

岩石・鉱物の粉碎反応による二酸化炭素の迅速吸収 Quick mechanochemical reaction of CO₂ and silicate rocks

田中 剛^{1*}, 三村 耕一²

Tsuyoshi Tanaka^{1*}, MIMURA Koichi²

¹ 名古屋大学 年代測定総合研究センター, ² 名古屋大学 大学院環境学研究所

¹Center for Chronological Res., Nagoya Univ., ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

断層からは、二酸化炭素や窒素ガスと共に、水素ガスが放出されている。その放出量は、活断層により多く、地震活動によってさらに増加する事が多い。断層からは、ウランやトリウムなど岩石中の放射性元素の壊変によるラドンやヘリウムなどの気体も放出されている。地震などにより割れ目が形成されると考えれば、ラドンやヘリウムの放出量が増加する事は、理解し易いが、なぜ水素なのか？地層中にパイプを打ち込んだだけでも、パイプ中に水素が検出される事から、活断層で測定される 1000ppm を超える水素は、鉱物の破砕に伴う反応の結果生じたと考えられた (Sugisaki et al., 1980; Wakita et al., 1980; 杉崎, 1985)。岩石鉱物の粉碎に伴う化学反応については、Schrader ら (1968) による石英の粉碎実験に始まり、Kita et al. (1982) や Sugisaki et al., (1983) などにより様々な条件下で実験がなされている。Kita et al. (1982) によれば、岩石の破壊面に生ずるラジカル (Si-O-Si Si· + ·O-Si) が水と反応するのであるが、低温領域と高温領域では、両ラジカルの安定性の差異のため、二つの異なる反応が起こる (メカノケミカル反応) と考えられている。すなわち、

1) 低温領域では $\text{Si-O-Si Si} \cdot + \cdot\text{O-Si} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiOH} + \cdot\text{O-Si} + 1/2\text{H}_2$ の式で水素ガスが発生する。

2) 高温では、Si·ラジカルと·O-Siラジカルがともに不安定化するため、 $\text{Si-O-Si Si} \cdot + \cdot\text{O-Si} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{SiOH}$ の式の一般的な反応が起こる。

上記の著者らは、石英などの岩片を実験素材として用いたので、発生するラジカルは、Si·ラジカルと·O-Siラジカルであるが、もし長石や輝石など Si 以外の元素を含む鉱物や岩石を実験素材に用いれば、鉱物の原子間結合が切れる位置に依って、Mg·ラジカルや Ca·ラジカルも生じるのではないか。そこに CO₂ や水があれば、CO₂ は、これらの元素を含む物質として迅速に固定されるのではないだろうか。この演繹が本研究の発端である。

2000cc のボールミル中に、様々な鉱物や岩石 100g と N₂ 90% + CO₂ 10% の混合ガス、および水を封入し、ゆるやかな粉碎反応実験を行った。反応時間ごとに、反応ガスを取り出し、ガスクロマトグラフでガス組成の分析を行った。その結果、(当然予想された事だが) 石英は二酸化炭素と全く反応が見られなかった。逆に反応が大きかったのは、カンラン石やカンラン岩であった。約 8 時間の反応実験で CO₂ は、初期状態の約 20% に減少した。輝石と玄武岩では、その中間の減少量を示し、長石類や花崗岩との反応量は僅かであった。CO₂ の減少量は、岩石鉱物中の元素存在度と明瞭な関係は見られなかった。

<文献> 田中 剛・三村耕一 (2013) ケイ酸塩岩も 14C 年代測定の対象となるか? 岩石の粉碎反応による CO₂ の迅速吸収? 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 XXIV 印刷中 (2013 年 3 月出版予定)

キーワード: 二酸化炭素, メカノケミカル反応, ケイ酸塩岩石

Keywords: carbon dioxide, CO₂ sequestration, mechanochemical reaction, silicate rocks

大阪南部，和泉層群でのCO₂質流体の移行と炭酸塩沈殿 CO₂地中貯留における流体移動のナチュラル・アナログ事例

Migration and carbonate mineralization by past CO₂-rich fluid in the Izumi Group, southern Osaka: A natural analogue on

奥山 康子^{1*}

Yasuko Okuyama^{1*}

¹産総研地圏資源環境研究部門

¹Institute for Geo-resources and Environment

地球温暖化の即効策としてCO₂地中貯留が注目される中、貯留の安定性が改めて重視されている。貯留の短期的安定性にとってはシール層性能が重要であり、浸透率が低く亀裂が存在しない厚みのあるシール層（以下、無傷で良好なシール層と記述）が、貯留層とともに存在することが望ましい。しかしわが国でCO₂地中貯留の場として想定される後期新生代の地層はしばしば砂岩泥岩の細互層からなり、また日本列島が地質学的変動帯であるため地層群に微細な亀裂が既に存在することが容易に想像される。CO₂地中貯留に好適な無傷で良好なシール層を期待することが難しい中では、地下のCO₂が上方に移行することを想定しながらも、移動する際に地層水と混合して溶解が進む（すなわち溶解トラッピングが機能する）ことや、また、さらに進んで岩石との反応を経て炭酸塩鉱物を沈着させる鉱物固定が起きることを、改善の移行遅延プロセスとして期待したい。亀裂系についても、そこが鉱物沈殿の場となり、よって亀裂系自体が埋められる「自己閉止」現象が起きることを、同様に期待したい。岩野原実証試験ではCO₂圧入後数年にて地層水化学組成が炭酸塩鉱物に対して過飽和となり、鉱物沈殿を起こしうる性質に変化したことが知られている。これは、上方に移動する貯留層流体が途中で鉱物沈殿を行う可能性を支持する材料と言える。ただし貯留流体の上方移行や鉱物沈殿を起こす可能性を、実際のCO₂地中貯留サイトであらかじめ把握することは、貯留層等を掘削のうえ岩石と地層水を調査する必要があるため、非現実的である。

大阪府南部，和泉山地山麓部は、ドーソン石などCO₂地中貯留の地化学環境下で安定な炭酸塩鉱物が産出し、過去のCO₂地中貯留地質体の超長時間を観察することのできるナチュラルアナログ・フィールドである。和泉山地山麓部では、白亜紀後期泉南流紋岩類が亀裂卓越型の変質流体貯留層となり、炭酸塩鉱物を含む著しい変質作用を受けている。ドーソン石などを産する白亜紀和泉層群は、泉南流紋岩類の上位に不整合で重なり、最下部の地層群に泥岩が卓越する部分を持つ特徴がある。泥岩卓越部は、和泉山地に山麓丘陵が広がる地域西部では緻密な黒色泥岩から成るが、東側では砂泥互層に岩相が変化する。炭酸塩変質脈の発達状況は、西側と東側で全く異なる。西側の黒色泥岩から成る部分では、CO₂質流体が泥岩層にforcibleに侵入し亀裂系を形成する傍らで、ドーソン石・あられ石・方解石を順次沈殿させて自己閉止する様子が観察される。炭酸塩脈はさらに上位の粗粒砂岩を主体とする和泉層群主帯には延伸せず、下位の泥岩層卓越部内にて止められている。一方基底部が砂泥互層である山麓東部では、変質脈が和泉層群主帯まで伸びる状況が観察される。このような炭酸塩脈の発達状況の違いは、良好なシール層が物理的だけでなく化学的にもCO₂質流体の上方移行を妨げうることを、明確に示す。また、CO₂質流体の活動は岩盤に亀裂系を形成するが、それらが鉱物沈殿により閉止する場合があることも併せて示している。

キーワード: 炭酸塩鉱物脈, ドーソン石, 自己閉止, シール層, 貯留流体, CO₂地中貯留

Keywords: carbonate vein, dawsonite, self-sealing, seal layer, reservoir fluid, CO₂ geological storage

分布式光ファイバーによるセメント試料の温度・ひずみ測定 Distributed fiber optic temperature and strain sensing in a cement specimen

小暮 哲也^{1*}, 薛 自求¹
Tetsuya Kogure^{1*}, Ziqiu Xue¹

¹ 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構
¹RITE

CO₂の圧入に伴い貯留層内の間隙水圧が上昇すると、圧入井周辺の地表面が隆起することが知られている。地層の変形量が大きくなると地層に亀裂が生じる可能性があり、CO₂の安全な貯留に影響を与える。したがって、CO₂圧入時には地層の安定性をモニタリングする必要がある。

