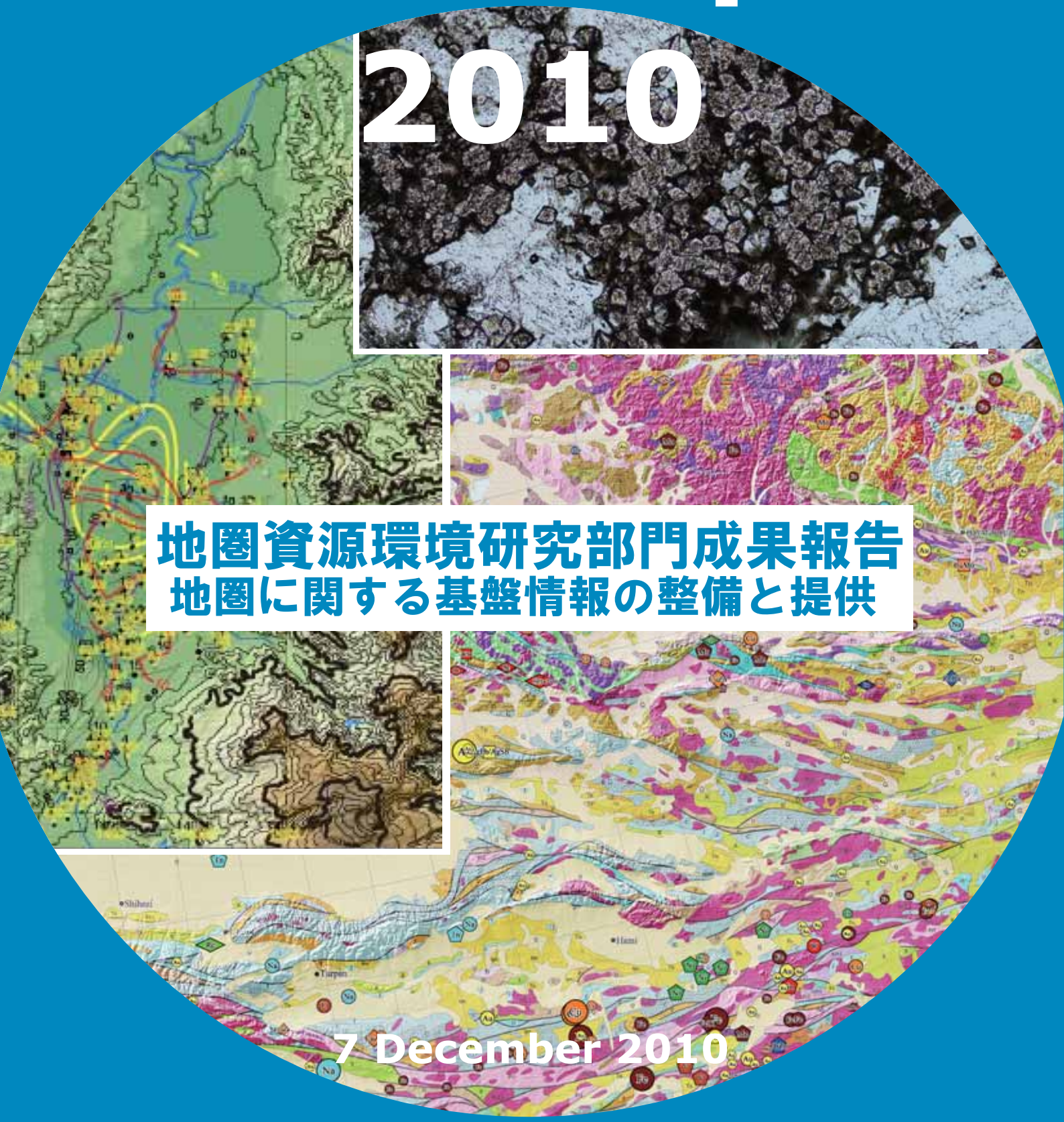
Green Report 2010



地圏資源環境研究部門成果報告
地圏に関する基盤情報の整備と提供

7 December 2010

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

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/

【表紙説明】

右上：アルカリ岩鉱床に含まれる重希土類含有ジルコン（カナダ，トアレイク）

希土類（REE: Rare Earth Element）はハイテク産業に欠かせない資源ですが，近年では価格の高騰や安定供給への不安から，新しい供給源の開発が進められているところです．鉱物資源研究グループでは，新しい重希土類資源として北米，ユーラシア，アフリカなどの大陸地域に分布するアルカリ岩に含まれるジルコンに着目しています．これまでジルコンは物理的，化学的に安定であるためREE資源とは考えられてこなかったのですが，アルカリ岩に含まれる熱水変質を被ったジルコンは酸やアルカリで容易に分解できる可能性があることがわかり，将来の供給源として期待されています．

左：水文環境図No.6「山形盆地」

産総研・地質調査総合センターでは，その前身である地質調査所時代から地下水情報の提供を目的とした図幅を作成･出版してまいりました．その一方で社会状況は大きく変化してきており，最近ではCO_2削減および省エネルギー対策のための地中熱利用，大深度掘削のコストが下がったことによる深層地下水利用に関する情報も求められるようになってきました．地下水研究グループでは，時代の要求に沿った水文環境図の出版を目指し，新たなる編集指針を検討してきたところですが，その新指針に沿って編集された最初の図幅が『水文環境図No.6「山形盆地」』です．本図では，地下水資源の保全や地中熱の有効利用のための情報のみならず，地下水中のイオン濃度などの水質データについても分かりやすい表示を行っています．

右下：300万分の1中央アジア鉱物資源図

海外の鉱物資源情報，とりわけ日本に近いアジア地域の情報を収集・解析することは，日本の資源確保戦略を立案する上で非常に重要です．鉱物資源研究グループでは，政府・鉱山業界等の要請に基づき，アジア地域の地質図・鉱物資源図，鉱物資源データベースなどの作成に継続的に取り組んでいます．300万分の1中央アジア鉱物資源図は，300万分の1中央アジア地質図（2007）を基図とした鉱物資源図であり，2011年の出版を予定しています．

まえがき

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

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

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

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

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

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

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

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

部門成果報告会では、メインテーマに関する講演以外に、各研究グループや個人の研究成果をより詳しく知っていただくために、ポスターセッションも例年同様設け、ご参加いただいた方との研究交流を深めてまいりたいと思います。この報告会は、部門の成果をお知りいただくと同時に、皆様から直接、貴重な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9回(2010年)　地圏資源環境研究部門研究成果報告会　プログラム

頁

13:00-13:25 地圏資源環境研究部門研究紹介
研究部門長　矢野雄策　1

研究発表

地圏に関する基盤情報の整備と提供

13:25-14:10　日本周辺大陸棚の基盤的情報と資源ポテンシャル
副研究部門長　棚橋　学　7

14:10-14:40　地熱資源に関する情報整備と資源評価
地熱資源研究グループ長　阪口　圭一　11

14:40-15:20　ポスターセッション

15:20-15:50　鉱物資源研究における産総研の役割　－レアメタル・非金属－
鉱物資源研究グループ長　高木　哲一　15

15:50-16:20　土壌汚染と表層土壌評価基本図
地圏環境リスク研究グループ　原　淳子　19

16:20-16:50　地下水に関する基盤情報　－水文環境図のねらいと今後の展望－
地下水研究グループ　町田　功　23

16:50-17:15　ポスターセッション

17:15-19:00　懇親会

ポスターセッション　発表題目一覧

(研究グループ発表)

地下水研究グループの紹介	丸井　敦尚	27
地圏環境評価研究グループの紹介	今泉　博之	29
CO_2地中貯留研究グループの紹介	中尾　信典	31
地圏環境システム研究グループの紹介	高倉　伸一	35
物理探査研究グループの紹介	内田　利弘	39
地圏化学研究グループの紹介	佐脇　貴幸	43
地圏微生物研究グループの紹介	坂田　将	49
燃料資源地質研究グループの紹介	鈴木祐一郎	51
地熱資源研究グループの紹介	阪口　圭一	55
鉱物資源研究グループの紹介	高木　哲一	57
地質特性研究グループの紹介	関　陽児	61
地下環境機能研究グループの紹介	伊藤　一誠	63
地圏環境リスク研究グループの紹介	駒井　武	65

（個人発表）

3次元Ｘ線ＣＴ画像データを用いた多孔質岩石中の空隙スケール電流シミュレーション*
中島善人・中野司（地質情報研究部門）
二酸化炭素地中貯留実験によって生じた地下温度の上昇*
宮越昭暢・當舎利行・高倉伸一
排ガスからの二酸化炭素回収・貯蔵を利用した農業分野への検討*
鈴木正哉・酒寄英里・永好けい子・月村勝宏・
犬飼恵一(サステナブルマテリアル研究部門)・前田雅喜(〃)
東南アジアのイオン吸着型希土類鉱化作用
実松健造・昆慶明・村上浩康・今井亮（秋田大）・渡辺寧　67
スカンジウムを含有するラテライト型鉱床
実松健造・星野美保子・渡辺寧　69
インジウム資源量と鉱床成因論　－日本、中国、ボリビアの錫多金属鉱床－
村上浩康・石原舜三　71
リチウム資源－ウユニ塩湖－
村上浩康　73
浅熱水性金鉱床形成に繋がる流体の発見とその進化
村上浩康・高倉伸一　75
灰重石と燐灰石の希土類資源ポテンシャル
村上浩康・石原舜三　77
LA-ICPMS を用いた各種分析法の立ち上げ*
昆慶明・村上浩康・渡辺寧・高木哲一
500 万分の1 アジア地質図*
寺岡易司・奥村公男
アジアの鉱物資源図と鉱物資源データベース*
大野哲二・神谷雅晴・奥村公男・寺岡易司
電子地球科学情報を利用した地熱資源評価手法の発展的研究：第2 期成果の概要
茂野博　79
陸源有機物とバイオマーカー*
鈴木祐一郎
熊野トラフ堆積盆、IODP Site-C0009 における炭化水素ポテンシャルの評価*
森田澄人
北部東シナ海陸棚堆積盆の構造形成パターン*
森田澄人・HAN Hyun-Chul・KANG Moo-Hee・
HWANG Jong-Sun（韓国地質資源研究院）
高メタンフラックス陸棚斜面における崩壊型堆積盆の形成*
森田澄人・中嶋健，花村泰明（JX日鉱日石開発）
関東地方の水溶性天然ガスの地質学的研究：南関東ガス田及びその周辺域について*
佐脇貴幸・金子信行・棚橋学・猪狩俊一郎・
前川竜男・中嶋健・森田澄人・坂田将
幌延沿岸域における反射法地震探査と海陸接合電磁探査*
上田匠・横田俊之・内田利弘・光畑裕司・
安藤誠・稲崎富士（土木研究所）

シミュレーションによる多孔質媒質中の気体が弾性波伝播に及ぼす影響評価について*
菊地恒夫
関東地方の水溶性天然ガスと地層水の地球化学*
金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・佐脇貴幸・
代田寧（神奈川温地研）・小田原啓（〃）・早稲田周（石油資源開発㈱）
我が国における地下岩盤内の初期地圧状態－応力解放法による実測データに基づく－
長秋雄・国松直・金川忠（日特建設㈱）・藤井真希（〃）・
横山幸也（応用地質㈱）・小川浩司（〃）・ 田仲正弘（㈱ レーザック） 81
汎用型ボアホールカメラの性能と地質調査への普及
国松直・山下智士（㈱復建技術コンサルタント）・
太田保（元㈱復建技術コンサルタント） 83
二点計測法によるひずみ計測*
唐澤廣和・鈴木宏治（鉱研工業㈱）・高橋幸司（〃）
Design and function of the artisanal/small-scale mining database*
Marivic Pulvera Uzarraga (CCOP)・Satoshi Murao・
Mihir Deb (University of Delhi)
石油系炭化水素を対象とした発光バクテリアを用いた簡易土壌汚染評価手法の開発
－抽出溶媒の選定および石油系炭化水素の毒性評価－*
杉田創・駒井武
カラム通水試験によるCRT ガラスからの元素溶出*
井本由香利・杉田創・山下勝（ユビキタスエネルギー研究部門）・
赤井智子（〃）・駒井武・肴倉宏史（国環研）
VOCs 汚染と浄化対策技術 その1：各種浄化対策技術の比較検討*
張銘・駒井武・竹内美緒・吉川美穂（ケミカルグラウト㈱）
VOCs 汚染と浄化対策技術
その2：嫌気性脱塩素細菌を利用したバイオレメディエーションの現状と課題*
竹内美緒・張銘・吉川美穂（ケミカルグラウト㈱）・駒井武
VOCs 汚染と浄化対策技術 その3：溶存水素拡散試験技術の開発*
吉川美穂（ケミカルグラウト㈱）・上沢進（〃）・
和田忠輔（〃）・張銘・竹内美緒・駒井武

---

*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

日本周辺大陸棚の基盤的情報と資源ポテンシャル

Basic Information and Resource Potential of Japanese Continental Shelf

副研究部門長：　棚橋　学
Deputy Director, Institute for Geo-Resources and Environment: Manabu Tanahashi
Phone: 029-861-3938, e-mail: tanahashi-m@aist.go.jp

１．はじめに

国連海洋法条約に基づく大陸棚の延伸，東シナ海天然ガス開発，地球温暖化の認識の拡大，レアメタル等鉱物資源の供給不安など海洋に関わる諸問題が注目され，特に資源・エネルギーの確保や地球環境の維持と経済発展等の人類的課題において海洋が果たす役割の増大が期待されている．海洋の開発・利用，科学的知見の充実，総合的管理，海洋産業の発展等を推進するために，「海洋基本法」が制定された．続いて「海洋基本計画」が閣議決定され，排他的経済水域等の開発推進のため，当面探査・開発の対象を石油・天然ガス，メタンハイドレート及び海底熱水鉱床として，政策資源を集中的に投入することになり，それに基づいて「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」が策定された．

ここでは，玉木(2010)，棚橋(2010)などに基づき，日本周辺の大陸棚延伸の状況，海域に賦存が期待される鉱物資源・燃料資源に関する基盤的情報の整備状況並びにそのポテンシャルを紹介する．

２．大陸棚延伸申請の状況

国連海洋法条約では図１のように海域の区分を行っている．その中で「大陸棚」は、地形学的地質学的性質に基づいて定められ，沿岸国により海底及び海底下の資源の開発が可能である（玉木，2010）．その範囲は排他的経済水域を越えることができ，2009年の５月を期限として根拠を示すことで大陸棚延伸申請が可能となった．

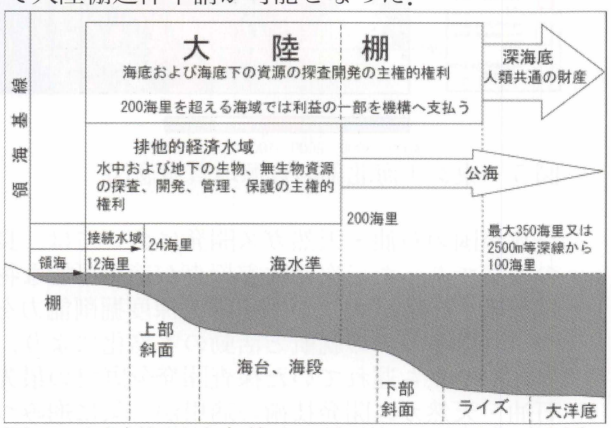


図１　国連海洋法条約上の海洋の法的区分（棚橋，2005）

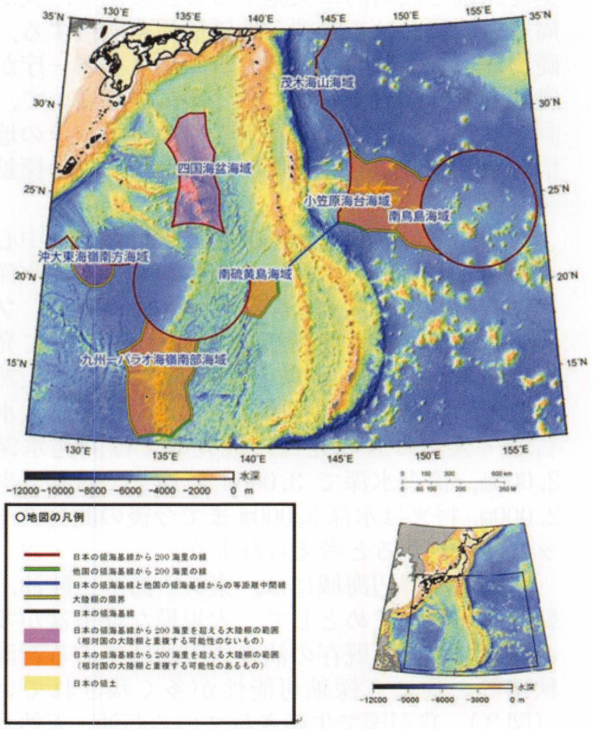


図２　我が国の大陸棚の限界申請（首相官邸ホームページより）

我が国は2004年の「大陸棚画定に向けた基本方針」に基づき，海上保安庁，海洋研究開発機構（JAMSTEC），石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）及び産総研が分担して延伸申請に必要な調査を実施した．

2008年に我が国が申請する延長大陸棚の範囲が決定され国連大陸棚限界委員会に提出された（図２）．申請総面積は，約74万平方キロメートル，日本の国土面積の約２倍である．我が国の申請は現在大陸棚限界委員会小委員会において審査中である．

我が国の申請状況を含めた諸外国の大陸棚延伸申請とその審査状況は，国連海洋法大陸棚限界委員会（UNCLOS/CLCS）のホームページ(http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/clcs_home.htm)に掲載されており，日本語の情報としては，海洋政策研究財団により詳しく解説されて同財団のホームページ(http://www.sof.or.jp/tairikudana/)に紹介されている．

3．「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」

3．1　石油・天然ガス資源

石油・天然ガス開発に関しては，国による取り組みとして，従来の二次元基礎物理探査に加えて，三次元物理探査船「資源」を活用した三次元基礎物理探査を 2008 年度～2011 年度に年間 5,000km^2，2012 年度～2018 年度までに年間 6,000km^2，総計 62,000km^2 の規模で実施することになった．二次元基礎物理探査による広域調査により，三次元探査のための調査海域が絞り込まれる．その情報に基づいて試錐地点の検討が行われ，2010 年度頃より基礎試錐を機動的に実施することにより，我が国周辺海域における詳細な地質情報を取得する．基礎物理探査，基礎試錐は，資源エネルギー庁が基礎調査実施検討委員会による審議に基づいて，計画を策定し，JOGMEC に委託して実施し，その地質情報は民間資源開発企業に提供され，その探鉱開発を促進する．

石油開発のフロンティアの拡大における中心的な課題として，大水深への挑戦がある．大水深における石油・天然ガス開発は，メキシコ湾，ブラジル沖，アフリカ南西部沖などを中心として発達している水深 1,000m 以上の海域での石油・天然ガス資源の開発と共に発達してきた．世界の大水深石油・天然ガス開発は，最先端では開発水深で 2,000m，探査水深で 3,000m に達しており，当面 2,000m，将来は水深 3,000m まで今後の開発ターゲットとなりうると考えられよう．

我が国の周辺海域には，東シナ海や三陸沖，常磐沖などをはじめとして，大規模な堆積盆が多数発達しており，既存の油ガス田地域である新潟，秋田等の他にも探鉱可能性が多く残されている（図３）．我が国で生産されている石油・天然ガスは，石油で消費量の 0.4%，天然ガスで 3.8%程度（2007）と大きくはない．しかし，これまでに生産・確認されている資源の量は，未発見を含めた推定資源量の 12%程度であり，現在も依然として高いポテンシャルを残していると推定される．

例えば，三陸沖に広がる三陸沖堆積盆では，大陸棚から水深 3,000m 程度までに白亜紀以降の堆積層からなる厚い堆積盆が発達している（図４）．新第三紀に，日本海溝の発達により東側が急速に沈降して現在のような東へ傾斜した堆積盆になったと考えられる．堆積盆の中心は大水深域にあり，水深 2,000m 程度での開発可能性を考慮すれば今後の石油・天然ガス探鉱のターゲットとして有望である．

未発見の資源の大半は，東シナ海（図５）を除くと水深 1,000m 以上の大水深域に存在し，従来困難であった 1,000m 以上の大水深域で，2,000m，3,000m までが開発可能水深となると我が国周辺海域の探査対象海域は非常に広いものになる．

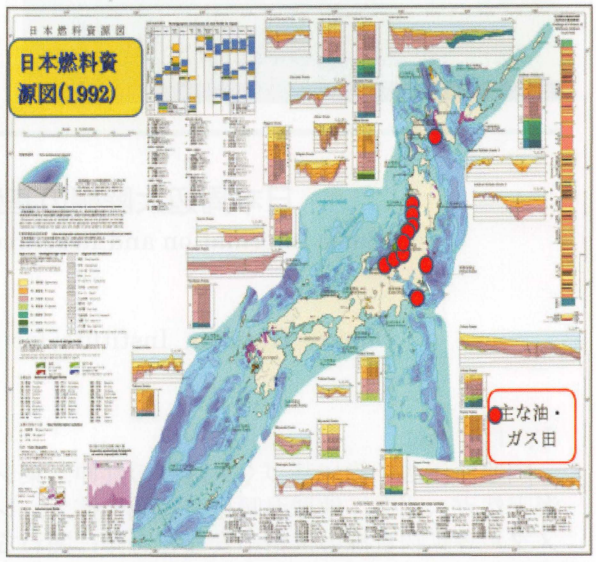


図３　日本周辺の堆積盆の発達状況　日本燃料資源図(1992)に基づく．

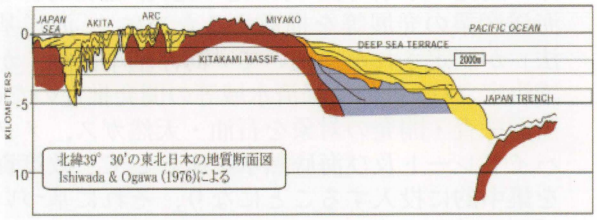


図４　三陸沖堆積盆を切る断面図（Ishiwada & Ogawa, 1976）

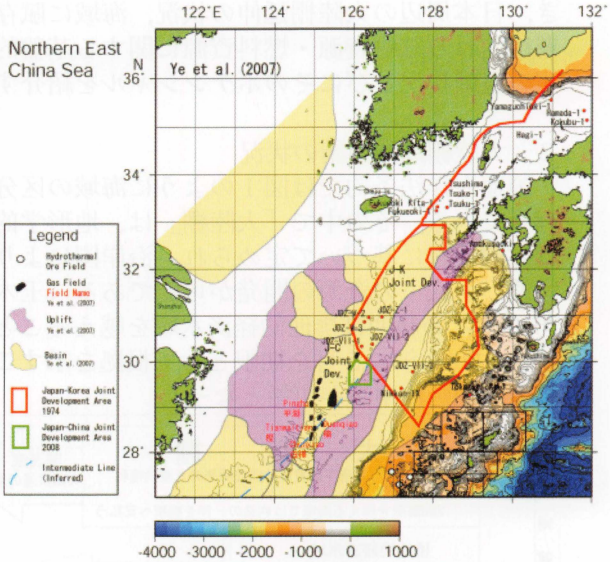


図５　東シナ海北部の資源地質概念図

我が国の石油・天然ガス開発においては，長年の懸案であった三次元地震探査が適用可能な物理探査船「資源」，および大水深大深度掘削能力を持つ「ちきゅう」の就航と活動の本格化により，世界にやや立ち遅れていた探査開発分野での最先端石油・天然ガス開発技術の適用が一気に進みつつある．

3．2　メタンハイドレート

メタンハイドレートの開発計画は，経済産業省資源エネルギー庁により 2001 年から 3 フェーズ 16 年計画として策定された「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」に基づいて実施されている．本計画はメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (通称 MH21) により実施されている．フェーズ 1 では，日本周辺海域でのメタンハイドレートの賦存状況の把握と，海洋産出試験候補海域の選定，基礎物性・分解生成技術等の基礎的研究，極地方の永久凍土地帯での陸上産出試験といった課題を実施し成功裏に完了している（フェーズ 1 総括成果報告書 2008)．「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」では，2009 年度から 7 年間程度の生産技術等の研究実証を中心とした 7 年間程度の第 2 フェーズ，その後 3 年間程度の商業化への技術整備の第 3 フェーズというスケジュールが示されている．

メタンハイドレートは，水とメタンガスが低温高圧でつくる固体であり日本周辺海域をはじめ世界の大陸縁辺域の深海に豊富に賦存していると推定されている．海域におけるメタンハイドレート存在の指標として反射法地震探査におけるその安定領域下限からの反射（BSR）の分布があり，MH21 によりその日本周辺海域における分布の概要が示され，日本周辺でのメタンハイドレートの分布の概要が判明している（図 6）．現在のところ，メタンハイドレートを商業生産した例はなく，資源として扱う段階ではないが,「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」のフェーズ 1 において，MH21 において資源量評価研究を実施した「東部南海トラフ海域」(図 7）において上記「孔隙充填型」のメタンハイドレートの資源量が原始資源量で 40TCF（兆立方フィート）（日本の天然ガス消費量の 14 年分程度）と試算された（MH21，2007)．

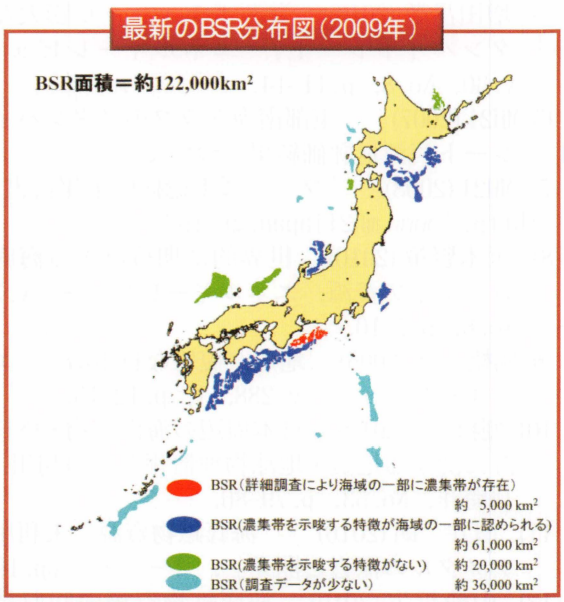


図 6　日本周辺 BSR 分布図 (MH21 ホームページより)

メタンハイドレート開発研究は，最終的な海洋メタンハイドレートの商業生産という目標に向けて，2009 年度より第 2 フェーズに入っており，海域におけるメタンハイドレートからの天然ガスの産出試験という野心的な研究開発が進められていく計画である（増田，2010)．

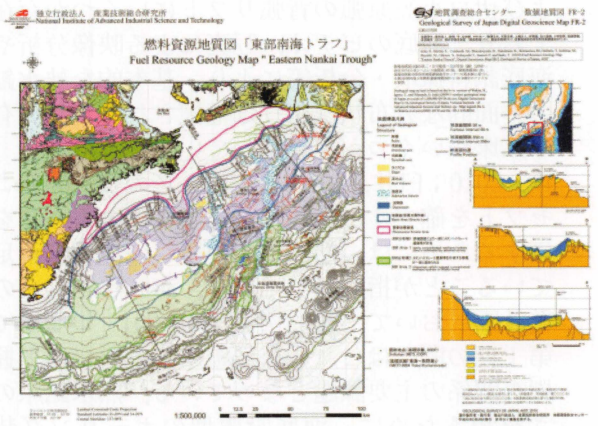


図 7　燃料資源地質図「東部南海トラフ」(2010)

3．3　海底熱水鉱床

海底熱水鉱床の開発計画では，研究開発を 2009 年度～2012 年度と，2013 年度～2018 年度の 2 つの段階に分けて推進される．第 1 期には，すでに存在が確認されている有望鉱床の詳細な資源量の把握，海洋環境調査の実施，環境影響予測モデルの開発，採鉱・揚鉱システムの検討，製錬技術の検討，第 2 期には，新規鉱床の探査と資源量の詳細な把握と，商業化のための諸技術の開発（採鉱実験機・精錬パイロットプラントの製作や実証試験）が実施される．

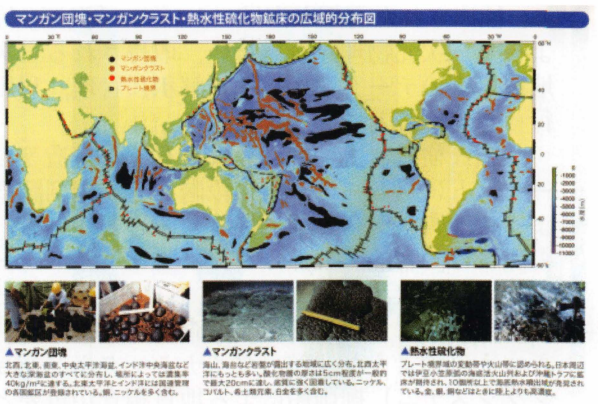


図 8　世界のマンガン団塊，マンガンクラスト，熱水性硫化物鉱床の広域的分布図（臼井，2010)

「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」における海底熱水鉱床の資源開発計画は，旧金属鉱業事業団から現在の石油天然ガス・金属鉱物資源機構を中心として，1970 年代に始まり長年実施されてきた，マンガン団塊，コバルトリッチクラスト，海底熱水鉱床等の海洋鉱物資源調査の成果(図 8）に基づいて立案された．これまでの海洋鉱物資源

調査により，海底熱水鉱床は日本周辺の大陸棚に賦存が確認されており，現在長期的な安定供給が強く求められているレアメタルの供給源として期待でき，水深との関係からもっとも開発可能性が高いと考えられる．これまでに我が国周辺において確認されている海底熱水鉱床は，沖縄トラフおよび伊豆小笠原弧の背弧リフトにいくつか存在しており，海底のビデオ，写真による映像分析や，海底試料採取・分析等により，基本的な熱水鉱床の平面的な分布状況がほぼ把握されており，有望な鉱床がいくつか発見されている状況である（飯笹，2010；臼井，2010）．一方，その資源開発コンセプトを確立するために必要な鉱床の質と量を評価するためには，熱水鉱床の厚さの情報が不足していることが指摘されており，海底熱水鉱床の開発計画において，2009 年度から 2012 年度までの第 1 期の間にはこれら有望鉱床の資源量の把握が探査関係の主要課題となっている．熱水鉱床の厚さを知るために，海底設置型のボーリング装置（BMS)が活用されている．第 1 期には，このほか，海洋環境調査や環境影響予測モデル開発といった環境影響評価の課題，採鉱システム，揚鉱システムの検討と実験機の設計といった資源開発技術の課題，さらには製錬技術の課題が設定されている（山崎，2010）．その後，2013 年度から 2018 年度にいたる第 2 期において，経済性評価ができるように，詳細資源量の把握，システムの検討，プラントの設計，試験等が計画されている．

4．今後の海洋資源開発の課題

石油天然ガス，メタンハイドレート探査のためには，まず詳細な調査を必要とする有望な海域を二次元地震探査により効率的に抽出する必要がある．抽出された有望な海域において，「資源」等によって三次元物理探査を行い，取得される三次元地震探査のデータ解析，地質解釈，管理，利用を行っていくことになる．

詳細な検討により抽出された有望な構造等のターゲットに対しては，次の段階として掘削調査によって地質状況を詳細に把握する必要がある．その際には，石油・天然ガス，メタンハイドレートなどの存在状況，その経済性の評価が必要となる．掘削調査では大水深海域の探査が重要となり，「ちきゅう」のような DPS（ダイナミックポジショニングシステム）掘削船による地質調査が重要となる．石油・天然ガス探査のためには，掘削を行い物理検層，コア試料採取により地質分析を行う，といった科学掘削で用いられる手法だけでなく産出試験をする機能が必要である．

熱水鉱床探査を主な目的として，浅層の掘削調査機能を備えた新探査船が建造中であり，2011 年度末から運航が開始される見込みである．世界トップクラスの探査機能を備えており，「資源」とともに，我が国の海洋資源エネルギー開発の 2 枚看板として，熱水鉱床探査のみならず，コバルトリッチクラスト，メタンハイドレート等の探査・開発・環境影響評価にも活用されていくことが期待される．

これらの探査が進展していくと，我が国周辺の広大な大水深域から得られる地質・地球物理情報は膨大なものとなっていく．三次元地震探査で得られる情報は，地下 10,000m 程度までの深度まで，水平方向 10m 程度のグリッドの密度で取得され，解析される．一方，海底熱水鉱床の開発においては海底火山活動や熱水活動のモニタリングが重要であり，地震，津波や海底地滑り予測などの防災や海底地下空間利用等のためにも，将来的には我が国の排他的経済水域，さらには延伸海域を含め法的大陸棚すべてを含め陸域の十倍以上の広大な海域の地質地球物理情報をこの程度の密度で管理し，モニターするといった基盤的情報の整備が必要となる．そのためには，現在の情報処理技術を越えた膨大な量の情報の効率的な管理，効果的な利用のための技術が重要な課題となるだろう．

このような課題を着実に実行していくためには，現在の我が国の海洋開発技術者は質・量ともに不足しており，産学官の関係者が一致協力して，我が国の海洋開発技術開発の体制の充実，人材の育成に取り組むことが求められている．

参考文献

1) 地質調査所 (1992)　「日本燃料資源図」
2) 地質調査所 (2010)　燃料資源地質図「東部南海トラフ」
3) 飯笹幸吉 (2010)　「日本近海に大鉱床が眠る」．技術評論社，pp214.
4) Ishiwada and Ogawa (1976) Petroleum geology of offshore areas around the Japanese Islands. UN-ESCAP, CCOP Technical Bulletin, v.10, p.23-34.
5) 増田昌敬 (2010)　資源ポテンシャル膨大なメタンハイドレート，　エネルギーレビュー，v.30，No.8，p.11-14.
6) MH21 (2007)　「東部南海トラフのメタンハイドレート資源量評価結果について」
7) MH21 (2008)　「フェーズ 1 総括成果報告書」（http://www.mh21japan.gr.jp/）
8) 玉木賢策 (2010)　世界的に期待高まる海底フロンティア資源，エネルギーレビュー，v.30，No.8，p.7-10.
9) 棚橋　学 (2005)　地殻が複雑な日本沿海．エネルギーレビュー，v.288，1，p.12-15.
10) 棚橋 学 (2010)　日本周辺の海洋鉱物・燃料資源に関する地質・地球物理情報とその利用．月刊海洋，No.53，p.79-86.
11) 臼井　朗 (2010)　「海底鉱物資源　未利用レアメタルの探査と開発」．オーム社，pp.198.
12) 山崎哲生 (2010)　海底鉱物資源の回収技術我が国の探査は世界水準，エネルギーレビュー，v.30，No.8，p.25-28.

地熱資源に関する情報整備と資源評価

Preparation and Provision of Information Concerning Geothermal Resources and Resource Assessment

地熱資源研究グループ長：　阪口　圭一
Leader, Geothermal Resources Research Group: Keiichi Sakaguchi
Phone: 029-861-3897, e-mail: k-sakaguchi@aist.go.jp

1．はじめに

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

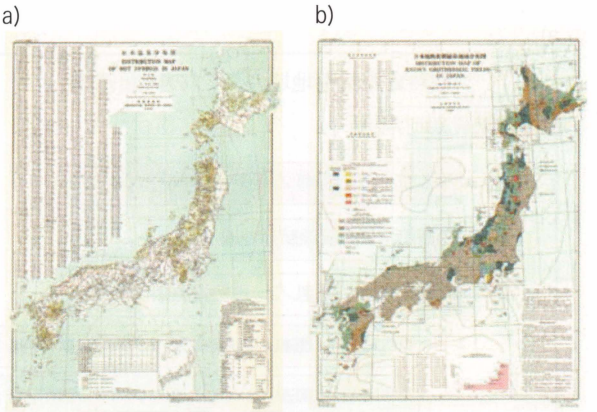
地熱が資源として捉えられるようになったのは鉱物資源や他のエネルギー資源に比べると最近であるが，その短い期間にも，地質調査所・産総研は，地熱資源の賦存の把握や評価のためにその時々の工夫を凝らしてきた．ここでは，主に広域－全国レベルの地熱資源の把握と評価という観点から，これまでの地熱資源に関する情報整備について概観し，今後の方向を考える．

2．地熱資源賦存図の系譜

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

1974 年にサンシャイン計画がスタートした後，1970 年代後半から 1980 年代初めにかけて，全国を対象とした一連の地熱資源図類が公表された．「日本地熱資源賦存地域索引図」(資源エネルギー庁・工業技術院地質調査所，1976)，「日本温泉分布図（第 2 版)」(角，1975)，「日本の熱水変質帯分布図」(角ほか，1980)，「日本地熱資源賦存地域分布図」(角，1980)，「日本温泉放熱量分布図」(角，1980）等である（第 1 図)．このうち，「日本地熱資源賦存地域分布図」(角，1980）は，日本の地熱資源を熱水対流系資源と深層熱水資源に大別し，それぞれを調査・探査段階で細分した分布を 200 万分の 1 全国図上に示したもので，地熱資源の賦存形態をモデル化した最初の例として注目される．

資源賦存図という形ではないが，1980 年代前半には，多様な地熱情報を扱う地熱情報データベースの研究が実施された（たとえば，花岡ほか，1986)．システム開発と共に，サンシャイン計画等で得られたデータのバンキングも実施された．データの社会への提供という観点で言うと，当時は CD-ROM 出版等による電子情報配布やインターネットによるオンライン・サービスの手段が整っておらず，収集・解析した情報を，地質調査所報告として印刷出版する方法が執られ，以下の報告書が出版された．「日本の主要地熱地域の熱水に適用した地球化学温度計」(地調報告 No.267)（比留川ほか，1988)，「日本の地熱調査における坑井データ　その 1」(地調報告 No.271)（矢野ほか，1989)，「日本の地熱調査における坑井データ　その 2」(地調報告 No.273)（須田ほか，1991)．



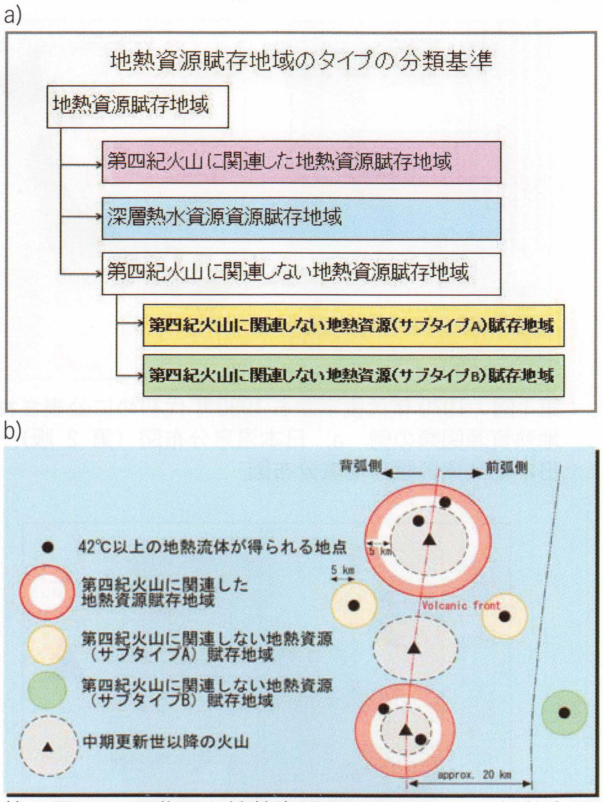
第 1 図　1970 年代後半から 1980 年代初めに公表された地熱資源図類の例．a) 日本温泉分布図（第 2 版)，b) 日本地熱資源賦存地域分布図．

第 2 図　50 万分の 1 地熱資源図「新潟」．

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

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

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



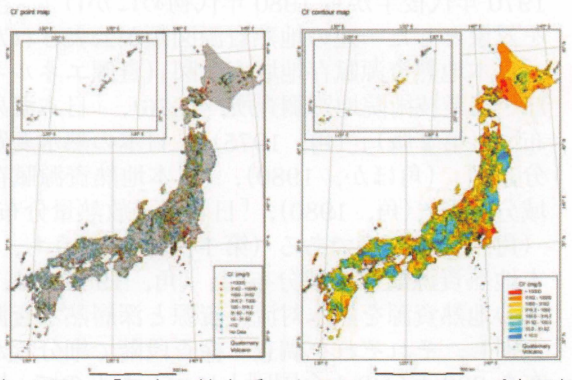
第 3 図　50 万分の 1 地熱資源図で用いた, a) 地熱資源のタイプ分けと, b) 深層熱水資源以外の地熱資源の地理関係の表現.

5 枚の地熱資源図は, 紙印刷の図面と説明書という従来の印刷出版物の形で発行されたが, 重力異常以外のデータの編集は GIS（Arc/INFO 及び ArcView）を用いて行ったことが特徴である. 上述の複雑で多様な情報を GIS で編集したことにより, データの更新や追加, 新たなデータとの比較や重ね合わせに際してのデータの再利用が容易になった.

