

地球化学図の作成

伊藤 司郎 (地質調査所)

要旨

1950年代から公害が社会的問題となり、環境の人為汚染による公害の予測・予防に資するためにバックグラウンドとしての地球化学図の作成とその有効性を明らかにする研究が要請されていた。

そのためまず北関東にモデルフィールド(約4000km²,北緯36度20分~37度、東経140度~140度20分の陸域部)を設定し、80メッシュ以下の河床堆積物(約3800試料)を採集した。分析した53元素の濃度分布図及び各種統計処理図をアトラス形式で出版した。これらの研究成果がプロトタイプとなって、その後の沿岸域を含む日本全土をカバーする「地球化学図」へと発展した。

まえがき

ある特定の地域で発生する特異な病の原因が特定の元素の存在にあると疑われることがある。その特定の元素の源が工業や鉱業の活動による場合は公害問題として重大な社会問題となる。そのような環境の人為汚染は汚染される前の状況と現況を比べる事ができれば容易に原因物質を明らかにすることができる。

地表における元素の濃度分布図を地球化学図と呼ぶ。その元素の存在の大部分はその地域の地質や風化作用などの自然営力に由来する。その他に火山活動や鉱化作用などで付加された場合が考えられる。そのことから地球化学図は広域的な鉱床探査又は鉱床のポテンシャル評価のために有効と考えられ、その目的のために一般的に作られてきた。鉱床探査の場合は鉱床を形成している元素または元素群の地表における濃度分布図が主な関心事である。或いはその鉱化作用に関連した元素群の地球化学図が研究対象となる。

1950年代からの水俣病やイタイイタイ病などがメチル水銀やカドミウムの人為汚染に起因すると考えられる等、公害問題が多発してきた。これらのように環境の人為汚染に汚染源を特定したり、汚染経路を調査することは問題の処理に重要である。筆者はそのことに地球化学図を利用する事ができることを指摘し、そのためには、公害発見後の時系列上早い段階からの広域の地球化学図を必要としている事を主張してきた(伊藤、他、1989,1990)。このような広域の地球化学図は既に数か国(イギリス、ドイツ、フィンランド、オーストリア、アメリカ合衆国、中国、ロシア等)で発行されており(Fauth et al.1985; Kautsky et al.1986; Thalmann et al.1986; Weaver et al.1983; Webb et al. 1978) それぞれ高く評価されている。

しかし、これらはそれぞれが独自の調査目的、調査法を採用しており、我が国では我が国に適した方法を検討して実施する必要がある。当時わが国では主に秋田大学や地質調査

所で探鉱目的の地球化学探鉱法の研究が実施されていた。しかし、広域の探鉱もしくは疫学的目的の調査研究は皆無であった。そこで、まず適度の広さのモデルフィールドを選び、全国規模に拡大するときの標準的な手法を検討することにした。モデルフィールドとして茨城県水戸市以北の北関東地域（北緯 36 度 20 分～37 度、東経 140 度～140 度 20 分の陸域部、約 4000km²）を設定した（第 1 図）。その検討結果の詳細は北関東の地球化学アトラス（伊藤 他、1991）に記述してあるが、以下に概要を述べる。

試料の種類

地球化学図作成に利用される試料の種類は目的によって岩石、土壌、河床堆積物、河川水、植物、湖沼堆積物、或いは大気などから選択される。それぞれ長所、短所が考えられる。環境の人為汚染の解釈に役立つ情報源として広域の地球化学図を考えているので、河床堆積物が最適の種類であると結論した。

分析法

環境の人為汚染問題にかかわる極微量の元素の分析には誘導プラズマ発光分光法、原子吸光法、中性子放射化法などが検討された。大量の試料を迅速に正確に分析する必要がある観点からそれらの長所短所がいろいろ比較されて、ここでは誘導プラズマ（ICP）発光分光法と中性子放射化法がその経済性から主たる分析法として採用された。その他の分析法や精度を比較するための外部委託分析のデータを加えて、53 元素の分析データをコンピュータファイルに保存してその後の統計処理、画像処理のデータベースとした。

