

セノテチス海の生成と消滅

—パキスタン西部, ムスリンバー地域の大陸大陸衝突境界—

中 孝仁¹⁾・木村克己²⁾・Rehanul Haq Siddiqui³⁾・
Jan Muhammad Mengal⁴⁾・小嶋 智⁵⁾・沢田順弘⁶⁾

1. はじめに

古生代後半に誕生し, 中生代から新生代初頭にかけて, 南の Gondwana 大陸と北のユーラシア大陸の間に東西に広がっていた海洋, テチス海. ギリシャ神話の海神オケアヌスの妻の名を持ち, 現在は失われてしまったこの海洋は, どの様にして生まれ, そしてどの様にして消滅したのだろうか? この壮大な謎を解く鍵の一つが, 乾燥した岩石砂漠が広がるパキスタン西部のムスリンバー地域(第1図)に秘められている.

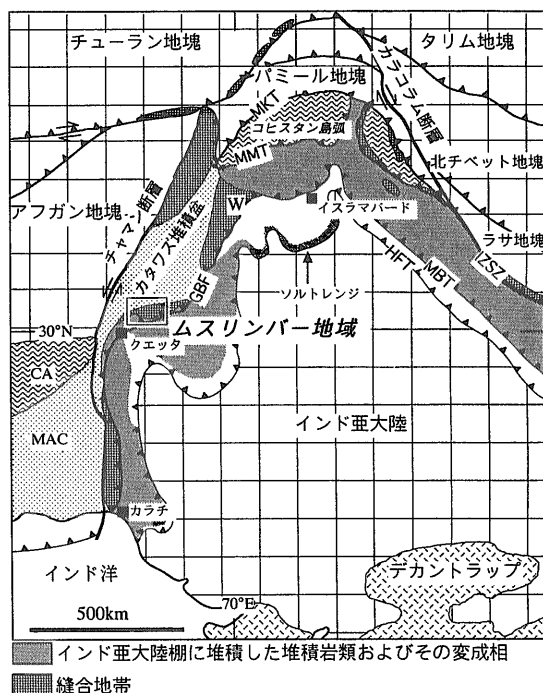
私たちは, パキスタン地質調査所地質科学研究所が行ったムスリンバープロジェクトの一環として, 鉱物資源探査に関わる地質図作成や化学分析などの技術移転を含む日・パ共同研究を行うと共に, (セノ)テチス海の一生涯の謎に迫ってみた. それはまた, ユーラシア大陸とインド亜大陸が, いつ, どの様にして衝突したのかという世界でも第1級の学術的謎を解きほぐすことでもあった.

なお, 本号の口絵にムスリンバー地域の露頭写真を掲載しているので参照されたい.

2. 南アジアの地質とテチス海

パキスタンを含む南アジアから中央アジアの地域は, 大小いくつかの大陸地塊(continental block)の寄せ集めから構成されていることが最近の研究でわかってきた(Sengör, 1987; Kazmin, 1991; Treloar and Searle, 1993; Metcalfe, 1996 など: 第

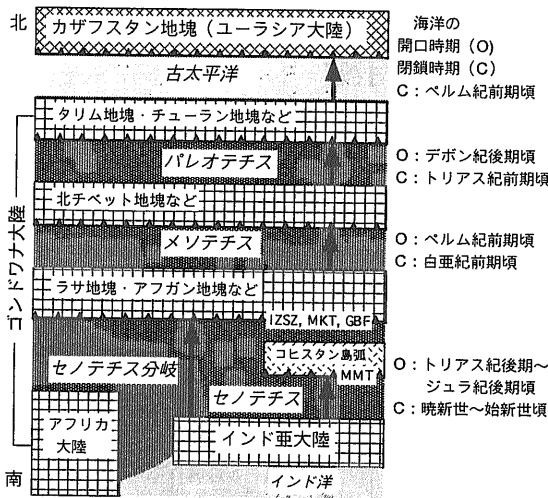
1図). これらの大陸地塊は元々, 前期古生代には Gondwana 大陸の北半分を構成していて, その後,



第1図 パキスタン周辺の地質構造概略図 (Humayon et al., 1991を簡略化し加筆). Wはワジリスタン地域を示す. CA:チャガイ火山弧, MAC:マクラン付加体, IZSZ:インダスツアンポー縫合地帯, MMT:主マントル衝上断層, MBT:主境界衝上断層, HFT:ヒマラヤ前縁断層, GBF:グワールバー断層. 白抜き部分はインド亜大陸とユーラシア大陸の衝突後に堆積した主に陸成層(シワリク層など)の分布を示す.

キーワード: ムスリンバー, パキスタン, テチス海, 大陸大陸衝突境界, オフィオライト, 玄武岩, チャート, メランジ, 放散虫, 放射年代

1) 地質調査所 地質部 (科学技術特別研究員)
2) 地質調査所 地質部
3) パキスタン地質調査所 地質科学研究所
4) パキスタン地質調査所 本所
5) 岐阜大学 工学部
6) 島根大学 総合理工学部

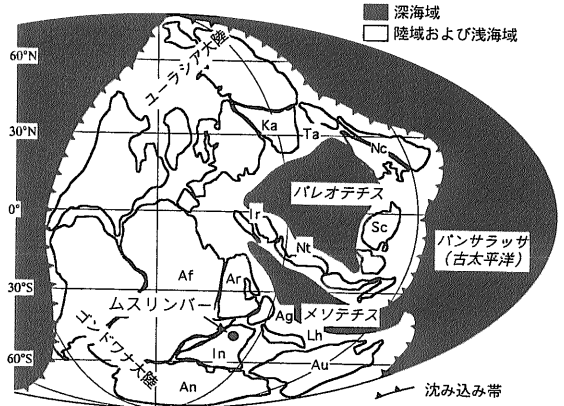


第2図 大陸地塊の分離史とテチス海の発展史 (Brookfield, 1993; Metcalfe, 1996; Naka *et al.*, 1996の資料を基に編図)。矢印は大陸地塊の移動方向を、黒三角の付いた直線は衝上断層または縫合地帯を表す。衝上断層の略号は第1図参照。

Gondwana大陸から次々と分離して北上し、ユーラシア大陸に衝突・合体した。ある大陸地塊が Gondwana大陸から分離する際、その大陸地塊と Gondwana大陸の間には新たに海洋地殻が誕生する。生成した海洋は拡大を続けていくが、次に分離した大陸地塊が北上し、北方のユーラシア大陸と衝突する時、その海洋は消滅する。これらの海洋こそがテチス海である。

衝突した大陸地塊群は現在、北に傾斜する衝上断層(群)で境されるが、この衝上断層(群)に沿って数100m～数10kmの幅を持つ地質構造の複雑な地帯が観察されることがある。このような地帯は縫合地帯(suture zone)と呼ばれ、それぞれの大陸地塊上または大陸棚上に堆積した碎屑岩類の他に、大陸地塊間にかつて存在した海洋、すなわちテチス海の地殻断片やテチス海洋底の堆積物などが複雑に分布する(第1図)。

