石油探鉱開発技術における堆積学的手法の進展

Recent development of sedimentological approaches in petroleum exploration and development technology

Abstract

高野 修* 荒戸裕之**

Osamu Takano* and Hiroyuki Arato**

2018年10月7日受付.

2019年11月15日受理.

* 石油資源開発(株)技術本部技術研究所
JAPEx Research Center, Technical Division,
Japan Petroleum Exploration (JAPEx), 1-2-1
Hamada, Mihama-ku, Chiba 261-0025, Japan

** 秋田大学大学院国際資源学研究科
Graduate School of International Resource
Sciences, Akita University, 1-1 Tegata
Gakuen-machi, Akita 010-8502, Japan

Corresponding author: O. Takano,
osamu.takano@japex.co.jp

This paper reviews the progress on the sedimentological approaches in the petroleum exploration and production technology of Japan during the last 25 years (1990's to 2010's). The notable progress on the sedimentological methods in the Japanese petroleum industry may include a) the introduction and application of sequence stratigraphy to actual exploration and production projects, b) the development of three-dimensional (3D) seismic geomorphology, c) an improvement of reservoir depositional models, d) the development of 3D geology/reservoir modeling, e) the basin analysis technique as an element of petroleum system, f) the siliceous rock petrography for shale development, and g) the methane hydrate-related researches. The sequence stratigraphic application has been accepted as an integration method of variable-scale petroleum industry data sets. The 3D seismic geomorphological approach resulted from the integration of sequence stratigraphy and the 3D seismic technology development, and has provided valuable benefits in terms of the improvement of depositional models and reservoir distribution analysis. The recent development of 3D geology/reservoir modeling technique has been facilitated by the advancing geostatistics and 3D seismic geomorphological methods. The recent industrial trends focusing on the petroleum system and unconventional hydrocarbon development have promoted the basin analysis technique and shale/gas-hydrate researches.

Keywords: petroleum exploration and development, sedimentology, sequence stratigraphy, seismic geomorphology, depositional model, reservoir modeling, petroleum system, sedimentary basin analysis, unconventional hydrocarbon exploration

はじめに

本論は、日本地質学会の100周年から125周年の間に当たる1992年頃から2017年頃の間、本邦での「石油探鉱開発技術における堆積学関連手法の進展」を概観することを主眼とする。この期間における堆積学に関連した石油探鉱開発技術の進展で特筆できるものとしては、石油探鉱開発技術における一大革命とも言えるシーケンス層序学の概念が世に出された後の受け入れと個別解析事例への適用(個々の油田への実適用など)、三次元地震探査技術の進展に伴う震探地形学(seismic geomorphology)の概念の進展、貯留層堆積モデルの精密化、三次元地質/貯留層モデリング技術の進展、石油システム要素としての貯留層・根源岩・堆積盆解析技術の進展、珪質岩研究の進展、およびメタンハイドレート開発に伴う堆積学研究の進展をあげることができる。これらの進展は、この25年間に実施された個々の石油探鉱開発プロジェクトのほか、この間に本格化した非在来型炭化水素開発

によっても推進されたと言える。

以下、本論では上記の各進展項目について概観する。

シーケンス層序学の導入と適用

1. シーケンス層序学の導入

1) 出発点としての「震探層序学」 今日では地質学の一分野としての地位を確立し、層序学、堆積学はもとより、地域地質や堆積盆地解析における基本的枠組み構築の概念を提供するシーケンス層序学(sequence stratigraphy)は、もともと石油探鉱技術から発展した学問分野である。

1940年代までに、石油探査の基本的なツールとして用いられるようになった地震探査法(seismic survey)は、1970年代ごろには地下の地質構造を把握するためだけでなく、岩相や石油・天然ガスの賦存を直接推定するツールとして多様な使途が模索されはじめていた。その活用法のひとつとして、エクソン・プロダクション・リサーチ(Exxon Production Research Company, 以下EPR)の技術者が研究と応用

を進めていたのが震探層序学(seismic stratigraphy)であった。当時、石油探鉱の対象域が陸域から海洋に拡大し、このころから大陸棚域を主体とする海洋の地震探査データが精力的に収録され始めていた。Exxon が収録した膨大な海洋地震探査データを踏まえて体系化された震探層序学は、Payton ed.(1977)の出版によって世界中に伝搬したが、同時に地震探査記録断面を層序学的に解釈する手法のあり方に対する疑義が頻出し、この段階では、おおかたの地質学者、石油地質技術者は純然たる地質学とは一線を画す手法と受け止めていた。

2) シーケンス層序学の成立 1980年代、EPRの技術者たちは多出した疑義や批判を震探層序学に取り込み、層序学、堆積学を統合する地質学的な枠組みとしての新しく強化された体系を構築していった。EPRで中心的役割を果たしたP. R. Vailは、1985年ごろから学会発表等でその新しい体系を「sequence stratigraphy」とよびはじめ、1987年には論文上でもこの名称を用いるようになったという。Sequence stratigraphyの体系は、1988年に出版されたWilgus et al., eds.(1988)によって広く世界に紹介され、本邦国内においても堆積学者の強い興味を引くに至った。その後、sequence stratigraphyは3もしくは4世代もの概念の進展を続け、現在に至っている(Weimer and Posamentier eds., 1993; Harris et al. eds., 1999; Posamentier and Allen, 1999; Catuneanu, 2006; Embry, 2009など)。

3) P. R. Vailの来日 シーケンス層序学の成立からまもない1990年2月、当時の石油公団が開催した新技術講座「地震地層学の基礎と応用」の講師として、米国ライス大学教授(当時)のP. R. Vailが来日した。このセミナーに参加した石油探鉱技術者は、地震探査記録断面を地質断面のごとく取り扱い、そこから堆積学的な解釈を導き出すシーケンス層序学の体系に少なからず衝撃を受けたが、同時に、そのような手法が地質学的に許されるのか判断しかねていた。一方で、堆積相解析や古環境解析結果を堆積盆地規模へとアップスケールするための枠組みにシーケンス層序学が適していることを理解した堆積学研究者たちは、地震探査記録断面の取り扱いには慣れていた地質・物探技術者との協働こそが新たな展開を導くと見極めをつけ動きはじめていた。

4) 国内学会の動向 本邦国内で最も早くシーケンス層序学に関する勉強会を独自に開催したのは、筑波地層の会であろう。同会は1990年秋から国内の石油開発各企業に呼びかけを行い、1991年1月、工業技術院地質調査所の後援のもとに特別セミナー「Sequence Stratigraphy: 新しいパラダイムを求めて」を開催した。このシンポジウムが、そののちの石油開発企業の活動や研究者と技術者による共同研究のきっかけになっていった。

堆積学研究会(現日本堆積学会)も、シーケンス層序学の成立に素早く、かつ、積極的に反応した学会のひとつである。P. R. Vailの来日セミナーから約4ヵ月後の同年6月に開催されたワークショップ「堆積相と堆積盆解析」には、A. D. Miall(当時、カナダトロント大学教授)のシーケンス層序学批判を聴講しようと多くの石油探鉱技術者が駆けつけた。さ

