

パキスタン北部の花崗岩類の帯磁率と硫黄同位体比

石原 舜三¹⁾・吉田 充夫²⁾・関 陽児³⁾

1. まえがき

私達が地表の露岩から得るデータを解析する場合に、地下深部の状態を想像して幾つかの仮定を設定し、観測データを解釈する。その場合に地下深部の実測データがあれば、それに優るものはないが一般には超深度掘削でも行われな限り、直接深部データを取ることは出来ない。

パキスタン北部にはユーラシア・インド両大陸の衝突によって大陸や島弧の深部が露出してそれぞれの断面を直接見て計測することが出来る。ここでは岩石帯磁率と硫黄同位体比に注目して、パキスタンプロジェクトの成果をYOSHIDA and FUJIWARA (1994), AHMED *et al.* (1995), ISHIHARA *et al.* (1996), KHADIM *et al.* (1997), SEKI *et al.* (1997) などから紹介してみたい。

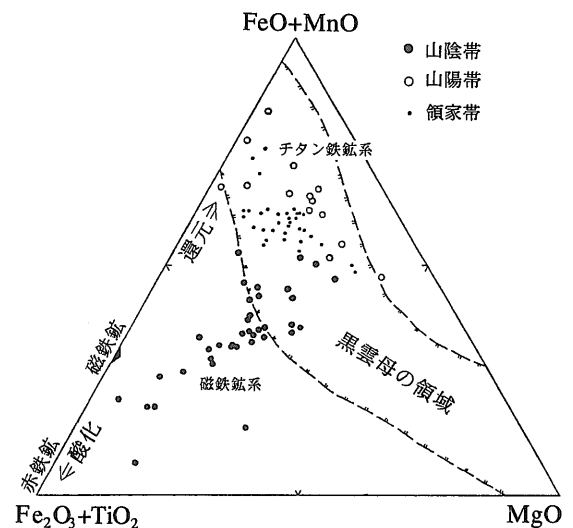


写真1 パキスタンの景色 (1) 名峰ナンガルパット (8,125m). プンジ南方より振り返る。右手黒色岩壁の白色脈はペグマタイト脈。

2. 帯磁率測定の意味

深部岩石の帯磁率を測定することは次の2点で非常に重要である。第1は地上の磁気探査データなどの解釈に不可欠な点である。地下の岩石にどのような値を設定するかによって、地上観測データの解釈も異なる。第2は帯磁率の測定によって磁鉄鉱の量が分かるが、それは岩石生成時の酸化/還元状態、すなわち化学ポテンシャルにも示唆を与える点である。

岩石には鉄が普通3番目に多い元素として含まれ、それは3価 (Fe_2O_3) と2価 (FeO) とから成っている。酸化的雰囲気では鉄は Fe^{3+} として、還元的条件下では Fe^{2+} として存在する。最も酸化的な鉱物



第1図 西南日本内帯花崗岩類の苦鉄成分三角図 (ISHIHARA, 1971).

1) 地質調査所 顧問
2) ジオサイエンス(株)
3) 地質調査所 資源エネルギー地質部

キーワード: パキスタン, カラコルム街道, 花崗岩, チラス複合体, 帯磁率, 磁鉄鉱系, チタン鉄鉱系, 硫黄同位体比

第1表 主要な造岩鉱物・造鉄石鉱物の帯磁率 (AHRENS, 1995).

鉱物	化学成分	比重	容量 κ (10^{-3} SI)
酸化物			
磁鉄鉱	Fe_3O_4	5.18	1,000.0-5,700
チタン磁鉄鉱	$Fe_{3-x}Ti_xO_4$	4.98	130.0-620
チタン鉄鉱	$FeTiO_3$	4.72	2.2-3,800
クロム鉄鉱	$FeCr_2O_4$	4.80	3.0-120
赤鉄鉱	$\alpha-Fe_2O_3$	5.26	0.5-4.0
マグヘマイト	$\gamma-Fe_2O_3$	4.90	2.0-2,500
珪酸塩鉱物			
ざくろ石	$A_2B_2(SiO_4)_3$	3.90	2.7
かんらん石	$(Fe,Mg)_2SiO_4$	4.32	1.6
鉄かんらん石	Fe_2SiO_4	4.39	5.5
斜方輝石	$(Fe,Mg)SiO_3$	3.59	1.5-1.8
黒雲母	$K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	3.00	1.5-2.9
石英	SiO_2	2.65	-0.0005
硫化物			
磁硫鉄鉱	$Fe_{1-x}S$	4.62	0.46-1,400
トロイライト	FeS	4.83	0.61-1.7
黄鉄鉱	FeS_2	5.02	0.04-5.0
硫砒鉄鉱	$FeAsS$	6.05	3.0
黄銅鉱	$CuFeS_2$	4.20	0.023-0.4

は赤鉄鉱 (Fe_2O_3) であり、次いで2価と3価が1モルずつ含まれる磁鉄鉱 ($Fe_2O_3 \cdot FeO$)、2価のみ含まれるチタン鉄鉱 ($FeO \cdot TiO_2$) である。赤鉄鉱はマグマから直接晶出する事ではなく、その後の熱水期に磁鉄鉱を酸化したりして見られることが多い。従って磁鉄鉱があれば、それを含まない岩石よりも酸化的と見なして良い。

一方、マグマが還元的であると磁鉄鉱は晶出しない。微量のチタン鉄鉱が晶出する事はあるが、一般には酸化物に乏しく、鉄は主に FeO としてかんらん石・輝石・角閃石・黒雲母などの苦鉄珪酸塩鉱物のみに含まれる。他方、磁鉄鉱を含む岩石の珪酸塩鉱物の Fe^{3+}/Fe^{2+} 比は当然のことながら高く、かつ鉄が磁鉄鉱の生成に消費される為に鉄サイトを取り易いマグネシウム量に影響を与え、酸化物より後期晶出の珪酸塩鉱物の Mg/Fe 比が高くなる。

一般の火成岩類には微量鉱物として磁鉄鉱とチタン鉄鉱の双方が含まれるものと長い間信じられてきたが、それを含むものと含まないものがある事が判ったのは比較的最近である。ISHIHARA (1977) は花崗岩を例に、それぞれを磁鉄鉱系列 (magnetite series) とチタン鉄鉱系列 (ilmenite series) と名付けた。両者の関係は苦鉄化学成分図上、第1図の様に示される。