大陸地塊(群)の Gondwana大陸から分離の時期、およびユーラシア大陸への衝突・合体時期の検討が進むにつれ、テチス海は2分または3分されるようになってきた。最近提唱された3分モデルでは、それぞれを古い順からパレオテチス(Paleo-Tethys)・メソテチス(Meso-Tethys)・セノテチス(Ceno-Tethys)と呼んでいる(Kazmin, 1991; Met-



第3図 後期ペルム紀の古地理図 (Scotese and Langford, 1995を簡略化し加筆)。大陸(地塊)の略号は以下の通り、Af: アフリカ大陸、Ag: アフガン地塊、An: 南極大陸、Ar: アラビア地塊、Au: オーストラリア大陸、In: インド亜大陸、Ir: イラン地塊、Ka: カザフスタン地塊、Lh: ラサ地塊、Nc: 北中国地塊、Nt: 北チベット地塊、Sc: 南中国地塊、Ta: タリム地塊。北チベット地塊を含む北西-南東方向の地塊列をキンメリア(Cimmeria)大陸と呼ぶこともある(Sengör, 1979)。

calfe, 1996)。第2図には、3分モデルのテチス海の歴史と、大陸地塊の分離・合体史を模式的に表した。なお、従来広く受け入れられてきた2分モデルでは、パレオテチスとネオテチス(Neo-Tethys)とに区分されており(Sengör, 1979)、ネオテチスはおおむねメソテチスとセノテチスを合わせたものにあたる。

第3図に後期ペルム紀の古地理図を示した。この図には、北チベット地塊などの地塊群が Gondwana大陸北縁から分離し、地塊群の背後(南方)に新たにメソテチスが誕生したことが表されている。

それでは、それぞれのテチス海のご環境や生成・消滅時期はどの様にして求められるのだろうか。大きくみて2つの方法がある(Butler, 1995)。1つは、古地磁気の検討やホットスポット(hot-spot)の軌跡の解析を行い、大陸地塊のかつての位置とその移動経路から推定する方法(Klootwijk *et al.*, 1992; Muller *et al.*, 1993など)である。もう1つは、2つの大陸地塊間の縫合地帯に分布する海洋地殻の断片や堆積物の岩相・年代から検討する方法(Dercourt *et al.*, 1986; Robertson and Degnan, 1993; Beck *et al.*, 1996など)である。小

論では主に後者の手法を用いた研究を紹介する。なお、縫合地帯の内、インド亜大陸とラサ地塊の間にあるインダスツァンポー(Indus-Zangbo)縫合地帯は特に有名で、多くの研究が行われている。

3. ムスリンバープロジェクトの概要と野外地質調査

ムスリンバープロジェクトは、総勢20名以上の日・パの研究者によって、1991-96年に行われた。プロジェクトは目的別に、(1)火成岩分布域の鉱床探査と化学分析、(2)縫合地帯の地質図作成、(3)浅海性堆積岩分布域の地質図作成、(4)古地磁気の解析の4つのグループに分かれて調査・研究を行った。小論では上記(2)のグループの成果を中心に紹介する。(2)のグループは合計約90日の野外調査を行った。

ムスリンバーはパキスタン西部のバルチスタン州にある(第1図)。その州都はクエッタで人口約30万人であり、ここにパキスタン地質調査所の本所がある。クエッタからムスリンバーまでは車で6時間ばかりを要する。ムスリンバーは小さな集落(人口数100人程度)のためレストランはない。そこでクエッタで食料品を買い込み調理人を連れて野外調査に赴いた。宿舎はムスリンバーのゲストハウス(日本の公民館のようなもの)を使用した。この地域はアフガニスタンとの国境に近く、クエッタに比べると治安が不安定なので、野外調査にはライフルを持った護衛を伴った。実際には現地では危険を感じることはなかったが、野外調査計画段階では、現地の治安情勢悪化のために計画の延期・中止がたびたびあった。

ムスリンバーは標高約1,700mにある。調査地域の最高点は、3,000mを越える。地域周辺には、隣接するアフガニスタンやイランにつながる広大な岩石砂漠が広がる。この地域は、夏は気温40℃を越し、冬は標高2,000m以上で積雪をみる厳しい気候である。したがって、野外調査に最適な季節は、春と秋の合計わずか3-4ヵ月しかない。道路網は発達しておらず、しかも幹線道路の一部が舗装されているにすぎない。

野外調査の際、私たちは位置の決定に携帯式の全地球測位システム(GPS)を用いた。また、3万分の1程度の空中写真も大いに活用した。岩石砂漠

地帯では、道路や人口構造物が極端に少ないので、地形図上で位置の決定が難しいためである。パキスタン政府発行の5万分の1地形図も利用したが、日本のものと比べると正確ではなかった。空中写真は撮影後約40年を経ているが、集落部を除けば地形の改変がほとんど進んでおらず、点在する高さ2-5m程度の木の配列すら変化がないので、確実に位置の決定ができた。なお、一般には空中写真・地形図とも入手は非常に困難である。

露頭状況の良いこの地域では、空中写真上でもしるいように地層をつないだり褶曲軸や断層を引くことができる。空中写真と幹線道路沿いの踏査のみで地質図を完成させようという誘惑にかられるほどである。空中写真で“見えている”ものをわざわざ現地に見に行くには金と時間と体力が必要となるからだ。しかし、日本の付加コンプレックス分布域で普通に経験するように、一見整合関係に見える岩相境界が実は断層関係であることが、縫合地帯に位置するこの地域でもあり得ることだと私たちは考えた。また、この地域では様々な起源の岩石が混在する混在岩相の存在がすでに指摘されていたが(Otsuki *et al.*, 1989など)、混在岩相の解析には現地をくまなく歩き回る“べた歩き”しか術がないことも、経験的に知っていた。そこで、私たちは日数はかかるが現地を丹念に歩きわまる日本式の“付加コンプレックス調査法”をムスリンバー地域に適用した。この調査法の効果は絶大で、後述するように、本地域の縫合地帯が、岩相・年代の異なる衝上断層で境されたいくつかのユニットからなることを解明し、それを地質図に表すことができた。

野外調査には、パキスタン式調査法も充分活用した。私たちは調査地に着くとまず、その日調査予定の稜線が見晴らせる数10mの比高をもつ丘に登った。なお、本地域では、一般に谷は転石で露頭が埋まっており、稜線の方が調査に都合がよい。そして、対面する稜線の事細かなスケッチをした後、稜線を実際に踏査し、スケッチに岩相や層厚などを次々と記載していった。するとその一枚の図が、その日の調査のまとめになり、かつ断面図にもなり柱状図にもなるのだ。ただし、概して日本人研究者は圧倒的な規模の露頭のスケッチが苦手であって、もっぱらポラロイド写真をふんだんに使用してスケッチの代わりとした。

4. ムスリンバー地域の地質

ムスリンバー地域の岩石は、岩相・年代・構造的特徴から、北に傾斜する衝上断層で境された次の3つの地帯、始新統～更新統の堆積岩からなるフリッシュ帯 (Flysch Zone)、中生界の縫合地帯、そしてインド亜大陸棚上に堆積したジュラ系～暁新統からなる石灰岩地帯 (Calcareous Zone) に区分できる (第4図)。縫合地帯には、ムスリンバーオフィオライト (Muslim Bagh Ophiolite) と堆積岩-火成岩コンプレックスであるバーコンプレックス (Bagh Complex) が分布する。第5図には私たちが作成した5万分の1地質図の一部を簡略化して示した。また、第6図には本地域の総合模式柱状図を示した。

