

## Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図から堆積環境を評価する

石賀 裕明\*・道前香緒里\*\*・アーメッドファルキ\*・ハワビビ\*・海田 学\*

### Evaluation of sedimentary environment using a Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram

Hiroaki Ishiga\*, Kaori Dozen\*\*, Faruque Ahmed\*,  
Mst. Hawa Bibi\* and Manabu Kaita\*

#### Abstract

A Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> discrimination diagram is proposed to evaluate sedimentary environments using geochemical data from coastal lagoon, tidal flat, lake and fluvial sediments. The concentration of zinc is sensitive to change in redox conditions. Zinc tends to be soluble in a reducing condition with divalent iron, and may accumulate as a sulfide mineral or be adsorbed to organic matter. Bulk geochemical composition, however, is also related to source material, and varies with grain size. Zinc behaves similarly to iron in igneous process and may form compositional trends on Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cross plots. Concentrations of Zn and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of normal sediments plot above the igneous compositional trend, and have steep inclination, suggesting enrichment of Zn over iron in finer grained sediments. Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> data from coastal lagoon in cities such as Hiroshima and Fukuoka show further enrichment of Zn over that of normal sediments. Data from larger cities such as Osaka city plot significantly above the Hiroshima trend, which identifying pollution from artificial activity, such as vehicle emission and factories. Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagrams are also useful for evaluation of environments. However, considering the greater concentrations of Zn in sediments (80-100 ppm) compared to Pb (20-40 ppm), discrimination for different environments by Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagrams is easier than that offered by Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cross plots.

#### はじめに

堆積岩の研究は文字どおり地層の積み重なりを様々な分野の研究から解読する。断片的な知識であってもそれらをつなぎ合わせ地球の歴史を解読し、総合して、地球上の環境変化を解き明かす研究に貢献してきた。層序を組み立てることは砕屑物を構成している粒子の検討から、堆積構造の解析、そしてその地層に含まれる化石の研究から年代や堆積環境を明らかにしてきた。地球上に存在する様々な環境とは地球の長い歴史の中で形成されてきた最終産物に近いとも言えるかも知れない。しかし、人間活動はこのような完成された環境を急速に変化させていることは事実である。環境変化を定量的に評価する試みは様々なところで行われており、人間環境にとってのもっとも必要不可欠である水環境に対しては明瞭な指標が示されている。しかし、生態系にとってもっとも重要であり、恒久的な生物のすみかとなる地球表層を覆う堆積物の評価についてはその指針は出されていない。これは堆積岩の組成が1) 源岩の組成、2) 風化作用、3) 運搬作用、4) 続成作用(堆積環境)の様々な作用の総和であるため(Taylor and McLennan, 1985; Fedo et al, 1995; Condie, 1993 など)、相互の

作用の評価が難しいとされていたことによる。筆者の内、石賀と道前は中・古生代の堆積岩の地球化学的研究を進め、これまでに日本の各地帯の堆積岩の元素組成を検討した(石賀・道前, 2000 a, b 参照)。また、今日的な環境問題として干潟や河川環境を堆積岩の元素組成から評価する研究を行った。その結果、重金属のいくつかの元素は堆積環境に対してその濃縮率が変化し、しかも自然界での挙動の類似する Fe との比較によって環境評価をおこなう指標と成ることを見出した。本論では Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いた判別図を提唱して、いくつかの環境の評価を行う。また、あわせて Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 図についても考察する。

#### 堆積岩の元素組成

堆積岩の元素組成は1) 源岩の組成、2) 風化作用、3) 運搬作用、4) 続成作用(堆積環境)の様々な作用の総和であるとされている。したがってそれぞれの要素を評価するには適切な元素の組み合わせによって行われる。これまでに様々な判別図が考案されてこれらの要素を評価する試みがなされている。

1) 源岩の組成：源岩の組成の評価は酸アルカリに溶けにくく水中での滞留時間の長い元素をパラメーターとして使用される。また、塩基性岩石と珪長質岩石の相違をもっともよく反映する元素として Th-Sc が用いられる。これは Th が珪長質岩石に Sc が塩基性岩石に濃縮しやすく両者は様々な鉱

