

河床堆積物の化学分析に基づく地球化学図作成の今後の展望[#]

- 地球化学図作成のための準備と分析方法を中心に -

青木 かおり* 新藤 智子*
楠野 葉瑠香* 福岡 孝昭*

キーワード：地球化学図、河床堆積物、荒川

1. はじめに

自然環境から得られる情報を図化したものとして、植物の種類分布を示す植生図、基盤岩の種類分布を示す地質図、高低差や距離を示す地形図などがあるが、それらに加えて地表面の元素分布を表す図として地球化学図がある。一般に地球の元素の分布は一様ではなく、多くは研究対象地域の表層に現れている地質によって変化する。すなわち、元素の分布が分かることで、その地域に分布する鉱物や地質を知る手がかりとなりうる。水が流れている河川の河床堆積物を採取し、化学分析することによって流域の地球化学図を作成する試みは1960年代に英国地質調査所 (BGS: British Geological Survey) の Plant によってはじめられ、現在に至るまでその手法は改良されながら各国で取り込まれるようになった。英国では現在も国の基盤プロジェクト (G-BASE: baseline geochemical mapping of Great Britain and Northern Ireland) として取り組まれている。G-BASE についてレビューをした Johnson *et al.* (2005) によると、当初は地球化学図の作成は資源鉱物の探査、すなわち探鉱を目的としてマグネシウム、タングステン、ウランといった金属元素、金や白金族元素といった貴金属元素の探査に重点を置いていた。その後、自然状態の地表面の元素分布は、人為の影響によって環境の変化が引き起こされたか否かを評価する環境アセスメントのための基礎資料として注目されるようになり、分析の対象とする試料も河床堆積物から土壌や河川水にまで拡大されて調査が続けられている (Breward *et al.*, 2007)。1980年代には欧米諸国において全国土をカバーする地球化学図が作成され、1990年代半ばからは BGS が主導する形で UNESCO (Darnley *et al.*, 1995) や FOREGS (Forum of European Geological Survey; Plant *et al.*, 1997)

の国際的なプロジェクトとして地球化学図の作成が推進されている。

日本国内では、独立行政法人産業技術総合研究所が全国規模で作成した地球化学図を公開している (今井ほか, 2004)。ただし、国土を網羅するために100km²で1地点を代表する形で調査が行われたことから、複雑な地域地質を反映した化学組成の分布図を作成するためには試料採取密度を高くする必要がある。試料採取密度を1km²で1地点を代表させた研究例としては、地質調査所 (現産業技術総合研究所) が調査した関東地方北部 (上岡ほか, 1990)、名古屋大学が調査した名古屋市東部から奥三河 (田中ほか, 1995; 山本ほか, 1998)、福岡大学が実施した福岡県内の調査 (古川ほか, 2004; 高本ほか, 2005; 伊藤ほか; 2007) などがある。これらの研究では地質図と元素分布図とを対比させながら、より詳細な考察が可能となっている。立正大学においては、2000年より学部3年生の実習と修士課程1年生の実習を兼ねた宇宙地球化学研究室のプロジェクトとして、キャンパスが立地している熊谷市を流れる荒川の流域奥秩父で試料採取密度を1km²で1地点を代表させた詳細な地球化学図を作成している。試料採取については田中ほか (1995) を参考にして若干の工夫を加え、化学分析には4種類の方法を採用している。2004年からは立正大学オープンリサーチセンター事業の一環として研究が続けられ (福岡ほか, 2005; 2006; 2007; 2008)、2000年~2008年の9年間に関わった延べ人数は100人を越える。

地球化学図作成においては40年の歴史を持つ英国では、7月~9月の夏季休暇中に地球科学・環境科学を専攻する学生を募集して試料採取キャンペーンが繰り広げられ、ひと夏に2000地点以上で試料採取が行われている (Johnson *et al.*, 2005)。国家事業として行われている英国と日本国内で個々に取り組んでいる大学では、対象

* 立正大学大学院地球環境科学研究科

平成17~20年度立正大学大学院地球環境科学研究科オープンリサーチセンター業績

地域の広さや開催規模に違いはあるものの、地球科学や環境科学を専攻する大学の学生や大学院生を動員して行われている点では共通している。いずれの場合においても、地球化学図の作成はチームで行う野外調査の方法を学び、化学分析の経験を積むことができるので、これから卒業研究や大学院での研究を始めようとする学生にとってはトレーニングを兼ねた非常に良いオリエンテーションとなっている。試料採取時にリーダー役を務められる経験者が増えれば、試料採取のための班を多く作り、調査対象地域を拡大して調査を継続させることも可能である。また、立正大学では2008年8月3日～8日に地球環境科学部で開催した「地球環境塾」のように、中学校・高等学校で理科を教える教員を対象とした研修の一部として、野外調査から化学分析までの一連の作業を体験できる題材として取り入れた。すべての分析を完了するためには、日程の追加や作業手順等の工夫をする必要があるが、大学に在学する学生以外を対象とした地学分野と化学分野の研修題材としても利用できるであろう。

地球化学図の作成は長年にわたるプロジェクトであることから、草創期から連続して参加している参加者は教員を除くとごく限られる。試料の採取方法や分析手順のばらつきを最小限に抑えるために、手法の改良が行われた場合には、その都度変更点を明記してマニュアルを改訂するべきであろう (例えば Johnson *et al.*, 2003)。本論は立正大学で実施されている地球化学図作成に必要な試料採取の準備と実施方法、および化学分析のための試

料の処理と分析方法を学習するための手引きとしてまとめられたものであり、最後に地球化学図の今後の課題と展望について考察した。

2. 試料採取の準備と実施方法

本研究室では、夏期休暇中に3泊4日の日程で試料採取のための野外調査実習を行っている。全体の参加者およびリーダーの人数によって班の数は変動するが、自動車によって移動が可能な地域では、3～5班程度で分担して60～70地点で試料採取が行われる。自動車での移動

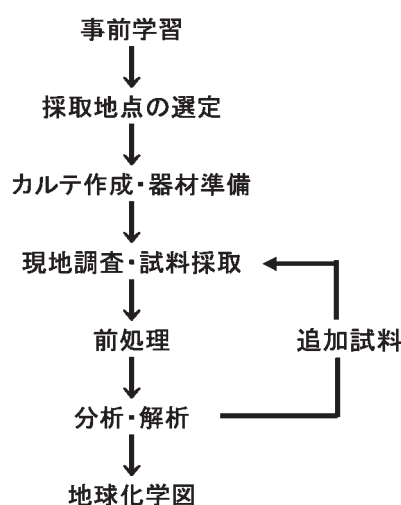


図1 地球化学図作成における全体のながれ

表1 試料採取で使用する器材一覧

| 器 材 | 仕 様 | 個 / 班 |
|-----------|----------------------|------------|
| ポリバケツ | 30.3 × 30.2cmH 容量15L | 2 |
| 深型スコップ | 穴開き | 2 |
| ふるい | 180 μ m | 2 |
| 水差し | 約 12cm × 13cm 容量 1 L | 2 |
| コーヒードリッパー | - | 2 |
| コーヒーフィルター | - | 採取地点の約 2 倍 |
| 茶封筒 | 長形 3 号 | 採取地点数 |
| ユニパック | H-4号 240 × 170mm | 採取地点数 |
| タイマー | - | 1 |
| GPS | Geko201 GARMIN 型 | 1 |
| カルテ | 図 3 を参照のこと | 採取地点数 |
| 画板 | - | 1 |
| 地形図 | 25,000分の 1 | 班員分 |
| コンパス | - | 班員分 |
| カメラ | - | 1 |
| 背負子 | - | 1 |
| 長靴・雨具 | - | 各自 1 |

