

GPS・古地磁気からみた 沖繩トラフ・琉球弧のテクトニクス

小田 啓 邦¹⁾

1. はじめに

沖繩トラフは、九州から台湾にかけて連なる琉球弧の南東側でユーラシアプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込むことによって、その背弧側で形成されつつある背弧海盆である。後期白亜紀から現在にかけて、東シナ海から沖繩トラフにいたるエリアには、後期白亜紀の中国大陸沿岸部から東に向かって順に背弧拡大にともなう海盆が形成され、それらの間には過去の島弧火山の活動によると思われる大きな正の磁気異常・重力異常を示すリッジが形成されてきたと考えられている(Lin *et al.*, 2005)。沖繩トラフよりも西側では、これらの構造は堆積物に埋没されていて海底地形からはわからない。沖繩トラフのすぐ西側には、このようにして形成された五島列島から日本海側まで伸びる台湾-尖道褶曲帯として知られるリッジが存在する。このリッジは、中期-後期中新世に琉球弧とともに隆起し、その後正断層をともなう沈降によって沖繩トラフが形成されたと考えられている(Letouzey and Kimura, 1986)。沖繩トラフは、その北端において伸張場にある別府-島原地溝帯へとつながり、さらに東側にフィリピン海の斜め沈み込みにもなっている中央構造線へと続く。沖繩トラフの南端は、台湾北部において伸張場を示す宜蘭(Ifan)平野へとつながり、そこから台湾衝突帯の主要な衝上断層である梨山(Lishan)断層へとつながる。このように日本列島と台湾の主要な断層を結ぶ、極めて重要な位置づけとなっている沖繩トラフおよびその東側に位置する琉球弧の構造発達史を解明することは日本と台湾の構造発達史を解明する上でも今後の活断層の運動を推定する上でも重要である。この目的のためには様々な地球物理的・地質学的手法を用いることができるが、ここでは

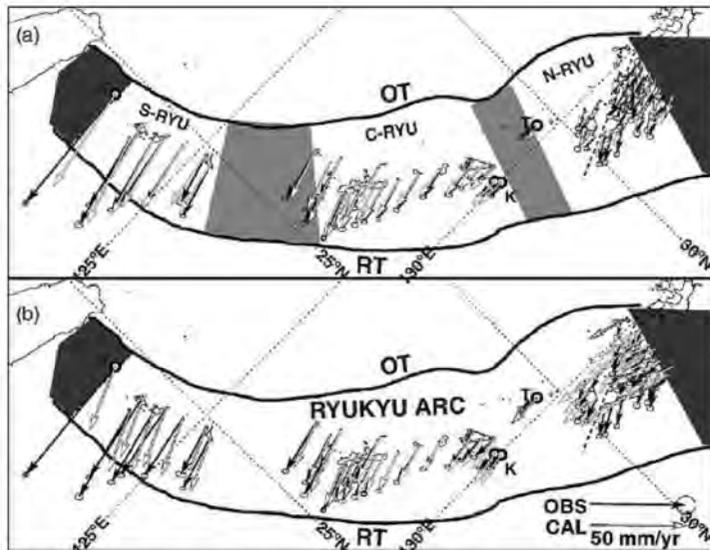
主としてGPSから推定される現在のテクトニクスと古地磁気から推定される中期中新世から最近までのテクトニクスについての研究を紹介する。

2. GPSによる現在のテクトニクス

近年のGPS観測網の発達によってプレート内の動きも詳細に追えるようになってきた。琉球弧においても国土地理院のGPS観測ステーションが多数存在し、これらのデータから琉球弧および沖繩トラフの現在の運動について研究がなされている。たとえば、Nishimura *et al.* (2004)は1996年から2002年のGPS観測データについて、解析を行った。GPS観測データから推定される歪みによると、琉球弧内部の変形は一部を除いてあまり大きくなく(Nishimura *et al.*, 2004; 2005)、剛体ブロックと考えることができる。全体的な特徴としては、琉球弧においては沖繩トラフから海溝側に向かう方向の地殻の移動が見られることである。彼らは観測データから、琉球弧のGPSデータを説明するモデルとして1ブロックのモデルと、吐噶らギャップおよび慶良間ギャップで分けられる北部琉球・中部琉球・南部琉球の3つのブロックからなるモデルの2種類を想定し、比較を行っている。第1図にその比較の結果を示すが、ブロックが1つであると仮定するよりも3つであると仮定した方がGPS観測データによる琉球弧の動きをよく説明できることを示している。3ブロックモデルについてオイラー極と回転速度が求められたが、北部琉球では時計回りの回転、中部琉球および南部琉球では反時計回りの回転である。オイラー極と回転速度から推定された沖繩トラフでの拡大速度を第2図に示す。この図から、拡大速度が北部沖繩トラフでは10mm/yr程度であるのに対して、中部沖繩トラフでは25-30mm/yr程度、南部沖繩

