

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04062

研究課題名(和文) 衝突山脈ヒマラヤの形成モデルの構築

研究課題名(英文) Construction of model on the mountain building process of the collided range Himalaya

研究代表者

酒井 治孝 (Sakai, Harutaka)

京都大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：90183045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：高ヒマラヤ変成岩は地表露出後下方に急冷(15-12Ma)、そのナップは北方に向け側方徐冷した。変成岩ナップの運動速度は3.5 cm/y、運動停止は10Maと推定。ナップに覆われた小ヒマラヤ堆積物は、ナップと同様に北方に冷却、ナップの上のテチス堆積物はMCTからの距離に従い下方冷却。ナップ先端と直下のMCTzoneは、高ヒマラヤと同じ変成相と温度・圧力履歴(10kbar, 660 以上と8kbar, 600 )を持つ。MCTzoneでは泥質岩・炭酸塩岩から水、CO<sub>2</sub>、Bが放出され、直上の変成岩は部分溶融し花崗岩メルトを形成。小ヒマラヤの原生界の18億年前の不整合と17億年前の後背地の変動を発見。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界最大の大陸衝突型山脈、ヒマラヤの形成プロセスとその形成メカニズムを解明する鍵となる、ヒマラヤの変成岩とそれが地上を広く覆った変成岩ナップの運動と熱史を解明する目的で研究を行った。その結果、ヒマラヤ山脈の形成過程は厚さ10kmを超える変成岩が地下約40kmから上昇を始め、地表に露出後も300 以上の温度を保持したまま、年間3.5cmの速度で120km余り南方に押し出され、約1000万年前に運動を停止し、その後北方に冷却することで形成された。またナップによってカバーされたインド亜大陸の堆積物も、ナップの上に載った堆積物もナップの熱により300 以上に達し、その後冷却したことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The HHC rapidly cooled downward after exposing (14.4-12Ma), and its nappe gradually cooled toward the north after termination of the emplacement (11.5-2Ma). Its emplacement rate is 3.5cm/y. The LHS beneath the hot HHC nappe had thermal imprint and also cooled toward the north at the same rate of the HHC nappe. The Tethys sediments cooled downward in proportion to structural distance from the MCT. HHC at the nappe front and underlying MCTzone have the same metamorphic phase and P/T condition (10kbar, 660 + & 8kbar, 600 ) of the HHC in the High Himalaya. Granitic melt was formed in the basal part of the HHC after release of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, B from the MCT zone by metamorphism. Depositional age of the Late Paleoproterozoic LHS was confirmed to be from 1900-1600Ma on the basis of U-Pb & Pb-Pb dating. Unconformity at 1800 Ma and provenance change at around 1700 Ma were found. Tectonic setting of igneous activity during 1900-1850 Ma was estimated to be hot spot and rift system.

研究分野：地質学

キーワード：衝突山脈 ヒマラヤ山脈 変成岩 ナップ フィッション・トラック年代 U-Pb年代 ジルコン レッサーヒマラヤ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大陸衝突山脈ヒマラヤの形成プロセスとそれを説明するシミュレーション実験が数多く行われ、デラミネーション・モデルやチャンネル・フロー・モデルが提唱されているが、実際の地質データに基づく熱年代学的研究や過去と現在のプレート境界断層の運動史に関する研究が充分でなく、モデルを検証するには到っていない。

### 2. 研究の目的

- (1) 変成帯と上盤のテチス堆積物、下盤のレッサーヒマラヤ堆積物の被熱・冷却過程の解明
- (2) 変成岩ナップのピーク変成作用と花崗岩メルトの形成プロセスの解明
- (3) Main Central Thrust (MCT)の活動開始期と停止期の熱履歴と運動史の構築
- (4) これらを総合して、ヒマラヤの変成帯の上昇・前進、被熱・冷却に関するモデルを構築

### 3. 研究の方法

- (1) ヒマラヤを横断する 4 本の測線とレッサーヒマラヤを横断する 2 本の測線に沿う地質調査と岩石試料採取
- (2) ジルコンの U-Pb 年代、およびジルコン、アパタイトのフィッション-トラック年代測定
- (3) MCT 直上と MCT zone の EPMA による変成岩石的分析と流体包有物分析、および変成した石英砂岩を使った MCT 近傍の歪み速度分布の解明
- (4) ナップが覆ったレッサーヒマラヤの原生界の年代、層状と環境変遷をジルコンの U-Pb 年代測定で明らかにする。またそれらに挟まれた火成岩の主成分組成分析、希土類元素分析を行う。

