

コヒスタンの地質概説

中島 隆¹⁾・久保和也²⁾・高橋 浩²⁾・御子柴真澄¹⁾・白波瀬輝夫³⁾・
Said Rahim Khan⁴⁾・Tahseenullah Khan⁴⁾・Allah B. Kausar⁴⁾

1. はじめに

パキスタンは、国内の標高差が8,000mを超える国である。国の南部は広大な海岸平野が広がる一方、北部にはエベレストに次ぐ世界第2の高峰K2をはじめ、カラコルム山脈の7,000~8,000メートル級の山々が連なる。カラコルム山脈はヒマラヤの西方に位置し、ユーラシア大陸とインド亜大陸の衝突によって形成された。

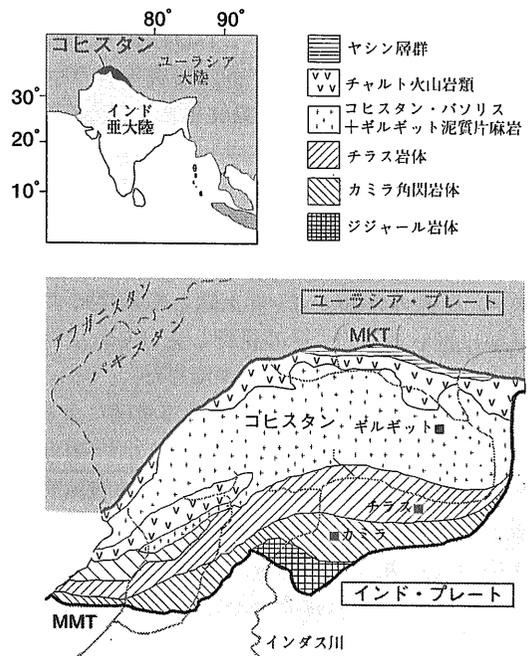
この衝突帯は、東西に伸びるスラストが幾重にも発達した北側上位の覆瓦構造で特徴づけられ、スラストシートは下位からサブヒマラヤ、レッサーヒマラヤ、ハイヒマラヤとよばれている。ハイヒマラヤの北側の地域はトランスヒマラヤとよばれ、基本的にユーラシアのユニットが分布する。ハイヒマラヤとトランスヒマラヤの境には多種の地殻深部岩石が混在するメランジが断続的に露出し、インダス=ツェンポ縫合帯とよばれる。

パキスタン領内で、このインダス=ツェンポ縫合帯に相当するユニットは島弧的な性格をもつと言われ、また地殻深部の岩石が広く露出することで注目されてきた。この、北側をMKT、南側をMMTおよびインダス=ツェンポ縫合帯で境された南北幅100kmほどのユニットを、コヒスタン帯あるいはコヒスタン地塊とよぶ(第1図)。コヒスタン地塊の南限はMain Mantle Thrust (MMT)でインド亜大陸と接し、北限はMain Karakoram Thrust (MKT, 通称 Northern Suture)を挟んでユーラシアに接する。近年このユニットはユーラシアとインドの衝突の際に両者の間に挟み込まれた古島弧の地殻断面であると考えられ、注目を集めている。コヒスタン

地塊の東方では、MKTとMMTに挟まれた地質体はラダック地塊とよばれる。ラダック地塊はコヒスタン地塊との間をNanga Parbatシntaxisによってさざぎられているものの、両者は本来単一の島弧であると考えられている。

2. コヒスタン古島弧地殻断面

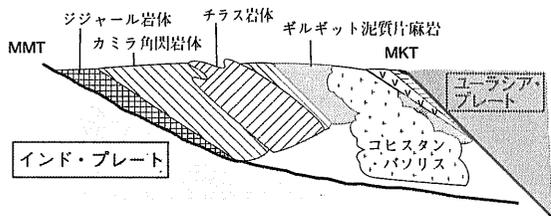
コヒスタン地塊をユーラシアとインドにはさまれた昔の島弧の地殻断面であると初めて言ったのは、当時ペシャワール大学の教授だったTahirKhe-