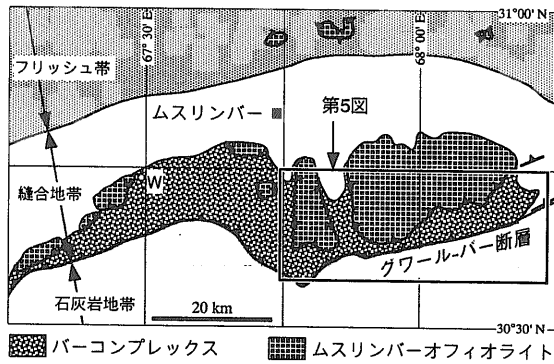
4.1 フリッシュ帯

フリッシュ帯には、カタワズ堆積盆 (Katawaz Basin, 第1図) に堆積した、浅海性～陸水性の主に砂岩泥岩からなる地層が分布する。地層の全層厚は約10,000mで、年代は不明確ながら始新世から更新世にわたるとされている (Hunting Survey Corporation, 1960; Cheema *et al.*, 1977など)。フリッシュ帯と後述する縫合地帯は、北に傾斜する低角の断層で境されている (第4図)。また、フリッシュ帯は北西端を左横ずれ活断層であるチャマン (Chaman) 断層で画されてアフガン地塊 (Afghan block または Helmand block と呼ばれる) と接している (第1図)。

4.2 ムスリンバーオフィオライト

ムスリンバーオフィオライトについてはムスリンバークプロジェクトを始める前にもいくつかの概略的な研究 (Rossman *et al.*, 1971; Ahmad and Abbas, 1979など) があった。ここでは、本プロジェクトにより明らかとなった、岩相分布およびクロマイト鉱床の分布と鉱物・化学組成 (Siddiqui *et al.*, 1995; 1996a; Hoshino *et al.*, 1996)、放射年代 (Sawada *et al.*, 1995) を基に記述する。

オフィオライトは40-50°の傾斜を持つ衝上断層を介してバーコンプレックス上に構造的に重なる (第5図)。オフィオライトを含む縫合地帯とアフガン地塊との直接の関係は、両者間にフリッシュ帯の岩石が分布するため、地表では確認できない (第1

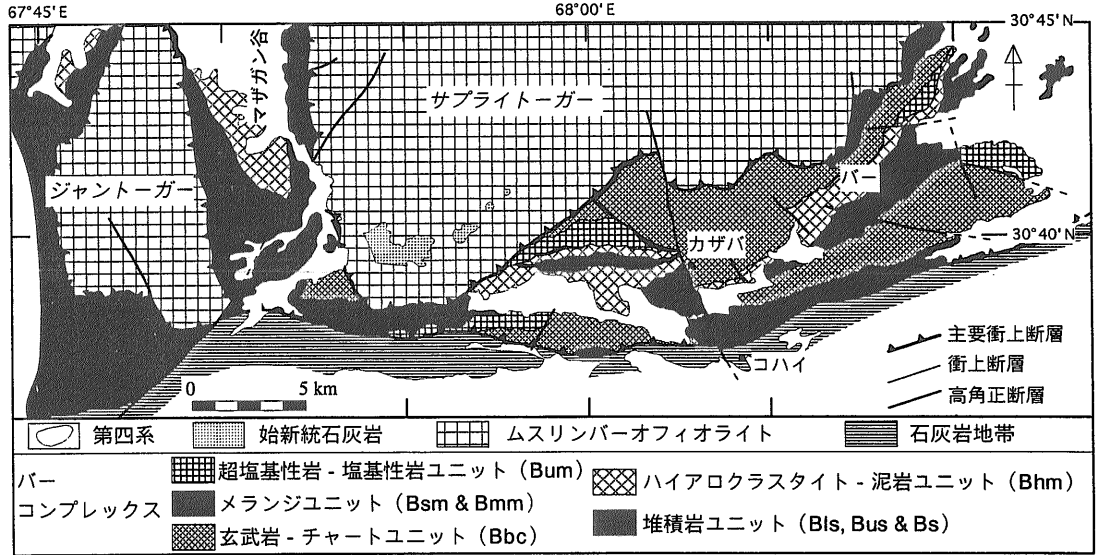


第4図 ムスリンバー地域の地質概略図 (Siddiqui *et al.*, 1996aを簡略化)。Wはウルガイ地域を示す。図の範囲を第1図に示す。

図)。しかし、重力探査の検討をもとに、地下深部ではアフガン地塊と縫合地帯が断層を介して接していると解釈されている (Jadoon, 1992)。なお、オフィオライトは、ほぼ水平な構造をもつ始新統石灰岩に不整合で覆われる (Allemann, 1979; Mengal *et al.*, 1993)。

オフィオライトは厚さ約17kmで、下位より、超塩基性テクトナイト・超塩基性集積岩・超塩基性-塩基性混合集積岩・塩基性集積岩・シート状貫入岩コンプレックスの5ユニットに区分できる。ほぼ理想的なオフィオライトシーケンスをもっているが、最上部を占める玄武岩や深海性堆積岩を欠く。調査地域では、ジャントーガー (Jang Tor Ghar) とサプライトーガー (Saplay Tor Ghar) の2つの岩体が見られ、そこには月面を思わせる風景が展開する。

オフィオライトの化学組成は、これらが中央海嶺起源であるよりもむしろ背弧海盆起源であることを示唆している。塩基性集積岩ユニット中のハンレイ岩の角閃石 K-Ar 年代は 67.4 ± 4.0 Ma を示す。一方、シート状貫入岩コンプレックス中の変粗粒玄武岩の角閃石 K-Ar 年代は 81.4 ± 5.5 Ma と 80.9 ± 3.5 Ma を示す。このうち、67.4 Ma の年代は約500°C以下に冷却した時の年代を表している。また、81.4-80.9 Ma の年代は変成年代に対応すると考えられる。ただし、この年代を持つ変粗粒玄武岩と、変粗粒玄武岩を貫く粗粒玄武岩の化学組成が酷似しているため、オフィオライトの形成年代は変成年代と大きくかけ離れてはおらず、おそらく81.4-80.9 Ma よりやや古い程度であろう。なお、Mahmood *et al.* (1995) は、シート状貫入岩コン



第5図 バー周辺の地質図(Naka et al., 1996を簡略化). メランジュユニットと堆積岩ユニットのそれぞれの細区分は一括して表す. 図の範囲を第4図に示す.

レックス中の斜長石花崗岩, 変粗粒玄武岩の⁴⁰Ar/³⁹Ar年代を報告しており, 斜長石, 角閃石から得られた年代値は, 65.8±3.5Ma, 68.7±1.8Maである. さらに, 私たちの岩相区分との対比は不明瞭ながら, バーコンプレックスとの境界のごく近傍に分布する角閃岩からの角閃石⁴⁰Ar/³⁹Ar年代として, 65.1±4.1Ma, 70.7±5.0Maという年代値を報告している.