### 4. 研究成果

4 本の測線、アンナプルナ-タンセン、カトマンズ-ランタン、エベレスト-ダーラン、カンチェンジュンガ-イラムに沿って地質図を作成し、岩石試料を採取した。

125 試料についてジルコンの FT 年代、20 試料についてアパタイトの FT 年代を測定した。また 18 試料についてジルコンの U-Pb 年代、1 試料について石灰岩の U-Pb 年代を求めた。また MCT を挟んで 7 試料の石英レンズの流体包有物の組成分析と均質化温度を測定し、MCT zone の炭酸塩岩と電気石について、詳細な組成分析を行った。さらに MCT を挟んで変成した石英砂岩粒子の歪み解析を行った。

またナップに被覆された中新世の河川堆積物中の有機物について、ラマン温度計を使って最高被熱温度を測定した。その結果は以下の通りである。

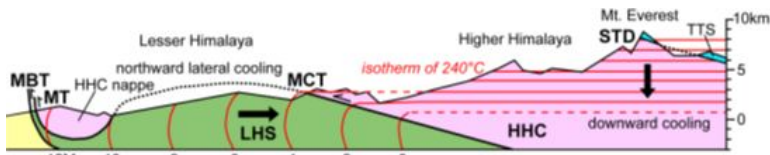
(1) 高ヒマラヤの変成岩は地表に露出後 14.4 Ma~12 Ma に下方急冷(エベレストモデル)、一方レッサーヒマラヤの変成岩ナップは南端(11.5 Ma)から北方(2 Ma)に向け側方に徐冷している。変成岩ナップは~10 Ma までに 250 以下に冷却し、運動を停止し(カトマンズモデル)、その運動速度は 3.5 cm/y と推定した。また現在、高ヒマラヤの北斜面地下の温度は 250 以上と推定した。

ナップに覆われたレッサーヒマラヤ堆積物上部は、ホットなナップにより被熱し、ナップと同様に北方に徐冷した。ナップ先端部直下の中新世の河川堆積物は最高温度 340 まで上昇し、ジルコンの FT は完全にアニールし、その年代は 10 Ma にリセットされた。

ナップの先端が 250 以下に冷却し、脆性破壊領域に達した 11.5-10Ma に、ナップ先端の MCT は脆性破壊断層を形成し、その後活動は停止した。

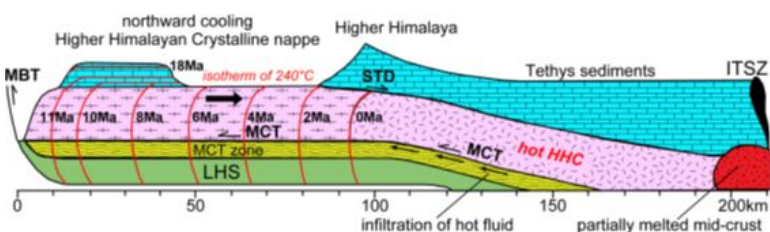
テチス堆積物は古生界が 250 以上に被熱し、MCT からの構造的距離に従い、下方冷却した。

変成帯が地表に露出後、側方に冷却しながら 1500 万年に亘り 300 以上の高温を保持した熱の供給源は、高ヒマラヤの北方に分布する部分溶融したチベットの中部地殻に求められる。



研究の成果として得られたモデル 1

エベレストモデル: 変成帯の上部では下方に急冷、ナップでは北方に側方冷却



研究の成果として得られたモデル 2

カトマンズ-ランタンモデル: ナップ先端から北方に側方冷却、一方ナップ上のテチス堆積物は下方冷却

(2) ナップ先端部とその直下の MCTzone は、100 km 北の高ヒマラヤと同じ変成相と温度・圧力履歴 (最高温度 10kbar, 660 以上、及び 8kbar, 600 ) を持っていることが明らかになった。この事実はバロビアン型の変成作用と逆転変成作用が、南北幅 100k 以上の距離の中で極めて低角度～水平の状態で行ったことを示唆する。

