

ヒマラヤの上昇と断層運動に関する熱放射年代学的研究 (予報)

在 田 一 則* 大 平 寛 人** 板 谷 徹 丸***
松 田 高 明*** 高 木 秀 雄****

Isotopic Geochronological Study on Uplift and Thrust Tectonics of the Himalaya

Kazunori ARITA *, Hiroto OHIRA **, Tetsumaru ITAYA ***,
Takaaki MATSUDA **** and Hideo TAKAGI *****

1. はじめに

ヒマラヤ・チベット山塊の上昇が、我が国を含む東アジアの新第三紀以降の気候変動に根本的な影響を与えていることは周知のことである。にもかかわらず、ヒマラヤの上昇過程の具体的なことはほとんどわかっていない。いっぽう、ヒマラヤは大陸衝突型造山帯の典型と考えられている。北上するインド大陸が約 5,000 万年前にユーラシア大陸に衝突し、両者の間にあったテチス海が消滅したが、その後もインド大陸の北上は続いた。そのため、インド大陸北縁に地殻規模の衝上断層群が形成された。ヒマラヤはその衝突前縁褶曲 衝上断層帯 (frontal fold-and-thrust belt) である。チベット高原ではアイソスタシは成立しているが、ヒマラヤでは成り立っていない。アイソスタシからみると、ヒマラヤは 2,000 m 高すぎるといわれている (河野, 1975)。このヒマラヤの高すぎる高

度は、現在も約 5 cm/年 で作用しているインドプレートの北への移動 (圧縮力) に起因していることは間違いない。しかし、その上昇が、脆性破壊面 (衝上断層) にそう隆起運動によるのか、あるいは弾性的な地殻が圧縮力によって撓むことによるのかは、はっきりしていない。

本研究計画は、ヒマラヤの上昇過程、上昇速度および上昇機構を、閉鎖温度の比較的低いフィッシュトラック法や K-Ar 法による放射年代学的検討によって明らかにすることを目的とする。この目的のために、2001 年 10 月 14 日から 11 月 13 日にかけて、中央ネパール、カトマンドゥ地域の主に下記の 3 ルートで地質調査と岩石試料採集を行った。

採集した岩石試料の室内実験は現在進行中であるが、ここでは調査地域の地質、地質構造および問題点などを報告する。

* 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

** 島根大学総合理工学部地球資源環境学科

*** 岡山理科大学自然科学研究所

**** 熊本大学理学部地球科学科

***** 早稲田大学教育学部地球科学科

* Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

** Department of Geoscience, Faculty of Science and Engineering, Shimane University

*** Research Institute of Natural Sciences, Okayama University of Sciences

**** Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kumamoto University

***** Department of Earth Sciences, School of Education, Waseda University

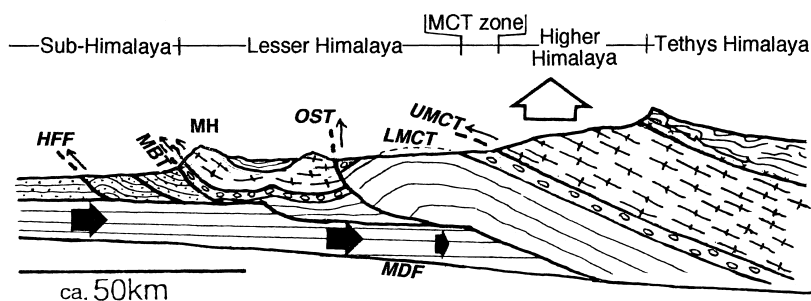


図 1 中央ネパール、カトマンドゥ付近の南北模式地質断面図。

HFF: ヒマラヤ前縁断層, MBT: 主境界衝上断層, LMCT: 下部主中央衝上断層, UMCT: 上部主中央衝上断層, OST: アウトオブシーケンススラスト, MDF: 主ディタッチメント断層, MH: マハーバーラト山脈