強磁性鉱物には磁鉄鉱、マグヘマイトなどがあるが(第1表)、後者は新鮮な火成岩には産出しないの

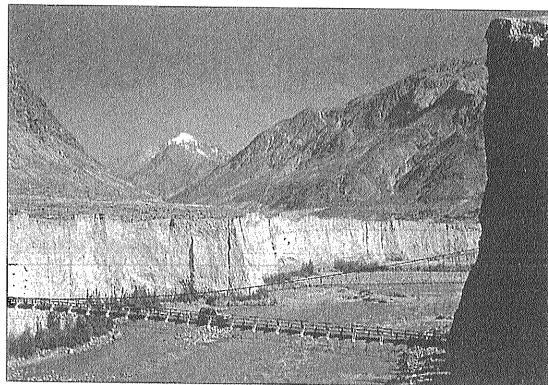


写真2 パキスタンの景色(2)河岸段丘。当地の隆起率の高さを物語る。ギルギット郊外。

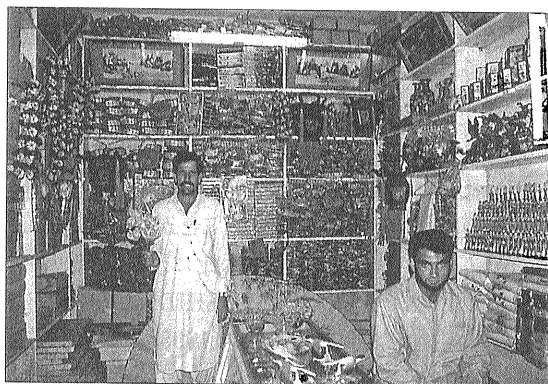
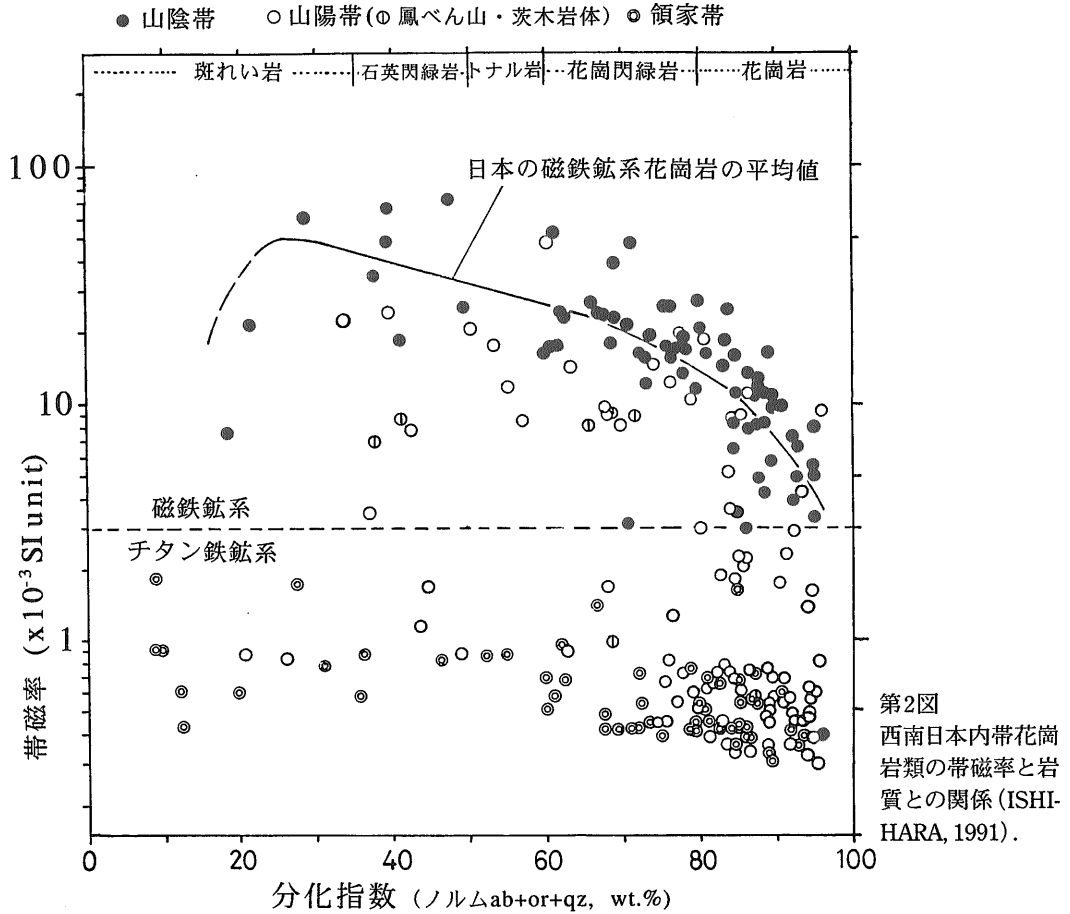


写真3 パキスタンの景色(3)カラコラム街道の中心地ギルギットのギフトショップ。

で一般には除外して考えて良い。CARMICHAEL (1989), AHRENS (1995) などの“教科書”の一覧表には、チタン鉄鉱に磁鉄鉱と同じオーダーの値が記されているが(第1表)、その出典は古い教科書に基づいておりそれぞれのチタン鉄鉱がどのような産状のものか示されていない。深成岩類に付随するチタン鉄鉱は私達の経験によると、磁鉄鉱より2-3桁低い値を示す。磁硫鉄鉱についても同様で、深成岩に産するもの(六方晶系)は低い値を示すに過ぎない。輝石・黒雲母などの鉄を含有する珪酸塩鉱物は常磁性鉱物であり、磁鉄鉱より3桁低い値を示す(第1表)。従って新鮮な火成岩類の全岩の帯磁率は磁鉄鉱量で決定されると考えて良い。反射顕微鏡観察によると、狭義の花崗岩 (SiO_2 70%前後) では帯磁率が $2.7-3.5 \times 10^{-3}$ SI 付近から磁鉄鉱が見えなくなるから、筆者らは両系列の境界を 3×10^{-3} SI においている(第2図)。



第2図
西南日本内帯花崗岩類の帯磁率と岩質との関係 (ISHIHARA, 1991).

日本のジュラ紀-中新世花崗岩類について言えば、両系列はほぼ同規模に分布する。西南日本内帯のランダム・サンプリング試料についての測定結果の例を第2図に示す。付随する噴出岩類や斑れい岩も花崗岩と同じ傾向を示す。第四紀火山はほぼ全面的に磁鉄鉱系である。超塩基性岩は蛇紋岩化時に二次的に磁鉄鉱を生じているが、その量は地域や共存する岩石組み合わせによって異なる。堆積岩は一般には磁鉄鉱を含まず、堆積岩源の変成岩類も同様である。火成起源の変成岩類には双方の場合がある。それではパキスタンの岩石はどうであろうか？

3. パキスタン北部の諸岩石の帯磁率

パキスタン北部においては、南から北に、インドプレート、主マントル衝上断層 (Main Mantle Thrust, MMT) を境に、コヒスタン-ラダク島弧 (南