ICP 発光分光法；風乾した 0.18mm 以下の試料 0.2 g を硝酸 4ml、過塩素酸 3ml、フッ化水素酸 5ml で加熱分解し、蒸発乾燥後（1+1）塩酸 6ml で溶解、水で 100ml に定容とする。測定にはシーケンシャル型の ICP 発光分光器（SPS-1200）を用い主成分 7 元素、微量成分 9 元素を分析した（今井、1987）。本簡便法で 300 試料／月の分析が可能であった。

中性子放射化法；試料 0.1 g を石英管に封入し、JRR-4 の T-パイプで 40 分間中性子照射して試料を放射化させた。照射 1 週間後及び 1 ヶ月後の 2 回高純度ゲルマニウム検出器及びマルチチャンネルアナライザーを用い測定した。この多試料、多元素のためのγ線自動計測・解析システムを開発し（田中他、1988）、河床堆積物や地質試料に充分適合したものであることが示された（上岡・田中、1989）。本システムで 80 試料／月のペースで 39 元素の微量成分が分析された。

試料の採取場所の選定

試料の採取場所の選定は各チームのリーダーに任されているが、ある程度ルール化しておいたほうがデータの解釈上有利である。そこで、原則として河川の本支流の合流地点で支流側から採取し、本流側は適度の間隔と採集密度を考慮して採取点を選ぶことにした。調査用車のアクセスに容易であることも考慮される。アクセス上、最上流部では本支流両

方から採取する。このように、採取した試料はその地点の上流域全てをカバーしていると考え、更に上流地点で採取した試料がある場合は、上流地点の試料のデータで上書きされる。

試料採集密度

広域の地球化学図を目指しているので、試料の採集密度は成果品の信頼度を左右する重要な要因である。この種のプロジェクトの先駆的な例であるイギリスでは 2.5km^2 当たり 1 試料でイングランドとウェールズ（併せて約 $151,000\text{km}^2$ ）の地球化学図を 1978 年に完成させている。西ドイツの全土（ $249,000\text{km}^2$ ）の場合は 1.5km^2 当たり 1 試料であった。日本全土（ $377,780\text{km}^2$ ）をカバーする地球化学図を考える場合は、北関東で実施した 1km^2 当たり 1 試料では採取に時間と費用がかかりすぎるので、試料密度をもっと粗く $3-4\text{km}^2$ 当たり 1 試料で十分かと思われる。

試料の採集法

河床堆積物は 80 メッシュ（ 0.18mm ）以下の粒子が分析の対象となる。できるだけ川岸の影響が少ない河床から採取した試料を乾燥してから篩い分けて分析試料とする（乾式）か、現場の河川水を注いで篩い分けてから乾燥するか（湿式）、モデルフィールドでその優劣が検討された。その結果、後者を採用することになり、1 チームに職員 1 人作業員 4 人で編成した数チームで試料の採集を実施した。モデルフィールド（第 1 図）での 1 チーム当たりの作業実績は平均で 1 日当たり 22 試料であった。

分析データの処理

膨大なデータから地球化学図を作成するにはデータのコンピュータ処理が不可欠である。当時（1990 年）のコンピュータ処理能力はまだ揺籃期にあつてハード面、ソフト面双方に地球化学図作成用に特化した手法を開発する必要があつた。

ワークステーション上に構築したデータベースの統計処理、画像処理を行って各種の地球化学図を出力するソフトウェアを開発した。まず、各試料の採取点の上流域を地形図上に表し、デジタイザで読み取り、緯度経度の点データの集合（ポリゴン）の形でワークステーション（EWS）上に入力した。このポリゴンに各試料番号と分析データを関連させて統計処理の基礎となるデータベースを構築する。

