

# GSJ 地質ニュース

GSJ CHISHITSU NEWS

— 地球をよく知り、地球と共生する —

2016

4

Vol. 5 No.4



# 4月号

97-112

**ベトナムのメガデルタに魅せられて** 齋藤文紀

113-118

**オレゴンから在外研究報告** 東宮昭彦

119-123

**日本学術会議公開講演会**  
「強靱で安全・安心な都市を支える地質地盤の情報整備  
—あなたの足元は大丈夫?—」の開催報告

日本学術会議地質地盤講演会準備会

124-126

**石油開発の視点からの地圏研究への期待**  
星 一良

127-131

**地下微生物のメタン生成ポテンシャルを  
評価する技術**  
坂田 将

132-136

**マルチスケールにおける  
ジオメカニクモデリング**  
雷 興林

## Cover Page



Kasumigaura (Nishiura) Lake and Sakuragawa lowland  
in Ibaraki Prefecture taken from an airplane.

(Photograph and caption by Futoshi NANAYAMA)

## 航空機から撮影された霞ヶ浦（西浦）と桜川低地

茨城県南部にある霞ヶ浦は、日本第2位の面積を持つ湖である。約3年前の最終氷期の時代に、現在の桜川の河道を鬼怒川が流れていた。その鬼怒川が作った幅広い谷が、西浦の起源である。霞ヶ浦の名は、縄文海進によって生じた古鬼怒湾のエスチュアリーに由来し、その後、海跡湖（汽水環境）となった。1963年に治水と塩害防止を目的とした常陸川水門（逆水門）の建設によって湖水はほぼ淡水化した。逆に潮汐による湖水の循環および浄化機能が失われ、水質汚濁が進んだとも言われている。

(写真・文：七山 太 / 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門)

# ベトナムのメガデルタに魅せられて

齋藤文紀<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

ベトナムとは思えないような天気だった。昼間の最高気温が8度しかない。小学校は朝の気温が10度を下回っているので休校。ベトナムを訪れるようになって20年近くが経つが、ハノイでこのような天候に遭遇するのは初めてだった。2016年1月26日のことである。ベトナムと言ってもハノイは四季があり、冬は結構寒く、中国文化の影響を強く受けているが、南のホーチミン市(旧サイゴン)は、乾季と雨季が明瞭で常夏の熱帯の気候であり、カンボジアの文化の影響を受けている。ベトナムは南北で大きな違いがある。

ベトナムには、世界を代表する2つの大きなデルタ(三角州)がある。ハノイ(河内)付近を三角形の頂点とする紅河(ホン河)デルタ、カンボジアのプノンペン付近からベトナムに広がるメコンデルタ(メコン河デルタ)である。巨大なデルタはメガデルタと呼ばれているが(Woodroffe *et al.*, 2006)、これら2つはメガデルタに該当する。アジアには、このようなメガデルタが多数分布している。東から黄河デルタ、長江(揚子江)デルタ、珠江デルタ、紅河デルタ、メコンデルタ、チャオプラヤデルタ、イラワジ(エーヤワディー)デルタ、ガンジス・ブラマプトラデルタ、インダスデルタ。これらすべてが、ヒマラヤとチベット高原に源流を持つ河川のデルタであり、ヒマラヤとチベットの隆起がこのような大河川の形成や発達を支配していることがわかる(齋藤, 2005a)。この他にも、インド高原に流域をもつゴダバリデルタも世界を代表するデルタである。アジアには何故このように大規模なデルタが多数分布しているのだろうか。デルタは、河川から供給された土砂が河口域に堆積し、海岸線が前進することによって形成される。海岸線の前進を大きく規制しているのは、運搬される土砂の量と海水準の変動である。アジアには運搬土砂量の大きな大河川が多数分布していること、完新世の海水準変動において、過去6千年間相対的に海水準が低下している地域が多いことが主な原因である。北米やヨーロッパの地域は、最終氷期最盛期に氷床が分布し、その周辺域は

完新世を通して海水準が上昇している地域が多い。一方、アジア地域は、氷床から遠く離れており(ファーフィールドと呼ばれる)、氷床の影響は受けないが、氷床が融解して増加した海水の荷重によるアイソスタシーの影響を受け、6~4千年前に現在よりも高い海水準が認められる地域が多い。これは、その頃世界的に海水準が高かったのではなく、海洋が荷重によって沈降し、海洋域のマントルが大陸の縁辺部に流動することによって隆起した結果である。この現象はハイドロアイソスタシーと呼ばれている。日本において、6千年前の縄文海進の頃に海面が2~3m高かったのもこの現象である(横山, 2007; 中田・奥野, 2011)。日本でも、相対的に海面が低下したことによって沖積平野が広く発達している。

さて、話をベトナムに戻そう。小論では、約20年にわたり取り組むことになったベトナムでの研究成果や、これまでの行ってきた活動を報告したい。

## 2. 共同研究の始まり

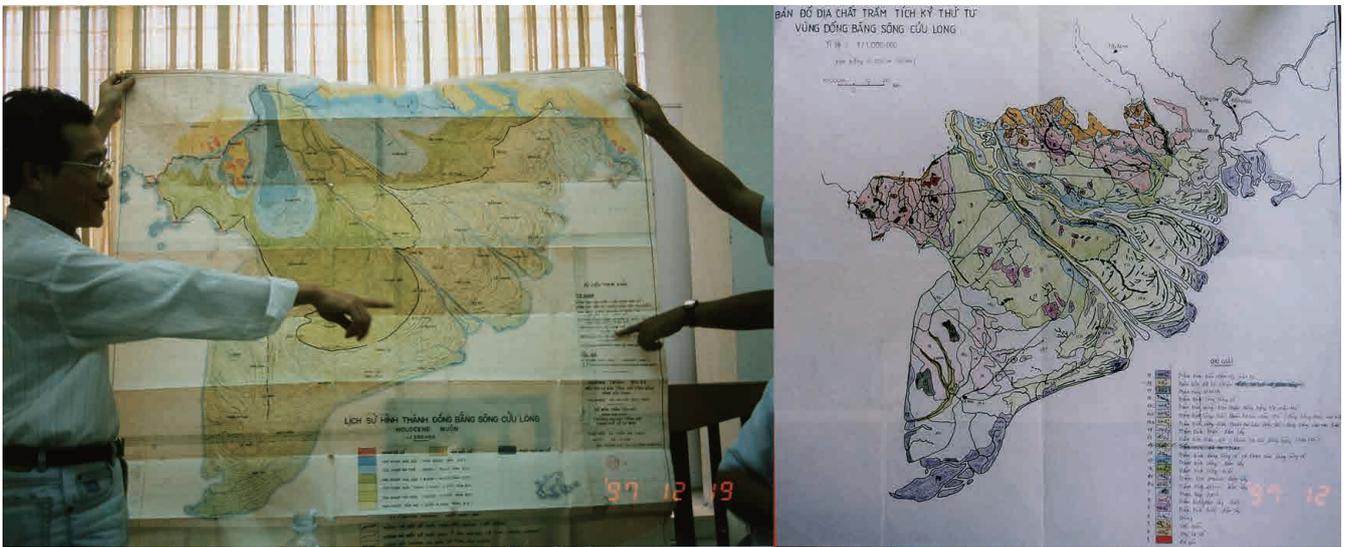
1997年の暮れに近い12月18日、初めてベトナムの地を訪問することになった。環境庁地球環境研究総合推進費「海面上昇の影響の総合評価に関する研究」プロジェクトが1997年度から始まり、プロジェクトの会合がタイのアジア工科大学で開催された。その会議後に同プロジェクトのメンバーである新潟大学の立石雅昭さんと小林巖雄さん、名古屋大学の海津正倫さん、愛媛大学の平井幸弘さんと一緒にベトナム、ホーチミン市を訪れ、同プロジェクトの研究対象であるメコンデルタを視察することになった(第1図)。現地のホストは、Vietnam National Centre for Natural Science and Technology(現在のベトナム科学技術院: Vietnam Academy of Science and Technology)に属するSub-Institute of Geography(地理副研究所、現在のホーチミン市資源地理研究所: Ho Chi Minh City Institute of Resources Geography)の Nguyen Van Lap(ラップ)さんで(第2図左)、彼が新潟大学で立石さんの指導の下で学位を取得していたことが縁で、メコンデルタ

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

キーワード: ベトナム, メガデルタ, 三角州, 完新世, 共同研究



第1図 バンコクからホーチミン市への飛行機から撮影したメコン河。右下にプノンペン。左から流れてくるトンレサップ川とメコン河本流が、プノンペンで合流し、メコン河とバサック河に分かれる。



第2図 左：地理副研究所で説明をする Nguyen Van Lap（ラップ）さん。右：地理副研究所で作成されていたメコンデルタの地形分類図。これらの成果は、後に Nguyen *et al.* (2000)として、発表される。

が調査地域に選ばれた。ホーチミン市は、メコンデルタというよりもサイゴン川が形成した平野に位置している。このためホーチミン市からメコンデルタの中央部に行くにも150～200 km近い移動が必要で、9つの分流を持つといわれる大河川を越えなければいけない。今では多くの橋や、一部高速道路も建設され移動が容易になったが、当時はフェリーを使い、分流を渡る必要があった。メコン河は、ベトナムでは、Song Cuu Long と呼ばれる。九龍川という意味で、正に多くの分流が特徴の大河川である。地理副研究所では、Ho Van Chin 所長やスタッフの Ta Thi Kim Oanh（オワン）さんのお世話になった。それから20年近くも共同研究をすることになるとは、この時は夢にも思わなかった。

メコンデルタでは、地理副研究所において詳細な地形の調査や完新世の海水準変動の研究が行われていた。第2

図右は、当時研究所で作成されていた地形分類図で、河口からカンボジア国境まで約200 km、南東北西方向で300 kmにも及ぶデルタ全域の詳細な地形区分が行われていた。これらの成果は、1997年に東京で行われた第四紀の国際会議でラップさんによって発表され、2000年に国際学術誌から報告されている (Nguyen *et al.*, 2000)。

### 3. メコンデルタと紅河デルタ

第1表に、メコンデルタと紅河デルタの特徴をまとめている。流量が大きなメコン河と流量の割に懸濁物量が多く比較的急勾配の紅河、懸濁物の多さが紅い（ホン）河という名前にも反映している。メコン河の勾配は緩く、河床が標高0 mになるのは、河口から約600 kmも上流である。河口から約250 kmのカンボジアとベトナムの国境で

第1表 紅河とメコン河の特徴. 堀・斎藤 (2003), Ta et al. (2005), Woodroffe et al. (2006), Tanabe et al. (2006), Milliman and Farnsworth (2013)から作成.

	全長 (km)	流域面積 (万km <sup>2</sup> )	流量 (km <sup>3</sup> /y)	浮遊堆積物 運搬量 (百万トン/y)	浮遊砂濃度 (懸濁物濃度) (kg/m <sup>3</sup> )	デルタ平野面積 (km <sup>2</sup> )	平均波高 (m)	平均潮差 (m)	最大潮差 (m)
メコン河	4,800	81	550	160	0.34	62,520	0.9	2.5	3.2-3.8
紅河	1,100	16	120	130	1.08	10,300	0.88	2.0-2.6	3.2-4.0

も乾季には約1mの潮差がある。2つのデルタで河口沿岸域の潮差はほぼ同じだが、メコン河は1日2回潮の半日周潮で、紅河は世界的にも珍しく1日1回潮の日周潮である。河口部の波浪は、メコンデルタは、南シナ海の南部に位置し、前面が開けているので、冬季の波浪の影響を強く受けている。また冬季は南シナ海全体で南部に海水が吹き寄せられ、メコン河の河口付近では冬季の水位が約40cm高い。これらの影響を受けてメコンデルタでは、南西に向けた沿岸流が冬季に卓越し、堆積物輸送や地形形成に大きく影響しており、河口付近では南西方向への砂州や砂嘴の成長が顕著である。一方、紅河デルタはトンキン湾に位置していることから、メコン河に比べて波浪の影響は小さく、河口部の砂州もほぼ対称系を示す。メコンデルタの陸域部分の面積は、全体で6万km<sup>2</sup>を超えるとされている。ベトナム内のデルタだけでも3.79万km<sup>2</sup>に達する。関東平野の面積が1.7万km<sup>2</sup>、関東地方の面積が3.2万km<sup>2</sup>であることを考えるとその大きさがわかる。このデルタ全てが、完新世の過去7千年ほどの間に形成されている。

#### 4. メコンデルタの層序と発達史とIGCP-475 第2回会合

メコンデルタの共同研究の最初の成果は、メコンデルタの沖積層の層序の確立と完新世の地史の解明であった。オワンさんらによる一連の論文が第1期の成果であろう (Ta et al., 2001, 2002a, 2002b; Tanabe et al., 2003a; Ta et al., 2005)。最終氷期最盛期には70mを超える深度の谷地形が現在の平野下に発達していたこと、完新世のデルタは、当初は潮汐が卓越するデルタであったが、デルタの前進に伴い、南シナ海の波浪の影響を強く受けるようになり、浜堤が形成されるようになったこと、それに伴いデルタの前進速度が低下し、堆積物は南西方向に運ばれ、カマウ半島が形成されたこと、などが主要な成果である。

メコン河とメコンデルタは、世界でもトップ10位内にランクされる。運搬土砂量と流量で世界10位、デルタ平野の面積では3位であり、世界を代表するデルタである

(堀・斎藤, 2003)。しかしながら、ミシシッピデルタやガンジス・ブラマプトラデルタ等と比べて、地質学的な研究は余りされていなかった。ラップさんやオワンさんたちによる一連の成果は、メコンデルタの基礎的な情報を世界に発信し、共同研究が可能であることを示したことで、その後のメコンデルタ研究を発展させたことは間違いない。その大きな契機となったのは、2005年1月10日から16日にホーチミン市で開催されたIGCP-475の第2回会合、国際デルタ会議であろう (斎藤, 2005b)。海外の22ヶ国から72名、ベトナム国内から31名、合計で103名が参加した。デルタや沿岸域研究で有名な、Janok Bhattacharya, Liviu Giosan, Colin Woodroffe, Steven Goodbred, Eric Wolanski, Klaus Schwarzerなど錚々たる顔ぶれが参集した (第3図)。海外からの参加者のほとんどがメコンデルタを訪れるのは初めてであり、彼らに貴重な機会を提供することができたとともに、ラップさんやオワンさんたちの成果を参加者に示すことができた。この会合は、2004年末に締結されたベトナム科学技術院 (VAST)と産業技術総合研究所との包括研究協力協定後の最初の会合であったことから、ベトナム科学技術院のDang Vu Minh院長も開会式に参加し、歓迎の挨拶を行っている。

#### 5. ベトナム地質鉱物局との共同研究

環境庁の予算でベトナムのデルタの研究を行うのに際し、上記の共同研究に加えてベトナム地質鉱物局 (DGMV: Department of Geology and Minerals of Vietnam, 現在のベトナム地質鉱物総局 GDGMV: General Department of Geology and Minerals of Vietnam) と共同研究することになり、「ベトナムのデルタ」という題目で、2000年に地質調査所とベトナム地質鉱物局との間で、2001年から2003年の3ヶ年の共同研究が行われることになった。具体的には、紅河デルタの沖積層調査とメコンデルタの音波探査調査である。

紅河デルタの調査はベトナム地質鉱物局の北部地質図作



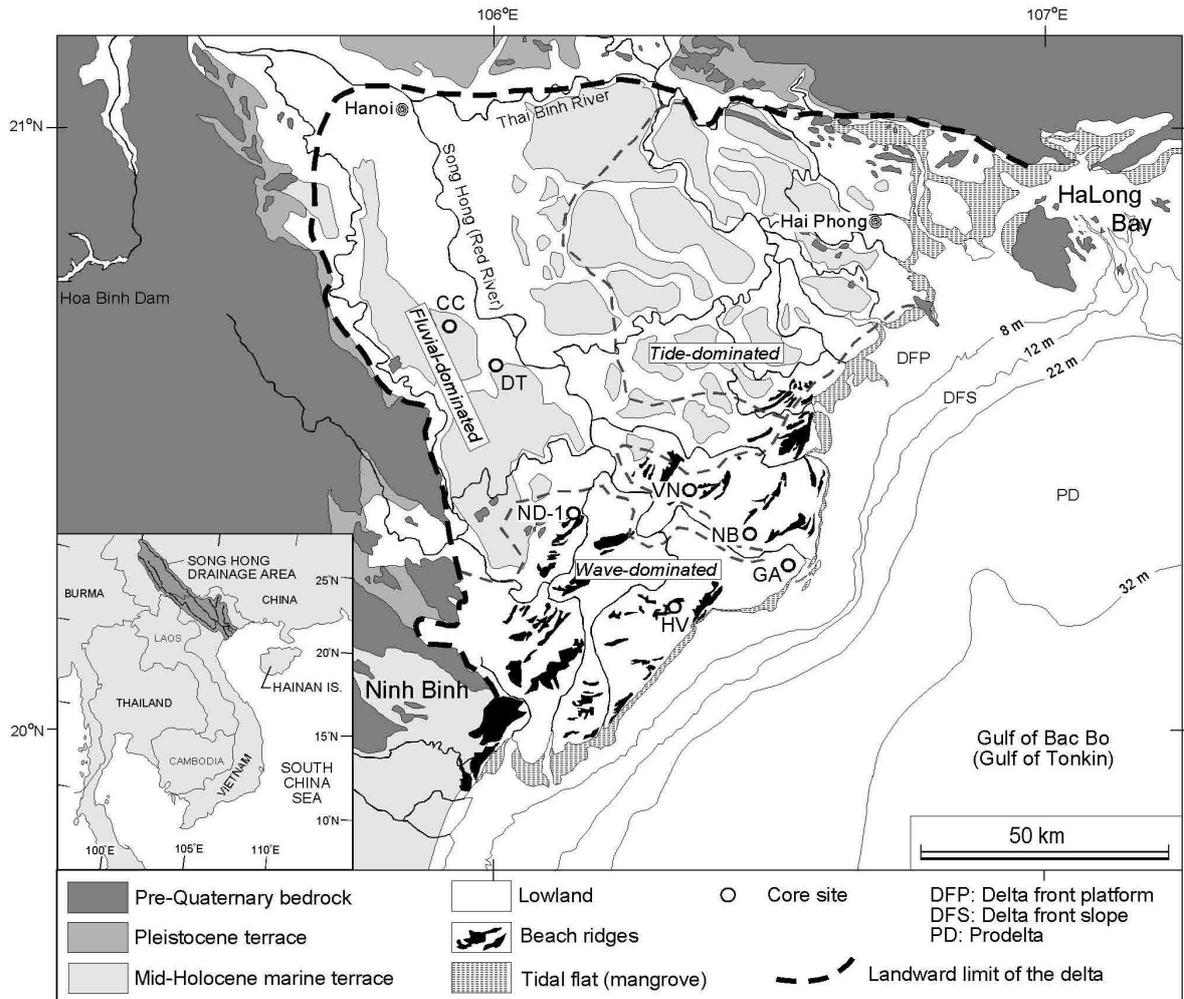
第3図 IGCP-475の第2回会合の集合写真. ホーチミン市タンサンニャットホテル. 2005年1月13日.