第1図 コヒスタンの地質概略図。Sullivan *et al.* (1993)をもとに一部改変。

キーワード: コヒスタン, 島弧地殻断面, カラコルムハイウェイ, ジジャール岩体, チラス岩体

1) 地質調査所 地殻化学部
2) 地質調査所 地質部
3) 元地質調査所 国際協力室
4) パキスタン地質調査所 地質科学研究所



第2図 コヒスタン地塊の概念断面図。凡例は第1図に同じ。Searle (1991)をもとに一部改変。

liであった(Tahirkheli *et al.*, 1979)。ペシャワール大学は古くからコヒスタンの調査研究の蓄積があり、当時すでにヒマラヤの地質研究で成果をあげていたフランスのグループが彼らとカラコルムの共同研究を開始していた。その後、コヒスタンのテチス造山帯としての意義と深部地殻岩石の性格に注目したB.Windley, M.Coward, M.Searleらイギリスの研究者グループが、彼らと国際共同研究に乗り出した。ペシャワール側はTahirkheli 後も彼の後継者Qasim M. Janが中心となってこの共同プロジェクトに参画し、その成果はこれまで多くの学術論文として国際誌を賑わせてきた。コヒスタン関連の重要論文の多くが、Journal of Petrology, Journal of the Geological Societyなどイギリスで出版される雑誌に掲載されているのはこうした事情による。コヒスタン研究の最近のレビューは、M.Searleが1991年に発表した彼のカラコルム研究の集大成“Geology and tectonics of the Karakoram Mountains”の中に一章を与えられている。

急峻な地形と高い標高、限られた自動車道路などのため、初期には山岳地質の専門家以外は十分な野外調査ができなかったコヒスタンも、少しずつアクセスの条件が改善されてきた。特にパキスタンと中国を結ぶ国境越えの幹線道路として、1970年代前半にカラコルムハイウェイが建設されたことは、地質学者たちに大きな福音となった。この道は、インダス川に沿ってコヒスタン地塊の最下部から最上部までをトラバースする形で通っており、さらに道路は川のV字谷の斜面を切って作られたため、道路沿いは半ば全面露頭に近い(写真1)。このため、地質調査には願ってもない好条件がもたらされたが、さらにこのルートは格好の巡検コースとして使われ、世界中の地質学者がこの地を訪れるようになって、コヒスタンの知名度を高めるのに大きく貢献した。

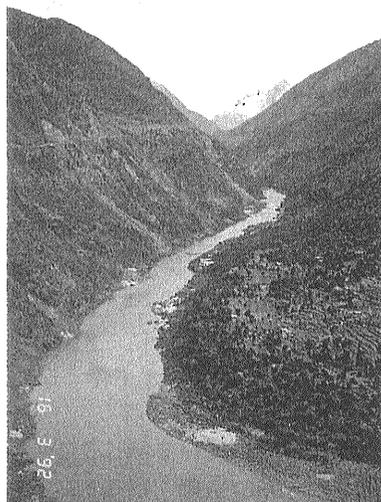


写真1 インダス川沿いのカラコルムハイウェイ遠景。道端の崖はほとんど全面露頭である。

日本の研究者がコヒスタンの研究を本格的に手掛けるようになったのはまだわずか10年ほど前、カラコルムハイウェイが完成してだいぶたってからである。東大大学院在学中に単身パキスタンに渡り、パンジャブ大学に1年留学してコヒスタンの調査を行った山本啓司氏(現鹿児島大)がそのパイオニアで、彼はその後の活躍ぶりもめざましい。さらに1990年に国際協力事業団の技術協力プロジェクト(白波瀬, 本特集)が地質調査所の全面的なバックアップと多数の大学関係者の協力で始まったことにより、パキスタン北部を訪れる日本人研究者の数は急激にふえた。プロジェクト開始以来8年の間に約15人の研究者がコヒスタンに赴き、パキスタン側研究者に技術指導を行うと同時に野外調査の機会を得た。その成果は最近学会等で少しずつ発表され始めている。

