様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２６ 年　 ６ 月 １７ 日現在

機関番号：１２１０２
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2010～2013
課題番号：２２４０３０１７

研究課題名（和文）南極―インド―マダガスカル地域の岩石学的精密解析とゴンドワナ超大陸の形成

研究課題名（英文）Petrological study of granulites from Antarctica-India-Madagascar region and the formation of the Gondwana Supercontinent

研究代表者
角替　敏昭（Tsunogae, Toshiaki）

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：５０２５２８８８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　9,300,000円、（間接経費）　2,790,000円

研究成果の概要（和文）：今から約5.5億年前の地球上には、ゴンドワナ超大陸と呼ばれる巨大な大陸が存在していた。南極―インド―マダガスカル地域はこのゴンドワナ超大陸形成時の大陸衝突の最前線であったと考えられている。本研究ではインド調査を４回、南極、マダガスカル、スリランカの調査を各１回ずつ行い、この大陸衝突帯がどのように延長するのかを検討した。その結果、インドのCauvery縫合帯、スリランカのハイランド岩体、南極のリュツォホルム岩体にはほぼ同じ時代に地下深部で形成された岩石が存在し、これらが当時の衝突前線に相当する可能性がある。またこの地域には32億年、25億年、８億年前の古い岩体が多数存在することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The Gondwana supercontinent is known as the only mega-continent present at 550-600 Ma. We performed field geological survey of collisional orogenic belts within the supercontinent, which corresponds to Antarctica - South India - Madagascar region, and collected various samples of high-grade metamorphic rocks and associated igneous rocks. Detailed petrological and geochronological studies on the rocks demonstrated that this region corresponds to a paleo-suture zone along which various high-pressure and high-temperature metamorphic rocks as well as remnants of oceanic plates (ophiolites) have been recognized, particularly from the Palghat-Cauvery suture zone in southern India. We also found crustal blocks with older ages of 3.2 Ga, 2.5 Ga, and 0.7-0.8 Ga from southern India and Antarctica. These older blocks within the 550-600 Ma suture zone might correspond to microcontinents or island arcs which accreted to Archean continents during the amalgamation of the Gondwana supercontinent.

研究分野：地質学

科研費の分科・細目：岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：ゴンドワナ　造山帯　変成岩　縫合帯　大陸衝突　先カンブリア時代　地殻進化

１．研究開始当初の背景

今から約 5.5～6 億年前に、地球上に分散していた大陸が集積して「ゴンドワナ超大陸」を形成したことが明らかになっている。この超大陸形成にともなって形成された衝突帯を東アフリカ−南極造山帯とよぶが、これは現在記録されている世界最大の造山帯である。したがってそのテクトニクス解明は、地球規模で起こった過去の超大陸形成プロセスや地殻進化プロセスの解明につながるであろう。本研究対象地域である南極−インド−マダガスカル地域は、この造山帯の中央部に位置しており、激しい造山運動と火成作用・変成作用を記録している岩石が広く分布している。今まで各地域の個々の岩石を研究した例はあるが、南極からマダガスカルまでの広範囲を総合的に研究した例はない。

２．研究の目的

以上のような研究背景をふまえ、本研究では以下の３つの研究目的を設定した。

(1) 南極−インド−マダガスカル地域に産出する高度変成岩の比較

南極−インド−マダガスカル地域は、東西ゴンドワナ大陸の衝突によって形成された東アフリカ−南極造山帯の中で、ほぼ同じような位置にある。したがって、同時期に同一の条件で形成された岩石が産出することが期待される。そこで３地域の詳細な地質調査を行い、薄片作成と組織の記載を実施し、これら岩石の温度圧力履歴を推定する。こうした情報はいままで散在的に得られていたが、３地域をまとめた研究は無い。同時に代表的な岩石の年代測定を行い、それぞれから原岩形成年代と変成年代を決定して対比を行う

