

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

2

Vol. 5 No.2



2月号

35-44 **SRCCS から 10 年** 奥山康子

45-49 **燃料資源図「関東地方」について**
佐脇貴幸・金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎

50-54 **地質も学べる展示館 —支笏湖ビジターセンター—**
杉原光彦

55-60 **地質も学べる展示館 —天平ろまん館—** 杉原光彦

61-62 **第 14 回 地圏資源環境研究部門成果報告会**
地圏資源環境研究部門広報委員会

63 書評「地球の変動はどこまで宇宙で解明できるか」

65 新刊紹介「火山噴火 何が起こる？ どう、そなえる？」

66 新人紹介 石原武志(再生可能エネルギー研究センター)

Cover Page



Boring survey in Kujukuri Plain, Chiba Prefecture.

(Photograph and caption by Junko KOMATSUBARA)

九十九里平野でのボーリング調査風景

産総研地質調査総合センターでは、沿岸域の地質・活断層調査の一環として、平成 26 年から 28 年にかけて九十九里平野の地下調査を行っている。写真は沖積層の調査のため、平成 27 年 11 月から 12 月にかけて千葉県山武郡横芝光町で掘削したボーリング調査の風景である。掘削用地は海岸砂丘の背後にある、汀線から 100m ほど内陸に入った町の駐車場を借用した。この日は明け方からの暴風雨で駐車場は広範囲に冠水したが、午後からは青空が広がり孔内計測等を行うことができた。

(写真・文：小松原 純子 / 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門)

SRCCS から 10 年

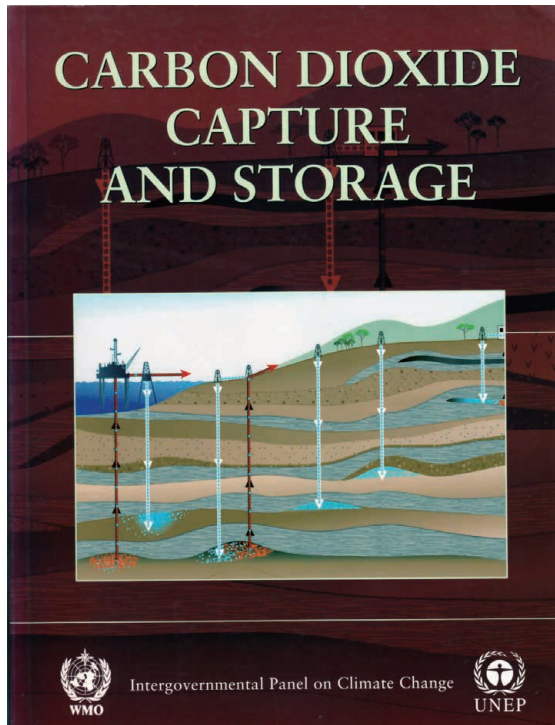
奥山康子¹⁾

1. はじめに

地球温暖化対策としての CO₂ 地中貯留に関わる人々が「SRCCS」と略称する出版物があります。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が 2005 年に発行した、「IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage」(二酸化炭素回収と貯蔵に関する IPCC 特別報告書; IPCC, 2005: 第 1 図) です。この出版物の発行は、2 年後の IPCC 第 4 次評価報告書発表とともに、それまで潜在していた CCS 研究開発への強力な追い風となりました。二酸化炭素回収と貯蔵という事柄や、その略号である「CCS」という言葉が、地球温暖化対策として普及する端緒となったともいわれます。2015 年は、SRCCS 発行から 10 年目にあたります。この間の CCS に関する内外での研究の進展には、目覚ましいものがあります。基礎研究が拡充した

だけではなく、先行していた Sleipner 海域 (北海) などに加えて実用規模から小さなところでは圧入量 1 万トン未満のパイロット試験が多数実施され、この分野の研究開発に携わる人員・機関は世界的にも爆発的に増加しました。産総研地質調査総合センターが CO₂ 地中貯留研究開発のプロジェクトを始めたのも、2005 年からです (當舎・奥山, 2008)。この 10 年間の総括は、化石燃料消費サイドとして CO₂ 排出削減問題に取り組む国際エネルギー機関温室効果ガス対策プログラム (IEAGHG) にとっても重要事項と考えられていて、IEAGHG が主催する国際会議「温室効果ガス制御技術国際会議 (GHGT)」の 2014 年の大会 GHGT-12 でも、最後のパネル・ディスカッションのテーマとなっていました (IEAGHG, 2014)。

この 10 年間の総括が必要という認識は広い範囲で共有されていましたが、節目となる年に SRCCS の後継となる IPCC の出版物は発行されませんでした。しかしそれに代わるように、Elsevier 社の発行する温室効果ガス対策技術の専門誌「International Journal of Greenhouse Gas Control (IJGGC)」に、10 周年記念特別号「Special Issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO₂ Capture and Storage」が組まれました (第 2 図)。特集号は、同誌の第 40 巻 1 号で、2015 年 9 月 1 日にオンライン版が公開されています。筆者は現在 CO₂ 地中貯留プロジェクトから離れていますが、外部の経験者としてこの特別号についてあらましを紹介したいと思います。10 周年特集号は専門誌であるため、技術系でない人も読者に想定した SRCCS よりはかかなり固い内容です。本稿が、地球温暖化対策としての CCS のこの 10 年間を知る 1 つの手がかりになれば幸いです。



第 1 図 SRCCS 表紙。図は、同書のあげた CO₂ 地中貯留法を左から右へ次のように示す; 深部塩水帯水層貯留 (沿岸域), 石油 / 天然ガス増進回収法 (CO₂-EOR/EGR), 深部塩水帯水層貯留 (陸域), 枯湯油・ガス田への貯留, 炭層メタン増進回収法 (ECBM)。



第 2 図 JGGC の 10 周年特集号表紙。

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

キーワード: SRCCS, CO₂ 地中貯留, レビュー, IEAGHG, 実証試験

2. SRCCS の構成

まず SRCCS の構成を第 1 表に示します。SRCCS は、IPCC の出版物らしく、政策立案者向け要旨と技術的要旨からはじまります。第 1 章は実質的な前書きで、CCS の概念や大気中 CO₂ による影響の緩和策としての意義などを概説しています。続いて、CO₂ 大規模発生源についての分析 (第 2 章)、大規模排出源からの CO₂ の分離・回収 (第 3 章)、貯留サイトまでの輸送 (第 4 章) となります。地球温暖化対策という「CO₂ の大規模発生源」とは火力発電所、特に石炭火力発電所、製鉄所、水素製造やアンモニア製造などの化学工場などを指します。CO₂ の貯留・隔離は 3 つの章にわたり、第 5 章で地中貯留、第 6 章で海洋貯留そして第 7 章で工業的鉱物化による CO₂ 隔離が扱われています。以上は、CO₂ の発生から貯留・隔離に至る物質としての流れに沿った配置といえます。

第 8 章は CCS のコストについてのレビュー、そして最終の第 9 章は CCS の温室効果ガスインベントリーへの影響を取り上げています。「温室効果ガスインベントリー」とは、CO₂ を含む 6 種類の温室効果ガスについて一定期間の排出量や吸収量をまとめたもので、普通は国連気候変動枠組条約や京都議定書のもとで各国が作成する「国家温室効果ガスインベントリー」を指します。SRCCS 当時は多国間の CO₂ 排出権取引や、京都議定書に定めるクリーン開発メカニズム (CDM) で CCS をどのように位置づけるかが特に重要な問題であったため、第 9 章で取り上げられました。以上の SRCCS においても重視されたのは分離・回収と地中貯留で、それぞれ 74 ページおよび 82 ページの分量を有しています。

3. 10 周年特集号の構成と特徴

一方の JGGC10 周年特集号ですが、こちらは第 1 表のような 18 編の論文に編集委員会からの緒言が加わり、全部で 19 編の記事から構成されています。458 ページという分量は、SRCCS を少々上回ります。第 1 表では、掲載論文のタイトルを SRCCS の構成に合うように並べました。論文タイトルの前にある数字は特集号での掲載順で、SRCCS と同じように CCS での物質 CO₂ の流れにおおむね従っているのがわかります。異なる点は、SRCCS の第 4 章、第 6 章、第 7 章および第 9 章の内容に合う論文が、特集号に見当たらないことです。SRCCS 第 6 章にある海洋貯留は、2006 年 2 月にロンドン条約 1996 年議定書が発効したことから、現在、本来の意味の実施は不可

能となっています。第 7 章で取り上げられている鉱物化も、温暖化対策としては限定的という見方が確立しています。一方、分離・回収した CO₂ を合成化学の原材料とするなどの CO₂ 利用は、まだ実験途上に近い状態で、温暖化対策とするには至らないという評価です (論文 1: Gale *et al.*, 2015)。したがって、SRCCS から 10 年を経た現在、CCS の「S」(貯留) 方策は地中貯留に限られ、このために効率的な輸送方法は、陸上ではすでに確立されているパイプライン輸送でほぼ決まったという状況です。日本のような海洋国では船舶輸送もあり得ますが、こちらは技術開発途上ということでしょう。こういった情勢が、SRCCS と今回の特集号の構成が著しく違う背景となっています。

SRCCS で CO₂ 発生源を扱う第 2 章に対応するのは、バイオマス利用に関する論文 16 (Kemper, 2015) のみです。バイオマスは大気中 CO₂ を生物が固定したものであり、それを燃焼でエネルギー利用することは CO₂ を元のよう大気に返すことから、CO₂ 排出として中立 (カーボン・ニュートラル) とみなされています。ここで発生する CO₂ を化石燃料利用の場合のように分離し大気から隔離できると、ネットの CO₂ 削減が図られると考えることができるわけです。論文 16 では、バイオマス・エネルギープラントへの CCS 適用の実証試験例を紹介し、技術的發展を展望しています。なお、バイオマス・エネルギーを対象とする CCS を IEAGHG 筋ではしばしば「Bio-CCS」と呼んでいますが、これは産総研で進行中の微生物利用のバイオ CCS とは異なる点にご注意ください。

SRCCS 第 3 章に対応する CO₂ 分離・回収に関する論文は、10 周年特集号では論文 2 から 6 の 5 編です (Idem *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2015; Stanger *et al.*, 2015; Abanades *et al.*, 2015; Jansen *et al.*, 2015)。CO₂ 発生源としては SRCCS から 10 年後の現在も石炭火力発電所が最も重要であり、それに適した分離・回収の実用的手法が 3 つあるということも変わりありません。論文 5 を除く 4 編はこの 3 方式について、この 10 年間の技術的進展をまとめたものです。これらの論文ではアミン溶液を用いた CO₂ 回収技術の進展をレビューしているのに対して、論文 5 はアミン以外の CO₂ 吸収材、具体的には分離膜や固体吸収剤などの研究開発の状況をまとめています。いずれの論文でも回収のコストを減らしエネルギー効率を向上させるために、さらに研究開発が必要という結論であり、課題は SRCCS 時代と同様と行うことができるでしょう。

論文 7 から 14 は CO₂ の貯留に関するものです。分量としては 10 周年特集号掲載論文の 3 分の 1 に達していて、SRCCS 以来この分野で最も盛んな研究開発が行われてき

第 1 表 SRCCS および 10 周年特集号 (JGGC, 第 40 巻第 1 号) の構成の比較.

SRCCS	JGGC, 40巻 第1号 (2015年9月)
Foreword	
Preface	
Summary for policy makers	
Technical summary	
Ch. 1 Introduction	1 Special issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO ₂ Capture and Storage
Ch. 2 Sources of CO ₂	16 Biomass and carbon dioxide capture and storage
Ch. 3 Capture of CO ₂	2 Practical experience in post-combustion CO ₂ capture using reactive solvents in large pilot and demonstration plants 3 Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvent 4 Oxyfuel combustion for CO ₂ capture in power plants 5 Emerging CO ₂ capture system 6 Pre-combustion CO ₂ capture
Ch. 4 Transport of CO ₂	該当論文 なし
Ch. 5 Underground geological storage	7 Review of CO ₂ storage efficiency in deep saline aquifers 8 CO ₂ migration and pressure evaluation in deep saline aquifers 9 Capillary trapping for geological carbon dioxide storage—From pore scale physics to field scale implications 10 Convective dissolution of CO ₂ in saline aquifers: Progress in modeling and experiments 11 Subsurface geochemical fate and effects of impurities contained in a CO ₂ stream injected into a deep saline aquifer: What is known 13 The state of the art in monitoring and verification—Ten years on 12 Recent advances in risk assessment and risk management of geologic CO ₂ storage 14 Development since 2005 in understanding potential environmental impacts of CO ₂ leakage from geological storage
Ch. 6 Ocean storage	該当論文 なし
Ch. 7 Mineral carbonation and industrial uses of carbon dioxide	該当論文 なし
Ch. 8 Costs and economic potential	15 The cost of CO ₂ capture and storage
Ch. 9 Implications of carbon dioxide capture and storage for greenhouse gas inventories and accounting	該当論文 なし
	17 Legal and regulatory developments on CCS 18 Developments in public communications on CCS

たことをうかがわせます。貯留に関する内容は、次の章でより詳しく見てみたいと思います。

論文 15 (Rubin *et al.*, 2015) は CCS のコストについて、SRCCS 以降 10 年間の見積りの変化をまとめたレビュー論文です。著者のうち 2 人 (E.S. Rubin および H.J. Herzog) は SRCCS の第 8 章の著者であり、まさしく同書のアップデートといえる論文でしょう。新興国の経済成長によって火力発電所の建設コスト、付随する CCS プラントのコストそして燃料費も SRCCS 時点より著しく上昇しているが、CO₂ 排出回避のコストは SRCCS 時点とあまり変わっていないとしています。また、後述のような石油増進回収 (EOR) 用に回収した CO₂ を売ることができれば、CCS のコストは著しく下げられるとしています。

CCS に関わる法規制について、回収・輸送・貯留という CCS の要素過程ごとに関係する法律が異なるため、SRCCS では各章の中で言及されていました。法規制の現況についてまとめた論文 17 (Dixon *et al.*, 2015) からは、この 10 年で CCS が CO₂ 発生から貯留・隔離まで一貫したシステムとして理解されるようになったことがうかがえます。CCS が、CO₂ 排出削減策として現実化している表れと言えましょう。

論文 18 (Ashworth *et al.*, 2015) は CCS についての社会対話の、ここ 10 年間の進展を取り上げています。これは SRCCS ではほとんど触れられてなかった項目です。この論文では社会科学者の CCS に対する姿勢を公表論文やその他の記事から探り、CCS の社会受容をはかる窓口としてこういった人々の手を借りられるか検討しています。

4. 地中貯留についての SRCCS 以降の進展

CO₂ 地中貯留の方法については、中尾ほか (2014) が紹介しています。SRCCS では、同書の表紙にもなっている第 1 図でいくつもの貯留法をあげていました。中でも深部塩水帯水層は石油・天然ガス鉱床を利用する場合と違って貯留場所が偏在せず、貯留量が著しく大きい可能性があるため、この 10 年間の貯留技術研究開発のターゲットでありました。中尾ほか (2014) にあるように、産総研の研究も深部塩水帯水層を念頭に置くものです。

CO₂ 地中貯留にあたっては貯留可能な地下の空隙体積を見積もる必要があり、SRCCS 当時は貯留層とする地下地層の空隙率をもとに貯留量が見積もられてきました (例えば Nakanishi *et al.*, 2009)。これに対して論文 7 にある貯留効率 (storage efficiency) という概念は、地下岩層の空隙体積など固定的要素だけではなく、空隙への CO₂ の

侵入しやすさや圧入した CO₂ プリュームの移動性などという動的要素も加味して貯留可能性を吟味・評価しようというものです (Bachu *et al.*, 2007)。論文 7 は、この概念の提唱者を中心としてまとめられました (Bachu, 2015)。貯留層だけではなくキャップロックを含めた貯留システム全体の特性・性能、さらには法的制約 (※これは国ごと、あるいはサイトごとに異なる可能性がある) まで含めた貯留可能量を見積もることで、深部塩水帯水層貯留の量的可能性や効率を評価する必要があると主張しています。このような貯留量評価が提唱される背景には、地下の貯留システムの数理モデル化や、圧入 CO₂ の挙動シミュレーションがこの 10 年間に著しく高度化したことが挙げられます。同様に論文 8 も、深部塩水帯水層貯留での圧入 CO₂ の移動性と地下圧力上昇に関して、近年のシミュレーション研究を中心にまとめています (Birkholzer *et al.*, 2015)。圧入 CO₂ の移動と閉じ込めについては、実証試験での知見を取り入れることで、SRCCS 当時未解明であった多くの事柄が理解されるようになってきました。シミュレーションの世界では、貯留に伴う圧入井付近の圧力上昇はごく短時間に広範囲に伝搬することが分かっている、これが場合によっては貯留性能を左右する重要な要素になりうるという著者たちは強調しています。また、貯留領域の境界の水文学的性状を定めることが、計算上も実用上も重要な事柄であるとしています。