4.3 バーコンプレックス

バーコンプレックスは私たちの調査によって初めて明らかにされた地質体で, 中生界の堆積岩類と火成岩類から構成される. 以下, 本プロジェクトによる層序学・構造地質学的検討(Mengal et al., 1993; 1994; Naka et al., 1996), 放散虫を主とする化石年代(Kojima et al., 1994), および火成岩類の化学分析結果と放射年代(Sawada et al., 1995; Siddiqui et al., 1996b,c)を基に記述する.

バーコンプレックスは北に40-60°傾斜する衝上断層, グワールバー(Gwal-Bagh)断層を介して南の石灰岩地帯上に重なる. バーコンプレックスは, 岩相・年代・構造的特徴から, 互いに衝上断層で境された次の5つのユニットに区分できる. それらは, 超塩基性岩-塩基性岩ユニット(Bum: 括弧内はユニットの略号, 以下同じ), メランジュユニット, 玄武岩-チャートユニット(Bbc), ハイアロクラスタ

イト-泥岩ユニット(Bhm), 堆積岩ユニットである.

超塩基性岩-塩基性岩ユニットは超塩基性-塩基性集積岩からなり, 最大の露出幅は約1.5kmである. 岩相と構造からムスリンバーオフィオライトがスライス状に分断されたものである可能性が高い.

メランジュユニットはその基質の岩相により, 泥岩基質メランジ(Bmm)と蛇紋岩基質メランジ(Bsm)の2つのユニットに細分できる. 様々な大きさを持つ, 超塩基性岩-塩基性岩, 変成岩(角閃岩など), 玄武岩, チャート, 石灰岩, 砂岩などの岩石塊が基質中に雑多に含まれる. メランジュユニットの最大露出幅は約1.5kmで, ムスリンバーオフィオライトとバーコンプレックスの境界, または超塩基性岩-塩基性岩ユニットと他のユニットとの境界に沿って分布している(第5図). 基質の年代は明らかでないが, チャートブロックは白亜紀の放散虫化石を含み, また, 角閃岩(amphibolite)ブロックの角閃石K-Ar年代は80.5±5.3Maを示す. 岩塊の岩相と年代から, 超塩基性岩-塩基性岩はムスリンバーオフィオライトから, その他の岩石はバーコンプレックスの他のユニットからもたらされたものであろう. さらに, 転石ではあるが, おそらくメランジュユニットからもたらされた角閃石岩(hornblendite)の黒雲母K-Ar年代は171.0±8.0Maを示す. この角閃石岩礫中の鉱物組み合わせと化学組成は, ホットスポット起源のアルカリ火山岩のそれらと類似しており, また組

織から考えてアルカリ質マグマからの集積岩と推定される。

玄武岩-チャートユニットはカザバ(Kazhaba)やバー(Bagh)付近に広く分布する。下位より、枕状玄武岩、チャート、珪質泥岩と重なる層序が認められる。層厚は約200mであるが、上記の層序がユニット内部で破断しながら繰り返し分布することで、ユニット全体の分布幅は著しく広がっている。枕状玄武岩の形成年代は不明だが、その化学組成はソレアイト質で中央海嶺玄武岩の組成に酷似する。玄武岩を直接整合で覆うチャートの放射虫化石年代は前期白亜紀(Berriasian to Hauterivian)を、また中～上部層準のチャートは後期白亜紀(Cenomanian to Turonian)を示す。珪質泥岩からは化石を得ていない。

ハイアロクラスタイト-泥岩ユニット(Bhm)は500m以上の層厚をもち、下部と上部に珪質泥岩が、中部に玄武岩溶岩および玄武岩質ハイアロクラスタイトが卓越する。また、層状石灰岩の薄層が層準を問わず挟まれる。玄武岩溶岩の化学組成は、海洋島アルカリ質火山岩類のそれに類似している。4個の試料のK-Ar年代は、 $74.7 \pm 3.4\text{Ma}$ 、 $72.3 \pm 3.8\text{Ma}$ (以上、黒雲母)、 $81.1 \pm 4.0\text{Ma}$ 、 $67.8 \pm 3.4\text{Ma}$ (以上、角閃石)である。下部層準の珪質泥岩からはジュラ紀～白亜紀前期を示す放射虫化石が産する。

堆積岩ユニットは、下部堆積岩(Bls)、上部堆積岩(Bus)および未区分堆積岩(Bs)の3ユニットに細区分できる。いずれのユニットも主に層状石灰岩、珪質泥岩、泥岩、砂岩から構成される。上部堆積岩ユニットには、酸性-中性火山岩礫やウーイド(ooids)を含む石灰質礫岩層も挟まれる。堆積岩ユニット全体の層厚は1,000m程度である。下部堆積岩ユニットと上部堆積岩ユニットの石灰岩と泥岩からはそれぞれ、後期トリアス紀と前期ジュラ紀を指示するアンモナイト化石などが産する。また、下部堆積岩ユニットの泥岩や珪質泥岩からはトリアス紀の放射虫化石が、上部堆積岩ユニットのそれらからは中期～後期ジュラ紀を示す放射虫化石が産する。本地域の未区分堆積岩ユニットからは化石を得ていないが、調査地域外のウルガイ(Wulgai)地域(第4図)のユニットにはペルム紀の石灰岩の存在も知られている(Japanese-Pakistani Research

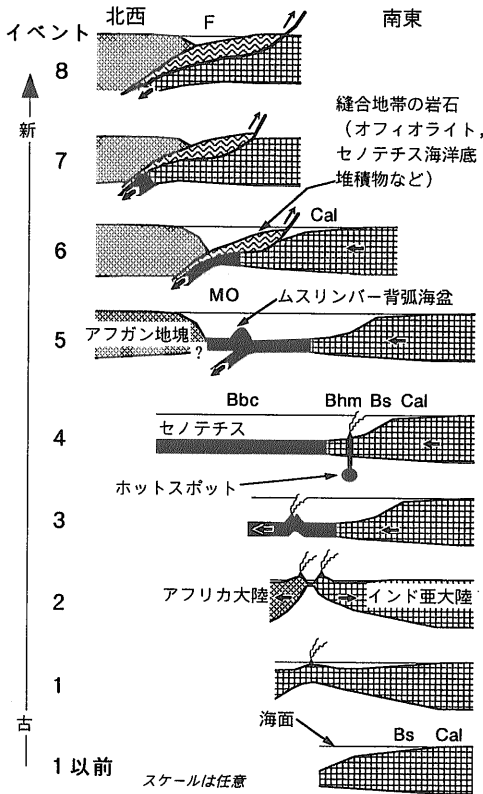
Group, 1989)。堆積岩ユニットと、後述する石灰岩地帯の同年代の堆積岩類とを比較すると以下の違いがあり、両者を明瞭に区別することができる。堆積岩ユニットの方が、1) 全体の層厚が薄いこと、2) 石灰岩単層の厚さが薄かつミクライト質であること、3) 珪質泥岩を普遍的に挟むこと、4) アンモナイト化石など浅海性化石に乏しく放射虫化石などの遠洋性化石に富むこと、などの相違点がある。