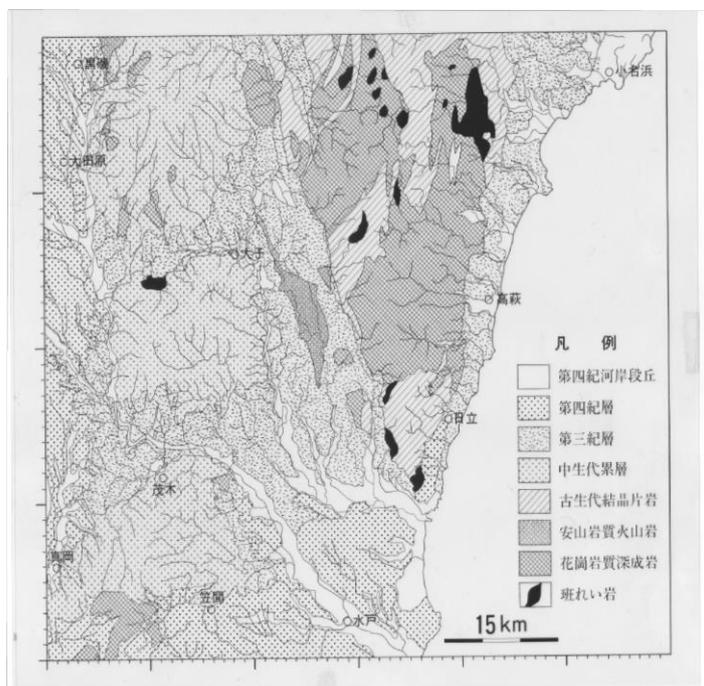
次に地図上に、ある大きさのメッシュを掛け、各メッシュ内の試料群の分析データにその試料のポリゴン面積を加味した加重平均を求め、各元素のメッシュデータとする。また、隣接するメッシュ（ 3×3 メッシュ）の平均値を中央のメッシュの値とする平滑化した図を作ることができる。このように様々な加工を施したデータファイルを地球化学図として出力する。

地球化学図の出力

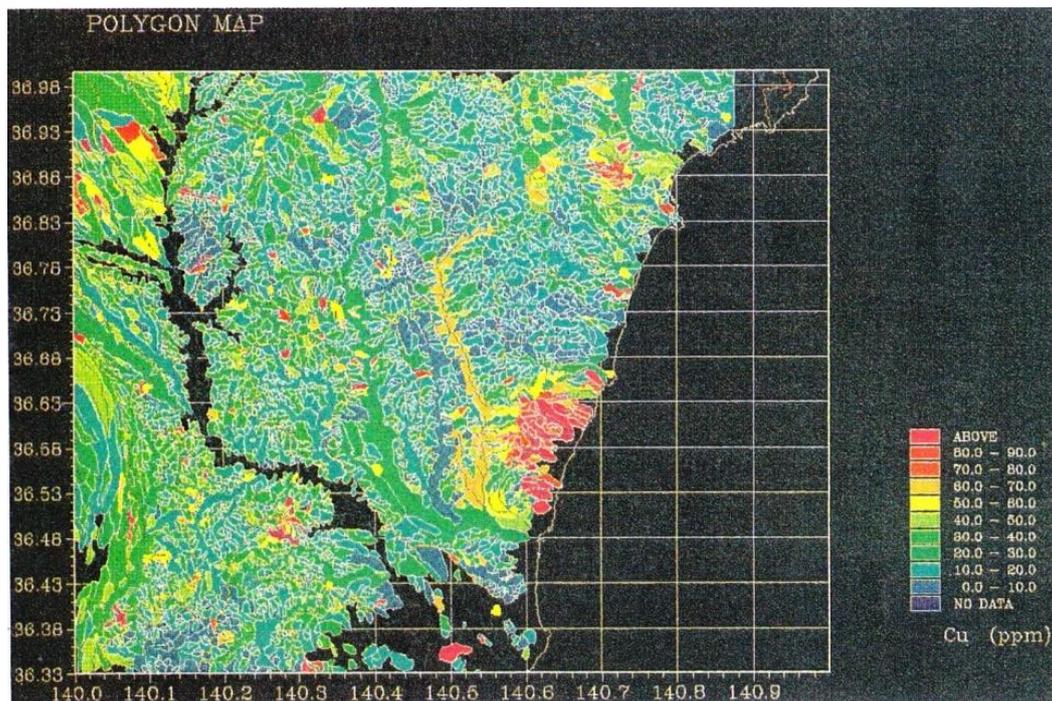
モデルフィールドで約 3850 個の試料を上記の方法で採集し、分析データを加工して各種の地球化学図を出力してその有用性を立証した。以下にその 1 部を例示する。