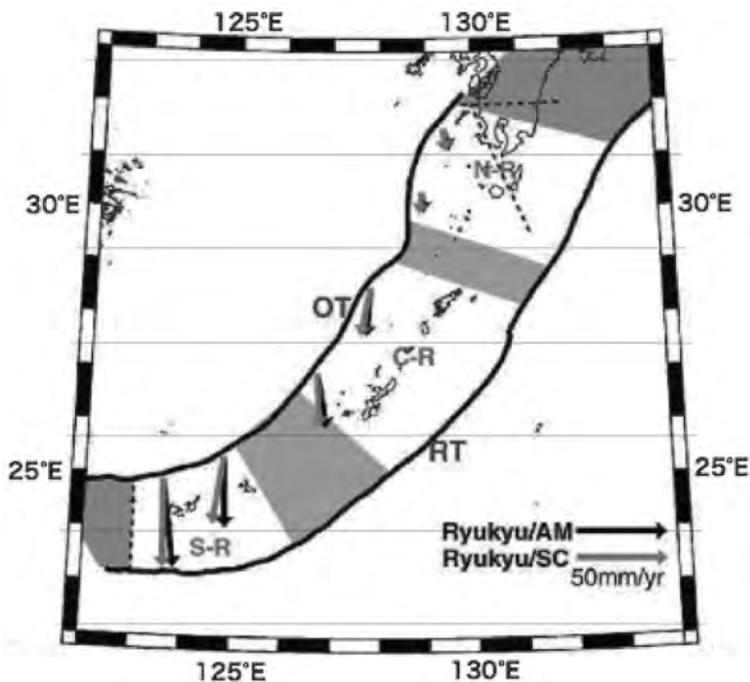
1) 産総研 地質情報研究部門

キーワード：沖繩トラフ, 琉球弧, 古地磁気, GPS, 地震波, 中央構造線, ユーラシアプレート, フィリピン海プレート



第1図

琉球弧のGPSデータから得られた各観測点の運動速度(黒矢印), およびモデルの推定による運動速度(白矢印). (a) 灰色の部分(吐喇ギャップおよび慶良間ギャップ)で区切られた3つのブロック(北から北部琉球・中部琉球・南部琉球ブロック)を仮定したモデルと(b) 1つのブロックを仮定したモデル. OTおよびRTは, それぞれ沖縄トラフと琉球海溝を示す. モデルの推定には種子島と屋久島の間に引いた破線よりも北東側のデータは使用していない(Nishimura *et al.*, 2004).

