

我が国の地球温暖化対策とCCS政策について

Strategy for carbon dioxide emissions reduction and CCS policy in Japan

*鎌田 真行¹、永澤 剛²

*Sadayuki Kamada¹, Takeshi Nagasawa²

1. 苫小牧市、2. 経済産業省

1. Tomakomai City, 2. Ministry of Economy, Trade and Industry(METI)

Widespread adoption of CCS technology could be key to limiting global average temperature increase. Supporters of carbon capture and storage technology say CCS needs to be brought to scale to limit global warming. This presentation covers an introduction on current status of research and development on CCS technology and CCS policy in Japan. Main topics are listed below.

- 1) overview of the Tomakomai large scale demonstration project
- 2) potential storage site survey
- 3) R&D of CO₂ capture and storage technology
- 4) international collaborations
- 5) Japanese government's policy on CCS

キーワード：CCS、政策、CO₂

Keywords: CCS, policy, CO₂

世界で稼働中のCCSプロジェクトのインセンティブ

Incentives for operational CCS projects in the World

*田中 良三¹*Ryozo Tanaka¹

1.公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

CCS is recognized as a promising technology to fulfill an ambitious target of CO₂ emission reductions. But the advancement of its deployment has been very slow than expected and acute growth in deployment cannot be anticipated at least for a short term. One of the reasons behind is the lack of economic incentives to compensate costs of CCS deployment. Then what are driving forces for existing large-scale CCS projects? There are currently 15 operational and 7 under-construction large-scale CCS projects in the world. The half of these projects have inherent CO₂ separation in the production process and sell the captured CO₂ to enhanced oil recovery (EOR) operation. This combination generally requires no additional investment for the installation of CO₂ separation and can generate revenue by selling CO₂. The remaining half has an additional CO₂ capture facility and/or use a saline formation as a CO₂ reservoir. To fill a financial gap, these projects receive public funding and/or enjoy other forms of financial incentives such as carbon credit, tax credit and avoidance of carbon tax. This presentation analyses factors making existing projects financially feasible and financial incentives implemented for future projects in major countries.

CO₂地中貯留サイトにおける坑井情報と弾性波探査情報を活用した地質モデル構築の試み：長岡サイトの例

Development of geological model using core-well-seismic integration technique at the Nagaoka CO₂ storage site, Japan

*伊藤 拓馬¹、中島 崇裕¹、薛 自求¹

*Takuma Ito¹, Takahiro Nakajima¹, Ziqiu Xue¹

1.公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1.Research Institute of Innovative Technology for the Earth

地中貯留サイトとして地質情報に乏しい帯水層を選定する場合、利用できる坑井情報や弾性波探査情報は限られる。しかし、貯留層を特徴づけるためには、地質モデル構築は欠かせない。この現状を克服するためには、既存の地質情報の有効活用に加え、得られた坑井情報と弾性波探査情報を適切に統合することが求められる。そこで、CO₂地中貯留に使用する塩水性帯水層の地質モデル構築手法を提案する。具体的には、(1)坑井データを用いて地層の堆積環境を把握し、地層境界面として使用するシーケンス境界を認定する、(2)シーケンス境界を使用したボクセルモデルを構築する、(3)坑井情報を空間的に広げる際の不確実性を減らすため、弾性波探査情報を考慮した岩相、孔隙率、浸透率の3次元モデルを構築する。本発表では、長岡サイトにおける地質モデル構築例を紹介する。

長岡プロジェクトでは、新潟平野の地下約1,000m付近に分布する塩水性帯水層を対象とし、約1万トンのCO₂が圧入された。塩水性帯水層は、前期更新世の灰爪層に対比された。本サイトでは、1本の圧入井(IW-1)と3本の観測井(OB-2, -3, -4)が掘削された。各坑井では物理検層データが得られ、IW-1では貯留層のコア試料が採取された。またCO₂圧入時から現在まで、地下でのCO₂挙動を観測するために物理検層によるモニタリングが実施されている。

初めに、IW-1から採取されたコア試料の堆積相解析と粒度分析を実施し、貯留層の堆積環境を把握した。貯留層にはラビンメント面が認められ、その上部は上方細粒化から上方粗粒化サクセッションで特徴づけられる。貯留層はプロデルタ～デルタフロント部から構成されると解釈される。デルタフロントとプロデルタは、含泥率が約40%を閾値として区分される。

次に、各坑井の地層を対比するため、坑井物理検層データを用いた。IW-1におけるコア試料と自然ガンマ線検層の比較から、自然ガンマ線検層の深度変化は含泥率の深度変化と類似することと、デルタフロントとプロデルタの堆積環境は自然ガンマ線強度が約75APIを閾値として区分されることが分かった。このことは、当サイトの自然ガンマ線検層は、堆積環境の識別ツールとして活用できることを示す。自然ガンマ線検層とコア試料に基づく堆積相解析の比較から、各坑井の堆積シーケンスとシーケンス境界を認定した。また、自然ガンマ線強度と孔隙率、孔隙率と浸透率を調べたところ、両者とも正の相関が認められた。シーケンス境界と物性同士の相関の情報は、地質モデル構築の際に活用する。

最後に、地質モデルの枠組みを作成するため、弾性波探査データを使用した。各坑井における地層のシーケンス境界は、Petrel (Schlumberger社製)を用いて複数の弾性波探査断面で追跡され、それらを補間することでシーケンス境界の空間的広がりを把握した。そして、2つのシーケンス境界によって定義される地層についてグリッド区分し、ボクセルモデルを作成した。地質モデル構築では、各ボクセルに岩相や孔隙率・浸透率の値を割り振った。岩相や物性値を空間的に割り振る際には、弾性波探査情報を活用した。本研究では、物理検層と弾性波探査情報を関連づけられるGDI (Geological Driven Integration) 解析から得た孔隙率の3次元分布モデルをガイドとし、前述の孔隙率、自然ガンマ線強度、浸透率の相関係数を拘束条件とし、collocated cokrigingを用いた逐次ガウスシミュレーションによって岩相と浸透率の3次元分布モデルを構築した。

上記手順に基づき得られた岩相と浸透率の3次元分布は、東部では泥質かつ浸透率が低い傾向を示す。この結果は、既存の地質調査において示された概ね西側から東側への碎屑物供給系が存在したとする古地理学的知見と整合する。一方、モニタリングによるCO₂の挙動観測の結果は、最も西側に位置する観測井OB-3でCO₂の到達が遅れることを示す。この観測結果は、得られた地質モデルの妥当性を支持する。

キーワード：CO₂地中貯留、長岡サイト、堆積学、地質モデル、坑井情報と震探情報の活用

Keywords: Geological storage of CO₂, Nagaoka site, Sedimentology, Geological modeling, core-log-seismic integration

弾性波探査データによる特性評価および坑井を用いたモニタリングによって較正された統合地質モデルの構築：長岡CO₂圧入サイトでの事例研究

Construction of an integrated geological model characterized by a seismic survey data and calibrated by log-based monitoring data: A case study at Nagaoka CO₂ injection site

*中島 崇裕¹、伊藤 拓馬¹、薛 自求¹、千代延 俊²

*Takahiro Nakajima¹, Takuma Ito¹, Ziqiu Xue¹, Shun Chiyonobu²

1. (公財) 地球環境産業技術研究機構、2. 秋田大学国際資源学部

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth, 2. Faculty of International Resource Sciences, Akita University

This paper discusses a methodology for the site characterization of deep saline reservoirs evaluated through dynamic flow simulations. Not only the traditional site characterization techniques, but also the injection and monitoring data can be used for the geological modeling. In this study we carried out flow simulations using a geological model based on a seismic survey data and monitoring data after the CO₂ injection at Nagaoka site.

Nagaoka project was undertaken in order to verify an ability of CO₂ injection into Japanese formation. The target reservoir consists of marine strata at a depth of 1100m. Between 20 and 40 tons of CO₂ were injected and a total of 10.4 k-tons of CO₂ was injected into a thin permeable zone. Bottom-hole pressure measurement, time-lapse well loggings and cross-well seismic tomography were conducted using three observation wells drilled between 40m and 120m from the injection point. For the modeling of the reservoir with heterogeneity, the method presented by Ito et al. (2016) was used; determined the sequence boundaries of the formation from the analysis of depositional environments, constructed a 3D reservoir framework by horizon picking of seismic trace, and developed a 3D distribution of reservoir parameter after the integration of lithologic records, well logging data, and 3D seismic attributes. It is worth to note that the heterogeneous feature from NNE to SSW direction can be seen in the revised interpretation model. For the hydrological properties we referred measured results as reported in Nakajima et al. (2015).

For the simulation of multiphase flow, we used TOUGH2/ECON2 simulator. The model was calibrated through the process of history matching to the bottom-hole pressure and CO₂ saturation. Several absolute permeability models were tested manually and good matches were achieved between monitoring data and simulated CO₂ behaviour. The results of CO₂ distribution were also consistent with the observed velocity anomalies from the cross-well tomography. The numerical results revealed the migration of CO₂ plume to up-dip direction along the most permeable zone during the post-injection period.

Sensitivity studies were conducted to investigate the effect of poorly constrained model parameters. We tested alternative parameters on absolute permeability, ratio of horizontal to vertical permeabilities, and pore compressibilities. We found that the effect of the ratio between horizontal and vertical permeabilities was relatively large, and pore compressibility had effects on pressure response. A small anisotropy in horizontal direction could also explain a better matching. These anisotropies could be created during the depositional process of the reservoir. We will report the long-term fate of CO₂ in the reservoir to evaluate the contribution of the trapping mechanisms.