\* 島根大学総合理工学部地球資源環境学科  
Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

\*\* (福)大阪府社会福祉事業団美原荘, 大阪府南河内郡美原町平尾 595-1

物に微量であるが含まれやすいためである。従って Th/Sc 比は源岩を評価する有効な指標でしかも粒度組成による濃度変化に大きく影響を受けない。Th/Sc 比は塩基性岩石では Th/Sc < 0.1 (Th = 1 ppm, Sc > 10 ppm) であり、珪長質岩石では Th/Sc > 2.0 (Th = 10 ppm, Sc < 5 ppm) である。上部大陸地殻は Th/Sc = 1.0 (Th = 10 ppm, Sc = 10 ppm), これを代表する頁岩の組成もほぼ同じである。希土類元素も源岩組成を評価する重要な指標である (Taylor and McLennan, 1985; Condie, 1993; Plank and Langmuir, 1998 など)。これらはいずれも化学的には +3 をとり類似しているが、軽希土類のほうが重希土類よりも珪長質岩石では濃縮率が高く、コンドライトで規格化した希土類元素のパターンは軽希土類元素に富む左上がりのグラフと成る。重金属は一般には Fe と同じ 2 価として存在してマグマの形成段階では調和的元素として挙動して塩基性岩石に濃縮しやすい。したがってその効果を評価する判別図が重要である。

2) 風化作用：この作用は岩石の風化の進行とともに溶脱する元素と溶けにくく残りやすい元素の比によって与えられる。たとえば、Al (分析値では Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) や Ti (TiO<sub>2</sub>) は Na<sub>2</sub>O, CaO, K<sub>2</sub>O などアルカリ金属、アルカリ土類に比較して安定である。したがってこれらの比較によって風化の程度を評価する試みがなされている。とくに元素の比をモル比で示した以下の指標 (CIA) は有効であり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O+CaO-K<sub>2</sub>O を頂点として示す三角ダイアグラムは CIA のみならず源岩組成をも決定する上で重要である (Fedó et al., 1996; Nisbitt et al., 1996)。

CIA = mol Al / (Al + Na + Ca\* + K) × 100 Ca\* = 珪酸塩鉱物  
風化作用は地表において十分な酸素の存在のもとで進行する化学的变化であり、鉱物の細粒化と粘土鉱物化が進行する。そのため、物質の細粒化にともなって元素の分配が生じ、また、粘土鉱物への重金属等の吸着が生じる。それにより細粒相に濃縮しやすい元素とその反対になる元素の分配は明瞭である。

3) 運搬作用：風化、侵食作用作用によって碎屑物となった粒子は流水のはたらきによって運搬される。粒子は流速によって分級作用を受ける。最も粒度の細かな粘土は懸濁物として水中で滞留してより粗粒な格分よりも運搬距離は長くなる。風化作用に強い重鉱物も運搬作用の途中で濃縮することがある。最も顕著な影響は Ti, Zr の元素比にあらわれる。すなわち、Ti はチタン Fe 鉱物やルチルなどの細粒鉱物に濃縮し、Zr はジルコンに存在するためシルトや細粒砂に濃縮するので、Ti/Zr 比は粒度組成を評価する指標と成る。これにあわせて Al を組み合わせた Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (wt%) - Zr (ppm) / 10 - TiO<sub>2</sub> (wt%) × 100 判別 3 角ダイアグラムは組成とともに粒度組成の変化を示す (Garcia et al., 1994)。環境評価で用いる重金属の濃度や濃縮は粒度組成に関連するので堆積物を一様に評価することは意味がなく粒度組成による元素の濃縮を評価することは重要である。

