Green Report 2007

地圏資源環境研究部門成果報告

地圏研究のシーズとニーズの多様性

4 December 2007

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
AIST

独立行政法人
産業技術総合研究所
地圏資源環境研究部門

GREEN
INSTITUTE FOR GEO-RESOURCES AND ENVIRONMENT

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

第三紀火山岩の割れ目にできた石英結晶（水晶）、結晶の直径は 5mm 前後。
右下の綿毛は蕗の種。（青森県むつ市、2007 年 6 月 1 日撮影）

まえがき

地圏資源環境研究部門長
Director of 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、今年が第６回目になります。今回の報告会のテーマは「地圏研究のシーズとニーズの多様性」です。当部門は地圏を対象として、人類社会の持続可能な発展に欠かせない資源と環境の研究を進めています。現在、常勤研究職員 80 名、客員研究員や契約職員を含めて総人員 200 名の体制で研究を進めています。限られた人員ですので、研究者一人一人が持っている研究ポテンシャルを最大限生かしていくこと、研究者相互の研究ポテンシャルの相乗効果を可能な限り生み出す体制にすることが、研究部門運営においてたいへん重要なことと考えています。また、研究部門自身もひとつの研究組織として外部の組織との連携・協力を進めてゆくことが重要と考えています。

研究者の研究ポテンシャルを生かす研究の原動力あるいはきっかけは、社会から当部門に求められる多様な「研究ニーズ」と、研究者自身が研究を進め、研究ポテンシャルを磨いている中で生み出される「研究シーズ」があります。研究ニーズの高い場合には、例えば産総研の外部から研究予算がもたらされ、研究人員の強化、研究施設・設備の強化、予算を用いた調査・分析の実施などが行われます。現在、当研究部門の重点研究課題は以下の通りですが、これらは研究ニーズを主要な原動力として設定してきた経緯があります。

＜当部門の重点研究課題＞

１．地圏流体挙動解明による環境保全及び資源探査技術の開発
２．土壌汚染リスク評価手法の研究開発
３．地層処分環境評価技術の研究開発
４．低環境負荷天然ガス資源の評価・開発
５．CO2 地中貯留システムの解明・評価と技術開発
６．物質循環の視点に基づいた環境・資源に関する地質の調査・研究
７．地層処分安全規制支援研究（深部地質環境研究コアによる研究）

これらの重点研究課題は、基本的には研究ニーズを基に研究を進めているものですが、これらの研究を進める中で、新たな研究シーズも生まれてきています。例えば、当部門では、昨年度から「部門内競争的研究グラント」の募集を行い、応募された多数の研究テーマの中から、毎年、３テーマを実施しております。昨年度選定したテーマは、「難透水層汚染の浄化に向けた汚染物質の挙動と微生物浄化機能の評価」、「坑井内自然電位観測に関する基礎的研究」、「カスカディア縁辺域におけるメタン生成プロセスの解明」でした。今年度は、「インジウム濃縮プロセスの研究」、「多孔質媒体の微小空隙構造測定のための物理探査用核磁気共鳴スキャナーの改良」、「微生物の遺伝的特性を用いた水文地質学的シーズ研究」というテーマで研究を進めています。

これらの「シーズ研究」は、現在のニーズ研究と関わりの深いテーマ、あるいは応用面において複数のニーズ研究に将来的に有用であろうテーマなども含まれています。当部門の研究者の専門分野は、地質学、地球化学、岩盤工学、物理探査工学、貯留層工学、地球物理学、地下水学などに渡ります。従って、生まれてくる研究シーズもこのような分野のテーマとなりますが、微生物学など当部門においては比較的新しい研究分野についても、最近その応用可能性が高まっており、当部門の研究グラントテーマとして採りあげております。

本年度の研究報告会においては、このような部門のニーズ研究、シーズ研究の中から、３件を選んでご報告すると同時に、京都大学の松岡俊文先生をお迎えして、「地圏環境資源研究における物理探査の役割」というタイトルでご講演をお願いいたしました。

部門からの報告の１件目は、楠瀬勤一郎主幹研究員による地層処分の研究についての報告です。当部門では、資源エネルギー庁の委託による沿岸域の地下水、塩淡境界面調査を行っており、今年度からは新しいフェーズの研究を開始しています。一方では、研究部門からは独立して地層処分の安全規制研究を行ってきた深部地質環境研究センターが、今年度からは深部地質環境研究コ

アとして、その一部のグループは当部門に所属するようになりました。当部門を含む産総研の地質調査総合センターの地球科学に関する研究ポテンシャルは、安全規制を含む地層処分の幅広い分野で求められています。地層処分研究に関する当部門の取り組みをご報告する予定です。

部門の２件目の報告は須藤定久主任研究員による骨材資源に関する報告です。骨材資源とは、砂利や砂、砕石など、建設の資材となる資源です。当部門では日本各地域の骨材資源の分布について調査を行い、とりまとめて自治体等に資源情報を提供してきました。このように資源の分布状況を、整備されたデータ、すなわち知的基盤として社会に提供するという活動は、当部門の重点課題の基本となる部分です。地質に関する資源及び環境の知的基盤を整備する研究活動の一端をご理解いただければと思います。

部門の最後の報告は、竹内美緒研究員による地下の微生物に関する研究報告です。上記２件の研究が主として研究ニーズをベースとする研究であるのに対して、この研究は、研究シーズの側面が強い研究です。竹内研究員は、上述した昨年度の部門内競争グラントで微生物による難透水層の浄化機能について研究を行いましたが、難透水層に限らず、地下の微生物の地圏環境問題への適用については、大きな可能性のある研究であり、本報告会を通じて皆様にご関心を持っていただければ幸いです。

部門成果報告会は、限られた時間ですので講演の数は限られておりますが、このような地圏研究の多様性の一端をお知りいただければと思います。また、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。部門成果報告会は、部門の成果をお知りいただくと同時に、皆様から直接、貴重なご意見を伺う重要な機会と位置づけており、毎年定期的に開催しております。今後とも変わらないご高配を賜りますよう、心からお願い申し上げます。

第６回（2007 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：部門研究紹介　部門長　矢野　雄策　1

（研究発表）

特集：地圏研究のシーズとニーズの多様性－

13:20-14:00：「地圏資源環境研究部門の放射性廃棄物地層処分研究」
主幹研究員　楠瀬　勤一郎　5

14:00-14:40：「骨材資源をめぐる諸問題－資源開発と環境保全－」
須藤　定久（鉱物資源研究グループ）　9

14:40-15:20：ポスターセッション
（発表：各研究グループ，個別課題研究）

15:20-16:10：招待講演「地圏環境資源研究における物理探査の役割」
松岡　俊文（京都大学）　１３

16:10-16:50：「地下微生物研究の地圏環境修復への応用」
竹内　美緒（地圏環境評価研究グループ）　１７

16:50-17:15：ポスターセッション
（発表：各研究グループ，個別課題研究）

17:15-19:00：懇親会（ポスター会場）

ポスターセッション

（グループ発表）

地下水環境研究グループの紹介　石井　武政　２１
地圏環境評価研究グループの紹介　駒井　武　２３
CO2 地中貯留研究グループの紹介　當舎　利行　２５
地圏環境システム研究グループの紹介　高倉　伸一　２９
地質バリア研究グループの紹介　丸井　敦尚　３３
物理探査研究グループの紹介　内田　利弘　３５
地圏化学研究グループの紹介　佐脇　貴幸　３９
地圏微生物研究グループの紹介　坂田　将　４１
燃料資源地質研究グループの紹介　棚橋　学　４３
鉱物資源研究グループの紹介　渡辺　寧　４７
地熱資源研究グループの紹介　村岡　洋文　５１
地質特性研究グループの紹介　伊藤　一誠　５５
地下環境機能研究グループの紹介　竹野　直人　５７

（個人発表）

堆積盆解析により示された 10Ma 付近での奥羽山脈の隆起とその広域テクトニクス上の意義*
中嶋　健（産総研･地圏）檀原　徹・岩野　英樹（京都フィッショントラック）
鎮西清高（京大）

電気探査および地中レーダの地圏環境モニタリングへの適用
－北関東地下水観測サイトでの実験－
高倉　伸一・西　祐司・杉原　光彦・石戸　恒雄（産総研･地圏）　５９

地熱調査井岩石変質データのデータベース化と事例地域モデル化処理の試み
茂野　博（産総研・地圏）　６１
パーカッション掘削時の岩石掘削特性 *
唐沢　廣和（産総研・地圏）
砂岩の力学特性に及ぼす CO_2 圧入の影響
及川　寧己・竹原　孝（産総研・地圏）　６３
超臨界 CO_2 の流体挙動の把握に関する研究
天満　則夫・坂本　靖英・西　祐司・當舎　利行（産総研・地圏）　６５
CO_2 炭層貯留における地化学モニタリングについて（続報）
鈴木　祐一郎, 猪狩　俊一郎, 前川　竜男（産総研・地圏）　６７
小牧　博信, 藤田　眞仁（KANSO テクノス）
CO_2 地中貯留深度での地下水と地化学的 CO2 トラッピング
奥山　康子・徂徠　正夫・柳澤　教雄・佐々木　宗建　６９
村岡　洋文・金子　信行（産総研・地圏）
マイクロフォーカスＸ線ＣＴによる多孔質岩石の拡散異方性の評価 *
中島　善人（産総研・地圏）中野　司（産総研・地質情報）
Estimating the formation and dissolution of inorganic pseudo-colloids
月村　勝宏（産総研・地圏）　７１
無菌無酸素水掘削で採取した試料を用いた深部地下における原位置の微生物環境の評価
須甲　武志・鈴木　庸平・伊藤　一誠・竹野　直人（産総研・地圏）　７３
山地小流域の渓流水質を用いた地化学ベースラインマッピング：金丸地区周辺での適用例 *
奥澤　康一・関　陽児・内藤　一樹・竹野　直人（産総研・地圏）亀井　淳志（島根大）
計測参照用岩石データベース, ver.2*
奥山　康子・楠瀬　勤一郎・丸井　敦尚・長　秋雄・松林　修（産総研・地圏）
二宮　芳樹（産総研・地質情報）高橋　直樹（三井住友建設技研）
レアアース資源を供給する鉱床タイプ
村上　浩康・石原　舜三（産総研・地圏）　７５
流体包有物及びマルチ同位体から推定される愛知県振草セリサイト鉱床における熱水の起源と進化
－振草鉱床形成に関する熱水は金属鉱化作用を伴うか？－
村上　浩康・佐々木　宋建・高倉　伸一（産総研・地圏）　７７
層状鉄マンガン鉱床の希土類元素濃集過程
守山　武・村上　浩康・渡辺　寧（産総研・地圏）　７９
中川低地沖積層の海成粘土層における微生物起源メタンとメタン生成菌の発見 *
吉岡　秀佳・竹内　美緒（産総研・地圏）田辺　晋・内山　恵美子（産総研・地質情報）
玉木　秀幸（産総研・生物機能）猪狩　俊一郎・坂田　将（産総研・地圏）

---

* の発表は別途要旨発表済み等の理由により本報告書には未収録

地圏資源環境部門の放射性廃棄物地層処分

Reach activities of technology for nuclear waste disposal in the Institute for Geo-Resources and Environment

主幹研究員：楠瀬勤一郎
Principal Researcher: kinichiro KUSUNOSE
Phone: 029-861-3882、e-mail: k.kusunose@aist.go.jp

１．はじめに

現在の文化は、莫大な量のエネルギーを消費することで成り立っている。しかし、化石燃料など、産業革命以降に本格的な使用が始まった化石燃料などに因るエネルギー消費は、長い間をかけて平衡状態にあった地球環境に新たな負荷を与えている。たとえば、化石燃料を使用すれば、温暖化ガスの排出が避けられず、それを軽減するために、ウランなど核物質をエネルギー源として用いれば、放射性の廃棄物が生まれる。地圏資源環境部門で行われている、放射性廃棄物処分研究や二酸化炭素地中貯留研究は、エネルギー生産に伴うこれら廃棄物を如何にして安全に処理・処分するのかという研究である。今回は、これらの研究分野のうち、当部門の高レベル放射性廃棄物処分研究の枠組みについて紹介させていただくとともに、放射性廃棄物処分をとりまく最近の情勢について、私見を述べさせていただく。

２．地圏資源環境研究部門での高レベル放射性廃棄物研究

当部門では、高レベル放射性廃棄物処分研究として、文部科学技術省の受託研究、資源エネルギー庁から委託される基盤研究開発、実施主体である原子力発電環境整備機構からの技術開発研究を実施してきた。また、本年度からは、深部地質環境研究コアの創設に伴って、保安院からの受託研究を行う研究グループの一部が部門内に新たに加わった。これらの研究は、そのスキームのちがいから、研究の目的・内容が異なっている。

文部科学技術省から受託している研究は、放射性廃棄物について、安全審査指針の整備などのために必要な知見を得るため、研究者から提案されるもので、原子力安全委員会が策定している、放射性廃棄物安全研究年次計画にもとづいて実施される。高レベル廃棄物処分事業は、事業機関も評価期間も長期にわたることから、審査方針などは、将来の科学・技術の到達点を見通したうえで、策定する事が求められる。したがって、このスキームで行われている研究は、近々の技術の実用化ではなく、将来の科学・技術のシーズを育てることが求められている。当部門では、物理探査技術の高度化や超長期のモニタリング技術開発などが行なわれており、これらは、将来、処分場の地下構造調査の精度向上や処分場のモニタリングの可能性についての知見を提供する事が期待されている。

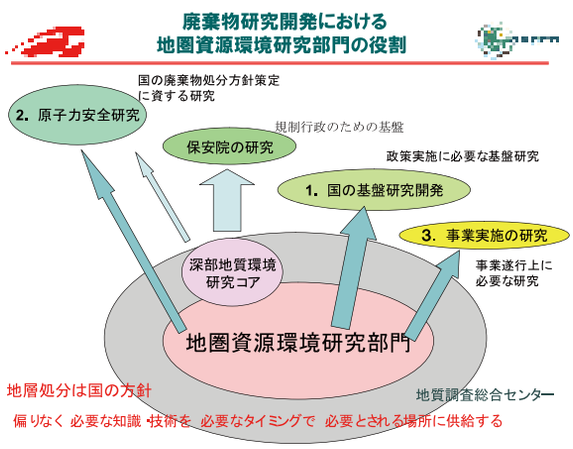


図１　地圏資源環境研究部門における放射性廃棄物研究

深部地質環境研究コアの一部が今年度から当部門に配置された。部門全体として、廃棄物処分に係わる様々な機関・組織からの要望に対し、必要

なときに必要な知見・技術を提供したいと考えている。

資源エネルギー庁の基盤開発研究は、原子力政策大綱に基づき、原子力発電環境整備機構の処分事業実施や国の安全規制に活用するために行われる研究であり、実施主体の研究に先立って、国として用意すべき技術開発を行う事が求められている。開発された技術や知見は、処分事業で実際に用いる事が可能であることが求められる。原子力政策大綱の中で、研究実施に当たって、処分研究全体を俯瞰して、総合的・計画的に実施されることが求められており、研究計画の立案に際して、資源エネルギー庁と研究実施機関により構成される基盤研究開発調整会議により、中期計画と各年度の成果の見直し、次年度の実施計画が協議されている。基盤研究開発調整会議には、成果の反映先でもある、保安院および原子力発電環境整備機構がオブザーバーとして参加して、それぞれの立場から実施している研究について情報を提供するとともに、基盤研究への要望をあげる事で、処分事業研究に過不足が生じないよう、研究課題が調整されている。策定された基盤研究開発計画は、一般公開されるとともに、有識者による委員会で研究計画・成果が評価される。

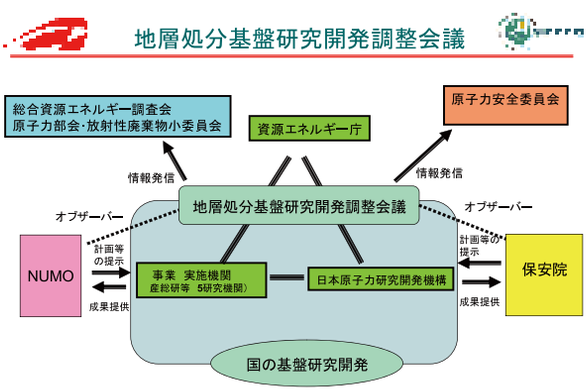


図２　基盤研究開発開発調整委員会

当部門も参加し、高レベル放射性廃棄物研究全体を俯瞰し、成果の反映先を意識して適切な研究計画の立案に勤めている。

事業主体の研究は、事業実施に向けた既存技術の効率化が中心となる。具体的な調査が始まるようになれば、その地質条件に合わせて、調査技術や掘削など技術を最適化するための研究などが開始されると予想している。当部門では、2005 年度までに、「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」と「地下深部の岩盤応力分布に関する数値解析モデルの開発」の 2 件を実施しており、文献調査から概要調査時に実施主体が処分場設計にこれらの成果を活用することを期待している。

また、2001 年から深部地質環境研究センターで行ってきた保安院からの受託研究は、安全規制の立場から、事業主体が行う調査・評価が妥当である事を判断するために必要な知見を確保するための研究であり、本年度から、深部地質環境研究コアに引き継がれ、現地質調査総合センターに所属するコア代表の統括の下に各研究ユニットに所属するコアメンバーが実施することになっている。

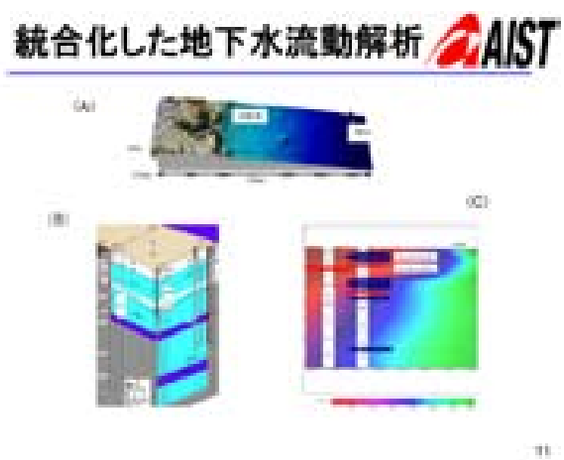


図 3 塩淡境界面形状把握調査の成果例

研究成果の統合化、(A) は解析領域（本研究対象地域）の概略を示す。(B) は物理探査で得られた地質構造にボーリング調査結果と地下水試料分析結果を重ね、塩淡境界面を 3 次元的に示した。この結果、図中青く示した深度 100m と 170m 付近に明瞭な塩水の侵入が見られた。(C) は地下水流動解析結果と地下水の長期観測結果による塩淡地下水侵入を示したもので、暖色が淡水・冷色が塩水領域を示す。とりわけ潮汐や周辺工事の影響を受けなかった深部において、(B) によく対応した 2 つの塩水侵入が観測され、流動解析において示した圧力分布 (塩水侵入領域) ともよく合致した。このように結果を統合することで、塩淡境界の形状や地下水の実流動さらには水理地質構造との関連が明確になった。

放射性廃棄物処分研究では、従来、処分場の地質環境を結晶質岩地域と堆積岩地域の二つに分類し、地質環境の将来予測や地下水流動などの地下構造の調査手法の開発を実施してきた。これらは、主に岩盤の物理的性質での区分に基づくものであったが、昨年度終了した「塩淡境界面形状把握調査」の成果をひとつの契機として、塩水地下水と淡水地下水が共存するという、沿岸域特有の水文地質構造の重要性が認識されるようになり、廃棄物処分研究に、新たに沿岸域というカテゴリーが作られた。本年度から、沿岸域における塩淡境界の形状把握と地下水の長期的な流動・滞留状況を評価するため、「沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発」が開始され、幌延をテストフィールドとした現地調査を開始する予定である。この調査では、資源エネルギー庁が開発してきた物理探査技術の知見を活用するほか、当部門が文部科学技術省の委託事業で実施してきた「物理探査手法の高度化」の成果を取り入れて、調査手法が異なる、海域と陸域の調査結果を統合して海―陸にまたがる地下構造を推定するための解析手法の開発も実施する予定である。成果は、実施主体等に技術移転できるよう、調査過程で得られた知見とともに調査手法をマニュアル化する計画である。

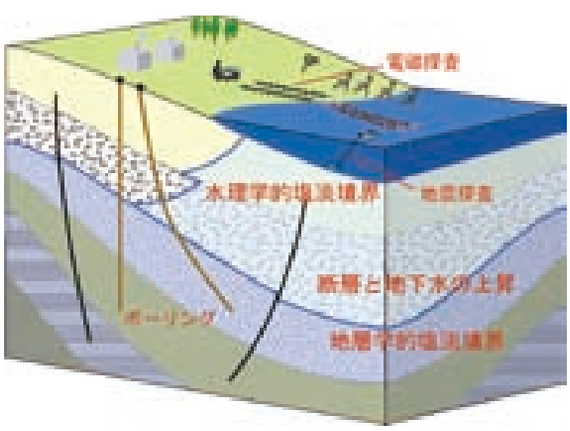


図４「沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発」の研究内容
沿岸部特有の地下水水文構造を明らかにする事を目的に、本年度から研究をスタートさせる

３．放射性廃棄物研究開発を取り巻く状況

安部総理の突然の辞任が大きく報道されたその日に、高レベル放射性廃棄処分事業に関しても気になるニュースが報道された。処分場候補地の選定は、国情の違いから、各国で異なる方式が採用されている。わが国の高レベル放射性廃棄物処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構は、地元からの応募を受けて、候補地選定の第一段階である文献調査を開始するとしてきたが、処分場候補地の選定作業は滞っていた。候補地選定作業をよりスムーズに行う事を目的に、経済産業省廃棄物小委員会は、従来の公募方式に加え、国から地元へ候補地の受け入れの申し入れを行うことも、併用する方針を発表した。これは、候補地選定に対し、今までよりも国が積極的に係わるという意思を示したものと思われる。スイスでも、地元が賛成しても州レベルの反対のために候補地の選定がなかなか進まなかった。そのため、地元と国が連携を取り合うことで、処分場候補地選定が円滑に進むよう、従来よりも連邦が前面に出た「地層処分特別計画」の制定が予定されている。候補地の選定に際して、国がより積極的に役割を果たすような流れが、国際的生まれてきているように思われる。

高レベル放射性廃棄物場は、超長期にわたって生活圏から安全に隔離する性能が求められる。そのため、人工バリアの劣化や地質環境の変化などの長期の変化を適切に取り込んだ評価をどのように行うのかは大きな問題である。高レベル放射性廃棄物処分場の安全性の評価について、原子力安全委員会の「高レベル放射性廃棄物の処分に係わる安全規制の基本的考え方（第１次報告書）」（平成 12 年）では、評価期間として、「一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても、あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていない事を確認する事が基本」であり、また、評価においては、「評価モデルの不確実さやパラメータの変動幅等を考慮した評価を行うこと」が求められているが、この報告書には、具体的な評価期間や線量のめや

すは示されていない。平成16年の原子力安全委員会「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項」では、「きわめて長期にわたる安全評価が必要である事から、評価に付随する不確実性は避けられない」ので「シナリオ発生の可能性とその影響を組み合わせたリスク論的考え方」を導入することが勧められている。

高レベル放射性廃棄物については、今後の議論になると思われるが、いわゆる余裕深度処分については、「低レベル放射性廃棄物埋設処分に関数安全規制の基本的考え方（中間報告)」（平成19年　原子力安全委員会）に、処分場の安全評価を行う際に、発生の可能性の高いシナリオに従った評価では、めやすとなる線量として10マイクロシーベルト/年を当てはめる事とし、さらに、処分場設計のパラメターの不確実性を考慮して、可能性が低いが、安全評価上重要な変動要因を考慮したシナリオや、稀頻度の事象を考えたシナリオを当てはめた評価の場合には、それぞれの発生の可能性を考慮して、300マイクロシーベルト/年（自然界の放射能レベルの数分の１)、10～100ミリシーベルト/年の線量（これ以下の線量レベルでは、放射能の漏洩があっても何らかの作業をする必要はないと国際的に考えられているレベル）のめやす値を提言している。また、「高レベル放射性廃棄物の処分に係わる安全規制の基本的考え方（第1次報告書)」の提言に従えば、処分場の安全評価は、数十万年の期間まで行われる可能性が高いと想像している。

４. おわりに

20年近く前になるが、ニューメキシコのハイウエーを車で走っていたときに、赤茶けた荒野に、ビニールや古タイヤなど様々なものが大量に積み上げられているのを見た事がある。それが最近はそれほどでもないという話を聞いた。理由は、ゴミが金になるからだという。最近のニューズウイーク誌によれば、中国など、アジア諸国の工業の発展で、金属くずや古紙の値段があがり、そのために、ゴミの中から資源となるものをリサイクルし、中国などアジア諸国に輸出する事業が盛んになっており、捨てられるゴミの量が大幅に減ってきているそうだ。環境の面からだけでなく、エネルギー経済の観点からも、ゴミのリサイクルは有益で、たとえば、銅をリサイクルすれば、必要なエネルギーは、鉱石から精錬する場合に比べ15%、またプラスッチクならば、20%ですむという計算もある。

放射性廃棄物処分では、どこの国でも処分場の受け入れ先を探す事が第一の問題となっている。高レベルの放射性廃棄物が厄介なのは、放射能という高密度のエネルギーを長期にわたって放出する事である。今は、これを生物圏から安全に隔離する事が課題となっているが、もしこれを適切に利用する技術が開発されるならば、という夢を見ている。

骨材資源をめぐる諸問題－資源開発と環境保全－

Some problems on aggregate supply in Japan - it's development andenvironment

鉱物資源研究グループ：須藤定久
Mineral Resources Group: Sadahisa Sudo
Phone: 029-861-3647, e-mail: sudo-gsj@aist.go.jp

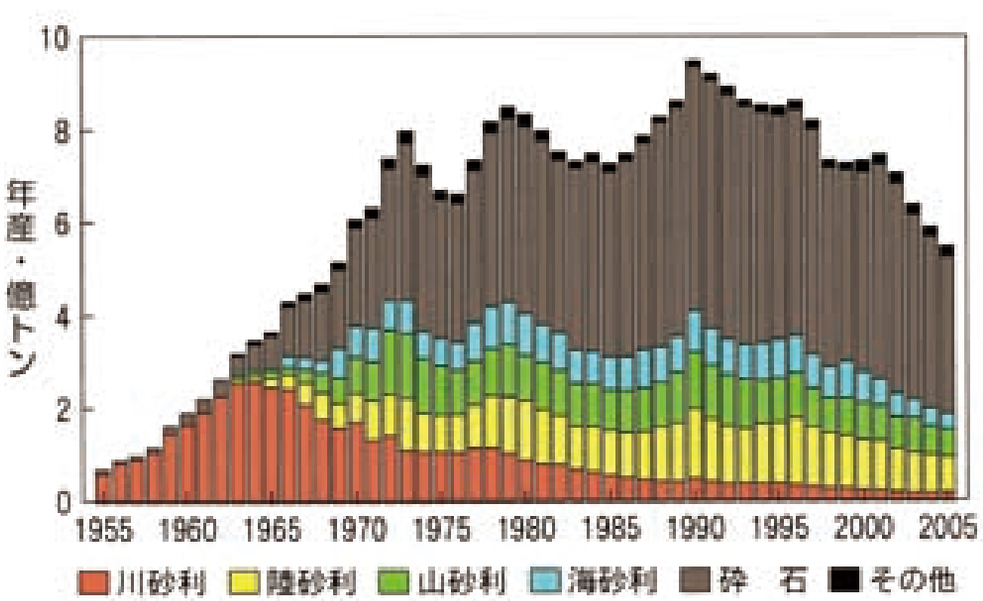
１．骨材利用の経緯

第２次大戦後、我が国の復興・経済発展とともに、コンクリートを使用した国土基盤整備が進められ、コンクリート社会が到来した。1990 には骨材の年間消費量は 9 億トン余に達し、その後減少したものの、７億トン前後で推移している（第 1 図）。

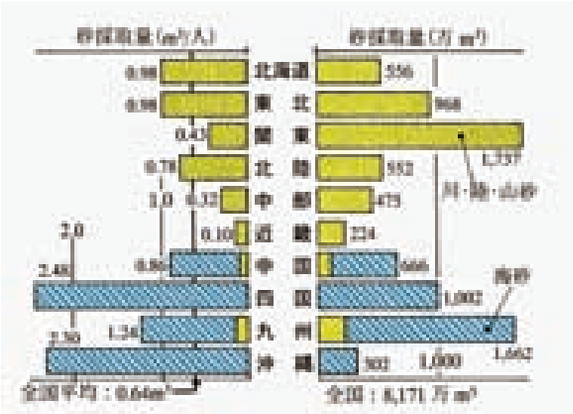
コンクリートが使用されるようになったのは明治後半のことである。レンガの接着剤として盛んに利用されるようになった。関東大地震によりレンガ建築が崩壊したことにより、以後、鉄筋コンクリートが使われるようになった。しかし、鉄筋コンクリートの本格的な利用は、戦後の復興が進み、東京オリンピックの開催に向けて建設ラッシュが始まった頃（1960 年代前半）である。

コンクリート用骨材資源としては当初、河川砂利が多量に使用されたが間もなく採取量の限界に達し、採取が厳しく規制されるようになった。代替え資源として、「陸砂利」･「山砂利」･「海砂利」が採取・利用されるようになった。もう一方では、砂利の代用として製造されるようになった「砕石」は順調に生産量を延ばし、砂利の採取量を凌ぎ、近年では日本で消費される骨材の 65% を占めるにいたった（第 1 図）。

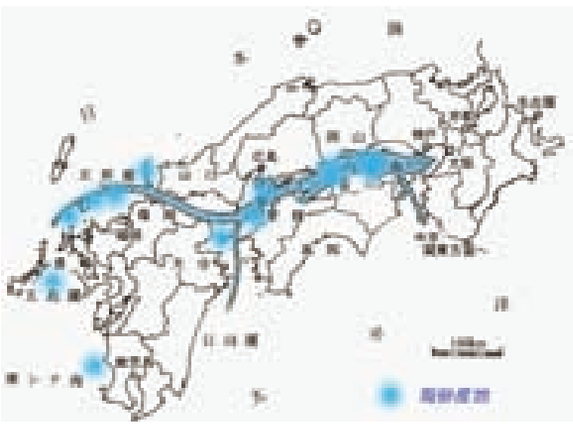
国内の骨材資源分布を見ると、西日本で砂利が著しく乏しい。国民一人当たりの砂利採取量は全国平均で約 0.6 立方ｍであるのに対し、近畿地方では 0.1 立方ｍに過ぎない（第 2 図）。近畿地方の骨材需要を満たすために、瀬戸内海や玄界灘で海砂が採取され、関西へと供給されてきた。そして関西の経済活動を支える重要な役割を果たしてきた（第３図）。



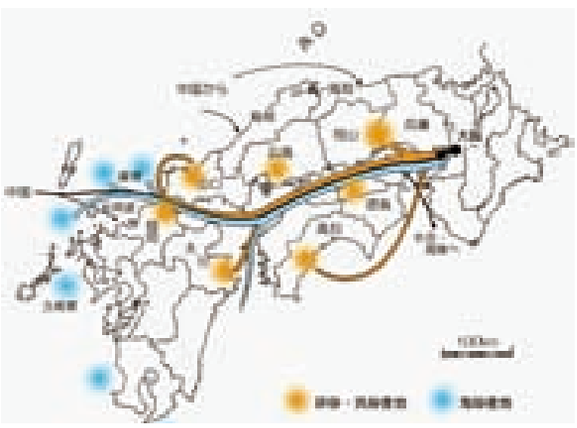
第 1 図　骨材の種別供給量の推移



第２図　地区別の骨材採取量



第３図　瀬戸内サンドロード（1990 年頃）



第４図　瀬戸内サンドロード（2005 年過）

2000 年代にはいると、環境を破壊するとの理由から瀬戸内海の海砂の採取が禁止され、中国からの輸入砂が重要な役割を果たすようになった（第４図。第５図にはには「影響的ない」の見出しがあるが、実際は？）。しかし 2007 年３月には中国が日本への砂の輸出を禁止し、大阪を中心とする西日本に波紋が広がっている（第５図）。

２．骨材資源の抱える諸問題と地質学

原油の約 3.5 倍にあたる年間７億トンもの巨大資源が採取され、使用される中で、様々な問題や摩擦も生じている。「多量の資源をいかに採掘するか？」、「安価・多量の資源をいかに運搬するか？」、「自然破壊をいかに少なくするか？」、「いかに自然を復元するか？」、「骨材資源をいかにキチンと使うか？」、「国土整備で自然破壊をしていないか？」などなど枚挙にいとまがない。

骨材の開発・利用に関する分野では、資源工学や土木・建築・海岸工学などの分野の研究者が大きな役割を果たしている。しかし、自然と向かい合うためには工学的な手法や技術では不十分であり、自然とのつきあい方が理解できる地質学が貢献できる問題も多い。

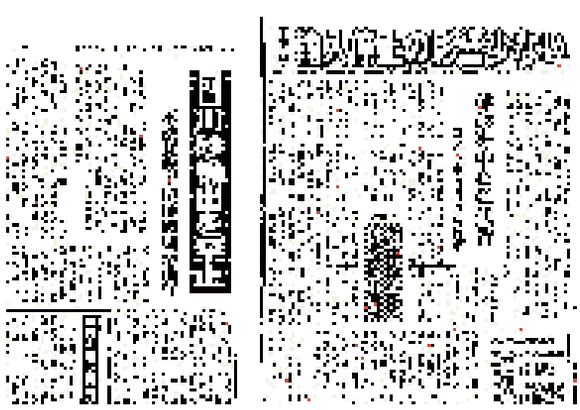
特に近年の地球環境変化によって、工学的シミュレーションの限界も見え隠れするようになり、長期的な環境変化を見抜くことが可能な地質学的な知識の果たすべき役割は日に日に大きくなりつつあるように思われる。

具体的に、地質学が貢献できる、貢献すべき課題について考えてみよう。

３．骨材資源の広域的・長期的見通し

骨材は多量の資源を確実に供給することが必須な資源であるにもかかわらず、これを研究する体制もなければ、投資も少ない。エネルギー資源や金属資源に比べれば、皆無に等しい。

今回の中国砂の禁輸により、関西を中心に四苦八苦の状況が続いている（第５図）。中国砂の輸入については、中国福建省の輸出業者の「砂利は採取してもすぐに上流から流れてくるから無尽蔵」との説明に、日本の業界は中国への依存度を高めていった。



第５図　中国禁輸の記事

地質学的に考えれば、中国は日本ほど砂利に恵まれておらず、急速な経済発展で、良質な砂利が不足することは目に見えていた。

地質学が骨材資源の状況を広域的・長期的に見通して、正確な情報を発信していれば、状況は変わっていたのだろう。

４．骨材資源の開発現場で期待される地質学

骨材資源の開発現場では、資源の確保・環境保全・安全の確保・経済的な開発などが重要な課題となる。

資源の確保には、どこにどのようにどのような資源が賦存するかの見極め（評価）がまず重要であり、地質学が担うべき分野の第一であろう。

「この方向に採掘すれば最も品質の高い資源が得られる」・「この方向に採掘するとこの部分が不安定になる」といった資源や安全に関する的確な情報が必要とされているにもかかわらず、地質学はその期待に十分に応えていないのが現状であろう。

資源や安全性の見極めができれば、それを環境にやさしく、安全に、かつ経済的な開発に向けて様々な手法や技術の結集が可能となるはずであり、地質学の知識はその中核となれるはずであり、なるべきであろう。

５．骨材と環境問題への地質学の貢献

（１）海砂利の採取と環境問題

2000 年以降、環境を破壊するとの理由から瀬戸内海の海砂の採取が禁止された。採掘によって海底の地形を変えてしまったことは事実で、環境を破壊したことは事実であろう。海浜砂の流出や漁業資源など環境へのダメージはどれほどのものであったのだろうか？

瀬戸内海の海砂利採取地の海岸、非採取地の海岸、九州や近畿・東海・関東の海岸をあちらこちら訪ねてみたが。海砂利採取地の海岸の方が破壊されているという傾向は見られなかった。

海砂の採取は自然の破壊を伴うことは事実。その罪は？自然は回復しているのか？していないなら、回復できないほどに破壊されたのか？それとも、自然破壊の主要因ではなかったのか？ 海砂利採取の功罪をきちんと検証・評価し、結果を世界に示すことは海砂を多量に採取した日本の義務でもあろう。

海砂利の採取禁止に伴い、瀬戸内海周辺地区で砕砂が増産され、海砂の代わりに供給されるようになった。各種骨材資源を採取・精製し、供給するまでの環境負荷を考えると、山を崩して硬質岩を破砕し、多量の廃棄物を出す「砕砂」に比べ、自然が造った海砂利は自然に優しい資源であったように思えてならない（第６図）。

種別	採取	製造	洗浄	廃物	配送	コメント
川砂	○	○	○	○	○	*1
陸砂	○	○	○	○	○	*2
山砂	△	○	○	○	△	*3
海砂	○	◎	△	◎	○	*4
砕砂	×	×	○	○	○	*5
洗砂	○	△	△	△	△	*6

環境負荷：小 ←◎ ○ △ × → 大

*1,*2：資源が先細り　*3：分布が限られる
*4：海洋への影響は？ *5：品質は安定
*6：品質にばらつき（負荷：小←◎○△　→大）

第６図　骨材の種別環境負荷
相対的な大きさを大局的に表示した

（２）日本列島総磯化？

海砂利の採取が浜を壊したか？との疑問に浜辺を歩いた。するとすぐに「海側に張り出した堅固な護岸の下の浜は消失し、手つかずの浜はほとんど失われていない」ことに気付いた。

砂浜海岸に堅固な護岸壁が造られ、宅地や道路・駐車場が造られてきた。護岸壁に波が砕け、砂を沖へと運び去る。護岸壁の下が砂浜から磯へと変化するには長い時間は要しない。たちまち「白砂青松」の砂浜は失われてしまうのである（第７図，第８図）。

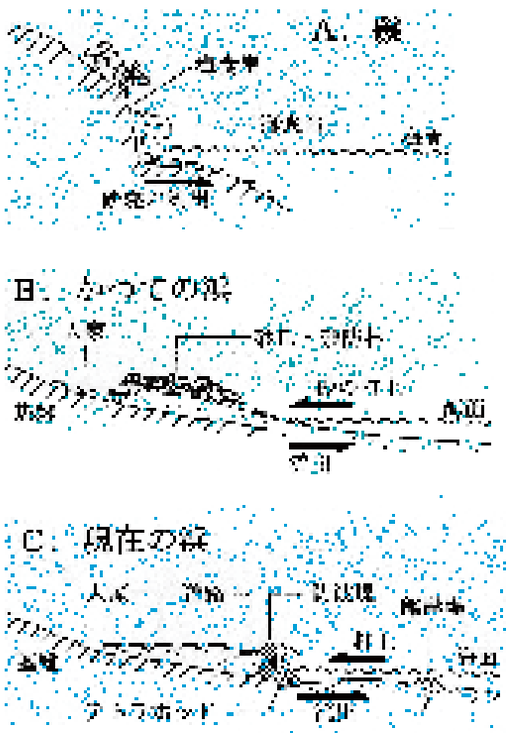
日本の海岸は構造物によって変形され、砂浜は磯へと変化しているようだ。日本列島の「総磯化」が進行しているのである。護岸にはいたる所に青海苔が育ち、磯化を端的にしめしている。

「護岸工事が海浜を破壊している」、海岸工学の研究者にもこのような主張が少なく無いように聞くが、依然として「大型護岸工事によって、力で自然を押さえこんで海岸を守る」ことが続けられている

のである。

このような方法には限界があるだろう。地球温暖化による気温上昇により、気象現象の振幅が拡大し、自然に対抗するために工事に工事を重ねるという悪循環に陥っているのではないだろうか？

自然の動きや反応を地質学的な知識で先読みし、自然の動きを利用して海岸を守る、「外科的な手法」から「内科的あるいは漢方的な手法」へ変更することが必要ではないだろうか。



第７図　かつての浜と失われた浜の模式図

さらに、地球温暖化による海面上昇により、水没の危機に直面する地域や国もでてきた。地球環境の変化に向けても、地質学は考え、行動すべきではないだろうか。

５．おわりに

地質学であまり研究対象とはなっていない「骨材資源とその関連領域」で調査･研究を行う中で、見受けられる地質学が果たすべき課題について紹介した。多くの方々がこれらの課題に取り組み、地質学が地球の将来に貢献することを期待したい。

参考文献

須藤定久ほか (2003-2007) 骨材資源調査報告書、平成 12 年度～ 17 年度、産総研地圏資源環境研究部門

須藤定久 (2007) 日本の砂・中国の砂・陸の砂・海の砂　ー砂を考え直すー、砂利時報、54 巻 6 号、p.30-33.

