

Green Report

2006



地圈資源環境研究部門成果報告

地圈流体モデリング研究

24 November 2006

表紙の写真は、黄河流域調査で、西安から内モンゴルの包頭(パオトウ)までの約 750km の
悪道を走破したときに通った黄河中・下流域で唯一の滝、黄河壺口瀑布の景観。
(写真提供：安川香澄氏)

まえがき



地圏資源環境研究部門長

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

瀬戸政宏

Dr. Masahiro Seto

1. はじめに

地圏資源環境研究部門の成果報告会は、今年が第5回目になります。今回の報告会では、平成17年度からスタートした第2期中期目標期間（以下、第2期。）における重点課題の中から、地圏流体モデリング技術の研究開発を中心テーマとして取り上げました。前回までと同様、報告会にご参加いただいた皆様からの多くのご意見やご教示をいただけたと幸いです。

さて、地圏資源環境研究部門は、平成17年度から5年間の計画で開始した産総研の第2期の中で、地圏環境の利用、地圏環境の保全、および資源の安定供給という3つの分野において重点的に研究開発を進めています。以下、地圏資源環境研究部門の第2期におけるミッションと、当部門が第2期での研究開発による成果を社会に如何にして還元しようとしているかという、当部門が目標とする研究開発のアウトカムについて、その概略を紹介させていただきます。

2. 部門ミッション

地圏資源環境研究部門は、“地圏環境の利用、地圏環境の保全、及び資源の安定供給という人類的な課題の研究と開発によって、社会生活の改善と向上を図り、人類の持続可能な発展に貢献する”ことをミッションとしています。我々のミッションの産総研における位置づけは、“持続可能な発展”に産業技術の研究開発によって貢献していくという産総研の経営理念のもとで、当部門が“持続可能な発展”に不可欠な資源問題と地圏環境の保全を実現するための研究開発、科学的知見の整備を進め、それを社会に迅速かつ適切に提供する役割と責任を担うということです。

当部門が研究対象とする環境負荷を最小化したもとの資源開発、地圏利用の問題は、現在世界的に進む市場の自由化・グローバル化の流れの中で、単に日本国内のみの資源の安定供給を図り、国内の環境汚染問題を解決することではなくなってきています。つまり、21世紀における人類の持続可能な発展を可能するために、現在石油、天然ガスなどの化石燃料に代表される再生不可能なエネルギーと資源に依存している人類がいかに持続的にエネルギー及び資源を安定的に確保できるか、二酸化炭素排出削減や土壤・水環境の保全の問題に対していかに適切に対処できるか、さらには進行する地球温暖化や人口増加の中で安全な水資源をいかに確保するかなど、国際的な連携や枠組みも踏まえたグローバルな視点が必要になってきています。

地圏資源環境研究部門は、このようなグローバルな社会情勢のもと、当部門に結集した地質学、地球化学、地球物理学、資源工学、地下水学などを専門とする研究者の研究ポテンシャルを融合させながら「持続可能な発展」に貢献していきたいと考えています。

3. 当部門が目標とする主なアウトカム

当部門は、ミッションの中でも記したように地圏環境の利用、地圏環境の保全及び資源の安

定供給という観点からの社会へのアウトカムの発信を目指しています。

具体的には、地圏環境の利用に関する分野では、“地層処分環境評価技術の研究開発”と“二酸化炭素地中貯留システムの解明・評価と技術開発”を重点研究課題として進めています。これらの研究開発においては、まず、地層処分に関する研究では、2030年代中頃以降に計画されている地層処分事業の実現に向けて、概要調査地区調査に必要な知見と技術を沿岸域について主導して取りまとめを行い、それを政策や社会に提供することをアウトカム目標としています。また、二酸化炭素地中貯留に関する研究では、2015～2020年以降の国内外での一般帶水層を対象とした地中貯留事業の実施に向けて、帶水層内での二酸化炭素の挙動解明に基づいて事業許認可に必要なモニタリング指針の策定、CO₂貯留規模の提示、インベントリー見積もりの基準策定等の提供を目標とするアウトカムとしています。

次に、地圏環境の保全に関する分野では、“土壤汚染リスク評価手法の研究開発”と“広域地下水循環に関する研究”を進めています。これらの研究開発における主なアウトカムとしては、土壤汚染リスク評価に関する研究では、土壤汚染リスク評価システムの開発と普及によって事業所等での土壤汚染対策を進展させ、社会全体としての土壤汚染のリスクを低減させるとともに、環境政策や法整備という面での進展を目標としています。また、広域地下水循環の研究では、我が国の代表的な大規模水文区での地下水循環系の調査・解析によって、水文環境図の策定、広域の地下水循環モデルの構築を行い、これに基づいて地下水資源の保全や有効利用に関する政策や施策に反映することを目標とするアウトカムとしています。

資源の安定供給に関する分野では、メタンハイドレート資源を含めた天然ガス資源の資源量・成因評価の研究開発、加えて鉱物資源の資源ポテンシャル評価、および地熱資源の資源評価と貯留層モデリングに関する研究開発を進めています。天然ガスに関する研究では、日本周辺海域でのメタンハイドレートも含めた資源ポテンシャルの評価や資源図の作成、およびメタンハイドレート研究ラボとの共同による生産手法の開発によって、日本周辺の天然ガス資源開発の進展、メタンハイドレート国家プロジェクトの成功への貢献をアウトカム目標としています。鉱物資源の資源ポテンシャル評価の研究では、レアメタル資源の資源ポテンシャル評価を重点的に実施し、地球規模での重希土類元素資源のデータベースや探査指針の策定、骨材資源に関する日本全体の資源調査の取りまとめを完了し、我が国の資源政策への提言や資源安定供給への貢献をアウトカム目標としています。また、地熱資源に関する研究では、地熱版風況マップや地熱貯留層モデルの改良を行うとともに、それら成果を国際シンポジウムの開催やユーザー会を組織した普及活動により、地熱資源に関する知的基盤情報や基盤技術を社会へ十分に普及することをアウトカムとして目指しています。

最後に、地圏資源環境研究部門成果報告会は、上に述べたアウトカムの実現に向けて、我々の研究成果を適時に外部の方々にご理解いただくとともに、社会への貢献という視点から我々が進めている研究に対する貴重なご意見をいただくための重要な機会と位置づけており、毎年定期的に開催していく予定です。今後とも変わらずご高配を賜りますよう、心よりお願ひ申し上げます。

平成18年11月24日

第5回（2006年）地圈資源環境研究部門研究成果報告会プログラム

13:00-13:20：部門研究紹介

部門長 濑戸 政宏

頁

（研究発表）

特集：地圈流体モデリング研究－環境・資源問題における流体の役割－

13:20-14:00：「塩淡境界調査研究から沿岸域研究開発へ」

丸井 敦尚（地質バリア研究グループ） 5

14:00-14:40：「物理探査電磁法による海岸平野における塩水性地下水の調査」

光畠 裕司（物理探査研究グループ） 9

14:40-15:20：ポスターセッション

（発表：各研究グループ、研究者の個別課題研究等）

15:20-16:10：招待講演「地圈水循環系モデリング技術の現状と課題」

登坂 博行（東京大学） 13

16:10-16:50：「地下深部の熱水の進化に伴う元素挙動－鉱物資源探査手法の開発」

村上 浩康（鉱物資源研究グループ） 17

16:50-17:15：ポスターセッション

（発表：各研究グループ、研究者の個別課題研究等）

17:15-19:00：懇親会（臨海センター11階ロビー）

ポスターセッション

（グループ発表）

地下水環境研究グループの紹介	石井 武政	21
地圈環境評価研究グループの紹介	駒井 武	23
C02 地中貯留研究グループの紹介	當舎 利行	25
地質バリア研究グループの紹介	楠瀬 勤一郎	29
物理探査研究グループの紹介	内田 利弘	33
地圈流体ダイナミクス研究グループの紹介	石戸 恒雄	37
有機地化学研究グループの紹介	坂田 将	41
燃料資源地質研究グループの紹介	松林 修	45
地熱資源研究グループの紹介	村岡 洋文	47
鉱物資源研究グループの紹介	渡辺 寧	51

（個人発表）

地下深部岩盤での初期応力状態に関する研究

長 秋雄（産総研・地圏） 55

坑内自然電位連続測定によるフラクチャー岩体の水理特性推定

西 祐司・石戸 経士（産総研・地圏） 59

根木 健之（日鉄鉱コンサルタント）

地球電磁気学的手法による良質な粘土鉱床の探査および評価技術の開発－深部熱水系調査から坑内鉱脈調査まで－

高倉 伸一・石戸 恒雄・須藤 定久・村上 浩康・安川 香澄（産総研・地図） 61

熱水変質岩中の緑泥石やイライトの化学組成並びに帶磁率を利用した鉱床探査手法

村上 浩康（産総研・地図） 63

層状鉄マンガン鉱床の重希土類鉱床としての可能性

守山 武・渡辺 寧・村上 浩康（産総研・地図） 65

地熱資源の統合的評価に資するデータ・ツール集 CD-ROM の出版（九州事例の編集）

茂野 博（産総研・地図） 67

CO₂ 地中貯留深度での深部地下水の化学的特性：地層間隙水データベース

奥山 康子・佐々木 宗建・金子 信行・徂徠 正夫・柳澤 教雄・村岡 洋文（産総研・地図） 69
CO₂ 貯留のための 3 次元深部地下構造モデリング*

麻植 久史・楠瀬 勤一郎・古宇田 亮一・丸井 敦尚・植木 俊明（産総研・地図）

CO₂ の鉱物固定の基礎研究－数値解析による地化学的要素過程の検討*

佐々木 宗建・徂徎 正夫・柳澤 教雄・金子 信行・中尾 信典・奥山 康子（産総研・地図）
CO₂ 炭層地中貯留における地化学モニタリングについて

鈴木 祐一郎, 猪狩 俊一郎, 前川 竜男（産総研・地図） 71

小牧 博信, 藤田 真仁（KANSO テクノス）

広域地下水流动評価手法 －CO₂ 地中貯留への適用－*

宮越 昭暢・丸井 敦尚・麻植 久史・楠瀬 勤一郎（産総研・地図）

X線CTによる岩石試料中の空隙の3次元イメージング*

中島 善人（産総研・地図）

微生物による有機塩素化合物汚染のNatural Attenuation*

竹内 美緒・川辺 能成（産総研・地図）・渡邊 英治（山形県環境研究センター）

杉原 麻生・小川 桂子・駒井 武（産総研・地図）

Ancient microbial DNAs remain in late Quaternary mud sediments*

Mio TAKEUCHI, Satoshi HANADA, Susumu Tanabe, Hideyuki TAMAKI, Yoshinori

MIYACHI, Tsutomu NAKAZAWA, Takeshi KOMAI and Katsumi KIMURA (AIST)

脂質バイオマーカー分析による南海トラフ深部堆積物中の古細菌の活動実態の解析*

大庭 雅寛、坂田 将（産総研・地図）

千葉の水溶性天然ガス付随水の同位体組成*

前川 竜男、猪狩 俊一郎、金子 信行（産総研・地図）

*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



特集： 地圏流体モデリング研究

—環境・資源問題における流体の役割—

塩淡境界調査研究から沿岸域研究開発へ

Progress of the National HLW Research from Scientific Study to Systematized Developing Research for Creating an Acceptable Engineering Design

地質バリア研究グループ：丸井敦尚

Atsunao Marui: Geo-barrier Research Group

Phone and fax: 029-861-3684

e-mail: marui.01@aist.go.jp

1. Acceptance の概念

廃棄物処分について、誰もが真っ先に考えることは“安全性”であろう。端的にいえば、危ないものや汚いものには近寄ってほしくないのが人情である。一方、テレビの広告にも見るように、わが国の電力の 1/3 は原子力発電によって補われており、将来的には地下深くにその廃棄物を処分することが法律で決まっている。国際的な道徳観から言えば、廃棄物は受益国内にて処分するのが常識であり、長期保存・監視することも含めて、その選択肢は限られている。先に提案した“人情”に反する国としての“責務”が発生している。

話は変わるが、国際化・IT 化の時代にあって、我々地球科学系研究者はグローバリゼーションを学んできた。歴史や地理・技術に加えて政治・経済・文化など専門以外の分野を学び、最善のリサーチ・デザイン構築を教育してきた。しかし、医療の世界で言うインフォームド・コンセントのような、受け手側の状況や心情に配慮したデザインを構築することは常識となつてはおらず、むしろ研究レベルを下げることにつながるとさえ考える者もいるのが現実である。理想的にあるいは理論的にグローバライズされた思想よりも、個々のアクセプタンスの集合体である、ワールド・ワイドあるいはローカルなアクセプタンスのほうが重要視される時代にかわりつつあることに気付いていない。より踏み込んで言えば、研究者側の提案には全ての要素を考慮する必要があるが、受用者や受容者側の選択要素には個人差があり、地域差があり、世代間の差異があることを認めるべきである。さらに、受け手側の選択は提案されたメニューのすべてを勘案しないのが常識であることを認めなくてはならない。立場を変えれば、受用者も

同様であり、提案側に位置する実施者は受け手のアクセプタンスを一つでも多く集めることが重要であると知らなくてはならない。

飛躍するが、国と受容者の間では、近い将来廃棄物処分について“飴とムチ”的取引が行われる。国は(結果として)飴がなるべく小さくなるような最善のエンジニアリング・デザインを構築すべきだし、我々は国立研究機関の研究者である以上、これに貢献するベスト・リサーチ・デザインを構築・実施しなくてはならないと考える。すなわち、最終的な受容者は何を要素に答えを選択するかわからないが、個々のアクセプタンスの集まりがパブリック・アクセプタンスであることをまず認識すること。そして、事業の実施者は研究者サイドから見ればリサーチ・デザインの受用者であること、そしてその受用者が現実的にはエンジニアリング・デザインを構築することを念頭に置き、受用者のアクセプタンスを獲得しなくてはならない。研究が研究らしくあればあるほど、アクセプタンスは段階的でタイム・ラグがあると認識すべきである。(余計な話しだが、家を建てるとき新妻は最新式のシステムキッチンを注文した。家が完成するまでに住宅メーカーは新たなモデルを発表しており、半年後に家が引き渡された時、若妻は最新型でないと泣いたそうである。)

2. 国の地層処分研究

わが国の 1 号原子炉(実験用)は 1961 年に茨城県東海村の日本原子力研究所に誕生した。その後、商業用の発電が行われるようになり、現在では 55 基の原子炉を有する世界第 2 位の原子炉大国となった。その結果として廃棄物が蓄積され、国は処分を迫られるようになった。核燃料サイクル開発機構(現在の日本原子力研究開

発機構)は廃棄物処分研究を進め、1992年の「第1次とりまとめ」では処分の技術的な可能性を提示した。そして、2000年の「第2次とりまとめ」では、将来10万年程度にわたって安定した地層処分可能な地質環境が、わが国に広く存在すると報告している(信頼性の提示)。これを受け、産業技術総合研究所も含め多くの国立の研究機関では、地層処分研究が活発に行われ、2006年までに第1フェーズといわれる研究を実施してきた。この段階での目標の一つに、既存技術で地層処分が可能かどうか評価するということが挙げられていた。国はこの研究フェーズの終了とともに基盤研究の進捗を調査し、次期フェーズへと研究を進めるために、高レベル廃棄物地層処分に関する研究開発マップを策定している。このマップの課題を見る限り、国は少なくとも地上からの調査(詳細は後述、文献調査で処分地の候補地となった複数の地点で実施される予定)においては、既存研究や既存技術の応用・統合で十分に対応できると考えている。さらに、2005年の通称「H17レポート」では、最終処分法に沿った工学的なデザインを意識し、処分研究・技術の展望を述べると同時に知識を体系化することの重要性を強調している。

具体的には、2005年度まで北海道の幌延と岐阜県の瑞浪においてそれぞれ堆積岩と結晶質岩地域を対象とした地上からの調査研究が実施されてきた。2006年度からは直径数mの立坑を掘削して次期フェーズの研究課題(立坑からの調査)を実施するとともに地上からの調査の精度評価を行う。さらに、処分場の立地を考慮して国は2007年度から沿岸域というカテゴリーを加えて、堆積岩・結晶質岩とあわせた3本柱で地層処分研究の体系化を実施する予定である。この研究フェーズの中で、国は地質環境長期安定性研究の中心課題のひとつに地下水の諸問題

(塩淡境界や断層に沿って上昇する深部地下水、深部に超長期間賦存する地下水の化学的特性等)を解明し、その知識をまとめ上げる予定である。また、その後は地質環境長期安定性研究の一環として火山活動を伴わない熱・热水活動や異常高間隙水圧現象などを含むいくつかの課題が解決すべき問題として残されている。これらを解決し、国はアクセプタブルな最終計画が構築できるよう研究を推し進めるつもりである。

(またもや余計な話しだが、昨今の高校や大学初等教育では地球科学に関する教育が軽んじられている。戦時下ならともかく、共通のアクセプタンスを得るために最低限の共通認識を持っていただくこと(教育)が必要不可欠だと思うが…)

3. 地下水の循環と問題

地下水は循環する。旧カリキュラムの人なら、

高等学校時代に「山に降った雨が川となり、平野を地下水が流れ、いずれは海に流れていく」という水循環を学んだと思う。例えば関東平野では、部分的にではあるが、地下2,000mの水までもが循環に加わっている。もちろん地質や気候により地域差はあるが、現在言われているように地下300m以深に処分場を建設したとしても、その部分の地下水が汚染物質を輸送してしまい、地表に流出する可能性は拭い去れない。

核燃料廃棄物の半減期はきわめて長い。拡散の度合いによるが、10万年ないし100万年を経なければ漏出した時に安全とはいえない。従って、処分計画もこれ(わが国の場合10万年以上安全であること)を目途に立案されている。では、これだけの長い間、安定している環境は地下のどれくらいの深度であろう。参考例ではあるが、縄文海進はたかだか6,000年前だし、氷期の繰り返しに伴う100m以上の海水準変動は12万年のサイクルで訪れた。さらに、地下水循環の活発な下総層群でさえ45万年前からの堆積物である。気候や海水準変動は地質学的に見るとかなりの短時間で起る現象である。地下水循環にしても45万年前の活発な流動層(上総層群)は今や深部に眼むり、(地質学的に見て)新たな帶水層が付加されている。地下水循環の経路そのものが変更されているのだ。

事業化には汚染物質を運搬する恐れのある地下水の流動環境を知ることが第一課題であるが、地球の温暖化や海水準変動などはもちろん、表層近くでの地質の付加や地形の変化(特に侵食)に耐えなければならないと考えるだけでも気が遠くなる。今できることは即ち、化石水(流動から外れた地下水)や地層水(地層ができたときに取り込まれた水)が存在する領域を確実に検知し、さらに地下水循環環境を破壊しない処分工法を追求しなければならないということであろう。ここで考えなければならないことは、最終のエンジニアリング・デザインには通常の工学技術で想定するタイム・スケールをはるかに超えた地質スケールを盛り込まなくてはならないことである。良く言えば、学術的コラボレーションであろうが、異なる常識の統合は容易ではないと考える。さらに、地下水という異分野の研究者(常識)が加わるから、一層困難であろう。だからこそ大きな研究課題(事業)であることに間違いはない。受容者側に理解してもらう前に、受用者にさえ理解してもらえないプランを組み上げるのではないかとの心配もある。(またまた余計な話しだが、トンネル工事をしていて「予期せぬ出水であった」という話をよく聞く。四国での突発出水の話しだが、工学屋は亀裂帯を通り過ぎたのに…と言ひ、水文屋は出水総量では想定内だけ…と言ひ、結局誰ならわかるの?と事業者は困惑したとか。)

地層処分事業で地下水を取り扱うものにとっ

では、流体としての問題のほかに、過去の学習にない地質の付加や深部環境の変化など自らに課さねばならぬ課題が多く残されているところに大きな問題がある。

4. 塩淡境界調査研究

産総研では二つの部署で地層処分に関わる研究を実施しているが、本部門では茨城県東海村の旧日本原子力研究所およびその周辺地域を対象にして、2002年から「塩淡境界面形状把握調査」を開始した。これは資源エネルギー庁からの受託研究であり、大強度陽子加速器の建設工事（工事揚水）に伴う沿岸砂層内の塩淡境界と地下水流动の変化を観測した。塩水化に限らず通常の地下水障害は、事が起ころうから問題が表面化し、観測が開始されることが多い。しかし、今回の場合、日本原子力研究科発機構（旧原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が管理するこの施設（J-PARC）については、コンクリートの保護や周辺住民への配慮などの観点から、塩水化を避けなければならなかつたため、建設前に産総研に打診があり、建設工事中の地下水（揚水）管理をするための共同研究が開始された。研究項目としては、“塩水化（KEK）＝塩淡境界観測（AIST）”と“揚水して低下させた地下水を淡水地下水で復活させる（KEK）＝地下水流动の解析と管理・検証（AIST）”とが重なり合い、利害の一致する共同研究となった。これに加えて産総研側は砂地に建設する巨大コンクリート構造物（1km×2km）であるJ-PARCそのものが負荷（付加）となり地下水流动に加重を与えるため、その影響を観測するという目的もあった。地下水管理の観点から見れば、地下水表面への負荷増加は地盤圧力の増加に等しく、ひいては地盤高の増大（海水準の低下や地層の付加）を想定した解析を実施する基礎資料となる。さらに、このような沿岸域での巨大工事開始時期からの一貫した地下水観測は世界的に見ても前例の無いことであり、当初から研究の意義が大きいと予想された。

工事区域では、工事を実施した3年間にわたり一日平均10,000t（ピーク時には20,000t）の揚水があり、塩水の浸入が観測された。当然工事の影響を最小限にするための揚水規制や地下水流动をコントロールするウォーター・カーテン設置などが行われ、地下水流动にかかる繰り返し解析や検証のための水文観測が実施された。開始時期には精度もそれなりであったが、2006年度には地下30mを超える深度の工事連壁撤去後の地下水流动変化を的確に捉え、地下水回復を日単位の精度で可能にした。さらに工事途中では、居住地域の地下水を守るために、ウォーター・カーテンの施工・運転により地下水流动の方向や時間をコントロールすることにも

成功している。本研究では、総長1,000mを超えるコア分析によるイレギュラリティーの検証など、基礎的な分析や解析が何度も行われた。本研究を実施することで、我々は観測や分析・解析の精度を向上させることはもちろん、リサーチ・デザインの組み立てや検証・体系化について大きな財産を蓄えたと自負している。

2000年レポートを拠所に地層処分を決め、国の関係機関は5カ年研究をそれぞれの立場で実施した。このフェーズでは既存技術（あるいはその応用）で地層処分が可能かどうかを評価することが大きな目標の一つであり、地下水研究を代表する当該研究課題では、その名のとおり“調査”をする手法を研究し“地下水観測の手法”についての答えを見出すことを達成した。すなわち、他の研究課題同様に（地層の繰り返しのように）、地下水に関する既存研究・技術の組み合わせによって最適な研究手法が組み立てられる事を見出した。東海村での地下水観測は深度200mまであるが、多層間での地下水移流や塩水の拡散（観測・解析）など、深部研究に応用できる基礎を獲得している。今後は深部へ移行する際の微修正が求められる状況にある。

5. 沿岸域研究開発への発展

今、国は（実際には実施主体といわれるNUMOだが）文献調査地域を公募している。平成20年代前半には、文献調査を終了して、地上からの調査が開始されることになっている。国が行う次期研究の大きな課題は、地上からの調査を意識した段階的な調査の体系化であり、地質に関して言えば、多様な地質（地下水）を段階的にかつ的確に評価して無駄のない調査を行うためのプランの策定と実施者への技術移転を行うことである。我々の行う次期フェーズ研究では、この調査指針にあわせてボーリングによる地下水調査、物理探査を駆使した水理地質構造の高精度把握、岩石-地下水DBによる水質進化解析、メタデータを用いた断層把握を念頭においている。本研究開発では、先にも述べた国の指針に合わせ、地下水の局部上昇流の推定や深部地下水の特性を高精度に把握するため、地形・地質など各種データの収集に始まり、これまで困難とされてきた浅海域において高精度に断層の位置や形態を推定する物理探査（あわよくば水理境界も判定）、深部岩石との長期的な接觸を考慮した水質進化解析などを実施する予定である。また、若手ペーマネント研究者が減少しつつある今だからこそ、産総研をはじめ関連研究機関や大学等の若手研究者を育成し、技術や研究体制を引き継がなくてはならないと考える。事業が大きくしかも長期にわたるため、関連分野も含め、次世代のための基盤作りも提案してゆきたい。（とっても余計な話だが、ゆとり

教育を受け、褒められて育った世代には競争力が低下している(というのが一般)。国際的な競争の中で技を磨くことが一つの解決方法だが、貪欲な途上国の研究者相手だと、たとえ負けても悔しささえ残らないことがある(見栄を張る)。小生の経験から言うと、ドイツなどが若手を磨いてくれる絶好の相手国になる気がする。)

先にも触れたが、国はこの次期フェーズ研究を実施するに当たり、基盤研究の進捗を調査して「高レベル廃棄物地層処分に関する研究開発マップ」を策定した。開発というと何か新しいものを造るように感じる人もあるだろうが、ここで言う“研究開発”とは研究を開発することで、既存の研究や技術の発掘と評価、そしてそれに続く体系化である。我々を例に挙げれば、今後焦点が当たられるであろう“沿岸域”に関しての英知を取りまとめることがある。従って、期待される成果は高度なスタディーの“取りまとめ”であり、沿岸域に関するリサーチ・メニューを作ったそのあとには受用者への技術移転が待っていると考えるべきであろう。

受用者はサイトに最適なツールをメニューから拾い上げ、独自のエンジニアリング・デザインを構築する。これは事業の性格上、社会的にも国際的にも受け入れられなければならない。我々がインフォームするもの全ては、各種のレビューや様々な議論に耐えうるテッパン情報でなくてはならない。次期フェーズを実施するに当たり、求められる情報と技術移転(ie. 研究の向上と社会貢献)を念頭においてこそ、

Acceptable Research となろう。

物理探査電磁法による海岸平野における塩水性地下水の調査

Electromagnetic Investigation of high-salinity groundwater zones in a coastal plain

物理探査研究グループ：光畠裕司

Geophysical Exploration Group: Yuji MITSUHATA

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

1. はじめに

沿岸地域では、淡水の地下水が海に向けて流出し、その下を海水が海から陸側に向けて楔(くさび)のように浸入する塩水楔の存在が報告されている。そしてこの淡水と塩水の境界面(塩淡境界あるいは淡塩境界)に沿って、淡水側で、淡水地下水が地下深部から上昇し、海洋へと流出することが観測およびシミュレーションにより知られている。

従来から、海岸平野での持続的な地下水の利用に関して、その塩水化が問題となっている。また最近では、高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの選定やその安定性の評価に関して、海岸付近からその内陸にかけての地下深部の帶水層への海水の浸入域を把握することが要求されている。地層処分の安全性を考える上で、地下水の影響は非常に重要で、漏洩した汚染物質が、地下水の流れによって人間環境へ運搬される可能性が想定され、「地下水シナリオ」と呼ばれている(原子力発電環境整備機構、2003)。沿岸地域の地下では、前述したように塩淡境界に沿った淡水地下水の上昇流があり、この流れによる汚染物質の運搬が懸念されている。

海岸付近の帶水層の分布が、単純な塩水楔で表現されるような均質な多孔質媒体でなく、複雑な不均質構造を有する場合、海水の浸入はもっと複雑になると考えられる。帶水層が複数存在する場合は、各層に海水浸入が発生する。また、塩水性地下水の存在理由として、地層中に取り残された化石塩水に起因するものも考えられる。一方では、沿岸海底下に、地層中に取り残された塩分濃度の低い淡水塊の存在も報告されており(徳永、2004)、沿岸域における実際の塩水性地下水の分布は、単純なモデルでは説明できない場合が考えられる。

以上のことを考慮すると、現状において、海岸平野で地下浅部から深部にかけて、どのように塩水性地下水が分布しているか把握することが重要である。本報告では、産総研が資源エネルギー庁からの受託研究「塩淡界面形状把握調査」のもとで、国内の代表的な海岸平野である九十九里浜平野において塩水性地下水の分布

域を把握するために実施してきた電磁気探査法調査の概略を報告する。さらに推定されて比抵抗値から地下水の塩分濃度の推定を試みた結果についても述べる。

2. 九十九里浜平野における電磁法調査

平成14年度から16年度にかけて千葉県九十九里浜平野(図1)で、三つの異なる電磁探査法調査を実施した。それらの手法は、広域・深部探査法として、可聴周波数帯域MT(Audio-frequency magnetotellurics、AMT)法、比較的浅部の調査法として時間領域電磁(Time-domain EM、TEM)法、浅部調査法として電磁プロファイリング法である(図2)。

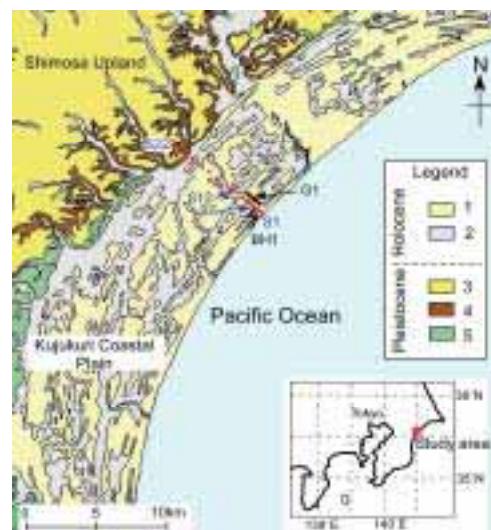


図1 九十九里浜平野における電磁探査法調査の測点配置と地表地質(産総研地質調査総合センター編(2004)をもとに作成)。凡例は1:浜堤及び砂丘堆積物(砂)、2:後背低地堆積物など(泥・砂まじり泥及び腐植質泥)、3:成田層(砂・泥質砂・泥及び礫)、4:地蔵堂層及び藪層(砂・泥質砂・泥及び礫)、5:笠森層(泥質砂岩)。BH1は孔井、S1~S22はAMT測点、S1~S10はTEM測点、G1は電磁プロファイリング調査側線を示す。

AMT法は、周波数帯域が1Hz~10kHzの赤道

付近の雷活動に起因する自然の電磁場変動を信号源とした電磁探査法であり、送信ループのような人工的な信号源を設ける必要がない受動的な方法である。TEM 法は、一边が 20m~100m の長さの送信ループを地表に設置し、そのループに数アンペアの電流を通電しておき、それを急激に遮断したときの 2 次磁場を送信ループの中心に設置した受信ループにより測定する方法である。また、電磁プロファイリング法は、小径の送信ループと受信ループを一定の間隔を隔てて固定し、様々な周波数の電磁場を送受信しながら地表を移動させることで、地下の比抵抗分布をプロファイリングする手法である。

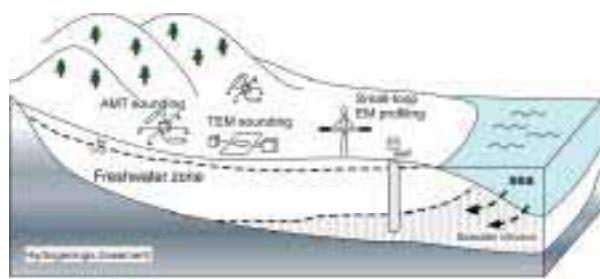


図 2 海岸平野での電磁探査法による塩水性地下水調査の概念図。

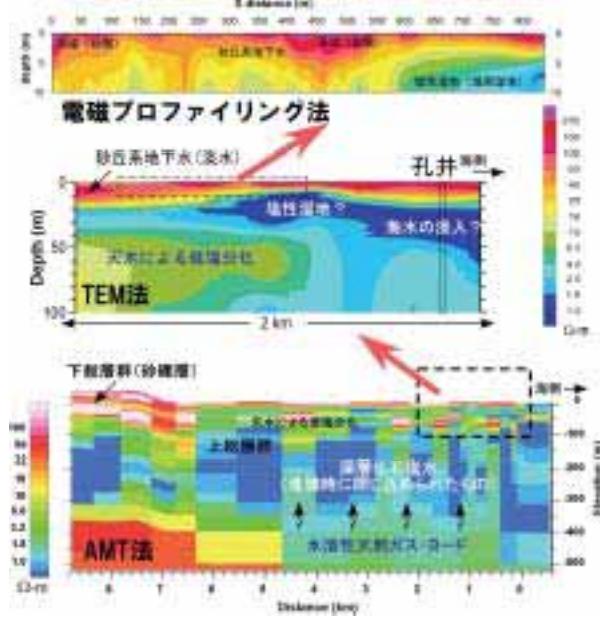


図 3 各種の電磁探査法により推定された比抵抗の深度断面図（光畑、2006 より）。中段のカラースケールは TEM 法と電磁プロファイリング法の比抵抗断面図に共通で、下段に示したカラースケールは AMT 法の比抵抗断面図のものである。

それぞれの探査法の適用によって推定された比抵抗の深度断面図を比較して図 3 に示す。AMT 法による断面図の点線で囲まれた範囲は、TEM 法による断面図の範囲に対応し、表層の高比抵抗層（赤色）とその下に存在する低比抵抗

領域（水色）、さらにその下の高比抵抗を示す領域の分布は、両者の間で完全には一致していないが整合的である。また、TEM 法の断面図の点線で囲まれた範囲は、電磁プロファイリング法による断面図の範囲に対応し、表層の高比抵抗層や右下の低比抵抗領域の分布の様子が整合している。

この地域では、茂原ガス田のように深部の地層の中に、天然ガスやヨードを多く含んだ海水（化石塩水）がトラップされていて、重要な資源となっている。したがって AMT 法の断面図で、深部の比抵抗の低い領域は、化石塩水の存在を示唆している。また、下総台地を構成する下総層群（または成田層群）は透水性が良く、降雨により地下水が涵養されている（千葉県、1966）。したがって、台地での降雨の浸透性も良く、地層中に含まれた塩分は容易に流出してしまい、高比抵抗となっているのではないかと推定している。

TEM 法による断面図で、海側にある低比抵抗領域（青色）は、海岸線まで伸びており海水の浸入を示唆するが、それより内陸に存在する低比抵抗領域は、深度も浅く、海水の浸入に起因するものとは考えられない。森脇（1979）は、縄文海進極相期に海岸線が現在の台地と平野の境界まで迫り、それ以後の間歇的な海退の過程で、ラグーン、砂堤、堤間湿地が海岸線に平行して形成されていく様子を示している（図 4）。海水が流入するラグーンが海退により、堤間湿地と成って行く過程で塩分が残留し、それが内陸の浅い低比抵抗領域を形成しているのではないかと推測している。千葉県（1966）には、九十九里平野北部における比較的浅部の塩水地下水の存在がいくつか報告されている。電磁探査法調査の詳細は Mitsuhashita et al. (2006) を参照して頂きたい。

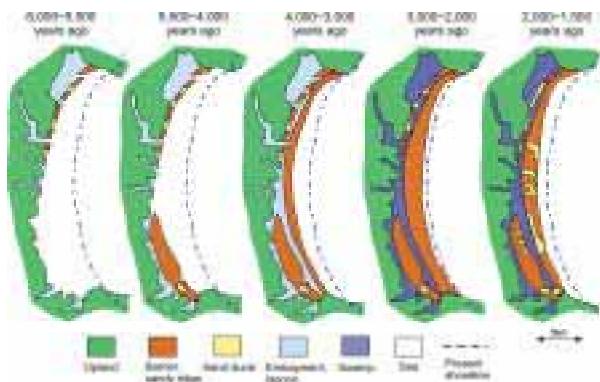


図 4 縄文海進極相期以後の九十九里浜平野の変遷（森脇（1979）をもとに作成）。

平成 17 年度には、浅部の低比抵抗の存在範囲をより詳しく把握するために、電磁プロファイリング法と TEM 法を面的に実施し、かつ、より詳細な比抵抗深度プロファイルをコーン貫

入型原位置比抵抗測定で簡易的に計測し、浅層低比抵抗領域の3次元的な存在範囲を把握した。また、いくつかの地点においては土質ボーリング調査や間隙水サンプルの水質分析を実施した(図5)。

TEM法調査について、図6に各測点の1次元逆解析結果を用いて作成した比抵抗分布を平面コンター図で示す。深度5mでは既に、調査域の南側で比抵抗は低くなり、深度20mでは、調査領域全体の南半分で、 $2\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗ゾーンとなっていることがわかる。

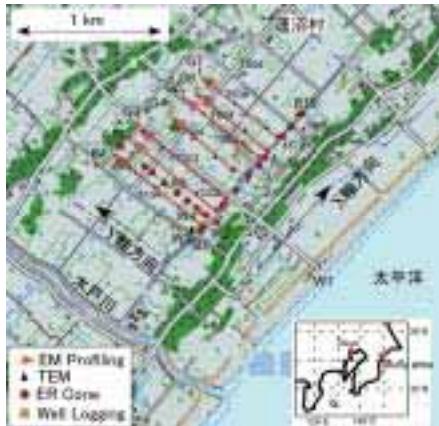


図5 浅部低比抵抗領域調査における測点配置(国土地理院5万分の1地形図を使用).

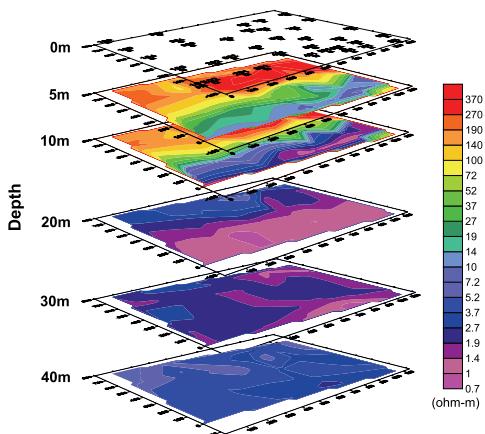


図6 各測点のTEM法データ1次元逆解析結果より作成した比抵抗分布平面図.

ボーリング調査では、深度30mまでの電気検層を実施した。各点のノルマル検層の結果を図7に示す。また、九十九里浜の海岸砂丘にある地点W1と、そこから約1km内陸にある地点W2の土質区分の概略も併せて示す。地点W1では、砂層の下部の深度20m付近から比抵抗が一定になってきているが、地点W2では、砂層の上部の深度約10m付近から一定になっている。海岸から離れているにも関わらず地点W2およびW4においては、地点W1に比べてより深い深度から比抵抗が低下していることが明瞭にわか

る。しかも、比抵抗の低下が発生する箇所は砂層の中で、電気伝導に大きく寄与する粘土鉱物の影響は少なく、低比抵抗の原因は間隙水の塩分濃度によって支配されていると見なせる。

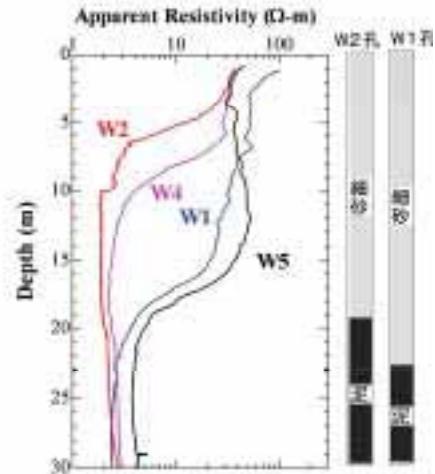


図7 地点W1からW5におけるノルマル検層(電極間隔100cm)結果の比較と地点W1とW2における土質区分の概略(地点W3の検層結果は、地点W2の結果と同様なので表示していない).

