その緩和波形の振幅は液体の水の量に比例する。図1のように、多少のノイズはあるが、氷の融解に伴って水由来の信号強度が時間とともに増加する様子をはっきり確認できた。ちなみに、完全に融解した状態(84分後)の波形の振幅から推定した体積含水率(14 vol.%)は、有効空隙率とほぼ一致した。このように、開発したプロトタイプは、室内実験レベルではあるが、土木現場での品質管理に使えるポテンシャルがあることがわかる。

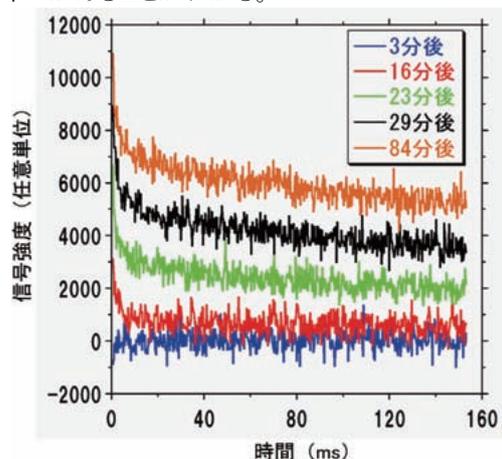


図8：融解中の凍結モルタル試料の緩和波形。枠内の時刻は凍結試料を室温にさらしてから経過時間

b) マルチ送信比抵抗探査システムの開発

複数の電極から同時に電流を送信することにより、従来の比抵抗探査装置と比較して十倍以上の速度で計測が可能なマルチ送信比抵抗探査装置(図9)を試作し、同期検波回路および送信出力装置の最適化および内部ノイズ対策を行った。その結果、屋外で従来の探査機で取得されるのと同等の品質のデータを非常に高速度で取得できることを実証した。その後、第2号機の開発を進め、1号機のシステムと比べて内部の同期検波の数や送信出力、電流コントロールのインピーダンス制御手法、ブロック構造型の専用スキャナーなど大幅な改良を加えた(図10)。その結果、毎分1200点を超える極めて高速なスキャンが可能な実用的システムとして完成した。また、本測定装置の電極切り替え生成ファイルから逆解析までを簡単に扱えるように、一連の総合管理ソフトウェア群も完成させた。

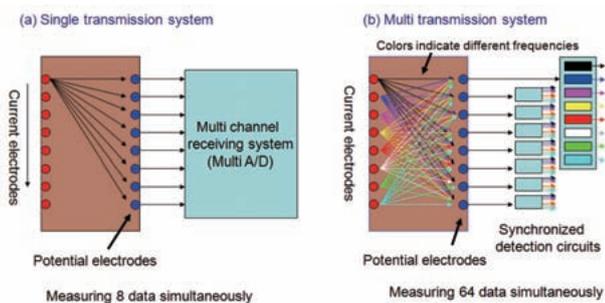


図 9：マルチ送信比抵抗探査装置（右）と従来装置（左）の比較。マルチ送信では、複数の電極から周波数の異なる電流を同時送信する。受信電極では、送信された混合信号を同期検波回路群で個別に分離するため、電流電極の切り替えなしに多数のデータを取得することができる。



図 10：マルチ送信比抵抗探査装置の試作 2 号機。同時送信 8ch、受信 8ch で 64 個のデータを約 3 秒で取得でき、毎分 1200 点のデータを取得可能である。

c) 河川堤防の健全性評価

河川堤防の健全性評価に物理探査を用いる方法について検討するため、埼玉県比企郡吉見町の河川堤防において地中レーダ、電磁マッピングによる調査を実施した。以下に地中レーダの 3 次元調査結果を示す。

当該地域は、過去に二度の台風（昭和 56 年、平成 13 年）で被害を受けており、また、平成 19 年 9 月の台風における増水に伴い、堤防裏のり尻の変状、堤防裏のり尻小段舗装面に生じたクラック、文覚川河床部からの湧水という、3 つの変状が観察された。これらの被害の原因を解明し、地下水分布や地下水流動を把握するため、変状の見られた区域で地中レーダによる 3 次元調査を行い、3 次元マイグレーション解析を適用した（図 11、図 12）。

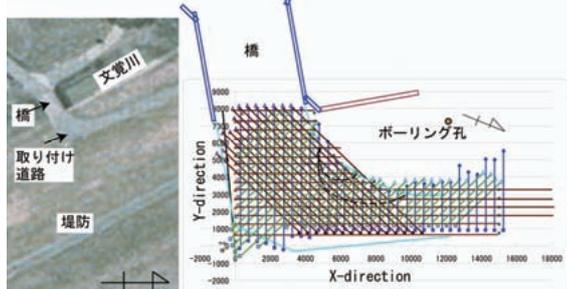


図 11：荒川堤防における 3 次元地中レーダ探査測線。測線方向は X, Y 方向に加え、 $\pm 45^\circ$ 方向の合計 4 方向にとった。図中に示した破線が、舗装路面に生じたクラックの位置。

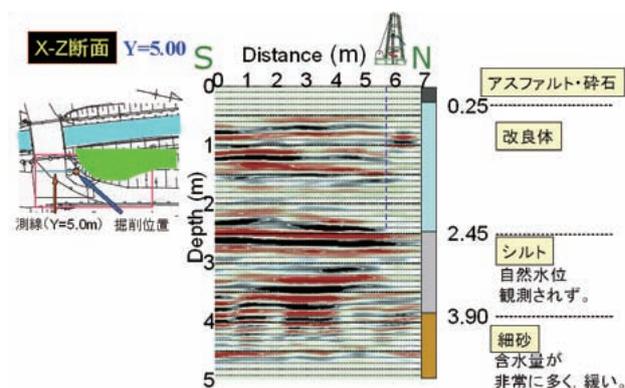


図 12：舗装路面上に生じたクラックを横切る測線 (Y=5.0m) における X-Z 断面。舗装路面上のクラック位置を断面内に破線で示す。また、コア観察による記載を併記した。路面クラックが存在する位置で、南側の深度 1 m 付近に存在する連続的な反射面が途切れているのがわかる。

4) 海域における物理探査適用

a) 海洋・沿岸域における電気探査法数値計算法の整備

近年、沿岸域における活断層調査、放射性廃棄物地層処分、二酸化炭素地中貯留、および、海洋での熱水鉱床、メタンハイドレート、石油ガスの探査等、沿岸から海洋における地下構造調査や資源探査への社会的要請が高まっている。

海域の電気・電磁探査データ解析技術は測定装置の開発に比べて遅れており、特に 2 次元以上の構造解析については依然として研究段階にあるのが現状である。そこで本研究では沿岸・海洋における上記のような様々な探査対象に適用可能な電気探査法の数値解析手法の検討を行い、新たにいくつかの数値計算プログラムを開発・整理した。具体的には、海水層を考慮した任意電極位置で計算可能な汎用的電気探査 1 次元解析、有限要素法による海水・海底地形を考慮する 2.5 及び 3 次元電気探査法モデリングについて、基礎理論の整理と基本的な精度検証並びに試験計算を進めている（図 13）。

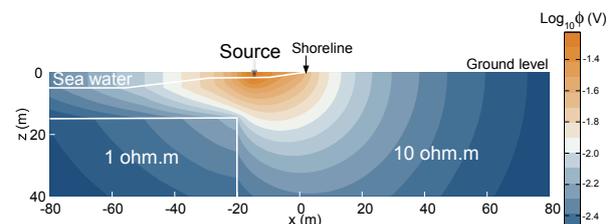


図 13：沿岸浅海域モデルにおける電気探査応答断面図。最大水深 10m の極浅海沿岸域において海岸線から 15m 地点 (水深 1.5m) の海底に電極をおいた場合の電位応答計算図。海底下には低比抵抗の異常構造を想定した (2.5 次元有限要素法プログラムにより計算)。

物理探査研究グループの紹介 -2010 年度- Exploration Geophysics Research Group, FY2010 Update

物理探査研究グループ長：内田利弘

Leader, Exploration Geophysics Research Group: Toshihiro Uchida

Phone: 029-861-3840, e-mail: uchida-toshihiro@aist.go.jp

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

1. グループの研究目的

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、CO₂ 地中貯留、土木分野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、鉱物資源等の資源分野における地質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 22 年度においては、放射性廃棄物地層処分場選定における地質構造評価、土壌汚染・地下水環境・土木分野等における浅部地質環境評価、CO₂ 地中貯留における物理探査モニタリング、地熱貯留層評価・地中熱利用への物理探査の適用、震源断層評価への物理探査の適用等の研究を進めるとともに、技術シーズ開拓のための基盤的研究を進める。

2. グループの概要

1) グループ員

内田利弘（リーダー）
上田 匠
神宮司元治
中島善人
光畑裕司
横田俊之
安藤 誠（産学官制度）

2) 平成 22 年度の主な研究予算

資エネ庁委託費「沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発」
JNES 委託費「震源断層評価に係る地質構造調査の高度化に関する研究」
環境省委託費「地中熱利用ヒートポンプシステム過負荷運転実証試験」
環境省委託費「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」
共同研究費「柳津西山地熱地域における 3 次元 MT 法探査に関する研究」
運営費交付金「沿岸域地質・活断層調査」
運営費交付金「工業用地下水資源の再開発・合理化研究」
など

3) 平成 22 年度の研究の概要

a) 地層処分場の地質構造評価

沿岸域の地質構造や塩淡水境界を把握するための物理探査技術として、浅海域を対象とする電磁探査法の機器開発とデータ解析手法の研究、北海道幌延地域における物理探査法適用調査、地層の物性を求めるデータ解釈法の研究等を行う。

b) 土壌汚染評価

油汚染サイトにおいて取得したデータの解析、試料の分析を継続し、得られた比抵抗構造、電磁波反射面分布、ダイレクトプッシュ原位置計測値等を総合的に解釈し、汚染評価のための基礎情報を整理する。

c) 浅部地質環境評価

核磁気共鳴 (NMR) 表面スキャナー装置について、農業や工業製品への適用実験を行う。マルチ送信比抵抗探査装置の改良を行う。発破液状化試験、空気注入地盤改良等の比抵抗モニタリングについて検討を進める。

d) CO₂ 地中貯留のモニタリング技術

物理探査（電磁探査等）による CO₂ 貯留モニタリング技術について海底電磁探査法等の数値実験による検討を行う。CO₂ のマイクロバブル注入技術およびモニタリング手法について基礎的検討を行う。

e) 地熱資源・地中熱利用における物理探査

地熱発電所の貯留層構造把握や温泉のつながりを評価する研究の一環として、いくつかの地熱地域において 3 次元比抵抗調査を実施する。地中熱利用における最適生産設計と環境影響予測のため、地盤物性パラメタの評価技術、環境負荷のモニタリング手法について検討を行う。

f) 沿岸海域における地質・活断層調査

沿岸域の物理探査データ空白域を補い、海陸にわたる地質・断層構造を把握する探査法について検討する。北海道苫小牧地域の陸域で反射法調査を実施する。

g) 物理探査技術の基盤的研究

物理探査による地下構造の高精度イメージングをめざす技術開発として、海底資源探査に向けた電気・電磁探査データ解析法の基礎研究、震源断層評価のための物理探査適用法の基礎研究、豪州における地殻構造調査のデータ解析を実施する。

3. 平成 22 年度の主な進捗状況

1) 地層処分場の地質構造評価

a) 沿岸域を対象とする物理探査技術開発

放射性廃棄物地層処分において、沿岸域の地質構造と地下水環境（塩分濃度等）を把握するための物理探査手法の整備が必要とされている。そのため、本研究では、浅海域を対象とする電磁探査法の機器開発および2次元・3次元データ解析手法の研究を進めるとともに、北海道幌延町のモデルフィールドにおいて、地震探査・電磁探査等の探査手法の適用研究を行う。

平成 21 年度には、浅海用海底電磁探査法の機器改良と幌延浅海域でのデータ取得試験、陸域での反射地震探査ならびに電磁探査法（MT 法）補足調査を行った。調査位置を図 1 に示す。

海底電磁探査法については、平成 19 年度から開発中の浅海用測定装置の改良と水槽実験を行って正常な動作を確認した後、幌延町の浅海底での適用試験を実施した（図 2）。その結果、実海域でも正常に測定が行えることを確認したが、波浪に起因する装置の揺動ノイズが大きく、測定データの品質は不完全であった。平成 22 年度には、さらに改良を加えるとともに、測定仕様を見直して、データ品質の向上を図った。陸域 MT 法測定データ（測線 A）と海域の 4 測点のデータを合わせて海陸接合の 2 次元構造解析を行った結果を図 3 に示す。

陸域の反射地震探査は、深さ 2000m 程度までの深部を対象とする P 波反射法と、深さ 100m 程度までの極浅層の構造を求める S 波反射法（ランドストリーマー使用）を実施した。測線は、沿岸部の浜里地区で掘削中の調査井付近を起点とし、東に、S 波は約 5km、P 波は約 8.5km の測線長で設定した。P 波反射法の解析結果を図 4 に示す。

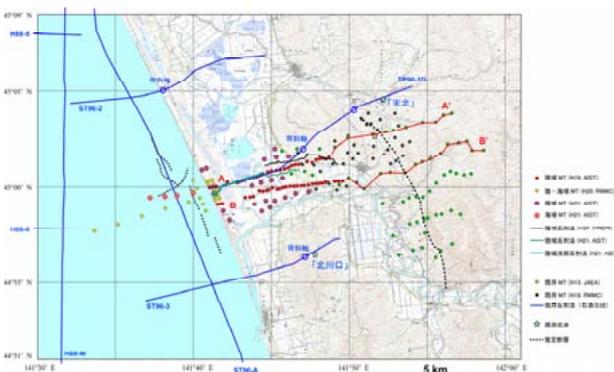


図 1：北海道幌延町の沿岸域モデルフィールドにおける平成 21 年度までの物理探査調査位置図。平成 22 年度には、海域における電磁探査調査を実施する。

b) 物理探査データ解析法の研究

物理探査や物理検層データから、地層の地質環境特性（間隙率、塩分濃度、力学的物性等）を定量的に推定する手法を開発する。岩石を大小二種類の球状粒子（砂・粘土粒子）で表現する二粒子モデル理論を適用し、弾性波速度と電気伝導度を解析する手

法の開発を進めた。幌延地域において実施された陸域電磁探査（MT 法）解析結果に上記解析法を適用し、第四紀地層（更別層）の間隙水電気伝導度分布を推定した（図 5）。



図 2：開発中の海底電磁探査装置の外観

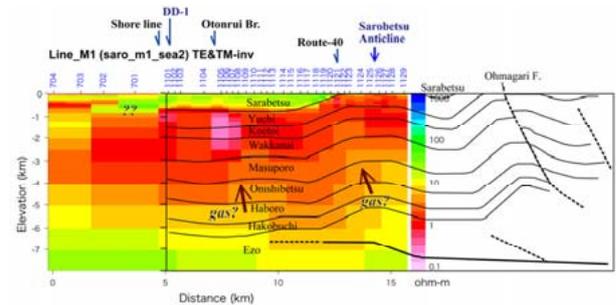


図 3：陸域の MT 法測線 A（平成 19 年度）と海域 4 測点のデータを用いた比抵抗構造 2 次元モデル（カラー表示）。既存反射法データ（石油公団）による地層境界解釈（黒線）を重ねて表示。海域のデータを加えることにより海岸線近傍のモデルの信頼性が向上し、海底浅部の比抵抗構造も求めることができた。ただし、海域データの品質は十分でないので、深部の比抵抗値の信頼性は低く、今後平成 22 年度のデータを加えた解析を行う。

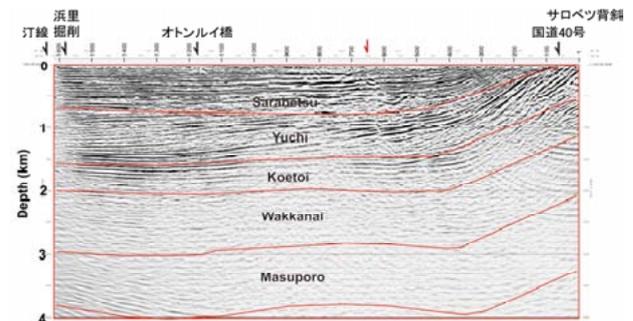


図 4：陸域 P 波反射法（平成 21 年度）のマイグレーション深度断面図（白黒表示）に石油公団の既存反射法断面の地層境界解釈結果（赤線）を重ねて表示。各地層内の詳細な層構造を追跡することができる。既存反射法断面の解釈は H21 反射法結果と少し異なる箇所があり、今後さらに解釈を進める必要がある。

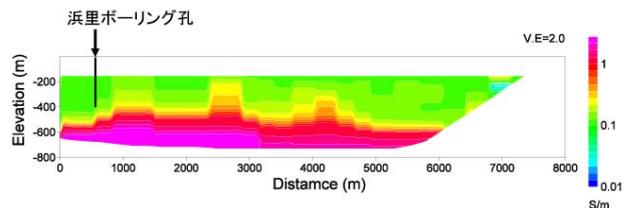


図 5：MT 法の比抵抗解析結果をもとに解釈して得られた更別層の間隙水の電気伝導度分布

2) 土壤汚染評価

地表からの物理探査や原位置計測によって、電気物性等の分布から油汚染土壌を評価する手法について検討するため、油分汚染モデルフィールドにおいて、これまで3次元電気探査、電磁マッピング法、地中レーダ等による調査を実施した。また、ダイレクトプッシュ型貫入プローブを用いた深さ数mまでの原位置計測、土壌・地下水サンプリング等を実施した。取得したサンプルについては、電気物性、X線CT、NMR等の計測を行った。それらの結果を総合して、油汚染に対する効果的な物理探査調査手法の検討を進めている。

a) 3次元電気探査と原位置計測

油分汚染サイトにおいて実施したダイレクトプッシュ型貫入プローブ計測の実施箇所と3次元電気探査（比抵抗探査）の結果を図6に示す。また、そのうち、4地点について、ダイレクトプッシュ型原位置計測による地盤の電気伝導度と揮発性成分（FFD）の測定結果を図7に示す。FFDによって油汚染の存在が確認された地点および深度と、3次元電気探査で得られた低比抵抗異常が良い相関を示すことが確認された。次に、4つの孔井でサンプリングした地下水の分析結果を表1に示す。汚染が検出された孔井（A-5、12、17）の間隙水は、油汚染が検出されなかった孔井（A-14）に比べると、3倍から5倍の電気伝導度を示すことがわかる。間隙水が高い電気伝導度を示す原因としては、微生物による油分（有機物）の分解等が考えられる。間隙水の電気伝導度が高い箇所は3次元電気探査による低比抵抗異常と良い相関を示す。

b) 核磁気共鳴法による土壤汚染の評価

核磁気共鳴（NMR）法では、水分子と油分子の粘性の違いに起因するプロトン緩和時間の差異を利用することで、油で汚染されたコアの部位を非破壊で検出できるポテンシャルがある。そこで、油で汚染されたサイトから採取した土壌コアサンプルに対してNMR法計測を実施した。調査サイトは粗～中粒砂の砂質地盤で構成されており、計測に用いたコアは深度0～4mの区間のサンプルである。なお、地下水位は深度約1mである。

永久磁石を搭載した低磁場核磁気共鳴装置（図8）にコアを装填し、プロトン緩和波形を2.7MHzの共

鳴周波数で計測した。指数関数的に減衰する横緩和波形の初期振幅を横軸に、横緩和時間を縦軸にプロットしたものが図9である。油汚染の無い部位（間隙流体が低粘性の水分子）のデータのトレンド（図中の水色のゾーン）と、油汚染のある部位（間隙流体が高粘性の油分子）のデータ点群とを、1つのデータ点を除いて識別することに成功した。このように、NMR法は、封印されたコアの汚染部位に関する情報を非接触非破壊で簡便に示してくれるので、ガスクロなどのコア開封後の時間のかかる様々な分析の前段階として大変有益な手法である。

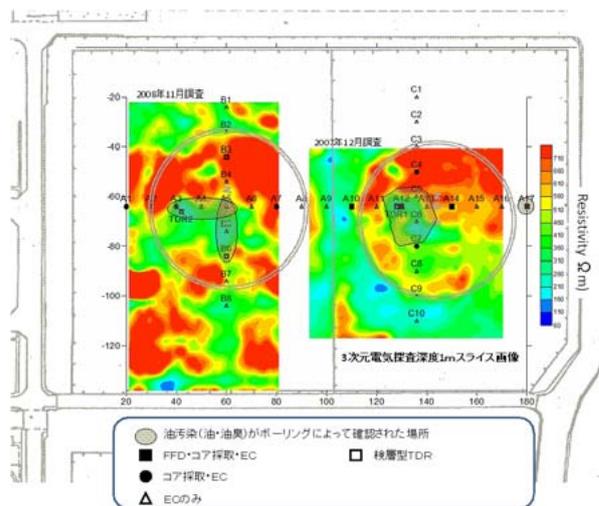


図6：油汚染サイトにおけるダイレクトプッシュ型貫入プローブ計測および土壌サンプリング実施箇所、および、3次元電気探査の解析結果（深度平面図）

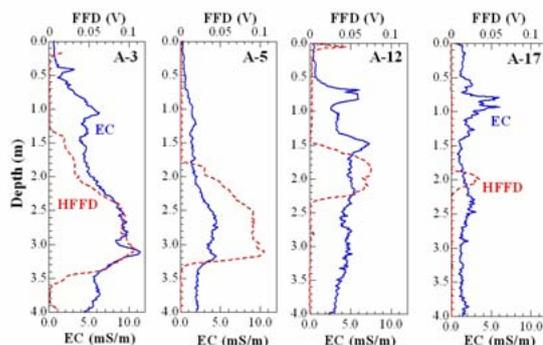


図7：ダイレクトプッシュ計測による地盤の電気伝導度とFFD結果

表1：地下水サンプルの電気伝導度と各種分析結果

孔井番号	地下水位 GL(m)	深度(m)	EC (mS/m)	pH	ORP (mV)	油臭	油膜	色・沈殿物	水質分析
A-5	-0.97	2-3	37.3	7.4	-143	油臭かなり強い/粘土っぽい臭い	あり	白濁、沈殿物有り	実施
A-12	-0.7	0.5-1	34.2	6.5	149	なし	なし	無色透明	実施
		1-1.5	18.14	5.9	211	わずかなり	あり	やや赤色・沈殿物あり	実施
		1.5-2	15.5	6.7	90	油臭わずか/少し粘土っぽい臭い	あり	やや赤色・沈殿物あり	
A-14	-0.9	0.5-1	3.57	7.9	-22	なし	なし	やや白濁	
		1-1.5	6.91	7.5	123	なし	なし	無色透明	
		1.5-2	6.37	7.2	103	なし	なし	無色透明	
A-17	-0.85	1.5-2	10.69	7	-184	油臭強い	あり	白濁、沈殿物有り	実施
		2.5-3	9.43	7.5	-148	なし	なし	白濁、沈殿物有り	実施

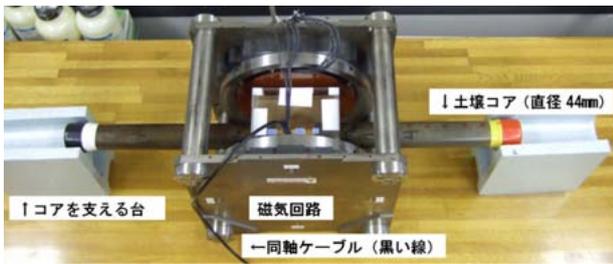


図 8：核磁気共鳴分析装置(土壌コアを計測中)

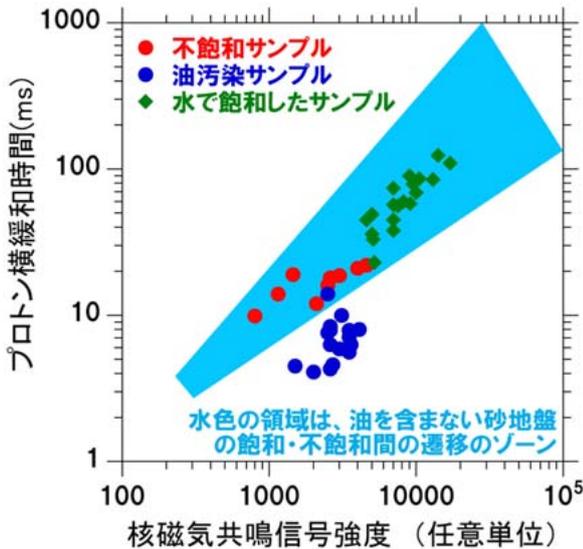


図 9：核磁気共鳴データによる汚染部位と清浄部位の識別

3) 物理探査技術の基盤的研究

a) 汎用な水平多層構造数値計算手法の開発

近年注目が高まっている海底下構造の探査について、海底下浅部の比抵抗探査を目的とした海底電気探査法の適用と、そのデータ解析手法について研究を進めている。本研究では、浅海から深海において、水平、垂直、傾斜など様々な電極配置による測定に対応する汎用性を備えた解析計算プログラムの作成、精度検証を行った。また、海底における鉛直型電気探査の実測試験を行い、測定データを再現する応答を数値計算により確認した(図 10, 図 11)。

b) 豪州における電磁探査法適用研究

豪州ビクトリア州政府の進める鉱物資源調査研究 Gold Undercover イニシアティブに協力し、豪州モナッシュ大学、産総研、韓国 KIGAM の共同研究として、2007 年および 2008 年に同州中部 (Bendigo 市周辺) において MT 法調査を実施した。

2次元解析の信頼性を向上させるため、スタティックシフトを未知数とできるように既存解析プログラムを改良した(図 12)。MT 法測点と同じ場所で TEM 法測定が実施されスタティックシフトが推定されているが、今回のインバージョンによるスタティックシフト推定値は、多くの測点でそれらと整合性の高いことが認められた。

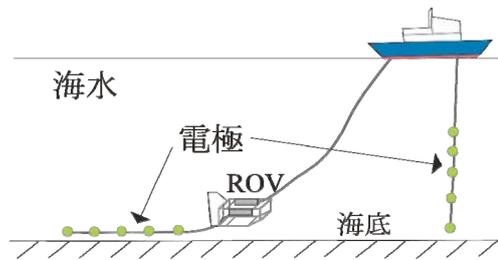


図 10：海底電気探査概念図(探査船からの電極ケーブル直接曳航や ROV を用いた電極展開)

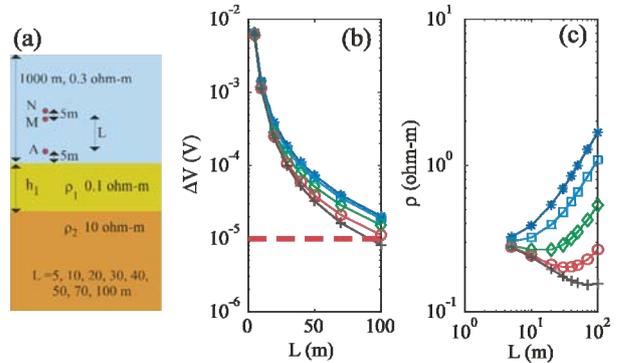


図 11：鉛直 3 極配置を用いた (a) 3 層構造モデルにおいて、低比抵抗 (0.1 ohm-m) の第一層層厚を 1m から 100m まで変化させた場合の (b) 電位応答と (c) 見掛比抵抗。

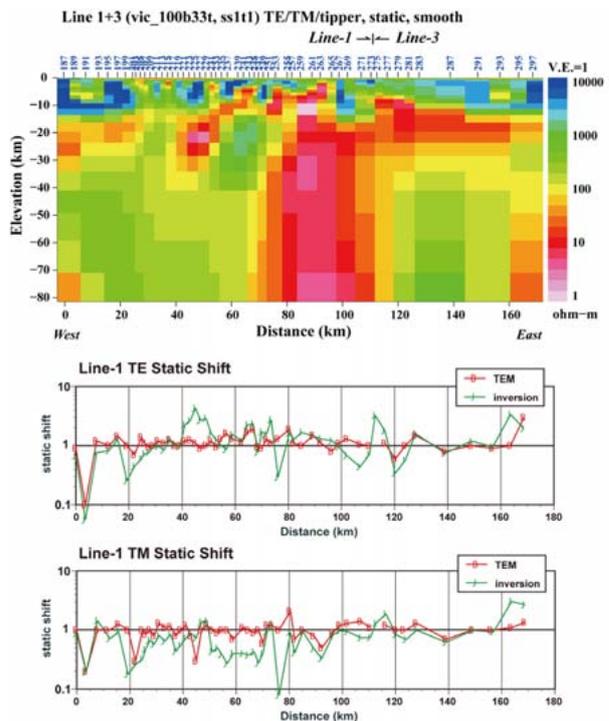


図 12：(上図) 豪州ビクトリア州中部で測定された MT 法データについて、TE・TM モードの見掛比抵抗・位相とティーパーを用いて解析を行った 2 次元比抵抗モデル。地下の比抵抗構造に加え、スタティックシフトも未知数とした。(下図) 2 次元解析によって推定したスタティックシフト (TE・TM モード) (緑線) と、MT 法と同じ測点で行った TEM 法データによって推定したスタティックシフト (赤線) の比較。

地圏化学研究グループの研究概要 Outline 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: t-sawaki@aist.go.jp

1. グループの研究体制

当研究グループは、有機地化学研究グループ、地質特性研究グループを再編する形で、平成19年10月1日に発足した。研究体制としては、地球化学、石油地質学、岩石・鉱物学、石炭岩石学等を専門とする研究者で構成されている。

高度な地化学分析技術をベースに、地下地質に関する基盤的情報を提供するとともに、地圏資源の開発や環境保全の研究に広く適用し、天然ガス鉱床等の成因や地下での分布状況の推定、二酸化炭素の地中貯留のための地化学的モニタリング技術の開発等の諸課題に取り組む。

2. グループの研究方針

当研究グループの目標は、地圏内の化学物質の分布と挙動、特にメタン等有用物質の生成・集積プロセスに関する地化学的解析、及び岩石、鉱物、流体等の地化学的性状の解明を通して、資源の成因解明、開発、環境保全等に資する研究を進めることである。

また、これらの研究課題に関して、産総研という研究機関として、価値ある研究成果を上げる（論文、学会発表、地質図類の作成等）のみならず、産総研外部からの要請への対応、精度の高い情報の発信、研究成果の普及（アウトリーチ活動）等を推進することを基本理念としている。

なお、研究を進めるに当たっては、燃料資源地質研究グループ、地圏微生物研究グループとの連携を密にすることとしている。

3. グループの研究資源

1) グループ員

佐脇 貴幸（グループ長）
猪狩俊一郎
金子 信行
高木 哲一
前川 竜男
須藤 定久（客員研究員）
鈴木祐一郎（地質調査情報センターへ出向中）

2) 予算

- 運営費交付金
 - ・地圏化学の研究

- ・関東平野における水溶性天然ガスの地質・地化学的調査研究

○委託費

- ・有機地化学的手法を用いたモニタリング技術に関する研究（環境総合テクノス）
- ・ベントナイト鉱床探査法の高度化に関する研究（クニミネ工業）

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
- ・ガスクロマトグラフ燃焼同位体質量分析計
- ・イオンクロマトグラフ
- ・ビトリナイト反射率測定装置（石炭顕微鏡）
- ・流体包有物温度測定装置
- ・流体包有物ガス分析装置

4. 平成20年度の研究計画と平成19年度～20年度前期までの研究進捗状況

1) 関東平野における水溶性天然ガス鉱床の分布に関する地質・地化学的調査研究（部門重点研究）

南関東ガス田が日本最大の水溶性天然ガス資源の賦存地域であることを踏まえ、将来にわたる資源の安定供給に資するために、本地域における水溶性天然ガスの賦存状況に関わる正確な地質学的情報を把握することを目的とする。本研究を進めるに当たっては、前述の通り、燃料資源地質研究グループ、地圏微生物研究グループとの連携を重要視している。

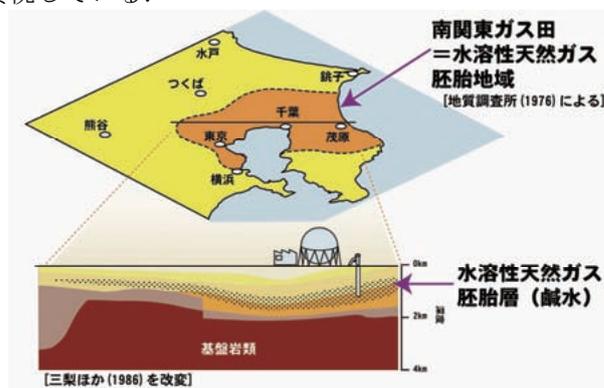


図1 南関東ガス田の概念図

予察的研究として、上総層群およびそれ以外の沖積層、三浦層群相当層、先新第三系の天然ガスポテンシャルについて情報収集を行い、上総層群分布域以外でも温泉掘削や土木工事により天然ガス噴出の危険性があることを確認した。特に、上総層群よりも古い新第三系が厚く堆積した地域に、天然ガス賦存の確率が高いことが明らかとなった。

今後も、上記の予察的研究を踏まえて本研究を進めるが、その推進のために、関連する機関（地方自治体、企業等）と連携を強化し、より精度の高い地質情報の整備に務めることとしている。

2) 燃料資源に関わる地化学的成因研究、資源評価、および知的基盤整備

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関わる地球化学的実験・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うことを目的とする。

これまでの成果としては、中条ガス田の微生物起源ガス端成分が南関東ガス田や新潟ガス田とほぼ同じ-65‰のメタン炭素同位体比と推定された。一方熱分解ガスの端成分としては、未変質なもの（構造的ウエットガス）と、溶存ガスが減圧による脱ガスによって組成分別を受け $C_1/(C_2+C_3)$ 比が増加したもの（水溶性ガス、構造的ドライガス）が認められた。水溶性ガスよりもメタン炭素同位体比の大きな構造的ドライガスは、水溶性天然ガス鉱床から遊離したガス相と、より組成分別を受けた熱分解ガスとの混合によるものと解釈された。これらの端成分の組みあわせで生成した混合ガスについては、従来の見積もりよりも熱分解ガスの寄与が大きいことが明らかとなった（図2）。

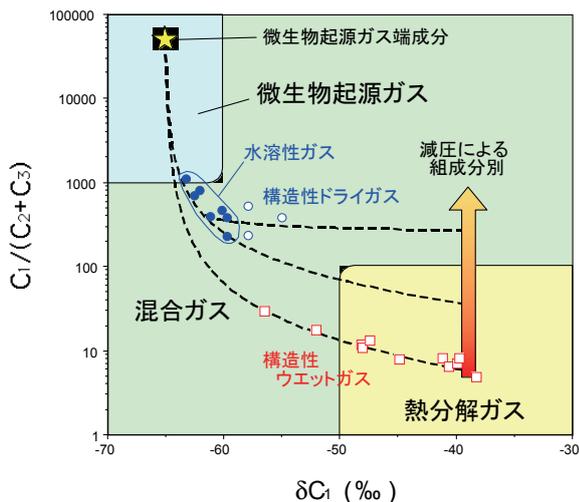


図2 中条ガス田の天然ガスの成因

ガスハイドレートの研究に関しては、室内合成実験により、水溶液の種類・濃度がガスハイドレート相平衡条件に与える影響を調べた。ア

ルコール水溶液を用いた実験では、濃度が高いほど、相平衡条件を低温側へシフトさせ、その効果は、メタノール>エタノール>エチレングリコール>ジエチレングリコール>トリエチレングリコールの順（等%濃度の場合）であった。しかし、プロパノールを用いた実験では、ある濃度では相平衡条件が高温側へシフトし、ガスハイドレートを安定化させる効果もあることを示した。

3) CO₂挙動の地化学的モニタリング技術の開発

地下におけるCO₂の挙動をモニタリングする技術を開発することを目的とする。この一環として、炭素同位体比をトレーサーとして利用するための基礎的データの取得、シミュレーション等を行う。

平成19年度末までの研究成果としては、夕張炭田をテストフィールドとした現地調査、化学分析を行ない、注入したCO₂の地表へ漏洩をモニタリングするための土壌ガスの化学分析結果から、少なくとも実験期間内では大規模なCO₂の漏洩が起きていないことを明確化できた。特に、CO₂、O₂、N₂、Arによる組成関係を用いる手法が有効であることが立証された。また、注入CO₂の観測井（コールベッドメタン生産井）への到達をモニタリングするためにおこなったコールベッドメタン中のCO₂炭素同位体分析から、今回の現場試験では到達（ブレイク）が生じていないことが確認された（図3）。これは注入されたCO₂が予定の1/10程度だったためにと考えられた。

ここまでに実施されたモニタリング手法は、CO₂地下貯留(CCS)の実用化の際に、CO₂の地表漏洩に対するモニタリングの有効な手法となる可能性が実証された。

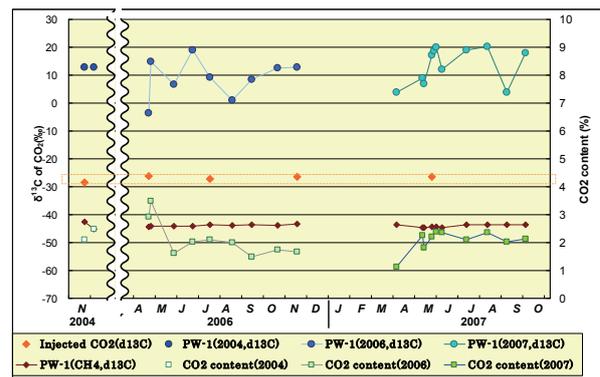


図3 CO₂濃度および $\delta^{13}C$ 測定結果の時系列変化

4) 非金属鉱物資源に関わる地化学・地質学・岩石学的研究

粘土鉱床、石材資源等の非金属鉱物資源の産状、分布、成因等についての現地調査・文献整理を行い、資源の安定供給に資する研究を実施すること、また、岩石・鉱物と地圏流体との関係を地化学・地質学・岩石学的手法により明らかにすること、

を目的とする。

これまでに、土浮山（どぶやま）・川崎ペントナイト鉱床（宮城県）の産状・性質を調査し、前者が低温の熱水変質作用による不規則塊状鉱床であり、後者が続成作用による層状鉱床であることを明らかにした。この成果を踏まえて、平成 20 年度より同鉱床の電気探査法による地下構造の解析を民間企業との共同研究として実施しているところである。

また、矢野馬木（やのまき）カオリン鉱床（島根県）の同位体地球化学的研究を行い、同鉱床の原岩である斜長石岩が Mo 鉱化作用に関連する高温の熱水変質作用によって形成されたことを明らかにした。

5) 地圏化学の基礎的研究

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。

これまでの研究結果としては、冬季の油田地帯（新潟）と非油田地帯（茨城・群馬）における空气中軽質炭化水素の経年変化を解析したところ、油田地帯では油田からの拡散によるものと思われるエタン濃度の上昇が観察される地点が存在した。また、茨城県南部地域では、軽質炭化水素濃度の経年的増加が観察され、都市化に伴うものと推定された（図 4）。茨城県南部地域については、現在も経年変化の観測を継続中である。

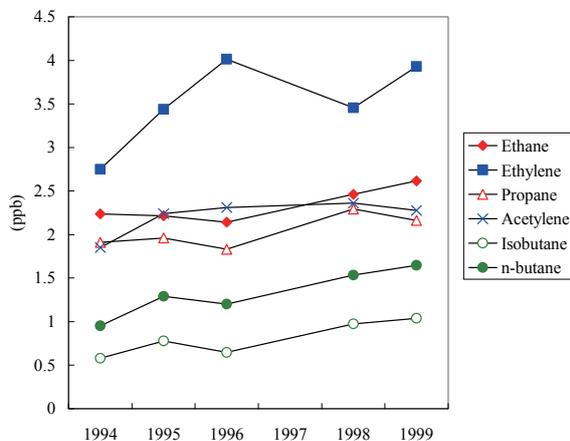


図 4 茨城県南部における軽質炭化水素濃度の経年変化

5. 成果普及活動（アウトリーチ活動）

得られた研究成果に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、産総研・一般公開（2008 年 7 月 26 日）、「地質情報展 2008 あきた」（2008 年 9 月 19-21 日）等に天然ガス、鹹水、ペントナイト、石油等に関する展示物を出展し、多数の来場者に対して、それらの地下資源の重要性と当グループの研究に関する説明を行った（図 5）。



図 5 産総研一般公開における水溶性天然ガスの説明

6. 主な成果（論文及び口頭発表；波線部がグループ員）

【論文】

Igari, S., Maekawa, T. and Suzuki, Y. (2007) Pentane and hexane isomers in natural gases from oil and gas fields in Akita, Niigata and Hokkaido, Japan: Determination factor in their isomer ratios. *Geochemical Journal*, **41**, 57-63.

