講 演
 Lecture

X 線 CT スキャンの活用法 “アブダビ海上コアサンプル中での白亜紀セノマニアン・ルディスト化石 (厚歯二枚貝) の発見”*

山中 基由^{**}・谷脇 天司^{**}・南條 貴志^{***}

(Received August 22, 2018 ; accepted November 6, 2018)

Application of X-ray CT scan to slab cores for extracting Cenomanian rudist fossils in Offshore Abu Dhabi as a state-of-the-art nondestructive testing methodology

Motoyoshi Yamanaka, Takashi Taniwaki and Takashi Nanjo

Abstract : Rudists are a group of strange shaped marine bivalves living in the Tethys Ocean from the Late Jurassic to the Late Cretaceous. They have various shapes ranging from box, tube, to ring shapes. In the Middle East, many carbonate oil fields are composed of rudists. But less attention has been paid to the taxonomy, paleo-ecology and sedimentology of rudists until now. It is important to capture three-dimensional geometry of rudist for understanding them mentioned above, although it is difficult to see three-dimensional geometry of the rudists in slab cores which just indicate partial sections at cutting surfaces. In this study, X-ray CT scan technology is using for delineating the above of rudists from cores as nondestructive approach. Scanning direction is also important to obtain better resolution for identifying taxonomy to identify rudist “species”. Our trial revealed that most of vertical CT images show probably software-based “ring artifact” which may be created by image correction process. This artifact may be a result of large difference of relative density between adjacent objects such as air and very hard tissue like rudist hard shells. Therefore, our trial suggests that transection direction (lateral direction) is the recommended scanning direction for obtaining better resolution. We are continuing study to identify “species” using 3D view software.

Currently, the identification of rudist is completely relying on human eyes. But it may be possible to use AI for rudist recognition on cores although it requires further development of techniques. rudist fossils can be identified even in the general X-ray CT scan as “Digital core” for the measurement of reservoir properties. Therefore, the development of image recognition for rudist could be a routine work for rudist recognition with AI in Cretaceous core in the future.

Keywords : radiolitidae, rudist, X-ray CT, Cenomanian, digital paleontology, digital core, shoal, depositional environment

1. はじめに

中東における多くの白亜系貯留岩は、ルディスト (厚歯二枚貝) 化石を主体とする炭酸塩岩から形成されている。ルディストは、ジュラ紀後期から発生し、白亜紀末にアンモナイトや恐竜とともに絶滅している。ルディストの形状

は、非常に特徴的であり、20 世紀の初頭から、形態の特殊性から博物学として発達し、分類学の観点から、これまで多くの研究が行われてきている。

今回のスタディ対象としている中東アブダビ海上 A 油田の貯留岩層コア中にもルディストが確認されている。しかし、コア中に確認されるルディストは、肉眼では切断面を基にした二次元的な観察しかできず、三次元的な形状を把握することが難しく、ルディストの分類、および、どのように堆積しているのかなどの考察には限界があった。また、同フィールドの貯留岩は浅海成石灰岩からなることため、示準化石の石灰質ナノ化石などが多産しないため、貯留岩の堆積年代を正確に把握することも難しい。ルディストの三次元的な形態の復元から分類学的な検討を試み、これをもとにルディストに基づいた地質時代の認定、およ

* 平成 30 年 6 月 13 日、平成 30 年度石油技術協会春季講演会 地質・探鉱部門シンポジウム「効率化と技術の進展が石油・天然ガス探鉱にもたらす影響」で講演 This paper was presented at the 2018 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “Impacts of Efficiency and Technology Development on Oil and Gas Exploration” held in Niigata, Japan, June 13, 2018

