

GSJ 地球をよく知り、地球と共生する 地質ニュース



小特集 ▶ 菱刈鉱山（鹿児島県）



2月号

小特集

菱刈鉱山（鹿児島県）

43 菱刈鉱山関係小特集について 地質調査総合センター研究戦略部

44 広域地質図作成から見た南九州の地質と菱刈鉱山の位置
斎藤 眞

48 鹿児島県菱刈金鉱床の氷長石—石英脈とその年代
実松健造

53 住鉱資源開発株式会社における新しい物理探査の取組み
岡田和也

62 関東の地球化学図 今井 登・岡井貴司

73 第52回東・東南アジア地球科学計画調整委員会(CCOP)
年次総会参加報告 竹内美緒・内田利弘

菱刈鉬山関係小特集について

地質調査総合センター研究戦略部

産業技術総合研究所は、その研究成果や最先端技術を産業界に普及し社会に還元することを使命としており、2015年度から始まった第4期中期計画では、開発した革新的な技術を製品化・事業化に磨き上げていく「橋渡し」機能を強化すると謳っています。地質調査総合センター(GSJ)でも、民間企業への地質情報や技術の提供、企業との共同研究の推進を重要活動方針にしています。

その一環として、資源関係の企業との意見交換を目的として、2016年2月24日に住友金属鉬山株式会社の菱刈鉬山(鹿児島県)を訪問し、同社および住鉬資源開発株式会社との意見交換会を実施しました。住友金属鉬山株式会社からは菱刈鉬山の開発状況と其中での技術的課題について、また、住鉬資源開発株式会社からは最近の物理探査技術開発について紹介していただきました。GSJからは、菱刈鉬山との関連ということで、九州南部のテクトニクスに関する新しい知見や菱刈鉬山の鉬床学的研究の成果を紹介するとともに、GSJで行っている鉬物資源研究や鉬物資源探査のための物理探査研究の現状について報告しました。鉬山に勤務されている地質関係の技術者と直接の意見交換を行い、互いの問題意識を共有することは、GSJで行う研究の今後を考える上で貴重な機会となりました。

本小特集は、意見交換会での発表の一部を原稿としてまとめたもので、以下の3件で構成されています。

- ・広域地質図作成から見た南九州の地質と菱刈鉬山の位置(斎藤 眞)
- ・鹿児島県菱刈金鉬床の氷長石-石英脈とその年代(実松健造)
- ・住鉬資源開発株式会社における新しい物理探査の取組み(岡田和也:住鉬資源開発株式会社)

始めの2件はGSJにおける最近の研究成果を要約したものです。3つ目は、鉬物資源・地熱資源等の探査に不可欠な物理探査技術について住鉬資源開発株式会社による調査事例、研究事例について発表をお願いしました。金属鉬山開発では、菱刈鉬山を例にしても、これまでに重力探査、電気探査、電磁探査などの様々な物理探査法が適用され、鉬床の発見や鉬床規模の把握に貢献してきました。本文では、新たな試みとして弾性波を用いる微動探査の菱刈金鉬床への適用や、最新の技術である空中重力探査、空中電磁探査の地熱資源への適用事例などが紹介されています。

本小特集が読者の方々の今後の研究や業務に役立つことができれば幸いです。

広域地質図作成から見た 南九州の地質と菱刈鉦山の位置

齋藤 眞¹⁾

1. はじめに

九州南部(本稿では白杵 - 八代構造線以南の地域を指す)では、新生代の地質構造として、北東南西走向の正断層が卓越することが、地質学的によく知られるようになってきた(第1図)。しかしながら、活断層をはじめ新生代の地質構造が東西圧縮による逆断層・横ずれ断層主体の本州の地質に慣れた方にとっては、まさに別世界、別“島弧”の話であろう。菱刈鉦山の金鉦床の形成された1 Ma 前後の時代(Sanematsu *et al.*, 2005)も大枠ではこのテクトニクスの中にあると考えられる。今回は、菱刈鉦山の形成と南九州の後期中新世以降の地質構造について、これまで筆者が出版してきた5万分の1、20万分の1地質図幅の成果などに基づいて述べる。

2. 九州南部の地質概要

菱刈鉦山の鉦床の形成された前期更新世の九州南部の地質を考える上では、それまでに形成された地質構造の理解が重要である。九州南部では中期中新世の中期(約1,500万年前)に西日本の太平洋側(屋久島～山梨の金峰山に分布)で活動した珪長質火成岩類(いわゆる“外帯花崗岩”)の活動の影響を受け、その前後では、状況が大きく異なる。また、この珪長質火成岩類の活動の後、宮崎層群の堆積が始まる中期中新世の後期までの間、地質の記録がいったん途切れる。このため、中期中新世の中期に珪長質火成岩類が活動するまでと中期中新世の後期以降に分けて述べる。

2. 1. 中期中新世中期まで

九州南部の新生代後期の地質を考える上で、それまでに形成された地質構造の理解が重要である。先新第三系には、1) 付加体、2) 付加体を覆う正常堆積物、3) 付加体を大局的には水平に近い断層で構造的に覆う、いわゆる

“黒瀬川帯*”と呼ばれる古生代から中生代の地層群、からなる。付加体は構造的下位のものほど新しい時代に付加した特徴を持ち(齋藤ほか, 1996 など)、最も若い付加体は古第三紀/新第三紀境界付近の年代を持つ(齋藤ほか, 1994, 1997 など)。さらに九州南部では付加体の構造が水平に近い構造を持つため、構造的上位の付加体が下位の付加体の上に島状に取り残される「クリップ」構造が見られたり、削剥もあまり進んでいないために前弧海盆堆積物が付加体を覆って残存しているところがある。例として菱刈鉦山の母岩である堆積岩類は、後期白亜紀の前期、チューロニアン期の二枚貝化石であるイノセラムスを産する(早坂, 1999)ことから、薩摩半島南部や四国宇和島地域のような前弧海盆堆積物と考えられている(齋藤ほか, 2010)。九州南部は後期更新世の火砕流堆積物に広く覆われて、それ以前の地質構造が理解しにくいので、付加体形成後から火砕流堆積以前に形成された地質構造を認識するためには、これらの地質構造の理解は必須である。

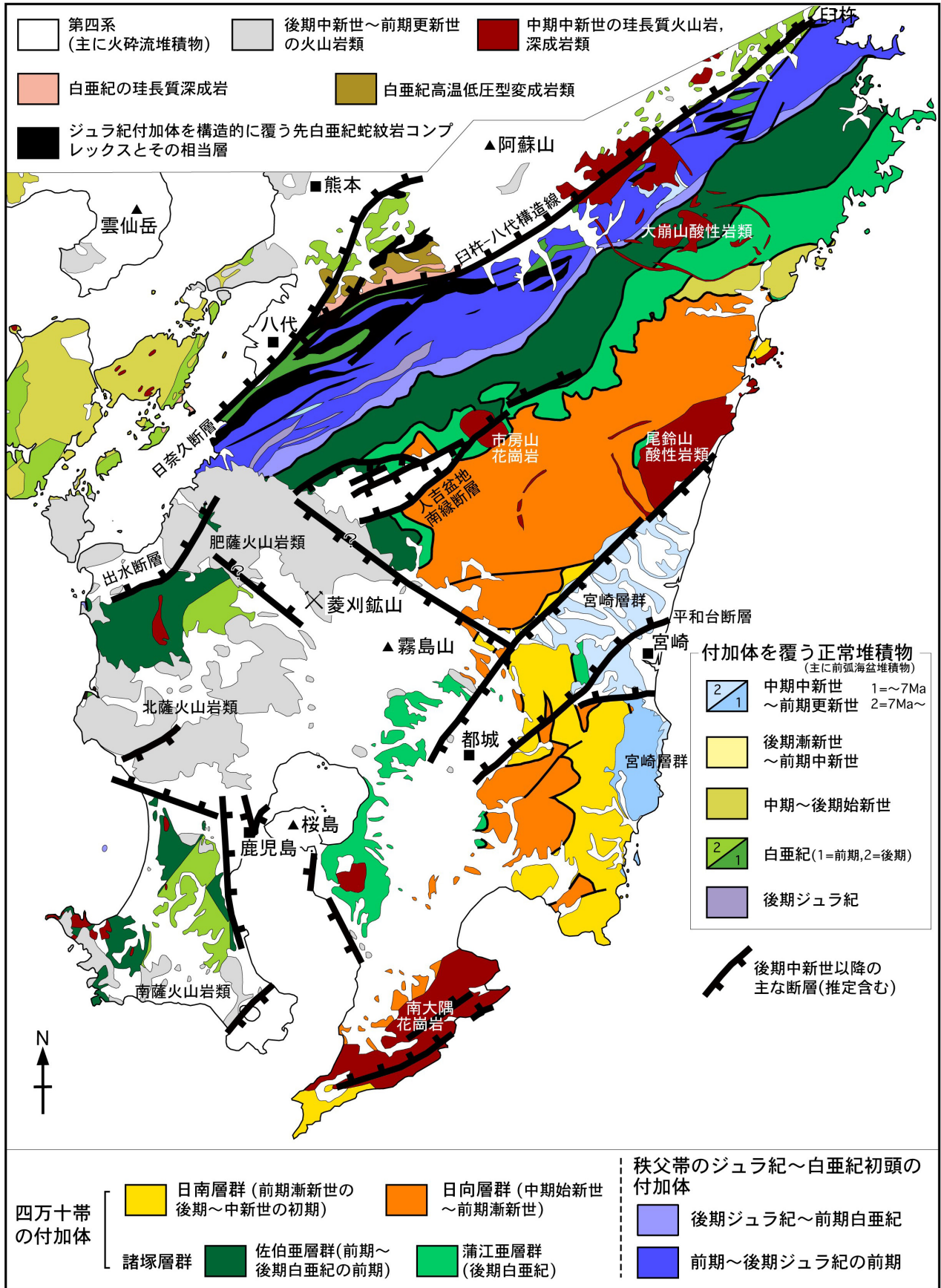
また、“秩父帯”のジュラ紀 - 前期白亜紀付加体を構造的に覆う“黒瀬川帯”の構成岩類はペルム紀付加体、前期古生代の深成岩類・変成岩類と、三畳紀～ジュラ紀の周防変成岩類及び石炭紀の蓮華変成岩類に対比される低温高压型変成岩、シルル紀 - 前期白亜紀正常堆積物からなることが知られ(齋藤ほか, 2005 など)、特に白杵 - 八代構造線の両側で三畳紀～ジュラ紀の周防変成岩類相当層が分布することは、九州の地質構造を考える上でも重要である(齋藤・宮崎, 2016)。

これら現在地表に存在する付加体の形成が終わった後、ほぼ同時期に南大隅花崗岩、市房山花崗岩、大崩山酸性岩類、尾鈴山酸性岩類などの中期中新世の珪長質火成岩類が活動し、後二者のようにコールドロンをつくるような大規模噴火を起こしたことが認識されるものもある。

* 付加体やそれらを構造的に覆う地質体が水平に近い構造をもつために分布域が帯状をなさないこと、“帯”は地層命名のガイドラインになく地層の区分名称としては不適切なことから、“帯”の名称は“付”きとした。

1) 産総研 地質調査総合センター 研究戦略部

キーワード：菱刈、広域地質、正断層、付加体、前弧海盆堆積物



第1図 九州南部の地質概略図。
 斎藤ほか(2005)を元に、斎藤ほか(2010)、宇都ほか(1997)、川辺ほか(2005)、川辺・阪口(2005)などの成果を用いて作成。

2. 2. 中期中新世の後期以降

中期中新世の後期 11-12 Ma 頃になると宮崎層群の堆積が始まる(鈴木, 1987). このころの宮崎層群は宮崎南方の^{わにつか}鱷塚山地東部に分布する. この時代の地層は, 南九州では宮崎層群に限られる. 後期中新世(7 Ma 頃)以降の宮崎層群の分布は宮崎平野に広がる. 宮崎平野の宮崎層群は, 鈴木(1987), 木野ほか(1984), 鳥井ほか(2000)などによれば, 後期中新世の 7-6 Ma 頃に堆積が始まる. 現在この宮崎層群は, 白亜紀~古第三紀付加体を不整合で覆うが, 北西端近くの北東方向の断層(一部は遠藤・鈴木, 1986 に図示)と, それに平行な宮崎市内を通る平和台断層(木野ほか, 1984)が地溝状の構造を作り, 宮崎平野南縁も断層で画される. またこれらの断層が^{みやこのじょう}都城盆地につながっていくことや, 付加体の褶曲軸を大きく変位させていないことが齋藤ほか(1997)で示されている. 7 Ma 以降の宮崎層群の分布域が, 宮崎平野に大きく広がること, 不整合近くに断層があることから, 7 Ma 以降の宮崎層群は正断層で画された平野部に発達してきたと考えられている(Miyazaki *et al.*, 2016). 一方, 九州南西部では, 薩摩半島南部に分布する^{なんざつ}南薩火山岩類が 7-6 Ma 頃, 鹿児島県-熊本県境界付近に分布する^{ひさつ}肥薩火山岩類が 7 Ma 頃に活動が始まるとされており(川辺ほか, 2005; 齋藤ほか, 2010), その後, 現在まで火山活動が続いている. これらの火山活動の開始時期は, 宮崎平野の宮崎層群の堆積開始時期とよく一致している.

3. 後期中新世以降の構造運動と菱刈鉱山の鉱脈

後期中新世以降の九州南部のテクトニクスについては, Tokushige and Fabbri(1996), Fabbri *et al.* (1997), Yamaji(2003)などが検討を行っている. Tokushige and Fabbri(1996)は宮崎層群の小断層解析から北西-南東の引張応力を受けたとし, 九州南部の鮮新世-更新世の火山岩類・堆積岩類にも同様の構造が存在することを示し, これらは中新世以降の沖縄トラフ周辺の引張応力場の影響と考えた. さらに Fabbri *et al.* (1997)は南大隅花崗岩中の断層が 12 Ma ~ 1 Ma の間に北西-南東ないし北北西-南南東の伸長による正断層とし, 同じ方向ではほぼ同時期の活動と考えられる断層(宮崎, 人吉など)の存在から九州中南部は同様の変形を受けたと考えた. 一方, Yamaji(2003)は, 宮崎平野の宮崎層群の解析から, 宮崎平野では前期鮮新世を境に東北東-西南西方向の圧縮場から, 西北西-東南東の伸長応力場に変化したとし, その要因は沈み込むスラブの後退によると考えた.

宮崎平野の宮崎層群の北西縁を画する正断層は第四紀にも活動している(遠藤・鈴木, 1986). 肥薩及び北薩火山岩類の分布地域では, 中期中新世以前の基盤岩類の高度が大きく下がっており, 断層が推定されているところもある(宇都ほか, 1997). 広域的な地質構造の観点からは, Fabbri *et al.* (1997)の言うように, 南大隅花崗岩を変位させる断層, 人吉盆地南縁断層など人吉盆地の形成に関わり市房山花崗岩を分断する断層(齋藤ほか, 1996, 2010), 薩摩半島の先端の池田湖の北西側に存在する断層(川辺・阪口, 2005; 川辺ほか, 2005)など, 後期中新世以降に北東-南西方向の正断層が九州南部で卓越し, おおむね南北引張の場に置かれたと考えることが妥当であろう. しかし, 沈み込むフィリピン海プレートの運動方向は 2-1 Ma に北北西向きから北西方向にかわったと考えられており(例えば Seno and Maruyama 1984; Yamazaki and Okamura 1989; Kamata and Kodama 1999), さらに現在, 九州南部のうち東部では地殻は西進し, 西部から南部は南進して地殻の運動方向の転換点にあり(Web1), その下には九州-パラオ海嶺が沈み込んでいる. このため鉱床形成時と現在の応力場は, 宮崎付近では少し異なっている可能性があるが, 九州南西部は現状も南北に延び鉱床形成時と調和的と考えられる.

菱刈鉱山の金鉱床の石英脈は北東-南西方向の走向を持ち, 後期中新世以降に九州南部に卓越する正断層の向きと一致する. さらに菱刈鉱床の縞状石英脈の各バンドは数万年の間隔で断続的に開いて形成されていることが知られており(Sanematsu *et al.*, 2005), 活動度が余り大きくない活断層の活動レベルである. また鉱脈の形成過程は火山活動と密接に関連があり火山フロントの位置の変遷が重要だが, 後期中新世以降, 霧島火山付近と阿蘇山との間には全く火山活動がなく, 活動は北薩^{ほくさつ}火山岩類の分布域から^{うと}宇土半島, 熊本につながる. このことは沈み込むプレートの形状が一様でないことを示している可能性がある. このような広域のテクトニクスも頭の隅に入れることが, 探鉱を進歩させるのかもしれない.

謝辞: 住友金属鉱山株式会社菱刈鉱山, 並びに住鉱資源開発株式会社には, 鉱山見学および意見交換会でたいへんお世話になった. ここに記してお礼申し上げる.

文 献

遠藤秀典・鈴木祐一郎(1986) 妻及び高鍋地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 105p.

- Fabbri, O., Tokushige, H. and Hayamizu, M. (1997) Normal faulting in the Middle Miocene Osumi granodioritic pluton, southern Kyushu, Japan, and its significance. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **103**, 141–153.
- 早坂祥三 (1999) 南九州四万十累帯からのイノセラムス化石. 自然愛護, **25**, 鹿児島県自然愛護協会, 表紙, 2–2.
- Kamata, H. and Kodama, K. (1999) Volcanic history and tectonics of the Southwest Japan Arc. *Island Arc*, **8**, 393–403.
- 川辺禎久・阪口圭一 (2005) 開聞岳地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 82p.
- 川辺禎久・阪口圭一・斎藤 眞・駒澤正夫・山崎俊嗣 (2005) 20 万分の 1 地質図幅「開聞岳及び黒島の一部」. 産総研地質調査総合センター.
- 木野義人・影山邦夫・奥村公男・遠藤秀典・福田 理・横山勝三 (1984) 宮崎地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 100p.
- Miyazaki, K., Ozaki, M., Saito, M and Toshimitsu, S. (2016) 2e The Kyushu-Ryukyuu Arc. In Moreno, T. *et al.* eds., *The Geology of Japan*, 139-174, Geol. Soc. London.
- 斎藤 眞・宮崎一博 (2016) 中央構造線に関する現在の知見—九州には中央構造線はない—. *GSJ 地質ニュース*, **5**, 175–178.
- 斎藤 眞・佐藤喜男・横山勝三 (1994) 末吉地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 111p.
- 斎藤 眞・木村克己・内藤一樹・酒井 彰 (1996) 椎葉村地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 地質調査所, 133p.
- 斎藤 眞・阪口圭一・駒澤正夫 (1997) 20 万分の 1 地質図幅「宮崎」. 地質調査所.
- 斎藤 眞・宮崎一博・利光誠一・星住英夫 (2005) 砥用地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 218p.
- 斎藤 眞・宝田晋治・利光誠一・水野清秀・宮崎一博・星住英夫・浜崎聡志・阪口圭一・大野哲二・村田泰章 (2010) 20 万分の 1 地質図幅「八代及び野母崎の一部」. 産総研地質調査総合センター.
- Sanematsu, K., Duncan, R., Imai, A. and Watanabe, K. (2005) Geochronological constraints using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on the mineralization of the Hishikari epithermal gold deposit, Japan. *Resource Geology*, **55**, 249–266.
- Seno, T. and Maruyama, S. (1984) Paleogeographic Reconstruction and Origin of the Philippine Sea. *Tectonophysics*, **102**, 53–84.
- 鈴木秀明 (1987) 宮崎層群の層位学的研究. 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, no. 90, 1–24.
- Tokushige, H. and Fabbri, O. (1996) Mesofaults and associated stress field in the Late Miocene to Pliocene forearc deposits of the Miyazaki district, southeast Kyushu, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **102**, 622–634.
- 鳥井真之・尾田太良・板谷徹丸 (2000) 宮崎層群に挟む凝灰岩層とその K-Ar 年代. *火山*, **45**, 131–148.
- 宇都浩三・阪口圭一・寺岡易司・奥村公男 (1997) 20 万分の 1 地質図幅「鹿児島」. 地質調査所.
- Yamaji, A. (2003) Slab rollback suggested by latest Miocene to Pliocene forearc stress and migration of volcanic front in southern Kyushu, northern Ryukyuu Arc. *Tectonophysics*, **364**, 9–24.
- Yamazaki, T. and Okamura, Y. (1989) Subducting seamounts and deformation of overriding forearc wedges around Japan. *Tectonophysics*, **160**, 207–229.

