



関東対曲構造の形成はいつ始まったか？

Kanto Syntaxis: when did it begin to grow?

星 博幸*

*Hiroyuki Hoshi**

2017年11月4日受付.

2018年5月1日受理.

* 愛知教育大学自然科学系理科教育講座地学領域
Department of Earth Sciences, Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448-8542, Japan

Corresponding author: H. Hoshi,
hoshi@aeu.ac.jp

Abstract

The Kanto Syntaxis in central Japan is a cusped, convex-northward deformation structure of zonal geologic belts and belt-boundary faults, and its formation can likely be attributed to the Neogene collision of the Honshu and Izu–Ogasawara (Bonin)–Mariana (IBM) arcs. However, it remains unclear as to how and when the deformation occurred. To determine the age of onset of syntaxis formation, this review summarizes recent geological and paleomagnetic studies, published during the past 25 years, in and around the collision area. The climax of tectonic rotation of both southeast and southwest Japan during the back-arc opening of the Japan Sea has previously been estimated at ~15 Ma, with this age potentially representing the onset of syntaxis formation. However, sedimentary records in the earliest accreted volcanic edifice indicate that arc–arc collision began at 17 Ma or shortly later. This edifice, named the Kushigatayama (or Koma) block, originally formed on the IBM arc and is now present in the Izu collision zone. Paleomagnetic analyses, which included an orocline test that utilized early Miocene data from both limbs of the Kanto Syntaxis, suggest that it began to grow between 17 and 15 Ma. This is consistent with the age estimate of the onset of arc–arc collision inferred from the geology of the collision zone. Thus, it is concluded that the arc–arc collision, which began between 17 and 15 Ma, caused the coeval onset of the syntaxis formation. Hypotheses relating to the development of the syntaxis are introduced, and these need to be tested in future studies.

Keywords: arc–arc collision, Honshu arc, Izu–Ogasawara (Bonin)–Mariana arc, Izu collision zone, Kanto Syntaxis, Median Tectonic Line, Miocene, orocline test, paleomagnetism, southwest Japan, tectonic rotation

はじめに

小論で筆者は「関東対曲構造 (Kanto Syntaxis) の形成はいつ始まったか」という問題に焦点を当て、主に地質データと古地磁気データの両面から現状の到達点について整理する。関東対曲構造は本州中部に見られる中央構造線 (MTL; Median Tectonic Line) とその周辺の帯状地質構造のハ型の屈曲構造である (Fig. 1)。19世紀の日本の地質学黎明期から数多くの地質研究者がこの構造に注目し、各地で地質を調査し、構造の形成過程について議論してきた。現在の一般的な理解は、伊豆–小笠原–マリアナ弧 (以下、伊豆弧と呼ぶ) の北端が中新世以降に本州中央部の地殻に衝突・突入したことによって対曲構造が形成されたというものであろう。日本地質学会が創立100周年を迎えた四半世紀前 (1993年) には、日本海拡大とともに本州弧 (東北日本+西南日本) がアジア大陸から回転運動を伴って分裂・移動した15 Ma頃 (Otofuji et al., 1985a, b) に伊豆弧衝突が始まって対曲構造も形成され

始めたという考え (例えば、Itoh, 1988; Takahashi and Saito, 1997) と、日本海拡大後のおそらく丹沢地塊 (Fig. 2) の衝突期 (後期中新世あるいは鮮新世) に対曲構造が形成されたという考え (例えば、Niitsuma and Akiba, 1985) の両方があった。その後、東北日本の反時計回り回転が15 Maより前に起こった可能性が指摘され (Hoshi and Takahashi, 1997, 1999; Takahashi et al., 1999)、同様に西南日本の時計回り回転も15 Maより前に起こったことが明らかにされた (Hoshi et al., 2015b; 星, 2018)。また、日本海拡大時代に伊豆弧を含むフィリピン海プレートは時計回りに回転しており、伊豆弧は15 Ma頃に現在の位置より数100 kmも西に位置していたとするプレート復元モデルも発表された (Hall et al., 1995a, b, c; Hall, 2002, 2012)。現在、日本列島の中新世火成活動や地殻変動については、房総沖の海溝型三重点の位置が現在とほぼ同じであったことを仮定する見方 (例えば、Kimura et al., 2005; Yamazaki et al., 2010) と、海溝型三重点が東に移動していたことを仮定する見方