3. 等価NaCl濃度の推定

地層の比抵抗は、電解溶液中のイオンの移動による電気伝導と、固液界面に形成される電気二重層をイオンの移動経路とする電気伝導(界面伝導とか表面伝導と呼ばれる)の二種類のイオン伝導メカニズムの並列回路モデルで表現される。これは比抵抗の逆数である電気伝導度 σ を用いると、次式のようになる。

$$\sigma_R = \sigma_L + \sigma_S \quad (1)$$

ここで、 σ_R は地層の電気伝導度、 σ_L は溶液中のイオン伝導、 σ_S は表面伝導による電気伝導度を表す。 σ_L は水飽和率が100%の場合、Archieの実験式により、

$$\sigma_L = \sigma_W / F \quad (2)$$

$$F = a \cdot \phi^{-m} \quad (3)$$

となる。ここで σ_W は間隙水の電気伝導度、 ϕ は間隙率であり、 F 、 a 、 m はそれぞれ地層比抵抗係数、迂回係数、膠結係数と呼ばれる。 σ_S は、 σ_W が小さい場合や粘土鉱物の含有率が大きい場合、あるいは固体粒子の粒径が小さい場合に卓越する。したがって、海水のような塩分濃度の高い間隙水を考慮した場合、 σ_S よりも σ_L の方が卓越すると考えることができる。そのような場合、測定される σ_R を $\sigma_R \approx \sigma_L$ と見なして、 ϕ が既知であれば、(2)と(3)式より σ_W を評価することが可能であると考えられる。

間隙水の電気伝導度 σ_W は、電解質濃度の増加に伴って増大する。また温度が上昇すると、水溶液の粘度が低下し、溶存イオンの移動度が増

加して、結果的に電気伝導度は増大する。

塩分濃度（あるいは単に塩分）とは、天然水中に溶けている物質の濃度の総和であるが、電気伝導度の測定から塩分濃度を評価する場合は、電解質濃度に相当する。海水の塩分濃度は約 35 g/L であり、その主要成分は Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ の 7 成分である。物理検層では、 NaCl 溶液の電気伝導度を基準とした等価 NaCl 濃度を使用している (Tiab and Donaldson, 2004)。これは、実際には様々な溶質を含んでいる間隙水の電気伝導度について、その値を説明することができる等価な NaCl 溶液の濃度のことである。

TEM 法により推定された地層の比抵抗分布を、BH1 孔井（図 1）のコアサンプルから抽出した間隙水の比抵抗値と比較すると（図 8 a）、両者の深度に対する変化の様子は調和的である。推定された地層の比抵抗は深度 10m 付近から急激に低下し、深度 30m で最も低くなっている。また浅部と深部で比抵抗が高くなっているが、標準偏差が大きく、推定の誤差が大きいと考えられる。

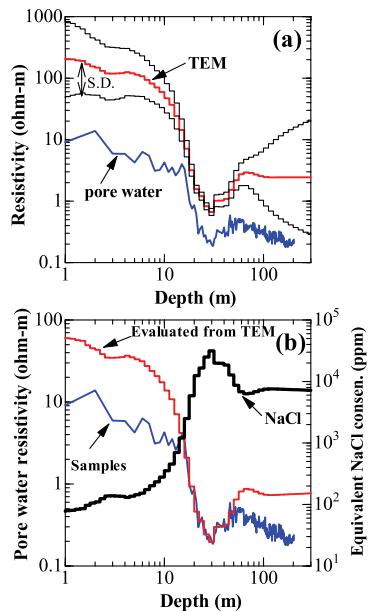


図 8 TEM 法による地層と間隙水の比抵抗および等価 NaCl 濃度の深度変化の推定 (光畠、2006 より)。(a) TEM 法によって推定された地層の比抵抗と BH1 孔井のコアサンプルの間隙水の比抵抗(木山・丸井、1999)との比較。S. D. は推定値の標準偏差。(b) TEM 法結果より推定された間隙水の比抵抗と等価 NaCl 濃度の深度変化。コアサンプルの間隙水の比抵抗と比較して示す。

中性子検層による間隙率の計測によると、深度 100m までの間隙率は約 50% であった。また温度検層の結果では、地表の約 16°C から深度 100m の 17°C まで一次式で近似できる熱伝導による単純な温度分布を示す(丸井ほか、1999)。したがって(3)式において $\phi=0.50$ とし、また比

較的多くの岩石に適用可能な Humble の式 ($a=0.62$ 、 $m=2.15$) を採用し (例えば、Tiab and Donaldson, 2004)、TEM 法によって推定した地層の比抵抗から間隙水の比抵抗を算出した。さらに温度検層データを用いて、25°C の間隙水比抵抗値へと変換した。最終的に推定された間隙水比抵抗と、コアサンプルの間隙水の比抵抗値との比較を図 8 b に示す。精度良く推定されていた深度 10~50m の範囲では、コアサンプルの実測値と整合しており、間隙水の比抵抗が推定できていることがわかる。

さらに、推定した間隙水の比抵抗から等価 NaCl 濃度を評価した (図 8 b)。評価方法の詳細については、光畠(2006)を参照して頂きたい。低比抵抗領域では高い等価 NaCl 濃度を示している。海水の塩分濃度は約 35000 ppm なので、推定された間隙水の等価 NaCl 濃度は、海水が希釈されたものであると考えると妥当な値を示している。

4. おわりに

九十九里浜平野における塩水性地下水調査に、様々なスケールの電磁探査法を適用した。そして、化石塩水や海水浸入の推定を行った。さらに、推定した比抵抗値から地下水の塩分濃度の評価も実施した。将来的な地下水環境を予想するために、塩分の移流分散をシミュレーションする場合、現状での高塩分濃度領域の分布とその値の定量的把握が必要である。本報告で示したような電磁探査法の適用は、有用な地下水調査手法の一つと成り得る。

引用文献 :

- 千葉県 (1966): 千葉県の地下水. 千葉県, 110p.
- 原子力発電環境整備機構 (2003): 地層処分 その安全性. 原子力発電環境整備機構, 150p.
- 木山保・丸井敦尚(1999): 千葉県蓮沼海浜公園における地下水流动と塩水・淡水境界に関する研究 その 2; 1 号観測井コアサンプルによる塩淡境界深度の確認. 地質ニュース, **539**, 55-59.
- 丸井敦尚・石井武政・内田洋平・林武司 (1999): 千葉県蓮沼海浜公園における地下水流动と塩水・淡水境界に関する研究 その 1 ; 研究方針と 1 号観測井の掘削状況. 地質ニュース, **539**, 47-54.
- Mitsuhata, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A. and Kusunos, K. (2006): Various scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain. *Geophysics*, **71**, in press.
- 光畠裕司 (2006): 電磁探査法による海岸平野におよぶ塩水性地下水調査 - 九十九里浜平野における例 -. 地学雑誌, 印刷中.
- 森脇広 (1979): 九十九里浜平野の地形発達. 第四紀研究, **18**, 1-16.
- 産業技術総合研究所 地質調査総合センター(2004): 20 万分の 1 数値地質図幅集「関東甲信越及び伊豆小笠原諸島」. 産業技術総合研究所, CD-ROM.
- Tiab, D. and Donaldson, E.C. (2004): *Petrophysics*. Elsevier, 889p.
- 徳永朋祥 (2004): 沿岸域の地下水環境と長期地球表層プロセス. 地下水技術, **46**, 1-9.

地圏水循環系モデリング技術の現状と課題

An Overview of Geosphere Hydrologic-cycle Modeling

東京大学工学系研究科：登坂博行

Department of Geosystem Engineering, University of Tokyo: TOSAKA Hiroyuki
e-mail: tosaka@geosys.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

地圏（ここでは、岩石圈とその上部の生物圏、及びその境界付近の気圏や水圏を含む領域と考える）では様々な人間活動が展開されており、それに伴い資源確保・災害低減・環境保全などの問題が発生する。地圏問題は自然を相手とする不確定性の強いものであり、その科学的評価（現状再現、将来予測）には、調査データを踏まえた数理モデル（数値シミュレーションモデル）の活用が求められ、歴史的に様々な技術開発が行われてきた。

本稿では、特に地圏域の水循環系モデリング技術を中心に、数理的取り扱い、現状と課題などを紹介する。

2. 地圏の流体関連モデリング

図-1に、地圏における水循環や環境、および地圏内を利用する人間活動などを描いてある。地表面付近に展開される人間文明は、水圏・気圧からもたらされる水循環の恩恵と、地下資源（水、石油、地熱、各種材料資源など）などの

恩恵を得て発展してきた。しかし、水循環は同時に災害をもたらすものであり、また、人間活動の巨大化による物質やエネルギー消費が全球の環境に影響しつつあり、地下は廃棄物の還元・隔離場所としても考えられ始めている。

表-1は地圏を中心とした各種の科学・工学問題とモデリングについてまとめたものである。著者は、数理モデリングの対象となる地圏工学的问题を、大きく次の2分類で考えている。

- ①地圏水循環系問題：気圧との境界、水圏との境界、および地下（地表下千m程度）を含む水循環の影響圏の水関連問題。
- ②深部流体資源問題：地熱貯留層や油・ガス層などの貯留層工学的問題。水循環とも密接に関係する場合があるが、一般に岩石圏内部の現象として水循環からは切り離して論じられるもの。

本稿では、特に①のモデリングに関わる内容を紹介する。これは、気圧・岩石圏境界の流れと地下貯留層問題を含んだものであり、生活圏の環境・防災と密接に関係したものである。

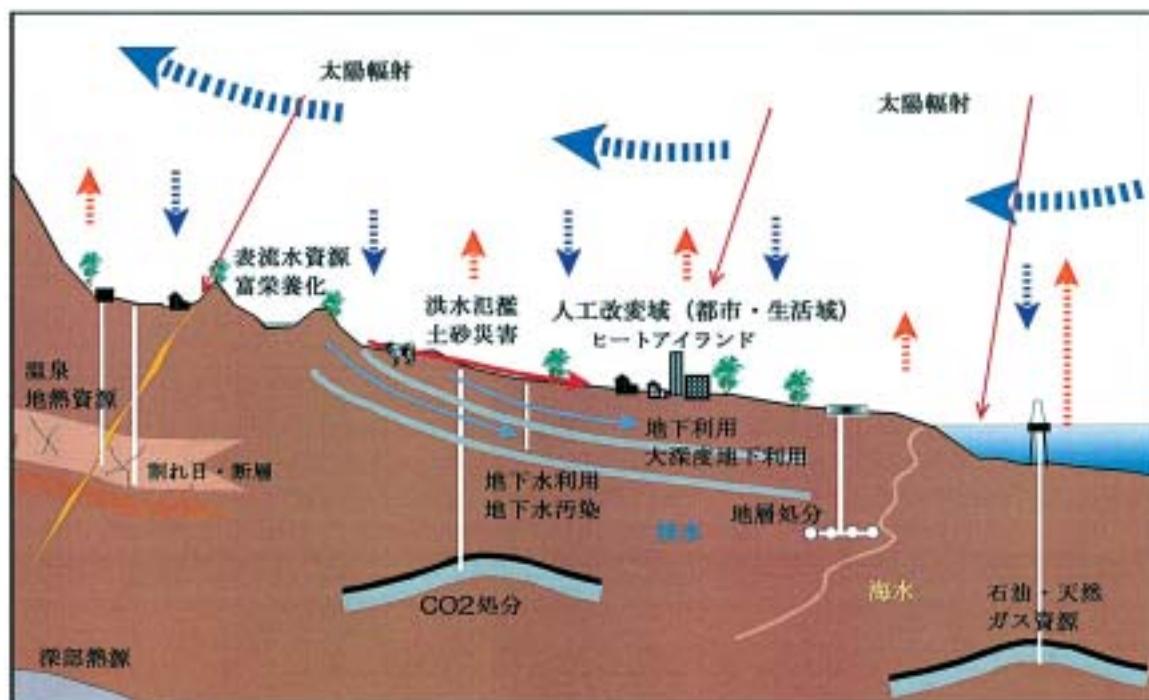


図-1 地圏の人間活動の概念図

3. 水循環系モデリング

3.1 流域と水循環系モデルの必要性

地図水循環系は「流域」という概念で平面的な境界を設定して扱われることが多い。面積的には河川流域全体、深度的には地表付近の大気圏から地下深部（地下千mオーダー）まで含んだものである。この上部には、山岳・森林、平野、都市などが載り、国や自治体による流域水管理が行われ、生活の安全性・快適性が維持されている。

水循環系のモデル化は、行政施策判断の客観的資料提供の役割を担う技術の一つであり、具体的には次のような目的で利用される。

- ①水資源管理（表流水管理、源流域保全、地下水盆管理、配水網管理、水処理・水質管理）
- ②水災害防止（河川管理・改修、都市洪水対策、土砂災害対策）
- ③流域水環境保全（排水管理、富栄養化対策、土壤・地下水汚染対策、自然環境保全），

3.2 モデル化すべきプロセス

一般に水文・水理学の分野で水循環モデルと称されるものは、流域の降雨一流出応答に関する主要なプロセス（降雨遮断や蒸発散、地表流出、地下水流出）をモデル化したもので、集中型モデル（タンクモデルなど）、分布型モデル

（流域を多数の斜面と河道に分割し、水理的な方法で洪水を追跡するもの）がある。また、様々な付随するプロセスを含め、環境評価に利用できるようにくみ上げられたものもある。

これらの他に、洪水氾濫モデル（浅水流モデル）、湖沼流動・生態系モデル、土砂移動モデル（土砂崩壊、地すべり、土石流など）、地下水モデル（飽和不飽和地下水解析、地下水汚染解析など）があるが、これら単独では水循環モデル

とは呼ばれない。

この領域のモデリングでは次のような現象を考慮する必要がある。

- ①降水の入力：低気圧、台風などに伴う降水（雨、雪）の入力、森林地帯での植生・リターによる遮断
- ②地表におけるプロセス：太陽輻射、大気圧変動、水の蒸発散
- ③斜面における水の浸透・地表流による流出
- ④河川による流出
- ⑤地下水系からの流出
- ⑥水圏との接触部（海岸部）に於ける相互作用（塩淡境界における流れ）
- ⑦人間活動：河川からの取水、地下水揚水、地表改変、地下利用などによる状態変化

3.3 地表での熱・物質収支の考え方

図-2に示したように、地表面では物質としての水、空気の移動、熱の移動（日射、長波の授受、大気圏の流動に伴う顕熱移動、潜熱移動、人間による熱の出入）が起こる。通常の水循環解析では、水の物質としての移動が追跡されるが、蒸発散により失われる部分は熱収支を考慮する必要がある。

地表付近の微小領域に対し、次の熱収支、物質収支が成り立つ。

$$\Delta Q = (1-\alpha)R_s + Q_{LA} - Q_{LS} - Q_H - Q_E - Q_G$$

$$\Delta M = r_a - r_{int} - r_E + \Delta f_S + \Delta f_G$$

ここで、 R_s は日射量、 α は地表反射率、 Q_{LA} は大気からの長波輻射、 Q_{LS} は地表面からの長波輻射量、 Q_H は顕熱移動、 Q_E は潜熱移動、 Q_G は地下への流出、である。また、 r_a は実降水量、 r_{int} は遮断量、 r_E は蒸発散量、 Δf_S は地表流による流入出収支、 Δf_G は地下との流入出である。

表-1. 地図流体問題の全体系とモデル

大分類	流体問題分類	内 容	モ デ ル
気象学的問題	気象予測	全球モデルにより行われる大気運動・水循環の日変動、長期気候予測	全球気象（気候）モデル
地 図 水 循 環 系 問 題	水資源問題	表流水資源管理（自然湖、ダム湖、河川）、地下水帯水層管理（揚水量管理、規制）、農業など産業水利利用	水循環モデル、河川水理モデル、湖沼モデル、地下水モデル
	水災害問題	河川洪水予測、洪水氾濫、治水計画、土砂災害（地すべり、土石流灾害など）、地盤沈下、液状化など	水循環モデル（集中型、分布型モデル）、浅水流氾濫モデル、地すべりモデル、土石流モデル、圧密沈下モデルなど
	水汚染・水環境問題	表流水汚染（河川汚濁、湖沼富栄養化）、土壤・地下水汚染（溶質汚染、非水溶性液体汚染）、地表・地下人工改変による水環境変化など。	河川水理モデル、湖沼富栄養化モデル、地下水モデル、地下汚染モデル（溶質、NAPL汚染）、水循環モデル
	地表・地下利用問題	地表改変、一般地下利用、大深度地下利用、地下を利用した廃棄物処分（大規模地下施設などによる地下水問題、放射性廃棄物地下処分、CO ₂ 処分）	地下水モデル、貯留層モデル、水循環モデル、核種移行モデル
深部流 体資源 問題	地熱貯留層問題	深部熱資源の利用温泉、発電利用、高温岩体利用	地熱貯留層モデル
	石油・ガス層問題	石油・天然ガス探査・開発：貯留層の埋蔵量評価、最適生産計画策定、CO ₂ 処分	油層モデル、EOR モデル
地球科学的問題	地球深部流体問題	マントル対流、プレート運動、火山噴火予知、地震予知など	マントルテクトニックモデル（防災）溶岩流、火砕流、噴煙拡散・降灰モデル

実解析時には可能蒸発散量の算出が最も重要であり、それは日射、気温、風速などの気象記録から経験式や空気力学的関係式から計算する。実蒸発散量はそれに適切な補正を加えて求める。

尚、一般的な水循環モデルでは、蒸発散量の計算をシミュレータとは別に計算しておき、前もって降水量記録から取り去っておくことが多い。今後は、シミュレータ内部で局所の状態に応じて算出する手法も開発されよう。

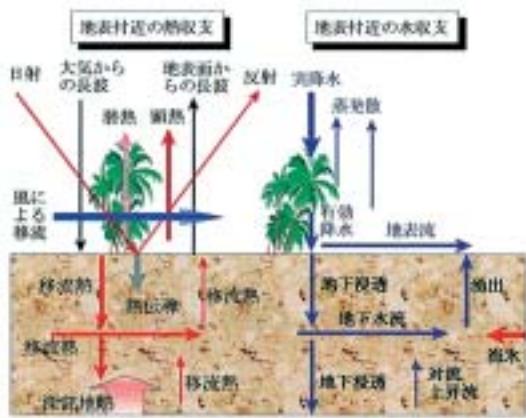


図-2 地表付近の水収支・熱収支

3.3 地表面での液相水の相互交換

水循環のモデル化では主役となる液相水、すなわち表流水と地下水の授受を表現することが重要となる。

図-3のように山岳地の斜面では、降雨の一部は、道路や踏み固められた登山道などに地表流として流れるが、殆どは斜面土壤中に浸透し、豪雨時にも地表流は現れにくい。やがて、飽和した斜面下部や崖下に地表流が現れ、河道へ流入するようになる。また、無降雨時には、ある程度深くまで浸透した地下水が河川に供給されるようになる。また、水底（河床・溜池・水田など）からの浸透、逆に地表に向かた斜面・谷筋・河床・湖沼・海底からの湧出がある。

このような地表流と地下浸透・湧出の相互交換は表現がそれほど簡単ではない。一般的な河川水理解析、洪水氾濫解析では地下流動は扱われず、また、一般的な貯留層解析では地表流は扱わない。しかし、水循環系の連続性を表現する上で両者を連成して解くことが本質的に重要である。これに関しては、次のような一般化が可能である。

(1)流れの型分類

水理学では、地表や管内流、多孔質体の流れの数理表現は明らかとなつておらず、後は両者をうまくつなぐ方法があれば良い。

著者は表-2のように地表・地下の

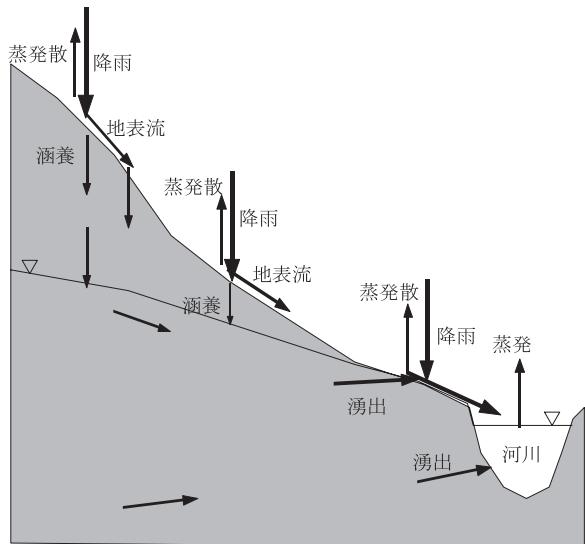


図-3 地表面での水の相互交換

流れの型を分類し以下のように相互作用をモデル化した。

(a)降水・蒸発散に関しては、大きくはソース項として扱う。

(b)地表流れは開水路乱流（マニング型等流平均流速）と運動量方程式の近似形（運動波近似、拡散波近似）によりモデル化される。例えば、拡散波近似では次の流速公式となる。

$$v = -\frac{R^{2/3}}{n} \sqrt{i - \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)} \operatorname{sgn}\left[i - \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)\right]$$

ここで、nはマニング係数、Rは径深、iは水路傾斜、hは水深、sgnは[]内が正の時1、負のとき-1である。

(c)地下の流れは、①簡単に地下の土壤表層の中間流浅部から深部まで含めて2相ダルシー流れ（層流状態の遅い流れ）として包括的に記述できる。

$$v = -\frac{Kk_r}{\mu} \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

ここで、Kは浸透率、krは相対浸透率、μは粘性係数、Ψはポテンシャルである。

(d)両者をつなぐ流れ（涵養と湧出）は、多相ダルシー流れ（一般には空気・水2相）として考えることができる。

表-2 流れの型分類

現象	流れの領域	流れの型
降水	自由空間中	ソース項
蒸発散	自由空間中	ソース項
取水・揚水	自由空間、地質媒体	ソース項
地表の浅水流	自由空間中	マニング型流れ
河川の流れ	自由空間中	マニング型流れ
トンネル内流れ	自由空間中	マニング型流れ
割れ目中の流れ	パイプ中+地質媒体中	混合型流れ
速い中間流出	パイプ中と地質媒体中	混合型流れ
降雨の地下浸透	自由空間から地質媒体へ	多相ダルシー型流れ
地下水の湧出	地質媒体から自由空間へ	多相ダルシー型流れ
地下の流れ	地質媒体中	多相ダルシー型流れ

(e) 川の流れはマニング型で近似されるが、同時に起こる河床からの浸透や地下からの湧出はダルシー型となる。

(f) 山地斜面の地表付近は様々な乱れ（風化や動植物によるもの）が大きく、速い中間流出が起こるが、このような側方流の一部は管路や開水路のマニング型流れに近く、一部は地質媒体中のダルシー型に近い混合した流れと想像される。

以上から、地図に小さな直方体領域を考えた時、その6面を通過する流れが各々の面で型が異なるとしてモデル化すれば、地表や地下の水の動きを切れ目なく追跡することができる。

自由空間(大気圏+地表付近)と地質媒体とは大きく異なった物性を有するものの、ほぼ同じ種類の物性により特徴付けることが出来る

地表面と地下多孔質体中の流れは、どちらも非線形性の強い流れであるが、同一形式に一般化し同時に解くことができる (Tosaka, et al., 2000)。

(2) 地表・地下相互交換の計算例

図-4は山岳地の地表水・地下水相互交換の計算例である。地下を完全に飽和させ、自然流出を起こしたときに、谷筋で地下水が湧き出し、尾根筋の地下水位が低下し、内部に大きな河川が形成され外部へ流出する。全域の地下水位は、降雨の浸透と湧出がバランスする形に落ち着き、大きな河川のみが地表に残る様子が見られる。

4. 水循環モデルの適用例

地表と地下のプロセスを組み込んだ水循環モデルとしては、欧米のものや我が国で開発されたものがいくつかあり、実際に流域環境評価に使われている。また、完全に地表と地下を結合することで、河川流出解析、地下水帯水層解析

(飽和不飽和解析)、洪水氾濫解析、汚染解析(溶質、NAPL)などに利用することができるものもある(登坂ら, 1996a,b 参照)。このような水循環解析は、既に大規模流域の解析にも適用され、多数の事例がある。また、熱循環を含む水循環モデルもある程度実用的に利用できる状況にある(例えば、登坂ら, 1998a,b)。

今後の開発課題としては、複雑な地形、水系網、植生分布、地下地層の表現力の向上、熱や多数の溶質を含めたより物理的な水循環モデルの開発、計算速度の向上、などが挙げられる。また、大気モデルとの結合、高温高圧貯留層解析との結合なども考えられている。

5. まとめと課題

本稿では、地図水循環系のモデル化手法について、その概要を紹介した。数式は割愛したので、文献を参照いただければ幸いである。講演では、水問題とシステムモデリングの必要性、

主要プロセスの詳細表現(蒸発散、河川、地下水、汚染物質移動、熱移動)、プロセス統合化の方法、および実用解析の要点、フィールド評価の事例(水害、環境、汚染など)、発展的手法、および今後の課題についても言及する予定である。

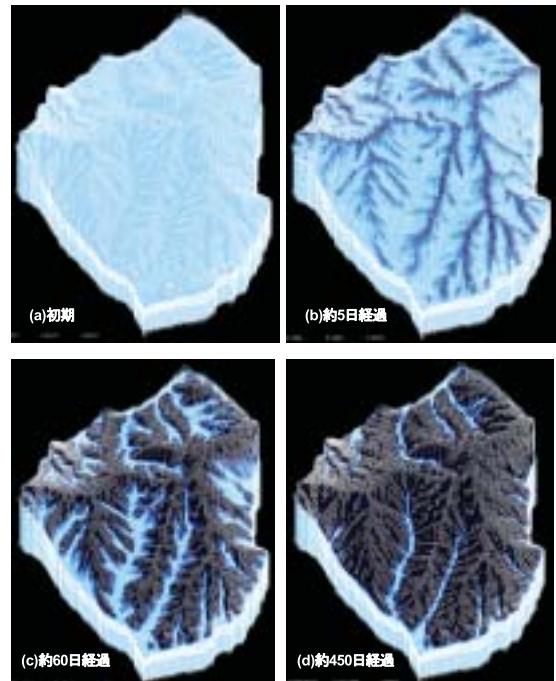


図-4 山岳地の河川網形成過程の計算例

参考文献 (主に筆者の関連したもの)

- 登坂博行、伊藤一誠、蝦原雅之、稻葉薰、伊藤彰、小島圭二 (1996a) : 多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析、地下水学会誌、第38巻第3号、167-180.
- 登坂博行、小島圭二、三木章生、千野剛司 (1996b) : 地表流と地下水水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発、地下水学会誌、第38巻第4号、253-267.
- 登坂博行、伊藤彰、田中将希、岩井卓 (1998a) : 自然水理系の流体・熱移動統合モデリングの試み、その1. 流体・熱移動の新しい定式化と実験的検討、地下水学会誌、第41巻第3号、147-158.
- 登坂博行、伊藤彰、岩井卓 (1998b) : 自然水理系の流体・熱移動統合モデリングの試み、その2 フィールドシミュレーション、地下水学会誌、第41巻第3号、159-176.
- 登坂博行 (2002) : 地下水と地表水・海水との相互作用、その9. 地表水流れと地下水流れの結合解析、地下水学会誌、第44巻1号、45-52.
- TOSAKA Hiroyuki, ITOH Kazumasa and FURUNO Takashi (2000) : Fully Coupled Formulation of Surface flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation, Hydrological Process, 14., 449-464.



地下深部の熱水の進化に伴う元素挙動－鉱物資源探査手法の開発
Geochemical Variation associated with Hydrothermal Evolution in Geosphere
–Development of a Mineral Exploration Tool

鉱物資源研究グループ：村上浩康
Mineral Resource Research Group: Hiroyasu MURAKAMI
Phone: 029-861-3939, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

1. はじめに

鉱物資源研究グループでは、平成13年より金属鉱化作用と探査手法の研究を行っており、持続的発展に向けた鉱物資源の安定供給を目的として、より効率的な熱水性鉱床の探査技術の開発を目指している。熱水性鉱床の多くが、マグマの貫入に伴い形成された熱水系に生じていることから、マグマ-熱水系のモーデリングは、探査技術の開発・高度化において必要不可欠である。このような背景のもと、地下深部の“熱水”に着目し、その元素挙動傾向を体系化した金属資源探査手法を開発するとともに、これら科学的理解に立脚した資源ポテンシャル評価指標を提案する。本報告では、1)鹿児島県菱刈金鉱床における鉱床母岩の元素変動等を利用した鉱床探査手法、2)斑岩型鉱床における銅・金含有量を規制する要因について述べると共に、各鉱床タイプの探査指標を提示する。

2. 研究対象

地下深部（深度：1-4km）に貫入した珪長質マグマ活動に伴う熱水活動により、貫入場では斑岩銅鉱床などが形成され、その周囲では浅熱水性金鉱床などが時空間的に密接に伴うことが知られている（図1）。マグマの貫入に伴う熱水系では、銅や金などの様々な元素が移動・濃集し熱水性鉱床をもたらし、貫入する火成岩（斑岩）近傍では斑岩型銅-金鉱床が、マグマから離れた地表浅部には浅熱水性金鉱床が形成されてい

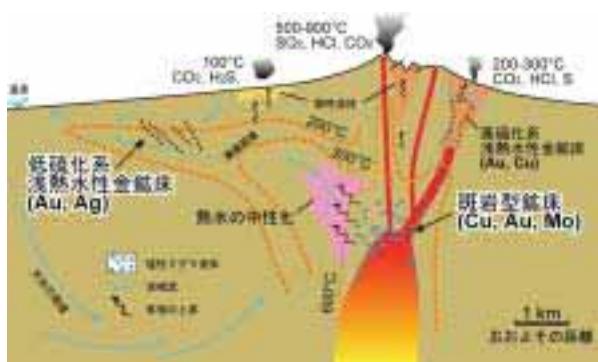


図1 マグマ-熱水系に発達する鉱床と変質帯
(Hedenquist and Lowenstern, 1994)を簡略化。

る。

3. 菱刈浅熱水性金鉱床における研究

1) 鉱床概要

菱刈鉱床は氷長石を伴う含金石英脈群（以下、鉱脈）から成る低硫化系浅熱水性金鉱床で、北から南に向かって、本坑、山神、山田の3つの鉱脈群から成る。本坑鉱脈群では鉱脈の60%が、山田鉱脈群ではすべての鉱脈が火山岩（菱刈下部安山岩類）中に胚胎するのに対し、山神鉱脈群では90%の鉱脈が堆積岩（四万十累層群）中に胚胎している。

2) 热水性鉱物の分布

菱刈鉱床周辺の岩石中では、熱水性鉱物が鉱床を中心とする累帯配列を示しており（茨城・鈴木, 1990; Izawa et al., 1990），母岩の種類に関係なく、粘土鉱物種の変化を伴う下記のI, II, III, IVの4帯の変質鉱物組み合わせによって分帶されている（図2）。

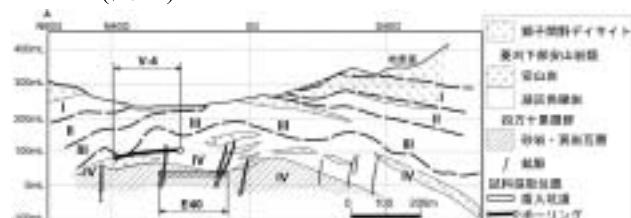


図2 菱刈鉱床模式断面図. (Ibaraki and Suzuki, 1993)
を簡略化。

クリストバライト+スメクタイト(I 帯)

石英+スメクタイト±カオリン(II 帯)

石英+混合層粘土鉱物(III 帯)

石英+緑泥石(IV 帯)

このうち、IV带は本坑や山神鉱床坑内の四万十累層群とそれを覆う菱刈下部安山岩類との不整合面周辺に分布し、菱刈下部安山岩類中を鉱床母岩とする山田鉱床にも確認されている。III带は、IV带を覆うように菱刈鉱床全域に認められる。採掘可能な鉱脈はIII及びIV带中に卓越している。それらIII带を取り巻くようにスメクタイトで代表されるII带が分布している。II带の外側にはI带が分布する。

3) 菱刈下部安山岩類の色調と帶磁率の変化

鉱脈に近づくに伴い、菱刈下部安山岩類の安山岩や凝灰角礫岩では单斜輝石が緑泥石や方解石または黄鐵鉱に置換されると共に、主に斜長石を交代して形成された熱水性イライト、石英、冰長石の集合体の量も多くなり、元々含まれていた斑晶鉱物はほとんど消失している。このような変質鉱物の存在により、火山岩類の色調が鉱脈に近づくに連れ黒緑色から淡緑灰色へ変化する(図3)。帶磁率が 20×10^{-3} SI以上を示す岩石では、色調は濃黒緑色を示し、帶磁率が低下する。

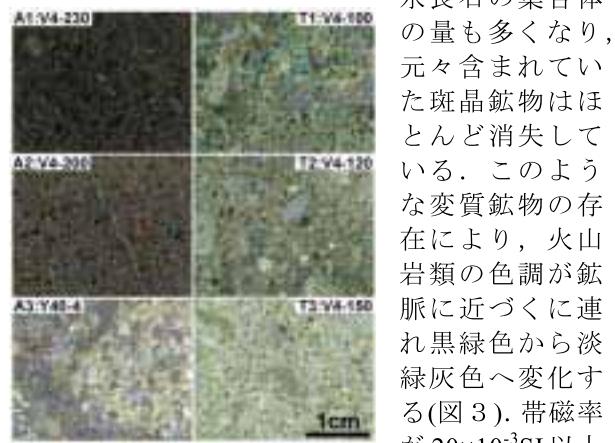


図3 菱刈下部安山岩類の色調変化。Aは安山岩、Tは凝灰角礫岩を示す。1から3に向かって帶磁率が低下する。

が 15×10^{-3} SI以下を示す岩石では色調は淡緑白色を呈し、磁鉄鉱は殆どが緑泥石や方解石に置換されるとともに、部分的に磁鉄鉱の仮像を示す赤鉄鉱も認められる。帶磁率が極端(2×10^{-3} SI以下)に低下する部分では黄鐵鉱の鉱染が一般に認められ、自形の黄鐵鉱が磁鉄鉱を交代する組織も観察される。

鉱脈から40m以上離れた菱刈下部安山岩類の凝灰角礫岩で $10 \sim 15 \times 10^{-3}$ SI、安山岩では $10 \sim 27 \times 10^{-3}$ SIの変動を示す(図4a)。特に、凝灰角礫岩では高品位鉱脈から40m離れた場所で帶磁率が低下し始めており、鉱脈から5-10mの位置で 0.5×10^{-3} SI以下になり、未変質母岩の値に比べて20分の1に帶磁率が低下する傾向があり

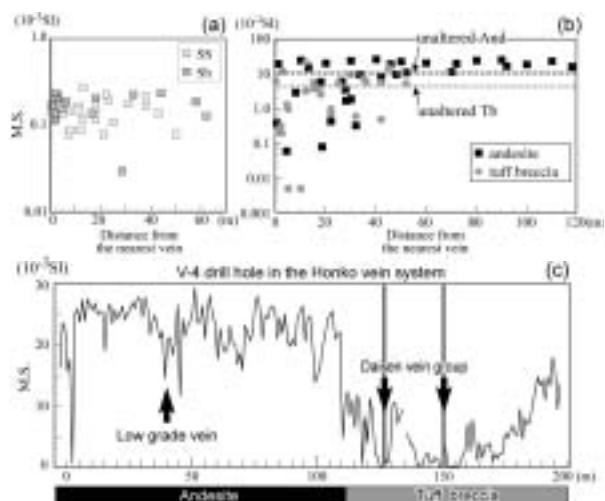


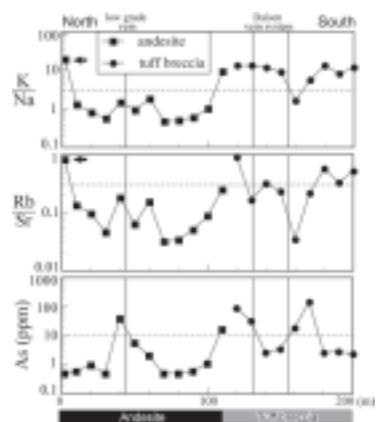
図4 菱刈下部安山岩類及び四十万累層群の鉱脈から距離と帶磁率変化(a,b)。本坑鉱床のボーリングコアにおける帶磁率変化(c)。

(図4c)，菱刈鉱床の母岩の中で最も帶磁率の変動区間が幅広いことを特徴とする。安山岩では、鉱脈からの距離が1-2mの範囲内で 5×10^{-3} SI前後の値を示すようになり、帶磁率低下の程度は未変質安山岩の値に比べて4分の1程度である。

一方、四十万累層群の場合は岩石種別にかかわらず帶磁率は $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ SIのほぼ一定の範囲内の値を示し、微細脈の有無や熱水変質鉱物の増加に伴う変化は殆ど認められない(図4b)。帶磁率による鉱化・変質作用の評価にあたっては、帶磁率が元々高く、浸透性の高い凝灰角礫岩の場合により有効であると考えられる。

4) 岩石化学組成変化と鉱脈との距離

菱刈鉱床の鉱床母岩では、変質帶中の熱水性粘土鉱物の中でも、イライト及び冰長石や硫化鉱物に由来するK, Rb, As並びに熱水変質による斜長石の消失に起因するNaやSrなどの元素が、鉱脈に近づくにつれ増加並びに減少する傾向が認められ、このような元素変動は変質鉱物の晶出と密接に関連している。このような変質に伴う元素の変化に着目した場合、増加する元素と減少または変化の少ない元素とを組み合わせた元素組成比は主要造岩鉱物の存在量による影響を最小限にとどめ、元素比は単元素濃度や全岩化学組成による指標に比べ熱水変質に伴う元素変化をより鋭敏に捉えることができると考えられる。特に、火山岩類では元素比K/Na, Rb/Sr比及びAs濃度が高い範囲が鉱脈群周辺に対応する



傾向がある(図5)。このように、岩石の王水溶解成分の元素組成比を複合的に検討することにより、鉱脈分布範囲の把握や坑内における新規鉱床探査をより効率的に行うことができると思われる。

4. 斑岩型鉱床の研究

1) 斑岩型金-銅鉱床の類似性と沸騰流体における元素分配

チリの斑岩型鉱床の中でも、南緯 $26^{\circ} \sim 28^{\circ}$ の標高4000mから6000mの中央アンデス山脈高地に位置するマリクンガ帯に分布するものは金含有量が高く、斑岩金鉱床と呼ばれている。斑岩金鉱床は大規模鉱量(5000万t-10億t)低品位(Au: 0.5-2g/t)であり、一般的な斑岩銅鉱床やCu/Au原子比が40000以上を示す金に富む斑

岩銅鉱床 (Kesler et al., 2002) と比べても銅品位に比べて金品位が高いことを特徴とする。多くの斑岩型銅-金鉱床では、斑岩類の定置深度で気液二相分離した低塩濃度の気相（蒸気）と高塩濃度流体（高濃度塩水）の2相が認められる。そのような沸騰流体は銅-モリブデン鉱化作用に重要な役割を果たしたと考えられている (Bodnar et al., 1985)。このような沸騰現象を伴う鉱化流体の活動は斑岩金鉱床にも認められる。では、これらの鉱床タイプの違いはなぜ生じるのでしょうか。

Heinrich et al. (1999) は、主な斑岩銅鉱床で観察される同一の温度・圧力で沸騰・分離した様々な気液二相ペア流体の組成分析を、レーザーAブレイション ICP 質量分析 (LA-ICP-MS) により実施している。その結果、Cu や Au, As などの元素は高塩濃度の液相だけでなく低塩濃度の気相側にも濃集し、Na, K, Fe, Mn, Zn, Pb などの元素は液相に富む高塩濃度流体に強く分配されることを明らかにした (図 6)。この元素

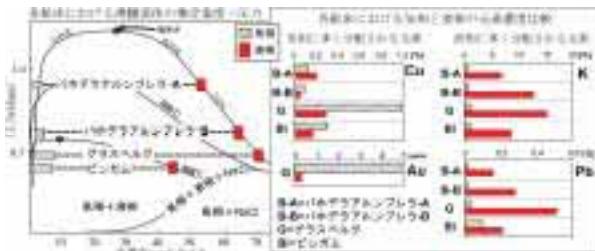


図 6 主な斑岩銅鉱床における気液2相分離した沸騰流体の推定温度・圧力及び分離した気相と液相中の元素濃度。図中データは Heinrich et al. (1999) による。

分配の選択性は、各元素と S や Cl 塩基との錯体形成能に依存しており、S は気相に、Cl は液相に強く分配されることが知られている (Drummond and Ohmoto, 1985)。Cu や Au などは HS 塩基と結合して錯体を形成しやすいことから蒸気側に選択的に濃集し、Cl 錯体を形成しやすい Na などの元素は流体側に強く分配されるためと解釈されている (Heinrich et al., 1999)。

斑岩金鉱床の気化前の沸騰流体における液相と気相間の元素分配に関する研究例は報告されていないが、筆者は、斑岩金鉱床の微弱な銅鉱化作用は沸騰後の流体の急激な気化による硫黄の散逸によるのではなく、気化以前の超臨界マグマ水の沸騰時における気液間の元素分配に起因すると考えている。そこでは金や硫黄は気化前の沸騰流体の高塩濃度液相中に、銅は気相側により強く分配されており、流体側の銅濃度が元々低かったと考えられる。なぜなら、斑岩金鉱床において 1) 沸騰流体の気相側は A 脉形成後期に鉱床上部に供給され、金鉱化の卓越する縞状石英脈形成期には存在しない、2) 早期脈と後期脈の Cu/Au 比に逆相関が認められる、3) 沸騰流体の気化に伴う硫黄の散逸は硫黄分圧の上昇を意味するので、銅硫化鉱物が形成されな

い理由を硫黄の散逸のみでは説明できないからである。このように、斑岩金鉱床の沸騰流体中における元素分配は、Cu に加えて Au, As などの元素が沸騰流体で気相側に強く分配される斑岩銅鉱床の場合 (Heinrich et al., 1999) とはやや異なることが予想される。

2) 斑岩型鉱床の Cu/Au 比を決定する要因

Sillitoe (1997) は環太平洋地域の 200t トンを超える金埋蔵量を持つ斑岩型鉱床の産状に基づき、金に富む斑岩型鉱床が形成するために必要な要因を考察している。それによれば、1) 酸化的マグマを形成するような島弧・大陸地殻-海洋地殻系のテクトニックセッティング、2) カリウムに富むアルカリ岩やショショナイト組成を示す火成活動、3) 浅所貫入岩の存在を示す同時期の火山岩・半深成岩を伴う火成活動の様式が関係するとした。しかしながら、海洋地殻の沈み込みとその部分溶融に伴う酸化的マグマの発生機構には海洋地殻自体のマントル内での挙動や沈み込む海洋地殻自体の部分溶融メカニズムに不明な点が多く (唐戸, 2002)，直接的な因果関係は明らかではない。また、環太平洋地域の大規模斑岩型銅-金鉱床のうちカルクアルカリ岩系の高 K₂O 火成岩類に随伴するものは全体の 45% であり、大規模斑岩型銅-金鉱床が必ずしもアルカリ組成に富む火成岩類に伴われるわけではない (Sillitoe, 1997)。一方、マリクンガ帯の斑岩金鉱床周辺における火成岩類の分布様式が浅所貫入を示すことから、鉱化に関連する貫入岩類の形成深度が金に富む斑岩型鉱床の規制要因の候補として残る (Vila and Sillitoe, 1991)。