地層の安定性を評価するためには、貯留層から地表面までさまざまな地層の変形を一括してモニタリングできることが望ましい。変位計を埋設することにより地層の変形を捉えることはできるが、変位計の埋設数には限りがあり深度方向に連続的なデータを取得できない。そこで我々は、石油天然ガス開発分野などで発展してきた、光ファイバーを使用したモニタリング手法をCCSに適用するための研究を行ってきた。光ファイバーは石油開発分野において水蒸気圧入を制御するために、温度分布を数千mの坑井内で連続して把握する技術として使用され始め、現在ではケーシングの変形をモニタリングするためにも使用されている。ケーシングの変形モニタリングではひずみが測定されており、この技術を応用して地層のひずみ変化を測定できれば、地層の安定性モニタリング技術として利用可能となる。

光ファイバーによりひずみ・温度などを計測する技術(以下、光ファイバーセンシング技術とする)は、点センサー方式と分布式センサー方式に分けられる。点センサー方式は光ファイバーセンシング技術の中で最も普及しており、あらかじめ光ファイバーに加工された特定のポイントにおいて高感度・高精度なデータ取得が可能である。代表的なものにFBG(Fiber Bragg Grating)があり、FBGを用いて地盤の変形を観測する研究が行われている。しかし、点センサー方式では光ファイバー上に測定ポイントを加工するたびに光が損失するため、分布式センサー方式に比べ測定ポイントの数が少なくなる。一方、分布式センサー方式は、光ファイバーそのものに加工をすることなく光ファイバー全体でデータを取得するため、測定ポイント数に限りがない。近年計測機器の発達により、温度およびひずみ測定の分解能はそれぞれ0.0096℃、0.078μmと、FBGと遜色ないレベルに到達してきた。したがって、点センサー方式の短所である、センサーの加工に伴う値段の高さや測定範囲の狭さを補う手法として、分布式センサー方式によるモニタリング手法が目ざされている。

これまでの岩石試料を用いた実験により、分布式センサー方式によって岩石の圧縮・膨張変形をひずみゲージと同等の精度で計測できることが分かっている。実用化する場合、光ファイバーは坑井に沿ってセメンチング中に埋設されることが予想される。したがって、埋設される光ファイバーはセメンチング中でも切れない強度を持ち、かつ周囲の地層の変形を測定できる感度を有する必要がある。市販されている埋設型光ファイバーは温度を測定するために開発されており、光ファイバーはらせん状に編み込まれた3重のステンレスワイヤーにより周囲を頑丈に保護されている。こうした被覆構造のため、既存の埋設型光ファイバーはケーシング周囲のひずみを測定できない可能性がある。

本研究では、既存の埋設型光ファイバーによるひずみ測定の有効性を検討するため、坑井への光ファイバーの設置を模擬した室内実験を行った。そして封圧変化時にひずみを測定したので、詳細な結果を報告する。

キーワード: 光ファイバー, 分布式センサー, 温度・ひずみ測定

Keywords: optical fiber, distributed sensor, temperature and strain measurement

CO₂ 地中貯留サイトにおける微小振動観測 米国 Cranfield 油田の観測結果 (その2)

Microseismic monitoring at the commercial-scale CO₂ geological storage site, Cranfield, U.S. (Part 2)

高岸 万紀子^{1*}, 橋本 励¹, 堀川 滋雄², 楠瀬 勤一郎³, 薛 自求¹

Makiko Takagishi^{1*}, Tsutomu Hashimoto¹, Shigeo Horikawa², Kinichiro Kusunose³, Ziqiu Xue¹

¹ 公益財団法人地球環境産業技術研究機構, ² サンコーコンサルタント株式会社, ³ 独立行政法人産業技術総合研究所
¹RITE, ²Suncoh Consultants Co., Ltd., ³AIST

CO₂ 地中貯留に起因する微小振動発生の可能性が議論されている。圧入によって生じる微小振動は、海外の CO₂ 圧入サイトによるモニタリング事例を踏まえてもマグニチュードが負の無感イベントであると報告されている。しかしながら、CCS の実施においては、特に世界有数の地震発生国である日本で CCS 実施を考えた場合、安全性評価や社会的受容性の観点から圧入サイトにおける微小振動モニタリングが必須である。

RITE では、米国のローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL)、 テキサス大学地質研究所 (BEG) 連携して米国大規模 CO₂ 圧入サイトで長期間に及ぶ微小振動観測を行い、CO₂ 圧入と微小振動発生との関係性について調査研究を行っている。この観測で得られる知見を用いて将来の国内の CCS 実証試験や、CCS の実用化の段階で必要な微小振動観測手法について検討・構築することを目的としている。

観測サイトは米国ミシシッピ州の Cranfield 油田である。この油田では CO₂-EOR により原油回収を実施している。2007 年から年間 100 万トンの大規模 CO₂ 圧入を実施しており、現在までに 4 00 万トンの圧入が完了している。RITE では Cranfield 油田において微小振動観測網を構築し、2011 年 12 月より連続観測を開始した。観測網は、半径約 3km の円周上 6 地点で深度 100m に設置した 3 成分微小振動計から構成される。観測開始から 1 カ月間の初期観測記録を解析した結果、CO₂ 圧入に起因した微小振動の発生は確認されていない [高岸・他, (2012, JpGU)]。

本発表では、1 年間に及ぶ微小振動観測記録を解析した結果を報告する。現在までに、観測システムは正常に作動しているものの CO₂ 圧入に伴う微小振動の発生は確認されていない。観測記録はバックグラウンドノイズ、人工ノイズ、遠地震、落雷によるノイズに分類され、この結果は目視確認した結果と整合した。また、観測された波形記録を用いて微小振動観測網のイベント検知能力を検討したので併せて報告する。

謝辞：本研究は経済産業省委託事業「二酸化炭素回収貯蔵安全性評価技術開発事業」の一環として行われた。

キーワード: CO₂ 地中貯留, 微小振動観測

Keywords: CO₂ geological storage, microseismic monitoring

長岡サイトの貯留層における V_p/V_s と岩相の関係

A relationship between V_p/V_s and lithology in the reservoir at the Nagaoka site

中島 崇裕^{1*}, 西澤修¹, 薛自求¹

Takahiro Nakajima^{1*}, Osamu Nishizawa¹, Ziqiu Xue¹

¹ (公財) 地球環境産業技術研究機構

¹Research Institute of Innovative Technology for the Earth

Seismic methods have been widely used for explorations of CCS sites and monitoring of CO₂ behavior. In this method P-wave data are primarily used. S-wave velocity has independent properties from P-wave velocity, such as S-wave is insensitive to the existence of fluid in the pore of rock. The ratio of these velocities has been utilized to evaluate lithology of formations and gas saturation in the rocks (e.g. Brie et al. 1995). This paper reports a relationship between V_p/V_s data and rock properties at the reservoir of Nagaoka site in Japan.

Nagaoka is the first Japanese pilot-scale CO₂ injection site. A thin permeable zone at the depth of 1100m was selected for the reservoir. For the sonic logging, a low frequency dipole sonic tool has been used at Nagaoka to observe P- and S-wave velocities. Data for the uncased hole logging were used to analyze V_p/V_s , since the V_s data of the cased hole logging had difficulty to separate true S-wave from flexural waves through the casing. Therefore V_p/V_s data in this paper showed results before the CO₂ injection.

Cross plot between porosity and V_p/V_s in the reservoir showed that the scattered data can be categorized into two parts; V_p/V_s were almost constant but porosity changed, and V_p/V_s were dispersive but porosity remained constant. This tendency cannot be seen in the cross plot between porosity and V_p , therefore V_p/V_s might have better response for the lithological evaluations. These differences in the V_p/V_s distributions are consistent with the Fullbore Formation MicroImager logging results, and the distribution in V_p/V_s had dependency on shale volume. The relationship between V_p/V_s and rock properties will be interpreted. Note that the difference in V_p/V_s distribution can be seen in the reservoir with the thickness of 10m. These V_p/V_s distribution might be a feature in Japanese formations, where rock properties change within complex alternate layers.

キーワード: CO₂ 地中貯留, 長岡, V_p/V_s , 検層

Keywords: CO₂ geological storage, Nagaoka, V_p/V_s , Well logging

長岡 CCS サイトの 3D 貯留層モデルと CO₂ 挙動シミュレーション

A three-dimensional static reservoir model of the Nagaoka CCS Site and to simulate a carbon dioxide plume migration

千代延 俊^{1*}, 中島 崇裕¹, 薛自求¹

Shun Chiyonobu^{1*}, NAKAJIMA, Takahiro¹, XUE, Zique¹

¹ (公財) 地球環境産業技術研究所

¹RITE

Authors constructed a three-dimensional static reservoir model of the Nagaoka CCS Pilot Site and to simulate a carbon dioxide (CO₂) plume migration for 10,000 t injected. The scope of work included incorporating all available geological and geophysical data (well logs, seismic, core, and cuttings data, as well as previously observed depositional and structural trends) to create a geological model of formations from the Haitsume sandstone near the Minami Nagaoka Natural Gas Field, Niigata, Japan. The injection well is to be located in the immediate vicinity of Nagaoka city, Niigata. The boundaries of the static reservoir model span a geographical area of approximately two square km around the Iwanohara base of INPEX.

