

学 位 論 文 題 名

Metamorphism and Deformation of
Forming Gigantic Sheath Folds in Visakhapatnam,
Eastern Ghats Granulite Belt, India.

(インド Eastern Ghats グラニュライト帯、Visakhapatnam の
巨大シース褶曲形成における変成作用および変形作用)

学位論文内容の要旨

The Eastern Ghats Granulite Belt forms an extended high grade terrain along the east coast of India. The rocks in the belt show upper amphibolite facies to granulite facies metamorphism including ultra high temperature granulites. The present study area, Visakhapatnam is located centrally in the Eastern Ghats and well exposed along the east coast of India. The khondalite (garnet-sillimanite gneiss), high Mg-Al granulites-spinel granulites and sapphirine granulites, orthopyroxene granulites (charnockite) and basic granulites are the main lithologies. These are highly interbanded, migmatized and deformed, and reveal a polyphase tectonometamorphic evolution.

Detailed investigations have been taken up around Visakhapatnam to integrate geological history with changes in pressure and temperature controlling the metamorphism and deformation of forming gigantic sheath folds. The present study is divided into three parts: 1) Structural analysis and relationships among litho-types, 2) Remote sensing (process for Aster Digital Elevation Model), 3) Petrography, mineral chemistry and thermo-barometry, simulation of metamorphic pressure-temperature path, and its tectonic implications.

Satellite images using Aster DEM data is improved and confirm the detail structural pattern of sheath folds in the study area. The structure of study area is an automatic presumption method for lineament from Aster DEM images of multishade image. The digital image processing techniques enable the user to get the desired information in a more reliable, quicker and easier way. In the present study, digital remote sensing has been used in the mapping of lineaments. Various approaches have been attempted to map the lineaments of the Visakhapatnam area, EGGB, India. Using the lineament map, the orientation of the structure patterns in the study area has been determined. Using TNT mips version 6.6 module, integration of the lineaments, structural pattern and the geological information have been attempted to evaluate the clear pattern of sheath folds in the study area.

From the structural studies of the investigated area it has recognized four different phases of deformations with respective folding (F1,F2,F3,F4): D1 as compositional banding, foliation of lenticular garnets in khondalites, D2 as mesoscopic intrafolial isoclinal to tight folds, pinch and swell structures with some stretching lineations in khondalites and leptynites. D3 as macroscopic open to tight fold showing doubly plunging shape (sheath/domal structure) in khondalites and D4 as NNE-SSW trending kink bands and foliation. Structural analysis show that the tectonic regimes around Visakhapatnam was compress ional (continent-continent collision?), which later changed in to the extensional one.

Structural and petrofabric study elucidate that the sheath folds Madhuravada (Tsuchiya et al, 1999), Visakhapatnam and Pedda Konda are possibly formed by an intense shearing. The principal process was ductile shear, which produced complex structures such as primary (mega) and secondary (meso) sheath folds. Detailed geometric analysis of minor structures of Ramadri coast provided important information about ductile sheared Khondalite which is so ductile that took migmatitic

feature formed miscellaneous and intensely deformed structures including secondary sheath folds. The mechanism to constructs the two mega-scale sheath folds Tsuchiya et al. (2000) mentioned that the Madhuravada sheath fold was formed by the top to the northward shearing. The khondalite layers folded tightly in an isoclinal shape by this intense shearing, and fallowed by bands of the hinge and formation of sheath structure. With progress stretch, the sheath was alternated. Not only at the main culmination of the sheath but also the hinge part (shoulder part) of it got concentration of such strong shearing force.

The pressure-temperature evolution has been reconstructed using geothermo-barometric constrains for the Spr-Spl granulites, charnockite and khondalites and recorded three metamorphic events. Sillimanite and garnet rims around spinel and sapphirine in Spr-Spl granulites in Madhuravada and Visakhapatnam region support decompression reactions. Sapphirine rims around spinel in Spr-Spl granulites support that spinel and quartz assemblage is formed at very high temperature and pressure (UHT metamorphism). From geothermo-barometric results: give a relatively isobaric heating-cooling path has recognized in the UHT Mg-Al granulites of Visakhapatnam.