コヒスタンでは、代表的なユニットはみな東西方向の連続がよく、地殻深部岩石が南側に、浅部のメンバーが北に分布していることから、第一次近似的には横倒しになった北側上位の地殻断面と考えるとわかりやすい。これを横断するカラコルムハイウェイは、夢の地底旅行にわれわれをいざなってくれる全行程数十キロの特設エレベーターである。

以下に、コヒスタンを構成する代表的な地質体を、カラコルムハイウェイでの産状を中心に、紹介

していくことにしよう。ここでは、南側すなわち見かけ下位のメンバーから順次紹介していく。

3. コヒスタン地塊を形成する岩石類

1) ジジャール岩体：地殻最下部の超塩基性岩とグラニュライト

コヒスタン地塊の最下部に、厚さ数キロのジジャール岩体が露出する。岩体の南半分が超塩基性岩、北半分がざくろ石グラニュライトであり、両者の間は連続である。超塩基性岩はダナイト、クリノパイロキシナイトといった沈積岩が主体で、少量のウェールライト、ウェブステライトを伴う。一方ハルツバージャイトは報告されている例はあるものの (Jan and Windley, 1990) 実際にはほとんどみられず、レールゾライトも非常に少ない。岩体の南限はMMTで切られており、コヒスタンでは溶け残りかんらん岩の層準より上位でデラミネーションが起こったと推定される。

ざくろ石が豊富に含まれるのがジジャール岩体の特徴で、クリノパイロキシナイトは大量のざくろ石岩のパッチや脈を伴い、ざくろ石グラニュライトは約30%のざくろ石を含む。これらざくろ石を含む岩石を用いた地質温度計・圧力計から、ジジャール岩体の形成条件は最高900°C、16Kbと見積もられている (Yamamoto, 1993)。

2) カミラ角閃岩体：コヒスタン島弧地殻下部物質の主役(?)

ジジャール岩体の上位には、厚さ最大30kmのカミラ角閃岩体が露出する。この岩体は名前の通りほとんどが塩基性の変成岩から成っており、島弧地殻下部物質の有力候補と考えられている。変成条件は大部分が緑簾石角閃岩相～角閃岩相であるが、部分によって多少異なり、変成分帯が可能である。

岩体南半部は著しくせん断変形を受けて一部マイロナイト様になっており、カミラ・シアゾーンとよばれる場合もある (Treloar *et al.*, 1990) 一方、岩体北半部は変形が少ない。原岩は、粗粒部でガプロ起源とわかる場合があるが、それ以外は判定が難しい。細粒部は火山岩起源としている報告が多いが、実際は粗粒岩がせん断変形の結果細粒になっ



写真2 せん断変形したカミラ角閃岩。

ている例も多く、注意深い観察が必要である。

ジジャール岩体とカミラ角閃岩体の間は構造境界とする考えがこれまで主流であったが、明確な不連続境界の露頭がないことや、ジジャール岩体の北限近くではグラニュライトが角閃岩に変化している部分が多く見られることから、最近では基本的に連続的と考える人も多い。

3) チラス岩体：ガプロノーライトの巨大岩体

コヒスタンの中南部に大規模な塩基性深成岩体が露出する。南北幅最大30km、東西方向には300kmに及ぶチラス岩体である。この岩体もコヒスタン島弧下部地殻の主役の一つであるが、この巨大さ故に成因は難問である。この岩体が液体マグマに由来することを物語るマグマティック・レーヤリング構造 (写真3) が観察されるが (Takahashi *et al.*, 1996)、この全体サイズのマグマだまりが地下深部にあったとは考えにくいからである。岩体の特徴づける岩相はガプロノーライトである。岩体全体がグラニュライト相の変成作用を受けているとする説もあるが、変成作用による再結晶のあとが見られるのは岩体の一部である。

岩体内にはもう一つのメンバーとして、超塩基性岩-塩基性岩-アノーソサイト複合岩ユニット (Ultramafic-Mafic-Anorthositic association ; UMA) が存在する。超塩基性岩は主にダナイトで少