「世界の砂」や「日本の砂」をキーワードに検索容易な須藤のホームページで、上記文献等がご覧いただけますので、ご参照ください。

第８図　銚子市君ヶ浜。立派な護岸の前の砂浜はほとんど失われてしまった。

地圏環境資源研究における物理探査の役割

Role of Exploration Geophysics for Earth Resources and Underground Environment

京都大学大学院工学研究科　社会基盤工学専攻：松岡俊文
Kyoto University: Toshifumi MATSUOKA
Phone: 075-383-3201、e-mail:matsuoka@earth.kumst.kyoto-u.ac.jp

１．はじめに

地中の状態を非破壊で、リモートセンセング的に調べる技術として物理探査が知られている。この技術は、地層あるいは岩石の持っている物理的な性質を利用することが基本であり、大別すると弾性的な性質、電磁気的な性質、さらに密度の違いなどに着目して、地下の物理的な状態を可視化している（佐々他、1993）。またその歴史は古く、100 年を超える長い歴史を持っている（物理探鉱、1949）。

近代的な物理探査は、地下資源の探鉱のために利用されて多くの成功を導き、その有用性が広く認められた。その後、資源の探鉱のみならず、地圏における情報取得に際して、非破壊で行える最も重要な技術として、環境問題、土木分野、防災、文化財埋蔵物探査などの場面で、広範囲な利用が進んでいる。

この様に、物理探査技術は地圏に関連する情報収集の為の道具であるため、その利用に際しては明確な目的が存在している。この目的を達成すること、つまり技術に対する顧客満足度が充分高い間は、この技術が消え去ることを心配する必要はない。またどんな時代においても、地圏に対して常に新しい情報が要求されていると言う意味では、物理探査は問題解決型の学問であり、理学と言うよりは純粋な工学と考えた方が良い。かつて天文学の新しい発見には、より精度の高い望遠鏡を作ることが必要であったように、物理探査技術の革新は、いつも新しい学術分野に多大に貢献してきた。ここでは、この様な物理探査技術の現状と将来、また環境や資源開発分野で担える役割について考えてみたい。

２．物理探査の現状と問題点

物理探査は、良く知られているように、その作業形態から大きく次の様な３つの作業要素に分けることが可能である。

① フィールドにおいて、リモートセンシングを行い、地中からの応答である各種データを取得する。

② 取得されたデータを処理し、この応答を作り出した地下の物理的な性質を可視化する。

③ 可視化されたデータを基に、地質学的な解釈を行い、顧客の目的に対して、最も利用しやすい形で地下モデルを提供する。

ここで、これら３つの作業について、①経費、②品質、③重要度という視点で考えると、表１のようにまとめられる。

データ取得作業には、今日では色々な高価な機材が必要となると同時に、大量の人手を必要とする作業も多く、労働単価の上昇に見合うだけの作業の効率化は進んでいない。その結果、物理探査作業の中で最も経費を必要とする段階である。一方この作業は、観測の仕様が決まれば、ノイズレベルの様に数値化も簡単であり、品質管理は進んでおり、作業間での品質は均一化され、またマニアル化も進んでいる分野である。

一方データ処理作業は、デジタル化と近年の計算機の発達によって、経費的にはかつてのような状況ではなくなり、また多くの市販のデータ解析用ソフトが入手できるようになり、品質も標準化されてきた。

しかしながら物理探査において、最終的に顧客満足度を大きく左右する解釈作業に関しては、現状では多くの問題点が有る。この作業は、一定の手法に従って行えるというものではなく、データ取得から処理作業に対する深い知識と、さらに長年蓄積された経験を要求しているのが、現状である。そのため、作業結果の品質はバラツキが大きく、また作業自体が数値化できないため、経費的にもしわ寄せが及び、この作業の価格設定は、低く抑えられている。この様な状況は返って顧客満足度を下げ、物理探査の健全な発達を大きく阻害している。今後の物理探査の発展には、「解釈」という作業を工学的に再構築して行く必要がある。

表１　現状での物理探査作業とその性格

	経費	品質	重要度
データ取得	高	均一	中
データ処理	中	標準化	中
解釈	低	不均質	最大

図１　３次元物探船の例

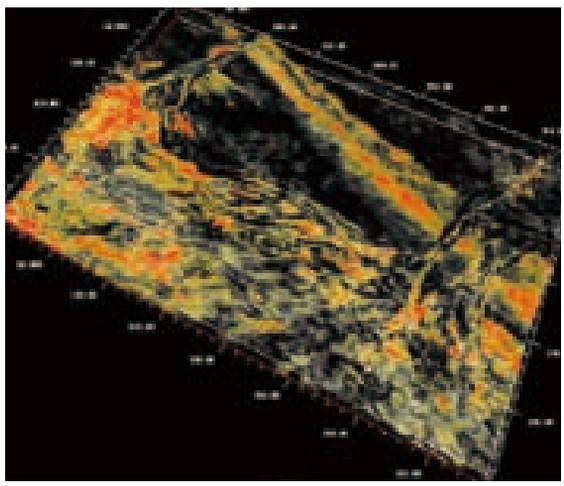


図２　３次元地震探査の結果の例

３．２次元探査から３次元探査へ

今まで物理探査技術では、調査測線を設定しその測線に沿って垂直方向に輪切りにした地下断面図の作成が出来ると主張してきた。しかしながら観測された記録が、信号源と観測点を結ぶ直線（調査測線に対応する）の真下からの応答である保証は無い。２次元調査測線で、正しく地下構造を反映しているのは、地下構造も２次元的な変化をしている場合のみである。当然の事ながら地下構造は３次元的に変化するものであり、必然的に調査測線という概念でなく、３次元的な面的調査の必要性を物語っている。この要求は古くからあったが、この夢が実現したのは比較的最近である。

まず石油の探鉱を目的にした反射法地震探査において、３次元調査が試みられた。それにともなう大量のデータ処理、解釈技術の開発が 1980 年代以降の反射法地震探査の中心的技術開発であった。この間の最大の課題は、コストとの戦いであった。その結果現在では、得られる情報量と結果の正確さ、さらに利用範囲の拡大と言う点で、３次元調査に費やされる支出は十二分に引き合うというのが、資源探査業界では一般的な見解である。

３次元地震探査ではデータ取得が最も重要なステップであるが、解決すべき技術的課題も多く含まれている。海洋での３次元地震探査調査においては、この目的に特化した特殊な調査船が必要となってくる (図１参照)。この調査船は、船尾より人工震源となるエアガンを曳航し、さらに受振器が内装してある 6000m 以上のストリーマケーブルを 10 本以上も曳航し、一度に 5000 チャンネルぐらいのデータを約 30 秒間隔程度で連続観測する。さらに取得されたデータは、基礎的な処理は船上でなされるのが一般的である。この様にして取得されたデータの一例を図２に示す。これは現在では地下 1000m を超す深度での地下構造の鳥瞰図である。かつてここは大陸斜面の縁に位置し、そこには陸棚谷が幾つか存在し、その流れが地表からの堆積物を運び、海底に扇状地を作り出していたことが、ありありを手に取るように認識できる。

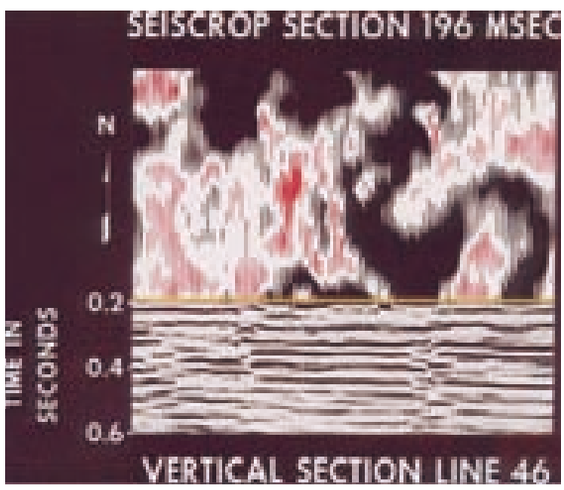


図３　３次元地震探査データの例。上半分はタイムスライス表現でチャネル構造が認識出来るが、下半分の通常の断面図では、これが認識できない（Brown, 1996）。

また、調査手法が３次元化されたことで、それまでは見ることが出来なかった地下の姿が、見えるようになってきた。その例を図３に示す。この図の黒くなっている部分は、かつての河道を表しているが、それは今までの断面図（下半分）では認識不可能であった。これは平面的なデータが取得されたため、岩体の「形」という情報が取得出来るようになったからである。そしてこの様な今までとは全く異なった地下情報は、堆積学において新しい地震地形学（Seismic Geomorphology）と呼ばれる分野を生み出しつつある（Davies, et al. 2007）。

地質学的な情報を得る場合には、露頭の観察から始める。露頭での観察は表面だけであ

り、２次元調査に対応している。地質技術者は、これらのデータを基に地下構造を推定し、地下モデルを作り上げる。物理探査手法は地下に関する情報を提供するが、このような今まで地質技術者が行ってきた露頭での観察から得られる情報とは全く違っている。現代の物理探査データは突き詰めて行けば、計算機のメモリー上にある数字の羅列でしかない。この数字の羅列から、地質学的に意味のある情報を引き出し、あたかも目の前に露頭があるように再現するのが、物理探査データの可視化技術であり、その究極としてバーチャルリアリティ (VR) 技術がある。

近年における IT 技術の広がりは、反射法地震探査作業において、今までとは全く異なった状況を作り出しつつある。３次元地震探査データの解釈作業において IT 技術を利用する大きな理由は以下のような理由である。

①各種データのデータベース化が容易
②データと地下モデルの可視化が容易
③地質技術者が構築した地下モデルの修正が容易
④将来像の予測（シミュレーション）とその可視化が容易

近年ほとんどの学問分野に、デジタル化の波が押し寄せている。地質学においてもその傾向は強く、多くのデータはデジタルデータとして保存されるようになってきた。その結果、既存データの集約とデータベース化はさらに押し進められた。通常物理探査を行う地域に対しては、何らかの先験的な地質学的なデータや情報が存在している。さらに別の探査法を適用した結果も存在している場合が多い。民間企業や大学の研究室レベルにおいても、IT 技術を利用することでこれらをデータベース化し簡便に利用できる環境が、提供されつつある。特に地質情報は位置情報が本質的であり、今後は GIS を中心とし、物理探査によって取得された情報も取り込んだシステム構築が益々進むと考えられる。

異種のデータを総合させながら地下モデルを構築し、最終的にはあたかも地質技術者が露頭を見るように、地下の状況を目の前に可視化することは、対象物が岩盤や地層である場合には、非常に重要である。地下の状態に対して技術者が、通常の露頭のようなイメージを持つことは、既存データとの比較や技術者の直感にとって非常に有益である。これらは地下モデルの可視化技術として、近年バーチャルリアリティ技術などを取り込み一層の技術開発がなされている（Middum, et al. 2000）。

このようなバーチャルリアリティ技術を用いることであたかも地下を飛行する飛行機のコックピットに座っているような状況も作り出せる。この様な技術は一見すると表示の為だけと考えられがちであるが、実際に利用し地質的な解釈作業を行ってみると、著しい作業能率の向上が認められている。図４にはこの様な例を示す。

３次元探査は何も反射法に限ったことではない。図５に示すのは、空中電磁法によって取得された地表近傍の比抵抗マップである。この図においても、平面に投影した形のデータを用いることで、旧河道が認識出来ている。

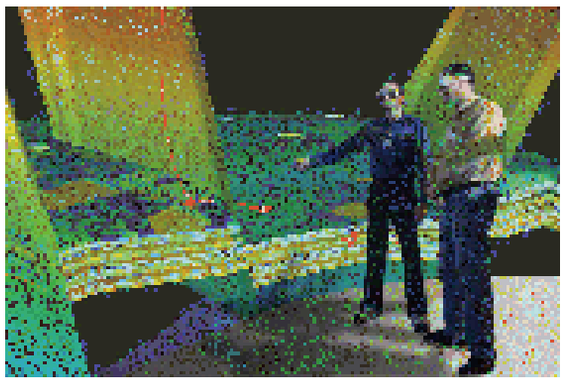


図４　バーチャルリアリティ技術による可視化

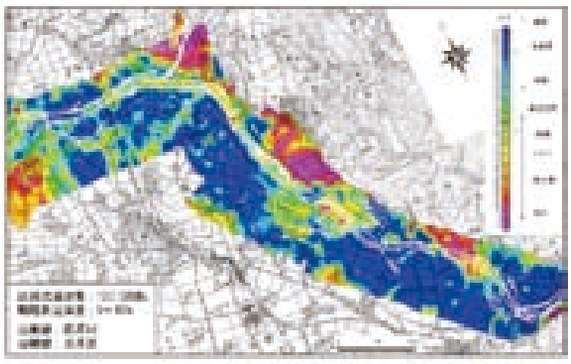


図５　最上川沖積平野部での空中電磁法の測定結果（大日本コンサルタント）

４．おわりに

現在物理探査は、資源開発分野、土木建設分野、環境分野、防災分野等、多方面に用いられている。そしてこの役割は今後とも続くと考えられる。しかしながらその適用にあたっては、①最終的な探査目的を明確にし、②目的に最も適した手法を選び、③最適な調査仕様を検討し、④単一でなく複数の手法の適用も検討し、⑤地質学的解釈を正しく行う、事が必要である。物理探査技術者は、これらの期待に応えるため、その技術的要求を認識し、目的達成のために貢献することが必要である。

引用文献：

佐々宏一，芦田　譲，菅野　強（1993）：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版

物理探鉱　(1949)：十周年特別号、物理探鉱技術協会

Midttum, M., Helland, R., and Finnstrom, E.(2000) : Virtual reality – adding value to exploration and production、The Leading Edge, Vol. 19、pp.538-544, 2000

Davies, R.J., Posamentier, H.W., Wood, L.J., and Cartwight, J.A. Ed. (2007) : Seismic Geomorphology : Application of Hydrocarbon Exploration and Production, Geological Society, London, 274p

BROWN, A.R., (1996):Interpretation of Three - Dimensional Seismic Data, AAPG MEMOIR 42

地下微生物研究の地圏環境修復への応用

Subsurface microbiology and its application for bioremediation of subsurface contamination

地圏環境評価研究グループ：竹内美緒
Geo-analysis research Group: Mio TAKEUCHI
Phone: 029-861-2478, e-mail: takeuchi-mio@aist.go.jp

１．はじめに

有害物質で汚染された地圏環境の修復は，重要な課題である。なぜならば，表層土壌の汚染は直接摂取による健康への危険性があり，また土壌圏以深の汚染については地下水を汚染し，地下水経由で健康被害を生じさせる可能性があるためである。地圏環境修復には地下水揚水曝気など物理的手法や土壌の洗浄や不溶化などの化学的手法といった様々な手法が用いられている。もう一つ重要と考えられているのが微生物や植物を利用した生物学的手法である。生物学的手法は，二次汚染が少ない，コストが低い，低濃度の汚染に適用可能といった利点が考えられている。

ここでは，微生物に注目する。微生物の種類や機能は様々であり，地圏環境汚染の浄化への利用法も様々である。その中で，Monitored Natural Attenuation (MNA) と呼ばれる方法がある（US EPA, 1999; 駒井・川辺，2004）。Natural Attenuation とは汚染物質濃度が１）希釈や拡散，２）化学反応による分解，３）微生物による分解，などにより自然に減衰することをいう。MNA とは現場に高い自然浄化力が存在する場合，これを適切に監視，管理することによって安全性を確保する方法であり，米国で汚染現場の浄化にお金がかかりすぎるために生まれた方法である。微生物の自然浄化能力を正確に評価するためには，地下環境での微生物生態に関する基礎知識が不可欠である。地下圏微生物の研究は 80 年代より盛んに行われてきた。その多くは地下水や透水層を主な対象にしたものであった（Fry et al., 1997: Kölbel-Boelke et al., 1988）。一方で，これまであまり注目されてこなかった難透水層が新たな研究対象として興味深い場所であることや，微生物活動や汚染物質の自然浄化に重要な役割を果たしていることが明らかになりつつある。透水層に比較して，難透水層の微生物に関するこれまでの知見は極めて限られている。そこで我々のグループでは，難透水層に注目し，そこに存在する微生物に関する基礎研究から汚染浄化への応用を目的とした研究まで幅広く行なったきたため，その概略を紹介する。

２．難透水層に残存する過去の微生物の遺伝子

1998 年，Coolen and Overmann は湖底堆積物を採取し，光合成細菌のバイオマーカーである okenone とともに 16S rRNA 遺伝子の検出を行なった。その結果，湖底下約 4 m，およそ 9,000 年前までの堆積物から光合成細菌の遺伝子を検出することができた。堆積物中は光があたらない環境であることから，光合成細菌が生きているとは考えられない。堆積物から検出されたこれらの遺伝子は水柱で生きていた微生物が堆積し，残存しているものに由来すると考えられた。また白亜紀の海洋無酸素事変時に堆積した黒色頁岩から海洋の硫酸還元菌の遺伝子が検出され，これについても過去の微生物の名残であると考えられた（Inagaki et al., 2005）。我々は，このような過去を反映する微生物遺伝子が普遍的に難透水層に存在しているのか，また地質学的に利用することが可能であるのかを解明するため，主に関東平野の沖積層の粘土質層を対象にし，地質情報研究部門や生物機能工学研究部門と共同で調査を行なった。4 ヶ所の掘削試料から，後期更新世から完新世の粘土層を採取し，微生物遺伝子の解析を行なった。その結果，全ての解析可能であった海成層から，現世の海底堆積物に存在している微生物の遺伝子と非常に近い遺伝子を検出することができた（図 1，Takeuchi et al., submitted）。例えば古細菌の ANME と呼ばれるメタン生成菌のグループは，現世の海底堆積物において，ある種の硫酸還元菌と共に嫌気的メタン酸化に関与していることが知られている（Boetius et al., 2000）。ANME に属する古細菌の遺伝子が検出されたことは，古東京湾堆積物において，嫌気的メタン酸化がかつて行われていたことを示すものであると考えられた。また，南海トラフ付近の海底堆積物から得られた微生物遺伝子に近縁なものが多く，地域的な共通性を示している可能性も示唆された。このような結果は，今後微生物地理学を解明する上でも重要である。

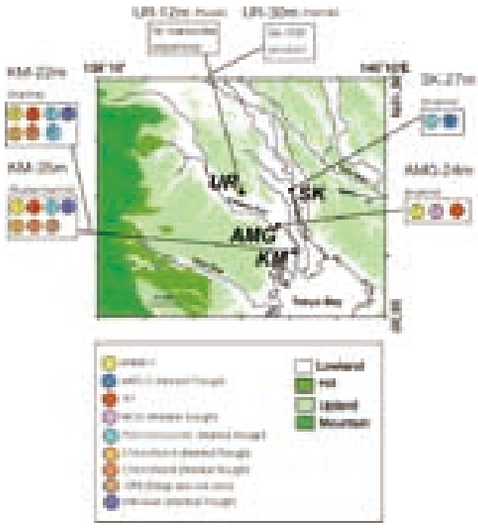


図１. 現世海底堆積物から得られる微生物遺伝子に近縁な微生物遺伝子の分布

以上の結果は多くの研究シーズを含んでいる。過去の環境を示す微生物遺伝子は幅広く存在していると考えられ，堆積物の堆積環境の新たな指標となる可能性がある。しかし，我々は約 12 万年前の堆積物から微生物遺伝子自体を回収することができなかった。死んだ生物の遺伝子 (ancient DNA) は，通常の環境下（15℃，pH 中性）では化学分解を受けるために 10 万年程度しか残存しないと言われている（Hofreiter et al., 2001）。それを考慮すると妥当な結果であるとは思われるが，手法の改良により，より多くの試料から多くの情報を得る事が可能であろう。白亜紀の事例は，特殊な環境下では微生物遺伝子が長期間残存する可能性も示している。それについても更なるデーターによって確証することが求められる。また我々は 16S rRNA 遺伝子にしぼった解析を行なったが，微生物遺伝子は機能遺伝子など無数に存在する。どの遺伝子をターゲットにすれば有意義な情報を得られるのかの検討も必要と考えられる。汚染浄化に関連して言えば，堆積物中で生きて活動している微生物の情報を得ることが必要であるが，その場合にはこのような　ancient DNA　は邪魔な存在となる。これと生きている微生物の遺伝子を区別して解析することも今後必要であろう。

近年，グリーンランドの氷から様々な植物や動物の遺伝子が回収された。それらを解析した結果によりかつて森林であった時代を推定することができた（Willerslev et al., 2007）。微生物については，微生物の生態自体未解明な部分が多かったが，近年の革新的な塩基配列解析技術の開発を受け (Hall, 2007)，今後飛躍的に理解がすすむと期待される。微生物遺伝子に関しても近い将来新たな過去の地球の姿を解明することができる存在となることを期待したい。

３．難透水層中の微生物による汚染の自然浄化

従来難透水層は微生物研究の主流な対象ではなかったことを述べたが，それは微生物活性が低いと考えられてきたためである。例えば，好気性の従属栄養細菌数だけでなく，全菌数（アクリジンオレンジによる計数）や，ATP 量（全微生物活性の指標となる）が，砂礫層や不飽和帯の砂質粘土ロームと比較し，シルト質粘土層などで低いことが報告されている (Beloin et al., 1988)。また ^{14}C を用いた手法により，有機物の好気・嫌気分解活性が白亜系の粘土層中では上部の砂層より低いことも明らかにされている (Phelps et al., 1989)。先に述べた，過去の環境を反映する微生物遺伝子の存在からも，難透水層は極めて死の世界に近いと言ってよいかもしれない。

なぜ，難透水層中では微生物活性が低いのか？ Fredrickson et al. (1989) は地層中の好気性従属栄養細菌数と堆積物の粘土の割合の間に負の相関があることを示し，粘土の割合が重要であると考えた。しかしその後，粘土の割合だけではなく，空隙サイズ分布が重要であることを報告している。白亜紀の砂岩，シルト岩，頁岩について微生物活性と空隙サイズ分布（水銀ポロシメータによる）を測定した結果，0.2 μm 以下の空隙しか存在しない試料では微生物活性が全く検出されなかった (Fredrickson et al., 1997)。微生物細胞の大きさが，1 μm 前後であることを考えると 1 μm 前後の空隙というのは微生物にとって，生きるか死ぬかのぎりぎりのラインであると考えられる。

以上の結果を逆に考えると，空隙サイズが大きい難透水層，すなわち圧密を受けていない表層近くの若い地層，においては微生物は十分活動しうるということを示しているのではないだろうか。若い粘土・シルト層の空隙サイズとしては，中央値として第三紀のロンドンクレー：0.1μm，更新世の粘土：0.3-2 μm との報告がある (Tanaka et al., 2003)。我々が沖積層の粘土層を用いて測定を行なった結果では，< 1.2 μm の中央値が得られた（図２, Takeuchi et al.，2007）。また地表下数 m では 1.2 μm, 地表下数十 m では 0.3 μm と深度と共に減少する傾向も見られた。このように第四紀の堆積物では白亜紀の頁岩などに比べると大きな空隙を有しており，特に表層近くの難透水層は相対的に大きな空隙があることが証明された。

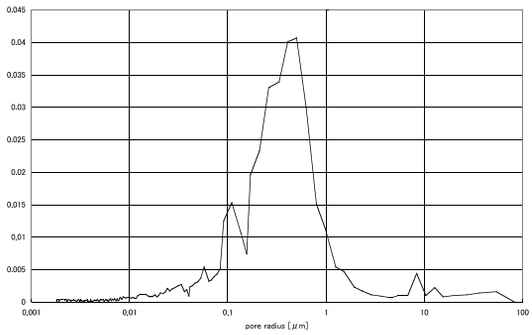


図２. 沖積層の空隙サイズ分布の一例

表層近くの難透水層における微生物活性は，他の研究からも示されている。硝酸性窒素は，主要な地下水汚染物質の一つである。主に肥料などに由来することから広範囲に汚染が広がっている。硝酸は，脱窒と呼ばれる微生物活動により，無害な窒素へと変換される。米国の，地表部にシルト質層が３ｍ以上存在する地域では，わずかな下向き方向の地下水の流れが観測されており，ここでは，硝酸イオンが表層から下向きに浸透しているものの，難透水層内の還元性の高い深度では硝酸濃度の減少がみられ，脱窒が起きていると考えられた (Robertson et al., 1996)。また Ernstsen et al.(1998) は地表下数ｍの難透水層において実際に微生物による脱窒活性を検出している。

揮発性有機塩素化合物汚染に関して，難透水層は従来バリアと考えられてきたが，近年では，難透水層内にも揮発性有機塩素化合物が浸透し，地下水汚染の長期化を引き起こす原因となっていると考えられている。このような地表近くの難透水層が汚染されている場合，微生物による分解が起きているのではないかと考えられる。揮発性有機塩素化合物の嫌気環境での分解は，主に Dehalococcoides というグループの微生物によって行われる。脱塩素反応により，テトラクロロエチレンなどが電子受容体として用いられ，塩素が一つずつはずれていき，最終的に無害なエチレンに変換される。この時電子供与体として用いられるのは水素であるが，水素は主に有機物の嫌気的分解によって生成されると考えられる。そのため嫌気的で有機物が豊富な難透水層内はこのような微生物活動に適した環境と予想される。

そこで我々は，地表近くの難透水層汚染が推測されている場所で掘削調査を行なった。この現場では，難透水層の下の透水層内で微生物による自然浄化が生じて入ることがこれまでの我々のグループの調査により確認されていたが（川辺ら，2004），難透水層に関する情報は全くなかった。掘削の結果，地表から約３ｍまで有機質粘土層が存在し，その下に約７ｍまで第１透水層が存在していた(図３)。

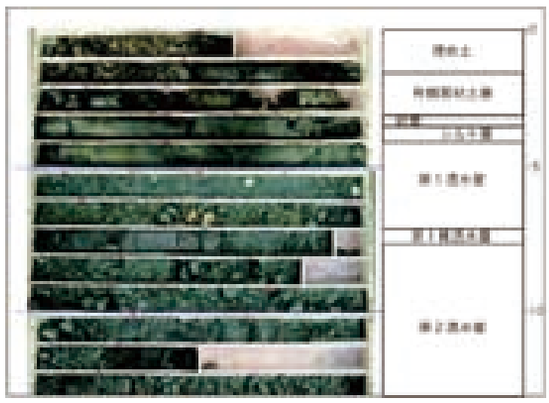


図３. 難透水層汚染現場のコア試料と柱状図

汚染源付近では，粘土層上部より，粘土層内部において汚染濃度が高く，難透水層汚染現場であることが確認された（図４）。

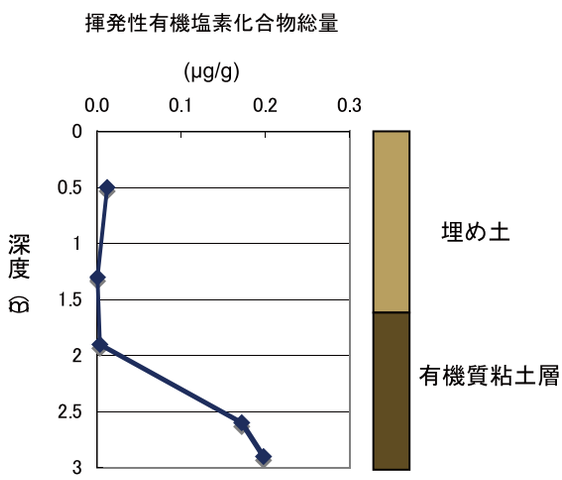


図４. 粘土層中に分布する汚染物質

また，粘土層上部では汚染物質であるテトラクロロエチレンが多く，粘土層内では，その分解産物であるジクロロエチレンが最も多くなり，この結果からも粘土層内で嫌気的微生物分解が起きていると考えられた。さらに我々は，微生物学的な裏付けをとるために，テトラクロロエチレンの分解に関与する，嫌気性水素生成菌（図５），Dehalococcoides の計数を MPN 法，リアルタイム PCR 法を用いて行なった。その結果，有機質粘土層内にこれらの菌が高密度に存在していることを確認することができた。また，潜在活性を測定するために，この粘土層にテトラクロロエチレンのみを添加して，培養を行なった。その結果，テトラクロロエチレンの完全な分解が確認された（テトラクロロエチレン濃度のみ示す，図６）。すなわち，地表近くの難透水層中では，そこに存在する有機物を利用したテトラクロロエチレンを分解する微生物生態系が活動しているのである。

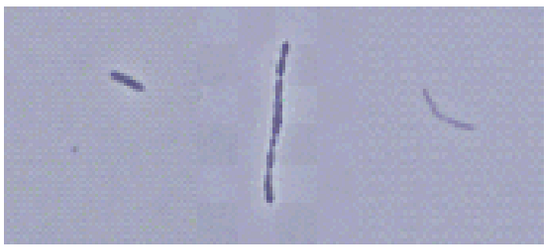


図５. 粘土層中の嫌気性水素生成菌群集

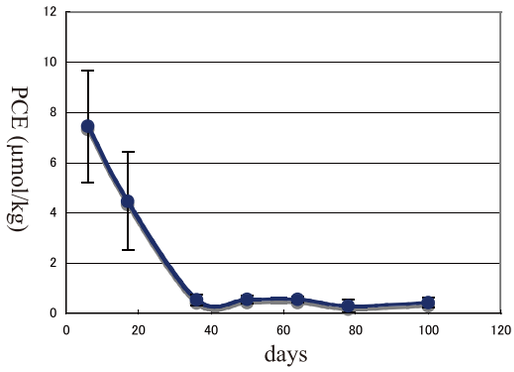


図６. 粘土層中の微生物によるテトラクロロエチレンの分解

４．おわりに

難透水層は興味深い微生物基礎生態学の対象であるたけでなく，汚染物質の自然浄化においても重要な場所であることが明らかにされた。今後は新たな分子生物学的解析技術や，同位体を利用した現場活性測定技術など，まだあまり適用されていない手法を取り入れ，難透水層の重要性を更に解明していきたいと考えている。

引用文献：

Beloin, R. M., J. L. Sinclair, and W. C. Ghiorse. 1988. Distribution and activity of microorganisms in subsurface sediments of a pristine study site in Oklahoma. Microb. Ecol. 16:85-97.

Boetius, A., K. Ravenshlag, C. J. Schubert, D. Rickert, F. Widdel, A. Gleseke, R. Amann, B. B. Jørgensen, U. Witte, and O. Pfannkuche. (2000): A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. Nature 407:623-626.

Coolen, M.J., and Overmann, J. (1998): Analysis of subfossil molecular remains of purple sulfur bacteria in a lake sediment. Appl. Environ. Microbiol., 64, 4513-21.

Ernstsen, V., Binnerup, S.J., and Sorensen, J., (1998): Reduction of nitrate in clayey subsoils controlled by geochemical and microbial barriers. Geomicrobiol. J., 15, 195-207.

Fredrickson, J.K., Garland, T.R. Hicks, R.J., Thomas, J.M., Li, S.W., and McFadden K.M. (1989): Lithotrophic and heterotrophic bacteria in deep subsurface sediments and their relation to sediment properties. Geomicrobiol. J,. 7, 53-66.

Fredrickson, J.K., McKinley, J.P., Bjornstad, B.N., Long, P.E., Ringelberg, D.B., White, D.C., Krumholz, L.R., Suflita, J.M., Colwell, F.S., Lehman, R.M., Phelps, T.J., and Onstott, T.C. (1997): Pore-size constraints on the activity and survival of subsurface bacteria in a Late Cretaceous shale-sandstone sequence, Northwestern New Mexico. Geomicrobiol. J., 14, 183-202.

Fry, N.K., Fredrickson, J.K., Fishbain, S., Wagner, M., and Stahl, D.A. (1997): Population structure of microbial communities associated with two deep, anaerobic, alkaline aquifers. Appl. Environ. Microbiol., 63, 1498-504.

Hall, N. (2007): Advanced sequencing technologies and their wider impact in microbiology. J. Exp. Biol. 209:1518-1525.

Hofreiter, M., D. Serre, H. N. Poinar, M. Kuch and S. Pääbo. (2001): Ancient DNA. Nature Rev. Genet. 2:353-359.

Inagaki, F., Okada, H., Tsapin, A.I., and Nealson, K.H. (2005): Microbial survival: the paleome: a sedimentary genetic record of past microbial communities. Astrobiology, 5, 141-53.

川辺能茂，駒井武，小川桂子，坂本靖英，大岩敏男，MNA フォローアップ部会 (2004): 山形県における有機塩素化合物汚染の MNA に関する研究−減衰挙動と地下水質との関連性について−，第 10 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集

駒井武，川辺能茂 (2004):MNA，土壌・地下水汚染の原位置浄化技術，平田建正（監），（株）シーエムシー出版，121-128.

Kölbel-Boelke, J., Anders, E-M., and Nehrkorn. A. (1988): Microbial communities in the saturated groundwater environment II: Diversity of bacterial communities in a Pleistocene sand aquifer and their in vitro activities. Microb. Ecol., 16, 31-48.

Phelps, T. J., E. G. Raione, D. C. White, and C. B. Fliermans. 1989. Microbial activities in deep subsurface environments. Geomicrobiol. J. 7:79-91.Robertson, W.D., Russell, B.M., and Cherry, J.A. (1996) :Attenuation of nitrate in aquitard sediments of southern Ontario. J. Hydrol., 180, 267-281.

Takeuchi, M., Hanada, S., Tamaki, H., Tanabe, S., Nakazawa, T., Miyachi, Y., Kamagata, Y., Komai, T., and Kimura, K. (submitted): Wide distribution of remnant prokaryotic DNAs in Late Pleistocene to Holocene mud sediments.

Takeuchi, M., Tamaki, H., Tanabe, S., Uchiyama, E., Takahashi, M., and Yoshioka, H. (2007): Living methanogens in the Holocene mud. ISME-Asia 2007, Matsuyama, Japan, ISME-38.

Tanaka, H., D. R. Shiwakoti, N. Omukai, F. Rito, J. Locat, and M. Tanaka. 2003. Pore size distribution of clayey soils measured by mercury intrusion porosimetry and its relation to hydraulic conductivity. Soils and Found. 43:63-73.

US EPA (1999): Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action, and underground storage tank sites. Office of Solid Waste and Emergency Response Directive (OSWER) 9200.4-17P.

Willerslev, E., E. Cappellini, W. Boomsma, R. Nielsen, M. B. Hebsgaard, T. B. Brand, M. Hofreiter, M. Bunce, H. N. Poinar, D. Dahl-Jensen, S. Johnsen, J. P. Steffensen, O. Bennike, J-L. Schwenninger, R. Nathan, S. Armitage, C-J. de Hoog, V. Alfimov, M. Christl, J. Beer, R. Muscheler, J. Barker, M. Sharp, K. E. H. Penkman, J. Haile, P. Taberlet, M. T. P. Gilbert, A. Casoli, E. Campani, and M. J. Collins. (2007): Ancient biomolecules from deep ice cores reveal a forested southern Greenland. Science 317: 111-114.

地下水環境研究グループの紹介

Introduction of the Water Environment Research Group

地下水環境研究グループ長：石井武政
Leader, Water Environment Research Group: Takemasa ISHII
Phone: 029-861-3827, e-mail: take-ishii@aist.go.jp

１．グループの研究目的

地下水は、地域のあるいは地球規模の水循環・水収支の過程において極めて重要な位置を占めるが、一般に滞留時間が長く、また地上からは容易に見ることができないという特性を有している。このような特性を理解しつつ、野外調査や実験を通じて地下水に関する具体的なデータを取得し解析していくことは、エネルギーや環境などに関連する様々な課題に対処する上で欠かせない。地下水環境研究グループは、流域規模の水循環・水収支の評価、地下水資源の有効利用に向けた現地調査とシステム提案、地下水に関する知的基盤情報の提供を主要な研究としている。

２．グループの構成と研究予算・課題

1) グループメンバー

石井　武政（リーダー）
安川　香澄
町田　　功
田口　雄作（テクニカルスタッフ）
宮崎　桂子（テクニカルスタッフ）
内田　洋平（地質情報センター出向中）

他に、ユニット内外と所外からの研究分担者、客員研究員からなる。

2) 主な研究予算と課題名

・運営費交付金「タイにおける地中熱ヒートポンプ利用の実証試験」（継続中）
・運営費交付金「水文環境図の作成」（継続中）
・運営費交付金「大都市圏プロジェクトの地下水課題」（継続中）
・科研費予算「地下水流動を考慮した群杭を用いた季節間蓄熱システムの実用化」（平成 19 年度新規）
・文科省 RR2002「人・自然・地球共生プロジェクト」協力業務予算「地下水の収支・循環機構解明のためのモニタリングと地下水循環モデルの構築」（平成 18 年度終了）

なお、「微生物の遺伝的特性を用いた水文地質学的シーズ研究（運営費交付金）」を本年度途中で開始した（別の機会に報告予定）。

３．平成 18 年度までの研究進捗状況

1) 「タイにおける地中熱ヒートポンプ利用の実証試験」：タイ地下水資源局（DGR）との研究協力により、タイ・カンパンフェット県の DGR 構内に、地中熱ヒートポンプによる屋内冷房システムを設置した。本システムは、熱交換井（＋ダブル U 字管）、ヒートポンプ（水－水タイプ）、屋内水槽（＋冷却水用ポンプ）、室内冷房用ファンコイル、屋外水槽（＋ U 字管循環水用ポンプ）からなる。地中熱冷房利用の実証試験として、2006 年 10 月より週日の日中のみ冷房運転を行い、システムの消費電力、室温、ヒートポンプへの 1 次流体と 2 次流体の温度、熱交換井内および周辺地下の温度変化等を連続測定している。

2) 「水文環境図の作成」：水文環境図の第 5 号となる「筑紫平野」の編集を行った。「筑紫平野」には、新たに「地下温度場データベース」を追加して内容の充実を図るとともに、図中や説明文中に現れる専門用語について理解の一助となるよう用語の解説機能（リファレンス機能）をつけた。また、第 6 号となる「山形盆地」の調査に着手し、これまで観測井 24 地点、河川水 8 地点の現地水文調査と水質分析を完了した。図 1 に成果の一端として筑紫平野における地下水の電気伝導度分布を示す。

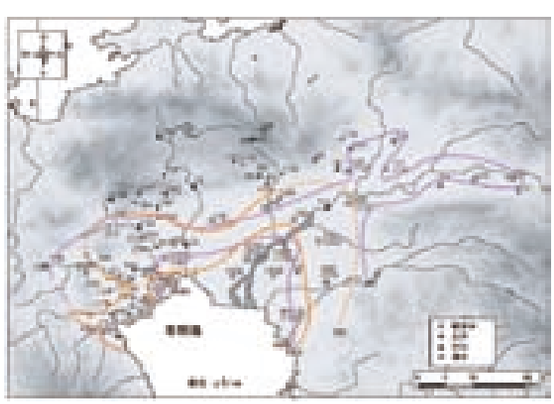


図１　筑紫平野における地下水の電気伝導度分布（内田ほか，印刷中）．
黄色の線が標高 -50m より浅い地下水、紫色の線が標高 -50m より深い地下水の電気伝導度等値線を表している。

3) 「大都市圏プロジェクトの地下水課題」：首都圏西部域のおよそ荒川と多摩川に挟まれた地域を対象に、総格子数約 52 万の地下水循環モデル基本バージョンを構築した。本モデルには関東平野の地下地質に関する既往の報告から代表的な地質構造（層序と断層）および土地利用から推定した地表の被覆状態が組み込まれており、これに平均的な降雨条件を設けてモデルを初期化した。

4) 「地下水の収支・循環機構解明のためのモニタリングと地下水循環モデルの構築」：文科省の「人・自然・地球共生プロジェクト」の中で、黄河領域の地下水循環モデルの構築と地下水資源の将来予測を担当し、水文資料収集、凍土分布に関するモニタリングと物理探査、水文地質構造の解析などに努めた。ついで、これらのデータをフィードバックしつつ、研究対象地域の地下水循環モデルを再構築して、黄河領域の現在と過去 20 年間にわたる地下水頭の再現、さらにシナリオに基づく 2020 年まで 5 年毎の地下水状態の予測を行った。英文研究成果報告書を本年度出版する運びである。

4．平成 19 年度の研究計画および期待される成果

1) 「タイにおける地中熱ヒートポンプ利用の実証試験」：本研究は、世界的にも例がない熱帯における地中熱利用システムの有効性を確かめ、かつ同システムの普及を図るために、タイに地中熱ヒートポンプを設置して実証試験を行うことを目的としている。地中熱ヒートポンプ（図２）は、高いシステム効率で地球温暖化を抑制し、ヒートアイランド現象を緩和する効果がある。1 年間の運転実績により、システム効率、地下の熱物性について解析する予定である。タイの広域的地下温度分布データを元にすれば、他地域でのシステム効率を推定できるであろう。

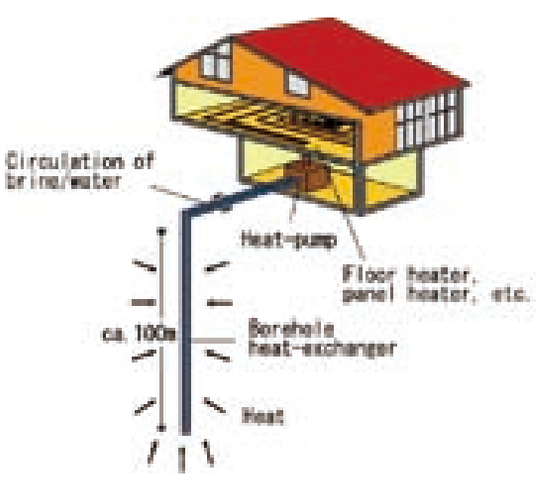


図２　地中熱ヒートポンプシステム概念図（環境省パンフレット英文版より）.

