

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340156

研究課題名(和文)ヒマラヤ山脈の上昇・削剥・冷却史とモンスーン変動史の研究

研究課題名(英文)Studies on the uplift, denudation and cooling history of the Himalayan range and associated changes in monsoon

研究代表者

酒井 治孝 (SAKAI, Harutaka)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90183045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円、(間接経費) 4,740,000円

研究成果の概要(和文)：高度変成岩ナップ先端部の研究から、変成帯下部とその下の延性剪断帯MCTゾーンの最高圧力・温度は、各々11kb/720 と8kb/580 であり、約100km北のナップのルートゾーンと変わらないことが判明した。従って、変成帯は22～16Maに急激に上昇する前、ほぼ水平な状態にあったこと、又その北端はチベットの中部地殻を成し、変成帯はアジア大陸の下に沈み込んだインド亜大陸の上部地殻がデラミネーションして形成されたことを示唆する。この15-10Maのナップの運動に先行して、低度変成岩ナップがMCTに沿って20～16Maに上昇・削剥されたことが、前縁盆地堆積物の重鉱物組成分析から判明した。

研究成果の概要(英文)：Chronological and petrological studies on sillimanite-kyanite grade metamorphic rocks of the lower part of the Higher Himalayan Crystallines and the Main Central Thrust zone at the frontal part of nappe in Dhankuta area, eastern Nepal revealed that they were formed under condition of 11 kb/720 centigrade and 8 kb/580 centigrade, respectively. Their P/T condition are as same as those of the metamorphic rocks distributed 100 km to the north of nappe front. It suggests that the metamorphic belt was nearly horizontal and its northern end had constituted the middle crust of Tibet after delamination of subducted Indian upper crust.

Heavy mineral analysis of the foreland basin sediments, Dumri Formation, clarified that preceding of the emplacement of higher-grade metamorphic nappe during 15-10 Ma, lower-grade metamorphic rocks of the Kathmandu nappe exhumed and eroded during 20-16 Ma.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：ヒマラヤ 変成帯 ナップ モンスーン テクトニクス 大陸衝突 造山帯

1. 研究開始当初の背景

ヒマラヤの変成帯の変成作用とテクトニクスに関する研究の多くが高ヒマラヤ直下で行なわれ、その成果は公表され、共通の理解に達している。ところが高ヒマラヤの南方に約 100km に亘って広がる変成岩ナップについては研究が稀有で、その理解は進んでいない。そこで変成帯の形成・上昇プロセスと冷却・変形史を解明する目的で、変成岩ナップの先端、中央部、ルートゾーンを調査・研究する研究計画を企画した。特に注目したのは先端とルートゾーンの変成度と熱史の違いである。

2. 研究の目的

(1) 変成岩ナップ先端部の MCT より上の高度変成岩とその下位の剪断帯 MCT ゾーンについて変成分帯を行ない、ピーク変成時の温度・圧力条件を明らかにし、ルートゾーンのそれとの違いを明らかにする。

(2) MCT ゾーンの下位の低度変成岩クンチャ・ナップについて年代、起源、運動史、熱史を明らかにし、上位の高度変成岩ナップとの関係を明らかにする。

(3) 変成帯が上昇した 22~16Ma の前縁盆地堆積物 Dumri 層のジルコンの年代分布と重鉍物組成の変化を明らかにし、当時のヒマラヤの削剥とテクトニクスを解明する。

(4) 変成帯と部分溶融したチベットの中部地殻の関係を明らかにし、変成帯の形成・上昇のプロセスとメカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 現地や外調査を行い、5000 分の 1 のルートマップに基づき、25,000 分の 1 の詳細な地質図・断面図を作成する。また変成岩の薄片観察に基づき変成分帯をする。さらに各種温度計、圧力計を用いてピーク変成時の P/T 条件を明らかにする。

(2) 碎屑性ジルコンの U-Pb 年齢とフィッシュン・トラック年代を求め、堆積年代、変成年代と冷却年代を明らかにする。

(3) 褶曲・断層・線状鉍物定向配列の記載と解析から、ナップの運動と変形の履歴を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 変成岩ナップ先端の変成分帯と変成条件、および流体活動

