

極東ネパールヒマラヤのスラスト・ テクトニクスと地殻短縮

Thrust Tectonics and Crustal Shortening of the Far-Eastern Nepal

在田一則*・D.D. Schelling**

Kazunori Arita & Daniel D. Schelling

Abstract: The eastern Nepal, like other areas in the Himalayan orogenic arc, is made up of three distinct thrust-bound tectonic packages: from north to south and from structurally higher to lower positions, the Higher Himalayan (crystalline) thrust sheet, the Lesser Himalayan (metasediment) thrust package and Sub-Himalayan imbricate zone. The eastern Nepal is underlain by a great detachment fault (Main Detachment Fault), which lies at about 6 km beneath the Sub-Himalaya and plunges gently northward to a depth of 25 km beneath the Higher Himalaya. The Higher Himalayan thrust sheet, mainly composed of sillimanite- or Kyanite-bearing gneisses and orthogneisses, has been thrust over the metasediments of the Lesser Himalayan thrust package along the Main Central Thrust. The Lesser Himalayan thrust package, consisting of various metasedimentary rocks metamorphosed up to the garnet zone, shows a hinterland-dipping duplex, with the Main Central Thrust and the Main Detachment Fault as the roof and floor thrusts, respectively. The Sub-Himalayan imbricate zone, consisting of Miocene to Pleistocene molasse sediments, displays an emergent imbricate fan geometry between the Main Boundary Thrust on the north and the Main Frontal Thrust on the south, both of which are splay thrusts off of the Main Detachment Fault. Balanced and restored structural sections across the far-eastern Nepal suggest that total north-south horizontal tectonic shortening across the Higher, Lesser and Sub-Himalayas has been on the order of 185 km to 245 km, or 59% to 65%. Thrust activities, except for an out-of-sequence thrust, have propagated foreland-ward (southward) with time, resulting in piggy-back geometry of thrusting. The upheaval of the Himalayan mountains which has also propagated from north southward with time may be related to the crustal ramping caused by sequential thrusting.

1992年1月5日受付. 1992年3月30日受理.

*北海道大学理学部地質学鉱物学教室.

**Earth Science and Resources Institute, The University of South Carolina, USA.

はじめに

ヒマラヤはインド大陸とユーラシア大陸の衝突による典型的な大陸-大陸衝突帯と考えられている。最近の古地磁気学などの研究 (Patriat & Achache, 1984) によると、両大陸の衝突は50Ma頃には始まり、その後の大陸地殻の短縮は2,600±900kmにたつるとされている。つまり、インド大陸は衝突後ユーラシア大陸に対して2,600km北上している。Gansser (1964) はヒマラヤ地域の地殻短縮は400km程度と推定しているが、残り2,000kmをこえる移動量を収容するために、①インドプレートの地殻が1,000km以上もユーラシアプレートの下にもぐり込み、チベット高原の北の方にまでたつているという考え (Powell & Conaghan, 1973)、②比較的熱く、柔らかいチベットが全体的に南北短縮し、それだけインドが北上し、またチベットの地殻が厚くなったとする考え (Dewey & Burke, 1973)、さらに③アルチンターク断層などのチベット高原やその北方に多数存在する大規模な水平ずれ断層にしめされているように、インド大陸の押しつけによりチベット高原などが東に押しだされ (extrusion tectonics)、その分だけインドが北上したとする考え (Molnar & Tapponnier, 1975) などがある。いずれにせよ、ヒマラヤ褶曲-衝上帯における地殻短縮量を明

確にし、また短縮速度を推定することは重要な問題である。

ヒマラヤでは、山脈に平行にその全域にわたって追跡できる構造線 (断層) がいくつか知られている。北から南へ、インダス-ツァンボ縫合帯、カンマー衝上断層 (康馬: Kangmar Thrust, 以下KTと記す)、主中央衝上断層 (Main Central Thrust, 以下MCTと記す)、主境界衝上断層 (Main Boundary Thrust, 以下MBTと記す) および主前縁衝上断層 (Main Frontal Thrust, 以下MFTと記す) あるいはヒマラヤ前縁断層 (Himalayan Frontal Fault) である。このうち、インダス-ツァンボ縫合帯は二つのプレート間のプレート境界断層 (inter-plate fault) であるが、他はインドプレートのプレート内断層 (intra-plate fault) である。KTについてはよくわかっていないが、これらの断層の活動時期は南へ新しくなり、MFTは現在も活動的である。いっぽう、最近の地震学的研究 (Seeber & Armbruster, 1981) によると、インド北部からヒマラヤさらにチベットへとしだいに深くなる比較的浅い (10-20km) 地震面が推定されており、インドプレート北縁の上述のプレート内衝上断層はそのデコルマ (decollement) から派生していると考えられる (Fig. 1)。このように、ヒマラヤはテチス海が消滅し、インダス-ツァンボ縫合帯が活動を終了した後、ユーラシ