MCTzone の電気石の産状と EPMA による元素分析と元素分布マッピングの結果、MCTzone では変成作用により、泥質岩・炭酸塩岩から H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、B が放出され、直上の変成岩の一部が溶融し花崗岩メルトを形成したことが明らかになった。

MCTzone の石英の流体包有物には CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> が含まれており、H<sub>2</sub>O に含まれる NaCl 濃度は黒雲母帯で 6.8%、ガーネット帯下部で 7.8%、十字石・藍晶石帯で 10.4%と MCT に向け上昇しており、ガーネット帯上部では最大 19.0%に達していることが判明した。また CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 包有物の中の CO<sub>2</sub> の体積比も MCT に向け上昇している。これは炭酸塩岩の脱水と脱炭酸が上部ほど進み、高塩分の水と炭酸に富む流体が不混和状態に達していることを示し、上記の変成岩石学的結果を指示する。

一方、MCT の位置については従来様々な見解があった。そこで MCT にほぼ直交する上盤と下盤の変成した石英砂岩の粒子の形状分析を行い、MCT を挟む歪み速度分布を求めた。その結果、ミグマタイト化した片麻岩と藍晶石帯の結晶片岩の岩相境界で歪み速度が最大となり、そこが MCT であると言う古典的見解を支持するデータが得られた。

(3) レッサーヒマラヤの原生界の堆積年代は 19-16 億年前であることが、砕屑性ジルコンの U-Pb 法による最大堆積年代と上部の石灰岩の Pb-Pb 年代から明らかとなった。この間を通じ、ジルコンの供給源となった岩体の年代分布は 2450Ma と 1850Ma の 2 つのピークを持つ。後者は原生界下部の堆積岩中に貫入した花崗岩類・玄武岩類に起源をもつ。

また約 18 億年前の不整合の存在を、砕屑性ジルコンの U-Pb 年代と年代分布および基底礫岩の発見と深海から砂漠環境への堆積相の変化に基づき指摘した。

さらに上部の堆積岩中の砕屑性ジルコンの U-Pb 年代分布は、1750 Ma にピークを持ち、下部・中部のそれとは異なる。これに基づき約 17 億年前のテクトニクスと地形の変化による後背地の変動イベントの存在を推定した。

ナップを造る高ヒマラヤ変成岩類の砕屑性ジルコンの U-Pb 年代分布は、レッサーヒマラヤ堆積物のそれとは異なり、1000- 600 Ma に集中する。

(4) レッサーヒマラヤの 19-17.5 億年前の花崗岩と玄武岩質岩石の地球化学的分析の結果、火成活動の起源は、東ネパールではホットスポットが形成した海洋島玄武岩質マグマに求められ、西ネパールでは下部地殻の汚染を受けた大陸リフトと推定された。

この原生界の岩相層序と年代に基づきレッサーヒマラヤの原生界とインドの楯状地地域、中国北東部の長城地域、オーストラリアの楯状地縁辺部、北西カナダの原生界を対比し、この火成活動と堆積盆地の形成は、超大陸コロンビアが形成直後に、その縁辺部で発生した大陸分裂初期の火成活動に伴い形成されたと推定した。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

小林航、酒井治孝、岩野英樹、檀原徹、平田岳史、Unconformity of ca. 1800 Ma between the Kuncha Formation of deep-water sediments and the Naudanda Formation of eolian sediments in Nepal Lesser Himalaya, Island Arc, 査読有り、2019 (in revision)

森康、河上哲生、酒井治孝、Saline fluid inclusions in the Main Central Thrust zone, eastern Nepal Lesser Himalaya , Island Arc, 査読有り、2019 (in revision)

佐藤活志、酒井治孝、河上哲生、Distribution of ductile deformation around the Main Central Thrust zone at the frontal part of nappe in southeastern Nepal Himalaya , Island Arc, 査読有り、2019 (in revision)

酒井治孝、佐藤活志、河上哲生、岩野英樹、桑原義博、檀原徹、A brittle fault zone along the Main Central Thrust at the Higher Himalayan Crystalline nappe front in Dhankuta, southeastern Nepal, and tectonic significance , Island Arc, 査読有り、2019 (in revision)

岩野英樹、檀原徹、檀原有吾、平林沙織、中嶋徹、酒井治孝、平田岳史、Zircon fission-track and U-Pb double dating using femtosecond laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry: Methodology and application to samples from the Everest Massif , Island Arc, 査読有り、2019 (in revision)