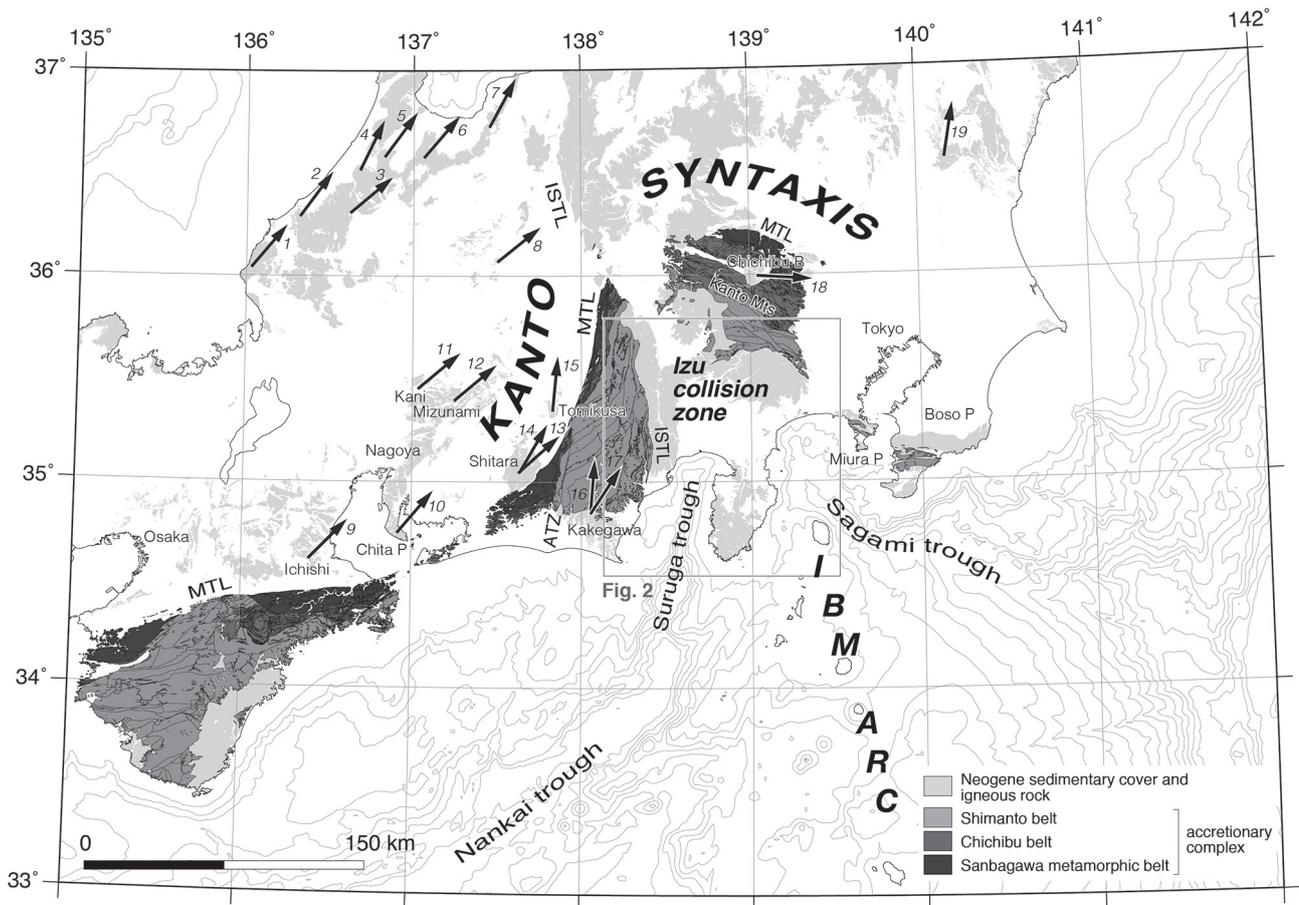


Fig. 1. Simplified geological map of the Kanto Syntaxis in central Honshu. ATZ = Akaishi Tectonic Zone, ISTL = Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, MTL = Median Tectonic Line. IBM arc = Izu-Ogasawara (Bonin)-Mariana arc. The arrows represent early Miocene (23–16 Ma) paleomagnetic declinations. 1 = Niu (Nakajima et al., 1990), 2 = Daishoji (Itoh and Ito, 1989), 3 = Mt. Wasso (Itoh et al., 2001), 4 = Kanazawa (Itoh and Ito, 1989), 5 = Iozen (Itoh and Kitada, 2003), 6 = Yatsuo (Tamaki et al., 2006), 7 = Uozu (Iwaki and Itoh, 2000), 8 = Takane (Sugisaki and Hoshi, in press), 9 = Ichishi (Hayashida and Ito, 1984), 10 = Morozaki (Hayashida, 1986), 11 = Kani (Hayashida et al., 1991), 12 = Mizunami (Itoh et al., 2006), 13 = Shitara (Torii, 1983), 14 = Shitara (Hoshi and Ogawa, 2012), 15 = Tomikusa (Sako and Hoshi, 2014), 16 = Kakegawa (Hayashida, 1994), 17 = Kakegawa (Hiroki and Matsumoto, 1999), 18 = Chichibu (Hyodo and Niitsuma, 1986), 19 = Motegi (Hoshi and Takahashi, 1997). The bathymetric contour interval is 500 m. The map was