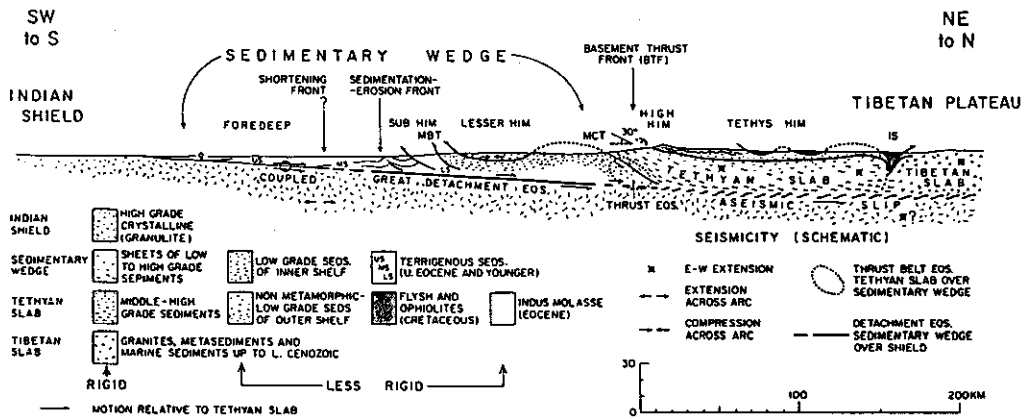


Fig. 1 Himalayan continental subduction model with a basement detachment dipping gently northward (Seeber & Armbruster, 1981).

アプレートの一部となったインド大陸の北縁に位置する前縁褶曲—衝上断層帯 (foreland fold—thrust belt) と理解できる。

いっぽう、1970年代以降、バランス地質断面法 (balanced cross section, Dahlstrom, 1969, 1970; Schelling, 1991ほか) による地質断面の解析は圧縮場や造山帯の地質構造の解析に有効であることが認識され、それらの地域のデコルマの深さや形状の推定および褶曲—衝上帯における地殻短縮量の推定に利用されている (Butler, 1983ほか)。

本論では、ヒマラヤ弧の中央に位置し、地形的にもまた地質学的にもヒマラヤの典型といえるネパールヒマラヤの極東部を例にとり、MCTを中心としたスラストテクトニクスとバランス法による地質断面復元から推定されるヒマラヤの地殻短縮量について検討する。なお、本論の内容の詳細については、Schelling & Arita (1991) を参照されたい。

東部ネパールヒマラヤの地質概略

東部ネパールヒマラヤはヒマラヤ弧 (Himalayan arc) の中央部に位置し、それぞれ断層で区切られる4つの構造ユニット、すなわち北から南へ、テーチスヒマラヤ帯 (Tethys Himalaya)、高ヒマラヤ帯 (Higher Himalayan crystalline thrust sheet)、低ヒマラヤ帯 (Lesser Himalayan metasediment thrust package) およびサブヒマラヤ帯 (Sub-Himalayan imbricate zone) にわけられる。これらのユニットは基本的には、北落ちの衝上断層によって境され、したがって、北側が構造的に上位になる。テーチスヒマラヤ帯は北上するインド大陸北縁のテーチス海に堆積した浅海性堆積物からなる。下位の高ヒマラヤ帯とは本来不整合で接していたと考えられるが、最近の東ネパール北方のチベットでの調査によると、両者の関係は正断層とされている (Burg & Chen, 1984)。この正断層はテーチス堆積物とその基盤であった変成岩類の間の不整合面をすべり面として発生したか、あるいはその面にそって形

成された衝上断層面を利用して再活動した中新世以降の重力性正断層と考えられる。高ヒマラヤ帯は中～高変成度の変成岩からなり、北部の高ヒマラヤ変成岩類 (Higher Himalayan crystallines) とそれらの南へのナップあるいはクリッペである低ヒマラヤ変成岩類 (Lesser Himalayan crystallines) あるいはマハバラート変成岩類 (Mahabharat crystallines, おもにマハバラート山脈に分布) からなる。低ヒマラヤ帯は低ヒマラヤ変堆積物から、また、サブヒマラヤ帯はモラッセであるシワリク堆積物からなる (Fig. 2)。

高ヒマラヤ変成岩類およびマハバラート変成岩類

高ヒマラヤ変成岩類は北側の地形的に高い部分を占め、高ヒマラヤ帯の基部に位置する。おもに、先カンブリア紀の岩石を原岩とする中～高変成度の砂質あるいは泥質の変成岩および正片麻岩からなり、変珪岩や石灰質片麻岩および少量の角閃岩をふくむ。北部には厚さ約2,000mの新第三紀優白質花こう岩が珪線石片麻岩中に貫入している (Fig. 2)。同じような花こう岩は本地域から西へマカルー、エベレストにかけて広く分布している (Hashimoto et al., 1973; Schelling, 1989)。高ヒマラヤ変成岩類の基底は変珪岩をとともなう藍晶石片麻岩からなり、珪線石はみられない (Fig. 3)。本地域北部では、高ヒマラヤ変成岩類の厚さは新第三紀優白質花こう岩をふくめると、30kmをこえる。高ヒマラヤ変成岩類はMCTを間に南の低ヒマラヤ変堆積物をおおっている。後期の構造である南北性のゆるい褶曲のためにMCTは大きくうねり、本地域の東部では、南に大きく張り出して後述のMBTのすぐ側にまでたっしている (Fig. 2)。それにともない、高ヒマラヤ変成岩類は南におおきく張りだして、ナップ構造やクリッペをつくり、マハバラート変成岩類 (あるいは低ヒマラヤ変成岩類) とよばれている。マハバラート変成岩類は東のシッキムヒマラヤのダージリン片麻岩類 (Gansser, 1964) の延長である。同様のナップ構造は中央ネパールのカトマンズ周辺にもみられ、また、同様の高変成度

