

Green Report

2010

地圏資源環境研究部門成果報告
地圏に関する基盤情報の整備と提供

7 December 2010

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第10回を迎えました。本年は3月11日の東北地方太平洋沖地震、さらに引き続く原発事故、電力不足で、私達の日常生活やエネルギーに対する価値観などが大転換を余儀なくされた年となりました。2万人の方々が亡くなったり行方不明となった津波の衝撃、安全を確保していたはずの原子力発電所がこれほどの事故を起こした現実、私達は大きなショックを受けました。地震は、津波は、予測・対処できなかったのか？原発事故は防げなかったのか？危険予測と防災に関する議論は産総研の地質分野の研究にも深く関わっています。地質学は過去を知り、それに基づいて未来を予測することが使命だからです。また、地震・津波と原発事故でもたらされた汚染から被災地を復旧・復興するために技術を提供することも地質分野の使命です。特に私達の部門は、地下水、土壤汚染、津波堆積物の状況、地盤液状化などに関連して地下の状態を把握する技術を持っており、これを使って現状と対処法を研究し、成果を社会に伝えて行く責務があると思っています。さらに、原発事故と電力不足によってエネルギー供給のあり方も大きな議論になっており、自然エネルギーが注目されています。地熱発電や地中熱利用も自然エネルギー利用の有力な選択肢であり、当部門が研究で貢献できる分野として力を入れていきたいと考えています。

このような中で、今年度の私達の活動状況と方向性を皆様にお伝えするために、今回の報告会のテーマを「震災と地圏システム」としました。当部門は地質分野の中で、特に資源と環境の課題を中心に研究を進めておりますが、震災とそこからの復興、そして今後のエネルギー供給という課題をどのように考え、取り組んでいるかをご理解いただければと考えております。

部門成果報告会では、メインテーマに関する講演以外に、各研究グループや個人の研究成果をより詳しく知っていただくために、ポスターセッションも例年同様設け、ご参加いただいた方との研究交流を深めていきたいと存じます。当部門は我が国にとっての喫緊の課題、あるいは中長期的な課題に取り組んでおり、それらをご紹介します。レアメタル、天然ガスあるいは地熱資源の探査、二酸化炭素の地中貯留、地層処分環境評価、土壤汚染などの戦略課題、さらには地質素材から発展させた材料開発や、地下微生物研究など多様な研究をご覧ください。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、毎年定期的で開催しております。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10回(2011年) 地圏資源環境研究部門成果報告会

日 時 2011年 12月13日(火) 14:00-18:10(開場 13:30)

場 所 (独)産業技術総合研究所

臨海副都心センター(別館 11F 会議室)

テーマ 「震災と地圏システム」

プログラム

14:00-14:20	地圏資源環境研究部門研究紹介	研究部門長 矢野 雄策	1
研究発表 「震災と地圏システム」			
14:20-15:00	招待講演 北上山地と仙台平野の地質環境と津波堆積物	東北大学大学院環境科学研究科 教授 土屋範芳	6
15:00-15:30	土壌汚染の評価手法と浄化技術の開発 ―震災復興支援に向けた取り組み―	副研究部門長 駒井 武	10
15:30-16:00	福島県いわき市の大震災被災地における物理探査法調査	主幹研究員 内田利弘	14
16:00-16:40	ポスターセッション	(各研究グループ, 個研究課題)	
16:40-17:10	復興に向けた広域地下水流動解析	地下水研究グループ長 丸井敦尚	18
17:10-17:40	液状化問題への物理探査技術の活用と取り組み	物理探査研究グループ 主任研究員 神宮司元治	22
17:40-18:10	持続可能な地中熱利用を目指して ―地中熱のポテンシャル評価手法の開発―	地下水研究グループ 内田洋平	26
18:15-20:00	懇親会		

ポスターセッション 発表題目一覧

(研究グループ発表)

地下水研究グループの紹介	丸井 敦尚	30
地熱資源研究グループの紹介	阪口 圭一	32
鉱物資源研究グループの紹介	高木 哲一	34
燃料資源地質研究グループの紹介	鈴木祐一郎	38
地圏微生物研究グループの紹介	坂田 将	42
地圏化学研究グループの紹介	佐脇 貴幸	44
物理探査研究グループの紹介	内田 利弘	48
CO ₂ 地中貯留研究グループの紹介	中尾 信典	52
地圏環境評価研究グループの紹介	今泉 博之	56
地圏環境リスク研究グループの紹介	張 銘	58
地圏環境システム研究グループの紹介	高倉 伸一	60

(個人発表)

つくば市内での石造文化財の被災事例 —2011. 3. 11東日本大震災—	長 秋雄	64
福島第一原子力発電所の半径30km圏周辺における広域地下水流動*	丸井敦尚・伊藤成輝・越谷 賢・小原直樹	
地中熱ポテンシャル評価手法の開発*	吉岡真弓・内田洋平・藤井 光 (九州大) ・ 山谷 睦 (日本地下水開発(株)) ・ 宮本重信 (福井大)	
震災復興に向けた地下水利用	丸井敦尚・内田洋平・伊藤成輝・越谷 賢・小原直樹・井川怜欧・吉岡真弓	66
東京湾埋立地における長期観測により認められた地下温度の上昇*	宮越昭暢 (地質標本館) ・ 林 武司 (秋田大)	
近年の中央アジア地域における金鉱床の開発について*	大野哲二・神谷雅晴・奥村公男・寺岡易司	
佐渡南西沖上越海盆西部における熱流量測定*	後藤秀作・森田澄人・棚橋 学・金松敏也 (海洋研究開発機構) ・ 八久保晶弘 (北見工業大) ・ 片岡沙都紀 (函館工業高専) ・ 町山栄章 (海洋研究開発機構) ・ 木下正高 (〃) ・ 山野誠 (東京大) ・ 松林 修・松本 良 (東京大)	
熊野トラフにおける鮮新世以降の構造変形とそれに伴う諸現象*	森田澄人・後藤秀作・棚橋 学	
シェールガス鉱床の地化学的条件と我が国でのシェールガス鉱床の可能性	鈴木裕一郎・小田 浩	70
Cs吸着能を持つ非晶質アルミニウムケイ酸塩の合成とその吸着特性*	末益 匠・鈴木正哉・月村勝宏・片元 勉 (戸田工業(株))	
関東地域の水溶性天然ガスに関する地質・地化学的研究*	佐脇貴幸・金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎・棚橋 学・中嶋 健・森田澄人・坂田 将	
コンクリートの乾燥収縮 —地質学の立場からの考察—	須藤定久	72
東日本大震災による砕石場の被害 —茨城県を例に—	須藤定久	74
排ガスからの二酸化炭素回収を利用した農業分野への検討 (2)*	鈴木正哉・月村勝宏・酒寄英里・池田智英子・永好けい子・ 犬飼恵一 (サステナブルマテリアル研究部門) ・ 前田雅喜 (〃)	
くりこみを用いた多孔質岩石の空隙スケール画像のフォーメーションファクターの計算*	中島善人・中野司 (地質情報研究部門)	

高温油層へのCO₂の注入が常在微生物のメタン生成活動に与える影響*

眞弓大介・坂田 将・前田治男（国際石油開発帝石㈱）・宮川喜洋（〃）・五十嵐雅之（〃）

発光バクテリアを用いたバイオアッセイによる土壌汚染評価手法の開発 ―土壌溶出成分の影響―*

杉田 創・駒井 武・井本由香利

微生物によるクロロエチレン類汚染浄化の分類と制限要因*

張 銘・吉川美穂（ケミカルグラウト㈱）・竹内美緒・駒井 武

難透水層を含むVOCs汚染地盤における*Dehalococcoides*属細菌の生息判別指標の検討*

吉川美穂（ケミカルグラウト㈱）・竹内美緒・張 銘・駒井 武

放射性物質によるヒトへの被ばく評価*

張 銘・保高徹生・田中敦子・川辺能成・原 淳子・坂本靖英・駒井 武

CO₂地中貯留のリスクアセスメントシステム GERAS-CO₂GS*

田中敦子・坂本靖英・駒井 武

放射性セシウムの土壌中での挙動評価*

保高徹生・中村公人（京大）

二、三の岩石におけるパーカッションビットの掘削特性*

唐澤廣和・鈴木宏治（鉦研工業㈱）・高橋幸司（〃）

*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

北上山地と仙台平野の地質環境と津波堆積物 Geological Environment of the Kitakami Mountains and Sendai Plain, and Tsunami Deposits

東北大学大学院環境科学研究科 教授：土屋範芳
Professor, Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University: Noriyoshi Tsuchiya
Phone: 022-795-6335, e-mail: tsuchiya@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

1. はじめに

2011年3月11日のM9.0の巨大地震によって三陸沿岸には大津波が押し寄せ、壊滅的な被害をもたらされた。被災地に位置する大学に勤務する者にとって、また、まがりなりにも地球科学に関連する学問に携わる者にとって、この震災の物理的、心理的影響には大きなものがあつた。一体何が自分にとってできることなのか、何をすべきなのか、手探りの状態がしばらく続いた後、やはりいままでの研究に立脚しながら、一步ずつ進むしかないと思いを新たに、被災地の復興につながる実学を進めていこうと考え、津波堆積物の中に含まれるヒ素および重金属類の分布と挙動についての調査、解析を開始した。

我々の研究グループと産総研 地圏資源環境研究部門との間には密接な研究協力関係があり、特に平成17～19年度に行われた「科学技術振興機構「産官学の効果的な連携」プログラムでは、駒井武氏を中心とするグループと共同で、地圏環境に関わる総合的なデータベースの構築を進めることができた^{1,2)}。地圏環境インフォマティクス(GENIUS: Geosphere Environmental Informatic Universal System)では、産総研のシームレス地質図、国土交通省を中心として進められていた土壌図、環境省の植生図などの情報をGIS(地理情報システム)に格納し、これらの画像データに加えて、岩石、土壌、地下水などの分析データ、さらに変質帯や鉱山の位置図などの情報を付加して、全国を網羅する地圏情報システムを構築し、DVD2枚組として公開した。

この地圏環境情報を基礎に、平成18～20年には宮城県と共同で、宮城県の土壌のヒ素および重金属類のバックグラウンド調査を実施した。これらの調査により、宮城県の平野部や、グリーンタフ変質帯の鉱床域、さらに北上山地の一部にはヒ素や重金属のリスクが高いことが判明した。

これらの研究から、宮城県沖、三陸沿岸の海洋底にはヒ素や重金属類に関わる環境リスクを内包する海洋底堆積物があることが予想された。還元環境にある海洋底に静かに堆積していたであろう堆積物が巨大津波により陸に押し上げられた。空気と触れることにより溶出のリスクも高まる。膨大なガレキに加えて、ヒ素や重金属に関わるリス

クを潜在的に抱える津波堆積物の処理を考える必要が出てくるであろう。とにかくまずは実態調査を始めよう。大学のとりあえずの復旧がすんだ4月中旬から、沿岸部での津波堆積物の調査を開始した。また津波ばかりでなく、宮城県の土壌放射線量調査も平行して実施した。

津波堆積物の調査と分析の結果、北上山地沿岸域、また仙台平野沿岸域の少なくない地点において環境基準を超えるヒ素の溶出をみた。本稿ではこれらの実態を速報として伝える。

2. 当該地域の地圏環境に関わる研究例

GENIUS (地圏環境インフォマティクス) :
GENIUS (地圏環境インフォマティクス) は地圏地図情報と分析データなどをGIS (ArcView) に格納している。ここには休廃止鉱山など6000以上の鉱山位置を鉱床タイプや代表的な鉱石鉱物などの属性情報ともに閲覧することができる³⁾。この情報により、北上山地の中古生層中には含金石英脈を主体とする金鉱山が数多く分布していることがわかる。これらの石英脈とその周辺の変質帯には、ヒ素を含む熱水変質帯が観察される。このことは、これらの地層を起源とするリワーク堆積物には相当量にヒ素の含有が予測される⁴⁾。



図1 地圏環境インフォマティクス(GENIUS: Geosphere Environmental Informatic Universal System) 左が ver.1.01 (2008), 右が ver.1.02 (2011)。

なお、平成 19 年度に研究終了時に発刊した GENIUS ver.1.01 は既に配布が終了し在庫がない状態であった。震災後、各方面から問い合わせがあったため、初期バージョンを修正し、さらに ArcView ver.10 に対応させた GENIUS ver.1.02 を作成した。入手希望の方は、下記 URL より申し込んでいただきたい。Viewer のみに対応するバージョンは原則無料で配布している。

<http://geoserv.kankyo.tohoku.ac.jp/genius/>

宮城県自然由来重金属バックグラウンドマップ：

宮城県内に分布する地層を各地質時代、各岩相などをほぼ網羅するように 120 地点で土壌を採取し、環境省告示 18,19 号試験および蛍光 X 線分析による全岩含有量(地球化学的含有量)を分析し、これらの分析結果をふまえて、各地層のヒ素および重金属類のリスクを点数化し、地層分布にしたがって宮城県全域のリスクマップ(スコア評価マップ)を作成した。対象とした元素は、鉛およびヒ素である。

この結果、鉛とヒ素に関しては、いくつかの地質単元に置いて環境基準値に限りなく近いバックグラウンド値を持つことが判明した。局所的には、環境基準値を超過するものもあった。

図 2 にヒ素の溶出量の結果とスコア評価した結果を示す。いずれ暖色系が溶出量が高かったり、リスクが高い地層単元を示している。仙台平野、細倉鉾山を含むグリーンタフ変質帯とその下流域、石巻市周辺域、さらに北上山地の一部(気仙沼周辺域)にはヒ素のリスクが高い地質単元が分布することが認められる。

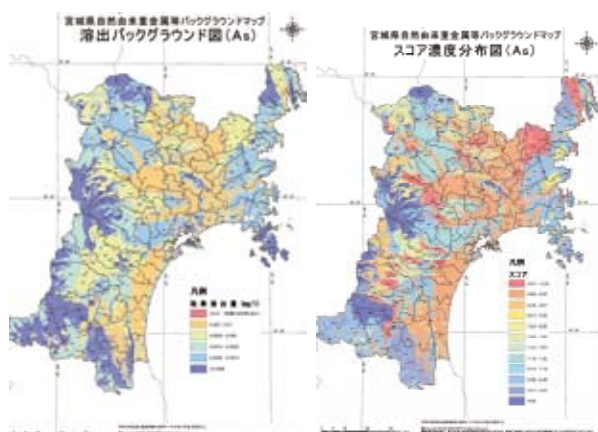


図 2 宮城県の重金属類のバックグラウンドマップ(ヒ素)、左が水溶出量、右が水溶出量、塩酸溶出量、含有量(地球化学的全岩含有量)結果を点数化してリスク評価したマップ⁵⁾

3. 津波堆積物

試料および試料調整：青森県八戸市から岩手県、宮城県および福島県の相馬市までの津波被災地の 129 点から試料を採取した。試料採取間隔はおおむね 5km とし、特に面的な広がりがある地域や、

川に沿って津波が湾深くまた河川上流まで遡上したところは 2km おきを基準に試料採取を行った(図 3)。



図 3 津波堆積物のサンプリング

津波堆積物には様々な粒度があるが、今回の調査は、津波によって陸上にもたらされたヒ素や重金属類の実態を明らかにすることが目的なので、調査候補地内でこれらの元素に関してリスクが高いと考えられるできるだけ細かな粒度の堆積物を採取した。また、被災地域では急ピッチでガレキ撤去作業が行われており、重機による擾乱などが生じている。このため、図 4 に示すような残存建屋内の浸水箇所、建物の土台の中など、堆積物の保存状態がよいところを選択した。さらに一部地点では、河川底質と河川水を採取している。河川水は、0.45 μm によりフィルタリングしている。



図 4 津波堆積物、河川水のサンプリング

分析：採取後は、冷蔵保存し、乾燥後、2mm ふるい下粒子を粉砕、ペレット法により蛍光 X 線分析(EDXRF) (PANalytical; Epsilon 5) により、主要成分および微量成分の分析を行った^{6),7)}。

本研究グループで開発したペレット法により、エネルギー分散型検出器であっても、波長分散型+ビード法と十分に比較できる精度での分析が可能となっている。波長分散型+ビード法に比べて短時間に多くの試料の分析が可能であるとともに、試料質量が大きいため、微量元素の分析には有利

に働く。

水溶出試験はほぼ環境告示第 18 号試験方法に準拠した方法で行っている。分析は、ICP-MS(パーキンエルマー DRC-II)により行った。

多段階ろ過法：ヒ素および重金属元素の化学形態を推定するために多段階 0.45 μm , 0.25 μm , および 3k ダルトンのろ過を行い、その後の試料について ICP-MS により分析を行った⁸⁾⁻¹⁰⁾。

4. 分析結果

図 5 にヒ素の水溶出量の結果マップを示す。また、図 6 に銅の含有量と水溶出量の分析結果を示す。ヒ素は、129 分析ポイントのうち 39 地点で環境基準値である 10 $\mu\text{g/kg}$ を超過し、9 $\mu\text{g/kg}$ 台の地点を加えると全体の 30%以上の地点が環境基準越えか、ぎりぎりの値を示していることが明らかとなった。

特に基準値越えが多い地点は、気仙沼市から南三陸町にかけての地域、石巻市沿岸部、仙台平野部である。地圏環境インフォマティクスおよび宮城県県の土壌の重金属類のバックグラウンドマップからの予測と一致している。気仙沼市から南三陸町にかけての地域は北上山地の含金石英脈金鉱山の密集地域、石巻市沿岸部はグリーンタフ地域の鉱床を後背地にもっている。また、仙台平野は、そもそもヒ素のリスクが高い地域である。

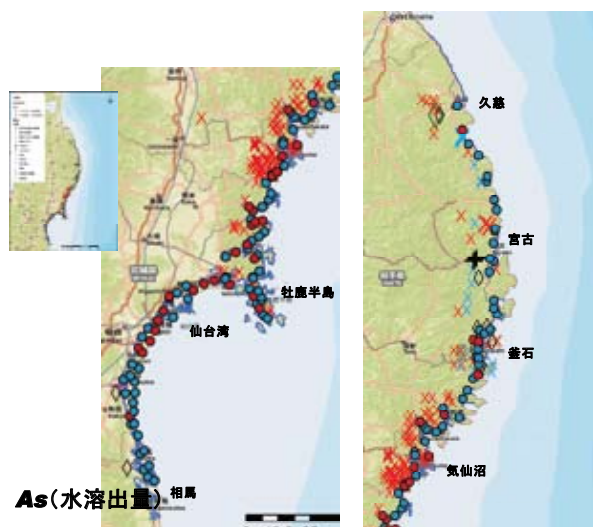


図 5 ヒ素の水溶出量（赤丸が環境基準値(10 $\mu\text{g/kg}$)以上の地点。赤い×は金鉱山を示す。)

5. 大谷鉱山

気仙沼の南方には大谷鉱山があり、この鉱山の鉱滓ダムは地震により決壊し、下流に大量の鉱滓が流出した。これに加えて、津波による堆積物が遡上している。図 7 に Google Earth 上にプロットした、大谷鉱山下流域の鉱滓および津波堆積物のヒ素含有量と水溶出量を示す。交差は 2563 mg/kg の含有量を示し、さらに水溶出も 107 $\mu\text{g/kg}$ 、海岸部では 250 $\mu\text{g/kg}$ を越えている。

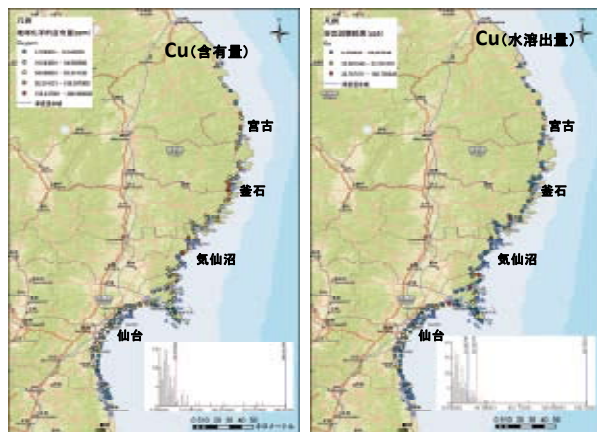


図 6 銅の含有量と水溶出量

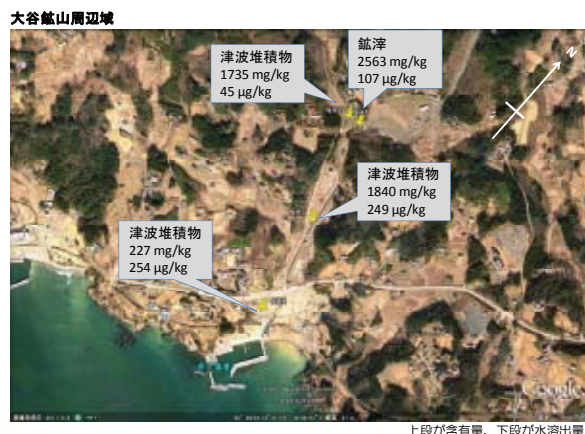


図 7 大谷鉱山下流域の鉱滓および津波堆積物のヒ素含有量と水溶出量

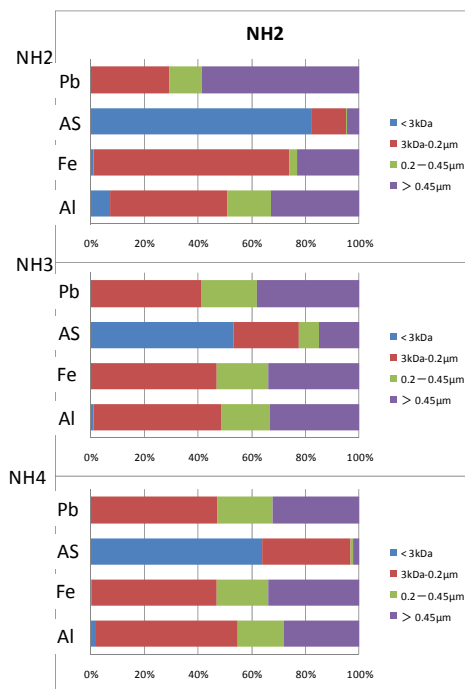


図 8 大谷鉱山下流域の津波堆積物の As, Pb, Fe, Al の化学形態

図8には、多段階ろ過法により得られたヒ素および鉛、鉄、アルミニウムの化学形態の差異を示す。鉛、鉄、アルミニウムでは3kダルトン以下のいわゆる溶存イオンの比率は極端に小さく、0.45 μ mまたは0.2-0.45 μ m間の粒子の割合が多い。これらの結果からだけでは充分な結論は導けないが、おおむね、FeとAlはコロイド粒子を形成し、Pbはそのコロイド粒子に吸着した形で存在しているのに対し、ヒ素は、最も移動性の高いイオンとして存在している。このことからヒ素の移行が他の元素よりも高い可能性が示唆される。

大谷鉱山とその下流域は、鉱滓ダム決壊と重なっているとはいえ、津波堆積物によるヒ素の除去などの環境修復は重大な問題であると考えられる

6. まとめ

津波浸水地域は未だ復興の具体的な道筋は見いだされておらず、津波エリアに恒久的な建物も、日常生活を営む住民もいない。このため、現時点では一部地域を除き、逼迫したリスクが顕在化はしていない。しかしながら、ボランティアによる残存家屋からの泥の撤去と清掃、ガレキ撤去と分別などでは相当量の粉じんが発生している。これらの作業環境では経口摂取の可能性も否定できないため、マスク着用や散水による飛散防止などの措置が必要であろう。さらに今後、これらの津波堆積物の除去と処理、新たな街造りがはじまる時にはこれらの津波堆積物には十分な注意を払う必要がある。本研究により津波堆積物のヒ素および重金属類のリスク評価の概要をつかむことができた。この結果を基礎にして安心・安全な復興への足がかりがつかめればと切に願う。

なお、講演では、津波堆積物の地球化学的特徴や、津波堆積物と海成層との判別などのついて述べる予定である。

謝辞

本調査を行うにあたり、下記の方々の献身的な協力があった。記して感謝申し上げます。井上千弘、山田亮一、山崎慎一、平野伸夫、岡本敦、小川泰正、渡邊隆弘、奈良郁子、渡邊則昭、須藤祐子、フェルナンド、ブルネイ、最首花恵、石橋琢也、ブトリ セティアニ、金築拓郎、小笠原由一、武者倫正、山本啓司、熊谷嘉朗、櫻井圭介、関口知寿（環境科学研究科）、鈴木昭夫、久利美和（理学研究科）、木村覚志、酒井伊織、谷中俊宥、田ノ下潤一、石黒敦子、稲垣湧斗、今村匡貴、小高 智太郎、坂井 健海、吉田雄斗（理学部）、加藤 紫穂里（文学部）、岡内啓悟、海老原匠、目黒康洋、浅野真仁、物井健太郎、吉澤優一朗（工学部）、新井陽、高木聖実、高橋紗枝子（農学部）高橋舞（医学部）、布原啓史（(株)テクノ長谷）、手塚和彦（(株)JAPEX） 敬称略

参考文献

- 1)土屋範芳, 駒井武, 白鳥寿一(2006): 地圏環境インフォマティクスのシステム開発と全国展開, 地質ニュース, No. 628, 21-28.
- 2)N. Tsuchiya, Y. Ogawa, R. Yamada, S. Yamasaki, C. Inoue, T. Komai, J. Hara, Y. Kawabe, T. Shiratori and S. Kano (2010): Geosphere environmental informatic universal system for evaluation of geological pollution on heavy metals. [Water Rock Interaction, 13, (2010), 673-676]
- 3)狩野真吾, 土屋範芳, 井上千弘, 原淳子, 駒井武, 白鳥寿一, 神宮宏(2008): 地圏環境インフォマティクスのデータベース構築とその応用例. [Journal of MMIJ, 124 (2), (2008), 148-153]
- 4)須藤孝一, 米田剛, 小川泰正, 山田亮一, 井上千弘, 土屋範芳(2010): 竜の口層の堆積岩における重金属類の溶出挙動および形態変化に及ぼす風化の影響. [応用地質, 51 (4), (2010), 181-190]
- 5)土屋範芳, 小川泰正, 山田亮一, 布原啓史(2009): 宮城県自然由来重金属等バックグラウンドマップ.
- 6)Tagami, Keiko, Shigeo Uchida, Akira Takeda, Shin-ichi Yamasaki and Noriyoshi Tsuchiya Estimation of Plant-Unavailable Iodine Concentrations in Agricultural Fields. [Soil Chemistry, 74 (5), (2010),1562-1567]
- 7)山崎慎一, 松波寿弥, 武田晃, 木村和彦, 山路功, 小川泰正, 土屋範芳(2011): 偏光式エネルギー分散型蛍光 X 線分析法による土壌および底質中の微量元素の同時分析. [分析化学, 69 (4), (2011), 315-323]
- 8)Ogawa, Y., Yamasaki, S. and Tsuchiya, N. (2007a): Possible mechanisms of REE fractionations as colloidal particles during the chemical weathering, *Water-Rock Interaction*, **12**, 441-444.
- 9)小川泰正, 原淳子, 土屋範芳, 丸茂克美, 駒井武(2007b): 多段階ろ過からみた風化粘板岩からの元素溶出挙動. 資源地質, **57**, 15-24.
- 10)OGAWA, Yasumasa, Shin-ichi YAMASAKI and Noriyoshi TSUCHIYA (2010): Application of a Dynamic Reaction Cell (DRC) ICP-MS in Chromium and Iron Determinations in Rock, Soil and Terrestrial Water Samples. [ANALYTICAL SCIENCES, 26, (2010), 867-872]

土壌汚染の評価手法と浄化技術の開発 ―震災復興支援に向けた取り組み― Risk Assessment Methodology and Remediation Technology for Soil Contamination - Actions for Reconstruction Support from Earthquake Disaster, 2011.3.11-

副研究部門長：駒井 武
 Deputy Director: Takeshi Komai
 Phone: 029-861-8294, e-mail: takeshi-komai@aist.go.jp

1. はじめに

近年、産業活動に起因した土壌・地下水汚染をはじめ、産業廃棄物の埋め立て処分、CO₂地中貯留などの地圏環境問題がクローズアップされている。また、東日本大震災による津波堆積物や農地土壌の塩害、さらには放射線物質の除染は喫緊の課題である。これらは、地圏システムにおいて人や生態系に与える「環境リスク」に関わる課題であり、リスクを低減あるいは適切に管理することが求められている。そのためには汚染現場の調査・モニタリングによって取得したデータを用いた汚染状態の程度、規模、拡がりなどの技術的な評価を行うことが必要である。また、汚染評価の結果や化学物質の情報をもとに、人や環境に対する影響について定量的に評価することが重要である。しかし、これまでわが国では人への環境リスクを評価する統一的手法がなく、環境汚染のリスク管理を実施するための技術基盤が十分とは言えなかった。

本稿では、化学物質の環境リスク評価の方法論を解説するとともに、土壌や地下水を対象としたリスク評価システムの開発について紹介する。また、有害化学物質および放射線物質による土壌汚染問題を取り上げ、環境リスクの評価および対策技術などの動向について論じる。

2. 環境リスク評価手法

2. 1 リスク評価システムの開発

筆者らは社会状況やリスク評価の重要性により、化学物質による健康影響の発生確率と影響度（毒性値）を基礎として、定量的に土壌・地下水汚染による健康リスクを科学的に評価するためのコンピュータシステムをわが国で初めて開発した¹⁾。この研究開発の中で、上記のリスク科学の方法論と土壌・地質汚染基本調査に基づく様々なデータベースを内包した地圏環境リスク評価システム（Geo-environment Risk Assessment System, GERAS）を開発し、一般に公開している。GERASの階層構造と主な用途を図1に示す。

本システムは、暴露評価とリスク評価を基礎とした健康影響の判定および浄化目標の濃度レベルやリスク設定のための“スクリーニングモデル”GERAS-1と、汚染現場の土壌特性、汚染物質の分解特性などを考慮して個別サイトのリスクを評価する“サイトモデル”GERAS-2から構成される。このうちGERAS-1は、すでに1000社を超える国内外の事業所や自治体などに試用供与されている。2009年にはGERAS-3（詳細モデル；廃棄物バージョンを含む）の開発が完了し、専門家の審査・評価を受けて公開するに至った。

地圏環境評価システム：GERAS(Geo-environment Risk Assessment System)

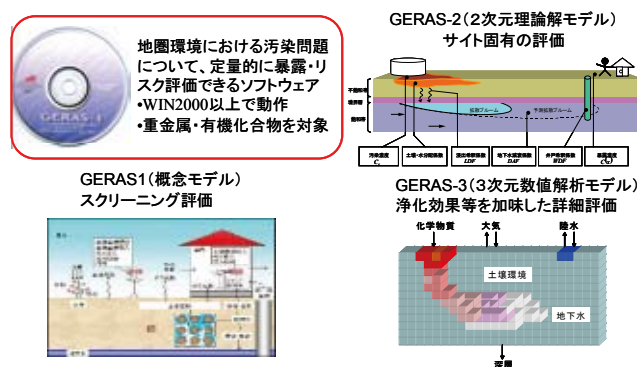


図1 地圏環境リスク評価システムの概要と階層構造

開発した GERAS は、土壌や地下水を汚染している化学物質の人への暴露量およびリスクを算出でき、Windows上で容易に使用することができる。主に工場や事業所などの自主的なリスク管理を推進するために使用する評価システムで、汚染物質としては、法で規定されている重金属等、揮発性有機化合物に加えて、油分（鉱物油）、PCB、ダイオキシン類などのリスク評価も可能である。さらに、2009年10月には鉱物油、重金属等、揮発性有機化合物、農薬等の複合汚染や3次元的风险解析が可能な詳細型モデル GERAS-3 を完成し、下記のウェブサイトにおいて無償で配布している。

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

（地圏資源環境研究部門 地圏環境リスク RG）

2. 2 研究融合による本格研究

本研究開発は、自然科学の要素技術の成果と社会科学を融合させて、製品としての GERAS を開発するための本格研究のアプローチをとっている²⁾。

具体的には、土壌・地下水汚染のリスク評価技術を確立するため、図2に示すように様々な研究分野の要素技術を統合して、統一的な方法論およびデータベースの構築に基づいてリスク評価システムとして完成させた。本研究の主要な要素技術としては、環境地質、リスク科学、分析化学、環境工学などの多くの研究分野におよんでおり、これらの連携が重要と考えられる。また、要素技術を融合させるためには、要素研究を単独で実施するだけではなく、共通の尺度である「環境リスク」に基づいた構成学的なアプローチが不可欠であった。この研究開発では、土壌汚染対策におけるリスクベースの対応やリスクガバナンスなどの新たな方法論を導入し、要素技術の最適な選択と統合、リスク評価の実践におけるスパイラル構成などの特徴的な研究開発を推進した。さらに、多様な利害関係者の参加によるリスクコミュニケーションを可能にする。

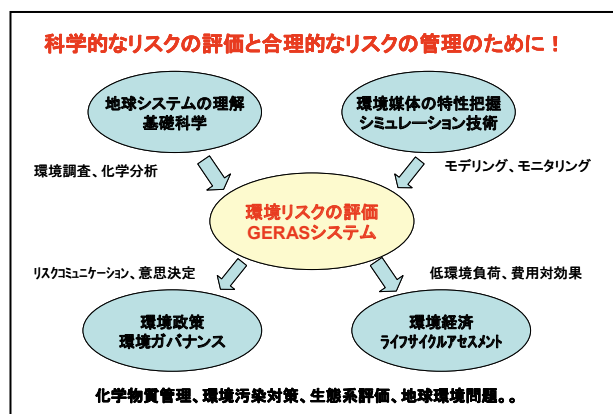


図2 GERAS 開発における構成学的な研究アプローチ

これまでに、開発した GERAS を国内では事業所、工場、自治体、浄化企業、地質コンサルタント、研究機関、大学関係者などに配布し、産業や社会で標準的な評価ツールとして活用されている。その主な用途は、事業所や自治体における土壌・地下水汚染の自主管理であり、全体の60%程度を占めている。また、海外用に英語版の GERAS-E バージョンを開発し、英国、中国、韓国、タイなどでは主に研究目的で活用されている。

開発した土壌汚染評価技術は、国土交通省（建設発生土のリスク評価）や経済産業省（サイトアセスメント）において国内唯一のリスク評価システムとして導入されている。将来的には、リスク評価の方法論を標準化することにより、法規制や社会システムへの適用、さらには ISO などの国際標準化を目指している。

3. 放射性物質による土壌汚染リスク

3. 1 放射性物質の環境動態と被曝経路

福島第一原子力発電所の事故以降、放射性セシウムや放射性ヨウ素による土壌への汚染の問題が懸念されている。これらの放射性物質は、排出源から大気や水域に放出され、特に大気では微粒子として広域に拡散したものと考えられている。土壌中で1価の陽イオンとしてふるまうセシウムは、負電荷を中和するかたちで土壌表面にとどまる傾向にある。しかし、他のイオン、腐植物質、有機酸などの存在で可溶性になることが指摘されており、水の動きに伴って環境中を移動する可能性もある。また、有機質に富む土壌や砂質土壌では、セシウムが土壌層の下方へ進む速度が比較的大きいことも知られている。最近の調査研究では、表層から15-20cmの深さにまで放射性セシウムが移行していると報告されている³⁾。一方、粘土鉱物等により地下への移行を抑制する効果も期待される。放射性ヨウ素については、半減期が比較的小さいため土壌中の蓄積は少ないが、陰イオンとしてふるまうため土壌にはとどまらず、地下水に移行する可能性が高い。

放射性物質の被曝には、内部被曝と外部被曝がある。ヒトは環境中の放射性物質から空間放射による外部被曝を受けるほか、経口摂取や経気道摂取により内部被曝を同時に受ける可能性がある。内部被曝の場合、主な経路は土壌を起点として図3のように示すことができる。土壌に沈着した放射性物質は大気、水および食品を経由して、ヒトが摂取する可能性がある。特に、食品の場合では農作物、肉、乳製品、海産物などの多様なものが考えられ、この他にも稲わらや牧草などの間接的な影響も無視できない。また、水泳や入浴などの被曝経路を考慮することもできるが、一般的にはこれらの寄与は少ないと考えられる。

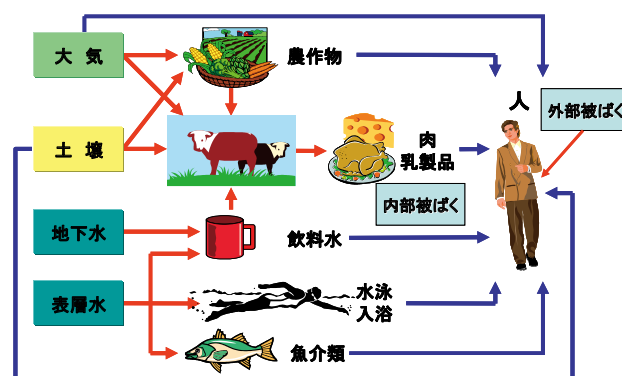


図3 放射性物質の被曝経路（土壌を中心として）

3. 2 放射性物質の環境リスク評価

このため、多様な被曝経路ごとの摂取の量とその割合、暫定基準値に対する相対リスクなどを容易に算定

できる放射物質リスク評価システムを開発し、実際の事例に適用している⁴⁾。この評価システムの活用には、環境や食品中の放射性物質の量（シーベルトあるいはベクレル）の観測値が必要である。公表されている数値を用いて評価した結果によれば、現状では外部被曝の割合が多く、平均的にみれば相対リスクの約8割以上が空間線量の数値に依存している。また、内部被曝の中では飲料水および主食からの寄与率が大きく、これらの基本的な食材を選択あるいは回避することが重要である。なお、外部被曝量の大半は土壌からの空間放射であることから、土壌中の放射性物質の除去対策や被曝量の低減などのリスク管理が重要な施策となる。

放射性物質を含む土壌からの被曝量の低減を図るためには、放射性物質の除去あるいは遮蔽、被曝経路の制御による方法が効率的である。放射性セシウムは土壌の表層部に存在するので、土壌をはぎ取る除染作業の効果は大きいと考えられる。恒久的には、汚染土壌を洗浄して発生源を除去する方法や、植物や微生物を用いて緩やかに濃度低減を目指す方法などが想定されている。また、内部（外部）被曝の回避の観点からは、飲用水や食品の選択、屋外滞在の回避、覆土などによる遮蔽、マスクや衣類などの着用なども一定の効果が期待できる。

4. 津波堆積物・土砂の調査および分析

東日本大震災により発生した大津波は、東北地方から関東地方の太平洋沿岸地域に甚大な被害をもたらした。短時間に津波が運搬した海底堆積物や土砂は、沿岸域から内陸の土壌の上に堆積し、農用地や市街地の復興に大きな障害となっている。宮城県南部の浸水域では津波堆積物の厚さは5～10cmに達し、砂質および泥質の互層を形成している箇所が多い。このような津波堆積物および土砂は、農耕や市民生活において支障となるほか、以下のような環境工学的な幾つかの問題がある。まず、堆積物の多くが海底堆積物に起因するため、ヒ素や鉛などの有害物質を含有する可能性があり、生活者や作業員の健康影響が懸念される。また、堆積物を土地の造成や土木工事に使用する場合、その粒度や強度などの力学特性に課題が残る可能性もある。さらに、土砂に含まれる塩分や油分などによる作物の生育障害も懸念される。