中嶋徹、酒井治孝、岩野英樹、檀原徹、平田岳史、Northward cooling of the Kuncha nappe and downward heating of the Lesser Himalayan autochthon distributed to the south of Mt. Annapurna, west-central Nepal, Island Arc, 査読有り、2019 (in revision)

小林航、酒井治孝、岩野英樹、檀原徹、平田岳史、Non-metamorphosed autochthonous Kuncha-Naudanda Formations and their differences from those of the Kuncha nappe: a multichronological approach, Island Arc, 査読有り、2019 (in revision)

河上哲生、酒井治孝、佐藤活志、Syn-metamorphic B-bearing fluid infiltrations deduced

from tourmaline in the Main Central Thrust zone, eastern Nepal Himalayas , Lithos, 査読有り、2019 ( in revision )

吉田孝紀, Manoj MC, 大崎愛, France-Lanord C , Miocene denudation history of the Himalaya deduced from IODP Exp. 354 Bengal Fan and Siwalik Group in Nepal Himalaya , Island Arc,査読有り、 2019 ( in revision )

酒井治孝、今山武志、吉田孝紀、朝日克彦、ヒマラヤのテクトニクス、地質学雑誌、査読有り、2013 巻、2017、403-421

DOI: 10.5575/geosoc.2017.0026

〔学会発表〕 (計 8 件)

TETSUO KAWAKAMI, HARUTAKA SAKAI, KATSUSHI SATO , Syn-metamorphic B-bearing fluid infiltrations deduced from tourmaline in the Main Central Thrust zone, eastern Nepal Himalayas, Goldschmit Conference , 2019

RYUICHI SHINJO, AMURO TOMOKI, KOHEI OURA, KAZUYA OHSHIRO, SIRO TAHARA, HARUTAKA SAKAI, Geochemical characteristics of mafic and felsic igneous rocks (1.9-1.75 Ga) in the Lesser Himalaya: Regional variation and its implications for tectonic setting, JpGU, 2019

Nakajima Toru, Harutaka Sakai, Hideki Iwano, Tohru Danhara, Takafumi Hirata, Denudation history of the Higher Himalayan Crystallines in West-Central Nepal: insights from zircon fission-track dating and thermokinematic modeling, JpGU, 2019

Nakajima Toru, Harutaka Sakai, Hideki Iwano, Tohru Danhara, Cooling history of the Higher Himalayan Crystalline nappe and underlying sediments in eastern Nepal, revealed by fission-track dating of detrital zircons, JpGU, 2018

Nakajima Toru, Harutaka Sakai, Hideki Iwano, Tohru Danhara, Thermal history of the Higher Himalayan Crystallines and over-lying sediments in west-central Nepal: LA-ICP-MS zircon fission-track analyses, Himalaya-Tibet, Karakoram Workshop, 2018

酒井治孝、平林沙織、中嶋徹、岩野英樹、檀原徹、瀧上豊、熱年代学的研究によるヒマラヤの変成岩ナップの形成プロセス、日本地質学会、2018

河上哲生、酒井治孝、佐藤活志、電気石を用いた含ホウ素 H<sub>2</sub>O 流体活動と部分溶融過程制約の試み-ネパールヒマラヤ東部・ダンクッタ地域の例、日本地質学会、2018

酒井治孝、平林沙織、中嶋徹、岩野英樹、檀原徹、ネパールヒマラヤの変成岩ナップのテクトニクスと被熱・冷却プロセス、日本地質学会、2017

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕 ホームページ等 なし

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：平田 岳史

ローマ字氏名：(HIRATA, Takafumi)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科

職名：教授

研究者番号(8桁): 10251612

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：吉田 孝紀

ローマ字氏名：YOSHIDA, Kohki

研究協力者氏名：河上 哲生

ローマ字氏名：KAWAKAMI, Tetsuo

研究協力者氏名：佐藤 活志

ローマ字氏名：SATO, Katsushi

研究協力者氏名：新城 竜一

ローマ字氏名：SHINJO, Ryuichi

研究協力者氏名：森 康

ローマ字氏名：MORI, Yasushi

研究協力者氏名：ゴータム ピタンバー

ローマ字氏名：Gautam Pitambar

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。