ここで、主な斑岩型鉱床の鉱床形成推定深度と鉱床の Cu/Au 原子比とを比較した結果を図 7 に示す。これによると、鉱床の Cu/Au 原子比の減少に

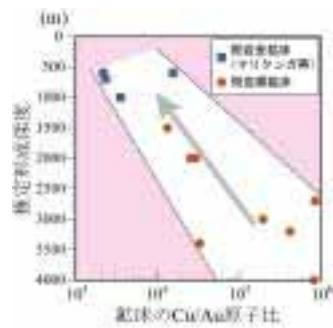


図 7 斑岩型鉱床の推定形成深度と鉱床の Cu/Au 原子比の関係。図中の矢印は鉱床の形成深度が浅くなるに伴い Au 量が増加する傾向を示す。

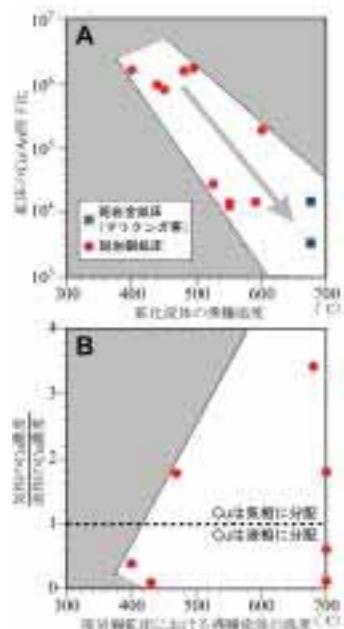


図 8 主な斑岩型鉱床における気液2相分離した沸騰流体の温度と鉱床の Cu/Au 原子比 (A) 及び分離した気相と液相中の銅濃度比の関係 (B)。

伴い、鉱床形成深度が浅くなる傾向が認められ、形成深度約1km以下では斑岩金鉱床のみとなる。一方、図8Aには主な斑岩型鉱床におけるCu/Au原子比と各鉱床の形成に関与した鉱化流体の高温側沸騰温度との関係を示した。この結果、鉱化流体の沸騰温度が高くなるに連れて斑岩型鉱床がAuに富む傾向が認められ、沸騰温度500°Cを境としてそれ以上では鉱床のCu/Au比が低くなる（鉱床がAuに富む）傾向が明瞭である（図8A）。更に、斑岩型鉱床における鉱化流体の沸騰が高温（500°C以上）で起こる場合ではそれ以下の温度に比べて気相にCuが多く分配される傾向がグラスベルグ鉱床で顕著に認められ、マグマ水の沸騰温度も鉱床のCu/Au原子比に影響を与えているのかもしれない（図8B）。図6に示されているグラスベルグ鉱床とその他の鉱床を比較した場合に、斑岩金鉱床が形成されるような高温低圧（700°C, 0.5kb）においてCuの蒸気への分配が顕著である点は、浅部(<1 km)に貫入したマグマから高温(>600°C)で分離した流体が沸騰することによって、銅が蒸気側に強く分配されるプロセスが存在する可能性を示している。Kesler et al., (2002)は、高温(600°C以上)の火山性噴気のCu/Au比が低温(400°C以下)の噴気に比べて数百～数千倍に高くなることを示した。このような火山性噴気がマグマ起源の沸騰流体から分離した気相側を反映していると仮定した場合、高温の場合は沸騰流体の気相側にCuが、低温ではAuが卓越する可能性を示唆している。従って、関連するマグマの組成や酸化・還元条件により鉱化流体中のCu/Au比は大きく変化するが（Ulrich et al., 1999; Halter et al., 2002），同様の組成を持つマグマ起源の鉱化流体が斑岩型鉱床の形成に関与したと仮定すると、斑岩型鉱床のCu/Au含有比は、沸騰や氣化を伴う熱水系の進化プロセスに加え、1)斑岩マグマの定置深度（マグマ性流体の沸騰深度）や、2)マグマから派生した流体の沸騰温度の違いに支配されると考えられる。具体的には、低圧（約0.5 kb以下：静岩圧1 km以下）・高温(>600±100°C)で熱水がマグマから分離・沸騰した場合は斑岩金鉱床を作り、高圧（約1.0 kb以上：静岩圧2-3 km以上）・低温(<500±100°C)では斑岩銅鉱床が形成され、前者の場合、銅が沸騰流体の蒸気側に多く分配されていると推察される（村上, 2005）。

5.まとめ

菱刈金鉱床における鉱床母岩中には、鉱床を中心とした熱水変質帯が発達しており、鉱脈に近づくに連れ斜長石や磁鉄鉱が消失し、石英、緑泥石、セリサイト、黄鉄鉱、氷長石などの熱水性鉱物が増加する。鉱化作用と関連する熱水性鉱物（特にK含有鉱物）及び硫化鉱物は王水にある程度溶解することから、岩石の王水溶解

分析は熱水性鉱物の増減に伴う岩石の化学組成変化を濃縮する。岩石王水溶解溶離液のICP分析は、一般的な商業分析においてXRF分析より費用が安価であるメリットも持つ。菱刈鉱床での既存鉱脈周辺における坑道・ボーリング探鉱においては、帶磁率低下ゾーン並びに王水溶解成分のK/Na比やRb/Sr比並びにAs濃度の高い火山岩類に着目することが有効であると言える。

斑岩型鉱床のCu/Au含有比はその資源的価値を大きく左右することから、探査段階においてそのCu/Au含有比を予想・把握することは非常に重要である。具体的には、鉱床形成に関連する沸騰流体の温度・圧力として約500°C及び0.5 kbを境界値に用いた場合、それよりも高温・低圧側では斑岩金鉱床が、低温・高圧では斑岩銅鉱床が卓越する傾向がある。流体包有物によるマイクロサーモメトリーにより斑岩マグマから分離した沸騰流体の示す鉱床形成時の温度・圧力を得ることで、探査段階において斑岩型鉱床のCu/Au含有比を識別できる可能性がある。

参考文献

- Bodnar, R. J., Burnham, C. W. and Stern, S. M. (1985) III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O-NaCl to 1000°C and 1500 bars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 1861-1873.
- Drummond, S. E. and Ohmoto, H. (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ. Geol.*, 80, 126-147.
- Halter, W. E., Pettke, T. and Heinrich, C. A. (2002) The origin of Cu/Au ratios in porphyry-type ore deposits. *Science*, 296, 1844-1846.
- Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J.B. (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.
- Heinrich, C.A., Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T. and Frischknecht, R. (1999) Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, 27, 755-758.
- 茨城謙三・鈴木良一 (1990) 菱刈鉱山鉱床母岩の熱水変質について. *鉱山地質*, 40, 97-106.
- Ibaraki, K. and Suzuki, R. (1993) Gold-silver quartz-adularia veins of the Main, Yamada and Sanjin deposits, Hishikari gold mine; A comparative study of their geology and ore deposits. *Resource Geol.*, Special Issue, 14, 1-11.
- Izawa, E., Urashima, Y., Ibaragi, K., Suzuki, R., Yokoyama, T., Kawasaki, Koga, A. and Taguchi, S. (1990) The Hisikari Gold Deposit : High grade - epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan. *J. Geochem. Explor.*, 36, 1 - 56.
- Kesler, S. E., Chrysoulis, S. L. and Simon, G. (2002) Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geol. Rev.*, 21, 103-124.
- 村上浩康 (2005) 斑岩金鉱床の成因－斑岩型鉱床のCu/Au比は何に規制されるか？－. *資源地質*, 55, 157-168.
- Sillitoe, R. H. (1997) Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Jour. Earth Sci.*, 44, 373-388.
- Ulrich, T., Günther, D. and Heinrich, C. A. (1999) Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. *Nature*, 399, 676-679.
- Vila, T. and Sillitoe, R. H. (1991) Gold rich porphyry systems in the Maricunga belt, northern Chile. *Econ. Geol.*, 86, 1238-1260.



地下水環境研究グループの紹介 Introduction of the Water Environment Research Group

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

1. グループの研究目的

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

2. グループの構成と研究資源

1) グループメンバー

石井 武政（リーダー）

安川 香澄

内田 洋平

町田 功

阿部 正洋（テクニカルスタッフ）

宮崎 桂子（テクニカルスタッフ）

他に、ユニット内外と所外からの研究併任者・研究分担者、客員研究員からなる。

2) 主な研究予算・課題

文科省 RR2002（新世紀重点研究創生プラン「人・自然・地球共生プロジェクト」）協力業務予算「地下水の収支・循環機構解明のためのモニタリングと地下水循環モデルの構築」（継続中）

科研費予算「ヒートアイランド現象の抑制を目指した都市型地中熱利用システムの開発」（平成17年度終了）

運営費交付金「タイにおける地下水循環系と地中熱分布の解明」（継続中）

運営費交付金「水文環境図の作成」（継続中）

共同研究費「三宅島噴火後の地下水水質変化に関する研究」（平成18年度新規）

運営費交付金「大都市圏プロジェクトの地下水課題」（平成18年度新規）

3. 平成17年度までの進捗状況

1) 「地下水の収支・循環機構解明のためのモニ

タリングと地下水循環モデルの構築」：黄河源流域の青海省で現地凍土調査ならびにデータ回収を行ったほか、山東省・甘粛省・陝西省・内蒙自治区にて現地水文調査を実施した。また、山東省青島市において中国地質調査局と合同でワークショップを開催し、成果を発表した。

2) 「ヒートアイランド現象の抑制を目指した都市型地中熱利用システムの開発」：筑紫平野を対象に、地下温度測定、地下水調査、一般水質・安定同位体比分析を行い、平野内の地下水循環系と地下温度構造の関係を明らかにした。この調査結果を基に、3次元地下水循環・熱移流モデル（解析領域については図1参照）を構築し、モデルの検証および筑紫平野における地中熱利用適地マップを作成した。

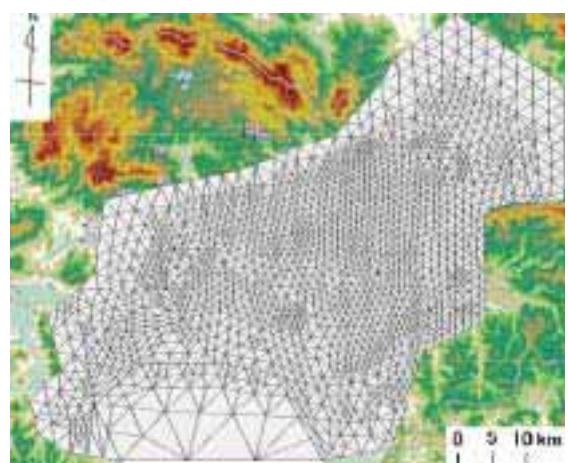


図1 筑紫平野における解析領域

3) 「タイにおける地下水循環系と地中熱分布の解明」：タイのチャオプラヤ川流域に存在する多数の地下水観測井を対象に、地下水の水頭、水質組成、同位体比、温度構造を調査し、広域地下水循環系を明らかにするための基礎データを得た。

4) 「水文環境図の作成」：第2期中期計画の一つである水文環境図「筑紫平野」の出版的目的とし、筑紫平野における現地水文調査を行った。現地水文調査では、筑紫平野に分布す

る地盤沈下対策用観測井、農業用井戸、一般家庭の汲み上げ井戸、河川水および湧水を対象とした。民間井戸、湧水、河川水については、現場にてEC、pH、サンプルの温度を測定し、分析用試料を採取した。また、観測井では同時に地下水位、地下水温を測定した。測定に用いたのは観測井40ヶ所、民間井戸22ヶ所、湧水8ヶ所、河川10ヶ所である。

4. 平成18年度の研究計画

- 1) 「地下水の収支・循環機構解明のためのモニタリングと地下水循環モデルの構築」：黄河流域を対象とする地下水循環モデルの構築を目指し、現地調査、資料収集、地下水位・凍土長期連続モニタリング装置のデータ回収、中国側研究機関との詳細研究打合せなどを行う。本年度は黄河流域全体の地下水資源のシミュレーションを実施し、シナリオに基づいた将来予測を試みる。また、年度後半に本研究に関わる地下水循環シミュレーション検討会（北京）およびワークショップ（つくば）の開催を予定している。
- 2) 「ヒートアイランド現象の抑制を目指した都市型地中熱利用システムの開発」については平成17年度に終了したが、本研究の成果は水文環境図「筑紫平野」のとりまとめに活用される。
- 3) 「タイにおける地下水流动系と地中熱分布の解明」：チャオプラヤ川流域で、地下水保全や省エネルギーにも寄与できる地中熱の利用可能性を探るため、地中熱による冷房システムの実証試験施設をタイ国カンパンフェットに設置する。なお、本研究は、タイ地下水資源局との研究協力のもとに実施する。
- 4) 「水文環境図の作成」：筑紫平野に関しては、現地調査で得られた各種データを整理・コンパイルして、CD-ROM媒体で出版する予定である。また、18年度からは水文環境図「山形盆地」の作成を目標として、山形県内の各関係機関への協力依頼および現地調査を開始する予定である。
- 5) 「三宅島噴火後の地下水水質変化に関する研究」：三宅島では2000年以降、噴火が継続しているが、火山噴火後の地下水に対する被害についての報告がほとんどない。そこで本研究では、三宅島の水道水源井、観測井などから得られた地下水および島内の降水それぞれの水質調査、井戸の水位調査などをを行い、噴火の地下水資源への質的・量的なインパクトとそのメカニズムを明らかにする。
- 6) 「大都市圏プロジェクトの地下水課題」：首都圏西部域を対象フィールドに地下水の現況および過去60年間の地下水の変遷を再現する地下水循環高精細モデルを構築することを目的とする。本モデルでは地下水のほかに地表水・大気および熱（地中熱）を統合化して扱う。初年度は、モデル基本格子の構築と初期化、現地調査・情報収集ならびに水質・同位体分析を行う予定である。なお、本研究課題は地質情報研究部門と内部連携して進められる。

5. 期待される成果

- 1) 「地下水の収支・循環機構解明のためのモニタリングと地下水循環モデルの構築」：中国地質調査局他との共同研究を通じて黄河の全流域を含む地下水循環モデルの構築を進めることにより、地下水資源の過去の復元ならびにシナリオに基づく将来予測に寄与する。なお、モデルには様々な素過程の研究成果を可能な限り取り込み、モデルの完成度を高める。本研究成果の骨子は中国政府に提出され、地下水資源評価等に活かされる運びである。
- 2) 「ヒートアイランド現象の抑制を目指した都市型地中熱利用システムの開発」：筑紫平野で主に利用が想定される地中熱利用システムは冷房である。地中熱利用ヒートポンプを冷房主体で運転する場合、地下への排熱によって地下温度が上昇し、ヒートポンプの運転成績係数が低下する恐れがある。本研究で得られた地中熱利用適地マップを参考によって、より効率的に地中熱利用システムを設計することが可能となり、ヒートアイランド現象の抑制に役立つと期待される。
- 3) 「タイにおける地下水流动系と地中熱分布の解明」：タイなど低緯度の熱帯地方では年間を通して地下温度が気温より高く、地中熱の冷房利用ができないが、多少の気温変化があり、かつ地下温度が比較的低い場合には、地中熱を利用できる可能性がある。それを現地にて実証するとともに、そのような地域に関する“地中熱利用可能性マップ”的作成を考えている。
- 4) 「水文環境図の作成」：各地の地下水調査により集積されるデータは水文環境図のとりまとめに適用する。また、シリーズ化されたCD-ROM版水文環境図により、知的基盤情報提供の目標を達成していく。
- 5) 「三宅島噴火後の地下水水質変化に関する研究」：火山島における水文プロセスの詳細を解明するという学術的な成果のほかに、三宅島島民の生活や産業振興に欠かせない水資源確保に大きく貢献できるであろう。
- 6) 「大都市圏プロジェクトの地下水課題」：多くの市民が生活し、産業や交通網が集積した首都圏における地下水の過去の変遷、現在の状態、将来予想される地下水の姿などを解析することにより、地下水のもつ環境要素としての側面および資源としての有用性と有効な利用方法を提示できるものと期待される。



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

地圏環境評価研究グループ長： 駒井 武
Leader, Geo-analysis Research Group: Takeshi Komai
Phone: 029-861-8294, e-mail: koma@ni.aist.go.jp

1. グループの研究目的

近年、土壤・地下水汚染問題が顕在化し、特に市街地や産業用地においては深刻な状況となっている。平成15年には、土壤汚染対策法が施行され、事業所や工場などにおける地圏環境リスク管理が急務の課題となっている。また、鉱山・温泉地帯や海域に接する地域では、有害化学物質の存在量が多く、自然的な起源による地質汚染の問題も発生している。これらに対処するためには、汚染物質の種類、存在量、形態に関する科学的な解明を基礎にして、人への健康影響や生態系への環境影響を定量的に評価することが重要である。また、土壤・地下水汚染のサイト評価およびリスク管理を実施するため、地圏環境の調査・評価・管理に関する方法論の確立と実汚染サイトへの適用が不可欠である。このほか、地質・土壤環境における様々な情報整備やデータベースの構築は、安全かつ豊かな国民生活のために必須である。さらに、地圏と大気の境界における音響環境の保全や騒音の防止などの研究開発は急務の課題である。

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

このような分野の研究を効率的に進めるため、環境省(国立環境研究所)、都道府県などの自治体、コンサルタント会社、浄化企業などと共同研究を

行っている。また、海外との国際共同研究として、米国ロスアラモス国立研究所、韓国科学技术大学などと密接な協力関係にある。

2. グループの研究資源

1) グループ員

駒井 武 (リーダー)
徳永修三
田中敦子
今泉博之
高橋保盛
杉田 創
竹内美緒
川辺能成
原 淳子
青木一男 *メタンハイドレート研究部 (兼務)
羽田博憲 *メタンハイドレート研究部 (兼務)
坂本靖英 *メタンハイドレート研究部 (協力)
丸茂克美 *地質情報研究部門 (協力)
テクニカルスタッフ 大野孝雄、小川桂子、高田貞江、
杉原麻生、小神野良美

国際制度来訪者 Mohammad Atiq ur Rahman,
Amria Kalorina Rivoir Vivacqua

2) 研究課題

運営費交付金「地圏環境評価の研究（地質）」
運営費交付金「地圏環境評価の研究（エネルギー）」
運営費交付金「土壤・地質環境リスク評価技術の開発」（部門重点化予算）
運営費交付金「難透水層汚染における汚染物質の挙動と微生物浄化機能の評価（競争グラント）
委託費「メタンハイドレート資源開発生産手法開発」（経済産業省）

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

委託費「鉱物油等に起因する複合的な土壤汚染のリスク評価手法に関する研究」（環境省）

委託費「地圏環境インフォマティックスのシステム開発と全国展開」（文部科学省）

委託研究「固体・ガス状試料の安全性評価システムの開発」（文部科学省）

3. 平成 18 年度の研究計画及び進捗状況

1) 地圏環境評価の研究（地質・エネルギー）

微生物による汚染浄化へ向けた地下微生物についての基礎研究を行なうとともに、有害金属類と微生物の相互作用を解明する。また、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。土壤・地下水汚染に關わる知的基盤整備に資するため、代表的な地域（東日本）を対象として自然起源と人為起源に関する各種データを取得し、土壤環境リスクマップを作成する。

汚染土壤・地下水からのフッ素・ホウ素除去法を確立するために、鉱物等への吸着挙動の解明を行う。また、重金属等で汚染された土壤について、土壤へのダメージを最小限にするとともに、有害物質を効果的に抽出除去する低環境負荷型浄化技術を開発する。環境影響評価の高精度化を図るために、風雑音特性を考慮した騒音計測技術の開発を目指すとともに、様々な環境要因を取り込んだ実用的な騒音伝搬予測および評価手法の構築を行う。さらに、地圏を対象にしたリスクマネジメントにおける環境・安全評価の方法論を確立するためにハザードの評価手法を開発する。

2) 土壤・地質環境リスク評価技術の開発

わが国の地圏環境における環境リスクを評価するための地圏リスク環境評価システム GEARS の開発と公開を進める。今年度は、特に汚染浄化のリスク低減の効果を評価するための詳細モデルのフレームワークおよび数値解析手法を開発し、必要なパラメータを集積する。また、土壤・地質汚染基本調査や地化学詳細調査などに基づいて、土壤特性および地下水特性を解析することにより、詳細モデルに必要なデータベースを作成する。

3) 難透水層汚染の浄化に向けた汚染物質の挙動と微生物浄化機能の評価

有機塩素化合物 VOCs (TCE, PCE) による地下水汚染サイトを調査し、観測データの解析や汚染物質の挙動予測、微生物による分解速度の評価などの検討を行う。MNA の判定を行うための重要な要素として地下水における微生物の浄化能の評価手法を検討する。そのため、実サイトの地下水をサンプリング調査して、現位置における微生物活性および有機塩素化合物に対する分解特性を明らかにする。その結果、自治体などが利用可能な MNA プロトコルを提示する。また、微生物の自然機能を活用する新規手法を研究し、難透水層にも適用可能なバイオ浄化技術を提案する。

4) 地圏環境インフォマティクスのシステム開発と全国展開

地圏環境情報を GIS 上に統合化し、地圏環境の環境リスク評価、土壤・地質の自然汚染と人為汚染の相互評価などを行い、土壤汚染対策、環境政策立案の基礎情報、環境リスクの長期管理などが可能な評価システムを開発する。情報整備とシステム開発の概念を図 1 に示す。今年度は、東日本における地化学情報および環境調査に基づいて、

地圏インフォマティクシステムに必要なデータベースを作成する。

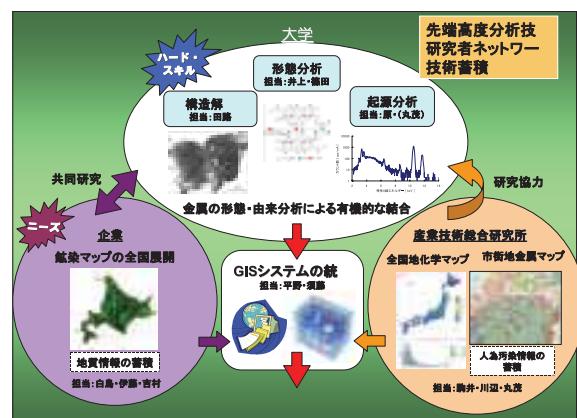


図 1 地圏環境情報の整備とシステム開発

5) 鉱物油等に起因する複合的な土壤汚染の環境リスク評価手法に関する研究

鉱物油等に起因する土壤汚染の環境リスクを科学的かつ客観的に評価するための地圏環境リスク評価システムを開発し、石油系炭化水素による複合的な土壤汚染に起因する環境リスクを定量的に把握するための評価手法を確立する。また、このリスク評価システムの運用に必要な様々なデータベースを整備し、汚染現場におけるリスク評価を可能にする。

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

個々の騒音低減対策による効果を都市域で広域的に考慮しながら最適な騒音対策を選択するためにソフトコンピューティング手法を開発する。併せて、GIS と数値地図を活用し都市広域の環境騒音を面的に推計する技術を構築し、騒音対策立案の支援を目指す。今年度は、騒音場の簡易推計モデル構築のために音響実験等を通じて基礎データを取得し、それらを GIS 上で簡易推計モデルと統合する。

7) メタンハイドレート資源開発・生産手法開発

ガスハイドレートを含む堆積層におけるメタンガスおよび水の浸透率特性を把握するための実験的検討を行い、生産性評価のための解析手法の開発に反映させる。また、絶対浸透率と相対浸透率の定式化により生産シミュレータに反映する。

4. 今後の方針

当グループは、グループ員の緊密な連携を図りながら、地圏環境評価に関する学術的成果を論文等で公表するとともに、積極的な対外活動を実施する。また、本分野のみでなく他の分野に関しても萌芽的研究から実用化研究まで幅広く研究を実施する。特に、リスク評価用ツール、浄化技術、環境影響評価の研究成果を一般に普及させ、土壤・地下水汚染や廃棄物処分場、環境アセスメントなどの問題解決に寄与することを目指す。

CO₂ 地中貯留研究グループの紹介 Introduction of the CO₂ Geological Storage Research Group

CO₂ 地中貯留GL: 當舎利行
Leader, the CO₂ Geological Storage Research Group: Toshiyuki Tosa
Phone: 029-861-8735, e-mail: toshi-tosa@aist.go.jp

1. グループの研究目標

当研究グループでは、長年にわたり研究を進めてきた資源開発技術の発展的研究として、地圏流体の地化学的性質の研究や地下構造の推定、地層・岩盤の特性評価、挙動予測のためのシミュレーション技術やモニタリング技術など温暖化対策としてのCO₂地中貯留や放射性廃棄物の地層処分に必要な研究・技術開発を進めてゆく。また、経済的な地層処分の事業化のために必要な低コスト高効率の革新的掘削技術や温暖化に対応したエネルギー変換に対応するための再生可能エネルギー技術開発などについての研究開発も併せて実施している。また、国内外での研究機関や企業との共同研究を企画・実践し、従来からの資源開発を主体とした研究成果を多方面への応用研究として技術適応を図って行くなど各種普及活動に取り組んで、研究成果の社会へ転移を積極的に進めている。

2. グループの特色等

当研究グループは、地圏環境技術の効率的な開発のため、昨年度新たに組織されたグループである。メンバーは、地質・地化学研究の専門家を始め、岩盤力学、物理探査、シミュレーション、掘削工学など環境対策としての地圏開発技術を多方面の専門家集団として取り組んでいる。

1) グループ員(専門)

當舎 利行(地球物理学)
唐澤 廣和(掘削工学)
奥山 康子(変成岩岩石学)
及川 寧己(岩石力学)
天満 則夫(貯留層工学)
柳澤 教雄(地化)
竹原 孝(岩盤工学)
相馬 宣和(地下計測工学)
徂徠 正夫(地化)

2) 予算

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

地球環境産業技術研究機構研究委託費 「高精度地中挙動予測手法の研究」

経済産業省補助事業に係る共同研究費 「ナ

チュラル・アナログによる二酸化炭素地中隔離の環境影響及び安全管理に関する研究」

共同研究費 「電気分解法を用いたスケール捕集試験」

共同研究費 「地熱井の坑井ライフの向上に関する研究」

産総研研究部門重点化予算 「二酸化炭素地中貯留のための基礎的研究」

産総研運営費交付金 「地圏資源環境技術の研究」等

3. 平成17年度までの進捗状況

1) 地化学関連研究

a) CO₂ 地中貯留のための地層間隙水データベースの作成

一般帶水層でのCO₂地中貯留では、時間経過とともに注入CO₂が地層間隙水に溶解し、帶水層堆積岩の構成鉱物と反応することが考えられる。貯留開始から比較的短時間では、CO₂流体の溶解で間隙水が酸性に傾き、炭酸塩鉱物やごく脆弱な粘土鉱物などを溶解・分解する。また、長期間経過後は、貯留層堆積岩の一般的な構成鉱物がCO₂流体を溶解した間隙水と反応することが考えられる。このため、CO₂地中貯留における地化学プロセスを実験的・理論的に解明する上で、地層間隙水の地化学的性質を初期条件として求める必要がある。

貯留深度に想定される地層間隙水の代表的組成を把握するために、公表された深部地下水データをデ

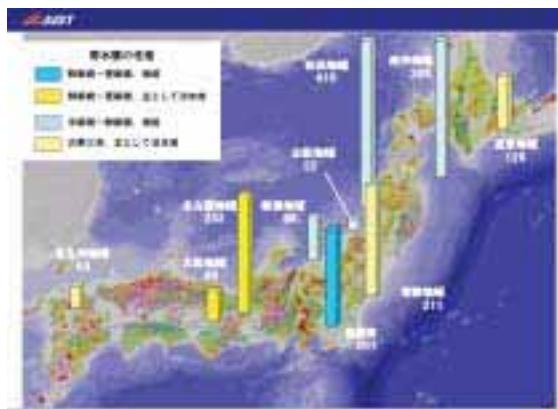


図1 深部地下水データを収集した地域とデータ件数(2006年

9月中旬現在)

ータベース化してきた(図1)。このデータベースは、実験的・理論的研究での初期条件としての地層間隙水組成を導くことにあるため、採択する項目は深度、水温、pH、胚胎層、溶存成分(Na、Mg、Cl、 HCO_3 など)、溶存ガスといった一般水質に相当するものである。地層間隙水は初生的には地層の堆積の場に存在した水と考えられ、このため溶存成分の性質は海成層堆積盆と汽水ないし淡水成層堆積盆で著しく異なる。また同一堆積盆でも、累層ごとに地化学的性質が異なる場合も多い。

b) 炭酸カルシウム析出過程に関する研究

熱交換を伴う热水循環系での炭酸カルシウムスケール付着への対応策の1つとして、(株)レイケンと高周波電気分解水処理装置ダイナクリーン D・150Tによる共同研究を実施している。この装置を用いたプラントでは、配管に付着していた炭酸カルシウムが溶解・剥離する事例が見られた。そこで、D・150Tを50Lの水槽に入れ、あらかじめ炭酸カルシウムを付着させたステンレス板にむけて常温の水を120時間循環させたところ、Ca100mg/Lで CaCO_3 に飽和する溶液では、D150Tによる明確な差が見られた。稼働させない場合、過飽和の溶液から73mgの CaCO_3 が沈積した。しかし、稼働させた場合、逆にステンレス板から569mgで CaCO_3 が溶解した。この際、電極カバーには10.9gの CaCO_3 が捕集され、同時に溶液のpHは初期の8.0から6.3まで低下した。さらに同一の濃度条件で、ステンレス板を水槽内でD150Tから離れた場所につり下げ、流動を止めた実験を行った場合、 CaCO_3 溶解速度はより早く($0.164 \text{ mg/m}^2/\text{s}$)なり、pH

は4.9まで低下した。

のことより、D150Tで通電させると CaCO_3 に過飽和であっても、電極と離れているステンレス板から CaCO_3 が溶解・剥離することが示された。そして、この現象は、D150Tによる CaCO_3 捕集に伴う溶液のpH低下によって起こることが示された。

c) CO_2 地中貯留長期安定性評価のための鉱物溶解速度の計測

CO_2 地中貯留の実用化に向けては、 CO_2 圧入直後に生じる物理的プロセスに加えて、圧入した CO_2 の長期安定性、すなわち数千年から数万年というオーダーでの地球化学的プロセスについても評価を行う必要がある。このような地球化学的プロセスの中では、貯留岩中での量比および反応性の観点から、 CO_2 溶存水中での長石の溶解が重要であり、現在、その溶解速度を求めるための室内実験を計画している。従来、鉱物の溶解速度は溶液組成の変化から見積られるのが一般的であったが、この方法では溶液分析の分解能の観点から、長石のような溶解速度の非常に遅い鉱物に対して、短時間に高精度の溶解速度データを取得することが困難であった。これに対して、溶解に伴う鉱物表面の微小な変化を直接観察する方法を用いれば、これらの問題を解決できる。本研究では、超臨界 CO_2 -水系で長石の溶解実験を行い、所定時間ごとに試料を取り出して、これまでに開発してきた位相シフト干渉計により、表面形状変化の履歴をナノスケールで計測する。このような溶解実験を種々の環境条件下(温度、圧力、鉱物組成、溶液組成等)で実施し、 CO_2 地中貯留に及ぼす影響について検討を行う。

2) 岩盤力学関連研究

a) 岩石コアによる地下応力評価の研究

コア法では、一般には試料採取後のなるべく早い時期(一週間程度)に実験が行われているが、計測実施までの経過時間の制限が緩和されれば応力評価技術としての運用性が向上し手法としての利便性がさらに高まると考えられる。AE/DRA法を適用した場合の経過時間の影響について詳しく調べることを目的に花崗岩の定方位岩芯試料を対象にAE/DRA法

試験条件	スケール剥離量 絶対値(mg)	電極カバーへの スケール付着量 (g)
装置未稼動、流動	-73	0
装置稼動、流動	569	10.9
装置稼動、静置 吊り下げ	1362	9.4

カルシウム濃度 100mg/l 炭酸水素イオン濃度 100mg/l

表1. 各試験状態での剥離量と付着量

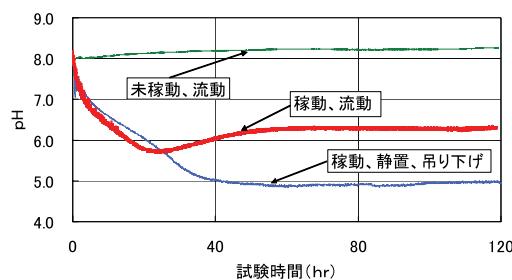


図2. 実験経過時間とpHの変化

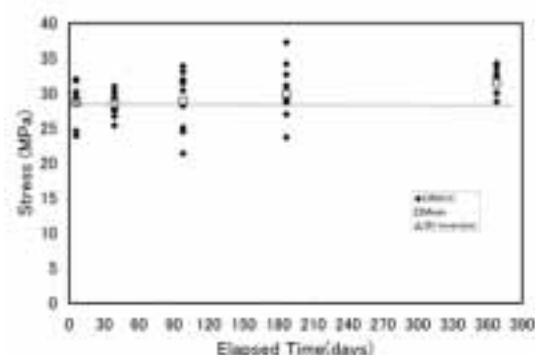


図3(a). DRA法による試料採取後の経過時間と評価応力値(従来法)

を適用した初期応力計測を採取後の経過時間を変えて行った。

AE 法における時間の経過にともなう鉛直方向の評価応力値の変化は、採取後の時間が経つにつれてばらつきが大きくなる傾向があり、この観点からは試料採取後 1 ヶ月以内の実施が望ましいと考えられる。また、評価応力値自体は時間の経過にともない過小評価する傾向がある。しかし、適切な応力値を決定するための実験(リファレンス実験)を精度良く実施することにより補正できる可能性がある。

DRA 法における時間の経過にともなう鉛直方向の評価応力値の変化を図3に示す。98 日後及び 187 日後の計測では得られる値のばらつきが大きくなっているが、368 日後の計測ではそれほど大きくなく、一概に経過時間の影響とは言えない。一方で平均値を見てみると 187 日後の評価応力値及び 368 日後の評価応力値は、やや過大評価となる傾向があり(368 日後で約 10%)、経過時間の影響が見て取れる。この傾向は、AE 法と同様に地下応力計測法における解析パラメータの妥当性に依存しており、これを決定するための実験(リファレンス実験)を精度良く実施することにより、今回の試料においては図3(a, b)に示すように精度良い補正が可能であった。

AE 法・DRA 法とともに、試料採取からの経過時間影響が 6 ヶ月を超えた場合に現れたものの、花崗岩を対象とした場合には概ね 1 ヶ月以内の試験実施を目安とすれば良いことが分かった。また、地下応力計測法における解析パラメータの妥当性が重要である。

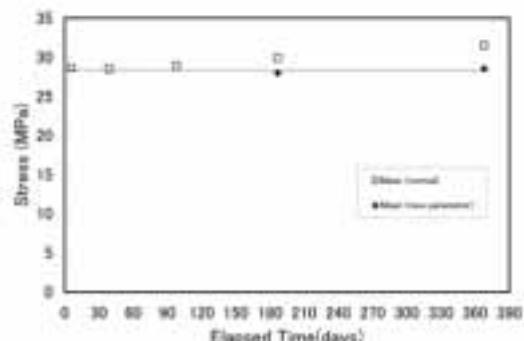


図3(b). DRA法による試料採取後の経過時間と評価応力値(従来法とパラメータ補正後の比較)

b) 岩盤安定性評価に関する研究

軟岩で多孔質供試体であるベレア砂岩を用いて、低応力レベル、温度・周圧を変えた条件での長期クリープ試験を実施した。大気圧下の実験では、ひずみは縦ひずみ横ひずみとも温度による顕著な差異は認められない。計測期間全般においてはクリープひずみが対数時間に対して直線的に微増していく傾向が見られた。(図4)封圧 5MPa の実験では、縦ひずみ、横ひずみとも温度が高いと瞬間ひずみがわずかであるが減少している傾向が見られた。また、大気圧下での実験と同様にクリープひずみが対数時間に対して直線的に微増していく傾向が見られた。ベレア砂岩で

は温度によるひずみの変化に顕著な差異は認められなかった。

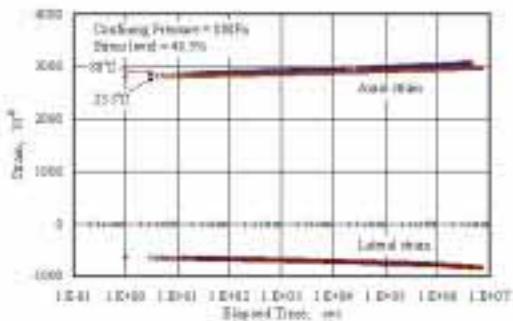


図4. ベレア砂岩の時間とひずみの関係(大気圧)

3) 挖削工学関連研究

a) 多結晶ダイヤモンドビットの研究

軟質な岩石が多く賦存する石油井などの坑井掘削において、多結晶ダイヤモンド(Polycrystalline Diamond Compact)を刃先とする PDC ビットが多用されている。これは、近年の高圧技術の進展により軟質な岩石の掘削において PDC ビットの性能(掘削速度とビットライフ)が大幅に向上し、掘削コストの低減に大きく寄与できるようになったためである。最近、より硬質な岩石の掘削が可能な PDC ビットの開発が要望されるようになると同時に、超高圧技術の進歩により新素材である耐熱性多結晶ダイヤモンド(Thermally Stable Polycrystalline Diamond: TSP)も開発されるようになった。このため、花崗岩のような研磨性の著しい硬質岩の掘削に適用できる TSP ビットの開発に着手した。この研究では、ビット製作に適する TSP 刃先の開発と、試作した TSP ビットの性能評価を行っている。

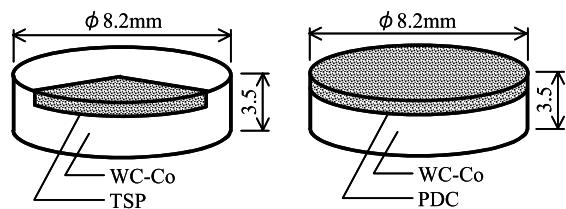


図5. 直径が 8.2mm の TSP 刃先(左図)および直径が 8.2mm の PDC 刃先(右図)

性能評価試験は、ビット回転数を 100rpm、掘削速度を 7cm/min 一定とし、両ビットを用いて沢入花崗岩(一軸圧縮強度 219MPa)を掘削して行った(図5)。TSP ビットは掘削長が 67m の時点でライフに達した。一方、PDC ビットはライフには達しなかったものの、刃先の摩耗が大きくなるとともにビット荷重が増大したため掘削長が 112m の時点で試験を打ち切った。硬質な花崗岩の掘削において TSP ビットの掘削長が 67m に達したことは、従来の経験から比較的よい性能を示したと判断している。しかし、TSP 刃先のダイヤモンド

が欠損しやすく、刃先の摩耗がPDC刃先に比べて速く進展したことから、今後、TSP刃先の耐欠損性の向上を図っていく予定である。

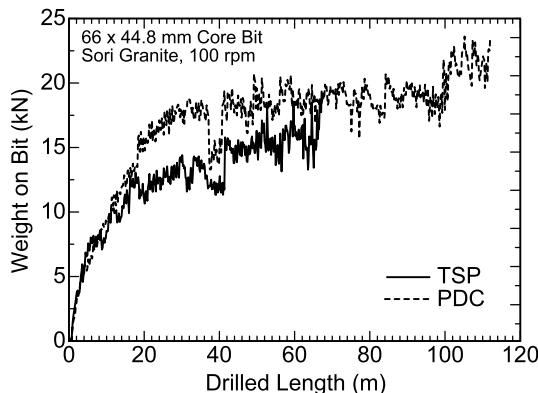


図6. PDC,TSP両ビットの性能評価試験結果)

4) 資源開発関連研究

a) 能動的抽熱・生産量予測技術

商業的な高温岩体発電の開発のため必要な多層貯留層システムの抽熱・生産特性には、未だに不明な点も多い。そこで、肘折高温岩体実験場で造成された二層貯留層の数値モデルを用いて数通りの注水流量に関して、10年間の予測計算を行い回収率と熱出力の結果を比較した。注水条件は次の3通りを考えた。注水条件1(丸)は、全て浅部貯留層へ注水、注水条件2(四角形)は全て深部貯留層に注水、注水条件3(三角形)は浅部と深部貯留層への注水比率が同じとした。この条件で総注水量を8.35kg/sから33.4kg/sまで変化させた。