4) 続成作用 (堆積環境)：堆積物は堆積環境によってその元

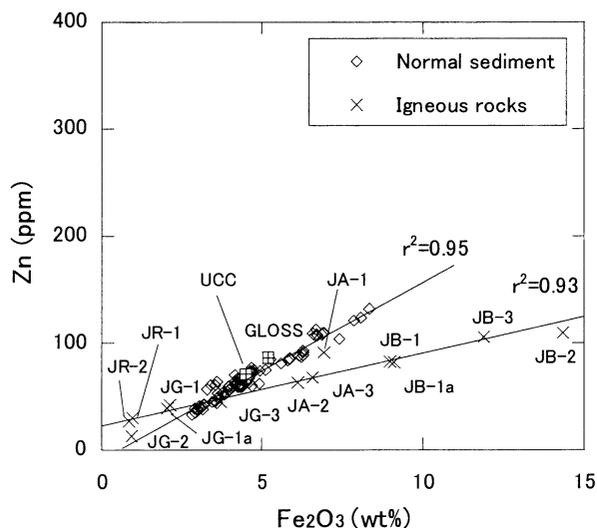
素組成に大きく影響を受けると共にヒ素および重金属は続成作用による濃縮の過程が重要であるといえる。これらの多くは還元的環境で溶解しやすく、硫酸還元反応によって形成される硫化水素と結びついて硫化物を形成する。そして不溶性物質として堆積物中に濃縮する。また、堆積物中に含まれる炭質物にヒ素や重金属の内の Zn や V などある種の元素が選択的に濃縮することもある (山崎ほか, 2000; Yamazaki et al., 2003)。都市環境において Pb が多量に消費され、昭和 30 年代以降著しく堆積物に濃縮していることがその濃度と同位体組成から示されている (Hirao et al., 1986)。しかし、堆積物の粒度組成や源岩の組成との比較検討によって評価されている研究はない。

#### 5) 生体濃縮と生体鉱物化作用

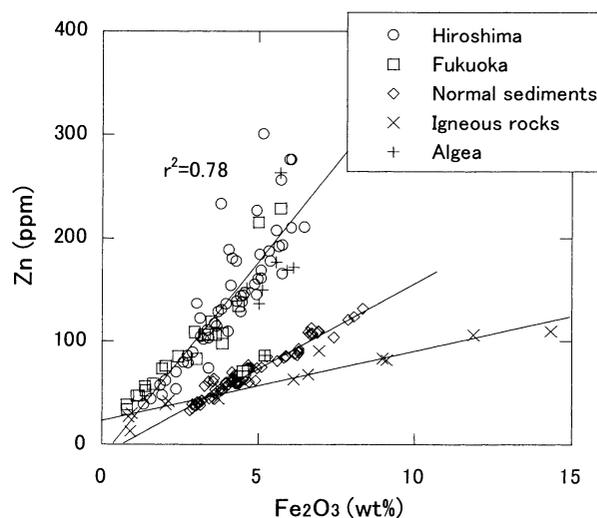
ヒ素および重金属は生物の基本的な活動の中で生体に取り込まれることが有る。したがって有機物に吸着され、生体濃縮により吸収されたこれらの元素が堆積物中に分解されずに取り込まれることにより含有率は増加する。これらの作用については十分な検討がなされていないといえるが、環境評価の上では最も重要な作用であり上述の続成作用と関連して重金属やヒ素の堆積物への濃縮の最も重要な作用と考えられる。

### Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図

Zn と Fe は人間生活のなかでもっともよく利用される金属元素であり、トタン板で知られるように Zn は Fe よりもイオン化傾向が大きく Fe 2 価にくらべて水に対する溶解度が高く還元的環境では Fe よりもよく溶解するといえる。また、両元素は火成岩の形成の過程ではシリカの含有量に反比例して含有され、両者の含有量は正の相関を示す。一方、堆積岩では Zn, Fe とともに砂岩のような粗粒堆積物に比較して泥岩などの細粒相に濃縮する。このような Zn と Fe の地球化学的性質を考慮して両元素のクロスプロットを環境の評価図として考察した。第 1 図には代表的な標準岩石の Zn と Fe (全鉄を Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> として示す) を示した。旧地質調査所 (現産業総合研究所) の標準岩石試料では両者は良い正の相関を示す (r<sup>2</sup> = 0.93)。したがってこれらの組成が示す相関線は岩石の組成線として酸性岩から塩基性岩石までの組成を代表する。一方、一般の堆積岩の組成として多くの試料の分析値を Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 図に示すと、両元素は良い正の相関を示し直線に近似される。ここでは韓国の干潟の組成を示したが両元素にはよい正の相関をもつ組成線が得られる。上部大陸地殻を代表する堆積物組成である GLOSS (Plank and Langmuir, 1998) や PAAS (post-Archean Australian Shale, Taylor and McLennan, 1985) もこの組成線上にプロットされる。この堆積岩の組成線は岩石の組成線とは斜交し、より大きな傾斜を持つ。上部大陸地殻の組成 (Taylor and McLennan, 1985 による) をあわせて示した。堆積物の組成線が岩石の組成線よりも傾斜が急になるのは Zn は細粒相では Fe よりも濃縮する傾向が有るためと判断される。これは Fe も Zn も細粒堆積物では濃縮



