

GSJ

地球をよく知り、地球と共生する

地質ニュース

2018
11
Vol.7 No.11



11月号

-
- 口絵 277 **2018年7月3日の洪水氾濫によって石狩川河岸に出現した旭川層の新露頭**
七山 太・重野聖之
-
- 279 **平成30年北海道胆振東部地震の関連情報**
桑原保人・岡村行信・中澤 努・川邊禎久・石塚吉浩
-
- 287 **SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の成果**
山崎 徹・小森省吾・池原 研
-
- 297 **人工知能を用いた火山灰形状の自動判別**
大槻静香・庄司大悟・野口里奈・日野英逸
-
- 300 **サイエンスフェスタ in 秋葉原 イベント開催報告**
畑 香緒里・藤原 治・宮地良典・川鈴木 宏・常木俊宏・
谷島清一・朝川暢子・斎藤 真・野々垣 進・森田啓子
-
- 303 **GSJ 国際研修 2018：阿武隈山地地質巡検と室内実習
(岩石薄片観察, XRF, EPMA)**
高橋 浩・宮崎一博・御子柴真澄・中村佳博・
坂野靖行・佐藤大介・脇田浩二

2018年7月3日の洪水氾濫によって 石狩川河岸に出現した旭川層の新露頭

七山 太¹⁾・重野聖之²⁾

2018年7月2日から3日にかけて、北海道内は梅雨前線の停滞に伴って日本海側を中心に、大雨に見舞われた。3日午前11時過ぎには、旭川市内各地で河川が氾濫し、家屋の床下浸水や車両水没等の被害が多発した。

この時石狩川上流域で発生した大規模な洪水流によって、旭川市内の秋月橋下流側の河床や河岸で大規模な侵食現象が起り、退水後には上川盆地を埋積する“第四紀層”と推定されている旭川層の露頭が出現した(第1図、第2図)。このことが、上川地域での広域ジオパークを構想している地元で話題になっている。

旭川層は褐色～灰色を呈する非海成堆積物であり、詳細な堆積年代は不明ながら、上部層準に挟する雨月沢火砕流堆積物(2.8 Ma)、上限を覆う美瑛火砕流堆積物(1.9～0.7 Ma)の年代値から、概ね後期鮮新世～前期更新世の堆積物と考えられている(北海道立地質研究所, 2009)。旭川市内のボーリングデータの解析から、主に砂礫層とシルト層が不規則に累重しながら出現し、層厚 200 m 以上に

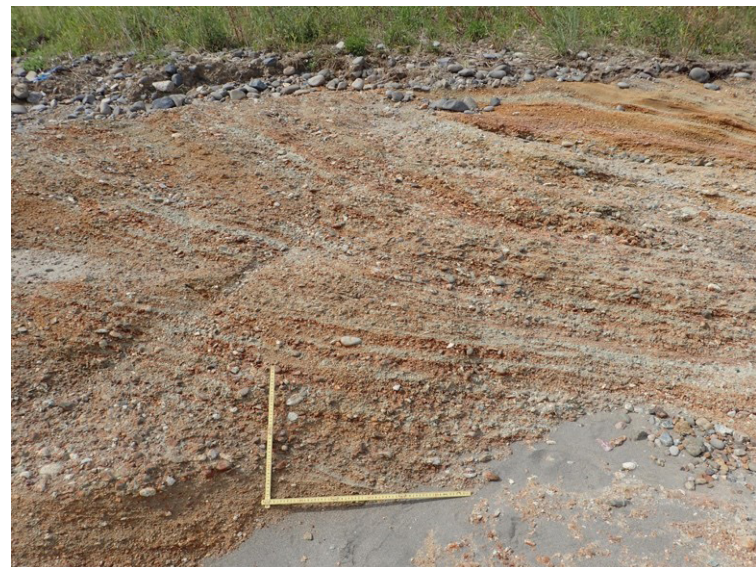
達することが判明している。今回、石狩川の河床や河岸に出現したのは、旭川層の上部層準と推定される。



第1図 秋月橋から石狩川の下流方向(西方)を望む。写真左側には大規模な河岸侵食が認められる。河床や河畔に点在するのが旭川層の露頭。



第2図 石狩川河岸に出現した旭川層の大露頭。



第3図 トラフ型斜交層理を示す縦州が横州を形成していた砂礫層。

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門
2) 明治コンサルタント株式会社北海道事業部

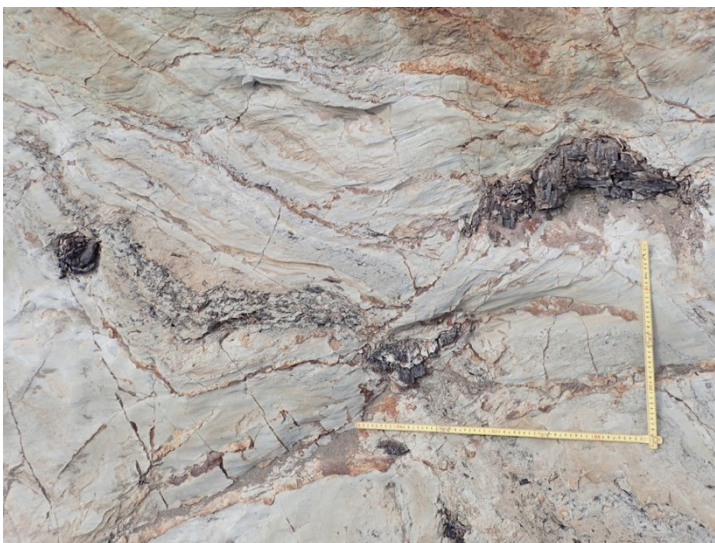
キーワード：2018年7月3日、洪水氾濫、石狩川河岸、旭川層、網状河川



第4図 シルト層をチャンネル状に侵食し、それを埋積する砂礫層.



第5図 砂礫層に認められる基盤岩起源の不淘汰な角礫～亜角礫.



第6図 シルト層中に頻繁に挟まれる材化石の産状.

砂礫層の多くは波長1～5 mオーダーのトラフ型斜交層理が見られ、その上部にはリップル葉理も確認出来る(第3図). これらは網状河川相を特徴づける横州や縦州(Miall, 2014)を形成していた舌状砂礫堆であろう. また、下位のシルト層をチャンネル状に侵食し、それを埋積する砂礫層も存在する(第4図). ここに含まれる礫は細礫～中礫サイズの垂円礫が主体で、礫種は上川盆地周辺に露出する空知-エゾ帯の基盤岩由来の赤色チャート、緑色岩、砂岩、泥岩からなる(第5図). 一方、シルト層は薄い砂層を頻繁に挟み、ブナなどの植物化石が多量に含まれる(第6図). シルト層は5～10 m程度の層厚があることから、ある程度広がりを持った氾濫原であったと推察される. また一部に立木状態を示す樹幹も認められる.

旭川市は“美味しい水の街”として全国的に知られており、市内には有名な酒蔵も複数立地する. 旭川層は大雪山系由来の地下水の帯水層として、この地の生活に大きく関わっていると考えられる.

文 献

北海道立地質研究所(2009) 上川支庁管内の地質と地下資源Ⅱ 上川地方中部. 北海道立地質研究所. 62p.

Miall, A. D. (2014) *Fluvial Depositional Systems*. Springer, Heidelberg, 316p.

NANAYAMA Futoshi and SHIGENO Kiyoyuki (2018) The new outcrop of the Asahikawa Formation appeared on the Ishikari River bed due to flooding on July 3, 2018.

(受付:2018年8月20日)

平成 30 年北海道胆振東部地震の関連情報

桑原保人¹⁾・岡村行信¹⁾・中澤 努²⁾・川邊禎久¹⁾・石塚吉浩¹⁾

<https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/hokkaido2018/> を再構成して転載

1. はじめに

2018 年(平成 30 年)9 月 6 日 03 時 07 分頃に、北海道胆振地方中東部でマグニチュード 6.7 の「平成 30 年北海道胆振東部地震」が発生した。この地震の震央周辺の地質と活断層とに関する情報を掲載する。また、地震に伴う地すべりや液状化による甚大な被害が発生しており、これらの地質について概説する。

第 1 図や、海陸シームレス地質情報集の紹介の第 2 図、第 3 図は、2018 年 9 月 6 日開催の地震調査委員会(臨時会)資料を一部修正したものである。なお、記載された内容については、あくまで速報であり、今後の調査研究の

進展により修正・変更することがある。また、速報性を重視するため、位置図等については十分な精度がないものもある。

2. 震央周辺の活断層と地質情報

石狩低地は最大で厚さ 5 km 前後の堆積物に覆われる堆積盆地である。その西側には複数の活火山が分布し、特に支笏カルデラは石狩低地の南部全体を覆う火砕流を噴出してきた。低地帯の東縁には石狩低地東縁断層帯が発達し、その東側には第四紀に隆起した馬追丘陵が発達する(第 1 図)。

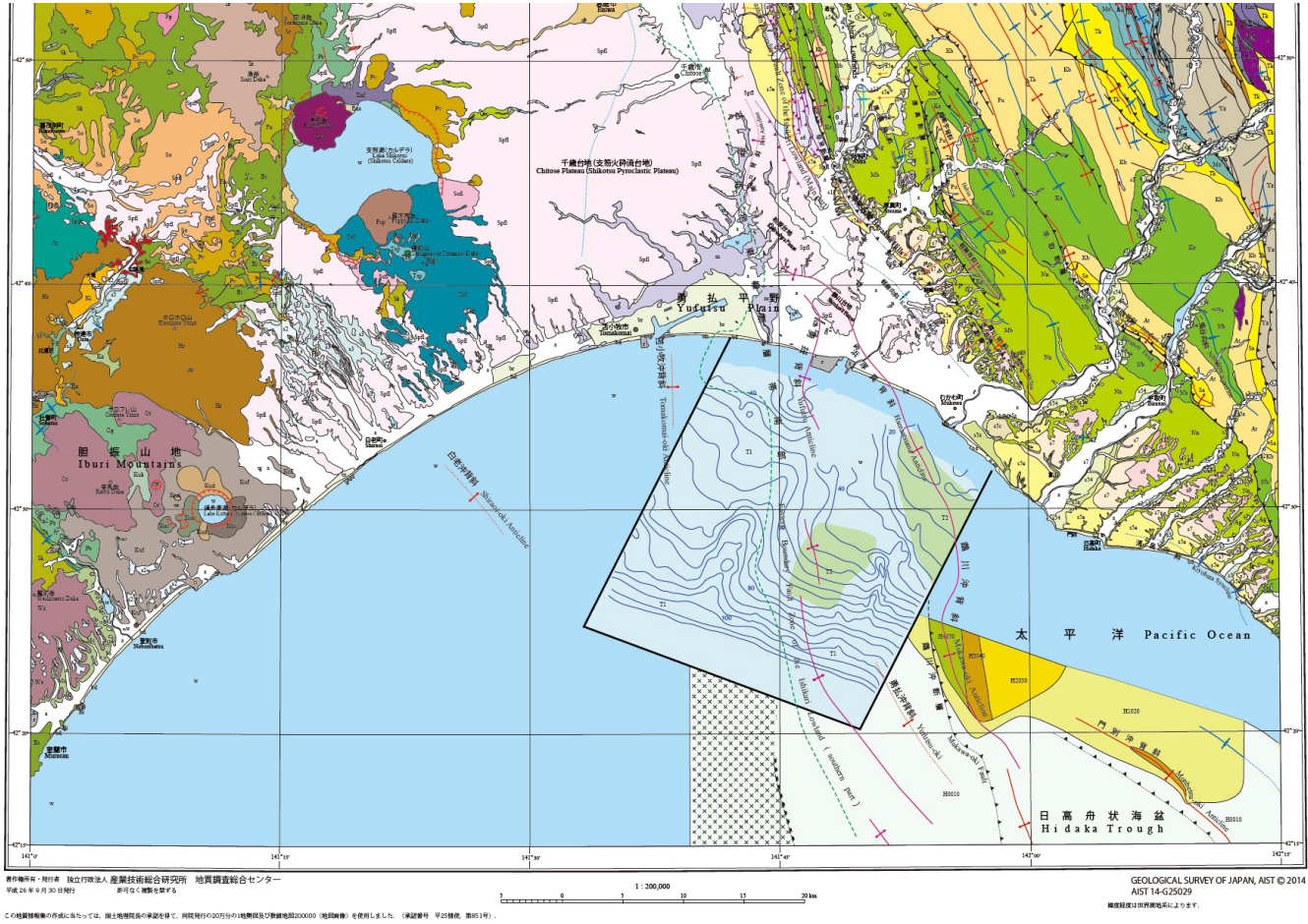


第 1 図 石狩低地東縁断層帯周辺の陸域地質図と活断層(赤線)。背景は地理院地図にシームレス地質図 V2 を重ねた。震央は気象庁報道発表資料による。(地質図 Navi, 産業技術総合研究所地質調査総合センター: <https://gbank.gsj.jp/geonavi/>, 2018 年 9 月 7 日確認)

1) 産総研 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

2) 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：平成 30 年北海道胆振東部地震, 活断層・地質情報, 地震被害, 液状化被害, 地すべり



第2図 海陸境界の地質図及び活断層 (佐藤ほか, 2014).