成部 (Northern Geological Mapping Division) と、メコンデルタの調査は地球物理部 (Geophysics Division) との共同研究として実施された。2001年2月に共同研究を開始するに当たり、ハノイのベトナム地質鉱物局を訪問した際に、共同研究の始まりのお祝いとして夕食に招待された。レストランは二者択一で、コブラか、犬の選択であった。ハノイの紅河を挟んだ対岸は、コブラ料理が有名な地域である。学生の頃に四万十帯の調査でマムシを食べた経験があるのでコブラの選択をしたが、店に入ると壁一面の網のケージに生きたコブラが入れてあり、2匹を選べという。コブラ以外には猿もいた。結局、店の人がコブラを選び、出されたコブラ料理は10皿を超えるフルコースであった。ただ、心臓を蒸留酒に入れて乾杯をしたり、生き血を蒸留酒に入れて乾杯をしたり、先が思いやられる共同研究の始まりであった。

紅河デルタの調査では、ベトナム地質鉱物局の国際室の Nguyen Van Quy (クイ) さん、北部地質図作成部の Vu Quang Lan (ラン) さん、Ngo Quang Toan (トアン) さんにお世話になった。丁度、英国地質調査所 (BGS) の Mathers らによる紅河デルタの表層微地形図の報告書が出版され (Mathers *et al.*, 1996)、トアンさんらを中心に紅河デルタの第四紀地図が2000年に出版された直

後であったことから、完新世の海成段丘分布など、既存の資料を使用することができた。また環境庁のプロジェクトでは、2000年度からの第2期に東京大学の春山成子さんが加わり、彼女らの調査とも合わせて、紅河デルタの沖積層の研究が行われた。沖積層の基底図、模式柱状図、完新世の紅河デルタの地史、上部第四系の地史など多くの成果が得られている (第4図) (Tanabe *et al.*, 2003b, 2003c, 2006; Hori *et al.*, 2004; Hanebuth *et al.*, 2006; Tanaka *et al.*, 2011)。

メコンデルタの調査では、地球物理部と共同で音波探査を河道と沿岸部で行った。産総研からは村上文敏さんが責任者として参加し、ベトナム地質鉱物局側は地球物理部長の Nguyen Tran Tan (タン) さんが全体の責任者で、実行責任者は Nguyen Truong Luu (ルウ) さん (現副部長) であった。調査は、2002年から2003年にかけて3回実施され、音波探査の総延長は1,700 kmで、ほぼメコンデルタ全域の主要な河道や水路と沿岸域で調査を行うことができた。調査機器は、地球物理部が所有するものを用いて行われ、音源はブーマーとスパーカーで、シングルまたは8チャンネル記録システムが採用された (Murakami *et al.*, 2004) (第5図)。本調査によってメコンデルタにおいて最終氷期最盛期の谷地形が明らかになっている。



第4図 紅河デルタ. Tanabe *et al.* (2006)に, Ha Long Bay と Ninh Binh を加筆. デルタ平野の離水面である完新世の海成段丘がデルタの内陸側に分布している. ハロン湾 (Ha Long Bay) とニンビン (Ninh Binh)には完新世の離水ノッチが見られる (第10図).



第5図 2002年4月にメコン河で行われた音波探査調査.

## 6. ベトナムでの調査のたのしみ

ベトナムではコブラやハリネズミなど珍しい物を食することもありますが、ベトナムでの調査の楽しみは、何と云っても美味しい食事である。野菜が豊富で、麺類の種類も多い。ベトナムといえばフォー（Pho）が有名だが、それ以外にも、少し硬めの麺のフーチャー（Hu Tieu）、うどんのようなバンカン（Banh Canh）、ソーメンのようなブン（Bun）、どれも米粉から作られた麺類である。牛肉、豚肉、鳥肉やカニ・エビ・イカ、魚介類などが使われるが、決まり事があるようで、フォーは牛肉と豚肉、フーチャーやバンカンには牛肉が一般的には使われないようである。各地で名産があり、ハノイと言えばブンタン（Bun Thang）、ブンモック（Bun Moc）、ブンガン（Bun Ngan）、ブンチャ（Bun Cha）、ベトナム中部のフエと言えばブンボー（Bun Bo）フエ、南部のニャチャンといえばブンカー（Bun Ca）、メコンデルタ中央部のミイトー（My Tho）といえばフーチャーミイトーなど、地域ごとに何かしらの麺類がある（オアンさんからの情報提供）（第6図）。飲み物は、地方に行くと蒸留酒が一般的で、もち米からつくったネップモイやうるち米からのルアモイが有名だ。これも各地に特産品がある。

珍しいお酒では、壺に籾殻とうるち米を入れて作ったルオカン（Ruou Can）がある（第7図）。ベトナム北部の山岳地域からラオスからタイの山岳地域のお酒のようだ。ベトナム地質鉱物局（DGMV）とのメコンデルタの共同調査の際に、ハノイのスタッフが持ってきくれたお酒で、壺に入った酒に竹のストローを刺し、一斉に一緒に飲む。液



第6図 ベトナムの麺類。  
左上：フーチャー、右上：フォーボー、左下：バンカン、  
中下：ブンチャ、右下：ミー

面が下がるが、何と水を追加して、もとの分量にしてしまう。徐々にお酒は薄くなるが、酔っ払ってきているので気にならない。メコンデルタで採れた手長エビを食しながらの酒は格別であった。なお、船の調査で毎晩飲んでいたのは、20リットルのポリタンクに入った蒸留酒であった。

もうひとつ忘れてならないのは、ビールである。北部では薄目の生ビールのピアホイが楽しめる。紅河デルタを調査していた2000～2002年頃は田舎では一杯2,000～4,000ドン（20～30円）だったように思う。ベトナムのビールは、北部はピアハノイ、南部は、ピア333（バーバーバー）、ピアサイゴンが有名である。ベトナムのビールはフランス統治時代にフランスの製造技術により作られ始めた。ピア333、ピアサイゴンのSABECOは1875年創業、ピアハノイのHABECOは1890年創業で非常に古い。中国ではロシア人が設立したハルビンビールが最も古く1900年、ドイツの租借地で作られた青島ビールは1903年創業、フィリピンのサンミゲルはスペインの技術により1890年の創業である。日本では、1877年に冷製札幌ビール、1888年にキリンビール、1890年にエビスビール、1892年にアサヒビールが発売されている。ベトナムのビールの歴史はアジアでは古い方なのだ。

## 7. 近年のデルタの変動を探る

沖積層の調査によって、メコンデルタや紅河デルタの層序や完新世の環境変動は徐々に明らかになってきた。しかし、千年オーダーの時間スケールの解析では、現在の環境変化の理解には直接貢献できない。季節単位、年単位、十年単位、百年単位、これらの変動を知ることによって、過去の変動の解析結果を、現在の環境変化や将来予測に貢献できる。このギャップを埋めることを目的として、2005



第7図 ベトナムのお酒とコーヒー。  
左：壺酒、右上：ピアハノイとピア333、右下：ベトナム  
コーヒー、コーヒーの下には練乳。アイスに入れてカフェ  
スアダー。

年度から 2007 年度の 3 ケ年間、日本学術振興会のベトナムとの二国間共同研究「メコンデルタの海岸沿岸域における変化と人間活動の影響に関する研究」が行われた。日本学術振興会に対応するベトナム側の省庁はベトナム科学技術院 (VAST) で、ベトナム科学技術院は、研究機関を擁する政府機関であるとともに、研究予算を配分する省庁でもある。本課題はベトナムとの二国間共同研究が始まって初めての採択テーマであった。ベトナム側の代表者は、先に述べた地理副研究所のラップさんである。

2005 年の最初の調査で、地中レーダー探査装置 (GPR) を日本から持ち込みメコンデルタの浜堤で調査を行った。日本の九十九里浜平野では前浜堆積物が明瞭に識別できていたことから (Tamura *et al.*, 2008; 田村ほか, 2008), 同様の結果を期待して、浜堤がよく発達した地域で調査を行ったが (七山, 2006; 渡辺, 2008), 結果は芳しくなかった。海側に緩く傾斜する反射が見られない。いくつか試みたがよく似ている。それではと、実際の海浜に向かい、メコンデルタ中央部のチャービン省の海岸、バードンビーチに向かうと、そこには今までに見たこともない海浜の景色が広がっていた。潮間帯である前浜には、数列の沿岸州が発達し、潮が引くとそれらが露出している。日本の浜堤平野で見られるような前浜は存在しなく、沿岸州とトラフが分布する上部外浜に近い。海側に単調に傾斜する反

射面が見られなかった主な原因は、この沿岸州とトラフであった。メコンデルタは上記したように潮差が 3 ~ 4 m に達する。潮間帯は、満潮時には、上部外浜と似た環境となり、干潮時には干潟のように露出する。これでは、海側に傾く明瞭な反射面が見られないのも無理はない。

調査は未だ途中で、さてこれからどうするか。GPR 調査を継続することは難しい。咄嗟の判断で、この見たこともない潮間帯の沿岸州とトラフのモニタリングを行えば新しいことが見つかるかもしれないという直感を頼りに、潮間帯の測量をすることに急遽変更する。継続して行うためには、ベンチマークと潮汐表が必要になる。慌てて、ニャチャンの海洋研究所から潮汐表を取り寄せ、建物などを基準点に測量を実施することになる。幸いに GPR 調査用に測量の機材は揃っている。結果的に 3 ケ年のプロジェクトで秋に 3 回、春に 2 回の測量を潮汐ビーチで実施することができた。すべて人海戦術で、400 m の巻縄を引き、オートレベルで測量を行った。村上文敏さん、七山 太さん、田村 亨さん、渡辺和明さん、立石雅昭さん、洞口圭史さん、またベトナム側のラップさん、オアンさん、スタッフのランさんほか、多くの方々に参加、協力を得て、調査を遂行できた (立石, 2007; 渡辺, 2008) (第 8 図)。今ならドローンを用いた空中写真で容易に測量ができたかもしれない。



第 8 図 チャービン省バードン海岸での測量と堆積物調査, GPR 調査。

これらの調査の結果、堆積物と地形は乾季と雨季で大きく異なることが明らかになった。雨季は、南からの風波が卓越するが比較的弱く、河川からは大量の土砂が供給される。潮間帯上部には沿岸州も発達するが、下部は明瞭で、河からの細粒堆積物（泥）の供給を受けて、堆積物も細くなる。一方乾季は、北西からの風波が強く、水位も高い。沿岸州は潮間帯域すべてで地形が明瞭になり、堆積物も粗粒になる。雨季に潮間帯下部から潮下帯に堆積していた泥は、再浮遊し、運び去られる。この際懸濁した泥が南西方向に運ばれてメコンデルタの南西端のカマウ半島が形成されているのである。メコンデルタの沿岸域は、モンスーンの影響を強く受けていることが明らかになった (Tamura *et al.*, 2010)。この3ヶ年の調査の後に行ったバードン海岸の調査では (第9図)、福島第一原子力発電所の事故に由来する放射性核種が2011年の秋の調査で確認されており、半減期が53日しかないベリリウム7 ( $Be-7$ )を用いて、調査年雨季 (夏季) に供給された泥の識別に成功している (Kanai *et al.*, 2013; 金井ほか, 2013)。

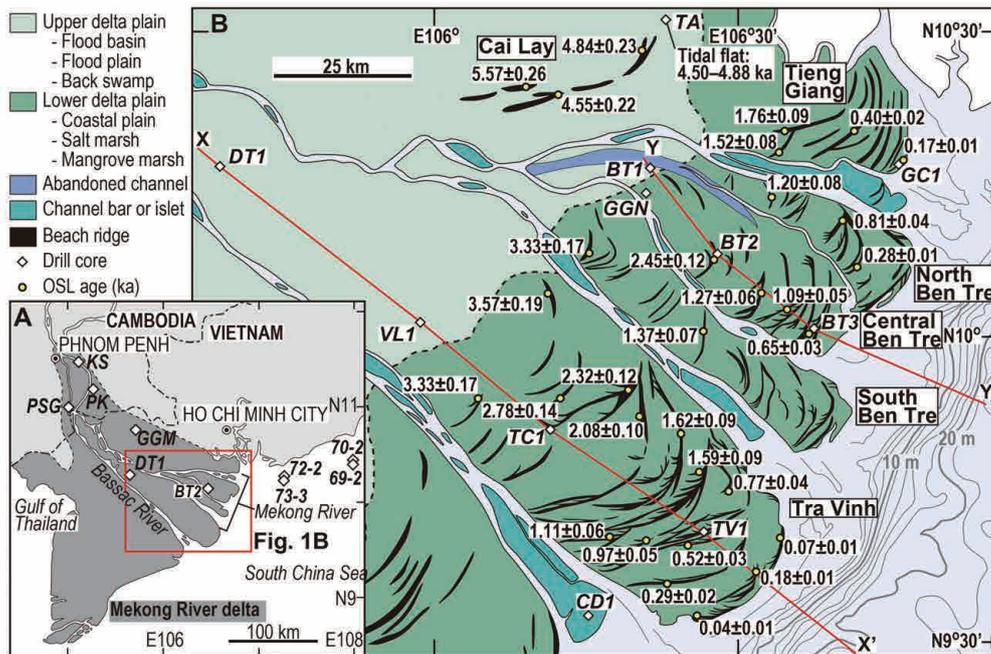
### 8. ハノイとハイフォンにおいてデルタの会合

ベトナムとの共同研究では、現地で行った研究集会や勉強会を持った。ベトナム地質鉱物局との共同研究の成果は、2004年2月12日にハノイのベトナム地質鉱物局本部において研究発表会を開催した。ベトナム地質鉱物局

に加えて、ベトナム国家大学ハノイ校、ハノイ鉱山地質大学、海洋地質・地球物理研究所などから、合わせて70名を超える参加があった。この研究発表会については、ベトナム地質鉱物局からプロシーディングが出版されている (Nguyen *et al.*, 2004)。

2007年7月5日には、ハノイのベトナム科学技術院海洋地質・地球物理研究所 (Institute of Marine Geology and Geophysics (IMGG): 元の Institute of Oceanography in Hanoi) において公開デルタセミナー「Delta Evolution and Deltas at Risk」を開催した。ベトナムから2名、中国、華東師範大学の Chen Zhougyuan 教授、バングラデシュ、ラジャヒ大学の Md Badrul Islam 教授と筆者が講演し、約80名が参加した。セミナーのお世話を頂いたのが、当時副所長で、現在所長をしている Phung Van Phach (ファック)さんである。

アジアにおけるデルタ研究の推進やネットワーク構築を目指して、2003～2008年にIGCP-475を米国の Steven Goodbred さんと一緒に行ってきたが (齋藤, 2016)、更なる進展を期して、日本学術振興会のアジア・アフリカ学術基盤形成事業「メガデルタ監視技術に関するアジアにおけるネットワーク構築と人材育成」を2008年度から2010年度の3ヶ年実施した。この事業では、日本、中国、ベトナム、タイの4ヶ国に焦点を絞り、中国からは中国海洋大学海洋地球科学学院の Yang Zuosheng 教授、ベトナムからはベトナム科学技術院海洋環境資源研究所



第9図 メコンデルタの浜堤から得られたOSL年代。Tamura *et al.* (2012a)より。チャービン (Tra Vinh) の0.07ka辺りがバードン海岸。

の Tran Duc Thanh (タン) 所長, タイからはチュラロンコン大学地質学科の Jarupongsakul Thanawat (タナワット) 准教授が各国のとりまとめを行った。この事業の会合「沿岸侵食の監視と評価に関するセミナー」を, CCOP の DelSEA プロジェクトと共催し, 2010 年 11 月 24 日~29 日にハイフオンのベトナム科学技術院海洋環境資源研究所 (Institute of Marine Environment and Resources (IMER): 元の Haiphong Institute of Oceanology) がホストとなり実施した (斎藤, 2011)。12 ヶ国から約 50 名が参加し, 研究発表の後には, 沿岸侵食が顕著な紅河河口の南部地域, ニンビンの完新世中期の離水ノッチ (後述する第 10 図参照) とハノイ周辺の旧河道の巡検が行われた。

これら以外にも, ハノイでは, ベトナム国家大学ハノイ校のハノイ科学大学 (Hanoi University of Science; Vietnam National University, Hanoi) の Tran Nghi 教授, ハノイ鉱山地質大学 (Hanoi University of Mining and Geology) の Mai Thanh Tan 教授にはお世話になり, 大学においてセミナーを開催して頂いた。

## 9. 完新世におけるベトナムの海水準変動

ベトナムにおける研究成果のひとつに完新世の海水準変動とデルタとの関係がある。完新世のデルタは, 世界の 36 のデルタをレビューした Stanley and Warne (1994) によって, 中期完新世以降の海水準の上昇速度が低下したことに応答してデルタの形成が始まったことが知られている。最終氷期最盛期以降から前期完新世までは海水準の上昇速度が大きく, 河口域での堆積量では海岸線を維持できず, 溺れ谷を形成しつつ, 海岸線は後退していた。上昇速度が低下したことから, 河口での堆積によって, 海岸線が海側に前進を始め, デルタが形成され始めたのである。徐々に海水準の上昇速度が遅くなるならば, 土砂供給の大きな河川では, より早くデルタの形成が始まるはずだが, 年代に大きな差異はない。完新世初期における海水準の上昇に伴う海岸線の後退は一律でなく, 9,000 年前から 8,500 年前に急速に海岸線が陸側に移動していることがアジアのデルタの研究から明らかになってきた (Hori and Saito, 2007)。特に 8,500 年頃は海水準の上昇が大きく, その上昇の後に 8,000 年頃からデルタが前進し始めていることが, メコンデルタのカンボジア低地における研究から明らかになった (Tamura *et al.*, 2009; Nguyen *et al.*, 2010)。同様な例は, オランダのライン・ムッセデルタや中国の長江デルタなどからも報告されている (Hijma and Cohen, 2010; Wang *et al.*, 2013; Song

*et al.*, 2013)。メコン河河口部の海水準変動の応答については, Tamura *et al.* (2009) の後, 花粉分析によって潮間帯のマングローブ群集の詳細な解析が行われ, 8,200 年前を境に海進から海退に転じたことが明らかになっている (Li *et al.*, 2012)。また河口部ではない周辺部 (Plain of Reeds) における堆積環境の変化については, Hanebuth *et al.* (2012) によって, エスチュアリーからデルタ環境への変遷が明らかにされている。

完新世の始まりには, ヤンガードリアス直後の急激な海水準の上昇 (融水パルス 1B: Meltwater Pulse 1B) があるとされていたが (Fairbanks, 1989), 近年の研究ではそのような急激な海面上昇は確認されていない (Bard *et al.*, 2010; Tjallingii *et al.*, 2014)。9,000 年前から 8,000 年前の海水準の上昇については, サンゴを用いた海水準変動の研究においても連続的な良質な記録は報告されていなく (Smith *et al.*, 2011), オランダや中国においても 8500 年前以降に限られ, 連続的なデータは報告されていなかった。この 9,000 年前から 8,000 年前の急激な海面上昇に対し, メコンデルタの沖合と陸域のデータを取りまとめて, 初めて海面上昇の全容が明らかになっている (Tjallingii *et al.*, 2014)。彼らのデータは, ハイドロアイソスタシーの効果が除かれていないので若干誇張されているが, その上昇の規模や速度を見ることができる。最終氷期最盛期後では, 融水パルス 1A (Meltwater Pulse 1A) が最も大きい (Fairbanks, 1989; Deschamps *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2016), それに次ぐ上昇であったことがわかる。完新世のデルタは, この急激でかつ大規模な海面上昇の直後から形成が始まったのである。これはデルタに限ったことではないだろう。現在の海岸沿岸環境, 海岸沿岸地形すべてに当てはまるに違いない。

この海面上昇の中心は 8,500 年前である。8,500 年前といえば, 北米にあったローレンタイド氷床の背後の氷河湖であるアガシー湖が決壊・消滅し, 淡水が一気にハドソン湾を經由して北大西洋に供給された時期と重なる。この淡水供給が北大西洋から始まる海洋大循環に影響し, 8,200 年前の寒冷化が起こった。 (Barber *et al.*, 1999)。しかし, アガシー湖の淡水だけでは, 海面は 50 cm 程度しか上昇しない (Teller *et al.*, 2002)。氷床そのものが崩壊し, 融解または冰山として海洋に流出したのである (Lajeunesse and St-Onge, 2008; Jakobsson, 2008)。Gregoire *et al.* (2012) もこの時期のローレンタイド氷床の融水過程をシミュレーションから提示している。

最終氷期最盛期以降の南シナ海南部のスندا陸棚における海水準変動や地層形成については, Hanebuth *et al.*

(2011)で取りまとめが行われており、ハイドロアイソタシーによって、海水準変動曲線がタイ湾奥部からメコンデルタ域でどのように違うかが示されている。

デルタの形成が始まって以降の最も大きな変化は、約4千前頃の相対的な海水準の低下である。紅河デルタでは最も内陸側にデルタ平野が離水した完新世の海成段丘が見られる。ボーリング調査や露頭調査によれば中期完新世の高い海水準に対応した潮間帯の堆積物が離水しており、堆積は約4千年前頃まで継続している (Funabiki *et al.*, 2007, 2012)。同様なデルタ面の離水は長江デルタの内側でも見られ、同じく4千年前頃に離水している (Song *et al.*, 2013)。