第1図 Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図。標準岩石試料 (Potts et al., 1993 による) および一般の堆積物組成 (道前・石賀未公表) を示す。岩石試料および堆積物試料は両元素について正の良好な相関を示す。現在の海洋堆積物の平均値の GLOSS および UCC はこの組成線の上に示される。



第2図 Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図に広島県太田川水系の堆積物および福岡の河川堆積物の組成をプロットした。これらの試料は一般の堆積物の組成よりも Zn に富む傾斜の大きなトレンドを示し、Fe に対して Zn が濃縮していることを示す。これらの堆積物についても両元素について正の良好な相関を示す。

率が高くなるが、Zn はさらに粘土鉱物に吸着されたり、鉄の酸化物や酸化水酸化物に吸着されて濃縮するためと考えられる (Tribouille et al., 1994; Huerta-Diaz and Morse, 1992; Price and Moore, 1982 など)。

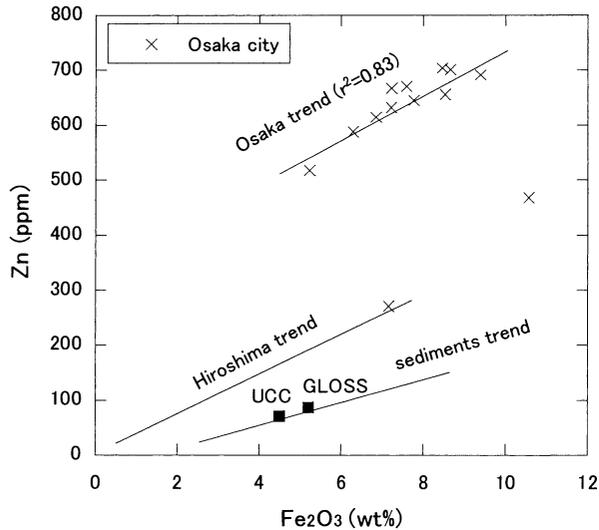
湖沼や干潟堆積物では As, Cu, Zn, V が濃縮することが知られているが (Calvert and Pedersen, 1993; Jones and Manning, 1994 など)、これらの元素の中で Zn は他の元素に比較して濃縮率に顕著な変化が認められる (道前・石賀, 2002)。ここでは Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 図に河川堆積物、ダム湖底質、および干潟の堆積物を示し、それぞれの環境を評価した。還元的環境での堆積物は堆積岩の組成線よりもさらに Zn に富む組成範囲にプロットされることが示されている。

第2図には広島市の太田川水系の堆積物および福岡市の河川堆積物を Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 図に示した。分析に用いた両地域の試料は暗色を示し、ヘドロ特有の腐敗臭をもつ。太田川水系の堆積物は試料採取時に測定した酸化還元電位 (ORP) は 0 ~ -50 mV を示し、還元状態であることを示す。第2図のプロットでは亜鉛-鉄に関して正の相関を示し、堆積物組成線よりもさらに Zn に富む組成を示し両元素は正の相関を示す。この組成は堆積岩の組成よりもより傾斜が大きく Fe に対して Zn がさらに堆積物に濃縮していることを示す。同様に大阪平野の都市河川における堆積物をプロットした (第3図)。試料の詳細は道前・石賀 (準備中) に記述予定である。試料は淀川水系の道頓堀川、寝屋川、木津川などで採取された。これらは著しく高い濃度の汚濁物質を含み重金属では Zn, Pb, Cu を示す。Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 図では堆積物の組成線のはるか上方にプロットされ Zn が Fe に対して著しく高い値を示すことを示す。現在 Zn に関して環境基準は示されていないがこの判別図から予想される環境は著しく還元的でしかも汚濁物質に伴って重金属の濃縮が生じていることを示唆する。この

