

# GSJ 地質ニュース

GSJ CHISHITSU NEWS

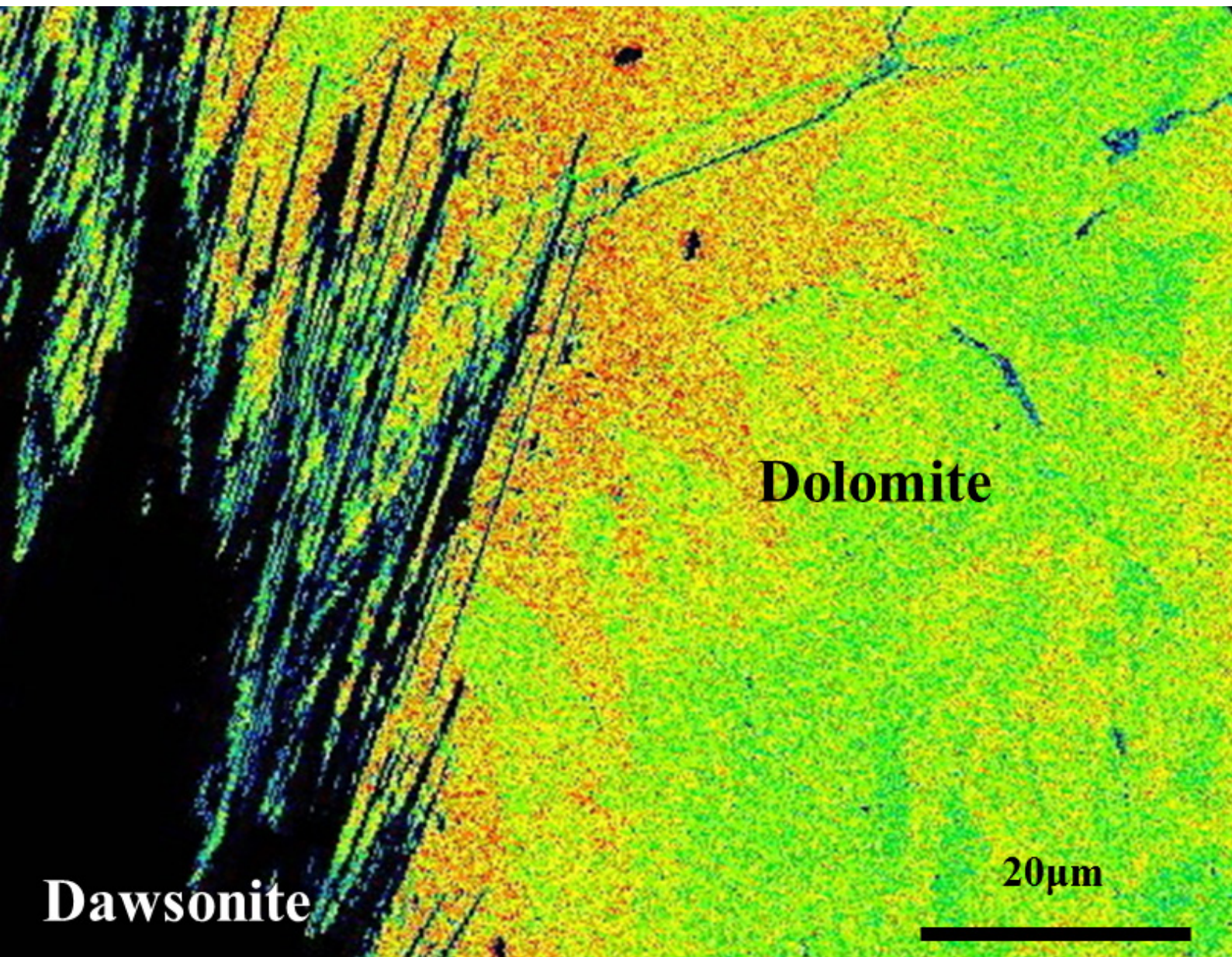
～地球をよく知り、地球と共生する～

2014

5

Vol. 3 No.5

特集：CO<sub>2</sub> 地中貯留



Dawsonite

Dolomite

20μm

口絵

テキサス州ファーンズワース CO <sub>2</sub> 地中貯留調査サイトでの超伝導重力計の導入 杉原光彦・名和一成・相馬宣和・石戸経士・西 祐司	129~132
--------------------------------------------------------------------------------	---------

**特集：CO<sub>2</sub> 地中貯留**

CO <sub>2</sub> 地中貯留技術の概要と産総研での取り組み	中尾信典・當舎利行・西 祐司	133~136
CO <sub>2</sub> 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司		137~142
ポストプロセッサによる地球物理観測量の変動予測	石戸経士・杉原光彦・西 祐司	143~148
CO <sub>2</sub> 地中貯留での地盤変化を予測するー岩石力学ー流体流動シミュレーション研究ー 奥山康子・船津貴弘・藤井孝志		149~152
CO <sub>2</sub> 地中貯留における砂岩泥岩互層の遮蔽性能評価 徂徠正夫・佐々木宗建・藤井孝志・加野友紀・上原真一		153~156

誕生石の鉱物科学 — 5月 ひすい —	奥山康子	157~158
---------------------	------	---------

● ニュースレター

2013 年度第 2 四半期 (7 月~9 月) の地質相談報告	下川浩一	159~160
地域地質研究報告「京都東南部」地域の地質 (5 万分の 1 地質図幅) について	脇田浩二	160

**表紙説明**

**CO<sub>2</sub> 鉱物固定のナチュラル・アナログにあたる鉱物脈**

CO<sub>2</sub> 地中貯留では極めて長時間経過後には、貯留した CO<sub>2</sub> が貯留層内での地化学反応によって炭酸塩鉱物になると考えられている (鉱物固定)。表紙の画像は、ドーソン石 (Dawsonite, NaAl(CO<sub>3</sub>)(OH)<sub>2</sub>) と不定比ドロマイト (Dolomite, (Ca,Mg)<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) から成る鉱物脈。ドーソン石は希産鉱物で、鉱物固定に向けた反応で沈殿する可能性があると考えられるが、鉱物固定の実体としてはこの画像のドロマイトなど、産出が普遍的な炭酸塩鉱物の寄与が大きいとみられる。群馬県藤岡市日比野産。反射電子像を画像処理。  
(写真・文：奥山康子<sup>1)</sup> 1) 産総研 地圏資源環境研究部門)

**Cover Page**

Dawsonite-dolomite vein as a possible natural analogue of CO<sub>2</sub> mineral trapping, Fujioka, Gunma Prefecture. (SEM photograph and caption by Yasuko Okuyama)

# テキサス州ファーンズワース CO<sub>2</sub> 地中貯留調査サイトでの超伝導重力計の導入

<杉原光彦<sup>1)</sup>・名和一成<sup>2)</sup>・相馬宣和<sup>3)</sup>・石戸経士<sup>1)</sup>・西 祐司<sup>1)</sup>>

テキサス州ファーンズワースCO<sub>2</sub>地中貯留調査サイトで重力モニタリングを開始した。極めて高感度な超伝導重力計による連続測定を中心に、絶対重力計と可搬型重力計による繰り返し測定も併用する。超伝導重力計は1970年代から各地の測地研究所等で潮汐・自由振動や地球深部ダイナミクス研究の目的で長期間の重力変動観測に使用されてきたが、最近、小型機が開発されて用途の広がりが期待されている。このCO<sub>2</sub>地中貯留調査サイトへの導入は、貯水システムのモニタリング実験に次ぐ実用分野への適用事例となる。



第1図 調査地ファーンズワースはテキサス州北端部にある。北米南西部7州炭素隔離パートナーシップ SWP の調査サイトがある。



写真1 ファーンズワースではCO<sub>2</sub>注入による石油生産増産効果も狙う実証試験が行われる。石油井が点在する調査サイトに重力計測小屋 iHut を設置した。地形は極めて平坦で、起伏のない地平線から朝日が昇る。

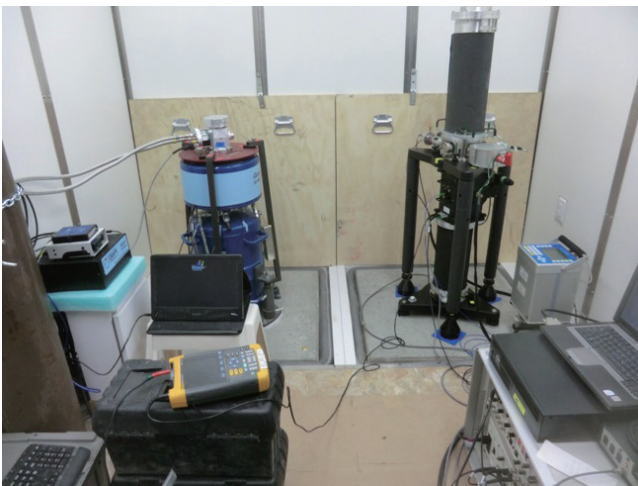


写真2 重力計測小屋内には辺長約1mの計測用基台が2つ隣接して設けられている。左の基台で超伝導重力計 iGrav による連続計測が行われ、右の基台では絶対重力計 FG5 による計測が繰り返し行われる。その右下には可搬型相対重力計 CG5 が待機状態。

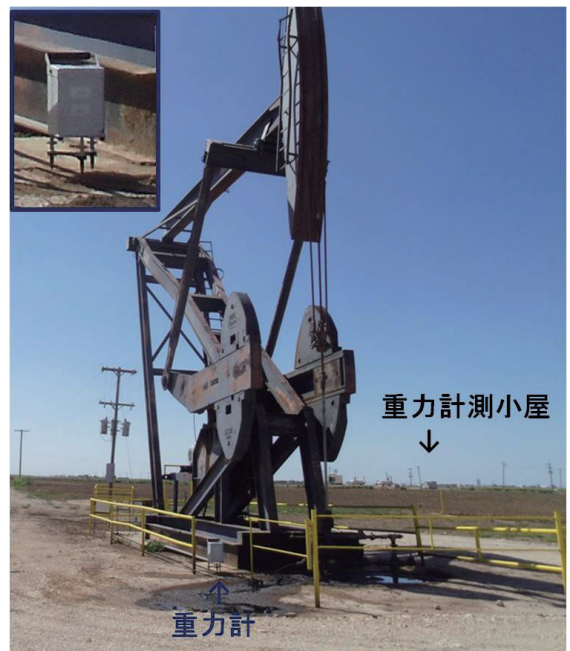
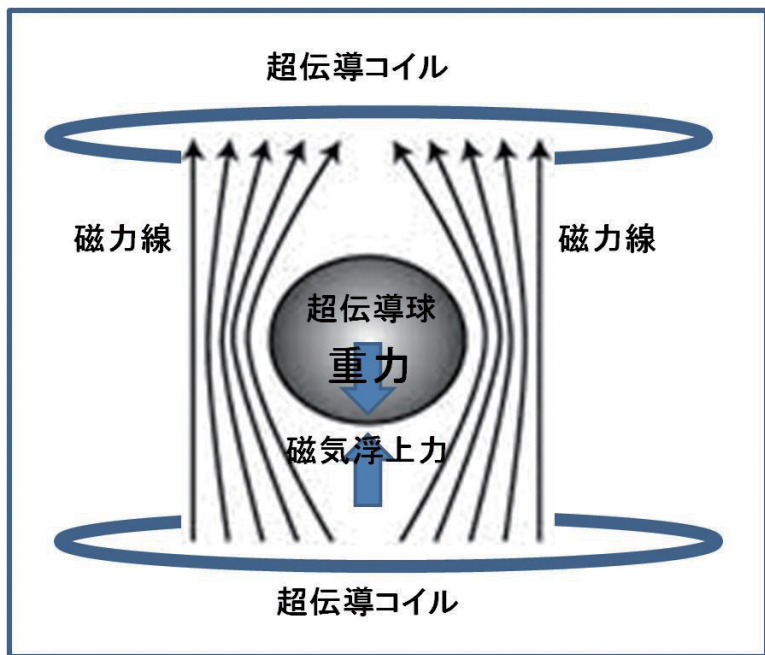


写真3 ポンプジャックが設置された石油生産井。重力計測小屋周辺で可搬型重力計による巡回測定を行う。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門  
2) 産総研 地質情報研究部門  
3) 産総研 再生可能エネルギー研究センター

SUGIHARA Mituhiko, NAWA Kazunari, SOMA Nobukazu, ISHIDO Tsuneo and NISHI Yuji (2014) Installation of superconducting gravimeter at the Farnsworth field, Texas CO<sub>2</sub> sequestration site.



第2図 超伝導重力計センサーユニットの原理。超伝導コイルを流れる永久電流が作る磁場内に置かれた超伝導球内部には磁場が浸透しない。球に働く磁気浮上力を重力とつりあわせて浮いた状態に保つことができる。永久電流が極めて安定であること、極低温状態の安定性と低ノイズのために極めて安定で高感度な相対重力計となる。



写真4 超伝導重力計 iGrav 本体部分と併置された気圧計。センサーユニットは本体下部の液体ヘリウム容器内に設置されている。冷凍機は絶対温度 4 K を実現する。



写真5 超伝導重力計 iGrav 一式。制御は本体上部円筒内に組み込まれた基板と小型制御ボックスとノート PC で行われる。リモート制御も可能。本体冷凍機は冷凍用圧縮機に接続している。ヘリウム気化温度以下（絶対温度 4 K）の冷凍機能により正常動作中のヘリウム供給は不要。ヘリウムガスポンペはメンテナンス用である。



写真6 超伝導重力計 iGrav 本体上部から冷凍機（コールドヘッド）を引き出した状態。

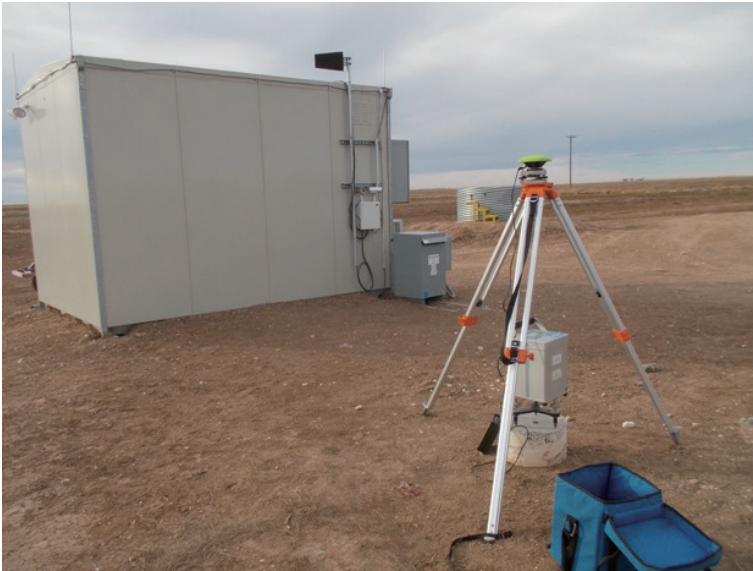


写真7 重力計測小屋に隣接して円柱形の基台を設置し、可搬型相対重力計で巡回測定する際の基点としている。基台中心の測量標を基準としてGPS計測も行ふ。



写真8 現場から北東方向約 30 km にある GPS 連続計測施設。5 秒サンプルデータが公表されている。

写真9 重力計測小屋の中の重力計測基台と屋外 GPS 点の高度差はレーザーレベルを利用して計測する。重力計測小屋のドアを開けた時に屋内基台と屋外基台を同時に見通せる地点にレーザーレベルを設置して受光器を付けた標尺で基台の高度差を計測する。現場は冬季には降雪がある。

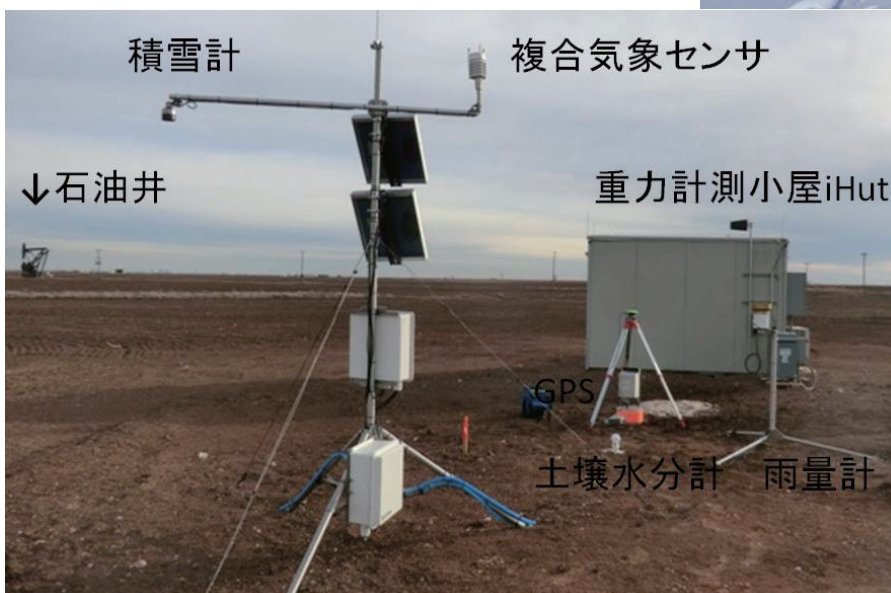
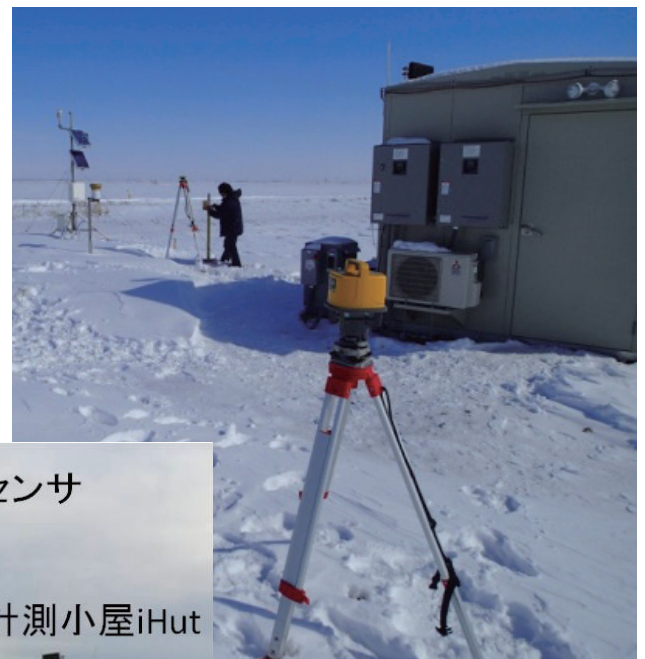


写真10 重力計測小屋近傍には気象観測装置を設置している。気圧、温度、湿度、雨量、積雪量、風向、風速に加え、土壌水分量と地温も連続計測している。



写真 11 重力計測用基台設置工事。辺長約 1 m の立方体上の鉄筋入りコンクリート台を 2 つ併設した。1 m 深掘削し、木枠を 2 つ設置し、あらかじめ組んだ鉄筋を置く。その後、コンクリートを流し込んで表面を整形した。同時に計測小屋外部に設置する円柱基台と竜巻対策として小屋自体を固定する円柱も設置した。



写真 12 重力計測小屋は別の調査候補地点に設置していたものを移設した。重力計測小屋自体の可搬性を確認できた。1 回の給油で 1 か月連続運転可能な自家発電システムも一緒に移設した。



