

## CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> storage: Application to Matsushiro phenomena

船津 貴弘<sup>1\*</sup>, 奥山 康子<sup>1</sup>, 雷 興林<sup>1</sup>, 中尾 信典<sup>1</sup>  
Takahiro Funatsu<sup>1\*</sup>, Yasuko Okuyama<sup>1</sup>, Xinglin Lei<sup>1</sup>, Shinsuke Nakao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(独) 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

<sup>1</sup>Institute of Geo-Resources and Environment, AIST

The mechanical responses of CO<sub>2</sub> reservoir and the caprock around the storage region become crucial for Japanese geological CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.

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 CO<sub>2</sub>-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, CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> storage, Natural analogue, Matsushiro phenomena

## V<sub>p</sub>-V<sub>s</sub>によるCO<sub>2</sub>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<sub>p</sub> and V<sub>s</sub> monitoring for MVA program of offshore CCS project

北村 圭吾<sup>1\*</sup>, 薛 自求<sup>2</sup>  
Keigo Kitamura<sup>1\*</sup>, Ziqiu XUE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学 WPI-I<sup>2</sup>CNER, <sup>2</sup>地球環境産業技術研究機構

<sup>1</sup>WPI-I<sup>2</sup>CNER Kyushu University, <sup>2</sup>Research Institute of Innovative Technology for the Earth

For the safe operation of CCS, we are required to monitor the CO<sub>2</sub> behavior and to accurately account for the storage volume of CO<sub>2</sub> in deep reservoirs. It is well-known that the P-wave velocity measurements (V<sub>p</sub>) can be used for monitoring the CO<sub>2</sub> behavior in deep reservoirs. However, it is difficult to accurately estimate the storage volume of CO<sub>2</sub> by only using V<sub>p</sub>. 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<sub>p</sub> and V<sub>s</sub> 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 CO<sub>2</sub> saturation, and to monitor the CO<sub>2</sub> behavior in porous sandstone by measuring V<sub>p</sub> and V<sub>s</sub>. First, we injected near 1.3PV water into the vacuumed specimen (Water injection). After this process, over 2.2PV CO<sub>2</sub> is injected into the water saturated specimen (Drainage). Finally, CO<sub>2</sub>-saturated water over 2.3 PV is re-injected into the CO<sub>2</sub>-injected specimen (Imbibition). We illustrated the V<sub>p</sub>-V<sub>s</sub> relationships of all the processes. This V<sub>p</sub>-V<sub>s</sub> 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<sub>p</sub>-V<sub>s</sub> change with injecting CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-saturated water. These changes indicate the changes of CO<sub>2</sub> saturation during drainage and imbibition stage. This result suggests the potential to estimate CO<sub>2</sub> saturation by using the V<sub>p</sub>-V<sub>s</sub> relationship. Additionally, V<sub>p</sub> does not recover to pre-drainage levels after end of imbibition process. This V<sub>p</sub> difference is considered to be the effect of residual trapped CO<sub>2</sub>. This result also indicates the potential of monitoring the residual trapped CO<sub>2</sub> from seismic wave velocities.

キーワード: P 波速度, S 波速度, 多孔質砂岩, CO<sub>2</sub> 飽和度, MVA

Keywords: P-wave velocity, S-wave velocity, Porous sandstone, CO<sub>2</sub> saturation, MVA

## 超臨界 CO<sub>2</sub> 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 scCO<sub>2</sub> microbubbles

片所 優宇美<sup>1\*</sup>, 木山 保<sup>2</sup>, 辻 真也<sup>1</sup>, 薛 自求<sup>2</sup>, 松岡 俊文<sup>1</sup>  
Yumi Katasho<sup>1\*</sup>, Tamotsu Kiyama<sup>2</sup>, Shinya Tsuji<sup>1</sup>, Ziqiu Xue<sup>2</sup>, Toshifumi matsuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> 公益財団法人地球環境産業技術研究機構

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

The effectiveness of CO<sub>2</sub> microbubble method for geological sequestration was investigated. For the comparison of the conventional method and CO<sub>2</sub> microbubble method, the CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, there were two factors of the change of Vp. One is CO<sub>2</sub> dissolution into pore water and another is replacement of CO<sub>2</sub> and pore water. To separate the factor of the change of Vp, Vp of saline water was measured when injecting CO<sub>2</sub> microbubbles into saline water. The change of Vp effected by CO<sub>2</sub> dissolution was less than 1 %. Therefore, in first experiment. the change of Vp in the injection of CO<sub>2</sub> was effected by the CO<sub>2</sub> replacement of pore water more than the CO<sub>2</sub> dissolution. And the change of Vp in Berea sandstone showed the slow CO<sub>2</sub> migration in CO<sub>2</sub> microbubble method. This is because dissolution of amount of CO<sub>2</sub> microbubbles increased.

This result shows microbubble method could increase the reservoir potential for CO<sub>2</sub>, 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CO<sub>2</sub>注入時の多胡砂岩のひずみ測定 Monitoring the Strain of Tako sandstone injected with CO<sub>2</sub> using Optical Fiber Sensing

堀内 侑樹<sup>1\*</sup>, 小暮 哲也<sup>2</sup>, 薛 自求<sup>2</sup>, 松岡 俊文<sup>1</sup>

Yuki Horiuchi<sup>1\*</sup>, Tetsuya Kogure<sup>2</sup>, Ziqiu Xue<sup>2</sup>, MATSUOKA, Toshifumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院 工学研究科, <sup>2</sup> 地球環境産業技術研究機構