このため、青森県から千葉県に至る沿岸域を対象として、津波堆積物の緊急調査および試料の採取を行い、上記の課題を中心とした研究を実施している。また、岩手県と宮城県の沿岸域では、陸域からの土砂の移動も考慮した調査を実施した。図4は、ある調査地点における津波被害と堆積物の状況を示したものである。



図4 気仙沼市周辺の津波被害と堆積物の状況

宮城県沿岸部で採取した津波堆積物について化学分析を行った結果、一部の地域でヒ素などの有害元素の濃度（溶出値）が比較的高いものの、全体的に含有量、溶出量の基準値を下回り、地球化学的なバックグラウンドと大差がないとの予察の結果が得られた⁷⁾。また、堆積物は主に砂質の海洋底質から構成され、一部の地域では下部に黒色の底泥による薄層がみられた。これは金属硫化物と考えられ、沿岸域の底泥や海洋底質の特徴を反映したものとなっている。

これまでの調査では青森県から宮城県南部までの沿岸域の調査を完了している。今後、調査地点を拡大するとともに、津波堆積物と海底堆積物との関係、沿岸域から陸域の物質輸送などを中心に本格的な調査研究を展開する予定である。

5. 土壌汚染のリスク管理技術

5. 1 原位置の土壌汚染対策

放射能土壌あるいは津波堆積物の処理を考えると、汚染が発生した場所（原位置あるいはオンサイト）において様々な汚染対策を行うことには、幾つかの明確な利点がある⁵⁾。まず、新しい表層の土壌汚染では、原位置で汚染の除去を行うことにより、地下水への汚染の拡散を防止することができる⁶⁾。また、限定的な汚染源では封じ込めや隔離などの対策も有効である。さらに、掘削せずに土壌を処理するので、周辺や外部への汚染の拡散を未然に防ぐことも可能である。

図5は、米国環境保護庁によって類型化された土壌汚染浄化技術をリストアップしたものである。土壌汚染の浄化対策には、原位置における浄化とオフサイト（掘削後に別の場所）の処理の2つに分類される。このうち、原位置浄化には形質変更をせずにその場所で浄化を行う場合と、掘削した土壌を敷地内で処理する場合とがある。ここでは、主に表層土壌や地盤の形質変更を伴わない原位置浄化技術を取り上げ、それらの特徴や適用性について検討する。

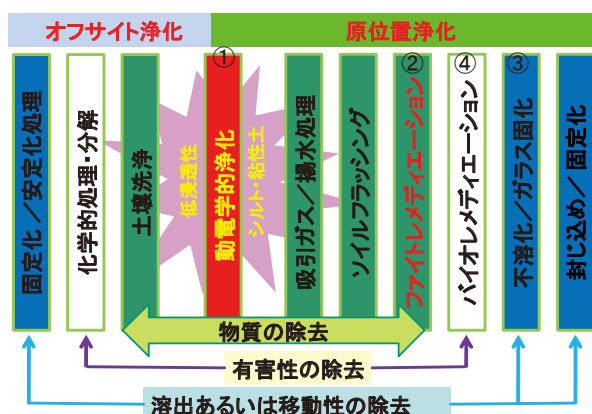


図5 重金属等による土壤汚染浄化技術の分類

土壤汚染の浄化対策には、図5に示すように以下の3つのメカニズムがある。1)汚染物質の除去、2)有害性の除去および3)溶出や移動性の除去。環境リスクの低減効果は1)が最も大きい、浄化コストは最大となる可能性が高い。そこで、物質の変換や無害化を図る、または不溶化や固定化を図る手法を選択する2)や3)の適用事例も多い。欧米の対策事例を参照すると、原位置土壤対策としては①動電学的浄化技術、②ファイトレメディエーション、③バイオレメディエーション、さらには④不溶化および固定化技術に関する実績が多数報告されている⁸⁾。この他、ソイルフラッシング、土壌洗浄、化学的処理などの手法も多数適用されている。

5. 2 土壤汚染対策の技術的、社会的評価

土壤汚染の原位置対策を促進させるためには、既往の技術的な評価に加えて、浄化コストや浄化期間のような経済的な検討をはじめ、環境負荷、操業条件、立地条件といった社会的な評価も必要である。このため、図5に示すような多様な浄化手法を対象として、浄化効果、持続性および現場適用性などの技術的な評価が実施され、汚染サイトや汚染状況に応じた選択や併用が検討される。その上で、操業条件や立地条件、さらには浄化コストや浄化期間の制約などの社会的な要素も加えて、総合的評価が行われる。最近では、土壤浄化施工に伴う環境負荷（有害物や二酸化炭素の排出、騒音・振動）や周辺環境（敷地境界外の地下水、生態系）への影響が評価項目として採用される場合もある。そこで、土壤汚染対策では汚染サイトの範囲だけでなく、地域環境や地球環境といったグローバルな観点からみたトータルの環境リスクの軽減がきわめて重要である。これらの総合的評価は、自治体や周辺の住民などとのリスクコミュニケーションを円滑に進める上できわめて重要と考えられる。

6. まとめ

土壤汚染対策法の施行および改正に伴い、市街地を中心とする土壤・地下水汚染が顕在化し、そのリスク低減対策が重要となっている。このため、土壤中の化学物質がヒトに与える健康影響、すなわち環境リスクを科学的に定量化するためのリスク評価システムの開発と普及を行った。東日本大震災の以後では、このような従来型の土壤汚染に加えて、放射性物質による広域の土壤汚染問題や津波堆積物に含有する重金属等の問題も潜在的に大きな問題となってきた。これらに共通する課題は、実際にヒトや生態系が受ける暴露（被曝）の評価を正確かつ的確に実施できるかどうかに関わっている。また、土壤汚染の浄化などの現場対策において、効率的に環境リスクを低減するには如何なる方法が適切であるか、費用対効果の高い浄化技術の選択には如何なる方法論を採用すべきかなど、今後も検討すべき課題が多い。本稿は、このような環境リスクとその対策について、化学物質と放射性物質に関わる環境問題を取り上げて具体的に議論した。環境汚染の改善や汚染現場の実務において御参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) T. Komai, Disclosing the software system GERAS for risk assessment of soil contamination, AIST Today, 36, 22-24, (2010)
- 2) 駒井 武, 川辺能成, 原 淳子, 坂本靖英, 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ーリスク管理の実践に向けた構成学的研究アプローチー, シンセシオロジー, 1(4), 276-286, (2008)
- 3) 藤川陽子: 土壤環境における放射能の分析・解析の方法と除去の考え方, 放射性物質の土壤汚染と浄化技術セミナー, エヌティーエス, (2011)
- 4) 駒井 武: 土壤汚染のメカニズムと浄化技術の最新動向, 放射性物質の土壤汚染と浄化技術セミナー, エヌティーエス, (2011)
- 5) 駒井 武: 原位置の土壤汚染対策技術の現状と研究開発, 環境資源工学会シンポジウム「重金属等汚染土壌処理の取り組み」予稿集, 12, 12-17, (2010)
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: リスク削減技術戦略調査成果報告書, (2010)
- 7) 川辺能成・張 銘・駒井 武: 東日本大震災に伴う宮城県沿岸津波堆積物の緊急調査, 2011.6.15
- 8) 張 銘・駒井 武・小野暁: 動電学的手法による地質汚染浄化について: その現状と展望, 環境地質学シンポジウム論文集, 18, 111-116, (2008)

福島県いわき市の大震災被災地における物理探査法調査 Geophysical surveys at damaged sites in Iwaki City, Fukushima Prefecture, by the Great East Japan Earthquake

主幹研究員：内田利弘
Principal Researcher: Toshihiro Uchida
Phone: 029-861-3840, e-mail: uchida-toshihiro@aist.go.jp

1. はじめに

2011 年東日本大震災では、強い地震動によって、東北地方、関東地方を中心に、道路、鉄道、電力、ガス等のインフラの損傷、地盤の液状化、河川堤防の損傷、農業用ダムの劣化など、多くの地盤災害が発生した。また、大津波によって、東日本太平洋沿岸の港湾、市街地の多くの建造物や施設が破壊され、広大な農地が塩水を被った (Uchida and Aizawa, 2011)。

福島県南部から茨城県北部の太平洋沿岸部は日本有数の産炭地の 1 つである常磐炭田が分布し、その範囲は陸域において東西約 5~25km、南北約 95km である (須貝ほか, 1957)。その中央に位置する福島県いわき市には炭鉱閉山後も石炭採掘用の坑道が多数残されている。いわき市では 3 月 11 日の本震による震動によって、石炭採掘跡地特有の地表の陥没や地下水噴出事故が多数発生した。また、常磐炭田分布域を含む福島県南部から茨城県北部では、本震の直後から多数の群発地震が発生した。陥没や地下水噴出現場周辺の住民からいわき市に対して、事故の原因究明や対策を求める苦情が寄せられ、また、群発地震発生域の住民からは、地下からの「地鳴りのような音」が住居の下にあるかもしれない旧坑道が地震によって崩落して発生しているのではないか、という不安の相談が多く寄せられた。

3 月末にいわき市および資源エネルギー庁から相談を受け、筆者が会長を務める物理探査学会では、4 月 8 日に災害現場の予察を行った。その直後の 4 月 11 日には、いわき市周辺で最大マグニチュード 7.0 の強い余震が数回発生し、活断層と認識されている井戸沢断層と湯ノ岳断層に対応して地表変位が観測された。また、これらの地震のあとに周辺の温泉地域において温泉や地下水の湧出量の変化が報告された (図 1)。

以上の状況を受け、物理探査学会では有志による調査チームを組織し、陥没・地下水噴出地点および湯ノ岳断層において緊急の現地調査を実施することとした。当研究部門の研究者も当該調査に協力することになった。

本報告では、これらの調査の概要を紹介する。なお、物理探査の調査結果は、内田ほか (2011)、相澤ほか (2011)、鈴木ほか (2011)、横田・佐藤 (2011)、

伊東ほか (2011)、Aizawa and Uchida (2011) からの引用による。



図 1. いわき市における調査位置図。破線は推定断層、ただし、藤原断層の破線は今回の地震で出現した地表変位箇所を繋いだもの。黒点は地震計設置位置。国土地理院 5 万分の 1 地形図「平」、「小名浜」を使用。

2. 被害の概要

いわき市では、3 月 11 日の本震により、炭鉱跡地の複数箇所では地面の陥没や出水の被害が報告された (図 2、図 3)。旧炭鉱地域の採掘用坑道は、地上に坑口跡が残っている場所を除き、坑道の位置や形状に関する正確な情報はほとんど残されていない。この付近の炭鉱では、以前から地下水や温泉の湧出が活発であることが知られており、現在も、旧坑道から出ていると思われる湧水があり、調査地周辺では

沈殿物によって川が赤茶けた色を呈しているところがある。

3月11日の本震以降、福島県南部および茨城県北部で小規模の地震が頻発し、その状態は現在も続いている(図4)。特に、4月11日～12日には大きな余震が数回発生し、既知の活断層(井戸沢、湯ノ岳)に沿って地表変位が生じた(図5)。変位は南西側が沈降する正断層型である。その際、湯ノ岳断層の変位に加え、その南東側延長部に相当し、これまで地質断層とされていた藤原断層も変動し、最大約80cmの鉛直変位を示した(図6、図7)。

本震および大規模余震により、常磐湯本温泉地域における温泉湧出量の変化や、周辺の地下水湧出の変化が報告されている。また、大規模余震の後、地域南部の旧炭鉱の坑口から、大量の温泉水の湧出が始まった(図8)。



図2. 出水によって陥没が生じた道路(4月8日撮影)



図3. 出水跡の例(4月8日撮影)。後方の空き地の出水跡が浅部物理探査実施箇所の1つ。

3. 物理探査法による調査

物理探査学会では、4月中旬から6月にかけて、陥没・出水被害現場での各種物理探査とボーリング調査、群発地震を対象とする地震観測、藤原断層(湯ノ岳断層延長部)におけるCSAMT法調査を実施した。また、陥没・出水被害現場については、その後にも補足調査を行った。

(1) 地震観測

福島県南部および茨城県北部では防災科学技術研

究所等が群発地震を対象に臨時観測点を設置している。物理探査学会では、防災科学技術研究所と協力する形で、陥没・出水箇所周辺で地鳴り音の相談のあった場所等に4月中旬に計4測点の観測点を設け、頻発する地震と地鳴り音との関係を調べるため、地震波形を連続観測した。地元住民の中には、地鳴り音の発生を記録されていた方がおり、今回の観測においても、数週間程度、地震を感じた場合はその時刻を記録していただくことにした。

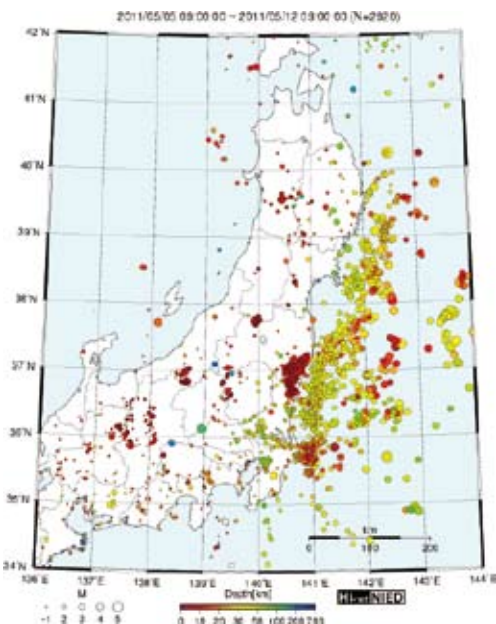


図4. Hi-Netによる2011年5月5日から1週間の本州東部の地震分布(防災科学技術研究所ホームページより)。

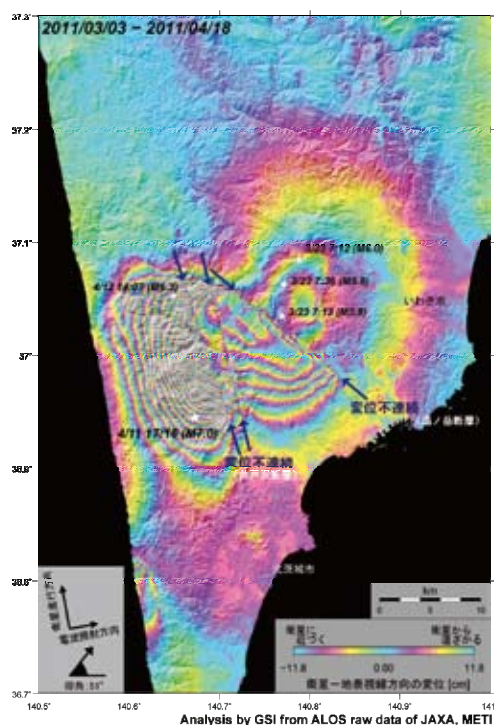


図5. 人工衛星SAR干渉解析画像による井戸沢断層・湯ノ岳断層周辺の変位(国土地理院ホームページより)。本地域は全体的に沈降する傾向にあり、その中で両断層は南西落ちの正断層型を示す。



図 6. 4 月 11 日の余震で発生した藤原断層相当断層北端近くの地形変位(5 月 16 日撮影). 右が北東方向で, 正断層型の変位(鉛直約 80cm)を示す. CSAMT 法の B 測線に当たる.



図 7. 4 月 11 日の余震で発生した藤原断層相当断層南端部の地形変位(4 月 17 日撮影). 右が南西方向で, 沈降している. CSAMT 法の D 測線, E 測線付近.



図 8. いわき市泉町の旧炭鉱換気竪坑から湧出を始めた温泉(4 月 17 日撮影). 新聞報道によると, 温度は約 55°C, 湧出量は毎分約 5 トン.

(2) 陥没・出水箇所における浅部物理探査およびボーリング調査

坑道跡に関係すると思われる陥没と出水が発生した地点を 2 箇所選び, 地中レーダ, 電磁マッピング(スリングラム), 表面波探査を 4 月中旬～5 月中旬に実施した(図 9)(相澤ほか, 2011; 横田・佐藤, 2011). 図 2 に示した陥没箇所での表面波探査および地中レーダ探査の結果を図 10 に示す. 陥没が生じた箇所では, 深さ 1.5m 以上で S 波速度が小さい傾向に

あることがわかる.

もう 1 つの陥没・出水箇所(図 3)では, 表面波探査, 地中レーダ探査等の結果を参考に, 浅いボーリング調査(3 箇所)を実施した. その結果, 2 箇所のボーリングで, 出水に関連すると思われる空洞の存在を確認した.

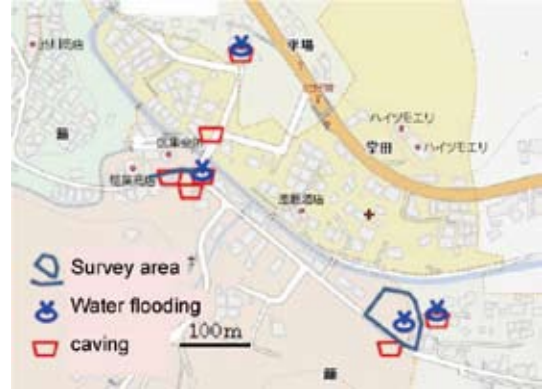


図 9. いわき市好間における陥没・出水事故現場での調査位置(相澤ほか, 2011). 緑線で示す 2 箇所浅層物理探査を実施した.

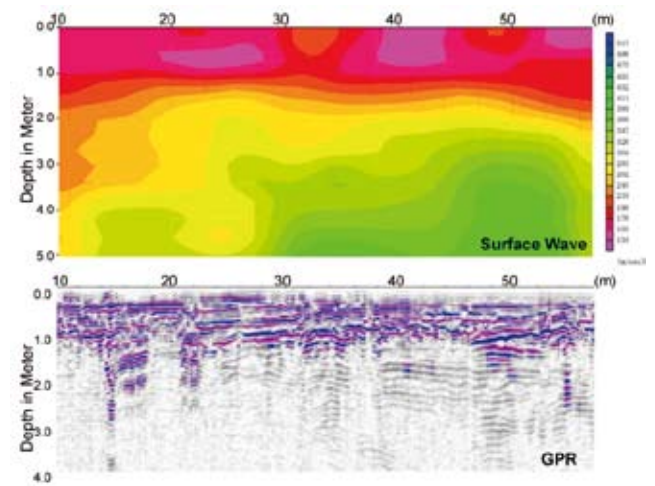


図 10. (上)表面波探査による S 波速度構造と, (下)地中レーダによる反射断面(相澤ほか, 2011). 距離 20m および距離 35m(図 2)の付近で陥没が生じたが, 調査時にはすでに埋め戻しが終了していた.

(3) 藤原断層における CSAMT 法調査

藤原断層に相当すると思われる 4 月 11 日出現断層の詳細な地下構造を求めるため, CSAMT 法調査を 5 月下旬～6 月上旬に実施した(鈴木ほか, 2011). 藤原断層を横切る形で 6 本の測線を設定した(図 11). 調査期間中はすでに稲作が始まっており, 水田区域では測点はあぜ道に沿って設定した.

ゴルフ場の中に設定した測線 A および B の 2 次元解析結果を図 12 に示す. 断層の両側では比抵抗分布に顕著な変化があり, 地層が大きく異なっていることがわかる. 藤原断層は須貝ほか(1957)による炭田地質図に記されており, 鉛直変位は南西落ちで約 200m とされる. ただし, 須貝ほか(1957)による断層の位置は今回地表変位を生じた場所とは少し異な

るようである。



図 11. 藤原断層における CSAMT 法測線の位置(鈴木ほか, 2011). 送信源は測線 F から南東に約 5.5km 離れた場所に設置し, 電流ダイポール長は約 2km である。

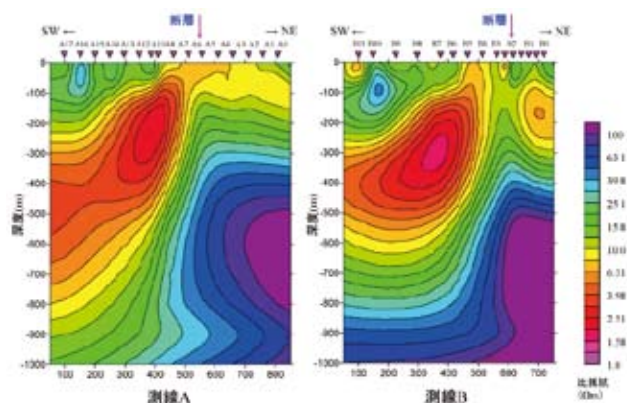


図 12. CSAMT 法の測線 A(左)および測線 B(右)の2次元抵抗構造(鈴木ほか, 2011). 矢印は藤原断層による変位出現位置。

4. おわりに

東日本大震災および福島第一原子力発電所の事故によって大規模な災害が発生した。復旧・復興に向けた様々な活動が進められているが、地球科学研究に携わる研究者の貢献すべき課題も多くある。今回のいわき市における物理探査法調査はそのごく一例の活動と認識できる。大震災による地盤・地質災害の発生状況の解明、種々のリスクの予測、復旧復興における地質・地盤の調査等において、当研究部門の貢献が期待される。

謝辞

本報告で紹介した現地調査は一般社団法人物理探査学会の研究チーム「いわき市での緊急災害対策に

関する研究委員会」によって実施された。発表にあたり、同学会の相澤隆生氏(サンコーコンサルタント)、鈴木浩一氏(電力中央研究所)、狩野嘉昭氏(ジオライト)、三浦豪氏(テラ)他による解析結果を引用した。また、現地調査には多くの物理探査学会員がボランティアによって参加した。現地調査の実施にあたり、福島県いわき市役所生活環境部環境企画課には、事前検討や地権者・住民への周知、安全対策など、調査が円滑に実施できるよう様々な協力を得た。調査の一部は、社団法人東京地学協会「東北太平洋沖地震関連緊急研究・調査助成」を得て実施された。関係各位および調査地周辺住民の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 相澤隆生・三浦 豪・内田利弘・稲崎富士・渡辺文雄 (2011): 福島県いわき市での緊急災害調査—炭坑跡地での陥没及び出水災害箇所での浅部物理探査—, 物理探査学会第 125 回学術講演会論文集, 13-14.
- Aizawa T., and Uchida, T. (2011): Urgent disaster investigation in Iwaki City, Fukushima Prefecture, Japan: geophysical surveys at a site of caving and water flooding in an old coal mine area, *SEG 2011 Annual Meeting, Workshop 13, Geophysics Applied to Geohazards and Public Safety*, San Antonio, USA.
- 伊東俊一郎・相澤隆生・山中義彰 (2011): いわき市湯ノ岳・藤原断層近傍における MEMS 受振器による反射法地震探査, 物理探査学会第 125 回学術講演会論文集, 15-16.
- 須貝貫二・松井 寛・佐藤 茂・喜多河庸二・佐々木実・宮下美智夫・河内英幸 (1957): 日本炭田図 I, 常磐炭田地質図説明書, 地質調査所, 143p.
- 鈴木浩一・内田利弘・相澤隆生・狩野嘉昭・佐々木吾郎・田上正義・窪田健二・上田 匠・真田佳典・内田真人・鈴木敬一・岸本宗丸・濱 友紀・谷口友規 (2011): 福島県いわき市での緊急災害調査—CSAMT 法による湯ノ岳・藤原断層近傍の地下構造—, 物理探査学会第 125 回学術講演会論文集, 5-8.
- 内田利弘・相澤隆生・佐藤源之 (2011): 福島県いわき市での緊急災害調査の概要, 物理探査学会第 125 回学術講演会論文集, 1-4.
- Uchida, T., and Aizawa T. (2011): Great East Japan Earthquake in March 2011: what is a role of geophysicists?, *SEG 2011 Annual Meeting, Workshop 13, Geophysics Applied to Geohazards and Public Safety*, San Antonio, USA.
- 横田裕也・佐藤源之 (2011): 福島県いわき市での緊急災害調査—高精度地中レーダを用いた地下空洞の計測—, 物理探査学会第 125 回学術講演会論文集, 9-12.

復興に向けた広域地下水流動解析

A Wide Area Groundwater Analysis on the Recover from the Earthquake Disaster

丸井敦尚（地下水 RG）

Atsunao Marui

Groundwater Research Group

*Corresponding Author's e-mail: marui.01@aist.go.jp

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、我々は未曾有の大震災に襲われた。震災は地質学的に大きな意味を持つばかりでなく、地下水学的にも重大な変化をもたらした。地下水流動の変貌、地震の影響による水位変化、深部地下水の上昇、着色など列举に暇がない。人々の生活にも変化が表れた。その中でもライフラインの確保は言うまでもないが、その後の街創りやインフラ整備など地下水を含め、これまでに類を見ないほどの地球科学情報が必要となってきた。

このような状況の中、筆者らは、3月末までに東北太平洋側の各県ごとの地下水流動シミュレーションを実施し、「本来ならば地下水はどう流れているはずだ」というモデルを提示した。これにより、地域に必要な地下水を得るための三次元情報を提供するほか、地下水の異変を的確に判断する情報提供にも寄与することができた。さらに、筆者らのモデルは地下水の流動方向や流動速度までも解析しており、塩水や汚泥、所によっては放射性物質による汚染までもその拡大範囲や拡大速度、自然浄化の速度等を推定することができるようになっている。復興に向け、地球科学情報のもっとも重要な要素の一つである地下水情報を的確に伝え、復興のために地下水を有効に利用していただく一助になることを願う。

これらの情報は、ホームページに掲載したほか、NHKをはじめとするテレビ各局、読売新聞をはじめとする新聞各紙、日経ビジネス等のネットニュース、東洋経済等の各種情報誌（週刊誌・月刊誌）でも報じられている。

2. 被災各県の地下水流動解析

2.1. モデリングの方法（福島県を例に）

広域（全県）地下水盆モデルは、越谷ほか（2011）の三次元モデルから対象領域のデータを抽出した。このモデルに使用データは、数値地質図、ボーリングデータ、数値標高モデルである。ボーリングデータの収集は、資源探査、地盤調査、学術調査を目的に実施された文献を対象とした。収集した文献には地質柱状図のほか、地質断面図上に記載されたボーリングデー

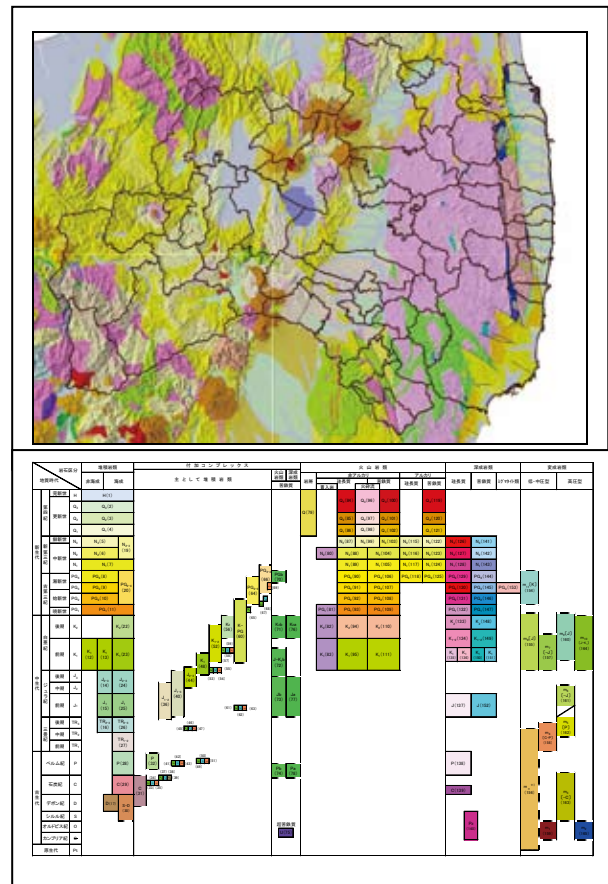


図1 福島県周辺の100万分の1数値地質図（産業技術総合研究所，2003）

タがあり、それらのデータも抽出した。収集したボーリングデータの全データ数は12,210本（昨年度6,400本）であり、掘削深度が200m以上のデータ数は4,040本、先新第三系に到達したデータ数は2,010本であった。使用した文献は全部で500編になるが、本論では煩雑となることを避けるため記載を割愛した。なお、収集した文献は、論文（査読の有無）、図幅、報告書、業界紙、書籍の区分を併記したリストを作成し、データの信頼性の検証を可能とするとともにトレーサビリティを確保した。

広域モデルにおける対象層は、新第三紀以降の地層を対象とし、新第三紀以降の地層を、鹿

野ほか（1995）の地質時代の区分に基づき、第四系を4層（H, Q₃, Q₂, Q₁）、新第三系を3層（N₃, N₂, N₁）に区分した。なお、Q₂は第四系中部更新統、Q₁が第四系下部更新統、N₃は新第三系鮮新統～上部中新統上部、N₂は新第三系上部中新統下部～中部中新統中部、N₁は新第三系中部中新統下部～下部中新統中部に相当する。なお、日本における地下水貯留層は、第四紀の地層が有能であるが、このほかに新第三紀鮮新世の地層が知られる（農業用地下水研究グループ、1986）。深層の地下水として、例えば、温泉源となる深層熱水は地下深部において高い間隙率を有する地層に賦存し（山口ほか、1992）、坂口・高橋（2002）は深層熱水資源の賦存域として新第三紀以降の堆積盆を挙げている。佐藤ほか（1999）は岩石の物理特性を岩種ごとに検討し、有効間隙率について先新第三系のほとんどが10%以下（最頻値が2%）、新第三系では平均値が15~20%で60%まで幅広い値を示すとしている。これらのことから、先新第三紀と新第三紀以降の地層とは水文地質的な特性が大きく異なり、地下水資源の賦存層として新第三紀以降の地層は有望であると考えられる。

モデル化する堆積層の地層境界面は、地表面と対象とする地層境界の基底面とした。データ間の補間は地球統計学的手法の一つである普通クリギング法を用いて、対象層ごとに1kmメッシュのグリッドデータを構築した。構築した地層境界面は、例えばQ₁がQ₂の上部に位置する様に、層序の逆転する箇所があった。そのため、層序が逆転した箇所は、下位の地層境界面の深度を上位の地層境界面の深度に置き換えた。また、対象の地層より古い時代の地層が地表に露出する箇所は、地層境界の深度を地表面の標高値に置き換えた。

構築した広域の三次元地質モデルは、現在の地形面からN₁の下面（層厚が薄いため、図2にはH, Q₃, Q₂をpost Q₂としてまとめて図示）まで、標高値で色分けして図2に深度分布を示した。また、図2には、各地層の層厚分布を併せて示した。層厚図には、対象の地層よりも古い地層が地表面に露出する範囲を併記した。なお、深度分布は現在の地層境界の形状を示し、層厚は現在の地層の分布と厚さを示している。

2.2. 福島県の地下水流動

解析モデルの境界は福島県境とし、解析ソフトウェアとしてFEFLOWを用いた。3次元モデルを構築するために、沖積層(H)、第四紀層(Q₁, Q₂, Q₃)、第三紀層(N₁, N₂, N₃)の7つの地層の3次元情報(基底面深度)を用いた。同データは、前述のモデリング手法(越谷ほか、2011)に基づいている。ただし、透水係数は、常磐炭田沖での既往の地下水流動解析結果(内部資料)を参考に、沖積層と第四紀層については、水平方向10⁻⁴m/s、鉛直方向10⁻⁶m/sとし、第三紀層については、水平方向10⁻⁴m/s、鉛直方向10⁻⁶m/sとし、第三紀層については、10⁻⁶m/sで等方とした。すなわち、今回のモデルでは実質上2層に区分されたことになる。

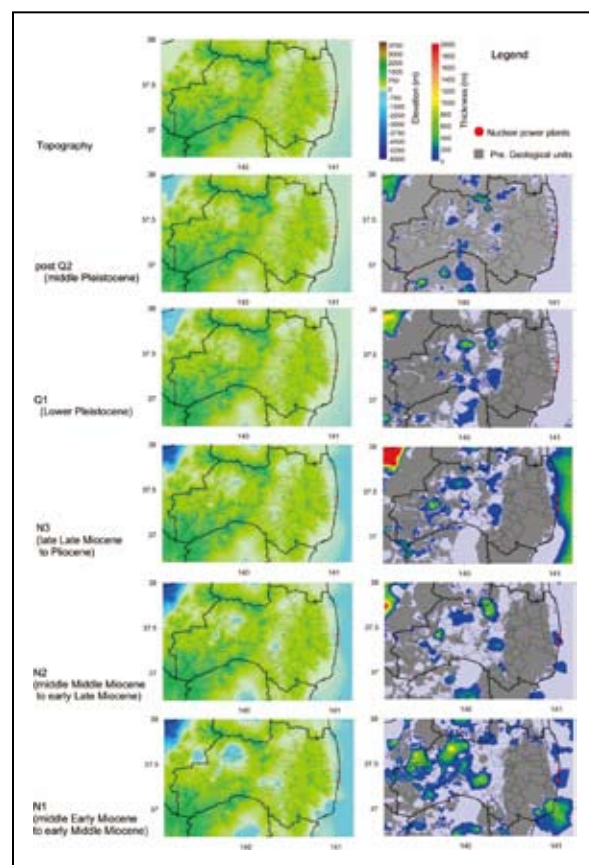


図2 福島県周辺の広域の三次元地質モデル
左列の図は各対象地層の深度分布図、右列の図は各対象地層の層厚分布図

地下水流れの境界条件として、モデル全周の水位を標高で固定し、表層全域に1mm/dayの涵養を与えた。これにより、モデル内で過剰になった地下水が全周から流出できるため、現実に近い状況を再現できる。3次元モデルの外観は、図3のとおりであり、要素数53872、節点数32208となった。

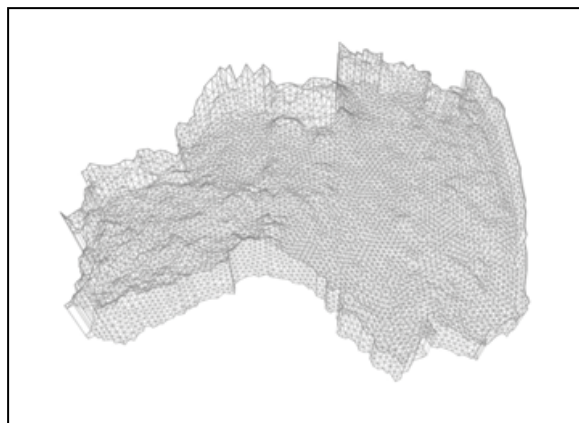


図3 地下水流動解析モデル。地下水流動に影響を与える堆積構造として、第四紀層と第三紀層をモデル内で区分した。

地下水流動解析によって得られた水頭分布は、図4のとおりである。また、福島第一原発から半径30kmの位置は、阿武隈高地で最も水頭(標

高)が高い領域と概ね一致している。阿武隈高地から沿岸に至る集水域も同様に、30km程度の奥行きを有することを示している。

地下水流向を、福島第一原発から半径30km圏を中心に拡大して示すと図5のとおりである。原発から半径30km圏にある地下水は、前述のとおり、阿武隈高地から海に向かう流れが支配的であるが、陸側に着目すると、北側よりも西側および南側から圏外に流出することが分かる。これらの流出する地下水が人口密集地である浜通りの郡山市周辺や浜通り南部のいわき市周辺に向かうと、事故状況が改善された後であっても、地下水の流速が遅れるために、両市の生活用水に時間差で影響が出ることを否定できない。心配な地域では、表層汚染による影響が小さな深井戸を整備するなどして、水供給システムを強化するとより高い安心が得られると考える。また、福島第一原発周辺の沿岸域に着目すると、地下水は概ね海に向かって流れるものの、局所的に南北方向に流れる箇所があることが分かる。沿岸域は、地形が平坦なため、地下水の動水勾配も小さく、局在する地形的な高まりや堆積構造の変化によって、地下水の流向が変化しやすいためと考えられる。地形の変化が少ない福島第一原発周辺でも、埋没河川等に影響される不規則な地下水流れが局在するため、さらに現地での精密な調査が必要である。

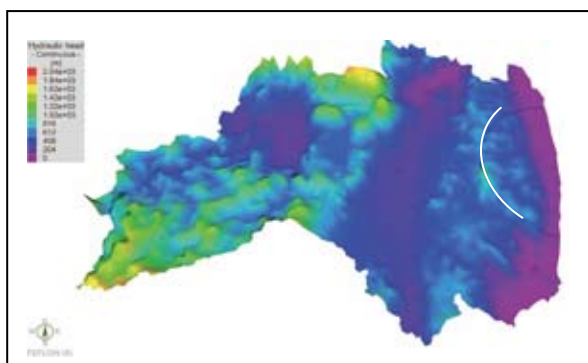


図4 福島県全域の水頭分布。水頭分布から、浜通りにある福島第一原発周辺の地下水は、阿武隈高地への降水によって涵養され、海に向かって流れることが判読される。また、会津盆地の地下水には、地形から見て、半径30km圏内の地下水が流入しないことも分かる。

2.3. 宮城県の地下水流動

県内の地下水水頭分布を図5に、地下水流動(流向・流速)を図6に示す。宮城県西部に位置する奥羽山脈から沿岸部に向かう地下水流動が生じており、概ね地形に沿って地下水が流動していることが分かる。宮城県南西部に位置する山地・丘陵では、その地形に従った局所的な流動方向の変化が認められるが、仙台平野にかけては、概ね仙台湾に向かう流動が形成されている。これらの地下水流動系は、より詳細な仙台平野の解析結果と整合的である。

また、仙台市の西部や石巻市南東部では、地下水の流速が相対的に小さい地域(停滞域)が現れている(図6中、赤丸)。仙台市西部では、

その地域の地形の形状により地下水の流れが複雑になっており、このような停滞域が生じていると考えられる。一方、石巻市南東部では、起伏の少ない平坦な地形により動水勾配が小さいため、地下水流れが遅く、停滞域を形成していると考えられる。

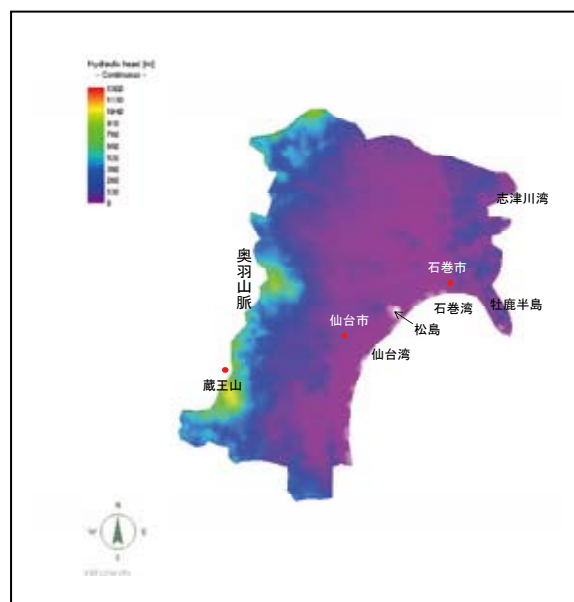


図5 宮城県における地下水水頭分布

宮城県における自然状態下での地下水流動を飽和・定常解析により計算した。その結果、宮城県全域において、概ね奥羽山脈から沿岸域(仙台湾や石巻湾)への地下水流動が生じる結果となった。しかし、県北部の沿岸域については、局所的な流動系が形成されていると考えられる。詳細な地下水流動を推定するためには、流域を細分化し、モデルを構築する必要がある。本解析結果はその基礎データとして有用である。

