

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：14501  
研究種目：基盤研究(B)  
研究期間：2010～2014  
課題番号：22403012  
研究課題名(和文)大陸のテクトニクス：大陸の姿・形を変えた様子を古地磁気学から探る

研究課題名(英文) Deformation of a continent

研究代表者  
乙藤 洋一郎 (Otofuji, Yo-ichiro)  
神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90160895  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：インド亜大陸-アジア大陸の衝突に伴うアジア大陸の変形の様子を、古地磁気学的方法で明した。古地磁気測定の結果、インドの衝突が原因で、(1)中国四川省南部・雲南省・インドシナ半島は、20度以上の時計回り回転運動と約10度の南下運動を被った、(2)中国四川省南部・雲南省では、弧状山脈を形成する様な内部変形をうけた、(3)変形現象は、カンボジアをこえマレー半島まで及んだ、ことがわかった。

研究成果の概要(英文)：Deformation aspect of a continent is studied by paleomagnetic view points. We focus on the Asian continent due to collision of the Indian continent. SE Asia is chosen for deformation study of the Asian continent. Because India collided with Asia at about 50 Ma, we collected Cretaceous red sandstones from Yunnan, Sichuan, Indochina Peninsula and Malay Peninsula. Reliable paleomagnetic directions are observed after careful thermal demagnetization. These data describe deformation of SE Asia as follows. (1)SE Asia experienced clockwise rotation more than 20 degrees. A zone affected by clockwise rotational deformation extends from the southern tip of the Chuan Dian Fragment, through Indochina Peninsula to as far as the Malay Peninsula. (2) The Shan-Thai block and the southern margin of the Indochina Peninsula were subjected to internal tectonic deformation. (3)The Khorat basin behaved as a rigid block during continental deformation.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：大陸 変形 古地磁気学 アジア大陸 インド亜大陸 アフリカ大陸

## 1. 研究開始当初の背景

ポストプレートテクトニクスの理論構築に要求されている大きな研究課題の一つは、非剛体の大陸のテクトニクスの理解である。大陸は、変形しない剛体の海洋プレートと異なり、分裂・合体を経験し、姿・形を変えていく。大陸のテクトニクスの解明への一歩は、大陸の変形過程のよりよい理解である。

大陸変形は三つの過程からおこっている：(1)大陸衝突、(2)マントルとの相互作用による大陸分裂、そして(3)大陸移動中におこる大規模変形。この三つの過程を起源とする大陸変形現象を、大陸の中に見出し、その変形の様子、変形の時間的変遷を、明らかにすることが要求される。

現在の変形の様子は、GPS測地学から、詳細にわかるようになってきた。ところが、GPS測地学は、過去ほんの15年程度の変形現象しか取り扱うことができない。時間をさかのぼって大陸の大規模変形の様子を定量的に明らかにする方法は、古地磁気学しかないことは多くの研究者に理解されている。大陸が変形している場を研究対象とし、古地磁気学のための岩石を採取することが、古地磁気学を基礎とする大陸変形の研究スタイルである。年代学を組み合わせることで、変形の時間的変化まで観察することができる。

インド亜大陸を含む7つの大陸には、上記の三つの過程を起源とする大陸変形現象を見ることができ、適切に研究対象を選ぶことによって、三つの過程による大陸変形現象を、詳細に記述することができ、剛体でない地球物質の変形過程にせまることができるに違いない。

## 2. 研究の目的

本研究は、大陸の姿・形をかえる現象をあきらかにすることである。従来大陸変形の研究は、褶曲・断層などの地殻の変形を取り扱ってきたが、本研究はより大規模な変形現象に注目して

いる。

大陸の姿・形をかえる現象は、おおきく三つのテクトニクスが原因でおこる：(1)大陸衝突、(2)大陸分裂、(3)大陸漂移。本研究は、三つの大陸変形のうち、(1)大陸衝突と(2)大陸分裂に、注目した。

### 大陸衝突：

大陸どうしの衝突によって大陸が変形する現象には、昔から多くの人々の興味注がれてきた。特に、大陸の衝突によるアルプス・ヒマラヤ山脈形成のように、山ができて地面が上昇する造山運動の解明は、地質学にとって、ひとつの大きな研究課題であった。衛星写真が手にはいるようになった1980年代からは、大陸の平面的な変形現象に、すなわち大陸が姿・形を変える現象に、興味注がられるようになった。インド亜大陸が衝突したアジア大陸の東部は、地質学や地球物理学の研究者の注目をあつめた。