ベトナムでは紅河デルタの北東部のハロン湾と、陸のハロン湾と呼ばれるデルタ南東部のニンビンにおいて、見事なノッチを観察することができる (第10図)。現在の海面から2~3m上位にあるノッチが、中期完新世に形成されたノッチである (Tanabe *et al.*, 2003c, 2006)。またメコンデルタでもタイ湾側において島状に分布する石灰岩の基盤にノッチが見られる (Nguyen *et al.*, 2000; Kiernan, 2011) (第10図)。これらのノッチから報告されている年代を見ると、ノッチは約4千年前頃に放棄されており、デルタの完新世の海成段丘の形成時期とほぼ同じである。なお、中期完新世の高海面については、メコンデルタの北東の海岸でも離水したビーチロックが報告されている (Stattegger *et al.*, 2013)。

現在国際地質科学連合 (IUGS) の国際層序委員会 (ICS) の第四紀層序委員会 (SQS) において、完新世の細分が検討されている。Walker *et al.* (2012) にその詳細が示されており、前期と中期の境が8,200年前、中期と後期の境が4,200年前である。これらの境は、デルタの形成が始まった時期と完新世の高位面 (デルタ平野の内側の離水面) の形成時期とほぼ一致する。より高時間分解能の解析を期待したい。

## 10. デルタ堆積物に記録された人間活動の歴史

デルタ堆積物には、完新世における様々な人間活動の歴史が記録されている。紅河デルタの完新世における堆積した地層を数千年ごとに区切って、その堆積量の変化を見ると、9千年前から2千年前までは年間2千万トンでほぼ同じだが、過去2千間は年間5千万トンに急増する (Tanabe *et al.*, 2006)。ダムによる土砂輸送が減少する以前の年間1億トンから1億3千万トンには及ばないが、過去2千間の間でも更に急増していることが推定さ

れる。堆積物に含まれる花粉分析の結果からも、3,300年前から2,100年前の間に山地草本が増加しており、2,100年前から1,500年前にはイネ科の花粉が増加する (Li *et al.*, 2006a, b)。これらの結果から、紅河では流域における森林伐採とそれに伴う土壌流出がこの時期に顕著になったことがわかる。また堆積物に含まれる炭質物の含有量の変化を見ると、5,000年前から1,500年前までは、気候変動とリンクし、含有量が少ない時期は寒冷な時期に一致する。しかし、過去1,500年間はこのような関係は明瞭ではなく、含有量の多い時期は王朝の交代時期と重なり、戦争による火災が炭質物の増加として堆積物に記録されている (Li *et al.*, 2009)。この研究は、Li Zhen (李珍) さんが第41回CCOP年次総会においてEager賞を受賞し、その副賞の資金を基に行われた研究である。

## 11. 数十年から数百年の変動の解明

これまで述べたデルタの変遷や海水準変動は、沖積層の調査では時間スケールが千年から数千年であり、海浜の調査は季節から数年であり、残念ながらその間には大きなギャップがある。従来の手法ではこのギャップを埋めることは難しかったが、当部門の田村 亨さんがメコンデルタの完新世の浜堤から採取した海浜堆積物の石英砂の光ルミネッセンス (OSL) 年代を、イギリス、シェフィールド大学のMark Bateman教授と共同で測定したことによって、新たな地平を切り拓くことができた。オアンさんらの研究によってメコンデルタでは過去約3千間は浜堤が発達してきたことがわかっていたので (Ta *et al.*, 2005)、この浜堤の海浜堆積物を系統的に採取すれば、浜堤の平面的な分布とこれらの年代から、当時の海岸線を詳細に復元することが可能になる。OSL年代測定による研究が、ラップさんやオアンさんとの共同研究によって行われ、過去3,500年間の詳細な海岸線の移動やメコン河の分流の歴史が明らかになった (Tamura *et al.*, 2012a, b) (第9図)。世界のデルタの中で、ここまで詳細に地形変化と変遷が明らかになっているデルタは少ない。

## 12. 危機的な現在のデルタの環境

現在世界のデルタの多くは、危機的な状況にある。特にアジアのデルタは、ダム建設や砂利採取などの流域における人間活動と、干潟の埋め立てやマングローブ伐採等による土地利用の変化、地下水の汲み上げなどのデルタ内の人間活動によって、大きな影響を受けている。ベトナムの



第10図 ベトナムのノッチ。左上：ハロン湾，数段のノッチが確認出来る。左下：ハロン湾，上段の連続性の良いノッチが中期完新世，右上：ニンビンの中期完新世ノッチ，右下：メコンデルタのノッチ，箱尺は3 m，中段の連続性の良いノッチが中期完新世，上段は年代が得られていない。メコンデルタのノッチは，タイ湾側に見られる。2段ノッチの下段が完新世ノッチ。上段は年代が得られていない。

デルタも例外ではなく，流域のダム建設によって河川からの運搬土砂量は大きく減少してきている (Thanh *et al.*, 2004 ; Lu *et al.*, 2014)。また流域の砂利採取量は非常に大きく，2011年だけで，主河道から 3,448 万  $m^3$  の砂利採取が行われている (Bravard *et al.*, 2013)。またメコンデルタでも 1998年から2008年の10年間に2本の主河道において 1.3 m 水深が深くなっており，2億  $m^3$  の堆積物を失っており，年間にすると平均で2千万  $m^3$  である (Brunier *et al.*, 2014)。年間の浮遊堆積物運搬量が1億6千万トンとしたら，ベッドロードの運搬量は1割程度であることから，1,600万トンしかない(約1千万  $m^3$ )。供給量の数倍の砂利採取がメコン河で行われていることになる。また現在の浮遊堆積物運搬量やベッドロードの量は，1億6千万トンよりもはるかに少なくなっていることも報告されている。運搬土砂量の減少や砂利採取は，デルタの発達を阻害し，海岸侵食や沿岸侵食を導くことが予想され

る。実際にメコンデルタでは，2003年から2012年間の海岸線の変化を見ると，2003年から2007年と2007年から2012年を比べると，デルタ河口前面では陸域の拡大速度が，0.78  $km^2/y$  から 0.26  $km^2/y$  に減少してきている (Anthony *et al.*, 2015)。また沖合でも2003年から2012年間に，懸濁物濃度が減少してきていることが衛星データの解析から示されている (Loisel *et al.*, 2014)。第11図の写真のように，メコンデルタでは多くの地域で海岸侵食が目につくようになってきている。更に，地下水の汲み上げ過多による地盤沈下が2007年から2010年間のInSARの解析によりメコンデルタの広域で示されており (Erban *et al.*, 2013, 2014 ; Schmidt, 2015)，環境は悪化の一途をたどっている。これら約10年間の変化は，デルタが発達し，成長してきた地形変化とは調和的でない。これらのギャップを埋める数十年間から数百年間の解析と，変動と変化の要因を明らかにする必要がある。よ



第10図 メコンデルタの海岸侵食。全てチャービン (Tra Vinh) 海岸。

り長期的な変化や変動の中で現在の変化を評価する必要があるだろう。また、現在のデルタの環境をいかに正確にモニタリングするかも重要な課題である。運搬土砂量、砂利採取量、またデルタ平野、河道から沿岸域の地形変化など、基礎的なデータの定常的な取得技術の確立も重要な課題である。様々な衛星データの活用が大きな役割を担うことは間違いない (Tanaka *et al.*, 2016)。持続的なデルタの利活用とデルタの保全のためにも、早急に対応することが重要である。

### 13. おわりに

小論では、筆者らが行ってきたベトナムでの研究や活動を、その背景を中心に述べた。ベトナムとの共同研究では、ベトナム科学技術院の研究所であるホーチミン市資源地理研究所 (元の地理副研究所) のラップさんとオアンさん、ハノイの海洋地質・物理研究所のファックさん、ハイフオンの海洋環境資源研究所のタンさん、またベトナム

地質鉱物総局のランさんやタンさん、彼らと巡り会えたことが、ここに述べた数多くの成果を得ることができた最大の要因である。幸いにも、2015年にはベトナム科学技術院 (VAST) からホーチミン市資源地理研究所の発展に貢献したとして VAST Campaign Medal を授与して頂いた (<https://www.gsj.jp/researches/topics/vast-campaign-medal.html> 2016/2/17 確認)。身に余る光栄である。約20年間のベトナムとの共同研究の間に、人が育ち、研究は大きく進展した。それに少しでも貢献できたとしたら、この上ない幸せである。今、ベトナムのメガデルタは環境が悪化しつつある。特にこの20数年間における流域とデルタ域の人間活動の影響が大きく、これに地球温暖化に伴う海面上昇や気候変動が助長しようとしている。これらの対策や環境保全のために、今後も科学的な基礎を提供できればと思っている。

## 文 献

- Anthony, E.J., Brunier, G., Besset, M., Goichot, M., Dussouillez, P. and Nguyen, V.L. (2015) Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human Activities. *Scientific Reports*, **5**, 14745.
- Barber, D.C., Dyke, A., Hillaire-Marcel, C., Jennings, A.E., Andrews, J.T., Kerwin, M.W., Bilodeau, G., McNeely, R., Southon, J., Morehead, M.D. and Gagnon, J.-M. (1999) Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. *Nature*, **400**, 344–348.
- Bard, E., Hamelin, B. and Delanghe-Sabatier, D. (2010) Deglacial meltwater pulse 1B and Younger Dryas sea levels revisited with boreholes at Tahiti. *Science*, **327**, 1235–1237.
- Bravard, J.-P., Goichot, M. and Gaillot, S. (2013) Geography of sand and gravel mining in the Lower Mekong River. First survey and impact assessment. *EchoGéo*, **26**, URL : <http://echogeo.revues.org/13659> ; DOI : 10.4000/echogeo.13659. (2016/2/17 確認)
- Brunier, G., Anthony, E.J., Goichot, M., Provansal, M. and Dussouillez, P. (2014) Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilization. *Geomorphology*, **224**, 177–191.
- Deschamps, P., Durand, N., Bard, E., Hamelin, B., Camoin, G., Thomas, A.L., Henderson, G.M., Okuno, J. and Yokoyama, Y. (2012) Ice-sheet collapse and sea-level rise at the Bølling warming 14,600 years ago. *Nature*, **483**, 559–564.
- Erban, L.E., Gorelick, S.M., Zebker, H.A. and Fendorf, S. (2013) Release of arsenic to deep groundwater in the Mekong Delta, Vietnam, linked to pumping-induced land subsidence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 13751–13756.
- Erban, L.E., Gorelick, S.M., Howard, A. and Zebker, H.A. (2014) Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, **9**, 084010.
- Fairbanks, R. G. (1989) A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, **342**, 637–642.
- Funabiki, A., Haruyama, A., Nguyen, V.Q., Pham, V.H. and Dinh, H.T. (2007) Holocene delta plain development in the Song Hong (Red River) delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, **30**, 518–529.
- Funabiki, A., Saito, Y., Vu, V.P., Nguyen, H. and Haruyama, S. (2012) Natural levees and human settlement in the Song Hong (Red River) delta, northern Vietnam. *The Holocene*, **22**, 637–648.
- Gregoire, L.J., Payne, A.J. and Valdes, P.J. (2012) Deglacial rapid sea level rises caused by ice-sheet saddle collapses. *Nature*, **487**, 219–222.
- Hanebuth, T.J.J., Saito, Y., Tanabe, S., Vu, Q.L. and Ngo, Q.T. (2006) Sea levels during late marine isotope stage 3 (or older?) reported from the Red River delta (northern Vietnam) and adjacent regions. *Quaternary International*, **145–146**, 119–134.
- Hanebuth, T.J.J., Proske, U., Saito, Y., Nguyen, V.L. and Ta, T.K.O. (2012) Early growth stage of a large delta – transformation from estuarine-platform to deltaic progradational conditions (the northeastern Mekong River Delta, Vietnam) . *Sedimentary Geology*, **261–262**, 108–119.
- Hanebuth, T.J.J., Voris, H.K., Yokoyama, Y., Okuno, J., and Saito, Y. (2011) Formation, fate, and implications of depocentres along the sedimentary pathway on the Sunda Shelf (Southeast Asia) over the past 140 ka. *Earth-Science Reviews*, **104**, 92–110.
- Hijma, M.P. and Cohen, K.M. (2010) Timing and magnitude of the sea-level jump precluding the 8,200 yr event. *Geology*, **38**, 275–278.
- 堀 和明・斎藤文紀 (2003) 大河川デルタの地形と堆積物. *地学雑誌*, **112**, 337–359.
- Hori, K. and Saito, Y. (2007) An early Holocene sea-level jump and delta initiation. *Geophysical Research Letters*, **34**, L18401.
- Hori, K., Tanabe, S., Saito, Y., Haruyama, S., Nguyen, V. and Kitamura, A. (2004) Delta initiation and Holocene sea-level change: example from the Song Hong (Red River) delta, Vietnam. *Sedimentary Geology*, **164**, 237–249.
- Jakobsson, M. (2008) The last stampede of a glacial lake. *Nature Geoscience*, **1**, 152–153.

- Kanai, Y., Saito, Y., Tamura, T., Nguyen, V.L., Sato, A. and Ta, T.K.O. (2013) Sediment erosion revealed by study of Cs isotopes derived from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Geochemical Journal*, **47**, 79–82.
- 金井 豊・齋藤文紀・田村 亨・Nguyen Van Lap・Ta Thi Kim Oanh・佐藤明夫 (2013) メコンデルタ堆積物におけるベリリウム-7, 鉛-210 及び放射性セシウム同位体の分布と堆積環境の季節変化. *地球化学*, **47**, 89–100.
- Kiernan, K. (2011) Monadnocks of the Mekong delta: character and evolution. *Cave and Karst Science*, **38**, 71–80.
- Lajeunesse, P. and St-Onge, G. (2008) The subglacial origin of the lake Agassiz-Ojibway final outburst flood. *Nature Geoscience*, **1**, 184–188.
- Li, Z., Saito, Y., Matsumoto, E., Wang, Y., Tanabe, S. and Vu, Q.L. (2006a) Climate change and human impact on the Song Hong (Red River) delta, Vietnam, during the Holocene. *Quaternary International*, **144**, 4–28.
- Li, Z., Saito, Y., Matsumoto, E., Wang, Y., Haruyama, S., Hori, K. and Doanh, L.Q. (2006b) Palynological record of climate change during the last deglaciation from the Song Hong (Red River) delta, Vietnam. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **235**, 406–430.
- Li, Z., Saito, Y., Dang, P.X., Matsumoto, E. and Vu, Q.L. (2009) Warfare rather than agriculture as a critical influence on fires in the late Holocene, inferred from northern Vietnam. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **106**, 11490–11495.
- Li, Z., Saito, Y., Mao, L.M., Tamura, T., Li, Z., Song, B., Zhang, Y.L., Lu, A.Q., Sieng, S. and Li, J. (2012) Mid-Holocene mangrove succession and its response to sea-level change in the upper Mekong delta, Cambodia. *Quaternary Research*, **78**, 386–399.
- Liu, J., Milne, G.A., Kopp, R.E., Clark, P.U. and Shennan, I. (2016) Sea-level constraints on the amplitude and source distribution of Meltwater Pulse 1A. *Nature Geoscience*, **9**, 130–134.
- Loisel, H., Mangin, A., Vantrepotte, V., Dessailly, D., Dinh, D.N., Garnesson, P., Ouillon, S., Lefebvre, J.-P., Mériaux, X. and Phan, T.M. (2014) Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade. *Remote Sensing of Environment*, **150**, 218–230.
- Lu, X.X., Matti Kumm, M. and Oeurng, C. (2014) Reappraisal of sediment dynamics in the Lower Mekong River, Cambodia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **39**, 1855–1865.
- Mathers, S.J., Davies, J., McDonald, A., Zalasiewicz, J.A. and Marsh, S. (1996) The Red River Delta of Vietnam. British Geological Survey Technical Report WC/96/02, 41p.
- Milliman, J.D. and Farnsworth, K.L. (2013) River Discharge to the Coastal Ocean. A Global Synthesis. Cambridge University Press, 394p.
- Murakami, F., Saito, Y., Kinoshita, Y., Tateishi, M., Nguyen, T.L., Luong, B.L. and Nguyen, T.T. (2004) High-resolution seismic reflection survey in the Mekong river delta, Vietnam. In Nguyen, T.V., Saito, Y., Nguyen, V.Q., and Ngo, Q.T., eds., *Stratigraphy of Quaternary system in deltas of Vietnam*. Department of Geology and Minerals of Vietnam, Hanoi, Vietnam, 25–35.
- 中田正夫・奥野淳一 (2011) グレイシオハイドロアイソスタシー. *地形*, **32**, 327–331.
- 七山 太 (2006) 産総研・沿岸都市地質研究グループ, 新潟大学とベトナム VAST の共同による地中レーダーを用いたメコンデルタの浅層地下構造の調査風景. *地質ニュース*, no.626, 表紙.
- Nguyen, T.V., Saito, Y., Nguyen, V.Q. and Ngo, Q.T., eds. (2004) *Stratigraphy of Quaternary system in deltas of Vietnam*. Department of Geology and Minerals of Vietnam, Hanoi, 223p.
- Nguyen, V.L., Ta, T.K.O. and Tateishi, M. (2000) Late Holocene depositional environments and coastal evolution of the Mekong River Delta, southern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, **18**, 427–439.
- Nguyen, V.L., Ta, T.K.O. and Saito, Y. (2010) Early Holocene initiation of the Mekong River delta, Vietnam, and the response to Holocene sea-level changes detected from DT1 core analyses. *Sedimentary Geology*, **230**, 146–155.
- 齋藤文紀 (2005a) ヒマラヤチベットの隆起とアジアの大規模デルタ：デルタの特徴と完新世における進展.