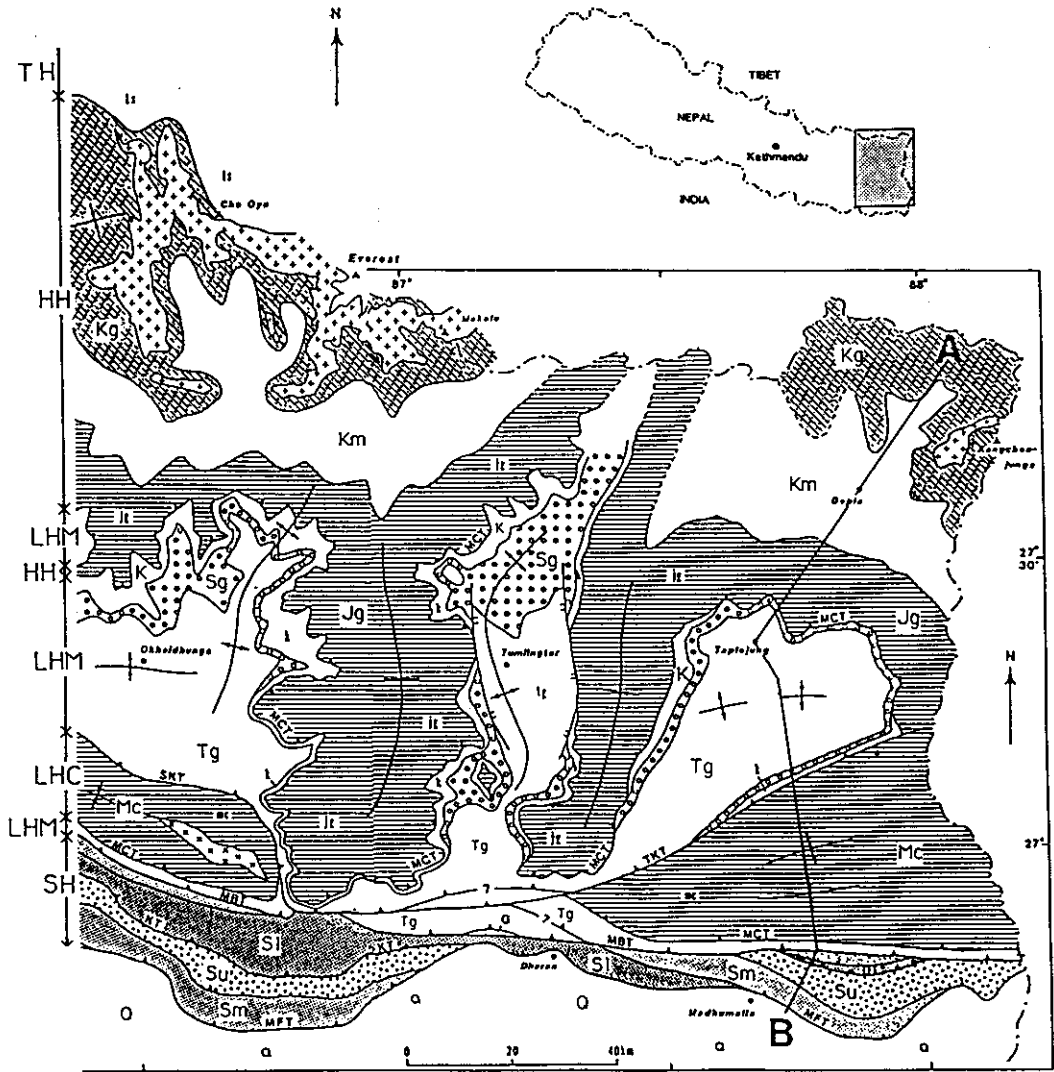


Fig. 2 Simplified geological map of eastern Nepal.

TH: Tethys Himalaya, HH: Higher Himalayan crystalline thrust sheet, LHM: Lesser Himalayan metasediment thrust package, LHC: Lesser Himalayan crystalline thrust sheet (Mahabharat crystalline nappe), SH: Sub-Himalayan imbricate zone, ts: Tethyan sediments, Kg: Kangchenjunga paragneisses, Km: Kangchenjunga migmatites, Jg: Jumbesi Group, K: Khare phyllites, Sg: Sisne Khola augen gneisses, Tg: Taplejung Group, Mc: Mahabharat crystallines (Lesser Himalayan crystallines), Sl: Lower Siwalik Group, Sm: Middle Siwalik Group, Su: Upper Siwalik Group, Q: Ganges alluvium, MCT: Main Central Thrust, MBT: Main Boundary Thrust, MFT: Main Frontal Thrust, TKT: Tamar Khola Thrust, SKT: Sun Kosi Thrust, DT: Dabmai Thrust, KT: Kamala Thrust. A-B: Cross line for section on Figs. 3, 4 and 5.