キーワード：CO₂地中貯留、長岡サイト、多相流、トラッピングメカニズム

Keywords: CO₂ geological storage, Nagaoka site, multiphase flow, trapping mechanism

Simulation study on trapping processes of CO₂ at Nagaoka pilot project

*Hajime Yamamoto¹, Takahiro Nakajima², Ziqiu Xue²

1.Technology Center, Taisei Corporation, 2.Research Institute of Innovative Technology for the Earth

Long term stability of CO₂ stored in reservoir is of intrinsic importance for ensuring the viability of geologic sequestration of carbon dioxide. Demonstrating the permanence of storage is an important task of pilot projects. In the Nagaoka project, Japan's first pilot-test of geological CO₂ sequestration that injected about 10,400 tonnes of CO₂ from 2003 to 2005, a stable containment of CO₂ in a reservoir has been successfully demonstrated by kept monitoring the CO₂ behavior even after the end of injection during about 10 years. Systematic and continuous data acquisition of time-lapse well loggings (e.g., resistivity, neutron, and sonic velocity) successfully illustrated the detailed nature of CO₂ migration at intra-reservoir resolution.

In this study, a three-dimensional reservoir model with sub-meter spatial resolution has been developed with comprehensively involving coupled process of two-phase fluid flow and geochemical transport. The model was history-matched against a set of monitoring data acquired during the post-injection period including pressure, well loggings, and fluid samplings. The calibration of a large model is computationally demanding, hence we newly developed a parallel version of coupled fluid flow and geochemistry TOUGHREACT V2.0/ECO2N with MPI parallelism, in-house. The new code also features hysteretic effect in relative permeability and capillarity which was not implemented in the original TOUGHREACT V2.0.

The detailed 3D history matching study reproduced the observed distribution of CO₂ saturation at sub-meter scale over time. From the lessons learnt through the history matching study, the following insights into the trapping processes of CO₂ at the project have been obtained.

- During the injection, free CO₂ migrated preferentially through higher permeable layers. The uneven arrival times of CO₂ to the well-depths are well explained by, and consistent with the non-uniform permeability distribution measured at wells.
- Pressure-driven-flow during the injection squeezed the formation water out of the reservoir, and consequently resulted in hydrodynamic dispersion of dissolved CO₂ into over- and under-lying lower permeable layers. This behavior is highly consistent with the resistivity changes observed by well loggings.
- In the post-injection period, negligible vertical migration of free CO₂ suggests that even a thin, intra-reservoir muddy-layer behaves like an impermeable flow barrier to trap CO₂, by a combined effect of lower vertical permeability and high capillarity to prevent the invasion of CO₂.

Keywords: Reservoir Simulation, CO₂ trapping, Nagaoka, Parallel Computation, TOUGH2

苫小牧CCS大規模実証試験における地震波干渉法のモニタリングへの適用性検討

Subsurface monitoring using seismic interferometry for the large-scale CCS Demonstration Project at the Tomakomai Area

*新色 隆二¹、東中 基倫¹、阿部 進¹、土屋 真²、斉藤 秀雄²、薛 自求³、利岡 徹馬³

*Ryuji Niino¹, Motonori Higashinaka¹, Susumu Abe¹, Makoto Tsuchiya², Hideo Saito², Ziqiu Xue³, Tetsuma Toshioka³

1.株式会社地球科学総合研究所、2.日本CCS調査株式会社、3.地球環境産業技術研究機構

1.JGI, inc., 2.Japan CCS Co., Ltd., 3.RITE

経済産業省が日本CCS調査株式会社に委託して実施している苫小牧CCS大規模実証試験事業の一環として、苫小牧港西港区沖の港湾区域内にケーブル長3.6m、受振点間隔50mの常設型OBCが敷設され、2014年7月より常時観測が実施されている。

本報告では、この常時観測データを用いる受動的な地震探査手法の二酸化炭素貯留範囲を把握するための安価な繰り返し反射法探査としての適用性を検討することを目的として、地震波干渉法を自然地震記録に適用した事例を報告する。

OBCによる常時観測は、地震活動のモニタリングおよび繰り返し弾性波探査を目的としたものであるが、6年間のモニタリング期間中に亘って長期連続観測記録が取得されるため、期間中の任意のデータに対して地震波干渉法による地下構造イメージングが可能である。

対象地域では、圧入中および圧入後の二酸化炭素の挙動把握を目的として繰り返し弾性波探査が計画され、圧入前のベースライン調査として2009年に三次元弾性波探査、2013年に二次元弾性波探査が既に実施されている。2016年度に予定されている二酸化炭素圧入開始以降、定期的なモニター調査が実施されるが、エアガン振源を用いた繰り返し弾性波探査には高額のコストがかかるため、頻繁なモニター調査の実施は困難である。これに対して地震波干渉法は、連続観測記録の任意の期間のデータに対して適用可能であるため、通常の繰り返し弾性波探査と比較して、短い時間間隔で貯留層内の二酸化炭素挙動を把握できる可能性がある。

そこで、常設型OBCによる連続観測記録に地震波干渉法を適用し、二酸化炭素挙動モニタリングへの適用性に関する検討を実施した。2015年1月1日から2015年11月21日までに観測された自然地震記録のうち、北緯41.5度から43.75度、東経140.25度から143度の範囲に位置し、かつ震源距離が48 kmよりも長い地震のうち、M2.0以上の地震を対象とした。対象とした全251イベントのうち、P波およびS波の初動が明瞭に認められる158イベントについてコーダ波を含むP波部分を抽出し、イベント毎に地震波干渉法を適用した。適用結果を全て重合した記録に対して反射法データ処理を適用し、反射法重合断面図を得た。得られた重合断面とエアガン振源による重合断面を比較した結果、地震波干渉法による重合断面上で貯留層に相当する反射面が確認された。

本報告の結果は、地震波干渉法による貯留層深度での反射法イメージングの有意性を示すものであり、また相対的に安価な繰り返し探査反射法の手法となる可能性を示すものである。

今後は、異なる期間のイベントを用いた場合の処理結果の再現性、処理対象イベント数と重合結果の品質との関係を明らかにし、二酸化炭素挙動モニタリングにおける繰り返し反射法探査として地震波干渉法の適用性を精査する。

キーワード：地震波干渉法、二酸化炭素、CCS、モニタリング

Keywords: Seismic Interferometry, CO₂, CCS, monitoring

超安定震源を用いたサウジアラビアAl Wasseにおけるタイムラプス観測とそのデータ解析
Time-lapse observation and its interpretation in Al Wasse field in Saudi Arabia using
ultra-stable seismic source

*笠原 順三^{1,2,4}、Al Damegho Khhaled³、Al-Anezi Ghunaim³、村瀬 圭⁴、上村 彩⁴、藤本 理⁴、大沼 寛⁴、羽佐
田 葉子⁵

*Junzo Kasahara^{1,2,4}、Khaled Al Damegh³、Ghunaim Al-Anezi³、Kei Murase⁴、Aya Kamimura⁴、Osamu Fujimoto⁴、Hiroshi Ohnuma⁴、Yoko Hasada⁵

1.静岡大学理学部防災総合センター、2.東京海洋大学産学地域連携推進機構、3.KACST、4.川崎地質
(株)、5.大和探査技術(株)

1.University of Shizuoka, Faculty of Earth Sciences, 2.Tokyo University of Marine Science and
Technology, 3.KACST, 4.Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 5.Daiwa Exploration and Consulting
Co. Ltd.

1. Introduction

The Carbon Capture and Storage (CCS) is one of ways to reduce the CO₂ radiation to the air. In CCS, CO₂ is injected to the subsurface and is stored in the subsurface. Technologies of monitoring (time-lapse) of CO₂ leakage from the storage zone have been studied in many institutions. We have used the ACROSS seismic source for the time-lapse and have tested the technology in Al Wasee field, Saudi Arabia after the air injection study in Japan (Kasahara *et al.*, 2013). The same technology can be used in EOR (Enhanced Oil Recovery) and PRM (Permanent Reservoir Monitoring) cases.

2. Time-lapse observation in Saudi Arabia and data processing

The test site is a national water pumping field. Water is pumped up from aquifers around 400 m depth. The geology of this area comprises limestone, sandstone and unconsolidated sand. There is no seismic survey in this area before our study.

We used the ACROSS unit as an ultra-stable seismic source and 32 seismographs at 500 m spacing grids with distances between 500 m to 1.76 km. The source transmitted chirp signal from 10 to 40 Hz and the seismic waves were recorded by data-loggers. Because of so frequent power downs during the observation, the obtained data were intermittent. The transfer functions between the source and receivers were obtained by division of observed records by source signatures in spectral domain by the similar way as before (*e.g.*, Kasahara *et al.*, 2013, 2015). By processing, we obtained the transfer functions corresponding to vertical and horizontal forces. As the interpretation of one-day stacked data, we used the refraction survey in 2015 (Kasahara *et al.*, 2016; in this session).

3. Results

We obtained the transfer functions from April to December, 2015 for 30 stations, but the data are not continuous for whole period due to frequent power downs. The first arrivals disappear at the distance further than 1 km and large amplitude phase is dominant at the stations further than 1.5 km. The temporal variation in the arrivals later than 1.0 seconds is extremely large as same as that in April to June, 2015 (Kasahara *et al.*, 2015). The first arrivals closer than 1 km do not give large temporal changes, which is similar to the previous results in April to June 2015

Using the refraction data obtained in 2015 we interpreted the phases. The first arrivals at the distance less than 1 km are refracted wave with 3.5 km/s travelling the upper limestone layer. The phase with large amplitude at the distance further than 1 km is estimated as refracted wave with 4.5 km/s travelling in the basement. This phase shows some temporal variation. The Raleigh wave could have large amplitude and this is dominated after refracted waves. The temporal changes in surface waves do not show coherent characteristics from one to another.