** 国際石油開発帝石株式会社 INPEX Corporation

*** 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)

† Corresponding author : E-Mail : motoyoshi.Yamanaka@inpec.co.jp

Fig. 1 (a) field location map and section of A field (modified from Neo,1996). Location of the study filed is shown by a yellow star. (b) Stratigraphic outline of the Upper Cretaceous in Abu Dhabi to Dubai (modified from Al-Zaabi *et al.*, 2010 and Yamamoto *et al.*, 2017). Stratigraphic interval examined by this study is indicated (red square). (Yamanaka *et al.*, 2018)

び、堆積様式の推定を行うことは、貯留岩の地質モデルを作成する上で、大いに役に立つと考えられる。

今回、切断面にルディストを含むスラブコアを対象にして、X線CTスキャンを実施し、コアの内部構造を特定した。X線CTスキャンは非破壊調査手法であり、コアを破壊せずに内部構造を把握できる利点がある。

本講演では、スタディの手法、結果について紹介するとともに、将来的なX線CTの利用法の一例、また、その先にあるデジタルコアの有用性について論じたい。

2. スタディ対象フィールドと手法

2.1 スタディ対象フィールド

今回、分析の対象としたのは、アラブ首長国連邦アブダビ市街から沖合 20 km に位置する A 油田である (Fig. 1a)。同油田は、ジャパン石油開発株が、アブダビ国営石油 (ADNOC) と共同で開発、操業を進めてきた油田であり、40 年以上の操業実績がある。

同油田の貯留岩は、セノマニアン期に堆積した石灰岩層 (A 層) である (Fig. 1b)。A 層は、ルディストを多産する層を含む浅海成石灰岩からなり、陸源物質の混入のきわめて少ない石灰岩である (根尾, 1987, Al-Zaabi *et al.*, 2010 and Yamamoto *et al.*, 2016)。アブダビ海域では、この A 層は、東側と西側にそれぞれ分布するが、ベースンの中央部には存在せず、この中央部には Intrashelf basin として遠洋性石灰岩が堆積している (B 層)。B 層は、浮遊性有孔虫を多産する遠洋性石灰岩からなり、根源岩として機能していると考えられている (Kojima *et al.*, 2017)。特にアブダビ海域の東側では、ルディストはマウンドあるいは島状のバンクに局所的に発達している。一方、アブダビ海域の西側にもルディストが存在していたと考えられているが、これら西側のルディストは、陸域の海岸線に沿って発達していた

と考えられており、東側のルディスト層の発達様式とは異なる。東側の島状に分布するルディストのショール相は、ドバイ側では、Fateh 油田、SW Fateh 油田の貯留層を形成している。Fig. 1a の断面図から、A 油田自体は、油田の中心部が凹状にくぼみ、油田の頂部で凸状に盛り上がっていることから、これ自体が礁を形成しているように考えられていたが、本油田のルディストは、サンゴ礁のような礁を形成するものではなく、牡蠣礁のようにルディストが積み重なって形成されたものと考えている (ショール相)。

2.2 セノマニアン A 層

Fig. 2 に示したとおり、本地域における A 層 (2 ~ 4) および B 層 (1) の主要な岩相は、コアおよび物理検層上の特徴から、下記の 4 つに大別できる (Yamanaka *et al.*, 2018)。

- (1) ベースン相 (Basin Facies)：浮遊性有孔虫を多く含むワッケストーン / マッドストーンからなる。スタイロライトを伴うことが多い。
- (2) スロープ相 (Middle-Upper Slope Facies)：ベースン相とショール相の間に位置する相。上部～中部スロープ相は、ショール相に近く、礫サイズのルディスト化石片や貝化石片を含むグレインストーン / パックスストーン / ワッケストーンからなり、下部スロープ相は、ベースン相に近く、スタイロライトを伴うワッケストーンからなる。
- (3) ショール相 (Shoal Facies)：準現地性のルディスト又は現地性のルディストを主体とし、礫サイズの貝化石片などを伴うラドストーン / フロートストーンからなる。基質は、グレインストーン / パックスストーン / ワッケストーンからなる。
- (4) ラグーン相 (Lagoon Facies)：底生有孔虫を含みスタイロライトを伴う、パックスストーン / ワッケストーン