3. 海陸シームレス地質情報集 S-4 「石狩低地帯南部沿岸域」の紹介

岡村ほか(2014)によると、石狩低地東縁断層帯は海域へも海岸から40 km以上連続している可能性が高い(第2図;佐藤ほか, 2014)。断層帯は逆断層が厚い堆積物中に発達するため、地表付近では断層は伏在し、撓曲帯や活褶曲が発達する。特に南部では支笏カルデラの火砕流堆積物に覆われ、褶曲や撓曲帯の分布が複雑でわかりにくくなっている(佐藤・小松原, 2014)。反射探査などによって明らかにされた地下構造は、多くの褶曲が低角逆断層の上盤に発達することを示しており、断層帯全体が低角で東側に連続すると考えられている(第3図)。

4. 安平町, 厚真町, 苫小牧市における地震被害の概査報告

2018年9月7日に震央周辺の安平町, 厚真町, 苫小牧市のそれぞれ一部地域において地震被害の概査を実施した

ので報告する。

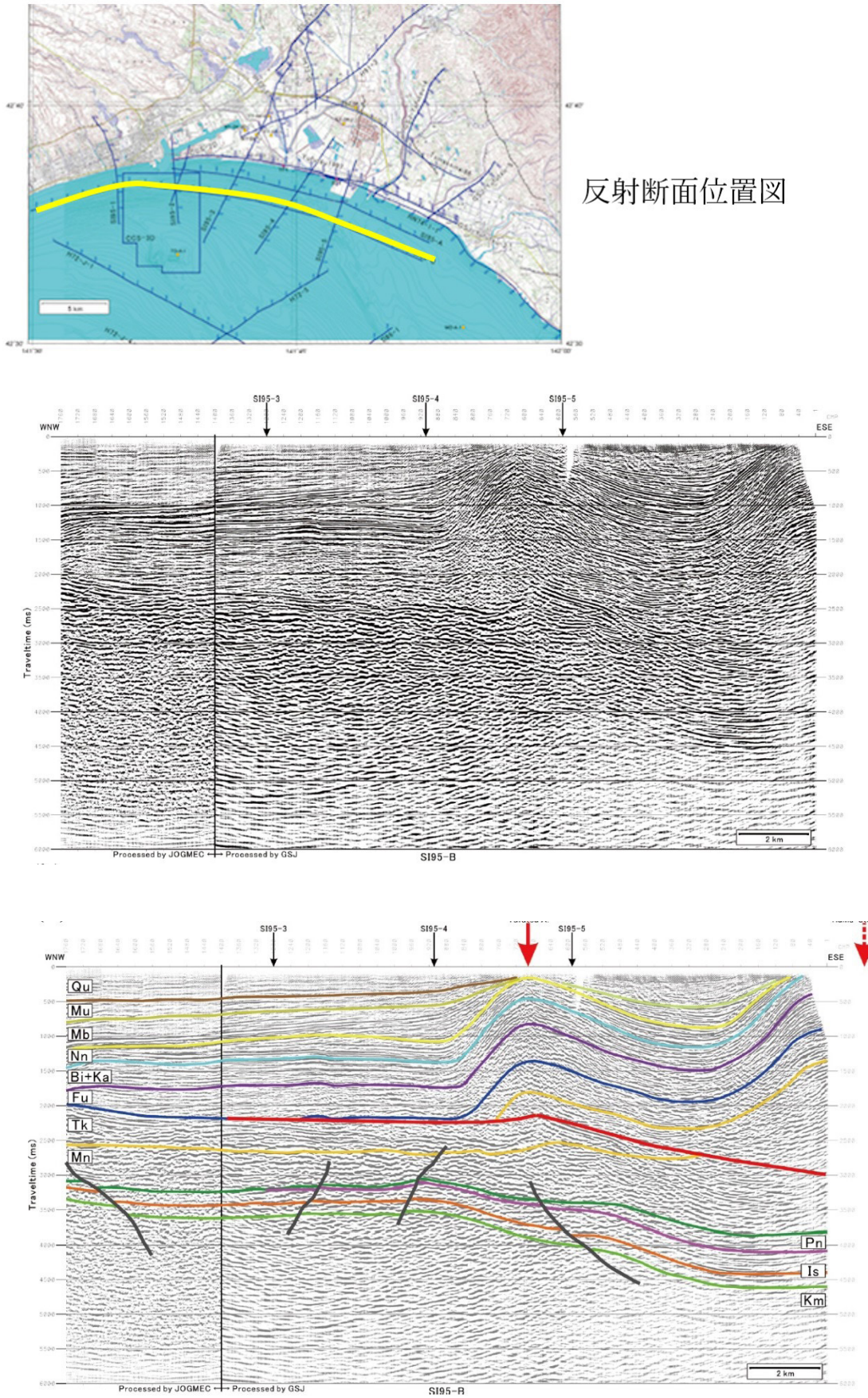
4.1 苫小牧港(東港)付近の埋立地の液状化被害

厚真川河口の西側、苫小牧港(東港)の苫東厚真火力発電所西側の道路沿いには、液状化による噴砂と道路の波状変形がみられた(第4図, 第5図)。新旧の空中写真の比較に基づけば、この地域は埋立地に相当する(第6図)。一方で、この付近から苫小牧港(西港)まで海岸沿いに続く道沿い(自然地盤と考えられる箇所)には顕著な液状化被害はみられなかった。

4.2 安平町早来の市街地の被害

安平町早来の市街地では家屋被害がみられた。しかし概査をおこなった厚真町・安平町内では、全体的に地震の揺れの大きさに比して家屋の被害はさほど著しくはないようである。

安平町の道路沿いには、地盤の液状化によると思われるマンホールの抜け上がりや道路の変形がみられた(第7図,



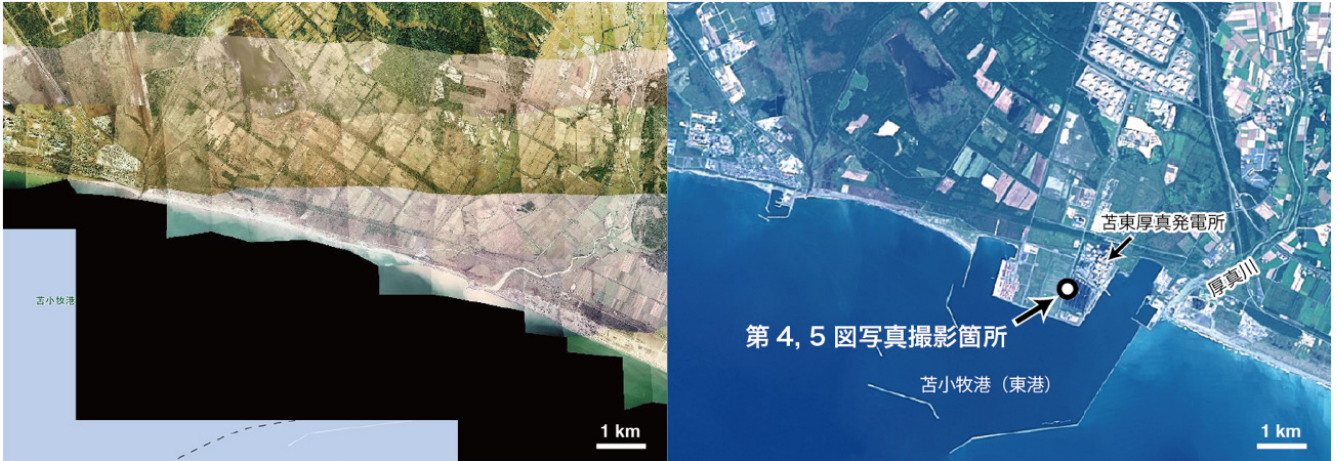
第 3 図 苫小牧沖の海岸に平行な反射断面（横倉ほか，2014）。
JOGMEC データを再処理したもの。



第4図 液状化による噴砂と泥水。
水たまりになっている箇所がみられるが、それ以外の箇所も道路上に泥水の乾燥した跡が広がっていることから、地震直後は噴出した泥水により広く冠水していたことが推測される。東側車線。



第5図 液状化による噴砂と道路の波状変形。
第4図とほぼ同地点の西側車線。



第 6 図 写真の撮影位置。

新旧の空中写真の比較に基づけば、当該箇所は埋立地に相当する。

左：1974～1978年の空中写真，右：2007年以降の空中写真（国土地理院ウェブサイトの地理院タイル（空中写真）を使用）。



第 7 図 液状化によると思われるマンホールの抜け上がりと道路の変形。

第 8 図)。この箇所の旧地形は確認できていない。

4.3 厚真町の地すべり災害

すでに多数報道されているように、厚真町の桜丘、吉野、富里にかけての地区では、各所で多数の地すべりが発生した(第 9 図)。一部の地すべりを遠望した限りでは、平滑なすべり面が露出し、その上位の斜面表層部の堆積物が滑落したように推測される。地すべり土塊は主にテフラ

層と土壌層からなる。

厚真町富里地区の地すべり土塊(第 10 図、第 11 図)から採取した試料には橙色の軽石と灰白色の軽石が含まれ、それぞれ火山ガラスの屈折率は 1.532-1.538、1.496-1.503 であった。よって橙色軽石は樽前 d テフラ(約 9000 年前)、灰白色軽石は樽前 a テフラ(約 300 年前)を起源とすると考えられる。これらは斜面のごく表層に分布するテフラである。今回の地すべり災害はこれら表層の



第 8 図 安平町，厚真町の被害写真の撮影位置。背景図は 20 万分の 1 日本シームレス地質図を使用。



第 9 図 厚真町吉野地区の厚真川の低地沿いに 3 km 以上にわたりほぼ連続して発生した地すべり。厚真川の低地の対岸側より遠望。

テフラ層と土壌層を主体とした堆積物の移動によるものと推測される。

5. 札幌市清田区の地盤災害について

9月6日未明に発生したM6.7の地震で、札幌市清田区里塚、美しが丘付近で大きな被害が生じた。この付近は標高約60～80mほどの台地となっており、4万年ほど前に支笏カルデラが形成されたときに噴出した支笏火砕流堆積物できている。古い空中写真や地質図を見ると、火

砕流台地には侵食作用でつくられた谷がいく筋か走っており、そこを造成、盛土して住宅街が作られている(第12図)。現時点で確認できる被災地は、いずれも旧谷地形を谷埋め盛土した地域にある。

東日本大震災では丘陵部に造成された大規模盛土造成地が地すべりを起こして大きな問題となった。このような盛土は液状化も起こしやすいことが知られている。今回の地震では、前日までの降雨の影響もあり、谷埋め盛土で液状化現象が起こったと考えられる。

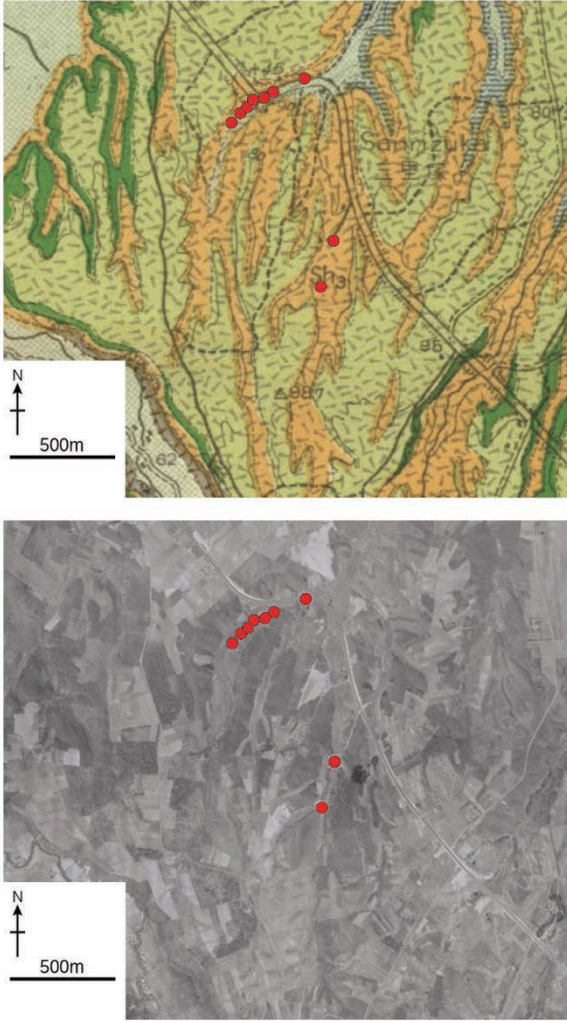


第 10 図 厚真町富里地区の地すべり。
平滑なすべり面が遠望され、主に斜面表層部の堆積物が滑落した様子がうかがえる。



第 11 図 地すべり土塊の末端部付近。
地すべり土塊は観察した限りでは主にテフラ層と土壤層からなる。全体に水分を多量に含むわけではない。厚真町富里地区。

文 献



第 12 図 液状化が発生した場所 (赤丸地点).
 上:北海道立地下資源調査所の 5 万分の 1 地質図幅「石山」
 (土居・小山内, 1955).
 下:1961 年撮影の空中写真「MH0613A-C21」(国土地理
 院ウェブサイトの地理院タイル(空中写真)を使用).

土居繁雄・小山内 熙(1955) 5 万分の 1 地質図幅「石山」.
 北海道立地下資源調査所. 54p, 1sheet.

岡村行信・佐藤智之・小松原 琢・横倉隆伸・尾崎正紀・
 木村克己・大熊茂雄・駒澤正夫・山口和雄・片山 肇・
 岡田真介・内田康人・輿水健一・康 義英・西田尚央・
 花島裕樹・小松原純子・中島 礼・田辺 晋・池原
 研・中塚 正・上嶋正人・阿部 進・本郷美佐緒・植
 木岳雪・石原武志(2014) 海陸シームレス地質情報集,
 「石狩低地帯南部沿岸域」, 海陸シームレス地質図 S-4
 (DVD), 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

佐藤智之・尾崎正紀・小松原 琢(2014) 石狩低地帯及
 び周辺地域の 20 万分の 1 海陸地質図. 海陸シームレ
 ス地質情報集 S-4 「石狩低地帯南部沿岸域」, 産総研
 地質調査総合センター.

佐藤智之・小松原 琢(2014) 石狩低地帯南部と勇払平
 野沖の活構造と沖積層基底の埋没地形面. 海陸シーム
 レス地質情報集 S-4 「石狩低地帯南部沿岸域」, 産総
 研地質調査総合センター.

横倉隆伸・山口和雄・岡田真介(2014) 勇払周辺の新た
 な反射法地震探査データの解析. 海陸シームレス地質
 図 S-4 「石狩低地帯南部沿岸域」, 産総研地質調査総
 合センター.

KUWAHARA Yasuto, OKAMURA Yukinobu, NAKAZAWA
 Tsutomu, KAWANABE Yoshihisa and ISHIZUKA Yoshihiro
 (2018) Quick report on the 2018 Hokkaido Eastern Iburi
 Earthquake.

(受付:2018 年 10 月 15 日)

SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の成果

山崎 徹¹⁾・小森省吾²⁾・池原 研¹⁾

1. はじめに

戦略的イノベーション創造プログラム(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program; SIP)は、総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)が司令塔機能を發揮して、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために創設されたプログラムです。SIPは、社会的に不可欠で、日本の経済・産業競争力にとって重要な課題とそのプログラムディレクター(PD)、そして予算をCSTIがトップダウンで決定し、府省連携による分野横断的な取組を産学官連携で、基礎研究から実用化・事業化までを見据えて一貫通貫で研究開発するという特徴もっています。

産総研地質調査総合センター(GSJ)地質情報研究部門は、11課題のSIP第1期(2014年度～2018年度)プログラムのうち、「次世代海洋資源調査技術」(PD、浦辺徹郎東京大学名誉教授、国際資源開発研修センター顧問)に発足当初の2014年度から参画しています。本論では、このSIPプログラムにおける海洋資源の成因研究に関するGSJの5カ年の成果を紹介します。

なお、本論の記述は、地質調査研究報告に掲載予定の山崎ほか(印刷中)を一般向けに要約したものです。本論における研究成果の解説にあたっては、GSJ地質ニュースの目的を鑑み、英文誌等に発表された学術論文の多くの引用を省略していますが、より詳しい議論や学術誌に掲載された論文の引用元は、山崎ほか(印刷中)に示されています。SIP施策全体及び「次世代海洋資源調査技術」全体に関する記述は、内閣府のウェブサイト^(注1)やパンフレットに公開されている資料に基づいています。本SIPプログラムに関しては、研究開発計画(内閣府政策統括官, 2018)に、より詳しい記述があります。また、本SIPプログラムに関するGSJの取り組み及びこれまでの進捗については、山崎・池原(2014, 2017)及び山崎ほか(2015, 2016)で紹介されています。