- 地質学雑誌, **111**, 717-724.
- 斎藤文紀 (2005b) 国際デルタ会議開催される (2005年1月10日~16日ベトナムホーチミン市). GSJ Newsletter, no. 5, 5.
- 斎藤文紀 (2011) JSPS - CCOP/GSJ/AIST デルタの沿岸侵食に関する合同セミナー報告 (紅河デルタ). GSJ Newsletter, no. 79, 3-5.
- 斎藤文紀 (2016) アジアの大陸棚から沿岸域の研究. 第四紀研究, **55**, 49-57.
- Schmidt, C. (2015) Alarm over a sinking delta: Rise and Fall project seeks ways to slow land subsidence in Vietnam's populous Mekong delta. *Science*, **348**, 845-846.
- Smith, D.E., Harrison, S., Firth, C.R. and Jordan, J.T. (2011) The early Holocene sea level rise. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 1846-1860.
- Song, B., Li, Z., Saito, Y., Okuno, J., Lu, A.Q., Hua, D., Li, J., Li, Y.X. and Nakashima, R. (2013) Initiation of the Changjiang (Yangtze) delta and its response to the mid-Holocene sea level change. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, **388**, 81-97.
- Stanley, D. J. and Warne, A.G. (1994) Worldwide initiation of Holocene deltas by deceleration of sea-level rise, *Science*, **265**, 228-231.
- Stattegger, K., Tjallingii, R., Saito, Y., Michelli, M., Nguyen, T.T. and Wetzel, A. (2013) Mid to Late Holocene sea-level reconstruction of Southeast Vietnam using beachrock and beach-ridge deposits. *Global and Planetary Change*, **110**, 214-222.
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y. (2001) Sediment facies and diatom and foraminifer assemblages of Late Pleistocene-Holocene incised-valley sequence from the Mekong River Delta, Bentre Province, Southern Vietnam: the BT2 core. *Journal of Asian Earth Sciences*, **20**, 83-94.
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y., Nakamura, T. (2002a) Sediment facies and late Holocene progradation of the Mekong River Delta in Bentre Province, southern Vietnam: an example of evolution from a tide-dominated to a tide-and wave-dominated delta. *Sedimentary Geology*, **152**, 313-325.
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I., Tanabe, S. and Saito, Y. (2002b) Holocene delta evolution and sediment discharge of the Mekong River, southern Vietnam. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 1807-1819.
- Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Konayashi, I. and Saito, Y. (2005) Holocene delta evolution and depositional models of the Mekong River Delta, southern Vietnam. In Giosan, L. and Bhattacharya, J.P., eds., *River Deltas - Concepts, Models and Examples*, SEPM special publication no. **83**, 453-466.
- Tamura T., Murakami, F., Nanayama, F., Watanabe, K. and Saito, Y. (2008) Ground-penetrating radar profiles of Holocene raised-beach deposits in the Kujukuri strand plain, Pacific coast of eastern Japan. *Marine Geology*, **248**, 11-27
- 田村 亨・村上文敏・七山 太・斎藤文紀・渡辺和明 (2008) 海浜堆積物の地中レーダー記録. 地質ニュース, no. 642, 19-24.
- Tamura, T., Saito, Y., Sieng, S., Ben, B., Kong, M., Sim, I., Choup, S. and Akiba, F. (2009) Initiation of the Mekong River delta at 8 ka: evidence from the sedimentary succession in the Cambodian lowland. *Quaternary Science Reviews*, **28**, 327-344.
- Tamura, T., Horaguchi, K., Saito, Y., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Ta, T.K.O., Nanayama, F. and Watanabe, K. (2010) Monsoon-influenced variations in morphology and sediment of a mesotidal beach on the Mekong River delta coast. *Geomorphology*, **116**, 11-23.
- Tamura, T., Saito, Y., Nguyen, V.L., Ta, T.K.O., Bateman, M.D., Matsumoto, D. and Yamashita, S. (2012a) Origin and evolution of inter-distributary delta plains, insights from Mekong River delta. *Geology*, **40**, 303-306.
- Tamura, T., Saito, Y., Bateman, M.D., Nguyen, V.L., Ta, T.K.O. and Matsumoto, D. (2012b) Luminescence dating of beach ridges for characterizing multi-decadal to centennial deltaic shoreline changes during Late Holocene, Mekong River delta. *Marine Geology*, **326-328**, 140-153.
- Tanabe, S., Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I. and Saito, Y. (2003) Delta Evolution Model Inferred from the Holocene Mekong Delta, Southern Vietnam. In Sidi, F.H., Nummedal, D., Imbert, P., Darman, H., Posamentier, H.W., eds., *Tropical Deltas of Southeast Asia - Sedimentology, Stratigraphy, and Petroleum*

- Geology*, SEPM Special Publication no. 76, 175–188.
- Tanabe, S., Hori, K., Saito, Y., Haruyama, S., Doanh, L.Q., Saito, Y., Hiraide, S. (2003b) Sedimentary facies and radiocarbon dates of the Nam Dinh-1 core from the Song Hong (Red River) delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, **21**, 503–513.
- Tanabe, S., Hori, K., Saito, Y., Haruyama, S., Vu, V.P. and Kitamura, A. (2003c) Song Hong (Red River) delta evolution related to millennium-scale Holocene sea-level changes. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 2345–2361.
- Tanabe, S., Saito, Y., Vu, Q.L., Hanebuth, T.J.J. and Ngo, Q.L. (2006) Holocene evolution of the Song Hong (Red River) delta system, northern Vietnam. *Sedimentary Geology*, **187**, 29–61.
- Tanaka, G., Komastu, T., Saito, Y., Nguyen, D.P. and Vu, Q.L. (2011) Temporal changes in ostracod assemblages during the past 10,000 years associated with the evolution of the Red River delta system, northeastern Vietnam. *Marine Micropaleontology*, **81**, 77–87.
- Tanaka, A., Uehara, K., Tamura, T., Saito, Y., Nguyen, V.L. and Ta, T.K.O. (2016) Temporal changes in river-mouth bars from L-band SAR images: a case study in the Mekong River delta, South Vietnam. In Tessier, B., Reynaud, J.-Y., eds., *Contributions to Modern and Ancient Tidal Sedimentology Proceedings of the Tidalites 2012 Conference*. Special Publication of International Association of Sedimentologists, no. 47, 21–33, John Wiley & Sons.
- 立石雅昭 (2007) ベトナム、メコンデルタ海岸の沿岸砂州、その形態的变化に関する調査ノート. 堆積学研究, no. 65, 29–32.
- Teller, J.T., Leverington, D.W. and Mann, J.D. (2002) Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 879–887.
- Thanh, T.D., Saito, Y., Huy, D.V., Nguyen V.L., Ta, T.K.O. and Tateishi, M. (2004) Regimes of human and climate impacts on coastal changes in Vietnam. *Regional Environmental Changes*, **4**, 49–62.
- Tjallingii, R., Stattegger, K., Stocchi, P., Saito, Y. and Wetzel, A. (2014) Rapid flooding of the southern Vietnam shelf during the early to mid-Holocene. *Journal of Quaternary Science*, **29**, 581–588.
- Walker, M.J.C., Berkelhammer, M., Bjorck, S., Cwynar, L.C., Fisher, D.A., Long, A.J., Lowe, J.J., Newnham, R.M., Rasmussen, S.O. and Weiss, H. (2012) Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science*, **27**, 649–659.
- Wang, Z.H., Zhan, Q., Long, H.Y., Saito, Y., Gao, X.Q., Wu, X.X., Li, L. and Zhao, Y.N. (2013) Early to mid-Holocene rapid sea-level rise and coastal response on the southern Yangtze delta plain, China. *Journal of Quaternary Science*, **28**, 659–672.
- 渡辺和明(2008) メコンデルタ海岸測量記. 地質ニュース, no. 650, 2–14.
- Woodroffe, C.D., Nicholls, R.J., Saito, Y., Chen, Z. and Goodbred, S.L. (2006) Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change. In Harvey, N., ed., *Global Change and Integrated Coastal Management: the Asia-Pacific Region*. Coastal Systems and Continental Margins, **10**. Springer, 277–314.
- 横山祐典 (2007) 地球温暖化と海面上昇—氷床変動・海水準上昇・地殻変動. 日本第四紀学会・町田 洋・岩田修二・小野 昭編「地球史が語る近未来の環境」東京大学出版会, 33–54.

---

SAITO Yoshiki (2016) Collaborative study on megadeltas in Vietnam.

---

(受付: 2016年2月17日)

# オレゴンから在外研究報告

東宮昭彦<sup>1)</sup>

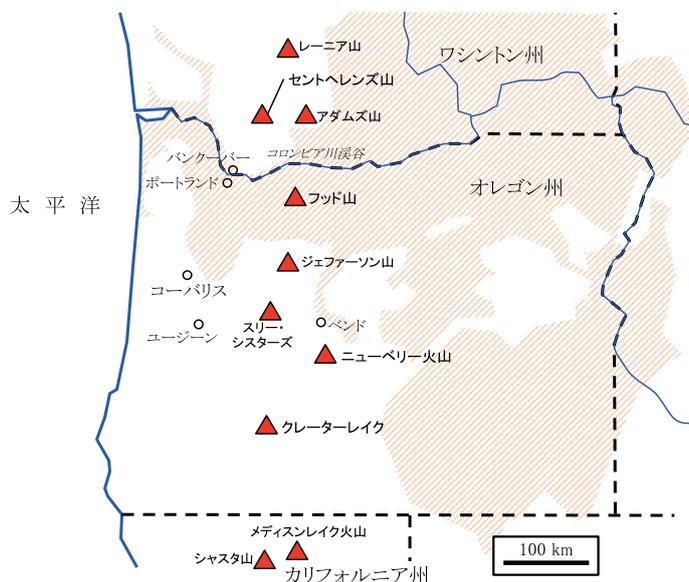
2014年11月より2015年12月までの400日間、米国オレゴン州立大学（Oregon State University；略称OSU；オーエスユー）において在外研究する機会をいただきました。そこで、滞在先の町や大学のこと、現地での研学生活などについてご紹介します。

## 1. オレゴン州とコーバリス

オレゴン州は、米国の西海岸に位置し、南はカリフォルニア州、北はワシントン州と接しています（第1図）。州の中ほどを南北にカスケード山脈（4章も参照）が走っていますが、これは太平洋からのプレートの沈み込みによってできている火山列です。第1図の赤三角は、最近1万年ほどの間に噴火を起こした活火山（potentially active volcanoes）です。このうち、フッド山（Mt. Hood）はオレゴン州で最も高く（3,426 m）かつ最も新しく（1865～

1866年）噴火した火山です。また、州のほぼ東半分はコロビア川洪水玄武岩に覆われています。オレゴン州最大の都市はポートランドで、国際空港もここにあります。筆者くらいの世代ですと、オレゴンといえばテレビドラマ「オレゴンから愛」（フジテレビ、1984年）を思い浮かべる方も多いかもしれません。このドラマの舞台は、州の中央部、第1図のバンドの町の近辺になります。4章で述べるカスケード火山ワークショップでは、まさにこのドラマの舞台も回りました（ビリー・チヌーク湖（Lake Billy Chinook）など）。

さて、オレゴン州立大学（OSU）のあるコーバリス（Corvallis）市（第2図）は、ポートランドから南へ100 kmあまり走ったところにあります。ウィラメット・バレー（Willamette Valley）と呼ばれる広大で肥沃な谷の中ほどに位置しています。周辺は自然が豊かで、農産物に恵まれています。ウィラメット・バレーはワインの世界的産地で



第1図 オレゴン州の地図。赤三角はカスケード山脈沿いの活火山で、その多くは3,000 m級の大型成層火山。斜線で塗った範囲はコロビア川洪水玄武岩の分布範囲（Barry et al., 2013）。東宮ほか（2015a）の図を改変。



第2図 コーバリスのダウンタウン。上：ランドマークである時計台（実は裁判所）。下：商店街の様子。

1) 産総研 地質調査総合センター活断層・火山研究部門

キーワード：オレゴン州立大学、VIPER、火山、マグマ、コーバリス、カスケード山脈

あるほか、オレゴン州のこの辺り一帯は地ビールが美味しいことでも知られています（第3図）。コーバリスの人口は5万人ほどで、OSU関係者でその半分以上を占めると言われています。町はこじんまりしていて、ダウントウンにも高層建築はありません（第2図）。緑豊かで美しく、治安もとても良い町です。妻と娘2人（到着時点の米国の学年で4th grade（4年生）とKindergarten（幼稚園年長に相当））も安心して暮らしていました。ちなみに、コーバリスに日本人学校はありませんでしたので、娘2人は現地の小学校（Hoover Elementary School）に通って英語で授業を受けました。はじめはちんぷんかんぷんだったようですが、1年経たないうちに英語で姉妹喧嘩するほどになっていて、子どもの順応性の高さには驚かされました。

## 2. オレゴン州立大学とVIPER

オレゴン州立大学（OSU）は、オレゴン州コーバリスにメインキャンパスを置く総合大学です（第4図）。学部生・大学院生合わせて約3万人、広大な敷地と多数の学部を持つ大規模校です。全学生のうちアジア系留学生が約7%を占め、キャンパス内でよく見かけますが、その大半は中国人（1,400人以上）で、日本人は比較的少ない（50人あまり）です。なお、オレゴン州にはオレゴン大学（University of Oregon；略称UO）もあって間違いやすいですが、こちらはユージーン市にある別の大学です。OSU



第3図 オレゴンの代表的な地ビールの一つ、Full SailのIPA（India Pale Ale）。ラベルにはフード山が描かれている。

とUOはいわばライバル校であり、大学対抗のフットボールの試合は“Civil War”などと呼ばれて毎年大いに盛り上がります。

OSUで私が所属していた部門は、地球海洋大気科学部（College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences；CEOAS；スィーオス）です（第5図）。ここは世界でも有数の地球科学系部門で、100人以上の教員と、学部生



第4図 オレゴン州立大学の中央にあって多くの学生があつまるメモリアル・ユニオン。中には、8つの飲食店、売店、銀行ATM、床屋、音楽会も開かれるメインロビー、ボーリング場などがある。



第5図 上：筆者や de Silva 教授などの居室があるドーズ・ハウス (Dawes House). 下：地球海洋大気科学部の多くの大学院生の居室があるウィルキンソン・ホール (Wilkinson Hall). 地下には、岩石切断、鉱物分離、試料研磨などを行う実験室もある。

約 600 人・大学院生約 200 人を擁しています。このうち、私の専門である火山関係のメンバーは、火山学・火成岩岩石学・鉱床学研究グループ (Volcanology, Igneous Petrology and Economic geology Research group ; VIPER ; ヴァイパー) と呼ばれるグループを作り、共通のセミナーを開くなど、連携しながら研究を進めています。私の在籍当時は、教官 12 名、大学院生約 20 名、ポスドク・客員研究員若干名から成っていました。

### 3. VIPER と研究生活

OSU での私の受入担当教官は、Shanaka de Silva (シャナカ・デシルヴァ) 教授でした (第6図)。岩石学的分析に基づき火山地下のマグマの動きを解明する研究を行っており、特にカルデラ火山 (破局噴火) のマグマ供給システムの研究において、世界的第一人者として知られています。また、VIPER には他にも Adam Kent 氏・Frank Tepley 氏といった、火山岩中の鉱物等の微小領域 (ミクロン・スケール) 化学分析の国際的スペシャリストがいます。私はこれまで、火山岩に含まれる鉱物の微小領域化学分析等に基づき、有珠山 (北海道)・霧島山新燃岳 (九州) などのマグ

マ供給システムを解明する研究を行ってきました。従って、OSU/VIPER は、これまでの私の研究をより深めるために絶好の環境でした。

VIPER では、大学院生の授業の一環として毎週セミナーがありました (第7図)。学期ごとにテーマを決め、院生と教官が持ち回りで論文のレビューをすることにより、関連情報の共有と意見交換・議論を行っています。テーマはたとえば 2015 年冬学期 (1~3 月) が “crystal mush” (結晶を半分程度含むお粥状のマグマ溜まり)、同・春学期 (4~6 月) が “マグマプロセスの時間スケール” でした。火山岩岩石学上のホットな話題が取り上げられ、私の研究内容にも非常に近く、たいへん参考になりました。また、2015 年春学期の間には、私の研究発表の時間をいただくことができました。霧島山新燃岳 2011 年噴火の前にマグマ溜まりで何が起きてどのように噴火に至った



第6図 Shanaka de Silva 教授 (左) と筆者。



第7図 VIPER セミナーの様子。

のかを、噴出物中の磁鉄鉱（という鉱物）などの化学組成分析によって、時間スケールを含めて明らかにした研究 (Tomiya *et al.*, 2013) の紹介です。詳細な岩石学的解析とともに、噴火時の観測データ（地殻変動など）と組み合わせることで議論した点がなかなか好評のようでした。

さて、私が OSU で行っていた研究の対象ですが、オレゴンの火山ではありませんでした（日本のカルデラ火山）。OSU の他の火山研究者の多くも、米国以外のフィールドを対象にしていました。たとえば、de Silva 教授の下の大大学院生・ポスドクの研究対象は、トバ・カルデラ（インドネシア）、雲仙（日本）、長白山/白頭山（中国/北朝鮮）、プーナ高原（アルゼンチン）、といった具合です。これは、米国本土ではめったに噴火が起きないためと思われます。日本の火山研究者の多くが日本の活火山を対象に研究していることとは対照的です。日本では噴火が頻繁に起こり、その中には社会的に大きな影響を与えるものもあります。従って、日本の火山研究者が日本の火山を研究するのは、社会の要請でもあり、また必然的なことでもあるのでしよう。

OSU の研究生生活は比較的平穏で、予算さえ潤沢ならば研究に集中できる良い環境だと思いました。一方で、予算が無いとほとんど何もできません。共同利用の分析装置（電子線マイクロアナライザーやレーザーアブレーション ICP 質量分析計など；第 8 図）は高額の利用料金が必要でした。私が渡米した時期（2014 年秋）、ちょうど円安ドル高が急激に進行したため、用意した研究予算が当初予定より 2 割ほど目減りしてしまって苦労しました。一方で、OSU では装置のメンテナンスや分析の下準備のためのスタッフ・補助体制が充実しており、短時間で効率的にデータを得ることができました。これは、効率を重視する米国的な考え方といえましょう。

#### 4. カスケード火山ワークショップ

私の OSU 滞在中の 2015 年 6 月 20 日～27 日には、de Silva 教授が主催する「2015 Cascade Volcano Workshop」（カスケード火山ワークショップ）が開かれました（東宮ほか, 2015a, b）。これは、カスケード山脈の火山（第 1 図）を理解するとともに、日本や中国など他国の火山とも比較することで、お互いの研究成果をフィードバックしながら、火山システムについて深く議論する場でした。参加研究者は、米国 2 名（OSU）・日本 6 名（産総研 3 名、東北大・常葉大・京大各 1 名）・中国 5 名（中国地震局）の計 13 名でした。北米の西海岸沿いに連なるカスケード



第 8 図 OSU の共同利用のレーザーアブレーション ICP 質量分析計で分析中の筆者。

山脈は、北はカナダのブリティッシュコロンビア州に始まり、米国のワシントン州・オレゴン州を縦断し、南はカリフォルニア州北部まで、総延長 1,250 km に及び、大型火山だけで 30 ほど、小さな単成火山まで含めれば 2,300 以上もの第四紀火山が分布しています (Hildreth, 2007)。

ワークショップの初日には、本ワークショップの概要やカスケード山脈に関する研究等についてレクチャーがありました。2 日目からは、いくつかの火山および火山噴出物等の調査観察にワゴン車 2 台に分乗して回りました。回ったのは、セントヘレンズ山、米国地質調査所 (USGS) カスケード火山観測所、コロンビア川洪水玄武岩 (溶岩台地)、ニューベリー火山、クレーターレイク (マザマ山)、バンド周辺の火山および火山噴出物、フッド山、ボーリング火山群 (ポートランド近郊) などです。詳細は、東宮ほか (2015a, b) にて多数のカラー写真入りで紹介していますので、そちらをご覧ください。また、セントヘレンズ山、カスケード火山観測所、フッド山については、須藤 (2007) に詳しい紹介があり、そちらも参考になるでしょう。

本ワークショップのメイン・ターゲットは、クレーターレイク (Crater Lake) でした (第 9 図)。クレーターレイクは、マザマ山 (Mount Mazama) の約 7,700 年前の大噴火でできた直径 8～9 km のカルデラです。カルデラ湖は美しく印象的な青色を呈していますが、これはカルデラ湖ならではの深さ (最大水深 592 m ないし 594 m で米国一) によっています。カルデラ形成時の噴火では、はじめにプリニー式噴火 (高い噴煙柱を上げて大量の軽石・火山灰を広範囲に降らせるタイプの噴火) が発生し、引き続いて大規模火砕流噴火とカルデラ陥没が起こりました。ワー



第9図 クレーターレイクをカルデラ南壁のリム・ビレッジより臨む。青い色が美しい。写真中央のウィザード島は、カルデラ陥没後にできた火砕丘の1つ。

クショップでは、この噴火による堆積物の地質学・岩石学的観察や、地形観察などをしながら、参加者間で議論を深めました。

ここでの議論のテーマの1つは、クレーターレイクと長白山(チャンバイシャン=中国語)[またの名を白頭山(ペクトウサン=朝鮮語)]との比較でした。長白山も約1,000年前の大噴火によって山頂にカルデラおよびカルデラ湖ができており、見かけはクレーターレイクによく似ています。このときの噴出物は、日本海を越えて北日本にも降り積もっています。長白山は、クレーターレイクに比べると、カルデラの直径が4～5 km と小さいのと、マグマの組成が違います。しかし、大まかな噴火史などには似た点もあり、地下のマグマ供給システムの発達過程に共通点があるのではないか、と議論していました。

## 5. 在外研究の意義

在外研究には、多岐にわたって大きな意義がありました。まずは、滞在先である OSU の研究テクニックを学べたことです。たとえば、OSU ではレーザーアブレーション ICP 質量分析計(第8図)によって鉱物中の微量元素濃度の微小領域分析を行う技術が確立されており、筆者は滞在中に分析のノウハウやデータを得ることができました。また、滞在先の国際的研究者や若手研究者との人的ネットワークの形成・強化ができました。そして、上記分析データや国際的研究者との議論によって一定の研究成果が得られました。研究については、帰国後も共同研究が続いています。また、異なる環境に身を置くことで、心身と頭のリフレッ

シュができました。たとえば、研究上の相談・議論の際やセミナー発表の際などに、これまでとは違った角度からのコメントを聞くことができました。日本で慣れ親しんだ緻密で詳細な分析・議論に対し、米国ではより大局的なビッグピクチャーを描く傾向があり、そういうアプローチもあるのかと視野を広げられました。さらに、現地滞在中は義務的な仕事が少なく、日本にいるときに比べて研究や勉強に集中できる時間を確保することができました。

米国人と日本人の考え方・研究スタイル等の違いも、いろいろな場面で見ることができました。前述のように米国人は効率を非常に重視しており、短時間でできるだけのことを行い、夕方は5時・6時に帰宅してしまいます。休日はしっかり遊んでいますし、夏休みも長いです。(ちなみに小学校の場合、2015年の夏休みは6月13日から9月8日までと、日本の倍の長さでした。)米国人の考え方は、(良く言えば)視野が広く、細かいことは気にしません。国土が広く、道路も広くて真っすぐ、食事は大盛り。これらは米国人の国民性と深く結びついているようです。一方で、日本の良さも見えてきました。細かな気配り、繊細な感性、勤勉で器用なこと。日本製品は品質がとても良く使いやすいと壊れにくいですし、日本の食品・料理は美味しいです。おそらく研究スタイルも、日本人のこうした特質を活かしたほうが国際的に有利なのではないか、と思われました。

もし在外研究/海外留学しようか迷っている、という方がいらっしゃれば、ぜひ行かれることをお勧めします。もちろん、行くとなると準備は大変ですが、上に述べたようにそれ以上に得るものが大きいと思います。

## 6. おわりに

## 文 献

本報告内容の詳細につきましては、所内の部門ニュース (IEVG ニュースレター: <https://unit.aist.go.jp/ievg/>) に現地から連載しておりました以下の各報告をご覧ください: オレゴンから在外研究報告～現地到着編 (東宮, 2015a), 同・VIPER 紹介編 (東宮, 2015b), 同・研究生活編 (東宮, 2015c), 同・帰国編 (東宮, 2016); 米国カスケード火山ワークショップ報告・前編 (東宮ほか, 2015a), 同・後編 (東宮ほか, 2015b). これら各報告と今回報告とで内容や写真などが一部重複します点, ご了承願います.