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

3.「日本の熱水系アトラス」と「全国地熱ポテンシャルマップ」

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

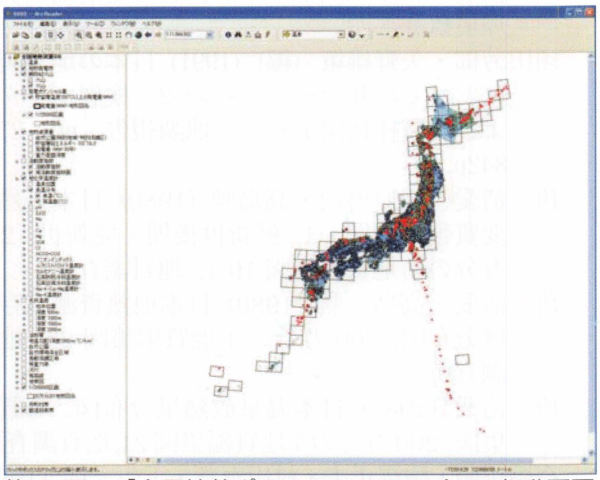


第 4 図　「日本の熱水系アトラス」でのマップ表示例（Cl^-濃度分布）

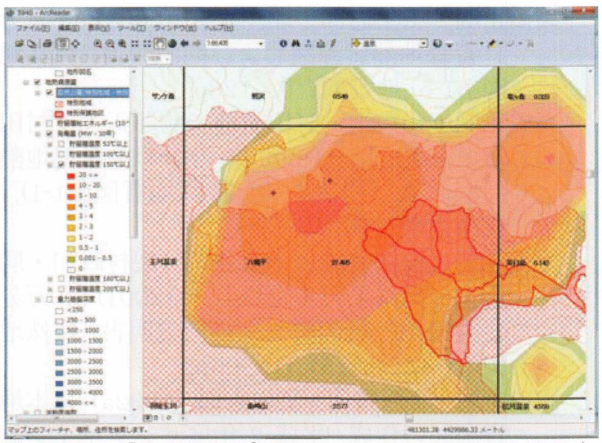
これらの作成の最も基礎になるデータは, 全国から収集した約 7,200 個の温泉化学分析値データと約 3,000 個の坑井地温データである.「日本の熱水系アトラス」は, 収集した温泉と坑井の温度, pH, 代表的な化学成分, 化学組成や温度・深度から計算される地化学温度計温度や各種の指数という要素的なデータを, 全国マップとして地理情報システムによって表示したものである(第 4 図).

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

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



第 5 図　「全国地熱ポテンシャルマップ」の起動画面（全国マップ表示）．



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

「日本の熱水系アトラス」で編集した温泉・坑井情報に加えて，地質，等重力線，地表面からの重力基盤深度等の地熱資源評価に有用な情報や，自然公園，自然環境保全区域，鳥獣保護区域等の地熱開発の条件を検討するにあたって有用な情報も閲覧できる（第 6 図）．また，容積法（Brook *et al.*, 1979）を用いて全国を 1km メッシュに分けて計算した熱水系資源量も付加してある．本システムで点データまたはコンターマップとして表示できる要素的情報は，以下の多種類に上る．熱水湧出温度，熱水 pH，熱水主要化学成分（Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, $HCO_3^-+CO_3^{2-}$, SiO_2），アニオンインデックス，主要熱水地化学温度計（α-クリストバライト，カルセドニー，石英断熱冷却，石英伝導冷却，Na-K，Na-K-Ca，Na-K-Ca-Mg），坑井地温（500m，1000m，1500m，2000m），活動度指数，火山位置，地熱発電所位置，坑井位置，地質図，活断層，等高線，等地温線，等重力線，河川，都道府県界，市町村界，自然公園，自然環境保全区域，鳥獣保護区域，地表面からの重力基盤深度，1/2.5 万図幅地域ごとの熱水系資源量．各々の情報は GIS データのレイヤーとなっており，用途に応じて，これらから必要な情報を選び出し，重ね合わせることによって，熱水系資源の開発や利用のための，様々な地域的評価を行うことができるようにデザインされた．

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

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

LD　：貯留層底部の深度（m）
UD　：貯留層下限温度の深度（m）
$t(z)$　：深度の関数としての貯留層温度（℃）
t_{ef}　：基準温度（15℃）

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

4．今後の課題と方向

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

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

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

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

文献

Brook, C.A., mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffaniti, M. and Muffler, L.J.P.（1979）Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures ≥ 90° C. In: Muffler, L.J.P. ed., Assessment of geothermal resources of the United States－ 1978, U.S. Geol. Surv. Circular, no.790, 18-85.

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

地質調査総合センター（2009）全国地熱ポテンシャルマップ CD-ROM 版．数値地質図 GT-4，産総研地質調査総合センター．

花岡尚之・矢野雄策・津　宏治・西　祐司・浦井　稔・村田泰章・小川克郎（1986）地熱情報データベース・システム SIGMA　‘83 について．地調報告，no. 265，1-18.

林　正雄（1982）深部高温地熱貯留層のターゲット．日本地熱学会誌，4，81-90.

比留川　貴・高橋正明・茂野　博(1988) 日本の主要地熱地域の熱水の適用した地球科学温度計．地調報告，no. 267，754p.

駒澤正夫（2003）日本の重力探査事情－地下構造とのかかわり．石油技術協会誌, 68, 21-30.

村岡洋文・阪口圭一・玉生志郎・佐々木宗建・茂野　博・水垣桂子（2007）日本の熱水系アトラス．産総研地質調査総合センター, 110p.

宮崎芳徳・津　宏治・浦井　稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克郎（1991）全国規模地熱資源評価の研究．地調報告，no. 275，17-43.

阪口圭一・野田徹郎・高橋正明・駒澤正夫（2000）50 万分の 1 九州地熱資源図および同説明書．特殊地質図(31-3)，地質調査所, 88p.

阪口圭一・高橋正明（2002）東北・九州地熱資源図(CD-ROM 版)．数値地質図 GT-1，産総研地質調査総合センター．

資源エネルギー庁・工業技術院地質調査所（1976）日本地熱資源賦存地域索引図. 65p.

茂野　博（2010）電子地球科学情報を利用した地熱資源評価手法の発展的研究：第 2 期成果の概要．Green Report（本号），産総研地圏資源環境研究部門．

須田芳郎・矢野雄策（編）(1991) 日本の地熱調査における坑井データ　その 2　検層データおよび地質柱状図データ．地調報告，no. 273，842p.

角　清愛・金原啓司・高島勲（1980）日本の熱水変質帯分布図，1. 鮮新世後期－ 完新世，200 万分の 1 地質編集図 19-1，地質調査所．

角　清愛・高島　勲（1980）日本地熱資源賦存地域分布図．200 万分の 1 地質編集図 20，地質調査所．

角　清愛（1980）日本温泉放熱量分布図．地質編集図, 200 万分の 1 地質編集図 21,地質調査所．

高橋正明・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎（1996）50 万分の 1 秋田地熱資源図および同説明書．特殊地質図(31-2),地質調査所, 162p.

高橋正明・玉生志郎・駒澤正夫（2001）50 万分の 1 青森地熱資源図および同説明書．特殊地質図(31-5),地質調査所, 126p.

高橋正明・山口靖・野田徹郎・駒澤正夫・村田泰章・玉生志郎（1993）50 万分の 1 新潟地熱資源図および同説明書．特殊地質図(31-1)，地質調査所, 116p.

玉生志郎・松波武雄・金原啓司・川村政和・駒澤正夫・高橋正明・阪口圭一（2001）50 万分の 1 札幌地熱資源図および同説明書．特殊地質図(31-4)，地質調査所, 65p.

山口　靖・金原啓司・玉生志郎（1992a）日本地熱資源図の作成．平成 2 年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書国土地熱資源評価技術に関する研究, 59-99.

山口　靖・金原啓司・玉生志郎・角　清愛・田中啓策（1992b）日本地熱資源図．日本地質アトラス(第 2 版)，朝倉書店．

矢野雄策・須田芳郎・玉生志郎(編)（1989）日本の地熱調査における坑井データ　その 1　コア測定データ　－物性，地質層序，年代，化学組成－．地調報告，no. 271，832p.

鉱物資源研究における産総研の役割　－レアメタル・非金属－

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

鉱物資源研究グループ長：　高木哲一
Leader, Mineral Resources Research Group: Tetsuichi Takagi
Phone: 029-861-3926, e-mail: takagi-t@aist.go.jp

1．鉱物資源を巡る状況と産総研の役割

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

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

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

2．レアメタル資源探査への取り組み

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

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

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

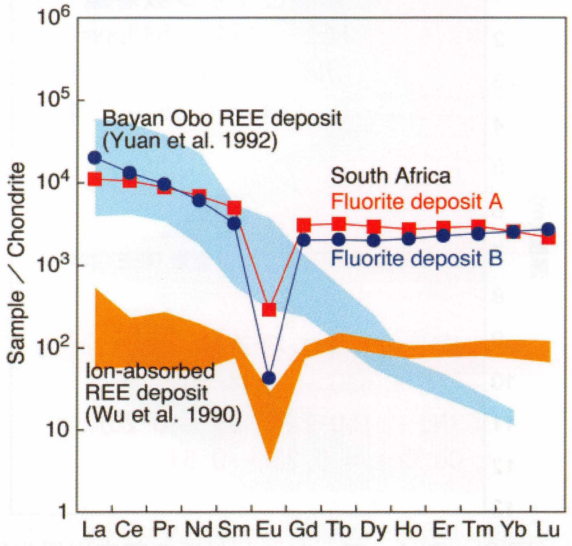


図1　南アフリカ北東部に分布する蛍石鉱床の希土類パターン（鉱床名非公表）．

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

図２　南アフリカでの希土類鉱床調査．放射能計を用いて鉱徴地を探していく．

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

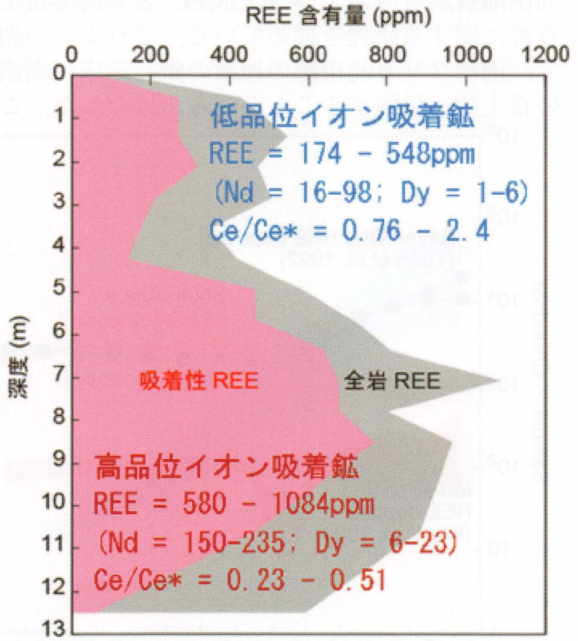


図３　タイ・プーケット付近の花崗岩風化殻に発達するイオン吸着型希土類鉱床の希土類含有量の深度変化．

現在は基礎研究の段階であるが，事業化等に向けた今後の展開が注目される．

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

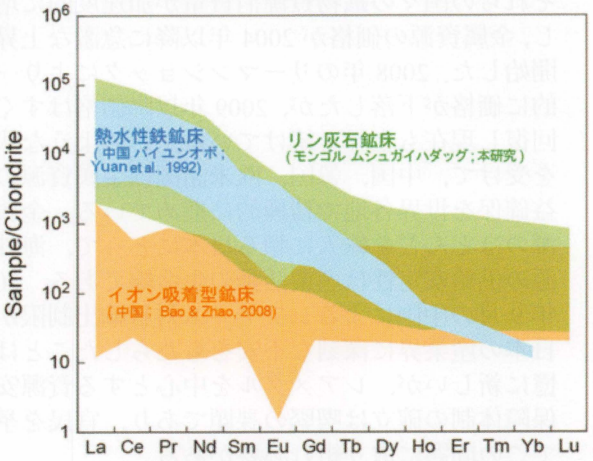


図４　モンゴル・ムシュガイハダッグ鉱床の希土類パターン．

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

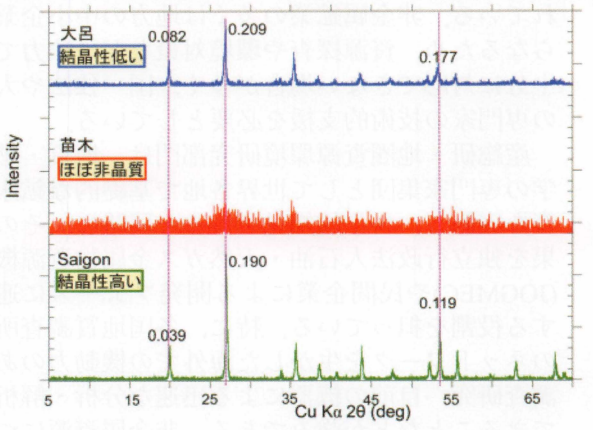


図５　結晶度の異なるジルコンのＸ線回折パターン．苗木のジルコンには希土類が約 3. 2%含まれ，1N 塩酸 (250°C) による処理でほぼ全量が抽出される．

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

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

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

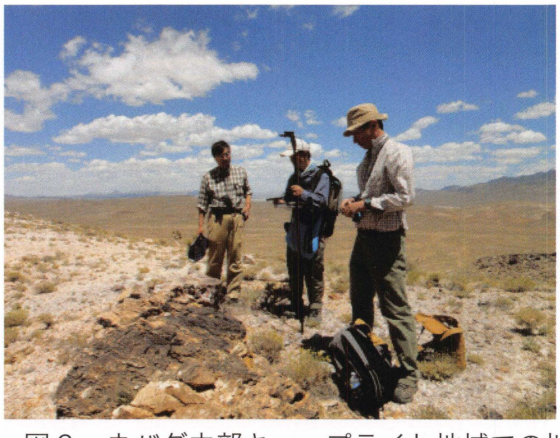


図６　ネバダ中部キュープライト地域での地質調査．衛星・航空機による画像の検証は，砂漠地帯など裸地で実施する必要がある．

３．非金属資源探査への取り組み

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

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

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

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

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

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

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

４．まとめ

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

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

文献

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

Yuan, Z., Bai, G., Wu, C., Zhang, Z., Ye, X., (1992) Applied Geochemistry , 7, 429442.

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

土壌汚染と表層土壌評価基本図

Soil Pollution and Geochemical risk assessment map of subsurface soils

地圏環境リスク研究グループ：　原　淳子
Geo-environment Risk Research Group: Junko Hara
Phone: 029-861-8710, e-mail: j.hara@aist.go.jp

1．はじめに

我が国の環境中汚染物質に関する規制が明確に開始されたのは，1970 年に工場排水などを規制対象とする水質汚濁防止法が施行されたことに遡るが，この当時の規制は地下水や土壌などの媒体を対象としたものではなかった．土壌に関する汚染規制が初めて制度化されたのは，2003 年とごく最近のことである．この規制開始に伴って現在までに土地利用の変更や売買に伴う土壌の調査実施件数は増加している．土壌汚染の規制対象物質としては，重金属類および揮発性有機塩素系化合物（以下 VOCs）が主体をなし，指定区域の報告件数は以下のように変化している．2005 年の環境省調査[1]では指定区域にされた件数は重金属類，VOCs 共に同程度で重金属類が 10%ほど VOCs を上回る状況であったが，2008 年には重金属類の汚染件数が増加し，VOCs 件数の約 4 倍の件数が新たに報告されている[2]．また，重金属類の中でも土壌汚染対策法施行当初には鉛およびその化合物，砒素およびその化合物が主体をなしたのに対し，近年では六価クロムおよびその化合物，フッ素およびその化合物の件数が増加し，現在の累積件数ではこれらの報告汚染物質の上位を占めている．さらに，重金属類による汚染原因は VOCs と異なって判定できないケースが多く，VOCs 汚染の場合に汚染源の特定が出来ないケースが指定区域件数の 10%ほどなのに対し，重金属類の原因不明件数は 2005 年度で全体の 36%，2008 年度で全体の 48%と増加している．さらに自然由来を汚染原因と判断された割合は 2005 年度で 8%，2008 年度で 9%という値を示し，特に重金属の場合は汚染原因の特定は難しく自然由来と人為由来の判定も困難な場合が多いことが伺える．

また，実際の土壌環境は様々な因子が複雑に関与することからその評価も困難で，現在の土壌汚染対策法に基づく評価手法に関しても様々な議論が絶えないのが現状である．このような土壌を対象とした地球科学情報の整備は統一した手法での評価は勿論，人間活動による局所的な異変が生じる可能性も十分にあることから調査および評価手法については十分な吟味をする必要がある．実際に，2010 年 4 月には土壌汚染対策法が改正され，リスク管理と情報公開の強化がはかられており，リスクベースの評価が浸透しはじめている．

我々が情報整備している表層土壌評価基本図は，汚染件数事例も多く，自然由来としても存在する有害重金属類に関する濃度情報およびリスク評価情報である．これらの情報は汚染源特定およびリスクベースの土壌環境評価の一助となることを期待し，整備を進めている．本稿では，本表層土壌評価基本図の国内外の地球化学情報整備における位置づけおよび土壌汚染対策法との関わり，表層土壌の評価手法，土壌成分の母材岩石および河川堆積物成分との関係について論じる．

2. 地球化学情報整備における位置づけおよび土壌汚染対策法との関わり

地殻表層における濃度分布図（地球化学情報）について，近年では環境問題の観点からその存在が注目され，多くの国でその取り組みが行われてきている．評価対象物質としては，調査流域において比較的広範囲の岩石や堆積物を代表する値として河川堆積物を対象とした報告が多く[3~7]，近年は各地層の岩石や土壌，さらには地下水や表層水を対象とした詳細スケールでの調査なども多く報告されている[5),8~11)]．それでは，今回我々が対象としている表層土壌に関する整備状況はというと，国内では一部，農地を対象に調査されたデータ[12)]や地質調査をベースにそのトップソイルを調査した東北大（GENIUS，2008）[13)]に関する特定地域の調査データは報告されているものの，いまだ整備が不十分なのが現状である．しかし，諸外国では既に香港や台湾などのアジア圏をはじめ，EU 諸国，アメリカなどでも土壌のデータも既に整備されており，わが国の整備状況は遅延しているといえる．

表層土壌中の地球化学情報は，母岩由来もしくは過去の採鉱活動や河川の氾濫などによって表層堆積物にもたらされた自然起源の重金属類の情報で，土壌の母材をなす岩石由来の重金属類と 2 次的に付加された重金属類の両情報を含んでいる．現行の土壌汚染対策法では自然由来の重金属類は法の規制対象外と定められているが，実際には自然由来と人為由来の判断は難しい場合が多く，その対処法は未だ明確な提示がなされていない．これらの判定には，広域の土壌成分分布を明確にし，

地形，地質的要因も含めた分布範囲において調査された超過濃度がバックグランドレベルであるか判定を行う必要がある．また，表層土壌中の重金属類情報は，生活環境，農業などに与える影響も大きく，ある地点で高濃度の有害重金属類を含む土壌が検出された場合，動植物がここから飛散した土壌を直接的に摂取したり，土壌間隙水へと移行した後に農作物や地下水を介して間接的に摂取することにより，生態系に影響を与える可能性も示唆される．このように，土壌化学成分が動植物の活動影響を受けるのと同様，人間も土壌成分の影響を少なからず受けており，自然起源と判断された場合も，人体もしくは生態系に対するリスク評価を行い，土地利用や土地活用等の政策へと反映することが望ましい．

3. 表層土壌の評価手法

表層土壌の調査では，5 万分の 1 土地分類基本調査図（国土交通省）の土壌種区分および主要河川の分水界に基づき，調査地域の主要な土壌種について採取，解析を行った．さらに，土壌採取密度を 5km メッシュ区分中に 1 試料以上と設定することで空間的に情報が疎となる部分がないようにつとめた．採取の際，表層の腐葉土層，植生および大礫は除去して深度 50cm 程までの土壌を掘削採取した．また，本調査では大気からの影響をできるだけ除去するため，表層 5ｃｍの部分は採取対象外とした．採取した土壌は十分に風乾させた後，礫や植物片を取り除いて団粒，土塊を潰し，非金属製の 2mm メッシュのふるいを通して，前処理検体とした．

この前処理後の検体を用いて，土壌の化学特性（pH, EC, りん酸吸収係数，全有機炭素量），蛍光エックス線を用いた土壌構成成分の全含有量分析，公定法（環境告示 18 号，環境省告示 19 号）に準ずる手法による溶出試験（水溶出試験），含有量試験（0.1M 塩酸溶出試験）を行い，データベースを作成した．溶出試験値に関しては有害重金属類 18 成分，土壌構成成分の全含有量値に関しては，岩石構成成分 19 成分のデータを掲載している．これらの公定法による濃度値の整備は，土壌汚染対策法に法った調査結果との比較を可能とするためであり，溶出試験法に関する議論は未だに絶えないが，整備情報の利活用を重視した整備を目指した．

評価基本図にはこのようにして採取・分析した表層土壌試料の採取地点を含む採取土壌種の領域および土壌化学データが提示されており，これらの土壌化学データはこの地域の土壌化学バックグランドデータの一例として参照できる．さらに基本図には，その解析事例の一つとして有害性を有する 12 成分の有害物質のリスク評価図が含まれている．これらは以下の仮定に基づいて算出した人体に対する健康リスク評価結果を示している．土壌中の有害重金属類を人体が摂取する主な暴露経路としては，大気中に飛散した土壌の経気摂取および経口摂取，間隙水を介して生態濃縮した農作物の摂取，地下水の摂取，揮発性物質の皮膚からの吸収を想定した．ここでのリスク計算には，データベース化した採取土壌の重金属類溶出特性データ，土壌化学特性データ，生活様式因子を設定して算出している．

各暴露経路に使用した具体的なデータ値は以下のとおりである．大気を介しての土壌粒子吸引による暴露計算には，土壌そのものを肺から吸引することから土壌中の全含有量値を用い，含有量濃度と大気中の浮遊粒子濃度，浮遊粒子中の土壌密度，平均呼吸量，平均暴露時間，肺中遅延係数，体内吸収率の積で算出した．一方，土壌の直接経口摂取については，塩酸溶出値を用い，溶出濃度と土壌平均摂取量，体内吸収率の積で計算した．土壌から間隙水への溶出率は水溶出値を用いて算出し，農作物への吸収濃度は間隙水濃度と各農作物の生態濃縮係数の積および土壌沈着濃度で求め，作物摂取量，汚染率，体内吸収率および耕作密度の積で人体への吸収量を求めた．また，地下水からの暴露量は間隙水濃度，希釈率，井戸水の摂取量，体内吸収率の積で求めた．これらの吸収量の和を一日に人体が摂取してよい許容摂取量（TDI 値もしくは Rfd 値）[14~15] と比較し，リスク評価の指標とした．図 1 にその一例として宮城県におけるヒ素と鉛のリスク評価図を示す．この図は，TDI 値に対する割合でリスクの大小を示している．

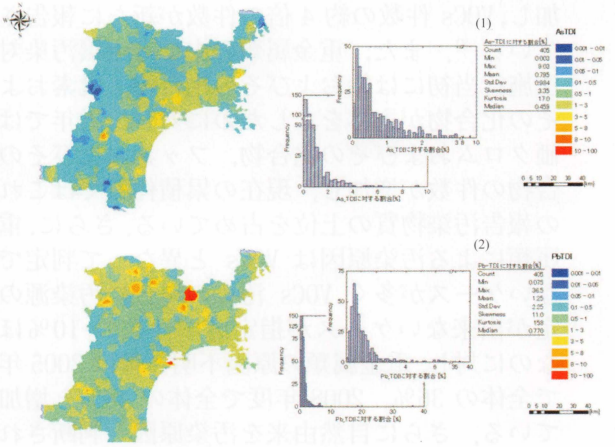


図 1．リスク評価図（1）TDI 砒素，(2) TDI 鉛

環境調査では，有害重金属類の含有量値は低いが水溶出試験値が環境基準を超過してしまうという事例をよく耳にする．宮城県の調査においてもこのような事例にいくつか遭遇している．環境基準値を超過するような場所では，環境調査にとどまらず，実際にこの溶出値が人体に対してどのくらい健康リスクを及ぼすものなのか，長期的な評価を行っていく必要がある．

今回の計算手法で宮城県におけるリスク計算を行ったところ，環境基準値を超える土壌はいくつか検出されたものの，バックグランドレベルの有

害重金属類が人体に影響を及ぼす地域は検出されなかった．この結果は，現在宮城県地域では自然由来の元素が人体におよぼすリスクは許容される範囲であることを明示している．しかし，解析結果は今後の環境変動や土木工事等によって変化していくことも述べておきたい．先に述べたように自然由来の重金属類は土壌汚染対策法では対象外とされているが，広範囲に賦存する天然の有害元素については適切な土地利用，管理を行って，生態系に及ぼすリスクを軽減していかなくてはならない．また，今後新たな人為的汚染拡散が生じないよう土壌・地質特性を生かした策定が必要である．

このように，調査地点における土壌化学データは，環境基準値と直接比較することで調査対象地域の土壌中濃度レベルの高低が判断でき，さらにこの結果をリスク解析へと展開させることで，リスク管理の基礎資料として土地利用の策定・管理へと活用できる．

また，図１には一般的な生活環境条件における人体リスク評価を示したが，表層土壌のデータベースを応用して，さらに既存の地理情報（土地利用図，水系分布図，耕作農作物，鉱床位置）等の空間情報を併せた解析を進めることで，対象地域の土地用途状況や環境条件に応じた解析が可能となる．このような解析手法を用いて，原ら（2007）では農作物（植物体）を対象とした自然由来重金属類意の吸収リスク評価[16]を，原ら（2008）では鉱床からの重金属流出リスク評価を行い，表層土壌データの活用例を示している[17]．

４．土壌成分の母材岩石および河川堆積物成分との関係

有害重金属類のなかで特に特徴的な分布を示した鳥取県地域のクロム，ニッケル，および宮城県地域の鉛，砒素を例として示す．

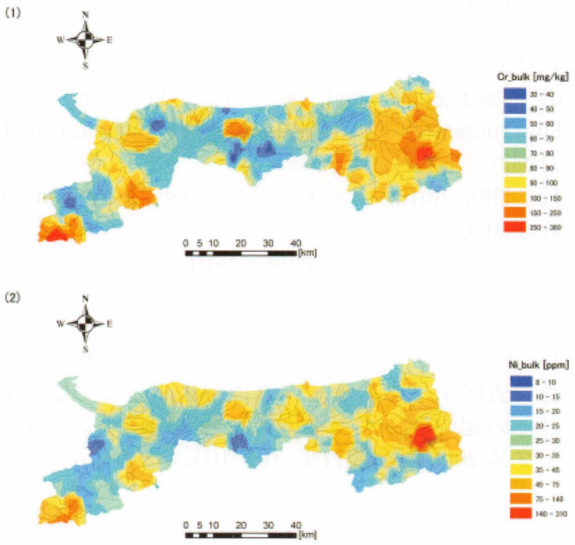


図２．含有量分布図　(1) クロム　(2) ニッケル

図２に鳥取県におけるクロム，ニッケルの濃度分布を示した．鳥取県地域にはクロム鉱床周辺でクロム含有量が高い表層土壌の分布が得られており，地質図と比較すると斑レイ岩，蛇紋岩の分布する地帯と一致することが確認されている．この地域ではニッケルがクロムとよく類似した分布を示しており，ニッケル，クロムといった深成岩に富む元素がこれらを母材とする表層土壌にも多く含まれていた．同様の傾向は河川堆積物を対象に調査した地球化学図でも報告されており[6]，これらの元素に関しては表層土壌と河川堆積物で類似した傾向を示すことがわかる．また，クロム，ニッケルの土壌成分空間分布は深成岩分布域を中心として河川下流域の土壌へと低濃度域が広がる分布を示している．土壌データは常に流水さらされる河川堆積物と異なり，一度蓄積された元素をより長く保持・記録している傾向が見られている．

宮城県の仙台平野中心部を流れる３河川（七北田川，広瀬川，名取川）中流～下流域を対象に解析した表層土壌化学データの鉛および砒素の濃度分布図を示す（図 3）．鉛の濃度分布は全含有量，水溶出値，塩酸溶出値ともに類似した分布傾向を示し，鮮新世の泥岩・亜炭層およびその周辺の段丘堆積物を母材とする土壌で高濃度の分布を示した．これに対し，砒素は全含有量と溶出値の分布が各々異なる傾向を示した．全含有量として高い値を示したのは下流に位置する現世の河床堆積物を母材とする土壌であるが，水溶出値の分布は河川中～下流域にかけて広範囲にやや溶出値の高い土壌が分布している．水溶出値のみ高い値を示す土壌には，河川を媒体としてヒ素が２次的に土壌へと付加された可能性が考えられ，河川流域の特

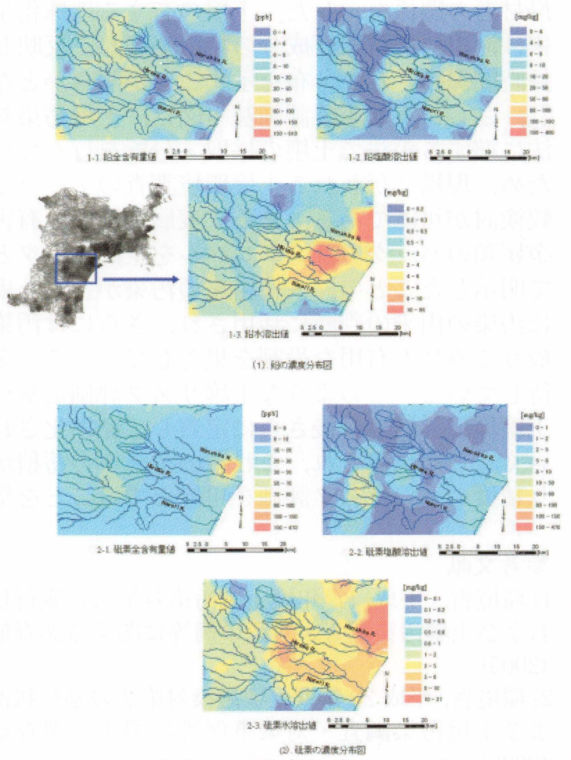


図３．鉛および砒素の濃度分布図　(1) 鉛　(2) 砒素

性が土壌中重金属の濃度情報に現われていることを示している．一方，塩酸溶出値の比較的高い土壌は名取川中流域の鮮新世の段丘堆積物を母材とする地帯で検出されており，これも水溶出値の分布とは異なる傾向を示している．相対的に高い水溶出値を示した河川中流から下流域の地帯では土壌からの鉄溶出量も高いのに対し，塩酸溶出値の高い土壌では鉄溶出量が少なく，ヒ素の溶出を緩和する鉄成分の欠落が酸性環境下でのヒ素出を助長している可能性が考えられた．

このように，土壌化学組成は周辺河川の影響や母材となった岩石の化学情報を反映しており，濃度分布図を作成することでよりその特性を判断しやすくできる．今回のデータベース整備では，土壌区分（土壌種）と河川流域を参考にデータの採取位置を決定している．土壌種の区分は土壌の生成環境条件を反映しており，同じ流域の土壌でも土壌種によって重金属類の含有量に特徴が現れている．例えば図３に示す流域では砒素が黒ボク土壌，泥炭土壌といった土壌中有機物や炭質成分の多い土壌に多く含有され，その水溶出値は河川流域周辺に顕著に分布するグライ土壌や灰色低地土壌で高い傾向を示した．それに対して鉛と銅は赤黄色土壌での平均含有量が高く，同土壌種からの水溶出値も高い．このように重金属類の含有量および水溶出値は土壌種ごとに特徴を有し，どの土壌種で特定の重金属類を保持もしくは再溶出させやすいか傾向を示している．

5. まとめ

本稿はわが国の表層土壌データ整備の遅延，表層土壌の評価手法，土壌化学成分と河川堆積物，母材との関係を示した．土壌の有する地球化学情報は河川や母材岩石成分の特徴を著しく反映し，長時間保持された分布を示すことが明らかとなった．さらに表層土壌評価基本図は，土壌汚染対策法に準ずる手法で土壌の採取・分析を行っているため，現場で行われる土壌環境調査のデータと比較検討が可能である．また，表層土壌中の有害重金属類のバックグランドレベルを空間データとして明示したことで，人為由来の汚染が生じた場合に汚染の由来の判断に活用され，さらには汚染の絞りこみにも有用な役割を果たしていくことを期待している．このような土壌リスク評価に基づく土壌環境評価は今後さらに定着し，標準化されていくことが予想され，これらのデータの蓄積がより精度の高いリスク評価を可能とすることを望む．

参考文献

1) 環境省，平成 17 年度土壌汚染対策法の施行状況および土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果 (2005)

2) 環境省，平成 20 年度土壌汚染対策法の施行状況および土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果 (2008)

3) Webb, J.S., Tornton, I., Tompson, M., Howarth, R.J. and Lowenstein, P.L., The wolfson geochemical atlas of England and Wales. Clarendon Press, Oxford, 69p, (1978)

4) Fauth H., Hindel, R., Siewers, U. and Zinner, J., Geochemisher Atlas Bundesrepublik Deutschland. Bundesansalt fur Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 79p, (1985)

5) Lis J. and Pasiecana, A. Geochemical atlas of Poland. Polish Geochemical Institute, 125p, (1995)

6) 今井　登・寺島　滋・太田充恒・御子柴真澄・岡井貴司・立花好子・富樫茂子・松久幸敬・金井豊・上岡　晃．日本の地球化学図．産総研地質調査総合センター，210p. (2004)

7) Carranza, E.J.M. Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geochemical landscapes Geochemistry: Exploration Environmental analysis, 10(2) 171-187, (2010)

8) Koljonen, T. The geochemical atlas of Finland, Part2: Till, Geochemical Survey of Finland, 218p, (1992)

9) 丸茂克美・竹内美緒・江橋俊臣・楡井　久，土壌・地質汚染評価基本図「5 万分の 1 姉崎」．産総研地質調査総合センター，CD-ROM. (2003)

10) 丸茂克美・根本尚大・氏家　亨・江橋俊臣・小野木有佳・山田亮一・吉田武義．土壌・地質汚染評価基本図「5 万分の 1 仙台地域」．産総研地質調査総合センター，CD-ROM. (2006)

11) Cicchella, B. De Vivo, A. Lima, S. Albanese and L. Fedele, Urban geochemical mapping in the Campanina region. Geochemistry: Exploration Environment analysis, 8(1), 19-29, (2008)

12) Yamasaki S., Takeda A., Nanzyo M., Taniyama I. and Nakai M., Background levels of trace and ultra-trace elements in soils of Japan. Soil. Sci. Plant. Nutr., 47, 755-765. (2001)

13) 東北大学環境科学研究科，GENIUS (Geosphere Enviromental Informatic Universal system), DVD, (2008)

14) USEPA, Health effects assessment. In: Office of Emergency and Remedial Response. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. (1989)

15) WHO, Guideline for Drinking-Water Quality, second ed. (1996)

16) 原　淳子・川辺　能成・杉田　創・丸茂　克美・駒井　武，土壌中重金属情報の整備とリスク評価．資源素材学会講演要旨集，7. (2007)

17) 原 淳子・川辺 能成・駒井 武・垣原康之・丸茂克美表層土壌におよぼす鉱床由来重金属の影響およびその起源解析，土壌汚染と地圏環境インフォマティクス 2008 講演要旨集，101-105. (2008)

地下水に関する基盤情報　－水文環境図のねらいと今後の展望－

Basic information for Groundwater －The aim of Water Environment Map and the prospects－

地下水研究グループ：　町田　功
Groundwater Research Group：Isao Machida
Phone: 029-861-3736, e-mail: i-machida@aist.go.jp

1．はじめに

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

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

また，近年は少雨年と多雨年の変動幅が次第に増加し，渇水年の年降水量が減少傾向にあるのみならず，年最大連続無降雨日数（降水のない日が連続する最も長い期間）も長くなる傾向が認められている．こうした現象によりダム等の水資源開発施設が計画された当時の開発水量を安定して供給できないなど，水供給の利水安全度（実力）が低下している．そのため，河川水と地下水の総合的な利用方法を考えることが重要な検討課題となっている．

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

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

2．地下水関連図幅と水文環境図

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

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

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

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

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

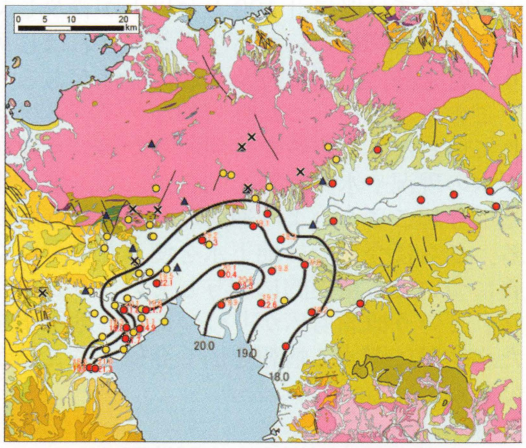


図 1　水文環境図 No.5「筑紫平野」（内田ほか，2007）[9]
標高－50m における等水温分布．地下水涵養域である山地周辺では 18℃以下であるのに対し，流出域の平野中央部では 20℃以上となっている．

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

3．水文環境図の編集指針

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

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

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

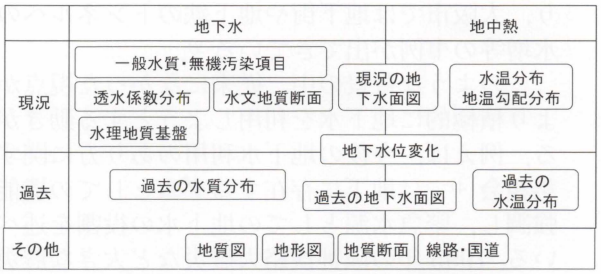


図 2　水文環境図の中心的な編集項目

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

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

4．水文環境図 No.6「山形盆地」[12]のねらい

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

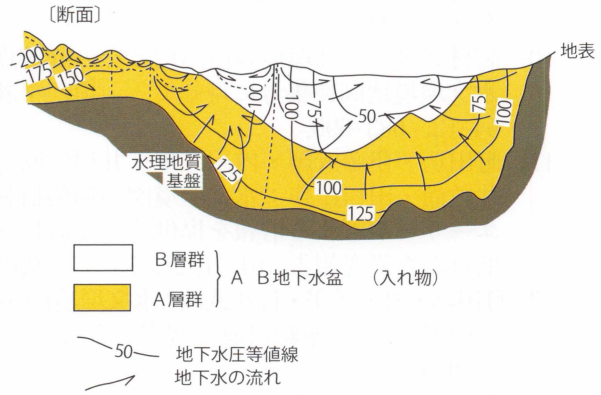


図 3　地下水盆のイメージ図
（柴崎，2004[13] を一部修正）

従来，山形盆地の地下水盆は第四系からなり，水理地質基盤は第三系からなると考えられてきたが [14]，その根拠は明らかではなかった．そこで，山形盆地 No.6 では地下水の水質・同位体に関する詳細な調査を実施し，その特性や地下水年代を推定することにより流動性の判断を試みた．このように図幅作成に研究の要素を取り入れることは，研究者が直接現地調査に携わる地質調査総合センターの強みである．実際の作業としては，個人所有の浅井戸，農業用井戸，工業用井戸だけでなく，温泉水の調査を実施し，各種のイオン濃度や酸素・水素安定同位体比に加え，必要に応じてトリチウム（水素放射性同位体比）や ^{14}C（炭素放射性同位体比）を分析した．

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

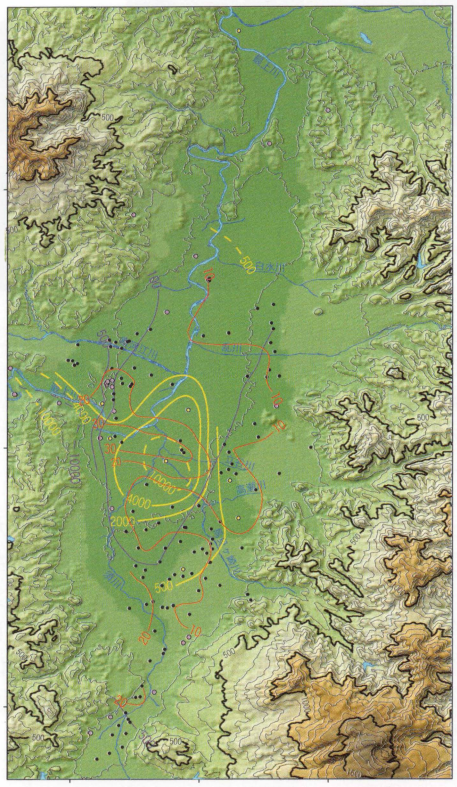


図 4　山形盆地における地下水中の Cl 濃度．地下水および温泉の現地調査結果に既存データを加えた．第四系内での濃度コンターは赤色，第三系浅層の地下水（400m 以浅）は紫色，第三系深層の地下水（400m 以深）は黄色で示されている．第三系深層では盆地全域にて Cl 濃度が高い．これらの地下水には Na も多く含まれており，化石水などと呼ばれている．第三系浅層では Cl 濃度が高く，地下水が非流動性になりつつあることが示されている．