が難しい地域では、同様の日程で廻れる地点は20地点程度である。基本的に経験者1名をリーダーとして配して、3～4人が1組となって行動する。地球化学図を作成する手順を図1に示し、表1に試料採取に必要な器材をまとめた。本章では事前準備と試料採取方法について以下に詳述する。

2. 1. 試料採取のための事前準備

野外調査に出る前に、参加者は地形図と地質図の読図方法を学習した上で、採取地点の選定を行う。参加者は、地形図から陸上の地形・水系・道路・鉄道・集落・建造物・植生・基準点・地名・境界などの詳細な情報を得られることを理解した上で等高線から読み取った尾根線を地形図上に書き込み、尾根に囲まれた領域(集水域)から採取地点を選定する。尾根に囲まれた地域の表層の物質は、雨水等に侵食され各支流の下流端に運ばれる。たとえば、図2に示した地点aは尾根で囲まれた集水域Aの組成を代表する。本研究の試料の採取地点は、地形図上の尾根に囲まれた約1km²の流域から1地点を選ぶ。支流では増水時に本流の水が支流に逆流することを考え、本流と交わる100m程度上流の地点を選択する(図2; 地点a、b、d、e)。また、斜面の崩落や護岸工事等で水が枯れて河床堆積物の採取が困難な集水域があるので、本流でも5kmおきに採取する(図2; 地点c、f)。さらに、地質図と照らし合わせ、化学組成に影響する可能性のある地質が観察される集水域では1km²未満の範囲であっても採取する。本研究室で調査している奥秩父では旧秩父鉱山とその周辺地域を除くと主に砂岩・泥岩からなるが、石灰岩の採石場や貫入した火成岩が露出している地点の近くでは約1km²よりも細かい範囲に試料採取地点を選定している。

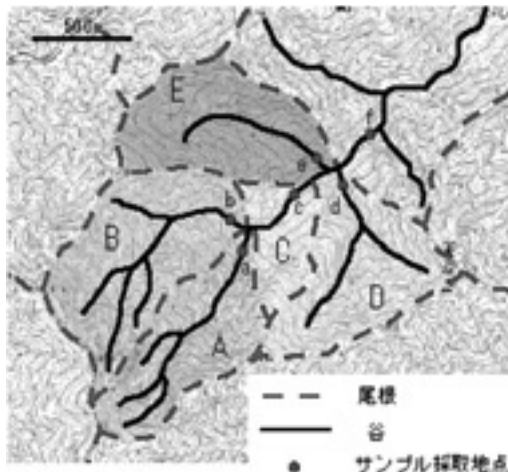


図2 採取地点選定の例

深い谷に入った際にはGPSでは衛星からの情報を取得できないことが多いため、自分の現在地を確認することが必要となる。そこで現地調査に出かける前に登山のための技術研修を行う。まず、予め調査対象地域の地形図に磁北線を記入して、コンパスの使用方法を学び、目標とする谷や尾根の方位を正しく認識する方法を実習する。

さらに、礫の種類を判別するために、基本的な岩石の種類とその特徴を学習する必要がある。本研究では河床堆積物を80メッシュ(<180μm)のふるいに通し、180μm以下の粒子を試料として持ち帰り化学分析を行う。180μm以上の砂礫は化学分析の対象とはしないが、化学組成と地質との対応を議論する際の重要な情報であることから、岩石の種類や大きさ、色について詳細に記述する必要がある。荒川流域に分布している岩石については、地学団体研究会の「川原の石のしらべ方 荒川の石」(「荒川の石」編集委員会, 1999)と、荒川で採取された礫の標本を参考にして学習する。

試料採取地点で観察結果を記録するための統一した規格の用紙(図3: 以下カルテと呼ぶ)を準備する。観察結果を記録する表現力には個人差があることから、見落としを防ぐために、カルテには予め必要な調査項目を簡潔に表示している。また、車道から採取地点までの経路や、河岸の様子、試料の化学組成に変化を与えそうな民家や工場の存在、廃棄物といった特殊な状況を記録する欄を設けている。

2. 2. 試料採取の手順

採取地点に到着したら、図4に示した流れで試料を採取し、周辺状況をカルテに記入する。以下に試料採取の手順を詳述する。

コンパスと地形図を用いて目標地点に到達していることを確認後、GPSを起動する。GPSによる位置情報取得は、衛星からの信号を受信するために木の葉等の障害物が上空に少なく安定した場所で行い、緯度・経度・高度をカルテに記入する。周辺の様子と河床堆積物の写真を撮影し、カルテの各項目に観察した事柄を記入する。写真撮影ではスケールを統一するために、例えば、河床堆積物の写真は深型スコップやふるいと一緒に撮影する。

試料の採取方法をフローチャートに示した(図5)。図中の番号は以下に記す採取方法の手順～に対応している。採取に使用する道具類はあらかじめ河川水で良く洗浄する。

ふるいの下にポリバケツを置き、深型スコップですくった河床堆積物をふるいの上ののせて、水差して水をか

2008年度 セミナー I 調査カルテ メンバー名 越田・楠野・貞

| | | | | | |
|---------|--|----------|--------------|---------|------------|
| 地形図 | 中津峡 | 仮サンプルNo. | 34 | サンプルNo. | |
| 採取日(天候) | くもり | 08/08/16 | 採取時刻 | 13:42 | |
| アプローチ方法 | キャンプ場に駐車し、そこから上流へ 民家(キャンプ場の)の横に流れている沢を登った。 (40mほど) | | | | |
| 採取場の様子 | 左岸は杉林 が になっている 右岸は林 川におおむね石が散らばっている。 | | | | |
| 礫径(cm) | 最大 100cm 平均 5~6cm | 礫種 | 砂岩 泥岩 | 周辺の地質 | 泥岩 (土壌) |
| 写真:採取付近 | くもり | 写真:河床 | くもり | | |
| GPSデータ | 高度 486m 北緯 35°59'05.1" | 東経 | 138°54'50.3" | | (G111X2) |
| 特記 | ・採取地点より下でつりをしている人たちがいる ↳ 魚釣り。 ・キャンプ場から下流にある | | | | |