made using Generic Mapping Tools (GMT, ver. 5.2.1; Wessel and Smith, 1998) and QGIS (ver. 2.6.1 Brighton), with data from the Geological Survey of Japan (2015) and ETOPO1 global relief model.

(例えば, Clift et al., 2013; Pickering et al., 2013; Kimura et al., 2014)の両方がある。

この20年ほどの間、伊豆弧の衝突開始を伊豆衝突帯(南部フォッサマグナ; Fig. 2)の地質から読み解く研究は停滞気味であるが、一方で関東対曲構造の形成開始の検討に利用できる古地磁気データは質・量ともに充実してきた。小論で筆者はまず、伊豆衝突帯の地質から推定される伊豆弧の衝突開始時期について現状の理解を示す。次に、対曲構造の形成に関係する古地磁気学的研究のうちこの四半世紀に報告されたものを中心に詳しくレビューし、対曲構造の形成開始について現状の理解をまとめる。対曲構造の形成に関する未解決だが検証可能な問題についても紹介する。

伊豆衝突帯の地質から推定される伊豆弧の衝突開始時期

伊豆衝突帯における伊豆弧衝突過程を地質学的に解明する

目的で、80年代から90年代にかけて衝突帯の新第三系と第四系が多く、地質研究者によって調査された(青池, 1999 および平田ほか, 2010のレビューが詳しい)。その成果は『月刊地球』通号88号(1986)や『化石』43号(1987), 『Modern Geology』14巻(1989)と15巻(1991)の特集号などで報告され、日本地質学会創立100周年記念出版物の『日本の地質学100年』でも松田(1993)が概要を紹介している。80年代から90年代にかけての研究により、櫛形山地塊(巨摩地塊)とその周辺の地質(小坂・角田, 1969; 小山, 1984; 田村ほか, 1984)が伊豆弧の衝突開始時期を記録している可能性が高いと多くの研究者に認識されるようになった(Soh, 1986; 天野ほか, 1986; 天野, 1986; Koyama, 1991; 小山, 1993; 青池, 1999)。その後、衝突した地塊とその周辺の堆積学的、岩石学的、年代学的、地球物理学的研究などが多数行われた(例えば, Takeshita, 1995; Kawate and Arima, 1998; Martin