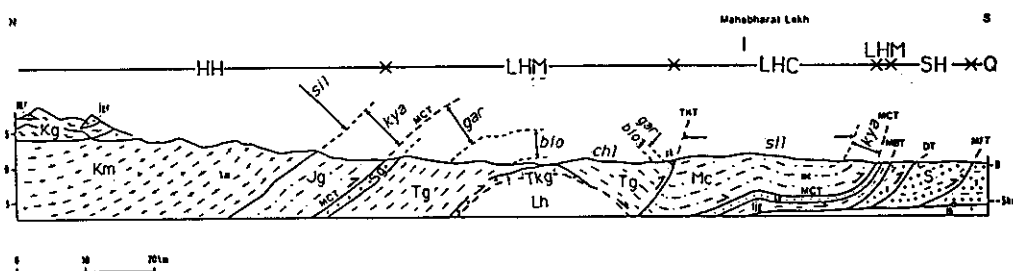


Fig. 3 Geologic and metamorphic cross section of far-eastern Nepal.

Line of section A-B on Fig. 2.

HH: Higher Himalayan crystalline thrust sheet, LHM: Lesser Himalayan metasediment thrust package, LHC: Lesser Himalayan crystalline thrust sheet (Mahabharat crystalline nappe), SH: Sub-Himalayan imbricate zone, Kg: Kangchenjunga para-gneisses, Km: Kangchenjunga migmatites, Jg: Jumbesi Group, Sg: Sisne Khola augen gneisses, Tg: Taplejung Group, Tkg: Tamar Khola granite, Lh: unknown Lesser Himalayan rocks, Mc: Mahabharat crystallines (Lesser Himalayan crystallines), S: Siwalik Group, MCT: Main Central Thrust, MBT: Main Boundary Thrust, MFT: Main Frontal Thrust, TKT: Tamar Khola Thrust, DT: Dabmai Thrust, sil: sillimanite, kya: kyanite, gar: garnet, bio: biotite, chl: chlorite.

岩石からなるクリッペは西ネパールにもみられる。これらのナップやクリッペはヒマラヤ主稜部の前山(マハバラート山脈, Mahabharat Lekh)を構成している(Figs. 3 and 4a)。本地域のマハバラート変成岩類は北部の高ヒマラヤ変成岩類とほぼ同じ岩石からなるが、厚さがうすく、南端部でもっともうすく約5 kmである(Figs.3 and 4a)。藍晶石-珪線石アイソグラドはマハバラート変成岩類でも、またナップの根である高ヒマラヤ変成岩類でもMCTの上5~7 kmのところ位置する(Fig. 3)。したがって、東部ネパールでは、藍晶石-珪線石アイソグラドは南北65km以上にわたってMCTや変成岩の片理にほぼ平行に分布する。

低ヒマラヤ変堆積物

低ヒマラヤ変堆積物は中央~西部ネパールではミッドランド変堆積物とよばれ(Hashimoto et al., 1973)、ヒマラヤ主稜部とマハバラート山脈の間の比較的低い地域(ミッドランド)に広く分布する。しかし、東部ネパールでは、高ヒマラヤ帯の変成岩類におおわれ、中央部にフェンスター(tectonic window)として露出す

るほか、南部でMCTとMBTにはさまれてせまく分布するのみである(Fig. 2)。これらの変堆積物は石英砂岩・千枚岩・黒色~緑色片岩・石灰岩・珪岩からなり、少量の角閃岩をともしなう。これらの岩石は中央~西部ネパールに広くみられる先カンブリア紀のミッドランド変堆積物に対比される。さらに、中央ネパールでウレリ(Ulleri)眼球状片麻岩(Le Fort, 1975; Arita, 1983)、またシッキムヒマラヤではLingtse眼球状片麻岩(Sinha-Roy, 1982)とよばれている特徴的なマイロニティック眼球状片麻岩(Sisne Khola augen gneisses)がMCTにそって分布する。低ヒマラヤ変堆積物は基本的には複背斜構造をなしているが、全体的な南北性のゆるい褶曲構造と重なって、ドーム構造(Tamar Khola Dome)をしている(Figs.2 and 4)。

低ヒマラヤ変堆積物はいわゆる逆転変成作用(inverted metamorphism)をしめし、構造的に下位であるドーム構造の中心部では非変成あるいは弱変成であるが、構造的に上位の北あるいは南へ変成度は上昇し、MCTちかくではザクロ石が出現する(Fig. 3)。ザクロ石帯はドー