写真 13 2 台の発電機の自動切替で使用する自家発電システム。このタンクで 1 か月連続運転可能。ファーンズワースでは予備電源として使用されている。



写真 14 重力観測小屋付近に現れた野ウサギ。小屋の床下に棲みつけた可能性があり動向を監視中。

# CO<sub>2</sub> 地中貯留技術の概要と産総研での取り組み

中尾信典<sup>1)</sup>・當舍利行<sup>2)</sup>・西 祐司<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon-dioxide Capture and Storage）は、火力発電所や製鉄所などの大規模な排出源から二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を分離回収し、地下または海洋に長期間にわたり貯留・隔離することで、大気中に排出されるCO<sub>2</sub>の量を削減し、気候変動を抑制しようとする技術です。

温室効果ガスの排出は、一つの技術のみで大幅に削減できるものではなく、再生可能エネルギーの普及や、省エネルギーの一層の促進など、多様な技術を組み合わせて対応していくことが気候変動対策として重要です。その中でCCSは、化石燃料の使用にある程度依存する必要があるとする今後の中長期的なエネルギー展望の中で、化石燃料に依存したエネルギー消費社会から低炭素社会への脱却を図るまでの過渡的な段階において、CO<sub>2</sub>を即効的に削減可能な技術として最近注目されている技術の一つです。

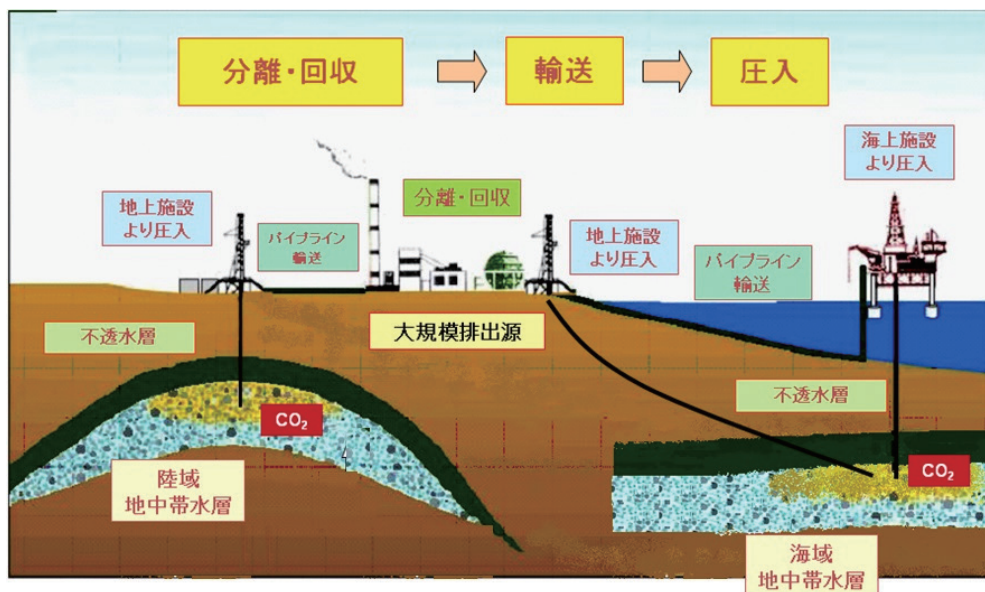
少し前になりますが、2008年7月に行われた洞爺湖サミットの首脳宣言において、「我々は、2020年までにCCSの広範な展開を始めるために、各国毎の様々な事情を考慮

しつつ、2010年までに世界的に20の大規模なCCSの実証プロジェクトが開始されることを、強く支持する。」ことが、明記されました。国際的にも気候変動対策の一つとしてCCSに重点を置く方向性が打ち出されています。また、2012年6月に、政府のエネルギー・環境会議が取りまとめた「エネルギー・環境に関する選択肢」の3つのシナリオ（原子力発電の比率を2030年までに0%、15%、20~25%程度に下げるというシナリオ）のいずれにおいても、2030年時点での化石燃料の依存度は50~65%と想定されています。このように、しばらく化石燃料に依存したエネルギー消費社会が続く限りは、CO<sub>2</sub>を即効的に削減可能なCCS技術の早期導入・普及が不可欠と考えられます。

本稿では、「CO<sub>2</sub>地中貯留」小特集の導入として、CCSのしくみ、CCSのうちCO<sub>2</sub>地中貯留技術に関して、現状と課題、国内外の動向、産総研の研究取り組みなどを紹介します。

## 2. CCSとは

CCSとは、人為的大規模排出源からCO<sub>2</sub>を分離回収し、



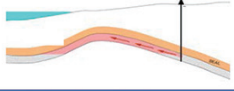
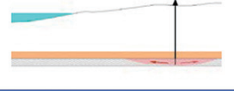
第1図 二酸化炭素回収・貯留（CCS）の一連の流れと仕組み（経済産業省，2007より）

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

2) 産総研 地圏資源環境研究部門（現 石油天然ガス・金属鉱物資源機構）

キーワード：CO<sub>2</sub>地中貯留，気候変動対策，モニタリング，モデリング，安全性評価

第1表 国内深部帯水層のカテゴリー分類と貯留ポテンシャル（経済産業省，2007より）。

地質データ		カテゴリーA 構造性帯水層	カテゴリーB 非構造性帯水層
油ガス田	坑井・震探 データが豊富	A1 35億t-CO <sub>2</sub>	B1 275億t-CO <sub>2</sub>
基礎試錐	坑井・震探 データあり	A2 52億t-CO <sub>2</sub>	
基礎物探	坑井データなし、 震探データあり	A3 214億t-CO <sub>2</sub>	B2 885億t-CO <sub>2</sub>
貯留概念図			
小計		301億t-CO <sub>2</sub>	1,160億t-CO <sub>2</sub>
合計		1,461億t-CO <sub>2</sub>	
(参考)実施状況		Weyburn(カナダ)等 長岡岩野原(日本)	Sleipner(ノルウェー)等

地下または海洋に長期間にわたり貯留・隔離する技術であり、第1図に示すように、分離回収、輸送、貯留の3つのプロセスから構成されます（経済産業省，2007）。CO<sub>2</sub>の分離回収には、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法などが、輸送方法には、パイプライン、船舶、車両などがあります。貯留には、地中貯留と海洋隔離があります：地中貯留には、帯水層貯留、石油増進回収（EOR：Enhanced Oil Recovery）・ガス増進回収（EGR：Enhanced Gas Recovery）、枯渇油・ガス層貯留および炭層固定が、海洋隔離には、溶解希釈方法と深海底貯留隔離があります。海洋隔離は、海洋に囲まれた日本にとっては長期的観点から重要なCO<sub>2</sub>貯留・隔離方法ですが、国際的に実施するための環境がまだ整っていない状況です。日本におけるCO<sub>2</sub>地中貯留を想定した場合、深部帯水層（塩水を間隙に保持している地層）への貯留が大きな貯留ポテンシャル（貯留可能容量）を有しており、有望と考えられています。しかし、一定程度の経済メリットのある省エネルギー技術などと異なり、また、CCSの同類で経済的インセンティブが働くEORとは異なり、CCSは単独ではインセンティブが働かない温暖化対策に特化した方策です。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）がCCSに関する特別報告書を2005年に発表して以来（IPCC，2005）、二酸化炭素の回収・貯留技術をCCSと呼称することが定着し、気候変動対策の手法として脚光を浴びるようになりました。ただし、CCSの各プロセスは以前から研究がされていたものであり、それらの既存技術を気候変動対策として組み合わせたのがCCSであるといえます。分離回収技術については都市ガスの生産用に60年ほど前に関連手法が開発され、それ以降様々な手法が研究されています。1980年代には、気候変動対策として発電所からのCO<sub>2</sub>分離回収

の適用が初めて議論されています（Horn and Steinberg, 1982）。地中への圧入・貯留については、石油・ガスの探査・生産と同様の掘削技術などが応用可能であり、EORを目的としたCO<sub>2</sub>圧入が1970年代から実施されています（Blunt *et al.*, 1993）。さらに、塩水帯水層（Koide *et al.*, 1992）、石炭層（Gunter *et al.*, 1997）への貯留が、貯留概念の発展系として提唱されてきました。

では、CCSにより、どの程度のCO<sub>2</sub>排出量の削減が可能となるのでしょうか。IPCCのCCS特別報告書によると、地中貯留によるCCSだけでも約2兆トンの貯留ポテンシャル（貯留可能容量）が見込まれており（IPCC，2005）、これは現在の世界全体のCO<sub>2</sub>排出量の約80年分に相当します。一方、日本での貯留ポテンシャルは第1表に示す通り、地球環境産業技術研究機構（RITE）の調査によると、約1461億トンと算出されています（経済産業省，2007）。我が国の温室効果ガスの総排出量は2010年度に12億5800万トンであり、我が国周辺にも十分な地中貯留量が見込まれます。

また、国際エネルギー機関（IEA）が公表した「エネルギー技術展望2012」では、2050年のCO<sub>2</sub>累積削減量の最大20%をCCSにより達成する、という青写真が描かれています。このように、CCSには非常に高い評価と期待が寄せられています。しかし約20%削減を担うためには、現在商用ベースで稼働している北海・スライプナーのCO<sub>2</sub>年間貯留量と同規模の地中貯留プロジェクトが、2050年に世界で数千ヶ所必要となります（世界排出量の約4%に当たる日本では、100ヶ所オーダーに相当）。これは非常にチャレンジングな目標であるとともに、このスケールを意識した上で、一日も早い実用化に向けたRD&D（研究・開発・実証）を加速させる必要があります。



第2表 海外における主な CCS 関連プロジェクト.

	ノルウェー スライプナー	ノルウェー スノービット	カナダ ウェイバーン	アルジェリア インサラ
実施主体	Statoil社	Statoil社	Encana社	BP社+Statoil社
場所	ガス田上の 帯水層	ガス田上の 帯水層	油層(EOR)	ガス田
	海域	海域	陸域	陸域
開始時期	1996年10月	2008年4月	2000年9月	2004年7月
注入レート (国内総排出量比)	100万トン/年 (2.9%)	70万トン/年 (2.3%)	100万トン/年 (0.2%)	120万トン/年 (1.7%) 2012年11月中止
総量	1700万トン	4000万トン	2000万トン	1700万トン
CO <sub>2</sub> 源	天然ガス随伴	天然ガス随伴	石炭ガス化炉	天然ガス随伴

### 3. 貯留技術の国内外動向

CO<sub>2</sub>は常温常圧では気体の状態にあり体積が大きいため、地下への圧入には向きません。そこで、気体と液体の区別がなくなる超臨界状態（圧力7.38 MPa以上、温度31.1℃以上）にして体積を小さく、かつ粘性が低い状態にして坑井を通して地下に圧入する必要があります。深度的には超臨界状態を保持できる圧力・温度となる深度800 mよりも深い地層まで坑井を掘削して貯留用のターゲットとします。

海外で実際に稼働している大規模なCCS関連プロジェクトは、2013年10月10日時点で12か所あり、2015年までに稼働予定のプロジェクトも同程度あります（Global CCS institute, 2014；以後GCCSIと略す）。12の稼働中のプロジェクトのうち、主なものを記します（第2表）。EORではない海域のプロジェクトとして一番古いのは、1996年から稼働している北海のスライプナー天然ガス田です。スライプナーでは、天然ガスに伴って産出される9%程度のCO<sub>2</sub>を分離して、海底下約800 mから1,000 mの深さにある地層へ圧入する事業が行われています。CO<sub>2</sub>貯留量は年間100万トン規模であり、貯留したCO<sub>2</sub>の挙動を把握するため、弾性波探査（反射法）を利用したモニタリング（監視）ならびに海底重力計による重力モニタリングが行われています。カナダのウェイバーン（陸域）ではEORを主体とした圧入および弾性波探査によるモニタリングが実施されています。アルジェリアのインサラでは年間120万トンが圧入されていましたが、2011年6月から操業が停止されています。

上述の稼働中12か所以外にも、CCS関連プロジェクトはEOR、EGR関連のプロジェクトだけでなく、帯水層を

貯留場としたプロジェクトも含めて先進国を中心に53か所ほど計画されています（GCCSI, 2014）。しかし最近では、米国をはじめとして、経済的なインセンティブが働くEOR関連のプロジェクトにシフトする傾向が見られます。一方、2011年10月にはISO（国際標準化機構）のTC265専門委員会が設立され、CCSの国際標準化に向けた検討が進められています。

我が国では、新潟県長岡市の帝国石油岩野原サイトにおいてRITEにより基礎的な圧入実験が行われました。2003年2月より2005年1月までの間で総量約1万トンのCO<sub>2</sub>が圧入され、弾性波を用いたモニタリング手法である坑井間トモグラフィなどにより貯留帯水層内にCO<sub>2</sub>が漏洩することなく留まっていることが確認されています（薛・松岡, 2008）。このような石油ガス田の付随する地層は、構造的にCO<sub>2</sub>貯留に適していると考えられており、通常、石油ガスが採取された後の地層は塩水地下水に満たされていることから構造的帯水層と呼ばれています（第1表参照）。

一方、CCSの適用対象として考えられている火力発電所などの大規模排出源から貯留場所が近ければ近いほど、輸送に必要なコストの低減が可能となります。現在、我が国の多くの大規模排出源は大都市周辺に立地しており、構造的帯水層が確認されている地域からは離れた地域にあります。このような大規模排出源が立地する大都市の多くは海岸沿いの平野部にあり、その地下には比較的単純な構造で、長期間にわたって停滞して水資源として利用できない地下水（塩水）に満たされた地層が存在しています。このような非構造的帯水層（第1表）についても、今後は地中貯留のターゲットとして技術的な検討をする必要があると考えられます。

国内のCCS進捗状況としては、経済産業省が2012年2

月に北海道苫小牧地点において実証試験を実施することを決定し、委託先の日本CCS調査株式会社が2012年から設計・建設等に着手、2016年にはCO<sub>2</sub>地中貯留が開始される見込みとなっています。

#### 4. 技術的課題と産総研の取り組み

地下に貯留したCO<sub>2</sub>が長期間にわたり留まるかを監視することは、CCSの事業化を推進する上で非常に重要なポイントです。実際に利用可能なモニタリング技術として、地震探査、重力探査という物理探査手法がありますが、地下貯留したCO<sub>2</sub>量をより正確に検証するためには、精度の高い当該技術の開発やCO<sub>2</sub>保持機能の解明を進めるとともに、モニタリング技術の低コスト化に向けた取組を進め、モニタリング結果を踏まえたCO<sub>2</sub>挙動予測手法の確立を図ることが今後の課題です。圧入したCO<sub>2</sub>が地下構造、地層、地層水との間で物理的・化学的にどのようにトラップ（保持）されるかを定量的に調べることも課題です。また、地震国であり活断層が数多く存在する我が国においては、環境影響評価・社会的受容性の確保も、CCSにとって重要な課題であり、CCSの事業化に当たっては、社会的な認知度を高めていくことが技術開発とともに必要です。

地圏資源環境研究部門では現在、経済産業省からの受託研究を中心にCO<sub>2</sub>地中貯留関連の技術開発・研究を行っています。それらの内容は、地下貯留層に圧入されたCO<sub>2</sub>を精度よく、かつ低コストで効率的にモニタリングする技術開発、長期的な挙動を予測・モデル化する技術開発、圧入したCO<sub>2</sub>を封じ込めるための地層（断層を含む砂岩泥岩互層）の遮蔽性能を評価するための技術開発・知見の蓄積など、CO<sub>2</sub>地中貯留を安全に、かつ効率的に実施するための研究です。本特集号では当部門で実施しているこれら研究の概要を紹介し、また当部門では、地下に圧入したCO<sub>2</sub>の漏洩がないか評価をする“リスク評価”技術の開発(田中ほか,2010)や、資源創成に向けたCO<sub>2</sub>圧入による地下微生物の挙動(メタン生成)に関する萌芽的研究(Mayumi *et al.*, 2013)などにも積極的に取り組んでいます。

#### 文 献

- Blunt, M., Fayers, F. J. and Orr Jr., F. M. (1993) Carbon dioxide in enhanced oil recovery. *Energy Convers. Manage.*, **34**, 1197-1204.
- Global CCS Institute (2014) Status of CCS project database. <http://www.globalccsinstitute.com/data/status-ccs-project-database> (2014/03/27/ 確認)
- Gunter, W. D., Gentzis, T., Rottengusser, B. A. and Richardson, R. J. H. (1997) Deep coalbed methane in Alberta, Canada: a fuel resource with the potential of zero greenhouse gas emissions. *Energy Convers. Manage.*, **38**, 217-222.
- Horn, F. L. and Steinberg, M. (1982) Control of carbon dioxide emissions from a power plant (and use in enhanced oil recovery). *Fuel*, **61**, 415-422.
- IEA (2012) エネルギー技術展望2012エグゼクティブサマリー日本語版, [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP\\_Executive\\_Sum\\_Japanese\\_WEB.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP_Executive_Sum_Japanese_WEB.pdf) (2014/03/27/ 確認)
- IPCC (2005) *Special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge Univ. Press, New York, 431p.
- 経済産業省 (2007) CCS2020—二酸化炭素の分離回収・地中貯留技術の現状と実用化の方向について, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60525a09j.pdf> (2014/03/27/ 確認)
- Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K. and Shindo, Y. (1992) Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs. *Energy Convers. Manage.*, **33**, 619-626.
- Mayumi, D., Dolfing, J., Sakata, S., Maeda, H., Miyagawa, Y., Ikarashi, M., Tamaki, H., Takeuchi, M., Nakatsu, C. H. and Kamagata, Y. (2013) Carbon dioxide concentration dictates alternative methanogenic pathways in oil reservoirs. *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms2998.
- 薛 自求・松岡俊文 (2008) 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素地中貯留技術の現状と課題. *地学雑誌*, **117**, 734-752.
- 田中敦子・坂本靖英・駒井 武 (2010) CO<sub>2</sub>地中貯留に対するリスクアセスメント取り組みの現状. *Journal of MMIJ*, **126**, 592-601.
- NAKAO Shinsuke, TOSHA Toshiyuki and NISHI Yuji (2014) Outline of CO<sub>2</sub> geological storage, and AIST's research approach.