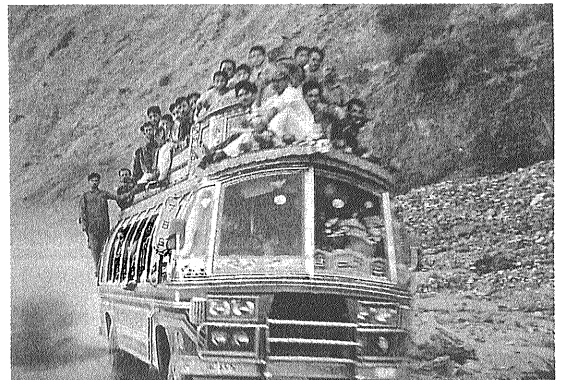
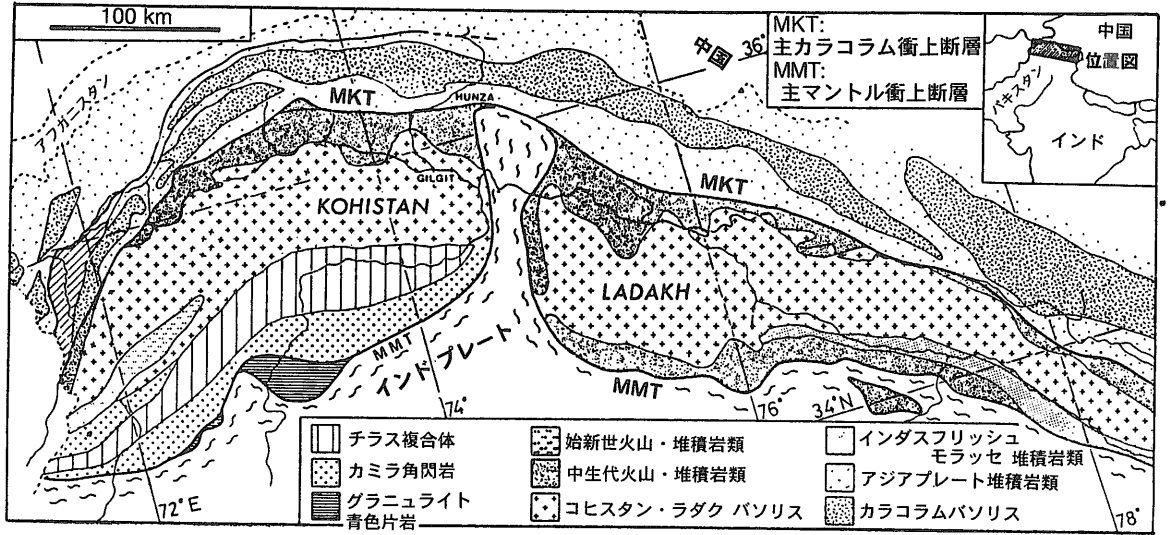


写真4 パキスタンの景色 (4) たそがれ時にギルギットより山間の部落へ急ぐ超満員の最終バス。

側が深部相), その北縁の主カラコラム衝上断層 (Main Karakoram Thrust, MKT) を夾んでユーラシアプレートの諸岩石が分布する (第3図)。

本プロジェクトにおいては、まず上記を横断するカラコラム街道沿いで帯磁率を測定した。ハッサ



第3図 パキスタン北部の地質概略図 (PUDSEY, 1986を一部修正).

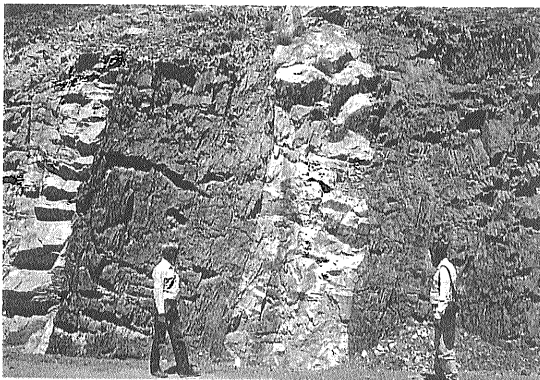
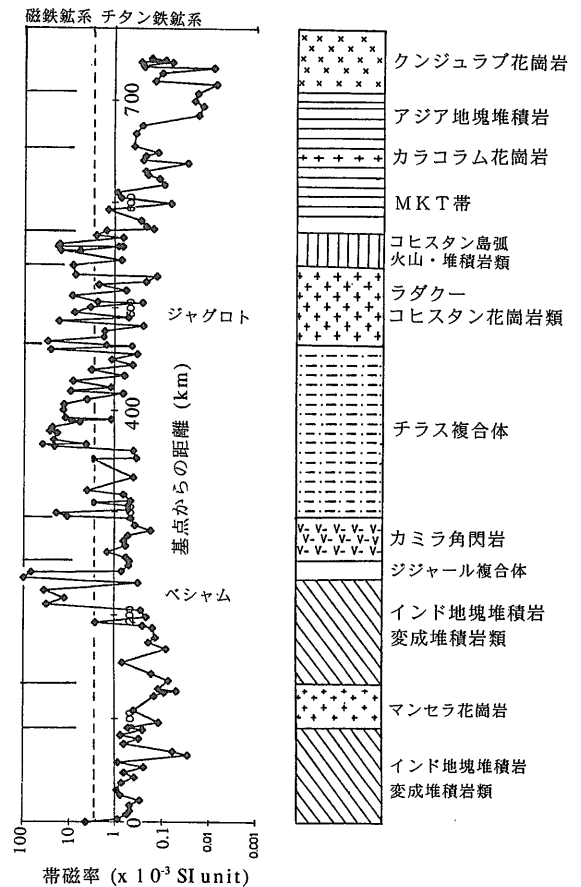


写真5 パキスタンの景色 (5) 衝突によって直立するコヒスタン島弧の砂岩・頁岩層。チャルト付近。

ン・アブダル交差点を基点とし、インダス・ギルギット・クンジュラブ河沿いの742kmに及ぶルートにおいて、3km間隔を原則として携帯用帯磁率計KT5で計測した。その結果 (AHMED *et al.*, 1995) を第4図に示す。

基点から13測点 (39km) までは現世土壌しか露出せず、それは一般に 0.9×10^{-3} SI 以下である。

インドプレートに属する堆積岩類はドロマイトが $0.03-0.06 \times 10^{-3}$ SI、雲母片岩、石英片岩などの変成堆積岩類は 0.7×10^{-3} SI 以下で低いが、ベシヤムの石英片岩の2個は $11.9-28.3 \times 10^{-3}$ SI を示した。ジャール複合体の北半分を占めるざくろ石グラニュライトは低い値を示すが、2個の蛇紋岩は非常に



第4図 カラコラム街道沿い諸岩石の帯磁率変化 (AHMED *et al.*, 1995).