(2) 超高温変成作用の解析

南極やインド地域には、超高温変成岩の産出が知られているが、その数は多くない。これは、ほとんどの岩石がピーク変成作用後の熱の影響を受け、初生的な情報が消されてしまっているためである。しかし、ざくろ石などの包有物として高温期の証拠が残っている可能性がある。したがって、岩石組織の詳細な解析を行い、ゴンドワナ大陸形成時の変成作用がどれくらい高温であり、それは何を意味するのか（例えば、高い地温勾配？）を検討する。また、最新の研究手法である、鉱物平衡モデリング法による解析を当該地域に適用する。

(3)ゴンドワナ大陸形成メカニズムの解明

以上の結果をもとに、テクトニクスの考察を行う。

３．研究の方法

上記の研究を実施するための方法は以下の通りである。

(1) 南極−インド−マダガスカル地域に産出する高度変成岩の比較

研究に必要な岩石の産状の確認および試料採集のため、研究期間４年間のうち、前半の２年で南極とインドの、後半の２年でインドとマダガスカルの研究を中心に行った行う。４年間の調査の回数は、南極１回、インド４回、マダガスカル１回であった。また比較のためにスリランカ、中国北東部の調査を行った。全地域より合計 3000 個の岩石試料を採集し、これらの約 50%について、岩石薄片の作成と岩石組織の記載を行った。約 200 個の試料について、鉱物の化学分析、約 10 個の岩石について年代分析を行った。その結果をもとに、スリランカを含めた当該調査地域の岩石の比較を行った。

(2) 超高温変成作用の解析

南極、インド、マダガスカルの岩石について、形成時の最高温度圧力条件の見積もりを行う。そのために、岩石約 30 個を抽出し、詳細な組織の観察、X 線マイクロアナライザーのよる鉱物の化学分析、さらに全岩化学組成の分析を行った。

(3)ゴンドワナ大陸形成メカニズムの解明

上記(1)、(2)の研究によって得られたデータおよび過去の研究成果をもとに、まずは大陸衝突帯の正確な位置を推定した。さらに、南極とインドの間に位置するスリランカの帰属問題（ゴンドワナ大陸の復元において、スリランカの位置は人によって異なる）を解決することを試みた。

４．研究成果

各研究テーマの成果は以下の通りである。

(1) 南極−インド−マダガスカル地域に産出する高度変成岩の比較

南極地域については、第 52 次南極地域観測隊の行動の一環として行い、リュツォ・ホルム岩体の 20 カ所の露岩地域から約 2000 個の岩石試料を採集した。特に長期滞在したスカレビークスハルセン、ルンドボークスヘッタ、アウストホブデ、かすみ岩、天文台岩、明るい岬の３地域からは、十分な露頭観察や地質構造の解析結果をもとにした試料採集を行うことができた。さらに、ベスレクナウセンやすだれ岩のような人跡未踏の地からも試料を採集することができた。本研究の大きな成果として、ベスレクナウセンの詳細な地質図を作成し、25 億年前の原岩形成年代と 5.5-5.9 億年前の変成作用の年代をえることに成功した（Tsunogae et al., 2013

Geoscience Frontiers)。このような２つの年代は、リュツォ・ホルム岩体南西部において特徴的な年代である。また周辺の露岩地域の主要岩相（チャノッカイト、黒雲母片麻岩、苦鉄質片麻岩）とベスレクナウセンの岩相は非常に類似している。このような年代学的・岩相的特徴は南インドのマドゥライ岩体のものとも類似しており、後述する広域的な対比に役立つ。

インド地域については、４回の地質調査により、Palghat-Cauvery 剪断帯、ニルジリ岩体、マドラス岩体、セーラム岩体、クーグ岩体など、南インドの様々な地質体からの試料を得ることに成功した。注目すべき成果として、Palghat-Cauvery 剪断帯中に散在しているざくろ石-単斜輝石岩の解析を行い、この岩石の原岩が沈み込みの火成作用において形成されたこと、高圧の変成作用を記録していることを確認した。また、Palghat-Cauvery 縫合帯の北に位置するクーグ岩体について、初めて本格的な岩石学的･年代学的研究を行った結果、この岩体が 32-33 億年前の火成作用と変成作用によって形成され、その後の熱的イベントを全く受けていない特殊なものであることを初めて明らかにした（Santosh et al., 2013 Gondwana Research)。この発見により、南インドの地帯区分を再検討する必要があること指摘した。さらに、クーグ岩体の南に位置するニルジリ岩体から、25 億年前の海洋プレートの断片（オフィオライト）を発見した（Santosh et al., 2013 Precambrian Research)。同様の 25 億年前の岩石は、この岩体の東方延長である Palghat-Cauvery 縫合帯に沿っていくつか発見されている。Palghat-Cauvery 縫合帯は 5.5-5.9 億年間の大陸衝突帯であるにもかかわらず、このような 25 億年や 8 億年の岩体が多数報告されていることは、これら岩体は当時は微小大陸（セーシェルなど）や島弧（日本やフィリピンなど）として存在していた島々が、大陸衝突にともなう海洋（今回の場合はモザンビーク海）の閉塞によって大陸に付加したものと考えられる。