論文 9 から 11 は、CO₂ がいかにして地下に貯留されるかという「貯留メカニズム」に関する研究のレビューです。これらについては、次の章でみてみたいと思います。

地下に圧入・貯留した CO₂ は、予想外に移動したり漏洩することがないように監視 (モニタリング) する必要があります。モニタリングは手法として地球物理学的モニタリングと地球化学的モニタリングに分けられ、さらに対象別に貯留層程度の深度を対象とするものと、人の生活圏を含む浅層を対象とするものがあります。両者とも、貯留サイトが陸上か海底かによって方法が系統的に異なります。モニタリングが非常に多様であるのは、目的が貯留状態の把握に限らず各種規制への対応など多様であることによります。論文 13 は、CO₂ 地中貯留でのモニタリングの、ここ 10 年間の進歩をレビューするものです (Jenkins *et al.*, 2015)。3 人の著者は、筆頭者 (C. Jenkins) が Otway 実証試験 (オーストラリア) のモニタリング全般、次の A. Chadwick が Sleipner 海域での CO₂ 地中貯留の繰返し弾性波探査をそれぞれ総括し、また最後の S.D. Hovarka は北米大陸での CO₂-EOR サイトを中心に活躍する、この世界の代表者たちです。このレビュー論文では特に代表的とい

える海域 2 か所，陸域 4 か所のサイトを例に，いかなる手法とそれらの組み合わせが成功裏のモニタリングとして結実したかをまとめています（第 3 図）．弾性波探査や重力など要素技術別の進歩についても，選ばれた 6 か所に限定することなくまとめられています．筆者たちの見解では，モニタリングにとっては SRCCS からの期間は成功の 10 年と言えるようです．今後の課題は，地下での実際の貯留量を高精度で見積もる方法を確立することと，漏洩がないことを誰にも理解できるように示す手法を確立して規制のスキームに組み込むことであるとしています．

CCS で CO₂ 漏洩が起こった場合に周囲の環境が受けるインパクトは，SRCCS 以降急速に理解が深まった領域と

言えます．論文 14 (Jones *et al.*, 2015) では，環境影響調査を組み込んだ貯留実証試験や天然での CO₂ 湧出地でのナチュラルアナログ研究を，陸域表層部の生態系，飲料水，浅海域の生態系という対象別に分けてレビューしています．結論的に，既存の坑井などよく知られていてシナリオ化された経路からの漏洩の影響は小さく，短時間で緩和するとしています．一方，圧入井やパイプラインからは大規模な漏洩が起きる可能性があり，著者たちはむしろこの方面について事象の予測と対策の研究を進めるべきとしています．

CO₂ 地中貯留のリスク評価も SRCCS 以降急速に進歩した領域とされます．この背景には，世界的に CO₂ 地中貯

プロジェクト	Sleipner 北海	Snøhvit ノルウェー	Decatur アメリカ	Weyburn カナダ	Cranfield アメリカ	Otway オーストラリア
貯留タイプ プロジェクトの性格	帯水層* 事業	帯水層 事業	帯水層 試験/事業	CO ₂ -EOR 事業	CO ₂ -EOR 事業	帯水層 試験
モニタリング手法 (深層対象)						
繰り返し3次元弾性波探査	■	■		■		
3次元多成分弾性波探査			■			
2次元海底弾性波探査	■					
VSP			■		■	
坑井間弾性波トモグラフィー			■		■	
坑井間比抵抗トモグラフィー			■		■	
微小地震検出			■		■	
海底重力観測	■	■				
坑井重力観測					■	
坑井電磁気観測					■	
坑底圧観測		■	■	■		■
坑底温度測定		■				
地球物理学的坑井観測				■	■	
坑井内流体採取						■
トレーサー試験						■
(浅海域浅層-表層対象: 海域)						
高分解能3次元弾性波探査		■				
海底-水中音響イメージング	■	■				
堆積物採取						
海洋物理的調査	■					
海洋化学的調査	■					
(浅海域浅層-表層対象: 陸域)						
浅層地下水の地球化学的調査			■	■	■	■
土壌ガスCO ₂ 濃度			■	■	■	■
地表CO ₂ フラックス観測			■	■	■	■
赤外レーダー観測						■
大気中CO ₂ 観測					■	
空中電磁気調査					■	

* 深部塩水帯水層貯留 ■ 法規制対応 ■ 試験目的

第 3 図 代表的な 6 か所の大型実証試験で採用されたモニタリング手法. Jenkins *et al.* (2015) の Table 1 を翻訳 (一部抜粋).

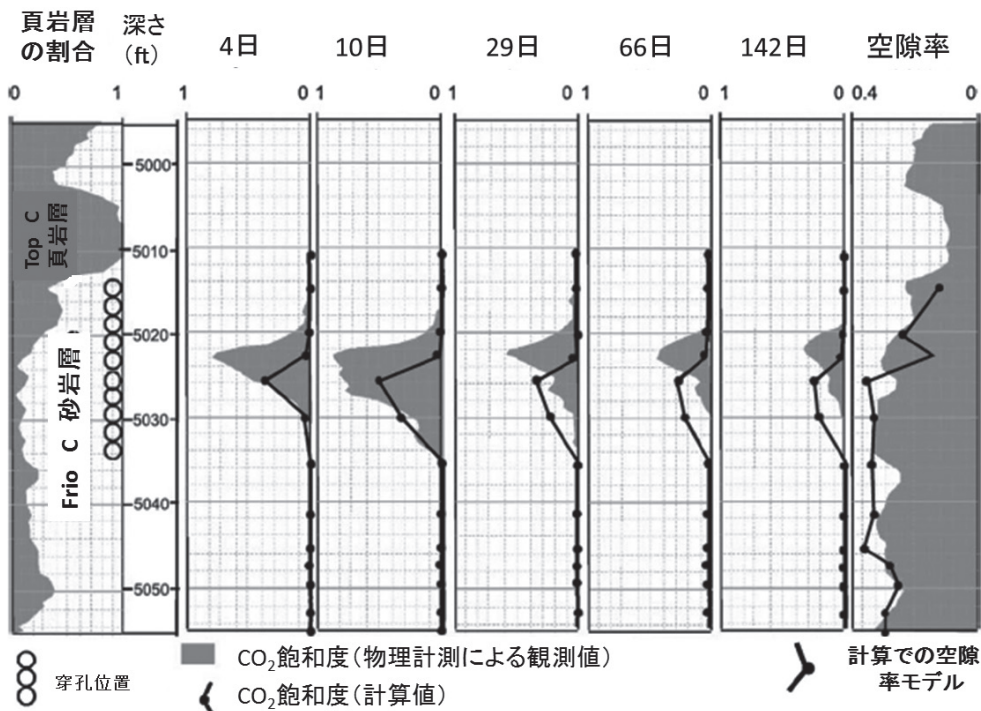
留試験が広く行われるようになり、その中で知識が集積されてきたことが挙げられます。論文 12 (Pawar *et al.*, 2015) は各国での取り組みや、国際連携のもと遂行された 45 件以上のフィールド試験をもとに、CO₂ 地中貯留のリスクとして貯留そのものの確実性、貯留のパフォーマンス、社会受容そして市場の破たんという 4 要素をあげています。社会的要素 2 つが大きなリスク要素とみなされていることに、注意する必要があるでしょう。CO₂ 地中貯留が実用化しようという中で、リスク評価も定量的に行われる必要が高まり、今後の研究の進展に期待したいとしています。

5. 貯留メカニズム研究の進展

地下に圧入された CO₂ はまず貯留層岩石の粒子の間隙に入り込み、毛管圧により脱出できなくなってその場にとどまると考えられています。これが「残留ガス・トラッピング」あるいは「キャピラリー・トラッピング」と呼ばれる貯留メカニズムです。深部塩水帯水層貯留では流体の閉じ込めに適した地質構造が期待されないため、SRCCS 当時からこのメカニズムが重要視されていました。その後 10 年の残留ガス・トラッピング研究の進展をまとめた論文 9 によると (Krevor *et al.*, 2015), SRCCS のところは概念でしかなかった残留ガス・トラッピングが、リアリティーを持って CO₂ 地中貯留で最も重要な閉じ込めメカニズム

であると認識されるようになったとしています。室内実験スケールでは、マイクロフォーカス X 線 CT によるその場観察が強力な武器となって、CO₂ 閉じ込めの研究が進んできました。残留ガス・トラッピングに寄与する空隙体積が、典型的には空隙全体の 30 % 内外であるというのが、現在の共通認識であるとしています。野外スケールでは、残留ガス・トラッピングによって圧入 CO₂ のプリュームの移動が遅れ、また安定化することが確認されてきています。その好例としてこの論文で引用されている Frio パイロット試験 (アメリカ、テキサス州) の状況を, Hovarka *et al.* (2006) により第 4 図に示します。この試験では、地下約 1,500 m の傾斜した砂岩層に 1,600 トンの CO₂ を 10 日間かけて圧入し、その後の変化をアップディップ側にある観測井で観測しました。図のように、CO₂ は圧入後短時間で観測井に到達し、圧入終了時点 (10 日後) に CO₂ 飽和率のピークに達します。CO₂ 飽和率は時間とともに徐々に低下しますが、100 日以上経過後も一定量 (飽和率として 40 % 台) が残り続けています。この結果は、圧入 CO₂ が残留ガス・トラッピングでほぼ不動化したことを示すと解釈されています。こういった結果から論文 9 の著者たちは、CO₂ 貯留容量の見積りに当たっても残留ガス・トラッピングの効果を組み入れる必要があると主張しています。

地下の CO₂ は、長期的には貯留層を満たした間隙水に徐々に溶け、こうして移動速度が間隙水の流動と同じに



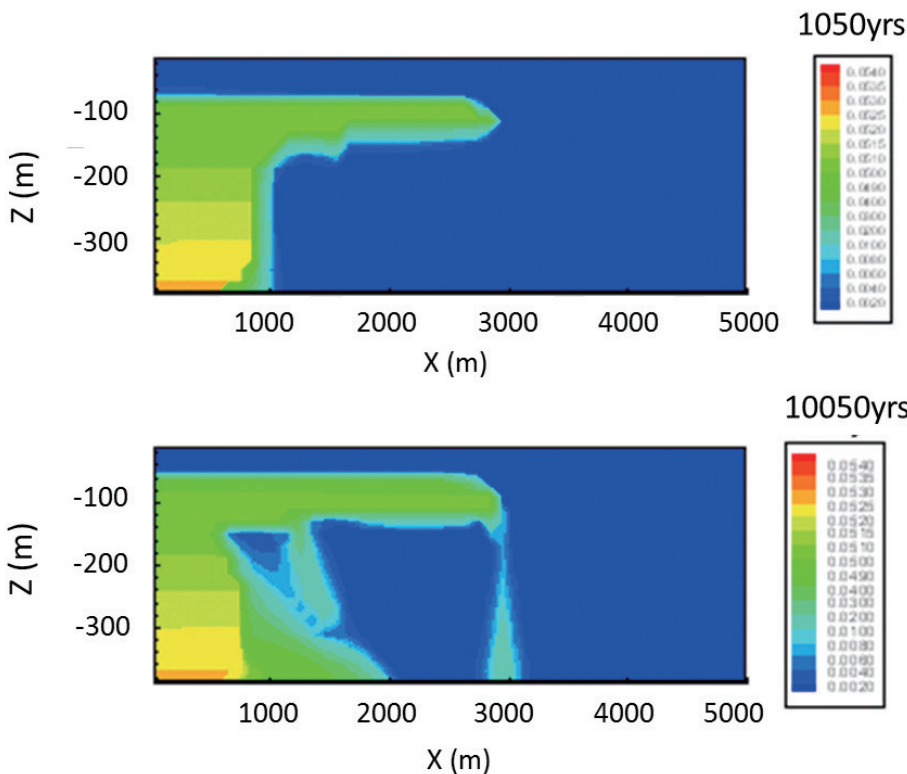
第 4 図 Frio パイロット試験で観測された CO₂ プリュームの変化。Hovarka *et al.* (2006) より翻訳。

なり、すなわち CO₂ プリウム状態よりもはるかに移動が遅くなります (溶解トラッピング)。CO₂ の溶解を進めるメカニズムとして SRCCS 以降注目されているのが「対流混合 (convective mixing)」です (論文 10: Emami-Meybodi *et al.*, 2015)。密度差のため貯留層上部にとどまる CO₂ プリウムが周囲の間隙水に溶け込むと、間隙水は密度を増し、貯留層下部の CO₂ を溶かしていない地層水との間に重力的不安定状況が生じます。この結果、上部の重い間隙水が貯留層下部に沈降するとともに、下部の水が上方に移動し、一種の対流が形成されます。数値シミュレーションで描き出された対流混合の様子を、戸高ほか (2009) より第 5 図に例示します。この例は、厚さ 300 m の砂岩貯留層と同じく 100 m の泥岩キャップロックからなる側方延長 5,000 m の 2 次元モデルで、CO₂ を年間 25 万トンの割合で 50 年間圧入して、圧入後の変化を追ったシミュレーションです。きわめて長い時間が経過した後に、貯留層内での CO₂ 溶解に伴い対流混合が起きることが示されています。対流混合は CO₂ と間隙水の接触を進め、さらなる溶解を進めると期待されています。論文 10 では、対流混合を中心とした圧入 CO₂ の溶解プロセスのシミュレーション及び実験による研究をレビューしています。また、対流混合を工学的に進める技術開発についても、レビューを行っています。現在検討されている中では、貯留層の上部に淡水を圧入して CO₂ がより溶けやすいよう改質を図る方法があるとのこと。

地中貯留で圧入される CO₂ の純度は、ロンドン条約の規定に合わせる形で、高純度が要求されています。圧入 CO₂ に高純度を求められることは分離・回収側の負担でもあり、CCS のコスト高の一因ともなっています。そうであっても微量の不純物はさげられず、それが地下でどのような挙動、とくに貯留 CO₂ の安定化を阻害する挙動を取らないかということが関心事でした。論文 11 (Talman, 2015) では、火力発電所の排ガスから分離した CO₂ 中に含まれるうる不純物について、地中貯留条件下での長期的地化学的挙動の研究をレビューしています。この 10 年間の研究から、比較的不活性な不純物ガス (例: Ar, N₂) は圧入以降にあまり影響しないが、酸性ガス (例: SO_x) の存在は圧入井周りを中心にネガティブな影響がありそうなことがわかってきました。O₂ や H₂S のように、貯留層の構成鉱物に依存して影響の異なる不純物もあるということです。不純な CO₂ と貯留層の化学的相互作用については野外スケールを含めた実験研究が今後必要であり、特に圧入から長時間経過後の不純物の挙動はまだ解明すべき点が多いとしています。

6. 10 周年特集号の先には？

ここまで紹介したように、SRCCS 以降 10 年で CO₂ 地中貯留の理解の仕方は著しく変わりました。たとえば貯留メカニズムと安定化を例に挙げれば、SRCCS ではほぼ未



第 5 図 TOUGH-REACT シミュレーションで描き出された対流混合の状況。側方延長 5,000 m、厚さ 400 m の 2 次元モデルに年 25 万トンの CO₂ を 50 年間圧入したことを想定してのシミュレーションでの、溶存 CO₂ の分布を示す。溶存 CO₂ 濃度は、図の青から赤に向かって高くなる。上段=圧入開始から 1,050 年後。CO₂ プリウムがモデルの貯留層上面に達しキャップロックの底を横に広がり始めた状況を示す、溶存 CO₂ 分布。下段=同じく 10,050 年後。CO₂ 溶解によってプリウムの柱の部分が横に崩れ、上部からは密度の増した地層水が底部に沈下しつつある。戸高ほか (2009) より抜粋。

知であった各種貯留メカニズムの寄与度が量的に把握できるようになってきました。一方で、貯留メカニズムとその時間変化はサイトごとに異なり、統一的にとらえることはできないこともわかってきました。貯留メカニズムの寄与を定量的に把握することは可能であるが、そのためには限られた情報量からいかに正確に不均質な地下の状況を知ることができるかということが、実用上は鍵となるわけです。シミュレーション技術が高度化しても、実データが限定的であれば、それが描かれる結果を制約することは言うまでもありません。

特集号の各論文では、それぞれの領域で今後目指すべき方向性も示されています。ここで各論文の結論は、必ずしも調和した方向ではないということに注意する必要があります。たとえば論文8で貯留層の圧力上昇とこれに起因しての断層などを経由した漏洩が懸念される一方、CO₂漏洩の環境影響をまとめた論文14ではこのようなすでにシナリオ化された漏洩は大きく影響しないと結論しています。こういった一種の食い違いは、今後実用規模を含めた貯留実証で経験を積むことによって収束していくと思われれます。