4. Discussion and conclusions

The presence of low velocity zone just below the 3.5 km/s layer makes difficult to interpret the temporal change. The first arrivals quickly decay at the distance further than 1 km by the low-velocity layer. At the distance further than 1 km, large amplitude phase refracted at the layer deeper than 800 m is dominant. The upper limestone layer does not show large temporal changes and the refracted arrivals show some temporal changes due to the migration of aquifer. The surface waves seem travel in the low velocity layer, and the temporal change of surface wave is so large and shows roughly week period. This may be caused by pumping of water from aquifer.

Acknowledgements

This survey was supported by JCCP (Japan Cooperative Center for Petroleum) in Japan and KACST in Saudi Arabia. We express our great thanks to members of JCCP and KACST for their aggressive support of this project.

キーワード：タイムラプス、アクロス、シャドーゾーン、屈折波、低速度層、帯水層

Keywords: Time-lapse, ACROSS, shadow zone, refracted wave, low-velocity layer, aquifer

分布式光ファイバーを用いた遮蔽層や坑井健全性監視技術開発

Geomechanical monitoring of caprock and wellbore integrity using fiber optic cable

*薛 自求¹、橋本 努¹

*Ziqiu Xue¹, Tsutomu Hashimoto¹

1.公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

1.Research Institute of Innovative Tech for the Earth

We have been developing a new technology to monitor the caprock and wellbore integrity at CO₂ injection sites by utilizing the Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS). DFOS has an advantage to measure temperature and strain at any point in an unprocessed optical fiber, contrary to the conventional Fiber Bragg Grating (FBG) sensing which measures temperature and strain at a limited number of discrete points along the processed fiber cable. To put the DFOS technique into the practical use at the CCS sites, we measured the frequency shifts of the Rayleigh and Brillouin scattering in an optical fiber attached to sandstone samples under hydrostatic pressure, and also measured strain of the samples by conventional strain gages simultaneously. Strains measured by optical fiber are estimated based on the frequency shifts and those strains agreed well with the strains by conventional strain gages. The experimental results demonstrated the potential use of DFOS as a promising technology for monitoring the geomechanical deformation of geological formation at the CO₂ injection site.

キーワード：二酸化炭素地中貯留、光ファイバー、健全性監視

Keywords: CO₂ geological storage, optic fiber sensing , integrity monitoring

産総研におけるCO₂地中貯留のための自然電位モニタリングの研究Self-potential Monitoring Study for Geological Storage of CO₂ in AIST

*西 祐司¹、石戸 経士¹

*Yuji Nishi¹, Tsuneo Ishido¹

1.独立行政法人 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment

An appropriate monitoring program is important for an CO₂ geological storage project to detecting subsurface changes within the reservoir, to provide for potential risk, and to improve the predictive capability of reservoir simulation. AIST have studied passive geophysical monitoring method to reduce the repetition of the expensive seismic sounding, especially in post-injection period (Nishi et al., 2015).

The self-potential (SP) method is mainly used in volcanic or geothermal field to delineate thermal anomaly from streaming potential generated by subsurface fluid flow. In CO₂ geological storage site, SP changes due to stream-potential might be a promising geophysical tool to monitor pressure changes in shallower levels (Ishido et al., 2009).

SP anomaly just around a well could be another important target for SP monitoring. As subsurface changes in geochemical condition might change the well-casing SP due to geo-battery effect (Ishido et al., 2013), simple surface SP monitoring could be an early warning alarm for CO₂ plume arrival to the well bottom.

In the presentation, some of our recent advances in SP monitoring & modeling will be summarized.

キーワード：CO₂ Geological Storage、modeling、streaming potential

Keywords: monitoring, self-potential, geo-battery

非線形動的応答解析によるCCSサイトにおける遮蔽層の地震時安全性評価

A Study on seismic stability safety evaluation of the cap rock for geological CO₂ storage using non-linear dynamic response analysis

*堀川 滋雄¹、佐々木 猛¹、高田 尚秀¹、橋本 励¹、中島 崇裕²、薛 自求²

*Shigeo Horikawa¹, Takeshi Sasaki¹, Naohide Takada¹, Tsutomu Hashimoto¹, Takahiro Nakajima², Ziqui Xue²

1.サンコーコンサルタント株式会社、2.公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1.Suncoh Consultants Co., Ltd., 2.Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)

CO₂地中貯留サイトにおいて非線形動的応答解析をおこない、地震時の遮蔽層の安全性を評価した。適用した場所は長岡CCSサイトである。入力地震動は2004年10月23日に発生した新潟県中越地震 (Mw6.6) の際、当サイトに設置した地震計で得られた波形をもちいた。解析に必要な地盤の工学的特性値は、実際にサイトで得られた数値を入力した。

動的解析にあたっては、地表面で記録された地震動に対して、水平成層モデルを仮定してSHAKE (一次元応答解析プログラム) により基盤層 (椎谷層に仮定、深度1,370m) からの入力波形を設定した。この波形を解析モデルに直接入力して運動方程式をNewmarkの β , γ による直接積分法を用いて解いた。地震応答解析には岩盤を不連続性岩盤としての取り扱いが可能で、複雑に褶曲する地質構造にも対応可能なMYM (二次元有限要素法解析) を使用した。

地盤の強度変形特性は、拘束応力依存性を考慮したDuncan-Changの構成則に除荷特性を付加して、非線形繰り返しモデルを採用・実施した。本特性は、水平成層と拘束応力を一定と仮定した Hardin-Drnevich骨格曲線を、任意方向の地層で拘束圧に依存させ、強度特性としてMohr-Coulombを組み合わせた変形特性である。解析範囲は圧入井を中心に幅約1.2km深さ約1.4kmの範囲である。

遮蔽層の最大剪断ひずみ応答は、地震終了後に 1.1×10^{-4} 程度発生した。安全率応答は当初の1.925から地震終了後1.875に0.05低下した。これは全体の2.5%程度の低下に相当するもので、安全性への影響は小さいものと判断できる。

現在まで、坑井間弾性波トモグラフィ測定によるCO₂挙動モニタリングの結果、CO₂は圧入後から2つの地震を経て現在まで貯留層内に留まっており、漏洩の事実は認められていない。今回の非線形動的応答解析結果ではそれを支持する結果、つまり地震後においても地盤の安定性を損なうことはないことを確認した。今回実施した非線形動的応答解析手法を用いて性能予測をおこなうことにより、今後計画されるCO₂貯留サイトにおいても地震発生に伴う深部岩盤の安全性評価が予測可能になることを示すものである。

謝辞：第5, 第6著者らは経済産業省からの委託事業「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業」の一部として研究を行った。記して謝意を表します。

キーワード：CCS、非線形動的応答解析、地震時安全性評価

Keywords: Carbon Dioxide Capture and Storage, non-linear dynamic response analysis, seismic stability evaluation

地層水生産によるCO₂貯留層内圧力上昇の抑制に関する数値解析検討

Numerical study mitigation of pressure build-up mitigation by production of formation water during CO₂ injection

*藤田 クラウディア¹、平塚 裕介¹、山本 肇¹、中島 崇裕²、薛 自求²

*CLAUDIA FUJITA¹, Yusuke Hiratsuka¹, Hajime Yamamoto¹, Takahiro Nakajima², Ziqiu Xue²

1.大成建設株式会社、2.公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1.Taisei Corporation , 2.Research Institute of Innovative Technology for the Earth

二酸化炭素の回収貯留(CCS)を大規模に適用する上での大きな問題の一つとして、CO₂を圧入時の貯留層内圧力の上昇がある。圧力上昇が大きいと、必要なレートでの継続的な圧入が困難になるだけでなく、周辺の断層の活動に影響を与える可能性も指摘されている。

本研究では、CO₂の圧入による圧力上昇を減少する方法としてBuscheckら(2014)が提案した圧入開始前に地下水を揚水することにより予め貯留層圧を低減する手法(デュアルモード坑井)および圧入と同時に別の井戸にて揚水する手法を検討した。数値解析コードとしてはTOUGH2、アメリカLawrence Berkeley National Laboratory(LBNL)で開発された多成分・多相流体と熱流動の数値解析コードを用いた。

ケーススタディーとして、苫小牧市で実施中の大規模CCSプロジェクトでの

圧入対象層に相当する簡易モデルを作成し、様々な揚水・圧入レート、貯留層の体積および揚水井と圧入井の位置関係の影響を検討した。

3つの体積が異なるモデル(15 km x 8 km x 100m, 24 km x 24 km x 100 m, 5 km x 5 km x 100 m)を作成し、各々について揚水・圧入レートを変えた2ケース(200 kt/年、1 Mt/年)を検討した。ケース1は基本ケースであり、地層水生産無しでCO₂を圧入するケースである。ケース2では圧入開始に先立って3年間あるいは5年間地層水を生産してからCO₂を圧入する。最後にケース3ではCO₂を圧入と同時に別の井戸から地層水を生産する。ケース3では井戸の適切な位置関係も検討した。なお、CO₂の圧入期間は100年間とした。

地層水生産のない基本ケースとケース2の結果を比較すると、事前の生産により貯留層内の圧力低下が得られるが、生産終了後の地下水圧の回復が早く、圧力抑制効果は、当初数年程度に限られた。ただし、貯留層の体積が小さくなれば圧力抑制の効果は高くなる。

圧入と生産を同時に行う手法(ケース3)は、全圧入期間にわたって圧力をほとんど一定に保つことができ、継続的かつ安定した圧力抑制効果が得られることが分かった。

以上のように、圧入開始前に地層水生産をする手法(デュアルモード坑井)あるいは圧入と揚水を同時に行う手法により、CO₂圧入時の貯留層圧力上昇を抑制することが可能である。これらの手法を用いることで、貯留層内の圧力上昇による圧入レートの維持のみならず周辺への影響を減少することができる。CO₂貯蔵容量を増やすことができ、CCSの対象サイトの選択肢を増やす上で役立つと考えられる。