4.4 石灰岩地帯

本地域の石灰岩地帯にはジュラ系から暁新統の、主に石灰岩、泥岩、砂岩などからなる浅海性の堆積岩類が分布し、一部に火成岩類が挟まれている(Hunting Survey Corporation, 1960; Fatmi, 1977; Cheema *et al.*, 1977; Allemann, 1979など)。ただし、最上部白亜系と暁新統は断層関係にあり、直接の関係は不明である。ジュラ系～暁新統の全層厚は7,000mに達する。なお、調査地域外の本地帯に相当する地域ではジュラ系以前の堆積岩類や始新統の石灰岩も分布する。

石灰岩地帯の堆積岩類は、インド亜大陸地殻の非活動縁辺部(passive margin)上に堆積したとみなされていて、地震波探査やボーリング試料の解析から、これらは北に傾くデュプレックス構造をなして、全体として約10-15kmの厚さでインド亜大陸地殻上に積み重なっている(Jadoon *et al.*, 1994)。

本プロジェクトによって石灰岩地帯で以下の2つの重要な事柄が新たに明らかにされた。1つは上部白亜系の堆積岩類に挟まれるビバイ(Bibai)火山岩類の、化学組成と放射年代(Sawada *et al.*, 1995; Siddiqui *et al.*, 1996c)、および形成時の古緯度(Yoshida *et al.*, 1995; Khadim *et al.*, 1996)、火山岩類を挟む地層の化石年代(Yoshida *et al.*, 1992)が明らかにされたことである。もう一つは詳細な地質図作成により、中～上部ジュラ系中に平行不整合が発見されたこと(Warraich *et al.*, 1995)である。ビバイ火山岩類の組成は、海洋島アルカリ質火山岩類のそれに類似しており、その全岩K-Ar年代は $71.4 \pm 3.4\text{Ma}$ である。この年代値は化石を産する上下の堆積岩類の年代と矛盾しない。また古地磁気の検討からビバイ火山岩類は南緯 $17 \pm 8^\circ$ で噴出したと推定される。



第7図 ムスリンバー地域の構造発達史 (Naka *et al.*, 1996 を加筆・修正)。それぞれのイベントの時期におけるおおよそ南東-北西断面を表す。図における Cal, Bs, Bhm, Bbc, MO, F はそれぞれ、石灰岩地帯、堆積岩ユニット、ハイアロクラスタイト-泥岩ユニット、玄武岩-チャートユニット、ムスリンバー-オフィオライト、フリッシュ帯の堆積・形成場を表す。ただし、堆積物そのものは表現していない。

5. セノテチス海の一生

本プロジェクトで得られた上記の結果と考察 (Siddiqui *et al.*, 1996a, b, c ; Naka *et al.*, 1996 など) をもとに、セノテチス海の一生を描いてみよう。第6図の総合模式柱状図には、ムスリンバー地域で顕著な地質現象が生じた時期をイベント1~8として示した。第7図にはそれぞれのイベントの時期におけるインド亜大陸周辺の北西-南東断面を示した。また、第8図には後期ジュラ紀 (イベント3の時期)・後期白亜紀 (イベント4・5の時期)・前期始新世 (イベント8の時期) のそれぞれの古地理図を示した。なお、以下の相対年代と絶対年代の対応は Harland *et al.* (1990) に基づく。

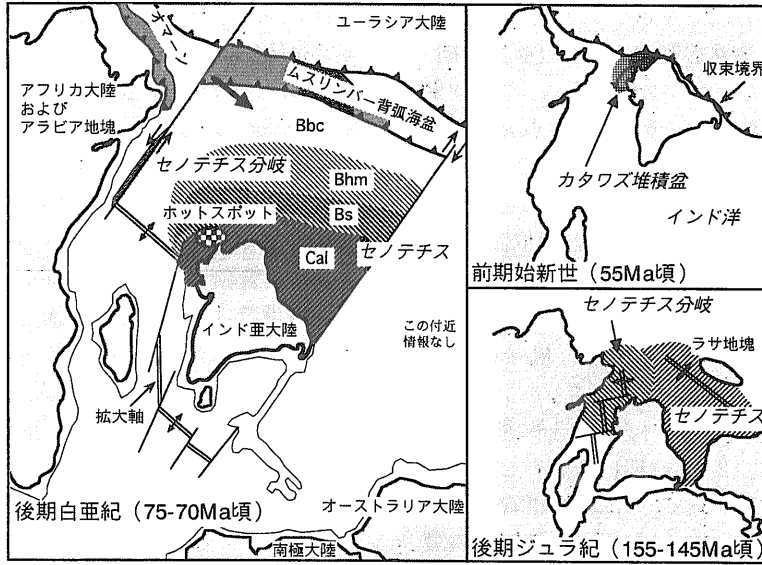
イベント1以前；静穏期 (トリアス紀~中期ジュラ紀, 245Ma~175Ma頃)：ムスリンバー地域を含むインド亜大陸西~北西縁には浅くて広大な大陸棚が広がっていた。石灰岩地帯とパーコンプレックスの堆積岩ユニットの堆積相・化石相の解析から、より大陸に近い場に前者が、より沖合いに後者が堆積していたと考えられる。

なお、調査地域外のウルガイ地域 (第4図) の堆積岩ユニットには、化学組成が不明ながら、上部トリアス系に玄武岩溶岩が挟まれる (Japanese-Pakistani Research Group, 1989)。後期トリアス紀頃には、インド亜大陸北~北東縁からラサ地塊などが分離を始めていると考えられているので (Metcalf, 1996 など；第2図)、ウルガイ地域の玄武岩溶岩はラサ地塊分離時の火成活動を表しているのかもしれない。

イベント1；大陸分裂前夜 (中期ジュラ紀, 175Ma~165Ma頃)：現在のアフリカ大地溝帯で見られるように大陸が分裂する際には、大量のマグマの地下からの突き上げによって地表が盛り上がりつつ (リフティング)、活発な火山活動が生じる (諏訪, 1997)。メランジュユニットに含まれていたであろう171Maの年代の角閃石岩礫は、その岩石組織・構成鉱物の種類・化学組成からアルカリ質マグマからの集積岩と考えられ、リフティングに伴う火山活動に由来する可能性が高い。同時期の石灰岩地帯と堆積岩ユニットには火山岩類が見られないため、この火山活動は両者の堆積場から離れた場、おそらくより北西方で生じたのであろう。

イベント2；大陸分裂 (中期ジュラ紀後半~後期ジュラ紀前半, 165Ma~155Ma頃)：この時期、石灰岩地帯には平行不整合が認められる。また、上部堆積岩ユニットには酸性-中性火山岩礫やウーイド (ooids) を含む石灰質礫岩層も挟まれる。この礫岩に伴う厚層砂岩には斜交層理が発達しており、礫の岩相ともあわせ、これらが浅海域で堆積したことを示唆する。以上の現象はインド亜大陸西~北西縁でのリフティングを表しているのであろう。このことはイベント1の火成活動に引き続き、この頃大陸が分裂を開始したことを物語る。