写真3 チラス岩体のマグマティック・レーヤリング。

量のウェーラライトやパイロキシナイトを伴う。塩基性岩はトロクトライトで、沈積岩起源である。トロクトライトにはかんらん石と斜長石の間にシンプレクタイトが形成されており、この岩体がある程度の深さで形成されたことを示している。

チラス岩体とカミラ角閃岩体の関係は大きな問題で、境界部ではチラス岩体のガプロが變成されて角閃岩化している一方、カミラ角閃岩体の角閃岩にガプロが貫入しているように見える部分もある(久保ほか, 1997)。このことから、チラス岩体のマグマはかなり長期にわたって継続的あるいは断続的に供給され、早期の貫入部分から順にその深度での条件で再平衡・再結晶作用を受けて角閃岩化し、それが後からの同源マグマによって貫入される、というプロセスで現在のチラス岩体を形成したのかも知れない。

4) ギルギット泥質片麻岩

チラス岩体とチャルト火山岩類にはさまれた広大な地域は、地質図上でしばしばコヒスタン・バソリスとして塗色されるが、実際は花崗岩類と貫入母岩の混在地域である。この貫入母岩は、アクセスの容易な場所に良好な露出域がないためかコヒスタンの中でもこれまであまり詳細な研究はされていないが、主体は堆積岩源の變成岩で、ギルギット泥質片麻岩とよばれている。原岩は基本的に泥岩・

砂岩・緑色岩など島弧や大陸縁の付加体にみられる岩石のようである。變成度は、緑色片岩相から角閃岩相高温部に及ぶ。最近では北側のチャルト火山岩類ユニットとの関連が議論され始めており(T. Khan *et al.*, 1996, 1997)、コヒスタン地塊の全体構造を解明する鍵を握るユニットかも知れない。

5) コヒスタン・バソリス

コヒスタン北部に広く分布する花崗岩類は、北部ではチャルト火山岩類、南部ではギルギット片麻岩類に貫入している。その分布域はコヒスタン地塊のチラス岩体の北側からコヒスタン地塊の北限近くに及ぶ。これらをまとめてコヒスタン・バソリスと呼んでいるが、個々の貫入体の形は全域で明らかになっているわけではない。岩相は多岐にわたっており、片麻状花崗岩と塊状花崗岩が狭い範囲で共存している。噴出岩相としての酸性火山岩類は伴っていない。化学組成は総じて島弧的だといわれるが、年代は100Maから30Maまで広い範囲の値が得られており(Petterson and Windley, 1985)、もしこれらの数字がみな正しいとすると、コヒスタンが島弧であったと言われる時代からインド亜大陸の衝突後まで、さまざまなテクトニックセッティングでの花崗岩類が混在していることになる。

6) チャルト火山岩類：變成された海底玄武岩

コヒスタンの北部に分布するチャルト火山岩類は、變成された海洋性玄武岩である。變成度はかなり高く、緑簾石角閃岩相程度の変成条件が推定される(中島ほか, 1997)が、源岩の構造は非常によく保存されており、巨大な枕状溶岩の断崖が随所にみられる。それらの多くは著しく変形して軸比1:10以上に扁平化しており(写真4)、海底に噴出した後かなりの荷重圧を受けたことを示す。チャルト火山岩類には、カラコルムハイウェイルート以外では高マグネシア安山岩や流紋岩なども含まれるという報告があるが、詳細は不明である。

チャルト火山岩類は、その全岩化学組成から島弧火山岩の性格をもつといわれ、チラス岩体の噴出岩相と考えられたこともあった。しかし最近、島弧的性格のものと背弧海盆的性格のものが共存するという説が発表され(T. Khan *et al.*, 1996)、コヒスタン島弧断面の一部見直しが始まっている



