# Green Report





November



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



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



地圈資源環境研究部門長 Director of the Institute for Geo-resources and Environment, AIST 中尾 信典

Dr. Shinsuke Nakao

地圏資源環境研究部門の研究成果報告会は、今年で12回目となります。さて、2011年3月に起きた東日本大震災は、これまでの科学的な常識を覆し、未曾有の被害と社会的な混乱をもたらしました。自然の力は想像を絶するものであり、自然災害の脅威に対して、今後の科学技術がいかにあるべきかが我々の大きな課題となりました。復旧・復興のためには、エネルギー・資源の確保や環境の保全、さらには安心・安全の確保を目指した対策が必要です。当部門ではそのために、津波堆積物、液状化、地下水などの複合地質リスクの評価、原発事故による放射性物質土壌の対策に関する研究、さらには福島第一原子力発電所敷地内の汚染水が海へ流出することを防止するための政府による対策検討に参画するなど、所内外の関係機関と連携して復旧・復興支援に係る研究業務に積極的に取り組んでいます。

震災の復興・復旧に必要な対策に加えて、再生可能エネルギーの安定的な確保、飛躍的な開発促進が待ち望まれている中、産総研は、2013年10月つくばセンター内に「再生可能エネルギー研究センター」を設立しました。2014年4月には、郡山市に「福島再生可能エネルギー研究所」を開所する予定です。同センターでは、太陽光発電や風力発電、エネルギー輸送や貯蔵システムの統合化技術などとともに、地熱・地中熱エネルギーの研究・開発を行います。地熱・地中熱の研究は、当部門で蓄積されてきた成果に基づいており、今回、研究者の輩出にも当部門は大きく寄与しています。センター発足に関連して当部門では、地圏環境評価研究グループ・地熱資源研究グループを廃止し、9グループ体制となりましたが、今後も変わらず、地圏資源の安定供給、地圏環境の保全・利用の基盤となる研究を推進していきます。センターに異動する研究者の一層の活躍を期待するとともに、当部門としてもセンターと連携し、互いの成果を活かし、発展させていく所存です。

一方,2009年からのレアアース高騰は落ちついてきてはいるものの、未だ資源の供給源が一極集中した状態にはかわりがなく、レアメタル・レアアース資源の、将来を見越した安定確保の課題は残されたままです。このような背景の中で、本年は「レアメタル資源の将来と日本の取るべき道」をテーマにした成果報告会を開催いたします。招待講演として、JOGMECの廣川満哉氏より「レアメタル資源開発の動向と課題」について、東京大学の岡部徹氏より「レアメタル供給に関するボトルネック」について講演していただきます。また、これまで当部門で培ってきた研究成果や最近の話題などを取り混ぜて、レアメタル・レアアース研究の展開および問題点、解決法などを議論していただきたいと考えております。

当部門の研究には、上述のように、日々刻々と変化する社会情勢を見ながら社会ニーズを的確にとらえて 推進していく研究テーマもあれば、地球科学の知的基盤として地道に取り組む研究テーマや、学際的・萌芽 的な研究テーマなどがあります。部門成果報告会では、メインテーマに関する研究以外に、各研究グループ や個人の研究成果をより詳しく知っていただくために、例年同様にポスターセッションの場を設け、ご参加 いただいた方との研究交流を深めてまいりたいと考えております。土壌汚染や地下水環境、燃料資源、微生 物、新材料・新技術の開発など、様々な研究成果の紹介を用意しております。

この成果報告会は、部門の研究成果をお知りいただくと同時に、皆様から直接、貴重なご意見を伺う貴重な機会と位置づけており、毎年定期的に開催しております。今後とも変わらないご高配を賜りますよう、心からお願い申し上げます。

# 目 次

| 【プログラム】     |                                |       |    |
|-------------|--------------------------------|-------|----|
| 13:30-13:50 | 地圈資源環境研究部門研究紹介 研究部門長           | 中尾信典  | 1  |
| 13:50-14:10 | レアメタル資源確保に対する産総研の役割            |       |    |
|             | 鉱物資源研究グループ長                    | 高木哲一  | 6  |
| 14:10-14:30 | レアアースのマテリアルフローと需給予測            |       |    |
|             | 鉱物資源研究グループ                     | 森本慎一郎 | 10 |
| 14:30-15:00 | レアメタル資源開発動向と課題                 |       |    |
|             | (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構             |       |    |
|             | 金属企画部国際業務課長                    | 廣川満哉  | 12 |
| 15:00-15:45 | ポスターセッション                      |       |    |
| 15:45-16:30 | レアメタルの供給に関するボトルネック             |       |    |
|             | 東京大学 生産技術研究所                   |       |    |
|             | サステイナブル材料国際研究センター長             | 岡部 徹  | 14 |
| 16:30-16:45 | レアメタル探査への SHRIMP, LA-ICPMS の活用 |       |    |
|             | 鉱物資源研究グループ                     | 昆 慶明  | 18 |
| 16:45-17:00 | リモートセンシングのレアメタル探査への応用          |       |    |
|             | 鉱物資源研究グループ                     | 児玉信介  | 20 |
| 17:00-17:15 | 南アフリカの蛍石鉱床に伴われるレアアース鉱化作用       |       |    |
|             | 鉱物資源研究グループ                     | 星野美保子 | 22 |
| 17:45       | 懇親会                            |       |    |
|             |                                |       |    |

# 【ポスターセッションの内容】 (研究グループ発表)

| 地下水研究グループの紹介      | 地下水研究グループ長      | 丸井敦尚  | 26 |
|-------------------|-----------------|-------|----|
| 鉱物資源研究グループの紹介     | 鉱物資源研究グループ長     | 高木哲一  | 28 |
| 燃料資源地質研究グループの紹介   | 燃料資源地質研究グループ長   | 鈴木祐一郎 | 30 |
| 地圏微生物研究グループの紹介    | 地圏微生物研究グループ長    | 坂田 将  | 34 |
| 地圏化学研究グループの紹介     | 地圏化学研究グループ長     | 佐脇貴幸  | 36 |
| 物理探査研究グループの紹介     | 物理探査研究グループ長     | 光畑裕司  | 42 |
| CO2地中貯留研究グループの紹介  | CO2 地中貯留研究グループ長 | 西 祐司  | 44 |
| 地圏環境リスク研究グループの紹介  | 地圏環境リスク研究グループ長  | 張 銘   | 48 |
| 地圏環境システム研究グループの紹介 | 地圏環境システム研究グループ長 | 高倉伸一  | 52 |

# (福島再生可能エネルギー研究所の紹介)

再生可能エネルギー研究センターにおける地熱・地中熱研究の紹介

イノベーションコーディネータ 阪口圭一 56

#### (個人発表)

筑波花こう岩と人の営み - 文化地質学による地域振興の試み-

長 秋雄 58

産総研におけるアウトリーチ活動 (その2)\*

水垣桂子, 吉岡真弓, 柳澤教雄, 佐脇貴幸, 内田洋平, 阪口圭一, 安川香澄 関東平野北部の地下温度分布にみられる地下水開発の影響\*

宮越昭暢, 林 武司(秋田大学教育文化学部)

重希土類資源としてのイオン吸着鉱の成因と探査の指針

実松健造, 昆 慶明, 星野美保子, 徐 維那,

森田沙綾香, 渡辺 寧 60

関東平野地下に賦存する可燃性天然ガスと泉質の関係\*

金子信行, 佐脇貴幸

炭田堆積盆におけるシェールガス・シェールオイルのポテンシャル\*

鈴木祐一郎

土壌からの放射性 Cs 脱離における固液比の影響について\*

鈴木正哉, 月村勝宏

レアメタルに関する吸着回収技術及び発光バクテリアによる土壌汚染評価手法の開発\*

杉田 創,原 淳子,駒井 武(東北大学大学院)

画像センサー深度計内蔵ボアホールスキャン画像プローブの開発\*

国松 直,佐々木孝幸((株)ボア)

CIP 法を用いた弾性波動伝播シミュレーションプログラムの開発\*

菊地恒夫

粘土中の間隙水の異方的拡散の計測:予察的シミュレーション\*

中島善人

CO<sub>2</sub>地中貯留と微生物の融合. リスク評価\*

田中敦子. 坂本靖英 他

土壌・地下水汚染浄化に係るサステナビリティ評価 - そのフレームワークと海外動向 -\*

張 銘

微生物による cis-DCE の酸化分解条件の検討\*

吉川美穂(ケミカルグラウト(株)), 竹内美緒, 張 銘, 駒井 武 (東北大学) バイオレメディエーションにおける物質移行の意義と促進技術\*

張 銘、吉川美穂 (ケミカルグラウト(株)),

竹内美緒, 駒井 武 (東北大学)

Possibility of Identifying Naturally-Occurring Heavy Metals

by Combination of XRF Analysis and Leaching Tests\*

張 銘, 星野美保子, 原 淳子

Determining Diffusive Properties of Acetate and Dissolved Hydrogen in Soils\*

吉川美穂(ケミカルグラウト(株)), 竹内美緒, 張 銘, 駒井 武 (東北大学) 多層構造を持つ PDC チップを用いたパーカッションビットの性能評価\*

大野哲二、宮崎晋行、唐澤廣和、高倉伸一、Eko Akhmadi (三菱マテリアル (株))、

寺倉稚晃(〃), 松尾俊彦(〃), 大橋忠一(〃)

— 5 —

<sup>\*</sup> 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



# レアメタル資源確保に対する産総研の役割

## Role of AIST for the securement of critical metal resources

#### 鉱物資源研究グループ長:高木哲一

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

# 1. 地質調査所の鉱物資源研究

産総研地質分野の前身である地質調査所では、明治15年の発足以来、各種資源に関する調査・研究が中心的業務の一つであった。1960年代頃までは、鉱床部、各支所の鉱床担当者を含めると、数十名に上る研究者が資源研究に携わっており、各通産局管内で地質調査所の支所・出張所が技術支援を行っていた。地質調査所月報に掲載される論文は、1950年代までは8割が資源関連のものであった。地質図幅作成において、日本列島を構成する地質の精密な層準解析が行われた背景には、純粋な地質学研究と併せて、黒鉱やキースラーガーといった層準規制の著しい鉱床を探査することが大きな目的であった。

1970年代から80年代にかけて,国内金属鉱山の稼行数が急速に減少し,地質調査所における鉱物資源研究の役割も徐々に純粋科学にシフトした.石原舜三博士(元鉱床部長,元工業技術院長)が重要な花崗岩分類法の1つである磁鉄鉱系列・チタン鉄鉱系列花崗岩類を提唱したのが1977年である<sup>1)</sup>.同じ時期に,佐藤壮郎博士(元鉱床部長,元人事院総裁)が,今日でも支持される黒鉱鉱床の形成モデルを提唱した<sup>2)</sup>.さらに,松久幸敬博士(元地殻化学部長)が酸素同位体の鉱物間分配係数に関する歴史的論文を1979年に発表した<sup>3)</sup>.

1990年代には、Jeffery Hedenquist 博士(元米国資源地質学会会長)が地質調査所鉱物資源部に所属し、彼の招きで数多くの優秀な欧米研究者がフェローとして地調に滞在し研究を進めた。1994年、Hedenquist 博士は、フェローの1人であった Jacob Lowenstern 博士(現 USGS)と共著で、熱水鉱床の成因に関する論文を Nature 誌に発表した<sup>4)</sup>。1970-90年代は、地質調査所における鉱物資源研究の黄金期と言えよう。

しかし、これらの輝かしい成果とは裏腹に、この期間、国内金属鉱業は衰退の一途を辿り、それに歩調を合わせて、1997年に鉱物資源部と燃料資源部の合併が行われ、さらに2001年の独立行政法人化で、わずか1研究グループにまで縮小されてしまった。また、鉱物資源研究のもう1つの拠点であった北海道支所は廃止された、資源研究者の多くは、組織改編に伴い、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究等の他部署に異動した。

#### 2. 産総研の鉱物資源研究

20世紀後半、金属資源の国際価格は極めて安定し

ており、経済力によって資源を自由に輸入できる時代が続いていた。その時代にも、金属鉱業事業団や各鉱山会社を中心に海外の探鉱活動は行われていたが、純粋に経済的理由によるところが大きかったと言える。地質調査所の鉱物資源研究に対する役割は、大局的には、戦後の疲弊した国内産業を立て直し、高度経済成長を原料供給面で支えることにあった。したがって、21世紀に入り、国内金属鉱業が衰退し、経済発展が一段落して低成長時代に入ると、その役割も終えたと考えられたのである。独法化後、わずか数名となった鉱物資源研究グループにさえ、廃止が打診されたと聞いている。

このような流れが一変したきっかけが、2004年頃から始まった金属国際価格の上昇である。この原因は、BRICSを始めとする新興工業国の資源需要が急増し、市場が吸収できる一定の限界を超えて供給不足が顕在化したことによる。この価格上昇傾向は、リーマンショックで一旦足踏みするも、今日もなお継続している(図1)。このような背景を受けて、2005年頃から産総研の鉱物資源研究に対する空気が逆風から順風へと変化し、所内の戦略予算が認められるようになった。特にレアアースは、供給構造が中国への一極集中で不安定であり、輸出枠の設定やそれに伴う価格上昇が始まっていたことから、まず国内のレアアース資源調査が実施された。2007-08年には、インド、南アフリカ、モンゴルなどのレアアース鉱徴地の予察的調査も開始された。

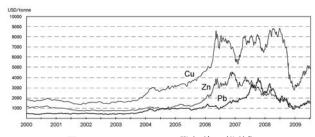


図1 ベースメタル国際価格の推移5

#### 3. レアメタル資源研究の拠点化

2010年9月の尖閣列島漁船衝突事件をきっかけにした中国による事実上のレアアース輸出禁止措置により、日本の産業界は深刻なレアアース供給不足に見舞われた。そこで、中国外のレアメタル資源を確保するために、未開発海外鉱物資源の評価・研究体制を国内に早急に構築する必要が生じた。2010年秋に、資源エネルギー庁から産総研に対し、レアメタ

ル資源研究の拠点整備の要請があった.しかし,産 総研(旧工業技術院)では鉱物資源研究を縮小して 時間が経っており,全ての鉱物資源関連分野で本格 的な研究を短期間に再開できる状況にはなかったた め,議論の結果,上流(探査から初期的選鉱まで) を鉱物資源研究グループが,下流(本格的選鉱と製 錬)は主に東北大学が担当することになった.この 方針を受けて,2011年度と2012年度に,資源エネル ギー庁から大型の補正予算が鉱物資源研究グループ と東北大学に措置され,レアメタル資源研究・評価 のための施設を短期間で整備した.その結果,当グ ループは,それまでの野外調査に軸足を置いて進め てきた研究の範囲を下流側に拡大し,化学分析・初 期的選鉱まで一通りを産総研内で実施可能な鉱物資 源研究の拠点ラボとして再出発したのである.

#### 4. レアメタル資源研究施設の詳細

産総研地質分野には、充実した共同利用実験室が 装備されており、これまでの鉱物資源研究において も利用してきた。しかし、レアメタル資源研究では、 極端な化学組成を持つ鉱石やトリウムなどの放射性 元素を通常の岩石より多く含む鉱石をしばしば扱う ことから、鉱物資源研究以外から供される通常の岩 石試料を汚染する可能性が否定できない。そこで、 新施設は、共同利用実験室を利用しなくても作業プロセスが完了できるように設計した。

## 4.1. 鉱物分析·解析設備

鉱床・鉱徴地で採取された試料は、まず構成鉱物の種類を明らかにする必要がある。そこで、本設備(7-3A 棟223室)には、以下の設備が設置されている

- · X 線回折計 (リガク Smart Lab)
- ・エネルギー分散型元素分析装置・カソードルミネッセンス付き走査型電子顕微鏡(JEOL JSM-6610LV)
- ・電界放射型電子線プローブマイクロアナライザー (JEOL JXA-8530F)
- ・レーザーラマン分光分析装置(日本分光 NRS-500)
- ·鉱物単体分離解析装置(FEI MLA250F)

これらのうち、最も特徴的な設備は鉱物単体分離解析装置(Mineral Liberation Analyzer: MLA)である(図2). これは、エネルギー分散型元素分析装置付き走査型電子顕微鏡に強力な画像解析装置がドッキングしたもので、以下のフローで解析が実施される. まず試料の反射電子線像を全て取得すると同時に、構成する粒子毎に化学組成を測定し鉱物種を特定する. 次に、それぞれの鉱物の量比、大きさ、形状、他の鉱物との接触率などを迅速に計算しオペレーターの指示により図示する. 鉱物名については、ライブラリの制限から特定できない場合もあるが、粒子の種類別に解析を行い、後からユーザーが鉱物名をアサインすることが可能である. 通常の薄

片もしくは樹脂封入試料で、1 試料あたり数時間で 測定が終了する. 本機は, 鉱石試料のみならず選鉱 物の解析・評価にも大きな威力を発揮する(図2 下).



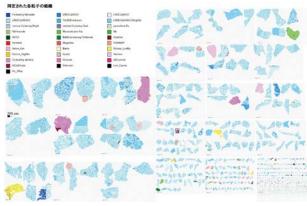


図2 鉱物単体分離解析装置 MLA250F(上), MLAに よる選鉱物の粒子解析結果の例(下)各鉱物・化 合物が同じ色で表現される.

#### 4.2. 鉱石化学分析·同位体分析設備

鉱床・鉱徴地から採取された試料は、化学分析を 行い組成や品位を把握する必要がある。そこで、本 設備(7-3A 棟222室、7-6棟1110室)には、以下の 機器を導入した。

- ・誘導結合プラズマ質量分析計(Agilent Technology 7500)
- ·多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析計 (Thermofisher Scientific Neptune Plus)
- ・ガルバノ装置付フェムト秒レーザー照射装置 (Cyber Laser IFRIT)
- ・蛍光 X 線分析装置(リガク ZSX Primus III+)
- ・蛍光 X 線用ビードサンプラー(Herzog)
- ·粉末自動秤量装置(太陽計測)

これらのうち、誘導結合プラズマ質量分析計は、 レーザー照射装置と連結して、主にレーザーアブレイション(LA-)ICPMSとして使用する(図3)、 LA-ICPMSとは、固体試料の表面局所をレーザー光 で蒸発させ、発生したエアロゾルを高純度アルゴンガスに乗せて誘導結合プラズマ質量分析計に導入 し、固体表面の化学分析を行う装置である。この手 法は、試料の前処理が容易であり、酸・アルカリ溶 解で常に問題となる試料の溶け残りが発生しない.また、1試料あたりの測定時間が2分程度と極めて迅速である.したがって、適切な標準試料さえあれば非常に強力な分析ツールとなる.当グループでは、蛍光 X 線分析用のガラスビードの表面を LA-ICPMS で分析し、全岩化学組成を得るルーチンを確立している<sup>6)</sup>.多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析計は、Sr, Nd, Pb などの同位体比を測定するための機器であり、分析対象は、溶解した試料から各元素を抽出した液体試料が中心であるが、LA 装置と連結して測定する方法を開発中である。これらの同位体比は、鉱床を形成したマグマや熱水の起源や形成年代を明らかにする上で重要な手掛かりとなる.



図 3 レーザーアブレイション ICPMS 左がレーザー照射装置,右が誘導結合プラズマ質 量分析計

#### 4.3. 選鉱実験設備

鉱山で採掘された粗鉱は、まず選鉱によって有用鉱物が濃集する精鉱となり、精鉱を製錬することにより目的の有用元素からなる製品となる。したがって、まず選鉱の可否が鉱山開発の成否を決めていると言ってよい。特にレアアースなど開発の歴史が浅く、かつ多様な産状を示す鉱物資源は、選鉱方法が十分に確立していないため、選鉱にかかる技術開発の比重が他の鉱種よりも大きい。そこで本施設では、従来法を主とした初期的選鉱実験設備を整備した。主な選鉱設備は以下の通りである。

- ・ジョークラッシャー (Herzog)
- ·全自動岩石粉砕器(Herzog)
- ・高電圧パルス選択性粉砕装置(SELFRAG AG)
- ・ボールミル (Retsch)
- ・振動ミル (CMT)
- ・石川式自動メノウミル (石川製作所)
- · 乾式常磁力磁選機(Eriez Magnetics)
- ・乾式レアアースロール磁選機(Eriez Magnetics)
- ·湿式高磁力磁選機(Eriez Magnetics)
- ・静電セパレーター(Eriez Magnetics)
- ・ハイドロサイクロン (KREBS)
- ・アジテア式浮遊選鉱機3L (WEMCO)

- ・アジテア式浮遊選鉱機0.5L (CMT)
- ・カラム式浮遊選鉱機 (Eriez Magnetics)
- ・ウィルフレーテーブル (Motive Traction)
- ・アイソダイナミック分離器(Franz)

また、選鉱物の解析用として以下の設備を導入した.

- ・ゼータ電位測定器(日機装)
- ・レーザー回折式粒度分布測定器(Malvern)
- ・フーリエ変換赤外分光分析計(島津)
- ・比表面積測定装置(日本ベル)

これらの設備のうち、最も特徴的なものは高電圧パルス選択性粉砕装置である(図4). これは、岩石・鉱石に対し高電圧電流をパルス状に流し、鉱物等の粒界で粉砕する装置である. 本装置により、目的の有用鉱物の分離性が格段に向上するほか、過粉砕による微粉の生成も抑制することができる.



図 4 高電圧パルス選択性粉砕装置(SELFRAG AG 製)

選鉱実験室(7-6棟1108室)は、作業員の粉じん 吸引を防止するために局所排気装置を装備してい る. また、実験で生じる廃水は、フィルターでろ過 した後、室内タンクに一時貯水し、放射能濃度を計 測して基準値の10分の1以下であることを確認した 後に外部の研究排水系に流している。しかし、この 方法では、将来、廃水量が増加した際に処理能力が 不足するため、2013年度内に廃水真空加熱減容装置 を導入する予定である。

#### 4.4. 高精度年代測定装置 SHRIMP

未開発資源のポテンシャルを適切に評価するには、鉱床を形成したマグマや熱水の起源および鉱床形成プロセスを解明し、それらの知見に基づき、鉱体の形状や品位分布を予測する必要がある。2013年2月に導入した SHRIMP II e(ASI 製)は、この目的のために岩石・鉱石の形成年代を高精度に測定するための分析機器である。本機は大型の二次イオン質量分析計で、酸素イオンまたはセシウムイオンプローブを目標物に照射し、たたき出された二次イオンを質量分析計で分析する。地質学研究専用の仕様を備えており、岩石・鉱石に広く含まれるジルコンの U-Pb 年代の測定では、本型機によるデータの信

頼性が最も高い. 2013年度末には,本機のマルチコレクター化を行い,各種安定同位体の局所分析も可能にする計画である(詳細は,本号掲載の昆慶明氏の解説を参照).



図 5 高精度年代測定装置 SHRIMP IIe

#### 5. レアメタル資源確保に対する役割

新興工業国の発展,浅所資源の枯渇,資源国の保護主義政策の傾向などを総合的に考えると,鉱物資源が安値で自由に輸入できる時代は,もう二度と来ないであろう.2013年現在,レアアースは価格が下落し供給力に十分な余裕があるが,こういう時にこそ海外の有望鉱床の権益を獲得し,将来の高騰に備えるべきである.

レアメタル資源は、採掘量が少なく価格も不安定であるため、鉱山開発への投資リスクがコモンメタルやベースメタルに比べて大きい、そのため、日本では(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)が民間企業に先駆けて未開発鉱床の探

査・評価を行うと同時に、一定のリスクマネーも供給できる体制を整備している。しかし、JOGMECもリスクの大きい不良案件に投資し損害を出すことは可能な限り避けなければならない。

そこで、産総研の役割は、以下の2点に集約される と考えている。

- 1)各国地質調査所との連携体制,機動力,新ラボの高度な分析能力などを活用して,未開発鉱物資源の探査に初期段階から関わり,質の高い資源ポテンシャル評価を行うことにより,開発に至る段階での各種リスクを軽減する.
- 2) 上記を達成するために,鉱床・鉱物学的知見の蓄積(基礎研究),分析技術の高度化,若手研究者の育成などを長期的視点に立って行う.

両方の役割を車の両輪とすることにより,産総研は日本のレアメタル資源確保に大きく貢献できるものと確信している.

#### 参考文献

- 1) Ishihara, S. *Mining Geol.*, 27, 293–305 (1977)
- 2 ) Sato, T. Jour. Geol. Soc., Special Pub., 7, 153-161 (1977)
- 3) Matsuhisa, Y., Goldsmith, J.R. and Clayton, R.N. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1131–1140 (1979)
- 4) Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J.B. *Nature*, 370, 519–526 (2004)
- 5) 経済産業省 レアメタル確保戦略参考資料集, p16 (2009)
- 6) Kon, Y., Murakami, H., Takagi, T. and Watanabe, Y. *Geochemical Jour.*, 45, 387–416 (2011)



# レアアースのマテリアルフローと需給予測

# Material Flow Analysis and Demand Forecast of Rare Earth

鉱物資源研究グループ:森本慎一郎、徐維那

Shinichirou Morimoto<sup>1)\*</sup>, Yuna Seo<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Mineral Resources Reseach Group, Institute for Geo-Resources and Environment. \*Corresponding Author, e-mail: sh-morimoto@aist.go.jp

#### 1. はじめに

近年,エレクトロニクス製品やハイテク製品を含む IT 機器や自動車など工業製品の高性能化に伴い,それら製品におけるレアメタル(希少金属)の使用量は世界的に増大している.レアメタル資源は地域偏在性が極めて高く,生産国の政治的・経済的要因により供給メカニズムや価格は大きく変動する.また,レアメタルの中でも特にレアアースと呼ばれる鉱種についてはその世界生産量のうち約97%を中国が占めており,上述した価格変動や近年の中国による輸出規制により,我が国のみならず世界的な産業発展やイノベーション推進に大きな影響を与えることが懸念されている1-20.

しかし近年、レアアースの需要量は減少している。レアアースの世界供給量は2010年では134,000REOt/yであったのが世界経済の減速、需要家のレアアース離れ、及び省レアアース対策等の推進等により2012年には119,300REOt/yにまで大幅に減少した。2013年の予想は126,700REOt/yと前年比では増加するものの、需要家は新規調達を控えており、また単位製品当たりのレアアース使用量も今後、元に戻ることは考えにくいことから、価格高騰前の水準まで急激に世界需要量が増えることは考えにくい1.2)。

他方,国内のレアアース輸入量,及び需要量も2011年以降は減少しており,国別にみると中国からの輸入は減少している一方で中国外からの輸入量が増えている。国内需要も一時期の価格高騰で国内の製造業はレアアース使用量を減らすための対策を行っており,価格が回復してもレアアース使用量を元に戻すことは考えにくい。しかしながら2013年には磁石,セラミック,電池産業を中心にレアアース需要量が回復しており,イットリウム,ネオジム,ディスプロシウム,サマリウム等の需要が回復している。

本稿ではこれら需要が回復しているレアアースを中心に国内のマテリアルフロー,需要予測の結果を述べると共に省レアアース対策の現状,リサイクルの可能性,及びレアアースの需要に関する将来展望について述べる.

#### 2. イットリウム

Y (イットリウム) は世界需要量のうち53%を蛍 光体,45%をセラミック,その他2%を磁石等が占 めている。蛍光体に関しては蛍光ランプ、LED、プラズマテレビ、CCFL(バックライト)等に使用されているがその大部分の需要量を占める蛍光ランプがLEDに代替されることにより、短期的には需要が軽減できるものの、中長期的には全体の需要量は増えると予測されている。

他方、セラミックス製品に使用されるレアアースは、中国や日本、北東アジアにおいて需要量が多く、2011年ではアジア地域の需要量が世界全体の需要量の70%以上を占めている。また、セラミック製品用のレアアースの需要は、今後も増加すると予想されており、セラミック製品材料のレアアースの中で50%以上を占めるイットリウム(その他はランタン、セリウム、ネオジムなどが占める)の需要量は今後も増加すると予想されている<sup>3)</sup>.

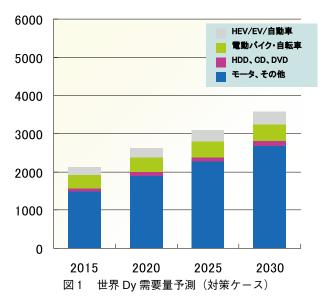
セラミック用途のイットリウムは世界では安定化ジルコニア (YSZ) やイットリウム・アルミニウム・ガーネット (YAG) などの中間材料に使用され、最終製品としてはガスタービンエンジン部品、鋳造製品、研磨材、粉砕媒体、固体酸化物燃料電池(SOFC)、セラミックナイフ等に使用されている、特に日本では安定化ジルオニアの具体的用途としては上記の他に酸素センサー、(光コネクターなどの)電子材料、歯科補綴材料等の他、光学ガラス、NiMH電池などにも使用され、需要量は安定化ジルコニア39%、光学ガラス19%、NiMH電池27%、その他15%となっている。今後は特に安定化ジルコニアの中で電子材料用途のイットリウム需要量が増加すると予想される。

#### 3. ディスプロシウム

レアアースの中で世界的に最も需要量が多いのが 永久磁石用途として使用されているレアアースであ り、特に NdFeB 焼結磁石等に使用されている Nd (ネ オジム)、及び NdFeB 焼結磁石の耐熱性を保持する ために含有される Dy (ディスプロシム) は今日の 産業発展に大きな役割を担っている.