2) 「水文環境図の作成」：近年、国民の環境に対する関心が高まり、その意識は地下水環境にも向けられつつある。この流れを受けて出版されることになった「水文環境図」シリーズでは、主に地下水の質、すなわち溶存化学成分と安定同位体比に焦点を当てている。本年度は、「筑紫平野」の出版および「山形盆地」の現地水文調査・分析を行う。なお、「山形盆地」では水質分析値として新たに重金属類 9 項目を加えており、水文環境図のさらなる充実を目指している。

3) 「大都市圏プロジェクトの地下水課題」：首都圏西部域を対象フィールドに地下水の現況および過去 60 年間の地下水の変遷を再現する地下水循環高精細モデルを構築することを目的としていえる。本年度はモデルのバージョンアップを図るため、帯水層構造の見直しと細分化を行う。また、モデルの妥当性を検証するのに必要な水質や同位体についてのデータ収集に努めることとする。なお、本研究課題は地質情報研究部門と内部連携して進められる。モデル化の範囲を下に示す（図３）。

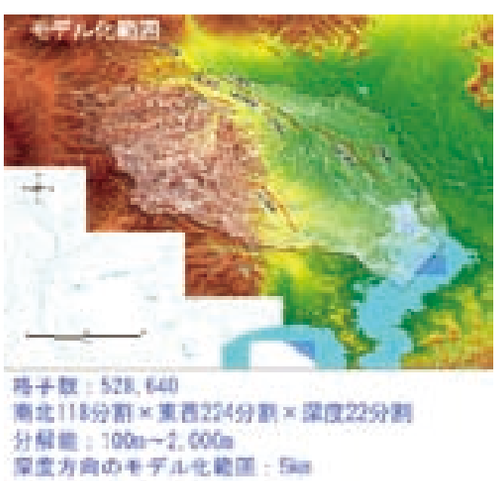


図３　首都圏西部域地下水循環モデル範囲（地圏環境テクノロジー原図）.

4) 「地下水流動を考慮した群杭を用いた季節間蓄熱システムの実用化」：四季の変化のある我が国においては、地中熱を利用した冷暖房システムでは採熱・排熱を行う熱交換杭は相互干渉しないように従来 5m 程度離して設置されてきたが、地中に蓄えられた熱は春・秋のシステムの運転休止期間中に周辺地盤に拡散してしまう。この季節間での熱の拡散を防ぐため、従来とは逆に熱交換杭を 1.5 － 2m 間隔に配置する　群杭　の効果により夏の熱を冬まで保存する。本研究は、このようにして蓄えた熱を冬季の橋梁融雪・凍結抑制に活かす技術を確立し実用化を図ることを目的としており、福井平野を対象に実施する予定である。

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: koma@ni.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、二酸化炭素の地層処分の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。

このような分野の研究を効率的に進めるため、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、英国インペリアルカレッジ、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
高橋保盛
杉田　創
竹内美緒
川辺能成
原　淳子
井本由香利
坂本靖英
羽田博憲　＊ﾒﾀﾝﾊｲﾄﾞﾚｰﾄ研究ﾗﾎﾞ（兼務）
今泉博之　＊ｲﾉﾍﾞｼｮﾝ推進本部（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、覚本真代、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（ｴﾈﾙｷﾞｰ）」
運営費交付金「土壌・地質環境リスク評価技術の開発」（部門重点化予算）
運営費交付金「難透水層の汚染物質挙動と微生物浄化機能の評価」（競争グラント）
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「地圏環境インフォマティックスのシステム開発と全国展開」（文部科学省）
委託費「メタンハイドレート資源開発生産手法開発」（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に関する研究」（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 18 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・地下水からのフッ素・ホウ素除去法を確立するために、鉱物等への吸着挙動の解明を行う。また、重金属等で汚染された土壌について、有害物質を効果的に抽出除去する低環境負荷型浄化技術を開発する。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とともに、リスクマネジメント手法の検討を行う。

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サイトモデル（図１を参照）を完成し、一般に公表した。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、代表的な地域における土壌環境リスクマップの作成に必要な各種データを取得する。さらに、土壌・地質環境評価のための詳細モデルの数値解析手法を開発し、必要なパラメータを集積する。

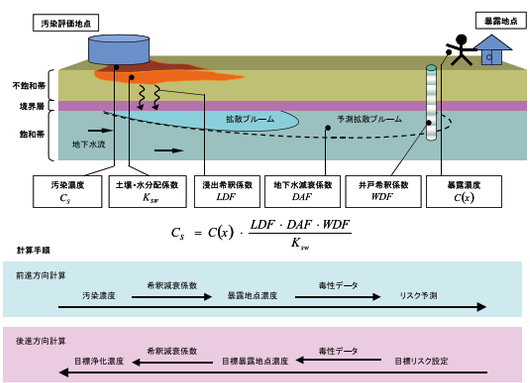


図１　土壌汚染リスク評価手法の開発

３）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に関する研究

鉱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鉱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ックスのシステム構築と全国展開

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する。図２には、情報整備とシステム開発の概念を示す。本年度は、東日本および西日本における地化学情報および環境調査に基づき、地圏インフォマティックシステムに必要なデータベースを作成し、公開する。

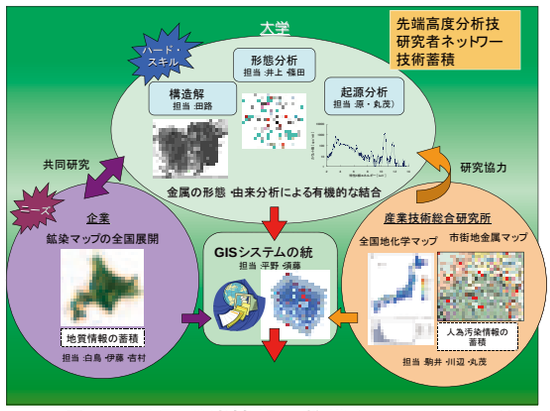


図２　地圏環境情報の整備とシステム開発

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に関する研究

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。本年度は、主要な騒音源に係る属性データの抽出及び騒音場の簡易推計モデル構築の基礎検討を行う。

５）メタンハイドレート資源開発生産手法開発

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、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。また、本分野のみでなく他の分野に関しても萌芽的研究から実用化研究まで幅広く研究を実施する。特に、地圏環境評価システム、新規浄化手法、環境影響評価手法および地圏環境評価基本図などの成果物を一般に普及させ、土壌・地下水汚染、生態系影響、ヒューマンファクターなどの問題解決に寄与することを目指す。

CO_2 地中貯留研究グループの紹介

Introduction of the Environmental Technology Research Group

CO_2 地中貯留研究 GL：　當舎利行
Leader, CO_2 Geological Storage Research Group: Toshiyuki Tosha
Phone: 029-861-3518, e-mail: toshi-tosha@aist.go.jp

１．グループの研究目標

CO_2 地中貯留研究グループは、昨年 11 月に、より明確な目的を持つグループであることを示すため、それまでの地圏環境技術研究グループを改名することにより誕生した。また、本年 7 月に第 7 と西事業所の分かれていたグループをグループ研究の効率化のために、それぞれの事業所ごとにグループを再編して新たにスタートをした。当研究グループでは、グループに名前を冠した CO_2 地中貯留に資する研究を中心とした研究を目標としている。その中心となっている研究以外でも、元となった地圏環境技術研究グループの目標であった資源開発技術の発展的研究や温暖化に対応したエネルギー変換に対応するための再生可能エネルギー技術開発、地圏流体への豊富な知見を生かした実企業で応用研究などを引き続き継続するとともに、放射性廃棄物の地層処分に必要な研究・技術開発や CO_2 地中貯留ならびに放射性廃棄物の地層処分不可欠なモニタリング技術開発も引き続き進めてゆく。また、さまざまな研究成果を多方面への応用研究として技術適応を図って行くなど各種普及活動に取り組んで、研究成果の社会へ転移を積極的に進めている。

２．グループの特色等

当研究グループの構成メンバーは、地質・地化学研究の専門家を始め、岩石力学、物理探査など環境対策としての地圏開発技術を多方面の専門家集団として取り組んでいる。

1) グループ員（専門）
　當舎　利行（地球物理学）
　奥山　康子（岩石学・地球化学）
　雷　興林（岩石力学）
　杉原　光彦（地球物理学）
　西　祐司（地球物理学）
　柳澤　教雄（地球化学）
　相馬　宣和（地下計測工学）
　徂徠　正夫（地球化学）

２）予算

地球環境産業技術研究機構研究委託費「高精度地中挙動予測手法の研究」

文部科学省試験研究費　「高レベル放射性廃棄物地層処分のための地質環境の特性広域基盤情報の整備」

共同研究費　「電気分解法を用いたスケール捕集試験」「上の岱地熱地域における AE 観測網最適化配置に関する研究」

産総研研究部門重点化予算　「二酸化炭素地中貯留のための基礎的研究」

産総研運営費交付金　「地圏資源環境技術の研究」等

３．平成１８年度までの進捗状況

１）地化学関連研究

ａ）CO_2 地中貯留のための深部地下水研究（「地層水データベース」の作成）

一般帯水層への CO_2 貯留が社会的に受容されるためには、圧入 CO_2 が生活圏から安定的に長期に隔離されることを示す必要がある。長期隔離において、CO_2 と帯水層の堆積岩やそれを満たす深部地下水との地化学的相互作用は，重要な要素である。

一般帯水層地中貯留では、注入 CO_2 は地層間隙水に溶解するとともに（溶解トラップ）、貯留層堆積岩の構成鉱物と反応し、最終的には新たな炭酸塩鉱物を生成して地中に安定的に保持されると考えられる（鉱物固定）。このような一連のプロセスを実験的・理論的に解明する上で、地層間隙水の地化学的性質を初期条件として求める必要がある。

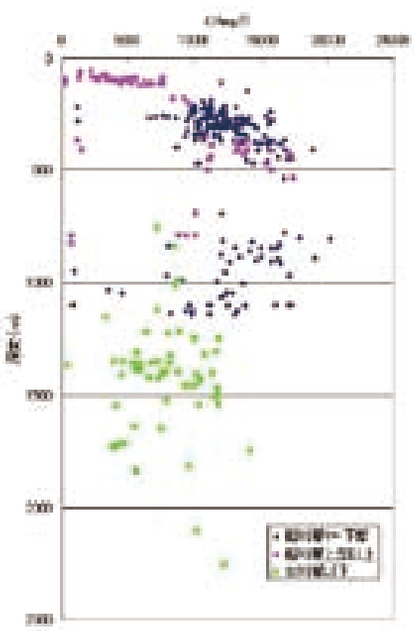


図１　秋田地域における深部地下水の塩素（Cl）濃度の深度と層序別分布

当研究グループを中心とする CO_2 地中貯留地化学プロセス研究チームでは、国内の主要 10 地域について文献データをもとに深部地下水の化学組成を集積した、「地層水データベース」の構築を進めてきた。地層を満たす深部地下水の性状が初生的には堆積の場に存在した水に影響されることを考慮して、データ収集の対象には、海成層からなる 5 地域と主として淡水成層からなる 5 地域を選定している。選定した 10 地域には、いわゆる大規模排出源立地地域を含む。収集データ数は本年 8 月時点で約 2300 件であり、このうち地中貯留深度とされる 800 m以深の水のデータが 1000 件以上存在する。

この研究から、国内主要地域の地下に存在する深部地下水の地化学特性の概要が判明してきた。海成層地域と淡水成層地域では深部地下水組成に著しい違いがあるが、海成層地域でもその濃度は平均的な海水より著しく希薄である。秋田地域では、Cl 濃度が層序に依存し、中新世船川層中・下部に濃度の極大が存在する（図 1）。同様の現象は新潟油田地域からも報告されており（吉村ほか、2000）、いわゆるグリーンタフ地域での特長の可能性がある。塩水の CO_2 溶解度は全溶存固形成分量（TDS）増加とともに急激に減少し、海水相当の TDS では真水の 85% 程度である。国内主要地域の深部地下水が海水に比べて希薄な組成であることは、十分な CO_2 溶解ポテンシャルを持つことを示唆する。

b） 炭酸カルシウム析出過程に関する研究

熱交換を伴う熱水循環系での炭酸カルシウムスケール付着への対応策の 1 つとして、（株）レイケンと高周波電気分解水処理装置ダイナクリーン D・150T による共同研究を実施している。この装置を用いたプラントでは、配管に付着していた炭酸カルシウムが溶解・剥離する事例が見られた。そこで、図 2 のような実験システムを (株) レイケンの工場内に設置し、プレート式熱交換器にあらかじめスケールを付着させ、工場水道水を冷却塔から循環させ、一方で温調機からも水を供給した。熱交換機の出口側の pH、Ca、HCO_3 濃度の変化、熱効果器のスケール量変化を測定した。その結果、表 1 に示すように熱交換器に付着させたスケールはダイナクリーン・D 稼働時には剥離したが、未稼働時では熱交換器の重量が増加、つまりさらにスケールが付着する傾向を示した。また、ダイナクリーン・D 稼動時と未稼働時では循環水の水質変化についても差が確認された。ダイナクリーン・D 稼動時は循環水中のカルシウムイオン濃度、炭酸水素イオン濃度が減少し、pH が低下する傾向を示したが、未稼働時では循環水中のカルシウムイオン濃度、炭酸水素イオン濃度が増加し、pH も上昇する傾向を示した。

表 1　スケール剥離効果

	スケール剥離量(mg)	スケール剥離率（%）
ダイナクリーン・D稼動	121	7.75
	スケール剥離量(mg)	スケール剥離率（%）
ダイナクリーン・D未稼動	−20	−1.39

c） CO_2 地中貯留長期安定性評価のための鉱物溶解速度の計測

CO_2 地中貯留の実用化に向けては、CO_2 圧入直後に生じる物理的プロセスに加えて、圧入した CO_2 の長期安定性、すなわち数千年から数万年というオーダーでの地球化学的プロセスについても評価を行う必要がある。このような地球化学的プロセスの中では、貯留岩中での量比および反応性の観点から、CO_2 溶存水中での長石の溶解が重要であることから、天然の灰長石 ($CaAl_2Si_2O_8$) 結晶のへき開片と溶液を、オーブン内に設置した反応容器中にセットし、10MPa、50℃の条件下で 1 ヶ月間のバッチ式の溶解実験を行った。あらかじめ室温条件下で作製した灰長石飽和溶液を希釈することにより、種々の未飽和度の溶液を作製した。所定時間ごとに試料を取り出し、溶解初期および後期において、それぞれ位相シフト干渉計およびレーザー顕微鏡による計測を行った。最終的に、ナノからミクロンに至る表面形状変化に基づいて、溶解速度を算出した。

未飽和度の違いにより溶解速度に顕著な差が生じることが示された（図 3）。今回の実験条件では、溶解速度は最大で 1 桁程度異なっている。長石溶解速度の未飽和度依存性に関しては、シグモイダルな関数形か、平衡点近傍と平衡から離れた領域で不連続に変化するかについてまだ検証がなされていないため、今後のデータ点数の増加が重要である。溶解表面が未飽和度に依存して変化する様子も観察された。すなわち、平衡に近い条件では溶解面が平滑なままであるのに対して、平衡から離れた条件ではかなり凹凸の激しい形状となっている（図 4）。一方で、

図 2　実験システムの概観

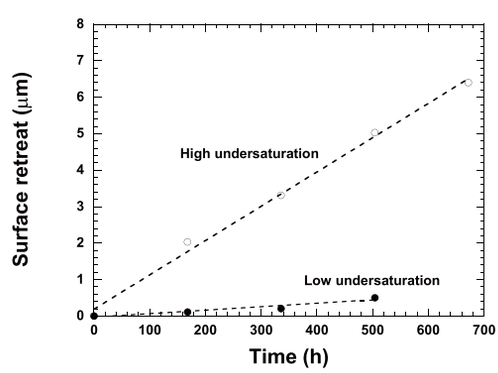


図 3　長石溶解速度の未飽和度による変化

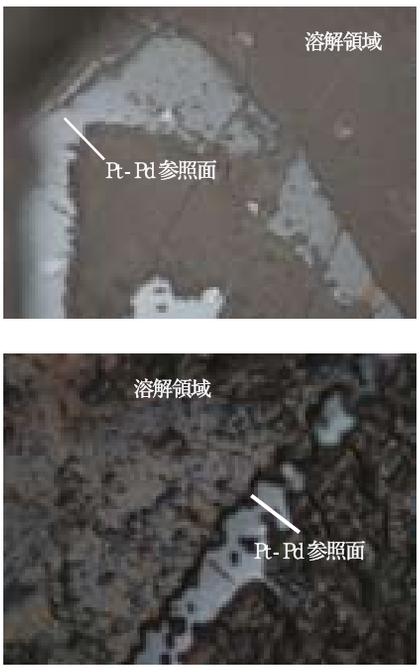


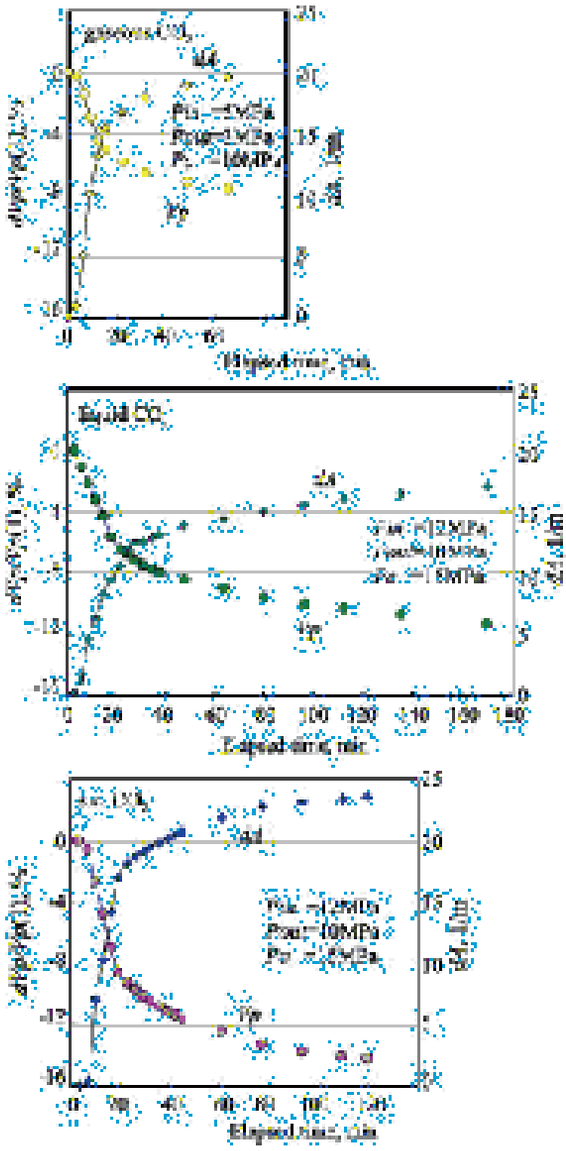
図４　長石の溶解表面
上図：低未飽和度、下図：高未飽和度

今回の実験では、いずれの未飽和度条件においても、溶解に伴う結晶面の鉛直方向での後退量が直線的に増加し、80℃の実験で観察されたような初期の過渡的な溶解速度からその後の定常溶解速度への変化は観察されなかった (図３)。

２）岩盤力学関連研究

CO_2 地中貯留を事業化し政策設定者及び公衆に受け入れられるためには、CO_2 地下注入後の挙動モニタリングと安全性の確認が避けられない。あらゆる時点で CO_2 の空間分布を精確に知る必要があり、CO_2 飽和度の測定、漏洩通路の検出などにおいて、高度なモニタリング技術が必要である。現時点では、地震探査手法は CO_2 の分布と移動を把握するためのもっとも有効な方法と考えられおり、弾性波速度は、岩石組成、間隙率、飽和度に敏感する。一方、間隙のミクロ構造、浸透率、流体の粘性は弾性波の減衰に重要な役割を果たす。しかしながら、現在のところ、CO_2 と水を含む典型的な多孔性の岩石における地震波の速度や減衰に関する実験研究は非常に少ないことから、これらのデータを取得する目的で、実験室条件下で多孔質砂岩の試料における CO_2 注入実験を実施し、超音波周波数帯域での弾性波伝播測定を時空間において稠密に行った。

図５は、試料の平均速度減少率と減衰係数の注入経過時間による変化を表している。気体 CO_2、液体 CO_2、超臨界 CO_2 の注入による最終的な速度低下はそれぞれ、7.5%、12%、14.5% である。同時に、圧入以前の岩石の減衰係数からの変化分はそれぞれ 20m^{-1}、17m^{-1}、および 22 m^{-1} であり、超臨界 CO_2 の圧入による減衰が大きいことが判明した。また、減衰係数を Q^{-1} に変換すると、水飽和状態に比べ Q^{-1} がそれぞれ 3.3、2.7、および 3.7 倍増加した。この実験結図



５　試料の平均速度減少率と減衰係数の注入経過時間による変化

果は White and Dutta-Odé の理論モデルを使って良く説明できる。これは、超音波周波数帯域でも間隙流体の局所的な粘性流動が速度分散とエネルギー損失において大きな役割を果たしているのを示す。また、得られた不均質飽和（パッチ）の特長サイズは b=1.3~1.5mm であり、X 線 CT 観察結果と調和的である。これらの結果は、CO_2 飽和度の増加に伴い、減衰が急速増加し、30-40% のところにピークを持ち、その後完全 CO_2 飽和状態になるまで (それが可能であるなら) 次第回復する特徴を示している。 しかしながら、最終的な CO_2 の飽和度はおよそ 30-40% すぎなかった。

３）地球物理学関連研究

a) CO_2 地中貯留に関するモニタリング技術及び評価技術の開発

野外調査では夕張などでの調査を実施した。夕張では CO_2 炭層注入実験本年度も半年間にわたって継続されているが、この圧入実験中に自

図６　釜石鉱山内における坑内自然電位 (SP) 測定の様子
データロガーからの流量制御バルブ開閉により、KF-1 坑の湧水流量と坑内の圧力を変化させ、それに伴う坑内の SP 変化を測定した。

然電位測定と GPS 測定を実施した。自然電位測定では、圧入井周辺の電位が圧入の影響により最初下降した後に上昇に転ずることが確認された。これは、CO_2 の圧入に伴って圧入層周辺の酸化還元状態が変化をし、その変化が井戸を構成する鉄管により地表に伝達したものと解釈される。また、GPS 観測によって得られた特徴的な変動成分について CO_2 炭層注入実験との関係を検討した。

ｂ) 地圏における物質の循環・集積メカニズムの解明と評価に関する研究

新しい地質調査法として坑内自然電位調査法の基礎実験を釜石鉱山において実施した。平成 18 年 11 月から、釜石鉱山の KF-1 坑及び KF-3 坑を利用して圧力遷移試験を実施し、新たに設計・作成した坑内自然電位 (SP) 測定装置を用いて連続観測を行った (図６)。その結果、流量変化に伴い、観測井においても坑内 SP 変化の

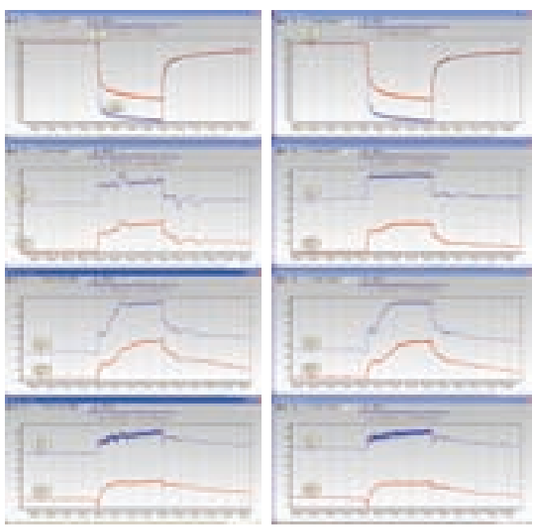


図７　釜石鉱山内での坑内 SP 測定データの例
横軸は時間 (秒) で、上から両坑井の坑口圧力、KF-3 坑最深部、フラクチャー部、坑口近くの自然電位変化（KF-1 坑をバルブ開放した場合）。バルブ開閉に伴い、観測井の坑内圧力と SP も変化する。

検出に成功し、亀裂岩体の水理パラメータ把握における坑内 SP 連続測定の有効性を確認した (図７)。また、測定方法の実用化に向けた課題の抽出も行った。

ｃ）地熱資源開発のための物理探査手法の研究

自然電位観測は、地表に設置した電極と基準電極との電位差を測定することにより、地下で発生している様々な要因の現象を捉えようとするものである。特に地熱地帯では、自然電位の空間的な分布を計測することにより、熱水の地下からのわき出しを探してきた。鹿児島県霧島市の大霧発電所にて昨年 4 月に蒸気出力維持のため NT-B6 坑井が掘削され、蒸気生産に寄与している。また、本地域では新たな生産井の掘削も計画されていることから、当地域の恒常的な自然電位観測を目指して観測を開始した。観測点は、１ｍ及び 8m 観測孔の坑底に設置した自然電位電極の電位変化をケーブルにて伝送している。図８に昨年 4 月から 10 月までの電位変化を図示する。

また、上の岱地域での微小地震観測、澄川地域での自然電位観測等を継続するとともに、大霧、奥会津地域について各種モニタリングデータを統合した貯留層モデルの改良を進めている。

d）火山性流体移動連続観測による噴火予知技術の高度化に関する研究

地質情報 RI のマグマ活動 RG と連携して、伊豆大島三原山を対象に平成 18 年 3 月より開始した連続 SP 観測によるモニタリングを継続している。「貯留層変動探査法開発」で開発した SP モニタリング・システムを三原山カルデラ内に設置して測定を開始するとともに、火山において他地域より激しい雷害に対して、システム保護装置の改良などを実施している。

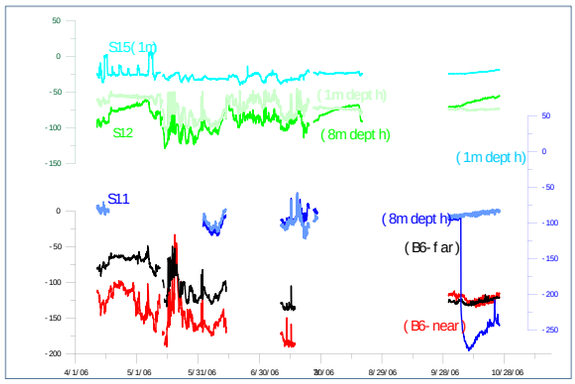


図８　大霧地域自然電位データ
地熱流体採取地点の直上の地点（S-12 緑線) は、井戸の周囲の電極 (B6　黒赤線) と同じ原因の信号を受けていることから、酸化還元電位を示すものと考えられる。

地圏環境システムグループの紹介

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
Phone: 029-861-3927, e-mail: takakura-s@aist.go.jp

1. グループの研究目標

当グループでは，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．そして，それらの技術を CO_2 地中貯留研究や放射性廃棄物地層処分研究などへの適用を行っている．

また，当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，CO_2 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とし，今年の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り，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．

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)
藤井 孝志 (産学官制度来所者)

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」
共同研究費「地熱井の坑井ライフの向上に関する研究」
運営費交付金「地圏環境システムの研究」
運営費交付金「二酸化炭素地中貯留のための基礎的研究」
地球環境産業技術研究機構研究委託費「高精度地中挙動予測技術の研究」
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」等

3. 主な研究の平成 18 年度までの進捗状況

平成19年7月に発足したグループであるが，ここでは当グループ員が継続して取り組んでいる研究の進捗状況の一例を示す．

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．このためには，高レベル放射性廃棄物の輸送や貯留を行うため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と考えられている．本研究は，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を目的として，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ため，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データの蓄積を進めている．

a) 深部岩盤空洞周り緩み域における 3 次元応力計測

本研究テーマでは，緩み領域から堅牢領域までの連続的な 3 次元応力評価を現場コアを

用いて実施している．その予備試験として，深度約 100m の岩盤中に開削された坑道壁面から水平ボーリングによって採取された砂岩質のコア試料の応力計測を試験的に実施した．AE 法による応力計測データの例を図 1 に，DRA による応力計測データの例を図 2 に示す．試験片数が限られていることなどから計測判定は目視によったが，AE/DRA 法からの計測結果を総合的に評価すると，評価応力値は鉛直方向が 1.9　0.1MPa，水平方向 (コア軸方向) が 1.5　0.1MPa，水平方向 (コア軸直交方向) が 1.8　0.1MPa もしくは 2.4　0.1MPa となる．低強度でフラクチャが発達していた割には妥当な応力値が得られていると考えられ，AE/DRA 法による応力測定が可能と判断された．

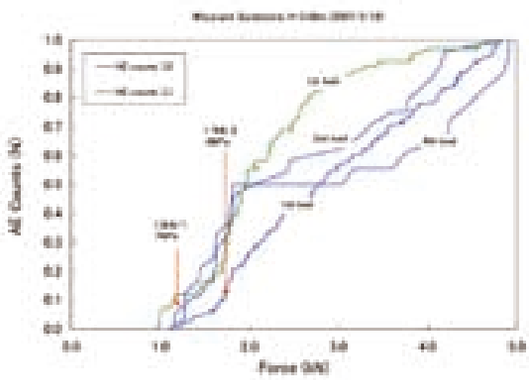


図 1　AE 法による応力計測データの例

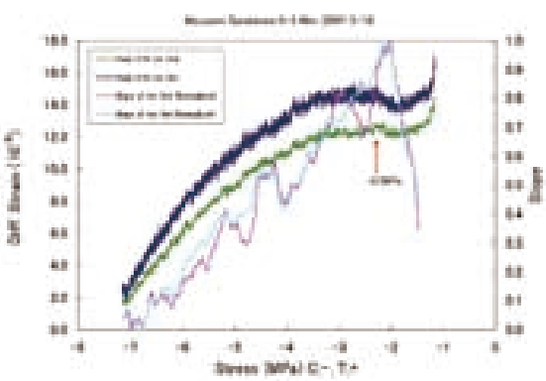


図 2　DRA による応力計測データの例

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

本研究テーマでは，緩み域での環境条件を模擬した温度，圧力条件における，三軸圧縮応力下での岩石 (種々の堆積岩) の長期変形特性を把握するため，岩石のクリープ実験を試みている．クリープ実験は，温度は常温から 100℃の範囲内で最低 3 条件，圧力条件は大気圧から 10MPa の範囲内で 3 種類の条件を組み合わせて，2 段階以上の応力レベル (強度の 80% 以上と 50% 以下) で実施することを目標としている．本年度は，堆積岩としてベレア砂岩，珪藻土を用いた常温下での一軸および三軸圧縮試験を実施し，ひずみ速度と圧縮強度の関係を調べ，載荷速度依存性を明らかにした．

ベレア砂岩の圧縮強度と実ひずみ速度の関係を図 3 に示す．図より載荷速度が大きいほど圧縮強度が増加し，周圧が増加しても同じ傾向であることがわかる．また，珪藻土の応力 - ひずみ線図を図 4 に示す．この結果から，多孔質であり空隙率が高く強度も弱い珪藻土は，脆性破壊ではなく延性破壊が起きている可能性が示唆される．

これらの実験を通して，クリープ試験実施においてこれまで難しかった軸ひずみを長期間精度良く計測する手法を検討した．そして，LDT 変位計を用いた計測システムを構築し，2 週間ほどの高精度計測が可能なことを確認した．また，クリープ試験時の載荷精度の問題点についても検討した．

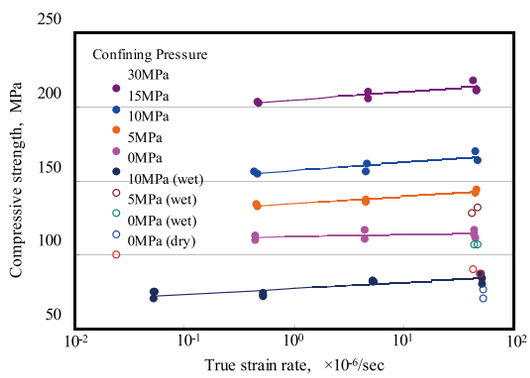


図 3　圧縮強度と実ひずみ速度の関係 (Berea 砂岩).

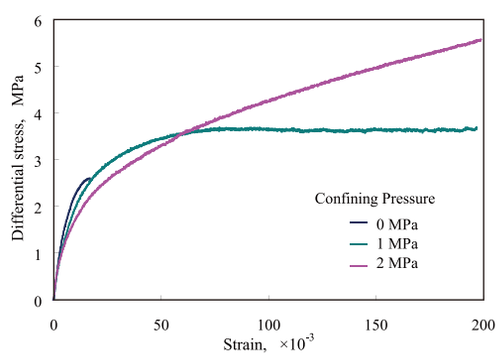


図 4　応力 - ひずみ線図 (珪藻土).

2) 地熱井の坑井ライフの向上に関する研究

再生可能エネルギーの一つである地熱資源を有効に活用して地熱発電量を増大させるため，地熱井の坑井寿命の向上を目指す研究に取り組んでいる．この研究の一環として，坑井寿命の向上に欠かせない坑井の応力評価に用いる基礎データを得るため，ケーシング・セメント・地層からなる模擬試料を用いてケーシングとセメントとの接着強度を測定した．

接着強度試験に用いた模擬試料の一例を図5に示す．本試料はケーシング外径 9-5/8in.(245mm)，ビット径 12-1/4in.(311mm) の実坑井を基本にモデル化したもので，ケーシングと鋼製パイプ (地層) から形成された空間に比重 1.80 の地熱セメントスラリーを充填して作成した．セメントの養生時間は 7 日間，養生温度は室温である．なお，本セメントスラリーの硬化体の機械的性質は，一軸圧縮強度が 25.6MPa，圧裂引張強度が 2.89MPa，ヤング率が 8.59GPa，ポアソン比が 0.202 である．

図中の矢印で示した方向に荷重を加えてケーシングとセメントとの接着強度を 4 回測定した結果，平均値として 3.25MPa を得た．この結果は，上記セメントの圧裂引張強度と大雑把に一致した．図 6 は接着強度試験時に得られた時間－荷重曲線の一例で，一般に荷重が最大に達した時点でケーシングとセメントとの接着が破壊した後，ケーシングがセメント表面を徐々に滑る現象が見られた．

今後の課題として，(1) 実坑井の応力シミュレーションへの本試験結果の適用，(2) セメントに掘削泥水が混入したときの接着強度への影響の検討などが挙げられる．

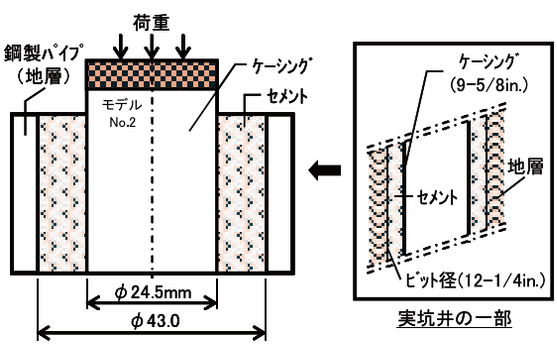


図 5　接着強度試験に用いた模擬試料の一例.

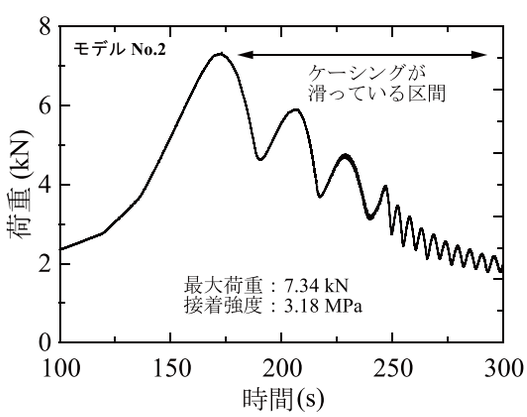


図 6　時間－荷重曲線の一例.

3) 地圏環境システムの研究

a) 地熱エネルギー利用の研究

地球環境保護の観点から CO_2 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，本システム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，環境影響評価に関して数値シミュレーションによる検討を行った．具体的には，仙台平野を対象に構築された 3 次元モデルを用いて，地中熱を利用している世帯が密集した 300m 300m の範囲における地域冷暖房を想定することとした．そのため，U 字管や同軸管を用いる坑内熱交換型より，より広範囲での地域冷暖房に向いていると考えられる地下水利用型のシステムを仮定した．さらに地中熱利用を主要な熱源として長期間に渡って実施した場合を想定して，構築された 3 次元モデルの複数の地点において地下への採廃熱を与えて地下環境の温度変化に関する検討を行った (図 7)．その結果，河川流域における地中熱利用では，第四系を利用した場合には流速や河川流域における地下水の流動の影響によって温度の冷却域が大きく変化することが明らかになった．

また，図 8 に示すように，本モデル上の任意の地点 (PL) における第三系と第四系に対する 30 年間の地中熱利用の計算結果では，第三系では採廃熱地点の温度低下が大きいが，採廃熱地点に隣接するグリッドの温度低下は小さいことから，温度低下の範囲が周辺に拡がっていないと考えられる．すなわち，第三系を地中熱に利用する場合の影響範囲は，かなり狭い範囲に限られることがわかる．それに対して，第四系では影響範囲が大きい一方，採廃熱地点での温度変化は小さい．これは，冷却された地下水が移動して冷却域が拡がったために，採廃熱地点の温度低下が小さくなったためと考えられる．

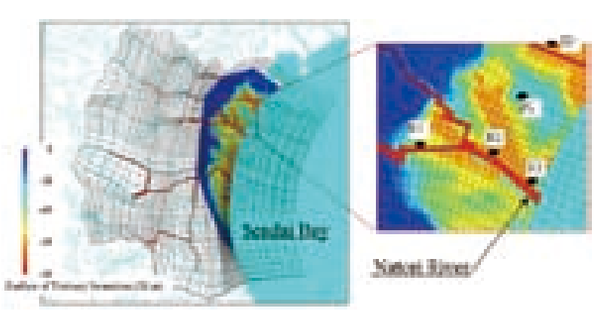


図 7　仙台平野モデル及び地中熱利用を想定した地点.

