

ランドサット映像を使用した構造解析 (第1報)

— ヒマラヤ山脈とその周辺地域 —

小池一之・坂田篤稔・柳田 誠
百瀬 貢・岩崎孝明・中村拓道

まえがき

地形分類や地形・地質構造を研究する場合、基本的には、研究者自身の地表調査が中心となることは言うまでもない。しかし、砂漠・熱帯雨林・高山・極地方などでは、詳細な地表調査を行うことは困難である。また、このような地域の調査を含め、広範な地域の地形や環境などを巨視的にみて、その大要を把握しようとする場合、航空写真や衛星映像の解析は重要な研究手段である。航空写真の実体視による判読は、地形学に対し、長足の進展をもたらし、活構造の検出や地形分類・段丘面区分などの研究上、最も基本的な解析手段となっている。活断層研究会編 (1980年) はこのような成果の一大集成と言えよう。

最近、人工衛星から送られてくる映像を解析するリモートセンシングの技法が、急速に発達している。特に、地上調査が困難な地域や種々の事情で航空写真の入手が不可能な地域で、地形・地質を概観したり、種々の活構造を検出しようとする場合、衛星映像の判読は有力な研究手段となってきた (SIEGAL and GILLESPIE, 1980)。これは、NASA が Landsat (以前は Arts と呼ばれていた) 計画を開始し、衛星映像の入手が容易になったためである。

ランドサットに搭載されている MSS の瞬間視野 (IFOV) は 0.086mR であるので、地上 79m 四方の区域が 1 画素 (pixel) の範囲となる。これが地上での最小解像力である (和達ら, 1976)。ランドサットの送ってくる映像は、小縮尺ではある¹⁾が、一般に画質は良好で、撮影時を選ぶことによって、雲量の少ない映像が得られる。映像は 4 バンド²⁾に分けて地上に送られ、それらの組み合わせおよび単独の利用によって、各種の情報を引出すことができる。植生のまばらな乾燥地帯などでは、多バンドを合成したカラー映像が、地形・地質の判読に利用され得るが、厚い植生でおおわれた地域では、カラー合成映像を使用しても岩質などの判別は困難である。したがって、地表の地形・地質構造の判読には、一般には、単バンドの映像でもある程度の成果が得られるので、Band 7 のモノクロ印画が用いられることが多い (例えば、DALY *et al.*, 1979 ; A. IRANPANAH, 1977, 1980 ; LÖFFLER and SULLIVAN, 1979 など)。

今回、報告者らが取り上げた地域は、Himalayan Suture Zone (GANSSEY, 1980, 以下、HSZ と呼ぶ) および Main Boundary Fault (以下、MBF と呼ぶ) に南北を境されたヒマラヤ山系を中心とし、東西 2 つの Syntaxes 部分で、ほぼ日本列島 (北海道・本州・四国・九州) の全域に匹敵する範囲である。

I. ランドサット映像の判読方法

今回の地形・地質構造解析に使用したランドサット映像は、Band 7 のモノクロ印画で、全域を 1/100万（1 区画約 18cm×18cm）に引伸ばした。判読区画の総数は約 100 枚ほどであった。ランドサット映像の判読は、報告者間で地域を分担し、接合部分については複数の判読者によって調整した。その後、全体の判読原図（1/100万）を約 1/2 に縮小したものを接合して、地域全体の構造解析図（図 6）を作成して、全体の調整を行った。判読者が複数であったため、判読の精度は全地域で必ずしも同一ではないが、短時間に広域の判読を行うためには、やむを得ないことと言えよう。

Band 7 のモノクロ印画から得られる情報は、大部分、地形に関するものなので、通常の航空写真判読と同様、映像上での地物の形・陰影・色調や、リニアメントなどのパターンの識別から始まった。局地的には映像がオーバーラップしているので、実体視も可能であったが、大部分の地域では、実体視は不可能であった。

そこで、ランドサット映像上で、影のつき方・形態・大きさなどから地表面の起伏を判断し、映像の明るさ・色調・肌理（例えば、滑らかさ、凹凸や斑点状・粒状・線状・帯状などの形態）などの諸要素の組み合わせによって地形・地質構造を判定した。

地層の層理面はケスタ、 Hog バッグ、谷の方向などの示す線状模様によって、映像上で判読される。特に、第三紀層の層理面は明瞭なことが多く、写真 1 はその典型である。一方、先カンブリア紀などに属する古い地層や玄武岩、片麻岩などの地域で、層理面に類似した特徴を持つ線状模様は、節理・クラック・片理と解釈した（写真 2）。地層の傾斜は層理を示す線の間隔やケスタ地形の背面の傾斜などから推定できる場合もあり、これによって、褶曲構造や地層の不整合を読みとることも可能である（写真 1）。

断層は、層理・節理・片理などの食い違い、傾斜の急変点、地形上の急崖、段丘面や丘陵の変形に基づいて識別し、それぞれの特徴の鮮明度や基準要素によって、活断層か地質断層かを判定した（写真 2, 3, 4 参照）。

これらのほかに、ランドサット映像からは、構造平野と沖積平野との差異（写真 1）、低断層崖や段丘（写真 2）、砂丘（写真 3）、種々の氷河地形やペディメント（写真 4）などが判読できた。

II. ヒマラヤ山脈とその周辺地域の概観

ヒマラヤ山脈は、山脈の高さ・大きさ、および構造発達史の特殊性などのため、その形成に関しては、多くの人々の関心を集めてきた。特に、1950年にネパールが開国されて以来、ネパールを中心とするヒマラヤの新知見が続々と公刊されている（例えば、GANSSEY, 1964, 1980 ;

HASHIMOTO, *et al.*, 1973; STÖCKLIN, 1980など)。また、最近では、ランドサット映像による構造解析の試みも多い(池田, 1980 ; MOLNAR and TAPPONNIER, 1978など)。

ヒマラヤには、山脈にほぼ並行する3本の構造線がみられる。北から Himalayan Suture Zone (Indus-Tsangpo Suture Zone) (HSZ), Main Central Thrust (以下, MCT と呼ぶ), および Main Boundary Fault (MBF) で、これらの構造線により、ヒマラヤ周辺地域は、① HSZ より北のチベット高原 (Tibetan Plateau), ② HSZ と MCT 間の大ヒマラヤ (Great Himalayas), ③ MCT と MBF 間の小ヒマラヤ (Lesser Himalayas), および ④ ヒマラヤ前縁 (Himalayan Front) の4地形帯に区分される。

それぞれの地形帯における造山運動の主時代は、HSZ より北の北チベットで三畳紀後半, HSZ の線で白亜～第三紀前半, MCT で第三紀中葉, MBF～ヒマラヤ前縁で鮮新～更新世で、北から南へ主活動期が移動している (STÖCKLIN, 1980)。いうまでもなく、ヒマラヤの成因は、インド亜大陸とユーラシアの衝突に求められ、一般に両者の境界がHSZであるとされている (MOLNAR and TAPPONNIER, 1977 ; GANSEER, 1980) が、STÖCKLIN (1980) は、まず、チベット地塊がゴンドワナ大陸から分離して北上し、前面の古テチス海をせばめ、背後に新テチス海を広げ、その後、インド亜大陸がチベット地塊と衝突した線がHSZであると解釈した。彼は、チベットとインドの二陸塊がゴンドワナ大陸から分離し、次々にユーラシア大陸に衝突し、追加されたと推定した(図5)。

地形的にみた場合、大ヒマラヤは高度 6,000m を超える高山帯で、前面の小ヒマラヤ (2,000～3,000m) との間には、切峯面上にも明瞭な急崖帯が現れる (HASHIMOTO, *et al.*, 1973, Plate 1)。またヒマラヤ前縁は、高度 1,000～1,300m の幅の狭い丘陵地帯である。また、現在、造山運動が最も活発なのは、MBF とその前縁部で、段丘を切る明瞭な活断層や段丘面の変形が報告されている (NAKATA, 1972)。

現在、8,000m を超す高峰が連なるヒマラヤ山脈の上昇は、インド亜大陸の衝突後に始まり、始新世ごろには、1,000m にも達していなかったとも考えられている。大ヒマラヤの高度 (エベレスト周辺) は、鮮新世末に 3,000m に達し、更新世～完新世の間に 5,000m ほど上昇 (平均上昇速度, 2.5mm/y) した (在田, 1980)。これは、ヒマラヤ周辺での花粉分析結果に基づく、植物帯の移動とも矛盾しない (山中, 1980)。