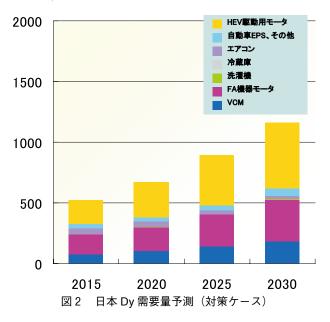
希土類磁石の世界需要量は自動車,電動自転車,電子機器 (HDD, CD, DVD等),音響機器で約60%近くを占める<sup>4)</sup>.ディスプロシウムの世界需要量は今後,人口と GDP に比例して需要量が増加した場合,2030年,無対策ケースで4,800t/y,対策ケースで3,600t/y まで増加することが予想された.特に今後,割合の増加が予想されるのは電動自転車用途

のディスプロシウムであり、その生産台数はアジアを中心に毎年飛躍的に増加していることが分かった.



他方,我が国のディスプロシウムは HEV 駆動用 モータ,自動車 EPS モータ,自動車その他,エアコン,冷蔵庫,洗濯機,FA 機器モータ,及び VCM 等に使用されている $^{5}$ .

国内のマテリアルフローではディスプロシウムの 需要量のうち HEV 駆動用モータ等の自動車用途が 43%, エアコン等の家電用途が25%, FA 機器用途 が22%, VCM 用途が10%となっている.



ディスプロシウムの日本需要量は今後,2015年までは僅かに減少するが2030年には無対策ケースで1,900t/y,対策ケースで1,100t/yまで増加することが予想された.用途別では自動車駆動用モータ,FA機器の割合が高くなることが予想された.

また我が国のモーターメーカーにヒアリングを行い、用途別レアアース永久磁石の代替材料に関するニーズ傾向を調査した。その結果、例えば FA 機器モータ等では永久磁石を使用する機器の規格上、NdFeB 焼結磁石以外の磁石を使用することが難しいため Dy レス代替磁石を利用する傾向が強いことが分かった。それに対して自動車用途に使用されるレアアース永久磁石では Dy レス代替磁石を利用する一方で SmFeN 磁石など一部、NdFeB 焼結磁石以外の磁石を使用する傾向もあることが分かった。

リサイクルについては自動車、エアコン、HDD からのネオジム、及びディスプロシウムのリサイクル可能性を検討するため、それぞれのリサイクルコストについて試算した。その結果、エアコン、HDD において収入が支出を上回り、リサイクルの実現可能性があることが確認できた。

現在,永久磁石の需要は回復の傾向を示しているが世界及び国内の需要予測から中長期的にディスプロシウム等の需要量は引き続き増加し続ける.そのため,我が国の産業競争力を維持するための戦略としての資源確保が重要であることが分かった.

#### 4. まとめ

本稿では2013年以降,需要が回復しているレアアース鉱種を中心にマテリアルフローと需要予測について概説した.

最終製品ベースでのレアアース需要量は2030年まである程度増加すると予想されるが、我が国の材料や製品の製造拠点は依然、海外にシフトしている傾向が強いためレアアースの国内輸入量は減少していくことが予想される.

我が国の製造業における競争力確保を維持するためには早急な対策が必要であり、レアアース等の資源確保はこれら我が国製造業の産業競争力確保を見据えた枠組みで戦略の構築が必要となる.

#### 参考文献

- 1) アルム出版社,「工業レアメタル No.129」, アルム出版社, (2013).
- 2) SBI Energy; Rare Earth Elements Markets Worldwide, SBI Report, (2011).
- 3 ) Dudley Kingsnorth and Industrial Minerals company of Australia, "The Global rare Earths Industry: A Delicate Balancing Act", (2012).
- 4 ) Steve Constantinides, "Materials Matters" in Arnold Magnetic Technologies Corporation, (2012).
- 5) T.Minowa, "Rare Earth Magnets: Conservation of Energy and the Environment", Resource Geology, Vol.58, No.4, (2008).



## レアメタル資源開発動向と課題

# Trends and Issues in Rare Metal Resources Development

## (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属企画部国際業務課長 兼 鉱種戦略チーム担当調査役: 廣川満哉

Director, Metals Strategy Department: Mitsuya Hirokawa e-mail: hirokawa-mitsuya@jogmec.go.jp

#### 1. はじめに

日本の産業を支える金属鉱物資源は、ほぼ全量を輸入に依存しており、将来にわたって安定的な供給を図るには、海外での資源確保が不可欠である。金属鉱山は、インフラの乏しい辺境の地、厳しい自然環境下で開発されることが多く。また、探査から生産に相当の時間と投資が必要であり、リスクの高い産業と言える。とりわけ、レアメタルは、需給の急速な変化、価格の不安定さなどなどからベースメタルより更にリスクが大きく、鉱山ビジネスの成立が困難な性格を有する。

一方,2010年の尖閣諸島を巡るレアアース問題を契機にレアメタル(レアアースを含む)は高度な技術を支える重要な元素として社会に認識されるようになった.経済産業省が2010年に策定したエネルギー基本計画では、レアメタル(戦略レアメタル)の自給率を2030年に50%以上とする政策目標値を設定し、資源の安定供給を目指している.レアメタルの自給率を高め、安定的に供給するために、鉱山開発は有力な手段があるが、その推進には相当な時間とリスク低減が必要となる.

近年のレアメタルブームの中で資源開発上の課題 となっている事項を検討した.

#### 2. 金属資源開発とレアメタルを取り巻く状況

近年の金属資源を取り巻く状況は、①資源国における外資規制、課税強化、高付加価値化などの資源ナショナリズムの再興、②中国でのレアアースなどの生産、輸出規制、③中国国内の資源需要の急増とそれに伴う海外投資の活発化、④探鉱開発プロジェクトの優良案件の減少及び参入条件の悪化、⑤鉱石の低品位化、難処理化による技術リスク・生産コストの増大、⑥資源メジャーの再編による供給のさらなる寡占化など、簡単に資源が手に入る時代から大きく変化した。

経済産業省鉱業審議会では31鉱種(レアアース1 鉱種として)をレアメタルと定義している.

レアメタルは、高機能材など日本の産業競争力の 向上に不可欠な金属であり、特に省エネ製品や地球 環境に優しい金属として、新しい技術によりその需 要は増加する。レアメタルの一部は、中国、ロシア、 南アフリカなどへの地域的偏在性が高く、特にレア アース、タングステン、ニオブ、アンチモン、白金 族は生産国が集中している。日本の輸入国もこれに 対応して、少数の国々からの輸入に頼っている鉱種が多く、供給の多角化が求められている.

最大の金属需要国である中国は、アジア、豪州を 初めとして、アフリカ、中南米と世界中の資源開発 に投資しているが、アフガニスタンやコンゴ民など 投資リスクの高い国までに及んでいる。海外での資 源獲得競争は厳しくなっているが、日本の保有する 高い技術や信用、環境意識等を通じて持続性のある 資源開発に取り組んでいく必要がある。



ボリビア、ウユニ塩湖のリチウム

#### 3. 資源開発の課題

# 3.1. 資源開発における供給面の特性

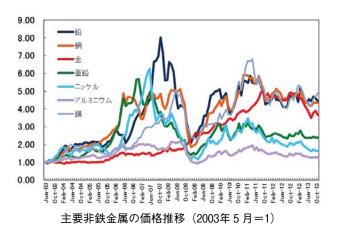
資源開発の進捗は、コモディティ価格だけでなく、資源国の投資環境変化、地元対策などの社会的要因、資金調達状況、インフラ整備の状況など様々な要因に影響を受ける。大規模高品位な優良鉱床の発見は、極めて重要であるが、それだけでは資源開発は進まないことが多い、探査から開発までのリードタイムが長いことが資源開発の特徴でもあり、短期的な供給障害での対策には対応できない側面を有する。従って、中長期的な取り組みが必要である。

探査~開発まで複雑な要因により長期間を要し、 具体的な例としては、発見から30年間を経て生産を 開始したモンゴルの Oyu Tolgoi 銅鉱山開発が挙げ られる.

2011年には、銅、金、レアアース、タングステンを初めとして多くの金属が史上最高値をつけた. 2012年以降も高値を維持している鉱種もあるものの、全般に下落傾向に有る、収益が悪化してきた資源メジャーを初めとする鉱山会社は、収益性の低い鉱山資産の処分を始めている。また、カナダや豪州のジュニア企業は、探鉱資金調達が滞りキャッシュ不足が深刻化している。こういう状況は、資源獲得競争にとってはチャンスが広がってきているとも言



モンゴル Oyu Tolgoi 銅鉱床発見の契機となった旧坑



える.

# 3.2. レアメタル資源開発の課題

レアメタルは、インジウム、コバルト、ビスマスなど主としてベースメタル鉱山の副産物として産出する鉱種と、レアアース、リチウム、タングステンなど主として単独で開発される鉱種に分けられる.

副産物で産出する鉱種は、ベースメタル生産動向に影響をうけ、特にインフラ整備が進む新興国等のベースメタル需要動向に左右される。また、レアメタルの需要は技術開発や代替など技術革新による用途変更の影響が大きいこと、用途により高品質(低不純物)や酸化物などの化合物での供給が重要な要素となり、その変化にも対応した資源確保が求められる

単独で産出するレアメタルの鉱山開発は, 鉄鉱石, 石炭, ベースメタルと比較すると, 市場規模が小さく需給が不安定で, 短期の契約形態と鉱山経営

鉄鉱石・石炭・ベースメタル・レアメタルの比較 レアメタル (ニッケル) 鉄鉱石·石炭 市場規模(全世界) 数十兆円 数兆円 数千億円~1兆円 数千億円~十数兆円 千数百億円 市場規模(日本) 数兆円 数百億円~1兆円 数千億円 数百億円~数千億円 数百億円 開発投資額 ~数千億円 ~数千億円 ~数千億円 ~1000億円 数十億~数百億円 安定的 契約形態 長期 長期 長期 短•中期 短期 価格決定方法 相対取引 取引所 取引所 区引所/相対取引 相対取引 寡占度(全世界) 中(3社で40%) 低(3社で30%) 中(3社で40%) 高(3社で80%) 高(中国90%) 資源の偏在性 低 高

高

高

が安定しにくく、リスクが相対的に高い。一方で、 資源の偏在性があり、寡占化と相まって供給リスク がある。このように、ビジネスが成立しにくい状況 にあることが鉱山開発を困難にしているが、我が国 産業にとって重要なレアメタルを今後とも安定的に 供給できる方策を模索していかなければならない。 特に新たな産業分野の最先端技術開発については、 その動向と必要な金属を注視することが重要である。

#### 4. 戦略的鉱物資源と JOGMEC の取り組み

昨年6月に開催されたパッケージ型インフラ海外 展開関係大臣会合において、製造業等の最終ユーザ の今後の需要動向、重要性の見通しによりプライオ リティ付けを行い、特に重点的に資源獲得に取り組 むべき鉱種を「戦略的鉱物資源」として、30鉱種を 挙げている。さらに、我が国産業にとっての重要性、 供給上の支障が生じる可能性、資源の安定供給の実 効性の3要素から重要度を検討することが必要であ る。

JOGMECでは、各鉱種の需給見通し並びにサプライチェーンを把握し、中長期的視点に立って、資源探査、金融支援、技術開発等の業務を総合的に効率的に実施していくために、これまでの鉱種勉強会から本年4月より鉱種戦略チームを正式に組織化した、鉱種戦略チームは、部横断的なメンバー約30名、鉄鋼・ステンレス、電池等、磁石・触媒、電線・伸銅等の産業製品分野別4グループで構成し、重要鉱種毎に川下(製品)から川上(鉱山)に遡って、マテリアルフローを詳細に把握することにより、供給上の課題を抽出し、その対処法を検討していく、また、個別元素毎の情報収集を通じて、専門性向上を目指している。



# レアメタルの供給に関するボトルネック Bottlenecks Related to the Supply of Rare Metals

東京大学 生産技術研究所 サステイナブル材料国際研究センター センター長: 岡部 徹

Director, International Research Center for Sustainable Materials, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo: Toru H. Okabe Phone: 03–5452–6312, e-mail: okabe@iis.u-tokyo.ac.jp

# 1. はじめに

数年前までは、レアメタル→希少金属→枯渇、といった短絡的な理解に基づき、メディアで多くの報道がなされていた、最近では逆に、「日本近海の海底には、レアアース資源が沢山存在するので、海底資源を利用すれば、日本のレアアースの供給問題は解決する」という不可解な報道も見受けられる。さらに、「海底のレアメタル資源の採掘・製錬を短期間で商業化する可能性」についてまで、まことしやかな報道が行われている。

一連の報道は、とても"夢のある話"ではあるが、海底のレアアース資源の商業利用については、筆者からみれば遠い将来のことであり、経済的な観点から判断する限り現時点では実現不可能である。これら一連の報道は、大きな誤解を含んでおり、また、ともすると生産性の低い非効率な資源開発政策に利用されるので注意を要する。

資源量のみに注目した海底資源の将来性や有用性の報道は一般受けすることが多い. しかし, 実際にはレアアースをはじめとする多くのレアメタルの製造や供給については, 資源量そのものはあまり問題ではなく, 製造コストや環境問題が重要となる. 残念ながら, 現在の技術では, 低いコストで海底の資源を有効に利用してレアメタルを生産することはできない. また, 採掘・製錬に伴って発生する廃棄物の処理についても解決しなければならない課題が多い.

とりわけ、レアアースの資源の埋蔵量は、陸上だけでもほぼ無尽蔵にあり、現在の産業規模では海底資源を利用する必要性は少ない、採掘に伴う環境破壊やレアアースの製錬に伴って発生する有害物・廃棄物の処理費用が問題であって、資源量そのものは大した問題ではないのである。このような基本的なことが、報道関係者をはじめ一般には理解されていないのは遺憾である。

陸上の資源は、海底資源に比べて低いコストで採掘できるため、今後も利用され続けるであろう. しかし、廃棄物の処理や環境破壊などの問題が顕在化しているため、採掘・製錬を行う条件が年々厳しくなっている. また、鉱石中のレアメタル濃度(品位)も低下する傾向にあるため、廃棄物の発生量の増大と生産コストの増加は避けられない.

このような陸上資源に関する問題が深刻化すれば、遠い将来には、海底資源を利用しなければなら

ない時代が到来する可能性があるので、学術的な意味での探査や海底での採掘技術に関する基礎的な研究開発は重要であろう。しかし、既存技術の延長上で現在のレアメタルの状況や価格をベースに物事を考える限りにおいては、海底資源の商業利用の可能性は何十年も先を見越して進めるべき基礎研究の課題である。

特殊な事例としては、金や白金などの貴金属が海底表層に高度に濃縮している箇所を選択的に採掘する活動は早期に実現するかもしれない。また、石油や天然ガスなどの流体の採掘を利用したりしてレアメタルを分離回収する場合には、海底資源開発にも採算が採れるケースが出てくるかも知れない。さらに、仮に採掘や製錬に伴って発生する廃棄物や有害物の海洋投棄が許されるということになれば、海底資源の利用が早まる可能性もある。

レアメタルの供給や需要に関する中長期的な展望を考えるに当っては、何が制約要因(ボトルネック)となっているのかを正確に理解することが肝要である。資源量やその資源の偏在性のみを基本情報として机上の議論をしても、意義のある議論にはならない。

#### 2. レアメタルの供給問題のボトルネック

レアメタルの生産と供給に関するボトルネックについて考えるに当って、考慮しなければならない主な項目は以下の3点である.

- ①資源供給制約(Resource Supply Restriction)
- ②技術制約(Technology Restriction)
- ③環境制約(Environmental Restriction)

上記の①②③は、独立している場合は少なく、お互いに強く関連している。レアメタルの生産を商業化するには、上記①②③のすべてを解決することが不可欠である。しかし、最近の海底レアアース泥の報道の事例からもわかるように、①のみで議論する事例が多い。ボリビアのウユニ湖からのリチウムの採取・製錬についても、②や③を無視して、①のみが報道されている典型的な事例の一つである。

技術が進歩すれば、深い深度の地底や海底の資源 を利用できるようになり、また、品位が低い鉱物の 利用も可能となる。また、レアメタルの分離・精製 などについては、環境規制により実施できる国や地 域が制限されている場合が多いが、技術の進歩によりこれらの制約が無くなる場合もある.

レアメタルの供給については、資源供給が制約となっている事例よりも、技術や環境が制約要因(ボトルネック)になっている事例の方がむしろ多いことを認識するべきである。

#### 3. 環境制約の大きいレアメタルについて

レアアースの中でも、ネオジムなどの軽希土元素については、資源供給は大した問題ではなく、環境制約が問題となる。ネオジムを含む鉱石は、世界中に豊富に存在し、現在の需要からすると地上の資源だけでも優に数百年分はあるので、事実上、無尽蔵と言ってよい。しかし、このネオジムの鉱石を採掘して製錬する過程で環境に大きな負荷を与えてしまうことが問題となっている。

環境負荷を度外視して、採掘に伴う環境破壊を考えず、ゼロコストで生産すれば、ネオジムなどの軽希土元素は極めて低いコストで生産ができる。ただし、製錬に伴って発生する処理困難な廃棄物を適正に処理しなければ、環境破壊は必至である。日本のような環境規制が厳しい国にネオジムのような難処理有害物を含むレアアースの鉱石を持ち込んで製錬することは、環境コストを考慮すれば商業的にそもそも不可能である。したがって、ネオジムの供給については、環境制約が主たるボトルネックである。このように、地域・国における環境コストの違いにより、生産や物流の態様が大きく変化する(図1参昭")

中国がレアアースの生産シェアを97%近くまで増大できた最大の理由は、極めて低い環境コストでレアアースを生産して全世界に供給したため、他国の鉱山からの生産がコスト的に競争できなかったこと

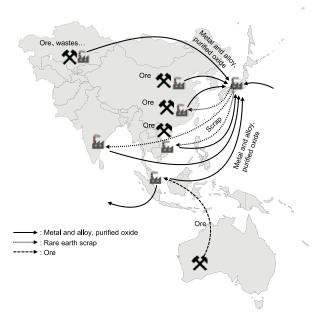


図1 レアアースなどの金属や合金を製造する場合やそのスクラップを処理する場合の世界的なマテリアルフローの概略<sup>1)</sup>.

に尽きる.

日本は、長年、レアアースの鉱石を輸入していない。これは、中国から中間原料を購入することによって環境コストの負担を経済的に回避し、環境問題となる要因を国内に持ち込まないよう中国のレアアース生産システムを都合よく利用してきたとも考えることができる。これはNIMBY(Not in my backyard)という行動であるが、詳細は著者らの解説を参照されたい<sup>2)</sup>.

最近は、オーストラリアで採掘したレアアースの 鉱石を、マレーシア国内で製錬し、製錬によって生 じたウランやトリウムなどの処理が困難な廃棄物な どをマレーシアで処分してから、純度の上がったレ アアースの化合物のみを日本国内に持ち込んで高付 加価値の工業製品を製造する動きがある. これは, 中国による資源供給制約リスクを回避し、さらに、 マレーシアを利用することでオーストラリアや日本 が抱える厳しい環境規制を回避するというビジネス モデルである. 環境コストの地域差を上手く利用 し、さらに、鉱石の供給リスクも同時に回避して、 比較的、低いコストでレアアースを生産するこのビ ジネスモデルは、レアアースの価格が高い場合に は、商業的には成り立つであろう. しかし、廃棄物 処理の迂回策やロンダリング手法とも考えられるの で、今後国際社会がどう反応するのか注目される.

また、中国が以前のように全世界に向けて安値でレアアースを供給し続けるのであれば、中国からの生産に比してコスト競争力がない上記のビジネスモデルは破綻する可能性がある。レアアース製品を必要とする需要家は、高値であっても、環境コストを適正に負担している企業からレアアースを購入するということにすれば、中国一極依存の状況を回避できるが、採算を重視するビジネスの視点からは、中国から安いレアアースを購入するのが得策となる。

ジスプロシウムなどの重希土元素については、中国にイオン吸着鉱と呼ばれる、極めて低いコストで重希土元素を生産できる希少性の高い鉱体が存在する。このため、現状では、重希土元素は中国からの資源供給に一極集中している<sup>3)</sup>. しかし、ジスプロシウムなどを多量に含む鉱石は、中国以外にも多く存在するため、仮に、中国以外の鉱山で採掘される鉱石からジスプロシウムを低いコストで効率良く分離回収する新技術が開発され、さらに、製錬に伴って発生するウランやトリウムなどの廃棄物の処理などの環境問題が解決されれば、中国のイオン吸着鉱に頼らなくても、ジスプロシウムを生産することが可能となる。

イオン吸着鉱は、希少元素であるジスプロシウムを含む鉱石が何百万年という歳月をかけて風化され、これが粘土質の鉱体に特異的に吸着、濃縮した、奇跡の鉱物と言われている。すでに、ジスプロシウム成分が自然に濃縮されているので、表土をはがし、地中に穴を掘って、鉱体に硫酸アンモニウムな

どの溶離剤を直接注入するだけで、イオン吸着鉱からジスプロシウムが溶け出してくる.

この特殊な鉱体を利用すれば、極めて低いコストでジスプロシウムの採掘と分離回収が可能である.このため、10年前までは、希少金属のジスプロシウムの販売価格は50ドル/kgであった(現在は700ドル/kg前後)、環境コストや自然に濃縮された希少な鉱物の価値をゼロカウントとすると、とても低い価格で製造できるが、環境コストの視点、さらには鉱体の希少性を考慮に入れると適正な価格でないことは明らかである.

なお、レアアースについては、酸化物の原料を製造するために溶媒抽出(SX)法という分離精製技術を使い、また、金属や合金を製造する場合には、溶融塩電解法という技術を使う。これらの技術は確立された製錬技術であり、技術的には日本をはじめ世界各地どこでも行うことは可能である。しかし、溶媒抽出法を利用すると重金属を多量に含む酸や有機溶媒の排液が発生し、また、溶融塩電解法を利用するとフッ化物を含む排ガスが発生する。環境規制が厳しい日本では、環境対策のためのコストが莫大となり、結果的に海外で製錬を行うほうが安価に製造できるというのが現状である。現時点では、レアアースの溶媒抽出や溶融塩電解のプラントは中国に一極集中しているが、これも環境制約の地域差によって生じたものと考えられる。

レアアースについては、資源的な制約の側面ばかりに目が向けられているが、溶媒抽出や溶融塩電解のプラントが中国に一極集中していることのほうが著者からみれば大きな問題である。今後、これらの製錬プラントの偏在が、レアアース供給のボトルネックとして問題となる可能性が高い。

レアメタルではないが、銅や鉛、亜鉛などの非鉄金属についても、今後は環境規制が厳しくなり、生産がより困難になると思われる。採掘に伴って発生する粉塵や膨大な量の廃棄物、製錬に伴って発生する排液や排ガス、さらには、ヒ素やカドミウム、水銀などの有害元素を含む廃棄物処理などのコストは、環境規制が厳しくなるとともに増大する。レアメタルについては、生産規模が上述の非鉄金属に比べて桁違いに小さいため、現時点では大きな問題とはなっていない。しかし今後は、レアメタルの生産についても同様の問題が顕在化して、ボトルネックの一つの要因となる可能性は高い。

#### 4. 技術制約の大きいレアメタル

先に述べたように、深い深度の地底や海底の資源を低いコストで探査・採取する技術が確立され、さらに低いコストで有害物の無害化が行える技術が開発されれば、人類にとってレアメタルの資源供給制約というボトルネックは解消されるであろう。しかし、このような技術開発は50年以上先のことと思われる。このため、当面は、特異的に濃縮した品位の

高い鉱石のうち、地表近くに存在するものを、環境 規制が緩慢な地域で採掘・製錬して利用することが 行われるであろう。

今後、ロボット技術やIT技術の進歩によって、これまで人が立ち入ることが困難であった場所での遠隔操作型のロボットによる無人の資源探査・採掘技術の発展が期待される。長期的には、技術の進歩によりレアメタルの可採埋蔵量は飛躍的に増大すると考えられる。

資源的な制約がなく,技術制約によって普及が進んでいないレアメタルの代表格は,チタンである.数多くの元素の中で,技術的な制約のみがその生産や普及を制限している例は少なく,チタンやスカンジウムがその範疇に入っているのみである.将来,チタンの製造技術にイノベーションが起こり,ステンレス鋼と同程度のコストでチタン合金が製造できるようになれば,資源的に無尽蔵で抜群の性能を有するチタンは爆発的に普及する可能性が高い4).

# 5. 資源供給制約の大きいレアメタル

白金やパラジウム,ロジウムなどの白金族金属は資源供給制約のレアメタルの代表格である<sup>5)</sup>.白金族金属は,鉱石の品位が数 ppm と低く,また,現状ではこれらの鉱石も大半が南アフリカとロシアの特殊な鉱山から生産されている.深い深度の鉱石を低いコストで採掘する技術が開発されれば,生産量は増大する可能性はあるものの,当面は,年間数百トン規模の資源供給が上限と思われる.

白金族金属に代表される本質的に資源供給量が少ない資源供給制約の大きいレアメタルは,新材料の発明などによる急な需要の発生により,一時的な供給不足に陥りやすい。これらのレアメタルは年間生産量が限られているため,需要に応じた生産量の調整ができない。さらに,一旦供給不足が生じると,投機マネーの流入も相まって急激な価格の高騰が助長される場合が多い。レアメタルを国外から調達して高付加価値製品として加工・生産する日本では,一時的なレアメタルの供給不足が経済活動に大きな影響をもたらす

リサイクル原料からの供給のみで成長過程にある レアメタルの需要のすべてを賄うことは原理的に不 可能であるが、リサイクルによるレアメタルの循環 利用は、一次的な供給不足を緩和する供給バッファ として機能する。たとえば、白金族金属の一つであ るルテニウムは、2007年以前はほとんど需要がな く、300円/gと白金族金属の中では最も安価であっ た.しかし、2007年に急に3000円/gへと価格が10 倍に高騰する事態が生じた。これは、ハードディス ク用の磁気記録膜の下地層としてのルテニウムの新 規用途が発明され、ルテニウムのスパッタ・ター ゲット材の需要が急増したためである。ルテニウム は白金の副産物として年間数十トンしか産出しない ため、需要に応じて生産量を増やすことができな い. 結果的に、一時的な供給不足が生じ、価格が一時的に高騰した. 磁気記録膜用のルテニウムの実需要は、総供給量に比して小さいため、現在では、使用済みルテニウムのターゲット材リサイクル・フローが確立し、価格は以前のように落ち着いている. このように、資源供給制約の大きいレアメタルは、一時的な供給不足が発生する危険性を有している. なお、一時的なレアメタルの供給不足の事例として、近年の中国によるレアアースの輸出停止の例が広く知られているが、これは資源供給制約の問題ではなく、環境問題を表面的な理由にした外交政策や政治的な思惑に起因して起こった現象であると考えられる.

#### 6. レアメタルのリサイクルの重要性

レアメタルのリサイクルは供給バッファとしての機能以外にも、環境保全という観点からも重要である。リサイクル原料からの製錬では、鉱石の採掘・製錬に伴って発生する有害元素や放射性廃棄物などを含む難処理廃棄物が発生しない。これは、リサイクルによる資源の循環利用の大きな利点のひとつである。

鉱石の採掘・製錬は、多くの場合、環境破壊を伴い、鉱山開発や製錬活動による環境資源の損失は甚大である。経済合理性を追求する現代の社会システムにおいては、利益率の高い優良な鉱石から優先的に採掘することが重要となるため、損失をこうむる環境資源の価値は無視される場合がほとんどである。長期的な環境資源の持続的利用を考慮した場合には、二次資源であるスクラップからのリサイクルによるレアメタルの循環利用が、人類の持続的な発展において不可欠である。

しかし、現状では環境コストの低い地域が存在するために、現行のレアメタルのリサイクル技術では 経済的に見合わないケースがほとんどであり、現段 階でのレアメタルのリサイクルの経済合理性は低い、将来的には、世界的な環境コストの上昇、及び 優良鉱石の減少による鉱石原料からのレアメタルの 生産コストの上昇により、リサイクル利用の経済的 境界条件の変化も予想されるため、環境調和型のリ サイクル技術の開発はより一層重要となるであろう。

#### 7. おわりに

レアメタルの供給のボトルネックについて考える場合、多くの場合、資源的な側面ばかりに目が向けられる.しかし、実際には、製錬プラントの技術面や社会・経済システムがボトルネックになっている場合が多いことを認識するべきである.