参照 WEB サイト

Web1 : <http://www.gsi.go.jp/cais/HIZUMI-hizumi6-100.html> (2016 年 12 月 22 日確認)

SAITO Makoto (2017) Geology of southern Kyushu by making wide-area geological maps, and position of the Hishikari Mine.

(受付: 2016 年 12 月 2 日)

鹿児島県菱刈金鉱床の氷長石—石英脈とその年代

実松健造¹⁾

1. はじめに

かつての日本には、多数の金銀鉱山や銅・鉛・亜鉛等の鉱山がありましたが、現在操業している金属鉱山は鹿児島県伊佐市にある菱刈金銀鉱山のみと言えます。菱刈鉱山の鉱石の平均金品位は世界でもトップクラスであり、発見当初からボナンザ(高品位)鉱床として有名です。金品位が高い鉱石を一時的に採掘することは他の金鉱山でも可能ですが、出鉱開始の1985年から安定して長年にわたって高品位鉱石を生産できる金鉱山は世界的にもまれです。現在も住友金属鉱山株式会社によって金鉱石の採掘が行われています。

菱刈鉱床は、浅熱水性鉱脈型金銀鉱床と分類されます。鉱脈のほとんど(90%以上)は石英から構成されるため、石英脈と呼ばれます。石英の他には氷長石やスメクタイト等の粘土が少量含まれます。この石英脈は、母岩である堆積岩(頁岩・砂岩)や安山岩中に生じた割れ目の中に熱水が浸入し、溶解度の低下によってSiO₂等が沈殿することによって形成されました(石英だけでなく、非晶質シリカも初生的にたくさん沈殿したと考えられるので、SiO₂と表現しています)。この時、金や銀を含む他の元素も沈殿するため、含金銀石英脈が形成されます。

地質調査総合センターは、2016年2月24日に菱刈鉱山において、住友金属鉱山株式会社および住友資源開発株式会社との意見交換会を行いました(写真1)。本稿では、その時の筆者の発表内容の一部を用いて、菱刈鉱床の含金銀石英脈がどのような時間スケールで形成されたかについて説明したいと思います。石英の放射年代測定は不可能ですが、菱刈鉱床では氷長石(KAISi₃O₈)が様々な石英脈中に金と一緒に産出するため、これを用いたK-Ar年代測定またはAr-Ar(⁴⁰Ar/³⁹Ar)年代測定による年代値が報告されています(例えば、Izawa *et al.*, 1993; Sekine *et al.*, 2002; Sanematsu *et al.*, 2005, 2006)。母岩中に割れ目が生じてから、熱水中のSiO₂等が沈殿して割れ目の大部分を充填するのが地質学的に短時間であったとすると、この氷長石—石英脈の年代値は、構造的に割れ目が形成された時期お



写真1 菱刈鉱山坑内見学時の集合写真(内田利弘氏提供)。後ろに見える石英脈は友泉6脈(海拔+110m)。

よび氷長石と一緒に金が沈殿した時期を示すこととなります。年代値と石英脈の構造から、当時の鉱床周辺地域の応力場を知ることが可能です。

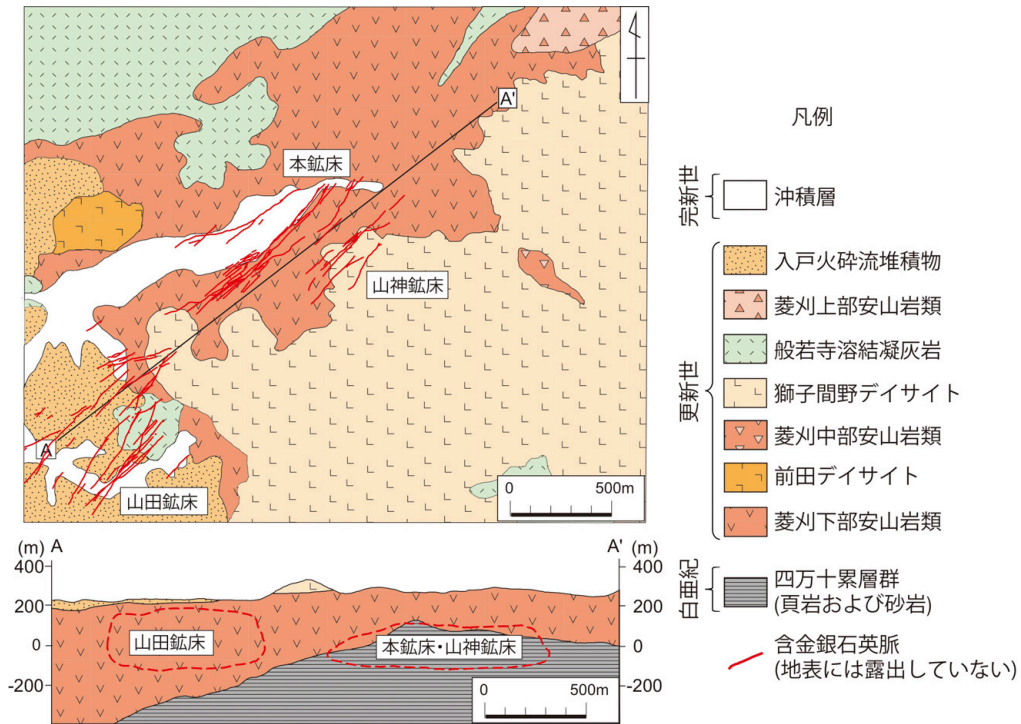
2. 菱刈鉱山の発見の経緯と特徴

菱刈鉱床の高品位石英脈は、1981年2月の金属鉱業事業団(現在のJOGMEC)のボーリング(55MAHT-5)によって発見されました。菱刈鉱床の周辺では、基盤岩である白亜紀の四万十累層群を第四紀の火山岩類が不整合に覆っています(第1図)。鉱床発見当時、それまでは浅熱水性金鉱床は一般に火山岩中に胚胎されるものと考えられており、深部の四万十累層群までボーリングを進める必要がないのではという意見もあったそうです。結果として、この時、四万十累層群まで掘り進めたところ、着脈幅15cm、金品位290g/t、銀品位167g/tの高品位含金石英脈が確認され(中山, 2004; 浦島, 2004)、関係者を驚かせました。

更なるボーリングに続き、石英脈の状況を詳しく把握するために、1982年からは探鉱坑道を掘り進め(坑口は海拔+265m)、1985年7月13日には海拔+100mで菱刈脈群に着脈しました(阿部ほか, 1986)。この日から同年

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: 菱刈, 金銀鉱床, 熱水, 割れ目, 石英脈, 氷長石, 年代, 鹿児島県



第1図 菱刈鉱床周辺の地質平面図および断面図 (NEDO, 1991; Ibaraki and Suzuki, 1993 を一部改変). 平面図上に石英脈 (住友金属鉱山株式会社, 2016) を投影して示している.

12月末日までの探鉱出鉱実績は、鉱石量 19,200 t、平均金品位 129 g/t、平均銀品位 171 g/t、すなわち産金量は約 2,500 kg であり (阿部ほか, 1986)、この実績からも世界的な高品位金鉱床であることが分かります。その後、出鉱する鉱石の平均金品位は徐々に下がったものの、現在でも十分に高品位です。2015 年は平均金品位 37 g/t で出鉱量 20.4 万 t、すなわち 7.5 t の金が生産されました (住友金属鉱山株式会社, 2016)。これまでの産金量は 224 t (2016 年 3 月時点) に達するのに加え、2015 年末の時点で可採金量が約 170 t とされており (住友金属鉱山株式会社, 2016)、まだ膨大な量の金が採掘可能な状態で鉱山内に眠っていることとなります。

最初に発見された鉱床は本鉱床と呼ばれ、その後、1988 年には本鉱床の南西部から山田鉱床が発見されました (第 1 図)。ちなみに、菱刈鉱床の探鉱の歴史は江戸時代の 1750 年代の、周辺の山田金山の試掘までさかのぼります (岡田, 2004)。当時から探鉱され、断続的に小規模に採掘されたと言われてはいますが、現在採掘されている主要な石英脈は地表までは達していません (岡田, 2004)。そのため、我々が知る菱刈鉱床の発見は 1981 年ということになります。

菱刈鉱山で採掘・破碎された後の粗鉱は、自動選別機 (オアソーター) による選別および人間による手選別により、

鉱石とそれ以外の廃石 (ズリ) に分けられます。鉱石は加治木港で船積みされ、愛媛県の東予工場に運ばれます。東予工場では、海外からの銅鉱石を製錬する際の融剤 (珪石) として菱刈鉱山の金鉱石が使用されます。電気銅を製造する過程で出てくる金や銀などが、別工程で回収されます。

菱刈鉱山では、後述するように第四紀の若い石英脈群を採掘しているため、鉱山内からは現在も約 65 ~ 80℃ の温泉水が湧き出ています。温泉水はポンプで汲み上げられて、パイプラインを通過して地元の湯之尾温泉に供給されています (写真 2)。鉱床が形成された当時は、熱水はより高温 (210℃ 前後) で金を多く含んでいましたが、現在湧き出ている温泉水中の金濃度は 0.6 ± 0.4 ppt と低く (Hayashi *et al.*, 1997)、金鉱床を作る熱水でないことが分かります。

3. 九州の火山活動と金鉱床の形成時期

九州は菱刈鉱床以外にも多数の浅熱水性金鉱床 (串木野、鯛生^{たいお}など) が存在し、そのほとんどが北九州地域の豊肥地溝および南九州の鹿児島地溝と平行に分布しています (渡辺, 2004)。これらの地域では、火山フロントは東側 (海溝側) に移動してきたことが火山岩の年代測定から分かっています (Izawa and Watanabe, 2001)。このこと



写真2 菱刈鉱山周辺の風景。水田が広がっている。手前に見えるパイプラインを通して鉱山から汲み上げられた温泉水が運ばれる。

は、ユーラシアプレートの下に沈み込むフィリピン海プレートの角度が急になったことを示唆しています。火山フロントは東側に移動してきているため、九州の現在の火山フロントの西側に金鉱床が発見されています。火山岩および金と同時期に晶出したと考えられる鉱物(氷長石、イライト、ミョウバン石)をK-Ar法により年代測定した結果、火山活動の開始時期から約50万年後に周辺に金鉱床が形成されたことが分かっています(Izawa and Watanabe, 2001)。

菱刈鉱床に着目すると、周辺には第四紀の火山岩(溶岩・凝灰岩)が分布しています(第1図)。その中で、獅子間の野デイサイトからは1.0～0.7 Ma(Izawa et al., 1990)、鉱床の母岩の一部である菱刈下部安山岩からは1.8～0.8 Ma(Izawa et al., 1990; NEDO, 1991; 通商産業省資源エネルギー庁, 1996)のK-Ar年代がそれぞれ求められています。菱刈鉱床の石英脈の年代は、氷長石のK-ArおよびAr-Ar年代測定により1.2～0.64 Maであることが分かっています(Izawa et al., 1993; Sekine et al., 2002; Sanematsu et al., 2005, 2006)。菱刈鉱床においても、火山活動の始まり(1.8 Ma頃)から、およそ50万年後に菱刈鉱床の含金石英脈が形成し始めたということが言えます。このように、火山活動と浅熱水性金鉱床の関係が時間・空間的に分かってくると、同様の金鉱床を探鉱する際に非常に役立ちます。

4. 菱刈鉱床の石英脈の特徴とその年代

菱刈鉱床の含金石英脈の大部分は走向がN50°Eで

あり、70°～90°北傾斜しています(阿部ほか, 1986; Izawa et al., 1990)。脈幅は0.4～4 mが一般的です(Izawa et al., 1990; Sekine et al., 2002)。鉱石鉱物として、エレクトラム(Au, Ag)、ナウマン鉱(Ag₂Se)、硫セレン銀鉱(Ag₄SeS)、濃紅銀鉱(Ag₃SbS₃)等が確認されます(Izawa et al., 1990, 2001)。脈石鉱物は大部分が石英で、氷長石やスメクタイトを含むことが多いです。

石英脈は縞状構造を示し、エレクトラム、銀鉱物、硫化物に富んだ縞(バンド)は銀黒バンドと呼ばれ、菱刈鉱床の高品位鉱石にしばしば見られる特徴です(写真3)。一方で、銀黒は見られずとも、粘土に富んでいて脆いバンドが高品位であることもあります。芳泉1脈という縞状石英脈は左右対称な構造を示しており、このような銀黒バンドや粘土バンドが見られ、かつ年代測定可能な氷長石が産出します(Izawa et al., 2001)。Sanematsu et al. (2006)は、芳泉1脈(海拔+62.5 mおよび-20 m)の氷長石のAr-Ar年代を測定し、各バンドがどのようなタイミングで形成されたのかを調べました(写真4)。その結果、各バンドは30,000年～110,000年の間隔で形成されており、芳泉1脈全体で、少なくとも260,000年かかったことが分かります(写真4)。その他のいくつかの氷長石-石英脈において、母岩際の最も古い年代と脈中央付近の最も新しいと思われる年代の差を計算したところ、誤差は多少大きいです。7,000±16,000年ないし320,000±30,000年でした(Sanematsu et al., 2005)。つまり、菱刈鉱床の縞状石英脈を構成する氷長石を含んだ各バンドは数万年の間隔で断続的に形成され、一つの石英脈が形成し終わるまでの時間は32万年以下というオーダーであったということが分かります。

各バンドが形成されたのは地質学的には短時間で、年代値の誤差内に収まると考えています。なぜなら、氷長石と一緒に産出する石英の組織が、割れ目が生じて熱水が浸入してきたときに、SiO₂が急激に沈殿した様子を示すことが多いからです。母岩中に割れ目が生じたのと、氷長石を含むバンドが形成されたのがほぼ同時であったと仮定すると、氷長石の年代は割れ目が形成された時の年代を示すこととなります。

石英脈を形成する割れ目は広域応力場の影響を受けます。南九州地域では、後期中新世から前期鮮新世にかけて、前弧域の応力場が圧縮から引張へと変わりました(Yamaji, 2003)。また、対馬を固定点としたGPSによる観測結果から、最近の南九州の鹿児島県付近の水平変位は南東方向に動いていることが分かっています(西村ほか, 1999)。菱刈鉱床で石英脈に充填されている割れ目は裂罅(垂直方

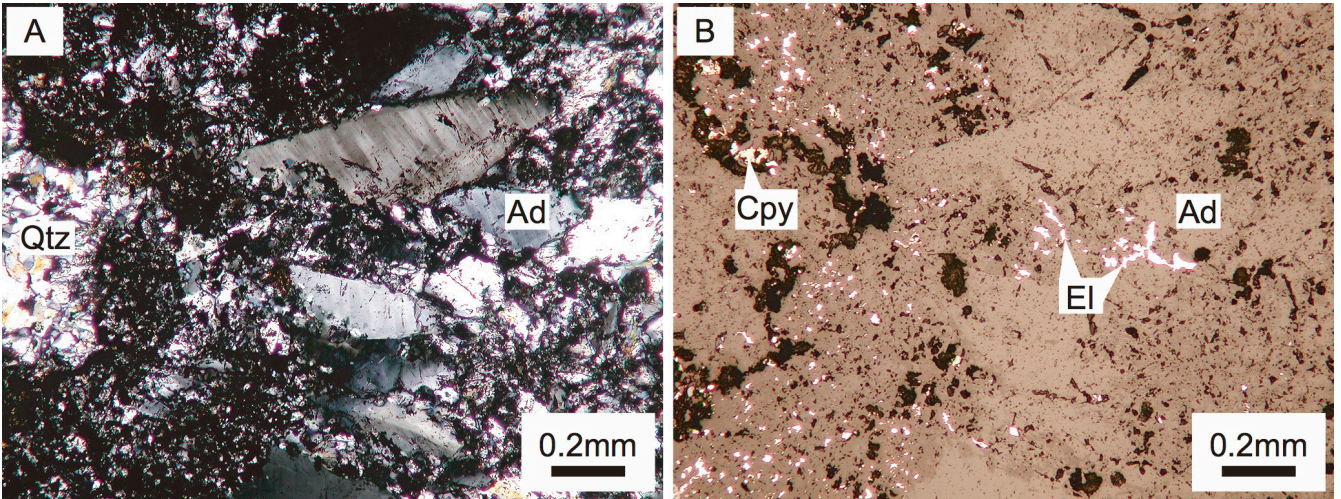


写真3 芳泉1脈(海拔+62.5 m)に見られる高品位バンドの(A)偏光顕微鏡(直交ニコル)写真および(B)反射顕微鏡写真(Sanematsu *et al.*, 2006 を一部改変). Ad, 氷長石; Qtz, 石英; El, エレクトラム; Cpy, 黄銅鉱.

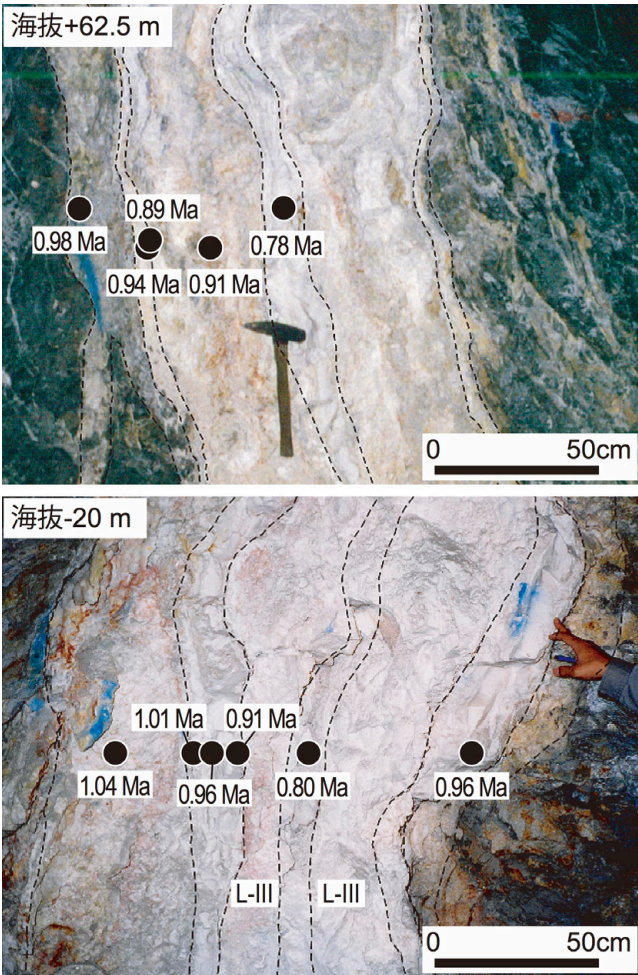


写真4 芳泉1脈の構造と Ar-Ar 年代値 (Sanematsu *et al.*, 2006 を一部改変). ほぼ左右対称の構造をしており, 断続的に割れ目が生じ, 盤際から石英脈が成長したことが分かる. 年代測定用の試料採取値を黒丸で示してある.

向の変位がない割れ目)が多く, このような引張応力場で生じた第四紀の割れ目に熱水が浸入して石英脈を形成したと考えられます.

引張応力場で形成された浅熱水性鉱脈型金鉱床は, 九州にもいくつか見られます. 例えば, 産金量 56 t の鹿児島県串木野鉱床や産金量 36 t の大分県鯛生鉱床は, それぞれ日本で 4 番目, 5 番目に大きい金鉱床です(渡辺, 2004). 金を含んだ熱水と, 金を沈殿させるための十分なスペース(割れ目)があれば, 金鉱床が形成されそうなのが想像できます. しかし, なぜ菱刈鉱床が他の鉱脈型金鉱床よりも金に富んでいるのかについては, 未だに謎が多いです. 熱水中で SiO_2 と金のナノ粒子が物理的に(溶けた状態ではなく)運搬され, 金が凝集したという考え方もあります(例えば, Saunders *et al.*, 2016). また, 菱刈鉱床の特徴の一つとして, 基盤岩である白亜紀の四万十累層群が盛り上がったところに存在しているということが挙げられます(Morishita and Nakano, 2008). それ自体では金に富む理由にはなりません, 例えば, Hosono and Nakano (2004) は鉱石, 火山岩, 堆積岩の Pb や Sr 同位体を分析し, 四万十累層群とさらにその下位の下部地殻との間にある地殻流体が, 獅子間野デイサイトが貫入した際のマグマ水と混ざって金に富む鉱化流体を形成したというモデルを作りました. このような深部(約 30 km)まではとてもボーリングはできませんし, 金鉱床ができた直接の証拠を見つけることは大変難しいです. 色々な手法を組み合わせ, 金に富む鉱床がどうやってできたのかを科学的に調べるという意味で, 菱刈鉱床は研究者にとっても魅力的な場所です.

