

学位論文題名

Tectono-thermal evolution
in the Far-Eastern Nepal Himalaya:
petrological and geochronological studies

(極東ネパールヒマラヤにおける構造－温度発達史：
岩石学および地球年代学的研究)

学位論文内容の要旨

著者は、極東ネパールヒマラヤ (Tamor 河上流セクション) において、変成岩類の変成圧力－温度条件および圧力－温度履歴の推定を行ない、全岩ネオジム同位体比、黒雲母 K-Ar 年代およびジルコンの分光観察を加えて構造－温度発達史を解析した。高変成度岩で構成される上位の高ヒマラヤ帯は、下位の低変成度岩からなる低ヒマラヤ帯と主中央衝上断層 (Main Central Thrust、以下、MCT) によって境されている。MCT は地殻中部のデコルマから分岐する断層群のうち、高ヒマラヤ帯を地表にもたらしした断層として最も重要な断層の一つと考えられている。MCT 帯は幅 1km 以下から数 km に及ぶ脆性－延性せん断帯であり、その上限断層である MCT において低ヒマラヤ帯と高ヒマラヤ帯の全岩ネオジム同位体比、 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 値 (低ヒマラヤ帯: $-22.0 \sim -26.9$, 高ヒマラヤ帯: $-10.0 \sim -18.0$, MCT 帯: $-19.7 \sim -26.2$) に大きな違いが認識できる。

上記セクションにおいて、変成岩中にみられるザクロ石成長累帯構造にギブス法を適用して温度圧力経路を推定した結果、MCT を境として圧力－温度履歴の不連続が存在することが明らかになった。MCT の下盤の岩石は断熱的な圧力上昇経路を示すのに対し、その上盤では温度上昇・圧力上昇経路から温度上昇・圧力降下経路へ変化する。この圧力－温度履歴の不連続は、造山帯の異なる場所でそれぞれ圧力－温度ピークに到達した岩石がテクトニックに集合した結果として説明できる。このことは、前述の高ヒマラヤ帯と低ヒマラヤ帯における全岩ネオジム同位体比の異なる値が、源岩の相違を反映しており、両者は元来大きく離れた場所で形成されたことを示唆することとも調和的である。

また、著者は、地質温度計、圧力－温度グリッド、および変成組織に基づいて、同セクションにおける変成圧力－温度プロファイルを推定した。MCT 帯から構造的上位の高ヒマラヤ帯上部に向かって、泥質片麻岩中にみられる指標鉱物は、ザクロ石出現、十字石出現、藍晶石出現、珪線石出現、白雲母消滅、きん青石出現の順に変化し、それらのアイソグラッドは構造的上位への温度上昇を示している。ザクロ石－黒雲母地質温度計を用いて最高温度条件を推定した結果、MCT 近辺では最高温度は構造的上位へゆるやかに上昇し (約 $610\text{--}740^\circ\text{C}$)、白雲母消滅アイソグラッドより上位の高ヒマラヤ帯内部ではほぼ一定の温度を示すことが明らかになった。一方、ザクロ石－黒雲母－石英－斜長石の地質圧力計から見積もられた最高温度時の変成圧力条件は、MCT の直上において圧力ピークを示し、高ヒマラヤ帯内部では構造的上位へ低下し、上部ではほぼ一定になる。これら地質温度圧力計から見積もった温度圧力条件とその岩石の鉱物組み合わせは、温度圧力グリッドから推定される鉱物組み合わせの安定領域と概ね調和的である。ただし、きん青石を含む片麻岩から見積もられた温度－圧力

条件は、上記グリッドから推定されるきん青石を含む鉱物組み合わせの安定領域より幾分高い圧力を示す。この圧力の相違は、同片麻岩中のザクロ石斑晶の周りに発達したきん青石のコロナ構造から推定される後退変成時における等温減圧経路を考慮した場合、調和的に説明される。

