含泥率の三次元モデル構築：長岡 CO₂ 圧入実証試験サイトへの適用

Geostatistical modeling for the spatial mud content: an application to the Nagaoka CO₂ storage site, Japan

Abstract

伊藤拓馬* 中島崇裕* 千代延 俊**
薛 自求*

Takuma Ito, Takahiro Nakajima*,
Shun Chiyonobu** and Ziqiu Xue**

2014年12月4日受付.

2015年6月17日受理.

* 公益財団法人地球環境産業技術研究機構
Research Institute of Innovative Technology
for the Earth, 9-2 Kizugawadai, Kizugawa-
shi Kyoto 619-0292, Japan

** 秋田大学国際資源学部
Department of Earth Resource Science, Fac-
ulty of International Resource Sciences, Aki-
ta University, 1-1 Tegata gakuencho Akita
010-8502, Japan

Corresponding author: T. Ito,
t-itou@rite.or.jp

We present the depositional environments and geostatistical modeling of the spatial distribution of mud content within a sequence stratigraphic framework for a CO₂ reservoir at Nagaoka, Japan. Carbon dioxide was injected into strata interpreted as deltaic or coastal plain deposits characterized by upward-shallowing successions. The spatial distribution of the mud content, as estimated by geostatistical modeling, shows sandy sediments prograding from the lower to the upper part of the reservoir. Geophysical monitoring during and after CO₂ injection suggests that CO₂ migration within reservoir rocks is inhomogeneous; CO₂ breakthroughs were observed at two observation wells, but were not observed at one observation well (OB-3), although the wells are located at similar distances from the injection well. The results of geostatistical modeling also indicate the heterogeneous distribution of muddy sediments. The heterogeneity of the CO₂ distribution can be explained by the distribution of muddy sediments around well OB-3, which is located at the most distal (offshore) location. Genetic interpretations of the spatial distribution of mud can be useful for predicting and estimating the distribution of injected CO₂ in a reservoir.

Keywords: Carbon dioxide capture and storage (CCS), Sequence stratigraphic framework, Core-log integration, Mud content, Geostatistical modeling

はじめに

二酸化炭素回収・貯留(Carbon dioxide Capture and Storage: CCS)は、石油増進回収(Enhanced Oil Recovery: EOR)の技術が応用できるため、即効性のある温室効果ガス削減策として注目されている。CO₂ 圧入対象層は、一般に浸透性の良い砂岩等の堆積岩から構成され、塩水がその粒子間隙を満たしている。塩水は飲料水や農業用水等の経済的な利用価値がほとんどない。このような貯留層は世界に広く分布しており、CO₂ 貯留ポテンシャルが約2,000 Gt(ギガトン)とされる(IPCC, 2005)。

我が国初のCO₂ 圧入実証試験は、南長岡ガス田で実施された(薛・松岡, 2008)。長岡CO₂ 圧入実証試験サイト(長岡サイト)では、CO₂ 貯留の長期安全性を評価するため、CO₂ 圧入井周辺に3つの観測井を設け、貯留層に圧入したCO₂ の挙動を坑井物理検層や坑井間トモグラフィによりモニタリングしている(例えば, Saito et al., 2006; Xue et al., 2006; Nakajima and Xue, 2013)。その結果、長岡サイトでは地層の不均質性がCO₂ 分布を規定していることが示された(薛・渡辺, 2008; Nakajima and Xue, 2013)。

CCS分野での地層の不均質性評価に関する研究は、CO₂

地中貯留サイトであるKetzinサイト(ドイツ)、CO₂CRC Otway Project サイト(オーストラリア)やKapuni Field サイト(ニュージーランド)などで数多く実施されている(Förster et al., 2010; Norden et al., 2010; Dance, 2013; Olierook et al., 2014)。これらの研究では、貯留層のコア試料や坑井物理検層に基づく鉱物組成や岩相層序に基づく地層の不均質性評価が行われている。CO₂ 圧入対象層となる碎屑性堆積岩は、河川のチャネル堆積物、デルタ等の浅海堆積物、風成堆積物等が選定される。選定される貯留層の堆積環境の違いは、数百年～数千年スケールでみた場合のCO₂ 圧入可能量や地下でのCO₂ 挙動にも影響することがシミュレーション結果から指摘されている(IEAGHG, 2014)。このことは、CO₂ 地中貯留サイトの選定では、地層の堆積環境の把握が必要であることを意味する。地層の堆積環境を把握する手段となる堆積相解析やそれに引き続く堆積組相や堆積システムの解析を実施すれば、より広域な地層をシーケンス層序学的な枠組みの中で扱うことができ、地下の不均質性の広がりに対して簡便で確度の高い予測が可能となる(高野, 2004)。したがって、CCS分野においても、CO₂ 貯留対象層に堆積学的な解析手法を導入し、地層の不均質性とCO₂ 分布の関連性を地層の成因論的な視点から理解することが望

Fig. 1. Location map of the Nagaoka site. (a) Topography and location of the study site. (b) Spatial configuration of the injection well (IW-1) and the monitoring wells (OB-2, OB-3, and OB-4).

まれる。

これまでの沖積層の研究では、浅海堆積物の場合、含泥率が堆積環境を特徴づけることが示されてきた(例えば、石原ほか, 2013)。また砂質堆積物の含泥率は、堆積物の粒度分布や淘汰度等に影響するため、地下流体の浸透性を支配する浸透率と密接な関わりがあることが知られている(Slatt, 2006)。したがって、堆積物の含泥率を調べることは、地層の不均質性を明らかにする上で重要である。本研究では、(1)実際にCO₂圧入が行われた長岡サイトのボーリングコア試料を用い、堆積相解析とシーケンス層序区分の設定(堆積環境解釈と地層境界の認定)、(2)含泥率についてコア試料と坑井物理検層データを統合し、地球統計学的手法による含泥率の三次元モデルをシーケンス層序区分に従って構築、さらに(3)これまで坑井物理検層から観測された不均質なCO₂分布に関して、構築した含泥率の三次元モデルに基づいて堆積学の視点から解釈を行う。

研究地域の地質と堆積様式の概説

研究対象域は、新潟平野南部、新潟県長岡市中心部から9 kmほど離れたところにある南長岡ガス田の長岡サイトである(棚瀬ほか, 2008)。長岡サイトは、信濃川の支流である洪海川の左岸に位置し、西側には標高200~300 mの東頸城丘陵が、東側には新潟平野がみられる(Fig. 1a)。

新潟平野とその周辺部の中新統~完新統を堆積させた新潟堆積盆の堆積様式は、多くの先行研究で明らかにされてきた。高野(1998)は、新潟堆積盆全域の上部鮮新~下部更新統の堆積システムおよびシーケンス層序区分を設定し、堆積