Maekawa, T. (2008) Equilibrium conditions for clathrate hydrates formed from methane and aqueous propanol solutions. *FLUID PHASE EQUILIBRIA*, **267**, 1-5.

Takagi, T. and Kamei, J. (2008) ^{40}Ar - ^{39}Ar and K-Ar geochronology for plutonic rocks in the central Abukuma Plateau, northeastern Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. (doi.10.2465/jmps.071120).

Takagi, T., Naito, K., Collins, L. and Iizumi, S. (2007) Plagioclase-quartz rocks of metasomatic origin at the expense of granitic rocks of the Komaki district, southwestern Japan. *The Canadian Mineralogist*, **45**, 559-580.

【口頭発表】

猪狩俊一郎 (2008) 冬季における油ガス田地域（新潟）と非油ガス田地域（茨城・群馬）の空气中の軽質炭化水素。有機地球化学シンポジウム。

金子信行 (2008) 南関東ガス田の水溶性天然ガスと化石海水の起源。日本地球惑星科学連合 2008 年大会。（招待講演）

金子信行・猪狩俊一郎 (2008) 高 $C_1/(C_2+C_3)$ 比を示す熱分解ガスの成因。石油技術協会平成 20 年度春季講演会。

前川竜男 (2008) アルコール水溶液と共存するガス
スハイドレート相平衡条件. 日本化学会第 88
春季年会.

須藤定久 (2008) 日本の骨材資源- 骨材資源調査
を終えて-. 日本学術振興会第 76 委員会. (依
頼講演)

高木哲一 (2008) 中国地方白亜紀- 古第三紀深成
岩類の活動域変遷に関する一考察. 日本地球惑
星科学連合 2008 年大会.

地圏化学研究グループの研究概要 Outline 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: 029-861-3908, e-mail: res_geo_x@m.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、石油地質学、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、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質学的・地球化学的・鉱物学的解析を通して、燃料資源の成因解明・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、末益 匠（2009年10月1日～）、前川竜男、須藤定久（客員研究員）および契約職員

2) 研究項目

○運営費交付金による研究

- ・地圏化学の研究
- ・関東平野における水溶性天然ガスの地質・地化学的調査研究

○受託研究

- ・加温機排気中の CO₂ の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発（農林水産省受託研究）

○共同研究

- ・関東南西部の温泉に付随する可燃性天然ガスに関する地質学的・地球化学的研究
- ・工業用ハスクレイにおける実用化レベルの合成および疎水性揮発性有機化合物用吸着剤に関する研究
- ・ハスクレイの生体毒性評価に関する研究
- ・ガス化合成液体燃料製造用触媒の開発
- ・気中に含まれる親水性有機溶剤の分離・回収に関する研究
- ・製鉄所において発生するガスにおける二酸化炭素吸着分離剤に関する研究
- ・ハスクレイ材料のデシカント空調部材への応用に関する研究

- ・環境試験機におけるナノチューブ状アルミニウムケイ酸塩（イモゴライト/ハスクレイ）を使用したデシカントローターの利用に関する研究
- ・植物工場における二酸化炭素利用システムに関する研究
- ・工業用ハスクレイの内装建材への応用に関する研究

3) 主な研究設備

- ・ガスハイドレート合成実験装置
- ・ガスクロマトグラフ
- ・ガスクロマトグラフ燃焼同位体質量分析計
- ・イオンクロマトグラフ
- ・流体包有物温度測定装置
- ・流体包有物ガス分析装置
- ・ハスクレイ合成装置

3. 平成 22 年度の研究計画と平成 21 年度~22 年度前期までの研究進捗状況

1) 関東平野における水溶性天然ガス鉱床の分布に関する地質・地化学的調査研究（部門重点研究）

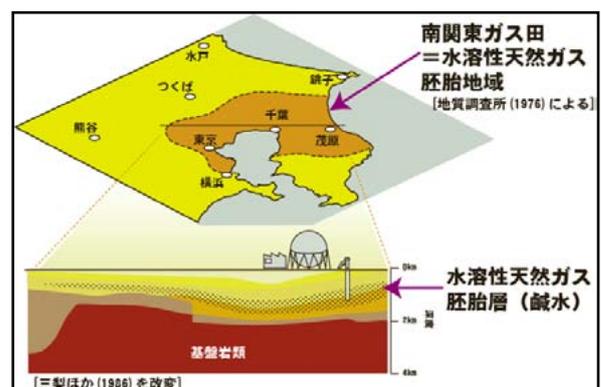


図1 南関東ガス田の概念図

南関東ガス田（図 1）が日本最大の水溶性天然ガス（メタン）資源の賦存地域であることを踏まえ、将来にわたる資源の安定供給に資するために、関東地域における水溶性天然ガスの賦存状況に関する正確な地質学的情報を把握することを目的とする。なお、本研究を進めるに当たっては、燃料

資源地質研究グループ、地圏微生物研究グループと連携している。

本研究は、平成20年度から3年計画で開始された。これまでに、文献調査と関係機関への聞き取り調査に基づき、南関東ガス田分布域以外にも天然ガス（メタン）がさまざまな層準に存在していることを明らかにするとともに、関東地方における天然ガスの存在形態、分布等に関して情報を整理した。それらの情報に基づき、群馬県、栃木県、茨城県、埼玉県、東京都、千葉県下のガスを付随する温泉井及びガス井をピックアップし、実坑井での水・天然ガス採取を行い（図2）、天然ガスや地層水についての化学分析、水素・炭素・酸素の同位体分析を行っている。また、神奈川県については、神奈川県温泉地質研究所との共同研究に基づき、データの解析を行っている。



図2 温泉水・ガスの採取

本研究の開始以前にも、当研究グループ員によって既に南関東ガス田の研究は進めてきていた（例えば、金子ほか、2002）が、その結果では、南関東ガス田のメタンの炭素同位体比・水素同位体比、及びメタン/（エタン+プロパン）比のデータから、「南関東ガス田のメタンは、CO₂とH₂、H₂Oからアーケアが生成した微生物起源ガスである」と結論付けている。今回の研究にて採取した様々な試料についても、それらのデータには既研究と同じ傾向が認められ、関東平野各地域の堆積盆内で確認されたメタンガスは、基本的には微生物起源であることが推定された。ただし、採取地点毎にそのデータのばらつきが大きく、地域に応じた多様な形成プロセスがあることが推測された。なお、茨城県北部や群馬県の一部の温泉では、熱分解性のメタンガスも認められた。

また、南関東ガス田地域内だけでなく、堆積物が厚く堆積している堆積盆内でもメタンが存在すること（図3）、及び先新第三系では熱分解起源の天然ガスが検出される場合があることから、地質学的背景を考慮した情報の整理と提示が必要であることがより明瞭となった。

以上の研究データを踏まえると、南関東ガス田全体のメタンガスの性状をより詳細に解明するためには、特に房総地域において鉱床の形成過程を明らかにし、過飽和状態でのガスの移動を考慮す

べきであり、移動したガスの再溶解と天水の侵入による鉱床の破壊過程を地化学データの解析から正しく認識する必要がある。

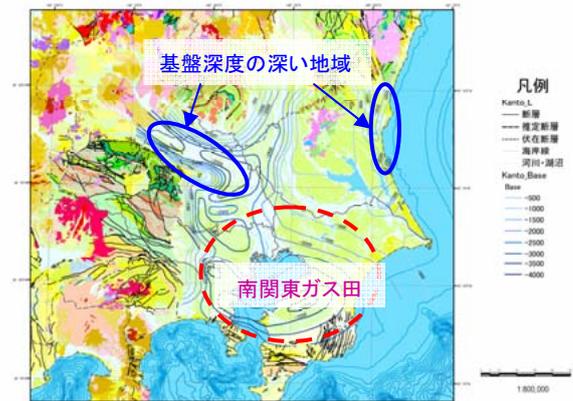


図3 高橋(2008)による基盤深度を入れたシームレス地質図

現在、温泉の泉質（Na、Cl濃度等）及び地下の地質情報との対比に基づいて、メタンガスの起源とその後の変遷についてより詳細な解析を進めているところである。

2) 燃料資源に関わる地化学的成因研究、資源評価

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関わる地球化学的実験・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うことを目的としている。

この中で、まずガスハイドレートの地化学的成因評価研究として、ガスハイドレートの安定性を考察するため、アルコール類、アセトン等溶存成分がガスハイドレート相平衡条件に及ぼす影響を実験的に測定した。その結果、メタノール、エタノールはガスハイドレート生成阻害効果があるのに対し、プロパノールにはメタンに対しガスハイドレート生成促進効果もあることがわかった。また、アセトンはメタンに対しては生成促進効果があるが、プロパンに対しては生成阻害効果が見られ、ガスハイドレート生成に対する生成阻害・促進効果は、ガス種や水溶液濃度に依存することがわかった。

次に、石炭起源天然ガス、コールベッドメタンの起源を明らかにすること、および石炭のガス吸着能力と炭質の関係を実験等で明らかにすることを目標とし、多孔質物質へのガス吸着能測定、すなわち水存在下でのガス吸着特性を検討するための実験に着手している。また、液相へのガス溶解度の測定のための実験手法を確立し、水または塩水へのメタン溶解度を測定した。平成21年度には、多孔質物質として活性炭を用い、水を充填した試料について窒素、二酸化炭素を吸着させる実験を行った。その結果、乾燥試料と比較して水充填試料の場合は、窒素の吸着量が大きく減少したのに対し、二酸化炭素の場合は、低圧では吸着量が減少するものの、高圧での飽和吸着量は変わらない

ことがわかった。

さらに、ヨウ素 129 年代値に縛られていた天然ガス（メタン）成因論から脱却し、海溝充填堆積物および前弧海盆堆積物でのメタン生成に注目した前弧域でのメタンの濃集機構について検討した。その結果、南関東ガス田や東海～四国沖のメタンハイドレートに代表されるメタンの濃集は、堆積物中に取り込まれた間隙水が、付加体の形成と斜面・前弧海盆での堆積による圧密を受けて浅部に溜まり続け、それと同時に微生物によるメタン生成が継続したことによると考えられた。また、ハイドレートの形成は、付加体の成長に伴う隆起により減圧され、間隙水がメタンに過飽和になったことによると考えられる。

3) 非金属鉱物資源に関わる地化学・地質学・岩石学的研究

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

平成 20 年度にプレスリリースしたハスクレイ（図 4）については、気体（水蒸気、二酸化炭素等）の吸脱着に優れている無機多注目され、結露防止、デシカント空調、二酸化炭素回収



図 4 ハスクレイ

等の目的に利用されることが期待されている。また、産総研外部からの注目も高く、現在、様々な企業及び研究機関との共同研究を進めている。このために、産総研内部の研究体制として、サステナブルマテリアル研究部門とのユニット間連携研究、その大量合成法の研究開発とともに、その用途・市場の拡大化に資する研究開発を進めているところであるが、以下にはそのうちの代表的な研究実施例について示す。

平成 22 年 7 月には、農林水産省の公募型受託研究として、「加温機排気中の CO₂ の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発」が採択された。これは、施設園芸における収量増大・品質向上を目的とした CO₂ 施用にハスクレイを用いることで、加温機の排気中の二酸化炭素を効率よく回収貯留し再利用可能な、施設園芸用省エネ型 CO₂ 施用システムとその活用技術を開発しようというものである（図 5）。

ここで解決すべき問題となるのは、加温時に発生する排気中の CO₂ を再利用するにあたって、NO_x や SO_x など植物の生育に悪影響を及ぼす有害物質の低濃度化と、CO₂ の回収貯留である。本研

究開発では、ハスクレイを用いることで、排ガス中の有害物質を効率よく低濃度化するシステムを構築するとともに、装置の小型化および運転にかかるエネルギーの低減を主目的とした省エネ型 CO₂ 回収貯留システムを構築し、その適用による園芸作物の増収・高品質化を実証するものである。

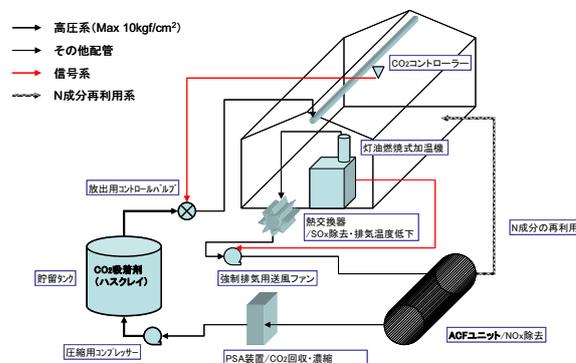


図 5 新しい CO₂ 施用システムの概念図

なお、平成 21 年度以降、ライセンス契約実施によるハスクレイの販売開始、共同研究や試料提供などを通じてハスクレイの製品化を進めるとともに、展示会や産総研オープンラボ出展等の場での普及活動に努めた。

4) 地圏化学の基礎的研究

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。

平成 21 年度後半以降の研究成果としては、CO₂ の地中貯留に関わり、CO₂ のハイドレート相平衡条件、溶解度等を実験的に測定した。メタンに対してはハイドレート生成促進剤となるプロパノール、アセトンを用いて相平衡実験を行った結果、CO₂ に対しては生成阻害効果を示すことがわかった。

また、ハスクレイおよび多孔質材料について、特に二酸化炭素吸着に関し、細孔径分布や細孔形状との関係を含めた検討を行った結果、二酸化炭素に対しては水蒸気と異なる吸着サイトが存在するとともに、吸着状態も水蒸気の吸着と異なることが明らかとなった。

4. 2009 年 9 月～2010 年 8 月の研究成果（波線部がグループ員）

【誌上発表（論文、著書等）】

Ishikawa, K., Akasaka, T., Nodasaka, Y., Ushijima, N., Kaga, M., Abe, S., Uo, M., Yawaka, Y., Suzuki, M. and Watari, F. (2009) Physical properties of aluminosilicate nanotubes, imogolite, as scaffold and effect on osteoblastic mineralization. *Nano Biomedicine*, **1**, 109-120.

- Ishikawa, K., Abe, S., Yawaka, Y., Suzuki, M., and Watari, F. (2010) Osteoblastic cellular responses to aluminosilicate nanotubes, imogolite using Saos-2 and MC3T3-E1 cells, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, **118**, 516-520.
- 金子信行 (2009) 前弧海盆堆積物中の間隙水の起源とヨウ素とメタンの濃集機構. ヨウ素, No. 12, 109-110.
- Maekawa, T. (2010) Equilibrium conditions of carbon dioxide hydrates in the presence of aqueous solutions of alcohols, glycols, and glycerol. *Journal of Chemical and Engineering Data*, **55**, 1280-1284.
- 宮脇律郎・佐野貴司・大橋文彦・鈴木正哉・小暮敏博・奥村大河・亀田 純・梅染卓也・佐藤努・千野大輔・弘山郁織・山田裕久・田村堅志・森本和也・上原誠一郎・八田珠郎 (2010) 日本粘土学会参考試料の分析・評価. 粘土科学, **48**, 158-198.
- Nakanishi, R., Suzuki, M., Inukai, K. and Maeda, M. (2009) CO₂ adsorption/desorption on mesoporous silica at various pressures. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, **34**, 743-745.
- Rodionov, S., Obolenskiy, A. A., Distanov, E. G., Badarch, G., Dejidma, G., Hwang, D. H., Khanchuk, A. I., Ogasawara, M., Nokleberg, W. J., Parfenov, L. M., Prokopiev, A. V., Seminskiy, Z. V., Smelov, A. P., Yan, H., Davydov, Y. V. V., Gerel, O., Letunov, S. N., Li, X., Ratkin, V. V., Sudo, S., Sotnikov, V. I., Spiridonov, A. A., Sun, F., Timofeev, V. F., Wakita, K. and Zorina, L. V. (2010) Summary of Major Metallogenic Belts in Northeast Asia (the Russian Far East, Yakutia, Siberia, Transbaikalia, Northern China, Mongolia, South Korea, and Japan). *U.S. Geological Survey Professional Paper*, No. 1765, C-1 - C-31.
- 佐脇貴幸 (2010) 地質地盤情報協議会のこれまでの活動. 地質ニュース, No. 667, 78-84.
- Sawaki, T. (2010) Geothermal resources and their development in Japan. *CCOP Technical Bulletin*, **32**, 37-47.
- Sawaki, T. (2010) Useful geological datasets and databases in Japan for establishment of the geothermal database. *CCOP Technical Bulletin*, **32**, 49-51.
- 佐脇貴幸・金子信行 (2010) 「南関東ガス田研究」についての地質地盤情報の重要性. 地質ニュース, No. 667, 53-57.
- 須藤定久 (2009) 耐火物資源の地質学的特徴と成因. 耐火物, **61**, 438-446.
- 須藤定久 (2009) 北部フォッサ・マグナのろう石鉱床(3) 群馬県四万鉱山のろう石鉱床—高温熱水の極限状況を考える—. 地質ニュース, No. 661, 19-32.
- 須藤定久 (2010) 砂と砂浜の地域誌(23) 島根県東部の砂と砂浜—弓ヶ浜から島根半島へ—. 地質ニュース, No. 668, 29-40.
- 須藤定久 (2010) 古いフィールドノートから(3) 京都府夜久野鉱山—熱変成を受けたろう石鉱床. 地質ニュース, No. 668, 41-49.
- 須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮① 収縮の原因とプロセス・対処法を考える. 骨材資源, **42**, 16-24.
- 須藤定久 (2010) 砂と砂浜の地域誌(24) 出雲平野と宍道湖・斐伊川の砂. 地質ニュース, No. 671, 39-52.
- 須藤定久 (2010) 砂と砂浜の地域誌(25) 岩見東部の砂と砂浜—大田から浜田へ—. 地質ニュース, No. 672, 50-60.
- 須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮—(1) 乾燥収縮のモデルを考える. 骨材情報紙「アグリゲイト」No. 144, 6-7.
- 須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮—(2) 骨材原石・製品の層間水の予測的測定. 骨材情報紙「アグリゲイト」, No. 145, 6-7.
- 須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮、一般岩石の層間水が最大の問題か? セメント新聞, No. 2916, 4.
- 須藤定久・有田正史 (2009) 砂と砂浜の地域誌(21) 能代から八森の海岸へ. 地質ニュース, No. 661, 33-41.
- 須藤定久・有田正史 (2009) 砂と砂浜の地域誌(22) 羽越海岸—酒田から村上へ. 地質ニュース, No. 663, 35-46.
- 鈴木正哉 (2010) 二酸化炭素を吸脱着する「ハスクレイ」. 日刊工業新聞 科学技術・大学, No. 621, 18.
- Suzuki, M. and Inukai, K. (2010) Synthesis and Applications of Imogolite Nanotubes. *Inorganic and Metallic Nanotubular Materials*, Springer Publishing Company, 159-168.
- 鈴木正哉・中西亮介 (2009) イモゴライト系 CO₂ 吸着剤. セラミックデータブック 2009年版, **37**, 94-96
- 鈴木正哉・中西亮介 (2010) 二酸化炭素を効率的に回収する無機多孔質材. 工業材料, **58**, 58-61.

- 鈴木正哉・中西亮介 (2010) 無機系吸放湿材料によるヒートポンプへの応用. セラミックス, **45**, 538-542.
- 鈴木正哉・中西亮介 (2010) アロフェン・イモゴライト. 機能性粘土素材の最新動向, シーエムシー出版, 31-42.
- 鈴木正哉・月村勝宏・前田雅喜・犬飼恵一 (2010) 新しい高性能無機吸着剤を安価で開発. 粉体技術, **2**, 57-57.
- Tsukimura, K., Suzuki, M., Suzuki, Y. and Murakami, T. (2010) Kinetic theory of crystallization of nanoparticles. *Crystal Growth & Design*, **10**, 3596-3607.
- 【口頭発表】
- 猪狩俊一郎・前川竜男・佐脇貴幸 (2010) 南関東地域の温泉ガス中の炭化水素の地化学的特徴: 他の油ガス田との比較. 有機地球化学シンポジウム, 2010/8/5.
- 犬飼恵一・鈴木正哉・前田雅喜・中西亮介・月村勝宏 (2009) 新規高性能吸着剤である非晶質アルミニウムケイ酸塩の水蒸気および二酸化炭素吸着特性. セラ協第 22 回秋季シンポジウム, 2009/9/17.
- 石川紘佑・赤坂 司・鈴木正哉・八若保孝・亘理文夫 (2010) 骨芽細胞様細胞の増殖・分化に及ぼすケイ酸塩ナノチューブ(イモゴライト)の影響. ナノ・バイオメディカル学会 第 2 回大会, 2010/2/22.
- 金子信行 (2009) 前弧海盆堆積物中の間隙水の起源とヨウ素とメタンの濃集機構. 第 12 回ヨウ素学会シンポジウム, 2009/10/29.
- 金子信行 (2010) 微生物によるメタン生成と間隙水への濃集/ハイドレート形成の地質学的・地球化学的解釈. メタンハイドレート総合シンポジウム, 2010/2/16.
- 金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・佐脇貴幸・代田 寧・小田原啓・早稲田周 (2010) 関東地方地下の天然ガスについて. 石油技術協会春季講演会, 2010/6/10.
- 前田雅喜・犬飼恵一・鈴木正哉 (2009) デシカント空調用新規吸着材 (ハスクレイ). シンポジウム「新材料で構成する快適建築空間—エクセルギー的視点を中心にして—」, 2009/12/4.
- Nakanishi, R., Inukai, K., Maeda, M., Suzuki, M. and Tai, Y. (2010) Preferential oxidation of Co over Pt catalysts supported on mesoporous aluminum silicates in the presence of H₂. The 11th International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD2010), 2010/1/10.
- 中西亮介・宮本早苗・鈴木正哉・犬飼恵一・前田雅喜 (2009) 非晶質アルミニウムケイ酸塩と低結晶性粘土との複合体の合成条件. 第 19 回日本 MRS 学術シンポジウム, 2009/12/7.
- 西本登志・佐野太郎・仲 照史・宍戸拓樹・堀川大輔・鈴木正哉・喜多村克宏・吉川正晃 (2010) 開放系における灯油燃焼式加温機の排気の施用がコマツナの生育に及ぼす影響. 第 15 回園芸学会近畿支部兵庫大会, 2010/8/31.
- 小笠原正継・鈴木正哉・吉成幸一・井坪信一・上岡 晃 (2010) 産業技術総合研究所におけるエックス線装置の取り扱いに関する安全管理体制の進展. 第 47 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2010/7/9.
- 須藤定久 (2009) 日本の骨材資源—その過去・現状と将来—. 資源素材学会 2009, 2009/9/9.
- 須藤定久 (2009) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮問題① 乾燥収縮の原因・プロセス・対応. 骨材資源工学会秋季講演会, 2009/11/13.
- 須藤定久 (2009) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮問題② 乾燥収縮への現実的対応—砂岩・安山岩を例に—. 骨材資源工学会秋季講演会, 2009/11/13.
- 須藤定久 (2010) 地球の話あれこれ—業務の安全に関連して—. 県南火薬類取扱者安全講習会, 2010/3/24.
- 須藤定久 (2010) 耐火物資源の地質学的特徴と成因. 第 2 回 耐火物の基礎学問と検査技術研修, 2010/5/17.
- Suemasu, T., Suzuki, M., Inukai, K., Maeda, M. and Tsukimura, K. (2010) High Performance New Amorphous Aluminum-Silicate Adsorbent Water Vapor and Carbon Dioxide. 2010 SEA-CSSJ-CMS Trilateral Meeting on Clays, 2010/6/10.
- 鈴木正哉 (2009) 天然土壤中に存在するナノ物質をモチーフにした吸着剤の開発. 幌延地圏環境研究所講演会, 2009/10/28.
- 鈴木正哉 (2009) 二酸化炭素吸着能をもつ無機多孔質材について. 第 1 回燃料電池セミナー, 2009/12/18.
- 鈴木正哉 (2010) 高性能アルミニウムケイ酸塩吸着剤(ハスクレイ)の性質と応用. 平成 21 年度産業技術連携推進会議 ナノテクノロジー・材料部会総会, 2010/2/2.
- 鈴木正哉・月村勝宏・中西亮介 (2010) 無機材料

- における水蒸気吸着機構について. 第 8 回 微生物-鉱物-水-大気相互作用研究会, 2010/3/18.
- 鈴木正哉・月村勝宏・犬飼恵一・前田雅喜 (2010) 高性能吸着剤ハスクレイ. ナノテック 2010, 2010/2/17.
- 鈴木正哉・月村勝宏・犬飼恵一・前田雅喜 (2010) ケイ酸塩ナノチューブ(イモゴライト)を用いた水蒸気選択性吸着剤の開発. ナノ・バイオメディカル学会 第 2 回大会, 2010/2/22.
- Suzuki, M., Tsukimura, K., Inukai, K. and Maeda, M. (2010) High Performance Aluminum-silicate adsorbent for Water Vapor and Carbon Dioxide. NIMS International Workshop on Photocatalysis and Environmental Remediation Materials 2010, 2010/2/23.
- 鈴木正哉・中西亮介・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏 (2009) 低結晶性粘土と非晶質アルミニウムケイ酸塩複合体の形成過程における構造変化について. 鉱物科学会 2009 年年会, 2009/9/9.
- 鈴木正哉・月村勝宏・犬飼恵一・中西亮介・前田雅喜 (2009) 水蒸気選択吸着剤の開発. 第 19 回日本 MRS 学術シンポジウム, 2009/12/7.
- 鈴木正哉・酒寄英里・永好けい子・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏 (2010) ビニールハウス栽培への適用を目指した CO₂ 回収・貯留システム. 第 8 回アロフェン・イモゴライト研究会, 2010/8/25.
- 鈴木正哉・中西亮介・小塚奈津子・鈴木智恵子・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏 (2009) 低結晶性粘土と非晶質アルミニウムケイ酸塩複合体の形成過程と吸着特性について. 第 53 回粘土科学討論会, 2009/9/11.
- 月村勝宏・鈴木正哉・鈴木庸平・村上 隆 (2009) フェリハイドライト・コロイドに固溶する Pu 量:熱力学的考察. 日本鉱物科学会 2009 年年会, 2009/9/9.
- Tsukimura, K., Suzuki, M., Suzuki, Y. and Murakami, T. (2010) Long-term prediction on the presence of colloidal ferrihydrite and the radionuclide sorption. Japan Geoscience Union Meeting 2010, 2010/5/25.
- Tsukimura, K., Suzuki, M., Suzuki, Y. and Murakami, T. (2010) Behavior of colloidal ferrihydrite as radionuclide carrier in the Lake Karachai area. Goldschmidt Conference 2010, 2010/6/15.
- HAS-Clay), ハノーバーメッセ 2010 (ドイツ見本市), 2010/4/19~4/23.
- 鈴木正哉・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏, 新しい高性能無機吸着剤を安価で開発! APPIE 産学官連携フェア 2009, 2009/10/23.
- 鈴木正哉・月村勝宏・末益 匠・中西亮介, 高性能水蒸気・二酸化炭素吸着剤“ハスクレイ”の開発, 産総研オープンラボ, 2009/10/15~10/16.
- 鈴木正哉・月村勝宏・末益 匠・犬飼恵一・前田雅喜・中西亮介・小塚奈津子・鈴木智恵子, 高性能吸着剤ハスクレイーデシカント空調や CO₂ 回収に最適ー, nano tech 2010 国際ナノテクノロジー総合展, 2010/2/17~2/19.

引用文献

- 金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎 (2002) アーケアによるメタンの生成と間隙水への濃集機構. 石油技術協会誌, **67**, 97-110.
- 三梨 昂・尾田太良・江藤哲人 (1986) 新生代東北日本弧地質資料集 第 3 巻-付録 関東地方地質断面図(北村 信 編), 宝文堂.
- 高橋雅紀 (2008) 関東平野の基盤の凹み ~日本海の拡大時期に遡って~, *Japan Geoscience Letter*, **4**, No. 2, 3-5.

