

地理情報システム(GIS)と統計学を用いた川砂中の元素挙動の解析 —地球化学図の新しいデータ解析法—

太田 充恒¹⁾・今井 登¹⁾・寺島 滋¹⁾・立花 好子¹⁾
岡井 貴司¹⁾・御子柴(氏家)真澄¹⁾・久保田 蘭¹⁾

1. はじめに

産業技術総合研究所地質調査総合センターでは、日本全土における有害元素を含めた53元素の濃度分布と元素のバックグラウンドを明らかにするために、日本の地球化学図(元素の地図)の作成に取り組んできた(今井ほか, 2001, 2004a, b). 元素のバックグラウンドとは、自然由来の元素濃度の変動のことであり、平均値、標準偏差(ばらつきを表す)、最小値、最大値などの統計データから、人為的な有害元素汚染を判別するときの判断基準とする。日本全土より、3,024個の河川堆積物(川砂)を集め、化学分析を行い、地球化学図(元素の地図)としてまとめられた研究結果は、大きな社会的なインパクトを与え、平成17年度の環境賞(主催:(財)日立環境財団・(株)日刊工業新聞、後援:環境省)の優良賞を受賞した。一方、地球化学図を利用し、日本特有の地表の物質分布を明らかにするなど学術的な成果も大きく挙げてきた(太田ほか, 2004; Ohta *et al.*, 2004, 2005a, 2005b; Ujii-Mikoshi-ba *et al.*, 2006)。

地球化学図を作成するために使用する川砂は、基本的に岩石が粉々にくだけてできた砂から構成され、他に化学的風化と呼ばれる反応を受けて変質した鉱物や粘土などから出来ている。例えば、富士山の溶岩は鉄や銅を多く含む岩石であり、そこから供給された川砂もまたこれらの元素が多い(Ohta *et al.*, 2005a)。また、鉱山近くの川砂は、鉱石に入っている銅・亜鉛・カドミウム・鉛などの金属元素を多く含む(太田ほか, 2004; Ohta *et al.*, 2004, 2005b)。青森県の恐山の様な活発な地熱活動地帯では、ヒ素や水銀などの有害な元素が川砂に多く含まれている(Ujii-Mikoshi-ba *et al.*, 2006)。このため、地球化学図(元

素の地図)を解析するときは、まず地質図(岩石や岩石になる前の砂泥の分布図)や鉱床図(鉱山の地図)、温泉・鉱泉図(地熱活動の地図)などと比較する事から始まる。しかし、プレートが沈み込む場所に位置する日本の地質は、大陸地質と異なり非常に複雑である。そのため、単純に地図同士を比較するだけでは、判断に迷う場合が多く、限界がある。自然由来の元素の分布が十分説明できなければ、人為汚染の判別もまた難しくなる。今回は、この問題を打開するために著者らがこれまで取り組んできた、地理情報システム(GIS:地図作成ソフトウェア)と数理統計解析を用いた、新しい解析方法の説明とその有効性について紹介したい。

2. 従来の解析法では何が問題か?

地球化学図の解析は、地理情報システム(GIS)と呼ばれる地図作成ソフトウェアを使って行う。まず地図上に、川砂を取った場所(緯度経度情報)を表示する。次に点と点の何もデータのない場所を、数学的手法で補間してゆき(太田2002; Ohta *et al.*, 2004a)、点のデータから面状に色が塗られた地球化学図を作成する。こうして作成された地球化学図は、地質図や鉱床分布図などと対比し、解析を進めていく。地球化学図の作成方法や地質図・鉱床分布図との比較方法については今井ほか(2001, 2004a, 2004b)に分かりやすく説明されているため、ここでは詳しく説明しない。口絵1-4には近畿-東海地方のナトリウム、亜鉛、ウランの地球化学図と中国地方の鉄の地球化学図を示した。例として、ナトリウムの地球化学図(口絵1)に着目しよう。地質図と見比べると、赤色のナトリウムの濃度が高い地域は、地質図上で赤く示された