SRCCSにインベントリーに関する章があったように、温暖化対策の文脈からは貯留CO₂量はある程度厳密に把握される必要があります。特集号では、論文7や8が象徴するように深部塩水帯水層貯留に重点が置かれていますが、世界各地で実施中のCO₂地中貯留の約3/4はCO₂を用いた石油・天然ガスの増進回収(CO₂-EOR)であり、この手法は今後も重要な位置づけを持つと見られています(Global CCS Institute, 2014)。CO₂-EORでのCO₂は一種の薬剤として繰り返し使用されるため、地下に実際に留め置かれたCO₂量の把握が難しいという特性があります。これは地球温暖化対策の文脈上は、あまりありがたくない特性と言えましょう。

CO₂-EORには実施可能な場所が地理的に遍在する問題がありながら、2008年のリーマン・ショックをきっかけに、「CO₂分離・回収と利用・貯留(CCUS)」とよばれて重要性が強調されるようになりました。このようなリアクションは、深部塩水帯水層貯留が経済的メリットを持たないことによるもので、環境対策としてのCO₂地中貯留の最大の弱点とも言えます。この難点を技術開発によるコストダウンではたして克服できるかどうかは、CCS関係者すべてにとって未知の領域といえるでしょう。

CO₂の回収でも、特集号が取り上げた石炭火力発電以外に多様な発生源が存在し、温室効果ガス対策としてはそれらへの対応が残されていることを忘れてはならないでしょ

う。さらに発電セクターでは、先進国を中心に石炭から天然ガスへのシフトが起こっていることに注意すべきでしょう。ガスタービン発電からのH₂Oに富む排ガスからのCO₂分離回収は、いろいろな意味で石炭燃焼と同じとは限らないと予想されます。

一方で石炭は石油と違って分布が偏在しないため、発展途上国にとって今後も利用しやすいエネルギー資源であることに変わりはありません。石炭火力発電所を前提とするCCS技術には、今後は発展途上国支援という展開がありうるでしょう。

日本は地質学的変動帯にあるため、CO₂地中貯留が既存の断層に及ぼす影響、とくに断層の再活動とそれに伴う地震発生、ひいては貯留CO₂が漏洩することが心配されます。特集号の論文には断層の問題に言及するものがいくつもありますが、断層とそのジオメカニカルな安定性を主題としたものはありません。しかし断層がCO₂地中貯留にとってさまざまな意味で重要であることは認識されており、IEAGHGはCO₂地中貯留での断層の安定性に関する機関レポートを発表して(IEAGHG, 2015)、断層の安定性の判断基準について機関としての見解を示しています。

断層は廃止坑井とともに、貯留CO₂の潜在的漏洩経路として常に想定されるものです。天然ではCO₂湧出はごく普通に観察されるにもかかわらず、CCSで貯留CO₂が漏洩する可能性は、事業が社会的になかなか受け入れられない理由の1つとなっています。このため、シナリオ化された漏洩をあまり危惧しない特集号の論文14に筆者は、実際はその通りかもしれないとは思いつつ、やや楽観的ではないかという感想を持っています。砕いていえば、安全であると示すことだけで安心は得られないのではないかということです。CCSが地球温暖化対策となるためにはいたるところでそれが実施される必要がありますが、社会の側の受け止め方はどうでしょうか？オピニオン・リーダーたちを巻き込む努力が必要ではないでしょうか。

7. 日本の実証試験と産総研への期待

日本は世界第5位のCO₂排出国であり、CCS研究にも早期から取り組んできました。世界で初めての陸域での貯留実証試験である岩野原実証試験から14年を経て、2016年4月には、北海道の苫小牧で年10万トン規模のCCS実証試験が始まる予定です。この試験は、石油精製の過程で発生するCO₂を陸上輸送の上、苫小牧沖の浅海底下の地層に貯留する、日本で初めての回収-輸送-貯留が一貫した試験であることが特徴です。

産総研での CO₂ 地中貯留研究は、中尾ほか (2014) によって取りまとめのうえ、GSJ 地質ニュースの特集号として紹介されています。産総研での研究は、CO₂ 地中貯留で標準的である三次元弾性波探査と組み合わせる地球物理学的モニタリング手法の開発と (相馬ほか, 2014; 石戸ほか, 2014; 杉原, 2015), わが国の地質に合わせ亀裂系を有する細かなスケールの砂岩泥岩互層が貯留の場所となることを想定して CO₂ の閉じ込め性能を評価しようという遮蔽性能評価の研究 (徂徠ほか, 2014; 奥山ほか, 2014) を柱としてきました。この一連の紹介記事の後には、苫小牧実証試験を踏まえてモニタリング研究の拠点を実証試験エリアに移してきました。2015 年度には、2016 年からの CO₂ 圧入にそなえた地球物理学的モニタリングのためのベースライン観測が始まっています。第 3 図に見るように、浅海底下の地層をターゲットにした地球電磁気学的モニタリングは世界でもほとんど例がなく、成果が目まぐるしく進んでいます。

日本では、CO₂ 地中貯留を組み込んだ CCS はあまり話題にならず経緯してきました。特に 2011 年の東日本大震災以降は、エネルギーの安定供給と原子力発電の問題の方が注目され、CO₂ 問題は棚上げにされたようにも思えます。しかし IPCC の第 5 次評価報告書を待つまでもなく、地球温暖化の影響はじわじわと身近に及びつつあります。2015 年 5 月にハワイでの継続観測で大気中 CO₂ 濃度が 400 ppm を超えた (NOAA, 2015) ことが報じられ、大気中 CO₂ の濃度上昇が温暖化の原因であるという理解が少しずつ広まってきたように思われます。同時に温室効果ガス対策としての CO₂ 地中貯留も、苫小牧実証試験が最近の経済誌に取り上げられたように (河野, 2015) 注目されてきているようです。産総研の CO₂ 地中貯留研究は、2016 年度から新しいフェーズに入る予定です。日本の地質条件に合った CCS についての技術的展望が開けることを期待して、本稿を終えることといたします。

文 献

- Abanades, J.C., Arias, B., Lyngfelt, A., Mattisson, T., Wiley, D.E., Li, H., Ho, M.T., Mangano, E. and Brandani, S. (2015) Emerging CO₂ capture systems. *JGGC*, **40**, 126-166.
- Ashworth, P., Wade, S., Reiner, D. and Liang, X. (2015) Developments in public communications on CCS. *JGGC*, **40**, 449-458.
- Bachu, S. (2015) Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers. *JGGC*, **40**, 188-202.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P., Maathiasen, O.M. (2007) CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps. *JGGC*, **1**, 430-443.
- Birkholzer, T., Oldenburg, C.M. and Zhou, Q. (2015) CO₂ migration and pressure evolution in deep saline aquifers. *JGGC*, **40**, 203-220.
- Dixon, T., McCoy, S.T. and Havercroft, I. (2015) Legal and regulatory developments on CCS. *JGGC*, **40**, 431-448.
- Emami-Meybodi, H., Hassanzadeh, H., Green, C.P. and Ennis-King, J. (2015) Convective dissolution of CO₂ in saline aquifers: Progress in modeling and experiments. *JGGC*, **40**, 238-266.
- Gale, J., Abanades, J.C., Bachu, S. and Jenkins, C. (2015) Special Issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO₂ Capture and Storage. *JGGC*, **40**, 1-5
- Global CCS Institute (2014) The global status of CCS 2014. Global CCS Institute. <https://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/180923/global-status-ccs-2014.pdf> (2015 年 12 月 3 日確認)
- Hovorka, S.D., Benson, S.M., Doughty, C., Freifeld, B.M., Sakurai, S., Daley, T.M., Kharaka, Y.K., Holtz, M.H., Trautz, R.C., Nance, H.S., Myer, L.R. and Knauss, K.G., (2006) Measuring permanence of CO₂ storage in saline formations: the Frio experiment. *Environ. Geosci.* **13**, 105-121.
- Idem, R., Supap, T., Shi, H., Gelowitz, D., Ball, M., Campbell, C. and Tontiwachwuthikul, P. (2015) Practical experience in post-combustion CO₂ capture using reactive solvents in large pilot and demonstration plants. *JGGC*, **40**, 6-25.
- IEAGHG (2014) GHGT-12 conference summary. http://ieaghg.org/docs/General_Docs/GHGT-12%20Summary%20Brochure.pdf (2015 年 10 月 29 日確認)
- IEAGHG (2015) Criteria of fault geomechanical stability during a pressure build-up. Report:2015/04, 111pp. http://www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2015-04.pdf (2015 年 10 月 29 日確認)
- IPCC (2005) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 431pp.

- 石戸経士・杉原光彦・西 祐司 (2014) ポストプロセスによる地球物理観測量の変動予測. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 143-148.
- Jansen, D., Gazzani, M., Manzolini, G., Dijk, E.V. and Carbo, M. (2015) Pre-combustion CO₂ capture. *JGGC*, **40**, 167-187.
- Jenkins, C., Chadwick, A., Hovorka, S.D. (2015) The state of the art in monitoring and verification—Ten years on. *JGGC*, **40**, 312-349.
- Jones, D.G., Beaubien, S.E., Blackford, J.C., Foekema, E.M., Lionse, J., Vittor, C.D., West, J.M., Widdicombe, S., Hauton, C. and Queirós, A.M. (2015) Developments since 2005 in understanding potential environmental impacts of CO₂ leakage from geological storage. *JGGC*, **40**, 350-377.
- 河野拓郎 (2015) CO₂ を海底下に封じ込める！ 地球温暖化対策の切り札「CCS」開発最前線. *Diamond_on_Line* - “激変 エネルギー最新事情”, *ダイヤモンド*. <http://diamond.jp/articles/-/80490> (2015 年 10 月 27 日 確認)
- Kemper, J. (2015) Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review. *JGGC*, **40**, 401-430.
- Krevor, S., Blunt, M.J., Benson, S.M., Pentland, C.H., Reynolds, C., Al-Menhali, A. and Niu, B. (2015) Capillary trapping for geologic carbon dioxide storage – From pore scale physics to field scale implications. *JGGC*, **40**, 221-237.
- Liang, Z.H., Rongwong, W., Liu, H., Fu, K., Gao, H., Cao, F., Zhang, R., Semaa, T., Henni, A., Sumon, K., Nath, D., Gelowitz, D., Srisang, W., Saiwan, C., Benamor, A., Al-Marri, M., Shi, H., Supap, T., Chan, C., Zhou, Q., Abu-Zahra, M., Wilson, M., Olson, W., Idem, R. and Tontiwachwuthikul, P. (2015) Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents. *JGGC*, **40**, 26-54.
- Nakanishi, S., Mizuno, Y., Okumura, O., Miida, H., Shidahara, T. and Hiramatsu, S. (2009) Methodology of CO₂ aquifer storage capacity assessment in Japan and overview of the project. *Energy Procedia*, **1**, 2639-2646.
- 中尾信典・當舎利行・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留技術の概要と産総研での取り組み. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 133-136.
- NOAA (2015) Recent monthly mean CO₂ at Mauna Loa. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> (2015 年 10 月 27 日 確認)
- 奥山康子・船津貴弘・藤井孝志 (2014) CO₂ 地中貯留での地盤変化を予測する—岩石力学—流体流動シミュレーション研究—. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 149-152.
- Pawar, R.J., Bromhal, G.S., Carey, J.W., Foxall, W., Korre, A., Ringrose, P.S., Tucker, O., Watson, M.N. and White, J.A. (2015) Recent advances in risk assessment and risk management of geologic CO₂ storage. *JGGC*, **40**, 292-311.
- Rubin, E.S., Davison, J.E. and Howard J. Herzog, H.J. (2015) The cost of CO₂ capture and storage. *JGGC*, **40**, 378-400.
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO₂ 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 137-142.
- 徂徠正夫・佐々木宗建・藤井孝志・加野友紀・上原真一 (2014) CO₂ 地中貯留における砂岩泥岩互層の遮蔽性能評価. *GSJ 地質ニュース*, **3**, 153-156.
- 杉原光彦 (2015) テキサス州ファンズワースでの重力計測の手記. *GSJ 地質ニュース*, **4**, 251-258.
- Stanger, R., Wall, T., Spörl, R., Paneru, M., Grathwohl, S., Weidmann, M., Scheffknecht, G., McDonald, D., Myöhänen, K., Ritvanen, J., Rahiala, S., Hyppänen, T., Mletzko, J., Kather, A. and Santos, S. (2015) Oxyfuel combustion for CO₂ capture in power plants. *JGGC*, **40**, 55-125.
- Talman, S. (2015) Subsurface geochemical fate and effects of impurities contained in a CO₂ stream injected into a deep saline aquifer: What is known. *JGGC*, **40**, 267-291.
- 戸高法文・奥山康子・赤坂千寿・佐々木宗建・當舎利行 (2009) 地化学・貯留層シミュレーションによる二酸化炭素の地化学トラッピングの検討：東京湾岸モデル. *岩石鉱物科学*, **38**, 90-100.
- 當舎利行・奥山康子 (2008) CCS 技術開発と評価—CO₂ 地中貯留技術の現状と展望. *産総研 TODAY*, **8**, no.1, 14.

OKUYAMA Yasuko (2016) 10 years from SRCCS.

(受付：2015 年 12 月 1 日)

燃料資源図「関東地方」について

佐脇貴幸¹⁾・金子信行²⁾・前川竜男²⁾・猪狩俊一郎²⁾

1. はじめに

2015年2月に、産総研・地質調査総合センターの出版物として、燃料資源図「関東地方」が出版されました(第1図)。燃料資源図は、石油、天然ガス等の資源ポテンシャルを示したもので、この「関東地方」は、2005年出版の「三陸沖」(棚橋ほか, 2005)、2010年出版の「東部南海トラフ」(後藤ほか, 2010)に次ぐ3番目の出版物(CD-ROM)です(前二者出版時には、燃料資源地質図として出版)。ここでは、燃料資源図「関東地方」を製作するに至った研究の経緯とその出版物の内容を簡単に紹介します。

2. 研究の経緯

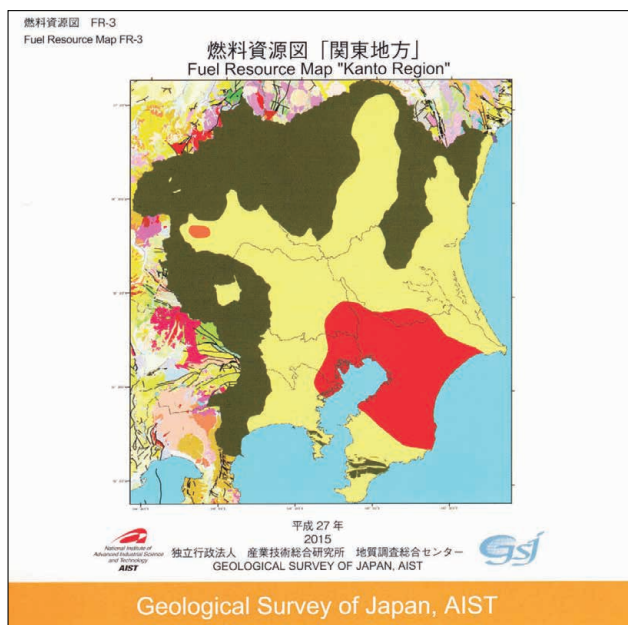
旧地質調査所時代には、様々な燃料資源に関する地球科学図が出版されました。そのうち、1/200万地質編集図「日本油田・ガス田分布図(第2版)」(以下「油田ガス田図」; 矢崎編, 1976)は、当時の研究・開発状況を踏まえ

て、全国の燃料資源の分布を俯瞰できる形で編集されました。ここには、その名のとおり日本における油田、ガス田の分布が示されていますが、関東地方にも水溶性天然ガス鉱床の分布が示されています。これは「南関東ガス田」と呼ばれるもので、その範囲が千葉県、茨城県、埼玉県、東京都、神奈川県にまたがる、わが国最大の水溶性天然ガス田です。水溶性天然ガスとは、その名の通り地下深部の地層水(主に鹹水)中に溶け込んでいるガスのことで、地表に汲み上げると遊離します。

南関東ガス田では、そのガスの成分の90%以上がメタンからなり、房総半島中部(茂原市、九十九里町等)で生産されたメタンガスは千葉県内に供給されています。また、水溶性天然ガスと同時に汲み上げられた鹹水には、海水の約2,000倍の濃度のヨウ素が溶解しており、この鹹水を原料としてヨウ素が生産されています(金子, 2005)。このように、南関東ガス田は、南関東という人口密集地の直下に広がっている、天然ガスとヨウ素の優良な鉱床です。しかしながら、この「油田ガス田図」の出版以降、南関東ガス田及びその周辺における水溶性天然ガスの賦存状況の調査・研究については、現在もガス開発が行われている房総半島中部以外では停滞していたというのが実情でした。