Several phases static and dynamic modeling were conducted, each with successively greater geoscience data support. Static model was constructed a reservoir from the Zone2 to Zone5 bottoms included 3D seismic data for Stratigraphic control as well as well log petrophysical data. Petrophysical properties in the Zone2 and Zone5 were supported by data from 4 wells and attributed data from 3D seismic. Simulation modeling explored the impact of stochastic uncertainty in static model properties on injection performance using the Nagaoka data (Sato et al., 2011). Petrophysical properties (porosity and permeability) were computed from well logs of Injection Well-1 (IW-1), Observation Well (OB-2), OB-3, and OB-4, 3D seismic data, and core analyses. The amount of well log based petrophysical property control diminishes with depth. Petrophysical property were interpolated throughout the static model using seismic attribution, stochastic method, and upscaled into the simulation grids.

ドイツ Ketzin CCS 実証試験サイトにおける地震波アクロスと地震計アレーによる タイムラプスのシミュレーション Time-lapse simulation for the Ketzin (Germany) CCS site assuming a single seismic ACROSS and multi-seismic receivers

笠原 順三^{1*}, 高梨 将², 加藤 文人², 羽佐田 葉子³, ステファン ルース⁴, クリストファー ジュリン⁵
Junzo Kasahara^{1*}, Mamoru Takanashi², Ayato Kato², Yoko Hasada³, Stefan Lueth⁴, Christopher Juhlin⁵

¹ 東京海洋大学, ² 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, ³ 大和探査(株), ⁴ GFZ, ドイツ, ⁵ ウプサラ大学

¹Tokyo University of Marine Science and Technology, ²JOGMEC, ³Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., ⁴GFZ, Germany, ⁵Uppsala University

Time-lapse-studies of the physical state of the injection zones or fractured zones is a key component in the CCS, CO₂-EOR and shale-gas development. Monitoring systems using the seismic-ACROSS can be one of the most suitable methods for these purposes. We have made simulations assuming a single ACROSS source and a multi-seismometer- array installed at the Ketzin pilot site for CO₂ storage in Germany. At Ketzin, CO₂ has been injected since July, 2008. About 62 ktons of super-critical CO₂ have been injected to date at about 630-650 m depth, and injection will continue into 2013. To monitor how the injected CO₂ behaves after injection is extremely important for studying the long term behavior of a storage site. The objectives of this study are to find the most suitable locations for an ACROSS-source and receivers at the Ketzin site given infrastructure constraints. Preliminary results using the velocity-density structure site model shows that a rectangular injection zone 200 m wide and 10 m thick at 665 m depth is well imaged. This result encourages us to plan for using an ACROSS-source for time-lapse-studies to monitor the migration of injected CO₂ at Ketzin, even after injection has finished.

キーワード: タイムラプス, CCS, アクロス, モニタリング, 地震波, タイムリバーサル法

Keywords: Time lapse, CCS, ACROSS, monitoring, seismic waves, timerevesal method

X線CT可視化技術による Berea 砂岩中のマイクロバブルCO₂流動特性の検討 X-ray CT visualization of CO₂ microbubbles migration in Berea sandstone

辻 真也^{1*}, 薛 自求², 西尾晋³, 亀山寛達³, 松岡俊文¹

Shinya Tsuji^{1*}, Ziqiu Xue², NISIO, Susumu³, KAMEYAMA, Hirotatsu³, Matsuoka Toshifumi¹

¹ 京都大学大学院工学研究科, ² 公益財団法人地球環境産業技術研究機構, ³ 東京ガス

¹Graduate School of Engineering, Kyoto University, ²Research Institute of Innovative Technology for the Earth, ³Tokyo Gas

Laboratory core flooding experiment was run to investigate supercritical CO₂ migration in brine saturated sandstone. The sample was cylindrical Berea sandstone measuring 35mm in diameter and 70mm in length. A grooved disc and a special porous filter were set to the sample ends.

Supercritical CO₂ was injected into the sample under same pressure and temperature conditions. X-CT system was used to visualize migrations of CO₂ injected from different filters. When injecting CO₂ from the special porous filter the CO₂ was microbubble and through the grooved disc the CO₂ was normal bubble. CO₂ saturation estimated from CT values and the CO₂ distribution clearly showed advantages of microbubble CO₂ injection and the experimental results suggest the usefulness of microbubble CO₂ injection in both saline aquifer storage and enhanced oil recovery.

キーワード: マイクロバブル CO₂, ベレア砂岩, X線CT, 可視化技術, 石油増進回収, 帯水層貯留

Keywords: microbubble CO₂, Berea sandstone, X-ray CT, Visualization, enhanced oil recovery, saline aquifer storage

CO₂ ナノスケール化による安定地中隔離技術開発 Development of stable geological storage technique by CO₂ nano-sizing

植村 豪^{1*}, 近藤 史也¹, 松井 陽平¹, 津島 将司¹, 平井 秀一郎¹
Suguru Uemura^{1*}, Fumiya Kondo¹, Yohei Matsui¹, Shohji Tsushima¹, Shuichiro Hirai¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

1. 緒言

大気中への多量の CO₂ 排出を防ぐ二酸化炭素回収隔離 (Carbon Capture and Sequestration, CCS) において, CO₂ 地中隔離が実用化に最も近い CO₂ 削減技術として期待されているが, CO₂ は浮力によって地下帯水層中を上昇するため, 地表への CO₂ 漏洩リスクを低減させる, 社会的受容性の高い地中隔離手法の確立が求められている. そこで本研究ではナノスケールまで微粒化した CO₂ を帯水層に圧入し, 浮力を分散させた安定性の高い地中隔離手法を提案する. 実際に高圧水中でナノスケール CO₂ 液滴を生成し, 粒径分布の時間発展現象の観察および経時変化に対する安定性を調べた. さらに帯水層を模擬した多孔質内にナノスケール CO₂ 液滴を圧入し, X 線 CT 法を用いて多孔質内部における挙動を観察した.

2. 実験方法

実験ではスタティックミキサーを有する循環回路を用い, CO₂ の微粒化を行った. 実験では界面活性剤 (トリシロキサン) の濃度, 水と CO₂ 液滴の体積比をパラメータとした. CO₂ 液滴の粒径は動的光散乱測定装置を用いて計測した. また, 微粒化した CO₂ 液滴は多孔質中に圧入し, マイクロフォーカス X 線 CT を用いて, CO₂ 挙動を三次元で可視化した. 水と CO₂ を明確に判別するため, 造影剤 (ヨウ化ナトリウム) を水に溶解させた上で前述の方法で CO₂ を微粒化した後, 多孔質内部に圧入した. 圧入後, 数日間にわたって定温定圧条件を維持し, 多孔質内部における CO₂ 液滴の挙動を観察した.

3. 実験結果および考察

水, CO₂, 界面活性剤を微粒化し, ポンプ停止直後から動的光散乱測定装置を用いて個数換算粒径分布の時間変化を計測した. ポンプ停止直後の液滴の粒径は大半が数十 nm であり, CO₂ がナノスケールまで微粒化されていることが分かった. 時間と共に CO₂ 液滴は少しずつ成長し, ポンプ停止から 50 分が経過したところで, 粒径分布のピークはより大きなピークとより小さなピークの 2 つに分岐した. 粒径分布が変化するメカニズムには, 複数の液滴が単一の液滴になる合- , あるいは液滴径に依存した局所的な溶解・析出による液滴径の増減 (オストワルドライプニング) が挙げられる. ポンプ停止直後では液滴の個数が多く, 液滴間距離が小さいために液滴同士の接触頻度が高く合- が起こりやすい. 合- が進行するにつれて図 4 のように液滴の個数は減少し, 液滴間距離が大きくなると共に液滴径の分布も広くなる. その結果, 接触頻度が低下して合- が起こりにくくなると共に, 相対的にオストワルドライプニングが顕在化すると考えられる.