(受付: 2014年3月28日)

# CO<sub>2</sub> 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討

相馬宣和<sup>1)</sup>・杉原光彦<sup>2)</sup>・石戸経士<sup>2)</sup>・名和一成<sup>3)</sup>・西 祐司<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub>地中貯留事業のうちモニタリングは、地下に圧入したCO<sub>2</sub>の貯留層内での挙動を探知し監視することや、貯留層からのCO<sub>2</sub>漏洩という潜在的なリスクに備えることを目的に実施され、CCS事業にとって不可欠である。これは、サイトの調査や開発、操業中は言うまでもなく、CO<sub>2</sub>圧入終了後のサイト閉鎖後も含めて長期間の実施が求められるため、安全性の確保と同時に適切なコストであることが不可欠であり、極力費用対効果の高いモニタリング技術が求められている。実際に社会的に受け入れられるCO<sub>2</sub>地中貯留事業を実現するためにも、長期的なコスト面への配慮は一層重要になってくる。

2次元もしくは3次元的な物性分布を地表／海上から探知する物理探査手法は、坑井データ（地下深部の直接的な情報をもたらすが、点もしくは線上の測定）を補う有効なモニタリング手法として用いられる。その代表的な方法が、国際的にもCO<sub>2</sub>地中貯留における標準的なモニタリング手法として考えられている「弾性波探査」、すなわち「反射法」、「VSP法」および「弾性波トモグラフィ」等の「能動的地震波探査手法」である。これらの能動的な弾性波探査では、地表・海底もしくは坑内に展開した多チャンネルの地震計アレイにより、移動する人工震源によって多数の発振点から発せられた弾性波（地震波）を受信して解析することにより、弾性波が伝播する媒質の弾性的な物性、すなわち弾性波速度、減衰等を推定し、それに基づき地下構造や状態を推定する。これによって圧入したCO<sub>2</sub>が地下で拡がっている領域（CO<sub>2</sub>プルームと称される）の輪郭を検知できると考えられているため、能動的な地震波探査手法、特に反射法地震探査はCO<sub>2</sub>監視において非常に有用な手法と考えられている。

1回の能動的弾性波探査により、ある時点での地下のCO<sub>2</sub>プルームを捉えた「スナップショット」を得られるが、これを適当な時間間隔で繰り返し実施することにより、「スナップショット」の時間変化を検知するのが一般的な弾性波探査によるモニタリングである（反射法では、発振点や受振点を地表に面的に分布することによって地下の弾性波

物性分布の3次元的な「スナップショット」を得る探査のことを3次元（略して「3D」）反射法と呼ぶが、モニタリングではこれに時間軸を加えるため、「4D」という呼び方をされることもある）。しかし、このような弾性波探査は高価であり、特に発振・受振に船舶を使用することになる海域での調査は非常に高コストである。また、広い範囲に発振点・受振点を展開することから、調査範囲における地元関係者等との調整も必要で、CCS事業の社会受容性にも影響を与える可能性もある。このように、定期的を実施する必要があるモニタリングにおいては、弾性波探査は非常に負担が大きな手法と考えられ、能動的弾性波探査の実施回数を少なくすることは、CCS事業全体のコストや社会受容性の観点で、望まれる方向性の一つと考えられる。また、弾性波により探知できる物性は弾性的なものに限定されることや、使用する弾性波の周波数・エネルギー・発振位置等によって探知できる構造・分解能が左右されるという、原理的な限界もある。弾性波探査とは違う種類の地下情報を取得することにより、モデル不確か性の低減や、CO<sub>2</sub>貯留状況の合理的判断基準の設定に結び付くと考えられる。

このため、我々の研究では、弾性波以外のモニタリング手法を組み合わせて能動的弾性波探査を補完することを考えている。基本的に、能動的弾性波探査に比較して低コストである自然信号等の信号源を用いた受動的な物理探査手法を併用し、CO<sub>2</sub>貯留の最適モデリング法との組み合わせによるモデル検証をベースにしたモニタリングの概念によって、“補完”を実現しようと構想している。これらの実現のために、弾性波探査以外のモニタリング手法の、CO<sub>2</sub>地中貯留のモニタリングに対する性能や適用性、適切な利用方法等を明らかにするための諸検討を行っている。

本稿では、このような産総研の研究における反射法地震探査を補完する多面的モニタリング技術の基本構想、具体的な実フィールド研究のために参画している米国・南西部炭素隔離地域パートナーシップ（Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration：SWP）プロジェクトとそのテストサイトの概要を説明する。次に、米国における観測計画、観測基点の設置状況、ベースライン測定結果など、進捗状況を報告する。

1) 産総研 再生可能エネルギー研究センター（地圏資源環境研究部門兼務）  
2) 産総研 地圏資源環境研究部門  
3) 産総研 地質情報研究部門

キーワード：CO<sub>2</sub>地中貯留、多面的モニタリング、SWP、ファーンズワース、重力、自然電位、AE

## 2. 多面的モニタリング技術の基本構想

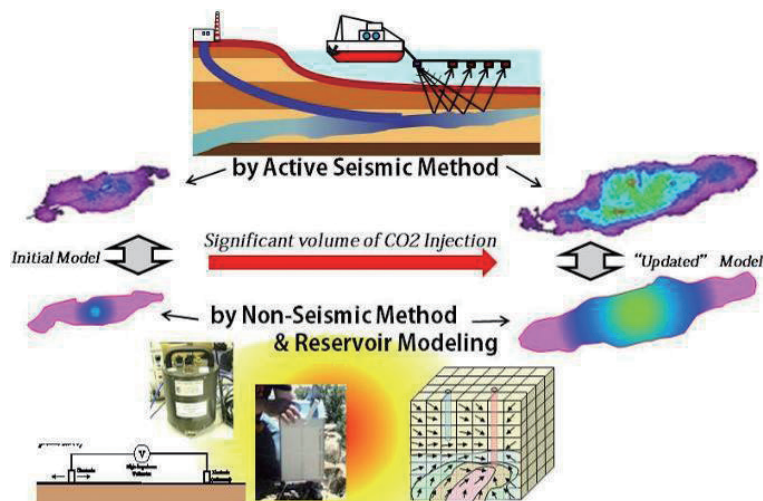
反射法地震探査に代表される人工震源を用いる能動的弾性波探査技術は、CO<sub>2</sub>地中貯留のモニタリングにおいても信頼性の高い標準的な手法であると見なされている。従って、産総研の多面的モニタリングの研究においても、能動的弾性波探査の実施を基本的な前提にしつつ、CO<sub>2</sub>地中貯留の各段階やサイトの状況に応じながら、モニタリング期間全体の中で、大掛かりな能動的弾性波探査の実施回数を少なくすることを“補完”の中心的な考え方にして諸検討を行っている。多面的モニタリングによる“補完”は、弾性波探査を完全に置き換えるのではなく、全体として“モデル検証”に基づく評価を行うことで実現すると考えている。

物理探査的手法によるCO<sub>2</sub>貯留状況の把握は、対象が地下深く真実そのものを確認することが通常不可能であることから、それ自体が、本質的には何らかの仮定を含んだ“モデル”の創出であると考えられる。そこで、「圧入されたCO<sub>2</sub>が時間と共に広がる状況」をモニタリングするという意味を、適切に“モデルを更新すること”とその検証であると考え、初期のモデルを坑井情報や能動的弾性波探査を用いて精緻に構築することができていれば、そこからある程度の時間範囲においては、弾性波探査以外の方法によっても信頼し得る“モデルの更新”を可能にすることができるのではないかと考えている。この実現により、能動的弾性波探査の実施回数を抑えることが、多面的モニタリングによる“補完”の基本概念である(第1図)。この概念の実現には、モニタリング技術だけでなく、最適なモデリング技術ならびにこれらの組み合わせ法が併せて重要である。

多面的モニタリング技術については、単に弾性波探査の回数を減らすだけではなく、探査法自体も低コストであることが望まれる。そこで、能動的信号源を必要としない方法に注目し、適用性について検討している。同時に、異なる複数の物性値を反映した地下情報が得られることで、例えば貯留層周辺の圧力変化の監視や潜在的漏洩経路の推定など、能動的弾性波探査のみを多数回実施するのとは違う観点からの安全監視が実現することにも期待している。

## 3. 米国・南西部炭素隔離地域パートナーシップ

弾性波探査を補完する多面的なモニタリング技術の研究を進めるために、産総研は我が国に先んじて実施される米



第1図 弾性波探査の補完のコンセプト。

国の大規模なCO<sub>2</sub>地中貯留実験の場に参加しており、CO<sub>2</sub>地中貯留の実フィールドでの観測とデータ解析を行うことにより、CO<sub>2</sub>モニタリングへの適用性の検討や基本的な特性の把握、最適な観測や解析手法の検討を行っている。

米国における二酸化炭素隔離技術の研究開発は、エネルギー省(DOE)の主導する地域パートナーシップ(Regional Carbon Sequestration Partnerships: RCSP)を主体として進められている。RCSPによるCO<sub>2</sub>地中貯留に関する研究は、異なる地域、地質条件下で、大規模CO<sub>2</sub>地中貯留を実施するための技術開発、インフラ設置、法規制整備などを支援することを目的として、これまで地域特性検討と小規模実証試験の2つのPhaseが実施され、現在はPhase IIIと呼ばれるDevelopment Phase(内容は大規模実証試験であり、計画期間は2008～2017年)に移行している。産総研では2006年頃から、モニタリング研究を主題にして、SWPに参加しており、Phase IIサイトのユタ州アネスで自然電位の長期連続モニタリングを実施した。SWPの対象地域は米国南西部のユタ、ニューメキシコなど全部で9州に及ぶ広い範囲である。SWPのPhase IIIでは、現在、テキサス州ファーンズワース付近の石油EORサイトを実証試験サイトとしてプロジェクトを進めている(第2図)。

2013年4月にキックオフミーティングが開催された後、現地石油会社の有する地質や過去の探査情報などの共有が始まり、2013年秋から本格的にプロジェクトが開始されたが、産総研ではSWPを介して現地石油会社の了解を得て、本格的なSWP Phase IIIプロジェクトの開始前の2012年11月より、観測基点の設置とベースライン測定を開始している。

#### 4. ファーンズワース・テストサイトと観測計画

ファーンズワース・テストサイトはテキサス州最北部付近に位置し、オクラホマ州に本社を置く Chaparral Energy 社の操業する石油フィールドである。ファーンズワースのCO<sub>2</sub>注入層は石油産出層である Morrow Formation（深度約2400 m付近、透水性100～10,000 mD）という砂岩層である（第3図）。本サイトでは水を注入する石油生産が行われてきたが、2012年頃から既にCO<sub>2</sub>-EORが開始されており、SWPは今後のCO<sub>2</sub>圧入を研究のターゲットと考えている。プロジェクト計画段階でのCO<sub>2</sub>注入規模は5年間で約100万トン（年間20万トン程度）であり、これを最大25坑井から行うとされている。SWPの正式なテストサイトに決定して日が浅く、まだ詳細な情報は公開されていないが、石油開発の過程で地震探査や坑井検層等の数多くの地下情報があるとのことである。

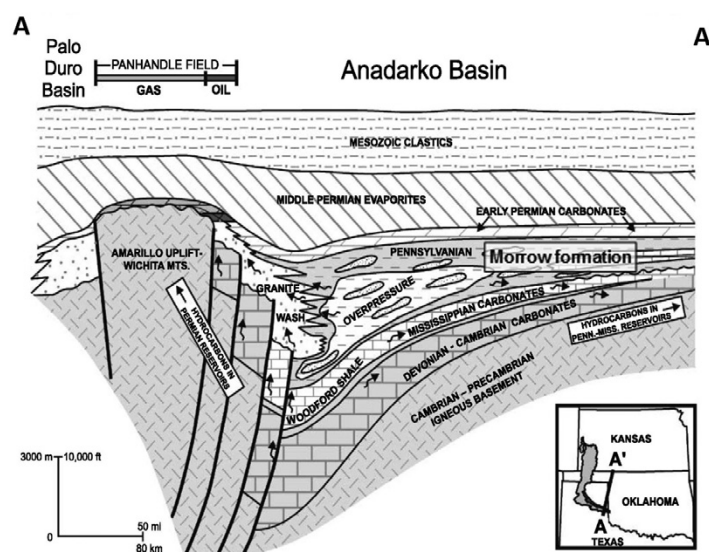
ファーンズワースにおいては、プロジェクトの本格始動に先駆けて、最初の3次元反射法地震探査が、2013年1～2月に実施され、今後VSPや坑間トモグラフィ、坑井内地震計アレイを用いた微小地震観測などが計画されている。物理探査モニタリング以外にも、地下水や土壌ガスなど様々なモニタリングが実施されている。産総研の多面的モニタリング研究では、重力、自然電位、地表AE観測などの、比較的簡便な、能動的信号源を必要としないモニタリング手法を実施している。主たる観測基点は2012年11月から12月にかけてファーンズワースに設置しており（第4図）、それぞれについて最初のベースライン測定を開始している。

##### 4. 1 重力モニタリング

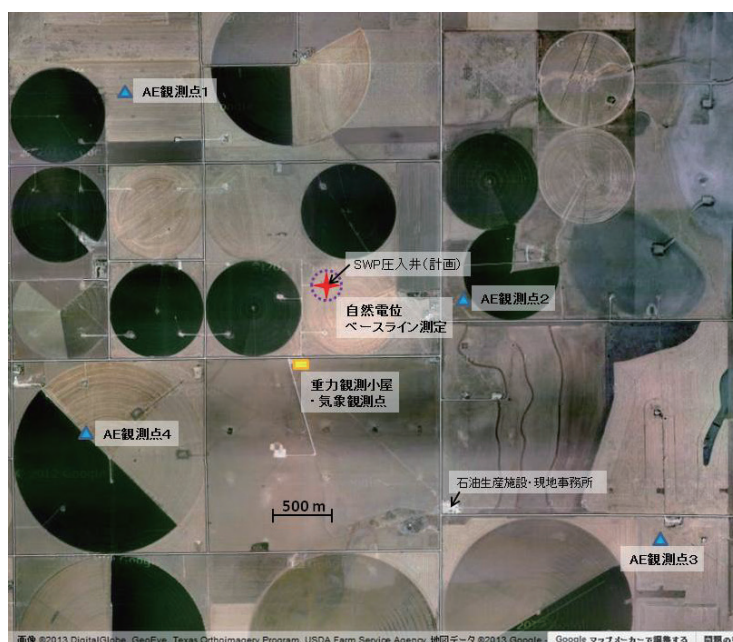
重力測定では、地下の密度変化による地表の重力の変化を重力計を用いて測定する。モニタリング手法としては、60年代から地熱開発における貯留層評価手法として用いられてきた。CO<sub>2</sub>モニタリングでも、低密度のCO<sub>2</sub>の注入に伴う地下の変化が評価できると期待されており、実際に北海スライプナーでのCO<sub>2</sub>圧入による重力変化が検出できたと報告されている（Alnes *et al.*, 2008）。重力測定は地下の全変化の積算として重力値が現れるため、局所的な浅部の擾乱の影響の識別と補正が、深部の微小重力



第2図 ファーンズワース・サイトの米国内での位置（Google Map による）。



第3図 ファーンズワース・サイト付近の地質断面概略図。Sorenson(2005)に加筆。



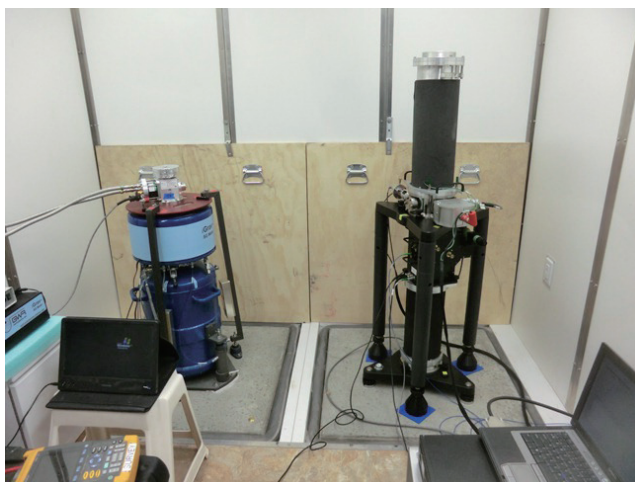
第4図 ファーンズワースにおける産総研の観測基点およびベースライン測定位置。

変化を評価する上では重要である。本研究の重力モニタリングでは、CO<sub>2</sub>注入に伴う微弱変化を捉えることが最終的な目標であるが、CO<sub>2</sub>地中貯留の特性を考えると、様々な重力の測定手法の中から最適な方法を確立することも目指している。

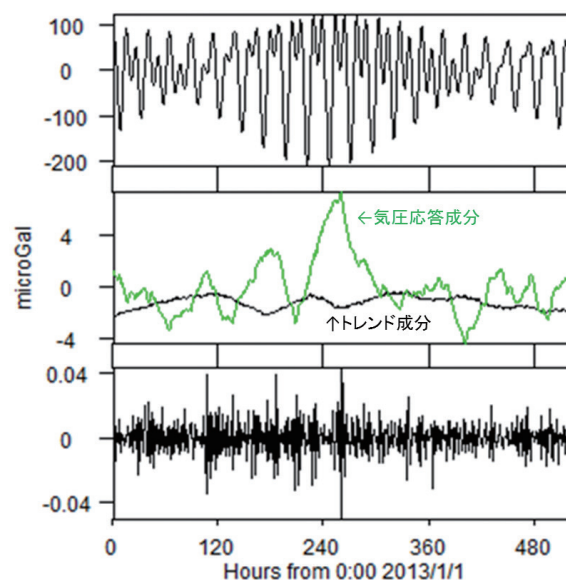
相対重力測定では、重力変動が予想される地点と重力変動が無いと仮定する基準点の間を可搬型相対重力計を用いて往復して測定し、ある時点での両地点間の相対的な重力差を評価する。この往復測定を、予想される変動の速度に見合った頻度で繰り返すことで、全体的な重力変動の傾向が得られると考える。広範囲の測定が比較的容易に行えることが利点であるが、重力変動が無い基準点は現実には存在しないので、空間的に一様でない微小な経時変化を評価することは困難である。そこで、相対重力測定に合わせて、基準点において絶対重力測定を同時に行い、基準点の重力変動も測定して測定誤差を抑制する方法があり、ハイブリッド重力モニタリングと呼ぶ (Sugihara and Ishido, 2008)。

一方、定点での高精度な連続重力測定は時系列解析を可能にするため、様々な時間スケールの変動の分離に有効である。CO<sub>2</sub>地中貯留では、貯留層深度が深かったり、観測基点との距離が離れていたり、また、貯留層内の既存流体(水、石油等)とCO<sub>2</sub>との密度差が極端ではない可能性もあり、初期に大きな重力変化が期待できないこともあり得ることから、本研究では従来より桁違いに高感度な超伝導重力計による連続測定を実施している。超伝導重力計は、大型かつ定期的な液体ヘリウム補充が必要であったため利用用途が限定されていたが、最新の新世代の超伝導重力計では、低コスト化・小型化に加え利用中の液体ヘリウム補充が不要になるなど維持管理が簡便になり、実用目的で研究施設以外でも活用できるようになっている。超伝導重力計はドリフトや感度変化が極めて小さいが、本質的に相対重力計であることから、本研究ではこれを定期的にハイブリッド重力モニタリング(可搬型相対重力&絶対重力)と組み合わせ、石油生産や農業の散水等の空間的な影響も把握し、超伝導重力計の効果が最大限になる測定方法を構想している。

2012年11月末から12月にかけて、超伝導重力測定および絶対重力測定を実施するための観測基点(観測小屋)をファーンズワース・サイトに設置して、諸準備の後、翌1月から超伝導重力計のベースライン連続測定を実施した。超伝導重力計は完全な野外向け構造ではないため、重力計を設置するコンクリート基台(1m角、2個)の上に、



第5図 重力観測基点内における超伝導重力計測(左)と絶対重力計測(右)の併行測定の様子。



第6図 超伝導重力測定データの基本処理結果例(上から潮汐成分、気圧応答成分(緑色)、トレンド成分、不規則成分)。

電源の確保や温度管理を考えた観測小屋(加工された船舶用コンテナハウス)を被せ、その内部で測定を行う。第5図に重力観測基点の状況を示す。重力測定点の標高変化は重力値に直接影響するため、標高の変化をモニタリングするためのGPS観測用の基台も小屋近傍の外部に設置してある。絶対重力測定は、超伝導重力計と同じ小屋内の基台で絶対重力計FG5により行い、相対重力測定は基点周辺で相対重力計CG5によって約20地点で行っている。第6図に、超伝導重力ベースライン測定で得られた結果の基本処理例を示す。超伝導重力計は安定的に動作しており、本研究で構想した重力測定方法は十分に実現可能であることがわかる。トレンド成分に微弱変化が反映されると考えら

