

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	Dyuti Prakash Sarkar
学位授与の要件	学位規則第4条第①・②項該当		
論文題目			
<p>Deformation processes of crustal-scale faults depending on depth: Studies of paleo- and active orogenic belts from Indian continent</p> <p>(深度に依存する地殻スケール断層の変形過程：インド大陸における古造山帯と活動的な造山帯の研究)</p>			
論文審査担当者			
主 査	教 授	安東 淳一	
審査委員	准 教 授	DAS KAUSHIK	
審査委員	教 授	井上 徹	
審査委員	教 授	片山 郁夫	
審査委員	教 授	柴田 知之	
審査委員	教 授	須田 直樹	
審査委員	教 授	藪田 ひかる	
審査委員	教 授	Gautam Ghosh (Department of Geology, Presidency University)	
〔論文審査の要旨〕			
<p>岩石中に記録されている変形微細組織は、地球上で発生する応力状態や岩石変形メカニズム及び構造発達史の解明に重要な情報を与える。本論文では、形成された深度が異なる3つの断層岩を対象とした研究を行い、断層形成に伴う岩石変形挙動の多様性を明らかにし、地殻変動のシナリオに重要な示唆を与えることを目的とした。研究対象とした断層岩は、1) 古造山帯のDelhi-Aravalli地帯に露出する南北約200 km に伸びるRakhabdevリニアメント(構造線, 断層), 2) 活動的造山帯であるヒマラヤ地域に露出する主境界衝上断層と3) ナハン衝突断層に沿って形成されたものである。2) と3) の断層は、インド大陸がアジア大陸に衝突した際に形成されたもので、それぞれ約300万年前に運動を停止したものと現在活動中の断層である。</p> <p>変形微細組織のキャラクタリゼーションと鉱物の化学組成分析は、偏光顕微鏡・走査型電子顕微鏡・透過型電子顕微鏡・電子後方散乱回折装置・ラマン分光分析装置・EPMAを用い多角的な見地から解析を行った。また主境界衝上断層面の特定には、LA-ICP-MSを用いて測定したジルコンのU-Pb年代を使用した。本論文は4つの研究からなり、以下の主要な結論を示している。</p> <p>(1) Rakhabdevリニアメント(構造線, 断層)に関する研究</p> <p>リニアメントに沿って露出するアンチゴライト蛇紋岩に着目し、その変形微細組織と含有されているスピネルの化学組成分析を行った。その結果、蛇紋岩は上部マントル起源のペリドタイトであり、上部マントルから下部地殻に上昇する過程では、断層岩はすべて塑性変形することを述べている。また本リニアメントは大陸地殻縁辺部の沈み込み帯に沿って形成されたもので、浅部地殻においてはCO₂を含む流体との交代作用の重要性を明らかに</p>			

した。この結果は、Rakhabdevリニアメントの成因をはじめて明らかとしたもので、インド大陸地殻の形成過程を明らかとする上で非常に重要な成果となっている。

(2) 主境界衝上断層の研究

まず主境界衝上断層の正確な位置を特定するために、構造地質学的調査とジルコンを用いた年代学的解析を行った。その上で、上盤と下盤の岩石変形の特徴を明らかとした。上盤側には、岩石のコンピテンシーの差による多層系の座屈褶曲の発達、及び褶曲軸のフェルゲンツの変化から逆向き衝上断層の存在、更に顕著に発達する層間すべりの存在を明らかにした。一方下盤側では、断層面に向かい傾斜の角度が急になる単一の大規模な座屈褶曲の存在と、褶曲中に発達するカルサイト脈の存在を明らかとした。そしてカルサイトの変形双晶から、変形時の温度は200°C以上であったことを見積もった。これらの結果から、主境界衝上断層は脆性-塑性遷移領域で活動したことを明らかとした。この研究は主境界衝上断層に対し、高分解能サンプリングと年代学的解析を行った初めての事例である。

(3) ナハン衝突断層の研究

約150 mに渡る断層破碎帯から系統的に岩石を採取し微細組織観察を行った。研究の結果、断層破碎帯の主要な岩石である灰緑色と黒色ガウジ層及び赤色ガウジ層の原岩は石英アレナイト質砂岩と粘土質砂岩であったことが理解された。また岩石変形挙動は、灰緑色ガウジ層は応力集中とそれに伴うカタクレシス、赤色ガウジ層ではクリープ挙動が支配的であったこと、そして黒色ガウジ層はウルトラカタクレサイトに富む主すべり帯の形成、脱ガス気泡や粘土クラスト凝集体が確認でき、地震生性断層によるものであることが明らかとなった。すなわち本研究から、断層形成時の岩石変形挙動は原岩によって大きく異なり、本地域では緻密な石英アレナイト質砂岩にのみ地震性断層が発達することが理解された。この研究はナハン衝突断層の断層岩の初めての微細組織・鉱物学的研究である。

(4) 断層形成時の温度測定法の研究

断層形成時の温度条件の見積もりは、断層挙動を明らかにするうえで重要である。300°C以下の温度条件を正確に見積もる方法は存在しなかった。本研究では、カルサイトを対象に炭酸塩クランプ同位体温度測定を応用し、酸素-炭素結合の時間と温度変化の数値計算を基に、300°C以下の断層形成温度条件を求め得ることを証明した。その結果から、主境界衝上断層は $262\pm 30^{\circ}\text{C}$ 、ナハン衝突断層は $170\pm 10^{\circ}\text{C}$ で形成されたことが示された。

以上の様に、本論文は古造山帯と活動的な造山帯に発達する断層岩を研究し、形成深度が異なる塑性変形領域、脆性-塑性遷移領域、脆性変形領域での岩石変形挙動の特徴を明らかとすることができた。特に、原岩の違いによって断層形成時の岩石変形挙動が大きく異なることの発見は、構造地質学研究への大きな貢献となっている。また本論文では、インド大陸地殻の形成過程を解明する上で重要な情報を提示している。更には、炭酸塩クランプ同位体温度測定が断層形成時の温度条件の正確な見積もりに応用できることを初めて示した。これまで300°C以下の断層形成時の温度条件を正確に求める方法がなく、岩石変形挙動の研究に大きな支障となっていた。本研究は断層岩研究にも大きな貢献を成し得ている。

以上の通り、本博士論文の内容は博士課程の研究にふさわしいものであり、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

- [1] D.P. Sarkar, J. Ando, K. Das, A. Chattopadhyay, G. Ghosh, K. Shimizu and H. Ohfuji, 2020, Serpentine enigma of the Rakhabdev lineament in western India: Origin, deformation characterization and tectonic implications. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 115, 216–226.

参考論文

- [1] B. Ghosh, P. Das, D. P. Sarkar, G. Ghosh, J. Mukhopadhyay, and J. Ando, 2018, Coalescing microstructure and fabric transitions with AMS data in deformed limestone: Implications on deformation kinematics. *Journal of Structural Geology*, 114, 294–309.