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

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

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

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

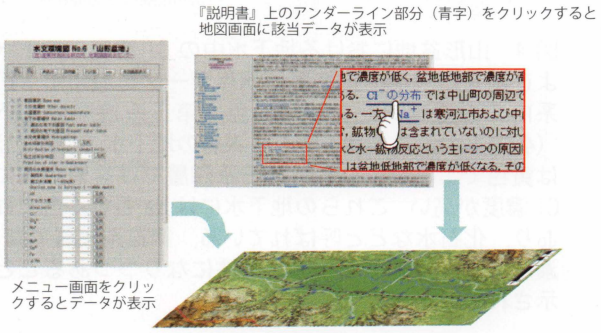


図 5　説明書と図面のリンク強化

5．さらなる発展に向けて

前章までに述べてきたように，水文環境図では幾つかの試みをおこなっている．現在では「石狩平野」および「熊本平野」の編集をおこなっているが，今後は水文環境図 No.6「山形盆地」では対応しきれなかった，様々な改良を加えていく予定である．例えば地下水盆の形状，広域地下水流動，地下水位，地下水流速情報に関しては，地下水研究グループが平成 19 年度より実施中の地下水賦存量調査結果を積極的に利用する予定である．この調査では日本全国のボーリング柱状図を収集，解析することにより，平野や盆地スケールでの地下地質構造を明らかにし，さらに地下水流動シミュレーションをおこなっている．これらのデータを加えることによって，地域の水文地質情報をより詳細に検討できると考えられる．

参考文献

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

地下水研究グループの紹介

Introduction of the Groundwater Research Group

研究グループ長：丸井敦尚
Leader, Groundwater Research Group: Atsunao Marui
Phone 029-861-3684, e-mail: marui.01@aist.go.jp

1．グループの研究目的

日本人の生活を支える地下水資源開発とその環境保護のため、当研究グループでは以下の目標を掲げています：

○日本列島の地下水資源や水環境情報を見える化した水文環境図を作成！

○全国の工業用水を再開発し合理的な利用を推進するためのプロジェクト！

○地中熱を効果的に利用した新しい地下水の利用法で省エネ＆地球温暖化対策！

○二酸化炭素を削減するための研究（地層処分研究や地中貯留研究）で社会貢献！

○技術移転を含めた東・東南アジア各国とのプロジェクト研究の推進！

○沿岸域の活断層評価など多角的な基礎研究！

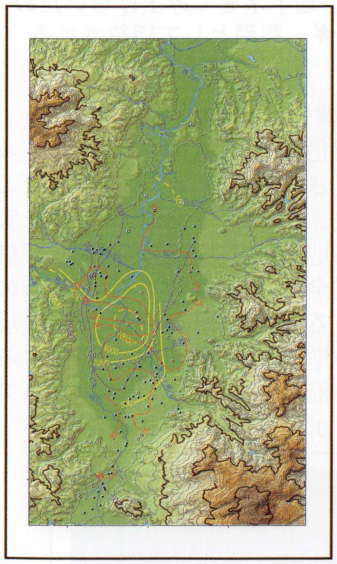
2．主な研究項目の内容

2.1. 水文環境図/工業用地下水の研究

地下水資源の有効利用と地下水環境の保護とは両立することが難しいけれども解決しなければならない課題です。場所や深度によって、あるいは人間活動の状況に合わせて多角的に地下水をとらえ、最も有効な利活用を提案しようと考えています。当研究グループでは、地下水の物理性に着目した地下水流動解析や地下水の年代測定を含めた化学的な解析を使って、地域の地下水を科学的に理解することに努めています。そのため、当研究グループでは実際にフィールドに出て現場の研究をすることを重視しています。

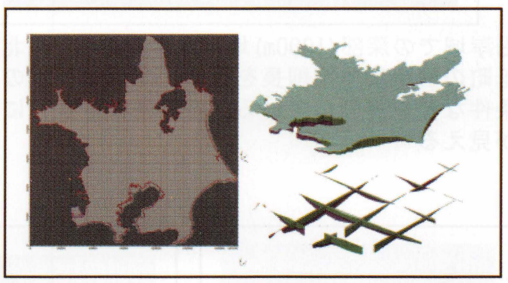
この代表的な研究が水文環境図の作成であったり、工業用地下水資源の開発です。水文環境図はこれまでの水理地質図を踏襲して、現代の社会生活に適した、より有益な３Ｄ環境情報を提供することを目指しています。具体的には、地下水の流動情報・地球化学情報・水温等物理定数情報・地域の特有情報などを盛り込んでいます。

工業用地下水資源の(再)開発プロジェクトは、



水文環境図の一例：山形盆地における地下水中の Cl 濃度．地下水および温泉の現地調査結果に既存データを加えた．第四系内での濃度コンターは赤色，第三系浅層の地下水（400m 以浅）は紫色，第三系深層の地下水（400m 以深）は黄色で示されている．第三系深層では盆地全域にて Cl 濃度が高い．これらの地下水には Na も多く含まれており，化石水などと呼ばれている．

これまで地質調査所時代から続けてきた地下水適正利用調査を発展させ、理事長枠分野融合プロジェクトとして発足しました。全国の地下水資源の量を再評価するとともに、使用できる資源量(流動性地下水の量)を正確に把握し、我が国の工業を下支えするための研究です。



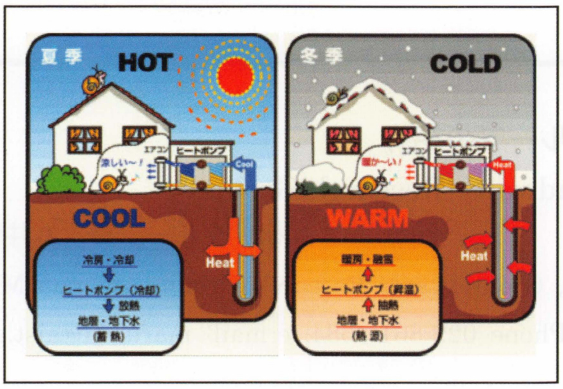
工業用地下水資源の再開発（関東平野の帯水層分布の例）：全国の地下水盆の水文データを有しており、地下水の賦存量と流動量をすでに計算している。工業用水として再利用できる地下水資源をピンポイントで評価する。

2.2. 地球温暖化対策としての地中熱利用研究

地中熱を利用した冷暖房は、再生可能エネルギーの代表であり、低炭素化社会の実現に向けて最も期待されるエネルギーの一つである。

地下水研究グループでは、地下水流動の観点

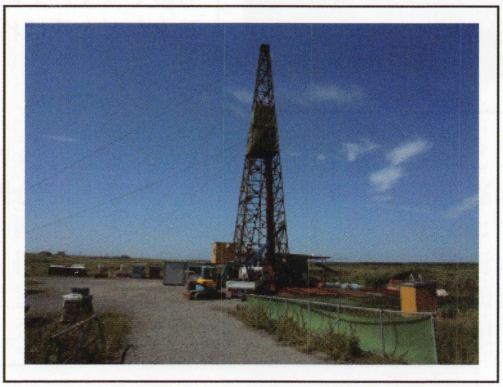
から効率のよい地中熱利用の方法を提案し、地球温暖化対策を推進している。



地中熱利用の概念図：地下水をくみ上げないため環境調和型のエネルギー利用として期待される

2.3. 二酸化炭素削減のための地層処分研究

原子力発電は二酸化炭素削減のためのエネルギーとして近年見直されつつある。しかし、この廃棄物の処理が大きな問題であり、これを実現するために、深部地下水環境の安定性を評価して、無理のない安全な地層処分を行うための基礎研究を進めている。この研究では、塩淡境界など沿岸域特有の地下水流動環境を解明することや、全国規模の沿岸域帯水層データベースを構築することなどが大きな課題である。



沿岸域での深部(1000m)地下水調査の様子：北海道幌延町の沿岸部で掘削長を行い、深部地下水の再流動条件などを評価している。好天時には遠くに利尻島が見える

3．グループの研究体制

丸井　敦尚（グループ長）
内田　洋平（主任研究員）
宮越　昭暢（研究員）
町田　功（研究員）
井川　怜欧（研究員）
越谷　賢（研究員）
吉岡　真弓（産総研特別研究員）
小原　直樹（共同研究員）
田中　基樹（産総研特別研究員，PD）
チェックベレー（産総研特別研究員，PD）
樽沢　春菜（テクニカルスタッフ）
中山　京子（テクニカルスタッフ）
潮田　みどり（テクニカルスタッフ）
宮崎　圭子（テクニカルスタッフ）
楠瀬　勤一郎（客員研究員）
伊藤　成輝（共同研究員）
細谷　真一（共同研究員）
安藤　誠（共同研究員）
田中　正（客員研究員）
三宅　紀治（客員研究員）
高村　弘毅（客員研究員）
新藤　静夫（客員研究員）

4．最近の主な研究成果の例

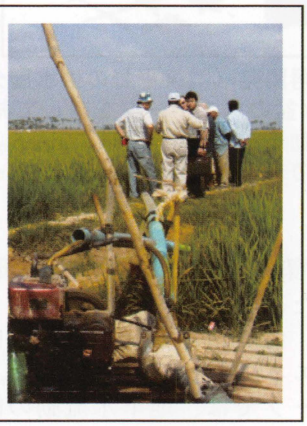
町田功・内田洋平・石井武政(2010)：水文環境図 No.6 山形盆地、地質調査総合センター

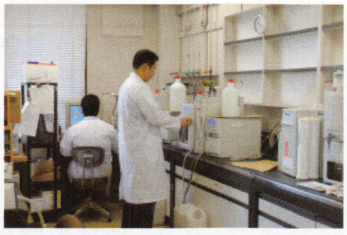
Machida M, Suzuki Y, Takeuchi (2010): The 14C age of confined groundwater in a sandy-muddy Pleistocene, Selected papers on Hydrogeology, 16, 67-78.

吉岡真弓・登坂博行(2010)：高透水性多孔質媒体中の非ダルシー流れに関する考察、地下水学会誌 52(3)、275-284

Ikawa, R., J. Shimada, T. Shimizu (2009): Model estimation of stemflow contribution during the rainfall-runoff process in a mountainous forested area, IAHS Publication 326, p25-33

丸井敦尚ほか(2009)：地下水のトレーサー試験、技法堂出版、東京、383p





(上)当グループでは水質実験などの基礎研究を重視している
(左)海外への技術移転研究の例

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：今泉博之
Leader, Geo-analysis Research Group: Hiroyuki Imaizumi
Phone: 029-861-8287, e-mail: hiroyuki.imaizumi@aist.go.jp

1．グループの概要と研究目標

市街地や産業用地において深刻な土壌・地下水汚染に係る問題が顕在化する中で，2003 年に土壌汚染対策法が施行される等，社会全体において地圏環境の適正な管理及びそれらに関連する技術開発が危急の課題となっている。地圏環境評価研究グループでは，土壌・地下水環境における汚染解析，環境影響評価技術に関する理学的，工学的な研究開発を中心に実施し，地圏環境の評価・保全を通じた安全・安心な社会の構築に貢献することを目標として掲げている（図 1）。

図 1　土壌・地下水汚染等を中心とした地圏環境評価の研究

具体的には，土壌や地下水汚染等の評価のための物理的・化学的・生物的な危険度の評定技術及びその浄化手法，地圏における物質循環機構の解明や地圏環境情報の整備，物質浄化のための特定微生物の活性最適条件の探索，等に留まらず，地圏環境の計測技術に係る基礎的な研究，ならびに地圏環境との境界において人の健康等に関わる課題として音環境の予測・影響評価手法に係る研究等も幅広く実施している。

これらの研究を通じて得られた知見は原著論文等にまとめ発表するだけでなく，これら基礎的な研究の成果等を発展させ，有害元素による土壌・地下水汚染の未然防止に係る試験法及び長期環境安全性の評価，多孔質媒体における混相流数値解析手法の開発，ならびに音環境影響評価に資する計測システムの開発などに展開し，社会ニーズやその動向にフィットした成果を発信し社会への普及を図っている。

2．グループの研究資源

1）グループ員

・今泉博之（リーダ），成田　孝，高橋保盛，杉田　創，井本由香利，竹内美緒（地圏微生物研究グループと兼務）
・山岸昌夫，小川桂子，津村美幸（以上，テクニカルスタッフ）
・吉川美穂，中村英博（以上，産学官制度来所者）

2）研究課題

・運営費交付金「地圏環境評価の研究（地質）」
・運営費交付金「地圏環境評価の研究（エネルギ）」
・運営費交付金「ブラウン管ガラスに含まれる金属元素の除去・回収技術開発」（部門内競争グラント）
・委託費「電子機器用ガラス廃棄時における有害元素の長期浸出評価」（環境省）
・委託費「公共用水域・地下水中窒素を低減するための畜産廃水からの窒素除去技術の開発」（環境省）
・委託費「健康リスク解析のための騒音曝露の長期観測データ収集システムの開発と住民参加型データベース構築手法の研究」（環境省）

3．研究の進捗状況

1）地圏環境評価の研究（地質・エネルギー）

発光バクテリアを用いた石油系炭化水素の毒性評価手法を開発している。汚染物質としてガソリン，灯油，軽油，ベンゼン，トルエン，二硫化炭素及び n-ヘキサンをターゲットとし，抽出溶媒としてメタノールを用いることで，単独では検出性が低かった灯油，軽油，n-ヘキサンも発光バクテリアによって十分検出が可能となった。100vol%及び 1vol%以下の条件における毒性の強さは，ガソリン＞灯油＞軽油となり，炭素数が小さい炭化水素を多く含む鉱油ほど発光バクテリアに及ぼす毒性が高いことを明らかにした。一方 1vol%以下の毒性の強さは，n-ヘキサン＞トルエン＞二硫化炭素＞ベンゼンとなり，メタノールを溶媒にすることでオクタノール/水分配係数が高い物質であ

っても塩溶液への溶解が容易になり，発光バクテリアに吸収されやすくなったためと考えられる。さらに，ガソリン，灯油，n-ヘキサンは 0.01～1vol%の範囲で，軽油，ベンゼン，トルエン，二硫化炭素は0.1～1vol%の範囲で，おおよその定量評価が可能となった。

さらに，地圏環境評価に係る別の視点からの研究として，新型応力変化測定装置（特定成分）の応答性の検証と多成分測定への拡張を継続して検討している。

2）電子機器用ガラス廃棄時における有害元素の長期浸出評価

地上デジタル放送への完全移行が2011年7月に迫る中，ブラウン管などの電子機器等に使用されるガラスからの浸出や拡散に関する基礎データを提供し，土壌環境における廃棄及び再利用におけるガラスからの有害元素の浸出特性に関する実験及び解析から，標準試験法及び長期環境安全性の評価に必要な技術的な提言を取りまとめている。CRT ガラスが環境中で接触する可能性のある酸性雨や一部の土壌間隙水等の酸性溶液やセメント浸出水等のアルカリ性溶液の影響を把握するために，幅広い pH レンジ（pH3～12）の溶媒共存下で，粒径1～2㎜の CRT ガラスを用いて各4週間のバッチ式振とう試験を行ない，連続通水試験（上向流通水カラム試験）を実施して各元素の溶出挙動について詳細に解析した。

バッチ式振とう試験では，初期 pH の値に関わらず，4週間では CRT ガラスからの溶媒への溶出は完全には平衡に達しない，すべての実験で溶出液中の Pb 濃度は環境基準値を大きく超過する，溶出液中の Pb 濃度は pH が 10 で最低値を取り 11 以上あるいは 8 より低くなると高くなる傾向が見られる，特に pH12 以上または pH4 以下で急激に上昇する，等を明らかにした。

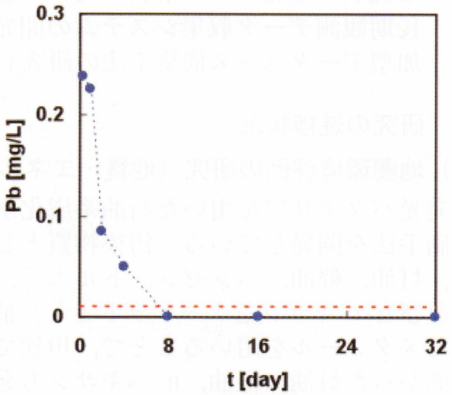


図2　カラム排出液中の Pb 濃度（点線は土壌環境基準値:0.01mg/L）

上向流通水カラム試験では，通水初期のカラム排出液から土壌環境基準値（指針値）を超える濃度の Pb および Sb が検出されたが，通水を継続すると濃度は減少し，同時に pH はアルカリ性から中性に戻り電気伝導度も低下した。ガラス主成分のケイ素の溶出に伴って有害元素も溶出しカラム外へ排出されるが，Pb は 16 日以降，ケイ素が溶出しているにも関わらず検出されなくなった（図2）。バッチ試験とカラム試験の結果を比較すると，ガラス単位重量あたりの各元素の溶出量は試験によって異なり，Pb についてはバッチ試験，Sb についてはカラム試験がそれぞれ安全側にたった評価となることを示した。

3）ブラウン管ガラスに含まれる金属元素の除去・回収技術開発

ブラウン管ガラスの大量廃棄に伴う土壌・地下水等の汚染防止と有用金属資源のリサイクルに係る技術の両者に寄与するために，その基礎パラメータであるガラス含有元素の溶出速度と溶媒移動速度について詳細にデータを蓄積し，それによって廃ガラスから有害元素やレアメタル等を効率よく除去回収できる手法の開発を目指している。

4）健康リスク解析のための騒音曝露の長期観測データ収集システムの開発と住民参加型データベース構築手法の研究

個別対策による騒音低減効果という視点に加え，都市住民が大きな騒音に長時間曝露されることを余儀なくされ，騒音問題に生活妨害や心理的影響だけではなく健康への影響という新たな視点も不可欠という現状を鑑み，住民の行動パターンと騒音曝露量を長期間にわたって取得し，それをデータベースとして収集・蓄積するためのシステムを開発している。携帯型情報通信端末を基幹とした住民行動パターンと騒音観測データの自律型収集システムの実機を製作し，GIS を用いた騒音曝露量予測システムも同時に検討している。

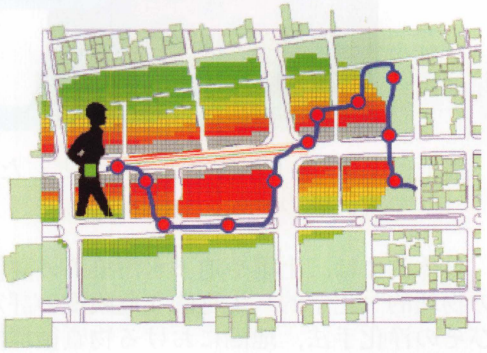


図3　GIS 上での住民行動パターンと騒音マップのオーバーレイ

4．今後の方針

当研究グループは，各グループ員の研究手法が地圏環境に対する物理的・化学的・生物的なアプローチと多岐にわたる中で，個々の研究ポテンシャルを最大限に発揮し，それぞれの研究業務を着実に遂行することを基本としながら，地圏環境の評価及び保全に関する研究ならびにそれに係る技術開発を実施し，安全・安心な社会の構築に資する。

CO_2 地中貯留研究グループの紹介

Introduction to CO_2 Geological Storage Research Group

CO_2 地中貯留研究グループ長：中尾 信典
Leader, CO_2 Geological Storage Research Group: Shinsuke Nakao
Phone: 029-861-3955, e-mail: sh-nakao@aist.go.jp

1. グループの研究目的

当研究グループでは，CO_2 地中貯留の実用化に向けて，1）CO_2 がどのように帯水層内に貯留されるか（貯留メカニズムの解明），2）CO_2 の挙動をどのように監視・予測していくか（モニタリング・モデリング技術），3）どのように安全性を評価し確保していくか（安全性評価，影響評価），という 3 つの問題意識に基づいた研究を推進している。また，これらの研究を地圏環境の利用と保全，資源の安定供給という観点への研究・技術開発にも応用することを目指している。

2010 年度からの産総研第 3 期においても CO_2 地中貯留は重点課題に指定されており，中期計画として，“CO_2 地中貯留において，CO_2 の安全かつ長期間にわたる貯留を保証するための技術を開発し，早期の実用化に寄与すること”を目標としている。

2. グループの研究資源

1） グループメンバー

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

2） 予算

○運営費交付金「CO_2 地中貯留の研究」，「沿岸域海底下 CO_2 地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」他
○経済産業省受託研究「二酸化炭素挙動予測手法開発事業（低コストなモニタリング技術及び断層モデリング手法の開発）」
○地球環境産業技術研究機構受託研究「CCS モニタリング技術高度化等の研究」
○共同研究費等。

3. 平成 22 年度上期までの進捗状況

ここでは，当グループメンバーが実施している CO_2 地中貯留研究の主な進捗状況を紹介する。

1） サイスミック・データによるガス飽和度の推定

室内注入実験データの解析を行い，弾性波探査による CO_2 注入後挙動モニタリングの基礎となる多孔質弾性論モデルの高度化を進めている。図 1 は，ガス注入後弾性波の分散の影響を受け，弾性波波形が大きく変化したことを示す。ピークのマッチングにより得た速度低下は初動のマッチングにより得たものよりも大きいことが分かる。現場データの場合 P 波初動が不明瞭であるため，一般的に波のピークを追跡して速度の変化を求める。その結果を用いてガス飽和度を推測する場合，過大評価しないよう分散を考慮したモデルを利用する必要がある。室内実験では現場より良いデータが得られるため，現場データ解析に適用できるモデルの構築が可能であり，更なる研究を進める予定である。

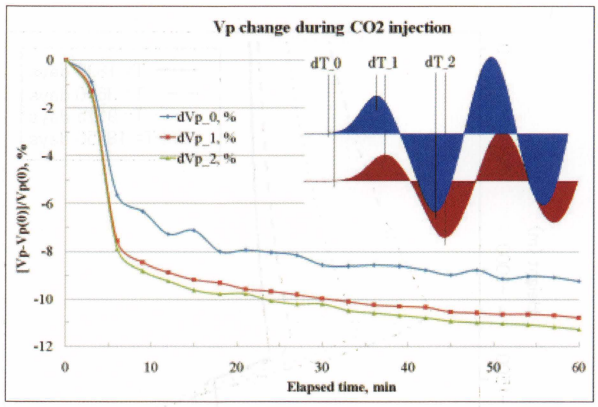


図 1：CO_2 注入実験において P 波速度変化を求めた例。初動と最初のピークのマッチによる P 波走時差が計算されるが，分散の影響でピークのマッチングにより得た速度低下は初動のマッチングにより得たものよりも大きい。

2) 重力モニタリング技術

重力モニタリングは質量分布という反射法地震探査と別の側面から CO_2 の地中貯留状況を見られるので，反射法を補完するモニタリング手法と考えられる。反射法地震探査のように地中に注入した CO_2 の貯留領域の形を細かく描き出すことはできないが，重力では貯留域と測定点の間の物質で遮蔽されることなく質量分布の積分効果が測定される。分解能の点では鈍いが堅実なモニタリング手法であり，経済性の面でも，反射法地震探査に比べ十分安価な手法といえる。

CO_2 生産源に近い東京湾岸において既存データに基づいて地下構造を数値モデル化し，CO_2 地中貯留の数値シミュレーションにより適用性を評価した。年間 1000 万トンの CO_2 を 1400m の深度を中心に注入し，計測井が注入井とほぼ同位置の場合の坑内重力計で計測される重力変化を計算した（図 2）。注入深度を境に重力変化の極性が逆転しており，注入深度では重力変化量はゼロに近い。重力は引力の鉛直成分なので大きい質量変化があっても真横には影響が出ないためである。それでも通常，重力計測が行われる地表に比べれば，信号源に近い効果で地下での信号レベルは大きい。従って信号レベルが大きい坑内で計測を行うことは，より明確に地下の状態を把握できることになる。また，地上での測定では深度方向の状態変化に対して鈍感になるが，坑内重力計で計測される深度方向の変化のコントラストは明瞭であるため，CO_2 地中貯留のモニタリング手法として極めて魅力的である。他にも坑内重力計を想定したシミュレーション評価例は蓄積されており，また利用可能な坑内重力計の種類も増え，今や実際に坑内重力計測を行う段階にきている。

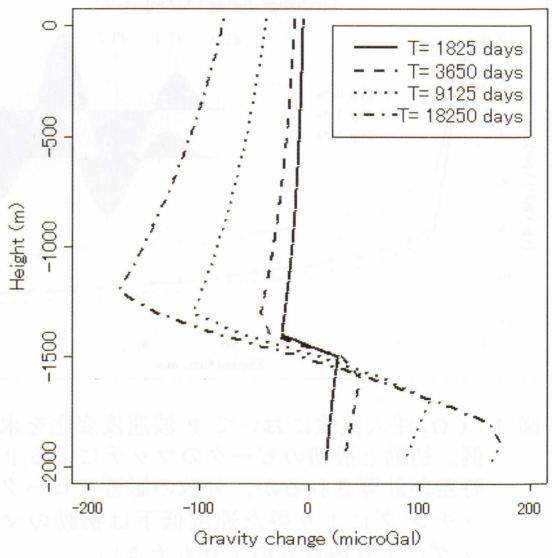


図 2：坑内重力測定を行う計測井が注入井とほぼ同位置の場合の計算結果例。

3) モニタリング技術の現場実験

米国 SWP (Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration)の実施する Aneth Oil Field における大規模 CO_2 地中貯留実験は，年間 15 万 ton 以上の CO_2 を 3 年以上にわたって注入する陸域での大規模 CO_2 地中貯留実験である。自然電位モニタリングの経験蓄積・改良を図るとともに，米国の CCS 研究開発に関する情報収集を目的として，2007 年 11 月から自然電位モニタリングを継続してきたが，SWP による PhaseII 実験の終了と PhaseIII への移行に伴い，現地測定を終了した。およそ 3 年間にわたる長期無人測定に成功し，取得したデータには，注入開始時に圧入した地下の CO_2 に起因すると考えられる注入井周辺の電位上昇が認められた。それ以外では地表付近にソースを持つと考えられるイベントが認められた(図 3)。なお，本研究は米国ロスアラモス国立研と産総研との MOU に基づき実施しており，PhaseIII への参加は経産省からの受託研究として実施する。

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

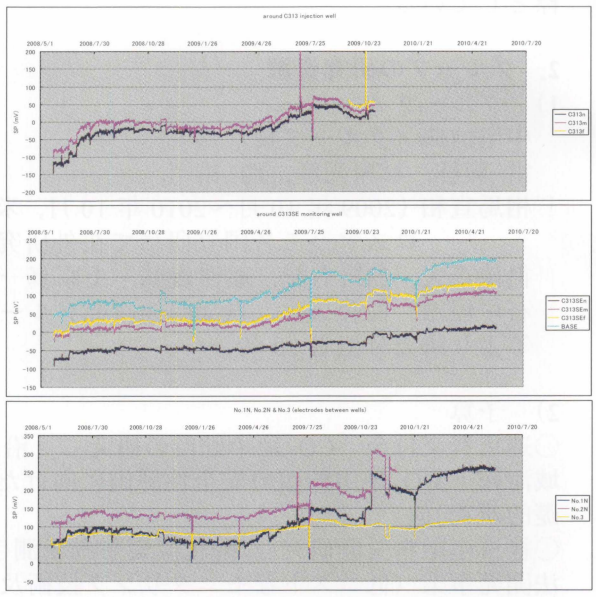


図 3：2008 年 5 月から 2010 年 5 月までの Aneth テト・サイトにおける自然電位変化。C313 圧入井（上）では，注入開始時に圧入した地下の CO_2 に起因すると考えられる電位上昇が認められる。C313SE モニタ井周辺（中）及び坑井間の電極（下）に見られる電位変化は，地表付近にソースを持つと考えられるイベント。

4）Aneth サイトの微小地震の再解析

ロスアラモス国立研究所(LANL)が 1 観測井のみで観測した Aneth サイトの CO_2 圧入時の微小地震について，特に震源位置決定深度の曖昧さを低減することを目的に再解析を行った。波形初動部の詳細観察とレイトレーシングの組み合わせによるフォワードモデリング的な解析を行い，取得微小地震が CO_2 に関係するものとそれ以外に分けられることを推察した（図 4）。さらに，低速度岩塩層前後で多重反射が発生していると仮定して，それを利用した高 SN イベントの位置決定（マスターロケーション）と低 SN イベントの相対位置決定の組み合わせによる全体の震源分布の評価手法を検討した（図 5）。その結果，従来法よりも Aneth サイトの CO_2 および廃塩水の注入深度に近い深度に震源位置は移動し，より面構造的な震源分布が得られるようになった。検討手法により 1 観測井だけでも信頼性のある震源位置が得られることが分かった。

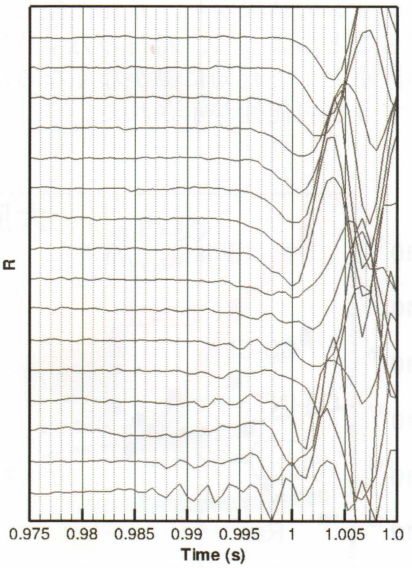


図 4： Aneth 微小地震初動部の拡大例。R 成分，下から坑井内アレイのセンサ 1〜18 番目。相互相関による初動は 1.005 付近のピークを追っているが，拡大すると，実際には屈折の影響がアレイ下部に現れている。

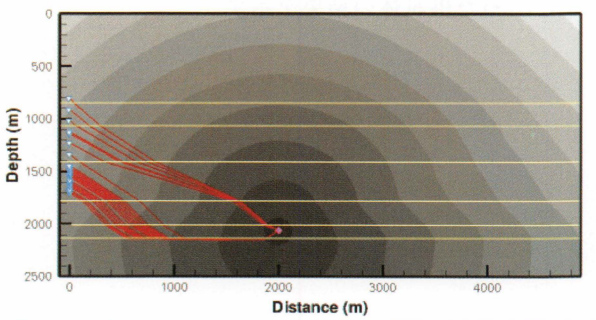


図 5：レイトレーシングモデリング例。震源位置深度を岩塩層(第 5 層)の下と仮定し，震央位置が 2000m の場合。Aneth サイトの南側に発生した微小地震と調和的である。

5） CO_2 長期挙動シミュレーション

地中に圧入された CO_2 とそれに伴う地層の長期挙動シミュレーションを行っている。地中貯留においてシール層の浸透率と毛管圧は共に CO_2 プルームの遮蔽性に大きな影響を示すが，そのメカニズムにより地層内の圧力上昇に関しては異なる効果が働く。シール層の浸透率が低い場合地層水とプルームの双方を遮蔽するため著しい地層内の圧力上昇を招くが，高毛管圧のシールはプルームのみを遮蔽するため，地層内の圧力上昇に関しては低毛管圧のシール層と比較して大きな違いを示さない（図 6）。CO_2 の圧入に伴う地層内の圧力変化の範囲はプルームの延伸範囲より更に広く，プルーム自体が貯留層内に留まる場合においても，上部塩水の浅部移行を引き起こす可能性がある（図 7）。この現象は圧入停止後の圧力緩和に伴い同じく緩和される傾向にある。

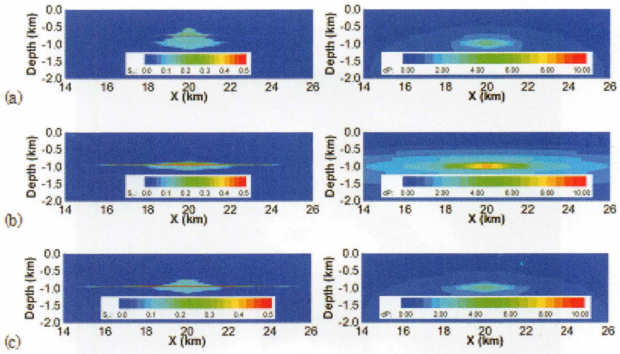


図 6：1.0Mt/yr/km×50 yrs の CO_2 圧入を行った時のシール層の鉛直浸透率と毛管圧（Sw=0.8）が(a) 1 md/62 kPa, (b) 0.1 md/62 kPa, (c) 1 md/500 kPa の各ケースにおける（左）CO_2 プルーム分布（圧入停止後 1000 年経過時）と（右）圧力変化（圧入停止時）の違い。

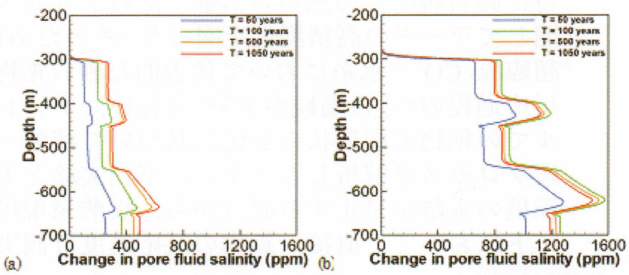


図 7：図 6(b) 0.1 md/62 kPa，(c) 1 md/500 kPa の各ケースにおける間隙水の塩分変化の鉛直プロファイル。

6）砂泥互層人工試料によるシール圧測定

本研究では，CO_2 地中貯留におけるキャップロックのシール性能評価に関連して，地中貯留の環境条件下（10 MPa，40°C）において，超臨界 CO_2 に対するスレッショルド圧の測定を行った（図 8）。本研究の目的は，岩石のスレッショルド圧の変動に及ぼす各種因子の効果を定量的に明らかにし，キャップロックが取り得るスレッショルド圧の範囲を推定するモデルを構築することである。このために，粒径を制御したシリカビーズ焼結体試料を作製し，種々の粒径についてスレッショルド圧と浸透率の関係を求めた。その結果，均一粒径（0.2～10 μm）の焼結体のスレッショルド圧は，粒径の減少と共に増加することが確認された。また，両対数プロット上でスレッショルド圧と浸透率の間に良好な直線関係が得られたが，これは，安全性の観点から特に重要となる，均質岩石におけるスレッショルド圧の下限値に相当するものと考えられる。

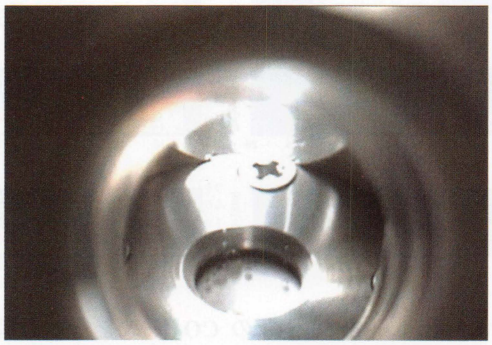


図 8：超臨界 CO_2 のブレークスルーの観察画像

7）砂岩鉱物の化学的反応プロセスの評価

本研究では，砂泥互層における CO_2 挙動に及ぼす地化学プロセスの影響を検証するために，特に砂岩層内での鉱物の溶解－沈殿プロセスに関してデータの高精度化を図った。そのために，超臨界 CO_2－水系において代表的な砂岩鉱物の反応過程の“その場観察実験”を行い，ナノレベルでの鉱物表面形状の変化に基づいて溶解－沈殿プロセスを解析した。また，室内実験と天然環境の乖離を是正する観点から，炭酸泉現場サイトにおいて，直接，鉱物の反応速度計測実験も行った。最終的に，モデル系での地化学反応シミュレーションにより，孔隙率変化に基づいた砂岩層のシール性能変化の評価までを行った。今後は，温度，pH や CO_2 濃度のみならず，種々の溶存化学種濃度の効果も踏まえて，系統的に天然での反応速度の解析を行う予定である。

8）深部条件下での新第三紀泥質岩中の亀裂透水性の推定

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

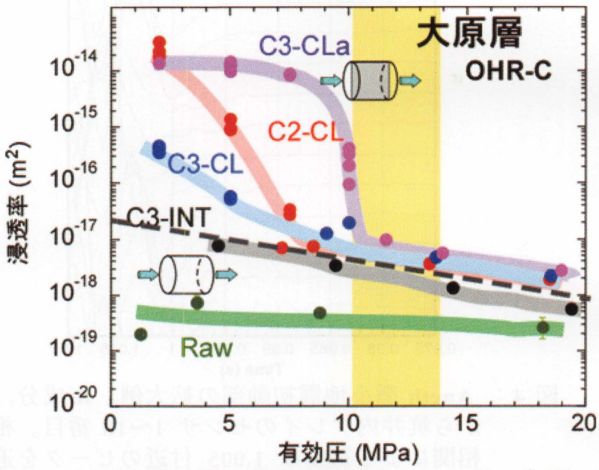


図 9：上総層大原層泥質岩を対象とした，単一亀裂の入った供試体の浸透率の有効圧依存性についての室内実験結果。C3-INT，Raw は亀裂の入っていない供試体の結果，それ以外は単一亀裂の入った供試体の結果を示す。

地圏環境システム研究グループの紹介
Introduction of the Geo-Environmental Systems Research Group

地圏環境システム研究グループ長：高倉伸一
Leader, Geo-Environmental Systems Research Group: Shinichi Takakura
e-mail: takakura-s@aist.go.jp

1．グループの研究目標

地圏環境システム研究グループでは，環境に調和した地圏の開発・利用を図るため，岩盤応力測定や岩石コア実験による地下構造の評価技術，物理探査を利用した非破壊モニタリング技術，数値シミュレーションによる地下環境のモデリング技術などの基盤研究を進めている．また，CO_2地中貯留研究や放射性廃棄物地層処分研究などへの適用研究を行っている．当研究グループ員が長年にわたり研究を進めてきた各種技術は，浅部から深部に至る地圏環境の解明，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にかかげ，平成19年7月に新しく組織された．メンバーは，地球物理学，岩石力学，掘削工学，岩盤工学の専門家からなる．物理学的実験およびフィールドワークの手法を用いて，環境に調和した地下の有効利用，資源開発に必要な技術開発に取り組んでいる．

研究対象は環境評価から資源探査までと多岐にわたり，予算項目は複数にまたがっている．いずれの研究においても，「環境との調和を考えた地圏の開発・利用を図ること」を基本理念としている．研究内容も基礎研究から応用研究まで幅広いが，技術的に重なる部分も多い．そこで，研究テーマを便宜的に以下の4つに分類し，個々の研究テーマの管理し，研究の効率化を図っている．

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

1)グループ員

高倉 伸一（リーダー）
及川 寧己
唐澤 廣和
竹原 孝
相馬 宣和（CO_2地中貯留RGより分担）
船津 貴弘（CO_2地中貯留RGより分担）

2)予算

文部科学省試験研究「放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究」
運営費交付金「沿岸域海底下CO_2地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」
運営費交付金「地圏環境システムの研究」
日本鉱業協会研究委託費「坑内精密電気探査技術に関する研究」（平成21年度まで）
「磁鉄鉱と硫化鉱物を含有する岩石の電気的特性に関する研究」（平成22年度から）
共同研究費「ナトリウム型ベントナイト鉱床を形成する地質環境の解明に関する研究」
等