イベント3；セノテチス海の誕生 (後期ジュラ紀中頃~最前紀白亜紀, 150Ma~140Ma頃)：玄武岩-チャートユニットの基底を占める中央海嶺起源



第8図 インド亜大陸周辺の後期ジュラ紀、後期白亜紀、前期始新世における古地理図(Naka *et al.*, 1996を修正)。後期白亜紀の図における太い矢印はムスリンバーオフィオライトのオブダクションの方向(Mahmood *et al.*, 1995)を示す。同図におけるCal, Bs, Bhm, Bbcはそれぞれ、石灰岩地帯、堆積岩ユニット、ハイアロクラスタイト-泥岩ユニット、玄武岩-チャートユニットの堆積場を表す。

と考えられる枕状玄武岩の噴出年代は、それを整合で覆うチャートの年代から最前期白亜紀以前であることは確実である。したがってこの時期、 Gondwana大陸の分裂に引き続き、新たに海洋底が誕生し拡大を開始したと考えられる(第8図)。チャートは、海洋プランクトンである放射虫の化石を大量に含み陸源砕屑物を全く含まないなど、遠洋性の堆積環境の指標となるので、最前紀白亜紀頃にはこの海洋は十分な広さを有していたといえる。

なお、古地磁気の検討からGondwana大陸を構成していたインド亜大陸とアフリカ大陸+アラビア地塊との分裂は155Ma頃生じたと推定されている(Klootwijk *et al.*, 1992など)。大陸分裂とセノテチス海誕生の私たちのシナリオはこの検討結果と矛盾せず、かつ具体的な証拠を呈示したものと見える。

一般にセノテチス海はインド亜大陸北～北東縁とラサ地塊の間の海洋を指すので(Metcalf, 1996など)、インド亜大陸西～北西縁とアフリカ大陸の間に生じたこの海洋は、セノテチス海の分岐(Cenozoic branch)と呼ぶことができる(第8図)。

イベント4；インド亜大陸の北上(後期白亜紀後半, 81Ma～71Ma頃)：この時期、堆積岩相から判

断すると、セノテチス海とセノテチス海分岐には南から北に、石灰岩地帯、堆積岩ユニット、ハイアロクラスタイト-泥岩ユニット、玄武岩-チャートユニットの堆積場が順次広がっていた(第7, 8図)。そして、ハイアロクラスタイト-泥岩ユニットでは81Ma頃に、より南方に位置する石灰岩地帯では71Ma頃に、アルカリ玄武岩が噴出している。さらに南方のインド亜大陸中央部では、65Ma頃にアルカリ玄武岩が大量に噴出し(Courtilot *et al.*, 1986)、デカントラップと呼ばれる台地を形成した(第1図)。これらのアルカリ玄武岩の化学組成と、石灰岩地帯の玄武岩の形成時の古緯度(南緯約17°)を考慮すると、玄武岩はレユニオン(Reunion)ホットスポットの活動とみなすことができる。ホットスポットは一般にその位置を変化させないので、アルカリ玄武岩の活動時期の違いから判断すると、セノテチス海洋地殻とインド亜大陸地殻はレユニオンホットスポット上を南から北に向けて順次通過したと考えられる。

なお、レユニオンホットスポットの活動軌跡は、現在のレユニオン島(東経56°, 南緯21°のインド洋)からデカントラップまで追跡されていたが(Duncan and Storey, 1992など)、本プロジェクトの検討結果は活動軌跡が従来より16Ma古く、さらにより北

方まで追跡可能であることを示している。

イベント5；背弧海盆の形成（後期白亜紀中頃，81Ma頃）：ムスリンバーオフィオライトは，その放射年代81Maより，やや古い時期に形成されたと考えられる。また，オフィオライトの化学組成は，これが背弧海盆地殻の一部として形成されたことを示唆する。第7，8図には考える背弧海盆の位置を“ムスリンバー背弧海盆”として示したが，背弧海盆の実態は未だ不明である。

イベント6；セノテチス海の消滅（最後期白亜紀，67Ma頃）：玄武岩-チャートユニットでは，(1) 後期白亜紀頃（80Ma頃），チャートが珪質泥岩に覆われ始める。そして，(2) 最後期白亜紀にはいと（74Ma頃），パーコンプレックスには堆積岩が認められない。(3) メランジュユニットに含まれる岩塊の最も新しい年代は後期白亜紀（83Ma～74Ma）である。(4) ムスリンバーオフィオライトが約500℃以下に冷却したのは67Ma頃である。

これらのことがらはセノテチス海の消滅の過程を表している。まず，(1) はセノテチス海洋底に陸源碎屑物が供給され始めたことを示す。すなわち海域の狭小化を示している。(2) はこの頃，パーコンプレックスの堆積場（深海底からインド亜大陸棚端まで）が失われたことを示唆している。(3) はメランジュの形成年代の下限を規定する。メランジュユニットの分布から判断すると，メランジュの形成はオフィオライト岩体がパーコンプレックス上にのしあげた運動（オブダクション）に伴う可能性が高い。(4) の冷却年代はオフィオライト岩体のオブダクションに関連している可能性がある。なお，Mahmood *et al.* (1995) はオフィオライト岩体下底の衝上断層のごく近傍に産する変成岩（角閃岩）とオフィオライトのシート状貫入岩コンプレックスの⁴⁰Ar/³⁹Ar年代の検討から，オフィオライトの冷却とオブダクションはほぼ同時期に生じたと推定している。

以上をまとめると，ムスリンバー背弧海盆を形成していたオフィオライト岩体が，セノテチス海洋地殻からインド亜大陸地殻の端にかけて，その上位に構造的に定置したのは，言い換えると広大で深いセノテチス海が消滅したのは，最後期白亜紀頃（67Ma頃）と判断できる。ただし，上・下限の正確な年代は不明確ながら，石灰岩地帯では暁新統（65Ma～56Ma頃）の浅海性堆積岩類が認められ

るので，セノテチス海の名残の浅海域は暁新世末まで存続した。

イベント7；インド亜大陸とユーラシア大陸の衝突（暁新世，65Ma～56Ma頃）：上記の通り，暁新世の終わり頃（56Ma頃）まで石灰岩地帯では浅海性堆積岩類が認められる。そして，これら暁新統の堆積岩類は地域外において始新統の浅海性石灰岩類に不整合で覆われる（Cheema *et al.*, 1977）。縫合地帯では，ほぼ水平な構造をもつ始新統浅海性石灰岩がムスリンバーオフィオライトを不整合で覆う。また，縫合地帯は石灰岩地帯の暁新統に衝上している。これらのことは，始新世以前に石灰岩地帯と縫合地帯の接合が行われていたことを示している。すなわち，ムスリンバー島弧とその背弧海盆およびセノテチス海洋底堆積物などが変形を伴いながらインド亜大陸地殻上にのしあげたことを物語っている。これらの接合と変形は，インド亜大陸とユーラシア大陸の衝突に伴うものであろう。