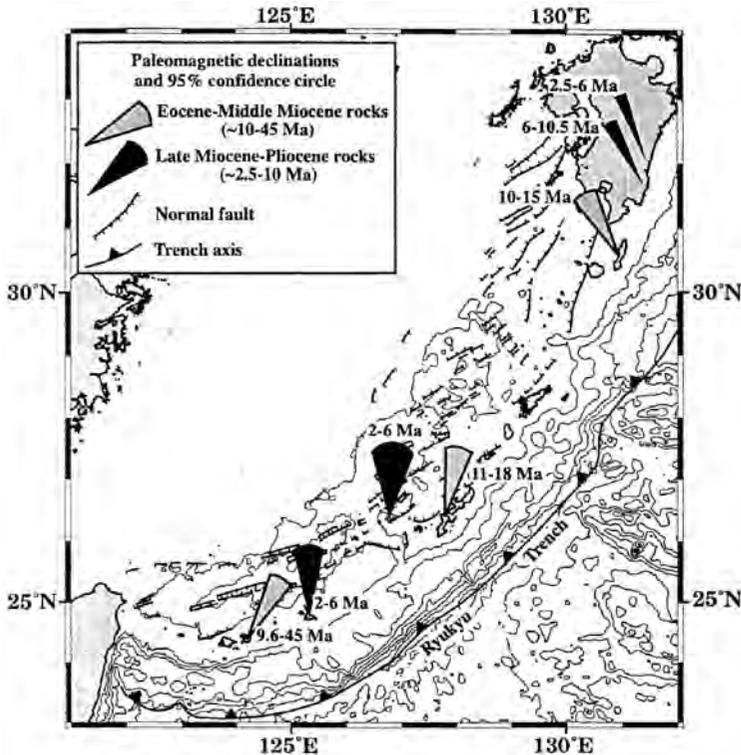


第2図

アムールプレート(黒矢印)および南中国プレート(灰色矢印)に対する相対的な沖縄トラフの拡大速度(Nishimura *et al.*, 2004に加筆修正).

トラフでは35-50mm/yr程度と, 北から南に向かって増加していく傾向が読み取れる. また, 北部および中部沖縄トラフでは拡大方向がトラフの軸に斜行しているのに対して, 南部ではトラフの軸にほぼ直交していることがわかる. これらは震源解析の結果から得られた沖縄トラフの伸張軸方向(Kubo and Furuyama, 2003)とも整合的である. また, 北部琉球ブロックと中

部琉球ブロックの間では琉球弧に沿った方向に10mm/yrの伸張場を示し, これもKubo and Furuyama (2003)によって求められた琉球弧に平行な伸張場の方向と一致する. 3ブロックモデルからは中部琉球ブロックと南部琉球ブロックの間では右横ずれの動きを示すが, 右横ずれを示すような地震活動等は報告されていない.



第3図

沖縄トラフの構造地質図 (Shibuet *et al.*, 1987) に琉球弧と南九州の第三紀の古地磁気偏角を扇形で示した。ただし、沖縄島の灰色の扇形は沖縄島と久米島の平均をとったものを示す。図に示した年代値は古地磁気偏角を記録している岩石のもの。等水深線は1,000 m間隔 (Fournier *et al.*, 2001)。

一方、Nakamura (2004) は1999年から2001年の奄美大島以南のGPS観測データの解析によって、同じく3ブロックモデルを提唱しているが、ブロックの境界はNishimura *et al.* (2004) とは少し異なる。彼は、赤池情報量基準 (AIC) を用いて、奄美ブロック・沖縄ブロック・八重山ブロックの3つに区切り、境界を徳之島と沖縄本島の間および宮古島と石垣島の間を設定した。このモデルによると、沖縄本島と宮古島は同じブロックに属し、慶良間ギャップをはさんで一体として運動していることになる。AICを用いた判断は客観的なモデルのように思えるが、奄美大島より北の観測データを用いていないことや使用したデータの期間が短いことなどからNishimura *et al.* (2004) の3ブロックモデルとの違いが生じた可能性が考えられる。

3. 古地磁気による第三紀～第四紀のテクトニクス

古地磁気の研究からは過去のプレートやテクトニックブロックの回転運動を論ずることができる。琉球弧の主だった古地磁気データを第3図に示すが、これら

は北部 (南九州を含む) ・中部・南部に分けることができる。北部は、北から順に南九州の宮崎 (宮崎層群: Kodama *et al.*, 1995; 内海川層群: Kodama and Nakayama, 1993)、そして種子島 (Kodama *et al.*, 1991) からなり、共に西振りの偏角を示す。中部は久米島と沖縄島 (Miki, 1995) からなり、11-18 Ma および 2-6 Ma の古地磁気方位は共に北向きの偏角を示す。南部は北から順に宮古島と石垣島 (Miki *et al.*, 1990; Miki, 1995) からなり、9.6-45 Ma の古地磁気方位は東振りの、2-6 Ma の古地磁気方位は北向きの偏角を示す。これらの古地磁気データに基づく様々なモデルが提案されているが、それらを順に紹介していきたい。