2. 「次世代海洋資源調査技術」(海のジパング計画)の概要

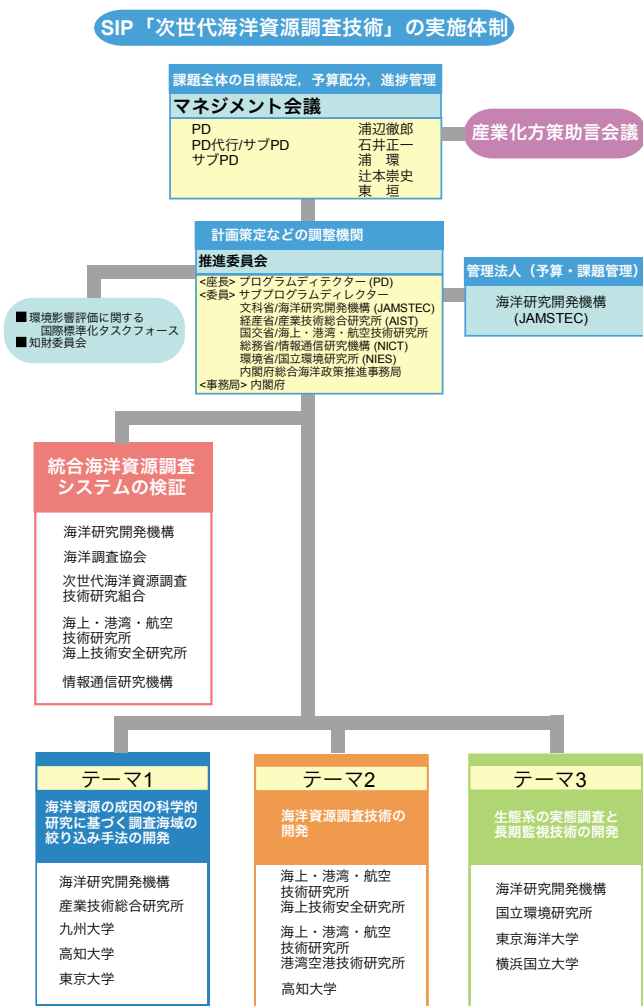
我が国は、国土面積の12倍を超える領海・排他的経済水域を有しており、これらの海域には、産総研をはじめ、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)、国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)や大学等の海洋調査によって、海底熱水噴出口を伴う塊状硫化物やコバルトリッチクラストなど、数多くの有用元素濃集域の存在が報告されています。しかしながら、これらは厚い海水に覆われているため、資源の確認や開発、利用のためには、有望海域を絞り込むための海洋資源の成因解明研究や、従来よりも飛躍的な効率で調査するための調査機器・手法の開発、さらに、開発に伴う海洋環境悪化を防止するための海洋環境を長期に監視する技術の開発が必要です。

SIPプログラム「次世代海洋資源調査技術」(海のジパング計画)では、府省連携のもと、海洋鉱物資源を低コストかつ高効率で調査可能で、資源が眠る深海域において使用可能な技術を世界に先駆けて実現することを目標に研究開発に取り組んできました。そして、競争力のある技術を産官学一体で開発し、その技術ノウハウを民間企業に移転して海洋資源調査産業を創出すること、また、グローバルスタンダードを確立し、海外での調査案件受注など海外へ展開することを出口戦略と位置づけてきました。これらを実現するため、本SIPプログラムでは(1)海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発、(2)海洋資源調査技術の開発、そして(3)生態系の実態調査と長期監視技術の開発の3つの柱で研究開発をスタートし、2015年度からは、大学等を取り込んで海洋資源調査技術を産学官一体で開発することによって海洋調査産業の創出の加速化を図り、2016年度には本SIPプログラムのマネジメント体制を一新して、それらの大学等の公募事業を既存の研究課題と統合し、3つのテーマとしました。さらに、2017年度からは、海底熱水鉱床を対象として、技術移転を受ける民間企業が主体となって調査を行う、(4)統合海洋資源調査システムの実海域での開発・検証を事実上の4つ目のテーマとして、次世代海洋資源調査技術の確立を目指してきました(第1図)。

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

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：戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)、次世代海洋資源調査技術、海底鉱物資源、海洋地質



第1図 SIP「次世代海洋資源調査技術」研究開発体制の全体像。SIP「次世代海洋資源調査技術」web site (<https://www.jamstec.go.jp/sip/> 2018年8月23日確認)をもとに作成(山崎ほか, 印刷中より転載)。

GSJは、4つのテーマのうち、「(1) 海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」(以下、SIP 成因研究)においてJAMSTECや国立大学法人九州大学を代表とする研究課題と連携して研究開発に取り組んできました。加えて、「(4) 統合海洋資源調査システムの実証」の主体である民間の次世代海洋資源調査技術研究組合(J-MARES)及び一般社団法人海洋調査協会(JAMSA)と連携し、SIP 成因研究で得られた科学的知見や海洋調査技術の民間企業への橋渡しを進めてきました。

3. 海底鉱物資源調査の概要・課題と産総研の取組みの全体像

海底鉱物資源調査の概要と課題を解説するために、まずは調査手法が確立され実績の豊富な陸上における資源探査

の概要を紹介します。陸上の資源開発においては、探査の結果に基づいて鉱床の形状・鉱量・品位分布などを明らかにするための開発ボーリングと、それに平行して行われる選鉱試験、そしてフィージビリティ・スタディ(FS:事業化調査)が行われ、最終的な開発判断がなされます。この段階の前までに行われる資源探査が、リモートセンシング、空中物理探査、地上物理探査、地化学探査、地表踏査、そして探鉱ボーリングです。これらのうち、リモートセンシングでは、人工衛星や航空機に搭載されたセンサーから得られるデータを解析し、広い範囲を対象に鉱床賦存可能性のある地域を絞り込むための調査が行なわれます。空中物理探査では航空機やヘリコプターなどを用い、重力探査、磁気探査、電磁探査、放射能探査等を行います。これらは鉱床胚胎と関係する地質構造把握を目的とし、広い範囲を対象とします。さらに、地上物理探査では、空中物理探査で用いられる手法のほか、比抵抗/誘導分極法(Induced Polarization; IP法)電気探査(陸域探査ではしばしば強制分極法電気探査とも呼ばれます)等も行われます。これらは、潜頭性鉱床の発見や鉱体の深部への連続の確認を目的とし、狭い範囲を対象とします。以上の調査のうち、人工衛星や航空機を利用した広い範囲を対象とした探査を一般に概査と呼び、陸上で調査を精査と呼びます。また、人工衛星による探査は地球規模であるため、それよりも探査範囲の狭い航空機やヘリコプターによる探査を準精査と呼ぶ場合もあります。精査には、物理探査のほかに、岩石・土壌・水・堆積物や植物等に含まれる化学成分や土壌からのガスの成分を分析して鉱床賦存の可能性を判断する探査法である地化学探査(地球化学探査とも呼ばれる)や、地表踏査(地質探査、地質調査)も含まれます。

海底鉱物資源調査においては、海底面あるいは海底面下に賦存する鉱物資源は厚さ数千mに及ぶ海水に覆われているため、陸上探査で用いられる人工衛星によるリモートセンシングは実施不可能で、航空機やヘリコプターによる探査に相当する、船舶を用いた調査が実際にデータを得る概査としての最初のステップとなります。これらの調査では、船舶に搭載された地球物理学的調査機器を用いて、マルチビーム音響測深機等による地形調査や重力異常・磁気異常調査、エアガン等を用いた反射法・屈折法地震探査等が行なわれます。続く準精査では、手法的には概査と同じく音響による地形調査や重・磁力調査が行われますが、プラットフォームが自律型無人潜水機(AUV)や深海曳航体(Deep Tow)となり、船舶ほどの行動範囲はないものの、海底面により近づくことによって高精度のデータを得ることができるようになります。さらに、精査においては、有

索式無人潜水艇 (ROV) を用いた音響による地形調査や重・磁力調査のほか、リアルタイムの映像による観察が行われ、準精査 - 精査段階では、ROV や船上からのピストンコアリングやドレッジ、掘削等による試料採取も平行して行われます。

我が国周辺の海底鉱物資源有望海域は数千 km² 規模であり、船舶や探査機が短期間で行動でき概査が可能な面積である数百 km² 規模にまで絞り込むためには、資源の形成過程や濃集メカニズム等の成因解明による地球科学的根拠に基づいた手法を用いるほかに考えられません。例えば、目的海域周辺の広域的なデータをリモートセンシング等によって得ることはできませんが、全世界の海洋域における、これまでの海洋調査による海底地形データや各種地球物理調査結果、掘削やドレッジによる海底表層構成岩石・堆積岩類の科学的データの蓄積は、各種文献やデータベースによって入手することが可能です^(註2-3)。したがって、船舶による概査以前に、これらの既存の地質情報を用いた概査海域の絞り込みが机上作業によってある程度可能です。このためには、現在の海洋底において、海底鉱物資源がどのような成因で、どのような地球科学的な位置づけの場所に形成されるのかを知る必要があります。また、その後のより詳細な調査によって有望海域をさらに絞り込むためにも、成因論に基づき最適な取得データ項目や調査機器の仕様を決定することが重要です。海底鉱物資源調査の概査である船舶を用いた調査は、内容やスケールは陸域の準精査に近いものの、航空機やヘリコプター (時速 200 km 以上) に比べると遥かに遅い速度 (時速数 km 程度) でしか実施することができず、船舶の利用に多額のコストを要するという問題があります。続く準精査や精査における海底鉱物資源調査はさらに困難を極め、陸上での車両による機器運搬や移動、徒歩による調査は、海域においては AUV や ROV を用いた調査・観察・試料採取や、船上からのピストンコアリングやドレッジ等による試料採取等に相当し、極めて高コストとなります。したがって、調査コストを抑えた高効率の調査のためには、短時間でより賦存可能性の高い海域を見いだすための鉱物資源調査に特化した手法や、指標を開発する必要があります。

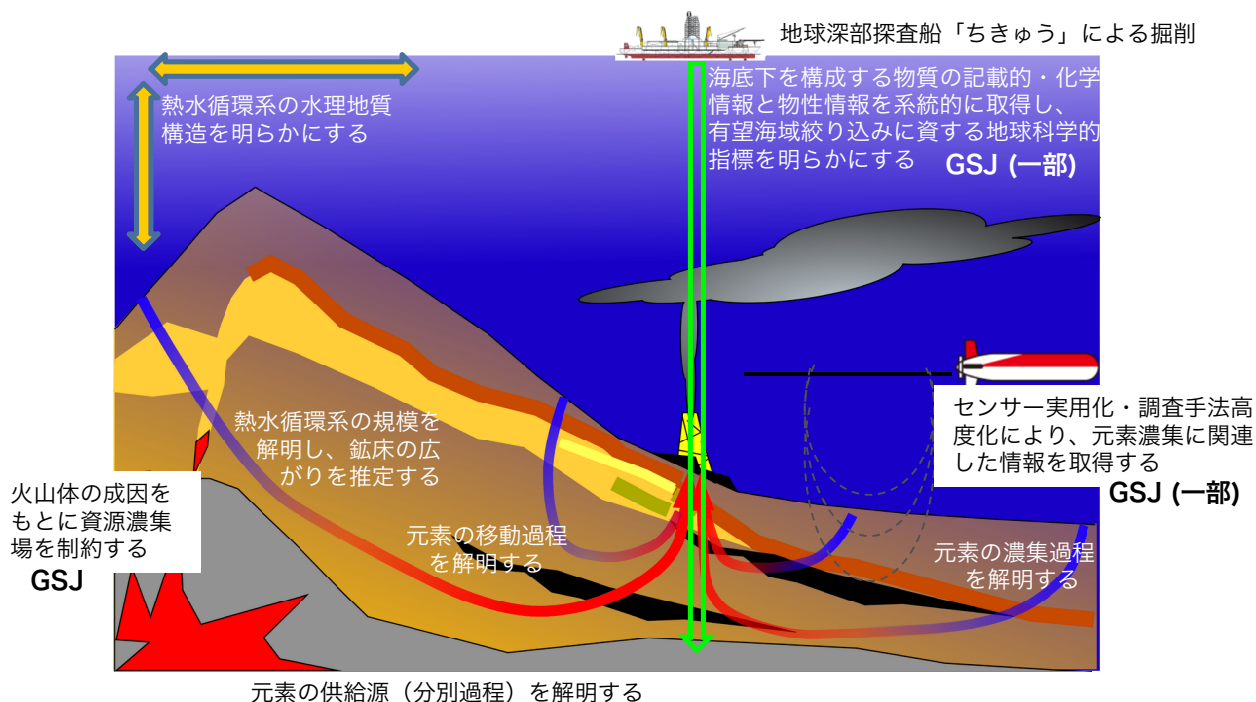
そこで、SIP 成因研究では、海底鉱物資源の成因に関する科学研究を通じて、海底鉱物資源が、いつ・どこで・どのように形成した (形成される) のかを明らかにすることで成因モデルを構築し、それに基づいて有望海域絞り込みのための地球科学的指標を明らかにすることを目的に研究開発に取り組んできました。GSJ は我が国の「地質の調査」に関するナショナル・センターとしての役割を

担っており、過去 40 年以上にわたり日本周辺海域の海洋地質学的研究及びその成果としての海洋地質図の出版を行ってきました。海底鉱物資源に関しては、特にこの数年、沖縄周辺海域において活発な熱水活動域を複数域で発見し、多種類の金属を含む塊状硫化物等の採取に成功しています^(註4-6)。そこで、GSJ では、海洋資源の成因に関する科学研究と成因モデル構築の一環として、海底熱水鉱床を胚胎する基盤岩類の地質構造発達史、熱水循環の熱源として機能するマグマの発生メカニズムと資源濃集過程との関連、そして火成岩類・堆積岩類・硫化物の化学組成・物性の検討を通じた、有望海域の絞り込みに資する科学的調査指標の特定に関する研究開発を、JAMSTEC や大学等と連携し、SIP 成因研究全体で一体となって研究開発を推進すると同時に、GSJ の強みとする部分については主たる分析・解析等を主導的に分担して実施してきました (第2図)。以下にその主要な研究開発成果を紹介します。なお、GSJ は海底鉱物資源に関する成因研究のうち、海底熱水鉱床とコバルトリッチクラストに関する研究開発に参画してきましたが、本 SIP プログラム全体として海底熱水鉱床に関する研究開発を重点化して進めてきたため、ここでは海底熱水鉱床に関してのみ紹介します。

4. GSJ の主要な研究開発成果

GSJ では、海底熱水鉱床の成因モデルの構築と有望海域の絞り込みに資する科学的調査指標の特定に関する研究開発に対し、本 SIP プログラムのモデル海域として、地球深部探査船「ちきゅう」を用いて実施された沖縄トラフにおける 3 度の科学掘削航海の全てに乗船研究者として参画し、掘削コアの船上での記載・計測・分析・解析に従事するとともに、(1) 基盤岩類の地質構造発達史と資源濃集過程との関連に関する研究開発、及び (2) 有望海域の絞り込みに資する科学的調査指標の特定に関する研究開発を進めてきました。このうち、「ちきゅう」による掘削航海については、山崎・池原 (2014, 2017) 及び山崎ほか (2016) にその概要と船上成果の速報が紹介されています。また、第 3 事業年度までの成果については、鈴木ほか (2016) として取りまとめています。

(1) 基盤岩類の地質構造発達史と資源濃集過程との関連に関する研究開発では、中部沖縄トラフで得られた掘削試料を用いて、主として火成岩岩石学的な観点からマグマの成因を検討することにより、マグマの発生機構と地殻の進化が資源の濃集とどのように関係しているのか、そしてそのような現象が生じる場にどのような特徴があるのかにつ



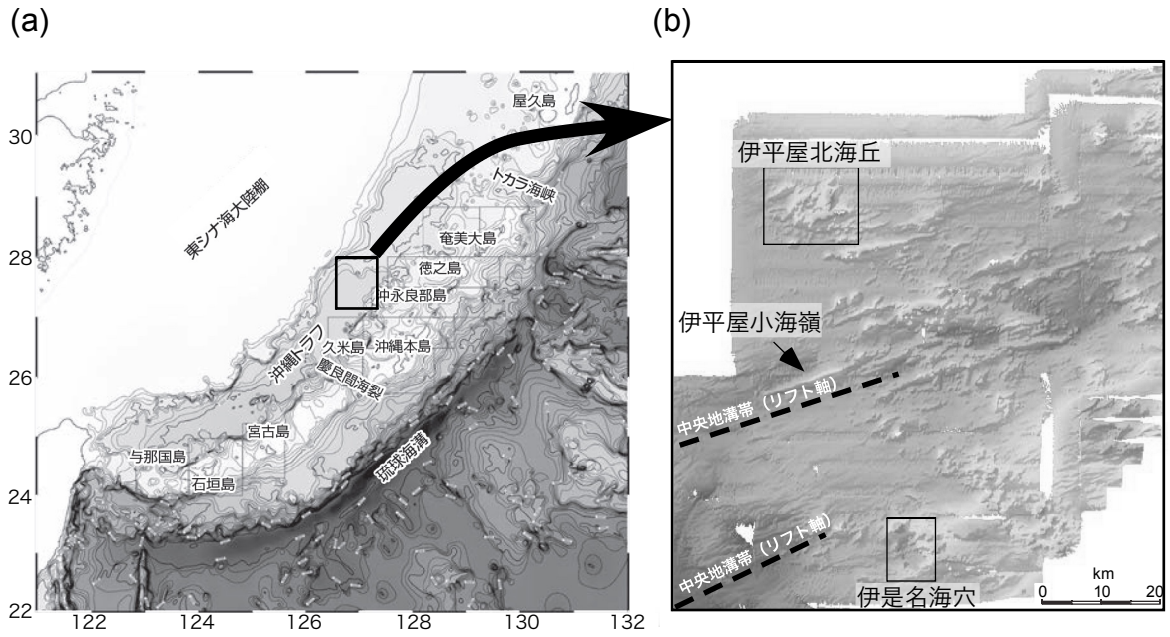
第2図 SIP「次世代海洋資源調査技術」, テーマ1「海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域の絞り込み手法の開発」における, 海底熱水鉱床が形成される過程の模式的モデルと, 本SIPプログラムでの取組み. GSJの記述がある部分に関し, 産総研が研究開発を分担した. 鈴木ほか(2016)に一部加筆(山崎ほか, 印刷中より転載).