図7に10年間の予測計算後の回収率(白)と熱出力(黒)の結果を示す。図より、注水条件2の熱出力(■)が最も高く、次に注水条件3(▲)、1(●)の順になっている。これは、注水条件2では、HDR-3の生産温度が高いために、HDR-3の熱出力も高くなり全体の熱出力が高くなっている。また、注水条件2では流量の増大に伴って、熱出力は増加するが、その増加率は、流量増大に伴って小さくなっている。これは、注水条件2では、HDR-2aにおいて深部貯留層から生産された流体が浅部貯留層へ流入する結果、深部貯留層から得られた熱エネルギーの一部が地表に取り出されていないことに起因している。

また、注水条件1の回収率(○)は65~70%程度と

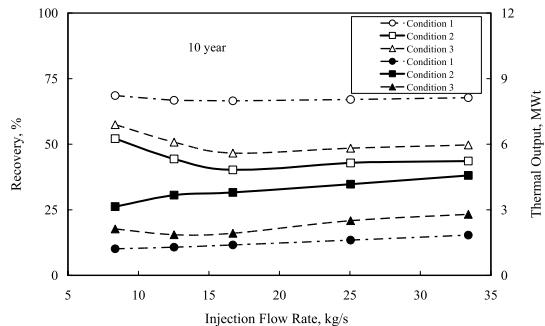


図7. 10年間の予測計算による回収率と熱出力の比較

高い値を示しているが、熱出力は全ての注水条件で最も低く、効率の良い抽熱ではないと考えられる。さらに注水条件2及び3では回収率は低く、11~13kg/s以上の流量では回収率は50%未満となっている。したがって、少なくとも注水条件2及び3は高注水流量では熱出力の増加率が低く、回収率の面でも効率が良くないと考えられる。

以上の結果より熱出力が最も高い注水条件2において、注水流量16.7kg/sの場合が肘折貯留層からの抽熱を実施する上で良いと考えられる。ただし、注水条件2では、一部の生産流体が浅部貯留層に流入するために地下からの熱回収に無駄が生じている。さらに浅部と深部貯留層に対する最適な注水比率を与えることで、より効率的な熱出力が得られると考えられる。

b) 地熱資源開発のための自然電位モニタリングの研究

自然電位観測は、地表に設置した電極と基準電極との電位差を測定することにより、地下で発生している様々な要因の現象を捉えようとするものである。特に地熱地帯では、自然電位の空間的な分布を計測することにより、熱水の地下からのわき出しを探してきた。鹿児島県霧島市の大霧発電所周辺地域でも発電所の運転開始前から自然電位の分布調査が行われてきており、地熱流体の生産還元に伴って生産域では正の電位異常が現れたことが報告されている。

本年4月に大霧発電所での蒸気出力維持のためNT-B6坑井が掘削され、蒸気生産に寄与している。また、本地域では新たな生産井の掘削も計画されていることから、当地域の恒常的な自然電位観測を目指して観測を開始した。観測点は、1m及び8m観測孔の坑底に設置した自然電位電極の電位変化をケーブルにて伝送している。ケーブル切断などの観測上のトラブルのため中断時期が多いものの観測を継続している。

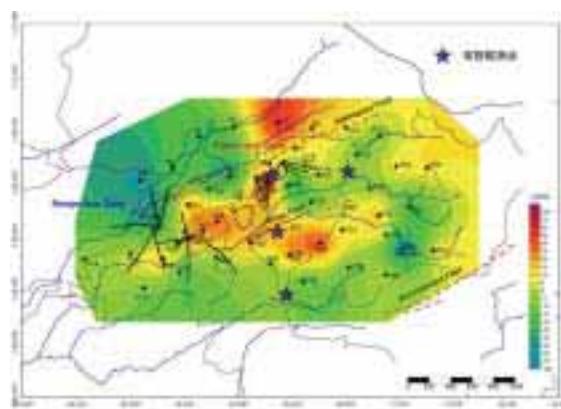


図8. 大霧地域自然電位観測点配置図



地質バリア研究グループの紹介

Recent activity of Geo-barrier Research Group

地質バリア研究グループ長：楠瀬勤一郎

Leader, Geo-barrier Research Group: Kinichiro KUSUNOSE

Phone: 029-861-3882, e-mail: k.kusunose@aist.go.jp

1. 研究グループの目標

地質バリア研究グループは、快適で安全な生活空間を確保・維持するため、地下深部空間の開発と有害物質の地下深部隔離に必要な研究を行っている。以下、現在の研究内容を紹介する。

2. 研究の内容

1) 地下水挙動把握にかかる基礎研究

地質バリア研究グループは、快適で安全な生活空間を確保・維持するため、地下深部空間の開発と有害物質の地下深部隔離に必要な研究を行っている。特に、地下水挙動を的確に把握することは、地下深部の開発や地中隔離の安全性評価にとって重要と考えている。

地下水挙動研究のため、茨城県東海村で地下水井の水質等の連続観測を実施し、広域的な地下水流动の推定と、比較的浅い地下水流が、降雨、潮汐の変動や大規模な揚水を伴う工事によって受ける影響について調査・研究を実施し、浅部地下水流动の変化を、数値シミュレーションを用いて、定量的な解釈をおこなった。

さらに、周辺の井戸に与える影響を減じることを目的に、地下にウォーターカーテンを設置し、予測にもとづいて水流管理を行った。その結果、周辺井戸に対する工事の影響を大幅に減じることが示された。さらに、定常状態での地下水流动解析と揚水に伴う地下水観測結果の比較や揚水を加味した解析方法の開発などから、今後の沿岸域における大規模揚水工法や環境変化に関して、基礎情報を発信する準備を行っている。

2) CCOP 地下水データベース構築に関する研究

DCGM4 「東・東南アジア地下水データベース研究」における研究の成果をもとに、地下水の評価と管理を目的としたプロジェクトを平成18年度から開始した。

プロジェクトは三つのサブプロジェクトで構成されており、日本・韓国・中国がそれぞれの

サブプロジェクトをリーダーとして担当している。日本は、都市海岸域の地下水に関する都市化の影響や二酸化炭素地中貯留の可能性評価など地下水の環境と利用に関する「都市部海岸域の地下水環境と地下水管理」のサブプロジェクトを担当する。また、韓国は「地下水モニタリングシステムを使った地下水環境評価」中国は「地下水と地盤沈下モニタリング」を担当することになっている。

日本のサブプロジェクトにはインドネシア・フィリピン・パプアニューギニアが参加しており、各国の沿岸平野（日本の事例は関東平野）を題材に、海岸域に発達する各国の都市の規模の違いによる地下水への影響を評価する。各サブプロジェクトは2008年までに終了させ、2009年に全体をまとめる予定である。

3) 塩淡境界面形状把握調査

沿岸部に処分場が建設される場合には、塩淡境界面に沿った地下水流动が、核種の生物圈への移行経路になる可能性がある。このため、塩淡境界面の形状やその変動、境界面に沿った地下水流动などの性質を解明する技術が必要であるが、塩淡境界面の形状・変動についての野外データはきわめて乏しい。本研究の目的は、野外調査により、塩淡境界面の形状や境界面に沿った地下水流动を把握し、地質状況に応じた塩淡境界面の形成機構を解明し、得られた知見を普遍化して、概要調査地区での調査に適用可能な、精度の高い広域塩淡境界面推定手法を開発することである。このため、①沿岸域の現地調査に基づく研究 ②井戸台帳や地下水試料・岩石試料を用いた統合データベースの構築を行っている。①では、研究試験地での物理探査・孔井での検層と地下水分析・観測井での連続観測により、塩淡境界面の形状を把握し、さらに、塩淡境界面の変動を観測することにより、地質状況に応じた塩淡境界面形成機構を解明する。これらの研究で得られた知見を普遍化し、概要

調査地区に適用可能な、井戸調査を含む野外調査手法を確立する。②では、深部地下水など、長期間滞留し、化学的に平衡状態になっている地下水の組成を、岩石－水反応試験および岩石組成から化学平衡理論による推定により求め、さらに、この結果を地下水データベースとリンクさせて、総合的なデータベース構築を試みる。広域の塩淡界面は、この総合的なデータベースと野外調査結果、地質図など既存文献資料を総合的に解釈することで、確度高く推定できると考えている。

本研究では、平成14年度に、千葉県蓮沼海浜公園内の研究試験地(50m×50m)で、孔井および物理探査手法による塩淡界面の把握手法の検証・評価を行った。深部の比抵抗構造を明らかにするため、ATM法による調査・解析手法の開発に着手した。これを受け、平成15年度に、茨城県東海村の日本原子力研究所の敷地内に、2km×2km程度の研究試験地を設定し、蓮沼試験研究地で検証した手法を用い、塩淡界面の把握を行った。試験地内にある加速器リンクの建設予定地には、日本原子力研究所により、多くの浅層地下水の観測井が設置され、塩淡界面の上面が観測されている。地質バリアグループは、日本原子力研究所敷地内外に、これらの井戸を補完する形で地下水観測井の整備を行い、塩淡界面の位置とその変動の観測を開始した。また、電気探査と弾性波探査をおこなって、調査地の地質構造を明らかにした。観測井掘削時に地質サンプルの分析や各種の物理検層等の結

果から、試験地の深度200mまでに2層の帶水層があり、それぞれに塩淡界面が存在することが確認された。これまでの研究によって、地下水観測井のデータから、加速器リンク工事による地下水汲み上げに伴って、海側より塩水地下水が内陸に浸入してきた様子を明らかにすることができた。海水準下40mにおいて地下水汲み上げが行われているが、塩分地下水の浸入は、海水準下10m程度より上部の帶水層に限られていることが判明した。平成17年度には、定常状態での地下水流动解析と揚水に伴う地下水観測結果の比較を行い、揚水の影響を三次元的に可視化し、地質構造などとの比較を行った。また、深部地下水など、長期間滞留し、化学的に平衡状態になっている地下水の組成を、岩石－反応試験および岩石組成から化学平衡理論による推定により求めることを目的として、地下水データベース・深部岩盤データベースの構築、岩石－反応試験を継続している。

4) 沿岸域断層評価手法の開発に関する研究調査

海域と陸域では、調査に用いることができる手法が違う。本研究調査では、範囲・深度・精度等が異なる陸域断層調査文献と海域断層調査文献を、それぞれの調査特性を考慮して既存文献調査により総合的に検討、又、海域・陸域の調査データを用い、陸域・海域を一体のものとして統合し、断層・大規模破碎帯の情報抽出を試みる。実データに基づいた作業を通じ、基盤整備事業として実施する際の技術的な問題点を明確化し、実行可能な事業提案の形にして成果のとりまとめを行うことを最終目標としている。

平成17年度は、以下の成果を得た。

- 海上保安庁海洋情報部、独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター、国土地理院の沿岸域基礎資料メタデータを作成した。
- 各機関のメタデータを更新し、公開型webベースメタデータシステムを試作した。

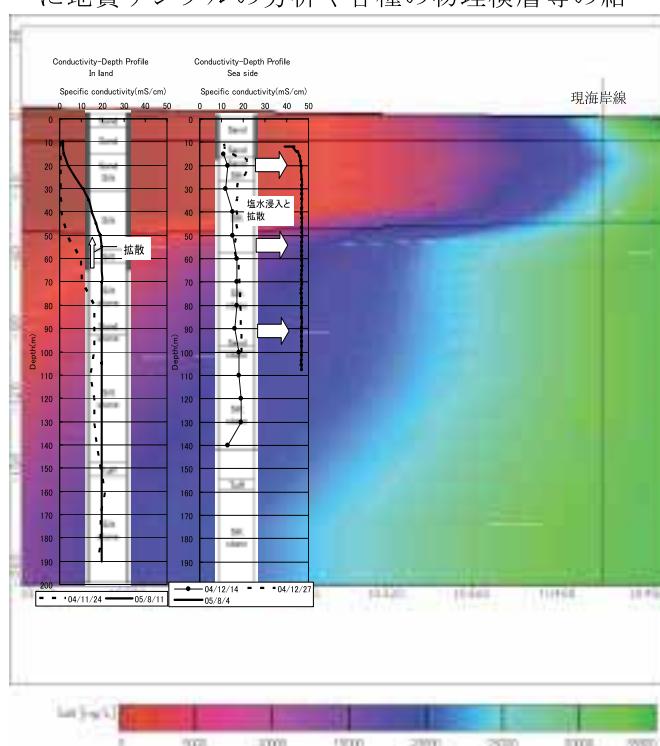


図1 東海村の沿岸域における塩淡界面の形状と実測した地下水の塩分濃度比較、この研究の結果、大規模揚水工事の影響は最上位の未固結砂層内(深度40m)でのみ発生していることが確認された。

- 深度・手法・精度の異なる陸域断層調査文献と海域断層調査の結果を統合する際の技術

的な問題点について検討、事例として、熊本平野部に存在し、沿岸域断層である日奈久断層に MT 探査法を適用した結果事例を整理解析、又、海底重力探査より、大阪湾内の断層分布を推定した文献を整理した。

また、今後の課題として以下のことことが明らかとなつた。

測定データにおける年次ごとの互換性を明確にする必要がある。

- ・ 各機関の解析結果において海岸線が異なっているので、これを一致させる必要がある。
- ・ 沿岸域伏在断層の構造調査には様々な手法があり、目的にあう選択が必要。
- ・ データ有効利用のため、既存アナログデータをデジタルデータに変換する必要がある。
- ・ 補足調査によって、沿岸域にターゲットを絞った情報基盤を作成する必要がある。

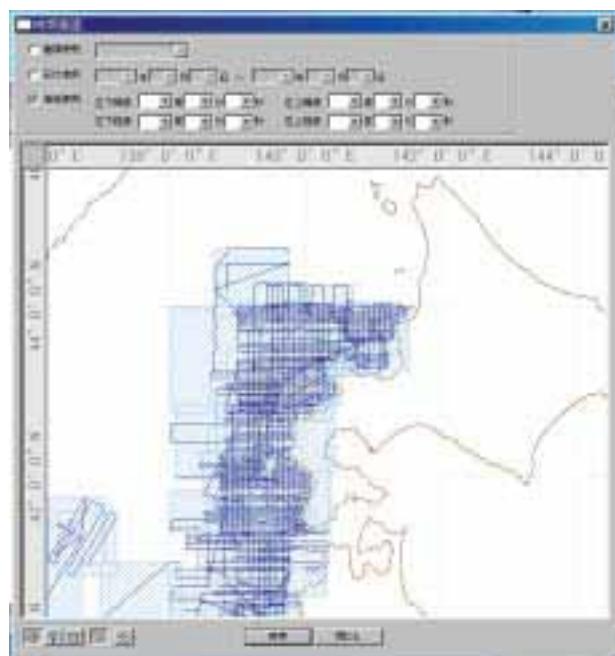


図 2：音波探査データ測線の検索マップ

5) 光音響分光法を用いた地下水センサーの開発と適用に関する研究

本研究では、これまでに実験室レベルで提案されている光音響分光法を用いた長期安定水分センサーを現場用に開発し、その実用化に関する研究を実施する。このため、最初の 3 年間では実験室レベルのセンサーシステムを実用化するため、励起光源の開発、レーザー伝播用ファイバーケーブルの選定、ディテクターの高精度軽量化等を実施した。その後 2 年で、観測井を

設けて地下水位を変動させながら水分変化を観測する現地適応試験を実施した。

本プロジェクトは、H17 年度終了し、以下のような成果を挙げた。

- ・ センサーとしての有用性が理論的には指摘されていた、「光音響分光法を用いた地下水水分量センシング技術」を実用化した。励起光に対する反射光は岩質によらないことを確認するため、間隙率や水分量が既知の試料を約 100 体もちいて、キセノンランプ光源から励起光を照射し、同時に反射光の観測を実施した。この実験を繰り返すことで、キャリブレーション測線を作成し、特定励起光ならびに反射光の減水率を測定した。
- ・ 当初の段階では 1.39～1.65 ナノ・メータの範囲の励起光を用いて水分量を観測することを考えた。これに加えて、水質観測用のセルを新たに試作して、これまでに開発した水分量観測用のセルと一体化した。
- ・ センサーが、深度 1000m 前後の温度・圧力を



図 3 実験室における岩石水分量測定実験の様子

で長期間にわたり安定して作動する必要があるため、実験室内でこのような温度・圧力条件を再現し、キャリブレーション曲線を作成した。また、200m 深の観測井を用いた現場実証試験を実施した。

- ・ これらを小型化し、直径 5.5cm の円筒状地下水センサーとした。

6) 地下深部岩盤初期応力の実測

地下深部岩盤での初期応力状態は、高レベル放射性廃棄物地層処分の重要な地質環境特性の一つである。しかし、応力測定は、応力解放法による測定が主に山岳地域で、水圧破碎法による測定が主に関東東海地域・活断層周辺で行われてきた。これらは、いずれも地球科学的活動域である。わが国の地下深部岩盤での初期応力状態を一般的に評価するには、応力測定の空白域である地球科学的静穏域で応力測定が必要である。本研究では、①地球科学的静穏域での地下深部岩盤初期応力の実測 ②広域応力場を推定するための数値計算手法の開発 ③水圧破碎法により測定された応力値のデータ集作成を実施した。

地球科学的静穏域として岡山市周辺を選定し、平成 13 年度から平成 16 年度にかけて深さ 750 m の応力測定孔の掘削・各種岩盤調査・周辺地質調査・応力場の数値計算と実施した。現地調査結果概要は次の通りである。

- (1) 本応力測定孔での岩盤初期応力値は、420 m 付近を境に不連続に増加した。150–420 m 区間では水平最小応力約 7 MPa・水平最大応力約 10 MPa であった。430–700 m 区間以深では水平最小応力 10~17 MPa・水平最大応力 19~31 MPa であった。応力値の不連続な変化は岩盤状況に起因すると考えられる。
- (2) 本応力測定孔での水平最大応力の方位は、650 m 以浅では東南東–西北西、650 m 以深では東–西または東北東–西南西であり、国土地理院による三角測量から得られたこの地域の地殻水平歪変化の圧縮軸とほぼ一致した。
- (3) 本応力測定孔での岩盤初期応力値は、国内硬岩地域でのそれと比較して、低~中レベルであった。このことは、地球科学的活動性と地下深部岩盤初期応力の大きさが相関することを、示唆している。
- (4) ASR 法から推定された地下応力場はほぼ等方的であり、これは水圧破碎法による測定結果と一致しなかった。

また、地質構造モデルの改良を行い、広域応力場（東西 2 km × 深さ 1 km）を数値計算した推定するための、数値計算手法の開発を行った。

＜地下構造モデルの設定＞ 地下構造モデルは、地質調査・採取コア観察・検層・コア物性試験等の結果を検討し、岩盤の硬さと亀裂密度に着目して細分帯区分を行った。深さ 750 m ま

での岩体を 33 分帯に区分した。深さ 420–424 m の破碎帯も地下構造モデルに組み込んだ。

＜母岩物性モデルの設定＞ 数値計算に入力する母岩物性は、コア物性試験で得た物性値に、寸法効果を評価して設定した。

＜数値解析モデル＞ 数値解析モデルには複合降伏モデルを採用した。亀裂面の変形特性は採取コアでの亀裂面の変形特性を室内試験により求め、寸法効果を評価して設定した。

＜数値計算での要素分割・境界条件＞ 数値計算は東西方向の二次元鉛直断面で行った。数値計算の領域は、境界の影響を排除するために、検討領域（東西 2 km × 深さ 1 km）より大きい東西 4.5 km × 深さ 2 km とした。要素分割は東西方向約 80 分割、深さ方向 70 分割とした。東西端面での境界条件は鉛直ローラー（鉛直方向の変位は拘束しない）で、強制水平変位 2.4 m を両端面に与えた。この値は、深さ 700 m での測定値 25 MPa とその深さでのモデル弾性係数に基づくものである。

＜数値計算結果＞ 数値計算結果で得られた本応力測定孔位置の応力値の深さ分布は、傾向が実測結果と一致したが、値は一致しなかった。この原因として、今回の数値計算に用いた母岩物性や亀裂面物性は室内試験結果に基づき寸法効果を評価して算出した値であったが、実値との相違があったためと考えられる。今後は、これら物性の原位置測定や寸法効果の再評価が必要である。

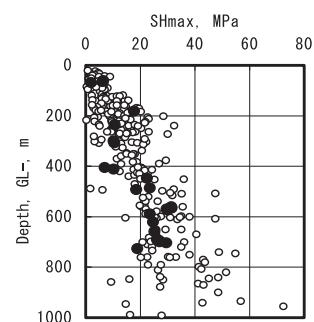
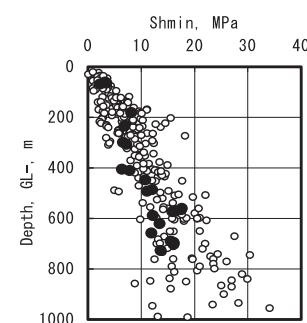


図 5 地球科学的静穏域での深部岩盤初期応力測定結果 (●)

上図：水平最大応力値
下図：水平最小応力値

○は、国内他地域の値



物理探査研究グループの紹介 -2006 年度- Exploration Geophysics Research Group, FY2006 Update

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

1. グループの研究目的

放射性廃棄物地層処分、土壤・地下水汚染、CO₂ 地中貯留、土木分野等の地圈環境分野における地盤・岩盤の評価やモニタリング、及び、地熱等の資源分野における地質構造調査に不可欠な物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査手法の技術開発と適用研究を行う。平成 18 年度においては、放射性廃棄物地層処分場の岩盤評価・モニタリング、土壤汚染・地下水環境等の浅部地質環境評価、地中貯留された CO₂ の挙動把握、地盤の液状化ポテンシャル評価の4項目を中心に研究を行うとともに、技術シーズ開拓のための基盤的研究を進める。

2. グループの概要

1) グループ員

内田利弘(リーダー)
神宮司元治
中島善人
西澤 修
光畠裕司
横田俊之
松島 潤(産学官制度、東京大学)

2) 平成 18 年度の研究テーマ

原子力特研「地層処分場岩盤特性評価のための高分解能物理探査イメージング技術の研究」
環境省委託費「鉱物油等に起因する複合的な土壤汚染の環境リスク評価手法に関する研究」
産総研ハイテクものづくり PJ「地盤災害予防のための土木建造物メンテナンス用核磁気共鳴物理探査装置の開発」
産総研ハイテクものづくり PJ「マルチウェーブ高速 3 次元比抵抗トモグラフィ技術の開発」
ほか

3) 研究の概要

a) 地層処分場の岩盤評価・モニタリング

人工信号源電磁探査(CSEM)測定システムの改良と 3 次元野外データ取得実験、3 次元順解析プログラムの改良を実施する。反射法地震探査データより弾性波減衰特性と亀裂卓越部を抽出するためのデータ解析

手法を検討する。NMR データから地層の水理特性を定量的に解析するため、粘土中の水の拡散に関する包括的なモデル構築を行う。光ファイバー熱伝導率計測によって廃棄体周囲の温度・含水率の変化をモニタリングする手法について詳細な検討を行う。

b) 浅部地質環境評価

土壤汚染、地下水環境、土木分野等における浅部地質環境評価のため、土木構造物メンテナンス用 NMR 計測装置の適用実験、マルチ送信比抵抗探査装置試作機の製作、油汚染土壤における地中レーダー、電磁探査、IP 法等の適用試験、電磁プロファイリング法データ解析ソフトウェアの開発と配布、河川堤防・泥火山地域等における地下水環境評価のための地中レーダー・電磁探査調査法の開発等を行う。

c) CO₂ 地中貯留における地層物性評価

地中貯留された CO₂ の挙動を地震波を用いてモニタリングするため、CO₂ 置換による弾性波減衰データの解析とそのメカニズムの解明を行う。

d) 地盤液状化ポテンシャル評価

ER-VPT(比抵抗貫入振動試験)による屋外および室内実験を継続し、液状化特性についての詳細な検討を行う。また、土壤汚染用 NMR ペネトレータ・プロトタイプの性能試験を行う。

e) 物理探査技術の基盤的研究

地圏における資源開発及び地質環境評価のため、物理探査による地下構造の高精度イメージングのための技術開発を行う。今年度は、韓国地質資源研究院との地熱資源調査等に係る電磁探査法のデータ解析法について共同研究、ランダム不均質構造に起因する地震波の乱れ、パーカッションドリリング SWD データを用いた地震波干渉法による地下イメージング法の FS 等を行う。

3. 平成 18 年度の主な進捗状況

1) 地層処分場の岩盤評価・モニタリング

a) 岩盤評価のための物理探査法開発

深度約 2km までの地下比抵抗の 3 次元分布を高精度にイメージングするために、人工信号源を利用した電磁探査法の研究開発を実施している。その中で、周波数領域と時間領域の両方の測定が可能なハイブリッド領

域電磁探査測定システムを開発し、平成 16 年度は時間領域測定、17 年度は周波数領域測定の野外実験を茨城県東茨城台地の実証フィールドで実施した。両者の測定結果を周波数領域で比較して(図 1)、整合性のある結果が得られた。

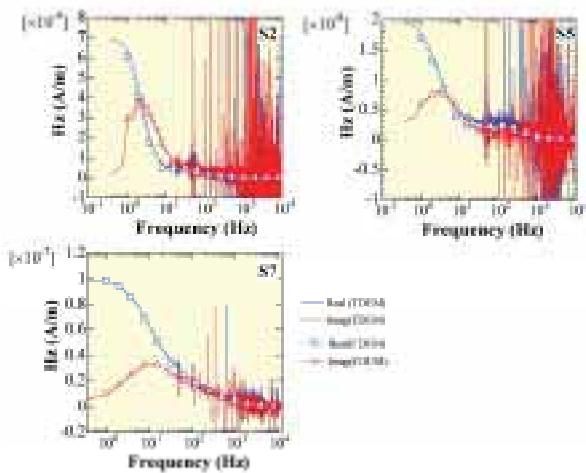


図 1: 周波数領域(FDEM)と時間領域(TDEM)測定から得られた鉛直磁場Hzの周波数スペクトルの比較。測点S2, S5, S7は送信源からそれぞれ約 2.2, 1.3, 0.7km 離れている。

地震波データ解析法の開発について、反射法地震探査データより抽出される速度情報と減衰情報を組み合わせた地層評価法を確立するため、反射法データから弾性波減衰情報を高精度に抽出するためのデータ前処理法について検討した。発震点ならびに受振点に起因する弾性波応答の差違が減衰特性解析に及ぼす影響を考慮するため、サーフェスコンシスティント振幅処理とサーフェスコンシスティントスペクトル処理を施し、個々の波形の乱れを平滑化する前処理を検討した(図2、図3)。

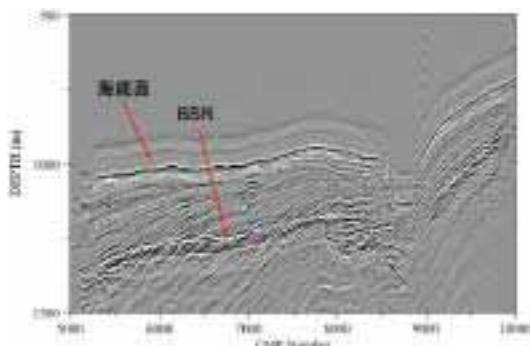


図 2: 東海沖海上地震探査データに対し、CMP重合ならびに重合後マイグレーションを施した地震断面。

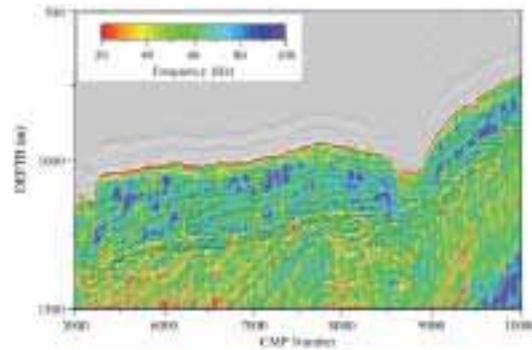


図 3: 図 2 に対して瞬間周波数を求め、図 2 に示した地震断面図に重ね合わせた。

b) 塩淡境界把握調査のための電磁探査法の適用

沿岸域帯水層への塩水浸入域調査を目的に、様々な電磁探査法の適用実験を、九十九里浜平野に位置する蓮沼実験地域において実施している。平成 17 年度は、浅部の高塩分地下水に起因する低比抵抗領域の広がりを3次元的に把握するために、面的に時間領域電磁探査(TEM)法調査を実施した(図 4)。結果として、深度5mぐらいから調査エリアの南東側で低比抵抗領域が現れ、深くなるにつれて北西方向に広がっている様子が把握できた(図 5)。

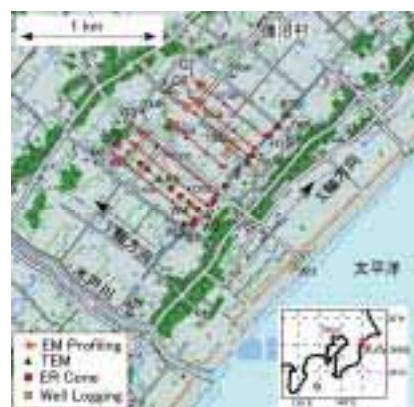


図 4: 蓮沼実験地域における TEM 法測点配置図。国土地理院 5 万分の 1 地形図を使用。

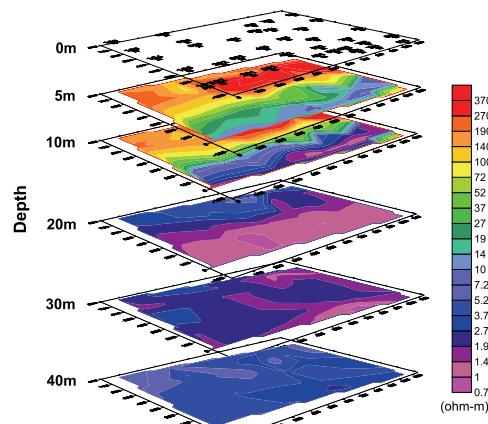


図 5: 各測点の TEM 法 1 次元逆解析結果より作成した比抵抗分布平面図。

2) 浅部地質環境評価

a) 土木構造物メンテナンス

老朽化した土木建造物のメンテナンスのため、トンネル・ダムなどのコンクリート構造物中の水を含む亀裂などの欠陥を非破壊で原位置計測できるプロトン NMR(核磁気共鳴)計測装置を開発中である(図 6)。NMRは、他の物理探査手法と異なり、水分子から直接シグナルを得るので、コンクリート中の水で満たされた亀裂の幅を定量的に検出できるという特長がある。これまでの進捗状況は、探査深度 5cm の磁気回路を完成させ、探査深度 1cm のテストコイルを用いて、室内での模擬亀裂の開口幅の定量計測実験に成功したところである(図 7)。現在、コイルの探査深度を目標値の 5cm にすべく、テストコイルを改良中である。



図 6: 開発中の NMR 計測システムによる模擬亀裂試料の計測実験。磁気回路表面から 5cm 上方の感度領域に水で満たされた模擬亀裂試料があり、その直下 1cm にテストコイルが配置されている。

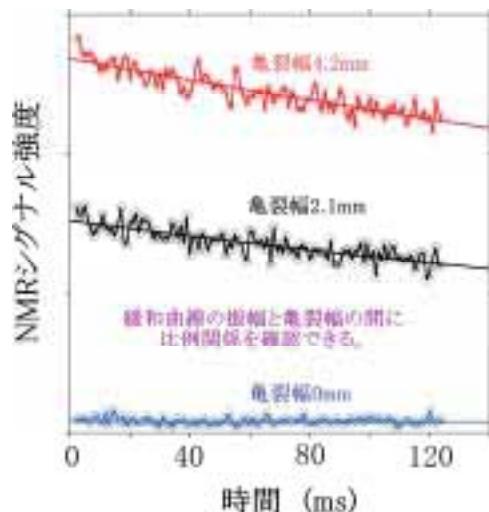


図 7: 図 6 の状態で計測した NMR 横緩和時系列データ。計測所要時間は 20 秒。亀裂幅にシグナルの振幅が比例していることに注意。このことは、適切なキャリブレーションを行えば、亀裂幅の定量が可能であることを示している。

b) マルチ送信比抵抗探査システムの開発

大規模な3次元比抵抗探査の実用化やリアルタイム比抵抗モニタリングを目指した電気探査装置の開発を実施している。単一周波数の電流を用いて送信電極と

受信電極を順次切り替えるながら測定する従来の方式とは異なり、送信電極を切り替ることなく複数の異なる周波数の電流をそれと同数の電極から同時に送信し、複数の受信電極で同期検波により送信信号の周波数を分離しながら受信する方式を採用することによって、飛躍的に高速なデータ取得を行うことができる。これまでに試作装置を製作し、マルチ周波数送信の有効性を確認した(図 8、図 9)。



図 8: マルチ送信比抵抗探査システムの試作装置。

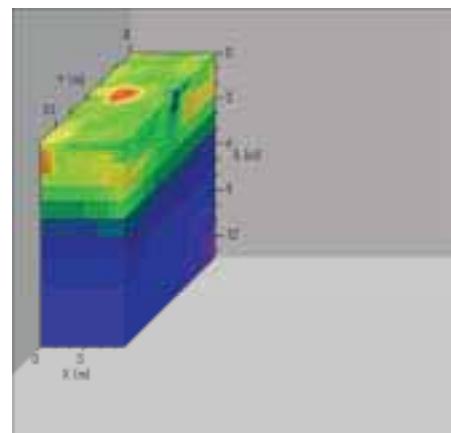


図 9: 試作機を用いた 3 次元探査実験の解析例。

c) 泥火山地域における地下水環境評価

泥火山とは、粘土が地下水や温泉水とともに地表に噴出して、火山に類似した堆積地形や陥没地形を生じたものであり、その流体噴出は、地下の異常間隙水圧により発生すると考えられている。泥火山の存在は、地下建造物の破壊や建造時のトラブルの発生などを引き起こす可能性があり、その周辺の地下構造の把握は、防災の観点から重要である。本研究では、石油やガスの存在に起因する泥火山が現在でも活動している、新潟県十日町市松代地区において、地中レーダ探査を実施し、浅部地下構造を明らかにした。実験を行った現場は、自動車練習場として使用されている場所で、その舗装道路上で3次元的な地中レーダ探査を実施した。なお、実験には 200MHz の地中レーダアンテナを用いた(図 10、図 11)。



図 10：松代地区地中レーダ 3 次元探査測線図

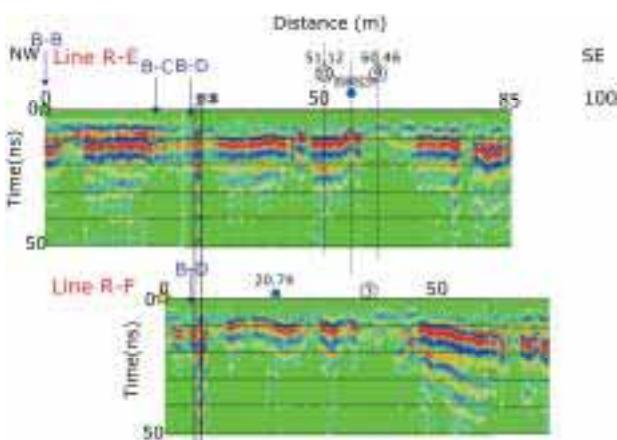


図 11：北西—南東方向測線での地中レーダ・プロファイル結果。同じ道路の両側に設置された測線でありながら、両者の差異は大きい。この地域の噴出泥水が、 $1000\sim 1500 \text{ mS/m}$ ($= 0.67\sim 1 \Omega\text{m}$) という高い導電率を持っていることを考慮すると、地中レーダ・プロファイル測線 R-E の 60m 地点および測線 R-F の 40m 地点にみられる電磁波反射波の減衰は、測線 R-E の 55m 地点北東 10m にみられるガス・地下水・石油に伴う泥水の定常的な噴出を反映したものだと考えられる。

3) CO₂ 地中貯留における地層物性評価

地球環境技術研究機構が行った CO₂ 地下注入実験の際の坑井間地震トモグラフィ・データの再解析を行った。従来用いられてきた地震波線の線形インバージョンに代わり、有限波長理論を用いた非線形インバージョンを行い、CO₂ 貯留層の性状を正確に把握する。有限波長理論は波線の広がりを考慮するので、波線理論に比べ細かい変化をより詳しく検出できる。図 12 は有限波長理論における地震波の広がりを示している。地震波の広がりの影響を考慮すれば、波線理論で地震波が通過しないとされた領域の影響が受信点に現れることになり、イメージがより鮮明になることが期待される(図 13)。

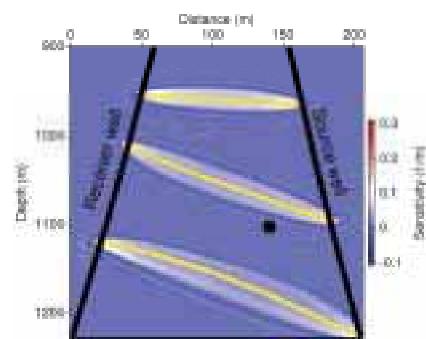


図 12：有限波線理論における地震波の影響領域。

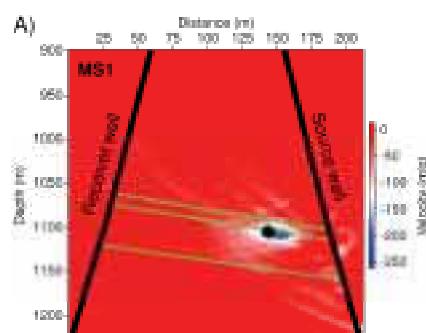


図 13：有限波線理論を用いた坑井間走時トモグラフィ解析結果。

4) 物理探査技術の基盤的研究

a) 地熱地域における電磁探査データ解析

韓国地質資源研究院(KIGAM)との共同研究として、済州島において火山・地下水構造を解明すること目的に、MT 法・AMT 法調査を実施している。人工ノイズの除去のため、国土地理院の江刺観測所における MT 法モニタリングデータを使用するリファレンス処理を行い、比較的良質のデータが得られることを確認した。また、国内の地熱地域における AMT 法調査データについて3次元解析を試みた(図 14)。

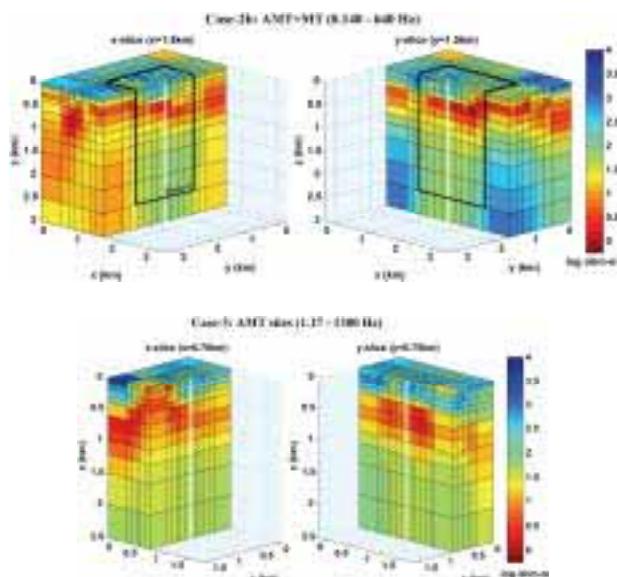


図 14：大霧地域 AMT 法データの 3 次元解析結果。3 次元モデルを x 軸、y 軸の鉛直面で切って表示。(上) AMT 法と MT 法データを使用、(下) AMT 法データのみを使用。上図の黒い太線枠は下図の表示領域を表す。x 軸は 150 度の方向。

地圏流体ダイナミクス研究グループの紹介 Introduction of the Reservoir Dynamics Research Group

貯留層ダイナミクス研究グループ長： 石戸恒雄
Leader, Reservoir Dynamics Research Group: Tsuneo Ishido
Phone: 029-861-3829, e-mail: ishido-t@aist.go.jp

1. グループの研究目的

地圏の流体・熱・化学種の循環系を対象に、挙動解明・予測のための数値シミュレーションによるモデル構築や地球物理学的観測等によるモデル検証について基盤研究を進め、帯水層に圧入された二酸化炭素挙動のモデリング技術の開発や地熱貯留層管理技術の改良などを行う。CO₂帯水層貯留に関わるモデリングおよびモニタリング技術の開発では、帯水層のCO₂隔離性能ならびに貯留ボテンシャルの評価のために、CO₂の臨界点を含む10–100°Cの条件下での水・CO₂の多成分混相系について数値シミュレーション技術の基盤を確立する。また地下深部の帯水層に圧入されたCO₂の挙動を把握するための各種地球物理モニタリング技術について、それぞれの手法の高精度化を図ると同時にヒストリーマッチングへの適用性や漏洩検出能力などを評価する。

地熱貯留層管理技術の開発では、民間企業との共同研究として、各種モニタリングデータを統合した貯留層モデルの改良を行い、その成果をソフトウェアユーザ会などを通して普及する。地圏における物質の循環・集積メカニズムの解明と評価に関する研究では、流体循環系の数値モデリング技術ならびに野外観測技術について室内実験を含む基盤的・萌芽的研究を進め、ユニット間の連携などにより環境評価や資源探査の分野への展開を図る。