また, 本在外研究は, 産総研地質調査総合センター (Geological Survey of Japan; 略称 GSJ) の長期海外派遣制度「国際的な研究拠点化の推進に向けた人材育成」によるものです. これは, GSJ が日本の地質学的研究のナショナルセンターとして海外研究者との接点になるべく, そのための人材を育てることを目的としたものです.

最後になりましたが, 今回の在外研究の機会を与えて下さった地質分野研究企画室 (現・地質調査総合センター研究戦略部) および活断層・火山研究部門の関係の方々, de Silva 教授をはじめとする OSU のの方々, その他様々な形でサポートして下さいました方々に, 深く感謝いたします.

Barry, T.L., Kelley, S.P., Reidel, S.P., Camp, V.E., Self, S., Jarboe, N.A., Duncan, R.A., and Renne, P.R. (2013) Eruption chronology of the Columbia River Basalt Group. In Reidel, S.P., Camp, V.E., Ross, M.E., Wolff, J.A., Martin, B.S., Tolan, T.L., and Wells, R.E., eds., The Columbia River Flood Basalt Province. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **497**, 45–66.

Hildreth, W. (2007) Quaternary Magmatism in the Cascades—Geologic Perspectives. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, **1744**, 125 pp.

須藤 茂 (2007) セントヘレンズとフッドーポートランド近辺の火山. 地質ニュース, no. 636, 10–34.

東宮昭彦 (2015a) オレゴンから在外研究報告～現地到着編. IEVG ニュースレター, **1**, no.6, 6–8.

東宮昭彦 (2015b) オレゴンから在外研究報告～VIPER 紹介編. IEVG ニュースレター, **2**, no.1, 9.

東宮昭彦 (2015c) オレゴンから在外研究報告～研究生活編. IEVG ニュースレター, **2**, no.2, 14–15.

東宮昭彦 (2016) オレゴンから在外研究報告～帰国編. IEVG ニュースレター, **2**, no.6, 14–15.

Tomiya, A., Miyagi, I., Saito, G., and Geshi, N. (2013) Short time scales of magma-mixing processes prior to the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Kirishima volcanic group, Japan. *Bulletin of Volcanology*, **75**:750, doi:10.1007/s00445-013-0750-1.

東宮昭彦・宮城磯治・斎藤元治 (2015a) 米国カスケード火山ワークショップ報告・前編. IEVG ニュースレター, **2**, no.3, 13–17.

東宮昭彦・宮城磯治・斎藤元治 (2015b) 米国カスケード火山ワークショップ報告・後編. IEVG ニュースレター, **2**, no.4, 8–13.

---

TOMIYA Akihiko (2016) My wonderful stay at Oregon State University.

---

(受付: 2016年3月2日)

# 日本学術会議公開講演会 「強靱で安全・安心な都市を支える地質地盤の情報 整備—あなたの足元は大丈夫?—」の開催報告

日本学術会議地質地盤講演会準備会<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

2016年1月23日(土)、標題の公開講演会が日本学術会議講堂において開催された(第1図)。主催者・講演者を含め148名の参加があった。

本講演会は、2013年1月の日本学術会議提言「地質地盤情報の共有化に向けて—安全・安心な社会構築のための地質地盤情報に関する法整備—」(日本学術会議地球惑星科学委員会, 2013)のフォローアップとして計画された。提言から3年を経て、この間の地質地盤情報に関する学術研究や技術開発の進展および提言の波及効果の実例が報告され、地質地盤情報の利用の現状および今後の問題点が議論された。また、地質地盤情報の活用推進のための法整備についても言及された。参加者からの質問や全講演者による総合討論など活発な議論が行われ(写真1)、地質地盤情報が国民の暮らしの安全・安心の確保と国土強靱化、社会・経済の持続的発展のために必須の情報であることが再確認された。本講演会は、2016年1月9日、48学会が集まって設立された「防災学術連携体」と連携している。

日本学術会議提言は、2010年、地球惑星科学委員会と土木工学・建築学委員会の連携により検討が始まったが、今回の講演会ではその参画の規模が拡大し、19の学協会・研究機関の後援を得て、地質、地盤、土木、建築などの地質地盤の関係機関に加えて、不動産、都市計画、地中熱利用などの学協会等への広がりが認められ、講演者にも専門の多様性が出てきたことが特筆される。

なお、本講演会での議論をより理解していただくために、上記の提言及びこれまでの経緯・動向に関する報告(栗本, 2015)を参照していただきたい。

## 2. 講演内容

講演会は小嶋 智氏の司会で進められた。まず、日本学術会議の大西 隆会長は「開会挨拶」において、本講演会の意義に加え、日本学術会議の活動状況にも言及した。次に、地球・人間圏分科会委員長の氷見山幸夫氏は、主催者を代表して「開催趣旨」を述べ、日本学術会議提言後の活動と本講演会開催に至る経緯を紹介した。

講演では3つのテーマが設定され、それぞれについて、最新の成果と動向が紹介された。

テーマ1「地質地盤情報の整備と共有化、地下モデルの技術開発と活用事例」では、北田奈緒子氏が関西圏地盤情報ネットワーク(KG-NET)の活動を中心に、全国規模での地質地盤情報の利活用の必要性を述べた。次に、中澤 努氏は地下3次元構造モデルの構築と今後のウェブ公開について報告した。

テーマ2「住民に最も近いユーザー地方自治体の情報整備とハザードマップ」では、岩田孝仁氏が静岡県での地震対策について紹介した。詳細な地質・地盤情報やボーリングデータに基づく地質断面図に加えて、防災にかかわる人材育成にも言及した。

テーマ3は「地質地盤情報の技術開発と社会・ビジネスでの応用事例」として、3講演が行われた。田村和夫氏は建築・土木構造物と地盤情報との関係を整理し、特に都市の耐震に言及した上で、地盤情報の有効活用について述べた。笹田政克氏は施工中の地中熱事業事例を紹介し、今後の開発の展開・推進とそのためへの地質地盤情報の共有化が重要であることを述べた。中城康彦氏は不動産の価値について、欧米との比較を行い、地質地盤が不動産の価値判断に重要な要素となることを紹介した。

以上の3テーマ6講演を受けて、総合討論では、「学術

1) 後援団体として、産業技術総合研究所内に日本学術会議地質地盤講演会準備会を設置し、本講演会の運営を担当した。メンバー：栗本史雄、藤原 治、川畑大作、佐脇孝幸、牧野雅彦、宮崎一博、中澤 努、宮地良典、水野清秀、尾崎正紀、小松原純子、中島 礼、野々垣進。

キーワード：日本学術会議、地質地盤情報、共有化、法整備、地下モデル、地方自治体、ビジネスモデル、防災学術連携体

「強靱で安全・安心な都市を支える地質地盤の情報整備－あなたの足元は大丈夫？－」

平成 28 年 1 月 23 日（土） 於：日本学術会議講堂

主 催 日本学術会議 地球惑星科学委員会地球・人間圏分科会 土木工学・建築学委員会学際連携分科会

後 援 日本応用地質学会、地盤工学会、日本地質学会、土木学会、日本建築学会、日本地震工学会、物理探査学会、日本地球惑星科学連合、日本不動産学会、日本都市計画学会、日本情報地質学会、日本第四紀学会、建設コンサルタンツ協会、産業技術総合研究所地質調査総合センター、防災科学技術研究所、北海道立総合研究機構環境・地質研究本部地質研究所、地域地盤環境研究所、地中熱利用促進協会、地質・地盤情報活用促進に関する法整備推進協議会

司 会： 小嶋 智（日本学術会議連携会員、岐阜大学工学部教授）

開会挨拶 大西 隆（日本学術会議会長）

開催趣旨 氷見山 幸夫（日本学術会議会員、北海道教育大学名誉教授）

<テーマ 1 地質地盤情報の整備と共有化、地下モデルの技術開発と活用事例>

北田 奈緒子（地域地盤環境研究所研究開発部門長）

「日本における地盤情報の整備・共有化と活用事例」

中澤 努（産業技術総合研究所地質情報研究部門情報地質研究グループ長）

「都市平野部における地質地盤情報－地下 3 次元構造モデル－」

<テーマ 2 住民に最も近いユーザー地方自治体の情報整備とハザードマップ>

岩田 孝仁（静岡大学防災総合センター教授）

「防災に役立つ地質地盤情報」

<テーマ 3 地質地盤情報の技術開発と社会・ビジネスでの応用事例>

田村 和夫（日本学術会議連携会員、千葉工業大学工学部教授）

「地盤情報の活用と強靱で魅力のある都市設計」

笹田 政克（地中熱利用促進協会理事長）

「地中熱利用の普及に必要な地質地盤情報の共有化」

中城 康彦（明海大学不動産学部長・教授）

「土地利用に関する新たな展開－不動産の新しい価値の概念」

<総合討論 学術研究成果の社会への迅速な橋渡し、地質地盤情報システムの社会実装化、及び利活用促進のための法整備>

佃 榮吉（日本学術会議連携会員、産業技術総合研究所理事）

「地質地盤情報の課題と今後の取り組み－法整備を目指して－」

講演者登壇と質疑応答・議論

コメント 米田 雅子（日本学術会議連携会員、慶應義塾大学特任教授）

閉会挨拶 依田 照彦（日本学術会議会員、早稲田大学理工学術院創造理工学部教授）

「本公開講演会の意義と今後の展開」

第 1 図 公開講演会プログラム。



写真 1 参加者との質疑応答の様子。

研究成果の社会への迅速な橋渡し、地質地盤情報システムの社会実装化、及び利活用促進のための法整備」をテーマとしたが、まずこれに先立ち、本テーマの話題提供として、佃 栄吉氏が「地質地盤情報の課題と今後の取り組み－法整備を目指して－」と題して、これまで地質地盤情報の整備・活用にかかる活動の総括と経緯に加えて、法整備に関する動向を紹介した。

総合討論では、全講演者が壇上にあがり、社会への橋渡しやシステムの社会実装化について、佃氏のコーディネーターによる討論が行われた（写真2）。この際、参加者の質問（第3章参照）を参考にして、討論が進められた。

総合討論のあと、本講演会主催の土木工学・建築学委員会学際連携分科会委員長の米田雅子氏が、地質地盤情報の重要性と法整備を進め、社会における認識を広げる方策について、示唆に富んだコメントを述べた。

最後の閉会挨拶では、土木工学・建築学委員会委員長の依田照彦氏が「本公開講演会の意義と今後の展開」と題して、オランダでの干拓事業・堤防建設の事例を引用し、各学術分野の連携の必要性を強調した。その連携は、学術的な学会や研究分野を横断する連携に加えて、社会的立場、政治、学術、技術などを巻き込んだ社会全体を見据えた連携の必要性を述べたものであり、本講演会の今後の展望にふさわしい締めくくりであった。

### 3. 参加者からの質問・意見

当日は、総合討論において広く議論を進めるために、参加者に質問を記入する用紙を配布した。休憩時間にこれを回収し、参加者の質問・意見を参考にしながら討論を進めた。全ての質問・意見を取り上げる時間的余裕はなかった



写真2 全講演者による総合討論。

が、今後の議論の参考と問題点の共有のために、代表的な質問・意見を抜粋し、第2図に取りまとめた。なお、すべての質問・意見については主催・講演者ですでに共有しており、今後の議論に生かすことができると考えている。

### 4. アンケート結果

講演会後に来場者69名からアンケートの回答を得た。主な意見や感想を抜粋し、以下に列挙する。読みやすくするために若干のアレンジを加えている。

#### テーマ1

- ・ 関西や関東において、ボーリングデータなどのデータベース化、公開・共有化が進み、地質地盤図の作成や可視化・三次元化が実施されている。
- ・ 地質地盤情報の実用化と民間での利用については分散管理統一プラットフォームを利用するため、GIS技術の標準化が課題である。
- ・ データ密度による地盤モデルの活用や適応条件の検討・高精度化が課題である。特にデータの少ない地域を考慮する必要がある。
- ・ 情報公開の際には、地盤情報の共有化についてメリットとデメリットを理解し、三次元地盤図を広く理解してもらう必要がある。

#### テーマ2

- ・ 防災教育の必要性と防災の人材育成及びマイスター制度の確立について、大学－県－住民が連携した行政の取り組みが進んでいる。
- ・ 人材育成については地質地盤に限らず、防災という視点からも重要である。

#### テーマ3

- ・ 地盤情報に対する認識については学問分野間に大きな差がある。
- ・ 情報を社会科学や経済に生かそうとする有機的な取り組みが必要である。
- ・ 地中熱に関する状況とその普及に必要な地質情報の共有化が理解できた。またこのような情報が建築申請時の省エネ対策として重要な選択肢となっている。
- ・ 安定した再生可能エネルギーは重要であるとともに、初期投資や有効熱伝導率の調査コストなどの課題がある。さらに大深度地下空間の利用が他の構造物と競合する懸念がある。
- ・ 住む場所を選ぶ際、建築・土木構造物と地盤の情報を活用することは今後有益になる。
- ・ 今後不動産の資産価値について地盤情報が大きく影響す

### 前半の講演

#### 北田先生への質問

- ・関西の協議会 (KG-NET) のように、各地域で長期的に DB 構築、研究推進を行うためには、どのような取り組み (施策) が必要か? 国の機関として、地質 DB を一元的に管理する組織があるとよいか。

#### 北田先生、中澤先生への質問

- ・地質地盤モデル公開に際して、その精度を保証する原データについてはどのような (公開) 扱いが適切と考えるか。
- ・地震動の予測や液状化の評価には、地質境界のみならず物性のデータが重要。物性値についてはどのくらい集められているのか。

#### 岩田先生への質問

- ・県民への防災情報の提供・周知について。「不安感の増大」「地価の低下」等の面から問題が生じたり、コンセンサスが得られなかったりする場合、どのような対応を取って来たか。その中で住民に要する対応 (自助、共助) の位置づけ・役割はどうであったか。
- ・地質地盤情報の基本であるボーリングデータの精度について、特に大学理学部から地質学科がなくなったことと、ボーリング業者が弱小企業集団でしかないことから、データの信頼性が疑われる状況になっている。今後の方策についてお尋ねしたい。

#### 前半全般についての質問

- ・基準ボーリング測定为国基準の統一マニュアルを作るか。
- ・ボーリングデータがばらばらな測定ではデータの信頼性が低い。各省庁、全国の土木関係者に基準ボーリングデータの統一、3Dモデルの統一手法を全国的に統一すべきと思う。
- ・地質地盤情報の公開は理念としては理解できるが、進めるには展開の問題もあるので理念法で進めるべきではないか。
- ・ボーリングデータの共有化にあたり、位置情報、標高情報などの基本情報の取り扱いについても法整備が必要と思う。
- ・地質情報 (ボーリングデータ、土質採取試料) を工学的に利用するだけでなく、地質学的問題点の解決にも利用すべき。採取試料を廃棄しないで、C14、化石、テフラ・・・など分析、測定することで、地層年代、堆積環境の解明に役立つはずである。

### 後半の講演

#### 田村先生への質問

- ・官公庁、民間発注のボーリング調査データを、自然科学発展のため、有効利用すべきと思われる。
- ・ボーリング調査により採取される土質試料は、人類共通の財産と思われる。法整備が必要と思われる。

#### 笹田先生への質問

- ・地中熱の利用には大深度地下空間が必要だが、他の構造物との競合など、懸念が考えられる。解決策などがあれば、お聞きしたい。

#### 中城先生への質問

- ・地質情報の公開について、メリット、デメリットは何か。
- ・日米比較で米国は、経過年数と共に価値上昇しているが、これはコロナ調の石柱建築などに一般市民が住みその価値が高いためでもある。日本にもそのような住居が、最も増えても良いと思われるが、その為の施策などについて考えを伺いたい。

#### 後半全般についての質問

- ・熱伝導率は地中熱利用にきわめて有効ではあるが、一般の地盤情報とはとても言えない。したがって情報の共有化といってもどのようなデータを共有化すべきか、データの普遍性の視点でとらえなければならないのではないか。
- ・不動産業者に防災上の資格をとらせることは可能か。
- ・地質地盤情報の利活用を推進するため、建築確認申請データを活用するにあたり、法整備が必要であるが、実現の可能性はあるか。

第2図 質問用紙のまとめ。

ることを理解する必要がある。

### 全体について

- ボーリングデータの整備が進んでいる。一方、土木工学的問題点解決のため使われた後、土質試料は廃棄されているが、試料は地質学的（地層年代、堆積環境など）問題点解決のためにも重要である。
- 法整備の問題を含めて、議論を深めていくべきである。公開の方法と範囲など考えるべき課題は多い。
- 民間の地盤情報が公開できるような整備を進めるための全国的な組織作りを期待する。
- 地質地盤情報の収集・整備と利活用は、法律によって強制的に行わないと不可能と感じた。
- 社会がビッグデータのひとつとして土地や地盤情報を共有する必要性を痛感し、そのための土地、私権の制度に踏み込んだ議論と制度設計が必要と考える。
- 国会図書館のデータベースの様に閲覧できるようになるとよい。
- 一連の取り組みは未来将来指向であり、成熟社会へのかじ取りである。

### 5. まとめ

本講演会は、地質地盤情報の活用に関する進展、自治体での取り組みや人材育成、及び社会・ビジネスでの応用事例を広く取り扱った。講演内容が多岐にわたり、セッションを限定した方が良いとの意見も当初はあったが、現状での到達点と今後の展望について、全体として有意義な議論ができたと思われる。今回の議論を参考にした今後の展開が期待される。

### 謝辞

本公開講演会の準備にあたって、参加者の事前登録のウェブ設定について地質情報基盤センターの斎藤英二氏、川畑 晶氏のご協力を得た。

### 文 献

- 栗本史雄（2015）地質地盤情報の活用促進と法整備. GSJ 地質ニュース, 4, 107-113.
- 日本学術会議地球惑星科学委員会（2013）提言：地質地盤情報の共有化に向けて－安全・安心な社会構築のための地質地盤情報に関する法整備－. 日本学術会議, 21p.
- 日本学術会議地質地盤講演会準備会（2016）日本学術会議公開講演会「強靱で安全・安心な都市を支える地質地盤の情報整備－あなたの足元は大丈夫？－」講演要旨集, 27p.
- \* 日本学術会議公開講演会講演要旨集は以下からダウンロードが可能です。
- [http://janet-dr.com/01\\_home\\_calendaer/201601/20160123chishitujiban\\_youshi.pdf](http://janet-dr.com/01_home_calendaer/201601/20160123chishitujiban_youshi.pdf) 2016/2/23 確認  
（出典：防災学術連携体 <http://janet-dr.com/>）
- [https://www.gsj.jp/event/docs/20160123chishitujiban\\_youshi.pdf](https://www.gsj.jp/event/docs/20160123chishitujiban_youshi.pdf) 2016/2/23 確認  
（出典：産業技術総合研究所地質調査総合センター <https://www.gsj.jp/event/2015fy-event/jsc20160123/JSC20160123.html>）

---

The planning committee of the SCJ (Science Council of Japan) geo-information symposium (2016) An implementation report of the SCJ (Science Council of Japan) public symposium "Geo-information for resilient and safely urban life".