第 1 図にモデルフィールドの流域と地質図を重ね合わせた図を示した。なお出版したアトラスでは流域と地質図それぞれを透視フィルムとして添付してある。第 2 図は銅のポリゴンマップである。各ポリゴンがそのまま、分析値のランクに対応する色で表示されている。なお、より下流で採取された試料のポリゴンのデータはその流域のより上流で採取された試料のポリゴンのデータで上書きされている。第 3 図は 60 秒×60 秒(約 1.5km 四方)にメッシュ化されたデータを表記のランクによって色分けした銅の地球化学図である。同じ図を移動平均して平準化した図を第 4 図に示した。広域的なトレンドがはっきりと表現されている。

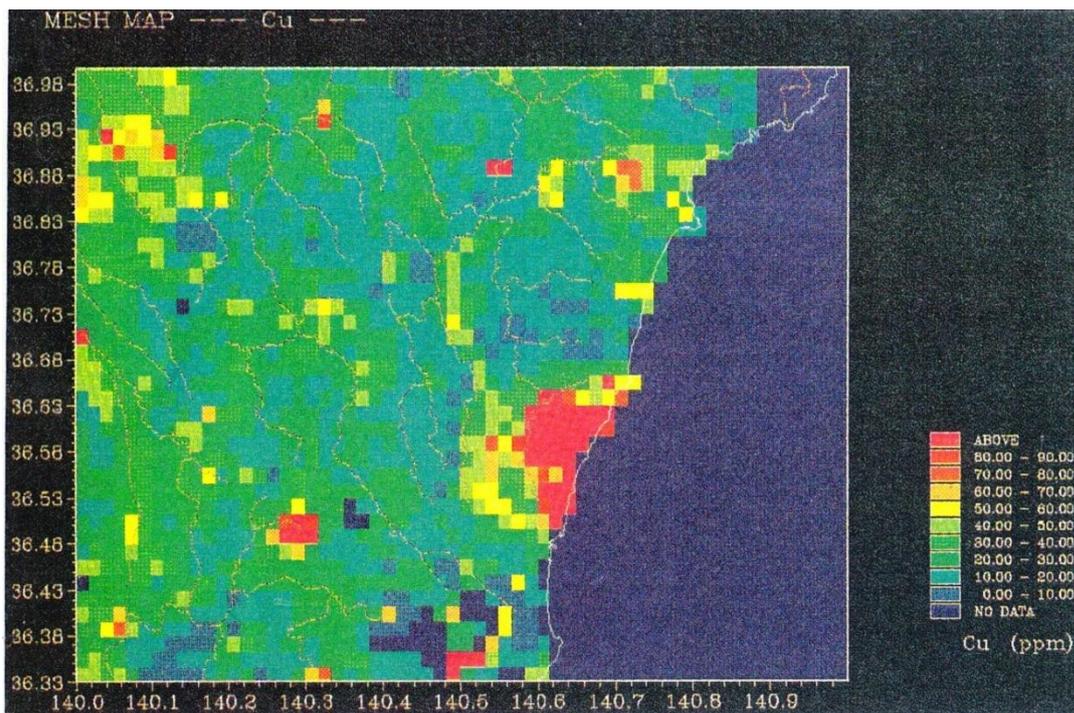
第 1 図 モデルフィールドと地質図



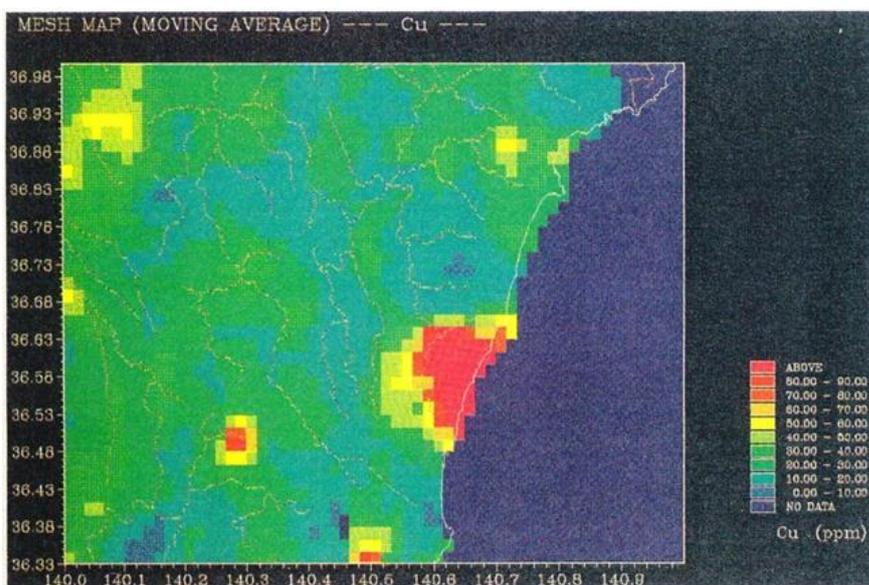
第2図 銅のポリゴンマップ (未加工)