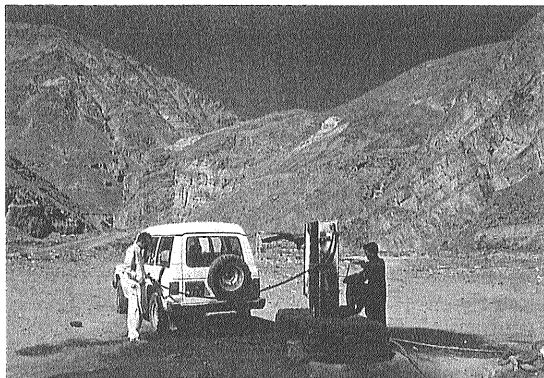


写真6 パキスタンの景色 (6) パキスタン最奥地のガソリンスタンド。スツト北方。砂利敷に注目。

高い値 ($88.2, 61.1 \times 10^{-3}$) を持ち、蛇紋岩化において磁鉄鉱が生成したことを示している。カミラ角閃岩は $0.2-1.4 \times 10^{-3} \text{SI}$ で、低い値を示す。

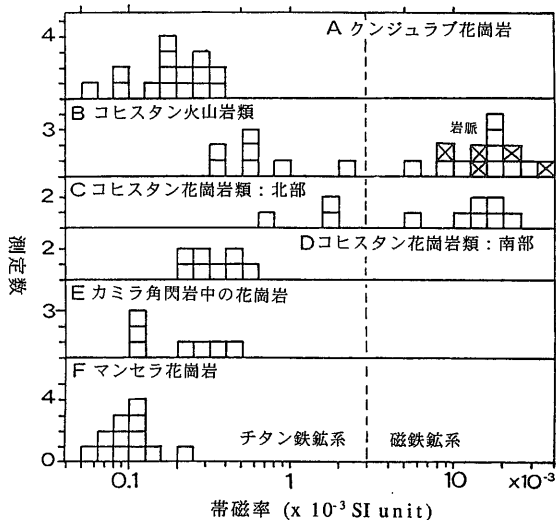
一方著名なチラス火成岩複合体は幅広い値を示す。帯磁率が高く、磁鉄鉱系の値を示すものは斑れいノーライト・かんらん岩 ($3-27 \times 10^{-3} \text{SI}$) と斑れい岩 ($3-35 \times 10^{-3} \text{SI}$) である。高橋 浩氏の採集サンプルからは最高 $113 \times 10^{-3} \text{SI}$ が得られた。今後の不透明鉱物の研究が期待される。その他の岩石はチタン鉄鉱系の低い値を示すが、それらは層状斑れい岩、メタ斑れい岩、キウムレイト斑れい岩、閃緑岩類である。

その北方のコヒスタン火成弧の諸岩石も同様に幅広い値を示し、その主役は花崗岩類 ($0.3-16.6 \times 10^{-3} \text{SI}$) と岩脈 ($0.7-14.5 \times 10^{-3} \text{SI}$) および変成火山岩類 ($1.5-15.7 \times 10^{-3} \text{SI}$) である。変成火山岩類・堆積岩類からなるMKT帯、その北方の堆積岩類とカラコラム、クンジュラブ花崗岩類はいずれもチタン鉄鉱系の低い帯磁率を示す。

4. 花崗岩類の帯磁率

カラコラム街道のこれまでの測定値の頻度分布を第5図に示した。この地域の花崗岩類は南から北へ次の地帯に分布する。

- (イ) インドプレートの堆積岩類に貫入するカンブリア紀のマンセラ花崗岩：斑状黒雲母花崗岩、弱いタングステン鉱化作用を伴う(Sタイプの)、
- (ロ) カミラ角閃岩に小規模ストック状に貫入する両雲母花崗岩(Sタイプ)、

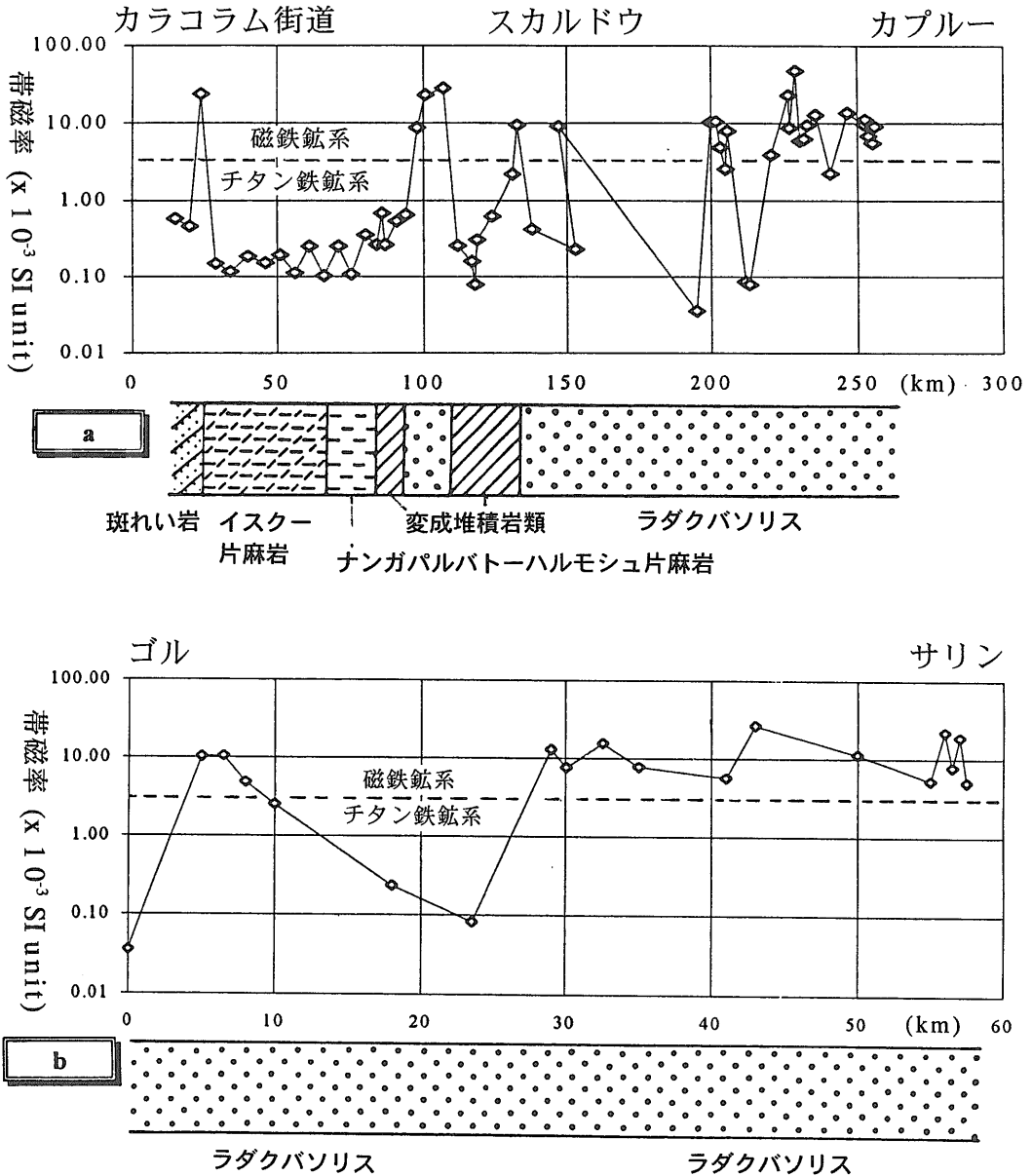


第5図 カラコラム街道沿い花崗岩類と一部の火山岩類の帯磁率変化 (ISHIHARA et al., 1996)。

- (ハ) コヒスタン島弧の花崗岩・花崗閃緑岩類(Iタイプ)、
- (ニ) アジアプレートに貫入するカラコラム花崗岩・花崗閃緑岩類(Iタイプ)、
- (ホ) 中国との国境付近に貫入するクンジュラブ花崗岩類(Sタイプ)。