いて明らかにしました. 沖縄トラフは, 琉球弧-海溝系の背弧側に1,200 km以上にわたって延びる舟状海盆で, リフティングの初期段階にあると考えられています. 沖縄トラフは一般にトカラ海峡を境に北部と中部, 慶良間海裂を境に中部と南部の3つのセグメントに分けられ(第3図a), 本SIPプログラムでモデル海域として中心に検討を行なったのは, 中部沖縄トラフの3つの異なる地形的特徴をもつ海域です. すなわち, ドーム状の高まりである伊平屋北海丘, 山脈あるいは海嶺状の地形を示す伊平屋小海嶺, そしてカルデラ状の凹地である伊是名海穴です(第3図b). これら3つの海域のいずれにおいても活発な熱水活動の存在や, 硫化物(鉱石)の存在が確認されています.

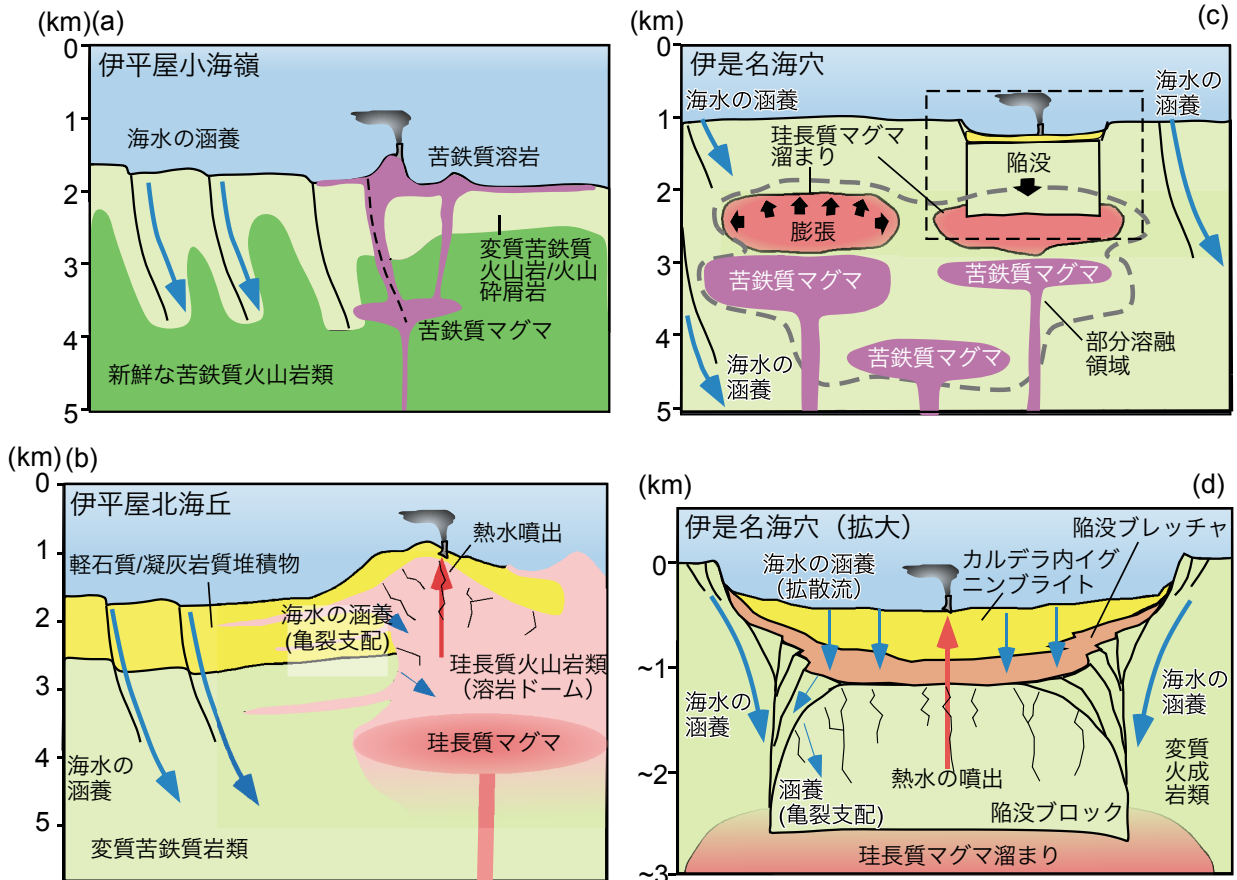
ここでは, 従来の研究や調査によって明らかとなっている, 以下のいくつかの謎を明らかにすることを手がかりに, その成因を検討しました. 1つ目は, 沖縄トラフの火山岩類が, 玄武岩質と流紋岩質の組成をもち, 中間の安山岩質組成を欠く点です(以下, 玄武岩質のことを苦鉄質, 流紋岩質のことを珪長質と記述します). このような火成活動をバイモダル火成活動と呼び, 一般に海陸のリフト帯に特徴的に産することが知られています. 2つ目に, 日本周辺海域の海底熱水鉱床はカルデラ状の海底地形に伴われることが多いのですが, これにどのような意味があるのか,

という点です. 3つ目は, 金属元素の起源についてです. 既存の研究成果等の情報によると, 沖縄トラフ海域には場所によって, 銅に富む鉱石と, 銅に乏しく鉛や亜鉛に富む鉱石とが産するケースがあり, この原因についてはよく分かっていません. そして4つ目は, 資源の濃集を引き起こしたと考えられる熱水循環を維持する熱源の問題です. 開発に必要な程度の大きさの鉱床が形成されるために必要な時間は正確には分かりませんが, 恐らく地質学的な時間スケールでの期間であると想定されます. 熱水循環は, 深海の極低温の海水によって, マグマ溜まりあるいは固結した火成岩を冷却するラジエーターのような役割を果たしており, 長期間の熱水循環が維持される場合には, 何らかの地質学的な条件が必要はらずです. これらはいずれもマグマ活動と密接に関連した問題であるため, マグマの成因の検討が鍵を握ると考えました.

本SIPプログラムの5カ年の間の様々な検討の結果, 全てを合理的に説明する以下のような仮説のモデルを得ることができました(第4図). まず, 1つ目のバイモダル火成活動の成因については, 地殻物質の含水部分溶解によって説明されます. これまで, SrやNd同位体比から苦鉄質岩と珪長質岩の起源が共通であると考えざるを得なかったことから, 珪長質マグマの成因は苦鉄質マグマの結



第3図 地球深部探査船「ちきゅう」によるSIP掘削航海実施海域。(a) 沖縄トラフ概要。(b) 中部沖縄トラフ、伊平屋北海丘、伊平屋小海嶺、伊是名海穴海域の海底地形。山崎ほか（印刷中）より転載。原図の出典等は転載元を参照。



第4図 中部沖縄トラフにおける構造-火成-熱水活動の概念図(山崎ほか, 印刷中より転載。原図の出典と詳しい説明は転載元を参照)。

晶分化作用によって説明されてきました。しかし、Sr や Nd 同位体比の等しいバイモーダルな火成岩類の成因は、長期間の火成活動と熱水循環の過程で、早期に固結した苦鉄質岩自身が含水部分溶融することによっても説明可能です。このプロセスの初期段階は、第4図aの伊平屋小海嶺海域のモデルで説明されます。リフト軸付近の、最も地殻が薄くなっている部分では、苦鉄質のマグマが地下浅所まで到達し、リフティングに伴って形成された正断層系を通じて海底まで噴出します。苦鉄質マグマは粘性が低く、正断層に沿って海嶺あるいは山脈状の地形を形成します。この正断層系は、同時に熱水循環の海水が地下深部に導入される通路としての役割も果たし、断層に沿った部分から変質が進みます。海水による変質が進むと、間欠的に次々とやって来る苦鉄質マグマの熱で部分溶融が発生します。部分溶融で形成されるマグマは珪長質ですので、これにより、中間質(安山岩質)のマグマを欠く原因が合理的に説明可能です。そのような次々とやって来る苦鉄質マグマによって、珪長質マグマが発生している様子を第4図cに模式的に示しています。伊平屋北海丘は、基本的にそのような珪長質マグマを主体とする溶岩ドームで(第4図b)、伊是名海穴は珪長質マグマの噴火によって形成された陥没カルデラである(第4図c)と解釈されます。

珪長質マグマは玄武岩質マグマに比べて低温までマグマ(結晶とメルトの混合体)として存在可能です。したがって、部分溶融によって珪長質マグマが発生すると、間欠的な苦鉄質マグマの上昇によって次第にマグマ溜まりが大きくなり、また、再加熱されて長期間にわたってマグマ溜まりとして存在できるようになると想定されます。この珪長質マグマ溜まりが大きな熱容量をもつことが、4つ目の謎の答えであると考えられます。陥没カルデラの存在は、そのような大きな珪長質マグマ溜まりが存在したことの痕跡であり、長期間にわたり熱水循環系が存在したために海底熱水鉱床を伴うことも多いのだと思われまます。これが2つ目の謎の解答の一部です。

珪長質マグマは、伊平屋北海丘のような溶岩ドームを形成する場合と、伊是名海穴のような陥没カルデラを形成する場合とがあるものと考えられます(第4図b, c)。伊是名海穴において、珪長質マグマ溜まりのルーフ、あるいはカルデラの陥没ブロックは、単純化するならば伊平屋小海嶺のモデルで考えられたような変質苦鉄質岩で構成されていると想定されますので、この部分で熱水循環による水-岩石反応(熱水-岩石反応)が起きると、苦鉄質岩中の銅が熱水に溶解し、銅に富み鉛や亜鉛に乏しい鉱床が形成されることが期待されます(第4図d)。一方、珪長質岩

は銅に乏しい一方で、鉛や亜鉛に富んでいますので、伊平屋北海丘のような、珪長質岩を母岩とする熱水循環系では、銅に乏しく鉛や亜鉛に富む鉱床が期待されます。これらが2~4つ目の謎を合理的に説明するメカニズムであると考えられます。

伊平屋小海嶺も伊是名海穴も、沖縄トラフのリフト軸付近に位置しており、広域的には琉球弧-海溝系の火山フロントとリフト軸とが収斂している海域(例えば、下司・石塚, 2007)ですので、巨大な珪長質マグマ溜まりの形成に必要な苦鉄質マグマの間欠的かつ浅所までの上昇が起きやすいことが長期にわたる熱水循環とそれによる大規模な鉱床の発達に重要である可能性が示唆されます。

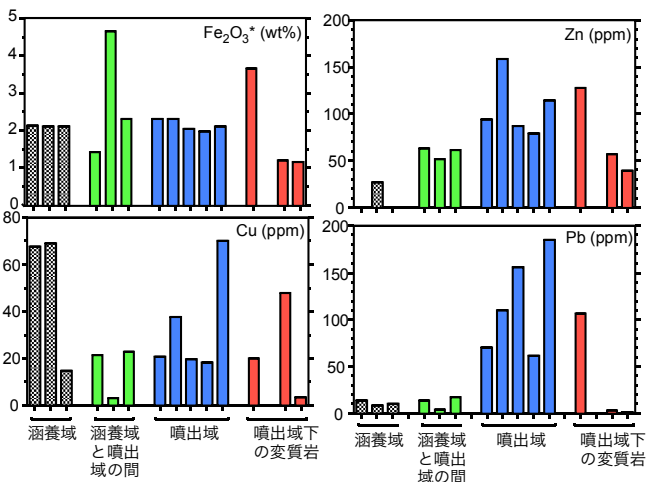
次に、(2)有望海域の絞り込みに資する科学的調査指標の特定に関する研究開発については、掘削コアの化学的・物理的(電気的)特性の検討を通じて、地化学調査法の提案と、物理探査手法の高度化に資する地質試料の電気特性の解明を行いました。地化学調査は陸上の鉱床の探査において最も有効な調査技術のひとつ(例えば、小笠原, 2005)ですが、海域では主として系統的な化学分析のための試料を入手することが難しいことなどの理由から、有効な地化学調査法が提案されていませんでした。陸域の鉱床探査の場合、踏査等による変質帯の識別が極めて重要な意味をもちますが、同様の調査は海域においてはドレッジやROVによる観察、海底着座型掘削装置(BMS)による掘削といった時間・コストのかかる手段でしか実施することはできず、また、調査可能範囲も極めて狭いという問題があります。沖縄トラフ伊平屋北海丘は、SIP以前に統合国際深海掘削計画(IODP)による掘削調査が実施され、海水のrecharge(涵養)とdischarge(噴出)との関係が科学的に裏付けられている海域です。島弧に関連した海底熱水鉱床域には、伊平屋北海丘と同様に珪長質噴出物(軽石等)が広範囲に分布するため、伊平屋北海丘の海水の涵養域と噴出域の構成物との元素濃度の違いが識別できれば、海底面下に鉱化帯が存在する可能性のある噴出域を見いだす地球化学的指標を見いだすことができると期待されます。そこで、海底熱水活動の影響のある部分(噴出域)と、影響のない部分(涵養域)との火山噴出物の組成の違いを検討しました。

軽石は少なくとも伊平屋北海丘の一定範囲に一樣に堆積したと考えられるため、初生的には組成が同じであった軽石の、変質あるいは鉱化作用の違いに応じた組成差を、噴出域と涵養域の試料の比較によって検出されることが期待されます。したがって、単純には、鉱液(熱水)にさらされた噴出域の軽石においては目的元素であるベースメタル