れるが、現時点でCO<sub>2</sub>圧入は無いことから、降雨影響などとの比較を考えている。

#### 4. 2 自然電位モニタリング

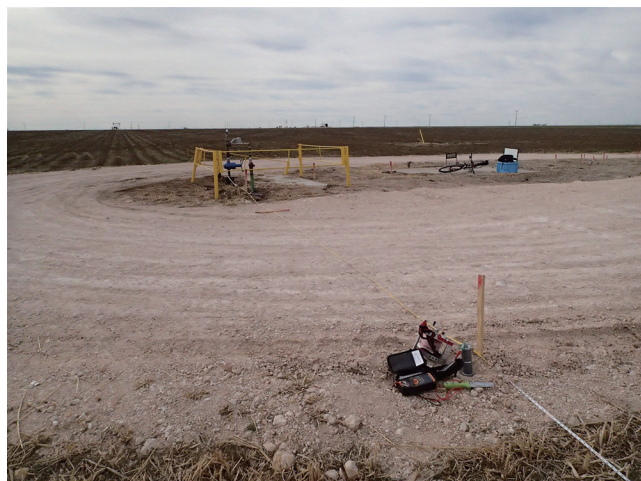
自然電位とは、通常、地面に自然に発生している時間的に安定して存在する電位差のことを指す。正負の電荷を分離するメカニズムは主に電気化学的な過程と考えられ、界面動電効果（流動電位）、酸化還元反応、熱電気現象、拡散電位などが発生原因となる。鉱床探査や検層分野への適用は古いが、熱水対流に伴う正電位異常への着目や貯留層圧力変動等の探査の試みは地熱分野で行われている。自然電位は、測定が基本的に簡便かつ低コストで、弾性波探査とは異なる電気化学過程を反映した情報が得られるために、CO<sub>2</sub>地中貯留でも実用利用ができれば有用性は大きいと考えられる。

CO<sub>2</sub>地中貯留への適用に関して、数値シミュレーションによる検討では、地下深部に流動電位係数の境界面が存在しCO<sub>2</sub>注入に伴う圧力変化がその境界面まで及ぶような状況では、自然電位モニタリングが地下の圧力変化を検出するための有効な手法になる可能性が示されている。また、これまでの空気やCO<sub>2</sub>の坑井への圧入実験の結果と酸化還元電位を考慮した数値シミュレーションから、坑口近傍で比較的小規模な電極のアレイを展開することで、鋼管ケーシングの深部にCO<sub>2</sub>プルームが到達したときに、坑井近傍の電位変化としてこれを検出できる可能性が示されている (Ishido *et al.*, 2013)。

ファーンズワースにおけるCO<sub>2</sub>圧入においては、特に後者の既存坑井付近へのCO<sub>2</sub>の到来検知を主なターゲットとして、CO<sub>2</sub>の流動に関するモニタリング法としての適用性を検証する予定である。長期の自然電位モニタリングの観測システムを展開する前にフィールドの基本的な特性やCO<sub>2</sub>圧入予定井周りの状況を把握するため、2013年1～2月にかけて、観測坑を横断する約5.5 km長の測線に沿った比抵抗調査を実施するとともに、自然電位ベースライン調査に着手している (第7図)。

#### 4. 3 AEモニタリング

AE (Acoustic Emission) は「(物質の破壊や変形に伴い放出される) 音響周波数領域の弾性波」を元来は意味しており、音響学的あるいは地震学的な手法によって観測され、材料、圧力容器、建築構造物などの健全性や耐久性の評価など、工学的目的のためにAE法と称して利用される。受動的に観測できる弾性波を幅広く工学的に活用することが

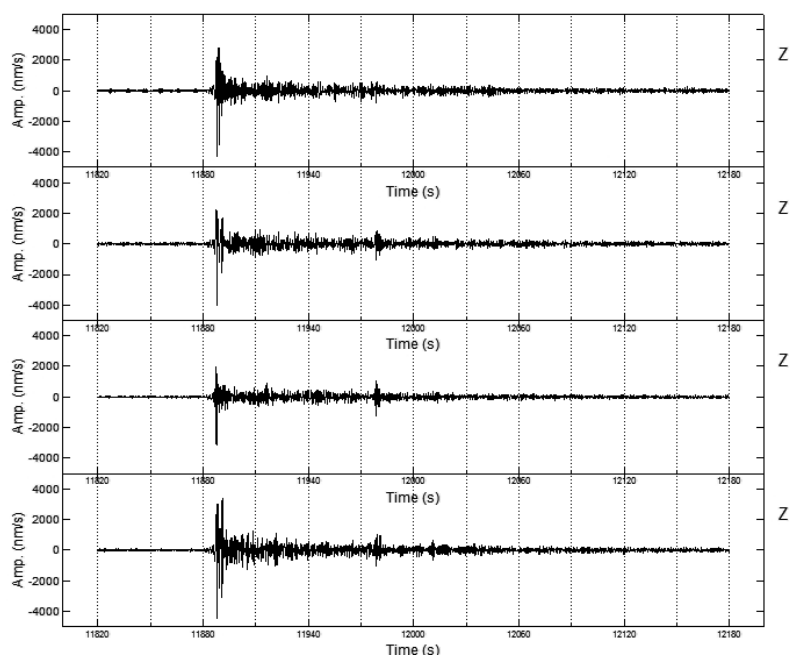


第7図 観測坑周辺における自然電位ベースライン測定。

AE法の特徴であり、新妻 (1997) によると、「天然現象、石油や地熱流体の採取、水圧破碎、坑道・トンネルの掘削、坑井の掘削、など、何らかの原因により地下において付随的に発生した弾性波を何らかの方法で観測し、それを工学的に用いること」とAE法は定義付けられている。本研究においては「AE」を広く捉え、CO<sub>2</sub>地中貯留サイトで受動的な観測によって得られる可能性のある比較的高い周波数の弾性波全てに注目し、それぞれの性質に応じた信号処理法を開発、適用して、地下情報を抽出することを検討しており、一般に「Passive seismic」とも呼ばれるものを対象としている。

AE計測は、CO<sub>2</sub>貯留域の拡大を説明する情報の一つになり得ると考えられるとともに、潜在的漏洩経路となる小断層やき裂帯のような弱線の抽出法としても期待できる。地下に観測器を設置する坑井内観測はノイズや信号品質の面で有利であるが、我が国では坑井内観測点を多数点確保することはコストなどの面で困難と考えられる。また、地質も複雑で連続性が悪い。そこで、適切なコストで信頼性ある結果を得るために、少数の坑井内点+地表点という観測方式の適用を検討している。坑井内観測で微弱AEを受信すると共に、地表観測点で比較的大きなAEの受信を行って、組み合わせて信頼性のあるAE位置決定を実現する。SWPが観測坑井を準備してVSPと受動弾性波観測を行う計画であるので、産総研では補助的に地表AE観測点を設置し、相互に協力し合う予定である。ファーンズワースにおいては地表観測点4か所 (第4図) を設置し、ベースライン測定を2012年11月下旬から開始している。

観測に用いているAEセンサは、英国Guralp社の24bitデータロガーとGPS時計を内蔵した広帯域3成分地震計CMG-6TD (30秒～100Hz、感度2400 V/(m/s)) である。



第8図 AE 観測波形例 (Z成分. 上からAE観測点1~4). 縦軸は速度型地震計の振幅値, 横軸は時間 (秒).

強風等のサイト特性に対応させた低コストの設置方法として、センサは地表から1 m弱掘り下げた穴の底に設置している。設置期間中に記録した3成分波形例 (第8図) では、目的とするサイト付近からのAEではないが、異なる4観測点で同一の地震動が記録されており、観測システムの正常動作が確認できた。しかし、地表が農地として利用されている本サイトではバックグラウンドノイズレベルが高く、地表観測にはより厳しい環境であることもわかった。

## 5. まとめ

CO<sub>2</sub> 地中貯留において、能動的弾性波探査を補完するモニタリング手法を実現するために、その基本概念を構築し、米国SWPプロジェクトPhase IIIに参加して実証規模サイトでの検証を目指している。2012年秋~冬にテキサス州ファーンズワースに観測基点を設置し、重力、自然電位、AE等のベースライン測定を開始した。超伝導重力測定の本格運用は安定的に行えており、微弱重力変化抽出に向けた観測方法の基本構想が実現可能なことを確認することができた。今後は、全測定項目のベースライン測定を継続して地域特性の把握と観測システムの改善を行い、SWPプロジェクトの進捗に合わせて、当該地域でのCO<sub>2</sub> 圧入時のデータ取得に進んでいく予定である。

## 文献

- Alnes, H., Eiken, O. and Stenvold, T. (2008) Monitoring gas production and CO<sub>2</sub> injection at the Sleipner field using time-lapse gravimetry. *Geophysics*, **73**, WA155-WA1.
- Ishido, T., Pritchett, J. W., Toshi, T., Nishi, Y. and Nakaniishi, S. (2013) Monitoring underground migration of sequestered CO<sub>2</sub> using self-potential methods. *Energy Procedia*, **37**, 4077-4084.
- 新妻弘明 (1997) AE・微小地震解析による地熱貯留層キャラクターゼーション. *資源と素材*, **113**, 301-307.
- Sorensen, R. P. (2005) A dynamic model for the Permian Panhandle and Hugoton fields, western Anadarko Basin. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, **89**, no. 7, 921-938.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (2008) Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry. *Geophysics*, **73**, WA37-WA47.

---

SOMA Nobukazu, SUGIHARA Mituhiko, ISHIDO Tsuneo, NAWA Kazunari and NISHI Yuji (2014) Multi-geophysical monitoring technique for CO<sub>2</sub> geo-sequestration.

---

(受付: 2014年4月1日)



# ポストプロセッサによる地球物理観測量の変動予測

石戸経士<sup>1)</sup>・杉原光彦<sup>1)</sup>・西 祐司<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

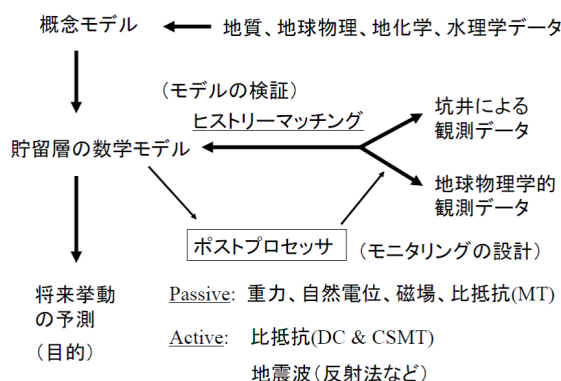
地下に圧入したCO<sub>2</sub>の貯留層内での挙動を把握するため、また、貯留層からのCO<sub>2</sub>漏洩という潜在的なリスクに備えるため、適切なモニタリングの実施はCCS事業にとって不可欠な要素となっています。また、モニタリングにより検知した変化をフィードバックすることによって、地下モデルが精緻化され、貯留層内の挙動のより正確な把握と将来予測精度の向上が図れると考えられています。

種々のモニタリングによって得られたデータを数値シミュレーションによって再現するよう貯留層の数値モデルを変更・調整する作業をヒストリー・マッチングといいます。産業技術総合研究所では、物理探査手法(微小重力測定、地震探査、電気・電磁気探査等)によって得られたデータをヒストリー・マッチングで使えるようにするための研究を進めています。具体的には、地下の流体流動シミュレーション(以下、貯留層シミュレーション)によって計算される圧力、温度、塩分濃度、CO<sub>2</sub>飽和度等の変化を、地球物理観測量の変化に変換するためのプログラムの開発・整備を行っています。この物理量変換プログラムのことを地球物理(学的)ポストプロセッサと呼んでいます。

以下、本稿では、地球物理ポストプロセッサの概要と、最近の適用例を紹介します。

## 2. 地球物理ポストプロセッサの開発

地球物理ポストプロセッサの開発は、産業技術総合研究所(旧地質調査所)における地熱分野の研究の中で始まりました。1997年までに、汎用貯留層シミュレータSTARによるシミュレーション結果を処理して地球物理観測量の変動を計算するための基本フレームを構築し、微小重力、自然電位測定に対応したポストプロセッサを開発しました(Ishido *et al.*, 1995; Ishido and Pritchett, 1999)。その後、NEDOの「貯留層変動探査法開発」プロジェクトとして、地熱貯留層管理技術のための応用研究が進められ(當舎ほか, 2001; 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2003;



第1図 地球物理ポストプロセッサを用いたヒストリー・マッチング。

産業技術総合研究所, 2003), 直流法やMT法といった比抵抗探査に対応したポストプロセッサの開発や、フィールド・データへの適用を通して手法毎のポストプロセッサの改良が行われました(第1図)。また、各ポストプロセッサで使われる構成則を改良するために、例えば、自然電位ポストプロセッサ関連では高温下の流動電位係数について室内実験などを行いました。さらに、複数の物理探査手法の適用によるヒストリー・マッチングの効率化を目指して「システム統合化」のための共同研究などを実施しました(Ishido *et al.*, 2005; 石戸・當舎, 2010)。

CCSの研究が始まってからは、特に地震波ポストプロセッサの開発を加速させ、反射法や坑井間探査に対応した機能を整備するとともに、地震波速度・減衰変化のCO<sub>2</sub>飽和度依存性をパッチィ飽和モデルで与えるよう構成則の改良を行いました。また、汎用貯留層シミュレータSTAR(Pritchett, 1995, 2002)用に状態方程式パッケージとして、CO<sub>2</sub>の臨界点近傍を高精度に扱えるよう“SQSCO2”を開発しました。このパッケージを使うと、H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NaClの3成分と、水溶液(CO<sub>2</sub>とNaClが溶解)、CO<sub>2</sub>の気相(超臨界相)・液相とNaCl固相の4相を扱えますが、これに対応して地球物理ポストプロセッサの拡張を行っています。これまでに開発したポストプロセッサのCO<sub>2</sub>地中貯留分野での適用性についてはIshido *et al.* (2011)で報告しています。その他、現在手掛けているのは、地表変位ポスト

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: CO<sub>2</sub>地中貯留, 貯留層シミュレーション, モニタリング, 物理探査

プロセッサの改良と、自然電位ポストプロセッサについて界面動電効果に加え、坑井の金属ケーシングパイプ周りの“ジオバッテリー”効果を扱うための機能の拡張です (Ishido *et al.*, 2013).

ちなみにポストプロセッサという命名は、対象とする地球物理観測量を計算するのに、地球物理現象の支配方程式を貯留層シミュレーションの支配方程式とカップルさせて解く必要はなく、貯留層シミュレーションの結果（スナップショット）を使って“後から”解けばよいということに因っています。例えば、自然電位のポストプロセッサで扱う界面動電現象では、岩石空隙中の流体流動にカップルして電流が流れる、その結果、流体の圧力差に比例した電位差（流動電位）が発生する現象を扱いますが、電位差が発生するとそれが二次的な圧力差を発生させるという電気浸透現象も同時に発生します。ただし、二次的に発生する圧力差は非常に小さく無視できるので、界面動電現象の支配方程式を流体流動の支配方程式と同時に解く必要はありません。貯留層シミュレーションではT（熱）とH（流体・化学種）の輸送を記述する支配方程式をカップルさせて解くので、T-Hカップルド・シミュレーションですが、これにG（地球物理観測量）を加えたT-H-Gシミュレーションは一般には必要ではありません。ただし、地下の流体圧や温度の変化による応力変化や地表の変位を計算する際に、応力変化による空隙率や浸透率などの変化を考慮するには、M（力学）を入れたT-H-Mカップルド・シミュレーションが必要になります。現在、我々が改良を進めている地表変位ポストプロセッサでは、当然ながらこのフィードバックは扱えませんが、貯留層シミュレータSTARのほうで、空隙率・浸透率の圧力・温度依存性の力学モデルを組み込んであるので、そちらの方で限定的な取り扱いが可能です。

これまでに開発したポストプロセッサは、「汎用貯留層シミュレータSTAR用地球物理ポストプロセッサ」として産業技術総合研究所の知財管理システム：AIMSに登録されています。各ポストプロセッサは、汎用貯留層シミュレータSTARの計算出力ファイル（“geoファイル”）を入力として、地球物理観測量の空間分布・時間変化を計算するためのモジュール群であり、他の汎用貯留層シミュレータの計算出力もgeoファイル形式に変換可能であればポストプロセッサに入力可能です。現在までにTOUGH2の計算出力をgeoファイルに変換するインターフェースも開発しています。ポストプロセッサは、基盤レイヤー（geoファイルの入力、図化ファイルへの出力処理、日付・時刻処理等の各探査手法共通の処理を実施）、物性モデリング・レ

イヤー（geoファイルに記録された圧力・温度・塩分濃度・CO<sub>2</sub>飽和度等から構成則を用いて地震波速度・減衰、流動電位係数、比抵抗構造等、各探査法に関連する物性値を計算）、および探査モデリング・レイヤー（物性値の3次元分布から各物理探査の観測量を計算）の3つのレイヤーから構成されています。なお、MT法のポストプロセッサでは、探査モデリング・レイヤーは外部プログラムへのインターフェースのみを準備し、計算は外部プログラムを使用して実施するようにしています。

### 3. 繰り返し反射法を補完する微小重力モニタリング

CO<sub>2</sub>地中貯留の分野において、貯留層シミュレーションとリンクした地球物理ポストプロセッサ計算は、以下のようないくつかの目的で使用できるものと考えています。

① 適切なモニタリング・システムの選択・配置の検討：想定した地下モデルおよび潜在リスクに対して、地表における物理探査データの分布および変化を予測し、これを測定するための適切なモニタリング手法の選択とその配置などを検討する。

② 地下状態の迅速な把握：実測で得られたモニタリング・データを、計算により予測された物理探査データの変化と比較することによって、圧入したCO<sub>2</sub>が予測通り貯留されているか確かめる。

③ 予測とは異なる実測値が得られた場合、実測値を説明するよう地下モデルを改良し、CO<sub>2</sub>の挙動も含めて差異が生じた原因を究明する。また、予測とは異なる挙動が、潜在リスクに起因する可能性が考えられる場合には、その監視のための効果的なモニタリング手法の選択とその配置などを検討する。

④ 貯留モデルの検証・高精度化：ヒストリー・マッチングによる地下モデルの改良により、より精度の高いCO<sub>2</sub>の将来挙動予測を行う。

ここでは、上記の①の観点で行った、潜在リスクを想定した貯留層シミュレーションと、その結果に重力および地震波（反射法）のポストプロセッサを適用した計算例を紹介いたします。

#### (1) 貯留層シミュレーション

ここで述べる貯留層シミュレーションは、米国ユタ州のGordon Creek地域の概念モデルにもとづいて行ったものです。第2図に示すように、かなり単純化したもので、Entrada砂岩層（200~400 mRSL）を圧入帯水層、その上