---

（受付：2016年2月23日）

# 石油開発の視点からの地圏研究への期待

星 一良<sup>1)</sup>

石油の探鉱開発に携わる地質技術者の視点から、産総研での地圏研究に期待する点を列記させていただきます。石油探鉱で得られた知見が地圏の利用と保全に活用されると同時に、日本発の地圏の研究が世界の石油探鉱に貢献する相乗効果を期待します。

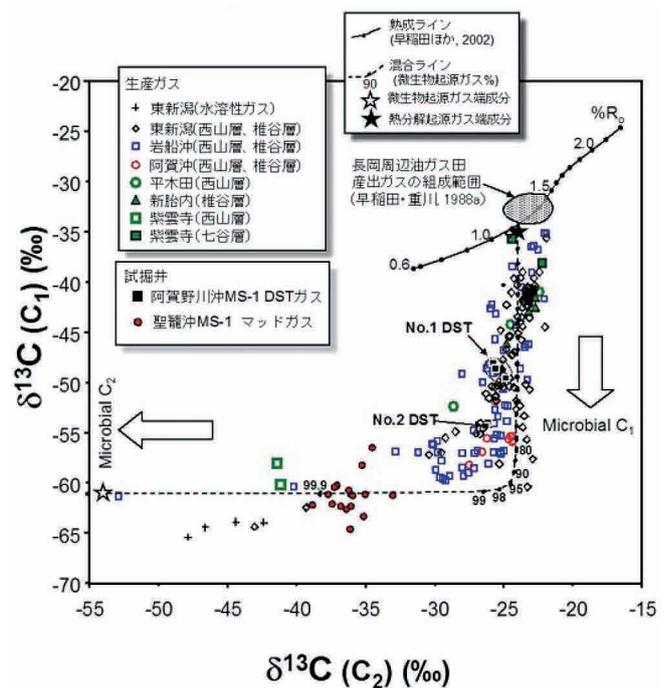
## 1. 地圏内の物質移動の解明

石油天然ガスの探鉱開発では、深度およそ 1,000 m から 5,000 m の範囲での油ガスの生成と移動集積を主に扱うが、地圏の研究はこれより幅広い深度範囲での天水から地下水、温泉や熱水、CO<sub>2</sub> などを含めてより多くの物資移動を対象とする。地層流体の移動過程の解明の鍵として、メタンと塩分濃度、地層圧力、溶脱孔隙が指標となる例を提示する。

### 微生物起源ガス

天然ガスの起源は微生物起源ガスと熱分解起源ガスに大きく分かれる。近年開発技術の進歩により海洋での未固結砂岩からのガス生産が可能となり、微生物起源ガスへの注目が高まっている。東インドネシアのバリ島北方 90 km に位置する Terang ガス田では、大量の微生物起源ガスが水深約 90 m 海面下約 600 m の鮮新統の固結度の弱い砂岩に集積している。石油資源開発（株）と三菱商事はパートナーの EMP 社と共同で、水平坑井と出砂を防ぐグラベルパック仕上げを用い、2012 年より海底生産施設から日産約 800 万 m<sup>3</sup> の天然ガスを生産している。21 世紀に入りベンガル湾（ミャンマー沖）やナイルデルタ沖（エジプト）、イスラエル沖などで主に微生物起源とされる巨大ガス田が発見されている。これらの海域では熱分解起源ガスもあるが、微生物起源と熱分解起源ガスは地下で如何に移動し混ざるののだろうか？炭化水素組成と炭素同位体組成を用いた解析によると新潟県中越の油ガス田は熱分解起源ガスのみからなるが、下越の北蒲原地域の油ガス田では両

者が混合しており、浅部の水溶性ガス田は純粋な微生物起源であるが、深い層ほど熱分解起源ガスの割合が高い傾向がある（早稲田ほか、2011）。



第 1 図 北蒲原油ガス田のガス組成（早稲田ほか、2011）。

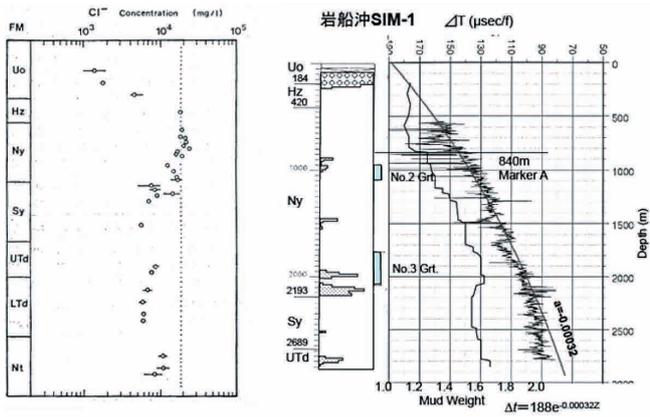
### 地層水塩分濃度

新潟下越の海成層の地層水の塩分濃度は概ね海水より低く、深度と地質層準に応じて変化し、特に異常高圧が生じる寺泊層では約 10,000 ppm と低くなる（加藤、1987；吉村ほか、2004）。埋没過程で堆積物から移動する間隙水の量を直接測定することは困難だが、測定のより簡単な孔隙率の増減の観察から地層流体量の増減を見積もることができる。音波検層を用いた孔隙率測定は事例も多く圧密過程の検討に適し、地層圧力や削剥量の推定に有用である（星、2013）。これらガス、塩分濃度、孔隙率と地層圧力の指標を用いることにより、堆積岩の埋没過程での海水の排出と天水の浸入、その過程での地下微生物の役割と、ケ

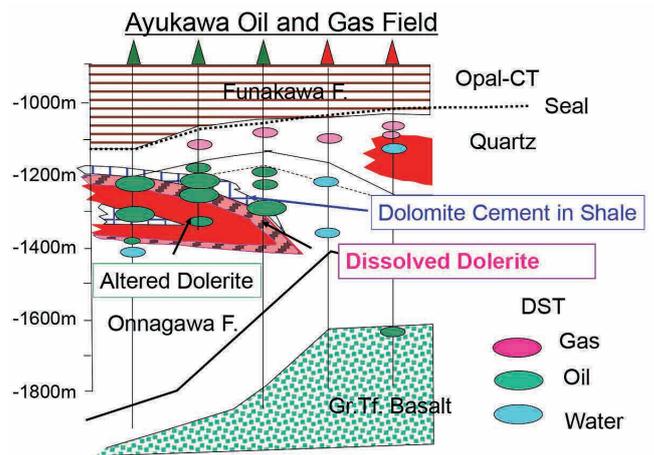
1) 石油資源開発株式会社 中東・アフリカ・欧州事業本部

キーワード：地下物質移動、地層変形、地下地質データアーカイブ

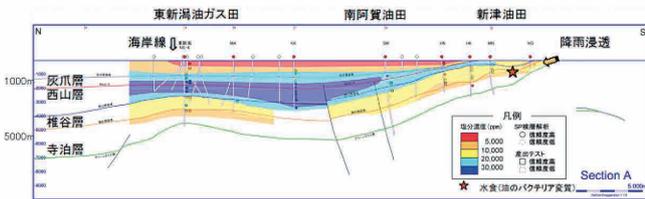
この原稿は地圏資源環境研究部門が発行した「GREEN Report 2015」より転載したものです。



第2図 左：新潟の地層水Cl<sup>-</sup>変化（加藤，1987）．  
右：新潟下越・岩船沖油田の音波検層柱状図と地層圧力（星，2013）．



第4図 鮎川油ガス田の断面図（Hoshi，2010）．



第3図 新潟下越の化石塩水の塩分濃度分布（吉村ほか，2004）．

ロジェンの熱分解による炭化水素の生成と移動の過程が解明され、地圏内の地層流体移動のモデル構築が可能と考える。また新潟の水溶性ガスや関東天然ガス田の知見が、地下水研究と合わさって、世界の微生物起源ガス資源開発に貢献する余地大と信じる。

### 泥質岩中の流体移動

砂岩中の流体移動については従来から多くの研究や測定が行われてきたが、近年のシェールオイル／ガスの探鉱開発を通じて、泥質岩の微細孔隙内での流体移動に注目集まり多くのデータが集積されつつある。泥質岩のマトリックスからフラクチャーへの流体移動、砂泥互層での泥岩から砂岩への流体移動、砂岩から上位シール層を通過する流体移動の解明が、地圏研究と石油探鉱のシナジーによって躍進し、地圏利用に貢献することを期待する。

### 地層流体による鉱物の溶脱と沈殿

秋田県の鮎川ガス田では中新世女川層の珪質頁岩がシェールオイル・ガス貯留岩であり、そこに同時代のドレライトが貫入している。ドレライトの一部では輝石の溶脱により二次孔隙が形成され孔隙率は20%に達する一方、ドレライトに接する女川層珪質頁岩にはCaとMgが沈殿

してドロマイトセメントとフラクチャーが発達し、いずれも生産性良い油貯留岩となっている（Hoshi，2010）。

新潟県中越の片貝ガス田の下部寺泊層（中新世）2,700 m 層砂岩では長石溶脱による二次孔隙が観察される。長石を溶脱させた要因については有機物の熱分解によって生じた有機酸や火山活動に起因する熱水などの説があるが、いずれ埋没後の地層流体の活発な移動の産物と考えられる。

世界の天然ガス田開発は条件の良いものから進んできたが、今後はCO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>S成分に富むサワーガスの開発に重点が移ると予想され、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Sの地層圧入の必要性が高まる。また油田での二次回収技術としてCO<sub>2</sub>-EORへの期待が高い。CCSのみならず石油開発分野でも、CO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>Sの地層内挙動のモニタリングと、地層水、鉱物との地化学反応の予測、安定性の評価研究への期待が益々高まる。

## 2. 地下流体の汲み上げや地下圧入の地表環境に及ぼす影響の定量的評価

地下水利用に始まり、石油ガスの生産、油ガス田への水圧入、シェール開発でのフラクチャリング、CO<sub>2</sub>の地下圧入などいずれの産業活動でも、地層にはなんらかの変形が伴う。地層の変形と地表への影響のモデリング・シミュレーションとモニタリングは今後益々重要となる。モニタリング技術を活用した貯留層変動評価技術の開発は、CCSや地中熱利用のみならず、未固結砂岩ガス層やオイルサンド、フラクチャー貯留岩の開発にとって火急の課題となっている。モニタリング技術としての物理探査については反射法地震探鉱以外に、屈折法、自然地震の利用や、電磁探鉱、重磁力測定と組み合わせた費用対効果の高い取得・解析技術の進歩に期待する。

### 3. 地下地質データのアーカイブ

産総研の地質情報データベースにより多くのボーリングデータや物理探査データが集積されることを期待する。石油坑井データのアーカイブ構築が世界的に進められており、特に米国や豪州、英国などでは坑井データは原則公開され、サービス会社から使い易いGISデータベースとして提供されている。米国の坑井はAPI番号で整理され、世界の石油坑井については近年IHS社がID番号をつけるGlobal Well Identifier Serviceを提唱している。国内のボーリングデータについてもアーカイブ構築がいつそう進むことを期待する。また国内の物理探査データについても石油会社、研究機関、大学が取得した震探に近い将来に使い易い形式で整理・公開されて、多目的に用いられることを期待する。

### 文 献

- Hoshi, K. (2010) Hydrothermally Dissolved Dolerite Reservoir in the Akita Basin, Japan. AAPG Search and Discovery #50370.
- 星 一良 (2013) 音波検層を用いた新潟堆積盆の圧密トレンドの検討とその構造発達史解析への応用—削剥量の推定, 荒谷背斜の隆起と中越地震—. 地学雑誌, 122, 90-115.
- 加藤 進 (1987) グリーンタフ貯留岩の地層流体. 石油技術協会誌, 52, 33-42.
- 早稲田周・岩野裕継・浅利康介 (2011) ガス炭素同位体組成からみた北蒲原地域における炭化水素の移動・集積. 石油技術協会誌, 76, 43-51.
- 吉村公孝・山本修一・桑原 徹・正本美佳・横井 悟・高橋利宏 (2004) ナチュラル・アナログの見地による我が国の化石塩水の特徴. 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 129-132.

---

HOSHI Kazuyoshi (2016) Expectations for geosphere research from a petroleum geologist.

---

(受付：2016年3月3日)

# 地下微生物の メタン生成ポテンシャルを評価する技術

坂田 将<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

地下微生物は堆積物や堆積岩中の有機物を嫌氣的に分解して、二酸化炭素とともにメタンを生成する。このプロセスは天然ガス資源の形成に重要な役割を果たしている。世界の天然ガス資源の少なくとも2割は地下微生物が生成したものと考えられており、国産天然ガスの約18%を占める水溶性天然ガス、将来の資源化が期待される南海トラフの海底ガスハイドレートも微生物起源である。このような天然ガス資源の探鉱、開発を効率的に進めるためには、地下微生物のメタン生成ポテンシャルを理解することが必要である。地圏微生物研究グループ（以下、当グループと略記）では部門重点研究課題「燃料資源に関する評価技術の開発」に取り組むため、国内の油ガス田や海洋メタンハイドレート賦存域を対象として、地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価する研究を進めてきた。その結果、メタンを生成する微生物であるメタン生成菌（メタン生成アーキア）がこれらの地下環境に広く分布し、メタン生成活性を有することを見出してきた。本講演では、当グループがこれまで適用してきたメタン生成ポテンシャルの評価技術について、概要を紹介する。

## 2. メタン生成ポテンシャルの評価技術

メタン生成ポテンシャルを評価する技術は多様でそれぞれ特徴があり、得られる情報も異なるため、相補的な関係にある。区分としては、培養する／しないというアプローチによって、培養依存的評価技術と培養非依存的評価技術に二分することができる。

### 2.1. 培養依存的評価技術

新地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価する直接的な方法は培養である。培養依存的評価技術は、地下から採取される試料を嫌気条件で容器内に密閉してから、恒温装置で原位置の温度に保ち、ヘッドスペースのメタン濃度のモニタリングによって、メタン生成量（積算量）や生成速度を測定する方法である。

#### 2.1.1. 集積培養

他の環境と同じように、地下環境においても、メタンを生成する微生物はメタン生成菌であり、限られた化合物（ $H_2 + CO_2$ 、酢酸、メタノール、メチルアミン、ジメチルアミン、トリメチルアミンなど）を基質として利用する。集積培養は、地下から採取した堆積物や地層水等の試料に基質を過剰に添加して、メタン生成を経時的にモニタリングする方法である。メタン生成が検出されれば、その基質を利用するメタン生成菌が試料中に生息していたことがわかる。また添加した基質とメタンの生成量を比較することによってメタンの収率が計算され、メタン生成ポテンシャルの指標となる。これまで当グループでは水溶性ガス田のかん水の集積培養を行い、高い収率を得ている（Katayama *et al.*, 2015；Mochimaru *et al.*, 2007a, 2007b）。メタンの収率が低い場合、基質供給以外の規制要因が示唆され、ミネラル、ビタミン等の添加で収率の変化を調べることによってその詳細を調べることも可能である。このような情報は、バイオスティミュレーションによって天然ガスを増産する資源技術の可能性を判断する手がかりとなる。集積培養は実際の地下の環境よりも過剰な基質を添加するため、必ずしも原位置メタン生成プロセスを再現するものではない点を留意する必要がある。集積培養は基質を利用できる微生物を環境から分離する方法でもある。地下環境からメタン生成菌を分離して、その進化系統や生態を明ら

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

キーワード：地下微生物、天然ガス、メタン生成、メタン生成菌、環境模擬培養、トレーサー、核酸分析、脂質バイオマーカー

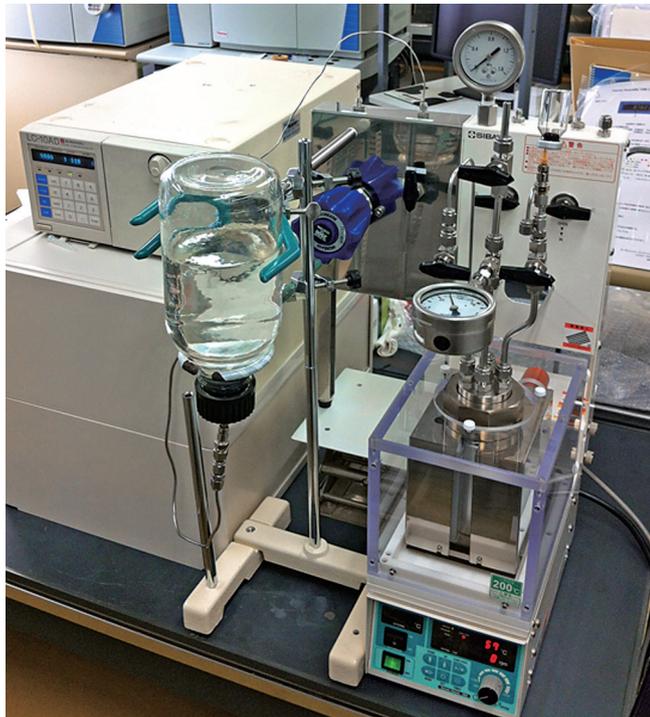
この原稿は地圏資源環境研究部門が発行した「GREEN Report 2015」より転載したものです。

かにすることも、天然ガス資源の成因解明のための有効なアプローチである。これまで当グループでは、水溶性ガス田のかん水から新種のメチル資化性メタン生成菌を2種分離している (Katayama *et al.*, 2014; Mochimaru *et al.*, 2009)。

### 2.1.2. 環境模擬培養

天然ガス資源の成因解明や効率的開発のためには、地下微生物の原位置でのメタン生成ポテンシャルを評価することが必要である。そのため、当グループでは地下から採取したかん水、堆積物、原油等を用いてマイクロコズムを構築し、メタン生成を経時的にモニターする実験を行っている。深部の地下環境は温度に加え圧力も高い。その環境を模擬する場合、恒温槽で加熱するほか、耐圧容器に試料を入れて、ヘッドスペースに不活性ガスを充填するかポンプで水を圧入することによって加圧する (第1図)。地下環境において、微生物は主に砂や粘土の粒子の隙間に生息している。この孔隙環境を模擬するために、粒度を調整した砂をマイクロコズムに加えることも試みている。

これまで当グループでは、常圧で水溶性ガス田の堆積物 (Yoshioka *et al.*, 2015)、メタンハイドレート分布域の海底堆積物 (Yoshioka *et al.*, 2010)、高圧条件で油田かん水 (Mayumi *et al.*, 2011, 2013) のメタン生成ポテンシャルを評価している。特に水溶性ガス田の堆積物のメタン生



第1図 当研究グループで構築した高静水圧培養システム。砂を充填して孔隙環境を模擬することもできる。

成ポテンシャルが大きく、最大で堆積物中の全有機炭素の18%に相当するメタン生成を観察している (Yoshioka *et al.*, 2015)。

### 2.1.3. $^{14}\text{C}$ -トレーサー添加培養

環境模擬培養では、基質や栄養塩を添加しないため、メタン生成が遅く、培養が長期にわたることが多い。実験室で地下の環境を完全に模擬することは不可能であり、培養期間が長くなることは、原位置のメタン生成ポテンシャルを評価する上で好ましくない。

$^{14}\text{C}$ -トレーサー添加培養は、この問題を解消するために短時間の培養でメタン生成ポテンシャルを評価する方法である。 $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ または $^{14}\text{CH}_3\text{COO}^-$ を測定試料に添加して、比較的短期間 (通常、数日から2週間)、検体ごとに異なる期間培養したのち、水酸化ナトリウム水溶液を含むバイアル中に封入して培養を停止する。ヘッドスペース中のメタンを $\text{CO}_2$ に変換してアミン溶液にトラップし、液体シンチレーションカウンターで放射能を検出する。最初に基質として添加した $^{14}\text{C}$ が単位時間あたり $^{14}\text{CH}_4$ に変換される割合を求め、これに試料中の基質濃度を乗じることで、この基質からのメタン生成速度を計算できる。 $^{14}\text{C}$ -トレーサー法は、添加する基質が極微量であり、環境模擬ながらも短期間の培養で評価可能なため、原位置のメタン生成ポテンシャルを推定する方法として優れている。しかも添加する基質ごと、つまり $\text{CO}_2$ 還元と酢酸分解の経路ごとのメタン生成ポテンシャルを評価できる。