謝辞：住友金属鉱山株式会社菱刈鉱山の高橋昭仁鉱山長、大和 裕探査課長、瀬戸隆之副探査課長、菅 琢磨氏、並びに住友金属資源開発株式会社の岡田和也社長、千葉昭彦氏、佐藤直樹氏には、鉱山見学および意見交換会でお世話になりました。改めてお礼申し上げます。

文 献

- 阿部一郎・鈴木英雄・磯上篤生・後藤寿幸(1986) 菱刈鉱山の地質と探鉱開発. 鉱山地質, **36**, 117-130.
- Hayashi, S., Nakao, S., Yokoyama, T. and Izawa, E. (1997) Concentration of gold in the current thermal water from the Hishikari gold deposit in Kyushu, Japan. *Resource Geology*, **47**, 231-233.
- Hosono, T. and Nakano, T. (2004) Pb-Sr isotopic evidence for contribution of deep crustal fluid to the Hishikari epithermal gold deposit, southwestern Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, **222**, 61-69.
- Ibaraki, K. and Suzuki, R. (1993) Gold-silver quartz-adularia veins of the Main, Yamada and Sanjin Deposits, Hishikari Gold Mine; A comparative study of their geology and ore deposits. *Resource Geology Special Issue*, **14**, 1-11.
- Izawa, E. and Watanabe, K. (2001) Overview of epithermal gold mineralization in Kyushu, Japan. Society of Economic Geologists Guidebook Series, **34**, 11-15.
- Izawa, E., Urashima, Y., Ibaraki, K., Suzuki, R., Yokoyama, T., Kawasaki, K., Koga, A. and Taguchi, S. (1990) The Hishikari gold deposit: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan. *Journal of Geochemical Exploration*, **36**, 1-56.
- Izawa, E., Kurihara, M. and Itaya, T. (1993) K-Ar ages and the initial Ar isotopic ratio of adularia-quartz veins from the Hishikari gold deposit, Japan. *Resource Geology Special Issue*, **14**, 63-69.
- Izawa, E., Etoh, J., Honda, M., Motomura, Y. and Sekine, R. (2001) Hishikari gold mineralization: a case study of the Hosen No.1 vein hosted by basement Shimanto sedimentary rocks, southern Kyushu, Japan. Society of Economic Geologists Guidebook Series, **34**, 21-30.
- Morishita, Y. and Nakano, T. (2008) Role of basement in epithermal deposits: the Kushikino and Hishikari gold deposits, southwestern Japan. *Ore Geology Reviews*, **34**, 597-609.
- 中山 建(2004) 北薩・串木野地域広域・精密調査の概要. 地質ニュース, no. 599, 11-19.
- NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) (1991) 地熱開発促進調査報告書, 菱刈地域. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 川崎, 982p.
- 西村 宗・安藤雅孝・宮崎真一(1999) 南海トラフ沿いのプレート間 カップリングと九州南部の南東向き運動について. 地震 第2輯, **51**, 443-456.
- 岡田和也(2004) 菱刈鉱山の開発および現況. 地質ニュース, no. 601, 16-27.
- Sanematsu, K., Duncan, R., Imai, A. and Watanabe, K. (2005) Geochronological constraints using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on the mineralization of the Hishikari epithermal gold deposit, Japan. *Resource Geology*, **55**, 249-266.
- Sanematsu, K., Watanabe, K., Duncan, R. A. and Izawa, E. (2006) The history of vein formation determined by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of adularia in the Hosen-1 vein at the Hishikari epithermal gold deposit, Japan. *Economic Geology*, **101**, 685-698.
- Saunders, J.A., Mathur, R., Kamenov, G.D., Shimizu, T. and Brueske, M.E. (2016) New isotopic evidence bearing on bonanza (Au-Ag) epithermal ore-forming processes. *Mineralium Deposita*, **51**, 1-11.
- Sekine, R., Izawa, E. and Watanabe, K. (2002) Timing of fracture formation of mineralization at the Hishikari deposit, southern Kyushu, Japan. *Resource Geology*, **52**, 395-404.
- 住友金属鉱山株式会社(2016) 菱刈鉱山パンフレット. 住友金属鉱山株式会社, 東京, 10p.
- 通商産業省資源エネルギー庁(1996) 平成7年度広域地質構造調査報告書 北薩・串木野地域. 通商産業省資源エネルギー庁, 東京, 153p.
- 浦島幸世(2004) 回想-北薩・串木野地域広域調査. 地質ニュース, no. 601, 1-2.
- 渡辺 寧(2004) 生きている九州- 浅熱水性金鉱床生成区の変遷. 地質ニュース, no. 599, 31-39.
- Yamaji, A. (2003) Slab rollback suggested by latest Miocene to Pliocene forearc stress and migration of volcanic front in southern Kyushu, northern Ryukyu Arc. *Tectonophysics*, **364**, 9-24.
- SANEMATSU Kenzo (2017) Adularia-quartz veins and their ages of the Hishikari gold deposit in Kagoshima Prefecture.

(受付:2016年12月22日)

住鉱資源開発株式会社における 新しい物理探査の取組み

岡田 和也¹⁾

1. はじめに

本稿は、2016年2月に菱刈^{ひしかり}鉱山で開催された産業技術総合研究所と住友金属鉱山株式会社との意見交換会において紹介した、住鉱資源開発株式会社で取り組んでいる新しい物理探査技術について述べたものである。住鉱資源開発株式会社は、試錐・物理探査を含む地質調査とその関連技術を主体とした資源・環境分野のコンサルタントとして、1963年に住友金属鉱山株式会社により設立された*。国内においては、住友金属鉱山株式会社の探鉱・開発プロジェクトや同社の保有する菱刈^{ひしかり}鉱山の探鉱・採鉱・開発において実績を重ね、地震・火山噴火予知のための観測網の整備関係業務や全国規模の地熱資源・鉱物資源調査・海洋資源探査などにも携わってきた。また、海外においては、資源確保および我が国政府による海外協力・援助のための金属鉱物、エネルギー、水資源調査などの業務を実施してきた。物理探査は、当社の設立当時から保有技術として重要な位置を占め、本稿で紹介する菱刈^{ひしかり}鉱山の発見およびその後の探査においても大きく貢献した。当社では、金属鉱物資源探査に用いられることの多い電気探査、電磁探査、重力探査等に加えて、近年、微動アレー探査、空中物理探査および3次元逆解析などの新しい技術に取り組んでいる。以下に、これらの新しい物理探査技術について具体的に紹介していく。

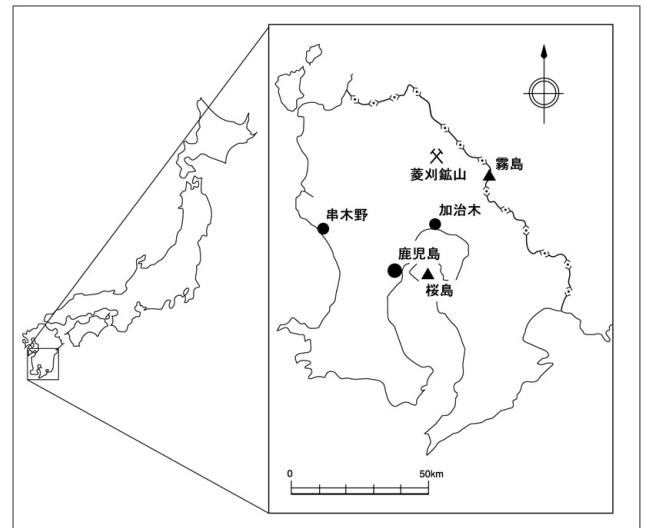
* 創立時の社名は住鉱コンサルタント株式会社、2010年に主たる業務を資源開発調査に特化して社名変更。

2. 菱刈^{ひしかり}鉱山の概要

菱刈^{ひしかり}鉱山は、鹿児島県の北東部に位置する(第1図)。同鉱山の年間生産量は、金量約7tであり、国内で産出される金量の9割以上を占め、総産金量においても1985年7月に出鉱を開始してから2015年3月末までに216.7t

を越える金を生産した我が国最大の金鉱山である。

菱刈^{ひしかり}地域の探鉱の歴史は、1750年代の馬越^{まごし}郷山田^{やまだ}金山の試掘まで遡るとされているが、現在開発されている主要な鉱床は潜頭性のものであり、1981年の鉱床発見および以降の開発において物理探査は重要な役割を演じている(岡田, 1998, 2004)。



第1図 菱刈^{ひしかり}鉱山の位置。

菱刈^{ひしかり}鉱山周辺の地質は、先新第三系の四万十累層群を基盤とし、これを不整合に覆う第四系の火山岩・火山砕屑岩類および沖積層から成る。四万十累層群は南九州の基盤をなしており、対象地域では頁岩と砂岩およびそれらの互層を主体とする。これらの岩石の露頭は鉱山付近では見られないが、試錐と坑道探鉱により海拔0m～130m(地表下100m～200m)に確認されている。第四紀火山岩は、下位より上位へ菱刈下部安山岩類、黒園山^{くろぞんざん}石英安山岩類、菱刈中部安山岩類、獅子間野^{ししまの}石英安山岩類および菱刈上部安山岩類である。菱刈下部安山岩類は、火砕岩、凝灰岩、安山岩溶岩を主体とし、四万十累層群を不整合に覆う。鉱

1) 住鉱資源開発株式会社

キーワード：微動アレー探査、空中重力探査、空中電磁探査、3次元逆解析、金属資源探査、地熱探査

床は、浅熱水性の含金銀石英水長石脈であり、砂岩、頁岩および安山岩中の割れ目を充填して分布する。

金鉱床発見の糸口となった物理探査では、広域重力探査、電気探査(シュランベルジャー法)、空中電磁法が実施された。また、SIP(Spectral IP)法、CSAMT(controlled source audio-frequency magnetotelluric)法による試験調査も行われ、鉱床周辺の物性的環境がある程度明らかにされた。これらの調査結果の検討から、鉱化帯と高重力異常、低比抵抗異常との関連が認められ、当地域の鉱床探査に対して物理探査の重要性が認識された(川崎ほか、1986)。菱刈鉱床に関わる物理探査上の知見は下記のとおりである。

(1) 高重力異常は、標高 130 m まで盛り上がった基盤(密度差 $0.2 \sim 0.25 \text{ g/cm}^3$)と解釈され、さらに、この盛り上がりは、火山活動に関連した基盤の局所的なドーム形成であると解釈される。基盤のドーム形成が裂隙を引き起こす可能性があるため、局所的な高重力異常は、探鉱上注目し得る指標である。

(2) 対象地域の比抵抗断面は、以下の三層構造によって特徴づけられる。比抵抗マッピングと直流法および電磁法を含む比抵抗サウンディングは、岩相および地質構造を把握する上で重要である。

- 1) 未変質の火山岩類に対応する高比抵抗(100 ~ 1,000 $\Omega \text{ m}$)の最上層
- 2) 変質した火山岩類に対応する低比抵抗(3 ~ 8 $\Omega \text{ m}$)の中間層
- 3) 基盤岩に対応する高比抵抗(80 ~ 200 $\Omega \text{ m}$)の最下層

(3) 低比抵抗帯中の IP 異常(高チャージビリティ異常)は、鉱化帯を探索する上で最も重要な指標である。IP 異常の原因については、なお議論の余地があるが、硫化鉱物、粘土および多孔質の岩石中に存在する導電性の熱水が関係して引き起こされる現象であると考えられる。

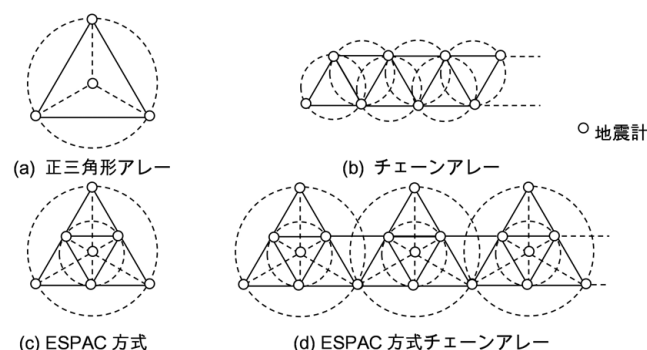
3. 微動アレー探査

地震活動が無い時でも、地表では人間が感じられない振幅の微動が発生している。土木地質調査分野・地震工学分野では、微動波形のスペクトル解析から表層地盤の卓越周波数や増幅特性を推定し、耐震設計のための資料として用いられてきた(物理探査学会、2008)。1970年代から、卓越する表面波に着目して S 波速度構造を推定する微動アレー探査が試みられ(工藤ほか、1976 等)、地震防災のための堆積平野地下構造調査を通じて実用化された(岡田

ほか、1990)。松岡ほか(1995)は詳細な地質構造解釈も可能な高精度 3 次元地下構造探査法へと発展させた。当社では、松岡ほか(2007)の現場解析システムを用いて、チェーンアレー探査(林ほか、2010)や平野部の地下構造調査、空洞調査等を行ってきた(南ほか、2011)。非鉄金属鉱床では地盤の弾性波動を利用した物理探査が使われることは少なく、日本国内で微動アレー探査が適用された報告はない。今回、菱刈鉱山地域において鉱床探査への適用性について検討したので、その概要について紹介する。

3.1. 調査方法

微動アレー探査は、第 2a 図に示すように、4 台の地震計を正三角形の頂点と重心に配置する正三角形アレーを基本とし、正三角形アレーを単独、もしくは複数組合せた多重アレーで測定を行う。本調査では、測線下の含金石英脈の位置を特定する目的で複数の正三角形を線状に並べて観測するチェーンアレー(第 2b 図)を採用し、これに加えて S 波速度構造も解析できる拡張空間自己相関法(以下、ESPAC 法)で用いるアレー(第 2c 図)を組み合わせた ESPAC 方式チェーンアレー(第 2d 図)も適用した。



第 2 図 微動アレー探査の地震計アレー様式例。

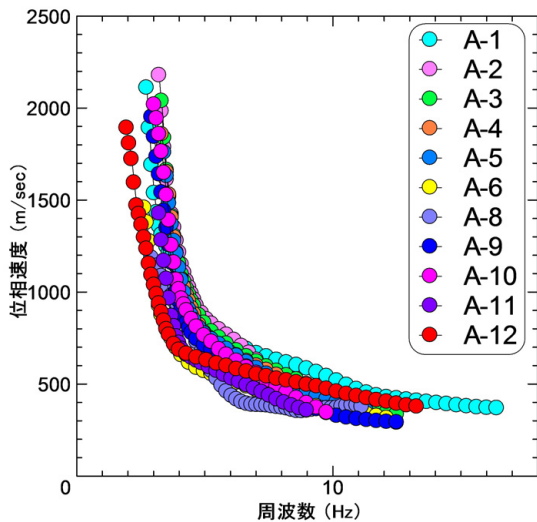
探査深度は第 2 図に破線で示す各正三角形の頂点が円周上に位置するような円の半径、言い換えれば正三角形の重心から各頂点までの距離に依存する。経験上、この半径は探査深度の $1/10 \sim 1/20$ が目安となるので、本試験の対象である四十累層群の上面深度が 200 ~ 800 m と想定して半径 15 ~ 40 m 程度とした。現地測定には、上下成分を測定する固有周期 7 秒の地震計を用い、20 分間の予備測定でノイズ状況等を確認した後に 40 ~ 60 分間の測定を行った。

3.2. 調査結果

測定データから空間自己相関法(SPAC 法)によって位

相速度を計算した結果(位相速度分散曲線)を第3図に示す。求めた位相速度は各周波数と位相速度から求まる波長の約1/2の深度の位相速度に相当するので、チェーンアレーによる測定を行った測線では、測点下の半波長に相当する深度に位相速度をプロットして位相速度断面図を作成した。さらに、ESPAC方式チェーンアレーを用いた測点では遺伝的アルゴリズムによる1次元逆解析で測点下のS波速度構造を求めた。ここでは、菱刈鉱山の本鉱床を横断する測線(本鉱床横断測線と記す)の探査結果を紹介する。

本鉱床横断測線の位相速度断面図と各測点でのS波速度構造を第4図に示す。調査地区周辺は、大局的には基盤の四万十累層群と、それを不整合に覆う菱刈下部安山岩類の2層構造として考えることができる。菱刈鉱山内で確認された四万十累層群の上面深度を位相速度断面図に重



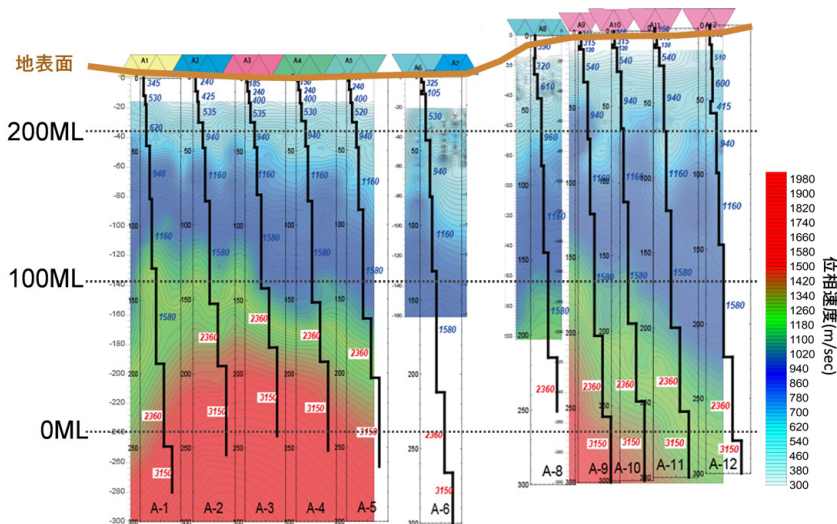
第3図 菱刈鉱山の本鉱床横断測線の位相速度分散曲線。

ねたものを第5図に示す。第5図では、S波速度が2,300 m/sの速度層の上面が四万十累層群の上面深度と調和的である。他の測線では、2,300 m/s速度層の上面が基盤深度と調和的である測点と、1,550 m/s速度層の上面が基盤深度と調和的である測点とに分かれた例も認められた。周辺で採取した四万十累層群の岩石試料のP波速度を測定すると、速度分布頻度の極大値が2群に分かれたことから、四万十累層群のS波速度も一様ではなく、概ね2群の速度帯に分かれて分布すると考えられる。以上の結果から、微動アレー探査によって鉱床を規制する基盤の上面深度を捉えられることが確認できたと言える。

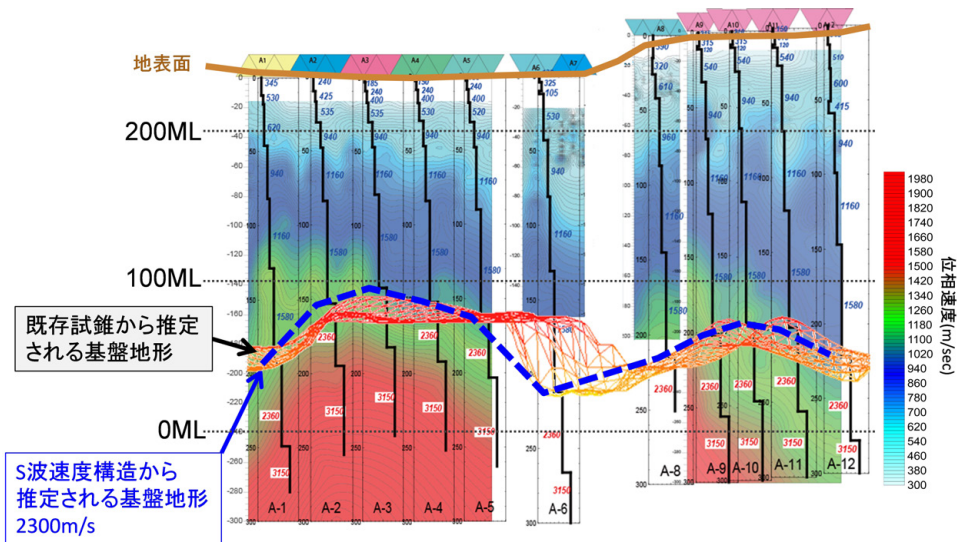
第6図に本鉱床横断測線の周辺の鉱脈位置を示す。鉱脈が分布する付近は深部の高位相速度層(赤色部)が盛り上がった箇所に対応する。また、鉱脈直上の測点では、第6図の位相速度分散曲線上に赤矢印で示したように、4~5Hzの低周波数帯で、表面波の基本モードの理論曲線では表すことができない高次モードの信号の混入が認められる。一方、直下に鉱脈が存在しない測点では高次モードの混入は認められない。以上から、微動アレー探査の位相速度分散曲線から鉱脈の位置を推定できる可能性が示唆された。