次に多孔質内部に微粒化した CO₂ 液滴を圧入し, X 線 CT 画像からその経時変化を捉えた. 圧入直後は大半の CO₂ 液滴が空間分解能 (20 micrometer) 以下であるため, CT 画像中ではナノスケールの CO₂ は観察できないが, 3 日後には CO₂ 液滴が空隙サイズまで成長し, 多孔質内部で均一に分散していることが分かった. この時の分布は 6 日後においてもほぼ同様であり, 安定してトラップされていることが分かった. この結果から, ナノスケール CO₂ 液滴は多孔質内部に均一に浸透した後, 空隙程度のスケールまで粒径が増加するものの, 依然として液滴に働く浮力は小さいために, 毛管力によって空隙中に安定してトラップされることを明らかにした. これは CCS を行うにあたり, ナノスケール CO₂ 液滴であれば帯水層内において安定して隔離できる可能性を示唆している.

4. 結言

CO₂/水系に界面活性剤を少量添加し, スタティックミキサーを用いて CO₂ を初期平均粒径で数十 nm のナノスケール液滴に微粒化することに成功した. また, 多孔体内部に圧入されたナノスケール CO₂ 液滴は空隙スケールの液滴まで粒径が増加するものの, 浮力が小さいために毛管力によって安定してトラップされることを示した.

キーワード: 二酸化炭素地中隔離, 微粒化, ナノスケール, X 線 CT

Keywords: CO₂ geological sequestration, Micronization, Nano-sizing, X-ray CT

CCS実証試験のための北九州地点における調査の概要 Geological Surveys for CCS Demonstration in Kitakyusyu, Western Japan.

阿島 秀司^{1*}, 大川史郎¹, 原 彰男², 東中基倫², 白濱章悟³, 下山み⁴, 田中智之¹, 瀧尾順一¹, 阿部正憲¹
Shuji Ajima^{1*}, Shiro Ohkawa¹, Akio Hara², Motonori Higashinaka², Shogo Shirahama³, Mio Shimoyama⁴, Tomoyuki Tanaka¹, Junichi Takio¹, Masanori Abe¹

¹ 日本CCS調査, ² 地球科学総合研究所, ³ JPHYTEC, ⁴ 応用地質

¹Japan CCS Co., Ltd., ²JGI, Inc., ³JPHYTEC Co., Ltd., ⁴OYO Corporation

北九州地点(響灘海域および沿岸域)は、平成20年度に実施された経済産業省補助事業において、全国115地点の候補地から日本におけるCCS大規模実証試験候補地(3地点)の一つとして選定された。北九州地点は、日本における古第三紀層を対象とした唯一のCCS実証試験候補地であるとともに、西日本で唯一の候補地である。調査ならびに実証試験により古第三紀層の貯留層・遮蔽層の有効性が確認されれば、これまでCO₂貯留の対象とされなかった古第三紀層の可能性が広がり、日本におけるCO₂貯留可能量は増大すると考えられる。また、北九州地点におけるCO₂貯留可能性の検証は、古第三紀層が分布する他の地域での貯留可能性の評価、将来のCCS事業の展開に大きく寄与するものと期待される。

北九州地点は既存の深部地質情報が少ない。このため、将来的な実証試験の実施に向けた貯留層評価のための調査として、2009年に既往データを用いた重力解析、2010年にボーリング調査(北九州CCS-1)とVSPならびにその近傍での二次元弾性波探査、2011年に重力探査(補完調査)および北九州CCS-1コアを用いた堆積相解析等の深部地質構造調査・解析を実施した。

重力探査の結果、本地域の堆積盆の形態がより明瞭になった。北九州CCS-1(掘削深度1,180m)は、当該地域で1,000m以深の基盤岩まで初めて到達したボーリングであり、基盤岩までの層序・層厚を確認した。弾性波探査およびVSPにより、ボーリング調査地点から海域方向への地質構造データ(走向と傾斜等)を取得した。さらに、ボーリング調査地点周辺の堆積環境の推定および堆積層の連続性に関する検討を行い、重力探査、ボーリング調査、弾性波探査、VSP等の調査結果も考慮して、本地点の初期地質概念モデルを構築した。

北九州地点における調査は、将来の実証試験に向けた評価のための基礎データを収集した段階にある。現在得られている調査データは主に北九州市の陸域に限られたものであり、堆積盆をカバーする海域での広域データ取得により、貯留層評価の精度向上が期待される。2012年には、下関市西方のデータ取得および将来的に海域での広域データ取得をする際の予備的調査として、下関市の海域および沿岸域で小規模な二次元弾性波探査を実施した。

本論は、経済産業省委託事業「二酸化炭素削減技術実証試験事業(北九州地点における調査、検討)」の成果の一部をとりまとめたものである。

キーワード: 二酸化炭素地中貯留, CCS基礎実証試験, 古第三系

Keywords: CO₂ geological storage, CCS pilot-scale demonstration, Paleogene

北九州沿岸地域を対象とした地質データの総合解析に基づく地質概念モデルの構築 Geological Conceptual Model Based on Integrated Analysis Using Some Geological data obtained in the Kitakyusyu Site.

原 彰男^{1*}, 野中美雪¹, 阿島秀司², 大川史郎², 田中智之², 東中基倫¹, 瀧尾順一²

Akio Hara^{1*}, Miyuki Nonaka¹, Shuji Ajima², Shiro Ohkawa², Tomoyuki Tanaka², Motonori Higashinaka¹, Junichi Takio²

¹ 株式会社地球科学総合研究所, ² 日本CCS調査株式会社

¹JGI, Inc., ²Japan CCS Co., Ltd.

北九州地点(響灘海域および沿岸域)は、日本における古第三紀の貯留層を対象とした唯一のCCS実証試験候補地であり、日本CCS調査により、将来的なCCS実証試験の実施を目指した貯留層評価のための地質データ収集を目的として、各種調査が行われている。本解析は、日本CCS調査(株)が掘削したボーリング孔「北九州CCS-1」のコア試料観察および物理検層データを用いた堆積学的解析、重力解析、およびそれを補足する地表地質調査等に基づき、対象地域に分布する古第三系の岩相および岩相組み合わせから推定される堆積環境、地層の空間的分布特性に関する地質情報を抽出し、地質概念モデルの構築を行ったものである。

北九州CCS-1のコア試料のうち、基盤岩(白亜紀の花崗岩類)直上に堆積した出山層天籟寺部層および上津部層について、堆積学的な視点から観察・検討を行った結果、これらの地層が河川および河川間堆積物から成る陸成層である可能性が高いことが推定された。また、北九州CCS-1の物理検層解析結果からは、天籟寺部層および上津部層の砂岩は、その物性値の違いから、チャンネル充填堆積物に由来すると考えられる砂岩(しばしば礫岩を伴う)と、洪水起源のオーバーフロー堆積物に由来すると考えられる砂岩(泥岩中に挟在される)の二種類の砂岩層があると推定された。

北九州CCS-1近傍で実施された弾性波探査データについて地質判読を行ったところ、天籟寺部層に対比される地層において見られる強い反射面については、北東-南西方向に伸長した形状をしている可能性が示唆された。この強反射面は、礫岩層に対比できるものと考えられ、反射面の伸長方向は、チャンネルの伸びの方向を示している可能性がある。

重力データ解析結果においては、堆積盆地は南北方向に伸長し、東側が急斜面で西側は比較的緩やかな斜面を呈した半地溝状の形状をしていることが示された。これに関し、堆積盆地の西側の斜面に相当すると考えられる北九州市から下関市の島嶼部において地表地質調査を実施した結果、当該地域の地質構造は北東方向にプランジした開いた向斜状の地質構造を呈しており、重力データ解析結果から推定される堆積盆地の形状と整合的であった。

一連の検討結果から、天籟寺部層および上津部層は、南北方向に伸張した半地溝状の堆積盆地の形成初期に堆積した、河川および河川間堆積物から成る陸成層である可能性が高いものと判断し、今後の貯留層評価に資するため地質概念モデルを作成した。

本論は、経済産業省の委託事業成果の一部である。また、千葉大学大学院の伊藤慎教授には堆積相解析に関する助言を戴いた。これらの方々に謝意を表す。

キーワード: 二酸化炭素回収・地中貯留, 堆積相解析, 地質概念モデル

Keywords: carbon dioxide capture and storage (CCS), Sedimentary facies analysis, Geological conceptual model

現場温度圧力条件下における海底下夾炭層への二酸化炭素注入実験 A CO₂ injection-experiment with subseafloor coal measures under in-situ pressure and temperature condition

大友 陽子^{1*}, 井尻 暁¹, 堤 正純¹, 池川 洋二郎¹, 稲垣 史生¹
Yoko Ohtomo^{1*}, Akira Ijiri¹, Masazumi Tsutsumi¹, Yijiro Ikegawa¹, Fumio Inagaki¹

¹ 海洋研究開発機構海底資源 LP 地球生命工学研究グループ

¹ Geobio-Engineering and Technology Group, JAMSTEC

The release of one-carbon compounds (i.e., CO₂ and CH₄) into the atmosphere due to human activities has been recognized as a major factor causing dramatic climatic change on the Earth. In recent years, the increasing concentrations of greenhouse gases are expected to cause warmer surface temperatures at an accelerating rate and subsequent alternation of ecosystems and biogeochemical cycles. Consequently, a variety of CO₂ disposal options are discussed, including CO₂ Capture and Storage (CCS) followed by injection of CO₂ into deep subseafloor hydrocarbon reservoirs such as coal formations. However, geophysical and geochemical behaviors of high concentration of CO₂ within subseafloor environments, as well as ecological consequence and biogeochemical carbon cycle, remain largely unknown. In this study, we performed a CO₂ injection-experiment using subseafloor bituminous coal samples (Kushiro Coal Mine, Co. Ltd.) under high pressure and temperature condition.