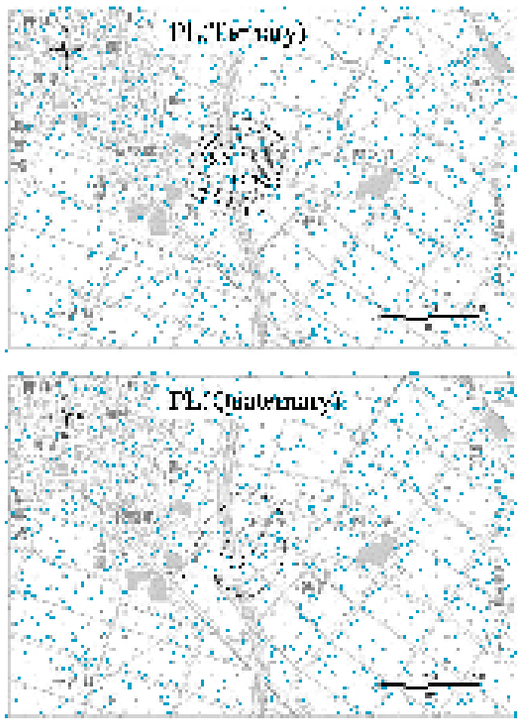


図 8　任意の地点 PL における採廃熱深度の違い (第三系と第四系) による地中熱利用 30 年後の温度差コンター (温度差コンターは，地中熱利用 30 年後の温度から開始時の温度を引いた値である).

b) 坑内に適用する物理探査技術の研究

当グループでは，坑道近傍を含む岩盤の 3 次元応力計測技術，物理探査による地層構造のイメージングおよびモニタリング技術，対象岩盤の力学特性を評価するための技術，岩盤内物質移動も扱えるシミュレーション (モデリング) 技術などの研究を実施し，岩盤評価に有効な計測技術の基礎を開発してきた．本研究では，それら個々の技術を組み合わせ，それぞれの利点を伸ばし，問題点を補完することで，より確からしい岩盤評価手法として利用できる総合的な計測技術の実用化を目指している．その一環として，愛知県北設楽郡東栄町振草地区にあるセリサイト鉱山において実施した地中レーダ探査のデータを再解析し，それを電気探査や地質調査の結果と合わせて解釈し，岩盤評価への有効性を検討した．

地中レーダ探査では，岩盤の露出した坑壁面にアンテナを押しつけながら，プロファイル測定のデータ取得を行った．坑壁面は平坦ではないので地形補正が必要となるが，その起伏については光波測量で正確に求められている．また，地形補正および深度断面の作成には電磁波の伝搬速度が必要であるが，これについては回折波を利用したパターンマッチング法で算出されている．なお，いくつかの岩石サンプルの室内測定によって，電磁波速度の妥当性を確認した．ある測線の深度断面を，比抵抗 /IP 法から求められた正規化充電率断面とともに図 9 に示す．地中レーダの結果には地質境界や不均質構造を示す反射面がいくつも見られ，これらは電気探査や地質調査の結果と整合的であることがわかる．また，岩盤内の割れ目および熱水変質の存在を推定させる反射波のパターンが検出され，坑道掘削に伴ってできたと考えられるゆるみ領域に対応する不連続面もイメージされた．この結果から，地中レーダ探査法は岩盤内の鉱脈や割れ目を詳細にイメージする方法であり，岩盤坑壁の状況を評価する有効な手法であると判断できるとともに，電気探査など他の手法の結果と組み合わせて解釈することで，より確からしい岩盤評価が可能になると期待される．

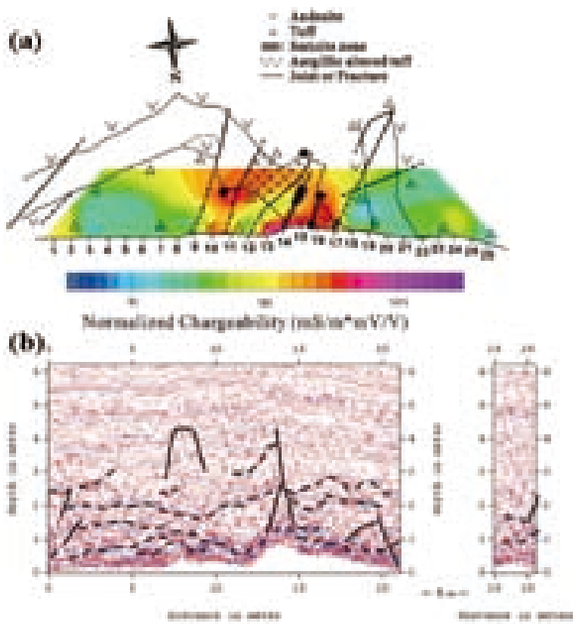


図 9　坑内で実施した電気探査と地中レーダ探査から得られた (a) 正規化充電率断面と (b) 電磁波速度震度断面図.

4.　平成 19 年度の研究計画

当グループの研究対象は環境評価から資源探査まで多岐にわたり，予算項目は複数にまたがっている．平成 19 年度は，以下の 4 つの研究テーマに大きく分け，研究に取り組んでいる．

1)CO_2 地中貯留技術に関する研究
2) 放射性廃棄物地層処分に関する研究
3) 地圏の継続的利用に関する研究
4) 地圏環境システムの解明に関する研究

一つのテーマには地球物理・地質・地球化学・地下水学など複数の学問領域が含まれ，室内実験，数値実験，フィールド調査の手法を必要とする．グループ員相互の意見交換や協力，グループの境界を越えた連携を行いながら，基盤的な技術の開発から，実用化を目指した応用研究を進めていく予定である．

地質バリア研究グループの紹介

Recent activity of Geo-barrier Research Group

地質バリア研究グループ長：丸井 敦尚
Leader, Geo-barrier Research Group: Atsunao MARUI
Phone: 029-861-2382, e-mail: marui.01@aist.go.jp

～あゆみ～

発足当初は、岩盤力学と地下水学の観点から地質の天然バリア性能についての研究を中心に活動してきたが、その後 CCOP を介しての国際貢献や児童生徒への啓蒙活動、産業界への技術移転、大学との連携など研究活動ならびに成果普及の幅を広げてきた。

とりわけ、高レベル廃棄物処分に関わる地質バリア研究は資源エネルギー庁や文部科学省の委託研究を通じて成果を挙げ、関連学界へも大きく貢献してきた。グループ発足当初に受けていた塩淡境界研究も、本年度より研究の対象地区と規模を拡大し、資源エネルギー庁の推進する沿岸域研究プロジェクトの中核を担うまでに成長した。

サロベツ湿原から利尻富士を眺める
（本年度から調査地となる幌延町にて）

巡検中（北緯 45 度線）のグループ写真
前列左より
麻植、丸井、周（西日本工業大学）、
古宇田（産学官連携ｺｰﾃﾞｨﾈｰﾀ）、樽沢、
安藤、吉澤、潮田、越谷

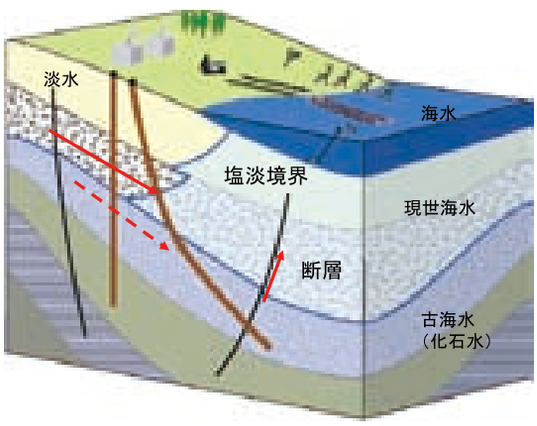
～メンバー紹介～

丸井敦尚（グループ長、地下水）
長　秋雄（主任研究員、岩盤力学）
宮越昭暢（研究員、地下水）
麻植久史（ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ研究員、物理探査）
潮田みどり（ﾃｸﾆｶﾙｽﾀｯﾌ、水質分析）
菅野真紀（ﾃｸﾆｶﾙｽﾀｯﾌ、原子力）
樽沢春菜（ﾃｸﾆｶﾙｽﾀｯﾌ、CG）
中山京子（ﾃｸﾆｶﾙｽﾀｯﾌ、国際会議）
安藤　誠（共同研究員、物理探査）
伊藤成輝（共同研究員、地下水）
越谷　賢（共同研究員、地質）
細谷真一（共同研究員、地下水）
吉澤拓也（共同研究員、地下水）

～研究成果の一例～

高レベル廃棄物処分研究

当研究グループでは複数の研究課題を通じて積極的に地層処分研究に取り組んできた。茨城県東海村における塩淡境界面形状把握調査においては、地下水位の変化に伴う塩淡境界面の形状変化やその移動を捉えることができた。またこれらの成果はサイバー資料館(共同研究者による共同 HP) などを通して公開されている。



沿岸域研究のイメージ図

物理探査とボーリング調査により、対象域の地質や地下水の構造を明らかにする。特に断層や塩淡境界のような地下水の上昇流のきっかけになる部位を詳細に評価する。最終的には地下水の不動領域を判定し、処分事業に資することを目的とする。

地下水利用適正化調査

地質調査所時代から当研究グループが指導的な立場で工業団地予定地区の適正な地下水利用に関する量的評価を実施してきたが、本年度より継続的に利用可能な地下水資源の量を評価することを目的として、産総研が主体となり全国調査事業を実施することになった。初年度（本年度）は全国を対象に海岸線を通過する淡水地下水資源評価を実施した。

CCOP 東南アジア地下水マネージメント研究

CCOP に加盟する 11 カ国のリーダーとして、これまでに CCOP 地下水データベースを作成し、さらに地下水マネージメントの方法論、地盤沈下情報のマップ化、関連国の地下水管理に関する法律情報の整備をすすめてきた。これらの情報は地域全体の開発可能性評価や今後取得・整備すべき情報の明確化につながり、関連国内の活性化に大きく貢献している。

タイ巡検中の伊藤（手前）と中山（奥）
（バンコク市内にて）

物理探査研究グループの紹介　-2007 年度 -

Exploration Geophysics Research Group, FY2007 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 19 年度においては、放射性廃棄物地層処分場の岩盤評価・モニタリング、土壌汚染・地下水環境等の浅部地質環境評価、地中貯留された CO2 の挙動把握、地盤の液状化ポテンシャル評価の４項目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
西澤　修
光畑裕司
横田俊之
松島　潤（産学官制度、東京大学）

2）平成 19 年度の研究テーマ

原子力特研「地層処分場岩盤特性評価のための高分解能物理探査イメージング技術の研究」
資エネ庁委託費「沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発」
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」
産総研ハイテクものづくり PJ「マルチウエーブ高速 3 次元比抵抗トモグラフィ技術の開発」
ほか

3）研究の概要

a）地層処分場の岩盤評価・モニタリング

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）測定システムを用いた 3 次元野外データ取得実験、3 次元解析プログラムの改良を実施する。反射法地震探査データを用い、速度、減衰率などを組み合わせて亀裂卓越部等を抽出する手法を開発する。NMR 検層による地層中の水みちの原位置計測の可能性を検討する。沿岸域の断層や塩淡境界把握のための物理探査技術開発として、沿岸域のテストフィールドにおいて、電磁探査法による地質構造調査を実施するとともに、浅海域電磁探査データ取得技術を整備する。

b）浅部地質環境評価

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のため、マルチ送信比抵抗探査装置の改良と従来機との比較試験、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開発、油汚染土壌における地中レーダ、電磁探査、ダイレクトプッシュ法等の適用試験と土壌サンプルの電気物性測定、地下構造物からの漏水箇所検知のための３次元地中レーダ探査実験、河川堤防の内部構造を高効率に探査するための地中レーダ、電磁探査実験等を行う。

c）CO2 地中貯留における地層物性評価

地中貯留された CO2 の挙動を地震波を用いてモニタリングするため、貯留層内の CO2 浸潤による地震波の減衰について、CO2飽和度の違いに起因する不均質の特徴的サイズを地震波で確認する手法を開発する。

d）地盤液状化ポテンシャル評価

地盤に空気を注入する液状化対策工法に寄与するため、比抵抗測定による地盤飽和度モニタリング手法について適用試験を行う。また、発破液状化実験による地盤密度変化の比抵抗測定による連続モニタリングについて検討する。土壌の水理学的特性を原位置で計測する NMR ペネトレータ・プロトタイプを完成させる。

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、ランダム不均質構造に対する地震波データ解析法の研究、韓国地質資源研究院等との共同研究による済州島の MT 法データの３次元解析、及び、豪州における地殻構造調査を実施する。

３．平成 19 年度の主な進捗状況

1）地層処分場の岩盤評価・モニタリング

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に、人工信号源を利用した電磁探査法の研究開発を実施している。これまでに開発した GPS 時刻同期 24 ビット測定装置に、送信電流波形のモニタ機能、現場でのデータ処理ソフトウェア、作業効率化のための小型受信装置の追加等の改良を加え、茨城県中部の実証フィールドで測定実験を行った。その結果、周波数領域及び時間領域とも、良好なデータを効率的に取得できることを確認した（図 1、2）。

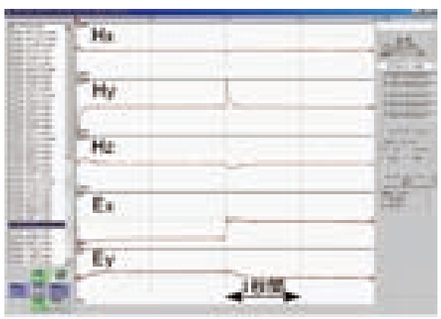


図 1：GDP32 Ⅱ時系列データの PC 上での処理状況。スタッキング処理と折り返し重合処理によりノイズが消え、Hy, Hz磁場成分にインパルス応答が、Ex電場成分にステップ応答が現れてくる。

図 2：三つの送信源からの信号に対して測点 S120 で取得された周波数領域データによる CSAMT 見掛比抵抗曲線。緑色破線以下の周波数ではニアフィールドとなり、大地の比抵抗構造を反映していない。測点 S120から送信源 A, B, Cまでの距離はそれぞれ約 0.8km、3km、5.3km である。

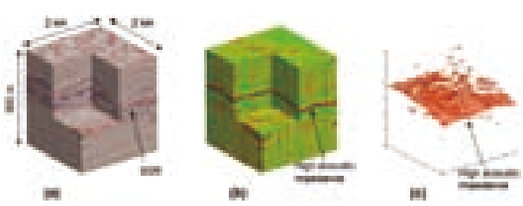


図 3：3 次元海上地震探査データに対する音響インピーダンスアトリビュート解析の例。(a) 3 次元地震探査ボリューム、(b) 相対的音響インピーダンスボリューム（寒色系 0 ～暖色系 1）、(c) 相対的音響インピーダンス値が 0.95 以上の領域。

地震波データ 3 次元解析法について、弾性波に関する速度情報と減衰情報を組み合わせた地層評価法を開発するため、地震探査ボリュームから音響インピーダンスアトリビュートを抽出して速度構造を求める手法を検討した。本手法を 3 次元海上地震探査データに適用して、メタンハイドレート層に起因する高速度領域を高精度に抽出できることを確認した（図 3）。

2）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

老朽化した土木建造物のメンテナンスのため、トンネル・ダムなどのコンクリート構造物中の水を含む亀裂などの欠陥を非破壊で原位置計測できるプロトン NMR（核磁気共鳴）計測装置プロトタイプの開発を継続した。今年度の開発目標は、探査深度（センサーであるコイルから感度領域までの距離）を昨年度の約 1cm から向上させることである。コイルユニットの磁石(導体)とコイルの電磁気的相互作用（渦電流など）が予想外に強く、コイルから十分な出力の電磁波が発振できず、探査深度が向上しなかった。今年度、電波送信ユニットの改良、渦電流低減用スリットの採用、プロトン励起パルスプログラムの改良、より高い耐電圧値をもつコンデンサーの採用による S/N 改善などにより、探査深度約 5cm を実現できた（図 4、図 5）。

図 4：テストサンプル（水道水）の計測実験配置。スペーサーの厚さは約 5cm。

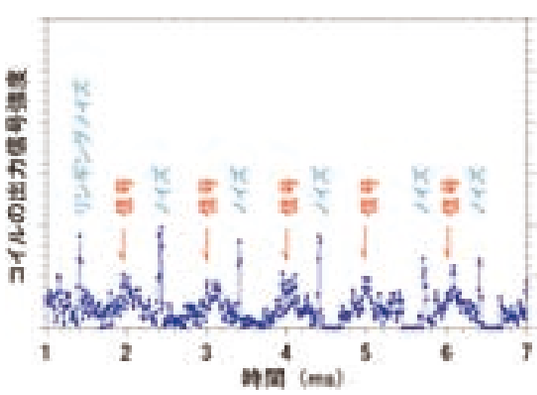


図 5：図 4 のテストサンプルから得た NMR 信号の生波形。1ms 間隔で 5 個の信号が並んでいる。スタッキングは 32 回、計測所要時間は 320 秒。

b）マルチ送信比抵抗探査システムの開発

大規模な3次元比抵抗探査の実用化やリアルタイ

ム比抵抗モニタリングを目指した電気探査装置の開発を実施している。単一周波数の電流を用いて送信電極と受信電極を順次切り替えながら測定する従来の方式とは異なり、送信電極を切り替えることなく複数の異なる周波数の電流をそれと同数の電極から同時に送信し、複数の受信電極で同期検波により送信信号の周波数を分離しながら受信する方式を採用することによって、飛躍的に高速なデータ取得を行うことができる。今年度は、本体の測定精度向上とともに、本装置で適用可能な256チャンネルのスキャナーおよびコントロールソフトウエアの開発を行った。当該スキャナーは、従来の単一周波数送信用スキャナーと異なり、同時に32極の電極を選択する必要がある。また、独自のブロック構造切り替えを行うため個別のリレー切り替えをCPUで制御するインテリジェント型となっている。(図6)。

図6：マルチ送信比抵抗探査システムの本体とスキャナーの試作装置。

c）油分汚染土壌の調査手法開発

油分による汚染領域を物理探査手法で把握するための基礎的な研究を実施している。物理探査により、非破壊で汚染範囲を把握できれば、調査自体による汚染物質の拡散の恐れを無くすことができる。港湾埋立地の油槽所跡地をモデルサイトとし（図7)、電磁マッピング調査・比抵抗法調査（図8）および地中レーダ法（図9）による地表からの間接的な調査を実施した。さらに、ダイレクトプッシュ型貫入装置にメンブレン・インターフェース・プローブ（MIP）を装着し、直接、地盤にプローブを貫入させながら揮発性有機化合物（VOC）を検出する膜界面サンプリング分析法を適用した。同時にプローブに付属する地盤導電率計測用チップにより地盤の導電率も計測した。また、土壌コアサンプルを採取し電気的物性値の計測も行った（図10)。それらのデータを解釈し、ドラム缶リサイクル工場跡地での、油や洗浄用の有機溶剤の漏洩、地下への浸透と表層粘土質層の分布、砂質土層への貯留などの関係を考察した。

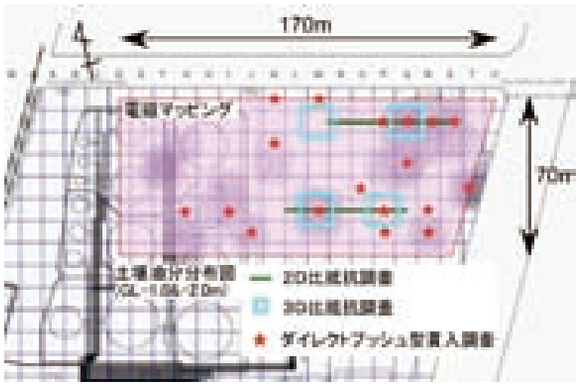


図7：油槽所跡地の適用実験サイト。70m×170mの汚染サイト内で、2次元・3次元の比抵抗（電気探査）法調査、電磁マッピング調査および貫入プローブ（MIP・導電率）調査を実施した。

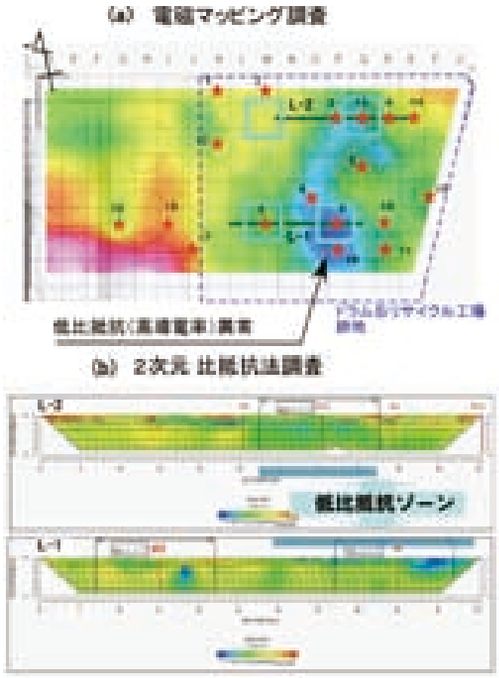


図8：(a) 電磁マッピング調査のデータ（14.6kHzの離相成分）と油分異常分布図との比較。(b) 2次元比抵抗法調査によって推定された比抵抗断面図。青色が低比抵抗、赤色が高比抵抗に対応する。

3）物理探査技術の基盤的研究

a）ランダム不均質構造における地震波伝播

地下には小規模ランダム不均質構造が存在し、ここから発生する散乱波は、地質的不連続面からの反射波を乱し、探査精度を下げる要因となる。小規模ランダム不均質構造とそこから生じる散乱波との関係を研究し、その結果を地震波データ処理に生かせば、探査精度向上に役立てることができる。この研究は、室内モデル実験によって小規模不均質構造から発生する弾性波を調べ、有効な地震波データ処理手法を開発するためのものである（図11、12)。

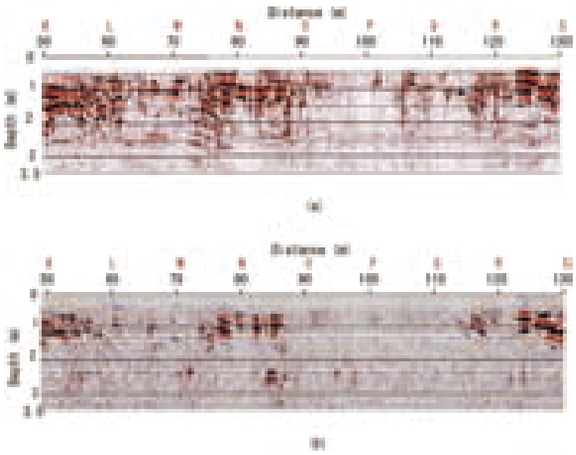


図 9：測線 2（比抵抗２次元探査測線 L-2 とほぼ同じ測線）における GPR 探査深度断面。(a) 送・受信アンテナ間隔を一定（90cm）に保った GPR プロファイル探査結果、(b) 送・受信アンテナ間隔を 8 通り（30cm ～ 240cm）変えて、8 つのデータの足し合わせを行ったワイドアングル GPR 処理結果。両者とも、距離 90-110m（O ～ Q 間）で電磁波弱反射ゾーンが捉えられている。このゾーンは、電磁波マッピングや比抵抗探査の低比抵抗帯に相当し、地表付近の低比抵抗な地層により電磁波が減衰したものと考えられる。ワイドアングル探査結果は、プロファイル結果に比較して高品質なデータが得られており、より深い場所からの電磁波反射をイメージングすることができている。これは、CDP 重合によるスタッキングの効果と多重反射除去による品質向上が寄与しているものと考えられる。

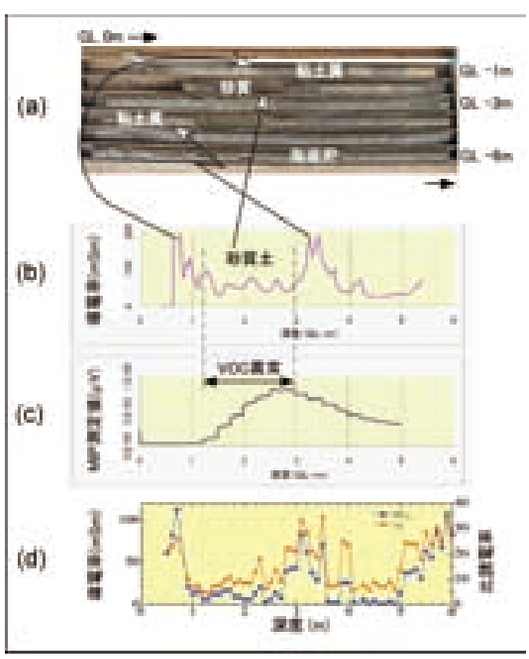


図 10：貫入試験地点 #13における (a)土壌コアサンプルと貫入プローブ調査による、(b)地盤導電率、(c)MIP 測定値深度プロファイルの対比、(d)WET Sensorにより計測したコアサンプルの導電率と比誘電率の深度分布。

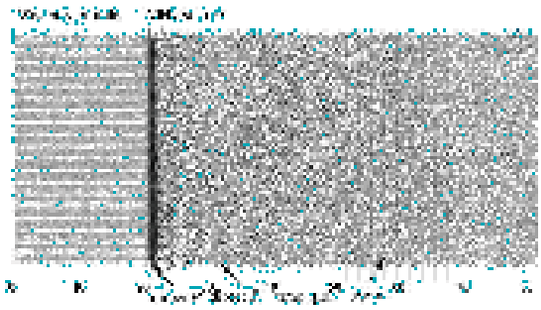


図 11：短波長ランダム不均質を含むウェスタリー花崗岩中を伝播した波形。反射波 *PP'P"* が明瞭ではない。

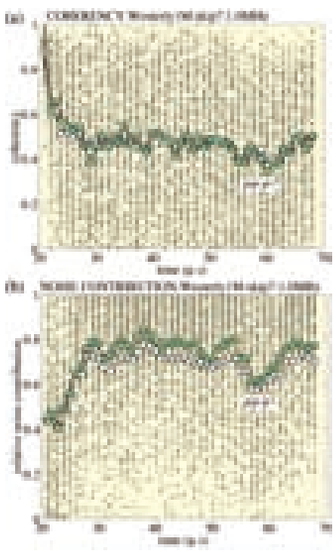


図 12：コヒーレンシー (a) と相対ノイズ寄与率 (b) の経過時間に対する分布。反射波 *PP'P"* 到達時にコヒーレンシーは大きくならないが、相対ノイズ寄与率には明瞭な変化が見られる。

b）電磁探査データ解析

電気・電磁探査の定量解析に必要不可欠な偏微分方程式の数値計算において、大規模線形連立方程式の求解は、計算コストの大部分を占める。本研究では、より簡便に種々の求解法（クリロフ部分空間反復法）を利用するための計算ライブラリを作成し、電気・電磁探査の 2・3 次元数値解法に組込み、有効性を検証している（図 13）。

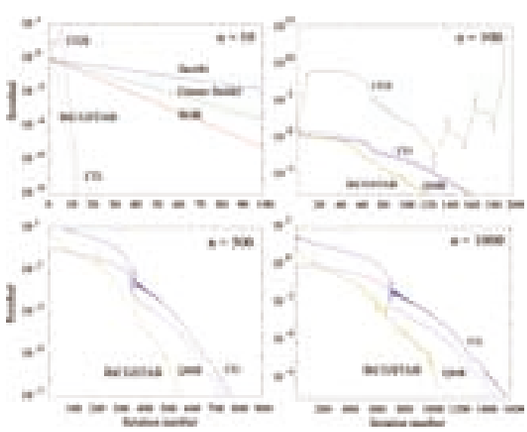


図 13：種々の連立方程式反復求解法における収束状況の様子。

地圏化学研究グループの紹介

Introduction of the Resource Geochemistry Research Group

地圏化学研究グループ長：　佐脇貴幸
Leader, Resource Geochemistry Research Group: Takayuki Sawaki
Phone: 029-861-3908, e-mail: t-sawaki@aist.go.jp

１．グループの研究目的

地圏における化学物質と同位体の分布と挙動、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を通じて、地球システムにおける物質循環に関する基盤的情報を提供するとともに、資源の開発、保安、環境保全に資する研究を行う。燃料資源地質研究グループ、地圏微生物研究グループと共同して、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」に取り組み、各種天然ガス資源の成因の地化学的解析を目指す。

２．グループの研究資源

１）グループ員

佐脇　貴幸（リーダー）
猪狩俊一郎
金子　信行
鈴木祐一郎
高木　哲一
前川　竜男
坂田　　将　　地圏微生物研究グループより分担

２）予算

運営費交付金
「地圏化学の研究（地質）」
「地圏化学の研究（エネルギー）」
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）

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）

３．グループの特色

地球化学、鉱物学、石油地質学、石炭岩石学を専門とする研究者で構成され、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。

４．**19** 年度前期までの研究進捗状況

１）ガスハイドレートの地化学的成因評価

室内実験と統計熱力学的解析をもとにガスハイドレート（GH）の相平衡条件を評価し、GH の資源量評価等に必要な基礎情報を提供する。

・GH 安定条件に影響を与えるハイドレート生成阻害剤・促進剤を用い、相平衡条件への影響を実験的に測定した。

２）在来型天然ガス資源の地化学的成因評価

水溶性ガス等天然ガス資源について、ガス、鹹水、堆積物の地化学分析、地層水移動シミュレーションをもとに、炭化水素の起源や鉱床の成因を解明する。

・従来、熱分解ガスが移動による組成変化をしたものとされていた「メタンの炭素同位体比が大きく $C_1/(C_2+C_3)$ 比の小さな天然ガス」の成因について、高圧下で天然ガスに飽和した地層水から地層の隆起による減圧で過飽和となったガス相を連続的に失うことによる分別作用により生成することを示した。
・前弧海盆堆積物中に胚胎する水溶性ヨウ素天然ガス鉱床やメタンハイドレートの成因について、トラフ底に堆積した海溝充填堆積物とともに取り込まれた海水を起源とした間隙水が、埋積と付加体の形成に伴う圧密により 1 億年程度の時間を掛けて付加体堆積物＞斜面堆積物＞前弧海盆堆積物へと移動し、その過程を通じて微生物がメタンを作り、ヨウ素が堆積有機物から間隙水へと濃縮するモデルを提唱した。

３）石炭起源天然ガス資源の地化学的成因評価

油ガスの地化学解析等により、石炭起源天然ガスに関する石油システムを構築し、ガス生成ポテンシャルを解析する。コールベッドメタン (CBM) のガス組成、同位体比を測定し、CBM の起源を明らかにする。CBM ポテンシャル解析で重要な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。

・石狩炭田の旧赤平、南大夕張、奔別、砂川、清水沢炭鉱、及び苫前炭田の旧羽幌炭鉱の坑口跡から CBM 試料を採取し、ガス組成、同位体比を分析した。炭化水素の組成と炭素同位体比から、多くの CBM は熱分解起源と推定された（図 1 、2)。炭化水素中の 99.5% 以上をメタンが占めており、炭層への吸着や水への溶存などの過程で C_{2+} 成分が失われた可能性が大きい。旧赤平炭鉱の CBM は例外的に C_{2+} 成分が多く、深部からの新たなガスの供給が推定された。羽幌および奔別の CBM は、メタンの炭素同位体比から生物起源と推定された。両炭坑では炭層からのガスの放出はすでに止まっており、坑内水中の微生物活動による CH_4 が大部分を占めるためと考えられる。
・CBM ポテンシャル解析で重要な石炭のガス吸着能力と炭質の関係を明らかにするための吸着実験を開始した。

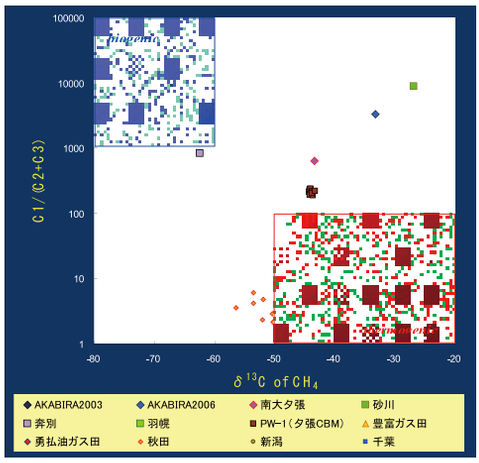


図 1　ガス組成と同位体による起源の推定

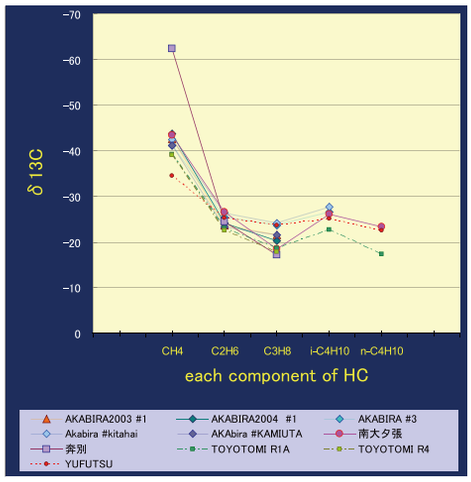


図 2　メタンと C_{2+} 炭化水素の炭素同位体比。

4）燃料資源情報の収集・燃料資源図の作成

筑豊炭田図の編纂作業を完了し、出版する。新たに北海道石炭起源天然ガス賦存図の編集を開始する。可燃性天然ガスに関する地化学データベースのデータを収集・補充する。炭田調査関係資料の電子化、データベース化を進める。
・炭田地質調査関係資料等を電子ファイル化する作業を進めるとともに，筑豊炭田図の編纂のため，炭層対比図や説明文の作成を進めた。
・爆発事故防止の観点から地下浅所の可燃性天然ガスの分布に関する既存情報を収集するとともに，公開に向けた準備作業を進めた。

5）CO_2 挙動の地化学的モニタリング技術の開発

夕張炭田をテストフィールドとして、炭層に圧入した CO_2 の挙動を地化学的にモニタリングする技術を開発する。
・土壌ガスの組成は、多くの地点で CO_2 濃度が低いものの、3 カ所で CO_2 濃度が 1% 以上を示した。この 3 カ所では O_2 濃度の減少も認められたことから、CO_2 濃度が高い原因は注入 CO_2 の漏洩ではなく土壌有機物の分解と推定された。
・生産ガスを毎月採取・分析した結果，CO_2 濃度は高くならず (3% 以下)，連続的に炭素同位体比が低下する傾向も認められなかったため，ブレーク（注入 CO_2 の観測井への到達）に至っていないと判断された。

6）地圏化学の基礎的研究

地圏の資源・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。
・当グループにおけるこれまでの研究で、急速に都市化が進むつくば市周辺地域の非メタン炭化水素濃度が高くなりつつあることが推定された。そこで今回はつくば市周辺地域から、同一試料採取地点について 3 回ずつ空気試料を採取し、非メタン炭化水素の測定を行った。今後、同様の方法で継続的に試料採取・測定を続けていく予定である。
・天然ガスに起因する爆発事故が頻発する南関東ガス田について、上総層群の分布を把握するための資料の収集を行った。

5．主な論文成果

Maekawa, T., Igari, S., Kaneko, N. (2006) Chemical and isotopic compositions of brines from dissolved-in-water type natural gas fields in Chiba, Japan. Geochemical Journal,40, 475-484.

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.

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。燃料資源地質研究グループ、地圏化学研究グループと共同して、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」に取り組み、各種天然ガス資源の成因の地球化学的、微生物学的解析を目指す。

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、菊池美裕、仁道純子、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）」
委託費
「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）
「大水深基礎調査（資源ポテンシャル）に係わる共同研究」（JOGMEC）

３）主な研究設備

・ガスクロマトグラフ
・ガスクロマトグラフ質量分析計
・元素分析装置
・嫌気チャンバー
・嫌気ガス置換装置

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。産総研内の他グループやユニット、石油天然ガス開発企業、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．**18** 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評価

培養実験と地化学分析をもとにガスハイドレート（GH）分布域の地下微生物のメタン生成活動を把握することにより、海洋 GH の成因解明・資源量評価に貢献する。

・IODP 航海 311（カスカディア・マージン・ハイドレート）によって採取されたコア堆積物を、現地に近い温度条件で 嫌気培養を行った結果、66 試料中、47 試料でメタン生成を確認できた。試料によっては、培養開始から 300 日経過した現在でもメタン生成が継続している。GH の分布域や BSR より深いところ、ガスのメタン / エタン比が大きいところでメタン生成が多く確認され，付加体縁辺域を横断するように調査された 5 つの掘削サイトのすべてにおいて同様の傾向が認められた（図１）。
・^{14}C でラベル化した基質を用いたラジオトレーサー実験では、GH の分布域や BSR より深部の他、表層近くの堆積物にもメタン生成活性が認められた。

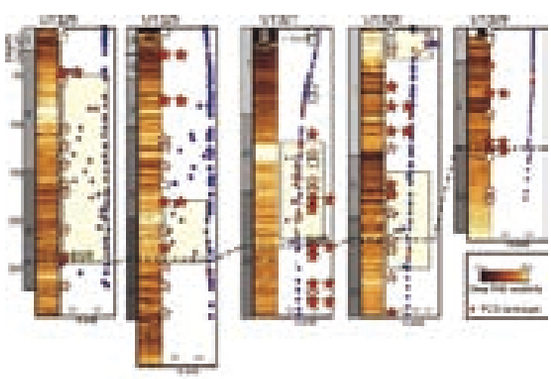


図１　IODP 航海 311 のコア試料のメタン生成活性の分布状況。顕著なところを赤星で示す。

２）大水深海域の非生物起源炭化水素ポテンシャル評価

多数の蛇紋岩ダイアピルが分布する伊豆–小笠原–マリアナ海溝の前弧域において、蛇紋岩の形成（橄欖岩の加水分解）に伴って生成する水素やメタンが濃集して炭化水素鉱床が形成される可能性を検討する。

・大水深基礎調査海域岩石中の炭化水素を分析するための準備段階として，岩石中の炭化水素を分析するために必要となる岩石炭化水素抽出システムを製作した
・混合ガスを用いたガス分析テストを行い，当該システムの性能を確認した。

３）在来型天然ガス資源の成因評価

水溶性ガス等天然ガス資源について、堆積物、ガス、鹹水の地化学・微生物分析をもとに、炭化水素の起源や鉱床の成因を解明する。

・茂原と新潟の水溶性ガス田から採取したかん水沈殿物を長期間培養した結果、TOC の約６～ 20％に相当する量のメタンが生成された。その安定炭素・水素同位体比は、従来想定されている微生物起源のメタンの同位体比とは著しく異なっている。
・ラジオトレーサー実験の結果、スラッジ堆積物には活発なメタン生成が起こっていることが確認され、メタン生成の際、微生物によって二酸化炭素と酢酸のほか、メタノールもメタン生成に利用されていることがわかり、多様性の高い微生物群集であると考えられる。
・茂原と新潟の水溶性ガス田より新種のメタン生成古細菌の分離に成功した。特に採取深度が約 1000 m で地層水温度が 45℃の東新潟ガス田より分離した *Methanolobus* 属に属する新種のメタン生成古細菌は、至適温度が現地温度と同じ 45℃でメタノールのみを利用するという性質を示した。このことから地層中に閉じ込められた高温の古海水環境に適応して進化したことが推察される。また、メタノールを中間産物とした有機物分解経路が存在することを示唆している（図 2）。

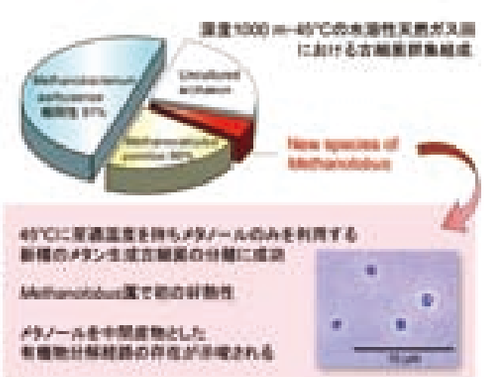


図 2 水溶性ガス田から分離された新種のメタン生成古細菌

・東京都足立区・埼玉県草加市で採取された沖積層について間隙水中のガス組成やメタンの炭素同位体を分析した結果、沖積層海成粘土層に微生物起源のメタンが含まれていることが分かった。
・沖積層海成粘土層ついて、長期培養実験やラジオアイソトープを用いたメタン生成活性実験を行った結果、現世の微生物によるメタン生成が起こっていることが確認できた。

４）油田微生物の天然ガス生成ポテンシャル評価

油田微生物が原油を分解して天然ガスを生成する活動の実態と支配因子を明らかにすることにより、枯渇油田の原油を天然ガスに変換する増産回収技術の開発の可能性を評価する。

・昨年度採取した八橋、南阿賀油田の原油のノルマル／イソプレノイドアルカン比と、天然ガスの化学組成・炭素同位体比を測定した結果、微生物によるアルカン分解やメタン生成の形跡は見いだされなかった
・過去の地化学データを再検討するとともに、補足的に原油（保管試料）のアルカン組成を分析した結果、由利原、余目油ガス田の原油と天然ガスにおいて、微生物によるアルカン分解やメタン生成の形跡が顕著に認められた。

９）基礎的研究

地圏の資源・環境に関する新規研究課題の探索、新しい有機地化学的技術の開発等、萌芽的・共通基盤的研究を行う。

・環境因子（水素分圧）が微生物起源のメタンの水素同位体比に与える影響について再検討するため，メタン生成古細菌 *Methanobacterium thermoautotrophicus* Δ H の水素同位体分別に関する補足実験（培養と同位体分析）を行い，論文を修正，投稿した。
・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にまとめ投稿した。
・亜熱帯地域において近接して分布するマングローブ林，海草藻場，サンゴ礁生態系の相互依存の関係を有機物の動態という視点から検証する目的で，石垣島における各生態系の主要な一次生産者と表層堆積物中の脂質分析を進めた。

５．主な論文成果

Oba, M., Sakata, S., Tsunogai, U. (2006) Polar and neutral isopranyl glycerol ether lipids as biomarkers of archaea in near-surface sediments from the Nankai Trough. Organic Geochemistry 37, 1643-1654..

Riedel, M., Collett, T., Malone, M., (以下 24 人名略), and Yoshioka, H.: Gas hydrate transect across Northern Cascadia Margin. EOS 87, 325-332.