2. グループの研究資源

1) グループ員

石戸恒雄（リーダー）・菊地恒夫・杉原光彦・西祐司・高倉伸一・中尾信典・長谷英彰（非常勤、H18.5まで）

*当部門他グループより分担：安川香澄

*地質情報研究部門より分担：松島喜雄

2) 予算

運営費交付金「地圏流体ダイナミクスの研究」、「二酸化炭素地中貯留のための基礎的研究」／共同研究費「超臨界CO₂対応貯留層シミュレーション手法に関する研究」他2件／内部グラント「良質な粘土鉱床の探査・評価技術の開発」／委託費「高精度地中挙動予測手法の研究」／地質情報RI交付金

「火山性流体移動連続観測による噴火予知技術の高度化に関する研究」／深部地質環境RC委託費「堆積岩地域の物理探査による調査」など

3. 平成17年度までの成果概要

1) CO₂地中貯留に関するモニタリング技術及び評価技術の開発

H16–17年度は、電源開発との共同研究「超臨界CO₂対応貯留層シミュレーション手法に関する研究」などにより、CO₂臨界点近傍を扱う数値シミュレーション技術についての高精度化を行うとともに、これに対応して地球物理学的ポストプロセッサの改良を行った。汎用貯留層シミュレータSTAR用に新たに開発した気(CO₂)・液(CO₂)・液(H₂O)三相の状態方程式を用いて仮想モデルによるシミュレーションを行い、反射法や重力、自然電位、比抵抗などの物理探査手法によるCO₂挙動のモニタリングについてその可能性を検討した。成果はGHGT-8などで報告。

野外調査では夕張、松代などの調査を支援するとともに、GPS測量、電気探査などを分担した。また、平成15–16年度に実施した澄川地域での空気圧注入実験ならびにCO₂注入基礎実験(NEDO委託費

「最適モニタリング設計技術に関する先導研究」により実施）について、データの再解析などをを行い国内外の学会発表を行った。また、自然電位に対する坑井ケーシングの影響を評価するために、金属表面での電子授受反応や酸化還元電位起源のSP発生について理論的検討を行った。

以上に加え、「高精度地中挙動予測手法の研究」の一環としてシミュレータ相互比較を分担し、例題作成、結果の取りまとめなどを行った。

2) 「地圏における流体モデリング技術の開発」

「地熱貯留層管理技術の開発」として、民間企業との共同研究等により大霧、上の岱地域での微小地震観測等を実施するとともに、大霧、奥会津地域については、重力、自然電位などのモニタリングデータを用いてヒストリーマッチングによる貯留層モデルの改良を進めた。上の岱地域については生産流体のエンタルピーやトレーサー試験結果を再現するための予備的なモデリングを実施した。得られた成果は、国内学会の他、WGC2005などに

GRC2006、RE2006で発表した。また、ソフトウェアユーザ会を開催し、地熱貯留層管理ソフトウェアの使用状況などについて報告するとともに意見交換を行い、貯留層管理技術の普及を図った。その他、DOE予算によるEGSプロジェクトに参加し、コソ地域のコア試料について高温下でのゼータ電位測定などを行った。

また、「熱・热水の影響評価手法に関する検討」の一環として、北上低地を含む東北地方の東西2次元断面について、地質データ等を参考にしてモデルを作成し広域流動シミュレーションによる感度解析を実施した。山岳部地下の熱異常（高温部）を再現するための必要条件や、平野部（低地）地下の深層热水の形成条件などを確認し、中間報告書としてまとめた。

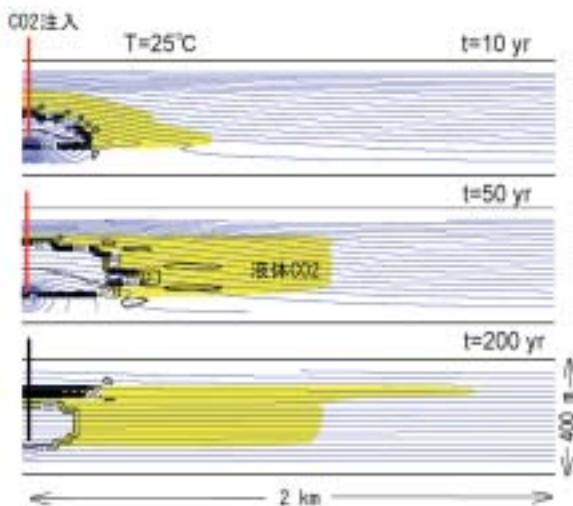


図2 温度 25°C の帶水層に超臨界 CO_2 を年間 100 万トンで 50 年間注入したときの予測シミュレーション。 CO_2 は井戸近傍では気体（超臨界）だが、31°C より低温では液体状態。

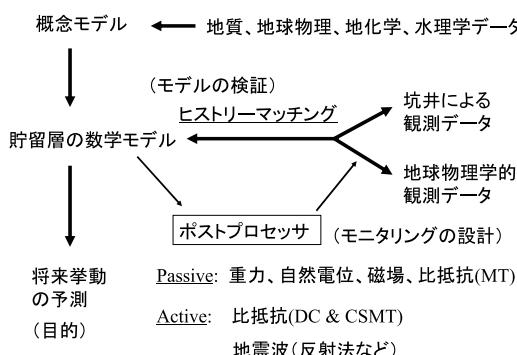


図4 貯留層シミュレーションの結果から地球物理学的観測量の変動を計算するための各種ポストプロセッサ。

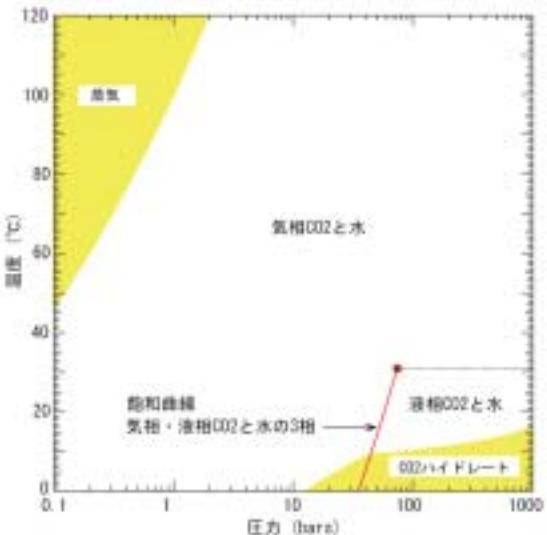


図1 帯水層条件下での $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 系の相図。

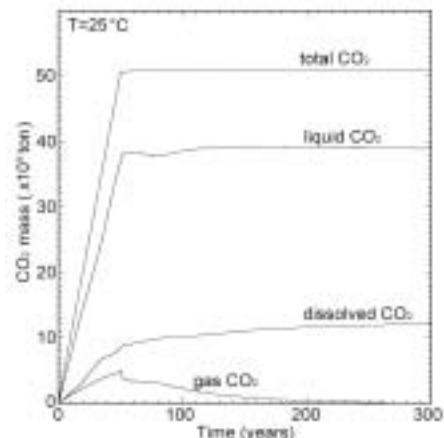


図3 図2のシミュレーションにおける液相・気相 CO_2 量および水に溶解した CO_2 量の時間変化。

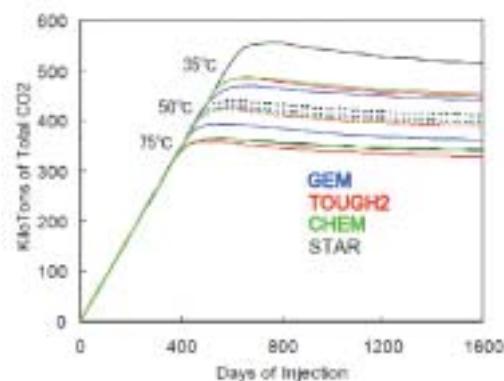


図5 CO_2 帯水層貯留に係わる数値シミュレータの相互比較。人工的に細部まで定義された例題についての GEM-GHG, TOUGH2/ECO2N, ChemTOUGH, STAR/CO2SQS による計算結果。

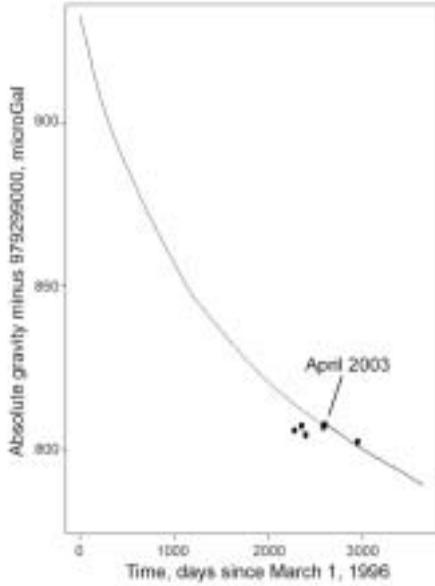


図6 大霧地域での重力変動データによるヒストリーマッチング。測定値は絶対重力計による。2003年4月の定期修繕時の微小な変化は相対重力計を合わせたハイブリッド測定により面的な変動分布も捉えている。

3) 「地圏における物質の循環・集積メカニズムの解明と評価に関する研究」

内部グラント予算による「地球電磁気学的手法による良質な粘土鉱床探査および評価技術の研究」では、H16-17年度の2年間、愛知県北設楽郡東栄町振草地区にあるセリサイト鉱山をモデルフィールドとして、いくつかの電気・電磁探査法の実証実験を実施した。H17年度は、セリサイト鉱脈の存在が予想される坑道において、比抵抗法およびIP法調査を実施したが、その後の掘削調査の結果との比較から、充電率の値を比抵抗の値で割った正規化充電率がセリサイト帯の検出に有効であることを示した。その結果を国内外の学会で発表するとともに国内誌に投稿（受理済み）した。また、非分極性電極を岩盤へ設置する方法を考案し、それを用いた電気・電磁探査の方法について特許出願をした。

新しい地質調査法については、この他に釜石鉱山における基礎実験を実施した。平成17年12月の3日間、釜石鉱山のKF-1坑を利用して圧力遷移試験を実施し、新たに設計・作成した坑内自然電位(SP)測定装置を用いて連続観測を行った。その結果、流量変化に伴う坑内SP変化の検出に成功し、Ishido and Pritchett (2003)が示した亀裂岩体の水理パラメータ把握における坑内SP連続測定の有効性を確認した。測定結果については国内外の学会で発表するとともに、国内誌に投稿した。

火山体のSP発生メカニズムに関する数値シミュレーションについては、EGU2006での招待講演や、ホワイト島の観測データについての国内誌公表を行った。また、2000年有珠火山噴火後に生じた西

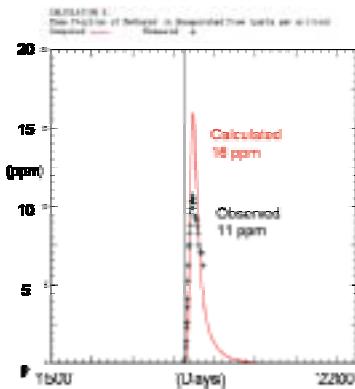


図7 上の岱地域、坑井E-2の気相トレーサ再湧出曲線のマッチング例。

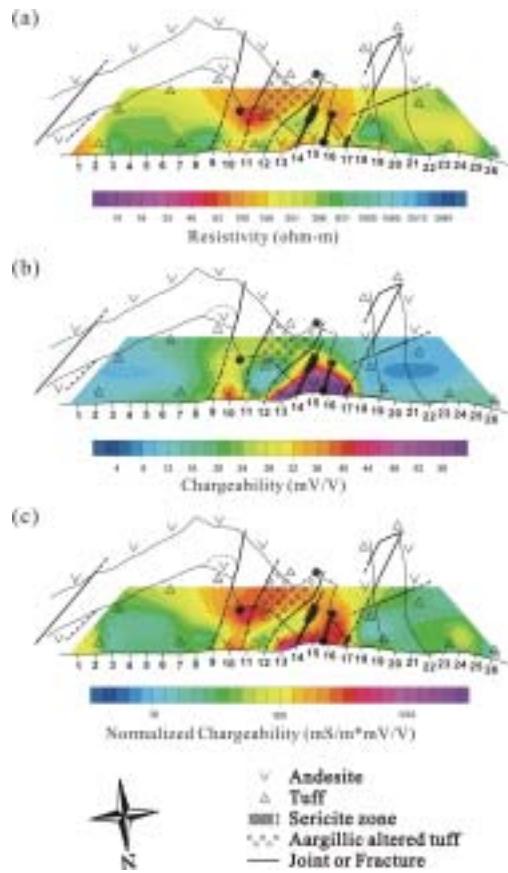


図8 セリサイト鉱山をモデルフィールドとした電気・電磁探査法の実証実験。坑道掘削によって確認された地質および粘土分布と(a)比抵抗断面、(b)充電率断面、(c)正規化充電率断面との比較。

山地熱地域において実施した電気探査・地温の繰り返し測定の結果をまとめ、国際誌へ投稿した。

「火山性流体移動連続観測による噴火予知技術の高度化に関する研究」では、マグマ活動RGと連携して、伊豆大島三原山を対象に連続SP観測や繰り返し電磁探査によるモニタリングを開始した。

「貯留層変動探査法開発」で開発したSPモニタリング・システムを三原山カルデラ内に設置して測

定を開始するとともに、AMT法調査により三原山周囲の詳細な比抵抗構造を把握した。

基盤研究としては、流体を含む岩石の複素比抵抗、ゼータ電位等についての室内実験を継続した。高温下でのゼータ電位測定については、測定装置や手順の改良を行い、より高精度のデータ取得に成功し、国内学会にて報告した。

弾性波シミュレーションについては、フラクチャーなどの強いコントラストがある場合でも安定して計算できる新しい差分法シミュレータを開発し、手法の評価を進めた。

4)「堆積岩地域のベースライン調査に関する研究」

深部地質環境RCへの研究分担として、物理探査モニタリングについて研究開発を進めた。H17年度は北関東調査サイト周辺で比抵抗、自然電位調査を実施するとともに、重力、微小地震等のモニタリングについて準備を進めた。また、概要調査のガイドラインに係わる技術資料作成に資するため、関連技術についてのレビューを行い、原稿執筆を分担した。H16年度に実施した会津盆地西縁断層群のMT法電磁探査の結果については国内外の学会で発表した。



図10 釜石鉱山内における坑内自然電位(SP)測定の様子。写真中央のバルブ開閉により、KF-1坑の湧水流量と坑内の圧力を変化させ、それに伴う坑内のSP変化を測定した。

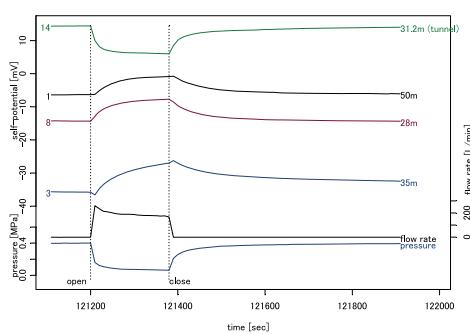


図11 釜石鉱山内での坑内SP測定、基本サイクルのデータ例。横軸は時間(秒)で、下から、坑口圧力、湧水の流量、坑内3カ所及び坑道壁面のSP。波線で示したバルブ開閉に伴い、坑内圧力とSPが変化する。

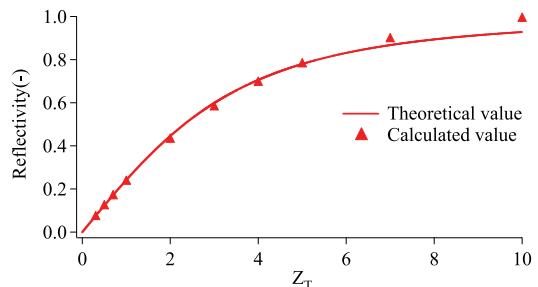


図9 水平フラクチャーに鉛直入射したSH波の反射係数。▲はrotated staggered finite-difference gridの結果。

4. 平成18年度の研究計画

「二酸化炭素帯水層貯留に関わるモデリングおよびモニタリング技術の開発」では、引き続き、地下深部の帶水層に圧入されたCO₂の挙動を把握するための地球物理モニタリング技術、ならびにCO₂の挙動を予測するためのモデリング技術について研究開発を進める。モニタリング技術については、これまでに取得したデータの再解析とともに、夕張、松代などの野外調査を分担する。モデリング技術については、H18-20年度の間、重点化予算及び電源開発との共同研究費により、CO₂および塩水からなる多成分多相流体の挙動をより高精度に扱うための数値シミュレーション手法について研究を進める。また、沿岸域帶水層におけるCO₂の各種トラッピングメカニズムについて感度解析等により定量的検討を進める。

「地熱貯留層管理技術の開発」では、民間企業との共同研究として大霧、上の岱地域での微小地震観測、澄川地域での自然電位観測等を継続するとともに、大霧、奥会津、上の岱地域について各種モニタリングデータを統合した貯留層モデルの改良を進める。また、ソフトウェアユーザ会の運営など貯留層管理技術の普及を図るとともに、DOE予算によるEGSプロジェクトに参加する。

「地圈における物質の循環・集積メカニズムの解明と評価に関する研究」では、自然電位・比抵抗観測等から流体循環系のモデルを構築・検証する方法について検討を行う。また、電気及び電磁気観測の結果を数値モデルに反映させるため、流体を含む岩石の電気物性測定に関する室内試験を継続する。釜石鉱山の既存坑井を利用した観測では、流動変化に伴う電位の変化を観測井でも行い、亀裂岩盤の水理特性を推定する新たな手法としてその成果を発信する。また、マグマ活動RGとの連携により、伊豆大島での連続SP観測などを継続する。

「堆積岩地域のベースライン調査に関する研究」では、北関東調査サイトにおいて、揚水試験時に比抵抗、地中レーダー、自然電位、重力、微小地震等のモニタリングを実施し、その成果を報告書等にまとめることとする。



有機地化学研究グループの紹介

Introduction of the Organic Geochemistry Research Group

有機地化学研究グループ長：坂田 将
Leader, Organic Geochemistry 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

地圏におけるメタン等炭化水素の生成、集積、分解プロセスに関する生物・有機地化学的解析を通じて、地球システムにおける物質循環に関する基盤的情報を提供するとともに、燃料資源の開発、地球環境保全に資する研究を行う。燃料資源地質研究グループと共同して、当研究部門の重点課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」を取り組み、各種天然ガス資源の成因の地化学的解析を目指す。

2. グループの研究資源

1) グループ員

坂田 将 (リーダー)
猪狩俊一郎
金子 信行
古宮 正利
鈴木祐一郎
前川 竜男
吉岡 秀佳
小田 浩 燃料資源地質研究グループより分担

2) 予算

運営費交付金

「有機地化学の研究（地質）」
「有機地化学の研究（エネルギー）」
「地圏・海洋における微生物のメタン生成・消費プロセスの解明」

委託費

「大水深基礎調査（資源ポテンシャル）に係る共同研究」(JOGMEC)

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質量分析計
- ガスクロマトグラフ燃焼同位体質量分析計

- 元素分析装置
- イオンクロマトグラフ
- 高速液体クロマトグラフ
- ビトリナイト反射率測定装置（石炭顕微鏡）

3. グループの特色

有機・生物地化学、石油地質学、石炭岩石学の専門家集団であり、ガスハイドレート等天然ガスの成因や資源としての可能性の検討を行う。資源としての微生物起源メタンの地球化学的、鉱床学的研究を行っている点を特徴とし、産総研バイオ分野と連携して、地下微生物のメタン生成・消費プロセスを解析する技術の開発・高度化を行う。

4. 18年度前期までの研究進捗状況

1) ガスハイドレートの地化学的成因評価

培養実験と地化学分析をもとにガスハイドレート (GH) 分布域の地下微生物のメタン生成活動を把握するとともに、GH生成実験と統計熱力学的解析をもとに相平衡条件を評価することにより、海洋GHの成因解明・資源量評価に貢献する。

平成15年度基礎試錐「東海沖-熊野灘」堆積物中の非修飾極性ヒドロキシアーキオール(生息中のメタン生成菌に特徴的な脂質成分)を測定した結果、深度を問わずほとんどの試料(最深381m)からこの物質を検出した。ヒドロキシアーキオールはこれまでメタン冷湧水地点の表層堆積物から検出されているものの、深部堆積物から検出された例はない。データ解析の結果、堆積物中のメタン生成菌の分布が深度よりも有機物の総量に強く支配されることが判明し、ガスハイドレートのメタン生成の場が浅部堆積物に限定されないことが明らかになった。

カスカディア・マージンの航海 (IODP Exp. 311) に参加し、ガスハイドレートの形成段階が異なる5サイトにおいて、148ポイントの堆積物試料を採取した。約60試料について長期培養を行い、

約30試料から高いメタン生成活性が検出された。活性が高い試料についてラジオトレーサー法によるメタン生成速度・経路の評価を開始した。

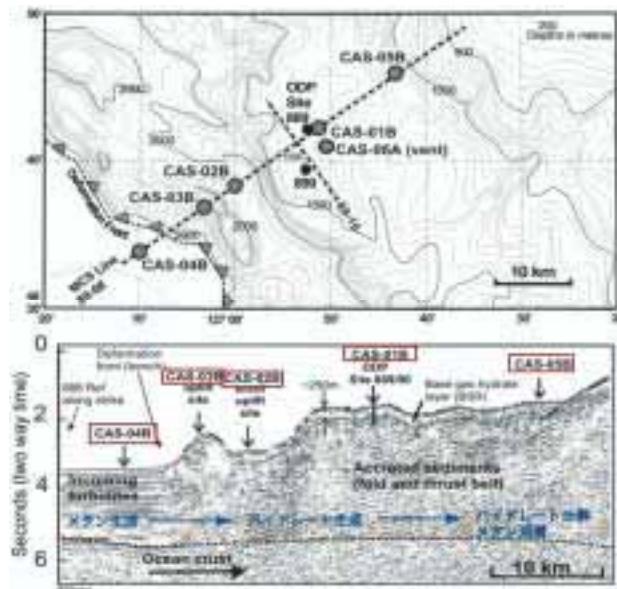


図1 IODP Exp.311 の掘削地点。付加体の発達（ハイドレート形成）段階が異なる5サイトより、148 ポイントの堆積物試料を採取。多くの試料から高いメタン生成活性を検出。

2) 大水深海域の非生物起源炭化水素ポテンシャル評価

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

- ・ 非生物起源炭化水素の研究動向調査の結果、火成岩と水の反応、特に橄欖岩の蛇紋岩化が生成プロセスとしてもっとも期待されることが分かった。
- ・ 分析法に関しては、岩石中のガス（鉱物中の液体包有物など）を抽出する際、ヘリウム気流中で岩石を加熱状態でプレス破碎して、オンラインでガスクロマトグラフに導入する方法が最適と判断された。

3) 在来型天然ガス資源の地化学的成因評価

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

- ・ 茂原・新潟の水溶性天然ガス田における堆積物（鹹水沈殿物、コア）+鹹水の長期培養を行い、

多量のメタンが生成されるとともに、堆積有機物量が減少することを発見した。生成するメタンの炭素と水素の安定同位体比を測定した結果、実際の天然ガスの値と大きく異なるデータが得られた。

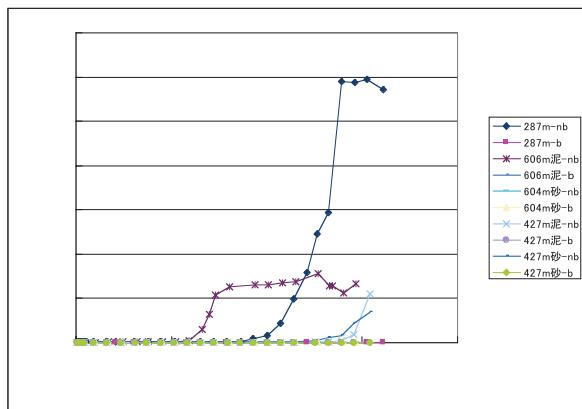


図2 水溶性ガス田（茂原）深部コア試料 + 鹹水の長期培養に伴うメタン生成。b はメタン生成活性の特異的阻害剤 (BES) を添加、nb は無添加。

- ・ 中川低地沖積層の柱状堆積物試料を長期間培養することによりメタン生成活性を評価した。
- ・ 秋田・新潟油ガス田の天然ガスのペンタン、ヘキサン異性体組成の支配因子に関する論文(投稿中) の改訂を進めた。

4) 油田微生物の天然ガス生成ポテンシャル評価

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

- ・ 天然ガス再生が期待される八橋油田、南阿賀油田から、原油、油層水、天然ガスを採取した。石油の微生物分解の痕跡を検出する目的で、現在炭化水素成分組成を分析中。
- ・ 八橋油田の油層水+原油の長期培養実験を開始した。

5) 石炭起源天然ガス資源の地化学的成因評価

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

- ・九州地区および白亜紀石炭のバイオマーカーを分析した（現在解析中）。
- ・赤平炭田CBMのメタン同位体分析とガス組成を分析した結果、同ガスが深部熱分解起源である可能性が認められた。また夕張炭田のCBM中のCO₂炭素同位体比が特徴的に高く、今後の同層にCO₂が注入された際のモニタリングの指標として有効であることを明らかにした。

6) 地圏・海洋における微生物のメタン生成・消費プロセスの解明

地化学分析、培養実験により堆積物中のメタン生成・消費微生物の活動を評価する技術を開発する。

- ・生息メタン生成菌に特徴的な非修飾極性ヒドロキシアーキオールを、定量的にモノフィタニルグリセロールエーテルに変換しガスクロマトグラフで分析する方法を確立した（Organic Geochemistry誌に掲載予定）。

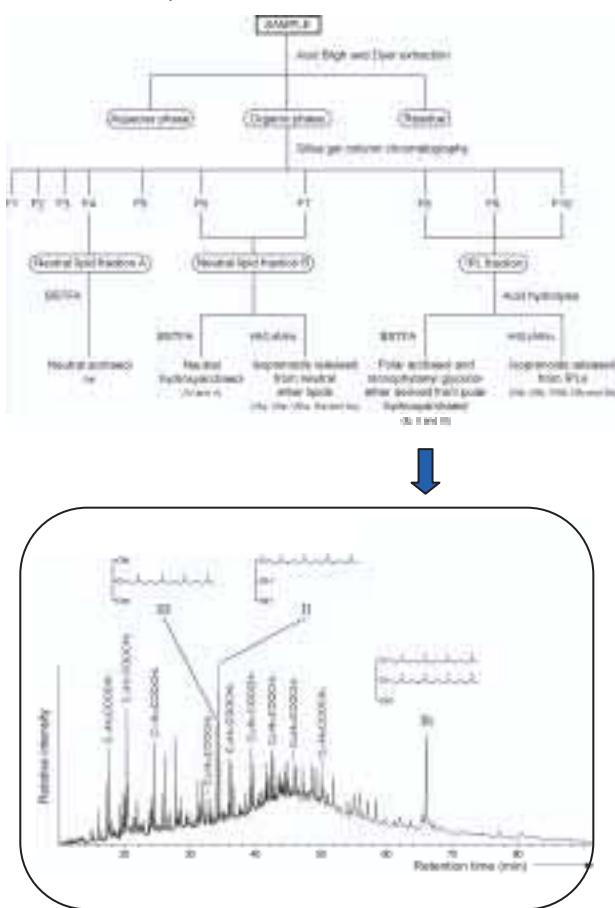


図3 非修飾極性ヒドロキシアーキオールをガスクロマトグラフで分析する方法。

- ・放医研の協力のもと、炭素-14でラベル化した基質を添加する培養実験（ラジオトレーサー法）によって堆積物のメタン生成速度を経路ごとに

高感度で評価する技術を導入し、測定することを可能にした。

- ・微生物のメタン生成に伴う水素の同位体分別（メタンと水の水素同位体比の相違）が水素濃度に依存する可能性を検討した論文（投稿中）の改訂を進めた。

7) 燃料資源情報の収集・燃料資源図の作成

筑豊炭田図の編纂作業を完了し、出版する。新たに北海道石炭起源天然ガス賦存図の編集を開始する。可燃性天然ガスに関する地化学データベースのデータを収集・補充する。炭田調査関係資料の電子化、データベース化を進める。

・釧路地域のおおよその炭質分布について既存資料を解析し、大概の様子を明らかになってきている。筑豊炭田図は炭層の分布および対比を編集中、既存文書を編纂を電子化し編纂中。

8) CO₂挙動の地化学的モニタリング技術の開発

夕張炭田をテストフィールドとして、炭層に圧入したCO₂の挙動を地化学的にモニタリングする技術を開発する。

- ・土壤ガス、観測井からのCBMのガス組成、炭素同位体分析をおこなってきた。
- ・土壤ガスについては組成解析からCO₂濃度の上昇是有機物分解起源であることが明らかにされ、注入CO₂の漏洩は無いと判断できた。
- ・CBMに関しては注入CO₂はまだ到達していないことが炭素同位体解析から明確にできている。
- ・注入性改善のために注入したN₂が到達している可能性があり、解析手法について検討中。

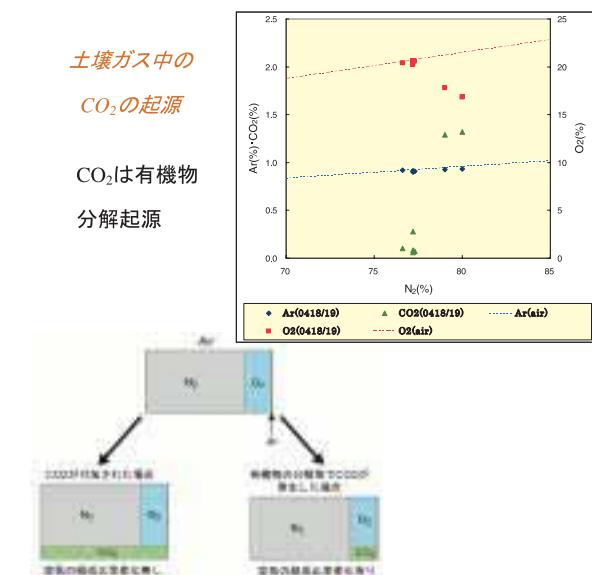


図4 夕張炭田テストフィールドの土壤ガスの分析結果。

9) 有機地化学の基礎的研究

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

- ・新潟・群馬・茨城の空気を採取し、含まれる炭化水素の解析を行った。その経年変化について解析を行った結果、急激に都市化が進む茨城県南部地域において、非メタン炭化水素濃度が増加している可能性があることが示された。
- ・地質ホパンの炭素同位体比の分布を理解するための基礎として、主要な起源生物とみなされるアンモニア酸化細菌の炭素同位体分別の特徴を解析し、論文にまとめた。
- ・亜熱帯地域において隣接するマングローブ林、海草藻場、サンゴ礁生態系の相互依存の関係を検証にするため、石垣島（吹通川周辺）における各生態系の一次生産者と堆積物の脂質組成等の測定、解析を進めた。

5. 主な論文成果

- 1) Maekawa, T., Phase equilibria for hydrate formation from binary mixtures of ethane, propane and noble gases. *Fluid Phase Equilibria*, 243-1, p.115-120. (2006).
- 2) Maekawa, T., Igari, S., Kaneko, N., Chemical and isotopic compositions of brines from dissolved-in-water type natural gas fields in Chiba, Japan. *Geochemical Journal* (in press).
- 3) Oba, M., Sakata, S., Tsunogai, U., Polar and neutral isopranyl glycerol ether lipids as biomarkers of archaea in near-surface sediments from the Nankai Trough. *Organic Geochemistry* (in press).



燃料資源地質研究グループの紹介 Introduction of the Fuel Resource Geology Group

燃料資源地質研究グループ長：松林 修
Leader, Fuel Resource Geology Research Group: Osamu MATSUBAYASHI
Phone: 029-861-3998, e-mail: matsubayashi-osamu@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・資源評価技術の高度化、およびガスハイドレート等未利用燃料資源の資源化をめざして、それら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、当部門の有機地化学研究グループとの協力のもとに重点研究課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」を実施する。

2. グループの研究資源

a. グループ員とその専門分野

(常勤研究者)

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

(他グループ所属の協力者)

横田俊之	[物理探査 RG]	反射法地震探査
渡辺真人	[地質調査情報セ]	堆積地質
池原 研	[地質情報研究部門]	海洋地質
七山 太	[地質情報研究部門]	堆積地質

b. 研究資金（平成 18 年度）

- ・運営交付金「燃料資源地質の研究」（地質）及び同（エネルギー）
- ・受託研究（JOGMEC）「新しい MH 濃集・賦存モデルを考慮した地化学調査の有効性再検討」
- ・受託研究（経産省）「平成 18 年度京都メカニズム関連技術普及等事業」

3. 研究の進捗状況

1) 石炭起源天然ガス資源の鉱床成因、形成機構、および資源ポテンシャル評価技術に関する地質学的研究

・ジャパンエナジー石油開発（株）との共同研究の一環として北海道の夕張層を貫く掘削坑での地下地質データおよび石炭層の情報を解析し

て、三陸沖から北海道中軸部にかけての地域についての資源ポテンシャルの検討を行った。

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

・南海トラフ海域におけるメタンハイドレート鉱床成因解明を大きな目標として、地化学探査法適用の研究および地質的な場の解析を進めてきた。また熊野海盆における地震探査記録と潜水調査船による地質調査・熱流量探査などを併用した検討により、ハイドレート鉱床生成の物理過程の理解を深めることができた。

・直江津沖メタンハイドレート域の海洋地質調査航海に参加して上越海盆域でのコアリングを実施し、地震探査での BSR 分布域での海底表層堆積物試料を採取した。JOGMEC による地震探査の結果と合わせて検討した。同海域で得られた堆積物の地質解析を現在も進めており 2006 年日本地質学会などでその成果を口頭発表した。

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

・日韓国際協力により、韓国東海岸の第三紀堆積盆（ポハン堆積盆）の現地調査を行い年代測定の結果を含めて同地域の石油システムを総合評価する研究を行って、報告書にまとめた。

・背弧海盆や前弧海盆に見られるタービダイト砂岩の分布様式・堆積環境・堆積機構を明らかにする研究を行った。特に房総半島のタービダイトから古流向を復元し論文にまとめた。

4) 燃料資源地質図の編集

- ・「燃料資源地質図南海トラフ」の編集に向け、対象地域の熱流量データほかを収集・解析した。
- ・房総半島の水溶性ガス田の地質・資源の情報を総括する資源地質図を作成する可能性を現地調査も行って検討したが、既存のデータだけでは十分でないため作成計画は一時中断された。
- ・「北海道石炭起源天然ガス賦存図」を編集する方針を立て、釧路地域に関して文献調査を行つて既存資料に含まれるデータの概要を把握した。

5) 燃料資源地質の基礎的研究

燃料資源全般に関する生成機構・探査法・資源評価法などについての基礎的ないし萌芽的な研究を行っている。根源岩評価法、資源評価技術、海洋地質調査法、地質構造発達史、堆積構造解析、地球環境論、等々広範な課題について地球科学的考察を行い、その結果を学会誌、出版物や口頭発表などの形で公表してきた。

- ・富山沖の深海底に見出された洪水堆積物についての研究結果が国際誌に発表された。また、同海域も海底試料から求められた中部日本の過去7万年の気候変動についての論文を投稿した。
- ・深層掘削コア試料の各種物性値の相互関係について他機関と共同で非破壊測定およびデータ解析をする研究を行い、その結果が共著論文として国際誌に発表された。
- ・IODPの北米大陸西方沖での掘削航海で得られた海底未固結堆積物について熱物性の特徴について論文を作成中。



図1 富山沖深海底にて洪水堆積物が確認された海域を示すマップ (Nakajima, 2006)

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

- ・東南アジア地域について収集した堆積盆の地質情報に基づいて最新の石油システムシミュレーションソフトを用いた堆積盆解析を実施して、CO₂地中貯留ポテンシャル評価の基礎にするための事例研究を行った。

4. 今後の研究計画と期待される主な成果

今後とも地球科学的な広い視野に立って、ガスハイドレート資源・石炭起源天然ガス・在来型天然ガスの鉱床成因と形成機構および資源ポテンシャル評価に関わる研究を重点研究課題「低環境負荷天然ガス資源の評価・開発技術」として継続する。

現在特に当グループでは堆積盆解析や水理地質現象等のモデル解析を行うための最新ソフトウェアの導入とシステム整備を進めてきており、それらを用いて行った数値モデリング研究の成果が南海トラフ燃料資源地質図に反映されるような方針で作業に取り組んでいる。

5. 研究グループ員による論文発表など

平成17年度公表の論文：

- 徳橋秀一：千葉県清和郡民の森周辺に分布する安房層群清澄層最下部ユニットのタービダイト砂岩古流向の追加測定とその意義、堆積学研究, 62, 3-16 (2005).
- Nakajima, T. : Hyperpycnes deposited 700 km away from river mouths in the central Japan Sea, Jour. Sedimentary Res., 76, 60-73 (2006).

○石原与四郎, 徳橋秀一：房総半島安房層群最上部安野層の堆積様式－前弧堆積盆を埋積するタービダイト・システムの一例－, 地質学雑誌, 111, 269-285 (2005).

○小松原純子, 鵜飼宏明, 檜原徹, 岩野英樹, 吉岡哲, 中嶋健, 鹿野和彦, 小笠原憲四郎：九州北西部, 下部－中部中新統野島層群のフィッショングラウト年代と沈降速度, 地質学雑誌, 111-6, 350-360 (2005).

平成18年度公表の論文(但し8月まで)：

- 徳橋秀一：浅海域で形成された洪水起源砂岩とストーム起源砂岩は識別可能か？：新潟堆積盆東山南部に分布する鮮新統川口層中の陸棚タービダイト砂岩の再検討から、「徳永重元博士論集」, 印刷中 (H18年秋に出版予定)

○ Hiroto, Lin, Yeh, Soh, Hashimoto, Sone, Matsubayashi, Aoike, Ito, Kinoshita, Murayama, Song, Ma, Hung, Wang, Tsai : High magnetic susceptibility of fault gouge within Taiwan Chelungpu fault: Nondestructive continuous measurements of physical and chemical properties in fault rocks recovered from Hole B, TCDP., G.R.L., 33, L15303, doi:10.1029/2006GL (2006).