盆北部は海底扇状地タービダイト~トラフ充填タービダイトシステム、南部は陸棚~浅海~内湾~河川システムからなり、それらには3次オーダーの堆積シーケンスがみられることを示した。保柳ほか(2000)は、長岡サイトに近接する東頸城丘陵北東部の鮮新~更新統に注目し、デルタ・エスチュアリーシステムを復元し、そのシーケンス層序学的な位置づけを明らかにした。

本研究域付近に分布する上部鮮新統~下部更新統は、下位から西山層、灰爪層、魚沼層であり、灰爪層および魚沼層は一部同時異相の関係にある(Fig. 2)(例えば、安井ほか, 1983; 菊池ほか, 1984; 荒戸・保柳, 1995; 保柳ほか, 2000)。さらに、本研究域付近の新潟平野地下には灰爪層および浅海~デルタ堆積物からなる未呼称中部更新統が分布する(Fig. 2; 小林, 1996)。魚沼層は、浅海ないし内湾堆積物の海成層と河川堆積物の非海成層が繰り返すが(小林ほか, 1986; 風岡ほか, 1986; 風岡, 1988)、灰爪層は全てが海成層からなるため、魚沼層よりも沖合の堆積物とされている(小林ほか, 1986)。薛・松岡(2008)によると、本研究で扱う堆積物は灰爪層相当層である。灰爪層では、基底部に侵食面をもつ上方浅海化する堆積相累重が繰り返す。これら堆積相累重は海進・海退サイクルに対応している(保柳ほか, 2000)。

長岡サイトのコア試料とCO₂圧入実証試験の概要

長岡サイトでは、1つのCO₂圧入井(IW-1)と3つの観測井(OB-2~4)が掘削された(Fig. 1b)。本研究に用いるボーリングコア試料(長岡コア試料)は、IW-1坑井の深度1,073~1,109 mから採取され、全長35.7 mである。コア試料は

Age	Higashi-kubiki Hill	Niigata Plain
Early–Middle Pleistocene	Uonuma Formation	Unnamed Middle Pleistocene
	Haizume Formation	Haizume Formation
Late Pliocene	Nishiyama Formation	Nishiyama Formation

Fig. 2. Generalized stratigraphic column for the region around the study area (modified from Kobayashi, 1996).

礫岩、細粒～粗粒砂岩、シルト岩の互層を主体とし、深度 1,091.5～1,092.5 m には基底部に侵食面をもつ礫岩濃集層が認められる。

CO₂ 圧入実証試験は、灰爪層を対象とし、2003 年 7 月から 2005 年 1 月まで 20～40 トン/日で圧入が行われた。圧入井 (IW-1) の深度 1,093～1,105 m が CO₂ 圧入区間とされ、総圧入量は約 10,400 トンであった (薛・松岡, 2008)。圧入した CO₂ の分布は、観測井 OB-2～OB-4 における音波検層、中性子検層、比抵抗検層などの坑井物理検層によりモニタリングされている (Xue et al., 2006; Nakajima and Xue, 2013)。これまでの岩石物性実験から、CO₂ 飽和度が高くなると P 波速度が減少することが確かめられ (Xue and Lei, 2006)、長岡サイトにおける坑井物理検層にもその結果は適用できることが判明している (Xue et al., 2006; 薛・渡辺, 2008)。P 波速度の検層モニタリング結果から、観測井 OB-2 と OB-4 には、P 波速度に 28% 程度の減少が観測されており、CO₂ が到達したと判断される。CO₂ 圧入後、CO₂ は約 240 日後に観測井 OB-2 へ、約 340 日後に観測井 OB-4 へ到達している (Fig. 3)。一方、観測井 OB-3 には、CO₂ 圧入から約 3,000 日後を経た時点で P 波速度の減少は観測されておらず、CO₂ の到達は確認されていない (Fig. 3)。

方 法

圧入井 IW-1 から採取された長岡コア試料は、1 m ごとに切断され、一部は真空バックに入った状態で保管されている。本研究では、コア試料の堆積相解析と坑井物理検層解析に基づく堆積シーケンスの解析から、含泥率の三次元モデル構築に使用する地層境界 (シーケンス境界) を認定し、含泥率のモデリングを実施した。コア試料の堆積相解析、坑井物理検層解析と含泥率の三次元モデル構築の方法を述べる。

Fig. 3. Temporal changes in P-wave velocity at wells OB-2, OB-3, and OB-4.

1. コア試料の堆積相解析

コア試料の堆積相解析は、肉眼観察による記載に加え、X線 CT 画像による堆積構造、岩相境界の特徴、生痕や貝殻の有無の記載的特徴および粒度分析結果に基づいて行った。さらに堆積組相の累重様式からシーケンス層序区分を設定した。X線 CT 撮影と粒度分析の各条件を以下に詳述する。

1) X線 CT 撮影 X線 CT 撮影は、1 m ごとに保管されている深度 1,080～1,109 m のコア試料について実施された。装置は東芝スキャナ Aquilion ONE TSX-301A (東芝メディカルシステムズ株式会社製) が使用された。撮影条件は電圧 80 kV、電流 150 mA、スキャン速度 1 秒、撮影スライス厚 0.5 mm、画像スライス厚 0.5 mm に設定された。

2) 粒度分析 粒度分析は、礫を含まない堆積物ではレーザー回折散乱型粒度分析装置 SALD-3100 (島津製作所製) を用いて行った。圧入井 IW-1 から採取されたコア試料では、概ね 5～50 cm 間隔で 61 試料の測定を行った。観測井 OB-2 と OB-3 では、コア試料採取区間に対比される層準において、カッティングス試料が各 1 試料得られており、その測定を行った。これらの試料に含まれる有機物を除くため、乾燥試料 0.1 g 程度を秤量し、容器 50 ml の遠沈管に入れ、30% の過酸化水素水を十分量加えた。遠沈管を 85°C の恒温槽に入れ、発泡がおさまるまで静置した。これを遠心分離処理し、残渣に対して 0.5% のヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液を 10 ml 加え、10 分間の超音波振盪後、粒度分析を行った。同一試料を 3 回測定した粒度分析の誤差は、中央粒径で 5% 以内であった。

礫を含む堆積物には、JIS 規格標準ふるいを用いたふるい分け法による粒度分析を行った。コア試料で礫質堆積物が認められる任意の層準から4試料を選択し分析を行った。−6φ〜4.0φのふるいを用い、0.5φ刻みで分析を行った。乾燥試料を50g程度採取し、自動ふるい振とう機でふるい分けた。各ふるい上に残留する試料重量を測定し、粒度分布を求めた。粒度分析時における重量損失は1%未満であった。

本研究では、累積粒度分布が50%となる粒径を中央粒径とし、また粘土とシルトを合せたものを泥(粒径0.063mm以下)と定義し、それが堆積物に占める割合を含泥率とした。