ヒマラヤ山脈の東西両端には、大規模な対曲構造 (Syntaxis) が発達し、それぞれの南部には、東側にアラカン (Arakan), バトカイ (Patkai) 山脈が、西側にはスライマン (Sulaiman) 山脈が発達する。これらの山脈も、中生界～第三系からなる褶曲山脈で、山脈背後には、東にはビルマ中央盆地東縁を限る右横ずれ断層が、西にはクエッタ・チャマン (Quetta Chaman) 左横ずれ断層がみられ、ユーラシア大陸から分離され、インド亜大陸とともに北上しているように見える。

なお、ヒマラヤの地質や地震活動についての研究史は、多くの人々によって、手際よく紹介されている (在田, 1980 ; 三東, 1971 ; 山下, 1971など)。

Ⅲ. ランドサット映像の判読結果

1. インド・ビルマ山系周辺

この地域は、ヒマラヤの東の対曲構造 (Himalaya-Burman Syntaxis) とその南方に続くアラカン山脈地域である。パトカイ山脈からアラカン山脈北端部とシロング高地 (Shillong Plateau) 周辺については、ランドサット映像による構造解析が進められ、シロング高地とインド・ビルマ山系との関係を示すモデルも提示されている (池田, 1980)。

イラワジ (Irrawaddy) 川の流れるビルマ中央盆地より西方に分布するアラカン山脈は、ほぼ南北方向に伸びる帯状の褶曲構造が明瞭な新テチス帯に属する堆積物の作る山脈 (STÖCKLIN, 1980) で、東より西へ白亜紀～中新世の地層が帯状に分布している (UNESCO, 1976)。アラカン山脈からアンダマン (Andaman) 諸島へ続く構造帯は、火山列を伴い、中・深発地震の示す震源面も認められる (三東, 1971 ; KUMAR, 1981)。

次に、アラカン山脈中央部の判読例を示そう (写真1, 図1)。この地域は、全体として、南北または北北西～南南東方向の山脈と谷が交互に配列し、西から東へと次第に高度を増していく。山脈を構成する地層は第三系～白亜紀の堆積岩で、それぞれの地層の層理面が映像上で明瞭に識別できる。層理面の走向や密度の変化から、2つの不整合面が推定されるので、それらによって分帯できる3地帯を西から東へ A, B, C 帯と呼ぶことにする。

KUMAR (1981), STÖCKLIN (1980), UNESCO (1976) などによれば、A地帯は、構造的にはビルマ盆地の一部を占め、アルプス前縁凹地に属し、主に中新世の地層によって構成されている。B地帯は、フリッシュ帯で、後期アルプス前縁褶曲帯に属し、主に漸新世の地層が分布する。C地帯は、アラカン・ヨマ・サチュア帯 (Arakan Yoma Suture) で、新テチス帯に属し、中生代のフリッシュ・オフィオライト相よりなっている。

A地帯は 300～900m の高度を有するなだらかな山脈と谷から構成され、地層の層理面は最も明瞭で、褶曲構造の判読も容易である。背斜軸間の向斜部の多くは、盆地状の地形を呈しているが、盆地底にも明瞭な層理面がみられるので、向斜谷であると判断される。この地帯の西部では、北北西～南南東方向の褶曲構造の発達が良好である。一方、東部では、西に緩く、東に急斜するケスタ地形が認められ、地層が西南西へ傾斜する単斜構造、もしくは、西南西へ急斜する褶曲軸の存在が暗示される。ケスタ地形は 22° N, 92° 30' E 付近で最も顕著である。

B地帯は、600～1,800m の高度を有し、A地帯よりやや険しい地形を示し、地層の走向もほぼ南～北に近くなる。したがって、地層の走向の変化より、A・B両帯間の不整合面を明瞭に判定することが可能である。また、谷の密度も増し、東西方向のリニアメントも発達するようになる。浸食が進んでおり、写真中央にはメサ状の地形が、また、C地帯との境界付近には、火山岩 (?) の構成するメサおよび円錐状の地形がみられる。一方、カラダン (Kaladan) 川下流部では、向斜谷を埋める沖積平野が発達している。

C地帯は、高度 2,000~2,700m に達する急峻な山脈で、谷密度や地形の起伏は、関東山地・赤石山脈・四国山脈などによく似た映像を示している。この地帯では、A・B 両帯でみられた明瞭な層理面を示すリニアメントは認められず、多くの短いリニアメントは、節理やクラックを反映していると思われる。たとえば、21°N, 93°30'E 付近で、山脈や谷の方向（北北西～南南東）とはほぼ直交する東～西方向の短いリニアメントは、層理面を示すものとは考えられない。山脈や谷および層理面と思われるリニアメントなどの方向性から考えると、この地帯での褶曲軸の方向は、ほぼ北北西～南南東の方向で、局地的に北東方向へ軸が振れているようにみえる。

南北方向に伸びるアラカン山脈の北縁は、シロング高地南縁のダウキ (Dauki) 断層の手前でその西半部は沖積層下に没していくが、東半部では、褶曲軸が北東方向へ転じてパトカイ山脈を構成している (図6)。

2. ネパール～ブータン地区

この地域はエベレストを含むヒマラヤ山系の主部で、全体として東西方向の構造が発達する。この地域では、MCT と MBF 間の小ヒマラヤおよび MBF 前面のシワリク層の構成するヒマラヤ前縁の幅が狭く、大部分が大ヒマラヤに属する高山帯である。このため、山系中央部は氷河の発達する地域であり、構造解析には、不都合な部分が多い。ランドサット映像からは、HSZ と MBF が明瞭に識別され、MBF 前面に発達する活断層系は見事である。HSZ と MBF 間の高山地帯には、東西方向の層理面がよく発達し、これらを切る南北方向の正断層や地溝も存在する。

ネパールヒマラヤ地区は、近年最も研究の進んだ地域であるが、チベット側の調査が遅れているため、HSZ の東半部の存在も、ランドサットの映像解析によって、初めてその全貌が明らかになってきた (GANSSE, 1980)。また、ネパールからチベットにかけての地帯の構造解析も映像の判読によって解明され、地震の発震機構との関係も明らかにされてきている (MOLNAR and TAPPONNIER, 1978 ; Ni and YORK, 1978)。

ここに示す解析例 (写真2, 図2) は、ブータンヒマラヤとブラマプトラ川の沖積平野との境界付近である。山麓線に沿っては、活断層であるヒマラヤ前縁構造線 (Himalaya front tectonic line: NAKATA, 1972) が発達しており、何箇所かで段丘面や丘陵の変形が認められる。なかでも、サラルバンガ (Saralbhānga) 川付近の逆向き (北落ち) の断層崖 (図2中の①) は見事なもので、ランドサット映像からでもその存在および変位を確実に知ることができる。断層①は扇状地を横切る約 45m (陸地測量部 1942年発行の 1/25 万地形図より推定) の比高を有する逆向きのもので、崖下には断層崖に沿って池が存在する。

サラルバンガ川上流の山麓部の断層 ② も、ランドサット映像からその存在が推定できるもので、NAKATA (1972) によって、Intra-Daling thrust の名で報告されている。地形図の等高線から判断すると、サラルバンガ川の形成した扇状地面が平野側へたわみ下がっているようである。ブータンヒマラヤの山麓線に沿って、かなり連続性のよい推定活断層を図示したが、これらは映像のみによる判断は困難であった。活断層①, ②が存在することや文献 (NAKATA, 1972など)

に基づいて、その存在を推定した。

ブータンヒマラヤ内での積雪地帯の境界 (22. Feb. 1978) を点線で示した。この境界線がほぼ等高線に平行であるとみなせば、標高点の高度からみて、約 15,000 フィートの等高線を示しているものと推定される³⁾。これは2月の境界線であるので、現実の雪線高度はこの点線よりやや高いものと考えられる。点線の分布から判断すると、 $27^{\circ}30'N$ 付近に東西に伸びる低地帯が認められる。ランドサット映像から地質断層の存在は推定できなかったが、MCTはこの低地帯を通るものと思われる。なお、全域にわたって MCT が確実に認定できた場所はまれで、 $85^{\circ}30'E$ 付近にみられる右横ずれ断層 (図6) が MCT の一部分に相当するのかわからない。

したがって、この低地帯より南側の破線はミッドランド変堆積岩類の層理面を、北側ではヒマラヤ片麻岩類中の節理または葉状構造を示しているものかわからない。なお、地質断層として示した南北方向の断層群は、MOLNAR and TAPPONNIER (1978) などが述べているヒマラヤの南北方向の圧縮に伴う正断層群、あるいは大きな節理であると推定される。