らに、同年12月、翌1991年11月、翌々1992年11月の各秋季研究集会のシンポジウム等では、早くもシーケンス層序学を取り上げた数多くの講演が行われた。

これらの活動と並行して石油技術協会は、1992年9月、探鉱技術委員会の砂岩、炭酸塩岩、物探の3分科会共同で、ミニシンポジウム「石油探鉱におけるシーケンス層序学の可能性と課題」を開催した。この成功を足がかりに、翌年6月には第58回春季講演会の地質・探鉱部門シンポジウムとして「シーケンス層序学—その可能性を求めて—」が開催された。これによってシーケンス層序学は、国内の石油開発各社においても石油探鉱上不可欠な技術体系として不動の地位を認められるようになる。

また、石油技術協会が創立60周年記念に出版した「最近の我が国の石油開発」には、シーケンス層序学の概念と手法が「堆積学的評価技術」として紹介された(小椋ほか, 1993)。

日本地質学会は、1994年3月、第101年学術大会の討論会として「新しい地層観を目指して: シーケンス層序学は地質学に何をもたらすか」を開催した。その講演内容は、地質学論集第45号「シーケンス層序学—新しい地層観を目指して—」(斎藤ほか編, 1995)としてまとめられた。このなかには、シーケンス層序学の石油探鉱への適用に関する総説(荒戸・高野, 1995)や国内の石油探鉱データを用いたケーススタディ(荒戸・保柳, 1995; 岩田, 1995)も含まれていた。

5) 産業界・官界の動向 1990年代当時、石油公団(現: 石油天然ガス・金属鉱物資源機構)技術部は、職員の技術力向上を目的とした開発技術動向調査を実施していた。なかでも1992~1994年の調査では、おもに北米のシーケンス層序学・堆積学の著名な研究者が招聘された(Table 1)。石油公団に報告された彼らの調査結果は広く国内の石油開発企業に公開され、とくにその報告会は毎回満席となる盛況振りであった。このような取り組みが石油探鉱業界の技術者や学界の研究者を巻き込んで実施されたことで、結果的に我が国全体のシーケンス層序学「力」の向上につながった。

なお、シーケンス層序学が本邦に導入された頃の動向や経緯については、荒戸(2018)に詳しくまとめられている。

2. 実フィールドへの適用事例

上記のシーケンス層序学の導入後に行われた多くの国内外石油探鉱開発プロジェクトにおいて、シーケンス層序学の概念が積極的に適用された。本邦国内案件もしくは本邦の石油会社が携わった海外案件で、石油地質学データを用いたシーケンス層序学的解析が本格的に導入された事例としては、石狩平野(斎藤・小椋, 1994)、中東下部白亜系炭酸塩岩(柳本ほか, 1994; 白倉ほか, 2006; 藤田・ハニープヒンディ, 2012)、新潟平野(荒戸ほか, 1994; 荒戸・保柳, 1995; Arato, 1999)、常磐沖(岩田, 1995)、北西九州含炭堆積盆地(岩田・亀尾, 2001)、新潟堆積盆地蒲原地域(高野ほか, 2001)、メタンハイドレート開発にかかる東海沖~熊野灘(高野ほか, 2009, 2010)、新潟堆積盆地頸城地域(高野, 2011)、三陸沖(Takano and Tsuji, 2017)などを挙げることができる。

これらの様々な堆積盆の解析事例を通じて、物理検層や地震探査断面などの石油地質学的データ上での堆積シーケンス

Table 1. Table showing the trend surveys on “sequence stratigraphy”, conducted in Japan during the early 1990's. After Arato (2018).

Year	Invited researcher	Course name	Date
1992	Andrew D. Miall (Prof., Univ. of Toronto)	Sequence Stratigraphy: Current Status, Issues and Applications	March 16-17, 1993
	D.J.P. Swift (Prof., Old Dominion Univ.), W.E. Galloway (Prof., Univ. of Texas at Austin) A.W. Niedoroda (Woodward-Clide Consultants)	<ul style="list-style-type: none"> • Facies Models in Sequence Stratigraphy • Depositional Systems and Sequences in the Exploration for Sandstone Reservoirs and Stratigraphic Traps • Numerical Seismic Stratigraphy Modeling 	March 23-26, 1993 Including core workshop and field trip
1993	Dag Nummedal (Prof., Louisiana State Univ.)	Principles and Applications of Siliciclastic Sequence Stratigraphy	December 6-7, 1993
	D.J.P. Swift (Prof., Old Dominion Univ.) A. W. Niedoroda (Woodward-Clide Consultants)	Modeling Sequence Stratigraphy	January 24-25, 1994
1994	Dag Nummedal (Prof., Louisiana State Univ.)	Sequence Architecture and Depositional Systems of the Transgressive Systems Tract	January 12-13, 1995

の認定手法についてのノウハウが蓄積されたと同時に、堆積シーケンス形態に関して、エクソンモデルと異なる様々な多様性がありうるということが認識された(荒戸・保柳, 1995; 高野 2001 など)。

三次元震探地形学の進展

1. 震探地形学とは

1990年代から2000年代にかけてのシーケンス層序学の導入と適用の進行と並行して、三次元地震探査技術や地下情報の三次元可視化技術の著しい進展が見られた。これにより、過去および現在の個々の堆積体の三次元形態が抽出可能になり、河川、開析谷、浅海の砂岩体や、炭酸塩岩ビルドアップ、海底扇状地、氷河削痕などが容易に再現されるようになってきている(Davies et al. eds., 2004; Posamentier and Walker, 2006 など)。これは、従来「推定」や「解釈」を行っていた過去の堆積システムの分布・形態を一挙に現実に近い形で表示するものであるため、堆積学のみならず石油地質学的にも非常に大きなインパクトを与え、以降の多くの石油探鉱開発プロジェクトに適用されるようになってきている。このような「三次元地震探査データを用いた古地形形態、堆積形態の分類学もしくは解析技術、およびこれから派生する堆積プロセスや石油地質学的スタディ」に対して、Posamentier and Kolla(2003)やPosamentier(2004)、Posamentier et al.(2007)は、「震探地形学(seismic geomorphology)」という名称を与えている。

震探地形学解析の一般的手順としては、まず、対象地域の a) 基礎的シーケンス層序学的解析を行って、堆積システム概要や編年層序学的枠組みを明らかにした上で、b) 三次元地震探査データ上で、解析対象となる堆積体の三次元表示を行う。堆積体の抽出と表示には様々な手法があり、スライス表示(slicing)、サーフェス(面)表示(surface attribute display)、振幅不透明度調整画像解析(amplitude opacity ren-

dering)、ボリューム解析(volume analysis)、3D 震探相マッピング(3D seismic facies mapping)などが主な手法として用いられている(Posamentier, 2004; Posamentier et al., 2007; Fig. 1)。スライス表示は、三次元データキューブを水平にスライスするか、あるいはある層準面に平行に移動して2次元面を切り出して属性を表示させるもので、チャネル構造の抽出などに適している。サーフェス(面)表示は、ある層準面に対して様々な属性表示をするもので、堆積形状の表示に適している。振幅不透明度調整画像解析は、砂岩など表示したい物性を示す振幅値のみを残して他を透明にする表示法を用いるもので、表示対象の三次元形態の抽出に適している。以上のような対象の三次元表示に続いては、c) 抽出表示された堆積体に対して堆積学的解釈(堆積要素や堆積環境の解釈)が行われ、解釈結果は堆積形態・分布解析や、堆積過程解析、定量的貯留層性状・特性解析、定量的モデリングなどに利用される(Posamentier, 2004; 高野, 2006; Ethridge and Schumm, 2007; Posamentier et al., 2007; Wood, 2007; 高野・西村, 2009 など)。