受賞：

- 石原・徳橋(2005)に対して日本地質学会2006年度論文賞を受賞。



地熱資源研究グループの紹介 Introduction of the Geothermal Resources Research Group

地熱資源研究グループ長： 村岡洋文
Leader, Geothermal Resources Research Group: Hiroyumi Muraoka
Phone: 029-861-2403, e-mail: hiro-muraoka@aist.go.jp

1. グループの研究目的

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

2. グループの研究資源

1) グループ員

常勤研究員：村岡洋文、阪口圭一、佐々木宗建、佐脇貴幸、茂野 博、玉生志郎、水垣桂子
併任・客員研究員：中尾信典、大谷具幸ほか5名

2) 予算

- ・運営費交付金「中小地熱資源の研究」
- ・運営費交付金「地熱資源の研究」
- ・NUMO「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」

3. 平成17年度の研究計画

本研究グループは、地熱開発促進に向けて、国内の中核的研究グループとして、資源エネルギー庁、新エネルギー・産業技術総合開発機構、地熱産業界、地方自治体、日本地熱学会等、外部への積極的な働き掛けや貢献を行うとともに、アジアを中心とする海外との積極的な研究協力をを行う。第2期中期計画における主要研究課題は、大きく「中小地熱資源の研究（1号業務）」と「地熱資源の研究（2号業務）」からなる。「中小地熱資源の研究」は国の地熱事業であるNEDO地熱開発促進調査（中小地熱）を側面支援することを目的とし、地熱資源を有効利用するため、環境負荷の少ない中小地熱資源の開発に関する技術指針を産業界に提供することを目指している。これは、1) 中小地熱資源賦存地域の研究、2) 地熱有望度指標の研究の2つの柱からなる。「地熱資源の研究」は中長期的視点から地熱資源利用拡大のための基盤的研究を目的とし、地熱資源情報をGIS上で統合することにより、地熱情報データベースを作成し、地熱資源ポテンシャル評価に関する情報を社会に提供することを目指している。これは、1) GISを利用した地熱統合評価の研究、2) 地熱シーズ・基盤研究の2つの柱からなる。なお、17年度は第2期中

期計画のスタートの年であるが、両研究課題を合わせて、論文投稿7編、誌上発表7編、口頭発表14編を目標とする。また、平成14年度からスタートした「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」は、地熱知識ベースに関する重要な応用研究であり、グループの研究として位置づける。本研究課題については、中間まとめの年度であり、誌上発表4編、口頭発表4編を目標とする。さらに、本研究グループは国内の地熱資源研究の中核的グループであることから、グループのWebサイトの充実をグループの研究活動として位置づけることとし、今年度内にグループWebサイトを充実させることを目標とする。

1) a 中小地熱資源賦存地域の研究：地熱開発促進調査地域を中心に、中小地熱資源開発候補地の地熱地質と地化学に関する調査を行い、その熱源、貯留構造、地熱流体、熱史等を解析するとともに、その地熱ポテンシャルを評価し、最適開発方法等を明らかにする。1) b 地熱有望度指標の研究：環境負荷の少ない中小地熱資源の開発に関する技術指針作成の基盤データとして全国の温泉化学分析値等を収集し、地熱版『風況マップ』作成のための地熱有望度指標とその表示方法を検討する。今年度内に、地熱版『風況マップ』のプロトタイプをほぼ完成させることを目指す。2) a GISを利用した地熱統合評価の研究：電子地理情報と地理情報システム(GIS)にもとづく統合的・発展的なDB化・解析・評価手法をシステム化し、日本の各種地熱資源の多面的・定量的な評価を進める。その一環として、大分地域の事例研究成果を電子公開する。2) b 地熱シーズ・基盤研究：これまでに蓄積された地熱知識ベースをスピナーアウトさせて、新しい分野を開拓するための地下水熱環境研究、地下空間利用研究、地圈環境研究等へのシーズ研究を展開するなど、研究者の自由裁量による萌芽的研究を行うとともに、海外との地熱研究協力を推進する。3) 热・熱水の影響評価手法に関する検討(受託研究)：放射性廃棄物の地層処分のための基礎的な文献調査として、高温地域の地球科学的特性と成因の把握およびそれらの将来を含む影響の評価を行うための調査・解析・評価手法について、データ収集と解析を行うとともに、これまでの研究成果をまとめる。

4. 平成 17 年度の研究成果

1) a 阿蘇カルデラのコア解析と、比較のための鬼首カルデラのコアの簡易解析を実施し、両者のカルデラ形成時堆積物の層序に共通性を見出した。また、鬼首カルデラの陥没構造内に、従来の研究では存在しないとされていたカルデラ形成時の火碎流堆積物が分布する可能性があることを見いだした(図 1)。秋田県湯沢地域において、小規模地熱変質帯の現地調査および変質年代・古地温測定用の試料採取を実施した(図 2)。鹿児島県菱刈鉱床の断裂発達史を確率論的に研究するとともに(図 3)，全国の温泉水の直接利用性の向上を目指し、温泉場における微量成分元素の挙動を文献調査した。さらに、北海道地方の地熱開発促進調査(15 地域)の坑井調査変質データを今後電子化整備する目的で、NEDO 報告書などにより調査地域、坑井位置・仕様、坑内温度などのデータを予察的に検討・整理した。

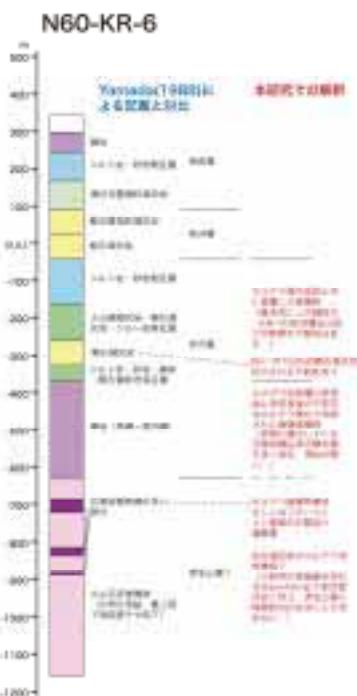


図 1 鬼首カルデラ内で掘削された KR-6 井の新しい地質解釈。



図 2 湯沢地域の小規模変質帯(赤破線)。

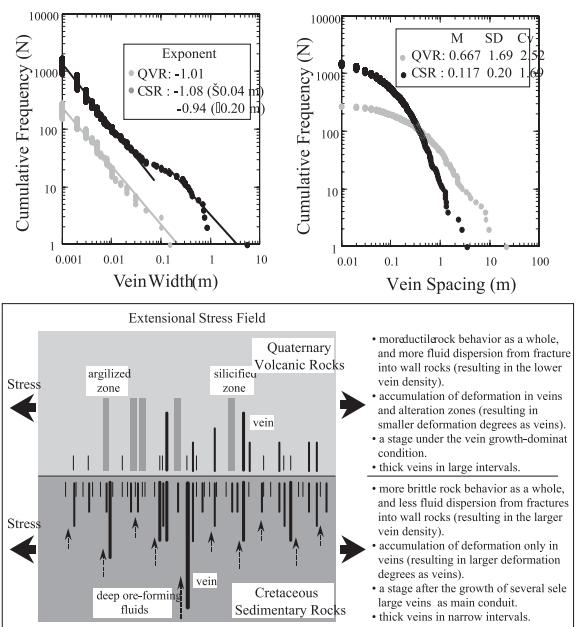


図 3 鹿児島県菱刈鉱床の断裂発達史(QVR が第四紀火山岩類層、CSR が白亜紀堆積岩類層)。確率論的な断裂の発生→競争成長→少数大規模化の数値モデルで概略説明できる(Sasaki, 2006)。

1) b 50 万分の 1 「東京」 図幅地域を対象に、昨年度収集した温泉等のデータ約 4000 件を、簡易データベースにまとめ、その約 30%についてデータの品質・地域による粗密などをチェックした。集積された温泉データの有効活用法を検討するため、データを用いて酸性温泉変質帯の形成過程を数値モデル解析し、実際の変質分帯と対比し、概略の一一致をみた。これらのデータを含めて、全国の温泉データ未収集地域から、温泉化学分析値を系統的に収集し、地熱資源図によって出版済みの約 2500 個のデータと合わせて、総計 7452 件の温泉化学分析データを収集した(図 4)。また、既存



図 4 温泉化学分析値を収集した 7452 個の泉温別温泉分布。

文献の調査により、全国から坑井地温データを3066件収集した。地熱版『風況マップ』の作成に向けて、これら全てのデータを、データベースとしてまとめた。さらに、地熱有望度指標作成のための基礎研究として、温泉の湧出モデルを利用した浸透率マッピング法を研究開発し、地熱有望度指標の重要な構成要素である、ほぼ全国の1kmスキン深度の浸透率分布図を作成し(図5)、その結果を国際誌に投稿した。

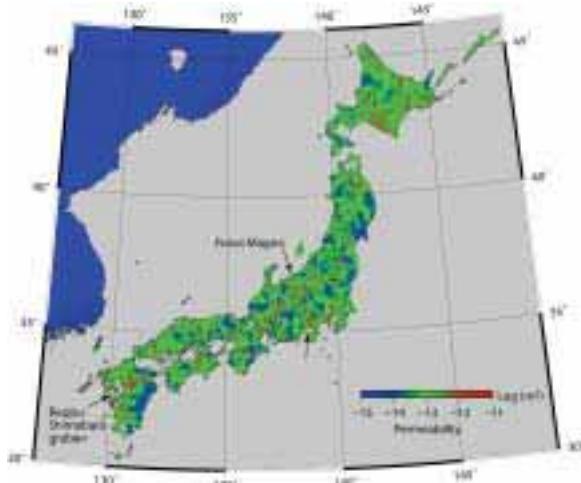


図5 温泉の湧出温度と湧出量の相関関係を用い、移流モデルにもとづいて作成した1kmスキン深度浸透率分布図(Muraoka et al., 2006).

2) a 第2期の「GISを利用した地熱統合評価の研究」の基礎・方向付けとして、九州地方の地球科学アトラスを自作し、電子地球科学情報の簡易的な統合利用に向けた事例研究を取りまとめて誌上公表した(図6)。この成果と第1期の「未利用地熱資源の資源量評価の研究/GISを利用した評価法の検討」による大分地域・豊肥地域の各種事例研究の成果を、合わせてCD-ROM公表するために各種データ整理、原稿編集・作成を進めた。

2) b これまでに測定してきた花崗岩中の流体包有物のデータを論文投稿のために再度取りまとめるとともに、堆積岩中の流体包有物の特徴について、既存の研究の総括を行った。下北等、小型カルデラ候補地の現地調査を継続し、層序が砂子原カルデラと酷似することを明らかにした。また、テフラのESR年代の検出限界がTD値で20~30Gyであるとの解析結果を得た。総延長26.6kmの地熱コア倉庫保管コアの画像デジタル・イメージを取得して、画像データベースを構築した。現時点で8割方完成し、インターネットを通じて一般公開している(図7)。日本の2つの非火山性沸騰泉の1つである和歌山県本宮温泉地域を調査し、これらが究極的には石英斑岩脈を貯留槽としていることを明らかにした。とくに川湯温泉は西北西-東南東に10km連続する石英斑岩脈の最低標高点から湧出しており、その湧出位置に必然性があ

ることを明らかにした。ヤンバージン地熱地域を始めとするチベット高原南部の地熱地域に関して現地調査を行い、何故、若い火山が欠如しているかを含めて、その広域テクトニクスの

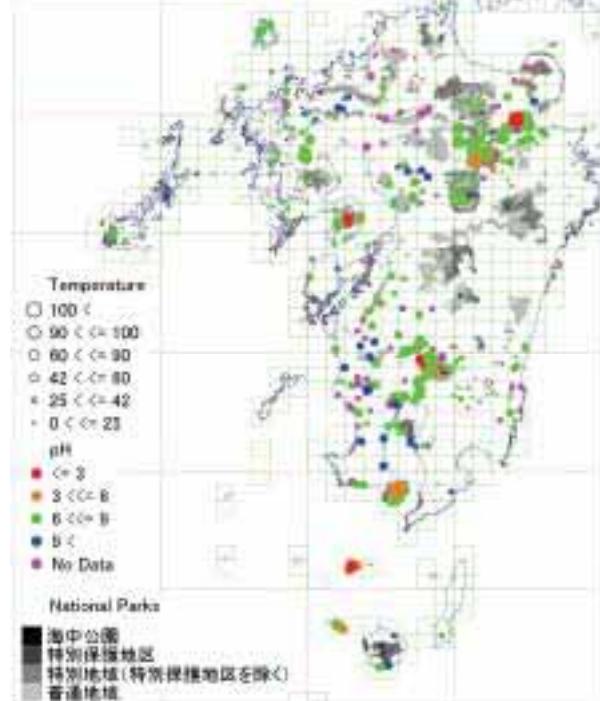


図6 「九州地方の地球科学アトラス」の一環として作成した温泉(泉温・pH)と自然公園の重合分布図(茂野, 2005).



図7 地熱コア倉庫保管ボーリング・コア画像データベースのweb公開。

特徴を明らかにした。さらに、中国青島市において、2006年7月に開催予定の第7回アジア地熱シンポジウムの開催準備を行った。

3) 熱・热水の影響評価手法に関する検討では、本研究では、わが国における高温地域の地球科学的特性と成因を把握し、放射性廃棄物地層処分地の概要調査地区選定およびそれ以降の調査段階に

における熱・热水の影響評価を行うため、以下の検討を実施した。

(1) 高温地域の地球科学的特性の検討

以下に示す文献調査およびデータの収集・整理を行った(図8)。

① 地球科学的特性に関する情報収集および2次元・3次元可視化

補完調査として東北地方北部(青森県)で東西方向1測線を設定し、既存の地表地質調査と地球物理探査データ及び坑井温度データなどを収集するとともに、熱異常の原因となる熱源分布、地下温度構造、深部断裂および热水対流の分布・形状等を把握するために必要なデータの可視化を行った。

② 紀伊半島の高温温泉の特性検討

中国・四国・近畿の広域テクトニクスおよび紀伊半島高温温泉群の局地的特性の観点から、紀伊半島の高温温泉群の成因についての考察を行った。

③ 高温地区を含む広域地域のタイプ分けの再検討

①における補完調査と②におけるシミュレーション結果を参考にして、東北地方のタイプ分けとモデル図の見直しを行った。

④ 高温地域の成因の検討

高温地域の成因を検討するために、以下の広域流動シミュレーションによる成因の検討を実施した。

昨年度に実施した北上低地を含む東北地方の東西120kmにわたる地形を取り込んだ2次元断面について、地質データ等を参考にしてモデルを作成し、地熱用の多成分多相流体流動シミュレータを用いた広域流動シミュレーションによる感度解析を実施した。

⑤ 調査・解析・評価手法の検討

熱・热水の影響評価における最適な調査・解析・評価手法を確認するために、以下に示す検討を行った。また、各手法における2003~2005年度の研究の成果と課題を取りまとめた。

⑥ 温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討

温泉放熱量分布計算における温泉産状や温泉ボーリング深度情報と放熱量値の関連等について検討した。

⑦ 岩石変質データベース構築に関する検討およびデータベース化

昨年度までにデータベース化を行った地域のうち、相対的に低温である4地域について、坑井岩石変質データと他種類データとの重合表示の試行、およびこれに基づいた変質分布を規制する要因などについての考察を行った。

⑧ 電磁探査による深部構造解析手法

東北地方の火山フロント外帯(阿武隈および宮城県北部)において取得されたデータについて再解析を行い、深部の比抵抗構造について検討を行った。

⑨ 震源データを用いた深部構造解析手法

自然地震および人工震源を含む、弾性波を用いた地下構造(特に熱構造)を推定する手法を、弾性波速度探査と弾性波減衰解析に分けて、文献調査の結果をまとめた。

⑩ 放射年代測定法を用いた地熱系の長期変動解析手法

低温析出鉱物におけるESR年代測定の研究事例を収集・解析した。また、ESR年代測定における温度一時間条件評価の検討および実験を行い、今後の課題を抽出した。

⑪ 流体地化学に基づく熱・热水の影響評価手法

堆積岩地域に賦存する海水起源の地下水水質の多様性を把握することを目的に、地化学平衡計算ソフトを用いて海水・塩水・天水と堆積岩との模擬反応実験を行い、水質形成過程の特徴を検討した。

⑫ 热・热水の影響評価のための調査・解析・評価手法

これまでの研究成果を踏まえて、概要調査計画の立案および概要調査の実施における「熱・热水の影響評価のための調査・解析・評価手法」を提案した。

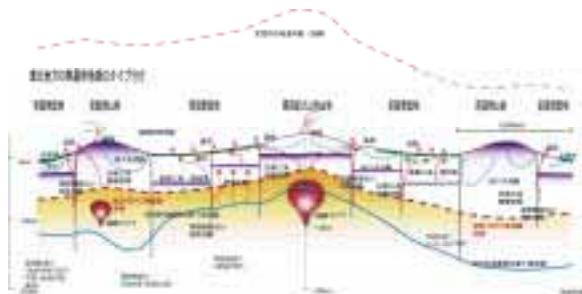


図8 東北地方の熱異常地域のタイプ分け
(Tamanyu et al., 2005).

5. 第2期中期計画の展開に向けて

平成18年度以降の第2期中期計画における展開としては、作成中の中低温地熱資源データベースを、NEDO地熱開発促進調査を中心とする地熱開発への活用のみならず、高レベル核廃棄物地層処分等、多方面に活用するための、応用研究を展開する予定である。この場合、これまで扱ってきた火山近傍の高温地熱資源のみならず、より広い裾野をもつ低温地熱資源を、総合的に把握することが重要課題となる。

この新しい展開のため、現在、資源エネルギー庁、新エネルギー・産業技術総合開発機構、地熱産業界、地方自治体、日本地熱学会等、外部への積極的な働き掛けを行っているところである。

また、社会の地熱ニーズを的確に把握し、研究成果を外部に開かれたものとするため、今後はWEBサイトの強化についても、重要課題として取り組む予定である。



鉱物資源研究グループの 2005-2006 年の活動

A year activities of the Mineral Resources Research Group from 2005 to 2006

鉱物資源研究グループ長：渡辺 寧

Leader, Mineral Resources Research Group: Yasushi Watanabe

Phone: 029-861-3811, e-mail: y-watanabe@aist.go.jp

1. グループの研究概要と構成

日本の産業や国民生活に不可欠な各種の鉱物資源の安定供給はナショナル・セキュリティーに関わる重要課題である。当研究グループは金属・非金属・骨材・GIS の専門家をもって組織し、各種の鉱物資源の安定供給のために必要な学術研究、資源探査・開発のための技術開発、流通安定化のための情報の収集・解析を行っている。CCOP 等の国際機関、経済産業省、資源エネルギー庁、JICA、JOGMEC、地方自治体等の実施する鉱物資源に関するプロジェクトに技術協力をを行うとともに、各種役職を通じ国内外の鉱物資源に関わる学会の活動を支援している。

第 2 期中期計画では、日本の先端産業にとって極めて重要なレアメタルの安定供給に貢献するために、重希土類の資源ポテンシャル評価を始めとする研究を開始した。当研究グループが第 2 期に行う主要な研究課題は以下の通りである。1)重希土類元素の濃集機構と資源ポテンシャル評価の研究、2)金属鉱化作用と探査手法の研究、3)骨材資源評価に関する研究、4)鉱物資源データベースの研究、5)鉱物資源に関するコンサルティング・国際協力。

グループ構成は以下の通り。

グループ長	渡辺 寧
グループ員	佐藤 興平, 須藤 定久, 大野 哲二, 村上 浩康
特別顧問	石原 舜三
特別研究員	守山 武
外来研究員	神谷 雅晴, 寺岡 易司, 平野 英雄, 奥村 公男
JSPS 海外特別研究員	Jargalan Sereen, Li Xiaofeng
テクニカルスタッフ	藤橋 葉子, 清水日奈子, 樊 倫
併任者	村尾 智, 内藤 耕

2006 年 7 月 13 日-21 日には Society of Economic Geologists の 2006 年 International Exchange Lecturer である Douglas J. Kirwin 氏, 7 月 22 日-8 月 9 日までアルゼンチン国立科学技術審議会の Maria Florencia Marquez-Zavalia 博士を戦略元素

循環化技術の開発に係わる共同研究者として受け入れている。



鉱物資源研究グループ主要構成メンバー

2. 研究の内容と成果の概要

1) 重希土類元素の濃集機構と資源ポテンシャル評価の研究

平成 18 年度から部門重点化予算テーマとして取り上げられた本研究は、重希土類元素の資源ポテンシャル評価を目的とし、世界の重希土類元素の資源量の見積もりを行うとともに、希土類元素の主たる生産地である中国以外の地域での希土類資源ポテンシャルの評価を目的としている。現在、重希土類元素の主要な供給源となっている「イオン吸着型鉱床」(図 1)が中国以外でも形成される可能性があるのかどうかの検討を行っている。



図 1 中国南部のイオン吸着型鉱床。風化土壤採掘跡。

イオン吸着型鉱床は、希土類元素に富む花崗岩類が花崗岩特有の深層風化により生成した粘土鉱物層に希土類元素が吸着し、希土類元素が2-3倍に濃集したものを指す。このタイプの鉱床を生成するには、もともとの花崗岩が①希土類元素に富んでいること、②厚い風化殻(粘土層)が形成されること、の2つの条件が必要である。

希土類に富む花崗岩はアルカリ質のものやチタン鉄鉱系列花崗岩に認められるが、分化の進んだ花崗岩は重希土類に富むという特徴がある(図2; Ishihara and Murakami, 2006)。厚い風化殻が形成されるためには気温が高く降水量が多いという条件が必要となり、イオン吸着型鉱床を探すにはこれら2つの条件がそろった地域を調査する必要がある。

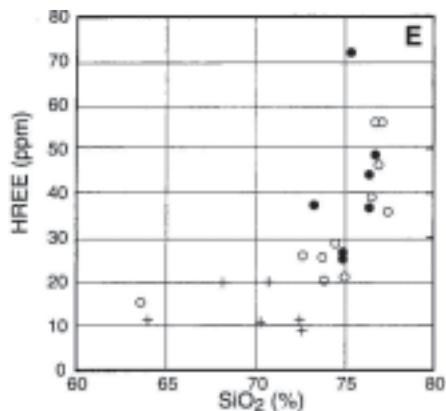


図2 中央-西南日本の花崗岩類の SiO_2 と重希土類含有量との関係(Ishihara and Murakami, 2006)。花崗岩の分化が進む(SiO_2 量が増加する)と重希土含有量も増加する。

図3はチタン鉄鉱系列花崗岩の主たる分布域と現在の年間降水量を示しており、年間降水量が約1,000mm以上でチタン鉄鉱系列花崗岩もしくはアルカリ岩が分布している地域を調査ターゲットとして選定している。



図3 チタン鉄鉱系列花崗岩の分布と現在の降水量。赤色部は中国でのイオン吸着型鉱床分布域、赤丸白抜は調査地域および調査予定地域。

これまでのところ、この条件を満たす北限の韓国、日本で、分化の進んだ花崗岩類について調査を行ったが(図4)。これらの地域では花崗岩上部の風化殻に希土類元素を吸着するハロイサイトがあまり形成されておらず、風化殻中の希土類元素の濃集は確認されなかった(図5)。



図4 韓国帶江地域の花崗岩上部風化殻の産状。

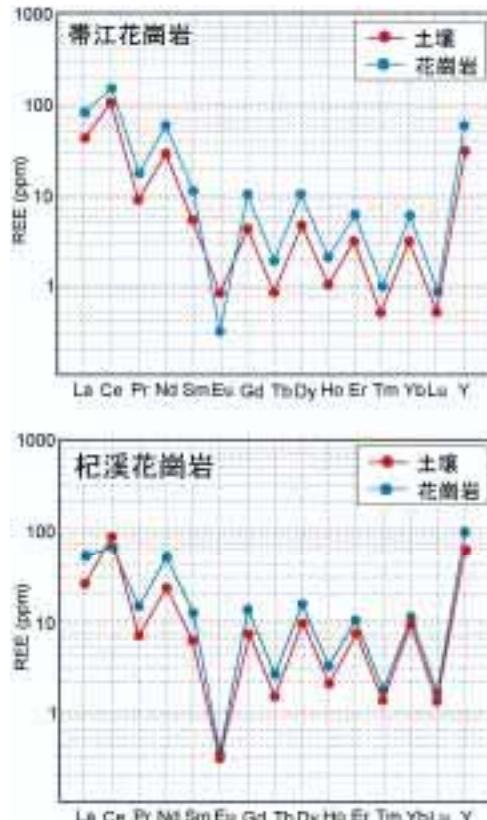


図5 韓国、帶江および杞溪地域の花崗岩および風化土壤中の希土類元素含有量(Ishihara et al., 2006)。土壤中の希土類量は下部の花崗岩の希土類量を下回り、風化殻に希土類の濃集が認められない。

この原因はこれらの地域の地殻の隆起速度が速く風化殻が十分保存されなかつたためと考えている(Ishihara et al., 2006)。

一方、タイ南部ではコサムイとプーケットの2箇所で重希土類元素に富む花崗岩が発見されており(図 6), プーケット北方では風化土壌に希土類元素の濃集が認められている(図 7). 詳細な調査はこれらからであるが、東南アジアで経済性のあるイオン吸着型鉱床が発見される日も近いと考えられる。



図 6 希土類元素に富むプーケット島北部 Khao Lam Ru 花崗岩の薄片写真. 希土類元素を含む褐廉石や磷灰石に富む.

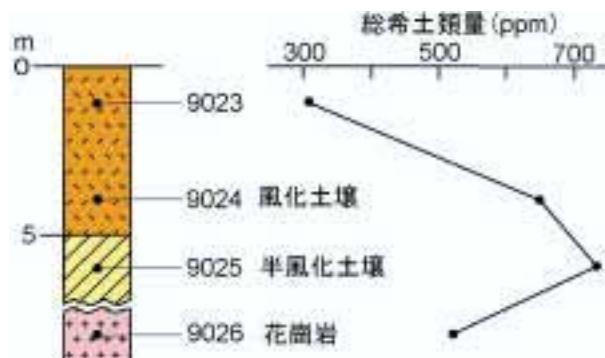


図 7 Khao Lam Ru 花崗岩とその上部の風化土壌中の希土類量(Hirano et al., 1994).

2)金属鉱化作用と探査手法の研究

本研究は斑岩銅鉱床, IOCG 鉱床, その他の銅・金鉱床やインジウム含有鉱床の基礎研究をもとに鉱床形成プロセスの解明を行い, 鉱床探査に貢献することを目指している。

インジウムを含有する鉱床タイプには塊状硫化型鉱床と珪長質岩に伴う鉱脈鉱床がある。後者のタイプの鉱床は日本にも豊富に存在する(図 8)。既存のデータおよび新たに分析した結果をもとに各鉱山のインジウム含有量を計算すると, 第 1 位が豊羽(4,653t), 第 2 位が足尾(1,129t), 第 3 位が生野(1,094t), 第 4 位が明延(1,000t 弱)となる(図 9)。第 5 位以下は 150-100t クラスまたはそれ以下となる。

これらの鉱床は錫およびその他の金属を伴うことを特徴とし, 磁硫鉄鉱の安定領域に近い還元的条件でインジウムの沈殿が生じている。インジウム含有鉱床の生成には, 硫黄に富む酸化的な花崗岩がインジウムに富む堆積岩を取り込み還元されることが重要である(Ishihara et al., 2006)。

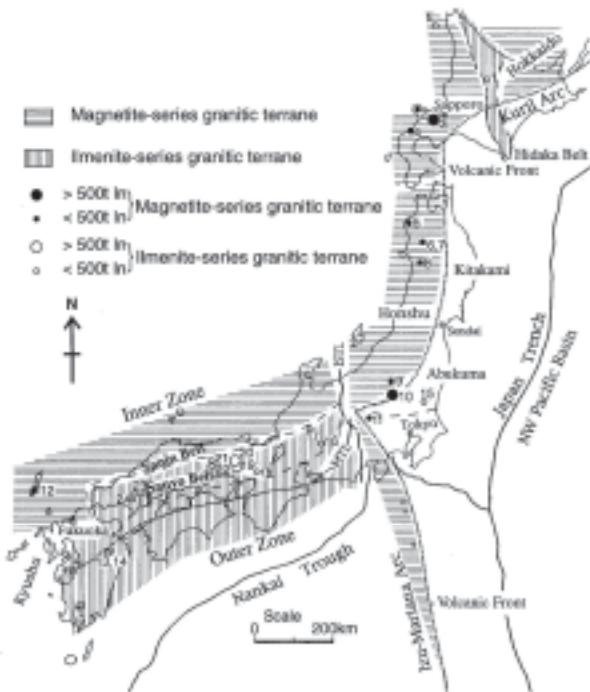


図 8 日本列島におけるインジウム含有鉱床の分布. 3:豊羽, 10:足尾, 19:生野, 20:明延(Ishihara et al., 2006).

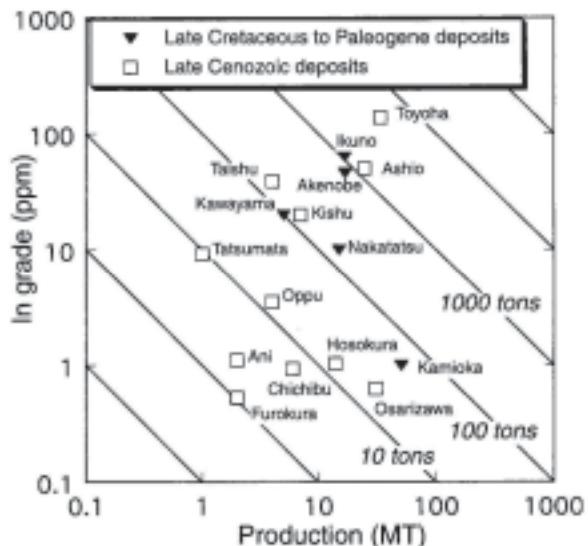


図 9 日本のインジウム含有鉱床の生産量とインジウム品位図(Ishihara et al., 2006).

3)骨材資源評価に関する研究

経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課の委託に基づき, 全国の骨材資源の分布状況とその性状をとりまとめ, 報告書として出版している。平成 17 年度は中部・近畿地域についてとりまとめを行った(図 10)。その結果, 1)北陸地域では砂利資源が豊富で当面骨材の供給に問題はない, 2)東海地域では土木工事に伴う剥土の骨材資源化や碎石の増産によって需要が満たされてきたが, 砂利・碎石とも一部地域においては資源の枯渇傾向が認められる, 3)大阪湾岸地域では瀬戸内海の海砂代替資源として, 洗砂や碎

砂・石灰岩碎砂が供給され、需要が低迷しているため骨材の供給不足は起こっていない、との結論を得た。平成 18 年度には関東・甲信越地域の取りまとめを行っている。

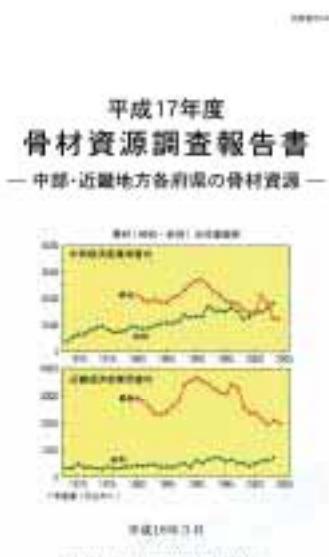


図 10 骨材資源調査報告書(産業技術総合研究所地圏資源環境部門)

4) 鉱物資源データベースの研究

鉱物資源に関する各種のデータベースを構築し、地質図や鉱物資源図の電子ファイルとして出版するとともにインターネット上で情報公開を目指す。

平成 17 年度には 20 万分の 1 地質図幅「白河」の鉱物資源の編纂を行い地質調査総合センターから 18 年度に出版された。平成 18 年度は「長岡」と「八代」の編纂を行う予定である。また東アジアの鉱物資源 GIS データベース作成と中央アジアの地質編纂図の作成を行っている(図 11)。



図 11 東アジア地域のタンゲステン(赤色)およびアンチモン鉱床(青色)の分布。

5) 鉱物資源に関する指導相談・国際協力

平成 17-18 年度には、JICA のモーリタニア・イスラム共和国鉱物資源開発戦略プラン策定プロジェクトに参加し、プロジェクトの最終報告

を平成 17 年 11 月にモーリタニアで行い、18 年 3 月にトロントの PDAC でブース展示を行った。また同時にヒルトンホテルで「モーリタニア・イスラム共和国の鉱物資源」と題する投資セミナーを開催した(図 12; 渡辺, 2006)。



図 12 投資セミナー「モーリタニア・イスラム共和国の鉱物資源」(平成 18 年 3 月 7 日カナダ・トロント)。

この他、新しくラオス鉱業分野投資促進のための情報整備・法制度改善支援プロジェクトと題する JICA プロジェクトの立ち上げに協力するとともに、JICA のザンビア鉱業採掘地域区分開発調査プロジェクト形成調査に参加している。

韓国地球科学鉱物資源研究院とは「日本および韓国のメタロジエニーおよび希土類元素鉱床の研究」というテーマで MOU を結び、共同研究を予定している。中国地質科学院とも中国南部のメタロジエニーをテーマとした共同研究を提案する予定である。

資源エネルギー庁の主催した資源戦略研究会や資源大学校に講師を派遣し、技術支援を行うとともに、JOGMEC との懇談会を通して情報交換を行った。

文献

- Hirano, H., Kamitani, M., Inthuuti, B., Japakasetr, T., Kraikong, C., Mookdee, T., Usiriprisan, C., Worakanog, W., Kanazawa, Y., Sudo, S., Kamioka, H. and Mamasaki, S. (1994) Study on rare-earth resources in weathered crusts of Thai granites. Report of International Research and Development Cooperation ITIT Projects No. 90-1-2: Study on Rare-earth resources in weathered granitoids in Thailand, p. 11-54.
- Ishihara, S. and Murakami, H. (2006) Fractionated ilmenite-series granites in Southwest Japan: Source Magma for REE-Sn-W mineralizations. Resource Geology, v. 56, no. 3, p. 245-256.
- Ishihara, S., Sato, K., Jwa, Y. and Kim, J. (2006) REE resource evaluation of some alkaline granites and their weathered crust in South Korea. Bull. Geol. Surv. Japan (in press).
- 渡辺 寧(2006)PDAC2006.資源地質 56 卷 1 号, p. 110-111.

地下深部岩盤での初期応力状態に関する研究

Research on deep underground stress state

国立機関等原子力試験研究（2001年度-2005年度）

地質バリア研究グループ：長 秋雄

Geo-barrier Research Group: Akio CHO

Phone: 029-861-3942, e-mail: akio.cho@aist.go.jp

1. 研究の目的

地下深部の岩盤初期応力状態は、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ」(核燃料サイクル開発機構(1999), 以下では2000年レポートとする。)で検討された四つの重要な地質環境特性(物質移動に関与する地質構造要素, 地下水の流動特性, 地下水の地球化学特性, 岩盤の熱・力学特性)の一つである。2000年レポートで評価に使われた実測データは, 応力解放法により測定されたものであった。岩盤初期応力の応力測定法には, 他に水圧破碎法がある。

これまでの応力解放法による応力測定地点(被り深さ100m以深)を図-1に示す。応力解放法による応力測定は, 地下構造物や鉱山での地下空間の安定性解析のために行われていたために, その測定地点のほとんどが山岳地域である(例えば, Kanagawa et al., 1986; 斎藤ほか, 1988)。

これまでの水圧破碎法による応力測定地点は図-2に示すように, 主に地震予知研究で行われてきたため, 測定地点は関東・東海地域や活断層周辺に集中している(例えば, Tsukahara and Ikeda, 1987)。塚原・池田(1989)は, 堆積軟岩岩盤中で応力値が深さの増加とともに単調に増加する現象を説明する「臨界降伏応力モデル」を提唱した。長(2000)は, 国内全23地点での水圧破碎法により測定データをとりまとめ, 地下深部岩盤での初期応力状態が2000年レポートでの推定応力状態と異なると指摘した。長(2001)は, 硬岩岩盤での応力値の深さ分布は単調増加ではなく, 階段状に増加するモデルを提唱した。

これまでの応力測定地点である山岳地域・関東東海地域・活断層周辺は地球科学的活動域である。また, 応力測定地点のほとんどが本州, それも本州中央部に偏在している。地球学的静穏域での測定としては唯一, 田中(1991, 1992)の測定がある。田中(1991, 1992)は, 地震活動が低い地域での応力の深度勾配の測定を目的として, 岡山市内で深さ300mまでの応力測定を行った。その結果, 深さ170m付近で応力値の不連続な増加が認められた。

地下深部の岩盤初期応力状態を全国的に評価するには, 応力測定の空白域である地球科学的静穏域や本州中央部以外での応力測定が必要である。

本研究では, 次の3項目を研究目的とした。

- (1) 地球科学的静穏域での岩盤初期応力測定
地球科学的静穏域を選定し, 深さ1000m(実績750m)までの岩盤初期応力測定を行う。
- (2) 広域応力場の数値計算法の開発
数km四方×深さ1km程度の応力場を推定するための数値計算法を開発する。
- (3) 水圧破碎法での既存応力測定データの検討
国内での水圧破碎法による応力測定事例の文献調査を行い, それらに基づき地下深部の岩盤初期応力状態を検討する。

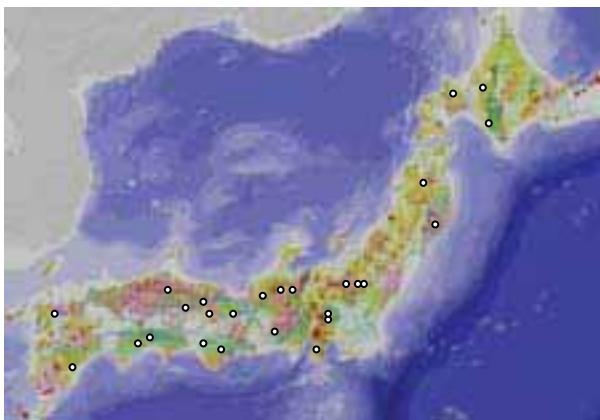


図-1 応力解放法による応力測定地点
(GSJ監修「日本列島の地質CD-ROM版」に加筆)

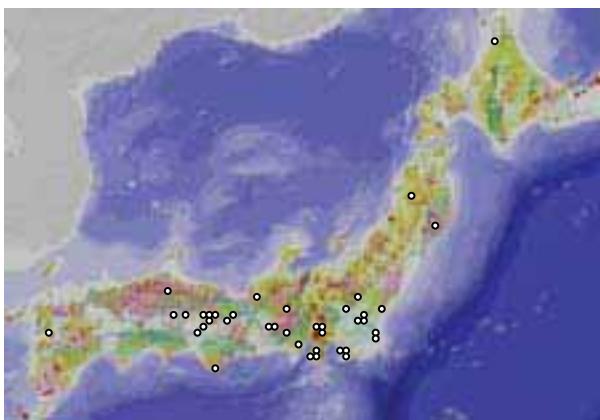


図-2 水圧破碎法による応力測定地点
(GSJ監修「日本列島の地質CD-ROM版」に加筆)

2. 地球科学的静穏域での岩盤初期応力測定

2.1 地球科学的静穏域の選定

地球科学的静穏域として岡山市周辺を選定した。岡山市周辺の地球科学的環境は次のとおりであり、いずれも地球科学的活動性が低いことを示唆している。

(1) 地質環境

図-3は、日本列島の地質CD-ROM版（地質調査総合センター監修、2002）に収録されているこの地域の地質と活断層分布である。岡山市周辺には中生代の花崗岩が広く分布する。「新編日本の活断層分布図と資料」（活断層研究会、1991）によれば、推定断層を含めて活断層は確認されていない。

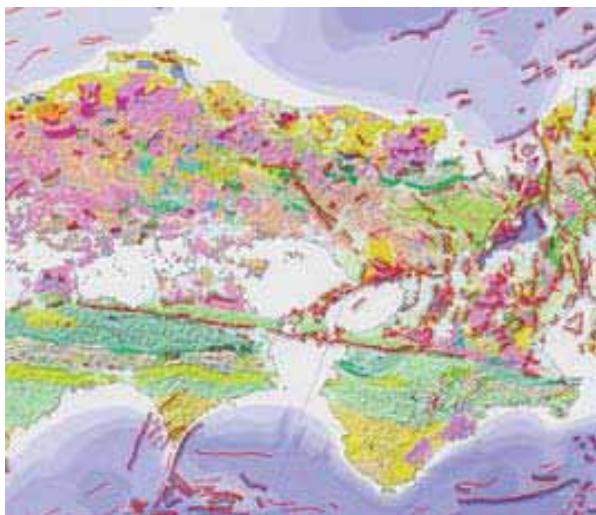


図-3 この地域の地質と活断層の分布
(GSJ監修「日本列島の地質CD-ROM版」より)

(2) 地震活動

図-4は、京都大学防災研究所地震予知研究センターによるこの地域の震央分布図（1990-1994）である。岡山市周辺では地震は発生していない。また理科年表（2006）によれば、過去120年間岡山県内に被害地震は発生していない。

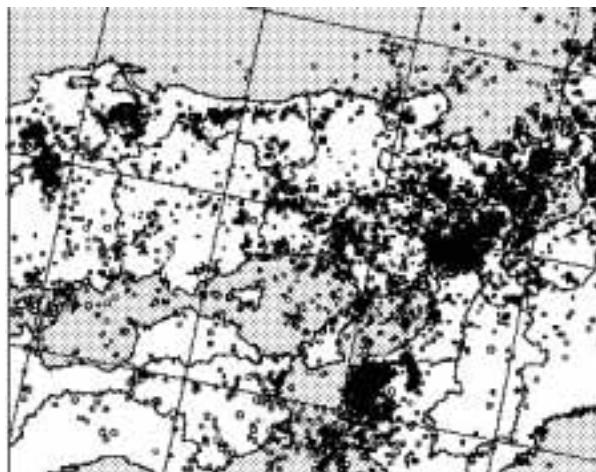


図-4 この地域の震央分布図（1990-1994）
(京大地震予知研究センターホームページより)

(3) 測地測量結果

図-5は、国土地理院が公表しているこの地域の過去約100年間（1994-1883）の地殻水平歪（変化量）である。国内の地殻水平歪の歪速度主軸の大きさは、一部の地域を除いて、 $1 \sim 3 \times 10^{-7}$ /年である。山陽地域でのそれは 1×10^{-7} /年程度であり、全国的に小さい値である。



図-5 この地域の地殻水平歪（1994-1883）
(国土地理院ホームページより)

(4) 地形

岡山県内の地形の特色を研究した高橋・村上（1974）によれば、岡山県の地形は、津山盆地の北縁から新見の北にかけての高度不連続帯と、岡山平野の北縁から小田川沿岸の北部を結ぶ高度不連続帯があり、ほぼ東西に帶状にのび、南に向かつて階段的に低くなる三つの地帯（中国背梁山地・吉備高原山地・岡山平野）に分けることができる。三地帯内部での標高差は小さく、準平原といえる。

このような地形的特徴は、地質学的な最近においても、岡山県での地殻変動量が小さかったことを示している。

(5) 地温勾配

「日本列島地温勾配図」（矢野ほか、1999）によれば、中国地方南部の地温勾配はわが国でのバックグラウンド値（低い地温勾配値）にあたる $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 程度である。

2.2 応力測定孔の掘削

岡山市内の花崗岩岩盤露頭において、深さ750mの応力測定孔を掘削した。掘削はダイヤモンドビット・ロータリー方式で行い、ワイヤーライン工法により全深度にわたってコアを採取した。掘削孔径は98mmであった。掘削中は掘削荷重・掘削回転数・掘削速度・コア切断荷重・逸湧水を記録した。採取したコア状況から孔壁状態が不良であると判断したときは、その後の孔内試験での抑留事故防止のため、保守的にセメンティングを行った。孔口の深さ10mまではケーシングを施したが、それ以外は裸孔である。掘削位置の標高は45mであり、地下水位は地表下45mであった。

2.3 応力測定孔周辺の地質調査結果

応力測定孔周辺(4km四方)の地質調査により、細粒花崗岩が粗粒花崗岩の上位に位置し、その境界面は低角であった。また北部地域には中古生層が分布し、その下部に粗粒花崗岩が分布した。両者の境界では、中古生層が熱変成作用をうけ、ホルンフェルス化していた。南北走向で高角の岩脈(輝緑岩・ひん岩・石英斑岩)が10本確認され、これらの岩脈は横山・原(1981)が行った西南日本の岩脈研究での「第3次相」岩脈に該当すると思われた。