3. カシミール～カラコルム

この地域では、ヒマラヤ山脈の主方向が東西から北西～南東方向に徐々に変化し、MBF は対曲構造の会合部まで明瞭に追跡され、ヒマラヤ前線に発達する HF TL (NAKATA, 1972) も、ほぼ連続して追跡できる。一方、MCT の位置は追跡不能であった。 $85^{\circ}E$ 付近まで、ツァンポー川の流路に平行して延びてきた HSZ も、MBF とほぼ平行して、その方向を徐々に北西へと転じている。 $80^{\circ}E$ 付近より西方では、北西～南東方向の長大な右横ずれ断層が K2 峰付近まで追跡され(カラコルム断層, Karakorum fault), さらに K2 峰の北東からは、東西に伸びるアルチンター層 (Altyn tagh fault) が東方へ伸びている (図6)。

北西～南東の方向を有する $80^{\circ}E$ 以西のヒマラヤでは、 $80^{\circ}E$ 以東 (ほぼ東西方向に伸びる) が山脈に平行する層理面と、これに直交する正断層群が発達するのに対し、南北方向の正断層群およびカラコルム断層に平行する北西～南東方向の右横ずれ断層がみられる (図6)。

図3は、ヒマラヤ山脈の西の対曲構造付近の判読図である。山脈背後に発達するクエッタ・チャマン左横ずれ断層を境として、北上するインド亜大陸に引きずられているスライマン山脈は、東部のアラカン山脈より複雑な褶曲構造を示している。スライマン山脈はアルプス前縁凹地～後期アルプス前縁褶曲帯 (Stöcklin, 1980) に属し、新旧の第三系よりなる褶曲山脈である。図3にも示したように、第三系の褶曲軸はほぼ東北東～西南西の方向を有し、ヒマラヤ主部に衝突する部分では、アコーディオンのように複雑に折れ曲がっている。特に、マンガラ (Mangla) 湖周辺で典型的にみられる。

スライマン山脈の北縁 (ソールト山脈, Salt Range) は、ジェルム (Jhelum) 川に沿う比高 700～1,000m の急崖で限られ、チェナブ (Chenab) 川などの作る沖積平野と接している。急崖の下部には先カンブリア系の地層が露出しており (UNESCO, 1976), その上部には、インダス川付近まで第三系が向斜状に厚く堆積しているので、前面の急崖を断層崖と推定した⁴⁾。ヒマラヤ山麓にみられるヒマラヤ前縁構造線 (HF TL) は、図3の東端では、東西方向の活断層である

が、その延長は背後の MBF に平行してマンガラ湖北方へは伸びず、方向を転じて、基盤岩の露出するジェルム川に沿う推定断層へ連続するようにみえる。

インダス川やソアン (Soan) 川周辺の平野上には、明瞭な層理面が認められるので構造平野と思われる。マンドラ (Mandra) 周辺にみられる白い斑状模様は、砂丘である可能性が大きい。

一方、ラワルピンジ付近では、主構造の走向がほぼ直交している。東方では北西～南東または北北方向の MBF が、図 3 より北方まで追跡されるが (図 6)、ヒマラヤ前縁の褶曲帯はマンガラ湖北方で、アコーデオン型の褶曲帯でさえぎられ、かわって図 3 の西半では、東北東～西南西方向の褶曲構造が卓越する。ラワルピンジ北方にみられる東北東～西南西方向の活断層を一応、MBF と推定した。この付近での MBF とその周辺での地帯構造は、中央日本におけるフォッサ・マグナ西縁断層と中央構造線周辺の地帯構造と似ており、インド亜大陸の北方への移動に伴って、スライマン山脈 (ユーラシア大陸の一部) の北端が引きずられている状態を示すものと思われる (SBORSHCHIKOV, *et al.*, 1981年)。また、この付近では、東のアラカン山脈と同様、深発地震の発生域で (三東, 1971 ; VERMA, *et al.*, 1980)、多くの浅発地震の発生する地域でもある (GORNITZ and SEEGER, 1981)。

図 4 は、タリム盆地南縁を限るアルチンター断層とその周辺地域である。アルチンター断層は世界で最も長い左横ずれ断層で、より古い褶曲山脈を斜断して活動を復活したものである (MOLNAR and TAPPONNIER, 1977)。アルチンター断層は、図 4 の中央にみえる西北西～東南東方向の顕著な左横ずれ断層である。アルチンター断層と、ほぼ平行して分布するタリム盆地南縁の断層群を除くと、大部分のリニアメントは北西～南東方向のもので、アルチンター断層の走向と斜交する。北西～南東方向のリニアメントは、ランドサット映像 (写真 4) 上で層理面を示す模様と比較して、新鮮で直線的であり、かつ連続性がよいので、アルチンター断層の左横ずれ運動に伴う断層および大規模なクラックと推定される。これに対し、写真 4 全域にわたって認められる北東～南西方向の微弱な模様は、層理面もしくは節理面を示すものと思われる。

また、タリム盆地と山地との境界は、西北西～東南東方向の直線状の急崖で、ランドサット映像から判読する限り、横ずれ成分は認めにくいので、正断層の作る断層崖であると判定した。おのおのの断層は 20～40km ほどの長さを有し、雁行して配列している。断層地溝・地塊構造も判読された。

タリム盆地南縁からプヤ (Puya) 付近にかけては、ペディメントと考えられる層理面が読みとれる比較的広い緩斜面が発達している。アルチンター断層の北側に平行して発達する山脈 (高度約 6,500m) からタリム盆地へ向かって U 字谷が伸びている (例; 図 4 中の①～③)。これらの U 字谷の出口付近には氷成～融氷流水堆積物が分布し、ペディメントと接している。

写真 4 の南東部には大規模な氷河が発達し、氷舌端も明瞭に判読される (図 4 中の④～⑥)。氷河地帯の南側に位置するチベット高地北部は、厚い氷成～融氷流水堆積物によって谷が埋積され、広い谷底平野が発達している。

4. スライマン山脈

スライマン山脈の主部は、 70° E の経線に沿ってほぼ南北方向を持っているが、 30° N 以南で北東～南西方向から東西方向へ折れ曲がっている。また、 32° N 以北では、複雑なアコーディオン状の折れ曲がり構造を示している（図6）。スライマン山脈の南半部では、第三系の作る明瞭な褶曲構造が読み取れ、その中央部では南北方向の左横ずれ断層によって、褶曲軸が転位している（図6）。

70° E 以東の部分では、山脈の方向はほぼ東西で、東端でヒマラヤ山脈との対曲構造を形成している。この部分では、山脈は折れ曲がり、横ずれ断層が発達している（図6）。このような第三系の褶曲軸の転位はヒマラヤに対し、インド亜大陸が北上した結果、スライマン山脈北部が、N-S 方向に圧縮されて生じたものと推定される（SBORSHCHIKOV, *et al.* 1981）。

あ と が き

今回の報文は、報告者らが計画している衛星映像による構造解析の第1報である。われわれは今後、解析地域を北方（チベット・中央アジア）および西方（アフガニスタン・イラン）へ伸ばし、中央アジア～西アジアのヒマラヤ・アルプス造山帯とその周辺の構造解析を進めようと計画している。したがって、この報文では、解析結果を示す構造図（図6）および、いくつかの地域での具体例（図1～4）を示すにとどめた。多くの研究者によって進められている、地質調査結果や地球物理学的データとの対応に関する検討は、一連の解析終了時にまとめて行う予定である。

なお、この報文に示した解析地域の一部のランドサット映像の判読には、前川由己・根本直樹・清水長生の三君も参加した。解析に使用した映像は、駒沢大学図書館所蔵のランドサット映像のネガを引伸ばした1/100万モノクロ印画である。記して謝意を表するものである。（1981. 11. 21）

注

- 1) ネガで約 1/300 万ほどで、引伸ばし印画の場合、1/50万程度までは、十分鮮明な画像が得られる。
- 2) ランドサット1, 2には Band 4 ($0.5\sim 0.6\mu\text{m}$), Band 5 ($0.6\sim 0.7\mu\text{m}$), Band 6 ($0.7\sim 0.8\mu\text{m}$), Band 7 ($0.8\sim 1.1\mu\text{m}$) の4バンドの MSS が搭載され、ランドサット3では、さらに $10.5\sim 12.6\mu\text{m}$ の MSS が加えられている（SIEGAL and GILLESPIE, 1980）。
- 3) この付近の 1/100 万の地形図には等高線が入っていないので、標高点からの推定による。
- 4) この部分に断層崖の存在を図示している報文は NAKATA (1972) ぐらいであるが、HFTL にほぼ連続する急崖で先カンブリア系の岩石が露出していることなどから推定した。

引用文献

- 在田一則 (1980) : 地質学データからみたヒマラヤの上昇プロセス. 月刊地球 2, 767～777.
池田安隆 (1980) : Himalaya-Burman Syntaxis のテクトニクス——Landsat 映像による活構造解析の試み—
月刊地球, 2, 699～706.
活断層研究会 (1980) : 『日本の活断層, 分布図と資料』東大出版会, 369p.
三東哲夫 (1971) : ヒマラヤ連峰周辺の地震活動. 科学, 41, 231～240.

