

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19403013  
 研究課題名 (和文) 西-東 Gondwana 大陸の衝突と超高温変成作用  
 研究課題名 (英文) West- and East-Gondwana collision and ultra-high temperature metamorphism  
 研究代表者  
 有馬 眞 (ARIMA MAKOTO)  
 横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授  
 研究者番号：10184293

研究成果の概要 (和文)：マダガスカル南部において地質調査を行い、超高温変成岩が広範囲に分布すること明らかにした。超高温変成岩石類の岩石学的解析とジルコン U-Pb 同位体年代分析を行い、変成温度圧力条件と変成年代についての新しい知見を得た。約 5.5 億年前の東 Gondwana 大陸と西 Gondwana 大陸の大陸衝突と、それに伴うマントルからの熱移送により、地殻下部において 1000°C を超す条件下で超高温変成岩が形成されたことをマダガスカル南部で初めて明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：This study conducted the geological, petrological, and zircon U-Pb geochronological studies on the rocks from southern Madagascar and documented for the first time that the studied area underwent regional ultra-high temperature (UHT) metamorphism following a clockwise *P-T* trajectory. The data indicate that the UHT metamorphic event was associated with E- and West-Gondwana continental collision during the Pan-Africa time (~550 Ma). The crustal UHT metamorphic conditions imprinted on the studied rocks represent high heat flux from asthenospheric mantle to overlying continental crust.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	12,700,000	3,810,000	16,510,000

研究分野：地球科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：地殻、Gondwana 大陸、超高温変成作用、マダガスカル

## 1. 研究開始当初の背景

Gondwana 超大陸は、西 Gondwana 大陸と東 Gondwana 大陸の衝突により誕生した。原生代・東アフリカ造山帯とよばれるモザンビークからマダガスカルに続き、さらに南極に至る長大な変動帯は、このような大陸衝突により形成された Gondwana 大陸衝突帯と考えられている。東アフリカ造山帯は約 7 億年前に

形成が開始し、4.5 億年前に終了し、Gondwana 超大陸が誕生した。

大陸衝突帯には、1000°C に達する温度条件で再結晶した超高温変成岩が分布している。研究代表者は、大陸衝突に伴い大陸下部層にマントルから大量の熱と物質 (マグマ) が供給され、これら超高温変成作用に形成されたとの着想を得た。すなわち、大陸衝突による

地殻厚化と重力不安定化によるリソスフェア・デラミネーションに伴い、大量の熱と物質（マグマ）が地殻下部へ供給され、超高温変成岩が形成されたとする仮説である。大陸衝突と超大陸の形成は、大陸地殻の進化ばかりでなく、マンツルの化学進化においても重要なプロセスと考えられ、マンツルダイナミクスに支配されたエピソード的な地球進化プロセスの具体的反映であり、その解明は全地球テクトニクスを理解する上で重要な研究対象である。

ゴンドワナ超大陸の主要構成要素である東ゴンドワナ大陸の形成時期は、約 10 億年前（グレンビル期）とする説と、4.5 億年前（パンアフリカン期）とする諸説が提唱されてきた。加えて、東—西ゴンドワナ大陸衝突帯の地理的分布を、モザンビーク—マダガスカル—南極リッツホルム帯とする説と、モザンビーク—マダガスカル—南アフリカ・ダマラ帯とする説が提唱されているが、精細は明らかではない。

## 2. 研究の目的

上記のように、西ゴンドワナ大陸と東ゴンドワナ大陸の衝突により誕生したゴンドワナ超大陸の形成過程の解明のためには、マダガスカルに分布する変動帯の研究が重要な位置をしめている。しかしながら、マダガスカルに分布する後期変成帯の形成時期、変成作用については、十分な研究が行われていない。

本研究は、マダガスカル南部に分布する後期変成帯の地質調査と地質情報の収集を行い、変成作用帯の分布、構造、変成作用と変成時代の解析を主な目的とした。また、ゴンドワナ大陸の一部を構成した、インドとカメルーンに分布する太古代岩石類についての年代測定と岩石学的評価を目的とした。

本研究の具体的研究目的：

- (1) 超高温変成帯の精細な現地地質調査に基づいた構造地質学的解析を行い、さらに変成温度圧力の評価と、温度圧力経路の推定を行う。
- (2) これら地域に分布する変成岩石類について、同位体年代学的手法による形成年代の推定を行う。
- (3) 変成岩石類の全岩化学組成の評価を行い、変成岩の源岩の特定、変成作用に伴うメルト・フルイドの役割について解析する。
- (4) 超高温変成作用の解析から、大陸衝突に伴う大陸下部地殻とマンツルの相互作用を評価し、大陸形成テクトニクスモデルを構築する。