ネパール東部、ダンクッタ周辺の MCT ゾーン(厚さ約 3km)には泥質片岩が広く分布し、ドロマイト岩やコーツァイト、マフィック岩を伴う。変成度は、藍晶石帯から十字石帯、ザクロ石帯へと、南に向かって MCT からの距離が増加するほど低くなる。藍晶石帯では石英脈中に mm から cm サイズの藍晶石が、少量の斜長石とともに含まれる。ザクロ石と藍晶石は石英脈の直近でのみ粗粒であり、藍晶石は石英脈の周囲にのみ産する。このことは、石英脈を形成した流体の活動が、藍晶石帯の変成ピーク前後に起き、Si、Al、Na、Ca が流体中に含まれ運搬されたことを示す。この流体活動の温度圧力条件は、約 8kbar、600 と暫定的に見積もられた。十字石帯やザクロ石帯においても同様に、石英脈の直近でザクロ石が粗粒化する。従って、このような石英脈は、変成作用の昇温期ならびにピーク変成時に、各変成分帯に対し、系外から流入した流体の証拠である。昇温変成を示す組成累帯構造をもつザクロ石中に大量の電気石が包有されることから、このような含ホウ素流体の流入は昇温変成期から起きていたと考えられる。さらに、片理面を切って貫入する電気石脈が存在することから、ピーク変成以降も含ホウ素流体の流入は続いた。電気石の極間の Ca/Na 分配から、電気石脈の形成温度は約 530-590 と推定される。MCT 直上のミグマタイト中に産する含電気石優白質花崗岩脈は、こうした含ホウ素流体流入に伴う、MCT 近辺での溶融の産物かもしれない。なおミグマタイトの形成条件は、約 11kb、約 700 と暫定的に推定された。

本研究により変成岩ナップ先端の変成分

帯、最高温度・圧力履歴、ピーク変成前後の流体活動が初めて明らかにされた。

(2) 低度変成岩から成るクンチャ・ナップの年代・起源と熱史

レッサーヒマラヤを南北 120 km に亘って広く覆うクンチャ・ナップの起源と熱履歴を明らかにするために、東ネパールのタプレジュン・ウインドウにおいて地質調査を行い、クンチャ層とタプレジュン花崗岩のジルコン、アパタイト、雲母についてマルチ年代学的研究を行った。クンチャ層に貫入した花崗岩体のジルコンの U-Pb 年代は 1852 ± 24 Ma と 1877 ± 21 Ma, 白雲母の Ar-Ar 年代は約 1650 Ma を示した。しかしジルコンとアパタイトのフィッシュン・トラック (FT) 年代は、各々 6.2~4.8 Ma, 2.9~2.1 Ma を示した。クンチャ層の結晶片岩中の碎屑性ジルコンの U-Pb インターセプト年代は 1888 ± 16 Ma を示し、これはクンチャ層下部の堆積年代を示すものと考えられる。同じ試料中の碎屑性ジルコンとアパタイトの FT 年代は、各々 5.4 Ma と 2.5 Ma を示す。碎屑性ジルコンには 16 億年より若いものは全く認められなかった。ハイヒマラヤ結晶質岩ナップ中の片麻岩、およびレッサーヒマラヤの眼球片麻岩中のジルコン粒子は、17 Ma に鉛口スを示す熱イベントを被っており、その影響はタプレジュン花崗岩体の周縁にも及んでいる。

本研究によって得られた年代と岩相層序に基づき、Naudanda 層は北中国地塊の Changcheng Group 最下部の Changzhougou 層、およびカナダの Coronation Supergroup 下部の Odjick 層と対比される。これらの地層は共通して同じ年代のオーソコーツァイトから成り、19 億年前に形成された超大陸コロンビアが分裂を始めた時期に形成されたものと解釈される。クンチャ層とその上位のカリガンダキ累層群、およびタプレジュン花崗岩は、カナダ北西部

のウオップメイ造山帯中のコロネーション累層群とヘブバーン貫入岩体に対比される。この 3 累層群は大陸リフトとそれに引き続く非活動的大陸縁辺に堆積したものと解釈される。