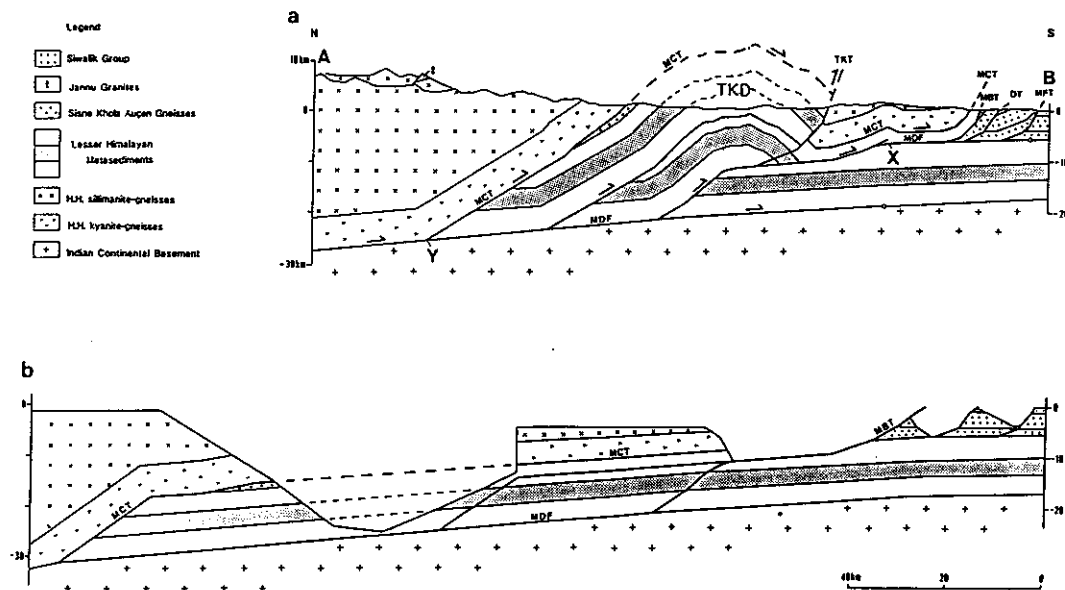


Fig. 4 Balanced, deformed-state (a) and restored (b) structural cross sections across the far-eastern Nepal with the Lesser Himalayan thrust package consisting of a hinterland-dipping duplex ((Schelling and Arita, 1991).

Line of section A-B on Fig. 2.

MDF: Main Detachment Fault, MCT: Main Central Thrust, MBT: Main Boundary Thrust, MFT: Main Frontal Thrust, TKT: Tamar Khola Thrust, TKD: Tamar Khola Dome.

ム構造の北側ではMCTの下位で約6.5km, 南側では3.5kmの厚さがある。いっぽう、マハバラート山脈の南の低ヒマラヤ変堆積物帯では、ザクロ石帯の厚さはわずか数百mである (Fig. 3)。このように、東部ネパールでは、MCTの下位に出現する低ヒマラヤ変堆積物のザクロ石帯は南へうすくなる。

MCT下位の低ヒマラヤ変堆積物はマイロニティック眼球状片麻岩などにみられるようにいちじるしく、広範囲に、変形している。また、MCT直上の片麻岩も強く変形している。それらにみられる非対称小褶曲構造、S-Cファブリック、プレッシャーシャドー、回転したザクロ石、鉱物の伸張りニエーションなどの変形構造はいずれも北北東-南南西の運動方向と上盤が南へ衝上する運動センスをしめしている。

シワリク堆積物

低ヒマラヤ変堆積物はMBTを境にサブヒマラヤ帯のシワリク堆積物に衝上している。サブヒマラヤ帯を構成するシワリク堆積物は中新世～更新世の砂岩・頁岩・礫岩からなるモラッセ堆積物である。これらは典型的な上方粗粒化傾向をしめし、ヒマラヤのほかの地域 (Hagen, 1969; Schelling et al., 1991) と同様に、泥岩や頁岩を主体とした下部層、珪線石や藍晶石をふくむ片麻岩を礫としてもつ礫岩層をときにはさむ砂岩からなる中部層、ときに径20cmの礫をふくむ礫岩を主体とする上部層にわけられる。本地域では全層厚約6kmである。中～下部シワリク層はMFTによって南のガンジス平原の現河床堆積物に衝上している。MFTは現在もっとも活動的な衝上断層である (Nakata, 1972)。

東部ネパールヒマラヤのバランス地質断面

バランス地質断面法はカナダロッキー山脈で生まれ、その後各地の前縁褶曲—衝上断層帯に適用され、圧縮構造帯の構造解析や構造の復元に有効であることが立証されている。最近では、伸長堆積盆の地質構造復元にも応用されている。バランス法では、褶曲や断層のような構造運動の前後で岩層の体積は変化しないという仮定に立っている (Dahlstrom, 1969)。したがって、対象の岩石は原則として非変成岩であり、変成岩の場合は緑色片岩相程度までといわれている (Elliot, 1983)。ヒマラヤは、東部ネパールヒマラヤをふくめ、岩相・変成度がヒマラヤ全体にわたってきわめて一様であることが特徴で、高ヒマラヤ帯の岩石は角閃岩相にたつする変成作用をこうむっているが、本論でももにあつかっている低ヒマラヤ帯の岩石は緑色片岩相より低い変成作用を受けている (Fig. 3)。また、高ヒマラヤ帯や低ヒマラヤ帯において現在みられる断層や褶曲などの基本的な構造は主要な変成作用の後のものであり、合理的な復元断面図を作成することが可能である。さらに、ネパール全域にわたって、MCTがその上下の高ヒマラヤ帯や低ヒマラヤ帯の岩石の片理とほぼ平行であること (Hashimoto et al., 1973; Le Fort, 1975; Stöcklin & Bhattarai, 1982など) から高ヒマラヤ帯の岩石の片理によってMCTやその下の低ヒマラヤ帯の構造を決定することが可能である。

極東ネパールのバランス地質断面図 (a) とバランス法による復元地質断面図 (b) を Fig. 4 にしめす。低ヒマラヤ帯はMCTおよびMain Detachment Fault (以下MDFと記す) とその派生断層であるTamar Khola Thrust (以下TKTと記す) をそれぞれルーフスラスト (roof thrust) およびフロアスラスト (floor thrust) とする後背地 (北) へ傾斜するデュプレクス (duplex) を構成している。MDFはデコルマであり、計算によるとその深さはマハバラート山脈の下では6~10km、北へ深くなり、Tamar Khola Dome北方の高ヒマラヤ帯では20~25km