Fig. 1 A schematic geological cross-section of the Kathmandu area in central Nepal. MFF: Himalayan Frontal Fault, MBF: Main Boundary, LMCT: Lower Main Central Thrust, UMCT: Upper Main Central Thrust, OST: Out-of-Sequence Thrust, MDF: Main Detachment Fault, MH: Mahabharat Lekh

II. カトマンドゥ周辺の地質と地質構造

ヒマラヤの地質構造は、地下深部 (10 km ~ 30 km) に存在するデコルマン (MDF: 図 1) から派生し、ヒマラヤに平行に延びる一連の衝上断層群で特徴づけられる (図 1)。それらは南から北へ、ヒマラヤ前縁断層 (Himalayan Frontal Fault: HFF), 主境界衝上断層 (Main Boundary Thrust: MBT) および主中央衝上断層 (帯 \ Main Central Thrust (zone): MCT zone) である。これらは、活動時期が南へ順次新しくなる一連の foreland propagating thrust system をなしている。ヒマラヤの地質はこれらの断層によって、南から北へ、サブヒマラヤ帯 (Sub-Himalaya), 低ヒマラヤ帯 (Lesser Himalaya), 高ヒマラヤ帯 (Higher Himalaya) およびテーチスヒマラヤ帯 (Tethys Himalaya) に帯状区分され (図 1), この区分は地形区分ともほぼ対応している (Gansser, 1964)。これらの衝上断層群のなかでも、MCT 帯はヒマラヤの地質構造を規制しており、高ヒマラヤ帯の岩石はしばしばこの断層を介して南の低ヒマラヤ帯の岩石をおおい、ナップやクリップを作っている。MCT 帯はところにより 1 km 以

下から 10 km に近い幅をもつ延性 脆性剪断帯で、ヒマラヤの変成岩類はこの衝上運動にともなう変成作用によって大きく改変している。各種放射年代が漸新世末期 ~ 前期中新世に集中することから、MCT 帯の活動はそのころと考えられる。しかし、その後のヒマラヤの上昇にも大きくかかわっている。

中央ネパールのカトマンドゥ地域 (図 2) では、北方の上部角閃岩 ~ グラニュライト相変成岩類からなる高ヒマラヤ帯が、その上位のテーチス堆積物からなるテーチスヒマラヤ帯の堆積岩類とともに南の MBT 近くまで張り出し、カトマンドゥナップ (カトマンドゥ盆地) を作っている (Stöcklin, 1980)。カトマンドゥナップはカトマンドゥコンプレックス (Kathmandu Complex) からなり、全体として東西方向に軸をもつ複向斜構造をなす。このナップは低ヒマラヤ帯の岩石からなるナワコットコンプレックス (Nawakot Complex) を衝上断層でおおっている (図 2)。ナワコットコンプレックスは原生代後半 ~ 古生代初期の浅海性堆積物からなり、一部では黒雲母帯にいたる変成作用をこうむっている。カトマンドゥコンプレックスは下位の厚さ約 9 km の変成岩類 (Bhimphedi