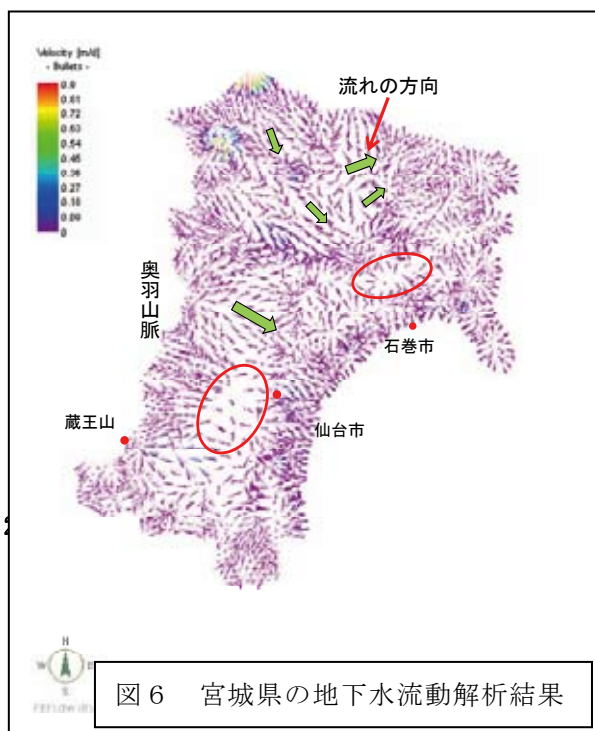


図6 宮城県の地下水流動解析結果

県北部では、奥羽山脈から地下水が、沿岸部へ向かう流れと、岩手県一関市方面へ向かう流れとに2分されている。また、牡鹿半島から志津川湾にかけての沿岸域では複雑な地形を有しており、いくつかの小さな流動系が形成されているものと推定される。局所的な地下水流速・流向の確認には、より詳細な現地調査が必要となる。

2.3. 青森県の地下水流動

解析領域の地表標高の分布を図2に示す。領域内で標高が最も高いのは、八甲田山が位置する県中央部の奥羽山脈である。奥羽山脈北側の青森市と東側の十和田市は、同山脈から水が供給されやすい地形条件にある。六ヶ所村と東通村が位置する下北半島では、南北に走る下北丘陵によって、地表に涵養された水が太平洋側と陸奥湾側に分けられる。むつ市は、恐山山地と下北丘陵に挟まれ、津軽海峡に通じる平野が北側に分布している。大間町は、恐山山地の北端の狭い平地に位置する。

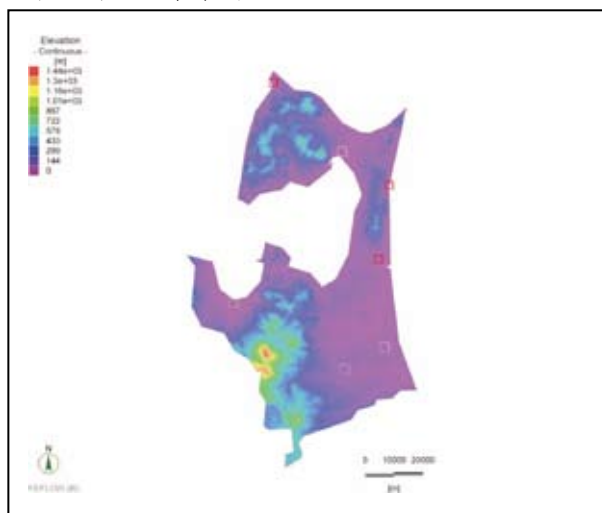


図7 青森県東部地域の地下水水頭分布

このように各地の解析を終え、地下水流動の方向や速度が外観できた。現在は調査地点を選定し、水質など震災前後の変化を比較するための資料(試料)を収集している。

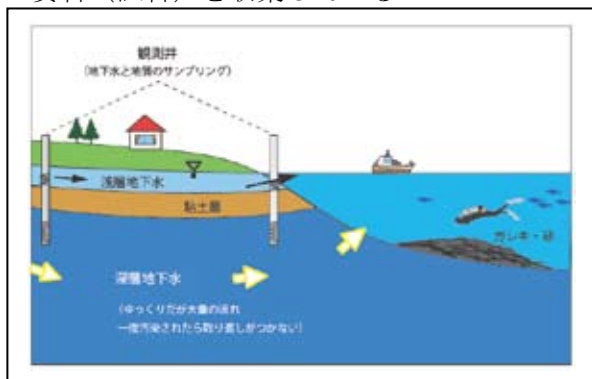


図8 地下水調査のイメージ：浅層地下水は汚染されている可能性が高いが東北地方では粘土層を介して汚染されない深層地下水が存在する場合が多く、現状で利用できる地下水の範囲と将来的に利用できるタイミングを把握する

3. おわりに

震災直後、我々は被災地の水源(飲用水)確保のため、地下水流動解析を実施した。そのため、解析境界には行政界を採用した。しかし、現状では避難所も全てなくなり、本格的な復興が始まろうとしている。この段階では、仮に汚染されている地域があったとして、その汚染のピークはいつなのか?ピーク後に地下水は浄化されるのか?人工的に浄化しなければならない部分があるのか?などが問われている。

我が国には、地表を所有する者の権利が地下に及ぶとの発想から、地下水は私有物として取り扱われてきた。しかし今回の震災で街の造り直しを余儀なくされたところが多い。こんな状況の中、かつて沿岸地域で問題となった塩水化や地盤沈下を避けながら、有効に地下水を利用できるように農・工・商の各用地を分類すべきではなかろうか。政治学的・経済学的な判断で街を造ることも必要かもしれないが、今こそこれまで以上に地球科学的な判断を重視すべきと考える。

本研究を実施して以下のことが分かってきた。

- 1) 東北地方太平洋岸の堆積平野には、概ね地表面下10~30mに粘土層がある。これは堆積環境が似通っていることに起因しているが、このため浅層地下水と深層地下水が分離されており、汚染の三次元的拡大を防いでいる。
- 2) 堆積平野において、地下水の流動量は大きく淡水は海に張り出している。東北地方全般に降水量が大きく、地下水流動は活発であり、淡水地下水は海底にまで流出し海洋下で湧出する。

参考文献

- 福島県企画開発部企画課(1952)：福島県相馬市および原町市における工業用水源調査報告。17p. およびこのシリーズ
- 国土交通省土地水資源局(2010)：水基本調査(地下水調査)。
- 森和雄・池田喜代治(1979)：福島県福島盆地水理地質図，1:50,000。日本水理地質図，29,1 sheet,地質調査所。
- 興津春生(1954)：宮城県内工場適地の地質及び工業用水(主として地下水)について，宮城県商工部，77p
- 仙台通商産業局(1987)：福島市周辺地域地下水利用適正化調査報告書(昭和62年度)。147p.
- 東北農政局計画部(1988)：農業用地下水調査・地域開発調査会津西部地区調査報告書。56p., 5 sheets. およびこのシリーズ
- 越谷賢・丸井敦尚(2011)：日本全国の地盤調査ボーリングデータを用いた地形・地質条件に基づく地下水面の推定：日本地下水学会誌53(2)，179-191

液状化問題への物理探査技術の活用と取り組み Applications of geophysical exploration technology for liquefaction researches.

物理探査研究グループ：神宮司元治
Exploration Geophysics Research Group: Motoharu Jinguiji
Phone: 029-861-8293, e-mail: m.jinguiji@aist.go.jp

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、広範囲にわたって地盤の液状化が発生し、埋立地や内陸の低地において多大な被害が生じた。また、今後発生が危惧されている東海、南海、東南海地震においても、8万棟を超える住宅の全壊が予想されており¹⁾、インフラ設備の被害や地域の経済活動を含めて多大な被害の発生が危惧される。液状化被害は人的被害が小さい一方、個人の資産やインフラに大きな被害を与え、住民生活や経済活動に多大な影響を与えることが今回の震災でも明らかになった。しかしながら、我が国は、世界でも有数の地震国であり、これまで新潟地震や阪神大震災においても大きな液状化被害を受けてきたことから、液状化に関する調査対策技術の研究についてはそれなりに行われてきた経緯がある。それにも関わらず、このような被害が顕在化した事実については、真剣に考えると共に、反省をこめて液状化研究や取り組みを深化させていく必要があると考える。本講演では、物理探査技術を液状化調査や対策にいかんにかけてゆくか、これまでの事例紹介を行い、現状の問題点と課題について論ずる。

2. 液状化被害について

地盤が大きな地震動によって液状化し、被害を受けることは、これまで多くの人々の間でも知られてきた事実である。しかしながら、液状化によって生じる被害を自分にかかる直接的な問題として捉えている人は少ないと思われる。そもそも、液状化による人的被害は非常に少なく、液状化による被害の大半は家屋の不同沈下による傾斜や水道管やガス管などのインフラ施設の損壊など、経済的な被害がほとんどである。また、コンビナートの石油タンクなどの大型のインフラ施設を除き、個人が所有する宅地等については法的な規制はなく、また、不動産の販売においても、液状化リスクについて告知義務があるわけではない。そのため、多くの人々は自分の所有する不動産や、居住する自治体のインフラ施設の液状化リスクがどの程度あるかについて十分に認識していなかった可能性がある。

今回の震災では、震源に近い東北地方沿岸だけでなく、遠く離れた東京湾の沿岸でも液状化被害

が発生した（震源に近い東北地方でも液状化被害が発生したが津波被害で覆いつくされている）。そのため、図らずしも、これまで液状化によるリスクを認識していなかった人々や新しく住宅資産を購入しようとしている人々にも液状化リスクを認知するに至ったと思われる。その一方で、液状化の調査や対策には少なからず費用（コスト）がかかる。建物倒壊被害と比べ、人的被害が少ない液状化についての調査・対策について、どの程度の費用をかけられるかはコスト・ベネフィットのバランスの問題であり、できればコストをかけたくない、最小限に抑えたいと考えるのが普通であろう。そのため、液状化にかかるコストをなるべく小さくする技術開発が求められており、そのような技術の開発を前提とした法的整備と情報開示が液状化被害の防止と人々の安心の確保への早道だと考える。

3. 物理探査技術とは

物理探査技術とは、地下に存在する物理的、化学的性質を用いて、地下の状態や状況を解明する技術である。技術的には、地表や空中・海上・宇宙から非破壊で地下を探索する技術、ボーリング孔を使った検層技術、地表から多機能プローブを地中に直接貫入させるダイレクトプッシュ法など多岐にわたる。物理探査技術は、検層技術を除き、ボーリングにたよらずに比較的広範囲の調査が可能であり、調査範囲に比べて比較的低コストで調査やモニタリングが可能などところにある。

4. バイブロコーンによる液状化評価

バイブロコーンに用いられるダイレクトプッシュ法は、土木分野で用いられる静的貫入試験のプローブを高度化したもので、先端コーンに様々なセンサを取り付けることで、地盤の物理的・化学的特性を評価できる技術である。バイブロコーンは、図1に示すようなプローブを地盤に貫入させ、任意の深度において、内部に設置された偏芯ロッドを回転させ、地盤に振動を加えることで地盤に液状化を発生させる動的試験装置である。本研究で開発したバイブロコーンには、間隙水圧計、加速度計、比抵抗用の電極が取り付けられており、地盤の液状化に伴い発生する間隙水圧の上昇、プローブの振動加速度、地盤の密度の変化に伴う比抵抗

変化をそれぞれ観測する．図 2 は，典型的な液状化層におけるプローブの振動加速度と間隙水圧の上昇を示しているが，プローブの通電に伴ってプローブ内部の加速度が上昇し，また，間隙水圧も増加し，残留しているのが分かる．本地点の地下水位は GL-50cm 程度である．また，各深度における比抵抗変化を図 3 に示す．

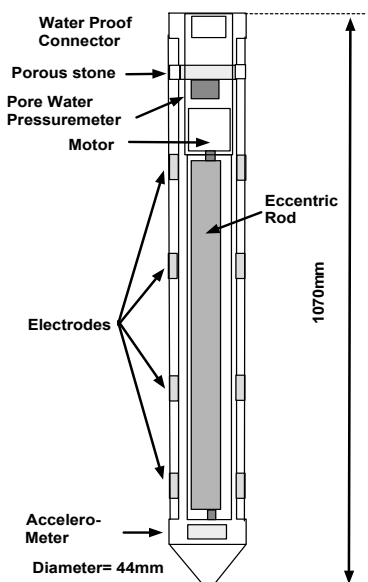


図 1 バイブロコーンの概観

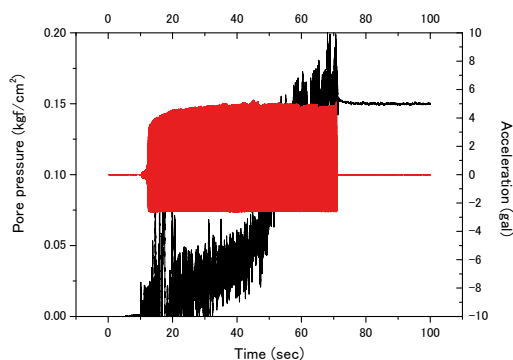


図 2 プローブの加速度と間隙水圧（深度 3.5m）

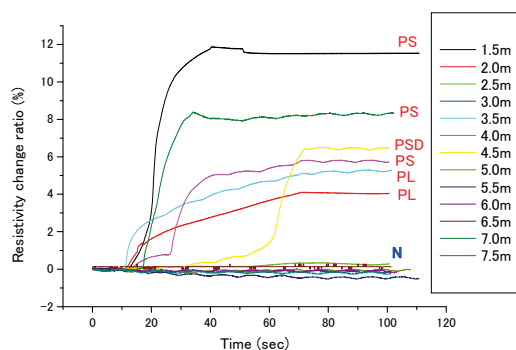


図 3 各深度における比抵抗変化(加震時間 90 秒)

比抵抗の変化は，地盤の密度変化（間隙率の変化）を示すと考えられるが，最大で 12% 近い変化を示している．また，比抵抗の変化パターンは，それぞれ異なり，すぐに比抵抗が増加するパターンから，ある程度，遅れて増加するものまで様々である．このように，バイブロコーンによって，得られる液状化に伴う定性的な変化を捉えられることは明らかであるが，地震動と高周波（50Hz）の振動との関係性など明らかにしなければならないことも多く，現在，研究を進めている段階である．図 3 の結果を CPT 三成分コーンの結果と同時に図 4 に示すが，貫入抵抗が低く周面摩擦力の小さい砂層で変化が大きいのが分かる．

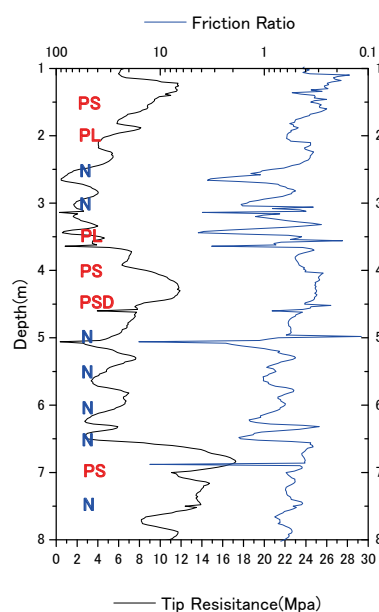


図 4 トルコ・アンタリア近郊におけるバイブロコーンによる液状化判定結果と CPT 三成分コーン測定結果との比較

5. 発破液状化による液状化実験

液状化は，地震動によって引き起こされる地盤災害であるが，地震はいつどこで発生するか予測が困難であり，液状化の実験には，振動台等を用いた室内実験が主に用いられる．振動台の中には，兵庫県三木市にある E-Defense のように，振動台のテーブル面積が，300m² (20m×15m) に達するものもあり，実際のスケールに近い地盤模型を製作して実験を行えるものもあるが，多額の費用がかかる．また，地盤模型と比べて実地盤は様々な地層構造を反映しており，実際の地盤において液状化の実験を行いたいというニーズも高い．地盤中に爆薬を仕掛け，発破による衝撃によって液状化現象を起こす発破液状化による実験（人工液状化実験）²⁾ は，コントロールされた環境の中で，原位置で実験を行うことのできる唯一の方法だと考えられる．ここで，この発破液状化実験を，地表から繰り返し電気探査を行って，モニタリングを行わない，液状化現象の評価や液状化対策工法の効果

確認を行った例について紹介する．発破液状化実験では，地盤中に爆薬を設置し，その衝撃によって液状化現象を発生させる．図5は，地表面付近まで砂層があると仮定した場合における，発破液状化実験によって地盤中にどのような現象が生じるかを模式的に示した図である．

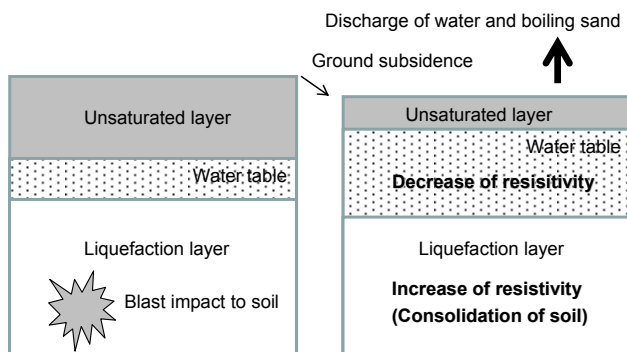


図5 発破液状化によって地盤中に生じる現象

発破による衝撃は，液状化層中の砂粒子のネットワーク構造を破壊し，砂粒子の再配列と共に間隙水圧が上昇し，それが全応力に達して有効応力が消失する．また，間隙水圧の上昇によって排出された間隙水は，不飽和層もしくは水みちを通過して，一部が地表に排水され，その過程で図6のような噴砂現象が観測される．上記においては，液状化層における砂の密度の増加に伴う比抵抗の増加，地下水位の上昇による不飽和層の飽和度増加による比抵抗の低下，低比抵抗間隙水の上昇による浅層の比抵抗の低下が見られるはずである．図7は，発破液状化実験の前後における比抵抗変化の例であるが，自然地盤の例であるA regionでは，深部での比抵抗の増加と浅部での低比抵抗ゾーンの拡大が確認された．なお，グラベルドレーンが設置されたB regionにおいては，A regionに見られたような大きなコントラストは確認されていない。



図6 発破液状化実験によって生じた噴砂

6. 地盤不飽和化工法における飽和度評価

液状化の対策には，地盤中に砂の杭をバイブロハンマーで打ち込んで締め固めるサンドコンパクション法，地盤中で固化する薬液を注入する薬液注入工法などの手法が用いられる．これらの対策方法は，液状化に対する耐性が高く，また信頼性が高いが，費用がかかるため，重要施設や大型構造物の基礎などに用いられる．住宅・水道・ガスなどのインフラでは，このような費用がかかる方法は，適用するのが困難であり，より安価で簡易な対策工法が求められている．

地盤中に空気やマイクロバブル水を注入して，地盤を不飽和化させることにより液状化を抑制する地盤不飽和化工法が近年注目を集めている．本工法は，比較的安価に施工を行うことが可能である．しかしながら，地盤不飽和工法では，注入した空気がどの程度地盤を不飽和化させることができたのか，また，どの程度地盤中に広がったのかを確認する必要がある，その評価方法が検討されている．

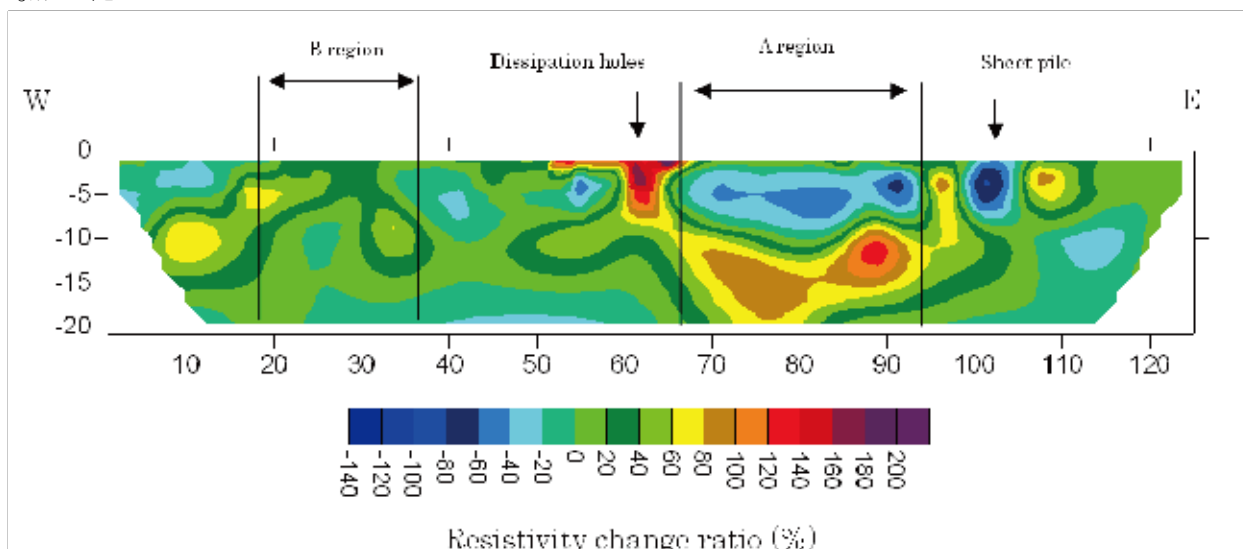


図7 発破液状化実験の前後における比抵抗変化（変化率%）

物理探査を用いた不飽和層のモニタリングには、繰り返し電気探査を用いた手法や地盤の誘電率から体積含水率を求める TDR 法による手法などが考えられる。図 8 は、繰り返し電気探査による地盤の比抵抗変化の計測例と、深度方向の体積含水率の変化を計測できる検層型 TDR センサによって、マイクロバブル水注入による地盤中の飽和度を計測した例である。

7. 安価な液状化評価手法・対策工法の確立へ

先に述べたように、一般の住宅や公共的なインフラを対象とする場合、液状化の調査・対策にかけられるコストには限界があると考えられ、その対策コストはなるべく低く抑える必要がある。そのためには、コストのかかるボーリングなどの方法をできるだけ行わない地表からの探査法や、地盤空気注入のような安価な手法が有効であると思われる。その一方で、調査や対策についての評価が不十分できちんとした評価が行われない場合には、その施工責任が問われる。場合によっては、訴訟や保障のトラブルが発生し、その調査法や対策法の信頼性も大きく毀損すると考えられる。そのため、しっかりとした調査や対策工法についての基準と評価手法を確立しておく必要があると考える。

8. まとめ

先の震災によって、液状化による経済的な被害が発生し、住民生活や経済活動に多大な被害を与えた。液状化被害を防止するためには、液状化の調査や対策が必要であるが、かけられる経済負担に限界のある一般住宅などの液状化被害では、液状化にかかる調査・対策コストはできるだけ低減させることが望まれる。物理探査手法は、地表からの探査が可能であり、調査費用の低減や対策工法の評価手法としても有望な手法であり、今後、手法の高度化と具体例を示すことで、十分に実用的で信頼性の高い調査手法および対策工法の評価手法として応用させていくことが期待される。

参考文献

- 1) 中央防災会議 (2003) : 「東南海、南海地震等に関する専門調査会」 (第 14 回), 資料 2.
- 2) 辻野修一・前田幸男・永尾浩一・吉田望・規矩大儀義 (2007) : 発破を用いた締固め工法の液状化対策への適用性に関する現場実験, 地盤工学ジャーナル, Vol2, No. 3, 125-137.

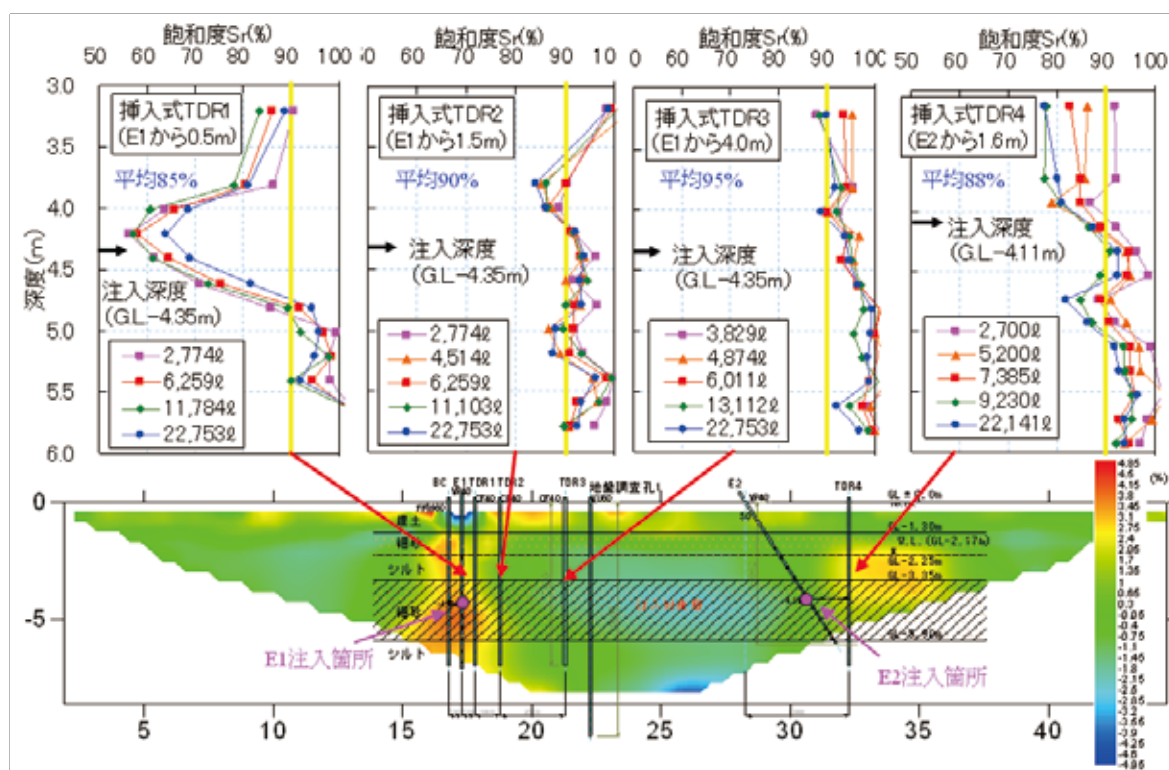


図 8 地盤へのマイクロバブル水注入による飽和度モニタリングの例

持続可能な地中熱利用を目指してー地中熱のポテンシャル評価手法の開発ー
Sustainable Use for Geo-coupled Heat Pump Systems
ーDevelopment of Potential Maps for GCHP Systemsー

地下水研究グループ：内田 洋平
Groundwater Research Group: Youhei Uchida
Phone: 029-861-3683, e-mail: uchida-y@aist.go.jp

1. はじめに

省エネルギー技術のひとつである地中熱利用システムは、比較的浅部（深度 50～100m 程度）の地中に賦存している熱エネルギーを冷暖房や融雪等に利用する技術である。地中熱の利用に際しては地下水を汲み上げる場合もあるが、揚水規制のある地域では熱交換井を掘削し、ヒートポンプを用いて採熱量を増大させる場合が多い。

地中熱利用システムの設計や設置方法，数値シミュレーション等の研究例は多い（例えば藤井ほか，2004 など）¹⁾．これらの地中熱に関する研究では，数値モデルを構築する場合に建築物一棟の周辺のみといった比較的狭い範囲でモデルの境界を設定し，境界条件における熱および地下水の流れに関してはあまり留意されていないのが現状である．しかしながら，住宅地などに地中熱利用システムを導入する場合には，熱効率の良いシステムを設計するために，流域全体におけるその地域の地下水流速や地下の温度分布を把握するといった，比較的広範囲にわたる地下水流動・熱移流シミュレーションが必要になってくる．また，地中熱利用の地下環境への影響を評価するためにも，流域規模の大きさを有するモデルが必要である²⁾

一方、日本における地中熱利用システムの普及を考えた場合、その導入コストを下げ、システム効率の向上が重要である。そのためには地域毎の

地中熱利用システムに関わる地下情報をまとめ、そのポテンシャルを評価する必要がある。本稿では、地中熱のポテンシャル評価について、現地調査から三次元地下水流動・熱輸送モデルの構築、構築したモデルと地理情報システム³⁾および熱交換井モデルを組み合わせたポテンシャル評価の手法⁴⁾を紹介する。

2. 研究対象地域の概要および地下温度構造

福井県は山地がその大部分を占めている。福井平野は県の北部に位置し、東西の幅約 10km、南北の長さ約 20km の地域である (図 1)。

当研究対象地域は西部に丹生山地、東部には九頭竜川を挟んで加越山地、越前中央山地があり、北部には加越台地と称される台地性丘陵が展開する。また、南は足羽山、八幡山、兎越山等の大小の孤立丘が散在している。福井平野は、これらの地形に囲まれて発達した平野である。北部の海岸線には三里浜砂丘があり、福井平野を貫通する河川は九頭竜川及びその支流である足羽川、日野川、竹田川があり、山地から平野に流入する所では小規模な扇状地を形成している。

現地調査および採水は2006年6月から2007年9月にかけて計4回行い、消雪用井戸、湧水、観測井、水道揚水井、および河川水を対象とした。現地調査では地下水温、および地下水位を測定し

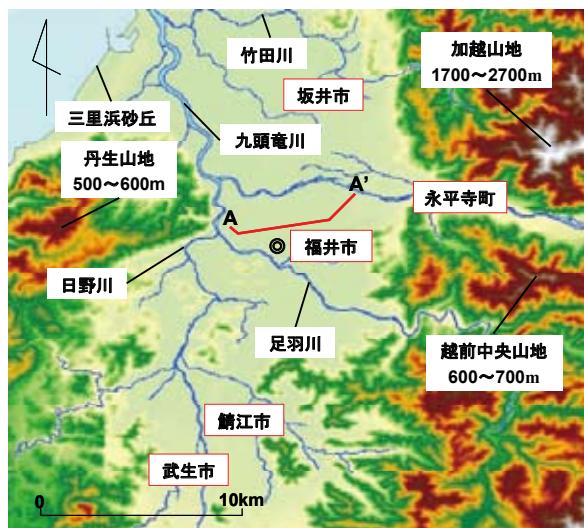


図1 福井平野概要

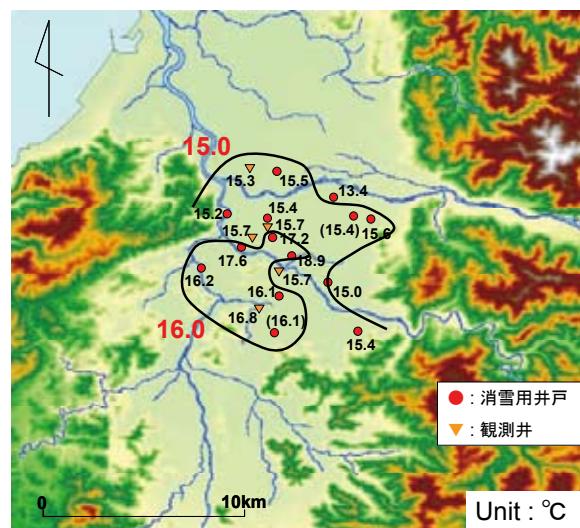


図2 標高-50mにおける地下温度分布

た．地下水温の測定においてはデジタルサーミスタ温度計（分解能 0.01℃，深度 170m まで測定可能）を用いて 2m 毎に地下水温を測定した．

標高-50m における地下温度分布を図 2 に示す．平野周辺部から平野中心部に向かうに従って地下水温度は高くなる傾向にある．また，温度－深度鉛直プロファイルによって求めた温度勾配も平野中心で大きくなる傾向が見られた．

3. 地下水流動・熱輸送解析

数値計算には WASY 社の 3 次元地下水流動・熱輸送解析コード（FEFLOW）を用いた．図 3 に解析対象領域を示す．解析対象領域は，福井平野を取り囲む分水嶺を境界として決定し，東西約 33km，南北約 56km とした．標

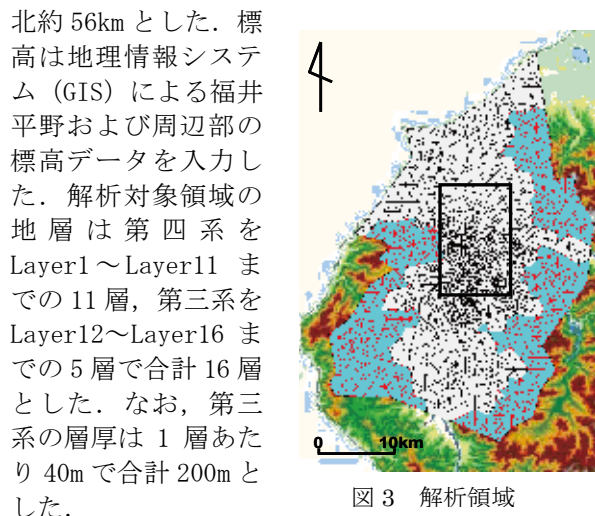


図 3 解析領域

高は地理情報システム（GIS）による福井平野および周辺部の標高データを入力した．解析対象領域の地層は第四系を Layer1～Layer11 までの 11 層，第三系を Layer12～Layer16 までの 5 層で合計 16 層とした．なお，第三系の層厚は 1 層あたり 40m で合計 200m とした．

福井県では，工業用，上水道用，消雪用などの用途で揚水が盛んに行われている．揚水量のデータは現地調査を行った 2006 年度の揚水量資料に基づき各年度の揚水量を決定した．最終的に決定したパラメータを表 1 に示す．

4. 地理情報システムを用いた地中熱ポテンシャル評価

地下水流動・熱輸送解析を実施した後，GIS を用いて地中熱利用のポテンシャルを評価するためのマップの作成を試みた．評価範囲は，福井平野中心部の人口集中地域を対象とした（図 3 中の枠）．



図 4 Index Overlay モデル

まず，主題図（土地利用，地下水流速分布，地下温度分布，地下水面，礫層分布）を作成した．これらの主題図を重ね合わせてポテンシャルマップを作成するが，主題図を重ね合わせる前に，各主題図のパラメータを区分し，ポテンシャルを示す数字を振り分ける必要がある．この操作は再分類（Reclassify）と呼ばれるもので，各パラメータを任意の指標階級に分類し，最小 1 から最大 10 までの点数をそれぞれの階級に振り分ける．それぞれの点数は，数字が大きいほど地中熱利用のた

表 1 モデルへ入力したパラメータ

		地層	透水係数 (m/s)	空隙率 (-)	熱伝導率 (W/m/K)	熱容量 (J/m ³ /K)
第四系	沖積世	Layer1 砂礫	3.0×10 ⁻⁵	0.3	1.6	4.9×10 ⁵
		Layer2 粘土	1.0×10 ⁻⁹	0.4	1.3	
		Layer3 砂	1.0×10 ⁻⁶	0.3	1.8	
		Layer4 粘土	1.0×10 ⁻⁹	0.4	1.3	
	洪積世	Layer5 砂礫	1.0×10 ⁻⁵	0.3	1.6	
		Layer6 粘土	1.0×10 ⁻⁹	0.4	1.3	
		Layer7 粘土	1.0×10 ⁻⁹	0.4	1.3	
		Layer8 砂礫	9.5×10 ⁻⁶	0.3	1.6	
		Layer9 粘土	1.0×10 ⁻⁹	0.4	1.3	
		Layer10 砂礫+砂+粘土	5.0×10 ⁻⁵	0.3	1.6	
		Layer11				
第三系	Layer12	安山岩/凝灰岩	1.0×10 ⁻⁷	0.05	1.83	
	Layer13		1.0×10 ⁻¹⁰			
	Layer14		1.0×10 ⁻¹³			
	Layer15					
	Layer16					
水		—	—	—	0.58	4.2×10 ⁶

表 2 各主題図の階級区分と点数

地表-25mにおける 地下水流速	地表-50mにおける 地下水流速	地表-25mにおける 地下温度	地表-50mにおける 地下温度	点数
指標階級 ($\times 10^{-3}$ m/day)	指標階級 ($\times 10^{-3}$ m/day)	指標階級 (°C)	指標階級 (°C)	
< 1	< 1	< 14.2	< 14.6	1
1 - 2	1 - 2	14.2 - 14.4	14.6 - 14.9	2
2 - 3	2 - 3	14.4 - 14.6	14.9 - 15.2	3
3 - 4	3 - 4	14.6 - 14.8	15.2 - 15.5	4
4 - 5	4 - 5	14.8 - 15.0	15.5 - 16.0	5
5 - 10	5 - 10	15.0 - 15.5	16.0 - 16.5	6
10 - 20	10 - 20	15.5 - 16.0	16.5 - 17.0	7
20 - 30	20 - 30	16.0 - 16.5	17.0 - 17.5	8
30 - 40	30 - 40	16.5 - 17.5	17.5 - 18.0	9
40 <	40 <	17.5 <	18.0 <	10

めのポテンシャルがより高い事を示す（表 2）。

最後に、地下水流速、地表面から地下水面までの距離および地表面下 50m までの地層に占める砂礫層の割合の 3 種類の主題図を用いて、図 4 に示す Index Overlay モデルにより、合成マップを作成した。Index Overlay とは、Weighted Overlay と呼ばれる操作の組み合わせによる主題図の積算モデルを示す。Weighted Overlay は、GIS 上における操作の一種であり、複数の主題図を各セル上における点数と重みに基づき重ね合わせ、合成マップを作成する操作である。

地下水流速に関しては、地表-25m および-50m における地下水流速分布図にそれぞれ 50%の重みを振り分けて重ね合わせた。さらに、重ね合わせた地下水流速に 35%，地表面下 50m までの地層に占める砂礫層の割合に 35%，地表面から地下水面までの距離に 30%の重みを振り分けて重ね合わせた。ところで、森林、河川地および湖沼に区分される土地については地中熱利用導入が不要あるいは困難な地域であるため、合成マップから除外する必要がある。そこで、Index Overlay モデルを用いて各主題図を重ね合わせた合成マップから、森林、河川地および湖沼の地域以外を抽出した。

以上の操作により、最終的に作成された地中熱利用のポテンシャルマップを図 5 に示す。作成されたポテンシャルマップは平野部において 8 つの階級に区分され、ポテンシャルの高い地域は、九頭竜川の北域および南域、足羽川の東域および南域であることが示された。

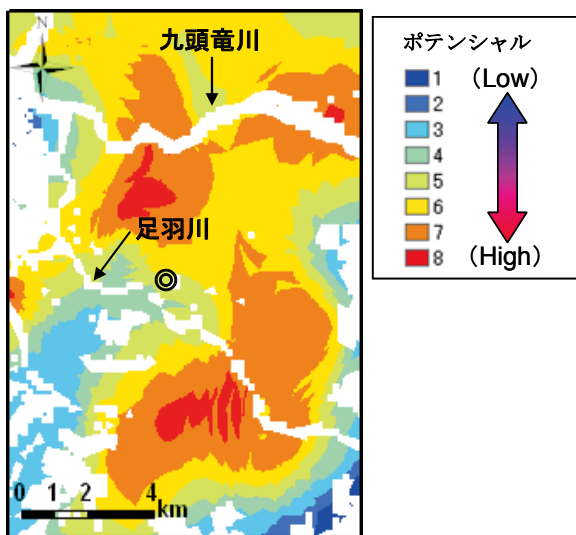


図 5 作成されたポテンシャルマップ

5. 熱交換井モデルを用いた地中熱ポテンシャル評価

先に述べた福井平野の広域地下水流動・熱輸送解析結果をもとに、熱交換井設置地点の地下水流動場と温度場に即した局所的な熱交換井モデルを構築し、平野内の複数点において熱交換量を計算することにより、より定量的な地中熱ポテンシ