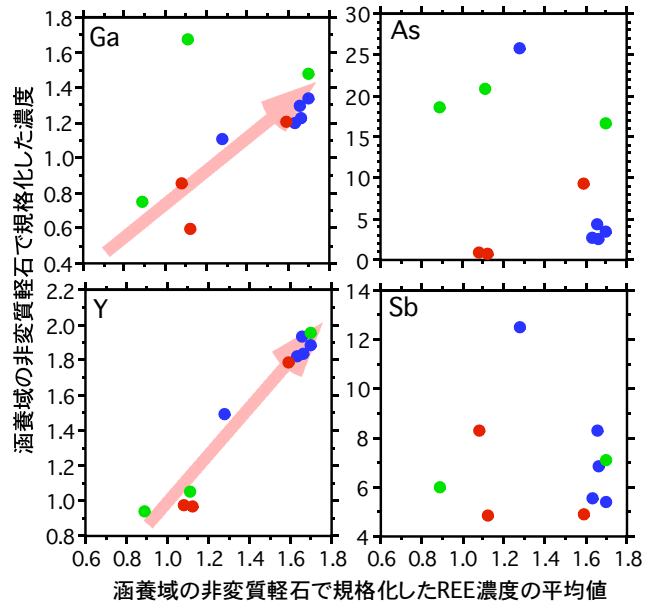
に富み、噴出域のチムニーから離れるに従って濃度が下がるという傾向が期待されます。しかしながら、実際の分析結果は、そのような単純な傾向は示さず(第5図)、鉍微域を絞り込むための指標としては使えません。これらの元素はマグマの分化においても鉍物とメルトとの分配によって濃度が変わりますので、マグマの分化に伴う含有量の増減を識別しなければ、後生的な変質/鉍化に伴う増減が識別できないと考えられます。

様々な検討の結果、涵養域の試料の組成で規格化した希土類元素の平均値と、同様に涵養域の試料の組成で規格化した微量元素の関係によって両者が識別可能であることが明らかとなりました(第6図)。希土類元素は、高い電荷を持つ液相濃集元素で、変質によって動きにくい元素です。マグマの分化に伴って元素が増減した場合、希土類元素と規則的な相関をもつことが期待されます。第6図に示したGaやYは基本的にそのような傾向を示していると理解されます。一方、AsやSbはそのような規則的な挙動を示さず、GaやYよりも涵養域の試料の組成で規格化した微量元素が1桁高い値を示しています(第6図)。これらは、鉍液(熱水)によって、不均質に噴出域や中間域の軽石に付加されていることがX線マッピングで確認されました。これらの元素は鉍床(鉍石)を構成する主要な金属元素である目的元素ではないものの、鉍化作用に関連した何らかの副成分としての指示元素であると考えられ、今回の結果は、海底熱水鉍床の地化学調査において指示元素が有用であることを示唆しています。

すでに述べたように、沖縄海域や伊豆-小笠原海域の熱水噴出域あるいは熱水鉍床分布域の周辺には、一般に珪長



第5図 伊平屋北海丘の海水涵養域、熱水噴出域及びそれらの中間域構成岩類の目的元素(ベースメタル)の含有量の比較。鉄や銅については、噴出域で富む傾向が認められない。山崎ほか(2018)を一部改変。



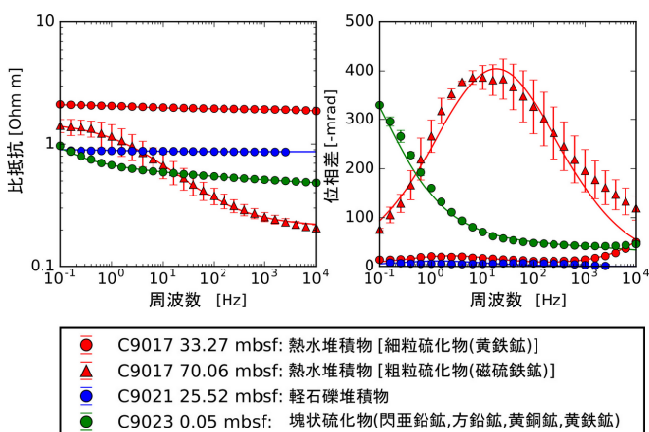
第6図 涵養域の軽石の組成で規格化した希土類元素濃度の平均値に対する各種元素の挙動。記号の色は第5図に対応。山崎ほか(印刷中)より抜粋の上、一部改変。

質の火山噴出物が分布しているため、この方法を用いた複数地点の試料の解析の結果、どの地点がより熱水噴出域に近いかを推定する指標として利用可能であると期待されます。一般に大規模な鉍床はその鉍体の構造的上位に熱水噴出域(チムニー)が存在すると期待されるため、熱水噴出口の位置を効率的に探すことができれば、それらのうちの幾つかにおいて、伏在している鉍体を発見する確率も向上すると期待されます。この手法は、概査もしくは準精査段階において、系統的なグリッド状のピストンコアリングを行うことによって最も有益な成果が得られるものと期待され、BMSを用いた掘削やROVによる試料採取に比べれば遥かに簡便、迅速で安価な、高効率の手法であるといえます。

最後に、物理探査手法の高度化に資する地質試料の電気特性の解明に関しては、準精査～精査段階での電気探査の精度向上に対して重要な知見を得ることができました。金属鉍床は電磁気学に基づいた物理探査法では低比抵抗として検出されるため、本SIPプログラムの研究開発では、海底熱水域における電気・電磁探査、とりわけ電気探査による比抵抗データを用いた地下構造の可視化や、自然電位探査が準精査～精査段階での鉍微地の発見に有効であることが分かってきました。電気探査は陸上の鉍床探査においても一般的に用いられる手法ですが、活発な熱水活動を伴う、あるいは海水に浸された状態にある海底熱水鉍床においては、構成岩石の物理的性質や置かれている環境が陸域とは

異なります。したがって、最適な物理探査手法の開発やそれによって得られるデータの正しい解釈のためには、原位置に近い状態で海底下構成岩類の電気特性に関する知見を直接的かつ詳細に得る必要があります。特に、海底熱水鉱床を構成する硫化物の多くは特有のIP効果が認められることが知られています。IP効果とは、堆積物・岩石中において流体で満たされた空隙中に硫化物が存在すると、硫化物が電気回路中のコンデンサに似た容量的性質を持つために電荷を蓄積・放電させ、結果として堆積物・岩石全体に流れる電流・電圧に位相差が生じる現象です。既存の研究成果に基づくと、硫化物はIP効果により、高周波においては非常に導電性である一方で、低周波では完全に絶縁性であることから、硫化物を含む堆積物の調査の場合は、IP効果は電流の周波数によって導電的でも絶縁的でもあり得ることになります。したがって、地球物理探査の解釈における不確かさを減ずるためには、実際の海底熱水域あるいは海底熱水鉱化域からの試料のIP効果に関する知見が不可欠であるといえます。そこで、本研究では、掘削試料について、比抵抗及びIP効果データをその他の物性・岩相・組成データ等と比較し、その支配要因を検討しました。

船上比抵抗・IP特性計測では、硫化物により特徴的な高位相のピークが生じ、ピーク周波数を境に高周波領域で導電的性質、低周波領域で絶縁的性質を持つというIP効果の典型的な特徴が捉えられました。第7図は、各掘削サイトから得られた代表的な堆積物・岩石の比抵抗・位



第7図 伊平屋北海丘及び伊平屋小海嶺における掘削試料のスペクトルIP特性の代表例。赤丸：伊平屋小海嶺において典型的に見られた細粒硫化物を含む熱水堆積物。赤三角：伊平屋小海嶺で採取された粗粒の磁硫鉄鉱を含む熱水堆積物。青丸：伊平屋北海丘において代表的に見られた軽石礫堆積物。緑丸：伊平屋北海丘の海底面付近で採取された塊状硫化物。山崎ほか（印刷中）より引用。

相の周波数依存性について示したものです。硫化物を含む熱水堆積物・塊状硫化物は、硫化物に乏しい軽石質堆積物に対して相対的に高い位相差を有し、位相差のピーク周波数より高周波数領域で低比抵抗、低周波数領域で高比抵抗となっています。したがって、位相差のピーク周波数は硫化物を含んだ堆積物・岩石のIP効果の特徴づける重要な指標となることが分かりました。一般に、位相差の周波数依存性、特にピーク周波数は硫化物の粒径に依存し、大きな粒子は位相差のピークを低周波数側へシフトさせることが知られています。本研究においても、硫化物の粒径の違いを反映していると考えられるピーク周波数の違いが認められました。また、塊状硫化物においては、周波数の減少に伴い位相が増加するという、細粒硫化物と正反対の特徴的なスペクトルIP特性が認められ、塊状硫化物のピーク周波数が、他の硫化物と比較して極めて低周波数側に存在することが分かりました。近年のIP研究の進展により、Cole-Coleモデルと呼ばれる電気回路モデルにおける変数のうち、充電率、時定数が本質的に硫化物の粒径や量と関係づけられることが明らかになってきました。このうち、硫化物の量や鉱化作用は、SIP成因研究における主要な関心の一つであるため、特に充電率に着目して検討しました。各種IPパラメータの推定結果とスペクトルIPデータのCole-Coleモデルへのフィッティング結果では、推定された充電率と硫化物量とに明らかな正の相関が認められることが分かりました。

一般に比抵抗は、流体の連続性(connectivity; 間隙率の関数)、流体の性質(塩濃度、温度)、粘土鉱物の表面伝導度及び粘土鉱物と硫化物粒子の存在による容量的性質の複合的な要素に支配されます。船上比抵抗・IP特性計測と併せて測定された間隙率・粘土含有率・硫化物含有率との比較の結果、比抵抗(1Hz)は間隙率と負の相関を示したのに対し、粘土含有率・硫化物含有率との明瞭な相関性は認められませんでした。これより、流体の連続性がバルク比抵抗を支配する主要因であることが分かりました。また、バルク比抵抗と硫化物含有率が明瞭な相関性を示さなかったのは、本調査において採取された熱水堆積物に含まれている硫化物の殆どが細粒であり、位相差のピーク周波数が高いために、1Hz程度の低周波数領域で硫化物は絶縁体として振る舞うことが関係していると考えられます。一方、高い硫化物含有率を有する塊状硫化物は低い間隙率であるにも関わらず、比較的低い比抵抗を示しました。このことは、大きな硫化物粒は位相差のピーク周波数が低く、1Hzにおいてもまだ導電的性質が優勢なためと考えられます。

これらのことから、活発な熱水活動を伴う海域での資源

調査における比抵抗値の解釈の際には、熱水の影響に対する注意が必要であり、電磁気及び直流比抵抗調査は硫化物鉱床のみならず、高温の熱水溜まりをも低比抵抗異常として検出する可能性があることが考えられます。本研究地域のような海底熱水系においては、350°Cを超える温度の熱水によって塩水(流体)の比抵抗は室温に比べて2桁程度、容易に減少し得ます。掘削地点のひとつである伊平屋北海丘においては300°Cを超える温度の熱水が観察されているほか、掘削同時検層(概要は山崎・池原, 2014; 山崎ほか, 2016を参照)においても、船上の測定値よりも1桁程度低い比抵抗値が得られています。これらのサイトでは掘削後に掘削孔からの熱水の噴出が認められていることから、掘削同時検層時に測定された低い比抵抗値は、熱水の温度の影響によるものであることが示唆されます。

本研究で得られた比抵抗・IP特性の鉛直プロファイルのデータは、海底熱水鉱床における海底物理探査データの妥当性検討や定量的解釈等への利活用が今後期待されます。特に本研究においては、充電率が硫化物含有量に極めて敏感であることが示されました。同様の結果は本SIPプログラムにおける伊是名海穴の掘削結果でも得られつつあり、IP調査が陸域と同様に硫化物鉱体を効果的に検出可能であることを示唆しています。特に、塊状硫化物のIP特性は、低周波数領域側に顕著な位相差異常を生ずるため、低周波数の交流電流送信及び電位計測(周波数領域での計測)、あるいは直流電流の長時間印加・遮断による電位差の過渡応答計測(時間領域での計測)が塊状硫化物鉱体の識別に有効である可能性があります。海底IP探査技術は現時点で開発途上の段階ですが、本研究により得られた知見は、本技術において開発すべき装置の仕様決定に貢献する他、調査手法に重要なガイドラインをもたらし、結果として調査コストの低減につながる事が期待されます。一方、高温条件はスペクトルIP特性を変化させ得るため、高温の熱水系においてIP効果による信頼性の高い調査手法の開発のためには、その温度依存性に関する更なる検討が必要であると考えられます。

5. おわりに

本SIPプログラムは、GSJの有する海洋地質学的な知見・地質情報に関するこれまでの蓄積を活かし、科学的知見や目的基礎研究成果を、出口を見据えた調査機器開発や民間での調査技術開発に活かす「橋渡し研究」の一環といえます。本論で紹介した研究開発成果は、依然、シーズ段階で

あり、その実用化までには距離があるのが現実であり、いずれの手法についても、今後、実海域での検証とその結果からのフィードバックによる精度や内容の高度化が不可欠です。今後、我が国がこの分野でイノベーションをリードしていくためには、本SIPプログラム終了後も継続的な高効率調査技術の研究開発の努力が必要で、科学研究による下支えのもと、産官学が連携して研究開発に取り組んでいくことが必要であると考えられます。

脚注

- 注1: 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP: エスアイビー) web site <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/> (2018/10/9確認)
- 注2: 例えば, InterRidge Vents Database Ver. 3.4 <https://vents-data.interridge.org> (2018/10/9確認)
- 注3: 例えば, IODP (International Ocean Discovery Program) のweb siteから過去の航海で得られたデータやサンプル, 航海の科学成果等へのアクセスが可能 <https://www.iodp.org> (2018/10/9確認)
- 注4: 沖縄県久米島西方海域に新たな海底熱水活動域を発見(2012年12月12日プレス発表) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20121212_3/pr20121212_3.html (2018/8/28確認)
- 注5: 鹿児島県徳之島西方海域に新たな火山活動域を発見(2013年9月9日プレス発表) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130909/pr20130909.html (2018/8/28確認)
- 注6: 沖縄県硫黄島周辺海域のごく浅海に海底火山を発見(2014年3月6日プレス発表) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140306/pr20140306.html (2018/8/28確認)

文 献

- 下司信夫・石塚 治(2007) 琉球弧の火山活動. 地質ニュース, no. 634, 6-9.
- 内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)(2018) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)研究開発計画. 内閣府, 43p. (<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html>) (2018/8/28 確認)
- 小笠原正継(2005) 中国における地化学探査と地球化学図. 地質ニュース, no. 616, 12-19.
- 鈴木勝彦・池原 研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎 徹(編著)(2016) SIP『次世代海洋資源調査技術』研究開発成果資料集 海底熱水鉱床の成り立ち—調査手法の確立に向けて—. 国立研究開発法人海洋研究開発機構 次世代海洋資源調査技術プロジェクトチーム, 60p.
- 山崎 徹・池原 研(2014) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「次世代海洋資源調査技術」に対する産総研の成因研究への取り組み. GSJ地質ニュース,

3, 346-349.
山崎 徹・池原 研 (2017) SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の2016年度成果と今後の取り組み. GSJ地質ニュース, 6, 190-194.
山崎 徹・池原 研・後藤孝介・井上卓彦 (2015) SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の2015年度の取り組み. GSJ地質ニュース, 4, 191-195.
山崎 徹・池原 研・石塚 治・井上卓彦 (2016) SIP「次世代海洋資源調査技術」における産総研の2015

年度の成果と今後の取り組み. GSJ地質ニュース, 5, 251-255.