燃料資源地質研究グループの紹介

Introduction of the Fuel Resource Geology Group

燃料資源地質研究グループ長：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）
・受託研究（JOGMEC）「新しいMH濃集・賦存モデルを考慮した地化学 調査の有効性再検討：追加分析解析」(平成18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リー業務」(平成19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18、19年度）
・助成金（日本学術振興会特定国派遣研究者事業)「タービダイトの形成機構とその石油・天然ガス資源探査への応用に関する研究」（平成18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18、19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18、19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、北海道の夕張層を貫く掘削坑での石炭の分析、地下地質データおよび石炭層の情報を解析し、三陸沖から北海道中軸部にかけての地域についての資源ポテンシャル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

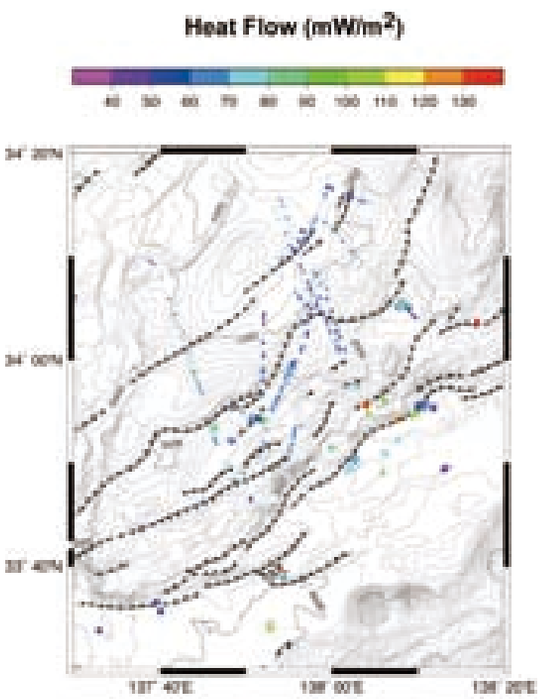


図１　東海沖南海トラフの熱流量分布図

・南海トラフ海域におけるメタンハイドレート鉱床成因解明を大きな目標として、地化学探査法適用の研究および地質的な場の解析を進めている。また熊野海盆における地

震探査と潜水調査船による地質調査・熱流量探査などを併用した検討により、ハイドレート鉱床生成の物理過程解明の研究を進めている。
・東海沖南海トラフ域を中心に熱流量データの収集と再解析を実施中である。これまでに収集した熱流量データの例を図１に示す。
・「よこすか」調査航海（YK06-08、YK07-03）で、熊野トラフの泥火山（第八熊野海丘および第五熊野海丘）において、AUV うらしまを利用した高解像サイドスキャンソナーおよびサブボトムプロファイル探査を実施し、泥火山の形成過程を解析した（図２および図 3)。第八熊野海丘の探査から泥火山形成過程では隆起と陥没を繰り返していること、また冷湧水活動は主に周縁部で起こっていることが分かった。

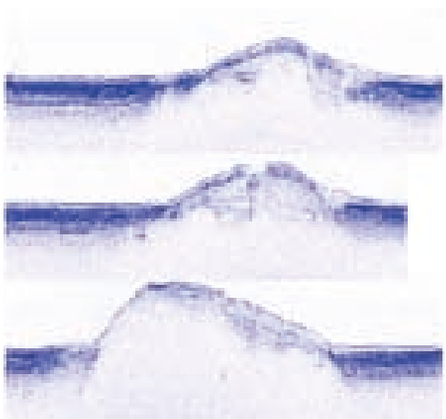


図２　第八熊野海丘のサブボトムプロファイラー記録例

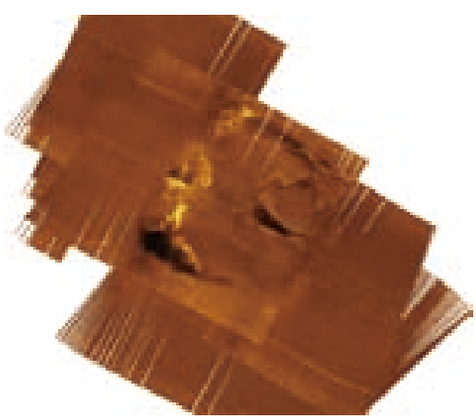


図３　第八熊野海丘のサイドスキャンソナーモザイク画像

・2006 年夏に淡青丸（KT06-19）により、実施した第五熊野海丘における擬似三次元地震探査のデータ処理を実施し、簡易三次元処理を行い地質構造の空間的把握を可能にした。データは現在も継続して処理解析中である。
・台湾南西沖メタンハイドレート分布海域の、「なつしま」による地形および地質構造探査 (NT07-05) において、台湾南西沖のメタンハイドレート海域において SeaBat による地形探査とシングルチャンネル地震探査による地質構造探査を行なった。データは現在解析中である。
・熊野海域における流体循環の研究（NT07-E01）として熊野沖メタンハイドレート海域の巨大スプレー断層および泥火山において、「なつしま」により昨年設置した冷湧水流量計（CAT-Meter）と長期式地殻熱流量計（LTMS）を回収した。
・昨年度に引き続き、直江津沖メタンハイドレート域の海洋地質調査航海に参加し、上越海盆域でのコアリングを実施し、地震探査記録上の BSR 分布域において海底表層堆積物試料を採取し、GSJ（現産総研）および JOGMEC（石油天然ガス・金属鉱物資源機構）による地震探査結果と合わせて解析中である。10 月にはハイパードルフィン ROV 調査およびシングルチャンネル地震探査を実施予定である。
・韓国 KIGAM およびソウル国立大学と共同で、韓国の調査船 Tamhae-2 を用いて 19 年 7 月に日本海対馬海盆の熱流量調査を行った。海盆西部の 10 地点で新たな高精度の熱流量値を取得した。KIGAM による同海域ガスハイドレート探査プロジェクトの中で安定領域の評価に使用された。
・JOGMEC の委託研究「新しい MH 濃集・賦存モデルを考慮した地化学 調査の有効性再検討：追加分析解析」を実施し、新しいメタンハイドレート濃集・賦存モデルに基づき、過去に実施された調査結果の検討とまとめを行い、地層温度測定データの解析、諸地質現象の解析を実施した。
・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リー業務」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する予定である。

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

・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った。最近のタービダイトの定義問題を総括し、学会等で問題提起を行った。また、房総半島のタービダイトから古流向を復元し論文にまとめた。
・岩手・秋田県内で一週間の地質調査を行い、堆積学的分析と年代測定を行った。東北脊梁部のテクトニクスと鉱床成因に関する論文を国際誌に出版。
・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」を開始した。
・ブラジル沖ほか世界の深海チャネルシステ

ムの 3D 地震探査記録解析を行い、チャ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た。

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、2)「ガスハイドレートの研究」において、対象地域の熱流量データ重磁力データほかを収集・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、ベースマップを作成した。
・水溶性ガス田である南関東ガス田の分布、特性について関心が高まっており、本地域の地質・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の、既存情報の収集及び解析、新たなデータ収集のための準備を進めている。

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・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行っている。根源岩評価法、資源評価技術、海洋地質調査法、地質構造発達史、堆積構造解析、地球環境論、等々広範な課題について地球科学的考察を行い、その結果を学会誌・出版物や口頭発表などで公表してきた。

・ハイドレート分布海域における潜水船（有人・無人）調査で使用するための小型表層地温勾配測定装置を導入し、海域調査に備えてセンサー検定作業を実施した。
・日本海の堆積物を用いた過去の気候の復元について国際誌 1 編を出版、1 編を投稿、国際学会での招待講演一件を行った。研究成果が部門 10 大ニュースに採択された。
・深層掘削コア試料の各種物性値の相互関係に関して他機関と共同で非破壊測定およびデータ解析をする研究を行っており、台湾陸上科学掘削 (TCDP) のコア熱物性の測定データ 400 点の解析および論文準備を行った。
・ニードルプローブを用いた連続加熱法により３つの熱物性（熱伝導率、熱容量、熱拡散率、図４参照）を測定する手法を開発した。IODP Exp.301 (the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge) で得られたデータに適用し、(1) 熱物性は堆積物の種類（泥質、砂質）に依存すること、(2) これは quartz の含有量が原因であること、(3) 泥質および砂質の海底堆積物の熱伝導率－熱拡散率および熱伝導率－熱容量の関係を明らかにし、これらの関係を示す経験式を提案し国際誌に投稿した。現在、間隙率と熱物性の関係についてモデル化を進めている。また、10 月末～ 11 月上旬にかけて日本海溝において熱流量の計測を行う予定である。

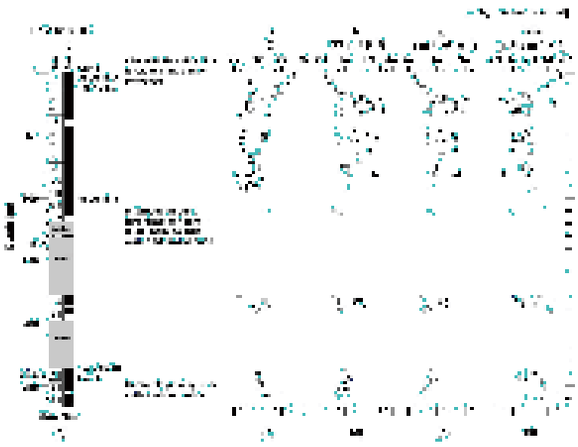


図４　IODP Exp.301 Hole U1301C の間隙率と熱物性の分布

・JOGMEC との共同研究「大水深海域資源ポテンシャルの研究」において、「大水深海域炭化水素ポテンシャルの研究」を実施している。大水深海域基礎地質調査データと深海科学掘削調査データを使用して堆積盆シミュレーションを行い、当該海域の炭化水素ポテンシャルを推定している。

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 CO_2 地中貯留ポテンシャルの評価）

・東南アジア地域の堆積盆の地質情報を収集した（図５）。

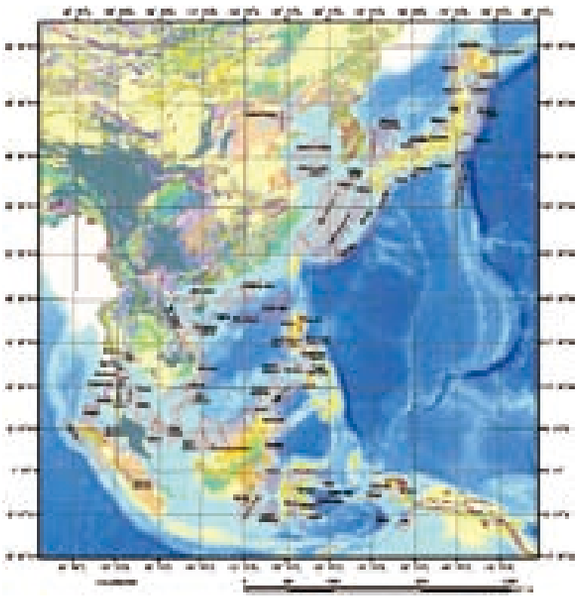


図５　東南アジアにおける堆積盆の分布図

・上記データに基づいて、最新の石油システムシミュレーションソフトウェア（IES PetroMod）を用いた堆積盆解析を実施して、CO_2 地中貯留ポテンシャル評価の基礎にするための事例研究を行った。東南アジアガス田海域において、安定なトラップであれ

ば、天然ガスの貯留量以上のボリュームの超臨界 CO_2 が貯留できる可能性を示唆した。また、東南～東アジア広域地下温度場が、貯留される地下 CO_2 の挙動に与える影響を考察した。

・本年度の東南アジア・東アジアの地質情報整備に関する委託研究においては、東南アジアの代表的な堆積盆において地下地質データを用いた堆積盆モデリングを実施し、東南アジアにおける CO_2 地中ポテンシャル推定精度の向上を図る。

・本受託調査に関連して、下記の情報収集を実施した。

・CCOP 主催の東南アジア堆積盆ワークショップに参加し、東南アジア地域の CO_2 貯留に関連する地質情報を収集した（H19 年 2 月）。

・CDM(クリーン開発メカニズム）に関する CCOP セミナーに参加し、事業が CDM として認定されるための必要条件等の情報を収集した（H19 年 5 月）。

・アーヘン工科大の熱流体シミュレータ SeaMAT の技術セミナーに参加し、同シミュレータの CO_2 貯留シミュレーションへの応用可能性について調査した(H19 年 8 月）。

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

資源エネルギー庁の委託研究の一部「3 次元地質地球物理情報可視化研究」を分担し、大水深基礎調査データを中心とした地質地球物理情報の可視化システム（没入型、高分解能型）の構築を進めている。また、内閣府が中心となって国内諸調査機関が共同して実施している大陸棚延伸申請準備作業に協力している。

4．今後の研究計画と期待される主な成果

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、CO_2 地中貯留をはじめとする、燃料地質学、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□D 最近の主な論文

Goto, S., T. Gamo, H. Chiba, K. Fujioka, K. Mitsuzawa: Contribution of heat outputs from high- and low-temperature hydrothermal sources to the neutrally buoyant plume at the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, accepted for the publication at Earth Planets Space.

Goto. S., O. Matsubayashi: Inversion of needle-probe data for sediment thermal properties as applied to the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge, submitted to J. Geophys. Res.

後藤秀作，キム　ヒョンチャン，内田洋平，大久保泰邦（2006）：地下温度データを用いた地表面温度履歴の復元，地質ニュース，626，p.45-51.

守屋俊治・檀原　徹・岩野英樹・山下　透・中嶋　健・鎮西清高；山形県新庄盆地の鮮新統のフィッション・トラック年代．地質学雑誌（投稿中）

守屋俊治・鎮西清高・中嶋　健・檀原　徹；山形県新庄盆地西縁部の鮮新世古地理の変遷ー出羽丘陵の隆起時期と隆起過程ー, 地質学雑誌（投稿中）

Nakajima, T., Danhara, T., Iwano, H. and Chinzei, K. (2006) Uplift of the Ou Backbone Range in Northeast Japan at around 10 Ma and its implication for the tectonic evolution of the eastern margin of Asia. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 241, p.28-48.

Nakajima, T. and Itaki, T. (2007) Late Quaternary climatic variabilities recorded in deep-sea turbidites along the Toyama Deep-Sea Channel, Japan Sea. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 247, 162-179.

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

棚橋学（2007）東日本沖海域の地質構造 「太平洋プレート北西縁辺部における地球史の解明の研究－ GH05 調査航海速報－」地質調査総合センター速報 no.40、p.24-42.

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－．パリノ・サーヴェイ株式会社創立 30 周年記念徳永重元博士謹呈論集、p.127-145.

内田洋平，後藤秀作（2006）：気温変化と地下の温度構造，地質ニュース，626，p.41- 44.

Yamano, M., M. Kinoshita, S. Goto; High heat flow anomalies on an old oceanic plate observed seaward of the Japan Trench, submitted to Int. J. Earth Sci.

Yamano, M., S. Goto, A. Miyakoshi, H. Hamamoto, R. F. Lubis, V. Monyrath, M. Taniguchi: Reconstruction of the thermal environment evolution in urban areas from underground temperature distribution, submitted to Sci. Total Environ.

鉱物資源研究グループの 2006 年度の活動
Activities of the Mineral Resources Research Group in 2006

鉱物資源研究グループ長：渡辺　寧
Leader, Mineral Resources Research Group: Yasushi WATANABE
Phone: 029-861-2472, e-mail: y-watanabe@aist.go.jp

１．鉱物資源研究グループの研究の概要

国民生活に不可欠な各種の鉱物資源の安定供給はナショナル・セキュリティーに関わる重要課題である．当グループは，金属・非金属・骨材分野・GIS の専門家をもって組織し，金属資源等海外に依存する鉱物資源，非金属資源や骨材資源のように国内で自給される鉱物資源，それぞれの安定供給のために必要な学術的研究・鉱物資源開発のための技術開発，流通安定化のための情報の収集・解析などを実施し，行政と連携して各種の鉱物資源の安定供給の確保に貢献する．

2005 年に開始した第 2 期中期計画では，次の 5 つのテーマに沿って研究を進めている．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，5) 鉱物資源に関するコンサルティング・国際協力．

２．鉱物資源研究グループのメンバー
(2007 年 9 月)

研究グループ長	渡辺　寧
研究グループ員	須藤定久，村上浩康，実松健造
産総研特別研究員	守山　武
JSPS フェロー	Li Xiaofeng
客員研究員	神谷雅晴，寺岡易司，平野英雄，奥村公男，松久幸敬
顧問	石原舜三
テクニカルスタッフ	藤橋葉子，樊倫，Bat-Erdene Khashgarel, 斉藤京子，村岡　論
併任	村尾　智

３．研究の概要

3.1 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

昨年度に引き続き，アルカリ岩関連 (韓国，エジプト，カナダ)，カーボナタイト (米国)，イオン吸着鉱（オーストラリア，日本，ラオス，ベトナム，タイ），燐灰石（イラン，南アフリカ共和国），層状マンガン鉱 (日本，南アフリカ共和国) の地質調査・試料分析を行い，資源ポテンシャル評価を行っている．

鉱物資源研究グループの主要構成メンバー

韓国では，17 年度の調査で高い希土類異常が得られた忠州鉄鉱床付近の詳細地質調査を行い，アルカリ岩の貫入に伴う曹長石化帯に希土類元素が濃集していることを確認した．これらの岩石はルチルや燐灰石などの希土類鉱物が確認された．米国ではマウンテンパス鉱床の調査を行い，鉱床の概要，鉱量を把握するとともに，鉱石鉱物，鉱石の希土類組成分析を実施し，重希土類資源ポテンシャル評価を行った．

韓国忠州鉄鉱床．現在は採石場になっている．

エジプトでは，2 箇所のアルカリ岩関連の熱水変質帯 (ガルエルハムラ，ガバルアブフルーク) の調査を行い，それぞれ岩石，変質帯の特徴を把握し試料を採取した．

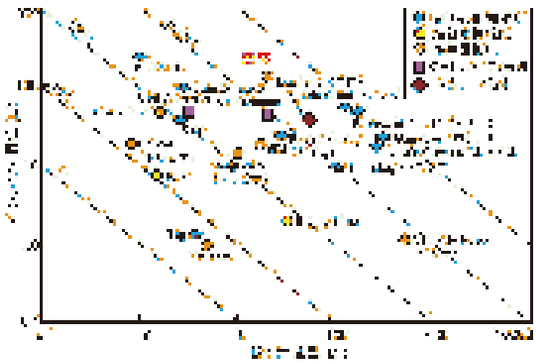
日本では層状鉄マンガン鉱床の調査を和歌山県，高知県で実施し，それぞれの地域での重希土類元素に富む岩石の産状と鉱物・化学組成を把握した．豪州東部では希土類元素に富む 2 箇所の花崗岩体の調査を行い，それぞれの地域での風化殻の発達状況を確認し，花崗岩・風化殻土壌の化学分析を行い，希土類濃集度を確認した．カナダではオカカーボナタイト鉱床を調査し，採取試料の化学分析を行い，希土類元素濃集度と組成を把握した．これらのデータと文献資料をもとに，希土類資源データベースを構築した．

北海道国力層状鉄マンガン鉱床

3.2 金属鉱化作用と探査手法の研究

今年度はインジウムに関する情報収集およびデータベース構築のための試料収集・化学分析を行った．中国の統計報告をレヴューした結果，中国のインジウム埋蔵量は 12,500t とほぼ 10 倍の埋蔵量を持つことが明らかになった．主要なインジウム賦存地域は広西自治区 (5,000t) と雲南省 (4,400t) であるが，内蒙古自治区にも 600t の埋蔵量が明らかになった．日本でかつて操業された卑金属鉱床の鉱石 145 試料の化学分析を実施し，日本のインジウム資源ポテンシャルの評価を行った . その結果，インジウム品位が最も高かった鉱床は豊羽 (138ppm) であり，生野，足尾，明延が次いでいる．採掘前のインジウム埋蔵量としては豊羽が 5,000t であり，足尾が 1,200t，生野が 1,094 ｔ，明延が生野よりやや少ない 1000t 弱と見積もられた．これらを総計すると日本のかつてのインジウム埋蔵量は 8,900t と計算され，日本は世界有数のインジウム埋蔵国であったことが明らかになった．本結果は，Ishihara (2006) に取りまとめられ，2006 年の Resource Geology 誌の Best Article Award に選ばれた．

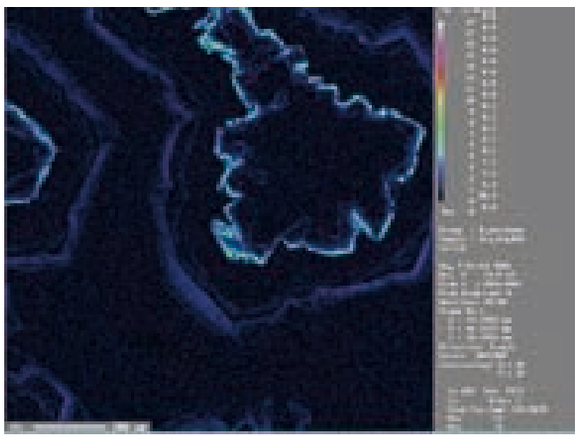
これらの研究により，インジウムの資源寿命 (埋蔵量 / 年間生産量) は米国地質調査所のデータに基づけば 6 年であったのが，33 年に延びることが明らかになった．



リバイズされたインジウム鉱床の品位・鉱石埋蔵量図

またモンゴルの Tsav 鉛亜鉛鉱床の鉱石の分析を予察的に行った．この鉱床の鉱石中の金属含有量は 0.65-38.72% Pb，0.33-21.43% Zn，9-1611g/t Ag, 0.25-0.41% Cu, 0.02-0.04% Cd, 0.007% Bi, 1.2-1.4 g/t Ag，0.02% Sb，0.03 As%. である．3 試料の分析結果により，高インジウム鉱石 (163ppm, 443pp,m) を確認した．これらの鉱石には亜鉛が 23%と 45% 含まれ，インジウムの含有量は亜鉛に比例する．この鉱床での亜鉛鉱石資源量 (1.54Mt) と品位 (4.0%) に基づくとインジウムの資源量は，37 ｔと見積もられた．

アルゼンチン北部の Capillitas 鉱床は中新世のマグマの貫入により形成された鉱脈型の浅熱水性多金属鉱床であり，鉱石には銅，鉛，亜鉛，錫，ビスマス，テルル，マンガン等が含まれる．この鉱石の閃亜鉛鉱中の EPME による分析によりインジウムが最大で 25% 含まれることが明らかになった．今後鉱石全体のインジウム含有量を分析することで，インジウムの埋蔵量を計算することができる．



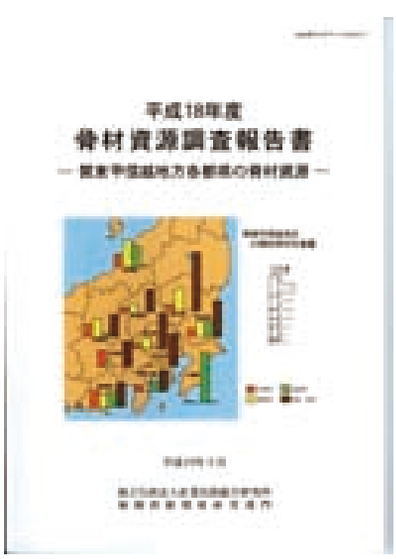
アルゼンチン Capillitas 鉱床の閃亜鉛鉱中のインジウム

3.3 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，関東及び甲信越地方についてのとりまとめ報告書を刊行した．この地域の砂利資源は中央部の産地から流下する河川が多数あり，その中～下流部には河川砂利や陸砂利が分布する．また新第三紀堆積岩の分布する地区には山砂利が分布する．信濃川・利根川・天竜川などの水系はわが国有数の川砂利・陸砂利の産地である．さらに新潟や静岡・千葉の丘陵地は山砂利が広く分布する．砕石資源では，北関東山地・関東山地などには中古生層の砂岩・チャート・頁岩・石灰岩などの良質な資源がまとまって分布する．新潟平野，フォッサマグナ，東海，南関東などの丘陵・平野部では硬質岩の分布がごく少ない地域が多く，新第三紀や第四紀の火山岩類が資源として利用されるが，多くは砂利や移入資源への依存が高い．

砂利資源の利用状況では，新潟・長野・静岡県では，中央高地から流下する豊富な川砂利，陸砂利，丘陵地の山砂利が採掘され骨材資源の中心となっている．山間部では河川沿いの川砂利・陸砂利が活用されているほか，ダム湖の堆砂の採取も盛んに行われている．硬質岩の分布が極めて少ない千葉県では多量の山砂利が採取され，広く東京湾岸へ供給されている．しかし西関東や北関東の平野部では都市化や開発の進行により，資源の枯渇が懸念される地域も多くなってきている．

砕石資源では北関東・西関東の産地の縁で中古生層の砂岩・チャート・頁岩・石灰岩などが採掘され，内陸側から関東平野へ供給されている．内陸部では各所で第三紀，第四紀の安山岩・玄武岩が採掘・利用されている．



骨材資源調査報告書

3.4 鉱物資源データベースの研究

国内鉱物資源 GIS データベース作成のために、1/50 万鉱物資源図（1 図 -7 図) について，最小限のデータの入力と一部未完成ながら表示システムのプロトタイプの作成を行なった．但し，一部データ等に位置ずれがあり，測地系の修正に誤りがあると思われるが特定には至っていない．20 万分の 1 地質図幅 2 地域（八代・長岡）の鉱物資源情報の集積と実地調査を行った．これらの結果をもとにそれぞれの地域の鉱物資源図を作成した．一昨年度に調査･編集を行った 20 万分尾 1 地質図幅「窪川」「小串」を出版した．東アジアの地質鉱物資源 GIS データベースを完成させ，7 月に神戸で開催された国際学会 IMA2007Kobe で公表するとともに 300 万分の 1 鉱物資源図を地質調査総合センターから印刷出版した．アジア全域の鉱物資源データベース作成のためイラン地質調査所を訪問し，イランの鉱物資源データおよび鉱物資源図を入手した．2006 年 5 月にデンバーで行われた SEG の隔年学会，2007 年 3 月にトロントで開催された PDAC2007 に参加し，世界の鉱物資源情報を収集した．

IMA での鉱物資源図の展示

3.5 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，10 万分の 1 地資質図幅作成に協力するとともにラオス地質調査所で鉱物資源に関わる講演を行った．

ラオスでの JICA プロジェクト地質調査チーム

イラン，イスファハン大学での講義

JICA の要請により，ザンビア共和国でのプロジェクト形成調査に参加し，プロジェクトの原案を作成，プロジェクトの立ち上げに協力した．

ザンビア地質調査所でのプロジェクト会議

課題別支援委員会 (鉱業) 委員として国際協力機構の鉱業プロジェクトの評価を実施，石油天然ガス・金属鉱物資源機構鉱物資源分野の人材育成に係る研究会委員として鉱物資源分野の人材育成策を資源エネルギー庁に答申．また同機構が主催するレアアース資源開発研究会に参加．アルゼンチン，タイから短期で研究者を招聘し共同研究を実施した．韓国地球科学鉱物資源研究院から要請を受け，希土類に関する招待講演を行った．

イラン・イスファハン大学の要請を受け，現地での野外調査指導と特別講義を行った．中小鉱山合理化指導員や試験委員として国及び地方行政に貢献した。地質標本館が行った「砂展」では、講演や資料作りなどで中心的役割を果たした。砂利や砕石、アスベスト問題などについて、講演会や業界紙などを通じて貢献した。石油天然ガス・金属鉱物資源機構の実施する深海底鉱物資源に関する共同研究に参加し、報告書を提出した。社) 未踏科学技術協会・磁性材料研究会 21，大阪大学，電子情報技術産業協会からの依頼で希土類資源に関する招待講演を行った．

文献

Ishihara, S., Hoshino, K., Murakami, H. and Endo, Y.（2006）Resource Evaluation and some genetic aspects of indium in the Japanese ore deposits. Resource Geology, v.56, no.3, p.347-364.

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，阪口圭一，佐々木宗建，茂野　博，玉生志郎，水垣桂子
併任・客員研究員：佐脇貴幸・大谷具幸ほか

２）予算

・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 18 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利用拡大のための基盤的研究を目的とし，地熱資源情報を GIS 上で統合することにより，地熱情報データベースを作成し，地熱資源ポテンシャル評価に関する情報を社会に提供することを目指している．これは，3）GIS を利用した地熱統合評価の研究，4）地熱シーズ・基盤研究の 2 つの柱からなる．また，4）においては，地熱知識ベースに関する重要な応用研究として，地層処分の研究に関する新規課題の立ち上げのための基礎研究も行う．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，新規作成済みのグループ 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，最適開発方法等を明らかにする．

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，今年度内に，地熱版『風況マップ』のプロトタイプを完成させ，ユーザーアンケート調査の発送までの完了を目指す．この完成に当たっては，その存在を広く知らせるため，広報活動に務める．

３）GISを利用した地熱統合評価の研究：電子地理情報と地理情報システム（GIS）を利用した地熱資源の DB 化－解析・評価手法を統合的・発展的にシステム化し，日本の各種地熱資源の評価を多面的に進め，今年度内に九州地方と大分地域の事例研究成果および CCOP アジア地熱データベースの成果を出版する．これら成果の出版に当たっては，広報活動に務める．

４）地熱シーズ・基盤研究：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下水熱環境研究，地層処分研究，地圏環境研究等へのシーズ研究を展開する．また，研究者の自由裁量による萌芽的研究を行い，海外との地熱研究協力を推進するとともに，第 7 回アジア

地熱シンポジウムを開催する．

４．平成 18 年度の研究成果

１）阿蘇カルデラ及び鬼首カルデラのコア解析では，今年度は 5 坑井の柱状図を作成して，従来作成したものと合わせて両カルデラの陥没構造・形成史の共通点と相違点を抽出した（図 1）．小型カルデラの熱ポテンシャルに関して，下北半島西部野平地区で湖成層分布域中央部に変質溶岩を発見し，後カルデラ期の火山・熱水活動が確実となった（図 2）．ESR 法による古熱水温度推定法に関して文献調査を行った．数値地質図 GT-3「九州－大分－豊肥地域の地熱データ処理集」の出版に連動して，坑井検層データ（温度・地質・変質）の GIS 化処理・表示プログラムの修正を行い，平成 19 年度の旧「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」グループの成果誌上発表に向けて準備した．

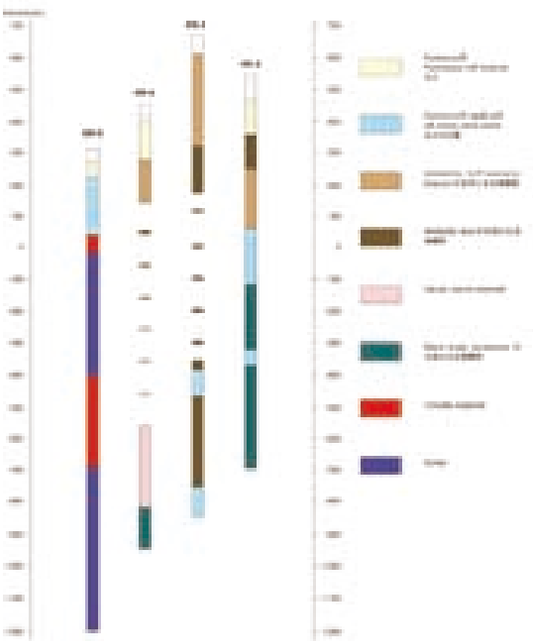


図 1　鬼首カルデラ南東部の坑井地質概略．

２）平野部の低温温泉を対象に種々の地化学温度計の適用可能性を検討した．地化学温度計の多くは地下温度より高い値を示したが，シリカ温度計と NaKCaMg温度計は地下温度に近い値を示す場合があった（図 3）．今後，中温温泉も考慮し地化学温度計の適用下限を評価する．皆瀬村小安地域で天水涵養量に対する温泉流出量と算定したところ，約 3%であった．この数字を開発可能性が高いと見るのかどうかは，今後の検討課題である．また，大噴湯のような自然兆候地はスティームキャップとして発達したものと推定された．全国の 3,686 個の温泉の湧出温度と湧出量に両対数正相関を見出し，このトレンドが一次元移流方程式で説明できること，この曲線からのずれを用いて全

図 2　野平地区の湖成層分布およびその中に発見された変質溶岩の位置．水色：野平層（湖成），ピンク：半太郎沢凝灰岩（湖成），赤丸：変質溶岩，スケールバー：2km．

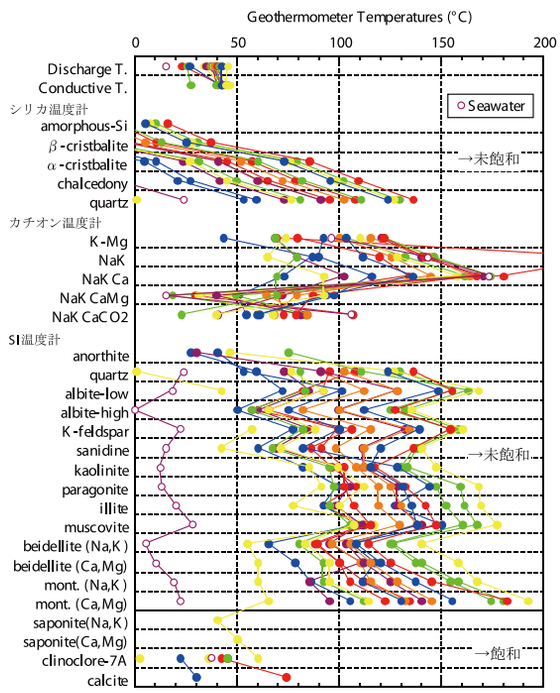


図 3　低温温泉への各種地化学温度計の適用可能性の検討結果．

国の浸透率マップの作成が可能であることを国際誌に論文発表した（図 4）．全国から 7,203個の温泉化学分析値と 3,066個の坑井地温データを収集し，「全国地熱ポテンシャルマップ」のプロトタイプ（CD-ROM）を作成し，100 以上の機関にユーザーアンケートを行うとともに，そのデータを用いて多数の全国マップを作成し，地質調査総合センターから「日本の熱水系アトラス」（冊子）として出版した（図 5）．

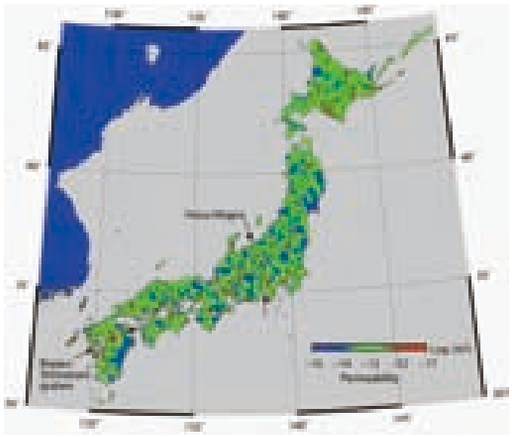


図４　温泉の湧出温度と湧出量の相関関係を用い，移流モデルにもとづいて作成した 1km スキン深度浸透率分布図（Muraoka et al., 2006).

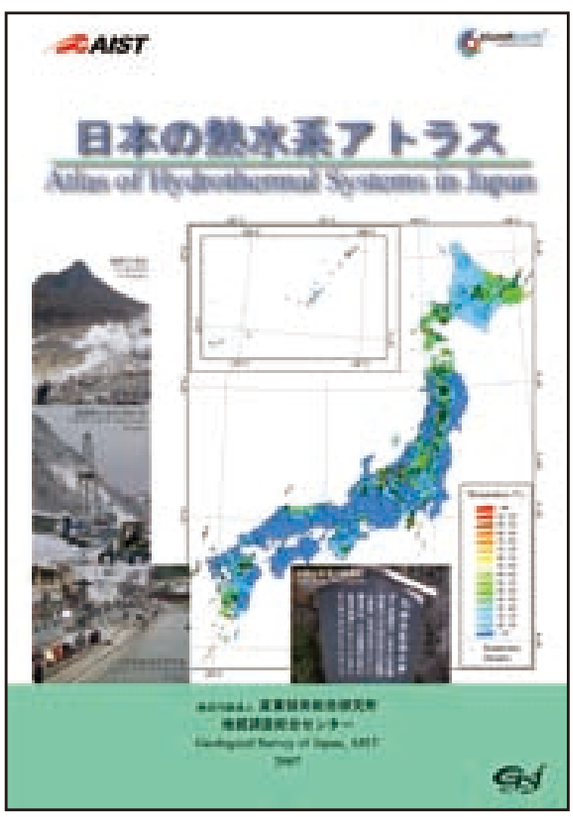


図５　2007年３月に産総研地質調査総合センターから出版した「日本の熱水系アトラス」(110p.).

３）地質調査総合センターから，数値地質図 GT-3「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)」を編集・出版した（図 6). これにより，第１期に実施した「未利用地熱資源の資源量評価の研究／ GIS を利用した評価法の検討」と昨年度に実施した電子地球科学情報の簡易的な統合利用に向けた事例研究（地球科学アトラス自作）の多様な成果を再整理して,幅広く利用し易い形で一般公開した.

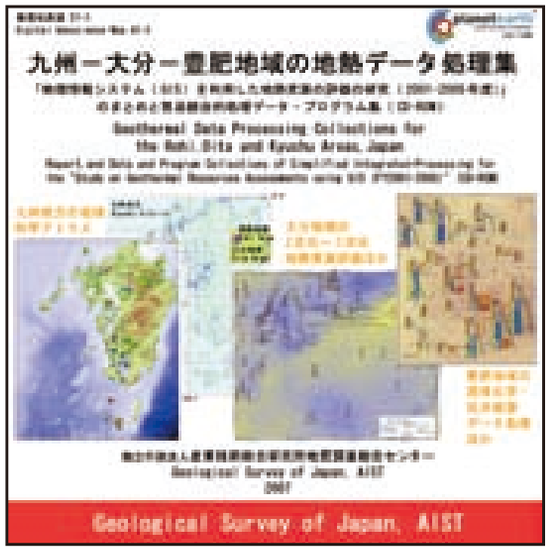


図６　2007年３月に産総研地質調査総合センターから出版した数値地質図 GT-3「九州－大分－豊肥地域の地熱データ処理集」.

図７　地熱コア倉庫保管ボーリング・コア画像データベースの web 公開.

４）温泉水の溶存成分の直接利用の可能性を検討するため，温泉変質帯における地化学成分の移動／濃集過程を調査した．対象は秋田県川原毛酸性変質帯における熱水活動時とその後の土壌発達時とし，岩石と土壌及び温泉水と間隙水の地化学分析を行い，数値モデル解析などを通じて結果を整理中である．ESR 法による小規模熱水変質帯解析手法の研究として，地下水～低温熱水から生成した鉱物の測定例および理論について文献調査を行い，基礎実験に適した試料を採取した．RIO-BD 地熱ボーリング・コア画像データベースに，コア箱約 7,100 箱分（1 箱約 2.5m）のコア画像と地質柱状図をアップロードし，公開した(図7). また，このデータベースを口頭発表と誌上発表を行ったために，アクセス数も月平均 1,000 件近くと大幅に増加した． 2005 年度実施した NUMO 受託研究の成果を，日本原子力学会で「地層処分のための熱・熱水の評価―東北地方の事例―」および「概要調査地区における熱・熱水の影響評価のための調査・解析・評価手法の提案」として口頭発表した．　2006 年

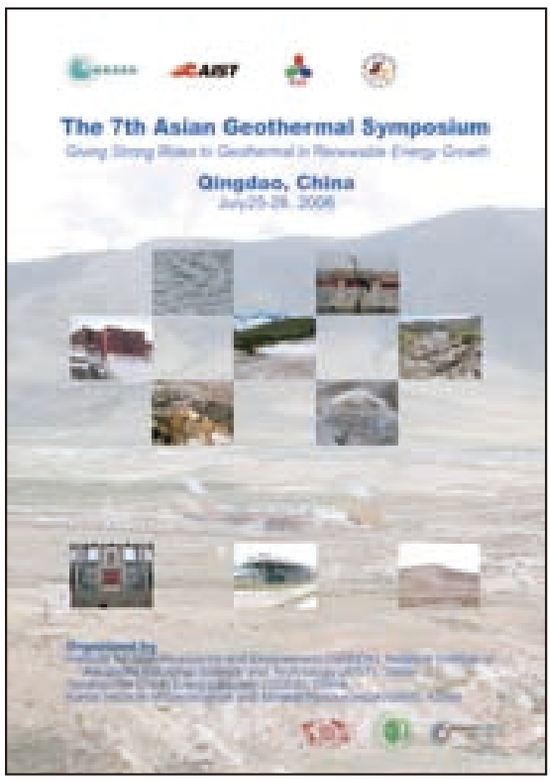


図８　2006年７月に出版した第７回アジア地熱シンポジウムのプロシーディングス（174p.）.

図９　第７回アジア地熱シンポジウム（中国・山東省青島市）の模様.

７月に中国青島市において第７回アジア地熱シンポジウムを主催し，174ページの英文プロシーディングスを出版するとともに（図８），その参加者は100名を超え，山東省テレビのイブニングニュースで大きく報じられた（図９）．JICA地熱発電マスタープラン調査のインドネシア依頼出張において，スラウェシ島，ジャワ島，スマトラ島の６地熱地域の地表概査を行って各地域の地熱資源の特徴を把握し，採取した試料の年代測定・化学分析を実施した（図10；図11）．

図10　スマトラ島シポホロン・プルアパート盆地末端の正断層（石灰華脈）からの温泉湧出.