すべてのジルコンとアパタイトの FT 年代は、クンチャ・ナップとその上を覆うハイヒマラヤ結晶質岩からなるナップの双方が、ナップの前縁から北方に向かって側方に冷却したことを示す。ナップの前縁部からナップ中央部に位置するタプレジュンまでの間では、中~後期中新世の間に、ジルコンの FT の閉鎖温度である 240 °C の等温線が、約 10mm/年の平均速度で北方に後退したことが分かった。

本研究により、レッサーヒマラヤの原生界の年代が確定し、その起源が超大陸コロンビアの分裂に求められること、また変成岩ナップでは先端部から北方に向かって冷却したことが初めて明らかになった。

(3) 弱変成した前期中新世の河川堆積物とナップに記録された熱史と運動史

弱く変成した前期中新世の河川堆積物デュムレ層、およびその上を覆うクンチャ・ナップとレッサーヒマラヤ結晶質岩ナップのマルチ熱年代学的研究を行い、その変成作用の時期と起源を明らかにすると同時に、これらのナップの前進と冷却の履歴を明らかにすることができた。

ドゥムレ層中の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代分布のピークは、約 10 億年前と 5~6 億年前にあるが、同じジルコン粒子のフィッシュン・トラック (FT) 年代測定の結果は、11~10 Ma に熱的イベントを受けたことを示す。クンチャ層の上に重なるノーダラ・コーツァイトの碎屑性ジルコンの U-Pb 年代は 17 億年より古いことを示すが、同じジルコンの FT 年代は 9.5 Ma を示す。ドゥムレ層とクンチャ層の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代分布の

差は、前期中新世にドゥムレ層が堆積した時にはクンチャ層は地表に露出してなかったことを物語っている。

結晶質岩ナップ基底の Main Central Thrust (MCT) 直下の剪断帯, MCT zone の両雲母ガーネット片岩中の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代は、6 億年より古い年代を示すが、同じジルコンの FT 年代は 7.8 Ma を、白雲母の Ar-Ar 年代は 19 Ma を示す。よってドゥムレ層の変成作用を起こした熱は、その上を覆ったナップに由来するものと解釈される。従って、ドゥムレ層が熱変成作用を被り、240 以下に冷却した約 10 Ma 以前に、ナップは現在の位置に到達したことを示す。

クンチャ・ナップの前縁部に貫入したバラジュール・コーラ花崗岩のジルコンの U-Pb 年代は 18.9 億年前を示すが、その FT 年代は前期中新世に熱的イベントを被ったこと、また 14.7 Ma には 240 以下に、10.3 Ma には 100 以下に冷却したことを示す。これらの熱年代学的データは、クンチャ・ナップの先端部が 15~14 Ma に地表に露出し、直ぐに冷却したが、ナップの内部は 120 km 余り前進する間、一貫してホットな状態だったことを示す。本研究により、変成岩ナップは 10Ma 以前に現在の位置に到達していたこと、その前進速度は 3~4cm/y であったことが初めて明らかになった。

(4) 変成帯の上昇期の記録を前縁盆地堆積物から読み取る

ヒマラヤの変成帯は約 22~16 Ma の間に急激に上昇した時期に、前縁盆地に堆積したのが Dumri 層である。変成帯上昇の初期過程を推定するため、Dumri 層の異なる層準の砂岩中の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代分布と、重鉍物組成の変化を明らかにした。U-Pb 年代測定と重鉍物組成分析結果から、Dumri 層の主な供給源は、1000 ~ 800 Ma の緑色片岩相の弱変成岩および未変成な岩石から

成り、600~500 Ma に花崗岩の貫入を受け、周囲の石灰岩が接触変成作用を受けたと考えられる。Dumri 層の後背地として想定される、この年代値を持つ岩体として、北ヒマラヤ花崗岩類やカトマンズコンプレックスに貫入した花崗岩類が考えられる。従って、これらのデータは Dumri 層が堆積した 22~16Ma に低度変成岩からなるカトマンズナップが、MCTに先行する MT に沿って上昇し、一部地表に達していたことを示す。