2. 坑井物理検層解析

長岡サイトでは各種坑井物理検層が実施された(薛・渡辺, 2008)。本研究では、後述の議論と関わる自然ガンマ線検層と比抵抗検層(薛・渡辺, 2008)のみを扱った。各坑井物理検層データは10cm毎に取得された。

一般的に自然ガンマ線は、砂岩と比べてK, U, Th等の元素をより多く含む泥岩や頁岩で高い値をもつため、岩相や含泥量の推定に用いられる(Rider and Kennedy, 2011)。したがって、自然ガンマ線強度は、相対的に高い値を示せば細粒化し、低い値を示せば粗粒化を表す。一方、比抵抗値は、一般的に炭化水素やガスハイドレートの含有を無視した場合、低い値を示せば細粒、高い値を示せば粗粒となる(高野ほか, 2001; 藤井ほか, 2009)。本研究では、両者の坑井物理検層パターンを用いて、長岡コア試料から認定された堆積シーケンスの検層パターンを対応づけ、シーケンス層序区分および坑井間の地層対比を行った。

3. 含泥率の三次元モデル構築

本研究では、含泥率の三次元モデルを次の手順で構築した。1) 層序的な含泥率の連続データを取得するため、コア試料データと自然ガンマ線検層の統合化、2) シーケンス層序学的フレームワークの作成、3) 地球統計学的手法による地質モデリング実施。含泥率の三次元モデル構築には、Petrel ソフトウェア(Schlumberger 社製)を用いた。詳細は以下の通りである。

1) 含泥率に関するコア試料と自然ガンマ線検層の統合化では、これまで使用されてきた自然ガンマ線検層に注目し、次式で含泥率を推定した(Rider and Kennedy, 2011)。

$$V_{shGR} = (GR - GR_{min}) / (GR_{max} - GR_{min}) \quad (1)$$

ここで、 V_{shGR} は自然ガンマ線強度から求めた含泥率、GR は深度ごとの自然ガンマ線強度値(gAPI)、 GR_{min} は最小値、 GR_{max} は最大値である。これらの値の設定については後述する。

2) シーケンス層序学的フレームワークの作成は、コア試料の堆積相解析と坑井物理検層解析の結果から認定されたCO₂ 貯留対象層について行った。地層境界の設定では、弾性波探査データ上でシーケンス境界のホライゾンピックアップ(層序的反射波面の追跡とその位置データの取得)を行うことでサーフェイスを作成した。サーフェイスの作成には、Petrel ソフトウェアに補間アルゴリズムとして装備されている

Isochore interpolation(各坑井のシーケンス境界の深度をコントロールポイントとして平滑なサーフェイスを作成する手法)を適用した。2つのサーフェイス間で定義される貯留対象層を地層に平行する厚さの等しい7層のレイヤーに区分し、各レイヤーで水平方向に約5mメッシュのグリッドモデルを作成した。後述の含泥率の三次元モデル構築では、この一つ一つのグリッドに対し、地球統計学的手法に基づいて含泥率を決定する。

3) 含泥率の三次元モデル構築には、各坑井の連続的な含泥率データを用い、地球統計学的手法を適用した。ここで扱う地質モデルは、貯留層モデルと言われるものに相当する(例えば、高橋, 2006; 高野・西村, 2009; 高野・辻, 2013)。含泥率の三次元モデル構築は、ピクセルベースモデリング手法のひとつである二点間の統計量に基づく地球統計学的手法を用いた。

まず各坑井における含泥率データについてバリオグラム(実験バリオグラム)を作成し、その実験バリオグラムに対し、理論バリオグラムを近似する。バリオグラムは、解析する領域の空間構造について、含泥率等のデータが距離に対してどのような相関をもつかを表現することができる。本研究では、理論バリオグラムのレンジを750m、ナゲットを0.001とした場合、指数関数によって実験バリオグラムが近似された。そして、これらの条件を用いて逐次ガウスシミュレーション(Deutsch and Journel, 1998)を行うことで含泥率の三次元モデルを構築した。また含泥率の三次元モデルを構築する際には、先行研究に基づく碎屑物供給系の情報を加味し、北西方向に含泥率が高くなるトレンド(風岡, 1988; 高野, 1998; 保柳ほか, 2000)をサーフェイスに沿って与えた。

長岡コア試料の堆積シーケンス解析

堆積物の解析は、堆積相の認定、堆積組相による堆積システム解析、シーケンス層序区分へと階層性に沿った解析を行うことが重要とされている(Nummendal and Swift, 1987)。本研究でもこの概念に従う。コア試料に認められる代表的な堆積相をFig. 4に、堆積柱状図と粒度分析結果をFig. 5に示す。粒度分析結果の黒丸と白丸の記号は、それぞれレーザー回折散乱法と篩分け法により測定された結果を示す。

本研究で扱う灰爪相当層は、保柳ほか(2000)が長岡サイト近傍の東頸城丘陵に分布する灰爪層を対象とし、堆積相解析とシーケンス層序区分を行ったものに相当する。ここでは、彼らの認定した堆積相やその累重様式を参照し、まだ詳しく検討されていない長岡サイトの地下に分布する灰爪相当層に対する堆積相解析とシーケンス層序区分を行う。

1. コア観察による堆積相の認定

長岡コア試料には5つの堆積相が認定された(Fig. 4)。

堆積相1(Facies 1): 暗灰色〜オリーブ色を呈する。粘土質シルト岩〜シルト質砂岩からなる。肉眼観察およびX線CT画像による観察では、堆積構造は認められない。稀に生痕が認められ、貝殻片も含む(Fig. 4a, 4d)。堆積相1は普

Fig. 4. X-ray computed tomography (CT) images showing five facies and their associations in the sediment core from Nagaoka, at depths of: (a) 1090.5–1091.0 m, (b) 1093.0–1093.2 m, (c) 1094.0–1094.4 m, (d) 1101.0–1101.4 m, (e) 1104.1–1103.6 m, and (f) 1103.0–1104.0 m.

Table 1. Facies associations in the Nagaoka sediment core.