一方、近年は都市平野部での温泉開発が盛んになってきていますが、これも地下深部の地層水を開発ターゲット(泉源)としています。日本においては、火山地域以外での地殻上部の平均的な地温勾配は20~30℃/1,000m(例えば、鈴木, 1985)で、地表近くの地下水温を15℃とすれば深度1,000mで35~45℃となり、温泉法に規定される温度条件(25℃以上)を満たすことになります。関東平野深部の地層水は、温度という観点からは「深層熱水資源」と位置づけられます(角・高島編, 1980; 佐脇・水垣, 2005)。

したがって、一見異なる事象のように見える南関東での水溶性天然ガス・ヨウ素の生産と温泉開発とは、実は同じ種類の地層水を開発していることを意味しています。すなわち、南関東での大深度温泉開発には必然的にメタンが伴



第1図 燃料資源図「関東地方」表紙。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門(現 地質情報基盤センター)
2) 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: 燃料資源図, 関東地方, 水溶性天然ガス, 賦存状況, 化学組成

われ、メタンの処理方法が不適切だと爆発事故が発生することもあります（例えば2007年渋谷区松濤^{しょうとう}での爆発事故）。この渋谷区の事故後、温泉爆発事故を防ぐ行政上の対策の基図として先述の「油田ガス田図」が利用されました。しかし、その時点で既に出版から30年以上経過しており、最新の地質情報を盛り込んだ燃料資源図の整備が産総研内外から求められました。これを受け、筆者らは2008年度から関東地方の水溶性天然ガスの研究を開始し、燃料資源図「関東地方」（佐脇ほか、2015）としてまとめました。

本研究の主目的は、将来にわたる日本国内の資源の安定供給の基礎情報とすべく、関東地方における水溶性天然ガスの賦存状況（分布範囲、資源量等）に関わる資源情報を整備し、新たな燃料資源図として取りまとめることでした。この研究を進めるに当たっては、

- (1) 関東地方の既存坑井データ、特にガス井・温泉等に関する関連資料等を収集する。
- (2) 温泉を含め、既存の坑井から地層水・水溶性ガス成分を採取し、化学分析を行う。これらの地化学データをもとに、天然ガスの成因、地下地質構造との関係等を考察する。
- (3) 上記の(1)、(2)で得られたデータを基に、関東地方の水溶性天然ガスの分布・性状・起源を明らかにし、燃料資源図として整備する。

という三段階の方針を立てて実施しました。

また同時に、整備した燃料資源図のアウトカムとして、①日本国内の燃料資源及び地下水（温泉）資源の安定供給・効率的利用、②行政・開発業者の方々に対する、水溶性天然ガスにかかわる地質・地化学情報の提供、③利用されず排出されているメタンガスの有効利用及び地球温暖化対策のための基礎情報提供等を想定しました。

なお、研究を進めるに当たっては、自治体の温泉担当部署、天然ガス・温泉開発会社等の関係機関の方々のご助力をいただきました。

3. 燃料資源図「関東地方」の内容

本燃料資源図（CD-ROM）は、以下の内容（ファイル）から構成されています。

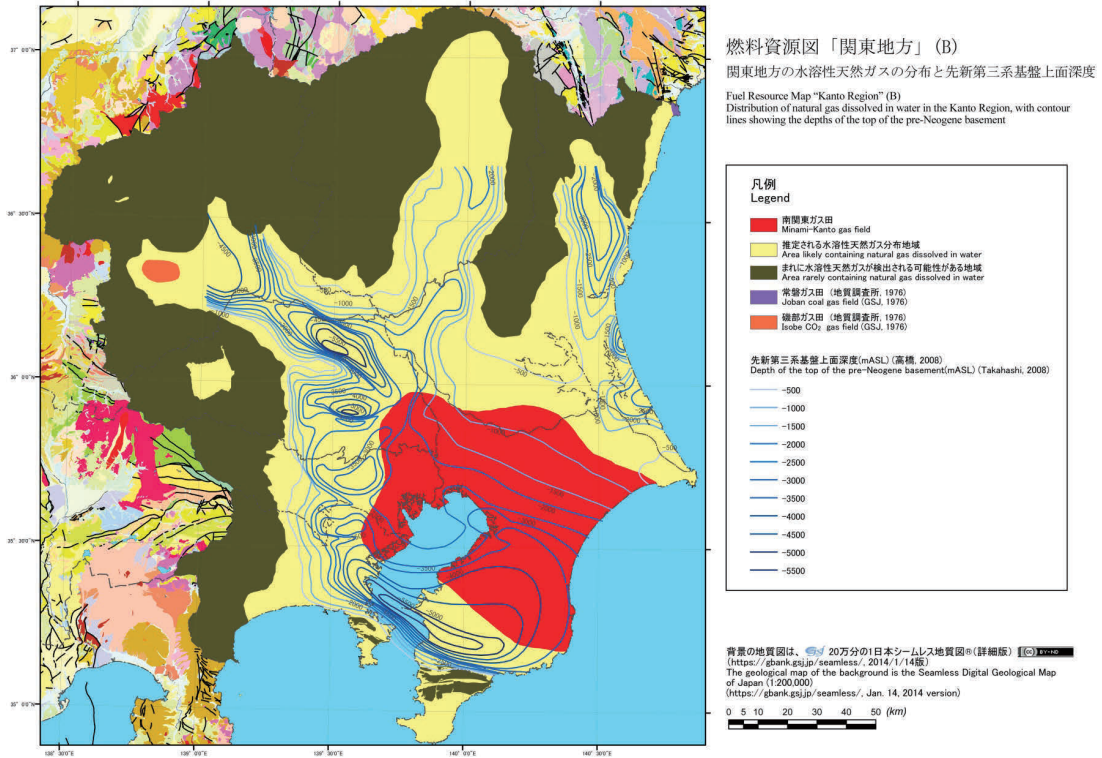
- | | |
|----------------------|--------|
| ・燃料資源図（pdf） | 2ファイル |
| ・燃料資源図「関東地方」説明書（pdf） | 1ファイル |
| ・図表（pdf） | 16ファイル |
| ・付表（pdf） | 2ファイル |
| ・その他補足説明用ファイル | |

詳細な内容は本図の方をご覧くださいと思います。このうち、いくつかの図について例示します。

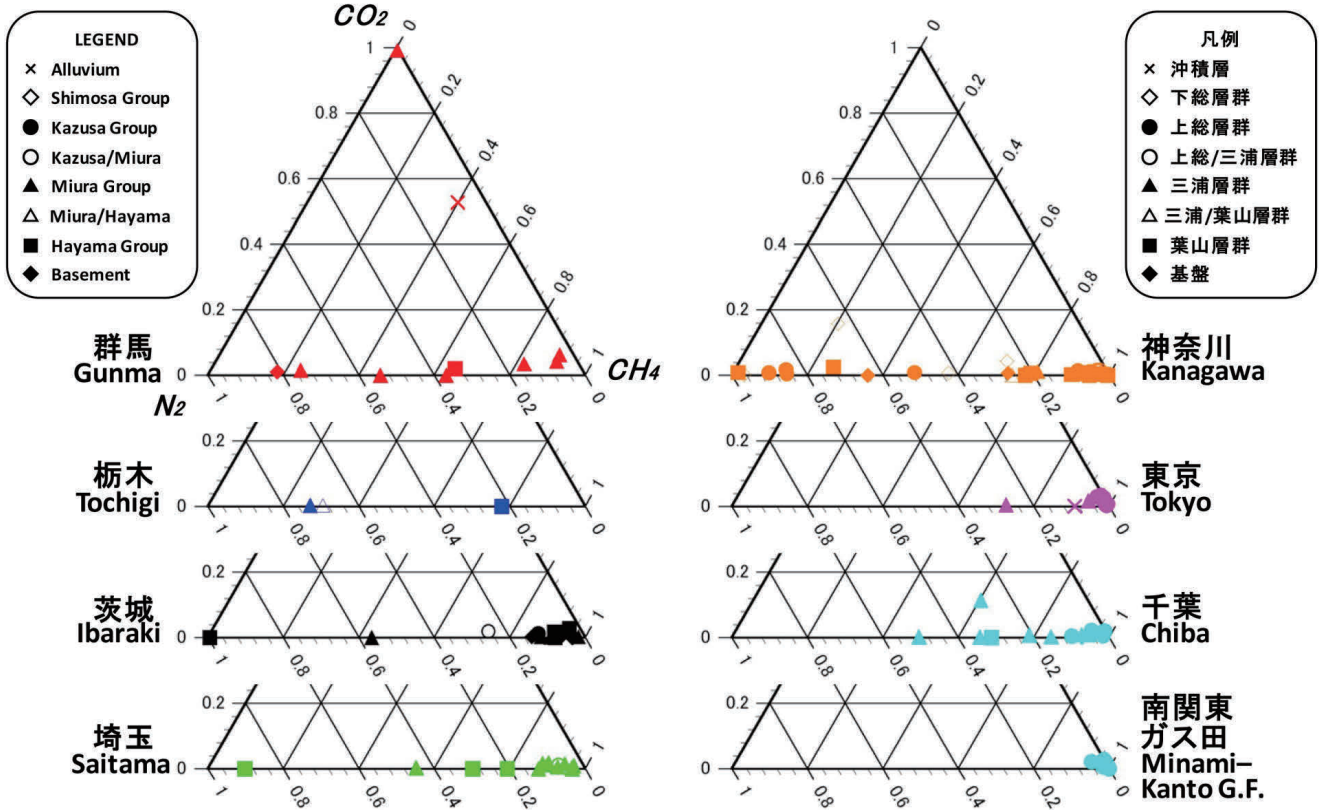
まず、燃料資源図についてはレイヤーの切り替えにより、天然ガスの分布、県境、20万分の1日本シームレス地質図[®]データベース（地質調査総合センターウェブサイト、<https://gbank.gsj.jp/seamless/>）等の表示が切り換えられるようになっていきます（第2図）。天然ガスの分布の表示範囲は、本研究で調査対象とした関東地方の一都六県内の範囲内に限っています。第2図にあるように、関東地方の天然ガスの分布地域は、(1)南関東ガス田、(2)推定される水溶性天然ガス分布地域、(3)まれに水溶性天然ガスが検出される可能性がある地域、(4)石炭起源ガス賦存地域、(5)炭酸ガス田地域の五つの地域に区分しています。ここで、それぞれの定義を述べますと、「(1)南関東ガス田」は、1976年の「油田ガス田図」を踏襲し、「一定量の水溶性天然ガスの産出（生産及び試掘段階）が認められた地域（過去に生産実績のある地域を含む）」としており、1976年の図に比べ、実績がある地区を含むよう、その範囲を若干拡大しています。「(2)推定される水溶性天然ガス分布地域」は、自治体での聞き取り調査や実坑井での試料採取等により、水溶性天然ガスが検出されている地域、「(3)まれに水溶性天然ガスが検出される可能性がある地域」は、ほぼ先新第三系の基盤岩類や第四紀の火山岩・火山砕屑岩類等が地表に分布する地域を示しています。また、「(4)石炭起源ガス賦存地域」は、1976年の「油田ガス田図」に示されているもの（同図上では「炭田ガス」と表記）、「(5)炭酸ガス田地域」は、同図において群馬県の磯部地区に分布する炭酸ガス田のことを示しています。

残念ながら、当初目的としていたガスの賦存量については、その計算のために必要な、「湧出するガス量及びガス水比」に関連する十分な情報が得られなかったため、全体の賦存量は示すことができていません。ただし、今後新たにデータが得られた時のことを想定し、賦存量を求めるための計算式は導出しています（説明書 5.5節）。

次に、第3図には、天然ガスの化学組成の特徴を県別に示したものを示します。この図では、天然ガスの主成分であるメタン、窒素、二酸化炭素（炭酸ガス）の三成分比率を三角図にプロットしています。基本的に、関東地方の地下の天然ガスは、メタンと窒素の二成分混合で説明できますが、千葉を中心とする南関東ガス田では、そのほとんどがメタンから成ります。そこから離れるに従い、窒素の割合が増加し、北関東や神奈川では窒素の割合が50%以上の温泉が認められることがあります。逆の見方をする



第2図 燃料資源図の表示例：天然ガスの分布，20万分の1日本シームレス地質図®データベース及び先第三紀基盤上面深度（高橋，2008）を表示。



第3図 関東地方都県ごとの天然ガス組成：CH₄-N₂-CO₂ 三角ダイアグラム。

と、メタンの量が南関東ガス田に向かって多くなることを表しており、地下に微量に存在する窒素がメタンにより希釈されて割合が減少しているものと考えられます。なお、群馬の一部には二酸化炭素の多い温泉が認められますが、これは前述の炭酸ガス田と火山に関連するものです。

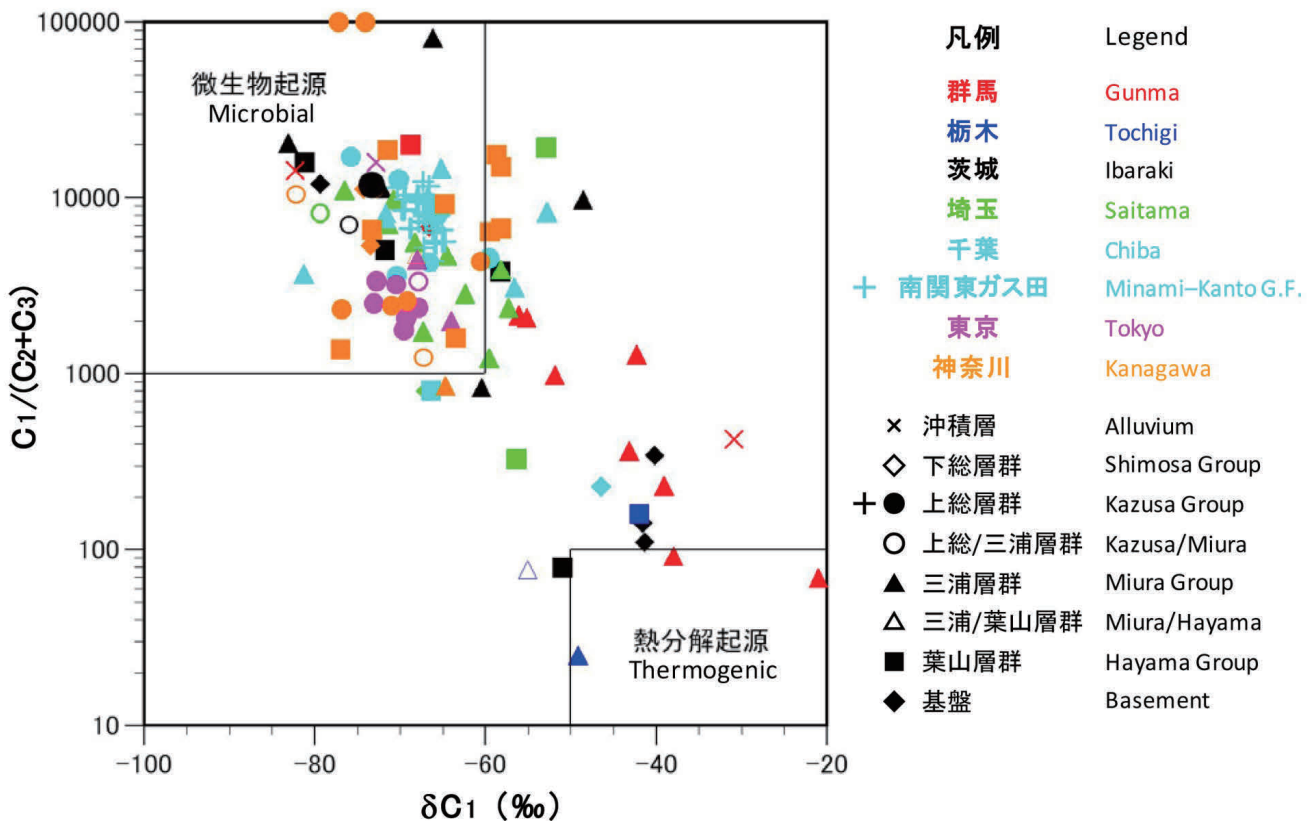
第4図には、横軸にメタンの炭素同位体比 (δC_1)、縦軸にメタン/(エタン+プロパン)比 ($C_1/(C_2+C_3)$) を取り、炭化水素の起源を示したものです。微生物起源ガスとは、地下の比較的浅い深度において、酸素のない環境で微生物が生成したメタンを主とする天然ガスであり、 δC_1 が -60‰ より小さく、 $C_1/(C_2+C_3)$ 比が 1,000 より大きいという特徴を示します。一方、熱分解起源ガスとは、より地下深部の高温の環境において、有機物の C-C 結合が熱的に切断されることにより生成した炭化水素ガスを主体とし、 δC_1 が -50‰ より大きく、 $C_1/(C_2+C_3)$ 比は 100 より小さい値を示すものです。第4図で明らかなように、関東地方の多くの温泉は、微生物起源のメタンを主体とすることが分かります。一方北関東には、 δC_1 の大きな熱分解起源のメタンが分布します。これは茨城では常磐沖堆積盆の縁辺部に位置する地域、栃木では喜連川地域の高温

の温泉、群馬の活火山周辺の温泉であり、いずれも泉温が 60℃ 以上と高いものです。

4. 研究を通してわかったこと

以上の分析結果をはじめとして、本研究における実地調査、各種文献調査、聞き取り調査の結果を総合して得られた結果は以下の通りです。

関東地方、特に平野部には南関東ガス田以外の地域にも水溶性天然ガスが存在しています。特に、先新第三系の基盤深度の大きな地域（ハーフグラベン等）が地下に存在し、その上に新第三系が厚く堆積した堆積盆地域では天然ガスを溶存する地層水が普遍的に滞留していると考えられます。次に、水溶性天然ガス中のメタンガスは、炭素同位体比と共存する炭化水素の組成から見て大部分が微生物起源と判断されますが、北関東では熱分解性のメタンガスも認められます。また、地層水の同位体分析結果から、関東地方地下を構成する新第三系、第四系中の水は、メタンを含む化石海水と天水との混合により形成されたことがわかりました。残念ながら、関東地方全体にわたっての水溶性



第4図 炭化水素ガス組成とメタン炭素同位体比（バーナード図）；境界線は Bernard *et al.* (1977) による。

天然ガスの賦存量については、信頼できるガス水比のデータ等が非常に少なかったため算出することはできませんでしたが、それに至るための計算式を導出することができました。

以上の詳細については、当燃料資源図本体をご覧くださいければ幸いです。

文 献

Bernard, B. B., Brooks, J. M. and Sackett, W. M. (1977)
A geochemical model for characterization of hydrocarbon gas sources in marine sediments. Proceedings of the Offshore Technology Conference, 435-438.