The reaction experiment was performed using a newly developed flow-through geobio-reactor system at the Kochi Institute for Core Sample research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). The reaction column was prepared from the coal chips (from 1 to 3 cm in diameter) and powdered sandstone, which were packed in a heat-shrinkable tube under anaerobic condition. Anaerobic artificial seawater (ASW) and CO₂ were continuously supplemented into the column for 56 days under the following condition: flow rate of ASW; 0.002 ml/min, flow rate of CO₂; 0.00001 ml/min, pore pressure; 40 MPa, confined pressure; 41 MPa, temperature: 40 degrees C. After the reaction, XRD analysis showed no or very little changes on mineral assemblages of the sandstone, whereas minor carbonate generation was observed by SEM-EDS analysis. The sandstone contained ~10⁴ microbial cells/cm³ after experiments, which was similar to the biomass prior to the experiment. Molecular analysis of the extracted 16S rRNA genes revealed the predominance of spore-forming bacteria (e.g., *Lysinibacillus* and *Bacillus*) in the coal samples, which members were also found in the reaction column after the CO₂-injection experiment. During the reactor operation, we observed increase of dissolved CH₄ concentration up to 186 micro M, whereas total dissolved inorganic carbon in the medium passed through the column decreases compared to the injected amount (e.g., total dissolved inorganic carbon in the medium: 125.6 mM, the injected total dissolved inorganic carbon: 138.38 mM at 56 days). Based on the carbon isotopic composition of DIC, it is most likely that no or very little microbial methanogenesis occurred and the absorbed CH₄ was released from the coal samples during the CO₂-injection experiment.

Keywords: Bio-CCS, Coal, CO₂

Bio-CCS に関する総合的なリスク評価の取り組み Risk Assessment Study for Bio-CCS

田中 敦子^{1*}, 坂本 靖英¹, 駒井 武¹
Atsuko Tanaka^{1*}, Yasuhide Sakamoto¹, Takeshi Komai¹

¹ (独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門
¹ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

本ポスターでは、我々が新たに着手した微生物と CCS の融合技術のリスク評価についての取り組みを紹介する。油ガス層内の炭酸ガスの分圧を上昇によってメタンガスを多く産出する微生物と CO₂ 地中貯留とを組合せる (Bio-CCS) ことにより、温暖化ガスの固定とともに天然ガス資源の創成を目指す研究プロジェクトに我々は着手した。このプロジェクトでは、微生物と CCS との組合せに関して微生物培養の最適化とあわせて、効果的で安全な新技術の確立のためのリスク評価を進めている。我々のリスク研究は次の領域をカバーするものである。1) 地層と注入井、2) 大気、3) 地上施設、4) 海底。これらの範囲のリスクシナリオとリスク評価結果は、我々が開発中の CO₂ 地中貯留リスク評価プログラム GERAS-CO₂GS に組み込む予定である。最終的には、Bio-CCS 技術のリスク評価のみならず、CO₂ 地中貯留全般に役立つリスク評価ツールとなることが期待される。

キーワード: CO₂ 地中貯留, リスクアセスメント, CO₂ 漏出, 地表, インパクト評価, Bio-CCS
Keywords: CO₂ geological storage, risk assessment, CO₂ migration, the surface of the earth, impact analysis, Bio-CCS

CO₂ 地中貯留における流体流動-岩石力学連成解析：ナチュラル・アナログ研究としての松代事象への適用 Coupled fluid flow and geomechanical modeling in geological CO₂ storage: Application to Matsushiro phenomena

船津 貴弘^{1*}, 奥山 康子¹, 雷 興林¹, 中尾 信典¹
Takahiro Funatsu^{1*}, Yasuko Okuyama¹, Xinglin Lei¹, Shinsuke Nakao¹

¹(独) 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門
¹Institute of Geo-Resources and Environment, AIST

The mechanical responses of CO₂ reservoir and the caprock around the storage region become crucial for Japanese geological CO₂ storage (GCS) after the M9.0 East Japan earthquake on March 11, 2011. The CCS Research Committee, METI (Ministry of Economy, Trade and Industry), recommended to screen out areas having a large-scale faults in the process of selection of storage site for 105t-scale demonstration (2009). Although the site for the planned demonstration adequately selected, we do not exclude fully at present the possibility of GCS reservoir failure and/or leakage of stored CO₂ from GCS site(s) elsewhere in Japan caused by geomechanical motions.

The examples of such phenomena are the re-activation of pre-existing faults, induced seismicity, reservoir failure and unintended uplift and so on, some of which are observed in an actual demonstration site (Mathieson et al., 2009; Vasco et al., 2010; Onuma et al., 2011).

The unintended phenomena listed above are essentially connected with stress field changes due to the increase in pore pressure, around the area of GCS, which is inevitable as GCS injects pressurized CO₂ into an underground reservoir. The rise in pore pressure reduces an effective confining stress to modify the conditions toward the critical failure line of Mohr-Coulomb law. The change in pore pressure is most probably cause micro-scale (or, pore-scale) deformations within the rocks, which will give rise to the changes in rock permeability. The permeability change probably cause a change in fluid flow underground in the next step, which will promote further rock deformation and then change in fluid flow. The sequence of process can be analyzed by a coupled analysis using fluid flows simulator for rock media and that calculating the geomechanical process under the changing pore pressures. The TOUGH-FLAC code is a good and working example of this coupled simulator, being applied to follow the CO₂ motion within faulted and tectonically active formations (Rudqvist et al., 2007, 2008).

We consider that the coupled simulation of fluid flow and geomechanics, exemplified by TOUGH-FLAC simulation collaborating with LBNL, is the most important tool in developing the scheme to assess the fluid-mechanical conditions around the underground storage regions of CO₂.

As not enough data such as rock deformation related to fluid flow is available from GCS site for evaluation of TOUGH-FLAC code applicability to Japanese geological condition, we investigate the Matsushiro field, Nagano, central Japan is selected for our natural analogue study. The Matsushiro field is famous for the earthquake swarm associated with the CO₂-rich fluid upwelling during the period of 1965-1967. The Matsushiro phenomena was previously studied by using TOUGH-FLAC (Cappa et al., 2009), however, the geological model was simplified very much, so it is afraid that the possibly important geological features can be missed.

In this study, we modified their model based on the various field and laboratory data and re-constructed the geological model with three layered strata according to P-wave velocity profile.

TOUGH-FLAC simulation has been conducted using updated geological model. The simulation results indicated the ground uplift due to fluid injection and the magnitude of the ground uplift is reasonably agree with actual observation in Matsushiro field during the swarm.

キーワード: 流体流動-岩石力学連成解析, 岩石力学, CO₂ 地中貯留, ナチュラル・アナログ研究, 松代事象

Keywords: Coupled fluid flow geomechanical modelling, Geomechanics, Geological CO₂ storage, Natural analogue, Matsushiro phenomena

V_p-V_sによるCO₂挙動モニタリングについて実験的手法に基づく検討 The potential of V_p and V_s monitoring for MVA program of offshore CCS project

北村 圭吾^{1*}, 薛 自求²
Keigo Kitamura^{1*}, Ziqiu XUE²

¹九州大学 WPI-I²CNER, ²地球環境産業技術研究機構

¹WPI-I²CNER Kyushu University, ²Research Institute of Innovative Technology for the Earth