インド亜大陸とユーラシア大陸の衝突は，両大陸地殻同士が直接すること，言い換えればセノテチス海洋地殻がユーラシア大陸地殻下へ完全に沈み込むこと，と定義される（Beck *et al.*, 1995; 1996）。この定義に立てば，本地域におけるインド亜大陸とユーラシア大陸の衝突時期は，ムスリンバーオフィオライトのパーコンプレックス上へのオブダクション以降で始新世の不整合以前，すなわち縫合地帯と石灰岩地帯が接合する時期である暁新世頃（65Ma～56Ma頃）と言えるだろう。この年代は，インド亜大陸とユーラシア大陸の衝突時期として従来受け入れられてきた始新世中頃（約50Ma）という年代（Searle *et al.*, 1987など）よりも明らかに古く，最近，ムスリンバー地域の北部延長であるワジリスタン地域（第1図）で得られている結果（Beck *et al.*, 1995; 1996）やヒマラヤ地域全域での縫合地帯の層序の再検討の結果（Rowley, 1996）と一致する。

イベント8；カタワズ堆積盆の形成（始新世以降，55Ma頃～）：始新世にはカタワズ堆積盆が形成され，フリッシュ帯の岩石が堆積を始める（第8図）。また，上記の通り，石灰岩地帯と縫合地帯にも始新世の間，浅海域が広がっていた。この浅海域は漸新世には消滅するが，カタワズ堆積盆は，インド亜大陸地殻がユーラシア大陸下へ沈み込みを

開始した後も、更新世頃にいたるまで存続していた。

6. おわりに

小論は、パキスタン地質調査所地質科学研究所によるムスリンバープロジェクトの一端を紹介したにすぎない。本プロジェクト以外の研究成果は極力引用を行うように努めたが、プロジェクトに関わる40を越す報告の大半は紙面の都合上、引用を省いた。小論で述べられたことの中には、根拠を詳しく論じていない部分や共著者間で見解が異なる部分がある。これは煩雑になることを恐れたため、詳しくは引用した報告や近ぢか公表予定の論文を参照されたい。

パキスタンを含むヒマラヤ周辺の縫合地帯は、小論でふれたように、学術的にまたは鉱床を探索する上で宝の山といえるが、縫合地帯の検討は、現地の研究者以外の欧米などの外国人研究者が中心となって行われていることが少なくない。しかしながら日・パの研究者が参加したムスリンバープロジェクトでは、開始当初はともかく、パキスタン人研究者が主導権を発揮して明らかにした事柄は数多い。私たちの技術移転を含む“共同研究”が土台となって、縫合地帯の研究が、現地の研究者自らの手で今後活発に行われることを願いたい。

小論をまとめるにあたり、プロジェクトに関わられたパキスタン人・日本人のすべての方々に深く感謝します。

文 献

- Ahmad, Z. and Abbas, S.G. (1979) : The Muslim Bagh Ophiolites. In Farah, A. and DeJong, K. A. (eds.), *Geodynamics of Pakistan*, Geol. Surv. Pakistan, 243-249.
- Alleman, F. (1979) : Time of emplacement of the Zhob Valley Ophiolites and Bela Ophiolites, Baluchistan (preliminary report). In Farah, A. and DeJong, K.A. (eds.), *Geodynamics of Pakistan*, Geol. Surv. Pakistan, 215-242.
- Beck, R.A., Burbank, D.W., Sercombe, W.J., Riley, G.W., Barndt, J.K., Berry, J.R., Afzal, J., Khan, A.M., Jurgen, H., Metje, J., Cheema, A., Shafique, N.A., Lawrence, R.D. and Khan, M.A. (1995) : Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia. *Nature*, 373, 55-57.
- Beck, R.A., Burbank, D.W., Sercombe, W.J., Khan, A.M. and Lawrence, R.D. (1996) : Late Cretaceous ophiolite obduction and Paleocene India-Asia collision in the westernmost Himalaya. *Geodinamica Acta*, 9, 114-144.
- Brookfield, M.E. (1993) : The Himalayan passive margin from Precambrian to Cretaceous times. *Sed. Geol.*, 84, 1-35.
- Butler, R. (1995) : When did India hit Asia? *Nature*, 373, 20-21.
- Cheema, M.R., Raza, S.M. and Ahmad, H. (1977) : Cenozoic. In Shah, S.M.I. (ed.), *Stratigraphy of Pakistan*, Mem. Geol. Surv. Pakistan, 12, 56-98.
- Courtilot, V., Besse, J., Vandamme, D., Montigny, R., Jaeger, J.J. and Cappetta, H. (1986) : Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary? *Ear. Planet. Sci. Lett.*, 80, 361-374.
- Dercourt, J., Zonenshain, L.P., Ricou, L.E., Kazmin, V.G., Le Pichon, X., Knippecr, A.L., Grandjacquet, C., Sibuet, J.C., Savostin, L.A., Sorokhtin, O., Westphal, M., Bazhenov, M.L., Llaue, J.P. and Biji-Duval, B. (1986) : Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. *Tectonophysics*, 123, 241-315.
- Duncan, R.A. and Storey, M. (1992) : The life cycle of Indian Ocean hotspots. *Geophys. Monogr.*, 70, 91-103.
- Fatmi, A.N. (1977) : Mesozoic. In Shah, S.M.I. (ed.), *Stratigraphy of Pakistan*, Mem. Geol. Surv. Pakistan, 12, 29-56.
- Harland, W.B., Armstrong, R.L., Cox, A.V., Craig, L.E., Smith, A.G. and Smith, D.G. (1990) : *A Geologic Time Scale 1989*. Cambridge Univ. Press, 263p.
- Hoshino, K., Siddiqui, R.H. and Nakagawa, M. (1996) : Chemical compositions of chromites from the Saprai Tor Ghar Massif of the Muslim Bagh Ophiolites, Western Pakistan. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, 16, 177-193.
- Humayon, M., Lillie, R.J. and Lawrence, R.D. (1991) : Structural interpretation of the eastern Sulaiman fold belt and foredeep, Pakistan. *Tectonics*, 10, 299-324.
- Hunting Survey Corporation (1960) : Reconnaissance Geology of part of West Pakistan. published for the Government of Pakistan by the Government of Canada, Tront, 550p.
- Jadoon, I.A.K. (1992) : Ocean/continental transitional crust underneath the Sulaiman thrust lobe and an evolutionary tectonic model for the Indian/Afghan collision zone. *Pakistan Jour. Hydrocarbon Res.*, 4, 33-46.
- Jadoon, I.A.K., Lawrence, R.D. and Khan, S.H. (1994) : Mari-Bugti pop-up zone in the central Sulaiman fold belt, Pakistan. *Jour. Struct. Geol.*, 16, 147-158.
- Japanese-Pakistani Research Group (1989) : Preliminary report of general survey on the geology of Baluchistan. In Okimura, Y. and Fatmi, A.N. (eds.), *Tectonics and Sedimentation of the Indo-Eurasian Colliding Plate Boundary Region and its Influence on the Mineral Developments in Pakistan*, Hiroshima Univ., 1-31.
- Kazmin, V.G. (1991) : Collision and rifting in the Tethys Ocean : geodynamic implications. *Tectonophysics*, 196, 371-384.
- Khadim, I.M., Ahmad, M.N., Ali, M., Zaman, H. and Yoshida, M. (1996) : Rock magnetic and paleomagnetic studies on Upper Cretaceous Bibai Volcanics in Muslim Bagh area, Balochistan: A summary. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, 16, 149-176.
- Klootwijk, C.T., Gee, J.S., Peirce, J.W., Smith, G.W. and McFadden, P.L. (1992) : An early India-Asia contact, paleomagnetic constraints from Ninetyeast ridge, ODP Leg 121. *Geology*, 20, 395-398.
- Kojima, S., Naka, T., Kimura, K., Mengal, J.M., Siddiqui, M.R.H. and Bakht, M.S. (1994) : Mesozoic radiolarians from the Bagh