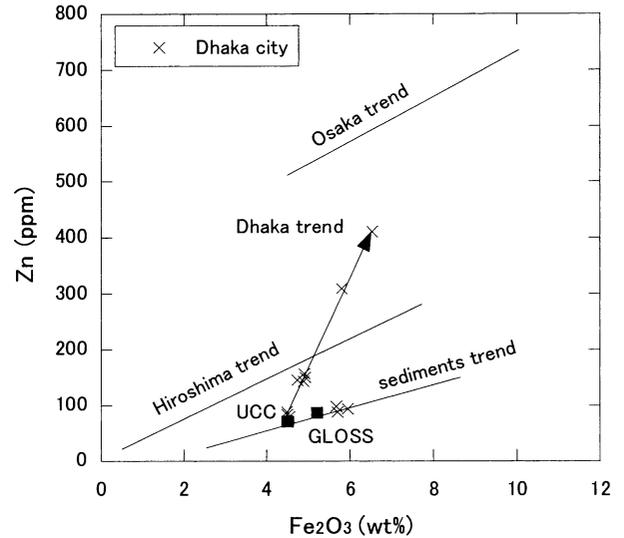
ような Zn と Fe の判別図によって都市環境の変化を評価することもこれからの課題である。筆者らはバングラデシュのダッカにおいて湖の柱状試料 (長さ 80 cm) を採取して元素組成の検討から環境変化を考察している (Ahmed et al., in preparation)。ダッカは建国以来著しい都市化と人口集中が進み交通機関としての2サイクルエンジンのベータータクシーと呼ばれる三輪車の排気ガスによって都市の大気は汚染された。そのためそれらの汚染の記録が湖成堆積物の柱状試料に記録されていると考えられる。Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 図 (第4図) にこの柱状試料の分析値を示す。汚染の始まる前には堆積物の組成線の上にプロットされるが、その上位で広島河川堆積物等の組成線の上にプロットされるまで Zn 濃度は増加する。そしてさらに Zn に富んだ組成へと変化して、それらは直線的にプロットされる。このような Zn 濃度の鉄含有率に対する増加の歴史的变化は都市環境の変化を示す有効な評価図として今後利用されることが考えられる。Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のクロスプロットは堆積物の源岩の組成や粒度組成による Zn と Fe の元素の濃縮率を考慮した判別図といえる。

### Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図

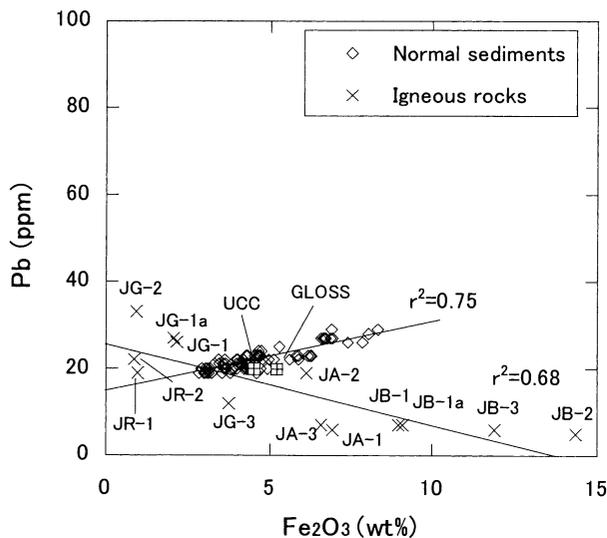
Pb も Zn と同様に人間活動のなかで使用される元素の1つである。Fe に対しては溶解度が低く Zn とは反対に溶解しにくい皮膜を作ることによって鉄の酸化を防いでいる。環境基準では Pb の毒性に配慮して検液では 0.01 mg/L と低い環境基準が定められている。自然界では土壌に 20 ppm 前後含まれている。Pb は火成岩の形成では長石にやや濃縮する傾向があり、塩基性岩よりも酸性岩の方が含有率は高くなっている (第5図)。これは Pb がバリウムと同様に長石に含まれ、珪長質岩でも 20 ppm 前後含まれるためである。しかし、Zn