- 山中英二 (1980): 花粉分析的研究からみたヒマラヤ山脈の隆起. 月刊地球, **2**, 778~789.
- 山下 昇 (1971): ヒマラヤの生い立ち. 科学, **41**, 221~230.
- 和達清夫, 土屋 清, 安田嘉純, 江森康文, 飯坂讓二, 長尾 真 (編著) (1976): 『リモートセンシング』朝倉書店, 280p.
- DAILY, M.L., FARR, T., ELACHI, C. and SCHABER, G. (1979): Geologic interpretation from composited Rader and Landsat imagery. *Photogr. Eng. and Rem. Sensing*, **45**, 1109~1116.
- GANSSER, A. (1964): *Geology of the Himalayas*. Wiley-Intersc., London, 289p.
- (1980): The significance of the Himalayan suture zone. *Tectonophysics*, **62**, 37~52.
- GORNITZ, V. and SEEBER, L. (1981): Morphotectonic analysis of the Hazara arc region of the Himalaya, North Pakistan and Northwest India. *Tectonophysics*, **74**, 263~282.
- HASHIMOTO, S., OHTA, Y. and AKIBA, C. (eds.) (1973): *Geology of the Nepal Himalayas*, Saikon, Tokyo, 292p.
- IRANPANAH, A. (1977): Geologic applications of Landsat imagery. *Photogr. Eng. and Rem. Sensing*, **43**, 1037~1040.
- (1980): Interpretation of structural lineaments using Landsat-1 images. *ibid*, **46**, 225~229.
- KUMAR, S. (1981): Geodynamics of Burma and Andaman-Nicobar region, on the basis of tectonic stresses and regional seismicity. *Tectonophysics*, **79**, 75~95.
- LÖFFLER, E. and SULLIVAN, M.E. (1979): Lake Dieri resurrected: an interpretation using satellite imagery. *Zeit. Geomor.*, **23**, 233~242.
- MOLNAR, P. and TAPPONNIER, P. (1977): The collision between India and Eurasia. *Sci Amer.* **236**(4), 30~42. 竹内均 (訳) (1977): インドとユーラシアの衝突. サイエンス, **7**(6), 96~109.
- (1978): Active tectonics of Tibet. *Jour. Geophys. Res.*, **83**(B11), 5361~5375.
- NAKATA, T. (1972): Geomorphic history and crustal movements of the foot-hills of Himalayas. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 7th ser. **22**, 39~177.
- NI, J. and YORK, J.E. (1978): Late Cenozoic tectonics of the Tibetan Plateau. *Jour. Geophys. Res.*, **83**(B11), 5377~5384.
- SBORSHCHIKOV, I.M., SAVOSTIN, L.A. and ZONENSHAIN, L.P. (1981): Present plate tectonics between Turkey and Tibet. *Tectonophysics*, **79**, 45~73.
- SIEGAL, B.A. and GILLESPIE, A.R. (1980): *Remote sensing in geology*. John Wiley & Sons, New York, 702p.
- STÖCKLIN, J. (1980): Geology of Nepal and its regional frame. *Jour. Geol. Soc. London*, **137**, 1~34.
- UNESCO (1976~): *Geological world atlas*.
- VERMA, R.K., MUKHOPADHYAY, M. and BHANJA, A.K. (1980): Seismotectonics of the Hindukush and Baluchistan arc. *Tectonophysics*, **66**, 301~322.



写真1 アラカン山脈、カラダン川付近のランドサット映像

Photo 1 Landsat image(E·2404-03294-7)of the Kaladan River area,
central Arakan Range

西南端には、ベンガル湾の一部が見え、アラカン山脈は全体として西から東へ高度を次第に増して行くとともに堆積層も古くなる。南～北ないしは北北西～南南東方向の山稜と谷が交互に配列し、褶曲構造が明瞭に読み取れる。

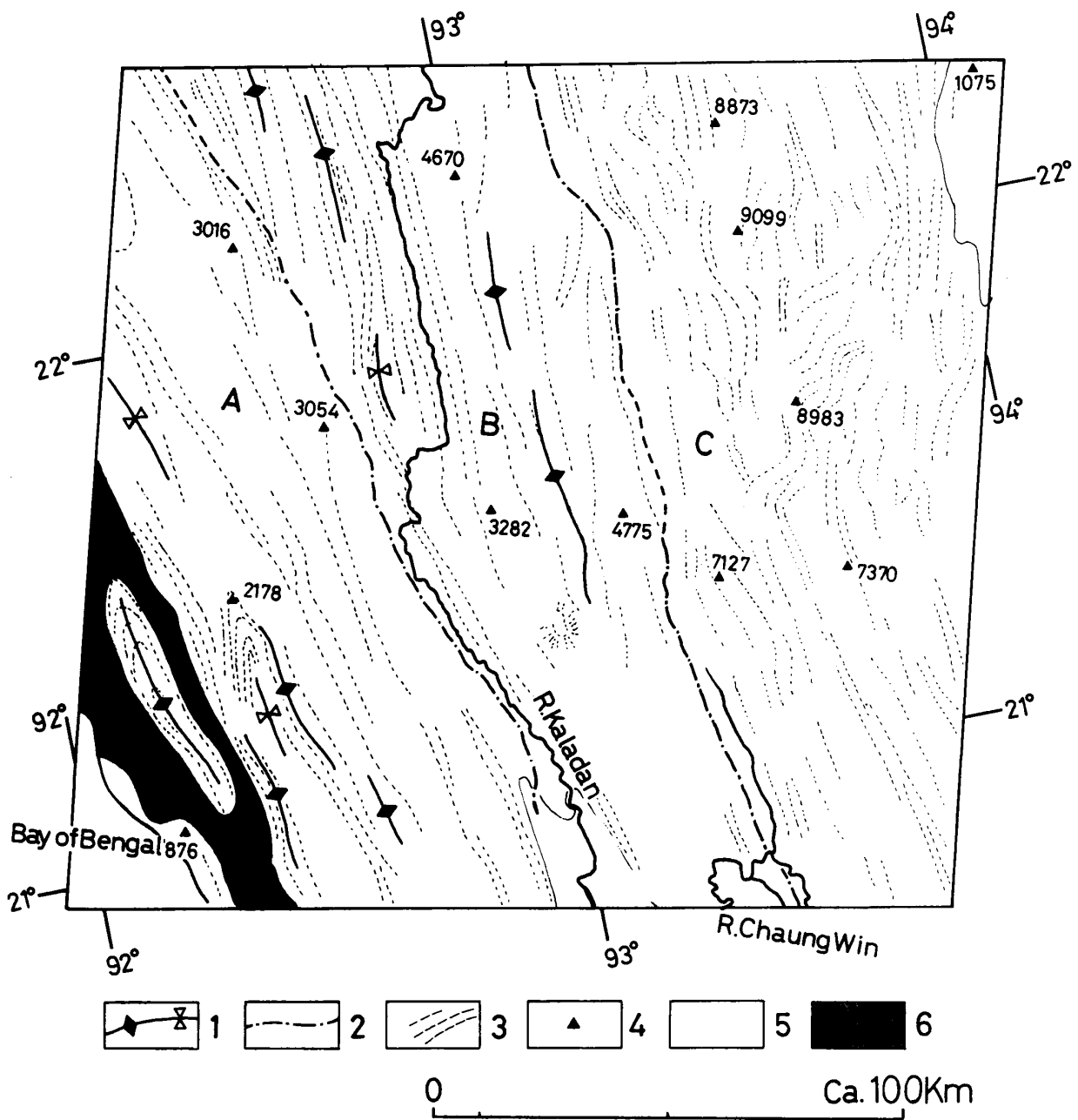


図1 アラカン山脈, カラダン川付近の構造判読図

Fig. 1 Structural analysis of the Kaladan River area, central Arakan Range by the interpretation of Landsat image