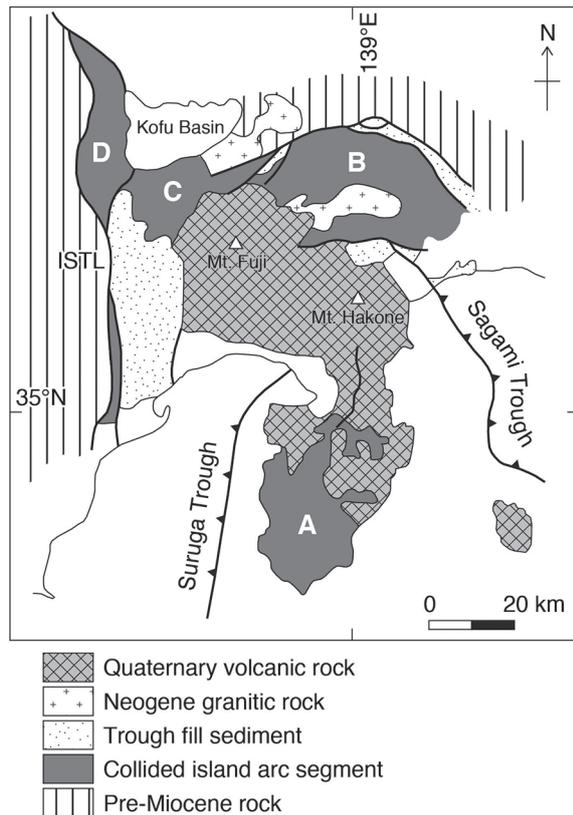


Fig. 2. Simplified geological map of the Izu collision zone (redrawn after Amano and Ito, 1990; Matsubara and Amano, 2010). A = Izu block, B = Tanzawa block, C = Misaka block, D = Kushigatayama (Koma) block. ISTL = Itoigawa–Shizuoka Tectonic Line.

and Amano, 1999; Akimoto et al., 2002; 金丸・高橋, 2005; Yamamoto et al., 2009; 松原・天野, 2010; Tamura et al., 2010; Tani et al., 2010; Arai and Iwasaki, 2014; Saito and Tani, 2017). 伊豆衝突帯において櫛形山地塊が最も早期に衝突・付加した火山性地塊であるという認識は現在も変わっていないと考えられる。

櫛形山地塊はいつ本州地殻に衝突・付加したか？天野(1986)は衝突を13~12 Ma頃と推定し、その見解は天野・伊藤(1990)とAmano(1991)でも示された。一方、小山(1993)は衝突が約15 Maに起こり、それが関東対曲構造の形成開始の要因になったと解釈した。この15 Maという年代の根拠は小山(1993)に詳述されているのでここでは触れないが、衝突前に櫛形山地塊と本州との間にあったトラフ充填堆積物と考えられる桃の木亜層群の堆積年代を16~15 Ma頃と解釈したことが大きい。その後、青池(1999)は小山(1993)の年代解釈が桃の木亜層群の微化石年代と整合しないことを指摘し、桃の木亜層群が15~13 Ma頃に堆積した可能性もあると論じた。それでも青池(1999)は櫛形山地塊を構成する櫛形山亜層群中に本州四万十帯起源と考えられる粗粒砕積物が含まれること(Koyama, 1991; 小山, 1993), および櫛形山亜層群の年代が17~15 Ma頃と推定されることを考慮し、伊豆弧衝突は17 Ma頃には始まりつつあり、

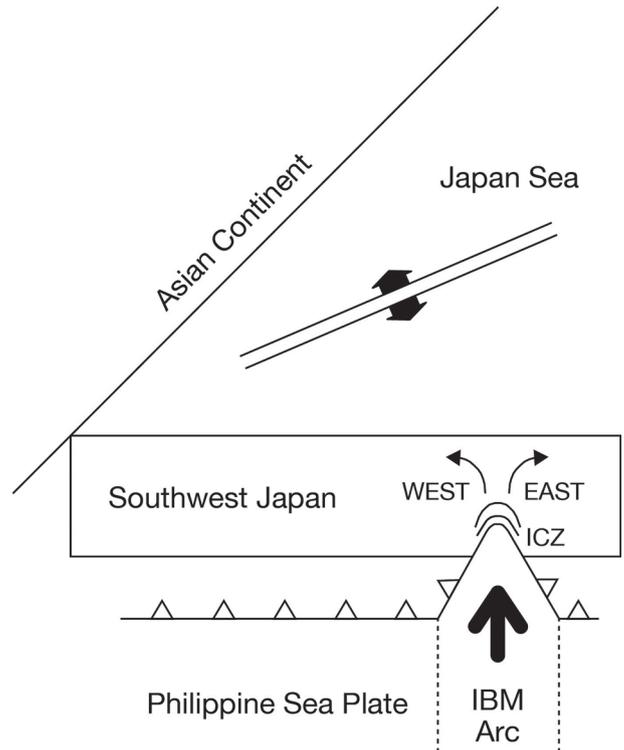


Fig. 3. Schematic model of differential crustal rotation in central Honshu (modified from Itoh, 1988). The IBM arc on the eastern margin of the Philippine Sea plate began to collide with the eastern part of southwest Japan during the mid-Miocene, causing differential rotation and the resultant convex-northward geological structure (Kanto Synaxis). ICZ = Izu collision zone.