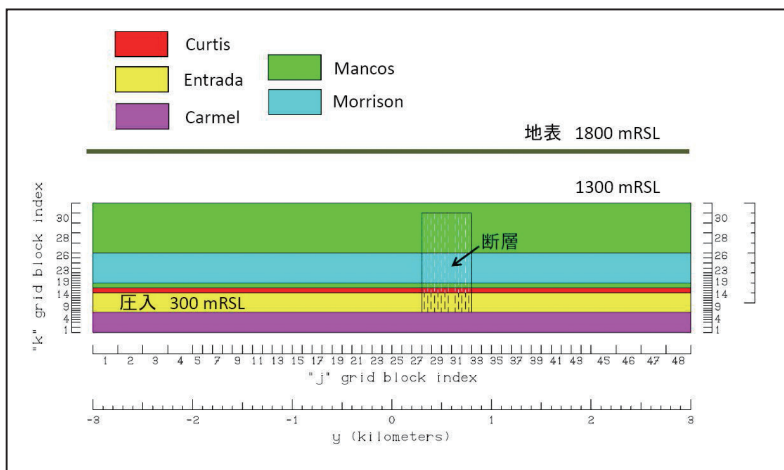
位のCurtis層を遮蔽層と設定し、CO<sub>2</sub>を年間100万トンで圧入した場合の地下におけるCO<sub>2</sub>の流動を計算しました。

解析対象範囲の地表標高は海拔1800 mで平坦とし、数値グリッドは鉛直方向(z方向)に海拔0 mから1300 mをk=1~31の31レイヤーに分割、水平方向にはx, y方向とも6 kmをi=1~48, j=1~48のブロックに分割しています。ブロックのサイズは中央の圧入深度付近で100 m×100 m×25 mと最も詳細にしています。岩石の浸透率は、Entrada層には水平方向100 mD(ミリダルシー)、鉛直方向10 mDを与え、遮蔽層となるCurtis層とMorrison層には(水平・鉛直とも)それぞれ0.01 mDと0.1 mD、浅部帯水層であるMancos層には100 mDを与えています。相対浸透率は水についてはvan Genuchtenの関係式、CO<sub>2</sub>についてはCoreyの関係式で与え、毛管圧はvan Genuchtenの関係式で与えています(スレシヨルド圧は砂岩層と断層部で~0.02 bar, 遮蔽層で~1 bar)。また、空隙率は断層部以外ではすべて10%としました(第2図)。

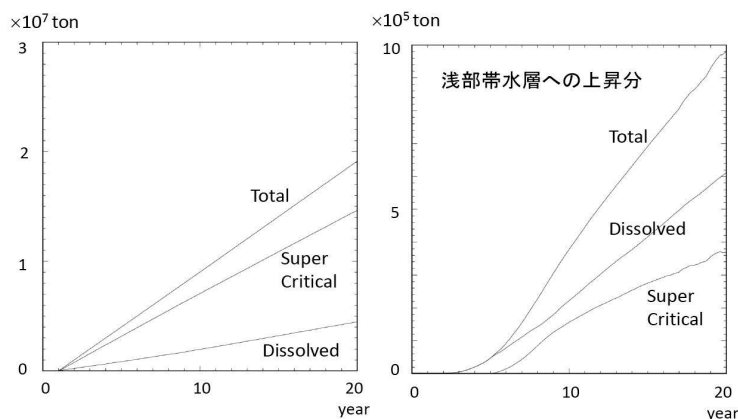
境界条件は、シミュレーション対象領域の上面(海拔1300 m)で不透水・30℃の温度固定、領域下面で不透水・69℃の温度固定、側面は最上層(k=31)とEntrada層中のk=10を除いて不透水・断熱としています。k=31の側面境界では50 barsの圧力固定、またk=10の側面境界では、圧力の10 barsの上昇に対して年間~100万トン相当の流体が系外に流出する圧力依存型の境界条件を設定しました。初期状態は、流体はすべて質量分率0.03のNaClを含み、地温勾配~30℃/kmの静水圧状態としました。

CO<sub>2</sub>の圧入は、海拔250 mに位置する中央(x=0, y=0)の4つのブロックに年間100万トンのレートで行い、地下の流体流動を計算しました。なお、圧入CO<sub>2</sub>の温度は60℃となるよう設定しています。

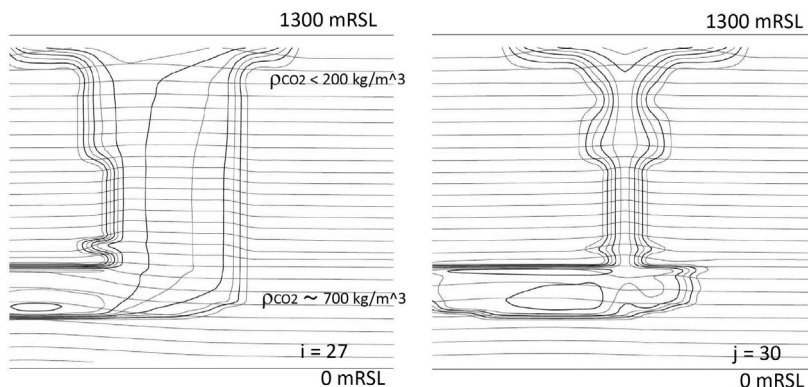
ここでは断層のない場合と、潜在リスクとして仮定の鉛直断層を設定した場合の2つのケースについてシミュレーションを行いました。



第2図 数値モデルで設定した地層区分とグリッドのブロック分割(i=27のyz断面)。地表標高は1800 mとし、深度方向に海拔0 mから1300 mを31レイヤーに分割、水平方向には6 km×6 kmを48×48のブロックに分割。断層ありのケースでは、i=27, j=28~32, k=7~30の範囲に断層ゾーンを設定。反射法ポストプロセッサの計算では、1300~1800 mRSL間の領域の弾性率等は、貯留層シミュレーションの最上k=31ブロックの値と等しいとした。



第3図 断層ありの場合の系内の気相(超臨界)CO<sub>2</sub>、水に溶解したCO<sub>2</sub>、それぞれのトータル質量の時間変化。(左)計算領域全体、(右)浅部帯水層。浅部帯水層へは圧入量の約5%が上昇。CO<sub>2</sub>圧入はt=1~20年の間、100万トン/年。



第4図 10年時点での断層面付近の気相(超臨界相)CO<sub>2</sub>の飽和度の分布(コンター間隔は0.05)。(左)i=27のyz断面、(右)j=30のxz断面。圧力分布は5 bars間隔の細線のコンターで示す。

た。断層ゾーンは、第2図に示すように、 $x=200\sim 300$  m,  $y=300\sim 800$  m,  $z=200\sim 1200$  mRSLの範囲に設定し、浸透率100 mD, 空隙率0.3%としています。Gordon Creek地域では、鉛直方向の断層の存在が知られていますが、ここでは、そのような断層の1つがCO<sub>2</sub>圧入によって開口し透水性を獲得したら、という仮の設定をしています。

第3図には、鉛直断層を設定した場合について、トータルのCO<sub>2</sub>量、そのうち超臨界状態（気相）のまま存在する量、および水に溶解する量の時間変化を示しています。左図の計算領域全体の時間変化は断層なしの場合もほぼ同じですが、右図に示すように断層ありの場合は、トータルの圧入量のうち約5%が断層を上昇し浅部帯水層へ流れ込みます。

第4図には、断層ありの場合のCO<sub>2</sub>の上昇の様子を示しました。浅部帯水層へ上昇したCO<sub>2</sub>は半分以上が水に溶解していますが、圧力が低下するためCO<sub>2</sub>ガスの密度は $\sim 200$  kg/m<sup>3</sup>以下まで小さくなります（圧入深度では約700 kg/m<sup>3</sup>）。

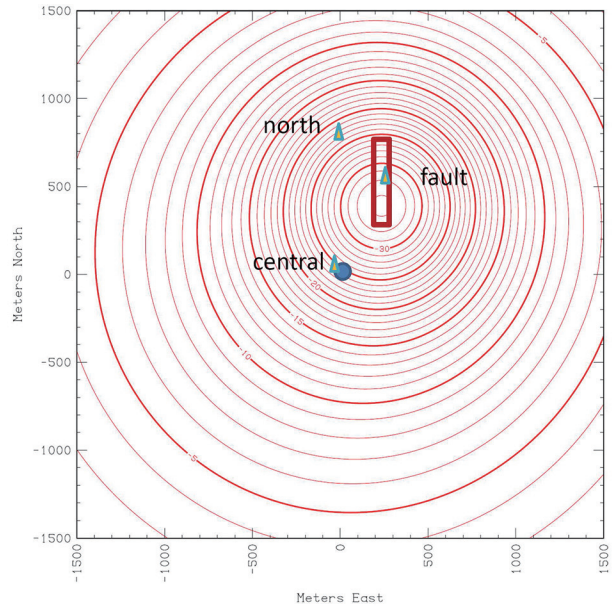
(2) ポストプロセッサ計算

以下、(1)で述べた流動シミュレーションの結果にポストプロセッサを適用して計算した微小重力測定と反射法探査に現れる変化を説明します。

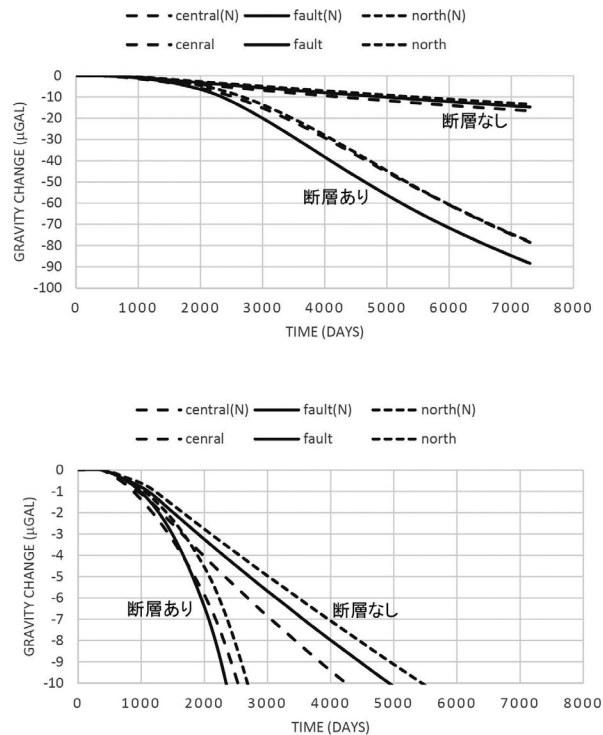
第5図に、圧入開始9年後の断層ありの場合の地表の重力分布の変化を示します。断層を通して浅部帯水層へ上昇した低密度のCO<sub>2</sub>ガスにより、断層の直上に重力低下の目玉ができています。これに対して断層なしの場合は、重力低下の目玉は中心にあり、また低下量は第6図に示すように、断層ありの場合の3分の1程度となります。

第6図では、断層なしと断層ありの場合について重力の時間変化を比較していますが、圧入開始6年後（2500日）あたりから差が広がり始めます。また、どちらの場合も、比較的広い範囲で同様な変化となるので、1か所で高精度の連続観測を行えば、断層なしと断層ありのどちらであるかを判断できると考えられます。また、超伝導重力計による連続観測等でサブマイクロガルの変化を検出できるようになれば、もっと早い圧入開始3年後（1500日）くらいである程度の判断ができると考えられます。

第7図には、断層ありの場合の反射法の応答を示しています。中心をx方向に走る測線では、圧入帯水層内でのCO<sub>2</sub>プルームの拡大に対応したイベントは明瞭に現れていますが、圧入開始後6年でも浅部帯水層に上昇したCO<sub>2</sub>に

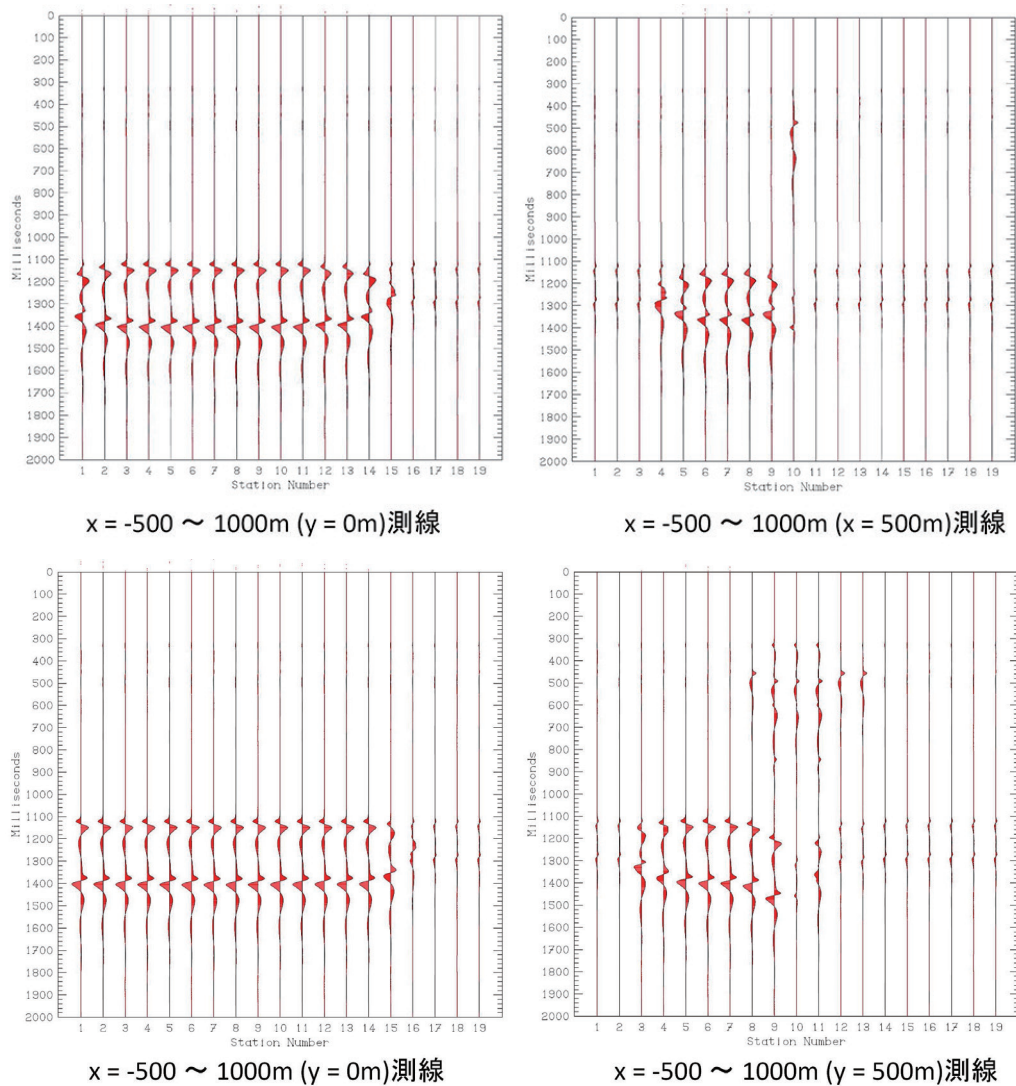


第5図 10年時点での地表での重力変化の分布（3km × 3kmの範囲）。中心の圧入点直上の central, 断層の直上の fault, 北側の north の3観測点での重力時間変化を第6図に示す。



第6図 観測点 central, fault, north における重力の時間変化。観測点名に (N) の付いているのは、断層なしの場合の結果。下図は上図の縦軸スケールを拡大。

対応するイベントは発生していません。これに対し中心からy方向へ500mの距離にある断層直上をx方向に横切る測線では、圧入開始後4年から6年の間に浅部帯水層に上昇したCO<sub>2</sub>に対応するイベントが出現します。反射法だから、浅部帯水層へのCO<sub>2</sub>上昇を検出しようとすると、断層位置が事前にわかっていない場合、平面的に測点を配置



第7図 反射法ポストプロセッサで計算した注入開始後4年(上)と6年(下)における時間記録断面. 左側は中心点をx方向に走る測線(測点8が中心点位置), 右側は中心からy方向へ500mの距離にある断層直上をx方向に横切る測線の結果. 右下の6年後の結果で, 浅部帯水層に上昇したCO<sub>2</sub>ガスによる反射イベントが現れている.

した3次元反射法をかなりの頻度で行うことが必要になります.

繰り返し反射法は, 潜在リスクに対処する上でも基本的なモニタリング手法ですが, 3次元の反射法をしばしば実施するのは費用の面から難しいと思われます. ここで紹介した計算例は, 1, 2か所での高精度の重力連続観測を併用することにより, 反射法の実施間隔を長くできる可能性を示唆しています. また, 超伝導重力計の導入によりサブマイクロガルの測定ができれば, 早い段階で潜在リスクの存在に気づいて, その挙動を監視するための反射法を含めた最適なモニタリング計画を立案するのにも役立つでしょう. 今回の設定ではモデルの上面が深度500 mですが, この深度まで上昇した時に検知できれば, さらに浅部への

移行を未然に防ぐ対策を立案するのにも役立つものと考えられます.

ここでは, 微小重力測定が有力なモニタリング手法となるケースを考えましたが, 別のケース, 例えば, 浅部帯水層の浸透率がもっと小さく, CO<sub>2</sub>の上昇によって圧力がかなり増加するケースを考えると, CO<sub>2</sub>密度がそれほど低下しないので, 5%程度の移動では重力の顕著な変化はなかなか現れません. この場合には, 浅部帯水層での圧力測定や(圧力変化に感度のある)自然電位測定などがモニタリング手法の候補になるでしょう. 今後, 様々なケースについて, 反射法を補完する物理探査手法によるモニタリングについて体系的な検討を進めたいと考えています.

## 文 献

- Ishido, T. and Pritchett, J.W. (1999) Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow. *J. Geophys. Res.*, 104, 15247–15259.
- 石戸経士・當舎利行 (2010) 貯留層変動探査法の目指したこと. 地質ニュース, no. 665, 7–11.
- Ishido, T., Sugihara, M., Pritchett, J. W. and Ariki, K. (1995) Feasibility study of reservoir monitoring using repeat precision gravity measurements at the Sumikawa geothermal field. *Proc. World Geothermal Congress, Florence*, 853–858.
- Ishido, T., Goko, K., Adachi, M., Ishizaki, J., Tosha, T., Nishi, Y., Sugihara, M., Takakura, S. and Kikuchi, T. (2005) System integration of various geophysical measurements for reservoir monitoring. *Proc. World Geothermal Congress, Antalya*, paper no.1160, 1–10.
- Ishido, T., Tosha, T., Akasaka, C., Nishi, Y., Sugihara, M., Kano, Y. and Nakanishi, S. (2011) Changes in geophysical observables caused by CO<sub>2</sub> injection into saline aquifers. *Energy Procedia*, 4, 3276–3283.
- Ishido, T., Pritchett, J.W., Tosha, T., Nishi, Y. and Nakanishi, S. (2013) Monitoring underground migration of sequestered CO<sub>2</sub> using self-potential methods. *Energy Procedia*, 37, 4077–4084.
- Pritchett, J. W. (1995) STAR — a geothermal reservoir simulation system. *Proc. World Geothermal Congress, Florence*, 2959–2963.
- Pritchett, J. W. (2002) STAR's user manual ver.9.0. *Report SAIC-02/1055*.
- 産業技術総合研究所(2003)貯留層変動探査法開発の解析・評価総括報告書. AIST03-C00018.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2003) 貯留層変動予測技術マニュアル. 443p.
- 當舎利行・石戸経士・中西繁隆・横井浩一 (2001) 地熱地域における貯留層診断技術—熱水流動シミュレーションと組み合わせた解析方法. 物理探査, 54, 433–454.

---

ISHIDO Tsuneo, SUGIHARA Mituhiko and NISHI Yuji (2014) Prediction of changes in geophysical observables by using so-called geophysical postprocessors.