Facies association	Facies	Description	Occurrence depth (m)
A	1, 3, 5	Massive fine-grained sandstone with moderately bioturbation	1,109.0 to 1,102.9
B	1, 3, 5, 4	Thinly cross-laminated fine-grained sandstone with channelized conglomerate	1,102.9 to 1,092.5
C	1, (2)	Silty sandstone (with transgressive lag deposits at the base)	1,092.5 to 1,080.0 (1,092.5 to 1,091.5)

遍的に認められるが、深度 1,091.5 m 以浅と深度 1,105.2 m 以深では頻度が高くなる。

堆積相 2 (Facies 2)：暗灰色～明灰色を呈する。基底部に細～中礫が濃集し、二枚貝類の貝殻片をしばしば含む石灰質なシルト質堆積物からなる (Fig. 4a, 4b)。二枚貝類には、汽水性のカキや海棲の二枚貝類などの生息環境の異なる種類が混じっている。この堆積相は、上方細粒化を示し、堆積相 1 へ漸移するという特徴がある。堆積相 2 は他の堆積相と比べて固結度が高い。深度 1,092.5 m を基底として認められ、層厚は 1 m 程度である。

堆積相 3 (Facies 3)：暗灰色を呈する未固結で不淘汰な礫岩を主体とする (Fig. 4c, 4d, 4f)。礫種は酸性火山岩類や頁岩片が卓越し、貝殻片も含まれる。礫岩は亜円礫～円礫が卓越する細礫～中礫よりなる。この堆積相の基底部には侵食面が発達することが多く (Fig. 4c, 4f)、しばしばチャネル状

を呈する。層厚は最大 15 cm 程度と薄い。深度 1,092.5 m 以深に薄層として認められる。

堆積相 4 (Facies 4)：暗灰色～明灰色を呈し、淘汰良好な粗粒砂～細粒砂を主体とする。X 線 CT 画像では斜交層理が認められるが (Fig. 4c, 4d, 4e)、肉眼観察では不明瞭である。生痕は殆ど認められない。深度 1,092.5～1,102.9 m に多く認められる。

堆積相 5 (Facies 5)：暗灰色～明灰色を呈し、生物擾乱を被った淘汰良好な細粒砂からなる。X 線 CT 画像では堆積構造が認められない (Fig. 4c, 4e, 4f)。堆積物を掘り込んだ生痕が観察される (Fig. 4f)。深度 1,102.9～1,105.2 m に多く認められる。

2. 堆積組相の区分

堆積相の組み合わせから 3 つの堆積組相が区分される (Fig. 5)。Table 1 には、各堆積組相を構成する堆積相、記

Fig. 5. Columnar section and stratigraphic profile showing the median size and the mud content of the Nagaoka sediment core. Filled and open circles represent results measured by laser diffraction and sieving methods, respectively.

載的特徴および深度の詳細をまとめる。

堆積組相 A

記載：この堆積組相は、深度 1,109.0～1,102.9 m に認められる (Fig. 5)。生痕化石を多産し、上方粗粒化する砂岩優勢砂岩泥岩互層で特徴づけられる。層厚数 mm～10 cm 程度の堆積相 3 や堆積相 5 を挟み、堆積相 1 を主体とする。斜交葉理等の初生的堆積構造は認められない。本堆積組相は、後述の堆積組相 B により漸移的に覆われる。中央粒径値は 46～158 μm の範囲で変化し (Fig. 5)、その平均値は 112 μm である。含泥率は 19～57% の範囲で変化し (Fig. 5)、その平均値は 34% である。

解釈：生痕化石が多産することと、堆積構造が認められないことから暴風時波浪限界水深以深の堆積物と考えられる。また、砂優勢砂泥互層で特徴づけられることから、晴天時には懸濁運搬された泥が沈降・堆積し、暴風時には陸側より砂礫が供給される堆積環境が推定される。晴天時には細粒堆積物が穏やかに沈降するため、生物擾乱を受け生痕化石が多産すると考えられる。上方粗粒化サクセションを示すので、上

方浅海化を示唆する。

堆積組相 B

記載：この堆積組相は、深度 1,102.9～1,092.5 m に認められる (Fig. 5)。上方粗粒化する斜交葉理砂岩優勢砂岩泥岩互層で特徴づけられる。堆積相 1、堆積相 3、堆積相 5 の薄層を挟む堆積相 4 が主体をなし (Fig. 4c, 4d)、上位に向かって堆積相 3 の占める割合が多くなる。本堆積組相の上位は、侵食面を介し、堆積組相 C に覆われる。中央粒径値は、泥質薄層では著しく小さいが (Fig. 5)、それらを除く平均値は 143 μm である。含泥率は、泥質薄層では著しく高いが (Fig. 5)、それらを除く含泥率の平均値は 20% である。

解釈：本堆積組相の主要な堆積相である斜交葉理砂岩には薄い泥層が挟在するため、晴天時波浪限界以深の堆積物と解釈される。一方、この砂岩には斜交葉理構造が発達するので、波浪や海流等の水流の影響を受けて堆積したことが示唆される。上方粗粒化サクセションを示すので、上方浅海化を示唆する。

Fig. 6. Stratigraphic correlations between wells under a sequence stratigraphic framework at the Nagaoka site. Wavy lines indicate sequence boundaries. Solid lines denote maximum flooding surfaces.

堆積組相 C

記載：この堆積組相は、深度 1,092.5～1,080.0 m に認められる (Fig. 5)。基底部に細礫～中礫からなる礫岩を伴う上方粗粒化するシルト質堆積物で特徴づけられる。基底部のみに認められる堆積相 2 は、堆積相 1 により漸移的に覆われる (Fig. 4a)。生痕化石は稀に認められ、葉理等の堆積構造は認められない。中央粒径値は 7～61 μm の範囲で変化し (Fig. 5)、その平均値は 43 μm である。含泥率は 47～97% の範囲で変化し (Fig. 5)、その平均値は 62% である。

解釈：基底部の礫岩濃集層を除くとシルト岩からなるため、暴風時波浪限界以深の堆積物と考えられる。粗粒堆積物は挟在しないため、晴天時と暴風時ともに細粒堆積物が沈降・堆積する堆積環境が推定される。基底部付近 (深度 1,091.5～1,092.5 m) を除くと、上方粗粒化サクセションを示し、上方浅海化を表わすと解釈される。基底部の侵食面を伴う礫岩濃集層は、海進時の波浪による侵食作用に由来するラグ堆積物と考えられる (Table 1)。

3. シーケンス層序区分の設定

東頸城丘陵に分布する灰爪層の堆積相と堆積組相は、明瞭な規則性をもって累重することが指摘されている (保柳ほか, 2000)。ここでは長岡コア試料において、上述の堆積相解析の結果を基にシーケンス層序区分の設定を行う。

長岡コア試料では、基底に侵食面を伴うラグ堆積物を境界

として二つの上方粗粒化サクセションが認められる (Fig. 5)。ただし、上位の上方粗粒化サクセション (堆積組相 C) の基底部には、侵食面をもつ粗粒堆積物 (堆積相 2) が認められ、その付近では上方細粒化をもつ特徴がある。上方粗粒化サクセションを示す堆積物は、デルタや海岸平野等の堆積速度が比較的大きい沿岸域の上方浅海化する堆積物の特徴 (Walker and Plint, 1992; 西村・保柳, 1992; 高野, 1995) と類似する。コア試料に認められる二つの上方粗粒化サクセションは、侵食面により画され (Fig. 5)、この部分では急激な海進が起きたことが示唆される。すなわち、基底部の粗粒堆積物は、海進期の波浪による侵食作用に伴って、より沿岸域の粗粒堆積物が沖合へ運搬された海進期ラグ堆積物 (西村・保柳, 1992; 高野, 1995) と判断され、侵食面はラビンメント面 (Nummedal and Swift, 1987) に対比され则认为られる。この海進期ラグ堆積物直上の深度 1,090 m 付近には、長岡コア試料の中で最も細粒化する堆積物が存在し、生痕化石も認められる (Fig. 5)。これは、この層準で堆積速度が低下したことを示唆する。この層準は、急激な海進による堆積速度の低下が原因で形成されるコンデンスセクション (Posamentier et al., 1988) に相当すると考えられる。つまり、長岡コア試料にみられる上方浅海化サクセションは、海進海退の繰り返しにより形成された可能性が高い。

堆積シーケンスは、1 回の相対的海水準の変動に応じて形

Fig. 7. Profile of mud content using the core-log integration technique.