1. 背斜軸 2. 不整合面 3. 層理 4. 標高点(フィート) 5. 構造平野 6. 沖積平野

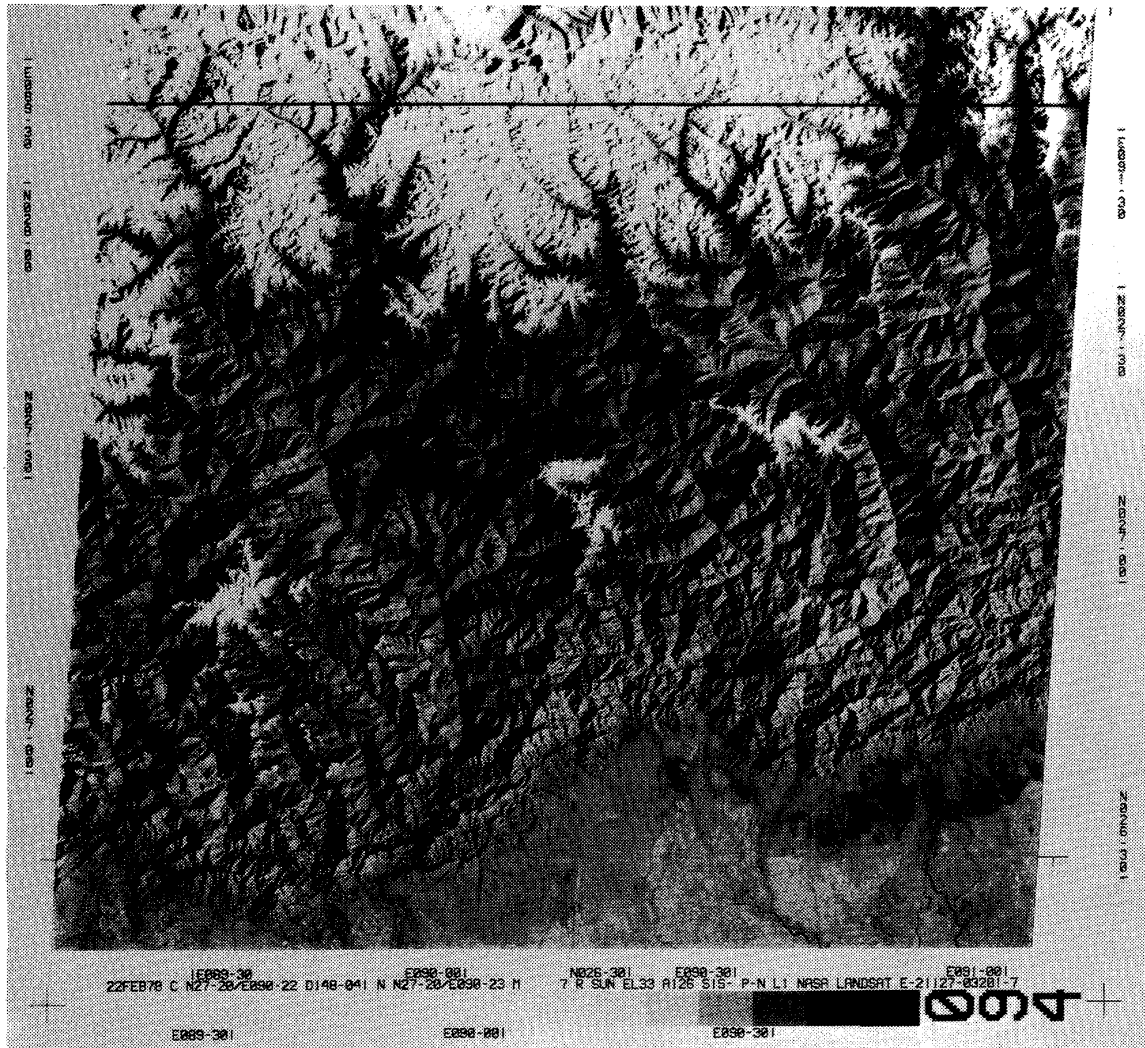


写真2 ブータンヒマラヤのランドサット映像

Photo 2 Landsat image(E-21127-03201-7)of the Butan Himalayas

この映像はブータンヒマラヤとその前縁で、山麓線に沿って活断層が発達している。活断層(Himalaya front tectonic line, HFTL)は何箇所かで段丘や丘陵を切っており、ランドサット映像上でも確実に追える非常に少ない例である。

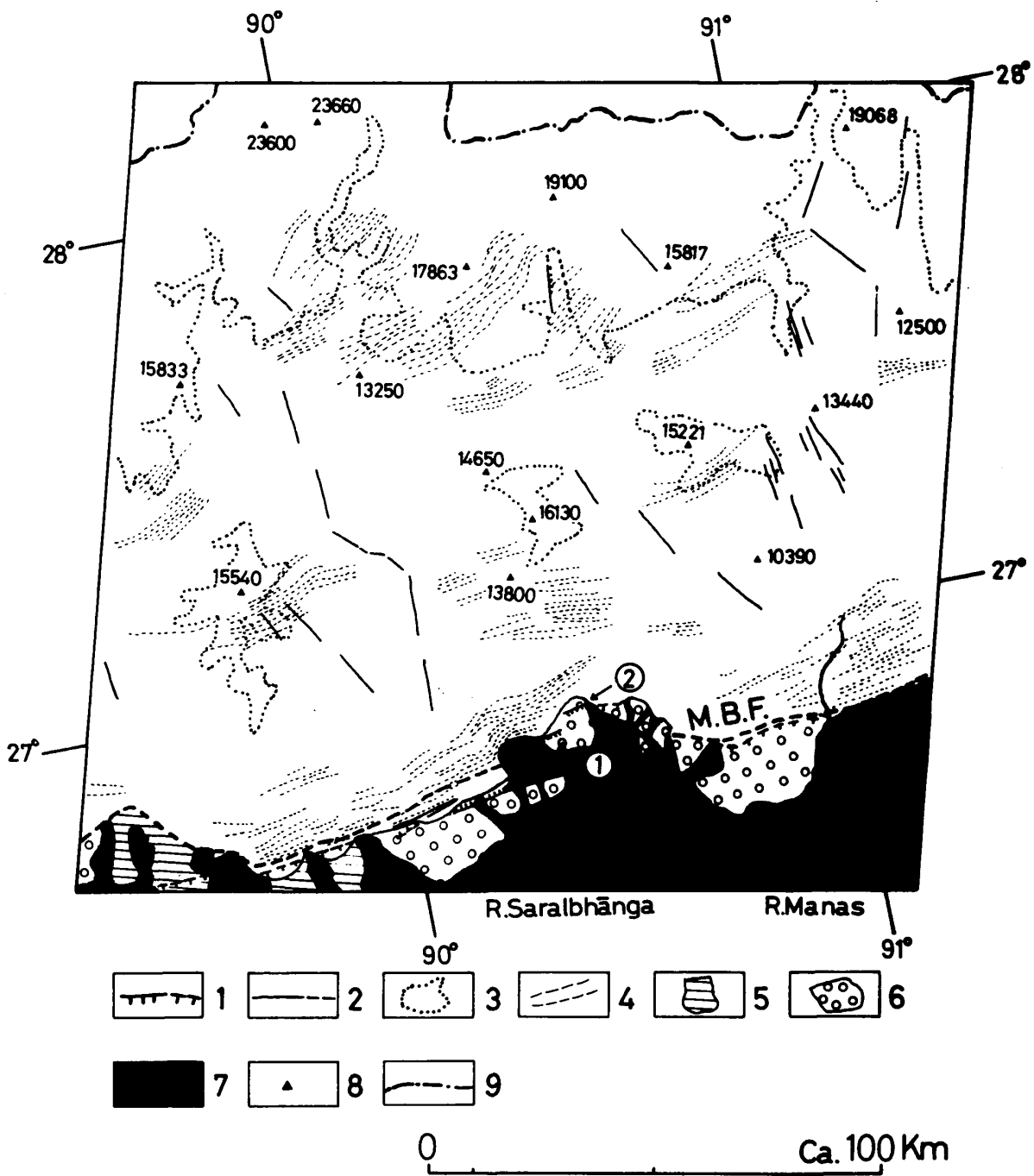


図2 ブータンヒマラヤとその前縁部の構造判読図

Fig. 2 Structural analysis of the Butan Himalayas by the interpretation of Landsat image