ルの評価を試みた。

まず、対象領域の熱交換量マップを作成するため、Fujii et al.⁵⁾の手法を参考に、領域内から熱交換井設置ポイント（Borehole heat Exchanger Point : BEP）を選び、各地点における熱交換量の計算を行った。熱交換量の計算には、広域流動解析と同じく FEFLOW を用いた。図 6 に示す 20m×20m 四



図 6 熱交換井モデル

方、深度 100m 程度の格子（局所モデル）を作成し、各 BEP における各地層厚さ、熱・水理物性を広域モデルと一致するように設定した。上部境界条件については、熱量・流量フラックス共に 0 とし、下部境界条件については、流量フラックスを 0 とし、熱量フラックスについては、広域流動解析で求められた温度の鉛直プロファイルから求めた地温勾配を与えた。各層の初期状態および境界条件には、広域流動解析で得られた各 BEP での流速・水頭・温度の計算結果を用いた。この段階で 10 年間の計算を行い、格子中心地点における温度、水頭、流速場が安定して広域流動モデルと適合するよう境界条件（温度、水頭）の調整を行った。

次に、局所モデル（図 6）の中心格子を地表面から深度 50m まで熱交換井（Borehole Heat Exchanger : BHE）と仮定した。ここでは、BHE として珪砂充填したダブル U 字管を仮定し、パラメータを与えた⁵⁾。この BHE に周期的な温度変化を与え、熱交換井全体の熱交換量の計算を行った。

図 7 に融雪利用時における熱交換量の分布図を

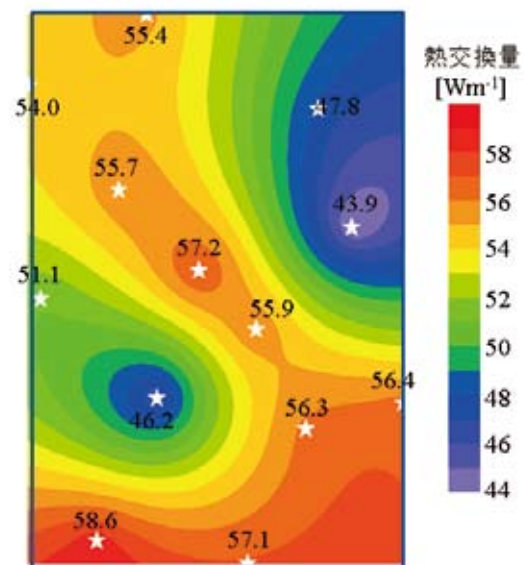


図 7 融雪利用を想定した熱交換量マップ

示す。この分布図では、地中熱ヒートポンプシステムの融雪利用を想定し、1年のうち90日間（冬季の約3カ月）について、採熱温度5℃、5時間／日のサイクルで運転を行う設定で、10年間の計算を行ったものである。対象地域内における最大熱交換量は58.6 W/m、最小は43.9 W/mであり、その差は14.7 W/m(約1.3倍)という結果となった。熱交換量の低い地域は対象地域の北東部と南西部に見られ、北西から南東にかけての範囲と南部では比較的熱交換量が高くなる傾向が見られた。

地中熱ポテンシャルマップと熱交換量マップとを比較すると、共に対象範囲の南側と北西部から南東部にかけての範囲にポテンシャルの高い（熱交換量の大きい）地域が見られ、地中熱利用に適する分布は同様の傾向を示している。詳細に比較した場合、各計算地点での熱交換量とポテンシャルの関係は一致していない地点も存在する。これは、ポテンシャルマップのWeighted Overlayの設定が影響を及ぼしている可能性が考えられる。

6. まとめ

本研究では福井平野における地中熱利用を想定し、現地調査によって得られたデータを基に三次元地下水流動・熱輸送解析を実施した。そして、地理情報システム（GIS）を用いて、得られた解析結果（地下水流速、地下温度分布）、水文地質情報（砂礫層分布、地下水面深度）、および地上の情報（人口密度、土地利用区分）をまとめ、地中熱利用におけるポテンシャルマップの作成を試みた。さらに、熱交換井設置地点の地下水流動場と温度場に即した局所的な熱交換井モデルを構築し、平野内の複数点において熱交換量を計算することにより、より定量的な地中熱ポテンシャルの評価も試みた。

今後は、熱交換量マップの作成手法を検証するため、実際に現地での温度応答試験や熱交換井の試験運転などを行い、モデルの精度を向上させる必要がある。最終的には、他の平野や地域においても同様にGISを用いたポテンシャルマップと熱交換量マップ、および水文地質環境との比較検討を進めることにより、より簡便な手法で作成できる地中熱ポテンシャルマップの高度化に繋げる予定である。

熱交換井の設計や性能評価に加え、今回のような広域の地下水流動場や温度場も含めて地中熱利用の可能性を検討することは、地中熱利用のポテンシャル評価のみならず、環境負荷が少なく持続可能な熱資源の利活用にも大いに役立つものと考ええる。

参考文献

- 1) 藤井光, 石上孝, 大島和夫, 金子泰大: 地結合ヒートポンプシステムを用いた融雪システムの設計に関する実験的および数値的検討, 日本地熱学会誌, 26, 39-57, (2004)
- 2) 内田洋平: 浅層の温度分布と地下水流動に関連して (1) 浅層の地下温度構造, 日本地熱学会誌, 28, 299-306. (2006)
- 3) 内田洋平, 與田佑季, 藤井光, 宮本重信, 吉岡真弓: 地中熱利用適地の選定方法 その1 地下水流動・熱輸送解析とGISを用いた地中熱利用適地マップの作成, 日本地熱学会誌, 32, 229-239, (2010)
- 4) 吉岡真弓, 内田洋平, 與田佑季, 藤井光, 宮本重信: 地中熱利用適地の選定方法その2 地下水流動・熱輸送解析を用いた熱交換量マップの作成. 日本地熱学会誌, 32, 241-251 (2010)
- 5) Fujii, H., Itoi, R., Fujii, J. and Uchida, Y.: Optimizing the design of large-scale ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling. Geothermics, 34, 347-364 (2005)

地下水研究グループの紹介 Introduction of Groundwater Research Group

研究グループ長：丸井敦尚

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

1. グループの研究目的

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

- ①日本列島の地下水資源や水環境情報を見える化した水文環境図を作成！
- ②全国の工業用水を再開発し合理的な利用を推進するためのプロジェクト！
- ③地中熱を効果的に利用した新しい地下水の利用法で省エネ&地球温暖化対策！
- ④二酸化炭素を削減するための研究（地層処分研究や地中貯留研究）で社会貢献！
- ⑤技術移転を含めた東・東南アジア各国とのプロジェクト研究の推進！
- ⑥沿岸域の活断層評価など多角的な基礎研究！

3.11 東日本大震災の影響で、②・⑤・⑥は本年度中止、①・④は減速のあおりを受けました。しかし、③は時代の要請を受け加速しています。当研究グループは時代の変化やニーズに合わせて臨機応変に研究課題を軌道修正しています。さらに、震災直後は被災3県を対象に、いち早く地下水流動解析を実施し、HPや新聞・テレビ等のメディア及び学会発表等を通じてその成果を広く公表しました。震災復興や原発事故への対応にもグループ一丸となって大きく貢献しています。

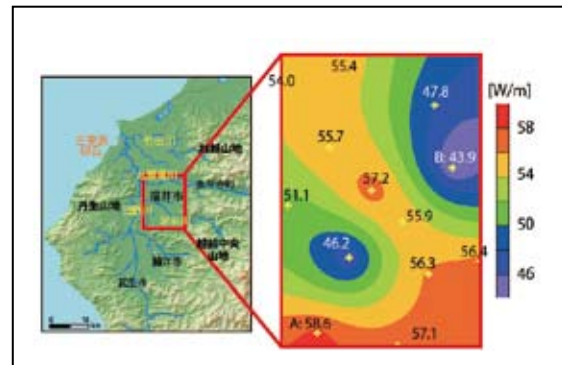
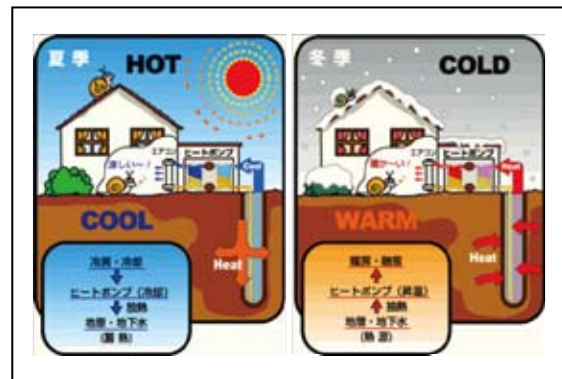
2. 主な研究項目の内容

2.1. 地中熱利用研究

（地球温暖化対策としての研究から省エネルギー&再生可能エネルギー研究へ）

地中熱を利用した冷暖房は、再生可能エネルギーの代表であり、低炭素化社会の実現に向けて最も期待されるエネルギーの一つです。地下水研究グループでは、地下水流動の観点から効率のよい地中熱利用の方法を提案し、省エネ

ギー&再生可能エネルギー研究を実施しています。昨年までは、地球温暖化対策でもありましたが、本年度からは震災復興への利用を考慮してその方向性が少しずつ変化してきました。より低コストで、より高効率を実現するために、地下水流動把握の技術や知識が必要であることを実証しています。



（上）地中熱利用の概念図：地下水をくみ上げずに地下の熱だけを利用するため、環境調和型の再生可能エネルギー利用として注目されている

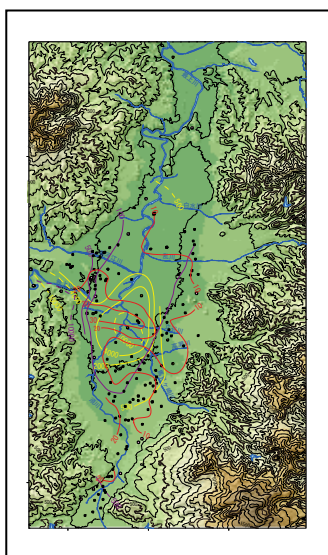
（下）福井市周辺で熱利用ポテンシャルを計測して事例（吉岡ほか、2010）：地下水の動きを知ること、掘削深度や熱交換量を高精度に把握できるため、無駄の無いシステム設計が可能となった

2.2. 水文環境図に関する研究

地下水資源の有効利用と地下水環境の保護と

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

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



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

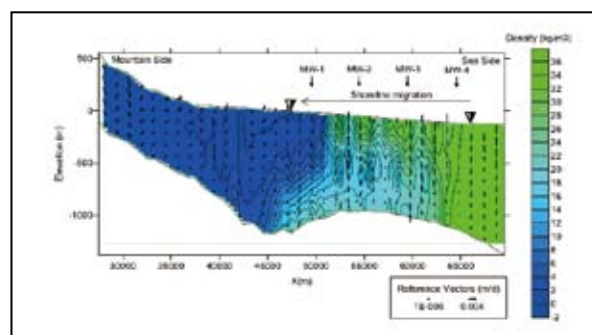
2.3. 地層処分研究&地中貯留研究

原子力発電は二酸化炭素削減のためのエネルギーとして見直されつつありました。しかし、この廃棄物の処理が大きな問題であると同時に、今回の震災で大量の廃棄物が出現しました。これを着実に処分するため、深部地下水環境の安定性を評価して、無理のない安全な地層処分を行うための基礎研究を進めています。本研究では、処分地として可能性の高い沿岸域特有の地下水流動環境を解明することや、全国規模の沿岸域帯水層データベースを構築することなどが大きな課題となっています。これまでに、日本列島全域の水収支解析や地下水盆地といわれる堆積平野の構造について全国規模でデータベースを構築してきました。現在では各地の地下水流動を把握すべく列島全域の地下水流動解析に取りかかり始めました。その結果、列島の沿岸部では、ほぼ全域に海底湧出地下水があることや、沿岸海底下には淡水地下水領域が存在すること

がわかってきました。さらにこれらの現象は、論理的には世界中のあらゆる地域で起こる可能性もあること分かってきました。新しい発見も挙げつつ研究は一層加速しています。さらに、この事実は二酸化炭素の地中貯留研究にも生かされています。



沿岸域での深部(1000m)地下水調査の様子：北海道幌延町での掘削。深部地下水の流動や環境を評価している。好天時には利尻島が見える



沿岸海底下の地下水環境解析結果の一例：過去からの海水準上昇にともなって沿岸海底下に淡水地下水が封じ込められた事例、この淡水地下水は超長期間安定していると考えられる

3. グループの研究体制

グループ長：丸井敦尚
主任研究員：内田洋平
研究員：宮越昭暢・町田功・井川怜欧・吉岡真弓・越谷賢・小原直樹
テクニカルスタッフ：樽沢春菜・中山京子・潮田みどり・宮崎圭子
産総研特別研究員 (PD)：伊藤成輝
共同研究員：細谷真一・吉澤拓也・西崎聖司
招聘研究員：楠瀬勤一郎・田中正・益田春江
三宅紀治・高村弘毅・新藤静夫・榎根勇
長野智則・井岡聖一郎・中屋真司

4. 最近の主な研究成果(ほんの一例)

町田功・内田洋平・石井武政(2010)：水文環境図 No.6 山形盆地，地質調査総合センター
越谷賢・丸井敦尚(2011)：日本全国の地盤調査ボーリングデータを用いた地形・地質条件に基づく地下水面の推定：日本地下水学会誌 53(2), 179-191.

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

研究グループ長：阪口圭一

Leader, Geothermal Resources Research Group: Keiichi Sakaguchi
Phone 029-861-3897, e-mail: k-sakaguchi@aist.go.jp

1. グループの研究目的

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

2. グループの研究資源

1) グループ員

常勤研究者：阪口圭一、佐々木宗建、茂野 博
(2011 年 3 月退職)、水垣桂子、安川香澄
(2011 年 5 月より)、柳澤教雄

客員研究員：村岡洋文

テクニカルスタッフ：古澤みどり、松林 修

2) 主要予算

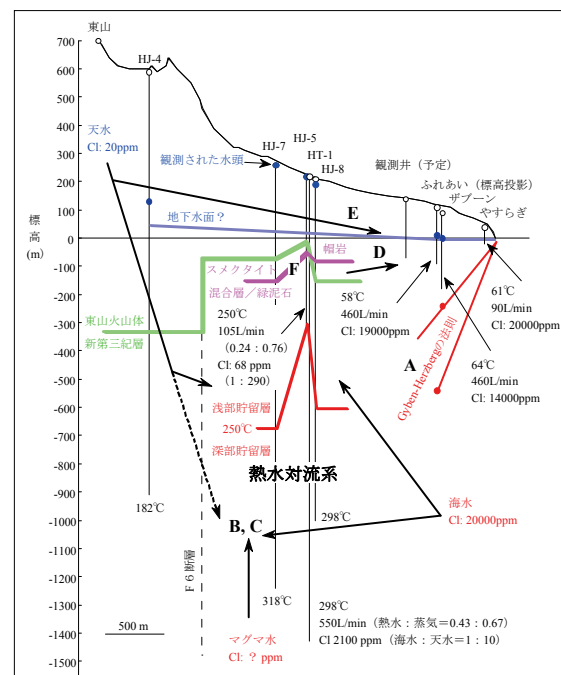
- ・環境省受託研究費「地球温暖化対策技術開発事業（温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究）」
- ・地熱技術開発株式会社受託研究費「温泉発電システムの開発と実証」（環境省委託費「地球温暖化対策技術開発事業（温泉発電システムの開発と実証）」の一部再受託）
- ・運営費交付金「地熱資源のポテンシャル評価の研究」
- ・運営費交付金「地熱資源の研究」

3. 平成 23 年度の研究計画

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

発ポテンシャルの拡大を図る。(1b)では、第 2 期研究課題「温泉発電の研究」の成果を発展させ、これまで発電資源対象でなかった温泉資源を地熱発電資源としても利用する技術を開発することによって開発ポテンシャルの拡大を図る。

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



第 1 図 八丈島の地熱系の初期概念モデルと今後の検討課題 (A から F)

4. 平成 22 年度の研究成果

1) 地熱・温泉共生の研究では、当グループを中心に部門内及び他部門の研究者の参加を得て、環境省委託の地球温暖化対策技術開発等事業「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」(H22-24 年度)を実施している。本研究は産総研が研究代表者となり、弘前大学、東電設計(株)、日鉄鉱コンサルタント(株)、八丈町との共同研究として実施している。22 年度は八丈島地域で調査研究を行い、地熱系モデルの初期モデルの作成と今後の課題の整理(第 1 図)、微小重力モニタリングに用いる高精度連続観測用重力計の安定測定の確認と観測井周辺域のベースライン評価、観測井(深度 200m)掘削と観測井周辺の水理構造モデル作成、次年度以降に浅部をより詳細にシミュレーションするためのモデルの設計、システム統合化のための概念設計等を実施した。

2) 温泉発電システムの研究として、当部門と地熱技術開発(株)(研究代表者)、弘前大学が共同して、新潟県十日町市松之山温泉地域において環境省委託の地球温暖化対策技術開発等事業「温泉発電技術の実証研究」(H22-24 年度)を実施している。産総研は、A)実証地域の温泉メカニズムの解析、B)実証試験に利用する当該源泉および周辺地域のモニタリング、C)スケール付着予測とその対策を実施した。

A)のメカニズム解析については、松之山地域の地質データの情報収集・解析、流体採取と同位体分析、微量元素の分析を行い、基礎データを取得した。B)のモニタリングについては、温泉発電を実施する鷹ノ湯 3 号井および周辺 1 km の源泉について、毎月温泉水を採取し、泉温、流量、pH、電気伝導度、および主要元素分析を行い、現時点まで安定していることが示された。C)のスケール付着予測については、発電試験に用いる鷹ノ湯 3 号の温泉水化学分析データをもとに、地化学計算を行い、カルサイトが過飽和であるが、ほかの主要スケール鉱物は不飽和であることなどから、スケール付着のリスクは流路内での蒸発を避ければ低減されることが示された。

3) 地熱資源地熱資源データベースの応用研究では以下の成果得た。

公開電子地球科学情報の地下地質 3 次元データと温泉化学データの統合処理・解析の事例研究として、北海道の石狩低地帯域を対象とした検討を行い、広域的に地下に分布する熱水系を 6 つの系に分類するとともに、各々の生成機構を概念的に明らかにした。

また、NEDO 地熱開発促進調査報告書に記載の温泉水と地熱水の地化学分析値、湧出地点、湧出深度等のデジタル化を行った。今後、温泉水の地化学的情報から地熱系の地化学的情報を推定する手法を検討・開発し、デジタル情報として

公表する予定である。さらに、平成 21 年に出版した「全国地熱ポテンシャルマップ」について、改良すべき点を抽出した。

4) 地熱シーズ・基盤研究では以下の成果を得た。

従来進めてきた、プレートスラブの斜め沈み込みと火山・地熱分布の関係のモデル化研究、公開熱水系シミュレータの地熱資源評価への応用研究などについて取りまとめ、誌上・口頭発表を行った。ESR 年代測定法を用いた熱履歴解析においては、これまでの成果をとりまとめた。また熱影響の範囲・程度をさらに詳細に解析するため、高温泉湧出点からの距離と年代測定について文献調査を行い、実測地域候補を抽出した。温泉からの資源的成分回収に関しては、本邦の酸性泉の地化学性と資源ポテンシャルを既存文献調査及び現地調査を基に明らかにした。オーストラリアの高温岩体に関しては、クーパーバーズンの循環試験中の熱水化学分析を行い、トレーサー試験の結果、およびアデレード大学での水岩石反応試験の結果を含めた解析を行った。

5. 平成 22 年度後期～23 年度前期の主な研究成果公表

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

Yanagisawa, N. (2011) Precipitation mechanism of carbonate and sulfate scales in Enhanced Geothermal System (EGS) at Hijiori, Japan, Proceedings of International Workshop on Mineral Scaling, 77-82.

Yanagisawa, N. and Matsumura, T. (2011) Scale removing and preventing by using high-frequency electrolysis system, GRC Trans, 34, in press.

Yanagisawa, N., Muraoka, H., Sasaki, M., Sugita, H., Ioka, S., Sato, M. and Osato, K. (2011) Status of development of generation system using hot spring fluid, Proceedings of 9th Asian Geothermal Symposium, in press.

Yanagisawa, N., Ngothai, Y., Rose, P and Wyborn, D. (2011) Geochemical behavior of EGS reservoir during first circulation test at Habanero site, Cooper Basin, Australia., Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan, 33-3, 125-130.

安川香澄・内田洋平・矢野雄策 (2011) 地熱・地中熱の開発・利用の現状と今後の展望について。金属, 81, 850-858, アグネ技術センター。

鉱物資源研究グループの紹介 Introduction of the Mineral Resources Research Group

研究グループ長：高木哲一

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

1. グループの研究目的と構成

鉱物資源研究グループは、陸域の鉱物資源を対象とした資源探査・評価など資源最上流部に関わる研究を実施している。現在 6 名の職員と 10 名の契約職員・客員研究員が所属している。ここでは当グループの研究内容を、レアメタル資源、非金属資源、鉱物資源情報、分析技術開発の 4 つに分けて紹介する。

研究メンバー構成

高木哲一（グループ長）
村上浩康（企画本部出向中）
大野哲二
実松健造
星野美保子
森本慎一郎（TIA 兼任）
昆 慶明（産総研特別研究員, PD）
堀内 悠（産総研特別研究員, PD）
大竹 翼（産総研特別研究員, PD）
申 基澈（産総研特別研究員, PD）
恒松麻衣子（テクニカルスタッフ）
佐藤恵美子（テクニカルスタッフ）
奥村公男（客員研究員）
平野英雄（客員研究員）
神谷雅晴（客員研究員）
寺岡易司（客員研究員）

2. レアメタル資源の研究

レアメタルとは、鉄やアルミニウムなどの汎用金属と金・銀などを除いた希少な金属資源で、現在 31 鉱種が経済産業省によって指定されている。レアメタルは、中国など新興国の急成長、2004 年以降金属資源の価格の急激な上昇、少数国やメジャー企業による資源の寡占化などにより、公正な価格で自由に輸入できない現象が起こり始めた。そこで、日本では官民の総力を挙げて海外金属資源の権益を確保する必要性が出てきた。鉱物資源研究グループは、供給不足が深刻なレアアース（ランタノイド, Sc, Y）を中心としたレアメタル資源の調査に力を注いでいる。レアアースは、高性能モーター等に不可欠な金属だが、ほぼ全量を中国からの輸入に頼ってきたため、最近の中国の輸出制限と価格高騰で産業界が深刻なダメージを被っている。そのため、当グループでは、強い政策ニーズに基づき、世

界各地で中国に替わるレアアース鉱床を求めて、一部は石油天然ガス・金属鉱物資源機構、米国地質調査所、民間企業などと共に調査研究を実施している。

産総研-米国地質調査所の共同研究は、平成 23 年 1 月の日米レアアース会議で合意され、今年度から積極的に推進している。その一環として、米国アラスカ州の Bokan Mountain レアアース鉱床の調査を米国地質調査所と共同で開始した。同鉱床はアルカリ花崗岩に付随する脈状鉱床で、カナダの鉱山会社が開発を行っている。約 6 km にわたる鉱脈が数本確認されており、ディスプロシウムなどの重希土類に富むことから、中国南部イオン吸着鉱に替わる鉱床として注目されており、2012 年から試験的な坑道採掘が開始される予定である。現在、当グループでは採取した試料の構成鉱物や化学組成などを解析中である（写真 1）。



写真 1 アラスカ Bokan Mountain の全景
（上）、レアアース鉱床での日米共同研究
の様子（下）

また、レアアース資源の世界的賦存状況の再評価およびマテリアルフローの解析事業にも着手した。この事業の目的は、現在中国に一極集中しているレアアースの供給元を多角化し、供給安定化を図ると共に、各レアアース元素の将来の需給状況を予測し、適切な資源開発を促進させることにある。現在、日米の情報交換を基に、重要鉱床のリストを作成し、公開情報の収集およびデータベースの再構築を開始したところである。また、産業界を対象に広くアンケート調査を実施し、上流から下流に至るレアアースの流れの解析を行っている。

平成 22 年度より、当グループでは情報技術研究部門と共同でリモートセンシングを利用したレアメタル資源解析技術の開発も行っている。この事業は、日本が開発・運用する ASTER、PALSAR などの衛星センサーが取得した画像データおよび航空機によるハイパースペクトルデータを用いたレアメタル鉱床探査技術の開発、各国の鉱物資源情報のコンパイルとデータベース化などを目的とする。これまでに、米国ネバダ州中部の金鉱床地帯（写真 2）およびチリアルゼンチン国境の銅鉱床地帯で地表踏査を行い、リモートセンシングデータの検証作業を行った。また、東アジア鉱物資源データベース作成のための ASEAN 各国との情報交換、海外技術者研修協会(AOTS)と共同で日本での各国担当者の研修などを実施した。



写真 2 米国ネバダ州における情報技術研究部門との共同調査の様子

これらの他にも、モンゴル、ブラジル、ベトナム、南アフリカにおいても共同・受託研究が進行中である。

3. 非金属資源の研究

石灰石、窯業原料(粘土、長石、珪石など)、採石・骨材などの非金属資源(工業原料鉱物)は、現在でも国内に約 300 カ所の鉱山が稼働しており、生活に必須な様々な原料を供給している。鉱物資源研究グループでは、これらの中で、特にベントナイト資源に注目し研究を行っている。ベントナイトとは、モンモリロナイトを主体とする粘土物質で、その膨潤性や吸着性により遮

水剤、掘削泥、鋳物砂粘結剤、ペット用トイレ砂などに利用されている。また、近い将来は、低レベル放射性廃棄物処分場において廃棄体周囲に充填する緩衝材としての用途が予定されている。現在、国内では宮城・山形地方などで良質なベントナイトが生産されているが、将来にわたり十分な供給量を確保するために、当グループでは、米国ワイオミング州、アラバマ州などに分布する鉱床の野外調査に基づく資源量評価や性能試験を実施している（写真 3）。また、ベントナイトの性能を示す重要な指標であるメチレンブルー吸着量に関する、測定法の改良や吸着メカニズムの解析なども行っている。



写真 3 米国アラバマ州 Sandy Ridge ベントナイト鉱床の現地調査

4. 鉱物資源情報の研究

海外の鉱物資源情報、とりわけ日本に近いアジア地域の情報を収集・解析することは、日本の資源確保戦略を立案する上で非常に重要である。鉱物資源研究グループでは、政府・鉱山業界等の要請に基づき、アジア地域の地質図・鉱物資源図、鉱物資源データベースなどの作成に継続的に取り組んでいる。これまでに、300 万分の 1 東アジア・中央アジア地質図、300 万分の 1 東アジア鉱物資源図、500 万分の 1 アジア地質図を出版し、2011 年度には 300 万分の 1 中央アジア鉱物資源図の出版を予定している（図 1）。

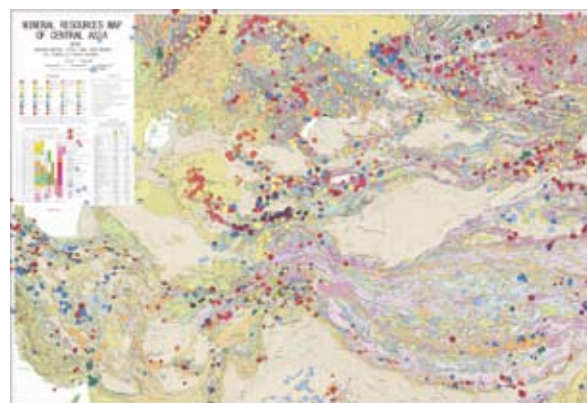


図 1 中央アジア鉱物資源図

また、これら鉱物資源図の編集に用いたデータベースは、将来 ASEAN 各国で構築中の東アジア鉱物資源データベースに組み込まれる予定である。このほか、既出版の 50 万分の 1 国内鉱物資源図の電子化などの作業も実施中である。

5. 分析技術開発

鉱物資源の研究を進める上で、鉱石や鉱物の精度の高い分析は不可欠である。そのために、鉱物資源研究グループでは、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置(LA-ICP-MS)による分析を実施している(写真4)。この分析装置は、フェムト秒という極めて短い(=エネルギー密度の高い)レーザーパルスを照射して試料表面の微小領域を溶融させることなく一瞬で粉碎し、発生した微粉末を ICP-MS に導入して高精度で化学分析する装置である。現在、全岩・鉱物分析ルーチンの開発や感度向上のための改良を行っている。この手法は、ほとんどの固体試料に適用が可能であり、1 試料 2~3 分と分析時間も極めて短い。また、難溶性鉱物が溶け残る心配がないため、レアアース鉱石の分析に適している。

ICP-MS では溶液試料の分析も可能であるため、イオン吸着鉱から抽出した希土類元素などの定量分析やベントナイトの交換性陽イオン組成分析なども行っている。



写真4 鉱物資源研究グループの
LA-ICP-MS システム

鉱物資源の研究には、鉱物の産状の観察や、鉱物を同定するための微小領域分析も必要不可欠である。そのために、エネルギー分散型 X 線分光分析器(EDS)を備えた走査型電子顕微鏡(SEM)による分析を実施している。この装置では、EDS を用いて $1\mu\text{m}$ 以上の粒子の定性・定量分析が可能だけでなく、粒子解析ソフトウ

ェアを用いて観察面の化学組成や鉱物粒のサイズ・量比などが自動的に解析可能であり(写真5)、鉱石のキャラクタリゼーションに大きな威力を発揮する。

この他、当グループでは粘土鉱物や選鉱物等の各種分析のため、熱分析装置(TG-DTA)、フーリエ変換赤外分光分析装置(FT-IR)、分光光度計などを装備している。

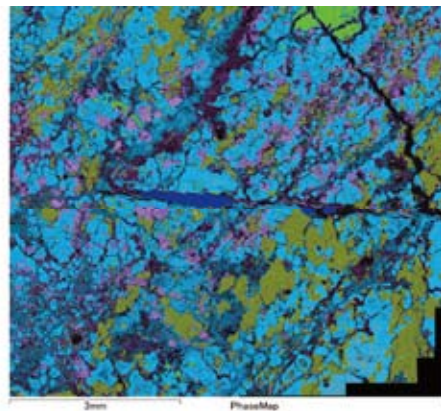


写真5 SEM-EDS(Inca-Energy)を用いた
ブラジル産レアアース鉱石の鉱物別
マッピング画像

6. 今後の展望

鉱物資源の供給安定性に対する産業界の不安が増大する中で、鉱物資源研究グループの役割は益々大きくなるであろう。現在、レアアース資源の国内評価体制を整備するために、経済産業省の予算により、レアアース分析・選鉱実験施設を当グループ内に建設中である。この施設が完成することにより、高度なレアアース鉱石の分析・解析技術の開発、鉱床成因の解明、さらにレアアース鉱物の分離技術の開発が可能となり、レアアース資源確保に大きな力を発揮するものと予想される。今後、高い学術的レベルを維持しつつ、政府・関連業界などからの要請に迅速・正確に対応できる体制を目指して行きたい。

7. 最近の主な研究成果

村上浩康・佐藤比奈子・石山大三・石原舜三 (2011) 難溶性高品位希土類元素鉱石の分析方法の検討: オーストラリア、ノーランズボア(Nolans Bore)REE-P-U 鉱床の場合、資源地質, 61, 129-137.

寺岡易司・奥村公男 (2011) 1:5,000,000 アジア地質図, 産総研・地質調査総合センター.

高木哲一 (2011) レアメタル鉱床の成因 ―地球物質循環機構の観点から―, 日本ガスタービン

学会誌, 39, 33-36.

Sanematsu, K., Ishihara, S. (2011) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of Da Lien granite related to the Nui Phao W mineralization in the northern Vietnam, *RESOURCE GEOLOGY*, 61, 304-310.

実松健造・菅 琢磨・面谷達彦・増川恭子・高橋亮平 (2011) 2011 年チリ鉱床巡検報告, 資源地質, 61, 139-148.

実松健造 (2011) チリ北部マリクンガ帯のカスピチエ斑岩金-銅鉱床, 資源地質, (印刷中)

Ishihara, S., Murakami H., Maria Florencia Marquez-Zavalia (2011) Inferred indium resources of the Bolivian tin-polymetallic deposits, *RESOURCE GEOLOGY*, 61, 174-191.

Sanematsu, K., Moriyama, T., Laochou Sotouky, Watanabe, Y. (2011) Mobility of rare earth elements in basalt-derived laterite at the Bolaven Plateau, southern Laos, *RESOURCE GEOLOGY*, 61 140-158.

高木哲一 (2011) リチウムイオン電池に使われるリチウム資源の現状, 金属, 81, 95-98.

Sanematsu, K., Murakami H., Sixomxeun Duangsurigna, Siphandone Vilayhack, Robert Duncan, Watanabe, Y. (2011) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of granitoids from the Truong Son fold belt and Kontum massif in Laos, *JOURNAL OF MINERALOGICAL AND PETROLOGICAL SCIENCES*, 106, 13-25.

実松健造 (2010) IAGOD シンポジウム 2010 の講演報告, 資源地質, 60, 235-238.

Moriyama, T., Miyawaki, R., Yokoyama, K., Matsubara, S., Hirano, H., Murakami, H., Watanabe, Y. (2011) Wakefieldite-(Nd), a new neodymium vandate mineral in the Arase stratiform ferromanganese deposit, Kochi Prefecture, Japan, *RESOURCE GEOLOGY*, 61, 101-110.

Murakami, H., Seo, J-H., and Heinrich, C.A. (2010) The relation between Cu/Au ratio and formation depth of porphyry-style Cu-Au $\pm$ Mo deposits, *MINERALIUM DEPOSITA*, 45, 11-21.

(本論文は, *Mineralium Deposita* 誌の 2010 年 Best Article Award を受賞)

Takagi, T., Naito, K., Kamei, J. (2010)

Petrographic contrast between ilmenite- and magnetite-series gabbroids in the Ryoke and San-in Belts, southwestern Japan Arc, *JOURNAL OF MINERALOGICAL AND PETROLOGICAL SCIENCES*, 105, 194-214.

村上浩康 (2010) ブラジルのニオブ資源:カタロンとアラシヤ鉱床, 資源地質, 60 VII-IX.