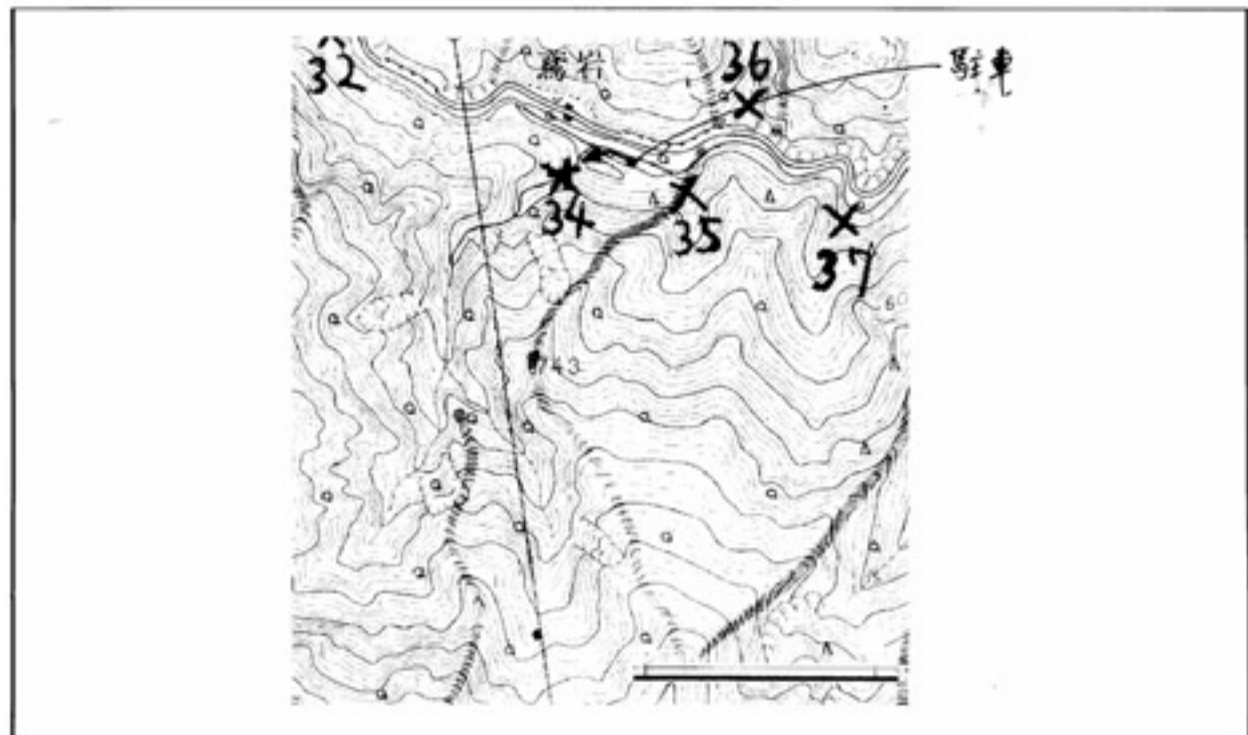


図3 2008年度版試料採取カルテの例

けながらふるいにかける。十分に水をかけ流したら、ふるいの上に残った砂礫を捨て、新たにスコップで堆積物をのせて同じように水でかけ流す。ポリバケツの中にある程度河床堆積物がたまったら水を足してバケツを満水にし、手で均一になるように底からかき混ぜる。安定した場所に静置し、5分後上澄

みを流す。このとき、静置時間を統一するためにタイマーを使用する。

ポリバケツに残った沈降物を水差しで水をかけ流しながらふるいにかける、の作業を繰り返す。

ポリバケツに残った全ての沈降物を水差しを使ってコーヒーフィルター上に移す。

フィルターに残ったものを試料とし、採取地点の番号を記入した茶封筒、ユニパックの順に封入する。

バケツを満水にし、かき混ぜて5分間静置する作業()と沈降物を全てコーヒーフィルター上に移す作業()は、どの採取地点でも同じ粒度の試料にするためである。バケツに採取した試料が多かった場合は、複数のフィルターに分けて回収し、室内作業時に均一になるよう混合して一つにまとめてから、分析用の試料を取り分ける。

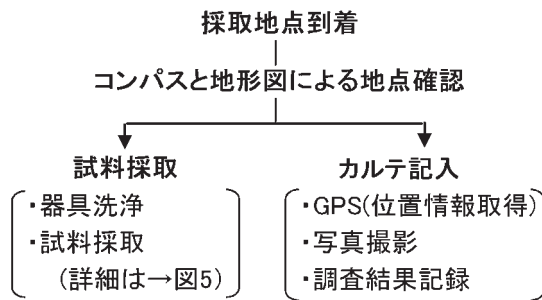


図4 採取および現地調査

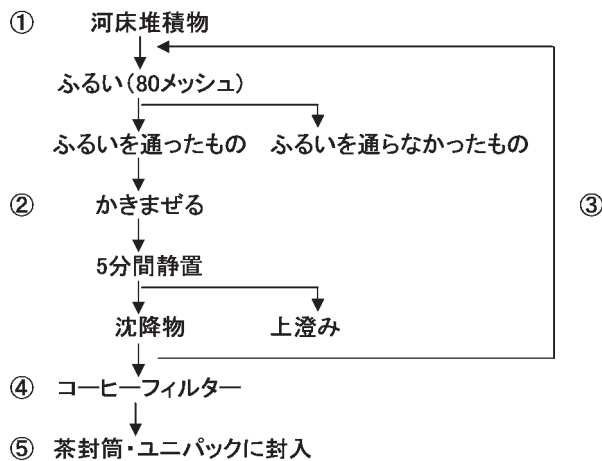


図5 採取方法のフローチャート

3. 分析方法

3.1. 本研究で用いる化学分析法

採取した試料の化学組成は、XRF (X-ray fluorescence analysis ; 蛍光エックス線分析)、LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry ; レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析)、INAA (Instrumental neutron activation analysis ; 機器中性子放射化分析)、PGA (Prompt gamma analysis ; 即発ガンマ線分析) の4種類の分析方法を用いて、1試料当たり48元素の濃度を求めることを目標とする(図6)。いずれも、多試料・多元素を効率的に分析が可能な手法である。Si、Fe、Al、Ca、K等の主成分元素を中心に21元素の分析は蛍光X

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 1 | H | | | | | | | | | | | | | | | | | He |
| 2 | Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| 3 | Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| 4 | K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| 5 | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| 6 | Cs | Ba | LA | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| 7 | Fr | Ra | AC | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | LA | La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| | | | AC | Ac | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

■ XRFで分析する元素 (Purple)

■ LA-ICP-MSで分析する元素 (Green)

■ INAAで分析する元素 (Yellow)

■ PGAで分析する元素 (Orange)

■ 分析しない元素 (White)

図6 地球化学図に用いる元素と分析手法

線分析 (XRF) で行い、B の分析は即発線分析 (PGA) で行う。LA-ICP-MS では微量元素の中でも希土類元素を中心に23元素を分析する。XRF や LA-ICP-MS で精度の良い分析値を得難い元素を含む15元素の分析には INAA を適用する。INAA では揮発性元素である Hg を分析するため自然乾燥した試料を用いる。以下、試料の前処理方法と注意点について述べ、分析方法ごとに使用する機器と分析条件、さらに分析値の計算方法についての概要をまとめる。分析結果の定量値化、分析精度や装置のドリフトをモニターするために用いる標準試料を表2にまとめた。

各分析方法の原理や機器の仕組みおよび定量計算の詳細については、専門の書籍を読み学習すると良い。LA-ICP-MS については新藤ほか (2009, 本号)、Montaser (2000)、放射能と放射線の基礎は海老原 (2005)、古川 (1994)、INAA の分析・解析技術は福岡 (1993)、伊藤ほか (2004)、Ge 検出器の原理・調整法については Knoll (1991) 等が参考になる。