Fig. 2 Classification of Sedimentary Environment around study area and facies types and thin section (Yamanaka *et al.*, 2018)

Fig. 3 (a) Photo of medical X-ray CT scan held by JOGMEC. (b) Campanian rudist fossil held by INPEX. (c) X-ray CT Scanning image of rudist fossil

からなる。また、一部準現地性又は現地性のルディスト、および貝化石片などを含む。

今回、スタディ対象とした箇所は、このうち、(3)のショール相に分布するものである。ショール相は、海水面から、晴天時波浪限界の間くらいに位置すると考えられる。今回分析したコアは、白色からクリーム色の色調であり、岩相は、ルディスト片を多量に含む、ラドストーン/フロートストーンからなる。また、薄片観察から、基質部は、グレ

インストーン/パックスストーン/ワッケストーンからなる (Fig. 2)。また、現地性と考えられる堆積したときのポジションを維持しているルディストは、基質がパックスストーン/ワッケストーンの所で認められる。コアの表面のみをみると、複雑に入り組んだ多種多様なルディストが観察されるが、ルディストの専門家でないかぎり、どのようなルディストが含まれているのか、同定が難しい。

Fig. 4 (a) Surface photo of slab core, we can recognize rudist fragment of left side corner . (b) X-ray CT image photo, we can recognize same of rudist in left side but also other rudist in the center part (Yamanaka *et al.*, 2018)

Fig. 5 (a) X-ray image of rudists including slab core, (b) sketch of rudists

Fig. 6 Scanning direction (lateral scanning to core) of the vertical position of slab core.

2.3 X線 CT スキャン

今回、コア内部に含まれるルディストを判別するためにX線 CT スキャンを実施した。X線 CT スキャンは非破壊検査が可能で、化石試料を破壊することなく同定が可能であることから、再現性も確保されている。近年は、古生物の分野に対して、X線 CT スキャンを実施し、分類学的検討を行う研究が進んでおり、“Digital Paleontology” (デジタル古生物学) として発達してきている (Molineux *et al.*, 2007)。

CT 画像は、Hounsfield Unit (ハンスフィールドはX線 CT の開発者) で定義され、鉄で+7000、石やアルミニウムは+2000、骨で+1000、水や木、石油は 0、空気は

-1000 となる。物質の固有数値は、前述のように決まっているが、CT スキャンで得られる画像は、グレースケール画像 (0.2 mm/pixel) であり、画像上の白い部分 (CT 値が高い部分、+7000 など) がX線の吸収度の高い部分であり、黒い部分 (CT 値が低い部分、0 など) がX線吸収の低い部分に対応する。

X線CT画像を取得するためには、対象物を固定し、その周りを発信機と受信機を回転させることによって、1枚のスライス画像を取得する (Yonebayashi *et al.*, 2018)。これを 0.5 mm 間隔で取得し、画像を積み重ねることによって立体的に画像を見ることができるようになる (立体化のためには、三次元モデリングソフトが必要となる)。

本スタディでは INPEX 内で保有しているルディストの

Fig. 7 Scanning direction (vertical scanning to core) of the lateral position of slab core

Fig. 8 Influence of ring artifact difference of scanning directions

化石を用いて、内部構造を確認するために試験的に X線CT画像を取得した (Fig. 3b, 3c)。その結果、この化石内にも一部、孔隙があるが、続成作用が進み、この孔隙が周辺から、充填されていることも確認された。

石油探鉱において X線CTスキャンは、SCAL (Special Core Analysis Laboratory) として、孔隙率、浸透率などの測定、あるいは、プラグサンプリング位置の決定を目的として取得されている。今回のスタディでは、コア中に存在する可能性のあるルディストの種類の同定、および分布様式を把握するために X線CTスキャンを実施した。方法としては、はじめに、切断面にルディストが含まれるコア試料を選択、JOGMEC TRC が保有する医療用第3世代 X線CTスキャンを用いて、スキャンを実施した (電圧は 140kV を使用) (Fig. 3a)。