地質調査総合センター，20万分の1日本シームレス地質図® データベース，<https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2015年12月3日参照)

後藤秀作・森田澄人・棚橋 学・松林 修・中村光一・駒沢正夫・石原丈実・上嶋正人・林 雅雄・及川信孝・小林稔明・稲盛隆穂・佐伯龍男 (2010) 燃料資源地質図「東部南海トラフ」，数値地質図 FR-2，産業技術総合研究所地質調査総合センター。

金子信行 (2005) 千葉県天然ガス・ヨウ素資源。地質ニュース，no. 605，33-35。

佐脇貴幸・水垣桂子 (2005) 地熱資源と地熱発電・地中熱利用，千葉近辺の温泉。地質ニュース，no. 605，29-32。

佐脇貴幸・金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎 (2015) 燃料資源図「関東地方」。燃料資源図 FR-3，産業技術総合研究所地質調査総合センター。

角 清愛・高島 勲 (編) (1980) 1:2,000,000 地質編集図 No. 20「日本地熱資源賦存地域分布図」，地質調査所。

鈴木宏芳 (1985) 関東平野の地中温度。防災科学技術センター研究報告，No. 35，139-154。

高橋雅紀 (2008) 関東地方の地質図と関東平野下の先中新統基盤深度図。日本地質学会 (編)「日本地方地質誌3 関東地方」，朝倉書店，口絵4。

棚橋 学・大澤正博・中西 敏・小田 浩・佐藤俊二・畑中 実・鈴木祐一郎・中嶋 健・徳橋秀一 (編) (2005) 燃料資源地質図「三陸沖」，数値地質図 FR-1，産業技術総合研究所地質調査総合センター。

矢崎清貫 (編) (1976) 1:2,000,000 地質編集図 No. 9「日本油田・ガス田分布図 (第2版)」，地質調査所。

SAWAKI Takayuki, KANEKO Nobuyuki, MAEKAWA Tatsuo and IGARI Shun-ichiro (2016) Fuel Resource Map "Kanto Region".

(受付:2015年12月3日)

地質も学べる展示館 — 支笏湖ビジターセンター —

杉原光彦¹⁾

産業技術総合研究所つくばセンターに併設されている地質標本館では地質学全般を学べる。国内外には他にも地質系博物館がある（例えば、田中・ユン、2015）。その一方で、たまたま入った展示館・博物館で地質も学べることもある。支笏湖ビジターセンターがそうだった。北海道苫小牧市に度々出張するが、市内はもちろん近隣の宿泊施設が軒並み満室で8泊の出張期間中に4か所への移動を強いられたことがあり、宿泊検索サイトでやっと見つけた支笏湖畔の宿泊施設にも2泊した。せっかくの機会だから支笏湖畔を散策しようと、建ち並ぶ土産物屋の前を通りぬけて湖畔に向かって歩いた。支笏湖は日本で8番目に面積が大きく2番目に深い湖である（第1図）。土産物屋を背にすると目の前には静謐な自然が広がる。周囲の山々を含

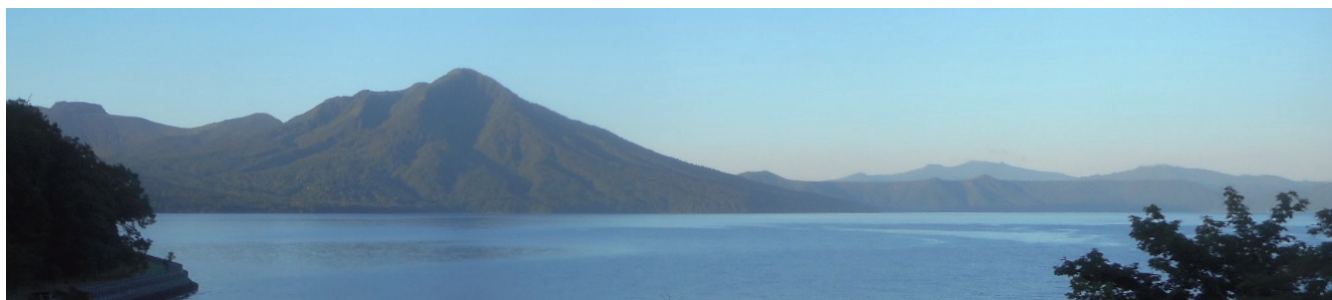
めた湖のたたずまいは雄大でありながら神秘的な美しさがある（第2図）。人の気配に振り返ると団体客が近づいてくると見えた。湖を前にして一様に感嘆の声をあげた、その声で彼らが中国系の観光客であることを知った。湖畔の説明用看板は四か国語（日本語・英語・中国語・韓国語）で表記されているので、正面やや左の風不死岳、その左横の樽前山が火山であること、支笏湖自体は大噴火によって陥没してできた言わば負の巨大な火山体であることを、恐らくは火山にあまりなじみのない中国系の人々も知ることができる。ただし、これだけでは噴火活動の変遷まではわからないだろうし、恵庭岳の説明には疑問があると思いつつ湖岸を後にした。宿に戻る道すがら三角形の大きなガラス窓が印象的な木造建物に気付いた（第3図）。それは



第1図 位置図。支笏湖ビジターセンターは支笏湖東岸にある。恵庭岳、風不死岳、樽前山は、ほぼ一直線上に並ぶ（地理院地図 <http://maps.gsi.go.jp> に加筆）。

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：支笏湖ビジターセンター、支笏火山、樽前山、カルデラ、破局噴火



第2図 支笏湖東岸から西南西方向の眺め。中央やや左側に風不死岳，その左側に樽前山の溶岩ドームが見える。

支笏湖ビジターセンターだった。ビジターセンターとは、自然公園法施行令第1条第9号に掲げる博物展示施設に該当しており、「主としてその公園の地形、地質、動物、植物、歴史等に関し、公園利用者が容易に理解できるよう、解説活動又は実物標本、模型、写真、図表等を用いた展示を行うために設けられる施設をいう。」と定義されている（ビジターセンターについて、https://www.env.go.jp/nature/ari_kata/shiryoku/031010-7.pdf, 2015年10月1日確認）。

支笏湖ビジターセンターの館内に入ると正面には3頭のヒグマの剥製展示があった。その右手奥には高さ3m以上の木柱が並び、「支笏地史への旅」という表示が目につく（第4図）。木柱には支笏湖40,000年前、風不死岳20,000年前、恵庭岳13,000年前、樽前山9,000年前と、火山活動年代の遷移が大きい文字で順番に示される。その柱に沿って進むとクリスタルジオラマと呼ばれる半透明の支笏湖周辺の地形模型があり、その上方では3方向に向けた画面に同じ番組が映っていた（第5図）。解説の進行に応じて、半透明のジオラマを下から照射する色が変わるしくみも人目を惹く。「カルデラシアター」と呼ばれる番組の起動スイッチはタイ語を含む6つの言語から選べる。私が入った時は4人の先客が時々クリスタルジオラマに手を触れながら中国語の説明にうなずいていた。中国語による番組終了後に私が日本語を選択して再開してみると、解説は「支笏カルデラの成り立ち」から始まった。約40,000年前に緑色の大地の中で噴火活動が始まり、高さ45,000mに及ぶ噴煙が東に流れて大量の火山灰を降らせる。大規模な火砕流が発生して周囲の谷を埋め尽くしていき、火砕流が出た跡の大地は陥没して湖ができる。湖が巨大な火山活動の痕跡であることがよくわかる。巨大噴火活動のあとには順次、風不死岳、恵庭岳、樽前山の火山活動が一直線に並ぶ配置で起こり、支笏湖の形状は風不死岳と恵庭岳の山体が付加されたために円型から現在の鞠型になったというところで、地質以外の話題に転じ



第3図 支笏湖ビジターセンターの外観。建物の左側に大きいガラスの三角窓がある。

る。湖畔にあった説明看板だけでは理解しにくい火山活動の変遷がよくわかる説明となっており、とりわけカルデラ形成過程がアニメーションによってわかりやすく説明されていることを好ましく思った。日本語以外の説明も選択できるので、火山活動とはなじみの薄そうな国々、タイや中国の人々にもスケールの異なる巨大なカルデラ噴火活動について印象付けられるだろう。

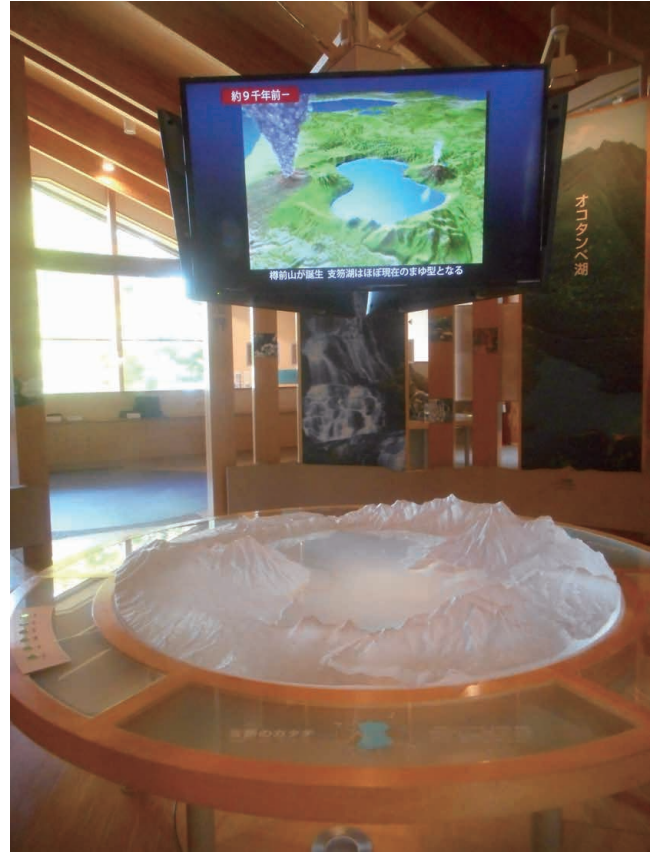
クリスタルジオラマの隣のエリアには樽前山の溶岩ドーム成立の展示、各種火山噴出物のサンプル、柱状節理の大きい写真があり、そして「苔の洞門」と呼ばれる火砕流堆積物の浸食跡については、少し離れた壁を広く使った高さ9mの実物大グラフィック展示がある。火山堆積物の地層模型と「いろいろな石」サンプル展示の間を歩き来しながら親子が会話している様子が微笑ましかった。ほかには千歳鉱山の金鉱石や樽前山防災マップや、「自然エネルギーの活用」として館内での地中熱利用システムの説明図もぬかりなく展示されていた。地質に関する展示が全体の半分を占めているのだろうか、ビジターセンターの定義にあるように動植物や歴史の展示もある。こうした盛りだくさんの内容がクリスタルジオラマを中心にコンパクトに効率



第4図 支笏湖ビジターセンター内部。支笏地史の展示。左側奥にクリスタルジオラマが見える。

よく配置されている。外を歩いていて目に付いた大きい三角ガラスを通して展示室に注ぐ外光も効果的だった。

クリスタルジオラマでのカルデラシアターとは別にレクチャールームでは150インチの大画面による映像説明がある。これも多言語対応らしい。受付で映像スケジュールを聞くと、随時放映するとのこと、すぐにも始めてくれるという。恐縮しながらも最前列に陣取り、大画面を一人占めで堪能した。内容はカルデラシアターと重複する部分もあったが、大画面の効果は圧倒的で、特に樽前山に設置した固定カメラや空撮による支笏湖の四季の変遷の美しさは際立っていた。レクチャールームを出てラウンジから三角窓の外を眺めると、緑豊かに繁った葉の間に青い湖面が見えた。木々の多くはカエデ科なので、秋になれば葉は色づき、やがて落葉すれば窓から湖面全体が見通せるだろう。樽前山の特徴的な溶岩ドームはギリギリ見えるかどうか微妙な角度だが、風不死岳と恵庭岳の山容は確実に見えるはずだ。冬になれば一転してモノクロームの世界になる。不凍湖として知られる湖面は鈍色の水を湛え、周囲の雪景色との対比が美しいことだろう。晴天の日は湖面が青鈍色に光り、雪の上にはキタキツネの足跡が点々と続いて



第5図 クリスタルジオラマ展示。映像は、支笏火山でカルデラ湖ができた後に、風不死岳、恵庭岳の火山活動があり、その後樽前山の火山活動が始まった場面。

いるかもしれない。風が吹き、雪が舞ってくれば、大きい窓から空を見上げると浮遊していく気分になるだろう。ドビュッシーの音楽が聞こえるようだ。寒々とした風景を暖かい室内から眺めるのも気持ちのいいものだろう。そして春になれば、日ごとに若葉が湖面を隠していく....実際には緑の葉の隙間から湖面が見えるだけだが、大画面で見た四季の映像の記憶の働きで、窓の外の四季の移り変わりも空想して楽しんだ。

出張から帰ったあとで支笏湖ビジターセンターでの展示内容を復習した。復習と言ってもカルデラ火山については展示を見て思い出した本の再読である。火山学者が一般向けに書いた新書(高橋, 2008)だ。最近10万年間で最大の火山噴火は71,000年前にインドネシアのトバ火山で発生した。この噴火によって人類の総人口は1万人以下にまで激減し、人類は種としての存在の危機に陥った。火砕流直撃のあとの火山灰に加えて、成層圏高く舞上がった硫酸エアロゾルによる北半球での10度の気温低下は6年間続いたためだ。仮に今、発生すれば、大規模火砕流による直接の犠牲者は数百万人を超え、その後2週間程度でタイ南部までが厚い火山灰に覆われることで農業は壊滅

的な打撃を受け、被災者は20億人規模にもなりうる。噴出量が $3,000 \text{ km}^3$ の規模の噴火がトバ火山で再発する可能性はまだ小さいが、米国のイエローストーンでは同規模の噴火発生の可能性が警戒されている。40,000年前の支笏火山の噴火は噴出物総量がトバ火山に比べて一桁小さい 300 km^3 だが、現在ならば札幌市を含む道央の広いエリアが火砕流に直撃される。日本には、この支笏火山クラスのカルデラ火山は北海道・東北と九州に存在するが、九州で発生した場合には火砕流が及ぶ範囲は同規模でも火山灰の影響範囲が大きい。偏西風によって関東地方も火山灰に厚く覆われるので日本埋没の危機となるし、経済的な影響は世界に及ぶ。仮に2桁小さい 5 km^3 規模の噴火であっても、発生場所が人口密集地あるいは経済活動の中心に近ければ、影響は世界に及ぶ恐れがある。噴出量が 30 km^3 以上のカルデラ噴火を破局噴火として数えると日本での発生頻度は7,000年に1回の割合である。前回の破局噴火の発生は7,300年前であることから多くの火山関係者は破局噴火について危機感を抱いている。以上が高橋(2008)の概要と言えらるだろうか。