【イベント出展】

前田雅喜・犬飼恵一・鈴木正哉, 高性能吸着材ハスクレイの開発(Excellent Adsorption Materials:

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。当研究部門の重点課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」、「地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究」に取り組み、油ガス田等に生息する微生物の活動（メタン生成、消費、石油分解等）の実態解明を目指す。

2. グループの研究資源

1) グループ員

研究スタッフ

坂田 将（リーダー）、古宮正利、
吉岡秀佳、持丸華子（特別研究員）

テクニカルスタッフ

執印訓子、仁道純子、三浦直子、張 華

2) 予算

運営費交付金

「地圏微生物の研究（地質）」
「地圏微生物の研究（エネルギー）」
「地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究」

委託費

「メタン生成・消費微生物群の分離培養と動態解析ツールの開発」（科研費）
「水溶性ガス鉱床における微生物メタン生成に利用される堆積有機物の解明」（科研費）
「放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質情報データの整備」（NISA）

共同研究

「大水深基礎調査（資源ポテンシャル）に係わる共同研究」（JOGMEC）
「ラジオトレーサ法による油層内微生物のメタン生成経路の評価に関する研究」（帝国石油（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

（岩石、水、ガス、油等）の採取と、化学・同位体分析、嫌気培養、ラジオトレーサー実験、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。帝国石油（株）、放射線医学総合研究所、JOGMEC等と連携し、水溶性天然ガスやガスハイドレートの成因解明、枯渇油田の天然ガス再生技術の検討を重点的に進める。

4. 20年度前期までの研究進捗状況

1) ガスハイドレートの成因に関する生物地球化学的研究

- IODP 航海 311 でカスカディア・マージンの2サイトから採取された深度0～300mのコア試料について、ラジオトレーサー法でメタン生成活性を評価した結果、全体的に水素+二酸化炭素からのメタン生成速度が酢酸からのメタン生成速度より大きく、また、メタンハイドレートの分布している深度においてメタン生成速度が大きい傾向が認められた。
- 長期培養試験では、66試料中47試料でメタン生成を確認できた。500日経過してもメタン生成が継続している試料があり、現在も培養を継続している。

2) 大水深海域の非生物起源炭化水素ポテンシャル評価

- 標準混合ガスを用いて岩石炭化水素抽出システムのガス分析条件を検討した結果、1回の試料導入で、水素、窒素、二酸化炭素、C1-C4炭化水素を全て高感度で定量することが可能になった。流体包有物を含む石英試料を用いて、破碎装置も含めたシステム全体の性能をチェックした結果、デクレピテーション・質量分析法による分析結果と概ね一致した。
- 予察的に母島海山北部から採取された蛇紋岩質碎屑岩に含まれるガスを測定し、1kgあたり数マイクロリットルという微量のメタンを検出した(図1)。

3) 在来型天然ガス資源の成因に関する生物地球化学的研究

- 水溶性ガス田から採取されたボーリングコア

熱伝導度検出器(TCD)のクロマトグラム

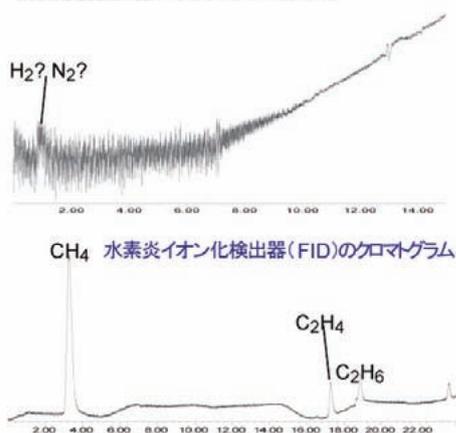


図1 蛇紋岩質砕屑岩のガス分析結果

試料について、ラジオトレーサー法でメタン生成活性を評価した結果、全体的に水素+二酸化炭素からのメタン生成速度が酢酸からのメタン生成速度より大きく、メタンの安定同位体比から推定される生成経路と調和的であった。

- 堆積有機物はタイプ III に分類され高等植物由来のケロジェンを多く含むこと、また脂質成分は *n*-アルカンや、脂肪酸が主要な成分であることが分かった。これらの一部がメタン生成に利用された可能性がある。

4) 地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究

- 原油、天然ガスの地化学データから微生物によるアルカン分解、メタン生成の形跡が顕著に認められる山形県の油田から、原油と油層水を採取し、微生物の活性や多様性を調べた。油層水中に 1,000 cells/ml オーダーのメタン生成古細菌が生息し、その中には水素利用のものに加え、メタノールなどのメチル化合物利用のものが含まれていた。ラジオトレーサー法で、水素+二酸化炭素、酢酸、メタノールを基質とするメタン生成活性を検出するとともに、*n*-ヘキサデカンを基質とするアルカン分解・メタン生成活性を検出した。

5) 堆積岩地域における物質移行特性の不確実性評価

- 那須烏山における無菌無酸素掘削で採取されたコア試料について、メタン生成活性の深度分布をラジオトレーサー法で評価するとともに、脱陰菌のバイオマスの深度分布を極性脂質脂肪酸分析によって推定した。

6) メタン生成・消費微生物群の分離培養と動態解析ツールの開発

- 茂原ガス田からメチル化合物を基質とする *Methanobolus* 属のメタン生成古細菌を分離し同定した結果、至適塩濃度、至適温度、遺伝子配列などが既知種と異なっていることを見い

出した。新種名を提唱し、論文に公表した。

7) 基礎的研究

- 水素資化性のメタン生成古細菌 *Methanobacterium thermoautotrophicus* ΔH を、酪酸から水素+二酸化炭素を生成するバクテリア *Syntrophothermus lipocalidus* とともにを培養し、生成するメタンと培養水の水素同位体比を測定した結果、環境試料（淡水環境）における両者の関係を再現することに成功した（図2）。
- 石油や堆積岩に普遍的に存在するホパン類の起源生物の一つと推定されているアンモニア酸化細菌の脂質の濃度と炭素同位体比の測定結果を論文公表した。

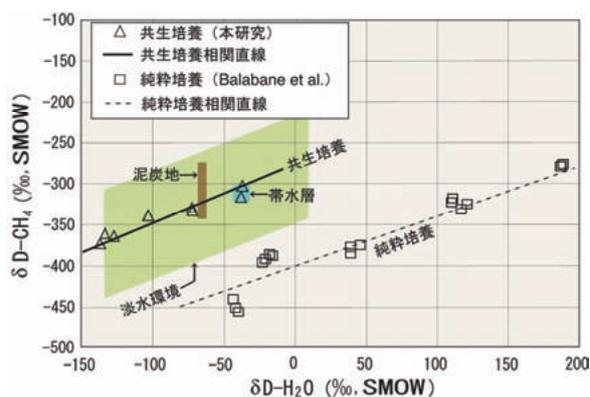


図2 共生培養におけるメタン生成菌の水素同位体分別

5. 主な論文成果

- 山本修一・吉岡秀佳・石渡良志: 環境中のケロジェンおよび腐植物質の熱分解及び化学分解ガスクロマトグラフィー/質量分析法と地球化学への応用, 分析化学, 56, 71-91 (2007).
- Katsuta N., Tojo B., Takano M., Yoshioka H., Kawakami S., Ohno N., and Kumazawa M.: Non-destructive method to detect the cycle of lamination in sedimentary rocks: rythmite sequence in Neoproterozoic Cap carbonates. Geological Society of London, Special Publications 286, 27-34 (2007).
- Yoshioka H., Sakata S., and Kamagata Y.: Hydrogen isotope fractionation by *Methano-thermobacter thermoautotrophicus* in coculture and pure culture conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta 72, 2687-2694 (2008). IF = 3.665
- Mochimaru H., Tamaki H., Hanada S., Imachi H., Nakamura K., Sakata S., and Kamagata Y.: *Methanobolus profundus* sp. nov., a new methylotrophic methanogen isolated from deep subsurface sediments in a natural gas field. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology (in press). IF = 2.384
- Sakata S., Hayes J. M., Rohmer M., Hooper A., and Seeman M.: Stable carbon isotopic compositions of lipids isolated from an ammonia-oxidizing chemoautotroph. Organic Geochemistry (in press). IF = 2.114

燃料資源地質研究グループの紹介

Introduction of the Fuel Resource Geology Research Group

燃料資源研究グループ長：棚橋 学

Leader, Fuel Resource Geology Research Group: Manabu TANAHASHI

Phone: 029-861-3938, e-mail: tanahashi-m@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. グループの研究資源

a. グループ員とその専門分野

棚橋 学	燃料地質、海洋地質
松林 修	物理探査、地球熱学
徳橋秀一	堆積地質、燃料地質
中嶋 健	海洋地質、堆積地質
佐藤幹夫	海洋地質
森田澄人	構造地質、海洋地質
小田 浩	石炭地質、堆積地質
後藤秀作	地球熱学

b. 研究資金

- ・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「部門重点化予算：関東地方の天然ガス資源評価」(分担, 平成 20-22 年度)
- ・受託研究(JOGMEC)「メタンハイドレートシステム構築に関わる浅層地質地化学研究および技術アドバイザー業務」(平成 19 年度)
- ・受託研究(JOGMEC)「東部南海トラフメタンハイドレート賦存海域の地質地化学総合解釈」(平成 20 年度)
- ・受託調査(経済産業省)「京都メカニズム関連技術普及等事業」(平成 19 年度)
- ・共同研究(石油資源開発技術研究所)「数学的手法による砂岩分布予測の研究」(平成 19, 20 年度)
- ・共同研究(JOGMEC)「大水深基礎調査(資源ポテンシャル)に関わる共同研究」(分担, 平成 19, 20 年度)
- ・受託調査(資源エネルギー庁)「大水深域にお

ける石油資源等の探査技術等基礎調査に関わる高度地質解析」(分担, 平成 19, 20 年度)

3. 研究の進捗状況

1) 石炭起源天然ガス資源の鉱床成因、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

- ・ジャパンエナジー石油開発(株)との共同研究の一環として、三陸沖堆積盆の天然ガスポテンシャル評価のため、物理探査データ、坑井データ等から本地域の資源地質、堆積史、熱史、構造発達史の検討を実施中である。

2) 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

- ・メタンハイドレート鉱床の探査法、資源評価法を開発するために、南海トラフ、上越沖、対馬海盆等における野外調査、試料分析、データ解析、内外の資料収集を行い、日本周辺及び世界のハイドレート分布の地質学的特徴の解明を進めている。

- ・東部南海トラフの資源量の見直しおよび上越沖等の海底下浅部を含めたハイドレート資源等を考慮した日本周辺のハイドレート資源量の再試算作業を進めている。

- ・南海トラフ域の熱流量データの収集と再解析(図 1)。本海域で実施された熱流量調査及び反射法地震探査記録上の BSR 深度から推定された熱流量データをコンパイル、海底下熱構造を推定し、燃料資源ポテンシャル評価のための基本パラメータとする。コンパイルデータのキャリブレーションを目的として、長期海底温度測定による新たな地殻熱流量測定を実施している。

- ・東海沖・熊野トラフにおける地震探査データ解析を進め、熊野トラフ外縁部における熱構造探査、上越沖海域での堆積物採取および地質構造探査(図 2)を、諸機関と共同して実施した。

- ・JOGMEC の委託研究「メタンハイドレートシステム構築に関わる浅層地質地化学研究および技術アドバイザー業務」(平成 19 年度, 図 3), 「東部南海トラフメタンハイドレート賦存海域

の地質地化学総合解釈」(平成 20 年度)において、海底面現象と、3D 地震探査情報、深部地質情報との関連を検討を進めている。

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

- ・我が国の天然ガス資源ポテンシャル評価の改訂のため、新しいポテンシャル評価技術の検討を進め、ハイドレート資源等を含めた新たな全国的資源ポテンシャル評価作業を進めている。
- ・部門重点化研究として、「関東平野水溶性天然ガス鉱床の地質・地化学研究」を開始し、層序、堆積構造情報の解析による三次元的な地質構造モデルの構築を進めている(図 4)。

- ・背弧海盆や前弧海盆に見られるタービダイト砂岩の分布様式・堆積環境・堆積機構を明らかにする研究を行い、砂岩の起源に関する論文を出版した(徳橋, 2007, 徳永博士論集, 127-145)。
- ・東北日本の油田成立に関わる脊梁部の地質構造発達に関して、論文を出版した(守屋・中嶋他, 2008, 地質雑, 114, 1-15; 守屋・中嶋他, 2008, 地質雑, 114, 389-404)

- ・石油資源開発(株)技術研究所と資金提供型共同研究「数学的手法による砂岩分布予測の研究」(平成 19, 20 年度)を実施中。
- ・ブラジル沖ほか世界の深海チャンネルシステムの 3D 地震探査記録解析を行い、アマゾン海底チャンネル内の貯留岩の形態と分布の解析及び自然堤防の厚さの側方への変化を解析し、新たな堆積構造 Outer Bank Bar を提唱した。

- ・石油資源開発(株)技術研究所と資金提供型共同研究「数学的手法による砂岩分布予測の研究」(平成 19, 20 年度)を実施中。
- ・ブラジル沖ほか世界の深海チャンネルシステムの 3D 地震探査記録解析を行い、アマゾン海底チャンネル内の貯留岩の形態と分布の解析及び自然堤防の厚さの側方への変化を解析し、新たな堆積構造 Outer Bank Bar を提唱した。

- ・石油資源開発(株)技術研究所と資金提供型共同研究「数学的手法による砂岩分布予測の研究」(平成 19, 20 年度)を実施中。
- ・ブラジル沖ほか世界の深海チャンネルシステムの 3D 地震探査記録解析を行い、アマゾン海底チャンネル内の貯留岩の形態と分布の解析及び自然堤防の厚さの側方への変化を解析し、新たな堆積構造 Outer Bank Bar を提唱した。

- ・石油資源開発(株)技術研究所と資金提供型共同研究「数学的手法による砂岩分布予測の研究」(平成 19, 20 年度)を実施中。
- ・ブラジル沖ほか世界の深海チャンネルシステムの 3D 地震探査記録解析を行い、アマゾン海底チャンネル内の貯留岩の形態と分布の解析及び自然堤防の厚さの側方への変化を解析し、新たな堆積構造 Outer Bank Bar を提唱した。

Heat flow (mW/m²)

20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

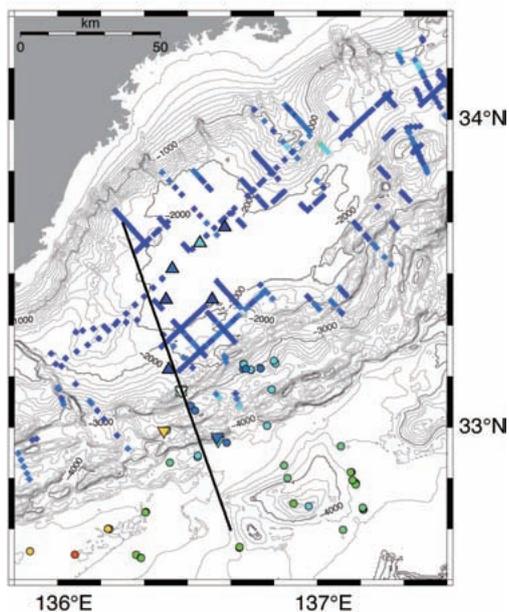


図 1 熊野トラフの熱流量データコンパイル

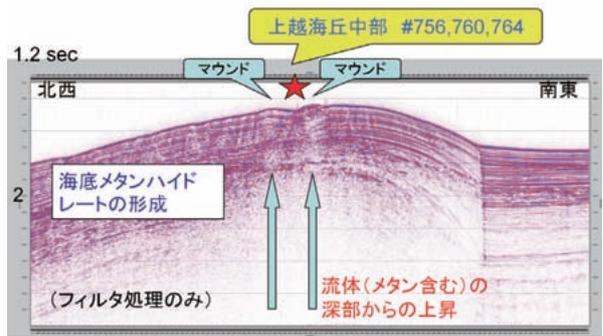


図 2 上越海丘のハイドレート堆積体の例

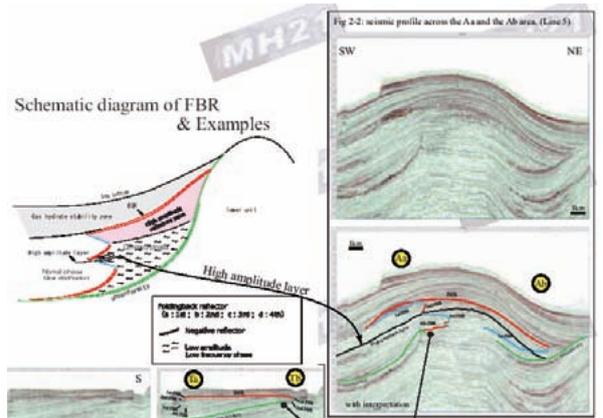


図 3 2重BSRの特徴 (Otsuka et al., 2008)

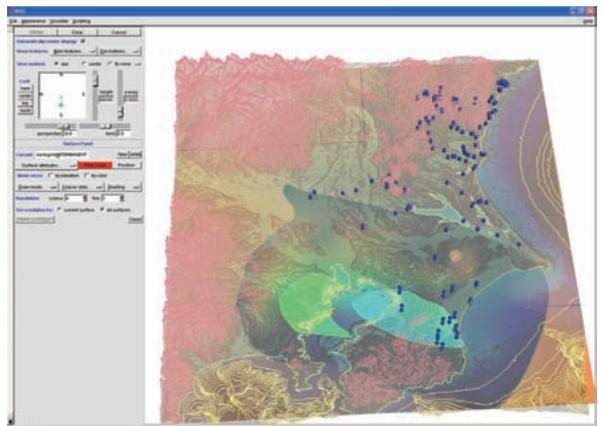


図 4 関東地方の予察的 3 次元地質構造モデル

4) 燃料資源地質図の編集

- ・燃料資源地質図「南海トラフ」の編集に向け、地震探査データ解析、熱流量データ重磁力データ等の収集・解析を進めている。
- ・「北海道石炭起源天然ガス賦存図」を編集する方針を立て、釧路地域に関して文献調査を行って既存資料に含まれるデータの概要を把握した。

- ・部門重点化研究を分担し、水溶性ガス田である「南関東ガス田」の地質・天然ガス資源情報を総括する燃料資源地質図編纂のため、三次元的な地質図編集のため、地質構造情報の収集及び解析を開始した。
- ・タービダイト研究、水溶性ガス田研究、CO₂地中貯留検討において重要な特殊地質図「千葉県清和県民の森周辺の地質図および説明書」(徳

橋, 石原, 2008) を出版した (図 5)。

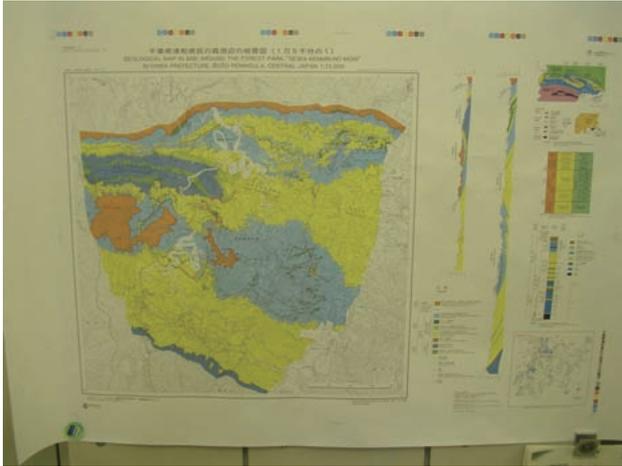


図 5 特殊地質図「清和県民の森周辺の地質図」

5) 燃料資源地質の基礎的研究

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ている。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, 口頭発表等で公表している。

- ・日本海富山深海長谷の堆積物に記録された気候変動記録について, 国際誌に論文を出版した (Nakajima & Itaki, 2007, PPP, 247, 162-179)。さらに, これら洪水堆積物の意義について産総研 Today で紹介した (図 6)。

- ・大西洋中央海嶺 TAG 海底熱水鉱床域における中性浮力を持つプルームの熱源に関する論文を出版した (Yamano et al., 2007, Earth Planet Space, 59, 1141-1146)。

- ・日本海溝海側斜面における古い海洋プレート上で高い地殻熱流量異常を見だし, 論文を出版した (Goto, 2008, Int. J. Earth Sci., 97, 345-352)。

- ・堆積物の熱物性の推定法に関する論文を出版した (Goto & Matsubayashi, 2008, J. Geophys. Res., 113, B08105)。

6) 経済産業省受託調査 京都メカニズム関連技術普及等事業 (東南アジア及び東アジア地域における CO2 地中貯留ポテンシャルの評価)

- ・東南アジア・東アジアの堆積盆に関し地質情報を収集し, 代表的な堆積盆において地質過程を推定し, CO2 地中貯留ポテンシャルの概要を推定した (平成 19 年度, 図 7)。

7) 資源エネルギー庁受託調査「大水深域における石油資源等の探査技術等基礎調査に関わる高度地質解析」の分担および JOGMEC 共同研究「大水深域の燃料資源ポテンシャルの検討」分担

- ・VR システム・3 次元地震探査解析システムを

用いた高度地質解析のための海洋資源地質地球物理情報可視化システムを構築した (図 8)。

- ・小笠原舟状海盆の炭化水素ポテンシャルの予察的な推定を実施し, 高い炭化水素生成ポテンシャルが存在する可能性を示した。

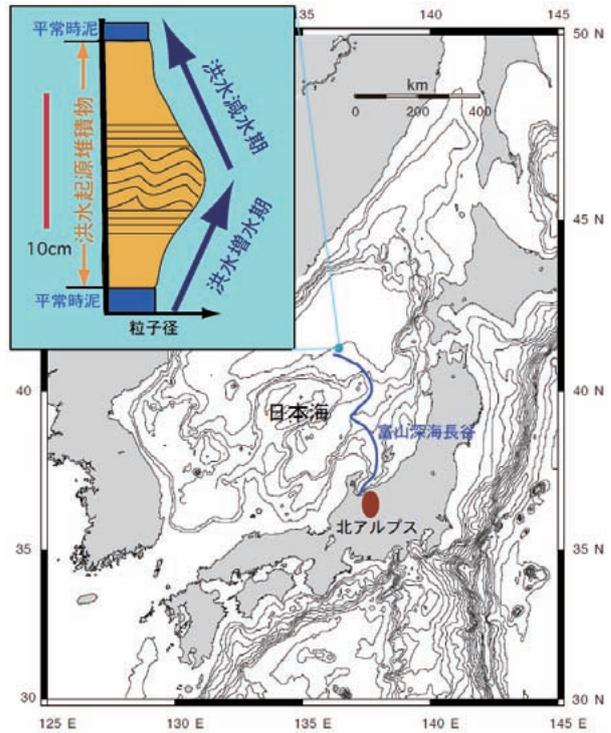


図 6 富山チャネルの洪水起源堆積物

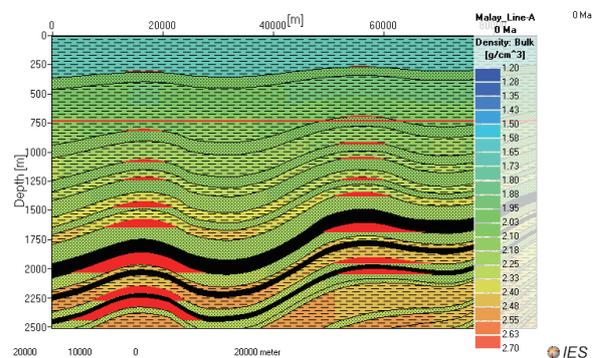


図 7 マレイ堆積盆の孔隙率モデル

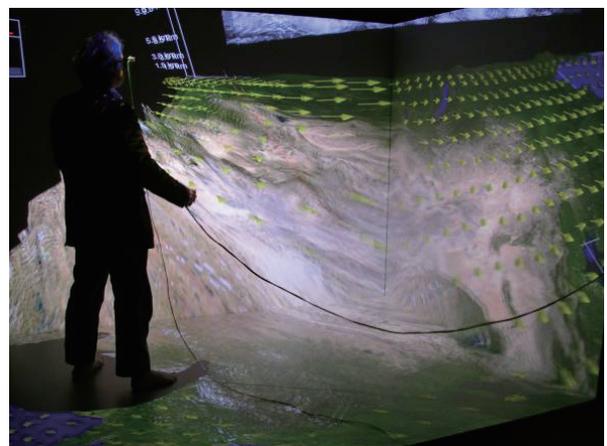


図 8 バーチャルリアリティ技術を用いた高度地質解析

4. 今後の研究計画

今後とも地質学, 地球物理学, 地球化学にわたる幅広い地球科学的な視野に立って, ガスハイドレート・石炭起源天然ガス・在来型天然ガス等の燃料資源鉱床の成因と形成機構および資源ポテンシャル評価に関わる研究を, 重点研究課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」として進め, 特に部門重点課題である「関東平野水溶性天然ガス鉱床の地質・地化学研究」を進める. 成果は論文として公表するとともに, 「燃料資源地質図」等の知的基盤情報として発信していく.

また, CO₂ 地中貯留をはじめとする, 燃料地質学, 燃料資源探査法等が応用可能な, 諸政策課題に積極的に取り組んでいく.

5. 最近の主な論文

Escutia, C., Donda, F. Lobo, F. J. and Tanahashi, M. (2007) Extensive mass transport deposits on the Antarctic Wilkes Land margin: a key to changing glacial regimes. USGS Open-File Report 2007-1047.

Goto, S., Gamo, T., Chiba, H., Fujioka, K. and Mitsuzawa, K. (2007) Contribution of heat outputs from high- and low-temperature hydrothermal sources to the neutrally buoyant plume at the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge. EARTH PLANETS SPACE, 59, 1141-1146. IF=0.954.

Goto S., O. Matsubayashi (2008), Inversion of needle-probe data for sediment thermal properties of the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge, J. Geophys. Res., 113, B08105, doi:10.1029/2007JB005119.

Goto, T., Kasaya, T., Machiyama, H., Takagi, R., Matsumoto, R., Okuda, Y., Satoh, M., Watanabe, T., Seama, N., Mikada, H., Sanada, Y. and Kinoshita, M. (2008), A marine deep-towed DC resistivity survey in a methane hydrate area, Japan Sea. Butsuri-Tansa, 61, 52-59.

Lin W., O. Matsubayashi, E.-C. Yeh, T. Hirono, W. Tanikawa, W. Soh, C.-Y. Wang, S.-R. Song, M. Murayama (2008), Profiles of volumetric water content in fault zones retrieved from hole B of the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), Geophys. Res. Lett., 35, L01305, doi:10.1029/2007GL032158. IF=2.602

Morita, S. (2007) Brief Reconstruction of the Southern Kumano Basin and Possible Fluid Migration Related to Gas Hydrate Deposits. Proceedings of the International Conference on Gas Hydrate: Energy, Climate and Environment, 47-49. Taiwan University.

守屋俊治, 檀原徹, 岩野英樹, 山下徹, 中嶋健, 鎮西清高 (2008) 山形県新庄盆地の鮮新統のフィッシュン・トラック年代, 地質雑, 114, 1-15.

守屋俊治, 鎮西清高, 中嶋健, 檀原徹 (2008) 山形県新庄盆地西縁部の鮮新世古地理の変遷 - 出羽丘陵の隆起時期と隆起過程 -, 地質雑, 114, 389-404.

Nakajima, T. and Itaki, T. (2007) Late Quaternary climatic variabilities recorded in deepsea turbidites along the Toyama Deep Sea Channel, Japan Sea. Palaeogeogr. Palaeoclimat. Paleoecol., 247, 162-179. IF=2.162

Nakajima, T., Katayama, H., and Itaki, T. (in press) Climatic control of turbidite deposition during the last 70 ka along the Toyama Deep-Sea Channel, central Japan Sea SEPM Special Publication.

Toki, T., Tsunogai, U., Gamo, T., and Tanahashi, M. (2007) Geochemical studies of pore fluid in surface sediment on the Daini Atsumi Knoll, J. Geochem. Expl., 95, 29-39, IF=0.922.

徳橋秀一 (2007) 浅海域で形成された洪水起源砂岩とストーム起源砂岩は識別可能か? - 新潟堆積盆東山南部に分布する鮮新統川口層中の陸棚タービダイト砂岩の再検討から -, 徳永重元博士献呈論集, 127-145.

徳橋秀一, 石原与四郎 (2008) 特殊地質図「清和県民の森周辺の地質図および説明書」, 地質調査総合センター.

Yamano, M., Kinoshita, M., and Goto, S. (2008) High heat flow anomalies on an old oceanic plate observed seaward of the Japan Trench. Int. J. Earth Sci., 97, 345-352. IF=1.905

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「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」、「地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究」に取り組み、油ガス田等に生息する微生物の活動（メタン生成、消費、石油炭化水素分解）の実態解明を目指す。

2. グループの研究資源 (22年度)

1) グループ員

研究スタッフ

坂田 将 (リーダー), 古宮正利,
竹内美緒, 眞弓大介 (特別研究員),
徐 維那 (特別研究員)

テクニカルスタッフ

氏家知子, 小神野良美, 執印訓子,
張 華, 三浦直子

2) 予算

運営費交付金

「地圏微生物の研究 (地質)」
「地圏微生物の研究 (エネルギー)」
「天然ガスの分布・成因に関する調査研究」

委託費

「メタン生成・消費微生物群の分離培養と動態解析ツールの開発」(科研費)
「陸域における微生物による嫌氣的メタン酸化プロセスの解明」(科研費)
「放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質情報データの整備」(NISA)
「幌延変動観測調査」(JNES)

共同研究費

「安定同位体トレーサ法による油層内微生物の原油分解メタン生成経路の評価に関する研究」(INPEX 帝石 (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」((株) テクノアース)

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、INPEX 帝石 (株)、(株) テクノアース、放射線医学総合研究所、JOGMEC 等と連携し、水溶性天然ガス・メタンハイドレート (MH) の成因解明や有効利用、枯渇油田の天然ガス再生技術検討を重点的に進める。

4. 21年度後期-22年度前期の研究進捗状況

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

- ・ カスカディア・マージンの2地点 (MH 分布域の内と外) から採取されたコア試料のラジオトレーサー実験の結果、MH の有無に関わらず同程度のメタン生成活性が検出され、表層近くより深部で高い活性が検出された。メタン生成経路は炭酸還元が酢酸分解よりも顕著であった (図1)。
- ・ 海底深部地下を模擬した高压条件下で、蟻酸を基質として水素資化メタン生成菌を培養し、メタン生成に伴う同位体分別を評価した。

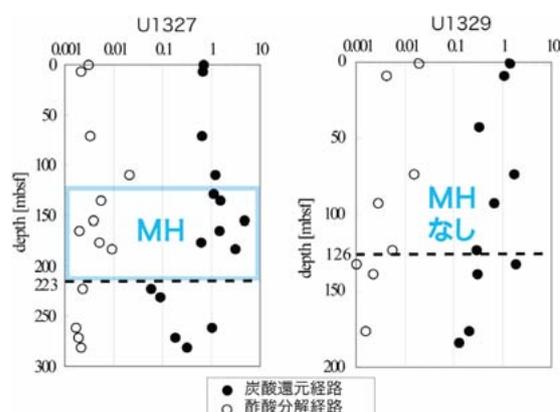


図1. カスカディア・マージンの2地点における海底微生物のメタン生成活性の分布³⁾

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

- 千葉県水溶性ガス田における地下微生物のメタン生成活性や生成経路、宮崎県、静岡県水溶性ガス田の天然ガスの起源について検討を進めた。

3) 地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究

- 企業との共同研究として天然ガス田地域のメタン溶存地下水を利用した地下水汚染のバイオレメディエーション技術の実用化向け、現地調査を行った。

4) 油層内微生物のメタン生成経路に関する研究

- 秋田県八橋油田のかん水を原油とともに油層の温度・圧力条件で培養した結果、主に酢酸酸化-炭酸還元経路でメタンが生成されることを見出した(図2)。安定同位体トレーサー法による原油炭化水素からのメタン生成経路の解明を目指し、新たに山形県新堀油田からかん水と原油を採取した。

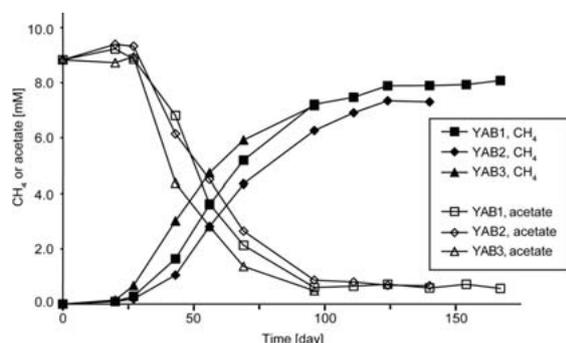


図2. 八橋油田の油層水の培養に伴うメタンと酢酸の濃度変化⁵⁾

5) 堆積岩地域の水文地質データの評価手法に関する調査

- 堆積岩地域における深部掘削で得られる柱状試料の脂質バイオマーカー分析を進めるとともに、新たに地下水の濾過で採取されるバクテリアや古細菌の脂質バイオマーカーを分析する手法を検討した。

6) メタン生成・消費微生物群の分離培養と動態解析ツールの開発

- 南海トラフの海底メタン冷湧水堆積物に含まれる古細菌起源の脂質とメタンの炭素同位体比の関係について解析を進めた。
- 陸域地下圏からメタン生成菌を分離し、その性質を解明した。

7) 陸上地下圏における微生物による嫌氣的メタン酸化の解明のための地球化学・微生物学的アプローチ

- 関東平野の沖積層コア試料について、DNA/RNAを用いた微生物相解析を実施し、嫌氣的メタン酸化古細菌が陸域地下圏にも生息していることを解明した。

8) 基礎的研究

- レーザーラマン顕微鏡と安定同位体を用いた微生物の1細胞レベルでの機能特定法を確立し、微生物集積培養系への適用を試みた。

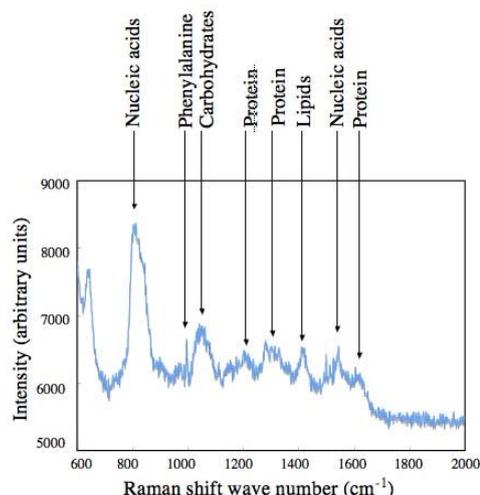


図3. 一細胞のラマンスペクトル (*B. subtilis*)

5. 主な論文成果

- Yoshioka H., Sakata S., Cragg B., Parkes J., Fujii T. (2009) Microbial methane production rates in gas hydrate-bearing sediments from the eastern Nankai Trough, off central Japan. *Geochemical Journal* 43, 315-321.
- Maeda H., Miyagawa Y., Kobayashi H., Sato K., Sakata S., Mochimaru H., (2009) Development of microbial conversion process of residual oil to methane in depleted oil fields. *SPE* 122573.
- Yoshioka H., Maruyama A., Nakamura T., Higashi Y., Fuse H., Sakata S., Bartlett D. H. (2010) Activities and distribution of methanogenic and methane-oxidizing microbes in marine sediments from the Cascadia Margin. *Geobiology* 8, 223-233.
- Mayumi D., Yoshimoto T., Uchiyama H., Nomura N., Nakajima-Kambe T. (2010) Seasonal change in methanotrophic diversity and populations in a rice field soil assessed by DNA-stable isotope probing and quantitative real-time PCR. *Microbes and Environments* 25, 156-163.
- Mayumi D., Mochimaru H., Yoshioka H., Sakata S., Maeda H., Miyagawa Y., Ikarashi M., Takeuchi M., Kamagata Y. (2010) Evidence for syntrophic acetate oxidation coupled to hydrogenotrophic methanogenesis in the high-temperature petroleum reservoir of Yabase oil field (Japan). *Environmental Microbiology* (in press).
- Waki M., Yasuda T., Suzuki K., Sakai T., Suzuki N., Suzuki R., Matsuba K., Yokoyama H., Ogino A., Tanaka Y., Ueda S., Takeuchi M., Yamagishi T., Suwa Y. (2010) Rate determination and distribution of anammox activity in activated sludge treating swine wastewater. *Bioresource Technology* 101, 2685-2690.
- Machida I., Suzuki Y., Takeuchi M. (2010) The ¹⁴C age of confined groundwater in sandy-muddy Pleistocene, Chapter 6 in *International Association of Hydrologists Selected papers*, 16, CRC Press, (Edited by Taniguchi M. and Holman I.P.), 67-78.