4. 空中物理探査

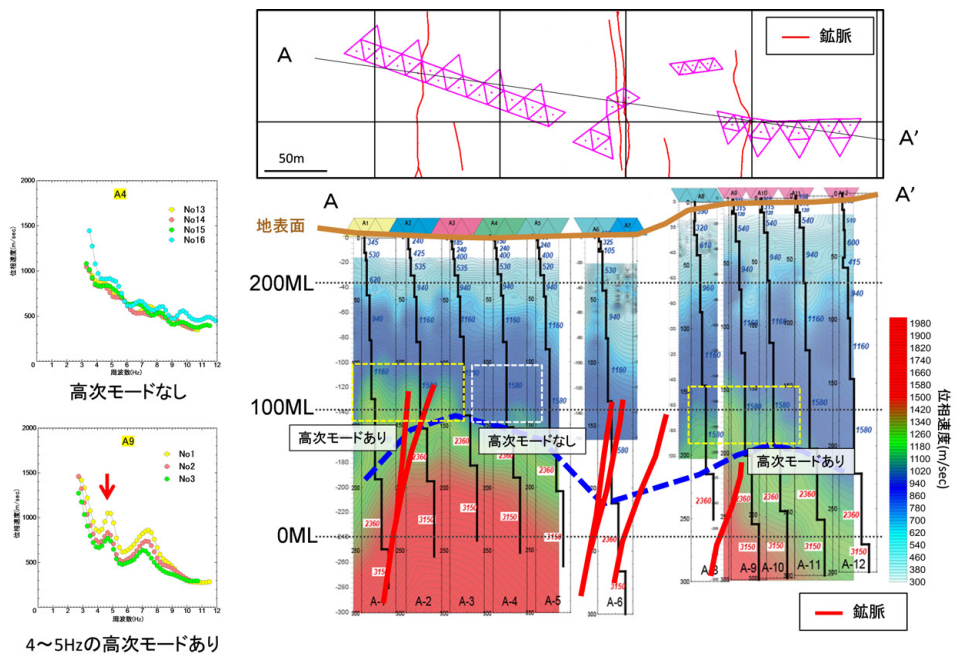
当社の前身である住鉱コンサルタント株式会社は、1970年代に自社で空中探査用の航空機を保有し、国内外で空中磁気探査や放射能探査を実施した。金属鉱業事業団(現 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、以下JOGMEC)は、1977年に周波数領域空中電磁法を日本に初めて導入した際、現在の菱刈鉱山を含む北薩地域の



第4図 本鉱床横断測線の位相速度断面図(カラー表示)と各測点のS波速度構造曲線(黒線)。



第5図 鉱山内で確認された本鉱床横断測線下の基盤(四万十層群)の上面深度(破線)とS波速度構造の比較。



第6図 鉱山内で確認された鉱脈の位置を位相速度断面図に投影して表示。微動アレーの配置(上)と特徴的な位相速度分散曲線の例(左)も示す。

探査に同法を適用した。JOGMECは、2013年からFugro Airborne Surveys社(当時)が運用する空中重力偏差法FALCONシステムと時間領域空中電磁法HeliTEMシステムを用いて地熱有望地域を抽出する調査を行っている。両システムとも、日本に初めて導入された空中物理探査法であり、現在はCGG社によって運用されている。当社は、株式会社フグロジャパン、CGG社、中日本航空株式会社と共にこの空中物理探査法による広域の地熱ポテンシャル評価調査に参画しており、本稿ではその概要を紹介する。

4. 1. 空中重力偏差法

重力探査は、資源分野を含めた実用という観点からは、重力そのものの測定よりも重力偏差の測定の方が歴史が古く、1890年にハンガリーの物理学者Loránd von Eötvösによって捻れ秤による重力偏差計が発明され、重力偏差の測定・応用研究の端緒が開かれた。重力偏差を用いた探鉱は、20世紀前半に活発に行なわれ、米国の石油探鉱においては、その件数は地震探査に匹敵するほどであった。しかし、捻れ秤による重力偏差の測定には長時間を要し、探

査能率が1日当たり数点と低かったため、10倍以上の探査能率を実現するスプリング式の可搬型重力計が1949年に開発されて以降は、重力偏差計は探鉱には殆ど利用されなくなった。重力偏差計が再び脚光を浴びるのは、本稿で紹介するFALCON (Lee, 2001; Dransfield and Lee, 2004) のような空中重力偏差計 (Airborne Gravity Gradiometer, 以下AGG) が実用化されてからである。FALCONは、1970年代に開始された米海軍の研究においてLockheed Martin社が開発した空中重力探査システム(1987年に初飛行)を発展させたものであり、BHP Billiton社が1991年から実現可能性調査を行い、1997年に初の飛行実験が実施された(岡田, 2001)。BHP Billiton社はAGG技術を独占的に用いて探鉱する権利を有し、J/V探鉱のパートナーに限定して利用させてきたが、2010年からFugro社によりFALCONの広範な商用利用が開始され、さらに2012年にCGG社に事業移転された。ただし、前述の通り、本技術は元々は米海軍ミサイル原潜のために開発された軍事技術を転用したものであり、測定機は勿論、データの取扱いについても米政府による厳しい制限が設けられている。

重力偏差計FALCONは、現在5台が運用中で、それぞれに高名な物理学者の名が冠せられているが、1~3号機(Einstein, Newton, Galileo)が固定翼機搭載型で、4~5号機(Feynman, Cavendish)がヘリコプター搭載用に小型化と回路のデジタル化が図られた機種であり、HeliFALCONと呼ばれる。本稿で紹介するJOGMECの地熱調査(JOGMEC, 2014)では、山岳地帯で詳細な探査を行うために、HeliFALCONを用い、原則として対地高度150mで飛行しながら測定を行った(第7図)。FALCONの測定機構やデータ処理の方法については千葉・Cevallos(2016)に詳しい。

地表で実施する重力探査では第8図に示す重力異常ベクトル \mathbf{g} の鉛直成分 g_D の異常を測定するが、AGGでは重力偏差テンソル \mathbf{G} の互いに独立な6成分 G_{NN} , G_{NE} , G_{ND} , G_{EE} , G_{ED} 及び G_{DD} を測定する。 G_{DD} は鉛直重力偏差とよ



第7図 地熱資源調査に用いた重力偏差計と測定方法。

ばれ、地下の密度分布を最もよく表していることから、鉛直重力偏差分布図を使って地下構造を定性的に推定することが多い。

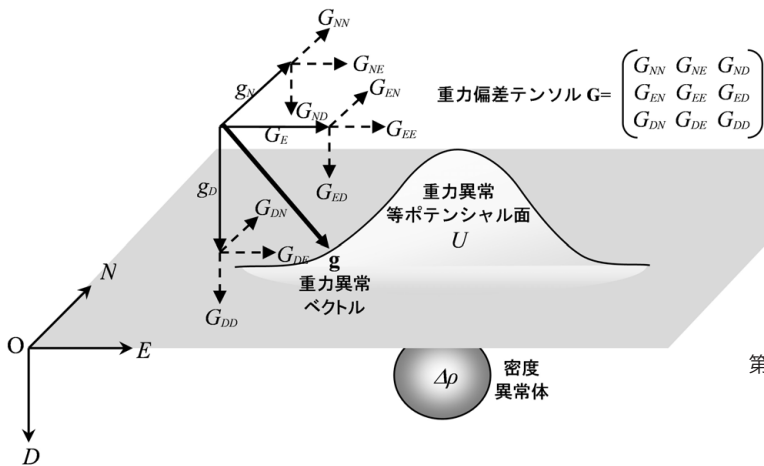
今回、空中重力偏差法を日本で初めて適用するに当たり、同手法の適用性の評価も行うため、参照できる既存データが多い地熱発電所を含む地域から探査を開始した。滝上、大岳、八丁原の3つの地熱発電所が位置するくじゅう地域を例に、鉛直重力偏差分布の解釈結果と既知の地質構造を重ねた総合解析図を第9図に示す。調査地域全体においては測線間隔250mの南北測線、大岳、八丁原を含む精査地域においては測線間隔125mの南北測線を設定し、測線方向には3~5m間隔でデータを取得した。鉛直重力偏差分布から解釈される線状構造は、既知の断層やリニアメントと調和的であり、各地熱発電所は高鉛直重力偏差異常内もしくは周辺に位置している。

空中重力偏差法では重力偏差だけでなく、重力異常の鉛直成分 g_D も算出される。くじゅう地域では200~500mの測点間隔で比較的密な地表重力探査が実施されているので、地表の重力異常分布を空中重力偏差法の飛行高度に上方接続し、空中重力偏差法の重力異常分布と比較した。その結果、空中重力偏差法から得られた重力異常と地表重力探査から求めた重力異常の相違は±5mgal以下に収まり、同データの妥当性を確認することができた。

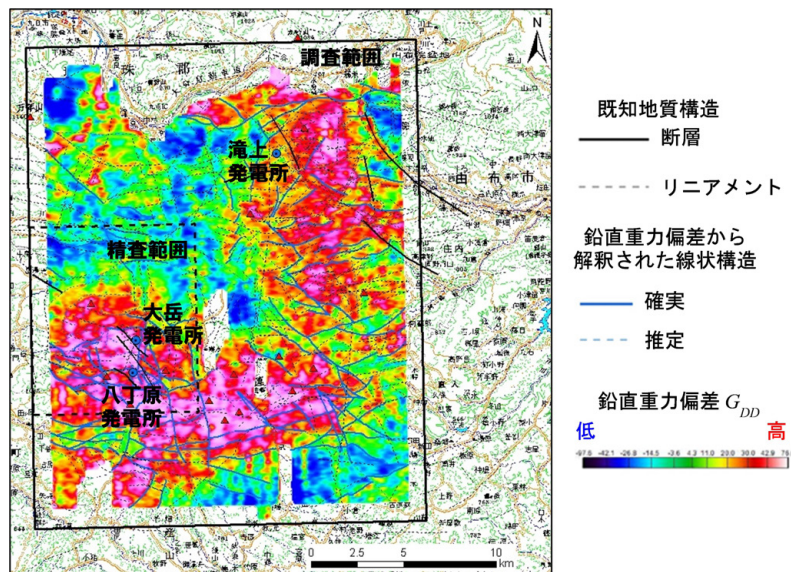
4.2. 時間領域空中電磁法

地下における電磁波の応答を利用して地下構造を調査する電磁探査法は、周波数領域電磁法と時間領域電磁法に大別される。時間領域空中電磁法は、第10図に示すように、送信ループにパルス電流を流して電磁波を発生させ、電流を遮断した後、受信機で観測される磁場減衰の時間変化を用いて地下の電気特性を調べる。電流遮断直後の磁場は地下浅部、遅くなるほど深部の電気特性に対応する。

本調査に適用した時間領域空中電磁法 HeliTEM は、第11図に示すように、直径30mの送信ループをヘリコプターに吊るして、ループの対地高度が70mになるように曳航しながら測定を行う。第10a図に示したような半正弦波パルス電流を繰り返し周波数30Hzもしくは25Hzで流して電磁波を発生させる。電流切断後の磁場の変化をヘリコプターと送信ループの間に取り付けた受信機で観測する。受信機内には互いに直交する3本のコイルが設置されており、飛行方向、飛行方向に直交する水平方向、鉛直方向の計3成分の磁場変動を測定する。測定した磁場変動は、30個の時分割(チャンネル)データとして記録される。また、時間領域空中電磁法の計測と同時に、送信ルー



第8図 重力異常ベクトル，重力異常ポテンシャルおよび重力偏差テンソル (千葉・Cevallos (2016) に加筆).



第9図 くじゅう地域の鉛直重力偏差 G_{DD} の総合解析図 (JOGMEC (2014) に加筆).

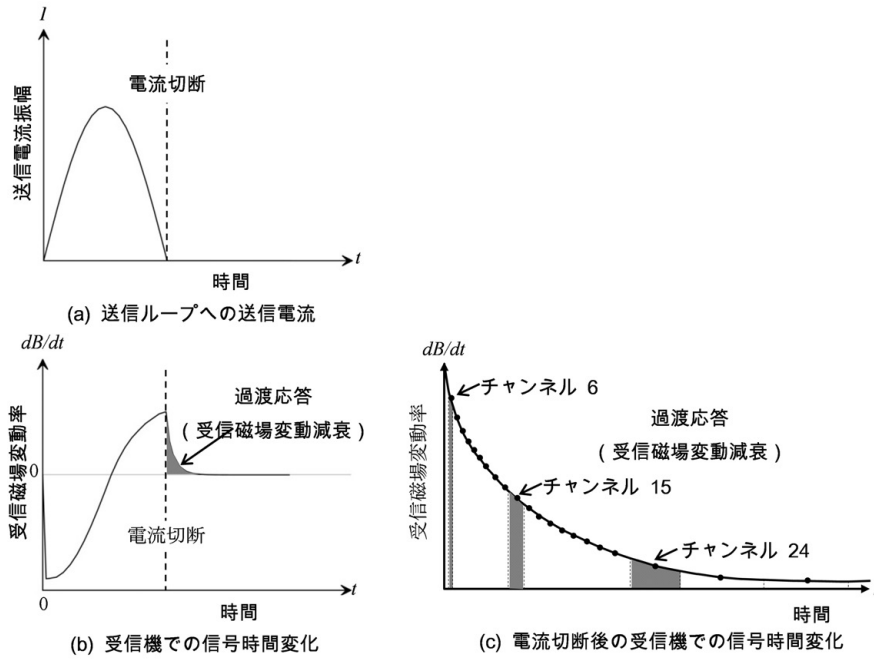
プの内側に取り付けた全磁力計で地磁気を計測している。

時間領域空中電磁法では、まず、チャンネル毎に測点の鉛直磁場 (dB/dt) をプロットして平面分布を求め、定性的に地下の比抵抗分布を推定する。HeliTEM で計測した 30 チャンネルのデータ (dB/dt) から浅部、中部、深部を代表する 3 個のチャンネルを選択し、それぞれに赤緑青 (RGB) の各色を割り当てて擬似カラー画像として合成することで 3 次元的な比抵抗構造の特徴を定性的に把握した。第 12 図に、くじゅう地域の鉛直磁場の擬似カラー画像と地表で確認された変質帯の分布を重ねて示す。白っぽい部分は、3 個のチャンネルの応答が全て高く、観測時間帯全般に亘って dB/dt が高く連続する、すなわち低比抵抗帯が浅部から深部へ連続する事を意味するが、それらの分布は既知の変質帯の分布と調和的である。時間領域空中電磁法で捉えられる低比抵抗帯は、大規模な変質帯すなわち地熱貯留層の帽岩が分布する可能性の把握に利用できると考えられる。

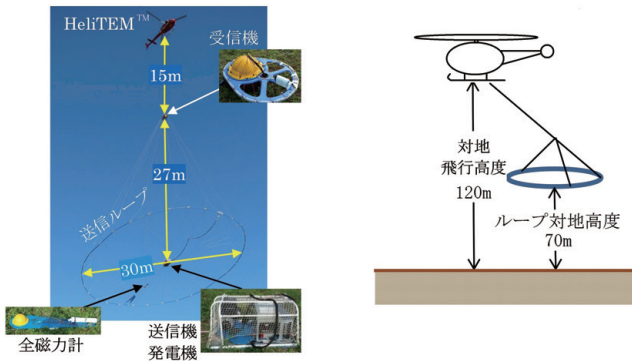
時間領域空中電磁法と同時に実施した空中磁気探査では、低磁気異常が変質帯の分布と調和的であり、比抵抗と同様に地熱貯留層の帽岩の分布を探査する上で有効な指標になりうる。

5. 3次元解析

物理探査データの逆解析では、従来実施されてきた 1 次元および 2 次元の逆解析に加えて、物性の 3 次元分布を推定する逆解析の適用が増えてきている。3 次元逆解析は、3 次元的に不均質な地質構造を解析できる利点があるものの、伝統的な解析法で精度の高い解析を行うには膨大な計算時間がかかるため、極めて高性能の計算機を用いたり、計算時間を節約するために精度を落として計算したりすることが多かった。最近では、計算機性能の向上や計算方法の高度化によって計算時間が短くなったものの、入力



第 10 図 HelixTEM の送信電流波形と受信信号波形。



第 11 図 時間領域空中電磁法システムと測定方法。

データ数が多かったり、解析範囲が広がったりする場合は、数日間や数週間の解析時間を要することもある。当社は、世界最新鋭の解析技術を有する米国 TechnoImaging 社と提携して、電磁法や空中重力偏差法の 3 次元逆解析を行っている。本稿では時間領域空中電磁法と MT 法の 3 次元逆解析の例について紹介する。

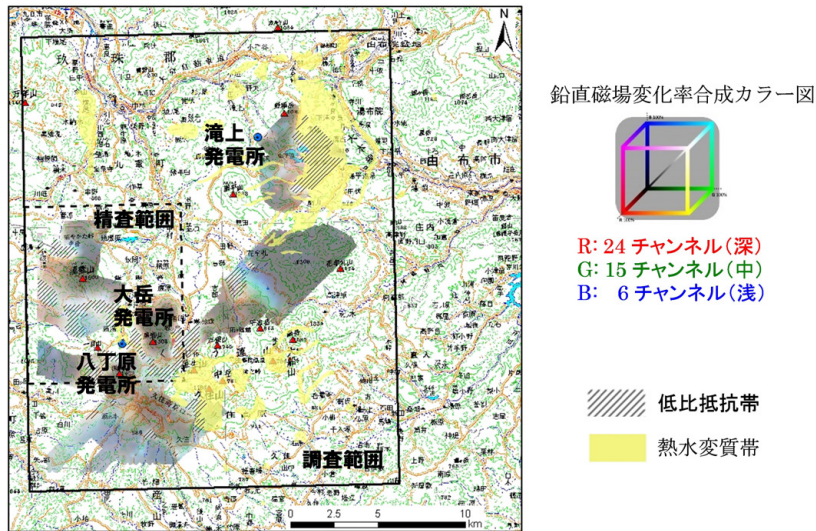
5. 1. 時間領域空中電磁法

空中電磁法は、地表で行う電磁法に比べてデータ量が膨大であり、解析範囲も広いことが多く、1 次元逆解析ですら長時間を要する。そのため、たとえば、豪州では同国で開発された簡易的な 1 次元解析ソフトウェアである EM-Flow を用いて定量解析が行われることが多い。本稿で紹介したくじゅう地域における時間領域空中電磁法探査で