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

研究グループ長：鈴木祐一郎

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

1. グループの研究目的

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

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

2. グループの研究体制，研究資源

2.1. 研究員（平成 23 年 10 月 1 日現在）

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

2.2. 主な研究資金（平成 22 年度～平成 23 年度）

- ・運営費交付金「燃料資源地質の研究」（地質）及び同（エネルギー）
- ・運営費交付金「部門重点化予算：関東地方の天然ガス資源評価」（分担，平成 22 年度）
- ・運営費交付金「天然ガス鉱床の分布・成因に関する調査研究」（分担，平成 22 年度）
- ・受託研究（JOGMEC）「日本周辺海域における砂層充填型メタンハイドレート濃集帯以外のメタンハイドレート賦存層に関する予備検討」（平成 22, 23 年度）
- ・共同研究（JX 日鉱日石開発株式会社）「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 22（ジャパンエナジー石油開発（株）と），23 年年度）
- ・共同研究（石油資源開発（株）技術研究所）「数学的手法による砂岩分布予測の研究」（平成 22, 23 年年度）
- ・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する高度地質解析」（分担，平成 22, 23 年度）

- ・科研費「急激な気候変動に対する海底扇状地の発達と二酸化炭素固定能力の応答の評価」（平成 22, 23 年度）
- ・科研費・基盤（B・一般）「鉄堆積作用：鬼界カルデラの熱水活動場から紐解く太古代海洋環境への制約条件」（分担，平成 22, 23 年度）

2.3. 主な研究ファシリティ

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

3. 平成 22 年～平成 23 年の研究成果および研究進捗状況

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

〈上越沖〉

- ・平成 22 年は，東京大学との共同研究として，2010 年 6 月に上越沖において，フランス極地研究所所属海洋調査船 Marion Dufresne (MD) 号を傭船し，長尺ピストンコアラによる海底下数 10m までのコア試料採取，ボックスコアラによる試料採取，熱流量測定，マルチビーム測深器による海底地形調査，3.5kHz サブボトムプロファイラによる海底表層探査等を実施した。



Marion Dufresne 号（MH21 HP より）

- ・船上作業では、コア中から発見されたメタンハイドレート(MH)の採取・冷凍保存、コアの堆積学的記載、温度測定、保管用堆積試料採取、密度、P波速度等の物理計測、スクリーザーによる間隙水化学分析等をおこなった。
- ・今回の上越沖の調査では、海底面近傍 MH (表層型 MH) と泥層内 MH (フラクチャ型?MH) を多数採取できた。日本海東縁一帯は、同様の地質環境にあり、上越沖と同じような MH が存在する可能性がある。そこで、今回の調査では、調査範囲を広げ、以前に堆積物内に MH の存在が示唆された奥尻海域でも調査を行った。

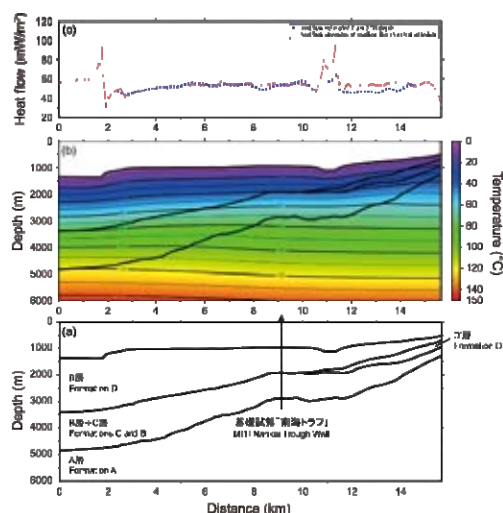


コア中に含まれていた塊状メタンハイドレート (MH21 HP より)

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

〈南海トラフ〉

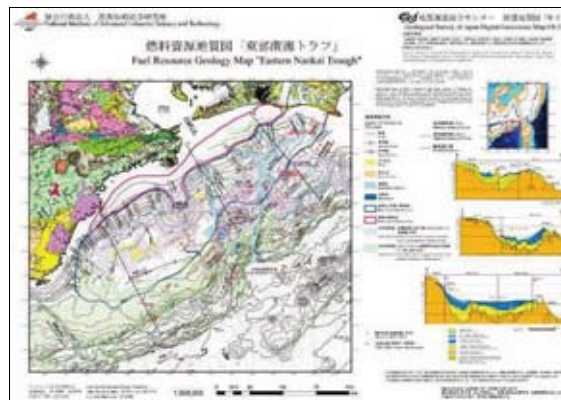
- ・南海トラフ域の熱流量データの収集と再解析を行った。本海域で得られた反射法地震探査記録上の BSR 深度から推定した熱流量データをコンパイルした。これらの熱流量データに基づき、海底下の温度構造モデルの構築を進めている (図 1)。海底堆積物の現場法による熱伝導率の計測方法の開発を進めている。



東部南海トラフの温度構造モデルの例 (後藤ほか, 2010)

3.2. 燃料資源地質図「東部南海トラフ」出版

- ・東部南海トラフのメタンハイドレート資源ポテンシャルを評価するための基礎情報を提供することを目的に、本海域で得られた海底地形、海底地質、地下構造、地磁気異常、重力異常、熱流量、掘削結果の既存情報および温度構造モデリングの結果を統合し、50 万分の 1 縮尺の地質図 (本図) 及び 100 万分の 1 縮尺の付図 7 枚としてまとめ、燃料資源地質図「東部南海トラフ」として出版した。

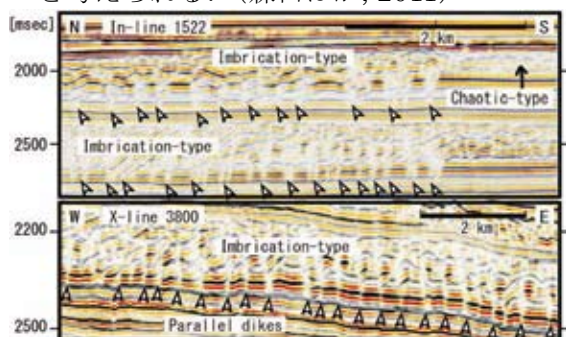


燃料資源地質図「東部南海トラフ」本図

3.3. 在来型天然ガス資源の鉱床成因、形成機構に関する地質学的研究

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

著な海底地すべり堆積層を認めた。地すべりの多くは特徴的な覆瓦構造を示し、それに依存した脱水構造も顕著に発達する。地すべり層周辺では天然ガスの存在を示す特徴が多く認められることから、一連の地すべりや脱水構造は、高いメタンフラックスが要因の現象と考えられる。(森田ほか, 2011)



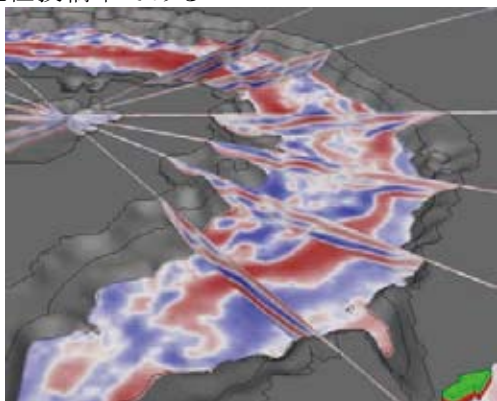
下北半島東方沖の地震探査データで認められる海底地すべり堆積層

- ・東北日本の油・ガス構造の形成に関わる脊梁部のテクトニクスについて、地形・地質調査を行い、第四紀の変動について従来にない知見を得て、学会発表を行った。
- ・22年8月、前年度に続き、韓国地質資源研究院 KIGAM の TAMHAE II による東シナ海陸棚堆積盆の地質構造探査に参加した。



KIGAM の海洋調査船 Tamhae II (KIGAM HP より)

- ・3D 地震探査記録の解析から、海底チャネルおよび自然堤防の貯留岩形態に関しては、長年英国 Leeds 大学等と共同で研究を進めている。海底チャネルに発達するアウターバンク堆積物などに関して、英国での研究集会で発表し、現在投稿中である。



3D 震探断面によるチャネル湾曲部のアウターバン

ク堆積作用の解析 (Nakajima et al., 2011 発表より)

- ・国際深海掘削計画による四国海盆の堆積物について、西南日本のテクトニクスや気候変動史の解明のために各種分析を行い、連合学会およびバルセロナでおこなわれたポストクルーズ会議で報告した。
- ・鹿児島県薩摩硫黄島の南東部に位置する長浜湾では、海底から Fe^{2+} イオンに富む弱酸性の低温熱水が湧出している。長浜湾は防波堤で囲まれた半閉鎖的な環境になっており、低温熱水と海水が反応して生じた鉄質沈殿物（水酸化鉄）が海底に多量に堆積していることが確認されている。この長浜湾における低温熱水の湧出速度を長期にわたって計測することを目的に、海底下長期温度モニタリングを実施した。



鹿児島県薩摩硫黄島長浜湾

- ・コールベッドメタン(CMB)に関しては、地圏化学 RG と協力し、水の存在下でのガス吸着特性がどのように変化するかについて実験をおこなった。低圧側での吸着特性がドライの状態と大きく変化すると予備的な結果が得られている。さらに実験を進め、水飽和状態である天然の模擬し、水飽和化での CO_2 の活性炭への吸着挙動を検討中した。
- ・今、話題のシェールガス(オイル)についても、米国やカナダなどのシェールガス田に関する文献調査を進めると共に、我が国のシェールガス資源の可能性についても既存資料を基に検討を進める予定。

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

- ・引き続き、大水深域の堆積盆の炭化水素ポテンシャル推定を、3次元石油システムシミュレータ等を用いて進めている。海洋資源地質地球物理情報可視化システムを使用した高度地質解析も目指している。
- ・日本国政府は、2008年11月に大陸棚限界委員会に対して、申請が提出された。今後は、委員会の審査、勧告に対応した調査、解析も大きな役割となると考えられる。

3.5. 共同研究

〈JX 日鉱日石開発(株)との共同研究〉

- ・共同研究では、三陸沖の 2D/3D 地震探査記録を用いた地質構造解析とスランプ堆積物の内部構造の解析を進め、論文投稿および学会発表を行った。また、富山トラフの 2D/3D 地震探査記録の解析から富山深海長谷の発達史についてまとめ、シンポジウムで発表した。
- ・釧路炭田地域で共同の地質調査を行い、白亜系から第三系までの貯留岩および根源岩石炭の分布の概略を把握した。また炭田ボーリングコアの記載・分析を共同で行った。



釧路炭田での共同調査（白糠丘陵音別層群露頭）

〈石油資源開発(株)技術研究所との共同研究〉

- ・砂岩層厚分布から貯留岩総体積を推定する数学的手法の開発を引き続き行い、上越地域西頸城丘陵での共同地質調査を行った。

4. 最近の主な研究成果

〈紙上発表〉

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

Goto, S. & Yamano, M.: Reconstruction of the 500 year ground surface temperature history of northern Awaji Island, southwest Japan, using a layered thermal property model. *Phys. Earth & Planetary Interiors*, v.183, 435-446, 2010.

Hamamoto, E., Yamano, M., Goto, S., Kinoshita, M., Fujino, K. & Wang, K.: Heat flow distribution and thermal structure of the Nankai subduction zone off the Kii Peninsula. *GEOCHEM. GEOPHYS. GEOSYSTEMS*, v.10, no.10, 1-22, 2011.

森田澄人, 後藤秀作, 松林修, 棚橋学: 数値シミュレーションによる CO₂ 地中貯留ポテンシャル評価の試み, — マレー半島東方沖マレー堆積盆におけるケーススタディ —. 地調研報, v. 61, no. 7/8, 245-270, 2010.

森田 澄人, 中嶋 健, 花村 泰明: 海底スランプ

堆積層とそれに関わる脱水構造: 下北沖陸棚斜面の三次元地震探査データから. 地質雑, v. 117, no. 2, 95-98, 2011

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

森田澄人, 東垣, 高野修, 山田泰広, 真田佳典: 石油技術協会—海洋研究開発機構共催シンポジウム「地下圏微生物と石炭起源の炭化水素資源 —西太平洋沿岸海域におけるエネルギー資源と生成メカニズム—」実施報告. 石油技術協会誌, 76, 4, 338-340, 2011.

本山玲美, 柳澤文孝, 上田 晃, 鈴木祐一郎, 金井 豊, 大澤英二, 小島武, 赤田 尚史: 東アジア地域の石炭に含まれる硫黄の安定同位体比とその地域分布. *Radioisotopes*, v.60, no.1, 27-33, 2011.

大塚宏徳, 森田澄人, 棚橋 学, 長久保定雄, 芦寿一郎: 東部南海トラフ三次元反射法地震探査断面に見られる地層流体の分布を示唆する音響反射面. 石油技協誌, v.76, no.1, 39-42.

鈴木 祐一郎: 石炭鉱床. 日本地方地質誌「北海道地方」(日本地質学会編), 408-417, 朝倉書店, 2010.

〈国際研究集会発表〉

Nakajima, T. & B. C. Kneller: Quantitative analysis of the geometry of submarine levees. Conference on Internal Architecture, Bedforms and Geometry of Turbidite Channels, Geol. Soc., London, 2011.

Nakajima, T., Peakall, J., McCaffrey, W.D., Paton, D.A., and Thompson, P.: Outer-bank bars: a new internal architecture within sinuous submarine channels. Conference on Internal Architecture, Bedforms and Geometry of Turbidite Channels, Geol. Soc., London, 2011.

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

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

Yamano, M., Hamamoto, E., Goto, S. & Kawata, K.: Heat flow distribution on the floor of the Nankai Trough and thermal structure of the subducting Philippine Sea plate. AOGS 8th Annual Meeting and Geosciences World Community Exhibition, Taipei, 2011.

地圏微生物研究グループの紹介

Introduction of the Geomicrobiology Research Group

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

1. グループの研究目的

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

2. グループの研究資源（22-23 年度）

2.1. グループ員

研究スタッフ

坂田 将（リーダー）、片山泰樹、竹内美緒、吉岡秀佳、徐維那*、眞弓大介*（*特別研究員）

テクニカルスタッフ

氏家知美、小神野良美、執印訓子、張 華、三浦直子

2.2. 予算

運営費交付金

「地圏微生物の研究（地質）」

「地圏微生物の研究（エネルギー）」

委託研究費

「深部地下圏を模擬した高圧条件下における生物的メタン生成過程の解明」（科研費）

「陸域における微生物による嫌氣的メタン酸化プロセスの解明」（科研費）

「メタンハイドレート開発促進事業に関する委託研究-新規取得試料の微生物学的研究」（JOGMEC）

「かん水の分析に基づく南関東ガス田の地下微生物の分布及びメタン生成速度の評価」（JOGMEC）

共同研究費

「安定同位体トレーサ法による油層内微生物の原油分解メタン生成経路の評価に関する研究」（国際石油開発帝石（株））

「メタン溶存天然水を用いた有機塩素化合物による汚染地下水の浄化工法の実用化に関する研

究」（（株）テクノアース）

3. グループの特色

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

4. 22 年度後期-23 年度前期の研究進捗状況

4.1. メタンハイドレート成因解明のための生物地球化学的研究

- ・ 東部南海トラフの海底掘削調査に参加し、2 地点において微生物のメタン生成酸化活性測定、群集解析、及び間隙水中の酢酸濃度分析のためのコア試料を採取した。メタン生成・酸化活性評価のために培養を開始するとともに、一部の試料について 16S rRNA 遺伝子のクローン解析と定量を行い、予察的に微生物の群集解析を行った。

4.2. 在来型天然ガス資源の成因解明のための生物地球化学的研究

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

4.3. 地下微生物を活用した地圏環境リスク管理技術の研究

- ・ 天然ガス田地域のメタン溶存地下水を利用したバイオレメディエーション技術の実用化を目指し、室内試験による最適条件の検討を進めた。
- ・ 揮発性有機塩素化合物によって汚染された難透水層中の嫌気性脱塩素微生物の分布と自

然浄化ポテンシャルに関する研究成果を論文公表した。

4.4. 油層内微生物のメタン生成経路に関する研究

- ・ CO₂ 地中貯留後の油層環境を模擬するために秋田県八橋油田の油層流体を N₂+CO₂ (90:10)で加圧し、油層温度で培養した場合、メタンが酢酸資化経路で生成し、N₂のみで加圧した場合よりメタン生成が速くなることを見出した。
- ・ 油層微生物による原油炭化水素の分解とメタン生成経路の解明を目指し、新たに山形県余目油田からかん水と原油を採取した。

4.5. 深部地下圏を模擬した高圧条件下における生物的メタン生成過程の解明

- ・ メタン生成に伴う炭素と水素の同位体分別に対する圧力の影響を調べるため、水素資化性メタン生成菌を常圧、及び海底深部地下を模擬する高圧の条件で培養した。基質は水素+二酸化炭素、蟻酸、及び酢酸を使用し、酢酸基質の場合は酢酸酸化細菌との共生系で培養した。

4.6. 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

- ・ 安定同位体等を用いた活性測定、分子生物学的手法を用いた微生物学的解析、さらに脂質同位体組成分析を行った結果、海底で嫌氣的メタン酸化を行っている古細菌とは異なるサブグループ (ANME-1a-FW, 下図) の嫌氣的メタン酸化古細菌が関東平野の沖積層コア試料中に存在することを見出した。

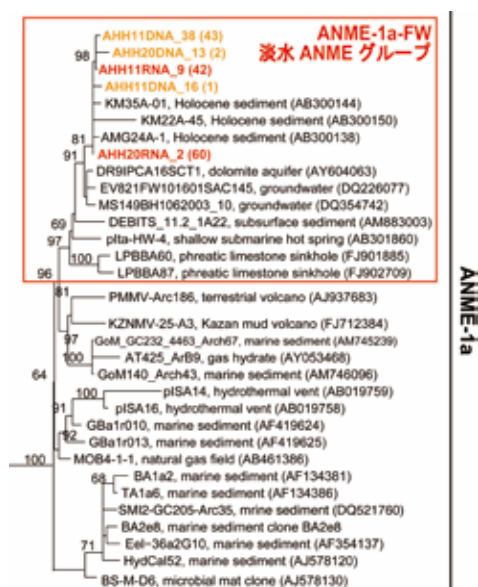


図 関東平野沖積層から検出された嫌氣的メタン酸化古細菌の遺伝子 (色文字)。

Takeuchi et al. (in press) を改変。

4.7. 公共用水域・地下水中窒素を低減するための畜産排水・窒素除去技術

- ・ 従来の安定同位体質量分析計の代わりに、よ

り使いやすいガスクロ質量分析計を用いて、細菌が無酸素条件下で亜硝酸とアンモニアから窒素を生成するアナモックス活性を測定するシステムを開発した。本システムにより、迅速かつ低コストに底質試料中のアナモックス活性を測定できるようになった。

4.8. 基礎的研究

- ・ 好気メタン酸化共生微生物群集を構成する難分離培養メタン酸化細菌 1 株と従属栄養細菌 2 株のドラフトゲノム情報を完成した。

5. 主な論文成果

吉岡秀佳, 坂田 将 (2010) 微生物起源メタンハイドレート分布域における微生物メタン生成活動. 地球化学 44,169-184.

Fukushima M., Furubayashi K., Fujisawa N., Takeuchi M., Komai T., Ootsuka K., Yamamoto M., Kawabe Y., Horiya S. (2011) Characterization of humic acids in sediments from dam reservoirs by pyrolysis-gas chromatography / mass spectrometry using tetramethylammonium hydroxide: Influence of the structural features of humic acids on iron(II) binding capacity. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 91, 323-331.

Takeuchi M., Kawabe Y., Watanabe E., Oiwa T., Takahashi M., Nanba K., Kamagata Y., Ohko Y., Komai T. (2011) Comparative study of microbial dechlorination of chlorinated ethenes in aquifer and a clayey aquitard. Journal of Contaminant Hydrology 124, 14-24.

Mayumi D., Mochimaru H., Yoshioka H., Sakata S., Maeda H., Miyagawa Y., Ikarashi M., Takeuchi M., Kamagata Y. (2010) Evidence for syntrophic acetate oxidation coupled to hydrogenotrophic methanogenesis in the high-temperature petroleum reservoir of Yabase oil field (Japan). Environmental Microbiology 13, 1995-2006.

Yoshinaga I., Amano T., Yamagishi T., Okada K., Ueda S., Sako Y., Suwa Y. (2011) Distribution and diversity of anaerobic ammonium oxidation (Anammox) bacteria in the sediment of a eutrophic freshwater lake, Lake Kitauro, Japan. Microbes and Environments 26, 189-197.

Takeuchi M., Yoshioka H., Seo Y., Tanabe S., Tamaki H., Kamagata Y., Takahashi H.A., Igari S., Mayumi D., Sakata S. (2012) A distinct freshwater-adapted subgroup of ANME-1 dominates active archaeal communities in terrestrial subsurfaces in Japan. Environmental Microbiology, in press.

Kobayashi H., Kawaguchi H., Endo K., Mayumi D., Sakata S., Ikarashi M., Miyagawa Y., Maeda H., Sato K. (2011) Analysis of methane production by microorganisms indigenous to a depleted oil reservoir for application in Microbial Enhanced Oil Recovery. Journal of Bioscience and Bioengineering, in press.

Kobayashi H., Endo K., Sakata S., Mayumi D., Kawaguchi H., Ikarashi M., Miyagawa Y., Maeda H., Sato K. (2011) Phylogenetic diversity of microbial communities associated with the crude-oil, large-insoluble-particle, and formation-water components of the reservoir fluid from a non-flooded high-temperature biodegraded petroleum reservoir. Journal of Bioscience and Bioengineering, in press.

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: 029-861-3707, e-mail: res_geo_x@m.aist.go.jp

1. グループの研究体制・研究方針

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

2. グループ員及び研究項目等

1) グループ員

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

2) 主な研究項目

- ・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
- ・加温機排気中の CO₂ の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発（農林水産省受託研究）
- ・工業用ハスクレイにおける実用化レベルの合成および疎水性揮発性有機化合物用吸着剤に関する研究
- ・気中に含まれる親水性有機溶剤の分離・回収に関する研究等

3) 主な研究設備

- ・ガスハイドレート合成実験装置
- ・ガスクロマトグラフ
- ・イオンクロマトグラフ
- ・流体包有物温度測定装置
- ・流体包有物ガス分析装置
- ・ハスクレイ合成装置

3. 平成 23 年度の研究計画と平成 22 年度~23 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

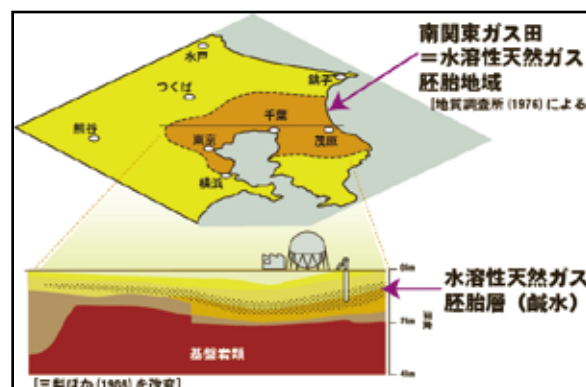


図 1 南関東ガス田の概念図

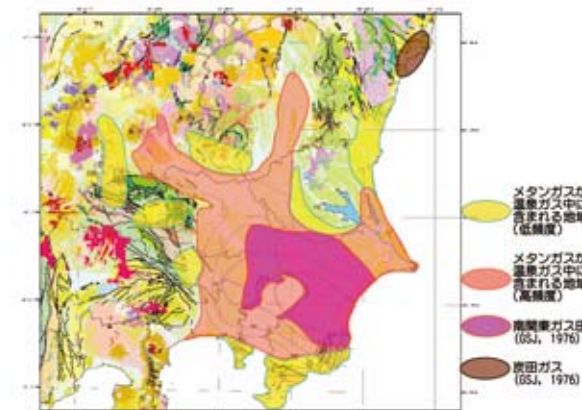
南関東ガス田（図 1）が日本最大の水溶性天然ガス（メタンガス）資源の賦存地域であることを踏まえ、将来にわたる資源の安定供給に資するために、関東地域における水溶性天然ガスの賦存状況に関わる正確な地質学的情報を把握することを目的とする。研究の実施に当たっては、部門内でのグループ連携とともに、地方自治体、天然ガス関係企業、温泉関連機関等の各機関のご協力の下、温泉でのガス試料採取や地質学的情報の収集を進めた。それによりまとめた研究成果は適宜学会発表により公表してきた（たとえば、金子ほか, 2010）。その成果は以下のようにまとめられる。

地質学的な観点からは、水溶性天然ガスを賦存するのは、基本的には基盤深度が深く、その上位に大量の新第三紀以降の堆積物が溜まっている地域である。

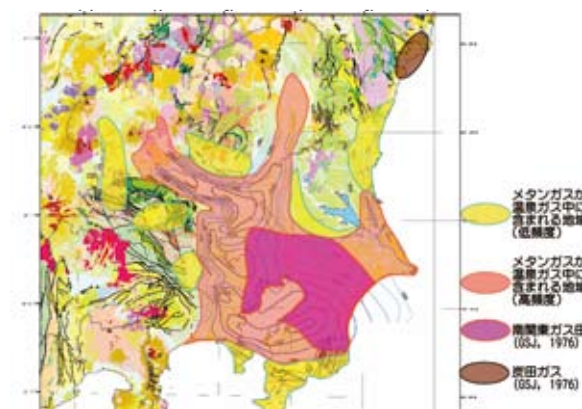
南関東ガス田（特に房総半島中部地域）では、水溶性天然ガスの胚胎層が上総層群であることはよく知られている。また南関東ガス田の範囲は上総層群の基底面深度と関係しており、上総層群基底深度が 1,000m（東部）～千数百 m（東京・神奈川）より深い範囲に一致する（第 2 図）。

しかしながら、それ以外の関東地方平野部や盆地部でも水溶性天然ガス（メタンガス）が温泉に

伴われている（但し、これらは資源として利用できるほどの量ではない）。これらの貯留層の層準は、上総層群の下位である三浦層群（安房層群）相当層あるいは同時期の層準である。例えば、埼玉県から群馬県にかけての利根川流域、すなわち高橋(2008)による関東平野地下にハーフグラベン構造が存在する地域と一致する（第3図）。逆に、花崗岩や火山岩類を掘削している温泉では、ほとんどメタンガスが検出されていない。ただし、湿原や沖積地では、地表近辺で生成したと推測されるメタンガスが検出される例もあり、上述のものは区別して取り扱わねばならない。



第2図 上総層群基底面深度(鈴木, 1996)と南関東ガス田の関係



第3図 新第三系基盤深度(高橋, 2008)と水溶性天然ガスの分布の関係

地球化学的観点からは、温泉水の塩分濃度や同位体比のデータに基づくと、水溶性天然ガスを含む地層水の多くは化石海水と天水との混合起源であり、大局的には、涵養域である関東平野西部および北部の山地に近い所ほど化石海水が天水で希釈されているが、盆状構造の南東側では希釈が進まず、化石海水が保存された領域が南関東ガス田となっていると解釈される。また、メタンの炭素同位体比からは、北関東の一部で熱分解起源のものも認められたが、大部分のメタンの起源は微生物起源であることが確認された。さらに、南関東ガス田地域から離れると、窒素ガスが増えてくるという傾向も認められる。

今後は、以上のような関東平野地下地質構造と地球化学的データとを結びつけた燃料資源地質図

として取りまとめる予定である。

2) 燃料資源に関わる地質学的・地化学的調査研究

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

地質学的な面からの研究としては、宮崎と沖縄の水溶性天然ガスに関わる地質構造等の検討を行った。これらの地域では、基盤岩中の熱分解ガスが直上の新第三系に移動し、後者の厚い地域に微生物起源ガスが貯存していることが推定された。

また、基盤岩中の熱分解ガスについて、シェールガスの観点から前弧域でのポテンシャルについて考察を行った。付加体を構成するトラフ底堆積物については、有機炭素量が低い傾向はあるが、埋没によりガス生成帯に到達した段階で隆起したものが大量に存在する可能性が大きい。沖縄では熟成度が高過ぎることが明らかとなったが、宮崎、静岡などの付加体についても、熟成度を調べる必要があると考えられる。

地球化学的な実験研究として、ガスハイドレートの安定条件決定、吸着能測定実験等を行った。ガスハイドレートの安定条件は、水中に含まれる溶存成分によって変化することが知られている。平成22年度以降も、これらの条件を明らかにするために、アルコール類やアセトン等の有機物質を用い、溶存成分がガスハイドレート相平衡条件に及ぼす影響を実験的に測定してきている。

また、地球温暖化ガスである二酸化炭素の石炭層への固定化技術に関し、石炭のガス吸着能を測定するため、二酸化炭素、窒素を用いた微粉炭のガス吸着実験を行い、それらの吸着曲線を取得した。

さらに、炭化水素の化学的測定法の技術改良を実施した。メタンを主成分とするガス中の微量非メタン炭化水素測定システムに関して、濃縮カラムに石英砂を充填する、濃縮カラムの手前に試料注入時のショックを緩和する空カラムをとりつける等の改良を行うことにより、測定法を確立させた。

3) 機能性鉱物材料に関わる化学的・鉱物学的・材料学的研究

機能性鉱物材料である高性能無機系吸着材「ハスクレイ（図4）」に関して、化学的・鉱物学的・材料学的観点から、その工業的生産にかかわる研究開発を行い、製品化に資する研究を実施している。そのために、サステ



図4 ハスクレイ

ナブルマテリアル研究部門とのユニット間連携研究とともに、様々な企業及び研究機関との共同研究を進めている。

平成 22 年 7 月に採択された、農林水産省公募型受託研究「加温機排気中の CO₂ の効率的回収貯留システムとその園芸作物への活用技術の開発」では、施設園芸における収量増大・品質向上を目的とした CO₂ 施用にハスクレイを用いることで、加温機の排気中の二酸化炭素を効率よく回収貯留し再利用可能な、画期的な施設園芸用省エネ型 CO₂ 施用システムとその活用技術を開発している (図 5)。

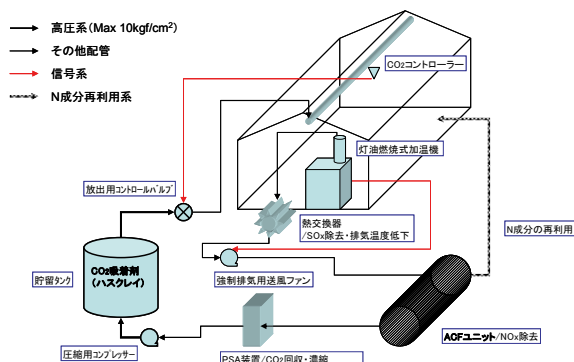


図 5 新しい CO₂ 施用システムの概念図

また、平成 22 年度には、これまでモデル物質程度の収量でしか合成できなかったハスクレイ高性能版について、工業的大量合成法の研究開発を進めた。その結果 20L スケールの合成において、乾燥重量として 1 バッチあたり 1kg 以上の合成が可能な高濃度合成法を確立した。またこれまで不明確であったハスクレイ高性能版の構造について、球状の非晶質アルミニウムケイ酸塩を核とし、その周囲を粘土鉱物であるハロイサイトが覆うような球状構造を有するとの推測に至った。

4) 地圏化学の基礎的研究

地圏流体、地層・岩石・鉱物および骨材資源等について地化学的・地質学的・鉱物学的手法により明らかにする研究を進めること、また、地圏資源・環境に関する新規研究課題の探索、新しい地球化学的技術の開発等、萌芽的・共通基盤的研究を行うことを目的とする。

骨材資源に関わる研究としては、茨城県内の採石場を調査した結果、付加体堆積物を骨材として使う場合、採石場の 1 つの露頭であっても、砂岩、泥岩、石灰岩等様々な岩種が混在するために、均質で強度の揃った骨材を鉱業的に得ることが困難なことがしばしばあることがわかった。この点を改善するため、付加体堆積学の知見を活かすと共に、今まであまり重視されてこなかった岩石学的・鉱物学的アプローチを進める予定である。

南関東ガス田から得られた地層水の解析の結果、これらの地層水では、I⁻や NH₄⁺のほかに HCO₃⁻も高く、有機物の分解量を反映していると考察された。さらに、δ¹³C(DIC)も高く、これらはメタン生

成量に関係していると考えられる。また、Mg²⁺/Ca²⁺比が高く、炭酸塩鉱物等との反応についても考慮する必要がある。

大気中の非メタン炭化水素の経年変化を明らかにするために、長期にわたり継続的な測定を行っているが、平成 22 年度も産総研の空気を採取し、その中の非メタン炭化水素の濃度を測定し、解析を行った結果、非メタン炭化水素濃度は年々、減少していることが推定された。また、油田地帯の大気中非メタン炭化水素濃度のデータを解析した結果、油ガス田からの拡散によるものと思われる濃度の異常が観察された。

ハスクレイ、ゼオライト、活性炭などの無機系吸着剤について、二酸化炭素・窒素・水蒸気の吸着量に関する検討を行うとともに、実際の混合ガスにおける吸着選択性についての評価も行った。その結果二酸化炭素の吸着に関して、ハスクレイおよびゼオライトは、水蒸気の影響を大きく受けることが明らかとなった。吸着剤における水蒸気の吸着量が增大するとともに二酸化炭素の吸着量が減少すること、また供給されるガス中の水蒸気は吸着され続けるのに対し、二酸化炭素は吸着剤に吸着されずにそのまま通過することが明らかとなった。

4. 2010 年 9 月～2011 年 8 月の研究成果 (波線部がグループ員)

【誌上発表 (論文、著書等)】

Maekawa, T. (2010) Equilibrium Conditions of Clathrate Hydrates Formed from Propane and Aqueous Solutions of Propanone and Sodium Chloride. *JOURNAL OF CHEMICAL AND ENGINEERING DATA*, 55, 3645-3648.

Maekawa, T. (2011) Equilibrium Conditions of Clathrate Hydrates Formed from Carbon Dioxide and Aqueous Acetone Solutions. *FLUID PHASE EQUILIBRIA*, 303, 76-79.

佐脇貴幸 (2011) 提言 2010 の骨子 -地質地盤情報の整備と活用の意義. 地質調査総合センター研究資料集, No. 536, 5-10.

須藤定久 (2010) 砂と砂浜の地域誌, 石見西部の砂と砂浜 -浜田から益田へ-. 地質ニュース, No. 673, 60-69.

須藤定久 (2010) 砂と砂浜の地域誌(27), 阿武隈の海岸を訪ねる -相馬から双葉へ-. 地質ニュース, No. 674, 60-72.

須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮②「砂岩・頁岩」を例にした予察的研究. 骨材資源, 42, No. 166, 80-87.

須藤定久 (2010) 岩石・鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮③「安山岩類」を例にした予察的

研究. 骨材資源, **42**, No. 166, 88-92.

須藤定久 (2010) 鉱物・岩石の性質から見たコンクリートの乾燥収縮－その原因と骨材サイドでの対策を考える－. コンクリートテクノ, **29**, No. 9, 32-38.

須藤定久 (2011) コンクリートの乾燥収縮を考える－全生連の試験値（岩石種・地区別集計）から－. 骨材資源, **43**, No. 169, 8-18.

Watari, F., Akasaka, T., Ishikawa, K., Matsuoka, M., Hirata, E., Terada, N., Yokoyama, A., Uo, M., Itoh, S., Yawaka, Y., Suzuki, M., Takashi, N., Totsuka, Y., Kitagawa, Y., Abe, S., Rosca, I. D., Kuboki, Y. and Bando, Y. (2010) Various Nanotube Scaffolds for Cell Proliferation. *Materials Science Forum*, **631-632**, 181-186.

引用文献

金子信行・猪狩俊一郎・前川竜男・佐脇貴幸・代田 寧・小田原啓・早稻田周 (2010) 関東地方地下の水溶性天然ガスと地層水の起源について. 日本地質学会 117 年学術大会, 2010/9/18.

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.

鈴木宏芳 (1996) 江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造. 防災科学技術研究所研究報告, 56, 77-123

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

物理探査研究グループの紹介 -2011 年度 -
Exploration Geophysics Research Group, FY2011 Update

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/expgeo/>

1. グループの研究目的

本研究グループでは、放射性廃棄物地層処分、土壌・地下水汚染、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・地中熱、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 23 年度においては、主に、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、CO₂ 地中貯留における岩石物性評価と物理探査モニタリング、地中熱利用における地下物性モニタリングおよび地熱貯留層探査・評価手法の研究を進めるとともに、技術シーズ開拓のための基盤的研究を進める。

2. グループの概要

1) グループ員

内田利弘（リーダー）
上田 匠
神宮司元治
中島善人
光畑裕司
横田俊之

2) 平成 23 年度の主な研究予算

資エネ庁委託費「沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発」
文科省科研費「富栄養化内湾堆積物における異種微生物間長距離細胞外電子伝達の実証」
環境省委託費「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」
請負研究費「インドネシア国地熱開発技術力向上プロジェクトに係る技術移転に関する協力」
運営費交付金「沿岸域地質・活断層調査」
など

3) 平成 23 年度の研究の概要

a) 地層処分場の地質構造評価

沿岸域の断層や塩淡水境界を把握するための物理探査技術として、浅海域を対象とする電磁探査法の機器開発と 3 次元データ解析手法の研究、北海道幌延地域における適用調査および既存データの

再解析等を行う。

b) 土壌汚染評価

油汚染サイトにおいて取得した物理探査データ（地中レーダ等）の解析を継続し、汚染評価のための基礎情報を整理する。X線CT法による非破壊イメージング手法の重金属汚染土壌コアへの適用可能性を検討する。

c) 浅部地質環境評価

核磁気共鳴 (NMR) 表面スキャナー装置について、農業や工業製品への適用を行う。物理探査及び CPT 技術を用いた液状化調査評価手法について検討する。

d) CO₂ 地中貯留のモニタリング技術

物理探査（電磁探査等）による CO₂ 貯留モニタリングについて、海底電磁探査の測定手法の検討、数値実験による最適なモニタリング計測配置等の検討を行う。また、CO₂ 貯留岩の電気物性評価のため、繰り込み理論をよる解析法を開発する。

e) 地熱資源・地中熱利用における物理探査

地中熱利用における最適生産設計と環境影響予測のため、地下水を汲み上げて熱交換を行うオープンサイクル地中熱利用に対するモニタリング技術の開発を行う。人工ノイズの強い地域における時間領域電磁探査法のデータ処理法に関する研究を行う。温泉との共生を目指した地熱資源開発について、電磁探査法による貯留層評価手法の検討を行う。

f) 沿岸海域における地質・活断層調査

沿岸域の物理探査データ空白域を補い、海陸にわたる地質・断層構造を把握する探査法について検討する。今年度は、北海道苫小牧周辺陸域で取得された反射法地震探査データを解析する。

g) 震源断層評価にかかる物理探査調査

震源断層評価技術開発のためのモデルフィールドにおいて昨年度に取得した浅層反射法および地中レーダの測定データについて 3 次元処理等を実施する。また、東日本大震災に係る地震断層において電磁探査法調査を実施し、断層周辺の比抵抗構造を求める。

3. 平成 23 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測定技術開発および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実施している。

平成22年度には、開発中の浅海用海底電磁探査装置を用いた調査を実施し、これまでに取得した陸域のデータと合わせて解析を行った。平成23年度には海底電磁探査の補足調査を実施中である。

幌延沿岸域における調査位置を図1に示す。平成22年度には海域の2測線（16測点）で測定を行った。測点間隔は約1kmであり、最も海岸線に近い測点は海岸から約400mに位置し、水深は約4mである。基本的に連続3日間の自然電磁場の観測を行い、MT法のデータ処理を行った。最終的な測定データの品質は0.1Hz周辺の自然信号の弱い帯域を除き比較的良好であった（図2）。ただし、水深が10mより浅い測点では、波浪によって装置が揺動することによるノイズが大きく、1Hzより低い周波数ではデータ品質は良くない。

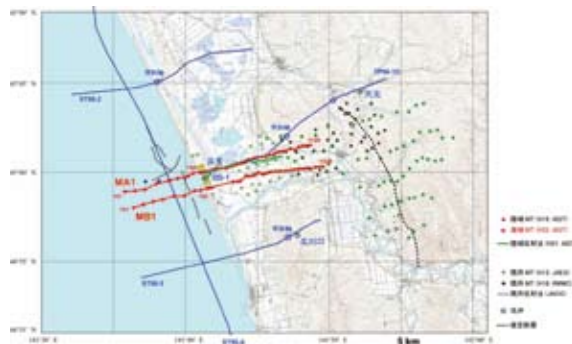
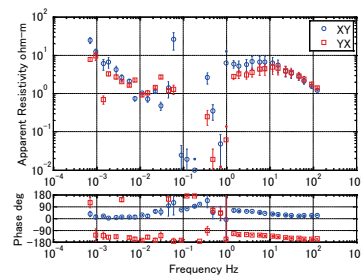


図1：北海道幌延町の沿岸域モデルフィールドにおける平成22年度までの物理探査調査位置。平成23年度には、海域における電磁探査の補足調査を実施している。

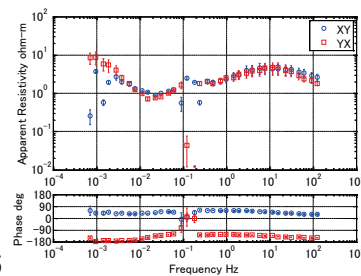
2つの測線について陸域のMT法測定データを含めて海陸接合の2次元解析を行った。MA1測線の比抵抗モデルを図3に示す。また、平成21年度に行った陸域の反射法地震探査について、沿岸部の深部調査井の検層データを用いて再解釈を行った結果を図4に示す。比抵抗構造の主な特徴として、以下が挙げられる。

- ・沖積層中に低比抵抗層（シルト層）が挟在する。
- ・陸側の更別層は概ね高比抵抗である。
- ・勇知層の層厚は水平方向に大きく変化し、大部分が低比抵抗であるが、上部に高比抵抗部が存在する。
- ・声間層はサロベツ背斜で地表近くに達し、全体的に低比抵抗である。これは地層中の化石海水によると推測され、サロベツ背斜の浅部にも保持されている。
- ・海底下の更別層の上部は海岸から数kmの範囲で高比抵抗で淡水的であると推定される。これは、沿

岸部において塩水と淡水が静的に平衡状態にある場合には考えにくい現象であり、過去の海進・海退の繰り返しにより形成され現在も維持されているものと考えられる。



(a) 測点 MA1



(b) 測点 MA5

図2：海域MA測線のデータ例。測点MA1の水深は約8m、MA5は約33m。

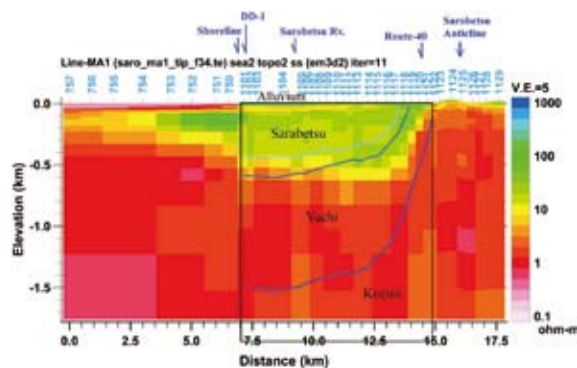


図3：海陸接合測線MA1の2次元解析結果。縦横比5。図4の反射法による地層境界を重ねて示した。DD-1は深部調査井（掘削深度1000m）の位置。

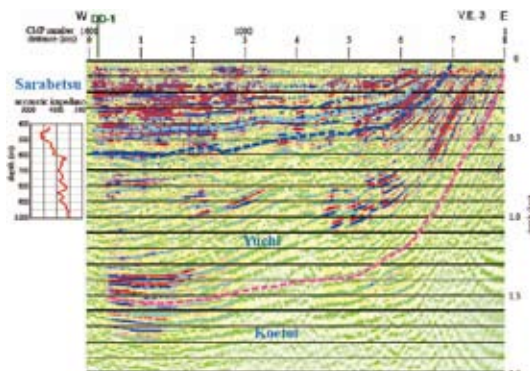


図4：陸域反射法（平成21年度実施）の再解釈結果。

2) 浅部地質環境評価

液状化対策の一つであるマイクロバブル地盤不飽和化工法の物理探査技術を用いた評価に関する研究を実施した（外部機関との共同研究）。江戸川河川敷で実施された地盤へのマイクロバブル水注