図11　スラベシ島北部ゴロンタロ市東方の無電化地帯の小学校と温泉井戸（右手前）.

５．今後の展開に向けて

平成19年度には，NUMO「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」に関する特集号の出版を予定している．

『温泉エコジェネシステムの開発』（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に採択された．このプロジェクトでは，国内外の温泉地域における小規模・低温発電技術の開発と市場開拓を目指す．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，国際協力機構等に積極的に協力して行く．

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），間中光雄，竹田幹郎，鈴木庸平，奥澤康一（産総研特別研究員），須甲武志（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」(JNES：委託研究）

・「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）

・「統合化地下構造データベースの構築」（文科省：科振費）

・「堆積軟岩の破壊および AE に関する研究」（民間受託研究）

・「南西太平洋熱水噴出域における細胞内共生細菌の系統による巻貝類の住み分け機構の解明」（文科省：科研費基盤Ｂ）

・「微生物の遺伝的特性を用いた水文地質学的シーズ研究」（内部グラント）

３．グループの研究トピックス

当グループにおける最大の研究課題である地質環境ベースライン研究は，地下水モニタリングのための物理探査手法，ベースライン把握を目的とした最適掘削手法，水理特性，物質移行特性把握手法に関する研究，地化学環境を把握する水理・水文学的手法，地中微生物環境等多岐に渡り，他グループからの研究協力も得て実施している．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最適掘削手法

当グループでは，新第三紀堆積岩地域を対象として，ボーリング孔掘削による地下水化学および微生物環境への影響を最小化することを目的とした無菌，無酸素調整を行った掘削水を用いた，深度 350m のボーリング掘削を実施した．採取された岩石サンプルは，掘削水と同等の水中で分割，保管が実施され，実験室内の無酸素雰囲気下で圧縮法によって間隙水抽出を行い，間隙水の化学分析，微生物活性の測定等を実施した．微生物の脱窒活性の研究例に関しては，本レポートの須甲他の報告を参考にされたい．

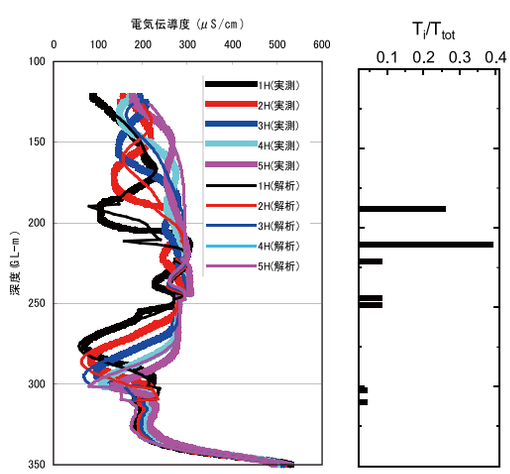


図１；地下水電気伝導度検層フィッティング例と湧水／漏水深度での相対透水量係数分布

また，水理特性計測が原位置の化学環境等に与える影響を最小化することを目的として，孔内水の純水への置換，揚水を伴う地下水電気伝導度検層を実施し，事前に実施した電気検層，キャリパー検層等の結果を用いた一次元移流拡散解析で揚水時の局所的な湧水量／

漏水量を計算し，深度方向の相対透水量係数を求め，ヒートパルス式孔内微流速検層等の結果との比較を実施した．結果として，試験の擾乱を最小化して水理特性を求めるという目的での本手法の有用性が示された．

２）地化学ベースラインと水質変化の検討

地表の渓流水の水質は，地表水－地下水の連結を考慮すると地下水の水質を示す重要な指標となりうる．そのため，当グループでは流域内にペグマタイト鉱山を含む花崗岩地域の小流域において，渓流水，河床堆積物等の採取，分析を行い，地化学ベースラインマッピングを実施した．その結果，当該地域においては，基底流量の３倍程度の流出状況であれば，渓流水の水質は基底流量下の水質とほぼ等しいこと，同一の地質条件を示す流域においても，化学組成，土壌・風化帯の厚さ等によって水質に大きなばらつきが見られる場合があることを示した．

また，本流域では上流部のペグマタイト鉱山に起因する渓流水中のウラン濃度が，下流側で低下している現象が見られた．その原因として，図２に例を示すように河床堆積物中の有機物，非晶質物質への吸着が関連していることを実証した．

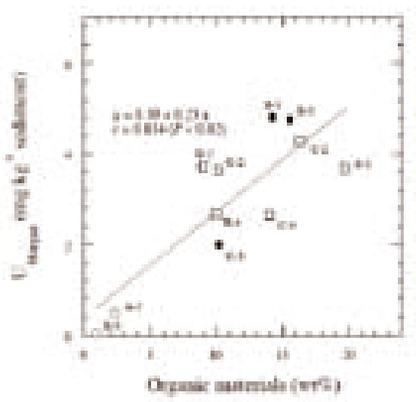


図２：河床堆積物中の有機物量と吸着ウラン量の関係

３）拡散係数算出のための室内実験解析手法

放射性核種の天然バリア中の移動を遅延させる要因として，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があげられる．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,トレーサーの性状によっては,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ーの性状に従って，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．

４）岩石の変形透水実験と内部構造変化把握

岩石の透水係数の静水圧(拘束圧)依存性は，特に低圧領域で大きいことが多くの実験から示されている．その原因としては，ミクロスケールでの透水経路となるき裂や空隙の空間的な連続性の低下が上げられているが，実証的なデータは少ない．そこで，当グループでは,マイクロフォーカスＸ線 CT および静水圧，間隙水圧を負荷可能な専用圧力容器を用いて，各種圧力条件下での変形，内部構造変化を非接触で計測する研究を実施している．図３に Berea 砂岩において，各種圧力条件下で CT 画像を元に算出された径方向の変形分布を示す．これから圧力変化に伴う変形の異方性を非接触で求めることが可能となった．

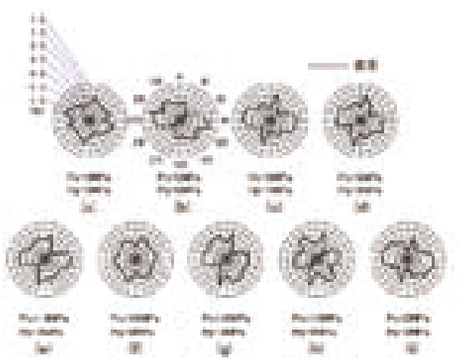


図３：Berea 砂岩における各種条件下での径方向の変形分布

４）原位置条件下におけるウラン易動度に対する微生物の影響

室内実験下では確認されている還元環境下での鉄還元バクテリアによるによるウランの還元沈殿現象は，地下水流動シナリオにおける核種移行性に大きな影響を与える．当グループでは，原位置のより不均質条件下において，微生物がウランの還元沈殿，易動度の変化に与える影響に関する研究を実施している．

５）安全評価手法の実環境への適用性研究

放射性廃棄物処分の安全規制支援機関が独自に開発している安全評価手法の整備を目的として，現在，原子力安全基盤機構，原子力研究開発機構と共同で，安全評価手法の幌延地区の実環境への試験的な適用，評価検討を実施している．当グループでは，既公表データをもとに，広域の３次元水理地質モデル，地下水流動モデルの構築を行うとともに，モデルの検証手法，高度化に関する研究を実施している．

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

当グループは，この3月に廃止された深部地質環境研究センターのチームの一つが地圏資源環境研究部門に移籍したもので，第2期中期計画に掲げられる「地質環境の隔離性能に関する研究」を引き続き主たるミッションとして担うことで放射性廃棄物処分における国の安全規制を支援するための研究を行っている．さらに10月にはグループの小改編がなされ，これまでの「隔離性能にかかる諸プロセス解明のための実験手法等の整備と，規制当局が行う安全評価を支援できる研究基盤の確保」（中期計画抜粋）に軸足を置きつつも，精密調査にわたるフェーズの研究として，より本格研究を目指した内容を加えることとなった．

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，冨島康夫，鈴木正哉

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」（JNES：委託研究）
・TRU廃棄物処理におけるヨウ素ガス固定化技術の開発と長期安定性に関する評価（文科省：原子力特研）
・ノンフロン型省エネ冷凍空調システムによるカーエアコンの開発（NEDO）
・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）天然水中におけるコロイドを介した元素移動の研究

天然のウラン濃集帯周辺の地下水および花崗岩後背地より流出する渓流の河川水を採取して，その水試料を異なる孔径のフィルターで段階濾過と化学分析し，フィルターに捕捉されたコロイドの影響を見積った．これによると，地下水ではアルミニウム，希土類元素，ウラン等，また河川水では希土類元素に富むコロイド粒子の存在が示唆されるいっぽう，シリカコロイドの存在は認められなかった．コロイドの粒径は，地下水が0.1μm前後から0.025μm程度で，河川水は0.1μm前後から存在するが0.025μm未満のものも多いことがわかった．図1に地下水の一例を示す．

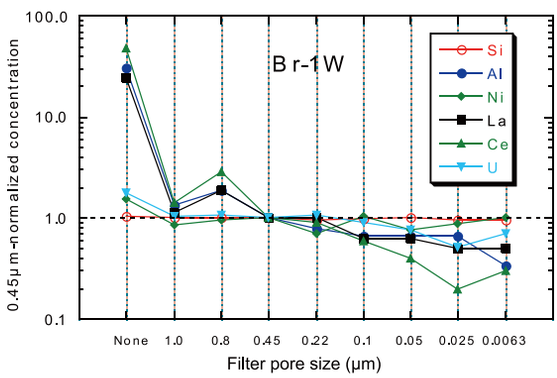


図1：フィルター孔径と0.45μmフィルター濾過正規化濃度の関係．

2）コロイド分析におけるフィルターの吸着特性の研究

コロイドの分析では，コロイドのサイズごとのコロイド態の推定と化学分析を行うが，そのために使用されるフィルターについて，元素の吸着特性を把握しておくことは大切なことである．今回，メンブランフィルター，ポリサルフォンフィルターについて次のような予察的実験を行った．pH約3，5，7のCo，Zr，La，Ce，Pr，Nd，Sm，Eu，Gd，Tb，Dy，Ho，Er，Tm，Yb，Lu，Pb，Th，U溶液を調製し，25 nmのメンブランフィルターで濾過した後，その50mlをガラスビーカーにとり，それぞれのフィルターを浸し，溶液残存濃度の時間変化を調べた．図2に実験結果からウランの例を示す．

なお，弊所出版物，地質ニュース2007年3月号にて「HLW地層処分とコロイド研究」と題した特集を組んだ．

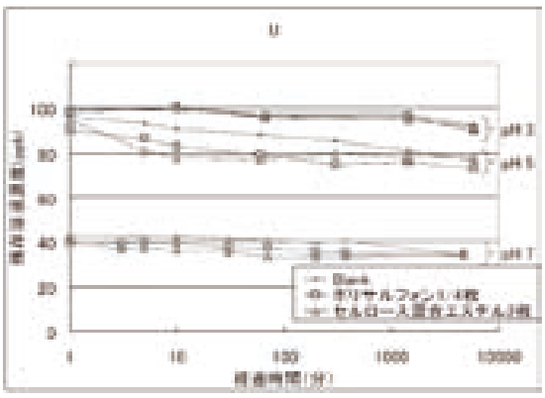


図 2：ウランのフィルターへの吸着実験結果.

3) ナノチューブ状アルミニウムケイ酸塩の利用の研究

ナノサイズのチューブ状アルミニウムケイ酸塩であるイモゴライトの特異な形状による高い比表面積，水との親和性，優れた吸着能力などを素材として暮しに役立てる研究を行っている．イモゴライト前駆体合成の生成阻害因子の除去などの工夫で，従来よりも 20 ～ 30 倍高い濃度でのイモゴライト合成が可能となった．また，ヒートポンプ熱交換材および結露防止材としての最適な特性の解明と利用・開発に成果をあげた.

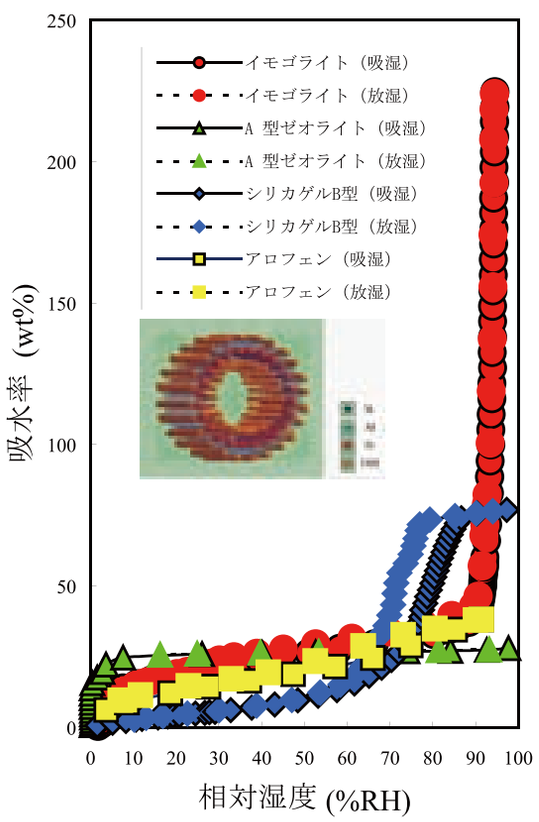


図 3：イモゴライトの水蒸気吸着等温線（結露防止材として優れた特性を示す）とイモゴライトの模式図（はめこみ図）.

4) AIST Online FEPs の構築

FEPs とは Features Events and Processes の略称で起因事象と訳される．その内容は廃棄体，人工バリア，天然バリア，地表環境とそれらに影響を及ぼしうる外因と人間活動にわたるあらゆる事象とプロセスのリストをさす.

高レベル放射性廃棄物の安全評価で重要なシナリオの構築では FEPs リストが利用される．FEPs リストは抜け落ちの無いことが大切なため網羅性が求められる．このため，FEPs リストはその項目数が増大していく傾向にあり，その管理にはデータベースが用いられることが普通である．本研究ではいわゆる Web2.0 技術を用いることで，ブラウザを用いてどこからでも簡単にデータベースの内容を閲覧したり更新したりできることを目指した．その結果，多くのエキスパートがその作成やレビューにかかわることになる FEPs の維持管理に好適なシステムが作成された.

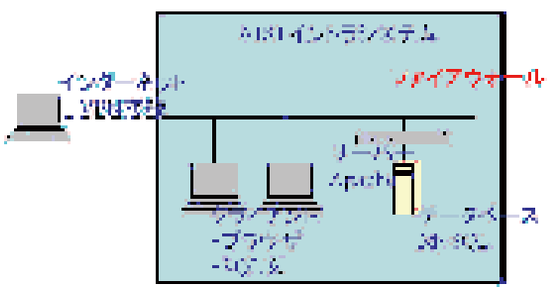


図 4：システムの構成

5) TPA コードについての調査研究

TPA コードは高レベル放射性廃棄物処分事業の安全評価において，その中核とも言うべき性能評価を行うためのコンピュータコードである．われわれは，これらに求められる地球科学データのありかたとその重要性の評価という観点から TPA コードについての調査研究を実施している．現在米国ユッカマウンテン処分場の審査に使用される予定の安全規制側コード (NRC 版) について調査を行っている.

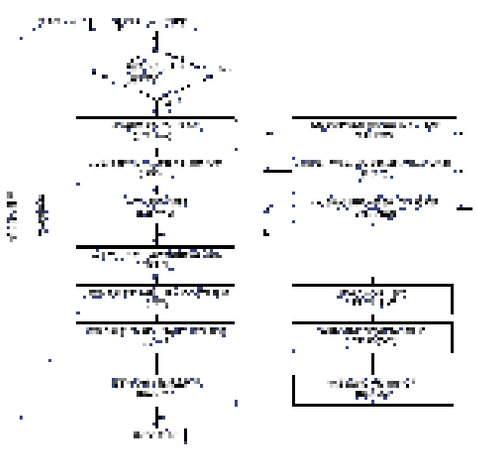


図 5：NRC 版 TPA コードのモジュール構成

電気探査および地中レーダの地圏環境モニタリングへの適用
－北関東地下水観測サイトでの実験－

Application of Electrical and GPR Surveys to Geo-Environmental Monitoring
-A Field Experiment in the North-Kanto Groundwater Observation Site-

地圏環境システム研究グループ：高倉伸一
CO2 **地中貯留研究グループ：西　祐司，杉原光彦**
地圏資源環境研究部門：石戸恒雄
Geo-Environmental Systems Group: Shinichi TAKAKURA
CO2 Geological Storage Research Group: Yuji NISHI, Mitsuhiko SUGIHARA
Institute for Geo-Resources and Environment: Tsuneo ISHIDO
Phone: 029-861-3927，e-mail: takakura-s@aist.go.jp

1．はじめに

本研究では，地層処分場となる地下岩盤内における割れ目や変質などに伴う含水状況の時間変化を，比抵抗法探査や地中レーダ探査によって非破壊に把握する技術の開発を目的としている．比抵抗は水の存在に敏感なパラメータであることから，比抵抗法電気探査により広い範囲の水理構造の変化を簡便に把握できると期待される．一方，地中における電磁波速度は誘電率に支配され，誘電率は主として地中の含水率を反映するため，地中レーダにより地中の詳細な含水状態の変化が把握できると期待される．将来的には坑井あるいは坑道を利用して地下深部にセンサーを設置し，処分場となる深度の岩盤の状況を精密にモニタリングすることを計画しているが，現時点では，いろいろな地質情報が得やすい地表からの探査実験を行い，比抵抗法と地中レーダの探査能力やモニタリングへの有効性を検討している．今回，北関東地下水観測サイトで，比抵抗法と地中レーダの繰り返し測定を行い，同サイトで連続観測されている気象・土壌水分・土壌温度の変化と比較した．本報告では，これらの結果について述べる．

2．地下水観測サイトの概要

北関東地下水観測サイトでは，2006 年 3 月から気象観測が開始され，気温，雨量，風向・風速，湿度，気圧，表層付近の土壌温度および土壌水分が観測されている．また，GPS 測位，自然電位，自然地震などの連続観測や重力観測小屋内での絶対重力繰り返し測定が実施されている．さらに，立体的な比抵抗構造を求める 3 次元電気探査や比較的深部を対象とした電気探査が実施された．これらのセンサーの位置を図 1 に示す．なお，サイト周辺では反射法や AMT 法による深部調査も実施されている．

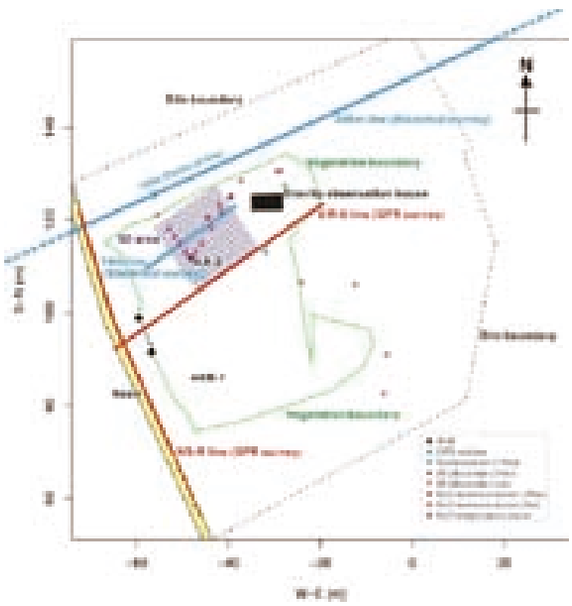


図 1　地下水観測サイトの各種観測センサーの位置図

3．比抵抗法繰り返し探査

比抵抗法電気探査による繰り返し測定では，降雨の影響を受けやすい地表下 10m 程度までの比抵抗変化の把握を目的に，長さ 24m の測線を常設し，2006 年 8 月 15 日から約 1 ヶ月ごとに 2 次元電気探査を実施している．各回の測定データは 2 次元解析され，毎回の比抵抗変化を求める．前回探査との比抵抗変化率を図 2 に示す．最初の結果に大きな変化が現れたのは，測線の南 3.7m に掘削された揚水井 KR-2 孔の影響である．なお，右下の図は 9 月 30 日から 1 月 25 日までの変化率である．比較のため，2006 年 8 月から 2007 年 1 月までの降水量，地温 (0.6m，3m)，土壌水分（0.6m，1.2m，1.8m，2.4m，3.0m）の変化を図 3 に示す．

地表付近を見ると、比抵抗が徐々に高くなる傾向がある．また、数 m 深部では逆に比

抵抗が低下する傾向がある。図 3 から土壌水分の変化は小さいことから，比抵抗変化の主な原因として土壌温度の変化があげられる．

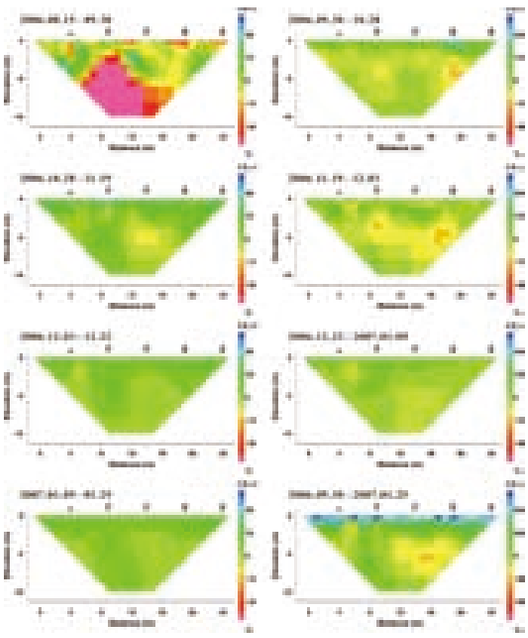


図 2　各測定とその直前の測定との比抵抗変化，および 9 月 30 日から 1 月 25 日までの比抵抗変化．

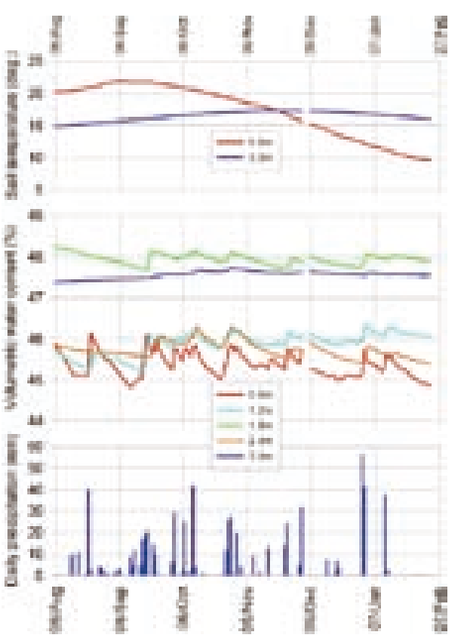


図 3　地温，含水率，降水量の変化．

4. 地中レーダ測定

当サイトでは，2006 年 2 月，12 月，2007 年 1 月，2 月に連続波およびパルス波地中レーダ探査が実施された．ここでは，図 1 に示す EW-0 測線で実施した連続波地中レーダ探査から求められた反射断面を図 4 に示す．なお，反射断面の作成に用いた電磁波速度は，ワイドアングル測定の結果から求めた．2006 年 2 月，12 月，2007 年 1 月，2 月の電磁波速度は，それぞれ，0.53　10^8m/sec，0.51　10^8m/sec，0.49　10^8m/sec，0.53　10^8m/sec であり，最大値と最小値の間には約 7.5%の差がある．2007 年 1 月の電磁波速度が低いのは，調査の直前にまとまった雨が降り，地表および浅部が湿潤状態にあったからと考えている．

測線全体にわたり深度 4 ～ 5m 付近に強い反射面が認められる．その上位には 2 枚の反射面が見られる．深度 5m の反射面の下位には，深度 7m 及び 9m 付近に連続性の良い反射面が認められ，測線の東端付近（水平距離 40 ～ 55m 間）にはさらに深い反射面が存在する．

深部の反射面は 2006 年 2 月の結果が最も明瞭である．測定パラメータは同じであるので，これは 2006 年 2 月が最も深部まで電磁波が到達していることを意味している．おそらく，地下の含水状態の違いが反映されているものと考えられる．

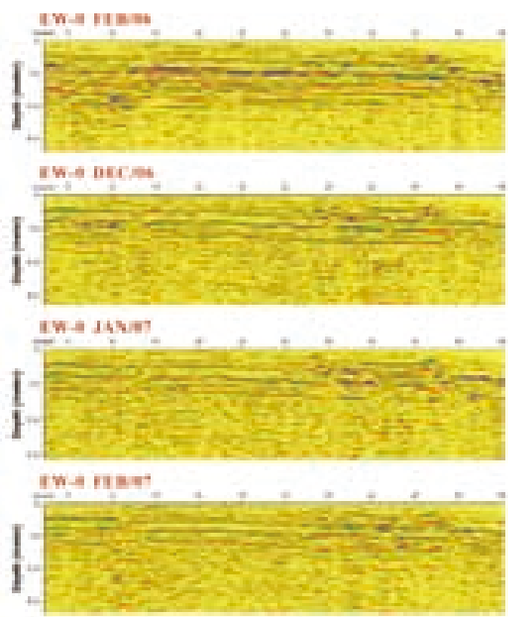


図 4　EW-0 測線の地中レーダ探査結果．

5. おわりに

気象観測や地球物理観測が行われている北関東地下水観測サイトにおいて，地表付近の水理環境の変化を把握するため，比抵抗法と地中レーダの繰り返し測定を実施した．解析された比抵抗構造と電磁波速度構造の変化を気象・土壌水分・土壌温度の変化と比較した結果，比抵抗法や地中レーダが地下水構造や地圏環境の変化の把握に有効であることが確認された．

謝辞

本研究は，経済産業省原子力安全・保安院からの委託研究「地層処分に係る地質情報データの整備」の一環として実施された．

地熱調査井岩石変質データのデータベース化と事例地域モデル化処理の試み

Studies on Making a Database of Rock-Alterations for Geothermal Exploration Wells and Modeling the Alterations of Case Study Areas

地熱資源研究グループ：　茂野　博
Geothermal Resources Research Group: Hiroshi SHIGENO
Phone: 029-861-3701, e-mail: hiroshi-shigeno@aist.go.jp

１．はじめに

岩石の変質は，過去－現在－未来の地下環境の推定･評価の指標･手段として重要である．

また変質は，地下岩石の化学・物理特性値（鉱物組成，強度，透水性など）を大きく変化させるため，地圏の各種資源開発，災害防止，地下空間利用などにおいて調査・検討が不可欠である．　従って，各種変質（風化，続成，熱水，熱，地滑り，断層など）に関する情報が電子データベース化されて，幅広く高度な利用が容易に可能となることが望まれる．

２．データベースの作成

新エネルギー･産業技術総合開発機構(NEDO)の地熱開発促進調査（図１）の坑井掘削調査･Ｘ線分析によって報告されている変質鉱物存在度データについて，九州 14 地域・本州 21 地域の 271 坑井分を表計算ソフトを用いて坑井毎に編集した．　その結果を，簡易的に坑井毎・地域毎に整理し，予察的な比較検討を行った（茂野，投稿中）．　将来的には，未作業の北海道 17 地域などを含めて電子データベース化公開の計画であるが，データフォーマットの規格化・共通化が難しい問題となっている．

３．事例６地域のデータ処理

上記地域の中から高温（～200℃＜）の阿蘇山西部（熊本県），八丈島（東京都），低温（～100℃＞）の菱刈（鹿児島県），本宮（和歌山県），王滝（長野県），最上赤倉（山形県）の６地域を事例として，地質調査総合センター（2007）の方法によって坑井検層･柱状（温度・地質・変質）データの各種処理・表示を行い，地下の熱・熱水環境の履歴を概念的にモデル化した．　図２に八丈島地域の調査データ（NEDO，1993）の処理例の一部を示す．　６地域の比較検討結果は,低温地域(非火山性地域を含む）においても多様な変質帯が分布しており,変質調査･解析が地下環境(地域的な熱源や熱水系の特性･分布･履歴，地形･断裂系・岩質分布に規定された不均一な透水構造，気液分離現象に伴う化学的な分化過程など）の推定に有力な手法となることを示している（茂野，投稿中）．

謝辞：本研究は，原子力発電環境整備機構(NUMO）の委託研究「熱・熱水の影響評価手法に関する検討（その１～3)」の一環として行われ，西日本技術開発株式会社の協力を頂いた．

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（CD-ROM）．数値地質図，GT-3.
茂野　博（---）：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．地調研報（投稿中）．
新エネルギー・産業技術総合開発機構（1993）：地熱開発促進調査報告書，no. 32，八丈島地域，1202p.

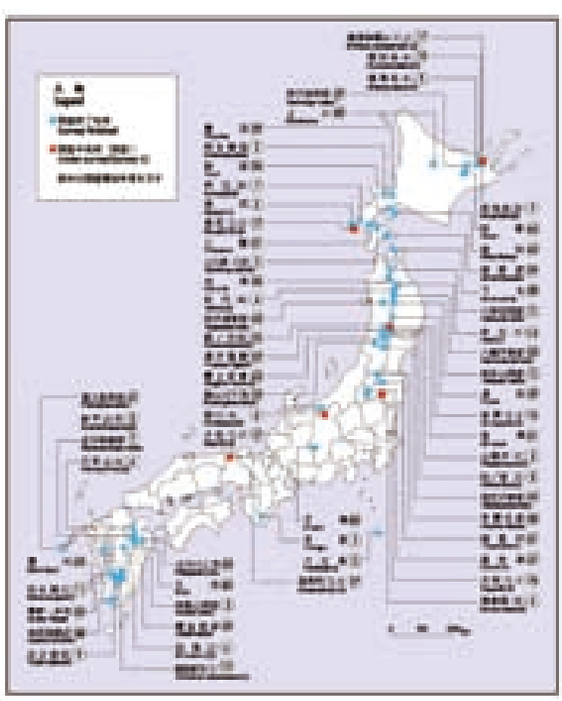
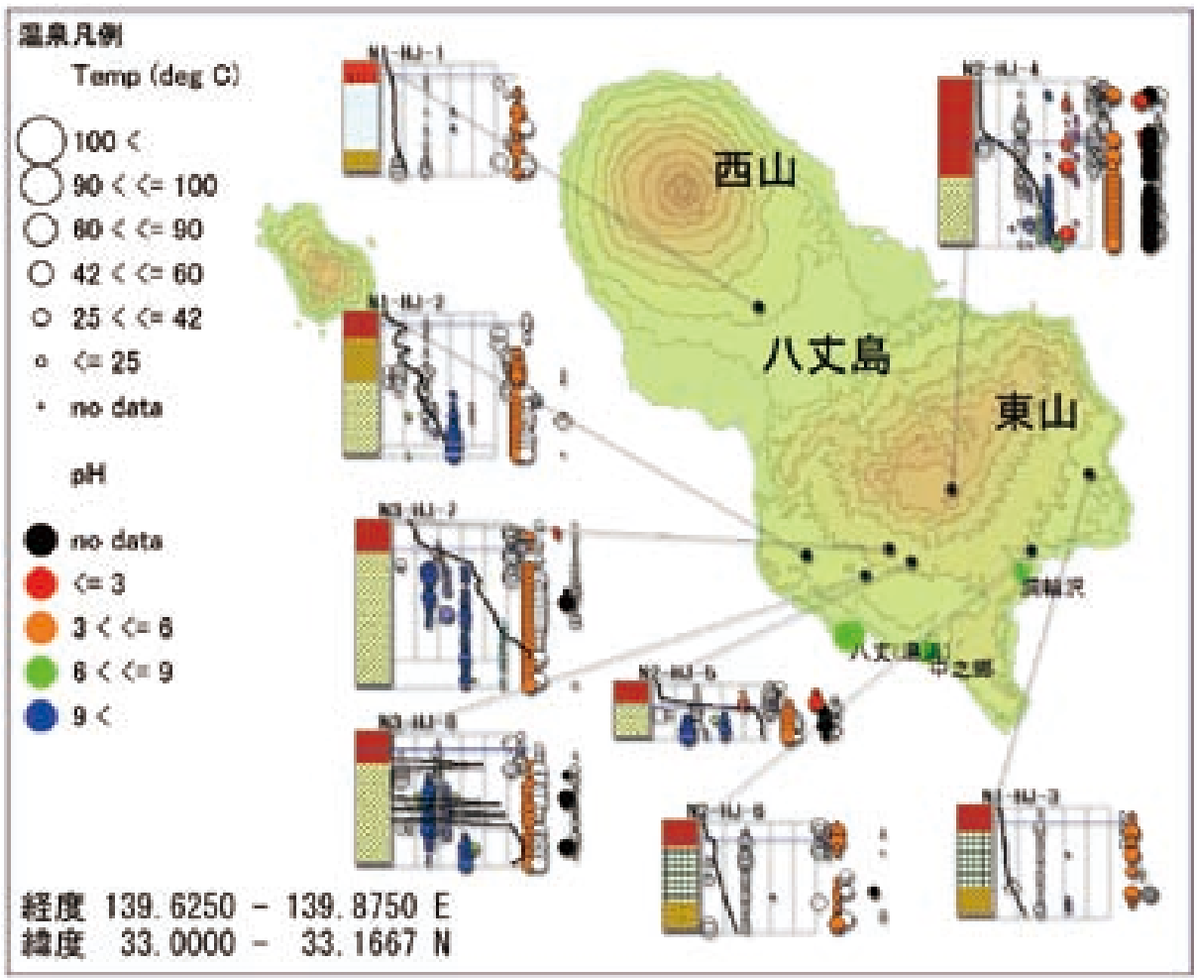


図１　地熱開発促進調査位置図（NEDO,2006）



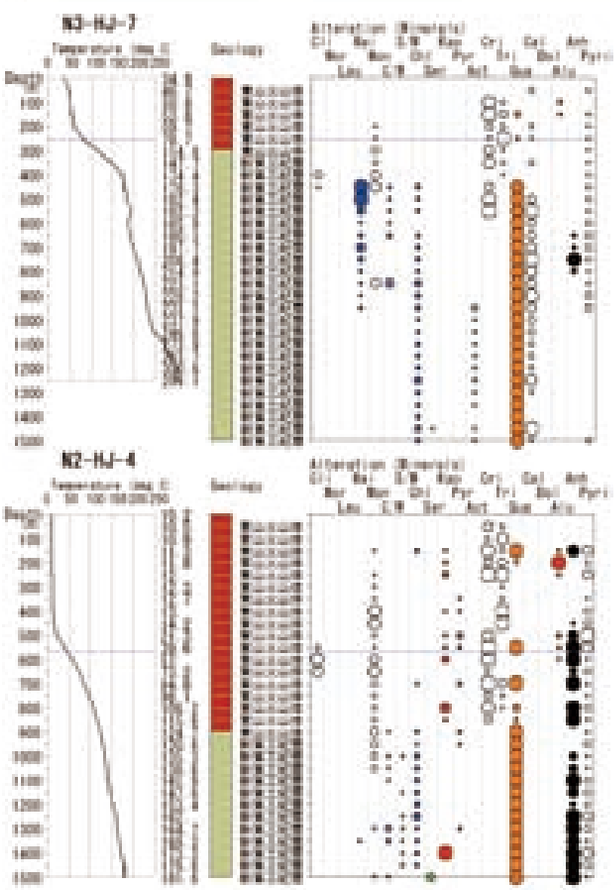


図２　八丈島地域の地熱開発促進調査（NEDO, 1993）で得られた坑井検層・柱状（温度・地質・変質）データの処理例.

上は地図上統合表示，左は代表的な個別坑井のやや詳細な表示である.　第四紀火山である東山の南西山腹の地下（HJ-7井・HJ-5井など）には，特に新第三紀層中に高温中性変質帯が広く分布しており，現在発達している熱水系分布に対応している.　その上位には帽岩となる中温変質帯が分布している.
これに対して，東山の山頂部の地下（HJ-4井）には，高温酸性変質帯が分布しており，過去の火山活動に伴う高温酸性流体の寄与が大きかったことを示している.　一方，周辺地域（HJ-1井・HJ-3井・HJ-6井；礫岩層などが発達）は，高温変質鉱物に乏しく，過去～現在を通じて高温環境にはなかったと推測される.
詳しくは，茂野（投稿中）を参照.　なお，一部の坑井温度検層データなどには測定・表示上の問題があることに注意.