Miki (1995) は石垣島の9.6-45 Ma の古地磁気極を計算し、ユーラシアプレートの40 Ma の古地磁気極と比較することで、約10 Ma 以降に $25.4 \pm 10.6^\circ$ の時計回り回転が起こったことを示した。また、石垣島の90 km 東に位置する宮古島の2-6 Ma の古地磁気極を10 Ma のユーラシアプレートの古地磁気極と比較することで、約6 Ma 以降ほとんど回転運動が認められないことがわかった。これらの事実を説明するモデルとして、石垣島と宮古島が異なるテクトニックブロックに

属して10Ma以降に石垣島のみが回転をしたというものが考えられる。しかし、彼女は石垣島と宮古島間の海底地形に500mよりも深い構造的境界が確認されないことから、2つの島は同じテクトニックブロックとして6-10 Maの間に時計回りの回転運動をしたと結論づけた。

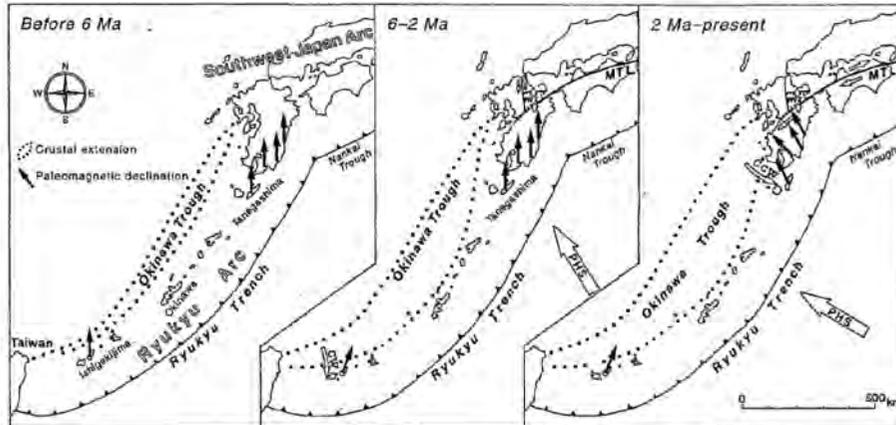
一方、Miki (1995)は久米島の17Maの火山岩および沖縄島の11 Maの貫入岩から10Ma以前の中部琉球弧の古地磁気極についても計算し、ユーラシアプレートの古地磁気極との比較から $8.72 \pm 11.2^\circ$ の時計回り回転を認めたが、回転量は誤差の範囲内で有意でないとした。これらのことから、6-10 Maの間に中部琉球弧は南部琉球弧とは異なったブロックとして運動をしたとした。しかしながら、沖縄トラフおよび琉球弧が南部から中部へと連続的に続くことから南部琉球弧が時計回り回転を起こす際にそれに呼応するように中部琉球弧が平行移動したとしている。また、南部琉球弧の時計回り回転および中部琉球弧の南東方向への平行移動によって琉球弧は引き延ばされることになり、その結果として慶良間ギャップが形成されたとしている。さらに、2-6Maの久米島の火山岩から求めた古地磁気極を10Maのユーラシアプレートの古地磁気極と比較し、中部琉球弧は6Ma以降アジア大陸に対して回転も南北方向の移動も起こしていないとした。彼女は沖縄トラフの拡大を2回のフェーズで起こったとし、第2フェーズは約1Maに再活動を始めて現在に続いているとした。第2フェーズはほとんど回転運動をともなわず、雁行配列した地溝で特徴づけられ、地溝の拡大軸に沿った火山性貫入岩が見られる。第2フェーズが1Ma以降に活動を始めたことについては、ドレッジした拡大軸の貫入岩は1Maより若い年代を示すことと、沖縄トラフで観測される磁気異常はブルネ正磁極期(0.78Ma-現在)に帯磁した火山性貫入岩で説明できる(Oshida *et al.*, 1992)ことから支持されるとしている。