入による原位置実験において、地盤飽和度の直接的な計測のため、ボーリング孔を掘削し、アクセスチューブを設置する検層型 TDR を用いて体積含水率のモニタリング計測を行った。また、地盤中のマイクロバブルの拡散状況の把握するため、繰り返し電気探査を行った。その結果、図 5 に示すように、注入地点において飽和度の明確な変化を検出した。

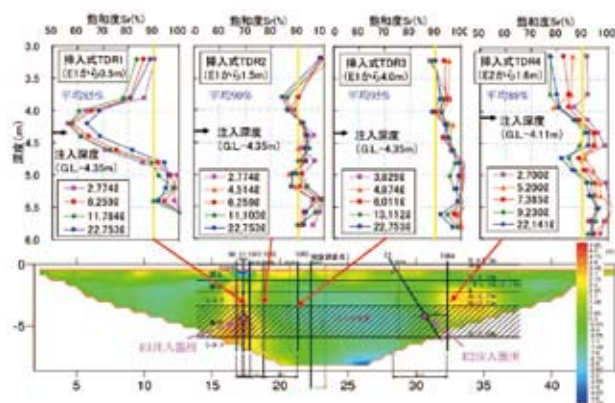


図 5：検層型 TDR による飽和度計測結果（上）と繰り返し電気探査による比抵抗変化分布（下）

3) CO₂ 地中貯留の岩石物性

フォーメーションファクター（間隙流体の比抵抗値で規格化された多孔質岩石や堆積物の比抵抗、以下、FF と記す）は、CO₂ 地中貯留のモニタリングなどで用いられる電気・電磁探査法における基本的な岩石物性である。物理探査や検層データと比較するため、コア試料の空隙スケールの X 線 CT 画像から FF を求めることがしばしば行われる。通常は、デジタル CT 画像データに対して、電位に関する 3 次元大規模ラプラス方程式を数值的に解く手段がとられる。本研究では、繰り込み (renormalization) という近似手法を適用し、桁違いに高速に計算が行える方法を開発し、その適用性を検討した。

まず、大規模画像をたとえば $2 \times 2 \times 8$ 個の画素からなるサブシステムに分割し、各サブシステムについてラプラス方程式を数值的に解いて FF 値を求める。この 8 個 $\rightarrow$ 1 個の縮小画像をシステムが単一の値になるまで次々と繰り返す。256³ 画素の画像に関する 8 回の繰り込みスキームを図 6 に示す。小規模なサブシステムのラプラス方程式を多数回解くことになるが、それでも大規模画像を直接解くよりも桁違いの時間短縮が期待できる。一例として、X 線 CT によって求めた砂岩の画像（図 7）に繰り込みを適用した結果を図 8 に示す。この画像では、FF の大規模ラプラス方程式解 17 に対して、繰り込みによる計算値は 58 であった。パソコンによる計算時間は前者が 7 時間、後者が 6 分であった。この例では両者の値の差はやや大きい、最初のサブシステムのサイズとしてたとえば $32 \times 32 \times 32$ 画素のように大きめを採用すると、両者はより一致することを確認済みである（ただし、計算時間の増加は避けられない）。繰り込みは、多孔質岩石に限らず複合材料な

どの複雑な境界条件のもとでの大規模なラプラス方程式の高速解法として広く応用できる。また、電気伝導のみならず熱伝導、物質拡散、ダルシー流れの 3 次元大規模シミュレーションにも広く適用できる。

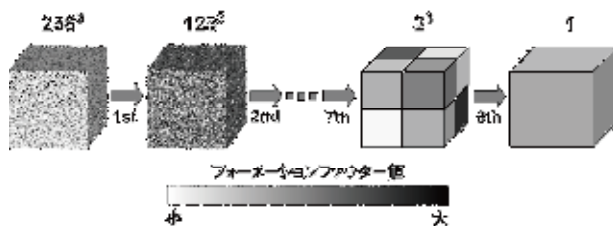


図 6：繰り込み操作の概念図

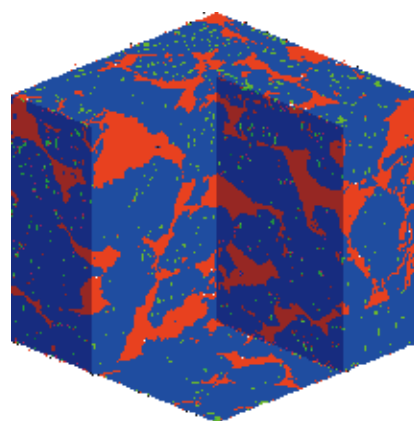


図 7：空隙率 20% のベリア砂岩画像。画像サイズは 256^3 画素 (0.54^3 mm^3)。赤はパーコレートした空隙でこの画素に電流が流れる。緑は孤立した空隙、青は固体（絶縁体）。

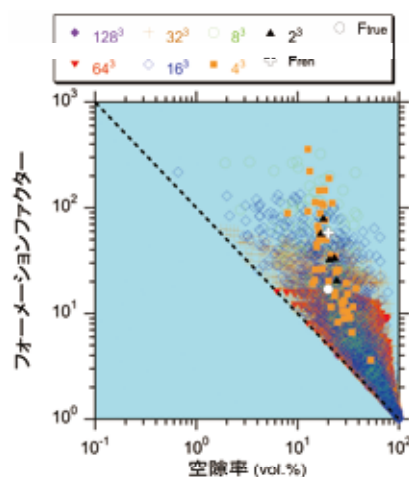


図 8：図 7 の画像の繰り込み結果。Ftrue (白丸) は、大規模ラプラス方程式を直接解いた値。Fren (白十字) は、図 6 の繰り込み操作を 8 ステップ繰りかえして得た値。

4) 地中熱利用における地下物性モニタリング

地中熱ヒートポンプシステムを使った冷暖房システムは、わが国においても急速に普及しつつある。しかし、地中熱システムが地盤の熱環境に与える影響については、これまで十分に検討されているとは言えない。特に、地下水面の変動などによって体積含水率が増加する不飽和地盤については、含水率に応じて熱伝導率が増加することを考慮する必要が

ある．本研究では，不飽和地盤の熱伝導率について検討を行った．

体積含水率の計測には検層型 TDR 体積含水率計を用いた．実験地の地盤は関東ローム層であり，ボーリング孔壁と TDR を挿入するアクセスチューブとの間に隙間が空いてしまうため，その隙間に珪砂を投入し埋め戻すことにした．珪砂が存在することによる TDR 計測値の変化を補正する変換式を作成し，地盤自体（ローム）の体積含水率の深度分布を求めた．その結果は，ロームを直接サンプリングして計測した体積含水率とほぼ同一であった．また，このボーリング孔を用いて体積含水率の長期的な変動を計測したところ，その変化は最大で 6% 程度であった．これから予測される熱伝導率の変化は極めて小さく，関東ローム層のような地盤では体積含水率の変動は小さいことが明らかになった．

次に，地下の熱伝導率構造を調べるため，ボーリング孔を用いた TCP（thermal conductivity profiling）法による試験を行った．用いた地下水観測井の深度が 160m と深いため，50m おきに加熱する分割加熱法を試みた．その結果，分割加熱でも測定が可能であり，大深度のボーリング孔においても全体を一度に加熱する必要はなく，部分的な加熱を行うことで熱伝導率を測定できることを確認した（図 9）．

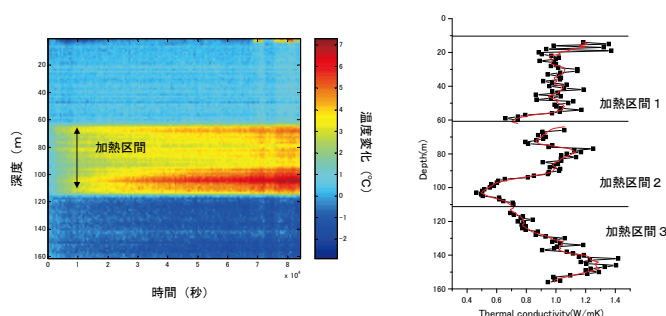


図 9：地下水観測井の部分加熱による TCP 測定結果．左は加熱区間 2 における温度の時間変化，右は温度変化より求めた熱伝導率の深度分布．

5) 震源断層評価への物理探査の適用

断層構造評価に対する物理探査の適用性検討を目的として，埼玉県北部の櫛挽断層をモデルフィールドとし，様々な物理探査手法の複合的な適用による野外調査を実施した．

a) 反射法地震探査と CSAMT 法の比較

P 波反射法と CSAMT 法によって得られた解析断面図に同じ解釈線を入れたものを図 10 に示す．P 波反射法で解釈された反射面のうち，A，C，D，E，F を黒色破線で示し，また，CSAMT 測点 CS4 の北東側での低比抵抗層の落ち込みを青色破線で示した．反射面 A は砂礫層とその下の低比抵抗層との境界，反射面 D は低比抵抗層とそれ以深の高比抵抗層との境界に相当する．反射面 D と E は，過去に行われた深部を対象とする反射法の結果では一連のイベントとして解釈されたが，今回新たに取得した浅層反射法の高分解能な記録においては，2 つに分断されたイ

ベントとして識別された．低比抵抗層の位置および反射面が途切れる位置は地表の断層推定位置に近く，断層の存在が何らかの影響を与えていると推定される．CSAMT 法の結果に見られる低比抵抗帯は，新第三系の活褶曲による背斜構造である可能性が示唆されているが，断層に伴う粘土化や断層にシールされた地下水の存在などと解釈することも可能である．一方，反射法の結果は断層に伴う地層境界面の乱れが捉えられていると解釈するのが最も自然であり，低比抵抗の翼部に急傾斜の断層を想定することが可能である．

b) 地中レーダによる極浅層探査

極浅部を対象とする地中レーダ結果を図 11 に示す．深度約 2m の南西傾斜のイベント（反射面）が三箇所所で不連続になっている様子がわかる（その部分に黒の破線で断層解釈線を入れた）．不連続になった端部は持ち上がっているように見える．これは，横方向の力により生じた変形と解釈することが可能である．これらの不連続が見られる位置は，トレンチ調査や群列ボーリングなどにより解釈された断層位置より約 15m 北東にあたり，極浅部における断層の分岐の一部を捉えた可能性が考えられる．

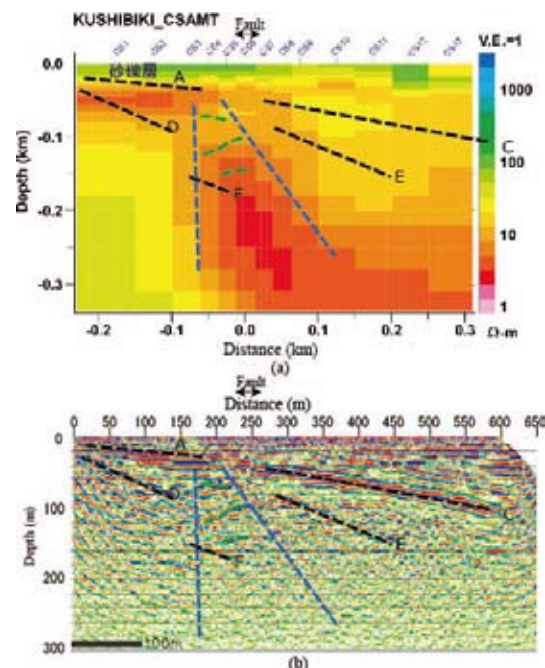


図 10：櫛挽断層における CSAMT 法 2 次元比抵抗モデル（上）と浅層反射法の深度解析断面図（下）．右が北東方向．

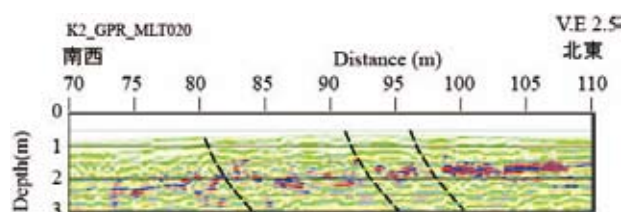


図 11：地中レーダによる探査結果．縦横比 2.5:1.

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の研究・技術開発への応用も目指している。

2010 年度からの産総研第3期においても CO₂ 地中貯留は重点課題に指定されており、中期計画として、“CO₂ 地中貯留において、CO₂ の安全かつ長期間にわたる貯留を保証するための技術を開発し、早期の実用化に寄与すること”を目標としている。

2. グループの研究資源

1) グループメンバー

中尾信典（グループ長）
雷 興林、杉原光彦、西 祐司、相馬宣和、
徂徠正夫、加野有紀、船津貴弘、石戸恒雄、
楠瀬謹一郎、藤井孝志、上原真一（産学官制度来所者）、佐藤久代、当部門他研究グループ等より研究分担者 15 名

2) 予算

- 運営費交付金：「CO₂ 地中貯留の研究」、「沿岸域海底下 CO₂ 地中貯留の安全性評価に向けた基礎的研究」他
- 経済産業省受託研究：「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO₂ 挙動評価技術の開発）」／「二酸化炭素削減技術実証試験事業（CO₂ 圧入手法の適正評価と CO₂ 貯留層の健全性評価）」／「次世代型地熱エネルギー探査技術の開発」
- 共同研究：「インバージョン解析ソフトウェアを用いた坑井内圧力遷移データ解析手法に関する研究」等

3. 平成 23 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) サイスマック・データによるガス飽和度の推定とアップスケーリング

室内注入実験データ解析による CO₂ 飽和度推測モデルを用いて現場スケールデータに適用するためには、モデルパラメータのアップスケーリングが不可欠である。室内実験においてなるべく広い周波数帯域での計測が重要である。本年度では、新しい弾性波計測手法の開発により 10KHz～1 MHz の範囲での弾性波の速度と減衰の測定が可能となった。図 1 は、その一例を示す。発信センサに一定周波数の連続波形をバースト的に入力し発進させ、受振側に遅れて同じ周波数の弾性波が記録される。安定になった部分の弾性波の対比により CO₂ と水との置換による弾性波速度と減衰の変化を精度よく求められる。様々な周波数において同様な計測を行えば、弾性波の分散曲線が得られる。この手法を用いて多くのデータを蓄積し、超音波帯域と地震波探査帯域で通用できるモデルを構築することを目指している。

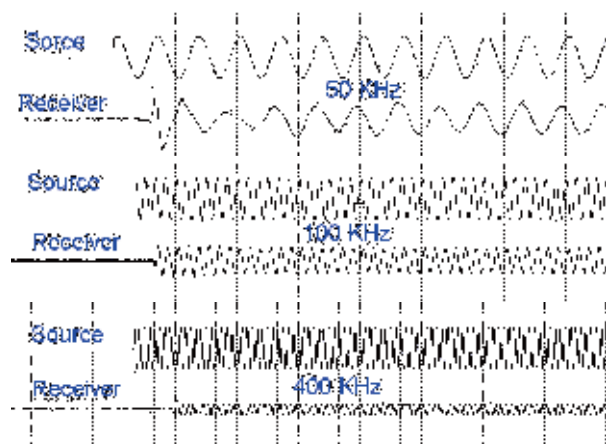


図 1: バースト連続波測定例。様々な周波数において同様な計測を行えば、弾性波の分散曲線が得られ、超音波帯域と地震波探査帯域で通用できるモデルの構築が可能

2) 弾性波探査補完モニタリング技術の開発

経済産業省受託研究「平成 23 年度二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業(弾性波探査を補完する CO₂ 挙動評価技術の開発)」のうち、「弾性波探査補完モニタリング技術の開発」では、CCS においてより信頼性の高い地下モデルの構築とモニタリングを可能とするために、重力・自然電位・AE 法等の弾性波探査を補完するモニタリング技術の開発を進めている。米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) との研究協力の下に、米国の南西部炭素隔離地域パートナーシップ (SWP) が FY2011 からユタ州において実施する深部塩水層への CO₂ 大規模圧入試験サイトにおいて、これらの物理探査手法の適用試験を行っていく。

重力モニタリングとしては、絶対重力計と可搬型相対重力計を組み合わせたハイブリッド重力計測システムに加えて高感度連続観測を加えた計測を予定している。自然電位モニタリングに関しては、SWP の Aneth 地中貯留実験サイトにおける測定システムを改良するとともに、繰り返しプロファイル調査の併用も含めて検討している。AE モニタリングに関しては、Aneth テストサイトにおける LANL 地震計アレイのデータ解析経験等を基に SWP 側測定と協調した AE 観測システムを準備中である。

これまでに、SWP の総括役であるユタ大学・LANL との打合せ、2011 年 2 月及び 7 月の圧入テストサイトの現地調査、各モニタリング手法の検討等々の様々な準備等を行った。現地調査から、テストサイトの観測条件、ノイズ等を行い、モニタリングの候補地選定等を行った。



写真 1：2011 年 2 月現地調査における測定。左側青いバッグ脇の銀色の計器が CG5 可搬型相対重力計。写真中央の円筒型計器が CMG40T 地震計。中央の小屋内に CO₂ 圧入井に転用予定のメタン生産井がある

3) 重力モニタリング技術

上記の南西部炭素隔離地域パートナーシップ (SWP) が 2011 年度より実施する大規模 CO₂ 地中圧入試験に参加し、反射法地震探査を補完す

るモニタリング技術の CO₂ 地中貯留への適用に関して研究を進める予定である。このうち重力モニタリング技術開発に関しては、通常の相対重力測定に絶対重力測定を組み合わせたハイブリッド重力測定を適用し、さらに高感度重力計による連続観測の適用により高精度の重力変動調査の実現を図る。調査場所は BSWP による CO₂ 地中貯留テストサイトとなるユタ州 Gordon Creek である。本格的な調査に先立って、現地の約 30 地点で可搬型重力計による計測を試験的に行い（写真 2）、CO₂ 注入井を中心に重力観測網の設定を検討した。実際に取得した記録によればノイズレベルは日本国内での調査地に比べて概ね良好であった（図 2）。



写真 2：重力観測風景

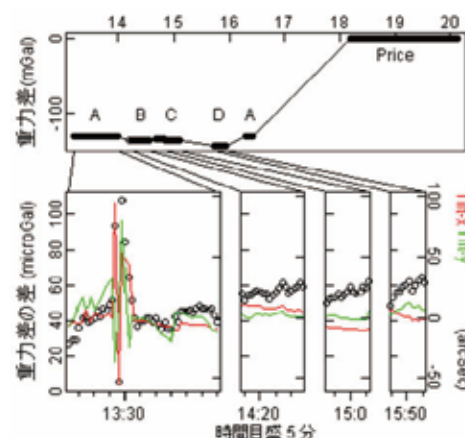


図 2：4 地点での重力計の記録（1 分毎の重力値と重力計傾斜 2 成分）

4) Aneth サイトにおける AE の再解析

昨年度に引き続き、ロスアラモス国立研究所 (LANL) が 1 観測井のみで観測した Aneth サイトの CO₂ 圧入時の AE（微小地震）について、AE 源位置決定深度の曖昧さを低減することを目的にした再解析と結果の評価を行った。1 観測井のみでの AE 観測は、コスト面などで我が国においても有利であるが、AE 源位置の特に深度の決定に曖昧さがあるのが問題だった。本研究では多重反射を利用する解析法を検討し、高 SN

イベントの反射波を用いた位置決定（マスターロケーション）と低 SN イベントの相対位置決定の組み合わせにより、全体の AE 源分布の信頼性向上を実現した。本結果は、波動シミュレーションにおいても起こり得ると確認することもできた。LANL 研究者との議論でも、CO₂ と廃塩水に対応する位置に移動したことは、Aneth 地域の CO₂ 等の注入状況を考えると、従来法よりも適切であると結論付けることができた。

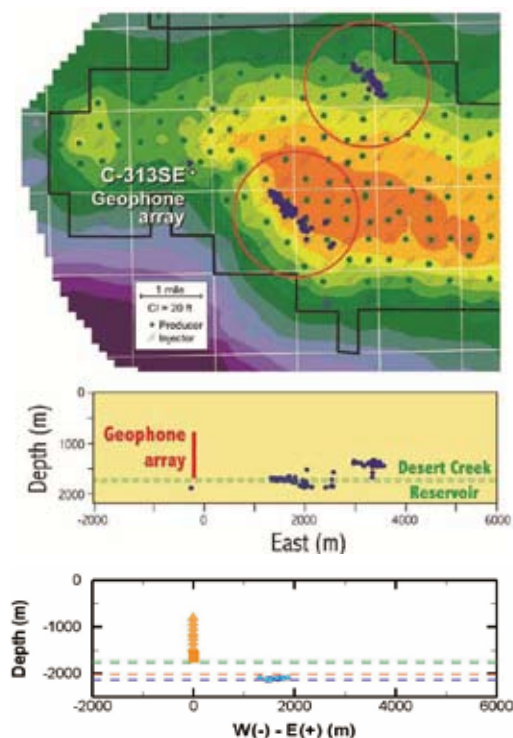


図 3: Rutledge (2009) による Aneth の予備的な AE 解析結果 (上) と本解析のマスターイベント (下) の推定深度の比較 (下図の緑点線が CO₂ 注入層, 赤および青点線の範囲が廃棄塩水が注入された範囲)

5) CO₂ 長期挙動シミュレーション

地中に圧入された CO₂ とそれに伴う地層の長期挙動シミュレーションを行っている。ここではシール層の構造による CO₂ 長期挙動の違いに関するシミュレーションの結果を紹介する。

CO₂ 地中貯留においては、低浸透率（一般に $<10^{-17} \text{ m}^2$ ）の泥岩・頁岩層が CO₂ を貯留層内に保持するためのシール層と見なされる。浸透率はコア試験や圧力遷移テスト等によるサイトの岩石特性調査によって計測される。既往のモデルではこれらの層は一般に均質多孔質として扱われるが、難透水性泥岩の水平方向の連続性が不十分で砂岩脈やフラクチャが存在した場合、マクロに平均化した浸透率は同等でも CO₂ 流動が高浸透部のパスに集中する可能性がある。当グループで行ったシミュレーションの結果を

図 4 および図 5 に示す。均質多孔質モデルでは、 10^{-17} m^2 の低浸透率シールにより CO₂ は貯留層内に封じられたが、二重孔隙モデルでは CO₂ が貯留層の外部へ漏洩する結果となった。漏洩は集中的なパスが存在する（高浸透部体積分率が小さい）場合ほど顕著となり、体積分率 0.01 の場合は長期的には二次貯留層まで CO₂ が漏出する結果となった。圧入による圧力上昇にケースによる大きな違いは見られなかったが、CO₂ の流動に伴い上部への伝播が促進された。また、二重孔隙モデルでは CO₂ が漏出した上層での圧力の緩和が若干遅くなった。

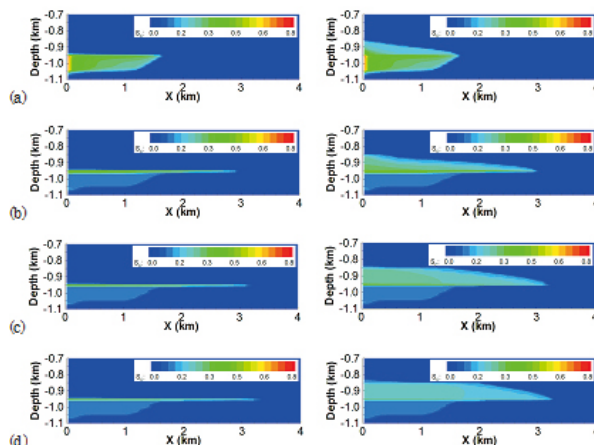


図 4: 平均鉛直浸透率が 10^{-17} m^2 のシール構造を (左) 均質多孔質モデル (右) 二重孔隙モデル (高浸透部の体積分率 0.01) とした場合の (a) 圧入停止時, (b) 1000 年後, (c) 2000 年後, (d) 3000 年後における CO₂ プルーム分布の違い

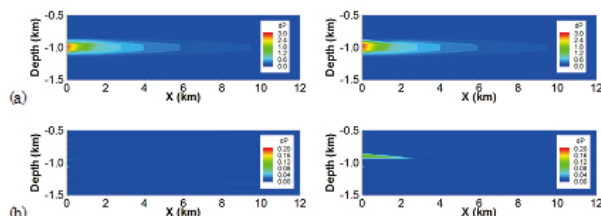


図 5: 図 1 の各ケースにおける (a) 圧入停止時, (b) 1000 年後の間隙水圧の違い

6) 砂泥互層人工試料によるシール圧測定

本研究では、CO₂ 地中貯留におけるキャップブロックのシール性能評価に関連して、地中貯留の環境条件下（10 MPa, 40°C）において、超臨界 CO₂ に対するスレッシュホールド圧の測定を行った。この際に、天然岩石のスレッシュホールド圧のばらつきに対して理論的な制約を与えるために、粒径を制御したシリカ粒子焼結体試料を作製し、種々の粒径についてスレッシュホールド圧と浸透率の関係を求めた。その結果、均一粒径（0.2~10 μm ）の焼結体のスレッシュホールド圧は粒径の減少と共に増加することが確認された。また、図 6 に示すように、両対数プロット上でスレッシュ

ルド圧と浸透率の間に良好な直線関係が得られたが、これは均質岩石におけるスレッシュホールド圧の基準値付近に相当すると考えられる。一方、粒径が $0.1\ \mu\text{m}$ および $1\ \mu\text{m}$ の粒子の混合試料について得られたスレッシュホールド圧と浸透率の関係からは、上述の均一粒径に対する直線と比較して、これらの試料のスレッシュホールド圧が同等あるいはそれ以下となることが示された(図6)。本研究の最終的な目的は、焼結体試料と岩石のスレッシュホールド圧の比較に基づいて、スレッシュホールド圧の変動に及ぼす各種因子の効果を定量的に明らかにすることである。したがって、今後は、他の異なるサイズの粒子の配合による孔隙率の違いや、球形以外の粒子形状の効果についても解析を行っていく予定である。

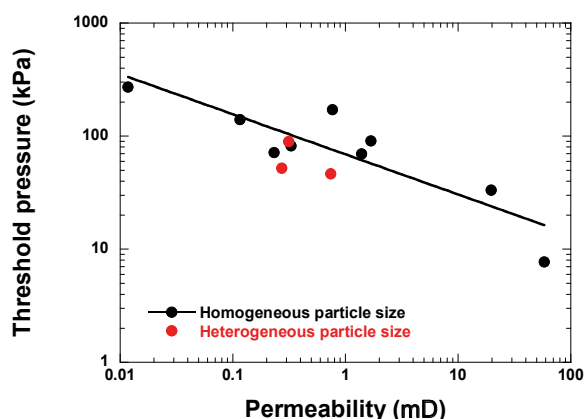


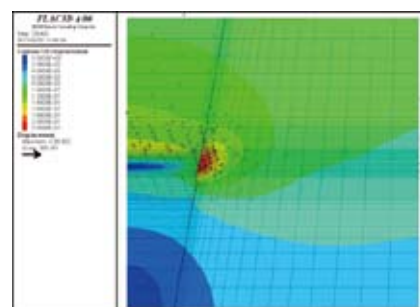
図6: シリカ粒子焼結体試料に対するスレッシュホールド圧と浸透率の関係

7) 砂泥互層内での化学的反応プロセスの評価

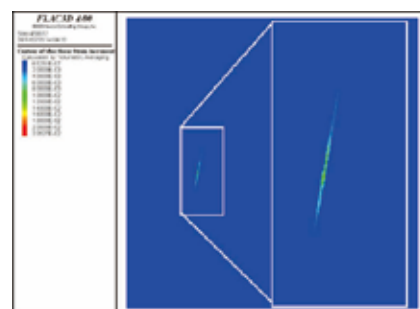
昨年度に引き続き、炭酸泉および炭酸水素塩泉において現場反応実験を行い、各種炭酸塩鉱物の生成プロセスおよび成長速度に関する検討を行った。カルサイトについては、文献値と比較して成長速度が大きく低下する様子が確認されたが、これは主として溶液中に存在する Mg イオンの効果であると考えられる。したがって、今後、 CO_2 分圧や pH、温度等の因子も含めて、 Mg イオンの効果を体系的に整理する必要がある。一方、炭酸カルシウム以外の炭酸塩鉱物であるドロマイトおよびマグネサイトについては、基板上で何らかの生成物が確認されたが、微量であったこともあり、現状では生成物の特定ができていない。これに関しては、最適な分析方法の適用により、早急に同定を行う予定である。いずれにしても、これらの鉱物の反応状況をカルサイトやアラゴナイトと比較すると、必ずしも過飽和度の違いとは対応しないことが明らかであり、 Mg/Ca 比を含めた種々の因子の効果を定量的に明らかにすることが今後の課題である。

8) ジオメカニクスを考慮した断層モデリング手法の開発

地下深部への CO_2 の圧入では、間隙圧の上昇をもたらす結果として地下に作用する応力場の変化が生じる。応力場の変化は地層、特に地下に先在するき裂や断層等の力学的安定性へ影響を及ぼすことが懸念される。また、断層や周辺地層の応力変化による変形は CO_2 を含む流体の流動特性へ影響をすることが予想されることから、力学的安定性の評価のみならず流体の挙動予測のために、力学(ジオメカニクス)と流体流動とを連成した数値シミュレーションの手法が必要となる。このために、ローレンスバークレイ国立研究所(LBNL)と共同で連成解析手法の検討、さらに室内試験により数値シミュレーションに必要なパラメータの取得と岩石の変形に着目した変形と流体流動の連成実験を行っている。図7には断層を含む地層中に CO_2 を圧入した時の(a)変位分布と(b)最大せん断ひずみの分布を示している。同図(a)から CO_2 圧入により地表面方向への変位が発生していること、さらに貯留層と断層の交差部において顕著な変異が認められる。(b)からは断層面において最大せん断ひずみが発生しており CO_2 圧入が断層など力学的安定性に影響を及ぼす可能性を示唆している。



(a) 変位分布図



(b) 最大せん断ひずみ増分

図7: $0.02\ \text{kg/m/s}$ の CO_2 圧入開始後1年における(a)変位分布および(b)最大せん断ひずみ増分の分布

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

地圏環境評価研究グループ長：今泉博之
Leader, Geo-analysis Research Group: Hiroyuki Imaizumi
Phone: 029-861-8287, e-mail: hiroyuki.imaizumi@aist.go.jp

1. グループの概要と研究目標

市街地や産業用地において深刻な土壌・地下水汚染に係る問題が顕在化する中で、2003年に土壌汚染対策法が施行される等、社会全体において地圏環境の適正な管理及びそれらに関連する技術開発が危急の課題となっている。地圏環境評価研究グループでは、様々な土壌特性下における有害物質による汚染等の評価のための物理的・化学的・生物学的な評価技術およびその浄化手法など、地圏環境の評価に係る基礎的な研究および技術開発を中心に実施し、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）。その他、地圏環境の計測技術に係る基礎的な研究、ならびに地圏環境との境界において人の健康等に関わる課題として音環境の予測・影響評価手法に係る研究等も幅広く実施している。

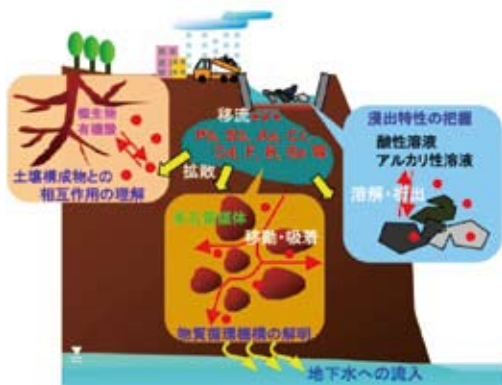


図1 土壌・地下水汚染等を中心とした地圏環境評価の研究

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
- ・中村英博（産学官制度来所者）

2) 研究課題

- ・運営費交付金「地圏環境評価の研究（地質）」
- ・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）

- ・共同研究「汚染土壌の測定・評価手法に関する研究」

3. 研究の進捗状況

1) 地圏環境評価の研究（地質）

発光バクテリアを用いた石油系炭化水素の毒性評価手法を開発している¹⁾。

これまでに得られた発光バクテリアに及ぼす石油系炭化水素（ガソリン、灯油、軽油）の急性毒性影響に関する実験データを用いて、反応速度論的解析を行った。その結果、反応初期の相対発光強度比のデータの多くが一次反応速度式に適合することを明らかにした。一次反応速度式が適用可能な濃度範囲は、ガソリン及び灯油では 0.05 ～ 1.0 vol%，軽油では 1.0～5.0 vol%であった。また、反応初期のデータを除外したとき、相対発光強度比と反応時間の逆数の間に極めて良好な正の相関関係が認められ、それらの関係を漸近式で表すことが可能であることを見出した。

その他、地圏環境評価に係る別の観点からの研究として、大規模地下空間利用施設の安全安定性評価に資するための原位置応力変化測定装置を開発している。この装置は、電気的な測定手法を用いないこと、当該装置の設置にセメント等を用いた固定作業を要しないことを特徴とする。石炭鉱山内の天盤崩落時の下盤での応力増加傾向を長期に実測し、既往の装置（フラットジャッキ）のそれと類似した特性があることを示した。

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に伴い、ブラウン管などの電子機器等を使用されるガラスからの浸出や拡散に関する基礎データを提供し、土壌環境における廃棄及び再利用におけるガラスからの有害元素の浸出特性に関する実験及び解析から、標準試験法及び長期環境安全性の評価に必要な技術的な提言を取りまとめている。

CRT ガラスの土壌環境下での浸出特性を把握する試験・評価方法の確立のために、土壌・CRT ガラス混合振とう試験を行ない、Pb や Sb 等の溶出挙動について検討した。その結果、土壌の種類によっては、ガラスからの Pb や Sb 等の溶出を抑

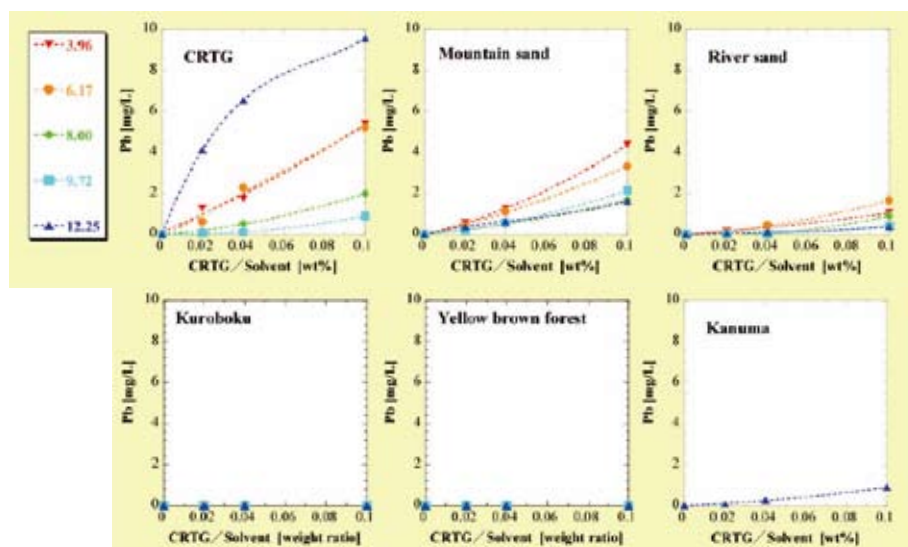


図2 土壌共存下でのブラウン管ガラスからの鉛の溶出濃度
(土壌：水=1：10 重量比)

制し、そのほとんどを吸着して、溶媒中への溶出を防ぐ可能性があることが明らかになった(図2)。

3) ブラウン管ガラスに含まれる金属元素の除去・回収技術開発

ブラウン管ガラスには鉛等の多種の金属元素が含まれている。ブラウン管ガラスの大量廃棄に伴う土壌・地下水等の汚染防止と有用金属資源のリサイクルに係る技術の両者に寄与するために、廃ブラウン管ガラスからの有害元素や有用金属等の除去・回収技術開発を目指し、その基礎パラメータであるガラス含有元素の溶出速度等の導出に関する実験を行った。溶媒 pH を変えたバッチ型溶出試験の結果から、Mn、Pb、Sb、Ti、Zr は酸性溶媒中で、Rb と Sr は酸性・中性・アルカリ性溶媒中で、ガラス骨格成分である Si よりも高い溶出率を示し、ガラスから選択的に溶出していることが推察された。

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

当研究部門内のシーズ・ニーズ研究の一つとして、騒音問題に生活妨害や心理的影響だけではなく健康への影響という新たな視点も不可欠という現状を鑑み、住民の行動パターンと騒音曝露量を長期間にわたって取得し、それをデータベースとして収集・蓄積するためのシステムを開発している。携帯型情報通信端末を基幹とした住民行動パターンと騒音観測データの自律型収集システムの実機を製作した(図3)。曝露騒音による断続特性を評価するために、1秒間隔以下で24時間連続記録が可能、携行性の観点から小型化・軽量化、簡

便化の観点から収録した騒音信号を無線方式で基幹とするモバイル型情報通信端末(位置情報計測部を兼ねる)に定期的に転送等で特化している。

実測例から当日午後15-17時に高騒音に曝露され、かつ同時時間帯に長距離移動(緑色ピン)していることから、何からの交通機関からの騒音曝露が推察され、時々刻々の個々の環境騒音への曝露状況が把握・分析可能である。

4. 今後の方針

当研究グループは、地圏環境に対する物理的・化学的・生物的なアプローチを通じ、個々の研究ポテンシャルを最大限に発揮して、それぞれの研究業務を着実に遂行することを基本としながら、地圏環境の評価及び保全に関する研究ならび

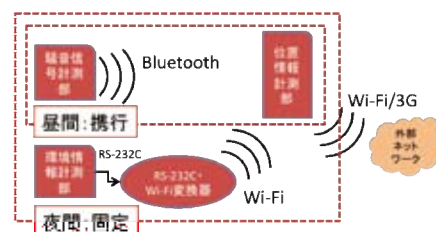


図3 開発中の自律型収集システムの機器構成と、ある被験者の一日の行動パターンと曝露された環境騒音データの実測例

にそれに係る技術開発を継続して実施する。

参考文献

- 1) 杉田, 井本, 駒井: 石油系炭化水素を対象とした発光バクテリアによる土壌汚染評価手法の開発ー反応速度論的解析ー, 資源・素材学会 2011 (堺)

地圏環境リスク研究グループの紹介 Introduction of the Geo-Environmental Risk Research Group

研究グループ長：張 銘

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

1. グループの研究目的

土壌・堆積物・帯水層・貯留層などの地質媒体における物理、化学及び生物学的諸現象の把握、メカニズムの解明とその制御に関する基礎的・先導的研究をベースに、土壌・地下水汚染、CO₂地中貯留、廃棄物地層処分、坑廃水、スモールスケールマイニング、生態系や地域社会への影響等の多様な環境リスク問題を解決するための基盤技術やリスク評価手法の開発を行い、地圏環境リスク評価システム（GERAS）に代表される研究成果の製品化と普及を行う（図1）。