7,000年に1回という頻度の災害に対する心構えは難しい。東日本大震災が発生する前、専門家は1,000年に1回の頻度の津波の発生を危惧していた(宍倉ほか, 2009など)が、その危機感は社会全般には受容されていなかった。大きい犠牲と引き換えのようにして大地震に伴う津波災害が現実的課題として認識されてきたように思える。カルデラ噴火には大規模火砕流が付随するが、火砕流という言葉が一般に理解されるようになったのは1991年雲仙火山噴火(山田, 1993など)以降だろう。雲仙火山噴火の噴出物総量は 0.3 km^3 以下で、破局噴火に比べて規模ははるかに小さいが、それでも犠牲のインパクトは大きかったのだ。守屋(1992)は「火砕流について、その堆積物の観察、文献、写真から自分なりのイメージを組み立てていました。その後30年たった1991年に初めて雲仙岳で火砕流をみて、案外驚かなかったのは、また初めて見たようには思えなかったのは、すでに頭の中にイメージができていて、それがあまり現実と違っていなかったから」と述べている。同じ内容を、ご本人が研究集会で淡々と話されたのを聞いて強い印象を受けた記憶がある。しかし専門家は理解していても、一般社会に理解されていないと噴火予測情報の出し方は難しい。高橋(2008)は破局噴火活動への警戒をめぐって1980年頃に米国で起こった事例を紹介している。静穏だったロングバレーカルデラ地域で急に地震活動が活発になり顕著な隆起も起こって噴火の兆候の可能性が危惧されたことから米国地質調査所が初期的

な警戒情報を出した。しかしカルデラ火山の認識が無い住民達の反発から政治力も働いて警戒情報は撤回された。オオカミ少年のような扱いを受けた火山専門家達の無念さを見ると胸が痛む。災害予測情報が風評被害ととらえられてしまうと経済活動との折り合いは難しい。

発生確率が低い災害については現実的な課題と感じられずに、発生を心配することは杞憂として見過ごされがちだ。杞憂という言葉は、起こりえない天体衝突を心配する取り越し苦労という意味だとすれば、それは実は杞憂ではない。低確率ながら長い地質学的時間の間には天体衝突も必ず起こる。トバ火山級の噴火も同様だ。高橋(2008)の執筆のきっかけは、九州での破局噴火を描いたSF小説(石黒, 2002)の内容が専門家から見ても極めてリアリティがあったためである。想定された噴火の規模は40,000年前の支笏カルデラ噴火に近い。小説では噴火を予測していた首相が噴火後の復興作戦を用意していた。しかし、これは広く公表された噴火警戒情報の対応とは別だ。

日本では噴火警戒レベル(気象庁, http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/level_toha/level_toha.htm, 2015年10月26日確認)が運用されている。噴火警戒レベルの話題がニュースで報道されることも多くなった(活断層・火山研究部門, 2015など)。2014年御嶽山噴火(中野ほか, 2014)の多くの犠牲に対しては、噴火警戒レベルの妥当性が議論になった。一方で噴火ハザードマップも普及しつつある。苫小牧出張中にたまたま見たTV番組では有珠山噴火に対するハザードマップが2000年有珠山噴火(川辺ほか, 2000)を機に住民に受容される過程が紹介されていた。支笏湖ビジターセンターには樽前火山ハザードマップが展示されていた。

破局噴火クラスとなると、規模が大きすぎてまだ対応は難しいのではないと思う。まずはカルデラ噴火に対する理解が広がることが重要だ。そのためには支笏湖のような実物を見てビジターセンターでの解説で学ぶというのは有効だと思う。日本ではカルデラという言葉を知っている人は多いと思うが、ビジターセンターの日本語による重層的な説明は理解を深めるのに役立つだろう。火山になじみが薄い国の人々は多国語対応の説明によってカルデラ噴火というものを認識できるだろう。破局噴火の影響は世界に及ぶし直接の被害は一国では支えきれないから、国際的に理解が広がることの意義は大きいと思う。

「支笏地史への旅」に関連しては、産総研が発行した樽前山火山地質図(古川・中川, 2010)の解説を読むと、展示内容にあった火山活動年代との数値の違いが気になった。火山地質図の筆頭著者の古川さんとは以前イタリ

文 献

アのブルカノ火山と一緒に調査した（古川ほか，2001；杉原ほか，2001）。その気安さから展示の表現「支笏湖40,000年前，風不死岳20,000年前，恵庭岳13,000年前，樽前山9,000年前」について質問してみたら，すぐに返信があった。「いずれの火山も複数回の噴火がありますので，リストのようであれば，非常に短期間に一気に火山ができたかのように誤解されていないか，心配です。特徴的な噴火の年代という意味ならわかります。支笏4万年前，樽前9千年前は問題ないと思います。風不死は以前から年代不詳で，地形的に支笏より若く，恵庭より古いことから大体2万年前という推定だったと思います。恵庭は1万5千年前というのが活動初期の噴出物の年代でしたが，年輪年代補正によって古くなりました。」なるほど。展示内容の疑問点は画竜点睛を欠くということではないが，最新の知見として産総研発行の樽前山火山地質図を展示，あるいはネットで参照しやすいようにしておけば完璧だ，と思ったが，その提案は産総研職員として，いささか手前味噌だろうか？

支笏湖ビジターセンターは夕方5時半まで（11-3月は4時半まで）開館しているので便利だ。湖畔の宿の宿泊者ならば徒歩で行ける。入場料は無料だが，湖畔駐車場を利用する場合は，協力金として410円支払う必要がある。「駐車場の料金は公園施設の維持管理に使われます」とのこと，確かに湖畔一帯はきれいに管理されていた。

謝辞

展示で学ばせていただいたことについて，まずビジターセンターの関係者に感謝したい。利用した支笏湖畔の宿泊施設とは支笏湖ユースホステル（YH）である。ここは日本最古のYHである。大学生当時以来のYH利用だったが，和室を占用するという選択肢があり，通常の出張時と同様に機器調整，データ処理作業もできた。快適な宿泊の場を提供していただいた上に，結果的に支笏湖ビジターセンター訪問の機会も得られたことについて支笏湖YHに感謝します。

- 古川竜太・中川光弘（2010）樽前火山地質図。日本の活火山，産業技術総合研究所地質調査総合センター，7p，https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/tarumae/text/exp15-1.html（2015年10月26日確認）
- 古川竜太・中野 俊・大熊茂雄・杉原光彦（2001）クラテールを訪ねて—イタリア，ブルカノ火山の地質調査—。地質ニュース，no. 559，32-40。
- 石黒 耀（2002）死都日本。講談社，東京，520p。
- 活断層・火山研究部門（2015）口永良部島火山の噴火に関する情報[2015年5月29日]。GSJ地質ニュース，4，221-224。
- 川辺禎久・風早康平・宝田晋治・総合観測班地質グループ（2000）2000年3月31日有珠山噴火。地質ニュース，no. 548，1-2（口絵）。
- 守屋以智雄（1992）火山を読む。岩波書店，東京，270p。
- 中野 俊・及川輝樹・山崎誠子・川辺禎久（2014）御嶽山，2014年9月の噴火（速報）。GSJ地質ニュース，3，289-292。
- 穴倉正展・藤原 治・澤井裕紀・藤野滋弘・行谷佑一（2009）沿岸の地形・地質調査から連動型巨大地震を予測する。地質ニュース，no. 663，23-28。
- 杉原光彦・大熊茂雄・中野 俊・古川竜太（2001）ブルカノ島での重力調査。地質ニュース，no. 559，25-31。
- 高橋正樹（2008）破局噴火，秒読みに入った人類滅亡の日。祥伝社，東京，244p。
- 田中 剛・ユンリーナ（2015）地質系博物館の紹介—韓国天然記念物センター—。GSJ地質ニュース，4，313-314。
- 山田スミコ（1993）地元住民の見た雲仙普賢岳1990年～噴火活動（その1）。地質ニュース，no. 466，18-24。

SUGIHARA Mituhiko (2016) Visit to a museum, where we can study geology - Lake Shikotsu visitor center - .

(受付:2015年10月28日)

地質も学べる展示館 — 天平ろまん館 —

杉原光彦¹⁾

1. はじめに

産業技術総合研究所つくばセンターに併設されている地質標本館では地質学全般を学べる。その一方で別の目的で入った展示館で地質も学べることがある。宮城県遠田郡涌谷町の天平ろまん館がそうだった。ここは日本国内で初めて金が産出された場所である。時は奈良時代、聖武天皇が大仏建立を祈念していた。大仏の表面に塗布する金の産出が望まれていたさなかに国内初の産金が涌谷で報告されて世は沸き返り、大伴家持は産金を寿ぐ有名な和歌を詠んだ。家持ファンの私にとって涌谷は、いつかは行きたい所だった。

地質調査所は1980年まで神奈川県川崎市溝ノ口にあったが、溝ノ口を始点とする一つのバス路線の終点近くで私は小学生後半期を過ごした。10数年前に流行ったノスタルジックな歌の歌詞そのままに、竹藪に秘密基地を作って一緒に遊んだ友達は転校していった。その竹藪から札束が発見されて全国ニュースになったこともあった。私が第一回卒業生となった小学校の本校は橘小学校だったが、1,300年前に橘在住の夫婦が詠んだ防人歌は哀感とは別に私には郷愁を呼び起こす。防人歌は大伴家持が、「出来が悪い歌はボツにする」などと言いながら採集し、方言の響きも残して万葉集にも採録した。その経緯を知って私は大伴家持に関心を持った。そして家持作歌の中で一番心に響いたのが産金を寿ぐ長歌だった。

2. 天平ろまん館

日本国内初の産金記念の地に建てられた展示館、天平ろまん館は、「あおによし奈良の都」の朱色が目立つ派手な外観(第1図)だが展示は至って真面目である。世界各地の砂金のプロローグ展示の後には、「古代の東北と小田郷」「聖武天皇の時代」「天平産金」「大仏建立の技術」と続く。「古代の東北と小田郷」展示は「涌谷は化石の宝庫である」という説明から始まり、追戸層で発見された複数の化石が展示されている。追戸層は化石が多いことでも知られ

る(高橋・松野, 1969; 石井・柳沢, 1984)が、展示館の近くにその模式地がある(第2図)。化石展示に続いて貝塚の出土品を始め考古学調査出土品が並べられたあと、産金の経緯がわかりやすく詳細に説明されていた。産金の中心人物は百済の王族の末裔の渡来人4世百済王敬福で、産金は渡来人の技術導入の成果だったようだ。大仏建立に必要な金属(銅, 錫, 金, 水銀)の生産地の分布が興味深い。主要原材料の銅は山口県の長登、鍍金の工程に必要な水銀は茨城県でも生産されていた。

順路に従って進むと外光が注ぐ渡り廊下のスペースには「採金技術と涌谷の砂金」展示があった。涌谷周辺の砂金採取地分布図、実際に涌谷で採取された砂金の標本と各種分析結果の説明があった。2体の人形を配置した砂金採取作業復元模型、金鉱石の標本、砂金発見の手掛かりとしたという石英を含む白い「モチ石」も展示されていた(第3図)。

順路は再び、人工照明の館内に入り「その後の産金地」「万葉北限の地」「企画展示室」「金の知識」を経て出口に至る。「万葉北限の地」コーナーには大伴家持の坐像があった。今から見れば、大伴一族の矜持を示しつつ産金を寿ぐ和歌を詠んだこの時が家持の絶頂期だった。大伴氏の政治力はすでに藤原氏に圧倒されていたが、この後は大伴家持は族長として一族の行く末を危ぶむようになる。百済王敬福の



第1図 天平ろまん館の近景。写真の左端が黄金山神社の参道の入り口にある鳥居。

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：天平ろまん館、涌谷、産金、大伴家持、百済王敬福、砂金、追戸



第2図 天平ろまん館の位置図（地理院地図，<http://maps.gsi.go.jp> に加筆）。追戸層の模式地となった追戸の地名も示した。産金に関係すると思われる地名、黄金迫こがねはさまも示した。黄金迫層という地層もある（高橋・松野，1969）。



第3図 天平ろまん館の館内展示のうち、外光があたる「採金技術と涌谷の砂金」展示の一部。右端奥がモチ石。

経歴の説明と照らし合わせると、多賀城への赴任時期、聖武天皇との関係などで、大伴家持と百済王敬副は微妙に交錯していた。

館外に出ると「砂金採り体験施設」があって、久々に体験してみようか、と心が動いた。20年以上前に、写真週刊誌「フォーカス」に芸能人などがスキャンダル場面を掲載されることを意味する「フォーカスされる」という言葉があった。私はフォーカスされた経験がある。地質標本館10周年行事の一環として久慈川の川原で行われた砂金探しのイベント（神谷，1991）に、独身だった私は甥と参加した。自然の川原での砂金探しなので皆がすぐに砂金を発見できたのではないが、徐々に収穫を喜ぶ歓声が広がっ

た。ところが無器用な私と甥は一かけらの砂金も見つけられずにいた。隣に居合わせた家族のお母さんが私達の窮状を見かねて声をかけてくれた。その瞬間の私と甥と女性を撮影して、「お父さん採れた？」のような小見出しをつけた見開き記事が掲載された（フォーカス，1990）。

結局、砂金採り体験はパスして「遺跡広場」を通過して「史跡ゾーン」に向かった。遺跡広場と裏山の境界を小川が流れていて地層の一部も見えた（第4図）。展示館のカタログには川底に砂金の粒が見えると書いてあるが、目をこらしても砂金の粒を確認することはできなかった。展示館内の説明では現在はずでに採りつくされているということだったし、周辺で採取されたという砂金標本も、はかなげな様子だった。茨城県での砂金体験の時にやっと見つけた耳垢のような砂金の粒子も砂の中ではなかなか気づかなかったのだから、さらに小さい涌谷の砂金は見えなくても当然だろうと思った。裏山には砂金探索時に掘ったあとと思われる穴凹が見えた。参道の奥の社は展示館とは異なり神さびた雰囲気だった。近づいてみると社の後ろの立派な杉の大きさは3本がご神域として囲まれており、樹齢400年の天然記念物だった。その一角には大伴家持の反歌の石碑もあった。参道を引き返し、天平ろまん館の正面を通り抜けて駐車場に戻ろうとして入口付近の石碑裏面の韓国国旗に気付いた。それは百済王敬福の業績に因んだ韓日友好



第4図 涌谷産金地の名残とされる小川。左側写真の小川部分を右側写真に示した。下部に水流、上部に地層の一部が見えている。



第5図 涌谷産金地の遠景。左端の矢印の下が天平ろまん館。写真撮影位置は第2図に矢印で示した。

記念碑だった。再び受付に立ち寄って2冊の資料（伊東，1994；涌谷町，1994）を購入して天平ろまん館を後にした（第5図）。

3. 見学後の楽しみ

帰路の車内で早速、購入した資料集を読んだ。地質学的に重要と思ったのは、百済王敬福の出身地「溪頭」の地形に似ていることが砂金発見の手掛かりになったという記述だ。しかし「溪頭」を検索してみたがでてきたのは台湾の観光地だった。資料集をよく読むと「成歆・全義あたりの砂金地」の記述があった。検索するとこちらは幹線鉄道の駅もある韓国内の地名で百済領内に位置していた。恐らく

は地形との類似性というよりは、石英を含む「モチ石」があるところに砂金が出るという渡来人の知識が砂金探索に役立ったのだろう。これは自分の経験に照らしても納得できる。私は子供のころに大正生まれの父から鉱物標本セットを譲り受けた。その中では金色の鉱物粒子を含む黄鉄鉱と石全体が結晶の形をして銀色に光る方鉛鉱がお気に入りだった。旧字体の漢字は読めなかったので、各々をカタカナの振り仮名、オウテックワウ、ホウエンクワウと記憶した。鉱物標本の中には金鉱石もあったが金色の粒さえ見えずにがっかりした。恐らく当時の人々も金色に見えない金鉱石から金がとれるとは思わなかったのだ。渡来人が石英を含む「モチ石」を手掛かりに砂金を探しだし、集めて日本初の産金に至ったのだろう。産金関係者の墓と思われる

横穴が追戸地区で発見されたという記述もあった。資料集の記述が最も詳しいのは、産金地が一度忘れられた後、再発見される過程だ。歴史の追跡は興味深かったが、地質との関わりは薄いので、ここでは割愛する。後日、機内誌でアメリカのゴールドラッシュの跡を訪ねた記事(石塚, 2015)を読んだ。時代も国も異なるが、一時の繁栄の後の忘れ去られた土地という状況は似ていた。なお遺跡発掘から天平ろまん館等の施設整備に至る経緯については涌谷町教育委員会(1996)に説明がある。