また、鉱石の採掘・製錬は、ほとんどの場合、環境破壊を伴い、鉱山開発や製錬活動による環境資源の損失は甚大であることも認識するべきである。経済合理性を追求する現代の社会システムにおいては、天然資源の希少性やその本質的な価値(Value of Nature<sup>2)</sup>)、さらには、環境破壊のデメリットが無視される場合がほとんどである。しかし、現在のような極めて低い環境コストで天然資源を採掘して製錬する活動を続けることは、長期的には困難となることは間違いない。

高度に持続性が高い社会の構築のためには、今後、効率の良い環境技術やリサイクル技術のさらなる進展が望まれる。とくに日本のように天然資源に乏しい国は、技術によってレアメタルの天然資源の保全と供給システムのボトルネックが解消すること目指し、世界に貢献するべきである。

本稿は、筆者が2013年8月、中国南部、江西省の 贛州市(Ganzhou)に出向き、イオン吸着鉱の生産 地で有名な地域の視察を行い、レアアースの溶媒抽 出や溶融塩電解の工場を見学したときに執筆したも のであり、雑誌「金属」に寄稿した原稿<sup>7)</sup>の一部を 抜粋、再編集したものである。

#### 参考文献

- 1) [監修] 岡部 徹, 野瀬勝弘: 'レアメタルの最新動向', 株式会社シーエムシー出版, 東京 (2012.10).
- 2) 岡部 徹, 野瀬勝弘: 'レアメタル資源の物質 フローに関する中長期展望', 廃棄物資源循環 学会誌(「特集:金属資源の物質フローとリサ イクル・廃棄物管理」), vol.22, no.6 (2011) pp.403-411.
- 3) 岡部 徹: 'レアアースの現状と問題', トライ ボロジスト, vol.56, no.8 (2011) pp.460-465. (特 集: レアメタルおよびレアアースの動向と将来 戦略)
- 4) 大井泰史, 岡部 徹: 'チタンの製錬法の歴史 と将来', 金属, vol.78, no.2 (2008) pp.114-120.
- 5) 岡部 徹: '貴金属・レアメタルの現状と課題', 化学工学((社) 化学工学会), vol.74, no.3 (2010) pp.102-108.
- 6) [監修] 足立吟也: 'レアメタル便覧 第1版', 丸善株式会社、東京(2011.1.19).
- 7) 岡部 徹, 野瀬勝弘: 'レアメタルの供給や需要に関する今後の展望', 金属, (㈱アグネ技術センター) (11月号, 10月25日発行予定) (2013.11).



# レアメタル探査への SHRIMP, LA-ICPMS の活用

Geochemical applications for investigation of rare-metal resources using Sensitive High Resolution Ion Micro Probe (SHRIMP) and Laser-Ablation ICP Mass Spectrometry (LA-ICPMS)

鉱物資源研究グループ 研究員:昆 慶明

Researcher, Mineral Resources Research Group: Yoshiaki Kon Phone: 029-861-3920, e-mail: yoshiaki-kon@aist.go.jp

#### 1. はじめに

レアメタルは、希土類元素(レアアース)等の希 少金属元素の総称である。鉄や銅などのベースメタ ルに比べ産業界での流通量・使用量が少なく産地も 偏在する為、供給が不安定になりがちである。

これらレアメタル資源のポテンシャル評価を行う際に、鉱石試料中のレアメタル元素濃度の定量は必要不可欠である。また、目的のレアメタル元素を多く含む鉱物を濃集させる選鉱過程を最適化する為には、鉱石中の特定の鉱物相にどの程度レアメタル元素が濃集しているのかを明らかにする必要がある。このように多種多様な天然の鉱石試料について元素分析を行う際に、対象となる鉱石やレアメタル元素種ごとに個別の分析法を用いることは現実的ではない、そこで我々は、全てのレアメタル元素に対応可能な分析法として、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計(LA-ICPMS)を用いた元素分析法の開発を進めてきた。

一方で、中長期的な鉱床探査の指針として、それぞれ鉱床の成因について研究を進めることも重要である。例えば、鉱床の生成に関連する地質的なイベントが『いつ』起きたのか、という年代情報は基礎的で重要な情報のひとつである。そこで我々は、火成岩試料の高精度局所 U-Pb 放射年代測定を行うため、高感度高分解能2次イオン質量分析計(SHRIMP)を用いた元素分析法の導入を進めてきた。

今回は、鉱物資源研究グループで運用している質量分析装置を用いた代表的なアプリケーション例について紹介する.

#### 2. LA-ICPMS による元素分析

レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計(LA-ICPMS)は、レーザー光を集束して固体試料表面の微小領域(直径 $15\mu m$  程度)を蒸発させ、エアロゾル化した試料をプラズマイオン源に導入し、質量分析を行う装置である(図 1). 分析に際しては、試料の溶解や鏡面研磨処理、伝導性膜によるコーティング等の複雑な前処理を必要としないため、迅速かつ高感度な元素分析が可能である. この装置を用いることで、鉱石・鉱物試料の微小領域(直径 $15\mu m$  程度)を光学顕微鏡で観察しながら、

任意の場所の元素組成を定量することが可能である.元素によって検出限界は異なるが,多くのレアメタル元素ではサブ ppm (0.0001%以下)の濃度範囲までの定量分析が可能である.

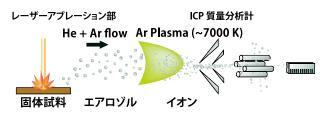


図 1 レーザーアブレーション ICP 質量分析計概略

また、鉱石試料の全岩元素組成分析法として、溶 融ガラスビードを用いた分析法が用いられている. このガラスビードは、一般に蛍光 X 線分析 (XRF) による岩石の主成分元素組成分析に使用されている 物であり、粉末岩石試料と四ホウ酸リチウムを1:10 で混合し、加熱溶融・急冷し作成される。このガラ スビードを直接レーザーアブレーションすること で、微量元素組成分析を行う. この手法の最大の利 点は、追加の試料調整が最低限度(ガラスビードの 切断のみ)で済み、かつ1試料の分析時間が2-3分 であることから、迅速かつ簡便に元素分析を行うこ とが可能である点である. また, リチウムを内標準 元素にすることで、XRF分析と併用することなく LA-ICPMS 単独での主成分・微量元素組成分析を行 うことも可能である (Kon et al., 2011). この分析法 を用いることで, 例えば地質調査総合センター発行 の標準岩石試料 (JB, JA, JG, JR シリーズ) について, 多くの元素で20%以下の不確かさでの定量分析が可 能である (図2).

最近の成果としては、ガルバノメトリック光学系を用いたレーザーアブレーション試料導入系(図3, Yokoyama et al., 2011)の産総研への導入が挙げられる。これは、2枚のミラーを用いてレーザー光を高速で走査し、分析試料表面を任意の形状で均一にアブレーションする手法である。このことで、分析対象試料に最適なクレーター形を任意に決定することが可能となった。また、最大20mm までの巨大な領域を走査可能であることから、ガラスビードのような均一な試料に対しては長時間安定した巨大クレーターによるアブレーションが可能であり、より高精

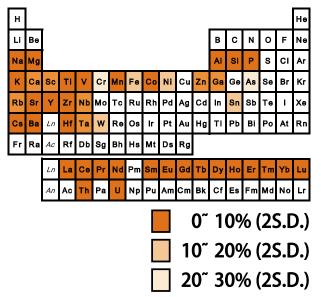


図 2 ガラスビード法による,主成分・微量元素組成分析の不確かさ(GSJ標準岩石試料の例)

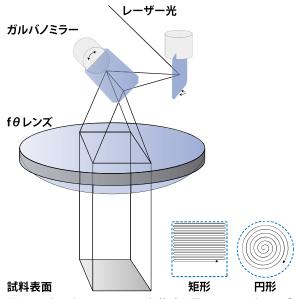


図3 ガルバノメトリック光学系を用いたレーザーアブ レーションシステム概略

度な定量分析が可能となった.

#### 3. SHRIMP による U-Pb 年代測定

当グループでは、2012年度末に高感度高分解能 2 次イオン質量分析計(写真1、SHRIMP)を導入し、現在基礎的なデータを収集している。火成岩をはじめとする岩石中にはジルコンという鉱物が普遍的に含まれており、SHRIMPを用いてジルコンの高精度局所 U-Pb 放射年代測定(e.g. Williams, 1998)を行う事ができる。一般にジルコンの U-Pb 年代は、火成活動の年代を意味することから、鉱床生成に関与した火成活動の年代を高精度で得ることが可能である

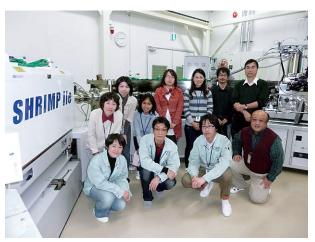


写真 1 SHRIMP IIe

#### 参考文献

Kon, Y., Murakami, H., Takagi, T., Watanabe, Y., 2011. Geochem. J. 45, 387–416.

Williams, I.S., 1998. Reviews in Economic Geology 7, 1–35.

Yokoyama, T.D., Suzuki, T., Kon, Y., Hirata, T., 2011. Anal. Chem. 83, 8892–8899.



# リモートセンシングのレアメタル探査への応用

# Applications of remote sensing for rare metals exploration

#### 鉱物資源研究グループ 主任研究員:児玉信介

Mineral Resource Research Group: Shinsuke Kodama Phone: 029-861-3285, e-mail: s.kodama@aist.go.jp

# 1. はじめに

リモートセンシングとは、対象を遠隔から測定す る手段であり、地球科学分野においては人工衛星や 航空機などから地球表面付近を観測する技術を指 す. リモートセンシングは、その広域観測能力(数 十キロメートル) と高空間分解能(数メートル)の ため、資源探査の初期段階で幅広く利用されてい る. その中でも、チャンネル数が100を超え、連続 した反射スペクトルを取得できるハイパースペクト ルセンサは、チャンネル数が10程度しかない前世代 のセンサ(マルチスペクトルセンサ)に比べ鉱物識 別能力が向上しており、実利用に向けた研究が行わ れている. 特に日本は、2015年にハイパースペクト ルセンサ搭載衛星の打ち上げを予定しており、効率 のよい解析手法が求められている. また, 近年は, センサが小型化され比較的安価で利用できるように なり、現地調査における利用も期待されている。本 稿では、ハイパースペクトルセンサを用いたレアメ タル探査のうち、経済産業省の委託を受けた独立行 政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構と共同で進 めているレアアースマッピング手法の開発について 紹介する.

# 2. レアアースの分光特性

レアアースを含む鉱物の光学特性は、1920年ごろ から研究がなされており、可視から短波長赤外の領 域において図1に示すような幅の狭いスパイク状の 吸収帯を有することが明らかとなった<sup>1,2)</sup>. Nd, Sm 以外にも、ユーロピウム(Eu)やエルビウム(Er)、 ジスプロシウム (Dv) などにも同様な吸収帯が存 在する. これらの吸収は3価の陽イオンの電子遷移 によって起こるもので、吸収帯の位置(波長)は元 素ごとに固有であり、鉱物の種類が変わってもほと んど変化しない<sup>3)</sup>(図2). また,鉱物中のレアアー スの量が多いほど光の吸収が強く起こることがわ かっている<sup>4)</sup>. したがって, レアアース含有量と吸 収の深さを対応づけられれば、単にレアアースが多 いか少ないかを判断するだけでなく. 反射スペクト ルから岩石・鉱物中のレアアースの存在度を推定で きる. レアアース含有量と吸収の強さの関係につい ては、現在、岩石試料やレアアース酸化物試料を用 いた実験を行っている.

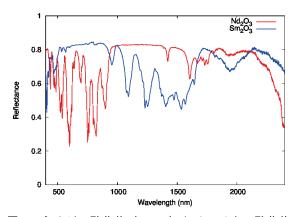


図 1 ネオジム酸化物  $(Nd_2O_3)$  とサマリウム酸化物  $(Sm_2O_3)$  の反射スペクトル

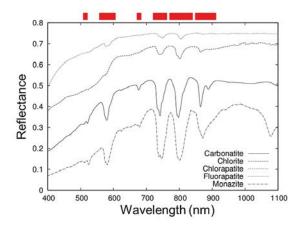


図2 レアアースを多く含む岩石・鉱物の反射スペクトル. グラフ上側の帯はレアアース吸収帯位置.

# ハイパースペクトルカメラによるレアアース マッピング

ハイパースペクトルカメラは、画像1画素毎に連続スペクトルを取得し、1度の観測で空間方向(X-Y)と波長方向(L)を軸に持つ3次元データ(ハイパースペクトルイメージ; HSI)を取得する(図3). 観測方式は、衛星搭載型センサと同じで、1回の撮像で画像1ライン分の空間視野についての分光イメージ(X-L)を取得し、カメラ移動(回転)させながら繰り返し取得することで HSIを取得する. HSI からは、図4のように任意の画素について反射スペクトルが得られる.

以下では、レアアース鉱床(ベトナム北西部)で行ったハイパースペクトルカメラ観測実験について紹介する。観測した地点がレアアースを含むかどうかを判定するために、レアアース吸収帯の吸収ピークにおける反射率 R(\(\alpha\)) に対する背景反射率(レアアースの吸収がないと仮定した場合の反射率;

 $R'(\lambda)$ ) の比 (R'/R) をレアアース吸収の深さとして求めた. 一定以上の深さを持つ画素をレアアース濃集画素と判定する.

図5に実験風景を示す. ここでは,河川を挟んで反対側(距離約100 m) にある石灰岩露頭を観測した. 石灰岩は川床付近に水平に広がっているため,見かけ上の表面積が小さくなっておりわかりにくいが,解析の結果,川の流れと平行な線に沿ってレアアースが濃集していることがわかった(図6).実際,画像が示す場所には,最大幅が50 cm程度のカーボナタイト脈が走っており(図7),レアアースが多く含まれていた(Nd=7,730 ppm). XRD分析では,このカーボナタイトは主要鉱物であるドロマイトのほかに,レアアース鉱物であるバストネサイトやカーボセルナイトが検出され,ハイパースペクトルカメラでレアアース鉱物を検出できることが確認できた.

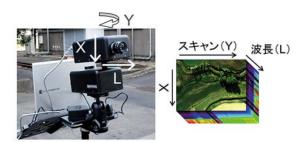


図3 ハイパースペクトルカメラ(左)とハイパースペクトルイメージ(右)

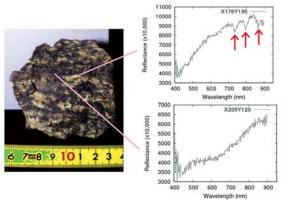


図4 ハイパースペクトルカメラで取得した鉱化作用を 受けた変成堆積岩画像(左)と反射スペクトル (右).

#### 4. まとめ

レアアースの光学特性と、それを利用したハイパースペクトルカメラによるレアアースマッピングについて紹介した、ハイパースペクトルカメラによる観測では、Ndが多く含まれる岩石を検出できることが確認できた。レアアース含有量と吸収の深さの関係を正確に把握できれば、反射スペクトルからレアアース含有量推定が可能になる。この手法は、衛星搭載型のセンサにもそのまま適用できるため、現地調査に限らず広域でのレアアース資源調査にも役立つことが期待できる。

#### 参考文献

- 1) E.T. Wherry, Mineral determination by absorption spectra, Am. Mineralogist, 14, 299–308, (1929).
- 2) J.W. Adams, The visible region absorption spectra of Rare-Earth minerals, Am. Mineralogist, 50, 356–366, (1965).
- 3) W.B. White, Diffuse-reflectance spectra of rareearth oxides, Appl. Spectroscopy, 21, 167–171, (1967).
- 4) L.C. Rowan, M.J. Kingston, and J. K. Crowley, Spectral Reflectance of Carbonatites and Related Alkalic Igneous Rocks: Selected samples from Four North American Localities, Economic Geology, 51, 857–871, (1986).



図5 ハイパースペクトルカメラによる観測風景



図6 レアアース抽出結果(赤色画素)

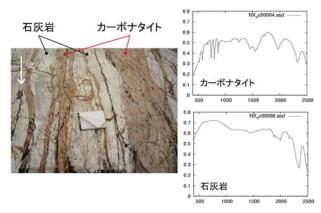


図7 石灰岩露頭写真(左)とカーボナタイト,石灰岩 試料の反射スペクトル(右)



# 南アフリカの蛍石鉱床に伴われるレアアース鉱化作用

# Rare earth mineralization accompanied by fluorite deposit in South Africa

鉱物資源研究グループ 主任研究員:星野美保子

Senior Researcher, Mineral Resource Research Group: Mihoko Hoshino Phone: 029-861-2474, e-mail: hoshino-m@aist.go.jp

## 1. はじめに

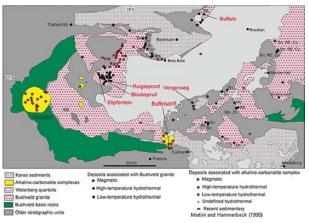
希土類元素 (REE: La-Lu, Y, Sc) は電子材料や 電気機器、医療機器の材料として必要不可欠な元素 だが、日本で消費される REE 資源の大部分を中国か らの輸入に依存している. しかし. 最近の中国国内 での需要拡大に伴う価格高騰や輸出規制によりその 安定供給が危ぶまれている. REE は、地球化学的な 性質の違いにより、軽希土類(LREE: La-Eu)と重希 土類 (HREE: Y, Sc, Gd-Lu) に分けられる. 特に, HREE (Dy, Tb,Y) は、ハイブリット自動車や電気自 動車などの日本の最先端技術に必須の元素であるこ とから、早急な資源開発が必要である. LREE は中 国以外にもカーボナタイト鉱床など様々なタイプの 鉱床から生産可能であるが、HREE の供給源は中国 南部のイオン吸着型鉱床にほぼ限定されている. イ オン吸着型鉱床の HREE は、含有量としては数百 ppm と少ないが、それらが粘土鉱物などの表面に吸 着しており、電解質溶液でイオン交換することに よって非常に低コストで回収できるという利点があ る. 高濃度の HREE 含有鉱床は、 閃長岩などのアル カリ岩に伴って世界中に存在しており(図1),その HREE の大部分は、ジルコン [(Zr,HREE)SiO<sub>4</sub>] やユー ジアル石 [Na4(Ca)2(Fe,Mn,HREE)ZrSi8O22(OH,Cl)2] な どの鉱物に含有されている. これらアルカリ岩に含 有される REE 鉱物は、REE 資源として有望である が鉱物学的な情報が不足しており、有効な鉱石の選 鉱や抽出法の確立の足かせとなっている. つまり. 中国以外にも HREE 鉱床は数多く存在するが、コス ト面で競合できないというのが HREE 資源開発の現 状である. しかし. アルカリ岩に伴われる HREE 含 有鉱床は、イオン吸着型鉱床と比較して高濃度の HREE(数パーセント程度)を含有しており、有効 な選鉱や抽出法が開発されれば、今後主要な HREE の供給源になりえる. 特に、蛍石(CaF<sub>2</sub>)の主要構 成成分であるフッ素は、REE を誘因する作用を持つ ことから、蛍石鉱床は、REEの鉱化作用を伴う場合 が多い. 南アフリカは、2012年時点で41万トンの世 界最大の蛍石埋蔵量を誇る、主要な供給源となって いる. そこで, 鉱物資源研究グループは, 有望な HREE 鉱床の発見を目指して、2008年から南アフリ カ地球審議会と共同で南アフリカのブッシュフェル ト花崗岩地域のアルカリ岩を伴う蛍石鉱床の REE 資 源調査を実施している。本稿では、これまでに得ら れた資源ポテンシャル評価の結果および REE の鉱化 作用に関する研究成果を概説し、今後の展開も含め て論じる.



現在進行中のアルカリ岩に伴う HREE 資源開発 図 1 プロジェクト (渡辺 2010)

# 2. 南アフリカブッシュフェルト複合岩体に分布す る蛍石鉱床の REE 資源調査

南アフリカプレトリア北部には約20億年前に形成 された年代を示すブッシュフェルト複合岩体と呼ば れる巨大な岩体が存在する. この岩体の最末期, 最 上部に形成されたブッシュフェルト花崗岩は、数多 くの蛍石鉱徴地を胚胎する. この地域の蛍石鉱床お よび鉱徴地は、この花崗岩に伴うものとカーボナタ イトやアルカリ岩に伴うものに分けられる(図2). 前述のように蛍石の主要構成成分であるフッ素は. REE を誘因する作用を持つことから、蛍石鉱床に は、REE 鉱化作用が伴う場合が多い. しかし、本 地域の蛍石鉱床および鉱徴地の系統的な REE 資源 調査はほとんど行われてこなかった. そこで. Buffalo, Vernenoeg, Ruigterpoort, Blockspruit, Slipfontein, Buffelsdrift の蛍石鉱床の調査を実施し た. 現地で地表調査を行い、採取された試料を鉱物 資源研究グループ設置の各種分析装置を用いて得ら



ブッシュフェルト花崗岩地域の蛍石鉱床・鉱徴地 の分布

れた鉱石の全岩化学分析および鉱物同定結果に基づいて,資源ポテンシャル評価を行った.本調査は,運営費交付金を使用して実施した.

#### 2.1. Buffalo 鉱床

Buffalo 鉱床は、2008年まで蛍石の生産がおこなわれていたが、現在は閉山している。鉱山内には、蛍石を生産した際に出た多量のテイリングが残されており、本調査ではその資源評価も行った。本鉱床は、花崗岩中に胚胎する7鉱体からなる。これらの鉱体は、 $1.5 \, \mathrm{km}$  四方の領域に分布し、鉱石を構成する蛍石は、花崗岩の頂部でアルカリ長石と縞状構造を構成したり、花崗岩に鉱染している(写真1)。鉱石中の主なREE 鉱物は、モナズ石(LREEPO4)、チャーチャイト(HREEPO4・ $2(\mathrm{H}_2\mathrm{O})$ )であり、蛍石にも平均4000 ppm 程度のREE が含有される。鉱石中のREE 含有量は、 $50-21,320 \, \mathrm{ppm}$ (平均 $5,310 \, \mathrm{ppm}$ )で蛍石を回収した後のテイリングにも平均 $3,089 \, \mathrm{ppm}$ のREE が含有される。



写真 1 アルカリ長石 (赤色部) と縞状構造を形成する 蛍石 (紫色部)

# 2.2. Vergenoeg 鉱床

Vergenoeg 鉱床は、1956年に操業を開始したオープンピットの鉱山で、世界最大の蛍石鉱床である。Buffalo 鉱床と同様に鉱山内には、蛍石を生産した際にでた多量のテイリング(写真 2 )が残されており、それらの資源評価も行った。本鉱床は、Vergenoeg 火成岩体とよばれる花崗岩を貫く鉄かんらん石を主とするかんらん岩上部の赤鉄鉱-蛍石濃集部を鉱体とする。鉱石中の主要な REE 鉱物は、モナズ石とゼノタイム(HREEPO4)であり、蛍石自身にも10,000 ppm 程度の高濃度の REE が含有される。鉱石中の REE 含有量は、292-21,320 ppm(平均7,586 ppm)の REE を含有し、蛍石選鉱物、テイリングにそれぞれ平均3,089 ppm、7,684 ppm の REE が含有される。

#### 2.3. Ruigterpoort 鉱徴地

Ruitepoort 鉱徴地は、オープンピットが残されており、詳細は不明であるが、小規模に鉄鉱石の生産がおこなわれていたようである。蛍石の鉱体は、強く赤鉄鉱化した鉄アクチノ閃石岩中に存在する(写



写真 2 蛍石の精鉱を生産する際にでたテイリング



写真3 赤鉄鉱化した鉄アクチノ閃石中の蛍石(白色結晶)

真 3 ). 次に述べる Blockspruit 鉱徴地と非常によく似た鉱物組み合わせであるが、REE 鉱物を伴わない. そのため、鉱石の平均 REE 含有量は、550 ppm と低い. また、蛍石自身には、146-1,844 ppm の REE が含有される.

#### 2.4. Blockspruit 鉱徴地

Blockspruit 鉱徴地は、探鉱用のトレンチが残され ているだけで、商業規模の蛍石が生産されたことは ないが、花崗岩を基盤とし、それに鉄アクチノ閃石 岩が貫入し、蛍石-ヘマタイト-石英の鉱化帯を形 成している。鉄アクチノ閃石岩には、赤色のアパタ イト (Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH,F,Cl)) が多量に含有されており (写真4), REEの大部分は、後期の熱水作用によっ てアパタイトを置換したモナズ石とゼノタイムに よって含有されている. モナズ石は, 一般的には, REE の中で Ce を最も多く含有したモナズ石 - (Ce) として産出するが、本鉱徴地のモナズ石は Nd を最 も多く含有するモナズ石 - (Nd) である. そのため, 鉱石中の REE の割合は、HREE の割合が高い、鉄 アクチノ閃石岩には、896-10,187 ppm の REE が含 有されている. 蛍石自身にも146-2,959 ppm 程度の REE が含有されている. 後述するが、地表には、 鉄アクチノ閃石岩が風化した風化殻が形成されてい る.



写真 4 多量のアパタイト (赤色鉱物) を含有した鉄ア クチノ閃石岩

## 2.5. Slipfontein 鉱床

Slipfontein 鉱床は、花崗岩質ペグマタイト鉱体からなり、赤鉄鉱、石英、蛍石を含有する、鉱石中の主要な REE 鉱物は、バストネサイト( $Ce(CO_3)F$ )とモナズ石である。REE 含有量は、1 試料(6,913 ppm)を除くと169-2,131 ppm と低い。

#### 2.6. Buffelsdrift 鉱徴地

Buffelsdrift 鉱徴地は、粗面岩起源の角礫岩を蛍石が膏結したもので、全体の20%程度まで蛍石を含有する物もある. 鉱石中の REE 含有量は、375-926ppm と低い.