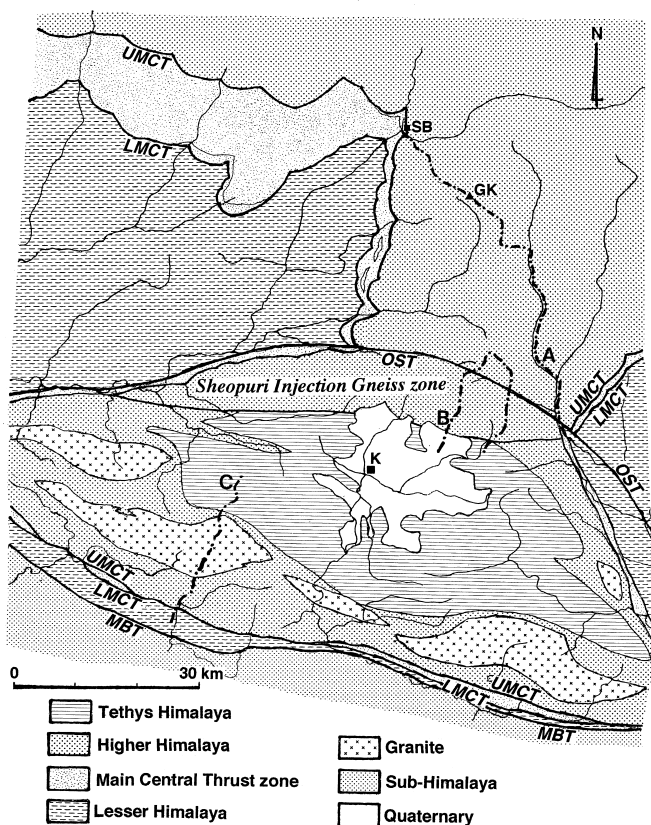


図 2 中央ネパール，カトマンドゥ地域の地質区分図と試料採集ルート．
MBT：主境界衝上断層，LMCT：下部主中央衝上断層，UMCT：
上部主中央衝上断層，OST：アウトオブシーケンススラスト
(Trisuli-Likhu 断層)，K：カトマンドゥ，SB：シャブルベンシ
村，GK：ゴザインクンド．A, B および C は試料採集ルート．

Fig. 2 Geological division of the Kathmandu area in central Nepal.
MBF: Main Boundary, LMCT: Lower Main Central Thrust,
UMCT: Upper Main Central Thrust, OST: Out-of-Sequence
Thrust (Trisuli-Likhu Fault), K: Kathmandu, SB: Shabru
Bensi Village, GK: Gasainkund Lehk. A, B, and C show
sampling routes.

Group：高ヒマラヤ帯相当岩石）と上位の上部に
シルル系をもつ厚さ約 5 km のテーチス堆積物
(Phulchouki Group) からなる。北方のナップの
ルート部では，テーチス堆積物とその下位の高ヒ
マラヤ変成岩類との境界付近に正断層が推定され
ているが，カトマンドゥナップ内では，両者の間
に断層は今のところ見つかっていない (Funaka-
kawa, 2001)。

カトマンドゥナップの基底を画する衝上断層が
北方のナップのルート部の Upper MCT の延長で
あるのか，あるいは異なるものであるのか，最近
議論がある。後者の場合は，このスラストシート
は Upper MCT スラストシートの下に位置する別
のスラストシートと考える (Rai *et al.*, 1998;
Upreti and Le Fort, 1999)。しかし，我々のカト
マンドゥ周辺での調査によると，MCT 帯は狭い

ながらもカトマンドゥナップをとりまいて分布しており(図2), カトマンドゥ地域は一つのスラストシートからできていると考えられる。カトマンドゥナップのルートである北方の高ヒマラヤ帯の変成岩類は泥質岩に珪線石や藍晶石を含み, グラニュライト相に達しているが, カトマンドゥナップの変成岩類(Bhimphedi Group)はこれらのアルミノ珪酸塩鉱物を含んでおらず, 変成度はルート部に比べて低そうである。このことは上記の二重スラストシート説の根拠になっている。しかし, この変成度の違いはルート部とカトマンドゥナップとでMCT帯の活動深度レベルが異なることに起因していると思われる(在田ほか, 2001)。

カトマンドゥ盆地の北縁にはSheopuri Injection Gneiss帯(図2)が存在する(Arita *et al.*, 1973)。この帯の北側のTrisuli-Likhu断層はMCT帯を切って東西に延びるout-of-sequence thrustである(OST: 図2)(Arita *et al.*, 1999)。最近10数年間の測地学的データによると, この断層を境に北東側の平均上昇速度は南西側よりもはるかに大きい(Jackson and Bilham, 1994)。また, その地下2~3 kmでは微小地震が活発である(Pandey *et al.*, 1995)。カトマンドゥナップ南部ではPhulchouki GroupとBhimphedi Groupの境界付近にカンブリア紀~オルドビス紀の優白質花崗岩が貫入し, 一帯は東西に伸びる山脈(マハーバーラト山脈: 図1のMH)となっている。前期更新世と考えられる上部シワリク層群が堆積した時期にはこの山脈はまだ隆起していなかったと考えられており(Hagen, 1969), マハーバーラト山脈の上昇はヒマラヤ全体の上昇問題にとって重要である。