地熱資源研究グループの紹介

Introduction of the Geothermal Resources Research Group

地熱資源研究グループ長： 村岡洋文

Leader, Geothermal Resources Research Group: Hirofumi Muraoka

Phone: 029-861-2403, e-mail: hiro-muraoka@aist.go.jp

1. グループの研究目的

中小地熱資源開発等，国内外の地熱資源の開発を目指して，地熱資源の分布，成因，探査，評価，モデル化，データベース化，利用技術，開発技術等に関わる総合的な研究業務を行う。また，これらの研究をベースに，地下空間利用や地圏環境問題等に関わる応用的な研究業務を行う。

2. グループの研究資源

1) グループ員

常勤研究員：村岡洋文，佐々木宗建，茂野 博，玉生志郎，水垣桂子

研究協力者：阪口圭一，柳澤教雄，駒澤正夫

2) 予算

- ・地熱技術開発株式会社受託研究費「材料試験・温泉沈殿物試験及び市場規模調査」(新エネルギー・産業技術開発機構 [NEDO] の新エネルギーベンチャー技術革新事業「温泉エコジェネシステムの開発」フェーズ I の一部再受託)
- ・運営費交付金「中小地熱資源の研究」
- ・運営費交付金「地熱資源の研究」

3. 平成 19 年度の研究計画

第 2 期中期計画における本研究グループの使命は，次の通りである。「中小地熱資源開発等，国内外の地熱資源の開発を目指して，地熱資源の分布，成因，探査，評価，モデル化，データベース化，利用技術，開発技術等に関わる総合的な研究業務を行う。また，これらの研究をベースに，地下空間利用や地圏環境問題等に関わる応用的な研究業務を行う」。この使命から，本研究グループは，地熱開発促進に向けて，国内の中核的研究グループとして，資源エネルギー庁，新エネルギー・産業技術総合開発機構，地熱産業界，地方自治体，日本地熱学会等，外部への積極的な働き掛けや貢献を行うとともに，アジアを中心とする海外との積極的な研究協力を行う。第 2 期中期計画における主要研究課題は，大きく「中小地熱資源の研究 (1 号業務)」と「地熱資源の研究 (2 号業務)」からなる。「中小地熱資源の研究」は国の地熱事業である NEDO 地熱開発促進調査 (中小地熱) を側方支援することを目的とし，地熱資源を有効利用するた

め，環境負荷の少ない中小地熱資源の開発に関する技術指針を産業界に提供することを目指している。これは，1) 中小地熱資源賦存地域の研究，2) 地熱有望度指標の研究の 2 つの柱からなる。「地熱資源の研究」は中長期的視点から地熱資源の利用の拡大を始め，地熱資源情報を他分野のニーズに広く生かすための基盤的研究を目的とし，地熱資源データベースの研究を中心として，地熱資源情報を様々な分野に提供することを目指している。これは，3) 地熱資源データベースの応用研究，4) 地熱シーズ・基盤研究の 2 つの柱からなる。3) は H18 年度まで「GIS を利用した地熱統合評価の研究」であったが，その成果発表を契機にテーマを拡大し，H19 年度から地層処分や海外地熱の応用に関する新規課題の立ち上げを目指した基礎研究を行うものとする。なお，本研究グループは国内の地熱資源研究の中核的グループであることから，グループの Web サイトの充実をグループの研究活動として位置づけることとし，グループ Web サイトをさらに充実させることを目標とする。

1) 中小地熱資源賦存地域の研究：地熱開発促進調査地域を中心に，中小地熱資源開発候補地の地熱地質と地化学に関する調査を行い，その熱源，貯留構造，地熱流体，熱史等を解析するとともに，その地熱ポテンシャルを評価し，最適開発方法を明らかにする。

2) 地熱有望度指標の研究：環境負荷の少ない中小地熱資源の開発に関する技術指針作成の基盤データとして，全国から収集済みの温泉化学分析値・坑井温度検層データ等から，地熱有望度指標とその表示方法を検討し，昨年度構築した『全国地熱ポテンシャルマップ』プロトタイプを，昨年度行ったユーザーアンケート調査にもとづいて改良する。

3) 地熱資源データベースの応用研究：これまでに蓄積された地熱知識ベースをスピンアウトさせて，新しい分野を開拓するための地層処分研究，地下水熱環境研究，地圏環境研究等へのシーズ研究を展開する。また，JICA インドネシア等，海外との地熱研究協力を推進する。

4) 地熱シーズ・基盤研究：研究者の自由裁量による萌芽的研究を行う。また，当グループは国内の地熱資源研究の中核的グループであることか

Gravity Basement Depth

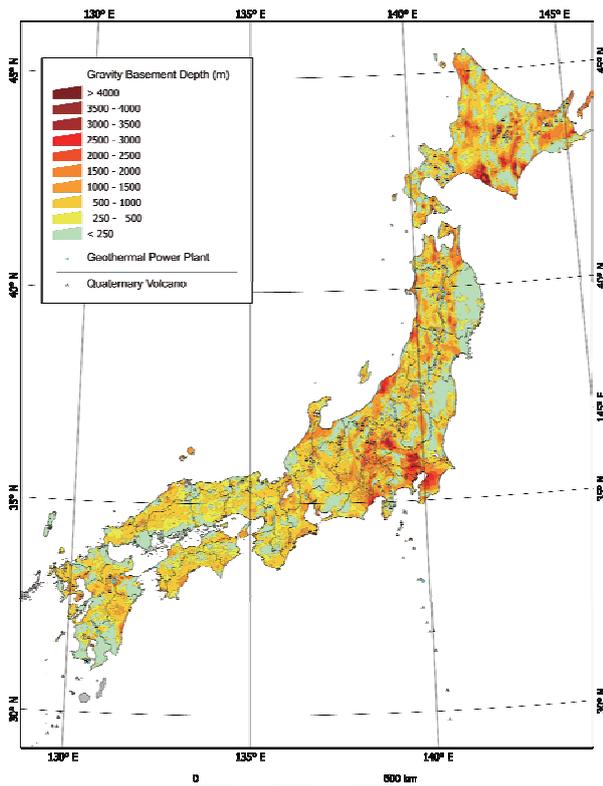


図 1 全国の地表面下重力基盤深度図(駒澤, 2003 を改変).

ら, グループの Web サイトの産総研のガイドラインに沿ったりリニューアルやさらなる充実を始め, 広報活動に務める.

4. 平成 19 年度の研究成果

1) 従来の「地熱調査坑井についての変質データベースの構築と事例地域のデータ処理・モデル化」の研究成果を再整理し, NEDO の地熱開発促進調査の公表データについて地方別の概要と 6 事例地域のモデル化比較を取りまとめた地質調査研究報告特別号で公表するとともに, 学会ポスター発表などを行った. また, 小規模熱水変質帯解析手法の研究として, ESR 法および類似手法を用いた過去の低温熱水活動の検出および温度推定の可能性について文献調査を行い, その結果を取りまとめた.

2) 地化学温度計は貯留層温度の推定に有効であるが, 低温の熱水系への適用性は評価されておらず, 検証が必要であると思われる. そこで, 地化学温度計の適用下限を明らかにするため, 既存文献を収集し, 地下温度と水質データを抽出して, その検討を開始した. 「全国地熱ポテンシャルマップ」については, これまでの収集データに加え(村岡ほか, 2007), 駒澤(2003)の重力基盤深度データから地表面下の重力基盤深度図を作成した(図 1). これらのデータを用いて, 様々な温度範囲の熱水系資源量を GIS ベースで評価した(図 2;

Electricity (150°C<=Reservoir Temperature)
[Reservoir Bottom Depth = Gravity Basement Depth]

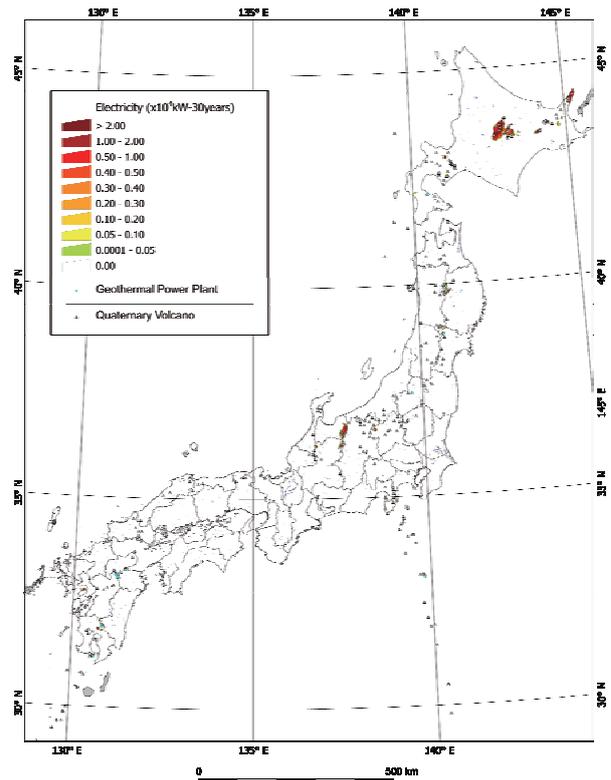


図 2 重力基盤上の 150°C以上の熱水系資源分布.

村岡ほか, 2008). これらは GIS ベースのため, 直ちに資源量分布マップとして可視化することができるが, 同時に大容量となるため, 平成 20 年度出版予定の「全国地熱ポテンシャルマップ」におけるその表示方法を検討した.

3) 島弧系下への海洋プレートスラブの斜め沈み込みについて簡易数値モデルと数値シミュレータを開発し, これを近畿地方の非火山性高温温泉分布と関東地方の極低地熱分布に適用し(図 3), 各々の異常の生成環境をモデル化して, その成果を, 一部口頭発表するとともに誌上発表 3 件として投稿した. また, 今後の地熱資源評価の高度化の目的でオープンソースの熱水系シミュレータ (HYDROTHERM) を稼働させると同時に, 簡易的なプレーポスト・データ・プロセッサ群を作成して処理の効率化を図った. JICA 地熱発電マスタープラン調査 (インドネシア) の最終ワークショップに協力するとともに, GIS を利用したスマトラ島スマトラ断層沿いのプリアパート盆地の地熱的意義に関する研究を口頭発表した (図 4).

4) 温泉水質の利用性の向上を検討するために, 温泉成分の挙動を酸性変質帯における土壌の発達過程の観点から調査した. 土壌化は色調の変化や鉱物粒度の低下として認識され, 水質は土壌間隙水, 変質帯の側壁の湧水, 変質帯下底の温泉水で異なり, 土壌植生の発達には, 初期の窒素固定化,

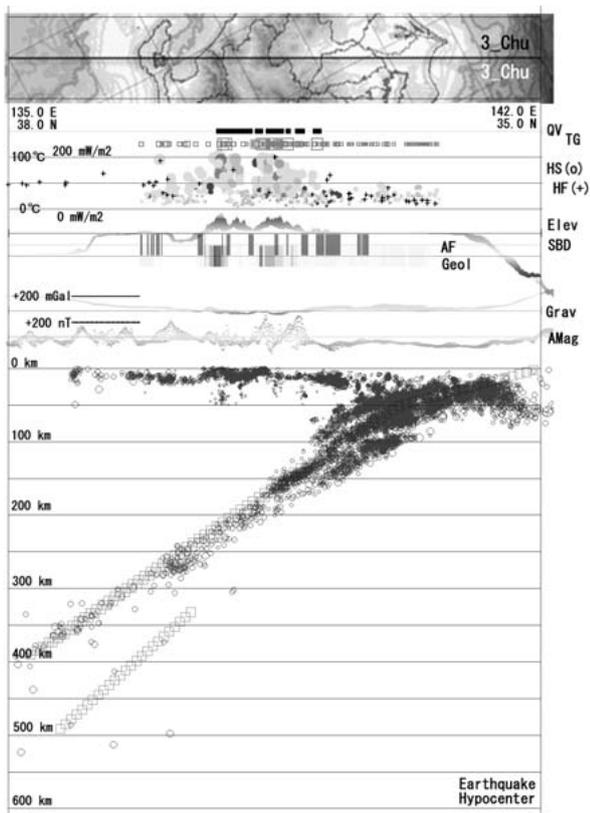


図 3 関東-中部地方の断面線に沿う様々な電子地球科学情報の統合表示. 上部は第四紀火山, 高地高温勾配井, 高温温泉などに乏しい関東平野の特徴を, 下部は4~5層化した深部震源分布(O)と太平洋プレート-スラブの沈み込みの簡易モデル-シミュレーション結果(□)を示す(茂野, 2008).

降水による間隙水の高 pH 化と低塩濃度化, 栄養塩類の複雑な溶出/濃集挙動などが関与すると推定された(図5). また, 小型カルデラの熱ポテンシャル評価に関して, 下北半島西部の調査を完了し層序を明らかにした(図6). これまでの成果と文献調査から, 濁川型と呼ばれる小型カルデラは単成火山として扱うのが妥当であると結論した. 平成16-18年度 NUMO 受託研究「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」の成果をとりまとめ, 地質調査研究報告59巻1-2号に特集号として出版した.

5) このほかに, 平成19年度8月に『温泉エコジェネシシステムの開発』(委託先:地熱技術開発㈱, 再委託先:当部門)が, 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成19年度新エネルギーベンチャー技術革新事業フェーズI(FS調査)に採択された. このプロジェクトでは, 国内の高温温泉において, 浴用温度より高温側の温度差エネルギーが未利用のまま廃棄されていることから, 小規模・低温型発電システムを開発し, 温泉発電市場の開拓を目指す. 平成19年度はFS調査のため, 温泉発電の市場規模を評価し(図7), 長野県小谷村において, 温泉沈殿物の現場実験を行うとともに(図8;図9), 熱交換器の目詰まり防止策を検討した.

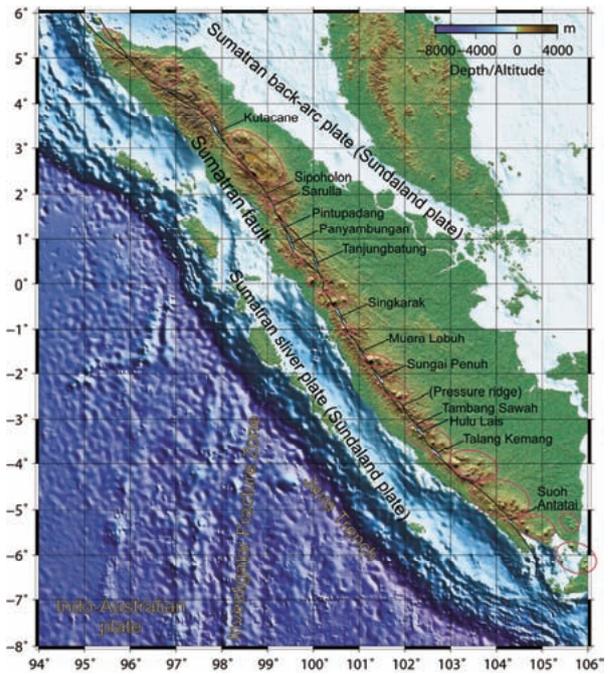


図4 スマトラ島における重要な熱水貯留層としてのブルーパート盆地(盆地名を表記).

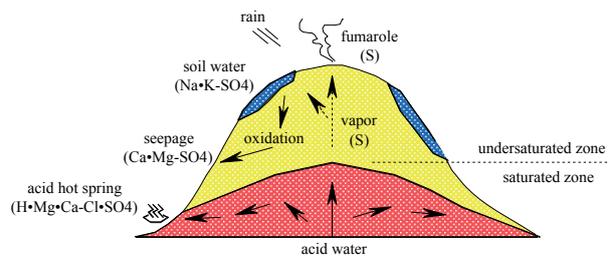


図5 酸性変質帯における温泉成分の挙動.



図6 下北半島畑地区のカルデラ湖堆積物. 成層した細粒凝灰岩に径10cm以上の円礫や炭化木片が混在し, 不安定な堆積環境を示す.

5. 今後の展開に向けて

平成20年度には「全国地熱ポテンシャルマップ」(CD-ROM版)を出版する予定である.

『温泉エコジェネシシステムの開発』(委託先:地熱技術開発㈱, 再委託先:当部門)は, 平成19年度FS調査の成果が評価され, 平成20年度新エネルギーベンチャー技術革新事業フェーズII(本格

Electricity (kW-30years)
 [T_{res}=53°C, 53°C<=Reservoir Temperature<120°C]

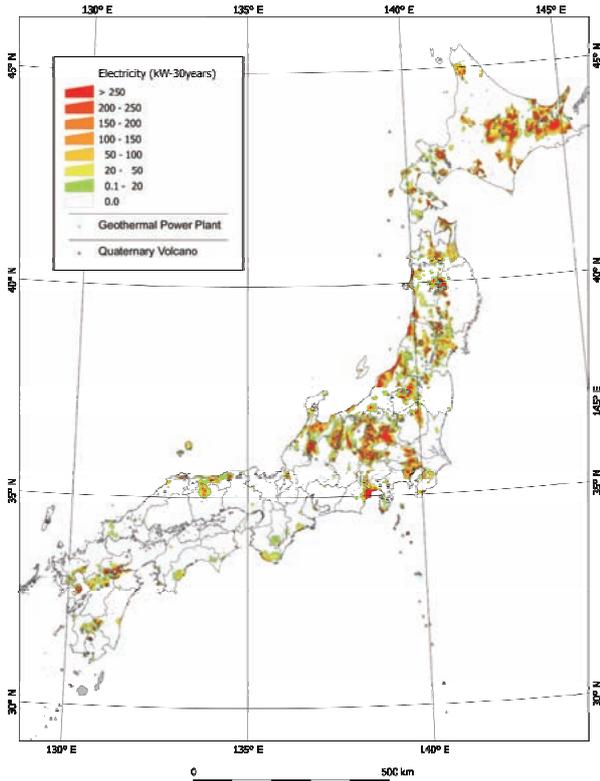


図7 重力基盤上で53~120°Cの範囲に入る熱水系資源分布。抽出域面積は全国の22%に及び、発電の低温拡大による効果の大きさを表す。



図8 長野県小谷村の現場実験地域。



図9 長野県小谷村の沈殿物試験装置。

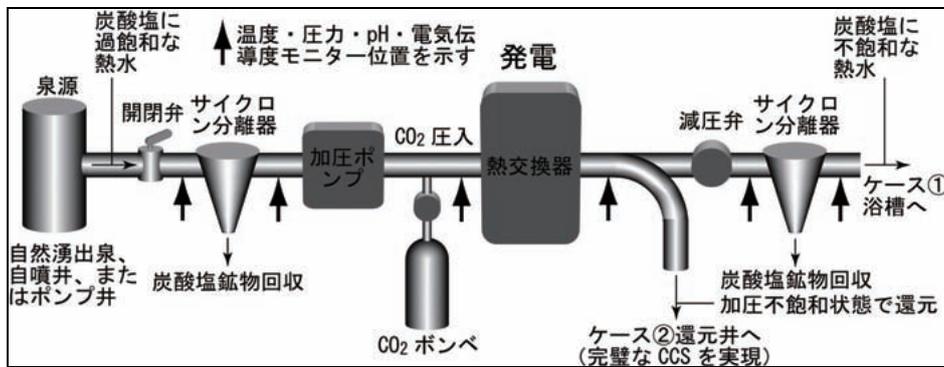


図10 温泉沈殿物除去技術の概念図。

ステージ)に採択された。本格ステージにおいては、地熱技術開発㈱が50 kW カーナサイクル発電システム本体の製作を担当し、当部門が主に温泉沈殿物除去技術の研究開発を担当する(図10)。

また、引き続き、国内の地熱エネルギーの有効利用を目指して、資源エネルギー庁、NEDO、地熱産業界、地方自治体、日本地熱学会等に積極的に協力し、アジアの地熱エネルギー・インフラの普及を目指して、国際協力機構等にも積極的に協力して行く。

文献

駒澤正夫 (2003) 日本の重力探査事情—地下構造

とのかかわり. 石油技術協会誌, 68, 1, 21-30.
 村岡洋文・阪口圭一・玉生志郎・佐々木宗建・茂野 博・水垣桂子 (2007) 日本の熱水系アトラス. 産総研地質調査総合センター, 110p.
 村岡洋文・阪口圭一・佐々木 進・駒澤正夫 (2008) 日本の1kmグリッド地熱資源量評価 2008: 熱水系から浅部マグマをみる (要旨). 日本地球惑星科学連合 2008 年大会予稿集.
 茂野 博 (2008) 相模トラフ域—関東平野におけるフィリピン海プレートスラブの沈み込み—公開電子地球科学情報を利用した簡易モデル化—数値シミュレーションによる検討—. 地質ニュース 648 号, 20-33.

鉱物資源研究グループの 2007-2008 年の活動

Activities of the Mineral Resources Research Group in 2007-2008

渡辺 寧 (鉱物資源 RG)

Yasushi Watanabe

Mineral Resources R.G.

*Corresponding Author, e-mail address: y-watanabe@aist.go.jp

1. はじめに

鉱物資源研究グループ(表 1)は、2007-2008 年に、1)重希土類元素の濃集機構と資源ポテンシャル評価の研究、2)金属鉱化作用と探査手法の研究、3)骨材資源評価に関する研究、4)鉱物資源データベースの研究の研究を実施してきた。鉱物資源に関するコンサルティングも同時に行っている。

表 1 鉱物資源研究グループの構成

メンバー	期間
渡辺 寧	グループ長
須藤定久	グループ員 ~2008.03
大野哲二	グループ員 2008.06~
村上浩康	グループ員
実松健造	グループ員
守山 武	特別研究員
村尾 智	併任

2. 重希土類元素の濃集機構と資源ポテンシャル評価の研究

本研究は 3 年間の部門重点課題研究の 2-3 年目に当たる。世界の重希土類資源ポテンシャル評価を行うとともに資源データベースを作成することを目的としている。

2007 年度にはこれまでの調査結果をもとに、世界の元素別希土類データベースを完成した。さらに重希土類元素の濃集機構と資源ポテンシャル評価を行うために、イオン吸着型鉱化作用の調査をラオス、ベトナム、タイで実施し、資源ポテンシャル評価を行った。また南アフリカ共和国地球科学審議会および独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構と同国の希土類資源ポテンシャル評価を行うために研究協約を締結し、同国の層状マンガン鉱床(図 1)、カーボナタイト、アルカリ岩の希土類資源ポテンシャル評価を行うために現地調査を行った。さらに燐灰石の希土類ポテンシャルを評価するために、ザンビア、チリ、イラン、インド等で現地調査を行うとともにその他の地域からも試料収集・化学分析を行った。



図 1 南アフリカ地球科学審議会が所蔵するカラハリマンガン鉱床の試錐コア。

ラオスでは、ラオス南部から中部地域に分布する 4 地域の花崗岩風化殻の調査を実施した。これらの地域では風化殻が十分な厚さまで発達しているものの、一部の例外を除いて希土類含有量は岩体毎の平均で 100-300ppm とあまり高くなく、また花崗岩の組成と比較しても希土類の濃縮率は 20%と小さいことが判明した。

一方ラオス南部ボローベン台地の玄武岩ラテライト(図 2)中やボーキサイト下部の粘土層に希土類が濃集していることを見出した。ボローベン台地の広域的な調査を行うとともに希土類のラテライト中の産状研究や希土類抽出試験を実施しており最終的な資源ポテンシャル評価を 2008 年度末に報告する予定である。



図 2 ボローベンラテライトの産状

ベトナムでは北部に分布するヌイファオ花崗岩に希土類の濃集が認められることが確認された。

層状マンガン鉱床のこれまでの調査結果によると、南アフリカ共和国の層状マンガン鉱石にはほとんど希土類の濃集が認められなかった(図3)。インド北東部オリッサ県の鉱床には一部に希土類の濃集が認められたものの、日本のものと比較すると含有量は少なく、資源としてのポテンシャルは極めて低いことが判明した。

マグマ性、または熱水性の燐灰石には0.5-2%程度の希土類が含有され、世界で年間に生産される燐灰石中の希土類総量は14万トン(氧化物換算で17万トン)に達することが明らかになった(表2)。この量は現在の世界の希土類の需要を上回っており、今後燐灰石から副産物として希土類が回収されることが望まれる。

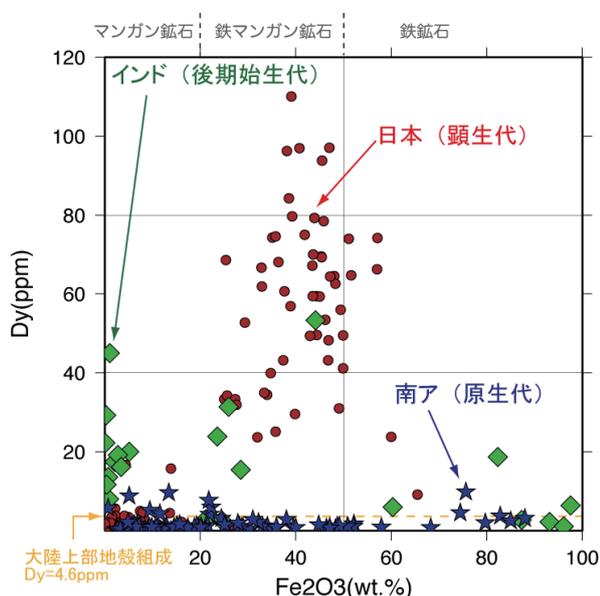


図3 日本、南アフリカ共和国、インドの層状マンガン鉱床中のジスプロシウム(Dy)含有量。

表2 燐灰石中に含まれる希土類

鉱山名	燐灰石生産量(t)	希土類含有量(t)
Kiirunavaara (スウェーデン)	20万トン	1450
Palabora (南ア)	240万トン	17000
Nolans Bore (豪州)	50万トン(予定)	12750
Esfordi (イラン)	10万トン	1330
Chadormalu (イラン)	10万トン	750
Siilinjärvi (フィンランド)	98万トン	3320
Aaxa, Catalao (ブラジル)	550万トン	(38500)
JSC Apatit (露)	876万トン	(57800)
JSC Kovdorsky (露)	196万トン	(9460)
合計概算		142,360

第33回万国地質学会議(International Geological Congress)組織委員会から、戦略元素に関する今後の世界の見通しについての講演依頼を受け、2008年8月12日にIGCで開催された鉱物資源に関する講演会「Mineral resources in a fast growing global economy-are there any natural limits?」においてRare earth elements: a new scope of mining for saving energy and environmentと題するPlenary Lectureを行った(図4)。



図4 IGCでのPlenary Lectureの様子

3. 金属鉱化作用と探査手法の研究

中国地質科学院鉱産資源研究所とも連携し、中国南部に位置する含インジウム鉱床(都龍、大蔽鉱床)およびタングステン鉱床(大明山ほか、図5)の調査を行った。この調査は、中国地質科学院鉱産資源研究所(北京)と産業技術総合研究所地質調査総合センター間で中国南部の含インジウム鉱床と日本の金属鉱床に関する研究に基づいている。



図5 大明山鉱床の含鉄マンガン重石石英脈

ボリビア・アルゼンチンにおける含インジウム鉱床の現地調査では、アルゼンチン国立科学技術審議会(CONICET) Maria Florencia Marquez-Zavalía を招聘し共同調査を実施した。これらの調査結果並びに既存資料に基づき、中国南部では1万トン以上、ボリビアでは8000ト

ン以上のインジウム資源量が賦存する可能性があることが判明した。アルゼンチン共和国のカタマルカ県、カピジータス地域に分布する垂鉛鉱石中にインジウムが存在することを新たに見出し、アルゼンチン共和国は世界有数のインジウム埋蔵国である可能性が判明した。

Ore & Orogenesis シンポジウム(米国ツーソン)からの依頼講演で、菱刈金鉱床の鉱脈が流体による静岩圧下での破壊により形成された裂隙に天水が混入しない環境で形成されたとするモデルを提案した。同学会に付随する九州での国際巡検(図 6)を組織実施し、巡検案内書をアリゾナ地質学会から出版した。 Gondwana 国際学会で中国南部のメタロジェニーに関する Keynote 講演を行うとともにコロラド鉱山大学からマリー・ヒッツマン教授(日本学術振興会海外特別研究者招聘制度(短期)、インド工科大学からパニグラフィ准教授を招聘し共同研究を実施している。



図 6 菱刈鉱山での巡検参加者集合写真

4. 骨材資源評価に関する研究

経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課からの要望に基づき、全国の骨材資源の分布状況とその性状を報告書として取りまとめる研究であり、本年度は北海道・東北地方各道県の砂利資源、採石資源の概要、生産量推移、分布、地域別の問題点をとりまとめ報告書として刊行した。北海道・東北地域では骨材資源は豊富であるが、砂利資源は日本海側に、碎石は太平洋側に偏って分布している。太平洋側では碎石資源・陸砂利・山砂利資源の分布や品質を適確に把握し有効利用を図ることが重要。日本海側では、陸砂利は多孔質岩を含むことが多く、碎石は変質を受けて脆いものもあり、高品質砕砂などの移入も必要になる。これにより平成 15 年度から 5 年間にわたり行ってきた日本全土をカバーする骨材資源の地域別調査報告が完結した。

5. 鉱物資源データベースの研究

平成 19 年度は 20 万分の 1 地質図幅中津の情報収集を行った。東アジアの地質鉱物資源 GIS データベースを完成させ、300 万分の 1 鉱物資

源図(図 7)として地質調査情報センターから出版し、詳細データは、地質調査情報センターのウェブサイト <http://www.gsj.jp/Map/JP/overseas.htm> に資源図説明書とともにアップロードした。また中央アジアの地質編纂作業を終了し、300 万分の 1 中央アジア地質図として出版した。日本国内の鉱物資源情報は 20 万分の 1 地質図幅「白河」、「長岡」、「山口」及び「見島」として地質調査総合センターから出版した。

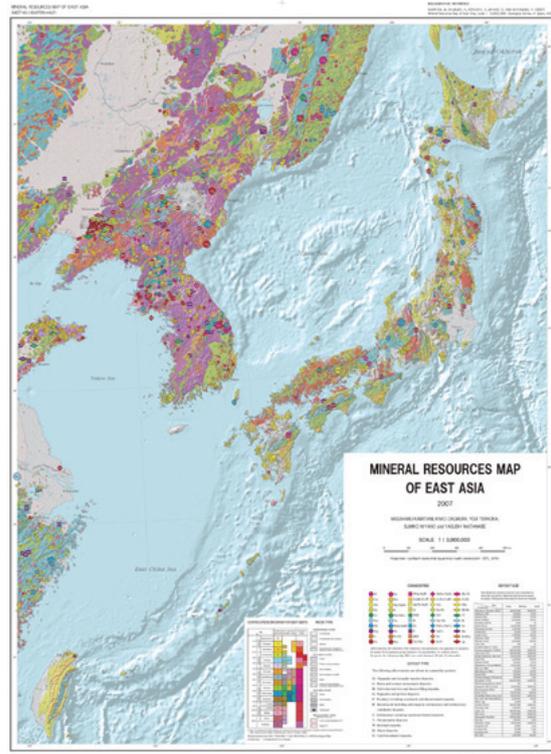


図 7 300 万分の 1 東アジア鉱物資源図。

6. 鉱物資源に関するコンサルティング・国際協力

要請に応じ CCOP、経済産業省、地方経済産業局、資源エネルギー庁、国際協力機構、石油天然ガス・金属鉱物資源機構、地方自治体等の実施する鉱物資源に関するプロジェクトに参加し、技術支援、技術移転活動を行った。

国際協力機構の実施するラオス人民共和国での地質鉱物資源開発戦略プラン策定プロジェクトに参加し、ラオスでは 20 万分の地質図幅 2 葉を作成するとともに、2 名の研修員(Chansavath Boupfa, Khampha Phommakaysone)を受け入れた。ザンビア共和国ではプロジェクトの進行状況の確認を行った。鉱業課題別支援委員会委員として JICA の鉱業関連プロジェクトのレビューも行っている。

要請によりイランの Bafgh 大学、イスファハン大学(図 8)、中国の桂林工学院(図 9)、ザンビア地質調査所、南アフリカ地球科学審議会、ラオス地質調査所、国際資源大学等で特別講演を行った。



図8 イラン・イスファハン大学での講演



図9 中国桂林工学院での講演

資源地質学会年会において「レアメタル—レアアース資源」と題する国際シンポジウムを組織した。発表内容は Resource Geology 誌 58 巻 4 号に編集し Thematic Issue として掲載される。

産総研レアメタルタスクフォースと共同で産業技術総合研究所第 2 回レアメタルシンポジウムを実施するとともに工業調査会から「レアメタル」(図 10)を出版し、研究成果の普及に努めた。2008 年度には日本地球惑星科学連合 2008 年大会において「資源地質学の新展開：レアメタル・レアアース資源を中心として」を開催し、当研究グループから 6 件の研究発表を行った。

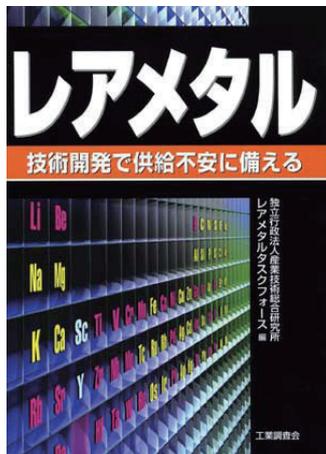


図10 「レアメタル」(産総研レアメタルタスクフォース編). 鉱業調査会から出版。

第 5 回 AOGS2008 において「Magma, fluids and mineral deposits of Asia and Oceania」(SE61) を主催し、当研究グループから 6 件の研究発表を行った。また日本地球惑星科学連合 2008 年大会において「緊急災害セッション：四川大地震」において、当研究グループから 3 件のポスター発表を行っている。当研究グループが協力していた JICA プロジェクト「ラオス鉱業分野投資促進のための地質・鉱物資源情報整備計画調査」の成果報告会がビエンチャン（ラオス）で 2008 年 8 月 6 日に行われ、成果報告を行った(図 11)。



図11 ラオス、ビエンチャンで開催されたラオス鉱業分野投資促進のための地質・鉱物資源情報整備計画調査最終報告会(2008年8月6日)

7. 主な研究成果

- Murakami, H. (2008) Variations in chemical composition of clay minerals and magnetic susceptibility of hydrothermally altered rocks in the Hishikari epithermal gold deposit, SW Kyushu, Japan. *Resource Geology*, v.58, No.1, p.1-24.
- Ishihara, S., Qin, K. and Wang, Y. (2008) Resource evaluation of indium in the Dajing Tin-polymetallic deposits, Inner Mongolia, China. *Resource Geology*, v.58, No.1, p.72-79.
- Murao, S., Deb, M. and Furuno, M. (2007) Mineralogical evolution of indium in high grade tin-polymetallic hydrothermal veins-A comparative study from Tosham, Haryana state, India and Goka, Naegi district, Japan. *Ore Geology Review* (Available online at www.sciencedirect.com).
- Kamitani, M., Okumura, K., Teraoka, Y., Miyano, S. and Watanabe, Y. (2007) 1:3,000,000 Mineral Resources Map of East Asia with Explanatory Notes for the Mineral Resources Map of East Asia. Geological Survey of Japan, 2 figures and 14p.
- Teraoka, Y. and Okumura, K. (2007) Geological Map of Central Asia 1:3,000,000. Geological Survey of Japan.
- 渡辺 寧(2008) 希土類資源：現況と将来予測. *金属*, 78, No. 8, p. 748-753.
- Li, X., Watanabe, Y., Hua, R. and Mao J. (2008) Mesozoic Cu-Mo-W-Sn mineralization and ridge subduction in south China. *Acta Geologica Sinica*, v. 82, No. 5, p. 625-640 (in Chinese with English abstract).