インド亜大陸がアジア大陸に衝突する事件を対象とし、アジア大陸の変形現象の研究がモデル実験からはじめられた。モデル実験は、アジア大陸内部に、断層で区切られるいくつかの大陸断片形成を引き起こし、その後大陸断片群の南下と時計回り回転運動という、一連の大陸変形過程が起こる可能性を示した。近年、大陸が異なる3つの物性を持つ場合の大陸変形モデルが研究されている；脆性を持つ場合、連続体で塑性を持つ場合、あるいは下部地殻が流体である場合。アジア大陸の力学的性質が異なると、予想されるアジア大陸の変形の様相に、差異が生じることがわかってきた。

モデルは如何せんモデルであり、観測が不可欠である。変形現象を定量的に明らかにする効果的な研究方法は、GPS測地学と古地磁気学である。長い年月の変形現象は、古地磁気学でしか明らかにできない。アジア大陸の変形現象は、アジア大陸にインド大陸が衝突した50Ma以降生じたので、古第三紀・白亜紀の岩石の古地磁気学研究から、大陸の変形の様子を定量的にあきらかにできる。

インド大陸がアジア大陸に衝突する際のアジア大陸の変形現象を研究することを、研究目的とした。次の疑問に焦点あてて研究をおこなった。(A)大陸変

形の変形過程の研究:大陸断片形成と断片の回転・南下・内部変形の時間的変遷、(B)変形地域と非変形地域の領域の確定、(C)変形地域と非変形地域を支配する、物理過程と、地殻・マントルの物理的性質。

アジア大陸の変形の発生は、インド大陸の衝突だけでなく、いくつかの小大陸の衝突に伴ってもおこった。たとえば、北中国地塊と南中国塊の衝突、シベリア地塊とKolyma-Omolon地塊の衝突。これらの衝突現象に伴う大陸変形現象も、研究目的とした。

### **大陸分裂:**

大陸の分裂の初期の様相を示すのは、アフリカ大陸東部にあるリフトバレーが有名である。リフトバレーは、大陸の分裂が進行した海洋底拡大現象の開始段階にあり、中央海嶺が海面上に露出している場と考えられている。リフトバレーは、海洋底が拡大形成している様相を陸上でみることができる、地球上でも稀有な地域である。この地域から、大陸分裂に伴う大陸変形を見出すことができる。

この地域を対象に、大陸分裂に伴う大陸変形の変形過程の研究を、研究目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) インドの衝突に伴うアジア大陸の変形

研究領域:

アジア大陸にインド大陸が衝突した際に変形した可能性を持つ領域として、中国華南地塊、中国雲南省・四川省、ベトナム、カンボジア、タイ、マレーシアを考えた。

研究方法:

##### 1. 岩石の古地磁気学測定

古地磁気学的方法を用いた。中国華南地塊、中国雲南省・四川省、ベトナム、カンボジア、タイ、マレーシアへ赴き、古地磁気学のための岩石を採取し、研究室で初生の残留磁化を見出し、そのデータをもとに、大陸変形の様子を考察する。

アジア大陸にインド大陸が衝突した時期は、50Ma以降と考えられているので、古地磁気学研究の対象は、古第三紀・白亜紀の岩石とする。古地磁気学的に信頼性の高い岩石と知られる赤色砂岩、を採取対象岩石とする。褶曲テストを適用できるように、試料採取地域では、褶曲の両翼で試料を採取する。

#### 2. 古地磁気データのコンパイル

アジア大陸にインド大陸が衝突した際の変形を、アジア大陸の私たちの古地磁気データだけでなく、世界各国の研究者が報告したデータを組み入れ、総合的に研究する方法も採用する。

#### (2) シベリア地塊とKolyma-Omolon地塊の衝突に伴うアジア大陸の変形

研究領域:

Kolyma-Omolon地塊に絞る。

研究方法:

岩石の古地磁気学測定から地塊の変形を調べる。Okhotsk-Chukotka Volcanic Beltを構成する火山岩のうち、溶結凝灰岩を古地磁気学研究対象岩石とする。研究室で初生の残留磁化を見出し、そのデータをもとに、シベリア地塊とKolyma-Omolon地塊の変形の様子を考察する。

#### (3) 大陸分裂にともなうアフリカ大陸の変形

研究領域:

アフリカ大陸東部にあるリフトバレーに注目する。

研究方法:

リフトバレー近傍の3か所に注目する。1. 拡大軸に最も近い、2.5 Maに形成された、ドビに分布する玄武岩層、2. 中新世 更新世に形成された、ケッセム周辺に分布する玄武岩と溶結凝灰岩層、3. 漸新世に形成された、ゴングール周辺に分布する玄武岩と溶結凝灰岩層に着目し、それぞれ3地域の玄武岩と溶結凝灰岩層を研究対象岩石とする。それらを古地磁気学のために採取し、研究室で初生の残留磁化を見出し、そのデータをもとに大陸分裂初期のアフリカ大陸の変形を考察する。

### 4. 研究成果

#### 4 - 1 古地磁気学とGPS測地学から見た、アジア大陸の変形 (Otofujii et al., 2010)

インド亜大陸の北上は東アジアに大規模な変形テクトニクスを引き起こしている。過去 5000 万年間の変形に伴う回転運動は、古地磁気データに残されている。東アジアの回転運動を記述するために、東アジアの 79 箇所から古地磁気データを集め、解析した。これらのデータは、時計回り運動を経験した地域は、チュアンディアン地塊からインドシナ半島までにわたっていたことを明らかにした。もっとも回転がおおきかった地点は北緯 23.5°、東経 101°であった(図1)。一方、現在の変動を示すGPS測量からは、もっとも回転していた地点は北緯 27.5°、東経 95.5°であることがわかった。この違いは、東アジア大陸内部においては、最大の回転を経験した地域が、南東に押し出されていることを物語っている。現在の北緯 23.5°、東経 101°地点の地塊は、5000 万年前には北緯30°、東経94°に存在しており、インド大陸がアジア大陸に衝突したことが原因で、時計回り回転をしながら、1000kmの南東への変移を被ったと結論した。

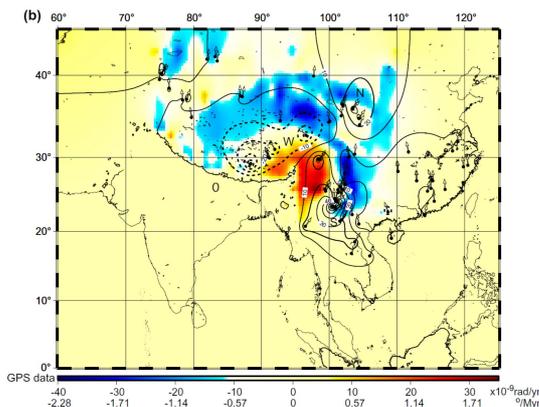


図1 . 古地磁気学(コンター)とGPS測量(カラー)で見た回転量の比較

#### 4 - 2 ジュラ紀 白亜紀の古地磁気記録から見た、マレー半島屈曲部の変形現象 (Yamashita et al., 2011)

ジュラ紀 白亜紀のKhlung Min and Lam Thap 層の赤色砂岩を、マレー半島屈曲部のトラン向斜において33か所で採取した。注意深い

熱消磁の結果、北部トラン向斜から初生磁化を取り出すことに成功した。その方向は、偏角31.1°、伏角12.2°、 $\alpha_{95}$ は13.9°であった。このことは、マレー半島屈曲部はインドチャイナ地塊と一緒に時計回り回転を経験したと結論した。この地域は、インドの衝突に伴うアジア大陸の変形を被った領域の一部だった。一方、南トラン向斜からは、偏角324.8°、伏角22.3°、 $\alpha_{95}$ は12.7°の2次磁化を発見した(図1)。このことは、一度時計回り回転運動を経験したマレー半島屈曲部は、その後オーストラリア大陸の北上が原因で、ボルネオとともに反時計回りの回転を被ったと結論した。