1. 活断層(破線部は推定) 2. 地質断層(破線部は推定) 3. おおよその雪線(約15,000フィートの等高線に相当する) 4. 層理 5. 丘陵 6. 段丘 7. 沖積平野 8. 標高点(フィート) 9. ブータンと中国との国境

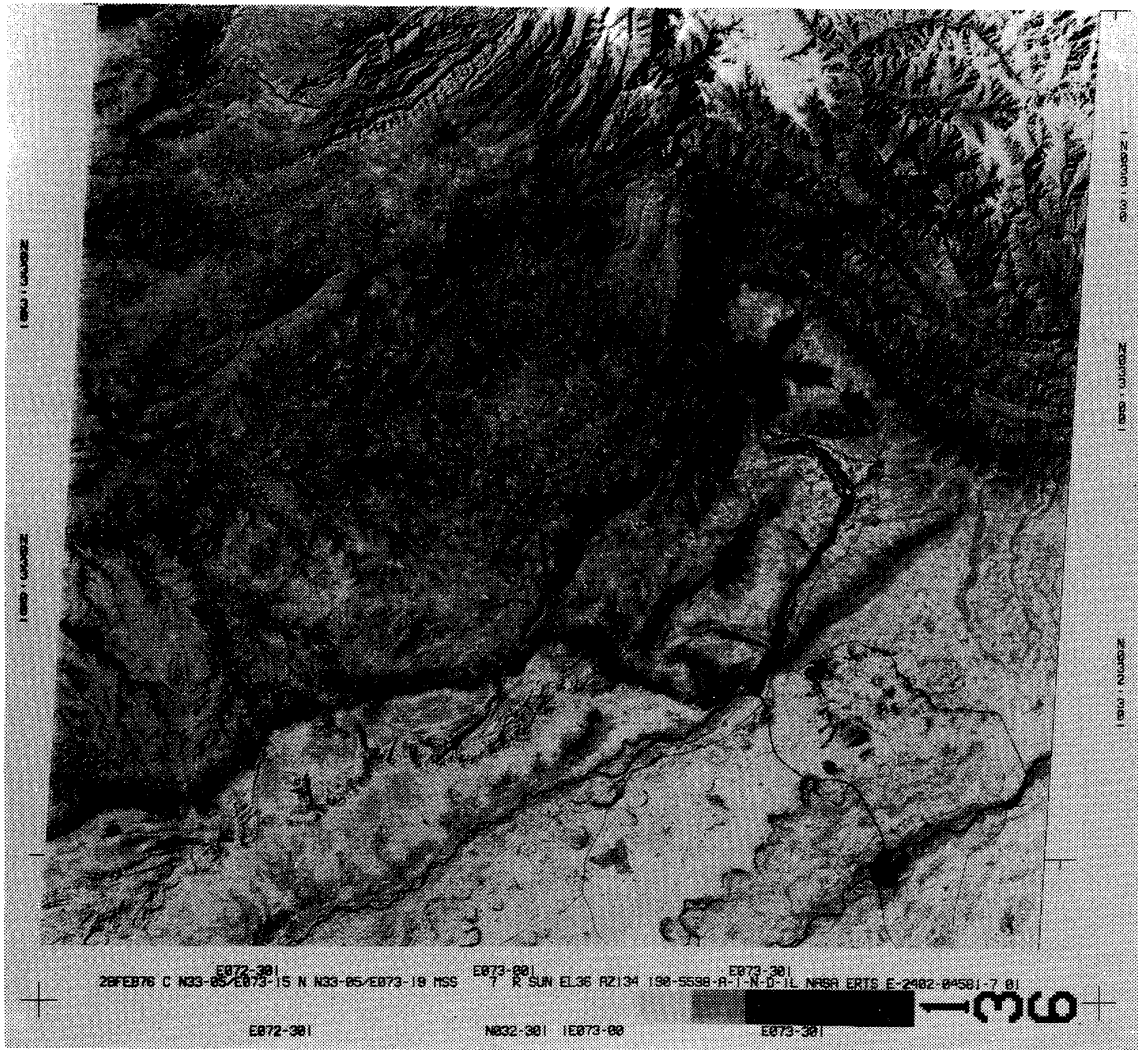


写真3 ラワルピンジ周辺のランドサット映像

Photo 3 Landsat image(E-2402-04581-7)around Rāwalpindi

写真はラワルピンジ周辺の構造を示すもので、ヒマラヤの西の対曲構造（Himalaya-Sulaiman Syntaxis）が明瞭に判読できる。対曲するMain Boundary FaultおよびHimalaya front tectonic line（HFTL）が代表的な構造線である。

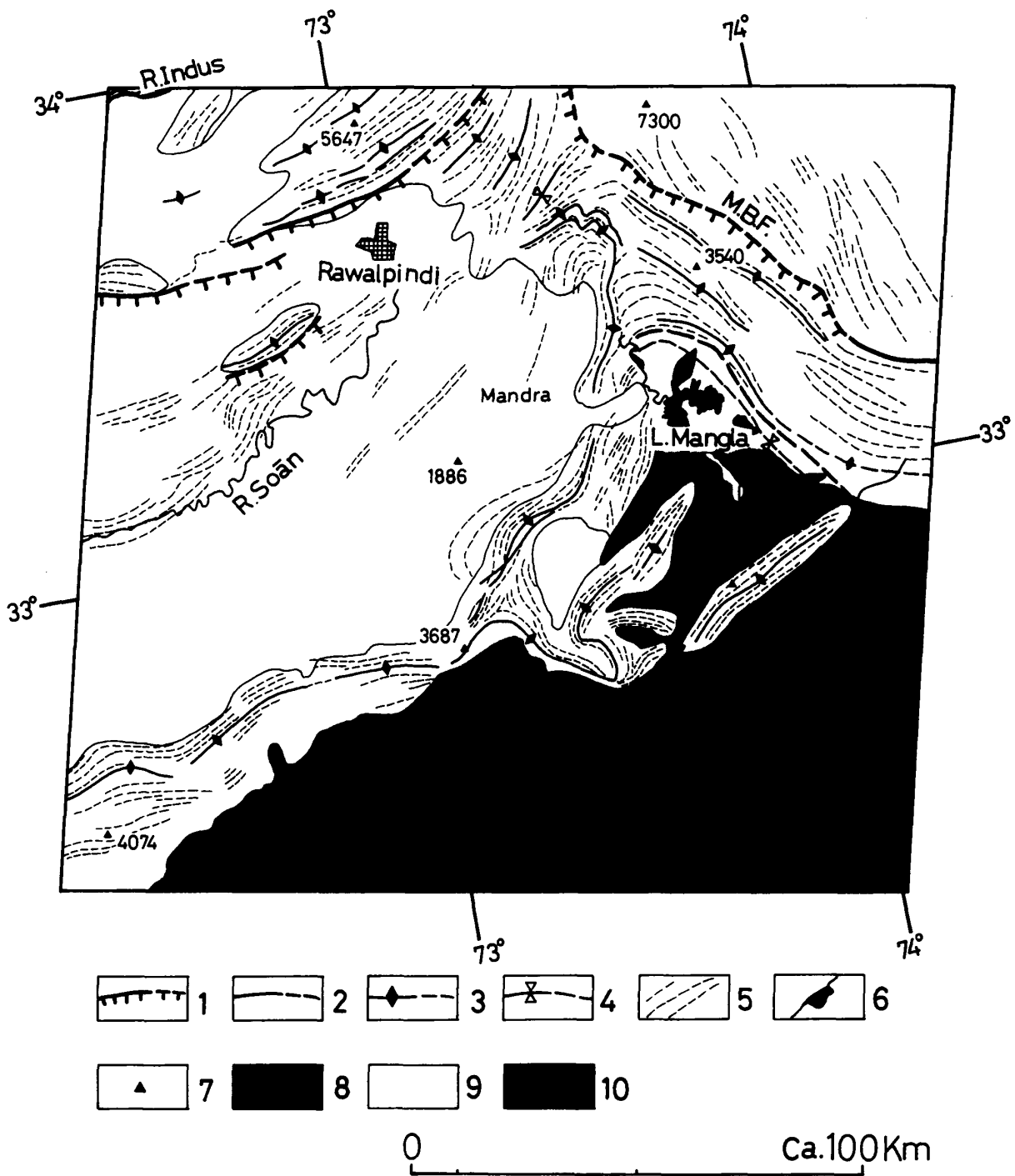


図3 ラワルピンジ周辺の構造判読図

Fig. 3 Structural analysis around Rāwalpindi by the interpretation of Landsat image