#### 3. 有望な HREE 鉱床の発見と今後の展開

上述の6つのブッシュフェルト花崗岩地域の蛍石鉱床の研究結果について表1にまとめた。それによると本地域の蛍石鉱床には、花崗岩に伴うもの(BuffaloとSlipfontein)、苦鉄質アルカリ岩に伴うもの(Vergenoeg, Blockspruit, Ruigtepoort)、カーボナタイトに伴うもの(Buffelsdrift)の存在が確認された。鉱石の化学分析の結果、カーボナタイトや花崗岩に伴われる蛍石鉱床のREE含有量は、苦鉄質アルカリ岩に伴われるものと比較して低い。苦鉄質アルカリ岩に伴われるVergenoegとBlockspruit鉱床は、主要なREE鉱物としてゼノタイムを含有しており、総REE中のDy含有量はそれぞれ3.6%と4.0%と他のタイプのものと比べて高い。

このように蛍石鉱床を伴う母岩の違いで、REE の鉱化作用に多様性が見られるのは、非常に重要な発見であり、その原因究明のために、今後さらなる学術的な研究が必要である。また、Blockspruit のような苦鉄質アルカリ岩に伴う蛍石鉱床に HREE の鉱化作用が確認できた点は、今後の探査の指標となる

Blockspruit 鉱徴地は、地圏資源環境研究部門の鉱物資源研究グループが南アフリカ地球審議会との共同調査で発見したもので、HREE の大部分は、ゼノタイムやモナズ石といった REE リン酸塩鉱物に含まれている(図 2)。地表調査の結果、花崗岩に貫

表 1 南アフリカブッシュフェルト花崗岩地域の蛍石鉱 床と鉱徴地の REE 資源調査の結果

| 蛍石鉱床と<br>鉱徴地<br>(母岩)                | 総 REE<br>(ppm) | HREE<br>(ppm) | Dy<br>(ppm)    | REE 鉱物                    |
|-------------------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------------------|
| Buffalo<br>(花崗岩)                    | 1431           | 867<br>(60%)  | 67<br>(4. 7%)  | モナズ石                      |
| Vergenoeg<br>(かんらん<br>岩)            | 3134           | 2643<br>(84%) | 115<br>(3. 7%) | ゼノタイ<br>ム, モナ<br>ズ石       |
| Blockspruit<br>(鉄アクチ<br>ノ閃石岩)       | 8546           | 3364<br>(39%) | 352<br>(4. 1%) | ゼノタイ<br>ム, モナ<br>ズ石       |
| Ruigtepoort<br>(鉄アクチ<br>ノ閃石岩)       | 764            | 698<br>(91%)  | 20<br>(2.6%)   | モナズ石                      |
| Buffelsdrift<br>(カーボナ<br>タイト)       | 825            | 68<br>(8%)    | 6<br>(0.8%)    |                           |
| Slipfontein<br>(花崗岩質<br>ペグマタイ<br>ト) | 991            | 749<br>(76%)  | 34 (3. 4%)     | モナズ<br>石, バス<br>トネサイ<br>ト |

入した鉄アクチノ閃石岩が600m<sup>2</sup>の領域に分布する ことが明らかとなった. この鉱徴地の表層部分は, 岩石の風化が広範囲に進み(写真5),厚い鉄アク チノ閃石の風化殼を形成している. 地表調査により 採集された鉄アクチノ閃石岩の風化殻の平均 REE 含有量は5,118ppm (REO:0.6 wt%) であり、最大で 8,069ppm を含有する部分も見つかった. モード分 析の結果、鉄アクチノ閃石岩の風化殻は、石英やア ルバイト, Fe 酸化物が主成分として含まれており, 鉄アクチノ閃石も4%程度残存している。また、 HREE 鉱物であるゼノタイムを約3wt%と高濃度で 含有することが判明した. 含有される REE 鉱物の 平均粒子サイズは、ゼノタイム:103.08μm, モナ ズ石:53.24μmであり、風化殻であるため微細であ る。前述のように地表の新鮮な鉄アクチノ閃石岩に は、鉄アクチノ閃石中に多量のアパタイトが含まれ る. その SEM-EDS による分析の結果. 鉄アクチノ 閃石岩中のアパタイトは REE を含有していないが、 後期の熱水変質作用によりゼノタイムやモナズ石に よって置換されている.一方,新鮮な鉄アクチノ閃 石で普遍的に観察されるようなアパタイトは、地表 の鉄アクチノ閃石の風化殻では観察されない. これ は、ゼノタイムやモナズ石によって部分的に置換さ れたアパタイトがフッ素に富んだ熱水により分解さ れ、それに含有されていたゼノタイムやモナズ石の みが残存した結果、表層で高濃度の HREE を含有 した鉄アクチノ閃石岩の風化殻が生成されたと考え られる.一般的に、風化残留型鉱床は、REEに富 む花崗岩やカーボナタイトが風化変質作用を受ける 過程で形成される.一方,Blockspruit の表層風化殼 は、蛍石鉱床の形成に伴い、苦鉄質アルカリ岩の変 質作用により形成されることから、新しいタイプの

REE の鉱化作用であるといえる. そのため,表層の風化殻は,風化前の鉄アクチノ閃石岩(写真4)と比較して,より HREE 含有量が高く,今後有望な HREE 鉱床になる可能性がある. この鉱徴地付近には,同様の鉱徴地が数多く分布し,今後さらなる HREE の鉱徴地の発見が期待される. また,ブッシュフェルト地域の蛍石自身にも最大で10,000ppm程度の REE が含有されている. ブッシュフェルト

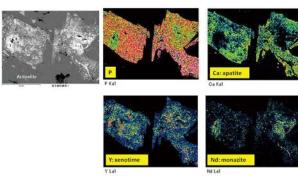


図3 鉄アクチノ閃石岩中のアパタイトに含有されるモナズ石 -(Nd)(右下)とゼノタイム -(Y)(左下)



写真 5 ゼノタイムやモナズ石を含有する鉄アクチノ閃 石岩の表層風化殻

地域には、世界最大の Vergenoeg をはじめとする多くの蛍石鉱床もあることから、蛍石を生産する副産物として、REE を抽出する方法も今後検討していく必要がある.

#### 4. まとめ

HREE 鉱床の開発には、その資源評価に基づく有効な選鉱方法の確立が必須である。現在、地圏資源環境研究部門内のレアメタル選鉱施設で、南アフリカブッシュフェルト地域から採取された風化岩石中のモナズ石とゼノタイムの選鉱試験を実施し、その結果に基づいてこの鉱床の経済性の評価を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) Chi R, Tian J (2009) Weathered crust elution-deposited rare earth ores. Nova, New York, 288 pp
- 2 ) USGS Mineral Commodity Summary (2013)
- 3) Martini J.E.J., Hammerbeck E.C.I. (1998) The mineral resources of south Africa. Council for Geoscience, Pretoria, 269–279 pp
- 4) 渡辺 寧, レアメタルテキスト: (1) 希土類, 資源地質, 103-122第30回希土類討論会講演要 旨, 94-95, (2010)
- 5)渡辺 寧, E.L. Tongu, 西村光史, 星野美保子, 恒松麻衣子, 大野哲二, 堀内 悠, 村上浩康, 昆 慶明, 高木哲一, 南アフリカ共和国ブッ シュフェルト花崗岩地域の希土類鉱化作用, 第 30回希土類討論会講演要旨, 96-97, (2013)
- 6) 星野美保子,渡辺 寧,恒松麻衣子,南アフリカ Blockspruit 蛍石鉱床に産出する角閃岩中の 希土類鉱物,第30回希土類討論会講演要旨, 94-95,(2013)
- 7 ) Roskill Market Report, The Economics of Fluorspar 10<sup>th</sup>, Roskill Information Services Ltd., 2009



# 地下水研究グループの紹介

# Introduction of the Groundwater Research Group

#### 地下水研究グループ長:丸井敦尚

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

## 1. グループの研究目的

良好な環境の維持に必要な水文学・地下水学に関 するノウハウの蓄積と地下の開発・利用に係る技術 の向上や創造を目標としています. 現在は震災復興 に重きを置き、被災地の水文環境の把握や再生可能 エネルギーである地中熱の有効利用に関する研究を 推し進めています。また、水文環境図の作成を基軸 に地下水の資源・環境に関する情報を体系的に取り まとめ、部門の重点課題でもある放射性廃棄物地層 処分、CO。地中貯留プロジェクトに関しても積極的 に協力し研究を推進しています. さらに, 知的基盤 整備の加速、研究シーズの創出に関わる研究など基 礎研究にも力点を置いています. 研究対象地域は日 本国内のみならず、CCOP 活動などを通して海外に も進出しています.

#### 2. 各研究項目の内容

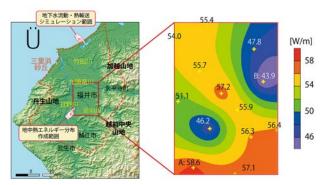
#### 2.1. 震災復興に係る研究

震災復興に供するため、地下水リスク評価研究と して被災地の地下水環境や地下水流動予測。再興の ための基盤情報提供をしています. これまでに被災 地各県で400検体以上に及ぶ水試料の採取や海岸平 野での地下水流動解析を行ってきました. 陸前高田 市や気仙沼市、南相馬市などで調査をした結果、被 害を受けていない地下水の存在を確認することがで きました.

さらに、福島県に創設された福島再生可能エネル ギー研究所における地中熱チームでは、地中熱エネ ルギーの共同利用に関する効率化をテーマにこれま でにない地下水のエネルギー利用に関する取り組み



被災地におけるボーリング調査の様子



福井平野における地中熱ポテンシャル分布の研究事例、 このように利用できるエネルギーを地下水流動を考慮し て評価している

にチャレンジしようとしています.

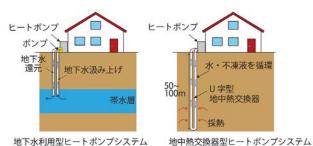
#### 2.2. 地中熱の有効利用に関する研究

地球の熱を利用する方法はその深度や温度によっ て異なります。おおよそ100m深までの地下水や地 層のもつ熱エネルギーを利用する方法を地中熱と呼 んでいます. 気温は夏と冬で大きく変化しますが, 地下での温度変化はほとんど見られないことから. 夏は冷房に、冬は暖房に利用されています.

産総研では、直接地下水をくみ上げて採熱する方 法やU字管を利用して間接的に採熱・放熱する方 法などを比較検討しながら、最適な地中熱利用シス テムの構築を模索しています.

#### 2.3. 知的基盤整備に係る研究

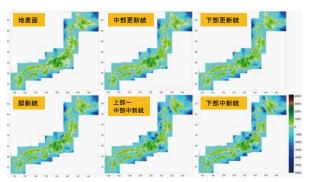
水文環境図の作成に関しては世界的な基準をレ ビューし、我が国に見合ったものを作成して発信し ています. この基準にあわせて新しい水文環境図を 発刊してきました. また. 全国堆積層データベース の構築により、我が国の地下水資源量が13兆トンで あることもわかりました. 各種データベースの構築 から我が国の水環境を解き明かす挑戦が続いていま す。富十山が世界遺産に登録されたこととタイミン グを合わせ、駿河湾地域を新たな研究フィールドと



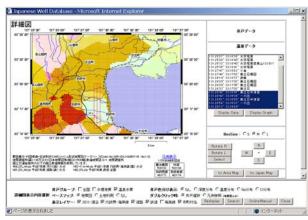
して新図幅の制作が始まりました.

## 2.4. 深部地下環境の利活用に関する研究

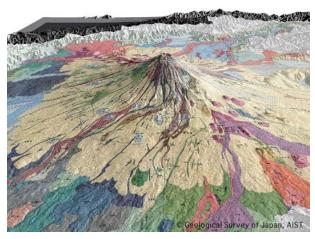
たとえ原子力発電をやめてもこれまでに利用してきた原子力発電に伴う核廃棄物は処理しなくてはなりません。現在のところ、最も有効な手段として地層処分が考えられています。これは地下深部の安定した環境に廃棄物を封じ込め、人間界と遮断するものです。我が国の原発基地がすべて沿岸部に立地することから、産総研では沿岸域の深部地下に焦点を



全国堆積層データベースによる堆積層区分

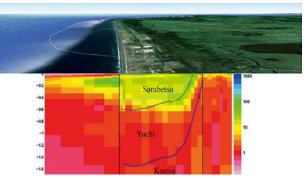


データベースを用いた地下水環境の例示



本年度からは駿河湾地域を対象域に選定し,新たな水文 環境図の制作が始まった

絞り,地下水環境の安定性についての研究を実施してきました。まだ中間的な成果ですが、日本列島の堆積平野の沖には氷期に活発に流動していた地下水の痕跡があり、海底下に淡水地下水の領域を形成している可能性を発見しました。この領域は超長期的に安定しているものであり、上下の地下水を遮断しています。この発見は、今後の地層処分研究に大きく貢献すると確信しています。



幌延沿岸域における海底下地下水の観測および解析の結果、海岸線を越えて陸域から淡水地下水が海底下に張り出している様子がうかがえる(赤の塩水領域に黄色~青色の淡水地下水が張り出している)。 本研究により、列島のいたるところでは、堆積平野の沿岸海底下に淡水領域が存在することが明らかにされた.

#### 3. グループの研究体制

丸井 敦尚 (グループ長)

内田 洋平(主任研究員)

町田 功(研究員)

宮越 昭暢 (研究員)

井川 怜欧 (研究員)

吉岡 真弓 (研究員)

シュレスタ・ガウラブ (第一号職員)

小野 昌彦(第一号職員)

楠瀬勤一郎(第五号職員:招聘研究員)

古宇田亮一(第五号職員:招聘研究員)

樽沢 春菜 (テクニカルスタッフ)

中山 京子 (テクニカルスタッフ)

宮崎 桂子 (テクニカルスタッフ)

田口 雄作(產学官制度来所者;常駐)

平野 智章(産学官制度来所者;常駐)

その他産学官制度来所者(客員研究員)多数

本年10月1日より内田洋平は福島再生可能エネルギー研究所再生可能エネルギーセンター地中熱チーム長を, 吉岡真弓は同チーム研究員を併任しています.



## 鉱物資源研究グループの紹介

# Introduction of the Mineral Resources Research Group

鉱物資源研究グループ長:高木哲一

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

# 1. グループの研究目的と構成

鉱物資源研究グループは、陸域の鉱物資源を対象とした資源探査・評価、選鉱試験など資源上流部に関わる研究を実施している。現在7名の職員、14名の契約職員・客員研究員が所属している。ここでは当グループの研究内容を、レアメタル資源、非金属資源、鉱物資源情報、分析・選鉱技術開発の4つに分けて紹介する。

研究メンバー構成

高木哲一 (グループ長)

大野哲二

児玉信介

実松健造 (豪州留学中)

星野美保子

昆 慶明

森本慎一郎 (国際部兼任)

堀内 悠 (産総研特別研究員, PD)

Jacqueline Satur(産総研特別研究員,PD)

徐 維那 (産総研特別研究員, PD)

三好陽子(產総研特別研究員, PD)

江島輝美 (産総研特別研究員, PD)

森田沙綾香 (テクニカルスタッフ)

須藤定久 (テクニカルスタッフ)

Buenaventulada Calabia (テクニカルスタッフ)

猪川洋子 (テクニカルスタッフ)

奥村公男 (客員研究員)

平野英雄 (客員研究員)

神谷雅晴 (客員研究員)

寺岡易司 (客員研究員)

大竹 翼(客員研究員, 北海道大学准教授)

#### 2. レアメタル資源の研究

レアメタルとは、鉄やアルミニウムなどの汎用金属と金・銀などを除いた希少な金属資源で、現在31鉱種が経済産業省によって指定されている。レアメタルは、中国など新興国の急成長、2004年以降金属資源の価格の急激な上昇、少数国やメジャー企業による資源の寡占化などにより、公正な価格で自由に輸入できない状況が継続している。そこで、日本では官民の総力を挙げて海外金属資源の権益確保に乗り出している。鉱物資源研究グループは、供給不足が深刻なレアアース(ランタノイド、Sc、Y)を中心としたレアメタル資源の調査に注力している。レアアースは、2009年来の中国の輸出制限と価格高騰(レアアース危機)で産業界が深刻なダメージを

被ったが、2011年8月を境に価格が下落し、2013年 現在、供給安定性がほぼ回復している。しかし、重 レアアースの供給元は依然として中国のみであり、 将来の供給不足が懸念される。そのため、当グルー プでは、世界各地で中国に替わる重レアアース鉱床 を求めて、各国の地質調査所、政府機関、民間企業 などと共同で調査研究を実施している。

2013年度は、経産省委託事業により、モンゴル民間企業、南アフリカ共和国地質調査所(CGS)、ブラジル鉱産局(DNPM)などと共同で重レアアース鉱床・鉱徴地の探査・評価を実施している(写真1上下、2上).

一方,所内戦略課題研究では,韓国地質資源研究院(KIGAM)とも協力して,海外リチウム鉱床の調査も開始したところである(写真2下).

レアアース資源の世界的賦存状況の再評価および マテリアルフローの解析事業を2012年度に引き続





写真 1 南アフリカ・重レアアース鉱床における試錐調 査(上)、試錐コアの反射スペクトル測定(下)

き,米国地質調査所 (USGS) と共同で実施している。さらに、2010度より、東アジア鉱物資源データベース作成のための ASEAN 各国との情報交換、海外産業人材育成協会 (HIDA) と共同で日本での各国担当者の研修などを実施している。





写真 2 ブラジル・アラシャ鉱山でのカーボナタイト鉱 床調査 (上), 韓国慶尚北道でのリチウム雲母 鉱床調査 (下)

#### 3. 非金属資源の研究

石灰石, 窯業原料,採石・骨材などの非金属資源(工業原料鉱物)は、現在でも主に国内鉱山から供給されている。鉱物資源研究グループでは、これらの中で、特にベントナイトと珪石に注目し研究を行っている。ベントナイトは、低レベル放射性廃棄物処分場や福島地域の汚染土壌処理において廃棄体の下部や周囲に遮水材として用いられる。しかし、品質評価のための示標であるメチレンブルー吸着量や陽イオン交換容量(CEC)の測定方法がメーカー毎に異なるため、その標準化が求められている。そこで、2013年度から2年間。所内国際標準推進部の予算により、同測定方法に関する標準化の研究を実施中である。また、民間企業と共同で、東北地方のベントナイト資源の賦存量調査なども実施中である。

珪石は、低品位なものはセメントに、中品位なものはガラスや建材に、高品位なものは金属シリコンや炭化ケイ素の製造に用いられるなど、工業的用途が幅広いが、資源の安定確保が年々難しくなっている。当グループでは、国内外の珪石鉱床の現地調査を通じて、その安定供給に資する情報を収集している。

#### 4. 鉱物資源情報の研究

鉱物資源研究グループでは、政府・鉱山業界等の要請に基づき、アジア地域の地質図・鉱物資源図、鉱物資源データベースなどの作成に継続的に取り組んでいる。これまでに、300万分の1東アジア・中央アジア地質図、300万分の1東アジア鉱物資源図、500万分の1アジア地質図を出版し、2012年度には300万分の1中央アジア鉱物資源図を出版した。2013年度末には、アジア全域の鉱物資源図を入稿予定である。

#### 5. 分析・選鉱技術開発

鉱物資源の研究を進める上で、鉱石や鉱物の精度の高い分析や選鉱実験は不可欠である。そのために、鉱物資源研究グループでは、2012年3月に、多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析装置、電界放射型電子線プローブマイクロアナライザー、鉱物単体分離解析装置(MLA)、レーザーラマン分光分析装置などを導入した。さらに、集塵・排水浄化システムを備えた選鉱実験施設も整備し、全自動粉砕器、磁力選鉱器、浮遊選鉱器、静電選鉱器、湿式サイクロンなどを導入した。さらに、2013年2月には、高電圧パルス選択制粉砕装置 SELFRAG、高精度年代測定装置 SHRIMP IIe を導入した。これらについては、別稿で詳述する。

#### 6. 今後の展望

日本を巡る外交関係の緊張や世界的な資源ナショナリズムの台頭、新興工業国の資源消費量の増大などにより、鉱物資源の供給安定性に対する産業界の不安は益々増大している。鉱物資源研究グループは、経済産業省、JOGMEC、民間企業などの要請に基づき、各国の地質調査所と連携した機動的な現地調査や迅速な鉱床・鉱石の分析評価を積極的に実施していく所存である。

一方、研究所として要求される高い学術研究レベルも維持し発展させるためには、それに必要な人材を育成することが急務であり、他の研究グループとも協力して、若手研究員や産総研特別研究員 PD に十分な経験や技術を獲得させ、将来の資源研究に役立つ人材を確保したい。



## 燃料資源地質研究グループの紹介

# Introduction of the Fuel Resource Geology Research Group

燃料資源研究グループ長:鈴木祐一郎

Leader, Fuel Resource Geology Research Group: Yuichiro Suzuki Phone 029-861-3919, e-mail: yu-suzuki@aist.go.jp

# 1. グループの研究目的

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

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

## 2. グループの研究体制, 研究資源

# 2.1. 研究員 (平成25年10月1日現在)

鈴木祐一郎 石炭地質, 有機地球化学 海洋地質, 堆積地質 中嶋 健 佐藤 幹夫 海洋地質, 構造地質 森田 澄人 構造地質. 海洋地質 後藤 秀作 地球熱学, 物理探查 小田 石炭地質, 堆積地質 徳橋 秀一(客員研究員), 堆積地質 中村 祐貴 (テクニカルスタッフ) 仁道 純子 (テクニカルスタッフ)

## 2.2. 主な研究資金(平成24年度,平成25年度)

- ・運営費交付金「燃料資源地質の研究」(地質)及 び同(エネルギー)
- ・運営費交付金「天然ガス鉱床の分布・成因に関す る調査研究」(平成25年度)
- ・運営費交付金「天然ガスが作用する地すべり型堆 積盆の流体循環解明プロジェクトの推進」(平成 24年度)
- ・受託費(資源エネルギー庁)「メタンハイドレート開発促進事業」(産総研と JOGMEC の共同受託) の一部「日本海におけるメタンハイドレート資源 に関する調査・研究」(平成25年度)
- ・共同研究(JX日鉱日石開発株式会社)「国内堆積 盆の炭化水素ポテンシャル評価に関する総合的研 究」(平成24年度, 25年度)
- ・共同研究(石油資源開発(株)技術研究所)「砂 岩貯留岩の堆積分布様式の研究」(平成25年度)
- ・受託調査(資源エネルギー庁)「国内資源開発基 礎情報取得等事業」(分担, 平成24年度, 25年度)
- ・受託研究(JAMSTEC)「海底地すべりメカニズム 解明のための三陸沖科学掘削に向けた海域データ 整備」(平成24年度, 25年度)
- ・科研費「鉄堆積作用:鬼界カルデラの熱水活動場 から紐解く太古代海洋環境への制約条件」(分担.

平成24年度, 25年度)

・科研費(新学術領域研究)「巨大地震断層の三次 元高精度構造と物性の解明」(分担,平成24年度, 25年度)

# 2.3. 主な研究ファシリティ

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

# 3. 平成24年~平成25年の研究成果および研究進捗 状況

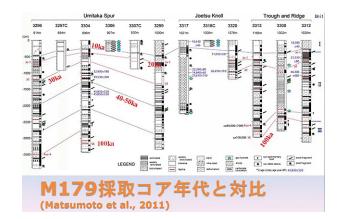
3.1. ガスハイドレート資源の鉱床成因,形成機構,および資源ポテンシャル評価技術に関する地質学的研究

#### 〈上越沖・日本海〉

- ・2010年6月に上越沖で、東京大学との共同研究として、フランス極地研究所所属海洋調査船Marion Dufresne(MD)号で、長尺ピストンコアラーにより海底下数10mまでのコア試料採取や熱流量測定、海底地形調査、海底表層探査等を実施した
- ・船上では、コア中からメタンハイドレート (MH) の採取、コアの堆積学的記載、温度測定、保管用 堆積試料採取、密度、P波速度等の物理計測、間 隙水の化学分析等を行った、また航海後、コアの 非破壊測定およびサンプリングを進めると共に、

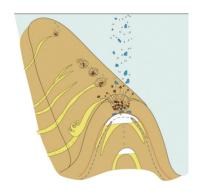


コア中に含まれていた塊状メタンハイドレート(MH21 HP より)



採取した試料の微化石分析, 地化学分析等の作業 を行った.

・コアの解析と3D 震探の解析を基に、上越海丘のポックマークと海底谷の成因を考察し、海水準低下期におけるメタンハイドレートの分解による機構を提案し、論文にまとめた. (Nakajima et al. in press).

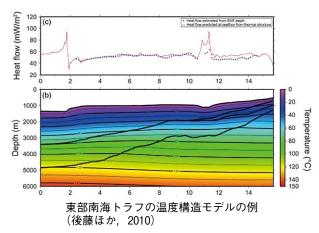


上越海丘におけるポックマークと海底谷の形成モデル (Nakajima et al. in press より).

- ・上越沖海域のメタンハイドレート安定領域下限深度を推定することを目的に,本海域で計測した熱流量に基づき,後述の南海トラフと同様な手法で本海域の温度構造モデルの構築を進めている.
- ・平成25年度経産省委託事業「メタンハイドレート開発促進事業」の一部,約20億円を産総研が受託した.MH生産技術の研究をメタンハイドレートセンターが担当し,地圏資源環境研究部門が,日本海のメタンハイドレート資源関係の調査,研究を担当することになった.現在事業が進行中である.今後,海域での調査データ等の取得,解析が進展すれば.その結果が報告される予定である.

#### 〈南海トラフ〉

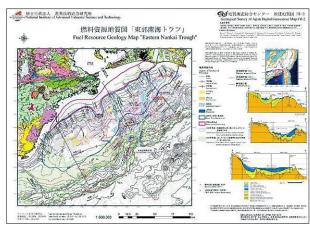
・南海トラフ域の熱流量データの収集と再解析を 行った.これらの熱流量データに基づき,海底下 の温度構造モデルの構築を進めている.また,海 底堆積物の現場法による熱伝導率の計測方法の開 発を進めている.



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

#### 3.2. 燃料資源地質図の編集・出版

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



燃料資源地質図「東部南海トラフ」本図

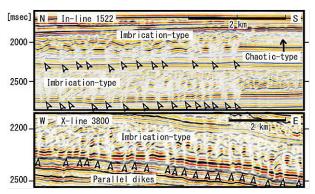
・また、燃料資源図「筑豊炭田図」の編集や「上越沖・日本海」へ向けたデータ収集を進めている.

# 3.3. 在来型天然ガス資源の鉱床成因, 形成機構に関する地質学的研究

- ・燃料資源全般に関する生成機構・探査法・燃料資源評価法などについての基礎的ないし萌芽的な研究を実施した。根源岩評価法、資源評価技術、海洋地質調査法、物理探査法、地質構造発達史、堆積構造解析、地球環境論、等々広汎な課題について地球科学的考察を行い、学会誌、出版物、口頭発表等で公表を行った。
- ・三陸沖堆積盆の天然ガス資源を調査する目的で、 下北半島東方沖の地震探査データを用いた地質構造解析を進めている.正断層群で切られた中新統 以深に対し、鮮新統以浅では顕著な海底地すべり 堆積層を認めた.地すべりの多くは特徴的な覆瓦

構造を示し、それに依存した脱水構造も顕著に発達する。地すべり層周辺では天然ガスの存在を示す特徴が多く認められることから、一連の地すべりや脱水構造は、高いメタンフラックスが要因の現象と考えられる。

・これらの成果は、森田ほか(2011)として地質学雑誌上に論文発表を行った。これに対し、その内容がこれまでの地質学的常識を覆すような新発見であるとの評価を受け、2012年日本地質学会小藤文次郎賞を受賞している。



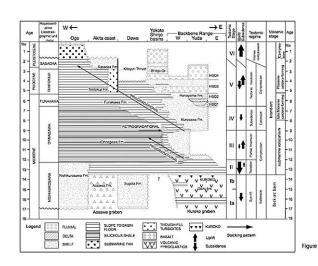
下北半島東方沖の地震探査データで認められる海底地すべり堆積層

- ・ガスに関連した海底地すべりの発生条件が重要なキーである。現在、その条件を求めることを目的とした"ちきゅう"による IODP 科学掘削計画の提案を意図として研究を進めている。2012年秋に、熱流量調査の基礎データ取得のため、三陸沖に海底温度計を設置した。(部門内グラント、JAMSTEC 委託)
- ・これに関連して、宮崎県日南市で現地検討会および研究集会を実施した.

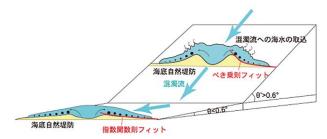


日南市での現地討論会、猪崎鼻での地質巡検

- ・東北日本の油・ガス構造の形成に関わる脊梁部の テクトニクスについて、地形・地質調査を行い、 東北日本の後期新生代テクトニックイベントと内 陸堆積盆の発達史についての論文を出版した(中 嶋, 2012; Nakajima, 2013)
- ・3D 地震探査記録の解析から、海底自然堤防の貯留岩形態に関して、斜面傾斜によりその形態が変化することを英国 Aberdeen 大学と共同で研究を進め、国際誌に出版した(Nakajima & Kneller,



秋田堆積盆地の発達史(Nakajima, 2013)



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

2013)

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



鹿児島県薩摩硫黄島長浜湾

- ・コールベッドメタン (CBM) に関して、これまで収集した地化学データを再検討し、北海道における CBM 鉱床の成因について検討を進めている。
- ・今, 話題のシェールガス・シェールオイルについても, 米国やカナダなどのシェールガスに関する文献調査を進めると共に, 我が国の炭田堆積盆でのシェールガス・シェールオイル資源の可能性についても既存資料を基に検討を進めている.
- ・女川層などシェールオイルの可能性が考えられる 地層について試料の地化学分析を検討中.

#### 3.4. 共同研究

## 〈JX 日鉱日石開発(株)との共同研究〉

- ・釧路炭田地域において共同で行った地質巡検の様子について GSJ 地質ニュースに特集号を組んで紹介した.
- ・釧路炭田地域において共同で採取した, 白亜系から第三系までの凝灰岩の U-Ub/FT 年代測定を行い, 熱史の解析を行った.



GSJ 地質ニュース Vol.1 No. 12釧路特集号

・2013年春に、JX が新潟県佐渡南西沖で実施予定の試掘調査に向けて、試掘で予想されるコアの岩相対比のため予想される地層について、新潟、富山、能登の陸上露頭で観察を行った。



JX 開発,産総研の地質調査参加者 (富山,能登境界の仏島を背景に)

#### 〈石油資源開発(株)技術研究所との共同研究〉

・砂岩層厚分布から貯留岩総体積を推定する数学的 手法の開発を引き続き行った.

#### 4. 受賞

<2013年日本地質学会小藤文次郎賞> 受賞者:森田澄人・中嶋 健(当グループ)

花村泰明(JX 日鉱日石開発(株))

受賞論文:海底スランプ堆積層とそれに関わる脱水構造:下北沖陸棚斜面の三次元地震探査データから. 地質雑, 117, 2, 95-98, 2011.

#### 5. 最近の主な研究成果 (2011年-2013年)

#### 〈紙上発表〉

Morita, S., Nakajima, T. and Hanamura, Y.: Possible ground instability factor implied by slumping and dewatering structures in high-methane-flux continental slope. In Yamada et al. (eds.), Submarine Mass Movements and their consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research 31, Springer, 311–320, 2011.