マダガスカル地域については、現地の治安悪化のため当初予定していた地域を調査できなかった。しかし、チャノッカイト、ミグマタイトなどの貴重な試料を採集した。マダガスカル中部のアンタナナリボ岩体には、褐色で斜方輝石を含む花崗岩質岩（チャノッカイト）がパッチ状に優白色で斜方輝石を含まない黒雲母片麻岩中に点在している。このような組織は「incipient charnockite」と呼ばれており、インドやスリランカの同時代の岩石に特徴的である。その成因については、二酸化炭素に富む流体の浸透による黒雲母の脱水反応と斜方輝石の成長が指摘されている。マダガスカル中央部にも同様の岩石が存在することは、インド - スリランカからマダガスカルにつながる地域における、広域的な CO_2 流体の浸透が考えられる。

(2) 超高温変成作用の解析

当該地域に特徴的な超高温変成作用について、鉱物平衡モデリングをもとにしたシュードセクション法による解析を行った。この方法は、全岩化学組成と鉱物の熱力学的データから、任意の温度圧力において安定な鉱物組み合わせを計算するものである。

南極地域については、リュツォ･ホルム岩体東部の明るい岬に産出するサフィリンやスピネルを含む苦鉄質岩にシュードセクション法を適用し、900℃を超えるような超高温変成作用の証拠を見いだした。一般的にリュツォ･ホルム岩体は西部で最も変成温度が高く、東部ではせいぜい 700℃程度の変成作用を被っていると考えられてきた。しかしながら、今回初めて東部から高温の変成作用が報告されたことは、リュツォ･ホルム岩体全体の変成作用について再検討する必要があるといえる。

インドについては、マドゥライ岩体の Rajapalaiyam 地域、セーラム岩体の Kanja Malai 地域、Palghat-Cauvery 縫合帯の Perundurai 地域など、広範囲の岩石について解析を行った。Rajapalaiyam 地域からは 1000℃を超える超高温変成作用が得られたのに対し、Kanja Malai および Perundurai 地域の変成作用はせいぜい 800℃であった。これは異なる時代の変成作用を示唆している可能性がある。

マダガスカル地域の解析については、現在チャノッカイトに含まれるざくろ石+斜方輝石を含む鉱物組み合わせの形成条件を解析中であるが、インドの岩石と同程度の温度圧力条件が得られている。この結果はインドとマダガスカルの岩石の対比に役立つであろう。

またその他の地域として、中国北東部・北中国横断造山帯、モンゴル西部・アルタイ岩体、南部アフリカ・リンポポ岩体の高温～超高温変成岩のシュードセクション法による解析を行い、それぞれの地域の変成史とテクトニクスを解析するとともに、ゴンドワナ大陸形成にともなう造山運動との比較を行った。概して大陸衝突型の高温変成作用は、岩石埋没時に高温高圧の変成作用を受け、その後急激な隆起とともに様々な減圧組織が岩石中に記録され、最終的に地表に達するという温度圧力経路を持つことが明らかになった。

(3) ゴンドワナ大陸の形成過程の解明

以上の結果をもとに、岩相および変成作用を広域的に対比し、ゴンドワナ大陸の形成過程の考察を行った。南インドには明瞭な大陸衝突時の縫合帯として、Palghat-Cauvery 縫合帯が存在する。これは大陸衝突にともなう海洋の閉塞によって形成されたものであるが、西部では Bhavani-Moyar 縫合帯を経由してマダガスカルへと連続することが知られ