1. 活断層 2. 地質断層 3. 背斜軸 4. 向斜軸(以上1~4中の破線部は推定)
 5. 層理面 6. 内水面 7. 標高点(フィート) 8. 沖積平野 9. 構造平野 10. 先カンブリア系の露出範囲

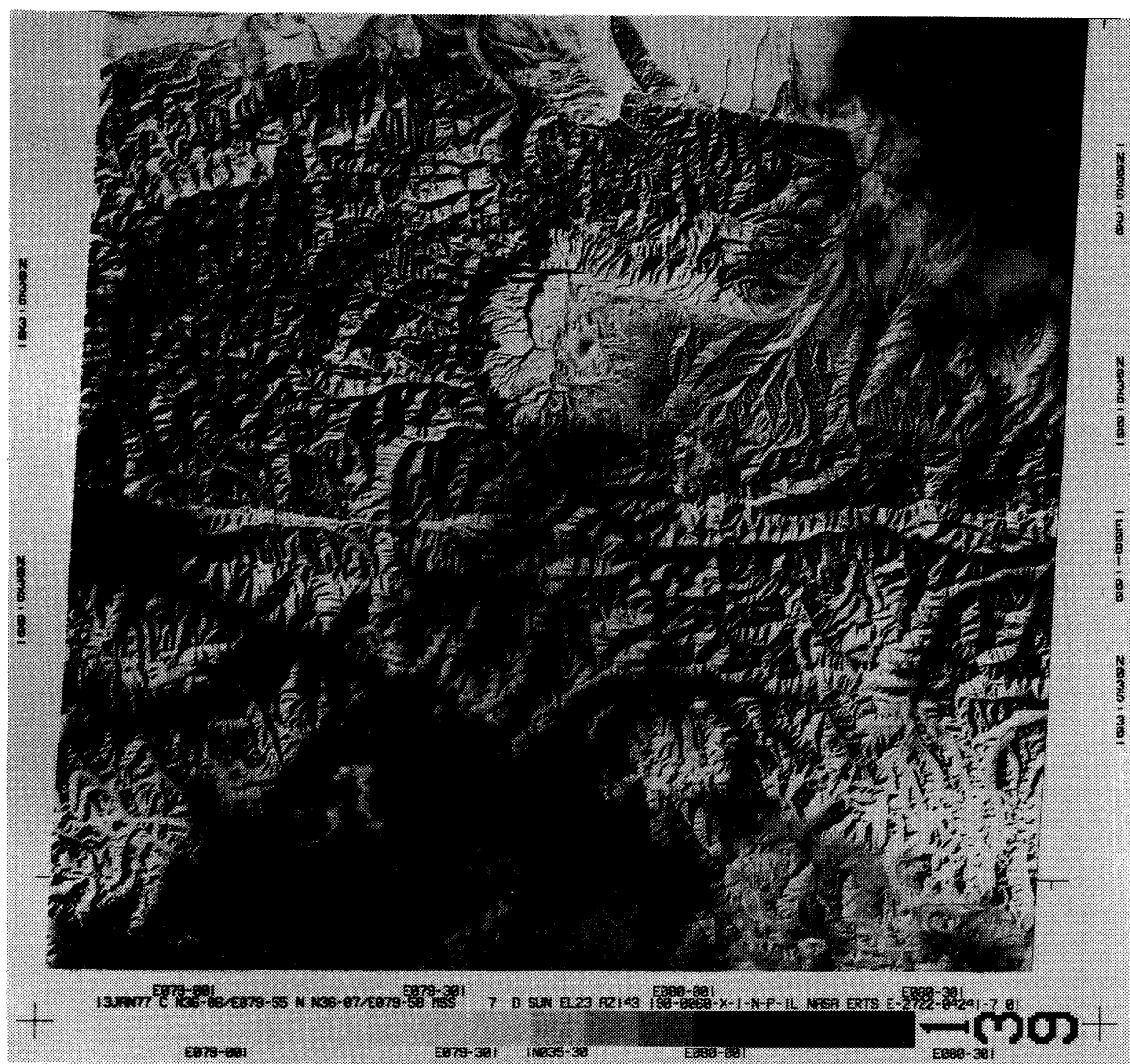


写真4 アルチンター断層西部のランドサット映像

Photo 4 Landsat image(E·2722-04241-7)of the western part of Altyn tagh fault

写真中央を西北西～東南東方向に走るのがアルチンター断層である。東部でこの断層に連続するカンスー断層と合わせると、総延長は2500kmを超えるとされる。

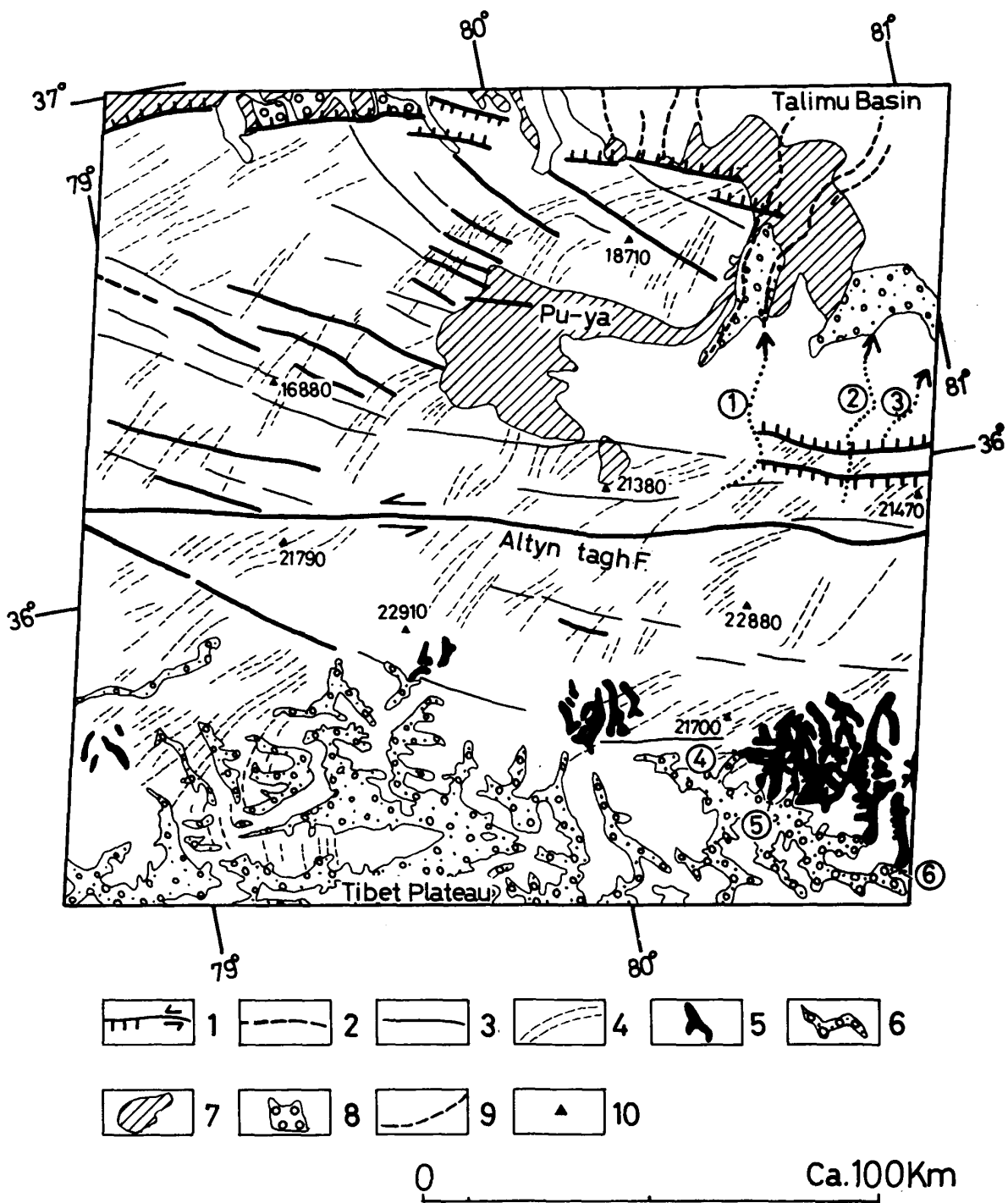


図4 アルチンター断層西部の構造判読図

Fig. 4 Structural analysis of the western part of Altyn tagh fault by the interpretation of Landsat image