写真4 変形したチャルト火山岩類の枕状溶岩。画面中央のハンマーがスケール。

(A.M.Khan *et al.*, 1997など)。

チャルトはコヒスタン北縁部に位置する小集落の名前だが、その集落そのものはチャルト火山岩類ではなくヤシン層群の上に立っている。そのため、チャルト火山岩類の呼称を使わず、山体の大部分がこの火山岩類で構成される標高7,800mの秀峰ラカポシ山の名をとってラカポシ火山岩類とよばれる場合もある。

7) ヤシン層群：不純石灰岩と石灰質砂岩

コヒスタン地塊の中で現在見られる最上位のメンバーが、ヤシン層群の堆積岩類である。このユニットを代表するのは石灰岩であるが、すべて堆積性の不純石灰岩であり、日本の付加体にみられるような石灰質分100%の礁性石灰岩はみられない。また、砂岩に相当量の石灰質分が含まれている点も大きな特徴である。

ヤシン層群は北限をNorthern Sutureで切られているので、本来の層厚は不明である。またこのさらに上位に別のユニットがあったかも知れない。ヤシン層群最下部の岩石はチャルト火山岩類と同程度に変成されているので(中島, 未公表データ)、現在地表で見られる部分の上位にあったかなりの厚さの部分が失われている可能性がある。

コヒスタン地塊の北限付近の道端に「大陸ここに

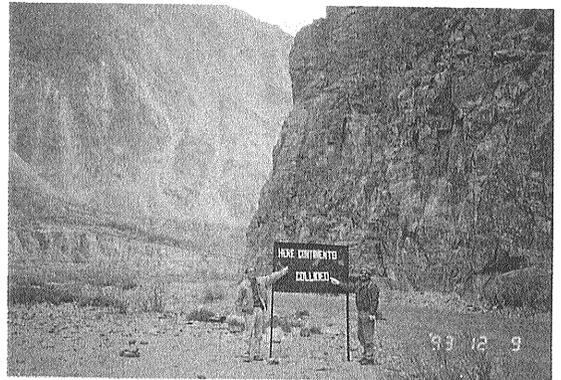


写真5 大陸ここに衝突せり。

衝突せり」と書かれた看板が立っている(写真5)。ところが看板はNorthern Sutureの位置でなく、ヤシン層群とチャルト火山岩類の境界に立っている。看板をよく見ると、下の方に手書きで「ここは境界ではない。境界はこの1キロ北にあり。Tahirkheli」と書いてある。70才を過ぎた今もまだ一人で活発に野外調査を続けておられるというTahirkheli博士の心意気を感じられる(注, p.35)。

4. コヒスタン地塊の形成と年代

コヒスタンは白亜紀ごろテーチス海に浮かんでいた島弧で、テーチス海の収斂に従って北進し、インドより先にユーラシア大陸に衝突癒着した後、インドの衝突を受けて現在の位置を占めるに至った、と一般には理解されている。しかし研究が進み、コヒスタンに関する事実情報がふえるに従って、いろいろ未解決の問題が浮び上がってきた。例えば、(1)現在コヒスタンで見えているのは連続断面なのか、間に大きな欠落はないか(2)コヒスタンの島弧地殻はいつ頃どこでできたのか、また島弧になる前の地殻物質もふくまれているのか(3)日本のような花崗岩質地殻をもつ島弧だったのか、それとも海洋性島弧だったのか(4)チラス岩体のような巨大塩基性深成岩体は島弧の下部地殻に一般的なのか、コヒスタンだけにあるものなのか(5)ジジャール岩体の推定圧力から予想されるコヒスタンの地殻の厚さは50kmに及ぶが、なぜそんなに厚いのか(6)ジジャール岩体の比較的高いP/T条件をサブダクションで説明するなら、そこで形成された付加体はどこへ行ったのか(7)コヒスタンの北側にあった海

はどういう海であったのか(8)そもそもコヒスタンは本当に島弧なのか(!)等々である。既版の論文の中にはすでにこれらに対する答えしきものを示している場合もあるが、その多くは根拠が充分でない。