これらの多くはチタン鉄鉱系に属する低い帯磁率を示し、中でもマンセラ花崗岩が最も低い値を示す。磁鉄鉱系の値はコヒスタンの花崗岩類、岩脈類、火山岩類にわずかに認められるに過ぎず、花崗岩については北部で10個中7個(70%)が磁鉄鉱系の、南部では8個全てがチタン鉄鉱系の値を示し、全体としては18個中7個(39%)が磁鉄鉱系であるに過ぎない。絶対値としては最高 $23 \times 10^{-3} \text{SI}$ であり、これは磁鉄鉱として約0.7容量パーセントに相当する。

コヒスタン花崗岩類はコヒスタン島弧の骨幹を形成するものであり、その古い部分はインド大陸がアジア大陸およびその南方にあったコヒスタン島弧に衝突する以前に、北向きのサブダクションに關係して発生したマグマの噴出と貫入によって生じ、若い部分はインド大陸がコヒスタン島弧と衝突した以降に発生・貫入したと考えられている。これは東方へ連続してラダク花崗岩類と呼ばれている。次にこのラダク花崗岩類の磁氣的断面を見てみよう(第6-1, 2図)。

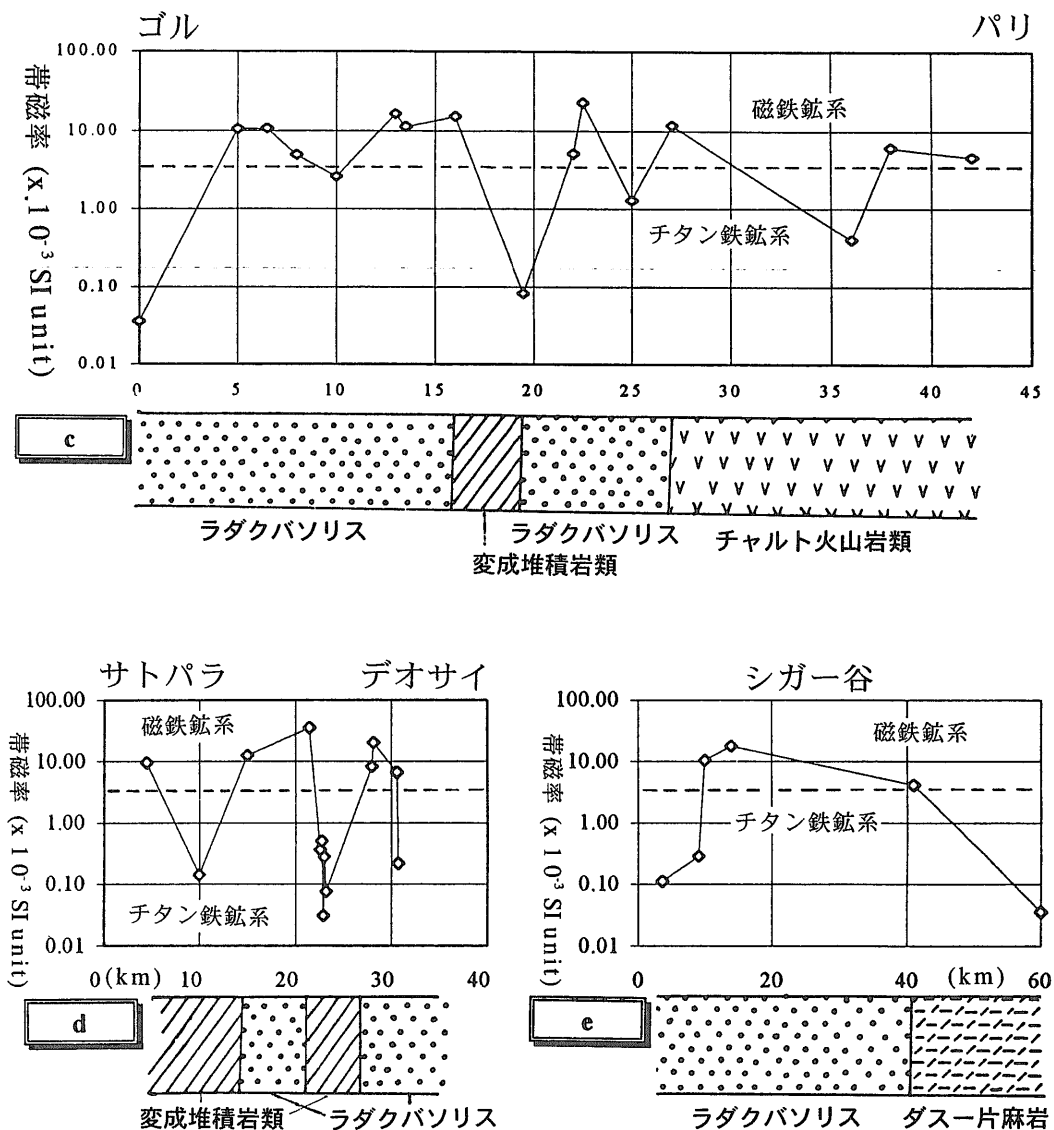


第6-1図 ラダク島弧諸岩石の帯磁率変化：(a) カラコラム街道-スカルドウ-カプルー (b) ゴル-サリン (KHADIM et al., 1997).

この調査はキルギット東方のブンジでカラコラム街道(KKH)から東方に分かれるインダス河本流沿いのルートで行われた。地質的にはラダク花崗岩類の北縁部を見ることになる。まずカラコラム街道-スカルドウ-カプルーの260kmの断面では、磁鉄鉱系に属する高い値のほとんどはラダク花崗岩類に属することが判る。磁鉄鉱系の値を持つものが22個、チタン鉄鉱系の場合が8個、従って70%が磁鉄鉱系ということになる。

一方、スカルドウ-東南東方、約27kmのゴル付近の横断面では、北西-南東方向のゴル-パリ線で12個の内9個が磁鉄鉱系(75%)、西北方向のサトパラ-デオサイ線で6個の内5個(83%)、シガー谷で4個の内2個(50%)、が磁鉄鉱系であった。

総計としては全71個中53個(75%)が磁鉄鉱系であり、コヒスタン花崗岩類よりも磁鉄鉱系の割合が著しく高く、また絶対値も 47×10^{-3} SI(磁鉄鉱約1.4容量%)を最高として、大きい傾向がある。帯磁



第6-2図 ラダク島弧諸岩石の帯磁率変化：(c) ゴル-パリ, (d) サトパラ-デオサイ, (e) シガー谷 (KHADIM et al., 1997).