近年の石油探鉱開発においては、プロジェクトをデータ評価段階から試掘・探掘段階へと進めるためには三次元地震探査データの取得が必須になりつつある。これと同時に、三次元地震探査データの震探地形学解析も、より精密な坑井位置決定や埋蔵量算定の上で、必須項目になっている。

2. 実フィールドへの適用事例

本邦あるいは海外石油探鉱開発プロジェクトにおいて本邦石油技術者が震探地形学解析に取り組んだ事例としては、オーストラリア Eromanga Basin(Nakanishi et al., 2003; 中西, 2006)、東海沖～熊野灘(佐伯ほか, 2006; 高野・西村, 2009; Noguchi et al., 2011)、新潟堆積盆岩船沖～北蒲原(齊藤ほか, 2008)、三陸沖(Takano and Tsuji, 2017)などが挙げられる。

Fig. 1. Representative methods of seismic geomorphological analysis. Seismic geomorphology can be defined as the study and analytical methods of paleo-topography, sediment morphology and depositional styles, using 3D seismic survey data. The representative methods of the seismic geomorphological analysis may include surface attribute display, slicing, amplitude opacity rendering and 3D seismic facies mapping. Modified after Takano (2018). Data images from the METI seismic survey “Sanriku-oki Hokusei 3D” and “Sanriku-oki Toho 3D” are used.

貯留層堆積モデル精度の向上

1970年代から80年代にかけて発展した堆積相モデル (facies model) や堆積システム (depositional system) の概念は、これらの発展と同時に、国内外問わず、石油探鉱開発プロジェクトにも積極的に適用されてきた(阿部, 1978; Scholle and Spearing, 1982; Moslow, 1984; 秋葉ほか, 1987など)。その後、シーケンス層序学や三次元地震探査技術による三次元可視化技術や震探地形学的手法も加わることで、1990年代以降、貯留層分布・性状解析技術が格段に向上し、構築される貯留層堆積モデルの精度も一段と高くなっている(Weimer and Posamentier, 1993; Bridge, 2006; Weimer and Slatt, 2007など)。1990年代以降、本邦石油技術者が関与して貯留層堆積モデルを構築した事例のうち、河川システムを主体とするものとして、南米東ベネズエラ堆積盆(滝本ほか, 2001)、中東カフジ油田(内村, 2001)、オーストラリア内陸堆積盆(中西, 2006)、カナダのオイルサンド鉱床(高橋ほか, 2006)の事例をあげることができる。これらの事例では、コア堆積相、坑井検層解析結果、三次元地震探査データの震探地形学解析結果、現世アナログを統合的に駆使することにより、複雑な河川システムの堆積モデルを構築し、砂岩貯留層の精密分布解析を行っている。一方、海底扇状地タービダイト砂岩貯留層モデル構築事例として、齊藤ほか(2008)による新潟堆積盆北蒲原地域～岩船沖油田の例やNoguchi et al. (2011)による渥美沖のメタンハイドレート貯留層の例が挙げられる。この事例では、坑井データ解析と震探地形学解析により、チャネルと舌状体の識別や、チャネル内網状パターンの認識など、海底扇状地タービダイト砂岩貯留層の精密堆積モデルを検討している。

これらの解析は、単に個々の案件における精密堆積モデルの構築にとどまらず、河川システムや海底扇状地システムの多様性も明らかにすることになり、従来の基本堆積相・堆積システムモデルの高精度化にも貢献している。

三次元地質・貯留層モデリング技術の進展

1. 石油業界における三次元地質・貯留層モデリング

石油探鉱開発プロジェクトでは、石油・天然ガス鉱床の発見成功確率の向上のため、複雑な貯留層分布・トラップ条件の油・ガス層ターゲットを正確に掘削することが求められる。加えて、石油生成・移動・集積評価や、鉱量算定と生産挙動シミュレーションのための精緻な性状分布モデルが求められる。このため、石油探鉱開発業界では、1990年代以降、地質構造モデリング、堆積盆石油システムモデリング、層序モデリング、貯留層モデリングなどの三次元地質モデリング技術の開発が継続的に行われてきた(Fig. 2; Harbaugh et al. eds., 1999; Lister, 2004; Bentley and Smith, 2008; Howell et al., 2008; 高野・辻, 2013など)。これらのうち、堆積学に緊密に関係するのは、層序モデリングと貯留層モデリングであり、1990年代後半以降、本邦においても本格的な導入が試みられた。

層序モデリングは、堆積シーケンスなどの層序ユニットや堆積システムが、どのような堆積プロセスを経て、どのように累重して堆積盆埋積様式あるいは累重様式を呈しているかをモデリングするものである(江川・小島, 2016)。一方の貯留層モデリングは、貯留層堆積体オーダーの岩相、堆積相の分布形態や、孔隙率、浸透率などの性状の分布をモデリングするものであり、試掘地点選定のための基準データとして、あるいは油田開発段階における石油・天然ガスの生産状況シミュレーション用地質データとして用いられる。Fig. 2に、貯留層オーダーの堆積体や性状のモデリングを主目的とした三次元貯留層モデリングの標準的作業手順(ワークフロー)を示す。貯留層モデリングの最終目的は、既存データ(物理探査、坑井、露頭データおよび地質情報)をもとに貯留層オーダーの堆積物・性状分布を三次元数値モデル化することであり、数値モデルの構築においては、地震探査データや坑井データに基づく地球統計学的手法が多用される。この地球統

Fig. 2. Variations of representative 3D geologic modeling in petroleum exploration and development, and a basic workflow for 3D reservoir modeling in petroleum industry. The basic data include geologic information, seismic survey data and well data. The main part of the workflow comprises 3D geologic framework modeling as the earlier stage task and geostatistical property modeling as the later stage task. Modified after Takano and Tsuji (2013).

計学的手法によるモデリング自体は地質学的な概念が無くとも構築が可能であるものの(ピクセルベース二点間法など), あらかじめわかりうる地質学的・堆積学的事項を確定論的に設定し, それをフレームワークとして, あるいは地質規制パラメータとして取り込んだ地球統計学的数値モデリングが行われることが実情にあったモデリングのためには望ましいとされる(高野・辻, 2013; Fig. 2). この点において, 既存地

質データ, 坑井データ, 地震探査データの堆積学的・シーケンス層序学的解析による性状分布解析や概念堆積モデルの構築と地質規制としてのモデリング上の設定が非常に重要な役割を果たすことになる。加えて, 地質もしくは堆積学的規制パラメータを有効に利用するための地球統計学的シミュレーション手法やアルゴリズム自体の開発も, 1990年代以降, 積極的に進められて来ている(Fig. 2)。堆積学要素を取り入れ

Fig. 3. Schematic illustration showing principle elements of petroleum system and their sedimentological factors (black rectangle).

た地球統計学的手法として、舌状体やチャネルなどの堆積オブジェクトを用いる「オブジェクトベースモデリング」、ピクセルベースの訓練像を用いる「多点法モデリング」、堆積面の積み重なりシミュレーションを基本とする「サーフェースベースモデリング」、演繹的な堆積プロセス再現を基本とする「堆積プロセスモデルベースモデリング」などがあげられる (Fig. 2).