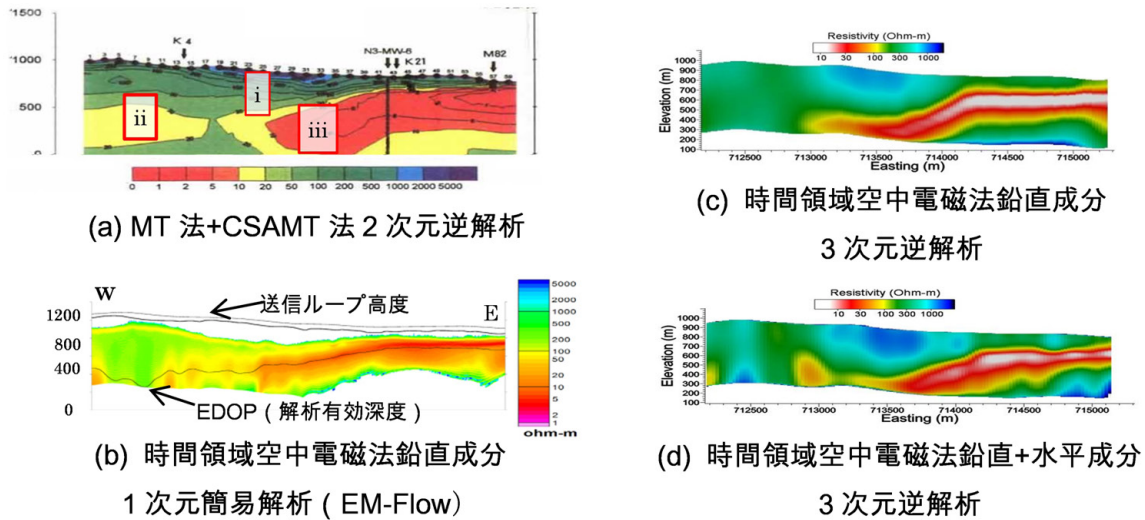
は、既往の MT 法・CSAMT 法の 2 次元ジョイント逆解析が行われた測線に沿って測定を実施した。当該の測定結果を用いて 3 次元逆解析を実施し、EM-flow による解析結果や既往の 2 次元逆解析結果と比較した (Nogami *et al.*, 2015; 第 13 図)。HelixTEM データの EM-Flow による解析結果 (第 13b 図) は、第 13a 図に示した既往の地表電磁探査データの逆解析結果と大局的には調和するものの、浅部の高比抵抗層が十分に捉えられていない他、深部の低比抵抗層にも相違が認められる。第 13c 図は HelixTEM の鉛直磁場のみを使って 3 次元逆解析を行った結果であるが、浅部の高比抵抗層も明確に捉えられている。第 13d 図は、鉛直磁場だけでなく測線方向の水平磁場も使って 3 次元逆解析を行った結果である。第 13c 図の解析では第 13a 図に示した ii の深部低比抵抗帯が捉えられていなかったが、第 13d 図では捉えられており、最も良好な結果が得られたと評価できる。

5. 2. MT 法

MT 法では、互いに直交する水平電場 2 成分と水平磁場 2 成分および垂直磁場 1 成分の計 5 成分を時系列で観測し、各成分のデータを周波数解析して、周波数毎にインピーダンスとティッパーを求める。地下構造が 2 次元の場合、走向に沿った電場とそれに直交する磁場から求まるインピーダンスを TE モードのインピーダンスと呼び、走向に直交する電場とそれに直交する磁場から求まるインピーダンスを TM モードのインピーダンスと呼ぶ。1 次元ないし



第 12 図 くじゅう地域の時間領域空中電磁法で抽出された低比抵抗帯と地表の熱水変質帯 (JOGMEC (2015) に加筆)。



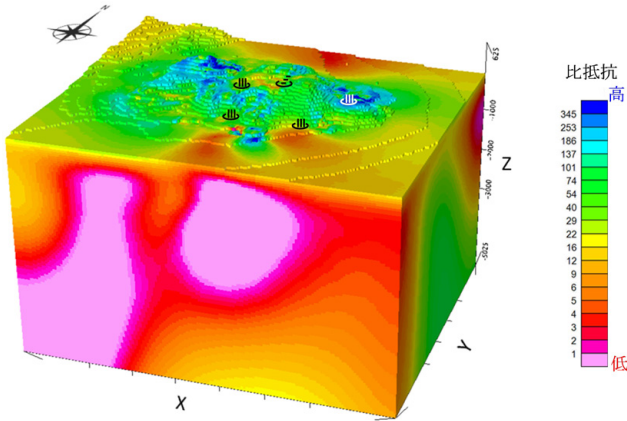
第 13 図 時間領域空中電磁法の 3 種類の比抵抗解析断面と地表 MT 法 2 次元解析断面 (Nogami et al. (2015) に加筆)。

2次元逆解析では、地下構造を2次元と見做せない場合においても、地下構造の大局的な走向にインピーダンスを回転してTE, TMのそれぞれのモードを定めるが、その選び方に任意性があるため、解析者による走向の選択によって解析結果が左右されることがありうる。一方、3次元逆解析では、走向を前もって決めておく必要が無いので、その選択に関する解析者の任意性は介在しない。このような3次元逆解析の利点に着目して、その適用事例が近年増えてきた。第14図に地熱探査を目的に実施したMT法探査データの3次元逆解析の例を示す。MT法は大深度かつ大規模な地下構造を対象とする場合が多く、その解析においては、深度や平面上の距離に比較して相対的に変化が小さ

い地形を考慮しない事も多いが、この例では地形も考慮して3次元逆解析を実施した。火山体の浅部には溶岩層に相当する高比抵抗層、温泉や噴気が関連すると考えられる深部の低比抵抗帯の3次元的な形状が詳細に捉えられている。

6. おわりに

本稿では、住鉱資源開発株式会社における物理探査に関する新しい取組みを紹介したが、地球科学に携わる諸兄の参考になれば幸甚である。また、当社においては、これらの取組みの他にも、空中でMT法と同じように地磁気変動



第 14 図 地形も考慮した MT 法 3 次元逆解析の例。

を測定する ZTEM 法と、地表の MT 法を組み合わせ、一般的な時間領域空中電磁法よりさらに深部の探査を可能にする試みなど、さらなる技術開発を続けており、さらに、このような新たな取組みを活かした地質的な解釈を含めて、地質調査技術についても最新のデータや技術の活用に取り組んでいる。今後、技術の進化に向けて、内外の研究機関との交流も活発にしていきたい。

謝辞：本稿に使用した各種データの使用には、住友金属鉱山株式会社菱刈鉱山、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構および株式会社レノバのご承認を頂いた。また、本稿を纏めるに当たって住鉱資源開発株式会社の千葉昭彦氏に助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。最後に、本稿執筆に機会を与えて頂いた国立研究開発法人産業技術総合研究所の各位に御礼を申し上げる。

文 献

物理探査学会 (2008) 第 5 章 微動アレイ探査. 新版物理探査適用の手引(土木物理探査マニュアル 2008), 111-126.

千葉昭彦・Cevallos, C. (2016) 空中重力偏差法探査の概要と現状. 物理探査, 69, 5-18.

Dransfield, M. H. and Lee, J. B. (2004) The FALCON airborne gravity gradiometer systems, Abstracts from the ASEG-PESA. Airborne Gravity 2004 Workshop, 15-20.

林 久夫・松岡達郎・水落幸広・小野雅弘 (2010) 微動アレイ探査法の拡張の試み—チェーンアレイ探査法の適用について—. 地盤工学会誌, 58, 10-13.

JOGMEC (2014) 平成 24 年度「地熱資源ポテンシャル

調査のための空中物理探査」報告書. 179p.

JOGMEC (2015) 平成 26 年度地熱資源ポテンシャル調査のための空中物理探査(九州 2 地域における時間領域電磁探査)業務報告書. 212p.

川崎 潔・岡田和也・窪田 亮 (1986) 菱刈鉱山における物理探査. 鉱山地質, 36, 131-147.

工藤一嘉・太田 裕・後藤典俊・鏡味洋史・塩野計司・坂尻直巳・成瀬聖慈・出原孝示・竹内文朗 (1976) やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (4) - Array 観測による微動伝播性の検討 -. 地震 II, 29, 323-337.

Lee, J. B. (2001) FALCON gravity gradiometer technology, Extended Abstracts of ASEG 15th Geophysical Conference and Exhibition, 4p.

松岡達郎・梅沢夏実・巻島秀男 (1995) 空間自己相関法による浅い地下構造の推定. 物理探査学会第 92 回学術講演会論文集, 149-153.

松岡達郎・白石英孝・中村光宣・佐坂公規・八戸昭一 (2007) 地下構造データベースを利用した微動探査法現場解析システムの開発. 物理探査学会第 116 回学術講演会論文集, 243-246.

南雄一郎・水落幸広・松岡達郎・原口 強・元木健太 (2011) 微動アレイ探査法による大阪平野都市域全域の深部 S 波速度構造の推定. 応用地質, 55, 110-117.

Nogami, S., Endo, M., Cox, L. H., Kuwamura, J. and Chiba, A. (2015) 3D inversion of HELITEM data in geothermal area, Japan, Proceedings of the 12th SEGJ International Symposium, Paper S4-4, 4p.

岡田和也 (1998) 金属資源の探査, 2. 鉱床別探査の実例, 2.1 浅熱水性金鉱床, 2.1.1 菱刈鉱山. 物理探査ハンドブック, 物理探査学会, 1018-1024.

岡田和也 (2001) オーストラリアにおける金属資源開発と物理探査技術を取り巻く状況. 物理探査, 54, 315-327.

岡田和也 (2004) 菱刈鉱山の開発および現況. 地質ニュース, No. 601, 16-27.

岡田 広・松島 健・森谷武男・笹谷 努 (1990) 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法, 物理探査, 43, 402-417.

OKADA Kazuya (2017) Efforts aimed at applying new geophysical technologies to mineral and geothermal exploration in Japan by Sumiko Resources Exploration & Development Co., Ltd.

(受付: 2016 年 12 月 2 日)

関東の地球化学図

今井 登¹⁾・岡井貴司¹⁾

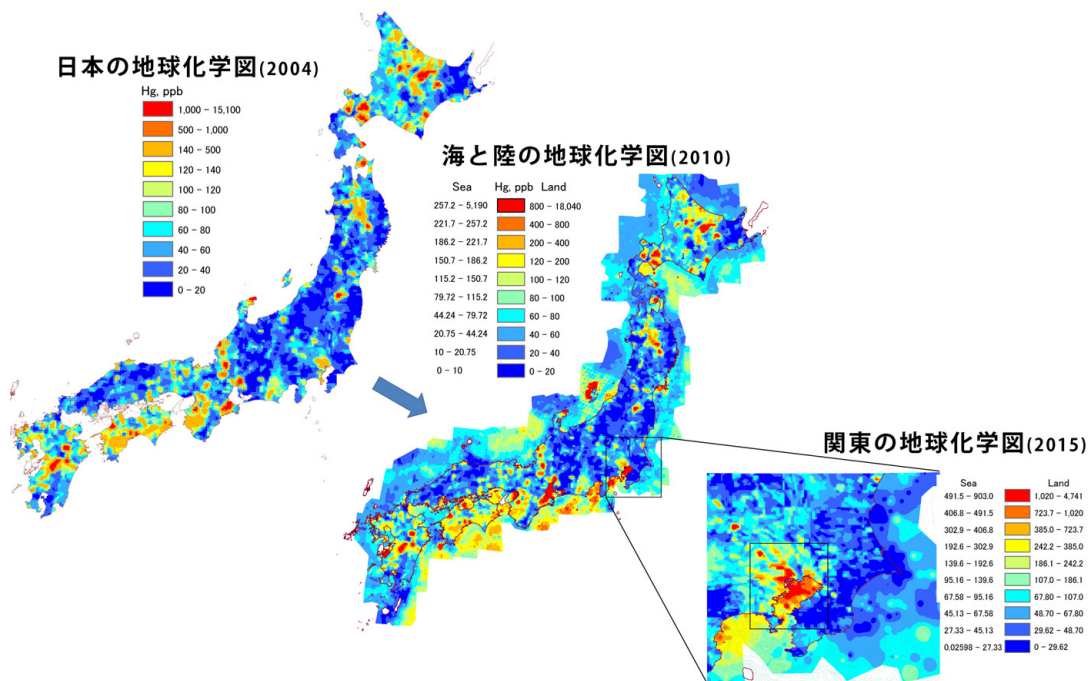
1. まえがき

このほど従来よりも大幅に精度が向上した「関東の地球化学図」が出版された(今井ほか, 2015)。第1図に示したように、これまでに日本全国の元素の分布を初めて明らかにした「日本の地球化学図」(今井ほか, 2004), 及び全国の沿岸海域の元素分布を明らかにした「海と陸の地球化学図」(今井ほか, 2010)を作成してきた。今回は、人口が集中し産業・経済の中心である東京, 横浜などの首都圏を含む関東地方について高解像度の地球化学図を作成した。例として第2図に水銀の分布を表す「日本の地球化学図」, 「海と陸の地球化学図」, 今回作成した「関東の地球化学図」を示した。この中の関東の地球化学図で水銀が東京南部と東京湾で連続して高濃度になっている様子がよく分かる。「関東の地球化学図」は、関東地方において試料数を2004年に作成した全国版よりも一桁多くして高解像度化し、これにより従来は精度が不足して分からなかった詳細な元素分布が明らかとなった。特に、全国版では採

取した試料がほとんどなかった東京・横浜などの大都市内部でも試料採取を積極的に行い都市内部の元素分布を明らかにしたことが大きな特徴である。



第1図 「日本の地球化学図」, 「海と陸の地球化学図」, 「関東の地球化学図」の表紙。



第2図 水銀の日本の地球化学図, 海と陸の全国地球化学図, 関東の地球化学図。

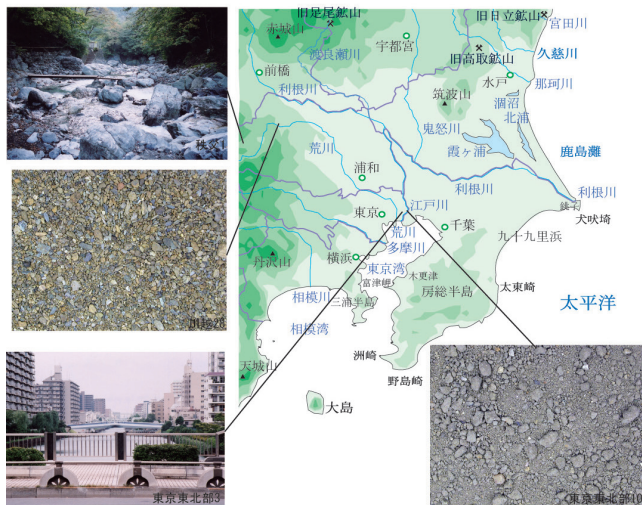
1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

キーワード：地球化学図, 関東, 環境汚染, 元素, GIS

2. 関東平野と試料

第3図に関東地方の主な地形と試料採取地点および試料の写真を示した。関東平野には西部に関東山地、箱根・富士火山があり、北部に赤城山、男体山などの火山がある。大きな河川としては利根川、鬼怒川等があり、特に首都圏では多摩川、荒川、江戸川の三つの河川が生活環境の影響と東京湾への元素の移動を考えるうえで重要である。北部には足尾、高取、日立の大きな旧鉱山がある。特に関東山地では各種の変成岩類、堆積岩類が分布し、超苦鉄質岩を源岩とするクロムを高濃度に含有する緑色片岩がある(大森ほか, 1986; 寺島ほか, 2007)。

第3図の左上の写真は今回試料を採取した場所の一つで(秩父1), 通常はこのような自然の河川で試料採取を行うが, 左下のような都心部の河川(東京東北部3)でも多くの試料を採取した。また, 図には関東山地北部の山間部の河川で採取した砂質試料(川越28)と都心部の河川で採取した泥質堆積物(東京東北部10)を示した。本研究では, 第1表に示したように5万分の1地形図の稲取から日立までの範囲で河川堆積物1457試料を採取した。試料を採取した年月は, 1/20万東京と1/20万千葉の中の1/5万姉崎, 千葉, 佐倉, 龍ヶ崎の範囲は2002年8月~2003年8月で, それ以外は2011年12月~2014年3月に採取した。また, 海域の地球化学図を作成するために使用した海底堆積物は, 東京湾の柱状試料29を含む鹿島灘から相模灘までの海底堆積物217試料である。「関東の地球化学図」(今井ほか, 2015)では, 採取した河川堆積物



第3図 関東地方の主な地形と試料採取地点(左上:秩父1 東京都奥多摩町, 左下:東京東北部3 東京都江東区)および試料の写真(左中:川越28 埼玉県越生町, 右下:東京東北部10 東京都江戸川区。写真の横は6cm)。

第1表 河川堆積物試料を採取した地域の5万分の1地図名, 試料数, および海底堆積物を採取した海域と試料数。試料採取は1/20万東京と1/20万千葉の中の1/5万姉崎, 千葉, 佐倉, 龍ヶ崎の範囲は2002年8月~2003年8月に行い, それ以外は2011年12月~2014年3月に行った。

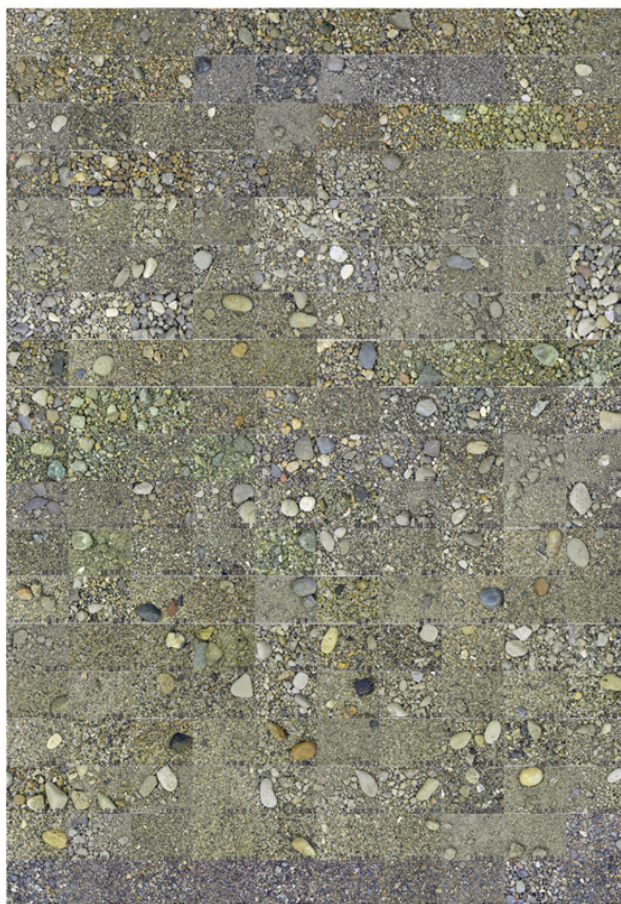
地図名	試料数	地図名	試料数	地図名	試料数
1/20万横須賀		青梅	27	深谷	20
稲取	3	東京西北部	20	古河	21
伊東	10	東京東北部	30	小山	21
館山	12	秩父	29	前橋	24
熱海	11	川越	33	桐生及足利	19
三浦三崎	2	大宮	35	栃木	20
那古	18	野田	27	壬生	21
小田原	21	1/20万千葉		沼田	19
平塚	6	姉崎	31	足尾	24
横須賀	12	茂原	21	鹿沼	19
富津	19	千葉	29	宇都宮	20
1/20万千葉		東金	24	1/20万水戸	
鴨川	18	木戸	5	土浦	29
勝浦	1	佐倉	34	玉造	19
大多喜	25	成田	24	鉢田	13
上総大原	21	八日市場	27	真壁	21
1/20万東京		銚子	8	石岡	24
秦野	32	龍ヶ崎	28	磯浜	8
藤沢	38	佐原	32	真岡	19
横浜	15	潮来	21	水戸	25
木更津	12	1/20万宇都宮		ひたちなか	10
上野原	29	寄居	24	烏山	20
八王子	27	熊谷	27	常陸大宮	21
東京西南部	25	鴻巣	28	日立	14
東京東南部	0	水海道	27		
五日市	32	高崎	26		
航海	年	海域	試料数		
GH80-2	1980	鹿島灘, 房総沖	65		
GH97	1997	東海沖	27		
GC04-1	2004	鹿島灘	55		
GC04-2	2004	相模灘	41		
GC04-3	2004	東京湾(柱状試料)	29		

1,457試料すべての採取地と試料の写真を付図として左右見開きで対応させて載せているが, ここでは第4図にその一部(稲取1から秦野12)を示した。左右を見比べることにより, どこでどのような試料が採取されたかが分かる。

3. 試料採取, 試料処理, 分析法

河川堆積物試料の採取は各河川の指定地点において細粒の堆積物(最大粒径3mm程度以下)約1kgをスコップ等で採取した。海底堆積物試料は鹿島灘や相模灘では調査船とグラブ採泥器(スミスマッキンタイヤー型採泥器)を用いて海底から採取した。東京湾については約1mの柱状試料を29試料採取した。柱状試料の採取は第5図に示したようにプラスチック製のインナーチューブ(内径6cm程度, 長さ1m程度)をハンマーで海底に打ち込んで採取し, 深度方向に2.5~5cm毎に分割し, 合計310個の試料を得て分析した(今井ほか, 2010)。