3．平成21年度までの研究進捗状況

以下では，主な研究について平成21年度までの進捗状況の一例を紹介する．

3.1. 放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究

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

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

a) 深部岩盤空洞周り緩み域における 3 次元応力計測

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

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

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

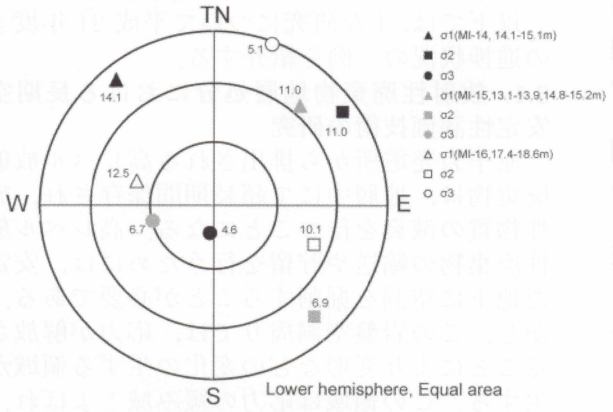


図 1　3 次元解析例（各孔奥部試料）

b) 空洞周り緩み域における岩盤長期変形挙動に関する研究

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

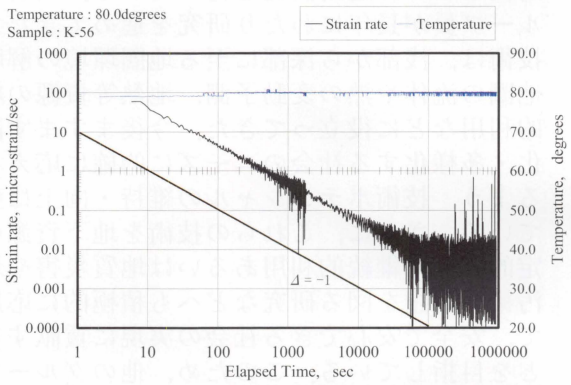


図 2　クリープひずみ速度の経時変化

3.2. 地圏環境システムの研究：坑井掘削の高効率化

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

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

図 4 に，E 点における時間と応力との関係を

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

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

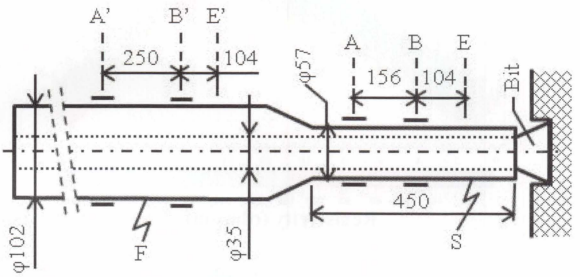


図 3　掘削ロッド 2

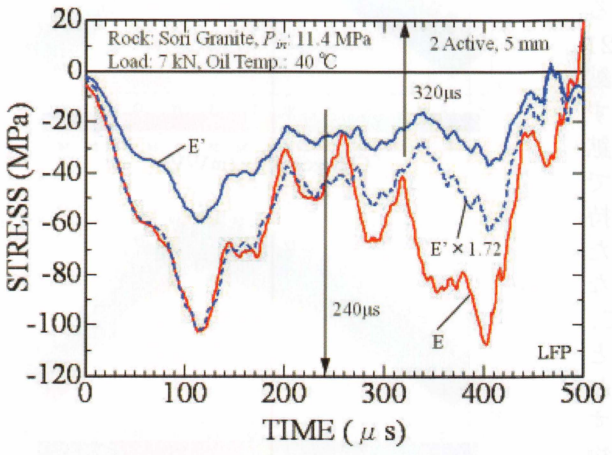


図 4　E 点と E' 点の応力波形

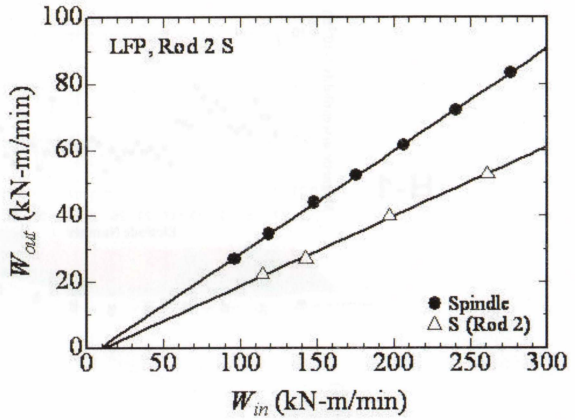


図 5　W_{in} と W_{out} との関係（ロッド 2 の S 部）

3.3. 坑内精密電気探査技術に関する研究

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

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

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

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

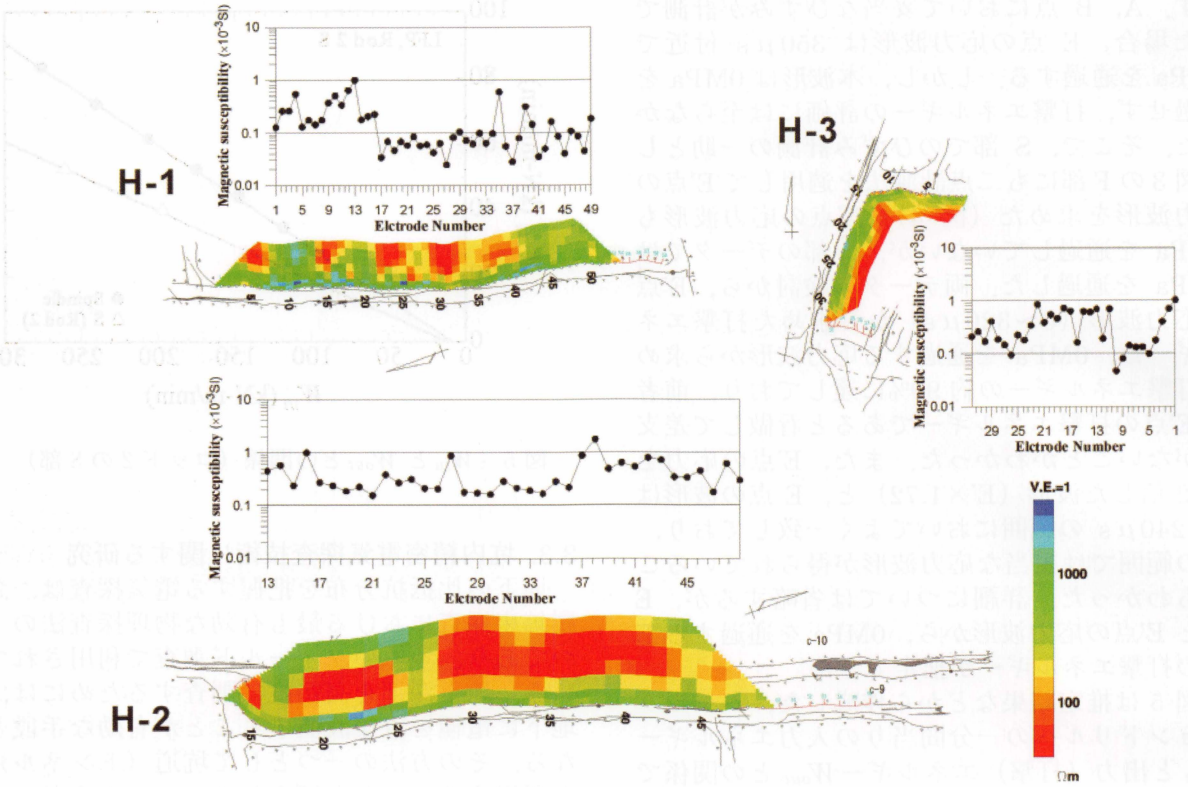


図 6　坑内比抵抗法電気探査の測線と解析比抵抗断面および帯磁率測定の結果

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

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

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

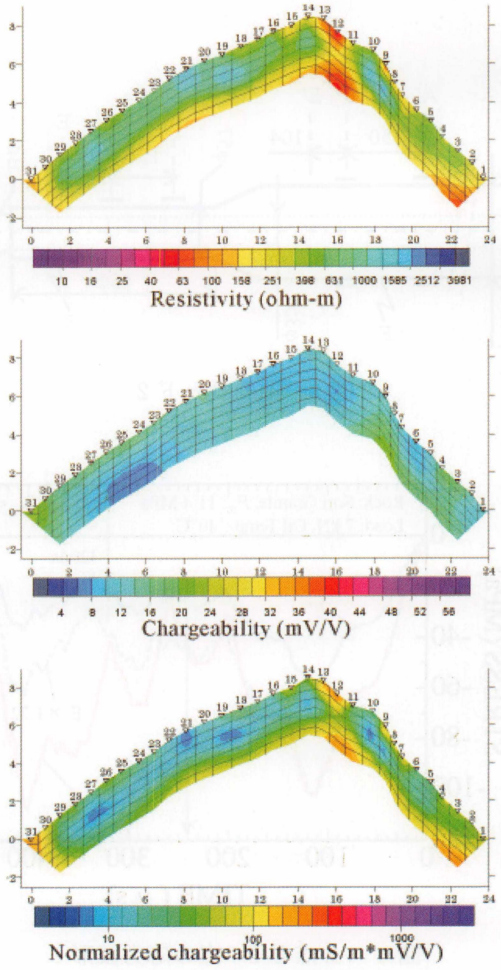


図 7　坑内 IP 法の解析結果

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

物理探査研究グループ長：内田利弘
Leader, Exploration Geophysics Research Group: Toshihiro Uchida
Phone: 029-861-3840, e-mail: uchida-toshihiro@aist.go.jp
http://unit.aist.go.jp/georesenv/explogeo/

1．グループの研究目的

本研究グループでは、放射性廃棄物地層処分、土壌・地下水汚染、CO_2 地中貯留、土木分野等の地圏環境分野における地盤・岩盤の評価やモニタリング、及び、地熱、鉱物資源等の資源分野における地質構造調査に不可欠な物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査手法の技術開発と適用研究を行う。

平成 22 年度においては、放射性廃棄物地層処分場選定における地質構造評価、土壌汚染・地下水環境・土木分野等における浅部地質環境評価、CO_2 地中貯留における物理探査モニタリング、地熱貯留層評価・地中熱利用への物理探査の適用、震源断層評価への物理探査の適用等の研究を進めるとともに、技術シーズ開拓のための基盤的研究を進める。

2．グループの概要

1) グループ員

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

2) 平成 22 年度の主な研究予算

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

3) 平成 22 年度の研究の概要

a) 地層処分場の地質構造評価

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

b) 土壌汚染評価

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

c) 浅部地質環境評価

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

d) CO_2 地中貯留のモニタリング技術

物理探査（電磁探査等）による CO_2 貯留モニタリング技術について海底電磁探査法等の数値実験による検討を行う。CO_2 のマイクロバブル注入技術およびモニタリング手法について基礎的検討を行う。

e) 地熱資源・地中熱利用における物理探査

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

f) 沿岸海域における地質・活断層調査

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

g) 物理探査技術の基盤的研究

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

3. 平成 22 年度の主な進捗状況

1) 地層処分場の地質構造評価

a) 沿岸域を対象とする物理探査技術開発

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

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

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

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

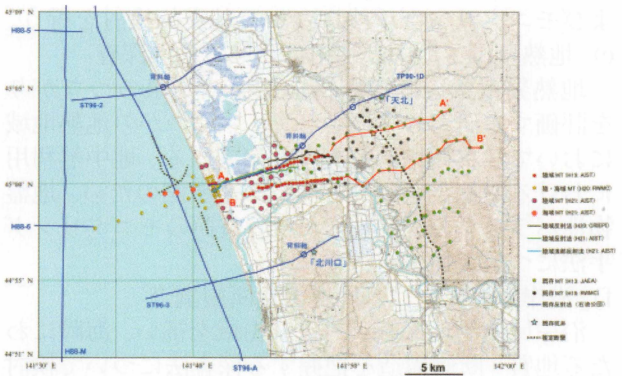


図 1：北海道幌延町の沿岸域モデルフィールドにおける平成 21 年度までの物理探査調査位置図。平成 22 年度には、海域における電磁探査調査を実施する。

b) 物理探査データ解釈法の研究

物理探査や物理検層データから、地層の地質環境特性（間隙率、塩分濃度、力学的物性等）を定量的に推定する手法を開発する。岩石を大小二種類の球状粒子（砂・粘土粒子）で表現する二粒子モデル理論を適用し、弾性波速度と電気伝導度を解釈する手法の開発を進めた。幌延地域において実施された陸域電磁探査（MT 法）解析結果に上記解釈法を適用し、第四紀地層（更別層）の間隙水電気伝導度分布を推定した（図 5）。

図 2：開発中の海底電磁探査装置の外観

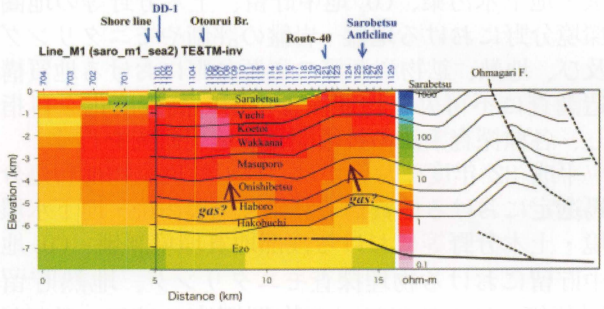


図 3：陸域の MT 法測線 A（平成 19 年度）と海域 4 測点のデータを用いた比抵抗構造２次元モデル（カラー表示）。既存反射法データ（石油公団）による地層境界解釈（黒線）を重ねて表示。海域のデータを加えることにより海岸線近傍のモデルの信頼性が向上し、海底下浅部の比抵抗構造も求めることができた。ただし、海域データの品質は十分でないので、深部の比抵抗値の信頼性は低く、今後平成 22 年度のデータを加えた解析を行う。

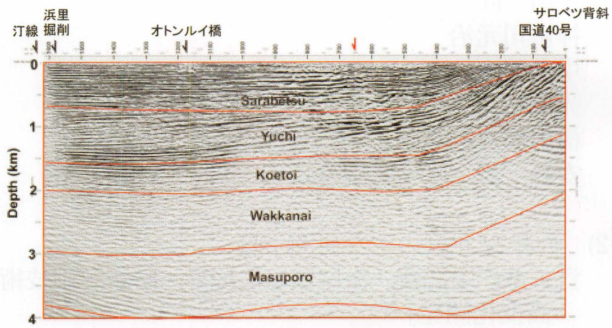


図 4：陸域 P 波反射法（平成 21 年度）のマイグレーション深度断面図（白黒表示）に石油公団の既存反射法断面の地層境界解釈結果（赤線）を重ねて表示。各地層内の詳細な層構造を追跡することができる。既存反射法断面の解釈は H21 反射法結果と少し異なる箇所があり、今後さらに解釈を進める必要がある。

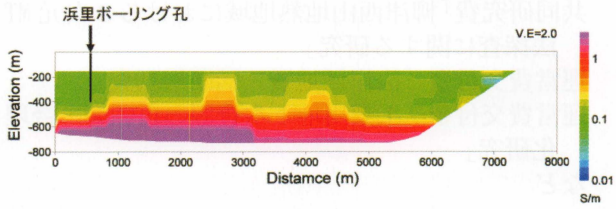


図 5：MT 法の比抵抗解析結果をもとに解釈して得られた更別層の間隙水の電気伝導度分布

2) 土壌汚染評価

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

a) 3次元電気探査と原位置計測

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

b) 核磁気共鳴法による土壌汚染の評価

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

永久磁石を搭載した低磁場核磁気共鳴装置(図8)にコアを装填し、プロトン緩和波形を2.7MHzの共鳴周波数で計測した。指数関数的に減衰する横緩和波形の初期振幅を横軸に、横緩和時間を縦軸にプロットしたものが図9である。油汚染の無い部位（間隙流体が低粘性の水分子）のデータのトレンド（図中の水色のゾーン）と、油汚染のある部位（間隙流体が高粘性の油分子）のデータ点群とを、1つのデータ点を除いて識別することに成功した。このように、NMR法は、封印されたコアの汚染部位に関する情報を非接触非破壊で簡便に示してくれるので、ガスクロなどのコア開封後の時間のかかる様々な分析の前段階として大変有益な手法である。

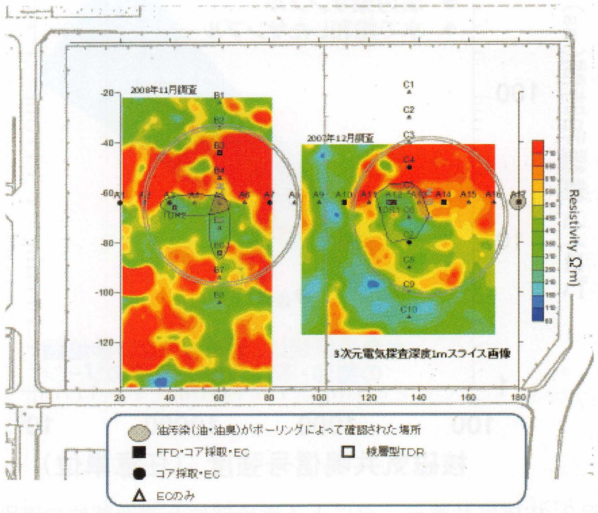


図6：油汚染サイトにおけるダイレクトプッシュ型貫入プローブ計測および土壌サンプリング実施箇所、および、3次元電気探査の解析結果（深度平面図）

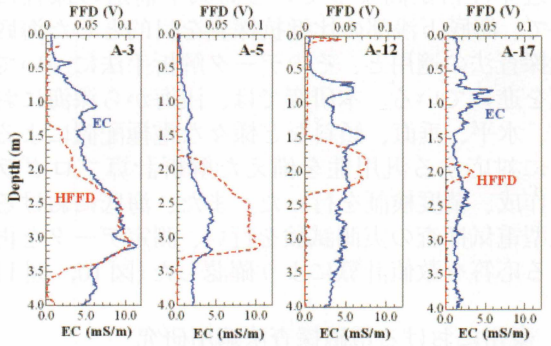


図7：ダイレクトプッシュ計測による地盤の電気伝導度とFFD結果

表1：地下水サンプルの電気伝導度と各種分析結果

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

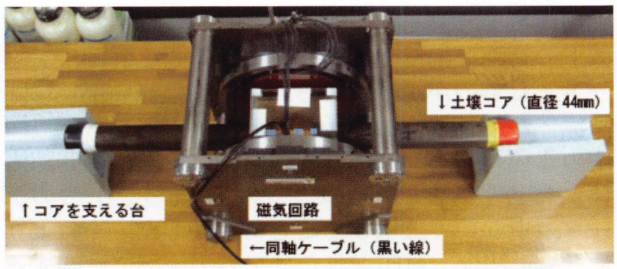


図 8：核磁気共鳴分析装置 (土壌コアを計測中)

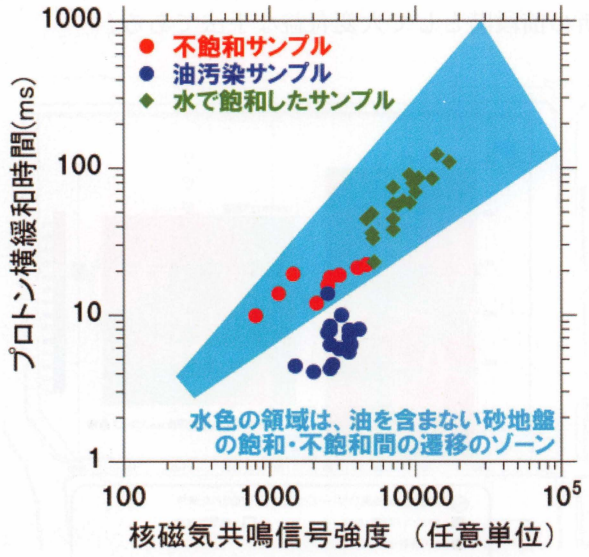


図 9：核磁気共鳴データによる汚染部位と清浄部位の識別

3) 物理探査技術の基盤的研究

a) 汎用な水平多層構造数値計算手法の開発

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

b) 豪州における電磁探査法適用研究

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

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

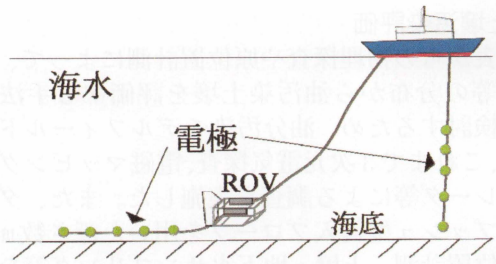


図 10：海底電気探査概念図 (探査船からの電極ケーブル直接曳航や ROV を用いた電極展開)

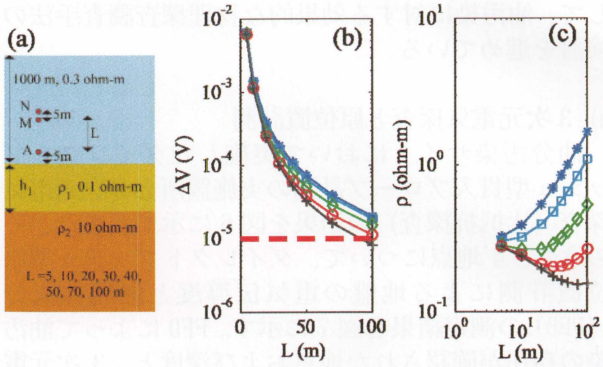


図 11：鉛直 3 極配置を用いた (a) 3 層構造モデルにおいて、低比抵抗 (0.1ohm-m) の第一層層厚を 1m から 100m まで変化させた場合の (b) 電位応答と (c) 見掛比抵抗。

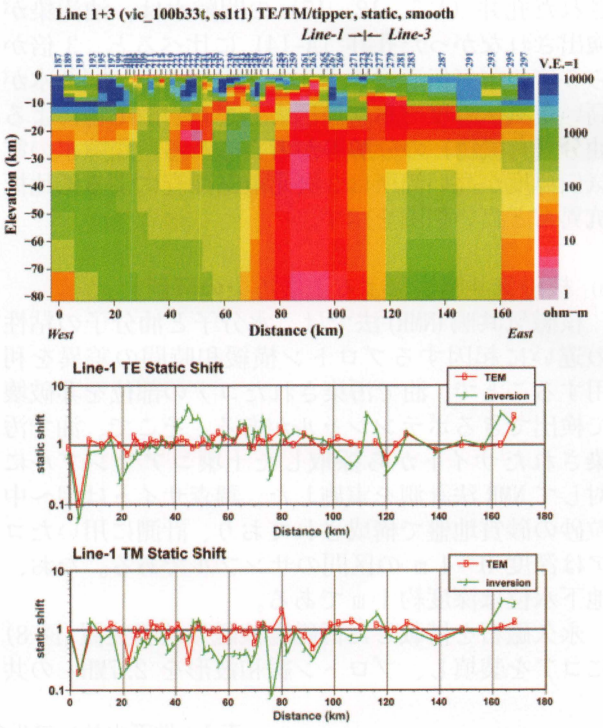


図 12：（上図）豪州ビクトリア州中部で測定された MT 法データについて、TE・TM モードの見掛比抵抗・位相とティッパーを用いて解析を行った 2 次元比抵抗モデル。地下の比抵抗構造に加え、スタティックシフトも未知数とした。（下図）2 次元解析によって推定したスタティックシフト（TE・TM モード）（緑線）と、MT 法と同じ測点で行った TEM 法データによって推定したスタティックシフト（赤線）の比較。

地圏化学研究グループの研究概要
Outline of the Resource Geochemistry Research Group

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

1. グループの研究体制・研究方針

当グループは，地球化学，石油地質学，岩石・鉱物学等を専門とする研究者で構成されている．この体制により，燃料資源，非金属鉱物資源・材料及びこれらに関連する地圏流体についての地質学的・地球化学的・鉱物学的解析を通して，燃料資源の成因解明・開発，環境保全，製品化等に資する研究を進めていくことをグループの目標としている．また，これらの研究課題に関して，研究機関としての価値ある研究成果を上げる（論文，学会発表，特許等）のみならず，産総研外部要請への対応，精度の高い情報の発信，研究成果の普及等を推進することを基本理念としている．

2. グループ員及び研究項目等

1）グループ員

佐脇貴幸（グループ長），猪狩俊一郎，金子信行，鈴木正哉，末益　匠（2009 年 10 月 1 日～），前川竜男，須藤定久（客員研究員）および契約職員

2）研究項目

○運営費交付金による研究
- 地圏化学の研究
- 関東平野における水溶性天然ガスの地質・地化学的調査研究

○受託研究
- 加温機排気中の CO_2 の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発（農林水産省受託研究）

○共同研究
- 関東南西部の温泉に付随する可燃性天然ガスに関する地質学的・地球化学的研究
- 工業用ハスクレイにおける実用化レベルの合成および疎水性揮発性有機化合物用吸着剤に関する研究
- ハスクレイの生体毒性評価に関する研究
- ガス化合成液体燃料製造用触媒の開発
- 気中に含まれる親水性有機溶剤の分離・回収に関する研究
- 製鉄所において発生するガスにおける二酸化炭素吸着分離剤に関する研究
- ハスクレイ材料のデシカント空調部材への応用に関する研究
- 環境試験機におけるナノチューブ状アルミニウムケイ酸塩（イモゴライト/ハスクレイ）を使用したデシカントローターの利用に関する研究
- 植物工場における二酸化炭素利用システムに関する研究
- 工業用ハスクレイの内装建材への応用に関する研究

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

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

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

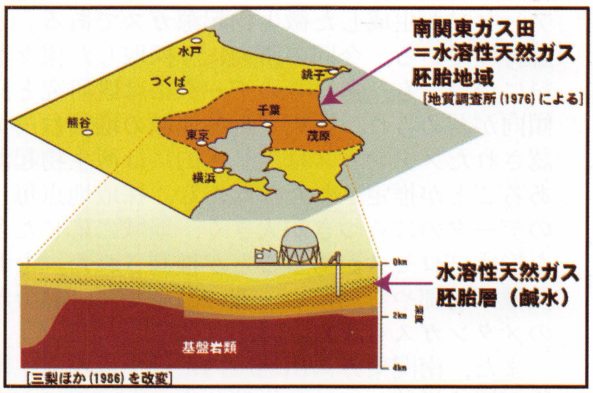


図 1　南関東ガス田の概念図

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

資源地質研究グループ，地圏微生物研究グループと連携している．

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

図 2　温泉水・ガスの採取

本研究の開始以前にも，当研究グループ員によって既に南関東ガス田の研究は進めてきていた(例えば，金子ほか, 2002)が，その結果では，南関東ガス田のメタンの炭素同位体比・水素同位体比，及びメタン/（エタン+プロパン）比のデータから，「南関東ガス田のメタンは，CO_2 と H_2，H_2O からアーケアが生成した微生物起源ガスである」と結論付けている．今回の研究にて採取した様々な試料についても，それらのデータには既研究と同じ傾向が認められ，関東平野各地域の堆積盆内で確認されたメタンガスは，基本的には微生物起源であることが推定された．ただし，採取地点毎にそのデータのばらつきが大きく，地域に応じた多様な形成プロセスがあることが推測された．なお，茨城県北部や群馬県の一部の温泉では，熱分解性のメタンガスも認められた．

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

以上の研究データを踏まえると，南関東ガス田全体のメタンガスの性状をより詳細に解明するためには，特に房総地域において鉱床の形成過程を明らかにし，過飽和状態でのガスの移動を考慮すべきであり，移動したガスの再溶解と天水の侵入による鉱床の破壊過程を地化学データの解析から正しく認識する必要がある．

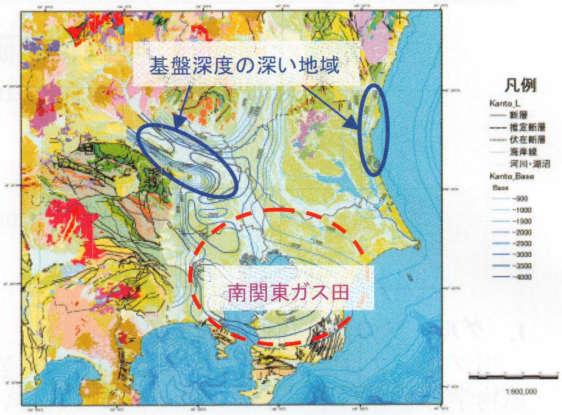


図 3　高橋(2008)による基盤深度を入れたシームレス地質図

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

2) 燃料資源に関わる地化学的成因研究，資源評価

南関東ガス田以外のガスハイドレート，水溶性天然ガス，石炭起源天然ガス等の燃料資源に関わる地球化学的実験・分析に基づく研究を進め，それらの成因，資源評価，賦存状況の把握等を行うことを目的としている．

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

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

ことがわかった．

さらに，ヨウ素 129 年代値に縛られていた天然ガス（メタン）成因論から脱却し，海溝充填堆積物および前弧海盆堆積物でのメタン生成に注目した前弧域でのメタンの濃集機構について検討した．その結果，南関東ガス田や東海ー四国沖のメタンハイドレートに代表されるメタンの濃集は，堆積物中に取り込まれた間隙水が，付加体の形成と斜面・前弧海盆での堆積による圧密を受けて浅部に溜まり続け，それと同時に微生物によるメタン生成が継続したことによると考えられた．また，ハイドレートの形成は，付加体の成長に伴う隆起により減圧され，間隙水がメタンに過飽和になったことによると考えられる．

3) 非金属鉱物資源に関わる地化学・地質学・岩石学的研究

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

平成 20 年度にプレスリリースしたハスクレイ（図 4）については，気体（水蒸気，二酸化炭素等）の吸脱着に優れている無機多注目され，結露防止，デシカント空調，二酸化炭素回収等の目的に利用されることが期待されている．また，産総研外部からの注目も高く，現在，様々な企業及び研究機関との共同研究を進めている。このために，産総研内部の研究体制として，サステナブルマテリアル研究部門とのユニット間連携研究，その大量合成法の研究開発とともに，その用途・市場の拡大化に資する研究開発を進めているところであるが，以下にはそのうちの代表的な研究実施例について示す．

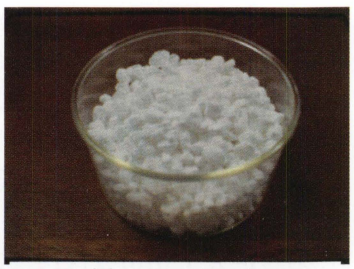


図 4　ハスクレイ

平成 22 年 7 月には，農林水産省の公募型受託研究として，「加温機排気中の CO_2 の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発」が採択された．これは，施設園芸における収量増大・品質向上を目的とした CO_2 施用にハスクレイを用いることで，加温機の排気中の二酸化炭素を効率よく回収貯留し再利用可能な，施設園芸用省エネ型 CO_2 施用システムとその活用技術を開発しようというものである（図 5）．

ここで解決すべき問題となるのは，加温時に発生する排気中の CO_2 を再利用するにあたって，NOx や SOx など植物の生育に悪影響を及ぼす有害物質の低濃度化と，CO_2 の回収貯留である．本研究開発では，ハスクレイを用いることで，排ガス中の有害物質を効率よく低濃度化するシステムを構築するとともに，装置の小型化および運転にかかるエネルギーの低減を主目的とした省エネ型 CO_2 回収貯留システムを構築し，その適用による園芸作物の増収・高品質化を実証するものである．

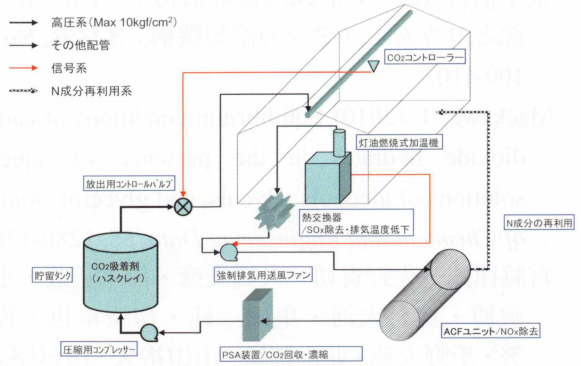


図 5　新しい CO_2 施用システムの概念図

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

4) 地圏化学の基礎的研究

地圏資源・環境に関する新規研究課題の探索，新しい地化学的技術の開発等，萌芽的・共通基盤的研究を行うことを目的とする．

平成 21 年度後半以降の研究成果としては，CO_2 の地中貯留に関わり，CO_2 のハイドレート相平衡条件，溶解度等を実験的に測定した．メタンに対してはハイドレート生成促進剤となるプロパノール，アセトンを用いて相平衡実験を行った結果，CO_2 に対しては生成阻害効果を示すことがわかった．

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

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

【誌上発表（論文，著書等）】

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

Ishikawa, K., Abe, S., Yawaka, Y., Suzuki, M., and Watari, F. (2010) Osteoblastic cellular responses to aluminosilicate nanotubes, imogolite using Saos-2 and MC3T3-E1 cells, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, **118**, 516-520.

金子信行 (2009) 前弧海盆堆積物中の間隙水の起源とヨウ素とメタンの濃集機構. ヨウ素, No. 12, 109-110.

Maekawa, T. (2010) Equilibrium conditions of carbon dioxide hydrates in the presence of aqueous solutions of alcohols, glycols, and glycerol. *Journal of Chemical and Engineering Data,* **55**, 1280-1284.

宮脇律郎・佐野貴司・大橋文彦・鈴木正哉・小暮敏博・奥村大河・亀田　純・梅染卓也・佐藤努・千野大輔・弘山郁織・山田裕久・田村堅志・森本和也・上原誠一郎・八田珠郎 (2010) 日本粘土学会参考試料の分析・評価. 粘土科学, **48**, 158-198.

Nakanishi, R., Suzuki, M. Inukai, K. and Maeda, M. (2009) CO_2 adsorption/desorption on mesoporous silica at various pressures. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, **34**, 743-745.

Rodionov, S., Obolenskiy, A. A., Distanov, E. G., Badarch, G., Dejidma, G., Hwang, D. H., Khanchuk, A. I., Ogasawara, M., Nokleberg, W. J., Parfenov, L. M., Prokopiev, A. V., Seminskiy, Z. V., Smelov, A. P., Yan, H., Davydov, Y. V. V., Gerel, O., Letunov, S. N., Li, X, Ratkin, V. V., Sudo, S., Sotnikov, V. I., Spiridonov, A. A., Sun, F, Timofeev, V. F., Wakita, K. and Zorina, L. V. (2010) Summary of Major Metallogenic Belts in Northeast Asia (the Russian Far East, Yakutia, Siberia, Transbaikalia, Northern China, Mongolia, South Korea, and Japan). *U.S. Geological Survey Professional Paper*, No. 1765, C-1 - C-31.

佐脇貴幸 (2010) 地質地盤情報協議会のこれまでの活動. 地質ニュース, No. 667, 78-84.

Sawaki, T. (2010) Geothermal resources and their development in Japan. *CCOP Technical Bulletin*, **32**, 37-47.

Sawaki, T. (2010) Useful geological datasets and databases in Japan for establishment of the geothermal database. *CCOP Technical Bulletin*, **32**, 49-51.

佐脇貴幸・金子信行 (2010) 「南関東ガス田研究」にとっての地質地盤情報の重要性. 地質ニュース, No. 667, 53-57.

須藤定久 (2009) 耐火物資源の地質学的特徴と成因. 耐火物, **61**, 438-446.

須藤定久 (2009) 北部フォッサ・マグナのろう石鉱床(3) 群馬県四万鉱山のろう石鉱床－高温熱水の極限状況を考える－. 地質ニュース, No. 661, 19-32.

須藤定久 (2010) 砂と砂浜の地域誌(23) 島根県東部の砂と砂浜－弓ヶ浜から島根半島へ－. 地質ニュース, No. 668, 29-40.

須藤定久 (2010) 古いフィールドノートから(3) 京都府夜久野鉱山－熱変成を受けたろう石鉱床. 地質ニュース, No. 668, 41-49.

須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮① 収縮の原因とプロセス・対処法を考える. 骨材資源, **42**, 16-24.

須藤定久 (2010) 砂と砂浜の地域誌(24) 出雲平野と宍道湖・斐伊川の砂. 地質ニュース, No. 671, 39-52.

須藤定久 (2010) 砂と砂浜の地域誌(25) 岩見東部の砂と砂浜－大田から浜田へ－. 地質ニュース, No. 672, 50-60.

須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮－(1) 乾燥収縮のモデルを考える. 骨材情報紙「アグリゲイト」No. 144, 6-7.

須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮－(2) 骨材原石・製品の層間水の予測的測定. 骨材情報紙「アグリゲイト」, No. 145, 6-7.

須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮、一般岩石の層間水が最大の問題か？ セメント新聞, No. 2916, 4.

須藤定久・有田正史 (2009) 砂と砂浜の地域誌(21) 能代から八森の海岸へ. 地質ニュース, No. 661, 33-41.

須藤定久・有田正史 (2009) 砂と砂浜の地域誌(22) 羽越海岸－酒田から村上へ. 地質ニュース, No. 663, 35-46.

鈴木正哉 (2010) 二酸化炭素を吸脱着する「ハスクレイ」. 日刊工業新聞 科学技術・大学, No. 621, 18.

Suzuki, M. and Inukai, K. (2010) Synthesis and Applications of Imogolite Nanotubes. *Inorganic and Metallic Nanotubular Materials*, Springer Publishing Company, 159-168.

鈴木正哉・中西亮介 (2009) イモゴライト系 CO_2 吸着剤. セラミックデータブック 2009 年版, **37**, 94-96

鈴木正哉・中西亮介 (2010) 二酸化炭素を効率的に回収する無機多孔質材. 工業材料, **58**, 58-61.

鈴木正哉・中西亮介 (2010) 無機系吸放湿材料によるヒートポンプへの応用. セラミックス, **45**, 538-542.

鈴木正哉・中西亮介 (2010) アロフェン・イモゴライト. 機能性粘土素材の最新動向, シーエムシー出版, 31-42.

鈴木正哉・月村勝宏・前田雅喜・犬飼恵一 (2010) 新しい高性能無機吸着剤を安価で開発. 粉体技術, **2**, 57-57.

Tsukimura, K., Suzuki, M., Suzuki, Y. and Murakami, T. (2010) Kinetic theory of crystallization of nanoparticles. *Crystal Growth & Design*, **10**, 3596-3607.

【口頭発表】

猪狩俊一郎・前川竜男・佐脇貴幸 (2010) 南関東地域の温泉ガス中の炭化水素の地化学的特徴：他の油ガス田との比較. 有機地球化学シンポジウム, 2010/8/5.

犬飼恵一・鈴木正哉・前田雅喜・中西亮介・月村勝宏 (2009) 新規高性能吸着剤である非晶質アルミニウムケイ酸塩の水蒸気および二酸化炭素吸着特性. セラ協第 22 回秋季シンポジウム, 2009/9/17.

石川紘佑・赤坂　司・鈴木正哉・八若保孝・亘理文夫 (2010) 骨芽細胞様細胞の増殖・分化に及ぼすケイ酸塩ナノチューブ(イモゴライト)の影響. ナノ・バイオメディカル学会 第 2 回大会, 2010/2/22.

金子信行 (2009) 前弧海盆堆積物中の間隙水の起源とヨウ素とメタンの濃集機構. 第 12 回ヨウ素学会シンポジウム, 2009/10/29.

金子信行 (2010) 微生物によるメタン生成と間隙水への濃集／ハイドレート形成の地質学的・地球化学的解釈. メタンハイドレート総合シンポジウム, 2010/2/16.

金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・佐脇貴幸・代田　寧・小田原啓・早稲田周 (2010) 関東地方地下の天然ガスについて. 石油技術協会春季講演会, 2010/6/10.

前田雅喜・犬飼恵一・鈴木正哉 (2009) デシカント空調用新規吸着材（ハスクレイ）. シンポジウム「新材料で構成する快適建築空間－エクセルギー的視点を中心にして－」, 2009/12/4.

Nakanishi, R., Inukai, K., Maeda, M., Suzuki, M. and Tai, Y. (2010) Preferential oxidation of Co over Pt catalysts supported on mesoporous aluminum silicates in the presence of H_2. The 11th International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD2010), 2010/1/10.

中西亮介・宮本早苗・鈴木正哉・犬飼恵一・前田雅喜 (2009) 非晶質アルミニウムケイ酸塩と低結晶性粘土との複合体の合成条件. 第 19 回日本 MRS 学術シンポジウム, 2009/12/7.

西本登志・佐野太郎・仲　照史・宍戸拓樹・堀川大輔・鈴木正哉・喜多村克宏・吉川正晃 (2010) 開放系における灯油燃焼式加温機の排気の施用がコマツナの生育に及ぼす影響. 第15回園芸学会近畿支部兵庫大会, 2010/8/31.

小笠原正継・鈴木正哉・吉成幸一・井坪信一・上岡　晃 (2010) 産業技術総合研究所におけるエックス線装置の取り扱いに関する安全管理体制の進展. 第 47 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2010/7/9.

須藤定久 (2009) 日本の骨材資源－その過去・現状と将来－. 資源素材学会 2009, 2009/9/9.

須藤定久 (2009) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮問題① 乾燥収縮の原因・プロセス・対応. 骨材資源工学会秋季講演会, 2009/11/13.

須藤定久 (2009) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮問題② 乾燥収縮への現実的対応－砂岩・安山岩を例に. 骨材資源工学会秋季講演会, 2009/11/13.

須藤定久 (2010) 地球の話あれこれ－業務の安全に関連して. 県南火薬類取扱者安全講習会, 2010/3/24.

須藤定久 (2010) 耐火物資源の地質学的特徴と成因. 第 2 回 耐火物の基礎学問と検査技術研修, 2010/5/17.

Suemasu, T., Suzuki, M., Inukai, K., Maeda, M. and Tsukimura, K. (2010) High Performance New Amorphous Aluminum-Silicate Adsorbent Water Vapor and Carbon Dioxide. 2010 SEA-CSSJ-CMS Trilateral Meeting on Clays, 2010/6/10.

鈴木正哉 (2009) 天然土壌中に存在するナノ物質をモチーフにした吸着剤の開発. 幌延地圏環境研究所講演会, 2009/10/28.

鈴木正哉 (2009) 二酸化炭素吸着能をもつ無機多孔質材について. 第 1 回燃料電池セミナー, 2009/12/18.

鈴木正哉 (2010) 高性能アルミニウムケイ酸塩吸着剤(ハスクレイ)の性質と応用. 平成 21 年度産業技術連携推進会議 ナノテクノロジー・材料部会総会, 2010/2/2.

鈴木正哉・月村勝宏・中西亮介 (2010) 無機材料

における水蒸気吸着機構について. 第 8 回 微生物-鉱物-水-大気相互作用研究会, 2010/3/18.

鈴木正哉・月村勝宏・犬飼恵一・前田雅喜 (2010) 高性能吸着剤ハスクレイ. ナノテック 2010, 2010/2/17.

鈴木正哉・月村勝宏・犬飼恵一・前田雅喜 (2010) ケイ酸塩ナノチューブ(イモゴライト)を用いた水蒸気選択性吸着剤の開発. ナノ・バイオメディカル学会 第 2 回大会, 2010/2/22.

Suzuki, M., Tsukimura, K., Inukai, K. and Maeda, M. (2010) High Performance Aluminum-silicate adsorbent for Water Vapor and Carbon Dioxide. NIMS International Workshop on Photocatalysis and Environmental Remediation Materials 2010, 2010/2/23.

鈴木正哉・中西亮介・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏 (2009) 低結晶性粘土と非晶質アルミニウムケイ酸塩複合体の形成過程における構造変化について. 鉱物科学会 2009 年年会, 2009/9/9.