The reported U-Pb and Sm-Nd ages of 1Ga confirm that the granulite facies metamorphism is associated with emplacement of charnockite in the Visakhapatnam area (Grew and Manton, 1986, Takano, 1999). The documented geochronological ages of charnockite and sapphirine granulites (Grew and Manton, 1986, Takano, 1999) suggests that the ultra high temperature metamorphism may be associated with the igneous intrusive complexes (charnockites?) as local/regional phenomena in the EGGB.

Combining the present structural data and metamorphic pressure-temperature path from the khondalites, high Mg-Al granulites and charnockites, and the geochronological data with those reported by previous studies in the study area, Visakhapatnam region confirm a multi-stage character of tectono-thermal history. The

deformation and metamorphism reveals the tectonic evolution of sheath folds followed by an intrusion of charnockite (1Ga) magmas under plate convergent margin environment which was subsequently followed by continental collision tectonics (Shaw and Arima, 1998, Takano, 1999).

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 松 枝 大 治

副 査 教 授 在 田 一 則

副 査 助 教 授 藤 原 嘉 樹

学 位 論 文 題 名

Metamorphism and Deformation of Forming Gigantic Sheath Folds in Visakhapatnam, Eastern Ghats Granulite Belt, India.

(インド Eastern Ghats グラニュライト帯、Visakhapatnam の
巨大シース褶曲形成における変成作用および変形作用)

近年、超高度変成岩地帯における研究が精力的に試みられている。しかし、それらの多くは地質構造解析や温度・圧力などの変成条件の推定と変成経路の解明を主な目的としており、特に多重変成作用を被った衝突テクトニクス場における複雑な地質構造の解析とその時間的変遷に関して詳細な解明が待たれている状態である。

東ガーツ、グラニュライト帯はインドの東海岸に沿って伸びる高度変成帯であり、分布する岩石は上部角閃岩相から超高温グラニュライトを含むグラニュライト岩相の変成作用を示している。本研究地域のヴィシャカパトナムは、インドの東ガーツ、グラニュライト帯の中央部に位置している。コンダライト(ざくろ石-珪線石片麻岩)、高 Mg-Al グラニュライト、スピネル-グラニュライト、サフィリン-グラニュライト、斜方輝石-グラニュライト(チャーノックイト)および塩基性グラニュライトがその主な構成岩石である。これらの岩石は著しく縞状に組み合わさっており、混成岩化あるいは変形していて、多重の変形・変成作用を蒙ったことを示している。

ヴィシャカパトナム周辺の変成作用を支配した圧力と温度の変化、および巨大なシース褶曲を形成した変形運動の地質階梯を統合するため、詳細な研究をおこなった。この研究は以下の3部分からなっている；1) 構造解析と岩石種の関係、2) リモートセンシング(Aster Digital Elevation Model)、3) 岩石記載、鉱物化学、熱圧力解析、変成の温度-圧力経路のシミュレーションとその構造発展との関連である。

Aster DEM データを用いた衛星写真像は、この地域のシース褶曲の詳細な構造様式を明確なものとした。この地域の構造は、multishade image の Aster DEM データから得られたリニアメントから自動推定法で決定した。Digital image processing 技法により、希望情報をより信頼性高くすばやく入手できる。この研究では、デジタルリモートセンシングによりリニアメントの図化をおこなった。インドでは、東ガーツグラニュライト帯ヴィシャカパトナム地域のリニアメントを図化するため、様々な取り組みがおこなわれている。リニアメント図を用いて、調査地域の構造パターンを方向を決定した。TNT mips ソフトのバージョン 6.6 モジュールを用い、シース褶曲の明瞭なパターンを得るためリニアメント、構造パターンおよび地質情報の総合化をはかった。