率の測定からはコヒスタン-ラダク花崗岩類は基本的にはアメリカ大陸のコルディレラと同じく、Iタイプ磁鉄鉱系であることを示している。チタン鉄鉱系がやや多いコヒスタン花崗岩類はラダクより深部相でかつ構造的に擾乱し、部分的に地殻起源炭素により還元された所を見ているのではあるまいか。

5. 硫黄同位体比

硫黄同位体比は岩石中の³⁴S/³²S比をキャン-

デアブロ (Canyon-Diablo) 産の隕石のトロイライト (troilite, 併せてCDTと略称) と比較した場合の隔たりとして千分率 (パーミル, ‰) で示すものであり、 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ として表される。測定する硫黄は一般には岩石中に含まれる微量の硫化物に由来するものと思われる。硫化物とその他の造岩鉱物に含まれる量との比率などについてはまだ十分に解っていない。硫化物は一般に、磁硫鉄鉱, ペントライト鉱, 黄鉄鉱, 黄銅鉱などである。後2者については徐冷時代の生成物の可能性もある。

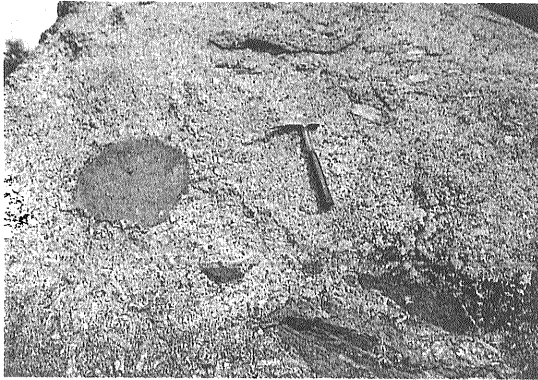


写真7 パキスタンの花崗岩(1)マンセラ花崗岩-1:カリ長石の巨晶に注目。下部に堆積岩源捕獲岩,中央左に火成岩源包有物が見える。

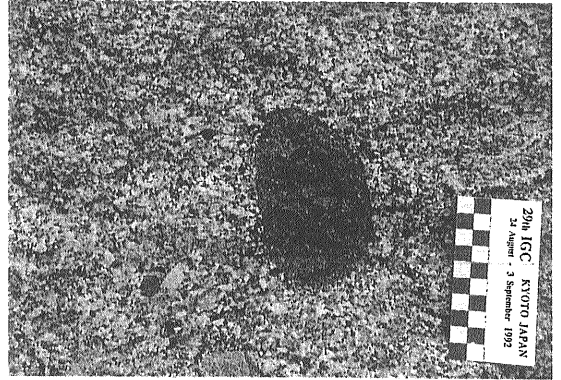
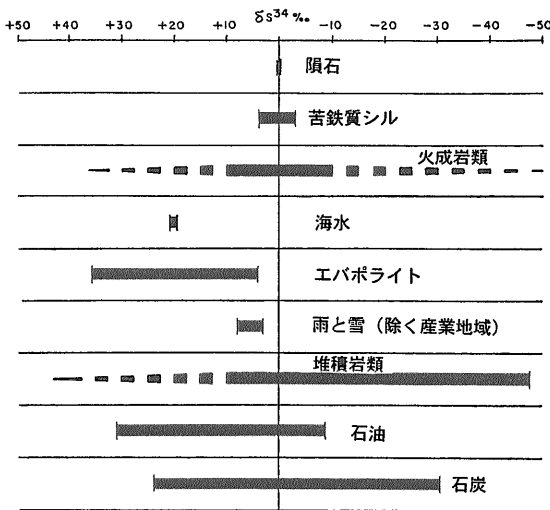


写真8 パキスタンの花崗岩(2)マンセラ花崗岩-2:花崗岩組成であるが色指数(黒雲母)が高く,堆積岩源包有物が多い点に注目。



第7図 主要岩石の硫黄同位体比 (THODE, 1963).

$\delta^{34}\text{S}$ は隕石中のトロイライト(FeS)を標準とするために, いろんな種類の隕石は0パーミルに近い値を示し, マントル捕獲岩やマントル起源の苦鉄質シルはその前後の値を示す(第7図). この事実から, 0ないし1パーミルに近い値を持つ火成岩は全てマントル起源と長い間考えられてきた。

ところが, SASAKI and ISHIHARA (1979)は日本などの沈み込み帯に伴う磁鉄鉱系深成岩類が平均4.5パーミル, チタン鉄鉱系深成岩類が平均-4.5パーミルの値を示すことを見だし, 前者が4パーミル程度重くなる事実は, 海水中の硫酸塩硫黄が海嶺における熱水変質作用を経て沈み込み作用を通じて上部マントルを汚染した結果ではなかろうかと考えた. すなわち, マントルもその構造的背景に

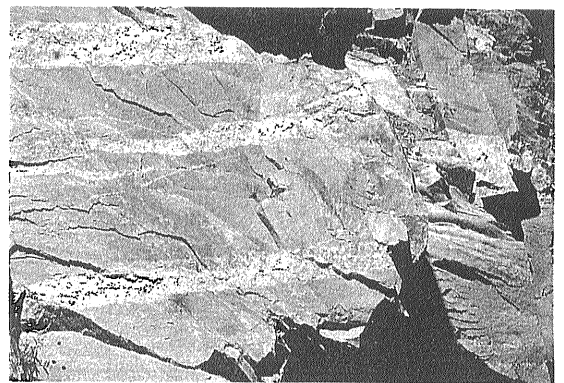
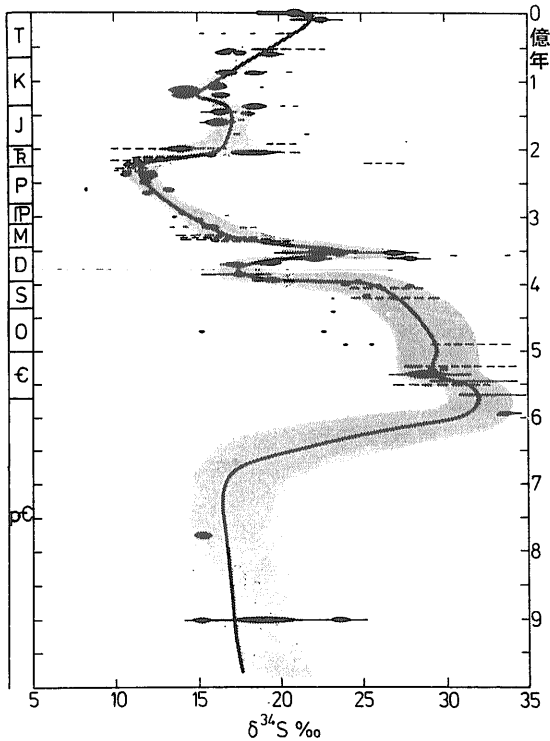


写真9 パキスタンの花崗岩(3)コヒスタン花崗岩体の細粒花崗閃緑岩とそれを切る白雲母ペグマタイト岩床。

よって異なる $\delta^{34}\text{S}$ 値を持つようである。

硫黄同位体の分別作用は高温の火成活動では非常に小さいが, 低温の熱水変質作用などでは大きくなる(佐々木, 1977). また硫黄は気相としても存在し易いため脱ガスを伴う火山岩類の $\delta^{34}\text{S}$ 値は変化する. その場合硫黄には酸化種と還元種があるため酸素フュガシティの規制を著しく受ける.(酒井・松久, 1996). 酸化硫黄種は ^{34}S を著しく濃集し, 海水やそれから溶存成分が濃集晶出したエバポライトなどは $\delta^{34}\text{S}$ 値が大きい(第7図). 一方, 還元的海底の嫌気性バクテリアは硫酸硫黄を食べて硫化物を沈殿せしめるが, その過程で $\delta^{34}\text{S}$ を小さくする. 従って強力な還元材である有機炭素を含む泥質岩類などは, 一般に小さい $\delta^{34}\text{S}$ 値を示す。



第8図 顕生代におけるエバポライトの $\delta^{34}\text{S}$ の変化 (CLAYPOOL *et al.*, 1980). 左側の地質区分は上から、第三紀, 白亜紀, ジュラ紀, 三疊紀, ペンシルベニア紀, ミシシッピ紀, デボン紀, シルル紀, オルドビス紀, カンブリア紀, 先カンブリア紀.