---

(受付: 2014年3月27日)

# CO<sub>2</sub> 地中貯留での地盤変化を予測する —岩石力学—流体流動シミュレーション研究—

奥山康子<sup>1)</sup>・船津貴弘<sup>1)</sup>・藤井孝志<sup>1)</sup>

## 1. 岩石力学—流体流動シミュレーション技術とは？

CO<sub>2</sub>地中貯留では地下の貯留層にCO<sub>2</sub>を圧入・貯留するため、地下を満たした流体の圧力（間隙圧）を上げ、地下の応力分布を変化させる可能性があります。この変化はさらに、岩盤の変形や岩盤内の微小亀裂の活動などの動的変化につながる可能性があります。実際に天然ガス生産のためにCO<sub>2</sub>を圧入しているアルジェリア、In Salahガス田では、CO<sub>2</sub>圧入井の周りで年1cm程度の地盤隆起、ガス生産井の周りで同じ程度の地盤沈下が起きていることが、衛星からの合成開口レーダー観測で判明しています（Onuma and Ohkawa, 2009）。地質学的な変動帯にある日本でCO<sub>2</sub>地中貯留を行って、こういった変化が目に見える規模でおきる心配はないのでしょうか？ わが国でCO<sub>2</sub>地中貯留を安全に安定的に行い、貯留サイト周辺に限らず広く社会に受け入れてもらうためには、この問いに答えるための技術開発が欠かせません。

この技術の芽として注目されているのが、「岩石力学—流体流動連成シミュレーション技術」です。これは地下での流体流動のシミュレーションと、応力分布の変化にともなう岩石力学的变化のシミュレーションを連成させたもので、CO<sub>2</sub>地中貯留だけではなく、シェールガス開発や人工的な地熱貯留層形成など、地下での応力状態を変える必要のある開発行為が盛んになるにつれ注目されてきました。このシミュレーション技術は発展途上にありますが、中でも米国・ローレンス・バークレイ国立研究所（Lawrence Berkeley National Laboratory: LBNL）が開発した「TOUGH-FLAC」（Rutqvist *et al.*, 2002）は特に注目されています。TOUGH-FLACシミュレータは、LBNLが開発した流体流動シミュレータであるTOUGH2シミュレータと、土木工学や鉱山開発分野で岩盤安定性の評価に広く使われている商用シミュレータFLAC3Dを連成させたものです。TOUGH-FLACは、地熱開発など岩石物性上「硬岩」

とされる岩盤の流体流動を伴った変形の解析に実績があり（Todesco *et al.*, 2004）、またCO<sub>2</sub>地中貯留への適用例もできています（Rutqvist *et al.*, 2007, 2008, 2010）。

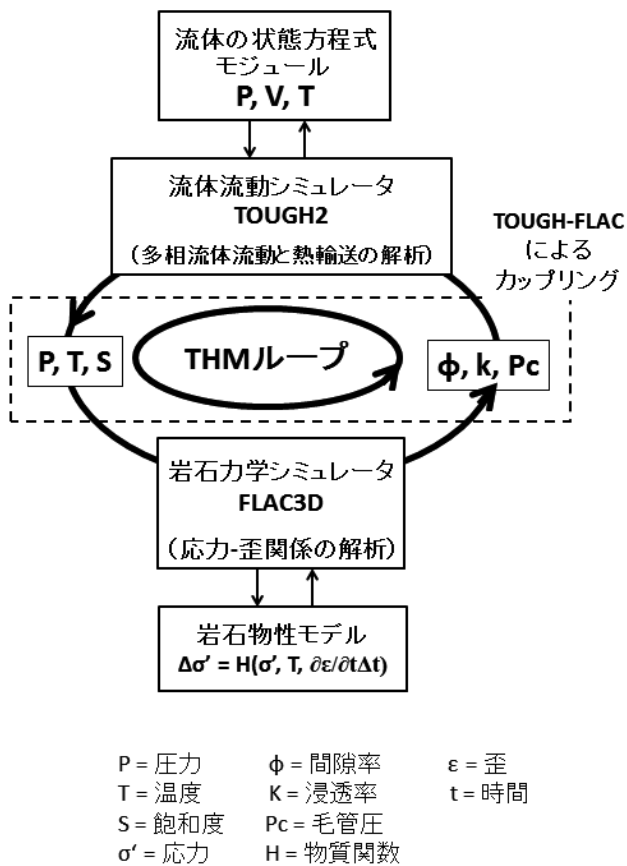
わが国でCO<sub>2</sub>地中貯留の場に想定されるのは、地球環境産業技術研究機構が実証試験を行った新潟県長岡地区に代表される新生代の地層であり、それらは岩石物性上「軟岩」と総称される堆積岩から主に構成されます。軟岩は、応力変化に対して硬岩と異なる応答をすることが経験的に知られ、硬岩地域の現象の解析に実績のあるTOUGH-FLACがそのまま軟岩岩盤へのCO<sub>2</sub>地中貯留に適用できるかは自明ではありません。わが国でのCO<sub>2</sub>地中貯留に向けTOUGH-FLACを軟岩用にカスタマイズする—これが産総研のCO<sub>2</sub>地中貯留研究開発での目標の1つです。

## 2. TOUGH-FLACシミュレーションの流れ

TOUGH-FLACシミュレータで取り扱う物理量と、シミュレーションでの情報の受け渡しを、第1図に模式的に示します。CO<sub>2</sub>貯留層は、地層水に満たされた多孔質媒体と考えられます。ここで貯留層に流体（この場合、CO<sub>2</sub>）を圧入すると、間隙流体圧が上がり、地層水と圧入流体の流動が起きます。間隙流体圧の変化は、貯留層岩石のわずかな変形につながります。また貯留層と圧入流体の間に温度差があると、流体が流動して広がることで熱が輸送され、温度変化に起因する岩石変形もおこるでしょう。流体流動シミュレータは間隙流体圧、温度、飽和度の変化を計算し、結果を岩石力学シミュレータに送ります。岩石力学シミュレータの側では、粒子の変形を計算し、間隙率・浸透率・毛管圧の変化として出力します。新たな浸透率などの値は、流体流動シミュレータ側で次のステップの流動計算に使われます。こうして計算は進みます。計算された変形の積み重なりが、岩盤・地盤の隆起や沈降という形で表現されます。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード：CO<sub>2</sub>地中貯留、岩石力学、流体流動、連成シミュレーション、変位



第1図 TOUGH-FLACで取り扱う物理量と計算の流れ. Rutqvist et al. (2002)に基づき作図.

### 3. CO<sub>2</sub>質流体活動による岩盤変位のナチュラル・アナログ研究

シミュレーション研究では、実データと計算結果をつき合わせる「ヒストリー・マッチング」が欠かせません。岩石力学-流体流動連成シミュレーションでのヒストリー・マッチングには、実際のCO<sub>2</sub>地中貯留実証試験などで岩盤に対する影響を計測したデータを用いるのが最も望ましいといえます。しかし岩盤の動的な変化はCO<sub>2</sub>地中貯留実証試験で起こってほしくないものの1つであり、実際に長岡などでは観測されていません。実証試験での実データ取得は無理であるため、産総研では、天然でのCO<sub>2</sub>質流体の活動による類似の現象の観測例をヒストリー・マッチングに使用する「ナチュラル・アナログ研究手法」を採用しています。ナチュラル・アナログ研究の対象地域には、長野県長野市南東部の松代地区を選定しました。ここでは、1965-1967年の足掛け3年にわたって顕著な群発地震が起き、のちには地割や断層露頭が出現し、地割れに沿ってCO<sub>2</sub>を含む高濃度の塩水が湧出するなど、CO<sub>2</sub>地中貯留で

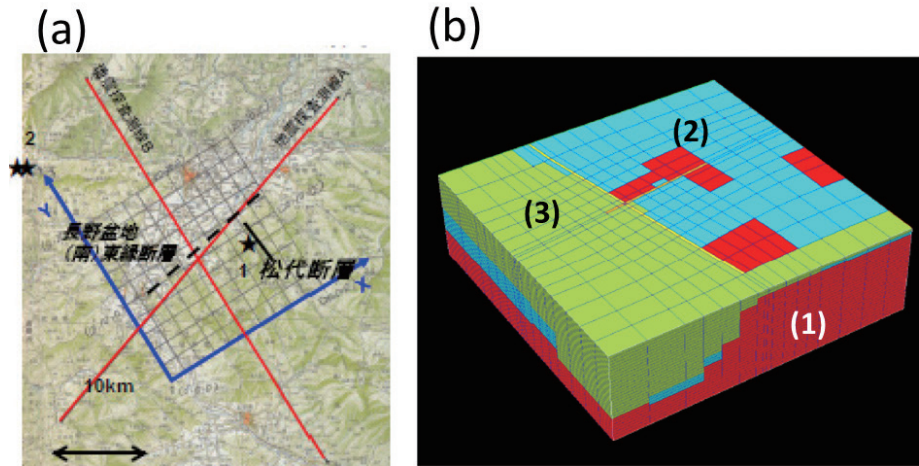
の極端な漏洩事象とみなせる天然現象が起きました(大竹, 1976; 石川, 2006)。この現象にて地下から湧き出した塩水は、総量1,000万トンと推定されています。CO<sub>2</sub>と塩水の自然湧出や地震活動は現在おさまっていますが、今では当時の湧水と似た水質の温水を地下深くからくみ上げて盛んに温泉利用しているように、松代一帯の地下はまだ高温の含CO<sub>2</sub>塩水で満たされているとみられます。

TOUGH-FLACを用いた松代群発地震の研究については、シミュレータ開発者であるLBNLの研究者たちによる先行研究がありますが(Cappa et al., 2010)、用いた地質モデルは極度に単純化されています。このため産総研では、実際の地質データに合致した地質モデル上でTOUGH-FLACが現象を再現するよう運用することを最初の課題として、研究を進めてきました。

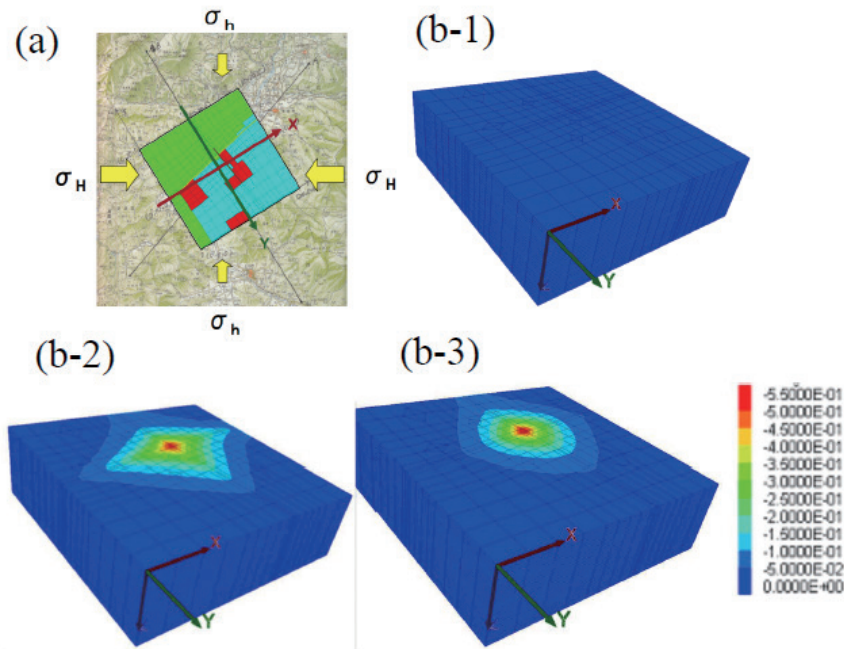
第2図に、シミュレーション研究用に作成した地質モデルを示します。地質モデルは、松代の市街地を中心とする地表20 km四方、深さは地下6 kmで、上面は海水準としています。松代地区の位置する長野県中-北部は、群発地震を契機に現在に至るまで繰り返し地球物理学的地下構造調査が行われ、地震波速度構造などの地下データが豊富です。また地表地質も、産総研による調査を含め、比較的よくわかっています。地質モデルは、これら既存データを基に作成しました(※地質モデル作成にあたって参照した文献は、本論では割愛します)。この地質モデルは、P波速度がそれぞれ6.0, 4.5, 3.0 kmである3層構造をなし、それらが地震波探査などで得られた地下断面と合った分布をなす点が先行研究と異なります。モデル内には、群発地震期に注目された「松代断層」と、地質学的に存在が推定された「長野盆地南東縁断層」(加藤・赤羽, 1986)を共役関係に置きました。広域応力場の設定は、東西に最大圧縮軸、南北に最小圧縮軸です(第3図)。このモデルを断層部分は非常に細かく、周囲のマトリックス部分は断層から遠方に向けて粗くなるよう段階的にグリッド分割し(深度方向は500 m間隔で均等分割)、セル総数を9,248としました。試験的なシミュレーションにあたっての各種パラメータ(浸透率、岩石のヤング率など)やCO<sub>2</sub>質流体の圧入レートは、先行研究(Cappa et al., 2010)にあわせました。これは、先行研究に対して地質モデルの大きさと精密度を変えたシミュレーションに相当します。

試験的なシミュレーションでの上面の鉛直変位分布を、第3図に示します。計算された最大隆起量は55 cmで、観測量約75 cmにほぼ匹敵する値となりました。モデル上面での隆起量分布や、破壊領域(天然現象での震源域に相





第2図 松代地区を対象としたシミュレーション用地質モデル. a) 地勢図上に示すモデル範囲. 赤色実線: 1969年の反射法人工地震探査測線, 黒実線: 松代断層, 黒鎖線: 長野盆地南東縁断層 (SEBF). b) 3次元地質モデル. a)の北西側から見た配置. (1) 6 km 層, (2) 4.5 km 層, (3) 3.0 km 層.



第3図 試験的シミュレーションの結果. a) 仮定した広域応力配置. b) TOUGH-FLACシミュレーション結果. b-1: 圧入前, b-2: 3年経過後, b-3: 5年経過後. 深さ方向を正に取っているため, 隆起はマイナスの値で表現されている.

当)の広がりについても、観測事実に比較的良好であった結果を得ました。また非対称な隆起量分布など、地質モデルの特性を反映した結果が出る要素があることもわかりました（詳しくは、Funatsu *et al.*, 2013参照）。

#### 4. むすび

TOUGH-FLACを軟岩用にカスタマイズするためには、岩石の変形様式を記述する構成則を軟岩用に更新する必要

があります。次のステップでは、CO<sub>2</sub>地中貯留の場を模した流体存在下で軟岩岩石に対する力学試験を行って、流体流動に伴う軟岩岩盤の変形様式を導き、それをシミュレータに組み込むことが必要になります。こうして改良したシミュレータを地質モデル上で動かして良好な結果を得ること、さらに松代地区に留まらない他の地域の地質条件に対しても適用可能であることを確認したうえで、最終的には手法を技術手順としてまとめることを目指していきます。

軟岩岩石の力学特性試験では、日本の後期新生代の多

様な岩石類も取り上げています。これは研究開発の最終目標が、わが国でのCO<sub>2</sub>地中貯留に向けたシミュレーション手法の一般化にあるからです。最近行った代表例が、CCS大規模実証試験が予定されている北海道、苫小牧地区の坑井試料についての摩擦強度試験です。この試験の結果は断層の安定性評価に用いられ、評価結果を受けて2012年2月に実証試験の開始が正式に決まりました。産総研は直接CO<sub>2</sub>地中貯留試験を行うわけではありませんが、この事例のように実証試験の要所要所に対してカギとなる情報を提供し、地下に関する専門研究所として必要な助言を行っています。こうして、わが国でのCO<sub>2</sub>地中貯留の実用化に向け貢献しています。

## 文 献

- Cappa, F., Rutqvist, J. and Yamamoto, K. (2009) Modeling crustal deformation and rupture processes related to upwelling of deep CO<sub>2</sub>-rich fluids during the 1965–1967 Matsushiro earthquake swarm in Japan. *J. Geophys. Res.*, **114**, B10304, doi:10.1029/2009JB006398.2009.
- Funatsu, T., Okuyama, Y., Lei, X-L., Nakashima, Y., Uehara, S., Fujii, T. and Nakao, S. (2013) Assessing the geomechanical responses of storage system in CO<sub>2</sub> geological storage: an introduction of research program in the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). *Energy Procedia*, **37**, 3875–3882.
- 石川有三 (2006) 松代群発地震から40年. 月刊地球, **28**, 753–757.
- 加藤碩一・赤羽貞幸 (1986) 長野地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, つくば, 120p.
- Onuma, T. and Ohkawa, S. (2009) Detection of surface deformation related with CO<sub>2</sub> injection by DInSAR at In Salah, Algeria. *Energy Procedia*, **1**, 2177–2184.
- 大竹政和 (1976) 松代地震から10年. 科学, **46**, 303–313.
- Rutqvist, J., Wu, Y.-S., Tsang, C.-F. and Bodvarsson, G. (2002) A modeling approach for analysis of coupled multiphase flow, heat transfer, and deformation in fractured porous media. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **39**, 429–442.
- Rutqvist, J., Birkholzer, J., Cappa, F. and Tsang, C.-F. (2007) Estimating maximum sustainable injection pressure during geological sequestration of CO<sub>2</sub> using coupled fluid flow and geomechanical fault-slip analysis. *Energy Convers. Manage.*, **48**, 1798–1807.
- Rutqvist, J., Birkholzer, J. T. and Tsang, C.-F. (2008) Coupled reservoir-geomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO<sub>2</sub> injection in multilayered reservoir-caprock systems. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **45**, 132–143.
- Rutqvist, J., Vasco, D. and Myer, L. (2010) Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO<sub>2</sub> injection and ground deformation at In Salah, Algeria. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **4**, 225–230.
- Todesco, M., Rutqvist, J., Chiodini, G., Pruess, K. and Oldenburg, C. (2004) Modeling of recent volcanic episodes at Phlegrean Field (Italy): geochemical variations and ground deformation, *Geothermics*, **33**, 531–547. doi: 10.1016/j.geothermics. 2003.08.014.

---

OKUYAMA Yasuko, FUNATSU Takahiro and FUJII Takashi (2014) Assessing ground motions associated with CO<sub>2</sub> geological storage; coupled fluid flow-rock mechanics simulation.