1) 産総研 地質情報研究部門

キーワード:地球化学図, 河川堆積物, 地理情報システム(GIS), 流域解析, 統計学, 多重比較法

花崗岩の分布と一致しているように見えることから、その高濃度分布は花崗岩の分布に支配されていると解釈される。つまり、「ある場所でナトリウムの濃度が高くなるのはなぜですか?」という問いに、「ナトリウムを多く含む花崗岩が広く分布していて、そこから川砂が多く供給されているからです」と答えることが出来る。

これまででは、このような視覚的な(目で見た)解釈を通じて、地球化学図の解析を行ってきた。しかし、視覚的な(目で見た)解析は簡単ではあるものの、定量性(数値データの裏付け)・客観性(思いこみのない)に乏しいという欠点がある。定量性(数値データの裏付け)・客観性(思いこみのない)に乏しい解析はどのような問題を引き起こすのかについて、同じ地域の垂鉛の地球化学図を例に見てゆこう(口絵2)。赤色の垂鉛の濃度の高い地域は、地質図上で青く示された塩基性火山岩の分布と良く対応している。塩基性火山岩は他の岩石に比べ垂鉛を多く含むことから、近畿-東海地方で垂鉛の濃度が高い場所は、塩基性火山岩から川砂が供給されたからだとと言える。しかし、他にも大阪、名古屋など広い平野に位置する大都市周辺にも垂鉛の濃度が高い地域が認められる。この原因の一つとして、人為汚染が考えられる。そこで、地質図とは別に土地利用図と呼ばれる地図と比較してみたところ、赤く示した市街地が広がる地域で垂鉛の濃度が高い(赤色)事が分かる。しかし、地図を見比べただけで、汚染と決めつけてよいのであろうか? 本当に異常と言えるほど垂鉛の濃度が高いのだろうか? 他の地質の影響では説明できないのであろうか? もうすこし、何らかの根拠(もっともらしい理由)がないのだろうか?

3. 流域解析(地球化学図と地質図の定量的解析)

地球化学図は元素濃度という数値データから構成されている。では、地質図や土地利用図を地球化学図と“数値的に”比較するためには(定量化)、どうすればよいのであろうか? ここで使用するのは、流域解析と呼ばれる方法である(口絵5)。川砂は、試料を採取した地点より上流の集水域と呼ばれる一帯から集められたと考えられる(今井ほか, 2004a)。集水域は流域界とも呼ばれ、雨が降ったときに川へ水がどのように流れ込むかを表した領域であり、尾根を境

界としている。流域解析の手順については、口絵5を参照しながら進めてゆく。流域解析は、国土地理院発行の50mメッシュ標高データ(50mに1点の間隔で標高の値を並べたデータ)を元に、地理情報システム(GIS)に地形の傾斜を計算させる。次に、傾斜に沿って水の流れる方向を計算して、集水域を求める。こうして得られた流域界を地質図に重ね合わせ、流域界ごとに地質の分布面積を計算する(口絵5参照)。地質図というクッキーの生地を、流域界という型枠で抜き取ると言えば分かり易いであろうか。最終的には、それぞれの流域において、地質を“露出面積”という数値データに変換する。本当は、この露出面積を使って色々と計算したいのであるが、議論を簡単にするために、露出している面積が半分を超える岩相が、その流域の代表的な岩相であると考え、つまり、最も広く分布している岩石ほど多くの川砂を供給すると考える。例として、口絵5の試料A(緑丸の地点)の持つ流域に着目すると、花崗岩と堆積物が約20%ずつ分布し、塩基性火山岩が53%分布している。この場合、塩基性火山岩から供給される砂の化学組成が川砂A(緑丸の地点)の化学組成を決めていると考える。実際には流域面積以外にも、斜面角度(急傾斜ほど砂がたくさん川へ供給される)、河川水量(水量が多いほど砂が多く運ばれる)、植生(植物が多いと砂が川へ供給されにくい)、岩石や鉱物の風化に対する強さ(チャートはほとんど削れない)など様々な要因が関係していると考えられる(太田ほか, 2002)。しかし、1/200万規模の地球化学図ならばこの方法で充分解析できることが分かっている(Ohta *et al.*, 2004, 2005a, 2005b; 太田ほか, 2004)。