2. 本邦における適用事例

1990年代の中後半にかけて、旧石油公団石油開発技術センターが層序モデリングと演繹的堆積シミュレーションの組み合わせモデルの開発を試み、炭酸塩岩層序モデリングに成功している (松井ほか, 1998). 2010年代には、東海沖の堆積同時変形小堆積盆において、堆積プロセスモデルをベースとした演繹的堆積シミュレーションが行われている (Egawa et al., 2013).

貯留層モデリングに関して本邦の石油開発関係者が携わった事例としては、メキシコのココンテバック堆積盆の事例 (山本ほか, 2002; Abbaszadeh et al., 2003), カナダにおけるオイルサンドの貯留層モデリングの例 (高橋ほか, 2006; 高野・辻, 2013; 辻ほか, 2013), 中東白亜系の炭酸塩岩の貯留層モデリングの例 (白倉ほか, 2006; 藤田・ハニー・ブヒンディ, 2012) などが挙げられる.

石油システム要素としての 貯留岩・根源岩・堆積盆解析技術の進展

石油探鉱開発業界では、1990年代に「石油システム (petroleum system)」の概念 (Magoon and Dow, 1994) が進展し、根源岩や貯留岩の堆積から、埋没、熟成、炭化水素の生成、移動、集積までを、一連の石油生成プロセスとして堆積盆の枠組みの中で捉えることが主流となった. 既存の学問分野的視点からすれば、石油システムの概念は有機地球化学を主体として、これに堆積盆にかかる堆積学、構造地質学などの複数の地質学関連分野が複合した考え方であると捉えることができる. このうち、堆積学に関わる要素としては、堆積盆タイプ区分 (リフト盆地、前縁盆地、前弧盆地、背弧盆地、内

陸サグ盆地など)、根源岩の堆積環境・分布・性状、貯留層の堆積環境・分布・性状、埋没履歴と性状変化などが、石油システム構成要素となっており (Fig. 3), これら要素の正確な認識が石油システムの統一解析の重要なポイントとなっている (Allen and Allen, 1990; Magoon and Dow, 1994 など). 各要素は密接に関連しあっており、例えばリフト盆地の場合、リフト底部に湖成もしくは挟炭根源岩が堆積し、深部被熱熟成により炭化水素を生成し、浅部ポストリフト貯留層に移動集積する石油システムを構成するという特徴を示す場合が多い.

本邦においても、1990年代以降、これらの構成要素を石油システムの枠組みの中で統一的に評価することが主流となってきており、評価事例のいくつかは、石油技術協会のシンポジウムポストプリント特集号としてまとめられている. 石油システム要素の統一的な解析評価を行った例としては、常磐沖堆積盆の例 (岩田ほか, 2002), インドネシアバディガス田の例 (木原ほか, 2007), 西アフリカの例 (井上ほか, 2007), ブラジルカンボス堆積盆の例 (佐々木ほか, 2007) などがあげられる.

非在来型炭化水素資源開発における堆積学の進展

1. 珪質岩研究の進展

1990年代後半以降、シェールガス・オイルやメタンハイドレートなどの非在来型炭化水素開発が盛んに行われるようになってきている (Collet et al., 2009; 伊原, 2012; Shah et al., 2017 など). 非在来型の筆頭を占めるシェールガス・オイルの開発は、従来根源岩として捉えられていた頁岩 (シェール) 層に坑井を掘削し、人工フラクチャーを作ってその隙間に油ガスを染み出させ、回収・生産するものである. シェールガス・オイル技術の進展に伴って、欧米では泥岩の堆積学研究が盛んに行われるようになった (Slatt et al., 2011; Slatt and Rodriguez, 2012 など). 本邦においてシェール開発のターゲットとなる頁岩は珪藻起源物質を主体とする珪質岩タイプであることから (例えば、秋田地域の女川層、道北地域の増幌層・稚内層など)、本邦においても1990年代初

頭から珪質岩の堆積学研究が継続的に行われている(Tada, 1991; 辻ほか, 1991; 辻・横井, 1994; 早稲田ほか, 1995; 渡部ほか, 1995; Tsuji et al., 2011 など)。Tada(1991), 多田(1995)や渡部ほか(1995)では女川層(相)が後期中新世における日本海の閉鎖環境に伴う珪藻の大量発生に関係し, 地形的な規制や海水準変動の規制によって根源岩性状が異なることを明らかにしている。辻・横井(1994)やTsuji et al. (2011)では, 埋没続成によるシリカ鉱物の相転移に伴う孔隙の形成による珪質岩内のトラップの成立について報告している。

2. メタンハイドレート開発に伴う堆積学研究の進展

1990年代末期以来, 本邦においてメタンハイドレート開発にかかる研究が盛んに行われるようになった。これに伴い, メタンハイドレートの貯留層分布や性状に関する堆積学的研究も継続的に行われるようになってきている(Fujii et al., 2009, 2015; Nakajima et al., 2014; Komatsu et al., 2015 など)。BSR(Bottom Simulating Reflector)の顕著な発達によりメタンハイドレートの主要濃集エリアと評価された東部南海トラフエリアでは, 坑井データおよび地震探査データを用いたメタンハイドレート貯留層砂岩の分布形状解析やモデリング研究が複数行われた(高野ほか, 2009, 2010; Noguchi et al., 2011; Egawa et al., 2013 など)。これらの研究では, 最新の技術を用いた三次元地震探査データ解析や坑井データ解析を行っているため, 本邦における堆積学研究手法の進展に大きな貢献をもたらしている。

ま と め

本論では, 日本地質学会の100周年から125周年の間に当たる1992年頃から2017年頃の間, 本邦での「石油探鉱開発技術における堆積学関連手法の進展」を概観した。この期間における堆積学に関連した石油探鉱開発技術の進展で特筆できるものとして, 以下の点をあげることができる。

- 1) 石油探鉱開発技術における一大革命とも言えるシーケンス層序学の概念が本邦に紹介され, 主要研究者による講演やセミナーが行われるとともに, 個々の石油探鉱開発プロジェクトへの実適用が行われた。
- 2) 三次元地震探査技術の進展に伴い, 震探地形学(seismic geomorphology)の概念が進展し, 三次元地震探査データの堆積学的解析ツールとして様々なプロジェクトにおいて適用が行われている。
- 3) 高精度の石油地質データ(地震探査データや坑井データ)を用いた解析事例の増加により, 1970~1980年代に欧米研究者主体で構築された各種堆積システム(堆積環境)の主要貯留層堆積モデルの精密化・高度化が進んだ。
- 4) 三次元地質/貯留層モデリング技術が進展し, より現実に即したモデリングを行うために, 堆積学的な要素を取り入れる手法が用いられるようになった。
- 5) 石油システムの概念の進展により, 貯留層, 根源岩の分布性状解析を, 堆積盆の枠組みの中の位置付けを念頭に置いて捉えるようになった。

6) 非在来型炭化水素開発の進展により, 本邦におけるシェール開発の対象となる珪質岩について, 堆積環境と根源岩性状との関連や, 続成鉱物相転移による孔隙率変化などの研究が進展した。