---

(受付：2014年3月27日)

# CO<sub>2</sub> 地中貯留における砂岩泥岩互層の遮蔽性能評価

徂徠正夫<sup>1)</sup>・佐々木宗建<sup>1)</sup>・藤井孝志<sup>1)</sup>・加野友紀<sup>1)</sup>・上原真一<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub>地中貯留において、地下深部の帯水層は有望な貯留層の一つである。ところが、我が国の帯水層は、砂岩と泥岩それぞれの薄い層が交互に堆積した地層（砂岩泥岩互層）を形成していることが一般的である。このような互層にCO<sub>2</sub>を貯留する場合、各岩層で鉱物組成や粒径分布等の違いに依存して遮蔽性能やCO<sub>2</sub>の流動性、さらには地化学プロセスまでが変化するため、単一の岩層の場合と比較してCO<sub>2</sub>の挙動がより複雑になることが予想される。したがって、貯留後のCO<sub>2</sub>の挙動を評価する際には、互層全体について、物理的、化学的両方の側面から体系的な解析を行うことが必要となる。

貯留後のCO<sub>2</sub>の挙動は複雑かつ長期にわたるプロセスを含んでおり、直接観測することも困難であるため、通常その予測は数値シミュレーションに依存している。しかしながら、現行のシミュレーションには、種々の仮定や未知のパラメータが多数設定されているため、信頼性の向上に向けこれらの不確定性を排除していかなければならない。本稿では、これら未知のパラメータのうち、特に砂岩泥岩互層内での遮蔽性能を決定づける2つのパラメータ、すなわち、物理的観点からの毛管圧（スレッシュホールド圧）とより長期の化学的観点からの炭酸塩鉱物の反応速度について、現在取り組んでいる研究内容を紹介する。

## 2. 砂岩泥岩互層に対応したスレッシュホールド圧の測定

CO<sub>2</sub>地中貯留では、浮力に起因してCO<sub>2</sub>が上昇し地表に漏洩することを防止するために、泥岩やシルト岩のような低浸透性の岩層の下部にCO<sub>2</sub>を注入することが想定されている。これらの岩層の下面では、CO<sub>2</sub>にかかる上向きの圧力（単位面積当たりの浮力あるいは注入圧）と下向きの毛管圧が作用しているが、CO<sub>2</sub>圧が毛管圧よりも大きくなると泥岩あるいはシルト岩内部にCO<sub>2</sub>が浸透する。したがって、岩石の遮蔽性能は、CO<sub>2</sub>が試料内部に浸透を開始する際の毛管圧であるスレッシュホールド圧を計測することにより評価される。しかし

ながら、スレッシュホールド圧は岩石内部の局所的な構造に支配されるため、天然の岩石ではその値に大きなばらつきが生じることが予想される。すなわち、対象とする岩石が取り得るスレッシュホールド圧の範囲を把握するためには、単一ではなく、多数の試料についての計測が不可欠となる。しかも、大規模なCO<sub>2</sub>地中貯留の実施に際しては、広域的に遮蔽性能を評価する必要がある。ところが、現実的には貯留サイトにおいて採取できる岩石コアの数は限られており、必ずしもサイト全域にわたってコア試料を入手できる訳ではない。

これに対して、筆者らは、内部構造を制御した人工試料を用いて単純な系からより複雑な系へと順次拡張していくことにより、スレッシュホールド圧のばらつきを人為的に再現する手法を提案している（徂徠ほか、2011）。この手法を適用すると、岩石試料を手当たり次第に測定することなく、岩石が持ち得るスレッシュホールド圧のばらつきの範囲を予測することが可能となる。その第一段階として、砂岩泥岩互層が岩相に応じて異なる粒径分布を持つ点を踏まえ、シリカビーズからなる焼結体を作製し、粒径（0.1, 0.2, 0.5, 1, 5, 10 μm）を種々に変えることで浸透率を変動させた。CO<sub>2</sub>の浸透実験は、地下1000 mの環境条件に相当する10 MPa, 40°Cにおいてあらかじめ試料内部に水を充填しておき、次に試料の下部からCO<sub>2</sub>を10 MPaより高い圧力で段階的に加圧注入することにより行った。このとき、試料両端の差圧と水、CO<sub>2</sub>それぞれの流量の測定に加えて、試料上面をカメラで観察した。

第1図に、0.1 μmの粒径試料を例として試料表面の観察結果を示す。はじめは毛管圧の効果によりCO<sub>2</sub>は試料を貫通することができないが（第1図a）、CO<sub>2</sub>を加圧させていくことにより、やがて試料表面からCO<sub>2</sub>のブレイクスルーが起こる。この際、試料内部で粒子は比較的均質に充填されていたにも関わらず、CO<sub>2</sub>のブレイクスルーは特定の1点から開始した。その後、差圧の増加に伴いこの点を通過するCO<sub>2</sub>量が増加したが（第1図b）、さらに差圧を増加させていくと、ブレイクスルー点が徐々に増加し、最終的に表面全体が覆われた（第1図c）。本研究では、最初のブレイクスルーが確認されたときの差圧をスレッシュホールド圧として定義した。

得られた焼結体試料のスレッシュホールド圧と、別途水に対し

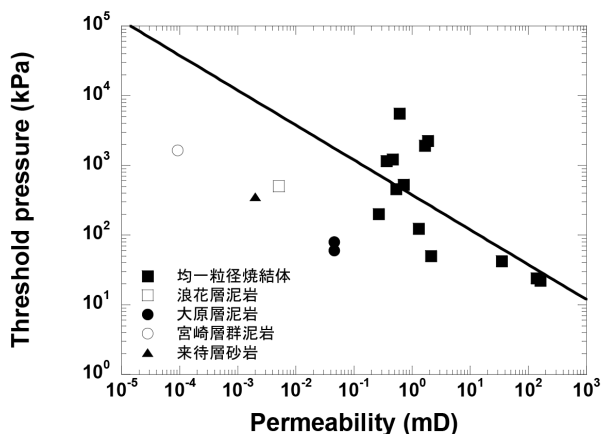
1) 産総研 地圏資源環境研究部門  
2) 東邦大学理学部 生命圏環境科学科



第1図 試料表面からのCO<sub>2</sub>のブレイクスルーの様子：a) ブレイクスルー前，b) 試料表面上1点からのCO<sub>2</sub>のブレイクスルー，c) 試料全面からブレイクスルー。

て測定した浸透率の関係を第2図に示す。均一粒子の最密充填を仮定した場合には、両者のパラメータは両対数グラフ上で直線関係として表わされるが、実際には焼結体内部の粒子はランダムに充填しているため、測定値は最密充填直線の周囲に分散し、その傾向は低浸透率側でより大きくなっている。これまでの解析からは、試料の焼結条件により粒子の充填状態が変化し、粒子充填の不均質性が卓越すると直線の上側、全体的には均質であるが局所的に亀裂のような不均質構造が含まれる場合には直線の下側にくることが示唆されている。なお、第2図には各種堆積岩に対する測定結果も併せて示した。全般的に焼結体よりも下方にプロットされているが、これは天然の岩石に含まれる粒子のサイズや形状、鉱物組成が多様であることに起因している。言い換えると、これらの因子により岩石のスレッシュヨルド圧は大きく変動することになる。

このようなスレッシュヨルド圧の変動は、注入後のCO<sub>2</sub>プルームの広がりや予測の際にどの程度影響するのであろうか。ここでは、層厚が100 mの砂岩層と泥岩層からなる砂岩泥岩互層を設定し、深度950～1050 mの砂岩層にCO<sub>2</sub>を年間100万トンずつ50年間注入した場合のCO<sub>2</sub>プルームを計算した。各層の鉛直方向の浸透率をそれぞれ10 mDおよび0.1 mDと仮定し、泥岩層のスレッシュヨルド圧に対して0.1 mDに対応した実験の上限値1.2 MPaと下限値150 kPaを与えて比較したところ、特に注入終了後の期間においてCO<sub>2</sub>プルームの広がりや大きな影響がみられた。すなわち、スレッシュヨルド圧を高くした場合は、CO<sub>2</sub>の大部分が長期にわたり注入層内に留まっていたのに対して（第3図a）、スレッシュヨルド圧を低くすると、CO<sub>2</sub>は注入終了後も浮力により泥岩層内を上昇し注入終了から1000年後には1層上の砂岩層にまで到達した（第3図b）。このように、スレッシュヨルド圧の値は貯留後のCO<sub>2</sub>挙動の予測に大きな影響を及ぼす。今後は岩石のスレッシュヨルド圧の変動範囲を決めることが課題となるが、次のステップ

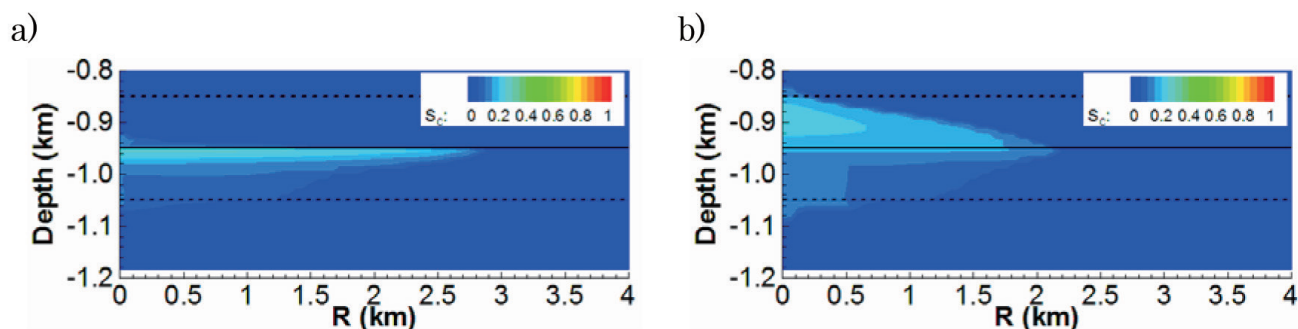


第2図 焼結体および各種堆積岩におけるスレッシュヨルド圧と浸透率の相関性（直線は球状粒子の最密充填を仮定した場合の計算値）。

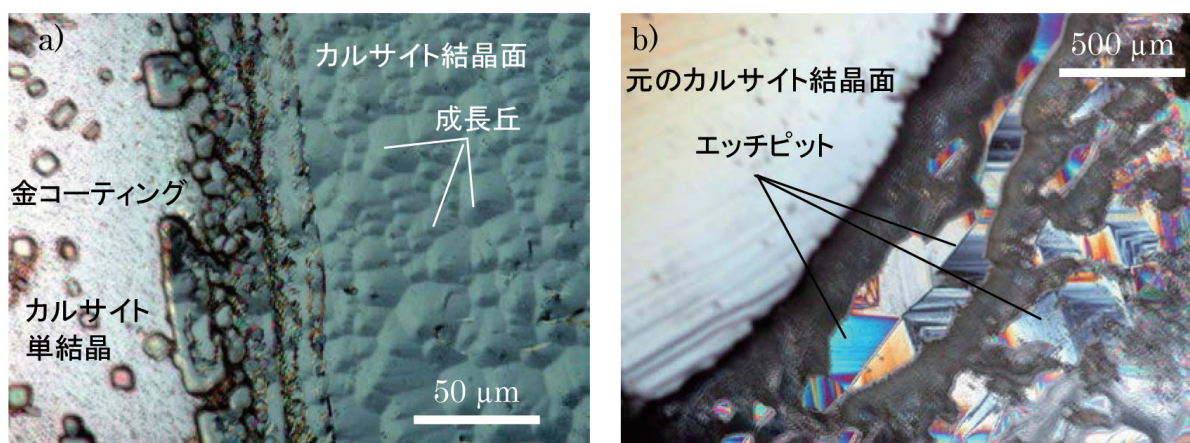
として、異なるサイズの粒子を混合することによる粒径分布の効果に加えて、粒子の形状、鉱物組成等がスレッシュヨルド圧に及ぼす影響についても検討を進めている。

### 3. 炭酸塩鉱物の現場反応速度の測定

帯水層に貯留されたCO<sub>2</sub>は地層水に溶解して炭酸となり、周囲の岩石に含まれる鉱物を長期的な時間スケールで溶解させる。通常、鉱物の反応速度はきわめて遅いが、例外的に炭酸塩鉱物であるカルサイトやアラゴナイト（いずれも炭酸カルシウム）は反応性が高い。炭酸塩鉱物の溶解が砂岩泥岩互層の中で起こると、特に各層の厚さが薄い場合には、より上位の層への漏洩経路の形成につながる可能性がある。一方で、砂岩層中の鉱物から溶出した陽イオンが炭酸成分と結合することで炭酸塩鉱物の沈殿も起こり得る。この場合には、砂岩層の目詰まりにより遮蔽性能が強化される。このように、炭酸塩鉱物の反応はCO<sub>2</sub>地中貯留に伴われる最も重要な化学プロセスの一つであり、その速度を知ることはCO<sub>2</sub>地中貯留の地化学シミュレーションに



第3図 泥岩層のスレッシュヨルド圧の違いがCO<sub>2</sub> プルームに及ぼす影響（実線は砂岩層の上端、破線は泥岩層の上端を示す）：泥岩層のスレッシュヨルド圧が a) 1.2 MPa, b) 150 kPa.



第4図 カルサイト劈開面の微分干渉顕微鏡像：a) 増富温泉での成長実験（反応開始30分後）、b) 七里田温泉での溶解実験（反応開始336時間後）。

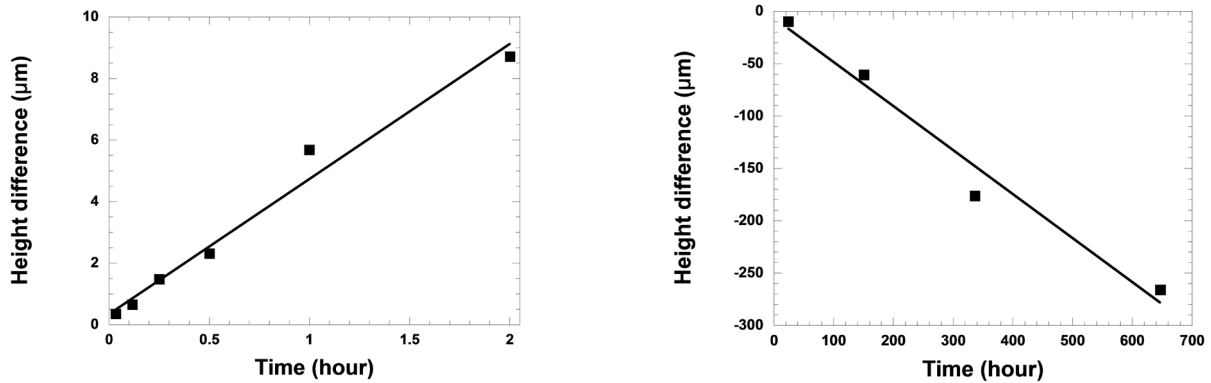
において不可欠となっている。

一般的に、実験室で鉱物の反応速度を計測すると、反応時間、表面積、表面状態（欠陥、コーティング）、間隙水組成、物質移動、生物作用等のさまざまな因子が影響することで、天然における反応速度と著しく乖離することが指摘されている（Blum and Stillings, 1995; White and Brantley, 2003）。そこで筆者らは、日本各地の炭酸泉や炭酸水素塩泉をCO<sub>2</sub>地中貯留の模擬サイトとみなし、あらかじめ用意した炭酸塩鉱物試料をこれらの温泉水中で反応させることにより、現場での反応速度を求めることを試みている。これらの温泉には、炭酸塩鉱物が過飽和条件で成長する場合と未飽和条件で溶解する場合がそれぞれ含まれる。いずれのサイトにおいても、炭酸塩鉱物の劈開片試料を複数個、温泉水中に最長1ヶ月間浸漬させ、所定時間ごとに1個ずつ回収して劈開面の変化量を解析した。この際に、実験前後で変化しない基準面とするために、あらかじめ劈開面の一部について金コーティングあるいはゴム被覆を行った。

はじめに、第4図aに、山梨県増富温泉における過飽和温泉水中で反応させたカルサイト劈開面の微分干渉顕微鏡像を示す。実験開始直後から成長丘と呼ばれるピラミッド

型の成長パターンが多数形成し、これらの成長丘は時間の経過とともに拡大と合体を繰り返す様子が明らかとなった。ここで興味深いことに、金をコーティングした領域では、菱面体を呈するカルサイト単結晶が沈殿することが示された。このことは、結晶面上への均質な溶質のフラックスに対して、カルサイト結晶面では直接溶質が取り込まれて成長丘が形成するが、金コーティング面では溶質を取り込めないため、カルサイトが新たに核形成することを意味している。これに対して、第4図bに大分県七里田温泉における未飽和条件での実験結果を示す。ここでは実験時間が長く反応量が多かったために、第4図aと比較して画像のスケールが異なっている。この場合は、溶解パターンである逆ピラミッド型のエッチピットが形成し、時間の経過とともにエッチピットの拡大と合体が観察された。

次に、これらのカルサイト劈開面に対して、ナノレベルからの鉛直分解能を有する位相シフト干渉計およびレーザー顕微鏡を用いて基準面と反応面の段差量の計測を行った（Sorai *et al.*, 2007）。第5図に、第4図の実験に対応した段差量の経時変化を示す。段差量は、前者においては基準面からの成長としてプラスに、後者においては基準面



第5図 カルサイトの反応に伴う段差量の経時変化：a) 増富温泉での成長実験，b) 七里田温泉での溶解実験。

からの後退としてマイナスに表示した。第5図における近似直線の勾配からは、カルサイトの成長速度および溶解速度が、それぞれ  $3.3 \times 10^{-5} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  および  $3.2 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  と見積もられた。ところが、地化学シミュレーションで一般的に用いられる米国地質調査所のデータベース (Palandri and Kharaka, 2004) に基づいて、同じ温度、pH条件での反応速度を抽出すると、成長速度は  $4.5 \times 10^{-5} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、溶解速度は  $2.9 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  となり、特に成長速度に関して今回の値の方が30%近く減少することが示された。上記のデータベースでは、温度、pHおよび飽和度のみの関数として反応速度が定義されており、溶液中に含まれる不純物の影響は考慮されていない。しかしながら、特にマグネシウムイオンの存在下では、カルサイトの核形成および成長が抑制されることが古くから知られており (例えば、Morse *et al.*, 2007)、今回の実験でも、主としてマグネシウムイオンに代表される微量溶存成分により成長速度が低下した可能性がある。一方で、溶解速度については実測値と計算値がほぼ同等であったことから、カルサイトの溶解プロセスに対する不純物効果は小さいことが予想される。

#### 4. おわりに

CO<sub>2</sub>地中貯留の実用化に向け、貯留後のCO<sub>2</sub>の挙動を予測する手段として、数値シミュレーションが果たすべき役割は重要である。しかしながら、数値シミュレーションは多くの不確実性のもとに成り立っており、入力パラメータ1つの違いでその結果は大きく左右される可能性があることを忘れてはならない。本稿では、砂岩泥岩互層へのCO<sub>2</sub>地中貯留に際してCO<sub>2</sub>の挙動を特徴づける2つのパラメータに注目して、その計測結果を紹介した。ただし、これらのパラメータはあくまでも代表例にすぎない。今後、より一層数値シミュ

レーションの信頼性を上げていくために、実証試験でのモニタリング結果や室内実験、ナチュラル・アナログ研究などを適切に参照しつつ、不確実性の高いデータや仮定を一つ一つ地道に検証していくことが求められている。

#### 文 献

- Blum, A. E. and Stillings, L. L. (1995) Feldspar dissolution kinetics. In White, A. F. and Brantley, S. L. eds., *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*, Reviews in Mineralogy, **31**, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 291–351.
- Morse, J. W., Arvidson, R. S. and Lüttge, A. (2007) Calcium carbonate formation and dissolution. *Chem. Rev.*, **107**, 342–381.
- Palandri, J. L. and Kharaka, Y. K. (2004) A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling. *U.S.G.S. Open File Report 2004-1068*, 64p.
- Sorai, M., Ohsumi, T., Ishikawa, M. and Tsukamoto, K. (2007) Feldspar dissolution rates measured using phase-shift interferometry: implications to CO<sub>2</sub> underground sequestration. *Appl. Geochem.*, **22**, 2795–2809.
- 徂徠正夫・船津貴弘・中山一夫 (2011) 超臨界CO<sub>2</sub>に対する人工キャップロック試料のシール性能評価. 石油技術協会誌, **76**, 32–38.
- White, A. F. and Brantley, S. L. (2003) The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field? *Chem. Geol.*, **202**, 479–506.