山崎 徹・小森省吾・井上卓彦・石塚 治・池原 研 (印刷中) 海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域絞込み手法の開発: 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「次世代海洋資源調査技術」における産総研地質調査総合センター (GSJ) の研究開発成果. 地質調査研究報告.

YAMASAKI Toru, KOMORI Shogo and IKEHARA Ken (2018) GSJ's results of the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), "Next-generation technology for ocean resources exploration".

(受付: 2018年8月28日)

人工知能を用いた火山灰形状の自動判別

大槻静香¹⁾・庄司大悟²⁾・野口里奈³⁾・日野英逸⁴⁾

1. はじめに

形状や色、表面のテクスチャーといった火山灰の“見た目”は、噴火直前のマグマの状態や、噴火の様式に依存しています。そのため、採取した火山灰を分類し、その結果を噴火様式と対応づけることは、噴火の状況を理解する上で重要な手掛かりとなります。しかし、非常に複雑な形をしている火山灰粒子の分類は、観察する人の主観によって、結果に違いが生じてしまう恐れがあります。また、粒子の特徴が曖昧な場合や、複数の特徴が混ざっている場合では、その粒子をある一つのタイプに当てはめて分類することが難しいという問題も生じてきます。近年では、火山灰粒子の形状解析によって得られる定量的な値（例えば、面積や周囲の長さ）を使用することで、客観的な火山灰分類も可能となりましたが、その場合でも、分類に使用するパラメータの選び方には何通りもの組み合わせがあり、適切なパラメータの選択は困難であるのが現状です。

これらの問題を解決するために、我々は、近年画像認識の分野で大きな成果をあげている“ニューラルネットワーク”を用いた火山灰粒子の分類を試みました。ニューラルネットワークは、人工知能の基本技術の一つで、脳内にある神経細胞（ニューロン）のつながりである神経回路網を模倣した数理モデルであり、画像にある物体の形状や模様のパターンを学習させることで、その物体が何かを判別させることができます。これにより、人間の直感に基づく分類によって、複雑なパラメータを使用せずとも粒子を判別することが可能となります。

本稿では、ニューラルネットワークで火山灰粒子を判別させた結果(Shoji *et al.*, 2018)について、概要を紹介しします。

2. 火山灰試料

火山灰試料は伊豆半島（マグマ噴火）、三宅島（マグマ噴火およびマグマ水蒸気噴火）、アイスランド（ルートレス

噴火）で採取したものを用いました。マグマ噴火は地下から上昇してきたマグマがそのまま地表面に噴出する噴火、マグマ水蒸気噴火はマグマが火道や火口付近で外来水に接触することで発生する噴火です。ルートレス噴火は地表面を流れる高温の溶岩が水に接触することで発生します。全ての試料は苦鉄質マグマ（ $\text{SiO}_2=49\text{--}53\%$ ）で、単成火山の噴火活動によって噴出したものです。

3. 火山灰粒子の画像取得と形状の分類

ニューラルネットワークの学習には多くの画像を必要とします。そのため、本研究では火山灰粒子の画像をMorphologi G3S (Malvern Instruments 社製)を用いて取得しました。Morphologi G3Sは数万粒もの粒子画像を短時間で取得し、さらに多様な形状パラメータの計測を自動で行うことができる装置です。粒子同士が接触しないようにガラスプレート上に散布した火山灰粒子をプレートの下から光を当てることによって、モノクロの粒子シルエット画像を取得することができます。本研究では粒径 125–250 μm の火山灰粒子のみを解析に使用するとして、全試料で合計約 15,000 枚の粒子画像を得ました。

分類する形状は Blocky（角ばっている・ブロック状）、Vesicular（気泡壁のあるもの・えぐれた形状）、Elongated（細長い）、Rounded（丸い）の4クラスとしました。BlockyやVesicularはマグマの破碎や急冷を反映しますが、マグマが冷え固まる前に引き伸ばされるとElongated、表面張力で丸くなるとRoundedとなります。なお、噴火様式によってそれぞれの形状クラスの割合や生成要因は異なります。

4. 機械学習と判別処理

本研究では1) 明確な形状の火山灰粒子の形状を学習させてから、2) あいまいな形状を含む全粒子の形状判別を試みました(第1図)。

1) 産総研 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

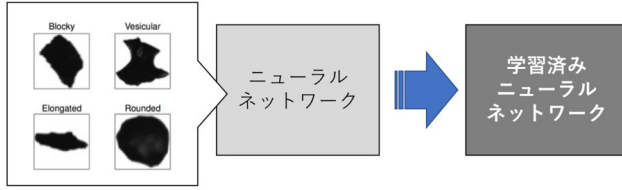
2) 東京工業大学 地球生命研究所

3) JAXA 宇宙科学研究所

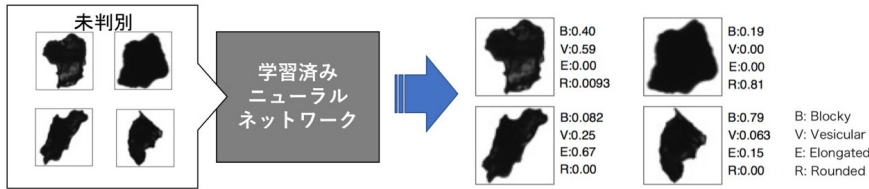
4) 統計数理研究所

キーワード：人工知能、ニューラルネットワーク、機械学習、火山灰、火山噴火、噴火様式

①4クラスの粒子形状をニューラルネットワークに学習させる



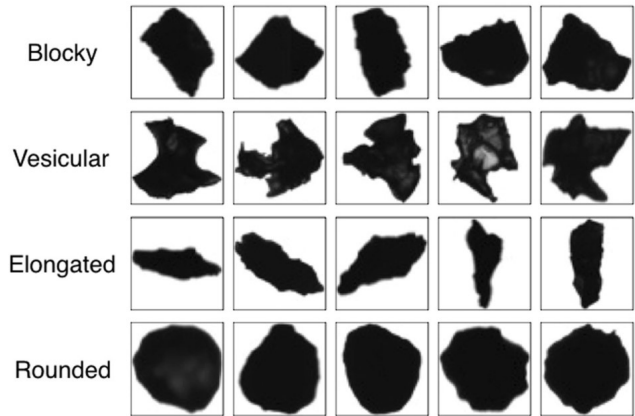
②学習済みニューラルネットワークを用いて粒子形状を判別し、4クラスの形状の確率を出力する



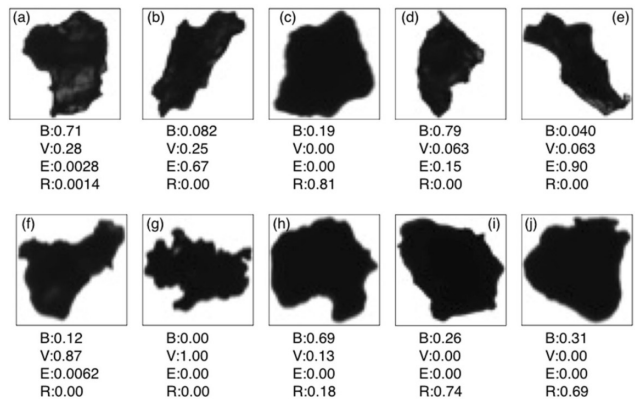
第1図 人工知能の学習および自動判別の手順。

まず、形状の学習について説明します。人間の目で明らかに分類することができる画像は各クラスで250枚ほどあり、そのうち各クラス200枚を訓練画像としてニューラルネットワークに学習させ、残りの画像は学習済みニューラルネットワークの精度を確認するためのテスト画像としました(第2図)。学習では「全800枚の訓練画像のうちランダムに200枚選んで20回訓練させること」を1ステップとし、ステップ数を重ねることで判別精度を上げていきます。本研究では100ステップ実施した時点で、テスト画像の判別精度が92%になりました。

次に、この学習済みニューラルネットワークを用いて、全ての画像の粒子形状を判別させます。粒子形状の判別結果は、一つの粒子が当てはまると判断されたクラスそれぞれの確率として出力されます。あるクラスに特徴的な形状を持つ粒子については一つのクラスの確率が高い結果になりますが、特徴が混ざったような形状の粒子では複数のクラスに確率が分散します。つまり、粒子ごとに出力される4つのクラスの確率の比率を「1粒子に含まれる4つの形状の構成比率」とみなすことができます。この方法により、どのクラスに含まれるのか明確でないあいまいな形状の粒子を、1つのクラスに強引に分類せず、基底クラス(今回は4つの形状)の割合として評価することができます。



第2図 学習時に訓練画像・テスト画像として用いた粒子画像の例 (Shoji et al., 2018)。



第3図 粒子画像に対応する各特徴的の形状の確率の例 (Shoji et al., 2018)。

5. 形状判別の評価

第3図に粒子画像の例と、対応する各クラスの確率を示します。粒子の1クラスの比率が0.1以上の組み合わせに着目すると、1クラスのみ(第3図 e, g), 2クラス(第3図 a, b, c, d, f, i, j), 3クラス(第3図 h)の粒子が見られました。なお、4クラス全ての特徴的の形状をもつ

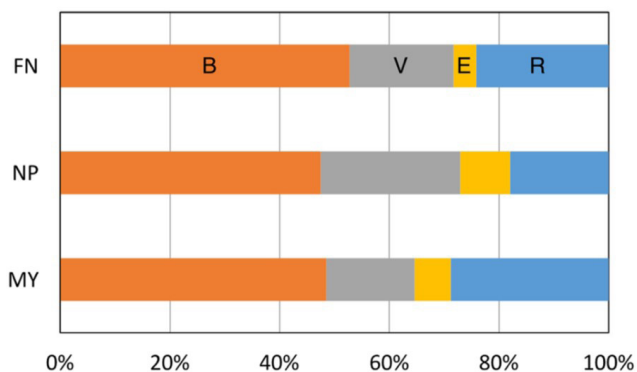
粒子は存在しませんでした。これは、RoundedはBlockyと混合しますが、VesicularやElongatedとはほとんど混合しないという特徴があることによります。このことは、丸くてかつ細長いものや、丸くてえぐれている粒子は極めて少ないということを意味しており、形状の定義(丸いと

ということ、細長い、えぐれているということは相反する)とも整合的です。シンプルなニューラルネットワークを用い、訓練画像も少なかったため、この数値にはばらつきがありますが、概ねうまく粒子の特徴的な形状の確率を表すことができました。

今回の結果では、粒子の形状の構成比率は、粒子外形をおおまかにとらえることはできましたが、ある一部分の小規模な構造の特徴的形状をとらえて判別することは困難なようでした。たとえば、Vesicular の特徴である発泡したマグマの気泡表面部分が反映されたと思われる形状(丸みを帯びた凹部)を一部分だけ持っていたとしても、Vesicular の比率が極端に低いか0である粒子も存在しています(第3図 d, e, j)。これは、ニューラルネットワークが Vesicular の特徴的形状を「外形全体が不定形で凹凸があるもの」と学習したからと考えられます(第2図)。また、画像取得時の粒子サイズと解像度の兼ね合いによっては、小さい凹部を Vesicular ではなく Blocky や Elongated の一部と判別した可能性があります。小規模な構造も判別に反映させるためには学習に用いるデータを増やし、高解像度の画像を用いることも視野にいれなければならないことがわかりました。

6. 火山灰形状と噴火様式の関係

次に伊豆半島、三宅島、アイスランドの試料の粒子形状の傾向について述べていきます。個々の粒子の形状の比率をクラス別に足し合わせることで、サンプリング地点ごとの試料全体の形状比率を求めました(第4図)。3試料全てにおいて Blocky の比率が5割を占めていましたが、特に伊豆半島が他の試料に比べて多い傾向にありました。



第4図 3地点ごとの火山灰形状の平均 (Shoji et al., 2018). FN = 伊豆半島・船原, NP = 三宅島・新鼻, MY = アイスランド・Myvatn. B=Blocky, V=Vesicular, E=Elongated, R=Rounded.

また、三宅島は Vesicular と Elongated, アイスランドは Rounded が多い傾向がありました。しかしながら、形状だけでは試料毎(噴火様式別)の有意な差は見られませんでした。

本稿で詳細は述べませんが、今回の形状判別の結果と Morphologi G3S で得られる粒子の透明度に関するパラメータを考慮してクラスター分析(大きな集団の中から似た特徴を持つグループに分ける統計的手法)を行うと、おおまかに伊豆半島、三宅島、アイスランドのサンプリング地点ごとにグループ分けすることができました。今後、形状以外にも、表面のテクスチャーのような粒子特徴を示す画像をニューラルネットワークに学習させることで、噴火様式ごとに粒子の特徴を捉えることができる可能性があります。また、幅広いマグマ組成の火山灰にも応用できるかもしれません。

7. おわりに

現段階では、シンプルな画像とニューラルネットワークを用いているため、実用化にはさらに改良が必要となります。将来的に火山灰の詳細な情報を学習させた、高精度のニューラルネットワークを使用できるようにすれば、噴火発生時に迅速かつ機械的に火山灰の自動判別ができるようになり、噴火状況の把握に貢献できます。そのため今後は、細かい特徴まで写された高解像度の顕微鏡画像や電子顕微鏡画像を用いて、火山灰粒子の色合いや表面のテクスチャーも学習させることを目指していきたいと思います。

文献

Shoji, D., Noguchi, R., Otsuki, S. and Hino, H. (2018) Classification of volcanic ash particles using a convolutional neural network and probability. *Scientific Reports*, DOI : 10.1038/s41598-018-26200-2.

OTSUKI Shizuka, SHOJI Daigo, NOGUCHI Rina and HINO Hideitsu (2018) Classification of volcanic ash particles using artificial intelligence.