3. 分析結果と問題点

3.1 分析結果

分析の結果、特徴的なスラブコアを確認した。このスラブコアは、表面上には、斜め下を向くルディストの破片しか確認できない (Fig. 4a の黄色の部分)。しかしながら、X線CT画像をみると、内部に起立した漏斗型のルディストを複数個体確認することができた (Fig. 4b)。これは、表面上で観察されるルディストとは、別個体であり、起立した状態であることから、現地性のルディストであると考えられる。このルディストを詳細に観察すると、高さ 5 から 3 cm 程度で 3 個体による群集を成すルディストであることが分かる (Fig. 5)。これらは形状、殻の特徴から Radiolitidae 科と認識される。しかしながら、この X線CT画像のみでは、殻の表面や蝶番が確認できないことから、属や種まで同定することができない。

3.2 走査方向の変更

X線CT画像は、0.5 mm 間隔で取得されていることから、これより小さい構造は、捉えることができない。今回、殻の表面や蝶番を確認するため、画像の走査方向をかえるテストを行った。画像を取得するためのしきい値の変更などは加えず、あくまでも走査方向をかえることによって、どのように画像が変わるか試験を行った。

まず、Fig. 6 に示したとおり、はじめに走査方向をスラブコアに対して、水平に取得した (X線CTスキャンの中にスラブコアを立てて画像を取得)。この場合、スラブコアの厚さが 2.5 cm であるため、取得画像数は、50 スライスとなる。これに対して、スラブコアを横向きにおいて、画像を取得した (Fig. 7)。

この場合、スラブコアの 8 cm の縦長となるため、スライス数は、160 枚となり、スラブコアを立てた場合の 3 倍近い画素数が取得できる。同じスラブコアで比較した場合の走査方向の違いを表した結果が、Fig. 8 である。

スラブコアを横にした場合には、偽像を伴わずに内部構造を測定できたが、縦にした場合には、リングアーティファクト (Ring Artifact) という同心円の疑像が表れてしまうことが分かった。スラブコアを横置きにした場合には、円

に近いことから、X線の発信機と受信機からのX線照射の距離が変わらず、スムーズに画像が取得できる（X線CTが人間の内部構造を確認するために作成されたことに由来する）。一方、縦においた場合は、スラブコアの角の部分が際立つため、中心と角との画像の補正がうまくいかず、同心円のリングの二次画像が表れてしまう。これらのテストの結果、よりよいCT画像を取得するためには、コアは横向きの方が適していることが分かった。

また、スラブコアではなくて、化石自体を鑑定した場合にも同様のアーティファクトが現れる（Fig. 9）。ルディスト化石を横向きに置くと、メタルアーティファクト（直線

状のややぼやけた像）が現れる。これは、化石の置き方のみではなく、化石中に含まれる鉱物（カルサイト？）により、ビームハードニング現象が現れてしまっているようである。アーティファクトについては、以下のウェブサイト詳しく解説されている（https://white-rabbit.jp/contents/XRayCT/CT_04artifact.html（cited 2018/06/21））。

4. 技術の進展に伴う“デジタルコア”の重要性

X線CTスキャンは、ルディストを含むコアの内部構造を知る上で、非常に有用なツールであることが分かった。ただし、よりよい画像を取得するためには、取得の工夫が

Fig. 9 (a) Scanning of rudist fossil. (b) X-ray CT image photo of rudist fossil with “Artifacts”