海水中の硫酸イオンの $\delta^{34}\text{S}$ は長い地質時代では異なった値を示し、一定ではない。例えばアーケアン海水から沈殿した重晶石は5パーミル前後であるが、古生代には30パーミルを超えるものがある。第8図の実線は顕生代のエバポライト硫酸塩鉱物の変化曲線であるが、先カンブリア紀/カンブリア紀境界へ向けて $\delta^{34}\text{S}$ が急上昇し、その後下降して二疊紀末には10パーミルに低下し、再び上昇を始めて現在に至る。

以上のように $\delta^{34}\text{S}$ の変化は堆積岩類で最も大きく現れ、かつ堆積岩類の値も時代によって異なる。従ってこれら堆積岩類と関与した火成岩類も幅広い値を示す可能性がある。

6. パキスタン北部における硫黄同位体比

パキスタン北部における諸岩石の値を第9図に示す。まず堆積岩類について泥質岩同志を比較す

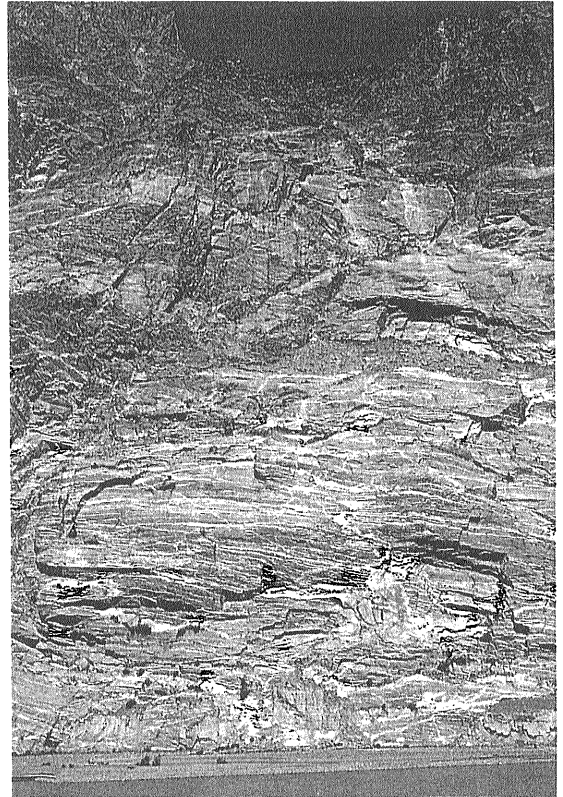


写真10 パキスタンの花崗岩 (4) カラコラム花崗岩バソリス南部の花崗閃緑岩に貫入する大量のペグマタイトーアプライト岩床。多時期の貫入と変形が認められる。

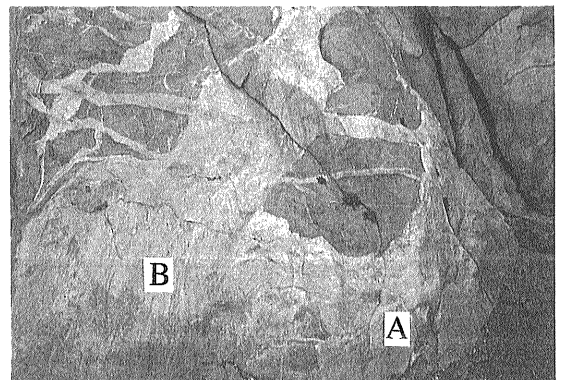
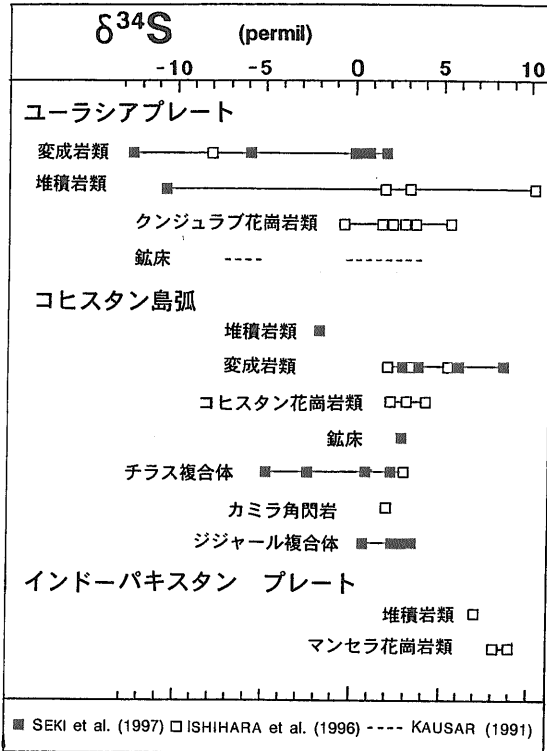


写真11 パキスタンの花崗岩 (5) 写真10のクローズアップ。ここでは最大の岩床 (幅50-70cm, A) が傾斜脈 (幅30cm, B) に切られ、更に水平細脈に切られる。

ると、インドプレートでは $\delta^{34}\text{S}$ が大きく (7.0%)、ユーラシアプレートで -0.8 ~ 1.7% ある。

インドプレートの値はシルル-デボン紀スワット層



第9図 パキスタン北部諸岩石の硫黄同位体比 (SEKI et al., 1997).