- Complex in the Muslim Bagh area, Pakistan: Their significance in reconstructing the geologic history of ophiolites along the Neo-Tethys suture zone. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **45**, 63-97.
- Mahmood, K., Boudier, F., Gnos, E., Monie, P. and Nicolas, A. (1995) : $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the emplacement of the Muslim Bagh ophiolite, Pakistan. *Tectonophysics*, **250**, 169-181.
- Mengal, J.M., Siddiqui, M.R.H. and Khan, S.H. (1993) : Geology and tectonics of Muslim Bagh Ophiolite Complex, in 39 B/2 Quadrangle, Zhob Valley, Balochistan, Pakistan. *Information Release 541*, Geol. Surv. Pakistan, 10p.
- Mengal, J.M., Kimura, K., Siddiqui, M.R.H., Kojima, S., Naka, T., Bakht, M.S. and Kamada, K. (1994) : The lithology and structure of a Mesozoic sedimentary-igneous assemblage beneath the Muslim Bagh Ophiolite, northern Balochistan, Pakistan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **45**, 51-61.
- Metcalf, I. (1996) : Pre-Cretaceous evolution of SE Asian tectonics. In Hall, R. and Blundell, D. (eds.), *Tectonic evolution of Southeast Asia*, Geol. Soc. Spec. Publ., no.106, 97-122.
- Muller, R.D., Royer, J.Y. and Lawvey, L.A. (1993) : Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks. *Geology*, **21**, 275-278.
- Naka, T., Kimura, K., Mengal, J.M., Siddiqui, R.H., Kojima, S. and Sawada, Y. (1996) : Mesozoic sedimentary-igneous complex, Bagh Complex, in the Muslim Bagh area, Pakistan: Opening and closing ages of the Ceno-Tethyan branch. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **16**, 47-94.
- Otsuki, K., Anwar, M., Mengal, J.M., Brohi, I.M., Hoshino, K., Fatmi, A.N. and Okimura, Y. (1989) : Breakup of Gondwanaland and emplacement of Ophiolitic Complex in Muslim Bagh area of Baluchistan. *Geol. Bull., Univ. Peshawar*, **22**, 103-126.
- Robertson, A.H.F. and Degnan, P.J. (1993) : Sedimentology and tectonic implications of the Lamayuru Complex, deep water facies of the Indian passive margin, Indus suture, Ladakh Himalaya. In Treloar, P.J. and Searle, M.P. (eds.) *Himalayan Tectonics*, Geol. Soc. Spec. Publ., no.74, 299-321.
- Rossmann, D.L., Ahmad, Z. and Rehman, H. (1971) : Geology and economic potential for chromite in the Zhob Valley ultramafic complex, Hindubagh, Quetta Division, West Pakistan. *Pakistan and U.S. Geol. Surv. Report*, PK-50, 63p.
- Rowley, D.B. (1996) : Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data. *Ear. Planet. Sci. Lett.*, **145**, 1-13.
- Sawada, Y., Nagao, K., Siddiqui, R.H. and Khan, S.R. (1995) : K-Ar ages of the Mesozoic igneous and metamorphic rocks from the Muslim Bagh area, Pakistan. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **12**, 73-90.
- Scotese, C. R. and Langford, R. P. (1995) : Pangea and the paleogeography of the Permian. In Scholle, P. A., Peryt, T. M. and Ulmer-Scholle, D. S. (eds.), *The Permian of Northern Pangea*, Vol. 1, Springer-Verlag, 3-19.
- Searle, M.P., Windley, B.F., Coward, M.P., Cooper, D.J.W., Rex, A.J., Rex, D., Tingdong, L., Jan, M.Q., Thakur, V.C. and Kumar, S. (1987) : The closing of Tethys and the tectonics of the Himalaya. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **98**, 678-701.
- Sengör, A.M.C. (1979) : Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications. *Nature*, **279**, 590-593.
- Sengör A.M.C. (1987) : Tectonics of the Tethysides, ophiolite beltic collage development in a collisional setting. *Ann. Rev. Ear. Planet. Sci.*, **15**, 213-244.
- Siddiqui, M.R.H., Aziz, A., Mengal, J.M., Hoshino, K. and Sawada, Y. (1995) : Petrology and mineral chemistry of Muslim Bagh Ophiolite Complex and its tectonic implications. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **9**, 17-50.
- Siddiqui, R.H., Aziz, A., Mengal, J.M., Hoshino, K. and Sawada, Y. (1996a) : Geology, petrochemistry and tectonic evolution of Muslim Bagh Ophiolite Complex, Pakistan. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **16**, 11-46.
- Siddiqui, R.H., Mengal, J.M. and Haider, N. (1996b) : Mesozoic mantle plume activities in the Neo-Tethys ocean and its relationship with the break-up of Gondwanaland: Evidence from intra-plate volcanism in Muslim Bagh area. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **16**, 95-114.
- Siddiqui, R.H., Khan, I.H. and Aziz, A. (1996c) : Geology and petrogenesis of hotspot related magmatism on the Northwestern margin of Indian Continent. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **16**, 115-148.
- 諏訪兼位 (1997) : 裂ける大地アフリカ大地溝帯の謎. 講談社, 256p.
- Treloar, P.J. and Searle, M.P. (eds.) (1993) : *Himalayan Tectonics*. Geol. Soc. Spec. Publ., no.74, 630p.
- Warraich, M.Y., Ali, M., Ahmad, M.N., Siddiqui, M.R.H. and Hirayama, J. (1995) : Geology and structure of the Calcereous Zone in Muslim Bagh and Kila Saifullah area, Balochistan. *Geologica, Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **1**, 61-75.
- Yoshida, M., Zaman, H. and Yamazaki, M. (1992) : Campanian nanofossils in the Waltoi Formation, Calcereous Zone, Muslim Bagh area: A short Note. *Proc. Geosci. Colloq., Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **1**, 85-88.
- Yoshida M., Khadim, I.M. and Zaman, H. (1995) : Paleomagnetism of pillow basalts in the Muslim Bagh area, Balochistan, Pakistan: Late Cretaceous trace of Reunion hotspot. *Geologica, Geosci. Lab.*, Geol. Surv. Pakistan, **1**, 77-90.

NAKA Takahito, KIMURA Katsumi, SIDDQUI Rehanul Haq, MENGAL Jan Muhammad, KOJIMA Satoru and SAWADA Yoshihiro (1998) : Evolution of the Ceno-Tethys Ocean in the Muslim Bagh continent-continent collision zone, Pakistan.

<受付: 1998年4月2日>