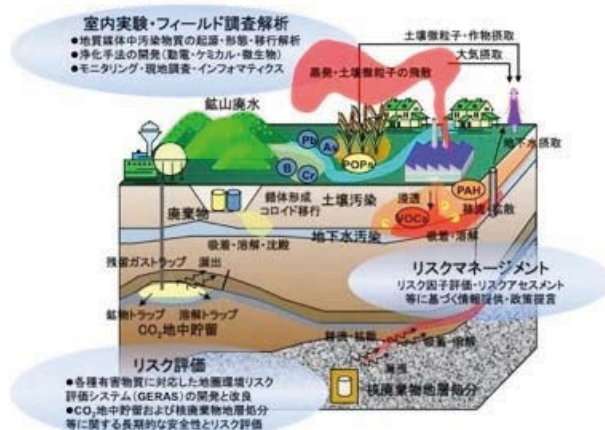


図1 地圏環境リスク評価関連の主要な研究課題

また、社会・経済モデルや環境疫学及びリスク文化形成に関連する研究要素も取り入れ、リスクガバナンスに関する研究を展開し、各種リスクコミュニケーションや政策提言及び国際事業への支援などにも積極的に関与する。

2. 各研究項目の内容

地圏環境リスク研究グループは以下に示す主要項目で研究を実施している。

2.1. 地圏環境リスクの研究

土壌や地下水中の残留性有機塩素系化合物に関する浄化手法の開発及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、自然起源及び人為起源に関する各種データを取得し、表層土壌環境基本情

報を整備する。

石油系炭化水素や重金属類などの各種汚染物質に関して、環境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の開発と改良を重ねていく。揮発性有機化合物や重金属等の土壌汚染に対して、自然エネルギー及び微生物等を活用した浄化手法の開発、及び迅速オンサイト型の分析・調査技術の評価を行う。

福島第一原子力発電所の事故により発生した広範囲の放射性土壌汚染に関して、放射性汚染土壌によるヒトへの被ばく評価手法と基盤ツールの整備（図2）、土壌環境における放射性物質の移行特性調査、評価及び長期的予測技術の開発、ならびに科学的リスクアセスメントに基づく放射線リスクコミュニケーションを実施する。

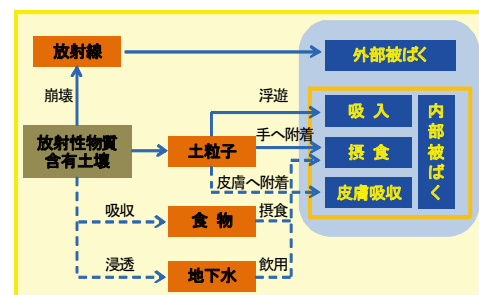


図2 放射性汚染土壌によるヒトへの被ばく経路

2.2. リスクガバナンスの研究

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

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

トの在り方を検討・提案する。

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

さらに、物理、化学的な視点に加え、土壤汚染浄化における環境負荷や経済的及び社会的効果を評価し、土壤汚染対策事業のさらなる展開と促進に努める。

2.3. 地圏汚染リスク評価技術の開発

地圏環境リスク評価システム(GERAS)を高度化し、産業や社会に普及させる。有害物質を含む廃棄物の堆積場や埋立処分地における土壤・地下水・地表水汚染による環境リスクを時間的・空間的に評価するために、2010年にはGERAS-3 廃棄物バージョンを公開した。また、温暖化物質排出抑制を目的としたCO₂地中貯留のリスク評価に利用するために、2010年度にはGERASのCO₂地中貯留バージョンのプロトタイプとしてGERAS-CO₂GSを公開した。

今後、植物や水生生物、土壤中生物などの生態系リスク評価の方法論を確立し、統合化リスク評価システムの検討を進める。また、放射性汚染土壤の環境リスクの評価が可能となるようにシステムの改良を行う。

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

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

2.5. 原位置土壤汚染調査・浄化技術の研究開発と現場適用

重金属類汚染のオンサイト調査評価技術、太陽光などの自然エネルギーを利用した電気修復法による汚染浄化のパイロット試験に成功を収めており、現在受託研究等により、低環境負荷浄化促進剤の考案や電気修復法の実用化に向けた更なる研究開発を進めている。

また、VOCs 汚染浄化技術をリスク評価の観点から汚染物質の毒性低減法、汚染物質の濃度低減法及び暴露経路の遮断法に体系的に分類し、提案を行った。特に、自然界に生息する微生物を活かしたバイオレメディエーションの研究開発にも共同研究などにより取り組んできた。そ

の結果、特定微生物の生息環境を解明し、現在複雑な自然環境に起因する各種制限要因を考慮した浄化促進法の開発及び浄化設計法の確立に向けて更なる研究を重ねている。

3. グループの研究体制

地圏環境リスク研究グループは、以下の体制で研究を実施している。

張 銘（グループ長）

田中敦子

村尾 智

川辺能成

原 淳子

坂本靖英

保高徹生

高田貞江（テクニカルスタッフ）

小川桂子（テクニカルスタッフ）

森田佳美（テクニカルスタッフ）

渡邊真理子（テクニカルスタッフ）

山崎哲生（客員研究員）

西脇淳子（協力研究員）

吉川美穂（産学官来所者）

また、異分野や内外部との連携を重視し、研究協力、共同研究及び研究成果の社会還元を積極的に進めている。

4. 最近の主な研究成果

1. 保高徹夫，張 銘，駒井武，松田裕之(2011) 土壤に含有された放射性物質の被ばく量評価に関する研究，第9回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，135-138.
2. J. Nishiwaki, Y. Kawabe, Y. Sakamoto, T. Komai, and M. Zhang (2011) Risk Assessment of Residual Gasoline Components in Unsaturated Soils, Environmental Engineering Science, 28(2), 95-101.
3. J. Nishiwaki, Y. Kawabe, Y. Sakamoto, T. Komai, and M. Zhang (2011) Volatilization Properties of Gasoline Components in Soils, Environmental Earth Sciences, 63, 87-95.
4. 坂本靖英，西脇淳子，原 淳子，川辺能成，菅井裕一，駒井 武（2011）鉱物油に起因した土壤・地下水汚染を対象としたリスク評価システムの開発—土壤・地下水環境における反応を伴う多相・多成分系流動に関する数学モデルの構築—，土木学会論文集，67(2)，78-92.
5. T. Komai, Y. Sakamoto, and A. Tanaka (2011) Risk Assessment for CO₂ Capture and Geological Storage in Offshore Environment, Proceedings of Int. Soc. of Offshore and Polar Engineering, 44-48.
6. M. Zhang, T. Komai, and J. Hara (2010) Rethinking about Site Selection Approaches for Geological Disposal of High Level Radioactive Waste from Social Psychological Viewpoints, Proceedings of Waste Management Symposium 2010, Paper ID: 10182(9pp).

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）
船津 貴弘（CO₂地中貯留 RG より分担）
中村 竹博（産学官制度来所者）
東海林太郎（産学官制度来所者）

2) 予算

文部科学省試験研究「放射性廃棄物地層処分における長期空洞安定性評価技術の研究」
運営費交付金「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」
運営費交付金「地圏環境システムの研究」
日本鉱業協会研究委託費「磁鉄鉱と硫化鉱物を含む岩石の電気的特性に関する研究」
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22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22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た。

a) 深部岩盤空洞周り緩み域における 3 次元応力計測

瑞浪超深地層研究所の研究坑道深度 200m レベルの試験用横坑からの 3 孔のボーリングで採取された、花こう岩コアを用いた AE/DRA 法による応力計測とその解析についてとりまとめた。3 孔各 3 個所、合計 9 地点分の各計測においては概ね安定して三次元応力場を評価することに成功した。主応力方向に関しては、全体的には最大圧縮応力方向については東西～（北西－南東）～南北の範囲に評価され、ばらつきも含めて概ね既存の水圧破碎法のデータと整合的な結果が得られた。また、試験用横坑からの距離に応じて主応力方向の傾向が異なる結果が 1 孔において得られており坑道の影響をうかがわせる。主応力の大きさについては、地点により水圧破碎法と比較して妥当な値が得られているものもあるが、全体的に深度の割に大きい主応力値が得られた。掘削影響領域に関わる応力変化の傾向を捉えている可能性があるデータを得たため、その妥当性について単純なモデルによる検討を行った。解析例を図 1 に示す。計測された応力場は定性的には空洞開削の影響の傾向を現していると考えられるものの、応力値自体は必ずしもモデルと合致しない場合が見られた。今後得られた応力場の妥当性についてモデル側、計測側双方の視点からよく検討を行う必要がある。

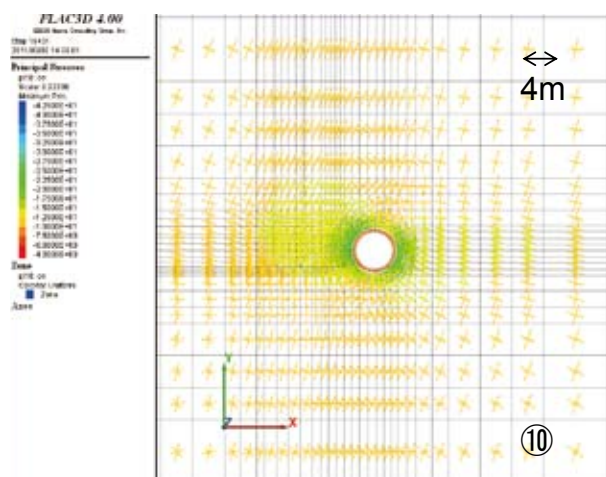


図 1. 坑道底面から 5.6m 下側面の主応力ベクトル

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

強制湿潤状態の珪藻土を用いてニアフィールド環境（封圧 10MPa, 中間温度領域として温度 80℃）を模した条件下でひずみ速度を変えた非排水の三軸圧縮試験を実施した。また、比較のため常温（25℃）での試験も実施した。昨年課題であった変位計測手法の開発では、高温型 LVDT を組み込んだ治具および専用アンプを製作し、長期計測（実測 1.5 ヶ月）において精度良く安定した計測ができることを確認した。温度 2 条件の応力-ひずみ線図では上に凸の延性破壊を呈する結果が得られた。また、破壊強度は、常温より中間温度領域の試験値が小さくなる傾向と双方の温度条件下でそれぞれ载荷速度依存性が認められた。クリープ試験は非排水条件下で、封圧 10MPa, クリープ荷重 90%, 常温と中間温度領域で試験を行い、1 次クリープが対数クリープ則に従うことを確認した（図 2）。3 次クリープまで収録できた試験例で破壊に至った試料は、せん断破壊による破断面の形成が観測された。破壊しない場合は長期観測（約 2 ヶ月）においてデータの蓄積を行い、封圧解放後の様子を観察した結果、圧密に類似した変形を確認した。

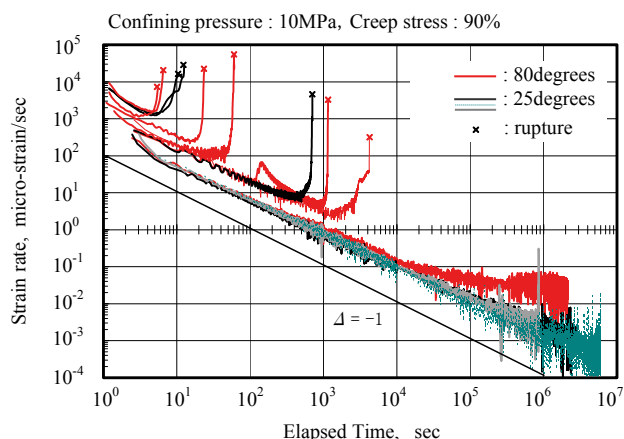


図 2. クリープひずみ速度の経時変化

3.2. 地圏環境システムの研究：坑井掘削の高効率化

パーカッション掘削における岩石の掘削特性の究明を目的に、直径が 65mm のハイスピードタイプのパーカッションビットを用いて、新小松安山岩（軟質）、新小松安山岩（硬質）および沢入花崗岩に対して掘削実験を行った。各岩石の一軸圧縮強度は 131, 184, 214MPa である。実験条件は、パーカッションドリルへの入力油圧 Pin が約 7.5～13.5MPa, ビット回転数が 25

～175rpm, ビット荷重が約 6～8kN, 清水流量が 45L/min とした。

ビット回転数と掘削速度との関係, ビット回転数と比エネルギーとの関係を用いて実験から得られたデータを解析した。その結果, 入力油圧 P_{in} が約 13.5MPa のとき, 掘削速度が最大になるとともに比エネルギーが最小になることがわかった。比エネルギー S_e (MPa) は次式から求めた。

$$S_e = (Fu + 2\pi NT + W_{out}) / 1000Su$$

ここで, F はビット荷重, u は掘削速度, N はビット回転数, T はトルク, W_{out} は打撃エネルギー, S はビット断面積で, (1)式右辺の分子は総掘削エネルギーである。比エネルギー S_e は単位体積の岩石を掘削するのに要するエネルギーを表わしており, S_e が小さいほど掘削効率が優れていることを意味する。

図 3～5 は, それぞれ新小松安山岩 (軟質, 硬質), 沢入花崗岩の掘削実験から得られたデータを掘削速度と総掘削エネルギーとの関係で整理したものである。図中の直線は, 比エネルギーがほぼ最小のデータ (△印) を用いて原点を通る最小二乗法による近似から求めた。これらの結果から,

- ①掘削速度と比エネルギーを勘案すると, いずれの岩石においても適切なビット回転数は 75rpm 程度である,
- ②岩石の掘削が効率的に行われている場合, 掘削速度に及ぼす打撃エネルギー W_{out} とその他のエネルギー ($Fu + 2\pi NT$) の影響はほぼ等しい,
- ③岩種にかかわらず, 岩石の一軸圧縮強度と比エネルギーの最小値は大雑把に一致する,
- ④パーカッション掘削 (■印) に比べて大きい, ことなどが明らかとなった。

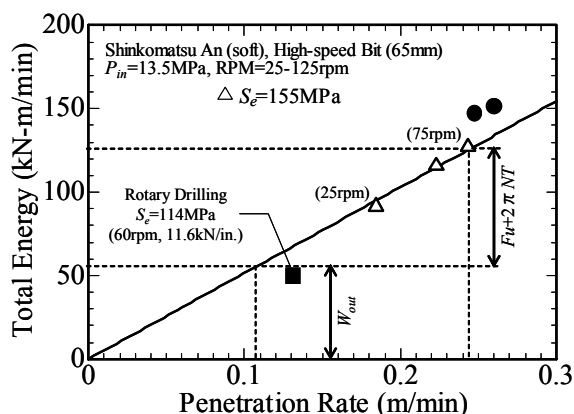


図 3. 新小松安山岩 (軟質)

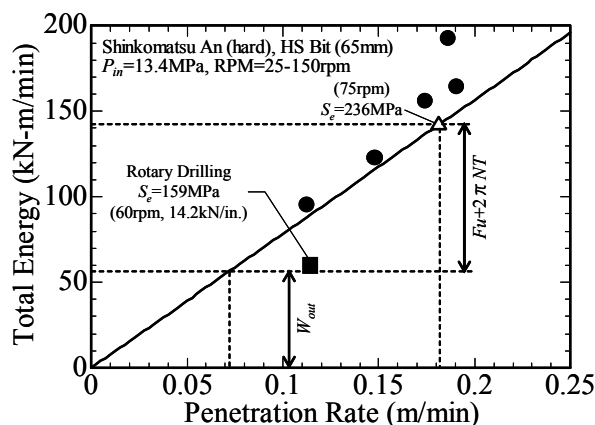


図 4. 新小松安山岩 (硬質)

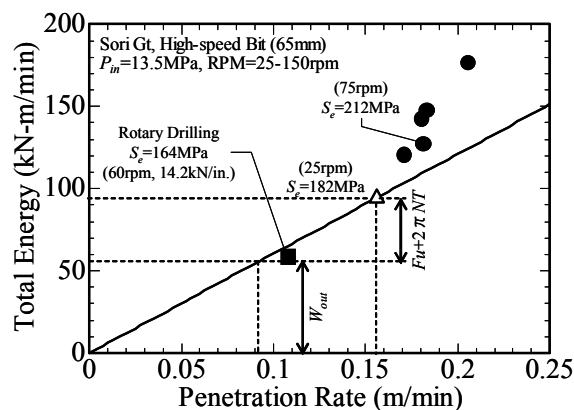


図 5. 沢入花崗岩

3.3. 磁鉄鉱と硫化鉄鉱を含有する岩石の電気的特性に関する研究

斑岩銅鉱床や酸化鉄銅金鉱床などの非鉄金属鉱床探査では IP 法電気探査を用いることが多い。これは鉱床に賦存する黄鉄鉱や黄銅鉱などの硫化鉄鉱が IP 効果を持つからである。しかし, IP 異常が観測されたところで試錐をしても, 目的とする鉱物の発見に至らないことがある。その原因の一つとして, 硫化鉄鉱とは異なるメカニズムの IP 効果を持つとされる磁鉄鉱の存在があげられる。本研究では磁鉄鉱と硫化鉄鉱を含む岩石の電気的特性を詳しく調べ, それぞれの鉱物が電気的特性に及ぼす影響を解明することにより, スペクトル IP 法など詳細な IP 法を用いて磁鉄鉱と硫化鉄鉱を識別する方法の開発を目指している。平成 22 年度は, 室内で試料の電気的特性を測定するシステムを構築し, 黄鉄鉱および磁鉄鉱を混合させた人工サンプルでテスト測定を行った。

黄鉄鉱の試料は愛知県産の黄鉄鉱の粒を入手し, 篩によって粒径が 0.5mm 未満, 0.5～0.7mm, 0.7～1.0mm, 1.0～1.4mm, 1.4～2mm, 2mm 以上の 6 グループに分類した。また, 磁鉄鉱の試料はチリ産の鉄鉱石を破碎・粉碎し, 黄鉄鉱と同様に篩い分けした。今回は粒径が 1.4～2mm の黄鉄鉱と磁鉄鉱の金属粒子を用いて, そ

れを 400g のガラスビーズに混合させた人工試料を作成した．間隙水には濃度が 0.01mol/l の KCl 水溶液を用いた．金属粒子の量は，ガラスビーズの重量に対して 0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 20%となる重量，すなわち 0, 4, 12, 20, 40, 60, 80g とした．ただし，金属粒子の量には限りがあるので，まずガラスビーズだけの試料を測定し，次にそこに 1%の金属粒子を加えた試料の測定をした．その後，金属粒子の重量が 3%, 5%, 10%, 15%, 20%となるように加え，順次，測定を行った．作成した試料の測定では，長さ 120mm，幅 40mm，高さ 40mm のアクリルのサンプルホルダー（写真 1）を使用した．電流電極はホルダーの両端に付けたステンレス板であり，電位電極は銀－塩化銀電極である．今回の測定では，銀－塩化銀電極の間隔は 40mm と固定した．

複素比抵抗の測定には英国ソーラトロン社のインピーダンスアナライザ 1260 とガルバノポテンシostat 1287 を使用した（写真 2）．測定は 1MHz から始め，0.01Hz まで行った．測定周波数間隔は 1 桁の周波数範囲を対数上で 5 等分するように選んだ．

黄鉄鉱を含有させた人工試料の複素比抵抗の測定結果を図 6 に，磁鉄鉱を含有させたそれを図 7 に示す．いずれの図においてもボード図表示をしており，横軸は対数周波数であり，縦軸は上段が比抵抗を，下段が位相差を表している．

図 6 より，黄鉄鉱粒子を含有させた人工試料では，位相差が極大となる臨界周波数は 100～1000Hz になることがわかる．一方，図 7 より磁鉄鉱粒子を含有させた人工試料では，周波数の増加とともに位相は大きくなり，臨界周波数は 10kHz までには現れない．確認のため，磁鉄鉱粒子が 20%の試料に 10%の黄鉄鉱粒子を含有させた測定を行い，その結果を図 7 に示した．この場合，臨界周波数が 1kHz 付近に現れた．このことは，黄鉄鉱と磁鉄鉱では，複素比抵抗の周波数依存性が異なることを示している．

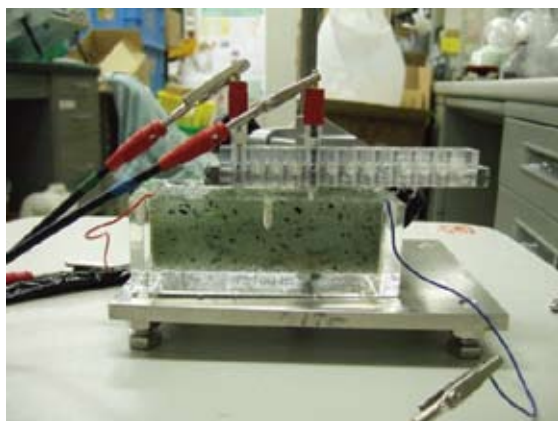


写真 1. サンプルホルダー



写真 2. 複素比抵抗の測定システム

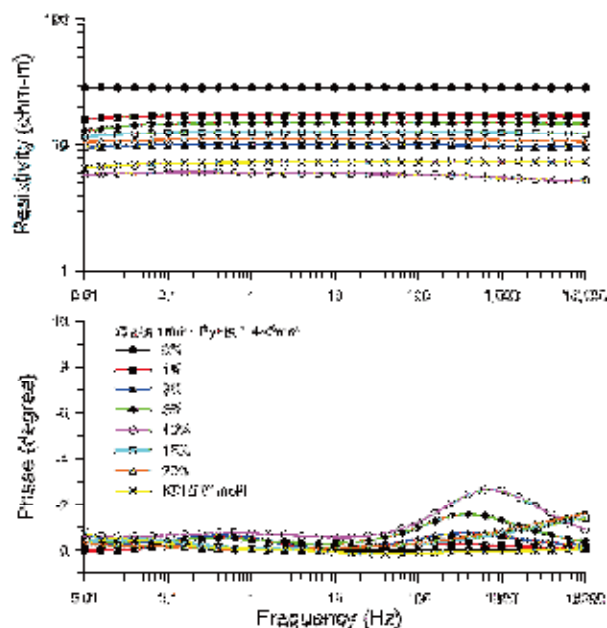


図 6. 黄鉄鉱粒子を含有させた人工試料の複素比抵抗（上：比抵抗，下：位相差）

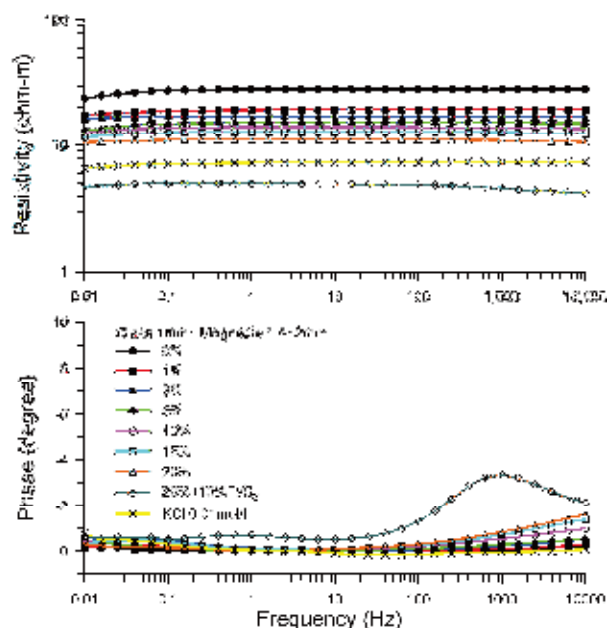


図 7. 磁鉄鉱粒子を含有させた人工試料の複素比抵抗（上：比抵抗，下：位相差）

つくば市内での石造文化財の被災事例 — 2011. 3. 11 東日本大震災 —
Examples of Stone Arts damaged by M9.0 earthquake on March 11, 2011
in Tsukuba, Ibaraki prefecture

長 秋雄（主任研究員）
Akio Cho
Senior Researcher
e-mail: akio.cho@aist.go.jp

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本太平洋沖地震（M9.0）では、巨大津波が岩手県・宮城県・福島県・茨城県沿岸部に甚大な被害をもたらした。加えて、地震と津波により被災した福島第一原子力発電所から放射性物質が放出され、原子力災害が発生した。

この地震での茨城県つくば市での震度は 6 弱であった（図 1）。つくば市の被災は、死者 1 名、負傷者 13 名、道路損壊 281 件、上水道漏水等 106 件、下水道施設損壊 106 件、公共施設一部損壊 191 件、家屋全壊 7 件、家屋半壊 115 件、家屋一部損壊 1,602 件、塀損壊 849 件、崖崩れ 5 件、床下浸水（地下水）1 件、液状化 2 件であった（6 月 1 日現在つくば市とりまとめ）。

岡田ほか（2011）は、3 月 29 日撮影の Google Earth 画像を用いて屋根瓦の損壊・落下箇所が認められる建物（ブルーシート等で判別）を識別し、つくば市及び土浦市周辺地域において合計 6,294 件の被害を確認した。

岡田ほか（2011）がつくば市内で屋根瓦の損壊・落下箇所が認めた建物は、つくば市都市建

設部建築指導課が「茨城県南部地震（M7.3）」及び「どこでも起こりうる直下の地震（M6.9）」を想定地震として作成した「つくば市地震防災マップ②地域の危険度マップ」において、昭和 56 年以前に建築された建物（通称：旧耐震の建築物）の割合も評価した上で、「危険度 5（全壊率 20%～）」に分類された街区で多く発生していた。

著者は、2006 年産総研地域産業活性化支援事業を契機に茨城県内の石材産業界と共同研究を行っていたので、つくば市内での石造物・石造文化財の被災状況調査を 3 月 22 日と 4 月 5～6 日に行った。本報告では、つくば市内での石造文化財の被災事例を紹介する。

2. つくば市内での石造文化財の被災事例

2.1 小野崎地区

八坂神社境内入口より、

○鳥居（平成 17 年 4 月建之）

額束の背下部の破損、柱の中貫接合部の破損。

○鳥居（大正 4 年 11 月建之）

中貫の落下、左右の島木・笠木のズレ。

○台灯籠（昭和 58 年 6 月建立、左右一対）

左右とも灯籠部が倒壊（写真 1）。

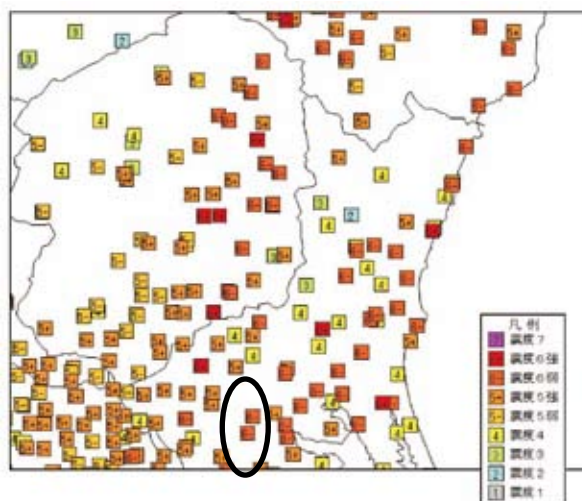


図 1 茨城県とつくば市（囲み部）の震度分布
（気象庁発表資料より）



写真 1 小野崎八坂神社の被災状況

- 灯籠（平成 22 年 2 月建立，左右一対）
左右とも倒壊（写真 1）。
- 灯籠（平成 3 年 6 月建立，左右一対）
左右とも被災なし（写真 1）。
- 台灯籠（昭和 58 年 6 月建立，左右一対）
右の灯籠部が倒壊。
- 台狛犬（昭和 58 年 6 月建立，左右一対）
左右とも被災なし。

2.2 つくば道（神郡・臼井・沼田）

- 蚕影神社の鳥居（昭和 15 年 4 月建之，神郡）
被災なし。笠木の上に投げ上げられた小石が残存していた。
- 飯名神社の鳥居（沼田）
右の島木・笠木が落下した（写真 2）。



写真 2 飯名神社の鳥居の被災状況

- つくば道の一の鳥居（1759 年建之，臼井）
被災なし
- 筑波山口の大鳥居（大正 14 年建之，沼田）
神明式の鳥居で，左右の柱の笠との接合部が破損した（写真 3）。



写真 3 筑波山口の大鳥居の破損状況

2.3 小田地区（小田）

小田地区は関東地方での石造文化の発祥地である。鎌倉時代に作られた石造物が多く残されており，そのいくつかは，茨城県指定文化財やつくば市指定文化財になっている。

- 長久寺の灯籠（鎌倉中期作，県指定文化財）
被災なし。
なお，同寺の平成 22 年 10 月建立の一対の石灯籠では，右の石灯籠の竿石が台座に対して北へ 5cm ずれていた。

- 延寿院薬師堂の五輪塔（1538 年作，県指定文化財）
被災なし。

- 地藏菩薩立像（鎌倉後期作，県指定文化財，写真 4）
被災なし。



写真 4 地藏菩薩立像

- 極楽寺跡の五輪塔（鎌倉後期作，市指定文化財）
被災なし。

- 宝篋山山頂の宝篋印塔（鎌倉中期作，県指定文化財，写真 5）

相輪が落下した。
上から見て反時計回りの回転があった。塔身は下の基礎石に対して約 15 度，蓋も基礎石に対して回転していたが塔身の回転量より小さかった。笠の上部と下部には相対的な回転はなかった。
基礎石は下の台座に対して相対的に東に約 3cm ずれていた。



写真 5 宝篋山山頂の宝篋印塔の被災状況
（南西から見る）

引用文献

岡田真介ほか（2011） Google Earth 画像を用いたつくば市及び土浦市周辺の地震被害（建物被害）分布調査，GSJ Newsletter, 80, 4-5.

つくば市都市建設部建築指導課 つくば市地震防災マップ②地域の危険度マップ，つくば市ホームページ

<http://www.city.tsukuba.ibaraki.jp/>

震災復興に向けた地下水利用 Effective Groundwater Use on the Recover from the Earthquake Disaster

丸井敦尚*, 伊藤成輝, 越谷賢, 小原直樹, 内田洋平
吉岡真弓, 井川怜欧, 町田功 (地下水 RG)
Atsunao Marui*, Narimitsu Ito, Masaru Koshigai, Naoki Kohara
Yohei Uchida, Mayumi Yoshioka, Leo Ikawa and Isao Machida
Groundwater Research Group
*Corresponding Author's e-mail: marui.01@aist.go.jp

1. はじめに

東日本大震災は地質学的に大きな意味を持つばかりでなく、地下水学的にも重大な変化をもたらした。地下水流動の変貌、地震の影響による水位変化、深部地下水の上昇、着色など列举に暇がない。さらに人々の生活にも変化が表れたことは言うまでもない。ライフラインの確保が真っ先に必要となったが、その後の街造りやインフラ整備など地下水を含め、これまでに類を見ないほどの地球科学情報が必要とされるようになってきた。

このような状況の中、筆者らは、3 月末までに東北太平洋側の各県ごとの地下水流動シミュレーションを実施し、「本来ならば地下水はどう流れているはずだ」というモデルを提示した。詳細は、本成果発表の丸井「復興に向けた広域地下水流動解析」に譲るが、地域に必要な地下水を得るための三次元情報を提供するほか、地下水の異変を的確に判断する情報提供にも寄与することができた。さらに、筆者らのモデルは地下水の流動方向や流動速度についても解析しており、塩水や汚泥、所によっては放射性物質による汚染までもその拡大範囲や拡散速度を推定している。この発表では復興に向け、地球科学情報のもっとも重要な要素の一つである地下水情報について、宮城県と福島県を例に挙げ、地下水の有効利用についての基礎情報を提示したい。

これらの情報は、ホームページに掲載したほか、NHKをはじめとするテレビ各局、読売新聞をはじめとする新聞各紙、日経ビジネス等のネットニュース、東洋経済等の各種情報誌（週刊誌・月刊誌）でも報じられている。

2. 宮城県の地下水情報

2.1. 帯水層モデリング

丸井「復興に向けた広域地下水流動解析」にて詳細を述べているとおり、広域（全県）の地下水盆モデル（帯水層モデル）は、越谷ほか（2011）の三次元モデルから対象領域のデータを抽出している。このモデルに使用データは、数値地質図、ボーリングデータ、数値標高モデル

であり、ボーリングデータの収集は、資源探査、地盤調査、学術調査を目的に実施された文献を対象とした。収集した文献には地質柱状図のほか、地質断面図上に記載されたボーリングデータがあり、それらのデータも抽出した。

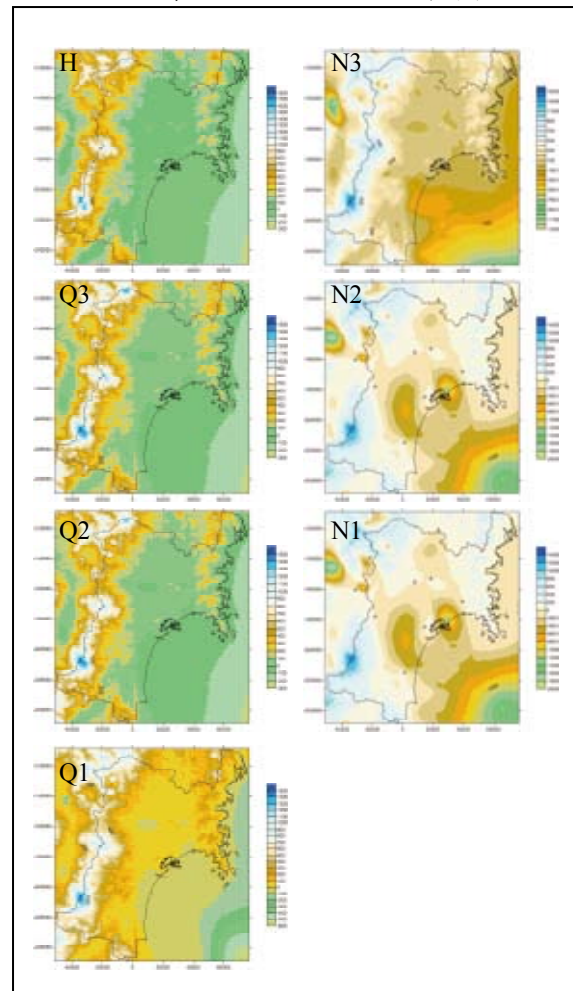


図1 宮城県周辺における沖積層、第四紀層（Q3, Q2, Q1）および第三紀層（N3, N2, N1）の基底面深度の分布（越谷ほか、投稿中）。凡例は標高を表わし、単位は[m]。

2.2. 地下水流動

宮城県における地下水の流動を FEFLOWTM によって解析した。三次元解析モデルは、越谷 (2011) の 3 次元地質モデルに基づき、沖積層 (H), 第四紀層 (Q3, Q2, Q1), 第三紀層 (N3, N2, N1) 7 の基底面深度を与えた。各層における基底面深度分布を図 1 に示す。各層の透水係数は、内田ほか (2005) を参考に沖積層および第四紀層を $2.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ とし、第三紀層を $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ として与えた。側方および底部境界は非流動境界とし、上部境界条件は、標高から推定した地下水面を与えた (固定条件)。なお、沿岸部は、第四紀層までの水理水頭を標高 0m で固定し、第三紀以深については非流動境界とした。3 次元モデルの外観は図-3 の通りである。モデルの要素数は 28152 点である。

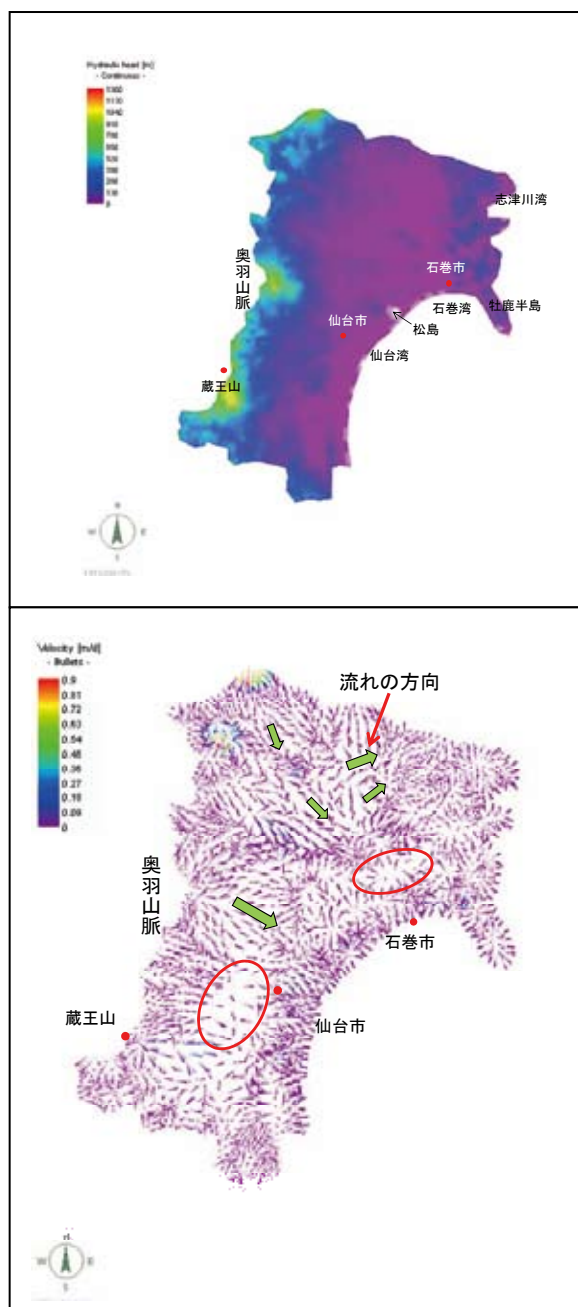


図 2 解析結果：自由地下水の全水頭（上図）とその流動概況（下図）

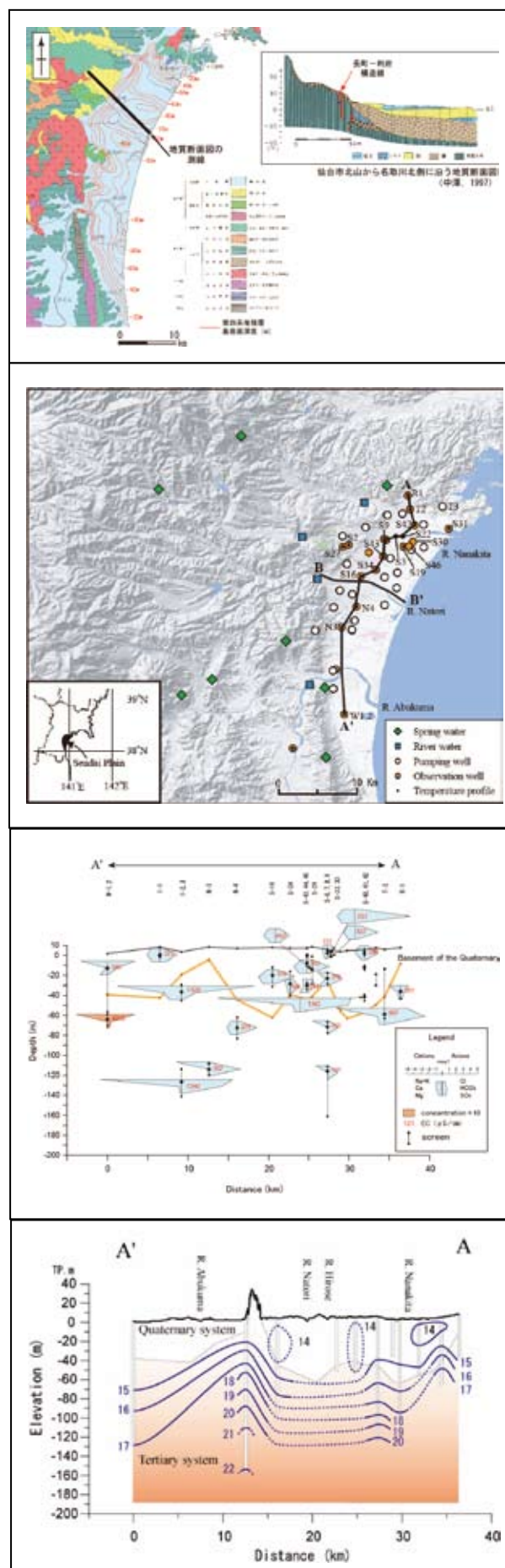


図 3 仙台平野の地下水状況，上図：第四系基

底面図および地質断面図（中澤，1997），中上図：仙台平野を中心とした水質観測網，中下図：仙台平野を縦断する測線（上図の A-A'）における地下水質の **Stiff Diagram**，最下図：A-A'断面における地下温度分布