For the safe operation of CCS, we are required to monitor the CO₂ behavior and to accurately account for the storage volume of CO₂ in deep reservoirs. It is well-known that the P-wave velocity measurements (V_p) can be used for monitoring the CO₂ behavior in deep reservoirs. However, it is difficult to accurately estimate the storage volume of CO₂ by only using V_p. Takahashi (2000) indicated the potential of S-wave velocity for monitoring of fluid behavior and accounting for the storage volume of natural gas in deep reservoirs. S-wave monitoring can be achieved by deploying a permanent ocean bottom cable(OBC) system at the off-shore CCS sites. In our own study, we conducted a simultaneous measurement of V_p and V_s of porous sandstone by injecting various types of fluids under set in-situ pressure and temperature conditions. For this study, we use the Tako sandstone, which is an early Miocene marine sandstone, mainly composed of quartz and plagioclase. Tako sandstone has near 10mDarcy of permeability and almost 24% porosity. The sample was cut into a column shape (5cm in diameter and 10cm in length), and polished on both ends (1PV=47 ml). In this study, we tried to estimate CO₂ saturation, and to monitor the CO₂ behavior in porous sandstone by measuring V_p and V_s. First, we injected near 1.3PV water into the vacuumed specimen (Water injection). After this process, over 2.2PV CO₂ is injected into the water saturated specimen (Drainage). Finally, CO₂-saturated water over 2.3 PV is re-injected into the CO₂-injected specimen (Imbibition). We illustrated the V_p-V_s relationships of all the processes. This V_p-V_s relationship diagram clearly illustrates the obvious differences between water injection and drainage. On the other hand, drainage and imbibition show the similar tendency of V_p-V_s change with injecting CO₂ and CO₂-saturated water. These changes indicate the changes of CO₂ saturation during drainage and imbibition stage. This result suggests the potential to estimate CO₂ saturation by using the V_p-V_s relationship. Additionally, V_p does not recover to pre-drainage levels after end of imbibition process. This V_p difference is considered to be the effect of residual trapped CO₂. This result also indicates the potential of monitoring the residual trapped CO₂ from seismic wave velocities.

キーワード: P 波速度, S 波速度, 多孔質砂岩, CO₂ 飽和度, MVA

Keywords: P-wave velocity, S-wave velocity, Porous sandstone, CO₂ saturation, MVA

超臨界 CO₂ マイクロバブルを圧入した際の地層水の音響特性 Acoustic characteristics of formation water when injecting scCO₂ microbubbles

片所 優宇美^{1*}, 木山 保², 辻 真也¹, 薛 自求², 松岡 俊文¹

Yumi Katasho^{1*}, Tamotsu Kiyama², Shinya Tsuji¹, Ziqiu Xue², Toshifumi matsuoka¹

¹ 京都大学大学院工学研究科, ² 公益財団法人地球環境産業技術研究機構

¹Kyoto University Graduated School of Engineering Department, ²Research Institute of Innovative Technology for the Earth

The effectiveness of CO₂ microbubble method for geological sequestration was investigated. For the comparison of the conventional method and CO₂ microbubble method, the CO₂ behavior in Berea sandstone saturated by the KCl solution was monitored by measuring ultrasonic compressional velocity (Vp) in both method.

However, in the injection of CO₂, there were two factors of the change of Vp. One is CO₂ dissolution into pore water and another is replacement of CO₂ and pore water. To separate the factor of the change of Vp, Vp of saline water was measured when injecting CO₂ microbubbles into saline water. The change of Vp effected by CO₂ dissolution was less than 1 %. Therefore, in first experiment. the change of Vp in the injection of CO₂ was effected by the CO₂ replacement of pore water more than the CO₂ dissolution. And the change of Vp in Berea sandstone showed the slow CO₂ migration in CO₂ microbubble method. This is because dissolution of amount of CO₂ microbubbles increased.

This result shows microbubble method could increase the reservoir potential for CO₂, which also showed by X-ray CT scan results.

キーワード: マイクロバブル, 二酸化炭素地中貯留, P 波速度

Keywords: microbubble, carbon capture and storage, P-wave velocity

光ファイバーセンシングによるCO₂注入時の多胡砂岩のひずみ測定 Monitoring the Strain of Tako sandstone injected with CO₂ using Optical Fiber Sensing

堀内 侑樹^{1*}, 小暮 哲也², 薛 自求², 松岡 俊文¹

Yuki Horiuchi^{1*}, Tetsuya Kogure², Ziqiu Xue², MATSUOKA, Toshifumi¹

¹ 京都大学大学院 工学研究科, ² 地球環境産業技術研究機構

¹Kyoto University Graduate School of Engineering, ²Research Institute of Innovative Technology for the Earth

効果的な地球温暖化対策技術として、二酸化炭素地中貯留（CCS）が注目されている。アルジェリアの In Salah プロジェクトでは、CO₂ 圧入による地表の隆起が観測されている。CCS の安全性の観点から、CO₂ 圧入時の岩盤の深度方向の変位を計測し、CO₂ の圧入による貯留層の圧力増加と地表で観測された変位の関係を明らかにすることが求められている。従来の変位計では、変位計の設置地点の変位しか計測できない。そこで本研究では、光ファイバーセンシングを用いて地下岩盤の変位を深さ方向に対して連続的に計測する方法を提案し、光ファイバーを用いた岩石のひずみ測定に関する技術開発を行った。

岩石のひずみを光ファイバーセンシングで測定できるかを検討するため、粗粒部と細粒部から成る多胡砂岩に間隙圧を負荷し、多胡砂岩のひずみを光ファイバーとひずみゲージによって測定した。間隙圧を負荷する過程では、光ファイバーセンシングによって測定されたひずみはひずみゲージの結果とほぼ一致し、光ファイバーセンシングにより多胡砂岩のひずみを測定することができた。また、粗粒部のひずみは細粒部のひずみより大きくなり、光ファイバーセンシングにより粗粒部、細粒部の弾性率をそれぞれ評価することができた。CCS の現場においても、同一の光ファイバーによって異なる地層の物性を同時に測定できると考えられる。本研究では、光ファイバーセンシングによる岩盤のひずみ分布測定の有効性を検討するための基礎データを得ることができた。

キーワード: CO₂ 地中貯留, 多孔質砂岩, 光ファイバーセンシング, ひずみ

Keywords: CO₂ geological sequestration, porous sandstone, optical fiber sensing, strain

J-PARC/BL19「匠」での中性子回折による岩石中のひずみ測定 Strain analysis in Rock samples using Neutron diffraction at J-PARC/BL19 "TAKUMI"

阿部 淳^{1*}, 関根 孝太郎², ハルヨ ステファヌス¹, ゴン ウー¹, 相澤一也¹
Jun Abe^{1*}, Kotaro Sekine², Stefanus Harjo¹, Gong Wu¹, Kazuya Aizawa¹

¹ 日本原子力研究開発機構, ² 石油天然ガス・金属鉱物資源機構
¹JAEA, ²JOGMEC

茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設 J-PARC の BL19 工学材料回折装置「匠」において、金属材料への適用が主である中性子回折を用いたひずみ測定を岩石材料へ展開するための研究をこれまで行ってきた。その結果、測定領域を 2x2x2 mm に設定し、中性子の透過距離が 40 mm 程度になる岩石試料内部からでもひずみ解析可能な中性子回折パターンが得られる事が明らかになり、1 軸圧縮変形その場中性子回折実験では、ひずみゲージから求まる試験片全体のひずみ量と中性子回折パターンから求まる石英粒子内部のひずみ量に差が見られ、鉱物粒子内に蓄積するひずみと鉱物粒子のすべりが岩石全体のひずみ量に関係していることが示唆された。

二酸化炭素地下貯留などの地下環境の工学的利用のためには、地殻応力の評価が必要であり、地殻から回収したコア試料には、地殻応力を反映したひずみが残留していると考えられる。そこで、地下深部より回収した岩石コア試料中の中性子回折実験を行い、残留ひずみが生じているか検討した。

岩石コア試料は、2009 年三重県熊野市にて深度 589m から採取した凝灰岩であり、弾性波伝播速度の直交異方性が測定されている。測定位置に対して、石英粒子および長石粒子の格子定数の違いが観測され、コア試料の中心部付近に存在する石英中には引張りの残留ひずみが、長石中には圧縮の残留ひずみが生じていると推測される。これらの実験結果から、岩石試料の残留ひずみ解析により、地下の応力情報を取得でき、中性子回折手法を用いた新たな地殻応力評価が今後可能になり得ると予想される。

キーワード: 中性子回折, ひずみ解析

Keywords: Neutron diffraction, strain measurement

超伝導重力計 iGrav による CO₂ 地中貯留サイトでの連続重力測定 Continuous gravity measurement with an iGrav superconducting gravimeter for CO₂ sequestration

杉原 光彦^{1*}, 名和 一成¹, 西 祐司¹, 石戸 経士¹, 駒澤 正夫¹, 相馬 宣和¹
Mituhiko Sugihara^{1*}, Kazunari Nawa¹, Yuji Nishi¹, Tsuneo Ishido¹, Masao Komazawa¹, Nobukazu Soma¹