III. 従来の山脈上昇に関する放射年代学的研究と山脈上昇の問題点

ヒマラヤにおける放射年代学的手法による山脈上昇問題の研究は, ヒマラヤ西部シンタクシス周辺のナンガパルバット山付近(Zeitler *et al.*, 1982 ほか)やカラコラム山脈(Krol *et al.*, 1996),あるいはその東のインドヒマラヤ(Sorkhabi *et al.*, 1996; Jain *et al.*, 2000)などではかなり行わ

れている。しかし, ネパールヒマラヤではあまり行われていない。在田・雁澤(1997)は中央ネパールにおいて2.3 Maから1.2 MaのジルコンFT年代を報告し, 上昇(削剥)速度は最近になるほど速くなり, 1.2 Maから現在までの平均速度は6.2 mm/年であると報告している。また, 正の相関を示す年代値とサンプル高度の関係がUMCTの存在によって乱されていないことから, MCT帯は最近の高ヒマラヤ帯の上昇に関与していないことを示唆した。さらに, ヒマラヤ主稜部の最近の急激な上昇の原因は, MDFにそうインド大陸地殻下部の楔作用によるジャッキアップおよびout-of-sequence thrustのランプによるfault-bend foldingに起因する岩層の撓曲にあるとした(図1)。前述の測地学および微小地震観測のデータはout-of-sequence thrustが最近も活動的であることを示しており, 上述の上昇メカニズムを支持していると思われる。

前述のように, マハーバーラト山脈の上昇は, シワリク層群の検討から前期更新世以降と推定されているが, カトマンドゥ盆地の湖成層の検討によると, 約100万年前から急激に上昇したと考えられる(在田, 1988; 酒井, 2002)。

このような, ヒマラヤの最近の上昇過程あるいはそのメカニズムを検討するためには, 上昇(削剥)速度のより詳細な定量的検討が必要である。

IV. 平成13年度の現地調査

上述のカトマンドゥ地域のテクトニクスと山脈上昇の関わりおよび山脈上昇速度を, フィッシュトラック法とK-Ar法により検討するために, 以下のルートについて, 地質調査と年代測定のための岩石試料採集を行った。現地調査は2001年10月中旬~11月中旬に在田が行った(図2)。

(1) 高ヒマラヤ帯(ナップルート部)を横断するルートA

カトマンドゥ盆地北東のメラムチ川(標高910 m)から北へ, コザインクンド連峰(標高5,500 m)を経て, 北のランタン川, シャブルベンシ村(標高1,600 m)へ横断するルートで, 標高数100 mごとに15ヶの花崗岩質片麻岩あるいは

砂泥質片麻岩（各数 kg）を採集した。ここでは、試料の高度差あるいは閉鎖温度の異なる放射年代法により、ヒマラヤ主稜部の上昇（削剥）速度の推定が期待される。

（２）カトマンドゥ盆地北側のルート B

カトマンドゥ盆地北方の out-of-sequence thrust の南北両側で、標高のほぼ等しい試料を 2 ケづつ、2 つのルートで採集した。ここでは、out-of-sequence thrust の両側でのフィッシュントラック年代値の違いにより、このスラストの動きを推定できることが期待される。

（３）マハーバーラト山脈（ナップ先端部）を横断するルート C

カトマンドゥ盆地南方のマハーバーラト山脈を南北に横断して、標高 660 m から 2,580 m にかけて 8 ケの花崗岩と 2 ケの砂泥質片岩を採集した。ここでは、MBT の活動と関連すると思われる低ヒマラヤ帯南縁の上昇過程を明らかにできると期待される。

謝 辞

本研究計画の現地調査にあたって、東京地学協会の平成 13 年度研究・調査助成金を使用した。ネパール国トリブバン大学 Centre of International Relations, Executive Director の D.M. Karmacharya 教授, Central Department of Geology (Kirtipur Campus), Chairman の D.P. Adhikary 教授, Department of Geology (Tri-Chandra Campus), Chairman の N.B. Upreti 教授, Department of National Parks and Wildlife Conservation, Director General の T. Maskey 博士, Department of Mines and Geology, Director General の N.R. Sthapit 氏にお世話になった。これらの方々に感謝申し上げる。