3. 2. 分析試料の前処理

分析に至るまでの試料処理の過程を図7に示した。

採取した試料は、現地から持ち帰ると直ちに袋から出し、数日かけて室温で自然乾燥させる。乾燥しやすいようにコーヒーフィルター内の試料をもみほぐし、ポリエチレンフィルムでコーティングされた大きな紙上に置く。自然乾燥が完了した試料は、二酸化炭素ガスを噴きつけ塵を除いたスチロール瓶に保管する。1地点で採取された試料が複数のコーヒーフィルターに分けられている場合は、自然乾燥後にひとまとめにしてスチロール瓶

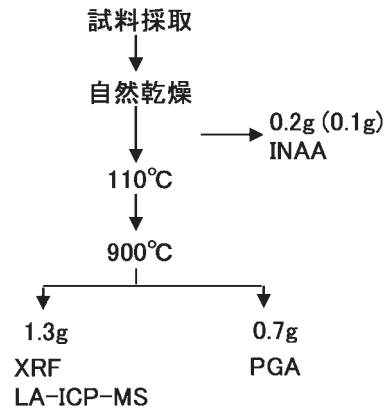


図7 分析試料前処理のながれ

表2 XRF、LA-ICP-MS、INAA、PGA で用いた標準試料と各元素の公表値

| 目的元素 | Rb | Cs | Sr | Ba | Y | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Zr | Hf | Nb | Ta |
|--------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ¹ JA-3 | 36.7 | 2.08 | 287 | 323 | 21.2 | 9.33 | 22.8 | 2.4 | 12.3 | 3.05 | 0.82 | 2.96 | 0.52 | 3.01 | 0.51 | 1.57 | 0.28 | 2.16 | 0.32 | 118 | 3.42 | 3.41 | 0.27 |
| ¹ JB-1a | 39.2 | 1.31 | 442 | 504 | 24 | 37.6 | 65.9 | 7.3 | 26 | 5.07 | 1.46 | 4.67 | 0.69 | 3.99 | 0.71 | 2.18 | 0.33 | 2.1 | 0.33 | 144 | 3.41 | 26.9 | 1.93 |
| ¹ JB-2 | 7.37 | 0.85 | 178 | 222 | 24.9 | 2.35 | 6.76 | 1.01 | 6.63 | 2.31 | 0.86 | 3.28 | 0.6 | 3.73 | 0.75 | 2.6 | 0.41 | 2.62 | 0.4 | 51.2 | 1.49 | 1.58 | 0.13 |
| ¹ JR-1 | 257 | 20.8 | 29.1 | 50.3 | 45.1 | 19.7 | 47.2 | 5.58 | 23.3 | 6.03 | 0.3 | 5.06 | 1.01 | 5.69 | 1.11 | 3.61 | 0.67 | 4.55 | 0.71 | 99.9 | 4.51 | 15.2 | 1.86 |
| ¹ JR-2 | 303 | 25 | 8.11 | 39.5 | 51.1 | 16.3 | 38.8 | 4.75 | 20.4 | 5.63 | 0.14 | 5.83 | 1.1 | 6.63 | 1.39 | 4.36 | 0.74 | 5.33 | 0.88 | 96.3 | 5.14 | 18.7 | 2.29 |
| 分析法 | LA/ICP-MS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 目的元素 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Rb | Ba | Nb | Sr | Zr | Y | Cr | Ni | V | Pb | Cu |
|--------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| ¹ JA-3 | 62.27 | 0.7 | 15.56 | 1.15 | 0.104 | 3.72 | 6.24 | 3.19 | 1.41 | 0.116 | 36.7 | 323 | 3.41 | 287 | 118 | 21.2 | 66.2 | 32.2 | 169 | 7.7 | 43.4 |
| ¹ JB-1a | 52.41 | 1.28 | 14.45 | 2.55 | 0.148 | 7.83 | 9.31 | 2.73 | 1.4 | 0.26 | 39.2 | 504 | 26.9 | 442 | 144 | 24 | 392 | 139 | 205 | 6.76 | 56.7 |
| ¹ JB-2 | 53.25 | 1.19 | 14.64 | 3.33 | 0.218 | 4.62 | 9.82 | 2.04 | 0.42 | 0.101 | 7.37 | 222 | 1.58 | 178 | 51.2 | 24.9 | 28.1 | 16.6 | 575 | 5.36 | 225 |
| ¹ JR-1 | 75.45 | 0.11 | 12.83 | 0.35 | 0.099 | 0.12 | 0.67 | 4.02 | 4.41 | 0.021 | 257 | 50.3 | 15.2 | 29.1 | 99.9 | 45.1 | 2.83 | 1.67 | 7 | 19.3 | 2.68 |
| ¹ JR-2 | 75.69 | 0.07 | 12.72 | 0.27 | 0.112 | 0.04 | 0.5 | 3.99 | 4.45 | 0.012 | 303 | 39.5 | 18.7 | 8.11 | 96.3 | 51.1 | 3.1 | 1.99 | 3 | 21.5 | 1.36 |
| 分析法 | XRF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 目的元素 | Cs | Sc | La | Sm | Eu | Yb | Lu | Th | Hf | Cr | As | Sb | Co | Ir | Au | Hg | B | Si | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------|-------------------|--------------------|------|-------|--|
| ¹ JA-3 | 2.08 | 22 | 9.33 | 3.05 | 0.82 | 2.16 | 0.32 | 3.25 | 3.42 | 66.2 | 4.68 | 0.32 | 21.1 | n.d ^{*1} | 0.95 | 1.9 | 24.8 | 29.11 | |
| ¹ JB-1a | 1.31 | 27.9 | 37.6 | 5.07 | 1.46 | 2.1 | 0.33 | 9.03 | 3.41 | 392 | 2.3 | 0.25 | 38.6 | n.d ^{*1} | 0.71 | 6.65 | 7.88 | 24.5 | |
| ¹ JB-2 | 0.85 | 53.5 | 2.35 | 2.31 | 0.86 | 2.62 | 0.4 | 0.35 | 1.49 | 28.1 | 2.87 | 0.25 | 38 | n.d ^{*1} | 5.64 | 4.78 | 30.2 | 24.89 | |
| ¹ JR-1 | 20.8 | 5.07 | 19.7 | 6.03 | 0.3 | 4.55 | 0.71 | 26.7 | 4.51 | 2.83 | 16.3 | 1.19 | 0.83 | n.d ^{*1} | 0.25 | 3.4 | 117 | 35.27 | |
| ¹ JR-2 | 25 | 5.59 | 16.3 | 5.63 | 0.14 | 5.33 | 0.88 | 31.4 | 5.14 | 3.1 | 19.2 | 1.51 | 0.46 | n.d ^{*1} | 0.13 | 0.9 | 145 | 35.38 | |
| Allende | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 780 | 140 ^{*2} | 12.1 ^{*3} | - | - | |
| 分析法 | INAA | | | | | | | | | | | | | | | | | PGA | |

太字で示した標準試料の公表値を基準に、未知試料中の目的元素濃度を計算する。

*1 本研究では JB-1a、JR-2 中の Au と Hg は検出不可であるため、n.d とした。公表値は Imai *et al.* (1995) に示されている。