さらに、見積もった変成圧力-温度条件および圧力-温度履歴を、近年プレート収束域で注目されているチャネル流れモデル (HT1 モデル: Jamieson et al., 2004) から予想されるそれらと比較した。その結果、観察される変成圧力-温度条件と上記モデルから予想されるそれらとの相違点と類似点が明瞭になりつつある。モデルは本研究で推定された最高温度プロファイルに対して、構造的低位 (MCT 近辺) で熱過剰を示し、その上位 (高ヒマラヤ帯中~上部) で熱不足を起こす。また、モデルで予想される大きなフィールド温度勾配は、観察される MCT 近辺の緩やかなフィールド温度勾配やより上位の等温的な最高温度とは明らかに矛盾する。さらに、低ヒマラヤ帯においてモデルから予想される等圧温度上昇経路は、MCT 下盤から推定された天然の断熱的圧力上昇経路の傾向とも大きく異なる。一方で、MCT の上盤と下盤での異なる圧力-温度履歴や、MCT 直上の変成圧力ピーク、およびきん青石片麻岩における等温減圧経路は、チャネル流れ予想と調和的である。

さらに、著者は、同セクションにおける 6 試料の片麻岩類から黒雲母による K-Ar 年代測定を行ない、それらの冷却年代 (約 300 °C) を推定した。これらの結果は 9-27 Ma の幅広い年代分布を示し、過剰アルゴンの影響を無視できると仮定した場合、後期に活動した熱水活動を伴う断層運動を異なる程度に受けた結果、冷却年代が異なる程度リセットされ、幅広い年代分布を持つに至ったと解釈できるかもしれない。また、これらの冷却年代はチャネル流れモデルから推定される冷却年代 (< 8Ma) に比べて、十分に古い。さらに、カソードルミネッセンス像を用いて片麻岩中のジルコンの内部構造観察を行なった結果、基質部のジルコンからは碎屑性起源の累帯構造を示すコアとそれを取り囲む薄いリムが認識された。それらのコア-リム構造は、源岩が堆積する前の火成活動時とその後の高温変成作用時にそれぞれ形成されたと考えられる。

これまで述べてきたように、現状のチャネル流れモデル予想と本研究の観察結果における主な矛盾点は、温度発達史に多く関連しており、広域的な温度場の起源の再検討が必要とされる。特に、現状のチャネル流れモデルはマグマや流体移動による熱移流を考慮しておらず、これらの垂直方向の熱移流を加えてモデルを改変することにより、現モデルが予想する高いフィールド温度勾配はより天然に観察される緩やかな勾配へと近づき、それら矛盾点の一部は解消される可能性がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 竹 下 徹

副 査 教 授 塚 本 尚 義

副 査 教 授 松 枝 大 治

副 査 研究員 在 田 一 則 (総合博物館資料部・

元理学研究科教授)

副 査 准教授 岩 森 光 (東京大学大学院理学系

研究科)

学 位 論 文 題 名

Tectono-thermal evolution in the Far-Eastern Nepal Himalaya: petrological and geochronological studies

(極東ネパールヒマラヤにおける構造－温度発達史：
岩石学および地球年代学的研究)

著者は、極東ネパールヒマラヤ (Tamor 河上流セクション) において、変成岩類の変成圧力－温度条件および圧力－温度履歴の推定を行い、全岩ネオジム同位体比、黒雲母 K-Ar 年代の測定およびジルコンのカソードルミネッセンス観察を加えて構造－温度発達史を解析した。高変成度岩で構成される高ヒマラヤ帯は、低変成度岩からなる低ヒマラヤ帯と主中央衝上断層 (Main Central Thrust, 以下 MCT) によって境される。両者の境界部には幅 1～数 km に及ぶ厚い剪断帯 (MCT 帯) が存在するが、本研究では MCT 帯の上限断層である MCT より上位の高ヒマラヤ帯と下位の低ヒマラヤ帯の間で、全岩ネオジム同位体比 ($\epsilon_{\text{Nd}}(0)$) に大きな違いがあることが明らかとなり (低ヒマラヤ帯: $-22.0 \sim -26.9$, MCT 帯: $-19.7 \sim -26.2$, 高ヒマラヤ帯: $-10.0 \sim -18.0$)、両者を構成する原岩が大きく異なっていることが推定された。