地層水生産の効果は、貯留層の地質条件や特性に大きく依存する。今回の結果は、苫小牧地点を対象とした簡易的な事前検討であり、今後、新たなデータを加えた検討が必要である。

キーワード：二酸化炭素の回収貯留、圧力上昇、地層水生産

Keywords: Carbon Capture and Storage, pressure build-up, production of formation water

An Experiment study on dynamic displacement and non-equilibrium dissolution for CO₂ in porous media

*LANLAN JIANG^{1,2}, Ziqiu Xue¹, Hyuck Park¹, Yongchen Song²

1.Research Institute of Innovative Technology for the Earth, 2.Dalian University of Technology

A clear understanding of the displacement and dissolution processes in porous media is of importance for CO₂ trapping mechanism during geological storage. The porous media were filled with quartz glass beads. CO₂ and water injection with different flow rates in porous media were investigated using MRI. The intensity of MRI images decreased with CO₂ injection and increased with water injection in the longitudinal sections at various times. Flow patterns in the drainage, changed with different flow rates. However, water imbibition proceeded as the uniform displacement front even with the fast flow rates. The residual CO₂ saturation after imbibition was sensitive to the capillary number and initial CO₂ saturation. As capillary numbers increased, viscous forces dominated the flow resulting in a decreasing in CO₂ phase trapping. At high initial saturation range, the residual saturation decreased with initial CO₂ saturation. For post imbibition, CO₂ dissolution dominated the mass transfer reflecting the transition from capillary trapping to solubility trapping. The concentration of supercritical CO₂ (ScCO₂) decreased sharply during imbibition and slightly during post imbibition. In contrast, lots of gaseous CO₂ dissolved into water during post imbibition. The dissolution rate for ScCO₂ was around the order of magnitudes 10^{-6} - 10^{-7} Kg/m³.s. And the CO₂ saturation during post imbibition decreased. The study visualization measured dynamic drainage and imbibition processes and investigated the influence of dissolution to trapping characteristics which is useful for CO₂ geological storage.

Keywords: capillary trapping, dissolution, CO₂ saturation, geological storage, flow pattern

泥岩の浸透率変化に及ぼす応力緩和時間および粘土鉱物含有量の影響

Effects of stress relaxation and clay mineral contents on permeability changes of mudstones during fracturing processes

*藤井 孝志¹、俣徠 正夫¹、雷 興林¹

*Takashi Fujii¹, Masao Sorai¹, Xinglin Lei¹

1. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

An understanding of fluid transport within aquifers plays an important role for geological CO₂ storage (GCS). During CO₂ injection into the reservoirs, a change in stress induced by increasing pore pressure might lead to deformation of surrounding reservoir rocks including caprocks, and this might also result in occurrence of seismic or aseismic slip along fractures/faults because of decreasing rock matrix and fault strengths. Thus, the presence of fractures and faults into caprocks such as mudstones and shales should provide an impact on the relationship between hydraulic properties (i.e., permeability and capillary pressure) and rock deformation. A few studies on measurement of permeability during shear fracturing in mudstones have been reported so far, but evolution of permeability throughout fracturing, slipping, stress-relaxing and variations of effective pressure levels processes has rarely been investigated. The objective of this study is to measure experimentally a change in permeability in a series of complex processes from fracturing to effective pressure dependency for mudstones. Particularly, we investigate impacts of stress relaxation and clay mineral contents on permeability evolution in response to variations of effective pressure levels which assume change in stress within targeted reservoirs resulting from the occurrence of overpressure. In this study, permeability tests were performed by employing the four steps: (i) fracturing, (ii) slipping, (iii) stress-relaxing, and (iv) effective pressure dependency at temperature of 40°C and effective pressure ranging from 2 to 15 MPa (confining pressures: 12-25 MPa and pore pressure: 10 MPa at constant) for two mudstones. The two samples tested were taken from GCS demonstration site of Tomakomai in Hokkaido (DS) and lower formation of Tentokuji in Akita associated with screening of all GCS sites in Japan (SS). Based on mode analysis of mineral compositions, it was shown that majority of mineral compositions for the SS sample was about 70 vol.% smectite-rich matrix. On the other hand, for the DS sample, little clay minerals was observed. Our results demonstrated that the rock samples tested exhibited brittle failure behaviours in stress-strain curves. As for the process (iii), it was apparent that permeability values measured after the long relaxation time (almost 7 days) were a significantly more susceptible to change in effective stress than that after the short time within 1 day. A comparison result showed that for the DS sample, magnitude of change in permeability values with decreasing effective pressure for the DS was almost two times larger than that for the SS sample relative to permeability values in the stress-relaxation state. This result showed that in the case of lower contents of clay minerals such as smectite and kaolinite, if the pre-existing fractures/faults into such mudstones had several events of tectonic movement over a long period, it might possibly lead to slipping behaviour easily due to the decrease of effective pressure induced by CO₂ injection. Also, it is further shown that its degree of slipping and magnitude of change in permeability could be depending strongly on the types of mudstones such as clay mineral contents. The present results should be pointed out that time of stress relaxation and clay mineral contents could provide a significant impact on change in permeability against effective pressure levels depending on the types of caprocks.

キーワード：応力緩和、粘土鉱物含有量、浸透率変化、泥岩

Keywords: Stress relaxation, clay mineral contents, change in permeability, mudstones

二相流の流動様式が泥岩の変形に与える影響の検討

Influence of flow pattern of two-phase fluid flow on deformation of mudstones

*後藤 宏樹^{1,2}、徳永 朋祥²、愛知 正温²

*Hiroki Goto^{1,2}, Tomochika Tokunaga², Masaatsu Aichi²

1.日本学術振興会特別研究員PD、2.東京大学

1.JSPS Research Fellow, 2.University of Tokyo

二酸化炭素地中貯留においては、地中への二酸化炭素の圧入に伴い岩盤が変形するため、地表面変動が発生しうる。従って、地表面変動を予防もしくは制御するために、二酸化炭素の浸入に伴う岩盤の変形の理解が必要となる。本研究では、岩盤を構成する岩石の一つである泥岩について、二酸化炭素が浸入した場合の変形を理解するために、室内実験を実施した。具体的には、水で飽和した円柱形試料（上総層群梅ヶ瀬層の泥岩）に対して、静水圧応力条件下において下端から空気を圧入する実験を実施し、試料の中央の高さにおける軸ひずみと周ひずみを計測した。二相流動と変形の連成過程を解く数値シミュレータ（愛知, 2010）を用いて、現実的なパラメータ設定の下で実験の数値シミュレーションを試みた結果、実験から得られた値よりも大きいひずみが得られた。実験で用いた泥岩の間隙径分布と実験で設定した間隙流体圧に関する条件からは、実験においては空気が選択的な流路を形成しつつ試料中を流動した可能性が考えられた。一方、数値シミュレーションにおいては、二相流体は均質な試料中をDarcyの法則に基づき流動し、選択的な流路は試料中に形成されなかった。以上の結果は、二相流の流動様式が泥岩の変形に影響を与える可能性があることを示唆していると言える。

参考文献

愛知正温（2010）, 熱力学的考察に基づく二相流動・変形連成シミュレータの開発と水溶性天然ガス貯留層シミュレーションへの適用, 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻博士論文.

キーワード：二酸化炭素地中貯留、泥岩、変形、二相流動、室内実験

Keywords: Geological sequestration of carbon dioxide, Mudstone, Deformation, Two-phase fluid flow, Laboratory experiment

CO₂を利用したEORおよびECBMRを目的とした高圧CO₂雰囲気下における水・石油・石炭のその場観察 In-situ observation of water, oil and coal under high CO₂ pressure for CO₂-EOR and ECBMR

*菅井 裕一¹

*Yuichi Sugai¹

1.九州大学

1.Kyushu University

CO₂を利用した石油およびコールベットメタンの増進回収においては、貯留層内に圧入されたCO₂が地層水や石油に溶解したり、石炭表面に吸着することが予想される。これにより、地層水のpH変化や、石油および石炭の体積膨張が生じ、EORやECBMRに影響を及ぼすことが考えられる。本研究においては、水、石油ならびに石炭が高圧CO₂雰囲気下に晒された際に生じる変化挙動について、高圧可視化セルを用いてその場観察を行なった。各種貯留層内に存在する水にCO₂が溶解した場合、そのpHが低下すると予想されるが、貯留層水および貯留層を構成する岩石にはpHの緩衝作用を有する成分が存在し、そのpH変化は貯留層条件により様々であると考えられる。本研究では混合pH指示薬を含む水試料を高圧可視化セルに導入し、同セル内にCO₂を圧入しながら吸光度分析を行なうことにより、水試料のpHを高圧CO₂雰囲気下で測定する方法を検討した。pH5.6を境として、より高pH側および低pH側において、614 nmおよび444 nmの波長の吸光度とpH値に相関が認められた。これらの一次関係式を用いて、高圧CO₂雰囲気下で測定された純水のpH変化は、化学平衡論に基づいて推算されたpH変化と一致し、本方法の妥当性が示された。本方法を用いて、油田で採取された油層水のpHを高圧CO₂雰囲気下で測定した結果、油層水に含まれる重炭酸イオン濃度の違いに基づくpH変化の違いが検出された。すなわち本方法によれば、地層水へのCO₂の溶解ならびに地層内の各種成分の影響を反映した地層水pHの測定が可能である。石油貯留層内において石油にCO₂が溶解すると石油の体積膨張が生じることが知られている。これにより、石油の見かけ体積が増加するため、石油の増進回収に有効であるとされている。石油を高圧可視化セルに導入し、CO₂の圧力を変化させながらリアルタイムに石油の膨潤挙動を観察した。CO₂の圧力に加えてCO₂と油の接触面積によっても石油の膨潤率は変化することが示唆され、5.6 MPaのCO₂圧力条件下において、CO₂と油の接触面積が約4 cm²/g-oilの場合に約27 %の膨潤率を示した。油層内においては油の飽和率が変化するとCO₂と油の接触面積も変化することが考えられ、CO₂の溶解に伴う油の膨潤を考慮する場合に、油の飽和率もそのパラメータの一つとして考慮した数値予測等の必要があると考えられる。コールベットメタンの増進回収のために、メタンよりも石炭への吸着性が高いCO₂を炭層に圧入する方法においては、CO₂が吸着することにより石炭の膨潤が生じ、その浸透率が低下するため、CO₂の圧入とメタンの生産が停滞する。そのため、石炭の膨潤を生じさせない窒素などの不活性ガスをCO₂と交互に圧入するなどして炭層の浸透率維持が試みられているが、経済的に効率的ではなく、CO₂の圧入を継続しながら石炭の膨潤も抑制する手法の開発が求められている。本研究においては、高圧CO₂雰囲気下に晒された石炭を直接観察することによって、その膨潤を求める実験を行ない、その膨潤特性を調べた。石炭（瀝青炭）を30~60℃の温度条件下において高圧CO₂雰囲気下に晒した場合において、30℃ならびに40℃においては約3.4%の膨潤率が観察され、これらの温度条件下においては膨潤率に大きな差は認められなかったが、50℃以上において膨潤率の低下が認められた。一般に温度が高いほどCO₂の石炭への吸着量は低下するため、石炭の膨潤量も低下すると予想される。すなわち、CO₂圧入井周辺の炭層温度を上昇させることができれば、石炭の膨潤を抑制し浸透率の維持に有効であると考えられる。