2.4 応力測定孔コア観察結果

応力測定孔の地下地質は、粗粒花崗岩と細粒花崗岩から構成され、両者の境界は低角($0\sim30^\circ$)であった。420m~424m区間は破碎帶であった。この破碎帶は、南北走向で東に 70° で傾斜していた。ボーリング柱状図作成要領(案)解説書(改訂版)

(建設大臣官房技術調査室監修、1999)に基づき、採取コアを観察・記載した。採取コアの岩級区分に着目し、深さ750mまでの岩盤を0~320m($C_M\sim C_H$ 級主体)、320~420m(C_H 級主体)、424~750m(B~A級)の3区間に区分した。変質度3の変質は320m以深では見られなかった(420~424mの破碎帶区間を除く)。

2.5 応力測定孔での検層結果

応力測定孔では、密度検層・速度検層・電気検層(自然電位と比抵抗)・温度検層・超音波BHTV(ボアホールテレビュア)観察を、10~750m区間で行った。

・ 密度検層結果

10~320m区間(粗粒花崗岩の密度値 $24.7\sim25.0\text{ kN/m}^3$)と320~750m区間(同 $24.8\sim25.2\text{ kN/m}^3$)の2区間に区分した。

・ 速度検層結果

10~40m区間(P波速度値 $4.8\sim5.2\text{ km/sec}$)、40~320m区間(同 $5.0\sim5.3\text{ km/sec}$)、320~750m区間(同 $5.2\sim5.5\text{ km/sec}$)の3区間に区分した。

・ 比抵抗検層結果

10~320m区間(ロングノルマル値とショートノルマル値との比が $1\sim1.5$)、320~420m区間(同 $1.5\sim2$)、424~750m区間(同2.5前後)の3区間に区分した。

・ 超音波BHTV観察結果

観察された亀裂発生状況より、10~45m区間(低角亀裂と高角亀裂が共存)、45~225m区間(低角亀裂卓越区間と高角亀裂卓越区間が交互に分布)、225~355m区間(北北東・東・西傾斜の亀裂が卓越)、355~650m区間(北・南傾斜の亀裂が卓越)、650~750m区間(無亀裂)の5区間に区分した。

以上の各検層結果に基づく区分とコア観察結果に基づく区分を総合して、応力測定孔の深さ750mまでの岩体を、10~45m区間、45~320m区間、320~420m区間、424~750m区間の4区間に大区分した(図-6)。

大分体	コア観察	密度検層	速度検層	比抵抗検層	BHTV観測
10m	岩級区分 10m	cGrの ρ kN/m^3 10m	cGrの V_p km/sec 10m	SN値とLN値 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ 10m	亀裂方位と傾斜角 10m
45m	大分体1 CM-CH級	24.7~25.0	4.8~5.2 45m 5.0~5.3	SN: 200~5000 LN: 200~8000 LN/SN: 1~1.5	低角亀裂と高角亀裂が共存 45m
320m	大分体2 CH級主体	320m	320m	320m	低角亀裂と高角亀裂が排他的に発生 225m 東北東・東・西に傾斜した高角亀裂あり 355m
420~424m	大分体3 420~424m B-A級	24.8~25.2	5.2~5.5	SN: 2000~5000 LN: 2500~10000 LN/SN: 1.5~2 420~424m SN: 5000~7000 LN: 13000~19000 LN/SN: 2.5前後	北もしくは南に傾斜した高角亀裂あり 650m 亀裂なし
750m		750m	750m	750m	

図-6 応力測定孔の分体区分

2.6 水圧破碎法による岩盤初期応力測定結果

応力測定孔では33深度で水圧破碎試験を実施し、うち23深度で応力ちが得られた。水平最小主応力と水平最大主応力の被り深さ分布を図-7に示す。応力値の算出には次の式を用いた。

$$Sh_{min} = Ps$$

$$Sh_{max} = 3Ps - (Pb - T) - Pp$$

ここで、 Ps は亀裂閉鎖圧

Pb は亀裂発生圧

T は試験箇所のコア圧裂引張強度

Pp は間隙水圧(水頭圧)

150~420m区間では、深さに伴う応力値の増加は不明瞭で、水平最小主応力約7MPa・水平最大主応力約10MPaであった(深さ181mの試験結果は亀裂再開口試験の再現性が悪く、信頼性は低い)。430~750m区間でも、深さに伴う応力値の増加は不明瞭で、水平最小主応力10~17MPa・水平最大主応力19~31MPaであった。そのため、深さ420m付近を境に応力値の不連続な増加が認められた。この応力状態は、420m以浅が $C_M\sim C_H$ 級岩盤、424m以深はB-A級岩盤という岩盤状況と対応していた。

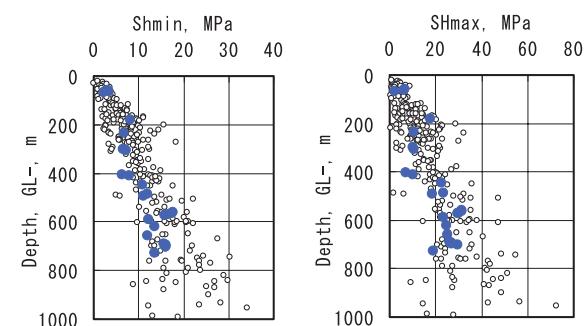


図-7 応力測定孔の応力値(●)

左図: 水平最小主応力、右図: 水平最大主応力、○は国内の硬岩地域での応力値

図-7には、国内の硬岩地域での水圧破碎法による応力測定結果を○で示している。地球科学的静穏域に位置する本応力測定孔の応力値は、国内硬岩地域での応力値分布幅の低～中レベルであった。このことは、地球科学的活動性と岩盤初期応力が相関することを示している。

応力測定孔での水圧破碎亀裂の発生方位（水平最大主応力の方位）は、N92～116° E（真北表示）の範囲に分布した。この方位は、応力測定孔を含む三角網での地殻水平歪変化の圧縮軸の方位（N125° E (1994-1985) および N80° E (1994-1883) とほぼ一致した。

2.7 ASR 法による岩盤初期応力測定結果

応力測定孔では、採取コアを用いて ASR 法による応力測定を約 50m 間隔で行った。ASR 法は採取コアの非弾性歪から地下応力場を推定する方法である。コアの非弾性歪量は、コア軸方向で -20～+60 × 10⁻⁶、周方向で 0～+80 × 10⁻⁶ であった。コアはほぼ等方的に膨張しており、軸方向と周方向の差や周方向での異方性は確認できなかった。そのため、地下応力場はほぼ等方的と推定され、水圧破碎法での測定結果と一致しなかった。

3. 広域応力場の数値計算手法の開発

広域応力場（2km 四方 × 深さ 1km）を推定するための数値計算法の開発を行った。数値解析プログラムは二次元複合降伏モデル（佐々木ほか, 1994）と三次元有限要素法を用いた。以下では、最終年度に行った二次元複合降伏モデルで行った数値計算について述べる。

3.1 地下構造モデルの設定

地下構造モデルは、地質調査・採取コア観察・検層・コア物性試験等の結果を検討し作成した。岩盤の硬さと亀裂密度に着目して、深さ 750mまでを 33 分帯に区分し、深さ 420-424m の破碎帶も組み込んだ、水平成層 + 傾斜弱線構造とした。

3.2 入力物性値モデルの設定

数値計算に入力する母岩の物性モデル値は、コア物性試験で得た物性値に、寸法効果を評価して設定した。亀裂面の変形特性モデル値は、採取コアでの亀裂面の変形特性を室内試験により求め、寸法効果（吉中ほか, 2006）を評価して設定した。

3.3 数値解析法

数値解析法に用いた複合降伏モデルは、岩盤の変形を母岩の変形と亀裂面での変形の和として取り扱う解析プログラムである（佐々木ほか, 1994）。

3.4 数値計算での要素分割・境界条件

数値計算は東西方向の二次元鉛直断面で行った。数値計算の領域は、境界の影響を排除するために、検討領域（東西 2km × 深さ 1km）より大きい東西 4.5km × 深さ 2km とした。要素分割は東西方向約 80 分割、深さ方向 70 分割とした。東西端面での境界条件は、鉛直方向の変位は無拘束で、強制水平変位 2.4m を両端面に与えた。この値は、深さ 700m での測定値 25MPa とその深さでのモデル弾性係数

に基づくものである。

3.5 数値計算結果

数値計算結果の一例を図-9 に示す。応力測定孔位置での計算値を実測値と比較すると、値は小さなもの、実測値の分布傾向を再現することができた。値が小さくなった原因として、寸法効果を考慮して設定した母岩と亀裂面の変形特性のモデル値が実際の値より小さかったためと考えている。今後は、これら物性の原位置測定とそれに基づく寸法効果の検討が必要である。



図-9 広域応力場の数値計算結果の一例

4. 水圧破碎法での既存応力測定データの検討

国内での水圧破碎法による応力測定事例全 48 地点（軟岩地域 12 地点、硬岩地域 26 地点、群発地震発生域 3 地点、活断層周辺 7 地点）の文献収集を行い、地下深部の岩盤初期応力状態を検討した。

軟岩地域では応力値は深さとともに単調に増加するとともに応力値の大きさは岩盤密度と相關した。硬岩岩盤では、応力値の分布幅が大きい。また、200-300m 以深で応力値は一定になる傾向が認められた。群発地震発生域では、深さ 500m 以深で 60MPa 以上の大規模な水平最大主応力が測定されている例があった。

文 献

- Kanagawa et al. (1986) Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 23, 29-39.
斎藤ほか(1988) 土木学会論文集, 394/III-9, 71-78.
Tsukahara and Ikeda(1987) Tectonophysics, 135, 329-345.
長(2000) 日本応用地質学会平成 12 年度研究発表会講演論文集, 129-132.
長(2001) 日本地震学会 2001 年度秋季大会講演予稿集
田中(1991) 京都大学防災研究所年報, 34, B-1, 313-323.
田中(1992) 京都大学防災研究所年報, 35, B-1, 421-431.
高橋・村上(1974) 岡山大学教育学部研究集録, 38, 49-56.
横山・原(1981) 中生代造構作用の研究, 3, 149-163.
佐々木ほか(1994) 土木学会論文集, 505/III-29, 59-68.
吉中ほか(2006) 土木学会論文集 C, 62, 457-470.

謝 辞

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

調査用地を貸与いただいたとともに、調査期間中多大のご協力をいたいたい地権者様に感謝します。また、5 年間の調査・研究にともに携わってくれたサンコーコンサルタント株式会社の皆さんに感謝します。



坑内自然電位連続測定によるフラクチャー岩体の水理特性推定

Characterization of hydrological properties of fractured rock
using continuous borehole self-potential measurements

地圈流体ダイナミクス研究グループ：西 祐司・石戸 恒雄
Reservoir Dynamics Research Group: Yuji NISHI and Tsuneo ISHIDO
Phone: 029-861-3969, e-mail: y.nishi@aist.go.jp
日鉄鉱コンサルタント株式会社：根木 建之
Nittetu Mining Consultants Co., Ltd.: Tateyuki NEGI

1. はじめに

地下の岩盤中を流体や化学種、あるいは熱がどのように輸送されるかを把握することは、地下水・地熱・石油等の流体資源の採取にとって、また土壤汚染、地層処分などに係わる環境評価技術において重要な課題であり、岩盤の水理特性はその基本となるデータである。岩盤中にはしばしば、ジョイント・割れ目等の透水性の高い「フラクチャー」が存在する。フラクチャーが発達した岩体（フラクチャー岩体）では、フラクチャーを通路とした流体流動によって化学種や熱が極めて短時間で移動する。ただし、長期間にわたる流体・化学種・熱等の挙動に関する評価においては、フラクチャーに囲まれた緻密な母岩部分（マトリックス部）の貯留の影響を把握する必要がある。

地下岩盤の浸透率などの水理特性の推定には、圧力遷移・干渉試験、トレーサー試験などの方法が用いられている。しかし、これらの手法ではマトリックス部の貯留効果を分離して評価することは一般に困難である。一方、流動電位を発生メカニズムとする自然電位のデータは、マトリックス部の影響を強く受けるため、これを取り入れることによって今まで以上の精度でマトリックス部を含んだフラクチャー岩体の水理特性を把握できる可能性がある。本研究では、現場実験を通してその測定方法を探ることを目的としている。

2. フラクチャー岩体での流動電位

固体と流体の境界面には電気二重層と呼ばれるごく薄い層が形成され、外部から電場もしくは圧力差を加えると、固液間に相対的な滑り運動が生じる。岩石中の空隙を水が流動する場合にも、流動と空隙表面の電気二重層との相互作用によって電荷が運ばれ、流れの方向に電位差（流動電位）が発生する（例えば Ishido and Mizutani, 1981）。地熱・火山地帯においては、熱水対流の上昇域において界面動電現象により

正の電流源が発生し、地表に正の自然電位異常をもたらす（石戸, 1981）ため、自然電位法は、地下における流体の流動を地表から検知する探査手法として用いられている。

Ishido and Pritchett (2003)は、流体流動によって発生する電流が浸透率よりも空隙率の関数であることに着目し、圧力遷移試験時に坑内で自然電位(SP)の連続測定を併用することによって、従来の坑井テストに比して高精度にマトリックス部の圧力平衡時間などを推定しうることを示した。この数値シミュレーションによって示された可能性を実験的に検証するために、本研究では、釜石鉱山内の既存坑井を利用して坑内自然電位連続測定を併用した圧力遷移試験を実施した。



図1：釜石鉱山 KF-1坑における坑内自然電位変化測定の実験風景

坑口のバルブ操作により湧水流量と圧力を制御し、それに伴う自然電位変化を測定する。

3. 釜石鉱山における実験

釜石鉱山は、130年を超える操業歴を持つ我が国最大級の鉱山であり、鉄銅鉱石の総生産量は7千万トンに達する。花崗岩等の強固な岩石中の総延長 140km に達する坑道と鉱石採掘跡

の地下空間は、様々な科学的な実験に利用されている（横井ほか、1991）。

動力炉・核燃料開発事業団の地層科学研究「花崗岩における原位置試験」（1988～1998年実施）の一環として掘削されたKF-1坑及びKF-3坑においては、坑口操作に伴う圧力変化によって坑道壁面に自然電位変化が生じる（根木ほか、1996）。坑口のバルブ操作によって簡単に圧力遷移試験が実施できること、坑井近傍において実際に自然電位変化が検知できることから、このKF-1坑を用いて平成17年12月に最初の実験を行った。

KF-1坑においては、坑口開放時には毎分400リットルの湧水を生じ、坑口閉鎖時には約5気圧までの圧力がかかり、坑口の開放・閉鎖のみで坑内圧力と湧水量を変化させる圧力遷移試験を簡単に実施することが可能である。このような坑井の特性を利用して、様々なバルブ開放時間に対応した坑井内及び坑道トンネル壁面における自然電位変化と坑口圧力、湧水流量を連続的に記録し、圧力遷移に伴う高品質かつ再現性の良いデータセットの取得に成功した。

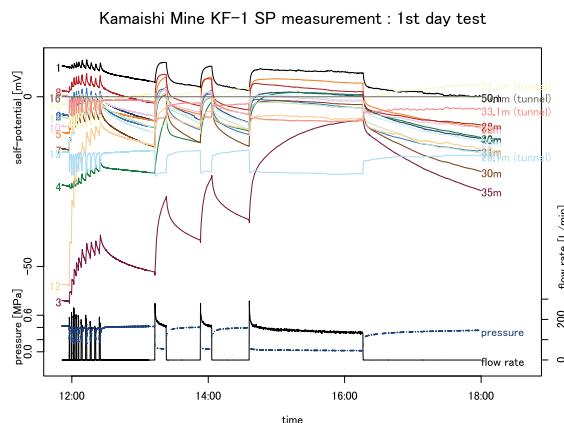


図2：実験第1日目の測定データ

下の2本の曲線が坑口圧力及び湧水流量、その他は自然電位変化を示す。各プロット右端の数字は坑内点は電極までの深度、坑壁点(tunnel)はKF-1坑口からの距離を示す。

4. 2005年の実験結果と今後の予定

2005年の実験データから、坑口開放に伴う坑内圧力低下に伴い坑内においては自然電位の上昇が、また坑道壁面では電位降下が起こっていることが明らかとなった。坑内における自然電位変化は、坑口開放後数秒はバルブ開放後の経過時間に応じた電位上昇を示すが、100～600秒で経過時間に関わらずほぼ一定となった。自然電位変化を圧力変化で規格化した $\Delta S/P / \Delta P$ の値は、坑口開放後10分以降で一定値となった。

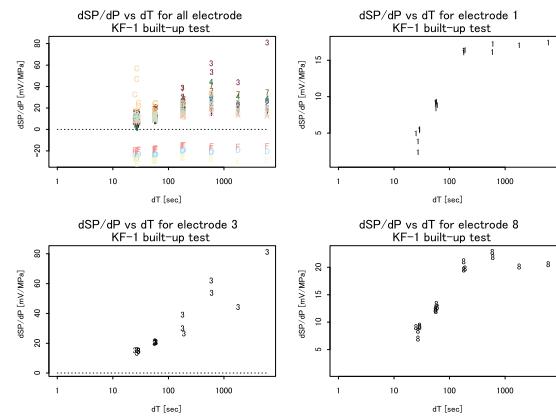


図3：バルブ開放時間による $\Delta S/P / \Delta P$ の変化
自然電位変化を圧力変化で規格化した $\Delta S/P / \Delta P$ の値は右上もしくは右下のように坑口開放後10分以降で一定値となった。

このような自然電位変化は流动電位をメカニズムとしてモデル化が可能であり、フランクチャーワークのマトリックス部の圧力平衡緩和時間が10分程度、浸透率1～10 micro-darcyとした場合のフランクチャーの平均的な存在間隔は1～3m程度と推定できた。

得られたデータには、坑内の電極位置による電位変化パターンの違いも認められた。また、隣接したKF-3坑の坑口開放による圧力低下に応じた坑内圧力の変化と自然電位変化も検知された。

このように、2005年の実験から、坑内における自然電位変化が観測可能であり、圧力変動に伴う自然電位変動が実際に発生していること、さらにそのデータから実際の水理パラメータ推定ができることが示せた。

このようなFSを基に、2006年の実験では、バルブ操作を自動化した測定システムを開発し、十分な回復時間を持たせてKF-3坑も含めた適切な時空間分解能を持ったデータセットの取得を目指している。さらに、鋼鉄製ケーシングなど実際の坑井環境を想定した測定や、数値シミュレーションによる定量解析などをを行い、坑内自然電位観測をフランクチャーワークの水理特性推定のための新しいアプローチとして実用化するための研究を実施する予定である。

謝辞

KF-1坑を使用した実験に際しては、釜石鉱山株式会社に多くの便宜を図っていただいた。記して謝意を表したい。



地球電磁気学的手法による良質な粘土鉱床の探査および評価技術の開発 —深部熱水系調査から坑内鉱脈調査まで—

Development of Investigation and Evaluation Techniques for a Good Quality Clay Mineral Deposit by Electromagnetic Methods
-From a Deep Geothermal Survey to a Precise Vein Survey in Tunnel-

地圈流体ダイナミクス研究グループ：高倉伸一・石戸恒雄

鉱物資源研究グループ：須藤定久・村上浩康

地下水環境研究グループ：安川香澄

Reservoir Dynamics Research Group: Shinichi Takakura, Tsuneo Ishido

Mineral Resources Research Group: Sadahisa Sudo, Hiroyasu Murakami

Water Environment Research Group: Kasumi Yasukawa

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

1. はじめに

日本では良質な粘土が各地で産出され、窯業が盛んに行わされてきた。また、国内産の粘土は工業製品の原材料や土壤改良材などにも広く利用され、最近では新素材の材料としても注目されている。しかし、地表から採掘できる良質な粘土は少なくなっているが、これまで現場の人間の経験や勘に頼ることが多く、探査技術は確立していないのが現状である。

粘土鉱物は岩石が熱水・統成・風化変質を受けて生成され、水を含みやすく、イオン交換能が大きいので、母岩とは電気化学的特性が大きく異なることが多い。したがって、電気・電磁探査法や自然電位法のような地球電磁気学的手法を用いることにより、地下にある粘土鉱物の検出やその種類や性質の把握が可能と考えられる。このような背景から地球電磁気学的手法を用いた粘土鉱床の探査と評価技術を開発する研究を開始した。平成16年度は、愛知県北設楽郡東栄町振草地区にあるセリサイト鉱山をモデルフィールドとして、様々な電気探査の手法を適用する実験を試みた。平成17年度は、セリサイトを生成させる熱水系の把握のため、鉱山周辺でAMT法による比抵抗構造調査を実施した。また、鉱脈の直接探査を目指し、坑内において比抵抗法、IP法、SP法を実施した。地表探査の結果は昨年度の成果報告会で発表しているので、本報告ではAMT法調査の結果と坑内調査の結果の概要について報告する。

2. 鉱山の概要

振草地区のセリサイト鉱山は新第三紀の火山活動で形成された大峠コールドロン中にある。コールドロン形成後に、環状の火山岩体(大峠コ

ーンシート)が形成され、その後に北北東—南南西方向の平行な岩脈(設楽火成複合岩体)の貫入が起きた(Geshi,2005)。当該地区のセリサイト鉱体の多くは安山岩の岩脈内部やその縁に発達する節理に沿って分布しており、設楽火成複合岩体の貫入によって形成されたと考えられる。ここで産出されるセリサイトは、その純度の高さと優れた感触性、更には高い白色度を有していることから世界的に見ても大変貴重なもので、化粧品、特にファンデーション用の体质顔料として必要不可欠な存在になっている。

3. AMT 法調査

当該地区的セリサイト鉱体を形成した深部熱水系の構造を調査するため、鉱山周辺でAMT法電磁探査を実施した。測点位置を図1に示す。測点は設楽火成複合岩体の走向にほぼ直交する測線に沿って、18点配置された。測定装置にはPhoenix社のMTU-5Aを使用した。調査地域の約4km西方に固定のリモートリファレンス点を設置し、夜間に電磁場5成分の時系列データを取得した。データは全てリファレンス処理を行い、0.35~10400Hzの範囲の60周波数のインピーダンスから、見掛け比抵抗や位相などのAMTパラメータを求めた。

解析では測線が地質構造に直交すると仮定して、平滑化制約付きMT法2次元インバージョン(Uchida and Ogawa, 1993)を適用した。解析に使用したデータは、周波数範囲4.7~10400HzのTMモードの見掛け比抵抗と位相、TEモードの位相である。解析された比抵抗断面を図2に示す。また、図には周辺の地質情報に基づいた解釈結果も示す。

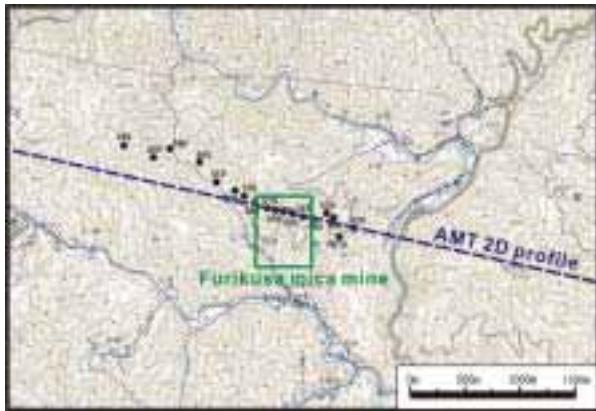


図 1 調査地域と AMT 法測点位置

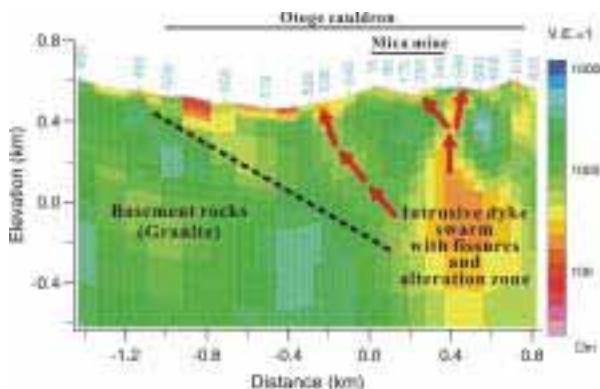


図 2 AMT 法の 2 次元解析結果とその解釈

求められた比抵抗構造には、コールドロン構造の特徴が現れている。低比抵抗帯はセリサイト鉱体を含む熱水変質帯に対応し、高比抵抗帯は未変質の母岩や基盤に対応する。セリサイト鉱山の深度約 500m にある幅約 500m の低比抵抗帯は、貫入してきたダイクと考えられる。その低い比抵抗からダイクは割れ目や変質を伴っていると予想され、この貫入により当該地区にセリサイト鉱床が生成されたと推測される。

4. 坑内の IP 法調査

坑道の近傍にセリサイト粘土脈の存在が予想される 6 つの場所で IP 法調査を実施した。この探査では、高さ約 2m の坑壁のほぼ 1m の高さに、1m 間隔で電極を配置し、その位置を光波測量で正確に求めた。使用した電極は鉛・塩化鉛電極であり、これを高倉(2005)が考案した方法で壁面に設置した。IP 法測定はダイポール・ダイポール配置で実施した。電極間隔 a は 1m であり、電極隔離係数 n は 1~5 とした。測定には SYSCAL-R2 を用いた。電流送信中の電流値と電位差を測定することで見掛け比抵抗を求め、電流遮断後の電位差の積分値を送信中の電位差で割って見掛け充電率を求めた。また、得られたデータに 2 次元解析を適用し、測線ごとに比抵抗断面と充電率断面を求めた。さらに、充電率を比抵抗で割った正規化充電率の断面を求めた。測線 5 の比抵抗断面、充電率断面、正規化充電率断面を図 3 に示す。図中に重ねられている粘

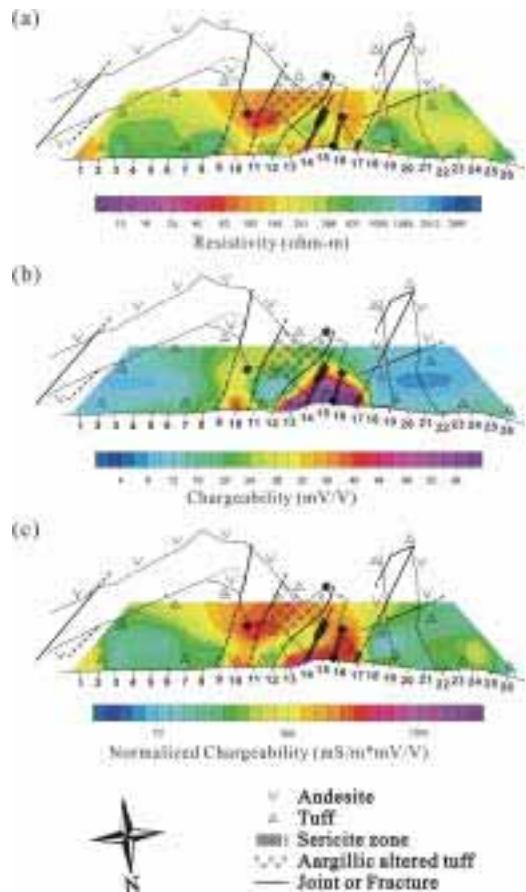


図 3 測線 5 の(a)比抵抗断面、(b)充電率断面、(c)正規化充電率断面と粘土分布および地質との比較。

土分布や地質分布は、調査後に掘削された新たな坑道によって明らかにされたものである。

この図を見ると、安山岩中のセリサイト粘土の分布域と正規化充電率の高異常域とがほぼ重なっていることがわかる。また、安山岩分布域と比較すると凝灰岩分布域の正規化充電率が低いのは明らかである。これらのこととは、正規化充電率がセリサイト粘土の探査に有効であることを意味している。

5. おわりに

本研究では、セリサイト鉱山をモデルフィールドとして、様々な電気・電磁探査を適用し、良質な粘土鉱物の探査および評価する技術の開発を実施してきた。その結果、電気・電磁探査は、広域の深部熱水調査から坑内の鉱脈調査まで幅広い目的の探査に有効であることが確認できた。今後は、本研究で実施した岩石サンプルの電気物性測定結果と比較・検討し、粘土鉱物の品位を評価する技術の確立を目指す。

参考文献

- Geshi N. (2005): Journal of Volcanology and Geothermal Research, 141, 267-281.
- 高倉伸一(2005): 特願 2005-108200
- Uchida,T., and Ogawa,Y.(1993): Open-file Report, Geol. Surv. Japan, 205, 115p.

熱水変質岩中の緑泥石やイライトの化学組成並びに 帯磁率を利用した鉱床探査手法

Mineral Exploration Tools using Variations in Chemical Composition of Chlorite and Illite and Magnetic Susceptibility of Hydrothermally Altered Rocks

鉱物資源研究グループ：村上浩康
 Mineral Resource Research Group: Hiroyasu MURAKAMI
 Phone: 029-861-3939, e-mail: h-murakami@aist.go.jp

1. はじめに

鹿児島県北部（北薩）地域の浅热水性金鉱床周辺に分布する火山岩類では、金鉱化作用に伴う热水変質により帶磁率が低下することが指摘されている(Feebrey et al., 1998)。また、热水変質岩に含まれる緑泥石の化学組成は鉱床タイプ毎で一定の化学組成を持つ傾向があり、浅热水性鉱床の金銀鉱脈中に産する緑泥石はMgに富むことが報告されている(e.g., 米田, 1989)。このように様々な変化を示す热水変質岩やそれに含まれる鉱物の緒性質は、それらの化学組成も含め、空間的に変化することが期待される。

本報告では、鹿児島県菱刈金鉱床に分布する热水変質岩の帶磁率変化や、热水変質岩中に認められる緑泥石やイライトの組成変化を利用した鉱床探査手法を提案する。

2. 鉱床概要

菱刈鉱床は氷長石を伴う含金石英脈群(以下、鉱脈)から成る低硫化系浅热水性金鉱床で、北から南に向かって、本坑、山神、山田の3つの鉱脈群から成る。本坑鉱脈群では鉱脈の60%が、山田鉱脈群ではすべての鉱脈が火山岩(菱刈下部安山岩類)中に胚胎するのに対し、山神鉱脈群では90%の鉱脈が堆積岩(四万十累層群)中に胚胎している。

3. 热水性鉱物の分布

菱刈鉱床周辺の岩石中では、热水性鉱物が鉱床を中心とする累帶配列を示しており(茨城・鈴木, 1990), 母岩の種類に関係なく、粘土鉱物種の変化を伴う下記のI, II, III, IVの4帯の変質鉱物組み合わせによって分帶されている(図1)。

クリストバライド+スマクタイト(I带)

石英+スマクタイト±カオリン(II带)

石英+混合層粘土鉱物(III带)

石英+緑泥石(IV带)

このうち、IV带は本坑や山神鉱床坑内の四万十累層群とそれを覆う菱刈下部安山岩類との不整合面周辺に分布し、菱刈下部安山岩類中を鉱床母岩とする山田鉱床にも確認されている。III带は、IV带を覆うように菱刈鉱床全域に認められる。採掘可能な鉱脈はIII及びIV带中に卓越している。それらIII带を取り巻くようにスマクタイトで代表されるII带が分布している。II带の外側にはI带が分布する。なお、本研究の試料はすべてIV带から採取している。

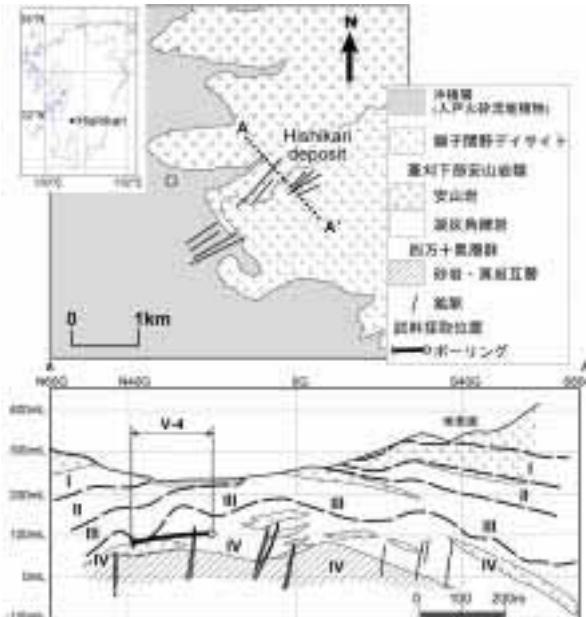


図1 菱刈金鉱床の地質図及び模式断面図

4. 热水性鉱物の化学組成

火山岩類中の緑泥石はMgに、堆積岩中の緑泥石はFeに富む傾向が認められる(図2)。火山岩類中の緑泥石の $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比は0.38-0.51の範囲で変化しており、単一試料中の組成変動は約0.10である。火山岩類中の緑泥石は $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比と四配位Al濃度との間に正相関が認められる。また、鉱脈から20m以内の火山岩中の緑泥石の $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比はそれ以外のものより高い傾向を示す。現在までに報告されている新鮮な菱刈下部安山岩類中の輝石の $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比は、

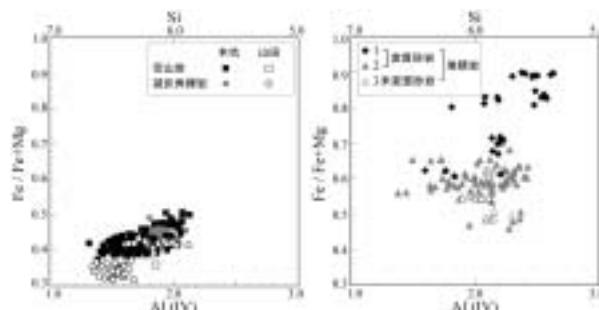


図2 热水変質岩中の緑泥石の組成変化。1=変質砂岩中の微細脈中の緑泥石, 2=変質砂岩中の碎屑・続成起源緑泥石, 3=未変質砂岩中の緑泥石

augite や hypersthene でそれぞれ約 0.25 及び 0.30 である(e.g. Hosono and Nakano, 2003). 従って, 火山岩類中に認められる熱水性緑泥石の Fe/Fe+Mg 比は母岩に含まれていた輝石に比べて若干 Fe に富む組成に変化していったと考えられる。

四十累層群砂岩に含まれる緑泥石の Fe/Fe+Mg 比は 0.46~0.90 の範囲で変化しており, 火山岩類中のものより幅広い組成変動を示す。単一試料中の組成変動は約 0.20 である。また, 変質砂岩中の微細脈に含まれる緑泥石は, 変質砂岩及び未変質砂岩中の碎屑性・続成作用起源の緑泥石に比べ, Fe/Fe+Mg 比と四配位 Al 濃度が高い(図 2). 一方, 変質砂岩中に含まれる碎屑性・続成作用起源の緑泥石は, 未変質砂岩中のものと同様の Fe/Fe+Mg 比を持つ。変質砂岩及び未変質砂岩中に含まれる碎屑性・続成作用起源の緑泥石は, 四配位 Al 濃度の変化が大きい。

火山岩及び四十累層群砂岩中のイライトの化学組成変化を八面体雲母鉱物である白雲母, セラドナイト, パイロフィライトを端成分とする三角ダイヤグラム上に示す(図 3)。火山岩中の

イライト並びに四十累層群砂岩中の微細脈中に認められるイライトは碎屑性イライトに比べて比較的一定の

Fe/Fe+Mg 比及び K 濃度を示す。特に, 砂岩微細脈中のイライトは, 碎屑性・続成変質イライトに比べて低い K 濃度及び高い Si 濃度で特徴づけられる。碎屑性・続成変質のイライトは, Si, K 及び Fe+Mg 濃度が白雲母組成からイライト組成の間で連続的に変化している。また, 母岩の種類に関わらず, 母岩中のイライトは鉱化帶に近づくに連れ, Fe/Fe+Mg 比が増加し, K 及び Al 濃度が減少する傾向が認められる。

これら鉱化帶近傍の熱水変質帶に多く認められる緑泥石やイライトが鉱物毎に鉱化帶に向かって一様な化学組成変化(ex., Fe/Fe+Mg 比の増加)を示すことから, これら熱水性鉱物の化学組成変化は鉱化作用を伴う熱水変質の良い指標になると期待される。

5. 菱刈下部安山岩類の帯磁率の変化

火山岩類の分布する V-4 ボーリングのコアの帯磁率を 1m 間隔で測定した結果を図 4 に示す。鉱脈から 40m 以上離れた菱刈下部安山岩類の凝灰角礫岩で $10 \sim 15 \times 10^{-3}$ SI, 安山岩では $10 \sim 27 \times 10^{-3}$ SI の変動を示す(図 4)。特に, 凝灰角礫岩では高品位鉱脈から 40m 離れた場所で帯磁率が低下し始めており, 鉱脈から 5-10m の位置で 0.5×10^{-3} SI 以下になり, 未変質母岩の値に比べて 20 分の 1 に帯磁率が低下する傾向がある(図 4)。Sasaki (2004) は, 菱刈鉱床の火山岩類

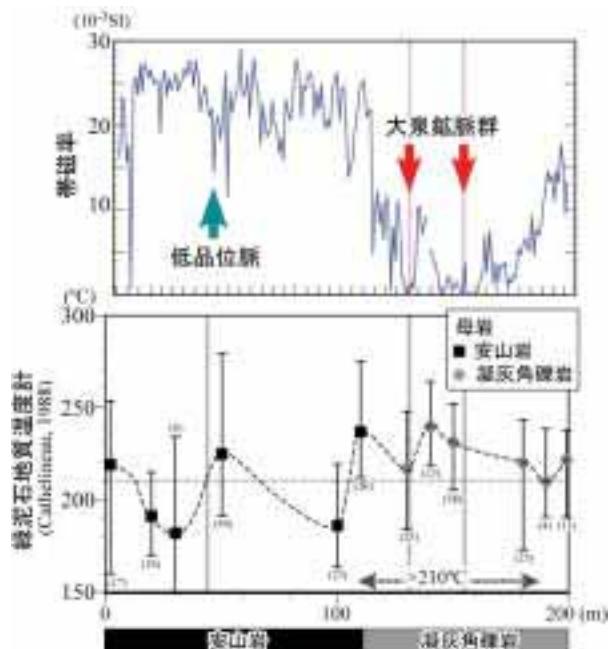


図 4 V4 号孔ボーリングコア中の火山岩類の帯磁率変化と緑泥石温度計の平均温度の変化

を母岩とする鉱物脈の分布密度が堆積岩類のそれに比べて数倍低いことを報告した。つまり, 火山岩類では鉱脈を形成する割れ目に限らず, 岩石自体の持つ空隙も熱水の通路となっていたため熱水変質帶がより広範囲に広がったことを示していると考えられる。従って, 帯磁率による鉱化・変質作用の評価にあたっては, 帯磁率が元々高く, 浸透性の高い凝灰角礫岩の場合により有効であると考えられる。

6. 緑泥石地質温度計

Cathelineau (1988) は, 緑泥石の化学組成を利用した地質温度計を提唱している。この温度計を火山岩中の緑泥石に適用した結果を図 4 に示す。火山岩中の緑泥石のうち, 鉱脈近傍の緑泥石は, 平均温度が 210°C 以上を示している。また, 鉱脈近傍の母岩に向かって, 緑泥石温度計の示す温度が上昇してゆく傾向が認められる。従って, 熱水変質帶の緑泥石組成の変化を利用することにより, 鉱脈を中心とする熱水活動の温度構造を捉えることができる可能性があり, 菱刈鉱床における鉱脈探査の指標として利用できるかもしれない。

参考文献

- Cathelineau, M. (1988) Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Miner.*, 23, 471-485.
- Feebrey, C. A., Hishida, H., Yoshioka, K. and Nakayama, K. (1998) Geophysical Expression of Low Sulphidation Epithermal Au-Ag Deposits and Exploration Implications - Examples from the Hokusatsu Region of SW Kyushu, Japan -. *Resource Geol.*, 48, 75-86.
- Hosono, T. and Nakano, T. (2003) Petrochemistry of volcanic rocks in the Hishikari mining area of southern Japan, with implications for the relative contribution of lower crust and mantle-derived basalts. *Resource Geol.*, 53, 239-259.
- 茨城謙三・鈴木良一 (1990) 菱刈鉱山鉱床母岩の熱水変質について. *鉱山地質*, 40, 97-106
- Sasaki, M. (2006) Statistical features of vein systems in the Hishikari epithermal gold deposit, Japan. *Resource Geol.*, 56, 27-36.
- 米田哲朗 (1989) 2, 3 の熱水性鉱脈産緑泥石の化学組成, とくに Fe-Mn 組成変化について, *鉱山地質*, 39, 6, 393-401..