## 3. 研究の方法

(1) マダガスカル南部に分布する後期変成帯の地質調査を各年度について行った。さらに地質情報の収集のため、平成 20 年にマダガスカル共和国アンタナナリボ大学地質学科と共催で、アンタナナリボ大学において、マダガスカルの地質に関するシンポジウムを 3 日間開催し、地質巡検を行った。

(2) 採集した岩石類の変成岩岩石学的解析を行った。岩石の組織解析を偏光顕微鏡と走査型電子顕微鏡、エネルギー分散型電子マイクロプローブ分析装置を用いて行った。

(3) ジルコン結晶を分離し、国立極地研究所の白石和行教授および D. Dunkley 博士と連携し、ジルコン結晶の U-Th-Pb 同位体組成分析を SHRIMP（二次イオン質量分析装置）を用いて行った。

(4) 採集した岩石試料について、全岩化学組成分析を蛍光 X 線化学分析装置および ICP-MS 化学分析装置を用いて行った。

## 4. 研究成果

### (1) 現地地質調査

①平成 19 年度：研究代表者（有馬）および研究分担者（白石和行、石川正弘）が、マダガスカル共和国アンタナナリボ大学の R. Rabeloson 教授と R. Rakotondrazafy 教授の協力を得てマダガスカル南部において 9-10 月に約 4 週間、地質調査を実施し構造地質的データの採取と岩石試料の採集を行なった。横浜国立大学大学院生（日本人院生 1 名およびマダガスカル人文部科学省国費留学生 1 名）が同行した。

②平成 20 年度：研究代表者（有馬）および連携研究者（石川正弘）がマダガスカル南部において 10-11 月に約 3 週間にわたり地質調査を実施し、構造地質的データの採取と岩石試料の採集を行なった。横浜国立大学大学院生（日本人院生 1 名およびマダガスカル人文部科学省国費留学生 1 名）が同行した。さらに、アンタナナリボ大学において、アンタナナリボ大学地質学科と共催でマダガスカルの地質に関するシンポジウムを 3 日間開催し地質巡検を行った（10 月 26—29 日、参加者約 100 名）。

③平成 21 年度：研究代表者（有馬）が、マダガスカル南部において地質調査を 9-10 月に約 4 週間実施し構造地質的データの採取と岩石試料の採集を行なった。横浜国立大学大学院生（マダガスカル人文部科学省国費留学生）2 名が同行した。

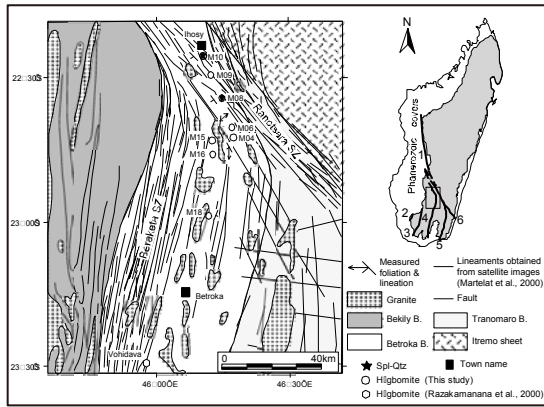


図1. マダガスカル南部調査地域とhōgbomiteの産出地点

(2) 変成岩岩石学的解析成果

マダガスカル南部に、下部地殻起源の超高温変成帯が30x100kmにわたり分布することを初めて明らかにした(図1)。変成温度と圧力条件に解析を行ない最高温度条件950°C、圧力条件0.65 GPaの値を得た。時計回りの温度圧経路を明らかにした(図2)。下部地殻フルイドによる交代作用により希少鉱物hōgbomiteが広範囲に生成したことが新たに確認された(図1)。推定された最高温度圧力条件(950°C、0.65 GPa)と時計回りの温度圧経路は、大陸表層を構成していた岩石類が大