全国地球化学図の比較に用いた地質図は1/100万規模の地質図で(地質調査総合センター, 1992)、岩相の区分も1/100万規模の地質図の凡例を元に、付加帯堆積岩、超塩基性岩、花崗岩、酸性火山岩、塩基性火山岩、低-中圧変成岩、高圧変成岩、堆積物(主として沖積層)、都市域堆積物(主として沖積層)、その他の10通りに区分した。その他とは、流域面積の半分を超える岩相が存在しない場合を指す。また、有害元素の発生源になる都市域は、沖積層が堆積している平野部に集中している。そこで、土地利用図を基に市街地面積が広い試料について、都市域堆積物という区分を加えた(詳しくはOhta *et al.*, 2005a)。本来、地質と土地利用は性質の異なる情報ではあるが、

簡単にするためにここでは一緒に議論する。

本誌では、近畿-東海地方、中国地方の2地域に着目した解析例を紹介する。前者は丹波-美濃帯、領家帯、三波川帯、四万十帯などの構造体が分布し、日本の主要な地質のほとんどがこの地域に認められる。また、大阪市・京都市・名古屋市などの大都市も含んでいる。そこで、様々な地質が地球化学図へ与える影響を調べることと、人為汚染を判別できるか試みた。一方後者は、花崗岩、酸性火山岩が広く分布するが、地質が複雑で入り乱れている。そのため、地質図と地球化学図の対比がしばしば困難となる場合がある。この地域においては、視覚的な(目で見た)解釈が困難である時の解析を行った。

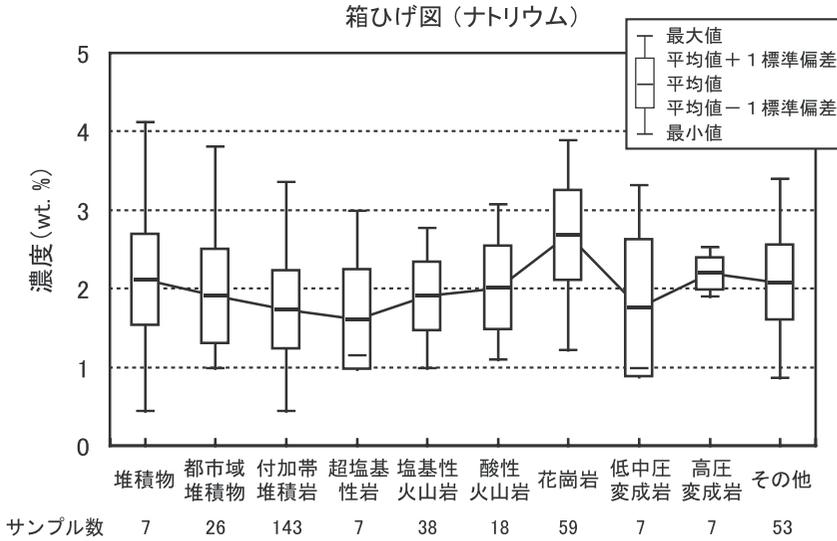
4. 地球化学図の統計解析

初めに、近畿-東海地方のナトリウムの地球化学図に対して流域解析結果を行った結果を示す。この地域では、10通りの地質が川砂の化学組成を決めている。この地域で最も広く分布するのは付加帯堆積岩で、143個の川砂の主な供給源になっている(第1図)。分布が狭い超塩基性岩・変成岩は、7個の川砂の供給源になっているに過ぎない(第1図)。岩相毎に区分けされた川砂であるが、元素濃度は一定ではなくある幅を持ってばらついている。データのばらつきを表すために、箱ひげ図を用いた。箱ひげ図は、中央の線が平均値、箱の大きさが±1標準偏差(全データの内、約66%がこの箱の中に入る)、最小値と最大値で、データのばらつきを示している。第1図の箱ひげ図より、花崗岩が主要な川砂の供給源になっている試料はナトリウム濃度が高く(平均値=2.68wt%)、超塩基性岩が流域界に広く分布する試料は値が低い(平均値=1.90wt%)ことが分かる。こうして、地球化学図と地質図の比較を定量化(数値化)することができた。しかし、平均値だけを見ると、10通りの主要な地質毎に大きな変化が見られるが、データのばらつき(箱の大きさ)を考えると、互いに濃度の変化幅が重なり合っている。最大値や最小値まで考えると、どの試料のナトリウム濃度が高いのか低いのか分かりにくい。この図から、どの地質がナトリウム濃度に大きな影響を与えているかを判断するにはどうすればよいのであろうか？