*2 Allende 中 Ir、Au 濃度は J. C. Laul (私信) による。

*3 Allende 中 Hg 濃度は標準溶液を標準試料として INAA で分析し、石本 (私信) による。

に保管する。

試料は水をかけ流しながら回収したために、フィルター内で比重によって分級している。スチロール瓶中でサジを使って均質になるよう良く混ぜ合わせた試料を20cm四方ほどの大きな紙の上に広げ、一つの山にする。その試料の山を4つに分割し、そのうち4分の2をひとつの山にして、再度4分割する作業を数回繰り返す(四分法)。化学分析に使用する試料として5g以上を取り分け、アルミナ製乳鉢ですりつぶして新しいスチロール瓶に保管する。残りの試料は元のスチロール瓶に戻して保管する。

INAAに用いる試料はここで0.1~0.2gを取り分ける。XRFとLA-ICP-MSで分析する試料は、高温で加熱して水、有機物等を分解揮発させる(強熱減量)。加熱後の試料は合計2.0g(XRFとLA-ICP-MSに1.3g、PGAに0.7g)必要であることから、減量することを見込んで約5g程度の試料を加熱する。強熱減量は2段階で行う。まず、恒量させた石英つばに試料を入れ、るつば込みの重量を記録する。110℃に設定した乾燥機で乾燥させて水分を蒸発させる。この試料を900℃に設定した電気炉で1時間加熱する。このとき、有機物や炭酸塩が二酸化炭素等酸化物に分解され揮発する。試料が恒量に達したらスチロール瓶に入れてデシケーター内で保管する。

INAAでは自然乾燥した試料、他の3分析法では900℃加熱乾燥した試料を使うため、揮発した成分の量によって試料重量が変わる。そのため、分析値の計算を行う際には、上記の作業で記録した自然乾燥の重量と900℃加熱乾燥後の重量の差から揮発成分の含有率を計算して、重量の補正を行う必要がある。

3.3. XRFによる分析方法

試料にエックス線を照射し原子を励起させると、原子の核外軌道電子が弾き出される。このときにできた核外軌道電子の空位に外側の軌道の電子が遷移すると蛍光エックス線(特性エックス線)が放出される。蛍光エックス線は元素に固有なエネルギーを持ち、その強度は濃度に比例することから、元素の同定および定量が可能である。

試料はガラスビードとよばれるガラス質の薄い円盤にして分析する。900℃加熱乾燥した試料約1.3gを精秤し、110℃で乾燥させた四ホウ酸リチウムを試料の2倍(約2.6g)加えてアルミナの乳鉢で均一に混ぜ合わせる。これを白金のつばに移し、東京科学社製の高周波溶融装置(ビードサンブラ)TK-4100を用いて試料を最高1200℃で加熱融解してガラスビードを作製する。揮発性成分が十分に抜けていない試料でビードを作製すると、融解時

に発泡がおり、ビード表面に凹凸ができ、XRF分析値の確度が悪くなるので900℃加熱乾燥が必要である(小林, 2001)。ガラスビードの分析には富士常葉大学に設置されている理学電機工業社の波長分散型蛍光X線分析装置RIX2100にRh管球を装着して使用し、電圧50kV、電流値50mAの条件で1試料につき約1時間測定する。検量線の作成には吉田・高橋(1997)に掲載されている壱岐火山岩試料を使用しており、その他の詳しい分析条件や分析確度、分析値の再現性等は佐野(2002)に詳しく記載されている。分析する元素は、主成分10元素(SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、FeO* (全鉄をFeOとした値)、MnO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅)および微量元素10元素(Rb、Ba、Nb、Sr、Zr、Y、Cr、Ni、V、Cu(2000年~2004年)またはPb(2005年~2008年))である。なお、XRFで定量されたYとSiの分析値は、それぞれLA-ICP-MSとPGAで内標準元素として補正計算に使用する。分析結果の正確度は独立行政法人産業技術総合研究所が販売している岩石標準試料JB-1a、JA-3、JR-2の分析値と推奨値(表2)との比較により検討する。

3.4. LA-ICP-MSによる分析方法

ICP-MS分析は、試料を大気圧下でArプラズマに通してイオン化し、そのイオンを質量と電荷の比により選別してイオン一つ一つを検出する質量分析法である。多数の微量元素を同時にしかも短時間で高精度分析することができる。立正大学では質量分離部が四重極型のICP-MS装置(SII社製SPQ9000)を使用し、この分析装置に試料を導入するためにLA(Laser ablation)装置(CETAC社製Nd-YAGレーザー(波長266nm)装置LSX-200)を使用している。LA装置は固体試料にレーザーを照射して直接エアロゾル化して、アルゴンガスに乗せてプラズマの中に送り込んでいる。この方法は試料を溶解する必要がないので、試料への汚染を極力少なくできる。また、溶液法では水分子等と結合して複雑な分子イオンが生じることにより補正計算が必要となるが、LA法ではその補正をする必要がほとんどない。本研究では、XRF用に作製したガラスビードをLA-ICP-MS分析にも使用している。これは、レーザーでエアロゾル化するのに適している均質なガラス試料であることに加え、次に述べる分析値の定量化および内標準補正が容易であることがその理由である。分析条件や手法については、新藤ほか(2009, 本号)を参考にすると良い。

ICP-MSで得られる分析結果は、単位時間当たりに検

出装置でカウントされたイオンの個数、すなわち強度比のみが得られる。そこで、各元素の強度を濃度 (ppm) として示すために、独立行政法人産業技術総合研究所の岩石標準試料 JA-3 (表 2) を分析して得られた強度と公表値を、未知試料の強度と比較して濃度を算出する。さらに、分析装置のドリフトによる分析感度の変動や、試料がレーザーでエアロゾル化される効率が化学組成によって異なるために生じる感度の変化 (マトリックス効果) を補正する必要がある。本研究ではガラスビード試料は XRF で定量された Y を内標準元素として用いて補正している。LA-ICP-MS で分析して得られた Y の濃度と、XRF で求められた同じガラスビードの Y の濃度の比から、ICP-MS で得られている感度の増減率を求めて、同時に分析されたその他の元素の濃度を補正する。最新の分析技術の情報交換のために、毎年東京工業大学理学部地球惑星科学科平田研究室で開かれる ICP-MS 技術セミナー (主に LA-ICP-MS) に参加し、本学の LA-ICP-MS 技術向上に努めている。学生の研究意欲を刺激する面でも効果的である。

3. 5. INAA による分析方法

INAA とは、原子炉で試料に熱中性子を照射し、試料中の非放射性核種を放射性核種に変え、放出される線の強度を測定し、同時に中性子照射した濃度のわかっ

ている試料 (多くの場合岩石標準試料) の強度と比較して目的元素の含有量を求める方法である。INAA は、生成した放射性核種から放出される線のエネルギーが核種によって異なるので、同時に多元素の分析が可能である。

自然乾燥後の試料約 0.2g を洗浄したポリエチレン製のバイアル (0.2ml 容量、キャップ付、Bel-Art products 製) に入れて精秤し、バイアルのフタと本体をハンダゴテで融封する。検出器と放射性物質の距離が線強度の検出に影響するため、線強度測定時の試料位置を検出器から一定距離に保てるように、バイアル側面が水平になるよう、融封時に生じた凸部を削り落とす。ポリエチレン製の袋にバイアルを入れ、ヒートシーラーを用いて融封する。