鈴木正哉・月村勝宏・犬飼恵一・中西亮介・前田雅喜 (2009) 水蒸気選択吸着剤の開発. 第 19 回日本 MRS 学術シンポジウム, 2009/12/7.

鈴木正哉・酒寄英里・永好けい子・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏 (2010) ビニールハウス栽培への適用を目指した CO_2 回収・貯留システム. 第 8 回アロフェン・イモゴライト研究会, 2010/8/25.

鈴木正哉・中西亮介・小塚奈津子・鈴木智恵子・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏 (2009) 低結晶性粘土と非晶質アルミニウムケイ酸塩複合体の形成過程と吸着特性について. 第 53 回粘土科学討論会, 2009/9/11.

月村勝宏・鈴木正哉・鈴木庸平・村上 隆 (2009) フェリハイドライト・コロイドに固溶する Pu 量:熱力学的考察. 日本鉱物科学会 2009 年年会, 2009/9/9.

Tsukimura, K., Suzuki, M., Suzuki, Y. and Murakami, T. (2010) Long-term prediction on the presence of colloidal ferrihydrite and the radionuclide sorption. Japan Geoscience Union Meeting 2010, 2010/5/25.

Tsukimura, K., Suzuki, M., Suzuki, Y. and Murakami, T. (2010) Behavior of colloidal ferrihydrite as radionuclide carrier in the Lake Karachai area. Goldschmidt Conference 2010, 2010/6/15.

【イベント出展】

前田雅喜・犬飼恵一・鈴木正哉, 高性能吸着材ハスクレイの開発(Excellent Adsorption Materials: HAS-Clay), ハノーバーメッセ 2010 (ドイツ見本市), 2010/4/19〜4/23.

鈴木正哉・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏, 新しい高性能無機吸着剤を安価で開発！ APPIE 産学官連携フェア 2009, 2009/10/23.

鈴木正哉・月村勝宏・末益 匠・中西亮介, 高性能水蒸気・二酸化炭素吸着剤“ハスクレイ”の開発, 産総研オープンラボ, 2009/10/15〜10/16.

鈴木正哉・月村勝宏・末益 匠・犬飼恵一・前田雅喜・中西亮介・小塚奈津子・鈴木智恵子, 高性能吸着剤ハスクレイ－デシカント空調や CO_2 回収に最適－, nano tech 2010 国際ナノテクノロジー総合展, 2010/2/17〜2/19.

引用文献

金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎 (2002) アーケアによるメタンの生成と間隙水への濃集機構. 石油技術協会誌, **67**, 97-110.

三梨 昂・尾田太良・江藤哲人 (1986) 新生代東北日本弧地質資料集 第 3 巻-付録 関東地方地質断面図（北村 信 編）, 宝文堂.

高橋雅紀 (2008) 関東平野の基盤の凹み 〜日本海の拡大時期に遡って〜. *Japan Geoscience Letter*, **4**, No. 2, 3-5.

地圏微生物研究グループの紹介
Introduction of the Geomicrobiology Research Group

地圏微生物研究グループ長：坂田　将
Leader, Geomicrobiology Research Group: Susumu Sakata
Phone: 029-861-3898, e-mail: su-sakata@aist.go.jp

1．グループの研究目的

地圏における微生物の分布と多様性，機能，活性を評価することにより，元素の生物地球化学的循環に関する基盤的情報を提供するとともに，資源開発，環境保全や地圏の利用に資する研究を行う．当研究部門の戦略課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」，「地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究」に取り組み，油ガス田等に生息する微生物の活動（メタン生成，消費，石油炭化水素分解）の実態解明を目指す．

2．グループの研究資源（22 年度）

1）グループ員

研究スタッフ

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

テクニカルスタッフ

氏家知子，小神野良美，執印訓子，
張　華，三浦直子

2）予算

運営費交付金

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

委託費

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

共同研究費

「安定同位体トレーサ法による油層内微生物の原油分解メタン生成経路の評価に関する研究」（INPEX 帝石（株））
「メタン溶存天然水を用いた有機塩素化合物による汚染地下水の浄化工法の実用化に関する研究」（（株）テクノアース）

3．グループの特色

有機・生物地球化学，微生物生態学を専門とする研究者で構成され，坑井等からの各種地下試料（堆積物，岩石，水，ガス，油等）の採取と，化学・同位体分析，好気・嫌気微生物培養，同位体トレーサー実験，遺伝子解析等を通じて，地圏微生物の活動に関する基盤的情報を提供する．燃料資源地質・地圏化学研究グループ，生物プロセス研究部門，INPEX 帝石（株），（株）テクノアース，放射線医学総合研究所，JOGMEC 等と連携し，水溶性天然ガス・メタンハイドレート（MH）の成因解明や有効利用，枯渇油田の天然ガス再生技術検討を重点的に進める．

4．21 年度後期–22 年度前期の研究進捗状況

1）メタンハイドレート成因解明のための生物地球化学的研究

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

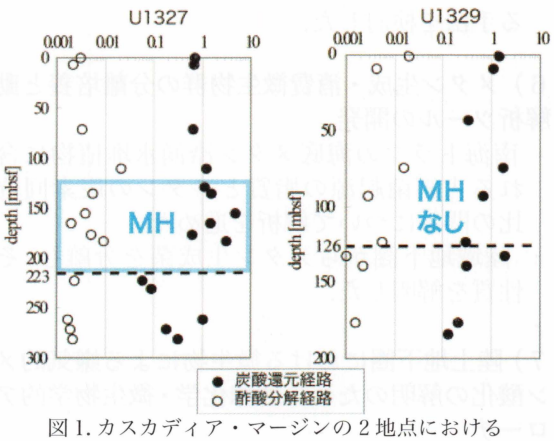


図 1. カスカディア・マージンの 2 地点における海底微生物のメタン生成活性の分布 [3)]

2）在来型天然ガス資源の成因解明のための生物地球化学的研究

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

3）地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究

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

4）油層内微生物のメタン生成経路に関する研究

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

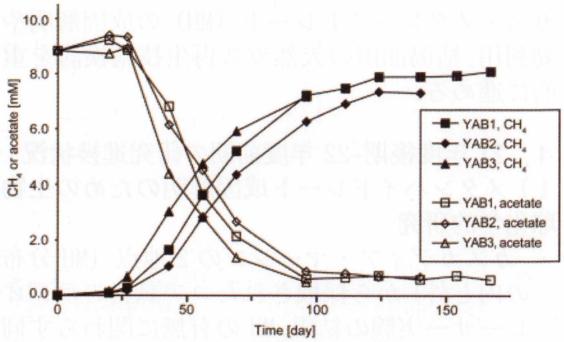


図 2. 八橋油田の油層水の培養に伴うメタンと酢酸の濃度変化 [5)]

5）堆積岩地域の水文地質データの評価手法に関する調査

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

6）メタン生成・消費微生物群の分離培養と動態解析ツールの開発

・ 南海トラフの海底メタン冷湧水堆積物に含まれる古細菌起源の脂質とメタンの炭素同位体比の関係について解析を進めた.

・ 陸域地下圏からメタン生成菌を分離し, その性質を解明した.

・

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

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

8）基礎的研究

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

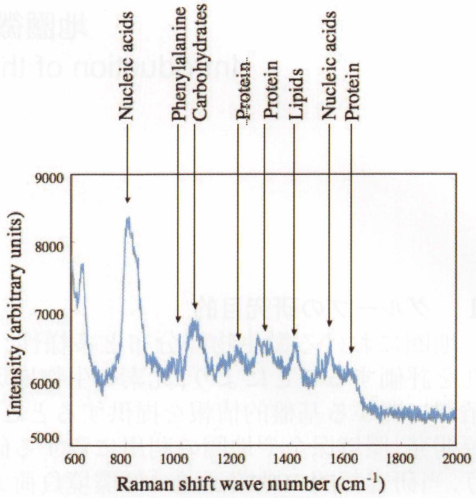


図 3. 一細胞のラマンスペクトル（*B. subtilis*）

5．主な論文成果

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

燃料資源地質研究グループの紹介

Introduction of the Fuel Resource Geology Research Group

研究グループ長：鈴木祐一郎
Leader, Fuel Resource Geology Research Group: Yuichiro Suzuki
Phone 029-861-3919, e-mail: yu-suzuki@aist.go.jp

1．グループの研究目的

石油，天然ガス，石炭等の燃料資源鉱床に関する探査手法・資源評価技術の高度化をめざし，その基礎となる鉱床成因モデルの構築，資源探査法の改良，資源ポテンシャル評価技術についての研究開発を行う．

特に，当部門の地圏化学研究グループ，地圏微生物研究グループと協力し，重点研究課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」を実施する．

2．グループの研究体制，研究資源

2.1. 研究員（平成 22 年 10 月 1 日現在）

鈴木 祐一郎	石炭地質，有機地球化学
松林 修	物理探査，地球熱学
中嶋 健	海洋地質，堆積地質
佐藤 幹夫	海洋地質，構造地質
森田 澄人	構造地質，海洋地質
後藤 秀作	地球熱学，物理探査
小田 浩	石炭地質，堆積地質
仁道 純子（テクニカルスタッフ）	

2.2. 研究資金（平成 21 年～平成 22 年）

・運営費交付金「燃料資源地質の研究」(地質)及び同（エネルギー）
・運営費交付金「部門重点化予算：関東地方の天然ガス資源評価」(分担，平成 21 年度)
・運営費交付金「天然ガス鉱床の分布・成因に関する調査研究」(分担，平成 22 年度)
・受託研究（JOGMEC）「日本周辺海域における砂層充填型メタンハイドレート濃集帯以外のメタンハイドレート賦存層に関する予備検討」(平成 21，22 年度)
・共同研究(ジャパンエナジー(JE)石油開発(株))「堆積盆の炭化水素ポテンシャル評価手法に関する総合的研究」(平成 21，22 年年度)
・共同研究（石油資源開発(株)技術研究所）「数学的手法による砂岩分布予測の研究」(平成 21，22 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 21,22 年度)
・科研費「急激な気候変動に対する海底扇状地の発達と二酸化炭素固定能力の応答の評価」(平成 21-23 年度)
・福武学術振興財団助成金「地形学と地質学の融合による高精度の奥羽山脈発達史の復元」(平成 21 年度)

2.3. 主な研究ファシリティ

・PetroMod(ベーズンモデリングソフトウェア)および PC サーバー
・ビトリナイト反射率測定用石炭顕微鏡
・熱分解 GC/MS 用キュリーポイント熱分解装置
・恒温槽
・COMSOL（数値シミュレーションソフトウェア）

3．平成 21 年度～平成 22 年度前期の研究成果および研究進捗状況

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

〈上越沖〉

・平成 21 年度は，日本周辺海域における砂層充填型メタンハイドレート濃集帯以外のメタンハイドレート賦存層に関する予備的研究として長年調査が行われてきた上越沖海域を中心に，文献調査，地質・地球物理データのコンパイルおよび地質地化学試料追加分析を実施した．
・平成 22 年度は，前年度策定した計画に基づき東京大学との共同研究として，2010 年 6 月に上越沖において，フランス極地研究所所属海洋調査船 Marion Dufresne(MD)号を傭船し，長尺ピストンコアラによる海底下数 10m までのコア試料採取，ボックスコアラによる試料採取，熱流量測定，マルチビーム測深器による海底地形調査，3.5kHz サブボトムプロファイラによる海底表層探査等を実施した．
・船上作業では，コア中から発見されたメタンハイドレート(MH)の採取・冷凍保存，コアの堆積学的記載，温度測定，保管用堆積試料採取，　密度，P 波速度等の物理計測，スクィーザーによる間隙水化学分析等をおこなった．

MD 号の長尺ピストンコアラ（MH21 HP より）

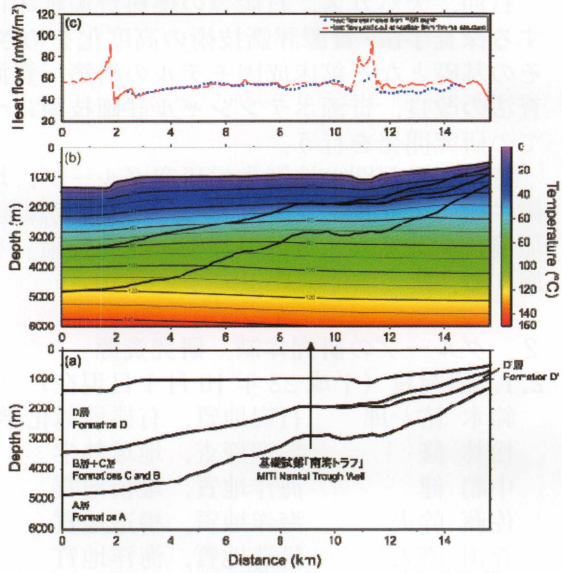
・今回の上越沖の調査では，海底面近傍 MH（表層型 MH）と泥層内 MH（フラクチャ型?MH）を多数採取できた．日本海東縁一帯は，同様の地質環境にあり，上越沖と同じような MH が存在する可能性がある．そこで，今回の調査では，調査範囲を広げ，以前に堆積物内に MH の存在が示唆された奥尻海域でも調査を行った．

コア中に含まれていた塊状メタンハイドレート（MH21 HP より）

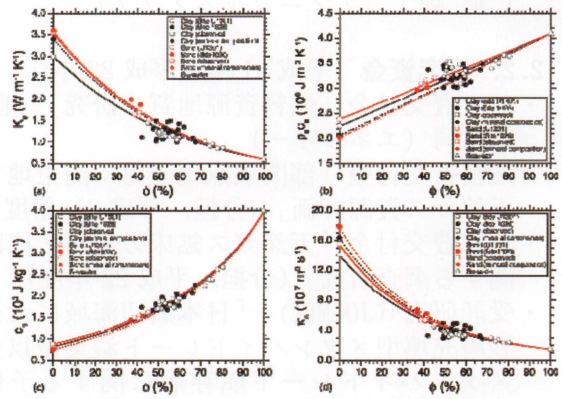
・航海後，コアの保存先である高知コアセンターにおいて，コアの非破壊測定およびサンプリングを進めると共に，採取した試料の微化石分析，地化学分析等の作業を進めている．
・上越沖海域のメタンハイドレート安定領域下限深度を推定することを目的に，本海域で熱流量を計測した．現在，このデータに基づいて温度構造モデルの構築を進めている．
・2010 年 7 月に調査船「よこすか」(JAMSTEC 所属）による YK10-08 航海（首席研究員：松本東大教授）に参加し，上越沖海域（MD 航海と同海域）において自律型無人探査機(AUV)「うらしま」を用いた高分解能地形探査，サイドスキャンソナー探査，SBP（サブボトムプロファイラ）による表層構造探査，及び「よこすか」によるシングルチャンネル地震探査(SCS)を実施した．現在，これまでのデータ及び MD 航海データと併せた解析を実施中である．

〈南海トラフ〉

・南海トラフ域の熱流量データの収集と再解析を行った．本海域で得られた反射法地震探査記録上の BSR 深度から推定した熱流量データをコンパイルした．これらの熱流量データに基づき，海底下の温度構造モデルの構築を進めている（図 1）．海底堆積物の現場法による熱伝導率の計測方法の開発を進めている．
・ファンデフーカ海嶺東翼で採取された海底堆積物の熱物性（熱伝導率，熱容量，比熱，熱拡散率）と間隙率の関係を調べ，熱伝導率，熱容量および比熱について既存の熱物性モデルを検証するとともに，熱拡散率については新しいモデルを提唱した．また，鉱物組成と熱物性の関係を明らかにした (Goto and Matsubayashi, 2009, 松林・後藤, 2009).



東部南海トラフの温度構造モデルの例（後藤ほか, 2010）

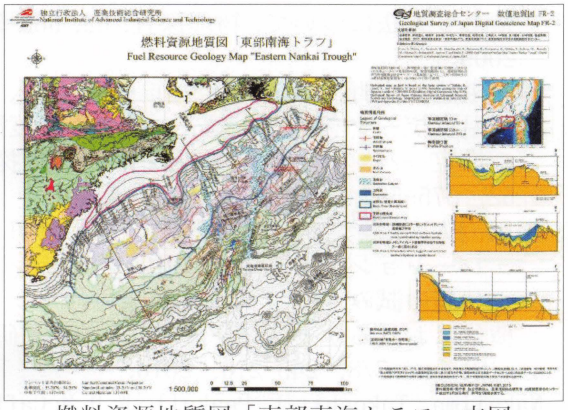


海底堆積物の熱物性と間隙率の関係（Goto and Matsubayashi, 2009）

3.2. 燃料資源地質図「東部南海トラフ」出版

・東部南海トラフのメタンハイドレート資源ポテンシャルを評価するための基礎情報を提供することを目的に，本海域で得られた海底地形，海底地質，地下構造，地磁気異常，重力異常，熱流量，掘削結果の既存情報および温度構造モデリングの結果を統合し，50 万分の

1縮尺の地質図（本図）及び100万分の1縮尺の付図7枚としてまとめ，燃料資源地質図「東部南海トラフ」として出版した．



燃料資源地質図「東部南海トラフ」本図

3.3. 在来型天然ガス資源の鉱床成因，形成機構に関する地質学的研究

・燃料資源全般に関する生成機構・探査法・燃料資源評価法などについての基礎的ないし萌芽的な研究を実施した．根源岩評価法，資源評価技術，海洋地質調査法，物理探査法，地質構造発達史，堆積構造解析，地球環境論，等々広汎な課題について地球科学的考察を行い，学会誌，出版物，口頭発表等で公表をおこなった．

・三陸沖堆積盆の天然ガス資源を調査する目的で，下北半島東方沖の地震探査データを用いた地質構造解析を開始した．正断層群で切られた中新統以深に対し，鮮新統以浅では顕著な海底地すべり堆積層を認めた．地すべりの多くは特徴的な覆瓦構造を示し，それに依存した脱水構造も顕著に発達する．地すべり層周辺では天然ガスの存在を示す特徴が多く認められることから，一連の地すべりや脱水構造は，メタンフラックスの高い当海域に特有の現象と考えられる．

・東北日本の油・ガス構造の形成に関わる脊梁部のテクトニクスについて，地形・地質調査を行い，第四紀の変動について従来にない知見を得て，学会発表を行った．

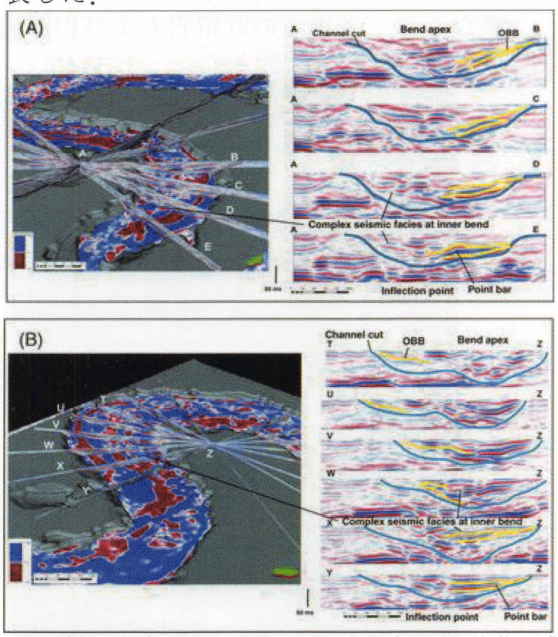
・前年度に続き，韓国地質資源研究院 KIGAM の TAMHAE II による東シナ海陸棚堆積盆の地質構造探査に参加した．

KIGAM の海洋調査船 TamhaeII（KIGAM HP より）

・科研費により，富山深海長谷の堆積物の花粉分析，有機炭素・窒素分析を行い，気候変動と砂岩貯留岩との関係について論文出版した（Nakajima et al., 2009）．

・国際深海掘削計画による四国海盆の堆積物について，西南日本のテクトニクスや気候変動史の解明のために各種分析を実施中．

・3D 地震探査記録の解析から，海底チャネルおよび自然堤防の貯留岩形態に関する論文を発表した．



3D 震探断面によるチャネル湾曲部の堆積作用解析(Nakajima et al., 2009)

・コールベッドメタン(CMB)に関しては，地圏化学 RG と協力し，水の存在下でのガス吸着特性がどのように変化するかについて実験をおこなった．低圧側での吸着特性がドライの状態と大きく変化するとの予備的な結果が得られている．今後，さらに実験を進めると共に，水飽和状態である天然の条件下での CBM への展開を図ることを検討中である．

3.4. 資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」(分担)、JOGMEC 共同研究「大水深域の燃料資源ポテンシャルの検討」(分担)．

・引き続き，大水深域の堆積盆の炭化水素ポテンシャル推定を，3次元石油システムシミュレータ等を用いて進めている．海洋資源地質地球物理情報可視化システムを使用した高度地質解析も目指している．

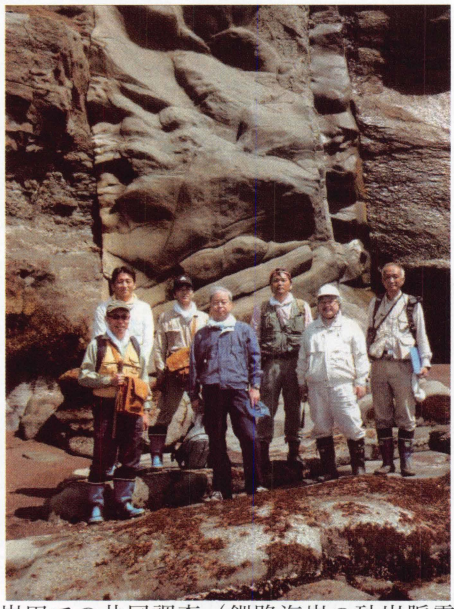
・日本国政府は，2008 年 11 月に大陸棚限界委員会に対して，申請を提出した．今後は，委員会の審査，勧告に対応した調査，解析も大きな役割となると考えられる．

3.5. 共同研究

〈JE 石油開発(株)との共同研究〉

・ジャパンエナジー石油開発との共同研究では，三陸沖の 2D/3D 地震探査記録を用いた地質構造解析とスランプ堆積物の内部構造の解析を進め，論文投稿および学会発表を行った．また，富山トラフの 2D/3D 地震探査記録の解析から富山深海長谷の発達史についてまとめ，シンポジウムで発表した．

・釧路炭田地域で共同の地質調査を行い，白亜系から第三系までの貯留岩および根源岩石炭の分布の概略を把握した．



釧路炭田での共同調査（釧路海岸の砂岩脈露頭）

〈石油資源開発(株)技術研究所との共同研究〉

・砂岩層厚分布から貯留岩総体積を推定する数学的手法の開発と検証を行い，学会発表を行った．

4．最近の主な研究成果

〈紙上発表〉

Goto, S. and Matsubayashi, O.: Relations between the thermal properties and porosity of sediments in the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge, Earth, Planets and Space, 61, 863-870, 2009

後藤秀作・森田澄人・棚橋　学・松林　修・中村光一・駒澤正夫・石原丈実・上嶋正人・林雅雄・及川信孝・小林稔明・稲盛隆穂・佐伯龍男：燃料資源地質図「東部南海トラフ」，数値資質図 FR-2，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2010.

Lubis, R.F., M.Yamano, R.Delinom, Sudaryanto, Y.Sakura, S.Goto, A.Miyakoshi and M.Taniguchi: Urban groundwater loading in Indonesian mega-cities, in Trends and Sustainability of Groundwater in Highly Stressed Aquifers, edited by Taniguchi, M., Dausman, A., Howard, K., Polemio, M., Lakshmanan, E., 291-298, IAHS Publ. 329, IAHS Press, Wallingford, UK, 2009.

松林　修・後藤秀作：海底堆積物の熱物性の見積もり方法について，物理探査，62，565-574，2009.

濱元栄起・山野　誠・後藤秀作・谷口真人：地下温度データを用いた過去の地表面温度履歴の推定 -バンコク地域への適用-，物理探査，62，575-584，2009.

森田澄人，後藤秀作，松林修，棚橋学：数値シミュレーションによる CO_2 地中貯留ポテンシャル評価の試み，— マレー半島東方沖マレー堆積盆におけるケーススタディ —．地調研報，v.61，no.7/8，245-270，2010.

Nakajima, Takeshi, J. Peakall, W.D.McCaffrey, D.Paton and P.Thompson: Outer-Bank Bars: A New Intra-Channel Architectural Element within Sinuous Submarine Slope Channels. JSR, v.79, 872-886, 2009.

Nakajima, Takeshi, H. Katayama and T. Itaki: Climatic Control on Turbidite Deposition during the 70kyr along the Toyama Deep-sea Channel, central Japan. SEPM Specila Pub., 92, 159-177, 2009.

鈴木祐一郎：第1章 1.石炭はどうやってできるのだろう，他．「トコトンやさしい　石炭の本」，日刊工業新聞社，2009.

Yamano, M., Goto, S., Miyakoshi, A., Hamamoto, H., Lubis, R.F., Monyrath, V., Taniguchi, M.: Reconstruction of the thermal environment evolution in urban areas from underground temperature distribution, Science of The Total Environment, 407, 3120-3128, 2009.

〈国際研究集会発表〉

Goto, S., O. Matsubayashi and S. Nagakubo: Numerical simulation of dissociation of methane hydrate in response to depressurization by periodic uplift, Eos Trans. AGU Fall Meeting, San Francisco, December 14-18, 2009.

Otsuka, H., S.Morita, M.Tanahashi, J.Ashi and S.Nagakubo: Possible migration front of gas-related fluid inferred from 3D-seismic data in the eastern Nankai Trough. The 13th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG2009), Kyoto, Japan, November 2009.

Morita, Sumito: Deep Sea Resources: Methane Hydrate -Exploration and Exploitation, Japanese-French Frontiers of Science Symposium, France, January, 2010.

地熱資源研究グループの紹介

Introduction of the Geothermal Resources Research Group

研究グループ長：阪口圭一

Leader, Geothermal Resources Research Group: Keiichi Sakaguchi

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

1．グループの研究目的

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

常勤研究者：阪口圭一，佐々木宗建，茂野　博，水垣桂子，柳澤教雄

客員研究員：村岡洋文

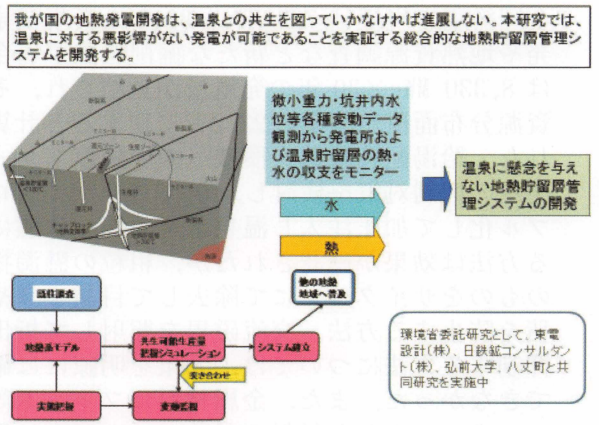
2）主要予算

- 環境省受託研究費「地球温暖化対策技術開発事業（温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究）」
- 地熱技術開発株式会社受託研究費「温泉発電システムの開発と実証」（環境省委託費「地球温暖化対策技術開発事業（温泉発電システムの開発と実証）」の一部再受託）
- 運営費交付金「地熱資源のポテンシャル評価の研究」
- 運営費交付金「地熱資源の研究」

3．平成 22 年度の研究計画

第 3 期のグループの主要研究課題を，1）「地熱資源開発ポテンシャル拡大の研究」及び 2)「地熱資源の研究」と設定して，研究を実施している．1）では，豊富な資源量が存在するにもかかわらず開発が伸び悩んでいる地熱資源の開発ポテンシャル拡大を目に見える形で示すことを目標とし，1a)「地熱・温泉共生の研究」及び 1b)「温泉発電システムの研究」という個別研究課題を設定する．1a) では，環境省地球温暖化対策技術開発等事業「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」（第 1 図）を中心に，温泉を含めた地熱資源の実態解明や，地熱発電資源と温泉資源の共生の実現などの円滑な開発促進のための技術開発を行うことによって，地熱資源開発ポテンシャルの拡大を図る．1b) では，第 2 期研究課題「温泉発電の研究」の成果を発展させ，これまで発電資源対象でなかった温泉資源を地熱発電資源としても利用する技術を開発することによって開発ポテンシャルの拡大を図る．

2）では，第 2 期に引き続き，中長期的視点からの地熱資源の利用拡大を始め，地熱資源情報を他分野のニーズに広く生かすための基盤的研究を目的とし，地熱資源データベースの研究を中心として，地熱資源情報を様々な分野に提供することを目指す．具体的には，2a)「地熱資源データベースの応用研究」及び 2b)「地熱シーズ・基盤研究」という課題を設定する．2a) では，地熱資源データベース及び第 2 期の成果である地熱ポテンシャルマップの更なる充実を図り，全国の開発候補地を系統的な抽出等によって政策決定等に貢献し，成果を活用して新しい課題・分野を開拓していく．2b) では，研究者の自由裁量による萌芽的研究を行う．

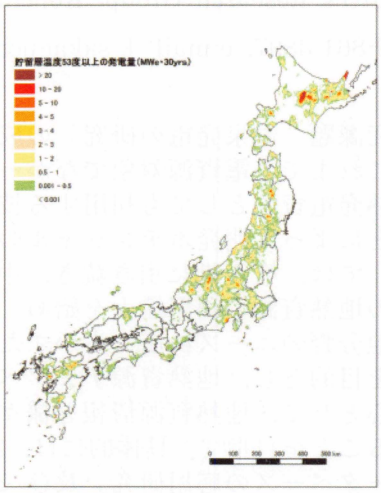


第 1 図　温泉共生型貯留層管理システムの研究の概念図

4．平成 21 年度の研究成果

1）中小地熱資源賦存地域の研究においては，以下の成果を得た．「全国地熱ポテンシャルマップ」を用いて各種条件下で計算して得られた全国の地熱開発ポテンシャル分布が環境省の「平成 21 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」において採り入れられ，今後の再生可

能エネルギー導入の指針作成に貢献にした．北海道の石狩低地帯南部の「深層熱水」型地熱資源の再解析，及びより広域の石狩低地帯とその周辺域について，最近公開された多様な電子情報の処理を進めて総合的な検討・取りまとめを行なった．関東平野の温泉水質と堆積岩組成を基に，温泉水の水質形成過程を数値モデル解析した結果，反応を遅延化させる変数や機構をモジュールに取り込む必要性が示唆された．



第２図　貯留層温度 53℃以上の地熱資源による発電量分布．

２）地熱技術開発株式会社が NEDO の新エネルギーベンチャー技術革新事業において受託している「温泉エコジェネシステムの開発」のうちの産総研再受託課題の「材料試験・温泉沈殿物試験及び市場規模調査」については，以下の成果を得た．既開発の温泉だけを対象とした場合の全国総電力規模は 723 MWe×30 年，新規温泉開発や地熱資源調査など新たな掘削を許す場合には 8,330 MWe×30 年の発電量が見積られ，その資源分布面積が国土の 22.2%に達すると計算された．給湯配管や熱交換機への炭酸塩スケール発生の抑制対策を検討し，CO_2 ガスをマイクロバブル化して加圧注入し温泉水を不飽和状態にする方法は効果が確認されたが，粗粒の懸濁物状のものをサイクロンにて除去して目詰まりや沈積を防止する方法，交流磁界を照射して析出を抑制する方法については，効果を明瞭には確認できなかった．また，金属材料にフィルム等をコーティングした材料の試験では，腐食は確認されなかったが，抑制対策を行う手前では，スケールの付着を確認し，コーティングの剥離の事例も生じることを確認した．

３）地熱資源データベースの応用研究においては，プレートースラブ斜め沈み込みの簡易モデル化－シミュレーション手法とその日本列島への適用研究について，さらに進展を図った．九州・近畿地域の火山・地熱活動の異常分布について，フィリピン海プレートースラブのセグメント化・急傾斜化を原因として検討し，誌上・口頭発表を行った．

４）地熱シーズ・基盤研究として，以下の成果を得た．地熱現象の多様性モデル化の研究として，米国地質調査所が公開する高温熱水系シミュレータ HYDROTHERM v.3.1 の中の HYDROTHERM INTERACTIVE について各種の熱水系事例などへの試用を行い，その結果を誌上発表した．また，表計算ソフト Excel に付随する VBA を用いて地熱関連プログラムを作成し，成果を誌上発表するとともに実用的・教育的な「オープンソース」の WWW 公開を行った．温泉・地熱エネルギー開発を支援する目的で，温泉・地熱水中の溶存微量成分の資源性を検討し，価格的に Sc, Cs, REE, Au の回収を研究する価値があると判断された．Sc 及び REE については既公表の水質分析値が数カ所以下しか無く，今後の試料採取・分析が必要なことが判明した．ジオダイナミクス社と共同で行ったオーストラリアのクーパーベーズンでのトレーサー試験の結果を解析，公表し，肘折などとの比較検討を行った．下北地域に想定される小型カルデラの調査研究結果について，地熱ポテンシャルだけでなく放射性廃棄物地層処分の研究における重要性も加味して，誌上発表のための取りまとめを行った．

５．平成 21 年度後期～22 年度前期の主な研究成果公表

村岡洋文 (2009) 総論:我が国の地熱エネルギー開発は蘇るか．OHM, 96-12, 17-22.

佐々木宗建・徂徠正夫・奥山康子・村岡洋文 (2009) 本邦の炭酸塩沈殿物を多量に伴う温泉・鉱泉の地化学的特徴－CO2 地中貯留に対するナチュラルアナログの可能性－．岩石鉱物科学，38，175-197.

茂野　博 (2009) 日本列島に沿って擬似赤道（大円）を引く擬似経度－緯度座標系（PLLCS, JILLS）の試み －東北日本３孤系下への太平洋プレート沈み込みへの適用事例－．地質ニュース，no. 664，50-61.

茂野　博 (2010) 火山・地熱活動異常の原因としてのスラブ沈み込みの急傾斜化 －幾何学モデルと琉球孤・西南日本孤の４セグメント域の比較検討－．地質ニュース，no. 666，21-30.

茂野　博 (2010) 米国地質調査所 (USGS) 公開の高温熱水系シミュレータ HYDROTHERM INTERACTIVE (v.3.1)の紹介．地質ニュース，no. 673，21-36.

Yanagisawa, N., Rose, P. and Wyborn, D. (2009) First tracer test at Cooper-basin, Australia HDR reservoir. GRCTrans., 33, 281-284.

鉱物資源研究グループの紹介

Introduction of the Mineral Resources Research Group

研究グループ長：高木哲一
Leader, Mineral Resources Research Group: Tetsuichi Takagi
Phone: 029-861-3926, e-mail: takagi-t@aist.go.jp

1．グループの研究目的と構成

鉱物資源研究グループは，陸域の鉱物資源を対象とした資源探査・評価など資源開発における最上流部に関わる研究を実施している．現在5名の職員と8名の契約職員・客員研究員が所属している．ここでは当グループの研究内容を，金属資源，非金属資源，鉱物資源情報，分析技術開発の4つに分けて紹介する．

研究メンバー構成

高木哲一(グループ長)
村上浩康
大野哲二
実松健造
星野美保子
昆　慶明(産総研特別研究員, PD)
堀内　悠(産総研特別研究員, PD)
西村光史(テクニカルスタッフ)
恒松麻衣子(テクニカルスタッフ)
奥村公男(客員研究員)
平野英雄(客員研究員)
神谷雅晴(客員研究員)
寺岡易司(客員研究員)

2．金属資源の研究

かつて日本国内には多くの金属鉱山が稼行していたが，高度成長期以降に鉱量枯渇，採掘コストの増大などの理由で次々と閉山し，現在は少数の金鉱山だけになってしまった．それ以降，日本は産業活動に必要な金属資源のほとんどを海外からの輸入に依存するようになった．ところが，中国などの新興国の急成長，2004年以降金属資源の価格の急激な上昇，少数国やメジャー企業による資源の寡占化などにより，鉱物資源(特にレアメタル)を公正な価格で自由に輸入できない現象が起こり始めた．そこで，日本では官民の総力を挙げて海外金属資源の権益を確保する必要性が出てきた．鉱物資源研究グループは海外の金やベースメタル(銅，鉛，亜鉛など)鉱床の他に，最近はインジウムや希土類元素(ランタノイド，Sc，Y)といったレアメタル資源の調査に力を注いでいる．特に需給が逼迫している希土類元素は，高性能モーター等に不可欠な金属だが，ほぼ全量を中国からの輸入に頼っている(Scはロシアの輸入が大部分を占めると推測される)．しかし，最近の価格高騰や輸出規制でその安定供給がますます危ぶまれている．そのため，当グループでは世界各地で中国に替わる希土類鉱床を求めて，一部は民間企業や石油天然ガス・金属鉱物資源機構と共同で調査研究を実施している．

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

写真1　カナダのトアレイク希土類鉱床での調査風景．

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

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

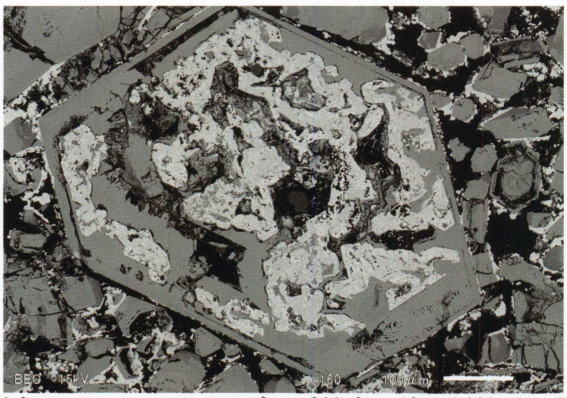


写真４　ムシュガイハダッグ鉱床の希土類鉱石の電子顕微鏡写真(反射電子像). 灰色部がリン灰石で白色部がモナズ石.

写真５　ミャンマーでのイオン吸着鉱の調査風景.

写真６　マレーシアでのイオン吸着鉱の調査風景.

写真７　南アフリカとの共同研究についての会議.

モンゴルでは，ゴビ砂漠にあるムシュガイハダッグ鉱床の調査を行った(写真３). この鉱床はマグマ性のリン灰石と磁鉄鉱を鉱体としているが，同時に希土類資源とのポテンシャルを持つことが分かった. 鉱石鉱物がリン灰石のみならばあまり希土類には富まないが，この鉱床では熱水性のモナズ石[(REE,Th)PO_4]がリン灰石の結晶中や粒間に産出しており(写真４)，希土類鉱石となることが分かった. 鉱体によって希土類鉱石の品位はばらつきがあるため，高品位鉱体の分布状況を把握するための調査・研究を行っている. また，周辺地域にある同様の希土類鉱床の探査を進めている.

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

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

３．非金属資源の研究

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

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

写真８　国内のベントナイト鉱床の調査風景．

４．鉱物資源情報の研究

海外の鉱物資源情報，とりわけ日本に近いアジア地域の情報を収集・解析することは，日本の資源確保戦略を立案する上で非常に重要である．鉱物資源研究グループでは，政府・鉱山業界等の要請に基づき，アジア地域の地質図・鉱物資源図，鉱物資源データベースなどの作成に継続的に取り組んでいる．これまでに，300 万分の１東アジア・中央アジア地質図，300 万分の １東アジア鉱物資源図を出版し，2010 年度に 500 万分の １アジア地質図，2011 年度には中央アジア鉱物資源図の出版を予定している．また，ASEAN 各国で構築中の東アジア鉱物資源データベースへの研究協力，既出版の 50 万分の１国内鉱物資源図の電子化などを実施中である．

５．分析技術開発

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

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

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

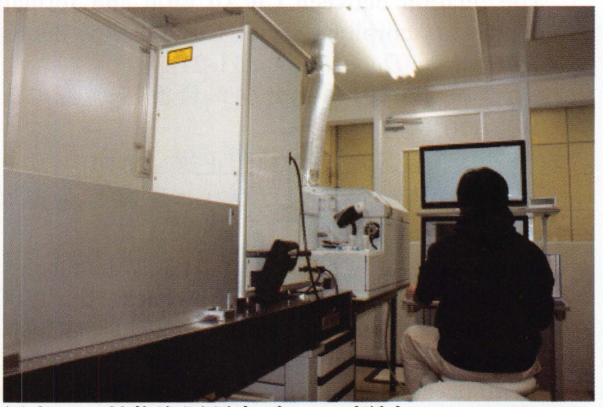


写真９　鉱物資源研究グループ所有の LA-ICP-MS.