砂岩の力学特性に及ぼすＣＯ２圧入の影響

Effect of CO2 injection on mechanical properties of sandstone

地圏環境システム研究グループ：及川寧己　竹原孝
Geo-Environmental Systems Research Group: Yasuki Oikawa and Takashi Takehara
Phone: 029-861-3876、e-mail: y.oikawa@aist.go.jp

１．はじめに

CO2の地中隔離においてはCO2圧入に伴う地層水の弱酸性化や有機物の溶解などにより地層がダメージを受け、力学的変形特性が変化することが考えられる。また、隔離は長期間に渡ると考えられていることから、地層の長期的な変形挙動について、あらかじめ良く研究してデータを蓄積しておくことは、今後のCO2地中貯留を考えると重要である。ここでは地下1,000m程度までの地層環境を想定し、ベレア砂岩を用いて三次元応力下で温度や孔隙圧を制御しながら試験片にCO2を圧入した後に、岩盤の変形挙動を調べる基礎的試験を行い、CO2圧入の力学特性に及ぼす影響について検討した結果について報告する。

２．実験

２．１　実験機器及び試験片

試料岩石はアメリカ産のベレア砂岩を用いた。試験片サイズは直径50mm高さ100mmであり、孔隙率は17.9%である。

図１に試験装置の概要を示す。軸載荷には最大容量500kNのMTS社製材料試験機を用いた。周圧載荷用ベッセルの制御は油圧サーボ式の周圧載荷装置で行った。ベッセルには加温ヒーターを胴体外周に巻き、試験中のベッセル内部温度を一定に制御した。試験片の孔隙圧は、温調ジャケットを装着した２台のシリンジポンプを用いて試験片の上下端から制御し、所定の温度で孔隙内流体を供給・回収できるようにした。

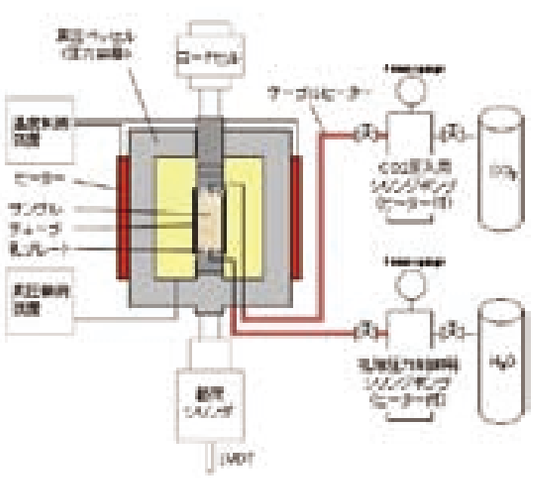


図１　試験装置の概要

強度試験においては試験片に貼り付けた１対のクロス型箔ゲージで縦ひずみと横ひずみを計測した。クリープ試験においては、この箔ゲージに加えて板バネ式変位計１対による軸変位の計測を併用した。

ベッセル内の試験片に油が浸潤しないように岩石試験片とエンドプレートをシリコン熱収縮チューブで被覆した。CO2を圧入する場合はCO2漏洩を低減させるために、岩石試験片とシリコン熱収縮チューブの間にさらにPETフィルムを被覆している。

２．２　実験条件及び孔隙流体

想定地下深度は、600、800、1000ｍとした。各想定深度における試験条件を表１に示す。なお想定深度800mと1000ｍの条件においてCO2は超臨界状態である。

孔隙流体は水とCO2を用いた。孔隙をまず水で飽和させ、水飽和の場合はそのまま（水飽和試験片）、CO2圧入の場合はさらに超臨界CO2を圧入・置換した（CO2圧入試験片）。いずれの試験片も置換時に送液した総流量は400ml以上とした。また、水飽和の場合の飽和度はほぼ100%、CO2圧入の場合の置換率は孔隙体積の50～60%がCO2の状態と見積もられる（残りは水）。

２．３　三軸圧縮強度試験

三軸圧縮強度試験は、水飽和試験片の場合は想定深度として600、800、1000ｍの各条件下で実施した。CO2圧入試験片の場合は、想定深度800ｍと1000ｍで実施した。軸載荷は、試験機の載荷シリンダの変位速度が一定となるように制御した。

Depth (m)	Confining pressure σ_3 (MPa)	Pore pressure σ_p (MPa)	Temperature (℃)
600	14.2	5.9	30
800	19.1	7.8	35
1000	24.0	9.8	40

表１　想定地下深度と実験条件

２．４　三軸クリープ試験

三軸クリープ試験は、想定深度 800 mの条件下のみで実施した。クリープ応力の設定では三軸圧縮試験での破壊強度を 100%とした。CO2 注入による破壊強度の変化はとくに見られなかったため、水飽和・CO2 圧入の両試験片共に同じクリープ応力値での実験となった。ここでは水飽和試験片と CO2 圧入試験片の直接比較が可能である 90%応力の試験片の結果について記す。

３．結果及び考察

３．１　三軸圧縮強度試験

表 2 に圧縮強度試験結果を示す。ここには予備試験で行った一軸圧縮試験結果（室乾状態・湿潤状態）の結果も併記した。圧縮強度 S_c は差応力で示した。水飽和試験片と CO2 圧入試験片では、想定深度において顕著な強度の差は認められない。

図 2 に水飽和試験片と CO2 圧入試験片の応力－ひずみ線図を示す。深度条件は 800mと 1,000mのものを描いた。横ひずみは両試験片とも顕著な差は認められない。縦ひずみは、CO2 圧入試験片の傾きが水飽和試験片と比べて若干小さくなる傾向が認められる。従って CO2圧入試験片のヤング率、ポアソン比は、水飽和試験片と比べて若干小さい傾向が認められた。

超臨界 CO2 圧入の影響を調べた岩石力学的データの蓄積は十分ではなく、試験条件を変えたデータの蓄積などが今後必要である。

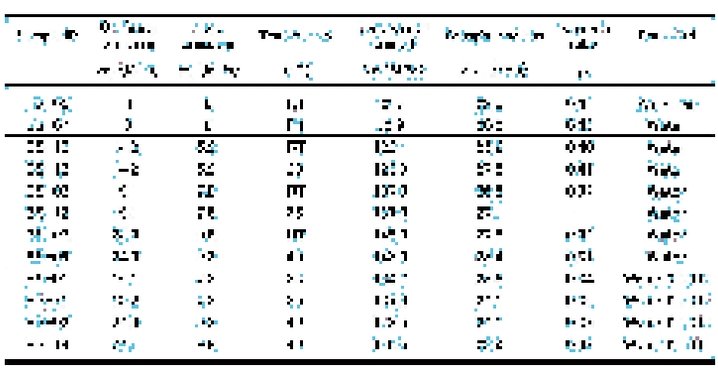
３．２　三軸クリープ試験

クリープひずみは、１次クリープ領域（減少クリープ）及び３次クリープ領域（増加クリープ）においてクリープ速度が経過時間もしくは残存寿命のn乗に反比例するような挙動が観察された。2 次クリープ（定常クリープ）についてはあまり明瞭ではなく、1 次クリープと 3 次クリープについて対数クリープ則に基づいて構成則を定めたところ、良好なマッチングが得られたためここでは考慮していない。対数クリープ則の基本式としては下式を用いた。ε はクリープひずみ速度、tは経過時間もしくは残存寿命、aは初期クリープ速度もしくは終期クリープ速度を表す。

$\varepsilon = at^{-m}$（a , m は定数）

クリープ寿命に関してはクリープ試験中の最大ひずみに基づく平均ひずみ速度と、定めた構成則に基づく最小クリープ速度との関係を調べた。ここでは最小ひずみ速度との関係のみを図 3 に示すが、いずれもひずみ速度の逆数に比例して寿命が延びる結果が得られている。また、水飽和試験片よりも CO2 圧入試験片の方が寿命が長く、さらに同じ CO2 圧入試験片でも寿命が異なり、CO2 置換後の待機時間が 1 日長い方がクリープ寿命が長かった。定性的にはより CO2 に曝されるほどクリープ寿命が長くなることを示唆しているのかもしれない。今後良く検討する必要がある。

表２　三軸強度試験結果



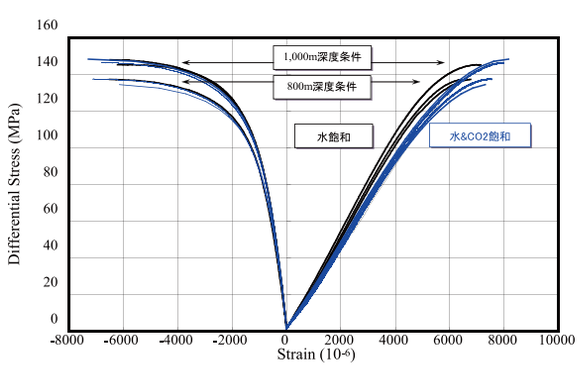


図２　三軸強度試験の応力－ひずみ関係

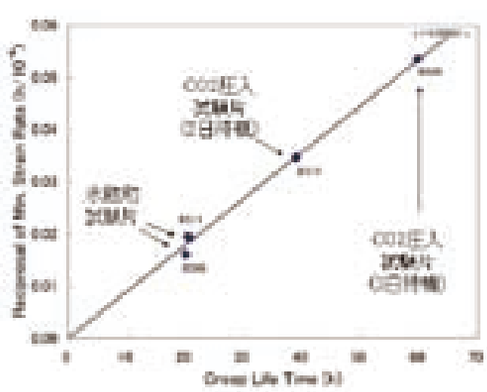


図3　最小クリープ速度の逆数とクリープ寿命

超臨界 CO_2 の流動挙動の把握に関する研究

Study of Experiment for the fluid flow of CO2 in Aquifer

天満則夫 (地圏環境システム RG), 坂本靖英 (地圏環境評価 RG), 西祐司 , 當舎利行（CO2 地中貯留 RG）
藤井孝志（東北大学大学院）
Norio Temma[1)*], Yasuhide Sakamoto[2)], Yuji Nishi[3)], Toshiyuki Tosha[3)] and Takashi Fujii[4)]
[1)] Geo-Environmental Systems R.G., [2)] Geo-analysis R.G.,
[3)] CO_2 Geological Storage R.G., [4)] Graduate School, Tohoku University.
[*]Corresponding Author, e-mail address: tenma-n@aist.go.jp

１．はじめに

CO_2 地中貯留技術では、長期にわたって CO_2 が帯水層に貯留することから、シミュレーションによる予測は CO_2 の地上へのリーク等のリスク評価を行う点や、実際のサイト選定や事業化等を検討する上で重要な技術の一つである。現在は、CO_2 に関する様々な実験（文献）より、CO_2 の物性値を数式で取り扱うことが可能であり、石油分野や地熱分野で開発されている汎用シミュレータに対して CO_2 の物性値に関する部分をサブルーチン化して組みこむ等の開発が進んでいる。しかしながら、コード内で取り扱っている CO_2 の流動特性モデル（モジュール）については実際の CO_2 圧入試験の数が少ないこともあり、妥当性が十分に確かめられていない。そこで、図 1 に示すようにリスク評価への利用を最終目標として、室内実験や現場試験での CO_2 流動に関するデータ取得を行い、数値シミュレーションによるマッチング等を進めながらモジュールの開発及び精度の向上を目指すこと

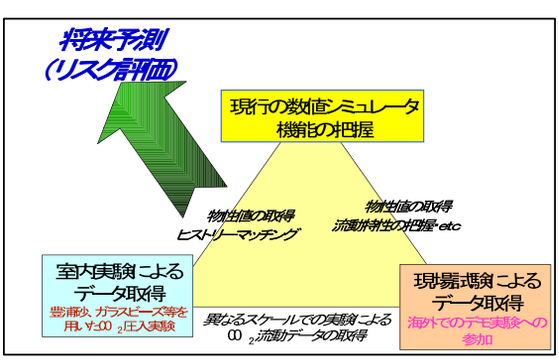


図 1　本研究の目的

とした。ここでは、数値シミュレーションのために進めている室内実験や現場試験の計測に関する進捗状況等について紹介したいと考えている。

２．室内実験

超臨界 CO_2 が帯水層内に圧入された際の流動を検討するために出来るだけ簡便な状態で実験を行うことを考えた。具体的には、豊浦砂を用いた擬似帯水層を作成して温度、圧力条件を制御した状態で超臨界 CO_2 を圧入して、水やガスの生産を計測し、不動水飽和度等の物性値を得ることを試みている。室内実験装置として準備したカラムは直径 50mm、長さ 200mm である。このカラムを水で満たした後に豊浦砂を充填して、水タンクに沈める。この水タンクの温度は制御できる。実験条件としては超臨界 CO_2 になる温度・圧力条件を設定し、超臨界 CO_2 の圧入試験を実施している。現在、実験数を増やしているところであり、さらに砂の種類等も変更していきたいと考えている。

また、超臨界 CO_2 の圧入に伴う水の排出（置換）の状況を把握するために、予察的な検討としてガラスビーズを用いた可視化実験も行っている。図 2 にガラスビーズを用いた可視化実験装置の概念図を示す。本装置では、ガラスビーズを詰めた擬似帯水層を準備して、それを水で満たした後に超臨界 CO_2 を圧入して流動を調べることにした。擬似帯水層は“覗き窓（スリガラス）”から状況を確認できるので、装置の背面には光源を設置して、光の透過の違いによって流動の状況を把握することを試みている。まずは、超臨界 CO_2 を圧入した際の流動をとらえることが出来るかどうかを確認するために、0.8mm（粗砂）の大きさ

のガラスビーズを用いて実験を行った。写真はその際の撮影結果である。最初は水で満たされたガラスビーズ内に下から超臨界 CO_2 が圧入され、ガラスビーズ内の下部が徐々に黒くなっていることがわかる。これより超臨界 CO_2 が水を排出していることがわかる。なお、この実験は温度 35℃、圧力 7.5MPa の条件で実施した。

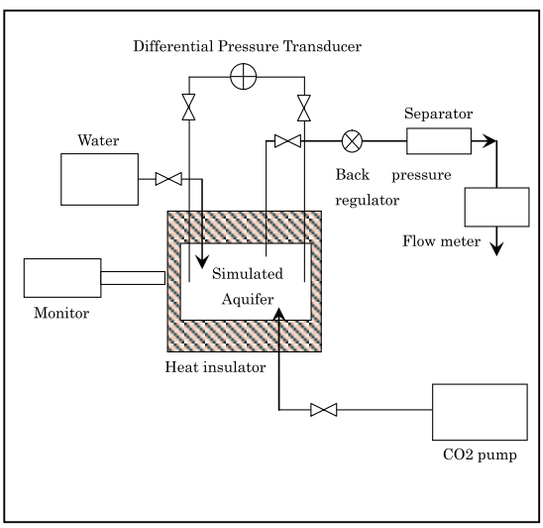


図 2　可視化実験装置

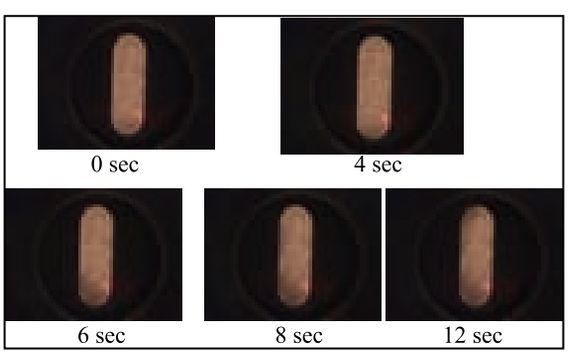


写真　超臨界 CO2 の圧入による流動変化

３．現場試験－海外での研究協力活動－

現場での CO2 圧入試験に関するデータ取得として、COP3 には参加していないアメリカ国内でエネルギー省の下にある七つの regional partnership の一つとして進められている SWP(Southwest Regional Partnership on Carbon Sequestration) プロジェクトへの参画を考えている (DOE, 2005)。この SWP プロジェクトは、Brian McPherson 教授 (New Mexico Institute of Mining and Technology) が中心となって、電力会社や石油会社等々と連携を図りながら進めている。この SWP では、現在、幾つかのフィールドで大規模なデモンストレーション試験が予定されており、物理探査技術による CO2 モニタリングや CO2 地中貯留を進めていく上でのリスク評価等に関する議論が進められている。我が国では、CO2 地中貯留の試験場が少なく、特に SWP のような実用規模の試験場は無いため、このような実作業での情報（研究課題）の把握が難しい。これらの情報が我が国における CO2 地中貯留研究をより進める上で有益な情報になると考えられる。産総研地圏資源環境研究部門では、このプロジェクトに参加して電気探査手法の一つである自然電位 (SP) 法を用いたモニタリング手法の実施を検討しているところである。現在は、ユタ州、アリゾナ州、コロラド州とニューメキシコ州が交差するフォーコーナーの近くにある Aneth(ユタ州) で実施予定の CO2 圧入試験を検討している。なお、図 3 に示すように現在 SWP のホームページにはプロジェクトの参加機関として AIST も名前が掲載されている。

図 3　SWP の協力メンバーリスト、上から 2 番目に AIST が掲載されている。

参　考　文　献；U. S. Department of Energy Solicitation (DOE) (2005): Southwest Regional Partnership on Carbon Sequestration – Phase 2, DE-PS26-05NT42255, Technical Narraitive.

CO2 炭層地中貯留における地化学モニタリングについて（続報）

Geochemical Monitoring on CO2 Sequestration in Coal Seams (Part 2)

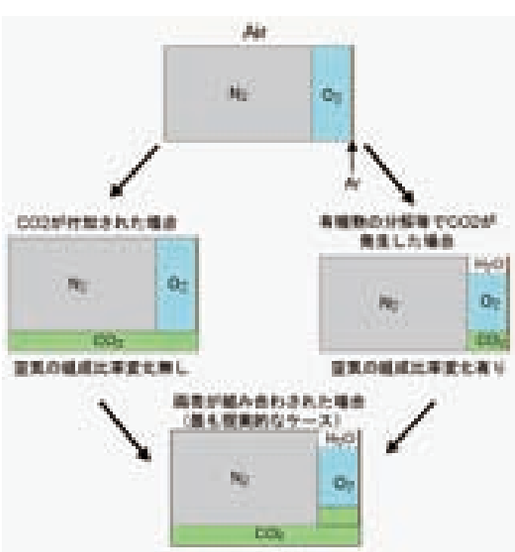
鈴木祐一郎，猪狩俊一郎，前川竜男（地圏化学 RG）
小牧博信，藤田眞仁（(株）環境総合テクノス）
Yuichiro Suzuki[1)*], Shun-ichiro Igari[1)], Tatsuo Maekawa[1)],
Hironobu Komaki[2)] and Masato Fujita[2)]
[1)] Resources Geochemistry R.G., [2)] The General Environment Technos Co., LTD.
[*]Corresponding Author, e-mail address: yu-suzuki@aist.go.jp

１．はじめに

2003 年以来，北海道夕張市において経産省補助金事業として（株）環境総合テクノスを中心となり「二酸化炭素炭層固定化事業」の現場予備実験が進められてきた．深度約 900m の CO_2 圧入井（IW-1）と観測井（CBM 生産井，PW-1）が夕張市南部地区に掘削され，CO_2 炭層圧入試験の実施により種々のデータが取得されつつある．

この現場予備実験では，CO_2 圧入による周辺への環境影響を評価するために種々のモニタリングが実施されている．CO_2 や CBM の地表への漏洩をモニタリングするために土壌ガスの地化学分析を実施しており，本予備実験の重要な課題の一つとなっている．また注入した CO_2 の観測井への到達（ブレークと称する）を検出する手法として，観測井からの生産ガスについて炭素同位体を用いた地化学モニタリングをおこなっている．

今回は，前年度にひき続き 2007 年度に実施している地化学モニタリングの結果について 12006 年後半の結果を合わせて報告する．



２．土壌ガスの地化学モニタリング

土壌ガス試料は前年度と同様に，注入井（IW-1)より数 10m内に配置された土壌ガス採取地点 4 カ所（G-3, G-3-1, G-3-2, G-3-3）および数 100 m離れた地点に設置された 3 地点（G-1， G-2， G-4）で定期的に採取した．前年度実施された IW-1 の坑井内観察で坑井自体からの漏洩の可能性が指摘されたため，新たに坑井近傍に 2 カ所（G-8, G-9)の採取地点を設けた。分析項目は前年度と同様である。

2.1. 昨年度の結果

2005年におこなわれた土壌ガス分析で CO_2 濃度が 1% を超える地点の存在が確認された。この CO2 濃度異常については，注入 CO_2 の地表への漏洩によるものかどうかについて CO_2 濃度だけでは判断することは困難であった。そのため 2006 年に CO2 の起源を特定することを目的とした詳細な組成分析および炭素安定同位体分析による土壌ガスの地化学モニタリング実施した．

CO_2 濃度が大きくなった原因として図１で示す２ケースが考えられたが，ガス組成分析の結果から N_2 と Ar が常に一定比率なのに対し，N_2 と O_2 は比率が変化し，O_2 と CO_2 には一定の負の相関が観測された。この結果，土壌ガス試料（4/12 ～ 9/12）中の CO_2 の起源は有機物の分解によるものと判断され，漏洩は認められなかった。

2.2. 今年度の研究結果

CO_2 漏洩の現実的なモデルとして外部付加 CO_2 と有機分解 CO_2 とのの混合想定される（図１の下部)。外部付加 CO_2 が 0% ～ 5% の各ケースで，有機分解 CO_2 の増加における N_2 に対する CO_2 と O_2 の組成比の関係をシミュレートしたのが図２である．このケースの場合，有機物分解で消費される O_2 の 40% が CO_2 へ変化すると想定している．この値は，2006 年に求めた CO_2 と O_2 の回帰直線の傾き 0.42 に基づいている．外部からの CO_2 の付加の増加に従い，図２上では CO_2 が左上方向に，O_2 は左下方向に直線関係がシフトする。この図から外部付加

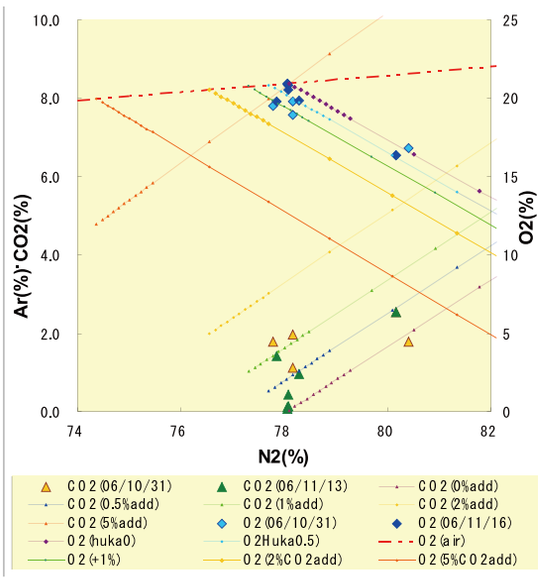


図 2. CO2 付加量変化による土壌ガス組成変化シミュレーションおよび 2006 年後期の結果

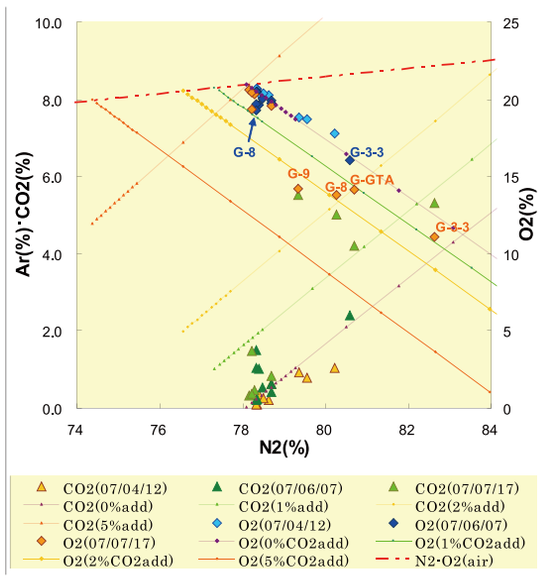


図３．2007 年土壌ガス組成分析結果

CO_2 と有機分解 CO_2 の混合を見積もることが可能である。図２には 2006 年 10 月，11 月の土壌ガス分析値をプロットしている。ガス組成は，N_2, O_2, Ar, CO_2 の 4 成分で 100%とするようにノーマライズしている．10 月の土壌ガス試料は，直前に IW-1 の坑内洗浄がおこなわれ，坑井周辺に CO_2 を大量に含んだ水が放出された時のものである。図上から 1%程度の CO_2 が付加されたと解釈でき，これはこの事象の反映と考えられる。11 月試料の場合は 10 月に比較し CO_2 付加量が若干減少している．これは時間の経過と共に CO_2 が大気や流水により拡散してためと考えられる．偶発的に発生したこの人工的な CO2 の付加実験で本手法の有効性が検証できた．

図３が，2007 年の土壌ガス試料の結果である．試料は 4 月，6 月，7 月に採取している．4 月試料は CO_2 注入前の段階で，全ての試料で CO_2 付加は確認されない．CO_2 濃度高い試料も全て有機分解起源と判断される．注目されるのは 7 月のの試料 G-8, G-9および新たな地点 G-GTAの組成である．図３上から明らかなように，これらのガス試料では外部からの 2% 程度の CO_2 の付加が予測され，CO_2 濃度の半分は外部起源と推定される．G-3-3 は 2006 年にも CO_2 濃度が高かったが有機分解起源と推定されていた．今年度も若干の外部付加は予想されるが，大部分は有機分解起源と推測される．

G-8，G-9 は IW-1 の近傍に設置されており，坑井内の CO2 が溶存した水が何らかの形で坑井外へ漏洩し，セメンチング等を通じて土壌中へ付加した可能性がある．これらサイトでは土壌ガス中の熱分解起源 CH_4 濃度も他のサイトに比べ高くなっている．

３．^{13}C 炭素同位体比（$\delta^{13}C$）による注入 CO_2 の PW-1 への到達（ブレーク）の確認

前年に引き続き，IW-1から注入された CO_2 の PW-1への到達をモニタリングするために PW-1 の CBM 中の CO_2 の ^{13}C 炭素同位体比（$\delta^{13}C$）の測定をおこなった．

図４は，2006 年，2007 年における PW-1 の CBM の CO_2 の $\delta^{13}C$ 値について示したものである．前年に引き続き $\delta^{13}C$ 値はかなりの幅で変化しているが．いずれも＋の値を示している．注入している CO_2 は −27‰程度で安定しており，連続的に $\delta^{13}C$ 値が軽くなる（マイナスが大きくなる）傾向は，認められていない．CO_2 濃度も考慮すれば，注入した CO_2 は未だ PW-1に達していないと判断される．この結果は，CO_2 の炭層内挙動に関するシミュレーションの結果とも一致している．

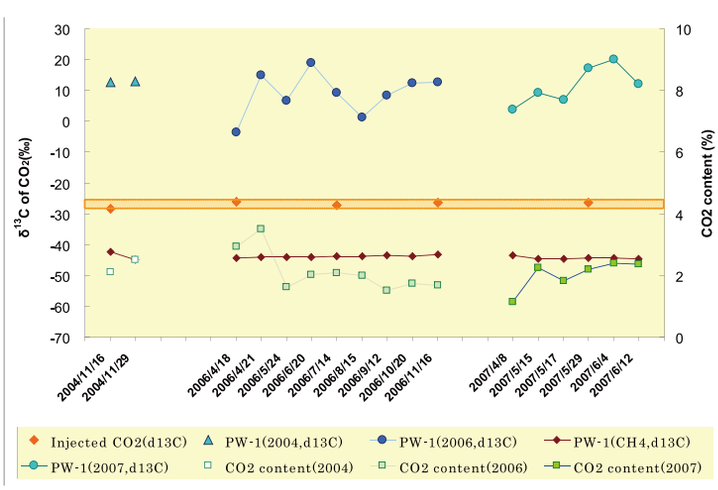


図４．CBM 中の CO_2 の $\delta^{13}C$ などの変化

CO_2 地中貯留深度での地下水と地化学的 CO_2 トラッピング

Geochemical characteristics of deep groundwater and geochemical trapping in open aquifer CO_2 storage

CO_2 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，村岡洋文
有機地球化学研究グループ：金子信行
CO_2 Geological Storage Research Group: Yasuko Okuyama*, Masao Sorai, Norio Yanagisawa
Geothermal Resources Research Group: Munetake Sasaki, Hirofumi Muraoka
Organic Geochemistry Research Group: Nobuyuki Kaneko
*Phone: 029-861-3883, e-mail: okuyama-gsj@aist.go.jp

１．はじめに

大気中の二酸化炭素（CO_2）による地球温暖化が顕在化しつつあるとの認識が広まる昨今「CO_2 地中貯留」が注目されている。中でも「一般帯水層貯留」は、わが国で CO_2 地中貯留を可能にする現実的方策と重視されている。

産総研地質調査総合センターでは、地圏資源環境研究部門を中心に、一般帯水層を対象とした CO_2 地中貯留の研究を実施している（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」）。この研究は、東京湾岸をモデル地域とした仮想的地中貯留から、地下での CO_2 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にしている。CO_2 地中貯留に関わる地化学的相互作用の研究は、サブテーマのひとつである。このサブテーマでは、全国主要地域の貯留層深度での深部地下水の地化学特性をレビューし（「地層水データベース」研究）、東京湾岸の地化学的条件下での地化学的 CO_2 トラッピングを定量的に検討することを目標としている。現在までの研究結果を簡単に紹介したい。

２．地化学トラップと深部地下水の役割

CO_2 貯留層を満たす深部地下水は、注入された CO_2 を溶解して保持するとともに（溶解トラップ）、貯留層岩石との反応によって新たな炭酸塩鉱物を形成する鉱物固定を媒介する。貯留層深度の温度は、通常、水の沸点に比しかなり低く、上記地化学反応の進行にはきわめて長期を要すると考えられる。しかし、一般帯水層貯留の対象に想定する若い地質時代の堆積物は、砕屑性炭酸塩を広範に含み、それらは CO_2 注入直後から溶解して、深部地下水組成と岩石の空隙率・浸透率の変化を引き起こすと予想される。このように、地化学的なプロセスは CO_2 貯留事業期間から機能する可能性が高く、深部地下水の役割は重要である。

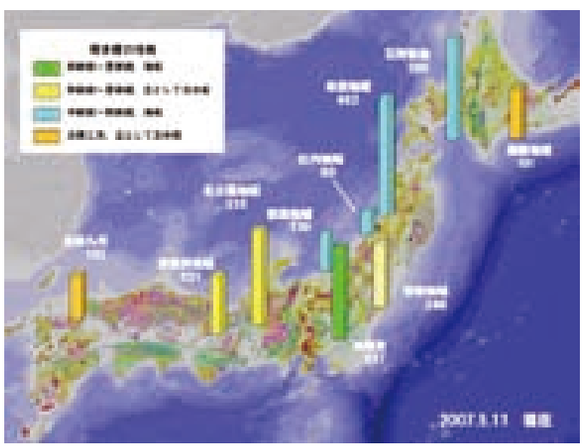


図１：「地層水データベース」研究対象地域

われわれは、国内の主要 10 地域について文献データをもとに深部地下水の化学組成を集積した、「地層水データベース」の構築を進めてきた。データ収集の対象は、海成層からなる 5 地域と主として淡水成層からなる 5 地域である（図１）。地層を満たす深部地下水は、初生的には堆積の場に存在した水が粒子間隙に取り込まれたものと考えられる。このため、海成と淡水成という異なる堆積環境の地層を検討対象とする必要がある。選定した 10 地域には、いわゆる大規模排出源立地地域を含む。収集データ数は本年 8 月時点で約 2300 件であり、このうち地中貯留深度とされる 800 m以深の水のデータが 1000 件以上存在する。

対象とした 10 地域について、深度 800 m以上の地下水の Cl 濃度をヒストグラム化し、図２に示す（※北部九州地域では現在の陸域での堆積盆深度が浅いため、400m 以深のデータを採択した）。図のように、淡水成層地域の深部地下水は非常に Cl 濃度が低い。5 箇所の海成層分布地域の深部地下水は、Cl 濃度が海水並みである場合も多いが、平均的には海水よりも低い。

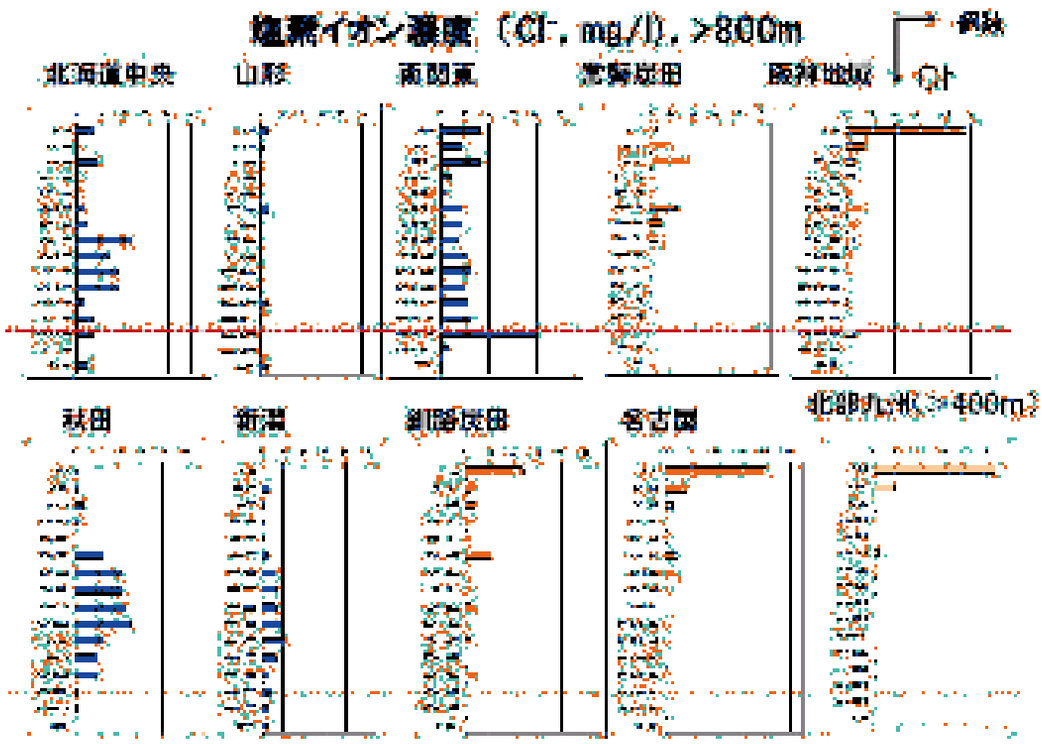


図２：「地層水データベース」による全国主要地域での深部地下水の Cl 濃度．青色は海成層地域、オレンジ色は淡水成層地域。赤細線は、北野（1995）による平均海水の値。

収集した深部地下水組成において、Cl 濃度が海水より低いことは、全溶存固形成分量（TDS）も海水より低いことを意味している。塩水の CO_2 溶解度は TDS 増加とともに急激に減少し、海水相当の TDS では真水の 85% 程度である（Enick & Klara,1990）。国内主要地域の深部地下水が海水に比べて希薄な組成であることは、十分な CO_2 溶解ポテンシャルを持つことを示唆する。

３．究極鉱物固定率の検討

集積したデータをもとに、貯留層深度でのモデル地下水組成を導いた。さらにわれわれは、東京湾岸モデルにおける究極的鉱物固定状況を予測する目的で、地化学計算ソフトウェア "Geochemist's Workbench"(Bethke, 1996) を用いた相平衡計算を行っている。計算は次の条件化で行った：1) 貯留層堆積岩のモデルを上総層群大田代層・黄和田層砂岩に求め実データを計算に使用、2) 深部地下水組成は地層水データベースに基づくモデル組成を使用、3) 初期状態で 1-2% の炭素が存在と仮定、3) 圧力 10MPa、温度 50℃、iv) 初期空隙率 40%。計算にあたっては、はじめに上記条件の岩石－水間で反応を起こして一度平衡状態を達成し、その後に CO_2 を注入して再度平衡状態を求める 2 段階を踏んだ。求めた CO_2 貯留層平衡モデルでは、初期状態からの次のような変化が認められた：i) 初生的に存在した斜長石とスメクタイトは完全に分解、ii) かわってカオリナイト＋シリカ＋炭酸塩が生成、iii) 空隙率は 30% に減少、iv) 炭酸塩は反応後の岩石全体積の 16-18% を占める。鉱物固定量は初期投入の炭素を差し引いた量に相当する。以上の関係を模式的に図 3 に示す。

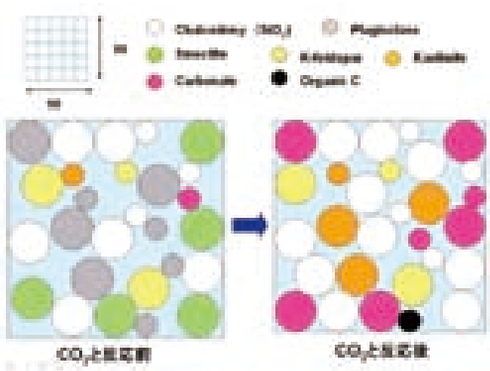


図３：相平衡シミュレーションによる CO_2 固定反応前後の状況を示す模式図。

４．まとめ

国内主要地域での深部地下水には、十分な CO_2 溶解トラッピング性能が期待できることが分かった。東京湾岸条件下での究極的鉱物固定状況も明らかになった。今後は貯留層地化学特性の時間変化を追跡する研究を行う予定である。

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

フェリハイドライトコロイドの生成と溶解

Estimating the formation and dissolution of ferrihydrite colloids

月村勝宏
Katsuhiro TSUKIMURA
Phone: 029-861-3945、e-mail: tsukimura-katsuhiro@aist.go.jp

１．はじめに

高レベル放射性廃棄物は、厳重に容器に封じ込まれて地下 300m 以深に埋められるが、放射性核種が地層中に流出した場合の安全性も検討しなければならない。このためには、地下水の流れを予測し、地下水とともに流れる放射性核種の量を予測することが必要である。

放射性核種のうちプルトニウムなどのアクチノイドは溶解度が低いために地下水とともにほとんど流れないとされてきた。しかし、ロスアラモスの放射性廃液処理施設から流出したプルトニウムが施設から数キロ離れた地点でコロイドに吸着した状態で発見されたこと（Penrose et al., 1990）から，コロイドの重要性が認識された。さらに、再処理施設からの廃液が多量に流出したロシアのカラチャイ湖の周辺でもコロイドに吸着しているアクチノイドが発見された（Novikov et al., 2006）。ここではコロイドの主成分であるフェリハイドライト（5Fe2O3・9H2O）のみにアクチノイドが吸着されていた。

本研究では、フェリハイドライトコロイド成因を明らかにし、フェリハイドライトコロイドが消滅するメカニズムと時間を検討した。

２．フェリハイドライトコロイドの生成

最初に、カラチャイ湖周辺のフェリイハイドライトコロイドの成因を検討する。この地域では地下水の酸化によりフェリハイドライトが生成したと考えられる。カラチャイ湖周辺の地下水は pH が 7 前後で還元的な状態にあるが、この地下水が再処理施設からの廃液と混合すると、廃液に含まれる硝酸イオンにより地下水が酸化され、フェリハイドライトとゲーサイトの溶解度は低下する（図１）。このため、地下水がフェリハイドライトについて過飽和になるので、核形成が容易なフェリハイドライトは瞬時（数秒以内）に生成する。一方、結晶であるゲーサイトやヘマタイトは過飽和になっているが、核形成が非常に遅いため瞬時には生成しない。

地下水の酸化によるコロイドの生成は日本の高レベル放射性廃棄物施設周辺の地下水でも起こり得る。それは硝酸を多量に含む TRU 廃棄物が高レベル放射性廃棄物と併置処分されるため、地下水が硝酸により酸化される可能性があるからだ。

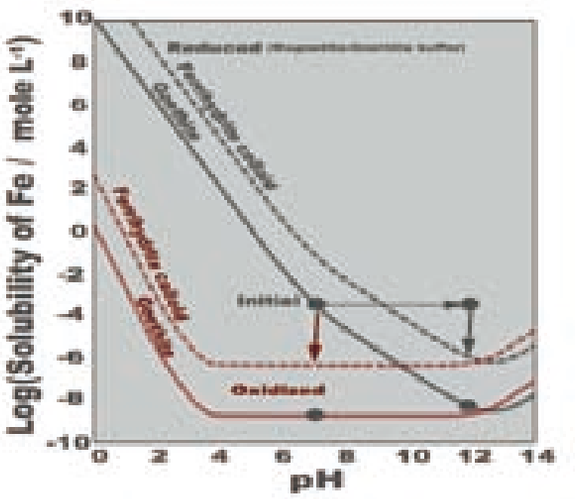


図１　鉄鉱物の溶解度

地下水のアルカリ化もフェリハイドライトの溶解度を低下させる原因となる（図１）。地下水のアルカリ化はセメントとの反応によっても起きるので、放射性廃棄物の埋設施設近傍においてはフェリハイドライトコロイドが生成することが予測される。

３．フェリハイドライトコロイドの溶解

非晶質のフェリハイドライトは準安定相であり、安定相であるゲーサイト結晶か、準安定相ではあるが安定性の高いヘマタイト結晶に相変化する。フェリハイドライトの相変化の実験（Schwertmann and Murad, 1983; Nagano et al., 1994; Shaw et al., 2005）によると、フェリハイドライトの溶解速度（言い換えると結晶の生成速度）は、フェリハイドライトの量に比例する（図３）。これまでは、これを１次反応であると説明しているだけであるが、フェリハイドライトの溶解速度は、フェリハイドライトの不飽和度や表面積、結晶の過飽和度や表面積に関係する複雑な関数になるので、１次反応であることは自明でない。そこで、様々な可能性を検討した結果、

フェリハイドライト表面にできる結晶の核形成が律速であり結晶が大きくなると沈殿して成長が止まるとするとすべてがうまく説明できることがわかった（図２）。溶解速度がフェリハイドライトの量に比例することは以下の筋道で説明された。溶解速度が結晶の表面積だけに比例することは、溶液濃度がフェリハイドライトの溶解度よりも少しだけ低い状態にある（図３）とすれば説明できる。結晶の表面積が結晶の核形成速度に比例することは、結晶がある大きさになると重力による沈降で溶液中から取り去られるとすれば説明できる。結晶の核形成速度がフェリハイドライトの量と比例することは、フェリハイド上にのみ結晶核が形成するとすれば説明できる。

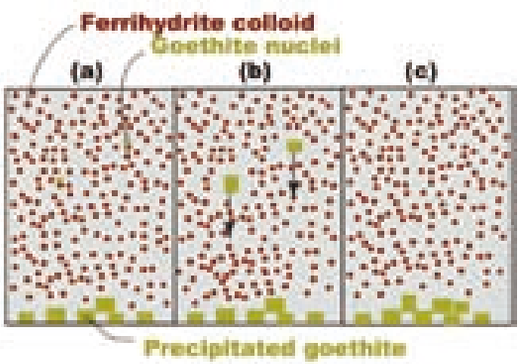


図２　フェリイハイドライト相変化の機構

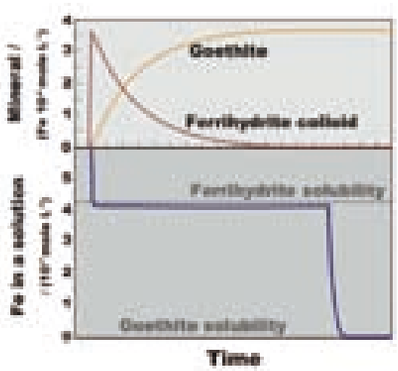


図３　鉱物量変化と溶液濃度変化

ゲーサイトの水溶液中の高さによる平衡分布を見ると、50 nm 前後で結晶は沈殿しやすくなる（図４）が、これは実際の結晶サイズと一致している。

既存の実験結果をもとにフェリハイドライトの量の変化を計算した結果、pH7 においてフェリハイドライトコロイドは数年で消滅することがわかった（図５）。天然条件下ではこの値がさらに短くなると考えられる。天然のれっか系では高さが 1mm 以下と小さいために底に沈殿した結晶の成長も無視できなるし、天然の系ではその他のコロイドも存在しその上に結晶の核が形成される可能性もあるからだ。

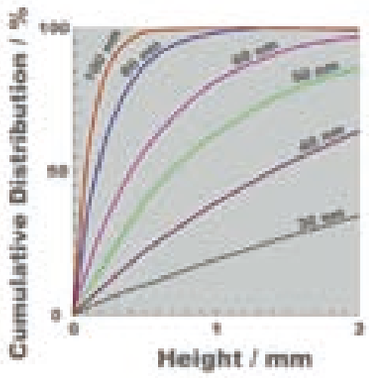


図４　コロイド粒子の平衡累積高さ分布

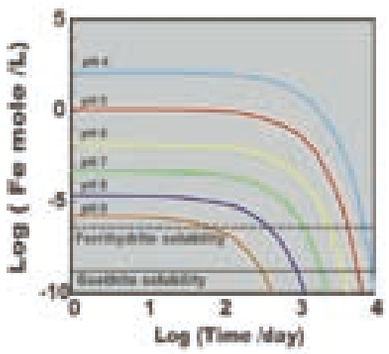


図５　フェリハイドライトの存在量変化

４．おわりに

本研究では、地下水が硝酸イオンにより酸化されたり、セメントによりアルカリ化されたりすることにより、フェリハイドライトコロイドが生成することを示した。また、フェリハイドライトコロイドの溶解は、コロイド上への結晶核形成速度が律速となっているとの仮説を提案し、この仮説がこれまでの実験結果をうまく説明できることを示した。

引用文献：

Nagano, T., Nakashima, S., Nakayama, S. and Senoo, M. (1994) The use of color to quantify the effects of pH and temperature on the crystallization kinetics of goethite under highly alkaline conditions. Clays and Clay Minerals, 42, 226-234.