これまで当グループでは、水溶性ガス田の堆積物 (Yoshioka *et al.*, 2015) とかん水 (Katayama *et al.*, 2015)、油田かん水 (Mayumi *et al.*, 2011)、メタンハイドレート分布域の海底堆積物 (Yoshioka *et al.*, 2009, 2010) のメタン生成ポテンシャルを評価しており、海底堆積物では深部メタンハイドレート濃集帯でメタン生成活性が高い傾向を見出している (Yoshioka *et al.*, 2009, 2010)。

## 2.2. 培養非依存的評価技術

培養に依らず、メタン生成菌のマーカとなる分子を同定・定量することによってメタン生成ポテンシャルを評価することが可能である。対象となる分子は、核酸、脂質、補酵素などである。

### 2.2.1. 核酸 (DNA, RNA) 分析

核酸によるメタン生成ポテンシャルを評価する方法としては、DNAの塩基配列の解読によってメタン生成菌の系統解析・優占度を評価するシーケンス解析と、(特定の)

メタン生成菌の塩基配列を計数するリアルタイム PCR が挙げられる。

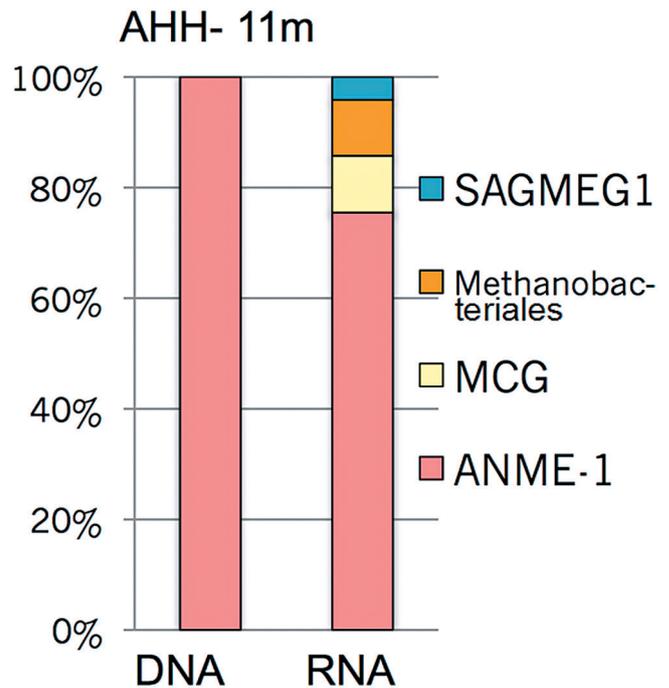
シーケンス解析では、16S rRNA 遺伝子と mcrA 遺伝子が対象となる。16S rRNA 遺伝子は原核生物全般の進化系統を解析するために有効である。一方 mcrA 遺伝子はメタンの代謝に関係するメチル補酵素 M 還元酵素の  $\alpha$  サブユニットを符号化したものであり、メタン生成菌と嫌氣的メタン酸化古細菌 (ANME) の系統分類に有効である。これまで当グループでは、水溶性ガス田のかん水 (Katayama *et al.*, 2015 ; Mochimaru *et al.*, 2007a, 2007b), 油田かん水 (Mayumi *et al.*, 2011, 2013) の 16S rRNA 遺伝子、メタンハイドレート分布域の海底堆積物 (Yoshioka *et al.*, 2010) の mcrA 遺伝子のシーケンス解析を行っている。

リアルタイム PCR は、特定の塩基配列を有する DNA を対象としてポリメラーゼ連鎖反応による増幅を経時的に測定し、レファレンスと比較することで初期のコピー数を計測する方法である。当グループでは、八橋油田のかん水中の全アーキアとメタン生成菌 (メタノバクテリウム目、メタノミクロビウム目、メタノサルシナ目) を定量し、メタノバクテリウム目が優占していることを明らかにしている (Mayumi *et al.*, 2011, 2013)。

DNA は地下環境において長期間保存される可能性があり、原位置の地下微生物の情報を反映するか、必ずしも明らかではない。この問題を検討するために、DNA より不安定で寿命が短い RNA の塩基配列を解読することが試みられている。RNA は DNA からタンパク質が作られる際に、DNA を鋳型として合成 (転写) される。そのため、RNA の塩基配列を解読すれば、生息している生物の存在とともに、その機能 (代謝) に関する情報が得られる。RNA の塩基配列は、逆転写によって DNA に変換してその塩基配列を解読することによる。当グループでは RNA ベースのシーケンス解析で陸域地下堆積物 (沖積層) 中のメタン生成菌や ANME の生存を実証している (Takeuchi *et al.*, 2011 ; 第 2 図)。

### 2.2.2. 脂質バイオマーカー分析

メタン生成菌に特徴的な脂質バイオマーカーを分析することによってメタン生成ポテンシャルを評価することが可能であり、アーキオール、ヒドロキシアーキオール (HA)、カルドアーキオール、2, 6, 10, 15, 19-ペンタメチルイコサンなどが対象とされている。脂質は溶媒抽出、誘導体化、ガスクロ分析という手順で測定され、PCR による増幅を行う核酸の測定に比べて定量分析の精度が高い。一方、メタン生成菌に対する特異性が脂質成分によって異なっており、メタン生成菌以外の微生物にも由来する可能性や、

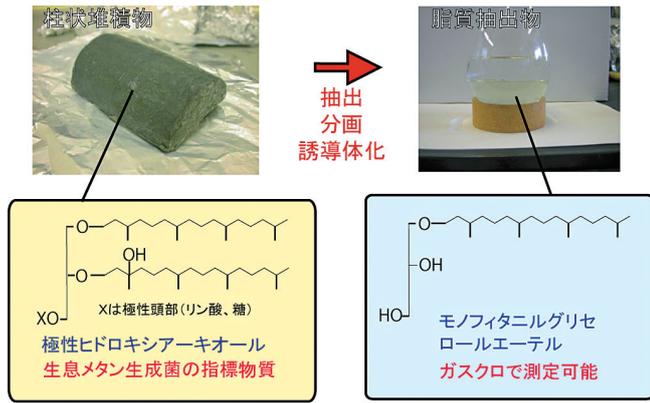


第 2 図 DNA ベースと RNA ベースのシーケンス解析による沖積層コア試料 (深度 11m, 海成粘土層) 中のアーキアの群集構造。

一部のメタン生成菌にしか由来しない可能性を考慮する必要がある。例えばアーキオールやカルドアーキオールはメタン生成菌以外の多様な古細菌も作る一方、HA はメタノサルシナ目とメタノコッカス目に属するメタン生成菌に限定される。また ANME はメタン生成菌と共通の脂質成分を作ることが知られており、炭素同位体比を測定することなどによって識別することが必要となる。核酸と同様、脂質の寿命 (安定性) も地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価する上で重要である。当グループでは極性頭部が脱離しやすくコア脂質が分解しやすいという理由から、極性 HA が原位置のメタン生成菌の指標として有効と考え、これをモノフィタニルグリセロールエーテルに変換 (第 3 図) して GC で分析する方法を確立するとともに、東部南海トラフの海底堆積物中の同成分を測定し、メタン生成菌の深度分布を評価している (Oba *et al.*, 2006, 2015)。

### 2.2.3. 補酵素 (F<sub>430</sub>) 分析

すべてのメタン生成菌はメチル補酵素 M 還元酵素を有しており、他の微生物でこれを有するのは ANME に限定される。補酵素 F<sub>430</sub> はこの酵素の活性部位であり、テトラピロール環の中心にニッケルを含む有機金属化合物である。近年、LC-MS/MS による分析法の開発によって、 $0.1 \times 10^{-15}$  mol (fmol) の F<sub>430</sub> を定量することが可能となった (Kaneko *et al.*, 2014)。これは  $10^2$ - $10^4$  細胞 (メタン生成菌) に相当する。実際、八戸沖海底掘削で海底下 2,500 m の



第3図 極性ヒドロキシアキオールからモノフィタニルグリセロールエステルへ変換。

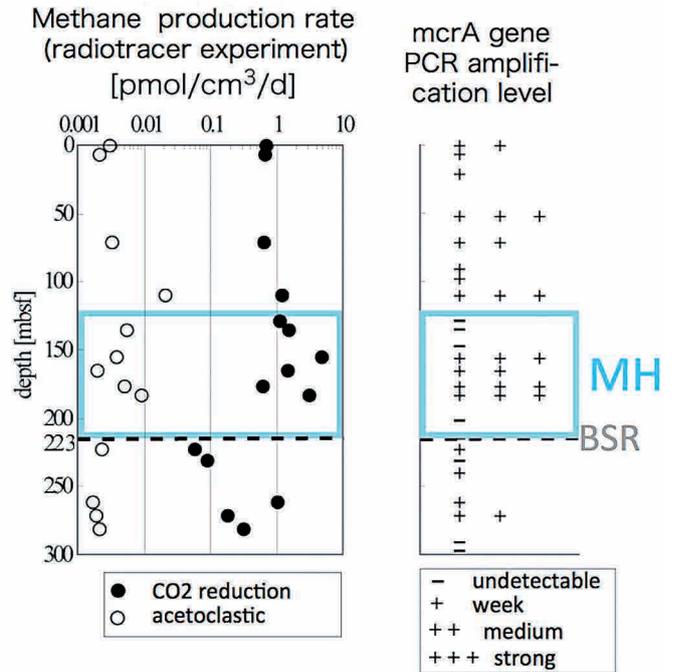
堆積物から F<sub>430</sub> が検出されている (Inagaki *et al.*, 2015)。メタン生成菌マーカーとしての普遍性と特異性において上記の脂質バイオマーカーより優れており、定量性において上記の mcrA 遺伝子より優れていると期待される。

### 2.3. 培養依存的・非依存的評価技術の融合

培養による方法は、現在試料中に生息するメタン生成菌のシグナルである一方、地下の環境を完全に模擬することは不可能であり、培養によるバイアスを避けることは困難である。一方、培養非依存的評価技術は、地下試料をそのまま分析するので、その場の情報が直接得られる一方、死んだメタン生成菌や他の菌のシグナルも拾っている可能性がある。このように、培養依存的評価技術と非依存的評価技術は、メタン生成ポテンシャルに関して異なる情報を提供するもので、相補的である、両者を組み合わせることによってより信頼性の高い評価を行えるものと期待される。

例えば、メタンハイドレートが分布するカスカディア縁辺域の海底コア試料について、メタン生成ポテンシャルの深度分布を培養依存的評価技術 (<sup>14</sup>C-トレーサー法) と非依存的評価技術 (mcrA 遺伝子) を適用した結果、整合的なデータが得られている (第4図)。

油田の地下微生物のメタン生成ポテンシャルに関しても、かん水と原油を用いた油層環境を模擬する培養実験によって、メタン生成ポテンシャルを見出すとともに、CO<sub>2</sub> 分圧によって優占するメタン生成菌の基質利用性が変化することをリアルタイム PCR 法によって見出し、CO<sub>2</sub> 分圧の高い条件で酢酸からのメタン生成速度が高くなる原因を解明した (Mayumi *et al.*, 2013)。この発見は枯渇油田を対象とした CCS と天然ガス再生の両立の可能性を示す技



第4図 カスカディア縁辺域の海底堆積物のメタン生成速度と mcrA 遺伝子増幅度。

術シーズとして注目されている。水溶性ガス田のマイクロコズム (堆積物コア+かん水) の実験でも、大きなメタン生成ポテンシャルを見出したが、培養後に優占しているメタン生成菌 (酢酸資化性) がもともとかん水に優占しているもの (水素資化性) と相違しており、培養で生成したメタンの炭素同位体比が実際の天然ガス中のメタンの値と異なる理由が合理的に説明された (Yoshioka *et al.*, 2015)。このように、地下微生物のメタン生成ポテンシャルを評価する技術は多様で、それを融合することによって現象の解明が進展し、資源評価や効率的な資源開発に有用な情報を獲得することができる。

### 文 献

Inagaki, F., Kaneko, M., *et al.* (2015) Exploring deep microbial life in coal-bearing sediment down to ~ 2.5 km below the ocean floor. *Science*, **349**, 420-424.

Kaneko, M., *et al.* (2014) Quantitative analysis of coenzyme F<sub>430</sub> in environmental samples: a new diagnostic tool for methanogenesis and anaerobic methane oxidation. *Analytical Chemistry*, **86**, 3633-3638.

Katayama, T., Yoshioka, H., Sakata, S., *et al.* (2015) Physicochemical impacts associated with natural

- gas development on methanogenesis in deep sand aquifers. *The ISME Journal*, **9**, 436–446.
- Katayama, T., Yoshioka, H., Mochimaru, Y., Sakata, S., *et al.* (2014) *Methanohalophilus levihalodurans* sp. nov., a slightly halophilic, methylotrophic methanogen isolated from natural gas-bearing deep aquifers, and emended description of the genus *Methanohalophilus*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **64**, 2089–2093.
- Mayumi, D., Mochimaru, H., Yoshioka, H., Sakata, S., Takeuchi, M., *et al.* (2011) Evidence for syntrophic acetate oxidation coupled to hydrogenotrophic methanogenesis in the high-temperature petroleum reservoir of Yabase oil field (Japan). *Environmental Microbiology*, **13**, 1995–2006.
- Mayumi, D., Sakata, S., Takeuchi, M., *et al.* (2013) Carbon dioxide concentration dictates alternative methanogenic pathways in oil reservoirs. *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms2998.
- Mochimaru, H., Yoshioka, H., Sakata, S., *et al.* (2007a) Microbial diversity and methanogenic potential in high temperature natural gas associated water in Japan. *Extremophiles*, **11**, 453–461.
- Mochimaru, H., Yoshioka, H., *et al.* (2007b) Methanogen diversity in deep subsurface gas-associated water at the Minami-Kanto gas field in Japan. *Geomicrobiology Journal*, **24**, 93–100.
- Mochimaru, H., Sakata, S., *et al.* (2009) *Methanolobus profundus* sp. nov., a new methylotrophic methanogen isolated from deep subsurface sediments in a natural gas field. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **59**, 714–718.
- Oba, M., Sakata, S. and Tsunogai, U. (2006) Polar and neutral isopranyl glycerol ether lipids as biomarkers of archaea in near-surface sediments from the Nankai Trough. *Organic Geochemistry*, **37**, 1643–1654.
- Oba, M., Sakata, S. and Fujii, T. (2015) Archaeal polar lipids in deep marine sediments from the Nankai Trough. Archaeal polar lipids in subseafloor sediments from the Nankai Trough: Implications for the distribution of methanogens in the deep marine subsurface. *Organic Geochemistry*, **78**, 153–160.
- Takeuchi, M., Yoshioka, H., Mayumi, D., Sakata, S., *et al.* (2011) A distinct freshwater-adapted subgroup of ANME-1 dominates active archaeal communities in terrestrial subsurfaces in Japan. *Environmental Microbiology*, **13**, 3206–3218.
- Yoshioka, H., Sakata, S., *et al.* (2009) Microbial methane production rates in gas hydrate-bearing sediments from the eastern Nankai Trough, off central Japan. *Geochemical Journal*, **43**, 315–321.
- Yoshioka, H., Sakata, S., *et al.* (2010) Activities and distribution of methanogenic and methane-oxidizing microbes in marine sediments from the Cascadia Margin. *Geobiology*, **8**, 223–233.
- Yoshioka, H., Mochimaru, H., Sakata, S., *et al.* (2015) Methane production potential of subsurface microbes in Pleistocene sediments from a natural gas field of the dissolved-in-water type, central Japan. *Chemical Geology*, **419**, 92–101.
- 
- SAKATA Susumu (2016) Technologies to assess the methane production potential of subsurface microbes.
- 

(受付：2016年3月3日)

# マルチスケールにおけるジオメカニクモデリング

雷 興林<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub> 地下貯留・シェールガスフラッキング・油田及びガス田廃水処分・地熱開発・石油天然ガスの EOR 等の分野において、地下深部に高圧流体を圧入する必要がある。これにより、貯留層およびその周囲の地層・岩石の空隙に存在する間隙水の圧力（間隙圧）を上昇させることが予測される。この変化は地下岩盤での応力分布を変え、その変形、潜在する亀裂や断層の再活動、場合により被害性誘発地震をきたす恐れもありうる。CO<sub>2</sub> 地下貯留の場合では、既知の一定規模以上の断層を避けて貯留サイトを選定することができるが、ほかのアプリケーションでは注水サイトを自由に選ぶことは制限される。また、弾性波探査の分解能には限界があり、貯留層および周辺の岩盤に亀裂や小断層が認知されていない可能性は排除できない。近年、地熱開発・シェールガス開発・廃水地中貯蔵など地下貯留層に流体を圧入することに起因と見られる誘発地震が急増し（Ellsworth, 2013；Lei *et al.*, 2008, 2013；Zoback and Gorelick, 2012）、被害性誘発地震の発生により事業が中止されたケースも発生した（Deichmann and Giardini, 2009）。

以上のような事情を背景に、地下注水関連事業を社会が受け入れたうえで実施するためには、岩盤破壊・被害性誘発地震及びこれらの変動に関連する漏洩等の現象が起きないように事業者が何らかの対策をあらかじめ講じる必要がある。

地下深部に CO<sub>2</sub> の流体を圧入することにより、間隙圧力上昇・地層の変形・亀裂の進展・断層活動・浸透率やシール圧力などの水理特性の変化などが連動的に発生することが予想されている。このような現象を総括したジオメカニクモデリング技術として注目されている。この技術は、多孔質媒体である含水地層・岩盤中の流体流動と熱伝播に関する数値シミュレーションと、地層・岩盤の力学的応答に対する数値シミュレーションを、岩石ひずみに対す

る浸透率の変化を媒介して連成解析するシミュレーション手法である。

ジオメカニクモデリングにおいて、まず、貯留システムの地質モデルを構築する。そして、地質モデルを数値化して数値モデルを作成する。そのため、地層の力学・水理学物性値、変形破壊を支配する構成則、物性と変形のカップリングを定義する関係式を与えなければならない。これらの物性値と構成則は一般的に室内岩石実験により得られるが、スケールアップが必要である。しかし、貯留層及び帽岩からなる貯留システムに対する情報には限界があり、最初に作れるモデルは妥当である保障はない。モデル予測値と観測値を用いてヒストリー・マッチングを行い、モデルを改良していくことが現実的なアプローチである。さらに、貯留層及び帽岩からなる貯留システムのスケールにおいて、様々な大きさの地層本来の不均質構造があり、あらゆる物性パラメータにはある程度の固有的な不確定さを持つ。これにより、解析結果にも不確定さが生じる。その不確定さを評価するため、物性値の不確定さの統計的な特徴を把握するモンテカルロ手法を用いる確率論的な評価手法を採用する必要がある。

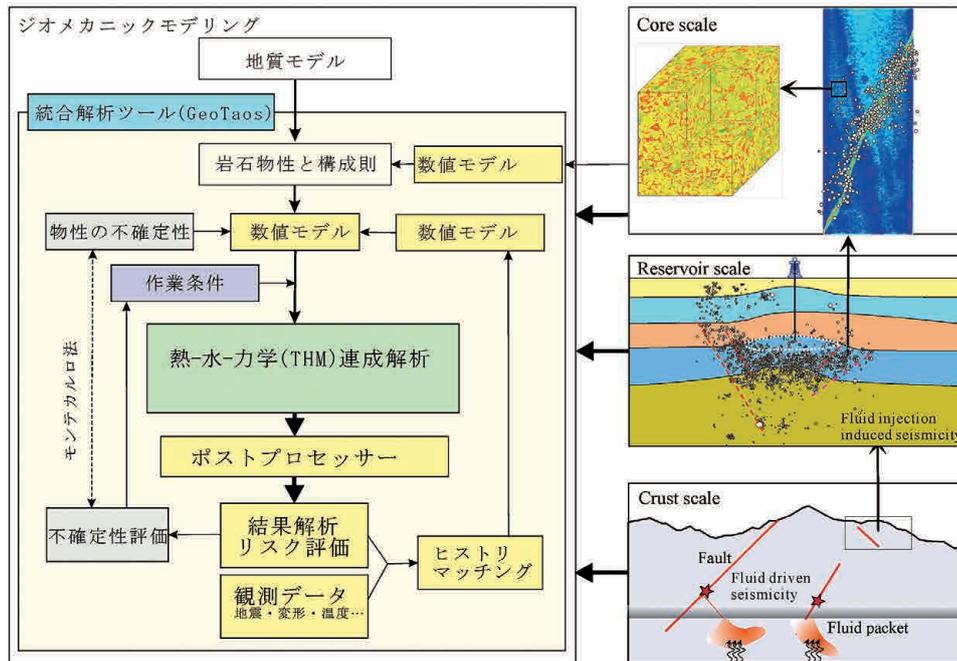
地圏メカニクス研究グループの中心的な研究の一つは、マルチスケールにおいてジオメカニクモデリング手法を開発することを目的とし、下記包括的な研究内容を含む。