15~13 Maに衝突が本格化したと考えた。17 Maという年代には±1 Ma程度の不確かさが伴うと筆者は推測するが、櫛形山亜層群の堆積時に伊豆弧北端が本州弧に接触し始めていた可能性が高い(青池, 1999)。なお、衝突本格化が15~13 Maだったという青池(1999)の見解には、西南日本の時計回り回転が約15 Maで(Otofujii et al., 1985a), 対曲構造の形成も15 Ma以降(Itoh, 1988; Takahashi and Watanabe, 1993; Takahashi and Saito, 1997)という当時の年代観が影響していたと思われる。

古地磁気学から推定される関東対曲構造の形成開始時期

関東対曲構造の形成はいつ始まったか？ MTLとその周辺の帯状地質構造はもともと直線状だったが、伊豆弧衝突の影響を受けて衝突域の西側と東側との間で差動的(differential)な回転が起こったことで現在のハ型構造が形成された、というのが多くの研究者が持つイメージと思われる(Fig. 3)。この中で、差動的回転によってハ型になったという仮説は古地磁気学の手法で検証可能である。また、異なる年代の岩石に記録されている残留磁化の方位を明らかにしてそれらを比較すれば回転時期もわかるに違いない。本州中部では80年代以降、いくつかの地域で残留磁化方位が調べられた(Fig. 1)。それらを利用して本州中部における地殻回転を議

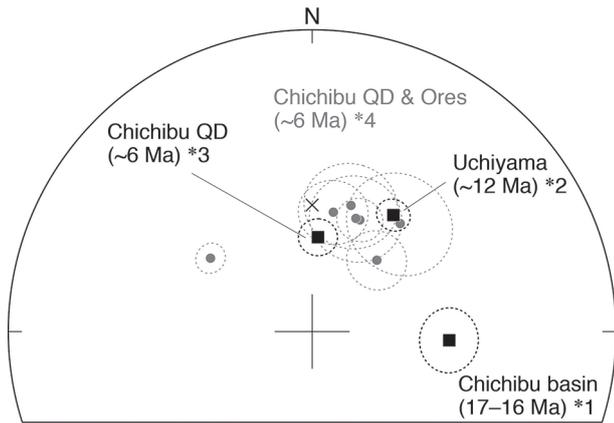


Fig. 4. Lower-hemisphere equal-area projection showing remanent magnetization directions of Miocene rocks from the Kanto Mountains. The square symbols represent formation-mean and rock body-mean directions, whereas gray circles are locality-mean directions. The dashed oval around the mean direction represents the region of 95% confidence with a radius α_{95} , and the 'x' represents the geocentric axial dipole field (GADF) direction in the Kanto Mountains ($D=0^\circ$, $I=55.5^\circ$). *1 = Hyodo and Niitsuma (1986), *2 = Takahashi and Watanabe (1993), *3 = Takahashi and Nomura (1989), *4 = Ueno and Tonouchi (1987). Note: Takahashi and Nomura (1989) reported a northerly mean direction for the Chichibu Quartz Diorite, whereas Ueno and Tonouchi (1987) reported north-northeasterly directions from the same diorite and associated ore deposits.

論できる。その結果、93年頃までに、中新世以降に対曲構造の西翼と東翼で逆センスの回転が起こったこと、すなわち西翼では西南日本本部(中国・四国・近畿地方)に対して反時計回りに、東翼では西南日本本部に対して時計回りにそれぞれ回転が起こったことにより対曲構造が形成されたという認識が深まっていたと思われる。

筆者はこの25年間、本州の新生界を主な調査対象として地域地質と古地磁気の両面から研究を行ってきた。本章では筆者が最近得た結果も含め、この四半世紀に報告された古地磁気学的知見のうち、対曲構造の形成開始時期の解明に関係する中新世データを中心にまとめる。