構造研究を通じて次の 4 期の時相が区分された；D1：コンダライトの縞状構造、レンズ状ガーネットのなす面構造、D2：コンダライト及びレプチナイト中のメソスコピックな層間等斜ないし閉じた褶曲、伸張性線構造を伴う pinch and swell 構造、D3：コンダライト中の二重に plunge したメソスコピックな等斜ないし閉じた褶曲、D4：NNE-SSW 方向のキンクバンドおよび縞状構造である。構造解析の結果、構造運動の形態は圧縮性（大陸同士の collision?）で、これは後に伸張性のものになったことを示している。

構造および岩石ファブリックの研究から、マドラヴァーダ (Tsuchiya et al., 1999)、ヴィシャカパトナムおよびペグダコンダシース褶曲が強い剪断によって形成されたことが明らかとなった。基本的な形成プロセスは可塑性の剪断によるもので、これにより主体のメガシース褶曲や二次的なメソシース褶曲が形成された。ラマドリ海岸のより小さな構造の詳細な幾何学的解析により、可塑性の剪断変形を受けたコンダライトについて重要な情報を得ることが出来たが、その可塑性の強さは二次的なシース褶曲を伴う多様な強い変形構造を形成したり、ミグマタイトの様相を示すほどのものであったことが明らかとなった。マドラヴァーダ、ヴィシャカパトナムの 2 つのメガシース褶曲を形成したメカニズムについて、Tsuchiya et al. (2000) はマドラヴァーダシース褶曲が北方へ向かった剪断の先端部にあたると述べた。コンダライトは、この強い可塑性の剪断によって等斜褶曲の形に強く褶曲し、シース褶曲を形成した。この伸張性の運動に伴い、シース褶曲が群生することとなった。主シース褶曲の頂部のみならず、ヒンジ部(肩部分)にも強い剪断力が集中し、二次的なシース褶曲が形成された。

サフィリンスピネルグラニュライト、チャーノッカイトおよびコンダライトについて、地質温度圧力計を用いて温度-圧力の変化を復元した。マドラヴァーダとヴィシャカパトナム地域のサフィリングラニュライト中のスピネル・サフィリンを取り囲む珪線石・ざくろ石のリムは、圧力低下の反応が起こったことを示している。サフィリンスピネルグラニュライトにおいて、スピネルの周囲のサフィリンからなるリムは、スピネル-石英の組合わせが非常に

高い温度・圧力下の変成作用(UHT)で形成したことを示している。地質温度圧力計の適用の結果は、ヴィシャカパットナムの超高温高圧 Mg-Al グラニュライトが、比較的等圧的な条件下の温度降下のパスを通して形成されたことを示している。

ヴィシャカパットナム地域のグラニュライト相の変成作用が、1 Ga(U-Pb, Sm-Nd 年代値)のチャーノッカイトの貫入を伴って生じていることが明らかにされている(Grew & Manton, 1986, Takano, 1999)。報告されたチャーノッカイト、サフィリングラニュライトの地質年代(Grew & Manton, 1986 ; Takano, 1999)は、超高温変成作用に伴う複合火成岩体(チャーノッカイト?)の貫入が東ガーツグラニュライト帯で、局所的かつ広域的に生じていることを示している。

研究地域の構造のデータ、コンダライト・高 Mg-Al グラニュライト・チャーノッカイトの変成温度圧力経路、および既発表の当地域における地質年代のデータを組み合わせて見ると、構造運動-温度履歴においてヴィシャカパットナム地域は多時相のものであることが明らかとなった。変形変成作用は、シース褶曲の形成に引き続いてプレート境界部環境でのチャーノッカイトマグマ(1 Ga)の活動を伴ったことが明らかとなり、これは大陸のコリジョンテクトニクスの結果として生じたものである (Shaw & Arima, 1998, Takano, 1999)。

これを要するに、著者は、インド東ガーツ変成帯における変成作用と変形作用の成因的因果関係についての新知見を得たものであり、本研究成果は超高度変成作用とそれに伴う大規模変形作用との時空的因果関係を詳細に明らかにすると共に、同地域における変成過程とその条件・経路および東インドにおける詳細な大陸衝突のテクトニクス場の復元に対して大きく貢献し、これらの成果は国際的にも同様なテクトニクス環境場にある地域での新たな視点からの研究展開にも多大な貢献をすると期待される。

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あるものと認める。