ここで使用するのは、有意差検定法と呼ばれる統

計解析である。この手法は統計学に基づいて、比較するデータの平均値が同じである確率(可能性)を計算し、その確率がある値よりも低い場合に平均値が異なると見なす。平たく言えば、自分で濃度が高い・低いを判断する代わりに、確率を使って判断しようというものである。詳しくは統計学の本を読んでいただきたいが(宗森・佐藤, 2004など)、少し具体的な例を挙げてみよう。花崗岩と塩基性火山岩が広く分布する地域で、それぞれ川砂を5個ずつ集めてナトリウムの値を求めた結果、前者の平均値と標準偏差が2.7%と0.4%、後者が1.9%と0.4%となったとする。ここで、たまたま試料を取った場所が悪くて、本当はナトリウムの濃度は違わないのに、たまたま平均値が違ってしまった確率を計算する。この計算は表計算ソフトで簡単にでき、平均値が同じである確率が約0.67%と計算される。このことは $0.67/100=1/150$ 、つまり150回に1回の確率でしか起こりえないまれな現象が起きた事を示す。従って、流域に分布する地質が違えば、ナトリウムの濃度が違ってくると判断できる。通常は、確率が5%未満か1%未満である場合、平均値が統計学的に違っていると判断する。残念ながら、統計学を用いた解釈は、はっきりと値が等しい・異なると断言できるものではない(宗森・佐藤, 2004)。「平均値が等しい」という仮定がどの程度妥当であるかを、確率という数値で評価するため、あくまで解釈の方向性を示すことに注意する必要がある。しかし、平均値が等しい・異なっていると判断基準を、統計的処理に任せることで、可能な限り主観的な(思いこみが入った)判断を排除することができる利点は大きいと思われる。

さて、第1図に示した10通りのナトリウムの平均値に統計学的な違いが認められるか否かについては、最終的には多重比較法と呼ばれる方法を用いて解析する。また難しい言葉が出たが、多重比較法とは、3つ以上の平均値の大小を調べる事ができる方法である(詳細はHochberg and Tamhane, 1987; 永田・吉田, 1997を参照)。地球化学図への応用や問題点については、Ohta *et al.* (2005a)を参照していただくとして、今回は結果だけを示す。多重比較法は、「流域に分布する地質(川砂の主な供給源)が違った場合でも、川砂の中の元素濃度の平均値に違いはない」確率を求めて、これが5%よりも低ければ平均値に違いがある(地質が違えば川砂の化学組成も違う)と見なす。残



第1図
 近畿-東海地方のナトリウムの地球化学図の解析. 主要背景地質毎に区分した河川堆積物中のナトリウム濃度の変化を表す.

第1表 多重比較法を用いた解析結果. 帰無仮説「背景地質が異なっても平均値に有意な違いは認められない」を有意水準0.05で検定を行った(Ohta et al, 2005a).

多重比較法の結果

	堆積物	都市域堆積物	付加帯堆積岩	超塩基性岩	塩基性火山岩	酸性火山岩	花崗岩	高温変成岩	高圧変成岩	その他
堆積物			○				×			
都市域堆積物							×			
付加帯堆積岩	×						×			×
超塩基性岩							×			
塩基性火山岩							×			
酸性火山岩							×			
花崗岩	○	○	○	○	○	○		○		○
高温変成岩							×			
高圧変成岩										
その他			○				×			

念ながら表計算ソフトではこの計算はできないので、専用の統計ソフト((株)エスミのEXCEL統計Ver 6.0)を使用して解析を行った.