Kodama *et al.* (1995)は、九州南部宮崎層群の2-6 Maの堆積岩から偏角 338.6° 伏角 47.5° の平均古地磁気方位を求めたが、後期中新世の内海川層群(偏角 322.0° 伏角 48.6°)・中期中新世の種子島(偏角 331.2° 伏角 41.3°)のデータとあわせて、中期中新世から鮮新世の南九州の平均古地磁気方位を $330.6 \pm 13.5^\circ$ 伏角 $46.3 \pm 14.5^\circ$ と計算した。さらに、この方位を新第三紀のユーラシアプレートの平均古地磁気極

と比較することで2Ma以降の $30.0 \pm 12.7^\circ$ の反時計回り回転運動を示唆した。Kodama *et al.* (1995)で取り上げられた古地磁気方位は鹿児島湾の東側に位置しており、30kmよりも浅い地震の震源分布から宮崎・大隅半島・種子島がそれぞれ別の3つのブロックに分けられることを指摘した。これらのブロックの西側境界に位置する鹿児島湾を南北に縦断する領域は後期鮮新世以降に火山性構造的沈降を起こしていることで知られている。また、北部沖縄トラフの海洋物理探査記録からは、後期鮮新世から前期鮮新世にかけて発達した正断層が確認されている(Shibuet *et al.*, 1987)。これらの事実からKodama *et al.* (1995)は、南九州の反時計回り回転は北部沖縄トラフおよび鹿児島湾で起こっている大陸地殻から海洋地殻へと変化しつつある過去200万年間のリフティングプロセスによって東に押し出された3つのブロックが回転運動を行ったものと結論づけた。

4. フィリピン海プレートの運動との関係

Kamata and Kodama (1999)はKodama *et al.* (1995)の考えをさらに発展させて、南九州の反時計回りのブロック回転を含む2Ma以降の西南日本弧と琉球弧のつながりにあたる九州の構造運動や火山活動をフィリピン海プレートの運動によって説明を行った(第4図)。プレート沈み込みに伴う火山活動が1.5Maに始まり北東-南西方向の火山前線を形成したこと、中央構造線の右横ずれ運動が2Ma以降に強まったこと、2Ma以降に北部沖縄トラフおよび鹿児島湾の東西方向への拡大に伴って南九州の反時計回りのブロック運動が起こったこと、これらのイベントの開始時期がフィリピン海プレートのユーラシアプレートへの沈み込み方向が北北西から北西に変化した時期(2Ma)と一致することを指摘した(第4図：中央から右)。彼らは、フィリピン海プレートの運動方向の変化を一連のイベントの根本的原因であるとし、沈み込み方向の変化によって沈み込んだフィリピン海プレートの海洋地殻の化学成分が火山前線に沿った島弧タイプの火山活動を作り出しているとしている。また、琉球海溝への沈み込み速度の増加によって、海溝の後退が引き起こされ、北部琉球弧におけるリフティングとブロック回転が引き起こされたとしている。これは現在のGPSによって観測される琉球弧の運動とも調和的である。



第4図 西南日本と琉球弧の6Ma以前、2-6Maそして2Ma以降の構造発達を示した図。白抜き矢印はフィリピン海の沈み込みの方向をしめす。黒矢印は古地磁気方位を表す。CCW：反時計回り、CW：時計回り、HVZ：豊肥火山帯、MTL：中央構造線、PHS：フィリピン海プレート (Kamata and Kodama, 1999)。

Kamata and Kodama (1999) はフィリピン海プレートは6-10Maの間沈み込みが停滞していたが、6Maには北北西方向の運動を開始したとしている(第4図：左から中央)。Watanabe (2005)によると、後期中新世に西向き沈み込みをしていたフィリピン海プレートが前期鮮新世に北北西に向きを変えたために、西南日本に沿ったフィリピン海プレートの沈み込みが9mm/yearから40mm/yearに急変したのであろうとしている。Miki (1995)は南琉球の時計回り回転の時期を6-10Maの間としたが、宮古島の年代は測定を行った島尻層群の堆積物がBlowの浮遊性有孔虫化石帯のN17-N22(2-6Ma)に対応していることしかわかっておらず、古地磁気試料は2-6Maの年代誤差を持つ。このことから、Kamata and Kodama (1999)は、Miki (1995)の南琉球のデータは2-6Maの間に南琉球は時計回りの回転をしたことを示すとし、南部沖縄トラフの拡大と6Ma以降のフィリピン海プレートの北北西向きの沈み込みと関連づけている。正確を期するのであれば、南琉球の時計回り回転運動は2-10Maの間に起こったと言うべきであり、そういう目で見ると南琉球の古地磁気データには未だ改善の余地があり、南琉球の時計回り回転モデルも修正される可能性がある。例えば、Park *et al.* (1998)は音波探査の記録に琉球弧に見られる島尻層群相当層が見られないことから、南部沖縄トラフのリフティングの開始時期を島尻層群堆積よりも後の後期更新世であるとした。これはMiki (1995)のリフティングの第2フェーズに当たるが、