となる (Schelling & Arita, 1991)。シワリク山脈の下では、MDFは5.5km~6kmの深度にある。インド北部のガンジスベーズンでの地球物理的調査やボーリングデータによると (Sastri et al., 1971; Rao, 1973)、シワリク堆積物とその基盤との不整合は地下数kmにあって、北へ数度で傾斜しており、シワリク堆積物は南へうすくなる楔状の形態をしている。サブヒマラヤ帯におけるMDFはこの不整合面に対応すると考えられる。MBTとMFTの間にはいくつかの衝上断層が認められ、Dabmai Thrust (DT) やKamala Thrust (KT) はその代表である (Figs. 2 and 4a)。これらの衝上断層を境に下部シワリク層が南側の上部シワリク層 (一部中部シワリク層) に衝上している。同様の衝上断層は中央ネパールでは中央チュリア衝上断層 (Central Churia Thrust) とよばれており (Tokuoka et al., 1986)、ネパール全体に分布すると予想される。MBTやMFTあるいはDTやKTなどのサブヒマラヤ帯の衝上断層はMDFから派生したsplay thrustであり、サブヒマラヤ帯はこれらの衝上断層によって、全体としてimbricate fanを構成している。これらの低ヒマラヤ帯やサブヒマラヤ帯内の衝上断層は、TKTをのぞき、時代とともに北から南へ順次形成している。TKTはMCTを切り、Dharanの西約45kmにあるbranch lineでMBTと合体している (Fig. 2)。したがって、TKTもMBTなどと同様にKDFから派生した衝上断層である。同じようにMDFから派生したbreach thrustはさらに西方にも認められ、Sun Kosi Thrust (Fig. 2) とよばれている (Schelling, 1989)。TKT背後のTamar Khola DomeはMDFにそった衝上運動によってつくられたランプアンチクライン (ramp anticline) である。マハバラート山脈の下では、クリップをつくる高ヒマラヤ帯の岩石 (マハバラート変成岩類) の構造から、MDFが低ヒマラヤ変堆積物の上部を切り、シワリク堆積物の基盤のレベルまで切りあがっていると推定される。マハバラートクリップの向斜構造はこのMDFのランプに起因している (Fig. 4aの点X付近)。

このような地殻構造に対して、もう一つの地殻構造モデルが考えられる (Fig. 5). このモデルによると、Tamar Khola Dome 付近では厚さ12km 前後の低ヒマラヤ変堆積岩類の下にはほぼ同じ厚さのインド大陸基盤岩 (高ヒマラヤ変成岩類に対応) が存在する. 従来のおおきのヒマラヤの地殻断面図はこの考えによっている (例えば, Gansser, 1980). しかし, Fig. 5において MDF と TKT の branch line である点 Y の南での全地殻短縮量は45km と計算されるのに対して, 北側での MDF にそう運動量は30km にみえない. したがって, Fig. 5 の断面はバランスしていない. バランス法による断面では (Fig. 4 a), 低ヒマラヤ帯は二つのホースからなるデュープレクス構造をなしている. Gansser (1964) によると, 本地域の東隣のシッキムヒマラヤの低ヒマラヤ帯において, 非変成の Gondwana 相当層が岩相・変成度から低ヒマラヤ変堆積岩類に対比される岩石を衝上断層によっておっており, デュープレクスモデルが支持される.

前述のように, 衝上運動の活動時期は TKT

をのぞき, 時とともに北から南へ新しくなっている. これらの衝上断層の中で, MCT の活動はもっともふるく, その運動量も最大である. MDF と MCT の branch line (Fig. 4 a の点 Y) の北側におけるアサイスミックな延性剪断運動 (Fig. 1 を参照) による地殻短縮により, 最初に MCT にそった剪断変形作用をともなった水平すべりあるいは極くゆるい衝上運動を生じた. つづいて, MCT から派生した MDF および MBT が低ヒマラヤ帯のデュープレクス構造をつくり, その後に MCT を切る out-of-sequence thrust として TKT が形成された. 引き続き MDF にそう南への衝上運動により, サブヒマラヤ帯の衝上断層が MDF から順次南へ派生した. このように, 全体として, 衝上断層の活動が時とともに南へおよぶ piggy-back thrust sequence をしめしている. MCT の衝上断層としての運動は現在では停止していると考えられる. このことは, 高ヒマラヤ帯~低ヒマラヤ帯の地震が MCT と MBT の間の15~30km の深さで発生し, MCT ぞいにはほとんど起こらないことから支持される (Ni & Barazangi, 1984).