Novikov, A., Kalmykov, S., Utsunomiya, S., Ewing, R., Horreard, F., Merkulov, A, Clark, S., Tkachev, V. and Myasoedov, B. (2006): Colloid transport of plutonium in the far-field of the Mayak Production Association, Russia. Science, 314, 638-641.

Penrose, W., Polzer, W., Essington, E., Nelson, D. and Orlandini, K. (1990) Mobility of plutonium and americium through a shallow aquifer in a semiarid region. Environ. Sci. Technol., 24, 228-234.

Shaw, S., Pepper, S., Bryan, N. and Livens, F. (2005) The kinetics and mechanisms of goethite and hematite crystallization under alkaline conditions and in the presence of phosphate. American Mineralogist, 90, 1852-1860.

Schwertmann, U. and Murad, E. (1983) Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. Clays and Clay Minerals, 31, 277-284.

無菌無酸素水掘削で採取した試料を用いた深部地下の微生物環境の評価

Evaluation of in-situ microbiological conditions in deep subsurface sediments sampled with aseptic and deoxygenated drilling method

須甲武志，鈴木庸平，伊藤一誠（地質特性 RG），
竹野直人（地下環境機能 RG）
Takeshi Suko[1)*], Yohey Suzuki[1)],
Kazumasa Ito[1)], and Naoto Takeno[2)]
[1)] Integrated Geology R.G., [2)] Experimental Geoscience R.G..
[*]Corresponding Author, e-mail address: sukou-takeshi@aist.go.jp

１．はじめに

放射性廃棄物の地層処分において処分施設建設の際，大規模な地下空洞を掘削することによって，地下の水理学的・化学的・微生物学的な改変が起こることが予想される．その改変の程度や埋め戻しによる環境の回復に関する評価を行うためには，事前の概要調査において処分地が本来有する環境（ベースライン）を正確に把握しておく必要がある．殊に微生物環境の評価に関して，バイオマス量や微生物種に関する知見は報告されているが，地層処分を念頭に置いて地下の現場活性を測定した例は皆無である．そして，現場活性の測定には地表からの擾乱を排除した試料を採取する必要がある．

本研究では，栃木県那須烏山市の火山活動などの無い安定した新第三紀堆積岩地域において無菌無酸素水を用いた清水掘削を行い，擾乱を排除した試料を採取し，種々の計測を行った．

２．コア試料の採取および処理

掘削水に関して，掘削予定地の近くに掘った深さ約 90m の孔井から地下水をポンプにて汲み上げてタンクに貯め，その中にトレーサーとしてヨウ化カリウムを 40ppm程度になるよう加えたものを使用した．汲み上げた地下水は，２つの濾過槽で限外濾過を行うことにより，無菌水の精製を行った．また，無菌水に窒素ガスを圧入して酸素を放出させ，無酸素状態とした（10～20L/minの流量の水に 0.1～0.2ppm の酸素濃度）．深度 120m～300mでは，98mmワイヤラインを用いた無菌水掘削を行い，微生物分析用に採取した 1m のコアを，無菌水プールの中で 20cm毎に切断した上で，アルミ製のバッグに入れて冷蔵庫にて保管した．深度 300～352mでは，76mm ワイヤラインを用いた無菌無酸素水掘削を行い，微生物分析用の 1.5m コアを，空気に触れさせないよう窒素ガスで満たしたビニルバッグに入れて密封し，冷蔵庫にて保管した．各試料は冷蔵状態を保ったまま実験室まで輸送し，嫌気チャンバー・クリーンベンチ内で所定の処理を行った．

３．水理学的指標の分析結果

掘削後の検層を行った後，地下水採取用のパッカーを設置した．Fig. 1は，その際に計測した間隙水圧の分布である．22 区間で行った計測で，深度 300m 付近の凝灰岩層の 2 区間で他の深度より 20m 近い間隙水圧の低下が確認された．

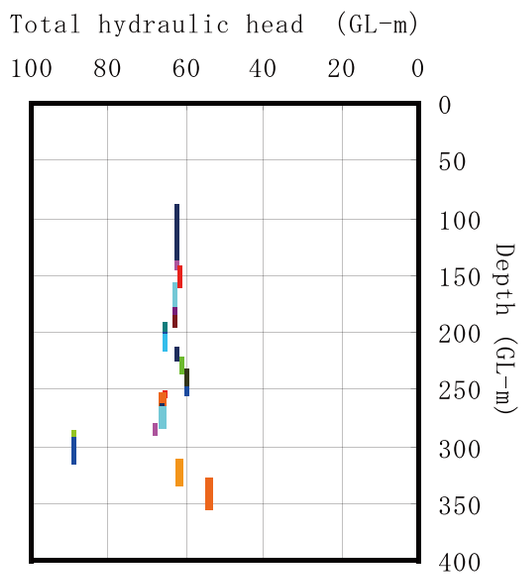


Fig. 1 Hydraulic pressure profile measured just after the installation of multi-packer system

Fig. 2に，透水係数の分布を示す．全深度 10^{-6}～10^{-8}m/sの範囲に収まっていたが，深度 300m の部分を挟んで，300m 以浅の層は，300m以深の層に比べ１オーダー程度高い値を示した．また，浅層域では，高い浸潤能を持つ薄層が何箇所かで観察され，その薄層に対応するように鉛直方向の浸透が起こっている部分が，検層により観察された．しかし，前述の間隙水圧の低い凝灰岩層は，透水係数の低さからここで述べ

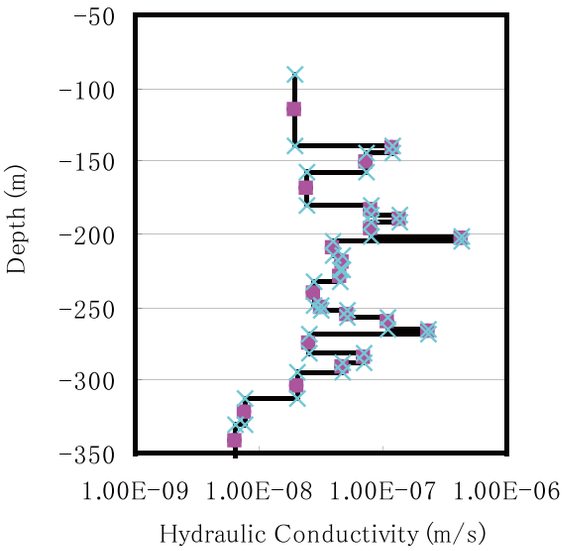


Figure 2 Permeability profile along borehole estimated from transient pressure data obtained in water sampling with multi-packer system.

た薄層には該当しなかった．

４．地化学的指標の分析結果

採取したコアから，圧縮法で搾り出した間隙水を用いて，水の安定同位体，アニオン，カチオン，有機物，メタンガスなどの測定を行った．どの深度の試料においても，天水起源の地下水が分布し，pH は 9 前後，Eh は -50mVの値を示した．深度 300mからメタン，塩化物イオン，硫酸等の濃度上昇が見られた．また，今回の掘削で明らかになった点として，ほぼ全深度で亜硝酸が検出され，硝酸イオンの減少とリンクしており，このサイトにおいて微生物による硝酸還元反応が起こっている可能性が示唆された．溶存有機物量(DOC) は全深度で高く，炭素安定同位体組成が微生物の二酸化炭素還元にる生成経路を介したメタンが地下深部の泥質砂岩層中に濃縮している事が明らかになり，微生物のエネルギー源に富んだ環境である事が示唆された．

５．コア試料を用いた脱窒活性の測定

前項の結果を踏まえ，採取したコア試料を用いて脱窒活性の測定を行った．本研究では，簡便で測定例の多いアセチレン阻害法を用いた．この方法は，硝酸→亜硝酸→一酸化窒素→亜酸化窒素→窒素と続く脱窒反応において，アセチレンを利用して窒素への反応を抑制して反応を亜酸化窒素で止め，亜酸化窒素の生成量から脱窒速度を求める方法である．

嫌気チャンバーにて，容器に所定量のコア粉砕物と溶液を加えゴム栓で密栓した．その上で嫌気チャンバーから取り出し，真空ポンプで容器内の気体を抜いた後，窒素ベースの 10%アセチレン混合ガスを容器内に満たし，25℃の恒温チャンバー内に静置した．24, 30, 48 時間後それぞれヘッドスペースのガスを採取し，ECD 検出器を持つ GC に導入することで亜酸化窒素の濃度を測定した．その後は 7 日毎に同様の測定を行った．コア試料は泥岩（深度 230m, 293m, 324m), 凝灰岩（深度 300m, 302m), 泥質砂岩（深度 340m, 351m) の計 7 深度のものを使用した．溶液は掘削水をベースに 10mM の硝酸ナトリウムを加えたもの，さらに数種の有機物やイースト (OCmix) を加えたもの作製した．OCmix を加えた試料に関しては，ヘッドスペースに水素ガスを体積ベースで 5%になるよう加えた．

Table 1, 2 に脱窒活性の測定結果を示す．24 時間後の脱窒速度は，深度 302m, 351m で高い値を示し，有機物の導入により 1 ～ 2 オーダーの上昇を見せた．また，脱窒活性が最大値を示した脱窒ポテンシャルに関しては深度 351m で最も高く，次いで深度 203m, その後に深度 300m, 302mの凝灰岩層が続く結果となった．深度 203m の部分は，今回使用した他の深度と比べ透水性が高いために地下水の流動が早く，活性を維持しやすいものと推察された．深度 300m, 302mの凝灰岩層では，粒子径と空隙が大きく微生物が活動する空間が存在する可能性が示唆された．深度 351m の泥質砂岩は，見た目では深度 340mの試料と変わりないが，脱窒速度では大きな違いが見られた．水銀圧入法による深度 350mの間隙径分布の結果では，1μm を超える径を持つ間隙が数％存在したことから，大きな径の間隙が物質移行ひいては微生物活動の場として使われた可能性が示された．また，350m はメタンや溶存成分が濃集しており，高いポテンシャルの維持に利用されていると考えられる．

Table 1 Denitrification rate after 24-h incubation

Depth	control	10mM NO_3^-	NO_3^- + OCmix + H_2
300m	0.30	0.35	4.19
302m	3.04	2.65	13.46
344m	0.17	Not detected	Not detected
352m	2.77	2.64	1.46E+03

unit : nmol/g dry sediment/day

Table 2 Maximum denitrification potential

Depth	Maximum denitrification
203m	2.22E+05
293m	4.48E+00
300m	1.24E+04
302m	2.04E+04
324m	3.59E+01
340m	1.01E+02
350m	1.36E+06

unit : nmol/g dry sediment/day

レアアース資源を供給する鉱床タイプ

Ore deposit types for REE resources

鉱物資源研究グループ：村上浩康*
産総研特別顧問：石原舜三
Mineral Resource Research Group: Hiroyasu MURAKAMI
Special Councillor, AIST: Shunso ISHIHARA
*Phone: 029-861-3939, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

１．はじめに

希土類元素 (Rare Earth Element; REE) は，炭酸 (COx) や燐酸 (POx) を含む鉱物中に取り込まれることが多く，これらの希土類含有鉱物が濃集することにより鉱床を形成している（表１）．希土類資源の重要な特徴は，中国一国に偏在する点に加え，卓越する希土類含有鉱物種を反映して，鉱床ごとに軽希土類元素や重希土類元素に富むタイプに分割される点にある（図 1 及び表 1; Kanazawa and Kamitani, 2006)．例えば，ランタンやセリウムなどの軽希土類元素に富む中国・内モンゴル自治区のバイヤンオボ（白雲鄂博）鉱床は世界の 50% 以上の酸化希土類を生産するが，重希土類元素に乏しい．重希土類元素に富むモナザイトなどの重鉱物が濃縮する漂砂海浜鉱床は，トリウムなどの放射性元素濃度も高く，近年はほとんど採掘されていない．一方，中国華南地域の希土類元素に富む花崗岩類の風化土壌中に発達したイオン吸着型鉱床には，重希土類に著しく富むものも認められる（Wu et al., 1990）．

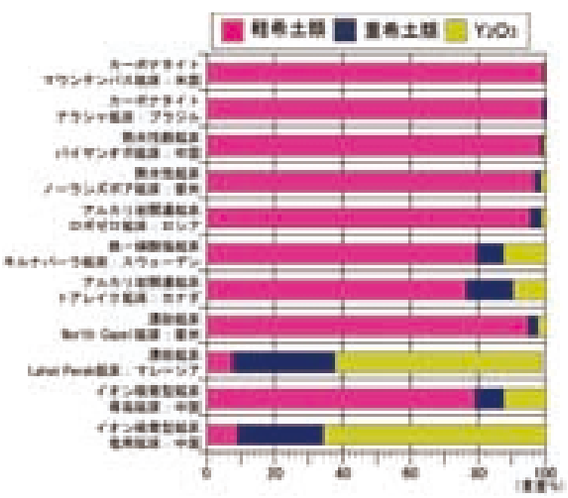


図１　希土類鉱床における含有元素の割合.

２．成因による分類

希土類鉱床は，その生成条件に基づき火成岩関連鉱床と風化鉱床に 2 大別できる（図 2）．

図２　火成・風化希土類鉱床の模式断面図.

火成鉱床は，希土類鉱物がマグマ形成期に濃集したマグマ性鉱床（ex., Lovozero, Russia; Bayun Obo, China; Mountain Pass, USA）と，熱水活動期に濃集した熱水性鉱床（ex., Strange Lake and Thor Lake, Canada; Nolan's Bore, Australia）とに分割される．風化鉱床は，現地性風化鉱床 (Longnan, China) と，移動して堆積した漂砂鉱床 (WIM150, Australia; Chavara, India) とに分けられる．

表１　代表的な希土類含有鉱物と希土類鉱床との関係.

３．各鉱床の特徴

希土類資源のこれまでの

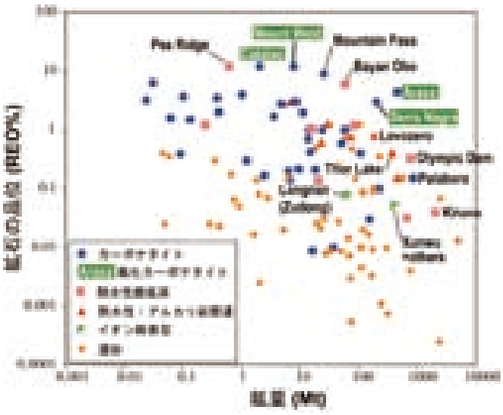


図 3　希土類鉱床の鉱量－品位モデル

図 4　世界の希土類鉱床の分布

稼鉱品位は，漂砂鉱床における平均 REO 数百 ppm から，1970 年代以降の数十 % のカーボナタイト鉱床まで様々である（図 3 及び 4）．2006 年現在，中国一国で世界の 95% 以上の希土類資源が生産されており，これは REO 品位 6% のバイヤンオボ鉱床の寄与が圧倒的に大きい．一方，これまでの発見資源の中には高品位鉱床が未開発または未処理で残存している．このうち，豪州のマウントウェルド鉱床に代表されるカーボナタイトの風化（ラテライト）鉱床は高品位・大規模である．このタイプの鉱床は，原岩が希土類に元々富むという地質条件に加えて，風化残留が促進される気候条件の制約を受けるが，ブラジル，豪州，南アフリカなどで今後も更なる発見が期待できる．カーボナタイトのラテライト鉱床は，希土類資源の安定供給のため，“脱バイヤンオボ“を早急に進める上で重要な探査対象のひとつである．

近年，希土類磁石などの製造に必須の軽希土類元素に加えて，重希土類元素も需要が増大している．この点で，カーボナタイトやそのラテライト鉱床はおしなべて軽希土類元素に富んでいるため，重希土類元素に富む過アルカリ岩とその熱水変質岩の重要性は高い．過アルカリ岩が希土類元素に富んでいれば，熱水循環によってそれが抽出され，希土類元素が変質岩に高品位で大量に濃集される可能性もある．その場合，軽希土類元素はフッ化物，炭酸塩鉱物などの形で固定されるが，重希土類元素はゼノタイムやジルコンなどの難溶解性重鉱物に濃縮する傾向がある．

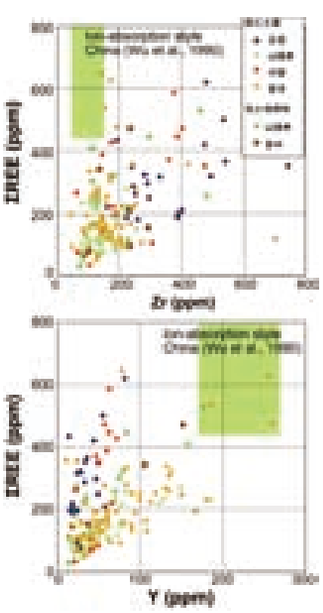


図 5　風化土壌等の総希土類濃度と Zr 及び Y 濃度との関係

イオン吸着型鉱床は，中国でのみ発見・開発されている鉱床であるが，重希土類資源ポテンシャルの高い鉱床タイプのひとつである．豪州における花崗岩風化土壌の予察的な調査では，錫鉱床地域の希土類元素に富むグライゼン化花崗岩を母材とする花崗岩風化殻で希土類元素の濃縮が認められる．日本では，希土類元素濃度の高い花崗岩の風化産物を母材とする粘土堆積物で希土類の濃縮が認められる（Murakami and Ishihara,　投稿中）．しかしながら，これら希土類元素に富む花崗岩風化土壌や粘土堆積物では，元々母岩に含まれていたゼノタイムやジルコンが少なからず残留しているようである（図 5）．これらの風化土壌や粘土堆積物における希土類元素の濃縮には，1) 粘土鉱物に吸着された希土類元素に加えて，2) 二次的な希土類含有鉱物の生成，3) 風化耐性を持つ難溶解性重鉱物の残留・濃縮，が寄与していると考えられる．

将来の需要に見合う希土類資源を確保するためには，マグマプロセス，熱水変質作用，風化作用における希土類元素の挙動を理解することや，ジルコンなどの難溶解性鉱物から希土類元素を分離・生成する環境負荷の少ない技術の開発が今後の課題となろう．

引用文献：

Kanazawa, Y. and Kamitani, M. (2006): Rare earth minerals and resources in the world. J. Alloy. Compd. 408-412, 1339-1343.

Murakami, H. and Ishihara, S. (投稿中) REE mineralization of weathered crust and clay sediment on granitic rocks in the Sanyo belt, SW Japan and the southern Jiangxi province, China. Resource Geol..

Wu, C-Y., Huang, D-H. and Guo, Z-X. (1990): REE geochemistry in the weathered crust of granites, Longnan area, Jiangxi Province. Acta Geol. Sinica 3, 193-210.

流体包有物及びマルチ同位体から推定される愛知県振草セリサイト鉱床における熱水の起源と進化
－振草鉱床形成に関連する熱水は金属鉱化作用を伴うか？－

Fluid inclusions, isotope geochemistry; implication for evolution of hydrothermal fluid at Furikusa sericite deposit, Aichi Prefecture
－ Possible potential for mineralization of the hydrothermal activity －

鉱物資源研究グループ：村上浩康*
地熱資源研究グループ：佐々木宗建
地圏環境システム研究グループ：高倉伸一
Mineral Resource Research Group: Hiroyasu MURAKAMI
Geothermal Resources Research Group: Munetake SASAKI
Geo-Environmental Systems Research Group: Shinichi TAKAKURA
*Phone: 029-861-3939, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

１．地質概要と鉱床

振草セリサイト鉱床は愛知県北設楽郡東栄町に位置し（図 1)，三信鉱工株式会社が現在も坑内からイライトを採掘している．鉱床周辺には，中期中新世の火砕岩類や岩脈群などから構成される大峠環状複合岩体（バイアス型カルデラ）が分布しており（下司，2003)，振草セリサイト鉱床はその南方縁辺部に位置している．大峠環状複合岩体は，初期の火山性陥没構造の形成に伴って噴出した大峠火砕岩類と，それを切る岩脈群から成る（図 1 及び 2)．大峠火砕岩類は，玄武岩質～安山岩質スコリアから成る火山角礫岩である．岩脈群はトラカイト質安山岩平行岩脈から成る大峠コーンシート群（東西系)，そのコーンシート群を切るトラカイト質安山岩平行岩脈から成る設楽中央岩脈群（南北系）で構成される．大峠環状複合岩体の岩脈から 15Ma 及び 13Ma の K-Ar 年代値が報告されている．

図１　振草セリサイト鉱床周辺の地質図（牧本ほか , 2004）を簡略化.

鉱床内に分布する大峠火砕岩類中には，平均幅 3m 程度の東西系岩脈及び南北系岩脈が 10 本以上確認される．イライト鉱体は主に南北系と東西系の岩脈群の交会部付近に発達しており，各岩脈が大峠火山活動に伴う熱水活動により粘土化したと考えられている．大峠火砕岩類中に鉱体は確認されていない．イライト鉱体は南北系岩脈近傍では垂直方向，東西系岩脈では岩脈走向方向に数 m から数十 m 程度連続しており，各岩脈中にパイプ状ないしはポッド状鉱体として点在している．各イライト鉱体中には不規則な脈状方解石が産し，脈幅は平均して数 cm 程度であるが，10cm 以上のレンズ状に肥大する部分もある．鉱体中には粒径 1mm 程度の自形の黄鉄鉱または硫砒鉄鉱の鉱染が一般に認められる．

２．試料と分析手法

本鉱床坑内（海抜 390m ～ 500m）に産するセリサイト，石英，方解石を採取し，それらの水素・酸素・炭素同位体比分析をそれぞれ行った．また，セリサイトと共生する石英の流体包有物均質化温度及び凝固点降下温度測定も併せて実施した．なお，X 線回折試験の結果から，セリサイトはイライト組成でポリタイプは２M であった．なお，イライトの Ar-Ar 年代測定法によるプラトー年代及び K-Ar 年代値はそれぞれ 14.5　0.2 Ma 並びに 14.2　0.4Ma 及び 14.7　0.3Ma を示しており，大峠火山岩類の中で設楽中央岩脈群の活動時期にほぼ相当すると考えられる．

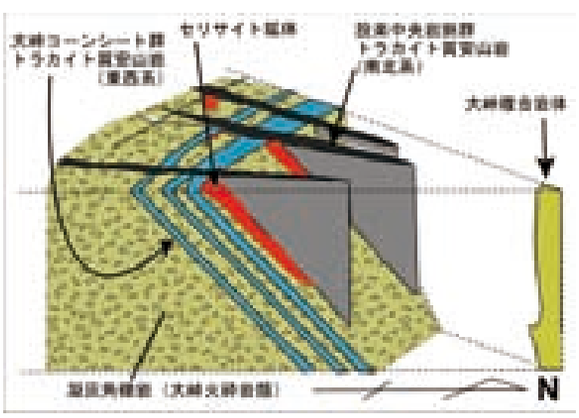


図２　振草セリサイト鉱床模式断面図.

３．分析結果と議論

イライト（5 試料）の水素同位体比（δD_{SMOW}）は -41‰から -46‰の範囲の値が，酸素同位体比（δ $^{18}O_{SMOW}$）は＋ 7.7‰から +10.6‰の値が得られた．イライト鉱体中の方解石（13 試料）の炭素同位体比（δ $^{13}C_{PDB}$）は -11.5‰～ -8.3‰，酸素同位体比（δ $^{18}O_{SMOW}$）は＋ 12.1‰～ +17.1‰の値を持つ．

イライトと共生する方解石中の包有物は 90% 以上が気相包有物である．石英中では気相包有物が多いものの，液相包有物も認められ，両者は密雑に分布している．これらの観察結果から，石英及び方解石の形成に関与した熱水は沸騰流体であると推察される．石英の流体包有物均質化温度及び NaCl 換算の塩濃度の平均値はそれぞれ 299℃，3.8wt% であった（図 3）．これらの流体包有物均質化温度は，石英及びセリサイト間の酸素同位体平衡温度（表 1）と同様の温度範囲を示している．

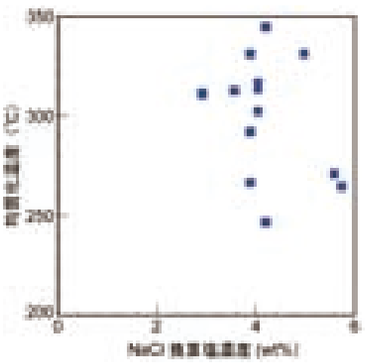


図 3　石英中の流体包有物の均質化温度と NaCl 換算塩濃度．

イライト形成温度を 300℃と仮定した場合，水－方解石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は＋ 11‰～ +15‰である．酒井・松久 (1996) は 300℃で生成したイライトと平衡にある熱水の水素同位体比は鉱物より約 30‰高く，酸素同位体比で 2.5‰低いことを述べている．これに基づき，イライトの水素同位体比から，熱水の水素同位体比の値として -10‰から -15‰が得られる．同様に，熱水の酸素同位体比として＋ 5.2‰～ +8.1‰が得られる．これらの水素・酸素同位体比は，薩摩硫黄島などの高温の火山蒸気と同じ領域にプロットされる (図 4)．これらの結果は設楽中央岩脈群を形成したマグマ起源の蒸気主体の熱水によって振草セリサイト鉱床が形成されたことを示しており，本鉱床の形成には天水起源の熱水がほとんど含まれていなかったと考えられる．熱水が蒸気主体であったことは，鉱石・脈石鉱物に揮発性元素を多く伴い，鉱床中に石英が希にしか認められないことからも支持される．更に，鉱床形成に関与した蒸気は 300℃前後の沸騰流体であることから，塩濃度が 5wt% の場合の沸騰曲線に基づき，鉱床の形成圧力は 0.2kb（20MPa) 以下と推定される．

試料（海抜）	酸素同位体比		Δ 石英−イライト	平衡温度
	イライト	石英		
井戸入坑 474m	10.6	16.6	6.0	304.4 ℃
西坑 494m	10	17	7.0	265.0 ℃

表 1　石英－イライトの同位体平衡温度．

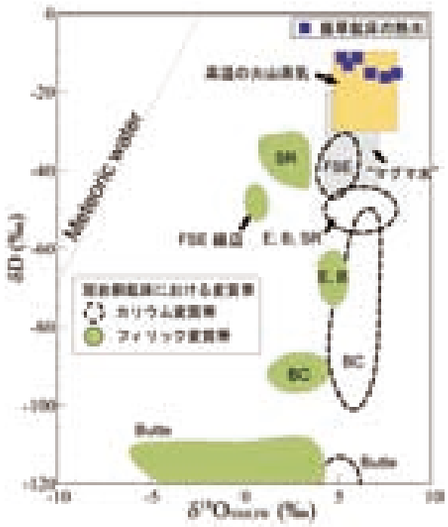


図 4　振草セリサイト鉱床中のイライト及び代表的な斑岩銅鉱床中の熱水鉱物と平衡にあるマグマ水、熱水並びに火山ガスの δD_{SMOW} 値と $\delta^{18}O_{SMOW}$ 値．B: Bingham, E: El Salvador, BC: British Columbia, SR: Santa Rita, FSE: Far Southeast の各データは，Hedenquist and Richards (1998) による．

振草セリサイト鉱床には金鉱化作用は認められないが，ほぼ同時期に形成された津具鉱床は金鉱化作用を伴う．この違いは，振草鉱床の形成に関与した沸騰流体の気相（蒸気）側に金が分配されていなかったことを反映しているのかもしれない．高倉ほか（2006）は，鉱床下部約 0.5km（地表下の設楽中央岩脈群に相当）に熱水変質を伴うダイクを推定している．このダイク形成に伴うマグマ水が沸騰し，その気相（蒸気）側が上方に散逸した結果，振草鉱床が形成されたと考えられる．一方，沸騰流体の液相側に金が分配され，その液相が鉱床下部に潜在するダイクに熱水変質を及ぼしていた場合，この部分に金鉱化作用が起こっている可能性は否定できない．

引用文献：

下司信夫（2003）愛知県設楽地域に分布する中期中新世大峠火山岩体の構造発達史とそのマグマ供給系．地質学雑誌，109，580-594.

Hedenquist and Richards (1998) The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. In: Richards, J.P., Larsen, P.B. (Eds.), Techniques in Hydrothermal Ore Deposits Geology. Rev. Econ. Geol., 10, 235-256.

牧本博・山田直利・水野清秀・高田亮・駒沢正夫・須藤定久 (2004) 20 万分の 1 地質図幅「豊橋及び伊良湖岬」，産業技術総合研究所 地質調査総合センター.

酒井　均・松久幸敬（1996）安定同位体地球化学．（財）東京大学出版会，403p.

高倉伸一・石戸恒雄・須藤定久・村上浩康・安川香澄 (2006) 地球電磁気学的手法による良質な粘土鉱床の探査および評価技術の開発－深部熱水系調査から坑内鉱脈調査までー．産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門，Greenreport2006，61-62.

層状鉄マンガン鉱床の希土類元素濃集過程

REE enrichment in stratiform ferromanganese deposits in Japan

鉱物資源研究グループ：守山　武・村上浩康・渡辺　寧
Mineral Resources Research Group: Takeru MORIYAMA, Hiroyasu MURAKAMI and Yasushi WATANABE
Phone: 029-861-3633、e-mail: t-moriyama@aist.go.jp

1．はじめに

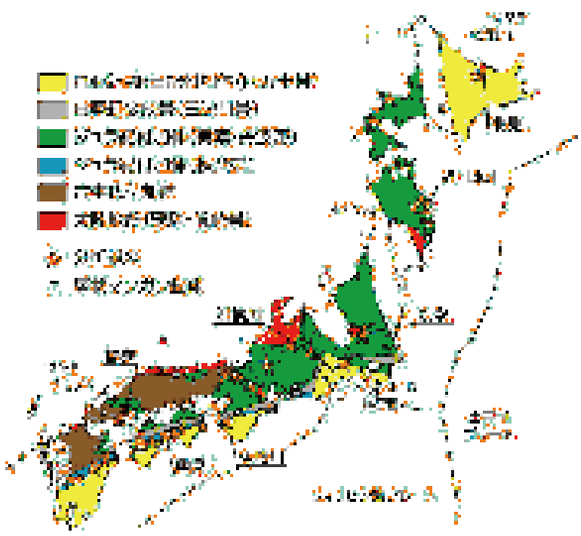
小型で磁力の強い希土類磁石（鉄ーネオジムーホウ素磁石）はエアコンなどの家電製品や携帯電話，ハードディスクドライブ，ハイブリッド自動車など身の回りの製品に広く使われており，日本の先端産業を支える重要な製品となっている．さらにその需要は急増している．しかしながら高温環境で強磁性を得るための添加剤として欠かせない**重希土類元素（HREE）**の生産が中国1国に限られているために資源の安定供給不安や価格高騰が問題化している．それらの問題解決の1つは非在来型の重希土類供給源を見つけることである．

日本列島の大部分は海洋プレートの堆積物が沈み込み帯で大陸側にはぎ取られた“付加体”から構成されている．この付加体中には海洋底で堆積した金属成分に富む堆積物が地表に露出した“**層状鉄マンガン鉱床**”が胚胎されている．近年，この層状鉄マンガン鉱石がHREEに富むことが報告された（例えばKato et al., 2005）．我々のグループでは日本に分布する層状マンガン鉱石・鉄マンガン鉱石中のHREEポテンシャル評価を行ってきた．その結果，特定の組成を持つ鉄マンガン鉱石にのみHREEが濃集することが明らかとなった（守山ほか，2006；渡辺ほか2007，産総研プレスリリース）．この鉄マンガン鉱石に含有されるHREE含有量は既存重希土類鉱床である中国の花崗岩風化型鉱床よりも高く，鉱石中のトリウムなど放射性元素が乏しいという特徴を持つ．

しかしながら，鉄マンガン鉱石にHREEが濃集するプロセスは明らかとなっていない．そこで日本のマンガン・鉄マンガン鉱石の化学組成を再検討し，HREEの濃集プロセスを検討した（Moriyama et al., 投稿中）．

2．日本の層状マンガン・鉄マンガン鉱床

日本の付加体中には1000以上の層状マンガン・鉄マンガン鉱床が分布するが，そのほとんどが1000t以下の小規模鉱床で1970年代には全ての採掘が終了している（桃井，1991）．マンガン鉱床としては岩手県野田玉川鉱床などが代表的で，そのほとんどはチャート中もしくは頁岩中に胚胎される．



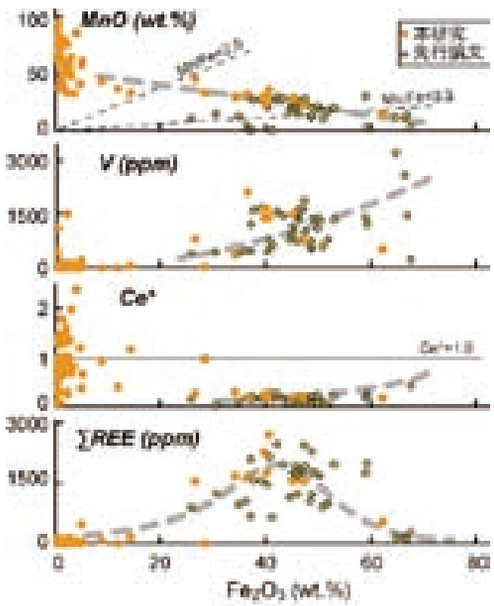
第1図．日本列島の地質区分と試料産地．分析試料は産総研 地質標本館に所蔵される鉱石試料を用いた．

これらマンガン鉱石は菱マンガン鉱やテフロ石，ブラウン鉱などから構成される．一方，鉄マンガン鉱床は高知県国見山鉱床が代表的で玄武岩とチャートの境界部に挟在する．暗褐色～黒色を呈し，赤鉄鉱とベメント石から構成される．

3．鉱石の化学組成

マンガン鉱石はFe_2O_3含有量が20wt.%以下，MnOを約30wt.%以上含有する鉱石で，一般にその他の主要・微量元素に乏しい特徴を持つ．バナジウム（V）や総希土類元素（Σ REE）含有量も鉄マンガン鉱石に比べて低い（第2図）．一方の鉄マンガン鉱石はFe_2O_3を20wt.%以上含有し，MnOを0-50wt.%含有する．NiやV，Σ REEに富み，Σ REEは最大2900ppmに達する（第2図）．

鉄マンガン鉱石のMnOおよびV含有量は，Fe_2O_3含有量が減少するに従って，それぞれ一様に増加または減少する（第2図）．それに対し，Σ REE含有量はFe_2O_3が35-45wt.%含有される鉄マンガン鉱石に濃集し，Fe_2O_3含有量がそれより高くても，低くてもΣ REEに乏しい特徴的なREE組成を持つ（第2図）．



第2図．鉱石の化学組成データ．燈色は本研究．黄色は Kato et al.,2006 など．Fe_2O_3 が 40wt.% 程度の鉄マンガン鉱石へ希土類元素が濃集する．太い点線は任意の組成トレンド．

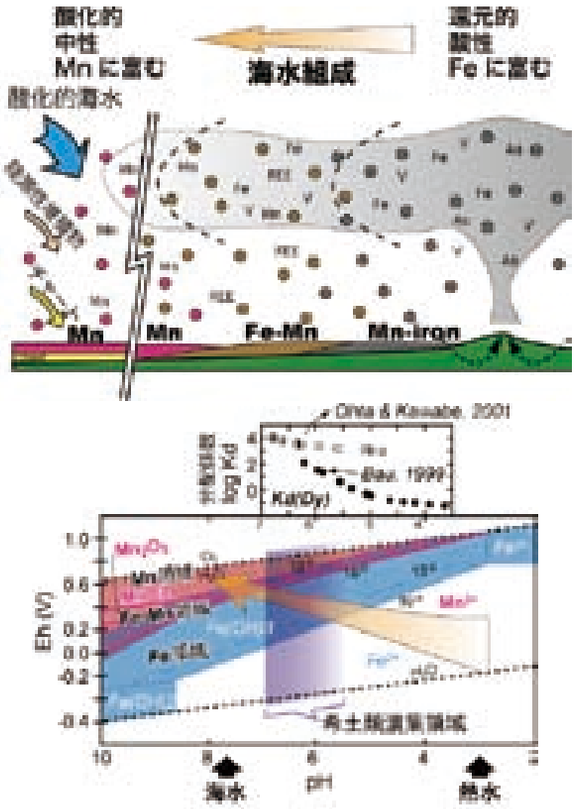
4．鉄マンガン鉱石の希土類元素濃集過程

鉄マンガン鉱石は中央海嶺起源玄武岩の直上に胚胎し，チャートもしくは頁岩によって被覆されている．また主要・微量元素組成が現世中央海嶺近傍に分布する鉄マンガン堆積物に類似する．この地質学的産状や化学組成から鉄マンガン鉱石は海洋底での熱水活動に伴って Fe や Mn が沈殿することで形成されたと考えられる（Kato et al., 2006）．

マンガン・鉄マンガン鉱石の Fe_2O_3 および MnO 含有量の連続的な変化は，海底熱水溶液と海水の混合モデルで説明できる（第3図）（Moriyama et al., 投稿中）．溶液中では Fe がより酸性・還元的な環境で沈殿するのに対し，Mn は Fe に比べてよりアルカリ・酸化的な条件で沈殿する．海底熱水系から放出された熱水が海水中へ拡散・混合していく過程で混合溶液の pH や酸化還元条件は変化し，沈殿する Mn と Fe の量比も変動する．

この混合モデルは微量元素の組成変化とも調和的である．V 含有量は熱水からの供給で増加し，熱水の影響が少なくなるにつれて減少する．また Ce* 値 [$=Ce_N/(La_N+Pr_N)$] は溶液の酸化度の指標となることが知られており，鉱石の Fe_2O_3 の減少とともに Ce* 値が低くなる事実は，鉄マンガン鉱石を形成した溶液が海水の混合によって酸化したとする上記混合モデルと矛盾しない．すなわち，鉱石化学組成の連続的な組成変動は大局的には海底熱水と海水との混合の程度の違いであるといえる．

前述したように HREE は Fe_2O_3 を 40wt.% 前後含有する鉄マンガン鉱石にのみ濃集する．既存の実験データ（Bau, 1999; Ohta and Kawabe, 2001）から鉄水酸化物－溶液間の HREE 分配係数は，酸性溶液では低く中性条件下で高くなることが知られている（第3図）．Fe に富む領域は酸性条件下で沈殿したために HREE が乏しい組成となったと推察される．混合溶液の酸化還元条件が中性・酸化的になるに従って Mn が沈殿し始め，堆積物の Mn/Fe 比は高くなっていく．その過程で中性の混合溶液から HREE に富む鉄マンガン堆積物が生成されたと考えられる．マンガン鉱石を形成するような溶液では，HREE が鉄マンガン堆積物によって効率的に除去されたため，REE 濃度が低かったのであろう．



第３図．マンガン・鉄マンガン鉱石の成因概略図と鉄水酸化物の分配係数，Fe, Mn の化学条件図．

本研究により鉄マンガン鉱石の HREE の濃集プロセスにおいて，混合溶液の化学条件が重要であることが明らかとなった．これまで世界のマンガン鉱石や鉄マンガン鉱石の REE・微量元素データは皆無である．現在我々は世界各地のマンガン鉱石の化学分析を進めており，濃集プロセスが明らかになることで非在来型重希土類鉱床としての評価が進むことが期待される．

引用文献：
Bau (1999) Geochimi. Cosmochim. Acta, 63, 67-77.
Kato et al. (2005) Res. Geol. 55, 291-299.
桃井（1991）地質雑，97，759-770.
守山ほか（2006）Green Report，65-66.
Ohta and Kawabe (2000) Geochem. Jour., 34, 439-454
渡辺ほか（2007）産総研プレスリリース．http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2007/pr20070208/pr20070208.html

地圏資源環境研究部門成果報告書 2007
(GREEN REPORT 2007)
AIST04-C00014-4

平成 19 年 12 月 4 日発行
編集：独立行政法人産業技術総合研究所
地圏資源環境研究部門
発行者：矢野雄策

〒305-8567 つくば市東 1-1-1　（第七事業所）TEL.029-861-3513
〒305-8569 つくば市小野川 16-1　（西事業所）TEL.029-861-8100

Green Report 2007

Diversity of Seeds and Needs of Geosphere Research

Research Reports of The Institute for Geo-Resources and Environment.
With Special Topics of Diversity of Seeds and Needs of Geosphere Research

4 December 2007

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
AIST

GREEN
INSTITUTE FOR GEO-RESOURCES AND ENVIRONMENT

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

地圏資源環境研究部門成果報告書2007
(GREEN REPORT 2007)
AIST04-C00014-5