中嶋 健;岩手県湯田盆地に分布する不整合と火砕 岩鍵層:その奥羽山脈発達史上の意義につい て. 地球科学, 66, 69-83, 2012.

Goto, S. et al.: Variations in the thermal conductivities of surface sediments in the Nankai subduction zone off Tokai, central Japan. Marine Geophysical Research, 33, 269–283, 2013.

Nakajima, T.: Late Cenozoic tectonic events and intra-arc basin development in Northeast Japan. In: Itoh Y. (ed.) Mechanism of Sedimentary Basin Formation - Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins. InTech, Rijeka, 153–189, 2013.

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

Nakajima, T. et al.: Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan. Jour. Asian Earth Sciences, 2013. (in press)

# 〈国際研究集会発表〉

Nakajima, T.: Earthquake/Tsunami hazard assessments based on recurrence intervals of turbidites in the southeastern margin of the Japan Sea. 5th ISSMMTC, Kyoto, 2011.

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

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

Morita, S. et al.: Exploration of ground instability factor causing slumping and related dewatering in high methane flux and gentle continental slope off Shimokita Peninsula, NE Japan. AGU Annual Fall Meeting, San Francisco, 2012.



# 地圏微生物研究グループの紹介

# Introduction of the Geomicrobiology Research Group

地圏微生物研究グループ長:坂田 将

Leader, Geomicrobiology Research Group: Susumu Sakata Phone: 029-861-3898, e-mail: su-sakata@aist.go.jp

# 1. グループの研究目的

地圏における微生物の分布と多様性,機能,活性を評価することにより,元素の生物地球化学的循環に関する基盤的情報を提供するとともに,資源開発,環境保全や地圏の利用に資する研究を行う.当研究部門の戦略課題「鉱物・燃料資源のポテンシャル評価」,「土壌汚染評価技術の開発」に取り組み,油ガス田や地下水汚染サイト等に生息する微生物の活動(メタン生成,消費,石油炭化水素・揮発性有機物分解)の実態解明を目指す.

#### 2. グループの研究資源(24-25年度)

#### 2.1. グループ員

研究スタッフ

坂田 将 (リーダー), 片山泰樹, 竹内美緒, 眞弓大介, 持丸華子, 吉岡秀佳

テクニカルスタッフ

氏家知美, 小神野良美, 篠塚由美, 執印訓子, 野澤富美江, 三朝千稚, 山岸昂夫

#### 2.2. 予算

#### 運営費交付金

「地下微生物で切り拓く資源創成型 CCS 技術の開発」 「地圏微生物の研究(地質)」

「地圏微生物の研究 (エネルギー)」

メタン生成過程の解明」(科研費)

#### 委託研究費・研究助成金

「メタンハイドレート開発促進事業に関する委託研究-新規取得試料の微生物学的研究」(JOGMEC)「かん水の分析に基づく南関東ガス田の地下微生物

の分布及びメタン生成速度の評価」(JOGMEC) 「深部地下圏を模擬した高圧条件下における生物的

「低炭素型枯渇油田再生化技術の開発を目指した原油分解メタン生成メカニズムの解明 | (科研費)

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

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

「環境生物集団における未知微生物群の探索」(科研費)

「地下深部油田に隔絶されていた系統的に新規な嫌 気微生物群」(発酵研)

#### 共同研究費

「枯渇油田の未回収原油を対象とした微生物利用メ

タン変換回収に関する研究」(国際石油開発帝石 (株)・東京瓦斯(株)

「かん水中微生物の高メタン生成活動域の調査及びメタン生成促進技術の開発」(関東天然瓦斯開発㈱) 「メタン溶存天然水を用いた有機塩素化合物による 汚染地下水の浄化工法の実用化に関する研究」(関 東建設㈱)

#### 3. グループの特色

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

#### 4. 24年度後期-25年度前期の研究進捗状況

# 4.1. メタンハイドレート成因解明のための生物地球 化学的研究

・MH21の研究の一部として、東部南海トラフの MH シール層及び濃集帯からコア堆積物及び間隙 水を採取し、ガス・水分析、メタン生成・酸化活性の評価、微生物量の評価を行った。主なメタン 生成経路は  $CO_2$  還元であり、シール層と濃集帯 にピークがあった。また、濃集帯下部に、メタン 酸化活性のピークがあった。真正細菌及び古細菌 のバイオマスは深度依存的に減少した。

# 4.2. 在来型天然ガス資源の成因解明のための生物地 球化学的研究

・石油・天然ガス基礎研究委託事業(JOGMEC)として、関東天然瓦斯開発㈱と共同で南関東ガス田の生産井から地下付随水(かん水)を採取し、真正細菌・古細菌の分布、及びメタン生成活性を評価した、いずれの試料もCO2還元が主要なメタン生成経路であり、水素資化性のメタン生成菌が優占していた、メタン生成速度と採取した井戸のガス水比に有意な相関が認められ、ガス生産による泥岩中からのメタン生成基質の供給、及び地下

圏生物的メタン生成における基質供給の重要性が 示唆された.

# 4.3. 地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術 の研究

・天然ガス田地域のメタン溶存地下水を利用したバイオレメディエーション技術の実用化に向けて、 実証試験に向けたカラム試験用のカラムを製作するとともにメタンやトリクロロエチレンを対象とした気密性チェックを実施した。また定期的にメタン溶存地下水中の微生物の状況を把握するための微生物定量解析を行った。

# 4.4. 油層内微生物のメタン生成ポテンシャルに関する研究

- ・2011年より継続している油層試料の高圧培養実験で原油からのメタン生成が観察された培養系において、新規の未培養細菌が高度に集積されていることを観察した。原油無添加の培養系と比較する事で、当細菌が原油分解反応に関与していることが強く示唆された。
- ・今年度,新たに秋田県および山形県の油田の全4 坑井から原油と油層水を採取し,現場環境を模擬 する高圧培養実験を行った.

# 4.7. 地下微生物で切り拓く資源創成型 CCS 技術の 開発

- ・ $CO_2$ 回収・貯留(CCS)技術の候補サイトである 枯渇油田において、 $CO_2$ 貯留が及ぼす地下微生物 への影響を評価した。その結果、 $CO_2$ 地中貯留は 地下微生物に致死的な影響を及ぼすことはなく、 むしろメタン生成活動を活性化させる可能性を見 出した。
- 4.6. 地球化学・微生物学的アプローチによる地下圏 における微生物によるメタン酸化プロセスの解 明
- ・沖積層コア試料(東京都)について、ガス・水分析、メタン酸化・酸化活性の評価、微生物遺伝子解析の結果をまとめた。間隙水は、初生的には海水組成だったが、天水の混合により淡水化した後、メタン生成が起こり堆積層にメタンが蓄積したが、その後、嫌気的メタン酸化古細菌の活動によってメタンが消費され大気への放出を制御していると考えられる。メタン酸化反応は、天水由来の硫酸イオンで規制されている。
- ・海底でのメタン消費を担っている好気性メタン酸 化細菌共生系について、分離したメタノール資化 菌を新属新種として国際誌に発表した. また共生 系の微生物群についてさらに精度の高いゲノム情 報を取得した.

#### 4.7. 基礎的研究

・国内油田から獲得したメタン生成菌の生理学的諸 性質を調査した結果,既存のメタン生成菌には存 在しない新規メタン生成反応を観察した.

#### 5. 主な論文成果・受賞(2012年10月以降)

- Elsaied H., Stokes H.W., Yoshioka H., Mitani Y., Maruyama, A. (in press) Novel integrons and gene cassettes from a Cascadian submarine gas hydrate-bearing core. FEMS Microbiology Ecology.
- Imase M., Ohko, Y., Takeuchi M., Hanada S. (2013) Estimating the viability of Chlorella exposed to oxidative stresses based around photocatalysis. International Biodeterioration and Biodegradation 78, 1–6.
- Kanno M., Katayama T., Tamaki H., Mitani Y., Menga X.-Y., Hori T., Narihiro T., Morita N., Hoshino T., Yumoto I., Kimura N., Hanada S., Kamagata Y. (in press) Isolation of butanol- and isobutanol-tolerant bacteria and physiological characterization of their butanol tolerance. Applied and Environmental Microbiology, DOI: 10.1128/AEM.02900-13.
- Machida I., Suzuki Y., Takeuchi M. (2013) Carbon-14 age and chemical evolution of Ca (HCO<sub>3</sub>) 2-type groundwater of age less than 8,000 years in a confined sandy and muddy Pleistocene aquifer, Japan. Hydrogeology Journal 21, 1289–1305.
- Mayumi D., Dolfing J., Sakata S., Maeda H., Miyagawa Y., Ikarashi M., Tamaki H., Takeuchi M., Nakatsu C. H., and Kamagata Y. (2013) Carbon dioxide concentration dictates alternative methanogenic pathways in oil reservoirs. Nature Communications, DOI:10.1038/ncomms2998.
- Nakamura K., Takahashi A., Mori C., Tamaki H., Mochimaru H., Nakamura K., Takamizawa K., Kamagata Y. (2013) *Methanothermobacter tenebrarum* sp. Nov., a hydrogenotrophic methanogen isolated from gas-associated formation water of a natural gas field. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology 63, 715–722.
- Sakata S., Maekawa T., Igari S., Sano Y. (2012) Geochemistry and origin of natural gases dissolved in brines from gas fields in southwest Japan. Geofluids 12, 327–335.
- 坂田 将(2013) 天然ガス・石油の成因と微生物の 寄与に関する有機地球化学的研究. 2013年度有 機地球化学賞(学術賞).
- Takeuchi M., Katayama T., Yamagishi T., Hanada S., Tamaki H., Kamagata Y., Oshima K., Hattori M., Marumo K., Nedachi M., Maeda H., Suwa Y., Sakata S. (in press) *Methyloceanibacter caenitepidi* gen. nov., sp. nov., a novel facultatively methylotrophic bacterium isolated from marine sediments near the hydrothermal vent area. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.
- Yamagishi T., Takeuchi M., Wakiya Y., Waki Y. (2013) Distribution and characterization of anammox in a swine wastewater activated sludge facility. Water Science and Technology 67, 2330–2336.



# 地圏化学研究グループの紹介

# Introduction of the Resource Geochemistry Research Group

地圏化学研究グループ長: 佐脇貴幸

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

# 1. グループの研究体制・研究方針

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

なお,2013年10月には,部門の組織改編に伴う異動により,旧地熱資源研究グループから,新たに研究者2名及び契約職員が当グループに加入した.

# 2. グループ員及び研究項目等

## 2.1. グループ員

佐脇貴幸 (グループ長), 猪狩俊一郎, 金子信行, 鈴木正哉, 前川竜男, 柳澤教雄 (2013/10/1から), 水垣桂子 (2013/10/1から) および契約職員・客員 研究員

#### 2.2. 主な研究項目

- ・関東平野における水溶性天然ガスの地質・地化学 的調査研究
- ・燃料資源に関わる地質学的・地化学的調査研究
- ・機能性鉱物材料に関わる化学的・鉱物学的・材料 学的研究
- ・地圏流体化学の研究
- ・地圏化学の基礎的研究
- ・加温機排気中の CO<sub>2</sub>の効率的回収貯留システム とその園芸作物への活用技術の開発(農林水産省 受託研究)

#### 築

#### 2.3. 主な研究設備

- ・ガスハイドレート合成実験装置
- ・ガスクロマトグラフ
- ・イオンクロマトグラフ
- · 流体包有物温度測定装置
- ・ハスクレイ合成装置
- ・ESR(電子スピン共鳴)装置 等

# 3. 平成24年度~25年度前期までの研究進捗状況

3.1. 関東平野における水溶性天然ガス鉱床の分布に 関する地質・地化学的調査研究

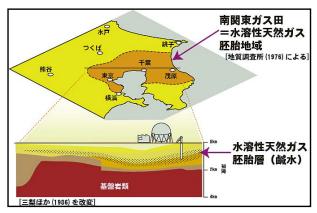


図1 南関東ガス田の概念図

南関東ガス田(図1)が日本最大の水溶性天然ガス(メタンガス)資源の賦存地域であることを踏まえ、将来にわたる資源の安定供給に資するために、関東地域における水溶性天然ガスの賦存状況に関わる正確な地質学的情報を把握することを目的とする。研究の実施に当たっては、部門内グループ連携とともに、地方自治体、天然ガス関係企業、温泉関連機関等の各機関のご協力の下、温泉でのガス試料採取や地質学的情報の収集を進めてきた。それによりまとめた研究成果は適宜学会発表により公表してきた(例えば、金子・佐脇、2013)。

平成24-25年度には、前年度までに収集した坑井 地質データの解析処理を進めるとともに、関東地方 の深層熱水型温泉水及び水溶性天然ガスの化学分析 結果を総合し、地質学的・地球化学的データの解析 を進めた。

関東地方では、房総半島中央部を中心とする南関東ガス田が水溶性天然ガスの巨大な貯留層であるが、この地域以外の様々な地域にも水溶性天然ガスが賦存している。それらは南関東ガス田の主要胚胎層となっている上総層群だけではなく、その下位層である安房層群・三浦層群等相当層、あるいは地表面に近い沖積層・湿原堆積物など、さまざまな層準に存在している。

南関東ガス田の範囲は上総層群基底深度が 1,000m(房総半島)~千数百m(東京・神奈川)より深い範囲に一致する(図2).一方,埼玉県,群 馬県等では、上総層群より下位の安房層群・三浦層 群相当層から揚湯する温泉に、鉱床規模ではないものの、水溶性天然ガスが付随することがある(図3)。また、利根川沿いのハーフグラーベンが地下に存在し、その上に新第三系が厚く堆積した地域(埼玉~群馬)や、茨城県北部の棚倉破砕帯に沿う堆積盆(図4)にも、水溶性天然ガスを含む温泉が多数分布している。このことは、大小の違いはあるが、このような堆積盆には、水溶性天然ガスを溶存する深層熱水が普遍的に滞留していることを示している。なお、先新第三系分布域にも、水溶性天然ガスが認められることがある。例えば、四万十帯の泥岩中や常磐炭田近辺の温泉である。

これらの深層熱水型の温泉水は、塩分濃度や酸素・水素同位体組成から、基本的には化石海水と天水の混合によるものである。天水の起源は若い時代のものだけでなく、神奈川県ではより古い地質時代に浸入した天水と推定されるものが認められた。また、基盤岩や直上の地層を仕上げた温泉で、水の酸素同位体比に、基盤岩との同位体交換反応が認められることがある。なお、平成24年度~25年度には、水の酸素・水素同位体比の信頼度を高めるための分析・検討を行った。

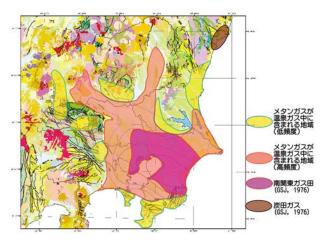


図 2 上総層群基底面深度(鈴木, 1996)と南関東ガス 田の関係、シームレス地質図(https://gbank.gsj. jp/seamless/)上に表示.

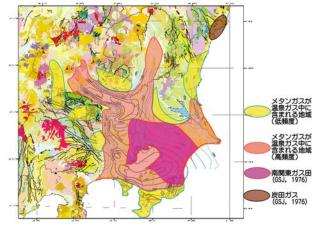


図3 新第三系基盤深度(高橋, 2008)と水溶性天然ガスの分布の関係.シームレス地質図上に表示.

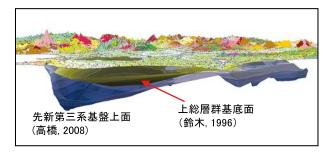


図4 関東平野のシームレス地質図及び地下構造透視図. 縦横比は5:1 に強調. 房総半島沖から北西方向を俯瞰したもの. 上総層群基底面: 房総半島〜東京湾にかけて盆状に凹んでいる. 先新第三系基盤上面: 上総層群基底面下から利根川沿いに凹みがつながる. そのほか, 鹿島灘沿いにも凹みが見える.

水溶性天然ガス中のメタンガスは、炭素同位体比 と共存する炭化水素組成から見て大部分が微生物起源であるが、北関東では熱分解性のメタンガスも認められる。また、そのような地域では窒素ガスの割合が多くなる傾向がある。

温泉の泉質とメタンガスの有無について、検討を行った、メタンが、基本的に化石海水中に存在する微生物起源ガスに由来することから、Na-Cl 強塩泉でメタンを含む割合が9割と高く、天水による希釈と岩石 – 水反応による泉質の変化に伴い、メタンを含む割合は減少する、泉質の陽イオンがNaCa型で、陰イオンの型に $HCO_3$ を含む温泉では、メタンガスは検出されていない。一方、単純泉でもメタンを含む温泉の割合は6%あり、浅層の沖積層中のものと、1,000mを超える深度の温泉があるが、後者のメタンの起源については不明であり、地球化学的な検討が必要である。

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

## 3.2. 燃料資源に関わる地質学的・地化学的調査研究

南関東ガス田以外のガスハイドレート,水溶性天然ガス,石炭起源天然ガス等の燃料資源源(有機物)に関わる地質学的調査,地球化学的実験・分析に基づく研究を進め,それらの成因および形成過程解明,資源評価,賦存状況の把握等を行うことを目的とする.

地球化学的実験研究として、天然ガスのイソブタン/ノルマルブタン比の支配因子を明らかにするために、それらの安定炭素同位体比の調査を行った。その結果、ノルマルブタンの一部が生成後イソブタンに変化していることが推定された。また、炭化水素測定時に使用する水からの汚染の除去法について実験を行った。その結果、加熱により汚染が低減することが明らかになった。

次に、メタン、エタン、キセノン等のガスハイドレートの相平衡条件を実験的に測定した。本年度は

ジオキサン等のガスハイドレート生成促進効果をも つ水溶液を用いて実験を行い、相平衡条件を決定し た. また、統計熱力学的手法によるハイドレート相 平衡条件の推定法を改良し、これらの水溶液等と共 存するガスハイドレートの相平衡条件の推定を行っ た.

# 3.3. 機能性鉱物材料に関わる化学的・鉱物学的・材 料学的研究

機能性鉱物材料である高性能無機系吸着材「ハスクレイ(図5)」やその他の機能性鉱物材料に関して、化学的・鉱物学的観点である。その工業的生産・利用にかかわる研究開発を行っている。



図5 ハスクレイ

まず、ハスクレイの物理化学的性質をまとめ、様々な工業用材料として利用するための基礎的情報となるハスクレイの性能を評価することにより、疎水化処理に向けたデータを取得した。製品化の研究では、共同研究等によりハスクレイに関する新しい用途開発を進めた。また、重金属汚染に関する天然ゼオライトでの吸着機構について検討を行い、Feおよび Mn における吸着形態についての検討を行った。

# 3.4. 地圏流体化学の研究

本研究では、さまざまな資源にかかわる地圏流体 及び鉱物に関する地化学的研究を進めることを目的 としている.

まず、ESR 年代測定にかかわる研究成果につい て述べる. ESR 年代測定とは、自然放射線によっ て電離された不対電子が, 鉱物等の格子欠陥に捕 獲・蓄積されることを利用し、蓄積された不対電子 の量を ESR 装置によって測定して、被爆線量およ び年代を算出する手法である。捕獲された不対電子 は加熱によって解放される. すべて解放された状態 をリセットと呼び、K-Ar年代測定法などにおける 閉鎖温度と同様にリセット温度がある。したがって ESR 年代測定によって算出される年代は、いった ん加熱された試料がリセット温度まで冷却してから 現在までの時間、または流体から固体が析出してか ら現在までの時間である. ESR 年代測定法の特徴 は、このリセット温度が比較的低いため熱水変質岩 の場合は変質年代を測定できること、石英など普遍 的な物質を測定できることである。また適用年代は 1万年~数百万年で、他手法で測定しにくい10万年 前後をカバーしている. 類似の方法に TL (熱ルミ ネッセンス) 法があるが、TL 法は試料を加熱して 不対電子を解放して測定するため1回しか測定でき ないのに対し、ESR 法は不対電子を解放しないの で繰り返し測定による誤差の低減が可能などの利点 がある.

ESR 法および TL 法はその特徴から、主に火山岩の噴出年代や変質岩の変質年代測定に用いられる、火山岩の噴出年代の場合、他手法による年代より若く算出される傾向が知られている。これまでの研究成果として、ESR 法で同一の噴出物を複数測定した場合の再現性は良いので、若くなる原因としては、常温でも不対電子がわずかずつ解放されている可能性が考えられる。このことを検証するため、他手法で年代のわかっている火山岩を ESR 法で測定し、年代値のずれが系統的かどうかの検討を進めている。

応用研究例として、火山岩の二次堆積物による噴出年代測定および熱水変質の検出を挙げる(図 6). 小型カルデラの火砕流がカルデラに流入して湖成堆積物となったものから高温型石英斑晶を抽出してESR年代測定を行った結果、ほとんどは元の火砕流堆積物と同一の年代が得られ、温泉近傍で明らかに変質している部分からは有意に若い年代が得られた.

また,温泉地域の地化学調査,流動解析を実施した.

新潟県松之山温泉地域においては、ドーム状のジオプレッシャー型と示唆されていることから、温泉地域の熱水やガス分析を行った。その結果、松之山地域の温泉水は、Cl 濃度が5000mg/l 前後の高塩濃度を示し、酸素水素同位体分析では、松之山地域の温泉水は天水ラインにはのらず、海水に近い比率を示した。また、蒸気中の凝縮ガスは、94%以上をメタンガスが占め、 $CO_2$  は0.5%程度であった。これらの結果は、松之山温泉が、化石海水起源のジオプレッシャー型であることを示している。

一方, 静岡県南伊豆温泉地域では、深さ150mから採取されている100℃付近の源泉が多数あるが、その相互の流動関係を確認するため、蛍光トレーサーの投入試験を行った、その結果、大局的には東

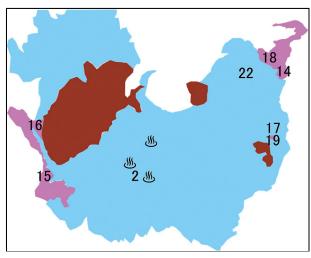


図6 火砕流堆積物とその二次堆積物の ESR 年代(単位:万年). 桃色:火砕流堆積物,水色:二次(湖成)堆積物,茶色:溶岩.(水垣,2012)

北東方向への温泉水の流動が確認され、その速度は約0.05mm/sであった。しかしながら、流動は断層に強く規制されており、断層方向にある井戸からは30%の以上のトレーサーが回収され、流動速度も0.3mm/sを示した。さらに深さ600mの井戸からもトレーサーの出現が確認され、深部方向への流動を示唆した。

# 3.5. 加温機排気中の CO2の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発

平成22年7月に採択された農林水産省公募型受託研究「加温機排気中の CO<sub>2</sub>の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発」(3年計画)では、施設園芸における収量増大・品質向上を目的とし、加温機の排気中の二酸化炭素を効率よく回収貯留し再利用可能な、画期的な施設園芸用省エネ型 CO<sub>2</sub>施用システムとその活用技術を開発してきた(図7). そのために、サステナブルマテリアル研究部門とのユニット間連携研究とともに、様々な企業及び研究機関との共同研究を進めてきた.

平成24年度までに、装置の小型化・低価格化を目指した省エネ型 CO<sub>2</sub> 回収貯留システムの試作機を製作し、奈良県および岩手県の施設園芸現場試験を通して園芸作物の増収・高品質化の実証試験を実施した。その3年間のプロジェクトのまとめを含めた検討を行い、次年度以降の商品化に向けた検討を行える体制を整えた。

# 3.6. Cs 吸着機構解明におけるアモルファス系吸着 剤の検討

福島原発事故による除染作業が進められているが、今後の課題として剥ぎ取った土壌等の減容化が大きな問題となっている。本研究では、表層土壌におけるアモルファス系吸着剤(アロフェン・イモゴライトなど)の Cs 吸脱着機構についての検討を行い、その吸脱着機構を基に減容化の開発に向けた検討を行うことを目的としている。本研究の実施に当たっては、原子力開発研究機構と物質材料研究機構を中心とし、11の研究機関による連携体制をとっている。

今年度は、表層土壌においてどの程度の非晶質物質が含まれているかの定量を行うとともに、水ひによって分画した試料において、粒子サイズと放射能濃度との関係についての検討を行った.

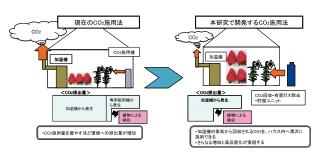


図7 施設園芸用省エネ型 CO<sub>2</sub>施用システムの概念図

#### 3.7. 地圏化学の基礎的研究

地圏資源・環境に関する新規研究課題の探索,新 しい地化学的技術の開発等,萌芽的・共通基盤的研 究を行うことを目的とする.研究内容について,以 下に箇条書きに記す.

- ① 産総研敷地内の空気を採取し、その中の非メタン炭化水素の濃度を測定し解析を行った。その結果、自動車起源と推定されるアセチレン濃度は、ここ数年はほぼ一定となっている傾向が観察された。
- ② 生成促進剤を用いた二酸化炭素ハイドレート相 平衡条件を実験的に測定した.本年度はジオキ サン等を用いて実験を行った.その結果,アセ トンの場合と同様,モル分率0.056の水溶液と 共存する二酸化炭素ハイドレートが最も安定で あることがわかった.
- ③ 温泉や工場の循環システム中への付着鉱物(スケール)の対策として、電気分解法の適用の研究を実施し、炭酸カルシウムスケール付着の抑制効果を確認している。

#### 4. 成果普及活動

得られた研究成果を、広く社会に還元する活動をグループの柱としている。その一環として、旧地熱資源研究グループのメンバーを中心とし、産総研・一般公開(2013年7月20日)、「地質情報展2013みやぎ」(2013年9月14-16日)において地熱・地中熱にかかわる説明パネルおよびゲームとペーパークラフトを出展した(図8)。それらを用いて、多数の来場者に対して、地熱・地中熱の特長、産総研における研究開発の説明を行った。

また、地質標本館夏の特別展「地球の恵み 地熱・地中熱エネルギーを活用しよう」(2013年7月17日-9月29日)には、地質標本館の依頼に応じて、説明用パネルを多数出展した。

そのほかに、「地質の日」関連イベントとして、経済産業省1階ロビーにおける知的基盤整備及び利用促進の方策にかかわる展示(2013年4月15日-5月10日)について、パネル作成および現地での説明に



図8 「地質情報展2013みやぎ」での体験型展示 (地質調査情報センター 川畑 晶氏撮影)

# 5. 平成24年度後半~平成25年前半の研究成果(主なもの,下線部がグループ員)

# 【誌上発表(論文, 著書等)】

- <u>猪狩俊一郎</u>(2012)メタンを主成分とするガス中の 微量非メタン炭化水素の測定法の改良. 地球化 学, **46**, 181-185.
- <u>猪狩俊一郎</u>(2012) 天然ガスの地球化学. 地球と宇宙の化学事典, 朝倉書店, 311-312.
- <u>Maekawa, T.</u> (2013) Equilibrium conditions of clathrate hydrates formed from xenon and aqueous solutions of acetone, 1,4-dioxane, and 1,3-dioxolane. *FLUID PHASE EQUILIBRIA*, **339**, 15–19.
- 中嶋 健・小笠原正継・<u>佐脇貴幸</u>・鈴木祐一郎・棚 橋 学・金子光好・門澤伸昭・中西 敏 (2012) 特集:釧路の地質を巡る. GSJ 地質 ニュース, **1**, No. 12, 353-356.
- 中嶋 健・小笠原正継・<u>佐脇貴幸</u>・鈴木祐一郎・棚 橋 学・金子光好・門澤伸昭・中西 敏 (2012) 白糠丘陵東部を訪ねて. GSJ 地質ニュー ス, 1, No. 12, 369-375.
- Ngothai, Y., Lane, D., Kuncoro, G., <u>Yanagisawa, N.</u>, Rose, P. and Pring, A. (2012) Effect of geothermal brine properties on silica scaling in enhanced geothermal systems. *Geothermal Resources Council Transactions*, **36**, 871–880.
- Sakata, S., <u>Maekawa, T., Igari, S.</u> and Sano, Y., (2012) Geochemistry and origin of natural gases dissolved in brines from gas fields in southwest Japan. *GEO-FLUIDS*, **12**, 327–335.
- <u>佐脇貴幸</u>(2012)流体包有物の温度測定. 地球と宇宙の化学事典,朝倉書店,305.
- <u>佐脇貴幸</u>・中嶋 健・小笠原正継・鈴木祐一郎・棚 橋 学・金子光好・門澤伸昭・中西 敏 (2012) 釧路海岸の浦幌層群. GSJ 地質ニュー ス, **1**, No. 12, 363-368.
- <u>鈴木正哉</u> (2012) 重金属類汚染対策のための鉱物・ 材料ハンドブック各鉱物の特徴と作用 (アルミ ニウム鉱物). 重金属類汚染対策のための鉱 物・材料ハンドブック, 星雲社, 151-162.
- <u>鈴木正哉</u> (2013) 加温機排気中の CO<sub>2</sub>回収・精製 再利用システムの開発. 二酸化炭素の直接利用 最新技術, エヌ・ティー・エス書籍, 55-63.
- <u>鈴木正哉</u> (2013) 新素材開発における X 線回折の 重要性. GSJ 地質ニュース, 2, No. 3, 91-93.
- 竹内美緒・吉岡秀佳・徐 維那・田邉 晋・玉木秀幸・鎌形洋一・高橋 浩・<u>猪狩俊一郎</u>・眞弓大介・坂田 将(2012)関東平野の沖積層において新たに発見された陸域における微生物による嫌気的メタン酸化活動.第22回環境地質学シンポジウム講演論文集,No.69,71.

- 棚橋 学・中嶋 健・小笠原正継・<u>佐脇貴幸</u>・鈴木 祐一郎・金子光好・門澤伸昭・中西 敏 (2012) 浜中湾-霧多布海岸の白亜系~古第三 系根室層群, GSJ 地質ニュース, 1, No. 12, 357-362.
- 柳澤教雄・水垣桂子・吉岡真弓・内田洋平・安川香澄・阪口圭一・古澤みどり・中山京子(2013)産総研つくば一般公開「地球の熱を上手に使おう〜地熱と地中熱〜」。GSJ 地質ニュース, 2, No. 2, 51-52.
- Yanagisawa, N., Sasaki, M., Sugita, H., Muraoka, H., Ioka, S., Sato, M. and Ohsato, K. (2012) Production test of Kalina system using hot spring fluid at geopressure field in Japan. *Geothermal Resources Council Transactions*, **36**, 1165–1170.
- Yanagisawa, N., Sasaki, M., Sugita, H., Muraoka, H., Ioka, S., Sato, M. and Ohsato, K. (2012) Scale and corrosion of a Kalina power generation system using hot spring water. *New Zealand Geothermal workshop 2012 Proceedings*, 1–5.
- Yanagisawa, N., Matsuyama, K., Takeda, Y., Tomita, K., Sakaguchi, K. and Yasukawa, K. (2013) Tracer test in hot spring fluid layer at Minami-Izu geothermal field, Shizuoka, Japan. Proceedings of 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 349–353.

# 【口頭発表 (グループ員が筆頭のもののみ)】

- 猪狩俊一郎 (2013) 天然ガスのi-C4/n-C4比とi-C4・n-C4の炭素同位体比. 有機地球化学シンポジウム, 岡山県倉敷市芸文館, 2013/8/19.
- 金子信行・佐脇貴幸 (2013) 関東平野地下における 天然ガスの賦存状況-メタンガスの有無と泉質 との関係-. 日本地質学会第120年学術大会, 2013/9/15.
- 水垣桂子(2012)小規模非溶結火砕流堆積物とその 2次堆積物のESR年代測定.日本第四紀学会, 2012/8/20.
- 水垣桂子・柳澤教雄・吉岡真弓・内田洋平・安川香澄・阪口圭一・佐脇貴幸・古澤みどり・中山京子(2012)産総研におけるアウトリーチ活動. 日本地熱学会,秋田県湯沢市,2012/10/2.
- 水垣桂子・吉岡真弓・柳澤教雄・内田洋平・安川香澄・阪口圭一・佐脇貴幸・古澤みどり(2013) 地熱利用を考えるくじ引き式ゲーム。日本地球惑星科学連合2013年大会、千葉県千葉市、2013/5/20.
- <u>鈴木正哉</u> (2013) 二酸化炭素吸着性能に優れ生産性に優れた無機多孔質材.  $CO_2$ 分離・回収技術と応用・研究開発動向、東京(お茶の水), 2013/4/23.
- <u>鈴木正哉</u>・月村勝宏 (2013) 福島県土壌での非晶質 物質における Cs 吸着量について. 日本地球惑

- 星科学連合2013年大会, 千葉市, 2013/5/20.
- <u>鈴木正哉</u>・月村勝宏(2013)土壌からの Cs 脱離に おける固液比の影響. 第57回粘土科学討論会, カルポート高知. 2013/9/5.
- 鈴木正哉・永好けい子・平林恵理・佐藤卓見・大和 田朗(2013) 天然ゼオライトにおける重金属吸 着機構. 日本鉱物科学会2013年年会, 筑波大学, 2013/9/13.
- <u>鈴木正哉</u>・月村勝宏・前田雅喜・犬飼恵一・西本登志・仲 照史・廣岡健司・佐野太郎・稲本勝彦・吉川正晃・岸本 章・喜多村克宏 (2012) 温室栽培での CO<sub>2</sub>回収利用システムにおけるデシカント空調の必要性. 2012年度日本冷凍空調学会年次大会,札幌市, 2012/9/13.
- Yanagisawa, N. (2012) Water-rock interaction of geothermal systems. コロラド鉱山大学セミナー, コロラド鉱山大学, 2012/10/4.
- <u>柳澤教雄</u>(2012) 地熱エネルギー利用・開発の国内 状況. 電気学会東京支部茨城支所講演会, 産総 研共用講堂, 2012/12/11.
- <u>柳澤教雄</u>(2013) 地熱利用の現状と将来. 生産システム懇談会, 明治大学, 2013/1/19.
- Yanagisawa, N. (2013) Metal sulfide minerals and brine from Kakkonda geothermal system. 10th International workshop on WD and JBBP project, 東北大学,2013/3/12.
- <u>柳澤教雄</u> (2013) 超臨界水中でのシリカガラスの溶解と鉄の影響. 日本鉱物科学会2013年年会, 筑波大学, 2013/9/11.

- 柳澤教雄・松村高宏(2012)電気分解法を用いた地熱,温泉システムでのスケール対策.資源・素材2012(秋田)秋季大会,秋田大学,2012/9/12.
- 柳澤教雄・佐々木宗建・杉田 創・佐藤真丈・大里和己(2012)松之山温泉発電および肘折 HDRにおける周辺温泉モニタリングのケーススタディー. 日本地熱学会平成24年湯沢大会, 湯沢文化会館, 2012/10/26.
- 柳澤教雄・松山一夫・武田康人・冨田一夫・阪口圭 ー・安川香澄(2013)南伊豆温泉地域における トレーサー試験. 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2013/5/21.
- 柳澤教雄・佐々木宗建・杉田 創・佐藤真丈・大里 和己(2013)松之山温泉発電試験および肘折高 温岩体試験での周辺温泉モニタリング. 資源素 材学会2013秋期大会, 北海道大学, 2013/9/3.

## 引用文献

- 三梨 昂·尾田太良·江藤哲人(1986)新生代東北日本弧地質資料集第3卷-付録関東地方地質断面図(北村信編),宝文堂.
- 鈴木宏芳(1996) 江東深層地殻活動観測井の地質と 首都圏地域の地質構造. 防災科学技術研究所研 究報告, **56**, 77-123.
- 高橋雅紀 (2008) 関東平野の基盤の凹み ~日本海の拡大時期に遡って~. *Japan Geoscience Letter*, **4**, No. 2, 3-5.



# 物理探査研究グループの紹介

# Introduction of the Exploration Geophysics Research Group

物理探査研究グループ長:光畑裕司

Leader, Exploration Geophysics Research Group: Yuji Mitsuhata Phone: 029-861-2387, e-mail: y.mitsuhata@aist.go.jp http://unit.aist.go.jp/georesenv/explogeo/

## 1. グループの研究目的

本研究グループでは、放射性廃棄物地層処分、土壌・地下水汚染、CO<sub>2</sub>地中貯留等の地圏環境分野における地盤・岩盤の評価やモニタリング及び、地熱・地中熱、メタンハイドレート、鉱物資源等の資源・エネルギー分野、地盤液状化、断層等の防災分野における地質・地盤構造調査に不可欠な物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査手法の技術開発と適用研究を行う、平成25年度においては、以下の7項目を中心に研究を行う。

地圏の環境分野として,

- 1) 放射性廃棄物地層処分事業における沿岸域および海域の断層及び地下水等の地質構造・環境評価のため、沿岸域モデルフィールドでの物理探査の適用試験、電磁探査データのデータ取得・処理・解析手法の開発、既存データの総合解釈等を基盤研究として実施する。
- 2) 土壌汚染, 地下水環境分野等における浅部地質環境評価のため, 東日本大震災に対応した東北地方沿岸域で空中電磁探査法や陸上の電気・電磁探査法等の適用による地下水塩水化領域の把握調査を実施する. また NMR 表面スキャナーの工業製品・農業への適用, 物理探査による油分土壌汚染評価等を行う.
- 3)  $CO_2$ 地中貯留 (CCS) における岩石物性評価と物理探査モニタリング手法の検討を行う。また、地圏の資源・エネルギー分野として、
- 4) 地中熱利用における地下物性のモニタリング 法,および事前評価手法の研究,新規の地熱資 源調査に向けた物理探査技術に関する研究課題 の立案を行う.
- 5) 海底熱水鉱床・メタンハイドレート探査や海底 地盤調査等を目指した新規電磁・電気探査法開 発の基礎研究を行う.

さらに、地圏の防災分野への適用として、

- 6) 東日本大震災への対応として,物理探査やCPT 技術の液状化調査への適用,およびCT画像に よる液状化判定に関する研究・取りまとめを行
- 7) 震源断層評価のための各種物理探査手法の適用 結果について、取りまとめを行う.

## 2. 主な研究項目の内容

## 2.1. 東日本大震災に関連した調査・研究

## 1) 地盤液状化リスク調査

液状化被害が発生した利根川下流域において,液 状化被害の程度や地質的条件が異なる調査地点を選 択し,各種の液状化調査を実施した.調査手法は, 三成分コーン貫入試験等の原位置貫入試験および表 面波探査や電気探査等の物理探査法である.

三成分コーン貫入試験は先端抵抗および周面摩擦・間隙水圧等のセンサーを有するプローブを静的に地盤に押し込みながら計測を行う方法であり、茨城県潮来市日の出地区を中心に集中的に実施した.結果として得られる液状化危険度(PL)は、例えば大規模な噴砂が発生した地点で25.87、液状化の被害が見あたらない地点においても24.71となり、いずれも液状化危険度が極めて高いと評価される結果となった.他の液状化判定手法と併せての評価が必要であることが認識された.

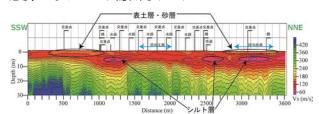


図1 千葉県香取市で実施した表面波探査による地盤中 のS波の速度分布(神宮司ほか, 2013a).

また表面波探査では、旧湖沼や旧河川で液状化が発生した地点で、弾性波速度の遅いシルト層の存在が推定された、砂層に比べて、透水性の低いシルト層の存在が液状化にどのように関与するのか、液状化発生との関連を検討している。

# 2) 地下水汚染リスク調査

宮城県南部・福島県北部の津波浸水域で、地下水の塩水化の状況やより深部の地下水源の探査を目的に、昨年度、空中電磁探査や地表における電気探査(34地点)・電磁探査(133地点)を実施した、陸域での電磁探査データを処理・解析した結果、空中電磁探査の結果と調和的な地下比抵抗分布が得られ、津波浸水域に対応した極表層の比較的低比抵抗な領域や海岸各区の10Ω-m以下を示す海水浸入領域、そして内陸のやや高比抵抗を示す淡水性地下水の存在を示唆する領域が推定された。

#### 2.2. 浅部地質環境評価

医療用 X線 CT装置を用いて、重金属を含む土壌

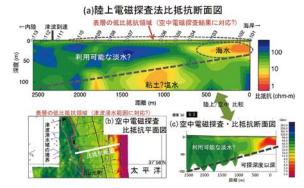
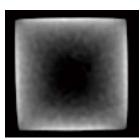


図2 陸上電磁探査と空中電磁探査による比抵抗分布の 比較.(a)陸上電磁探査による地下比抵抗断面図, (b)空中電磁探査による比抵抗平面図,(c)空 中電磁探査による比抵抗断面図.(a)と(c)の 断面図の位置は,(b)の白線で示す.(空中電磁 探査の結果は大熊・上田,2013より)

汚染コア試料を非破壊で分析し、原子番号とモル濃度を推定する手法を開発中である。線質硬化という画像のムラ(試料中心部ほど暗くなる)に着目して、塩化セリウム溶液を例にして、実測画像を最も良く再現できるシミュレーションを行った結果、一回のX線照射だけで、58Ce,59Pr、75Re、76Osの4種類まで元素を絞り込むことに成功し、またモル濃度値も誤差30%以内で推定できた。今後は、元素の絞り込みをより狭く行うべく改良を加える予定である。



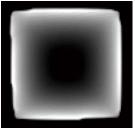


図3 直径3cm のプラスチック容器に注いだ塩化セリウム水溶液 (0.55mol/L) 試料の鉛直断面の CT 画像. (左) 実測画像, (右) シミュレーション画像.

#### 2.3. 海底電気探査法の基礎研究

近年注目が高まっている海底下の比抵抗分布調査に関して、一般的に利用されている水平電極配置型とは異なる鉛直電極配置型を採用した海底直流電気探査法の研究開発を進めている。昨年度は、東海大学と共同で、清水港周辺海域でデータ取得実験を実施した。そして今年度は、取得した鉛直電極配置型データに対して、焼きなまし(Simulated Annealing、SA)法による1次元逆解析法を開発・適用し、2層モデルでデータが説明できること示した。

## 3. グループの研究体制

以下の体制で研究を実施している. 光畑裕司(グループ長)・上田 匠・神宮司元治・ 中島善人・横田俊之・川畑史子(テクニカルスタッフ)・木村夕子(テクニカルスタッフ)・紙谷 進 (派遣)

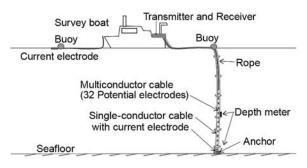


図 4 多電極ケーブルを用いた鉛直電極配置型電気探査 法の概念図.

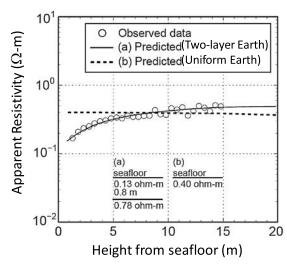


図 5 水深60m 地点で計測された電位差から算出した 見掛比抵抗データ(○)と逆解析による計算値(点 線および実線)の比較. (a)均質構造, (b)2層 構造で当てはめた場合の結果.

# 4. 最近の主な研究成果

Ueda,T, Mitsuhata, Y., Uchida, T., Marui, A. and Ohsawa K. (2013) A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, Journal of Applied Geophysics (Accepted).

Nakashima, Y. and Nakano, T. (2012) Nondestructive Quantitative Analysis of a Heavy Element in Solution or Suspension by Single-Shot Computed Tomography with a Polychromatic X-ray Source Analytical Sciences, **28**, 1133–1138.

神宮司元治, 横田俊之, 光畑裕司(2013a)物理探査および原位置地盤計測による液状化評価, 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究中間報告, 地質調査総合センター速報(印刷中).

神宮司元治,永尾浩一,前田幸男,中島善人(2013b) 繰り返し電気探査による人工液状化試験の比抵 抗変化の計測,物理探査,**66**,3-11.

大熊茂雄, 上田 匠 (2013) 東日本大震災の津波被 災地における海水の地下への浸透状況 - ヘリコ プターを用いた空中電磁探査で調査 - , 産総研 プレス発表, 2013.2.14.

中島善人,中野 司 (2012) コンピュータ断層撮影 を用いた分析方法. 特願2012-267612.



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

CO2地中貯留研究グループ長:西 祐司

Leader, CO2 Geological Storage Research Group: Yuji Nishi Phone: 029-861-3969, e-mail: y.nishi@aist.go.jp

# 1. グループの研究目的

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

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

## 2. グループの研究資源

2.1. グループメンバー (平成25年10月1日現在) 西 祐司 (グループ長)

雷 興林, 杉原光彦, 相馬宣和, 徂徠正夫, 加野有紀, 船津貴弘, 石戸恒雄, 藤井孝志,

上原真一 (産学官制度来所者), 佐藤久代, 当部門他研究グループ等より研究分担者14名

#### 2.2. 予算

- ○運営費交付金:「CO₂地中貯留の研究」,「沿岸域 海底下 CO₂地中貯留の安全性評価に向けた基礎 的研究 | 他
- ○経済産業省受託研究:「二酸化炭素回収・貯蔵安 全性評価技術開発事業(弾性波探査を補完する CO,挙動評価技術の開発)」他

#### 3. 平成25年度上期までの進捗状況

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

#### 3.1. 弾性波探査補完モニタリング技術の開発

経済産業省受託研究の一環として、米国 SWP (Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration) が実施する大規模 CO<sub>2</sub>地中貯留プロジェクトに参加し、反射法地震探査を補完するモニタリング手法として、重力・SP(自然電位)・AE(岩盤の微小破壊による高周波振動)等のモニタリング

手法の研究開発を進めている。平成24年度は、テストサイトがユタ州からテキサス州ファーンズワースへと変更されたことに伴い、観測機器の移設とベースライン測定( $CO_2$ 圧入開始前のバックグランド調査)を実施した。

重力モニタリングでは、ファーンズワースの調査 地に隣接した2つの90cm平方の重力測定用基台を 持つ観測小屋を設置し、超伝導重力計と絶対重力計 による並行測定(写真1)を行う上で必要十分な環 境を整備し、重力に関するベースライン計測を実施 した.

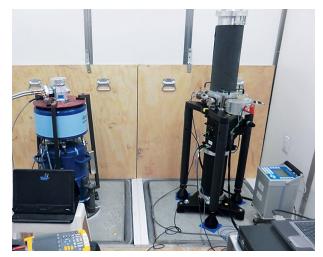


写真 1 超伝導重力計(左)と絶対重力計(右)の並行 測定.右端は可搬型相対重力計.

CO<sub>2</sub>地層注入試験開始に先立つ重力変動調査の ベースライン計測として①超伝導重力計による連続 計測. ②絶対重力計による計測. ③可搬型相対重力 計による巡回測定、および④地域的な重力異常把握 のための可搬型相対重力計による計測の4種類を実 施した。また、補正のための測量、気象・土壌水分 モニタリングも実施している. これらの測定の目的 は、重力計測のノイズレベル把握と測定精度向上可 能性の検討、および比較のための基準データ取得で ある. 超伝導重力計による高分解能な連続時間変動 のモニタリングが中心となり、絶対重力測定はその 較正を目的としている. 重力変動が構造に規制され る可能性があることから、空間的変動を把握するた めの相対重力測定も行い、その一部の測点はより精 密な巡回重力測定を行い時間変動を確認していく予 定である.

テストサイトは予想以上に天候条件が厳しかった が、重力モニタリングに関してのベースライン調査 は当初の目標を概ね達成できた。特に、中心となる超伝導重力計による高感度連続記録については、試運転期間を含めて80日間の連続記録を取得でき、主たる解析対象とみなしている振幅 $2-3\mu$ Galのトレンド成分を分離できた(図1)。巡回重力測定点網の構築という点でもほぼ目標としていた観測点の設置を達成できた。

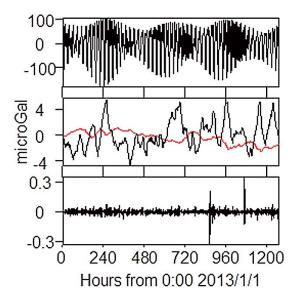


図1 超伝導重力計にる53日間の連続記録に対する BAYTAP-Gによる成分分離結果. 潮汐成分(上), 気圧応答(中・黒), トレンド成分(中・赤), 不 規則成分(下).

自然電位のベースライン測定としては、銀-塩化銀非分極電極を使用し、CO<sub>2</sub>圧入坑13-10A掘削予定地点近傍、この圧入井に最も近い観測井予定坑13-10近傍、及び13-10坑を通るNW-SE方向の3.6km長の測線において自然電位プロファイル調査を実施した、測定した結果、現在圧入中の水もしくは当地域の比抵抗構造の影響のためか、連続観測点設置予定の13-10坑の坑井周囲の自然電位分布(図2)はGordon Creekテストサイトでの測定例(破線)より小さな坑井周辺の負異常域を示したが、坑口ごく近傍の埋設パイプライン地表露出部等のごく一部を除き、13-10井周辺では障害となる局所的電位異常は無かった。

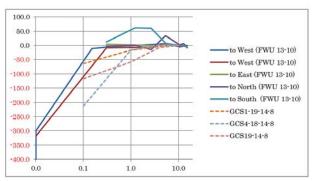


図2 自然電位ベースライン測定における観測井13-10 坑周辺における自然電位異常. 横軸は13-10坑からの距離(対数表示)

AE モニタリングでは、ファーンズワースへの観 測機器移設後に CO,圧入前ベースライン測定のた めの連続観測を再開し、3~4カ月に一度程度の頻 度で現地を訪れデータ回収をするとともに、AE 発 生ベースライン状況の把握ならびに最適観測設定の 検討を行っている. 当初のトリガ方式での AE(微 小地震を含む) 受信頻度は、現地滞在中の概算では 0.5イベント/時程度であったが、石油生産等からの ノイズや微弱信号のためにトリガ記録での詳細な解 析は困難であることが分かってきた. そこで. 平成 25年4月から低サンプルレートの連続記録に切り替 えた. その結果、予想より多くの AE が受信される ことが分かり、今後 SWP で行われる坑井内観測で は解析可能な AE 波形が十分に得られることが期待 できる. AE 発生状況は. 数 km 離れた 4 観測点間 で相関のある波形の発生が長時間継続する時間帯や 継続時間は短いが観測点間時間差が10秒前後と長い イベントなど単純ではない. また、日毎の受信数の 変化は大きく(図3),石油生産,地下水,雷・降 雨等の気象状況などとの比較検討が、今後必要であ ると考えている.

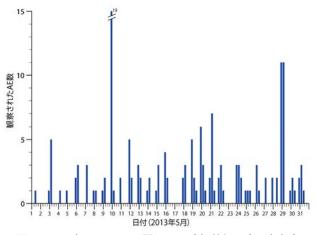


図3 2013年5月1ヵ月間の AE 受信状況. (石油生産 関係のノイズを避け, 現地時間19時~7時から目 視で AE 数をカウントした)

## 3.2. CO<sub>2</sub>長期挙動シミュレーション

本研究では地中に圧入された  $CO_2$  とそれに伴う地層の長期挙動シミュレーションを行っている。地層構造やシール特性による  $CO_2$  貯留性の違いや、圧入に伴う力学的な影響を検討する。ここでは  $CO_2$  圧入による地層の力学安定性に対する影響を検討した結果を紹介する。

 $CO_2$ の圧入計画においては間隙圧上昇による地層破壊や断層面におけるせん断すべりを防ぐ必要がある。 当グループでは未検出の断層を仮定して計画される  $CO_2$ 圧入による安定性の変化を検討した。

図 4 および図 5 は  $CO_2$ 圧入による間隙圧上昇のシミュレーション結果とそれに伴うすべり傾向係数(値が 1 の時せん断すべりが起こる)の変化である.間隙圧の上昇が圧入点付近で最も顕著であるのに対し、すべり傾向係数が最も高くなるのは数 km 離れ

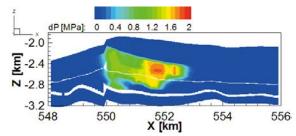


図4 CO<sub>2</sub>の圧入による間隙圧上昇分布

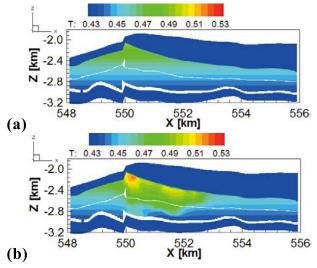


図5 (a) 初期状態および(b) 図4の間隙圧上昇が起こった時点におけるすべり傾向係数分布

た傾斜貯留層の上面付近であった.これは初期状態における安定性と不均質な貯留層における圧力伝播の重ね合わせによるものであり、CO2の圧入におけるモニタリング網を構築するに当たり留意が必要であることが示された.

#### 3.3. 砂泥互層人工試料によるシール圧測定

CO, 地中貯留の安全サイドからの評価において, スレッショルド圧低下の変動幅を把握することは非 常に重要である. 本研究では、キャップロックの シール性能評価の一環として、地中貯留環境下(10 MPa, 40℃)で、超臨界 CO, に対するスレッショル ド圧を測定した. その際. 天然岩石のスレッショル ド圧のばらつきに対して理論的な制約を与えるた め, 粒径を制御したシリカ粒子焼結体試料を作製し, 種々の粒径についてスレッショルド圧と浸透率の関 係を求めた、今年度は、昨年度までの均一粒径試料 に加え、 $10-0.1\mu m$ 、 $5-0.1\mu m$ 、 $1-0.1\mu m$ 、 $0.5-0.1\mu m$ および0.2-0.1 μm の混合粒径試料料 (混合比率が1:3, 1:1および3:1). および内部構造を詳細に解析した天 然岩石の測定を行った. その結果. 粒径分布の効果 により、スレッショルド圧が均一粒径試料よりも低 下し得ることが示された(図6). 天然岩石について も. 応力載荷に伴う浸透率の減少傾向は個々の岩石 により異なる特色を見せたものの、粒径分布の違い に依存して、均一粒径焼結体試料のランダム密充填 直線に一致するか、あるいは乖離するかが決まるこ と、すなわち、スレッショルド圧の変動に対しては

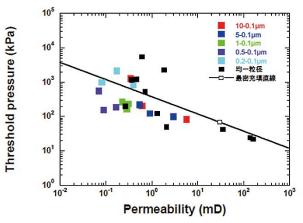


図6 シリカ粒子焼結体試料に対するスレッショルド圧 と浸透率の関係

粒径分布の効果が大きなことが示された.

# 3.4. 砂泥互層内での化学的反応プロセスの評価

本研究では、CO。地中貯留を模擬した炭酸泉およ び炭酸水素塩泉において現場反応実験を行い、種々 の炭酸塩鉱物の反応速度の計測と CO,の固定化に 至る炭酸塩鉱物の生成条件の検討を行った. 本研究 の目的は、CO<sub>2</sub>地中貯留における長期地化学プロセ スについて、シミュレーションによる予測精度の向 上を図るために、信頼性の高いパラメータおよび知 見を取得することである。特に、カルサイトの抑制 剤としての Mg イオンの効果に注目した結果, Mg/Ca 比の増加とともに、生成する炭酸塩がカルサ イトからアラゴナイトに変化することが確認され た. 一方で、一般的な帯水層条件下では、ドロマイ トおよびマグネサイトは成長しないことが示唆され た. カルサイトの成長速度と Mg/Ca 比の間には明 瞭な相関性がみられず, 室内実験に基づいた文献値 と比較して著しく低下することが判明した. これら の実験事実は、天然では単独の Mg イオンの効果は 薄れるものの、それ以外の様々な因子が複雑に関与 することにより炭酸塩鉱物の成長速度が変動し、そ の結果、CO、地中貯留の長期挙動予測にも大きな影 響を及ぼし得ることを意味している.

# 3.5. ジオメカニクスを考慮した断層モデリング手法の開発

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

力学 - 流体流動連成解析においては、流体流動 - 力学連成シミュレータ TOUGH-FLAC の日本の地質への適用性を評価することを目的として、1960年代に長野県松代地域で観測された事象を対象にシミュレーションを実施した、松代では1965年から2年に亘り群発地震とそれに伴う地表面の隆起、CO<sub>2</sub>を含む流体湧出が観測された、特に、松代地域の地質構造と地形の情報に基づき三次元地質モデルを構築

し、シミュレーションにより、地震の要因と考えられている地下深部からの流体の流入を模擬した解析を実施した. 計算結果の例として、事象開始から3年後の地表面の垂直変位分布を図に示す. 解析結果で得られた地表面隆起のパターンは観測結果と類似している. また、最大隆起量は30cmであり、観測量75cmと比較して調和的な結果が得られた.

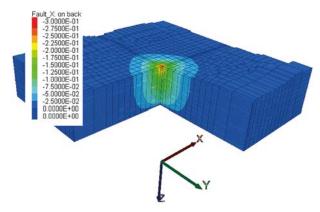


図7 事象開始3年後の地表面垂直変位分布

#### 3.6. せん断・透水試験

砂泥互層、キャップロック内には大小様々なき裂や断層が存在し、 $CO_2$ 注入により、それらは岩盤の安定性に強い影響を及ぼすとともに、水理特性も変化することが予想される。本研究では、三軸圧縮試験により、泥岩および砂岩の供試体内にせん断帯を発達させながら透水試験を行っている。図8には、封圧が20MPa、間隙水圧が10MPaの実験条件下での軸差応力とひずみの関係を示している。軸差応力がおよそ20MPa 以上においては、差応力の増加に対して、歪み量の変化がほぼ定常に達した、すなわち

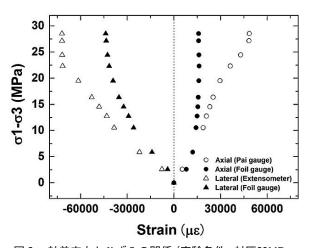


図 8 軸差応力とひずみの関係 (実験条件: 封圧20MPa, 間隙圧10MPa)

せん断すべりが生じたことが観察された.加えて、 実験後の供試体の直接観察においても同様に、実験 前に予想されたせん断角度に従い、すべり面が形成 されたことが観察された.今後は、実証試験サイト である苫小牧の岩石を対象に、引き続きせん断・透 水実験を行うとともに、取得した物性値を岩石変形 と流体流動の連成シミュレータに取り込み、岩盤力 学的変化を考慮した流体流動解析を行い、CO2貯留 での適切な注入圧の設計等を検討予定である.

# 3.7. マルチスケールにおける AE 及び注水誘発地震 に関する研究

流体の地下圧入により、AE と微小地震が誘発さ れる場合があることが観測により明らかとなってい る. AE と微小地震の発生は、その規模が貯留層の 物性と応力状態によりさまざまであり、地下貯留系 の発達状況, 水圧破砕の効果, 圧入流体の挙動を知 るための重要な手がかりである一方、有感地震が発 生すると地域社会に不安を招くリスクがある. まれ なケースではあるが、地下注水による(またはそれ に関係する)被害地震もこれまで10数件報告され、 近年増える傾向がみられる。被害地震の発生条件と 回避する可能性の究明は重要な研究課題である. コ アスケールの室内実験と現場スケールにおいて過去 の実例や地下流体が駆動する天然地震をナチュラル アナログとして研究すれば、注水誘発地震に関する 知識が得られる。そのため国際共同研究を通して該 当研究を展開している.

平成25年度は GeoTaos (地の道) というフレーム ワークを用いて中国内陸四川盆地の天然ガス田における廃水処分を目的とした枯渇ガス田への注水による誘発地震の最近の例を詳細に解析し、その成果を国際誌に発表した(図9). 他の実例に関してはデータの収集と解析を進めている。今後は、共同研究相手の学生を受入し現場で採集した岩石を用いて室内岩石実験を行う予定。

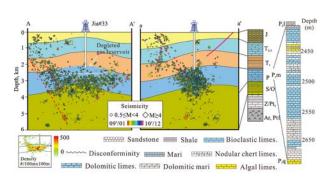


図 9 四川盆地天然ガス田における注水誘発地震の例 (Lei et al., JGR, 2013)



# 地圏環境リスク研究グループの紹介

# Geo-Environmental Risk Research Group

地圏環境リスク研究グループ長:張 銘

Leader, Geo-Environmental Risk Research Group: Ming Zhang Phone 029-861-3943, e-mail: m.zhang@aist.go.jp

# 1. グループの研究目的

土壌・地下水汚染や各種固体廃棄物の埋設処分などに代表される地圏環境及びリスク問題の調査・評価技術、低コスト・低環境負荷型汚染浄化対策技術並びにリスクやサステナビリティ評価技術に関する基礎的・先進的な研究を体系的に推進している。また、表層土壌評価基本図に代表される知的基盤の整備も着実に実施している。これらの研究において、理学的・工学的及び社会・経済学的などの観点から関連問題を俯瞰し、鋭意研究開発を重ね、合理的・科学的なリスク管理及びリスクコミュニケーションに資することを目的とする。図1に地圏環境とリスク評価関連の主要な研究課題を示す。

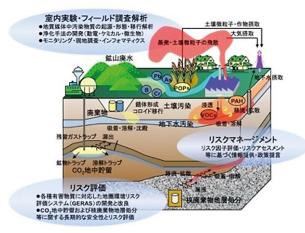


図1 地圏環境とリスク評価関連の主要な研究課題

特に、東日本大震災によって顕在化した大規模な 地質災害リスクや放射線リスクなどにも積極的に取 込み、津波堆積物の地球化学的検討とリスク評価、 放射性セシウムの環境動態調査・モニタリング及び モデル化の実施、経済モデルや生活環境モデルおよ び生態モデルなどを考慮した新たな評価機能を有す る地圏環境リスク評価システムの逐次開発・改良を 行い、復興支援や安全・安心な社会構築への貢献を 図る。

#### 2. グループの研究資源

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

# 2.1. グループメンバー構成(H25.10. 時点)

張 銘(グループ長)

田中敦子

村尾 智

川辺能成(地質分野研究企画室出向中,兼務)

原 淳子

坂本靖英

杉田 創

保高徹生

井本由香利

辻 英樹 (産総研特別研究員)

中村謙吾 (産総研特別研究員)

高田貞江 (テクニカルスタッフ)

渡邊真理子 (テクニカルスタッフ)

張 紅(テクニカルスタッフ)

軽部京子 (テクニカルスタッフ)

駒井 武(客員研究員)

山崎哲生 (客員研究員)

西脇淳子(協力研究員)

吉川美穂 (産学官来所者)

山野辺純一(産学官来所者)

黒澤暁彦 (派遣)

宇都宮達志 (派遣)

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

# 2.2. 主な研究資金

「運営交付金」

- ・ 地圏環境評価の研究
- ・地圏環境リスクの研究
- 土壌汚染評価技術の開発
- ・重金属類土壌汚染調査評価及びリスク低減方策 に関する技術開発「重点研究加速予算(戦略予 算)|
- ・放射性セシウム廃棄物等の管理に関する安全性 評価技術「融合・連携推進予算(戦略予算)」
- ・地下微生物を利用したメタンガス合成技術「融合・連携推進予算(戦略予算), 分担
- ・除染のあり方を考えるための放射性物質汚染の リスク管理に関する研究「分野イノベーション 推進予算 |
- ・吸着剤を使用した水中の低濃度の放射性セシウ

ムの迅速モニタリング方法の標準化 「受託研究」

- ・新規廃棄物処分場の適地選定手法の構築 「共同研究」
  - ・北海道内における自然由来有害物質の分布状況 に関する地質情報システムの開発
  - ・土壌汚染のバイオレメディエーションの効率化 に関する研究
  - ・地圏環境における有機物質の作用に関する研究
  - ・無機凝集剤によるヒ素汚染飲料水の処理評価に 関する研究
  - ・土壌汚染対策における環境負荷評価手法に係る 共同研究
  - ・水中の低濃度放射性セシウムのモニタリング技 術の実用化開発

# 「科研費・補助金・助成金」

- ・ベトナムにおける鉱物資源開発に関するガバナ ンス
- ・シビアな環境汚染除染以降のブラウンフィール ド問題とリスクコミュニケーションの課題
- ・丘陵地森林の放射性物質の流出・循環の景観生 態学的分析と里山の生態的再生の検討

## 2.3. 主な研究ファシリティ

多種多岐にわたる汚染物質を精度よく分析し、地 圏環境における存在形態や移動・移行、物質間の相 互作用、並びに浄化のメカニズムなどを解明するた めに、地圏環境リスク研究グループでは、研究ファ シリティの整備、研究環境の改善及び安全管理にも 力を注いでいる。重金属類や揮発性有機化合物 (VOCs)及び放射性物質、或いは、気体、液体及び 固体物質の何れ種類の汚染対象物質も分析・評価す るために、以下に示す主要機器の整備、または研究 目的に応じた試験システムの開発ができた。

- ・ガスクロマトグラフ質量分析計(GC-MS)
- ・ガスクロマトグラフ (GC, 有機, 無機対応)
- ・高速液体クロマトグラフィー/質量分析(HPLC/ MS)
- ・イオンクロマトグラフ (IC)
- ・誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP, ICP-AES, ICP-MS)
- ·原子吸光分析装置 (AA)
- ·全自動元素分析装置(CHNS/O)
- ·全有機炭素分析装置(TOC/TC,液体,固体)
- · 蛍光 X 線分析装置 (XRF, 携帯型, 卓上型)
- ·紫外可視分光光度計
- ·X線回折装置(XRD,携带型,卓上型)
- ・フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR)
- · 比表面積·細孔分布測定装置 (BET 法)
- ・微生物・遺伝子分析・定量装置(PCR, リアル タイム PCR)
- · 冷却遠心分離機
- · 携带型放射線量 · 成分測定装置
- ·可搬型放射能測定装置

- ·多項目水質計(溶存酸素,電気伝導率,pH,酸化還元電位ほか,10項目同時測定可能)
- ・高精度全自動透水試験装置(難透水性試料にも 対応)
- ・動電学的浄化試験システム
- ・カラム試験装置
- ・拡散試験装置ほか

## 3. 代表的なトピック

個々の研究課題において、研究計画の通り、研究 を進めているが、紙面制限のため、ここでは代表的 なトピックのみ紹介させて頂く.

# 3.1. 発光バクテリアを用いた土壌汚染評価手法の開発

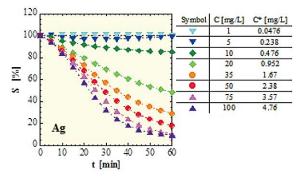
近年,発光バクテリアを用いたバイオアッセイが 注目されており,急性毒性や汚染物質の簡易検出技 術として研究開発が行われている。この技術は様々 な汚染物質の検出に適用可能であるが,本稿では メッキ金属に関する土壌汚染濃度の定量化を例とし て紹介する.

地金属の腐食や摩耗を防ぐ工業的な目的やあるい は色彩や光沢など装飾的な目的で、多種にわたる金 属によるメッキ処理が行われている. メッキ金属と して一般に使用されている金属種としては、金Au、 銀 Ag, プラチナ Pt などの貴金属類, クロム Cr, 鉄 Fe, ニッケル Ni, 銅 Cu, 亜鉛 Zn, カドミウム Cd, 錫 Sn 及び鉛 Pb などの重金属類が挙げられる。本 研究では土壌汚染対策法で規制されている Cr. Cd 及び Pb 以外にもメッキ金属として広く一般に使わ れている Fe, Ni, Cu, Zn, Ag 及び Sn に着目し, これらに対して発光バクテリア (Vibrio fischeri) に よる急性毒性試験を実施した. そして, 得られた試 験データを基にメッキ金属6種に関して発光バクテ リアに及ぼす急性毒性影響の定量化を行い、各パラ メータ値を取得した (例えば, Ag, 図2a). これら 取得したパラメータ値と相関式を適用することに よって、それぞれのメッキ金属種によって汚染され た土壌中の汚染濃度を概算することが可能となった (例えば, Ag, 図2b).

# 3.2. 津波堆積物中に含まれる有害重金属類とそのリスク

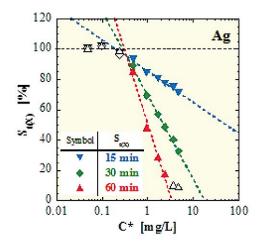
2011年3月11日に東日本地方を襲った巨大地震は、地震の直接的な被害のみならず、液状化や地盤沈降、さらには沿岸域における広域の大津波による甚大な被害をもたらした。特に、東日本沿岸における膨大な津波堆積物と震災瓦礫を含む土壌は、被災地の復興を妨げる大きな要因となっている。津波堆積物には通常の土壌と比べて、海成堆積物に特有な重金属類が含まれる可能性があり、その地質汚染リスクが懸念され、適切に評価することが重要となる

本研究では、東日本大震災の津波により陸域に堆 積した津波堆積物について、青森県から千葉県の沿



a) 銀溶液添加後の発光バクテリアの相対発光強度比の経 時変化

S:相対発光強度比 [%], t:検液添加後の経過時間 [min], C:検液中の銀濃度 [mg/L], C\*:発光強度測定試料中の銀濃度 [mg/L] = C/21



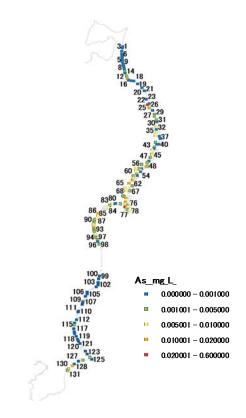
b) 発光バクテリアの相対発光強度比に及ぼす銀濃度の影響

St(X): 検液添加 X 分後における相対発光強度比 [%] 図 2 発光バクテリアの相対発光強度比による汚染物質 濃度の同定(Ag を例として)

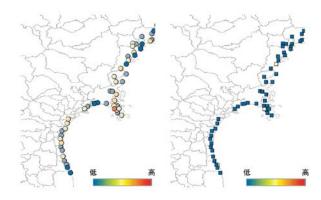
岸域より、計131ヶ所の試料を採取した(図3 a). 採取した津波堆積物に含まれる重金属の量(含有量)や水に溶け出す重金属の量(溶出量)を定量的に調査した。その結果、津波堆積物中の重金属量は、ほとんどの地域で環境基準値を下回っていたが、宮城県や岩手県などいくつかの地点でわずかに超過している場所があった。そこで、津波堆積物上に人が居住すると仮定して、そこに住む人への健康リスクを評価した。その結果、全ての地点において人の重金属類の摂取量は、WHO等で定められている許容摂取量をはるかに下回っており、リスクは小さいものと推定された(図3b).

# 3.3. 環境水中の低濃度放射性セシウムの迅速計測技 術の開発

環境水中の低濃度放射性セシウムの迅速測定及び存在形態別のモニタリングは長期に亘る水の利用や環境中における放射性セシウムの移動動態の解明において非常に重要である。本研究では、環境水中における低濃度放射性 Cs 濃度の形態別測定を簡便かつ迅速に行うために、プルシアンブルー担持不織布および懸濁物質回収不織布の2種類のカートリッジ



a) 津波堆積物採取地点ならびにヒ素の溶出量



b) 宮城県沿岸津波堆積物におけるヒ素濃度分布 (左)とそのリスク評価(右)

図3 津波堆積物の調査地点とヒ素リスクの例

型不織布フィルタからなる, 固液分離・溶存態放射性 Cs 濃縮を同時に行う装置を開発した(図4). 本方法では, 20L の環境水を対象として, 8分~40分程度で懸濁態と溶存態の分離およびカートリッジへの濃縮が可能となり, 従来法と比較して極めて短時間での分離/濃縮が可能となる. また, 分析用標準を準備することで, カートリッジをゲルマニウム半導体検出器で直接測定が可能である.

# 3.4. 自然由来汚染土壌における鉛の存在形態及び溶 出特性評価技術の開発

我が国における土壌汚染の判明事例は、年々増加傾向にあり、低コスト・低環境負荷汚染浄化技術の確立が最大の課題となっている。特に、平成22年度「土壌汚染対策法」の改正により、自然由来汚染も規制の対象となり、土壌汚染調査・対策のマーケッ

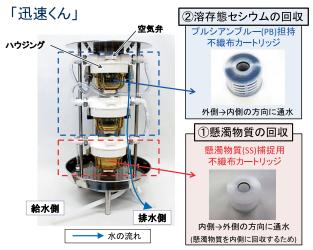
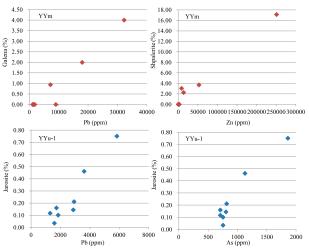


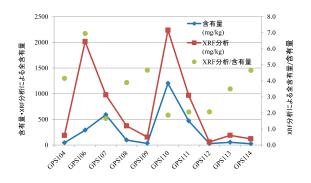
図4 環境水中の低濃度放射性セシウムの迅速測定装置

トが増大するとともに、問題も複雑になる。また、「土壌汚染対策法」の改正により、汚染土壌の移動を伴わない原位置浄化も望まれるようになった。

本研究では、日本における重金属類汚染事例とし て数多く存在する鉛汚染に注目し、汚染サイトから 採取してきた多種の自然汚染土壌を用い、鉛の存在 形態及び溶出特性評価技術を開発し、溶出特性とそ の他の化学的性質との相関性を評価した. その結 果. 本研究で考案した土壌の沈降分級. 粉末 X 線 回析分析及び金属シリコン標準試料を用いた簡易定 量分析法による汚染物質のホスト鉱物の同定に非常 に有効であることを示した(図5 a). また, 自然由 来汚染は、汚染物質の含有量が然程高くなくても、 溶出量で環境基準を超過するケースが比較的多く存 在することが分かった. 公定法分析より得られる含 有量は全含有量の評価が出来ず、浄化効率の評価に 適用困難と考えられる(図5b). 浄化効率を適切に 評価するためには、新しい評価基準の考案が必要と 思われる. 更に. 浄化の成否や浄化効率と密接に関 連する汚染物質の溶出特性は対象汚染物質の含有量 と関係なく、有機物及び汚染物質の存在形態に依存 し、これらを浄化成否の判断指標として利用するこ とが可能であることが示唆された。



a)分級した試料中の元素濃度と鉱物含有量の関係



b) 公定法による含有量と蛍光 X 線分析 (XRF) による全 含有量との相関性(鉛)

図5 自然由来土壌における鉛の存在形態及び溶出特性

# 4. 最近の主な研究成果

川辺能成,原淳子,保高徹生,坂本靖英,張 銘, 駒井武(2012) 東日本大震災における津波堆 積物中の重金属類とそのリスク,土木学会論文 集 G,68(3),195-202.

上記論文は平成25年度6月14日に開催された土木学会平成25年度定時総会にて平成24年度土木学会論文賞を受賞した.上記論文のほか,地圏環境リスク研究グループとしては年間20篇以上の誌上発表及び年間40件以上の口頭発表を行っている.



# 地圏環境システム研究グループの紹介

# Introduction of the Geo-Environmental Systems Research Group

地圏環境システム研究グループ長:高倉伸一

Leader, Geo-Environmental Systems Research Group: Shinichi Takakura Phone 029-861-3927, e-mail: takakura-s@aist.go.jp

# 1. グループの研究目的

地圏環境システム研究グループでは、環境に調和 した地圏の開発・利用を図るため、岩盤応力測定や 岩石コア実験による地下構造の評価技術、物理探査 を利用した非破壊モニタリング技術, 数値シミュ レーションによる地下環境のモデリング技術などの 基盤研究を進めている。また、CO<sub>2</sub>地中貯留研究や 放射性廃棄物地層処分研究などへの適用研究を行っ ている. 当研究グループ員が長年にわたり研究を進 めてきた各種技術は、浅部から深部に至る地圏環境 の解明、地圏の流体や熱の変動予測、地熱等資源の 継続的利用などに役立ってきた. 今後ますます高度 化・多様化する社会のニーズに的確に応えられるよ う,技術ポテンシャルの維持・向上に努めている. さらに, これらの技術を地下資源の安定的確保や継 続的利用あるいは地質災害や地質汚染の防止を図る 研究などへも積極的に応用して、安全で安心できる 社会の実現に貢献することを目指している. このた め、他のグループ・ユニット間の連携による研究. 外部研究機関や企業との共同研究を積極的に進める とともに、研究成果を迅速に発信し、社会への技術 の普及と振興に取り組む.

#### 2. グループの概要

当研究グループは、CO<sub>2</sub>地中貯留研究,地層処分安全研究,地熱等資源研究,地下利用技術研究を主たるミッションにかかげ,つくば西事業所で平成19年7月に新しく組織され,平成24年6月につくば中央第7事業所に移転した。メンバーは,地球物理学,岩石力学,掘削工学,岩盤工学などの専門家である。物理学的実験およびフィールドワークの手法を用いて,環境に調和した地下の有効利用,資源開発に必要な技術開発に取り組んでいる。

研究対象は環境評価から資源探査までと多岐にわたり、研究内容も基礎研究から応用研究までと幅広く、予算項目は複数にまたがっている。いずれの研究においても、「環境との調和を考えた地圏の開発・利用を図ること」を基本理念としている。

#### 2.1. グループ員

高倉伸一 (研究グループ長)

及川寧己

宮崎晋行

唐澤廣和 (評価部と兼務)

竹原 孝 (イノベーション推進本部と兼務)

成田 孝(平成25年10月より)

相馬宣和(CO2地中貯留 RG より分担)

船津貴弘 (CO2地中貯留 RG より分担)

大野哲二(鉱物資源 RGより分担)

東海林太郎 (産学官制度来所者)

## 2.2. 予算

経済産業省研究委託費「二酸化炭素回収·貯蔵安 全性評価技術開発事業」

運営費交付金「地圏環境システムの研究」

日本鉱業協会研究委託費「磁鉄鉱と硫化鉱物を含 有する岩石の電気的特性に関する研究」

共同研究費「PDC チップを有するパーカッションビットの性能評価に関する研究 |

共同研究費「豊羽地区における基礎調査解析に関する研究」等

#### 3. 研究の進捗状況

以下では、平成25年度前半までの主な研究の進捗 状況の一例を紹介する.

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

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

試料岩石は比較的容易に入手可能な,地表採取の千葉県産第四紀泥岩を用いた.これは CO<sub>2</sub>の地中隔離に係わる幾つかの基礎研究でも,キャップロックに相当する堆積軟岩として用いられたことがある.密度は含水状態で約2.0g/cm³,孔隙率は含水重量と乾燥重量の差から36%程度と見積もられる.試験片は,採取した岩石ブロックを加工して概寸で直径50mm,高さ100mmの円柱状に作成した.ここでは三軸クリープ試験について記すが,その他にもクリープ応力を定めるための三軸圧縮試験や試料岩石の力学特性把握の一環で一軸圧縮試験等も実施している.

図1に三軸試験装置概略を示す. 軸載荷には MTS 社製材料試験機(油圧サーボ式, 容量50t または100t)を用いた. 試験片は三軸圧力容器内部中央の台座上にセットし、均一に載荷するための球座を 挟んで軸載荷用のシリンダが上部に設置されてい る. 試験片に軸載荷する際には、この圧力容器ごと 持ち上げることにより、このシリンダが容器外部の 載荷板に取り付けられたロードセルを挟んで、容器 内部に押し込まれるような仕組みとなっている. 三 軸試験時の容器内部の圧力制御は動特性の良い油圧 サーボ式の載荷装置を用い、周圧載荷流体には機械 油を用いた. 圧力容器には加温ヒーターを胴体外周 に巻き, 容器内部に設置した温度センサの計測値を 基に、油で満たされた試験中の容器内部温度を PID 制御により一定に保持した. 試験片の孔隙圧は, 温 調ジャケットを装着した2台の高精度ギアポンプを 用いて試験片の上下端から制御し、必要に応じて上 下端に差圧を生じさせて孔隙流体を圧入・回収でき るようにした. ポンプとベッセルの間の孔隙圧制御 配管にはケーブルヒーターを巻いて圧入・回収時の 孔隙流体の温度低下を抑止した.

三軸クリープ試験における想定地下深度は陸域の 1000m として, 周圧19.4MPa, 孔隙圧9.8MPa, 温度 40℃と設定した. 孔隙流体は比較のため、水のみで 飽和させた試験片と水飽和させた試験片に CO<sub>2</sub>を 圧入した試験片の2通りの孔隙状態の試験を行って いるが、ここではCO2を圧入した試験片について のみ示す. CO。の圧入は試験片の上端と下端に圧力 差を生じさせることにより行った. 孔隙流体の圧入 置換終了後は、試験片上下端の圧力を所定圧9.8MPa に保持する. この状態で試験片は、周圧による時間 依存の圧縮変形を生じ徐々に縮んでゆく. この後に 実施するクリープ試験で、軸方向への差応力を生じ させたことによるクリープ変形となるべく区別する ために、この周圧による圧縮変形速度が十分に小さ く、もしくはこれ以上の圧縮変形速度の低下が見込 めないような、ほぼ一定値に収束した状態になるま で待機したのちにクリープ試験を行った. 試験片の セットアップからクリープ応力載荷までの準備期間 は3~4週間を要した.

三軸クリープ試験では荷重速度一定で所定の軸荷 重まで3秒で載荷し、その後軸荷重一定で保持し た. なお. 試験片が3次クリープを発現し破断に至 らない場合でも、載荷ラム変位がみかけ上+10mm に達した段階で、十分な変形量に達したと見なして 試験終了とした. 孔隙流体の移動に関しては. 孔隙 率が30数%とそれなりに大きいことを考慮し、上下 端からの排水条件として見かけ孔隙圧を試験中一定 に保持した. 載荷クリープ応力の設定は、CO、を圧 入した三軸圧縮試験において得られた応力 - ひずみ 関係を基に設定した。CO。圧入試験片の最大差応力 を16.1MPa とし、90%のクリープ差応力を14.5MPa, 85%のクリープ差応力を13.7MPa とした. CO<sub>2</sub>圧入 試験片においては90%クリープ応力の試験で、1分 以下と短時間の寿命ではあるが3次クリープを発現 したのちに破壊に至るものを一例得ることに成功し た(図2).24秒という短時間で破壊に至ったため、

応力一定等の厳密なクリープ条件が構成されていた かについては良く検討する必要があるが、今後はこ の条件をベースに実験を重ねて行く予定である.

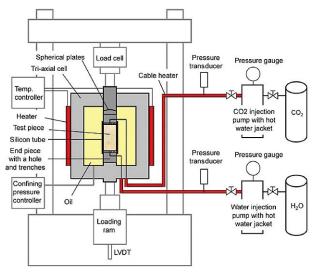


図1 三軸力学試験装置概要

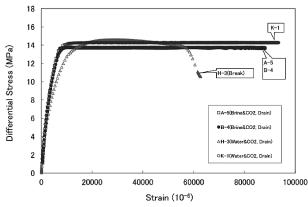


図2 クリープ試験時の応力ーひずみ関係

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

超臨界状態の CO<sub>2</sub>を海底下の未固結層に圧入する場合,数値シミュレーション等により海底地盤の力学的な挙動を予測し,安全性を確保しなければならない.そのためには,CO<sub>2</sub>貯留層の力学特性に関する知見を蓄積し,そのモデル化を行う必要がある.そこで,海底下のCO<sub>2</sub>貯留層を模擬する未固結堆積物の供試体を人工的に作製する手法を開発し,その三軸圧縮試験を実施した.

三軸圧縮試験装置の模式図を図3に示す.最大軸荷重は200 kN,最大セル圧は20 MPaである.セル液は、恒温水槽(図3の(5))から高圧ポンプ(6)に供給された後、三軸セル(8)内に吐出され、セル圧調節シリンダ(4)を経て、恒温水槽に戻る.このセル液循環システムにより、試験中の供試体(10)の温度をほぼ一定に保ち、かつ、供試体に対し拘束圧を負荷させることが可能となり、原位置環境に近い条件(有効拘束圧9 MPa,温度40℃)での力学特性を取得することができる.供試体は密詰め

の豊浦砂を一旦水で飽和した後、超臨界  $CO_2$ により間隙水を置換して作製した。このときの置換率、すなわち、間隙中に占める超臨界  $CO_2$ の体積比率は76%~78%と、岩石などの場合に比べて高かった。軸載荷方法として、一定の軸ひずみ速度与える定ひずみ速度試験と、一定の軸荷重を与えるクリープ試験とを実施した。

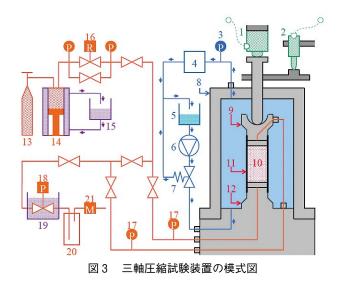
定ひずみ速度試験より得られた応力 – ひずみ曲線を図4に示す。軸差応力は軸ひずみに対して単調に増加し、ひずみ硬化傾向を示した。超臨界 $CO_2$ 含有供試体の方が、水飽和供試体よりも、わずかに大きな軸差応力を示した。クリープ試験より得られたクリープ曲線を図5に示す。時間の経過に伴い、クリープひずみは単調に増加した。超臨界 $CO_2$ 含有供試体では、サクションの影響により、見かけ上の粘着力が発現し、土粒子の団粒化が生じているものと考えられる。従って、超臨界 $CO_2$ を含む未固結堆積物は、一種の不飽和土として振る舞う可能性があるといえる。

## 3.3. 坑井掘削の高効率化に関する研究

坑井掘削の高効率化を目的として、パーカッショ ンビットの掘削性能評価試験を行っている. 現在. パーカッションビットのチップ材料として、多結晶 ダイヤモンド焼結体 (Polycrystalline Diamond Compact: PDC) が実用化されつつある(以下, PDC チップという). 図6にPDCチップの断面図を模式 的に示す. PDC チップは、パーカッション掘削に 対応すべく、耐衝撃性を向上させる多層構造(チッ プ表面の多結晶ダイヤモンド層から内部の超硬合金 基体に向かって、 多結晶ダイヤモンドの配合量が段 階的に減少する構造)となっている. PDC チップ を有するパーカッションビット(以下, PDCビッ トという), ならびに、超硬合金 (WC-Co) チップ を有する同形状・同寸法のパーカッションビット (以下, WC-Co ビットという)を用いて、沢入花崗 岩(一軸圧縮強度:約220 MPa)の掘削実験を行い、 掘削性能を評価した.

ビットの直径は65 mm であり、図7に示すように、チップはフェース部に3個、ゲージ部に5個、合計8個配置した。チップは、根元の直径11 mm、先端部の曲率半径6 mm のボタンタイプである。掘削条件は、ビット回転数75 rpm、ビット荷重約6.5 kN、掘削流量60 L/min(清水)、パーカッションドリルへの入力油圧約15.3 MPa とした。

掘削速度と掘削長との関係を図 8 に示す. 掘削開始時 (掘削長0 m) における掘削速度は, PDC ビットと WC-Co ビットでそれぞれ13 cm/min, 14 cm/min であったが, 掘削に伴う掘削速度の減少は, WC-Co ビットの方が大きかった. 掘削長30m における PDC ビットの掘削速度は約10 cm/min であったのに対し, 掘削長20 m における WC-Co ビットの掘



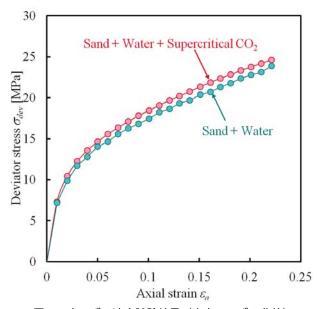


図4 定ひずみ速度試験結果(応力-ひずみ曲線)

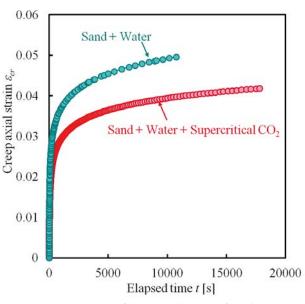


図5 クリープ試験結果(クリープ曲線)

削速度は約6 cm/min であった. ゲージチップの高さと掘削長との関係を図9に示す. PDC ビットでは、目視によってゲージチップの表面に摩擦痕が認められたものの、ゲージチップの高さはほとんど変化せず、掘削長が約30mに至っても掘削可能な状態であった. これに対し、WC-Co ビットでは、ゲージチップの摩耗が顕著で、掘削長が約20 mにおいてゲージチップの高さは掘削開始時から約0.9 mm減少し、ほぼビットライフに達した. これらの結果は、PDC ビットは WC-Co ビットに比べて耐久性の面で格段に優れていることを示している.

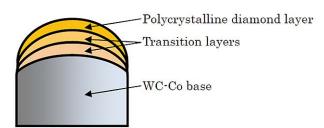
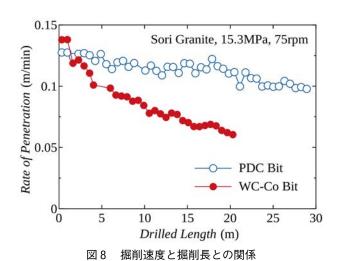


図6 PDC チップの断面図(模式図)



図7 ビット正面からの写真



#### 4. 最近の主な研究成果

麻植久史・小池克明・吉永 徹・高倉伸一(2012) MT 法と AMT 法の組み合わせによる広域 3 次 元比抵抗モデリングと水理地質構造解明への応

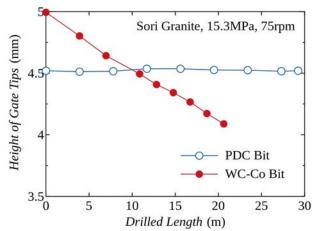


図9 ゲージチップの高さと掘削長との関係

用. 情報地質, 23, 121-129.

Kanda, W., Yamazaki, T., Ogawa, Y., Hashimoto, T., Sakanaka, S., Aizawa, K., Takakura, S., Koyama, T., Yamada, K., Kobayashi, T., and Komori, D. (2013) Shallow Resistivity Structure of Sakurajima Volcano Revealed by Audio-frequency Magnetotellurics. 火山, **58**, 251–267.

唐澤廣和・鈴木宏治・高橋幸司(2012)パーカッションビットのチップ摩耗に関する考察. *Journal of MMIJ*, **128**, 620-625.

Komori, S., Kagiyama, T., Takakura, S., Ohsawa, S., Mimura, M., Mogi, T. (2013) Effect of the hydrothermal alteration on the surface conductivity of rock matrix: Comparative study between relatively-high and low temperature hydrothermal systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **264**, 164–171.

Miyazaki, K., Tenma, N., Aoki, K., and Yamaguchi, T. (2012) A Nonlinear Elastic Model for Triaxial Compressive Properties of Artificial Methane-Hydrate-Bearing Sediment Samples. *ENERGIES*, **5**, 4057–4075.

Miyazaki, K., Tenma, N., Sakamoto, Y., and Yamaguchi, T. (2012) Triaxial Compression Test of Artificial Sediments Containing CO2 for Enhanced Methane Hydrate Recovery. Proc of 7th Asian Rock Mechanics Symposium.

中村竹博・及川寧己・竹原 孝・高倉伸一・山口 勉(2013) 三軸圧縮応力下での CO<sub>2</sub>圧入によ る太田代層泥岩の力学特性の評価. *Journal of MMIJ*, **129**, 440–446.

高倉伸一 (2013) セリサイトの複素比抵抗測定. 物理探査, **66**, 119-125.

高倉伸一・吉岡真弓・内田洋平・石澤友浩・酒井直 樹(2012)比抵抗モニタリングによる盛土中の 水分変化の推定、物理探査、**65**、223-236.



# 再生可能エネルギー研究センターにおける地熱・地中熱研究の紹介

Introduction of the Geothermal and Hydrogeological researches at the Renewable Energy Research Center

福島再生可能エネルギー研究所 福島連携調整室 イノベーションコーディネータ:阪口圭一

Innovation Coordinator, Fukushima Collaboration Office, Fukushima Renewable Energy Institute: Keiichi Sakaguchi Phone 029–861–3897, e-mail: k-sakauchi@aist.go.jp

# 1. 福島再生可能エネルギー研究所及び再生可能エネルギー研究センターの設立

産総研は2013年10月1日に、10番目の研究拠点として福島再生可能エネルギー研究所を設立した。福島再生可能エネルギー研究所では、「世界に開かれた再生可能エネルギーの研究開発の推進」と「新しい産業の集積を通した復興への貢献」を大きな使命とし、国内外から集うさまざまな人々と共に、再生可能エネルギーに関する新技術を生み出し発信する拠点を目指す。

建物は、福島県郡山市西部第二工業団地に平成26年1月に竣工予定で、その後順次研究開発設備の搬入・設置を進める。平成26年4月に福島再生可能エネルギー研究所を開所し、本格的に研究活動を開始する予定である(第1図)。開所までの研究活動は産総研つくばセンターで実施する。

福島再生可能エネルギー研究所では、研究推進組織として再生可能エネルギー研究センターを、研究支援組織として福島連携調整室および福島研究業務推進室を設置し、同研究所内で研究活動を展開する独立行政法人 科学技術振興機構(JST)などの外部機関と連携する(第2図).

再生可能エネルギー研究センターでは、再生可能 エネルギーの大量導入の早期実現に向けて、以下の 6つの課題を中心に、国内外の多様な外部機関と共 同で世界最先端の再生可能エネルギーの研究開発を 実施する.

# 1.1. 再生可能エネルギーネットワーク開発・実証

大きく変動する再生可能エネルギーの高密度の大量導入に必要な、さまざまなエネルギー貯蔵技術を活用したエネルギーネットワークを構築し、エネルギー需要とのマッチングや電力系統との円滑な連系を可能とする技術を開発・実証する.

#### 1.2. 水素キャリア製造・利用技術

太陽光・風力発電などの変動電源から水素キャリア(有機ハイドライド、アンモニアなど)を製造することにより、変動する再生可能エネルギーを大量貯蔵・輸送し、高効率で利用するシステム技術を開発・実証する.

# 1.3. 高効率風車技術およびアセスメント技術

遠方の風向や風速などの計測による発電量向上などの技術を確立し、発電および風車寿命の向上のための研究を実施する.

## 1.4. 薄型結晶シリコン太陽電池モジュール技術

結晶シリコン基板から太陽電池モジュールまでの一貫製造ラインを用いて、高効率・低コスト・高信頼性を兼ね備えた薄型結晶シリコン太陽電池モジュールの量産化技術の開発を実施する.

# 1.5. 地熱資源の適正利用のための技術

地熱発電所の持続的な運転や周辺温泉への影響監視・評価に必要なモニタリング技術, 地熱発電可能 地域を拡大する技術などの開発を実施する.

1.6. 地中熱ポテンシャル評価とシステム最適化技術 地下水流動・熱交換量予測シミュレーションに基 づく地中熱ポテンシャルマップを作成し、それを活 用して地中熱利用システムの最適化・高精度設計技 術の開発を実施する.

## 2. 地熱及び地中熱の研究課題

## 2.1. 研究体制

再生可能エネルギー研究センターに置かれた6研究チームのうちの地熱チーム及び地中熱チーム,及び研究センターと研究所のメンバーとして,地圏資源環境研究部門から研究員が参画している.

地熱チーム及び地中熱チームは,深部から浅部までの地球熱(地熱+地中熱)の適正利用を進めるための研究を実施する.

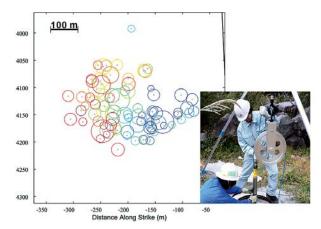
- ○再生可能エネルギー研究センター
- · 総括研究主幹:安川香澄
- ・地熱チーム: 浅沼 宏 (チーム長), 相馬宣和, 阪口圭一 (兼務)
- ・地中熱チーム:内田洋平 (チーム長), 高橋保盛, 吉岡真弓, シュレスタ・ガウラブ (1号契約職員)
- ○福島再生可能エネルギー研究所
- ・福島連携調整室:阪口圭一(イノベーションコーディネータ)

# 2.2. 地熱チームの研究: 地熱資源の適正な開発・管 理技術の開発

産総研の持つ高度な計測・探査技術を駆使した地 熱貯留層の適切な開発・管理や温泉資源との共生の 実現のための研究, 地熱発電可能地域の拡大を目指 した地熱貯留層能力改善や人工貯留層開発のための 技術開発を行う(第3図). また, モニタリング技 術やデータベース等を利用して地熱利用の合意形成 のための支援手法を開発し, 地熱利用の社会的受容 性向上を目指す.

# 2.3. 地中熱チームの研究:地中熱ポテンシャル評価 とシステム最適化技術

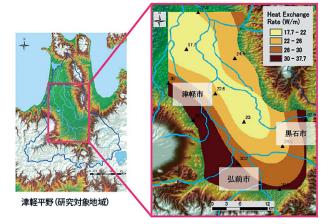
地下水流動・熱交換量予測シミュレーションに基づく地中熱ポテンシャルマップを作成し、地中熱利用システムの設計精度向上に寄与する(第4図).また、それを活用して、導入するそれぞれの地域に適した地中熱システムの最適設計手法を開発し、地中熱利用システムの普及拡大を促進する。地中熱ヒートポンプや地上部分のシステム設計などの工学的な部分については、日本大学や福島県ハイテクプラザ、民間企業などと共同して研究を実施する。



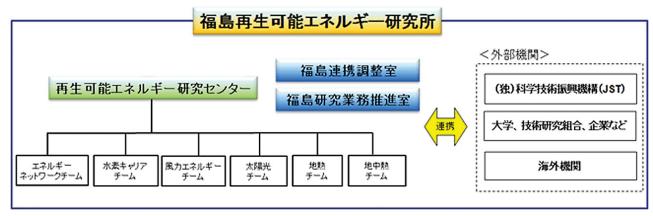
第3図 超高解像度 AE マッピングによって捉えられた き裂内の流体移動. 色の違いが時間進行を表 す. 右は坑内 AE センサー設置作業.



第1図 福島再生可能エネルギー研究所の完成予想図



第4図 津軽平野における地中熱交換量分布図 (シュレスタほか, 2012)



第2図 福島再生可能エネルギー研究所組織図



# 筑波花こう岩と人の営み -文化地質学による地域振興の試み-

Tsukuba Granites and Stone Sculptures in Tsukuba town

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

## 1. はじめに

つくば市北部の北条は、天和2年(1626)の常陸 北条藩の成立を契機に筑波地域の政治と経済の中心 地として栄え、土蔵造りの店蔵をはじめとする歴史 的建造物が多く残り、それらからなる地域特有の町 並みを残していました。2011年の東日本大震災で は、100近い土蔵の大半が傷み、10棟以上が倒壊し ました。この震災から立ち直りかけた矢先、2012年 5月6日に北条市街地を通過した竜巻は、前年の大 震災を超える甚大な被害をもたらしました。

北条の住民や商工会・筑波大学・つくば市でつくる「北条復興まちづくり協議会」は、2012年7~8月に行った住民アンケート調査に基づき、「筑波山麓の観光拠点としての復興」・「歴史的な町並みを活かした復興」を目指しています(嶋・安藤、2013).

筆者は、「文化地質学」(その地域に分布する地質資源に依拠して、地域が育ててきた地域文化・地域産業などの調査研究)の観点から、筑波山と加波山の周辺に分布する花崗岩と産業・生活・文化との関連を調べ、つくば市立手代木中学校サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト2007「花崗岩を通して地域を考える」(長、2008)や、地質情報展2011水戸でのブース展示「ふるさとの石 茨城の花こう岩-日本の近代化を築いた石たち-」(長、2012)を行ってきました。

そこで、北条の復興を支援するために、北条を含む旧筑波町に分布する筑波花崗岩とそれらを使った歴史的石造物を調べ、7月20日に行われた産総研つくばセンター一般公開に「筑波山・加波山の花こう岩と人の営み」を出展しました。

#### 2. 筑波花崗岩

筑波山の南山麓には、次の5種類の筑波花崗岩が 分布します(宮崎ほか、1996)。

- ・筑波花崗岩 1:細粒黒雲母角閃石閃緑岩・中粒黒 雲母角閃石トーナル岩
- ・筑波花崗岩2:片状黒雲母トーナル岩
- ・筑波花崗岩 3: 斑状黒雲母花崗岩・斑状白雲母黒 雲母花崗閃緑岩, 粗粒黒雲母花崗 岩, 粗粒黒雲母花崗閃緑岩, 中粒 黒雲母トーナル岩
- · 筑波花崗岩 4: 中粒白雲母黒雲母花崗岩
- · 筑波花崗岩 5: 細粒花崗岩類

## 3. 筑波花崗岩を使用した石造物

人々は、それぞれの地に賦存したそれぞれの筑波 花崗岩を使って幾多の石造物を造り、その想いを託 してきました.

## 片状花崗岩を使用した石造物

・国松の性山寺の常夜燈

## 斑状花崗岩を使用した石造物

- ・臼井の飯名神社の鳥居(平成24年修復)
- ・臼井の六所神社の鳥居
- ・筑波の筑波道の一の鳥居(宝暦9年, 1759)
- ・神郡の普門寺の九重層塔(慶長期, 1600頃)
- ・神郡の蚕影神社の鳥居と常夜燈
- ・北条の筑波道の道標(寛政10年, 1798)
- ・小田の宝篋山山頂の宝篋印塔 (鎌倉中期)

## 中粒花崗岩を使用した石造物

- ・北条の日向廃寺の礎石(平安末~鎌倉)
- ・北条の多気太郎義幹之墓 (鎌倉)
- ・北条の城山の城(戦国時代)
- ・北条の八坂神社の五輪塔(天文6年, 1537)
- ・北条の熊野神社の鳥居(寛永13年, 1636)
- ・小田の長久寺の石灯籠 (鎌倉後期)
- ・小田の地蔵菩薩立像(鎌倉後期)
- ・小田の極楽寺跡の五輪塔 (鎌倉後期)

#### 細粒花崗岩を使用した石造物

- ・沼田の茨城百景筑波山の石碑(昭和)
- ・山口の山口2号墳の石室奥正面に使われた大きな 花崗岩は細粒花崗岩であると思われました(古墳 時代).

## 引用文献

長 秋雄 (2008): 地質ニュース, 643, 32-35.

長 秋雄 (2012): GSJ 地質ニュース, 1, 111-114.

宮崎一博・笹田政克・吉岡敏和(1996): 真壁地域 の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 103p.

嶋 真史・安藤邦廣 (2013): 筑波大学知的コミュニティ基盤研究センターシンポジウム「大災害における文化遺産の救出と記憶・記録の継承」配布資料.

# 筑波花こう岩と人の営み

つくば市北部の旧筑波町には、花こう岩を使った石造物がたくさんあります。

筑波山と宝篋山に分布する花こう岩、北条の城山・小田の前山に分布する花こう岩を 使って、鎌倉時代から石造物が作られており、この地は「関東での花こう岩石造物文化の 発祥地」です。県指定文化財や市指定文化財が、たくさんあります。

下図は、この地域の地質図です(地質調査総合センター, 2011)。片状花こう岩を青色で、 <mark>授状花こう岩を赤色で、</mark>中粒花こう岩を桃色で、細粒花こう岩を紅色で、示しています。 なお、筑波山の中腹から山頂は、はんれい岩です

大正7年から8年(1919)に土浦・岩瀬間が開通した筑波鉄道の目的の一つは、真壁の石材の搬出ルートを短縮することでした。廃線後は、「つくばりんりんロード」になりました。





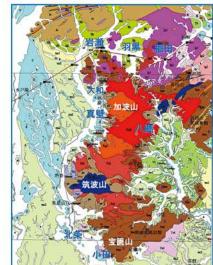








# 人の営み 石に託された想いを聞いてみ



茨城の花こう岩は、その鉱物の大きさや色あいにより、採石地の地 名を冠して呼ばれています。

- ·稲田石
- ·羽黒青糠目石
- ·坂戸石
- ·真壁石 やさとみかげ

高橋(2006)は、左の地質図に示す14種類に分類しています。

高橋裕平(2006):数値地質図「真岡」 及び「土浦」地質編集図(筑波山及び 周辺地域の地質案内). 地質調査総合 センター研究資料集. no.435 より

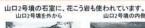
小田の石造物 (つくば市) 宝篋山のハイキングコースがお勧めです。







片状花こう岩・斑状花こう岩















# 中粒花こう岩・細粒花こう岩



図 1 産業技術総合研究所つくばセンター一般公開(2013年7月20日)での出展「筑波山・加波山の花こう岩と人の営み」 での展示パネル(6枚の内4枚,筑波花崗岩が使われた歴史的石造物)



# 重希土類資源としてのイオン吸着鉱の成因と探査の指針

Genesis of ion-adsorption ores as HREE resources and implication for exploration

鉱物資源研究グループ: 実松健造, 昆 慶明, 星野美保子, 徐 維那, 森田沙綾香, 渡辺 寧

Kenzo Sanematsu<sup>1,2)\*</sup>, Yoshiaki Kon<sup>1)</sup>, Mihoko Hoshino<sup>1)</sup>, Yuna Seo<sup>1)</sup> Sayaka Morita<sup>1)</sup> and Yasushi Watanabe<sup>1)</sup> Resources Geochemistry R.G., <sup>2)</sup> CODES, University of Tasmania \*Corresponding Author, e-mail: k-sanematsu@aist.go.jp

## 1. はじめに

希土類元素(REE: La-Lu)の中でも軽希土類 (LREE: La-Eu)に比べ重希土類(HREE: Gd-Lu)は 地殻中の存在量が少ない. 近年, HREE を生産可能 な鉱床の探鉱・開発が世界中で進められているが, 現時点でも HREE の大部分は中国南部のイオン吸着型鉱床から生産されている.

イオン吸着型 REE 鉱床はイオン吸着鉱と呼ばれる風化花崗岩から構成される鉱床である。1969年に中国江西省で発見されて依頼、探鉱・開発が進められてきたが、その成因を論じた文献の発表は意図的に制限されていた。しかし、当研究グループの研究結果により、イオン吸着鉱の成因、HREE に富む要因、具体的な探査法について明らかになってきたため(例えば Sanematsu et al., 2013)、本発表にて説明する。

#### 2. 原岩花崗岩中の REE 含有鉱物

イオン吸着鉱を形成する原岩は主としてカルクアルカリ花崗岩であり、一部はアルカリ花崗岩である。一般に、REE含有量はアルカリ花崗岩の方が高いが、HREE含有量を比較するとカルクアルカリ花崗岩と大差はない。よって、HREEの資源量を考慮すると、必ずしもアルカリ花崗岩が望ましい訳ではない。

花崗岩は結晶分化作用の過程で、HREE に対してより液相濃集元素である LREE に富む傾向がある. しかし、特に分化した花崗岩(SiO<sub>2</sub> > 73%程度)は HREE に富むことがあり、これが風化することにより HREE に富むイオン吸着鉱を形成する. この中で最も重要な鉱物は REE フッ素炭酸塩である(Bao and Zhao, 2008).

花崗岩に含まれるフッ素炭酸塩鉱物としてバストネス石 -Ce[LREEO3F] やシンキス石 -Y(HREE) [CaCe( $CO_3$ ) $_2$ F] 等が確認される。花崗岩固結末期の熱水がフッ素に富む場合,LREE よりも HREE と選択的に錯体を形成して運搬することがある (Pokrovski et al., 2013)。この場合,温度低下や $_2$ PHの上昇によっての $_3$ HREE に富むフッ素炭酸塩鉱物を形成する。ただし,これらの鉱物の産出は後述する鉱物よりも比較的まれである。そのため,HREE に富むイオン吸着鉱の資源量は一般に少ない。少量であるにも関わらずフッ素炭酸塩の形成が重要であ

るのは、風化により分解して土壌水中に REE を放出しやすいからである.

フッ素炭酸塩の他にも、イオン吸着鉱の HREE に寄与する鉱物はとしてチタン石 [CaTiSiO<sub>5</sub>] が考えられる。チタン石は REE を少量しか含まないが、HREE に富む。その他の HREE 含有鉱物であるジルコン( $ZrSiO_4$ )、ゼノタイム(HREEPO $_4$ )、フェルグソン石(HREENbO $_4$ )等に比べ、チタン石は粗粒で多く産出するため、主要な HREE 鉱物の一つといえる。ただし、フッ素炭酸塩と共に産出することは少なく、より未分化な花崗岩に産出する。チタン石は、風化耐性の高い鉱物(モナズ石やジルコン等)に比べると、風化によって分解され HREE を土壌水中に放出しやすい。

LREE に 富 む 鉱 物 と し て は、 褐 レ ン 石 [CaLREEAl<sub>2</sub>FeSiO<sub>11</sub>O(OH)], モナズ石 [(LREE,Th)  $PO_4$ ], リン灰石 [ $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl)$ ], そして一部の REE フッ素炭酸塩が挙げられる.

褐レン石は主要なLREE原の一つであり、前述したチタン石と共に産出することも多い。したがって、褐レン石とチタン石を含みREEフッ素炭酸塩を含まない花崗岩(このような花崗岩の方が一般的である)は、著しくHREEに富むことは少ない。褐レン石もチタン石と同様に、風化過程で分解されやすいため、これらの鉱物が花崗岩にある程度の量含まれていれば、REEフッ素炭酸塩がなくてもイオン吸着鉱を形成することは可能である。

## 3. 風化による REE の挙動と吸着

花崗岩が地表付近に表れると、上部ほど強く風化の影響を受け、下部ほど風化の影響が弱い風化断面が形成される(図1). 大別すると風化断面上部のREE 溶脱帯、イオン吸着鉱が存在する下部のREE 集積帯とに分けられる. 風化断面上部の土壌は大気中のCO2や腐植酸等の影響で酸性を示す. 土壌中ではREE 含有鉱物を含めた多くの鉱物の分解が促進されるか変質を被る. この過程で放出されたREE が土壌水に溶出して下部に運ばれるため、風化断面上部はREE 溶脱帯と言える. 溶脱帯は大気と接していて酸化的環境にあるため、Ce³+の大部分は酸化されてCeO2として固定される. 一方でその他のREE³+は風化断面下部へと運ばれる. その結果、溶脱帯は相対的にCeに富み、コンドライト隕

石規格化 REE パターンは正の Ce 異常を示す(図 1). 一方, 風化断面下部は集積帯であり, 上部の溶脱帯から運ばれた REE が, pH の上昇による溶解 度低下によって固定される. この pH の増加は, 鉱物による緩衝作用や, 地下水面との接触に起因すると考えられる.

集積帯で固定された REE は、二次鉱物の構造に取り込まれるか、鉱物(または非晶質かもしれない)に吸着して存在する。風化岩で形成される二次 REE 鉱物は、ラブドフェーン [LREEPO $_4$ ・ $H_2O$ ] やフローレンス石 [LREEAl $_3$ (PO $_4$ ) $_2$ (OH) $_6$ ] といったリン酸塩がほとんどである。したがって、REE が二次鉱物中に含まれずに吸着して存在するためには、 $P_2O_5$ に乏しい分化した花崗岩が原岩として望ましい

集積帯で REE の吸着を支配するのは鉱物の表面 電荷であり、REE は恐らくカオリンなどの粘土の 結晶端面に静電気的に吸着して存在していると考え られる. 土壌水中で REE が移動する際の多くは, 炭酸塩, 炭酸水素塩, 腐植物質等と錯体を形成する か、自由イオンとして存在するため (例えば、 Wood, 1990; Takahashi et al., 1999), その表面電荷は 正である. したがって、REE が鉱物表面に静電気 的に吸着されるには、その鉱物の表面は負に帯電し ている必要がある.風化花崗岩中の鉱物の量や、電 荷ゼロ点を考慮すると (Kosmulski, 2009), カオリ ンは最も REE を吸着している鉱物の一つであると 考えられる. 吸着した REE は硫酸アンモニウム溶 液のような電解質溶液溶液のイオン交換により抽出 される. ただし、吸着した状態の REE がどのよう な化学状態であるかは十分に解明されていない.

以上のREEが溶出してから吸着するまでの過程において、LREEとHREEの間(ただしCeを除く)に分別が起こると考えられるが、これは配位子、pH、イオン強度、吸着物質の種類等の影響を受けるため、簡単に説明することは難しそうである。むしろREEの分別は、原岩花崗岩中のREE含有鉱物の種類に受ける影響が大きい。したがって、HREEに富むイオン吸着鉱を見つけるには、風化過程でHREEに富むような条件を期待するのではなく、前述したようにHREEフッ素炭酸塩やチタン石等の風化で分解しやすい鉱物を含む花崗岩地域を特定した方が探査において有効である。

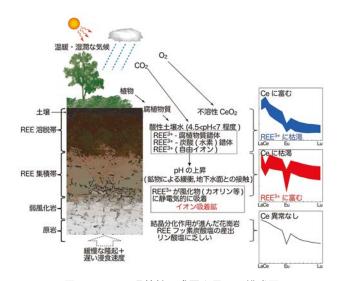


図1 イオン吸着鉱の成因を示した模式図

## 4. イオン吸着鉱探査の指針

先行研究や本研究結果を合わせて考えると、HREE に富むイオン吸着鉱を原岩は、結晶分化作用が進んで( $SiO_2 > 73\%$ )、 $P_2O_5$ に乏しく( $P_2O_5 < 0.1\%$ )、フッ素炭酸塩鉱物を含む花崗岩が理想的である。このような花崗岩は白雲母と若干の蛍石を含み、自生変質を被っている。そして、広域的に見ると W や Sn 鉱床地域に存在することが多い。

イオン吸着鉱となりうる風化花崗岩は、全岩化学組成が著しい Ce の枯渇(負の Ce 異常)を示す(図1; Sanematsu et al., 2013). 風化花崗岩中に吸着されている REE の割合と負の Ce 異常には相関がある. Ce 異常の代わりに Ce/La 比を用いても同様の相関が見られる. Ce や La は蛍光 X 線分析によっても定量可能であり、地化学探査の効率化を図れる.

## 引用文献

Bao, Z. and Zhao, Z. (2008) Ore Geology Review, 33, 519–535.

Bea, F. (1996) Journal of Petrology, 37 521-552.

Kosmulski, M. (2009) Journal of Colloid and Interface Science, 337, 439–448.

Pokrovski, G.S. et al. (2013) Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 76, 165–218.

Sanematsu, K. et al. (2013) Mineralium Deposita, 48,

Takahashi, Y. et al. (1999) Geochimica et Cosmochimica Acta, 63, 815–836.

Wood, S.A. (1990) Chemical Geology, 82, 159-186.

# 地圈資源環境研究部門成果報告書 2013 (GREEN REPORT 2013) AIST04-C00014-12

平成 25 年 11 月 20 日発行

編集:独立行政法人産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

発行者:中尾信典

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

# Green Report 2013

The future of rare metal resources and the way forward for Japan

Institute for Geo-Resources and Environment (GREEN)

20 November 2013





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

地圈資源環境研究部門成果報告書2013 (GREEN REPORT 2013) AIST04-C00014-12