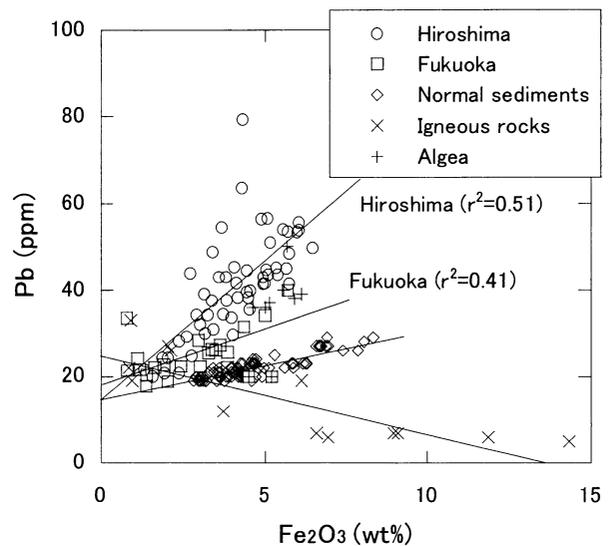
第3図 Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>判別図に大阪平野の河川堆積物の組成をプロットした。大阪平野の河川堆積物はさらにZnに富んだ領域にプロットされしかもそれらは両元素について正の強い相関を示す。広島河川堆積物の組成線およびその延長付近にプロットされる2試料は平野の大川(旧淀川)の比較的流速のある試料である。



第4図 Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>判別図にバングラデシュの湖成堆積物の柱状試料堆積物の組成をプロットした。バングラデシュの柱状試料ではその下部では一般の堆積物の組成線にあり、矢印で示される順に時代とともに太田川堆積物のそれに近付きさらにFeに対してZnに富んだ組成へと変化する。この試料は現在の湖の表層堆積物の試料で最もZn濃度が高くなる。



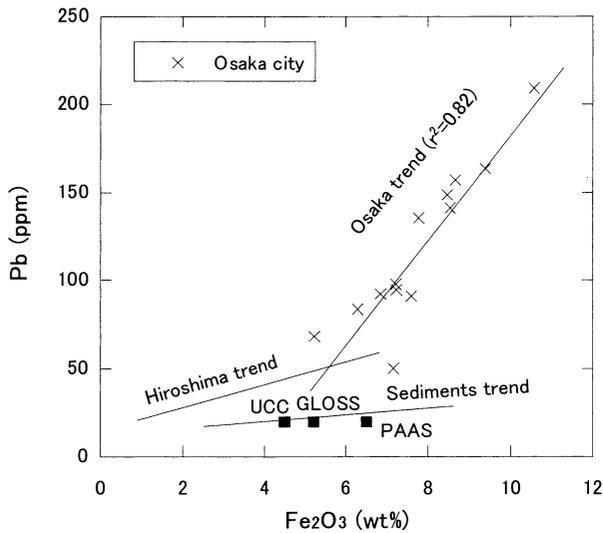
第5図 Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>判別図。標準岩石試料(Potts et al., 1993による)および一般の堆積物組成(道前・石賀未公表)を示す。岩石試料は両元素に明瞭な相関を示さないが、堆積物試料は両元素について正の強い相関を示す。GLOSS, UCCおよびPAAS (post-Archean Australian Shale)もこの組成線に示される。