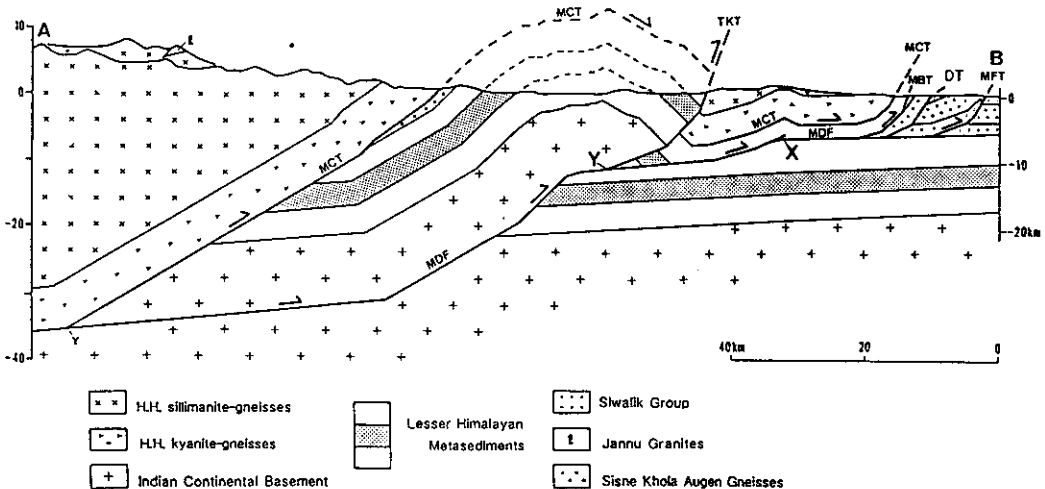


Fig. 5 Nonbalanced structural cross section across the far-eastern Nepal with the Lesser Himalayan thrust package interpreted as a single, unsliced thrust sheet (Schelling and Arita, 1991).

Line of section A-B on Fig. 2.

極東ネパールの地殻短縮量

復元地質断面図 (Fig. 4 b) から明かなように、低ヒマラヤ帯のデュプレクスが形成される前は、高ヒマラヤ帯の変成岩は MCT によって約 140km にわたって低ヒマラヤ帯の岩石をおおっており、極東ネパールにおける MCT にそう地殻短縮量は、最低約 140km が見積られる。しかし、この復元図において侵食された部分 (Fig. 4 b の MBT の北側の部分) を考慮すると、おそらく 175km の短縮が推定される (Schelling & Arita, 1991)。MCT の衝上運動が停止した後、MCT は褶曲や断層により最低約 20km (Fig. 4 b) における MCT と MDF の交点と MCT と復元地表面の交点との水平距離と Fig. 4 a における同様の距離との差) 短縮している。MBT の衝上運動による地殻短縮は 10~20km と見積もられ、またサブヒマラヤ帯内における褶曲や断層による地殻短縮は 15km と計算される (Schelling & Arita, 1991)。したがって、MCT の活動が終了した後の南北方向の総短縮量は 45~55km と計算される。いっぽう、Fig. 4 から求められる MDF およびそれから派生する衝上断層にそう移動量 (Fig. 4 b におけるピンラインから MCT と MDF の交点までの距離と Fig. 4 a における同様の距離との差) は約 70km である。両者の差の 15km ないし 25km は MDF にそう未知の運動あるいは MBT の侵食された部分のものであろう。したがって、極東ネパールのヒマラヤ褶曲-衝上帯における MCT の活動開始以来の南北方向の構造的な地殻短縮量は 185km (140km + 45km) ないし 245km (175km + 70km) の規模になる。ただし、本論では高ヒマラヤ変成岩類にみられる延性流動をしめす褶曲による短縮や高ヒマラヤ帯の北側に広く分布するテーチスヒマラヤ帯における褶曲・断層による短縮は考慮していないので、実際の短縮量はさらに大きいと考えられる。上述の短縮量は 59~65% の短縮率になり、この値はパキスタンの北西ヒマラヤで推定された地殻短縮率の 64% (Butler & Coward, 1989) にほぼ匹敵する。

東ネパールにおける MCT およびその上盤の

高ヒマラヤ帯の岩石の放射年代を総合すると、MCT の活動は 16Ma~25Ma の間にはじまったと考えられる。したがって、MCT の活動開始から現在までの平均地殻短縮速度は年間 7.4mm~15.3mm となる (Schelling & Arita, 1991)。

地殻ランピングと山脈隆起

ヒマラヤの地質学的あるいは地形学的データを総合して考えると、ヒマラヤの山脈隆起は北にはじまり、時とともに南におよんでいる (在田, 1988)。さらに、それらの隆起運動は、時とともに南へその活動場が移動する衝上断層運動と関連しているようにみえる。すなわち、インドスーツァンボ縫合帯の南にはカンマー衝上断層、ヒマラヤ主稜山脈の南には主中央衝上断層、マハバラート山脈の南には主境界衝上断層、シワリク山脈の南には主前縁衝上断層が存在している。このように、ヒマラヤにおいては、衝上断層運動による地殻ランピング (crustal ramping) が山脈隆起の一因として深く関連していると考えられる。また、衝上運動にしめされるような圧縮場の中で、伸長性の構造がみられることも注目される (Sakai, 1985)。主中央衝上断層の背後にあるヒマラヤ主稜部の北には前述のように、南北性の伸長をしめす正断層がみられ、主境界衝上断層の背後にあるマハバラート山脈の北の低ヒマラヤ帯には東西性の正断層がいくつか存在する (Arita et al., 1982; Sakai, 1985)。さらに、主前縁衝上断層の背後にあるシワリク山脈の北にはダン (Dang) とよばれる更新統および完新統からなる盆地が点在する。これらは伸長場における構造盆地である可能性がある。このように、ヒマラヤは前縁褶曲-衝上帯における山脈形成の典型として、興味ある問題を提供している。