Table 2. End members of gamma-ray intensity for shale volume estimation.

Wells	Systems tracts	End members	
		GR _{min} (gAPI)	GR _{max} (gAPI)
IW-1	TST1, HST1	60	90
	TST2, HST2	55	129
OB-2	TST1, HST1	53	90
	TST2, HST2	56	150
OB-3	TST1, HST1	54	91
	TST2, HST2	54	109
OB-4	TST1, HST1	61	97
	TST2, HST2	54	144

成される不整合面(シーケンス境界)で画される地層のパッケージである(Posamentier et al., 1988). 長岡コア試料のCO₂ 圧入層準における堆積シーケンスを定義するには, シーケンス境界を認定する必要がある. 上述の通り, 上方浅海化サクセションの基底部にはラビンメント面が認められる. ラビンメント面やシーケンス境界は, それぞれ成因の異なる面であるが, 沿岸の地層では海進時の侵食作用によって陸上侵

食面(不整合面)が失われ, ラビンメント面に置き換わっていることがある(Nummedal and Swift, 1987). 本研究では, 深度 1,092.5 m にみられるラビンメント面をシーケンス境界(SB1)とみなす. また, SB1 の直上にみられるコンデンスセクション相当層準を最大海氾濫面(mfs)とみなす. これら二つの基準面から, 長岡コア試料では以下の3つの堆積体が認定される. すなわち, 下位より高海水準期堆積体

Fig. 8. Voxel grid model of the reservoir.

(HST2), 海進期堆積体(TST1), 高海水準期堆積体(HST1)である(Fig. 5).

長岡サイトの CO₂ 圧入層準は, 圧入区間から HST2 に相当すると判断される。しかし, 取得された長岡コア試料長の都合上, HST2 を含む堆積シーケンスの下限をなすシーケンス境界(SB2)を認定できない。この SB2 の認定は, CO₂ 圧入層の堆積シーケンスを規定するために必要である。そこで以下では, 連続的にデータ取得されている坑井物理検層データを用い, 各坑井間で地層対比を行い, 研究対象層のシーケンス境界面を認定する。

4. 坑井物理検層データの堆積シーケンス解析

坑井間の地層対比とシーケンス境界の認定は, 自然ガンマ線検層と比抵抗検層のパターンが用いられる(例えば, 高野ほか, 2001)。自然ガンマ線検層のパターンおよび比抵抗検層のパターンは, 各坑井で類似している(Fig. 6)。IW-1 坑井におけるコア試料の採取深度(1,080~1,109 m)をみると, コア試料の観察により認定されたシーケンス境界(SB1)は, 自然ガンマ線検層から上方細粒化を示すと判断される基底部分にある(Fig. 6)。一方, SB1 の数メートルほど上位に認められる最大海氾濫面(mfs)は, 自然ガンマ線検層から上方粗粒化を示すと判断される区間の最下部の著しく細粒化を示す部分に相当する(Fig. 6)。コア試料観察の結果と坑井物理検層データとを比較すると, SB1 と mfs との間をなす地層は海進期堆積体(TST1), mfs より上位は高海水準期堆積体(HST1), SB1 より下位は高海水準期堆積体(HST2)と対応づけられることが分かる(Fig. 6)。またコア試料の観察から明らかにされた HST2 に相当する堆積物にみられる上方粗粒化は(Fig. 5), 比抵抗検層パターンによく表れている。したがって, 自然ガンマ線検層と比抵抗検層パターンに基づ

けば, 各坑井における堆積シーケンスの認定ができる(Fig. 6)。

坑井物理検層パターンに基づく地層対比を行った結果, コア試料で認められたシーケンス層序区分(HST2, TST1, HST1)の他に, コア試料の未回収部でのシーケンス層序区分(TST2, HST3)を行うことができる(Fig. 6)。本研究で注目する CO₂ の圧入層は, シーケンス境界(SB2 と SB1)に画された堆積シーケンスである。本研究では, これらシーケンス境界は, 圧入層の地質モデルを構築する際の地層境界として使用される。

含泥率の三次元モデル構築とその CCS 分野への意義

圧入後の CO₂ 分布からは, 圧入区間で水平移動が卓越し, 鉛直方向には移動していないことがモニタリング結果から判明している(Nakajima and Xue, 2013)。つまり圧入された CO₂ は, SB2 と SB1 とに挟まれた堆積シーケンスの範囲内に収まっている。したがって, これ以降は, SB2 と SB1 とに挟まれた堆積シーケンスのみに対し含泥率の三次元モデルの構築を行い, その意義を考察する。含泥率の三次元モデル構築は, 方法の節で述べた手順に従った。

1. 連続的な含泥率データの取得

地球統計学的手法による含泥率の三次元モデル構築には, 連続的な含泥率データが必要である。コア試料の粒度分析から求めた含泥率は, 実測値ゆえ信頼性は高いが, 不連続データという欠点がある。一方, 自然ガンマ線検層データは連続的だが, 間接データから含泥率を求めたものである。連続的で信頼性の高い含泥率データを取得するには, 両者のデータを適切に統合する必要がある。

検層による含泥率は, (1)式から計算されるが, 自然ガン

Fig. 9. Geological model of mud content in the uppermost and lowermost layers of the reservoir.