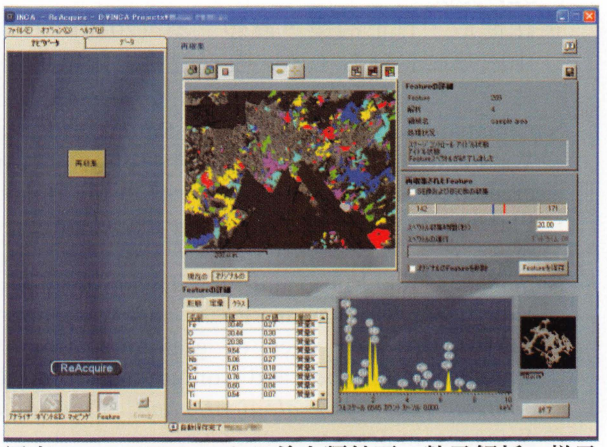


写真１０　SEM による希土類鉱石の粒子解析の様子．

６．今後の展望

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

7．最近の主な研究成果

Hoshino M., Kimata M., Nishida N., Shimizu M., Akasaka T. (2010) Crystal chemistry of zircon from granitic rocks, Japan: genetic implications of HREE, U and Th enrichment *Neues Jabuch fur Mineralogie-Abhanlungen,* 187, 167-188

Hoshino M., Kimata M., Chesner C.A., Nishida N., Shimizu M., Akasaka T. (2010) Crystal chemistry of volcanic allanites indicative of naturally induced oxidation-dehydration *Mineralogy and Petrology,* 99, 133-141

Hoshino, M., Kimata, M., Nishida, N. and Shimizu, M. (2010) Dissakisite-(Ce) chemical composition: some implications for its origins. *Physics and Chemistry of Minerals*, 37, 255-263.

石原舜三・石山大三・佐藤比奈子・村上浩康 (2009) 華南，日本，ボリビアにおける若干の堆積岩，火成岩類の微量インジウム含有量について．*資源地質*, 59, 219- 222

Murakami, H., Seo, J.H. and Heinrich, C.A. (2009) The relation between Cu/Au ratio and formation depth of porphyry-style Cu–Au±Mo deposits. *Mineralium Deposita*, 45, 11-21.

村上浩康 (2010) リチウム資源．*地質ニュース*，670，22-26.

村上浩康・辻本崇史・神門正雄 (2010) リチウム資源探査の最前線：ウユニ塩湖．*地質ニュース*，670，53-59.

Sanematsu, K., Murakami, H., Watanabe, Y., Duangsurigna, S. and Vilayhack, S. (2009) Enrichment of rare earth elements (REE) in granitic rocks and their weathered crusts in central and southern Laos. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*. 60 (11/12), 527-558.

実松健造・村上浩康・渡辺　寧 (2010) ラオス中南部におけるイオン吸着型希土類鉱化作用について．*月刊地球*, 32 巻, 8 号, 468-475.

Sanematsu, K., Moriyama, T. Sotouky, L. and Watanabe, Y. (2010) Mobility of rare earth elements in basalt-derived laterite at the Bolaven Plateau, southern Laos. *Resource Geology*, in press.

Sanematsu, K., Murakami, H., Duangsurigna, S., Vilayhack, S., Duncan, R. A. and Watanabe, Y. (2010) $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of granitoids from the Truong Son fold belt and Kontum massif in Laos. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, in press.

高木哲一　(2010) 日本のレアメタル確保戦略．*地質ニュース*．670，4-8.

Takagi, T., Naito, K. and Kamei, A. (2010) Petrographic contrast between ilmenite- and magnetite-series gabbroids in the Ryoke and San-in belts, southwestern Japan Arc. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 105(4), 194-214.

地質特性研究グループの紹介

Introduction of the Integrated Geology Research Group

研究グループ長：関　陽児
Leader, Integrated Geology Research Group: Yoji Seki
e-mail: yoji-seki@aist.go.jp

1．グループの研究目的

当グループは，地圏資源環境研究部門の研究グループであると同時に，高レベル放射性廃棄物地層処分における安全規制支援研究を行う深部地質環境研究コアの主要な研究グループの一つである．

本研究グループは，高レベル放射性廃棄物地層処分の安全性評価において、概要調査段階までの地表からの調査を中心とした安全性評価に必要な知見や技術を蓄積し国の安全規制政策に資すること、および天然バリアの性能評価やそれに係わる地質学・水理学・岩盤力学・鉱物化学・生物化学的プロセスの実態把握を進めて国の内外に先端的技術成果として発信することを活動の目標としている．

この目標のために，研究テーマとして「幌延地域を対象とした広域地下水流動モデルの検証研究」、「地層処分安全規制支援研究のうちの概要調査結果の妥当性レビューに関する研究・精密調査結果の妥当性レビューに関する研究・安全審査に向けた基本的考え方の整理に係る研究」、「水-岩石 - 微生物相互作用調査技術の評価」および「堆積岩地域での地質、水文ベースライン評価手法」等を設け実施中である．

2．グループの研究資源

1）グループ員：関　陽児（グループ長），金井豊，上岡　晃，鈴木庸平，内藤一樹，幸塚麻里子（産総研特別研究員）、今野祐多（産総研特別研究員）、中村有理（テクニカルスタッフ）

2）主たる研究課題と予算

・「放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質評価手法等の整備」（原子力安全・保安院：委託研究）

・「地下水流動解析モデルの総合的検証手法の検討（幌延変動観測調査）」（原子力安全基盤機構：委託研究）

3．グループの研究トピックス

当グループは，安全評価支援のための基盤的な研究を実施する地下環境機能研究グループと密接に協力しつつ、主に地質ベースラインの評価手法を中心とした研究を実施している。関係機関との研究協力体制については、日本原子力研究開発機構（JAEA）および原子力安全基盤機構（JNES）との研究協力協定に基づく共同研究を始めとして、地下環境機能研究グループに準じた体制で国内外の研究機関と協力しつつ実施している．

以下では、地質特性研究グループにおける重点的研究テーマである「幌延地域を対象とした広域地下水流動モデルの検証研究」および瑞浪地域を対象として実施している「水-岩石 - 微生物相互作用調査技術の評価」における研究事例からトピックスを紹介する．

1）幌延地域を対象とした広域地下水流動モデルの検証研究（原子力安全基盤機構委託研究）

本研究は，JAEA 幌延深地層研究センターとの共同研究体制のもとで、既往の規制支援研究により得られている幌延地域における広域地下水流動に関する解析結果を、新たに取得する水文地質学的実データに基づいて検証することを目的としている．検証は以下の二つの側面から行っている．

第一は、掘削中の立坑の影響を受ける周辺地下水の水理場やさらにその影響を受ける地表面形状の変化を観測し、得られた観測値に対して逆解析の手法を用いて水理特性の 3 次元分布を推定しようとするものである．これに必要なデータを取得するため、平成 20 年度 JAEA 幌延深地層センター内の東立坑に隣接して掘削した孔底深度 512m の観測井において遭遇亀裂や破砕部の詳細な観察、様々な透水性をもつ複数区間を対象としたシーケンシャル水理試験による高精度の水理特性値の網羅的測定を実施した．続く平成 21 年度には観測孔内に据置型の多深度の間隙水圧計を設置し、代表的な深度区間における全水頭の垂直分布の連続観測を開始し、今年度も観測を継続中である．また、浅部の自由地下水面の挙動を推定する目的で、絶対重力計と可搬型重力計を併用したハイブリッド重力測

定による地表面重力分布の精密な経時変化観測が平成 20、21 年度に引き続いて実施される予定である．さらに、人工衛星の合成開口レーダーを用いた地表面形状の精密な変動量解析も平成 20，21 年度に引き続いて実施され、水理場の変化により引き起こされると予想される地表面形状の微小な変化を捕捉する予定である．

第二は、地下水の水質形成機構や年代を解明し、そこから広域地下水流動モデルに制約条件を与えようとするものである．平成 20 年度の 512m 孔の掘削では、詳細な岩芯観察、リアルタイムの掘削水管理（図１）、流体電気伝導度検層等により主要なみずみちが３箇所で捕捉された．ピストンシリンダー型封圧採水容器を用いて、それらのみずみちから被圧大気非接触状態の地下水を原位置深度で採取することに成功した．原位置地下水試料の分析で得られた主要・微量溶存成分組成や水素・酸素・塩素・ホウ素・ヨウ素等の同位体組成の分析結果から、幌延の 512m 観測孔で得られた地下水は、1）天水、2）海水、3）酸素同位体比が高く塩化物イオン濃度が低い続成作用に関係すると考えられる水、4）起源不詳の高塩濃度の水、の４種の地下水の混合で説明可能であることが分かった．地下水年代については、ヘリウム同位体比からは地層年代に近い 10Ma が得られた一方、ヨウ素同位体比からは数 10Ma という極めて古い年代値が得られた．今年度は、原位置採取地下水に加えて地表水や周辺地下水の既存試料も分析し、幌延地域の深部地下水の水質形成機構と形成年代についてより確度の高い知見を得るとともに、微生物活動の地下水水質形成への関与のありかたに関する知見も整理して地下水流動概念モデルを構築した上で、地下水流動解析モデルの検証に資する予定である。

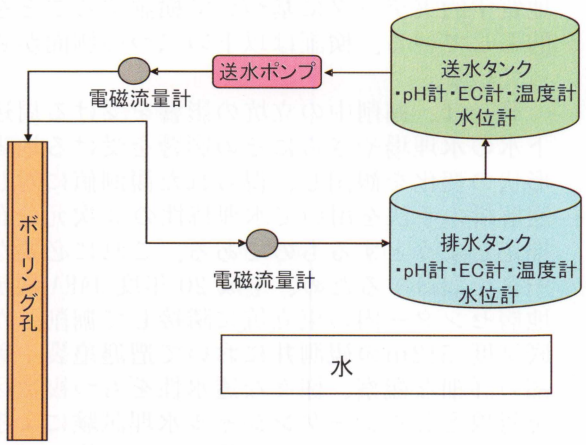


図１　昨年度実施した観測井掘削において採用されたリアルタイムの逸湧水管理システム．これにより高透水ゾーンでの逸水発生と逸水量を迅速に把握でき、有力なみずみちの捕捉に役立った．

２）精密調査結果の妥当性評価レビューに向けた検討（原子力安全・保安院委託研究）

本研究は、JAEA 瑞浪超深地層研究所との共同研究体制のもと、瑞浪地域における地下水観測孔および地下坑道から掘削された観測孔を利用して原位置性の高い地下水試料を採取し、核種移行へ重大な影響を及ぼす酸化還元電位と密接な関連をもつと考えられるコロイド・有機物・微生物の原位置における評価手法の妥当性評価と最適化を行うことを目的としている。

平成 21 年度は、深地層研究所で建設された深度 300m の研究用ステージから新たな観測孔を水平掘削し、採取されたコアを用いて有機物と微生物（特に微生物群集解析と代謝活性測定）を調べるとともに、観測孔に間隙水圧と水質のモニタリング装置（図２）を設置し、掘削流体の影響が十分に低減したことを確認したうえで原位置地下水を採取し、コロイド・有機物・微生物・溶存ガスを分析した。

今年度は、透水係数や湧水量が低く前年度掘削流体の影響の低減が不十分だと考えられた区間２を対象に、孔内水の排出時のコロイド・有機物・微生物・溶存ガスの経時変化を測定している．区間２は透水係数や湧水量を反映して、生物化学特性がより還元的にシフトしていることが明らかになりつつある。

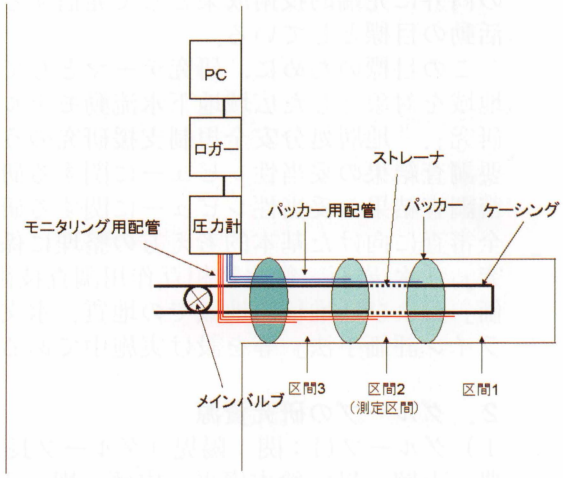


図２　瑞浪の 300m ステージにおいて掘削された地下水観測孔井の模式図．既存の観測孔や坑道の影響の少ない領域に新たに観測孔を掘削し、水頭の異なる岩盤の間をパッカーで遮断して、履歴や水質の異なる地下水を、原位置性を損なわない状態で個別に採取・モニタリングする．

地下環境機能研究グループの紹介

Introduction of the Experimental Geoscience Research Group

研究グループ長：伊藤一誠
Leader, Experimental Geoscience Research Group: Kazumasa Ito
e-mail: kazumasa-ito@aist.go.jp

1．グループの研究目的

当グループは，地圏資源環境研究部門の一研究グループであると同時に，高レベル放射性廃棄物地層処分における安全規制支援研究を行う深部地質環境研究コアの主要な研究グループの一つである．

本研究グループは，放射性核種移行評価に必要な地質環境の隔離性能評価，施設の安全評価に関わる諸プロセス解明のための実験手法，解析手法を整備し，規制当局である原子力安全・保安院が実施する安全評価を支援できる研究基盤を確保することを目的としている．そのために，大きな研究テーマとして「地質特性・水理特性評価」および「地質環境の隔離性能に関する研究」を進めている．

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，冨島康夫，間中光雄，竹田幹郎，李琦（産総研特別研究員）

2）主たる研究課題と予算

・「地層処分に係る地質情報データの整備」(原子力安全・保安院：委託研究)

・「地下水流動解析手法の総合的検証手法の検討」(原子力安全基盤機構：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)

3．グループの研究トピックス

当グループにおいては，地圏資源環境研究部門における高レベル放射性廃棄物地層処分の安全規制支援研究の中で，主として安全評価に関わる，岩盤の放射性核種に対する隔離性能の評価手法，および地下水流動-熱-力学-化学反応の連性モデル化手法，核種移行の安全評価手法の研究を実施している．

地質特性研究グループが主に実施している地質ベースライン評価手法の研究においても，密接な協力関係のもと，テーマの一部を分担している．また，研究の実施に当たっては，部門内の他の研究グループとの研究協力，大学，米国 Southwest 研究所をはじめとする国内外の研究機関との共同研究によって，研究を実施している．また，規制支援機関，規制支援研究機関としての原子力安全基盤機構 (JNES)，日本原子力研究開発機構 (JAEA) との研究協力協定の下の共同研究によって，JAEA の地下実験施設を用いた共同研究を進めている．ここでは，特にグループ内部で実施した成果の中から，代表的な事例を紹介する．

1）堆積岩における間隙水圧分布の成因と地下水流動への影響評価（原子力安全・保安院委託研究）

堆積岩地域においては，自由地下水面からの深度に比例した静水圧と比較して部分的に高い，いわゆる異常高圧を示す部分が存在することが多い．これらの異常間隙水圧は，多くの場合，周辺の地形あるいは低透水層の存在等の地質的な要因，あるいは鉛直，水平方向の荷重と変形による間隙の圧縮によるものと解釈される場合が多い．最近の研究では，地下水中の塩分濃度が鉛直方向で変化がある場合，堆積岩が不完全半透膜として作用して，化学的浸透圧が発生することが，異常間隙水圧の成因として注目されている．

異常間隙水圧が化学的浸透圧によって発生するものであった場合，地形・地質要因等による場合と異なり．透水係数と水頭差から判断される地下水流動，物質移行とは大きく異なる状況となるため，核種移行の評価にも大きな影響を及ぼす．

当グループでは，室内実験と解析解を用いたアプローチによって，化学的浸透圧の発生および変動を支配するパラメータの評価手法と間隙水圧変化の解析手法に関する研究を継続している．本年度は，浸透圧発生のパラメータである反発係数の応力依存性に関する検討、および浸透圧発生の予察的評価手法として，間隙性状，鉱物組成，陽イオン交換能等，岩石の物理化学的特性からの評価手法の検討を行った．

図1に塩分濃度差を持たせた一次元室内実験における差圧の変化を示す．差圧は温度変化に

連動した変動を示すが，差圧の最大値から岩石の反発係数を評価できる．

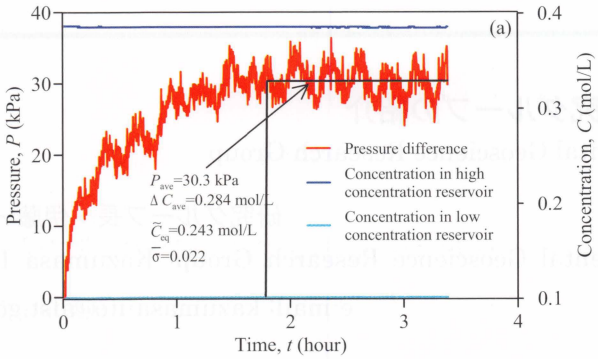


図１：岩石試料を用いた浸透圧試験結果の例

岩石試料に与える周圧を変化させ，同様のデータを取得し，周圧と反発係数の関係を示したものが図２である．

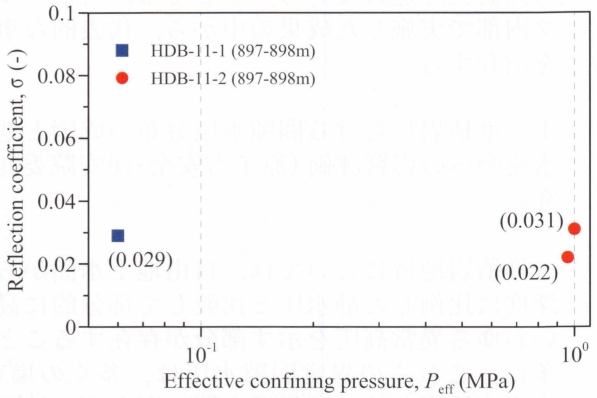


図２：周圧と反発係数の関係

現段階では，周圧が実際の地圧と比較して小さい範囲での限られたデータのみであるため，反発係数の応力依存性は明瞭には確認できていない．

また、当グループでは一般的な物理化学物性である空隙率、かさ密度、比表面積、表面電荷密度から反発係数を評価する Kemper-Bresler モデルを適用し、実験結果との比較を行い，反発係数の予察的評価の適用性を検討した．図３にモデルと実験の比較結果を示す．

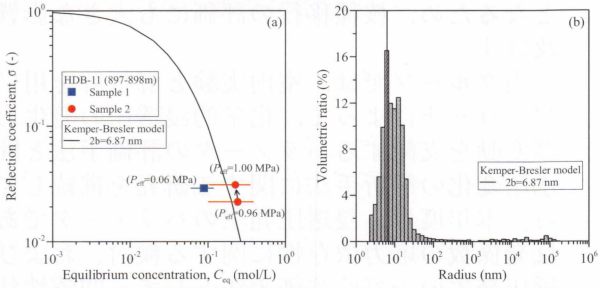


図３：浸透圧実験結果とモデル評価の比較

図３(a)は，反発係数の評価と実験結果を比較したものであり，Kemper-Bresler モデルによって反発係数はほぼ評価可能であることが示された．また，モデルから推定される間隙幅と実測の間隙径分布を比較した(b)より，モデルでの間隙径は、間隙径分布の代表値と整合的であることが示された．

２）地下水流動－熱－力学－化学反応連成解析に関する研究（原子力安全・保安院委託研究）

放射性廃棄物処分の安全評価を行う上での核種移行経路の抽出は，基本的には地下水流動モデルを用いて行われる．実際の地下水流動は，水理的な条件のみではなく，温度分布，岩盤の変形，地下水の化学および生物化学的な条件によって影響を受ける．また，逆に地下水流動によってそれらの外的な条件が変化する．また，地下水の酸化還元電位等の化学的な条件の変化によって，核種の溶解，沈殿状態が大きく左右される等，安全評価にも直接関係する場合がある．これらの複雑な条件を定量的に評価するために，当グループでは地下水流動－熱－力学－化学反応連成手法に関して，評価のベースとなる数値解析手法の研究と，室内実験によるパラメータ評価手法の研究を行っている．

本年度の成果の一例として，微生物活動による水質変化のモデル化を行い，既往の研究との比較を行った結果を示す．ここでは，長さ 25cm の一次元のカラム試験を対象として，微生物と微生物が消費する基質を同時に注入した試験を想定した．

図４に基質と微生物の出口側における濃度変化の解析結果を示す．

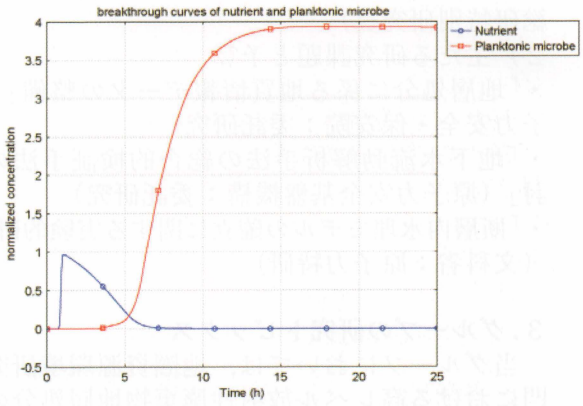


図４：微生物による水質変化の解析結果例

現状では、微生物による溶存物質の消費のみを対象としたモデルであるが，現在，酸化還元環境の変化を対象とした解析を開発している．

地圏環境リスク研究グループの紹介

Introduction of the Geo-environmental Risk Research Group

研究グループ長：駒井　武

Leader, Geo-environmental Risk Research Group: Takeshi Komai

Phone: 029-861-8294, e-mail: takeshi-komai@aist.go.jp

1．グループの研究目的

地圏環境における汚染の調査，リスク評価および対策技術に関する理学的，工学的，社会学的な研究開発を実施し，合理的・科学的なリスク管理に資する．具体的には，地圏環境リスク評価システムの開発，地圏環境情報の整備，鉱山を中心とする産業リスクマネジメントの方法論，有害化学物質の将来予測手法の開発，汚染評価のための物質循環機能の解明，天然鉱物・微生物および動電などによる土壌・地下水汚染の浄化等，様々な視点からの地圏環境の物理・化学・生物学的，環境疫学評価などに関する基礎的な研究を実施し，学術誌等に発表する．

さらに，これまでの地圏環境におけるリスク研究を発展させて，二酸化炭素地中貯留のリスク評価，地圏微生物を利用した環境リスク管理，多孔質体における混相流数値解析手法，核廃棄物を含む各種廃棄物の環境安全性評価，スモールスケールマイニングの管理などの開発につなぎ，より安全で安心な人間生活の実現に資するとともに，実用的な手法と対策技術の普及をはかる．

特に，地圏環境リスク評価システム GERAS の産業への普及，土壌汚染研究会（産業技術連携推進会議）の充実を目標とする．社会的な活動の中では，国内外の環境リスク問題に上記の研究のアウトプットを適用させ，土壌汚染評価システムやリスク評価手法の標準化などのアウトカムに結実させるための取り組みを強化する．

2．各研究項目の内容

地圏環境リスク研究グループは以下の各項目で研究を実施している．

2.1. 地圏環境リスクの研究

土壌や地下水中の残留性有機塩素系化合物に関する浄化手法の開発および自然減衰能評価を行う．また，土壌・地下水汚染に関わる知的基盤整備に資するため，自然起源および人為起源に関する各種データを取得し，表層土壌環境基本情報を整備する．図１は，特定地域における表層土壌の地化学的特性および環境リスクを解析したデータベースの一例である．

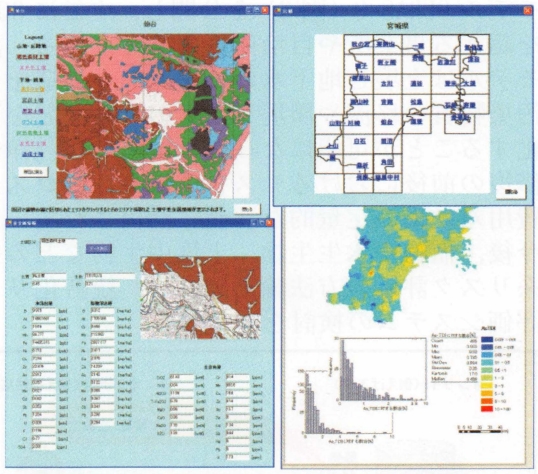


図１　表層土壌の地化学特性データベース

石油系炭化水素や重金属類に関して，土壌汚染リスク評価に必要な物性パラメータ，移動パラメータ等を取得し，汚染物質の移動性を予測する数値解析手法を開発する．

揮発性有機化合物や重金属等の土壌汚染に対して，自然エネルギーおよび微生物等を活用した浄化手法の開発，および迅速オンサイト型の分析・調査技術の評価を行う．さらに，植物や水生生物等の生態系への環境リスクを評価するための方法論を開発し，統合化リスク評価システムに反映させる．

2.2 リスクガバナンスの研究

スモールスケールマイニングについて，主に産業，環境および社会的リスクの観点から，研究を進める．産業リスクとしての研究では鉱物資源のフェアトレード確立に向けて，環境リスク研究では大型環境試料用の非真空 PIXE 分析法の開発，アジア有害元素汚染地域における食のリスク評価と専用大気 PIXE 分析システムの構築の研究に取り組み，さらには社会的リスク研究では地域住民との協働によるリスク管理に関わる研究を進める．

地圏環境における安全解析の不確実性を低減させるために，地質媒体における物質移行及び遅延特性の測定・評価技術の高精度化をはかる．

また，放射線リスク評価と学術体系に関する基礎研究を行い，各種背景を重視した放射線リスクガバナンスのフレームワークを提唱する．

鉱山のリスクマネジメント関する研究ポテンシャルの蓄積を活用して，政府機関等の鉱山政策上のリスク管理の検討のニーズに対して，学術的な支援・提案を行う．特に急激な社会構造の変化に対応しうる望ましいリスクマネジメントの在り方を検討・提案する．

2.3 土壌汚染リスク評価技術の開発

地圏環境リスク評価システム GERAS を高度化し，産業や社会に普及させる．2009 年には詳細モデル GERAS-3（図 2）を公開し，すでに 300 社を超える事業所や自治体に普及している．詳細モデルは土壌と地下水の 3 次元的な構造をもち，汚染物質の移流や環境リスクの分布などを可視化することが可能になった．現場では，浄化・修復の前後におけるリスク低減や浄化コストの費用対効果の定量的な評価に活用されている．今後，植物や水生生物，土壌中生物などの生態系リスク評価の方法論を確立し，統合化リスク評価システムの検討を進める．

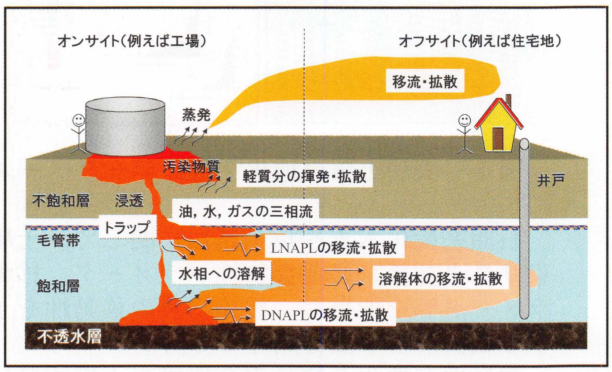


図 2　地圏環境リスク評価システム GERAS-3 の概要

さらに，土壌・地下水汚染の浄化技術として，鉱物，微生物，植物，産業副産物，再生可能エネルギーなどの天然物を活用した環境修復技術を開発し，原位置浄化技術の現場への適用化をはかる．特に，動電学的な手法を重金属土壌汚染に適用し，現場での重金属の除去効果と環境影響について実証的な検討を進めている．

2.4 腐植物質と金属元素の相互作用を活用した生態系修復技術（環境省委託研究）

腐植物質と金属元素の相互作用により，水環境中で可溶性の錯化合物（主としてフルボ酸鉄）を新たに生成させ，海域や陸域の生態系を促進させるための化学的，生物学的な研究を行う．また，鉄などの金属元素を多く含有する製鋼スラグと腐植物質の長期安定性の評価を行い，人や生態系への環境リスクに関わる基礎データを集積し，環境安全性に関わる技術的な指針を得る．これらの研究で得られた知見を利用して，実際の磯焼け海域の海水を利用した実証試験を行い，環境問題解決と循環型社会実現を推進するための技術体系を確立する．

2.5 メコン川底質中の有害物質の原位置浄化に関する調査研究（文科省委託研究）

農薬等の残留性有機汚染物質 POPs により汚染された土壌および地下水を対象として，自然浄化作用と同等なマイルドな反応を利用した浄化技術の確立をはかる．そのため，地圏環境における農薬由来成分の挙動解析と化学的分解を調べ，POPs 由来の挙動解明と，マイルドな化学的分解および微生物反応をアシストするような反応について検討する．また，自然減衰や地下微生物等による POPs 分解挙動を解明し，POPs 分解および無毒化に関する反応を検討するとともに，有害物質による人および生態系へのリスク評価を実施する．

3．グループの研究体制

地圏環境リスク研究グループは，以下の体制で研究を実施している．

駒井　武（グループ長）
田中敦子
村尾　智
張　銘
川辺能成
原　淳子
坂本靖英
高田貞江，森田佳美（テクニカルスタッフ）
山崎哲生（客員研究員）

4．最近の主な研究成果

1. 坂本靖英，川辺能成，駒井武他：鉱物油に起因した土壌・地下水汚染を対象としたリスク評価システムの開発―土壌・地下水環境における油の移動現象の解析と複合成分に起因したリスクの定量的評価―，土木学会論文集 G，66(4)，(2010)
2. 原　淳子，川辺能成，井本由香利，駒井武他：北海道長流川流域における鉱床・熱水変質帯分布と表層土壌中の重金属類濃度に関する調査，応用地質学会誌，51(1)，(2010)
3. 張　銘，原　淳子，駒井　武：環境疫学的視点による重金属バックグラウンドと平均寿命に関する考察，環境地質学シンポジウム論文集，19，(2009)
4. Y. Kawabe, J. Nishiwaki, J. Hara, T. Komai, Risk-based evaluation of soil contamination by mineral oils considering natural attenuations, Water Dynamics, 6, (2009)
5. 駒井　武，原　淳子，張　銘：医療地質研究の最前線，地質と調査，123，(2010)
6. S. Murao, Thematic Report: Mining, 国連 ESCAP, EDD/2009/RIM.18/6, (2009)

東南アジアのイオン吸着型希土類鉱化作用

Ion-adsorption type REE mineralization in Southeast Asia

実松健造，昆慶明，村上浩康（鉱物資源 RG），今井亮（秋田大），渡辺寧（鉱物資源 RG）
Kenzo Sanematsu[1)*], Yoshiaki Kon[1)], Hiroyasu Murakami[1)], Akira Imai[2)] and Yasushi Watanabe[1)]
[1)] Mineral Resources Reserch Group., [2)] Akita University.
*Corresponding Author, e-mail: k-sanematsu@aist.go.jp

1．はじめに

近年需給が逼迫しているレアメタルである希土類元素(REE)は軽希土類(La～Eu)と重希土類(Gd～Lu)とに大きく分けられる．重希土類の多くは軽希土類に比べて地殻存在度が低く，また鉱床タイプも限られている．そのため，世界の重希土類資源の大部分はイオン吸着型鉱床から供給されている．鉱石はイオン吸着鉱と呼ばれる風化花崗岩であり，選鉱(鉱石鉱物を選択的に集める処理)を行わずに電解質溶液を用いてイオン交換反応により希土類を抽出することが可能である．この種の鉱床は中国南部でしか開発されていないが，最近の当グループの研究により，イオン吸着型希土類鉱徴地(鉱床となる可能性の高い地域)が東南アジアに存在することが分かってきた．本発表ではタイ王国プーケットの風化花崗岩をモデルとしてイオン吸着鉱の成因と鉱床の探査法について説明する．

2．東南アジアの花崗岩

タイ，半島マレーシア，インドネシア西部，ミャンマー東部には花崗岩が分布しており，ペルム紀前期～三畳紀後期の東部地区，三畳紀後期～ジュラ紀前期の北部地区および中部地区，そして白亜紀後期～始新世の西部地区に分類される(例えば Cobbing et al., 1992; 図 1A)．東部地区は I タイプ花崗岩が支配的であるが，その他の地区では S タイプ花崗岩が広く分布する．中部地区と西部地区の花崗岩は特に Sn-W 鉱化作用と関連しているものが多く，その中で西部地区の花崗岩は希土類に富むことが知られている．

3．プーケットの花崗岩と風化殻

西部地区のプーケット島北部において，Kata Beach 花崗岩とその上部に発達する厚さ約 12m の花崗岩風化殻から試料採取を行った(図 1B)．風化殻は地表から下部に向かって，黒色で有機物に富む A 層，粘土質な B 層，花崗岩の組織が確認できる C 層に分けた．B 層はさらに B1～B12 層に機械的に分類した．最も普遍的に産出する粘土鉱物はカオリナイトであり，次いでハロイサイトとイライトが多い．原岩花崗岩は I タイプと S タイプの中間の特徴を持つ中粒～粗粒(2～8 mm)の等粒状黒雲母花崗岩である．花崗岩は希土類に富み(REE=595 ppm)，電子顕微鏡による観察と EDS 分析の結果，希土類含有鉱物として REE-Ca フッ素炭酸塩，褐簾石，チタン石，リン灰石，ジルコンが確認された．REE フッ素炭酸塩は長石斑晶の空隙，粒間，割れ目の中に他形または柱状自形結晶の放射状集合体として産出し(図 2A)，花崗岩貫入時の自生変質作用によって晶出したと考えられる．比較的弱い風化を受けた C 層の風化花崗岩では REE フッ素炭酸塩は確認されないが，カオリン化した長石の空隙や粒間にラブドフェーン-(Ce)[$REEPO_4 \cdot H_2O$]が確認される(図 2B)．B 層および A 層ではラブドフェーンの産出はまれであり，セリアナイト[$(Ce,Th)O_2$]が多い(図 2C)．ジルコンはほとんど変質を受けずに残っているが，褐簾石，チタン石，リン灰石は変質を受けて一部または全体が分解していることが多い(図 2D)．

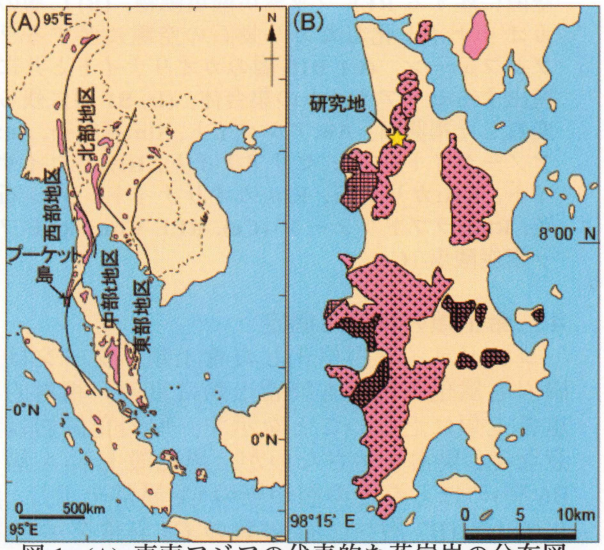


図 1. (A) 東南アジアの代表的な花崗岩の分布図．(B) 西部地区に属するプーケット島の花崗岩類と研究地．Cobbing et al. (1992)を一部改編．

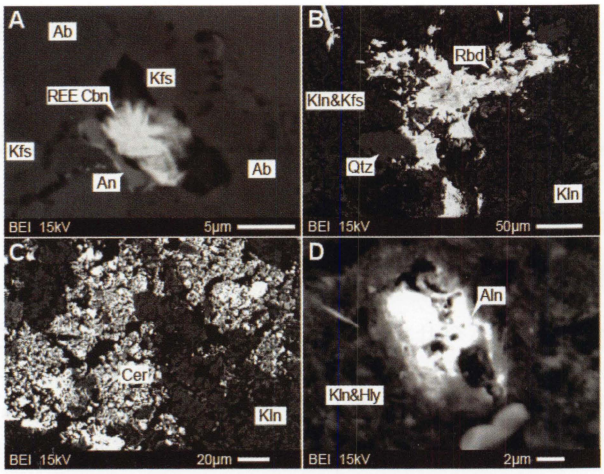


図 2. 反射電子像写真. (A) 原岩花崗岩の長石の空隙に産する REE フッ素炭酸塩鉱物. (B) C 層のカオリナイト化したカリ長石の空隙に産するラブドフェーン. (C) B10 層のカオリナイトと共に産出するセリアナイトの集合体. (D) B1 層に残る変質した褐簾石. Ab:アルバイト, Aln:褐簾石, An:アノーサイト, Cer: セリアナイト, Hly:ハロイサイト, Kfs:カリ長石, Kln:カオリナイト, Qtz: 石英, Rbd:ラブドフェーン-(Ce), REE Cbn: REE フッ素炭酸塩-(Ce).

4. 希土類の移動と固定

コンドライト規格化した希土類パターンは花崗岩も風化花崗岩も軽希土類に富み，相対的に重希土類に乏しいことを示す．原岩花崗岩は有意な Ce 異常を示さないが，風化殻上部(A 層～B6 層)のほとんどの層が正の Ce 異常を示し，風化殻下部(B7 層～C 層)は負の Ce 異常を示す(図 3B)．このことは B6 層と B7 層の間(深度 4.5m 付近)に Ce^{4+}と Ce^{3+}の酸化還元境界があったと考えられる．希土類含有量は原岩花崗岩で 595ppm であるのに対し，風化殻上部では 174～548 ppm と低く，風化殻下部では 578～1084 ppm と高い傾向にある(図 3C)．風化殻下部における希土類の増加は風化によって移動しやすい元素が風化殻から溶脱したことによる相対的な希土類の増加のみでは説明できないため，風化殻上部から希土類が移動し，風化殻下部で固定したことを示す．希土類の固定は低 pH の土壌水が比較的高い pH の地下水と接することによって起こるものと考えられる．希土類は風化殻中の二次鉱物の構造中に分配されるか，吸着物質に化学的に吸着することによって固定される．段階抽出実験の結果から，風化殻上部の希土類の 34～67%が，風化殻下部の希土類の 53～85%が吸着されていることが分かる(図 3D)．したがって，風化殻下部で固定された希土類は鉱物中に分配されずに，大部分が吸着して存在している．この結果は，風化殻下部の B 層において希土類鉱物がほとんど確認されないという電子顕微鏡による観察結果と調和的である(図 2C, 図 2D)．この風化殻下部は希土類含有量と希土類吸着率

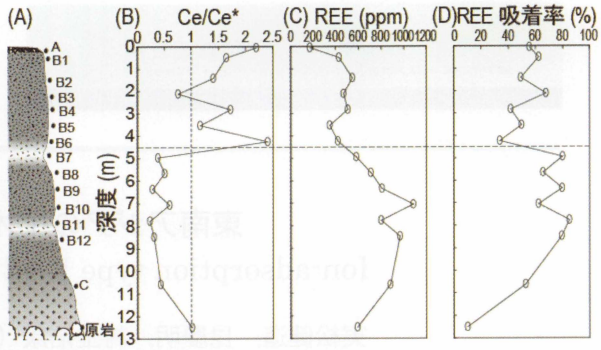


図 3. (A)花崗岩風化殻の模式図と(B)深度方向の(B)Ce 異常，(C)希土類含有量，(D)希土類吸着率の変化図.

が中国南部のイオン吸着鉱のそれらに匹敵するため，イオン吸着型鉱化作用であると言える．

5. イオン吸着鉱の成因と探査への応用

一般に，風化・浸食作用により地表に露出した花崗岩体は地表付近から風化し始める．地表付近は大気中の CO_2 と腐植土が存在するため，土壌水は酸性で最も風化が進行する．同時に大気と接しているために酸化的な環境でもある．したがって，希土類含有鉱物の変質によって土壌水に REE^{3+}が溶けて風化殻下部へ移動するが，酸化的であるために Ce^{4+}はセリアナイトなどの酸化物を形成することによって固定される．REE^{3+}を溶かした土壌水が比較的高い pH の地下水面と接触することにより，希土類の吸着や希土類含有二次鉱物の形成が起こる．ここで希土類は Ce に乏しいために，負の Ce 異常が特徴的である．イオン吸着鉱は吸着性希土類の割合が高いために全岩化学組成もしばしば負の Ce 異常を示し，探査において有効な指標となる．

原岩花崗岩中に産する希土類鉱物の変質に対する抵抗性もイオン吸着鉱の形成に大きな影響を与える．容易に分解する希土類フッ素炭酸塩の産出は中国のイオン吸着型鉱床の原岩でも確認されており(Ishihara et al., 2008)，鉱床の成因に関する重要な鉱物学的特徴である．また，褐簾石，リン灰石，チタン石の方がモナズ石やゼノタイムよりも変質で分解されやすいだろうから，イオン吸着鉱の希土類の供給源としては希土類炭酸塩＞褐簾石，リン灰石，チタン石＞モナズ石，ゼノタイムの順に望ましいと推定される．希土類に富み，かつ変質しやすい希土類含有鉱物を含む岩石として，I タイプと S タイプの境界付近の性質を持つ花崗岩が望ましいのかもしれない．以上の点をふまえ，現在は東南アジア西部地区の花崗岩を対象にイオン吸着鉱の成因の解明と希土類資源の評価を行っている．

引用文献：

Cobbing, E.J. et al. (1992) Overseas Memoir of the British Geological Survey No. 10. pp. 369, HMSO, London.

Ishihara, S. et al. (2008) Resource Geology, 58, 355-372.