試料は日本原子力開発機構原子力科学研究所へ輸送し、原子炉で試料に同時に熱中性子を照射する。使用原子炉と照射設備は、原子炉の運転状況により原子炉施設と打ち合わせて決定する。利用する設備や原子炉の出力等に応じて、照射後に測定する線強度がほぼ同じになるように、照射時間と試料数を調整する。照射後の試料は青山学院大学理工学部アイソトープ実験室内のドラフト内で照射時に試料を包装していたポリエチレン袋を、新しいポリエチレン袋に入れ替え、融封する。線強度の測定には同実験室に設置されている Ge 検出器を利用した。

表 3 INAA で分析する元素の安定核種、生成核種および線エネルギー

| | 安定核種 | | 生成核種 | | 線エネルギー (keV) | 妨害となる核種と線エネルギー (keV) |
|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---|
| | 核種名 | 存在比 | 核種名 | 半減期 | | |
| 測定 1 (照射後約 5 日) | ¹⁵² Sm | 0.267 | ¹⁵² Sm | 46.8 時間 | 103.2 | ²³⁰ U (²³⁹ Np) : 103.7, 106.5 |
| | ¹⁷⁶ Lu | 0.0259 | ¹⁷⁷ Lu | 6.74 日 | 208.3 | ²³⁹ Np : 209.8 |
| | ²³² Th | 1.00 | ²³³ Pa | 27.0 日 | 311.9 | ¹⁹² Ir : 308.5 ; ¹⁶⁹ Yb : 307.7 |
| | ⁵⁰ Cr | 0.0431 | ⁵¹ Cr | 27.8 日 | 320.1 | ¹⁹² Ir : 316.5 ; ¹⁴⁷ Nd : 319.4 ; ¹⁷⁷ Lu : 321.3 |
| | ¹³⁸ La | 0.999 | ¹⁴⁰ La | 40.2 時間 | 328.8, 487, 1596.6 | ⁵⁹ Fe : 335.0 ; ¹⁹² Ir : 489.1 |
| | ¹⁷⁴ Yb | 0.3183 | ¹⁷⁵ Yb | 4.19 日 | 396.1 | ²³³ Th (²³³ Pa) : 398.7 |
| | ¹⁹⁷ Au | 1.00 | ¹⁹⁸ Au | 2.7 日 | 411.8 | ¹⁵² Eu : 411.1 |
| | ¹⁸¹ Hf | 0.352 | ¹⁸¹ Hf | 42.4 日 | 482.2 | ¹⁹² Ir : 484.7 ; ¹⁸¹ Hf : 475.9 |
| | ⁷⁵ As | 1.00 | ⁷⁶ As | 26.4 時間 | 559.1, 657.1 | ¹²² Sb : 564.4 |
| | ¹³³ Cs | 1.00 | ¹³⁴ Cs | 2.06 年 | 797.0 | ¹³⁴ Cs : 802.0 |
| | ⁴⁵ Sc | 1.00 | ⁴⁶ Sc | 83.9 日 | 889.3, 1120.5 | ¹⁶⁰ Tb : 879.4 ; ^{110m} Ag : 884.7 ; ¹⁵² Eu : 1112.1 ; ⁶⁵ Zn : 1115.5 |
| | ⁵⁸ Co | 1.00 | ⁶⁰ Co | 5.26 年 | 1173.2, 1332.5 | ¹³⁴ Cs : 1167.9 ; ¹⁶⁰ Tb : 1177.9 |
| | 測定 2 (照射後約 1 ヶ月) | ¹⁵¹ Eu | 0.478 | ¹⁵² Eu | 12.7 年 | 121.8, 1408.1 |
| ²⁰² Hg | | 0.298 | ²⁰³ Hg | 46.9 日 | 279.2 | |
| ²³² Th | | 1.00 | ²³³ Pa | 27.0 日 | 311.9 | ¹⁹² Ir : 308.4 ; ¹⁶⁹ Yb : 307.7 |
| ⁵⁰ Cr | | 0.0431 | ⁵¹ Cr | 27.8 日 | 320.1 | ¹⁹² Ir : 316.5 ; ¹⁴⁷ Nd : 319.4 ; ¹⁷⁷ Lu : 321.3 |
| ¹⁹¹ Ir | | 0.373 | ¹⁹² Ir | 74.2 日 | 468.1 | |
| ¹⁸⁰ Hf | | 0.352 | ¹⁸¹ Hf | 42.4 日 | 482.2 | ¹⁹² Ir : 484.7 ; ¹⁸¹ Hf : 475.9 |
| ¹³³ Cs | | 1.00 | ¹³⁴ Cs | 2.06 年 | 797.0 | ¹³⁴ Cs : 802.0 |
| ⁴⁵ Sc | | 1.00 | ⁴⁶ Sc | 83.9 日 | 889.3, 1120.5 | ¹⁶⁰ Tb : 879.4 ; ^{110m} Ag : 884.7 ; ¹⁵² Eu : 1112.1 ; ⁶⁵ Zn : 1115.5 |
| ⁵⁸ Co | | 1.00 | ⁶⁰ Co | 5.26 年 | 1173.2, 1332.5 | ¹³⁴ Cs : 1167.9 ; ¹⁶⁰ Tb : 1177.9 |
| ¹²³ Sb | | 0.573 | ¹²⁴ Sb | 60.3 日 | 1691.1 | |

各核種の放出するいくつかの線強度のうち、最も高いか周囲に妨害ピークが少ないピーク (太字で示した線エネルギー) を用いて濃度計算を行う (福岡, 1993)。

測定は、分析する元素（生成した核種の半減期）に応じて原子炉での中性子照射後5日前後（表3；測定1）と1ヵ月後（表3；測定2）に分けて実施する。未知試料の線強度を、岩石標準試料（JB-1aまたはJR-2、表2）の線強度と比較することにより元素濃度へ換算する。分析値の正確度は、同時に照射した複数の岩石標準試料の分析結果と推奨値との対比で確認する。

3. 6. PGAによるBの分析方法

ガラスビード試料を用いて分析するLA-ICP-MSでは、ガラスビード作製に四ホウ酸リチウムを使うことから、Bの定量分析ができない。そこで、Bの分析にはPGAを適用する。PGAとは、試料に中性子を照射中に放出される即発線を測定することで、元素または同位体を分析する方法である（米沢，2002）。

900で乾燥させた粉末試料は、アルミナの乳鉢で細かくすりつぶし、約0.7gを専用の治具を用いて、約0.4tの圧力で直径12mm、厚さ3mm程度の錠剤に成型する（佐野ほか，1998）。これをFEP（四フッ化エチレン六フッ化プロピレン共重合樹脂、FLON INDUSTRY社製）袋に入れ、ヒートシーラーで融封する。中性子の照射、即発線の測定は日本原子力開発機構原子力科学研究所JRR-3M炉（最大熱出力3MW）の中性子ガイドビームホールに設備された即発線測定設備で行う。錠剤試料を包装したFEP袋の余白をPTFE製の糸で中性子ビームが一定の位置に照射されるように固定する。中性子の照射時間は、標準試料は60分間以上、未知試料は試料の即発線強度により調整する（最低20分間）。