例えば島弧の形成史を語るために不可欠な、コヒスタンを構成する地質体の良質の年代データが不足している。放射年代は一見数多く文献に収録されているが、その大部分は引用のまた引用で、元をたどっても最後まで年代値だけで測定データや測定試料の記載がないという例が少なくなく、取り扱いに注意を要する。また掲載されている年代のほとんどが冷却年代を示すK-Ar年代と ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代であることも重要である。ジジャール岩体では角閃石を用いた ^{40}Ar - ^{39}Ar 段階加熱スペクトラムは多量の過剰アルゴンの存在を示し、カミラ角閃岩体やチラス岩体でも大部分の角閃石が顕著なU字型の ^{40}Ar - ^{39}Ar スペクトルを示すことが報告されている(Treloar *et al.*, 1989)。これらの結果は、これらの岩体でこれまでに報告されていた角閃石のK-Ar年代が、年代値としての意味をもつかどうかを疑わねばならないことを示唆している。Treloar *et al.* (1989)による ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代のデータからは、カミラ角閃岩体やチラス岩体は80Ma頃には500°C前後まで冷却していたことが推定される。

岩体の形成年代を与える年代データとしては、コヒスタン・パソリスのいくつかの貫入体についてのRb-Sr全岩アイソクロン年代(Petterson and Windley, 1985)が報告されているのみである。ジジャール岩体については $91.0 \pm 6.3\text{Ma}$ のざくろ石グラニュライトのSm-Nd鉱物アイソクロン年代(Yamamoto and Nakamura, 1996)が報告されており、これはグラニュライトの変成条件とこの系の閉止温度を考慮すると、この石がグラニュライトであった時の年代にほぼ等しいと思われる。その他の岩体については、未だに岩体の形成年代を示すデータは得られていないが、ジジャール岩体がカミラ角閃岩体と連続でかつ一連の岩体ならば、それらは85~97Ma頃に再結晶のピークを迎え、80Ma頃には500°Cまで冷却していたことになる。

5. おわりに

Tahirkheliがコヒスタンは古島弧の地殻断面だ

と言ってから、はや20年が過ぎようとしている。このアイデアは当時あまりに魅力的な卓見であったため、研究者たちはそれから十数年、その構想を裏付けるための調査研究に群がった。それは言った人が地元の大物研究者であったことも手伝ったかも知れない。その後さまざまな研究が進み、最近になってその第1次モデルがそろそろ再検討されようとしてきている。その中心の一人で本論の著者の一人でもあるT. Khanは、日本の国際協力事業団が建設したパキスタン地質科学研究所に所属する気鋭の研究者で日本人研究者とも交流が深い。ペシャワール大学でQasim Janを指導教官とした、いわばTahirkheliの孫弟子にあたることを思うと、研究というものの大きな流れを感じないわけにはいかない。

20年たってからモデルが部分修正を求められたとしても、Tahirkheliの評価はいささかも揺らぐことはないであろう。彼のモデルは充分第一次近似としては有効だったし、ことによると今でも有効かも知れない。それは彼の説が、モデル提案の鉄則である「最初のモデルは可能な限り簡単で魅力的なものであること」に見事にかなっていたからであろう。ここしばらくのコヒスタン研究のターゲットは「コヒスタンは本当に上から下まで島弧地殻断面か。違う部分があるとするそれは何か、それは何を意味するのか」を中心に展開するであろう。コヒスタンは世界のhot potatoである状況は何ら変わっていない。日本のコヒスタン研究も国際的に大きく飛躍できる舞台が与えられている。

注) 今年4月ペシャワールで開かれたヒマラヤ・シンボジウムのコヒスタン巡検に参加した人の話では、現在の看板はこの場所にはないということである。

文 献

- Jan, M.Q. and Windley, B.F. (1990) : Chromian spinel-silicate chemistry in ultramafic rocks of the Jijal complex, northwest Pakistan. *Jour. Petrology*, 31, 667-715.
- Khan, M.A., Stern, R.J., Gribble, R.F. and Windley, B.F. (1997) : Geochemical and isotopic constraints on subduction polarity, magma sources, and palaeogeography of the Kohistan intra-oceanic arc, northern Pakistan Himalaya. *Jour. Geol. Soc.*, London, 154, 935-946.
- Khan, T., Khan, M.A. and Jan, M.Q. (1996) : Back-arc basin assemblages in Kohistan, Northern Pakistan. *Geodynamica Acta* (Paris), 9, 30-40