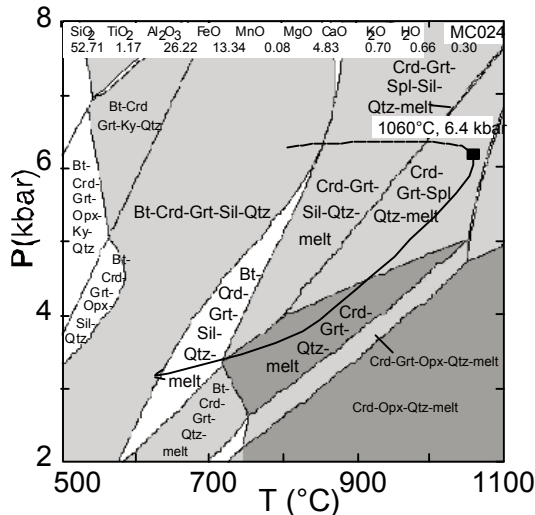


図2. 推定された変成温度圧力条件と温度圧力経路

陸衝突により地殻が深部に移動し、リソスフェア・デラミネーションに伴う大量の熱の供給により超高温変成岩が形成されたとする仮説を検証するものである。

(3) U-Th-Pb 同位体組成分析成果  
超高温変成作用の年代を正確に決定するため、ジルコンの分離を行ない、ジルコン結晶のU-Pb-Th 同位体測定を行った(図3)。変成年代として原生代550Maの年代値を得た。堆積岩起源変成岩から3100Ma、2905Ma、ミグマタイトから1913Ma、1889Maの太古代の年代を得た(表1)。これら太古代年代値は、太古代地質帯が原生代550Ma前の大陸衝突により再結晶し、超高温変成岩帯が形成された事を示唆している。

表1. SHRIMP ジルコン U-Pb 年代

岩石タイプ	年代 (Ma)
泥質変成岩	3100, 1959 ± 20, 533 ± 6
優白質ミグマタイト	1913 ± 26, 533 ± 18
優黒質ミグマタイト	1889 ± 24, 538 ± 15, 522 ± 24
砂質片麻岩	2905 ± 13, 1930 ± 21, 549 ± 12
花崗岩	550 ± 6, 522 ± 13
花崗岩	787 ± 7

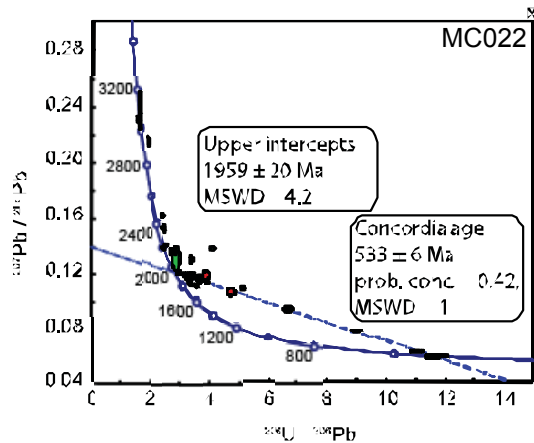


図3. 泥質変成岩のSHRIMP <sup>238</sup>U/<sup>206</sup>Pb vs <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb プロット

(4) 変成帯に分布する塩基性火成岩起源変成岩の地球化学的特徴を明らかにした。これら岩石の化学組成は、現在のプレート収束帯で形成されている玄武岩の特徴と類似しており、東一および西 Gondwana 大陸の衝突帯でプレート収束帯に特徴的な玄武岩マグマの活動が認められた。

(5) インド・シンブンクラトン、コンゴ・キバラン帯、カメルーン・ニテム帯の形成年代を明らかにした。

これら成果を査読付国際学術誌、学会発表：米国地質学会、日本鉱物科学会・地質学会などの学会・シンポジウムにおいて発表した。

## 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 10 件)

- ① N. O.T. Rakotonandrasana, M. Arima, R. Miyawaki, and R. A. Rambeloson. Widespread occurrences of hōgbomite (2N2S) in UHT metapelites from the Betroka belt, southern Madagascar: Implications on melt/fluid activity during regional metamorphism. 51, 869-895, doi:10.1093/petrology/egq004, Journal of Petrology doi:10.1093/petrology/egq004), March, 2010 査読有り.
- ② T. Takam, M. Arima, J. Kokonyangi, D. J. Dunkley, and E.N. Nsifa, Paleoarchaeoan charnockite in the Ntem complex, Congo craton, Cameroon: insights from SHRIMP zircon U-Pb ages. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 104, 1-11, 2009 査読有り.
- ③ R. Mazumder and M. Arima, Implication of mafic magmatism in an intracontinental rift setting: a case study from the Palaeoproterozoic Dhanjori Formation, Singhbhum Crustal Province, India. Journal of Geology, v. 117, No. 4, 455-466, 2009 査読有り.
- ④ R. Mazumder, J. P. Rodríguez-López, M. Arima, A. J. van Loon. Palaeoproterozoic seismite (fine-grained facies of the Chaibasa Fm., E. India) and their soft-sedimentary deformation structure. Geological Society of London Special Publication. 323, 301-318, 2009, doi:10.1144/SP323.152009 査読有り.
- ⑤ T. Takam, M. Arima, J. Kokonyangi, D. J. Dunkley, and E.N. Nsifa, Paleoarchaeoan charnockite in the Ntem complex, Congo craton, Cameroon: insights from SHRIMP zircon U-Pb ages. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 104, 1-11, 2009 査読有り.
- ⑥ S. Bose, K. Das, and M. Arima. Multiple stages of melting and melt-solid interaction in the lower crust: new evidence from UHT granulites of Eastern Ghats Belt, India. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 103, 266-272, 2008 査読有り.
- ⑦ S. Saito, M. Arima, and T. Nakajima,