スカンジウムを含有するラテライト型鉱床
Scandium-bearing lateritic deposits

実松健造，星野美保子，渡辺寧（鉱物資源 RG）
Kenzo Sanematsu*, Mihoko Hoshino, Yasushi Watanabe
Mineral Resources Reserch Group
*Corresponding Author, e-mail: k-sanematsu@aist.go.jp

1．はじめに

スカンジウムは用途の非常に限られたレアメタルであったが，近年になって固体酸化物形燃料電池の電解質に用いられるようになり，その急激な需要の増加が予想される．しかしながら，スカンジウムの生産はロシアなどの一部の国に限られており，資源の寡占化が懸念される．USGS(2010)によるとスカンジウム酸化物(Sc_2O_3)の価格は 900～3,260USD/kg であるが，最近ではさらに高騰しているようである．スカンジウムはウラン鉱石やタングステン鉱石などの製錬過程で副産物として生産されてきたが，今後の需要増加を賄うにはこれらの副産物だけでは不十分であると考えられる．したがって，スカンジウムを経済的に生産可能な鉱床を新たに評価することが不可欠である．スカンジウム含有鉱床については岸本(1986)に詳しい解説があるが，本発表ではスカンジウムを副産物として生産可能なラテライト型ニッケル鉱床を最も有望な鉱床として提案する．

2．スカンジウムに富む岩石

スカンジウムはマグマ中で適合元素として鉱物中に分配されるため，スカンジウム含有量は苦鉄質岩ほど高く，珪長質岩ほど低い傾向がある．ただし，超苦鉄質岩の含有量は様々であり，ダナイトでは低く(<10 ppm Sc)，輝岩や角閃岩では高い(50～100 ppm Sc)．これは Sc^{3+}が輝石や角閃石中の Fe^{3+}の一部を置換して存在していると考えられる．超苦鉄質岩に胚胎される鉱床として，クロム，白金族，ニッケル鉱床などが挙げられる．ニッケル鉱床には超苦鉄質マグマに伴われた硫化物マグマが鉱体を形成した硫化物ニッケル鉱床と，超苦鉄質岩が風化して形成されたラテライト型ニッケル(しばしばコバルトも伴う)鉱床がある．ラテライト型鉱床は硬質岩を鉱石とする他の鉱床に比べてスカンジウムが濃集しているという利点がある．なぜならばスカンジウムはラテライト化の過程で移動しにくい元素であり，一方で SiO_2，アルカリ元素，アルカリ土類元素といった主成分が溶脱することにより，スカンジウム含有量が相対的に 2～3 倍程度増加するからである(Sanematsu et al., 投稿中)．また，低品位鉱の製錬過程で用いられる高圧硫酸浸出法は，ニッケル鉱石からのニッケルやコバルトの回収だけでなくスカンジウムの回収にも適していると推定される．このような超苦鉄質岩起源のラテライト型ニッケル鉱床はオーストラリア，ニューカレドニア，フィリピン，インドネシア，マダガスカルなどといった低緯度地域に多く分布しており，またギリシャやカナダなどにも存在する．このように，鉱石中のスカンジウム品位，製錬法，資源量と鉱床の分布を考慮すると，ラテライト型ニッケル鉱床が新たなスカンジウム資源の供給源となると考えられる．

3．オーストラリアのラテライト型鉱床

鉱物資源データを参考しやすいオーストラリアのスカンジウム資源についてここで説明する．オーストラリアではニッケル-コバルト鉱床は西オーストラリア州に集中しており，クイーンズランド州やニューサウスウェールズ州にもいくつか存在する(図 1)．西オーストラリア州のニ

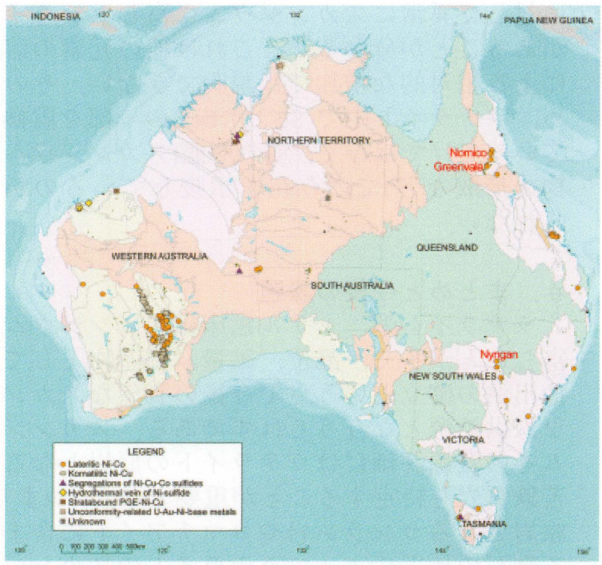


図 1．オーストラリアのニッケル鉱床の分布図 (Jaireth et al. (2010)を一部改編)．赤字は本文中で説明されているラテライト型鉱床．

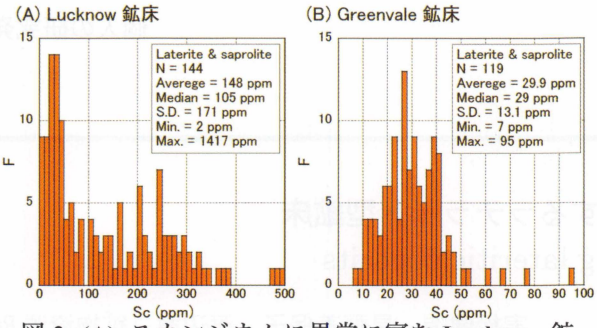


図 2. (A) スカンジウムに異常に富む Lucknow 鉱床と(B)スカンジウムに乏しい Greenvale 鉱床のスカンジウム品位を示したヒストグラム．Lucknow 鉱床では 27m にわたって 882 ppm Sc(そのうち 9m は 1417 ppm Sc)の高品位部が確認されている(データは Mettallica Minerals Ltd.)．高品位部はヒストグラム外の表示となる．

ッケル鉱床は主にラテライト型とコマチアイトに関連する硫化物型から構成されるが，東部の２州ではラテライト型が大半であり，また最近になってスカンジウムの鉱化作用が報告されている．ニューサウスウェールズ州で探鉱中の Nyngan Gilgai 鉱床はニッケルの品位は定かではないが，スカンジウムに関しては鉱量 12 百万 t で品位 261 ppm Sc であるため，4,804 t の Sc_2O_3 が見込まれる(Jervois Minining Ltd.社ウェブサイトより)．一方，クイーンズランド州の Nornico プロジェクトで探鉱中の Lucknow Ni-Co-Sc 鉱床は，鉱量 9 百万 t，平均品位 109 ppm Sc であるため，1,480 t の Sc_2O_3 が見込まれる(Mettallica Minerals Ltd.社ウェブサイトより)．この鉱床では局所的に数百 ppm Sc の高品位鉱が確認されるのが特徴である(図 2A)．しかし，同プロジェクトの Greenvale 鉱床では低品位である(図 2B)．このことから，ラテライト中のスカンジウム鉱化作用の評価には原岩の特定が重要であることが分かる．また，図 3 から Lucknow 鉱床には鉄に対して異常にスカンジウムに富むラテライトがあることが分かるが，これは他の元素の溶脱による相対的な増加では説明できない．そのため，ラテライト中で Sc^{3+}が Fe^{3+}の一部を置換しているだけではなく，別の形態(スカンジウム鉱物の形成など)での存在を示唆しているのかもしれない．

4．まとめと今後の課題

ラテライト型ニッケル鉱床はスカンジウムに富むことが多く，品位，鉱量，副産物としての抽出法の確立という点で今後の有望なスカンジウム供給源となりうるはずである．スカンジウムその資源評価にはラテライトの原岩となる超苦鉄質岩を特定することが重要となる．つまり，原岩となるカンラン岩やコマチアイトに含まれる輝石の比率によってラテライトのスカンジウム品位がある程度決定される．また，ラテライトを構成する地質として，オフィオライトとグ

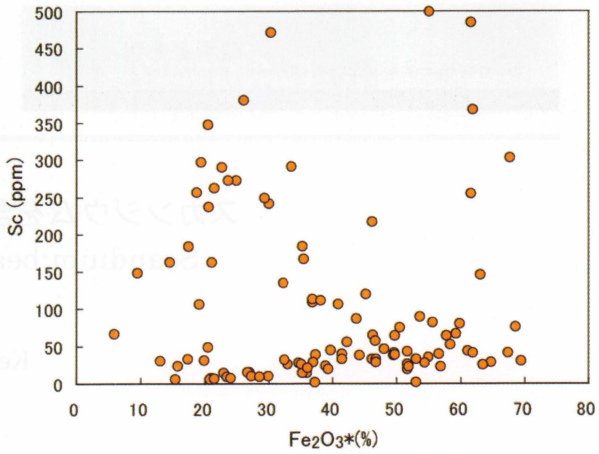


図 3．スカンジウムに富む Lucknow 鉱床のスカンジウム品位と Fe_2O_3*(全鉄)含有量との関係図(データは Mettallica Minerals Ltd.)．一般には線的な正の相関が見られるはずだが，この鉱床は Fe_2O_3*に対して Sc に異常に富むラテライトが確認される．

リーンストーン帯のどちらがスカンジウムの濃集に適しているかも調べる必要があるだろう．さらに，Lucknow 鉱床で確認されるように，超苦鉄質岩の通常のラテライト化によって説明できないような高品位スカンジウム鉱化作用についても研究する必要がある．

参考文献：

Jaireth, S. et al. (2010) Australian Nickel Resources (Sheet 2: Deposit types), 1:10,000,000 scale map, Geoscience Australia, Canberra, Australia.

岸本文男 (1986) 含スカンジウム鉱床，地質ニュース，10 月号，46-55

Rudnick, R.L. and Gao, S. (2003) The Crust (Rudnick, R.L. Ed.), Elsevier, 1-64.

Sanematsu, K. et al. (2010) Bulletin of the Geological Survey of Japan, 投稿中.

USGS (U.S. Geological Survey) (2010) Mineral Commodity Summaries, Scandium, 140-141.

インジウム資源量と鉱床成因論
－日本、中国、ボリビアの錫多金属鉱床－
Indium resources and metallogeny of tin-polymetallic base metal deposits in Japan, China and Bolivia

村上浩康（鉱物資源研究グループ）
石原舜三（産総研・特別顧問）
Hiroyasu Murakami[1)*] and Shunso Ishihara[2)]
[1)] Mineral Resources Reserch Group, [2)] Special Councilor, AIST
*Corresponding Author, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

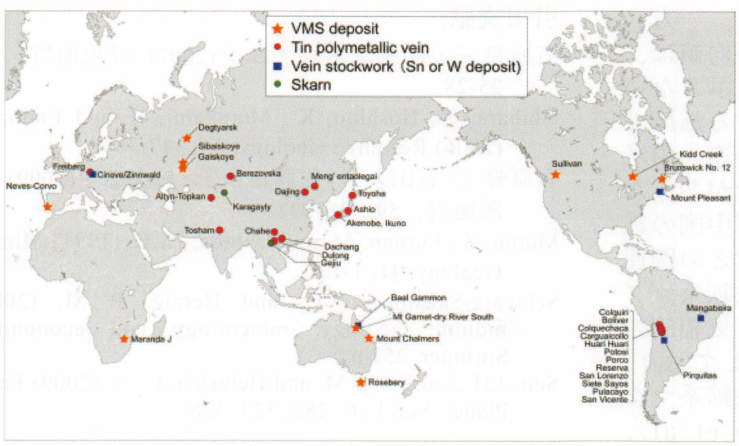
1．はじめに

インジウムを産する鉱床は、チタン鉄鉱系花崗岩に関連したスズを伴うスカルン型鉱床（カルシウム含有鉱物を伴う鉱床タイプ）や鉱脈鉱床であると理解されていた（例えばMurao et al., 1991）。しかしながら、日本のグリーンタフ帯に産出する豊羽鉱床や足尾鉱床がインジウムを産する鉱床として大規模であると認定されて以来（Ishihara et al, 2006）、磁鉄鉱系花崗岩帯を含めて生成場の再検討が必要となってきている。このような背景のもと、地圏資源環境研究部門の競争的資金等を活用し、日本、中国、ボリビアに分布するインジウム含有錫多金属鉱床に産する鉱石及び鉱石鉱物の ICP-MS 分析及びフェムト秒ﾚｰｻﾞｰｱﾌﾞﾚｲｼｮﾝ ICP-MS (fsLA-ICPMS) 分析を行った。この結果に基づき、世界の主要なインジウム産出国における資源量評価に加え、インジウム鉱床生成場における濃集プロセスを考察した。

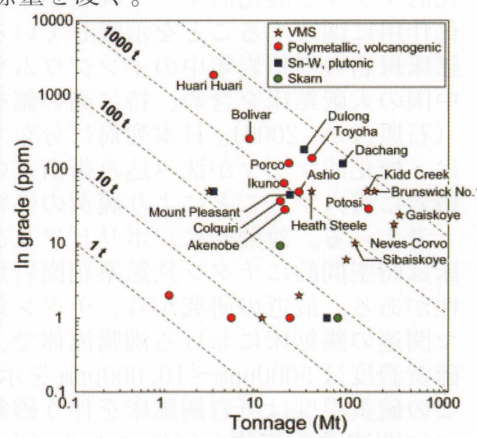
2．結果

2.1. 資源量評価

インジウムを産する鉱床タイプは、火山性塊状硫化物鉱床（VMS）、スズ多金属鉱床、タングステンやスズを伴う網状鉱脈鉱床、浅熱水性多金属鉱床、そしてチタン鉄鉱系花崗岩に関連したスズを伴うスカルン型鉱床がある（第１図及び第２図）。このうち、日本、中国及びボリビアに分布するインジウム含有錫多金属鉱床産鉱石（精鉱含む）のインジウム(In)含有量並びに1000In/Zn 比は以下のとおりである; 日本: 1030 ppm、2.1 (豊羽), 295 ppm、 3.2 (足尾), 328 ppm、13.7 (生野), 125 ppm、 0.35 (明延); 中国: 183 ppm、5.6 (都龍：Dulong), 83 ppm、2.3 (大蔵 92 号鉱体：Dachang No.92), 49.8 ppm、0.12 (Huagshaping)；ボリビア: 292 ppm、4.0 (ポトシ：Potosi), 1,867 ppm、11.3 (ワリワリ：Huari Huari), 100 ppm、0.3 (ツントコ：Tuntoco), 103 ppm、59.2 (アニマス：Animas), 1,160 ppm、3.7 (ピキリタス：Piquiritus), 1,080 ppm、2.1 (サンロレンゾ：San Lorenzo), 584 ppm、1.7 (ボリヴァー：Bolivar), 499 ppm、1.23 (ポルコ：Porco), 449 ppm、1.21 (レゼルバ：Reserva)、213 ppm、0.61 (コルキリ：Colquiri). これら鉱石中の In 含有量を精鉱品位から改めて比例計算した上で、過去の生産量及び埋蔵量に適応すると、ボリビアの錫多金属鉱床は約 14,500 トンのインジウム資源量となった(第１表)。これは、現在までに報告されている中国南部 (11,000 トン、石原ほか、2006)、日本 (9,000トン、Ishihara et al., 2006)、更には北中国－シホテアリン地域 (900 トン、石原・ゴネフチュク, 2007) などのインジウム資源量を凌ぐ。



第１図　主なインジウムを産する鉱床



第２図　鉱量-品位モデル。VMS は大規模・低品位、錫多金属鉱床は小規模・低品位

Deposit	Country	Tonnage (Mt)	In (g/t)	In (t)	Ref.
VMS					
Kidd Creek	Canada	135.0	50	6,750	1
Neves-Corvo	Portugal	261.5	18	4,707	1
Letneye	Russia	10.0	1	10	1
Komsomolskoye	Russia	25.0	2	50	1
Podolskoye	Russia	80.8	6	485	1
Sibaiskoye	Russia	100.0	10	1,000	1
Gaiskoye	Russia	300.0	24	7,200	1
Maranda J	South Africa	2.7	50	135	1
Brunswick No.12	Canada	161.0	50	8,050	1
Heath Steele	Canada	33.8	50	1,690	1
Polymetallic, volcanogenic					
Ashio	Japan	24.8	49	1,226	2*
Akenobe	Japan	17.5	29	500	2
Ikuno	Japan	17.1	64	1,094	2
Freiberg	Germany	4.7	1	5	1
Tosham	India	1.0	2	2	1
San Vicente	Bolivia	20.0	1	20	1
Bolivar	Bolivia	7.3	255	1,856	3
Colquiri	Bolivia	17.7	37	655	3
Porco	Bolivia	19.3	119	2,301	3
Huari Huari	Bolivia	3.0	1867	5,600	3
Potosi	Bolivia	140.0	29	4,030	3
Toyoha	Japan	33.7	138	4,651	2
Sn-W, plutonic					
Mount Pleasant	Canada	19.8	45	897	1
Baal Gammon	Canada	3.0	50	150	1
Cinovec	Czech	50.0	1	50	1
Dulong	China	28.0	183	5,124	3
Dachang	China	75.0	117	8,795	3

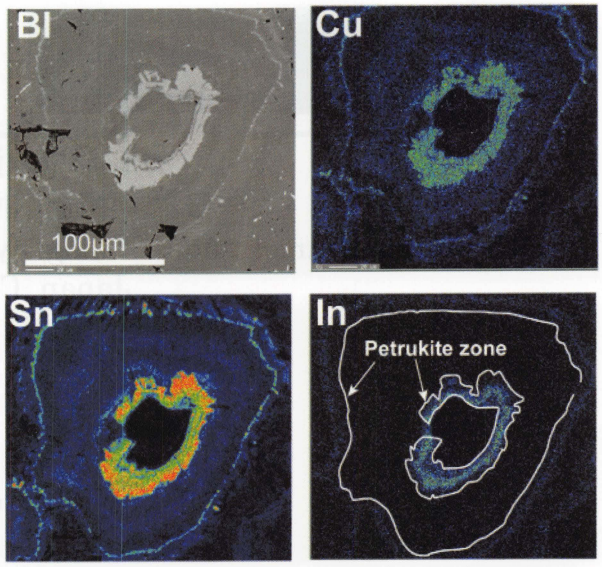
1=Schwarz-schampera and Herzig (2002); 2=Ishihara et al. (2006); 3=this study

* Histrical production of Cu used, instead of Zn.

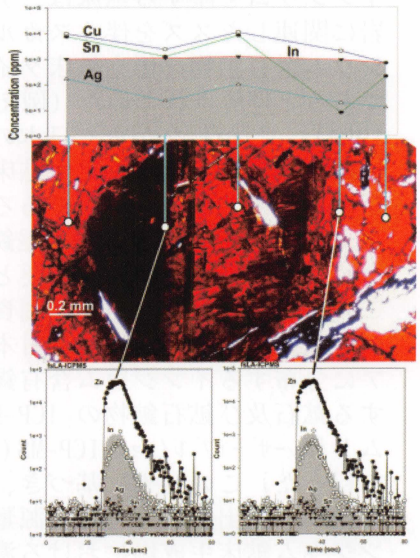
第 1 表　インジウム鉱床の鉱量（生産量及び埋蔵量）と品位

2.2. 鉱石鉱物中のインジウム含有量

インジウムの殆どは、不透明で鉄に富む黒色閃亜鉛鉱中に含まれている。日本及びボリビアの閃亜鉛鉱は光学的ゾーニングを呈し、一部にインジウムが濃集（>1 wt % In)する。このような高 In バンドは Cu 及び Sn 濃度の増加を伴い、petrukite ($(Cu,Fe,Zn,Ag)_3(Sn,In)S_4$) などの鉱物が形成されている（第 3 図)。これに対し中国の都龍及び大蔵鉱床産閃亜鉛鉱は光学的ゾーニングを持たず、閃亜鉛鉱中の In 濃度は、1,845 ± 139 ppm (1 σ)（都龍)、1,075 ± 230 ppm (1 σ)（大蔵）を示し比較的均質である（第 4 図)。日本、ボリビア、中国の閃亜鉛鉱は、Sn 及び Ag を微量に含む。これは、インジウムが銀－錫鉱化作用に関連することを示唆する。鉱石のインジウム濃度と銅・スズ濃度との間に正の相関が認められることや、鉱石中の硫黄同位体比から、還元的マグマと酸化的マグマ両者がインジウム鉱化作用に関連することを示唆している。一方、鉱床母岩の堆積岩類中のインジウム平均値は、中国の大蔵鉱床を含め、特に高い値を示さない（石原ほか、2009)。日本列島に分布する鉱床では、酸化的マグマが沈み込み帯由来の還元的堆積岩に貫入することにより硫黄の供給があったと考えらる。対照的に、ボリビア及び中国の鉱床は時空間的にチタン鉄鉱系花崗岩類との関連性がある。最近の研究から、チタン鉄鉱系マグマ関連の錫鉱床における沸騰流体で、気相側の硫黄濃度は 5000ppm～10,000ppm を示しており、この硫黄濃度は斑岩銅鉱床を伴う磁鉄鉱系マグマに関連する流体と同等である（Seo et al., 2009)。従って、チタン鉄鉱系マグマにおいても硫黄がインジウムの移動・濃集に重要な役割を果たしていた可能性がある。これらのチタン鉄鉱系花崗岩の貫入様式は浅成の斑岩類から、深成の等粒状組織を呈する花崗岩類を伴うものまで様々で、この深度の違いが閃亜鉛鉱中の微量成分濃度を規制している可能性もある。今後は、流体中のインジウム濃度や、沸騰流体におけるインジウムの気液分配を解明する必要がある。



第 3 図　ポトシ鉱床産閃亜鉛鉱の組成ゾーニング



第 4 図　大蔵鉱床産閃亜鉛鉱の LA-ICPMS 分析結果

引用文献

石原舜三・G. I.ゴネフチュク(2007) 資源地質、57, 25-28.

Ishihara, S., Hoshino, K., Murakami, H. and Endo, Y. (2006) Resource Geology, 56, 347-364.

石原舜三・石山大三・佐藤比奈子・村上浩康(2009) 資源地質、59, 219-222.

Murao, S., Furuno, M. and Uchida, A. C. (1991) Mining Geology, 41, 1-13.

Schwarz-Schampera, U. and Herzig, P. M. (2002) Indium: geology, mineralogy and economics. Springer. 257 p.

Seo, J.H., Guillong, M. and Heinrich, C. A. (2009) Earth Planet. Sci. Lett. 282, 323–328.

リチウム資源－ウユニ塩湖－

Lithium resources - Salar de Uyuni -

村上浩康（鉱物資源研究グループ）
Hiroyasu Murakami
Mineral Resources Reserch Group.
e-mail: h-murakami@aist.go.jp

1．はじめに

リチウムは二次電池製造分野における需要が旺盛で，現在最も“活気のある”元素のひとつである．2008 年における世界のリチウム総生産量（2 万 5 千トン：金属リチウム換算，以下同じ）は 1990 年（5.7 千トン）の約 4 倍に増加した（図 1 ；USBM，1991；USGS，2010）．リチウム二次電池の需要増とも相まって，

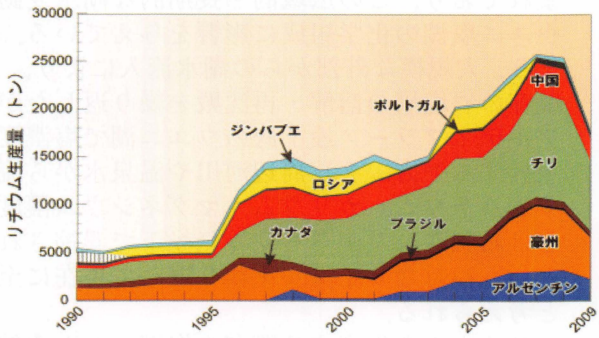


図 1　リチウム生産量の推移

2000 年以降の年間リチウム消費量は年 6 %の成長を示している（USBM, 2008）．この需要拡大に見合う「資源の安定供給」という天下御免の旗印のもと，新たな商機を窺う企業に加え，自国への利益誘導を目指す国家間の政策も錯綜しながら，リチウム資源獲得競争が南米（ボリビア，アルゼンチン），北米（米国），欧州（セルビア・フィンランド）で繰り広げられている．このうちウユニ塩湖を主体とするボリビアの未開発資源量は 900 万トンと見積もられている（USGS,2010）．この小文では，リチウム資源の概要と，現在も活発に探査が行われているボリビアのウユニ塩湖の地質学的背景やその成因について紹介する．

2．リチウム資源

現在までに確認されている世界全体のリチウム埋蔵量は 990 万トン，未採掘分も含めると 2300 万トンと膨大で，将来のリチウム需要が年 3～5%増加しても，200 年分以上の埋蔵量がある．

リチウム資源の供給源は，大陸内塩湖・かん水や海水といった水圏資源と，リチウムに富む鉱物を採掘する地圏資源とに 2 大別される（図 2）．地圏リチウム鉱床では，リチア輝石（Spodumene：$LiAlSi_2O_6$）などが採掘対称となる．主な生産国は中国，コンゴ，豪州，カナダ，ジンバブエなどで，操業中の鉱山全体で 111 万トンの埋蔵量がある．この他に豪州，カナダ，フィンランド，セルビアで開発中の案件がある．

3．リチウム鉱床の特徴

リチウム資源はリチウム単体で生産される鉱床が少ないという点にもある．地圏リチウム鉱床はベリリウム，タリウムなどの副産物を伴うことが多く，水圏リチウム鉱床はカリウム肥料やソーダ灰生産の副産物という位置づけである．水圏鉱床ではリチウム濃度を 0.2%程度から 6%にまで濃縮する過程で 12～15 ヶ月の長期間の蒸発工程を要する．かん水中のマグネシウム濃度が高い場合は，含水マグネシウム塩と含水リチウム塩とを分離する工程を繰り返し行い，マグネシウムを除去する必要がある．

4．ウユニ塩湖

ウユニ塩湖は面積 3800 平方マイル（約 1 万 km^2）以上，ペルー南部からボリビアを経てチリに跨るアンデス山脈の高原地帯（アルティプラーノ）の標高 3,653m に位置している．アルティプラーノの年間平均降水量は 200mm～800mm で，ウユニ塩湖の表面は，雨期（1 月～3 月）以外，塩湖南東部を除いてほぼ干上がっており，白色の“塩“で覆われている．干上がった湖面直下 10-20cm では，かん水が岩塩層中の空隙を満たすように分布している．このかん水中に含まれる金属資源量はリチウムで 900 万トンの他，カリウム 1 億 9 千万トン，ボロン 800 万トン，2

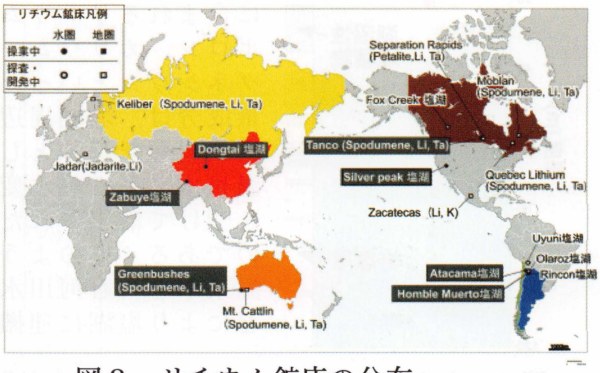


図 2　リチウム鉱床の分布

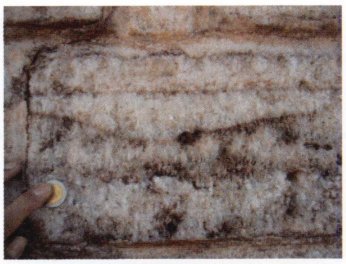


写真１　岩塩層

億１千万トンのマグネシウムが推計されている（Risacher and Fritz, 1991）．ウユニ塩湖における表層岩塩層の最大層厚は 11m で，湖の北東部で最も厚くなっている．この岩塩層は 10cm 程度の堅硬な岩塩単層の繰り返しによって構成される（写真１）．岩塩層は 90wt%以上の halite（NaCl）から成り，少量から微量の石膏や砕屑物を含む．表層岩塩層の空隙率は 30-40%で，岩塩層表面から 10cm 以深の空隙はかん水によって満たされている．岩塩層下位には不透水性の湖沼性堆積物が認められ，岩塩層と幾重にも重なる互層を成す（後述）．堆積物層は主に炭酸塩鉱物，石膏，火山性砕屑物で構成され，粘土鉱物（スメクタイト及びイライト）は希である．空隙率は 30-50%と岩塩層（15-30%）に比べて高い．

５．ウユニ塩湖のリチウム資源評価

塩湖・かん水における経済的に採掘可能なリチウム資源量は岩塩層の層厚とその空隙率に大きく影響を受ける（Warren, 2010）．アタカマ塩湖では湖面から 35m まで連続する岩塩層に空隙が認められ，25m までの平均空隙率は 18%である．この空隙を満たすかん水が 1500ppm 以上のリチウムを含んでいる．一方，ウユニ塩湖では空隙率の高い岩塩層は湖面下 11m に留まっており，下位には厚い湖沼性堆積物が薄い岩塩層と互層をなして発達する．その空隙を満たすかん水中のリチウム濃度は，最上位の岩塩層で 800ppm を示すが，湖面下 20m のかん水ではリチウム濃度が 500ppm 程度となり，40m では 300ppm 程度まで低下する（図４；Risacher and Fritz, 2000）．このように，ウユニ塩湖は，商業的な生産を行っているその他の塩湖に比べて，１）空隙率の高い岩塩層の層厚が薄く浅部での連続性が悪い，２）リチウム濃度が低く Mg 濃度が高い，という点で経済性に不利な側面を有している．

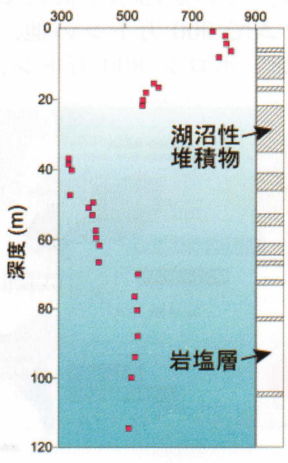


図４　かん水のリチウム濃度(mg/l)垂直変化

６．まとめ

ウユニ塩湖のかん水に含まれるリチウムやボロン，カリウム，マグネシウムといった微量成分は，塩湖周辺の火山岩類を起源とし，温泉水による熱水変質を受けて溶出されたものである．そのような温泉水を含む河川水などにより塩湖に運搬・

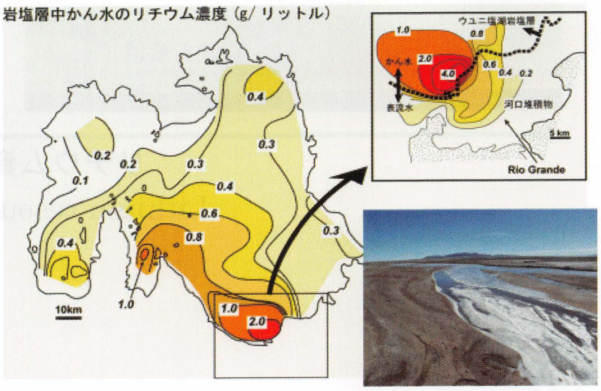


図５　かん水のリチウム濃度(mg/l)

供給されたものと考えられている（図５）．この元素濃縮には，現世における乾燥気候下での蒸発・濃縮が重要な役割を果たしている．

ウユニ塩湖を含むボリビア・アルティプラーノでは，気候変動に伴う水準変動により，数十万年前から引き続く塩湖の膨縮が起こっていたことが判明している．ウユニ塩湖では，このような変動史が少なくとも 20 万年以上前から刻まれており，この広域的・長期的な湖水変動はウユニ塩湖の化学組成に影響を与えている．つまり，大規模な外部からの湖水流入により，１）既存の岩塩層の溶解・再沈殿を繰り返しながらアルティプラーノ最下底のウユニ湖で塩濃度が上昇する一方，２）周辺河川や温泉水から流入するリチウム，カリウム，マグネシウム濃度などは希釈されながらも乾燥気候下で濃縮される，という複雑なサイクルを繰り返して現在に至る，と考えられる．

リチウムを生産する既存の塩湖・かん水鉱床は乾燥気候地帯に位置する．ここでは蒸発散量が多く，リチウム濃度を高める上で最適な立地条件を備えている．特に，ウユニ塩湖のように広域的盆地地形の最下底に位置する塩湖があれば，そのような場所は探査ターゲットとなり得るのかもしれない．塩湖・かん水におけるリチウム鉱床の資源的評価にあたっては，１）かん水や岩塩層中のリチウム濃度の不均質性，２）空隙率の高い岩塩層の連続性，３）精錬時の不純物となるマグネシウムなどの取り扱いが課題となるであろう．

参考文献

Risacher, F. and Fritz, B. (1991) Chemical Geol. 90, 211-231.

Risacher, F. and Fritz, B. (2000) Chemical Geol. 167, 373-392.

USBM (1991) Minerals yearbook 1991, 1754p.

USGS (2010) Mineral commodity summaries, 196p.

USBM (2008) Minerals yearbook 2008, Lithium, 10p.

Warren, J. K. (2010) EarthScience Reviews, 98, 217-268

浅熱水性金鉱床形成に繋がる流体の発見とその進化

Detection of fluids leading and evolving to epithermal gold deposits

村上浩康[1]（鉱物資源研究グループ）
高倉伸一[2]（地圏環境システム研究グループ）
Hiroyasu Murakami[1)*] and Shinichi Takakura[2)]
[1)] Mineral Resource Reserch Group., [2)] Geo-Environmental Systems Reserch Group.
*Corresponding Author, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

1．はじめに

地表浅部（1km 内外）に発達する浅熱水性金鉱床は重要な金資源であり，現在も世界中で探鉱が行われている。その形成にマグマ水と天水が関与することが指摘され（例えば Rye, 1993），鉱床はマグマ（斑岩銅鉱床を伴う火成岩類）の貫入に伴う熱水系中に生じているとされる（Hedenquist and Lowenstern, 1994；図 1）。

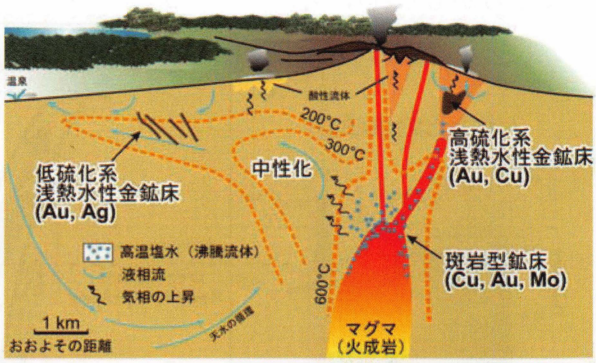


図 1．マグマ熱水系に発達する鉱床

深部の斑岩環境では沸騰・分離した気相中に金や銅が硫化物錯体として分配されることが明らかとなり、この”金に富む気相”によって浅熱水性金鉱床が形成され得ることも示されている（Heinrich et al., 2004）。Heinrich (2005) は，深部、高温・高圧の斑岩銅鉱床形成環境から浅部、低温・低圧の高硫化型浅熱水性金鉱床との間の物質流通系のモデル研究を行い、金を最も効率よく斑岩環境から浅熱水環境へ移送するためには，流体の硫黄濃度が高く、母岩の鉱物組み合わせ（カリ長石＋白雲母）により中性付近にバッファーされる必要性を指摘している．実際、Pudack et al. (2009) は斑岩型鉱床のフィリック変質帯（セリサイト変質）中の石英脈中の流体包有物で高い金濃度を報告している。しかしながら，天然の浅熱水環境において深部へ繋がる熱水経路は実証されておらず，低硫化型金鉱床と深部マグマ系との関係も不明な点が多い．

本研究の対象とした愛知県の振草鉱床は安山

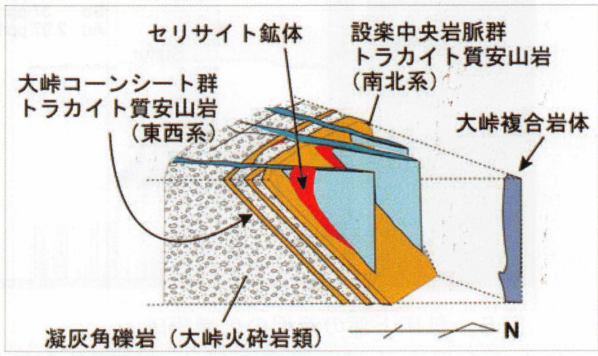


図 2．振草鉱床の模式図

岩質ダイク中のセリサイトを伴う熱水変質帯である (図 2)．振草鉱床のような変質帯は，マグマ－熱水系のどこに位置づけられるのであろうか．本論では，振草鉱床の形成に関与した熱水の性質を明らかにすると共に，熱水進化プロセスを検討した結果を報告する．

2．結果

振草鉱床は愛知県北設楽郡東栄町に位置する（図 3）。セリサイト（イライト-2M）を産し、硫砒鉄鉱や黄鉄鉱を普遍的に伴う．イライトの Ar-Ar 法によるプラトー年代は 14.5±0.2 Ma を示し，大峠火山岩類に貫入する設楽中央岩脈群の活動時期にほぼ相当する．

イライト鉱体中の石英自形結晶中には気相並びに液相包有物が認められ，それらの均質化温度及び NaCl 換算の塩濃度の平均値は，液相で 314°C, 2.8wt%, 気相で>328°C, 4.3wt%であった．いくつかの fluid inclusion assemblage が同

図 3．振草鉱床の位置及び周辺地質

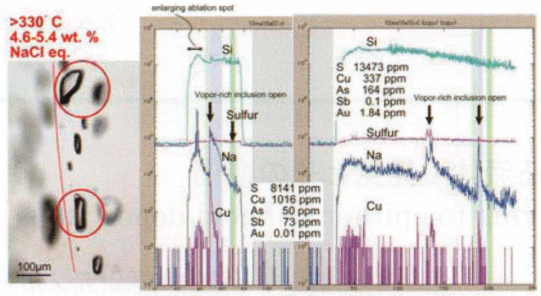


図４．鉱床下部の気相包有物の化学組成

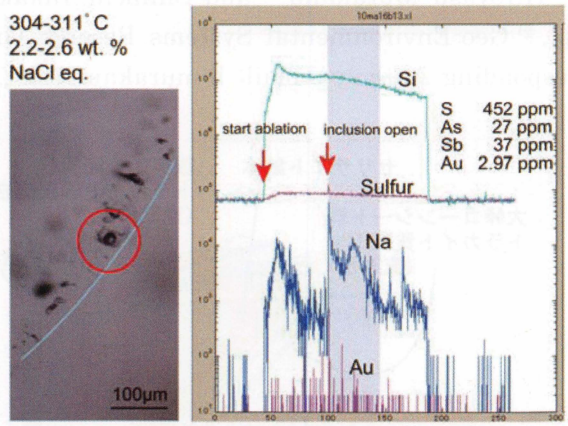


図５．鉱床上部の液相の化学組成

じような温度及び塩濃度を示す（気液共存領域で形成された）ことから，鉱床の形成圧力は0.12kb 程度と推定され，静水圧条件では形成深度は約 1.2km となる．鉱床下部に産する高温・高塩濃度の気相包有物で金，硫黄，銅などに富み，それぞれ平均で Au(1.42±2.48μg/g，1σ)，S（10,565±7,500μg/g，1σ），Cu（488±477μg/g，1σ），As(67±71 μg/g，1σ)，Sb（32±43μg/g，1σ）を示す(図４)．このような包有物は最大で 5wt%程度の CO_2 を含む．一方，鉱床上部の気相及び液相包有物や鉱床下部の液相包有物では，銅，硫黄，砒素濃度は減少するものの，Au の濃度変化は小さく(図５)，逆に Sb は増加する傾向がある．

鉱化熱水の温度を 330° C 前後と仮定した場合，イライト及び方解石の水－鉱物間の酸素同位体分別係数から推定される熱水の酸素同位体比として＋5.5‰～+10.5‰が，同様にイライトの水素同位体から，熱水の水素同位体比の値として -10 ‰から -15‰が得られた．これらの水素・酸素同位体比は，薩摩硫黄島などの高温のマグマ性火山蒸気と同じ領域にプロットされる（図６）．黄鉄鉱及び硫砒鉄鉱の硫黄同位体（δ^{34}SCDT）は -1.5 ‰ ～ -0.33‰の範囲であり，鉱床は還元的なマグマ活動に関連すると推察される．

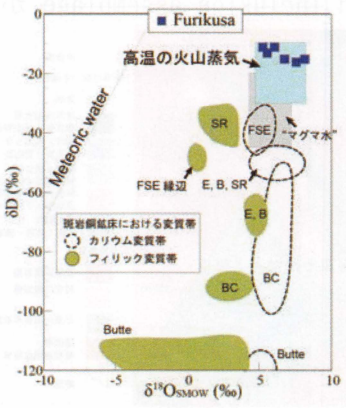


図６．熱水の同位体比

３．まとめ

振草セリサイト鉱床（愛知県）を形成したマグマ起源流体（気相・液相包有物）の化学組成を LA-ICP-MS により分析し，金，硫黄，銅に富むことを発見した．この流体は，潜在したマグマに関連する沸騰流体の気相側が地表浅部へと上昇する過程で捕獲されたものと考えられる(図７)．流体中の金濃度レンジは斑岩型鉱床の気相、浅熱水性金鉱床の流体（2-3ppmAu: Murakami et al, 2009）と同様の組成範囲を示す。

本研究で得られたデータから，振草セリサイト鉱床は，１）設楽中央岩脈群形成に伴うマグマ水を起源とし，２）CO_2 を含む高温・高塩濃度で金，銅，硫黄に富む流体によって形成されたと考えられる．この流体は，斑岩型鉱床から派生した沸騰流体のうち，地表浅部へと運搬される気相と化学的親近性を持つ．従って，イライト－黄鉄鉱－硫砒鉄鉱－石英で特徴付けられる振草鉱床の変質帯は，斑岩型鉱床の熱水系最末期：石英－セリサイト－黄鉄鉱（QSP）脈に近似できるかもしれない．

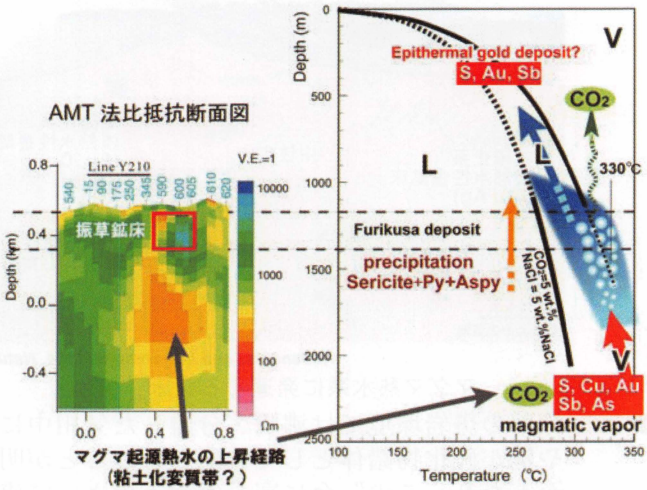


図７．流体の上昇に伴う物理・化学的進化のモデル。AMT 法による比抵抗構造から深部に熱水の流通経路となっていた粘土化変質帯が想定される。

参考文献

Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J. B. (1994) Nature, 370, 519-527

Heinrich, C. A. (2005) Mineral. Deposita, 39, 864-889.