展示館で気になった事項について、いろいろ検索することで知識が広がり理解も深くなる。砂金とは、含金鉱床の露頭が風化・浸食を受けて、金粒が多少とも現地を離脱し、砂礫土層部に集積したものである(本間, 2007)。涌谷砂金に関する地質について検索して知った資料の中では鈴木(2010)が決定版と言える。地質学的考察だけでなく、地質学的研究史、鉱山開発史も詳細かつ要領よくまとめられている。涌谷砂金の起源は、鮮新統の亀岡層の基底にある礫岩中に含まれていたものから洗い出されたもので、その初生の供給源は北上山地、先第三紀の金鉱脈とした。また、渡来人が出身地の地形との類似を手掛かりにしたという説に対しては、「地形を探查指針の一つとしたとすれば、砂金の発見者は一世の渡来人ということになる。なぜならば、微妙な地形の特徴は言葉や書物では伝習できるものではなく、実地観察を積んで体得するしかないからである。従って、日本で生まれ育った二世三世は地形を探查指針とすることができないはずである。砂金の発見者のひとり朱牟須壳しゆのむすめは渡来系の人であるが、一世か否か不明であるので、地形の類似が発見に結び付いたとすることは無理であろう。因みに、黄金を献上した陸奥国守百済王敬福は渡来人四世である。」と否定的な見解を示している。

展示館訪問をきっかけに過去に読んだ本・文献を思い出して再読するのも楽しみの一つだ。折口信夫「死者の書」に登場する大伴家持は、展示館の家持の坐像の印象と重なった。大仏は銅と錫の合金で形を作って表面を金で覆ったものだが、鍍金の工程で水銀が使用された。大仏の事業に関して必要とされた金属の内、銅はほぼ山口県の長登鉱山で賄えたようだ。長登の語源は「奈良登り」がなまったものだという(村上, 2007)。一方、水銀は国産では足りずに輸入に頼ったらしい(矢島, 1959)。水銀の産地は「丹生」のような文字を含む地名であることが多いことを手掛かりに現在地を推定されるが、続日本紀にも記載のある常陸国ひたちの産地については今のところ場所は特定されていないようだ。肝心の金については、涌谷の産金900両ではどうも足りず、新羅から輸入することでしのいだ(五

味, 2015)。国内初の産金ということで天平から天平感宝に改元までしたのだが、それは多分に象徴的な意味合いがあったようだ。ちなみに改元については、当時は年号が始まって間もない時期で、年号が無い期間もあり、瑞兆があった場合などに年号が制定された。701年に対馬での産金が報告されて「大宝」となったはずであった。しかし対馬での産金は虚報であった。対馬で産銀が報告された674年は年号が制定されなかったのに銅の産出を記念して708年に和銅が制定されたのは、産金虚報があったためかもしれない。それだけに749年の涌谷産金のインパクトは大きかったと想像できる。

産金については、涌谷から少し遅れて関東でも発見の報告があった。私が砂金採りを体験した茨城県の砂金発見もこの頃らしい。百済王敬福は涌谷産金の後、多賀城から常陸守に転任したので、その指導力が発揮されたのかもしれない。しかし現地に赴任しない遷任ようじんだったようだし、一方で、涌谷産金に関して昇進した人の中に関東出身者がいるので、百済王敬福とは別の技術者が常陸産金に関わっていた可能性もある。村上(2007)は、文字記録が始まった時期は7世紀後半だったが、金属の国内調達には6世紀後半に始まっていてもおかしくないとして、今後の出土遺物調査への期待を述べている。

天平以後、奥州藤原氏の繁栄を支えた砂金鉱山は宮城県・岩手県に多くあったはずである(本間, 2007)。それに関連した資料館も複数あるようだが、資料の一部は東日本大震災の津波で流出した(目時ほか, 2013)。日本では、16世紀までは金属は拾うものだったと言われる(司馬, 1990)が、16世紀頃から日本各地で金鉱山の開発が始まっていた(村上, 2007)。涌谷砂金の初生の供給源は北上山地、先第三紀の金鉱脈とされているが、宮城県内にも金鉱山がある。その一つが気仙沼市の鹿折金山しかせり(第6図)で、1904年に2,250g中1,875gもの金を含むモンスター金鉱石を産出したことで知られる(徳永, 1980, 1991)。その一部分362gは地質標本館に寄贈され、今も目玉展示の一つになっている(坂野ほか, 2004)。

周期律表で縦に並ぶ金・銀・銅は銅族元素と呼ばれ、自然金等で存在することも特徴の一つである(大木ほか, 1989など)。銅族と言うと、族つながりで、つい大伴一族の運命を連想してしまう。外国語であるはずの漢文を書き下し文で読んでも独特の語感があるのを不思議に思ったことがあるが、「一族皆殺しにされる」を意味する「族セラル」が典型だ。史記の項羽本紀の冒頭部分、始皇帝の地方巡幸を垣間見た若き日の項羽が、「俺がとってかわってやる」と言い、叔父が「めったなことを言うな、族セラル



第6図 涌谷・多賀城・平泉・鹿折金山の位置を示した広域位置図 (地理院地図, <http://maps.gsi.go.jp> に加筆).

ぞ」とたしなめた一節を漢文の授業で習った時は、「族」という単語が使われる中国大陸は何と苛烈な世界なのだろうと思った。まさに今、大ヒット中の漫画「キングダム」(原・久麻, 2012) が描く弱肉強食の世界だ。しかし大伴家持の時代は日本でも苛烈な政争の時代だった。家持は一族に向けて自重を促す長歌を詠み、赴任先の多賀城で亡くなるまでの27年間の後半生は歌を残していないことが謎とされる。恐らく家持も族セラルことを危惧して「めったなことを言わない」ようにしたのでだろう。757年の橘奈良麻呂の乱では家持自身は咎めを受けなかったが大伴一族に獄死者が出る一方、百濟王敬福は鎮圧側で動いた。785年に家持が死去した直後に発生した藤原種継暗殺事件に関して大伴一族は多数が死罪となった。死去していた家持も官位剥奪除名処分となり、806年に処分は取り消されたが大伴氏は凋落した。涌谷産金に関する聖武天皇の詔(荒木, 2014) と呼応した産金を寿ぐ和歌が評価された749年以後の急展開に歴史の非情を感じる。

すでに何回か引用したが、「金・銀・銅の日本史」(村上, 2007) は、日本史における金・銀・銅の通史としての名著である。地球・金属・人類の関係について「金の一生」という図を提示していて、以下のように要約できる。金属は、地殻の中にあるときは酸化物や硫化物などの化合

物としてエネルギー的に比較的安定した状態にある。人間は鉱床から鉱石を掘り出し、金属を抽出して金属素材を得る(第一の技術)。金属は大気中に曝されてエネルギー的には不安定な状態にある。人間は金属素材から目的に合わせて調整した合金を製品に形作り、表面加工して仕上げる(第二の技術)。その後、用済みになった金属は地中で腐食し、安定な状態に回帰していく。金銀銅は地表部分で自然金、自然銀、自然銅として存在することで知られており、人類と金属の邂逅は、まずここから始まり、長い年月をかけて試行錯誤を繰り返しながら、第一の技術、第二の技術がみがかれた。日本の特殊性は第二の技術による製品が大陸から持ち込まれた後で第一の技術による金属産出が行われたことである(村上, 2007)。涌谷産金は、その一例だが第一の技術も渡来人によってもたらされたい。そして以後、日本は第一の技術においても第二の技術においても「黄金の国ジパング」として発展期を迎える。

地球が46億年前に宇宙に誕生し、金属元素も地球の構成要素の一つと思えば、村上(2007)が提示した「金属の一生」図の「地球」を「宇宙」に拡張して金属の一生を考えることもできる。そして近々、金生成の謎が解明されることが期待されている(杉原, 2016)。生成の謎と言っても鉱床生成過程ではなく、元素の生成過程のことだ。星の中では核融合によって鉄Feまでが生成される。これより重い元素の生成は別のメカニズムによる。元素番号が大きい元素が生成されるには陽子を加える必要がある。しかし陽子は電荷を有するので反発力が働き簡単にはできない。中性子が付加されて同位体が作られた後に放射性崩壊で中性子が陽子に変わり原子番号が大きい元素が作られる。金銀のような原子番号の大きい元素が作られるには、効率的に中性子を取り込んでいかなければならない。そのような速い中性子捕獲プロセス(rプロセス)は、中性子星が合体してブラックホールが形成される際に実現するというのが最新の学説だ(田中, 2015)。まだ数値シミュレーションで予想された段階であって観測はされていないが、神岡で完成間近の重力波検出器KAGRAでの検出が期待される。重力波の観測によってrプロセスの発生頻度がわかって金銀等の存在量を説明できれば宇宙の中の「金属の一生」の理解は大きく前進することになる。

4. むすび

自分にとっての最近の関心事という意味のマイブームという言葉がある。天平ろまん館を訪ねて以後、金がすっかりマイブームだ。デンバー空港の売店では砂金探しの人形

のディスプレイが目について（第7図）お土産用の金鉱石の入った袋を思わず手に取った。一袋5.99ドル（約750円）だった。天平ろまん館でも、このようなものがお土産になりうるのではないか、と思った。砂金体験すれば恐らく収穫した砂金の粒は持ち帰りだろうから、すでに企画済みとも言える。しかし今回の私のように砂金体験を躊躇した見学者の需要はあるかもしれない。なお、柳沢幸夫氏から助言をいただいたことに感謝いたします。



第7図

デンバー空港で見かけた砂金採取作業の人形とお土産の金鉱石。

文 献

- 荒木敏夫（2014）古代日本の勝者と敗者。吉川弘文館，東京，224p.
- 坂野靖行・豊 遙秋・青木正博・春名 誠（2004）地質標本館における鉱物の一般分類展示（その1）。地質ニュース，no. 595，23-34.
- フォーカス（1990）「砂金探し」工業技術院の「採れる」で集まった100人の収穫。フォーカス，1990年9月7日号。
- 五味文彦（2015）文学で読む日本の歴史，古典文学篇。山川出版社，東京，373p.
- 原 泰久・久麻當郎（2012）キングダム，THE ANIMATION 王と剣。集英社，東京，227p.
- 本間久英（2007）砂金の成長についての一考察。東京学芸大学紀要 自然科学系，59，49-53.
- 石井武政・柳沢幸夫（1984）旧北上川沿いに分布する追戸層の地質時代について。地質調査所月報，35，623-635.
- 石塚元太良（2015）今月の旅先 Goldrush California 眩しい夢を見た土地。翼の王国，no. 575，40-58.
- 伊東信雄（1994）天平産金遺跡三版。涌谷町，20p.
- 神谷雅春（1991）地質標本館開館10周年記念行事を実施して。地質ニュース，no. 442，37-40.
- 目時和哉・吉田 充・赤沼英男・熊谷 賢（2013）陸前高田市立博物館所蔵被災金鉱石の歴史学的意義。岩手県立博物館研究報告，no. 30，13-22.
- 村上 隆（2007）金・銀・銅の日本史。岩波書店，東京，219p.
- 大木道則・大沢利昭・田中元治・千原秀昭（1989）化学大辞典。東京化学同人，東京，2755p.
- 司馬遼太郎（1990）街道をゆく 29 秋田県散歩・飛騨紀行。朝日新聞出版，東京，345p.
- 杉原光彦（2016）絶対重力計測の現場から―神岡編―。GSJ 地質ニュース，5，9-20.
- 鈴木舜一（2010）天平の産金地，宮城県篔岳丘陵の砂金と地質の研究史。地質学雑誌，116，341-346.
- 高橋兵一・松野久也（1969）涌谷地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，28p.
- 田中雅臣（2015）星が「死ぬ」とはどういうことか。ペレ出版，東京，202p.
- 徳永重元（1980）金塊によせて。地質ニュース，no. 313，16-17.
- 徳永重元（1991）大金塊発見，その後。地質ニュース，no. 444，17-20.
- 涌谷町（1994）黄金山産金遺跡―関係資料集―。涌谷町，115p.
- 涌谷町教育委員会（1996）涌谷町埋蔵文化財調査報告書，黄金山産金遺跡，黄金山南遺跡，<http://sitereports.nabunken.go.jp/9437>（2015/11/20 確認）
- 矢島澄策（1959）日本歴史と水銀鉱床。日本鉱業協会技術部第6回全国鉱山精錬所現場担当者会議探査講演集，95-99.

参照 Web サイト

涌谷町地域振興公社，天平ロマン館パンフレット，<http://www.tenpyou.jp/download/romankan.pdf>（2015/11/20 確認）

SUGIHARA Mituhiko (2016) Visit to a museum, where we can study geology - Tenpyou Romankan - .

（受付：2015年12月14日）

第14回地圏資源環境研究部門 研究成果報告会の開催

地圏資源環境研究部門 広報委員会¹⁾

平成 27 年 12 月 10 日(木)に秋葉原コンベンションホールにて、第 14 回地圏資源環境研究部門研究成果報告会を開催しました(写真 1, 写真 2)。産総研第 4 期中長期計画を踏まえ、民間企業を含む外部機関との一層の連携強化の観点から、当該報告会のテーマを「強い技術シーズの創出と展開」としました。石油資源開発株式会社の星 一良氏による招待講演のほか、当研究部門の技術シーズに関連した 6 件の講演とポスター発表を行い、130 名の方にご参加いただきました。

初めに中尾信典研究部門長より、産総研第 4 期中長期計画の概要について、社会・産業ニーズに即した目的基礎研究とその成果を事業化につなぐ“橋渡し”機能の強化が第 1 ミッションであること、産総研の技術シーズが社会・産業に多く活用されるように 7 つの研究領域に再編されたことなどが報告されました。その中で、当研究部門は「地質の調査」をミッションとする研究領域である地質調査総合センターに属し、「地圏の資源と環境に関する研究と技術開発」に取り組み、資源の安定確保と地圏環境の保全・利用に資する 6 つの戦略課題を推進すること、第 3 期までと同様に公的外部資金による政策ニーズ対応研究を中心とし、さらに技術シーズの橋渡しに臨むことが紹介されました。また、そのためには研究人材の補強が急務であることが述べられました。

光畑裕司研究グループ長は、物理探査技術のうち主に電気・電磁気探査法について地下資源探査、地下環境利用・保全およびインフラ整備・維持、防災等それぞれの分野への適用事例を紹介しました。具体的には、地下資源探査分野では飛行機やヘリコプターを用いた時間領域空中電磁探査法や海域における曳航型の人工信号源電磁探査 (CSEM) 法を用いた表層型メタンハイドレート探査を、地下環境利用分野では高レベル放射性廃棄物の地層処分に関連し沿岸域における地下水環境の状況把握調査を、地下環境保全分野ではマルチ周波数固定式小型ループ電磁探査法と土壤汚染探査への適用事例を挙げました。さらに、小型 NMR スキャナーを用いたトンネル非破壊検査や地盤液状化評価のためのパイロコーンの開発等のインフラ整備・維持、防災分野への適用も示し、継続的な技術開発と関係機関との連携強化、研究成果の効率的で魅力的な情報発信の重要性を指摘しました。

鈴木正哉研究グループ長は、天然土壤中の無機物質であるアロフェンおよびイモゴライト、これらを基に開発した粘土系吸着剤「ハスクレイ」の省エネルギー分野への応用事例を説明しました。アロフェンおよびイモゴライトは、軽石や火山灰など火山噴出物に由来する土壤中の風化生成物として存在する非晶質および低結晶性のアルミニウムケイ酸塩で、ナノマテリアルに特徴的な高い比表面積を有す



写真 1 講演会会場入口と参加受付の様子。



写真 2 講演会場の様子。

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：第 4 期中長期計画、技術シーズ、橋渡し、物理探査、ハスクレイ、地下物質移動、地層変形、メタン生成ポテンシャル、地下モデリング、水循環

るだけでなく、水との親和性や吸着能力も非常に優れ、湿度を制御する調湿材料等、さまざまな工業的応用が期待され、その一例として二酸化酸素吸着性能を利用したビニールハウス等施設農芸栽培における二酸化炭素施用とその効果を紹介しました。

石油資源開発株式会社の星 一良氏による招待講演（写真3）では、石油の探鉱・開発のご経験を踏まえ、地圏の研究に対して主に地下の物質移動、地下に流体を圧入・採取した際の地層変形、地質情報のアーカイブへの期待をお話いただきました。その中で、地下の物質移動では天然ガスの起源（微生物／熱分解）、地層水の塩分濃度、地層の圧力や孔隙率に関する様々な知見とそれらを用いた総合的な解析が貯留層モデリングに有効であること、地下に流体を圧入・採取すると地層変形が大なり小なり生じモニタリングやモデリング技術が直ちに必要になること、地質情報のアーカイブではこれまでに蓄積された調査ボーリングデータや各種の物理探査データのデータベース化が重要であることなど、有益なアドバイスをいただきました。