第3図 銅のメッシュマップすなわち地球化学図である



第4図 銅の平準化メッシュマップ



その他、彩色地質図と重ね合わせて考察するのに便利なコンター図、3次元柱状図、元素間の相関関係を検討する場合に便利な3元素の重ね合わせた図などを例示した。

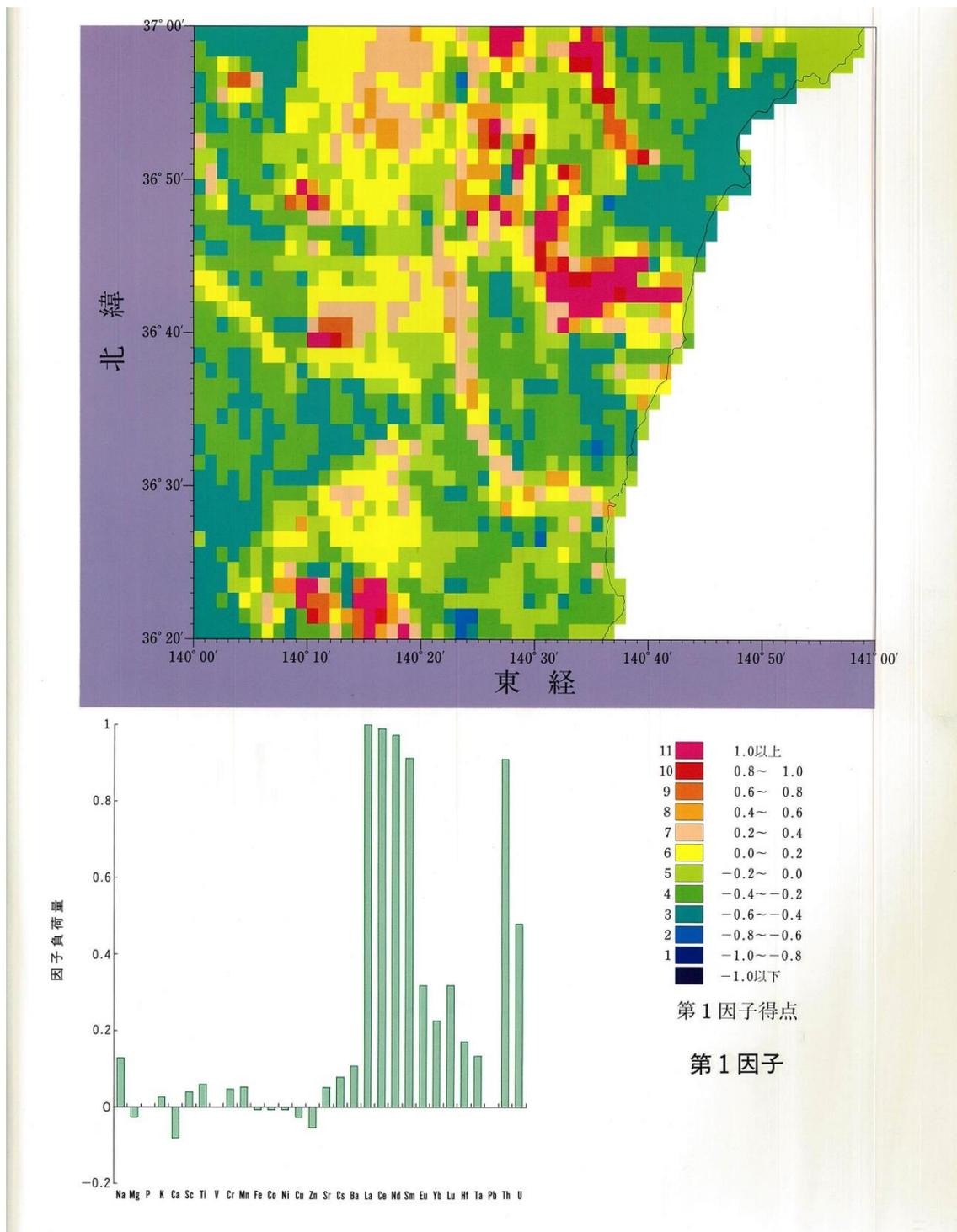
地球化学図の解釈

モデルフィールドで出力した各元素の地球化学図をこの地域の地質図（第1図）と重ね合わせて検討すると、基盤地質に対応した元素の濃度分布パターンが明らかに認められる。例えば、希土類元素、ウラン、トリウム、ハフニウムなどは花崗岩地帯及びその周辺に限って高濃度を示し、両者の関係は明らかである。