(受付: 2018年9月10日)

サイエンスフェスタ in 秋葉原 イベント開催報告

畑 香緒里¹⁾・藤原 治¹⁾・宮地良典¹⁾・川鈴木 宏¹⁾・常木俊宏¹⁾・
谷島清一¹⁾・朝川暢子¹⁾・斎藤 眞²⁾・野々垣 進²⁾・森田啓子²⁾

1. はじめに

「サイエンスフェスタ in 秋葉原」はつくばエクスプレスの運営会社である首都圏新都市鉄道株式会社が主催するイベントで、つくばエクスプレス秋葉原駅地下1階イベント広場にて、毎年7月下旬から8月初旬に開催されています。期間中、つくばの研究機関が数日ずつ交代で出展します。産総研は2013年頃から様々なテーマで出展しており、地質標本館からの出展実績も多数あります(たとえば川辺ほか, 2016)。2018年は、7月27日(金)から7月29日(日)までの3日間出展しました。他機関では、国土地理院、筑波宇宙センター(JAXA)、筑波実験植物園、つくばエキスポセンターが出展しました。

2. イベント概要

今回の産総研の展示は、地質標本館で開催中の特別展「関東平野と筑波山ー関東平野の深い地質のお話ー」(会期: 2018年4月17日~8月19日)の内容が中心でした。秋葉原からつくばまでのつくばエクスプレスでの旅は、まさに関東平野の地下から出発して、関東平野の北の端である筑波山地域までをたどる旅でもあります。秋葉原駅を利用する方々に、地質を少しでも身近に感じていただきたいと



第1図 筑波山の立体地質図に興味をもつ子どもやパロと遊ぶ子どもたち

いうことで、秋葉原駅周辺の地下がどうなっているかが分かる模型も展示しました。他には、サイエンス・スクエアつくばからアザラシ型メンタルコミットロボット「パロ」を出展しました(第1図)。

開催時の週末、台風12号の関東地方への接近があり、初日27日(金)の準備時には、首都圏新都市鉄道株式会社から、台風の影響により、28日(土)、29日(日)の開催を見送る可能性があるというお話がありました。しかし幸いイベントスペース自体は地下にあり影響を受けないことから、無事開催となりました。

3. 展示内容

今回、特別展で展示しているもののうち、下記を出展しました。

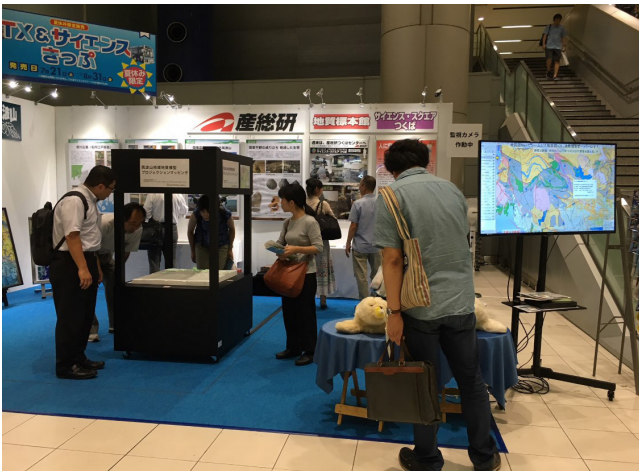
- ・筑波山立体地質図(プロジェクションマッピング)(芝原, 2014)
- ・地下模型「関東平野南部模型」と「山手線沿線の模型」、解説パネル
- ・解説パネル「歌川広重『名所江戸風景』1, 2」「関東平野から見える筑波山」「関東平野の成り立ち『絶滅した生物』」(中島ほか, 2018)
- ・『絶滅した生物』として、ナウマンゾウの左上顎第3大臼歯(GSJ F16097)並びにトウキョウホタテ(GSJ F17318)の化石

今回の展示の目玉の一つとして、イベントスペースの中央に設置したのは、プロジェクションマッピングによる筑波山立体地質図です(第2図, 第3図)。これは筑波山の白い立体地形模型の上に地質図や河川などの情報を表示するものです。会場の場所柄、来場者がほぼつくばエクスプレス利用者であるためか、筑波山への関心は高いようでした。模型の大きな突起が筑波山とお伝えし、その上に次々に映し出される情報画像に、なるほどと感心していただいたようです。来場者に地理的に身近な話題から地質に興味を持っていただけたことを考えると、今回の関東平野と筑

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

2) 産総研 地質調査総合センター 研究戦略部

キーワード: 地質標本館, アウトリーチ活動, 筑波山, 立体地質図, プロジェクションマッピング, 地下模型, 関東平野



第2図 筑波山の立体地質図をのぞき込んだり，説明を受ける来場者の方たち



第4図 大型地下模型「山手線沿線の模型」(左)と「関東平野南部模型」(右)



第3図 筑波山立体地質図（プロジェクションマッピング）



第5図 大型地下模型をご覧になる来場者

波山に関連した展示テーマの選択は成功したと思います。大人は河川図や道路図を重ねて表示するプロジェクションマッピング自体に興味をもつ方が多いようです。一方でカラフルな地質図画像は、ビジュアル的に魅力があり、小さいお子さんが思わず手を伸ばしてしまうほどでした。

多数のボーリングデータを基にした都市域の地質地盤の研究結果(たとえば田辺ほか, 2008, 2014; 小松原, 2014)を基に作成された大型の地下模型である「関東平野南部模型」と「山手線沿線の模型」(第4図, 第5図, 角田, 2014)は, 2万年前以降に堆積した関東平野の沖積層を取り除いて, 2万年前の氷期に形成された深い谷が復元されています。海面が現在よりも120 mくらい低い時代に, 深い谷が形成されました。氷期が終わり, 地球が徐々に温暖になっていくと, 深く削られた谷

は, 海面の上昇に伴って砂や泥, 礫によって埋められていきました。現在の中川や荒川に沿って広がる低地(沖積低地)は, 地質学的には非常に新しい軟弱な地層(沖積層)によって埋め立てられた平坦面であることが視覚的に理解できます(たとえば小松原ほか, 2016)。模型には鉄道網等も表示されていますので, 実際にご自宅や職場の場所が軟弱地盤かどうか確認する方もいました。つくばエクスプレスの秋葉原駅が, 地下深くに設置されていることもあり, 具体的に現在のこのイベントスペースが昔は海の中であった, という説明を受けると実感がわくようです。

春の特別展のブックレット(中島ほか, 2018)はじめ, 筑波山, ジオパーク関連のパンフレット等を配布しましたが, 展示を見る時間がないようでブックレットのみを

持ち帰る方も多数いました。また、イベントスペースへ訪れない方にも印象づけられるよう、もっとも通路に近い部分に、プロジェクションマッピングによる日本列島立体地質図のメイキング映像 (<https://www.youtube.com/watch?v=kktGFil9gLs> 2018年10月16日確認) と、20万分の1日本シームレス地質図 (<https://gbank.gsj.jp/seamless/> 2018年10月16日確認) の紹介映像を常時流すように工夫しました。日本列島立体地質図は、今年3月に地質標本館にリニューアルされたものです(藤原・芝原, 2018)。全長約9mの日本列島の精密立体模型(縮尺1/34万)の上に地質図などを投影し、そのうえに交通網など様々な情報画像を重ねられるもので、日本列島の地質全体を直感的に理解できると評判です。

4. 来場者数と結果

来場者数は、7月27日(金)が252名、28日(土)が257名、7月29日(日)が432名で、計941名でした。432名と言うのは、今年のサイエンスフェスタ全体を通じて一日の来場者数としては最高でした。開催時間は、平日の27日は12:00~19:00、土日の28日、29日は10:30~17:30です。来場者数が、平日の27日が3日間中一番少ないのは予想されますが、土曜の28日も来場者数が伸び悩んだのは、台風の影響が大きかったからと思われます。2017年開催時の他の研究機関の来場者数結果を見ても、土日の多いときに最大400人台までです。この人数はつくばエクスプレス秋葉原駅の利用者数に左右されます。

秋葉原駅は多くの人にとって移動途中の通過点ですので、イベントスペースへ足を踏み入れじっくり見るという方は少ないようです。夕方になると、仕事の帰りに立ち寄っていく人が多くなります。

印象として、足を止めて展示を見ていかれる方は、ロボットのパロに惹かれた小さなお子さんとそのご家族や、年配の男性で地図や地理に興味のある方が多いようです。TV番組の「プラタモリ」や地図関連イベントを例に、地図好きなことをお話される方が多数いました。また、つくば在住の方や、つくばで仕事をされている方など、元々産総研を知っている方が多い印象でした。

展示期間中は職員が常駐して来場者に直接説明したり、質問を受けたりしていました。職員が直接対応することによって来場者には一層理解を深めていただけたようでした。このイベントに参加することによって、産総研にとっては、通常ではつくばのサイエンス・スクエアつくばや地

質標本館へ来られない方々にも、広報をさせていただく新たな機会になっています。

文 献

- 川辺禎久・斎藤 眞・吉田清香・高橋雅紀・兼子尚知・高木哲一・堀川晴央・佐藤大介・田中伸一・芝原暁彦(2016) 2015年夏の地質調査総合センターアウトリーチ活動報告. GSJ地質ニュース, 5, 179-180.
- 小松原純子(2014) 荒川低地・中川低地・東京低地北部における沖積層の基盤地形. 関東平野中央部の地下地質情報とその応用. 特殊地質図, no.40 (CD), 地質調査総合センター, 51-55.
- 小松原純子・野田 篤・田辺 晋・佐藤善輝・宮川歩夢・細井 淳・木下佐和子・斎藤 眞・高橋須葉(須美子)・宮地良典・高橋雅紀(2016) 2016年産総研一般公開サイエンスコーナー「アナログ模型で地質を学ぼう!」. GSJ地質ニュース, 5, 389-398.
- 藤原 治・芝原暁彦(2018) プロジェクションマッピングでリニューアルされた「日本列島立体地質図」. GSJ地質ニュース, 7, 178-181.
- 中島 礼・藤原 治・宮地良典・都井美穂(2018) 地質標本館2018年度春の特別展 関東平野と筑波山-関東平野の深い地質のお話(第2版). 地質調査総合センター研究関連普及出版物, no.111, 24p.
- 芝原暁彦(2014) 精密模型による地質情報の立体化技術精密三次元造型とプロジェクションマッピングの連携. AIST today, 2014-11, 19. https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol14_11/vol14_11_p19.pdf 2018年10月12日確認
- 角田清美(2014) 東京都心・「日比谷の入江」の埋没地形と有楽町層. 駒澤地理, no.50, 113-120.
- 田辺 晋・中西利典・木村克己・八戸昭一・中山俊雄(2008) 東京低地北部から中川低地にかけての沖積層の基盤地形. 地質調査研究報告, 59, 497-508.
- 田辺 晋・石原武志・小松原 琢(2014) 沖積層の基底にみられる起伏地形: その成因の予察的解釈. 地質調査研究報告, 65, 45-55.

HATA Kaori, FUJIWARA Osamu, MIYACHI Yoshinori, KAWASUZUKI Hiroshi, TSUNEKI Toshihiro, YAJIMA Seiichi, ASAKAWA Nobuko, SAITO Makoto, NONOGAKI Susumu and MORITA Keiko(2018) Event report of "Science Festa in Akihabara".

(受付:2018年10月11日)

GSJ 国際研修 2018：阿武隈山地地質巡検と 室内実習（岩石薄片観察，XRF，EPMA）

高橋 浩¹⁾・宮崎一博¹⁾・御子柴真澄¹⁾・中村佳博¹⁾・坂野靖行¹⁾・佐藤大介¹⁾²⁾・脇田浩二³⁾

1. はじめに

2018年6月26日～7月13日の日程で、GSJ 国際研修が実施され、その一環として、阿武隈山地地質巡検(6月28～29日)と室内実習(岩石薄片観察, XRF, EPMA)を実施したのでそれらの概要について報告する。地質巡検及び実習参加者(研修生)は、タイ、マレーシア、パプアニューギニア、東ティモール、カンボジア、インドネシア、ラオス、ミャンマー、フィリピンの公立地質調査機関(CCOP 参画機関)から1人ずつの計9人であった。

2. 阿武隈山地地質巡検 (6月28～29日)

以下の日程・行程で、阿武隈山地地質巡検を実施した(第1図)。

6月28日(木)

地質調査総合センター(GSJ)(8:45)→常磐道, 国道118号経由→Stop 1: 八溝山地^{やみぞ}アダカイト質石英閃緑岩(10:30～11:00)→Stop 2: 袋田の滝(11:15～12:45)→道の駅奥久慈だいが(昼食, 13:00～13:30)→Stop 3: 棚倉町(棚倉破碎帯, 14:30～15:30)→いわき(17:00)



第1図 GSJ 国際研修阿武隈巡検コース (ベースマップは20万分の1日本シームレス地質図V2)

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

2) 産総研 地質調査総合センター 研究戦略部

3) 山口大学

キーワード：国際研修, 地質巡検, 阿武隈山地, 阿武隈変成岩類, 阿武隈深成岩類

6月29日(金)

いわき(8:30) → Stop 4: 花園溪谷(北茨城市, 9:30 ~ 12:00) → 大津(北茨城市, 昼食, 12:40 ~ 13:30) → Stop 5: 花貫溪谷(高萩市, 14:00 ~ 15:00) → Stop 6: 十王ダム(日立市, 15:30 ~ 16:00) → GSJ(17:00)

巡検参加者は、研修生9人の他に、高橋 浩、宮崎一博、御子柴真澄、中村佳博(以上地質情報研究部門)、内田利弘、加野友紀(研究戦略部)及び脇田浩二(山口大学)であった。

1日目(6月28日)

GSJ 正面玄関前をマイクロバスで出発し、常磐道、国道118号經由で、^{だいご}^{こゝろふじ} 大子町頃藤の久慈川にかかる奥久慈橋の東側袂の久慈川河床(Stop 1)で、前期白亜紀アダカイト質石英閃緑岩の露頭を観察した(写真1)。アダカイトとは、アリューシャン列島のアダック島に産する特殊な化学



写真1 前期白亜紀アダカイト質石英閃緑岩の露頭を観察する研修生たち(Stop 1, 大子町奥久慈橋袂の久慈川河床)



写真2 八溝層群(ジュラ紀付加体)の説明の様子(Stop 1, 大子町奥久慈橋袂の久慈川河床)

組成を持った火山岩(デイサイト)にちなんで命名された岩石のことで、海嶺近傍の若くて熱い海洋地殻が海溝で沈み込み、高圧下で溶融して生成されたと考えられている(Drummond and Defant, 1990)。しかし、八溝山地のアダカイト質石英閃緑岩の場合、その成因は海洋地殻の溶融では説明出来ず、玄武岩質マグマの分別結晶作用で形成されたと考えられている(Takahashi *et al.*, 2005)。また、Stop 1 では、アダカイト質石英閃緑岩の貫入母岩である八溝層群(ジュラ紀付加体)が露出しており、脇田氏による解説が行われた(写真2)。

袋田の滝(Stop 2)では、新第三紀中新世の男体山火山岩類を観察した(写真3)。袋田の滝付近の男体山火山岩類は、デイサイト質海底火山活動によって形成された自破碎溶岩が再堆積したもので、男体山火山岩類分布域の北縁部に位置している(細井ほか, 2017)。この海底火山活動は、左横ずれの棚倉断層による横ずれ引張堆積盆の内部で生じたもので通常の島弧では認められないアイスランドタイプの性格を持っている(周藤・八島, 1985; 高橋ほか, 1995)。

昼食は、道の駅奥久慈だいののレストランでとったが、奥久慈特産のシャモ肉入りカレーやそばは好評であった。

昼食後、棚倉に移動し、棚倉破碎帯の花崗岩マイロナイト及びウルトラマイロナイトを観察した(Stop 3, 写真4)。棚倉周辺の棚倉破碎帯中には、マイロナイトやカタクラサイトが発達しているが(越谷, 1986)、露頭のほとんどが風化しており、新鮮な露頭は稀である。ウルトラマイロナイトは、花崗岩マイロナイト中に幅数メートルほどの層状岩体として発達しており、花崗岩に取り込まれた八溝層群の堆積岩ブロックのようにも見える。しかし、注意深く観察すると、非対称プレッシャーシャドウを伴った



写真3 袋田の滝(Stop 2)での記念写真



写真4 棚倉破碎帯中の花崗岩ウルトラマイロナイト (Stop 3, 棚倉町屋敷)



写真6 花貫溪谷汐見滝下流河床の鳥曾根花崗閃緑岩



写真5 花園溪谷に沿う林道脇の竹貫変成岩類の露頭 (Stop 4)

斜長石のポーフィロクラストが認められ、花崗岩質岩起源のウルトラマイロナイトであることが分かる。

棚倉構造線は、西南日本と東北日本を分かつ日本列島で最大級の構造線であるが、阿武隈山地以北では広く新第三系や第四系に覆われるため、正確な位置は不明である (Takahashi *et al.*, 2012)。