Hybridization of a shallow 'I-type' granitoid pluton and its host migmatite by magma-chamber wall collapse the Tokuwana pluton, central Japan. Journal of Petrology. 48, 79-111, 2007 査読有り.

- ⑧ J. W. Kokonyangi, A. B. Kampunzu, R. Armstrong, M. Arima, M. Yoshida, T. Okudaira. U-Pb SHRIMP dating of detrital zircons from the Nzilo Group (Kibaran Belt): implications for the source of sediments and Mesoproterozoic evolution of central Africa. *Journal of Geology*, **115**, 99-113, 2007 査読有り.
- ⑨ S. Saito, M. Arima, T. Nakajima, K. Misawa, K., and Kimura, J., Formation of distinct magma batches by partial melting of hybrid lower crust in the Izu-Bonin-Marina arc and Honshu arc collision zone, central Japan. *Journal of Petrology*, **48**, 1761-1791; doi:10.1093/petrology/egm037, 2007 査読有り.
- ⑩ Pati, J. K., Patel, S. C., Pruseth, K. L., Malviya, V. P., Arima, M., Raju, S., Pati, P., and Prakash, K., Geology and geochemistry of giant quartz veins from the Bundelkhand craton, central India and their implications. *Journal of Earth System Science*. **116**, 497-510, 2007 査読有り.

[学会発表] (計 17 件)

- ① N. O.T. Rakotonandrasana, M. Arima, R. Miyawaki, R. Rambeloson, Widespread occurrences of Hōgbomite (2N2S) In UHT Metapelites from the Betroka belt, southern Madagascar: Implications of melt/fluid activity during regional metamorphism. Geological Society of America, Annual Meeting (18-21 October 2009) Portland.
- ② M. Arima, M. Ishikawa, and S. Saito, Granitic middle crust of the northern IBM arc: Constraints from geochemical and geophysical studies of the Miocene granitoids in the Izu collision zone, central Japan. Geological Society of America, Annual Meeting (18-21 October 2009) Portland, (invited).
- ③ T. Takam, M. Arima, D. Dunkley, Pb Loss in zircons of granitoids from the Ntem complex: questioning the

post-charnockite migmatization. 第29回極域地学シンポジウム、極地研究所, 10月8日, 2009年, 東京.