マ線強度のエンドメンバー (GR_{min} と GR_{max}) の設定が問題となる。石油業界では、 GR_{min} はクリーンな地層の自然ガンマ線強度、 GR_{max} は含泥率が 100% と想定される自然ガンマ線強度を使用することが多い(石油技術協会, 2014)。ここでは、検層から推定される含泥率が実測値と統合できるエンドメンバーの設定基準を検討する。圧入井 IW-1 の自然ガンマ線強度の層序変化をみると (Fig. 6)、深度 1,090 m 付近の最大海沓濫面 (mfs) の自然ガンマ線強度は、深度 1,107 m 付近のそれよりも低いことが分かる。しかし、コア試料の粒度分析に基づく含泥率は、深度 1,090 m 付近でほぼ 100% をとっている (Fig. 5)。このことは、自然ガンマ線強度を用いた含泥率の推定には、対象とする堆積シーケンスごとにエンドメンバーを設定する必要があることを示唆する。ここでは、mfs の自然ガンマ線強度を GR_{max} 、対象の堆積シーケンスにみられる最小の自然ガンマ線強度を GR_{min} とする (Table 2)。

Fig. 7 は、自然ガンマ線検層から計算した含泥率とコア試料およびカッティングス試料の実測値の層序パターンを示す。含泥率の実測値は、圧入井 (IW-1) では長岡コア試料を、

観測井 OB-2 と OB-3 ではカッティングス試料の値を示す。自然ガンマ線検層から推定した含泥率は、コア試料の含泥率とよく一致していることが分かる。カッティングス試料は、採取間隔が深度区間 10 m と広く、厳密な深度の含泥率は分からない。しかし、カッティングス試料の含泥率は、試料の採取区間に関して自然ガンマ線検層から推定された含泥率の範囲に収まっており、両者の含泥率はそれほど大きな隔たりはないものと判断される。これ以降は、Fig. 7 の含泥率の連続データを地質モデル構築に使用する。

2. シーケンス層序学的フレームワーク作成および含泥率の三次元モデル構築

含泥率の三次元モデル構築に際し、堆積相解析と坑井物理検層データから認定されたシーケンス境界 (SB2 と SB1) を地層境界とするサーフェイスモデルを作成し、両シーケンス境界に挟まれた堆積シーケンスについてグリッド化を行った (Fig. 8)。そして、このグリッドモデルに対し、含泥率の連続データを用いた地球統計学的手法による地質モデリングを実施することで含泥率の三次元モデルを構築した (Fig. 9)。グリッドモデル (Fig. 8) および含泥率の三次元モデル (Fig.

9)の X 軸と Y 軸は新日本測地系座標を、Z 軸は深度を意味する。

含泥率の三次元モデルに関する研究は、東京港湾地域において詳細に検討されている(石原ほか, 2013)。石原ほか(2013)は、沖積層の研究から含泥率が海成層の堆積相の特徴を反映すると述べている。本研究で扱う長岡コア試料における含泥率の層序的变化には、コア試料の記載の特徴である上方粗粒化パターンが認められる(Fig. 5)。これは含泥率が堆積環境の特徴を反映することを意味し、含泥率は堆積環境に由来する地層の不均質性を表す指標のひとつとなりうることを示す。

一方、新潟県における後期鮮新統～前期更新統の碎屑物供給系の知見は、精力的な先行研究から得られている(例えば、風岡, 1988; 高野, 1998; 保柳ほか, 2000)。長岡サイト近傍における後期鮮新統～前期更新統では、南ないし東方からの碎屑物供給によるデルタの前進が示され、この碎屑物供給系の枠組みは大きく変化しない(風岡, 1988; 高野, 1998; 保柳ほか, 2000)。本研究では、この碎屑物供給系の知見を考慮して含泥率の三次元モデルを構築した結果、西部に沖合環境が、東部には沿岸環境が分布するという従来の見解と大局的に合う三次元モデルを構築できた(Fig. 9)。Fig. 9 の上図は貯留層最上部のレイヤーにおける含泥率の三次元分布の俯瞰図(SB1 直下の層準付近)を、下図は貯留層最下部のレイヤー(mfs の層準付近)のそれを示す。上図における含泥率の三次元モデルは、下図と比べ、砂勝ちの堆積物が沖合へ前進している(Fig. 9)。この堆積様式は、コア試料の堆積相解析から判断される上方浅海化サクセションをもつ事実と整合している。一般的に上方浅海化はデルタや海岸平野等の堆積物に発達し、海退を示す累重様式とされており(Walker and Plint, 1992; 西村・保柳, 1992; 高野, 1995)、長岡サイトの CO₂ が圧入された貯留層は、海退を示すデルタや海岸平野の堆積物と捉えられる。

3. 含泥率の三次元モデルの坑井物理検層モニタリングに対する整合性とその意義

坑井物理検層モニタリングの結果では、観測井 OB-2 と OB-4 には CO₂ が到達しているが、観測井 OB-3 では CO₂ が到達していない(Fig. 3)。このため、CO₂ の分布を規制する地層の不均質性の影響があると解釈されてきた。含泥率の三次元モデルをみると、観測井 OB-2 と OB-4 付近では砂質堆積物の前進により、砂質堆積物が分布するが、観測井 OB-3 付近では含泥率がより高い堆積物から構成される。これは坑井の中で、観測井 OB-3 が最も沖合に位置しているためと解釈される。この分布様式は、地層の不均質性を反映しているものと考えられ、また坑井物理検層モニタリング結果を地層の成因論的観点から説明できる。すなわち、観測井 OB-3 付近では、他の観測井と異なり、泥勝ち堆積物が分布することが CO₂ の浸透を妨げたと解釈される。また観測井 OB-3 と他の坑井における含泥率値の違いは、5～6% 程度であるが(Fig. 9)、それが地下での CO₂ の浸透性に大きな影響を与えようと考えられる。

CCS 分野では、安全性の面から圧入後の CO₂ 分布の評価

が求められる。貯留層中の含泥率の三次元モデル構築は、圧入後の CO₂ 分布の予測や評価に大きな役割を担うであろう。また貯留層を成因論的視点で特徴づけることは、圧入後の不均質な CO₂ 分布を堆積学的に解釈できる点で有効と言える。

ま と め

本研究では、CCS 分野で重要となる圧入後の CO₂ 分布に影響する地層の不均質性を理解するため、不均質性の指標として含泥率を用い、長岡サイトの貯留層に対する事例研究を行った。貯留層から採取されたコア試料の分析結果を基に堆積相解析を行った結果、上方浅海化サクセションを示すことで特徴づけられるデルタや海岸平野の堆積物と解釈された。コア試料と坑井物理検層解析に基づき、貯留層のシーケンス層序区分を行い、地質モデル構築に使用するシーケンス境界を設定した。コア試料と坑井物理検層を統合して得られた含泥率データに対し、地球統計学的手法を適用し、含泥率の三次元モデルを構築した。坑井物理検層では、観測井 OB-2 と OB-4 には CO₂ が到達しているが、観測井 OB-3 には CO₂ の到着は認められない。このような分布は、観測井 OB-3 が他の坑井と比べて最も沖合に位置しており、含泥率の高い堆積物から構成されるためと解釈される。CCS 分野では、貯留層の含泥率分布を成因論的視点から特徴づけることは、圧入後の CO₂ 分布を地層の堆積様式と関連づけて理解でき、分布の予測や評価に役立つものと考えられる。