- Khan, T., Jan, M.Q., Khan, M.A. and Kausar, A.B. (1997) : High-grade metasedimentary rocks (Gilgit Formation) in the vicinity of Gilgit, Kohistan, northern Pakistan. *J.Petr.Min.& Econ.Geol.*, 92, 465-479.
- 久保和也, Kausar, A.B., Khan, T., 沢田順弘, 高橋裕平, 高橋 浩 (1997) : パキスタン北部, チラス岩体中の超苦鉄質層状岩体の起源. 日本地質学会第104年学術大会演旨, 225.
- 中島 隆, 白波瀬輝夫, Kausar, A.B. (1997) : コヒスタン島弧地殻上部に相当するチャルト火山岩類の変成作用. 日本地質学会第104年学術大会演旨, 190.
- Petterson, M.G. and Windley, B.F. (1985) : Rb-Sr dating of the Kohistan arc-batholith in the Trans-Himalaya of north Pakistan, and tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 74, 45-57.
- Searle, M.P. (1991) *Geology and tectonics of the Karakoram Mountains*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Sullivan, M. A., Windley, B. F., Saunders, A. D., Haynes, J. R. and Rex, D. C. (1993) : A paleogeographic reconstruction of the Dir Group: evidence for magmatic arc migration within Kohistan, N. Pakistan. In: Treloar, P. J. and Searle, M. P. (eds) *Himalaya Tectonics*. Geol. Soc. London, Spec. Pub., 74, 139-160
- Tahirkeri, R.A.K., Mattauer, M., Proust, F. and Tapponnier, P. (1979) : The India-Eurasia suture zone in Northern Pakistan: Synthesis and interpretation of recent data at plate scale. In: Farah, A. and DeJong, K.A. (eds) *Geodynamics of Pakistan*. Geological Survey of Pakistan, Quetta, 125-130.
- Takahashi, Yut., Takahashi, Yuh., Kausar, A.B., and Mikoshiba, M. (U.) (1996) : *Geology and Geochemistry of eastern part of the Chilas Complex, Northern Pakistan - Implication for the tectonic development of the Kohistan island arc*. Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab., Geol. Surv. Pakistan, 15, 183-205.
- Treloar, P.J., Rex, D.C., Guise, P. G., Coward, M.P., Searle, M.P., Windley, B.F., Petterson, M.G., Jan, M.Q. and Luff, M.W. (1989) : K-Ar and Ar-Ar geochronology of the Himalayan collision in NW Pakistan: constraints of timing, suturing, deformation, metamorphism and uplift. *Tectonics*, 8, 881-909.
- Treloar, P.J., Brodie, K.H., Coward, M.P., Jan, M.Q., Khan, M.A., Knipe, R.J., Rex, D.C. and Williams, M.P. (1990) : The evolution of the Kamila shear zone, Kohistan, Pakistan. In: Salisbury, M.H. and Fountain, D.M. (eds) *Exposed cross-sections of the continental crust*. Kluwer Academic Press, Amsterdam, 175-214.
- Yamamoto, H. (1993) : Contrasting metamorphic P-T-time paths of the Kohistan granulites and tectonics of the western Himalaya. *Jour. Geol. Soc., London*, 150, 843-856.
- Yamamoto, H. and Nakamura, E. (1996) : Sm-Nd dating of garnet granulites from the Kohistan complex, northern Pakistan. *Jour. Geol. Soc., London*, 153, 965-969.
-
- NAKAJIMA Takashi, KUBO Kazuya, TAKAHASHI Yutaka, MIKOSHIBA Masumi, SHIRAHASE Teruo, KHAN Said Rahim, KHAN Tahseenullah and KAUSAR Allah B. (1998) : *Geological outline of Kohistan*.
-

<受付: 1998年4月2日>