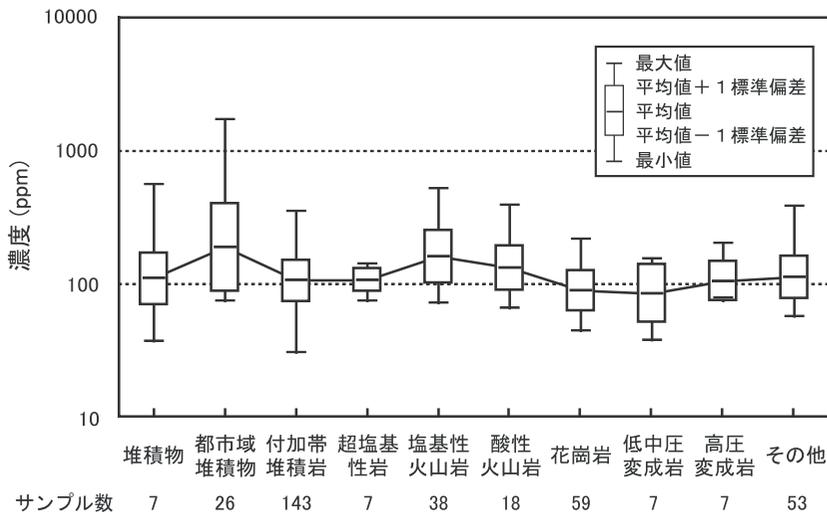
5. 結果および考察

5.1 近畿-東海地方の地球化学図の統計解析

まず、近畿-東海地方のナトリウムの地球化学図に対して多重比較法を適用した結果についてみてゆく. 花崗岩との関係が認められるナトリウムの多重比較法の結果を、第1表に表した. 表の見方は、野球やサッカーなどのリーグ戦結果の読み方と同じである. つま

り、○は左列に並ぶ試料が上の行に並ぶ試料よりも統計学的に平均値が高いと認められた場合、×はその逆を表す. 空白の欄は、統計学的に有意な違いが認められなかった(白黒はっきりしない)ことを示す. 第1表を見ると、花崗岩が流域に広く分布する地域で取られた川砂は、高圧変成岩が主な川砂の供給源である試料を除いて、全ての川砂よりもナトリウムの濃度が高いという結果を示した(○が横に並ぶ). この結果は、先ほど説明した視覚的な(目で見ただけ)解釈と同じである. 一方、付加帯堆積岩が主な川砂の供給源である試料に着目すると、堆積物・花崗岩・その他が流域に広く分布する地域で取られた川砂よりも濃

箱ひげ図(亜鉛)



第2図 近畿-東海地方の亜鉛の地球化学図の解析。主要背景地質毎に区分した河川堆積物中の亜鉛濃度の変化を表す。

第2表 多重比較法を用いた解析結果。帰無仮説「背景地質が異なっても平均値に有意な違いは認められない」を有意水準0.05で検定を行った(Ohta et al, 2005a)。

多重比較法の結果

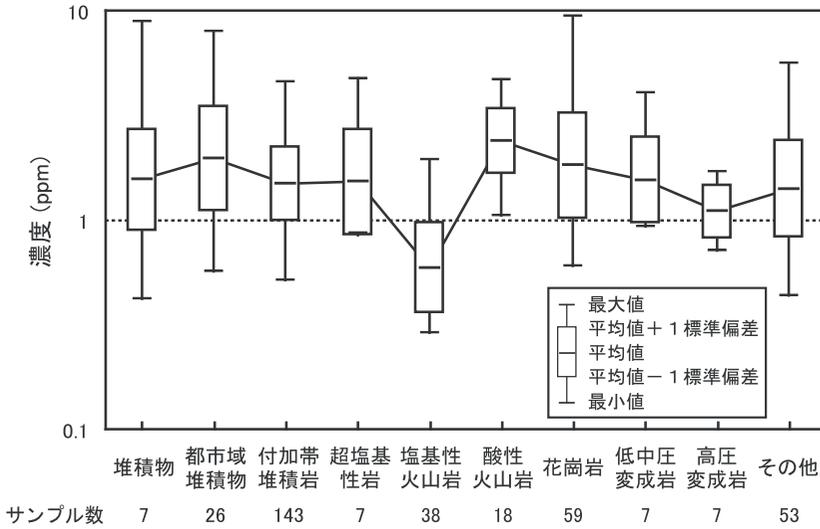
	堆積物	都市域堆積物	付加帯堆積岩	超塩基性岩	塩基性火山岩	酸性火山岩	花崗岩	高温変成岩	高压変成岩	その他
堆積物		×			×					
都市域堆積物	○		○				○	○		○
付加帯堆積岩		×			×					
超塩基性岩	○		○							○
塩基性火山岩							○	○		
酸性火山岩							○			
花崗岩		×			×	×				
高温変成岩		×			×					
高压変成岩										
その他		×			×					