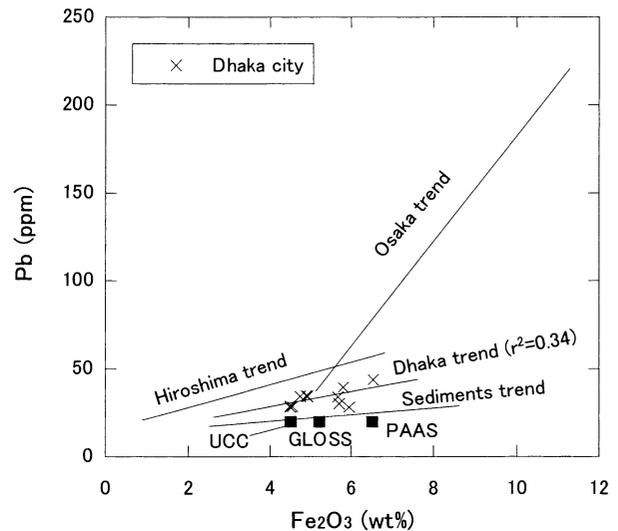
第6図 Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>判別図に広島県太田川水系の堆積物および福岡の河川堆積物の組成をプロットした。これらの試料は一般の堆積物の組成よりもPbに富む傾斜の大きなトレンドを示し、Feに対してPbが濃縮していることを示す。これらの堆積物についても両元素について正の強い相関を示す。Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>判別図とは異なりPbでは広島と福岡の組成は区分され広島の堆積物の方がFeに対してPbが高くなっている。

-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>図に示されると同様に一般の堆積物ではPbとFeは正の強い相関をもち( $r^2=0.75$ )、堆積岩組成のトレンドを構成する。韓国の干潟の組成をもとにPb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>図に組成を示すと両者は良い正の相関を持つ。これは右上がりの直線となり、岩石組成の示す負の相関とは異なる。一方、広島太田川、福岡の河川の試料はそれぞれ堆積岩の組成線よりも傾斜が大きくなる(第6図)。それらはやや分散するものの広島の試料( $r^2=0.51$ )および福岡の試料( $r^2=0.41$ )ともにPb-Fe<sub>2</sub>

O<sub>3</sub>は相関を示す。さらに大阪の河川堆積物の試料は堆積岩や太田川の試料のつくるトレンドよりもはるかに高いPbの値を持ち、多くの試料はPb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の間には明瞭な相関を持つ(第7図)。Pbそのものの組成は極めて高くなっているが、粒度組成に影響されてより大きな傾斜を持つ相関線を形成する。さらにダッカの試料をプロットすると、それらはやや分



第7図 Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図に大阪平野の河川堆積物の組成をプロットした。大阪平野の河川堆積物はさらにPbに富んだ領域にプロットされしかもそれらは両元素について正の良好な相関を示す。



第8図 Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図にバングラデシュの湖成堆積物の柱状試料堆積物の組成をプロットした。バングラデシュの柱状試料ではその下部では一般の堆積物の組成線上にあり、時代とともに太田川堆積物のそれからさらにPbに富んだ組成へと変化する。

散する ( $r^2=0.34$ ) ものの広島と堆積岩の間に正の相関を持つトレンドをつくる (第8図)。従って堆積物として蓄積されるPbの量は日本の都市に比較して低いことが分かる。以上のようにPb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 図においても両元素には一般の堆積物については相関をもち、組成線をなす。これを基準としてFeに対するPbの量の増減を評価することによって環境変化を解明することが可能である。

## ま と め

1. Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図において火成岩の組成は両元素に正の相関を示す。干潟の堆積物の元素組成を一般の堆積物として代表させた。この組成を用いて判別図にプロットすると両元素には正の良好な相関が有り火成岩組成が示すトレンドよりも傾きの大きな直線となる。
2. Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図に広島、福岡、大阪等の河川堆積物をプロットすると広島と福岡の試料は一般の堆積物の組成よりもFeに対してZnに富み、その組成は大きな傾きを示すトレンドを示す。大阪の河川の試料は一部を除いてFeに対してZnが極めて高い値を示し、広島や福岡のトレンドとは同じ傾斜を持つ。
3. Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図では火成岩は負の相関を示すが、一般の堆積物では両元素に正の相関が見られる。
4. Pb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図に広島、福岡は一般の堆積物にくらべてFeに対してPbが富んだ組成を示し、それぞれ異なる組成線にプロットされる。
5. Zn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図およびPb-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 判別図は火成岩、一般の堆積物の組成に対して重金属に富んだ堆積物の組成を示すことができ環境評価に役立つと言える。