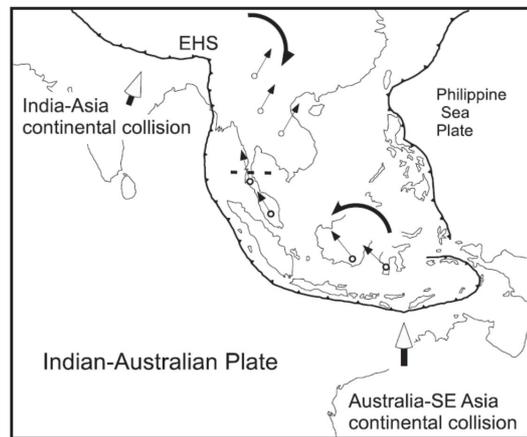


図1 . 東南アジアのジュラ紀 白亜紀の古地磁気偏角と回転テクトニクス

#### 4 - 3 白亜紀の古地磁気記録から見た、南中国地塊の変形現象 (Kawamura et al., 2012)

南中国地塊の変形現象の様子を調べるために、南中国地塊の南西部に位置する南寧(北緯22.8°、東経108.3°)に分布する白亜紀の赤色砂岩を採取した。丁寧な熱消磁ののち、赤色砂岩に初生磁化を見出すことに成功した。褶曲による傾きを補正すると、偏角3.3°、伏角41.7°、 $\alpha_{95}$ は4.1°となった。南中国地塊から従来求められている白亜紀のデータと比較すると、南中国地塊に対し、南寧地域は $13.4^\circ \pm 4.7^\circ$ の反時計回り回転運動を経験していることがわかった(図1)。南寧地域だけでなく、南中国地塊南部域の他の地点も、反時計回転運動を経験していることから、南中国地塊南部域は、変形しやすい領域であると結論した。南中国地塊南部域は、地震波のP波とS波ともに遅く伝わるNanpanjiang-Youjiang basinに属するので、

南寧地域の回転は力学的に固くないリソスフェアの変形が原因で起こったと推測した。

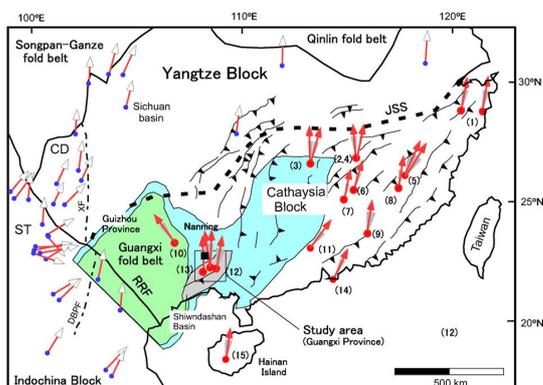


図 1 . 南中国地塊の白亜紀の偏角

#### 4 - 4 インドシナ半島西部のシブマス地塊の変形現象 (Fujiwara et al., 2013)

インドシナ半島は東から、インドシナ、スコタイそしてシブマス地塊から構成されている。これらの地塊は、 Gondwana 半島から順番に剥離した後、漂流し、そして東側から順にアジア大陸にこっついていった。その後、インド大陸がアジア大陸に衝突した際に、スコタイ地塊とインドシナ地塊は時計回り回転を経験した。シブマス地塊の変形の様子は、不明のまま研究から取り残されていた。シブマス地塊の Ratchaburi area (北緯 13.6°、東経 99.6°)においてジュラ紀の赤色砂岩を古地磁気学のために 21 か所で採取した。丁寧な熱消磁ののち、赤色砂岩に初生磁化を見出すことに成功した。褶曲による傾きを補正すると、偏角 348.5°、伏角 24.7°、 $\alpha_{95}$  は 10.5° となった。従来から報告されているシブマス地塊のジュラ紀の古地磁気データと比較すると、シブマス地塊は一体となった回転は経験していないことがわかった。古地磁気データに基づくと、かつては直線状な形状をしたシブマス地塊は、くねくねと曲がるような変形を経験したと結論した(図 1)。スコタイ地塊とインドシナ地塊が、インド大陸の衝突の結果、時計回り回転を行っている間、それらとは独立に、シブマス地塊は内部変形をした。このことは、シブマスとスコタイの両地塊の間に、変形しやすい領域があっ