謝 辞

西澤 修氏(地球環境産業技術研究機構)と公文富士夫氏(信州大学)には、粗稿に対するコメントを頂いた。保柳康一氏(信州大学)、辻 隆司氏(石油資源開発)、匿名査読者、編集委員の石原与四郎氏(福岡大学)には、有益なコメントを頂き、本稿が大幅に改善された。また高野修氏と柏原功治氏(石油資源開発)には、新潟の地質や地球統計学の基礎をご教示頂いた。本研究は経済産業省の「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術事業」の成果の一部である。本事業の実施にあたっては、国際石油開発帝石、エンジニアリング協会、地球科学総合研究所、物理計測コンサルタント等関係機関の多くの方々に協力頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- 荒戸裕之・保柳康一(Arato, H. and Hoyanagi, K.), 1995, 新潟堆積盆地における 3 タイプの第 4 オーダー堆積シーケンスモデル。地質学論集(Mem. Geol. Soc. Japan), no. 45, 118–139.
- Dance, T., 2013, Assessment and geological characterization of the CO₂CRC Otway Project CO₂ storage demonstration site: From prefeasibility to injection. *Mar. Petrol. Geol.*, **46**, 251–269.
- Deutsch, C. V. and Journel, A. G., eds., 2008, *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide 2nd ed.* Oxford University Press., New York, 369 p.
- Förster, A., Schöner, R., Förster, H. J., Norden, B., Blaschke, A. W., Luckert, J., Beutler, G., Gaupp, R. and Rhede, D., 2010, Reservoir characterization of a CO₂ storage aquifer: The Upper Triassic Stuttgart Formation in the Northeast German Basin. *Mar. Petrol. Geol.*, **27**, 2156–2172.
- 藤井哲哉・佐伯龍男・小林稔明・稲盛隆徳・林 雅雄・高野 修・高山

- 徳次郎・川崎達治・長久保定雄・中水 勝・横井研一(Fujii, T., Saeki, T., Kobayashi, T., Inamori, T., Hayashi, M., Takano, O., Takayama, T., Kawasaki, T., Nagakubo, S., Nakamizu, M. and Yokoi, K.), 2009, 確率論的手法による東部南海トラフのメタンハイドレート資源量評価. 地学雑(Jour. Tokyo Geogr. Soc.), **118**, 814–834.
- 保柳康一・池津大輔・清水由花・大村亜希子(Hoyanagi, K., Ikedzu, D., Shimizu, Y. and Omura, A.), 2000, 新潟県東頸城丘陵北東部に分布する鮮新—更新統におけるデルタ・エスチュアリーシステムの復元とシーケンス層序. 地球科学(Earth Sci. (Chikyu Kagaku)), **54**, 393–404.
- IEAGHG (IEA Greenhouse Gas R&D Programme), 2014, CO₂ Storage Efficiency in Deep Saline Formations: a Comparison of Volumetric and Dynamic Storage Resource Estimation Methods. IEAGHG, Cheltenham Office Park, UK, 59 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2005, Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Contribution of Working Group III of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, U.S.A., 431 p.
- 石原与四郎・宮崎友紀・江藤雅佳子・福岡詩織・木村克己(Ishihara, Y., Miyazaki, Y., Eto, C., Fukuoka, S. and Kimura, K.), 2013, 東京港湾地域のボーリング情報を用いた浅層3次元地質・地盤モデル. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **119**, 554–566.
- 風岡 修(Kazaoka, O.), 1988, 新潟県東頸城丘陵東部の魚沼層群の層序と層相. 地球科学(Earth Sci. (Chikyu Kagaku)), **42**, 61–83.
- 風岡 修・立石雅昭・小林巖雄(Kazaoka, O., Tateishi, M. and Kobayashi, I.), 1986, 新潟県魚沼地域の魚沼層群の層序と層相. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **92**, 829–853.
- 菊池おる・黒川勝己・丸山直子・落合浩代・小林巖雄(Kikuchi, K., Kurokawa, K., Maruyama, N., Ochiai, H. and Kobayashi, I.), 1984, 新潟油田地域, 灰爪層・西山層と魚沼層群の火山灰層による対比. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **90**, 101–115.
- 小林巖雄(Kobayashi, I.), 1996, 越後平野地下の第四系. 第四紀研究(Quatern. Res.), **35**, 191–205.
- 小林巖雄・立石雅昭・安井 賢・風岡 修・黒川勝己・油井 裕・渡辺其久男(Kobayashi, I., Tateishi, M., Yasui, K., Kazaoka, O., Kurokawa, K., Aburai, H. and Watanabe, K.), 1986, 新潟積成盆地における西山・灰爪累層, 魚沼層群の層序と古環境. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **92**, 375–390.
- Nakajima, T. and Xue, Z., 2013, Evaluation of a resistivity model derived from time-lapse well logging of a pilot-scale CO₂ injection site, Nagaoka, Japan. *IJGGC*, **12**, 288–299.
- 西村瑞恵・保柳康一(Nishimura, M. and Hoyanagi, K.), 1992, 陸棚斜面—陸棚—沿岸の堆積システムの変遷と相対的海水準変動—北部フォッサマグナ地域中新統青木層・小川層のシーケンス層序学—. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **98**, 337–354.
- Norden, B., Förster, A., Vu-Hoang, D., Marcelis, F., Springer, N. and Le Nir, I., 2010, Lithological and petrophysical core-log interpretation in CO₂SINK, the European CO₂ onshore research storage and verification project. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **13**, 179–192.
- Nummedal, D. and Swift, D. J. P., 1987, Transgressive stratigraphy at sequence-bounding unconformities: some principles derived from Holocene and Cretaceous examples. In Nummedal, D., Pilkey, O. H., Howard, J. D., eds., *Sea Level Fluctuation and Coastal Evolution*. SEPM Spec. Publ., no. 41, 223–340.
- Olierook, H. K. H., Piane, C. D., Timms, N. E., Esteban, L., Rezaee, R., Mory, A. J. and Hancock, L., 2014, Facies-based rock properties characterization for CO₂ sequestration: GSWA Harvey 1 well, Western Australia. *Mar. Petrol. Geol.*, **50**, 83–102.
- Posamentier, H. W., Jervry, M. T. and Vail, P. R., 1988, Eustatic controls on clastic deposition I—Conceptual framework. In Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C., eds., *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. SEPM Spec. Publ., no.42, 109–124.
- Rider, M. and Kennedy, M., eds., 2011, *The Geological Interpretation of Well Logs 3rd ed.* Rider-French Consulting Limited., UK, 432p.
- Saito, H., Nobuoka, D., Azuma, H., Xue, Z. and Tanase, D., 2006, Time-lapse crosswell seismic tomography for monitoring injected CO₂ in an onshore aquifer, Nakagaoka, Japan. *Expl. Geophys.*, **59**, 30–36.
- 石油技術協会(The Japanese Association for Petroleum Technology), 2014, 石油鉱業便覧 石油技術協会創立 80 周年記念(*Petroleum Technology Handbook 2013*). 石油技術協会(Japan. Assoc. Pet. Technol.), 957p.
- Slatt, R. M., 2006, *Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers*. Elsevier Publ., 478p.
- 高橋 功(Takahashi, I.), 2006, 三次元地震波探索を用いた油ガス層特性予測の現状と問題点. 石技誌(Jour. Japan. Assoc. Petrol. Technol.), **71**, 3–10.
- 高野 修(Takano, O.), 1995, 北部フォッサマグナ堆積盆浅海相前進ステージにおけるデルタ—陸棚システムと堆積シーケンス—東頸城地域鮮新統東川累層・奈良上累層の例—. 地質学論集(Mem. Geol. Soc. Japan), no. 45, 170–188.
- 高野 修(Takano, O.), 1998, 新潟堆積盆における上部鮮新統—下部更新統のシーケンス層序—研究の現状と今後の課題—. 堆積学研究(Jour. Sediment. Soc. Japan), no. 48, 21–39.
- 高野 修(Takano, O.), 2004, 堆積相・シーケンス解析から統合的堆積盆解析へ: 堆積環境・プロセス・分布解析手法の新たな展開. 堆積学研究(Jour. Sediment. Soc. Japan), no. 58, 13–31.
- 高野 修・守屋成博・西村瑞恵・秋葉文雄・阿部正憲・柳本裕(Takano, O., Moriya, S., Nishimura, M., Akiba, F., Abe, M. and Yanagimoto, Y.), 2001, 新潟堆積盆北蒲原地域における上部中新統—下部更新統のシーケンス層序と堆積システムの特徴. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **107**, 585–604.
- 高野 修・西村瑞恵(Takano, O. and Nishimura, M.), 2009, 三次元サイスミック地形学(seismic geomorphology)手法による貯留層のイメージングと分布解析: 海底扇状地タービダイト砂岩を例として. 石技誌(Jour. Japan. Assoc. Petrol. Technol.), **74**, 40–51.
- 高野 修・辻隆 司(Takano, O. and Tsuji, T.), 2013, 石油探鉱開発における三次元地質・貯留層モデリング: 堆積学・シーケンス層序学・サイスミック地形学・物理探査学・地球統計学の融合による地質モデルの構築. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **119**, 567–579.
- 棚瀬大爾・薛 自求・嘉納康二(Tanase, D., Xue, Z. and Kano, K.), 2008, 長岡における二酸化炭素圧入実証試験. *Jour. MMIJ*, **124**, 50–60.
- Walker, R. G. and Plint, A. G., 1992, Wave- and storm-dominated shallow marine systems. In Walker, R. G., and James, N., eds., *Facies Models—response to sea level change—*, Geol. Assoc. Canada, 219–238.
- 薛 自求・松岡俊文(Xue, Z. and Matsuoka, T.), 2008, 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素貯留技術の現状と課題. 地学雑(Jour. Tokyo Geogr. Soc.), **117**, 734–752.
- 薛 自求・渡辺二郎(Xue, Z. and Watanabe, J.), 2008, 長岡実証試験サイトにおける二酸化炭素挙動モニタリングへの物理検層の適用. *Jour. MMIJ*, **124**, 68–77.
- Xue, Z., Tanase, D. and Watanabe, J., 2006, Estimation of CO₂ saturation from time-lapse CO₂ well logging in an onshore aquifer, Nagaoka, Japan. *Expl. Geophys.*, **37**, 19–29.
- Xue, Z., Lei, X., 2006, Laboratory study of CO₂ migration in water-saturated anisotropic sandstone, based on P-wave velocity imaging. *Expl. Geophys.*, **37**, 10–18.
- 安井 賢・小林巖雄・立石雅昭(Yasui, K., Kobayashi, I. and Tateishi, M.), 1983, 新潟県八石油帯・中央油帯南部に分布する魚沼層群の層序. 地球科学(Earth Sci. (Chikyu Kagaku)), **37**, 22–37.