キーワード：CO₂、水、石油、石炭、pH、膨潤

Keywords: CO₂, water, oil, coal, pH, swelling

CO₂を注入した温泉水中での炭酸塩現場反応実験Field experiment of carbonate reactions in the CO₂-injected hot spring waters*徂徠 正夫¹、佐々木 宗健¹*Masao Sorai¹, Munetake Sasaki¹

1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

1. Research Institute for Geo-Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

CO₂地中貯留において、圧入したCO₂の長期的な挙動を予測するためには、地化学プロセスを考慮に入れた数値シミュレーションが不可欠である。このような地化学プロセスのうち、炭酸塩鉱物の成長と溶解は、それぞれ貯留安全性の増加と漏洩リスクの両面から最も重要である。しかしながら、CO₂地中貯留条件下での炭酸塩鉱物のキネティクスに関しては不明な点が多く、地化学シミュレーションの信頼性を向上させるためにもその不確定性を軽減することが課題となっている。

これまで、CO₂地中貯留のナチュラル・アナログとみなせる炭酸水素塩泉において、炭酸塩鉱物の反応実験を行ってきた。特に、炭酸塩鉱物の反応速度および生成相に及ぼすCO₂あるいはMgイオンの効果に関して、温泉水にこれらの物質を人為的に添加することで、極端な組成条件にまで拡張した検証を行っている。前回の実験では大気圧下でCO₂を注入したが、温泉水へのCO₂の溶解度が大きくないためにpHが十分に低下せず、実際のCO₂圧入井近傍で予想される炭酸塩鉱物の溶解には至らなかった。そこで、大気圧よりも高い圧力でのCO₂の注入が可能なステンレス製配管内に試料を設置することで、温泉水のさらなるpHの低下（CO₂の溶解度の増加）を目指した。

実験サイトとして、前回に引き続き、北海道斜里町のウトロ温泉を選定した。本サイトでは、源泉からの温泉水が貯水タンクに貯留された後、50 mの配管を伝って排水される。今回は貯水タンクより温泉水をポンプアップし、ステンレス製配管流路に通水させた後、既存の排水路に戻すシステムを構築した。配管内の1カ所で、温度、圧力およびpHを計測した。配管内に鉱物試験片ホルダーを直列に3個設置し、各ホルダーに、カルサイト、アラゴナイト(共にCaCO₃)、ドロマイト(CaMg(CO₃)₂)およびマグネサイト(MgCO₃)のへき開片を1個づつ固定した。これらの試験片を温泉水の流動条件下で最長24時間浸漬させ、所定時間ごとに1個づつ回収した。温泉水そのままに加えて、約0.3 MPaのCO₂注入条件下で塩化マグネシウムを添加しない場合(Mg/Ca = 0.5)と添加した場合(Mg/Ca = 3)、それぞれについて反応を行った。

回収した試料について、位相シフト干渉計およびレーザー顕微鏡を用いて、基準面と反応面の高さ変化をナノ〜マイクロレベルで測定することにより反応速度を算出した。今回の実験では、CO₂注入によりカルサイトおよびアラゴナイトが溶解した。両者の溶解速度はほぼ同一であったが、マグネシウムを混入させた場合に異なる挙動を示した。すなわち、カルサイトの溶解速度は半減する一方で、アラゴナイトの溶解速度はわずかに増加した。ドロマイトとマグネサイトについては明瞭な変化は観察されなかった。これらの結果は、CO₂圧入井近傍の地層水組成および炭酸塩鉱物の種類に依存して炭酸塩の溶解速度が決まり、炭酸塩に対して一律の反応キネティクスを適用することができないことを示唆している。

キーワード：CO₂地中貯留、炭酸水素塩泉、溶解速度、反応キネティクス、炭酸塩鉱物Keywords: Geological CO₂ storage, Bicarbonated spring, Dissolution rate, Reaction kinetics, Carbonate minerals

海洋環境影響評価のための漏出CO₂海中拡散モデル

A numerical model for calculating the behavior of leaked CO₂ in the sea for assessing the potential impacts on the marine environment

*内本 圭亮¹、松村 義正²、喜田 潤¹

*Keisuke Uchimoto¹, Yoshimasa Matsumura², Jun Kita¹

1.公益財団法人地球環境産業技術研究機構、2.北海道大学低温科学研究所

1.Research Institute of Innovative Technology for the Earth, 2.Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

To mitigate global warming, the reduction of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere is indispensable. We should make every endeavor to do it. Among options for it, CO₂ capture and storage (CCS) is thought to be one of the most important ones. Captured CO₂ in major CO₂ emission sources, such as power plants, is transported into deep geological formations and stored there. In Japan, mainly off shore areas will be selected as the storage sites. There is still concern that stored CO₂ may leak out into the sea and that leaked CO₂ may impact the marine organisms. To diminish the risk of CO₂ leakage, it goes without saying that it is necessary to select the storage sites and the formations where CO₂ will be stored stably and safely. In addition, we should enhance scientific knowledge and develop methods to assess the potential marine environmental impacts in case the stored CO₂ should leak out. How much the marine environment or organisms will be impacted depends on the rise in the CO₂ concentration in seawater consequent on the leakage.

Aiming at calculating dispersion of leaked CO₂ in the sea, we are developing a numerical model. In JpGU 2015 meeting, we presented a model where the leaked CO₂ dissolved into seawater (Δ DIC) is represented as a passive tracer. In the model, CO₂ bubbles were not calculated. However, it is considered that CO₂ would leak out from the seafloor mainly as bubbles. CO₂ bubbles from the seabed rise in the water column, dissolving into seawater. These processes may affect the distribution of Δ DIC because the dissolution rate and the movement of CO₂ bubbles depend on the size of the bubbles, and temperature and salinity of ambient water. Therefore, we have incorporated CO₂ bubbles into the model. The model is based on a non-hydrostatic ocean model, named kinaco, which has a Lagrangian particle tracking scheme. To represent CO₂ bubbles in the model, we apply properties of CO₂ bubbles, such as the mass and volume, to the particles. Based on the size of bubbles, and temperature and salinity of the cells that the bubbles exist in, the buoyancy and the dissolution rates are calculated. According to them, the movements and the sizes of CO₂ bubbles are computed. CO₂ dissolved into seawater is dispersed as Δ DIC, which is calculated as a passive tracer in the model. In our presentation, details of the model and examples of the calculation with the model will be presented.

キーワード：海洋環境影響、CCS、数値モデル

Keywords: potential marine environmental impacts, carbon dioxide capture and storage, numerical model

CCSコスト

The cost of CO₂ capture and storage

*中神 保秀¹、清水 淳一¹、斎藤 一郎¹、高木 正人¹

*Yasuhide Nakagami¹, Jyunichi Shimizu¹, Ichiro Saito¹, Masato Takagi¹

1.地球環境産業技術研究機構

1.Research institute of innovative technology for the earth

Carbon capture and storage (CCS) has been widely recognized as a key technology for mitigating global climate change, but the relatively high cost of current CCS systems remains a major barrier to its widespread deployment at power plants and other industrial facilities. The objective of my presentation is to assess the current costs of CO₂ capture and storage (CCS) for new fossil fuel power plants.

キーワード：CCS、コスト、CO₂貯留

Keywords: CCS, cost, CO₂ storage

CCS実用化に向けた技術事例集の作成について

Compilation of Best Practice Manuals toward CCS commercialization

*小牧 博信¹、間木 通政¹、指宿 敦志¹、高野 修¹、薛 自求¹

*HIRONOBU KOMAKI¹, Michimasa Magi¹, Atsusi Ibusuki¹, Osamu Takano¹, Ziqiu Xue¹

1.公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

The first CO₂ aquifer storage project was started at Sleipner, Norway in 1996. Following after Sleipner, many CO₂ geological storage projects were started in the world. Various Best Practice Manuals or Guidelines are made to summarize the knowledge and experience obtained from the existence projects.

For example, the European Commission provided Guidance Document published in four. These Guidance Documents "CCS directive" present rules related to CCS implementation to the EU member countries. On the other hand, the United States EPA (Environmental Protection Agency) provided many "UIC Class VI Well Guidance". DOE (The United States Department of Energy) was promoting preparation of a BPM (Best Practice Manuals) based on the knowledge experience of the CCS projects. As described above, accumulated experience and knowledge of pilot-scale tests involving CCS projects are analyzed and reviewed and adopted, and preparations are being made overseas for full-scale implementation of CO₂ storage subsurface.