度が低いと判断された(×が堆積物・花崗岩・その他の欄に表示)。しかし、超塩基性岩が流域に分布する地域で採取された川砂は、他のどの試料よりもナトリウム濃度の平均値が低い(1.61wt%)にもかかわらず(第1図)、多重比較法の結果からは濃度が低いとは判断されなかった(系統的に○×が並ばない)。これは、サンプル数が少ない(7個)のために、統計学的に信頼性が低い(平均値が低いと自信をもって言えない)ことが原因であろう。

次に亜鉛の地球化学図に着目してみる(口絵2, 第2図)。ここでの興味は、都市域で採取された川砂は、通常の堆積物地域では説明できない亜鉛の濃集を示

すのか、ということにある。第2図より、都市域で採取された試料の亜鉛濃度の平均的な値は、塩基性火山岩が流域に広く分布している地域で取られた試料と、ほぼ同じかそれ以上であることが分かる。多重比較法を用いた解析結果も同様で、都市域および塩基性火山岩の行に○が5個ずつ表示されている(堆積岩, 付加帯堆積岩, 花崗岩, 高温変成岩, その他に対して)。従って、流域に市街地を含む川砂試料は、塩基性火山岩を主な川砂の供給源である試料と同様に、堆積岩, 付加帯堆積岩, 花崗岩, 高温変成岩, その他が流域に分布する地域で採取された川砂よりも、亜鉛濃度が高いと統計学的に判断された。結果とし

箱ひげ図(ウラン)



第3図
 近畿-東海地方のウランの地球化学図の解析. 主要背景地質毎に区分した河川堆積物中のウラン濃度の変化を表す.

第3表 多重比較法を用いた解析結果. 帰無仮説「背景地質が異なっても平均値に有意な違いは認められない」を有意水準0.05で検定を行った(Ohta et al, 2005a).

多重比較法の結果

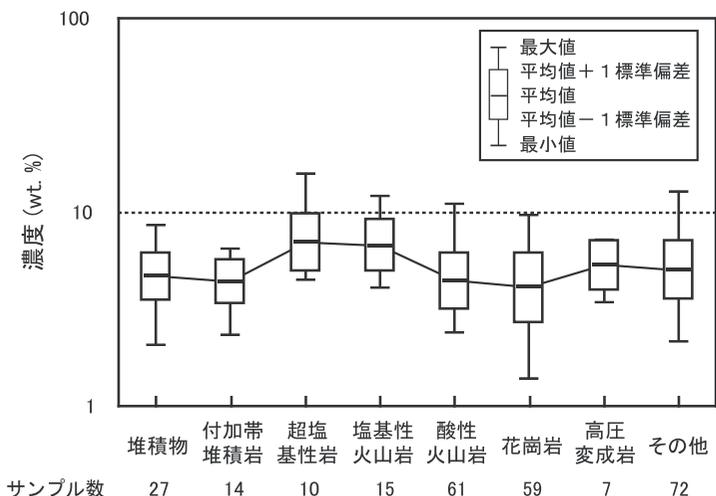
	堆積物	都市域堆積物	付加帯堆積岩	超塩基性岩	塩基性火山岩	酸性火山岩	花崗岩	高温変成岩	高圧変成岩	その他
堆積物					○	×				
都市域堆積物					○					
付加帯堆積岩					○	×				
超塩基性岩					○					
塩基性火山岩	×	×	×	×		×	×	×		×
酸性火山岩	○		○		○				○	○
花崗岩					○					
高温変成岩					○					
高圧変成岩						×				
その他					○	×				

て、都市域で採取された川砂は、通常の堆積物地域で採取された川砂に比べ、全く異なる濃度を示すと結論できた(第2表)。Ohta, et al. (2005a)によると、都市域で採取された河川堆積物試料は、亜鉛以外にも、リン、銅、亜鉛、カドミウム、スズ、アンチモン、水銀、鉛などの元素濃度も非常に高いことが統計学的に判断された。都市域周辺には大規模な金属鉱床もなく、亜鉛に富む岩石(塩基性火山岩など)も分布しない。従って、おそらく人為汚染によって亜鉛の濃度が高くなったと判断できる。