なお、共同研究者の松田高明氏は平成 13 年 9 月急逝された。フィッシュントラック法熱放射年代学的研究を期待されていたが、まことに残念の極みである。ここに衷心よりご冥福をお祈り申し上げます。

文 献

在田一則（1988）ヒマラヤはなぜ高い。青木書店。
在田一則・鷹澤好博（1997）ネパールヒマラヤのスラストテクトニクス・フィッシュン・トラック年代と山脈上昇過程。地学雑誌, **106**, 156-167。

在田一則・高須 晃（2001）中央ネパールカトマンドゥ地域のナップテクトニクス：シングルナップ？、ダブルナップ？ 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集, Go-002。

- Arita, K., Ohta, Y., Akiba, C. and Maruo, Y. (1973) Kathmandu Region. In Hashimoto, S., Ohta, Y. and Akiba, C. eds.: *Geology of the Nepal Himalayas*. Saikon Publishing Co. Tokyo, 99-145.
- Arita, K., Dallmeyer, R.D. and Takasu, A. (1999) Tectonothermal evolution of the Lesser Himalaya, Nepal: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the Kathmandu Nappe. *The Island Arc*, **6**, 372-385.
- Funakawa, S. (2001) Lower Palaeozoic Tethys sediments from the Kathmandu Nappe, Phulchauki area, central Nepal. *J. Nepal Geol. Soc.*, **25**, Spec. Iss., 123-134.
- Gansser, A. (1964) *Geology of the Himalayas*. Interscience Pub., London.
- Hagen, T. (1969) Report on the geological survey of Nepal. *Denkschr. Schweiz. Naturf. Ges.*, **81**, p.185.
- Jackson, M. and Bilham, R. (1994) Constraints on Himalayan deformation inferred from vertical velocity fields in the Nepal and Tibet. *J. Geophys. Res.*, **99**, 13897-13912.
- Jain, A.K., Kumar, D., Singh, S., Kumar, A. and Lal, N. (2000) Timing, quantification and tectonic modelling of Pliocene-Quaternary movements in the NW Himalaya: Evidence from fission track dating. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **179**, 437-451.
- 河野 長（1975）エベレストは高すぎる。自然, 1975 年 1 月号, 92-101。
- Krol, M.A., Zeitler, P.K., Poupeau, G. and Pecher, A. (1996) Temporal variations in the cooling and denudation history of the Hunza plutonic complex, Karakoram Batholith, revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology. *Tectonics*, **15**, 403-415.
- Pandey, M.R., Tandukar, R.P., Avouac, J.P., Lave, J. and Massot, J.P. (1995) Interseismic strain accumulation on the Himalayan crustal ramp (Nepal). *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 751-754.
- Rai, S.M., Guillot, S., Le Fort, P. and Upreti, B.N. (1998) Pressure-temperature evolution in the Kathmandu and Gosainkund regions. *J. Asian Earth Sci.*, **16**, 283-298.
- 酒井治孝（2002）100 万年前のヒマラヤ前縁山地の急激な上昇。月刊地球, **24**, 279-284。
- Sorkhabi, R.B., Stump, E., Foland, K.A. and Jain, A.K. (1996) Fission-track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for episodic denudation of the Gangotri granites in the Garhwal Higher Himalaya, India. *Tectonophysics*, **260**, 187-199.
- Stöcklin, J. (1980) Geology of Nepal and its regional frame. *J. Geol. Soc. London*, **137**, 1-34.
- Upreti, B.N. and Le Fort, P. (1999) Lesser Hi-

malayan Crystalline Nappes of Nepal : Problem of their origin. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **328**, 225-238.
Zeitler, P.K., Johnson, N.M., Naeser, C.W. and

Tahirkheli, R.A.K. (1982) Fission-track evidence for Quaternary uplift of the Nanga Parbat region, Pakistan. *Nature*, **298**, 255-257.