の炭素に富む粘板岩であるが、当時の海水の値はシルル紀で高く、デボン紀で低いことが知られている(第8図)。この黒色粘板岩としては高いδ³⁴S値を示すことから見ると、スワット層はシルル紀である可能性が大きい。

一方ユーラシアプレートの泥質岩類は二畳-石炭紀の年代を持ち、海水の値から最も低い値が予想されるのであるが、結果は主に0パーミル前後、一部岩石で-6~-13パーミルであった。

火成岩類についてはカミラ角閃岩が0.6~1.9パーミル(平均1.3%), ジジャール火成岩複合体が0.3~3.2パーミル, 平均2.2パーミルで共に“マントル値”に近い。従ってこれらがもともと下部地殻や最上部マントルを構成しており、MMT形成時にオブダクトした断片と考えることは可能である。他方チラス火成岩複合体は-4.8~2.1パーミル(平均-1.1%)であり、軽い地殻硫黄が若干混入した可能性が考えられる。

花崗岩類のうちインドプレートのマンセラ花崗岩はSタイプチタン鉄鉱系であり、その高い値(8.1~

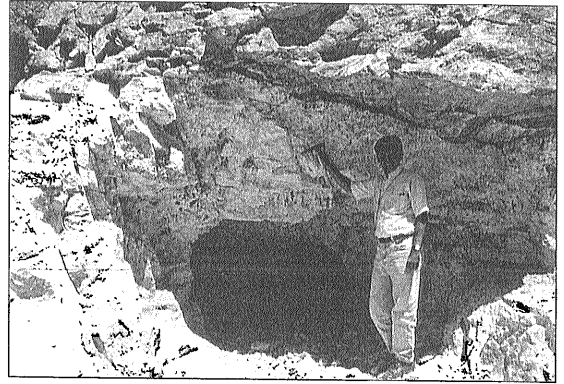


写真12 パキスタンのペグマタイト(1) 花崗岩質ペグマタイトにはエメラルド(緑柱石)・トパズ・三色電気石などの宝石が産し、宝石公社が造られているほどである(石原・小笠原, 1987)。稼行されるペグマタイトは一般に幅数メートルの岩脈・岩床状である。写真はシングス近くのペグマタイト岩床の採掘跡。



写真13 パキスタンのペグマタイト(2) 写真12のクローズアップ。ここでは電気石が多産する。

9.0%)は前述の高い堆積岩類の値を反映しているものと考えられる。コヒスタン花崗岩類は平均2.9パーミル, クンジュラブ花崗岩は平均3.0パーミル, 日本のチタン鉄鉱系花崗岩類よりやや重い値を持つ。

7. まとめ

パキスタン北部の諸岩石について、帯磁率と硫黄同位体比を測定した。帯磁率については、下部地殻を構成すると思われるカミラ角閃岩・ジジャール複合体は磁鉄鉱を含まない低い値(1.4×10⁻³SI以下)を示すが、チラス複合体では磁鉄鉱系に相当する高い値とチタン鉄鉱系に相当する低い値とが



写真14 パキスタンのペグマタイト(3) 宝石採掘の最前線。希産鉱物を求めて急崖を登り、手作業で採掘する。廃石を捨てる度に粉塵が舞い上がり、落石はインダス河へ直行する。シングス付近。

共存する。この磁鉄鉱を含む岩体は深所生成岩体でありながら固結時の酸素フュガシティが高い部分があり、不透明鉱物を含めた今後の研究によってその成因の解明が期待される。

花崗岩類はカンブリア紀-古第三紀の年代を持つS、Iタイプが分布するが、一般的にチタン鉄鉱系が卓越する。磁鉄鉱系はコヒスタン-ラダク花崗岩類、特にラダク花崗岩類で顕著に(測定数の75%)認められた。一般的にチタン鉄鉱系が卓越することは一般に硫化物鉱床が少ないことの一因であろう。

岩石中の硫化物の硫黄同位体比はカミラ角閃石(1.3%)とシジャール複合体(2.2%)で“マントル”値を示すが、チラス複合体は平均値(1.1%)はマントル値であるが、その変化幅は7パーミルもあり、地殻物質との部分的な反応が考えられる。

花崗岩類はインドプレートのマンセラ花崗岩で高く(平均8.6%)、これは基盤の堆積岩類の高い値を反映しているものと思われる。コヒスタン花崗岩類は平均2.9パーミル、クンジュラブ花崗岩類は3.0パーミルでチタン鉄鉱系であるが、その $\delta^{34}\text{S}$ 値は日本の同系の花崗岩類と較べて大きく、共に島弧型花

崗岩類とは言え両地域で性格を異にする。

謝辞：原稿を読まれ、適切な助言を頂いた白波瀬輝夫博士に感謝する。

文 献

- AHMED, M.N., KHADIM, I.M., ALI, M. and YOSHIDA, M. (1995) : Magnetic susceptibility observation across Himalaya-Karakoram Range, northern Pakistan, with special referencne to magnetic modelling of oceanic island arc crust. Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab., Geol. Surv. Pakistan, 13, 5-21.
- CLAYPOOL, G. E., HOLSER, W. T., KAPLAN, I. R., SAKAI, H. and ZAK, I. (1980) : The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. Chem. Geol., 28, 199-260.
- 石原舜三・小笠原正継(1987) : パキスタンの宝石資源。地質ニュース, no.399, 6-15.
- ISHIHARA, S., KAUSAR, A.B. and KARIM, T. (1996) : Sulfur isotopic profile and granitoid series in the northern Pakistan. Proc. Geosci. Colloq. Geosci. Lab., Geol. Surv. Pakistan, 15, 57-68.
- KHADIM, I.M., AHMED, M.N., HUSSAIN, I., and YOSHIDA, M. (1997) : Magnetic susceptibility observation of rocks distributed in the Skardu area, Baltistan, Ladakh Arc, northern Pakistan: Its implications for mineralization. Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab., Geol. Surv. Pakistan, 18, 5-30.
- OGASAWARA, M., WATANABE, Y., KHAN, F., KHAN, T., KHAN, M.S.Z. and KHAN, K.S.A. (1992) : Late Cretaceous igneous activity and tectonism of the Karakoram Block in the Khunjerab Valley, northern Pakistan. Geology of South Asia I: Proc. 1st South Asia Geol. Cong., 203-207.
- PUDSEY, C.S., (1986) : The Northern Suture, Pakistan: margin of a Cretaceous island arc. Geol. Mag. 123, 405-423.
- 酒井 均・松久幸敬(1996) : 安定同位体地球化学。東京大学出版会, 403 p.
- 佐々木昭(1977) : 安定同位体と鉱床。現代鉱床学の基礎(立見辰雄編)。東京大学出版会, 77-95.
- SASAKI, A. and ISHIHARA, S (1979) : Sulfur isotopic composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan. Contrib. Mineral. Petrol., 68, 107-115.
- SEKI, Y., NAKAJIMA, T., KUBO, K., KHAN, T., KHAN, N.A., and KHAN, I.H. (1997) : Sulfur isotope reconnaissance along the Karakoram Highway, northern Pakistan. Rept. Intern. Res. Devel. Coop. ITIT Proj. No. 87-1-2, 107-121, AIST.
- THODE, H.G. (1963) : Sulphur isotope geochemistry. Studies in Analytical Geochemistry. Royal Soc. Canada, Spec. Pub., 25-41.
- YOSHIDA, M. and FUJIWARA, Y. ed. (1994) : Magnetic approaches to geological sciences. Part III Paleomagnetism and its applications. Geosci. Lab. Geol. Surv. Pakistan, 177 p.
- ISHIHARA Shunso, YOSHIDA Mitsuo and SEKI Yoji (1998) : Magnetic susceptibility and sulfur isotopes of granitoids in the northern Pakistan.

< 受付 : 1998年1月13日 >