層状鉄マンガン鉱床の重希土類鉱床としての可能性 HREE potential of stratiform ferromanganese deposits

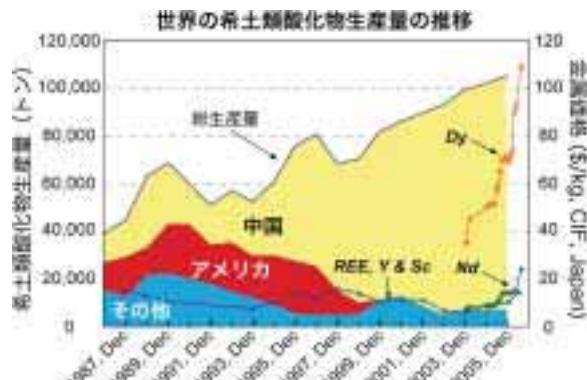
鉱物資源研究グループ: 守山 武・渡辺 寧・村上浩康
 Mineral Resources Research Group: Takeru MORIYAMA, Yasushi WATANABE, and Hiroyasu MURAKAMI
 Phone: 029-861-5080(内線 55750), e-mail: t-moriyama@aist.go.jp

1. はじめに: 重希土類資源

ネオジム磁石 (Nd-Fe-B 磁石) など希土類磁石はハードディスクなどの精密機器、自動車や家電のモーターに使用され、日本の先端産業に欠かせない製品となっている。特に近年の環境意識の高まりや原油の高騰を受けてハイブリッド車の人気が高まり、ネオジム磁石の需要が急増している。ネオジム磁石には高温耐性を高めるため重希土類元素のジスプロシウム (Dy) が数% 添加されるが、重希土類資源は中国南部のイオン吸着型鉱床 (花崗岩風化鉱床) のみから供給されており、資源の安定供給と価格の高騰が問題となっている。Dy の価格は 1 年間で 2 倍以上に高騰している(第1図)。このような重希土類資源の需要急増、資源の独占による供給問題などから新たな重希土類鉱床の開発が求められている。

希土類元素 (REE) とは一般にランタノイド系列の La-Lu および Y, Sc の 17 元素を総称し、特に La-Eu を軽希土類 (LREE)、Gd-Lu を重希土類元素 (HREE) と呼ぶ。現在 LREE 資源は主にカーボナタイト鉱床から生産され、HREE 資源はイオン吸着型鉱床から生産される。中国は LREE 鉱床としてバイヤン オボ鉱床、HREE 鉱床として龍南地域のイオン吸着型鉱床をかかえ、世界の総希土類生産量の 93% を占めている(第1図)。

現在、鉱物資源研究グループでは重点課題として重希土類資源の研究を進めている。その一環として今年度より進めている層状鉄マンガン鉱床の研究結果の一部を報告する。



第1図. REE 生産量と価格。

2. 層状マンガン・鉄マンガン鉱床

層状マンガン (Mn) 鉱床および層状鉄マンガン (Fe-Mn) 鉱床は海洋底で堆積したマンガンや鉄に富む堆積物が海洋プレートの移動によって陸地付近まで運搬され、陸地に付加し(付加体形成)、地表に露出したものである。一部の鉄やマンガンに富む海洋堆積物には鉄水酸化物に吸着して希土類元素が濃集していることが知られている(例えば、Ohta *et al.*, 1999)。鉄マンガン堆積物を起源とする Mn 鉱床や Fe-Mn 鉱床にも REE に富むことが期待されるが、同鉱床の REE を始めとする微量元素組成はほとんど報告されておらず元素分布は明らかではない。

本研究では地質調査総合センター・地質標本館に所蔵される日本の Mn 鉱石および Fe-Mn 鉱石試料から 56 鉱床・73 試料を選定し、微量元素・REE 組成の分析を行った(第2図)。

日本の Mn 鉱床は付加体のチャート質岩中に胚胎される。X 線回析の結果、主要構成鉱物としてバラ輝石、菱マンガン鉱、ハウスマン鉱、ブラウン鉱などマンガン珪酸塩鉱物やマンガン炭酸塩鉱物を主体とする。一方、Fe-Mn 鉱床はジュラ紀付加体(秩父帯)および白亜紀付加体(四万十帯)の玄武岩とチャートの境界部に挟在される。

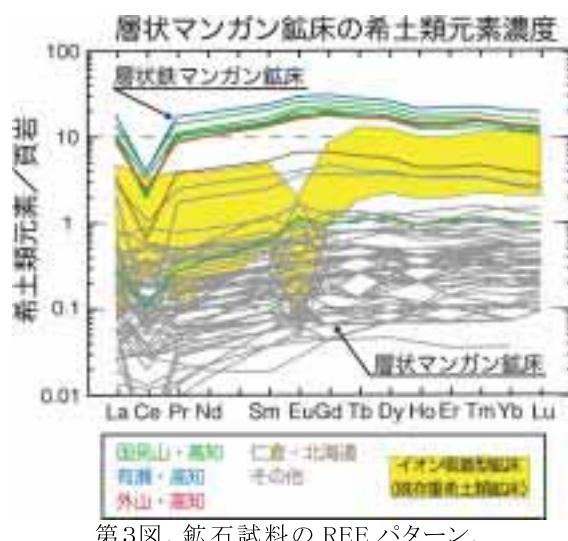


第2図. 日本の地帯区分と試料产地。

X線回析の結果から、本鉱石は赤鉄鉱やベメント鉱、菱マンガン鉱など鉄酸化物やマンガン珪酸塩鉱物から構成される。

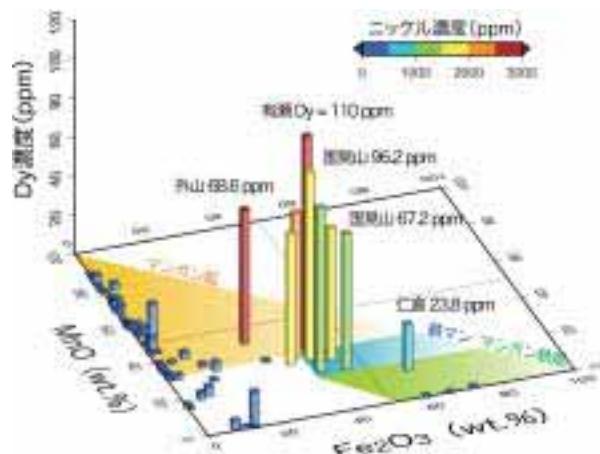
3. HREE に富む Fe-Mn 鉱床

分析した Mn 鉱石類試料の組成は $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.0 - 72.8 \text{ wt.\%}$, $\text{MnO} = 0.4 - 88.6 \text{ wt.\%}$ の広い組成範囲を持つ。鉄とマンガンの両元素とも濃度が低い試料は石英を含有することによって SiO_2 が増加し、チャート質岩へと漸移する。Mn 鉱石試料 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 20 \text{ wt.\%}$) はマンガンとカルシウムに富んでおり、Fe-Mn 鉱石試料 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 20 \text{ wt.\%}$) は鉄およびマンガンに富む。



第3図には堆積岩組成の代表である頁岩 (PAAS: post-Archean average shale, Taylor & McLennan, 1985) で規格化した鉱石試料のREE組成を示した。ほとんどの Mn 鉱床は頁岩よりも低いREE濃度であるが、一部の Fe-Mn 鉱石試料は頁岩の約20倍という高いREE濃度を持つことが明らかとなった。これらのREE含有量の高いFe-Mn 鉱石試料にはREEが1500–2700 ppm, Dyが66–110 ppm含まれる。REEパターンはややLREEの低い左下がりのパターンを持っており、相対的にHREEに富んでいる。またFe-Mn 鉱石試料にはセリウム(Ce)の負異常が顕著である。

Fe-Mn 鉱床にはREEとニッケル(Ni)やジルコニウム(Zr)などに正の相関が見られる。第4図には鉄・マンガン・Dy・Niの濃度を示した。狭い組成範囲 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 25 - 43 \text{ wt.\%}$, $\text{MnO} = 20 - 40 \text{ wt.\%}$) の試料に Dy が濃集しており、そのようなREEに富む試料は Ni にも富む傾向が明らかとなった(守山ほか, 2006)。これらのREEに富むFe-Mn 鉱石は赤鉄鉱を主体としており、構成鉱物においてもREEに乏しいMn鉱石試料とは異なる特徴を持つ。同様の鉄・マンガン組成を持つFe-Mn 鉱石試料においても、赤鉄鉱を含まず菱マンガン鉱とベメント鉱を主体とする試料のREE含有量は低い。



第4図. Fe-Mn-Dy-Ni組成図。

4. HREE 資源としての Fe-Mn 鉱床

これまでの結果、ある特定の主要元素組成を持ち、赤鉄鉱を主体とするFe-Mn 鉱床においてHREEが濃集する傾向がはじめて明らかとなつた。本研究で報告されたFe-Mn 鉱床のHREE含有量は、現在HREE鉱床として稼行している中国のイオン吸着型鉱床のHREE含有量よりも高い(第3図)。風化鉱床という地域偏在型のイオン吸着型鉱床に対して、Fe-Mn 鉱床は世界に広く分布しており、資源の安定供給の一翼を担う可能性を秘めている。

しかしながら、Fe-Mn 鉱床は資源としての価値の低さからこれまでほとんど着目されてこなかつた。そのためREE資源としての評価を行うためのデータが欠如しており、海外の鉱床やより古い時代の試料に関して日本のFe-Mn 鉱床と同様の性質を有するかは未知数である。ただし、インド東部に分布する原生代Fe-Mn 鉱床から一部REEに富む試料(Mishra et al., 2006)が、そしてパキスタンの白亜紀Fe-Mn 鉱床(Shah & Moon, 2004)からは本研究と類似する性質および組成が報告されている。これらの事実は本研究の結果が異なる形成年代のFe-Mn 鉱床や異なる地域のFe-Mn 鉱床においても適用可能である可能性を示唆している。比較的分析の簡易な主要元素組成でREEポテンシャルを推測可能とする本研究の結果は、資源探査の際にも有効であろう。今後日本以外のFe-Mn 鉱床に関するポテンシャル評価を行っていく必要がある。

文献

- Mishra et al., 2006, *Res. Geol.*, **56**, 55–64.
- 守山ほか, 2006, 日本地質学会第113年学術大会講演要旨, 144p.
- Ohta et al., 1999, *Geochem. Jour.*, **33**, 399–417.
- Shah & Moon, 2004, *Jour. of Asian Earth Sci.*, **23**, 1–15.
- Taylor & McLennan, 1985, *The Continental Crust: its Composition and Evolution*, Blackwell, Oxford, 312p.

地熱資源の統合的評価に資するデータ・ツール集 CD-ROM の出版（九州事例の編集）

CD-ROM Publication of Data and Tools for Integrated Assessments of Geothermal Resources (Editing the Case Study Results on the Kyushu District, Japan)

地熱資源研究グループ： 茂野 博

Geothermal Resources Research Group: Hiroshi SHIGENO
Phone: 029-861-3701, e-mail: hiroshi-shigeno@aist.go.jp

1. はじめに

地熱資源の調査・開発・保全などの長期的・継承的な発展に資する目的で、筆者らは「地理情報システム（GIS）を利用した地熱資源の評価（アセスメント）の研究」を2001年度から進めている。この中で、様々な個別的数据処理－表示手法と統合的資源評価手法について電子化事例研究（特に、九州地方、20万分の1地勢図範囲の「大分」地域、および「豊肥」地熱地域）を試行し、その結果を2.の成果報告一覧のように公表してきた。

現在、成果の幅広い利用を容易に可能とする目的で、電子的な取りまとめとデータ・ツール集をCD-ROM公開化する作業を進めており、地質調査総合センターの数値地質図（DGM GT-3）として2006年度中に出版の計画である。

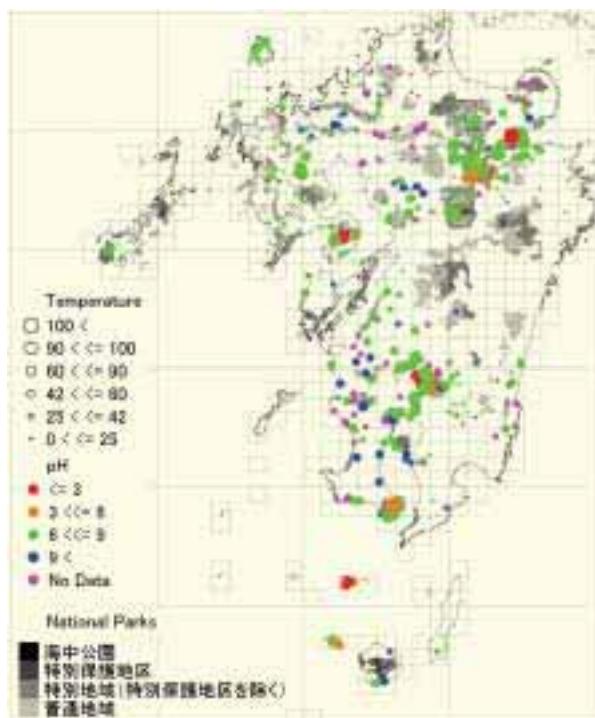


図1 九州地方の地球科学アトラスの一環として作成した温泉の湧出温度・pHと自然公園の分布の地図上重合表示（茂野, 2005c）。

2. これまでの成果報告一覧

茂野 博・阪口圭一 (2002a): 地理情報システム（GIS）を利用した地熱資源の評価（アセスメント）新計画. 地質ニュース, no. 574, 24-45.

茂野 博・阪口圭一(2002b): 電子地理情報を地熱調査・開発に利用する. 地熱エネルギー, 27, 252-273.

茂野 博・阪口圭一(2002c): 地質調査所「100万分の1日本地質図 CD-ROM版」メッシュデータの様々な利用法－国土地理院・標高メッシュ・ファイルフォーマット化を通じて. 地質ニュース, no. 578, 36-49.

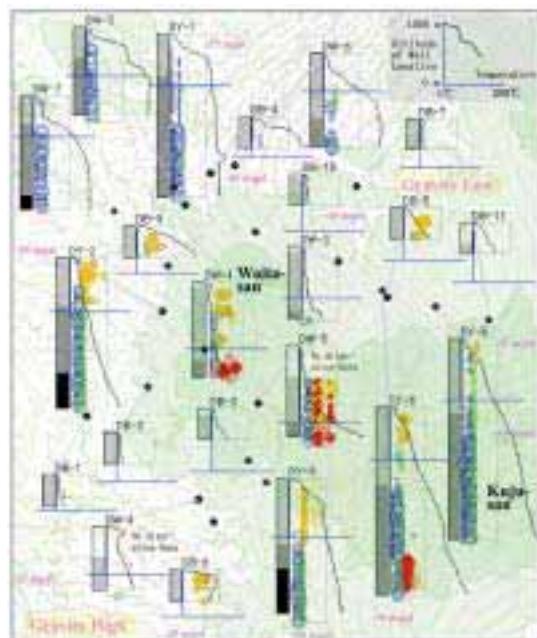


図2 豊肥地域の500m～3000m級坑井調査データ（温度・地質・変質）の地図上表示（データは新エネルギー・産業技術総合開発機構などによる）（茂野, 2004c）。

茂野 博 (2002)：九州の地熱発電開発地域の地質鳥瞰図一山と風景の GIS ソフト「カシミール 3D」による作図例. 地質ニュース, no. 580, 21-31.

茂野 博 (2003)：公開震源データと GIS を利用した深部地熱環境の推定—20万分の1地勢図「大分」地域を例とした試み. 地質ニュース, no. 581, 14-32.

茂野 博 (2004a)：火山防災と地熱開発の協力—磐梯山 1888 年噴火(水蒸気爆発)災害を例に考える. 地熱エネルギー, 29, 17-32.

茂野 博 (2004b)：地熱流体化学データの簡易データベース化と統合解析—GIS を利用した地熱資源評価研究の一環として「豊肥」地域を例に. 地質ニュース, no. 594, 58-69.

茂野 博 (2004c)：地熱井の温度・地質・変質データの簡易データベース化と地図上統合表示—GIS を利用した地熱資源評価研究の一環として「豊肥」地域を例に. 地質ニュース, no. 595, 43-56.

Shigeno, H. (2004) : Fluid geochemistry data processing for integrated assessment of Japanese geothermal resources using GIS: A case study for the Hohi area, Kyushu. Proc. 11th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction, Saratoga Springs 2004, 177-181.

茂野 博 (2005a)：標準 250 m メッシュユーレイヤー系を用いた地熱資源評価の事例研究(その 1)：20万分の1地勢図「大分」地域の 2 次元的有望地域抽出. 地質ニュース, no. 609, 19-30.

茂野 博 (2005b)：標準 250 m メッシュユーレイヤー系を用いた地熱資源評価の事例研究(その 2)：20万分の1地勢図「大分」地域の簡易 3 次元的資源評価. 地質ニュース, no. 610, 22-32.

茂野 博 (2005c)：九州地方を例とした「地球科学アトラス」の自作：電子地球科学情報の簡易的な統合利用に向けて. 地質ニュース, no. 616, 44-57.

本研究の進捗状況、関係資料などは、以下の WWW-HP をご覧下さい。

<http://staff.aist.go.jp/hiroshi-shigeno/index.html>

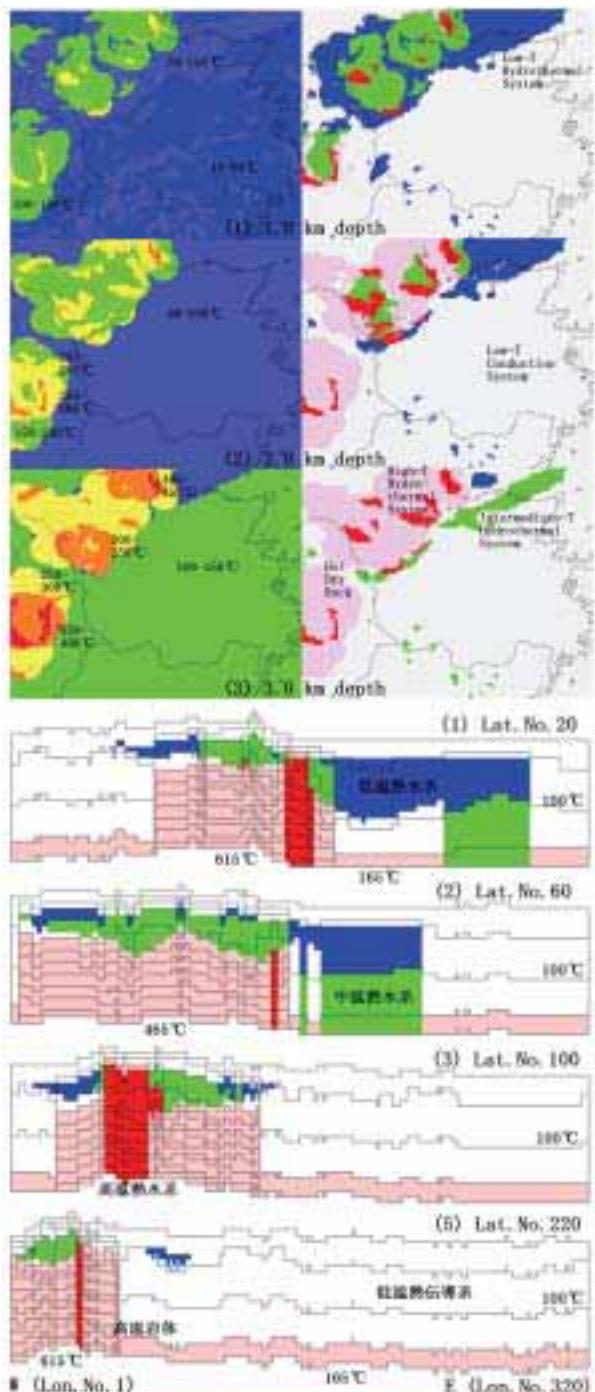


図 3 標準 250 m メッシュ—250 m 深度ユーレイヤー系を用いた簡易シミュレーションによる 20万分の1地勢図「大分」地域の 3 次元地熱資源評価の試行結果 (茂野, 2005b).

上は、平面図(左、温度；右、資源型；上→下、深度 1 km, 2 km, 3 km)で、下は W-E 断面図(5 km 深まで；上→下、(1)別府、(3)九重、(4)阿蘇の各地域を含む)である。

地熱資源型(推定分類)の凡例：青=低温热水系；緑=中温热水系；赤=高温热水系；白=低温広域热伝導系；桃色=高温岩体。

CO₂地中貯留深度での深部地下水の化学的特性：地層間隙水データベース

Geochemical characteristics of deep water in open aquifers: the formation water database for the study of geological CO₂ storage

CO₂地中貯留研究グループ: 奥山康子*, 徒徳正夫, 柳澤教雄

地熱資源研究グループ: 佐々木宗建, 村岡洋文

有機地球化学研究グループ: 金子信行

CO₂ Geological Storage Research Group: Yasuko Okuyama*, Masao Sorai, Norio Yanagisawa

Geothermal Research Group: Munetake Sasaki, Hirofumi Muraoka

Organic Geochemistry Research Group: Nobuyuki Kaneko

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

1. はじめに

昨年2月に京都議定書が発効し、温室効果ガス排出の効果的削減が求められている。この状況下、量的に重要な二酸化炭素(CO₂)を、排出源から分離・回収して地下深くに隔離する地中貯留が、技術的に実現可能な方策として注目されている。

中でも現在最も重視されているのは、「一般帶水層貯留」である。これは、水資源としての利用価値がない水質の深部地下水で満たされた地層に、CO₂を注入・貯蔵する方法である。この方法は地質学的な流体閉じ込め構造を必要としないために、地域的な貯留可能性が拡大する。地質構造上の制約が少ないとすることは、大規模排出源近くでの貯留をも実現可能とするであろう。一般帶水層貯留が注目されるのは、このような理由による。

一般帶水層でのCO₂貯留は、次の4種類の閉じ

込めメカニズムの組み合わせで成立すると考えられている；1)背斜構造や不透水層との不整合関係などによる地質学的閉じ込め、2)残留ガスとしての閉じ込めやキャップロックの力学的抵抗による物理的閉じ込め、3)貯留層を満たした深部地下水への溶解、4)溶存CO₂と貯留層の反応による炭酸塩鉱物生成(鉱物固定)(図1)。このうち、深部地下水への溶解と鉱物固定を合わせたものが、地化学的作用によるCO₂閉じ込め(地化学トラップ)に相当する。

2. 地化学トラップと深部地下水の役割

一般帶水層貯留の対象となるのは、深い埋没を経験しない堆積岩層である。CO₂は超臨界状態で注入することが考えられているので、貯留深度は十分な高圧が達成される地下800m以深と想定されている。深い埋没を経験しない堆積岩層では、このような深度でも空隙率の高い砂岩層が頻繁にはされ(松本, 1978), 空隙は深部地下水—多くは塩水—で満たされている。注入CO₂は地層の中を広がりつつ、堆積岩粒子の空隙を満たした深部地下水に溶けていく(図2)。CO₂は水への溶解度が高く、注入CO₂塊のごく近くの深部地下水は比較的短時間のうちにCO₂に飽和すると考えられる。この部分が溶解トラップを担う。CO₂の溶存形態はCO₂分子あるいは、電離したイオン(CO₃²⁻およびHCO₃⁻)である。

CO₂溶解により貯留層の深部地下水は著しく酸性に傾き、堆積岩を構成する各種鉱物粒子との反応を開始すると期待される。炭酸塩鉱物やごく脆弱な粘土鉱物などは、貯留開始から比較的短時間のうちに溶解・分解するであろう。この種の短期

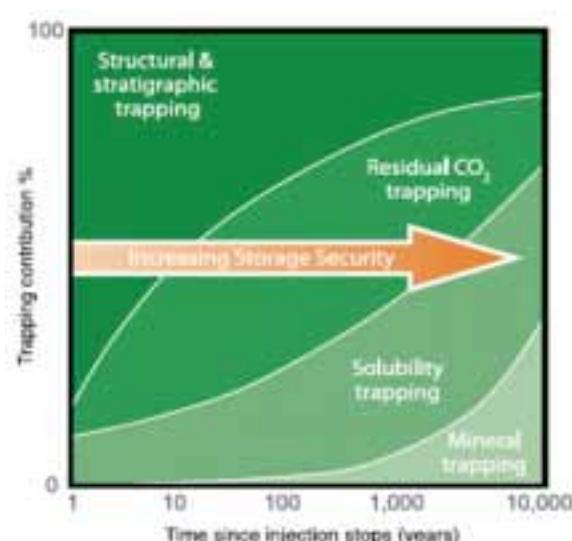


図1 閉じ込めメカニズムの種類と相対的貢献度。
(IPCC, 2005)

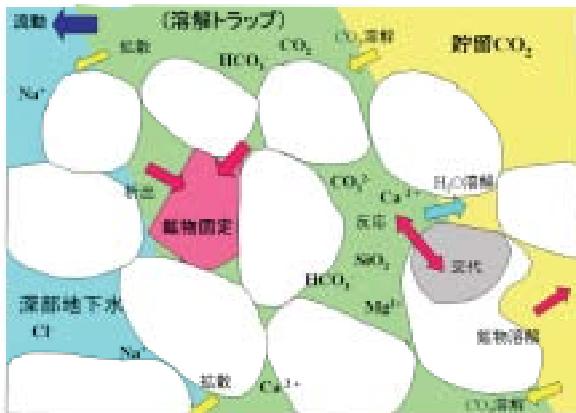


図2 貯留層での地化学的相互作用のモデル

的プロセスは、貯留層の空隙率や浸透性を変え、貯留性能に影響を及ぼす可能性がある。

碎屑粒子としてより一般的な珪酸塩鉱物も、長期間経過後は反応に加わり炭酸塩鉱物などを生成することが、堆積岩の続成作用の知識を元に考えられる。このような鉱物固定は、CO₂ 地中貯留における超長期的プロセスと考えられるが、そこには至る諸現象は短期的に観測不可能というわけではない。CO₂-EOR や CO₂ 貯留実証試験に伴い、地下での貯留層との反応と考えられる深部地下水の地化学的变化がしばしば観測されている（例：カナダ、Weyburn 地区、Raistrick ほか、2006；新潟県長岡地区、Mito ほか、2006）。

以上のように、地化学トラップにおいては貯留層の深部地下水が非常に重要となる。その塩分濃度は、CO₂ の溶解度、すなわち溶解トラップ性能に影響する可能性が大きい（Enick & Klara, 1990）。深部地下水の化学的特性は、地化学シミュ

レーションや反応実験に必要な初期条件でもある。したがって、地中貯留に伴う地化学的プロセスを解明するためには、深部地下水の地化学的特性を把握する必要がある。

3. 深部地下水のデータベース

上記の目的のため我々は、「地層間隙水データベース」の作成を、CO₂ 地中貯留研究の一環として昨年度から実施してきた。このデータベースは、日本での一般帶水層貯留を想定し、国内主要地域で貯留深度に想定される深部地下水の代表的組成を把握するために、公表された深部地下水データを集積したものである。

一般帶水層を満たす深部地下水は、初生的には堆積の場に存在した水が地層に取り込まれたものであり、海成層と淡水成層とで性質が著しく異なると期待される。さらに堆積物の性質、堆積盆の発達史などによっても変化することが考えられる。したがって深部地下水のモデル化は、限定した地域ごとに進める必要がある。対象地域は、本レポートの地圏環境技術研究グループ紹介記事を参照いただきたい。本年10月上旬時点でのデータ収集総件数は約1800件で、地域別では最多の秋田地域で433件となっている。淡水成層地域について多数のデータを収集している点が、特徴の一つである。実験的・理論的研究に向けたモデル組成を求めるのが目的であるため、データベースで採択する項目は深度、水温、pH、胚胎層、溶存成分（Na, Mg, Cl, HCO₃など）、溶存ガスといった一般水質に相当するものである。対象地域における深部地下水組成範囲を、表1にまとめる。

地層 位置	深度 m	測定地番	地層区分	剖面(深さ)	剖面(深さ)	剖面(深さ)	剖面(深さ)	剖面(深さ)	剖面(深さ)	剖面(深さ)	剖面(深さ)
深度 m				70-400	300-1000	21-300	200-1000	地表-1000	地表-1000	地表-1000	地表-1000
温度 °C				8.0-12.2	11.1-16.2	11.0-27.6	25.2-45.2	—	—	—	4.0-61.2
pH				8.4	8.6-9.8	7.3-8.2	8.2-9.8	8.9-9.2	7.0-7.8	8.0-9.8	8.0-9.7
電導 μS/cm				7.0-10.2	—	11.0-15.0	7.0-10.0	—	—	—	8.0-11.2
陽イオン mg/L				Na ⁺	11000	127-4020	3000-11200	4400-12000	8000-22000	4000-4900	10.0-2200
				K ⁺	351	0.1-0.1	0.1-0.1	0.1-0.1	0.1-0.1	0.1-0.1	0.0-0.1
				Ca ²⁺	0.021	0.1-0.7	—	—	—	—	0.1-0.8
				Mg ²⁺	400	0.0-0.2	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.1	0.1-0.2
				Ca ²⁺	1387	1.1-21.8	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.1
陰イオン mg/L				Cl ⁻	10000	7.2-11100	5000-10000	12.0-1300	0.0-2000	0.0-2000	0.0-4000
				Br ⁻	87	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
				F ⁻	0.041	0.2-0.7	0.7-4.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
				T ⁻	2000	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
				SO ₄ ²⁻	1.00	0.0-0.7	12.7-4020	32.0-5000	42.0-5000	78.1-3211	87.0-1040
計離溶成 分				HCO ₃ ⁻	—	—	8.0-24.8	10-200	8.1-11.3	—	—
				CO ₂	10.0	0.0-75.0	8.0-45.0	77-400	33-400	87-300	9.0-31.0

表1 全国的主要帶水層での深部地下水組成範囲

CO₂ 炭層地中貯留における地化学モニタリングについて

Geochemical Monitoring on CO₂ Sequestration in Coal Seams

鈴木祐一郎, 猪狩俊一郎, 前川竜男 (有機地化学 RG)

小牧博信, 藤田眞仁 ((株) KANSO テクノス)

Yuichiro Suzuki^{1)*}, Shun-ichiro Igari¹⁾, Tatsuo Maekawa¹⁾,
Hironobu Komaki²⁾ and Masato Fujita²⁾

¹⁾ Organic Geochemistry R.G., ²⁾ The General Environment Technos Co., LTD.

*Corresponding Author, e-mail address: yu-suzuki@aist.go.jp

1. はじめに

CO₂貯留技術の対象となる地層として油ガス田の油層や枯渇したガス層, 深部帶水層と並んで炭層があげられている。炭層へのCO₂注入, 貯留の場合, 同時にコールベッドメタン(CBM)の増進回収できることから, エネルギーバランス的なメリットがあると考えられている。

現在, 北海道夕張市で経産省の補助金事業として株式会社環境総合テクノス(KANSOテクノス)が中心となり二酸化炭素炭層固定化事業の現場予備実験が進められており, 深度900mのCO₂圧入井(IW-1)と観測井(CBM生産井, PW-1)が炭層へ掘削され, CO₂炭層圧入に関する種々のデータが取得されつつある。

この現場予備実験では, CO₂圧入による周辺への環境影響評価も重要な課題となっており, 種々のモニタリングを実施している。CO₂やCBMの地表への漏洩をモニタリングするため土壤ガスの地化学分析を実施している。また注入したCO₂の観測井への到達(ブレークと称する)を検出するため, 観測井の生産ガスの地学モニタリングをおこなっている。

2. 土壤ガスの地化学モニタリング

土壤ガスのモニタリングは, 注入井(IW-1)より数10m内に配置された土壤ガス採取地点4カ

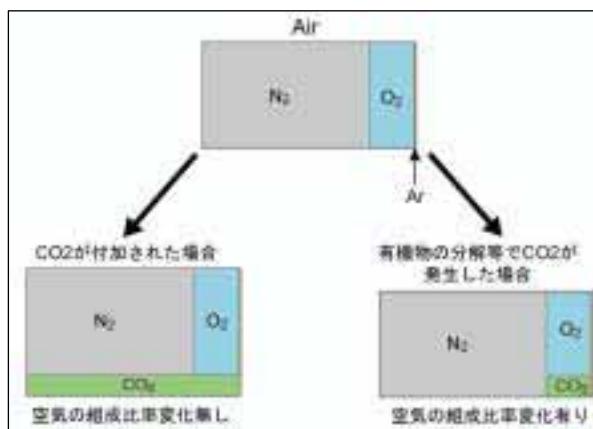


図1. 土壤ガス中のCO₂の起源について2つの可能性

所(G-3, G-3-1, G-3-2, G-3-3)および数100m離れた地点に設置された3地点(G-1, G-2, G-4)で定期的にガス試料採取し分析しておこなっている。G-3, G-3-1, G-3-3地点ではガスセンサーによる連続観察も実施している。

ガス分析の項目は, ガス組成分析(炭化水素(C₁-C₅), N₂, O₂, Ar, CO₂, H₂, He)および¹³C炭素同位体比分析(CH₄, CO₂)を実施した。組成分析結果から一部試料での大幅なCO₂濃度の上昇が認められた。具体的な事実は以下の通りである。

- 4/18および5/24の試料ではG3およびG3-3でCO₂濃度が1%を超える。
- 7/14および9/12の試料では, G-3-3でCO₂濃度が3%以上で依然濃度が高いが, G-3の濃度は0.5%以下へ減少し, G-2のCO₂濃度が1%以上へ上昇した。

CO₂濃度が大きくなった原因として図1で示す2ケースが考えられる。この両者の違いを明確にする方法は, 空気の主要成分であるN₂, O₂, Ar比を測定する方法である。CO₂が外部から付

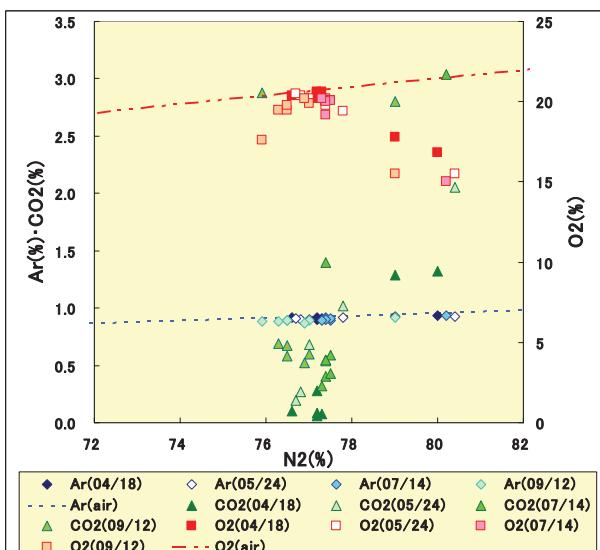


図2. 土壤ガス組成におけるN₂に対するAr, CO₂, O₂の関係

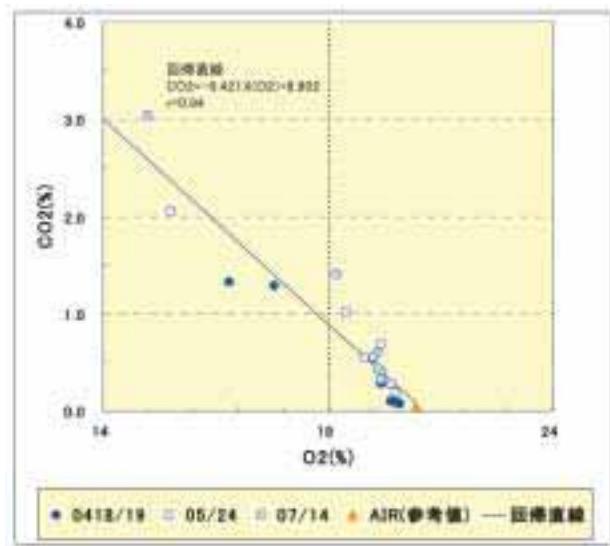


図3. 土壤ガス中のCO₂とO₂の関係

加された場合は、3成分の比は変化しないが、有機物分解などO₂が消費されCO₂が発生するケースでは3成分の比は変化するはずである。測定日別に、N₂に対するAr, O₂, およびCO₂の値をプロットしたものが図2である。図中には大気中のN₂に対するO₂, Arの関係を直線で示してある。

全ての試料でArは、大気中のN₂とArの関係を示す直線上に位置し、これらの起源が大気であることを示している。しかしO₂はCO₂濃度の高い試料で、大気の関係直線からO₂が減少する方向へずれており、CO₂濃度の低い他の試料はほぼ直線上にプロットされる。図3は、O₂とCO₂濃度の関係を示した図で、両者の間で強い負の相関関係があることが明らかである。CO₂の起源が有機物など酸化分解によると解釈される。回帰直線のO₂の減少量とCO₂の発生量が1対1の関係にないのは、有機物の分解ではCO₂とH₂Oが発生し、O₂は水の生成にも使用されるためであると解釈される。

今回の分析で、CO₂濃度が高い地点でも注入CO₂の漏洩によりCO₂濃度が上昇したのではなく

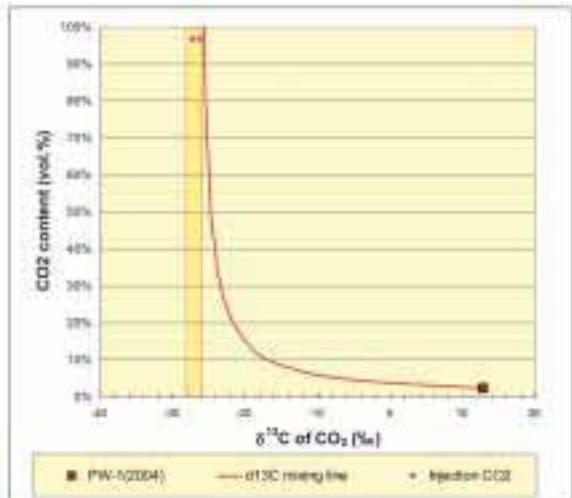


図4. 注入CO₂混合によるδ¹³Cの予想曲線

いことが明らかにされた。

3. δ¹³C 炭素同位体比(δ¹³C)による注入CO₂のPW-1への到達(ブレーク)の確認

2004年11月にCO₂注入直前、直後にPW-1から採取したCBM試料は、2%程度のCO₂を含んでおり、測定されたCO₂のδ¹³Cは+12.7‰という大変重い炭素同位体比を示した。IW-1から注入されたCO₂のδ¹³C値は、-26~-28‰前後の値が得られており、PW-1の値とは40%程度離れている。もしIW-1から注入されたCO₂がPW-1に到達した場合、PW-1から産するCBM中のCO₂のδ¹³C値が軽い方へ大きく変動することが予測される

(図4)。CBM中のCO₂濃度が注入CO₂の到達により倍(5%程度)へ上昇した場合、混合曲線からCO₂のδ¹³C値が-7‰へシフトすることが予想される。少量の注入CO₂が到達しても高感度でモニタリングできることが予想され、注入時やその後の地下でのCO₂挙動のモニタリング手法としてCO₂のδ¹³C値は有効な手法となると考えられる。この手法はヨーロッパでおこなわれたCO₂炭層固定化の試験であるRECOPOL Projectでもブレークの有効な手段として用いられ成果が得られている。

図5は、2006年におけるPW-1のCBMのCO₂のδ¹³C値について示したものである。δ¹³C値はかなりの幅で変化している。これは地下でのCO₂は状態が水中の溶存炭素などとの関係で若干不安定な要素もあるためとおもわれる。しかし連続的にδ¹³C値が軽くなる(マイナスが大きくなる)傾向は、現時点では認められない。CO₂濃度が上昇する傾向が認められない点も合わせて考慮すれば、注入したCO₂は未だPW-1に達していないと判断される。この結果は、別におこなわれているCO₂の炭層内での挙動に関するシミュレーションの結果とも一致している。

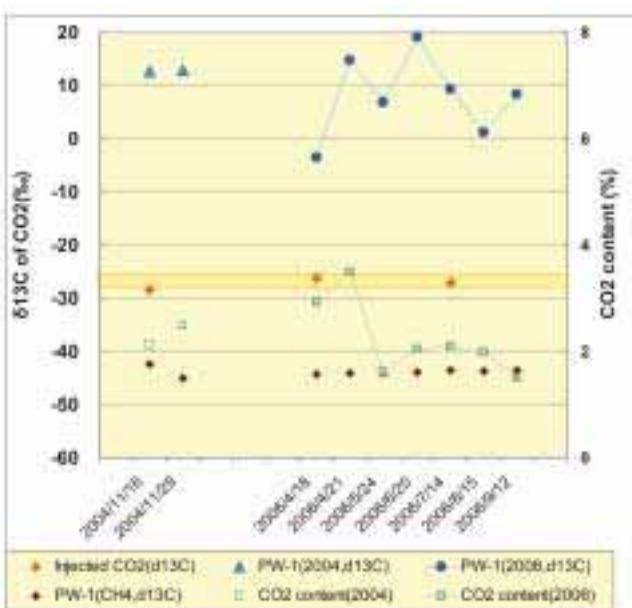


図5. PW-1ガスの組成、炭素同位体分析測定結果

**地圈資源環境研究部門成果報告書 2006
(GREEN REPORT 2005)
AIST04-C00014-3**

平成 18 年 11 月 24 日発行
編集：独立行政法人産業技術総合研究所
地圈資源環境研究部門
発行者：瀬戸政宏
〒305-8567 つくば市東 1-1-1 (第七事業所) TEL.029-861-3513
〒305-8569 つくば市小野川 16-1 (西事業所) TEL.029-861-8100

Green Report

2006

Geosphere fluid modering

Research Reports of The Institute for Geo-Resources and Environment.
With Special Topics of *Geosphere fluid modering*

24 November 2006