本研究により、変成岩ナップの形成が MT と MCT に沿って 2 段階で起こったこと、MT に沿ってカトマンズ・ナップが上昇・前進した時期に、前縁盆地では Dumri 層が堆積したことが判明した。

(5) ヒマラヤの変成帯形成モデルの提唱
これらの変成岩ナップの研究の成果と従来のグレートヒマラヤ直下のルートゾーンの変成帯の研究を比較し、総合的に比較検討した結果、ヒマラヤの変成帯の形成過程に関して下記の重要な新知見を得ることができた。

変成岩ナップの先端とルートゾーンは約 100km 離れているにも関わらず、その変成度は同じ珪線石-藍晶石グレードで、そのピーク温度は約 700、圧力は約 11~12kb である。

変成岩ナップ基底直下の剪断帯 MCT ゾーン上部の変成度も、先端とルートゾーンで変わらず、約 600、約 8kb である。

従って、ヒマラヤ北方の地下の変成帯の傾斜角を 20° として、先端部がルートゾーンに位置していた時のルートゾーンの深度を求めると約 40km となり、そこで最高圧力に達していたことが分かる。さらに先端部を 100km 元に戻すと、その時のルートゾーンの位置は、現在部分溶融しているチベットの中部地殻の南端と ITSZ (縫合帯) を超えてチベットの地下に達する。

これらの事実から、ヒマラヤの変成帯はチベットの中部地殻の南方延長であり、沈み込んだインドプレートの上部地殻がデラミネ

ーションによりマントル・下部地殻から剥がれて、チベットの地殻にアンダープレートの形成されてきたものと考えられる。またマントルと下部地殻が剥がれ落ちた結果、変成帯は急上昇を始めたものと考えられる。

本研究により、ヒマラヤの変成帯の形成・上昇プロセスが、統一的に説明できるようになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

Sakai, H., Iwano, H., Danhara, T., Hirata, T. and Takigami Y., 2013. Emplacement of hot Lesser Himalayan nappes from 15 to 10 Ma in the Jumla-Surkhet region, western Nepal, and their thermal imprint on the underlying Early Miocene fluvial Dumri Formation. *Island Arc*, 査読有, v. 22, p. 361-381, doi:10.1111/iar.12030.

Sakai, H., Iwano, H., Danhara, T., Takigami Y., Rai, S. M., Upreti, B. N. and Hirata, T., 2013. Rift-related origin of the Paleoproterozoic Kuncha Formation, and cooling history of the Kuncha nappe and Taplejung granites, eastern Nepal Lesser Himalaya – a multichronological approach. *Island Arc*, 査読有, v. 22, p. 338-360, doi:10.1111/iar.12021.

岩野英樹・折橋裕二・檀原 徹・平田岳史・小笠原正継, 2012. 同一ジルコン結晶を用いたフィッシュ・トラック年代とU-Pbダブル年代測定法の評価—島根県川本花崗閃緑岩中の均質ジルコンを用いて—. *地質学雑誌*, 査読有, v. 118(6), p.365-375.

doi:10.5575/geosoc.2012.0006

林辰弥ほか 8 名, 2012. 中-後期更新世における古カトマンズ湖珪藻の古群集生態 浮遊性・底生群集の生産性・種多様性 変遷. *地学雑誌*, 査読有, 121巻6号, 962-985.

doi:10.5026/jgeography.121.962

[学会発表](計 15 件)

河上哲生、東ネパール MCT ゾーンにおける変成同時の流体流入と優白質花崗岩の成因論、日本地球惑星科学連合大会、2014 年 4 月 28 日～5 月 3 日、横浜

Kawakami, T., Syn-metamorphic fluid

infiltration and petrogenesis of leucogranites in the MCT zone in Eastern Nepal, *Geofluid*3, 2013 年 2 月 28～3 月 3 日, 東京工業大学、東京

酒井治孝、ヒマラヤのナップ先端部の構造と冷却のプロセス、日本地質学会年会、2013 年 9 月 14 日、東北大学、仙台
佐藤活志、ネパールヒマラヤ東部のナップ前縁の主中央衝上断層帯にみられる延性および脆性変形、日本地質学会年会、2013 年 9 月 14 日、東北大学、仙台