ている。一方で東部への延長は不明であった。本研究によって、Palghat-Cauvery 縫合帯にて特徴的な高圧変成作用を被った苦鉄質片麻岩が、南極リュツォ·ホルム岩体から確認された。これは、Palghat-Cauvery 縫合帯が南極まで延長する可能性があることを示唆している。これは近年南インドや南極で相次いで確認された 25 億年前の太古代末期の原岩形成年代をもつ岩石が、両地域の広範囲に分布する事実と調和的である。つまり Palghat-Cauvery 縫合帯は大陸衝突の最前線であり、この構造帯の形成がゴンドワナ大陸形成の最末期（5.2 億年前）に起こったことを意味している。一方で南インドの各地で確認されているオフィオライト（海洋プレートの断片）が南極からは確認されていない。今後の更なる研究が期待される。

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３０件）

(1) Santosh, M., Yang, Qiong-Yan, Shaji, E., Tsunogae, T., Ram Mohan, M., Satyanarayanan, M. (2014) An exotic Mesoarchean microcontinent: The Coorg Block, southern India. Gondwana Research (in press) 、査読有.
doi: 10.1016/j.gr.2013.10.005

(2) Tsunogae, T., Dunkley, D.J., Horie, K., Endo, T., Miyamoto, T., Kato, M. (2014) Petrology and SHRIMP zircon geochronology of granulites from Vesleknausen, Lutzow-Holm Complex, East Antarctica: Neoarchean magmatism and Neoproterozoic high-grade metamorphism. Geoscience Frontiers, 5(2), 167-182、査読有.
doi:10.1016/j.gsf.2013.04.003

(3) Shimizu, H., Tsunogae, T., Santosh, M. (2013) Petrology and phase equilibrium modeling of sapphirine + quartz assemblage from the Napier Complex, East Antarctica: diagnostic evidence for Neoarchean ultrahigh-temperature metamorphism. Geoscience Frontiers, 4, 655-666、査読有.
doi: 10.1016/j.gsf.2012.09.001

(4) Iwamura, S., Tsunogae, T., Kato, M., Koizumi, T., Dunkley, D.J. (2013) Petrology and phase equilibrium modeling of spinel-sapphirine-bearing mafic granulite from Akarui Point, Lutzow-Holm Complex, East Antarctica: Implications for the P-T path. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 108, 345-350、査読有.
doi: 10.2465/jmps.130621a

(5) Endo, T., Tsunogae, T., Santosh, M., Shimizu, H., Shaji, E. (2013) Granulite formation in a Gondwana fragment: petrology and mineral equilibrium modeling of incipient charnockite from Mavadi, southern India. Mineralogy and Petrology, 107, 727-738、査読有.
doi: 10.1007/s00710-012-0214-x

(6) Santosh, M., Shaji, E., Tsunogae, T., Ram Mohan, M., Satyanarayanan, M., Horie, K. (2013) Suprasubduction zone ophiolite from Agali hill: Petrology, zircon SHRIMP U-Pb geochronology, geochemistry and implications for Neoarchean plate tectonics in southern India. Precambrian Research, 231, 301-324、査読有.
doi:10.1016/j.precamres.2013.04.003

(7) Endo, T., Tsunogae, T., Santosh, M., Shaji, E. (2012) Phase equilibrium modeling of incipient charnockite formation in NCKFMASHTO and MnNCKFMASHTO systems: a case study from Rajapalaiyam, Madurai Block, southern India. Geoscience Frontiers, 3(6), 801-811、査読有.
doi: 10.1016/j.gsf.2012.05.005

(8) Santosh, M., Xiao, W.J., Tsunogae, T., Chetty, T.R.K., Yellappa, T. (2012) The Neoproterozoic subduction complex in southern India: SIMS zircon U-Pb ages and implications for Gondwana assembly. Precambrian Research, 192-195, 190-208、査読有.
doi:10.1016/j.precamres.2011.10.025

(9) Tsunogae, T., Santosh, M. (2011) Fluids in high- to ultrahigh-temperature metamorphism along collisional sutures: Record from fluid inclusions. Journal of Asian Earth Sciences, 42, 330-340、査読有.
doi:10.1016/j.jseaes.2010.11.016