Foreseeing domestic and global CCS deployment in future, RITE has been compiling "CCS Best Practice Manuals" as a technical reference for Japanese companies to carry out CCS projects. As best practices in Japan, we have been summarizing mainly various technical aspects of the CO₂ injection test carried out in Nagaoka from 2003 to 2005. We have also been collecting and sorting out best practices in the USA RCSP (Regional Carbon Sequestration Partnership) and Europe.

Standard process flow of the CCS project is shown below. We classify the whole CCS process flow it takes into 8 phases. It consists of 8 phases, i.e. basic planning, site screening & selection, site characterization, master planning, design & construction, operation, injection cessation & well plug and abandon, post injection monitoring, post closure monitoring, and post closure liability transfer. Each phase correspond to individual chapter. Chapter 1, first step design relevant information is collected from within Japan and overseas, sorted and analyzed, and key aspects and major data of the Nagaoka CO₂ Pilot-Scale Injection Test are sorted out and summarized in parallel. Then, based on results from research and development conducted by RITE, a RITE version of the CCS best practice manual is compiled, and as a final step, a Japanese version of the CCS best practices manual is to be developed, incorporating the large-scale demonstration project in Japan.

キーワード：CCS、CO₂ 地中貯留、技術事例集

Keywords: CCS, CO₂ geological storage, Best Practice Manual

サウジアラビアAl Wasse地域におけるタイムラプスデータの解釈のためのアクロス屈折法調査
Refraction study using ACROSS seismic source to interpret the time-lapse data in Al Wasse field, Saudi Arabia

*笠原 順三^{1,2,3}、Al-Anezi Ghunaim⁵、Al Damegh Khaled⁵、村瀬 圭³、大沼 寛³、藤本 理³、上村 彩³、羽佐田 葉子⁴

*Junzo Kasahara^{1,2,3}, Ghunaim Al-Anenezi⁵, Khaled Al Damegh⁵, Kei Murase³, Hiroshi Ohnuma³, Osamu Fujimoto³, Aya Kamimura³, Yoko Hasada⁴

1.静岡大学防災総合センター、2.東京海洋大学産学地域連携機構、3.川崎地質（株）、4.大和探査技術（株）、5.KACST

1.University of Shizuoka, Faculty of Earth Sciences, 2.Tokyo University of Marine Science and Technology, 3.Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 4.Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 5.KACST

Introduction

To understand the physical change of subsurface by injection of CO₂ or vapor into the ground, we are proposing the time-lapse method using the very stable ACROSS (Accurately and Routinely Operated Signal System) seismic source and an array of seismometers for our studies.

In 2011, we carried out the time lapse study in Awaji Island by the injection of air into the ground and showed the clear migration of air just after the air injection (Kasahara *et al.*, 2013). In 2012, we moved the whole system to the water pumping site in Al Wasse, Saudi Arabia. In the test site, there are no seismic structural surveys in past. By our study in this field, we observed very rapid and large temporal changes during several months (Kasahara *et al.*, 2015). No structural data and sparse seismic stations in 500 m grids make difficult to explain the cause of temporal change seen in observed data. To solve this problem, we carried out refraction and reflection studies. In this paper, we report the first part.

Survey and processing:

Water is pumped up by more than 64 wells from aquifers at ~400m depth. The geological information is very poor. The surface of ground is partly covered by loose-sand and limestone pebbles.

The total length of survey line was 3 km. We used the ACROSS as the seismic source and placed 60 data loggers on the surface with 50 m spacing. The each sweep was 10 to 40 Hz during 200 seconds and an hour data contain 16 sweeps. The direction of rotation of ACROSS was switched every hour. One day data were recorded by data loggers with 200 Hz sampling and 24 bit A/D.

Recorded data were processed by similar way to the previous one (*e.g.*, Kasahara *et al.*, 2013 and 2015). We compared observed and synthetic waveforms. The synthetic waveform was calculated by FDM. We used vertical single force with 20Hz Ricker wavelet as the source.

Results

The records show that the first arrival has approximately 3.5km/s and tend to disappear around 700 m in offset distance. Later phases of 3.5km/s phase show weak amplitudes, but they disappear for further distance than 1.7km. The strong later arrivals with 4.5 km/s appear and become dominant at further than 1.5km/s.

The comparison of observed and synthetics suggests the presence of low velocity layer just about of 3.5km/s layer. The 4.5km/s phase seems the refracted phase from the deeper basement layer with velocity of 4.5-5km/s. The layer between 3.5km/s and 4.5km/s is thought to be inter-bedding of sand stone and limestone with velocity lower than 2.5km/s. The negative gradient of inter-bedding layer could explain the decay of amplitudes of 3.5km/s phase with distance.

Discussion and conclusions

The observed data show very weak first arrivals even if the offset distance of 1km. As shown in our results in Kasahara *et al.* (2015), the temporal change of the first arrivals is as much as 1-1.5ms during two months at the largest case. On the other hand, the most of large amplitude later phase show slower arrivals and seems Rayleigh waves in the present study. The rapid change of waveforms with time suggests the rapid migration of water in aquifers due to the pumping. The continuous monitoring stations are located at the grids of 500m distance and it is still difficult to explain the magnitude of migration. The refracted arrivals from 4.5km/s layer is only identified a few grid stations and it is also difficult to find this phase.

Acknowledgements

This survey was supported by JCCP (Japan Cooperative Center for Petroleum) in Japan and KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology) in Saudi Arabia. We express our great thanks to members of JCCP and KACST for their aggressive support of this project. We also express our great thanks to staffs in KACST for the hard works during the survey.

キーワード：タイムラプス、アクロス、地殻構造、シャドーゾーン、帯水層、揚水

Keywords: Time-lapse, ACROSS, crustal structure, shadow zone, aquifer, water pumping

リアルタイムイベント検出への忘却型学習アルゴリズム (SDAR) の適用について
Application of Sequentially Discounting AR Learning (SDAR) Algorithm to Real-time Event Detection

*高岸 万紀子¹、利岡 徹馬¹、成田 章²、古瀬 慶博²、薛 自求¹

*Makiko Takagishi¹, Tetsuma Toshioka¹, Akira Narita², Nobuhiro Furuse², Ziqiu Xue¹

1.公益財団法人 地球環境産業技術研究機構、2.三菱スペース・ソフトウェア株式会社

1.Research Institute of Innovative Technology for the Earth, 2.MITSUBISHI SPACE SOFTWARE CO., LTD.

CO₂圧入サイトにおける微小振動観測は、安全な貯留を示す上で重要なモニタリングの1つである。近年、多くのCO₂圧入サイトで微小振動観測が行われている。特に、観測された大量の波形記録から、リアルタイムでイベント（自然地震、微小振動）とノイズを正確に区別して到達時刻を読み取ることにより、信頼性の高い震源決定を行うが可能となる。

一般的なイベントのシグナルの検出方法として、波形振幅にしきい値を設定する方法、STA/LTA法 (Coppens, 1985)、ARモデルとAICを組み合わせた手法 (横田・他、1981) などが挙げられる。これらの手法はS/N比が良好な波形に対して非常に有効であり、自然地震などの波形処理に用いられている。一方、CO₂圧入に伴う微小振動はマグニチュードが小さく、多くはM0程度かそれ以下である。海域のCO₂貯留サイトの場合、海底面に設置された観測機器のデータはノイズレベルが高いため、ノイズに対してロバストなイベント検出手法が必要となる。

RITEではノイズを適切に処理できて、マグニチュードが小さいイベントをリアルタイムで検出する手法として、忘却型学習アルゴリズム (SDAR: Sequentially Discounting AR learning) を用いた波形処理手法に取り組んでいる。SDARは、非定常な時系列データを、局所的に定常性を仮定して自己回帰モデル (ARモデル) で表し、過去のデータを徐々に忘れながら新しいデータの性質に適応して統計モデルを更新するアルゴリズムである。つまり、先見情報を必要とせず、リアルタイムで時系列データにおける値の急激な変化を検出できる。もともと情報通信分野で開発された方法であり、不正アクセスの検知や侵入検知などに活用されていた (Takeuchi and Yamanishi, 2006)。

本報告では、このSDARを用いたリアルタイムイベント検出手法について紹介する。

[引用文献]

Coppens, F., (1985): First arrival picking on common-offset trace collections for automatic estimation of static correction: *Geophysical Prospecting* 33, 1212-1231.

Takeuchi, J., and Yamanishi, K.(2006): A Unifying Framework for Detecting Outliers and Change Points from Non-Stationary Time Series Data, *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 18(4), 482-492.

横田崇・周勝奎・溝上恵・中村功(1981): 地震はデータの自動検出方式とオンライン処理システムにおける稼働実験、*地震研究所彙報*、55、449-484.