次に、流域解析と多重比較法を用いて、思いこみによる誤った解析を回避できた例を紹介する。例と

して、近畿・東海地方のウランの地球化学図に着目する(口絵3, 第3図)。地質図と比較すると、ナトリウムと同様に花崗岩が分布している地域で、川砂のウランの濃度が高いと解釈された(口絵3)。箱ひげ図も同様に、花崗岩が川砂の主な供給源である試料において、ウランの濃度が高い結果を示す(第3図)。しかし、多重比較法の結果(第3表)はこれとは異なり、酸性火山岩が川砂の主な供給源である試料中のウラン濃度が、堆積物・付加帯堆積岩・塩基性岩・高圧変成岩・その他が川砂の主な供給源である試料に対して高い値(○が横方向に表示)を示す一方、塩基性火山岩が川砂の主な供給源である試料は、ほぼ全ての

箱ひげ図(鉄)



第4図
中国地方の全鉄の地球化学図の解析。
主要背景地質毎に区分した河川堆積物中の全鉄濃度の変化を表す。

第4表 多重比較法を用いた解析結果。帰無仮説「背景地質が異なっても平均値に有意な違いは認められない」を有意水準0.05で検定を行った(太田ほか, 2004)。

多重比較法の結果

	堆積物	付加帯堆積岩	超塩基性岩	塩基性火山岩	酸性火山岩	花崗岩	高压変成岩	その他
堆積物			×	×				
付加帯堆積岩			×	×				
超塩基性岩	○	○			○	○		
塩基性火山岩	○	○			○	○		
酸性火山岩			×	×				
花崗岩			×	×				×
高压変成岩								
その他						○		

試料に対してウラン濃度が低い結果を示した(×が横方向に表示)。花崗岩が川砂の主な供給源である試料では、何ら有意な濃度変化が統計学的に認められなかった(系統的に○×が表示されない)。つまり、多重比較法の結果は、酸性火山岩から供給された川砂のウラン濃度が他の川砂よりも高く、塩基性火山岩から供給された川砂のウラン濃度が他の川砂よりも低い事を示している。なぜ、視覚的な(目で見た)解釈や箱ひげ図を使った解釈が、統計学を使った解釈と違ってしまったのであろうか。一つは、ウラン濃度の最大値が、花崗岩の分布する地域に見られるため、それに解釈が引きずられた(花崗岩地域ではみな濃度が高いと思ってしまう)ことが考えられる。二つに、

花崗岩が供給源である川砂中のウラン濃度の変化が大き過ぎる事(濃度が高い試料も低い試料も多い)が挙げられる。つまり、ウラン濃度のばらつきが大きすぎたため、統計学的に信頼性が低い(平均値が高いと自信をもって言えない)ことが原因であろう。

5.2 中国地方の地球化学図の統計解析

流域解析と多重比較法は地質図が複雑で、地球化学図と視覚的(目で見て)に比較しにくい場合にも威力を発揮する。例として中国地方の鉄の地球化学図と塩基性火山岩、付加帯の火成岩の関係についてみてゆこう(口絵4, 第4図)。地質図より明らかなように、中国地方は地質構造が複雑で特定の岩相が広く

分布しない。鉄の濃度が高い地域には塩基性火山岩が分布しているように見えるが、塩基性火山岩の分布している面積が狭いためその影響がやや分かり難い。また、鉄の高濃度域には、塩基性火山岩だけでなく、付加帯の緑色岩や超塩基性岩も関係している様にも見える(口絵4)。いずれにしても、はっきりとある岩相が川砂中の鉄の濃度を支配していると言い切れない。この地域の地球化学図に対して流域解析を行い、流域に最も広く分布する地質(主要背景地質)ごとに、川砂を区分けした結果を第4図に示した。近畿-東海地方に比べ、中国地方では岩相の種類が7種類とやや少ない。