水質分析結果を，仙台平野を縦断する測線でのシェディフダイアグラムで示す．図の作成に際しては，東北地方建設局の所有する観測井の水質データ（建設省河川局編，1998より引用）も参考として用いた．地表水および地下水試料の多くは，重炭酸カルシウム型の水質組成を呈している．一方，地下水試料の一部は海水型，重炭酸ナトリウム型および両者の中間型の水質組成を呈した．重炭酸カルシウム型の水質組成を呈する試料は，主に地表水および地下浅部の第四系堆積層中より採取されたものである．平野内各地の深度 10 m 以浅より採取された試料は，いずれも重炭酸カルシウム型の水質組成を呈した．また仙台市内では，深度 10～50 m より採取された試料も主にこの型に属した．N-4 は，第三系基盤岩中より採水された試料（採水深度約 80 m）であるが，重炭酸カルシウム型の水質組成を示した．重炭酸ナトリウム型の水質組成を呈する試料は主に第三系基盤岩中より採水されたものである．

海水型の水質組成を示す試料は主に仙台市以外の地域の地下水である．採水深度で見ると，ほとんどが第三系の基盤岩より採水している．S-31 と W-1 の EC はそれぞれ 11350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，4550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と高い値を示すが，これら以外の試料は 251～545 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と低い値を示した．各観測井の位置を考慮すれば，S-31 以外では，海水型の水質組成は化石海水の影響によるものであり，とくに W-1 で影響が大きいと考えられた．

地下の温度は地域的な違いはあるが，おおよそ 14℃から 16℃であり，T-3 と N-3 の 2ヶ所は 17℃以上となっている．一般に堆積盆地や堆積平野の地下温度分布は地下水の流動の影響を受けており，地下水の涵養域と流出域とでは温度に違いが認められる．しかしながら，仙台平野における平面地下温度分布には，両者の明瞭な温度差を確認できなかった．そこで，仙台平野における地下温度構造を詳細に見るため，南北の測線断面における地下温度分布を最下図に示した．第四系内の地下温度は約 14℃～15℃で，温度勾配が非常に小さいことが特徴である．一方，第三系内では温度勾配にしたがって深度と共に地下温度が上昇する．第三系内の温度勾配は，3℃/100m 以上と第四系内の温度勾配と比較して大きい値を示した．

3. 福島県の地下水情報

3.1. 地下水流動解析と水質

これまで同様に越谷ほか（2011）の地質モデルをもとに帯水層モデルを構築した．解析モデルの境界は福島県境とし，解析ソフトウェアとして **FEFLOW** を用いた．3次元モデルを構築するために，沖積層(H)，第四紀層(Q1, Q2, Q3)，第三紀層(N1, N2, N3)の7つの地層の3次元情

報(基底面深度)を用いた．同データは，前述のモデリング手法に基づいている．ただし，透水係数は，常磐炭田沖での既往の地下水流動解析結果(内部資料)を参考に，沖積層と第四紀層については，水平方向 10^{-4}m/s ，鉛直方向 10^{-6}m/s とし，第三紀層については，水平方向 10^{-4}m/s ，鉛直方向 10^{-6}m/s とし，第三紀層については， 10^{-6}m/s で等方とした．地下水流れの境界条件として，モデル全周の水位を標高で固定し，表層全域に 1mm/day の涵養を与えた．これにより，モデル内で過剰になった地下水が全周から流出できるため，現実に近い状況を再現できると考えた．要素数 53872，節点数 32208 となった．

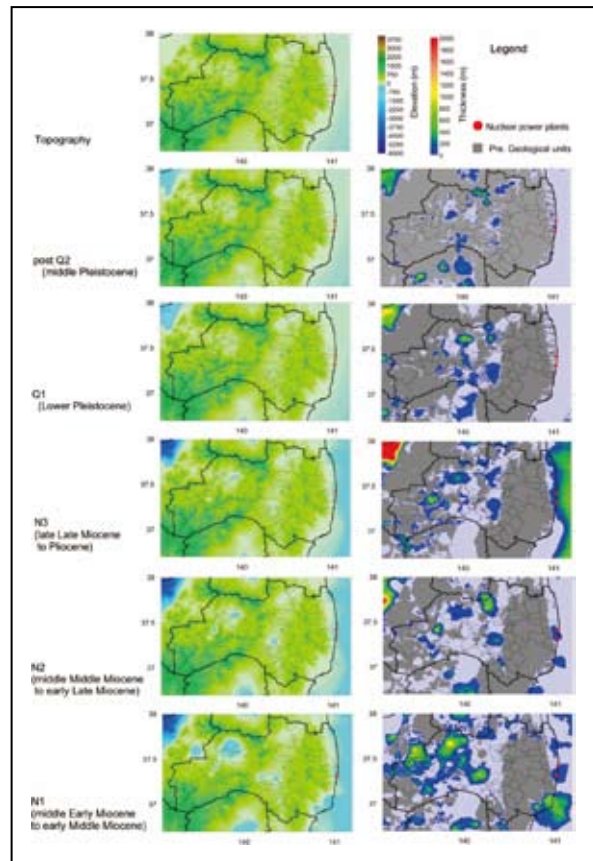


図3 福島県周辺の広域の三次元地質モデル
左列の図は各対象地層の深度分布図，右列の図は各対象地層の層厚分布図

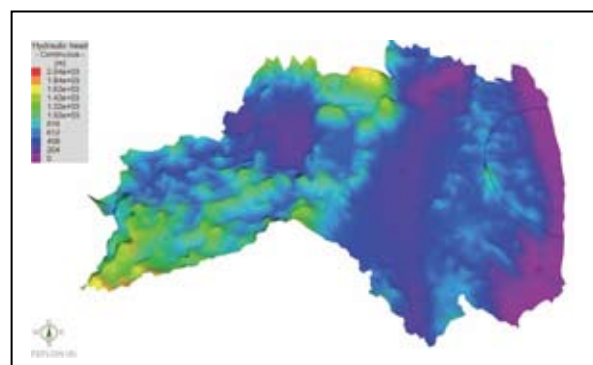


図4 福島県全域の水頭分布．水頭分布から，浜通りにある福島第一原発周辺の地下水は，阿武隈高地への降水によって涵養され，海に向かって流れることが分かった．

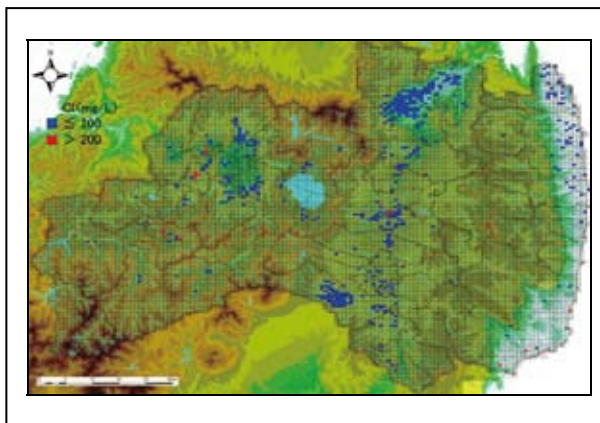


図5 県内各観測点での塩化物イオン濃度

地下水流動解析によって得られた水頭分布は、図4のとおりである。また、福島第一原発から半径30kmの位置は、阿武隈高地で最も水頭(標高)が高い領域と概ね一致している。阿武隈高地から沿岸に至る集水域も同様に、30km程度の奥行きを有することを示している。

地下水流向を、福島第一原発から半径30km圏を中心に拡大して示すと、原発から半径30km圏にある地下水は、阿武隈高地から海に向かう流れが支配的であるが、陸側に着目すると、北側よりも西側および南側から圏外に流出することも分かった。圏内から流出する地下水が浜通りや南部に向かうと、状況が改善された後であっても、地下水の流動がおく遅れるために時間差で影響が出ることを否定できない。表層汚染による影響が小さな深井戸を整備するなどして、水供給システムを強化するとより高い安心が得られる。

福島県における地下水のpHは概ね5.8以上8.6以下の範囲内にあるが、中通り地方の福島市・郡山市・白河市において一部、pH5.8未満の地下水が確認された。これらの地域では井戸深度は浅く、人口が集中していることから人間活動による地下水質への影響の可能性が示唆される。塩化物イオン濃度(図5)は、200mg/l以下であることが定められているが、県内の地下水は概ね基準を満たしている。会津地方において、200mg/lを超える地下水がいくつか確認されるが、これらの地域の井戸深度は150m以上と比較的深いことから、検出された塩化物イオンの起源は地表面からの浸透ではなく、むしろ過去の堆積環境に起因する地質的要因であると考えられる。また浜通り南部の沿岸域に見られる200mg/lを超える地下水は、井戸深度も浅い(50m未満)ことから、海水の侵入や地表から浸透した降水による海成堆積物からの洗い出しが要因として考えられる。硬度に関してはすべて300mg/l以下の基準値の範囲内に収まっている。蒸発残留物に関しては複数の地域で基準値である500mg/lを超える値が確認されたが、その原因が塩類にあるのか、有機物にあるのかは今回のデータからは判断できない。Feに関しては着色に関連する項目に区分されるが、多くの場所で基準値である0.3mg/lを超える値が確認された。要因としては、岩石に含まれる鉄分

の溶出などによる地質由来と、井戸に使用されている鉄管のサビなどが考えられる。今回の結果は、井戸深度や地方に関係なく検出されているため、今後、地下水を飲用として使用する際には、要因を適切に判断していく必要がある。

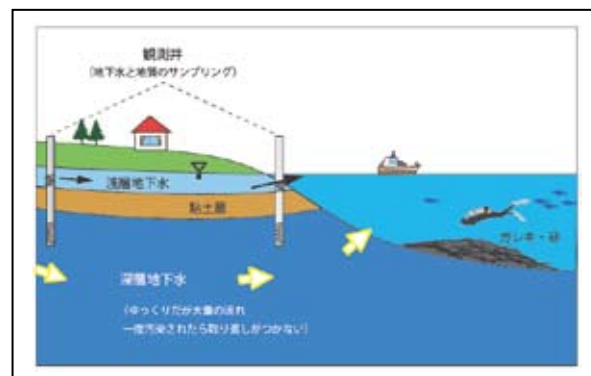


図8 地下水調査のイメージ：浅層地下水は汚染されている可能性が高いが東北地方では粘土層を介して汚染されない深層地下水が存在する 경우가多く、現状で利用できる地下水の範囲と将来的に利用できるタイミングを把握する

3. おわりに

震災直後、我々は被災地の水源(飲用水)確保のため、地下水流動解析を実施した。そのため、解析境界には行政界を採用した。しかし、現状では避難所も全てなくなり、本格的な復興が始まろうとしている。この段階では、地形情報に基づく流域単位の解析が必要になることは言うまでもない。今後は、借りに汚染されている地域があったとして、その汚染のピークはいつなのか？ピーク後に地下水は浄化されるのか？人工的に浄化しなければならない部分があるのか？などが問われてくる。政治学的・経済学的な判断で街を造ることも必要かもしれないが、今こそこれまで以上に地球科学的な判断を重視すべきと考える。

本研究を実施して以下のことが分かってきた。

1) 東北地方太平洋岸の堆積平野には地下の浅い部分に、ほとんどの場合において、粘土層がある。これは堆積環境が似通っていることに起因しているが、このため浅層地下水と深層地下水が分離されており、汚染の三次元的拡大を防いでいる。

2) 堆積平野において、地下水の流動量は大きく淡水は海に張り出している。東北地方全般に降水量が大きく、地下水流動は活発であり、淡水地下水は海底にまで流出し海洋下で湧出する。

参考文献

越谷賢・丸井敦尚(2011)：日本全国の地盤調査ボーリングデータを用いた地形・地質条件に基づく地下水面の推定：日本地下水学会誌53(2), 179-191

このほか各自治体等の出版したデータを利用しましたが、紙面の都合で割愛いたします

シェールガス鉱床の地化学的条件と我が国でのシェールガス鉱床の可能性 Geochemical conditions of Shale-Gas generation and its Potentials in Japan

鈴木祐一郎, 小田 浩 (燃料資源地質 RG)

Yuichiro Suzuki and Hiroshi Oda

Fuel Resources Geology R.G.,

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

1. はじめに

近年, 米国は天然ガス資源開発ラッシュに沸いている. シェールガスと呼ばれる非在来型の天然ガスの生産量が急速に増加し, 「シェールガス革命」と呼ばれている. シェールガスとは, 泥が海底などで堆積し, 地中深く埋没してできた硬い頁岩中の微少な孔隙や割れ目に貯留されているガスのことである. 2010 年には米国のガス生産量の 20%以上をシェールガスが占めることになった. カナダ, 豪州, 中国, ポーランドなどでも, シェールガスの探査, 開発の動きが盛んになってきている. 米国エネルギー統計局による, シェールガスの回収可能資源量予想は, 表 1 に示す.

地域	国	資源量 (Tcf)
北米	米国	862
	カナダ	388
	メキシコ	681
南米	アルゼンチン	774
	ブラジル	226
欧州	ポーランド	187
	フランス	180
アフリカ	アルジェリア	230
	リビア	290
	南アフリカ	485
アジア	中国	1,275
オセアニア	豪州	396

表 1 世界の主な国のシェールガスの技術的回収可能資源量 (米国 EIA より)

シェールガスは, 地下での圧力が弱いいため, ガス生産時に頁岩層から天然ガスを取り出す手法として, 地表から垂直の井戸を頁岩層まで掘削し, そこから坑井を頁岩層に沿って掘り (水平掘削), その坑井に対し, 地表から高圧の水を注入し, 頁岩中に圧力により多くの割れ目を発生させ, 天然ガスを回収する手法が取られる (水圧破砕法).

2. シェールガス鉱床の地化学的条件

2.1. 米国テキサス州の例

米国テキサス州・ニューメキシコ州に分布するバーネット頁岩層 (ミシシッピー系) のガス胚胎層は, 地表からの深度 3,048~6,400m に分布している. 有機物は主としてタイプ II の海生藻類を起源とするケロジェンである. ロックエバル分析では高熱熟成度のため, 水素指数 (HI) にはケロジェンタイプや元の炭化水素生成ポテンシャルが反映されていない. バーネット頁岩下部は, 上部よりも高い TOC の平均値を示す. バーネット頁岩下部の区間 D では平均 TOC 値が最も高く, 平均 4.40wt.%を示した. 熱熟成度が高いフォートワース堆積盆のバーネット頁岩のコアでは約 4.50wt.%を示す. ロックエバル分析の S1 (300℃) が増加し, S2 (300~600℃) が減少しているのは, 熟成度が高い炭化水素に典型的である. バーネット頁岩に含まれる有機物は, 主としてケロジェンタイプ II であり, 全有機炭素量 (TOC) は平均 4.40wt.%, 熟成度指標のビトリナイト反射率 (Ro) は最大 1.67% と高くなっている.

2.2. カナダの例

カナダ西部, 主としてブリティッシュコロンビア州に分布するベサリバー層, ホーンリバー層, ムスクワ層, フォートシンプソン層においてもシェールガスが産出している. ベサリバー層の頁岩は TOC が 0.9~5.7wt.%である. 下部黒色泥岩と上部黒色頁岩は, 中部頁岩 (TOC 1%以下) に比べて高い TOC 値を示す. 上位のマットソン層に挟在する頁岩は TOC 値が 0.2~1.5wt.%である. ムスクワ層の TOC 値は 0.4~3.7wt.%である. ベサリバー層に似て, 炭酸塩に富むムスクワ層の頁岩は低い TOC 値を示す. フォートシンプソン層は, TOC 値が 0.5wt.%以下で有機物に乏しいが, 地層境界付近では例外的に 2.4wt.%と有機物が濃集している. ロックエバル分析では, 有機物が石油生成帯を超えて分解したため, 顕著な S2 ピークが認められなかった. ビトリナイト反射率 (Ro) は 1.6~4.5 を

示している。地温勾配も $65^{\circ}\text{C}/\text{km}$ で、通常の古生界層の値 $30\sim 40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ に比べて高い。本地域では、最大層厚約 1km の高熟成度の頁岩層が存在し、TOC も最大 $5.7\text{wt.}\%$ でシェールガスポテンシャルは良好である。

以上のように米国とカナダの例では、シェールガス鉱床の地化学的条件は、頁岩層の層厚が数百メートル程度、TOC 値が少なくとも $4\sim 5\%$ 程度、熟成度 R_o 値は 1.6% 以上が必要である。

3. 我が国でのシェールガス鉱床の可能性

3.1.

堆積岩中の有機物からの天然ガスの発生を熟成度(ダイアジェネシス)の観点から考えると、図1に示されている2つの経路が考えられている。シェールガスが、比較的動きやすい気体状態で頁岩中に封じ込められている点、高熟成度の頁岩に限られる点を考慮すると、堆積岩でクロジェンから発生した微少な原油が、高い地圧下で熱分解してガス化した、高い封圧下で移動しなかったと考えるのが妥当である。このため、原油が分解してガス発生する熟成度、具体的にはビトリナイト反射率(R_o)が最低でも 1.2 程度以上あることが、熟成度の点での必要条件となる。

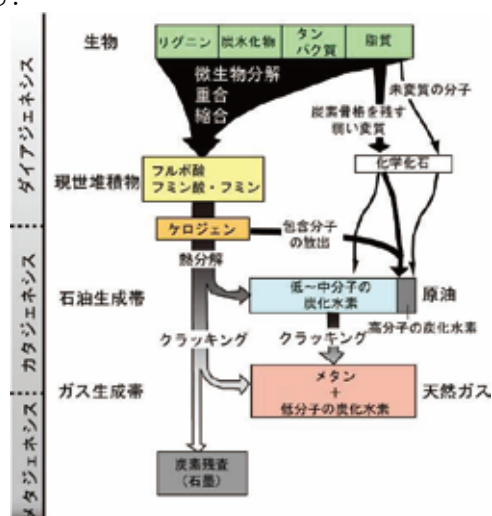


図1. 地中での有機物の変化についての概念図 (Tissot & Welte, 1978 より)

堆積した後に、比較的浅所で地層に小断層、割れ目が発達する付加帯堆積物でのシェールガス鉱床の発達は考えにくい。我が国で、付加帯堆積物以外が比較的大規模な堆積盆が残っている新潟堆積盆と古第三紀以降の堆積盆が、熟成度に注目しシェールガスの可能性を検討する。

3.2. 新潟堆積盆

新潟堆積盆の最大のガス田である南長岡・片貝ガス田での坑井の R_o プロファイル(図2)から、深度 4200m 付近で $R_o=1.2$ に達す。深度 4500m 付近の七谷層中のビジュアルクロジェン観察では、高い反射率を示し、紫外線蛍光を発する集合体がクロジェン中に多く含まれてい

るのが認められた。これは、石油の熱分解時に生じるパイロビチューメンに類する物質と考えられ、この付近の深度で原油の熱分解が起きていることが示唆される。

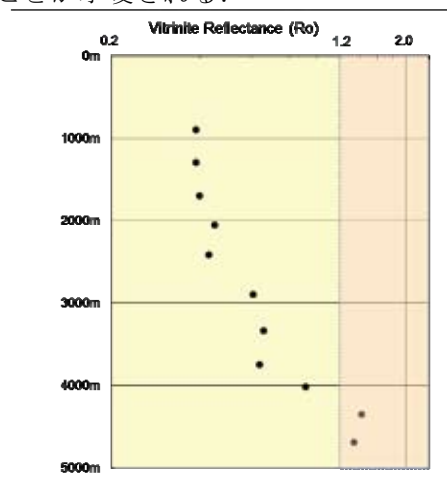


図2 南長岡・片貝ガス田付近の坑井での R_o の深度プロファイル

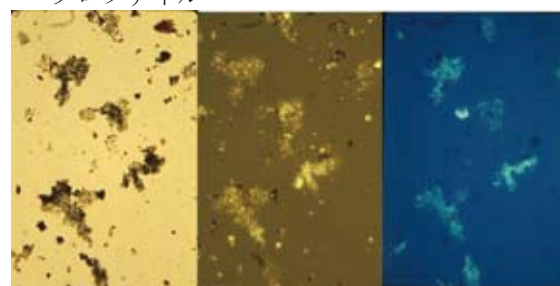


図3 図2の坑井の深度 4500m 付近のクロジェン(左:透過光, 中央:反射光, 右:紫外線2次蛍光)

新潟堆積盆では 4300m 以深の、たとえば七谷層などに TOC が高い泥岩が存在すれば、シェールガスが生じている可能性がある。

3.3. 北海道中軸部の堆積盆

北海道の中軸部には、石狩層群で代表される古第三系から成る堆積盆と、その上位に重なる深海成タービダイトや珪藻質泥岩からなる新第三系が分布する。新第三系で R_o が 1.0 以上に達する熟成を示す報告はない。古第三系は、夾炭層を中心にした地層である。過去に採掘された炭層の熟成度は、最大でも南大夕張炭鉱の $R_o=0.95$ 程度である。しかし、基礎試錐「夕張」の 3000m 以深では、 $R_o=2.0$ 以上の石炭が見いだされている。また、空知地域のイルムケップ山東方の新城峠付近でおこなわれた試錐では R_o が $1.5\sim 6.0$ の石炭が採取されている。試錐ではイルムケップ火山起源の閃緑岩が確認されており、局所的に火山等の熱で熟成度の進んだ地域が存在している可能性はある。

石狩層群の石炭は、元素分析から高い水素含有量を示し、その原因は微少なリプチナイトの集合体であるデグラディナイトの存在が原因である。これが、頁岩中に分散してれば、シェールガスの起源となる可能性がある。

(紙面の関係上参考文献省略)

コンクリートの乾燥収縮—地質学の立場からの考察 Drying Shrinkage of Concrete - A Consideration based on geology.

須藤定久（地圏化学 RG）
Sadahisa Sudo (Resources Geochemistry RG)

1. はじめに

近年、建築学会の基準設定により、コンクリートの乾燥収縮は850マイクロ以下への抑制が求められている。コンクリートの乾燥収縮の原因は十分に解明されているとは言えないが、骨材に使用される岩石種や骨材産地によって、差があることがわかってきた。この事実は、コンクリートの乾燥収縮を考える上で、岩石種や骨材産地についての地質学的、岩石・鉱物学的見地からの考察が必要であり、重要なものであることを示している。従来、行われてこなかった地質学的、岩石・鉱物学的見地からのコンクリートの乾燥収縮についての考察を試みてきた。

2. 地質・鉱物学から考えた乾燥収縮の原因

筆者は、試験データの地質・鉱物学的な立場からの解釈を基に、乾燥収縮は主に、①セメントの固結に伴う収縮、②骨材の微細亀裂に起因する収縮、③骨材中の粘土鉱物の収縮に起因する収縮、からなると考えた（第1図）。

ここで②骨材の微細亀裂に起因する収縮とは、吸水拡張した骨材中の微細な割れ目が、乾燥と共に水を失って割れ目が閉じることによって収縮し、コンクリートの収縮を助長するために生じるもので、どのような骨材にも広く見られる現象である。一方③骨材中の粘土鉱物の収縮に起因する収縮とは、膨潤性のある粘土鉱物が含まれる骨材では、含水して膨潤した粘土鉱物が乾燥とともに水を失って収縮して骨材を収縮させ、コンクリートの収縮を助長するために生じるもので、異常な乾燥収縮をもたらす最大の原因であると考えた。

3. 示された全生連の試験結果

平成20-22年度には、全国生コンクリート工業組合連合会（全生連）によって、約2300余の試験データが収集・解析され、岩種別・地域別の統計結果が示され、次のような点が明らかとなった。

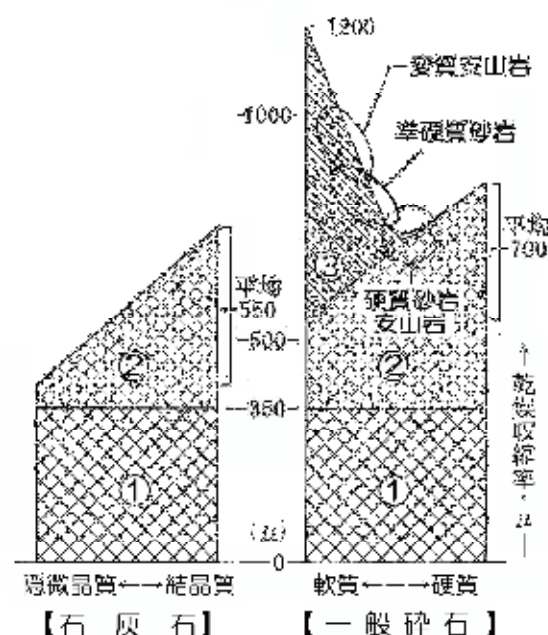


図1. 乾燥収縮のモデル. ①はセメントの固結に伴う収縮、②は骨材の微細亀裂に起因する収縮、③は粘土鉱物の収縮に起因する収縮。

①一般岩石に比べ、石灰岩を使用したコンクリートでは、著しく乾燥収縮が小さい（図2）。

②一般岩石の中では、砂岩や安山岩の一部に大きな乾燥収縮を示すものが見られる（図2）。

③地域的に見ると近畿南部から四国・南九州地区で、大きな乾燥収縮を示すものが見られる。

4. 統計結果の解釈

このような試験データの統計結果を、地質学・鉱物学的見地から考察すると、岩種別・地域別の集計結果は次のように解釈される。

「岩種別集計結果から」

①石灰石では、粘土鉱物が含まれないので、粘土鉱物の収縮に起因する収縮が無い場合、乾燥収縮は小さくなる。さらに、微細亀裂が発生しにくい隠微晶質石灰岩が骨材用に使用されているために、より乾燥収縮が低くなっている

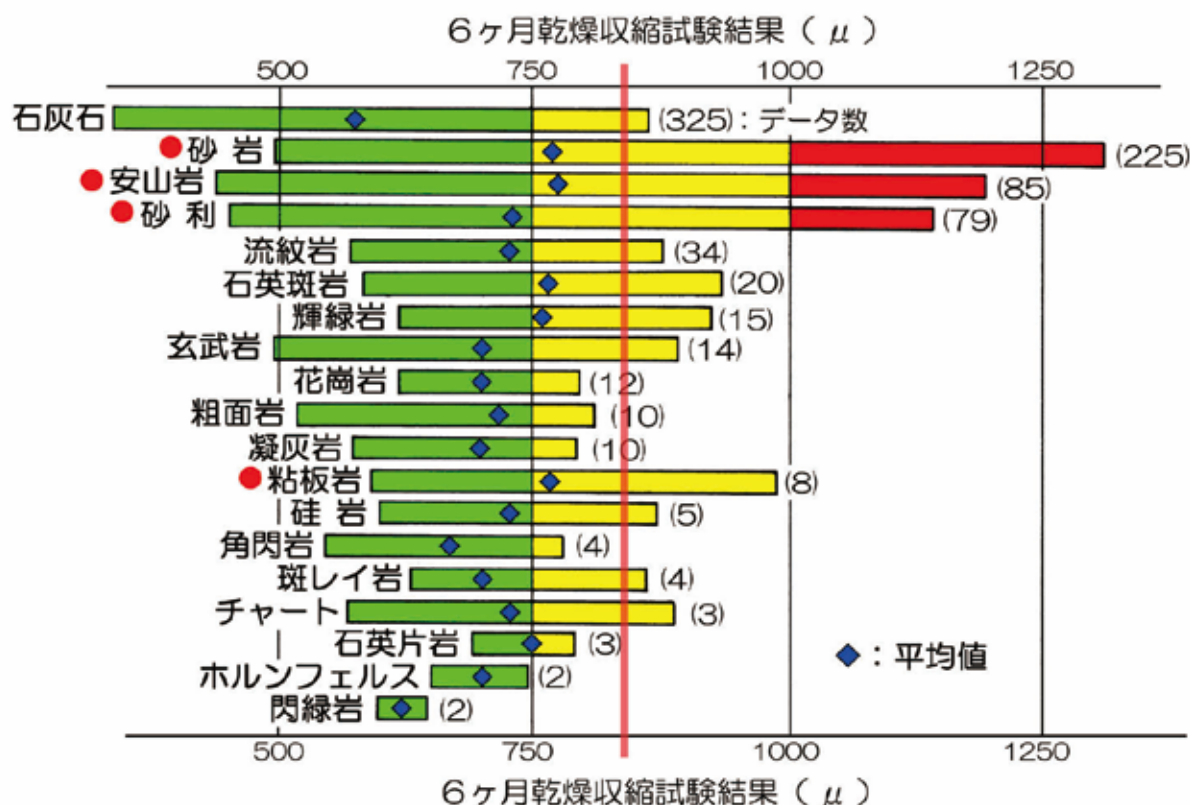


図2 仕様骨材の岩種別の乾燥収縮（全生連の資料を基に作成）．試験値の分布範囲と平均値を示す．基準値を縦の赤線で表示した．非常に大きな乾燥収縮値を示す岩種は、砂岩・安山岩・砂利・粘板岩など（赤丸を付した）である．石灰石の値に注意．

考えられる．

②固結が不十分な白亜紀以降に形成された砂岩や変質作用を受けた安山岩類では、含有されるハロイサイト類やスメクタイト類の収縮により、乾燥収縮が著しく大きくなることがあると推定される（2図）．

「地域別集計結果から」

①固結が不十分な白亜紀以降に形成された砂岩が分布する西南日本外帯や和泉砂岩層の分布域で、乾燥収縮が大きい傾向がある．これは、固結がやや不十分な砂岩・頁岩中の粘土鉱物（主にハロイサイト）の収縮に起因する収縮が大きいことに起因すると考えられる．

②グリーン・タフ地域に、乾燥収縮が高めな地域が見られが、これは変質安山岩に起因すると思われる．変質作用によって形成された粘土鉱物（主にスメクタイト）の収縮に起因する収縮が大きいことに起因すると考えられる．

5. 乾燥収縮の抑制のために

砕石の乾燥収縮の抑制には、次のような方策が考えられる．

（1）砂岩・頁岩では、砂岩に比べて、頁岩の方が乾燥収縮が大きいので、採掘・破碎工程で、頁岩の混入を避けることにより乾燥収縮の低下が期待される．

（2）安山岩類では、砕石場において変質部を的確に把握し、これをよけて採掘することによって、乾燥収縮が低下することが期待される．

それでも改善されない場合には、

（3）乾燥収縮低減効果の大きい石灰石を混合使用することが必要であろう．

文 献

須藤定久（2010）岩石鉱物から見たコンクリートの乾燥収縮（その1～3）、骨材資源、V.42, No.165-166, P.16-24, P.80-87, P.88-92.

須藤定久（2011）コンクリートの乾燥収縮を考えるー全生連の試験値（岩石種・地区別集計）からー、骨材資源、V.43, No.169, 8-18

東日本大震災による砕石場の被害－茨城県を例に Dameges of Quarries in Ibaraki Prefecture, by the Great Higashi-Nippon Earthquake.

須藤定久（地図化学 RG）
Sadahisa Sudo (Resources Geochemistry RG)

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれによって発生した津波や余震により岩手県から茨城県付近の太平洋岸を中心に大規模な地震災害「東日本大震災」が発生した。戦後巨大化した砕石場が初めて大きな揺れにさらされた。

今回の地震の特徴は震域が非常に広がったこと、震動が長時間継続したこと、震動の周期が極短かったことなどが指摘されている。

この揺れの中で、砕石場に何が起こったのだろうか？2011 年 6 月に行われた茨城県砕石事業協同組合の安全点検に同行し、砕石場の被害状況を検証した。詳細は同組合から報告されるので、概要のみ速報する。

2 地震による震度分布と砕石場

東北地方太平洋沖地震による震度は気象庁の観測によれば、岩手県から茨城県付近の太平洋岸を中心に広い範囲で震度 6 以上に達し、各種建造物にも大きな被害が発生した。茨城県でも平野や台地の広い範囲で震度 6 以上に達した。一方、砕石場が立地する阿武隈山地南部・八溝山から鶏足山地を経て筑波山に至る山地では、ゆれは比較的弱く、概ね震度 5 程度、久慈川中流部では震度 4 程度であったと推定されている（図 1）。

3. 砕石場の被害例

茨城県下の 16 砕石場について被害状況を観

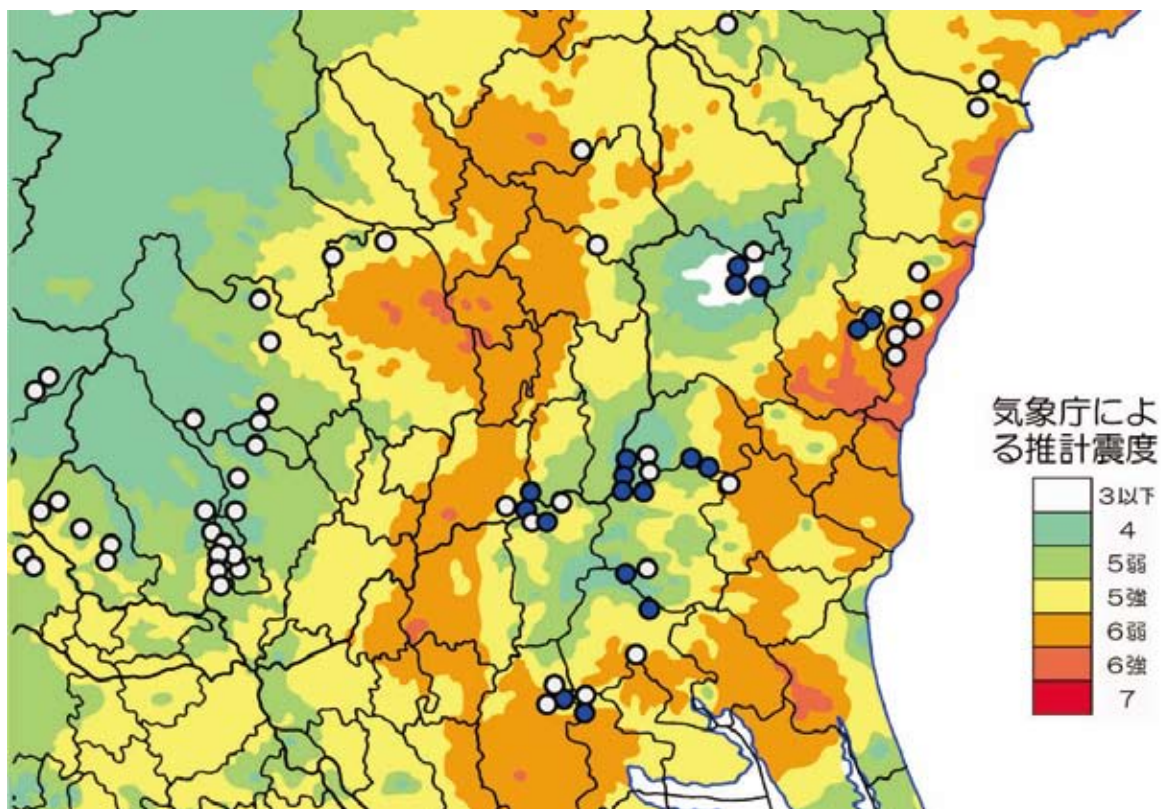


図 1 茨城県の震度分布と砕石場の分布。震度分布は気象庁発表資料を簡略化。丸印は砕石場・鉾山など。観察した砕石場・鉾山は青で表示（本報告を含め 18 ヶ所）。

察することができた。この結果、地震によるゆれが平野部に比べて比較的弱かったためか、碎石場には地震による大きな被害は認められなかった。しかし、小規模ながら崩壊や崩落が特徴的に発生しており、今後、地震に対する安全対策を考える上で、多くのヒントが得られた。

小規模な崩壊・崩落が起こったのは、①地震波を背に受ける北東側斜面、②風化しかけた古い採掘跡であった。北東側斜面では、崩壊・崩落に至らない場合でも、浮き石の発生等が見られるが、北東側斜面以外では目立った損傷は見られなかった。比較的新しい残壁・採掘壁の損傷は軽微で、落石が生じた？と思われる部分でも、各段の平坦部で、停止しており、安全は確保されていたようだ。

また、地震では崩壊を免れたものの、続いて発生した余震によって、崩壊した例も見られた。

今回の地震による被害が小さくて済んだのは、地震動の震動周期が短く、大きな構造物には影響が出にくかったことや茨城県では採掘壁・残壁の角度が国の基準より厳しくなっていること等の理由によるものと考えられる。

4. 今回の被害から学ぶもの

①今回見られた被害の多くは、戦後間もない頃に行われた古くベンチが設けられていない「古い採掘跡」で発生した。「古い採掘跡の管

理と解消」が大きな課題であることが浮き彫りとなった。

②緊急に点検を：大地震の発生が考えられる地域の碎石場では、古い採掘跡が崩壊しても、プラントや運搬路に被害が出ないかを、緊急に点検し、対策を講じる必要がある。小規模でも崩壊や崩落が発生すると、引き続く余震のために安全が確保できず、簡単に復旧できない可能性がある。

5. その他の注目される事項

碎石場における今回の被災体験には、今後の防災対策を考える上で興味深い点があり、多々あった。主なものは、

①ガソリン不足：重機類の重油に比べ、ガソリンが入手困難となった。従業員の出勤に、ひいては安全点検や復旧作業に大きな影響が出た。

②プラント関係：軽微な損傷・故障が起こっても、容易に修理してもらえない。古い部品を各社で保存し、災害時に融通することが必要。

③緊急需要：鉄道の復旧に鉄道路床用碎石に緊急需要が発生した。

④社会貢献：自家水源と散水車により、病院へ人工透析用の水を供給し、大きな社会貢献ができた。

今回の経験が活かされ、碎石場の安全性が向上することが期待される。



参考：画像による崩壊のチェック例

ほぼ同じ位置から撮影された震災前（上）と震災後（下）の画像を比較すると、崩壊した部分（下向き矢印）や、崩落物の堆積状況（上向き矢印）が良く理解された。復旧時の危険性の評価にも有用な情報である。

Green Report

2010

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

Institute for Geo-Resources and Environment (GREEN)
7 December 2010