採取した河川堆積物試料は自然乾燥した後, ふるって粒度80メッシュ(0.175mm)以下の部分を分離した。さら



第4図 河川堆積物の採取地と試料の写真(稲取1から秦野12)。採取地と試料の写真の位置は左右で対応している。写真の横は2cm。

に磁石を用いて磁鉄鉱などの明らかな磁性鉱物を除き分析試料とした。海底堆積物試料は、表層部から採取した試料を自然乾燥した後、めのう粉砕器で0.149 mm(100メッシュ)以下に粉砕して分析試料とした。

元素の分析についてはICP発光・質量分析法を用いた。試料処理は、0.2 gの試料をテフロンビーカーにはかりとり、硝酸、過塩素酸、フッ化水素酸を加えて200℃以下で加熱して分解した。蒸発乾固後、硝酸を加えて溶解し、水を加えて100 mlに定容した(今井, 1987; Imai, 1990)。

主要成分元素についてはICP発光分析法で分析を行った。元素として Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , MgO , MnO , Na_2O , P_2O_5 , TiO_2 , Ba , Sr , V である。微量成分元素についてはICP質量分析法で分析を行った。元素としてはAs, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Li, Lu, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Sb, Sc, Sm, Sn, Ta, Tb, Th, Tl, Tm, U, Y, Yb, Zn, Zrである。水銀(Hg)は加熱気化法を用いた自動水銀分析計を用いて分析した。

4. 関東地方の地球化学図

関東地方の河川堆積物中の元素濃度を元に、地理情報システムを用いて地球化学図を作成した。用いたソフトウエ

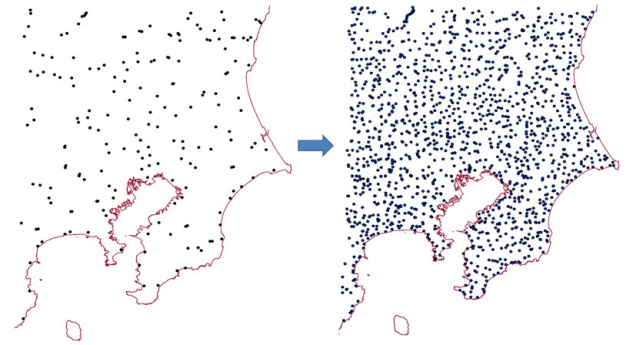


第5図 東京湾における柱状試料の採取。プラスチック製のインナーチューブ(内径6cm程度、長さ1m程度)をハンマーで海底に打ち込んで柱状試料を採取。

アは ESRI 社の ArcGIS[®]である。データの補間は最近接の 12 点を用いる Inverse distance weighted (IDW) 法で行った。これは最近接の 12 点を距離の 2 乗に反比例した重みを付けて平均化する方法で、分布が極端に偏っておりうまく表現できない場合は手動によって調整した(今井ほか, 2004)。

4. 1. 従来の地球化学図と今回の地球化学図の比較

第 6 図に従来の全国版の関東地方と、今回の関東地方の地球化学図における試料採取点を比較した。今回の試料採取密度が格段に高いことがよく分かる。これをもとに 53 元素と自然放射線の地球化学図を作成した。今回新たに作成した関東の地球化学図の精度が従来の地球化学図と比較してどのくらい向上しているかを示すため、第 7 図に従来のヒ素の全国版の関東地球化学図と今回作成したヒ素の関東地球化学図を並べて示した。新たな関東の地球化学図では陸域とともに海域の地球化学図も示した。従来の地球化学図では北部の三つの高濃度域のみが目立っていて、それ以外の地域はほとんど青一色で変化がみられない。この赤い地域は足尾、日立、高取の旧鉱山に関連して高濃度になっていると考えられる。これに対して新たな関東の地球化学図では足尾、日立、高取の旧鉱山の地域以外にも南部や東部に黄色～赤い高濃度域が多数みられる。また、海域についても東京湾の湾奥部に赤い高濃度域があることが分かる。このように解像度が上がったことにより、従来は見落とされていた詳細なヒ素の分布が明らかになった。ヒ素に関しては、この図で示されたように旧鉱山による影響は現在でも顕著であると考えられる。

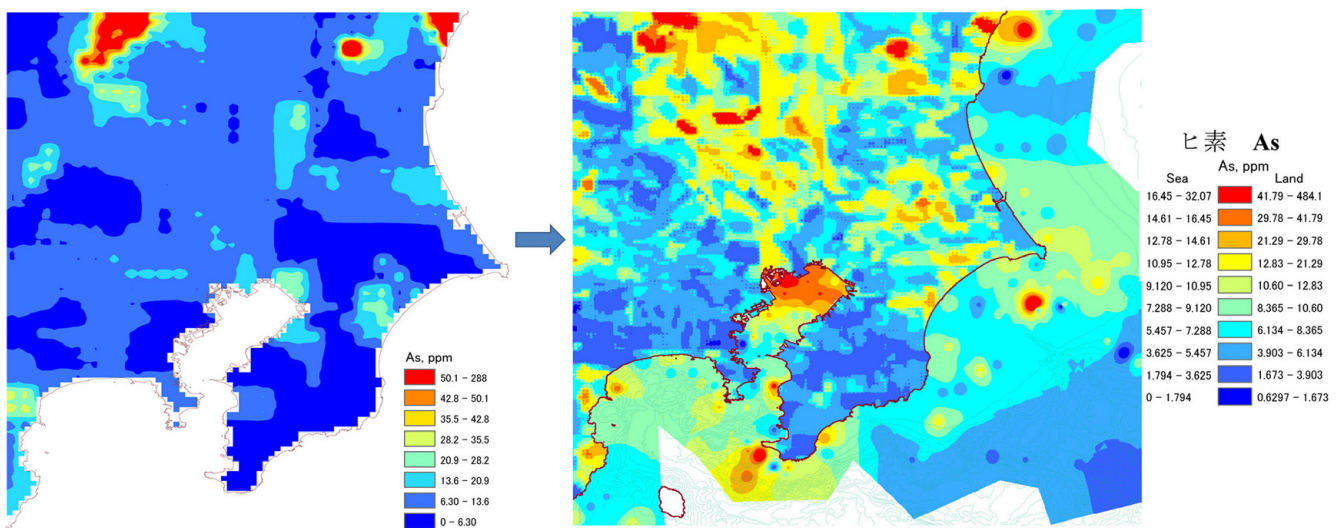


第 6 図 全国版の関東地方と、試料数を増やした今回の関東地方の地球化学図における試料採取点の比較。

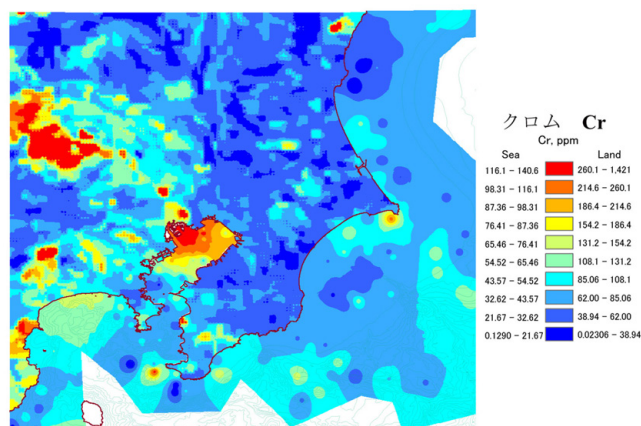
4. 2. 上記以外の元素の関東の地球化学図

第 8 図にクロムの関東地球化学図を示したが、北西部の関東山地北部に大きな高濃度域がある。これはこの地域に分布するクロムを高濃度に含有する超苦鉄質岩を起源とする緑色片岩によるものと考えられ、地質図の緑色片岩の分布域とよく一致する(地質調査総合センター；地質図navi： <https://gbank.gsj.jp/geonavi/> 2016 年 8 月 16 日確認)。また、東京の荒川下流域の高濃度域が東京湾奥の高濃度域へと連続しているのが分かる。東京湾奥の高濃度の原因は、荒川下流の過去のクロム汚染と関連がある可能性が考えられる(久保田ほか, 1995)。

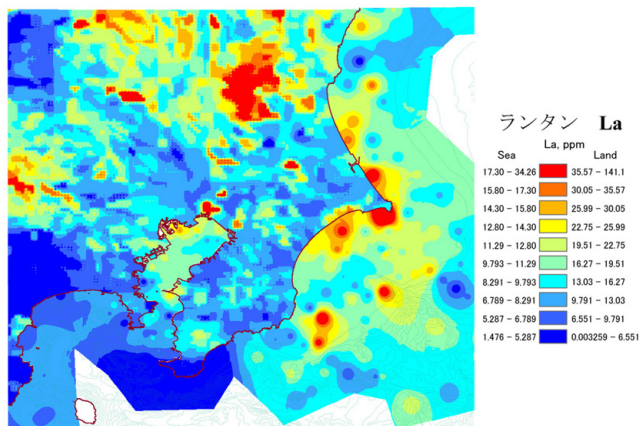
第 9 図に銅の地球化学図を示した。特に足尾、日立、高取の旧鉱山のあった地域で高濃度を示している。足尾では旧鉱山から渡良瀬川に沿って高濃度域が伸びているように見える。日立では旧鉱山から宮田川に沿って河口までの地域で顕著な高濃度を示している。銅、鉛、亜鉛等の重金属は旧鉱山周辺で高濃度になり、その影響が現在でも顕著



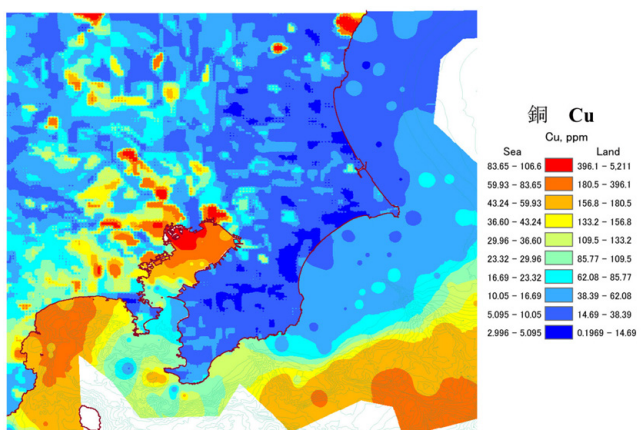
第 7 図 ヒ素の従来の全国版の関東地球化学図と今回作成した関東地球化学図。



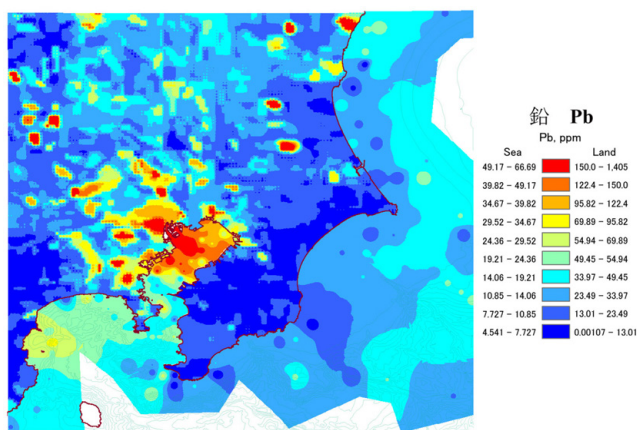
第 8 図 クロムの関東地球化学図.



第 10 図 ランタンの関東地球化学図.



第 9 図 銅の関東地球化学図.



第 11 図 鉛の関東地球化学図.

に見られることがある(神賀・田切, 2003). また, 東京の荒川・多摩川下流周辺で顕著な高濃度を示し, これが東京湾奥の高濃度域に連続しているのが分かる. 神奈川県南部と相模湾で銅の濃度が高いのは, 銅濃度の高い富士山の玄武岩質の岩石・火山灰の影響と考えられる.

第 10 図にランタンの地球化学図を示した. 特に茨城県中～北西部に顕著な高濃度域がみられる. これは筑波山から北部の地域に分布する花崗岩類によると考えられる. カリウムや他の希土類元素等も花崗岩類に高濃度に含有されるため, 類似した分布を示している.

第 11 図に鉛の地球化学図を示した. 鉛は銅と同様に足尾, 日立の旧鉱山のあった地域で高濃度を示すほか都市部で濃度が高く, 荒川, 多摩川下流で高濃度を示す. 特に荒川河口から東京湾へ高濃度域が連続しており, 荒川を通じた鉛の移動が示されている. 亜鉛の地球化学図も銅, 鉛とよく似た分布を示すが, 北東部の日立を除けば高濃度域の多くが都市部にあり, 特に荒川下流域の高濃度域が顕著で, ほかの重金属と同様に荒川から東京湾奥に高濃度の亜鉛が

流れ込んで堆積していることが示されている.

これまでに述べたように, 関東の地球化学図では主に荒川から高濃度の重金属が東京湾に流れ込んで湾奥に堆積している様子が明確になった. この地域は東京の人口が密集した地域であり, 工場による産業活動も活発である. このような生活環境や産業活動の影響によりこの地域から東京湾に重金属が移動して高濃度に堆積していることが示唆される.

4. 3. 関東の自然放射線の地球化学図

関東地方では 2011 年 3 月の福島原子力発電所の事故による影響で放射線量が自然状態よりも高くなっている所がある. 現在の関東周辺の放射線量の分布は文部科学省 (<http://ramap.jaea.go.jp/map/> 2015年11月4日時点 2016年8月16日確認) や原子力規制庁 (<http://radioactivity.nsr.go.jp/map/ja/> 2016年8月16日確認) などが公表している. また, 事故前の自然状態の放射線量の全国分布は放射線医学総合研究所などが測定したデータ

がある(古川, 1993). しかしながら, 過去の自然放射線量の分布はかなり大雑把であり, 各地点の詳細な分布は事故後の現在ではもはや知ることは不可能である. ところが, 大地からの自然放射線に関しては, その場所の地中のカリウム, ウラン, トリウム濃度から計算によって求める方法がある. この方法では現在の高線量の主要な原因である放射性のセシウムは計算には含まれないため, 各地点での事故前の自然状態の放射線量を推定することが可能である.

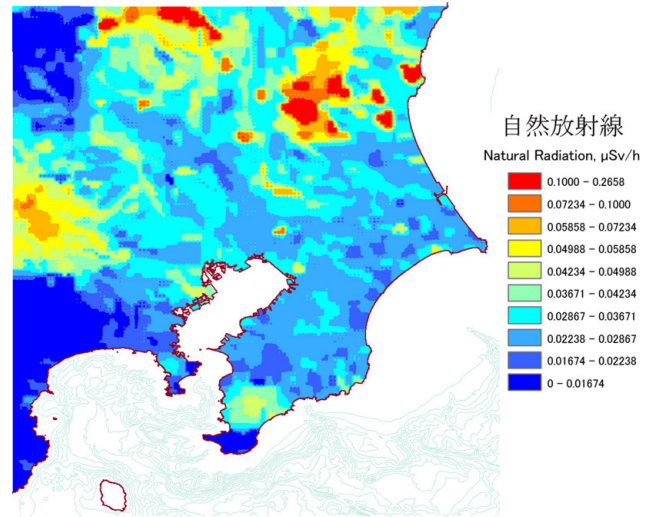
このことに基づいて, 本研究では関東地方の大地からの自然放射線の詳細な分布を求めた. 本研究の試料は 1/20 万東京と 1/20 万千葉の一部地域を除き事故後(2011 年 12 月以降)に採取したものであるが, 計算にはカリウム, ウラン, トリウム濃度のみを用いるので自然状態の線量が求まると考えられる. 地上 1 m の高さでの線量率 D (nGy/h) の計算は下記の式を用いた(湊, 2006).

$$D = 13.0 C_k + 5.4 C_u + 2.7 C_{Th}$$

ここで C_k (%), C_u (ppm), C_{Th} (ppm) はそれぞれカリウム, ウラン, トリウム濃度である. D の単位はナノグレイ (nGy) でこれをマイクログレイ (μ Gy) に換算する. グレイは吸収線量と呼ばれ, 単位質量あたりに放射線から受けるエネルギー量を表す. 一般によく用いられるシーベルト (Sv) は放射線が人間に当たったときにどのような健康影響があるのかを評価するための値である. 放射線が全身に均等に吸収されたとき 1 グレイ = 1 シーベルトと換算でき μ Gy/h を μ Sv/h と置き換えて表すことができる.

第 12 図に上記の式で計算した関東の自然放射線の地球化学図を示した. 高線量の地域はカリウム, ウラン, トリウムの三つの元素の分布と一致し, 茨城県中～北西部, 栃木県北部で高かった. ほとんどの地域で自然放射線は 0.05 μ Sv/h 以下であり, 茨城県北西部, 栃木県北部の一部地域で 0.1 μ Sv/h を少し超えている程度である. 自然放射線量が異なる要因は, 主にその地域に分布する岩石や土壌の種類によっており, カリウム, ウラン, トリウムを高濃度に含有する花崗岩類が分布する地域と自然放射線量が高い地域がよく一致している.

また, 前述した文部科学省の 2015 年 11 月のデータと比較すると事故前後の放射線量の変化が推定できる. 文部科学省のデータでは, 関東地方では筑波山～霞ヶ浦～東京にかけてやや線量の高い地域が認められるが, 自然状態のデータでは筑波山北部を除きこの地域は線量が低いことが分かる. 従って, この地域のやや線量の高い放射線量は事故後に付加したものであることが示唆される.



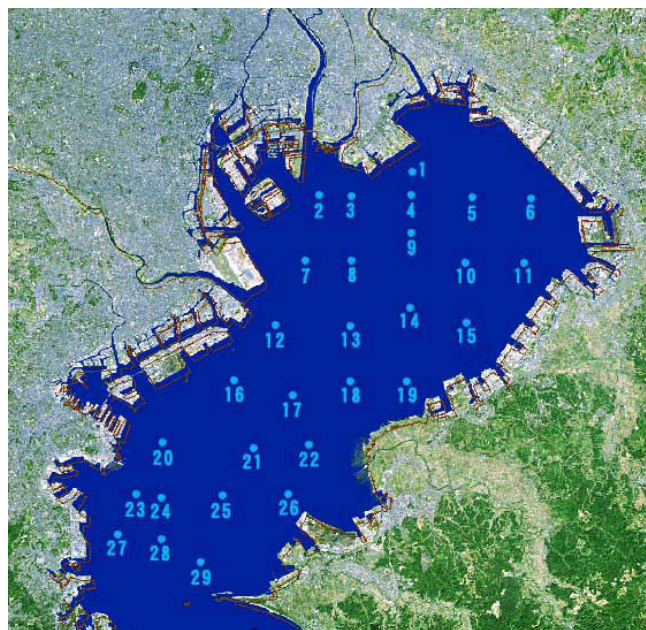
第 12 図 自然放射線の関東地球化学図.

5. 東京湾堆積物

東京湾では, 横浜～木更津の北側では細粒の泥質堆積物が卓越し, これよりも南側では粗粒で貝殻片に富む砂質堆積物が多い. 東京湾内における堆積物の堆積速度は, 湾奥部の荒川河口から多摩川河口にかけての海域が最も速く, その東方及び南方に向かって遅くなり, 木更津沖から湾口部では無堆積域とされている. 河川を通じた海域への重金属等の移動と分布は, 河口付近での淡水と海水の混合によるイオン強度や pH, 酸化還元電位の急激な変化による溶存イオンの沈殿とその後の移動に大きな影響を受ける(松本, 1983; 赤木・原口 1984). また, 洪水等による河川を通じた土砂堆積物の直接的な移動の影響も大きい. 本研究では東京湾の湾奥部から外に向かって第 13 図に示す位置で 29 本の柱状試料を採取した. 採取した柱状試料 No.1 から No.29 を第 14 図に示した. この図からも分かるように, 湾奥部の No.1 から No.22 の柱状試料までは泥質であるが, 湾口部の No.23 からは砂質堆積物になっている.