また、斑レイ岩とその周辺ではクロムの濃度が異常に高く、この元素の起源を暗示している。本地域の変成岩に特徴的に高い元素はマンガンとカルシウムで、セシウムもその傾向をもっている。中・古生界の地層は他の地層や岩質に比べてバリウム及びセシウムのバックグラウンドが高い。その他の第三紀層及び第四紀層を特徴づける元素はとくに見当たらない。

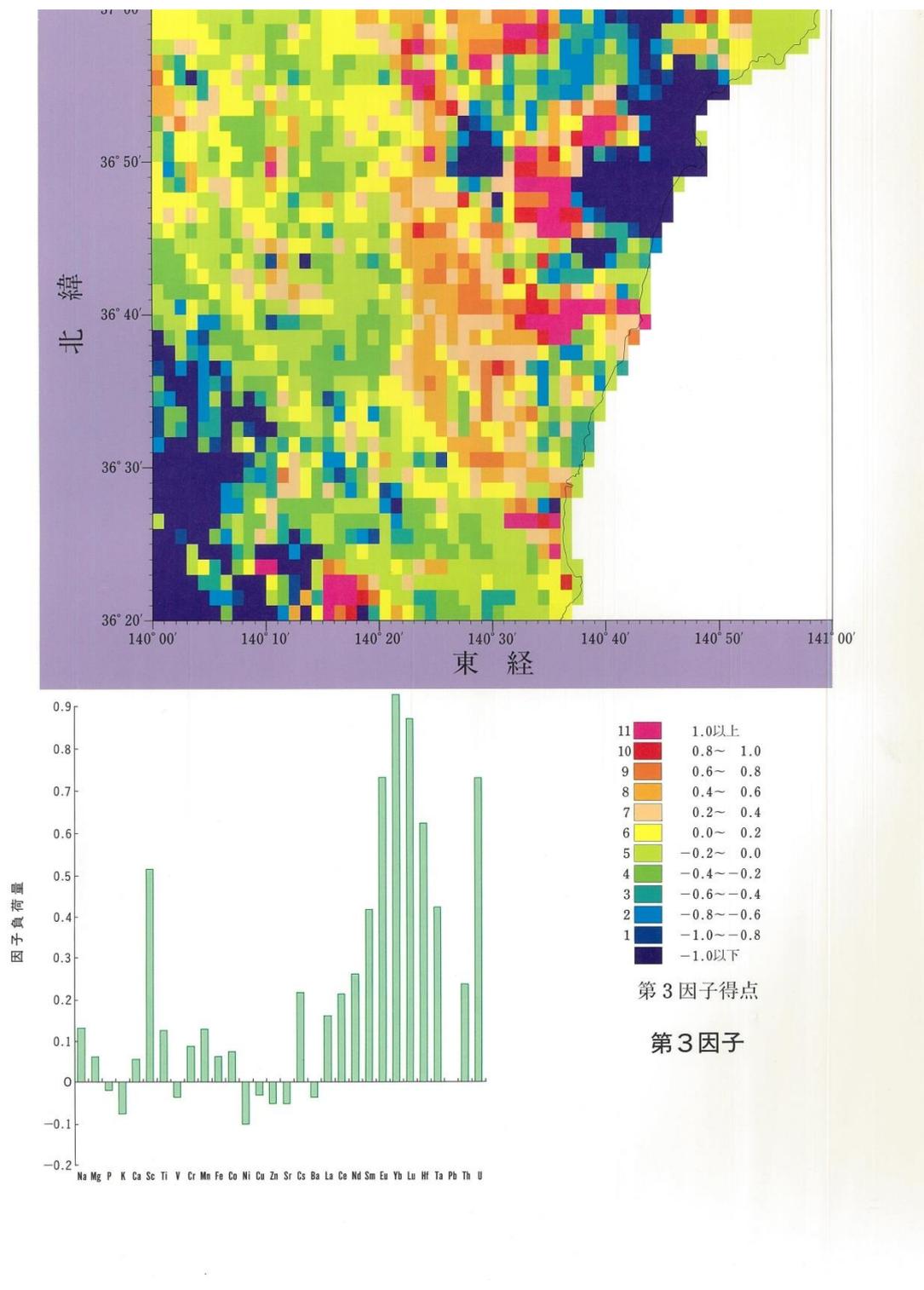
鉍化作用及び採鉍・選鉍に伴う元素群は日立及び高取の両鉍山付近で共通して超異常値を示す銅、亜鉛の他に日立地区のバリウム、高取地区のフッ素、ベリリウムが考えられる。これらの元素は鉍化作用を指示する元素群として採鉍に利用できるであろう。