鉱物資源研究グループの紹介

Introduction of the Mineral Resources Research Group

研究グループ長：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・評価など資源開発における最上流部に関わる研究を実施している。現在5名の職員と8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、金属資源、非金属資源、鉱物資源情報、分析技術開発の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)
 村上浩康
 大野哲二
 実松健造
 星野美保子
 昆 慶明(産総研特別研究員, PD)
 堀内 悠(産総研特別研究員, PD)
 西村光史(テクニカルスタッフ)
 恒松麻衣子(テクニカルスタッフ)
 奥村公男(客員研究員)
 平野英雄(客員研究員)
 神谷雅晴(客員研究員)
 寺岡易司(客員研究員)

2. 金属資源の研究

かつて日本国内には多くの金属鉱山が稼行していたが、高度成長期以降に鉱量枯渇、採掘コストの増大などの理由で次々と閉山し、現在は少数の金鉱山だけになってしまった。それ以降、日本は産業活動に必要な金属資源のほとんどを海外からの輸入に依存するようになった。ところが、中国などの新興国の急成長、2004年以降金属資源の価格の急激な上昇、少数国やメジャー企業による資源の寡占化などにより、鉱物資源(特にレアメタル)を公正な価格で自由に輸入できない現象が起こり始めた。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を確保する必要性が出てきた。鉱物資源研究グループは海外の金やベースメタル(銅、鉛、亜鉛など)鉱床の他に、最近ではインジウムや希土類元素(ランタノイド、Sc、Y)といったレアメタル資源の調査に力を注いでいる。特に需給が逼迫している希土類元素は、高性能モーター等に不可欠な金属だが、ほぼ全量を中国からの輸入に頼っている(Scはロシアの輸入が大部分を占めると推測される)。しかし、最近の価格高騰や輸出規

制でその安定供給がますます危ぶまれている。そのため、当グループでは世界各地で中国に替わる希土類鉱床を求めて、一部は民間企業や石油天然ガス・金属鉱物資源機構と共同で調査研究を実施している。

最近の研究では、アルカリ岩中に産するジルコン $[(Zr, HREE)SiO_4]$ の新たな重希土類としてのポテンシャルを評価するために、カナダのトアレイク鉱床で調査を行った(写真1, 2)。ジルコンは重希土類を若干量含む普遍的な鉱物であるにも関わらず、物理的・化学的耐性が強いためにこれまで希土類資源として注目されなかった。しかし、アルカリ岩に伴う熱水変質を被ったジルコンは結晶構造が比較的弱く、酸・アルカリによる分解が可能であることが分かってきた。将来の新たな希土類資源となることを目指して、現在、抽出実験による希土類の回収や、変質したジルコンの鉱物学的特徴を調べる研究を行っている。



写真1 カナダのトアレイク希土類鉱床での調査風景。



写真2 トアレイク鉱床の希土類鉱石。軽希土類に富む鉱石(左)の他に、重希土類に富む鉱石(右)が産出するため資源として重要である。



写真3 モンゴル南部ゴビ砂漠にあるムシュガイハダッグ希土類鉱床での調査風景。

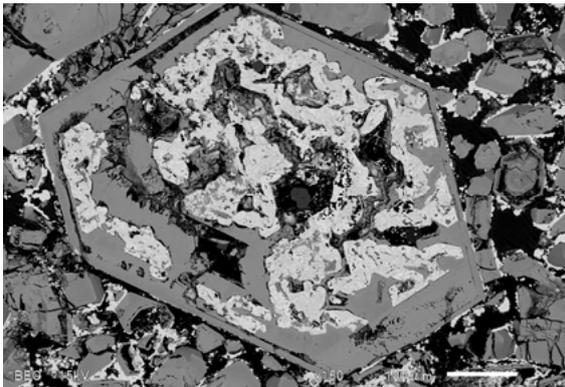


写真4 ムシュガイハダッグ鉱床の希土類鉱石の電子顕微鏡写真(反射電子像)。灰色部がリン灰石で白色部がモナズ石。

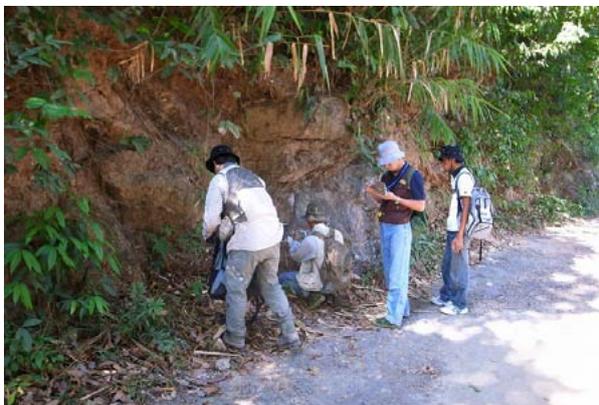


写真5 ミャンマーでのイオン吸着鉱の調査風景。



写真6 マレーシアでのイオン吸着鉱の調査風景。



写真7 南アフリカとの共同研究についての会議。

モンゴルでは、ゴビ砂漠にあるムシュガイハダッグ鉱床の調査を行った(写真3)。この鉱床はマグマ性のリン灰石と磁鉄鉱を鉱体としているが、同時に希土類資源とのポテンシャルを持つことが分かった。鉱石鉱物がリン灰石のみならばあまり希土類には富まないが、この鉱床では熱水性のモナズ石 $[(\text{REE}, \text{Th})\text{PO}_4]$ がリン灰石の結晶中や粒間に産出しており(写真4)、希土類鉱石となることが分かった。鉱体によって希土類鉱石の品位はばらつきがあるため、高品位鉱体の分布状況を把握するための調査・研究を行っている。また、周辺地域にある同様の希土類鉱床の探査を進めている。

東南アジア各国の花崗岩地域においてはイオン吸着鉱の調査をしており(写真5、写真6)、その結果、イオン吸着鉱の成因、分布、探査の方法について徐々に明らかになってきた。イオン吸着鉱とは、風化花崗岩が希土類元素を吸着した鉱石であり、電解質溶液を用いたイオン交換によって希土類元素を回収できるという特徴を持つ。希土類鉱物は一般に風化・変質に対する耐性が強いが、希土類炭酸塩や希土類珪酸塩の方がモナズ石などの希土類リン酸塩よりも分解しやすいと考えられる。そのため、希土類炭酸塩・珪酸塩を含む花崗岩が適度に風化すると、イオン吸着鉱は形成しやすいということが分かってきた。希土類資源に適する品位を持つイオン吸着鉱は、風化の程度だけでなく花崗岩の地球化学的特徴によっても支配されるため、広域的な花崗岩の分布からイオン吸着鉱の産出しやすい場所を推測可能と考えられる。

この他にも、鉱物資源の豊富な南アフリカにおいても共同研究・調査が進行中である(写真7)。その他、世界中の国々で様々なタイプの希土類鉱床の資源ポテンシャル評価を行っている。

3. 非金属資源の研究

石灰石、窯業原料(粘土、長石、珪石など)、採石・骨材などの非金属資源(工業原料鉱物)は、一般に工場や消費地に近い国内鉱山で採掘されている。現在でも、全国で約400カ所の非金属鉱山が稼働している。しかし、鉱量枯渇、宅地

化や環境問題等により、良質な資源の確保が徐々に難しくなっている。鉱物資源研究グループでは、非金属資源を扱う数少ない公的研究機関の1つとして、国内外の非金属鉱床の地質調査・資源評価などその安定供給に役立つ研究を実施している。現在は、建材用珪石資源の研究、国内外ベントナイト鉱床の研究などを民間企業と共同で実施している(写真8)。



写真8 国内のベントナイト鉱床の調査風景。

4. 鉱物資源情報の研究

海外の鉱物資源情報、とりわけ日本に近いアジア地域の情報を収集・解析することは、日本の資源確保戦略を立案する上で非常に重要である。鉱物資源研究グループでは、政府・鉱山業界等の要請に基づき、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東アジア鉱物資源図を出版し、2010年度に500万分の1アジア地質図、2011年度には中央アジア鉱物資源図の出版を予定している。また、ASEAN各国で構築中の東アジア鉱物資源データベースへの研究協力、既出版の50万分の1国内鉱物資源図の電子化などを実施中である。

5. 分析技術開発

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は不可欠である。そのために、鉱物資源研究グループでは、平成21年度にレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置(LA-ICP-MS)を導入した(写真9)。この分析装置は、フェムト秒という極めて短い(=エネルギー密度の高い)レーザーパルス照射して試料表面の微小領域を溶融させることなく一瞬で粉碎し、発生した微粉末をICP-MSに導入して高精度で化学分析する装置である。現在、全岩・鉱物分析ルーチンの開発や感度向上のための改良を行っている。ICP-MSでは溶液試料の分析も可能であるため、イオン吸着鉱から抽出した希土類元素などの定量分析も行っている。現在、イオン吸着鉱の資源評価や効果的な希土類元素

抽出法の開発を行っている。

鉱物資源の研究には、鉱物の産状の観察や、鉱物を同定するための微小領域分析も必要不可欠である。平成21年度には新たに粒子解析用ソフトウェアとエネルギー分散型X線分光分析器(EDS)を備えた走査型電子顕微鏡(SEM)を導入した。この装置では、EDSを用いて1 μ m以上の粒子の定性・定量分析が可能だけでなく、粒子解析ソフトウェアを用いて観察面の化学組成やサイズなどが自動的に解析可能である(写真10)。この装置の利用により、鉱石鉱物のサイズや産状の把握がより正確かつ迅速に行えるようになるため、鉱床のポテンシャル評価に多いに役立つ。

当グループではその他にも粘土鉱物の各種分析ルーチンの確立・改良など、鉱物資源の評価・研究に関する分析技術の開発を積極的に行っている。



写真9 鉱物資源研究グループ所有のLA-ICP-MS。

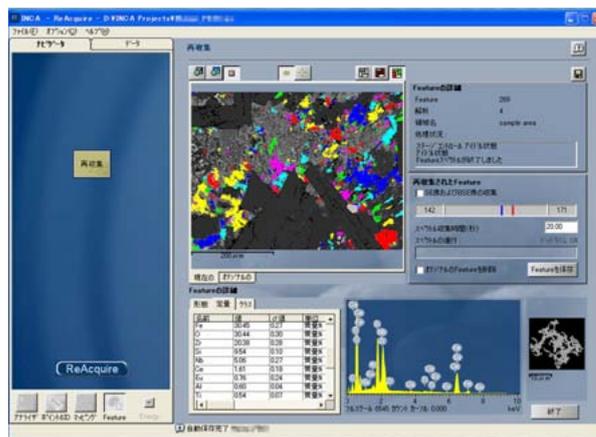


写真10 SEMによる希土類鉱石の粒子解析の様子。

6. 今後の展望

鉱物資源の供給安定性に対する産業界の不安が増大する中で、鉱物資源研究グループの役割は益々大きくなるであろう。今後、高い学術的レベルを維持しつつも、政府・関連業界などからの要請に迅速・正確に対応できる体制を目指して行きたい。

7. 最近の主な研究成果

- Hoshino M., Kimata M., Nishida N., Shimizu M., Akasaka T. (2010) Crystal chemistry of zircon from granitic rocks, Japan: genetic implications of HREE, U and Th enrichment *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 187, 167-188
- Hoshino M., Kimata M., Chesner C.A., Nishida N., Shimizu M., Akasaka T. (2010) Crystal chemistry of volcanic allanites indicative of naturally induced oxidation-dehydration *Mineralogy and Petrology*, 99, 133-141
- Hoshino, M., Kimata, M., Nishida, N. and Shimizu, M. (2010) Dissakisite-(Ce) chemical composition: some implications for its origins. *Physics and Chemistry of Minerals*, 37, 255-263.
- 石原舜三・石山大三・佐藤比奈子・村上浩康 (2009) 華南, 日本, ボリビアにおける若干の堆積岩, 火成岩類の微量インジウム含有量について. *資源地質*, 59, 219- 222
- Murakami, H., Seo, J.H. and Heinrich, C.A. (2009) The relation between Cu/Au ratio and formation depth of porphyry-style Cu-Au±Mo deposits. *Mineralium Deposita*, 45, 11-21.
- 村上浩康 (2010) リチウム資源. *地質ニュース*, 670, 22-26.
- 村上浩康・辻本崇史・神門正雄 (2010) リチウム資源探査の最前線: ウユニ塩湖. *地質ニュース*, 670, 53-59.
- Sanematsu, K., Murakami, H., Watanabe, Y., Duangsurigna, S. and Vilayhack, S. (2009) Enrichment of rare earth elements (REE) in granitic rocks and their weathered crusts in central and southern Laos. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*. 60 (11/12), 527-558.
- 実松健造・村上浩康・渡辺 寧 (2010) ラオス中南部におけるイオン吸着型希土類鉱化作用について. *月刊地球*, 32 巻, 8 号, 468-475.
- Sanematsu, K., Moriyama, T. Sotouky, L. and Watanabe, Y. (2010) Mobility of rare earth elements in basalt-derived laterite at the Bolaven Plateau, southern Laos. *Resource Geology*, in press.
- Sanematsu, K., Murakami, H., Duangsurigna, S., Vilayhack, S., Duncan, R. A. and Watanabe, Y. (2010) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of granitoids from the Truong Son fold belt and Kontum massif in Laos. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, in press.
- 高木哲一 (2010) 日本のレアメタル確保戦略. *地質ニュース*. 670, 4-8.
- Takagi, T., Naito, K. and Kamei, A. (2010) Petrographic contrast between ilmenite- and magnetite-series gabbroids in the Ryoke and San-in belts, southwestern Japan Arc. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 105(4), 194-214.

地質特性研究グループの紹介

Introduction of the Integrated Geology Research Group

地質特性研究グループ長：伊藤 一誠

Leader, Integrated Geology Research Group: Kazumasa ITO
Phone: 029-861-3977, e-mail: kazumasa-ito@aist.go.jp

1. グループの研究目的

当グループは、平成19年3月に廃止された深部地質環境研究センターの研究チームが地圏資源環境研究部門に移籍することで新設された研究グループで、高レベル放射性廃棄物処分における安全規制支援研究実施を目的とする深部地質環境研究コアの主要な構成研究グループの一つという位置づけである。当グループの主要な目的は、調査段階の進行に伴う変動を考慮して、地質環境のベースラインと呼ばれる自然状態における水理、地球化学、微生物学環境を含む地質環境、特に地下実験施設建設前の概要調査段階までの地質環境を把握するために必要な科学的な知見の整備、新たな手法の研究、ベースライン情報の統合的なモデル化手法の開発を通じて、放射性廃棄物処分の安全規制の支援を行うことである。

2. グループの研究資源

1) グループ員：伊藤一誠（グループ長）、高橋学、関陽児、内藤一樹（地質調査情報センター併任）、竹田幹郎、鈴木庸平、幸塚麻里子（産総研特別研究員）、福田朱里（産総研特別研究員）、李琦（産総研特別研究員）

2) 主たる研究課題と予算

- ・「地層処分に係る地質情報データの整備」（原子力安全・保安院：委託研究）
- ・「地下水流動解析手法の総合的検証手法の検討」（原子力安全基盤機構：請負研究）
- ・「断層内水理モデルの確立に関する実験的研究」（文科省：原子力特研）

3. グループの研究トピックス

当グループにおいては、高レベル放射性廃棄物地層処分の安全規制支援研究として、各調査段階における地質環境ベースライン評価を目的とした調査手法の研究、低透水性岩盤における水理特性、物質移行特性の室内試験による評価手法の研究、安全評価手法を実環境に適用するための、地下水流動モデルの総合的な検証手法の研究を実施している。それぞれ、物理探査、リモートセンシング、水理、化学、微生物学等の多岐にわたる研究分野において、他グループ

からの研究協力、大学等との研究協力を得て実施している。また、外部的には、日本原子力研究開発機構（JAEA）、原子力安全基盤機構（JNES）との共同研究協定の下で研究を進めている。ここでは、特にグループ内部で実施した中から、代表的な事例を紹介する。

1) 堆積岩地域における地下水環境ベースライン評価

当グループでは、平成18年度に新第三紀堆積岩地域を対象として、無菌脱酸素掘削水を用いたボーリング孔掘削および試料採取を実施した。採取された岩芯試料に対し、間隙水の抽出、分析、岩芯試料からの微生物分析等を実施した結果、岩芯試料中の間隙水と孔内からマルチパッカーシステムによって採取した地下水においては、化学成分に大きな相違が見られることが示された。図1に一例を示す。

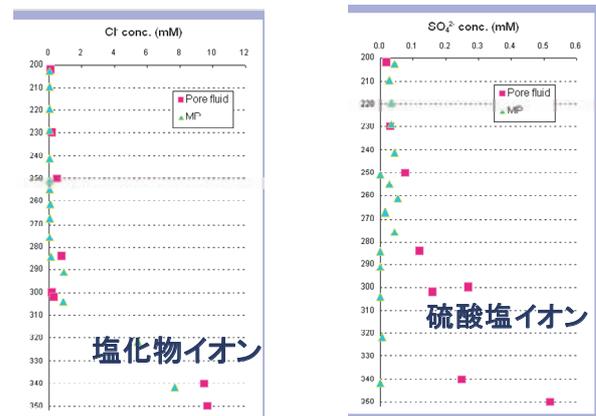


図1：岩芯試料中の間隙水とマルチパッカー採水における塩化物イオンと硝酸塩イオンの濃度分布

塩化物イオン等、微生物による代謝過程と関連が薄い成分に関しては、間隙水、孔内水の両者でほぼ同一の濃度分布が得られているが、硝酸塩イオンのように、微生物による代謝過程と直接関連する成分に関しては、両者で大きな相違が見られた。この原因としては、岩盤空隙中

の微生物代謝活性と孔内での活性の違いが考えられ、間隙径分布と脱窒活性との関連を分析することで実証した。

本年度は、以上の堆積岩地域における成果を発展させ、JAEA 東濃地科学センターとの共同研究において、瑞浪超深地層研究センターの地表からのボーリング孔および地下空洞からのボーリング孔から得られた地下水、岩石試料の分析を行い、地下環境ベースラインを評価するための試料採取、分析の最適手法に関する研究を進めている。

2) 岩石の物質移行特性評価のための実験・解析手法

放射性核種の天然バリア中の移動は、岩石の間隙中あるいは亀裂中の移流、あるいは遅延要因として、特定の高透水経路から周囲の岩石マトリックス中への拡散によって支配される。その現象を定量的にモデル化するためには、マトリックス部分の拡散係数を精度良く把握する必要がある。ただし、従来の実験、解析手法では、岩石、トレーサの性状によっては、有意な結果を得るためには実験に長時間を要し、拡散係数を効率的に算出することが困難である。当グループでは、岩石およびトレーサの性状に従って、最適な実験境界条件の設定と効率的なパラメータ同定を行うために、各種境界条件での非定常解析解を導出し、非定常データを用いた逆解析によるパラメータ同定の検討を実施した。その結果、各種性状下での最適な実験条件の整理が可能であると同時に、短時間の非定常計測データを用いたパラメータ同定の優位性が示された。また、従来用いられている簡易解析解の適用性の検討として、無次元解析解におけるパラメータによって、簡易解の適用範囲を示し、図2に示す実際の室内実験への適用によって、適用範囲の検証を行った。

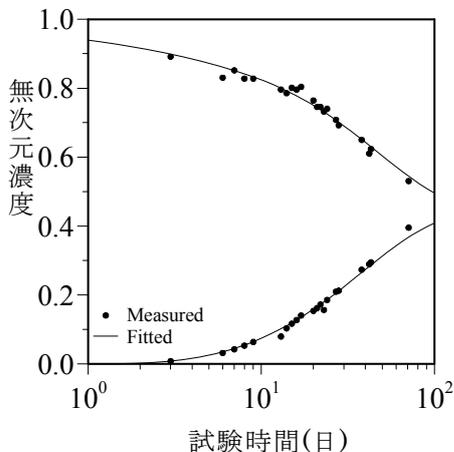


図2：室内拡散試験の無次元解析解による拡散係数評価結果

本年度は、拡散試験および解析の発展として、

岩石の不完全半透膜性と塩分濃度に起因する浸透圧発生の評価と、浸透圧が堆積岩地域における間隙水圧分布に与える影響に関するモデル構築に関する研究を進めている。

3) 地下水流動モデルの総合的検証手法に関する研究

当グループでは、昨年度までに構築した、幌延地域における広域地下水流動モデルの検証に関する研究として、JNES および JAEA との共同研究の下で、幌延地域における総合的検証手法の適用研究を実施している。

地下水流動モデルの検証においては、第一に JAEA 地下実験施設近傍における深度 520m の試験孔掘削と、地下水試料採取による同位体年代分析、各種化学、微生物分析を行っている。本年度は、地下水の流動系の分類、端成分の検討の予備検討を行い、将来的には周辺既存孔試料との比較によって、3次元的な評価を実施する。

また、研究対象地域においては、現在地下実験施設の立抗が掘削されている。ここでは、立抗掘削による地下水流動の変化を把握することを目的として、重力探査によるモニタリングおよび衛星レーダーの差分干渉解析による地表面変形モニタリングを実施している。

重力探査は、主に浅部の自由地下水面の低下状態の評価を目的として定期的を実施するものである。一方、衛星レーダーによる地表面変形モニタリングは、立抗掘削による深部地下水の間隙水圧変化に起因する地表面変形を、差分干渉解析を実施することで面的に高精度(1mm/年以下)で把握することを目的としたものである。現在は、予備解析として、図3に示すようなレーダーの差分干渉強度の解析を実施している。

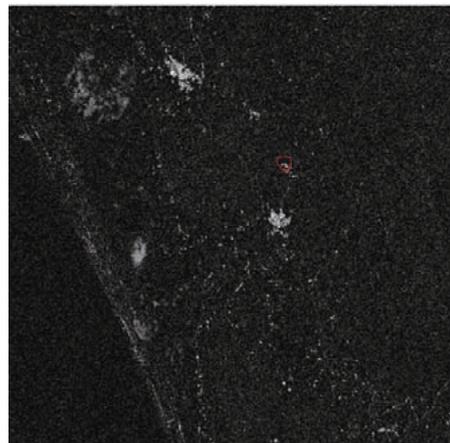


図3：幌延地域における衛星レーダー差分干渉強度の分布（赤丸部分が JAEA 地下実験施設）

また、モニタリング結果の評価手法として、水理-力学連成解析による地表面変形の評価モデルの開発も並行して実施している。

地下環境機能研究グループの紹介

Introduction of Experimental Geoscience Research Group

地下環境機能研究グループ長：竹野 直人

Leader、 Experimental Geoscience Research Group: Naoto TAKENO

Phone: 029-861-3936、 e-mail: n. takeno@aist.go.jp

1. グループの研究目的

地下環境機能研究グループが深部地質環境研究センター(平成 19 年廃止)から地圏資源環境研究部門に移って 2 年目を迎えた。この間、深部地質環境研究コアの一員として第 2 期中期計画の「地質環境の隔離性能に関する研究」をミッションとして放射性廃棄物処分における国の安全規制の支援を引き続き研究目的とするとともに、地質環境からの機能性素材の開発・利用を通じた産業および社会への技術的貢献を新たな研究目的として加えた。

2. グループの研究資源

1) グループ員

竹野直人(リーダー)、金井 豊、上岡 晃、鈴木正哉、富島康夫

2) 主たる研究課題と予算

- ・「地層処分に係る地質情報データの整備」(原子力安全保安院：委託研究)
- ・各種吸着剤の合成および評価(交付金)
- ・地下環境機能の研究(交付金)

3. 研究のトピックス

中期計画に掲げられているミッションの遂行では、当グループのみならず地質特性研究グループをはじめとする他研究グループの協力を得ているが、本報告会では、グループ員の研究成果を中心に、部門に移って一段と幅を広げた研究分野から紹介する。

1) 放射性核種移行解析コードの開発

地下水流動に起因する岩盤内部の放射性核種移行評価を行うための解析コードの開発を、米国放射性廃棄物処分場の評価コードを開発した米国サウスウエスト研究所と共同で実施している。本研究ではまず、観測データを基にした地下水流動モデルを作成し、核種の移行経路の抽出を行う。岩石マトリックス、亀裂内部における物質交換や崩壊系列を考慮し、この移行経路に沿った 1 次元の移行解析をおこなう。移行解析コードを構成する個々の解析モジュールは汎用解析ソフト GoldSim をフレームワークとして

統合する。本解析コードはデータの不確実性を考慮して解析が行える確率論的評価コードであり、さまざまな不確定要素に対して柔軟な対応が可能なものとする予定である。

2) AIST Online Hydrograph の研究

地下水流動モデルに不可欠な涵養量を推定するための基礎データとなるハイドログラフおよびハイトグラフを作成するためのデータベースとアプリケーションソフトの開発を実施している。ハイドログラフに必要な河川流量データは国土交通省の水文水質データベースを、ハイトグラフに必要なデータは気象データベース・アメダスおよび地上観測((財)気象業務支援センター)を利用した。これらの既存データベースは上記の用途には必ずしも便利な形式でないため、DRY(Don't repeat yourself)に則り、インハウス用データベースAIST Online Hydrographとしてデータベースを再構築した。データベースはwebアプリケーションにするとともに、アプリケーションの配布のしやすさ、保守の容易さなどを考慮して、オープンソースによる仮想化データベースアプライアンスとして実装した。本レポートでは技術的な要点とソフトウェアのlook and feelについて紹介する。

[実装]

アプリケーションプラットフォーム

rails 2.0.2

ruby 1.8.5

データベース MySQL® 5.0

図化ソフトウェア gnuplot 4.0.4

gs-gpl 8.54

OS Linux (Debian GNU/Linux 4.0r3)

仮想化ソフトウェア VMware-server® 1.0.5

仮想マシンは、図1のようなホストOS型と呼ばれる形式とした。これによりユーザはフリーのVMware player®などをダウンロードすることにより、ソフトウェアの種類やバージョンなどの詳細を気にせず仮想マシンを動かすことで、webアプリケーションを利用することができる。

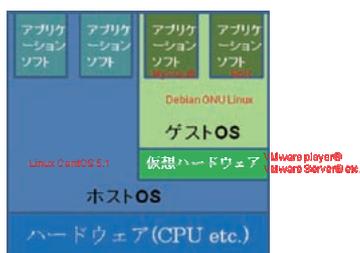


図1 ホストOS型の仮想化

仮想マシンを起動するとURLが表示されるので、そこにブラウザを進めることでwebアプリケーションが利用できる(図2)。

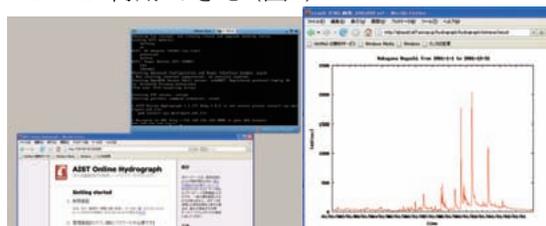


図2 AIST Online Hydrographのlook and feel

なお、昨年紹介したAIST Online FEPsおよび今後作成予定のNatural Analog Databaseも同様な実装としている。

3) 無機材料による高性能吸放湿材(ハスクレイ)の開発

これまで、天然の土壤中に存在するナノチューブケイ酸塩であるイモゴライトに着目し、その吸着性能について調べるとともに、大量合成法への検討を行ってきた(2003年11月, 2003年12月産総研特許紹介)。それ以降、イモゴライトの部分的な構造を有しかつ大量に合成できるアルミニウムケイ酸塩の合成を続け、相対湿度と水蒸気吸着量の関係が直線的で、幅広い湿度帯において吸脱着が可能なデシカント用吸着剤としてハスクレイの開発に成功した。

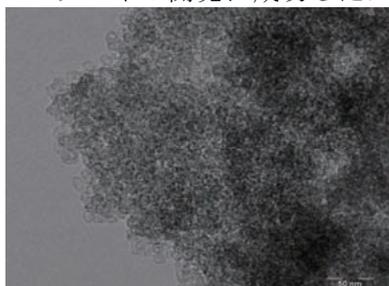


図3 ハスクレイの電子顕微鏡写真

ハスクレイは、一般的なゼオライトの合成に用いられる安価なケイ素源とアルミ源から合成が可能であり、特殊なテンプレートを要しない安価な原料からの合成が可能である。ハスクレイは、10nm程度の粒状体からなり(図3)、粉末X線回折では非晶質アルミニウムケイ酸塩(HAS: Hydroxyl Aluminum Silicate)に由来するピークと、低結晶性の層状粘土鉱物(Clay)

に起因するピークの2種類のピークが見られる(図4)。

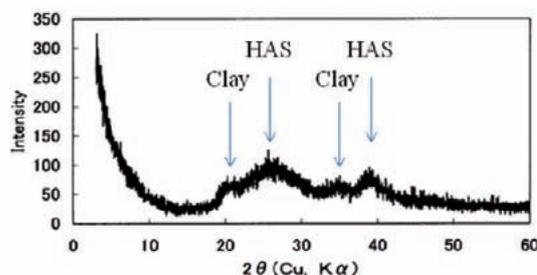


図4 ハスクレイの粉末X線回折図形

このハスクレイの水蒸気吸着等温線(図5)は、相対湿度の増加とともに水蒸気吸着量が右上がりの直線的に増加しており、またヒステリシスが小さいことから幅広い湿度帯において吸脱着が可能な吸放湿剤であることがわかる。また実際のデシカント空調用吸放湿剤としての簡易な評価として、100°Cで乾燥した重量を基準に、25°C相対湿度60%での吸着を行ったところ、40wt%以上の吸着量がありデシカント空調用素材として有望な材料であることが明らかとなった。またこの吸着した水蒸気は、80°C程度の熱源にてその大部分が放出する。

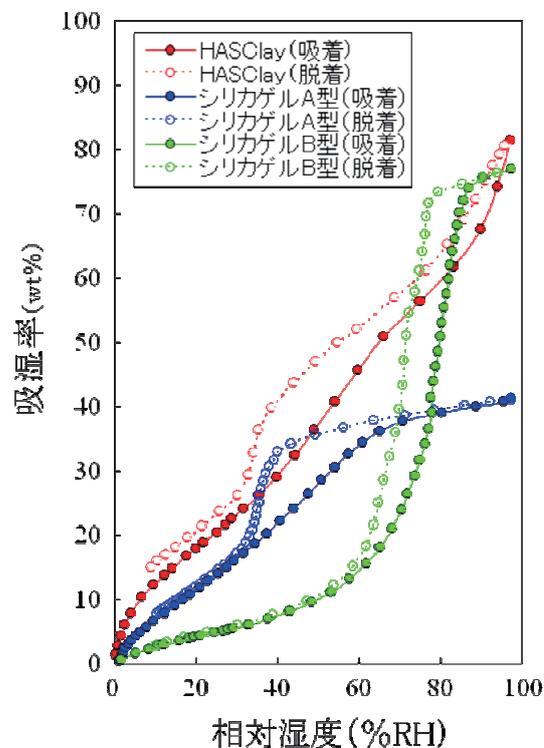


図5 ハスクレイの水蒸気吸着等温線の比較

なお、本研究を担当したグループ員鈴木正哉は一連の研究の成果により平成19年度応用鉱物科学賞を日本鉱物科学会より授与されました。

南関東ガス田の鉱床成因モデル
-前弧域での微生物起源メタンとヨウ素の濃集に関する地質学的・地球化学的制約-
Genetic Model of the Minami-Kanto Gas Field
-Geological and Geochemical Restricts for Accumulation of Microbial Methane and Iodine
in Forearc Region-

地圏化学研究グループ：金子信行

Resource Geochemistry Research Group: Nobuyuki Kaneko

e-mail address: nobu-kaneko@aist.go.jp

1. はじめに

沈み込み帯の発達する前弧域ではガスハイドレートの存在を示すBSRが広く分布し、付加体や前弧海盆から回収されたガス試料からは微生物起源のメタンの濃集が確認されている。千葉県九十九里地域を中心に分布する南関東ガス田は、このような前弧海盆に堆積した上総層群中に胚胎する国内最大の水溶性天然ガス鉱床であり、天然ガスの生産量は全国の14%(H18年度)、ヨウ素の生産量は世界全体の3割に及ぶ。

メタンハイドレートは安定領域が低温高压に限られることから、海底下では数百m以浅の若い時代の堆積物中に賦存している。上総層群の時代もおおよそ250~40万年前と若い。一方、ヨウ素129年代測定法の適用により、間隙水中に含まれるヨウ素が数千万年以上前に海水から隔離されたことが報告されている^{1),2)}。このような矛盾をはじめとして、メタンもヨウ素もその濃集機構についてはよく分かっていない。

本報告では、微生物によるメタンの生成深度や間隙水の起源などの論点を地質学的・地球化学的に無理なく説明できる南関東ガス田の鉱床成因モデルを提唱する。

2. メタンの生成深度と炭素同位体比の変化

微生物は海底下のどの程度の深度のところでメタンを作っているのでしょうか？一般に微生物が生息可能な深度は、泥岩の孔隙径と微生物の大きさの制約から、孔隙率が約0.3より大きな海底下1000mよりも浅い所と考えられている。

嫌気性微生物の鉛直分布は、硫酸還元帯直下で最も生息数が多いことが知られているが、ここでできたメタンのほとんどは硫酸還元帯へと拡散してしまい、濃集には寄与しない。

海洋底堆積物に含まれる溶存メタンの炭素同位体比は、一般に硫酸還元帯直下では-100~-80‰の小さな値を示し、そこから急激に大きくなるが、深部に向かってその変化は小さくなって一定の値に収束する(図1a)。水溶性天然ガス

やハイドレートのメタンの同位体比が-70‰以下の値を示すことから、硫酸還元帯直下で生成したメタンの寄与は小さいと考えられる。

溶存炭酸の炭素同位体比の変化もほぼメタンと相似となる(図1a)が、このような変化傾向は、有機物の分解と炭酸塩鉱物の溶解(もしくは同位体交換反応)により供給された溶存炭酸から一定の割合でメタンが生成して蓄積した場合のモデル計算の結果と類似する(図1b)。深度増加に伴う炭素同位体比の変化の減少はメタン生成反応の減速・停止を意味するものではなく、メタン生成が継続しても蓄積したメタンの炭素同位体比は変化しない。南関東ガス田主要部の同位体比が、層準や地域によらず-67~-66‰前後に集中する(図2)ことから、このモデルは支持される。

以上のことから、海底下数百mで生成したメタンが資源としてより重要であると考えられる。

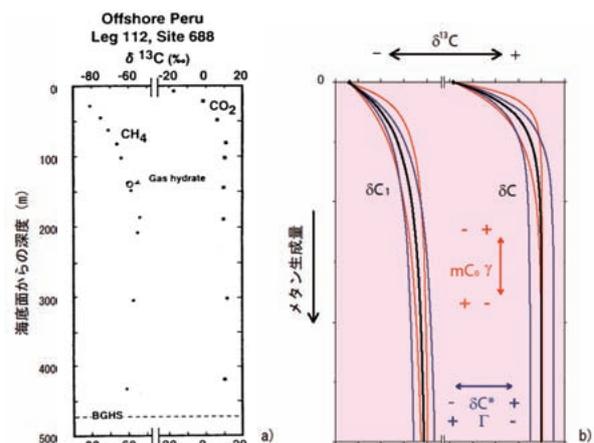


図1 a) 深海底堆積物中の深度に対するメタンとCO₂の炭素同位体比の変化³⁾, b) 半開放系モデル計算でのメタン生成量に対する炭素同位体比の変化と各要素の影響概念図

δC₁:メタン炭素同位体比, δC:溶存炭酸炭素同位体比, mC₀:初期溶存炭酸量, δC*:供給溶存炭酸炭素同位体比, γ:炭酸塩鉱物沈殿速度/メタン生成速度, Γ:溶存炭酸供給速度/メタン生成速度

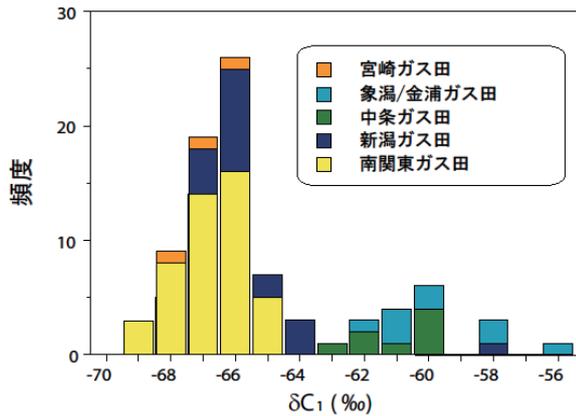


図2 国内水溶性天然ガスのメタン炭素同位体比南関東ガス田の値は-67~-66‰に集中する。

3. 間隙水の起源と特定層準への元素の濃集

前弧域において地層が厚く堆積するのはトラフ底と前弧海盆である。トラフ底で下位の遠洋堆積物の厚さが限定的ならば、タービダイト砂岩泥岩互層の堆積に伴い大量の海水が取り込まれる。堆積物が厚く貯まると圧密により孔隙率が減少するため、盆地の深化に伴い堆積物は埋没するが、間隙水の埋没は抑制される。深部での粘土鉱物などの脱水も、新たな海水の取り込みを抑制し、間隙水の埋没を抑制する。

一方、付加体においても構造的に堆積物の厚さが増すことにより圧密が進行する。トラフ底の下である程度の量のメタンが生成していれば、隆起による減圧によってメタンが過飽和になり、浮力で移動してハイドレートが形成される。BSRは前縁スラストよりも陸側の水深が浅くなる海域から確認されている。

ヨウ素は親生物元素であり、有機物に吸着した状態で埋没し、嫌氣的条件下で間隙水へと移行すると思われる。南関東ガス田の主要貯留層準は、上総層群の黄和田・大田代・梅ヶ瀬層であり、I/C1比は大田代層でピークを示し、上下層準では同比が減少する傾向を示す⁴⁾。埋没する堆積物から圧密により沈みにくくなった間隙水がメタンやヨウ素を受け取り濃縮したと考えれば、特定層準への元素の濃集を説明できる⁵⁾。

間隙水の¹²⁹I年代は、南関東ガス田の上総層群で47-52Ma¹⁾、南海トラフ海域では24-48Ma²⁾であり、堆積物の年代に比べてはるかに古い。間隙水へのヨウ素の移行が、異なる時代の地層から長期間に渡って起きた場合、¹²⁹I年代値は海水から隔離されたヨウ素の平均値として考えなければならない。現在共存する地層よりもはるかに古い時代に取り込まれた間隙水が、圧密によって地下数百mに留まり続け、埋没していく地層から長期間に渡ってヨウ素を受け取った結果と考えれば、¹²⁹I年代値が示す5千万年前よりもはるか以前からヨウ素は間隙水中へと移行していたことになる。

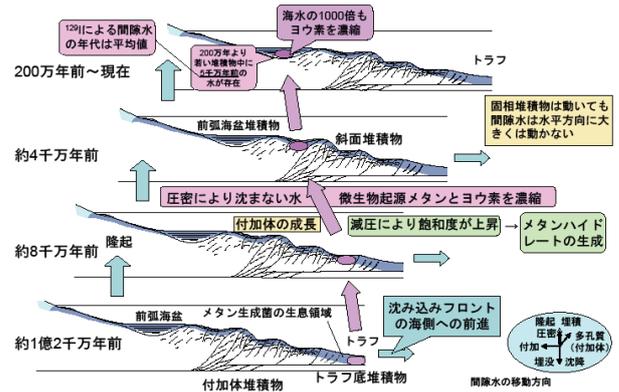


図3 前弧域でのメタンハイドレート/水溶性天然ガス鉱床成因モデル

4. 南関東ガス田の鉱床成因モデル

以上の議論を基に、以下のような鉱床成因モデルを提唱する。

1億年以上前にトラフ底でヨウ素を含む有機物がタービダイト砂岩泥岩互層とともに堆積し、埋没により圧密が進行し、数百mの深度で微生物が生成したメタンが保存され、ヨウ素が間隙水に移行した。プレートの沈み込みに伴って堆積物が付加体を形成すると、深部では圧密が進むが、表層付近に定置された堆積物では圧密の進行を免れた。付加体形成に伴う隆起により圧力が減少し、過飽和になったメタンは移動してハイドレートを形成した。斜面堆積物に覆われて付加体の圧密が進み、間隙水は斜面堆積物の孔隙を占めるようになった。隆起によりハイドレートの分解/形成によるリサイクルが進んだ。沈み込みフロントの段階的な前進に伴い、やがて前弧海盆が形成され、堆積速度の大きなタービダイト砂岩泥岩互層が再び堆積し、圧密により付加体上部および斜面堆積物中に存在した間隙水が前弧海盆堆積物の深部を占めるようになった。このすべての期間に渡って数百mの深度でメタン生成とヨウ素の移行が継続し、間隙水へと濃集した(図3)。

このモデルでは、プレートの沈み込みに関連して堆積物は水平方向に移動するが、間隙水は現位置に留まり、大規模な水平移動を考慮する必要がない。しかしながら、南関東ガス田の直下の基盤の三波川帯や秩父帯の岩石の孔隙率・浸透率が極めて小さいため、南東部の四万十帯から三浦層群および房総半島沖の最下部上総層群を経て間隙水が定置したものと推測される。

現在は、北西方向に地層が傾斜する房総地域では鉱床が保存され、天水の侵入を受けた地域では鉱床の破壊が進んでいる。

引用文献

- 1) Muramatsu et al. (2001) *Earth Planet. Sci. Lett.*, **192**, 583-.
- 2) Fehn et al. (2003) *Geology*, **31**, 521-.
- 3) 早稲田・内田(1998)地調月報, **49**, 527-.
- 4) 三田ほか(2006)海水学会誌, **60**, 91-.
- 5) 金子ほか(2002)石技誌, **67**, 97-.