¹産総研

¹AIST

米国 SWP プロジェクトの一環としてテキサス州ファンズワース調査サイトで重力モニタリングを開始した。同地域は地表では大規模農業が行われているが地下には油田が広がっていて EOR による CO₂ 地中貯留実験が行われる。調査サイトに 2 つの重力測定用基台を有する観測小屋を設置して、ベースライン調査として 3 種類の計測を行った。小型超伝導重力計 iGrav による連続観測を開始し、隣接する基台では絶対重力計 FG5 による並行測定を行った。1 月前半に実施した並行測定によって超伝導重力計の感度を評価した。小屋の周辺に重力観測網を設定して可搬型相対重力計による巡回測定も開始した。観測小屋に隣接して GPS 設置台を設け、データ収録を行う一方、重力測定用基台との標高差を定期的に水準測定する。50km 以内に 2 か所ある常設 GPS 観測点のデータを利用して評価する。超伝導重力計の試運転中に長時間の停電があり、連続観測が中断したが、観測小屋には 2 台のディーゼル発電機によるバックアップ機能があり、これを作動させて以降は良好な観測を維持している。1 日毎のデータを FTP で取得できる。20 日間のデータについて試みに BAYTAP-G で解析したところ、トレンド成分として振幅 2-3 マイクロガルの成分を得た。その一部は降雨応答と解釈できた。本研究は、経済産業省からの委託研究「平成 24 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）」の一部として実施した。

キーワード: CO₂ 地中貯留, 重力モニタリング, 超伝導重力計, ファンズワース

Keywords: CO₂ sequestration, gravity monitoring, superconducting gravimeter, Farnsworth

米国テキサス州ファンズワースでの重力調査 Gravity Survey in Farnsworth, Texas

駒澤 正夫^{1*}, 杉原 光彦¹
Masao Komazawa^{1*}, Mituhiko Sugihara¹

¹産総研

¹AIST

米国テキサス州ファンズワースで浅部地下構造を広域的に把握するため 2013 年 1 月に重力調査を行った。測定点は道路沿いにほぼ 300m 間隔に配置され、総測点数は 141 点となった。調査域における特徴的なブーゲー異常として、北西 - 南東方向に背斜構造に対応する高重力異常の高まりが検出された。本研究は、経済産業省からの委託研究「平成 24 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）」の一部として実施した。

キーワード: テキサス州, ファンズワース, 重力調査, CO₂ 地中貯留
Keywords: Texas, Fansworth, Gravity anomaly, CO₂ sequestration

国内の堆積岩における数種の方法を用いたスレッシュヨルド圧力の測定 Threshold pressure measurement by several methods on sedimentary rock in Japan

小野 正樹^{1*}, 亀谷裕志², 細田光一¹, 上堂園四男¹, 竹島淳也²

Masaki Ono^{1*}, Hiroshi, KAMEYA², Kohichi, HOSODA¹, Yotsuo, KAMIDOHZONO¹, Junya, TAKESHIMA²

¹ 応用地質株式会社 コアラボ試験センター, ² 応用地質株式会社 エネルギー事業部

¹OYO Corporation Core Lab, ²OYO Corporation Energy Division

We conducted laboratory tests to investigate threshold pressure in CO₂/water system. First technique is mercury intrusion test (MIT). Second technique is threshold pressure measurement with N₂ using step by step method. Third technique is threshold pressure measurement with supercritical CO₂ using step by step method. These techniques are commonly used but have both advantages and disadvantages. MIT is less time consuming but we cannot control the direction of injecting fluid. Test apparatus for threshold pressure measurement with N₂ is much simpler than that using supercritical CO₂. However, we have to estimate actual threshold pressure in CO₂ storage condition by converting threshold pressure in N₂/water system using interfacial tensions and contact angles. Threshold pressure measurement with supercritical CO₂ is most reliable.

Rock cores used in this study were derived from outcrop of The Yourou-valley, located in Chiba prefecture in Japan. This outcrop belongs to Kiwada formation of the Kazusa formation group which is thought to be formed in Plio-Pleistocene. Porosity of sample is 45%, natural density is 1.89g/cm³, water content is 31%.

In MIT, we used two methods to calculate threshold pressure. By first method, we drew the tangent line with minimum grade against the curve relating saturation and capillary pressure. The tangent line is spread to the vertical line which expresses mercury saturation is zero and this intercept means the threshold pressure. By second method, threshold pressure is determined by the pressure at 10% mercury saturation. Threshold pressure evaluated from former method is 4.08MPa and 4.87MPa is obtained by second method. Using the contact angles and interfacial tensions, we can convert threshold pressure in Hg/Air system to that in CO₂/water system. Estimated threshold pressures in CO₂/water system are 0.32MPa in first method and 0.38MPa in second method.

Threshold pressure measurement with N₂ was also conducted. Room temperature was kept approximately 21 deg c. By N₂ injection, pore water in a rock core was pushed out from a specimen but water production ceased according to the passage of time. Injection pressure was increased step-wisely when water production stopped. This procedure was repeated until continuous water flow was observed. In this test, continuous water flow was observed after injection pressure reached to 1.71MPa. We evaluated threshold pressure in N₂/water system is 1.66MPa which is average pressure of final pressure step and former pressure step (1.60MPa). Estimated threshold pressure in CO₂/water system is 0.66MPa.

Threshold pressure measurement with supercritical CO₂ was conducted under the temperature of 40 deg C. Pore water pressure of 10MPa was applied to ensure that CO₂ was in supercritical state during the test. After injection pressure reached to 1.10MPa, continuous water flow occurred. Threshold pressure in CO₂/water system is evaluated 1.04MPa.

Threshold pressure estimated by MIT was lowest. Threshold pressure obtained from direct measurement with supercritical CO₂ was highest value which is 1.6 times higher than that of N₂. Possible reasons for these test results are listed below;

1. Change of the structure of rock by drying procedure might affect the result of mercury intrusion test.
2. Difference of flow direction between mercury intrusion test and other techniques may have an influence on the value of threshold pressure.
3. Uncertainty of contact angles and interfacial tensions of displacing fluids is also a possible factor which leads different test result.

We gratefully acknowledge special support received from New Energy and Industrial Technology Development Organization(NEDO). Part of this study was performed under Innovative zero-emission integrated coal gasification combined cycle project.

1) Tim T. Schowalter. Mechanics of Secondary Hydrocarbon Mitigation and Entrapment. AAPG Bulletin, 1979, 63, 723-60

キーワード: スレッシュヨルド圧力, 超臨界 CO₂, 堆積岩

Keywords: Threshold Pressure, Supercritical CO₂, Sedimentary Rock

断層の浸透性と粒度組成について - メタンハイドレート堆積層の浸透性評価を目的として -

Permeability of fault and grain size distribution -Evaluation for the permeability of methane-hydrate bearing layers-

木村 匠^{1*}, 金子広明¹, 皆川秀紀¹

Sho Kimura^{1*}, Hiroaki Kaneko¹, Hideki Minagawa¹

¹ 独立行政法人産業技術総合研究所メタンハイドレート研究センター

¹ Methane Hydrate Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Permeability of sediments is important factors for production of natural gas from natural gas hydrate bearing layers. Methane-hydrate is regarded as one of the potential resources of natural gas. As results of coring and logging, the existence of a large amount of methane-hydrate are estimated in the Nankai Trough, offshore central Japan, where has a lot of faults. For the purpose of a rational evaluation of permeability of methane-hydrate layers, it is important to understand properties of fault zone because of different condition from other layers due to large displacement shear. In this study, we investigated the permeability of a specimen formed artificial fault in ring-shear test. Moreover, under high and low normal stresses the difference in grain size distribution of shear zone and other zones were discussed. This study is financially supported by METI and Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan (the MH21 Research Consortium).