5.1. 地点別濃度変化

各柱状試料別の成分濃度の平均値について, 東京湾岸地域から東京湾への元素の流れをより明確にするために, 荒川河口周辺と東京湾奥を更に拡大した図を作成した. 第 15 図に湾奥部を拡大したクロムの地球化学図を示す. この図から, 荒川と江戸川に挟まれた地域で特にクロム濃度が高く, そのまま東京湾の高濃度域と連続していることが分かる. この地域は過去に鉱滓埋め立てによるクロム汚染のあった地域であり, その影響の一部が現れているのかも



第13図 東京湾における柱状試料の採取位置。

しれない(久保田ほか, 1995)。

これ以外の主成分濃度は泥質堆積物が分布する湾央～湾奥(地点1～22)では、カルシウムをのぞいて濃度差が小さい。カルシウム濃度の変化は含有される貝殻片の多少が主原因であり、湾央～湾奥部よりも湾口部(地点23～29)で高い傾向がある。他の主成分は、カルシウム濃度の増加に伴って減少している。

微量成分については、ストロンチウムはカルシウムに富む堆積物で濃度が高く、その他はカルシウムの増加に伴って減少している。ビスマス、カドミウム、クロム、銅、モリブデン、ニッケル、鉛、アンチモン、スズ、タリウム、

亜鉛等については湾央～湾奥部で高濃度である。

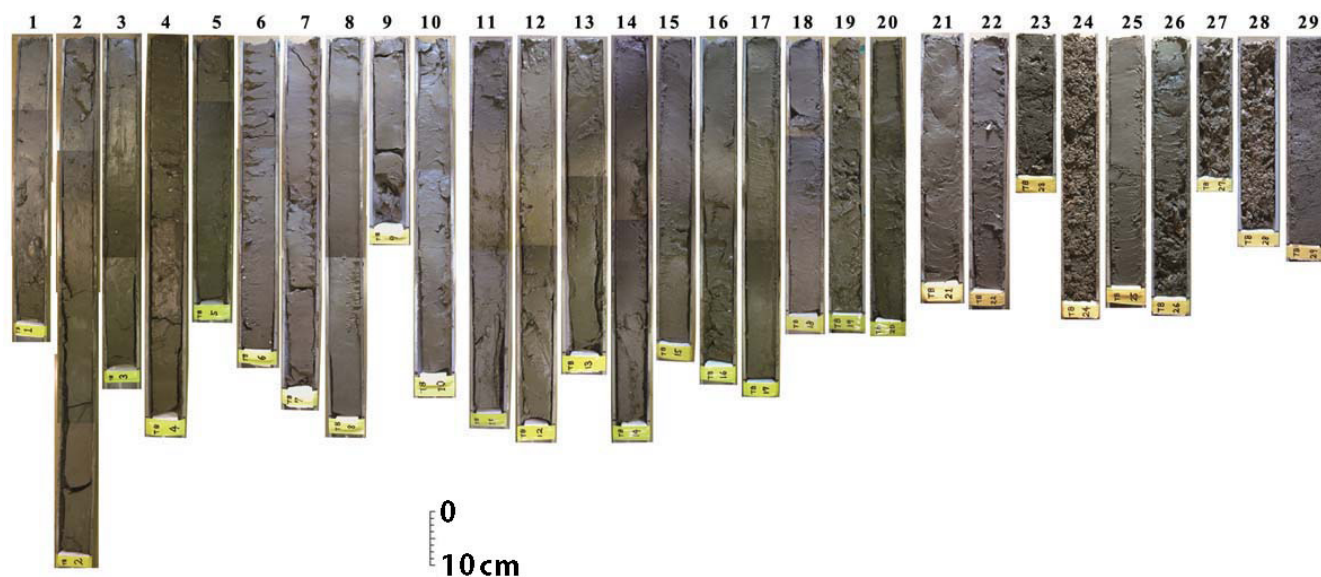
5.2. 鉛直濃度変化

第16図に東京湾の地点4のコア試料における亜鉛と鉛の鉛直方向の濃度変化を示した。図に示すように亜鉛と鉛について下層部では低く表層に向かって高濃度になり、深度約13cmの層準で最大値を示し、その上位では低下した。この原因は人為的に供給された亜鉛や鉛等の濃度が環境汚染の深刻だった1970年頃に最大となり、その後は減少傾向にあることに起因するとされている(松本, 1983; 松本ほか, 1983)。地点4と同様な変化は地点3, 5, 7, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 18等でも認められ、これら地点は東京湾において堆積速度が相対的に速い海域である。一方、湾口部の地点24では砂質試料であり鉛直方向の元素濃度変化はほとんどない。その他の銅、ビスマス、カドミウム、アンチモン等も同様な傾向を示す。

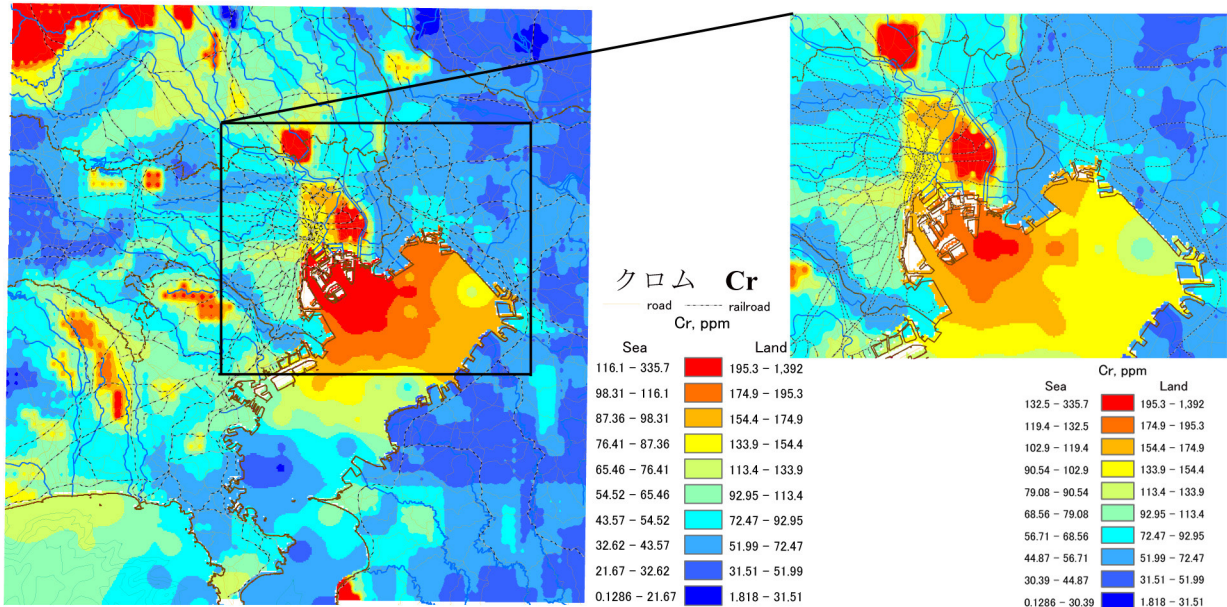
6. 全国の元素濃度データ

採取した関東地方の河川堆積物1,457個の元素濃度データの中央値, 最大値, 最小値, 標準偏差を第2表に示した。銅や鉛などの元素は鉱床周辺等では極端な高濃度となるため、平均値と標準偏差の算出に当たってはこのような異常値(はずれ値)はスミルノフ・グラブスの検定により除外して計算し、中央値, 最大値, 最小値は棄却前の全体から求めた。元素濃度の変動係数はほぼ20～60%程度である。

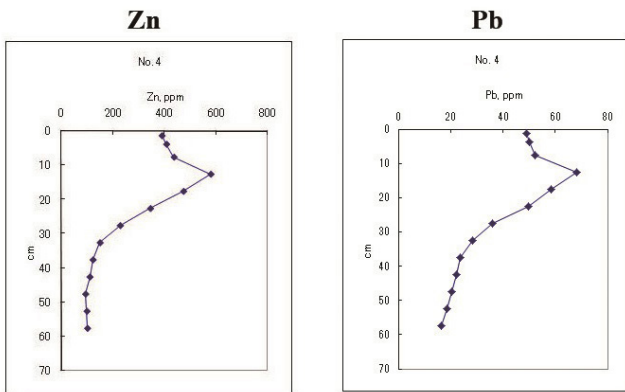
関東地方の元素濃度の特徴を示すため日本全国の中央値を比較した。関東地方の元素濃度が明らかに高濃度である



第14図 採取した柱状試料 No.1 から No.29.



第 15 図 東京湾奥部を拡大したクロムの地球化学図。



第 16 図 東京湾地点 4 の柱状試料における亜鉛と鉛の鉛直方向の濃度変化。

元素はカルシウム、鉄、マグネシウム、コバルト、スカンジウム、バナジウム、亜鉛で、日本全国の方が高濃度である元素は、アルミニウム、カリウム、ナトリウム、バリウム、ベリリウム、セシウム、ランタン、ニオブ、ルビジウムであった。関東地方は中央に広い関東平野があり厚い沖積層が分布するため、全体としてはこの特徴が元素組成に表れていると考えられる。

7. データの公開

これまでに蓄積された陸と海の地球化学図の全データはホームページ上で公開している。URL は <https://gbank.gsj.jp/geochemmap/> (2016 年 8 月 16 日確認) である (第 17 図)。ここでは全国の陸域の地球化学図と沿岸海域の地

球化学図が参照できるほか、地域ごとに拡大した地球化学図、全国 3,024 個の河川堆積物および全 4,905 個の海底堆積物のそれぞれの採取地の写真や元素濃度などの詳細情報がネットワーク上で簡単に参照できる。

今回、新たに図に示したような関東地方の地球化学図を追加した。関東地方のページからは、関東の地球化学図、地域別 (東京湾岸地域、関東南東部、関東北東部、関東北西部) の地球化学図、東京湾の拡大した地球化学図と柱状試料のデータ、そして今回採取した 1,457 試料の個別の採取地や試料の写真、濃度等のすべてのデータが参照できる。

また、これまで地球化学図の拡大縮小は ZOOMA と呼ばれる拡大縮小システムを用いていたが、今回、第 18 図に示したように背景の地図と重ねて表示するために新たに Google maps を用いることにした。全国図を拡大してゆくと図に示したようにある時点から関東地方の地球化学図が高解像度に切り替わって表示される。そのまま拡大すると拡大図になって背景地図の地名や河川等が表示され、元素濃度分布と地図との関係性がより明確となった。

今後は、関東地方で行ったような高解像度の地球化学図を全国的に作成してゆくために、名古屋・大阪・福岡などの他の大都市周辺で解像度の高い地球化学図を作成してゆきたいと考えている。

8. まとめ

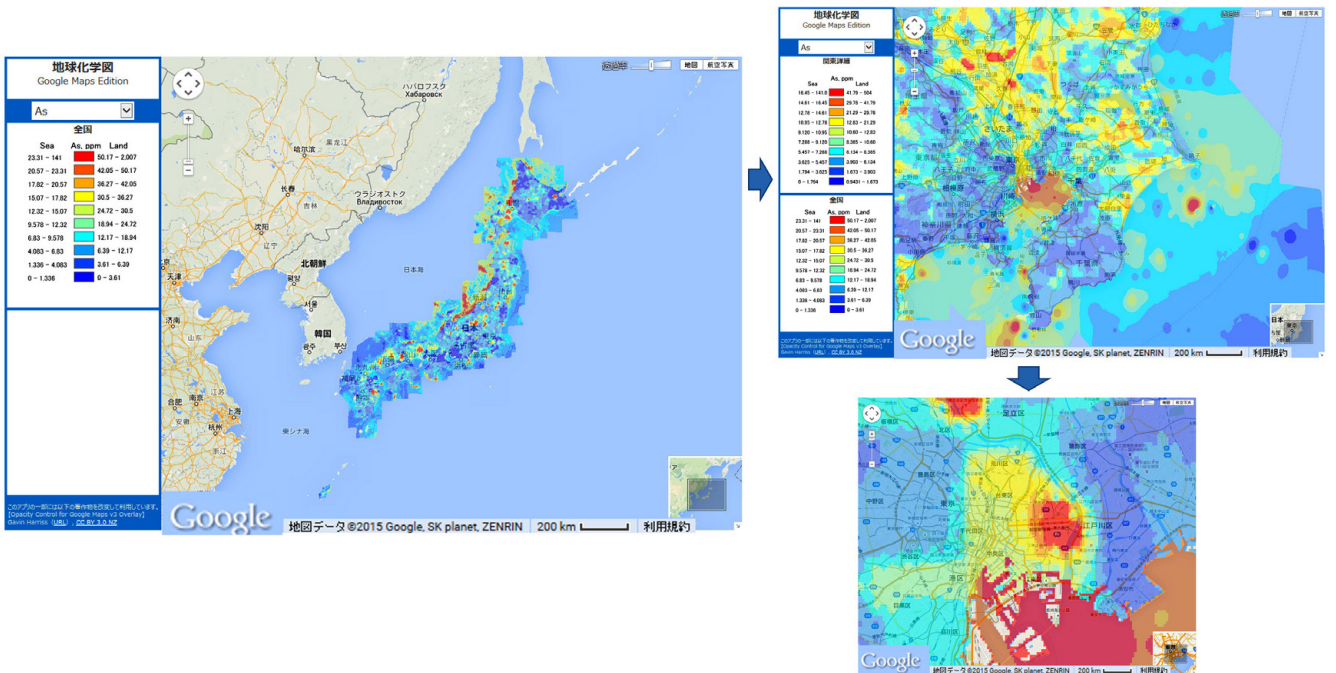
東京・横浜・千葉などの大都市圏を含む関東地方において、従来の全国版よりも試料数を約 10 倍にした高解像度

第2表 関東の河川堆積物の元素濃度及び自然放射線データの平均値, 中央値, 日本中央値, 最大値, 最小値, 標準偏差. 濃度の単位は Al₂O₃ から TiO₂ までは %, As ~ Zr までは ppm, Hg は ppb (ppm=mg/kg, ppb=μg/kg), 自然放射線の単位は μSv/h.

元素	平均値	中央値	日本中央値	最大値	最小値	標準偏差
Al ₂ O ₃	9.088	8.652	10.87	23.00	4.085	2.255
CaO	2.979	2.738	2.334	30.80	0	1.583
Fe ₂ O ₃	8.376	7.78	5.744	39.00	2.478	3.277
K ₂ O	1.206	1.153	1.738	3.086	0.221	0.482
MgO	3.679	3.412	2.555	9.756	0.552	1.537
MnO	0.163	0.153	0.120	1.853	0.042	0.071
Na ₂ O	1.65	1.666	2.159	4.294	0.168	0.459
P ₂ O ₅	0.191	0.149	0.121	1.790	0.022	0.136
TiO ₂	0.953	0.84	0.716	6.990	0.21	0.424
As	8.285	6.801	8.000	509.5	0.6	5.459
Ba	322.9	308.5	412.5	1743	67.64	117.2
Be	0.963	0.924	1.319	9.814	0.135	0.392
Bi	0.226	0.198	0.226	37.79	0.035	0.15
Cd	0.178	0.144	0.130	11.02	0.037	0.114
Ce	26.65	24.40	30.18	398.1	5.87	12.09
Co	23.08	21.34	14.20	115.9	5.348	9.321
Cr	71.33	64.25	53.08	3025	10.76	33.84
Cs	2.332	1.983	3.591	20.75	0.189	1.408
Cu	53.97	44.80	27.35	5212	5.424	38.64
Dy	2.586	2.53	2.863	7.982	0.794	0.550
Er	1.512	1.481	1.659	6.505	0.454	0.325
Eu	0.740	0.729	0.816	1.758	0.253	0.128
Ga	14.79	14.72	16.24	31.17	6.059	2.169
Gd	2.781	2.699	3.137	16.46	0.842	0.642
Hf	1.281	1.266	1.546	4.521	0.332	0.318
Hg	59.33	52.11	40.0	4756	0	41.21
Ho	0.510	0.498	0.560	1.379	0.156	0.111
La	14.13	1320	16.48	141.3	2.605	6.429
Li	22.81	22.20	28.31	104.3	3.53	8.149
Lu	0.220	0.217	0.245	0.658	0.070	0.047
Mo	0.938	0.865	1.154	43.05	0.187	0.442
Nb	5.693	5.402	7.155	41.86	0.589	2.701
Nd	13.60	12.80	15.63	116.1	4.237	4.642
Ni	30.42	25.45	20.74	468.8	0	18.39
Pb	24.60	21.60	20.72	1405	0	15.51
Pr	3.352	3.143	3.912	30.99	0.926	1.293
Rb	42.58	37.50	65.63	135.3	3.303	25.08
Sb	0.684	0.566	0.601	68.86	0.086	0.427
Sc	19.30	17.66	13.40	76.07	5.097	7.978
Sm	2.889	2.763	3.291	21.09	0.932	0.763
Sn	2.595	2.249	2.136	310.4	0.403	1.684
Sr	143.1	139.6	146.3	435.7	35.55	44.00
Ta	0.513	0.483	0.574	98.18	0.058	0.251
Tb	0.492	0.481	0.552	2.098	0.145	0.104
Th	4.235	3.944	5.43	81.54	0.442	2.209
Tl	0.356	0.337	0.469	13.71	0.041	0.172
Tm	0.24	0.237	0.265	0.704	0.072	0.05
U	1.018	0.982	1.292	25.21	0.141	0.451
V	191.1	166.3	118.8	1348	29.11	94.38
Y	15.26	14.87	17.255	42.14	3.289	3.55
Yb	1.494	1.472	1.66	4.30	0.439	0.313
Zn	176.6	152.1	107.1	5970	50.57	90.18
Zr	45.02	44.18	54.33	121.3	8.717	13.14
自然放射線	0.03017	0.02859	0.04076	0.2671	0.004868	0.01255



第 17 図 地球化学図のホームページ (https://gbank.gsj.jp/geochemmap/ 2016 年 8 月 16 日確認)。関東地方のページからは、関東の地球化学図、東京湾の拡大した地球化学図と柱状試料のデータ、今回採取した 1,457 試料の個別の採取地や試料の写真、濃度等のすべてのデータが参照できる。



第 18 図 Google Maps を用いた地球化学図を表示。拡大に伴い関東地方の地球化学図が高解像度に切り替わって表示される。

の地球化学図を作成した。試料は河川堆積物を用い、東京・横浜などの大都市の内部でも試料採取を行った。今回関東地方から採取した河川堆積物の試料数は 1,457 個である。これをもとに 53 元素と自然放射線の地球化学図を作成した。今回新たに作成した関東の地球化学図で解像度

が大きく向上したほか、従来の地球化学図ではほとんど濃度変化がない部分で、詳細な元素分布が明らかとなった。作成した関東地球化学図において、それぞれの元素の分布の特徴が明らかとなった。ヒ素は足尾，日立，高取の旧鉱山のあった地域で顕著な高濃度を示し，海域についても

東京湾の湾奥部に高濃度域があることが分かった。クロムは関東山地北部に大きな高濃度域があるが、この高濃度域はこの地域に分布するクロムを高濃度に含有する緑色片岩によるものと考えられる。また、東京の荒川・江戸川の下流域で高濃度域があり、過去の汚染との関連が考えられる。銅は、特に足尾、日立、高取の旧鉱山周辺で高濃度を示しており、旧鉱山から渡良瀬川や宮田川に沿って高濃度域が下流に延びていることが分かった。

また、関東の自然放射線の地球化学図を作成した。ほとんどの地域で自然放射線は0.05 $\mu\text{Sv/h}$ 以下であり、茨城県北西部、栃木県北部の一部地域で0.1 $\mu\text{Sv/h}$ を超えている地点があった。高線量地域はカリウム、ウラン、トリウムを高濃度に含有する花崗岩類が分布する地域とよく一致した。

また、東京湾から29本のコア試料を採取した。コア試料の鉛直方向における元素の濃度変化は、銅、鉛、亜鉛、ビスマス、カドミウム、アンチモン等は下層部では低く、表層に向かって高濃度になり、深度約13cmの層準で最大値を示した。この原因は過去の汚染により供給された銅、鉛、亜鉛等の濃度が1970年頃に最大となり、その後は減少傾向にあることに起因すると考えられた。

採取した関東地方の河川堆積物1,457個の元素濃度データの中央値、最大値、最小値、標準偏差を求めた。関東地方と日本全国の中央値を比較すると、関東地方が明らかに濃度が高い元素はカルシウム、鉄、マグネシウム、コバルト、スカンジウム、バナジウム、亜鉛で、日本全国の方が高濃度である元素は、アルミニウム、カリウム、ナトリウム、バリウム、ベリリウム、セシウム、ランタン、ニオブ、ルビジウムであった。

関東の地球化学のデータをホームページ上で公開するためのデータを作成した。今回新たに背景の地図と重ねて表示するためにGoogle mapsを用いて地図と重ね合わせて表示した。全国図を拡大してゆくと、ある時点から関東地方の部分が高解像度に切り替わって表示され、元素濃度と背景地図との関係性が明確となった。

文 献

赤木 右・原口栞紘 (1984) 多摩川河口 - 東京湾域における微量重金属元素の分布と挙動. 地球化学, **18**, 81-88.