文献

- Arita, K., Hayashi, D. and Yoshida, M., 1982: Geology and structure of the Pokhara-Piuthan area, central Nepal. Jour. Nep-

- al Geol. Soc., v.2, Spec. Iss., 5-31.
- Arita, K., 1983: Origin of the inverted metamorphism of the Lower Himalayas, central Nepal. *Tectonophysics*, v.95, 43-60.
- 在田一則, 1988: ヒマラヤはなぜ高い. 青木書店, 東京, 172p.
- Burg, J.P. and Chen, G.M., 1984: Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China. *Nature*, v.311, 219-223.
- Butler, R.W.H., 1983: Balanced cross-sections and their implications for the deep structure of the northwest Alps. *Jour. Struct. Geol.*, v.5, 125-137.
- Butler, R.W.H. and Coward, M.P., 1989: Crustal scale thrusting and continental subduction during Himalayan collision tectonics on the NW Indian plate. In Sengör, A.M.C., ed., *Tectonic Evolution of the Tethyan Region*. Kluwer Academic, Dordrecht, 387-413.
- Dahlstrom, C.D.A., 1969: Balanced cross-sections. *Can. Jour. Earth Sci.*, v.6, 743-757.
- Dahlstrom, C.D.A., 1970: Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bull. Can. Pet. Geol.*, v.18, 332-406.
- Dewey, J.F. and Burke, K.C.A., 1973: Tibetan, Variscan, and Precambrian basement reactivation: products of continental collision. *Jour. Geol.*, v.81, 683-692.
- Elliot, D., 1983: The construction of balanced cross-sections. *Jour. Struct. Geol.*, v.5, 101-115.
- Gansser, A., 1964: *Geology of the Himalayas*. Interscience Pub., 289pp.
- Gansser, A., 1980: The Peri-Indian suture zone. In Aubouin, J. et al., eds., *Geologie des chaines alpines issues de la Tethys*. *Mem. B.R.G.M.*, v.15, 140-148.
- Hagen, T., 1969: Report on the geological survey of Nepal, Vol.1: Preliminary reconnaissance. *Denkschr. Schweiz. Naturf. Gessel.*, v.81, 1-185.
- Hashimoto, S. et al., 1973: *Geology of the Nepal Himalayas*. Saikon Pub. Co., Tokyo, 286pp.
- Le Fort, P., 1975: Himalayas: The collided range. *Am. Jour. Sci.*, v.275-A, 1-44.
- Molnar, P. and Tapponnier, P., 1975: Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, v.189, 419-426.
- Nakata, T., 1972: Geomorphic history and crustal movements of the foot-hills of the Himalayas. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 7th Ser. (Geogr.), v.22, 39-177.
- Ni, J. and Barazangi, M., 1984: Seismotectonics of the Himalayan collision zone: geometry of the underthrusting Indian plate beneath the Himalaya. *Jour. Geophys. Res.*, v.89, 1147-1163.
- Patriat, P. and Achaache, J., 1984: India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. *Nature*, v.311, 615-621.
- Powell, C. McA. and Conaghan, P.J., 1973: Plate tectonics and the Himalayas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.20, 1-12.
- Rao, M.B.R., 1973: The surface geology of the Indo-Gangetic Plains. *Jour. Geol. Soc. India*, v.14, 217-242.
- Sakai, H., 1985: Geology of the Kali Gandaki Supergroup of the Lesser Himalayas in Nepal. *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ.*, Ser. D, Geol., v.25, 337-397.
- Sastri, V.V., Bhandari, L.L., Raju, A.T.R and Datta, A.K., 1971: Tectonic framework and subsurface stratigraphy of the Ganga basin. *Jour. Geol. Soc. India*, v.12, 222-233.
- Schelling, D., 1989: The geology of the Rolwaling and the eastern Nepal Himalaya. Un-

- published Ph. D. dissertation, University of Colorado, 512pp.
- Schelling, D., 1991: 前縁褶曲—衝上帯におけるバランス断面の作成. 構造地質, no.37, 75-87.
- Schelling, D. and Arita, K., 1991: Thrust tectonics, crustal shortening, and the structure of the far-eastern Nepal Himalaya. *Tectonics*, v.10, 851-862.
- Schelling, D., Cater, J., Seago, R. and Ojha, T.P., 1991: A balanced cross-section across the central Nepal Siwalik Hills: Hitauda to Amlekhganj. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. IV*, v.23, 1-9.
- Seeber, L. and Armbruster, J.G., 1981: Great detachment earthquakes along the Himalayan arc and long-term forecasting. In *Earthquake Prediction - An International Review*, Maurice Ewing Series 4, American Geophysical Union, 259-277.
- Sinha-Roy, S., 1982: Himalayan Main Central Thrust and its implications for Himalayan inverted metamorphism. *Tectonophysics*, v.84, 197-224.
- Stöcklin, J. and Bhattarai, K. D., 1982: Photogeological map of part of central Nepal, scale 1/100,000. Dept. Mines and Geol., Kathmandu, Tehran Maqshah Offset Press, Iran.
- Tokuoka, T., Takayasu, K., Yoshida, M. and Hisatomi, K., 1986: The Churia (Siwalik) Group of the Arung Khola area, west central Nepal. *Mem. Fac. Sci., Shimane Univ.*, no.20, 135-210.