Fig. 10 (a) X-ray CT photo. (b) 3D modeling view

必要である。また、医療用のX線CTは、走査間隔が0.5 mm/1 sliceであり、これ以上の細かい画像を捉えることはできない。さらなる詳細な画像を取得するためには、工業用X線CTを利用するのがよいと考えられる。今回の例は、石油探鉱において一般的に用いられている貯留岩性状把握を目的としたX線CTスキャンではなく、X線CTスキャンの使用方法的発想を転換させたものである。

X線CT画像は、あくまでも二次元の画像の組み合わせであり、これ自体で三次元イメージをつかむことは難しい。三次元イメージをもつためには、3Dモデリングが必要である。現在は、PCの能力の発達により、数多くの会社で3Dモデリングソフトが発売されている。今後のスタディとして、今回取得したX線CT断面を3Dモデル化して、科レベル以上分類群の定義を試みる。医療用CTに付属する3Dモデルソフトで試験的に画像を加工したものが、Fig. 10である。

今後は、本スタディのようなルディストの古生物学的な検討(Digital Paleontology)と、堆積学、化学層序などの分野を統合的に、多角的に貯留層を検討することで、貯留岩堆積場を理解できると考えている。そのためには、コアの連続的なX線CTスキャンの実施とともに、酸素・炭素同位体比、元素組成(粘土鉱物など)の測定などが重要な要素になってくる。

X線CTスキャン画像によるデジタルコアは、ますます、重要性を増してくると考えている。コア自体を保存することに加え、コア取得後にX線CTスキャンを取得し、デジタルコアとして保存することが重要である。デジタルコアとして保管されていれば、将来的には、AIによるルディストの同定や堆積環境の推定も可能と考える。

謝 辞

講演、本稿の公表を許可して下さったADNOC Offshore社、また、X線CT画像取得をサポートしていたJOGMEC土屋氏、村上氏に謝意を申し上げます。

SI 単位換算係数

$$\text{bbl} \times 1.589874 \text{ E} - 01 = \text{m}^3$$

引 用 文 献

- Al-Zabbi, M., Taher A., Azzam I. and Witte J., 2010 : Geological Overview of the Middle Cretaceous Mishrif Formation in Abu Dhabi, SPE 137894.
- Kojima, K., Yamanaka, M., Taniwaki, T., Amo, M. and Chiyonobu, S., 2017 : Evaluation of Late Cretaceous Cenomanian Petroleum System in Offshore Abu Dhabi with Geochemical Analysis, SPE 188289-MS
- Molineux, A., Scott R.W., Ketcham R.A. and Maisano J.A., 2007 : Rudist taxonomy using X-ray computed tomography, *Paleontologia Electronica*, 10:13.
- 根尾 定文, 1987 : アブダビにおける Mishrif 層礫性石灰岩の堆積相解析の実例について, *石技誌*, 52(1), 88-98
- Neo, S., 1996 : The structural origin and relating geological framework of the upper Mishrif formation in a Mishrif Reservoir oil field Offshore Abu Dhabi., SPE-36203.
- Yamamoto, K., Obara H., Tusaka K., Tsuji, Y., Al-Farhan Z. A., Aljneibi M. M., Takayanagi, H., Kurita H., Sato, T. and Iryu Y., 2016 : A Causal Link between Paleoenvironmental Dynamics and Borehole Instability in a Cenomanian Carbonate Reservoir, Offshore Abu Dhabi, SPE-183194-MS.
- Yamanaka M., Nanjo T. and Taniwaki T., Evaluation of Rudist Depositional environment using X-ray-CT scan Late Cretaceous Cenomanian in Offshore Abu Dhabi, 2018 : SPE-192923-MS.
- Yonebayashi H., Uetani T. and Kaido H., 2018 : Higher-Resolution Monitoring of Saturation Distribution in Carbonate Plug Core by Micro Computed Tomography Technology – Proper Core Restoration For EOR Laboratory Experiments, SPE-190366-MS.
- ホワイトラビットホームページ, https://white-rabbit.jp/contents/XRayCT/CT_04artifact.html (cited 2018/06/21).