1. 活断層 2. 推定活断層 3. 地質断層 4. 層理面 5. 氷河 6. 氷成～融水流水堆積物 7. ペディメント 8. 段丘 9. ワジ 10. 標高点(フィート)

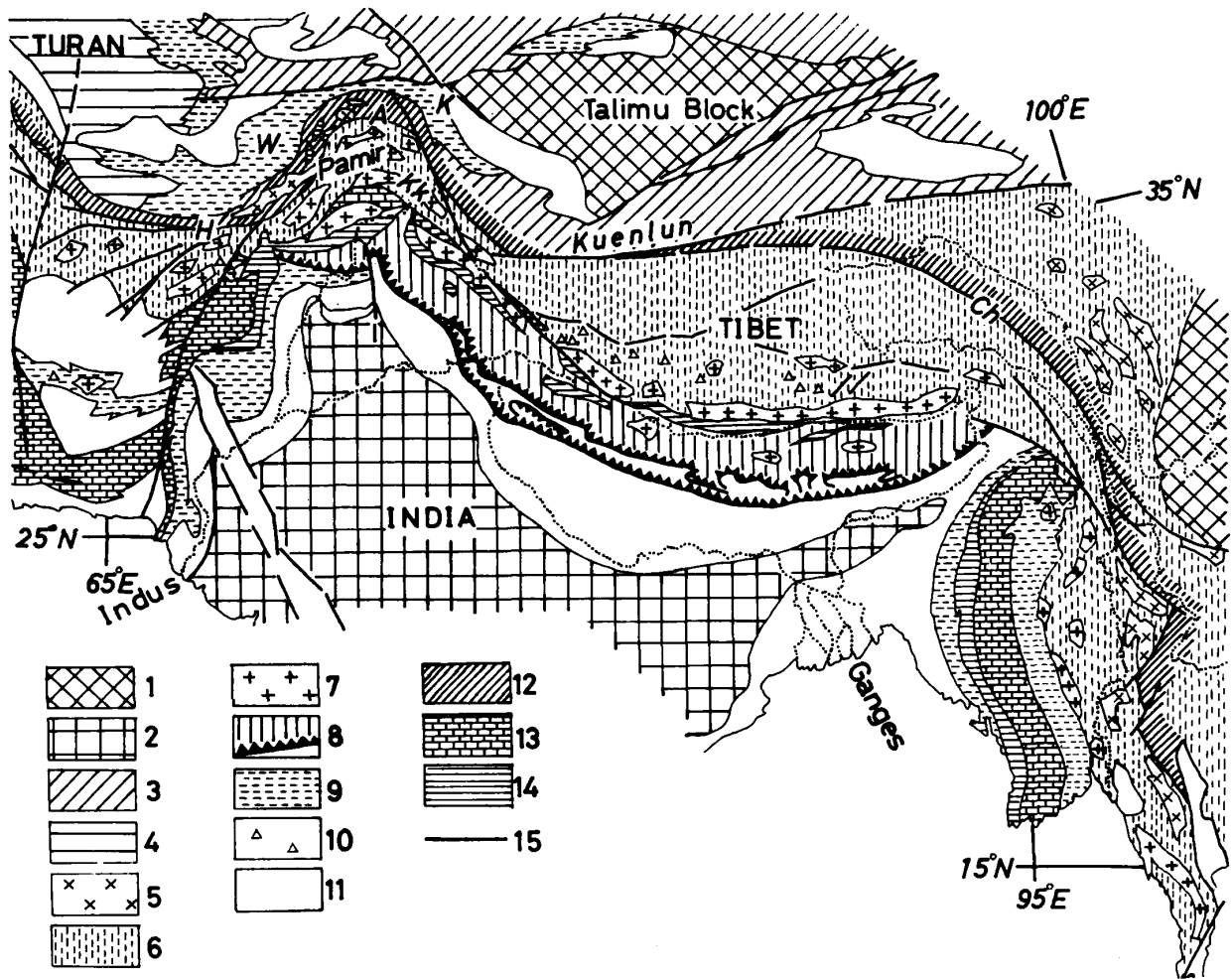


図5 中央～西アジアの模式構造図 (Stöcklin, 1980による)

Fig. 5 Tectonic sketch map of South-Central Asia (after Stöcklin, 1980)

1. アジアの大陸核(先カンブリア系) 2. ゴンドワナ大陸(先カンブリア系)とデカントラップ 3. ヘルシニア褶曲帯 4. ツラン(Turan)台地 5. ヘルシニア—インドシナ花崗岩 6. 中生代の褶曲帯 7. キンメリアン—アルパイン花崗岩 8. ヒマラヤ褶曲帯 9. 後期アルプス前縁褶曲帯 10. 新第三紀～第四紀火山 11. アルプス前縁凹地および山間盆地 12. 古テチス・サチュアゾーン 13. 新テチス・サチュア内帯 14. 新テチス・サチュア外帯 15. 主な構造線



写真 ヒマラヤ山脈とその周辺のランドサット画像のモザイク (Landsat mosaic of the Himalayas and its surroundings)

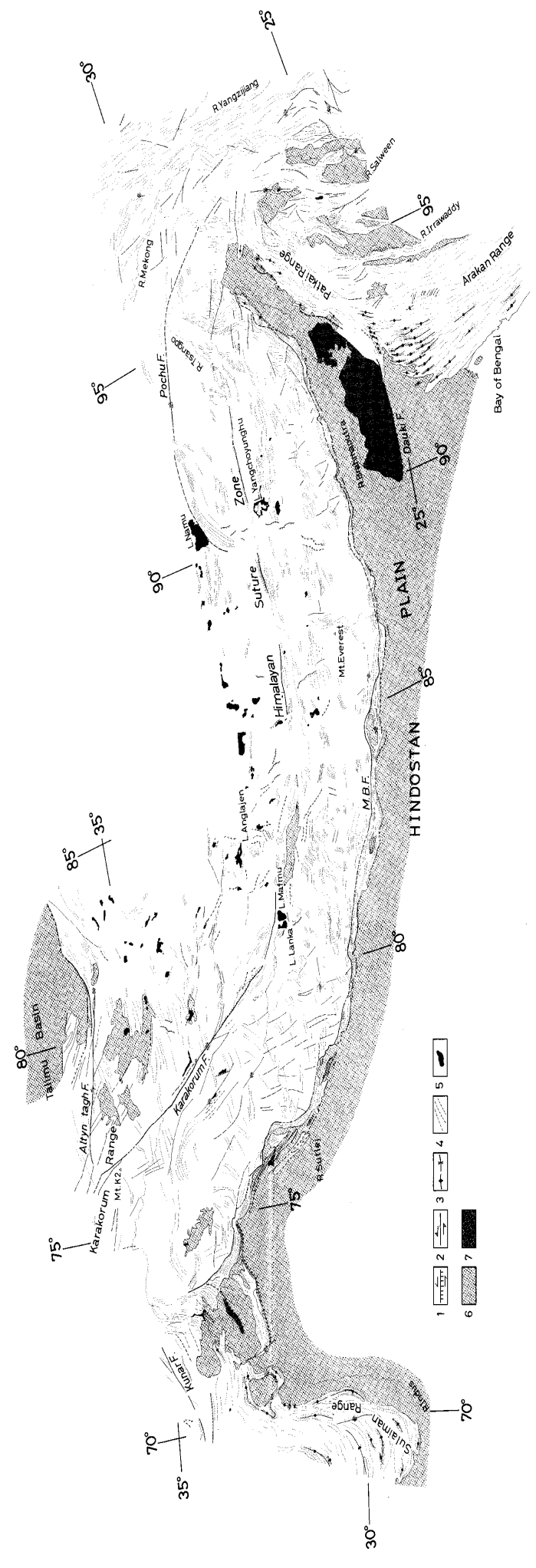


図6 ランドサット画像より作成したヒマラヤ山脈とその周辺地域の構造制図区(内地ほか, 1982)
 Fig. 6 Structural maps of the Himalayas and its surroundings by the interpretation of Landsat images (Kobayashi et al., 1982)
 1. 活断層および断層帯 (Active faults and fault zones) 2. 地質断層帯および不明なリニアメント (Geological fault zones and unknown linear features) 3. 褶曲軸 (Fold axes) 4. 扇形地 (Fan-shaped areas) 5. 盆地 (Basins) 6. 平原 (Plains) 7. ヒマラヤ山脈前縁に分布する先カンブリア系 (Precambrian rocks distributed along the Himalayan foreland)