## 謝 辞

地球資源環境学教室の山内靖喜教授には著者らが御指導御鞭撻いただいている。また、同バリーローザー先生には英文の添削をいただいた。記して感謝いたします。

## 引用文献

- Calvert S.E. and Pedersen T.F., 1993, Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implication for the geological record. *Marine Geol.* **113**, 67-88.
- Condie K.C., 1993, Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.* **104**, 1-37.
- 道前香緒里・石賀裕明, 2000 a, 堆積岩の元素組成からみた内帯・外帯の諸地帯の比較. 地学団体研究会専報, **49**, 37-54.
- 道前香緒里・石賀裕明, 2000 b, 堆積岩の希土類元素からみた中・古生代地帯の後背地. 地質学論集, **57**, 43-52.
- 道前香緒里・石賀裕明, 2002, 堆積物の元素組成から見た球磨川, 川辺川流域の環境評価. 島根大学地球資源環境学研究報告 **21**, 17-29.
- Fedo C.M., Nesbitt H.W. and Young G.N., 1995, Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*. **23**, 921-24.
- Fedo, C.M., Eriksson, K.A. and Krogstad, E.J., 1996, Geochemistry of shales from the Archean (~3.0 Ga) Buhwa Greenstone Belt, Zimbabwe: implications for provenance and source area weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 1751-1763.
- Garcia, D., Fontilles, M. and Moutte, J., 1994, Sedimentary Fractionations between Al, Ti, and Zr and the Genesis of Strongly Peraluminous Granite. *Jour. Geol.*, **102**, 411-422.
- Hirao, Y., Mabuchi, H., Fukuda T., Tanaka, H., Imamura, T., Todoroki, H., Kimura, K. and Matumoto, E., 1986, Lead isotope ratios in Tokyo Bay sediments and their implications in the lead consumption of Japanese industries. *Geochemical Jour.*, **20**, 1-15.
- Huerta-Diaz, M. and Morse, J. W., 1992, Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **56**, 2681-2702.

- Jones B. and Manning D.A.C., 1994, Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.* **111**, 111-129.
- McLennan S., Hemming S., MacDaniel D.K. and Hanson G.N., 1993, Geochemical approach to sedimentation, provenance and tectonics. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* **284**, 21-40.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., McLennan, S. M. and Keays, R. R., 1996, Effects of Chemical Weathering and Sorting on the Petrogenesis of Siliciclastic Sediments, with Implications for Provenance Studies. *Jour. Geol.*, **104**, 525-542.
- Price, M. L. and Moore, C. B., 1982, Adsorption of arsenic and arsenate on amorphous iron hydroxide. *Water Res.*, 16, 1247-1253.
- Plank, T. and Langmuir, C. H., 1998, The chemical composition of subducting sediments and its consequences for the crust and mantle. *Chem. Geol.* **145**, 325-394.
- Potts, P. J., Tindle, A. G. and Webb, P. C., 1992, Geochemical reference material compositions. Caithness, Whittles Publishing, 313 pp.
- Taylor S. R. and McLennan S. M., 1985, *The Continental Crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, pp. 312
- Tribouillard, N-P., Desprairies, A., Lallier-Verges, E., Bertrand, P., Moureau, N., Ramdani, A. and Ramanampisoa, L., 1994, Geochemical study of organic-matter rich cycles from the Kimmeridge Clay Formation of Yorkshire (UK): productivity versus anoxia. *Plaleogeogr. Paleoclimat. Paleocol.*, **108**, 165-181.
- 山崎静子・石賀裕明・道前香緒里・東直子・Faruque Ahmed・三瓶良和・Md. Hamidur Rahman・Md. Badrul Islam, 2000, バングラデシュ, ガンジスデルタ堆積物の元素組成-ヒ素はピートから溶出する?-. *地球科学*, **54**, 81-93.
- Yamazaki, C., Ishiga, H., Ahmed, F., Itoh, K., Suyama, K. and Yamamoto, H., 2003, Vertical Distribution of Arsenic in Ganges Delta Sediments of Deuli Village, Bangladesh. *Soil Science and Plant Nutr.*, **49**, 561-574.

(受付: 2003年10月30日, 受理: 2003年12月5日受理)