6-10Maに台湾北端のIlan平野を回転中心として南部沖縄トラフがくさび状に開いたという第1フェーズの存在を示す事実は南部沖縄トラフの海底構造には確認されていない。Park *et al.* (1998)は南琉球の時計回り回転と横ずれ断層の存在を、南部沖縄トラフの拡大に先立つ後期中新世(6-7Ma)の南部沖縄トラフ北縁にみられる圧縮場における褶曲と関連づけた。これは、先に述べた台湾-宍道褶曲帯を形成したテクトニックイベントに対応すると思われる。このように、現在の南琉球弧の古地磁気データには様々な解釈の余地があり、特に年代軸の精度を上げるとともに他の地質学的証拠を整合的に説明できるようなモデルを構築することが望ましい。

5. まとめ

最近になって、高橋 (2006) は、黒滝不整合が3Maであることからフィリピン海プレートの運動方向(オーダーポール)がその時に急激に変化したこと、そしてそれはユーラシアプレートと太平洋プレートに挟まれる形で日本列島の下に存在するフィリピン海プレートの3次元幾何学的制約によるものであることを示した。彼はまた、日本海拡大の直後の15Maから3Maまでの間、伊豆-小笠原弧が南部フォッサマグナに衝突し続けたことを制約条件として、伊豆-小笠原弧が西南日本の島弧方向に沿って東西に移動しないようなオーダーポールを日本海溝の数百km東方に求めた。

15Ma以降フィリピン海プレートの大きな運動方向の変化(オイラーポールのジャンプ)は3Maに一度だけであるというこのモデルは、先述した2Maおよび6Maに2度の運動方向の急激な変化があったとするモデル(Kamata and Kodama, 1999)と一致しない。いずれのモデルが現実に近いかについては、それぞれのモデルが西南日本および琉球弧・沖縄トラフに分布する地質学的証拠をどれだけ説明できるかで判断する必要がある。琉球弧からの制約条件を与えるためには、特に南琉球の古地磁気記録の年代精度を上げるとともに、古応力や構造運動などとあわせて総合的にテクトニクスを論じることが重要である。海洋磁気異常から沖縄トラフ拡大に関する情報を得ることが期待されるが、沖縄トラフの中部中軸部(古川ほか, 1989)および南部中軸部(Oshida *et al.*, 1992)で観測された磁気異常はトラフに貫入した火成岩体によるものであり海洋底拡大によるものではないことを示す。従って、沖縄トラフ拡大の歴史を復元するには、Shibuet *et al.* (1995)が行ったような海底地形や音波探査で確認できる地下構造が形成された時期を推定することが極めて重要であると思われる。音波探査で十分な情報が得られない部分については統合国際深海掘削計画(IODP)による海洋底掘削を行うことも必要であろう。最終的には、琉球弧・沖縄トラフの15Maの日本海拡大直後から現在までのテクトニクスを復元し、それをフィリピン海プレートの運動によって整合的に説明できることが望ましい。