元素の濃度分布図には以上のような基盤地質に由来する部分のほかに、土地利用、工場立地、人口密度など、多くの因子が反映していることが考えられる。この人為的な影響を強く受けた濃度分布を示す元素にリンと鉛がある。また、銅、亜鉛、バリウム、クロムなどの分布パターンの一部にも基盤地質からは考えられない地域があり、これらも部分的にこのグループに属していることが考えられる。

第5図 第1因子得点分布図。高得点域はモナズ石の高濃度分布域に相当する



第 6 図 第 3 因子得点分布図。高得点域はジルコンの高濃度地域に対応する。第 5 図
 のモナズ石の低濃度の花崗岩地帯であることが分かった



因子得点分布図

全試料で分析値が揃っている 30 元素について相関係数を計算した。この相関行列の中から 0.7 以上の係数値を与えた元素の組み合わせは、高い順に、

Ce-La、Ce-Nd、La-Nd、Nd-Sm、Ce-Sm、Lu-Yb、La-Sm、V-Fe、Th-Nd、Th-La
Ce-Th、Th-Sm、Fe-Co、Ti-Fe、U-La、U-Yb、V-Co、Ti-V

であった。このように、希土類元素同士及びそれらとウラン、トリウムの結束は強く、更に鉄、チタン、コバルト、バナジウムの関係の強さが示された。

これらの相関の強さは元素が群れをなして行動し、単独行動の割合が小さいことを表している。その群れの構成や元素の全分散における割合を求めるために因子分析を試みたところ、5 因子が抽出された。これら因子の強さ（固有値の大きさ）の順にその構成元素群から第一因子はモナズ石、第 2 因子は磁鉄鉱（チタン鉄鉱を含む）を意味すると解釈される。同様に第 3 因子はジルコン、第 4 因子は長石類を表す因子と考えられた。これらに対して第 5 因子は銅、亜鉛、リンの組み合わせである事からある種の人為的な原因を表わす因子であると解釈される。

この因子負荷行列を元の分析データ行列に掛け算してやると各試料の因子得点が得られる。各因子得点分布図は各因子の濃度分布図であり、各元素の地球化学図と同義である。例えば、第 1 因子の得点分布図はモナズ石の濃度分布図と言い換える事ができる（第 5 図）。地質図と重ね合わせると、この因子の高濃度地域は花崗岩地帯かその周縁部に分布しているが、花崗岩地帯でも低濃度域があることは注目される。更に第 3 因子得点分布図と重ねると、このモナズ石の低濃度の花崗岩地帯はジルコンの高濃度地帯であることが分かった（第 6 図）。

おわりに

地球化学図作成プロジェクトを企画した頃は広域の公害問題が明らかになり、その原因物質と責任が追求され始めた頃であった。世界的には自国の広域の鉱床資源探査に効率的に活用するために各国が地球化学図の作成に乗り出していた。わが国でも公害問題と鉱床のポテンシャル評価のために全国規模の地球化学図の作成プロジェクトが必要であると考えられた。それにはまず、安価で信頼できる標準的な手法を確立する事が求められる。計画の当初から大量の試料採集とその分析、データベースの構築、図示法の確立などが予測されたので、経常研究の枠では成果が得られるまで長期間かかることが難点とされていた。特に膨大なデータを処理する為のコンピュータ技術開発が未だ初期段階にあり、外部委託には多大な費用を必要とすることが予想された。