さて、第4図の箱ひげ図より、塩基性火山岩や付加帯の緑色岩や超塩基性岩が流域に分布する時、川砂中の鉄の濃度が高くなる傾向(平均値が高い)が見て取れる。第4表にまとめた多重比較法の結果に着目すると、塩基性火山岩や緑色岩・超塩基性岩が主要な川砂の供給源である試料は、堆積物、付加帯堆積岩、酸性火山岩、花崗岩が主要な川砂の供給源である試料に比べ、鉄の濃度が相対的に高い結果を示した(横方向に○が表示される)。従って、中国地方の鉄の濃度分布図は塩基性火山岩・緑色岩・超塩基性岩の分布に支配されていると結論づけられる。また、これらの岩体の分布は、他にも河川堆積物中のスカンジウム・バナジウムなどの遷移金属元素の濃度を有意に高くする事が分かった(太田ほか, 2004)。

6. 終わりに

従来、視覚的な(目で見ただけ)解析に頼ってきた地球化学図の解釈を、流域解析と多重比較法を組み合わせることで、定量的(数値化)かつ客観的(思いこみのない)に判断できる例について紹介した。この方法は、非常に強力な手法ではあるが、あくまで解釈の手がかりを与えるに過ぎない。例えば、なぜ亜鉛などの重金属元素が都市域で採取された川砂に濃集したのか、その反応過程までは明らかにしない。この問題については、別稿で議論したい。

参考文献

- 地質調査総合センター(1992):日本地質図(100万分の1)。
今井 登・寺島 滋・岡井貴司・金井 豊・御子柴真澄・上岡 晃・富樫茂子・松久幸敬・谷口政碩・横田節哉(2001):国内外の地球化学図と日本全国をカバーする地球化学図プロジェクト。地質ニュース, No.558, 9-17。
今井 登・寺島 滋・太田充恒・御子柴真澄・岡井貴司・富樫茂子・松久幸敬・金井 豊・上岡 晃(2004a):日本の地球化学図, 209p。
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(2004b):日本の地球化学図。地質ニュース, No.604, 30-36。
Hochberg, Y. and Tamhane, A. C. (1987): Multiple comparison procedures. John Wiley & Sons Inc., 480pp。
宗森 信・佐藤寿邦(2004):データの取り方とまとめ方。共立出版, 329p。
永田 靖・吉田道弘(1997):統計的多重比較法の基礎。サイエンス社, 187p。
太田充恒・今井 登・岡井貴司・遠藤秀典・川辺禎久・石井武政・田口雄作・上岡 晃(2002):山形市周辺地域における元素分布の特徴について-山形盆地南部の地球化学図-。地球化学, 36, 109-125。
太田充恒・今井 登・寺島 滋・立花好子(2004):河川堆積物を用いた中国地方の地球化学図による元素濃度のバックグラウンド評価。地球化学, 38, 203-222。
太田充恒・今井 登・寺島 滋・立花好子・岡井貴司・御子柴(氏家)真澄・久保田 欄(2008):逐次溶解法を用いた川砂中の元素の成分別分析-元素形態別地球化学図作成のための予察研究-。地質ニュース, No.646, 30-38。
Ohta, A., Imai, N., Terashima, S., Tachibana, Y., Ikehara, K. and Nakajima, T. (2004): Geochemical mapping in Hokuriku, Japan: influence of surface geology, mineral occurrences and mass movement from terrestrial to marine environments. Appl. Geochem., 19, 1453-1469。
Ohta, A., Imai, N., Terashima, S. and Tachibana, Y. (2005a): Application of multi-element statistical analysis for regional geochemical mapping in Central Japan. Appl. Geochem., 20, 1017-1037。
Ohta, A., Imai, N., Terashima, S. and Tachibana, Y. (2005b): Influence of surface geology and mineral deposits on the spatial distributions of elemental concentrations in the stream sediments of Hokkaido, Japan. J. Geochem. Explor., 86, 86-103。
Ujiié-Mikoshiba, M., Imai, N., Terashima, S., Tachibana, Y. and Okai, T. (2006): Geochemical mapping in northern Honshu, Japan. Appl. Geochem., 21, 492-514。

OHTA Atsuyuki, IMAI Noboru, TERASHIMA Shigeru, TACHIBANA Yoshiko, OKAI Takashi, UJIIÉ-MIKOSHIBA Masumi and KUBOTA Ran (2008): Application of a geoinformation system (GIS) and a statistical procedure to investigate elemental behaviors in stream sediments - New data analysis of geochemical maps -.

<受付:2007年11月1日>