一般帯水層 CO₂ 地中貯留での地化学トラッピング：東京湾岸モデルの検討

Geochemical trapping in an open aquifer CO₂ storage: a case study on Tokyo Bay model

CO₂ 地中貯留研究グループ: 奥山康子*, 徂徠正夫, 柳澤教雄
地熱資源研究グループ: 佐々木宗建

J-Power: 戸高法文

CO₂ Geological Storage Research Group: Yasuko Okuyama*, Masao Sorai, Norio Yanagisawa
Geothermal Resources Research Group: Munetake Sasaki

J-Power: Norifumi Todaka

*Phone: 029-861-3883, e-mail: okuyama-gsj@aist.go.jp

1. はじめに

大気中に急速なペースで増加する二酸化炭素 (CO₂) は、地球温暖化の主原因物質としてだけでなく、他の広汎な環境問題との関係からも、早急な削減が必要という認識が定着してきている。この中で「一般帯水層貯留」が、削減策としてわが国で CO₂ 地中貯留を可能にする、現実的方策として注目されている。

地圏資源環境研究部門を中心とした研究者グループは、H17-H19 年度にかけて、一般帯水層を対象とした CO₂ 地中貯留の研究を実施してきた (地球環境産業技術研究機構からの受託研究「高精度地中挙動予測手法の研究」、以下、高精度化研究)。この研究では、東京湾岸をモデル地域とした仮想的な地中貯留から、地下での CO₂ 流体の挙動を明らかにし、一般帯水層貯留成立の科学的立脚点とすることを目標としている。CO₂ 地中貯留に関わる地化学的相互作用の研究は、「地化学的貯留メカニズムの研究」サブテーマにて行ってきた。H19 年度は、東京湾岸の地化学的条件の下で「地化学トラッピング」が機能する可能性を、TOUGHREACT シミュレータ (Xu et al., 2004) を用いた地化学モデリングによって検討した。研究結果を簡単に紹介したい。

2. 地質モデルと諸条件および計算手順

(1) 地質モデル

CO₂ 地中貯留では超臨界状態の CO₂ を地下貯留するので、静水圧下でその状態を維持することができる深度 800m 以上の深地層が貯留の場に想定される。東京湾岸の地下には、「上総層群」として知られる後期鮮新世-中期更新世の厚い地層が分布し、これは貯留に適した特性を持つ厚い砂岩泥岩互層から構成されている。研究では、上総層群中部の梅ヶ瀬層砂岩を貯留層、その上位に重なる国本層の最下部泥岩をシール層に設定した (図1)。

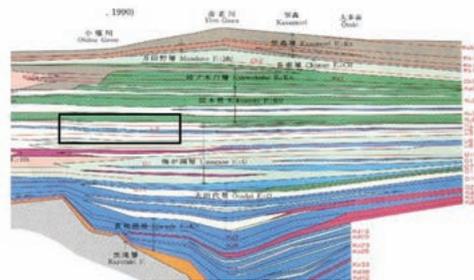


図1: 上総層群地質断面図 (鈴木ほか, 1995 より)。黒枠の範囲が、モデリング領域に対応。

モデリングでは、厚さ 300m の砂岩貯留層と上位の厚さ 100m の泥岩シール層からなる、2 次元帯水層モデル (厚み 1,000m) を設定し (図 2)、全部で 1100 のブロックに分割して計算を行った。貯留層およびシール層についての流動関係のパラメータは、シール層の透水係数を除き、流体流動シミュレーション (杉原ほか, 2008) と共通とした (以下、具体的にはポスターをご覧ください)。流動関係のパラメータは、高精度化研究の他の研究サブテーマにて得られた知識をもとに設定した。温度条件は、40°C (システム内で一定) とした。

(2) 地化学条件

地化学条件としては、i) 貯留層・シール層の化学組成, ii) 同じく鉱物構成, iii) システム内を満たす地層

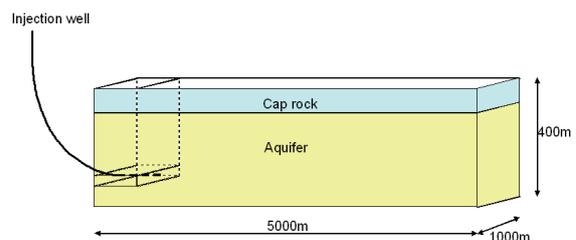


図2: モデルの内容。薄茶色の部分が貯留層, 水色部がシール層である。

水の化学組成の 3 者を与える必要がある。i) と ii) は、梅

ケ瀬層砂岩および国本層泥岩について求めた実データをを用いた。泥岩構成鉱物の量比は、五十嵐(1984)によるノルム計算にて求めている。iii)については、高精度化研究の一部である「地層水データベース」(奥山ほか, 2008)の研究で収集したデータより、東京湾岸での代表値を選び出して使用した。

地化学計算に必要な鉱物溶解速度定数は、TOUGHREACT のデフォルト値を用いた。Oligoclase の溶解速度定数は、Xu and Pruess(2006)の値を使用し、反応表面積は彼らの値の1/10に設定した。

(3) 計算手順

はじめに CO₂ を入れずにモデル地層水と貯留層を 500 年間反応させる自然状態シミュレーションを行い、水相の pH が落ち着くことを確認した。その後、図2の左端の圧入ブロックから、CO₂ を 25 万トン/年のレートで 50 年間注入した(帯水層モデルの対称性から、50 万トン/年の圧入量になる)。その後 10,000 年間の変化を計算した。

3. 計算結果

(1) 残留超臨界 CO₂ および溶存 CO₂ の分布

残留超臨界 CO₂ および溶存 CO₂ の分布を、図3に示す。圧入 CO₂ は浮力で速やかに上昇し、50 年間のうちにシール層下に達する柱状のブリュームをなす。その後はシール層下面に沿って横方向に広がるが、水平層モデルであるために広がりは著しくない。流動に伴って地層水への溶解が進み、1,000 年後には高濃度の超臨界 CO₂ はシール層直下に限られるようになる。CO₂ を溶かした地層水は密度が高くなり、10,000 年間の計算結果では貯留層下部に落ち込むことが予想されている。

(2) 貯留システム内の地化学変化と鉱物固定

CO₂ 注入に伴って貯留層では、ブリュームの通過する領域で著しく地層水の pH が低下するとともに、貯留層構成鉱物の溶解と、新鉱物の生成が進む。溶解する鉱物の代表は斜長石と緑泥石、新たに生成する鉱物の代表が方解石である。方解石以外の炭酸塩

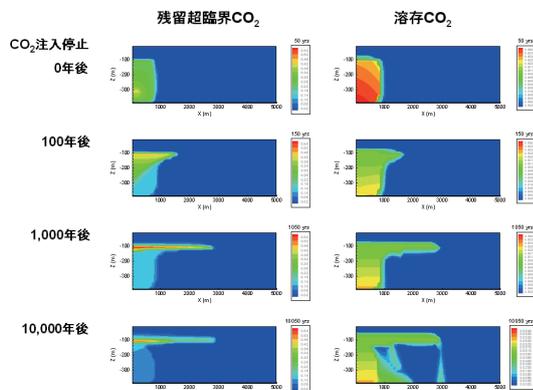


図3: 圧入停止後 10,000 年間にわたる超臨界 CO₂ (左)と溶存 CO₂(右)の分布。

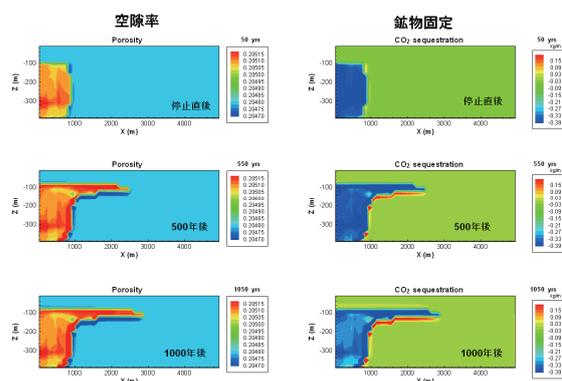


図4: 空隙率(左)と鉱物固定量(右)の1,000年間の変化

の生成も徐々に進行し、たとえばシデライト FeCO₃ は緑泥石の減少と相補的なパターンで生成が認められる。長時間経過後には、pH の低下した地層水が満たすブリューム内部に、カオリナイトを中心とする粘土鉱物が顕著に生成する。

新たに生成・沈殿する鉱物中、量的に最も重要なものは方解石である。CO₂ 鉱物固定は、量的には方解石の生成に依存しているといえることができる。方解石は CO₂ ブリュームの縁辺で、地層水の pH 変化のフロントに当たる部分に沈殿する。ブリュームの拡大中は、一度生成した方解石が再度溶解することもあるが、拡大が止まるとブリューム縁辺には方解石が他の炭酸塩鉱物とともに強力に沈殿することとなる(図4)。このように流動系での炭酸塩鉱物生成は、自己シールの的であると考えられる。

4. 今後の課題

本研究および関連する流体流動シミュレーション研究(杉原ほか, 2008)から、東京湾岸の地質・地化学条件にもとづく帯水層モデルで、実用規模の量の CO₂ を地中貯留できる可能性を示すことができた。地化学モデリングでは、岩石-水-CO₂ 相互作用により、圧入直後から貯留層内の状況が著しく変わることが分かった。鉱物固定が顕著となるのは、圧入終了後長時間(1,000 年以上)経過後である。

鉱物固定に関する鉱物の種類や CO₂ 貯留による地層水の変化などは、おおむね相平衡論的な予測に矛盾しない。しかし、各種鉱物の消長関係は速度論パラメータにかなり依存し、中には挙動が安定的に再現されない鉱物も認められた。特にドーソン石 NaAlCO₃(OH)₂ の挙動は問題と考えられる。地化学モデリングを CO₂ 地中貯留の状況を把握する有効な手法に発展させるためには、各種速度論パラメータの精査が今後の大きな課題といえる。

謝辞: 本研究を支援いただいた、(財)地球環境産業技術研究機構に感謝いたします。

海洋プレート斜め沈み込みの簡易モデル化と数値シミュレーション：手法と応用

Simplified modeling and numerical simulation of oblique subduction of oceanic plates: Method and applications

茂野 博 (地熱資源研究グループ)

Hiroshi Shigeno¹⁾*

¹⁾ Geothermal Resources Research Group.

*Corresponding Author, e-mail address: hiroshi-shigeno@aist.go.jp

1. はじめに

近年日本でも、様々な高品位の地理・地球科学情報の電子公開化とその処理システムの普及が進み、地圏資源・環境分野の多様な問題の検討が比較的容易に可能となってきた(地質調査総合センター, 2007)。さらに、これらに各種のモデル化手法、数値シミュレーション手法などを組み合わせることによって、高度なデータ処理・表示が様々な可能となりつつある。

2. 手法

1960年代以降プレートテクトニクス理論によって、世界各地の多様な地球科学的現象の生成機構が明らかにされてきた。最近茂野(2008a)は、基礎的に重要な海洋プレートスラブの大陸プレート-島弧系下への沈み込みについて、海洋プレートの相対進行方向・速度、スラブの沈み込み方向と傾斜角度を主要パラメータとした簡易的な数理モデル-数値シミュレータ(SSSS)を作成した(図1)。この手法は、プレートスラブの幾何・運動学に基づく単純なものであるが、3次元震源分布などとマッチングさせることによって、従来よりも高精度のプレートスラブの分布・運動の推定を可能とし、幅広い応用の可能性を持っている。

3. 応用

近年のプレートテクトニクス理論の進展によっても、未解決の問題が多数存在する。上記の新手法を、地熱資源分野で長年興味を持たれてきた近畿地方の非火山性地域に分布する高温温泉(和歌山県湯の峰、兵庫県有馬など)の生成機構の問題に適用した。その結果、(1)東方の伊豆小笠原弧下から斜めに沈み込む太平洋プレートのスラブが、近畿下では地下~400 kmに達して深部高温マントル物質(低密度)の上昇を生じており、(2)これが南東方の南海トラフから斜めに沈み込むフィリピン海プレートのスラブを3つにセグメント(短冊状)化して近畿下のセグメントの沈み込み角度を急傾斜化させ、(3)これによって垂直方向に開く近畿下のマン

トルウエッジ(深度25~100 km)への北方からの深部高温マントル物質の流入を生じて、(4)沈み込むフィリピン海プレートスラブの上位で熱流体~マグマが発生し上昇しているというモデルが得られた(図2・図3・図4)(茂野, 2008b)。また上記の簡易モデル化-シミュレーション手法を、近未来に大規模地震災害が危惧されるとともに、地温勾配が異常に低い関東平野下のプレートスラブの分布の問題に適用し、相模トラフ域から沈み込むフィリピン海プレートスラブ(伊豆小笠原弧の前弧域)の3セグメント化モデルを提案した(茂野, 2008c)。

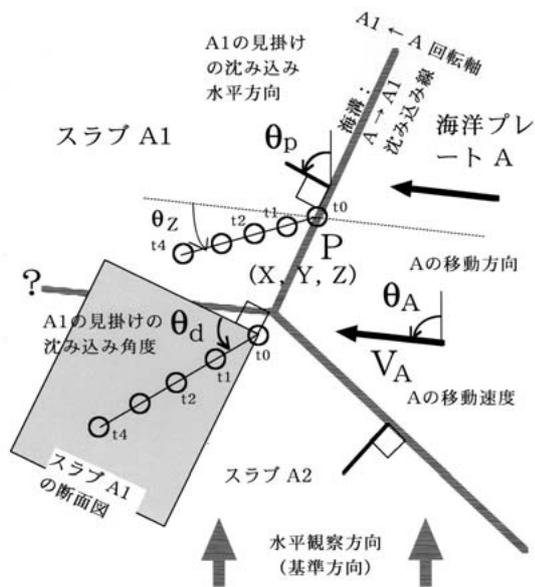
文献

地質調査総合センター(2007):九州-大分-豊肥地域の地熱データ処理集「地理情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価の研究(2001-2005年度)」のまとめと簡易統合的処理データ・プログラム集(CD-ROM)。数値地質図, GT-3。

茂野 博(2008a):海洋プレートスラブの斜め沈み込みの簡易数理モデルと数値シミュレーション-電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討(1)-。地質ニュース, no. 646, 6-21。

茂野 博(2008b):プレートテクトニクスに基づく湯の峰・有馬温泉の生成環境のモデル化-電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討(2)-。地質ニュース, no. 647, 25-38。

茂野 博(2008c):相模トラフ域-関東平野におけるフィリピン海プレートスラブの沈み込み-公開電子地球科学情報を利用した簡易モデル化-数値シミュレーションによる検討-。地質ニュース, no. 648, 20-33。



$$\begin{aligned} \Delta X' &= VA * \Delta t * \cos(\theta A - \theta p) * \cos(\theta d) \\ \Delta Y' &= VA * \Delta t * \sin(\theta A - \theta p) \\ \Delta Z' &= VA * \Delta t * \cos(\theta A - \theta p) * \sin(\theta d) \\ \Delta X &= -\Delta X' * \sin(\theta p) - \Delta Y' * \cos(\theta p) \\ \Delta Y &= \Delta X' * \cos(\theta p) - \Delta Y' * \sin(\theta p) \\ \Delta Z &= \Delta Z' \\ X_i &= X_{i-1} + \Delta X * 10^{-5} \text{ (km)} \\ Y_i &= Y_{i-1} + \Delta Y * 10^{-5} \text{ (km)} \\ Z_i &= Z_{i-1} - \Delta Z * 10^{-5} \text{ (km)} \end{aligned}$$

図1 島弧系下に沈みこむ海洋プレートスラブの幾何・運動学的な簡易数理モデル。

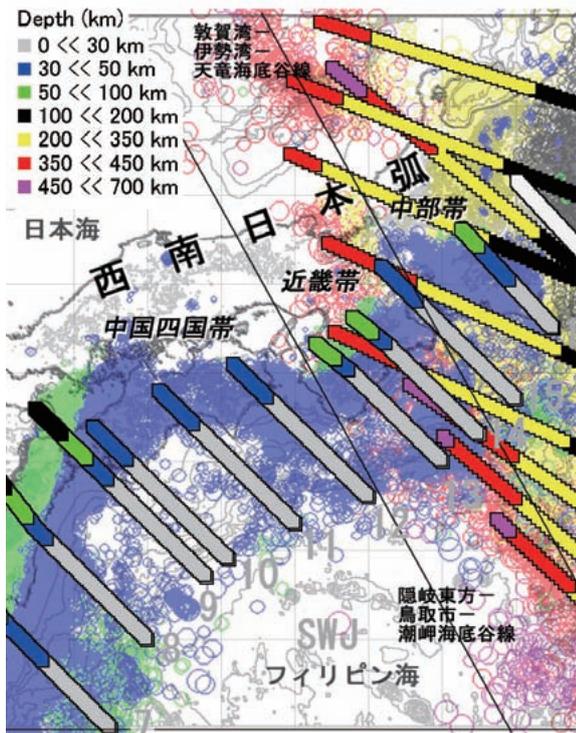


図2 西南日本弧の震源深度分布とスラブ沈み込み深度の簡易シミュレーション結果の比較。

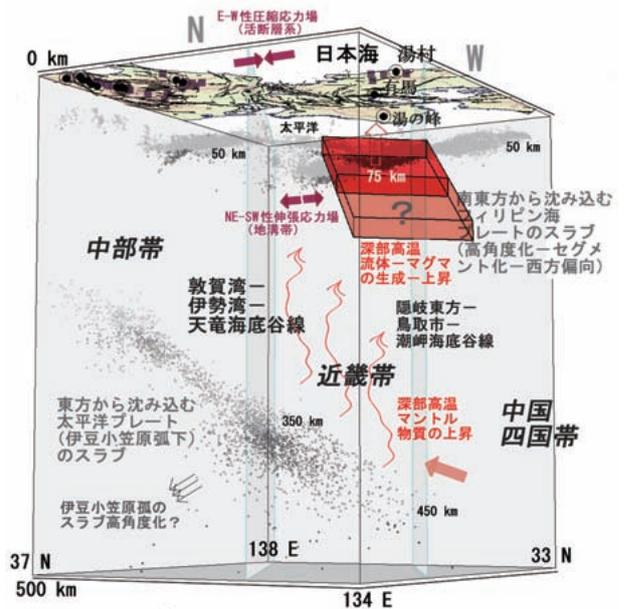


図3 近畿地方の高温温泉の生成環境・機構のモデル図 (NW方向地下からの3次元表示)。

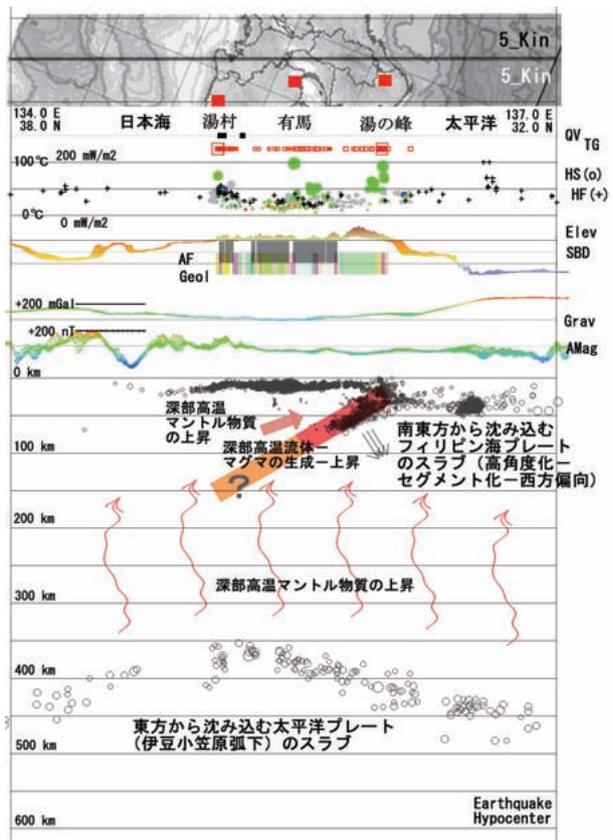


図4 近畿地方の高温温泉の生成環境・機構のモデル図 (NW-SE方向の断面図表示)。公開電子情報により温泉(HS)、標高(Elev)、水深(SBD)、震源(Earthquake Hypocenter)などの分布も示した。近畿帯では、太平洋とフィリピン海の2海洋プレートスラブの斜め沈み込みの相互作用によって、中国四国帯とは異なる特異な高温温泉の生成環境を生じている(本文参照)。

炭酸カルシウムスケール処理における高周波電気分解装置の適用 Control of calcite scaling using high frequency electrolysis

柳澤教雄¹⁾ (CO₂ 地中貯留 RG), 松村高宏²⁾ ((株) レイケン)
Norio Yanagisawai^{1)*} and Masato Fujita²⁾

¹⁾ CO₂ Geological Storage R.G., ²⁾ Reiken Co., LTD.

*Corresponding Author, e-mail address: n-yanagisawa@aist.go.jp

1. はじめに

工場などで使用されているクーリングタワーなどでは水質、温度条件により配管や熱交換器などの水の循環系に炭酸カルシウムスケール（以下スケールと表記）が付着することが多い。そのため、循環効率や熱交換効率の低下など様々な問題が生じている。水の循環系でのスケール対応策として、機械的な除去作業、薬品注入があるが、近年、電気分解を用いた手法も実用化されてきている。電気分解を用いる方法の1つとして(株)レイケンでは高周波電気分解水処理装置ダイナクリーン D・150T（以下D150Tと表記）を開発している。この装置は、図1に示すように制御部と電極部（3本の電極と電極カバー）からなり、電極の陽極と陰極を周期的に変化させ、電極自体にスケールが付着することを防ぐとともに、相対的にマイナスの電位を持つ電極カバーにスケールを捕集するものである¹⁾。また、副次的な効果としてすでに配管などに付着したスケールを剥離させる効果も確認されている²⁾。

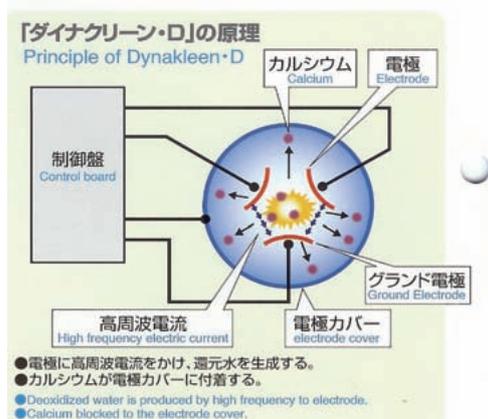


図1：ダイナクリーン・D150Tの原理図

本研究では D150T による炭酸カルシウムスケール処理に関して、電極カバーでの捕集およびすでに付着したスケールを剥離させるメカニズムを示した。

2. スケール捕集メカニズムに関して 2.1. 電極周辺の水質分布

装置の電極付近、電極カバー付近、そして装置から少し離れた水面付近の3カ所から採取した試料の pH を測定したところ、図2に示すように、電極カバー付近が一番高くなることが示された。また、カルシウム (Ca) 濃度を比較したところ、同様に電極カバー付近が、5~10% 高く、逆に電極付近は水面などより低い値を示した。これより、電極と Ca が反発しあい、電極カバーに Ca が引き寄せられスケールとして凝集していることが示された。

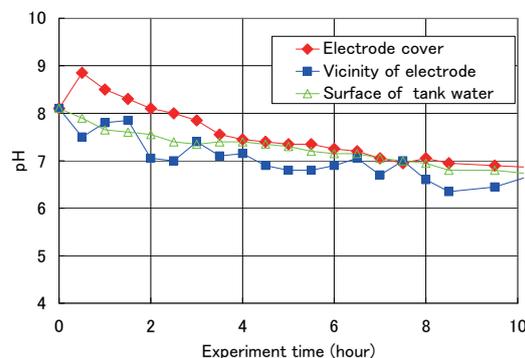


図2：実験中の pH の場所による変化

2.2. 炭酸カルシウム粒子のゼータ電位測定

図3に示すようにダイナクリーン・D を稼働させない場合、炭酸カルシウム粒子の表面電位の主な分布は-9~-21mv となり、マイナスに荷電した状態で分布していた。これに対しダイナクリーン・D を稼働し2日後では、大部分が-3~+3mv と0に近くになり炭酸カルシウム粒子が凝集しやすい領域に分布するように変化した。さらに、炭酸カルシウム粒子のゼータ電位は試験溶液の pH が7前後になると急激に電位がプラス方向にシフトすることが明らかになった。これより、ダイナクリーン・D を稼働させたときの試験溶液の pH 変化により炭酸カルシウム粒子界面の表面電位が変化し、スケールとして凝集しやすい状況をつくりだしていることが示された。

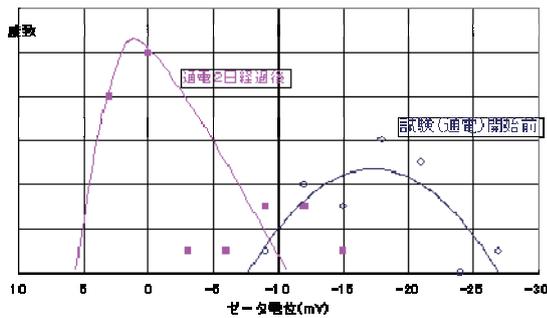


図 3 : 炭酸カルシウム粒子のゼータ電位

2.3. 自然沈積速度との比較

炭酸カルシウムスケールの捕集速度は、Ca100mg/l, pH7 のとき約 1mg/m²/sec であることが求められた。この値を流動システムでの自然沈積(スケールの自然捕集)と比較すると、室温, pH8 での自然沈積速度(Ca100mg/l のとき)は 0.01~0.03 mg/m²/sec であるので、自然沈積に比べ、ダイナクリーン・D 使用時の強制的な捕集の方が 100 倍程度の速さであることが示された。

3. スケール剥離メカニズムに関して

電気分解装置を用いることにより、すでに配管に付着していた炭酸カルシウムスケールを溶解・剥離させ除去する効果を検証するために、レイケンの工場内に、図 4 概念図に示すように、工業用水の供給部分にある冷却塔に D150T を設置し、熱交換器による加熱・冷却を行える配管システムを作成した。

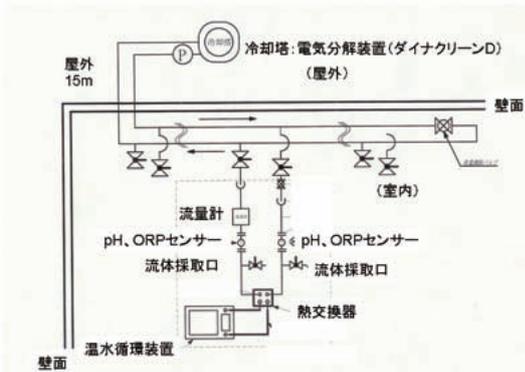


図 4 : 流動システム概念図

3.1. 剥離試験実験条件

まず屋外冷却塔部分は、電気分解装置として D150T (装置電流 : 0.8~1.0A, 電圧 16V) を用い、使用冷却塔は 10RT クーリングタワー (型式 MT-10LI) である。そして水温は 13~15℃ である。配管部分は、冷却塔から熱交換器までの距離が 20 m (うち屋外部 15 m) で内径が 25 mm である。

熱交換器はプレート式熱交換器 (UX-005A-J-12, 伝熱面積 0.03m²) を使用し、温水循環

装置は最高温度 90℃ に設定した(実際は 20℃ 程度で、そのため、熱交換器出入口の温度差は 1~2℃ となった)。この熱交換器のプレートに炭酸カルシウムスケールをあらかじめ付着させた。流速は 10L/min で試験期間は 1 週間とした。

pH は、熱交換器入口・出口にて連続測定し、Ca, および HCO₃ の分析用流体は、熱交換器入口・出口に設置したサンプリング口より随時採取した。そして、試験終了後、熱効果器を解体し、重量変化を測定し、スケールの付着(溶解)量を求めた。

3.2. 試験結果

熱交換器のスケール量の変化を表 1 に示す。電気分解装置稼働時には 1 週間で 121 mg 減少し、剥離していることが確認されたが、稼働しない時はさらに 20 mg 付着した。この際、稼働時の平均的なスケール溶解(剥離)速度 : 0.0067 mg/m²/s であり、未稼働時のスケール付着速度 : 0.0011 mg/m²/s であった。この傾向は水槽実験と同様であるが、水槽実験では水溶液の濃度が高いこともあり、剥離速度は 0.07mg/m²/s を示していた。

表 1 付着スケールの重量変化

CaCO ₃ adhesion on heat exchanger plate				
		weight change(mg)	precipitation rate (mg/m ² /s)	dissolution rate (mg/m ² /s)
FLOW	ON	-121		0.0067
	OFF	20	0.0011	

さらに、電気分解装置稼働時には Ca, HCO₃ 濃度は減少していたが、稼働しないときは逆にこれらの濃度は増加する傾向を示した。さらに図 5 に示すように、pH についても電気分解時は低下、無しの時は増加する傾向が見られた。この傾向は、工場試験の前に予備的に行った水槽での実験と同様の傾向であった。このことより、D150T を用いることで、配管に既に付着していた炭酸カルシウムスケールを溶解・剥離させる効果があることが確認できた。

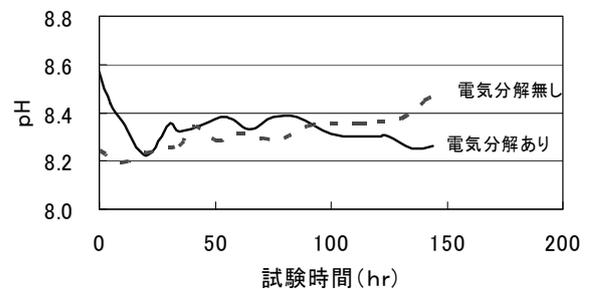


図 5 : 流動実験時の pH 変化

- 1) N.Yanagisawa, T.Matsumura (2006) JMPS, 101, 319-323
- 2) 柳澤・松村(2006) 地熱学会平成 18 年度学術講演会要旨集, B06