著者プロフィール

伊藤拓馬 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 研究員、博士(理学)。2010年 信州大学大学院総合工学系研究科博士課程修了。長野市立博物館職員、産業技術総合研究所特別研究員を経て、2013年から現職。専門分野：堆積学・環境地質学・第四紀学。研究内容：堆積学の手法を用いた地層解析と三次元地質モデル構築。E-mail: t-itou@rite.or.jp

中島崇裕 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 主任研究員、博士(理学)。1993年 東京工業大学大学院理学研究科応用物理学専攻博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、動力炉・核燃料開発事業団(現日本原子力研究開発機構)客員研究員、静岡大学客員准教授を経て、2010年から現職。専門分野：地球物理学・地球電磁気学。研究内容：物理検層と岩石物理解析、地層中の流体挙動解析。E-mail: tnak06@rite.or.jp

千代延 俊 秋田大学国際資源学部 准教授、博士(理学)。2008年 東北大学大学院理学研究科地学専攻博士課程修了。東北大学大学院理学研究科GCOE 助教、地球環境産業技術研究機構研究員を経て、2013年から現職。専門分野：層位学・石油地質学。研究内容：堆積盆解析と石油システム解析。E-mail: chiyo@gipc.akita-u.ac.jp

薛 自求 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 主席研究員、博士(工学)。1993年 北海道大学大学院資源開発工学専攻博士課程修了。基礎地盤コンサルタンツ株式会社、京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻講師、准教授を経て、2010年から現職。専門分野：資源工学・岩盤力学。研究内容：地中貯留に CO₂ 挙動モニタリング。E-mail: xue@rite.or.jp

(要 旨)

伊藤拓馬・中島崇裕・千代延 俊・薛 自求, 2015, 含泥率の三次元モデル構築：長岡 CO₂ 圧入実証試験サイトへの適用. 地質雑, **121**, 311–323. (Ito, T., Nakajima, T., Chiyonobu, S. and Xue, Z., 2015, Geostatistical modeling for the spatial mud content: an application to the Nagaoka CO₂ storage site, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **121**, 311–323.)

長岡の CO₂ 圧入実証試験サイトの CO₂ 貯留層について堆積相解析とシーケンス層序区分を行い、含泥率分布を推定するために地球統計学的モデリングを実施した。CO₂ 貯留対象層は、上方浅海化サクセションが認められるデルタまたは海岸平野の堆積物と解釈される。シーケンス層序区分に基づき、貯留層における含泥率の三次元モデル構築を行ったところ、砂質堆積物は西方へ前進する堆積様式をもつことが判明した。CO₂ 圧入後の検層モニタリングでは、観測井 OB-3 のみ CO₂ の到達が確認されていない。含泥率の三次元モデルから判断すると、OB-3 坑井は最も沖合に位置しており、他の坑井付近より含泥率の高い堆積物が分布している。これが OB-3 坑井では CO₂ の到達が認められない原因と解釈される。CCS 分野における地層の含泥率の成因論的解釈は、圧入後の CO₂ 分布の予測や評価に有効である。