7) 本邦近海部における新資源と目されるメタンハイドレート開発研究に伴って, 貯留層分布や性状に関する堆積学的研究も精力的に行われるようになってきている。

謝 辞

本論をまとめるあたり, 特集号世話人の方々には原稿執筆の機会を与えていただいた。国際石油開発帝石(株)(IN-PEX)には, 学会・セミナー出席報告等の社内資料を閲覧させていただいた。資源エネルギー庁, (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC), 石油資源開発(株)(JAPEX)には, 資料の公表許可をいただいた。2名の査読者の方々には多くの建設的意見を頂戴し, 原稿の完成に大きく寄与した。以上の方々に深く感謝申し上げます。

文 献

- Abbaszadeh, M., Takano, O., Yamamoto, H., Shimamoto, T., Yazawa, N., Murguia, F. S., ..., Rodriguez, F., 2003, Integrated geostatistical reservoir characterization of turbidite sandstone deposits in Chicotepec Basin, Gulf of Mexico. SPE 84052, doi: 10.2118/84052-MS.
- 阿部正名, 1978, 南阿賀油層砂岩の堆積機構について。石技誌, **43**, 398-406. [Abe, M., 1978, The sedimentary history of the Minami-Aga Reservoir Sandstones. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **43**, 398-406.]
- 秋葉文雄・佐々木栄一・佐賀 肇, 1987, 北蒲原平野紫雲寺ガス田における椎谷・西山階の砂岩層の発達過程について。石技誌, **52**, 48-57. [Akiba, F., Sasaki, E. and Saga, H., 1987, Note on sandstone development of the Shiya-Nishiyama Stages around the Shiunji Gas Field, Kitakanbara Plain. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **52**, 48-57.]
- Allen, P. A. and Allen, J. R. 1990, *Basin Analysis: Principles and Applications*. Blackwell, Oxford, 251p.
- Arato, H., 1999, A facies model for Quaternary hierarchical depositional sequences in the Niigata Basin, central Japan: An approach to prediction of petroleum reservoir distribution in back-arc basins. *J. Japan Petrol. Inst.*, **42**, 1-11.
- 荒戸裕之, 2018, シーケンス層序学事始めの頃: P. R. Vail 教授来日で加速したシーケンス層序学の普及と浸透。堆積学研究, **77**, 17-28. [Arato, H., 2018, The years of beginning on sequence stratigraphy: dissemination and permeation of sequence stratigraphy accelerated by Prof. P. R. Vail's visit to Japan. *J. Sediment. Soc. Japan*, **77**, 17-28.]
- 荒戸裕之・保柳康一, 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, **45**, 118-139. [Arato, H. and Hoyanagi, K., 1995, Three types of 4th-order depositional sequence model in the Niigata sedimentary basin. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **45**, 118-139.]
- 荒戸裕之・亀尾浩司・保柳康一, 1994, 背弧堆積盆地におけるシーケンス解析: 新潟県蒲原平野の例。石油技協誌, **59**, 18-29. [Arato, H., Kameo, K. and Hoyanagi, K., 1994, Sequence stratigraphic analysis of a back-arc sedimentary basin in Kambara area, Niigata, central Japan. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **59**, 18-29.]
- 荒戸裕之・高野 修, 1995, 石油・天然ガスの探鉱におけるシーケンス層序学の意義。地質学論集, **45**, 43-60. [Arato, H. and Takano, O., 1995, Significance of sequence stratigraphy in petro-

- leum exploration. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **45**, 43–60.]
- Bentley, M. and Smith, S., 2008, Scenario-based reservoir modeling: the need for more determinism and less anchoring. In Robinson, A., Griffith, P., Price, S., Hegre, J. and Muggeridge, A., eds., *The Future of Geological Modelling in Hydrocarbon Development*, Geol. Soc. London Spec. Publ., **309**, 145–159.
- Bridge, J. S., 2006, Fluvial facies models: recent developments. In Posamentier, H. W. and Walker, R. G., eds., *Facies Models Revisited*, SEPM (Soc. Sediment. Geol.) Spec. Publ., **84**, 85–170.
- Catuneanu, O., 2006, *Principles of Sequence Stratigraphy*. Elsevier, 375p.
- Collet, T. S., Johnson, A. H., Knapp, C. C. and Boswell, R., 2009, Natural gas hydrates: A review. In Collet, T., Johnson, A., Knapp, C. C. and Boswell, R., eds., *Natural Gas Hydrates-Energy Resource Potential and Associated Hazards*, Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., **89**, 146–219.
- Davies, R. J., Cartwright, J. A., Stewart, S. A., Lappin, M. and Underhill, J. R., eds., 2004, *3D Seismic Technology: Application to the Exploration of Sedimentary Basins*. Geol. Soc. London Mem., **29**, 355p.
- Egawa, K., Furukawa, T., Saeki, T., Suzuki, K. and Narita, H., 2013, Three-dimensional paleomorphologic reconstruction and turbidite distribution prediction revealing a Pleistocene confined basin system in the northeast Nankai Trough area. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, **97**, 781–798.
- 江川浩輔・小島啓太郎, 2016, タービダイト堆積前進モデリングの動向と探鉱分野における応用. 石技誌, **81**, 46–55. [Egawa, K. and Kojima, K., 2016, Turbidite forward modeling: Research trends and applications for exploration. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **81**, 46–55.]
- Embry, A. F., 2009, *Practical Sequence Stratigraphy*. Canadian Soc. Petrol. Geol., 81p.
- Ethridge, F. G. and Schumm, S. A., 2007, Fluvial seismic geomorphology: a view from the surface. In Davies, R. J., Posamentier, H. W., Wood, L. J. and Cartwright, J. A., eds., *Seismic Geomorphology: Applications to Hydrocarbon Exploration and Production*, Geol. Soc. London Spec. Publ., **277**, 205–222.
- Fujii, T., Namikawa, T., Okui, T., Kawasaki, M., Ochiai, K., Nakamizu, M.,...Tsuji, Y., 2009, Methane hydrate occurrence and saturation confirmed from core samples, eastern Nankai Trough, Japan. In Collet, T., Johnson, A., Knapp, C. C. and Boswell, R., eds., *Natural Gas Hydrates-Energy Resource Potential and Associated Hazards*, Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., **89**, 385–400.
- Fujii, T., Suzuki, K., Takayama, T., Tamaki, M., Komatsu, Y., Konno, Y.,...Nagao, J., 2015, Geological setting and characterization of a methane hydrate reservoir distributed at the first offshore production test site on the Daini-Atsumi Knoll in the eastern Nankai Trough, Japan. *Mar. Petrol. Geol.*, **66**, 310–322.
- 藤田 望・ハニー プヒンディ, 2012, 中東白亜系炭酸塩岩貯留層の Petrophysics スタディを基にした地質モデルの構築例. 石油技協誌, **77**, 72–81. [Fujita, N. and Hani Bu-Hindi, 2012, Innovative 3D modeling approach in Lower Cretaceous carbonate reservoirs, Middle East. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **77**, 72–81.]
- Harbaugh, J. W., Watney, W. L., Rankey, E. C., Slingerland, R., Goldstein, R. H. and Franseen, E. K., eds., 1999, *Numerical Experiments in Stratigraphy: Recent Advances in Stratigraphic and Sedimentologic Computer Simulations*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ., **62**, 362p.
- Harris, P. M., Saller, A. H. and Toni Simo, J. A., eds., 1999, *Advances in Carbonate Sequence Stratigraphy: Application to Reservoirs, Outcrops, and Models*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ., **63**, 421p.
- Howell, J., Vassel, A. and Aune, T., 2008, Modelling of dipping clinoform barriers within deltaic outcrop analogues from the Cretaceous Western Interior Basin, USA. In Robinson, A., Griffith, P., Price, S., Hegre, J. and Muggeridge, A., eds., *The Future of Geological Modelling in Hydrocarbon Development*, Geol. Soc. London Spec. Publ., **309**, 99–121.
- 伊原 賢, 2012, シェールガス革命とは何か: エネルギー救世主が未来を変える. 東洋経済新報社, 184p. [Ihara, M., 2012, *Shale Gas Revolution*. Toyo Keizai Inc., 184p.]
- 井上久隆・中東秀樹・工藤和男, 2007, 西アフリカ大水深における探鉱成果に基づく考察: ガボン・アンゴラのタービダイト砂岩を. 石技誌, **72**, 51–64. [Inoue, H., Nakahigashi, H. and Kudo, K., 2007, A view for further exploration potential and its key technologies based on exploration results of deep water offshore West Africa: To explore turbidite sand reservoir in offshore Gabon and Angola. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **72**, 51–64.]
- 岩田尊夫, 1995, 常磐沖堆積盆における下部中新統のシーケンス層序解析. 地質学論集, **45**, 223–237. [Iwata, T., 1995, Sequence stratigraphic analysis of Lower Miocene strata in the Offshore Joban Basin, Northeast Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **45**, 223–237.]
- 岩田尊夫・亀尾浩司, 2001, 北西九州の含炭堆積盆地におけるシーケンス層序と堆積過程. 石技誌, **66**, 278–291. [Iwata, T. and Kameo, K., 2001, Sequence stratigraphy and sedimentary process of coal-bearing sedimentary basins in northwest Kyushu. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **66**, 278–291.]
- 岩田尊夫・平井明夫・稲葉士誌典・平野真史, 2002, 常磐沖堆積盆における石油システム. 石技誌, **67**, 62–71. [Iwata, T., Hirai, A., Inaba, T. and Hirano, M., 2002, Petroleum system in the Offshore Joban Basin, northeast Japan. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **67**, 62–71.]
- 木原宏一・名倉 弘・本田博巳, 2007, 大水深におけるジュラ系沿岸～浅海成砂岩ガス貯留層: インドネシア・アバディガス田の例. 石技誌, **72**, 65–75. [Kihara, K., Nagura, H. and Honda, H., 2007, Jurassic coastal to shallow marine sandstone reservoir in present deep water: An example from the Abadi gas field, Indonesia. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **72**, 65–75.]
- Komatsu, Y., Suzuki, K. and Fujii, T., 2015, Sedimentary facies and paleoenvironments of a gas-hydrate-bearing sediment core in the Nankai Trough, Japan. *Mar. Petrol. Geol.*, **66**, 358–367.
- Lister, D. L., 2004, Modeling fault geometry and displacement for very large networks. In Davies, R. J., Cartwright, J. A., Steward, S. A., Lappin, M. and Underhill, J. R., eds., *3D Seismic Technology: Application to the Exploration of Sedimentary Basins*. Geol. Soc. London Mem., **29**, 339–348.
- Magoon, L. B. and Dow, W. G., 1994, The petroleum system. In Magoon, L. B. and Dow, W. G. eds., *The Petroleum System: from Source to Trap*, Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., **60**, 3–24.
- 松井良一・松田文彰・今吉秋則・松田純典・斉藤道典・岩橋龍太郎, 1998, 堆積シミュレーションモデルによる堆積相分布予測. 石技誌, **63**, 11–17. [Matsui, R., Matsuda, F., Imayoshi, A., Matsuda, S., Saito, M. and Iwahashi, R., 1998, Sedimentary simulation model for reconstruction of facies distribution. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **63**, 11–17.]
- Moslow, T. F., *Depositional Models of Shelf and Shoreline Sandstones*. Am. Assoc. Pet. Geol. Continuing Educ. Course Note Ser., 27, 102p.
- Nakajima, T., Kakuwa, Y., Yasudomi, Y., Itaki, T., Motoyama, I., Tomiyama, T.,...Matsumoto, R., 2014, Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan. *J. Asian Earth Sci.*, **90**, 228–242.
- 中西健史, 2006, オーストラリア陸上の河川成貯留岩の層厚予想. 石技誌, **71**, 44–53. [Nakanishi, T., 2006, Reservoir thickness estimation of a fluvial system in an onshore basin, Australia.]

- lia. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **71**, 44–53.]
- Nakanishi, T., Lang, S. C. and Mitchell, A. A., 2003, Visualization of a fluvial channel reservoir analogue from the Birkhead Formation, Merrimelia, Meranji and Pelican Fields, Eromanga Basin. *APPEA J.*, **43**, 453–471.
- Noguchi, S., Shimoda, N., Takano, O., Oikawa, N., Inamori, T., Saeki, T. and Fujii, T., 2011, 3-D internal architecture of methane hydrate-bearing turbidite channels in the eastern Nankai Trough, Japan. *Mar. Petrol. Geol.*, **28**, 1817–1828.
- 小椋伸幸・斉藤雄一・阿久津亨, 1993, 1.3 堆積学的評価技術—シーケンス層序—. 石油技術協会編, 最近の我が国の石油開発—石油技術協会創立 60 周年記念, 182–208. [Ogura, N., Saito, Y., and Akutsu, T., 1993, 1.3 Sedimentological Technology for Assessment. In Japanese Association for Petroleum Technology, ed., *Recent Japanese Petroleum Development: Memorials for the Foundation 60th Anniversary of Japanese Association for Petroleum Technology*, Japan. Assoc. Pet. Technol., 182–208.]
- Posamentier, H. W., 2004, Seismic geomorphology: imaging elements of depositional systems from shelf to deep basin using 3D seismic data: implications for exploration and development. In Davies, R. J., Cartwright, J. A., Stewart, S. A., Lappin, M. and Underhill, J. R., eds., *3D Seismic Technology: Application to the Exploration of Sedimentary Basins*, Geol. Soc. London Mem., **29**, 11–24.
- Posamentier, H. W. and Allen, G. P., 1999, *Siliciclastic Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications*. SEPM Concepts Sedimentol. Paleontol., **7**, 210p.
- Posamentier, H. W., Davies, R. J., Cartwright, J. A. and Wood, L., 2007, Seismic geomorphology – an overview. In Davies, R. J., Posamentier, H. W., Wood, L. J. and Cartwright, J. A., eds., *Seismic Geomorphology: Applications to Hydrocarbon Exploration and Production*, Geol. Soc. London Spec. Publ., **277**, 1–14.
- Posamentier, H. W. and Kolla, V., 2003, Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *J. Sediment. Res.*, **73**, 367–388.
- Posamentier, H. W. and Walker, R. G., 2006, Deep-water turbidites and submarine fans. In Posamentier H. W. and Walker, R. G., eds., *Facies Models Revisited*. SEPM Spec. Publ., **84**, 397–520.
- Payton, C. E., ed., 1977, *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Mem., **26**, 516p.
- 佐伯龍男・稲盛隆穂・高野 修, 2006, 熊野海盆北縁部における三次元地震探査. 物理探査, **59**, 249–259. [Saeki, T., Inamori, T. and Takano, O., 2006, 3D seismic survey in the northern part of the Kumano basin. *BUTSURI-TANSA (Geophys. Explor.)*, **59**, 249–259.]
- 斎藤文紀・保柳康一・伊藤 慎編, 1995, シーケンス層序学: 新しい地層観を目指して. 地質学論集, **45**, 249p. [Saito, Y., Hoya-nagi, K. and Ito, M., eds., 1995, *Sequence Stratigraphy: Toward a New Dynamic Stratigraphy*. Mem. Geol. Soc. Japan, **45**, 249p.]
- 斉藤雄一・小椋伸幸, 1994, 石狩平野北部地域新第三系のシーケンス層序. 石技誌, **59**, 30–42. [Saito, Y. and Ogura, N., 1994, Neogene sequence stratigraphy in the subsurface of the northern part of the Ishikari Plain, Hokkaido. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **59**, 30–42.]
- 斉藤雄一・山本哲也・山根照真・守屋俊治・西村瑞恵・高野 修, 2008, 北蒲原沖合における砂岩せん滅層位トラップの探鉱評価事例: “第二の岩船沖油ガス田” 発見へのチャレンジ. 石技誌, **73**, 38–46. [Saito, Y., Yamamoto, T., Yamane, T., Moriya, S., Nishimura, M. and Takano, O., 2008, Exploration case study of sandstone pinch-out stratigraphic traps offshore Kitakambara: Challenge to discovery of “the second Iwafunaoiki oil and gas field”. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **73**, 38–46.]
- 佐々木 哲・岩崎哲治・井口義朗・大野尚樹, 2007, ブラジルカンボス堆積盆地の石油システム評価. 石技誌, **72**, 40–50. [Sasaki, S., Iwasaki, T., Iguchi, Y. and Ohno, N., 2007, Petroleum system of Campos Basin, Brazil. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **72**, 40–50.]
- Scholle, P. A. and Spearing, D., 1982, *Sandstone Depositional Environments*. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., **31**, 410p.
- Shah, M., Shah, S. and Sircar, A., 2017, A comprehensive overview on recent developments in refracturing technique for shale gas reservoirs. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, **46**, 350–364.
- 白倉康隆・小原英範・姫野 修, 2006, 炭酸塩岩シーケンス層序に基づく油層地質モデリング: 中東下部白亜系炭酸塩岩油田の例. 石技誌, **71**, 64–75. [Shirakura, Y., Obara, H. and Himeno, O., 2006, A reservoir modeling of the early Cretaceous carbonate rock based upon sequence stratigraphy in giant oil field of the Middle East. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **71**, 64–75.]
- Slatt, R. M. and Abousleiman, Y., 2011, Merging sequence stratigraphy and geomechanics for unconventional gas shales. *The Leading Edge*, **30**, 274–282.
- Slatt, R. M. and Rodriguez, N. D., 2012, Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence? *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, **8**, 68–84.
- Tada, R., 1991, Origin of rhythmical bedding in Middle Miocene siliceous rocks of the Onnagawa Formation, northern Japan. *J. Sediment. Petrol.*, **61**, 1123–1145.
- 多田隆治, 1995, 我が国における石油根源岩堆積環境の再検討. 石技誌, **60**, 5–14. [Tada, R., 1995, Re-evaluation of depositional environment of the source rocks in Japan. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **60**, 5–14.]
- 高野 修, 2001, シーケンス層序学の概念をどう捉えるか—今後の多分野統合解析のために. 堆積学研究, **53**, 125–133. [Takano, O., 2001, Some comments on sequence stratigraphic applications: Usage and perspectives for multidisciplinary approach. *J. Sediment. Soc. Japan*, **53**, 125–133.]
- 高野 修, 2006, 堆積物の分布形態解析における統合的手法論序章—堆積学から震探地形学・地球統計学へのリンク. 石技誌, **71**, 11–20. [Takano, O., 2006, Perspectives in integrated reservoir-distribution analysis: a linkage from sedimentology to seismic geomorphology and geostatistics. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **71**, 11–20.]
- 高野 修, 2011, 北部フォッサマグナ新潟〜信越堆積盆頸城地域の上部新第三系難波山層〜名立層層準のシーケンス層序とタービダイトシーケンス. 地質雑, **117**, 238–258. [Takano, O., 2011, Upper Neogene sequence stratigraphy and submarine-fan turbidite sequences in the Kubiki area in the Niigata-Shin'etsu basin, Northern Fossa Magna, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **117**, 238–258.]
- 高野 修, 2018, 地質・堆積学規制情報と定量モデリング手法の最適統合による貯留岩および関連堆積物のリスク・不確実性評価. 石技誌, **83**, 40–50. [Takano, O., 2018, Reservoir rock risk assessment based on the optimized integration of geological/sedimentological constrain information and quantitative modeling methods. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **83**, 40–50.]
- 高野 修・藤井哲哉・佐伯龍男・下田直之・野口 聡・西村瑞恵……辻隆司, 2010, 東部南海トラフ海域のメタンハイドレート探査における堆積学的手法の適用. 石技誌, **75**, 30–41. [Takano, O., Fujii, T., Saeki, T., Shimoda, N., Noguchi, S., Nishimura, M., Tsuji, T., 2010, Application of sedimentological methodology to the methane-hydrate exploration project in the eastern Nankai Trough area. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **75**, 30–41.]
- 高野 修・守屋成博・西村瑞恵・秋葉文雄・阿部正憲・柳本 裕, 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, **107**, 585–604. [Takano, O., Moriya, S., Nishimura, M., Akiba, F., Abe, M. and Yanagimoto, Y., 2001, Sequence stratigraphy and char-