幸い、公害防止特別研究の一端に採用されることが決まり、多くの研究者の協力も頂くことが出来て、比較的短期間に成果を発表する事ができた。ここに関係者各位に深甚なる謝意を表す。特に、精力的に化学分析データを量産された今井登氏、放射化分析法を確立し分析結果をだされた田中剛氏、ワークステーションを開発しビックデータを格納、そ

の統計処理及び図化法のプログラミングを担当された上岡晃氏には多大な貢献を戴いた。それらの技術開発無くしてこのプロジェクトの成果はなしえなかった。ここに記して心より感謝申し上げます。

最後にモデル地域で行った本研究は、その後上記の共同研究者によって継承・発展され、現在では日本全土をカバーする「日本の地球化学図」(地質調査総合センター 2004)や沿岸域を含めた世界初の「海と陸の地球化学図」(地質調査総合センター 2010)として web 上でも公表され、誰でも利用できるようになった(今井 他、2015)。さらに関東地域では詳細な地球化学図が発行された(今井 他、2015)。実際このような地球化学図がたとえば福島第 1 原子力発電所の事故の際、ウランの自然放射線マップや放射線影響評価のベースに使われ、さらにはニュートリノ観測のバックグラウンド評価に使われるなど、今日、環境汚染や資源探査、基礎科学の重要な基礎データとして活用されていることを付記する。

引用文献

- 地質調査総合センター (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 <https://gbank.gsj.jp/geochemmap/setumei/setumei-book.htm>
- 地質調査総合センター (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 <https://gbank.gsj.jp/geochemmap/index.htm>
- Fauth, H, et al. (1985) Geochemischer atlas Bundesrepublik Deutschland, Institute of Geosciences and Natural Resources, 79p
- 今井 登 (1987) 誘導結合プラズマ発光分光法による河川堆積物の分析、分析化学、vol 36, p. T41-T45
- 今井 登 (2010) 日本全土の元素分布の調査とその活用 シンセシオロジー、vol.3, p281-291
- 今井 登、他 10 名 (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、217 p
- 伊藤 司郎、他 13 名 (1989) 地球化学図による元素のバックグラウンドと人為汚染の評価技術の研究 平成 2 年国立機関公害防止等試験研究成果報告書、p74.1~74.26
- 伊藤 司郎、他 13 名 (1990) 地球化学図による元素のバックグラウンドと人為汚染の評価技術の研究 平成 2 年国立機関公害防止等試験研究成果報告書、p73.1~73.21
- 伊藤 司郎、他 14 名 (1991) 地球化学アトラス—北関東— 地質調査所 35 p
- 上岡 晃、他 3 名 (1990) 地球化学図—元素の地表分布とその解析、地学雑誌、vol.99, p17-31
- 上岡 晃、・田中 剛 (1989) 機器中性子放射化法による地質試料の分析とその問題点—地質調査所岩石標準試料による検討—地学雑誌、vol.95, p. 835-850
- Kautsky, G. et al. (1986) Geochemical atlas of Northern Fennoscandia, Geological Surveys of Sweden, Finland and Norway, 19p, with 155 maps

田中 剛、他 2 名 (1988) 放射化分析用放射線自動計測・解析システムの開発と岩石標準試料の分析、地調月報、vol.39, p.537-557

Thalmann, F. et al. (1988) Geochemical atlas of the Republic of Austria, Geological Survey of Austria 141p with 35 maps

Weaver, T. A. et al. (1983) Geochemical atlas of Alaska, Los Alamos National Laboratory, 57p

Webb, I. S, et al. (1978) The Wolfson geochemical atlas of England and Wales, Imperial College of Science and Technology, 69p

著者略歴

伊藤 司郎 Itoh Shiro

昭和 08 年 (1933) 生

昭和 31 年 (1956) 東北大学理学部卒

同 年 地質調査所入所

昭和 49 年 (1974) 理学博士

昭和 63 年 (1988) 地球化学課長

平成 05 年 (1993) 定年退職

受理日：2017年3月31日