Heinrich, C. A., Driesner, T., Stefánsson, A., Seward, T. M. (2004) Geology, 32, 761-764.

Heinrich, C. A., Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T., Frischknecht, R. (1999) Geology, 27, 755-758.

Murakami, H., Heinrich, C. A., Marcel, G. (2009) Geochim Cosmochim Acta, 73, Supplement 1.

Pudack, C., Halter, W. E., Heinrich, C. A. and Pettke, T. (2009) Econ. Geol., 104, 449-477.

灰重石と燐灰石の希土類資源ポテンシャル

REE resources potential in scheelite and apatite

村上浩康[1)]（鉱物資源研究グループ）
石原舜三[2)]（産総研・特別顧問）
Hiroyasu Murakami[1)*] and Shunso Ishihara[2)]
[1)] Mineral Resources Reserch Group., [2)] The special councilor, AIST
*Corresponding Author, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

1．はじめに

灰重石並びに燐灰石はタングステン及びリン資源としてそれぞれ重要な鉱物である一方，著量の希土類元素（REE）等を含んでいる．これら未回収希土類資源のポテンシャルを把握することは，将来的な希土類元素資源の安定供給に向けた基礎資料になると期待される．

本報告では，日本産の灰重石（岩手県・東磐井鉱床，京都府・大谷鉱床，山口県・喜和田鉱床）を LA-ICP-MS により分析すると共に，豪州・ノーランズボア鉱床産鉱石及び燐灰石についてそれぞれ ICP-MS 及び LA-ICP-MS による化学分析を行い，これら灰重石及び燐灰石形成に関与した熱水の性質について比較検討した．LA-ICP-MS 分析はスイス連邦工科大学（ETH）にて実施した．

2．結果

2.1．灰重石中の希土類元素含有量

分析に用いた灰重石試料は，1）頁岩中の石英-灰重石脈（東磐井鉱床），2）花崗閃緑岩中の石英－灰重石－磁硫鉄鉱脈（大谷鉱床），3）縞状スカルン鉱石（喜和田鉱床）である（図1）．喜和田鉱床の縞状鉱石は，スカルン鉱体を貫く石英脈周辺に発達したもので，石英脈に移化する高品位縞状灰重石帯とスカルンに移化する硫化鉱物帯に2分される．各鉱床の関連火成岩は，磁鉄鉱系花崗岩（東磐井鉱床），チタン鉄鉱系黒雲母花崗閃緑岩（大谷鉱床），チタン鉄鉱系花崗岩（喜和田鉱床）と考えられている．

各鉱床の灰重石中の総希土類元素濃度（ΣREE）の平均は，東磐井鉱床：115 μg/g (n=27)，大谷鉱床：551 μg/g (n=41)，喜和田鉱床産縞状灰重石帯：643 μg/g (n=106)，喜和田鉱床産硫化鉱物帯：230 μg/g (n=76) であった．灰重石中の平均 Dy 濃度は，東磐井鉱床：15μg/g，大谷鉱床：41μg/g，喜和田鉱床産縞状灰重石帯：78μg/g，喜和田鉱床産硫化鉱物帯：9μg/g を示す．灰重石の平均 Mo 濃度は，大谷鉱床：133 μg/g 並びに喜和田鉱床：180μg/g に対して，東磐井鉱床で 0.28μg/g と極端に低い．灰重石の Th 及び U 濃度はおしなべて低く，多くの灰重石で 0.5μg/g 以下である．このようにチタン鉄鉱系花崗岩類に伴う鉱床の灰重石でΣREE が高く，その中でも石英脈に伴われ，硫化鉱物と共生しない灰重石が相対的に高い重希土類濃度を示す．大谷鉱床と喜和田鉱床の灰重石はカソードルミネッセンスによりゾーニングが観察され，両鉱床共に暗いゾーンでΣREE が高くなる．このゾーニングパターンから，喜和田鉱床では灰重石形成ステージの後期でΣREE が増加，大谷鉱床では灰重石形成ステージの初期から後期に向かいΣREE が減少したと考えられる．灰重石のコンドライト規格化 REE パターンは，喜和田鉱床及び大谷鉱床の灰重石形成ステージ初期で正の Eu 異常を示し，マグマ水の関与が示唆される（図2）．喜和田鉱床では後期に向かって負の Eu 異

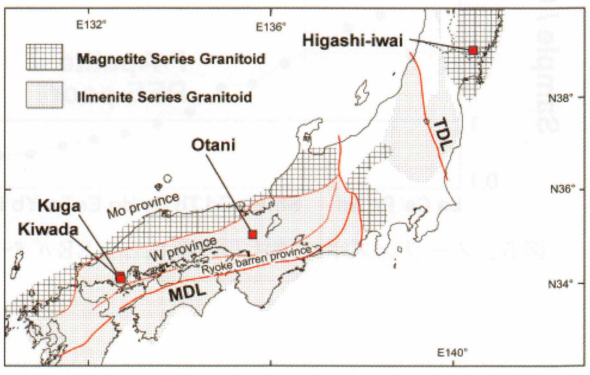


図1．灰重石を産した日本の鉱床

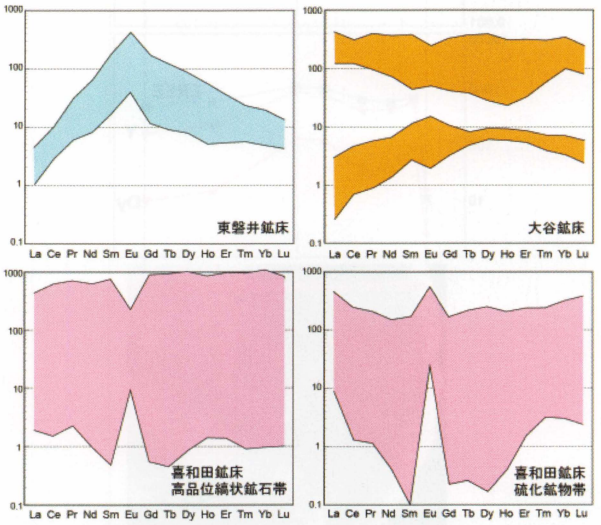


図2．灰重石の REE パターン（コンドライト規格化）

常を示すことから，マグマ分化に伴い熱水中の希土類元素濃度が増加していた可能性が高い．大谷鉱床では灰重石結晶マントルで負の Eu 異常を示し，リムでΣREE や Mo などの濃度が極端に低下する（図３）．大谷鉱床のこの傾向は，灰重石形成期における異なる起源を持つ熱水（マグマ水と天水）の混合を示唆している．

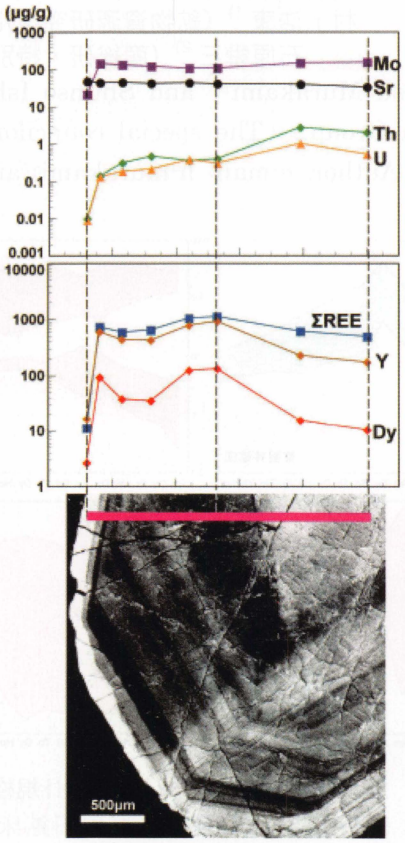


図３．大谷鉱床産灰重石のｿﾞｰﾆﾝｸﾞ

2.2. 燐灰石資源

豪州・ノーランズボア鉱床産鉱石の ICP-MS 分析を行った．その結果，鉱石は極めて軽希土類元素に富み，Ce 及び Nd が特に高い濃度を示す（図４）．総希土類元素濃度は最大約 7wt%である．また，難溶性鉱物を含む試料でも，その溶液化プロセスが適切で，試料濃度に適した希釈倍率による分析であれば，幅広い濃度レンジで高精度に希土類元素の定量が可能である．

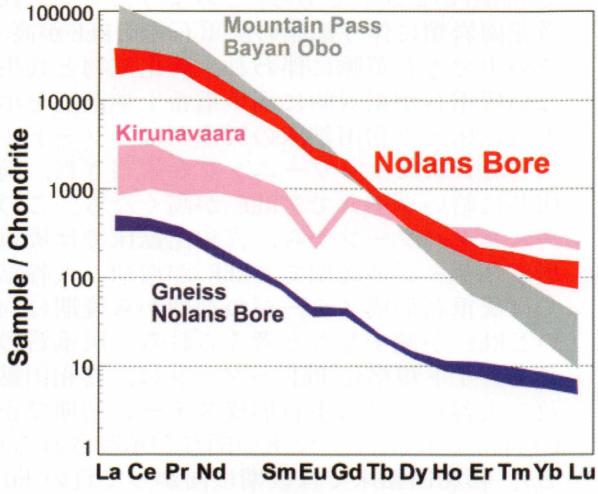


図４．ノーランズボア鉱石の REE ﾊﾟﾀｰﾝの比較

燐灰石は脈状に産し，脈幅は最大で数十 m に及ぶ．鏡下の観察から，燐灰石は２種類に分類される（図５）．Type１は自形結晶として産し，結晶中にアメーバ状赤鉄鉱（または複酸化物）の微少包有物を多く含む．Type1 の燐灰石は鉱石の主要構成鉱物である．一方，Type2 は他形結晶として，散点的に粒間を埋めるように産する．Type２燐灰石は Type1 燐灰石のフラグメントを包有する場合もあることから，Type1 は Type2 よりも早期に形成されたと考えられる．CL（カソードルミネッセンス）像では，Type1 は発光が著しいのに対して，Type2 は発光しない．LA-ICPMS 分析の結果，Type1 燐灰石は極めて軽希土類元素に富み，Th 及び U 濃度も高いことが判明した．特に，Ce 及び Nd 濃度が高く，総希土類元素濃度は最大約 6wt%の値を示す．Type2 は均質なフッ素燐灰石組成を持ち，Th 及び U を殆ど含まない．従って，ノーランズボア鉱床産の鉱石希土類品位は，モナザイトなどの難溶性希土類含有鉱物ではなく，Type1 燐灰石中の希土類濃度を強く反映していることが明らかとなった．

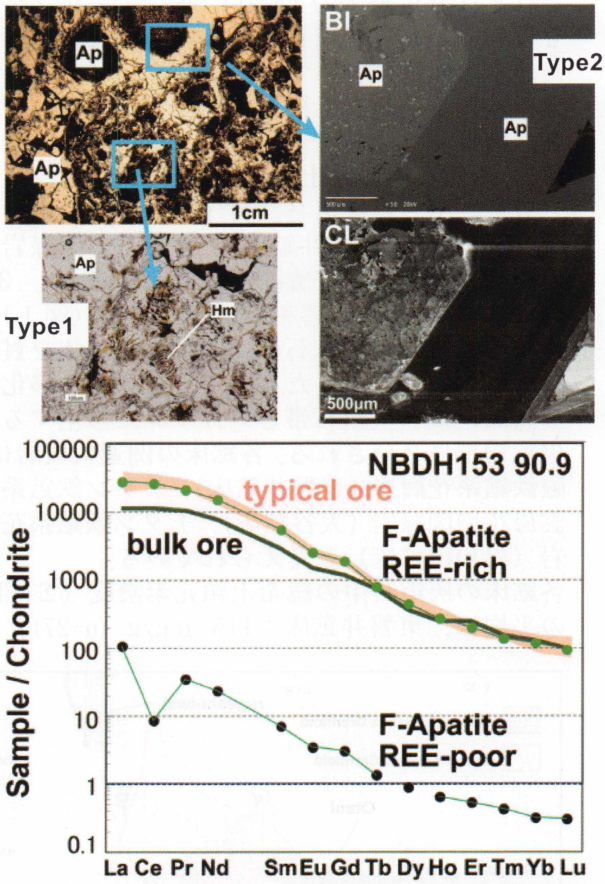


図５．ノーランズボア燐灰石の産状と REE ﾊﾟﾀｰﾝ

電子地球科学情報を利用した地熱資源評価手法の発展的研究：第２期成果の概要

Studies on Advanced Assessment Methods for Geothermal Resources in Japan using Electronic Earth-Sciences Information: Outline of the 2nd-Term Results.

茂野　博（地熱資源 RG）
Hiroshi Shigeno
Geothermal Resources Research Group
e-mail: hiroshi-shigeno@aist.go.jp

１．はじめに

地熱資源研究グループでは,研究の一環として手法開発と事例検討を中心に，電子地理・地球科学情報を利用した地熱資源評価の研究を継承－発展的に進めてきた．産業技術総合研究所の中期計画第２期（2005～2009 年度）には，第１期（2001～2004 年度＋）の成果（例えば，地質調査総合センター, 2007, 数値地質図 GT-3）を基礎に，より幅広い多様な研究を進めて，各種成果の誌上・口頭発表を行った．

２．第２期成果の紹介

「別表」に，第２期の誌上発表成果を６項目に整理して示す．特に (1) では，第１期に作成した各種のオープンソースの自作プログラム（Microsoft Visual Basic v.6 による）を拡張して，様々なデータを簡易的に統合断面図形式で表示するプログラムを作成するとともに，島孤下へ斜めに沈み込む海洋プレートースラブの３次元運動の簡易シミュレータなどを開発し，これらを九州，近畿，関東の各地方へ適用して火山・地熱地域分布の特異性に検討を加えた．(2) の坑井変質，(3) の温泉化学を中心とした統合的評価の研究における作図例を，図１に示す．(5) の MS Excel VBA (Visual Basic for Applications) によるオープンソースの各種プログラムなどはホームページ（http://staff.aist.go.jp/hiroshi-shigeno/index.html）からダウンロードが可能となっている．

３．今後の取りまとめ計画

第２期の様々な研究成果の取りまとめと上記のオープンソースの各種プログラムの公開・普及化などを目的に，「別表」(0) の地質調査総合センター（2007）の数値地質図 GT-3 と同様の CD-ROM 出版物の提供（数値地質図 GT-5？）を現在検討しており，現状では 2011 年度末の出版を目標としている．

なお，第２期の地熱資源研究グループの成果として，「日本の熱水系アトラス」（地質調査総合センター，2007），「全国地熱ポテンシャルマップ」（地質調査総合センター，2009，数値地質図 GT-4）などが出版されていることを付記する．

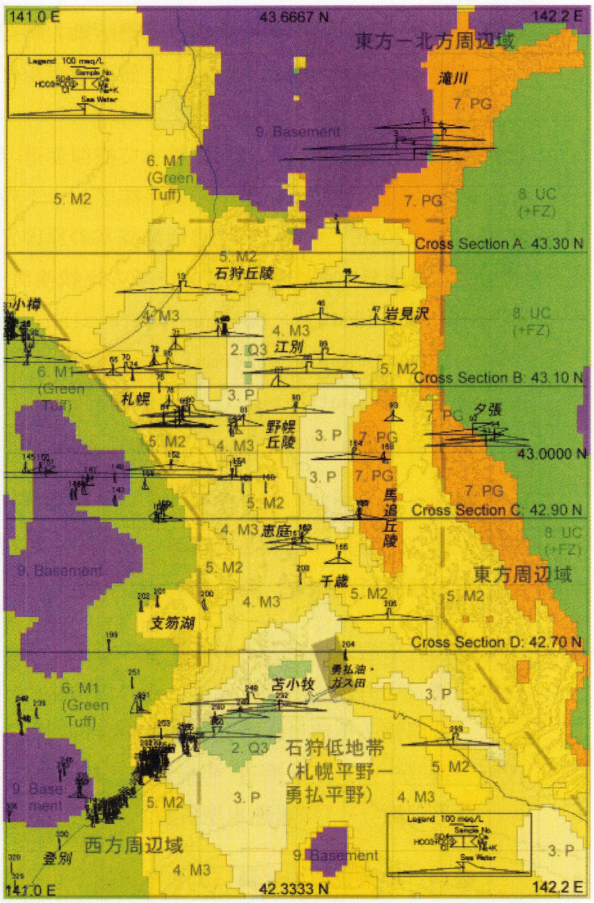


図 1. 北海道の石狩低地帯域における「大深度（掘削）温泉水」の溶存化学組成（ヘキサ図）と３次元地下地質分布（深度 1500m）の統合表示（茂野，投稿中）．　公開電子地球科学情報として，温泉化学データには地質調査総合センター（2002，数値地質図 GT-1）を，地質データには吉田ほか 編（2009，地質調査総合センター速報，no.48）を用いた．

電子地球科学情報を利用した地熱資源評価手法の発展的研究：第２期成果の概要

別表：研究成果の誌上発表の一覧表（2006年４月～2011年３月；印刷中・投稿中のものを含む）

●(0) 地熱資源評価研究の第１期成果のとりまとめと開発プログラム・処理データなどの電子公開化

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

●(1) 海洋プレート－スラブの斜め沈み込みと火山・地熱分布異常のモデル化・数値シミュレーション

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

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

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

茂野　博（2009）：九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレート－スラブの沈み込みの関係－電子地球科学情報を利用した簡易モデル化－シミュレーションによる検討－．地質ニュース，no. 656，10-28.

茂野　博（2009）：日本列島に沿って擬似赤道（大円）を引く擬似経度－緯度座標系（PLLCS，JILLS）の試み －東日本3弧系下への太平洋プレートの沈み込みへの適用事例－．地質ニュース，no. 664，50-61.

茂野　博（2010）：火山・地熱活動異常の原因としてのスラブ沈み込みの急傾斜化 －幾何学モデルと琉球弧・西南日本弧の4セグメント域の比較検討－．地質ニュース，no. 666，21-30.

Shigeno, H. (2010)：Oblique plate-slab subduction causing various anomalous distributions of volcanoes and geothermal systems in Japan: Simplified modeling and simulation. Proceedings of World Geothermal Congress 2010, Bali 2010, P1288, 12p.（*WWWで，International Geothermal Association (http://geothermal.stanford.edu/standard/) から検索により全文閲覧・保存が可能*）

●(2) 地熱地域の坑井変質データの統合表示と地下環境の比較モデル化検討（HLW地層処分への応用）

茂野　博（2008）：地熱井変質データベースの構築と事例６地域のモデル化による多様な変質環境の検討．地質調査研究報告，vol. 59，71-107.

●(3) 石狩低地帯とその周辺域の温泉化学・3次元地質データの統合表示・解析・モデル化

茂野　博（----）：石狩低地帯とその周辺域の「大深度（掘削）温泉」の化学組成と地下地質の3次元分布－公開電子地球科学情報の簡易統合処理による表示・解析の試み－．地質ニュース，（投稿中）

茂野　博（----）：北海道 胆振地方，白老地域と周辺3広域地域の「温泉水」の地球化学・同位体化学的な特徴と起源 －「深層熱水型資源」・「大深度（掘削）温泉」の事例研究－．地質調査研究報告，（投稿中）

●(4) 地熱資源の評価（アセスメント）への公開数値シミュレータ（オープンソース）の利用の試み

茂野　博（2010）：米国地質調査所（USGS）公開の高温熱水系シミュレータ HYDROTHERM INTERACTIVE (v.3.1)の紹介．地質ニュース，no. 673，21-36.

●(5) 地球科学への表計算ソフトウェアのマクロ言語プログラム（MS Excel VBA）の利用

茂野　博（2008）：Excel VBA（オープンソース）による地球科学データの処理 －(1) 水化学データの図化を例にして－．地質ニュース，no. 652，21-30.

茂野　博（2009）：Excel VBA（オープンソース）による地球科学データの処理 －(2) 標高・地質メッシュデータの組合せ図化を例にして－．地質ニュース，no. 656，29-38.

茂野　博・須藤　茂（2009）：Excel VBA（オープンソース）による地球科学データの処理 －(3) 侵食地形「燭台石（台湾）」の生成シミュレーションを例にして－．地質ニュース，no. 657，10-18.

我が国における地下岩盤内の初期地圧状態
－応力解放法による実測データに基づく－

Initial Rock Stress State at Deep Underground in Japan
－ Based on the Data Measured by Using Stress Release Method －

長秋雄，国松直（研究部門付主任研究員），金川忠，藤井真希（日特建設株式会社）
横山幸也，小川浩司（応用地質株式会社），田仲正弘（株式会社レーザック）

Akio Cho[1)*], Sunao Kunimatsu[1)], Tadashi Kanagawa[2)], Maki Fujii[2)]
Tatsuya Yokoyama[3)], Kouji Ogawa[3)] and Masahiro Tanaka[4)]
[1)] Senior Research Scientist / Assistant Director, [2)] Nittoc Construction Co., LTD,
[3)] OYO Corporation, [4)] LAZAC Incorporated
*Corresponding Author, e-mail: akio.cho@aist.go.jp

1．はじめに

地下空間建設や地下岩盤利用において，地下岩盤に作用する初期地圧状態を把握することは，それらの設計・施工・稼動・安全評価において，欠くことのできないことがらである．初期地圧の測定法については，これまでに種々の方法が考案され，多くの地下施設建設サイトにおいて使用実績と改良が積み重ねられてきた．初期地圧測定結果は，各研究者や各機関により，学会発表や学会誌等で公表されてきた．我が国での今後の地下空間開発に向けて，これまでに公表された初期地圧測定結果を収集し，公の共有の情報としてデータベース化を図ることは意義深いと考える．

我々は，初期地圧測定法の中で測定値の信頼性が高い応力解放法により測定され，測定点の被り深さが100m以深のものを対象として，文献調査を行い（全75編の論文），全54地点で62例のデータを収集した．収集したデータについては，今後の利活用を考慮して，データベース機能も有するように，データの整理と収録を行った．整理・収録したデータに基づき，我が国の地下深部岩盤での初期地圧状態の一般的傾向を考察した．

その結果については，地質調査研究報告（第60巻，第7/8号，p.413-447，2009年）に総説として報告しており，下記のサイトで閲覧とpdfファイルのダウンロードが可能である．今後の地下空間開発や地下岩盤利用において参考にしていただければ幸いである．

http://www.gsj.jp/Pub/Bull_new/vol_60/60_07/60_07_04.pdf

総説では，第2章に，関連する既往研究をまとめた．第3章では，埋設ひずみ法と孔底ひずみ法について概説した．第4章に，調査対象文献と収録項目を説明し収録測定地点の位置と収録データ一覧を示した．第5章では，整理・収録したデータに基づき我が国の地下深部岩盤での初期地圧状態の一般的傾向を考察した．第6章では，初期地圧に及ぼす各種要因について既往研究などから例示した．第7章において，得られた知見をまとめた．

本小文では，総説の概要を紹介する．

2．収録した初期地圧測定地点

収録した初期地圧測定地点（全54地点，62例）を，図1に示す．シンボル▲，○，●はそれぞれ，測定地点の岩石区分（火成岩，堆積岩，変成岩）を示す．＋は岩石区分が不明であった測定地点である．

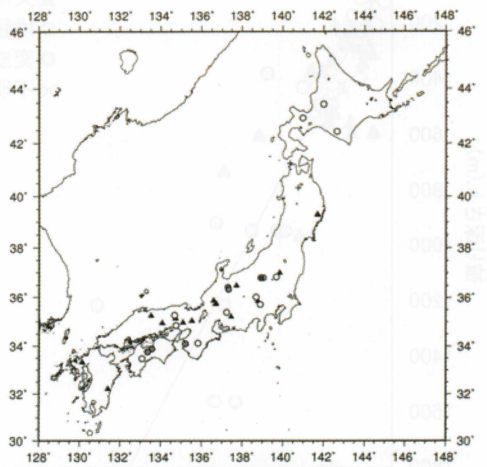


図1．収録した初期地圧測定地点

埋設ひずみ法による測定が 21 地点・21 例であり，孔底ひずみ法による測定が 33 地点・41 例であった．測定位置の岩石区分は火成岩 30 例・堆積岩 16 例・変成岩 13 例・不明 3 例であり，岩級区分は C_M～C_L 級 1 例・C_M～C_H 級 3 例・C_H 級 9 例・C_H～B 級 8 例・B 級 5 例・B～A 級 3 例，不明 33 例であった．孔底ひずみ法での測定では，岩級区分の記載が少なかった．

3．初期地圧の大きさと被り深さの関係

3.1．鉛直応力と被り深さの関係

鉛直応力 σ_V と被り深さ h の関係を，図 2 に示す．鉛直応力は，岩石区分による大きな相違は認められず，被り圧程度（被り圧の約 0.5 倍～約 1.5 倍）の値であった．図中の実線は岩盤密度を 26kN/m³ とした場合の被り圧を示す．

3.2．水平最大主応力と被り深さの関係

水平最大主応力 σ_{Hmax} と被り深さ h の関係を，図 3 に示す．

火成岩での水平最大主応力は，被り圧の約 1 倍～約 3 倍の値であった．火成岩では，同じ被り深さの堆積岩や変成岩での値と比べて大きな値が見られた．

堆積岩での水平最大主応力は，被り圧の約 1 倍～約 1.5 倍の値であった．

変成岩での水平最大主応力は，1 例を除いて，被り圧の約 0.5 倍～約 1.5 倍の値であった．

3.3．水平最大主応力と被り深さの関係

水平最小主応力 σ_{Hmin} と被り深さ h の関係を，図 4 に示す．被り深さ 600m以浅の水平最小主応力は，岩石区分による大きな相違は認められず，被り圧程度（被り圧の約 0.5 倍～約 1.5 倍）の値であった．被り深さ 900m以深での値（火成岩 1 例，変成岩 8 例）は，被り深さ 600m以浅での傾向を外挿した値より小さかった．

4．他の検討項目

収録データに基づき，次の項目に関しても分析と考察を行った．

- 水平最大主応力（方位と値）と地殻水平歪短軸（方位と値）の比較
- 三次元主応力と被り深さの関係
- 応力値と測定標高の関係
- 三次元主応力比と最小主応力の傾斜角の関係
- 岩級との関係

謝辞

初期地圧測定データの収録を許可いただいた測定実施各機関に感謝します．本文中の図において GMT を使用して作図しました．ここに謝意を表わします．

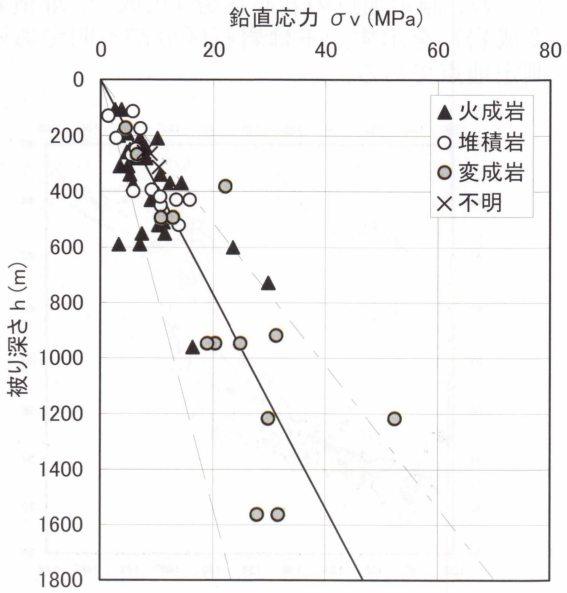


図 2．鉛直応力と被り深さの関係

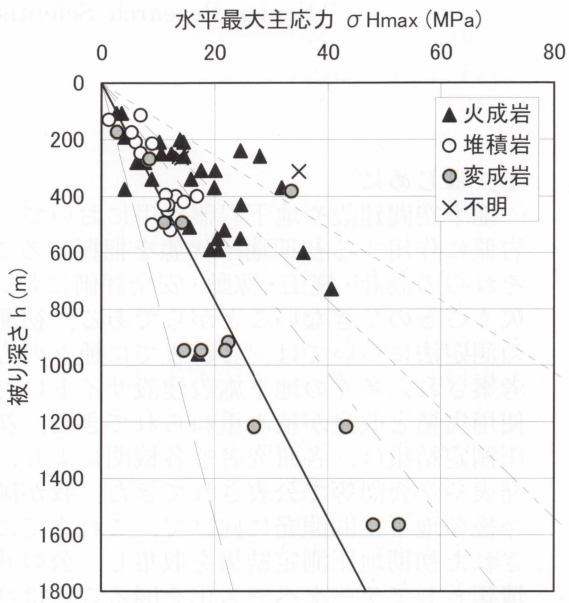


図 3．水平最大主応力と被り深さの関係

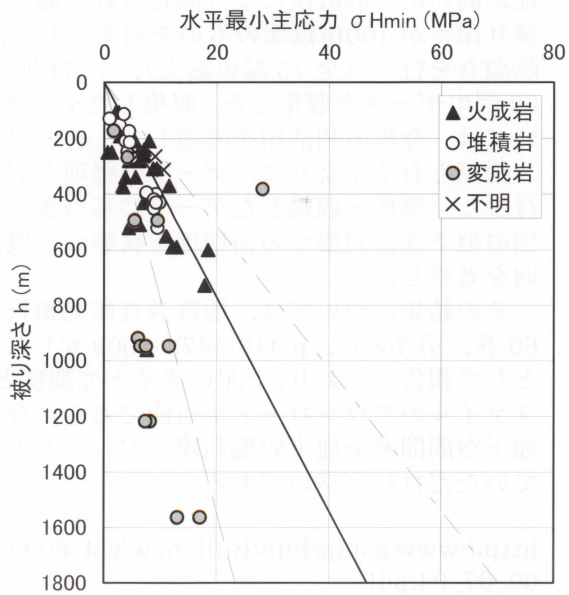


図 4．水平最小主応力と被り深さの関係

汎用型ボアホールカメラの性能と地質調査への普及

Performance evaluation of a developed low-cost and simplified borehole camera and spread to geological survey

国松　直（研究部門付主任研究員）[1)*]
山下智士[2)]，太田　保（(株）復建技術コンサルタント）[2)]
Sunao Kunimatsu[1)*],
Satoshi Yamashita[2)] and Tamotsu Ota[2)]
[1)] Senior Research Scientist / Assistant Director, [2)] Fukken Technical Consultant Co., LTD.
*Corresponding Author, e-mail: s.kunimatsu@aist.go.jp

1．はじめに

地質調査の基本である調査ボーリングは，地表踏査では得られない貴重な地下情報を提供してくれる．通常，ボーリングコアの直接的な観察により，岩種の特定，地質構造把握や亀裂性状の評価を行うが，コアの採取段階で回転等の影響を受けて，原位置での走行傾斜等の方位情報を失うことが大きな問題であった．この問題は孔壁をボアホールカメラで撮影，解析することで解決できるが，現状ではボアホールカメラを用いた調査は高価なうえ，専門の撮影技術者が必要なため，その適用はダム等の大規模な地質調査に限られている．

（株）復建技術コンサルタントが開発した小規模な地質調査でも安価で簡便に使用できる汎用型ボアホールカメラについて，平成21年度中小企業等製品性能評価事業において，いくつかの評価項目を設定し、性能評価のための実証研究を行った．本報ではその結果を概説する．

2．汎用型ボアホールカメラの概要[1)]

汎用型ボアホールカメラ（low-cost and simplified borehole camera；以下，LCSカメラと略記）は，市販の水中カメラ（前方視カメラ）に，撮影深度や方位情報が得られるようにリールや可とう管等を追加した構成である（概観図をポスター掲載）．

LCSカメラは安価（販売価格は40万円程度）で簡便（オペレーター一人で作業可能）に使用できる利点を有するが，深度・方位の計測センサを有さないため，深度±0.2m程度，方位±20°程度の計測誤差があることを念頭に撮影画像を扱う必要がある．

3．当該事業による研究概要

本実証研究では，汎用型ボアホールカメラの性能確認および今後の販路拡大を目指して，以下の3つの研究課題を設定，実施した．

(1) 全地質への適応性の実証研究

全国の8地区において地質状況の異なる撮影事例を80事例以上収集し，分析を行う．

(2) 岩盤の不連続性評価のための実証研究

地質の異なる3砕石場でコアを回収し，コア観察結果とボーリング孔内の観察結果を比較し，不連続性評価に対する性能をRQD指標を用いて，定量的に評価する．

(3) 濁度計測への適用のための実証研究

河川等の濁度計測への適用方法について検討を行い，数カ所の現場での濁度計による測定結果との比較を行う．

4．当該事業による成果概要

(1) 全地質への適応性の実証研究

全地質・土質での撮影が可能なボアホールカメラとしての性能評価のために，全国地質調査業協会連合会（以下，全地連という）の組織を通じて，8社に委託し，現場使用実績として全国8地区（北海道，東北，関東，北陸，中部，関西，中国地方山陰，中国地方山陽），82箇所の撮影画像記録を収集した．内訳は花崗岩類の岩盤18，花崗岩類の強風化岩盤5，新第三紀火山噴出物7，第三紀凝灰岩18，泥岩等の堆積岩19，第四紀砂礫層9、その他として河川堤防やトンネル覆工コンクリート5，産業廃棄物1箇所である．地質的に見ると全国に分布している花崗岩や第三紀の堆積岩などのデータがやや多い傾向にある．ボーリングの方向は垂直方向が最も多く65，水平12，斜め上3，斜め下2箇所である．撮影は空孔で53，水中または水の洗浄や汲み出し後に撮影したものが29箇所である．湧水箇所は2箇所で撮影されている．

以上の撮影画像事例から空孔ボーリング孔での花崗岩や安山岩類の節理・亀裂の開口状況や方向性，風化の程度，岩質・岩相の把握が可能であることが判明した．湧水箇所の撮影では湧水箇所の位置確認と流れの方向や流速の推定が可能であった（亀裂の静止画をポスター掲載）．地下水位以下の土質を対象とした撮影では濁水対策が必要であるが，その対策方法[2)]について

はポスターで説明予定である．

(2) 岩盤の不連続性評価のための実証研究

地質の異なる３箇所の砕石場（①板状亀裂の粘板岩，②塊状岩盤の砂岩，③これらの中間で最も普遍的な地質である安山岩を対象）を使用し，１砕石場に付き水平ボーリングによる10m掘削を方向の異なる２方向（節理状構造の岩盤の場合、亀裂の角度、頻度が変化する）で，ボーリングコアRQD（岩盤の不連続性を表す指標，亀裂の判定が必要）とLCSカメラによる岩盤内の亀裂状況（深度情報含む）との対比（亀裂判定精度の検討）を実施した．総延長は60mである．

ボーリング孔を横切る方向の開口亀裂はこのカメラが前方視カメラであるためボーリング軸方向の亀裂よりは観察が難しいが，亀裂の有無の確認は可能である．撮影モニター画面からも開口亀裂の有無，角度，方位を観察することが可能であるが，詳細な検討の場合には，オプション仕様ではあるが，撮影画像から孔壁の展開画像を作成する可能であり，より詳細な情報分析に有効である．

ボーリングコアを用いて岩盤の不連続性が評価され，岩盤構造物の設計にも反映されているが，コア採取時には機械的な衝撃の影響などにより，コア自体が折れたり，地山内では密着していた亀裂に沿って割れたりするためにコアによるRQDが地山内の岩盤状況を忠実に反映したものではないことが知られている．

コア観察によるRQD（コアRQD）と孔壁画像の亀裂観察によるRQD（孔内RQD）の違いについて，今後岩盤分類評価と結びつける検討が必要であることを指摘した[3]．

また，カメラ画像からは，「孔内RQD」情報以外に，岩盤内亀裂の生の情報，すなわち亀裂の向き，角度，開口幅，亀裂状況（開口，密着）などを読み取ることが可能である．さらに，現場周辺において複数のボーリングを行い，カメラ観察，展開図を用いた解析により，亀裂の三次元的な分布状況も推定可能であり，現場の地質構造の解釈にも重要な知見を与える情報の提供も可能である．

(3) 濁度計測への適用のための実証研究

近年，工場排水，生活排水等による環境汚染が増加しており，河川，湖沼，ダムなど濁度測定を必要とする場所は広範囲にわたっている．濁度の測定装置には透過光方式や散乱光方式などいくつか種類があるが，本研究ではLCSカメラによる撮影画像を用いた濁度測定を目的に，濁度標準液（ホルマジン，ポリスチレン）の濁度と画像解析による画像数値との関係を用いた検量曲線を作成し，市販の濁度計による濁度との比較を行った．

室内試験で求めた検量曲線をもとに，現場へ適用するために，濁水とともに標準の色見本をカメラ撮影画像に同時に撮影するための特殊なカメラキャップを作成し，ダム，井戸，河川で濁度測定を実施した．濁度計による濁度との比較により，カメラ撮影画像からほぼ妥当な濁度を求めることが可能と判断された[4]．本手法では，濁度情報のみならず，RGB値，すなわち「色調」情報まで得ることができることが大きな特徴である．

５．今後の普及・販路拡大に向けた展開

地質調査分野でのLCSカメラの普及に関して，全地連において，標準化仕様（案）（技術マニュアル（案）と積算基準（案）から構成）[5]を2011年4～5月頃に取りまとめる予定である．

LCSカメラは安価で大量使用が可能な価格帯であり，取扱が簡便であるのでボーリング技術者や地質技術者の補助具としての使用が期待される．地質調査におけるカメラ撮影画像調査の標準化仕様がまとまれば，カメラ撮影画像調査の必需品としての普及販売の増大が国内のみならず海外でも見込まれる．

また，地質調査業界以外の潜在的な市場として，大きな社会問題になっている維持管理調査について記述すれば，

橋梁・トンネル・道路斜面の維持管理調査に関連して，

・橋梁基礎コンクリート状況の確認（基礎岩盤との付着状況や空洞確認）
・地震後の基礎杭の亀裂の有無の確認
・トンネル背面の状況確認
・道路斜面モルタル吹き付け面の背面の状況確認
・斜面のすべり面の状況確認

配水管（上水道用、下水道用、農業用）や井戸の維持管理調査に関連して，

・漏水・破損箇所の検出
・スケール（垢）沈着状況の観察

などが挙げられ，これら以外にも多方面への用途展開が期待できる．

参考文献

1)山下智士・太田　保(2009)：超簡易型ボアホールカメラの開発，日本応用地質学会平成21年度研究発表会講演論文集．

2)山田　司・銭谷竜一・太田　保・国松　直・佐々木孝幸・齋藤重則(2010)：濁水中での汎用型ボアホールカメラの撮影方法の検討，日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集．

3)佐々木孝幸・国松　直・原口　強・太田　保・銭谷竜一・齋藤重則(2010)：汎用型ボアホールカメラを用いた岩盤の不連続性評価について，日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集．

4)齋藤重則・太田　保・国松　直・佐々木孝幸・前田修吾（2010)：汎用型ボアホールカメラによる濁度測定への適応性の性能評価，日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集．

5)山下智士・太田　保・原口　強・国松　直・山田　司・銭谷竜一(2010)：汎用型ボアホールカメラを用いた地質調査の標準化仕様への試み，日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集．

地圏資源環境研究部門成果報告書 2010
（GREEN REPORT 2010）
AIST04-C00014-8

平成 22 年 12 月 7 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. 029-861-3633
〒305-8569 つくば市小野川 16-1

Green Report 2010

Preparation and Supply of Maps and Databases on Geo-sphere Resources and Environment

Institute for Geo-Resources and Environment (GREEN)

7 December 2010

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2010
(GREEN REPORT 2010)
AIST04-C00014-8