- ④ Bose, S., Dunkley, D. J. and Arima, M., Zircon U-Pb SHRIMP Ages From Eastern Ghats Belt, India and Their Implication on the Indo-Antarctic Correlation. AGU Fall Meeting San Francisco, EOS Trans. 89(53) V31C-2159, 12月13日, 2008年.
- ⑤ M. Arima. Granitic middle crust in the northern Izu-Bonin-Mariana arc: its bearing on generation of the continental crust. Symposium National. Les dix Dernieres Annees des sciences de la Terre a Madagascar. Oct. Antananarivo, 10月27日, 2008年(invited).
- ⑥ N. O. T., Rakotonandrasana, M. Arima, R. Rabeloson, Metamorphism and melt/fluid-rock interaction of the mid-to lower crust during the pan-African orogenesis: A case study from the southern part of Madagascar. Symposium National. Les dix Dernieres Annees des sciences de la Terre a Madagascar. Oct. Antananarivo, 10月27日, 2008年.
- ⑦ M. Ishikawa, T. Ichiki, M. Arima, and R. Rakotondrazafy, Structure characteristics of metamorphic rocks around the Ifanadiana and Vohilava areas, central-eastern Madagascar. Symposium National. Les dix Dernieres Annees des sciences de la Terre a Madagascar. Oct. Antananarivo, 10月27日, 2008年.
- ⑧ T. Takam, M. Arima, D. J. Dunkley. Pre-2.9 Ga charnockite magmatic events in the Ntem complex-Congo craton, recorded by/from SHRIMP zircon geochronology. p. 54, 2008. 日本鉱物科学会年会、秋田, 講演要旨集 p. 55, 10月22日, 2008年.
- ⑨ N. O. T. Rakotonandrasama, M. Arima. Petrological evolution of the southern part of Ranotsara Shear Zone, Madagascar during the Pan-African event: metamorphism and melt/fluid-rock interaction 日本鉱物科学会年会, 秋田, 10月21日, 講演要旨集 p. 56, 2008年.
- ⑩ S. Bose, M. Arima, D. J. Dunkley. U-Pb zircon SHRIMP ages from the Eastern Ghats Belt, India and their implications on the evolution of the composite Eastern Ghats-Rayner orogenic belt. 日本鉱物科学会年会、秋田, 講演要旨集 p. 54, 10月21日, 2008年.
- ⑪ S. Bose, M. Arima, K. Das, and S. Karmakar, Metamorphic imprints of Chilka Lake granulite, Eastern Ghats Belt, India and their implications to the assembly of Proterozoic Gondwana. 27<sup>th</sup> 極域地学シンポジウムプログラム, Tokyo, 10月18日, 2007年.
- ⑫ T. Takam, M. Arima, J. Kokonyangi, D. Dunkley, K. Shiraishi, and E. Nsifa, Zircon U-Pb SHRIMP age of granitoids from the Ntem complex, Cameroon block in the Congo craton: Implication for Archaean crustal evolution. 27<sup>th</sup> 極域地学シンポジウム, Tokyo, 10月18日, 2007年.
- ⑬ Bose, S., Das, K., Ohnishi, I., Arima, M., Solid-melt-fluid interaction during reworking of the lower crust: evidence from the Eastern Ghats Belt, India. 日本地質学会第114学術大会、講演要旨 p. 171, 札幌, 9月10日, 2007年.
- ⑭ T. Takam, M. Arima, J. Kokonyangi, D. Dunkley, and E. Nsifa, The Archaean geochronology of the Ntem complex in the Congo craton, Cameroon: An insight from the zircon U-Pb SHRIMP age. 日本地質学会第114学術大会、講演要旨集 p. 169, 札幌, 9月10日 2007年.
- ⑮ N. O. T. Rakotonandrasana, M. Arima, R. Miyawaki, R. Rabeloson. Högbonite-bearing ultrahigh temperature metamorphosed metapelite from northern part of the Betroka belt, southern Madagascar. 日本地質学会第114学術大会、講演要旨 p. 301, 札幌, 9月10日, 2007年.
- ⑯ N. O. T. Rakotonandrasama and M. Arima. Högbonite-bearing ultra high temperature metamorphosed rocks from Southern Madagascar. Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, 5月22日, 2007年.
- ⑰ T. Takam, M. Arima J. Kokonyangi, D. Dunkley and E. N. Nsifa. U-Pb SHRIMP age of the charnockitic granitoids in the Ebolowa-Ambam region, Congo craton, South Cameroon. Japan earth and Planetary Science Joint Meeting, 5月22日, 2007年.

[その他]

ホームページ等

[http://www.eis.ynu.ac.jp/natural\\_frame.htm](http://www.eis.ynu.ac.jp/natural_frame.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

有馬 眞 (ARIMA MAKOTO)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授  
研究者番号：10184293

### (2) 研究分担者

石川 正弘 (ISHIKAWA MASAHIRO)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授  
研究者番号：70232270

(H20～H21 年度連携研究者)

鈴木 和博 (SUZUKI KAZUHIRO)

名古屋大学・年代測定総合研究センター・教授  
研究者番号：90111624

(H20～H21 年度連携研究者)

本吉 洋一 (MOTOYOSHI YOICHI)

国立極地研究所・研究教育系・教授  
研究者番号：90211606

(H20～H21 年度連携研究者)

白石 和行 (SHIRAISHI KAZUYUKI)

国立極地研究所・研究教育系・教授  
研究者番号：90132711

(H20～H21 年度連携研究者)

外田 智千 (HOKADA TOMOKAZU)

国立極地研究所・研究教育系・助教  
研究者番号：60370095

(H20～H21 年度連携研究者)

### (3) 連携研究者

研究分担者に記載