たことを物語っている。

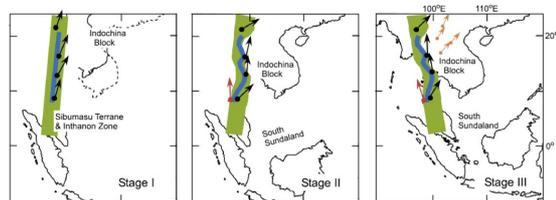


図 1 . シブマス地塊の変形モデル

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 11 件)

1. **Fujiwara, K.P., H. Zaman, A. Surinkum, N. Chaiwong, M. Fujihara, H-S. Ahn and Y. Otofujii**, New insights into regional tectonics of the Indochina Peninsula inferred from Lower-Middle Jurassic paleomagnetic data of the Sibumasu Terrane, *J. Asia Earth Science*, **94**, 126-138, (2014).  
[doi:10.1016/j.jseae.2014.08.020](https://doi.org/10.1016/j.jseae.2014.08.020)
2. **Kawamura, T., M. Hirota, H. Aoki, H. Morinaga, Y. Liu, H.S. Ahn, H. Zaman, M. Yokoyama and Y. Otofujii**, Tectonic deformation in the southern part of South China Block: Paleomagnetic study of the Early Cretaceous Xinlong Formation from Shangsi Foredeep Depozone in the Guangxi Province, *J. Geodynamics*, **64**, 40-53, (2013).  
[doi:j.jog.2012.10.005](https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.10.005)
3. **Otofujii, Y., V.D. Tung, M. Fujihara, M. Tanaka, M. Yokoyama, K. Kitada and Hr. Zaman**, Tectonic deformation of the southeastern tip of the Indochina Peninsula during its southward displacement in the Cenozoic time, *Gondwana Res.*, **22**, 615-627, (2012). [doi:10.1016/j.gr.2011.09.015](https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.015)
4. **Kondo, K., C. Mu, T. Yamamoto, H. Zaman, D. Miura, M. Yokoyama, H-S. Ahn and Y. Otofujii**, Oroclinal origin of the Simao Arc in the Shan-Thai Block inferred from the Cretaceous palaeomagnetic data, *Geophys. J.*

*Int.*, **190**, 201-216, (2012).

[doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05467.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05467.x)

5. **Yamashita, I., A. Surinkum, Y. Wada, M. Fujihara, M. Yokoyama, H. Zaman and Y. Otofujii**, Paleomagnetism of the Middle-Late Jurassic to Cretaceous red beds from the Peninsular Thailand: Implications for collision tectonics, *J. Asian Earth Sci.*, **40**, 784-796, (2011).  
[doi:10.1016/j.jseaes.2010.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.11.001)
6. **Otofujii, Y., M. Yokoyama, K. Kitada and H. Zaman**, Paleomagnetic versus GPS determined tectonic rotation around eastern Himalayan syntaxis in East Asia, *J. Asian Earth Sci.*, **37**, 438-451, (2010).  
[doi:10.1016/j.jseaes.2009.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.11.003)

〔学会発表〕(計 10 件)

1. Post-Jurassic Tectonics of the Southeast Asia inferred from Paleomagnetism, 乙藤洋一郎、地球電磁気・地球惑星圏学会第136回総会及び講演会、(2014年秋学会)
2. カンボジアにおけるジュラ紀・白亜紀赤色砂岩の古地磁気学的研究、土山幸穂、Sotham Sieng、Samuth Yos、佐藤鋭一、乙藤洋一郎、地球電磁気・地球惑星圏学会第136回総会及び講演会、(2014年秋学会)
3. A paleomagnetic study of Jurassic-Cretaceous redbeds from Ratchburi, Thailand、藤原克也、乙藤洋一郎、地球電磁気・地球惑星圏学会第132回総会及び講演会、(2012年秋学会)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

乙藤 洋一郎(OTOFUJI Yo-ichiro)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号:90160895

(2)研究分担者

宇野 康司(UNO Koji)

岡山大学大学院・教育学研究科・准教授

研究者番号:10510745

森永 速雄(MORINAGA Hayao)

兵庫県立大学・教授

研究者番号:40210182

山崎 和仁(Yamazaki Kazuhito)

神戸大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号:20335417

(3)連携研究者

( )

研究者番号: