講 演
 Lecture

米国ユタ大学での留学経験と成果－留学プログラムおよび研究プロジェクト

「ユタ州ユインタ堆積盆に分布する始新統河川～湖沼成堆積物 (Uinta 層
 および Duchesne River 層) のシーケンス層序, 後背地, 生痕相,
 およびレザバーモデリング」を通して*

佐 藤 隆 司^{**,*}

(Received August 31, 2016 ; accepted October 31, 2016)

**Study-abroad experience at the University of Utah : Study program and research project
 “Fluvial sequence stratigraphy, provenance, ichnology and reservoir modeling of the Eocene Uinta
 and Duchesne River formations, Uinta Basin, Utah”**

Takashi Sato

Abstract : Oil companies adopt their own system to provide educational opportunities for studying advanced knowledge at overseas research institutions and sponsor study-abroad programs. This system might be an effective approach for companies to obtain cutting-edge researches and technologies. From August 2012 to January 2015, the author experienced a graduate study (Master of Science) program, which was fully sponsored by INPEX Corporation, at the Department of Geology and Geophysics at the University of Utah. This paper introduces; a) the context of this author's study-abroad program at the University of Utah, b) the graduate research project, and c) overall outcomes of this study-abroad experience.

The graduate research project titled “Fluvial Sequence Stratigraphy, Provenance, Ichnology and Reservoir Modeling of the Eocene Uinta and Duchesne River Formations, Uinta Basin, Utah” focuses on continental deposits widely exposed in the Uinta intermontane lacustrine basin. This project consists of four different topics, covering the basin-scale sequence stratigraphic framework and sedimentary system to oil field-scale reservoir characterization. The University of Utah Geology and Geophysics Department has a great advantage in this type of field-based geological researches, in terms of convenient access to many excellent outcrops and oil-prolific basins, and a variety of researchers working on nearby outcrop-based projects.

The benefits and achievements from this author's study-abroad experience are divided into following aspects; 1) succeed in geological analog studies applicable to subsurface exploration and development projects, 2) accomplish a variety of course works useful for educating young geoscientists, 3) establish good relationships with researchers, and 4) understand local and specific knowledge about various onshore projects in the U.S.A. In addition, the author emphasizes that cultural interactions were also important for the author's career and communication skill enrichment. This paper would hopefully be a good reference for young professionals who consider a study-abroad opportunity in the future.

Keywords : Study-Abroad, Master Program, University of Utah, Uinta Basin, Petroleum Geology, Fluvial, Sequence Stratigraphy, Source-to-Sink, Ichnology, Reservoir Modeling

1. はじめに

* 平成 28 年 6 月 8 日, 平成 28 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「キャリアパスとしての海外留学の勧め」で講
 演 This paper was presented at the 2016 JAPT Geology and Exploration
 Symposium entitled “Studying Abroad for Future Career Development”
 held in Akita, Japan on June 8, 2016.

** 国際石油開発帝石株式会社 INPEX Corporation

† Corresponding author : E-Mail : takashi.sato@inpeex.co.jp

筆者は 2012 年 8 月から 2015 年 1 月まで, 国際石油開発
 帝石(株)従業員留学制度を活用し, 同社の探鉱・開発事業に
 資する技術を習得することを目的として, 米国ユタ大学
 (University of Utah) 大学院地質および地球物理学研究科

の修士課程における留学プログラムに参加した。研究プロジェクト（修士論文）のタイトルは、「ユタ州東部ユインタ堆積盆に分布する始新統河川～湖沼成堆積物（Uinta 層及び Duchesne River 層）のシーケンス層序、後背地、生痕相、及びレザバーモデリング」である。本稿では、研究内容およびその成果に加え、ユタ大学留学の背景や留学経験について紹介することで、今後、留学を志す若手技術者の指針となる内容としたい。

2. 留学の動機・背景

石油開発地質技術者として経験を重ねる中で、サブサーフェスの地質状況予測に関し、地表地質つまり露頭アナログ情報の重要性または有用性を強く認識するようになり、このテーマを深く掘り下げたいと意識するようになった。また、米国における大学と企業間の数々の共同研究プロジェクトの存在を知り、自らが留学して研究に携わることで、①地質評価に有用なアナロジー情報を得ること、②地質アナロジーデータを得る技術的手法を獲得すること、③自身の核となる専門知識や技術を得ることができると考え、米国留学を志望した。ユタ大学を選んだ理由は、研究に好適な露頭と実証済の石油システムと炭化水素鉱床がすぐ近傍に存在するという地の利を活かし、石油地質分野の研究に関し大きなアドバンテージを持っていること、多様性のあるスタディに取り組む環境が整っていることである。

3. 大学概要・指導教官・プログラム

ユタ大学はユタ州の州都であるソルトレイク市内、ロッキーマウンテンの西縁を形成するワサッチ山脈のフットヒルに広大なキャンパスを構える（標高約 1,500 m）（図 1）。キャンパスの象徴となっているフットボールのスタジアムは、2002 年のソルトレイク冬季五輪の開会および閉会セレモニーの会場である（図 1）。地質および地球物理学研究科のオフィスと研究施設は 2009 年に完成した比較的新しい 4 階建ての建物（ビル略称 FASB）にある。館内には岩石・化石標本、露頭写真、研究成果ポスターなどさまざまな趣

図 1 ユタ大学位置図および 2002 年のソルトレイク冬季五輪の開会セレモニーが行われたユタ大学のフットボールスタジアム（右上）

向を凝らした展示があり、35 名の教授・講師陣、80 名の大学院生、180 名の学部生（留学当時）がここで学んでいる。また、メジャーをはじめとする 60 以上の世界企業が参加するジオサイエンス技術コンソーシアムである Energy & Geoscience Institute (EGI) がキャンパス内にあり、世界のさまざまな地域や分野の研究プロジェクトが行われている。

豊かな自然環境に囲まれたユタ大学は地質学を学ぶ上で非常に恵まれた環境にある。大学から 1 時間程度で有名な塩湖であるグレートソルトレイクに行くことができ、現世の湖成堆積物を観察できる。ソルトレイクから南東へ 2 時間程度でシーケンス層序の教科書的露頭として有名なブッククリフへもアクセスできる。また、資源という面では、ソルトレイク市の南西約 40 km にはビンガムキャニオン銅鉱山、ワサッチ山脈の褶曲－スラスト帯の東にはユインタ堆積盆の油田地帯が広がっている。

筆者の指導教官は Marjorie A. Chan 教授で、層序学、堆積学、石油地質学を専門とし、堆積相や堆積盆の解析、流体移動、モデリングなど幅広いテーマに取り組んでおり、特に近年では地球のみならず惑星地球（火星）の分野にまで研究の幅が広がっている。また、2014 年には米国地質学会 Distinguished International Lecturer に選出され、日本を含む世界各国にて特別講義を行い、インターナショナルに活躍している。修士課程では、専門科目の講義、実習を含むコースワーク 20 単位と研究ワーク 10 単位を合わせた 30 単位が学位（修士号）取得の要件となっている。筆者の場合、コースワーク単位（合計 10 クラスを履修）は主に留学期間の 1 年目、研究プロジェクト単位は主に 2 年目に取得した。

4. コースワーク

留学先は大学院修士課程であり、コースワークが重視されている。表 1 に履修した 10 クラスを示す。ユタ大学は秋・春・夏の 3 学期制であり、セメスターごとにさまざまなクラスが開催されるが、その特徴は、優良な露頭と油・ガス田がすぐ近傍に存在するという恵まれた学習環境を生かしたフィールド実習が多く組み込まれていることである。石油企業との結びつきも強く、石油システムのクラス（PICP 1a）やレザバーキャラクタリゼーションのクラスでは、Anadarko, Hess, ConocoPhillips 社などから地質技術者を迎え、合同で巡検を行う場合もある（図 2a）。この他、Ichnology（生痕学）や Paleoeology（古生態学）の授業に関しては世界的に著名な教授による指導の下、生痕化石の模式標本採取地における記載法の実習（図 2b）、現世の潮間帯における環境および生物群集変化と化石化作用に関する実習といったユニークなフィールドワークがある。

冬の間（春セメスター期間）は、ユタ州は広く雪に覆われるため、専門技術ソフトウェアを用いた実習が多く組み込まれている（図 2c および 2d）。前述のように企業との結びつきが強く、レザバーキャラクタリゼーション、堆積盆モデリングの授業では、それぞれ ConocoPhillips 社や

表 1 履修クラスおよび内容の一覧

クラス名	内容
PICP 1a: Petroleum System (注: PICP は Petroleum Industry Career Path の略で、石油開発技術者育成コースの意味)	ユタおよびワイオミング州の Foreland 堆積盆地地域の石油システムを題材として、石油地質全般をカバーする内容。Anadarko 社および Hess 社から地質技術者を迎え、ワイオミング州のスラスト帯にて特別巡検を実施。
PICP 1b: Petrophysics	検層解析技術の授業。ワイオミング州の油田の坑井データを用いた実習あり。
PICP 2a: Seismic Data Processing	震探処理技術の授業。ユタ州陸上の 2D 震探データ（研究目的で取得）を用いたデータ処理実習あり（使用ソフトウェア: ProMax）。
PICP 2b: Seismic Interpretation	震探解釈技術の授業。アラスカ州ノーススロープの 2D 震探データ（BP 社提供）を用いた解釈実習あり（使用ソフトウェア: KINGDOM）。
Review of Earth Science	広い分野の地球科学トピック（ソルトレイク、熱流量とエネルギー、同位体分析、環境変動、米国の構造地質区分など）を扱う授業。
Basin Modeling	堆積盆モデリング技術の授業。スーダン陸上リフト堆積盆のデータ（特別講師 Apache 社地質技術者）を用いた解釈実習あり（使用ソフトウェア: PetroMod 2D）。
Geostatistics	地球統計学の授業。スタンフォード大が開発したソフトウェア SGeMS (GSLIB の後継) を用いた実習あり。
Reservoir Characterization	レザバークラリゼーション技術に関する授業。ConocoPhillips 社地質技術者を迎えたユタ州地質巡検、ソフトウェア Petrel および Eclipse を用いた実習あり。
Ichnology	生痕（化石）学に関する授業。合計 3 回の地質巡検あり（全てユタ州内）。
Paleoecology	古生態（環境・生物群集）およびタフォノミーに関する授業。メキシコのカリフォルニア湾潮間帯での野外実習あり。

図 2 コースワークの例

a) ワイオミング州西部における PICP1a フィールドトリップ風景。b) ユタ州中央部ブッククリフ地域における生痕学 (Ichnology) フィールドトリップ。c) ソフトウェアを用いたユタ州陸上 2D 震探データの処理実習。d) ソフトウェアを用いたアラスカ州ノーススロープ地域の 2D 震探データのシーケンス層序解釈実習。

Apache 社から地質技術者を迎えセッション形式で授業を行うこともある。

5. 研究プロジェクト内容

研究プロジェクトは、ユタ州最大の油・ガス田地帯であるユインタ湖成堆積盆（図 3）に露出する陸成層を題材としたもので、①シーケンス層序、②堆積物の供給源から盆地へのシステム、③陸成生痕群集、④砂岩レザバークラリゼーションという 4 つの異なるトピックをカバーする内容となっ

ている。以下に各トピックについて、目的・アプローチ・成果にフォーカスした形で概説する。

5.1 トピック 1: シーケンス層序 (Fluvial-Lacustrine Sequence Stratigraphy)

5.1.1 研究目的

陸成層のシーケンス層序モデルは、一般に下流側のベースレベルにコントロールされる沿岸～海成層シーケンスモデルとは異なり、コントロール要素が複雑なため、さまざまなモデルが提唱されている（例えば、Olsen *et al.*, 1995；

図3 研究対象地域，ユインタ堆積盆の地質概要

a) ユインタ堆積盆の地質図。Andersen and Picard (1974), Bryant (1992), Hintze *et al.* (2000), Sprinkel (2006, 2007) を改変。b) Laramide 湖成堆積盆システム位置図。Dickinson *et al.* (1988) を一部改変。c) ユインタ堆積盆第三系の模式柱状図。Hintze *et al.* (2000) を改変。

Currie, 1997; Legarreta and Uliana, 1998)。また、提唱されているモデルは一般に垂直方向のサクセッションにおける変化にフォーカスしているが、そもそも上流域においては、外的コントロール要素（例えば堆積空間や河川流量）が堆積盆内で一律とは限らない。トピック1の目的は、堆積盆スケールで地表露出する河川および一部湖沼成の Duchesne River 層を題材として、実際に陸成層の堆積ファシスがどのような分布や形態を示すか、その分布を規制するもの（外的コントロール要素）は何かを解明することにある。

5.1.2 アプローチ

広域地表地質調査による地質柱状図データの取得および堆積ファシス解析を行い、堆積盆スケールの広域断面を作成した。ユインタ堆積盆は、現在のユタ、コロラド、ワイオミング州にて、白亜紀末～古第三紀の Laramide 造山運動により形成された一連の湖成堆積盆システムの一角を成す (Dickinson *et al.*, 1988) (図3b)。本堆積盆の層序は、上方に粗粒化する典型的な湖成堆積盆埋積サクセッション、つまり下位より湖成 Green River 層、湖沼～河川成トランジションを示す Uinta 層、河川成 Duchesne River 層から成る (図3c)。このうち堆積盆南部に露出する湖成 Green River 層は世界的に有名な石油根源岩である。一方、筆者の研究プロジェクトはポテンシャルレザバー層準である Uinta 層～ Duchesne River 層を対象とするものである。

5.1.3 成果

堆積ファシス解析により 12 岩相区分および6つのファ

シスグループ (FA = Facies Association) を定義した。その結果、堆積盆スケールの広域地質断面 (図4) に示されるように、垂直方向にはシーケンス境界面に規制される典型的な上方細粒化のサイクルを示すが、水平方向に（同時期ユニット内に）著しく異なる堆積ファシス、層厚およびスタッキングパターンの変化が認められた。本地域では、シーケンス境界の形成は周辺後背地の隆起と関係しており、内部ファシスの形態については、堆積空間、スロープおよび流れのエネルギー、河川・堆積物の流量の3つの外的コントロール要素が堆積盆内で不均一に影響していると考えられる。なお、特にポテンシャルレザバー層準として重要な砂岩に富む基底部層 (Db) の側方へのファシス変化とそのコントロールメカニズム解明についてはトピック2で取り上げる。

5.2 トピック2：堆積物供給源からの盆地へのシステム (Source-to-Sink Fluvial Systems)

5.2.1 研究目的

トピック1で認定された堆積盆スケールでの Duchesne River 層の基底部層 (Db) の河川成ファシスの側方変化、すなわち堆積盆西部：高ネット砂岩-グロス層厚比率 (NTG) ファシス、堆積盆東部：低 NTG ファシスのメカニズムを堆積物供給源から盆地への堆積システムと合わせて解明する。

5.2.2 アプローチ

供給源から盆地 (Source-to-Sink) への堆積システムという用語が近年の学会発表などでよく使われる。これは、

図4 調査地域の広域地層対比図と層序フレームワーク

Sato and Chan (2015) を一部改変。Duchesne River 層は下位より, Brennan Basin Member (Db), Dry Gulch Creek Member (Dd), Lapoint Member (DI), Starr Flat Member (Ds) の4つの部層に区分される (Andersen and Picard, 1972)。下位の Uinta 層との境界は後背地の隆起に起因するシーケンス境界 (SB) により定義される。コンポジット柱状図 A ~ G 中の実線と番号はそれぞれ地質柱状図データの取得区間と露頭番号を示す。ローズダイアグラムは各露頭から得られた古流向データを示す。

Sink つまり盆地側の堆積物 (例えばレザバー) のみに注目した見方ではなく, 堆積物供給源から堆積場までのシステムまたはプロセスをパッケージで考える研究を総称して用いられる用語である。アプローチとしては大きく3つあり, ①古典的な砂岩粒子の組成分析を利用し後背地を推定するもの, あるいは碎屑性ジルコン年代測定による後背地の推定, ②上流側の流域面積 (Catchment Area) を考えて, 盆地への堆積物供給量を推定するアプローチ, ③上流側における堆積物の供給量と下流側での堆積量のマスバランスを前提として, 主要トランクチャネルの断面積から河川流量, 単位時間あたりの堆積量を計算するといったものがある (例えば, Allen *et al.*, 2013; Holbrook and Wanas, 2014)。このうち筆者の研究プロジェクトでは, 最も一般的な①砂岩粒子組成分析を用いて, 後背地から盆地への堆積システムを解釈するアプローチを採用した。砂岩粒子組成を求めるための具体的な分析手法としては, a) 岩石薄片調査 (Gazzi-Dickinson ポイントカウント法=偏光顕微鏡を用いて 500 ポイントの砂粒子のタイプを認定) (Ingersoll *et al.*, 1984) に加え, b) QEMScan (Quantitative Evaluation of Materials by Scanning electron microscopy) を用いた Automated Disaggregated カウント法 (砂岩を粉々に粉碎しセメントやマトリクス分を取り除いて, 砂粒子1つ1つ

を QEMScan でスキャンしカウントする手法) (Allen *et al.*, 2012) を採用した (図5)。

5.2.3 成果

砂岩粒子分析の結果, 堆積盆地西部サンプルと東部サンプルの粒子組成 (西: 石英に富む, 東: 岩片に富む) およびプロパティ (西: 孔隙率大, 東: 孔隙率小) に明らかな差異が認められた (図5a)。総合解釈としては, 3つの基本ファクターである堆積空間, 流れのエネルギー/スロープ, 河川流量の違いがファシス (砂岩比) をコントロールし, さらに堆積盆地の軸線に沿った河川システムによる粒子の長距離運搬が良好なレザバー発達の鍵となると結論した (図6)。

この他に, 本トピックでは, 河川形態に関する考察を取り上げている。河川形態は, 古くから網状河川と蛇行河川というエンドメンバーを用いて議論がなされてきたが, 近年は主に現世河川の分岐パターンを基にした分類, すなわち①分岐パターン (Distributary System), ②収束パターン (Tributary System), ③軸線パターン (Axial System) を用いた研究が多く報告されている (例えば, Weissmann *et al.*, 2010)。特に Distributive Fluvial System (略称 DFS) は, 広範囲に渡ってポテンシャルレザバーとなる河川成の砂を堆積, 保存させ得るシステムとして注目されている。具体的に, 筆者の研究プロジェクトの堆積盆地西部に分布す

図5 砂岩粒子組成を得るために採用した2種類の手法

a) 岩石薄片を用いた Gazzi-Dickinson ポイントカウント法。堆積盆西部の砂岩サンプルと東部サンプルの薄片写真において、石英%, 孔隙率, マトリクスおよびセメント%に大きな差が認められる。b) QEMScan Automated Disaggregated Count 法。サンプルを破砕し分離した砂岩粒子を QEMScan でスキャンする方法。スキャンされた砂岩粒子および同定された鉱物タイプを右図に示す。

図6 Duchesne River 層河川成砂岩の Source-to-Sink システムと堆積ファシスの規制要因 (A, B, C, D) 解釈

堆積盆中央西部に高 NTG かつ、良好な性状（高孔隙率）の砂岩レザバーが発達する。

高 NTG ファシスまたは河川システムのアナロジーとして、現在のヒマラヤ山麓にて報告されている複数の供給源を持つ高流量の Brahmaputra 川上流の DFS-Axial システム (Hartley *et al.*, 2010) を想定した。

5.3 トピック3：陸成生痕相および群集 (Fluvial-Lacustrine Ichnofacies)

5.3.1 研究目的

海洋環境における生痕相 / 群集解析は、古環境の推定さらにはシーケンス層序解釈に有効であり、石油開発業界でも一般的なツールとして使われつつある。一方、陸域の生痕群集を用いた古環境推定は発展途上段階にあり、シーケンス層序解釈への適用などその具体的な応用例はほとんど報告されていない。本トピックは、陸域（湖沼および沖積平野）環境で堆積した Uinta 層～ Duchesne River 層シーケンスを材料として、生痕相 / 群集にどのような変化がみられるか、報告されている陸成生痕相 / 群集モデル（例えば, Buatois and Mángano, 2007）との対応関係を議論しながら、明らかにすることを目的とする。

5.3.2 アプローチ

地表地質調査を通して観察される生痕を属名 (Ichnogenus) レベルにて記載する。特定の生痕属の出現と欠如をベースに、トピック1で行った古環境およびシーケンス層序解釈との対応関係を議論する。

5.3.3 成果

Uinta 層～ Duchesne River 層のシーケンス層序解釈および出現する生痕化石（生痕属）の関係を図7に示す。Uinta 層（湖）, Duchesne River 層 Db 部層（河川～氾濫原）, Dd 部層（湿地）, Dl 部層（湖）という上方への環境変化

図7 地表調査により観察される生痕属の出現状況とシーケンス層序フレームワークの関係

Duchesne River 層 Db 部層 (河川～氾濫原), Dd 部層 (湿地), D1 部層 (湖) という上方への環境変化に応じて, 生痕群集に変化が認められる。

に応じて, 観察される生痕群集に明瞭な変化が観察され, 陸成生痕相がシーケンス解釈および古環境推定に有効なツールとなることを示した。また, 各環境における群集の特徴, および環境を代表する生痕の種類について記載した。

5.4 トピック4:砂岩レザバーモデル(Fluvial-Lacustrine Sandstone Reservoir Modeling)

5.4.1 研究目的

トピック4は, 露頭ベースのレザバーモデリングプロ

ジェクトである。トピック1～3までは, 堆積盆スケールでの研究 (主に石油の探鉱に役立てる内容) であったのに対し, 本トピックは, 露頭スケール, 別の言い方をすれば開発井のスペーシング規模 (1 km ～) でレザバーの分布やネットワークを明らかにし, サブサーフェスにおけるレザバー分布予測手法の最適化に役立てることを目的としたものである。

5.4.2 アプローチ

ユインタ堆積盆西部の Blacktail 山の東崖面 (幅 2000 m × 高さ 200 m) (図 8a) に露出する Uinta 層 (湖成デルタファシス) ～ Duchesne River 層 (網状河川ファシス) を対象としたスタディで, 高解像度パノラマ写真 (GigaPan システムによりデータ取得), 地表地質調査データ (4 地点のコントロールとなる地質柱状図), 地表ガンマ線 (GR) データを用いて露頭ベースの地質モデルを構築する。さらにサブサーフェス環境における応用を視野に入れ, 複数のレザバーモデリング手法をテストし, 露頭モデルに最も近い実現像を得る。

5.4.3 成果

取得した地質柱状図データを解析し, 8 つの堆積ファシスを認定し (図 8b), 露頭全体に解釈を広げ, さらにその解釈データを三次元グリッドの地質モデルへと変換した (使用ソフトウェア: Petrel)。また, この露頭解釈からチャネル砂岩のディメンジョン (厚さ, 幅) 統計値, 堆積ファ

図8 露頭ベースのレザバーモデリングプロジェクト概要

a) 研究対象地域であるユインタ堆積盆西部 Blacktail 山の東崖面の露頭と高解像度写真撮影に用いた GigaPan システム。b) 同露頭の堆積ファシス解釈およびコントロールポイントとなる地質柱状図 MS-1 ～ MS-4 位置。8 つの堆積ファシス F1 ～ F8 を認定 (DC : Distributary Channel, DP : Delta Plain, MB : Mouth Bar, DF-PD : Delta Front-Prodelta, MASS : Mass-transport deposit, FC : Fluvial Channel, FP : Flood Plain, OB : Overbank Deposit)。

シス毎のバリオグラムを抽出した。Duchesne River 層（網状河川ファシス）を対象としたモデリング手法の検討においては、2つの地質柱状図（偽坑井）をコントロールポイントとして、インディケータークリギング（IK）、シーケンシャルインディケーターシミュレーション（SIS）、オブジェクトベースモデリング（OB）をテストし、実現像の河川成砂岩体のコネクティビティ（連結性）を評価することで、どのモデリング手法が実際の露頭データを再現するために最も適しているかを評価した。Larue and Hovadik (2006) および Pranter and Sommer (2011) と同様のスタティックコネクティビティ評価の手法を用いた結果、インプットとなる砂岩体ジオメトリーに不確実性が少ない条件においては、砂岩体連結度の再現性は OB モデルが最も良好であると結論した。

6. 留学を経て得たもの

第一に研究プロジェクトを通じて、湖成堆積盆における探鉱事業や河川成砂岩レザバー開発事業に資する知識（フィールドアナロジー）や技術を習得したことが挙げられる。具体的な研究内容と成果は、学会発表や査読論文などにまとめられている（図9）。これらの学会発表および論文投稿の機会は、研究成果やアイデアを純粋な視点から見直すために不可欠なステップである。多くの場合は、研究内容について厳しい指摘を受けることになるが、このプロセスを経ることで、科学論文レベルの洗練された研究成果へと辿り着ける。また、これらの機会は、他の研究者との関係を築く上でも非常に有益である。

第二にコースワークなどを通して、石油地質技術者育成に有用なフィールドや教材を開拓または獲得したことが挙げられる。先に述べたように、筆者が経験した留学プログラムでは、コースワークが重視されている。ただし、座学を通じた知識の獲得を重視するわけではなく、数多くの論文を読み込んだ上でのロジックの批判やディベート、コン

ピューター演習、実際のモノに触って考える野外実習やワークショップなどを通して、真の意味での理解や基礎を身に付けることに重きが置かれている。特にユタ州には地質学の教科書的な現場（露頭）が存在し、世界のジオロジストが羨むような場所で基礎作りができる。さらにキャンパス内外の関連協力機関（EGI やユタ地質調査所）との連携・交流も盛んであり、特別クラスやコアワークショップなどが地質および地球物理学研究科と共同で開催される。筆者の研究プロジェクトは陸成層の堆積システムに特化したものであるが、このようなコースワークを通して、しっかりと堆積学や石油地質学全般の土台を築くことができたと感じている。

第三に教授陣や大学関係者とのネットワーク構築を挙げる。石油地質やフィールドアナロジーの観点で重要な場所にあるユタ大学との関係維持は、将来、共同研究や人材育成など何らかのコラボレーションを行う際に有益である。個人的には、共に大学院で学んだ大学院生の多くが Chevron, ConocoPhillips, Anadarko 社などの石油会社に勤務している、または勤務予定であるため、この同窓生のネットワークも大事にしていきたいと考えている。また、これらの人間関係構築、文化的交流から得られる語学力、コミュニケーション能力の向上という側面も忘れてはいけない成果の1つであろう。

最後に米国陸上の油・ガス田開発を肌で感じたこと、土地勘を養ったことを挙げたい。研究対象地域は、これまでに数千の坑井が掘削されている歴史のある油・ガス田地帯にあり、現在も至る所でアクティブな採油井や掘削リグを見ることができる。周辺の町には、操業オペレーターやサービスカンパニーの事務所やヤードが立ち並んでおり、これらの事務所に足を運んで情報交換する機会も多くあった。この他に、野外調査の許可を得るために土地の権利者（個人オーナー、石油会社）、アメリカ先住民保護区の管轄事務所、土地管理局などに何度も足を運び、研究内容や目的

学会発表

Sato, T., and Chan, M.A., 2013, Fluvial Sequence Stratigraphy and Depositional Systems of the Tertiary Duchesne River Formation, Northern Uinta Basin, Northeastern Utah: AAPG Rocky Mountain Section Meeting, Salt Lake City, UT.

Sato, T., and Chan, M.A., 2013, Fluvial-Lacustrine Facies and Architecture of the Tertiary Duchesne River Formation, Northern Uinta Basin, Utah: Late-stage filling of Lake Uinta: GSA Annual Meeting, Denver, CO.

Sato, T., and Chan, M.A., 2014, Source to Sink Systems for Hydrocarbon Exploration in Lacustrine Basin Fill: Analog Examples from the Tertiary Duchesne River Formation, Northern Uinta Basin, Northeastern Utah: AAPG Rocky Mountain Section Meeting, Denver, CO.

Sato, T., Chan, M.A., and Ekdale, A.A., 2014, Fluvial-Lacustrine Ichnofacies of the Eocene Uinta and Duchesne River Formations, Northern Uinta Basin, Utah: GSA Annual Meeting, Vancouver, British Columbia, Canada.

Sato, T., Chan, M.A., and Stright, L., 2015, Outcrop-Based Fluvial and Lacustrine Sandstone Reservoir Characterization and Modeling of the Eocene Uinta and Duchesne River Formations, Northern Uinta Basin, Utah: AAPG Annual Convention & Exhibition, Denver, CO.

査読論文

Sato, T., and Chan, M.A., 2015, Fluvial-Lacustrine Facies Architecture and Sequence Stratigraphy of the Tertiary Duchesne River Formation, Uinta Basin, Utah: Journal of Sedimentary Research, v. 85, pp 1438-1454

図9 研究成果（学会発表と査読論文）のリストおよび2014年米国地質学会（GSA）年会におけるポスター発表時の写真

について説明するとともに、油田操業地域での地表調査における注意点や立ち入り申請の手順などについて指導を受けた。このような地元交渉は陸上の油田開発を行う上で必要不可欠なスキルであろう。また、同地域は、複数の非在来型資源がある点でも注目されており、オイル（タール）サンドの資源量は米国で1位を誇る他、オイルシェール、ギルソナイト（固体炭化水素鉱脈）などの資源も存在する。これらは筆者の研究プロジェクトと直接的に関係するものではないが、広い分野の石油開発事業を見渡す上で非常に良い場所である。

7. まとめとメッセージ

7.1 まとめ

ユタ大学での留学を通して得られるものは数多くある。そのうち筆者が自らの経験を通して感じる特筆すべき項目について、下記にまとめる。

- ・石油地質学を学ぶ上で非常に恵まれた環境（優良な露頭、油・ガス田、協力研究機関が近い）にあるため、効率的かつ包括的に知識や技術を習得することができる。
- ・多様性のある地質学専攻の教授陣および地の利を生かし、バラエティのある研究テーマ・プロジェクトを持つことが可能である。筆者の場合、4つの異なる研究トピックを成果として学会発表している。
- ・石油探鉱・開発プロジェクトに適用できるフィールドアナロジーの研究が可能である。筆者の場合、湖成堆積盆や河川成砂岩レザバーに関連する探鉱・開発プロジェクトに適用可能な研究テーマに取り組んだ。
- ・石油開発関連プロジェクトや研究コンソーシアムに携わっている研究室や教授陣が多く、これらの大学関係者とのネットワーク構築は、将来的に役立つ可能性が高い。
- ・調査研究を通して、米国陸上の石油開発事業のさまざまな側面を身近に感じることができる。各種分析のアレンジ・契約や土地権利者との地元交渉などを通して、陸上探鉱・開発オペレーションに必要なスキルが身に付く。

7.2 メッセージ

最後に、今回の講演の趣旨の観点から、留学を志す若手地質技術者への助言という形で締めくくる。筆者が考えるユタ大学大学院地質および地球物理学研究科への留学に求められる地質技術者の人物像は以下のとおりである。

- ・今一度、地質学の原点に返って、外で学びたい。また、業務上、その必要性を感じている。
- ・体力に自信あり。「五感」「足」「地質センス」を上手く使って成果を出すタイプ。
- ・多趣味。いろいろなものに興味があり、バラエティに富む研究テーマやプロジェクトに携わりたい人。
- ・現場主義。すぐ近傍にある調査地域（露頭）、油ガス田、協力研究機関に実際に足を運んで判断すること、現地交渉することを苦にしない。

謝 辞

石油技術協会には、2016年春季講演会シンポジウムに

において、本内容を講演する機会を頂いた。国際石油開発帝石株式会社には、筆者の研究活動を含む海外留学全般における支援を頂いた。ユタ大学 Marjorie A. Chan 教授には、研究のサポートに加え、本文執筆において貴重なご助言を頂いた。以上の協力者および関連組織に対し、ここに御礼申し上げる。

参 考 文 献

- Allen, J.L. and Johnson, C.L., Heumann, M.J., Gooley J. and Gallin, W., 2012 : New technology and methodology for assessing sandstone composition : A preliminary case study using a quantitative electron microscope scanner (QEMScan). *Geological Society of America Special Publication*, **487**, 177–194.
- Allen, P.A., Armitage, J.J., Carter, A., Duller, R.A., Michael, N.A., Sinclair, H.D., Whitchurch, A.L. and Whittaker, A.C., 2013 : The Qs problem: sediment volumetric balance of proximal foreland basin systems. *Sedimentology*, **60**, 102–130.
- Andersen, D.W. and Picard, M.D., 1972 : Stratigraphy of the Duchesne River Formation (Eocene-Oligocene?), northern Uinta basin, northeastern Utah. *Utah Geological and Mineral Survey Bulletin*, **97**, 29 p.
- Andersen, D.W. and Picard, M.D., 1974 : Evolution of synorogenic clastic deposits in the intermontane Uinta Basin of Utah. In Dickinson, W.R., ed. : *Tectonics and Sedimentation. SEPM Special Publication 22*, Society for Sedimentary Geology, 167–189.
- Bryant, B., 1992 : Geologic and structure maps of the Salt Lake City 1 degree x 2 degrees quadrangle, Utah and Wyoming. *U.S. Geological Survey, Miscellaneous Investigations Series Map I-1997*.
- Buatois, L.A. and Mángano, M.G., 2007 : Invertebrate ichnology of continental freshwater environments. In Miller, W. III, ed. : *Trace Fossils: Concepts, Problems, Prospects*. Elsevier, Amsterdam, 285–323.
- Currie, B.S., 1997 : Sequence stratigraphy of nonmarine Jurassic—Cretaceous rocks, central Cordilleran foreland-basin system. *Geological Society of America Bulletin*, **109**, 1206–1222.
- Dickinson, W.R., Klute, M.A., Hayes, M.J., Janecke, S.U., Lundin, E.R., McKittrick, M.A. and Olivares, M.D., 1988 : Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region. *Geological Society of America Bulletin*, **100**, 1023–1039.
- Hartley, A.J., Weissmann, G.S., Nichols, G.J. and Warwick, G.L., 2010 : Large distributive fluvial systems; characteristics, distribution, and controls on development. *Journal of Sedimentary Research*, **80**, 167–183.
- Hintze, L.F., Willis, G.C., Laes, D.Y.M., Sprinkel, D.A. and Brown, K.D., 2000 : Digital geologic map of Utah 1:500000.

- Utah Geological Survey.*
- Holbrook, J. and Wanas, H., 2014 : A fulcrum approach to assessing source-to-sink mass balance using channel paleohydrologic parameters derivable from common fluvial data sets with an example from the Cretaceous of Egypt. *Journal of Sedimentary Research*, **84**, 349–372.
- Ingersoll, R.V., Bullard, T.F., Ford, R.L., Grimm, J.P., Pickle, J.D. and Sares, S.W., 1984 : The effects of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, **54**, 103–116.
- Larue, D.K. and Hovadik, J., 2006 : Connectivity of channelized reservoirs: a modelling approach. *Petroleum Geoscience*, **12**, 291–308.
- Legarreta, L. and Uliana, M.A., 1998 : Anatomy of hinterland depositional sequences: Upper Cretaceous fluvial strata, Neuquen Basin, west-central Argentina. In Shanley, K.W., and McCabe, P.J., eds. : *Relative Role of Eustasy, Climate and Tectonism in Continental Rocks. SEPM Special Publication 59*, Society for Sedimentary Geology, 83–92.
- Olsen, T., Steel, R., Hogseth, K., Skar, T. and Røe, S.L., 1995 : Sequential architecture in a fluvial succession: sequence stratigraphy in the Upper Cretaceous Mesaverde Group, Price Canyon, Utah. *Journal of Sedimentary Research*, **B65**, 265–280.
- Pranter, M.J. and Sommer, N.K., 2011 : Static connectivity of fluvial sandstones in a lower coastal-plain setting: An example from the Upper Cretaceous lower Williams Fork Formation, Piceance Basin, Colorado. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **95**, 899–923.
- Sato, T. and Chan, M.A., 2015 : Fluvial facies architecture and sequence stratigraphy of the Tertiary Duchesne River Formation, Uinta Basin, Utah. *Journal of Sedimentary Research*, **85**, 1438–1454.
- Sprinkel, D.A., 2006 : Interim geologic map of the Dutch John 30' x 60' quadrangle, Daggett and Uintah Counties Utah, Moffat County, Colorado, and Sweetwater County, Wyoming. *Utah Geological Survey.*
- Sprinkel, D.A., 2007 : Interim geologic map of the Vernal 30' x 60' quadrangle, Uintah and Duchesne Counties, Utah, and Moffat and Rio Blanco Counties, Colorado. *Utah Geological Survey.*
- Weissmann, G.S., Hartley, A.J., Nichols, G.J., Scuderi, L.A., Olson, M., Buehler, H. and Banteah, R., 2010 : Fluvial form in modern continental sedimentary basins: Distributive fluvial systems. *Geology*, **39**, 39–42.