坂田 将研究グループ長は、天然ガス資源評価において重要である、地下微生物によるメタン生成機序やその能力の分析手法を紹介しました。メタン生成ポテンシャルの評価技術では、メタン生成菌を実際に培養してメタンを生成させて調べる方法（集積培養、環境模擬培養、¹⁴C-トレーサー添加培養等の手法）と環境試料に残るメタン生成菌の痕跡を基に調べる方法（核酸（DNA, RNA）分析、脂質バイオマーカー分析、補酵素（F430）分析等の手法）を挙げ、それぞれの手法に長所短所があるため、双方から得られるデータを総合的に解釈することで複雑な現象が良く理解できることを指摘しました。

雷 興林研究グループ長は、二酸化炭素地中貯留、EGS地熱開発、石油天然ガスのEOR、シェールガス開発等では大深度地層内に流体を圧入する必要があり、その際の地



写真3 招待講演を行う星 一良氏。

盤変形、誘発地震や圧入した流体の漏洩等のリスクを適切に評価する上で地下モデルの最適構築が有効と指摘しました。そこで、室内実験規模の岩石試料を用いたコアスケールから現場での各種実験・計測による km オーダーのスケールまでの様々な知見について実例を交えて示し、それらを統合してモデル構築できる解析ソフトウェアの開発状況も紹介しました。

丸井敦尚研究グループ長は、地球スケールの水循環に与える近年の地球温暖化の影響と今後の我が国の社会情勢を取り上げ、基盤情報の整備を含めた水科学に係る調査・研究開発の重要性を指摘しました。また、継続可能な水資源の利用を目指す社会が法律面でも整備されつつあることを踏まえ、地域毎の水循環を詳しく知ることの重要性やその基盤となる国内の水資源に関するデータベースを紹介しました。

ポスターセッションでは、再生可能エネルギーセンターの地熱チームおよび地中熱チームの紹介等を含めた32件の研究・技術に対して活発な意見交換が行われました（写真4）。

本研究報告会の講演等の要旨を収録した「GREEN Report 2015」は近日中に当研究部門ウェブサイト（<http://green.aist.go.jp/ja/>）より公開します。今回のGREEN Reportには、当該報告会のテーマを踏まえ、当研究部門に所属する研究員全員がどのような研究を推進し今後どう展開するのかについて紹介しています。是非ご一読の上、ご興味のある技術シーズ等には積極的にコンタクトしていただければ幸いです。

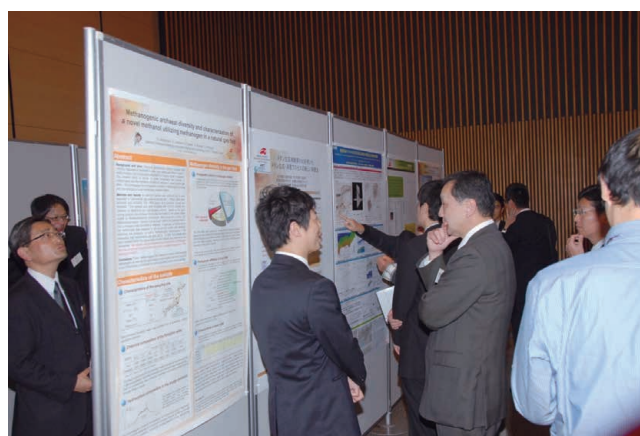


写真4 ポスターセッションにおける活発な意見交換。

Public Relations Committee, Research Institute for Geo-Resources and Environment (2016) Achievements report meeting No.14 of Research Institute for Geo-Resources and Environment.

（受付：2016年1月5日）

地球の変動は

どこまで宇宙で解明できるか

太陽活動から読み解く地球の過去・現在・未来
(化学同人選書 61)

宮原ひろ子 [著]

化学同人
発売日：2014年8月21日
定価：1,600円＋税
ISBN：978-4-759816617
B6判 (18.2 x 13.4 x 1.8 cm)
208ページ，普及書，ソフトカバー

本書は、太陽活動の変動が地球の気候に影響していること、それには銀河宇宙線の変動が関係していることを、一般向けに紹介したものです。この新しい研究分野は「宇宙気候学」と呼ばれつつありますが、まだあまり聞き慣れない方も多いでしょう。本書が扱っている年代は、過去1万年程度が主ですが、本書の後半では45億年の地球史全体にまで話題が広がっていて、宇宙「古」気候学とも言え、地質学にも大いに関連があります。

イントロダクションでは、太陽活動が現在200年ぶりの低調な状態を迎えていて、太陽物理学、宇宙気候学にとって特別に興味深い時期であることと、宇宙放射線が地球の気候に影響するという、いわゆる「スペンスマーク仮説」が議論となっていることが紹介されています。これが本書の主要なテーマとなっていきます。

第1章は、現在のダイナミックな太陽の姿、及び黒点観測の記録が残されている中世以降の変動が紹介されています。特に、17世紀中頃から18世紀初頭の、黒点が極端に少なかった「マウンダー極小期」の不思議と、太陽の光量の変化はごくわずかで、地球の気候に影響するには小さすぎることが紹介されています。また、太陽面での爆発現象である太陽フレアが、オーロラや磁気嵐をもたらすと同時に、人工衛星の障害や放射線被曝の原因となること、そしてこれを予測し軽減することに役立てようとする「宇宙天気予報」と呼ばれる、「宇宙気候」よりさらに人間生活に直結した時間スケールの研究も紹介されています。

第2章では、過去の太陽活動の復元が紹介されます。屋久杉や南極氷床コアに残された、宇宙線生成核種である

放射性炭素やベリリウム同位体記録から、過去1万年程度までの太陽活動の変遷が推定でき、「マウンダー極小期」のような無黒点期が繰り返されてきたことが述べられています。その基礎となる、太陽圏磁場の構造、太陽活動と宇宙線の関係の物理が丁寧に紹介されています。

第3章では、太陽活動と気候変動の関係が議論されます。まず、年輪、サンゴ、氷床コア、地層等を用いた古気候変動復元の方法が紹介されます。太陽の影響がはっきりしている例としてミランコビッチサイクルが挙げられ、次に、北大西洋の氷河性堆積物として記録された1,000年スケールの気候変動と太陽活動の相関が議論されています。小氷期を例に気候変化が社会に与えた影響についても述べられています。

第4章の章題は「宇宙はどのようにして地球に影響するのか」となっていますが、より具体的には「宇宙線は」ということになります。まず、太陽活動が気候に影響するいくつかのメカニズムを紹介し、太陽活動に伴う宇宙線量変動だけに特徴的な22年周期から、気候変動記録に確かに宇宙線の影響が見られることが述べられています。次に、宇宙線が雲形成に関与するプロセスについて、非常に複雑で未だ不明の点が多いけれども研究が急速に進みつつあることが紹介されています。

「変わるハビタブルゾーン」という題の第5章は、45億年の地球史と宇宙線の変動や太陽活動度との関連の可能性が紹介されています。第4章までの内容と比べると、未だ憶測にすぎない内容ですが、読者は意外なリンクの可能性に驚かれると思います。銀河の中の太陽系の位置によ





る宇宙線量の変動と億年スケールの気候変動の相関、白亜紀／第三紀境界頃の時代は隕石が飛来しやすい時期にあった可能性、犬山チャートに当時の宇宙環境の痕跡を捜す研究、暗い太陽のパラドックスと巨大フレアのような太陽活動度との関連など、刺激的な研究の紹介がされています。

最後の第6章は、再び現在の太陽活動の話題に戻り、現在低調な活動にある太陽が、今後「マウンダー極小期」のような状況になっていくのか、そしてその地球環境への考えられる影響が述べられています。さらに、雷活動や、マッデン・ジュリアン震動として知られる赤道域の積雲活動にも27日や11年の太陽活動周期が関係している可能性があることが紹介され、太陽フレアに関連した「宇宙天気予報」だけでなく、普通の意味での「天気予報」にも宇宙が関係するかもしれないことが示唆されています。

本書は、一般向けに書かれていますが、内容は最先端かつ高度です。地質学から宇宙物理学の非常に広い範囲の分野をカバーし、地球、太陽、宇宙が絡み合った複合科学のパズルのような面白さや意外性を上手く表現しています。また、太陽磁場やその宇宙線との関係についての物理が、数式を一切使うことなく、きちんと、しかも分かりやすく書かれている点も出色です。高校程度の物理学の知識で充

分理解できると思います。太陽黒点と磁力線の関係についての説明などは、類書にない直感的分かりやすさと感じました。第3章二節の、太陽磁場の逆転と宇宙線量の変動あたりの物理がやや難解ですが、第4章で重要となる宇宙線22年周期の物理的背景をきちんと説明しておきたいという著者の思いが込められたものなので、仮に理解できなくても著者を信じることにして先を読み進めることができます。あえて申し上げれば、ドリフトについて3次元的に描かれた図があれば、「カレントシートに落ち込んでしまったり」「極に近い方向に上昇して行ったり」の理解がなお容易であろうと思います。サイエンスにおいて、きちんと観測するということがいかに大変なことかということが、太陽の光量やグローバルな雲量を例に紹介されている点も印象に残ります。

新進気鋭の女性研究者である宮原さんの、サイエンスへの深い愛情を感じられる肩肘張らない語り口で話が進められる本書は、宇宙(古)気候学の、さらには研究ということの魅力伝える好著であり、多くの方にご一読をお勧めしたいと思います。宮原さんが現在お勤めの美術大の学生による、かわいい挿絵も魅力的です。

(東京大学大気海洋研究所 山崎俊嗣)

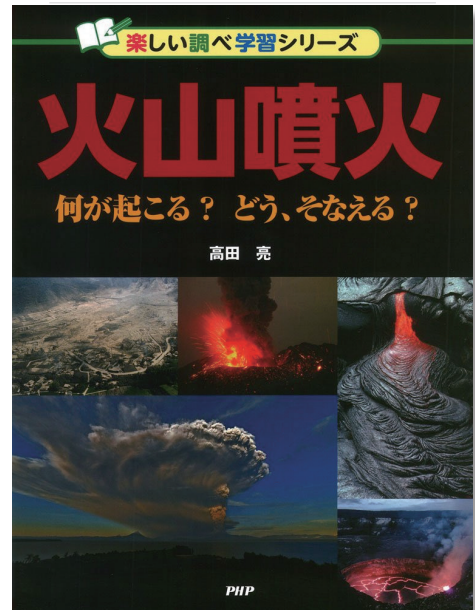
火山噴火

何が起こる？ どう、そなえる？

(楽しい調べ学習シリーズ)

高田 亮 [著]

PHP 研究所
発売日：2015年9月17日
定価：3,000円＋税
ISBN：978-4-569784939
A4判 (29 x 22 x 1.4 cm)
63 ページ，児童書，ハードカバー



著者である高田 亮氏は、工業技術院地質調査所に入所後、長らく産業技術総合研究所で火山研究に従事した。専門は火山学で、マグマの上昇噴火機構、富士火山の噴火史、インドネシアのカルデラなどの研究テーマを精力的に行ってきた、世界でも著名な研究者である。2015年3月の定年退官後も、産総研テクニカルスタッフとして在職している。実は評者は、高田 亮氏と20年以上の長い付き合いになる。彼は還暦を過ぎた今でも連日サッカー部の練習に参加し、実年齢にそぐわない若々しいプレーを見せている。体型も、加齢と共にメタボ体型に変化した評者に比べ、時の流れを超越している。服装も実に若々しい。おそらく脳年齢も精神年齢もそれ相応に若いのだろう。評者も定年退官後は彼のように心身ともに若々しくありたいと心から思っている。

また高田氏と長らく接してきて、敬うべき点がある。彼は有名大出身者にありがちな、自らの学歴を鼻にかけたような態度を我々に示したことは決してないのである。常に英国紳士のように実に謙虚でスマートなのだ。また彼くらいの研究業績があり、かつ人望があれば相応の管理職ポストに就くことは可能だったであろうし、実際その様な話もあったはずではあるが、最後まで主任研究員として全うしたのである。今振り返ってみても、おそらく彼は、ポストよりもご自分の研究を行う時間や環境を最も大事にされていたのだと思う。

彼を敬うべき点がもう一つある。本職である最先端の火山研究に励む一方、子どもたちが実験を通じて火山を楽しく学べるアウトリーチ活動もあわせて行って来たことであ

る。毎年7月に行われる産総研一般公開では、火山研究分野の若手研究者や子供たちと一緒に噴火実験を楽しそうに行っている姿が見られた。研究者の評価は研究論文の数と質と考える時流の中で、高田氏クラスの著名な研究者が積極的にアウトリーチを行う姿をみて、我々以外にも考えさせられた研究者は多いと想像する。

さて、この度、高田 亮氏が本を出版した。それもなんと児童書なのである。実に彼らしい発想と思える。2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)以降、御嶽山、口永良部島、箱根山、桜島等、110もの活火山がある日本列島で、一斉に火山活動が活発化しているとの指摘がある。火山が噴火するとどのような災害が起こるのか？ いざというときにとるべき行動は？ 本書では美しいイラストや写真で、子供でもわかりやすく平易な言葉で解説されている。噴石、火山灰、火砕流、土石流など、火山噴火がもたらす災害を子細に解説するとともに、日頃の備えと、いざという時の対処の仕方を紹介している。実に火山防災に関わる実用的な普及書と言える。

本書の目次は以下の通りである。

[第1章] 火山とは？……火山はなぜ噴火するの？／噴火のとき、火山で何が起きる？／噴火のタイプはさまざま／火山がつくる地形／地図で見る世界の火山分布／日本は火山大国

[第2章] おそろしい火山災害……噴石や有毒ガスがおそろ／世界を灰色にする火山灰／せまりくる火砕流・溶岩流／火山泥流がすべてを飲みこむ／最悪の大惨事、山体崩壊／想像を絶するカルデラ噴火の脅威／人々をおそろ火山災



害／富士山噴火の歴史／もし富士山が噴火したら？
 [第3章] そなえる！火山噴火……火山噴火は予測できるの？／富士山の観測活動を見てみよう！／目の前で大噴火したら？／家庭のそなえでできること

本書は児童書にしては索引がしっかり整理されており、学習用の辞書としても使える。また、各章に付記された5つのテーマのcolumnは、最近の火山学の研究成果を取り上げており、“より深く火山学を学びたい！”という子供のモチベーションをかき立てるものであろう。

2014年9月27日の御嶽火山噴火の大規模な人的被害以降、お茶の間でも火山防災の話題が多くなっていると想像される。おそらくこの緊迫した状況は、当分の間続くものと思われる。今後の火山災害を軽減させるためには、行政に頼るだけではなく、個人レベルでも正しい知識を得て防災のための平素の準備が不可欠である。火山国日本に暮らす多くの皆さんに、是非子供たちと一緒に一家団欒でご覧いただきたい一冊である。

(産総研 地質調査総合センター活断層・火山研究部門 古川竜太, 地質情報研究部門 七山 太)

新人紹介



石原 武志 (いしはら たけし) 産総研 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター(地中熱チーム)

再生可能エネルギー研究センター 地中熱チーム任期付研究員の石原武志です。2012年9月に東京大学大学院で学位を取得後、同11月より地質情報研究部門 平野地質研究グループのテクニカルスタッフおよび特別研究員、地中熱チームの特別研究員を経て、2015年4月より現職です。

専門は自然地理学、第四紀学、地形学です。大学院の研究では、オールコアと既存ボーリング資料の解析から関東平野中央部の沖積低地の地形発達史を明らかにしました。平野地質研究グループでは、関東平野中央部や駿河湾北部沿岸平野地下の第四系地質構造を調査・解析しました。地中熱チームではこれまでのノウハウを活かして、平野・盆地の地中熱ポテンシャル評価のための地質研究を行っています。現在は会津盆地の地下地質構造を調査しています。調査手法は大学院時代からほぼ一貫していますが、対象地質年代はどんどん広がっています。



今後は、東北地方の平野・盆地の三次元的な地下地質構造モデルの作成や、地質・地下水・地下物性(熱伝導率)などの情報を組み合わせた地下情報データベース構築にも挑戦したいと考えております。つくば、郡山の研究者の皆様には今後ご指導の程よろしくお願いたします。

GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 森 尻 理 恵
副委員長 下 川 浩 一
委員 丸 山 正
竹 田 幹 郎
杉 原 光 彦
中 嶋 健
七 山 太
小 松 原 純 子
伏 島 祐 一 郎

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 2 号
平成 28 年 2 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 : Rie Morijiri
Deputy Chief Editor : Koichi Shimokawa
Editors : Tadashi Maruyama
Mikio Takeda
Mituhiko Sugihara
Takeshi Nakajima
Futoshi Nanayama
Junko Komatsubara
Yuichiro Fusejima

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. 2
Feb. 15, 2016

Geological Survey of Japan, AIST

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

Maeda Printing Co., Ltd

