

Green Report

2009



地圏資源環境研究部門成果報告 部門第2期の成果と第3期への展望

3 December 2009

表紙は、右上から時計回りに、黄河壺口瀑布、メタン生成古細菌、メタン生成古細菌、
第三紀火山岩の割れ目にできた石英結晶、長岡 CO₂ 圧入井

まえがき



地圏資源環境研究部門長

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

矢野雄策

Dr. Yusaku Yano

地圏資源環境研究部門の成果報告会は、今年で第8回目を迎えました。今回の報告会のテーマは「部門第2期の成果と第3期への展望」です。産総研は平成13年度に創立され、当部門は産総研創立と同時に設立された研究ユニットです。産総研の第1期は平成13年度から平成16年度までの4年間でした。第2期は平成17年度から今年度平成21年度までの5年間、そして次期第3期は来年度平成22年度からスタートします。独立行政法人ですので、各期には所管の経済産業省からの中期目標に沿って、中期計画を策定してそれを達成すべく研究を実施していきます。

当部門は地圏を対象として、人類社会の持続可能な発展に欠かせない資源と環境の研究を進めています。現在、常勤研究職員約80名、客員研究員や契約職員を含めて総人員約200名の体制で研究を進めています。限られた人員ですので、研究者一人一人が持っている研究ポテンシャルを最大限生かしていくこと、研究者相互の研究ポテンシャルの相乗効果を可能な限り生み出す体制にすることが、研究部門運営においてたいへん重要なことと考えています。また、外部の組織との連携・協力を進めていくことが重要と考えています。この成果報告会を通じて、皆様方に部門の研究をご紹介します。皆様方との連携・協力を強めていければ幸いです。

当部門の重点研究課題は、産総研の中期計画と研究戦略に基づき、社会のニーズに沿って設定しております。現在第2期においては、下記の7つの重点研究課題の実進を進めています。

<当部門の重点研究課題>

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

長期的に見ますと、社会ニーズの変化に応じて重点研究課題も変遷しています。当部門

の重点課題は設立当初の地熱資源を柱とする資源問題から、第2期にかけて地層処分や地中貯留などの地圏環境の利用に関する研究と土壤汚染などの地圏環境の保全に関する研究が多くを占めるようになりました。しかし第2期には石油の価格の変動やレアメタルニーズの急騰など資源に係る社会情勢も変化を続け、本年9月に発足した新政権の元では、温室効果ガスの大幅削減が大きなテーマとなり、今後はまた再生可能エネルギーの開発が大きく求められると考えられます。このような新しい社会情勢を考慮しながら、また一方で資源と環境の問題は比較的長期の問題であるという認識を持ちながら、部門として新しい第3期への研究課題を策定し、これに取り組んでいきたいと考えています。

本年度の研究報告会においては、当部門の第2期の研究成果を概括し、第3期への展望をお示しできればと思います。今年度は招待講演者に井上千弘教授（東北大学）をお願いしております。井上教授のご講演は当部門の資源と環境の研究に大きな示唆を与えていただけるものと考えております。

部門の研究は、社会ニーズを的確に捉え、外部の皆様と連携して進めてゆくことが肝要です。部門成果報告会では、メインテーマに関する講演以外に、各研究グループや個人の研究成果をより詳しく知っていただくために、ポスターセッションも例年同様設け、ご参加いただいた方との研究交流を深めてまいりたいと思います。この報告会は、部門の成果をお知りいただくと同時に、皆様から直接、貴重なご意見を伺う重要な機会と位置づけており、毎年定期的に開催しております。今後とも変わらないご高配を賜りますよう、心からお願い申し上げます。

第 8 回 (2009 年) 地圏資源環境研究部門研究成果報告会 プログラム

	頁
13:00-13:20 地圏資源環境研究部門研究紹介	矢野雄策 (研究部門長) 1
研究発表	
部門第 2 期の成果と第 3 期への展望	
13:20-13:50 : 南関東ガス田 (水溶性天然ガス資源) の地質・地化学的研究 －地質・資源情報の把握とそのアウトカム－	佐脇貴幸 (地圏化学研究グループ長) 5
13:50-14:20 : 次世代二酸化炭素地中貯留 - 第 2 期研究成果と第 3 期研究への試案	當舎利行 (主幹研究員) 9
14:20-14:50 : 地圏資源環境研究部門における地層処分安全規制支援研究 －第 2 期の成果と今後の展望－	伊藤一誠 (地下環境機能研究グループ長) 15
14:50-15:30 : ポスターセッション	(各研究グループ, 個別研究課題)
15:30-16:20 : 招待講演 生物を利用した資源開発と環境修復	井上千弘 (東北大学大学院 環境科学研究科教授) 19
16:20-16:50 : 土壌汚染リスク研究の成果と環境ガバナンスへの展開	駒井 武 (副研究部門長, 地圏環境リスク研究グループ長) 23
16:50-17:15 : ポスターセッション	(各研究グループ, 個別研究課題)
17:15-19:00 : 懇親会 (ポスター会場)	
ポスターセッション	
(研究グループ発表)	
地下水研究グループの紹介	丸井 敦尚 27
地圏環境評価研究グループの紹介	今泉 博之 29
CO ₂ 地中貯留研究グループの紹介	中尾 信典 31
地圏環境システム研究グループの紹介	高倉 伸一 35
物理探査研究グループの紹介	内田 利弘 39
地圏化学研究グループの紹介	佐脇 貴幸 43
地圏微生物研究グループの紹介	坂田 将 47
燃料資源地質研究グループの紹介	鈴木祐一郎 49
地熱資源研究グループの紹介	村岡 洋文 53
鉱物資源研究グループの紹介	高木 哲一 57
地質特性研究グループの紹介	関 陽児 59
地下環境機能研究グループの紹介	伊藤 一誠 61
地圏環境リスク研究グループの紹介	駒井 武 63

(個人発表)

東京首都圏における地下水・地下温度環境の変遷*

宮越昭暢・林 武司(秋田大)

九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレートスラブの沈み込みの関係

65

茂野 博

New intra-channel architecture within sinuous Amazon slope channel revealed by a 3D seismic study*

Takeshi Nakajima・Jeff Peakall・William D. McCaffrey(University of Leeds)・Philip Thompson(University of Aberdeen)

高性能アルミニウムケイ酸塩吸着剤(ハスクレイ)の生成過程と性能変化について*

鈴木正哉・月村勝宏

枯渇油田における油層内微生物のメタン生成経路の解明*

眞弓大介・持丸華子・吉岡秀佳・坂田 将・前田治男(INPEX 帝石)・宮川善洋(〃)・五十嵐雅之(〃)・小林 肇(東京大)・佐藤光三(〃)

Carbon isotopic relationship between methane and archaeal lipids in near-surface sediments from the Nankai Trough*

Susumu Sakata・Urumu Tsunogai(Hokkaido U.)・Masahiro Oba(Tohoku U.)・Masatoshi Komiya

短いロッドにおけるひずみ計測*

唐澤廣和・鈴木宏治(鈹研工業)・高橋幸司(〃)

二酸化炭素吸着に伴う石炭の破壊強度の変化*

竹原 孝・及川寧己・當舎利行

プロトン核磁気共鳴を用いた日本産の地質試料の水理学的物性の研究*

中島善人・宇津澤 慎(New Mexico Resonance)

花こう岩石材に浸透する水－中性子ラジオグラフィ試験による可視化－

67

長 秋雄・松林政仁(日本原子力研究開発機構)・長谷川正一(羽黒石材商工業協同組合)・

吉田博和(茨城県工業技術センター)

サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト『花崗岩を通して地域を考える』

69

長 秋雄

古代吉備国から現在までの財(たから)を築いた石たち*

長 秋雄・能美洋介(岡山理科大)

中国とラオスにおけるイオン吸着型希土類鉱化作用の比較*

実松健造・村上浩康・渡辺 寧

東アジア鉱物資源図の紹介－電子媒体による情報提供について－*

大野哲二・神谷雅晴・寺岡易司・奥村公男・宮野素美子・渡辺 寧

地圏資源環境部門の国際展開－国連 ESCAP との協力－*

村尾 智

CO₂ 地中貯留のリスクアセスメントの課題*

田中敦子・坂本靖英・駒井 武

世界における原子力発電及び高レベル放射性廃棄物地層処分の現状*

張 銘・駒井 武・原 淳子

地層処分とリスクガバナンス*

張 銘・駒井 武

*の発表は別途要旨発表済み等の理由により本報告書には未収録

南関東ガス田（水溶性天然ガス資源）の地質・地化学的研究 -地質・資源情報の把握とそのアウトカム-

Geological and geochemical study on the Minami-Kanto Gas Field (natural gas resource of dissolved-in-water type):

Geoinformation on the geology and resource and its outcomes

佐脇貴幸*, 金子信行, 猪狩俊一郎, 前川竜男（地圏化学研究グループ）
棚橋 学, 中嶋 健, 森田澄人（燃料資源地質研究グループ）, 坂田 将（地圏微生物研究グループ）

Takayuki Sawaki^{1)*}, Nobuyuki Kaneko¹⁾, Shun-ichiro Igari¹⁾, Tatsuo Maekawa¹⁾,
Manabu Tanahashi²⁾, Takeshi Nakajima²⁾, Sumito Morita²⁾ and Susumu Sakata³⁾

¹⁾ Resources Geochemistry Research Group, ²⁾ Fuel Resource Geology Research Group,

³⁾ Geomicrobiology Research Group

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

1. はじめに

資源が乏しいといわれる日本にとって、鉄やレアメタル等の金属資源、石油・天然ガス等の燃料資源など、産業や社会生活に必要な各種資源の確保は、省エネルギー・省資源の問題と併せて、国として常に考慮しておくべき最重要な課題である。そのためには、国外での資源の確保とともに、国内のさまざまな資源についても、その正確な情報を把握しておくことが必要である。特に、近年の資源価格の高騰が国民生活に与えた影響は記憶に新しいところである。

そのような資源の確保という目的のために、例えば海底鉱物資源やメタンハイドレートの研究が進められているわけであるが、その一方で膨大な資源量がありながら、大規模開発が行われていない鉱床として、「南関東ガス田」がある。これは日本最大の水溶性天然ガス鉱床であるが、その賦存状況は今から30年以上前に取りまとめられたものの、その後の地質学的研究はあまり進められていない。一方、関東平野での温泉開発に関連して、ガス爆発事故が起きている。これが南関東ガス田の水溶性天然ガスと関連があると考えられ、南関東ガス田についての地質学的情報の再整備の必要性が産総研内外から指摘された。

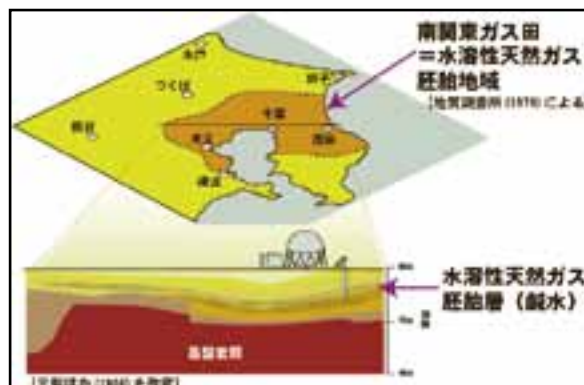
これらの状況を踏まえ、南関東ガス田に関する研究が平成20年度より開始された。本発表においては、その研究の概要、成果の一部、期待されるアウトカム等について述べる。

2. 南関東ガス田の概要

近年、都市平野部で大規模娯楽施設等を併設した温泉開発が盛んに進められているが、その一方で、関東平野では温泉水に含まれている水

溶性天然ガスが原因となった爆発事故が発生している。例えば、平成17年2月の東京都北区の温泉掘削現場でのガス炎上事故、平成19年6月の渋谷区での温泉施設爆発事故などがある。これらの事故が発生した地点は、「南関東ガス田」と呼ばれる水溶性天然ガスの分布域内に入っている。

南関東ガス田は、わが国最大の水溶性天然ガス田である。1976年に地質調査所によって出版された「日本油田・ガス田分布図（第2版）」（以下 油田ガス田図）にはその分布範囲が示されている（第1図）が、千葉県房総半島中部、茨城県南部、埼玉県東部、東京都東部、神奈川県東部にまたがる範囲がこれに相当する。その炭化水素資源量（原始埋蔵量）は、5500~6600億m³と見積られている（地質調査所石油課、1975）。



第1図 南関東ガス田の概念図

この水溶性天然ガスは、地下深くに胚胎する鹹水（かんすい）に溶存しているものであり、主成分はメタン（例えば、福田、1979）である。胚胎層となっているのは主として約250万年~40

万年前に海底に堆積した上総（かずさ）層群である。鉦床は、東京湾北部を中心とした盆状構造をなし、数百 m~2000m 程度の深さに胚胎されていると考えられている。房総半島中部の茂原市周辺では、この胚胎層に到達する坑井から鹹水を汲み上げ、分離した天然ガス（メタン）を千葉県下に供給している（第 2 図）。



第 2 図 水溶性天然ガスの生産井

また、鹹水には海水の約 2000 倍の濃度のヨウ素が溶解しており、水溶性天然ガスを採取すると同時に汲み上げられた鹹水からはヨウ素が分離抽出され、世界の生産量の約 1/3 をまかなっている

3. 研究の背景

このように、南関東ガス田は、人口密集地・都市平野部に分布する、日本における数少ない優良な鉦床の一つなのである。しかしながら、この水溶性天然ガス・鹹水の賦存状況の詳細や主要胚胎層である上総層群を含めた地下の地質状況の詳細については、現在も天然ガス開発が進められている九十九里周辺を除けば、前述の油田ガス田図の出版以降、ほとんど未解析のままといっても過言ではない。

一方、近年の関東地方平野部における温泉開発は、大部分が 1000m を超える大深度掘削のボーリングによるものである。日本においては、火山地域以外での地殻上部の平均的な地温勾配は 20~30℃/1000m であり（例えば鈴木，1985）、前述の鹹水は、温度という視点からは「深層熱水資源」と見なされ、これを温泉資源として開発していることになる。従って、関東平野（特に南部）での温泉開発の場合には、温泉の掘削・開発と並行して必ず水溶性天然ガスの安全な処理が必要となり、この配慮を怠ると、前述のようなガス爆発事故に繋がることになる。

このような事情から、油田ガス田図が、環境省による温泉ガス爆発事故対策のための緊急調査（平成 19 年）の基図として利用されることになった。しかしながら、その時点で油田ガス田図は出版されてから 30 年以上を経ており、これを最新の地質学的情報を盛り込んだものへと更

新する必要性が、産総研内外から指摘された。

4. 南関東ガス田に関する研究の概要

以上の背景を元にして、平成 20 年度から、産総研・地圏資源環境研究部門の重点研究項目として、「関東平野における水溶性天然ガス鉦床の分布に関する地質・地化学的調査研究」が開始された。本研究は 3 年計画（平成 20~22 年度）であり、研究実施体制は、産総研・地圏資源研究部門の有機地球化学、燃料地質学に関わる研究者がチームを構成している。

研究の主目的は、将来にわたる日本国内の資源の安定供給に資するために、南関東ガス田及びその周辺域における水溶性天然ガスの賦存状況（分布範囲、資源量等）に関わる資源情報、および関東平野の地下構造に関する地質情報等を整備し、新たな燃料資源地質図として取りまとめることである。同時に、研究成果のアウトカムとして、

- ・ 燃料資源・温泉資源の安定供給・効率的利用に資すること。
- ・ 水溶性天然ガスが原因となった温泉爆発事故を踏まえ、地質学・地化学的情報に基づいた対応指針として利用していただくこと。
- ・ 温泉中のメタンガスの有効利用および地球温暖化対策のための基礎的情報として利用していただくこと。

等を視野に入れている。

研究を進めるに当たっては、

- ① 関東地方の既存坑井データ、物理探査データ、関連資料を収集し、上総層群相当層を中心とした三次元的な地質状況を把握する。
- ② 温泉水・天然ガス等に関する既存情報を収集するとともに、既存温泉井等から水・ガス試料を採取し、化学分析を行う。この地化学データをもとに、天然ガスの起源、地下地質構造との関係、天水侵入の影響等を検討する。
- ③ ①、②を基に、南関東ガス田における天然ガス胚胎層の分布の概要を把握し、水溶性天然ガス鉦床の成因を明らかにする。
- ④ 以上のデータ解析に基づき、南関東ガス田を中心とした関東平野全域にわたる天然ガスの賦存状況を取りまとめた資源地質図及び三次元的な地質構造を解明する。

という方針を立てている。

これらの方針に基づいて既存の資料・情報に関する文献調査及び関係機関への聞き取り調査を行ない、関東地方における天然ガスの存在形態、分布等についての情報を整理しているところである。また、ガスを付随する温泉井、ガス井をピックアップし、実坑井での試料採取を行い（第 3 図）、天然ガスや地層水について化学組成分析、酸素・炭素・水素の同位体分析等も行っている。現在、その分析結果に基づき、ガス

の起源・成因等を解析中である。



第3図 坑内サンプラーを用いたガス採取

5. これまでの研究進捗

初年度の研究成果については金子ほか(2008), 佐脇ほか(2009)に報告しているが, 以下にはそれに沿って, 関東地方における天然ガスの賦存状況と地質学的な関係を概説する。



関東地方の極めて簡略化した模式柱状図は第4図のようになる。すなわち, 上位から沖積層, 新期段丘堆積物・新期関東ローム層, 下総層群, 上総層群, 三浦層群, 先新第三系となるが, 以下には,

これらのうち, 天然ガスに関する既報のデータがある, ①沖積層・段丘堆積物, ②上総層群, ③三浦層群及び相当層, ④先新第三系に関して概説する。

5.1 沖積層・段丘堆積物

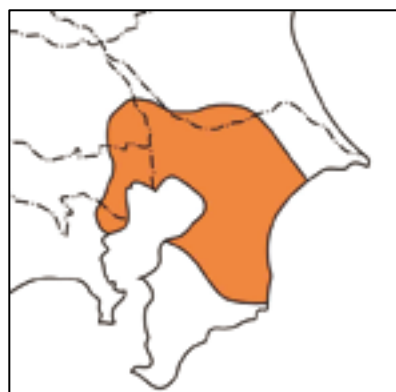
東京の下町低地や茨城県内の沖積地では, メタンが地表に湧出し, 時に建設現場で爆発事故が発生している。ただし, 深部に存在する水溶性天然ガスとの相互関係は不明である。また, 地下水位の変化により, メタンを含む空気が湧出する井戸もある(東京都土木技術研究所, 1993)。

5.2 上総層群

南関東ガス田の主要貯留層は, 房総地域では上総層群中部の黄和田(きわだ)層・大田代(おおただい)層・梅ヶ瀬層であるが, 現在の沈降地域となっている東京湾岸ではそれらの上位層準の国本(こくもと)層も加わる。また, 南関東ガス田の範囲は, 上総層群基底深度が1000m(東部)~千数百m(東京・神奈川)より深い範囲にほぼ一致する(第5, 6図)

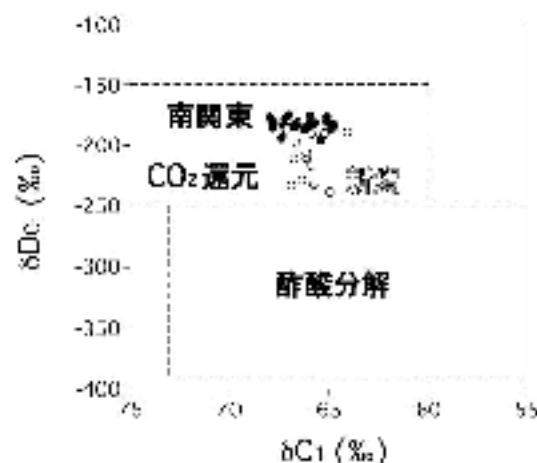


第5図 鈴木(1996)による上総層群基底深度。



第6図 南関東ガス田の範囲。地質調査所(1976)を簡略化。

水溶性天然ガス(メタン)の起源・性状については, 金子ほか(2002)により, CO_2 と H_2 , H_2O からアーケアが生成した微生物起源ガスであることが明らかになっている(第7図)。本研究でのこれまでのガス分析の結果でも, いまのところこれと同じ結果が得られている。



第7図 メタンガスの起源(金子ほか, 2002を一部修正)

しかしながら, 南関東ガス田全体のガスの性状解明のためには, 房総地域において鉱床の形成過程を明らかにし, 過飽和状態でのガスの移動を考慮すると共に, 移動したガスの再溶解と天水の侵入によるガス胚胎層(鉱床)の破壊過

程を地化学データの解析から正しく認識する必要がある。

5.3 三浦層群及び相当層

上総層群分布地域周辺部では、上総層群より下位の三浦層群相当層から揚湯する温泉にメタンが付随するケースが認められている。鉱床規模ではないにせよ、上総層群よりも下位の海成層である三浦層群相当層にも相当量のメタンが溶存していることを認識する必要がある。

5.4 先新第三系

常磐堆積盆に面する茨城県北部沿岸部には、常磐炭田と同じ古第三系を起源とする炭田ガス、もしくは石炭起源の天然ガスが賦存している。また、四万十層群中の温泉ガスには、しばしば熱分解起源と考えられるメタンが認められている(矢崎ほか, 1981)。

以上のように、関東地方には、南関東ガス田以外の地域にも、さまざまな深度に可燃性天然ガスが賦存していることが明らかとなってきた。したがって、燃料資源地質図としてまとめる際には、その利用(アウトカム)を考慮し、それぞれの天然ガスの性状の差を明らかとし、峻別した形で図上に表示しなければならない。

これらの事実を踏まえ、今後もさらに関東平野の広い範囲に亘って坑井試料を採取し分析することで、南関東ガス田及び周辺地域の天然ガスの賦存状況をより正確に把握していくこととしている。また、既存坑井データに基づく地下地質構造の解析も同時に進めることとしている。

6. おわりに

本研究では、独自で行う地質学的・地化学的分析とともに、地方自治体、開発業者(天然ガス、温泉)等の方々のご協力を仰ぎつつ、天然ガスの賦存状況、地下地質構造を解明しつつあるところである。これらの研究成果を通して、安全・安心な社会構築のために必要な地質学情報を提供していくことを目指している。

さて、本研究と同じように、地下の地質構造を明らかにする研究(例えば都市地質の研究など)においてしばしば問題となるのは、貴重な地下の地質情報(地質地盤情報:例えばボーリングデータ)が、しばしば未整理・未公開のまま利用できない状況にあることである(地質地盤情報協議会, 2007)。公共工事等、公的機関が実施した事業については、ようやくそのデータの整備が進みつつあるが、それ以外にも、許認可申請等のために自治体等に提出された多数の地質地盤情報が利用・公開されずに眠っている実情がある。このため、研究がさまざまな場面で壁に突き当たり、スムーズに進まないことがしばしばある。本研究においても、その点が一つの壁になっている。また、このような学術的な点だけではなく、地質地盤情報の取り扱いに

関して明確な法的根拠がないため、自治体等においても、各種行政施策を実施するに当たって、せっかくの貴重なデータが有効に利用されていないという問題点もある。

したがって、土木・建築や温泉開発等のさまざまな場面で得られた地質地盤情報全般について、その取扱に関する法的整備を行い、有効に活用できるようにすることが、資源の適正な管理、防災、都市計画等の施策に活かすための重要かつ喫緊の社会的課題であるといえる。このような考え方に基づいて、地質地盤情報が、国民が共有すべき社会的資産・知的基盤情報として理解され、位置づけられ、広く公共のものとして利用できるようシステムが構築されることが、安全・安心な社会の構築のために、さらに一層寄与するであろう。

引用文献

- 地質調査所(1976) 1:2,000,000 地質編集図 No. 9 「日本油田・ガス田分布図(第2版)」。
地質調査所石油課(1975) 水溶型ガス鉱床の埋蔵量。石油技術協会誌, 40, 183-185。
地質地盤情報協議会(2007) 地質地盤情報の整備・活用に向けた提言・防災, 新ビジネスモデル等に資するボーリングデータの活用-, 38p。
福田 理(1979) 共水性ガスとその鉱床(その1)。地質ニュース, no. 294, 1-15。
金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎(2002) アークアによるメタンの生成と間隙水への濃集機構。石油技術協会誌, 67, 97-110。
金子信行・佐脇貴幸・棚橋 学(2008) 関東平野下に賦存する可燃性天然ガスについて。日本地質学会第 115 年学術大会, P-90。
三梨 昂・尾田太良・江藤哲人(1986) 新生代東北日本弧地質資料集 第3巻・付録 関東地方地質断面図(北村 信 編), 宝文堂。
佐脇貴幸・金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・徳橋秀一・中嶋 健・棚橋 学・坂田 将・森田澄人(2009) 水溶性天然ガス資源(南関東ガス田)の研究 ―温泉開発, 深層熱水利用等の指針策定への貢献(アウトカム)―。温泉科学, 58, 302-309。
鈴木宏芳(1985) 関東平野の地中温度。防災科学技術センター研究報告, No. 35, 139-154。
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, No. 56, 77-123。
東京都土木技術研究所(1993) 東京下町低地における可燃性天然ガスの噴出について。東京都土木技術研究所特別報告 第1号, pp. 42。
矢崎清貴・影山邦夫・狛 武(1981) 山梨県早川町における四万十帯の天然ガス徴候地について。地質調査所月報, 32, 259-274。

次世代二酸化炭素地中貯留-第2期研究成果と第3期研究への試案

CO₂ Geological Storage for the next generation-results in the 2nd AIST research phase and plan in the 3rd phase

地圏資源環境研究部門主幹研究員：當舎 利行

Principal Research Scientist, GREEN: Toshiyuki Tosha,

* e-mail address: toshi-tosha@aist.go.jp

1. はじめに

気候変動(地球温暖化)が叫ばれている。IPCC (気候変動に関する政府間パネル) 第4次評価報告書(2007)では、「気候システムの温暖化には疑う余地がない」と断言している。この温暖化ガス濃度の減少には、森林の整備など直接、大気中のCO₂を減らす試みもさることながら、温暖化ガスを排出しない方策や排出源から大気中への放出を削減させる取り組みが行われている。エネルギー関連では、エネルギーの需要を抑制する省エネルギー政策や効率的なエネルギー発生、再生可能エネルギーの利用を目指す技術開発とともにエネルギー生産時に大気中に放出される温暖化ガスの減少のための発生したCO₂を地中に貯留する技術開発も進められている。本編はこのCO₂地中貯留技術についての近年の動向と産総研での研究現状について報告する。

2. 気候変動

地球は、過去温暖化と寒冷化を繰り返しており、最後の寒冷期は、およそ7万年前に始まり1万年前に終了したとされている。その後、地球は小さな温暖と寒冷を繰り返しながら平均気温は変動を繰り返してきており、近年は小さな温暖期を迎えていると言われている。IPCC 第3

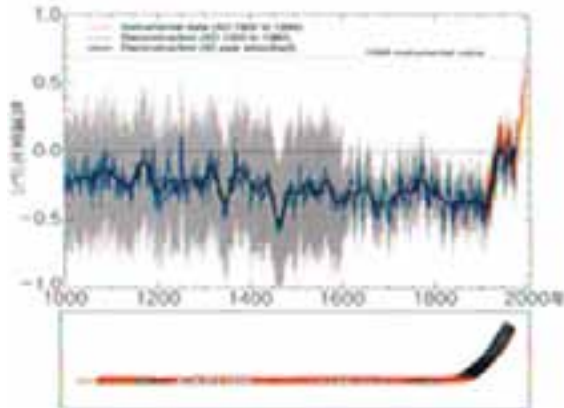


図1. ホッケースティックと呼ばれた気温変化. (IPCC 第3次報告書, 2001 より)

次報告書(2001)に「ホッケースティック」なる急激な気温上昇の図が載り、産業革命以降のCO₂排出が温暖化をもたらしたことを印象づけた(図1)ものの、1400年から1800年の小氷河期が表されていないことや統計上の誤りが指摘されていたことから、地球の平均気温の上昇は温暖化ガスによる地球温暖化ではなく温暖期に入ったことを表しているに過ぎないとの主張もある(たとえば、赤祖父, 2008 など)。この急激な気温の上昇は、その後改訂されて小氷河期等も再現されたものとなっているが、産業革命以降の気温上昇は、それ以前の自然による変化よりは大きな変化となっており、自然の営みとは

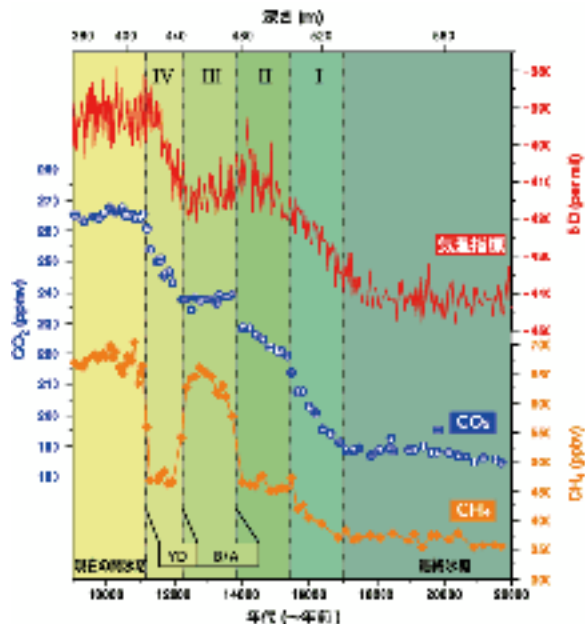


図2. 南極の気温指標 (δD), CO₂, CH₄ 濃度の変化. 横軸はコアの得られた深度を基準としているため右側ほど深い(古い). また、YDおよびB/Aはグリーンランドの氷から見つけれられたイベントである。(国立環境研究所のホームページ http://www-cger.nies.go.jp/qa/8/8-1/qa_8-1-j.html より: 原データは Monnin et al., 2001)

異なる原因によるものと思える。

一方、大気中のCO₂濃度の上昇も観測事実として確かなものである。気象庁の直接観測でも、1986年には、平均でおよそ350ppmであったものが2007年には380ppmを超えている。南極で掘削された氷床コアを解析して得られた22,000年前から9,000年前にかけての気温（水の水素同位体比）やCO₂濃度およびCH₄濃度の変遷を見ると、最終氷期からの気温と温室効果ガスの上昇はほぼ同時か、気温の方がやや早い（図2）。この現象は、まず気温上昇などの気候変動で温室効果ガスの濃度が変化し、温室効果ガスの変化がさらに気温変動を増幅させたものであると考えられている。

このように、地球の平均気温が上昇していることと温室効果をもたらしCO₂が上昇をしていることの二つの事象について直接的な関連の証明はなされていない。IPCC第4次報告書（2007）でも、「20世紀半ばから見られている平均気温の上昇は、人為的な温室効果ガスの増加によるものである可能性がかなり高い」として断定はしておらず、CO₂の大気中への放出を押さえることにより温暖化が抑制されるのかという命題は、科学的には解明されていない。しかし、シミュレーションによればCO₂の排出を今止めても、温暖化抑制効果は100年後に現れるなど、効果が現れるには、時間を必要としている。明確な因果関係が表れていないとしても、一時の猶予も許されない状況では、関連性の高い原因の除去は至急実施すべきであり、CO₂の大気への放出抑制は、人類がなし得る温暖化対策としてすぐにでも実施すべき施策であると考えられている。

3. 産総研での地中貯留研究（第2期の成果）

CO₂排出量の少ない再生可能エネルギーが十分に発展し、化石燃料に頼らなくてもよい時代まで、化石燃料を使用しつつ大気中のCO₂の排出

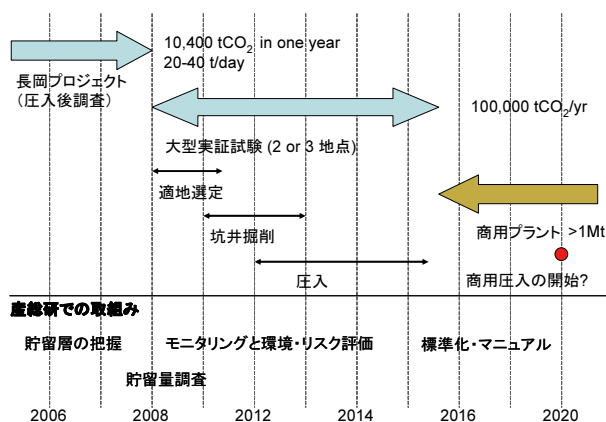


図3. 2020年のCCS技術の実用化を目指したロードマップ（経済省 CCS 研究会より）と産総研の研究目標

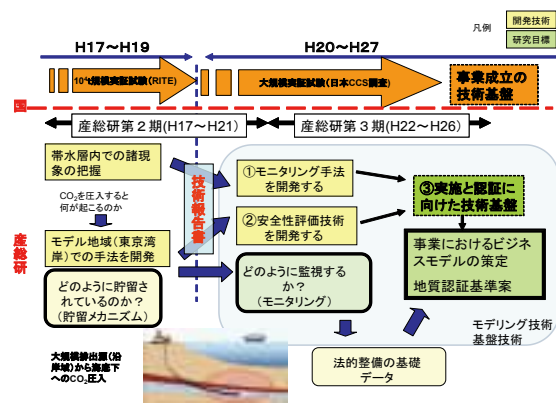


図4. 産総研でのCO₂地中貯留研究の重点課題。貯留メカニズム研究から安全基準策定への流れ

を抑えるという技術が必要となる。このような技術の一つとして、CCS技術がある。CCSとは、Carbon dioxide Capture and Storageの略称で、排出源からのCO₂の分離回収、輸送、貯留を表す。すなわち、CCS技術は火力発電所などの排出源からの排煙の中から高濃度のCO₂を回収し、適当な地中貯留地点まで輸送をして、地面の下に戻す技術である。経済産業省では、CCS技術の実用化を目指してロードマップを作成した（図3）。このロードマップを参考に産総研では研究の進展を図3の下図のように設定している。

2005年度から開始された産総研第2期研究戦略では、温暖化防止とその評価への貢献を目指す戦略目標を掲げて研究・技術開発を進めてきた。地圏資源環境研究部門でもCO₂地中貯留研究を部門重点研究課題に採択し、CO₂を帯水層に圧入した際の環境影響評価のために必要なCO₂の帯水層の内の挙動把握や隔離性能評価、挙動のモニタリング技術開発などを進めてきた（図4）。また、精度の高い貯留地点の選定と貯留可能量の推定のための研究も並行して行ってきた。2007年度までの成果については、地質調査総合センター速報No.44に二酸化炭素地中貯留に関する研究（2008）としてまとめられている。この成果並びに、その後につけ加わった産総研における第2期研究計画（2005～2009年度）での成果について主要な研究成果を次に示す。

3.1 沿岸域WEBシステムの開発

地中貯留では、多くの大規模排出源が沿岸域に立地していることから、実用規模の地中貯留は沿岸域での実施が検討されている。この沿岸域での貯留可能性については、RITE（2007）による貯留可能量の推定がなされているものの、この推定では貯留可能と考えられる帯水層などのおおよその容積から換算された量であり、実際の貯留計画に当たっては詳細なデータが必要とされている。

一方、沿岸域の地質データは、陸域と海域の

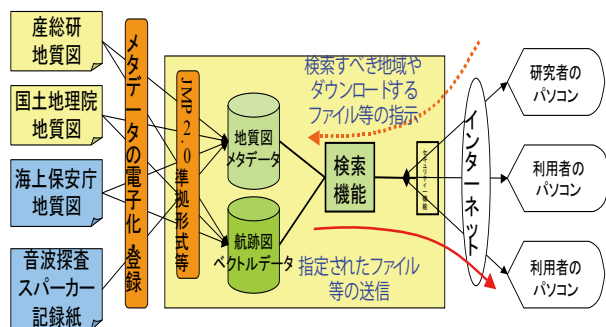


図5. 産総研の沿岸域 WEB システムの概要

狭間であるため統一的にデータの取得や管理を行っている機関はなく、産総研、海上保安庁水路部、国土地理院および関連する地方自治体などと様々な機関が関連している。このためデータの利用者は、各機関に照会を行ってデータの集積を行わなければならない、照会先機関が希望するデータを所有していることも不明である。このため利用可能な地質データ所在を記述したメタデータとして、(1) 海から陸にまたがる地質図情報の一元検索システムを構築し、(2) 沿岸域地質図メタデータおよび関連の航跡図ベクトルデータを完備し、(3) 航跡データと探査記録画像のリンクをサンプルとして搭載した（雨宮ほか、2007）。概要を図5に示す。これらのメタデータは、当面データの集積が多い産総研、海上保安庁水路部、国土地理院の3機関のメタデータを集積した。3機関の公刊地質図は、海上保安庁海洋情報部「沿岸の海の基本図（147枚）」、国土地理院「沿岸域土地条件図（70枚）」および産総研「沿岸域地質図（326枚）」である。

これらのメタデータは、Webからの閲覧を目標としており、現時点では試作版としての公開を行っている（図6）。内容の更新を継続し、順



図6. 日本地図からのメタデータ検索画面

次、公開を進めている。このデータを用いて沿岸域 CO_2 地中貯留のポテンシャル評価を実施する予定であるが、データは CO_2 地中貯留のみならず放射性廃棄物処理などのための地域検討のためにも利用されることが予想される。

3.2 モニタリング技術

モニタリング（監視）技術は、圧入が支障なく実施されていることを事業者が確認することに必要であるとともに漏洩など周辺環境に影響を及ぼしていないことを確認し、周辺住民への理解を得て信頼醸成のためにも必要である。

CO_2 地中貯留では、超臨界状態の CO_2 の圧入を行うことから深度が 1,000m 程度の地層に圧入を行うことになる。このような信号源が深部では、地表まで到達する信号が微弱となるため、信号がノイズに埋もれてしまうことが懸念される。このため、モニタリング時の信号強度などが観測開始以前に予測できれば、最適なモニタリング計画などが策定できる。帯水層の CO_2 の挙動把握のため、流動シミュレーションが利用されており、シミュレーションではシミュレーション範囲内の計算グリッドの温度、圧力、密度変化などを計算できることから、これらの物性値を用いて地表でどのような変化が現れるか計算することが可能である（図7）。たとえば、重力は地下の密度変化により地表に変動が現れることから、シミュレーション結果から密度変化を取り出して重力変化を計算する。このような変化を表すプログラムをポストプロセッサと呼ぶ。産総研では、このポストプロセッサの充実を図ってきており、すでに重力や SP（自然電位）のポストプロセッサは試行期間が過ぎて実用的な段階に入っている（e.g. Ishido and Pritchett, 1999）。本研究開発では、 CO_2 地中貯留にて多くのサイトで用いられている反射法探査に対応するポストプロセッサの開発を進めている。

一方、長岡での地中貯留実験の結果、弾性波トモグラフィが CO_2 のモニタリングに有用なこ

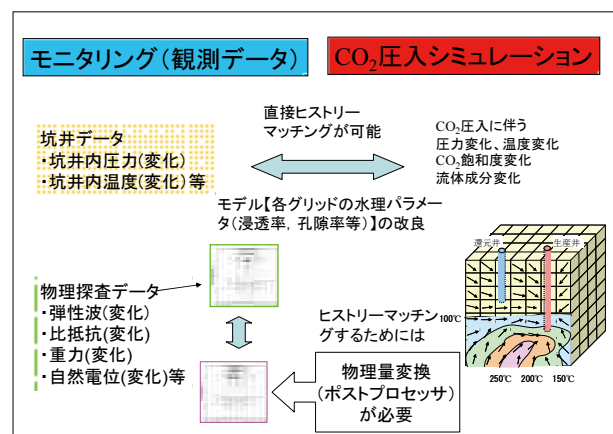


図7. ポストプロセッサの概念

とが判明した (Saito et al., 2006) が、産総研では、高い分解能を有する弾性波を利用する探査方法として弾性波トモグラフィの高精度化を研究テーマとして掲げており、その理論的背景の検討を実験室内での岩石試料実験により行っている。現在まで、 CO_2 ・水の置換による弾性波速度変化を詳細に計測し、弾性波速度変化に着目する相対トモグラフィ手法が有効であることを導き出した (Xue & Lei, 2006)。また、十分に高い周波数の弾性波を利用すれば、速度低下と CO_2 飽和度の間がほぼ線形的な関係になるため、P波速度から CO_2 飽和度を推定できる。しかしながら、現実の観測では減衰が避けられないために、周波数を上げるには限界があり、 CO_2 飽和度分布を正確に求めるためには弾性波速度以外の物性値を同時に測定する必要がある。そのひとつが弾性波の振幅であり、弾性波モニタリングでは、弾性波の振幅も同時に得られるため、弾性波の減衰が利用できれば同一の測定から必要なデータをすべて取ることができると考えられる (Lei and Xue, 2009)。

3.3 CO_2 帯水層挙動予測 (地化学的研究)

CO_2 が貯留層内でどのような挙動を示すかを調べることから始められた (図4)。このなかでは、 CO_2 の物理的な挙動とともに地化学的な振る舞いについても重点的に調べを行った。これは、産総研が、地形的なトラッピングメカニズムが作用して、ガス油田に多く見られる背斜構造への貯留ではなく、一般的な帯水層への圧入を研究対象としていたことによる。一般帯水層では、地形的なトラップメカニズムは作用せず、 CO_2 の溶解などの地化学的なプロセスが重要な貯留メカニズムとなってくる。この地化学的な挙動把握は、 CO_2 と岩石および水の相互作用を解明することになる (図8)。

CO_2 地中貯留における貯留層内地化学プロセスでは、比較的短時間のうちに CO_2 プリウム

周辺に炭酸塩が沈澱する自己シールの鉱物固定が起きうることが、地化学シミュレーションから分かっている (Okuyama et al., 2009; 戸高ほか, 2009)。このプロセスにおいて重要な貯留層岩石中の鉱物、とくに斜長石の溶解速度に関する実験研究を進めた結果、溶解プロセスがメカニズムの異なる3段階を経て進行することが新たに分かった (徂徠ほか, 2009)。この結果は地化学シミュレータにおける溶解速度式を見直す必要があることを示唆しており、シミュレーションに基づく環境影響評価手法の改善に向け検討要素を抽出したと考えられる。また、地下水との相互作用を見るため、日本各地の CO_2 貯留に適すると考えられる帯水層での地下水の主成分調査を実施した。

3.4 その他の研究

産総研では、 CO_2 地中貯留研究として、広域地下水流動把握、シール層での微小断裂の漏洩能力評価、シール層岩石の超長期変動評価、電磁気学的モニタリング手法の開発、モデル帯水層への圧入シミュレーションなども実施してきた。これらの成果の詳細は、「二酸化炭素地中貯留に関する研究」(2008)を参照していただきたい (産総研 CO_2 地中貯留研究グループ・HP: <http://unit.aist.go.jp/georesenv/geostorage/>より郵送申しこみ可能)。

4. 第3期への展望

産総研での地中貯留における第3期の研究では、図4に示すように、モニタリング手法の開発とリスク評価技術開発がおおきな柱となる。特に、リスク評価では技術開発は欧米に大きな後れをとっており、公共事業という名の元の開発では成り立たなくなっている。このため、地域に根ざしたコミュニケーションが必要とされている。

CO_2 地中貯留は、国が主体となって研究開発を進めてきており、大規模排出源からの大規模貯留を基本としている。しかし、大規模貯留においては関係する自治体や住民も多くなり、コミュニケーションも難しくなると考えられる。一方、超臨界状態での CO_2 の圧入を実施するため、1,000mを超える深度の坑井を掘削する必要がある。坑井は、掘削深度が深くなればなるほど指数関数的に費用が増大する。このため貯留に係る事業費のうち、坑井掘削費が大きなウェイトを占めることになる。浅い地層への圧入が可能であれば、坑井掘削費の削減が期待されることから、 CO_2 が超臨界状態にならない浅層への圧入も検討されている。この場合には、超臨界条件を満たさないため、 CO_2 をスムーズに圧入してその地層にとどめておくため、他の考え方による貯留を行うことになる。現在検討されている方法として、 CO_2 を細かな泡状 (マイクロバブ

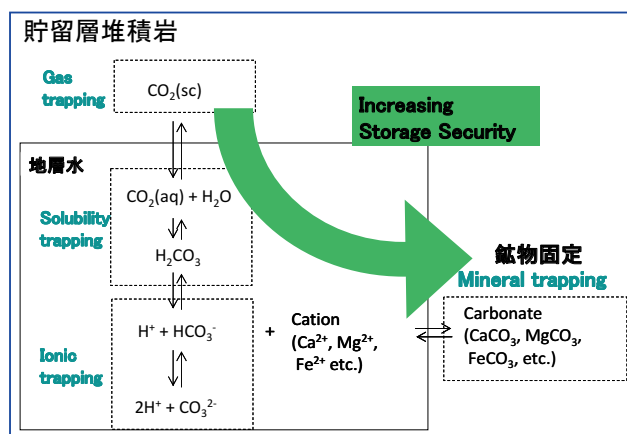
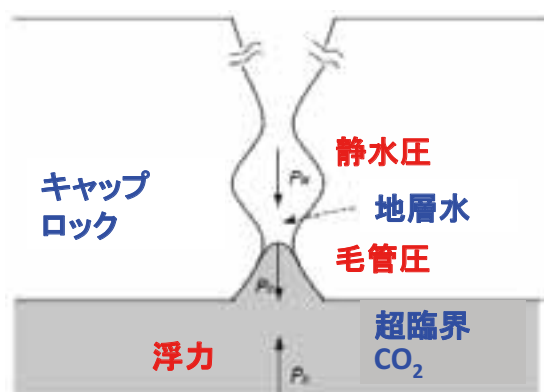


図8. CO_2 と岩石および水の地化学的相互作用

ル) にする方法がある。このマイクロバブルでは、CO₂は浮力を持たないため上昇せず、地層にとどまっていると考えられており、井戸の坑底でマイクロバブルを作る技術についても考案されている(薛ほか, 2009)。このような新しい技術を用いれば、大規模排出源からの貯留のみならず、中小規模の排出源からの分散型の貯留も可能である。貯留方法の検討とともに、どのような地層がこのような分散型の貯留に適するのかを調査・研究をしていく必要がある。

地化学的研究として、産総研の第2期研究では帯水層貯留に係る地化学的な反応について知見を得た。この地化学的な研究では、一般帯水層でのCO₂地中貯留を積極的な支持をする結果となっている。一方、第3期では、地中貯留研究において大きな研究テーマとなっている地中貯留の安全性についても、地化学等からの研究を推進すべきと考えている。具体的には、遮蔽層地質における遮蔽能力の評価が挙げられる(図9)。現時点においては、この貯留能力測定のためのキャピラリー圧測定は、物理的なプロセスのみの考慮であるが、近い将来、地化学のプロセスと組み合わせた解析や影響評価について検討ができると思われる。



CO₂が漏洩しない条件
静水圧+毛管圧>浮力

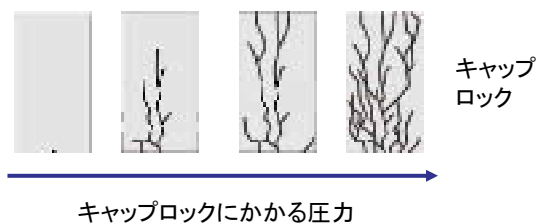


図9. 毛管圧の測定。浮力の上昇などでキャップロックにかかる圧力が増大するとCO₂が浸入してきて漏洩につながる。

一方、モニタリング技術は、リスク評価技術とともにCO₂地中貯留の実用化に向けて整備を必要とする技術である。操業の安全性確保とともにPAや信頼醸成に不可欠である。モニタリングでは、EORなど石油探査・開発技術から弾性波利用の探査方法が世界的な主流となってきたが、溶解したCO₂は弾性波での検出は難し

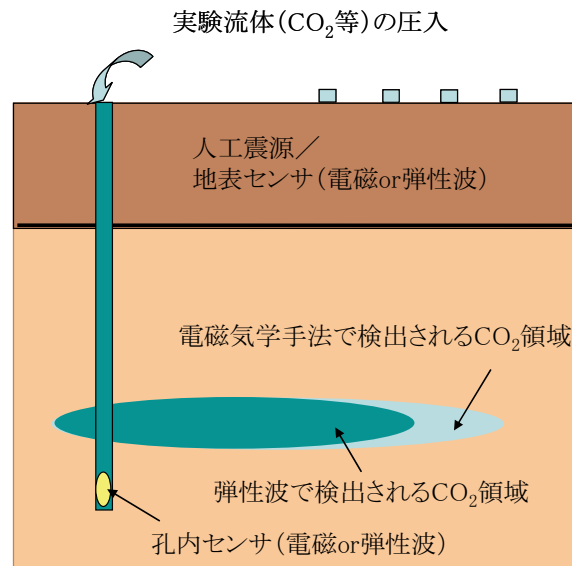


図10. 複合（弾性波と電磁波など）モニタリング手法開発

く、比抵抗など電磁気的な物理量が大きく変化をする。また、弾性波速度は岩石中のCO₂の量(CO₂飽和度)に対してある濃度以上になるとほとんど変化を示さないことから、弾性波速度とともに振幅情報を利用する方法(Lei and Xue, 2009)や比抵抗測定を平行して利用する(Nakatsuka et al., 2008)方法などが岩石実験の分野から提唱されている。理論的には、このような方法により圧入量とモニタリングを結びつけられると思われる反面、貯留地点としての沿岸域での条件を考えると、必ずしも理論通りにはならないと思われる。このため、沿岸域でのモニタリングを考え、そのような機器が使用可能であるかなど沿岸域でのモニタリング仕様の検討を始めている(図10)。

沿岸域の地質条件の整備は、CO₂地中貯留のみならず放射性廃棄物地層処分や大深度地下利用など沿岸域での地圏利用の機会が増大すると考えられる。このため、沿岸域での地質データの整備の重要さはますます大きくなるものと考えられる。一方、陸域と海域の接点である沿岸域は、積極的な、統一的な調査が行われてこなかった。そのため、陸域を主として扱う旧地質調査所と海域を主として扱う海上保安庁水路部と地質データにしても分かれてデータの取得や管理保管がなされてきた。データの一元化は、それぞれの省庁が違うことなどからすぐさま取

り上げて実施に移すことができないことから、所在地等を示すメタデータとしてデータの管理を行うシステムの構築を図ってきた。第3期では、これらのデータの充実を図るとともにデータそのもののダウンロードが可能のように関係機関との連携をはかって行くことを計画している。

5. まとめ

2020 年の実用化を目指したロードマップでは、大規模実証試験の候補地点の選択が終了している時期であるが、2009 年 10 月現在、まだ候補地点は決まっていない。地点が決まらなないと、その地点特有の地質や地形条件を加味したモニタリング計画やリスク評価が実施できないことから、やや閉塞感はある。気候変動と大気中の CO₂ 増加との因果関係は明らかにはなっていないものの、人類がコントロールできる因子として CO₂ の大気中への放出を抑制する必要がある、そのための一つの手段として CO₂ 地中貯留の実用化のための研究を今後とも進めていく必要がある。

参考文献

- 赤祖父 俊一(2008) 正しく知る地球温暖化, 誠文堂新光社, 183p.
- 雨宮 由美・植木 俊明・古宇田 亮一・麻植 久史・岸本 清行 (2007) 沿岸域メタデータ・ダウンロードシステム構築, 第 18 回日本情報地質学会講演会, 島根.
- IPCC (2001) 第3次評価報告書. 地球産業文化研究所の HP (<http://www.gispri.or.jp/kankyo/ipcc/ipccreport.html>) よりダウンロード可能. 原文は, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm よりダウンロード可能.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Ishido, T. and Pritchett, J. W. (1999) Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, *J. Geophys. Res.*, *104*(B7), 15247.
- Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K. and Shindo, Y. (1992) Subterranean Containment and Long-Term Storage of Carbon Dioxide in Unused Aquifers and in Depleted Natural Gas Reservoirs, *Energy Convers. Mgmt.*, *33*, 619.
- Lei, X. and Xue, Z. (2009) Ultrasonic velocity and attenuation during CO₂ injection into water-saturated porous sandstone: Measurements using difference seismic tomography, *Phys. Earth Planet. Inter.*, *176*, 224.
- Monnin, E., Indermühle, A., Dällenbach, A., Flückiger, J., Stauffer, B., Stocker, T. F., Raynaud, D. Barnola, J. (2001) Atmospheric CO₂ Concentrations over the Last Glacial Termination, *Science*, *291*, 112.
- Nakatsuka, Y., Xue, Z., Yamada, Y. and Matsuoka, T. (2009) Experimental study on monitoring and quantifying of injected CO₂ from resistivity measurement in saline aquifer storage, *Energy Procedia*, *1*, 2211.
- Okuyama, Y., Sasaki, M., Nakanishi, S., Todaka, N. and Ajima, S. (2009) Geochemical CO₂ trapping in open aquifer storage-the Tokyo Bay model. *Energy Procedia*, *1*, 3253.
- RITE(2007) 平成 18 年度二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書, 1705p.
- Saito, H., Azuma, H., Tanase, D. and Xue, Z. (2006) Time-Lapse crosswell seismic tomography for monitoring the pilot CO₂ injection into an onshore aquifer, Nagaoka, Japan, *Exploration Geophysics*, *37*, 30.
- 徂徠 正夫・佐々木 宗建・奥山 康子(2009) CO₂ 地中貯留における灰長石溶解プロセスの速度論的考察, *岩石鉱物科学*, *38*, 101.
- 戸高 法文・奥山 康子・赤坂 千寿・佐々木 宗建・當舎 利行 (2009) 地化学・貯留層シミュレーションによる二酸化炭素の地化学トラッピングの検討: 東京湾岸モデル, *岩石鉱物科学*, *38*, 90.
- Xue, Z. and Lei, H. (2006) Laboratory study of CO₂ migration in water-saturated anisotropic sandstone, based on P-wave velocity imaging, *Butsuri-Tansa*, *59*, 10-18.
- 薛 自求・山田 達也・松岡 俊文・亀山 寛達・西尾 晋(2009) マイクロバブル CO₂ による溶解型地中貯留について, *資源・素材 2009 (札幌) 地球・資源*, 143-150.

地圏資源環境研究部門における地層処分安全規制支援研究 —第2期の成果と今後の展望—

Regulatory Supporting Researches in the Institute for Geo-Resources and Environment

地下環境機能研究グループ長：伊藤一誠

Leader, Experimental Geoscience Research Group : Kazumasa Ito

e-mail address: kazumasa-ito@aist.go.jp

1. 安全規制における産総研の役割

わが国の高レベル放射性廃棄物地層処分事業は、事業実施主体としての原子力発電環境整備機構(NUMO)に対し、事業の安全を確保するための規制制度の整備、各調査段階で提出される調査結果の妥当性のレビュー、最終的な安全評価結果の審査を行う規制機関として、原子力安全・保安院(NISA)が位置づけられている。また、資源エネルギー庁(ANRE)は、実施主体、規制機関双方で利用可能な基盤研究開発を担当している。



図1：放射性廃棄物処分における規制支援研究体制（総合エネルギー調査会 原子力安全保安部会廃棄物安全小委員会,2009）

規制機関であるNISAに対して、図1に示したように、規制支援機関として独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES)が位置づけられ、産総研深部コアは、概要調査、精密調査の妥当性レビュー、安全審査に向けた検討において必要とされる課題に対して研究面での支援を行う機関の一つとして位置づけられている。また、規制支援機関であるJNESと、規制支援研究機関である原子力研究開発機構(JAEA)安全研究センター、基盤研究を担当するJAEA地層処分研究開発部門、および産総研は、放射性廃棄物地層処分の安全性に関する研究協力協定を締結し、協定下での個別の共同研究契約による共同研究、

あるいは各組織間での人材交流を進めている。

産総研においては、第2期途中の平成18年度までは深部地質環境研究センター、以降は地質分野研究ユニットのメンバーから構成される深部地質環境研究コアが、NISAからの受託研究“地層処分に係る地質情報データの整備”を担当している。

深部地質環境研究コアの中心となる研究グループは、地質情報研究部門の長期変動、深部地下水の2研究グループと、地圏資源環境研究部門の地質特性、地下環境機能の2研究グループである。それぞれの研究課題は、図2に示す産総研地質分野第2期研究戦略課題3-(2)に沿って設定され、平成19年には、概要調査の調査・評価項目に関する技術資料として公表を行った。

地圏資源環境研究部門においては、主に地質特性・水理特性評価手法、および地質環境の隔離性能評価手法の2点を課題として研究を推進してきた。

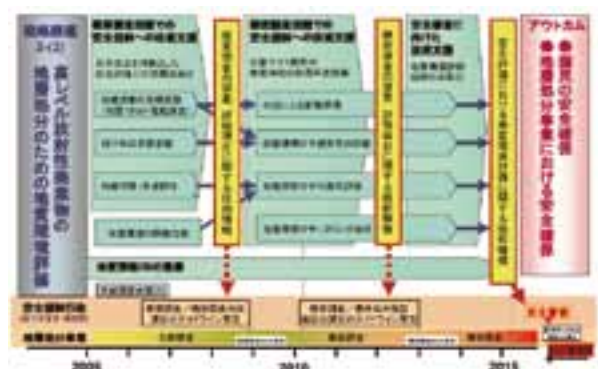


図2：産総研における放射性廃棄物安全規制支援研究の研究戦略

2. 地圏資源環境研究部門における成果

当部門における安全規制支援研究は、前述した2研究グループおよびそれ以外の深部地質環境研究コアメンバーが実施している。地質特性研究グループは、高レベル放射性廃棄物処分の概要調査および精密調査時の地質環境の調査手法や原位置におけるパラメータ評価手法において、ANREによる基盤研究あるいは大学等の既

往研究では十分にカバーできていない課題に対する研究を行っている。一方、地下環境機能研究グループは、安全評価における地下水流動と核種移行に影響を及ぼす事象とパラメータ、例えば岩盤の透水性、拡散係数、コロイドと微生物の影響等に関する評価手法、水理以外の各種事象との連成による地下水流動、物質移行の数値解析手法に関する研究を行っている。

核種移行の評価全体における両テーマのイメージを図3に示す。



図3：当部門における地層処分安全規制支援研究の課題分類のイメージ（左：地質特性・水理特性の対象，右：地下環境の隔離機能のイメージ）

以下に、第2期におけるそれぞれの研究の流れと主な成果を示す。

1) 地質特性・水理特性評価手法

地質特性および水理特性の調査・評価手法の研究では、放射性廃棄物処分における精密調査段階で建設される地下実験施設掘削前の水理、化学、生物化学環境のベースライン調査、評価手法、および精密調査段階における各種地下環境の変化に対するモニタリング手法の研究を行っている。

深部地質環境研究コアでは、深部地質環境研究センターであった第1期の平成15年から、処分深度程度の深部での地下水流動の流向、流速、地下水化学環境を把握することを主目的として、山形県金丸地域においてボーリング掘削、水理試験、間隙水圧モニタリング、トレーサー試験等を行った。その結果から、特に化学環境の調査には、調査自体による影響は無視できないということが示されたため、第2期の平成17年度から、栃木県那須烏山市において、掘削時に掘削水として地表の酸化的な水が地下に混入することを回避する掘削調査手法の実証研究として、無菌脱酸素掘削水を用いた深度350mのボーリング孔掘削、試料採取を行った。掘削水は、原水に対し三段階の限外ろ過を行うことによる微生物除去を行った上で、窒素注入と真空抜気による溶存酸素除去を行った。地上における試験結果から、微生物に関しては20/ml程度に、溶存酸素濃度は0.1ppmに低下させることが可能であった。

掘削時に採取された岩芯試料は、掘削水と同等の水中における取出し、気密性バッグへの収納を行い、冷凍状態で運搬を行った。持ち帰り

後は、周縁部を除去した後に70MPaの圧力で間隙水を抽出し、化学分析を行うとともに、岩芯試料の一部を掘削水とともに粉碎したスラリーから微生物の培養、遺伝子解析、脱窒活性分析を行った。また、地下水試料に関しては、掘削完了後に揚水を行った上で、電磁開閉弁付の密閉容器による原位置採取を行った。

ボーリング孔沿いの水理特性および間隙水圧に関しては、水理試験を行うことによる地下水化学環境の擾乱を最小化する手法として、地下水電気伝導度検層を適用するとともに、掘削終了後に多段パッカーシステムの設置によって把握した。

岩芯試料中の間隙水の掘削水による汚染に関しては掘削水に添加するトレーサーによって評価が可能であるが、汚染が生じた場合には、通常の掘削では化学的、生物化学的な評価が困難となる。ここで用いた掘削手法では、掘削水自体が間隙水の化学、微生物環境には影響を及ぼさないものであるため、希釈のみを評価することで化学、生物化学環境の評価が可能である。

一例として、間隙水中の微生物と、多段パッカーで採取された孔内水中の微生物の顕微鏡写真を図4に示す。

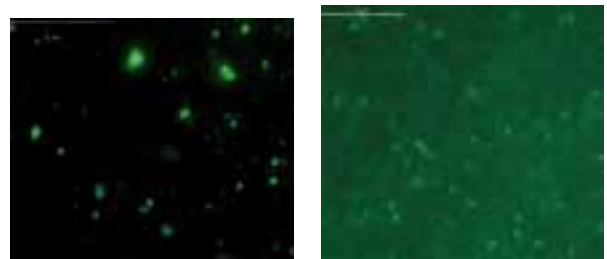


図4：地下350mから採取された微生物顕微鏡写真（左：掘削岩芯試料中，右：多段パッカー採水による孔内水）

間隙水と孔内水では、塩分濃度等生物化学的な影響を受けない水質に関しては調和的な結果を示したが、孔内の空間では岩盤中に存在する硝酸還元菌の活動制約が無くなることから、硝酸および亜硝酸塩濃度は有意な相違を示した。

また、水理特性から判断される地下水流動の不連続性が、水質の不連続性に対応していることが示された。

以上から、特に地表からのボーリングが予定されている概要調査段階において、地下の化学、微生物環境評価の品質管理、品質保証に関する技術を確立できた。

次の段階として、精密調査段階での地下実験施設建設が地下水流動および地下水化学環境に与える影響をモニタリングする手法の研究として、JAEA 瑞浪超深地層研究所との共同研究で、同研究所において、地表のボーリング孔から採取された地下水、地下研究坑道のボーリング孔

から採取された地下水試料の継続的な化学、微生物分析を実施している。そこでは、地下水試料の採取から分析までのハンドリングの問題、微生物の脱窒活性が低い環境での活性評価に関するデータの品質管理、品質保証の方法論を確立した。本年度は、実際の試料採取段階から、掘削後の連続モニタリングまでの高精度評価の方法論確立のために、同研究所深度 300m の水平坑道において、共同研究のもとで水平ボーリング孔の掘削、試料採取と分析、水圧・水質の連続モニタリング装置の設置を行っている。

以上の研究は、NISA からの委託研究で実施した成果である。

一方、JNES-JAEA-産総研の共同研究においては、JAEA 幌延深地層研究センターを対象として、JNES からの委託研究で、ベースラインとしての水圧、水質分布、同位体年代の評価を行うとともに、地下実験施設の建設に伴う地下水流動、水質の変化を、ボーリング孔を用いた直接モニタリングと、物理探査、リモートセンシングを用いた間接的な現象の把握から評価する手法の確立を目的として実施している。

また、概要調査段階等で事業者側で取得されることが予想されるデータ、例えば間隙水圧経時変化等を、対象岩盤の水理特性、地下水流動評価に有効利用するための手法として、間隙水圧変動からの鉛直方向の透水性評価手法、および塩分濃度等の化学的浸透による間隙水圧分布と地下水流動への影響に関する評価手法の研究も進めている。

特に、化学的浸透に関する課題においては、室内実験による浸透圧パラメータ評価手法の構築、地下水流動への影響評価のための解析手法の構築を行い、見かけ上の間隙水圧から推定される流動と、化学的浸透を考慮した実際の流動が異なる場合があることを示した。

2) 地質環境の隔離性能評価手法の研究成果

処分場からの核種移行の安全評価を行う際に、基本となるものは地下水流動によって移行しながら、き裂系岩盤ではき裂からマトリックスへの拡散による遅延、あるいは化学反応、微生物作用等による沈殿、溶解等の作用を受けるというモデルである。本研究においては、地下水流動に伴う核種移行に影響を及ぼし、かつ他機関での研究が十分とは言えない課題に対して、図 5 に示すような概念の下で課題設定を行った。

第 2 期では、各要因の相互的な影響を考慮する前に、個別要因に対する核種移行への影響評価とモデル化手法、高精度パラメータ評価手法を目的として、NISA からの委託研究事業として実施している。以下に、いくつかの代表的な成果について紹介する。

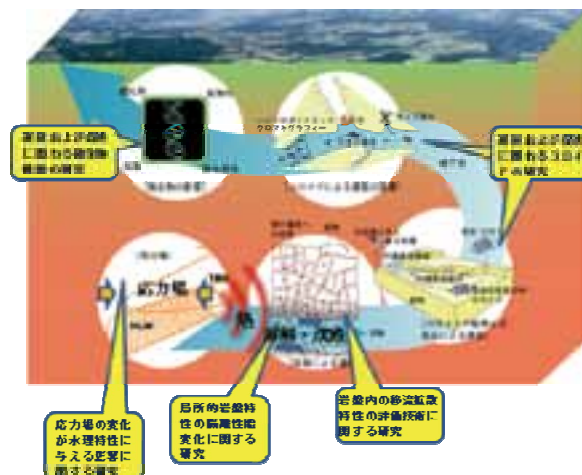


図 5：核種移行に影響を及ぼし得る要因と研究課題の概念

・岩盤内の移流拡散特性の評価技術に関する研究

本研究課題では、地層処分の対象となる低透水性岩盤の透水性岩盤の透水性を室内、および原位置において高精度で評価すること、あるいは透水性が低い場合には核種移行の主要因となり、き裂系岩盤においては遅延の要因となる、岩盤の拡散特性を室内実験で効率よく評価する実験および解析手法の開発を行った。

特に拡散特性評価においては、通常 100 日オーダーを要する試験に対し、非定常無次元解析解を適用することで、同程度の精度での評価を 1/10 程度の時間での測定データのみで得るための実験条件設定手法の構築を行った。

・遅延または促進に関わるコロイドの研究

ここでは、核種の地下水中での存在形態の一つとして、緩衝材の粘土粒子、あるいは自然由来のコロイド等と反応して形成されるコロイドの分析手法の確立と、安定性評価手法の研究を行った。コロイド分析手法では、天然に存在するコロイドに対して、原子間力顕微鏡によるサイズ分布、同一試料での透過型電子顕微鏡での化学組成分析によるキャラクター化手法を世界に先駆け確立した。また、コロイドの安定性評価では、模擬材料を用いた実験により、化学的安定性と吸脱着の可逆性評価の評価手法の確立を行った。

3. 地層処分安全規制支援研究の今後の課題

平成 21 年 8 月に、NISA から原子力安全・保安部会廃棄物小委員会報告として、「「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究計画（平成 22 年度～平成 26 年度）」について（案）」が公表された。そこでは、地層処分における規制機関としての NISA のニーズとして、(1) 概要調査・精密調査結果の妥当性レビューに向けた検討、(2) 安全審査等に向けた検討、の各段階を

対象としたニーズが示されている。ここでの要点としては、(1)においては、調査結果が安全性に関わる法的要件を満たすか否かの具体的な判断指標の策定のための研究、(2)においては、安全審査の基本的な考え方の策定と、それに従った判断指標の策定の必要性があげられている。具体的研究テーマは、現状の他機関での研究成果から、今後必要とされることが予想されるテーマ、あるいは基本的ニーズである判断指標策定に関するテーマがあげられているが、全体のニーズ、具体的な研究項目に関しては、PDCAサイクルとして適宜修正を行うとされている。

規制支援研究機関として同報告書でも支援が要請されている産総研深部地質環境研究コアとしては、基本的に規制機関のニーズに従って研究を進めていくが、今後は以下の事項を十分に考慮する必要がある。

- ・概要調査結果の妥当性レビューに関する研究

今後の事業のスケジュールにおいては、当初計画では平成 20 年代半ばでの概要調査地域選定とされている。現時点では、この計画に変更が無いため、概要調査の妥当性レビューを対象とした研究課題は、平成 23 年度程度には終了、取りまとめが必要とされる。

当部門で実施している概要調査を対象とした研究は、個別要素に関しては取りまとめ段階にあり、今後は、品質管理・品質保証も含めた妥当性の判断指標の検討を行う必要がある。

- ・精密調査結果の妥当性レビューに関する研究

精密調査を対象とした研究において、今後最も必要とされる課題は、地下実験施設を用いた調査およびモニタリング技術と、モニタリング結果から閉鎖後の挙動を推定する解析・評価技術である。現状でも深部地質環境研究コアでは、JAEA との共同研究による坑内および地表でのモニタリング技術に関する研究、水理-熱-力学-化学反応連成解析手法の研究を実施しているが、今後は、JAEA あるいは Nagra（スイス）等の地下実験施設を保有する国内外の研究機関との共同研究を推進することで、広域での地下水流動、あるいは化学環境等の長期的変動のモニタリングおよび予測手法に関する研究を推進する必要がある。

- ・安全審査に向けた研究

現状、深部地質環境研究コアにおいては、核種移行に影響を及ぼす可能性がある個別プロセスに関する評価手法の研究を実施してきた。しかしながら、今後は第一に“選択と集中”による研究課題の設定を行う必要が生じる。そのため、個別要素の、最終的な安全評価結果に与える影響に関する感度解析を実施し、影響が大きな要素を優先的に課題として抽出すること

が重要である。

また、今後は自然事象が安全評価に与える影響を定量的に評価する手法の確立が求められている。例としては、立地調査段階で排除されていない距離において、長期の評価期間で発生し得る火山噴火、あるいは断層活動が、地下水流動あるいは地下水の化学環境に与える影響、最終的には安全評価に与える影響を定量的に評価することである。

このためには、第一段階として各自然現象が地下水流動や化学環境に与える影響を段階を追ってダイアグラム化すること、次に広域を対象とした連成解析に必要なパラメータ評価手法を、事象にあわせた環境で確立する必要がある。そのためには、当部門の研究グループのみでなく、地質情報研究部門における地質長期変動に関する研究グループとのより密接な連携によって、成果の相互理解をより進め、適切なダイアグラムの策定を行うとともに、解析あるいは室内実験による定量的評価手法の高精度化を進める必要がある。

「招待講演」 生物を利用した資源開発と環境修復

Resources Production and Environmental Remediation using (Micro-)organisms

東北大学大学院環境科学研究科：井上千弘

Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University : Chihiro Inoue

e-mail address: inoue@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

1. はじめに

微生物は地球上のいたるところに存在し、自然界の物質循環において大きな役割を担っている。微生物の活動は多岐にわたり、微生物同士のみならず他の植物・動物とも共生しながら、現在の生態系を築いてきた。また、同時に生物は、岩石、鉱物、土壌など自然界に存在する無機物質や人工的に合成された化学物質ともさまざまな相互作用を示す。生物が担う反応は常温常圧で行われるため、省エネルギー、低環境負荷プロセスとしての利用が期待され、特に環境対策の分野での適用が注目を集めている。

我々はこれまで微生物による未利用地下資源の開発と、微生物や植物の機能を利用したさまざまな有害物質で汚染された地下環境の修復に関する研究に取り組んできた。また、同時に生物反応以外の反応にも着目してきた。ここではそれらの研究のうちの代表的なものについて、解説を加えながら報告する。

2. バイオリーチング

バイオリーチングとは、鉱石に含まれる有価金属を微生物の働きを利用して抽出、回収する技術である(1,2)。鉄酸化細菌を利用して銅地金を生産する方法が最もよく知られており、世界の銅生産量の 2 割近くを占める方法となってい

る。銅のバイオリーチングでは、図 1 に示すヒープリーチングがよく用いられている。この方法は銅鉱物を含む鉱石を堆積し、堆積層上部から散水して堆積層内部での細菌の活動を活性化させて銅を溶解させるものである。得られた浸出液中の銅イオンは溶媒抽出—電解採取(SX-EW)により回収している。乾式製錬による銅生産方式と比較すると、低コスト、低環境負荷で銅を生産できるという優位性がある。

しかし銅資源として最も賦存量が多い黄銅鉱は、一般に知られる鉄酸化細菌（最適温度は 30℃付近）によるバイオリーチングでは低い銅浸出率しか得られていない。そこで我々はバイオリーチングによる黄銅鉱の溶解を促進する方法として、70℃以上の温度で生育する高度好熱性細菌を利用した研究を行ってきた。これまでに、種々の条件での好熱性細菌によるバイオリーチング(3,4)を行い、短期間でほぼ 100%の黄銅鉱浸出を達成するとともに、共存する化学浸出反応の評価を行い(5)、これらの効果を組み込んだ反応モデルを作成した(6)。また、黄銅鉱の溶解は発熱反応なので、ヒープ内部のような環境では熱の蓄積が期待でき、外部から熱を加えなくても好熱性細菌の生育環境を維持できる可能性がある。このことをモデルにより評価、検証した(7,8)。

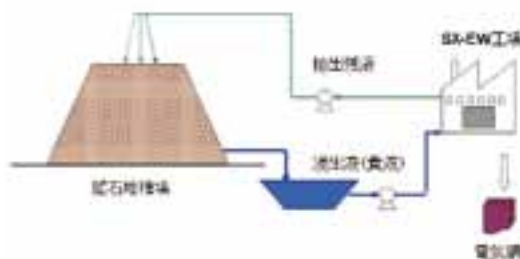


図 1 銅鉱石のヒープリーチング模式図

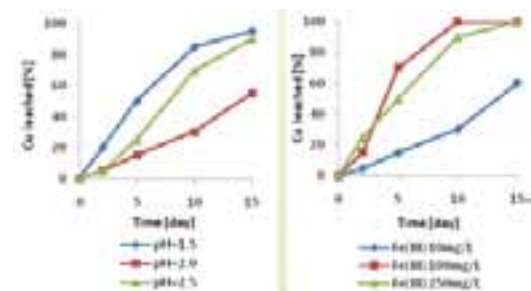


図 2 好熱性細菌による黄銅鉱バイオリーチングの結果

3. 微生物を利用したエネルギー資源の生産

微生物石油増進回収法（MEOR）は、既存の石油採掘技術では取り残されている油層中の石油を、微生物の力を活用して回収する方法である(11). 油層内での石油の流動性を改善させるために、微生物の生産する界面活性剤やポリマーを利用するもので、油層内に廃糖蜜などの有機物を供給し、その場で微生物にこれらを生産させ石油の増回収を図るものである。我々は以前に中国の吉林油田と共同で、実操業中の油層での MEOR の実証試験を実施し、一部の油層において良好な結果を得ている(11). 吉林油田では、その後 MEOR を実操業に移行させ、現在も継続している。

水素生産方法のひとつに、光触媒を用いて太陽の光エネルギーを利用する方法が提案されている(9,10). その場合、原料に硫化水素溶液を用いるため、水を原料にする場合よりも効率的に太陽光エネルギーを利用することができるが、反応後にポリ硫化物が残留するため、その処理が必要となる。我々は硫酸還元細菌を用い、このポリ硫化物の硫化水素への還元を行うことに成功した(12,13). 硫酸還元細菌による硫化水素への変換過程はエネルギーを必要とするが、そのエネルギーは廃棄バイオマスでまかなうことが可能である。これによって、微生物反応による硫化水素の再生と光触媒による水素生成がカップリングされ、システム全体でみると自然エネルギーと廃棄物から水素生成が行われていることになる(図 3)。

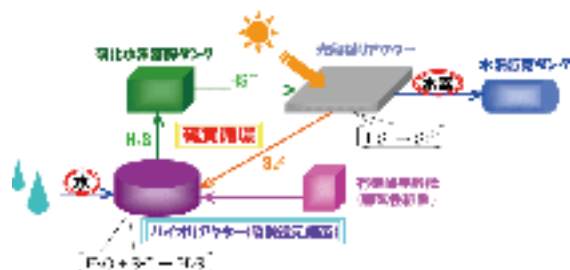


図3 光触媒と硫酸還元細菌を利用した水素生産

4. 石油系炭化水素や有機塩素化合物のバイオレメディエーション

バイオレメディエーションは、汚染物質の分解・除去に微生物を利用する方法であり、有機塩素系溶剤・石油炭化水素等による土壌・地下水汚染を低コストで環境に負荷を与えずに浄化することができる。地下の汚染部分に微生物の栄養源等を送り込むことにより、その場所に棲息する分解微生物を活性化させ、汚染物質を無害化していくものである。図4に原位置バイオレメディエーションの概念図を示す。また、場合によっては分解能力の優れた微生物を外部か

ら汚染現場に注入することも行われる。

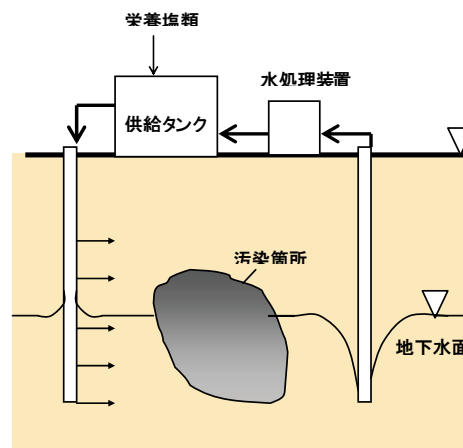


図4 バイオレメディエーションの模式図

石油は古くから地球上に存在する物質であるため、石油系炭化水素を分解する細菌は土壌に普遍的に棲息している。そのため、石油系炭化水素のバイオレメディエーションは比較的実用化が進んでいる。しかしながら、石油系化合物の中には、多環芳香族炭化水素類やイソアルカンなど微生物分解を受けにくい成分もある。我々は、これら微生物分解が起き難いとされる物質についての分解能力を持つ細菌の探索を進めている(14,15)。また最近、n-アルカン類よりもベンゼン、トルエンなどの単環芳香族類を優先的に分解する微生物コンソーシアムを見出している(未発表)。

揮発性有機化合物による土壌汚染事例として最も多く報告されているのは、トリクロロエチレン（TCE）とテトラクロロエチレン（PCE）である。TCE と PCE は取り扱いが容易で優れた脱脂力を有するため、金属材料の前処理、電子部品の洗浄やドライクリーニングの溶剤などに広く用いられてきた。1980 年代まではこれらの物質に対して排出基準や環境基準などの規制がかけられてなかったこともあり、その土壌汚染が顕在化してきた。TCE や PCE は発ガン性が疑われている物質であるが、自然分解性や生分解性が低いため、ひとたび地下環境中に放出されると長期間にわたり残存し蓄積してしまう恐れがある。人工的に合成された有機塩素化合物等は、極めて微生物分解を受けにくいため、それらが地下環境に廃棄された場合、長期間にわたり蓄積することが多い。

その一方で、これらの有機塩素化合物を脱塩素する能力を持つ微生物も見つかっている。我々は TCE で汚染された現場から採取した地下水から、TCE をエチレンまで脱塩素する微生物コンソーシアムを獲得した。図5は嫌気状態でこのコンソーシアムによる TCE の分解を示したものである(16)。この場合、TCE は 300 時

間ほどで完全に脱塩素され、無害なエチレンに変換されており、この反応を担う細菌は脱塩素呼吸と呼ばれる過程で有機塩素化合物を脱塩素しエネルギーを獲得している。このコンソーシウムは5年間にわたり安定してTCEの脱塩素活性を示しており、共存する微生物の動態や役割を含め、現在さらに解析を進めているところである。

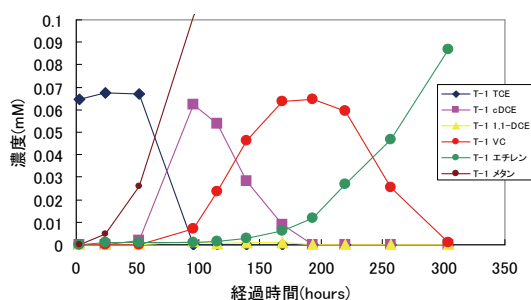


図5 微生物コンソーシウムによるTCEの脱塩素

土壌中の有機塩素化合物が極めて高濃度になった場合、分解微生物は有機塩素化合物の毒性で生育できなくなるので、微生物以外の分解方法を検討する必要がある。我々は鉄粉や黄鉄鉱を利用した有機塩素化合物の化学分解手法も検討を行ってきた(17-19)。図6は黄鉄鉱を用いてPCE, TCE および DCE 類の分解を行った結果であるが、3週間程度でこれらの有機塩素化合物はほとんど分解されることがわかる。鉄粉や黄鉄鉱のように比較的身近にある物質によっても有機塩素化合物は分解が可能であり、その反応が起こる環境条件は微生物反応のそれと類似のものである。今後の展望として、微生物分解と化学分解の両者を組み合わせて行くことにより、両者の特徴をとともに生かせる、より有効な有機塩素化合物汚染土壌の修復を行うことができる

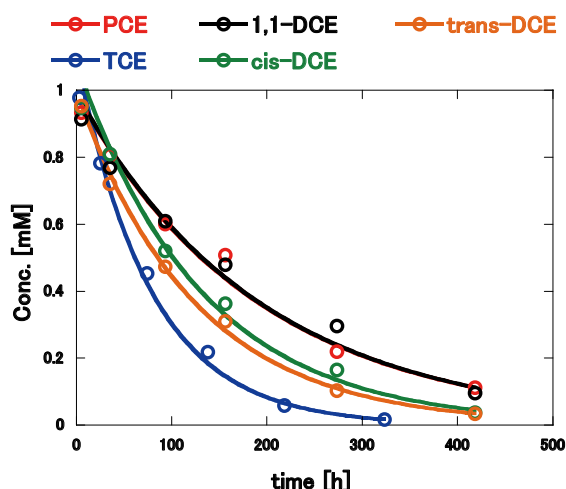


図6 黄鉄鉱によるTCEの脱塩素

と考えられる。

また我々は、有機塩素系農薬をはじめとする難分解性化学物質の土壌中での分解にもチャレンジを開始している。

5. 植物を利用した土壌汚染修復

植物を利用した土壌汚染修復（ファイトレメディエーション）が現在注目を集めている。この手法は、植物が根から水分や養分を吸収する際、同時に土壌中の有害物質(主として重金属類)を取り込ませて植物体内に蓄積させる、あるいは植物根圏に生息する微生物との共同作業により汚染物質を分解浄化する方法である。このうち前者の植物体内に吸収、濃縮する方法(ファイトエクストラクション、図7に概略を示す)が一般的であり広く検討が進められている。

高濃度の重金属を濃縮する植物体は、ハイパーアキュムレータと呼ばれ、重金属類を植物体の乾燥重量あたり0.1% (1000ppm)以上蓄積するものをいう。植物体としては亜鉛、カドミウム、ニッケルなどを蓄積するナズナ類や、鉛、ヒ素、カドミウムなどを蓄積するシダ植物などが知られている。なかでもモエジマシダでは乾燥重量の2%を超えるヒ素が濃縮されることが報告されている(20)。

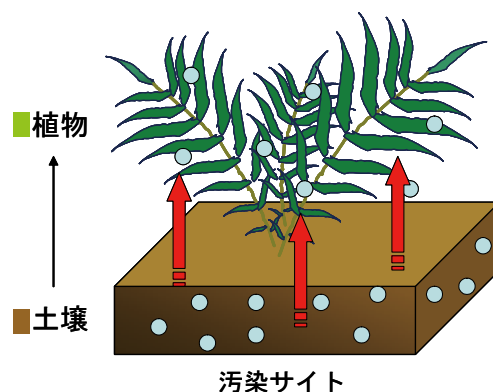


図7 ファイトエクストラクション法の概略

我々はヒ素のハイパーアキュムレータであるモエジマシダの水耕栽培を行い、ヒ素の吸収に関する諸条件の検討を行い、ヒ素は主に5価のヒ酸イオンの形態で吸収されること、ヒ素吸収の際にリン酸の影響が見られることなどを示してきた(21)。また、モエジマシダをヒ素模擬汚染土壌で栽培し、葉(羽片)に蓄積したヒ素濃度を調べるとともに、その分布をX線顕微鏡で測定した。各測定時間で20枚前後の羽片について1枚ずつ灰化して調べたところ、羽片間でのヒ素濃度のばらつきは小さく、土壌中から吸収されたヒ素は、すべての羽片にほぼ均等に輸送されていることが推定された。一方、1枚の羽片におけるヒ素の濃度分布を調べると、図8に示すよう

に、羽片の輪郭部にヒ素が偏在しており、その傾向は生育とヒ素の吸収が進み、色が褐変した羽片で特に顕著であった(図8)。また、モエジマシダのヒ素吸収過程におけるヒ素の化学形態の変化を追跡するとともに、このハイパーアキュムレータにおけるヒ素耐性の分子生物学的機構解明にも取り組んでいる。

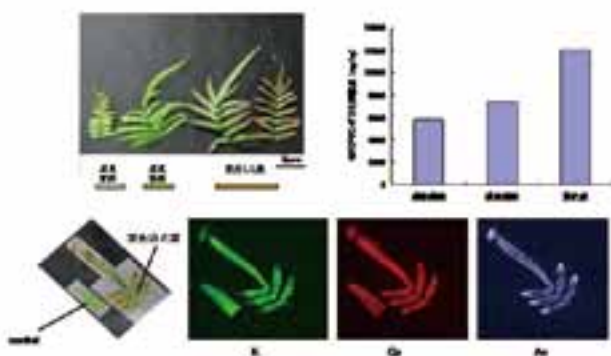


図8 モエジマシダ羽片におけるヒ素の蓄積
左上 各生育段階の羽片の写真
右上 書く生育段階における羽片全体のヒ素濃度
下 変色後の羽片における元素分布

6. まとめ

人類が利用できる資源は有限であり、また地球環境に対してこれ以上の負荷を与えることは難しい状況にある。その状況下で、新たな資源を獲得するためには、低濃度でかつ複雑な形態で存在する金属などの地下資源や廃棄物の有効利用を図る必要がある。また広範囲に広がってしまったさまざまな汚染物質に対して、我々は極力投入する資源を抑えながら、汚染された環境の修復に当たらなければならない。このような課題に対し、微生物あるいは植物などの高等生物を利用するプロセスは、今後一層重要になると考えられる。また、そのプロセスを検討するうえで生物反応のみに固執するのではなく、化学的プロセスあるいは物理的プロセスとうまく組み合わせることにより、双方の特徴を生かしたより有効なプロセスが構築できるのではないかと考えている。

引用文献

- 1) 渡邊信 他編, 微生物の事典, 朝倉書店, (2008)
- 2) 植田充美他編, メタルバイオテクノロジーによる環境保全と資源回収, シーエムシー出版, (2009)
- 3) J. Vilcaez, K. Suto, C. Inoue : International Journal of Mineral Processing, 88 (1-2), (2008), 37-44
- 4) J. Vilcaez, K. Suto, C. Inoue : Minerals engineering, 21, (2008), 1063-1074
- 5) J. Vilcaez, R. Yamada, C. Inoue : Hydrometallurgy, 96, (2009), 62-71
- 6) J. Vilcaez, K. Suto, C. Inoue : Minerals Engineering, 22, (2009), 951-960
- 7) J. Vilcaez, C. Inoue : Hydrometallurgy, 94, (2008), 82-92
- 8) J. Vilcaez, K. Suto, C. Inoue : Advanced Material Research, 71-73, (2009), 357-360
- 9) T. Arai et al. : Proc. Int. Symp. On Cluster Assembled Materials, IPAP Conf. Series 3, (2001), 75-78
- 10) Shinoda et al. : Materials Trans., 43, (2002), 1512-1516
- 11) 千田 佑 : バイオサイエンスとバイオインダストリー, 58, (2000), 401-404
- 12) Y. Takahashi et al. : 16th International Biohydrometallurgy Symposium Abstracts, (2005), 260-262
- 13) Y. Takahashi et al. : Journal of Bioscience and Bioengineering, 106 (3), (2008), 219-225
- 14) T. Ohnuma, K. Suto and C. Inoue : Water Dynamics, 4th International Workshop on Water Dynamics, AIP Conference Proceedings, 898, (2007), 231-234
- 15) H. Bacosa, K. Suto, C. Inoue : Journal of Water Resources and Environmental Engineering & Proceedings of Japan-Vietnam Estuary Workshop, Special Issue, (2007), 144-149
- 16) K. Ise, K. Suto and C. Inoue : Water Dynamics, 4th International Workshop on Water Dynamics, AIP Conference Proceedings, 898, (2007), 231-234
- 17) J. Hara et al. : Water Research, 39, (2005), 1165-1173
- 18) P. T. Hoa et al. : Environmental Science & Technology, 42, (2008), 7470-7475
- 19) P. T. Hoa et al. : Environmental Science & Technology, 43 (17), (2009), 6744-6749
- 20) Ma L. Q., et al : Nature, 409, p.579 (2001)
- 21) K. Tashiro et al. : Proceedings of the second IASTED international conference on advanced technology in the environmental field, (2006), 244-246

土壌汚染リスク研究の成果と環境ガバナンスへの展開

Outcomes of Soil Environment Risk Research and Advanced Risk Governance

副研究部門長・地圏環境リスク研究グループ長：駒井 武

Deputy Director and Leader, Geo-environment Risk Research Group : Takeshi Komai

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

1. はじめに

近年、産業活動や人間の活動に起因した土壌・地下水汚染の事例が増加している。また、砒素や鉛のように自然的原因による化学物質が土壌や地下水中に多量に存在し、バックグラウンドレベルが高い地域もみられる。これらの環境問題を客観的に評価するための手法として、リスク評価のアプローチが合理的である。これまで、大気汚染物質を対象としたリスク評価は比較的多くの事例があるが、土壌や地下水を対象としたリスク評価の事例はほとんどなく、米国のスーパーファンド法に基づく環境対策を行うため、リスクベースの取り組みが行われているにすぎない。

2003年に施行された土壌汚染対策法は、わが国における初めての法制度として画期的なものであり、今後の環境施策に大きく寄与することが期待された。また、2010年4月には、土壌汚染対策法の改正が予定され、リスク管理と情報公開の強化がはかれる。一方では、このような法制度でカバーできないような多くの問題点も指摘されており、技術的事項やガイドラインなどのさらなる整備が求められている。そのひとつの方法論として注目されているのがリスク評価である。

本稿では、まず土壌汚染を中心とする環境問題に対するリスク管理のあり方について整理し、リスク管理に基づく土壌汚染対策の方法論やリスク評価の実践について紹介する。また、土壌汚染のリスク評価ツールの開発について概観し、いくつかの適用事例と環境改善効果について述べる。さらに、最近注目されている環境ガバナンスの考え方とその適用の可能性についても論じる。

2. 土壌汚染のリスク管理

リスク管理とは、曝露（実際に人が被る摂取）とリスク（曝露の影響としての確率）の定量的な評価に基づいて、実施すべきリスク低減の方法や効果を比較検討し、費用対効果などの経済合理性の側面も含めて総合的にリスクを管理する一連のプロセスを意味している。この方法論は、米国の大統領令¹⁾にみられるように、科学的、社会的な側面を加味したマネジメント文書として確立されており、米国や欧州の環境政策ではおおむね本来

の意味のリスク管理が主流になっている。また、国際標準の考え方では、ISO(国際標準化機構)の環境マネジメントシステムのように、サイト毎のリスクを認知して定量化するプロセスが強調されている。一方、わが国では明確にリスク評価に基づいた法規制は行われておらず、土壌汚染対策法の中では曝露経路の特定と環境施策のオプション選択のために、リスク管理という概念が使用されているにすぎない。その背景には、一律に設定されている従来の環境基準との整合性、行政や市民レベルの認知の問題があるものと考えられる。

土壌汚染のリスク管理の方法としては、a)環境基準や浄化目標値などによる一律的な評価、b)曝露・リスクの解析にもとづくサイト毎の評価、の2つに大別できる。わが国の環境行政では、主にa)の一律的な評価が行われており、土壌環境基準および地下水環境基準などの基準値が設定されている。一方、工場、事業所といった特定の場所における自主管理を目的とした評価では、a)に加えて、b)サイト毎の諸特性（地質条件、水文条件、地下水利用、土地用途、生活形態など）に応じた汚染評価、すなわちサイトアセスメントを実施することが重要である²⁾。サイトアセスメントでは、定められた基準などによる一律の評価は行わず、環境マネジメントシステムの一貫として汚染調査・評価が実施される。個別の事業所において環境対策によるリスク低減の程度を明確化し、環境マネジメントの効果を最適化するためには、サイトアセスメントによるリスク管理の取り組みが重要である。

3. リスク評価手法の開発

土壌・地下水汚染に起因する曝露を予測し、その影響を評価するための手法として、いくつかの異なったタイプの数理モデルが開発され、実施のリスク評価に適用されている。曝露評価モデルは、それぞれ用途や目的が異なるため、モデルの構造や評価に必要なデータ類に大きな違いがみられる。以下、産業技術総合研究所で開発を進めている地圏環境リスク評価システム GERAS(Geo-environment Risk Assessment System)を例にとって、代表的な3つタイプのリスク評価モデルと各階層(GERAS-1～GERAS-3)における評価事例³⁾について紹介する。

一般的な環境条件や曝露のシナリオを設定して、曝露量やその影響を評価するために用いられる数値手法が概念的なスクリーニングモデル GERAS-1 である。その概要を図 1 に示す。曝露のシナリオとしては、想定される曝露経路を基本として、人の居住や移動、滞在期間に関するパラメータ、環境条件（土壌特性、汚染レベル、気象条件）のパラメータ、人の特性（摂取量、呼吸量、吸収率）に関する曝露ファクターなどを設定し、様々な条件で曝露評価が行われる。



図 1 スクリーニングモデル GERAS-1 の構造

また、サイトモデル GERAS-2 では、土壌や帯水層の諸特性をはじめ、地理的条件、地質・水理条件、気象条件などのサイトに特有のデータをもとに、サイトごとに異なる曝露を評価する。したがって、有害化学物質による汚染のレベルが比較的明確である場合に、汚染サイトからの曝露影響を定量的に評価するために使用される。また、リスクを目標レベル以下にまで低減するためには、どの程度まで地下水・土壌汚染を浄化・修復すればよいか、すなわち対策目標をサイトモデルにより評価することも可能である。このモデルの基本的な考え方は図 2 に示すとおりであり、土壌や地下水における化学物質の空間的、時間的な移流・分散、分解などの環境動態についても考慮することができる。このような設定の下で、土壌の直接摂取、地下水や大気を経由した間接摂取などを通じて、サイト上およびサイトから離れて居住している人が受ける曝露量を算定する。その結果とハザードデータ（毒性値等）を用いてリスクを評価し、目標とするリスクレベルと比較検討する。

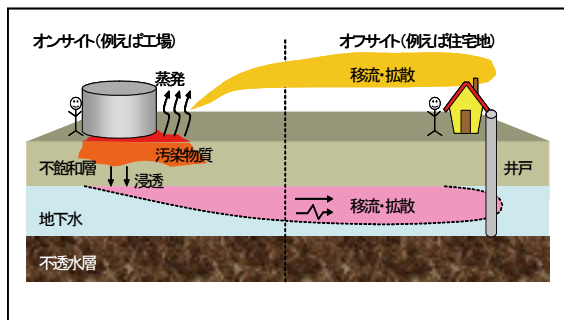


図 2 サイトモデル GERAS-2 の構造

化による汚染物質の分解などを精度よく解析するためには、多次元の構造を有する詳細型モデル GERAS-3 の活用が不可欠である。詳細型モデルには、土壌・地下水の化学物質の移流・分散や吸着性・分解性を考慮した浸透流解析モデルと、土壌や地下水の他に大気・水域・海洋などの物質移動を考慮した多媒体間解析モデルの 2 つのタイプがある。前者は主に汚染サイトの評価のために用いられ、後者は化学物質の広域的な影響を評価するために使用される。前述のスクリーニングモデルやサイトモデルと比較すると、環境媒体における化学物質の時間的、空間的な分布を求めるために精緻な数値解析手法を使用すること、2 次元あるいは 3 次元のグリッドを用いることなど、より複雑なモデルの構造をしている。

産業技術総合研究所では、独自に技術開発を行ってきた地圏環境リスク評価システム GERAS を公開し、その普及に努めている。これまでに開発を完了した上記の GERAS-1, 2 は、800 社以上の工場や自治体に配布し、国民各層への普及をはかっている。また、図 3 に示すような詳細型モデルを本年 9 月に公開した。これは、土壌・地下水の複合的な汚染による環境リスクを時間的・空間的に詳細に評価できる。土壌汚染調査のうち、フェーズ III の詳細な検討や自主的な取り組みにおいて有効な手段となり得る。その特長は以下に示すとおりである。

- ・ 土壌・地下水汚染など環境リスクの時間的、空間的な分布を詳細に表示
- ・ 鉱物油、揮発性有機化合物、重金属等の複合的な土壌・地下水汚染のリスク評価が可能
- ・ 汚染物質除去後のリスクの低減効果をも定量的に評価するわが国初リスク評価システム

全体システムは Windows-PC 上で動作可能な簡便なモデルであり、化学物質の毒性や人の基本的な特性などはシステム上に組み込まれている。土壌汚染の状況や汚染物質の濃度などの基本的なデータを入力すると、サイト内およびサイト外の人が受ける曝露とリスクレベルが短時間で計算される仕組みになっている。主に事業所や工場などの自主的な取り組み、自治体や国民各層の自主的な環境リスク管理に向けての活用に期待している。

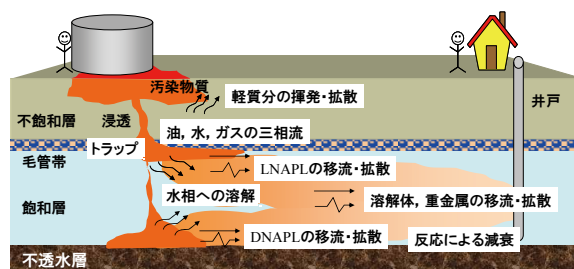


図 3 詳細型モデル GERAS-3 の構造

4. 地圏環境情報の取得と解析

土壤汚染のリスク評価を行う際には、その基本となる地圏環境情報の整備が喫緊の課題である。地圏環境における様々な情報は、土壤汚染をはじめとして土木工事、大規模建設、都市計画などの広範囲の分野において重要である。また、広域の生態系の評価や大規模事業を対象として実施される環境影響評価にも有用な基礎データベースである。産業技術総合研究所では、東北大学、同和エコシステムと連携して、図4のような地圏環境インフォマティクスシステムに必要な基礎データを取得している⁴⁾。わが国全体をカバーする地圏情報を公開しており、そのデータベース化およびGISシステムの統合化を達成している。

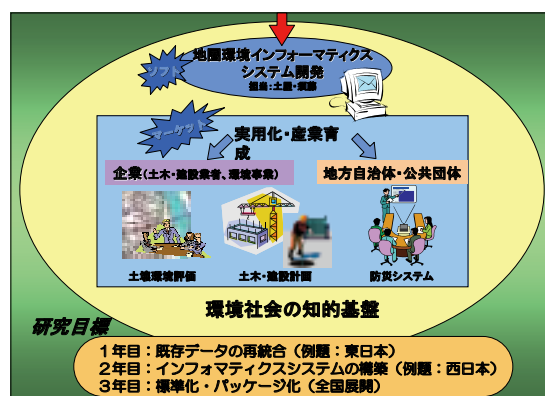


図4 地圏環境インフォマティクスシステム

本システムは、産業技術総合研究所で公開しているシームレス地質図（数値地質図）をベースとして、地球化学図、地形図、土壤図、地下水汚染図、鉱床・鉱染図、植生図などを解析し、GIS上で統合したものである。以下、地圏環境評価図の作成を目的として実施した土壤・地質調査、特に表層土壤中の有害元素の分布を調べた結果について述べる。

東日本における代表的な地域（本調査では、宮城県全域）を選定し、表層土壤における重金属類の分布調査を実施し、表層土壤評価基本図の作成を行っている⁵⁾。対象とした表層土壤は、土壤学的にはA層にあたり、主に自然的な土壤環境におけるものであるが、市街地では自然と人為起源が混在している地域もある。また、この調査では表層土壤に加えて、岩石露頭調査に基づく地質情報の取得および解析作業を行い、土壤中の重金属類の含有量および溶出量の分析作業および化学形態調査を行った。その結果、表層土壤中には母岩組成に依存する重金属が含有されていることが分かった。また、母材の供給時における堆積環境およびその後上流から溶出した重金属の負荷による蓄積がその分布様式に著しく反映されることが示唆され、表層土壤における重金属類の分布は河川流域（分水界）と良い相関を示した。また、同じ流域内においては土壤生成環境を反映する土壤種によって重金属類の存在形態に特徴があることが見

いだされた。このように重金属類の分布様式および母材（岩石）中の含有量を把握することにより、重金属バックグラウンドレベルが明らかとなり、人為起源の土壤汚染との判別を行う際の基礎データとすることができた。

その一例として、図5に宮城県における表層土壤におけるヒ素の溶出量分布および県内に分布する鉱床位置を示す。鉱床付近には5つの火山地域が分布し、これらの火山活動に伴う鉱床、温泉、変質帯を水源とする河川が多く支流を伴って仙台平野へと流れ下っている。主要な河川として迫川、江合川、鳴瀬川、七北田川、広瀬川、白石川があるが、いずれも下流側は市街地へと達している。鳴瀬川、広瀬川、白石川では局所的にヒ素の溶出量値の高い部分が検出された。この濃集のメカニズムとしては、移動性の高い化学形態あるいはコロイド粒子が河川の下流側に移動し、市街地あるいはその近郊の有機土壤中に捕捉されたことが考えられる。一方、含有量値では指定基準値を超えるものは殆どないが、河川の集水域にあたる支流の合流地点に高濃度部が検出されている。

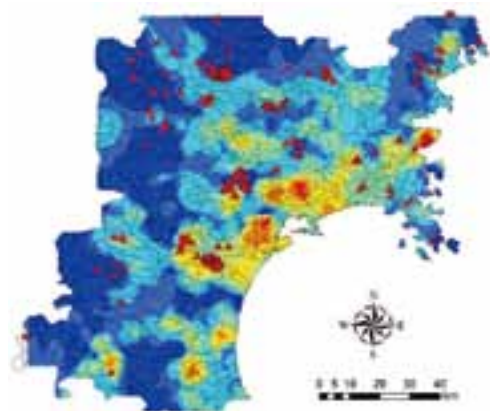


図5 表層土壤評価基本図（宮城県地域）

5. 環境ガバナンスへの展開

土壤汚染対策として、まずは法制度や社会システムを整備していくことが重要であり、土壤汚染対策法は評価基準や対策の考え方をとりまとめた法規制の枠組みとしては画期的なものであった。しかし、現在では法規制や社会システムの限界に起因する多くの問題点が指摘されている。従来の環境管理は、図6に示すように行政や自治体からのトップダウン的な規制や指導などにより環境改善を図ろうとするものであった。一方では、工場や企業内での自主的なリスク管理や自治体における取り組みのように、ボトムアップ的な対応もきわめて重要である⁶⁾。この両者をうまく組み合わせて、多くの利害関係者が納得できるような社会システムを構築する新たなパラダイムのことを環境ガバナンス⁷⁾と呼んでいる。欧米のいくつかの事例では、すでに持続可能社会に向けた環境ガバナンスの実践が成功をおさめており、円満なリスクコミュニケーションに大きく貢献している。

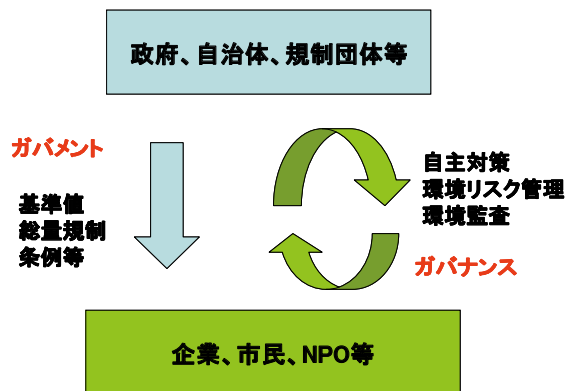


図6 環境ガバナンスのスパイラル構成⁶⁾

環境ガバナンスは、CSR 活動（社会的責任）の一貫と捉えることができる。わが国でも、このような環境ガバナンスの考え方を基本として、より良い制度・システムにしていく必要がある。土壤汚染のような環境問題だけではなく、資源開発、CCS や地層処分のような地下空間利用においても、環境ガバナンスの方法論は適用可能と考えられる。今後、リスク評価、リスク管理を基本として重点的に対処していくべき技術的、社会的な事項は、以下のように整理することができる⁸⁾。

リスクの側面：一元的な管理基準にとどまらず、人に対する健康影響の程度を定量的に表すことができるリスク（環境リスクあるいは健康リスク）の考え方が重要である。これにより、さまざまな環境施策の意思決定や経済評価も可能となるので、合理的なリスク管理が実施できる。特に、工場や事業所などの自主的な取り組みにおいて有効な方法と言える。

対策の本来の目的：そもそも、土壤汚染の浄化は何のために実施するのか。第一義的には人への健康リスクを低減し、回避するためである。したがって、リスクの現状レベルと浄化によるリスク低減を定量的に把握することが重要である。

現場主義：法制度やガイドラインのような普遍的な管理基準に加えて、現場の調査や監視を基本とした一品料理的な対応も必要である。まずは現場の状況や特性をよく把握し、適切な評価や対策を実施することが重要であろう。

専門家の育成：わが国では、欧米と比べて土壤汚染に関わる専門家が絶対的に不足している。学識者はもとより、行政担当者、事業者、コンサルタント、浄化企業のような、さまざまな分野の専門家を育成することが重要である。土壤汚染では、それぞれの専門性に加えて、社会的、技術的な両側面をもったジェネラリストの育成も不可欠と考えられる。

方法論の標準化：現状の汚染調査・評価では、同様な汚染状況でも個々のケースで異なった結果や対応になることがある。これに対処するため、科

学的な地質調査、汚染評価を進めるとともに、方法論の標準化という視点が重要と思われる。わが国でも世界標準的な指針やマネジメントシステムの構築、認定制度や登録制度の確立が必要である。

リスクコミュニケーション：情報の公開はもとより、全ての利害関係者間のコミュニケーションが重要である。大規模な土壤浄化を行う場合では、市民、行政、事業者、浄化企業などによる参加型事業（事前協議、監視、リスク評価）とすることで、よりスムーズな浄化活動が期待される。

環境ガバナンスの実践：複雑で多層的な利害構造をもつ環境問題では、さまざまな利害関係者の下での環境ガバナンスの実践が不可欠である。持続可能な社会の構築に向けて、社会全体で環境問題を捉えることが重要である。その判断の尺度として、透明性が高く科学的なリスク評価の方法論が活用されることを期待する。

6. まとめ

土壤・地下水汚染の諸問題を考えるとき、有害化学物質からの曝露とその影響としての環境リスクを適切に評価・管理することが合理的である。本稿では、土壤汚染のリスク管理のあり方を中心として、化学物質の曝露評価の基本的な考え方を整理するとともに、曝露・リスク評価に基づくリスク低減の方法と実際について述べた。また、さまざまなタイプの曝露評価モデルを紹介し、それらを用いてリスク評価を行った事例と問題点について論じた。筆者らは、土壤・地下水環境リスク評価システムの開発を行っており、評価事例や各種データを蓄積することにより、環境ガバナンスを基本としたリスク評価の方法論を広く普及させたいと考えている。

参考文献

- 1) Presidential/Congressional Communication on Risk Assessment and Risk management, Final Report Volumel, (1997)
- 2) サイトアセスメント 実務と法規：社団法人産業環境管理協会，丸善出版，(2003)
- 3) 川辺能成，駒井武：地圏環境評価システムの開発に関する研究，資源と素材，119(6, 7)，(2003)
- 4) N. Tsuchiya, Chishitsu News, 628, pp. 21-28, (2006)
- 5) J. Hara and T. Komai: Development of Geo-informatics system, Water Rock Interaction, (2007)
- 6) 駒井 武，川辺能成，坂本靖英，原 淳子，杉田 創：土壤・地下水汚染のリスク評価技術と自主管理手法，Synthesiology, 1(4)，276-286，(2008)
- 7) 松下和夫：環境ガバナンス論，京都大学学術出版会，(2007)
- 8) 駒井 武：土壤汚染対策の課題と環境地質学の役割，地学雑誌，116(6)，(2007)

社会に役立つ地下水研究（地下水研究グループ紹介）

Outcomes to the Society from Groundwater Science (Introduction of Groundwater Research Group)

地下水研究グループ長：丸井 敦尚

Leader, Groundwater Research Group : Atsunao Marui

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

1. はじめに

地下水研究グループは、地下水や水文学に関する基礎的研究を通して、水文環境図の作成、地下水流動解析、地下温度分布、地中熱利用、沿岸海底湧出地下水、第四系地下水流動域評価、地層処分に係わる研究等を実施しています。

また、地球温暖化対策に関する国際貢献、産学官制度の積極的な利用と民間研究機関との協調、CCOP国際協力研究、産業開発用地下水資源研究などを通して、社会にその成果を積極的に還元しています。主な研究を以下に項目別に紹介いたします。

1) 地下水の基礎的研究

国内および海外の研究機関と連携を取りながら、地下水流動、地下水資源、地層処分、地中熱、二酸化炭素地中貯留、塩水・淡水境界問題等の研究を実施しています。

2) 水文環境図の作成

2号業務「地質の調査」ミッションの一つである知的基盤情報整備の一環として、水文環境図の作成に向けて、現地水文調査、水質・同位体分析などを実施し、成果を公表しています。

3) 沿岸海域の深部地下水・活断層調査

沿岸海域の地質・活断層調査に資するため、海陸統合研究の構築の一環として、地下水データベースの構築を実施し、深部地下水の安定性に関する研究を行っています。

4) 東南アジア沿岸国における地下水の管理と評価（CCOPプロジェクト）

国際的な地下水プロジェクトの一環として、東南アジア諸国における沿岸地域の地下水の管理と評価に係る研究を実施しつつ、地盤沈下対策や地下水汚染対策のような日本の誇る技術を海外に移転する取り組みを実施しています。

2. 沿岸域の深層地下水研究

これまで温泉資源としてしか見られなかった沿岸域の深層地下水を研究することで、高レベル放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中貯留事業に深層地下水を利用・活用する方法を見出すほか、深部地下水の動向から活断層研究への情報提供をすることなど、深部地下水研究をすることで、研究の幅を広げています。

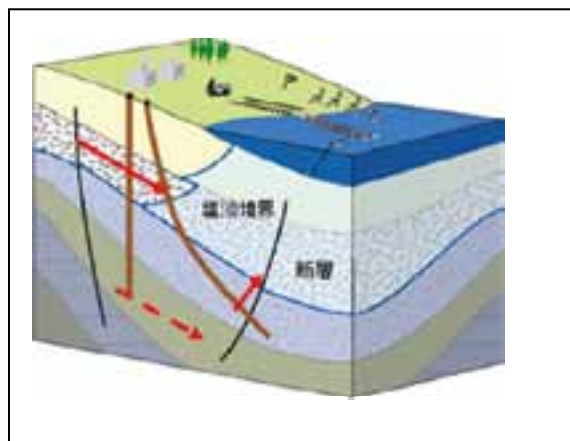


図1 沿岸域深層地下水賦存のイメージ図

3. 地中熱ヒートポンプシステムの適用のための地下水調査

地中熱を用いたヒートポンプシステムの普及は、大都市のヒートアイランド現象の緩和や二酸化炭素排出量の削減につながります。熱効率

(費用対効果)の高いシステム設計のためには、地下の温度分布、地下水流動などの地下情報を収集することが欠かせません。

私たちは日本の幾つかの主要な平野で地下水観測井を利用して、地下温度プロファイルを求め、また地下水試料を採取して水質分析や同位体比分析、さらに数値モデルの構築を行っています。

同様な試みをタイ地下水資源局 (DGR) と共同で、チャオプラヤ川流域の DGR 支所構内において実証試験施設を設けて実施しています。

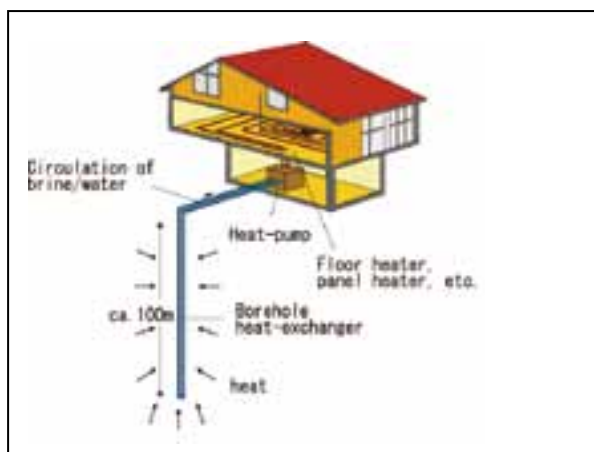


図2 地中熱ヒートポンプシステムの概念図

3. 水文環境図の作成

地下水研究グループの主要なミッションの一つに、“水文環境図の作成”があります。水文環境図は電子媒体 CD-ROM で出版されています。水文環境図においては、地下水位や水質、水素・酸素安定同位体比、地下温度などの各種トレーサーを統合して解析するマルチトレーサー手法を用いて、地下水流動系を明らかにしています。トレーサーの一つ一つには長所も短所もありますから、マルチトレーサー手法はそれらを補完しあうために有効です。

水文環境図からは様々な付図・付表によって地域の地下水の状態を知ることができます。現在、水文環境図は「仙台平野」「秋田平野」「関東東平野」「濃尾平野」「筑紫平野」「山形盆地」をすでに出版しており、現在新たな地域の現地調査や解析を行っています。

図3 関東平野の水文環境図 (下)



地圏環境評価研究グループの紹介

Introduction of the Geo-analysis Research Group

地圏環境評価研究グループ長：今泉博之

Leader, Geo-analysis Research Group : Hiroyuki Imaizumi

Phone: 029-861-8287, e-mail: hiroyuki.imaizumi@aist.go.jp

1. グループの概要と研究目標

市街地や産業用地において深刻な土壌・地下水汚染に係る問題が顕在化する中で、2003年に土壌汚染対策法が施行されるなど、社会全体において地圏環境の適正な管理およびそれらに関連する技術開発が危急の課題となっている。

このような社会状況を鑑み、地圏環境評価研究グループでは、土壌・地下水環境における汚染解析、環境影響評価技術に関する理学的、工学的な研究開発を中心に実施し、地圏環境の評価・保全を通じた安全・安心な社会の構築に貢献することを目標として掲げている（図1）。

具体的な研究内容としては、土壌や地下水汚染などの評価のための物質循環機構の解明や地圏環境情報の整備、それらに基づく浄化技術、汚染土壌の物理・化学・生物学的な危険度の評定技術および浄化手法、などに留まらず、地圏環境の計測技術に係る基礎的な研究、ならびに地圏環境との境界において人の健康等に関わる課題として音環境の予測・影響評価手法に係る研究なども幅広く実施している。

これらの研究を通じて得られた知見は論文などにまとめ発表するだけでなく、これら基礎的な研究の成果などを発展させ、有害元素による土壌・地下水汚染の未然防止に係る試験法および長期環

境安全性の評価、多孔質媒体における混相流数値解析手法の開発、ならびに音環境影響評価に資する計測システムの開発などに展開し、社会ニーズやその動向にフィットした成果を発信し社会への普及を図っている。

2. グループの研究資源

1) グループ員

今泉博之（リーダー）

成田 孝、高橋保盛、杉田 創、井本由香利

竹内美緒 *地圏微生物研究グループ（兼務）

山岸昂夫 *テクニカルスタッフ

2) 研究課題

- ・ 運営費交付金「地圏環境評価の研究（地質）」
- ・ 運営費交付金「地圏環境評価の研究（エネルギー）」
- ・ 委託費「電子機器用ガラス廃棄時における有害元素の長期浸出評価」（環境省）
- ・ 委託費「難透水層におけるバイオレメディエーションの浄化メカニズムに関する研究」
- ・ 委託費「公共用水域・地下水中窒素を低減するための畜産廃水からの窒素除去技術の開発（環境省）」
- ・ 委託費「都市環境騒音対策の最適選択手法と数値地図を活用した騒音場の簡易推計技術に関する研究」（環境省/平成20年度まで）
- ・ 委託費「健康リスク解析のための騒音曝露の長期観測データ収集システムの開発と住民参加型データベース構築手法の研究」（環境省/平成21年度より）

3. 研究の進捗状況

1) 地圏環境評価の研究（地質・エネルギー）

発光バクテリアを用いた石油系炭化水素や重金属類の汚染土壌毒性の評価手法の開発を行っている。アルコール構造異性体やアルカン構造異性体について毒性評価を行なった結果、構造異性体の種類および濃度によっても毒性の強さのみならず影響力の順位が変動することを明らかにした。またアルカン成分混合による複合毒性がその混合条件によって影響が大きく異なり、例えば成分の濃度比が同一の場合、複合毒性値は含有成分の中で

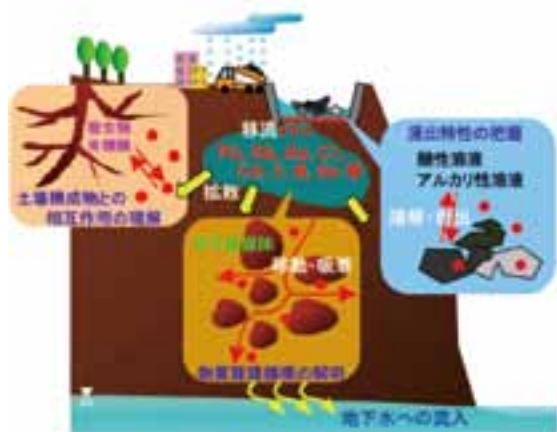


図1 土壌・地下水汚染などを中心とした地圏環境評価の研究

最大毒性値を有する単成分の毒性値に近い値となることなどを明らかにした。また、フッ素等重金属類で汚染された土壌からの有害物質の溶出特性を解明し、重金属類汚染と浄化手法に係る取りまとめを進めている。さらに、土壌汚染評価に必要な土壌パラメータを取得し、汚染物質の移動性を予測する数値解析手法を開発している。砂質土壌中における二酸化炭素の分散係数と吸収係数の流速および土壌含水率依存について実験的に検討し、二酸化炭素の分散係数がその平均流動速度が増加すると増加、含水率が増加（気相率が減少）すると増加することを示すとともに、分散係数と流動速度の関係から二酸化炭素の砂質土壌中の分子拡散係数の推算を可能とした。地下微生物を汚染浄化に有効利用するための研究として、難透水層における水素の挙動の解明を行っている。また、微生物機能を利用した高窒素濃度排水の処理方法について、活性と様々な条件の関係について解析を進めている。

地圏環境評価に係る別の視点からの研究として、新型応力変化測定（特定成分）の応答性について検証し、多成分測定への拡張の可能性を検討している。また都市環境保全のための実用的な騒音伝搬予測方法の開発について、時間平均気象データを騒音予測に適用できる可能性を明らかにするとともに、風雑音低減の効果が開発した除去装置の寸法に影響されることを実験的に示した。

2) 電子機器用ガラス廃棄時における有害元素の長期浸出評価

地上デジタル放送への完全移行が2011年7月に迫る中、ブラウン管型テレビの大量廃棄が土壌環境に及ぼす影響について想定されるシナリオに基づいた研究を実施している。具体的には、ブラウン管などの電子機器等に使用するガラスからの浸出や拡散に関する基礎データを提供し、土壌環境における廃棄および再利用におけるガラスからの有害元素の浸出特性に関する実験および解析から、標準試験法および長期環境安全性の評価に必要な技術的な提言を取りまとめている。ブラウン管用ガラス（ファンネルガラス（PbO 23wt%））の水への浸出のpH依存性及び時間依存性を評価し、pHの違いによって浸出挙動が異なり中性およびアルカリ性では長期予測のために浸出メカニズムをよ

り詳細に検討する必要があることを、酸性では浸出による重量減少および各元素の溶出量は時間の平方根に依存し拡散律速であることなどを明らかにした。また埋立地等の土壌環境で暴露された際のCRTガラスの浸出特性および拡散特性では、雨水・地下水等に接触することで有害物質のSbが他の成分と比較して溶出し易く、水の移動に沿って汚染範囲を広げる可能性や、その粒径が小さいほど溶出速度が速いなどを実験的に示し、併せて標準試験法について洗浄液およびCRTガラスの粉碎粒径に係る条件を提示した（表1）。

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

個々の騒音対策による低減効果を広域的に考慮しながら最適な騒音対策を選択するためのソフトコンピューティング手法、および都市域の数値地図を活用し都市広域の環境騒音を面的に把握・推計する騒音推計手法などを実装した環境騒音管理者が効率的な騒音対策の施策を立案するための支援システム（環境騒音 GIS）の動作検証を行うとともに、その推計精度を確認、全システムを確立した（図2）。さらに都市住民は大きな騒音に長時間曝露されることを余儀なくされ、騒音問題に生活妨害や心理的影響だけではなく健康への影響という新たな視点も不可欠になってきたという現状を鑑み、住民の行動パターンと騒音曝露量を長期間にわたって取得し、それをデータベースとして収集・蓄積するためのシステムを開発することを目的とする研究展開を行っている。

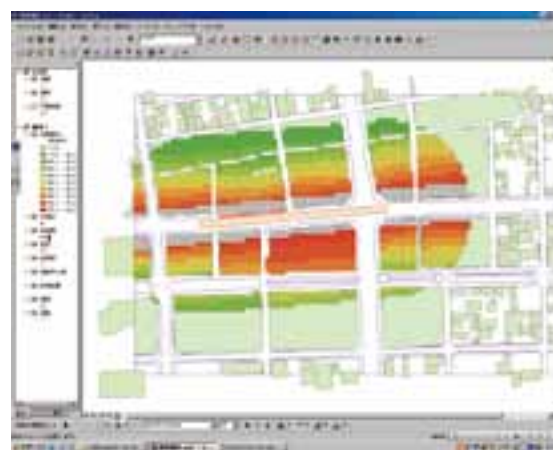


図2 環境騒音 GIS を用いた都市域の騒音推計結果

4. 今後の方針

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

表1 溶出液中のPb及びSi濃度

試験項目	洗浄方法	Pb (mg/L)			Si (mg/L)		
		pH1	pH6	pH11	pH1	pH6	pH11
100 < Dp < 125 μm	水洗浄	22.62	0.22	32.35	4.71	3.18	43.87
	水洗浄	18.07	0.11	25.45	0.97	1.79	31.37
	アルコール洗浄	17.85	0.08	18.62	0.86	1.99	24.24
1 < Dp < 2 mm	水洗浄	1.21	0.29	3.48	0.19	0.51	4.23
	水洗浄	0.89	0.19	2.62	0.40	0.26	3.07
	アルコール洗浄	0.87	0.22	2.62	0.36	0.29	1.19

CO₂ 地中貯留研究グループの紹介

Introduction to CO₂ Geological Storage Research Group

CO₂ 地中貯留研究グループ長: 中尾信典

Leader, CO₂ Geological Storage Research Group: Shinsuke Nakao

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

1. グループの研究目的

当研究グループでは、CO₂ 地中貯留の実用化に向けて、1) CO₂ がどのように帯水層内に貯留されるか（貯留メカニズムの解明）、2) CO₂ の挙動をどのように監視・予測していくか（モニタリング・モデリング技術）、3) どのように安全性を評価し確保していくか（安全性評価、影響評価）、という3つの問題意識に基づいた研究を推進している。また、これらの研究を地圏環境の利用と保全、資源の安定供給という観点への研究・技術開発にも応用を目指している。

2. グループの研究資源

1) グループメンバー

中尾信典（グループ長）

奥山康子（H21.6～部門付主任研究員）、

雷 興林、杉原光彦、西 祐司、相馬宣和、

柳澤教雄（H21.6～地熱資源 RG へ異動）、

俣 正夫、加野友紀、船津貴弘、石戸恒雄、

西澤 修、佐藤久代、柳原君子、当部門他研究

グループ等より研究分担者 28 名

2) 予算

運営費交付金「CO₂ 地中貯留の研究」、「沿岸域海底 CO₂ 地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」他／地球環境産業技術研究機構受託研究「長期挙動予測シミュレーションモデルの高精度化等の研究」／共同研究費 等。

3. 平成 21 年度上期までの進捗状況

ここでは、当グループメンバーが実施している CO₂ 地中貯留研究の主な進捗状況を紹介する。

1) サイスマチック・データによるガス飽和度の推定

室内注入実験データの解析を行い、弾性波探査による CO₂ 注入後挙動モニタリングの基礎となる多孔質弾性論モデルの高度化を進めている。室内条件下では S 波速度を利用してガス飽和度を推測することが可能で、現場で利用可能な P 波の速度及び減衰と飽和度との関係を示す WDO (White & Dutta-Ode) モデルを発展するこ

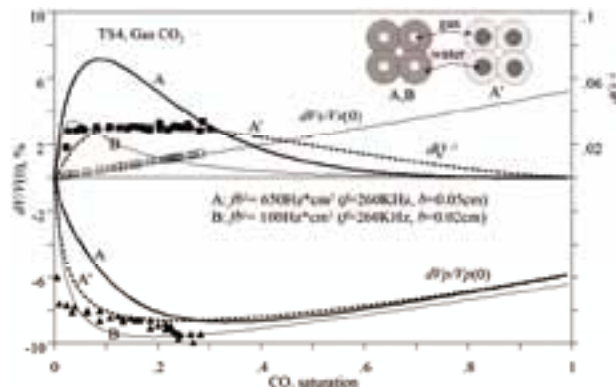


図 1: P 波の速度及び減衰と飽和度との関係についての実験データと White & Dutta-Ode モデルによる理論値との対比

とができた。図 1 は、ガス飽和度の増加に伴い、ガスと水の分布態様がガスバブルから残留水ポケットに変化したこと及び P 波の減衰が特にガス分布態様に敏感であることを示唆している。

2) 重力モニタリング技術

CO₂ 地中貯留に関する重力モニタリングの可能性を数値シミュレーションモデルにより評価した。東京湾モデルについては、CO₂ 注入開始 10 年後には検出可能な重力変化が予測され、それ以後は重力モニタリングが可能となる。一方、地下 400-900m 程度の帯水層に CO₂ を注入する場合についても重力変化を予測計算した(図 2)。東京湾モデルに比べて注入深度が浅いために、より大きい重力変化が予測された。帯水層の条件や注入 CO₂ の条件の違いにより、重力変化は大きく異なるので重力モニタリングが有効となりうる。注入した CO₂ が安定して地下に留まる割合は、CO₂ の溶解量が大きいほど、また密度が比較的大きく浮力の小さい液相 CO₂ 量が多いほど、多くなる。これは重力低下量のより小さいことに対応する。こうした特長に注目すれば、浅部帯水層への CO₂ 注入の場合には、重力モニタリングは特定の帯水層の CO₂ 貯留に対する適性を評価する上でも有効である。

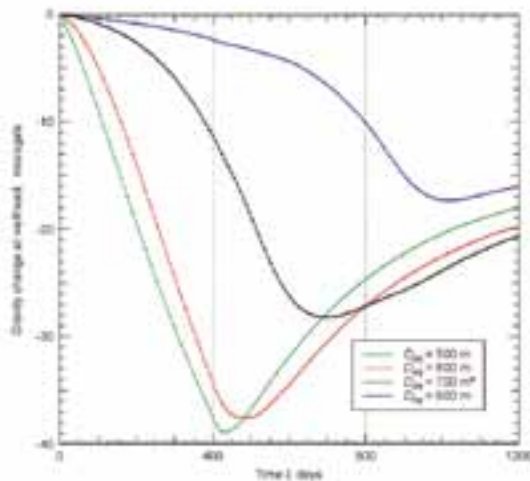


図 2 : CO₂ 注入深度が重力変化（坑口位置）に及ぼす効果の計算例

3) モニタリング技術の現場実験

米国 SWP (Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration) の実施する Aneth Oil Field における大規模 CO₂ 地中貯留実験に参加し、2007 年 11 月に開始した自然電位モニタリングを継続中である。この実験は、年間 15 万 ton 以上の CO₂ を 3 年以上にわたって地下に注入する陸域での大規模 CO₂ 地中貯留実験であり、自然電位モニタリングの経験蓄積・改良を図るとともに、米国の CCS 研究開発に関する情報収集を目的としている。取得したデータには、いくつかのイベントが認められたが、注入開始時の注入井周辺以外では地下の CO₂ に起因すると考えられるイベントはなかった(図 3)。なお、本研究は米国ロスアラモス国立研と産総研との MOU に基づき実施している。

4) 受動振動の相互相関解析に基づく地下情報抽出手法

地震波干渉法のような、人工震源を用いずに、受動的に観測される弾性波を相互相関解析に基づいて活用可能にするモニタリング手法は、送受信点数を抑えて低コストを実現したり、送受信展開に制約が強く一般的手法が適用困難なケースにも対応できる場合があるなどから注目されている。CO₂ 地中貯留時の弾性波モニタリングに関しても、最も信頼性の高い 3 次元反射法地震探査を補完する手法として、同様のアプローチの検討を行っている。また、地圏環境システム研究グループと協力して実施している原子力試験研究においても同様に、受動的に低コストで記録されるボーリング掘削振動を利用した相互相関解析により、地下空洞周りの地層構造評価を行う手法の開発を検討している。本年度は、花崗岩質の立坑道内でのコア採取時の掘削

振動を観測し、高品質データの長時間の 3 次元時空間相関解析によって、地下空洞近傍に存在する複数のき裂と調和的な反射イメージを得ることに成功した (図 4)。

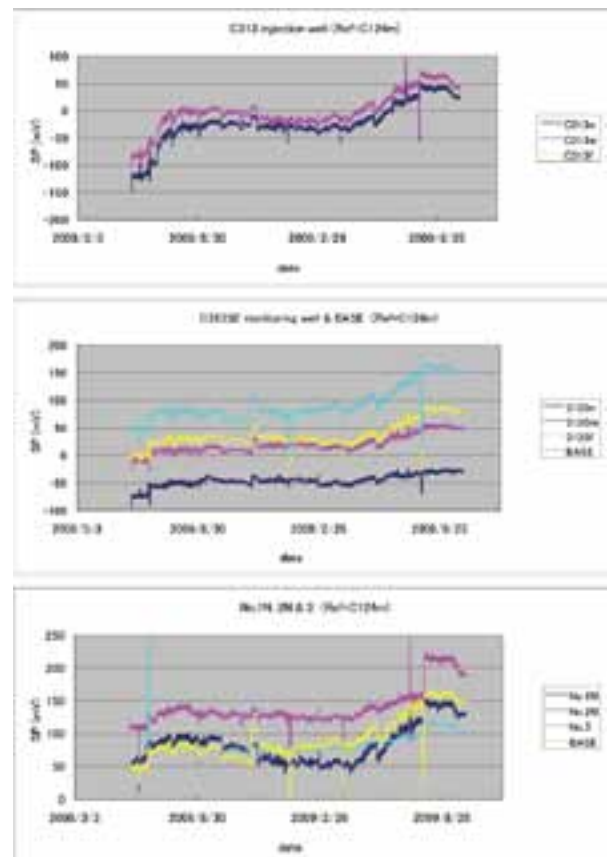


図 3 : Aneth における自然電位の記録例

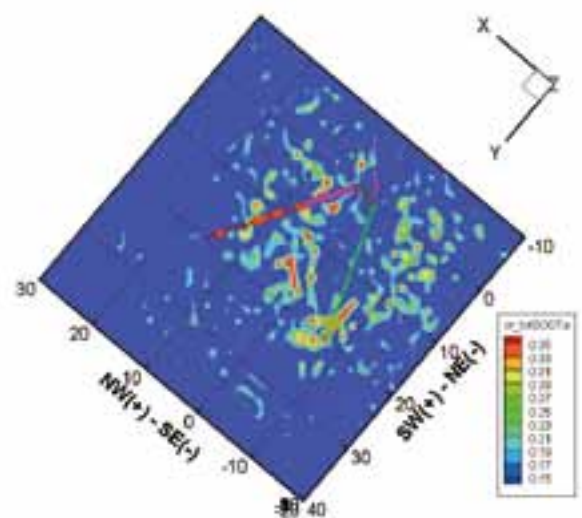


図 4 : 掘削振動解析に基づく水平孔口から-1m 面内の反射率分布を推定した結果

5) CO₂長期挙動感度解析シミュレーション

地中貯留におけるサイト依存のパラメータに関する感度解析を実施し、CO₂ プルーム分布・トラッピング量・圧力上昇等、留意すべき各長期挙動について影響の大きいパラメータを明らかにした(図5)。その結果、岩石の浸透率や相対浸透率、毛管圧及び地温勾配等 CO₂ の流動性に大きく影響するパラメータは、プルームの分布自体のみならず、それに伴う地層水との接触量が増減により長期の溶解トラッピング量に影響することが分かった。特にシール層の浸透率と毛管圧はプルームの遮蔽性には同等の影響を示したが、地層内の圧力上昇に関しては浸透率が高い感度を示したのに対し毛管圧の影響は小さかった。また、残留飽和度の変化は残留気相及び溶存 CO₂ としてそれぞれトラッピングされる割合に影響すると共に、相対浸透率のヒステリシスを考慮した場合には特に排水側において流動性を大きく左右した。

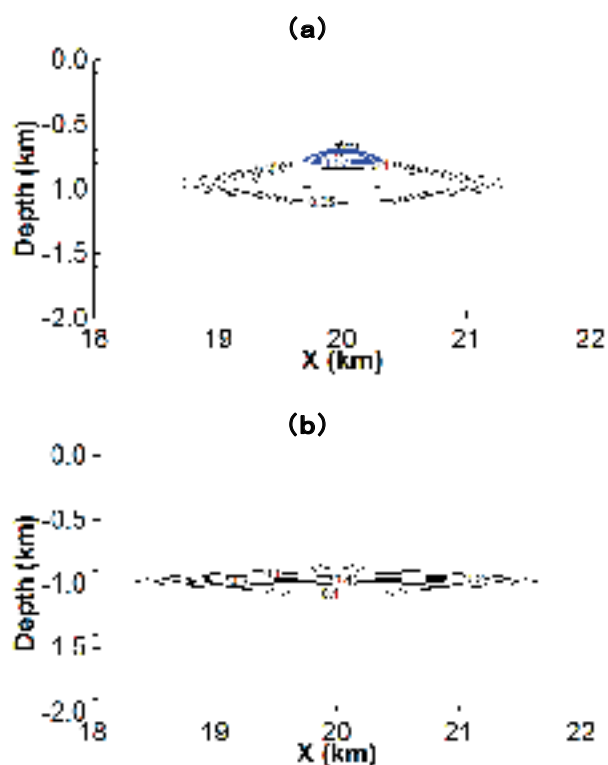


図5：シール層毛管圧の基準圧を(a) 62 kPa と(b) 500 kPa とした時の、CO₂ プルーム分布の違い (0.5 Mt/yr/km×50 yrs の圧入を終了後、1000 年経過時。黒線と青線はそれぞれ気相及び液相 CO₂ の飽和度)

6) CO₂ による鉱物溶解速度の実験的検討

CO₂ 地中貯留の実施に際しては、数年から数千年以上の長期のスケールで起こる化学プロセスについて、CO₂ 挙動の予測に基づいた安全性評価を行う必要がある。このような化学プロセスの中では、CO₂ の溶解により酸性化した地層

水中での長石の溶解が、その後の反応プロセスの基点となることからまず重要となる。一方で、化学プロセスの時間スケールに関して予測精度の向上を図るためには、信頼性の高い長石の溶解速度データを整備することが不可欠となる。この際には、特に、地層水の飽和度変化に対応した溶解速度の飽和度依存性を知ることが重要である。

本研究では、CO₂ 地中貯留において想定される地下 1,000m の圧力、温度条件下において灰長石の溶解実験を行い、溶解メカニズムおよび溶解速度に及ぼす飽和度の影響について検証を行った。その結果、 ΔG_r 依存性の関数形は、従来のシグモイド曲線とは異なり、3 段階のステップを有する非線形曲線に従うことが示された(図6)。このような関数形の違いは、CO₂ 地中貯留の地化学シミュレーションにおいて、初期の貯留岩鉱物の溶解に伴う貯留岩の孔隙率や浸透率変化のみならず、最終的な炭酸塩鉱物としての固定速度に対して重大な誤差を生じ得る。したがって、今後、より広範な飽和度条件下での溶解速度データも含めて、厳密に関数形を決定する必要がある。また、溶解速度の飽和度依存性に対して、温度や pH、その他の溶存化学種濃度等の因子が及ぼす影響についても検討していくことが重要である。一方で、今回の研究からは、鉱物表面の不均質性の扱いの難しさも浮き彫りになった。個々の結晶で欠陥密度が異なることに加えて、天然条件下の鉱物はフレッシュな表面を有していないことが一般的であるため、定常溶解過程に至るメカニズムの解明が今後の課題である。

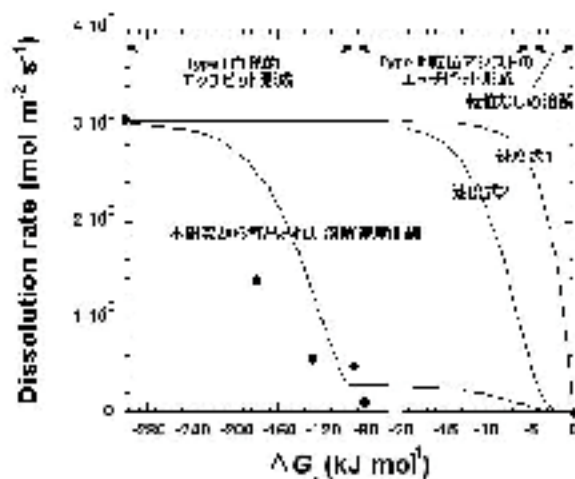


図6：灰長石の溶解速度および溶解メカニズムの ΔG_r 依存性

7) 超臨界 CO₂ に対するシール圧の測定

帯水層への CO₂ 地中貯留では、一般的に、泥岩やシルト岩のような低浸透性のキャップロックによる超臨界 CO₂ の地表への漏洩防止が想定

されている。これに関して、実際の岩相に応じたシール性能や CO₂ 注入時の上限圧力、さらには貯留ポテンシャルまでを評価するためには、超臨界 CO₂ に対するキャップロックのシール圧（毛細管圧）を検討する必要がある。しかしながら、シール圧の測定には長時間を有することとも関連して、これまで超臨界 CO₂ について岩石のシール圧を測定した事例は限定されており、理論的な解釈もほとんどなされていない。

このような状況に鑑み、本研究では、一般的な帯水層への CO₂ 地中貯留を想定した圧力、温度条件下において、粒径分布や充填方法に留意したスロート制御モデル岩石試料を用いて、超臨界 CO₂ に対するシール圧の測定を行った。このために、シリカ粒子から構成される焼結体試料を作製し、粒径を種々に変動させることにより、シール圧の粒径依存性を明らかにした（図 7）。また、石油のトラップの解析に適用されているシール圧の理論式を超臨界 CO₂ 系に適用し、モデル試料から得られた実測値と理論値の比較により、理論式の適用性の検討を行った。本研究の最終的な目的は、室内実験で得られた実測値と理論値の比較に基づいて、実岩石への適用が可能なシール圧予測手法の開発を行うことである。

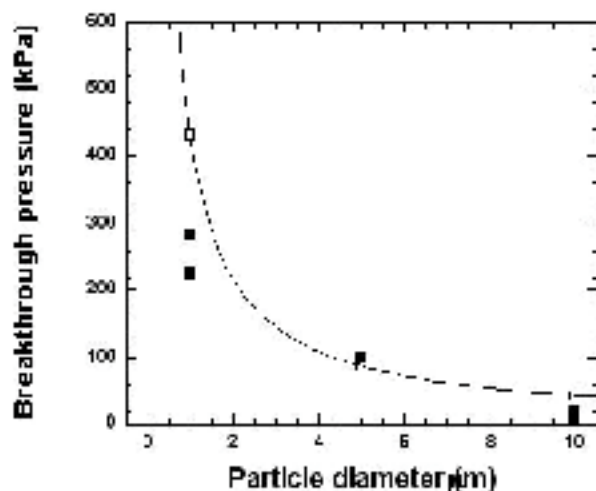


図 7：シール圧の粒径依存性（■：実測値，□および曲線：理論値）

8) CO₂ 帯水層貯留における鉱物固定の検討

CO₂ 地中貯留にかかる地化学的研究では、前年度までに、東京湾岸地域地下 1,000m に相当する地質・地化学条件をモデル化して行った地化学シミュレーションから、CO₂ 圧入後 1,000 年をこえると鉱物固定効果が顕著に現れることが分かった。一方で、固定を担う鉱物種の消長に著しいパラメータ依存性があることも課題として残った（奥山ほか，Green Report 2008）。特に、方解石 CaCO₃ とドーソン石 NaAl[CO₃](OH)₂ の相互の役割は、CO₂ 地中貯留の長期安定性を対

外的に説明するために、鉱物固定の最終像として明らかにすべき課題と考える。我々が実施した地化学シミュレーションでは、ドーソン石の最終的な分布は、超臨界 CO₂ の残留部とほぼ重なり、同じく Al が主成分の鉱物であるカオリナイトとは背反的であった（図 8）。

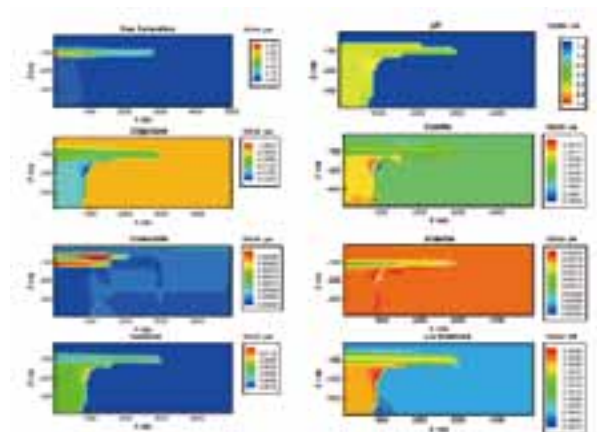


図 8：圧入停止後 10,000 年後の超臨界 CO₂、地層水 pH および各種鉱物の分布。赤色：相対的高濃度部、青色：同じく低濃度部

実験的再現に超長時間を要する地化学的現象に対しては、化学的に類似する天然現象を取り上げる「ナチュラル・アナログ研究」が有効である。本年度は、CO₂ 地中貯留での貯留層地化学変化に対応する可能性のあるナチュラル・アナログとして、ドーソン石形成作用を研究すべく、既存の公表文献データを整理した。ドーソン石は、地殻の主要構成元素のみからなる鉱物にもかかわらず、比較的産出がまれであり、形成条件などの比較・検討に耐えるデータが報告されているのは図 9 に示す 15 地域にとどまる。これら地域での研究報告に基づく、ドーソン石生成には、アフリカ、Oldvai 溪谷での産例を除き、CO₂（おそらく超臨界状態）の二次的流入が不可欠だったと考えられる。



図 9：これまでのドーソン石研究報告例と、形成にかかる状況の整理（個々の研究報告の引用を省略）

地圏環境システム研究グループの紹介

Introduction of the Geo-Environmental Systems Research Group

地圏環境システム研究グループ長：高倉伸一

Leader, Geo-Environmental Systems Research Group : Shinichi Takakura

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

1. グループの研究目標

地圏環境システム研究グループでは、環境に調和した地圏の開発・利用を図るため、岩盤応力測定や岩石コア実験による地下構造の評価技術、物理探査を利用した非破壊モニタリング技術、数値シミュレーションによる地下環境のモデリング技術などの基盤研究を進めている。また、CO₂地中貯留研究や放射性廃棄物地層処分研究などへの適用研究を行っている。当研究グループ員が長年にわたり研究を進めてきた各種技術は、浅部から深部に至る地圏環境の解明、地圏の流体や熱の変動予測、地熱等資源の継続的利用などに役立ってきた。今後ますます高度化・多様化する社会のニーズに的確に応えられるよう、技術ポテンシャルの維持・向上に努めている。さらに、これらの技術を地下資源の安定的確保や継続的利用あるいは地質災害や地質汚染の防止を図る研究などへも積極的に応用して、安全で安心できる社会の実現に貢献することを目指している。このため、他のグループ・ユニット間の連携による研究、外部研究機関や企業との共同研究を積極的に進めるとともに、研究成果を迅速に発信し、社会への技術の普及と振興に取り組む。

2. グループの概要

当研究グループは、CO₂地中貯留研究、地層処分安全研究、地熱等資源研究、地下利用技術研究を主たるミッションにかかげ、平成19年7月に新しく組織された。メンバーは、地球物理学、岩石力学、掘削工学、岩盤工学の専門家からなる。物理学の実験およびフィールドワークの手法を用いて、環境に調和した地下の有効利用、資源開発に必要な技術開発に取り組んでいる。

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

個々の研究テーマの管理し、研究の効率化を図っている。

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

1) グループ員

高倉 伸一（リーダー）

及川 寧己

唐澤 廣和

竹原 孝

相馬 宣和（CO₂地中貯留 RG より分担）

2) 予算

文部科学省試験研究「放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究」
運営費交付金「沿岸域海底 CO₂地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」
運営費交付金「地圏環境システムの研究」
日本鉱業協会研究委託費「坑内精密電気探査技術に関する研究」
共同研究費「ナトリウム型ベントナイト鉱床を形成する地質環境の解明に関する研究」等

3. 平成20年度までの研究進捗状況

以下では、主な研究について平成20年度までの進捗状況の一例を紹介する。

3.1. 放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究

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

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

a) 深部岩盤空洞周り緩み域における 3 次元応力計測

岩盤空洞周りの緩み領域から堅牢領域までの連続的な 3 次元応力評価の一部として、前年度に引き続き、深度約 300m の花こう岩質の岩盤中に開削された小トンネル（直径 2.5～3.5m 程度）壁面隅から採取長 20m の傾斜ボーリングによって得られた花こう岩のコア試料を用いて AE/DRA 法による応力計測を実施した。AE 法においては、繰返し载荷時に AE の発生率が増減を繰り返すような単純でない挙動が見られる場合が多く、一定の载荷応力範囲内において AE 累積発生曲線の幾何学的な変化(AE 発生率の変化)度を評価し、AE 発生状況と比較しながら変化の大きい箇所を候補点として 2 点選び出した。DRA は、屈曲点の特定にリファレンス試験を基に設定したしきい値を用いたが、屈曲点はあまり明瞭ではなく、AE 法と同様に応力値の大きく異なる複数の屈曲点が見られる試料も一部にあった。また、DRA では低応力側に出現する直線部分が短くて、応力が決定できない試験片が全体の三分の一程も見られた。

上述したように AE 法、DRA 共に複数の応力値候補が得られる場合があることから、各試験片の最終的な応力値を決定するために相互比較によるスクリーニングを実施し、AE 法による応力値と DRA による応力値が 3MPa 以内で最も近いものを選び出した。解析に用いたデータは、壁面側から深度 1 (0.05-0.9m)、深度 3 (2.1-2.9m)、深度 7 (9.75-10.7m)、深度 8 (18.68-19.85m) の 4 深度の試験片の各応力値である。2 次元解析は、適宜設定した互いに直交する 3 平面内 (L 面、AL90 面、AL0 面) の応力値の変化を比較検討した。3 平面のうちで最も多くの応力値データが得られた AL0 面の応力値データとそれに対するサインカーブフィッティング結果を図 1 に示す。3 次元解析の条件を満たすデータセットは深度 1 及び深度 7 のみであった。コア軸方向の水平面内投影を仮北として、ステレオネットに両データセットによる 3 次元応力場を表示したものを図 2 に示す。坑壁近傍の深度 1 データセットでは坑道に平行な方向のみが極端に低応力となるような応力場が得られた。一方で坑壁から 10m 程奥の深度 7 データセットでは坑壁に平行な方向が最大主応力方向と評価され、中間主応力方向は鉛直に近くその大きさは 8.1MPa とほぼ被り圧に相当する値となった。この応力場の違いの妥当性については今後もよく検討する必要があるが、坑壁

近傍と 10m 程奥の地点とでは大きく異なる応力場が得られた。

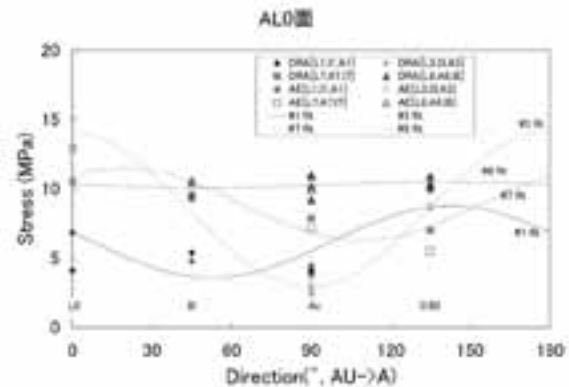


図 1. 2 次元解析例 (AL0 面)

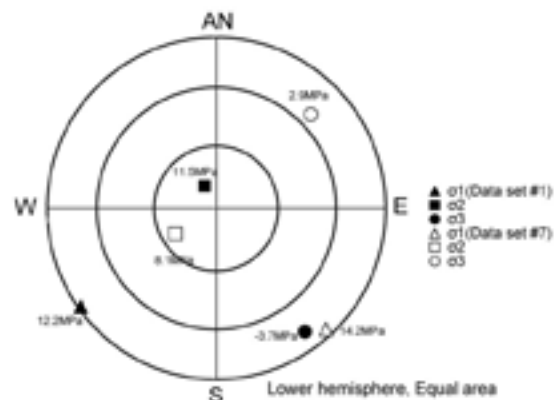


図 2. 深度 1 及び深度 7 の 3 次元応力場

b) 空洞周り緩み域における岩盤長期変形挙動に関する研究

三軸応力下で温度環境を模した状態での試験が可能で高応力負荷装置を製作し、高応力レベルでのクリープ試験が実施できる体制を整備した。常温・室乾状態の珪藻土を用いた応力レベル 95%でのクリープ試験を実施し、昨年行った実験の再現性の確認を行った (図 3)。また、含水飽和状態の珪藻土を用いた一軸圧縮強度試験を常温で実施した。2 種類の载荷速度で強度を調べた結果、载荷速度依存性があることがわかった。試験片のバラツキにより応力レベルの決定に難があるが、クリープ試験では破壊に至るまでの結果が得られなかった。荷重の载荷方法やひずみの計測結果より、精度の良い試験手法の検討が必要であることも分かった。また、高温域 (80℃) におけるひずみ計測の安定性の検討を行った。その結果、高温環境下でのひずみ計測の長期化 (1 ヶ月ほど) にともなう、変位計のドリフトが観測される場合があり、高温域におけるひずみ計測システムを再検討する必要があることがわかった。

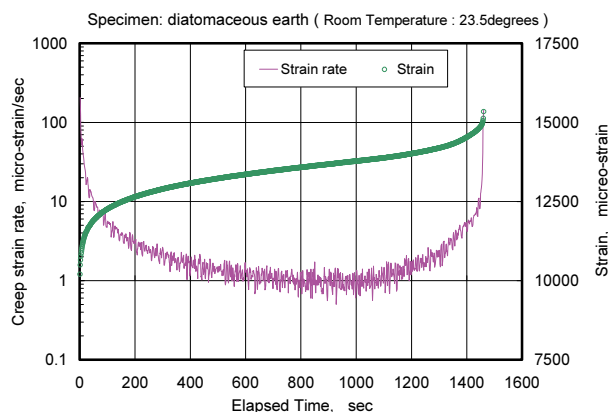


図 3. 応力レベル 95%での試験結果 (軸左: クリープひずみ速度, 軸右: クリープひずみ)

3.2. 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: CO₂ ガスを圧入した石炭の力学的特性

CO₂ 吸着に伴う石炭マトリックスの膨潤現象および N₂ ガス圧入による浸透率回復に着目し、それらの現象が石炭の力学特性に及ぼす影響を検討するために炭鉱から得られた石炭コアを用いた三軸圧縮試験を実施した。試験条件は想定深度 500m とし、周圧 10MPa, 孔隙圧 5MPa, 温度 35°Cで行った。原位置においては長期間の地圧の载荷により石炭内部の空隙が十分閉塞した状態になっていると考えられることから、試験においては所定の周圧下における試験片内部の空隙が十分閉塞した後に強度試験を行うこととした。その判断のために浸透率計測 (N₂ ガス使用) を経時的に行い、その値がほぼ一定値に収束した時点で試験片内部の空隙が十分閉口したものと見なした。孔隙媒体は、1.水、2.水→CO₂ (ガス)、3.水→CO₂ (ガス)→N₂ (ガス) と置換手法が異なる 3 種類の供試体を準備し実施した。孔隙媒体の置換の際、石炭への CO₂ 吸着・脱着による膨潤・収縮が生じていることが観察された (図 4)。破壊強度は、最終置換媒体が 2.CO₂ ガスの供試体が最も小さく、3.N₂ ガス、1.水の置換媒体供試体の順に大きくなることが確認された。

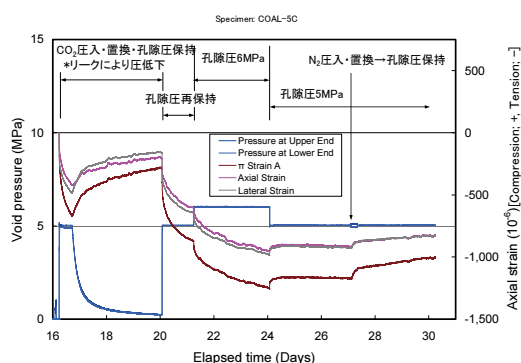


図 4. CO₂ 圧入・置換後さらに N₂ 圧入・置換後の試験片の変形の経時変化

3.3. 地圏環境システムの研究: 坑井掘削の高効率化

パーカッション (打撃) 掘削は現在普及しているロータリ (回転) 掘削に比べて掘削速度が極めて大きく、鉱山や土木分野では掘削能率の向上や掘削コストの低減に寄与している。しかし、高速現象を取り扱うパーカッション掘削では未解明の点も多く、現場における本掘削の実行やパーカッションドリルの設計などに欠かさない基礎データが極めて少ないのが現状である。

先年度までに岩石の掘削特性の解明に必要な打撃エネルギーの計測法について検討した結果、打撃エネルギーの計測が可能なシステムを構築することができた。しかし、この打撃エネルギーはビットから数 m 上方 (図 5 の S 点) で計測したため、継手などにおけるエネルギーの減衰を考慮することができなかった。そこで、ビット直上のロッドで打撃エネルギーを評価して、ビットに伝わる正確なエネルギーを求めることとした。ロッドでの打撃エネルギーの評価は Two-point Strain Measurement と呼ばれる方法により行った (図 5)。この方法では、ロッドの A 点と B 点に貼付したひずみゲージの信号解析により反射波を取り除いて E 点の打撃エネルギーを求める。

最初に 4 アクティブゲージ法を用いて A 点と B 点のひずみを測定し、E 点の打撃エネルギーを評価した。評価結果の一例を図 6 に示す。試行錯誤を重ねたものの、E 点の打撃エネルギーの評価に適する A 点と B 点の応力波形を得ることはできなかった。試行錯誤の一環として、ゲージ法を 4 アクティブから 2 アクティブに変えて A 点と B 点のひずみを計測してみた (図 7)。A, B および E 点 (0~220 μs) の応力波形はほぼ一致しており、E 点の打撃エネルギーを評価することができた。本結果から E 点の打撃エネルギーは S 点と比べて約 7%減衰することがわかった。

3.4. 坑内精密電気探査技術に関する研究

地下の比抵抗分布を把握する電気探査は、金属鉱床探査における最も有効な物理探査法の一つであり、多くのフィールド調査で利用されている。しかし、電気探査の分解能には限界があり、特に探査深度が大きくなるほどその分解能は指数関数的に低下する。したがって、地下深部を高精度に調査するためには、地下に電極を直接設置することが有効な手段となる。その方法の一つとして坑道 (トンネル) を利用することがあげられる。すでにある坑道を利用して近傍にある未発見の資源を探査するのは経済的であり、坑壁で実施する精密な電気探査は坑道の維持管理の方法にもなりうる。このようなことから、本研究は坑内に適用する精密電気探査技術の開発を目的に実施している。

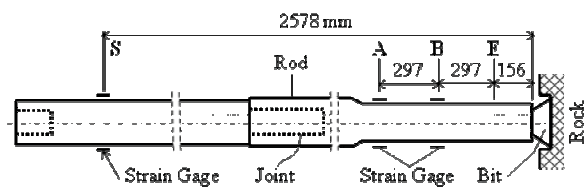


図 5. 打撃エネルギーの計測に用いた掘削システム

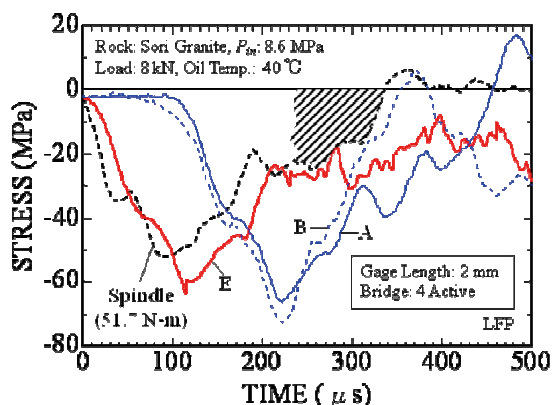


図 6. A, B, E および S 点の時間と応力 (4 アクティブ)

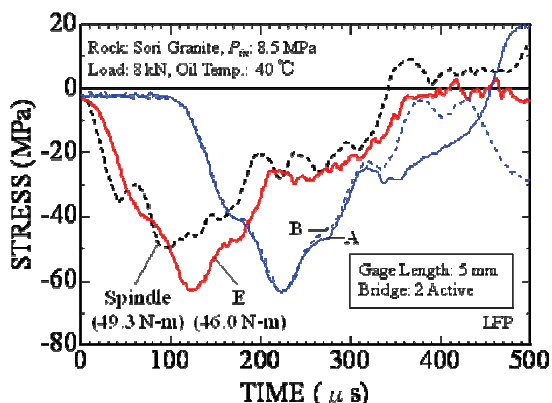


図 7. A, B, E および S 点の時間と応力 (2 アクティブ)

本研究では、坑道壁の調査に使用する電極やその設置方法の検討、坑内電気探査のフィールド実験、データ解析法の検討などを実施している。以下には、愛知県北設楽郡東栄町振草地区にあるセリサイト鉱山の坑道において実施した高密度比抵抗法電気探査の測定実験について紹介する。

この実験では、バッテリー駆動のできる多チャンネル電気探査装置 AES-6L を使用した。この装置は簡便な高密度比抵抗法電気探査を実現させるために、産業技術総合研究所が概念設計し、協同電気(株)が製作した装置である。本装置の仕様を表 1 に示す。バッテリー駆動が可能で、小型・軽量・防水であるので、機動性が高いという特長を有する。また、最大電流が 200mA、最大出力電圧が 300V であるので、数 10m 程度の

探査深度が得られる。さらに、データの取得から記録までをパソコンで制御できるので、電極組み合わせや測定時間を任意に設定することが可能である。

今回の実験では、比抵抗構造だけを求めることを目的としたので、電極に鉄棒を用いた。坑壁（岩盤）にドリルで穿孔し、接地抵抗を下げるために食塩と水を混ぜたベントナイトを電極に付け、それを穿孔した穴に差し込んだ。場所によって差はあるが、接地抵抗を 1~2kΩ 程度にすることができたので、50~100mA の電流を送信することができた。

測定は図 8 に示す 3 箇所で行った。測定場所の近くでは採掘や坑道掘進が行われていたが、夜間に無人連続測定を行うことにより、S/N 比の高いデータを効率的に取得することができた。

これらのデータに 2 次元解析を適用して、測線に沿った精密な比抵抗断面を求めた。その結果を図 8 に示す。粘土化を受けた部分が低比抵抗体として解析されるなど、熱水変質を受けた領域と強固な岩盤の部分が比抵抗法によって識別可能であることが確認された。

表 1. 多チャンネル電気探査装置の仕様

送信電流	: 200mA までの任意の定電流
最大出力電圧	: 300V
電流波形	: 交替直流 (DC~2Hz 程度)
測定電位	: ±20V (200mV, 2V, 20V ゲイン)
受信分解能	: 10 μV (20 ビット積分型 A/D)
電源	: DC12V
切替リレー	: 電流電極 標準 64 対 電位電極 標準 64 対
制御・記録	: Windows パソコン (シリアル接続)
外形・重量	: 320×510×165mm・14.2kg
その他	: 簡易防水、キャリー付き

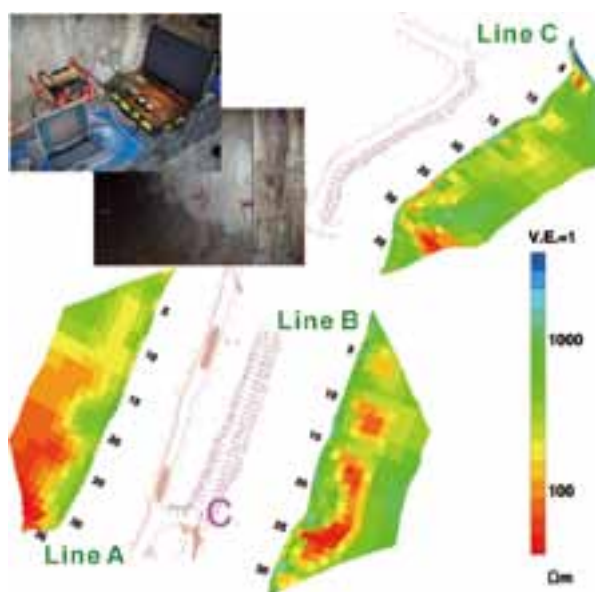


図 8. 坑内精密電気探査の測定例

物理探査研究グループの紹介 -2009 年度- Exploration Geophysics Research Group, FY2009 Update

物理探査研究グループ長：内田利弘

Leader, Exploration Geophysics Research Group : Toshihiro Uchida

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

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

1. グループの研究目的

放射性廃棄物地層処分、土壌・地下水汚染、CO₂ 地中貯留、土木分野等の地圏環境分野における地盤・岩盤の評価やモニタリング、及び、地熱、鉱物資源等の資源分野における地質構造調査に不可欠な物理探査技術の高精度化を目指し、各種探査手法の技術開発と適用研究を行う。平成 21 年度においては、放射性廃棄物地層処分場選定における地質構造評価、土壌汚染・地下水環境・土木分野等における浅部地質環境評価、および、海底資源探査や CO₂ 地中貯留等の海域における物理探査の適用を中心に研究を行うとともに、技術シーズ開拓のための基盤的研究を進める。

2. グループの概要

1) グループ員

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

2) 平成 21 年度の主な研究予算

資エネ庁委託費「沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発」
JNES 委託費「震源断層評価に係る地質構造調査の高度化に関する研究」
文部科学省委託費「海底下比抵抗構造の高精度推定のための海底接地型電磁探査法の開発」
運営費交付金「沿岸域地質・活断層調査」
民間委託費「コスタリカ国地熱地域電磁探査データの 3 次元比抵抗構造解析」

3) 研究の概要

a) 地層処分場の地質構造評価

放射性廃棄物地層処分場の岩盤評価のため、沿岸域の断層構造や塩淡境界把握のための物理探査技術として、浅海域を対象とする電磁探査法の機器開発と 2 次元・3 次元データ解析手法の研究、北海道

幌延地域における物理探査の適用調査、地層の物性を求めるデータ解析法の研究等を行う。

b) 土壌汚染評価

油汚染の顕著なサイトにおいて昨年度までに取得したデータの解析、試料の分析を継続し、得られた比抵抗構造、電磁波反射面分布、土壌サンプル物性計測値、ダイレクトプッシュ原位置計測値等を総合的に解釈し、地盤構造、油汚染分布等との相関を調べ、汚染評価のための基礎情報とする。

c) 浅部地質環境評価

地下水環境、土木建設等における浅部地質環境評価のため、河川堤防における物理探査データの解析、マイクロバブル注入による地盤改良実験および発破液状化実験における比抵抗モニタリングの適用実験、熱伝導率を用いた地盤の探査・モニタリング手法の検討等を行う。

d) 海域における物理探査適用

海底熱水鉱床開発に向けた探査技術開発、CO₂ 地中貯留等における地質構造把握やモニタリング等、海域における物理探査について基礎的な検討を行う。また、沿岸域の物理探査データ空白域を補い、海陸にわたる地質・断層構造を把握する探査法について検討し、新潟地域の沿岸域における海陸接合の物理探査法調査を実施する。

e) 物理探査技術の基盤的研究

地圏における資源開発及び地質環境評価のため、物理探査による地下構造の高精度イメージングのための技術開発を行う。今年度は、震源断層評価のための物理探査適用法の基礎研究、豪州における地殻構造調査のデータ解析を実施する。

3. 平成 21 年度の主な進捗状況

1) 地層処分場の地質構造評価

a) 沿岸域を対象とする物理探査技術開発

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

研究を行う。調査位置を図 1 に示す。平成 19 年度に陸域における MT 法・TEM 法調査を行い、広域の 2 次元比抵抗構造や海岸部掘削調査地点(図 1 の星印)周辺の 3 次元比抵抗構造を求めた。今年度は、海底電磁探査予備実験、陸域における反射法調査、MT 法補足調査を実施する。開発中の浅海用海底電磁探査測定装置の外観を図 2 に示す。

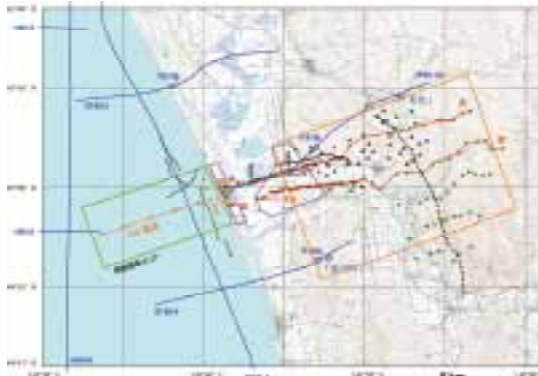


図 1：幌延沿岸域における物理探査調査位置。平成 21 年度には、海域における電磁探査予備実験（緑四角の領域で数箇所）、陸域における反射法調査（灰色線）、MT 法調査（紫多角形）を実施する。



図 2：海底電磁探査装置の動作試験の様子

b) 物理探査データ解釈法の研究

物理探査や物理検層データから、地層の地質環境特性（間隙率、塩分濃度、力学的物性等）を定量的に推定する手法を開発する。岩石を大小二種類の球状粒子（砂・粘土粒子）で表現する二粒子モデル理論を適用し、弾性波速度と電気伝導度の解釈を行った。幌延地域において掘削された坑井の検層データを用い、二粒子モデルにより粘土含有率と間隙率の関係を考慮した上で、間隙率と粘土含有率および弾性定数の関係、および、間隙率と粘土含有率および電気伝導度の関係を求めた（図 3）。

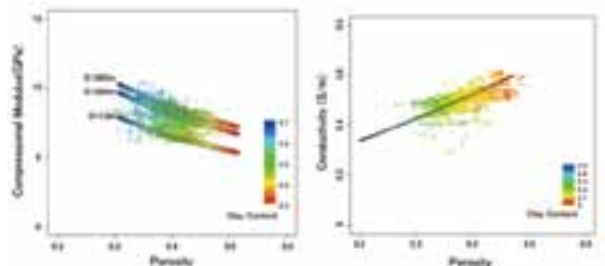


図 3：二粒子モデルによる理論曲線（線）と検層結果（点）の比較。粘土含有率で色付けした。（左）圧縮弾性率と間隙率、（右）電気伝導度と間隙率の関係。

2) 土壤汚染評価

地表からの物理探査や原位置計測によって、電気物性等の分布から油分汚染土壌を評価する手法について検討するため、油分汚染モデルフィールドにおいて、3 次元電気探査、電磁マッピング法、地中レーダ等による調査を実施した。また、ダイレクトプッシュ型貫入プローブを用いた深さ数 m までの比抵抗計測、土壌・地下水サンプリング等を実施した。取得したサンプルについては、電気物性計測、X 線 CT 計測、化学成分分析等を行った。それらの結果を総合して、モデルフィールドの 3 次元比抵抗構造、レーダ反射断面、原位置比抵抗計測値等と、地盤構造（砂、粘土等）、油分汚染分布とを比較し、油分汚染の効果的な調査手法を検討した。

a) ダイレクトプッシュ型貫入プローブ計測

各種センサーの附属したプローブを地盤に静的貫入あるいは打撃貫入しながら、地盤の物性を計測する。本研究では、地盤の電気伝導度（EC）を計測するプローブ、および、油分の蛍光反応を利用し、直接油汚染を検知可能な蛍光反応型検出（FFD）プローブを用いた。計測例を図 4 に示す。A-3 地点および A-5 地点では、EC と FFD の変化が良く対応している。一方で、A-12 地点では、FFD と EC との相関は明瞭ではない。油汚染土壌では、油系炭化水素の経年的な微生物的分解によって土壌間隙水中の TDS（総溶解固形物）が増加し、EC も増加すると言われている。A-3、A-5 地点の EC と FFD の相関はそのような過程が進行した結果と思われる。

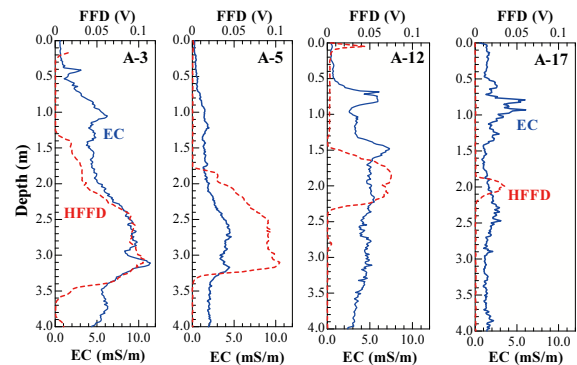


図 4：4 地点における電気伝導度と FFD 値の深度分布（場所は図 5 参照）。

b) 電磁マッピング

電磁マッピングデータの例として、周波数 29kHz の離相成分データを平面図で示す（図 5）。概略的にはタンク跡地周辺の地盤はその周りよりも比抵抗が高く、土壌サンプルの TPH 濃度が高い地点（赤△）は、その中であつてもやや比抵抗が低い領域に分布しているように見える。

c) 地中レーダ探査

3 次元地中レーダ探査によって得られたレーダ反射強度の深度スライスを図 6 に、断面図を図 7 に示す。深度 1.07m では、貯槽タンク跡に対応する円

形の反射強度異常が見える。深度 1.92m では、タンク跡の内部に強い反射面が見える。断面図には、地下水面に相当すると考えられる深さ約 1m と、深さ約 2m に連続的な反射面が見える。後者については、簡易ボーリングで油分汚染の上面が確認された深度に対応している。

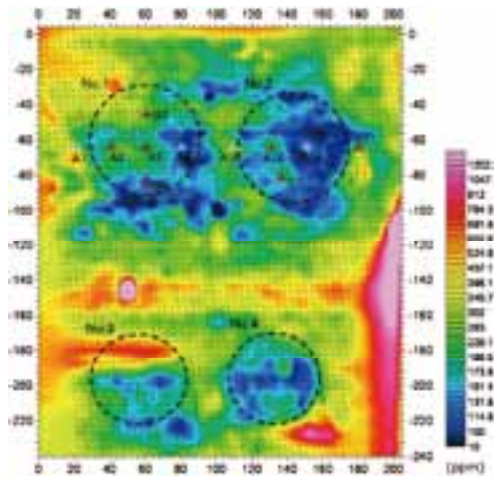


図 5: 電磁マッピング取得データ (29kHz の離相成分) 平面図。値が小さい (青色系) ほど高比抵抗である。丸い破線は貯槽タンク跡、三角はダイレクトプッシュ計測位置で、赤三角の地点は TPH 濃度が 1000mg/kg 以上。

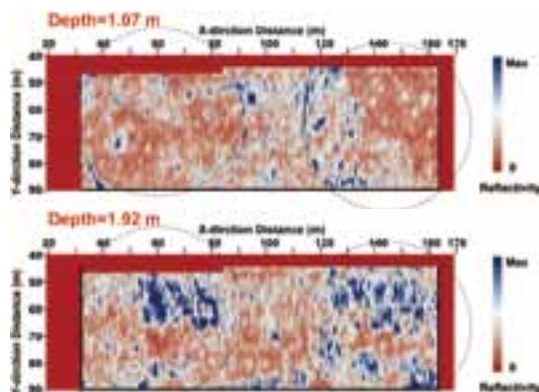


図 6: 3 次元処理による地中レーダ反射強度深度図。探索範囲は、図 5 の上側のタンク跡地 2 基付近に相当。



図 7: 3 次元処理による地中レーダ反射強度断面図

d) X 線 CT 計測

採取した土壌コアサンプルを用い X 線 CT 計測を実施した。使用した X 線 CT 装置は、医療用 CT とマイクロフォーカス CT である。前者は X 線量が大きく、コアを開封せずにそのまま 3 次元イメージングが行える。後者は空間分解能が約 2 桁優るが、X 線量が小さいので、コアを整形し 1cm³ 程度の小さい容器に収めてから計測を行う必要がある。図 8 は、名

目深度 0~1m (実長 72cm) のコアをそのまま医療用 CT で計測し、3 次元データを長手方向に断面をとった画像である。カメラ画像と比較すると、名目深度 0~50cm にはレキ (赤い画素) が分布することがわかる。また、地表付近の不飽和帯から深度 1m 付近の飽和帯にむけての体積含水率の上昇を、土壌のマトリックス部分の CT 数の増加 (図では緑から黄色の変化) として検出できた。なお、この深度には油分汚染は見られない。

マイクロフォーカス CT 画像の例を図 9 に示す。空気の画素 (青) と間隙水の画素 (緑) は明瞭に識別でき、CT 画像から空隙率を求めることができる。モデルフィールドは全般に砂質層で構成されるが、このサンプルは不飽和帯からのものであり、深部の飽和帯のサンプルの CT 画像と比較すると、飽和帯の体積含水率は、不飽和帯のそれより約 30% 高いことがわかった。

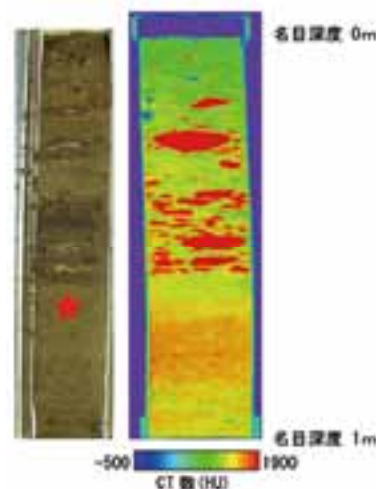


図 8: 地表から名目深度 1m までの区間の土壌コア (円筒形のプラスチック製コアケースの内径は 42mm) のデジタルカメラ写真 (左) と X 線 CT 画像 (画素値は Hounsfield Unit, HU)。

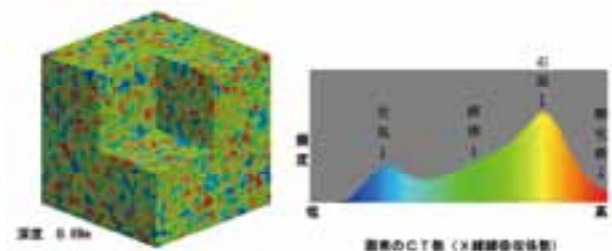


図 9: 図 8 の星印の場所から整形した試料のマイクロフォーカス X 線 CT 画像。一辺 5.1mm の立方体で、画素の大きさは約 10 ミクロン。色は CT 数の大小を表し、右図は CT 数のヒストグラム。

3) 浅部地質環境評価

a) 地盤液状化の比抵抗モニタリング

地盤の液状化リスク評価に資するため、液状化現象を物理的にモニタリングする技術について研究開発を行っている。液状化は数分から数十分と比較的短時間に生じる現象であり、連続かつ高速なモニタリングが行える手法が不可欠である。近年、受信チャンネルを複数有する電気探査装置や複数の電流電極から同時に送信するマルチ送信型探査装置などが開発され、高速なデータ取得が可能となっている。

本研究では、北海道の石狩湾新港で実施された大規模な発破液状化実験において、その一部のエリアを対象に2次元電気探査による繰り返し比抵抗モニタリングを実施した。実験場は港湾の埋立地であり、砂質土で構成される。深度 4m 以上は飽和ゾーンであり、低比抵抗を示す。発破後、6 分から 16 時間の間に 8 回の計測を行った。発破前の比抵抗からの変化量の分布を図 10 に示す。発破直後から、深度 4m を中心とする領域で比抵抗が減少し、発破後 16 分までその傾向が続いた。これは、液状化によって下部から水が上昇し、水飽和度が大きくなったことによると思われる。その後、深度 4m 以深では比抵抗が増加し、3 時間後には、比抵抗はほとんど変化しなくなった。この比抵抗増加は、地盤が間隙水を排出して圧縮され、間隙率が小さくなったことによると考えられる。

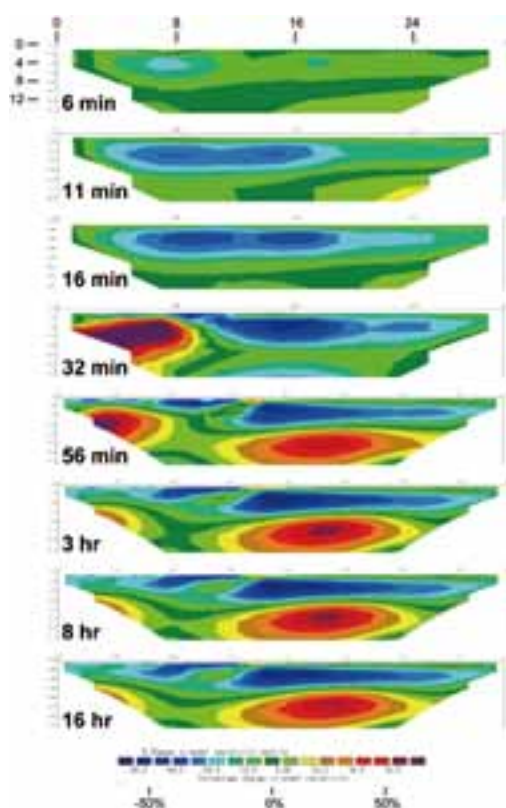


図 10：発破後の比抵抗断面。発破前の比抵抗断面からの変化量(%)で表示。左の数字は発破後の経過時間。

4) 海域における物理探査適用

a) 海底地形を考慮した汎用 3 次元電気探査順解析
海底熱水鉱床等の探査を念頭に、海底下浅部の比抵抗探査を目的とした海底電気探査法について、3 次元解析手法の研究を実施した。特に、浅海と深海の両方に対応する汎用性と、地下構造だけでなく海底地形についても 3 次元性を考慮できるように、有限要素法を用いた順解析計算プログラムを作成し、精度検証を行った。海底地形を含むモデリングによる電位分布計算例を図 11 に示す。これらを用い、効率的な海底電気探査法の適用方法について検討を進めている。

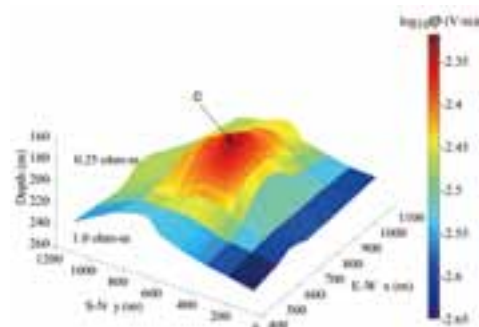


図 11：海底電流電極 C による電位分布計算例

5) 物理探査技術の基盤的研究

a) 電気・電磁探査 3 次元数値解析における連立方程式求解の高速・効率化

電磁探査法の 3 次元数値解析手法は、その計算精度、コストの問題から依然として研究途上にあり、実用的なデータ解析のためには、さらに計算の高精度化、高速化が求められている。本研究では、計算コストに大きな影響を与える線形連立方程式の求解について、計算工学分野の成果である汎用連立方程式求解ライブラリ Lis の電気・電磁探査法数値解析分野へ適用とその効果を検討した。MT 法 3 次元モデリングに用いた差分法構造モデルを図 12 に、また、各種ソルバを用いた場合の収束状況の比較を図 13 に示す。

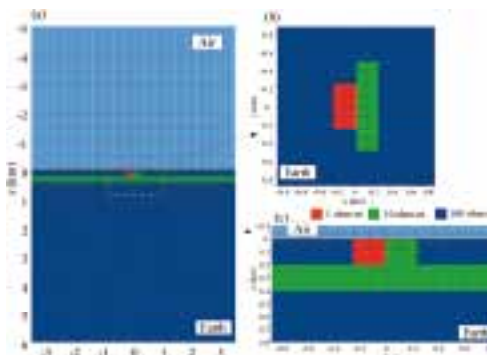


図 12：差分法による MT 法モデリングの離散化メッシュと比抵抗構造モデル

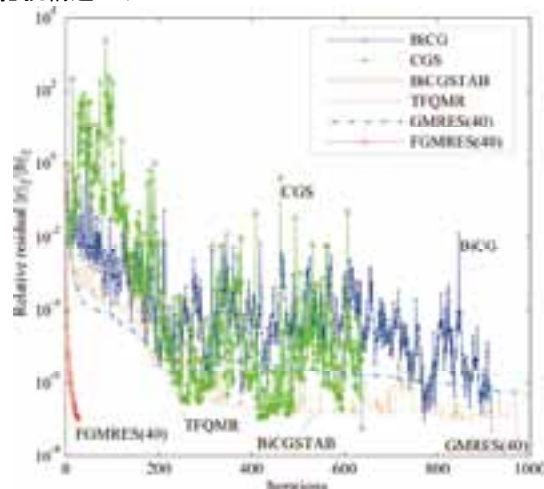


図 13：ILU(0) 前処理を用いた場合の各ソルバの求解反復状況

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

地圏化学研究グループ長：佐脇貴幸

Leader, Resource Geochemistry Research Group : Takayuki Sawaki

Phone: 029-861-3908, e-mail: res_geo_x@m.aist.go.jp

1. グループの研究体制・研究方針

当グループは、地球化学、石油地質学、岩石・鉱物学等を専門とする研究者で構成されている。

この体制により、地圏内の物質の分布・挙動の解明を行っている。具体的には、燃料資源（天然ガス、石油等）、非金属鉱物資源（骨材、粘土等）及びこれらに関連する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、鉱床の成因解明、開発、環境保全、さらには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、技術開発等）のみならず、産総研外部からの要請への対応、精度の高い情報の発信、研究成果の普及等を推進することを基本理念としている。

2. グループの研究資源

1) グループ員

佐脇 貴幸（グループ長）

猪狩俊一郎

金子 信行

鈴木 正哉（2009年4月1日から）

高木 哲一（2009年3月31日まで）

前川 竜男

須藤 定久（客員研究員）

鈴木祐一郎（2009年10月1日から燃料資源地質研究グループ長）

2) 予算

○運営費交付金

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

○委託費

- ・有機地化学的手法を用いたモニタリング技術に関する研究

3) 主な研究設備

- ・ガスハイドレート合成実験装置
- ・ガスクロマトグラフ
- ・ガスクロマトグラフ燃焼同位体質量分析計

- ・イオンクロマトグラフ
- ・ビトリナイト反射率測定装置（石炭顕微鏡）
- ・流体包有物温度測定装置
- ・流体包有物ガス分析装置
- ・ハスクレイ合成装置

3. 平成21年度の研究計画と平成20年度～21年度前期までの研究進捗状況

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

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

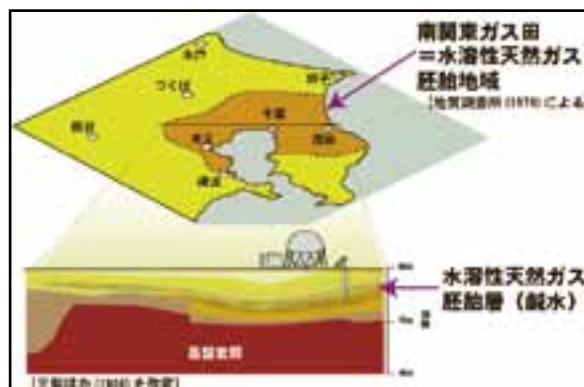


図1 南関東ガス田の概念図

本研究は、平成20年度から3年計画で開始された。初年度には主として文献調査を行い、南関東ガス田分布域以外にも天然ガス（メタン）がさまざまな層準に存在していることがわかった。また、関係機関への聞き取り調査に基づき、関東地方における天然ガスの存在形態、分布等に関して情報を整理しているところである。これと並行して、ガスを付随する温泉井あるいはガス井をピックアップし、実坑井での水・天然ガス採取を行い、天

然ガスや地層水についての化学分析、酸素・炭素・水素の同位体分析を行っている。現在、その分析結果に基づき、ガスの起源・成因等を解析中である。

2) 燃料資源に関わる地化学的成因研究、資源評価、および知的基盤整備

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

この研究項目にかかわる主たる研究成果としては、まず、秋田・新潟・静岡・宮崎の水溶性天然ガスの炭化水素組成の解析を行った結果、ヒドロキシラジカルによる分解や微生物による分解が炭化水素組成に大きく影響していることを明らかにした。

次に、石炭起源天然ガス、コールベッドメタン(CBM)の起源を明らかにすること、および石炭のガス吸着能力と炭質の関係を実験等で明らかにすることを目標とし、多孔質物質へのガス吸着能測定を行っている。今年度は、水存在下でのガス吸着特性を検討するための実験に着手した。また、液相へのガス溶解度の測定のための実験手法を確立し、水または塩水へのメタン溶解度を測定した。

さらに、ヨウ素 129 年代測定法の問題点について検討し、年代値が地質学的データと整合的でないことから、初生値が地質時代とともに増加しているために、年代値が過大に評価されている可能性があることを指摘した。

3) CO₂挙動の地化学的モニタリング技術の開発

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

地層中に注入された CO₂の挙動モニタリングの基礎データとするために、火力発電所、工場等の排出ガスを利用し、現在生産されている CO₂について、排出源ごとの炭素同位体比の特徴を把握した(図2)。その結果、石炭火力起源と石油火力起源の CO₂はほぼ同じ-25‰程度の値を示した。石炭を原料とする製鉄起源のガスを使用する高炉副生ガスも、ほぼ同じである。これに対し、天然ガス火力起源の CO₂については-40‰程度であり、これまで報告されている熱分解起源の天然ガスのデータ(-45‰~-35‰)と一致する。また、アンモニア合成プラントや石油精製プラントでも、同様の値を示している。天然 CO₂、石灰岩からの人造 CO₂は重い炭素同位体比を示す。以上のように、各プラントで使用する原材料により、排出される CO₂の炭素同位体比が左右されていること明確にした。

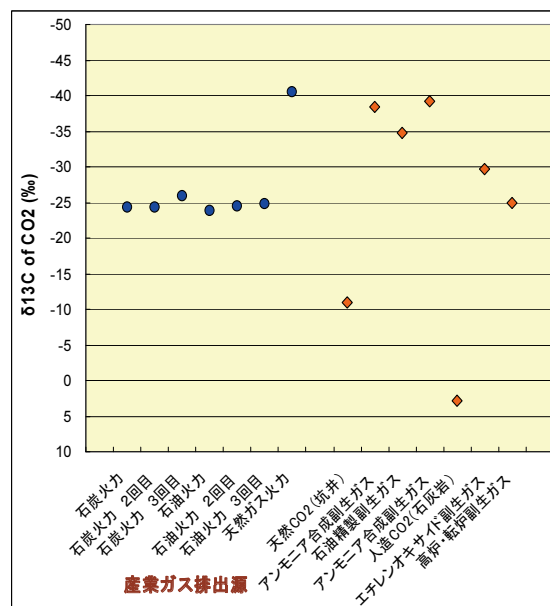


図2 排出源別 CO₂の¹³C炭素同位対比

4) 非金属鉱物資源に関わる地化学・地質学・岩石学的研究

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

この中では、茨城県内の採石場、砂利採取場を予察的に調査し、現在企業が求めている技術・資源評価等について聴取・検討した。これに基づき、付加体地域における砕石の効率化、第四系を対象とした砂利の採取・資源探査についての地質学的観点から支援できるような研究内容と研究方針を検討した。

平成20年度にプレスリリースしたハスクレイについては、気体(水蒸気、二酸化炭素等)の吸脱着に優れている無機多孔質材であることが注目され、結露防止、デシカント空調、二酸化炭素回収等の目的に利用されることが期待されている。現在、その大量合成法の研究開発とともにその用途・市場の拡大化に資する研究開発を進めているところである。

5) 地圏化学の基礎的研究

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

天然のメタンの起源推定の手段の一つとして、メタン/非メタン炭化水素比がよく使われている。しかし、微量の軽質非メタン炭化水素をガスクロマトグラフで測定する際、メタンが妨害成分とな

る場合が多い。この点については、既に、全成分からメタンを除去し非メタン炭化水素を濃縮・測定する改良法を開発しているが、注入する量が多い場合には非メタン炭化水素が一部濃縮されないことが明らかになってきた。これを踏まえて、測定精度を上げるために測定装置の改良を行った。石英砂を充填したプレカラムにより試料注入時のショックをなくすことと、濃縮カラムに石英砂を充填することにより、メタン中の非メタン炭化水素の回収率を上げることができた（図3）。

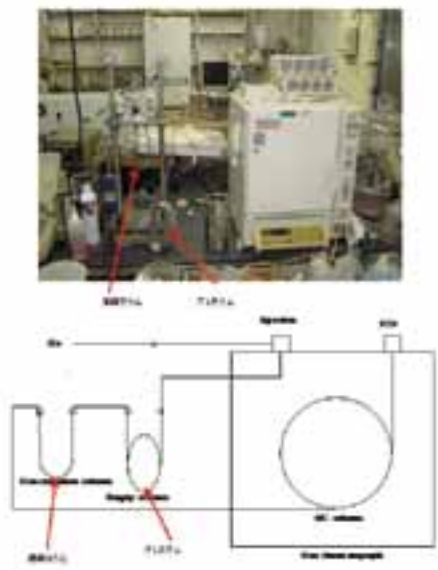


図3 改良した非メタン炭化水素測定装置

また、都市化が進むつくば市周辺の、空気中軽質非メタン炭化水素の測定を継続的に行っている。今年度は、試料採取条件についても検討を行った。その結果、曇天の日に、著しく炭化水素濃度が高くなる例が観察された。原因の一つとして、紫外線が弱いことが考えられる。今後は晴天日にのみ、試料採取を行っていく予定である。

4. 2008年度後半～2009年度前半の成果（誌上発表、口頭発表；波線部がグループ員）

【誌上発表（論文、著書等）】

- 有田正史・須藤定久 (2009) 砂と砂浜の地域誌—秋田県本荘から男鹿半島へ—。地質ニュース, no. 660, 6-15.
- 有田正史・須藤定久・藤橋葉子 (2008) 北海道の浜と砂 (2) 釧路から根室へ—台地の海岸を訪ねる。地質ニュース, no. 651, 22-34.
- 有田正史・須藤定久・藤橋葉子 (2008) 北海道の浜と砂 (4) 北部北海道の日本海岸を訪ねる。地質ニュース, no. 651, 47-57.
- 藤橋葉子・有田正史・須藤定久 (2008) 北海道の浜と砂 (3) 流水の海・オホーツクの沿岸を歩く。

地質ニュース, no. 651, 35-46.

金子信行 (2009) 秋田県の石油・天然ガス資源。地質ニュース, no. 658, 27-30.

Maekawa, T. (2008) Equilibrium conditions of propane hydrates in aqueous solutions of alcohols, glycols, and glycerol. *Journal of Chemical and Engineering Data*, **53**, 2838-2843.

奥山康子・佐々木宗建・村岡洋文・金子信行・徂徠正夫 (2008) CO₂ 帯水層貯留での「地層水」の役割とわが国でのCO₂ 地化学トラッピングへの適用性。地学雑誌, **117**, 768-781.

尾山洋一・鈴木正哉・上岡 晃・金井 豊 (2009) 原子間力顕微鏡と透過型電子顕微鏡を用いた天然水中のコロイド分析—山形・新潟県境金丸地区の例—。地球化学, **43**, 27-34.

佐々木宗建・佐脇貴幸・笹田政克 (2009) 日本のさまざまな鉱床に産する流体包有物の産状—文献資料に基づく取りまとめ—。地質調査総合センター研究資料集, No. 496, 15p.

佐脇貴幸・金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・徳橋秀一・中嶋 健・棚橋 学・坂田 将・森田澄人 (2009) 水溶性天然ガス資源（南関東ガス田）の研究—温泉開発、深層熱水利用等の指針策定への貢献（アウトカム）—。温泉科学, **58**, 302-309.

須藤定久 (2008) 地下資源。日本地質誌「関東地方」, 朝倉書店, 463-471.

須藤定久 (2008) 砂と砂浜の地域誌 (18) 茨城県中部の浜と砂—変貌する浜を見る—。地質ニュース, no. 649, 52-65.

須藤定久 (2008) 古いフィールド・ノートから (2) 伊那カオリン—信州ローム層の粘土化を測る—。地質ニュース, no. 650, 36-48.

須藤定久 (2009) 砂を考え直す (2) —日本の細骨材資源・需給の現状と将来—。骨材資源, **40**, 185-194

須藤定久 (2009) 北部フォッサ・マグナのろう石鉱床 (1) 長野県梵天山ろう石鉱床—ろう感のないろう石産出の意味—。地質ニュース, no. 659, 32-44.

須藤定久 (2009) 北部フォッサ・マグナのろう石鉱床 (2) 長野県信陽鉱山のろう石鉱床—出現したろう石鉱床—。地質ニュース, no. 660, 16-31.

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

須藤定久 (2009) 日本の骨材—地質学的産状と需給の現状と将来。平成20年度版・砕石ビジョン,

(社) 日本砕石協会, 59-62.

須藤定久・有田正史 (2009) 砂と砂浜の地域誌ー庄内・鳥海の砂と砂浜. 地質ニュース, no. 659, 21-31.

須藤定久・有田正史・藤橋葉子 (2008) 北海道の浜と砂 (1) 日高山地からの砂ー日高から十勝・釧路へ. 地質ニュース, no. 651, 8-21.

須藤定久・有田正史・藤橋葉子 (2008) 北海道の浜と砂 (5) 石狩湾・積丹半島・噴火湾の砂. 地質ニュース, no. 651, 58-68.

鈴木正哉 (2009) 天然ナノ物質の合成とそれらを用いたエネルギー有効利用への応用. 岩石鉱物科学, 38, 20-25.

鈴木正哉 (2009) 天然鉱物のナノ構造の再現と利用. まてりあ, 48, 170-173.

鈴木正哉 (2009) 粘土鉱物の性質(アロフェン・イモゴライト). 粘土ハンドブック[第 3 版], 技報堂出版, 88-92.

鈴木正哉 (2009) 粘土鉱物の合成と安定関係(アロフェン・イモゴライト). 粘土ハンドブック[第 3 版], 技報堂出版, 207-209.

Suzuki, M., Nakanishi, R., Inukai, K., Maeda, M., Hiradate, S. and Tsukimura, K. (2009) A new amorphous aluminum-silicate: High performance adsorbent for water vapor and carbon dioxide. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 34, 367-370.

【口頭発表】

猪狩俊一郎 (2009) 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. 有機地球化学シンポジウム, 2009/8/5.

金子信行 (2009) 前弧域での微生物起源メタンの濃集に関する地質学的・地球化学的制約. 石油技術協会平成 21 年度春季講演会, 2009/6/4.

金子信行・佐脇貴幸・棚橋 学 (2008) 関東平野下に賦存する可燃性天然ガスについて. 日本地質学会第 115 年大会, 2008/9/21.

前田雅喜・犬飼恵一・鈴木正哉 (2009) 実用化が期待される新規吸着材ーハスクレイー. 中部センター研究発表会, 2009/6/23.

前川竜男 (2009) アルコール水溶液中のガスハイドレート相平衡条件の測定と熱力学的検討. 日本化学会第 89 春季大会, 2009/3/28.

中西亮介・鈴木正哉・犬飼恵一・前田雅喜・田尻耕治 (2009) アミン修飾を試みたアルミニウムケイ酸塩に対する二酸化炭素吸脱着について. 第 7 回アロフェン・イモゴライト研究会,

2009/8/3.

坂田 将・棚橋 学・佐脇貴幸・関 陽児・柴崎洋志 (2009) ピストン・シリンダー破碎ーガスクロマトグラフィによる蛇紋岩中のメタンと C2 炭化水素の検出. 2009 年度石油技術協会春期講演会, 2009/6/4.

佐脇貴幸 (2008) 地質地盤情報の利用促進ー地質地盤情報の集積から有益な知の創出へ-. 産総研オープンラボ技術講演会, 2008/10/20.

佐脇貴幸・金子信行 (2009) 「南関東ガス田研究」についての地質地盤情報の重要性. 地質地盤情報協議会意見交換会, 2009/3/4.

佐脇貴幸・金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・徳橋秀一・中嶋 健・棚橋 学・坂田 将・森田澄人 (2008) 水溶性天然ガス資源(南関東ガス田)の研究ー温泉掘削, 深層熱水利用等の指針策定への貢献(アウトカム)ー. 日本温泉科学会第 61 回大会, 2008/9/26.

須藤定久 (2008) 細骨材需給のゆくえー日本の細骨材需給の経緯と現状そして今後の展開. 第 35 回全国砕石技術大会, 2008/10/1.

鈴木正哉 (2009) シリケートナノチューブイモゴライト及びハスクレイの開発と応用研究. 第 5 回クレースト連絡会, 2009/4/22.

鈴木正哉・月村勝宏 (2009) 非晶質物質と低結晶性粘土複合体の生成過程. 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009/5/16.

鈴木正哉・中西亮介・犬飼恵一・前田雅喜・加藤且也・月村勝宏 (2009) アルミニウムケイ酸塩からなる高性能吸着材(ハスクレイ)の性質と応用. 第 1 回ナノ・バイオメディカル学会, 2009/7/18.

鈴木正哉・中西亮介・小塚奈津子・鈴木智恵子・犬飼恵一・前田雅喜・月村勝宏 (2009) HAS と低結晶性粘土複合体(ハスクレイ)の形成過程における特性変化. 第 7 回アロフェン・イモゴライト研究会, 2009/8/4.

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

地圏微生物研究グループ長：坂田 将

Leader, Geomicrobiology Research Group : Susumu Sakata

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

1. グループの研究目的

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

2. グループの研究資源（21年度）

1) グループ員

研究スタッフ

坂田 将（リーダー）、古宮正利、
竹内美緒、吉岡秀佳、眞弓大介（特別研究員）

テクニカルスタッフ

氏家知子、小神野良美、執印訓子、徐 維那、
張 華、仁道純子、三浦直子

2) 予算

運営費交付金

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

委託費

「メタン生成・消費微生物群の分離培養と動態解析ツールの開発」（科研費）
「陸上・海底堆積物における細胞外DNAの分布とその重要性の解明」（科研費）
「放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質情報データの整備」（NISA）
「幌延変動観測調査」（JNES）

共同研究

「安定同位体トレーサ法による油層内微生物のメタン生成経路の評価に関する研究」（INPEX 帝石（株））

3. グループの特色

有機・生物地球化学、微生物生態学を専門とする研究者で構成され、坑井等からの各種地下試料（岩石、水、ガス、油等）の採取と、化学・同位

体分析、嫌気培養、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、ゲノムファクトリー研究部門、INPEX 帝石（株）、放射線医学総合研究所、JOGMEC 等と連携し、水溶性天然ガスやガスハイドレートの成因解明、枯渇油田の天然ガス再生技術検討を重点的に進める。

4. 20年度後期-21年度前期の研究進捗状況

1) ガスハイドレートの成因に関する生物地球化学的研究

- 基礎試錐「東海沖～熊野灘」で採取された南海トラフ堆積物試料について、ラジオトレーサー法でメタン生成速度を評価した結果を論文公表した。

2) 大水深海域の非生物起源炭化水素ポテンシャル評価

- 蛇紋岩ダイアピルと推定される母島海山北部から採取された岩石試料を圧縮破碎し、放出されるガス組成を分析した結果、全試料から微量のメタンを検出した。その濃度は高くても 25 $\mu\text{L/kg}$ であり、岩石中に貯留（残留）する炭化水素の資源ポテンシャルは低い。変質の進んだ粘土状の部分でメタン濃度が低く、掘削過程で破碎によってメタンが消失した可能性もある。

3) 在来型天然ガス資源の成因に関する生物地球化学的研究

- 水溶性天然ガス田の微生物がメタン生成に利用する有機物を解明するため、堆積物の長期培

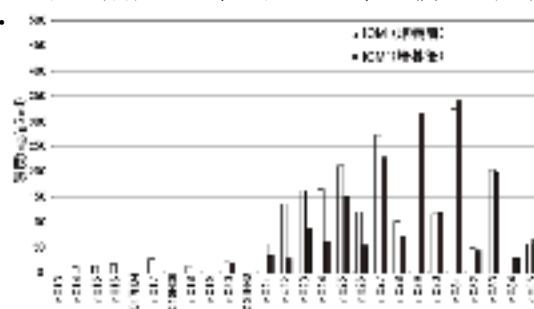


図1 堆積物の培養実験前後の n-アルカン濃度の変化

養実験前後の堆積有機物を分析した。脂質成分は、培養実験後に増加するものや、やや減少するものがあったが、生成したメタンの量を説明できる成分量の変化は認められなかったことから、脂質成分はメタン生成に利用されず、ケロジェンのような不溶性の有機物がメタン生成に利用されたと考えられる。

4) 地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究

- 揮発性有機塩素化合物による難透水層汚染サイトについて、難透水層（粘土層）中の脱塩素酵素の多様性について解析を行った結果、様々な脱塩素酵素と考えられる遺伝子が検出され、複数の脱塩素菌が汚染浄化に関与していることが明らかになった。



図2 難透水層から検出された脱塩素酵素遺伝子（赤文字）

5) 油層内微生物のメタン生成経路の評価に関する研究

- 秋田県八橋油田の油層水を高温高压条件下で培養した結果、油層水中の酢酸の減少に伴うメタン生成が確認された。培養前後の微生物群集構造解析の結果と、培養後の油層水に ^{14}C -基質を添加するトレーサー実験の結果から、メタンは主に酢酸酸化共生細菌と水素資化性メタン生成菌によって生成されていると推定された。

6) 堆積岩地域の水文地質データの評価手法に関する調査

- 幌延で採取されたコア堆積物について、ラジオトレーサー法でメタン生成活性を評価するとともに、極性脂肪酸組成を測定して予察的にバクテリアの分布について評価した。

7) メタン生成・消費微生物群の分離培養と動態解析ツールの開発

- 南海トラフのメタン冷湧水地点から採取された表層堆積物について、メタン資化古細菌に特徴的な脂質成分の炭素同位体比を測定し、同試料中のメタンの同位体比との関係を考察した。
- 水溶性天然ガス田におけるメタンフラックスを評価するために、安定同位体比を用いたメタ

ン酸化活性のトレーサー実験を行い、メタン酸化速度を評価した。

- 沖積粘土層におけるメタン生成に関与しているメタン生成菌を特定するため、培養や分離作業を行った結果、二酸化炭素還元型メタン生成菌を純粋分離することができた。

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

- 予備試験として以前の掘削試料を用いた嫌氣的メタン酸化の潜在活性を安定同位体ラベルしたメタンを用いて測定した結果、数ヶ月から半年程度で有意な溶存二酸化炭素の同位体組成変化が生じ、沖積層においても嫌氣的メタン酸化が生じていることが確認できた。

9) 基礎的研究

- 陸域地下堆積物から RNA を抽出し、生きている微生物群の解析を行った結果、*Proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Chloroflexi*, MCG など様々な微生物が粘土層内においても活動を行っていることが示唆された。

5. 主な論文成果

- Sakata S., Hayes J. M., Rohmer M., Hooper A., Seeman M. (2008) Stable carbon isotopic compositions of lipids isolated from an ammonia-oxidizing chemoautotroph. *Organic Geochemistry* 39, 1725-1734.
- Suzuki Y., Takahashi M., Yoshioka H., Takeno N., Ito K. (2008) Biogeochemical profiles in deep sedimentary rocks in an inland fore-arc basin, Central Japan. *Chemical Geology* 259, 107-119
- Mochimaru H., Tamaki H., Hanada S., Imachi H., Nakamura K., Sakata S., Kamagata Y. (2009) *Methanobrevibacter profundus* sp. nov., a new methanogenic methanogen isolated from deep subsurface sediments in a natural gas field. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 59, 714-718.
- Takahashi S., Oba M., Kaiho K., Yamakita S., Sakata S. (2009) Panthalassic oceanic anoxia at the end of the Early Triassic: a cause of delay in the recovery of life after the end-Permian mass extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 274, 185-195.
- Takeuchi M., Hanada S., Tanabe S., Tamaki H., Miyachi Y., Nakazawa T., Komai T., Uchiyama M., Kimura K., Kamagata Y. (2009) Bacterial and archaeal 16S rRNA genes in late Pleistocene to Holocene muddy sediments from the Kanto Plain of Japan. *Geomicrobiology Journal* 26, 104-118.
- Ohko Y., Nagao Y., Okano K., Sugiura N., Fukuda A., Yang Y., Negishi N., Takeuchi M., Hanada S. (2009) Prevention of *Phormidium tenue* biofilm formation by TiO_2 photocatalysis. *Microbes and Environments* 24, 241-245.
- Yoshioka H., Sakata S., Cragg B., J. Parkes, Fujii T. (2009) Microbial methane production rates in gas hydrate-bearing sediments from the eastern Nankai Trough, off central Japan. *Geochemical Journal* (in press).

燃料資源地質研究グループの紹介

Introduction of the Fuel Resource Geology Research Group

燃料資源地質研究グループ長：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. グループの研究資源

a. グループ員とその専門分野

鈴木祐一郎 燃料地質、石炭地質

松林 修 物理探査、地球熱学

中嶋 健 海洋地質、堆積地質

佐藤幹夫 海洋地質

森田澄人 構造地質、海洋地質

小田 浩 石炭地質、堆積地質

後藤秀作 地球熱学

(産総研特別研究員 PD)

江川浩輔 堆積地質

b. 研究資金

・運営費交付金「燃料資源地質の研究」(地質)及び同(エネルギー)

・運営費交付金「部門重点化予算：関東地方の天然ガス資源評価」(分担、平成20-22年度)

・運営費交付金「若年研究人材の正規就業支援事業」(平成21年度)

・受託研究(JOGMEC)「東部南海トラフメタンハイドレート賦存海域の地質地化学総合解釈」(平成20年度)

・共同研究(ジャパンエナジー石油開発)「堆積盆の炭化水素ポテンシャル評価手法に関する総合的研究」(平成21年度)

・共同研究(石油資源開発(株)技術研究所)「数学的手法による砂岩分布予測の研究」(平成19, 20, 21年度)

・受託調査(資源エネルギー庁)「大水深域における石油資源等の探査技術等基礎調査に関わる高度地質解析」(分担、平成19, 20年度)

・(独)日本学術振興会科学研究費補助金「急激な気候変動に対する海底扇状地の発達と二酸化炭素固定能力の応答の評価」(H21-23年度)

・(財)福武学術文化振興財団歴史学・地理学研究助成「地形学と地質学の融合による高精度の奥羽山脈地形発達史の復元」(H21年度)

3. 研究の進捗状況

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

・ジャパンエナジー石油開発(株)との共同研究の一環として、三陸沖堆積盆の天然ガスポテンシャル評価のため、物理探査データ、坑井データ等から本地域の資源地質、堆積史、熱史、構造発達史の検討を実施中である。なお、共同研究はH21年度より、三陸沖に加えて上越富山沖・新潟中条・根釧地域等をも対象地域とし、石炭起源天然ガス以外にも対象を広げて研究を進めている。

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

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

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

・南海トラフ域の熱流量データの収集と再解析。本海域で実施された熱流量調査及び反射法地震探査記録上のBSR深度から推定された熱流量データをコンパイル、長期海底温度測定による新たな地殻熱流量測定に基づき、海底下熱構造の推定法を検討した。

・東海沖・熊野トラフにおける地震探査データ解析を進め、熊野トラフ外縁部における熱構造探査、上越沖海域での堆積物採取および地質構

造探査を、諸機関と共同して実施した。

- ・JOGMEC の委託研究「東部南海トラフメタンハイドレート賦存海域の地質地化学総合解釈」(平成 20 年度)において、海底面現象と、3D 地震探査情報、深部地質情報との関連の検討を行った。

3) 在来型天然ガス資源の鉱床成因、形成機構に関する地質学的研究

- ・我が国の天然ガス資源ポテンシャル評価の改訂のため、新しいポテンシャル評価技術の検討を進め、ハイドレート資源等を含めた新たな全国的資源ポテンシャル評価作業を進めている。

- ・部門重点化研究として、「関東平野水溶性天然ガス鉱床の地質・地化学研究」を 20 年度に実施し、ボーリング資料の収集、層序、堆積構造情報の解析による三次元的な地質構造モデルの構築を進めている(図 1)。

- ・東北日本の油田成立に関わる脊梁部の地質構造発達に関して、論文を出版した(守屋・中嶋他, 2008, 地質雑, 114, 1-15; 守屋・中嶋他, 2008, 地質雑, 114, 389-404)

- ・石油資源開発(株)技術研究所と資金提供型共同研究「数学的手法による砂岩分布予測の研究」(平成 19, 20, 21 年度)を実施中。

- ・韓国地質資源研究院 KIGAM による日韓共同開発海域における TAMHAE II 地質調査(2009. 7-8)に参加し、東シナ海の堆積盆の地質構造の調査解析を開始した(図 2, 図 3)。

- ・ブラジル沖の 3D 地震探査記録解析から、アマゾン海底チャネル内の貯留岩の形態と分布の解析及び自然堤防の厚さの側方への変化を解析し、新たな堆積構造 Outer Bank Bar を提唱した(図 4 Nakajima et al. in press)。

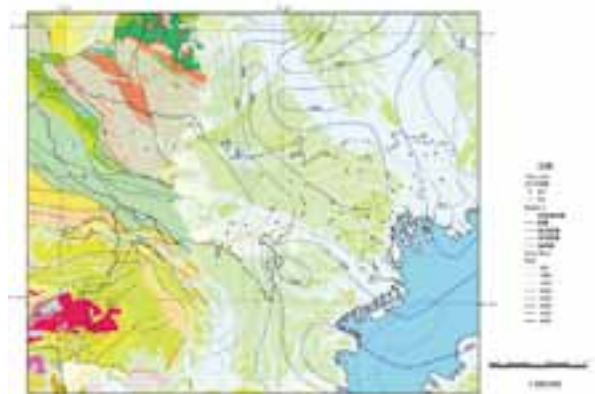


図 1 関東堆積盆(東京)の深部ボーリング

4) 燃料資源地質図の編集

- ・燃料資源地質図「南海トラフ」の出版に向け、地震探査データ解析、熱流量データ重磁力データ等の収集・解析を進め編集を完了した(図 5, 図 6)。

- ・「北海道石炭起源天然ガス賦存図」の編集のため、釧路地域に関して文献調査を実施した。

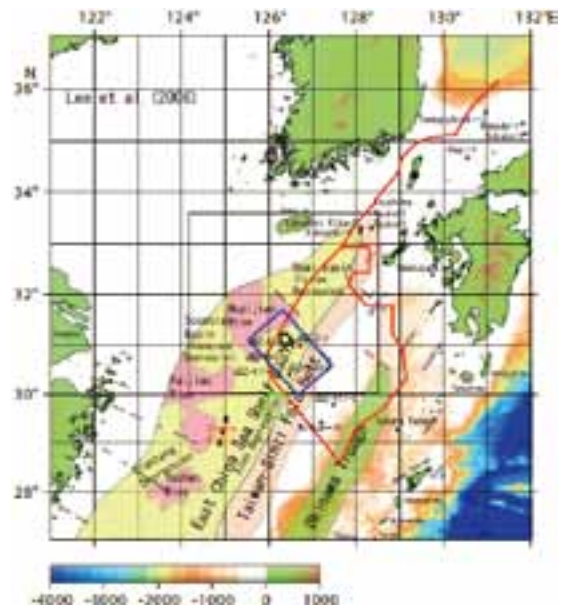


図 2 調査海域(青枠長方形)と日韓共同開発海域(赤枠)



図 3 KIGAM の海洋調査船 TamhaeII (KIGAM ホームページより)

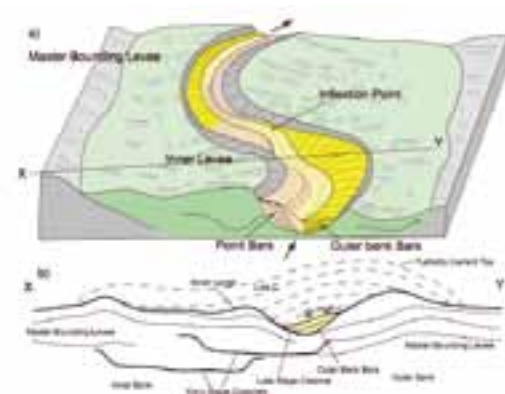


図 4 Outer-bank bars の形態と形成機構 (Nakajima et al., in press)

- ・部門重点化研究を分担し、水溶性ガス田である「南関東ガス田」の地質・天然ガス資源情報を総括する燃料資源地質図編纂のため、三次元的な地質図編集法を検討し、地質構造情報の収集及び解析を行った。

・タービダイト研究，水溶性ガス田研究，CO₂地中貯留検討において重要な特殊地質図「千葉県清和県民の森周辺の地質図および説明書」（徳橋，石原，2008，図7）を出版し，普及に努めた。

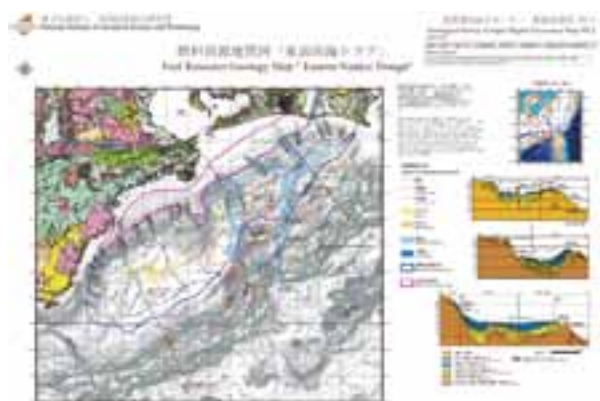


図5 燃料資源地質図「東部南海トラフ」作業図

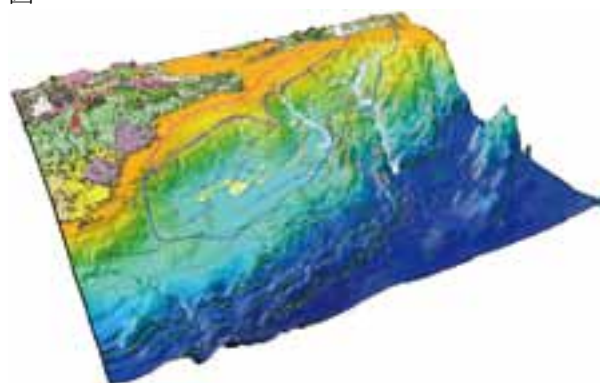


図6 燃料資源地質図「東部南海トラフ」鳥瞰図

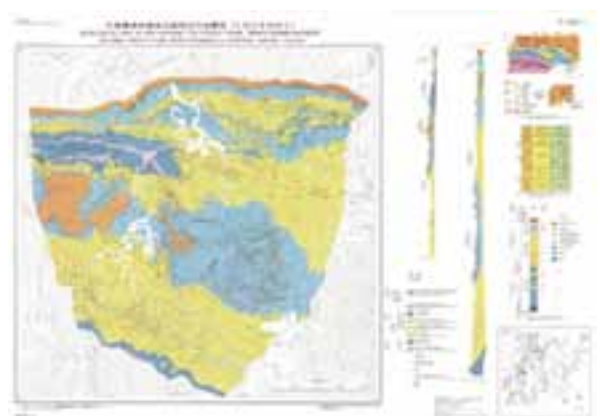


図7 特殊地質図「清和県民の森周辺の地質図」

5) 燃料資源地質の基礎的研究

燃料資源全般に関する生成機構・探査法・燃料資源評価法などについての基礎的な萌芽的な研究を実施している。根源岩評価法，資源評価技術，海洋地質調査法，物理探査法，地質構造発達史，堆積構造解析，地球環境論，等々広汎な課題について地球科学的考察を行い，学

会誌，出版物，口頭発表等で公表している。

・日本海富山深海長谷の堆積物に記録された気候変動記録と砂岩貯留岩の関係について，国際誌に論文を出版した（Nakajima et al., in press 図8）。

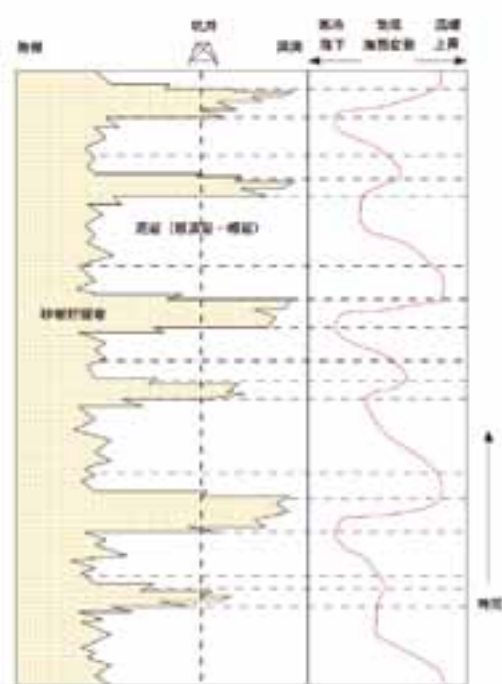


図8 砂岩貯留岩の気候規制の研究（Nakajima et al., in press）

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

・大水深域の堆積盆の炭化水素ポテンシャル推定を3次元石油システムシミュレータを用いて実施し，比較的高い炭化水素生成ポテンシャルが存在する可能性を示し（図9），海洋資源地質地球物理情報可視化システムを使用した高度地質解析を進めた（図10）。

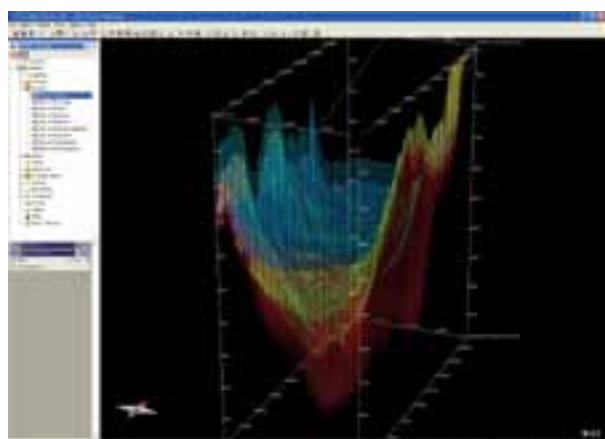


図9 大水深堆積盆の石油システムシミュレーション例

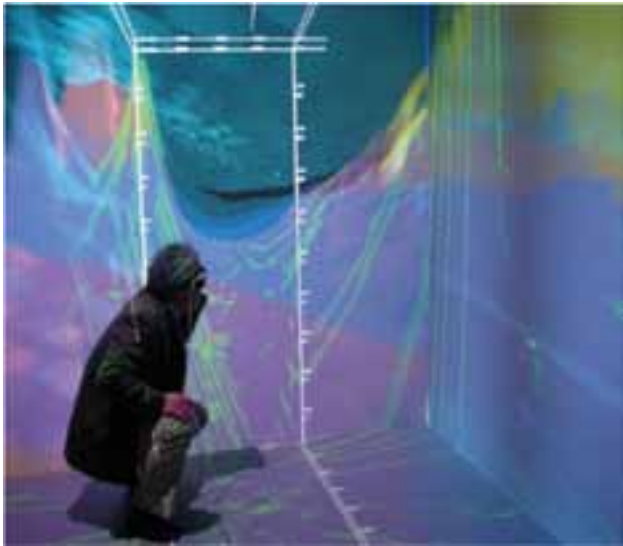


図10 バーチャルリアリティ技術を用いた高度地質解析（没入型可視化システムによる3次元表示）

4. 今後の研究計画

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

5. 最近の主な論文

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

後藤秀作（2009）海底堆積物の熱物性を推定する方法の開発 堆積盆における燃料資源ポテンシャルの推定を目指して，産総研Today，v.9, p.23.

上嶋正人・西村清和・岸本清行・弘松峰男・佐藤幹夫・松本 良(2009)上越沖，海底表層メタンハイドレート賦存域での深海底構造・微地形調査について．地学雑誌，118，p.72-92.

上嶋正人・佐藤幹夫・西村清和・岸本清行・弘松峰男・松本 良（2009）上越沖メタン活動域における深海底近傍の微地形，浅部構

造調査について－NT07-20 及び NT08-09 航海 DAI-PACK マッピング－．月刊地球，v.31，p.505-512.

森田澄人, Liu, C-S., Ku, C-Y., 町山栄章, Lin, S., 徐垣, 清水賢(2009) 台湾南西沖，海底マウンド分布域の流体循環－大陸棚斜面上のリッジにおける高精度地震探査について－．地学雑誌，v.118，424-434.

Nakajima, T., Katayama, H. and Itaki, T. (in press) Climatic control of turbidite deposition during the last 70 ka along the Toyama deep-sea channel, central Japan Sea. *SEPM Special Publication*, 92, 159-177.

Nakajima, T., Peakall, J., McCaffrey, W.D., Paton, D. and Thompson, P.J. (in press) Outer-bank bars: A new intra-channel architectural element within sinuous submarine slope channels. *Journal of Sedimentary Research*, 79, doi:10.2110/jsr.2009.094 IF=1.890

佐脇貴幸・金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・徳橋秀一・中嶋 健・棚橋 学・坂田 将・森田澄人(2009) 水溶性天然ガス資源（南関東ガス田）の研究 -温泉開発，深層熱水利用等の指針策定への貢献（アウトカム）-．温泉科学，58，302-309.

Yamano, M., Goto, S., Miyakoshi, A., Hamamoto, H., Fajar Lubis, R., Monyrath, V. and Taniguchi, M.(2009) Reconstruction of the thermal environment evolution in urban areas from underground temperature distribution. *Science of the Total Environment*, v.407, p.3120-3128.

受賞

守屋俊治・鎮西清高・中嶋 健・檀原 徹，日本地質学会論文賞 第44号 2009年9月4日

徳橋秀一，石油技術協会論文・論説賞 第73巻第1号 2009年6月2日

地熱資源研究グループの 2009 年次紹介

2009 Update of the Geothermal Resources Research Group

地熱資源研究グループ長：村岡洋文

Leader, Geothermal Resources Research Group : Hirofumi Muraoka

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

1. グループの研究目的

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

2. グループの研究資源

1) グループ員

常勤研究員：村岡洋文、佐々木宗建、茂野 博、水垣桂子

研究協力者：阪口圭一、柳澤教雄、駒澤正夫、玉生志郎

2) 予算

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

3. 平成 20 年度の研究計画

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

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

1) 中小地熱資源賦存地域の研究：地熱開発促進調査地域を中心に、中小地熱資源開発候補地の地熱地質と地化学に関する調査を行うとともに、全国から収集済みの温泉化学分析値・坑井温度検層データ等を用いて、『全国地熱ポテンシャルマップ』を構築する。

2) 温泉発電システムの研究：カーリーナサイクル発電等を高温温泉の上流に導入して、温泉発電を実現するためには、温泉沈殿物による熱交換器等の目詰まり等の問題を解決する必要がある。この問題に化学平衡論等を応用して、具体的解決策を考案する。

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

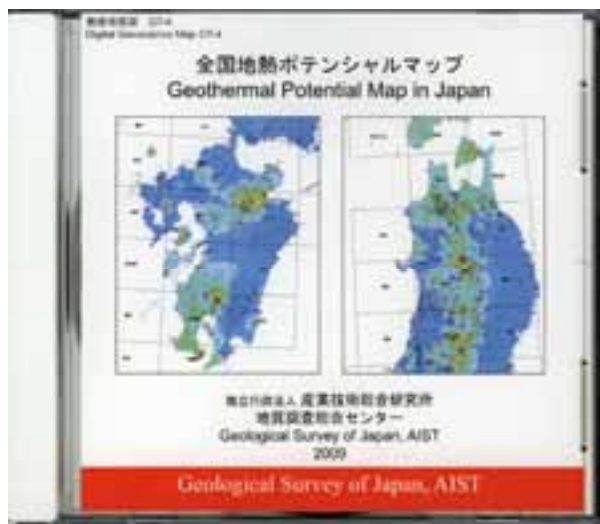


図 1 全国地熱ポテンシャルマップ(CD-ROM 版)の概観 (地質調査総合センター, 2009)。

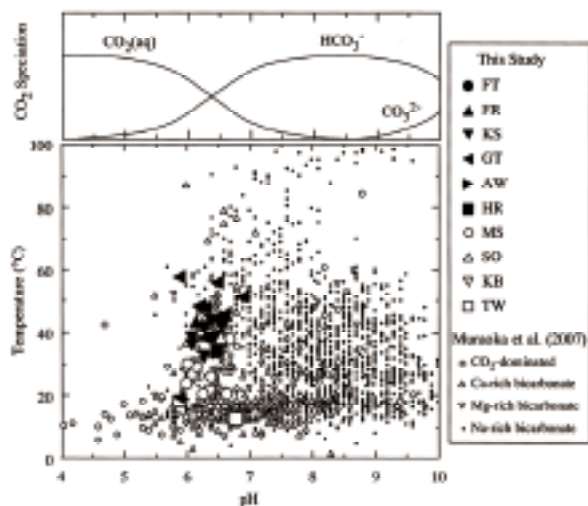


図 2 炭酸塩沈殿物を多量に伴う温泉水の pH と温度の特徴. 研究した炭酸塩鉱物を多量に伴う温泉, FT: 二股, FR: 古遠部, KS: 小坂, GT: 夏油, AW: 泡の湯, HR: 広河原, MS: 増富, SO: 入之波, KB: 木部谷, TW: 津和野, 本邦の二酸化炭素泉と炭酸水素塩泉: 村岡ほか(2007)による. 炭酸塩沈殿物を多量に伴う温泉の温度は 20–60°C で, 炭酸塩鉱物に対する溶解度が高すぎず低すぎず, pH は CO_2 と HCO_3^- による緩衝状態にあり, 流体/岩石反応が促進されやすい(佐々木ほか, 2009)。

4) 地熱シーズ・基盤研究: 研究者の自由裁量による萌芽的研究を行う。また, 当グループは国内の地熱資源研究の中核的グループであることから, グループの Web サイトの産総研のガイドラインに沿ったリニューアルやさらなる充実を始め, 広報活動に務める。

4. 平成 20 年度の研究成果

1) 2007 年度出版の「日本の熱水系アトラス」の熱水系データベースと駒澤 (2003) の重力基盤深度図をもとに, 容積法による全国の地熱資源量評価を行った。その結果は 2, 3 の学会で発表する

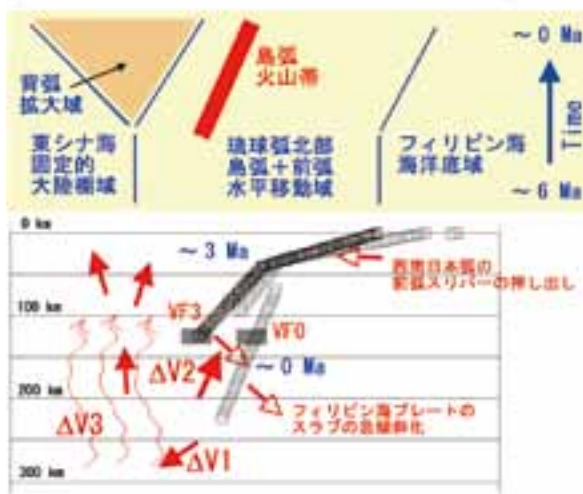
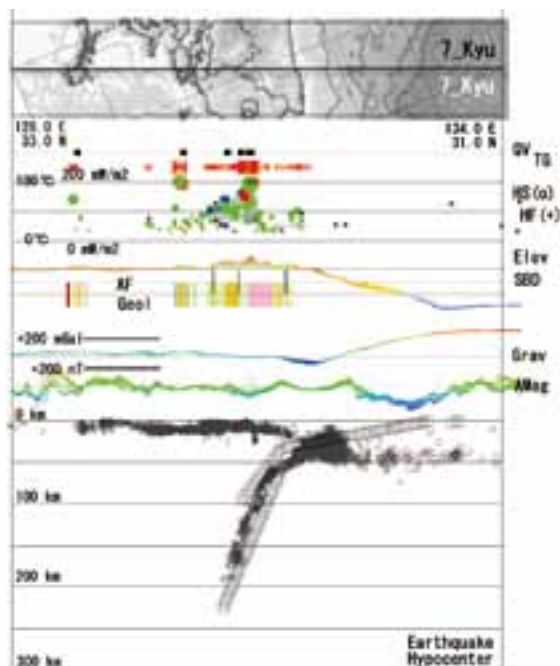


図 3 琉球弧北部(九州南部)の断面図. 各種の電子地球科学情報とともに, フィリピン海プレートの沈み込みのシミュレーション結果(～3 Ma・～0 Ma)を示し, 本地域に特異な火山・地熱活動の時空変化の説明を試みた(茂野, 2009 を一部修正)。

とともに, 資源エネルギー庁「地熱発電に関する研究会」において活用され, いくつかのマスメディアにも報じられた。これまでの各種の地熱基本図レイヤーに, この地熱資源量を 2.5 万分の 1 図幅ごとに表示したレイヤーを加えて, 「全国地熱ポテンシャルマップ (CD-ROM 版)」として出版した (図 1)。また, 北海道の石狩低地帯南部の周辺で NEDO によって過去に実施された地熱開発促進調査(「胆振地域」・「登別地域」について, 坑井調査(合計 13 本)の温度・地質・変質データを表計算ソフトを用いて簡易データベース化し, 昨年度までに開発した手法を用いて各種の表示・解析を行った。

2) 当グループは, 地熱技術開発株式会社が

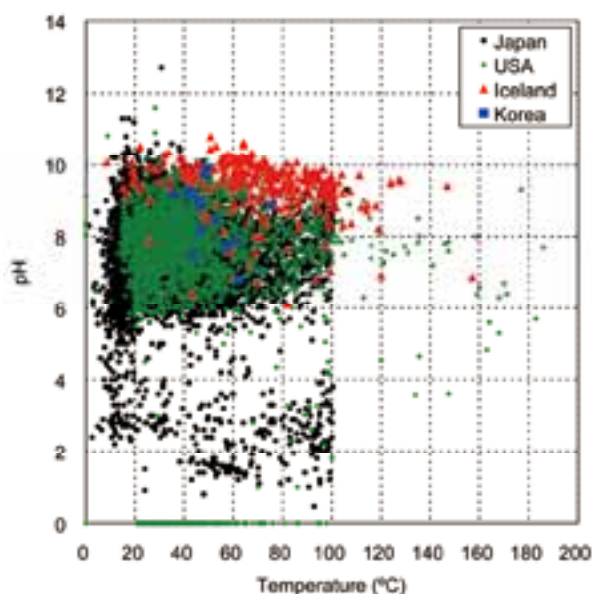


図 4 IEA 地熱実施協定参加 4 ヶ国の熱水系の温度と pH の比較 (Muraoka et al., 2008)。

NEDO の新エネルギーベンチャー技術革新事業において受託している「温泉エコジェネシスシステムの開発」のうち、「材料試験・温泉沈殿物試験及び市場規模調査」を再受託している。このテーマは地熱発電システムの小型化・低温化としての一般性・将来性があり、また、実際にいくつかの温泉地域から誘致を受けるなど、ビジネスモデルとしてもすでに反響を得ていることから、当該再受託研究のほかに、基礎研究部分を部門内競争グラントの交付金予算によって実施した。その一つは本邦温泉の代表的なスケールである炭酸塩沈殿物の研究である (図 2)。また、各種のスケール抑制試験において、スケール除去装置設置部の上流と下流の流量、圧力、電気伝導度、pH 等を常に測定する必要があることから、これらを自動的に測定できる熱水モニタリングシステムを構築し、今後の頻繁な利用に備えた。さらに、スケールインヒビター (薬剤) による抑制法や交流電磁場による粒子界面電位シフト抑制法など、幅広いスケール抑制法に関する情報を収集し、幅広い選択肢の中から実用的な手法を検討した。

3) 高温熱水系シミュレータの適用研究では、USGS の Hydrotherm の新バージョン (v. 3.1) について各種のテストランを行うとともに、Excel VBA を用いた前・後処理プログラムを試作し、一部成果を口頭発表した。また、昨年度までに開発した各種公開電子地球科学データの重合平面・断面図の表示法とプレートスラブ斜め沈み込みの簡易モデル化・シミュレーション手法を利用して、九州地方の火山・地熱活動の時空間変化の機構を検討し、その成果を投稿するとともに口頭発表を行った (図 3)。IEA 地熱実施協定のタスクにおいては、国際的な熱水系データベースを作成し、花崗岩地殻の熱水系と玄武岩地殻の熱水系との間で、

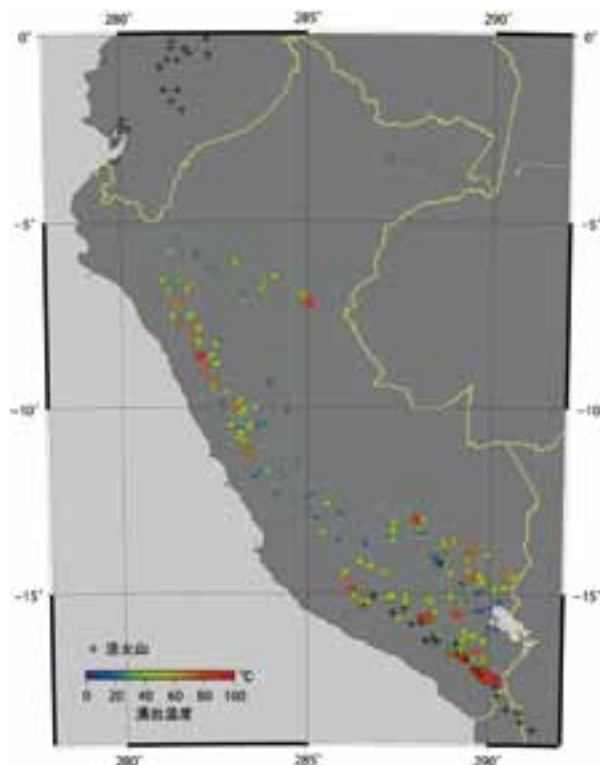


図 5 ペルーにおける熱水系湧出温度の分布 (村岡, 2009)。



図 6 ペルー南部カリエンテス地熱地域 (村岡, 2009)。

pH や B/C1 比に大きな違いがあることを明らかにし、RE2008 において論文発表した (図 4)。さらに JICA のペルー共和国地熱発電開発マスタープラン策定に係る協力準備調査に協力し、ペルーの地熱資源分布の概要を概査した (図 5 ; 図 6)。

4) 表計算ソフト (Excel) に付随するプログラム開発環境 (VBA) を用いて、水化学データの表示・解析に不可欠なキー図・ヘキサ図 (地図上) の作成プログラムを作り、「オープンソース」として誌上発表を行うとともに、WWW ホームページからのダウンロードを可能とした。同様に標高・地質メッシュデータの各種組み合わせ処理などについてもプログラムを作成し、投稿するとともに口頭発表を行った。本邦の代表的な酸性泉の物理化学的利用や希元素回収の可能性を目指して、微量成分

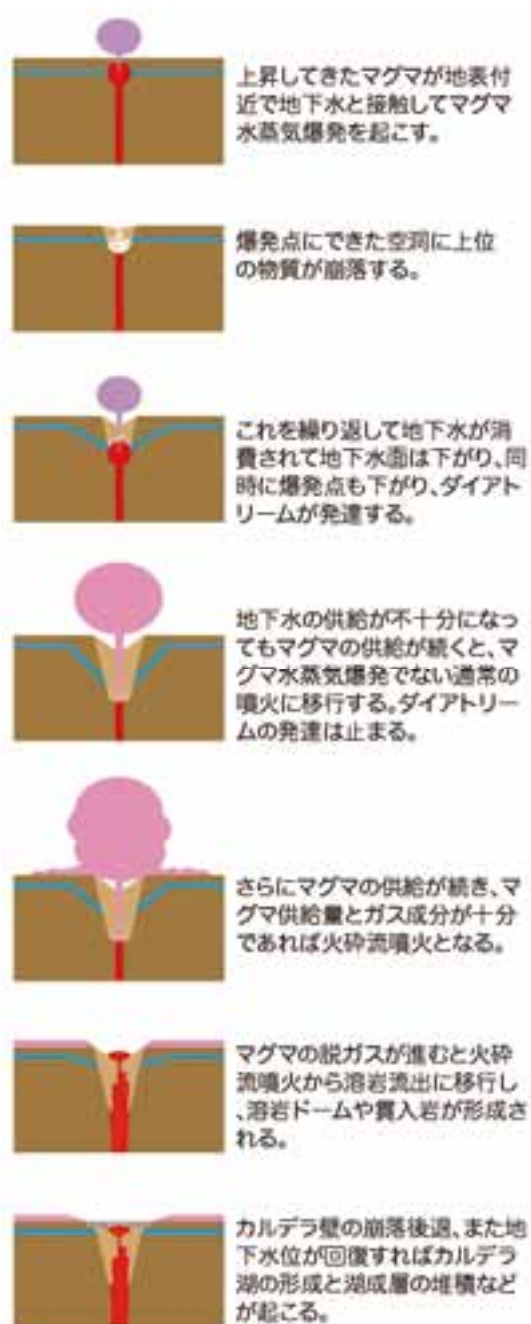


図 7 「濁川型」カルデラの形成過程モデル。主に崩落によって漏斗型の地下構造が形成されると推定した。火山学的にも地熱熱源的にも単成火山と考えてよい(水垣・萬年, 2009)。

の含有量を分析するため、秋田県玉川温泉について予察調査を行い、秋田県泥湯温泉について噴気地の特徴の口頭発表を行った。また、ESR 測定法の基礎およびクロスチェック対象となる他手法による年代値について、文献調査や研究集会への参加により情報収集を行い、九州において測定用試料を採取した。小型カルデラの構造および形成過程モデルについて、昨年までの成果にさらに検討を加えて論文を執筆した(図 7)。さらに、産総研出版の広報誌 SAN・SO・KEN (2008) No. 3「地熱のちから」の出版に関して、部分執筆・資料提供・

校正などの協力を行った。

5. 今後の展開に向けて

NEDO 新エネルギーベンチャー技術革新事業フェーズⅡ(開発ステージ)の『温泉エコジェネシスシステムの開発』(委託先:地熱技術開発㈱,再委託先:当部門)は、平成 20 年度に引き続き、平成 21 年度にも採択された。平成 21 年度は開発ステージの 2 年目であり、最終年度のため、地熱技術開発㈱が中心となって、いよいよ 50 kW カリーナサイクル発電システム本体の製作と、実証試験を行うこととなる。これに先行して、産総研もスケール防止技術の実証実験を行う。

また、引き続き、国内の地熱エネルギーの有効利用を目指して、資源エネルギー庁、環境省、NEDO、JICA、地熱産業界、地方自治体、日本地熱学会等に積極的に協力し、わが国および世界における地熱エネルギー・インフラの構築を目指す。

文献

- 地質調査総合センター (2009) 全国地熱ポテンシャルマップ (CD-ROM). 数値地質図 GT-4, 地質調査総合センター(説明書に記載の著者は村岡洋文・阪口圭一・玉生志郎・佐々木宗建・茂野 博・水垣桂子・駒澤正夫)。
- 駒澤正夫 (2003) 日本の重力探査事情—地下構造とのかかわり. 石油技術協会誌, 68, 1, 21-30.
- 水垣桂子・萬年一剛 (2009) 「濁川型」カルデラの再検討. 月刊地球, 31-1, pp. 41-49.
- 村岡洋文 (2009) 第 4 章調査結果. ペルー共和国地熱発電開発マスタープラン策定に係る協力準備調査報告書, 国際協力機構, 10-24.
- 村岡洋文・阪口圭一・玉生志郎・佐々木宗建・茂野 博・水垣桂子 (2007) 日本の熱水系アトラス. 産総研地質調査総合センター, 110p.
- Muraoka, H., Gunnlaugsson, E., Song, Y., Lund, J., Bromley, C. and Rybach, L. (2008) Host rock controls to thermal water chemistry induced from the global comparison. Proceedings of Renewable Energy 2008 (CD-ROM), Busan, 3p, 2008.
- 佐々木宗建・徂徠正夫・奥山康子・村岡洋文 (2009 印刷中) 本邦の炭酸塩沈殿物を多量に伴う温泉・鉱泉の地球化学的特徴—CO₂ 地中貯留に対するナチュラルアナログの可能性—. 岩石鉱物科学.
- 茂野 博 (2009) 九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレートスラブの沈み込みの関係—電子地球科学情報を利用した簡易モデル化—シミュレーションによる検討—. 地質ニュース 656 号, 10-28.

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

日本の産業を支える金属鉱物資源は、ほぼ全量を輸入に頼っている。金属鉱物資源を将来にわたって安定的に輸入するには、海外鉱床の地質・鉱床学的情報を正確に把握し、民間企業等に提供することにより、資源保有国への適切な投資や開発を促していく必要がある。とりわけ、レアメタルは世界的に激しい資源争奪戦が繰り広げられており、迅速な資源情報を取得・解析が求められている。一方、国内には石灰石を始めとする数百の非金属（工業原料鉱物）鉱山が稼行している。近年、良質な非金属鉱物資源が徐々に枯渇しつつあり、地質・鉱床学的情報に基づく新規開発が急務である。鉱物資源研究グループは、国内外の金属・非金属鉱物資源の賦存状況や成因を調査研究し、質の高い資源情報を発信することを目的としている。

2. 各研究項目の内容

2009年度、鉱物資源研究グループは以下の3項目で研究を実施している。

2.1. レアメタルの濃集機構と資源ポテンシャル評価の研究

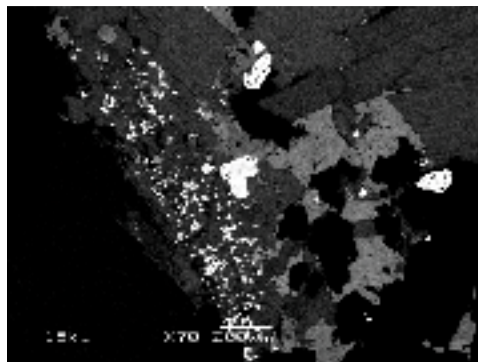
レアメタルの中でも、資源保有国が極端に偏在し、将来の安定供給が懸念される希土類元素（レアアース）を対象を絞り、海外鉱床を対象に調査研究を実施している。本研究は、産総研のナノテク・材料・製造分野および環境・エネルギー分野との分野融合課題の一部であり、レアメタルタスクフォースの活動の一環として位置づけられている。

希土類元素鉱床は、大きくイオン吸着型鉱床、鉄氧化物鉱床、アルカリ岩付随鉱床、カーボナタイト付随鉱床、漂砂鉱床の5種類に区分される。当研究グループでは、これら全ての種類の鉱床について、東南アジア、南アフリカ、中央アジア、カナダ等で現地調査を実施し、鉱床のタイプ・規模・鉱業情報などを把握すると共に、系統的に採取した鉱石試料の化学分析やEPMA、SEM-EDS、XRDによる希土類鉱物の同定結果などに基づき、資源ポテンシャル評価を実施し

ている。この評価結果は、具体的な鉱山開発に連結するために、民間企業や独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構に移転される。また、研究成果は可能な限り学術論文として公表している。



カナダ・トアレイク鉱床の野外調査



同鉱床の希土類元素含有ジルコンの
反射電子線像（明るい部分）

2.2. 非金属鉱物資源の賦存状況の研究

非金属鉱物資源の中で、機械工業や土木工事で多用されるベントナイトは、重要な工業原料鉱物の1つである。近い将来、大量のベントナイトが放射性廃棄物地下処分施設の緩衝材として使用される予定である。当研究グループでは、国内ベントナイト鉱山のうち、山形・宮城県の鉱山を対象に、電気・電磁探査法を用いた鉱床探査法の開発を、民間企業および地圏環境シス

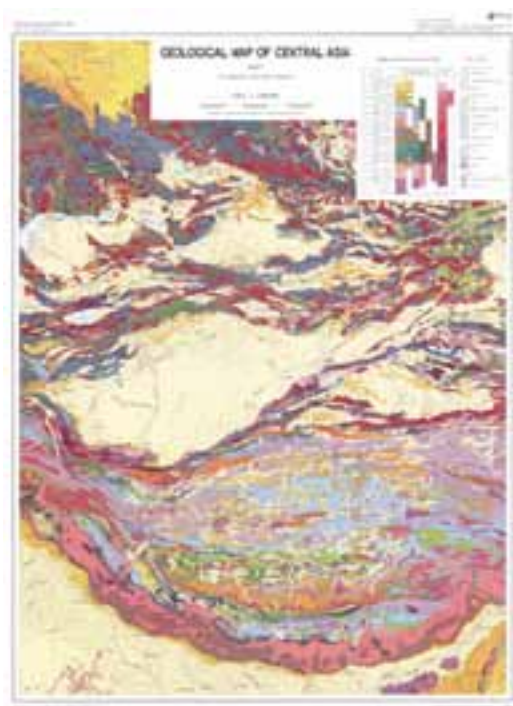
テム研究グループとの共同研究として実施している。さらに建材用珪石資源の研究を民間企業との共同研究として実施している。



珪石鉱床の野外調査（場所非公表）

2.3. 鉱物資源データベースの研究

当研究グループでは、アジア地域の膨大な地質・鉱物資源データをコンパイルし、広域的な地質図、鉱物資源図を作成・出版している。これまでに、東アジア地質図(2003)、東アジア鉱物資源図(2007)、中央アジア地質図(2007)（縮尺 1:3,000,000）を出版済みであり、アジア地質図、中央アジア鉱物資源図を今年度出版予定である。さらに、国内の 1:500,000 鉱物資源図（紙媒体にて出版済）のデジタル化の作業にも取り組んでいる。



中央アジア地質図(寺岡・奥村, 2007)の一部

3. グループの研究体制

鉱物資源研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

高木哲一（グループ長）

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

4. 最近の主な研究成果

Hoshino, M., Kimata, M., Nishida, N. and Shimizu, M. (2009) Dissakisite-(Ce) chemical composition: some implications for its origins. *Physics and Chemistry of Minerals*, (in press).

Murakami, H., Seo, J.H. and Heinrich, C.A. (2009) The relation between Cu/Au ratio and formation depth of porphyry-style Cu-Au±Mo deposits. *Mineralium Deposita*, 10.1007/s00126-009-0255-1 (published online).

Takagi, T. and Kamei, A. (2008) ^{40}Ar - ^{39}Ar and K-Ar geochronology for plutonic rocks in the central Abukuma Plateau, northeastern Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 103-5, 307-317.

Imai, A., Sanematsu, K., Ishida, S., Watanabe, K. and Boosayasak, J. (2008) Rare earth elements in weathered crust in Sn-bearing granite rocks in Southern Thailand. *Proceedings of the International Symposium on Geoscience Resources and Environments of Asia Terranes (GREAT 2008)*, 4th IGCP 516, and 5th APSEG, 232-237.

Ishihara, S., Moriyama, T. and Hirano, H. (2008) REE-rich granites of Ko Samui, Ko Phuket and Yod Nam Mine in the southern Thailand. *Proceedings of the International Symposium on Geoscience Resources and Environments of Asia Terranes (GREAT 2008)*, 4th IGCP 516, and 5th APSEG, 238-247.

Watanabe, Y. (2008) Thematic Issue: Rare earth resources: Are they sufficient or deficient? *Resource Geology*, 58-4, 335-336.

Ishihara, S., Hua, R., Hoshino, M. and Murakami, H. (2008) REE abundance and REE minerals in granitic rocks in the Nanling range, Jiangxi province, southern China, and generation of the REE-rich weathered crust deposit. *Resource Geology*, 58-4, 355-372.

地質特性研究グループの紹介

Introduction of the Integrated Geology Research Group

地質特性研究グループ長：関 陽児

Leader, Integrated Geology Research Group : Yoji Seki

e-mail address: yoji-seki@aist.go.jp

1. グループの研究目的

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

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

この目標のために、研究テーマとして「幌延地域を対象とした広域地下水流動モデルの検証研究」、「堆積岩地域の物質移行特性の不確実性研究」、「水・岩石 - 微生物相互作用調査技術の評価」、「核種移行における遅延または促進に係る微生物機能の研究」および「堆積岩地域での地質、水文ベースライン評価手法」を設け実施中である。

2. グループの研究資源

1) グループ員：関 陽児（グループ長）、金井豊、上岡 晃、鈴木庸平、内藤一樹、幸塚麻里子（産総研特別研究員）、福田朱里（産総研特別研究員）

2) 主たる研究課題と予算

- ・「地層処分に係る地質情報データの整備」（原子力安全・保安院：委託研究）
- ・「地下水流動解析モデルの総合的検証手法の検討（幌延変動観測調査）」（原子力安全基盤機構：委託研究）

3. グループの研究トピックス

当グループは、安全評価支援のための基盤的な研究を実施する地下環境機能研究グループと密接に協力しつつ、主に地質ベースラインの評価手法を中心とした研究を実施している。関係機関との研究協力体制については、日本原子力

研究開発機構（JAEA）および原子力安全基盤機構（JNES）との研究協力協定に基づく共同研究を始めとして、地下環境機能研究グループに準じた体制で国内外の研究機関と協力しつつ実施している。

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

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

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

第一は、掘削中の立坑の影響を受ける周辺地下水の水理場やさらにその影響を受けると考えられる地表面形状の変化を観測し、得られた観測値に対して逆解析の手法を用いて水理特性の3次元分布を推定しようとするものである。これに必要なデータを取得するため、昨年度 JAEA 幌延深地層センター内の東立坑に隣接して掘削した孔底深度 512m の観測井では、遭遇亀裂や破碎部の詳細な観察、様々な透水性をもつ複数区間を対象としたシーケンシャル水理試験による高精度の水理特性値の網羅的測定を実施した。引き続き今年度は観測孔内に据置型の多深度の間隙水圧計を設置し、代表的な深度区間における全水頭の垂直分布の連続観測を開始することになっている。また、浅部の自由地下水面の挙動を推定する目的で、絶対重力計と可搬型重力計を併用したハイブリッド重力測定による地表面重力分布の精密な経時変化観測が昨年度に引き続いて実施される予定である。さらに、人工衛星の合成開口レーダーを用いた地表面形状の精密な変動量解析も昨年度に引き続いて実施さ

れ、水理場の変化により引き起こされると予想される地表面形状の微小な変化を、差分解析の手法を用いて捕捉する予定である。

第二は、地下水の水質形成機構や年代を解明し、そこから広域地下水流動モデルに制約条件を与えようとするものである。昨年度掘削した地下水観測孔では、詳細な岩芯観察、リアルタイムの掘削水管理（図1）、流体電気伝導度検層等により主要なみずみちが3箇所捕捉され、ピストンシリンダー型封圧採水容器を用いて、原位置から被圧大気非接触状態の地下水を採取することに成功した。原位置地下水の採取にあたっては、みずみちへの掘削流体の流入量の低減、流入した掘削流体量の推定、採水に先立つ予備排水の効果の評価等を実施し、試料の原位置性を損なわないよう留意した。原位置地下水試料の分析で得られた主要・微量溶存成分組成や主要な同位体組成の分析結果から、幌延の512 m観測孔で得られた地下水は、 Na-HCO_3 タイプの浅部地下水と炭酸ガスやメタンガスに富む Na-Cl タイプの深部地下水とが種々の割合で混合したものである可能性が高いことが分かった。今年度は前記の3つの主要なみずみちをターゲット区間として設定した地下水モニタリング装置と新たに製作する専用の原位置地下水採取ツールを用いて、さらに原位置性の高い地下水試料を採取して塩素、ホウ素、ヨウ素等の同位体も分析するとともに、周辺の地下水や地表水の既存試料も分析し、幌延地域の深部地下水の水質形成機構と形成年代についてより確度の高い知見を得て地下水流動モデルの検証に資する予定である。

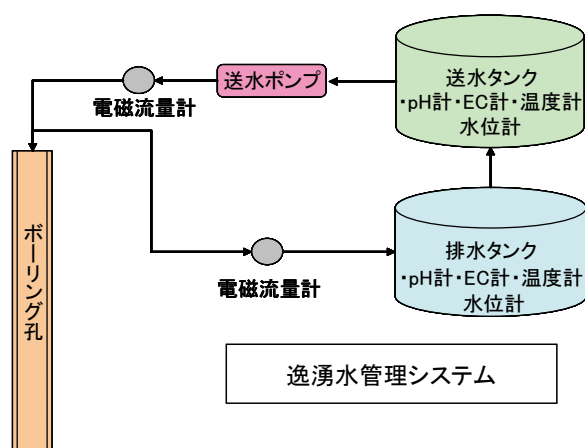


図1 昨年度実施した観測井掘削において採用されたリアルタイムの逸湧水管理システム。これにより高透水ゾーンでの逸水発生と逸水量を迅速に把握でき、有力なみずみちの捕捉に役立った。

2) 水・岩石・微生物相互作用調査技術の評価 (原子力安全・保安院委託研究)

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

昨年度は、JAEA 瑞浪超深地層研究所の既存の地下水観測孔井から、大気非接触条件での原位置地下水試料の採取と水質測定の手法の最適化を行い、当グループが開発してきた大気非接触採取法の妥当性の確認と改良を行った。また、大気非接触条件で限外ろ過した地下水中のコロイドについて NanoSIMS による元素マッピングや原子間力顕微鏡による立体形状測定などにより、その化学組成や流径分布を明らかにした。さらに、生物化学的な評価として、微生物がエネルギー源として利用しやすい有機酸はほとんど含まれていないこと、微生物代謝活性の特徴、難分解性有機物を含む種々の基質を利用可能な種が優先していることなどを明らかにした。

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

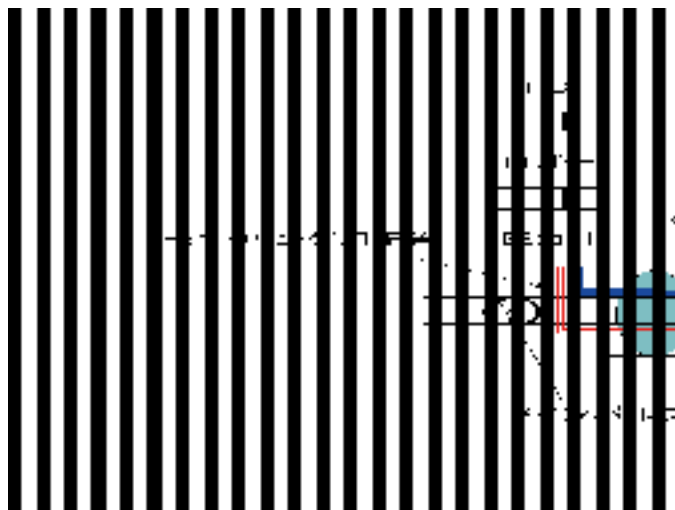


図2 今年度、瑞浪の300mステージにおいて掘削予定の地下水観測孔井の模式図。既存の観測孔や坑道の影響の少ない領域に新たに観測孔を掘削し、水頭の異なる岩盤の間をパッカーで遮断して、履歴や水質の異なる地下水を原位置性を損なわない状態で状態で個別に採取・モニタリングする。

地下環境機能研究グループの紹介

Introduction of the Experimental Geoscience Research Group

地下環境機能研究グループ長：伊藤一誠

Leader, Experimental Geoscience Research Group : Kazumasa Ito

e-mail address: kazumasa-ito@aist.go.jp

1. グループの研究目的

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

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

2. グループの研究資源

1) グループ員：伊藤一誠（グループ長）、高橋学、富島康夫、間中光雄、竹田幹郎、李琦（産総研特別研究員）

2) 主たる研究課題と予算

・「地層処分に係る地質情報データの整備」（原子力安全・保安院：委託研究）

・「地下水流動解析手法の総合的検証手法の検討」（原子力安全基盤機構：請負研究）

・「断層内水理モデルの確立に関する実験的研究」（文科省：原子力特研）

3. グループの研究トピックス

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

地質特性研究グループが主に実施している地質ベースライン評価手法の研究においても、密接な協力関係のもと、テーマの一部を分担している。また、研究の実施に当たっては、部門内の他の研究グループとの研究協力、大学、米国 Southwest 研究所をはじめとする国内外の研究機関との共同研究によって、研究を実施してい

る。また、規制支援機関、規制支援研究機関としての原子力安全基盤機構（JNES）、日本原子力研究開発機構（JAEA）との研究協力協定の下での共同研究によって、JAEA の地下実験施設を用いた共同研究を進めている。ここでは、特にグループ内部で実施した成果の中から、代表的な事例を紹介する。

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

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

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

当グループでは、観測される異常間隙水圧が浸透圧によるものか否かを判断し、異常間隙水圧が地下水流動に及ぼす影響を評価するために、岩石中での拡散試験の研究成果を発展させ、堆積岩試料を用いた室内実験による浸透圧発生パラメータの評価、ならびに解析解による異常間隙水圧の安定性および地下水流動への影響の評価を行った。

室内実験は、堆積岩供試体の片側を塩水槽、もう一方を淡水槽とし、浸透圧による水分が淡水側から塩水側への移動、拡散による塩分の移動による濃度、差圧変化を計測した。図1に実験

で得られた供試体上下流の塩分濃度と差圧の経時変化を示す。

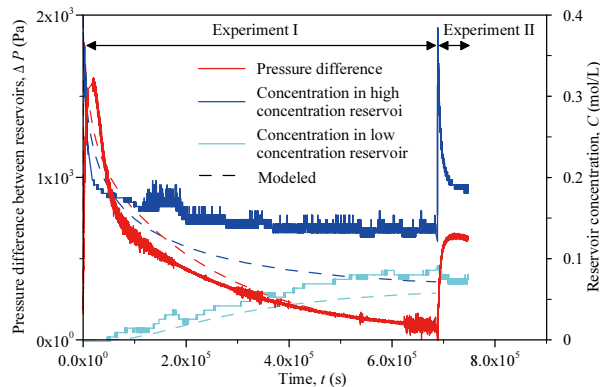


図 1：浸透圧実験による濃度，圧力変化

この結果から，岩石の半透膜としての特性を示すパラメータである反発係数と，岩石の実効拡散係数を同時に評価することが可能であることが示された。

また，浸透圧と拡散を考慮した水と塩分の質量保存則を無次元解析で解き，圧力と塩分濃度分布の経時変化を求めた．その結果，通常の代表的な水理パラメータを仮定した場合においても，浸透圧による異常間隙水圧は 100 万年オーダーで安定であり，地下水流動方向および流量ともに，圧力分布のみからは正確な評価が困難であることが示された。

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

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

数値解析手法に関しては，図 2 に示すように，水理－熱－力学－化学反応の連成（THMC）に加えて，微生物作用による生物化学反応も考慮した THMCB モデルで，それぞれが相互に与える影響の内，主要なものを抽出してモデル化を行い，現状では，一次元の既往実験データ等での検証を行っている．

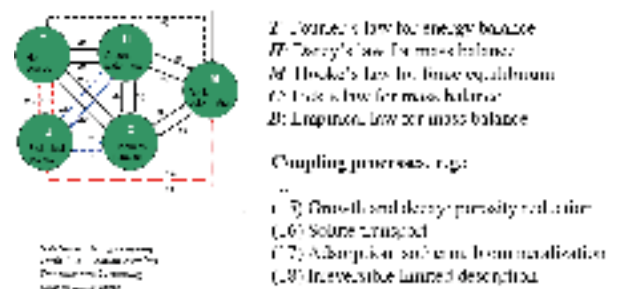


図 2：THMCB モデルの相互作用の概念図

室内実験では，水理－力学の連成パラメータを高精度で求めるための，排水条件下での三軸変形試験の改良，あるいは鉱物－水反応による水理特性変化の定量化等の実験を行っている．

3) 高レベル放射性廃棄物処分の安全評価手法に関する研究（運営費交付金）

放射性廃棄物処分の安全評価は，人間の生活圏における放射線量の時間的な変化の確率論的なモデルを構築することによって実施される．

岩盤の核種隔離機能評価のための素過程の評価に関しても，最終的な安全評価上での各素過程のパラメータ感度をあらかじめ評価することによって，パラメータ評価を行う上での優先順位を決定することが可能で有り，かつ素過程評価の研究を進める上でも，パラメータの感度解析は必要である．

以上のことから，当研究グループでは岩盤の各種隔離機能評価に加え，安全評価手法に関しても研究を進めている．安全評価手法は，地下水流動解析，あるいは連成解析結果から，処分場から流出点までに想定される流線を抽出し，流線上の吸着，拡散等の物質移行パラメータを確率論的に与えることによって，人間の生活圏での放射線量の時間変化を，多くのケースで求めるものである．

当研究グループでは，米国サウスウェスト研究所の協力を得て，米国 GoldSim 社が開発した市販のリスク評価ソフトウェアである GoldSim をベースとした安全評価プログラムの開発を行った．本プログラムは，GoldSim による確率論的モデル化に加え，ランダムウォークによる一次元流線上での移流，拡散，吸着のモデル化モジュール，および被爆量評価モジュールを加えた構成となっている．現在，仮想地下水流動モデルを用いた，他の評価コードとの比較によるプログラムの検証，および安全評価上の各素過程のパラメータに関する感度解析を実施している．

地圏環境リスク研究グループの紹介

Introduction of the Geo-environment Risk Research Group

副研究部門長・地圏環境リスク研究グループ長：駒井 武

Deputy Director and Leader, Geo-environment Risk Research Group : Takeshi Komai

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

1. グループの研究目的

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

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

さらに、これまでの地圏環境におけるリスク研究を発展させて、二酸化炭素地中貯留のリスク評価、地圏微生物を利用した環境リスク管理、多孔質体における混相流数値解析手法、核廃棄物を含む各種廃棄物の環境安全性評価、スモールスケールマイニングの管理などの開発につなぎ、より安全で安心な人間生活の実現に資するとともに、実用的な手法と対策技術の普及をはかる。特に、地圏環境評価システムの産業普及のための実用パッケージ化、土壌汚染研究会（産業技術連携推進会議）の充実を目標とする。社会的な活動の中では、

国内外の環境リスク問題に上記の研究のアウトプットを適用させ、土壌汚染評価システムやリスク評価手法の標準化などのアウトカムに結実させるための取り組みを強化する。

本年度は、新たに「製鋼スラグと腐植物質を活用した生態系修復技術の受容性と環境リスクに関する研究」および「メコン川底質中の有害物質の原位置浄化に関する調査研究」を開始させた。

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

2. グループの研究資源

1) グループ員

駒井 武（リーダー）

田中敦子・村尾 智・張 銘

川辺能成・原 淳子・坂本靖英

西脇淳子 産総研特別研究員（PD）

テクニカルスタッフ 高田貞江・小川桂子・森田佳美

2) 研究課題

運営費交付金「地圏環境リスクの研究（地質）」

運営費交付金「地圏環境リスクの研究（エネルギー）」

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

運営費交付金「地下水汚染の科学的自然減衰（MNA）に関する研究」（部門シーズ研究）

委託研究「製鋼スラグと腐植物質を活用した生態系修復技術の受容性と環境リスクに関する研究」（環境省循環型社会推進費）

委託研究「メコン川底質中の有害物質の原位置浄化に関する調査研究」（文部科学省）

委託研究「腐植物質の二価鉄錯形成能に関する研究（その3）」

共同研究「多様な環境リスクの統合的な評価手法に関する調査研究」

共同研究「土壌汚染検知技術に関する研究」

3. 平成 21 年度の研究計画及び進捗状況

1) 地圏環境リスクの研究(地質・エネルギー)

土壌や地下水中の残留性有機塩素系化合物に関する浄化手法の開発および自然減衰能評価を行う。また、土壌・地下水汚染に関わる知的基盤整備に資するため、自然起源および人為起源に関する各種データを取得し、表層土壌評価基本図(図1)を整備している。

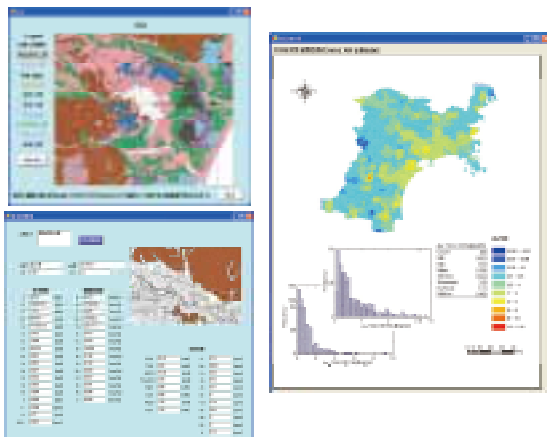


図1 表層土壌評価基本図の出版

スモールスケールマイニング SSM について、主に産業、環境および社会的リスクの観点から、研究を進める。産業リスクとしての研究では鉱物資源のフェアトレード確立に、環境リスク研究では大型環境試料用の非真空 PIXE 分析法の開発、さらには社会的リスク研究では地域住民との協働によるリスク管理に関わる研究を進める。

石油系炭化水素や重金属類に関して、土壌汚染リスク評価に必要な物性パラメータ、移動パラメータ等を取得し、汚染物質の移動性を予測する数値解析手法を開発する。また、重金属等の土壌汚染に対して、自然エネルギーを活用した浄化手法の開発、および迅速オンサイト型の分析・調査技術の検討を行う。さらに、植物や水生生物等の生態系への環境リスクを評価するための方法論を開発し、リスク評価システムに反映させる。

地圏環境における安全解析の不確実性を低減させるために、地質媒体における物質移行及び遅延特性の測定・評価技術の高精度化を行う。また、放射線リスク評価と学術体系に関する基礎研究を行い、わが国に適した放射線リスクコミュニケーションのフレームワークを提唱する。

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

2) 地圏環境リスク評価技術の開発

わが国の地圏環境における環境リスクを評価するための詳細モデル GERAS-3 (図2: 詳細型モデル)を開発し、そのデータベースを作成している。

これまでに、土壌の不飽和層から地下水の飽和層に至る汚染物質の移動モデルを作成し、吸着や反応などのプロセスを反映させた。また、土壌・地質汚染基本調査や地化学詳細調査などに基づいて、地圏環境情報DBの作成に必要な各種解析を行う。さらに、地質調査および室内実験を行い、必要なデータやパラメータを集積する。

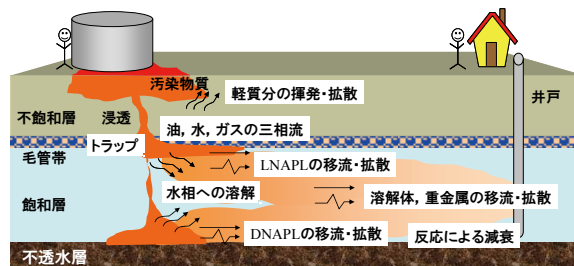


図2 土壌汚染リスク評価手法 GERAS の開発

3) 自然機能を利用した浄化手法及びMNAの研究

有機塩素化合物や石油系炭化水素による地下水汚染について、山形県内のモニタリングを通じてMNAの適用可能性の検討や、プロトコルの作成に関する検討を行う。特にMNAの過程における微生物分解について、バッチ試験による分解過程や炭化水素成分毎の分解に関する速度論的な解析を行う。また、現場のモニタリングや室内試験を通じて、微生物および副生成物の検出や定量を行い、汚染地下水中で分解が生じていることを証明する。さらに、難透水層の浄化手法の開発に向けて微生物の評価や機能向上の検討を行う。

4) 腐植物質と金属元素の相互作用を活用した生態系修復技術(国環研、北大、東大と共同)

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

4. 今後の方針

当グループは、グループ員の緊密な連携を図りながら、地圏環境評価に関する学術的成果を論文等で公表するとともに、積極的な対外活動を実施する。また、本分野のみでなく他の分野に関しても萌芽的研究から実用化研究まで幅広く研究を実施する。特に、地圏環境評価システム、環境共生浄化技術、リスクマネジメント手法および表層土壌評価基本図などの成果物を一般に普及させ、土壌・地下水汚染、生態系影響および環境修復などの問題解決に寄与することを目指す。

九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレートスラブの沈み込みの関係 Relation between Spatial-Temporal Changes of Volcanic and Geothermal Activities in Kyushu, and Subduction of the Philippine Sea Plate-Slab

地熱資源研究グループ：茂野 博

Geothermal Resources Research Group : Hiroshi Shigeno

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

1. はじめに

琉球弧と西南日本弧の会合部に位置する九州地域は、西日本の陸域中で特異的に新第三紀後期～第四紀の火山・地熱活動が活発かつ多様である。活火山については全国 108 の中で九州には 19 (高活動度のランク A の 13 の中では 5) があり、温泉については都道府県別の源泉総数・高温源泉数・総湧出量に関して、大分・鹿児島・熊本が各々上位 5 位以内に入っている。今回、九州の火山活動の時空変化とその原因になったフィリピン海プレートスラブの運動の時空変化との関係を中心に、地質調査総合センター

(2007)・茂野 (2008) を基礎に簡易モデル化—数値シミュレーションによって検討した (茂野, 2009, 2010) ので、その概要を紹介する。

2. 九州地域の火山活動の時空変化の概要

図 1 (A) に示すように、九州地域を北から時計回りに 6 ブロック (北部 (N)・東部 (E)・南部 (S)・南西部 (R)・西部 (W)・中央部 (C)) に分けて、火山活動の概要を整理する (図 1 参照)。

(1) 新第三紀後期 (～4 Ma 以降) には、南部 (S)・東部 (E)・西部 (W) の 3 ブロックに島弧火山活動、また西部 (W) に背弧火山活動 (～13 Ma 頃から継続的) が生じた。

(2) 第四紀 (～2 Ma 以降) になると、南部 (S) の島弧火山活動は東方へ移動し、後期には鹿児島地溝とトカラ列島に集中化して大規模火砕流の噴出によりカルデラ群が生成した。東部 (E) の島弧火山活動は南方へ移動し、ENE-WSW 走向の地溝帯を形成して中央部 (C)－西部 (W) にも繋がったが、後期には 3 つの複成火山 (阿蘇, 九重, 由布・鶴見) に集中化した。中央部 (C)－西部 (W) の火山活動は、後期には雲仙火山に残り、五島列島 (背弧火山活動) に広がった。

3. 簡易モデル化と数値シミュレーション

上記の火山活動の時空変化の生成機構を、簡易的に 5 時階 (13 Ma 頃～6 Ma 頃の間, 6 Ma 頃, 4～3 Ma 頃, 2～1 Ma 頃, 0.2 Ma 頃以降) に簡易モデル化した。フィリピン海プレートは 6 Ma

頃から定常的に NW 方向に～4 cm/year の速度で進行し、琉球弧と西南日本弧の下に沈み込んできたと想定した。特に今回のモデル化では、対象地域の特異な点として、沖縄トラフ域 (背弧海盆) の拡大、震源分布に顕著な琉球弧下のスラブの 3 セグメント化、九州地域下の上記スラブの急傾斜化、西南日本弧の前弧域の右横ずれ運動 (中央構造線に沿う) などに注目した。

茂野 (2008) の斜め沈み込みモデルを基礎に、今回上記モデルに沿って、より動的に沈み込み線の移動 (沖縄トラフ域の拡大に対応) を含めて～0 Ma と～3 Ma について簡易数値シミュレーションを行った (茂野, 2009, 2010)。これにより (残された検討課題は多いが)、2. に概説した九州地域の火山活動の時空変化などと調和的な結果が得られた (図 2・図 3 を参照)。

文献

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

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

茂野 博 (2009) : 九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレートスラブの沈み込みの関係—電子地球科学情報を利用した簡易モデル化—シミュレーションによる検討—。地質ニュース, no. 656, 6-21。

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

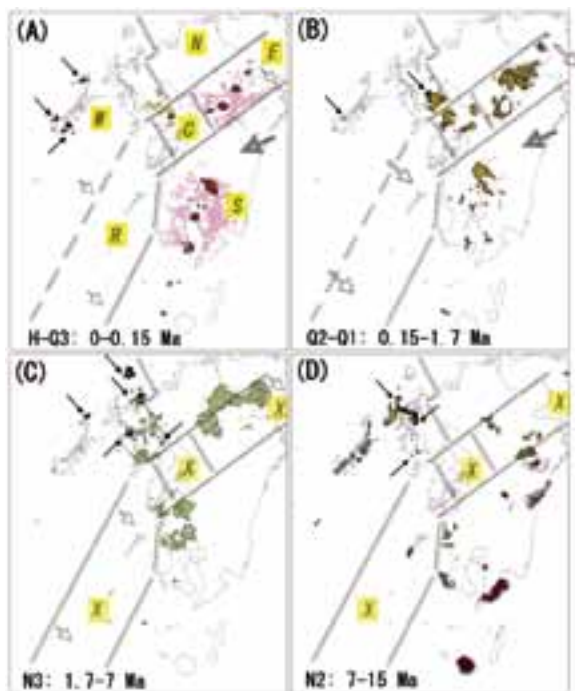


図1. 九州地域における新第三紀中期～第四紀 (D)→(C)→(B)→(A) の火山岩類の分布. 各図には、各種火山岩種の分布 (地質調査所, 1995) などとともに、6 地域ブロックの境界線などを示した. 小さな黒矢印はアルカリ岩系を、淡桃色は火砕流堆積物などを示す. 各種矢印、英字記号などを含めて、詳しくは茂野 (2009) を参照.

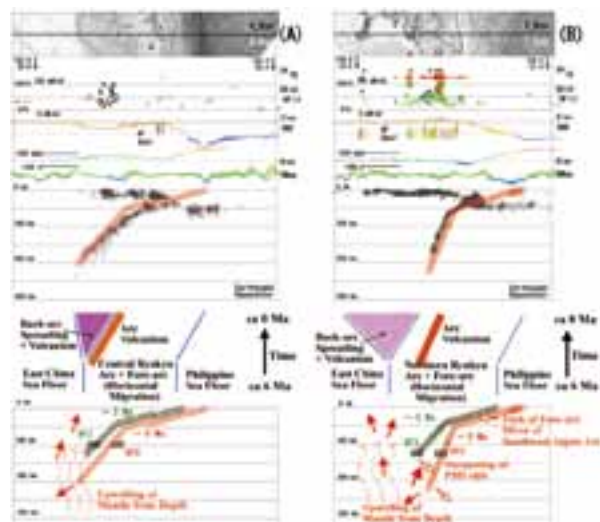


図3. 琉球弧を横断する2断面線 (図2の 8_Ryu と 7_Kyu) における火山・震源などの分布と簡易数値シミュレーションによって計算されたスラブ分布の時間変化. 本図の上部に各種の電子地球科学情報, その下方に震源分布とともに ~0 Ma のスラブ分布を示す. さらに、最下部には ~3Ma と ~0 Ma のスラブ分布のシミュレーション結果を比較・解釈 (赤色の矢印群は、3 種の機構による ~0 Ma の高温マントル物質の上昇を推定) し、その上方に経時 (6 Ma→0 Ma) 変化についての概略的な説明図を入れた. 使用したデータ源を含めて、詳しくは茂野 (2009, 2010) を参照.

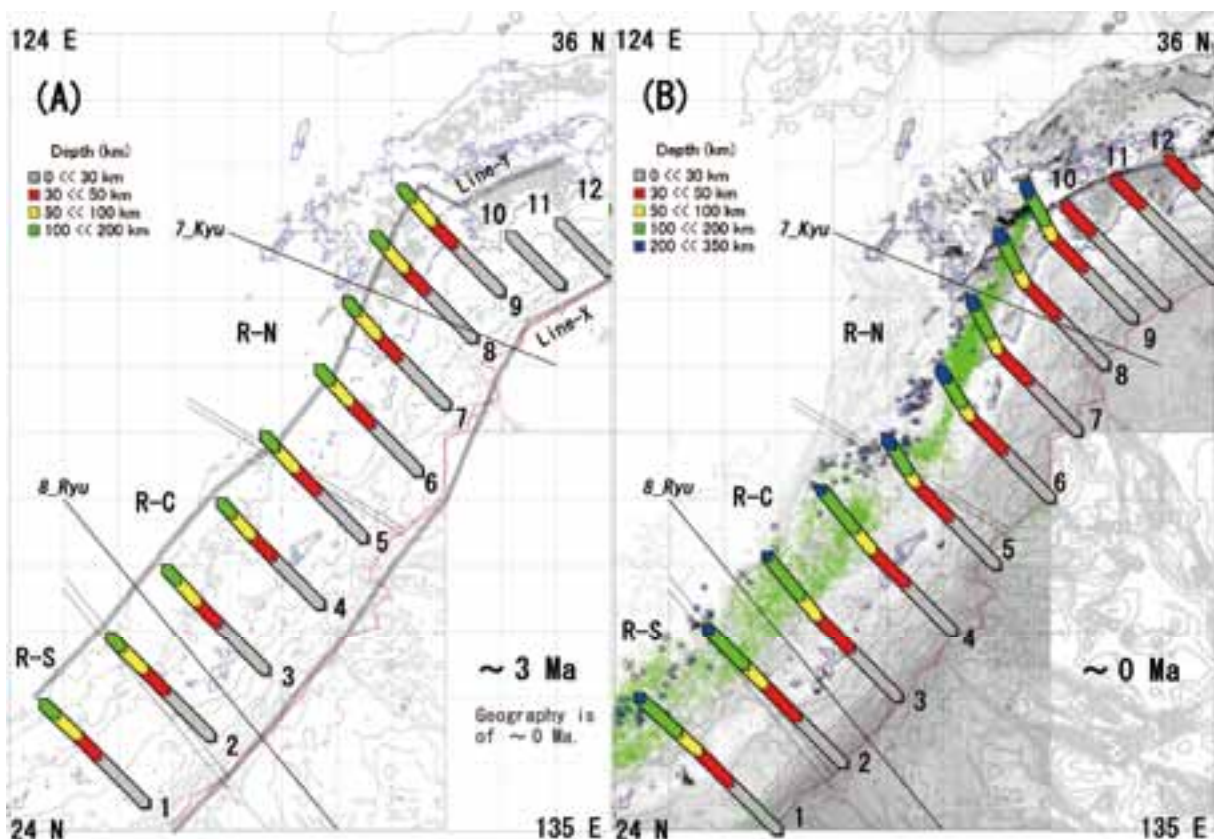


図2. 琉球弧下へ沈み込むフィリピン海プレートスラブ上の代表移動点群についての、簡易数値シミュレーション結果 (平面図). (A)は ~3 Ma, (B)は ~0 Ma の結果を示す. (A)の Line-X, Y は(B)の沈み込み開始線と到達線を示し, (B)ではシミュレーション結果とともに深部震源分布 (100 km <) を同色で示す. 使用したデータ源やシミュレーションのパラメータ値を含めて、詳しくは茂野 (2009, 2010) を参照.

花こう岩石材に浸透する水—中性子ラジオグラフィ試験による可視化— Visualization of water permeation into granite by neutron radiography

長秋雄（研究部門付主任研究員） 松林政仁（日本原子力研究開発機構）
長谷川正一（羽黒石材商工業協同組合） 吉田博和（茨城県工業技術センター）
Akio Cho^{1)*}, Masahito Matsubayashi²⁾,
Syouichi Hasegawa³⁾ and Hirokazu Yoshida⁴⁾

¹⁾ Institute for Geo-Resources and Environment, ²⁾ Japan Atomic Energy Agency,

³⁾ Haguro Stone Commerce Association, ⁴⁾ Ibaraki Prefecture Industrial Technology Center

*Corresponding Author, e-mail address: akio.cho@aist.go.jp

1. はじめに

花こう岩は、強度・耐久性・美観に優れるという素材特性を持ち、石垣・建築物・橋・舗装などの社会資本に用いられてきた。石碑・燈籠・墓・石造物・モニュメントに使われる花こう岩は、文化や伝統を過去から現在に、現在から未来に伝える自然素材でもある。

茨城県は国内有数の花こう岩産地であり、石材産業は重要な地場産業である。茨城県産の花こう岩には、稲田石・羽黒糠目石・真壁石・やさしみかげ・坂戸石などがある。

当研究部門は、(財)茨城県中小企業振興公社委託事業産・学・官共同研究「石材の劣化メカニズムの解明」(2007年度～2009年度)を、羽黒石材商工業協同組合・茨城大学工学部と行っている。この共同研究は、花こう岩石材製品の品質保証・サービスの向上を目的としている。

石材での劣化事例の一例として、産総研地質標本館玄関外壁に用いられた韓国産花こう岩石材での変質状況を図1に示す。1980年竣工であるが、既に、変色・鉱物の脱落・白色化が発生している。一般には、花こう岩は、難透水で水を透さないと考えられているが、実際には極め

てわずかであるが水を透す。図1に示した劣化事例では、花こう岩石材の背後及び下部から浸透した水とその溶解物が、花こう岩石材と緩慢な化学変化や物理変化を起こすことで、石材の劣化や変質が生じていると考えられる。したがって、花こう岩石材の劣化現象の解明および劣化防止対策の開発において、花こう岩石材での水の浸透特性を把握することが重要である。

我々は、(財)放射線利用振興協会の平成19年度中性子利用技術移転推進プログラム（通称トライアルユース）により、花こう岩石材に浸透する水の動態を可視化することを目的として、中性子ラジオグラフィ試験を行った。

2. 中性子ラジオグラフィ試験

試験には、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉（JRR-3）にある中性子ラジオグラフィ装置（TNRF）を用いた。この装置では、コンクリートのひび割れに浸透する水の可視化・植物中の水分動態の可視化などが行われてきたが、花こう岩石材のような難透水性素材での水分動態の可視化試験は今回が初めてであった。

試験には、稲田石（粗粒花こう岩）・真壁小目石（細粒花こう岩）・G614（中国産細粒花こう岩）・G623（中国産粗粒花こう岩）を用いた。これら花こう岩の吸水率は、いずれも約0.3%であった。

予備試験を行い、いずれの花こう岩でも、乾燥状態・湿潤飽和状態ともに、厚さ40mmでも中性子透過率が約40%であること、湿潤飽和状態では中性子透過率が約0.02%ポイント低下することを確認した。この結果を受け、粗粒花崗岩の粒径が5mm程度であることを考慮して、供試体の形状を一辺40mmの立方体とした。

本試験では、水を含ませたスポンジの上に供試体を載せ、毛管力により供試体底面から水を浸透させながら、中性子ラジオグラフィ画像を



図1. 地質標本館玄関の外壁石材の劣化状況。

約 10 分毎に撮影した。試験の前後で供試体の重量を測定し、重量変化量から供試体に浸透した水の量を求めた。

3. 試験結果

供試体底面から水を浸透させてから約 2 時間後の中性子ラジオグラフィ画像を、図 2 に示す。左が稲田花こう岩供試体の、右が G614 供試体の画像（直接画像）である。これらの直接画像では、水が浸透した部分を可視化することはできなかった。これは、水の浸透による中性子透過率の低下が、最大でも約 0.02%ポイントと小さく、背景となる花こう岩内部での中性子透過率の変動幅より小さいためである。

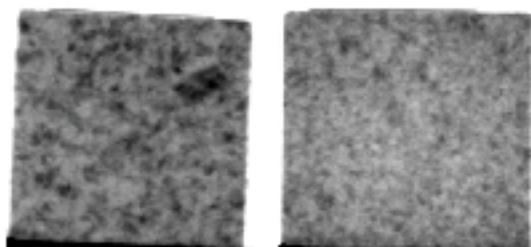


図 2. 底面から水を浸透させてから約 2 時間後の中性子ラジオグラフィ画像。

左：稲田石，右：G614

水の浸透に伴う中性子透過率の低下を明瞭にするために、2 枚の中性子ラジオグラフィ画像の差分画像を作成した。G614 供試体での連続した 2 枚の撮影画像の差分画像を、図 3 に示す。図 3 の上段左図にある数値「14min-4min」は、14 分後の撮影画像から 4 分後の撮影画像を引いた差分画像であることを示す。この図では、4 分後から 14 分後の間に新たに水が浸透した部分が黒く表示されている。他の図も同様である。差分画像を作成することで、G614 供試体に浸透する水の動態を可視化することができた。

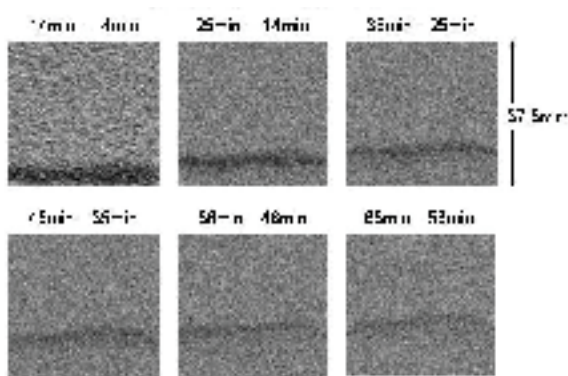


図 3. G614 供試体での、10 分毎に撮影した 2 枚の中性子ラジオグラフィ画像の差分画像。底面からの水の浸透フロントが黒く表示されている。

同様な差分画像を作成することで、真壁小目石供試体・G623 供試体でも水の浸透フロントを可視化することができた。稲田石供試体では、供試体が試験中に傾動したために、浸透フロントを可視化できなかった。

供試体底面から水を浸透させてから約 150 分後の供試体の重量増加（吸水量）は、稲田石・真壁小目石・G614・G623 供試体それぞれで、0.06g・0.17g・0.13g・0.07g であった。図 3 で可視化されている浸透フロントは 10 分間のものである。可視化されている水の重量は 0.01g 前後と推定できる。

図 3 に示す可視化画像より、浸透フロントはほぼ一様に上昇していることがわかる。供試体側面での浸透フロントの下方への湾曲は、供試体側面からの水の蒸発のためであろう。

中性子透過率の変化量について水平ライン上での平均値を計算し、その上下方向プロファイルを図 4 に示す。図中の 5 本のグラフは、右から、底面から水を浸透させてから約 23 分・約 44 分・約 65 分・約 86 分・約 112 分のものである。水が浸透すると中性子透過率が低下するので、透過率が低下し始めるグラフの肩が、水の浸透フロントの位置（高さ）を示す。このような数値化により、花こう岩石材に浸透する水の動態を定量的に評価することもできた。

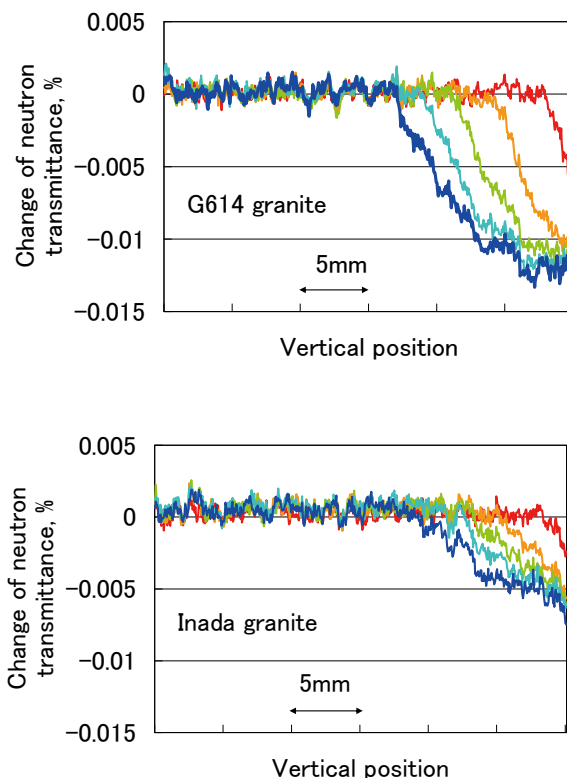


図 4 中性子透過率の変化量の水平ライン上での平均値の上下方向プロファイル。左から、約 23 分後・約 44 分後・約 65 分後・約 86 分後・約 112 分後

サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト「花崗岩を通して 地域を考える」 SPP classes “Let’s learn home area from topics of granite”

研究部門付主任研究員：長 秋雄

Institute for Geo-Resources and Environment：Akio Cho*

*Corresponding Author, e-mail address: akio.cho@aist.go.jp

1. はじめに

当研究部門では、エネルギー・環境分野での解決すべき課題として、高レベル放射性廃棄物地層処分や二酸化炭素地中貯留に係わる研究開発を行っている。これら事業の実施段階においては、実施地域での住民の理解が求められる。また、高レベル放射性廃棄物地層処分事業は、今後数十年を要する長期的な事業であり、この分野での次世代・次々世代の後継者を育成する必要がある。

しかし、地学教育の現状は負のスパイラルに陥っている。青木正博地質標本館館長は、次のように述べている。「初等中等理科教育において、地学は長年軽く扱われ、大学受験でも地学を選択する生徒はわずかであり、理科教師の中にも、高校時代以降地学の教育を受けていない方も少なくない。そのため、地学のカリキュラムが用意されていても、体験の裏付けを持たない教師には負担感が大きく、生徒たちを面白がらせるには至らないことも多いと聞きます。そして地学に興味を持たないまま青少年は大人になってゆきます。この悪循環を断ち切ることは出来ないものでしょうか。」(青木, 2008)

このような問題意識の中、つくば市立手代木中学校 2007 年度サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト「花崗岩を通して地域を考える」を、筆者が産総研側責任者となり、岩瀬石彫展覧館の浅賀正治氏とも連携して行った。

浅賀氏も次のように述べている。「自身の仕事に自信と誇りと感謝の思いがあれば、次の時代への後継を育てる責任が生まれます。」(浅賀, 2008)

産総研での担当者は、他に、地質標本館の宮地良典・目代邦康・青木正博・酒井彰と地質調査情報センターの内田洋平であった。

2. サイエンス・パートナーシップ・プロジェクトのねらい

サイエンス・パートナーシップ・プロジェクトは、科学技術振興機構からの資金支援により行うもので、学校等と大学・科学館等の連携により、研究者・技術者・展示解説者等を講師と

する、科学技術、理科・数学に関する観察、実験、実習等の体験的・問題解決的活動を中心とした学習活動を行い、生徒の科学技術、理科・数学に対する興味・関心と知的探究心等を育成することを目的としている。

手代木中学校 2007 年度サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト「花崗岩を通して 地域を考える」では、2006 年 11 月から担当教諭と話し合い、そのねらいを次のように決めた。

つくば市のシンボルである筑波山をつくっている花崗岩を題材として、この地域を育む素地となった花崗岩にまつわる地質現象・地下水・材料物性・地域産業・郷土史などの講座を通して、生徒の科学への関心を高める。

石彫家である浅賀正治氏の指導のもと、受講生には石彫を体験してもらう。対象に触れ、対象に働きかけることは、科学や技術の基本であり、受講生が石彫をしながら科学講座で学んだ事例を思い出してくれれば、学習効果は一層上がるであろう。

図 1 は、全体概要を紹介したパネルである。2007 年 6 月の手代木中学校文化祭で掲示し、生徒全員・保護者の方々にもこの取り組みを知ってもらうことにした。



図 1 全体概要を紹介したパネル

3. SPP「花崗岩を通して 地域を考える」での 講座内容

全 10 回の科学講座の内容を, 受講生の大河内君 (中学 1 年生) が手代木中学校 2008 年度文化祭でのステージ発表に向けて編集したスライドを用いて紹介する.

6/13 講座「岩石を五感で感じる」



6/27 講座「花崗岩の強さ・硬さ・波の速さー石の目」



7/11 講座「花崗岩の組成とつくばの地質」



7/25 講座「建築素材・芸術素材としての花崗岩」



9/19 講座「つくば市内の石材」



9/26 講座「地下水とは」



10/10 講座「筑波山周辺の石材加工の歴史」

講師：千葉隆司氏 (かすみがうら市郷土資料館学芸員)



10/13 講座「筑波山巡検」



11/3 講座「採石場とストーンフェスティバル」



2/6 講座「発表」

受講生の石彫作品「四季のベンチ」



参考文献

青木正博(2008): 地質ニュース, 643 号, 4.
浅賀正治(2008): 地質ニュース, 643 号, 57-59.

地圏資源環境研究部門成果報告書 2009
(GREEN REPORT 2009)
AIST04-C00014-7

平成 21 年 12 月 3 日発行
編集：独立行政法人産業技術総合研究所
地圏資源環境研究部門
発行者：矢野雄策

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

〒305-8569 つくば市小野川 16-1 (西事業所)

Green Report

2009

*Results of the 2nd Period and Vision for the 3rd Period
of the Institute*

Research Reports of The Institute for Geo-Resources and Environment
With Special Topics of
Results of the 2nd Period and Vision for the 3rd Period of the Institute

3 December 2009