(10) Saitoh, Y., Tsunogae, T., Santosh, M., Chetty, T.R.K., Horie, K. (2011) Neoarchean high-pressure metamorphism from the northern margin of the Palghat-Cauvery Suture Zone, southern India: petrology and zircon SHRIMP geochronology. Journal of Asian Earth Sciences, 42, 268-285、査読有.
doi:10.1016/j.jseaes.2010.11.015

〔学会発表〕（計５０件）

(1) Tsunogae, T., Dunkley, D.J., Miyamoto, T., Kato, M. (2013) Neoarchean magmatism and Neoproterozoic high-grade metamorphism in the southern Lützow-Holm Complex, East Antarctica. 第 10 回国際ゴンドワナ-アジアシンポジウム（韓国・太田）、2013 年 10 月 1 日.

(2) Koizumi, T., Tsunogae, T., Santosh, M., Chetty, T.R.K. (2013) Petrology, geothermobarometry and geochemistry of mafic-ultramafic rocks from Aniyapuram in the

Palghat-Cauvery Suture Zone, Southern India. 第 10 回国際ゴンドワナ-アジアシンポジウム（韓国・太田)、2013 年 10 月 1 日.

(3) Iwamura, S., Tsunogae, T., Koizumi, T., Kato, M., Dunkley, D.J. (2013) Petrology and phase equilibrium modelling of spinel-sapphirine-bearing mafic granulite from Neoproterozoic-Cambrian Lützow-Holm Complex, East Antarctica. 第 10 回国際ゴンドワナ-アジアシンポジウム（韓国・太田)、2013 年 10 月 1 日.

(4) 角替敏昭(2013) マダガスカル南部イフシ地域のパッチ状チャノッカイトの形成過程. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会（幕張メッセ)、2013 年 5 月 22 日.

(5) 角替敏昭、D.J. Dunkley、宮本知治、加藤睦実、堀江憲路、遠藤雄大(2012) 東南極リュツォホルム岩体 Vesleknausen の地質と変成作用. 第 32 回極域地学シンポジウム（立川)、2012 年 11 月 30 日.

(6) Tsunogae, T. (2012) Petrology and fluid inclusions of garnet-clinopyroxene rocks from the Gondwana suture zone in southern India: Implications for prograde high-pressure metamorphism. 欧州地球科学連合 2012 年大会 (オーストリア・ウィーン)、2012 年 4 月 26 日.

(7) 角替敏昭、Daniel J. Dunkley、宮本知治、加藤睦実 (2011) 東南極リュツォ・ホルム岩体最高温度部の温度圧力流体履歴の再検討. 日本地質学会第 118 年学術大会(茨城大学)、2011 年 9 月 21 日.

(8) Tsunogae, T., Santosh, M., Chetty, T.R.K. (2011) Carbonic fluids ultrahigh-temperature metamorphism along the Gondwana collisional orogen in East Antarctica and Southern India. 第 8 回国際ゴンドワナ-アジアシンポジウム（インド・ハイデラバード)、2011 年 8 月 27 日.

(9) Endo, T., Tsunogae, T., Santosh, M., Shaji, E. (2011) Incipient charnockite from Mavadi in the Southern Granulite Terrane, India: Geothermobarometry and mineral equilibrium modeling.第 8 回国際ゴンドワナ-アジアシンポジウム（インド・ハイデラバード)、2011 年 8 月 27 日.

(10) Tsunogae, T., Shimizu, H., Kato, M., Miyamoto, T., Dunkley, D.J. (2011) Carbonic fluids associated with ultrahigh-temperature metamorphism of the Neoproterozoic Lutzow-Holm Complex, East Antarctica: evidence from fluid inclusions. 第 11 回国際南極地学シンポジウム（イギリス・エジンバラ)、2011 年 7 月 12 日.

〔その他〕
ホームページ等
http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~gansekihp/index.html

６．研究組織

(1)研究代表者
角替　敏昭（TSUNOGAE, Toshiaki）
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号：50252888

(2)研究分担者
M. サントッシュ（SANTOSH, M.）
高知大学・名誉教授
研究者番号：20333453