- acteristics of depositional systems of the Upper Miocene to Lower Pleistocene in the Kitakambara Area, Niigata Basin, central Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **107**, 585–604.]
- 高野 修・西村瑞恵, 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, **74**, 40–51. [Takano, O. and Nishimura, M., 2009, Practical insights into 3D seismic geomorphological analysis of reservoir distributions: Example of submarine-fan turbidite sandstone reservoirs. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **74**, 40–51.]
- 高野 修・西村瑞恵・藤井哲哉・佐伯龍男, 2009, シーケンス層序学手法による東部南海トラフエリアのメタンハイドレート含有海底扇状地タービダイト砂岩分布解析およびBSR分布との関連の検討. 地学雑誌, **118**, 776–792. [Takano, O., Nishimura, M., Fujii, T. and Saeki, T., 2009, Sequence stratigraphic distribution analysis of methane-hydrate-bearing submarine fan turbidite sandstones in the eastern Nankai Trough area: Relationship between turbidite facies distributions and BSR occurrence. *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **118**, 776–792.]
- 高野 修・辻 隆司, 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. 地質雑誌, **119**, 567–579. [Takano, O. and Tsuji, T., 2013, 3D geology and reservoir modeling in oil industry: Geologic model construction by integration of sedimentology, sequence stratigraphy, seismic geomorphology, exploration geophysics and geostatistics. *J. Geol. Soc. Japan*, **119**, 567–579.]
- Takano, O. and Tsuji, T., 2017, Fluvial to bay sequence stratigraphy and seismic facies of the Cretaceous to Paleogene successions in the MITI Sanriku-oki well and the vicinities, the Sanriku-oki forearc basin, northeast Japan. *Isl. Arc*, **26**, e12184, doi: 10.1111/iar.12184.
- 高橋明久・鳥越隆弘・辻 隆司・柏原功治・中山 徹・古瀬雅己…… Ray Nasen, 2006, 坑井と地震探査データの統合によるオイルサンド貯留層の三次元地質モデリング. 石技誌, **71**, 54–63. [Takahashi, A., Torigoe, T., Tsuji, T., Kashiwara, K., Nakayama, T., Kose, M., ...Nasen, R., 2006, Geological modeling of the oil sands reservoir by integrating the borehole and seismic data in the JACOS Hangingstone SAGD operation area, Athabasca, Canada. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **71**, 54–63.]
- 滝本俊明・ダグラス ハミルトン・ウィリアム アンブローズ・ピーター ベストマン・溝部 晃・阿加井 宏・船山政昭, 2001, 河川デルタ成砂岩の堆積モデルを用いた貯留岩分布予測の試み: 東ベネズエラの例. 石技誌, **66**, 95–105. [Takimoto, T., Hamilton, D., Ambrose, W., Pestman, P., Mizobe, A., Akai, H. and Funayama, M., 2001, Predicting the distribution of potential reservoir facies through sedimentological comparison of modern depositional analogues: A case of fluvial deltaic sandstone reservoir in Eastern Venezuela. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **66**, 95–105.]
- 辻 隆司・増井泰裕・早稲田 周・井上洋子・栗田裕司・甲斐邦男, 1991, 秋田県矢島町周辺の女川層の岩相区分と堆積環境, およびその根源岩特性. 石油資源開発技研報告, **7**, 45–99. [Tsuji, T., Masui, Y., Waseda, A., Inoue, Y., Kurita, H. and Kai, K., 1991, The Onnagawa Formation in the vicinity of the Yasima town, Akita Prefecture, Northern Japan: with special reference to the lithologic units, the depositional environments and their relation to source rock characteristics. *Res. Rep. JAPEX Res. Center*, **7**, 45–99.]
- Tsuji, T., Masui, Y. and Yokoi, S., 2011, New hydrocarbon trap models for the diagenetic transformation of opal-CT to quartz in Neogene siliceous rocks. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, **95**, 449–477.
- 辻 隆司・岡田欣也・曹 奎煥・加藤 新・柏原功治・川田耕司……山田知己, 2013, 多点法統計を用いた侵食谷形状モデリング. 地質雑誌, **119**, 580–592. [Tsuji, T., Okada, K., Jo, G., Kato, A., Kashiwara, K., Kawada, K., ...Yamada, T., 2013, Multi-point geostatistical modeling of incised valley morphology. *J. Geol. Soc. Japan*, **119**, 580–592.]
- 辻 隆司・横井 悟, 1994, 北海道天北地域における新第三系珪質岩中の炭化水素トラップ. 石技誌, **59**, 283–295. [Tsuji, T. and Yokoi, S., 1994, Hydrocarbon trap in the Neogene siliceous rocks in northern Hokkaido, Japan. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **59**, 283–295.]
- 内村竜一, 2001, 中東カフジ油田, 中部白亜系ブルガン層に置ける河川成砂岩油層の分布予測. 石技誌, **66**, 106–118. [Uchimura, R., 2001, A positive prediction of the reservoir distribution based on sedimentological and sequence stratigraphic constraints for 3D-reservoir models of the Middle Cretaceous Burgan Formation (Albian), Khafji Oil Field, ex-Neutral Zone between Saudi Arabia and Kuwait. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **66**, 106–118.]
- 早稲田 周・辻 隆司・梶原義照・西田英毅, 1995, 女川層の有機物相と堆積環境. 石技誌, **60**, 49–61. [Waseda, A., Tsuji, T., Kajiwara, Y. and Nishida, H., 1995, Organic facies and depositional environment of the Onnagawa Formation: Comparison with the Monterey Formation. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **60**, 49–61.]
- 渡部芳夫・山本正伸・渡辺真人, 1995, 無機地球化学組成から見た女川珪藻質根源岩相の堆積物組成と古海洋環境. 石技誌, **60**, 15–26. [Watanabe, Y., Yamamoto, M. and Watanabe, M., 1995, Geochemistry and paleoceanography of the Onnagawa diatomaceous sediment. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **60**, 15–26.]
- Weimer, P. and Posamentier, H. W., eds., 1993, *Siliciclastic Sequence Stratigraphy: Recent Developments and Applications*. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., **58**, 492p.
- Weimer, P. and Slatt, R. M., 2007, *Petroleum Geology of Deep-water Settings*. Am. Assoc. Pet. Geol. Stud. Geol., **57**, CD-ROM.
- Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C., eds., 1988, *Sea-level Changes: An Integrated Approach*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ., **42**, 407p.
- Wood, L. J., 2007, Quantitative seismic geomorphology of Pliocene and Miocene fluvial systems in the northern Gulf of Mexico, U.S.A. *J. Sediment. Res.*, **77**, 713–730.
- 山本浩士・高野 修・島本辰夫・矢澤仁徳・マグスード アバザデ, 2002, 地球統計学手法によるメキシコ, チコンテペック堆積盆地群のタービダイト油層評価. 石技誌, **67**, 529–537. [Yamamoto, H., Takano, O., Shimamoto, T., Yazawa, N. and Abbaszadeh, M., 2002, Geostatistical reservoir evaluation of turbidite sandstones in the Chicontepec Basin, Mexico. *J. Japan. Assoc. Pet. Technol.*, **67**, 529–537.]
- 柳本 裕・高野 修・守屋成博, 1994, オマーン国ダリール油田のシェリフ層炭酸塩岩の堆積環境と続成作用. 石油資源開発株式会社技術研究所研究報告, **10**, 29–56. [Yanagimoto, Y., Takano, O. and Moriya, S., 1994, Sedimentary environment and diagenesis of carbonate rocks of the Shuaiba Formation in the Daleel Oil Field, Sultanate of Oman. *JAPEX Res. Center Res. Rep.*, **10**, 29–56.]

(著者プロフィール)

高野 修: 石油資源開発株式会社技術本部技術研究所所属. 専門は, 堆積学, シーケンス層序学, 堆積盆解析, 石油地質学. 本論では, 三次元震探地形学, 堆積モデル, 貯留層モデリング, 堆積盆解析, 非在来型炭化水素開発の項目執筆および全体総括を担当.

荒戸裕之: 秋田大学大学院国際資源学研究科所属. 13 年まで帝国石油株式会社および国際石油開発帝石株式会社に勤務. 専門は, 堆積学, シーケンス層序学, 化石層序学, 石油地質学. 本論では, シーケンス層序学の導入と適用の章の執筆を担当.

(要 旨)

高野 修・荒戸裕之, 2021, 石油探鉱開発技術における堆積学的手法の進展. 地質雑, **127**, 225–235. (Takano, O. and Arato, H., 2021, Recent development of sedimentological approaches in petroleum exploration and development technology. *J. Geol. Soc. Japan*, **127**, 225–235.)

1992 年頃から 2017 年頃の間、本邦における「石油探鉱開発技術にかかる堆積学関連手法の進展」を概観した。この期間における石油探鉱開発技術にかかる堆積学的手法の進展で特筆できるものとして、シーケンス層序学の導入と実適用、三次元地震探査データを用いた震探地形学の進展と適用、貯留層堆積モデルの精密化・高度化、三次元地質 / 貯留層モデリング技術の進展、石油システム概念に基づく堆積盆解析の視点の拡大、非在来型炭化水素資源開発にかかる珪質岩堆積学およびメタンハイドレート貯留層分布・性状に関する研究の進展をあげることができる。