線スペクトロメーターで得られるBの即発線のピークは470 - 485keVに観測され、特徴的な台形型を示す。その幅は通常の線ピークに比べて8～10倍と大きい。このピークは環境試料や岩石試料ではNa（472keV）とNi（483keV）のピークの干渉を受ける可能性がある。特にNaは、地質試料では普遍的に検出される主要元素の一つであることから、Naのピークを除去する計算を行わなくてはならない。本研究では、佐野ほか（1998）の方法に従ってBのピークを解析する。Bの濃度は、未知試料の線強度と岩石標準試料（JB-2、表2）の強度を対比させて算出する。さらに、中性子強度の時間変動や、錠剤の形や大きさのわずかな差異によるBの線強度（幾何効率）の変動を補正するために、試料ごとにPGAで求めたSiの分析値とXRFで求めたSiの分析値の比を用いて、Bの濃度の補正を行う（内標準補正；佐野ほか，1998）。PGAでは試料にH₂Oが数%以上含

まれていると、水素によって中性子が乱反射を受け、線検出器の不感時間を大きくし、測定を妨害する。一般に河床堆積物は含水量が多いので、900加熱乾燥が必要である。

4. 地球化学図の作成

本章では採取した地点と化学分析の結果を地球化学図にあらわすために使用しているアプリケーションとその利用手順をまとめる。

分析値から地球化学図を作成する場合、当初はグリッド方式で行ったが、2006年以来、名古屋大学で開発された「地球化学図作成プログラム」（稲吉，2005）を使用している。採取地点の位置情報と化学組成が入力されたExcelの表計算シートをテキスト形式（*.csvまたは*.txt）で保存して、上記プログラムで読み込むと、元素ごとに濃度分布を示すイメージファイル（地球化学図）を得ることができる。

次に、地図情報ソフトの「カシミール」に採取地点の緯度経度を入力して、地点が示された地形図のイメージファイル（*.bmp）を作成する。市販のグラフィックソフトであるAdobe Photoshopを使用してカシミールで作成した採取地点を示したイメージファイル、上記で作図した元素ごとの地球化学図のレイヤー、調査した流域を囲う尾根線を線で囲んだレイヤーを重ね合わせる。

レイヤーは、尾根線の内側を完成した地球化学図として表現するためである。分析して得られた化学組成は、集水域を代表する値として尾根線で囲われた地域を代表する値であることから、必要に応じて尾根線の外側の領域を切り取る等、完成したイメージの加工を工夫する。

5. 地球化学図の今後の展開と課題

地球化学図に関わる研究の今後の展開としては、いくつかの方向性が考えられる。まず、2008年度をもって、荒川源流についてかなり広い範囲の調査が終了した（図8）。これまでに調査が完了した地域については、分析値をまとめて公開する準備を進めている。さらに、調査を完了した地域については、作成した地球化学図を基礎資料として、例えば中津川で2006年に本工事が完了した大滝ダム（2008年末で試験湛水中）の周辺と下流部の環境変化をモニタリングすることは、今後の新たな課題の一つであろう。また、これまでに分析した試料の残りが自然乾燥された状態で保存されていることから、これら



図8 荒川上流の地球化学図の試料採取地点
: 2000年 - 2008年度に試料採取した地点 (合計337地点)

について新たな目的をもって分析するという方法も考えられる。例えば、Asahara *et al.* (2006) は、名古屋大学が地球化学図を作成するために採取した試料と調査対象地域に露出している基盤岩の⁸⁷Srと⁸⁶Srを分析し、その同位体比を比較することで河床堆積物の起源について論じた。その結果、地質図には表わされていない岩石(貫入花崗岩等など)の存在を予測している。我々の荒川上流の調査でも、高濃度のMgとCrが検出された地点についてクロム苦土鉱を伴う鉱脈の存在を予測しており(新藤ほか, 2008)、基盤岩についての詳細な地質調査と化学分析をすることで、新たな科学的事実が明らかになる可能性がある。

一方で、今後は調査対象地域をさらに拡大するという計画もある。拡大の対象とする地域は、秩父湖の西の甲武信ヶ岳や雁坂峠方面もしくは南の雲取山方面へ遡る地域と、これまでに調査した地域から下流方面が考えられる(図8)。甲武信ヶ岳、雁坂峠および雲取山方面への調査は自動車で移動できる範囲が限られており、登山の経験や沢のぼりの技術が必要であることから、山岳での活動や地質調査の経験者による調査への参加が望まれるであろう。逆に、下流方向では荒川の本流は秩父盆地に

流れ込み、荒川中流～下流域では農地、宅地、ゴルフ場といった人工改変地や建造物が増える。都市開発が進んだ地域では、試料の採取方法や分析する項目について工夫する必要もあるだろう(例えばFordyce *et al.*, 2005)。

第1章で述べたように、日本における地球化学図作成は、複数の研究機関、大学による成果が挙げられる。立正大学を含め、これら機関の成果は2009年度日本地球惑星科学連合同大会(2009年5月16～21日)地球化学セッションC202「地球化学図の新展開を探る: 環境、資源、研究、教育」でみることができる。新たな研究成果報告や、会場での議論によって開かれるこれからの地球化学図への道が期待される。また、2008年度の同位体比部会における本研究の取り組みを紹介した講演では、採取した試料を地球化学図以外の研究へ応用するという提案があった。例として、河床堆積物の宇宙線生成核種含有量から、侵食速度を求める研究がある。これまで本研究では集水域1km²ごとに試料を採取しているため、集水域ごとの地形・地質と侵食速度についての考察が可能であろう。実際に地形学研究者からの試料供給を望む声が多数あるため、保管している河床堆積物試料を希望者に配分することも考えている。

地球化学図の作成は、上記のように新しいアプローチ方法や課題が生まれており、これまでに調査を終えた地域についてもより深く探求する研究に発展させられる可能性がある。

謝 辞

XRF の分析では富士常葉大学の XRF 分析装置を利用させていただきました。INAA の中性子照射では日本原子力機構原子力科学研究所東京大学開放研究室のみなさまにお世話になりました。また、放射性物質の取り扱い、線の測定では青山学院大学理工学部アイソトープ実験室を利用させていただきました。PGA の中性子照射、即発線測定は日本原子力機構原子力科学研究所 3 号炉ガイドビーム施設を利用させていただきました。多くの方の支援に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 「荒川の石」編集委員会 (1999) 地学ハンドブック11「川原の石のしらべ方 荒川の石」。地学団体研究会, 66p.
- Asahara, Y., Ishiguro, H., Tanaka, T., Yamamoto, K., Mimura, K., Minami, M. And Yoshida, H. (2006) Application of Sr isotopes to geochemical mapping and provenance analysis: The case of Aichi Prefecture, central Japan. *Applied Geochemistry*, 21, 419-436.
- Breward, N. (2007) Arsenic and presumed resistate trace element geochemistry of the Lincolnshire (UK) sedimentary ironstones, as revealed by a regional geochemical survey using soil, water and stream sediment sampling. *Applied Geochemistry*, 22, 1970-1993.
- Darnley, A. G., Bjorklund, A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Kovan, P. V., Plant, J., A., Steinfeld, A., Tauchid, M., and Xuejing, X. (1995) A global geochemical database for environmental and resource management, 19, UNESCO Publishing, Paris.
- 海老原充 (2005) 現代放射化学。化学同人, 224p.
- Fordyce, F. M., Brown, S. E., Ander, E. L., Rawlins, B. G., O'Donnell, K. E., Lister, T. R., Breward, N. and Johnson, C. C. (2005) GSUE: urban geochemical mapping in Great Britain. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5, 325-336.
- 福岡孝昭 (1993) 機器中性子放射化分析法 (INAA), 第四紀学会編「第四紀試料分析法 2」。東京大学出版会, 199 - 217.
- 福岡孝昭・栗下勝臣・小林町恵・浦野日峰・新藤智子・杉内由佳・福士裕輔・加藤直子・楠野葉瑠香・越田千博・杉恵理子・小暮岳実 (2005) 荒川上流中津川・神流川流域の地球化学図の作成。立正大学文部科学省学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンター (ORC) 整備事業平成16年度事業報告書, 128 - 135.
- 福岡孝昭・新藤智子・杉内由佳・草野未緒・宮下香織・越田千博・杉恵理子・加藤直子・楠野葉瑠香・星有哉・関根友美・