謝辞: 地質情報研究部門の高橋雅紀氏にはフィリピン海プレートの運動について御教示いただいた。また、地質情報研究部門の七山 太氏・荒井晃作氏には粗稿を読んでいただき、アドバイスをいただいた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- Fournier, M., Fabbri, O., Angelier, J. and Cadet, J.-P. (2001) : Regional seismicity and on-land deformation in the Ryukyu arc: Implications for the kinematics of opening of the Okinawa Trough, *J. Geophys. Res.*, 106, 13751-13768.
- 古川雅英・北原康夫・伊勢崎修弘(1989) : 磁気異常解析から見た沖縄トラフの中軸部, *月刊地球*, 11, 604-611.
- Kamata, H. and Kodama, K. (1999) : Volcanic history and tectonics of the Southwest Japan Arc and the Ryukyu Arc since 2Ma, *The Island Arc*, 8, 393-403.
- Kodama, K. and Nakayama, K. (1993) : Paleomagnetic evidence for post-Late Miocene intra-arc rotation of South Kyushu, Japan, *Tectonics*, 12, 35-47.
- Kodama, K., Ozawa, T., Inoue, K., Maeda, Y. and Takeuchi, T. (1991) : Paleomagnetism and post-Middle Miocene counterclockwise rotation of Tanegashima Island off Kyushu, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, 721-740.
- Kodama, K., Tashiro, H. and Takeuchi, T. (1995) : Quaternary counterclockwise rotation of south Kyushu, southwest Japan, *Geology*, 23, 823-826.
- Kubo, A. and Fukuyama, E. (2003) : Stress field along the Ryukyu Arc and the Okinawa Trough inferred from moment tensors of shallow earthquakes, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 210, 305-316.
- Letouzey, J. and Kimura, M. (1986) : The Okinawa Trough: Genesis of a back-arc basin developing along a continental margin, *Tectonophysics*, 125, 209-230.
- Lin, J.-Y., Sibuet, J.-C. and Hsu, S.-K. (2005) : Distribution of the East China Sea continental shelf basins and depths of magnetic sources, *Earth Planets Space*, 57, 1063-1072.
- Miki, M. (1995) : Two-phase opening model for the Okinawa Trough inferred from paleomagnetic study of the Ryukyu arc, *J. Geophys. Res.*, 100, 8169-8184.
- Miki, M., Matuda, T. and Otofujii, Y. (1990) : Opening mode of the Okinawa Trough: paleomagnetic evidence from the South Ryukyu Arc, *Tectonophysics*, 175, 335-347.
- Nakamura, M. (2004) : Crustal deformation in the central and southern Ryukyu Arc estimated from GPS data, 217, 389-398.
- Nishimura, S., Hashimoto, M. and Ando, M. (2004) : A rigid block rotation model for the GPS derived velocity field along the Ryukyu arc, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 142, 185-203.
- Nishimura, S., Hashimoto, M. and Ando, M. (2005) : Corrigendum to "A rigid block rotation model for the GPS derived velocity field along the Ryukyu arc" [*Phys. Earth Planet. Inter.* 142 (2004) 185-203], *Phys. Earth Planet. Inter.*, 151, 177-178.
- Oshida, A., Tamaki, K. and Kimura, M. (1992) : Origin of the Magnetic Anomalies in the Southern Okinawa Trough, *J. Geomag. Geoelectr.*, 44, 345-359.
- Park, J.-O., Tokuyama, H., Shiohara, M., Suyehiro, K. and Tira, A. (1998) : Seismic record of tectonic evolution and backarc rifting in the southern Ryukyu island arc system, *Tectonophysics*, 294, 21-37.
- Shibuet, J.-C., Letouzey, J., Barbier, F., Charvet, J., Foucher, J.-P., Hilde, T.W.C., Kimura, M.N., Ling-Yun, C., Marsset, B., Müller, C. and Stéphane, J.-F. (1987) : Back arc extension in the Okinawa Trough, *J. Geophys. Res.*, 92, 14041-14063.
- Shibuet, J.-C., Hsu, S.-K., Shyu, C.-T. and Liu, C.-S. (1995) : Structural and kinematic evolution of the Okinawa trough back arc basin. In Taylor, B. (Ed.), *Backarc Basins: Tectonics and Magmatism*. Plenum, New York, pp. 343-378.
- 高橋雅紀(2006) : フィリピン海プレートが支配する日本列島のテクトニクス, *地学雑誌*, 115, 116-123.
- Watanabe, Y. (2005) : Late Cenozoic evolution of epithermal gold metallogenic provinces in Kyushu, Japan, *Mineralium Deposita*, 40, 307-323.
- ODA Hirokuni (2007) : Tectonics of Okinawa Trough and Ryukyu Arc in terms of GPS and paleomagnetism.

< 受付: 2007年2月14日 >