<sup>1</sup>Kyoto University Graduate School of Engineering, <sup>2</sup>Research 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、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 圧入時の岩盤の深度方向の変位を計測し、CO<sub>2</sub> 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: CO<sub>2</sub> 地中貯留, 多孔質砂岩, 光ファイバーセンシング, ひずみ

Keywords: CO<sub>2</sub> 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<sup>1\*</sup>, 関根 孝太郎<sup>2</sup>, ハルヨ ステファヌス<sup>1</sup>, ゴン ウー<sup>1</sup>, 相澤一也<sup>1</sup>  
Jun Abe<sup>1\*</sup>, Kotaro Sekine<sup>2</sup>, Stefanus Harjo<sup>1</sup>, Gong Wu<sup>1</sup>, Kazuya Aizawa<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>JOGMEC

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 CO<sub>2</sub> 地中貯留サイトでの連続重力測定 Continuous gravity measurement with an iGrav superconducting gravimeter for CO<sub>2</sub> sequestration

杉原 光彦<sup>1\*</sup>, 名和 一成<sup>1</sup>, 西 祐司<sup>1</sup>, 石戸 経士<sup>1</sup>, 駒澤 正夫<sup>1</sup>, 相馬 宣和<sup>1</sup>

Mituhiko Sugihara<sup>1\*</sup>, Kazunari Nawa<sup>1</sup>, Yuji Nishi<sup>1</sup>, Tsuneo Ishido<sup>1</sup>, Masao Komazawa<sup>1</sup>, Nobukazu Soma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>産総研

<sup>1</sup>AIST

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 挙動評価技術の開発）」の一部として実施した。

キーワード: CO<sub>2</sub> 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: CO<sub>2</sub> 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<sup>1\*</sup>, 杉原 光彦<sup>1</sup>  
Masao Komazawa<sup>1\*</sup>, Mituhiko Sugihara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>産総研

<sup>1</sup>AIST

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 CO<sub>2</sub> 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, CO<sub>2</sub> 地中貯留  
Keywords: Texas, Fansworth, Gravity anomaly, CO<sub>2</sub> 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<sup>1\*</sup>, 亀谷裕志<sup>2</sup>, 細田光一<sup>1</sup>, 上堂園四男<sup>1</sup>, 竹島淳也<sup>2</sup>

Masaki Ono<sup>1\*</sup>, Hiroshi, KAMEYA<sup>2</sup>, Kohichi, HOSODA<sup>1</sup>, Yotsuo, KAMIDOHZONO<sup>1</sup>, Junya, TAKESHIMA<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>OYO Corporation Core Lab, <sup>2</sup>OYO Corporation Energy Division

We conducted laboratory tests to investigate threshold pressure in CO<sub>2</sub>/water system. First technique is mercury intrusion test (MIT). Second technique is threshold pressure measurement with N<sub>2</sub> using step by step method. Third technique is threshold pressure measurement with supercritical CO<sub>2</sub> 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 N<sub>2</sub> is much simpler than that using supercritical CO<sub>2</sub>. However, we have to estimate actual threshold pressure in CO<sub>2</sub> storage condition by converting threshold pressure in N<sub>2</sub>/water system using interfacial tensions and contact angles. Threshold pressure measurement with supercritical CO<sub>2</sub> 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/cm<sup>3</sup>, 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 CO<sub>2</sub>/water system. Estimated threshold pressures in CO<sub>2</sub>/water system are 0.32MPa in first method and 0.38MPa in second method.

Threshold pressure measurement with N<sub>2</sub> was also conducted. Room temperature was kept approximately 21 deg c. By N<sub>2</sub> 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 N<sub>2</sub>/water system is 1.66MPa which is average pressure of final pressure step and former pressure step (1.60MPa). Estimated threshold pressure in CO<sub>2</sub>/water system is 0.66MPa.

Threshold pressure measurement with supercritical CO<sub>2</sub> was conducted under the temperature of 40 deg C. Pore water pressure of 10MPa was applied to ensure that CO<sub>2</sub> was in supercritical state during the test. After injection pressure reached to 1.10MPa, continuous water flow occurred. Threshold pressure in CO<sub>2</sub>/water system is evaluated 1.04MPa.

Threshold pressure estimated by MIT was lowest. Threshold pressure obtained from direct measurement with supercritical CO<sub>2</sub> was highest value which is 1.6 times higher than that of N<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>, 堆積岩

Keywords: Threshold Pressure, Supercritical CO<sub>2</sub>, 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<sup>1\*</sup>, 金子広明<sup>1</sup>, 皆川秀紀<sup>1</sup>  
Sho Kimura<sup>1\*</sup>, Hiroaki Kaneko<sup>1</sup>, Hideki Minagawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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<sup>1\*</sup>, 鹿園 直建<sup>2</sup>  
Tomohiro Katayama<sup>1\*</sup>, Naotatsu Shikazono<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 慶應義塾大学理工学部, <sup>2</sup> 慶應義塾大学 SFC 研究所  
<sup>1</sup>Faculty of Science and Technology, Keio University, <sup>2</sup>Keio 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 CO<sub>2</sub> and reproducing methane gas reservoirs : underground carbon recycling

小出 仁<sup>1\*</sup>

Hitoshi Koide<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研

<sup>1</sup>AIST

極地や深海底下の深部帯水層に CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 地中貯留が可能である。極地や深海底下は大規模 CO<sub>2</sub> 地中貯留には最適であるが、大規模な人為的 CO<sub>2</sub> 発生源から遠いので、通常の大規模 CO<sub>2</sub> 回収・貯留 (CCS) を実施するには CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> を回収し、極地や深海底下の帯水層に注入して、大規模な CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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<sup>1\*</sup>Yasunori Miura<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 客員 (国内外大学)<sup>1</sup> 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