古川雅英 (1993) 日本列島の自然放射線レベル. 地学雑誌, **102**, 868-877.

今井 登 (1987) 誘導結合プラズマ発光分析法による河川堆積物の分析. 分析化学, **36**, T41-T45.

Imai, N. (1990) Multielement analysis of rocks with the use of geological certified reference material by ICP-MS. *Analytical Sciences*, **6**, 389-395.

今井 登・寺島 滋・太田充恒・御子柴真澄・岡井貴司・立花好子・富樫茂子・松久幸敬・金井 豊・上岡 晃 (2004) 日本の地球化学図, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 209p.

今井 登・寺島 滋・太田充恒・御子柴真澄・岡井貴司・立花好子・池原 研・片山 肇・野田 篤・富樫茂子・松久幸敬・金井 豊・上岡 晃 (2010) 海と陸の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 207p.

今井 登・岡井貴司・太田充恒・御子柴真澄・金井 豊・久保田蘭・立花好子・寺島 滋・池原 研・片山 肇・野田 篤 (2015) 関東の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 217p.

神賀 誠・田切美智雄 (2003) 渡良瀬川流域および宮田川流域の河川堆積物と土壌の汚染の現状 - 一足尾銅山と日立鉱山の閉山後の汚染レベル. 地質学雑誌, **109**, 533-547.

久保田正亜・浅見輝男・南澤 究・土橋幸司 (1995) 日本化学工業株式会社小松川工場跡地周辺の土壌等のクロム汚染. 人間と環境, **21**, 15-18.

松本英二 (1983) 東京湾の底質環境. 地球化学, **17**, 27-32.

松本英二・加藤甲任・松永勝彦 (1983) 東京湾における水銀の地球化学. 地球化学, **17**, 48-52.

湊 進 (2006) 日本における地表 γ 線の線量率分布. 地学雑誌, **115**, 87-95.

大森昌衛・端山好和・堀 万吉 (1986) 日本の地質3 関東地方. 共立出版, 335p.

寺島 滋・今井 登・立花好子・岡井貴司・御子柴真澄・太田充恒・久保田蘭 (2007) 関東地域の土壌, 河川堆積物, 東京湾堆積物の化学組成とバックグラウンド評価. 地質調査研究報告, **58**, 69-91.

IMAI Noboru and OKAI Takashi (2017) Geochemical Map of Kanto Region.

(受付:2016年8月16日)

第 52 回東・東南アジア地球科学計画調整委員会 (CCOP) 年次総会参加報告

竹内美緒¹⁾・内田利弘¹⁾

1. はじめに

CCOP (Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia, 東・東南アジア地球科学計画調整委員会) は、東・東南アジア地域の経済発展と生活レベル向上を目指し、地球科学分野の研究プロジェクトやワークショップの推進・調整を行う政府間機関です。1966 年に国連アジア太平洋経済社会委員会 (ESCAP) の下に設立されたのが始まりで、現在は 14 の加盟国、14 の協力国および 14 の協力機関からの財政的、技術的支援により運営されています。日本は設立当初から加盟国であり、現在は地質調査総合センター (GSJ) が中心機関を務め、外務省、経済産業省、国内関係研究機関、関係大学 (金沢大学、山口大学など) の協力を得て CCOP の活動に参加しています。年次総会は加盟国の持ち回りで開催されており、2016 年 (第 52 回) 総会は 10 月 30 日 -11 月 3 日にタイ・バンコクで開催されました。引き続き 11 月 4 - 5 日に第 67 回管理理事会が開催され、CCOP 運営等に係る各種審議が行われました。なお今回は、CCOP の設立 50 周年記念でもあったことから通常よりも盛大に開催されました。



写真 1 総会会場の様子。

2. 第 52 回 CCOP 年次総会の概要

総会の本会議は 10 月 31 日 -11 月 2 日に、バンコクの Berkeley Hotel にて開催され (写真 1, 2), その前後に各種会議、地質巡検が催されました。期間中の日程概要は以下の通りです。

- 10 月 30 日 顧問会議, 財務委員会, 各国代表者会食
- 10 月 31 日 開会式, パネルディスカッション, CCOP 事務局活動報告, 加盟国カントリーレポート, ウェルカムディナー
- 11 月 1 日 技術セッション
- 11 月 2 日 協力国・協力機関のレポート, シームレス地質図プロジェクト会議, フェアウェルディナー
- 11 月 3 日 地質巡検

配付資料によると、参加者数は 224 名で (写真 3), 内訳は以下の通りでした。日本からは 14 名 (写真 4), GSJ からは地質調査総合センター長など 11 名が参加しました。

・加盟国：カンボジア (7 名), 中国 (15 名), インドネシア (14 名), 日本 (14 名), 韓国 (12 名), ラオス (4 名),



写真 2 CCOP 総会の各国代表。

1) 産総研 地質調査総合センター研究戦略部

キーワード：CCOP, 年次総会, 国際協力, 東・東南アジア, 地球科学



52nd CCOP ANNUAL SESSION

31 OCTOBER - 3 NOVEMBER 2016

BANGKOK, THAILAND

写真3 総会参加者の全体写真.



写真4 日本からの参加者.

マレーシア(4名), ミャンマー(4名), フィリピン(3名), タイ(42名), ベトナム(3名). 加盟国のうち, パプアニューギニア, シンガポール, 東チモールは不参加.

・協力国: カナダ(1名), デンマーク(1名), フィンランド(3名), ドイツ(2名), イギリス(1名), ノルウェー(1名), オランダ(1名)

・協力機関: EuroGeoSurveys (the Geological Surveys of Europe, ベルギー, 2名), ASCOPE (ASEAN Council on Petroleum, タイ, 1名), UNESCO (United Nations

Educational, Scientific and Cultural Organization, タイ, 2名), UKM (Universiti Kebangsaan Malaysia, マレーシア, 1名)

・名誉顧問: 8名

・名誉ゲスト: 4名(タイ政府等)

・ASEAN (Association of South-East Asian Nations, 東南アジア諸国連合): 1名

・オブザーバー: SPC (Secretariat of the Pacific Community) 地球科学局 (元 SOPAC (The Pacific Islands Applied Geoscience Commission), フィジー, 1名)

・招待者: ラオス(1名), インドネシア(1名), 日本(1名), ドイツ(1名), モンゴル(1名), オランダ(1名), タイ(48名), ベトナム(6名), 韓国(3名)

・CCOP 事務局: 8名

3. 年次総会の主要イベント

(1) 開会式

開会式では10月にご逝去されたタイのプミボン前国王に黙祷をささげた後, バンコク市知事 Asawin Kwanmuang 氏とタイ天然資源環境省鉱物資源局長 Tawsaporn Nuchanong 氏(タイ CCOP 代表)による歓迎の挨拶, CCOP 管理理事会議長代理 Mior Sallehuddin Mior Jadid 氏(CCOP

マレーシア代表)の挨拶がありました。続いて天然資源環境大臣 Surasak Karnjanarat 氏による開会宣言が行われ、開会式後に「社会のための地球科学」に関する特別パネルディスカッションが行われました。

(2) 活動報告

本会議の議事では、まず、CCOP 事務局と加盟国の代表者が 1 年間の活動内容を発表しました。カンボジア・ラオス・ミャンマー・インドネシア・マレーシア・中国・韓国・タイ・フィリピン・ベトナムから、資源調査、地質調査に関する活動や、CCOP プロジェクトに関連する活動の報告がありました。日本からは過去 1 年の活動報告として、GSJ や JOGMEC (独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構)、JAMSTEC (国立研究開発法人海洋研究開発機構) の 2016 年度のプレス発表内容を中心に紹介しました。本会議 2 日目(11 月 1 日)の Thematic Session は、資源・環境・地質情報の 3 会場に分かれて、各国の研究者が研究内容についての口頭発表を行いました。口頭発表は全部で 66 件(うち 9 件が Keynote)、その他にポスター発表 32 件が行われました。日本からは Keynote として大久保泰邦氏、脇田浩二氏が各々、「ASEAN 鉱物資源データベース」、1993-1999 年に実施されていた「DCGM(Digital Compilation of Geoscientific Maps)-CCOP プロジェクト」について発表しました。日本からの発表は全部で 8 件でした。

本会議 3 日目には、協力国と協力機関による 1 年間の活動報告として、カナダ・デンマーク・フィンランド・オランダ・ノルウェーが発表しました。また、EuroGeoSurveys (欧州の 37 機関が加盟)は、エネルギー・地下水・鉱物・ハザード・土壌についての情報が盛り込まれている地質情報データベース (European Geological Data Infrastructure, EGDI) を紹介しました。UKM からは、ジオパークやジオヘリテージについてのシンポジウム開催報告などが行われました。

続いて、CCOP 事務局長の Adichat Surinkum 氏より 2017 年の計画についての紹介がありました。最後は嶋崎吉彦名誉顧問等のスピーチがあり、閉会となりました。

(3) 展示

今回は、50 周年記念事業のテーマ「Geoscience for the Society」に沿って、CCOP の活動や加盟各国の地質調査に関する優れた研究成果を一般に紹介するための展示会も開催されました。GSJ もブース 1 小間を借りて、研究成果のポスター掲示・パンフレット配布を行いました。タイの天

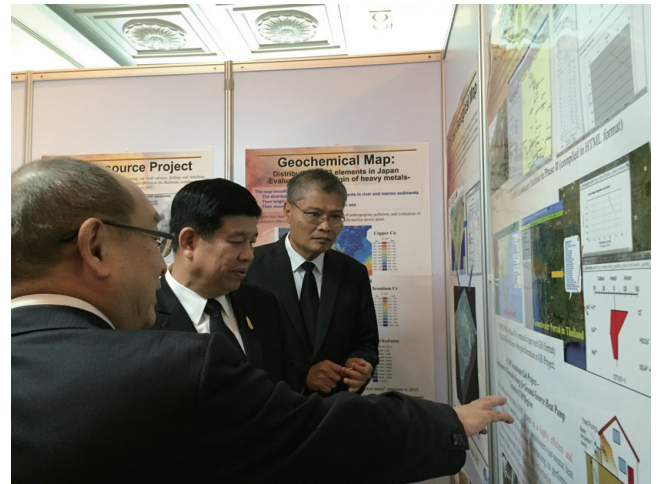


写真 5 GSJ ブースでタイ天然資源環境大臣に説明する 佃総合センター長。

然資源環境大臣など多くの訪問客がありました(写真 5)。また、プミポン前国王の地球科学に関わる取り組みを紹介するコーナーも設けられていました。

(4) 地質巡検

11 月 3 日は、タイ沿岸域の海岸侵食とその対策に関する地質巡検が行われました。タイでは、上流のダム建設などにより、河川からの土砂の供給量が 1960 年代と比較して約 20% に激減しているため、急速に海岸侵食が進んでおり、その対策が急務となっています。まず、タイ鉱物資源局からタイの海岸侵食の現状、地盤沈下、水害等の現状について説明がありました。続いて舟でタイ湾の海岸侵食対策としてのマングローブ林の状況観察を行った他、マングローブ林学習発展センターを訪問し、所長の講義を聴



写真 6 学習発展センターで所長の講義。



写真7 マングローブ林学習発展センター。



写真8 フェアウェルディナーの様子。

くとともに竹を用いた海岸侵食対策工事の現状や、マングローブ林の植樹の状況を観察しました(写真6, 7)。

(5) ウェルカムディナー, フェアウェルディナー

本会議の初日にホテル内でウェルカムディナーが、最終日にはフェアウェルディナーが開催されました。ウェルカムディナーは、プミボン前国王を偲ぶ映像を見ながらの開催となりました。フェアウェルディナーでは、恒例の各国の余興は自粛されましたが、顧問会議メンバーによるCCOPソングが歌われました(写真8)。

(6) 50周年記念本の出版

今回は、50周年を記念して、これまでのCCOPの歴史

をレビューする本(Jubilee Book)が出版されました(写真9)。CCOPの活動を写真とともに解説している他、GSJからも、東・東南アジアのデルタプロジェクト(DelSEA)の総括(斎藤文紀氏)、2011年の東日本大震災に関する解説(桑原保人氏)、アジア太平洋地域大規模地震・火山噴火リスクマネジメント(G-EVER)の活動(宝田晋治氏ほか)、CCOPにおけるOneGeology(世界中の約100万分の1縮尺の地質図をウェブ経由でアクセス可能にするプロジェクト)の活動と地質情報総合共有プロジェクトの紹介(宝田晋治氏・ジョエルバンディバス氏)、地下水データベースプロジェクトの紹介(内田洋平氏)、シームレス地質図プロジェクトの紹介記事(大久保泰邦氏)が掲載されています。参加者には無料で配布されました。

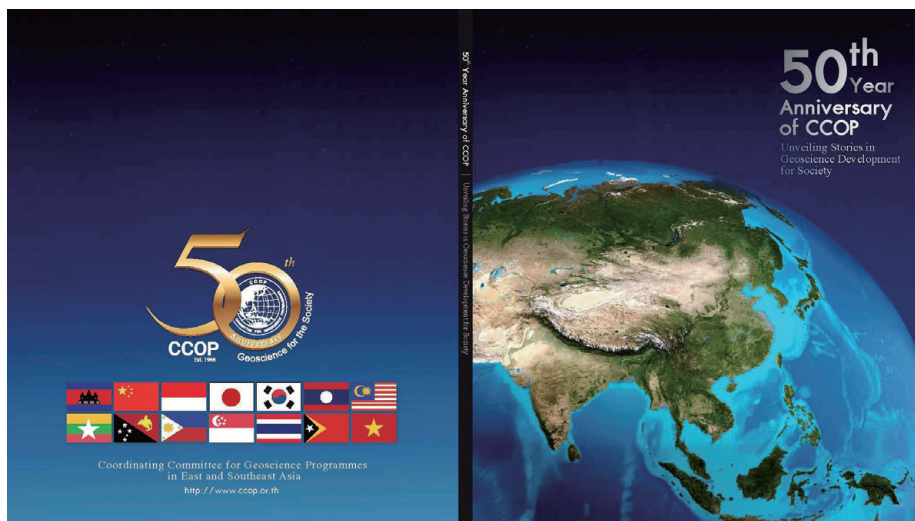


写真9 50周年記念 Jubilee Book.



写真 10 管理理事会出席者の全体写真。

4. 第 67 回管理理事会

管理理事会は 11 月 4 日 - 5 日に加盟国 11 か国(カンボジア・中国・インドネシア・日本・韓国・ラオス・マレーシア・ミャンマー・フィリピン・タイ・ベトナム)の代表が参加して開催されました(写真 10)。開会式では、タイ鉱物資源局(DMR)の Tawsaporn Nuchanong 局長と CCOP 副議長の Mior Sallehuddin Mior Jadid 氏(マレーシア鉱物地球科学局長)が挨拶を行い、会議の議長は Mior Jadid 管理理事会副議長が務めました。

会議では、新しく協力機関(Cooperating Organization)として CCOP に参加する SPC との協定書の調印, CCS-M(CCOP CO2 Storage Mapping)プロジェクト報告, 韓国地質資源研究院(KIGAM)が提案した非在来型石油・天然ガス資源プロジェクト報告, 2016 年上半期の CCOP 活動報告, 2017 年活動計画案, 財務委員会報告, 2017 年予算案, 2016-2017 年の議長の再選出, 今後の総会および管理理事会の開催地, 加盟国拠出金の標準化, 新規 CCOP プロジェクトの提案が行われました。

管理理事会の議長は 2016 年 1 月から 2 年間の予定で韓国 KIGAM の Kyu Han Kim 院長が勤めていましたが、人事異動により 2016 年 9 月から Joong-Ho Synn 新院長

が着任したため、Synn 院長が新たな議長となることが承認されました。

新規プロジェクト案として、日本から「Compilation and Publication of a Revised “Magnetic Anomaly Map of East Asia 1:4,000,000” on CD-ROM(主担当:地質情報研究部門・石原文実氏)」を提案し、承認されました。なお、旧版の CCOP 磁気図 CD-ROM は 2002 年に GSJ が出版しています。タイからも、シェールガス・オイル開発における水圧破碎(hydrofracturing)に関する技術協力プロジェクトが提案され、承認されました。次回の第 68 回管理理事会は、2017 年 3 月上旬にミャンマー・ネピドーで、2017 年の第 53 回 CCOP 総会・第 69 回管理理事会は 2017 年 10 月 15-21 日にフィリピン・セブ島で開催される予定です。

5. 日本が主導する進行中の CCOP プロジェクト

現在 CCOP で進行中の、日本が提案・主導しているプロジェクトは以下の通りです。

- ・「地下水プロジェクト」

地下水プロジェクトは、各国の地下水情報の整備や、地中熱利用の促進を目的としています。今回の総会では、担



写真 11 シームレス地質図プロジェクト会議参加者。

当者である内田洋平氏が口頭発表を行った他、プロジェクトの報告書が配布されました。

・「地質情報総合共有プロジェクト (GSi)」

2015 年からスタートした GSi プロジェクトは、各国で出版された地質情報を世界標準フォーマットで GIS を用いてウェブ上で共有することを目的としています。本総会では、担当者である宝田晋治氏により、2016 年 9 月に開催されたワークショップの報告や現状・今後の計画について発表されました。

・「デルタにおける統合的地質アセスメントプロジェクト (DelSEA)」

本総会では、担当者である斎藤文紀氏が、CCOP 加盟国のデルタや沿岸環境における近年の研究動向を報告し、CCOP の果たすべき役割について発表を行いました。

・「シームレス地質図 (CCOP-ASEAN Harmonized Geology) プロジェクト」

本プロジェクトでは、ASEAN 諸国での地質図のシームレス化を目指しています。今回もプロジェクト会議が開催され(写真 11)、これまでに得られた一次成果を Web-GIS で公開することになりました。

・「Stone Heritage Book プロジェクト」

東・東南アジア各国の主な史跡に使用された岩石の地質学的意味・岩石特性・歴史的意義などをまとめた「Stone Heritage Book」の出版を目指したプロジェクトです。本は既に完成し、2016 年 3 月の管理理事会で配布されました

が、今回の総会でも引き続き紹介されました。

6. おわりに

GSJ は、1966 年の CCOP 設立時から、資金援助、専門家の派遣、ワークショップの実施、刊行物の出版など中心的な支援活動を進めてきました。近年では資金援助については、中国や韓国も大きく貢献するようになりました。日本 (GSJ) も、今後は技術的支援や研究協力支援を重視しつつ、引き続き地球科学に関連するアジアの人材ネットワーク構築、地球科学の発展に貢献することが期待されます。

TAKEUCHI Mio and UCHIDA Toshihiro (2017) Report on the 52th CCOP Annual Session.

(受付:2017 年 1 月 13 日)

GSJ 地質ニュース編集委員会

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

事務局

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

GSJ 地質ニュース 第6巻 第2号
平成29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 : Takashi Okai
Deputy Chief Editor : Rei Nakashima
Editors : Takeshi Nakajima
Mihoko Hoshino
Mikio Takeda
Seiko Yamasaki
Junko Komatsubara
Yuichiro Fusejima
Rie Morijiri

Secretariat Office

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

GSJ Chishitsu News Vol. 6 No. 2
February 15, 2017

Geological Survey of Japan, AIST

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

Maeda Printing Co., Ltd

鹿児島県菱刈鉱山の含金銀石英脈（友泉6脈）



鹿児島県伊佐市に位置する菱刈鉱山は、1985年から現在に至るまで高品位金鉱石を安定して出鉱しており、世界的にも有名な金銀鉱山である。鉱石である含金銀石英脈は、第四紀の広域的な引張応力場によって生じたほぼ垂直な割れ目の中に熱水が浸入し、それが冷却して石英や金銀鉱物が晶出することによって形成された。温泉水は現在も湧き出ており、地元の湯之尾温泉に供給されて有効利用されている。写真は菱刈鉱山の山田鉱床の友泉6脈（海拔110m）であり、乳白色ないし灰色の石英による縞状構造が見える。この石英脈の母岩は更新世の菱刈下部安山岩である。

（写真・文：地質調査総合センター地圏資源環境研究部門 実松健造）

A gold-silver-bearing quartz vein [Yusen No. 6 vein] of the Hishikari Mine in Kagoshima Prefecture. Photo and Caption by Kenzo Sanematsu