- 福士裕輔・栗下勝臣・小暮岳実・伊藤靖浩・井上素子 (2006) 荒川上流中津川・神流川・河原沢川流域の地球化学図。立正大学文部科学省学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンター (ORC) 整備事業平成17年度事業報告書, 207 - 214.
- 福岡孝昭・新藤智子・楠野葉瑠香・町田尚久・王丹妮・星有哉・関根友美・東千亜希・永川由紀・宇野友則・高草木愛・杉内由佳・小暮岳実・伊藤靖浩・石本光憲 (2007) 荒川上流河原沢川・赤平川流域の地球化学図。立正大学文部科学省学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンター (ORC) 整備事業平成18年度事業報告書, 166 - 175.
- 福岡孝昭・新藤智子・嶋田有里奈・関美乃・三浦亜由美・楠野葉瑠香・宇野友則・高草木愛・東千亜希・永川由紀・田澤雄二・小暮岳実・石本光憲 (2008) 荒川上流薄川流域の地球化学図。立正大学文部科学省学術研究高度化推進事業オープンリサーチセンター (ORC) 整備事業平成19年度事業報告書, 151 - 160.
- 古川路明 (1994) 現代化学講座15 放射化学。朝倉書店, 221p.
- 古川直道・袖原雅樹・伊藤裕之・高本のぞみ・袖原美恵 (2004) 河川堆積物の化学組成の季節変動 室見川および袈川の例。福岡大学理学集報, 34, 27 - 44.
- 今井登・寺島滋・太田充恒・御子柴 (氏家) 真澄・岡井貴司・立花好子・富樫茂子・松久幸敬・金井豊・上岡晃・谷口政碩 (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.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. (1995) 1994 compilation values for GSJ reference samples, 'Igneous rock series'. *Geochemical Journal*, 29, 91-95.
- 稲吉正実 (2005) 地球科学図作成プログラム。名古屋大学博物館報告, 21, 51 - 56.
- 伊藤裕之・袖原雅樹・石原与四郎・古川直道 (2007) 福岡県西部, 室見川および那珂川流域の地球化学図。福岡大学理学集報, 37, 37 - 56.
- 伊藤泰男・海老原充・松尾基之 (2004) 放射化分析ハンドブック 確度の高い多元素同時微量分析への実践。日本アイソトープ協会, 133p.
- Johnson, C. C., Brown, S. E. and Lister, T. R. (2003) G-BASE Field Procedures Manual version 1.1. Internal Report, IR/03/096N. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham.
- Johnson, C. C., Breward, N., Ander E. L., and Ault, L. (2005) G-BASE: baseline geochemical mapping of Great Britain and Northern Ireland. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5, 347-357.
- 上岡晃・伊藤司郎・田中剛・今井登 (1990) 地球化学図 元素の地表分布とその解析, 地学雑誌, 99, 555 - 569.
- Knoll, G. (1991) 放射線計測ハンドブック。木村逸郎・阪井英次訳, 日刊工業出版プロダクション, 814p.
- 小林町恵 (2001) 河川堆積物試料の蛍光X線分析法の確立 地球化学図主成分元素分析, 立正大学地球環境科学部平成14

年度卒業論文.

Montaser, A. (2000) 誘導結合プラズマ質量分析法. 久保田 正明監訳, 化学工業日報社, 942p.

Plant, J. A., Klaver, G., Locutura, J., Salminen, R., Vrana, K., Fordyce, F. M. (1997) The Forum of European Geological Surveys Geochemistry Task Group: geochemical inventory. *Journal of Geochemical Exploration*, 59, 123-146.

佐野貴司・福岡孝昭・長谷中利昭・米沢伸四郎・松江秀明・澤 幡浩之 (1998) 即発線による火山岩中ホウ素の分析 ケイ素を用いた内部標準法, *Radioisotopes*, 47, 735 - 744.

佐野貴司 (2002) 蛍光X線分析装置を用いた火成岩中の主成分および微量成分の定量. 富士常葉大学紀要, 2, 43 - 59.

新藤智子・福岡孝昭・青木かおり・石本光憲・立正大学地球環境科学部宇宙地球化学研究室 (2008) 高濃度 Mg, Cr 地点の発見と Pb 人為汚染の可能性 荒川上流薄川流域の地球化学図. 2008年度日本地球化学会第55回年会講演要旨集, 211.

新藤智子・杉内由佳・嶋田有里奈・福岡孝昭 (2009) レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析 (LA-ICP-MS) 法によるガラスビード試料の定量分析. 地球環境研究, 11, 229 - 240.

高本のぞみ・袖原雅樹・古川直道 (2005) 福岡県東部, 今川・ 祓川流域の元素濃度分布. 福岡大学理学集報, 35, 41 - 66.

田中剛・川邊岩夫・山本鋼志・岩森光・安原靖大・三村耕一・ 浅原良浩・伊藤貴盛・米澤千夏・ドラグシャヌ クリスチャン・神田聡・清水乙彦・林正人・三浦典子・青木浩・太田充 恒・戸上薫・鳥海貴弘・松村陽子・榊原智康・谷水雅治・水 谷嘉一・宮永直澄・村山正樹・大林扶美子 (1995) 愛知県瀬 戸市周辺における河川堆積物中の元素分布と地圏環境評価の 試み. 地球化学, 29, 113 - 125.

山本鋼志・田中剛・川邊岩夫・岩森光・平原靖大・浅原良浩・ 金奎漢・Chris Richadson・伊藤貴盛・Cristian Dragusanu・ 三浦典子・青木浩・太田充恒・榊原智康・谷水雅治・水谷嘉 一・宮永直澄・村山正樹・仙田量子・高柳幸央・井上裕介・ 川崎啓介・高木真理・根布悟志・稲吉正実 (1998) 愛知県豊 田市北東部の領家花崗岩地域の地球化学図. 地質学雑誌, 104, 688 - 704.

米沢伸四郎 (2002) 原子炉中性子による即発ガンマ線分析, 分 析化学, 51, 61 - 96

吉田秀人・高橋奈津子 (1997) 北海道日高帯, 幌満マントルダ イアピル内での全岩主化学組成と微量成分組成の挙動. 岩鉱, 92, 391 - 409.

The Future Prospect for the Geochemical Mapping Projects and Manual of a Stream Sediment Geochemical Survey

AOKI Kaori*, SHINDO Tomoko*, KUSUNO Haruka*, FUKUOKA Takaaki*

*Graduate School of Geo-environmental Science, Rishsho University

Keywords: geochemical map, stream sediment, Ara river