SORAI Masao, SASAKI Munetake, FUJII Takashi, KANO Yuki and UEHARA Shinichi (2014) Evaluation of sealing performance of alternated sandstone and mudstone layers on CO<sub>2</sub> geological sequestration.

# 誕生石の鉱物科学

— 5月 ひすい —

奥山康子<sup>1)</sup>

唐突ですが、「きせき」という音を耳にしてどういう漢字表記を思い浮かべますか？ 奇跡、軌跡、鬼籍、貴石などなど数多い「きせき」の中から「輝石」を真っ先に思い浮かべる人は、地球科学に関係する人か大学受験生くらいでしょう。世間的にはマイナーな輝石ですが、地球科学ではいうまでもなくとても大切で、火成岩や一部の變成岩で岩石のFeやMgを担う、なくてはならぬ存在です。輝石は、ガーネット同様、多くの鉱物を包括する一大ファミリーを成します。中にはFe・Mg以外の元素を主成分にする物もあり、広範囲の組成の岩石に出現しています。

輝石のように岩石を形作る鉱物を、造岩鉱物と呼びます。造岩鉱物であるということは、希少性が重要な要素である宝石とは対極にあるともいえるわけです。しかし日本でエメラルドと並んで今月の誕生石とされる「ひすい」は、そうでもありません。

宝石ひすいのうち「硬玉」、「本ひすい」などと呼ばれるものは、ひすい輝石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_6$ という輝石の1種のごく細かな結晶から成る集合体です。組織学的な屁理屈をいえば、鉱物ではなく岩石です。宝石ひすいとして扱われるものの中には、同じような微細集合体を成す透閃石やアクチノ閃石もあり、ひすい輝石集合体の硬玉に対して「軟玉」と呼ばれます。しかし本稿ではこれらは脇に置いておくことにします。

ひすい輝石は、地殻の温度圧力のもとでは高压低温型變成岩に限定される鉱物です。ひすい輝石の組成は曹長石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ から $\text{SiO}_2$ を1分子引いたものに相当し、沈み込み帯や衝突帯での高压變成作用でNaに富む斜長石が分解して生成します。多くの輝石の仲間と異なりFeやMgを担うものではありませんが、岩石にとってこれらと並んで重要なNaとAlを主成分とし、平たく言えば高压變成岩の中で長石の代わりを務めるともいえるでしょう。

ひすいは、中国を中心に東洋で愛でられてきた宝石です。中南米の古代文化でも使われていましたが、誕生石の始まった欧米圏では異国趣味の一種として受け入れられている感があります。中国を中心に見れば、その東側



第1図 「琅玕(ろうかん)」と呼ばれる上質の緑色ひすい。0.5g.

には日本から台湾に至る沈み込み帯型の高圧變成岩が分布し、また中国南端部からミャンマーにかけてはインド亜大陸の衝突帯の蛇紋岩メランジが分布します(Teraoka and Okumura, 2010)。これはひすいの産出に好ましいセッティングで、ひすいが東洋の宝石であるのはつまりは産地に恵まれているからだろうかかえます。宝石になるひすいは、高压變成岩とともに分布する蛇紋岩メランジの中の、構造岩塊として産します。ひすいと聞けば、誰もが独特のしっとりした緑色を思い浮かべます(第1図)。ひすいが若葉の季節である5月の誕生石とされるのは、日本では緑色の宝石としてエメラルド以上に親しまれているためでしょう。

しかし純粋なひすい輝石は典型元素ばかりで構成されるため、無色の鉱物です。実際、白いひすいは珍しくありません。ひすい産地として知られる新潟県糸魚川市は、海岸でひすい拾いができることでも有名ですが、地元では「本物のひすいを探すなら、緑色ではなく、白い石を探せ」といわれているくらいです。台北市の故宮博物院には、ひすいの塊の白い部分と緑色の部分をそれぞれ白菜の軸と葉の先にみたとて彫り分けた、見事な彫り物が収蔵されています(<http://www.npm.gov.tw/ja/Article.aspx?sNo=04001080> 2014/03/14 確認)。では美しい緑色の原因は何かというと、それは微量のCrのせいであ

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード：宝石、誕生石、鉱物科学、造岩鉱物、希少性、輝石、ひすい輝石、オンファース輝石

ろうと長らく考えられてきました。ひすい輝石のAlをCr<sup>3+</sup>で置き換えると、コスモクロアNaCrSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>という鉱物になります。どぎついくらいの緑色が特徴の鉱物で、名前の通り最初は隕石から発見されました。ひすいの世界的大産地ミャンマーでは、ひすいと同じような産状で塊状のコスモクロアを産します。こういった関係から、ひすいの緑色はCrの混入（鉱物学的に表現すれば、ひすい輝石とコスモクロアの固溶体）のためだろうと漠然と考えられてきたのです。たとえば平凡社「地学辞典」の記述をご覧ください。

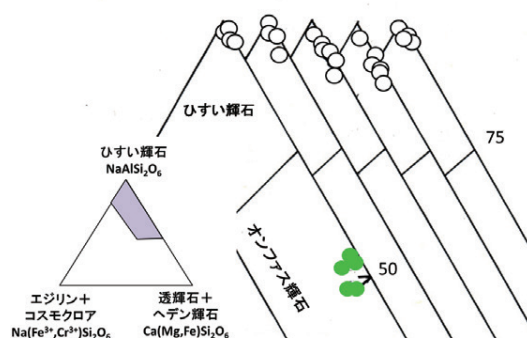
ところで宝石のひすいには、代表的な緑色と本来の白色の他にも、淡紫色や淡青色のものが知られていますが、発色の原因は長年わからないままでした。糸魚川市のフォッサマグナミュージアムの宮島 宏さんは、この謎に挑み、地元の収集家の協力も得て数多くのひすいのマイクロプロブ分析を行いました。まさに産地の強みを生かした研究でしょう。この研究は、糸魚川石をはじめとするSrやZrを含む新鉱物の発見につながりました。

この研究の副次的成果が、糸魚川産の緑色ひすい（第2図）の性質を明らかにしたことです。ひすいの色と微細組織と分析結果を照合した結果、糸魚川産の緑色ひすいはCrではなく、かわってFeによって発色していたのがわかったのです（宮島，2010）。第3図は、ひすい輝石をはじめとするアルカリ輝石（※Naを主成分とする単斜晶系の輝石の総称）の化学的分類図の一部です。図では、単斜晶系の輝石のベースともいえる透輝石-ヘデン輝石によるCa(Mg, Fe)、ひすいの成分NaAl、およびNa(Fe<sup>3+</sup>, Cr<sup>3+</sup>)という3成分の量比によってアルカリ輝石を分類しています。この図でひすい輝石と透輝石-ヘデン輝石の中間に、オンファス輝石という鉱物の領域があるのにご注意ください。糸魚川産の白色・淡灰色・淡紫色のひすいはほぼひすい輝石頂点付近の純度の高い組成であるのに対し、緑色ひすいの分析値は軒並みオンファス輝石の領域に落ちたのです。つまり、ここの緑色ひすいはオンファス輝石とするのが鉱物学的には正確である、という結果になったのです。この地域にオンファス輝石が存在することはすでに報告されていましたが（Oba *et al.*, 1992）、ひすいの発色と系統的に対比したのは宮島さんが初めてでした。

オンファス輝石は、パイロプ系ざくろ石とともに、玄武岩質の高圧変成岩であるエクロジャイトの構成鉱物です。糸魚川の緑色ひすいはオンファス輝石と当の宮島さんから聞いて、なぜかちょっとがっかりしました。ただの造岩鉱物かあ。なまじアルカリ輝石固溶体を知っていたために味わう、ちょっとした失望でした。



第2図 糸魚川産ひすい原石. 緑色の濃淡が認められる. 画面横幅は約3 cm.



第3図 アルカリ輝石分類図（部分）と、糸魚川地域の4か所に産するひすい中の輝石の化学組成. Oba *et al.* (1992)に基づき作図. 白丸印: 白色・灰色・淡紫色ひすい, 塗りつぶした丸印: 緑色ひすい.

たとえ鉱物学的実態が何であれ、糸魚川産の宝石ひすいの値打ちに響くことはありません。美しい物はあくまで美しい、ただそれだけです。

## 文献

宮島 宏 (2010) とっておきのヒスイの話 (第3版). フォッサマグナミュージアム, 糸魚川市教育委員会, 96p.

Oba, T., Nakagawa, Y., Kanayama, K. and Watanabe, T. (1992) Notes on rock-forming minerals in the Joetsu district, Niigata Prefecture, Japan. (5) Lavender jadeite from the Kotaki river. *Bul. Joetsu Univ. Educ.*, 11, 367-375.

Teraoka, Y. and Okumura, K. (2010) *Geological map of Asia, scale 1:5,000,000*. Geological Survey of Japan, AIST.

OKUYAMA Yasuko (2014) Mineralogical science of birthstones — May: Jade —.

(受付: 2014年3月17日)



2013 年度第 2 四半期（7 月～9 月）の地質相談報告

下川浩一（産総研地質標本館）

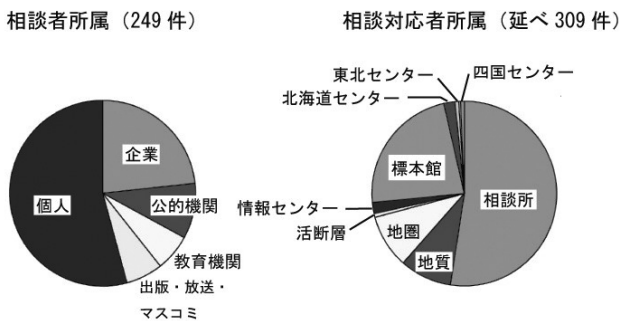
2013 年度第 2 四半期の産総研地質分野における相談件数は 249 件、回答者が複数の場合の延べ件数は 309 件で 2012 年度同期（以下、前年度；234 件、延べ 309 件）と比べて、件数はやや増加しました。また、2013 年度第 1 四半期（以下、前期；187 件、延べ 223 件）と比べると大幅に増加しました。

相談者の所属内訳では、前期と異なり夏休みの相談を含むことから、個人の相談が 135 件（54%）と半分以上を占め、次いで企業 58 件（23%）、公的機関 24 件（10%）、教育機関 16 件（6%）、放送出版マスコミ 16 件（6%）となっています（第 1 図）。前年度と比べ個人の相談が 33 件（12%）増加し、公的機関からの相談は 13 件（6%）減少しました。

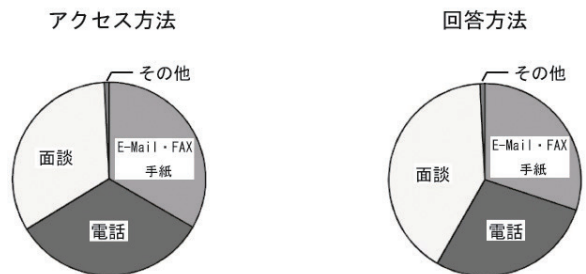
相談対応者の所属については、相談所が 162 件（52%）に対応しており、相談所に相談があったが、専門家の回答が必要のため研究者に対応を依頼したものの、または直接研究者に相談があったものが 59 件（19%）、地質調査情報センターと地質標本館（地質相談所を除く）が 77 件（25%）、地域センターが 11 件（4%）でした（第 1 図）。

相談者からのアクセス方法については、メール（ファックス・手紙を含む）が最も多く 83 件（33%）で、次に電話と面談がともに 82 件（33%）、となっています（第 2 図）。また、回答方法では、電話相談の後面談で回答することも多く、面談が最多の 102 件（41%）でした（第 2 図）。

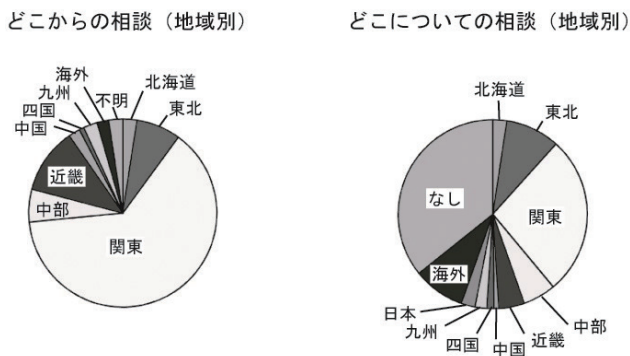
相談者の都道府県別の内訳について、今期は 33 都道府県からアクセスがありました。内訳は、茨城県の 72 件



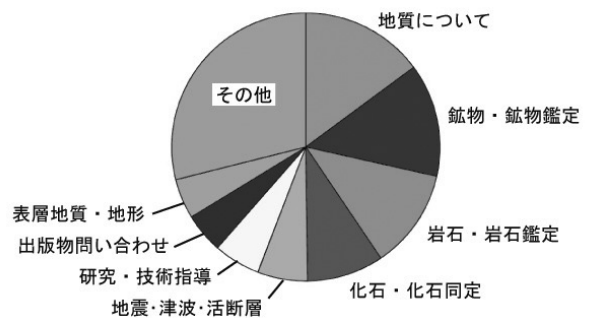
第 1 図 2013 年度第 2 四半期地質相談の相談者所属（左）および相談対応者所属（延べ数、右）。



第 2 図 アクセス方法（左）および回答方法（右）。



第 3 図 相談者所在地（左）および相談対象地域（右）。



第 4 図 地質相談内容内訳。

(29%) をトップに、東京都から 58 件 (23%)、千葉県から 14 件 (6%) など、関東地域から 158 件 (63%) の相談がありました (第 3 図)。他の地域では、兵庫県が 15 件 (6%)、宮城県と大阪府が同数の 9 件 (4%) となっています。ある特定の地域についての相談かどうかを調べてみると、半分以上 (132 件, 53%) が日本各地の地質などについての問い合わせで、外国についてのものは 22 件 (9%) ありました (第 3 図)。

今期の相談内容については、夏休みを挟んで小学生等の相談が多く、鉱物・鉱物鑑定、岩石・岩石鑑定、および化石・

化石同定を合わせると 87 件と全体の 1/3 以上を占め (第 4 図)、個人からの問い合わせでは半分以上を占めました。そのほか、地質についての質問や、地震関係、出版物問い合わせ、表層地質・地形、研究・技術指導など、多種の案件が寄せられました。企業からは地質についての相談が最も多く、地方公共団体等の公的機関からの相談は資料提供に関するものがトップでした。なお、地質図に関する相談、または地質図に基づいて回答した相談の件数は 34 件で、全体の 14% を占めています。

## 地域地質研究報告「京都東南部」地域の地質 (5 万分の 1 地質図幅) について

脇田浩二 (産業技術総合研究所客員研究員, 山口大学)

ここでは、2013 年 4 月に刊行された地域地質研究報告「京都東南部」地域の地質 (5 万分の 1 地質図幅) を紹介する。本報告の著者は、脇田浩二・竹内圭史・水野清秀・小松原 琢・中野聡志・竹村恵二・田口雄作 (敬称略) である。中野 (滋賀大学)・竹村 (京都大学) 以外は、産業技術総合研究所の所属である。ただし、脇田は地質調査・原稿作成時は産業技術総合研究所所属で、印刷発行時には山口大学の所属となっている。

「京都東南部」地域における現地調査は、平成 18～21 年度に実施した。調査研究と執筆について、丹波帯の付加コンプレックスの主部・非変成部を脇田が、同コンプレックスの熱変成作用を受けた東部と南部を竹内が、花崗岩および岩脈を中野が、古琵琶湖層群および大阪層群を水野が、高位段丘以降を小松原が、地下地質を竹村が、水資源を田口が、地下資源を中野が、それぞれ主に担当した。全体の調整は脇田が行った。

本地域には、ジュラ紀付加コンプレックス・白亜紀火成岩類・中新世綴喜層群・鮮新世 - 中期更新世大阪層群および古琵琶湖層群・沖積層が分布している。本地域で最も古い地質体は、ジュラ紀付加コンプレックスである。この地質体は、ジュラ紀を中核にした三畳紀から前期白亜紀の間、アジア大陸の東縁で海洋プレートが沈み込むことによって形成された付加体で主にメラングジュから構成されている。後期白亜紀には、珪長質の火成作用が活発となり底盤状の花崗岩体や斑状花崗岩を主とする珪長質岩脈が琵琶

湖コールドロン形成に連動して形成され、ジュラ紀付加コンプレックスに貫入している。そのうち、山科地域の弧状岩脈列が特に特徴的である。新生代になると、前期中新世末 - 中期中新世初頭には、海成層である綴喜層群が堆積した。鮮新世から中期更新世には、構造盆地を埋積する本地域北東部の古琵琶湖層群および西部の大阪層群が厚く堆積した。本地域の段丘堆積物は、高位 I 段丘堆積物・高位 II 段丘堆積物・中位段丘堆積物・低位 I 段丘堆積物・低位 II 段丘堆積物に区分される。山地・丘陵の斜面などにはマスマーブメントで形成された斜面堆積物が分布している。また、最終氷期後期以降に平野部に堆積した緩扇状地堆積物、後背湿地堆積物、自然堤防堆積物および天井川堆積物、旧河道堆積物および現河床堆積物などが京都盆地や近江盆地の平野部を覆っている。

京都東南部の地域の周辺では、京都西北部・京都西南部・京都東北部が刊行されており、本報告書の刊行により、京都 4 部作が完成し、京都盆地とその周辺の地質図が 5 万分の 1 縮尺で揃うこととなった。京都盆地は、日本の歴史においても重要な地域であるが、地質学においても、中生代から新生代にかけての重要な地質要素が分布している。本報告書を含めた京都 4 部作が、土木や環境整備などとともに東海自然歩道や近畿自然歩道などを利用した自然散策の際にも活用され、京都地域の地質がより親しまれ地質の面白さが伝わればと思う。

GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 利光誠一  
副委員長 金井 豊  
委員 富島康夫  
杉原光彦  
中嶋 健  
七山 太  
森尻理恵  
牧本 博  
渡辺真人  
宮内 渉

デザイン  
レイアウト 菅家亜希子  
5月号  
編集担当 関口 晃

事務局

独立行政法人 産業技術総合研究所  
地質標本館  
TEL : 029-861-3687  
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

<http://www.gsj.jp/publications/gcn/index.html>

GSJ 地質ニュース 第3巻 第5号  
平成26年5月15日 発行

独立行政法人 産業技術総合研究所  
**地質調査総合センター**  
〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1  
つくば中央第7

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

印刷所 前田印刷株式会社

GSJ Chishitsu News Editorial Board

Chief Editor: Seiichi Toshimitsu  
Deputy Chief Editor: Yutaka Kanai  
Editors: Yasuo Tomishima  
Mituhiko Sugihara  
Takeshi Nakajima  
Futoshi Nanayama  
Rie Morijiri  
Hiroshi Makimoto  
Mahito Watanabe  
Wataru Miyauchi

Design &  
Layout Akiko Kanke  
editorial  
staff Akira Sekiguchi

Secretariat

National Institute of Advanced Industrial  
Science and Technology  
Geological Survey of Japan  
Geological Museum  
Tel : +81-29-861-3687  
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

GSJ Chishitsu News Vol. 3 No. 5  
May. 15, 2014

National Institute of Advanced Industrial  
Science and Technology

**Geological Survey of Japan**

AIST Tsukuba Central 7, 1-1, Higashi 1-chome  
Tsukuba, Ibaraki 305-8567 Japan

All rights reserved

Maeda Printing Co., Ltd