- 1) 岩石力学実験により、岩石物性についての実パラメータを取得し、特に岩石の変形と浸透率変化との関係に関するデータ蓄積して構成則を作成する。データと構成則をモデリングに組み込む。
- 2) 断層安定性評価などを行うための室内実験を行い、連成解析のポストプロセッサを開発する。
- 3) モンテカルロ手法を用いる確率論的な評価手法を開発し、モデリングに適用する。
- 4) 注水誘発地震実例解析及び地下流体が関与する自然地震の研究を通して関連現象の特徴とメカニズムを解明する。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

キーワード：流体圧入、地盤変形、誘発地震、流体漏洩リスク、地下モデル、岩石実験、モデル構築、解析ソフトウェア

この原稿は地圏資源環境研究部門が発行した「GREEN Report 2015」より転載したものです。



第1図 マルチスケール・マルチアプローチを統合したジオメカニクモデリングフレームワーク。

5) 様々なスケールの試験モデルに対し、ジオメカニクモデリングを行い、スケーリングアップや履歴マッチングなどを含むモデリング手法を検証する。

6) ジオメカニクモデリングのための一般的なフレームワークを構築し、データ解析等の研究ツール群を融合・集積した統合プログラム (GeoTaos) を開発する。

室内実験研究では、多チャンネル弾性物性・水理特性・AE震源等の同時計測システムの開発と整備を行い、これを駆使して様々な岩石試料を用いて、様々な条件下での岩石実験を系統的に実施している。注水誘発地震の研究では、特に中国四川盆地の天然ガス田やシェールガス開発現場での注水誘発地震に着目し、被害性地震の発生条件・誘発地震予測モデルなどの研究と技術開発に取り込んでいる。大スケールの自然地震の研究は地熱活動地域の地震に集中し、地球潮汐・近辺及び遠隔の大地震への反応などを研究し、地下流体が地震に及ぼす影響の究明に努めている。

## 2. 室内岩石実験研究

地圏メカニクス研究グループでは、1) 三軸岩石透水(気)実験システム、2) 三軸岩石クリープ実験システム、と3) 弾性特性・水理特性・AE震源等同時計測システム等の実験装置が稼働している。これらの装置を用いて様々な条件において、1) 岩石の浸透率・ひずみ・弾性波速度等を同時に測定すること (Fujii *et al.*, 2015), と2) 水圧

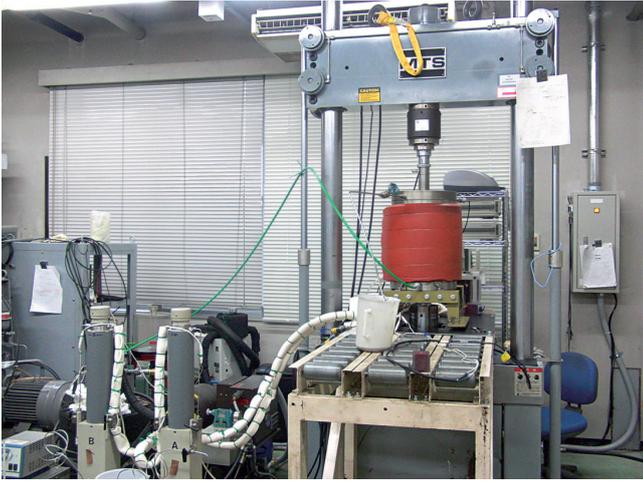
破砕を含む岩石破壊実験において静的変形から動的な破壊までの過程に微小破壊震源の時空間分布と弾性・水理物性値の変化を時空間において密に計測することが可能である。以下の図面は主要実験装置の写真と最近の代表的な実験成果を示す。各システムを活用した研究内容と成果の詳細は当グループメンバーのページに譲る。

## 3. コアスケールにおけるジオメカニクモデリング

室内では、よく制御した条件下での岩石注水実験を行うことができる。また、岩石試料の物性などを密に測定することにより、現場より優れたデータセットを収録できる。従って、実験データを用いてジオメカニクモデリング手法を開発・検証することが有効なアプローチである。

ここに、石英の脈を含有する花崗岩の三軸(封圧下)圧縮破壊実験の結果を用いて連成解析した結果 (Lei *et al.*, 2015) を紹介する。実験の条件は封圧 80 MPa で、軸応力を一定速度で上げて、破壊させた。その際、歪ゲージ 6 個、AE センサー 32 個を設けて破壊に至る過程の変形と微小破壊の時空間分布を調べた。また、複数のセンサーに電圧パルスを与え振動させて弾性波速度計測も実施した。トモグラフィ解析により岩石変形や流体による速度構造の変化を求めることができた。

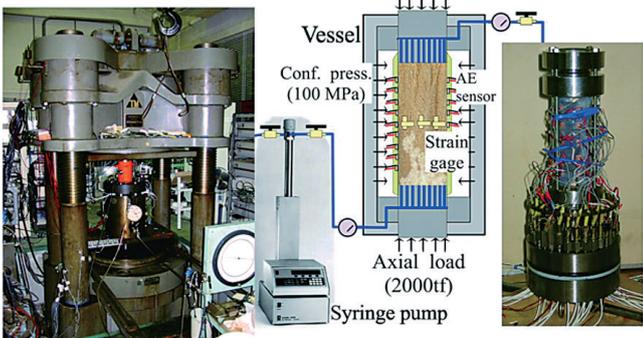
軸応力が 400 MPa を超えた時、AE、つまり微小破壊が急増し始め、破壊に強度接近していることが示される(第6図-A)。軸応力が 420 MPa になったとき、一旦



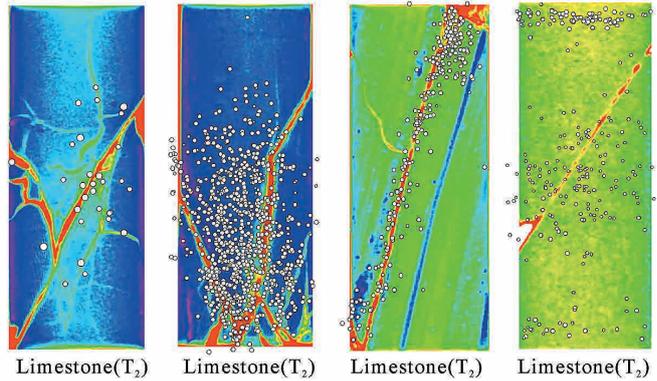
第2図 三軸岩石透水（気）実験システム差压下，岩石の浸透率・ひずみ・弾性波速度等を同時に測定。



第3図 三軸岩石クリープ実験システム。



第4図 弾性特性・水理特性・AE震源等同時計測システム。



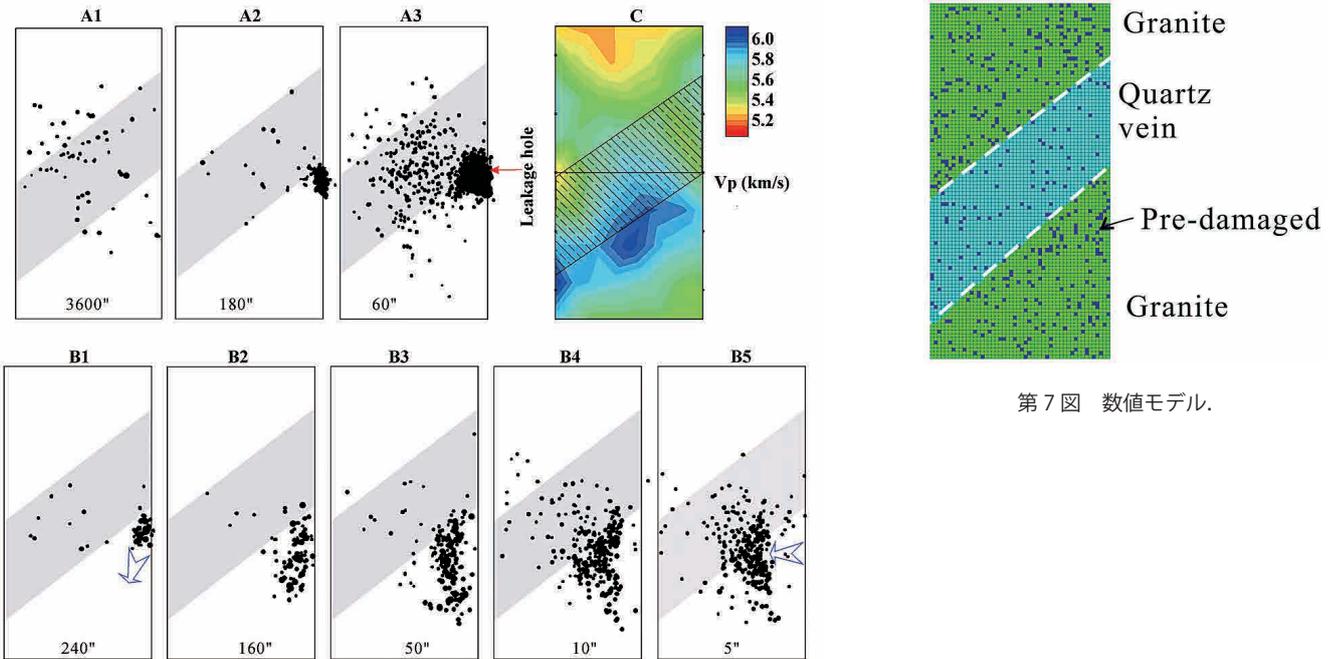
第5図 四川盆地注水誘発地震代表岩石試料の破壊実験結果。破壊過程に発生したAEの震源と試料（実験後）のX線CT画像 (Lei et al., 2014)。

180 MPa まで軸圧を減少させ、2 時間後再び軸圧を上げることにした。通常であれば、応力記憶効果により、一回目の最大応力を超えるとき、AE が再び活発化し、最終破壊に至ることが期待されるが、今回の場合、既存脈の影響により、一回目のロードの最後段階で AE が岩石表面に集中して発生したため、シリコンジャケットに穴ができてしまい、80 MPa の封圧オイルが試料内にリークする現象が発生した。試料内のオイル拡散はこの弾性波速度トモグラフィ画像（第 6 図 -C）や AE 震源の空間的な広がり様子に見て取れた（第 6 図 -B）。空隙にオイルが入ると P 波速度が大きくなるため、試料下部の青色で示した高速度領域はオイルに飽和（あるいは部分飽和）されていることは明らかである。

二回目のロードはこの影響を受けて、軸圧 280 MPa で破壊した。当初の目的という意味では失敗した実験であるが、自然界においても高压油田やガス田などで類似現象が観測され、実験結果は無意味ではないと思われる。ここで、この実験データを用いてジオメカニックモデリング手法を検証することを考えた。

数値モデル作成に当たり、1) モデル及び構成則はなるべく簡単なものにする、2) 不確定性の少ない物性をモデルの基本的な物性とする、3) 実験結果の細かいところではなく、本質的な実験データを重視することを基本方針とした。AE に着目する時、今回の試料の場合、インタクトな結晶質岩石であるため、既存の微小割れ目の密度がキーファクターであることが分かっており、これを如何にモデルに取り込むかについて様々な検討を行った。

様々な検討の末、最終的に、次に示すモデルにたどり着いた。まず、単純化のため、2 次元モデルとした。サンプルは試料と同様に花崗岩に石英脈を入れる形にした。既存



第6図 三軸圧縮水圧破碎実験でのAE震源分布と弾性波速度トモグラフィ結果。

第7図 数値モデル。

のクラックの扱いとして、個々のクラックを考慮することは不可能なため、欠陥セルをランダムに配置する方法を選んだ。欠陥セルの割合は脈では5%、他は10%とした。欠陥セルに対し、構成則として、Mohr-Coulombの破壊則とStrain softeningモデルを用いた(第7図)。

石英脈、花崗岩、欠陥セルの引っ張り強度はそれぞれ20, 10, 0.5 MPaとした。Cohesionは引っ張り強度の倍とした。これは基本モデル、モデル-1とした。さらに、欠陥セル以外部分の弾性率に約15%と25%のガウス型ランダム的な揺らぎを付加したモデルをモデル-2とモデル-3とした。この三つのモデルに対する数値シミュレーションを行った。

実験結果と数値シミュレーション結果を対比してみると、モデル-2は岩石の破壊強度、応力-歪関係、AEの全体の時空間特徴など基本的な実験データを良く再現できていることが分かった(第8図)。

結論として、マクロな不均質構造+欠陥セル+歪ソフトリング+ランダム物性分布+Strain softeningを有する数値モデルにより岩石試料の強度・流体圧の影響・AE発生の主な特徴を再現できた。このようなモデルと準静的な解析は健全性評価、リスク回避、AEあるいは微小地震を利用するモニタリング等において十分適用できると思う。また、ダイナミック破壊と破壊後の振る舞いは良く再現できなかったが、動的な解析を導入すれば改善できると考えられる。

#### 4. ナチュラル・アナログ研究

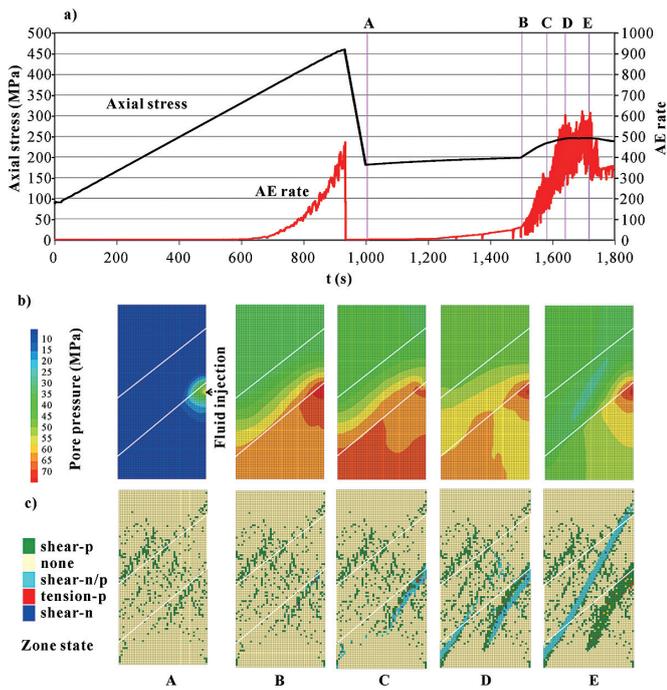
ナチュラル・アナログの研究例として、長野県松代地域にて1965-67年に発生した深層水湧出に伴う群発地震及び関連する事象に対する研究を行った。その詳細について、“地圏メカニクス研究グループの紹介”を参考にしてほしい。

#### 5. 統合解析プログラム (GeoTaos) の開発

ジオメカニックモデリングの一般的なフレームワークをベースに、熱-水理-岩石力学連成解析・ポストプロセッサ・ヒストリマッチング・不確定評価・観測データ解析等、関連する解析・処理プロセスを統合したプログラムであるGeoTaosを開発している。インターフェース・計算・統計解析・可視化を融合したソフトウェアを、研究の副産品として開発・集積したもので、日々成長していることが特徴である(第9-10図)。

#### 6. まとめ

地下深部に高压流体の圧入を必要とするCO<sub>2</sub>地下貯留・シェールガスフラッキング・ガス田廃水処分・地熱開発・石油天然ガスEOR等の分野において、マルチスケールを統合したジオメカニックモデリングが合理的である。本稿



第 8 図 連成解析結果.

では、室内実験・スケーリングアップ・ヒストリーマッチング・不確定性評価のあり方について、異なるスケールにケーススタディを通して議論した。このようなアプローチを基本とし、関連事業においてリスク評価とリスク低減方法へ発展させたいと考えている。

文 献

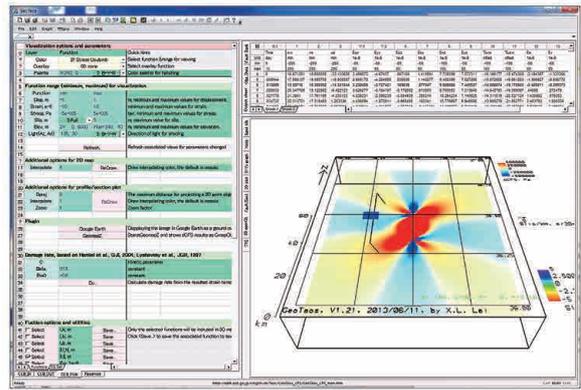
Deichmann, N. and Giardini, D. (2009) Earthquakes Induced by the Stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland). *Seismological Research Letters*, **80**, 784–798.

Ellsworth, W.L. (2013) Injection-induced earthquakes. *Science*, **341**, 1225942.

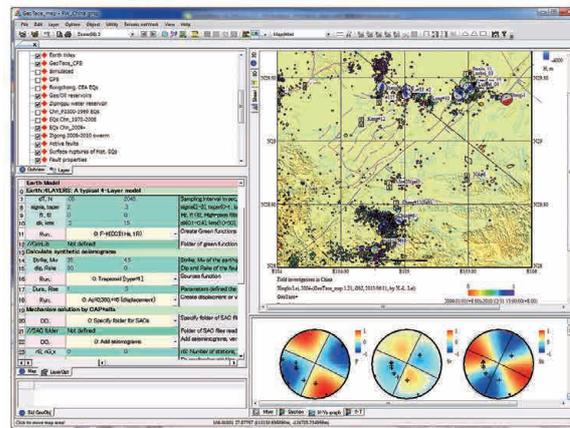
Fujii, T., et al. (2015) Evolution of Permeability during Fracturing Processes in Rocks under Conditions of Geological Storage of CO<sub>2</sub>. *Materials Transactions*, **56**, 679–686.

Lei, X., et al. (2008) Earthquakes induced by water injection at ~ 3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China. *Journal of Geophysical Research*, **113**, B10310.

Lei, X., et al. (2013) A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in



第 9 図 統合解析ソフトウェア GeoTaos クローン応力解析画面.



第 10 図 統合解析ソフトウェア GeoTaos 総合地震解析画面.

Zigong, southwestern Sichuan Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 4296–4311.

Lei, X., Li, X. and Li, Q. (2014) Insights on Injection-induced Seismicity Gained from Laboratory AE Study —Fracture Behavior of Sedimentary Rocks. in 8th Asian Rock Mechanics Symposium. 2014. Sapporo, Japan: Japanese Committee for Rock Mechanics.

Lei, X., et al. (2015) A laboratory acoustic emission experiment and numerical simulation of rock fracture driven by a high-pressure fluid source. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1–8.

Zoback, M.D. and Gorelick, S.M. (2012) Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proc Natl Acad Sci, U.S.A.*, **109**, 10164–10168.

LEI Xinglin (2016) A multiscale approach for geomechanic modelling.

(受付：2016年3月3日)

#### GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 岡井貴司  
副委員長 中島礼  
委員 中嶋健  
星野美保子  
竹田幹郎  
山崎誠子  
小松原純子  
伏島祐一郎  
森尻理恵

事務局

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
地質調査総合センター  
地質情報基盤センター 出版室  
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

---

GSJ 地質ニュース 第5巻 第4号  
平成28年4月15日 発行

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
地質調査総合センター

〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

印刷所 前田印刷株式会社

#### GSJ Chishitsu News Editorial Board

Chief Editor : Takashi Okai  
Deputy Chief Editor : Rei Nakashima  
Editors : Takeshi Nakajima  
Mihoko Hoshino  
Mikio Takeda  
Seiko Yamasaki  
Junko Komatsubara  
Yuichiro Fusejima  
Rie Morijiri

Secretariat Office

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
Geological Survey of Japan  
Geoinformation Service Center Publication Office  
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

---

GSJ Chishitsu News Vol. 5 No. 4  
Apr. 15, 2016

**Geological Survey of Japan, AIST**

AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1, Higashi, Tsukuba,  
Ibaraki 305-8567, Japan

Maeda Printing Co., Ltd