[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、忘却型学習アルゴリズム (SDAR)、リアルタイムイベント検出、微小振動観測
Keywords: CO₂ Geological Storage, Sequentially Discounting AR Learning (SDAR), Real-time Event Detection, Microseismic Monitoring

水銀圧入法および直接法による超臨界CO₂スレッシュヨルド圧力の評価Estimation of supercritical CO₂ threshold pressure by the mercury intrusion method and direct method*木山 保¹、薛 自求¹*TAMOTSU KIYAMA¹, Ziqiu Xue¹

1.公益財団法人地球環境産業技術研究機構

1. Research Institute of Innovative Technology for the Earth

CCSにおいて遮蔽層のスレッシュヨルド圧は貯留層のCO₂貯留能力を支配するので、スレッシュヨルド圧の正しい評価はCO₂地中貯留を安全かつ経済的に設計し実施するために重要である。スレッシュヨルド圧は、ラインで飽和した多孔質岩石に超臨界CO₂が浸入する際の毛管圧に起因するので、細孔径分布、接触角および界面張力などに支配される。本論では新第三紀泥質岩を対象とし、まず細孔径分布を水銀圧入法で分析した。接触角および界面張力を設定し、特徴的な細孔径と毛管圧の関係を検討した。つぎにコア試料を用いて、段階昇圧法、残差圧力法などの直接法でスレッシュヨルド圧を測定した。CCSの原位置条件を考慮して、間隙圧は10MPa、温度は40°Cとした。試料は、直径50mm、長さ50mmで、両端面から10mmの位置に周方向にひずみゲージを貼付した。段階昇圧法の事例を図示する。事前に残差圧力法で測定し、その後十分通水して初期状態に戻し、段階昇圧法に供した。残差圧力法で0.60MPaのスレッシュヨルド圧が評価されたので、初期の差圧を0.3MPaから始め、その後0.1MPaずつ段階昇圧した。図中A点で排出流量が停止し、超臨界CO₂が試料の端面に到達したことを示唆する。B点でわずかな排出流量の増加が確認された。段階昇圧法の定義に従って1つ前のステップの差圧をスレッシュヨルド圧とすると0.71MPaとなる。しかしその後差圧が増加しても流量の増加は認められない。つぎにC点において排出流量の明らかな増加が確認され、その後差圧が増加するのに伴って流量も増加した。ここでスレッシュヨルド圧は1.64MPaと評価される。注入側のひずみ挙動を見ると、わずかな流量が発生したB点でわずかな膨張が認められ、流量が増大したC点で顕著な膨張が認められる。超臨界CO₂とラインの境界では毛管圧が作用して超臨界CO₂側の圧力が高くなるので、超臨界CO₂が浸入した領域では間隙圧が高くなり、膨張変形をもたらす。

水銀圧入法の結果、細孔径分布は0.09μmと0.16μmにピークを持つバイモーダルな特性を示した。毛管圧P_cは、細孔径D、界面張力γおよび接触角θでつぎのように表される。

$$P_c = 4\gamma \cos\theta / D$$

ここで、40°C、10MPaにおけるラインと超臨界CO₂の界面張力γを28.5 mN/m、接触角θを0°と設定すると、上記の2つの細孔径に対応する毛管圧はそれぞれ1.27MPaおよび0.71MPaとなる。

残差圧力法による0.6MPaと段階昇圧法でわずかな流動が認められた0.71MPaは、0.16μmの細孔径に対応する毛管圧0.71MPaと良い一致を示した。また段階昇圧法で明らかに流量が増加した1.65MPaは、0.09μmの細孔径に対応する毛管圧1.27MPaに近い値を示した。

段階昇圧法におけるわずかな流動は径が0.16μmの細孔に超臨界CO₂が浸入するスレッシュヨルド圧に、流量の明瞭な増加は径が0.09μmの細孔に超臨界CO₂が浸入するスレッシュヨルド圧に対応すると考えると調和的である。一方、わずかな流動が発生してから、その後ほとんど流量が増加しなかったのは、細孔の容積、配向および連続性などの構造が関係していると考えられるが、これらの情報は等方的に水銀を圧入する水銀圧入法では得られない。たとえば、層構造を成す岩石の場合、コア試験では層に平行と直交でスレッシュヨルド圧は一般に異なるが、水銀圧入法では同じ情報しか得られない。

残差圧力法は段階昇圧法などに比較してスレッシュヨルド圧を過小評価しやすいといわれ、その一因として排水と浸潤過程で接触角が異なることなどが提案されている。本事例では0.16μmのモード径に対応する毛管圧が残差圧力法の結果に一致しているが、流動を停止して圧力の平衡を観測する残差圧力法ではわずかな流体の移動で圧力が伝播するので、段階昇圧法では流量が少なかった低い圧力でも、残差圧力法では毛管圧に漸近していくことが考えられる。

細孔径分布がバイモーダルを示さない岩石でも、淘汰が低い場合は大きい細孔径に対応する低い毛管圧で超臨界CO₂の浸入は開始し、残差圧力法では低いスレッシュヨルド圧を示すが、段階昇圧法などではモード径に対応す

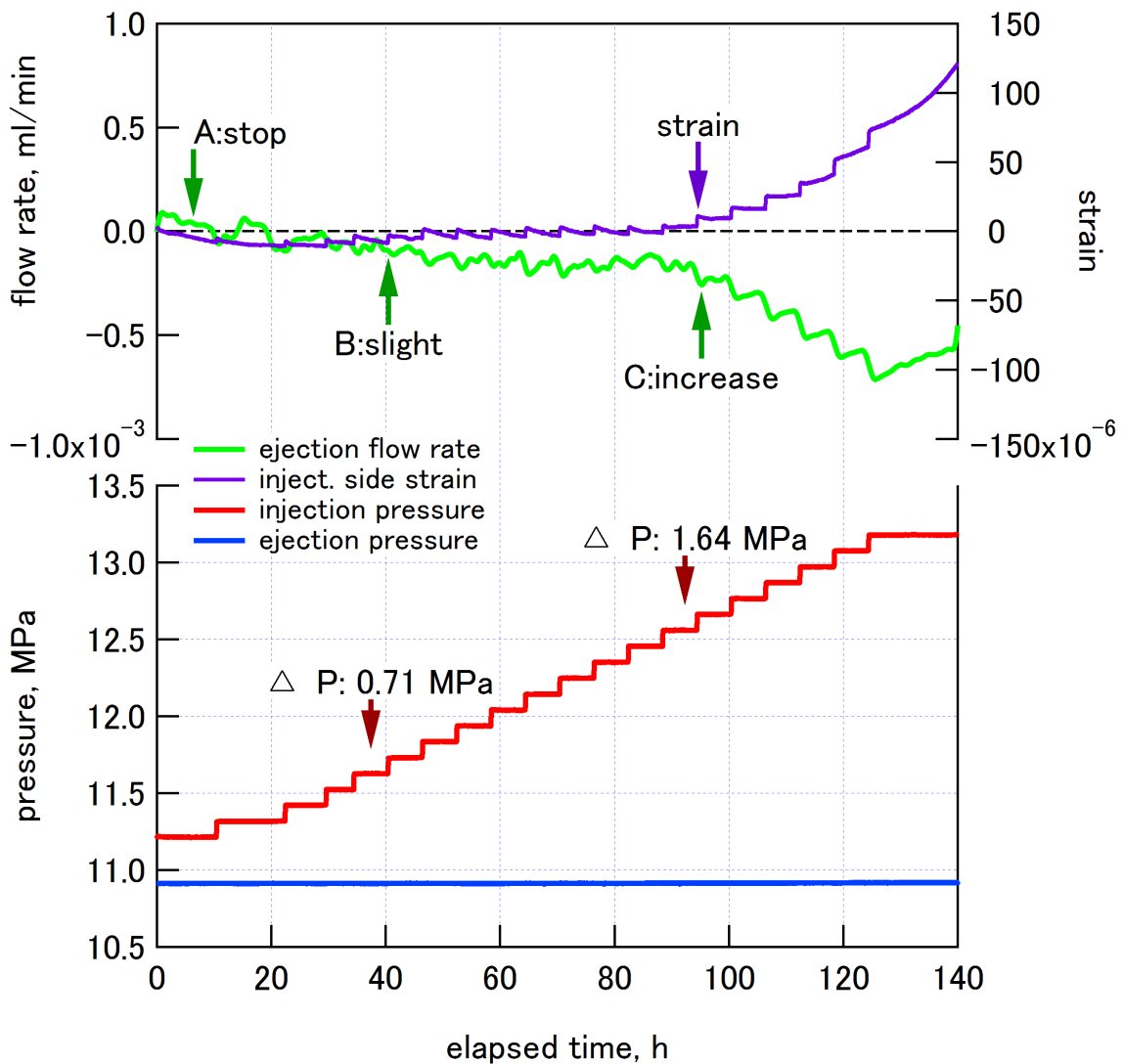
る比較的高い圧力で流量が増加すると考えられる。

水銀圧入法で分析される細孔分布特性はスレッシュホールド圧を評価する上で有益な情報を多く提供する。残差圧力法による結果の妥当性などに寄与することができる。一方、異方性などには対応できない。また、どの毛管圧で流量が増加するかは評価できないため、段階昇圧法などのコアを用いた直接法を省略することはできない。

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：水銀圧入法、超臨界CO₂、スレッシュホールド圧力、段階昇圧法、残差圧力法、バイモーダル

Keywords: Mercury intrusion method, supercritical CO₂, Threshold pressure, Step by step method, Residual pressure method, Bimodal



不均質堆積岩におけるCO₂流動の可視化と定量評価Visualization and measurement of CO₂ flooding in heterogeneous sedimentary rock

*朴 赫¹、蔣 蘭蘭¹、木山 保¹、西澤 修¹、張 毅¹、上田 良²、中野 正則²、薛 自求¹

*Hyuck Park¹, Lanlan Jiang¹, Tamotsu Kiyama¹, Osamu Nishizawa¹, Yi Zhang¹, Ryo Ueda², Masanori Nakano², Ziqiu Xue¹

1.公益財団法人 地球環境産業技術研究機構 (RITE)、2.石油資源開発株式会社 (JAPEX)

1.Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE), 2.Japan Petroleum Exploration Co., Ltd. (JAPEX)