著者は、MCT にほぼ直交する上記セクションにおいて地質温度圧力計および圧力－温度グリッドに基づき変成圧力－温度の空間分布を推定した。その結果、MCT 帯から構造的上位に向かって、泥質片麻岩中に認められる指標鉱物は、ざくろ石出現、十字石出現、藍晶石出現、珪線石出現、白雲母消滅、きん青石出現のアイソグラッドを通過して変化し、変成温度の上昇が示された。ざくろ石－黒雲母地質温度計に基づいて推定された最高温度条

件は、白雲母消滅アイソグラッドまでは緩やかに上昇し（約 610-740 °C）、その上位ではほぼ一定となる。一方、ざくろ石－黒雲母－石英－斜長石の地質圧力計から見積もられた最高温度時の変成圧力条件は MCT 直上において最大（約 12 kb）となり、その上位で緩やかに低下し、高ヒマラヤ帯ではほぼ一定（約 6-8 kb）となる。これらの地質温度圧力計から見積もった温度圧力条件は、変成鉱物組み合わせから推定されるそれ（圧力－温度グリッド）と概ね調和的であるが、きん青石を含む片麻岩から地質温度圧力計を用いて推定された温度圧力は、圧力－温度グリッドが示すものよりも高压側にずれている。この事実は、コロナ構造に基づき、きん青石が後退変成作用時に形成されたと解釈されることと調和的である。

さらに著者は、変成岩中に認められるざくろ石の成長組成累帯構造にギブス法を適用して圧力温度経路を推定した。その結果、MCT の下盤の岩石は断熱的な圧力上昇経路を示すのに対し、上盤では温度上昇・圧力上昇経路から温度上昇・圧力降下経路に変化し、MCT を境に大きな圧力温度経路の不連続があることが明らかとなった。この事実は、上記の全岩ネオジム同位体比から推定される MCT を境とする原岩の大きな相違も考慮すると、高ヒマラヤ帯と低ヒマラヤ帯の岩石は、もともとかけ離れた場所で変成作用を被り、MCT 付近まで移動し合体したことを示唆する。

見積もった変成圧力－温度条件および圧力－温度履歴は、近年ヒマラヤ変成岩について行われた構造－温度発達史モデル計算（Jamieson et al., 2004）と比較された。その結果、観察される変成圧力－温度条件とモデルから予想されるそれとの類似点および相違点が明瞭になり、ヒマラヤ変成岩形成の妥当な物理モデルが絞りこまれつつある。例えば、MCT 直上の圧力ピークや MCT を境とする圧力温度経路の不連続は、モデルから予想される MCT に沿う高ヒマラヤ帯岩石のエクストルージョン的上昇と調和的であるが、一方でモデルから予想される高いフィールド温度勾配は、観察される非常に低い温度勾配と全く一致しない。この相違は、モデルではメルトや流体移動による熱移流を考慮していない一方、天然では大量のメルトや流体移動が生じていることで説明されるかもしれない。

さらに著者は、同セクションから得られた 6 個の片麻岩試料について黒雲母 K-Ar 年代測定を行い、それらの冷却年代（閉鎖温度、約 300 °C）を推定した。その結果、1 試料が示す若い年代（9 Ma）を除き、16～27 Ma の年代幅を持つ値が得られた。1 つの若い年代は後期の断層活動に伴う熱水変質に起因する可能性がある。一方、もし過剰アルゴンの影響が無視出来るならば、その他の冷却年代は、これまで得られているピークの変成作用の年代が 20 Ma 前後であることを考慮すると非常に速い冷却速度を示唆し、非常に速い変成岩の上昇が生じたことが推察される。ジルコンのカソードルミネッセンス観察により、ジルコンは振動累帯構造を示すコアと無構造の薄いリムからなることが明らかとなった。コアはもともとマグマから成長し碎屑物として形成され、リムは変成作用時に過成長したジルコンと推察される。

以上、本論文の著者は、ヒマラヤ変成岩の構造－温度発達史について新たな新知見を得、地球造構学（テクトニクス）の進展に貢献した。よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。