キーワード: 断層, 浸透性, 粒度組成

Keywords: Fault, Permeability, Grain size distribution

人工鉱物スメクトンを用いたゲルトラッピングの可能性の検討 Examination of the possibility of gel trapping using artificial-mineral Smecton

片山 智弘^{1*}, 鹿園 直建²
Tomohiro Katayama^{1*}, Naotatsu Shikazono²

¹ 慶應義塾大学理工学部, ² 慶應義塾大学 SFC 研究所
¹Faculty of Science and Technology, Keio University, ²Keio Research Institute at SFC

クミネ工業が生産しているサポナイト構造を有する合成無機高分子、スメクトン SA は水に入れることで膨潤し、酸性条件で水と混合されることでイオンの結合が強まり、強固なゲルになることがわかっている。

これを二酸化炭素地中貯留に応用できれば、本来溶解トラッピングでのフェーズにおいて物理的なトラッピング効果が加算され、漏洩の危険性が低くなる可能性がある。

またこれによりトラッピングが可能なが判明すれば、人工鉱物を用いて貯留能力を高めることができるため、非常に有望である。

そこで今回は、二酸化炭素と水とスメクトン SA を混合して反応させる実験を行い、経過や状態を肉眼で観察と鉱物の構造からトラッピングができる可能性の検証を行った。

結果、スメクトン SA は二酸化炭素条件で水だけを入れたものよりも他の酸性条件での挙動と同様、強固なゲルになった。

また、気泡がゲル中で固まる現象も見られ、溶解トラッピングに加えて物理的な制約が加わっていることが肉眼でも確認できた。

以上からスメクトン SA および、性質の類似したスメクタイトなどの鉱物に二酸化炭素を通常の溶解トラッピングよりも強く二酸化炭素の漏洩を防ぐ能力がある可能性があることが確認できた。

この強固なゲル内および、ゲルを構成する鉱物の層間に二酸化炭素がトラッピングされるトラッピング構造を新たに「ゲルトラッピング」と定義する。

今後は反応する際の 1. 水と鉱物の反応比 2. スメクトン SA 以外のモンモリロナイト 3. 二酸化炭素以外の酸性条件での反応性との比較 4. 長期反応実験やシミュレーションによる鉱物トラッピングする過程までの検討を行い、活かしてゆく。

キーワード: スメクトン, スメクタイト, 二酸化炭素地中貯留, ゲル
Keywords: Smecton, Smectite, CCS, gel

グローバル地下ガス・ワイナリー構想：極地や深海底下の帯水層で地球温暖化防止とガス・エネルギー資源再生 Global underground gas winery absorbing air CO₂ and reproducing methane gas reservoirs : underground carbon recycling

小出 仁^{1*}

Hitoshi Koide^{1*}

¹産総研

¹AIST

極地や深海底下の深部帯水層に CO₂ を大量注入しても、地表下や海底下の適度な深さにハイドレート・シール層が形成され、ほとんど漏洩の心配のない長期無尽蔵の CO₂ 地中貯留が可能である。極地や深海底下は大規模 CO₂ 地中貯留には最適であるが、大規模な人為的 CO₂ 発生源から遠いので、通常の大規模 CO₂ 回収・貯留 (CCS) を実施するには CO₂ 輸送コストが膨大になる。他方、極地や海洋には膨大な手つかずの自然エネルギー資源が利用できないまま残されている。膨大な未利用の自然エネルギー資源を用いて、大気から直接 CO₂ を回収し、極地や深海底下の帯水層に注入して、大規模な CO₂ 地下貯留層を地球規模で形成することを提唱する。長期間地下の帯水層に貯留された CO₂ は、メタン生成原菌などの地下に常在する微生物の活動と熱水によりメタンに変換され、ガス・エネルギー資源として再生することが期待される。すなわち、極地や海洋の未利用自然エネルギーを活用して、地球規模の CO₂ 地下貯留層を極地や海底下に形成すれば、漏洩の怖れは無く、地球温暖化を防止でき、しかも将来のメタンガス・エネルギー資源を醸成できる。

キーワード: 炭素リサイクル、CCS、ハイドレート、メタン生成菌、再生可能エネルギー、自然エネルギー

Keywords: carbon recycling, CCS, hydrate, methanogen, renewable energy, natural energy

炭素含有の地球温暖化ガスを形成する地球型惑星における新形成モデル New Formation Model of Carbon-Bearing Materials Produced Greenhouse Gases on Earth-Type Planets

三浦 保範^{1*}Yasunori Miura^{1*}¹ 客員 (国内外大学)¹ Visiting (Universities)

大気や海を持つ地球惑星の活動系において、地球温暖化ガスの大気問題を議論をしても、動的地球では根本的な問題は解決しない (Miura, 2008)。その主な理由は、炭酸ガスの炭素等の起源 (地球内外)、地下の埋蔵過程と大気中生成・変化消滅などが、統一的に解明が出来ていないからである。現在の炭素含有量等の算出推定や炭素循環過程などで、地下に埋蔵する炭素含有物 (石炭・石油・ガスで特に石炭類) を十分検討していないの現状である。

そのためこの学会 JpGU の広領域視野で見直すと、現在の地球 (惑星) 科学分野では、「目視できる記載は正確で詳細な地球科学の進歩」の報告 (活動地球では比較的短時間に相当) は多くあるが、地球の長い起源に関わる最初と将来最後までの「活動地球の比較的長い時間」過程の議論は、その複雑で消滅を繰り返す長い活動時間と空間場所において、学問的にも軽元素は特に難しいブラックボックスの袋小路になっている (Miura, 2012)。しかし、この問題を根本的に解決して人類社会に適切な処理を模索するには、「この長い時間のブラックボックスを解明」していかないとその場地的になり根本的解明が進まないと考えられる (Miura, 2013)。これまで炭素・水素成分の地球へ供給は、既に出てきた地球への地球外の小惑星・彗星・惑星の衝突破片と現在考えられている。そのため、地球大気・海の生成は主に (小惑星衝突による) 水蒸気とその冷却で概説されているが、炭素や炭酸ガスは付随的で主なガスの流れではよく説明できていない。従って炭酸ガス大気の古い記憶を残す惑星 (火星・金星) がありながら、地球ではその大気が消滅して海水中での反応で大量の炭酸塩鉱物などの生成で表面的に概説されている (Miura, 2010)。この既存の考えを進めるために、このモデルの主な問題点を指摘するとすれば、地球型惑星に広い多量の海水圏を創成期の初めに (唐突に) 形成させて、適切な地球の海水温度のために長く保存されたと考えていることである。そのため、他の惑星ではその炭酸塩堆積層と広大な海水が消滅したとしているが、残存鉱物 (炭酸塩や岩塩など) が多量に発見されていない。これらの問題点を解明するために、地球惑星も最初は火星・金星の炭酸ガス大気が形成したと考えて、その新しいガス大気形成過程を地球 (炭素の地下埋蔵生成など) に適用して、本課題である石炭等の温暖ガス発生過程をブレークスルー的に見直してみる。

最近、月や火星の創世期からの表面は、空隙の多い岩石・表土の衝突集合体であり (Miura, 2011)、惑星の衝突成長時に内部へのガス流体が貫入して埋蔵したものであり、その後炭素含有流体ガス (上昇) も形成された「多段階形成モデル」 (Miura, 2012) が新提唱されている。そして、古い火星・金星 (海水圏がないとして) では、太陽や自転で主に回転面 (赤道) 付近にできる火山 (潮汐力形成) が地下の炭酸ガスを上昇させ、水より広い温度範囲で安定な炭酸ガス大気ができるモデル (Miura, 2011) を新たに考えてみる。ここで、大量の海水圏の形成は、現在末期の地球惑星の応用による考えのため創成期からの統一的な考えでないとして、古い火星・金星には適用していない。この二惑星における炭素含有物と炭酸ガスの形成 (衝突地下埋蔵・潮汐力噴出) モデルから考えて、大量の海水圏形成 (地球惑星のみ) の系統的な説明が困難である。そのため、地球は惑星間巨大衝突で地下内蔵の水素含有物が多量の水として残存した温度範囲で海水圏が形成され、その後の地球大気圏変遷の一部に炭酸ガスも活動循環していたと考える。

炭素資源とガスが地球惑星に形成されるのは、この数段階形成モデル (衝突・地下埋蔵・上昇の3段階) の考えから、水素含有の水に比べ、高圧で安定な化合物を形成するためであると考え。そのため、炭素含有物や炭素含有資源物 (石炭など) を活動的な地球内部で多く埋蔵して、古来からの人類社会生活で、多量の炭素含有資源を工業的に使用して、現在温暖ガスが増えたと考える。

この長い地球惑星活動における炭素含有物の形成の視点から、昨年 JpGU 学会で報告した主な三種類の炭素の起源から見た炭素循環 (地球長周期・生物短周期・工業人工廃棄物; Miura, 2012) に対して、前二者の主過程の変更は活動地球では人工的に短期間で制御できないものである。しかし、三番目の人工廃棄物を、活動地球で炭素回収制御による動的安定状態の科学技術的工夫 (動的放出による状態変化利用など; Miura 2013) を工夫することにより、グローバル視野の地球惑星で、根本的に解決する科学技術の考案を早急に技術応用して解決できることが世界中から期待されている。

キーワード: 二酸化炭素ガス, 地球温暖化, 炭素含有物, 地球型惑星, 多段階形成モデル, 創世期の惑星大気

Keywords: Carbon dioxides gas, Greenhouse warming, Carbon-bearing materials, Earth-type planets, Multy-steps formation model, Primordial air-planets