岩野英樹、ネパールヒマラヤの Ampipal 閃長岩は、白亜紀のインド亜大陸の分裂に伴う深成岩体である：U-Pb 年代学からのアプローチ、日本地質学会年会、2013 年 9 月 14 日、東北大学、仙台

岩野英樹、LA-ICPMS 法によるウラン定量と第四紀ジルコン FT 測定、日本地質学会年会、2013 年 9 月 14 日、東北大学、仙台

Sakai, H., Accreted Paleoproterozoic eolian beds and dolerite sills in the Miocene Siwalik belt, central Nepal, and their origin. 28th Himalaya-Tibet-Karakoram workshop, 2013 年 8 月 24 日, Tübingen University, Germany.

Fujii, R., Stepwise lowering of water-level caused by tectonic events occurred during 50-15 ka in the Paleo-Kathmandu Lake, central Nepal Himalaya. 28th Himalaya-Tibet-Karakoram workshop, 2013 年 8 月 22 日, Tübingen University, Germany.

Sakai, H., Emplacement of hot metamorphic nappe during 15-10 Ma, and thermal imprint on the underlying early Miocene fluvial Dumri Formation in Jumla-Surkhet area, western Nepal. 27th Himalaya-Karakoram-Tibet workshop, 2012年11月28日～30日, Kathmandu, Nepal.

Fujii, R., Reconstruction of paleomonsoon record in the Kathmandu Valley during the last 700 kyr: approach from pollen and charcoal analyses. 27th Himalaya -Karakoram-Tibet workshop, 2012年11月28日~30日, Kathmandu, Nepal.

Sakai, T., Evidence of fault activity recorded in the Pleistocene fluvio-lacustrine succession in Kathmandu Valley, Nepal. 27th Himalaya -Karakoram-Tibet workshop, 2012年11月28日~30日, Kathmandu, Nepal.

酒井治孝、リフト-非活動的大陸縁辺で形成されたレッサーヒマラヤの前期原生代カリガンダキ累層群. 日本地質学会年会、2012年09月09日~11日. 大阪府立大学、大阪

Fujii, R., Long climatic record during the last 700 kyr revealed by pollen and charcoal analyses on the lacustrine sediments of the Paleo-Kathmandu Lake, the central Himalaya 国際花粉学会議/国際古植物学会議2012, 2012年09月09日~11日, 中央大学、東京

酒井治孝、第四紀にグレートヒマラヤは本当に急激に上昇したのか?—ヒマラヤのFTデータの再検討—. 日本フィッシュン・トラック研究会、2012年1月6日、国立極地研、東京

酒井治孝、ヒマラヤの変成岩ナップの前進と冷却のプロセス、日本地質学会年会、2011年9月11日、茨城大学、水戸

〔図書〕(計 2 件)

Sakai, H., Guidebook for Excursion on Geology of Kathmandu Valley (Nepal Geological Society, Special Publication Series No.2), 2012, 47

酒井治孝、朝日新聞出版、ヒマラヤの形

成、2014、34

6 . 研究組織

(1)研究代表者

酒井 治孝 (SAKAI Harutaka)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：90183045

(2)研究分担者

平田 岳史 (HIRATA Takafumi)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：10251612

平島崇夫 (HIRAJIMA Takao)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：90181156

(平成 24 年度より連携研究者)

(3)連携研究者

河上 哲生 (KAWAKAMI Tetsuo)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：70415777

佐藤 活志 (SATO Katsushi)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：70509942

藤井 理恵 (FUJII Rie)
京都大学・大学院理学研究科・研究員
研究者番号：50398111

桑原 義博 (KUWAHARA Yoshihiro)
九州大学・大学院比較社会文化研究院・
准教授
研究者番号：90281196

瀧上 豊 (TAKIGAMI Yutaka)
関東学園大学・経済学部・教授
研究者番号：40206909

折橋 裕二 (ORIHASHI Yuji)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：70313046

酒井 哲弥 (SAKAI Tetsuya)
島根大学・総合理工学部・准教授
研究者番号：90303809