インド東部ベルディ燐灰石鉱床の Ta-Nb 鉱化作用

Ta-Nb mineralization of apatite ore from Beldih mine, east India

守山 武^{1)*}・石原舜三²⁾・Panigrahi, M.K.³⁾・渡辺 寧¹⁾

¹⁾ 地圏鉱物, ²⁾ 産総研特別顧問, ³⁾ インド工科大学

Takeru Moriyama^{1)*}, Shunso Ishihara²⁾, Mruganka K. Panigrahi³⁾ and Yasushi Watanabe¹⁾

¹⁾ Mineral Resources R.G., ²⁾ Special Councillor, AIST,

³⁾ Indian Institute of Technology Kharagpur

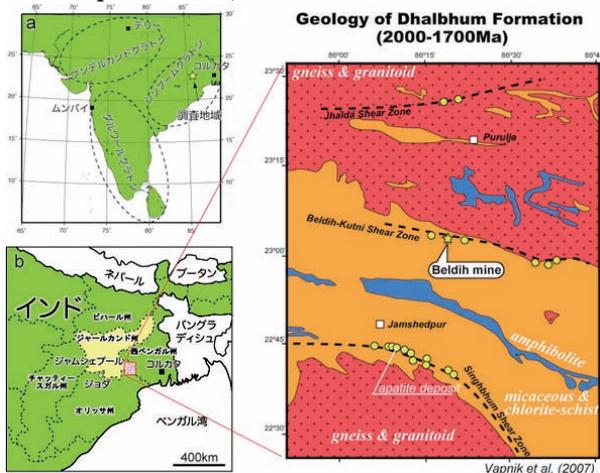
*Corresponding Author, e-mail address: t-moriyama@aist.go.jp

1. はじめに

インド東部にはシンブーム変動帯が分布しており、剪断帯に沿って後期始生代から原生代に形成された層状硫化鉄銅鉱床や燐灰石鉱床、ウラン鉱床などが胚胎している（石原・守山, 2008）。今回シンブーム変動帯に胚胎する燐灰石鉱床の1つ、Beldih 鉱床を調査する機会を得たので報告する。

2. シンブーム変動帯

シンブーム変動帯は堆積岩起源の変成岩類や塩基性変成岩類、花崗岩類、花崗岩質片麻岩などから構成される Dhalbhum 層が分布する（第1図）。Dhalbhum 層には南から Shingbhum Shear Zone, Beldih-Kutni Shear Zone および Jhalda Shear Zone の3つの剪断帯があり、全ての剪断帯において脈状の燐灰石鉱床が胚胎する（Vapnik et al., 2007）。



第1図. インド東部シンブーム変動帯の地質図 (Vapnik et al., 2007)。

3. Beldih 燐灰石鉱床

Beldih 燐灰石鉱床はジャムシェプールの北約 35km に位置し、シンブーム変動帯の北縁に沿った Beldih-Kutni Shear Zone に胚胎する。周囲の地質帯は東西方向の走向をもつ細粒緑泥

石片岩、雲母片岩、石英片岩、角閃岩を主体とする。数m厚の燐灰石鉱体が東西約 150m に渡って母岩の変成岩類の面構造と調和的に挟在する。鉱体は脈状もしくはレンズ状で南に約 75 度傾斜する。鉱石品位は 10-35% P₂O₅ で年間 16,000 トン生産している（第2図, 守山・石原, 2008）。粉碎後、肥料として近隣に販売される。



第2図. Beldih 鉱床の採掘風景。人力で採掘し、鉱石を積んだカゴを頭に寄せ運搬する。

3.1. 鉱石組織

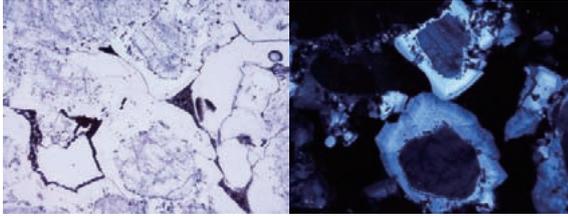
燐灰石鉱石はほぼ燐灰石から構成され、少量の磁鉄鉱、黄鉄鉱、コロンブ石 (Ta-Nb 鉱物)、モナザイトなどを含有する。

燐灰石は包有物を多く含むコアと、包有物を含まずコロフォルム様組織を持つリムからなり、両者の境界部は明瞭である（第3図）。鉱石中にはしばしば燐灰石の細脈が認められる。

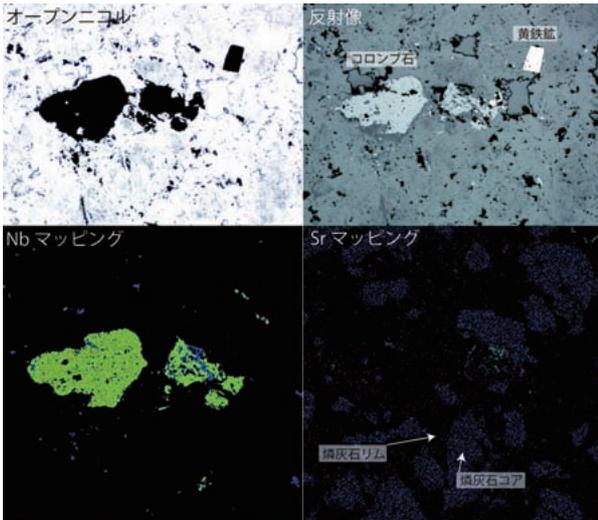
EPMA による鉱物組成分析の結果、コアは Sr および Ce に富み (~1 wt.% SrO, ~0.3 wt.% Ce₂O₃), F (~4 wt.%) に乏しい組成を持つ。一方リム組成は F に富み (~5 wt.%), Sr, Ce に乏しい (<0.1 wt.% SrO, <0.1 wt.% Ce₂O₃)。燐灰石細脈の組織および化学組成はリム組成のものと一致する。

鉄鉱物やコロンブ石、モナザイトは燐灰石のコア-リム境界部もしくはマトリックスに存在

する (第 4 図).



第 3 図. Beldih 鈇床産燐灰石鈇石の顕微鏡写真. (左) オープンニコール. (右) クロスニコール. 中心部に包有物の多い燐灰石コアがあり, リムは包有物を含まない. 写真の幅は約 1.2mm.

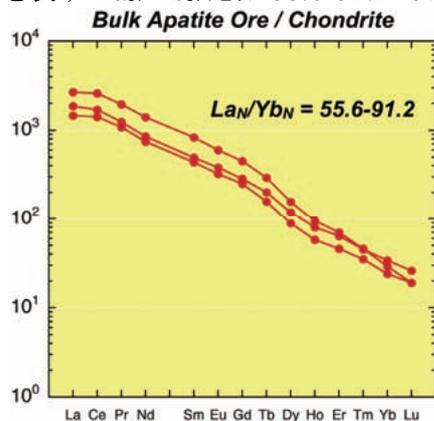


第 4 図. 燐灰石鈇石中の Ta-Nb 鈇物. Ta-Nb 鈇物は Sr に乏しい燐灰石コアまたはマトリックスに伴って産する.

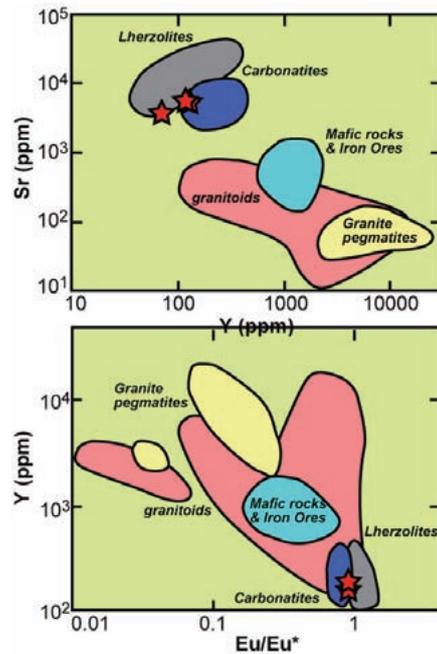
3.2. 全岩組成

鈇石の全岩組成は 54 wt.% CaO および 42 wt.% P₂O₅ で, ほとんどが燐灰石で占められる岩石監察結果と矛盾しない. Sr を 5000 ppm 程度含有し, 総希土類含有量は 2000-3000 ppm である. Nb は 1000 ppm 以上の高い含有量を持つ.

コンドライトで規格化した希土類パターンはスムーズな左上がりのパターンを示す (第 5 図). Ce や Eu のスパイクは認められない. パターンの傾きを表す La_N/Yb_N 比は 55.6-91.2 である.



第 5 図. 燐灰石鈇石のコンドライト規格化全岩希土類パターン.



第 6 図. 燐灰石組成による岩石分類図 (Belousova et al., 2002). 星印が Beldih 燐灰石鈇石の組成を示し, カーボナタイト起源であることを示唆する.

4. 議論

Beldih 鈇床産燐灰石鈇石の岩石組織とコア-リム組成の違いから鈇体は少なくとも 2 つのステージによって形成されたことを示唆する. 燐灰石コアは高い Sr, 希土類含有量によって特徴づけられる. 高い Sr 含有量と低い Y 含有量, スムースな希土類パターンはカーボナタイトの化学的特徴と一致する (第 6 図). このことから Beldih 燐灰石鈇床は初生的にはカーボナタイトに関連して形成されたと考えられる.

次のステージでは F に富む燐灰石や鉄鈇物, Ta-Nb 鈇物の晶出によって特徴づけられる鈇化作用が生じた. このステージではおそらく流体が形成プロセスに重要な役割を果たしたと考えられる.

-引用文献-

- Belousova et al. (2002) Apatite as an indicator for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type. *Journal of Geochemical Exploration*, 76, 45-69.
- Dasgupta, S. and Bhattacharya, D.K. (1992) Apatite mineralization along Singbhum and Purulia-Bankura Shear Zones: Their nature and physico-chemical characteristics. *Indian Minerals*, 46, 123-132.
- 石原・守山 (2008) 東インドクラトン, シンブーム地域の鈇化特性. *資源地質*, 58, 19-26.
- 守山・石原 (2008) インド東部, 西ベンガル州のアパタイト鈇床. *地質ニュース*, 647, 5-6.
- Vapnik, Y. et al. (2007) Fluid inclusion and mineralogical study of vein-type apatite ores in shear zones from the Shingbhum metallogenic province, West Bengal, India. *Ore Geology Reviews*, 32, 412-430.

リチウム資源－ウユニ塩湖－ Lithium resources - Salar de Uyuni -

村上浩康 (鉱物資源研究グループ)

Hiroyasu Murakami

Mineral Resources Reserch Group.

e-mail: h-murakami@aist.go.jp

1. はじめに

リチウムは二次電池製造分野における需要が旺盛で、現在最も“活気のある”元素のひとつである。2008年における世界のリチウム総生産量(2万5千トン：金属リチウム換算、以下同じ)は1990年(5.7千トン)の約4倍に増加した(図1；USBM, 1991；USGS, 2010)。リチウム二次電池の需要増とも相まって、

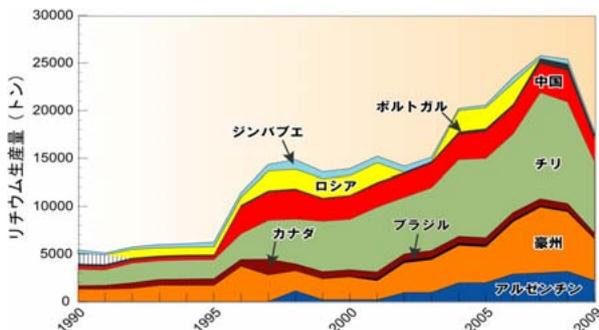


図1 リチウム生産量の推移

2000年以降の年間リチウム消費量は年6%の成長を示している(USBM, 2008)。この需要拡大に見合う「資源の安定供給」という天下御免の旗印のもと、新たな商機を窺う企業に加え、自国への利益誘導を目指す国家間の政策も錯綜しながら、リチウム資源獲得競争が南米(ボリビア、アルゼンチン)、北米(米国)、欧州(セルビア・フィンランド)で繰り広げられている。このうちウユニ塩湖を主体とするボリビアの未開発資源量は900万トンと見積もられている(USGS, 2010)。この小文では、リチウム資源の概要と、現在も活発に探査が行われているボリビアのウユニ塩湖の地質学的背景やその成因について紹介する。

2. リチウム資源

現在までに確認されている世界全体のリチウム埋蔵量は990万トン、未採掘分も含めると2300万トンと膨大で、将来のリチウム需要が年3~5%増加しても、200年以上の埋蔵量がある。

リチウム資源の供給源は、大陸内塩湖・かん水や海水といった水圏資源と、リチウムに富む鉱物を採掘する地圏資源とに2大別される(図2)。

地圏リチウム鉱床では、リチア輝石(Spodumene: $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$)などが採掘対象となる。主な生産国は中国、コンゴ、豪州、カナダ、ジンバブエなどで、操業中の鉱山全体で111万トンの埋蔵量がある。この他に豪州、カナダ、フィンランド、セルビアで開発中の案件がある。

3. リチウム鉱床の特徴

リチウム資源はリチウム単体で生産される鉱床が少ないという点にもある。地圏リチウム鉱床はベリリウム、タリウムなどの副産物を伴うことが多く、水圏リチウム鉱床はカリウム肥料やソーダ灰生産の副産物という位置づけである。水圏鉱床ではリチウム濃度を0.2%程度から6%にまで濃縮する過程で12~15ヶ月の長期間の蒸発工程を要する。かん水中のマグネシウム濃度が高い場合は、含水マグネシウム塩と含水リチウム塩とを分離する工程を繰り返し行い、マグネシウムを除去する必要がある。

4. ウユニ塩湖

ウユニ塩湖は面積3800平方マイル(約1万 km^2)以上、ペルー南部からボリビアを経てチリに跨るアンデス山脈の高原地帯(アルティプラノ)の標高3,653mに位置している。アルティプラノの年間平均降水量は200mm~800mmで、ウユニ塩湖の表面は、雨期(1月~3月)以外、塩湖南東部を除いてほぼ干上がっており、白色の“塩”で覆われている。干上がった湖面直下10-20cmでは、かん水が岩塩層中の空隙を満たすように分布している。このかん水中に含まれる金属資源量はリチウムで900万トンの他、カリウム1億9千万トン、ボロン800万トン、2



図2 リチウム鉱床の分布



写真1 岩塩層

億1千万トンのマグネシウムが推計されている (Risacher and Fritz, 1991). ウユニ塩湖における表層岩塩層の最大層厚は11mで、湖の北東部で最も厚くなっている. この岩塩層は10cm程度の堅硬な岩塩単層の繰り返しによって構成される (写真1). 岩塩層は90wt%以上のhalite (NaCl) から成り、少量から微量の石膏や碎屑物を含む. 表層岩塩層の空隙率は30-40%で、岩塩層表面から10cm以深の空隙はかん水によって満たされている. 岩塩層下位には不透水性の湖沼性堆積物が認められ、岩塩層と幾重にも重なる互層を成す(後述). 堆積物層は主に炭酸塩鉱物、石膏、火山性碎屑物で構成され、粘土鉱物(スメクタイト及びバイライト)は希である. 空隙率は30-50%と岩塩層(15-30%)に比べて高い.

5. ウユニ塩湖のリチウム資源評価

塩湖・かん水における経済的に採掘可能なリチウム資源量は岩塩層の層厚とその空隙率に大きく影響を受ける (Warren, 2010). アタカマ塩湖では湖面から35mまで連続する岩塩層に空隙が認められ、25mまでの平均空隙率は18%である. この空隙を満たすかん水が1500ppm以上のリチウムを含んでいる. 一方、ウユニ塩湖では空隙率の高い岩塩層は湖面下11mに留まっており、下位には厚い湖沼性堆積物が薄い岩塩層と互層をなして発達する. その空隙を満たすかん水中のリチウム濃度は、最上位の岩塩層で800ppmを示すが、湖面下20mのかん水ではリチウム濃度が500ppm程度となり、40mでは300ppm程度まで低下する (図4; Risacher and Fritz, 2000). このように、ウユニ塩湖は、商業的な生産を行っているその他の塩湖に比べて、1) 空隙率の高い岩塩層の層厚が薄く浅部での連続性が悪い、2) リチウム濃度が低くMg濃度が高い、という点で経済性に不利な側面を有している.

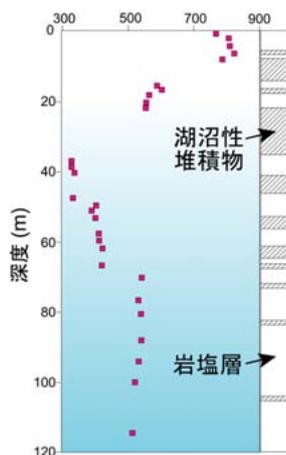


図4 かん水のリチウム濃度(mg/l)垂直変化

6. まとめ

ウユニ塩湖のかん水に含まれるリチウムやボロン、カリウム、マグネシウムといった微量成分は、塩湖周辺の火山岩類を起源とし、温泉水による熱水変質を受けて溶出されたものである. そのような温泉水を含む河川水などにより塩湖に運搬・

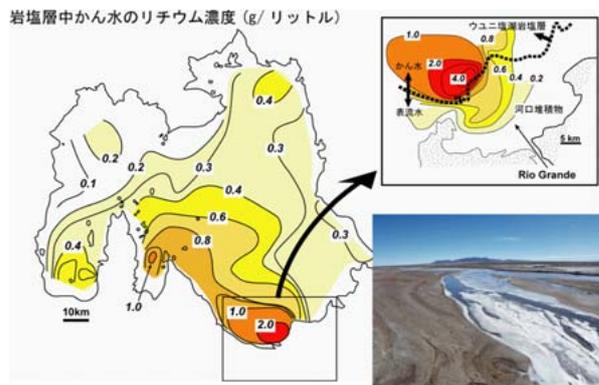


図5 かん水のリチウム濃度(mg/l)

供給されたものと考えられている (図5). この元素濃縮には、現世における乾燥気候下での蒸発・濃縮が重要な役割を果たしている.

ウユニ塩湖を含むボリビア・アルティプラーノでは、気候変動に伴う水準変動により、数十万年前から引き続く塩湖の膨縮が起こっていたことが判明している. ウユニ塩湖では、このような変動史が少なくとも20万年以上前から刻まれており、この広域的・長期的な湖水変動はウユニ塩湖の化学組成に影響を与えている. つまり、大規模な外部からの湖水流入により、1) 既存の岩塩層の溶解・再沈殿を繰り返しながらアルティプラーノ最下底のウユニ湖で塩濃度が上昇する一方、2) 周辺河川や温泉水から流入するリチウム、カリウム、マグネシウム濃度などは希釈されながらも乾燥気候下で濃縮される、という複雑なサイクルを繰り返して現在に至る、と考えられる.

リチウムを生産する既存の塩湖・かん水鉱床は乾燥気候地帯に位置する. ここでは蒸発量が多く、リチウム濃度を高める上で最適な立地条件を備えている. 特に、ウユニ塩湖のように広域的盆地地形の最下底に位置する塩湖があれば、そのような場所は探査ターゲットとなり得るのかもしれない. 塩湖・かん水におけるリチウム鉱床の資源的評価にあたっては、1) かん水や岩塩層中のリチウム濃度の不均質性、2) 空隙率の高い岩塩層の連続性、3) 精錬時の不純物となるマグネシウムなどの取り扱いが課題となるであろう.

参考文献

Risacher, F. and Fritz, B. (1991) Chemical Geol. 90, 211-231.
 Risacher, F. and Fritz, B. (2000) Chemical Geol. 167, 373-392.
 USBM (1991) Minerals yearbook 1991, 1754p.
 USGS (2010) Mineral commodity summaries, 196p.
 USBM (2008) Minerals yearbook 2008, Lithium, 10p.
 Warren, J. K. (2010) EarthScience Reviews, 98, 217-268

浅熱水性金鉱床形成に繋がる流体の発見とその進化

Detection of fluids leading and evolving to epithermal gold deposits

村上浩康¹⁾ (鉱物資源研究グループ)

高倉伸一²⁾ (地圏環境システム研究グループ)

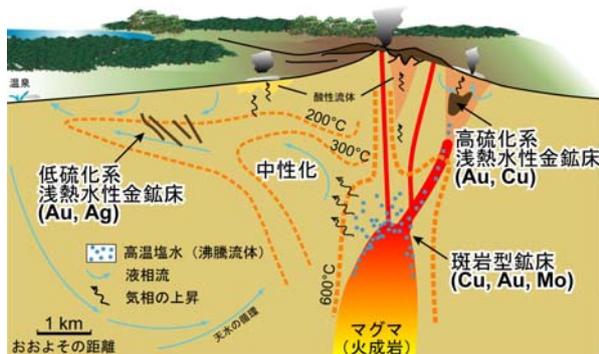
Hiroyasu Murakami^{1)*} and Shinichi Takakura²⁾

¹⁾ Mineral Resource Reserch Group., ²⁾ Geo-Environmental Systems Reserch Group.

*Corresponding Author, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

1. はじめに

地表浅部 (1km 内外) に発達する浅熱水性金鉱床は重要な金資源であり、現在も世界中で探鉱が行われている。その形成にマグマ水と天水が関与することが指摘され (例えば Rye, 1993), 鉱床はマグマ (斑岩銅鉱床を伴う火成岩類) の貫入に伴う熱水系中に生じているとされる (Hedenquist and Lowenstern, 1994; 図 1)。



Hedenquist and Lowenstern (1994, Nature)

図 1. マグマ熱水系に発達する鉱床

深部の斑岩環境では沸騰・分離した気相中に金や銅が硫化物錯体として分配されることが明らかとなり、この”金に富む気相”によって浅熱水性金鉱床が形成され得ることも示されている (Heinrich et al., 2004)。Heinrich (2005) は、深部、高温・高圧の斑岩銅鉱床形成環境から浅部、低温・低圧の高硫化型浅熱水性金鉱床との間の物質流通系のモデル研究を行い、金を最も効率よく斑岩環境から浅熱水環境へ移送するためには、流体の硫黄濃度が高く、母岩の鉱物組み合わせ (カリ長石+白雲母) により中性付近にバッファーされる必要性を指摘している。実際、Pudack et al. (2009) は斑岩型鉱床のフィリック変質帯 (セリサイト変質) 中の石英脈中の流体包有物で高い金濃度を報告している。しかしながら、天然の浅熱水環境において深部へ繋がる熱水経路は実証されておらず、低硫化型金鉱床と深部マグマ系との関係も不明な点が多い。

本研究の対象とした愛知県の振草鉱床は安山

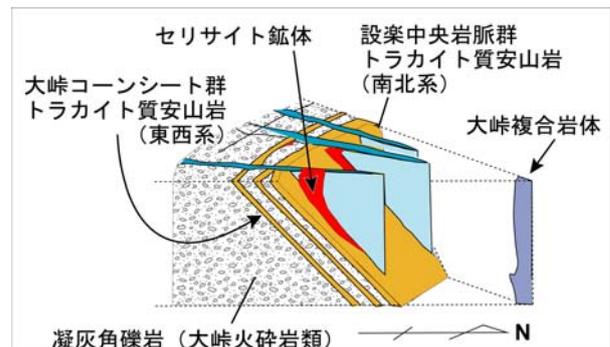


図 2. 振草鉱床の模式図

岩質ダイク中のセリサイトを伴う熱水変質帯である (図 2)。振草鉱床のような変質帯は、マグマ熱水系のどこに位置づけられるのであろうか。本論では、振草鉱床の形成に関与した熱水の性質を明らかにすると共に、熱水進化プロセスを検討した結果を報告する。

2. 結果

振草鉱床は愛知県北設楽郡東栄町に位置する (図 3)。セリサイト (イライト-2M) を産し、硫砒鉄鉱や黄鉄鉱を普遍的に伴う。イライトの Ar-Ar 法によるプラトー年代は 14.5 ± 0.2 Ma を示し、大崎火山岩類に貫入する設楽中央岩脈群の活動時期にほぼ相当する。

イライト鉱体中の石英自形結晶中には気相並びに液相包有物が認められ、それらの均質化温度及び NaCl 換算の塩濃度の平均値は、液相で 314°C , 2.8wt%, 気相で $>328^{\circ}\text{C}$, 4.3wt% であった。いくつかの fluid inclusion assemblage が同

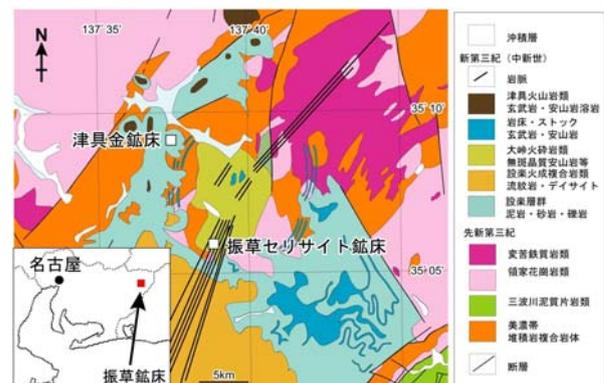


図 3. 振草鉱床の位置及び周辺地質

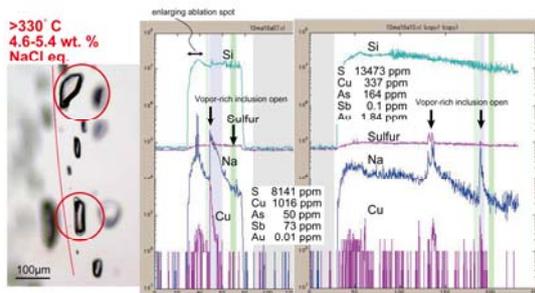


図4. 鉱床下部の気相包有物の化学組成

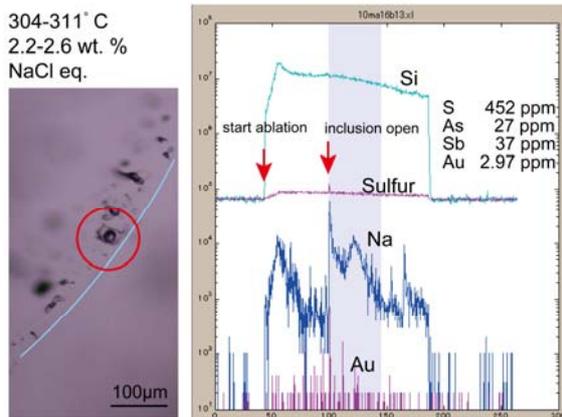


図5. 鉱床上部の液相の化学組成

じような温度及び塩濃度を示す（気液共存領域で形成された）ことから、鉱床の形成圧力は0.12kb程度と推定され、静水圧条件では形成深度は約1.2kmとなる。鉱床下部に産する高温・高塩濃度の気相包有物で金、硫黄、銅などに富み、それぞれ平均でAu(1.42±2.48 μg/g, 1σ), S (10,565±7,500 μg/g, 1σ), Cu (488±477 μg/g, 1σ), As(67±71 μg/g, 1σ), Sb (32±43 μg/g, 1σ)を示す(図4)。このような包有物は最大で5wt%程度のCO₂を含む。一方、鉱床上部の気相及び液相包有物や鉱床下部の液相包有物では、銅、硫黄、砒素濃度は減少するものの、Auの濃度変化は小さく(図5)、逆にSbは増加する傾向がある。

鉱化熱水の温度を330°C前後と仮定した場合、イライト及び方解石の水-鉱物間の酸素同位体分別係数から推定される熱水の酸素同位体比として+5.5‰~+10.5‰が、同様にイライトの水素同位体から、熱水の水素同位体比の値として-10‰から-15‰が得られた。これらの水素・酸素同位体比は、薩摩硫黄島などの高温のマグマ性火山蒸気と同じ領域にプロットされる(図6)。黄鉄鉱及び硫砒鉄鉱の硫黄同位体(δ³⁴SCDT)は-1.5‰~

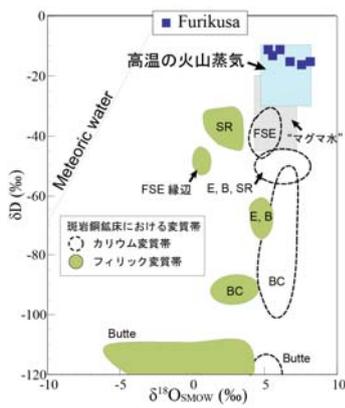


図6. 熱水の同位体比

-0.33‰の範囲であり、鉱床は還元的なマグマ活動に関連すると推察される。

3. まとめ

振草セリサイト鉱床(愛知県)を形成したマグマ起源流体(気相・液相包有物)の化学組成をLA-ICP-MSにより分析し、金、硫黄、銅に富むことを発見した。この流体は、潜在したマグマに関連する沸騰流体の気相側が地表浅部へと上昇する過程で捕獲されたものと考えられる(図7)。流体中の金濃度レンジは斑岩型鉱床の気相、浅熱水性金鉱床の流体(2-3ppmAu: Murakami et al, 2009)と同様の組成範囲を示す。

本研究で得られたデータから、振草セリサイト鉱床は、1) 設楽中央岩脈群形成に伴うマグマ水を起源とし、2) CO₂を含む高温・高塩濃度で金、銅、硫黄に富む流体によって形成されたと考えられる。この流体は、斑岩型鉱床から派生した沸騰流体のうち、地表浅部へと運搬される気相と化学的親近性を持つ。従って、イライト-黄鉄鉱-硫砒鉄鉱-石英で特徴付けられる振草鉱床の変質帯は、斑岩型鉱床の熱水系最末期: 石英-セリサイト-黄鉄鉱(QSP)脈に近似できるかもしれない。

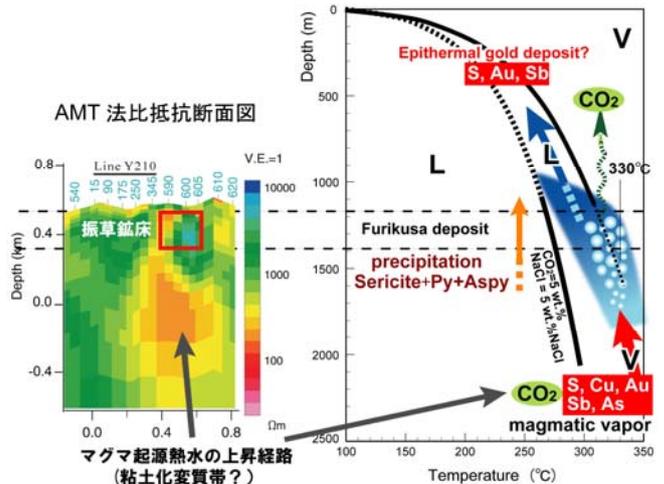


図7. 流体の上昇に伴う物理・化学的進化のモデル。AMT法による比抵抗構造から深部に熱水の流通経路となっていた粘土化変質帯が想定される。

参考文献

Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J. B. (1994) Nature, 370, 519-527
 Heinrich, C. A. (2005) Mineral. Deposita, 39, 864-889.
 Heinrich, C. A., Driesner, T., Stefansson, A., Seward, T. M. (2004) Geology, 32, 761-764.
 Heinrich, C. A., Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T., Frischknecht, R. (1999) Geology, 27, 755-758.
 Murakami, H., Heinrich, C. A., Marcel, G. (2009) Geochim Cosmochim Acta, 73, Supplement 1.
 Pudack, C., Halter, W. E., Heinrich, C. A. and Pettke, T. (2009) Econ. Geol., 104, 449-477.