To investigate CO₂ flow mechanisms and fluid recovery processes in heterogeneous rock, we designed a laboratory experimental system which visualizes CO₂ movements during flooding experiments by using X-ray CT. We carried out laboratory experiments of CO₂ flooding in heterogeneous sandstone, together with porosity calculation, fluid saturation monitoring based on CT images, and mass flow measurements for ejected fluids. Based on the experimental results, we try to understand the flooding characteristics of CO₂ in heterogeneous rocks having complex sedimentary structures, which will contribute to CO₂ geological sequestration and oil recovery. Sarukawa sandstone (diameter: 34.80mm, length: 79.85mm, north central Japan) was used in this study. Porosity of the specimen determined by X-ray CT imaging was 31.2%. As shown in figure1a, the specimen has a heterogeneous structure. Especially, upper part of the specimen is more complex than the lower part. The experiment was conducted under the pressure and temperature conditions that simulate underground environments; pore pressure: 10MPa, temperature: 40 degrees Celsius. The confining pressure selected in this study was 12MPa. Fluid pressure and its injection rate were controlled by high-precision syringe pumps. A high-pressure vessel having high transparency for X-ray was utilized in this study. The specimen was first saturated with KI aqueous solution (12.5%), and then oil was injected to change the specimens into oil-water mixed state. Totally, ten steps of CO₂ flooding were performed for this experiment. For each step, KI aqueous solution and oil were carefully recovered from the syringe pump which plays a role of back pressure. The CO₂ flooding test was carried out until the CO₂ injection reaches 3.03PV (pore volume). Figure 1b shows the differential CT images when the CO₂ injection reaches 0.26PV. In the figure, almost all of the CO₂ preferentially moves through the upper part of specimen. This represents that the sedimentation heterogeneity is the main factor that affects the CO₂ flooding pattern. The oil recovery was identified as 48.9% when injected CO₂ reached 1.0PV in the specimen. We increased the differential pressure to examine the influence of differential pressure on oil recovery in heterogeneous media. The oil recovery was 69.7% when injected CO₂ reached 2.0PV. The increment of oil recovery from 1.0PV-step to 2.0PV-step, 20.8% corresponds to more CO₂ flooding into the non-recovering zone (low porosity and/or low permeability) due to increasing of capillary pressure.

キーワード：CO₂流動、不均質性、X線CT、可視化、CO₂-EOR

Keywords: CO₂ flooding, heterogeneity, X-ray CT, visualization, CO₂-EOR

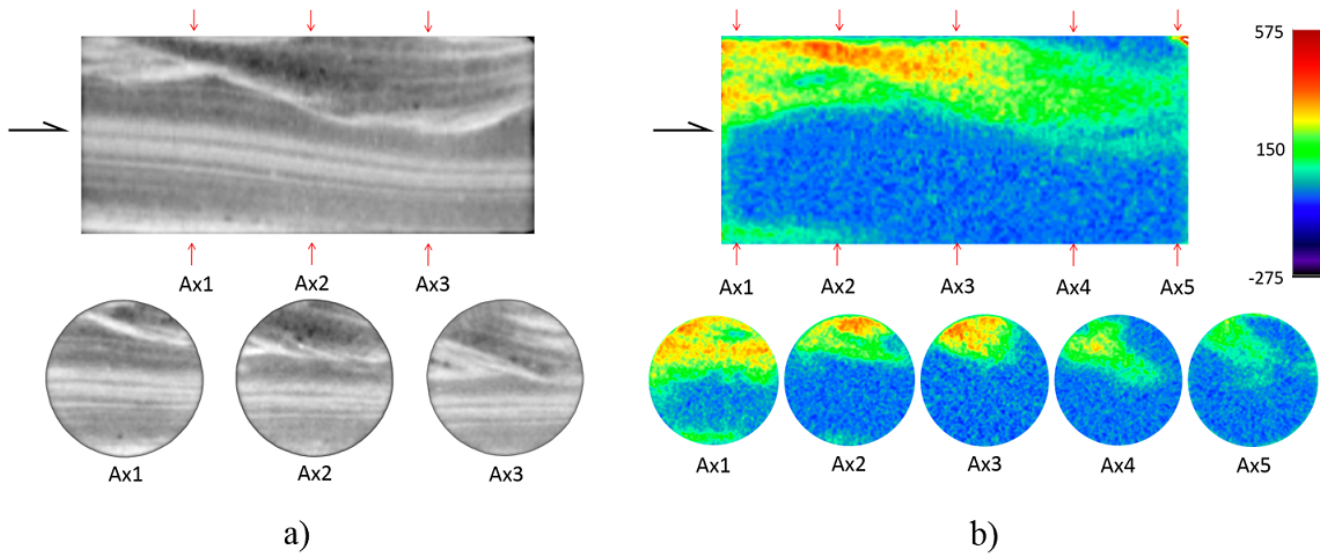


Figure 1: X-ray CT images of CO₂ flooding experiment.

a) core in dry condition, b) differential CT images at 0.26PV(pore volume) CO₂ injected

音響探査による海中の漏出CO₂気泡検知手法の開発Development of acoustic methods for detection of CO₂ leakage from sub-seabed storage site*中村 孝道¹、西村 真¹、内本 圭亮¹*Takamichi Nakamura¹, Makoto Nishimura¹, Keisuke Uchimoto¹1.地球環境産業技術研究機構, CO₂貯留1.RITE, CO₂ storage research group

Carbon dioxide capture and storage (CCS) is the primary technological option for reducing CO₂ emissions into the atmosphere and is expected to be an effective climate change mitigation technology. Because storage sites are selected deliberately to minimize the risk of leakage, CO₂ is assumed to be stable in the reservoirs. However, in a worst-case scenario, CO₂ could leak out from the ground surface into the atmosphere or from the seabed into the adjacent sea. Leakage could be caused by various factors, such as an increase in subsurface pressure due to CO₂ injection. CO₂ leakage may lead to significant damaging effects on the local environment. Therefore, concerns are emerging from the public about the risk of *in situ* leakage and ecological impacts. In Japan, operators of offshore CCS are required to plan monitoring programs, as stated in the Act for the Prevention of Marine Pollution and Maritime Disasters. In the monitoring plan, an operator has to be able to determine the location and extent of any CO₂ leakage. Consequently, it is necessary to develop detection methods of CO₂ leakage in the sea.

This study focuses specifically on active acoustic methods. Active acoustic methods, which are a type of bathymetry imaging, are examined for use in the detection of CO₂ leakage in shallow seawater columns. Side scan sonar (SSS) and multibeam sonar (MBS) were tested for use in detecting gas bubble streams in shallow coastal waters. In addition, image data was acquired with a sonar video camera. Gas bubbles were released from the seabed in a controlled manner using compressed air while scanning the seabed and water column using acoustic methods. All sonar technologies were able to detect gas bubbles and visualize gas streams in a water column (Fig.1). Both MBS and SSS data had a lower detection limit of bubbles at 100 mL/min of flow rate. MBS produced high precision localization, but detection sensitivities were affected by vessel speed. MBS is therefore most suitable for narrow area monitoring. SSS could scan wide views, and detection sensitivities were not affected by vessel speed, making SSS suitable for broad area monitoring. Additionally, there is some possibility of quantifying gas bubble concentrations from SSS scan data, which is the topic of ongoing research. Using the sonar video camera, gas streams could be visualized in the water column as dark areas in the video image. Sonar video cameras are only suitable for fixed-point observations. The data gathered indicate that acoustic methods are useful for the detection of CO₂ leakage, and may eventually be able to determine concentrations. In order to apply practical monitoring techniques, further experimental study in deep seas is required.

キーワード：二酸化炭素海底下貯留、漏出検知、音響技術

Keywords: sub-seabed CCS, leakage detection, acoustic methods

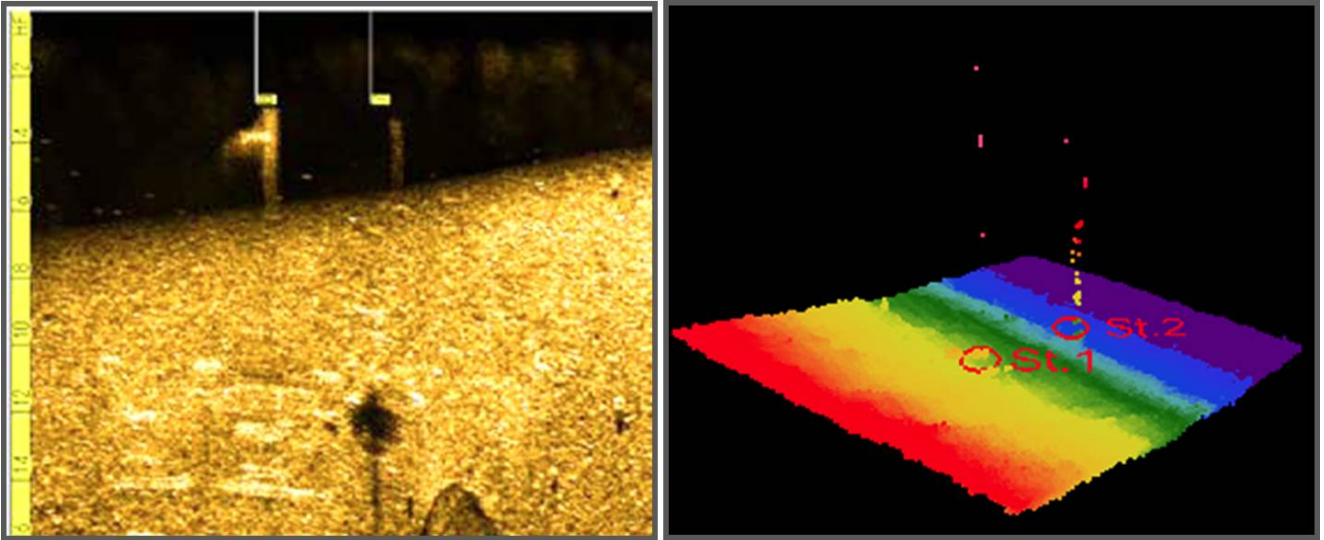


Fig. 1. Water column bubbles imaged on the data of SSS (left) and MBS (right)