棚倉破碎帯 (Stop 3) 観察の後、福島県いわき市に移動し、駅前のビジネスホテルに宿泊した。夕食は、各自で自由にとることとしたが、特に問題はなかった。

2日目 (6月29日)

ホテルで朝食を済ませた後、北茨城市の花園溪谷 (Stop 4) に移動した。花園溪谷には、阿武隈変成岩類の竹貫変成岩類が広く分布している。阿武隈変成岩類は泥質変成岩主体で苦鉄質変成岩類を伴う竹貫変成岩類 (角閃岩相～グラニュライト相) とその東側に分布する苦鉄質変成岩類を主体とし、泥質変成岩類を伴う御在所変成岩類 (緑色片

岩相～角閃岩相) から構成される (Miyashiro, 1958; 加納ほか, 1973)。御在所変成岩類 (メタチャート) からはジュラ紀の放散虫化石が見いだされており (Hiroi *et al.*, 1987)、変成年代はジュラ紀以降である。また、御在所変成岩類は、竹貫変成岩類の上に衝上断層を介してのし上げていると考えられており、この衝上運動により竹貫変成岩類は急速に圧力が高まったと考えられている (Hiroi *et al.*, 1998)。

花園神社より上流の花園溪谷には、広く竹貫変成岩類が分布しており阿武隈変成岩類の模式地となっている (写真5)。ざくろ石珪線石堇青石黒雲母片麻岩やざくろ石黒雲母片麻岩からなり、縞状の優白バンドが認められ、部分溶融が生じていたものと考えられる。また、一部、片麻岩中にかんらん岩ブロックが認められる。

花園溪谷での阿武隈変成岩類観察の後、北茨城市大津漁港近くの鮮魚センターが経営する海鮮レストランで昼食をとった。日本食は東南アジア諸国にも広がっているようで、刺身が好評であった。

花貫溪谷 (Stop 5) では、阿武隈花崗岩類の新期花崗岩類である鳥曾根花崗閃緑岩を観察した (写真6)。阿武隈山地の深成岩類は、貫入の古い順に、超苦鉄質岩、斑れい岩及び閃緑岩、細粒閃緑岩、角閃石黒雲母花崗閃緑岩、黒雲母花崗閃緑岩、粗粒黒雲母花崗閃緑岩及び優白質花崗岩からなる (Takahashi *et al.*, 2016)。鳥曾根花崗閃緑岩は黒雲母花崗閃緑岩に相当し、角閃石黒雲母花崗閃緑岩である上君田花崗閃緑岩に貫入し、粗粒黒雲母花崗閃緑岩及び優白質花崗岩に貫入されている (Takahashi *et al.*, 2016)。阿武隈山地の深成岩類のジルコン U-Pb 年代は、角閃石斑れい岩で 110 Ma 前後、細粒閃緑岩で 100 Ma 前後、角閃石黒雲母花崗閃緑岩及び黒雲母花崗閃緑岩で 105 Ma 前後、優白質花崗岩で 100 Ma 前後を示し、K-Ar 年代 (黒雲母、

角閃石)と近接することから、これらの岩体は貫入の後、急速に上昇したと考えられている (Takahashi *et al.*, 2016).

日立市十王ダムサイト (Stop 6) には、カンブリア紀の貫入年代を示す大雄院花崗岩 (Sakashima *et al.*, 2003; Tagiri *et al.*, 2011) が露出している (写真 7)。大雄院花崗岩は、変形が強いため、緑色片岩様の岩相を呈するが、変形の弱い部分では深成岩の組織を残しており、原岩は角閃石黒雲母トーナル岩であることが分かる。

3. 室内実習

阿武隈巡検 (6月28日～29日) の後、7月3日 (火) に、GSJ において、巡検で観察した阿武隈変成岩類、阿武隈花崗岩類及び八溝山地の前期白亜紀アダカイト質石英閃緑岩



写真7 十王ダムサイトに露出するカンブリア紀大雄院圧砕花崗岩

について偏光顕微鏡による岩石薄片観察、蛍光 X 線分析装置 (XRF) による全岩化学分析の説明と EPMA による鉱物化学組成分析が行われた。室内実習では、研修生 9 人を、5 人と 4 人の 2 班 (A 班及び B 班) に分け、午前中は、A 班を高橋、御子柴及び佐藤が担当し、阿武隈深成変成岩類及び八溝山地のアダカイト質石英閃緑岩についての偏光顕微鏡観察と XRF による深成岩類の全岩化学組成分析について説明が行われた。B 班は宮崎、坂野及び中村が担当し、花園溪谷で観察した阿武隈変成岩を用いて、EPMA による鉱物化学組成の分析が行われた。午後には、高橋、御子柴、佐藤が B 班を、宮崎、坂野、中村が A 班を担当し、午前と同様の研修を行った (第 1 表)。

偏光顕微鏡による岩石薄片観察と XRF による岩石の化学組成測定 (高橋・御子柴・佐藤)

7月3日 (火) の午前、輪講室 (7-1-860 室) において、A 班の 5 名の研修生に対して、阿武隈巡検 (6月28日～29日) の概要を再度説明し、偏光顕微鏡観察の予備知識として、見学した岩石の薄片写真について解説した。その後、光学実験室 (7-1-163) に移動し、巡検で観察した岩石を中心に、八溝山地及び阿武隈山地の深成変成岩類の岩石薄片を観察した (写真 8)。その後、XRF 実験室 (7-1-156) に移動し、蛍光 X 線分析装置の概要を説明し、火成岩岩石学における主成分元素、微量元素及び希土類元素分析の重要性と岩石学への適用例を紹介した (写真 9)。

EPMA による変成鉱物組成測定と変成温度・圧力解析 (宮崎・坂野・中村)

阿武隈巡検で訪れた花園溪谷の竹貫変成岩を用いて変成

第 1 表 GSJ 国際研修, 岩石学実習スケジュール

月日	時間	部屋	実習	講師・担当	備考
7月2日 (月)	13:30-16:30	光学解析実験室 7-1-163		高橋 浩, 中村佳博	光学解析実験室に 偏光顕微鏡搬入
7月3日 (火)	9:00-12:00	輪講室 (860) 光学解析実験 (7-1-163) XRF 実験室 (7-1-156)	「岩石鑑定法」講義 実習① 岩石薄片の顕微鏡観察 XRF 概要説明	高橋 浩, 御子柴真澄, 佐藤大介	A 班 (2グループ入替制)
		EPMA 実験室 (7-1-151) 輪講室 (860)	実習② 化学組成分析 (EPMA) EPMA 分析データ解析	宮崎一博, 坂野靖行, 中村佳博	B 班 (2グループ入替制)
	13:30-16:30	輪講室 (860) 光学解析実験 (7-1-163) XRF 実験室 (7-1-156)	「岩石鑑定法」講義 実習① 岩石薄片の顕微鏡観察 XRF 概要説明	高橋 浩, 御子柴真澄, 佐藤大介	B 班 (2グループ入替制)
		EPMA 実験室 (7-1-151) 輪講室 (860)	実習② 化学組成分析 (EPMA) EPMA 分析データ解析	宮崎一博, 坂野靖行, 中村佳博	A 班 (2グループ入替制)



写真 8 偏光顕微鏡による岩石薄片観察の様子



写真 10 EPMA の原理とデータ解析の講義の様子



写真 9 蛍光 X 線分析装置 (XRF) の説明の様子

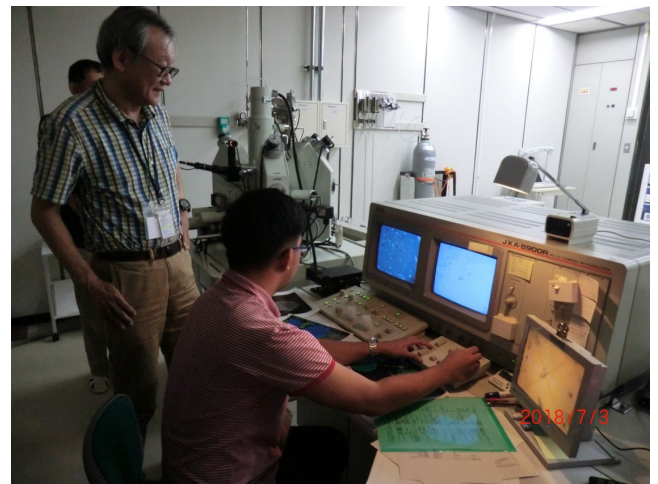


写真 11 EPMA 分析実習の様子

鉱物の化学組成から変成温度圧力を求める実習を行った。巡検では、ミグマタイト（部分溶融が進行した岩石）の産状を詳しく観察し（写真 5），EPMA 分析による温度圧力解析の意義を説明するための伏線を張った。7 月 3 日の室内実験では、最初に第一会議室で EPMA 分析の原理説明を行い（写真 10），その後 EPMA 実験室（7-1-151）へ移動し、変成鉱物の化学組成分析を行った。分析は実際に研修生一人一人が行い（写真 11），各自が温度圧力を求めるのに必要なざくろ石、黒雲母、斜長石の化学組成を取得した。分析後、再度、第一会議室へ移動し、鉱物化学組成から変成温度圧力を求める手法の講義を行い、各人に用意されたノートパソコンを用いて鉱物化学組成から温度圧力を求めさせた。講義ではさらに進んで、得られた温度圧力から阿武隈山地にミグマタイトが広域に分布する理由と、ミグマタイトが地殻内のどのような場で形成されたかを議論させ

た。研修生にとってはかなり高度な内容だったが、実際に自分で取得した鉱物化学組成から変成温度圧力を求めることに興味を持ってもらえたと思う。また、いずれの研修生も新たな知識の獲得に積極的だとの印象を持った。

4. おわりに

GSJ 国際研修は今回が初めてであったが、研修生の評価は高かったようである。しかし、内容が多岐にわたり、消化不良気味との感想も複数寄せられた。テーマを絞り込み、よりコンパクトにすることを検討することも考えてはどうかと感じた。

この種の研修は、研修生にとっては業務上のスキルや知識を得ることの出来る貴重な機会であり、GSJ にとっても国際的なプレゼンスを高める重要な取り組みである。今回

の研修生は意欲的で、今後、各国の中核的な役割を担う人材となることが予想される。長期的視点に立って今後のことを考えると、GSJや日本にとって、この種の国際研修を続ける価値はあると考える。

文 献

- Drummond, M. S. and Defant, M. J. (1990) A model for Trondhjemite–Tonalite–Dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Jour. Geophys. Res.*, **95**, 503–21.
- Hiroi, Y., Yokose, M., Oba T., Kishi, S., Nohara, T. and Yao, A. (1987) Discovery of Jurassic radiolaria from acmite-rhodonite-bearing metachert of the Gosaisyo Metamorphic Rocks in the Abukuma terrane, northeastern Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **93**, 445–448.
- Hiroi, Y., Kish, S., Nohara, T., Sato, K. and Goto, J. (1998) Cretaceous high-temperature rapid loading and unloading in the Abukuma metamorphic terrane, Japan. *Jour. Metamorphic Geol.*, **16**, 67–81.
- 細井 淳・橋本 純・天野一男 (2017) 棚倉断層沿いの中新世アイスランドイト質デイサイト海底火山の復元. *地質学雑誌*, **123**, 613–626.
- 加納 博・黒田吉益・宇留野勝敏・濡木輝一・蟹沢聰史・丸山孝彦・梅村隼夫・光川 寛・瀬戸延男・大平芳久・佐藤 茂・一色直記 (1973) 竹貫地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 116p.
- 越谷 信 (1986) 棚倉破碎帯の変形と運動. *地質学雑誌*, **92**, 15–29.
- Miyashiro, A. (1958) Regional metamorphism of the Gosaisho—Takanuki district in the central Abukuma Plateau. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. C* **8**, 245–68.
- Sakashima, T., Terada, K., Takeshita, T. and Sano, Y. (2003) Large-scale displacement along the Median Tectonic Line, Japan: Evidence from SHRIMP zircon U–Pb dating of granites and gneisses from the south Kitakami and paleo-Ryoke belts. *Jour. Asian Earth Sci.*, **21**, 1019–1039.
- 周藤賢治・八島隆一 (1985) 茨城県大子地域に産するホルトノライト安山岩. *岩石鉱物鉱床学会誌*, **80**, 398–405.
- Tagiri, M., Dunkley, D.J., Adachi, T., Hiroi, Y. and Fanning, M. (2011) SHRIMP dating of magmatism in the Hitachi metamorphic terrane, Abukuma Belt, Japan: Evidence for a Cambrian volcanic arc. *Island Arc*, **20**, 259–279.
- 高橋正樹・野口高明・田切美智雄 (1995) 希土類元素組成からみた東北日本中新世アイスランドイトの成因. *地質学論集*, **44**, 65–74.
- Takahashi, Y., Kagashima, S. and Mikoshiba, U. M. (2005) Geochemistry of adakitic quartz diorite in the Yamizo Mountains, central Japan : Implications for Early Cretaceous adakitic magmatism in the Inner zone of Southwest Japan. *The Island Arc*, **14**, 150–164.
- Takahashi, Y., Mao, J. and Zhao, X. (2012) Timing of mylonitization in the Nihonkoku Mylonite Zone of north central Japan: Implications for Cretaceous to Paleogene sinistral ductile deformation in the Japanese Islands. *Jour. Asian Earth Sci.*, **47**, 265–280.
- Takahashi, Y., Mikoshiba, M., Kubo, K., Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T. (2016) Zircon U–Pb ages of plutonic rocks in the southern Abukuma Mountains : Implications for Cretaceous geotectonic evolution of the Abukuma Belt. *Island Arc*, **25**, 154–188.

TAKAHASHI Yutaka, MIYAZAKI Kazuhiro, MIKOSHIBA Masumi, NAKAMURA Yoshihiro, BANNO Yasuyuki, SATO Daisuke and WAKITA Koji (2018) Report of GSJ International Training Course 2018: Geological excursion in the Abukuma Mountains and practical works in laboratories (petrography, XRF and EPMA).

(受付:2018年10月29日)

GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 宮地良典
副委員長 中島礼
委員 井川怜欧
児玉信介
竹田幹郎
落唯史
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7巻 第11号
平成30年11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

GSJ Chishitsu News Editorial Board

Chief Editor : Yoshinori Miyachi
Deputy Chief Editor : Rei Nakashima
Editors : Reo Ikawa
Shinsuke Kodama
Mikio Takeda
Tadafumi Ochi
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. 7 No. 11
November 15, 2018

Geological Survey of Japan, AIST

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

道の駅しもつまから見た筑波山

[cover photo](#)



茨城県下妻市にある道の駅しもつまは関東平野の北部に位置し、展望台からは平たい関東平野を見渡すことができる。最も近い山は東へ直線距離で約 10 km のところにある筑波山である。筑波山には 877 m の女体山, 871 m の男体山と東西に並んだ二つの峰があるが、両方の峰が重なって一つに見えている。写真中央に突出した峰の部分は白亜紀後期から古第三紀前期の斑れい岩, まわりのなだらかな部分は同じ時代の花崗岩 (筑波花崗岩と呼ばれる) などからなる。

(写真・文：産総研地質調査総合センター地質情報研究部門 小松原純子)

Mt. Tsukuba seen from the Michi-no-Eki "Shimotsuma". Photo and Caption by Junko KOMATSUBARA