灰重石と燐灰石の希土類資源ポテンシャル REE resources potential in scheelite and apatite

村上浩康¹⁾ (鉱物資源研究グループ)
石原舜三²⁾ (産総研・特別顧問)

Hiroyasu Murakami^{1)*} and Shunso Ishihara²⁾

¹⁾ Mineral Resources Reserch Group., ²⁾ The special councilor, AIST

*Corresponding Author, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

1. はじめに

灰重石並びに燐灰石はタングステン及びリン資源としてそれぞれ重要な鉱物である一方、著量の希土類元素 (REE) 等を含んでいる。これら未回収希土類資源のポテンシャルを把握することは、将来的な希土類元素資源の安定供給に向けた基礎資料になると期待される。

本報告では、日本産の灰重石 (岩手県・東磐井鉱床, 京都府・大谷鉱床, 山口県・喜和田鉱床) を LA-ICP-MS により分析すると共に、豪州・ノーランズボア鉱床産鉱石及び燐灰石についてそれぞれ ICP-MS 及び LA-ICP-MS による化学分析を行い、これら灰重石及び燐灰石形成に関与した熱水の性質について比較検討した。LA-ICP-MS 分析はスイス連邦工科大学 (ETH) にて実施した。

2. 結果

2.1. 灰重石中の希土類元素含有量

分析に用いた灰重石試料は、1) 頁岩中の石英-灰重石脈 (東磐井鉱床), 2) 花崗閃緑岩中の石英-灰重石-磁硫鉄鉱脈 (大谷鉱床), 3) 縞状スカルン鉱石 (喜和田鉱床) である (図 1)。喜和田鉱床の縞状鉱石は、スカルン鉱体を貫く石英脈周辺に発達したもので、石英脈に移化する高品位縞状灰重石帯とスカルンに移化する硫化鉱物帯に 2 分される。各鉱床の関連火成岩は、磁鉄鉱系花崗岩 (東磐井鉱床), チタン鉄鉱系黒雲母花崗閃緑岩 (大谷鉱床), チタン鉄鉱系花崗岩 (喜和田鉱床) と考えられている。

各鉱床の灰重石中の総希土類元素濃度 (Σ REE) の平均は、東磐井鉱床: 115 μ g/g (n=27), 大

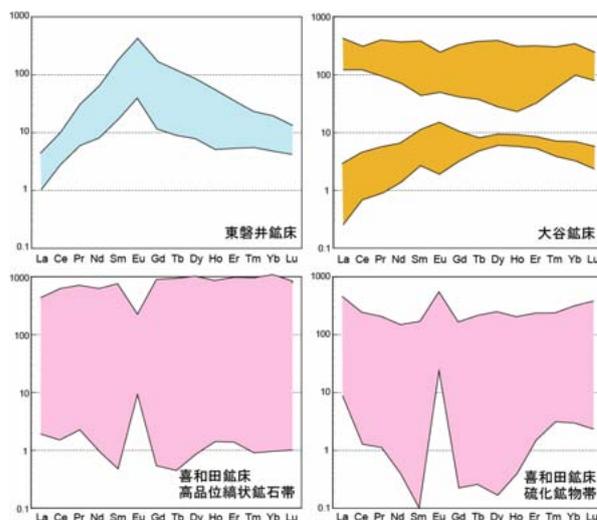


図 2. 灰重石の REE パターン (コンドライト規格化)

谷鉱床: 551 μ g/g (n=41), 喜和田鉱床産縞状灰重石帯: 643 μ g/g (n=106), 喜和田鉱床産硫化鉱物帯: 230 μ g/g (n=76) であった。灰重石中の平均 Dy 濃度は、東磐井鉱床: 15 μ g/g, 大谷鉱床: 41 μ g/g, 喜和田鉱床産縞状灰重石帯: 78 μ g/g, 喜和田鉱床産硫化鉱物帯: 9 μ g/g を示す。灰重石の平均 Mo 濃度は、大谷鉱床: 133 μ g/g 並びに喜和田鉱床: 180 μ g/g に対して、東磐井鉱床で 0.28 μ g/g と極端に低い。灰重石の Th 及び U 濃度はおしなべて低く、多くの灰重石で 0.5 μ g/g 以下である。このようにチタン鉄鉱系花崗岩類に伴う鉱床の灰重石で Σ REE が高く、その中でも石英脈に伴われ、硫化鉱物と共生しない灰重石が相対的に高い重希土類濃度を示す。大谷鉱床と喜和田鉱床の灰重石はカソードルミネッセンスによりゾーニングが観察され、両鉱床共に暗いゾーンで Σ REE が高くなる。このゾーニングパターンから、喜和田鉱床では灰重石形成ステージの後期で Σ REE が増加、大谷鉱床では灰重石形成ステージの初期から後期に向かい Σ REE が減少したと考えられる。灰重石のコンドライト規格化 REE パターンは、喜和田鉱床及び大谷鉱床の灰重石形成ステージ初期で正の Eu 異常を示し、マグマ水の関与が示唆される (図 2)。喜和田鉱床では後期に向かって負の Eu 異

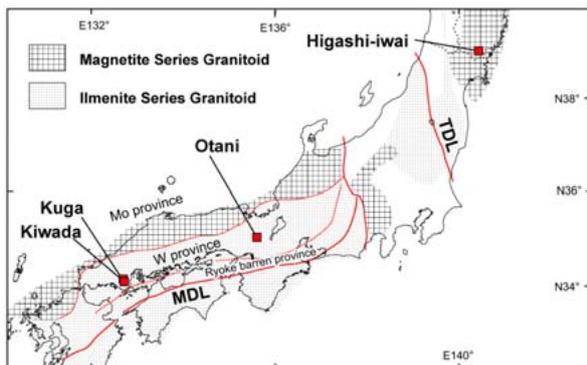


図 1. 灰重石を産した日本の鉱床

常を示すことから、マグマ分化に伴い熱水中の希土類元素濃度が増加していた可能性が高い。大谷鉱床では灰重石結晶マントルで負の Eu 異常を示し、リムでΣREE や Mo などの濃度が極端に低下する(図3)。大谷鉱床のこの傾向は、灰重石形成期における異なる起源を持つ熱水(マグマ水と天水)の混合を示唆している。

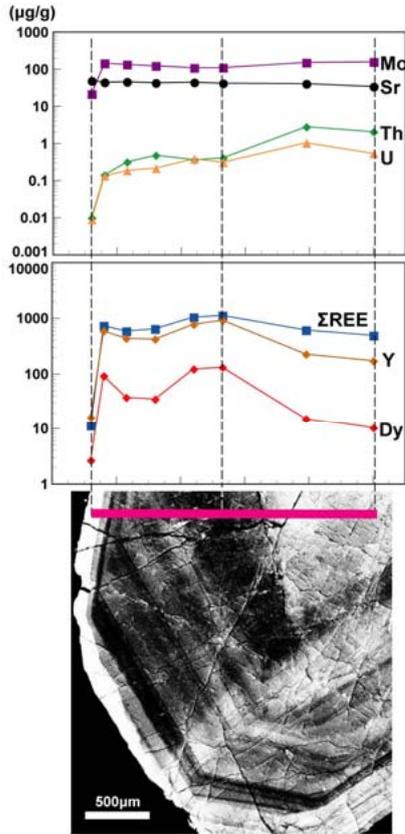


図3. 大谷鉱床産灰重石のゾーニング

2.2. 燐灰石資源

豪州・ノーランズボア鉱床産鉱石の ICP-MS 分析を行った。その結果、鉱石は極めて軽希土類元素に富み、Ce 及び Nd が特に高い濃度を示す(図4)。総希土類元素濃度は最大約 7wt%である。また、難溶性鉱物を含む試料でも、その溶液化プロセスが適切で、試料濃度に適した希釈

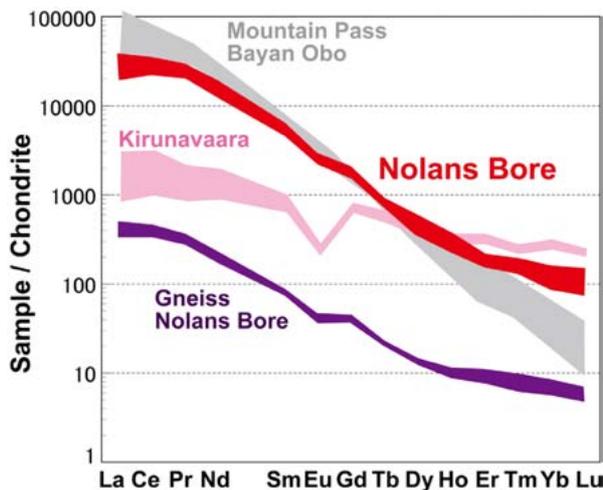


図4. ノーランズボア鉱石の REE パターンの比較

倍率による分析であれば、幅広い濃度レンジで高精度に希土類元素の定量が可能である。

燐灰石は脈状に産し、脈幅は最大で数十 m に及ぶ。鏡下の観察から、燐灰石は2種類に分類される(図5)。Type 1 は自形結晶として産し、結晶中にアメーバ状赤鉄鉱(または複酸化物)の微小包有物を多く含む。Type1 の燐灰石は鉱石の主要構成鉱物である。一方、Type2 は他形結晶として、散点的に粒間を埋めるように産する。Type2 燐灰石は Type1 燐灰石のフラグメントを包有する場合もあることから、Type1 は Type2 よりも早期に形成されたと考えられる。CL(カソードルミネッセンス)像では、Type1 は発光が著しいのに対して、Type2 は発光しない。LA-ICPMS 分析の結果、Type1 燐灰石は極めて軽希土類元素に富み、Th 及び U 濃度も高いことが判明した。特に、Ce 及び Nd 濃度が高く、総希土類元素濃度は最大約 6wt%の値を示す。Type2 は均質なフッ素燐灰石組成を持ち、Th 及び U を殆ど含まない。従って、ノーランズボア鉱床産の鉱石希土類品位は、モナザイトなどの難溶性希土類含有鉱物ではなく、Type1 燐灰石中の希土類濃度を強く反映していることが明らかとなった。

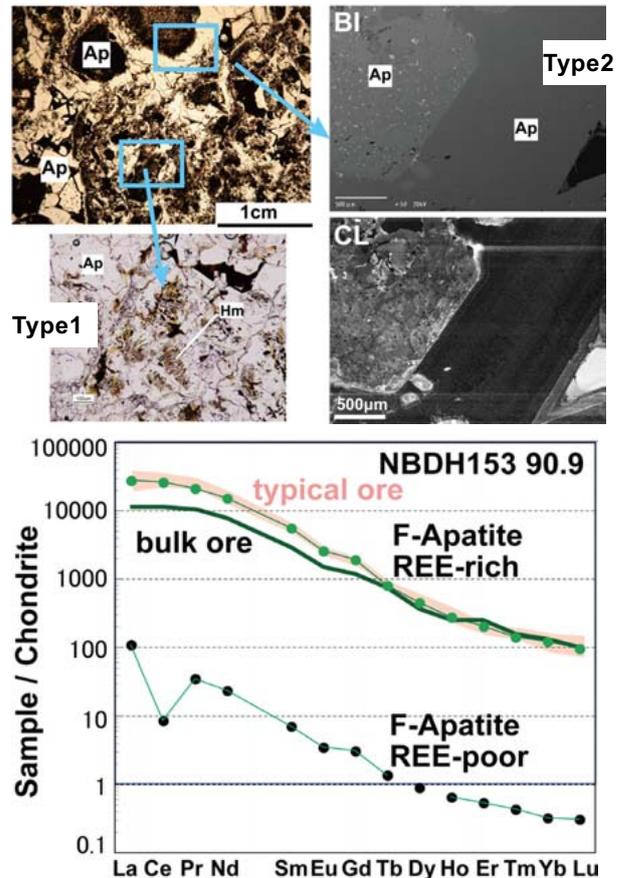


図5. ノーランズボア燐灰石の産状と REE パターン

電子地球科学情報を利用した地熱資源評価手法の発展的研究：第2期成果の概要 Studies on Advanced Assessment Methods for Geothermal Resources in Japan using Electronic Earth-Sciences Information: Outline of the 2nd-Term Results.

茂野 博 (地熱資源 RG)
Hiroshi Shigeno
Geothermal Resources Research Group
e-mail: hiroshi-shigeno@aist.go.jp

1. はじめに

地熱資源研究グループでは、研究の一環として手法開発と事例検討を中心に、電子地理・地球科学情報を利用した地熱資源評価の研究を継承・発展的に進めてきた。産業技術総合研究所の中期計画第2期（2005～2009年度）には、第1期（2001～2004年度+）の成果（例えば、地質調査総合センター、2007、数値地質図 GT-3）を基礎に、より幅広い多様な研究を進めて、各種成果の誌上・口頭発表を行った。

2. 第2期成果の紹介

「別表」に、第2期の誌上発表成果を6項目に整理して示す。特に(1)では、第1期に作成した各種のオープンソースの自作プログラム（Microsoft Visual Basic v.6による）を拡張して、様々なデータを簡易的に統合断面図形式で表示するプログラムを作成するとともに、島孤下へ斜めに沈み込む海洋プレートスラブの3次元運動の簡易シミュレータなどを開発し、これらを九州、近畿、関東の各地方へ適用して火山・地熱地域分布の特異性に検討を加えた。(2)の坑井変質、(3)の温泉化学を中心とした統合的評価の研究における作図例を、図1に示す。(5)のMS Excel VBA (Visual Basic for Applications)によるオープンソースの各種プログラムなどはホームページ（<http://staff.aist.go.jp/hiroshi-shigeno/index.html>）からダウンロードが可能となっている。

3. 今後の取りまとめ計画

第2期の様々な研究成果の取りまとめと上記のオープンソースの各種プログラムの公開・普及などを目的に、「別表」(0)の地質調査総合センター（2007）の数値地質図 GT-3 と同様のCD-ROM 出版物の提供（数値地質図 GT-5?）を現在検討しており、現状では2011年度末の出版を目標としている。

なお、第2期の地熱資源研究グループの成果として、「日本の熱水系アトラス」（地質調査総

合センター、2007）、「全国地熱ポテンシャルマップ」（地質調査総合センター、2009、数値地質図 GT-4）などが出版されていることを付記する。

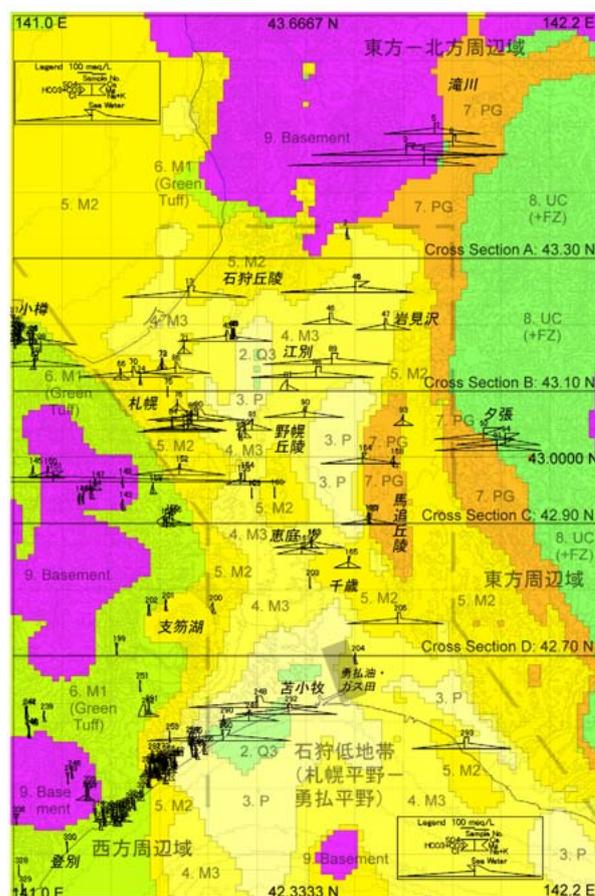


図1. 北海道の石狩低地帯域における「大深度（掘削）温泉水」の溶存化学組成（ヘキサ図）と3次元地下地質分布（深度1500m）の統合表示（茂野、投稿中）。公開電子地球科学情報として、温泉化学データには地質調査総合センター（2002、数値地質図 GT-1）を、地質データには吉田ほか編（2009、地質調査総合センター速報、no.48）を用いた。

電子地球科学情報を利用した地熱資源評価手法の発展的研究：第2期成果の概要

別表：研究成果の誌上発表の一覧表（2006年4月～2011年3月；印刷中・投稿中のものを含む）

- (0) 地熱資源評価研究の第1期成果のとりまとめと開発プログラム・処理データなどの電子公開化
地質調査総合センター（2007）：九州－大分－豊肥地域の地熱データ処理集 「地理情報システム（GIS）を利用した地熱資源の評価の研究（2001-2005年度）」のまとめと簡易統合的処理データ・プログラム集（CD-ROM）．数値地質図，GT-3.
- (1) 海洋プレートスラブの斜め沈み込みと火山・地熱分布異常のモデル化・数値シミュレーション
茂野 博（2008）：海洋プレートスラブの斜め沈み込みの簡易数値モデルと数値シミュレーション－電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討（1）－．地質ニュース，no. 646，6-21.
茂野 博（2008）：プレートテクトニクスに基づく湯の峰・有馬温泉の生成環境のモデル化－電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討（2）－．地質ニュース，no. 647，25-38.
茂野 博（2008）：相模トラフ域－関東平野におけるフィリピン海プレートスラブの沈み込み－公開電子地球科学情報を利用した簡易モデル化－数値シミュレーションによる検討－．地質ニュース，no. 648，20-33.
茂野 博（2009）：九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレートスラブの沈み込みの関係－電子地球科学情報を利用した簡易モデル化－シミュレーションによる検討－．地質ニュース，no. 656，10-28.
茂野 博（2009）：日本列島に沿って擬似赤道（大円）を引く擬似経度－緯度座標系（PLLCS，JILLS）の試み－東日本3弧系下への太平洋プレートの沈み込みへの適用事例－．地質ニュース，no. 664，50-61.
茂野 博（2010）：火山・地熱活動異常の原因としてのスラブ沈み込みの急傾斜化－幾何学モデルと琉球弧・西南日本弧の4セグメント域の比較検討－．地質ニュース，no. 666，21-30.
Shigeno, H. (2010) : Oblique plate-slab subduction causing various anomalous distributions of volcanoes and geothermal systems in Japan: Simplified modeling and simulation. Proceedings of World Geothermal Congress 2010, Bali 2010, P1288, 12p. (WWWで, *International Geothermal Association* (<http://geothermal.stanford.edu/standard/>) から検索により全文閲覧・保存が可能)
- (2) 地熱地域の坑井変質データの統合表示と地下環境の比較モデル化検討（HLW地層処分への応用）
茂野 博（2008）：地熱井変質データベースの構築と事例6地域のモデル化による多様な変質環境の検討．地質調査研究報告，vol. 59，71-107.
- (3) 石狩低地帯とその周辺域の温泉化学・3次元地質データの統合表示・解析・モデル化
茂野 博（――）：石狩低地帯とその周辺域の「大深度（掘削）温泉」の化学組成と地下地質の3次元分布－公開電子地球科学情報の簡易統合処理による表示・解析の試み－．地質ニュース，（投稿中）
茂野 博（――）：北海道 胆振地方，白老地域と周辺3広域地域の「温泉水」の地球化学・同位体化学的な特徴と起源－「深層熱水型資源」・「大深度（掘削）温泉」の事例研究－．地質調査研究報告，（投稿中）
- (4) 地熱資源の評価（アセスメント）への公開数値シミュレータ（オープンソース）の利用の試み
茂野 博（2010）：米国地質調査所（USGS）公開の高温熱水系シミュレータ HYDROTHERM INTERACTIVE (v. 3.1)の紹介．地質ニュース，no. 673，21-36.
- (5) 地球科学への表計算ソフトウェアのマクロ言語プログラム（MS Excel VBA）の利用
茂野 博（2008）：Excel VBA（オープンソース）による地球科学データの処理－(1) 水化学データの図化を例にして－．地質ニュース，no. 652，21-30.
茂野 博（2009）：Excel VBA（オープンソース）による地球科学データの処理－(2) 標高・地質メッシュデータの組合せ図化を例にして－．地質ニュース，no. 656，29-38.
茂野 博・須藤 茂（2009）：Excel VBA（オープンソース）による地球科学データの処理－(3) 侵食地形「燭台石（台湾）」の生成シミュレーションを例にして－．地質ニュース，no. 657，10-18.

我が国における地下岩盤内の初期地圧状態 －応力解放法による実測データに基づく－

Initial Rock Stress State at Deep Underground in Japan － Based on the Data Measured by Using Stress Release Method －

長秋雄, 国松直 (研究部門付主任研究員), 金川忠, 藤井真希 (日特建設株式会社)
横山幸也, 小川浩司 (応用地質株式会社), 田仲正弘 (株式会社レーザック)

Akio Cho^{1)*}, Sunao Kunimatsu¹⁾, Tadashi Kanagawa²⁾, Maki Fujii²⁾
Tatsuya Yokoyama³⁾, Kouji Ogawa³⁾ and Masahiro Tanaka⁴⁾

¹⁾ Senior Research Scientist / Assistant Director, ²⁾ Nittoc Construction Co., LTD,

³⁾ OYO Corporation, ⁴⁾ LAZAC Incorporated

*Corresponding Author, e-mail: akio.cho@aist.go.jp

1. はじめに

地下空間建設や地下岩盤利用において、地下岩盤に作用する初期地圧状態を把握することは、それらの設計・施工・稼動・安全評価において、欠くことのできないことからである。初期地圧の測定法については、これまでに種々の方法が考案され、多くの地下施設建設サイトにおいて使用実績と改良が積み重ねられてきた。初期地圧測定結果は、各研究者や各機関により、学会発表や学会誌等で公表されてきた。我が国での今後の地下空間開発に向けて、これまでに公表された初期地圧測定結果を収集し、公の共有の情報としてデータベース化を図ることは意義深いと考える。

我々は、初期地圧測定法の中で測定値の信頼性が高い応力解放法により測定され、測定点の被り深さが100m以深のものを対象として、文献調査を行い(全75編の論文)、全54地点で62例のデータを収集した。収集したデータについては、今後の利活用を考慮して、データベース機能も有するように、データの整理と収録を行った。整理・収録したデータに基づき、我が国の地下深部岩盤での初期地圧状態の一般的傾向を考察した。

その結果については、地質調査研究報告(第60巻, 第7/8号, p.413-447, 2009年)に総説として報告しており、下記のサイトで閲覧とpdfファイルのダウンロードが可能である。今後の地下空間開発や地下岩盤利用において参考にしていただければ幸いである。

http://www.gsj.jp/Pub/Bull_new/vol_60/60_07/60_07_04.pdf

総説では、第2章に、関連する既往研究をまとめた。第3章では、埋設ひずみ法と孔底ひずみ法について概説した。第4章に、調査対象文献と収録項目を説明し収録測定地点の位置と収録データ一覧を示した。第5章では、整理・収録したデータに基づき我が国の地下深部岩盤での初期地圧状態の一般的傾向を考察した。第6章では、初期地圧に及ぼす各種要因について既往研究などから例示した。第7章において、得られた知見をまとめた。

本小文では、総説の概要を紹介する。

2. 収録した初期地圧測定地点

収録した初期地圧測定地点(全54地点, 62例)を、図1に示す。シンボル▲, ○, ●はそれぞれ、測定地点の岩石区分(火成岩, 堆積岩, 変成岩)を示す。+は岩石区分が不明であった測定地点である。

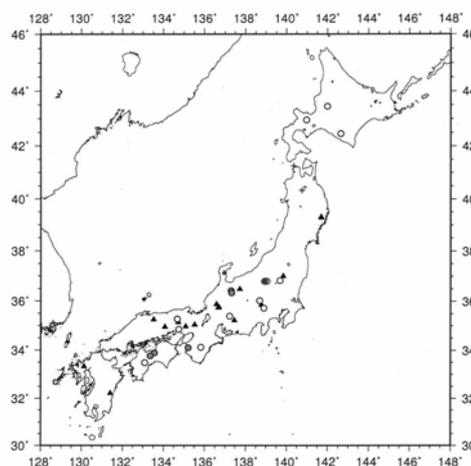


図1. 収録した初期地圧測定地点

埋設ひずみ法による測定が 21 地点・21 例であり、孔底ひずみ法による測定が 33 地点・41 例であった。測定位置の岩石区分は火成岩 30 例・堆積岩 16 例・変成岩 13 例・不明 3 例であり、岩級区分は $C_M \sim C_L$ 級 1 例・ $C_M \sim C_H$ 級 3 例・ C_H 級 9 例・ $C_H \sim B$ 級 8 例・ B 級 5 例・ $B \sim A$ 級 3 例、不明 33 例であった。孔底ひずみ法での測定では、岩級区分の記載が少なかった。

3. 初期地圧の大きさと被り深さの関係

3.1. 鉛直応力と被り深さの関係

鉛直応力 σ_v と被り深さ h の関係を、図 2 に示す。鉛直応力は、岩石区分による大きな相違は認められず、被り圧程度（被り圧の約 0.5 倍～約 1.5 倍）の値であった。図中の実線は岩盤密度を 26kN/m^3 とした場合の被り圧を示す。

3.2. 水平最大主応力と被り深さの関係

水平最大主応力 σ_{Hmax} と被り深さ h の関係を、図 3 に示す。

火成岩での水平最大主応力は、被り圧の約 1 倍～約 3 倍の値であった。火成岩では、同じ被り深さの堆積岩や変成岩での値と比べて大きな値が見られた。

堆積岩での水平最大主応力は、被り圧の約 1 倍～約 1.5 倍の値であった。

変成岩での水平最大主応力は、1 例を除いて、被り圧の約 0.5 倍～約 1.5 倍の値であった。

3.3. 水平最小主応力と被り深さの関係

水平最小主応力 σ_{Hmin} と被り深さ h の関係を、図 4 に示す。被り深さ 600m 以浅の水平最小主応力は、岩石区分による大きな相違は認められず、被り圧程度（被り圧の約 0.5 倍～約 1.5 倍）の値であった。被り深さ 900m 以深での値（火成岩 1 例、変成岩 8 例）は、被り深さ 600m 以浅での傾向を外挿した値より小さかった。

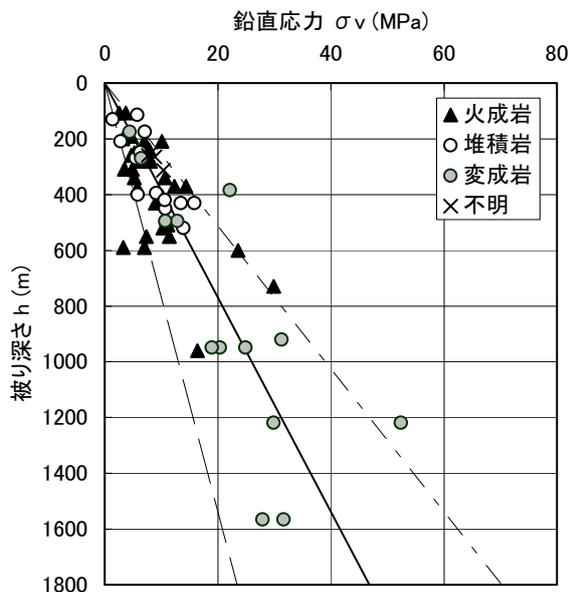


図 2. 鉛直応力と被り深さの関係

4. 他の検討項目

収録データに基づき、次の項目に関しても分析と考察を行った。

- ・ 水平最大主応力（方位と値）と地殻水平歪短軸（方位と値）の比較
- ・ 三次元主応力と被り深さの関係
- ・ 応力値と測定標高の関係
- ・ 三次元主応力比と最小主応力の傾斜角の関係
- ・ 岩級との関係

謝辞

初期地圧測定データの収録を許可いただいた測定実施各機関に感謝します。本文中の図において GMT を使用して作図しました。ここに謝意を表わします。

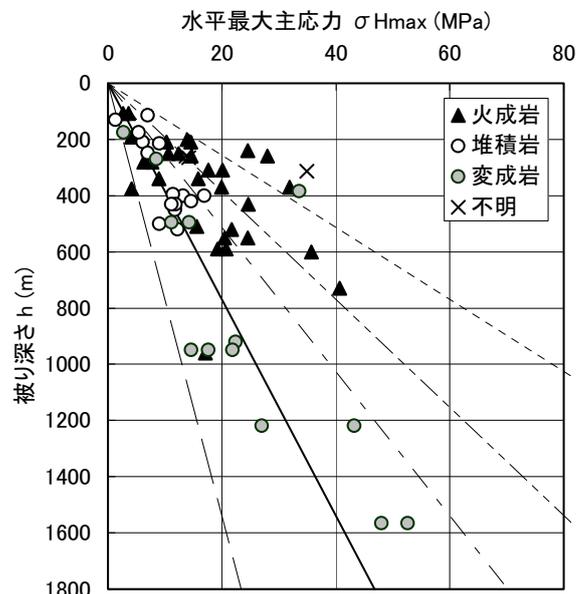


図 3. 水平最大主応力と被り深さの関係

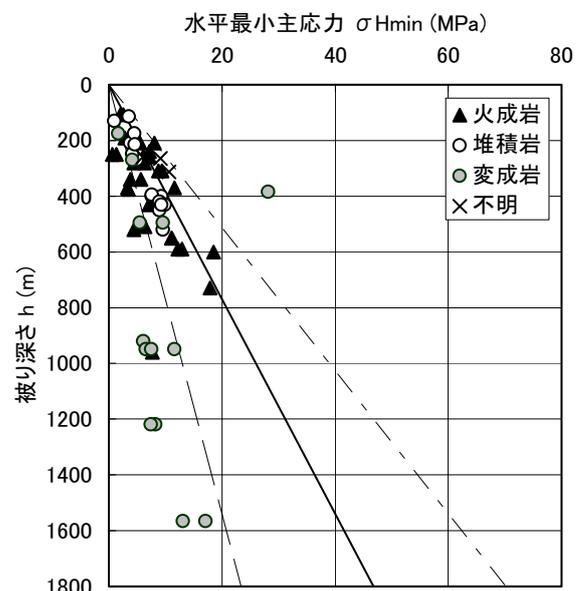


図 4. 水平最小主応力と被り深さの関係

汎用型ボアホールカメラの性能と地質調査への普及

Performance evaluation of a developed low-cost and simplified borehole camera and spread to geological survey

国松 直 (研究部門付主任研究員)^{1)*}

山下智士²⁾, 太田 保 ((株)復建技術コンサルタント)²⁾

Sunao Kunimatsu^{1)*},

Satoshi Yamashita²⁾ and Tamotsu Ota²⁾

¹⁾ Senior Research Scientist / Assistant Director, ²⁾ Fukken Technical Consultant Co., LTD.

*Corresponding Author, e-mail: s.kunimatsu@aist.go.jp

1. はじめに

地質調査の基本である調査ボーリングは、地表踏査では得られない貴重な地下情報を提供してくれる。通常、ボーリングコアの直接的な観察により、岩種の特定、地質構造把握や亀裂性状の評価を行うが、コアの採取段階で回転等の影響を受けて、原位置での走行傾斜等の方位情報を失うことが大きな問題であった。この問題は孔壁をボアホールカメラで撮影、解析することで解決できるが、現状ではボアホールカメラを用いた調査は高価なうえ、専門の撮影技術者が必要なため、その適用はダム等の大規模な地質調査に限られている。

(株)復建技術コンサルタントが開発した小規模な地質調査でも安価で簡便に使用できる汎用型ボアホールカメラについて、平成21年度中小企業等製品性能評価事業において、いくつかの評価項目を設定し、性能評価のための実証研究を行った。本報ではその結果を概説する。

2. 汎用型ボアホールカメラの概要¹⁾

汎用型ボアホールカメラ (low-cost and simplified borehole camera; 以下、LCSカメラと略記) は、市販の水中カメラ (前方視カメラ) に、撮影深度や方位情報が得られるようにリールや可とう管等を追加した構成である (概観図をポスター掲載)。

LCSカメラは安価 (販売価格は40万円程度) で簡便 (オペレーター一人で作業可能) に使用できる利点を有するが、深度・方位の計測センサを有さないため、深度 $\pm 0.2\text{m}$ 程度、方位 $\pm 20^\circ$ 程度の計測誤差があることを念頭に撮影画像を扱う必要がある。

3. 当該事業による研究概要

本実証研究では、汎用型ボアホールカメラの性能確認および今後の販路拡大を目指して、以下の3つの研究課題を設定、実施した。

(1) 全地質への適応性の実証研究

全国の8地区において地質状況の異なる撮影

事例を80事例以上収集し、分析を行う。

(2) 岩盤の不連続性評価のための実証研究

地質の異なる3砕石場でコアを回収し、コア観察結果とボーリング孔内の観察結果を比較し、不連続性評価に対する性能をRQD指標を用いて、定量的に評価する。

(3) 濁度計測への適用のための実証研究

河川等の濁度計測への適用方法について検討を行い、数カ所の現場での濁度計による測定結果との比較を行う。

4. 当該事業による成果概要

(1) 全地質への適応性の実証研究

全地質・土質での撮影が可能なボアホールカメラとしての性能評価のために、全国地質調査業協会連合会 (以下、全地連という) の組織を通じて、8社に委託し、現場使用実績として全国8地区 (北海道、東北、関東、北陸、中部、関西、中国地方山陰、中国地方山陽)、82箇所の撮影画像記録を収集した。内訳は花崗岩類の岩盤18、花崗岩類の強風化岩盤5、新第三紀火山噴出物7、第三紀凝灰岩18、泥岩等の堆積岩19、第四紀砂礫層9、その他として河川堤防やトンネル覆工コンクリート5、産業廃棄物1箇所である。地質的に見ると全国に分布している花崗岩や第三紀の堆積岩などのデータがやや多い傾向にある。ボーリングの方向は垂直方向が最も多く65、水平12、斜め上3、斜め下2箇所である。撮影は空孔で53、水中または水の洗浄や汲み出し後に撮影したものが29箇所である。湧水箇所は2箇所では撮影されている。

以上の撮影画像事例から空孔ボーリング孔での花崗岩や安山岩類の節理・亀裂の開口状況や方向性、風化の程度、岩質・岩相の把握が可能であることが判明した。湧水箇所の撮影では湧水箇所の位置確認と流れの方向や流速の推定が可能であった (亀裂の静止画をポスター掲載)。地下水位以下の土質を対象とした撮影では濁水対策が必要であるが、その対策方法²⁾ について

はポスターで説明予定である。

(2) 岩盤の不連続性評価のための実証研究

地質の異なる3箇所の砕石場(①板状亀裂の粘板岩, ②塊状岩盤の砂岩, ③これらの中で最も普遍的な地質である安山岩を対象)を使用し, 1砕石場に付き水平ボーリングによる10m掘削を方向の異なる2方向(節理状構造の岩盤の場合, 亀裂の角度, 頻度が変化する)で, ボーリングコアRQD(岩盤の不連続性を表す指標, 亀裂の判定が必要)とLCSカメラによる岩盤内の亀裂状況(深度情報含む)との対比(亀裂判定精度の検討)を実施した。総延長は60mである。

ボーリング孔を横切る方向の開口亀裂はこのカメラが前方視カメラであるためボーリング軸方向の亀裂よりは観察が難しいが, 亀裂の有無の確認は可能である。撮影モニター画面からも開口亀裂の有無, 角度, 方位を観察することが可能であるが, 詳細な検討の場合には, オプション仕様ではあるが, 撮影画像から孔壁の展開画像を作成する可能であり, より詳細な情報分析に有効である。

ボーリングコアを用いて岩盤の不連続性が評価され, 岩盤構造物の設計にも反映されているが, コア採取時には機械的な衝撃の影響などにより, コア自体が折れたり, 地山内では密着していた亀裂に沿って割れたりするためにコアによるRQDが地山内の岩盤状況を忠実に反映したものではないことが知られている。

コア観察によるRQD(コアRQD)と孔壁画像の亀裂観察によるRQD(孔内RQD)の違いについて, 今後岩盤分類評価と結びつける検討が必要であることを指摘した³⁾。

また, カメラ画像からは, 「孔内RQD」情報以外に, 岩盤内亀裂の生の情報, すなわち亀裂の向き, 角度, 開口幅, 亀裂状況(開口, 密着)などを読み取ることが可能である。さらに, 現場周辺において複数のボーリングを行い, カメラ観察, 展開図を用いた解析により, 亀裂の三次元的な分布状況も推定可能であり, 現場の地質構造の解釈にも重要な知見を与える情報の提供も可能である。

(3) 濁度計測への適用のための実証研究

近年, 工場排水, 生活排水等による環境汚染が増加しており, 河川, 湖沼, ダムなど濁度測定を必要とする場所は広範囲にわたっている。濁度の測定装置には透過光方式や散乱光方式などいくつかの種類があるが, 本研究ではLCSカメラによる撮影画像を用いた濁度測定を目的に, 濁度標準液(ホルマジン, ポリスチレン)の濁度と画像解析による画像数値との関係を用いた検量曲線を作成し, 市販の濁度計による濁度との比較を行った。

室内試験で求めた検量曲線をもとに, 現場へ適用するために, 濁水とともに標準の色見本をカメラ撮影画像に同時に撮影するための特殊

なカメラキャップを作成し, ダム, 井戸, 河川で濁度測定を実施した。濁度計による濁度との比較により, カメラ撮影画像からほぼ妥当な濁度を求めることが可能と判断された⁴⁾。本手法では, 濁度情報のみならず, RGB値, すなわち「色調」情報まで得ることができることが大きな特徴である。

5. 今後の普及・販路拡大に向けた展開

地質調査分野でのLCSカメラの普及に関して, 全地連において, 標準化仕様(案)(技術マニュアル(案)と積算基準(案)から構成)⁵⁾を2011年4~5月頃に取りまとめる予定である。

LCSカメラは安価で大量使用が可能な価格帯であり, 取扱が簡便であるのでボーリング技術者や地質技術者の補助具としての使用が期待される。地質調査におけるカメラ撮影画像調査の標準化仕様がまとまれば, カメラ撮影画像調査の必需品としての普及販売の増大が国内のみならず海外でも見込まれる。

また, 地質調査業界以外の潜在的な市場として, 大きな社会問題になっている維持管理調査について記述すれば,

橋梁・トンネル・道路斜面の維持管理調査に関連して,

- ・橋梁基礎コンクリート状況の確認(基礎岩盤との付着状況や空洞確認)
- ・地震後の基礎杭の亀裂の有無の確認
- ・トンネル背面の状況確認
- ・道路斜面モルタル吹き付け面の背面の状況確認

- ・斜面のすべり面の状況確認

配水管(上水道用, 下水道用, 農業用)や井戸の維持管理調査に関連して,

- ・漏水・破損箇所の検出
- ・スケール(垢)沈着状況の観察

などが挙げられ, これら以外にも多方面への用途展開が期待できる。

参考文献

- 1)山下智士・太田 保(2009):超簡易型ポアホールカメラの開発, 日本応用地質学会平成21年度研究発表会講演論文集。
- 2)山田 司・銭谷竜一・太田 保・国松 直・佐々木孝幸・齋藤重則(2010):濁水中での汎用型ポアホールカメラの撮影方法の検討, 日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集。
- 3)佐々木孝幸・国松 直・原口 強・太田 保・銭谷竜一・齋藤重則(2010):汎用型ポアホールカメラを用いた岩盤の不連続性評価について, 日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集。
- 4)齋藤重則・太田 保・国松 直・佐々木孝幸・前田修吾(2010):汎用型ポアホールカメラによる濁度測定への適応性の性能評価, 日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集。
- 5)山下智士・太田 保・原口 強・国松 直・山田 司・銭谷竜一(2010):汎用型ポアホールカメラを用いた地質調査の標準化仕様への試み, 日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集。