1. 関東山地

対曲構造東翼に位置する関東山地では、中新世の異なる年代の岩石から残留磁化データが報告されたことにより、93年当時には時計回り回転が明らかになっていた。Takahashi and Saito (1997)が詳しくレビューしているので、ここでは簡潔に紹介するにとどめる。埼玉県秩父盆地に分布する下部中新統赤平層群からは東向き($D=93.7^\circ$, $I=52.7^\circ$, $\alpha_{95}=8.3^\circ$, $n=11$ サイト; Hyodo and Niitsuma, 1986), 長野県佐久市東方の内山地域に分布する約12 Maの火山岩類からは北東向き($D=34.7^\circ$, $I=51.2^\circ$, $\alpha_{95}=4.4^\circ$, $n=9$ サイト; Takahashi and Watanabe, 1993), 埼玉県秩父鉾山周辺に分布する約6 Maの秩父石英閃緑岩からはほぼ北向き($D=3.5^\circ$, $I=64.4^\circ$, $\alpha_{95}=5.1^\circ$, $n=21$ サンプル; Takahashi

and Nomura, 1989) 残留磁化方位が報告された(Fig. 4)。ここで残留磁化方位の偏角と伏角は正極性の値である(以下同様)。これらの結果から Takahashi and Watanabe (1993)は関東山地で赤平層群の堆積から約12 Maまでの間に約60°の、約12 Maから約6 Maまでの間に約30°の時計回り回転が起こったと指摘した。そして前者の回転は日本海拡大時の西南日本の時計回り回転(約40°; 星, 2018)とそれと同時あるいはその後約12 Maまでに起こった伊豆弧衝突による関東山地の時計回り回転(20°程度)とが合わさったもので、後者の回転は12 Maから6 Maまでに起こった伊豆弧衝突による関東山地の時計回り回転を示すものと解釈された。赤平層群の堆積年代の解釈は使用する古地磁気-微化石年代尺度によって変わってしまうが、17~16 Ma頃と考えられる(高橋, 2008)。

この一連の解釈のうち、12 Maまでに関東山地が西南日本の回転以外にさらに20°程度の時計回り回転を受けたことが正しいなら、それは対曲構造の形成が12 Maよりも前に始まっていたことを強く示唆する(Takahashi and Watanabe, 1993; Takahashi and Saito, 1997)。

そして6 Ma以降に関東山地で回転が起こっていないことも正しいなら、後期中新世以降の丹沢地塊と伊豆地塊(伊豆半島)の衝突は対曲構造形成に直接の影響を及ぼさなかったことになる(Takahashi and Nomura, 1989)。ただし、Takahashi and Nomura (1989)が北向き残留磁化方位を報告した秩父石英閃緑岩からはUeno and Tonouchi (1987)が北北東向きの残留磁化を報告している(Fig. 4)。この北北東方位は約6 Ma以降も時計回り回転が継続していた可能性を示唆する。三浦半島と房総半島では後期中新世以降に時計回り回転が起こった(Yoshida et al., 1984; 小竹ほか, 1995; Yamamoto and Kawakami, 2005; Kanamatsu and Herrero-Bervera, 2006)。Ueno and Tonouchi (1987)の残留磁化方位が秩父石英閃緑岩形成時の古地磁気方位を示すなら、関東山地、三浦半島、房総半島を含む対曲構造東翼の広い範囲が6 Ma以降に時計回り回転を受けたことになる。一方、秩父石英閃緑岩は回転運動を受けず(Takahashi and Nomura, 1989)、時計回り回転は相模トラフ近傍の三浦半島と房総半島に限って起こった可能性もある。この問題の解明には秩父石英閃緑岩の残留磁化の再検討が必要である。

2. 掛川

静岡県掛川地域には始新世~前期中新世の付加体である三倉層群と瀬戸川層群を不整合に覆って前期中新世の前弧堆積物である倉真層群と西郷層群が分布する。三倉・瀬戸川両層群の卓越走向は北東~東北東である。倉真層群と西郷層群の残留磁化はHayashida (1994)とHiroki and Matsumoto (1999)によって報告されたが、両研究の残留磁化方位は大きく異なっている(Fig. 5)。

Hayashida (1994)は倉真層群上部から北向きの残留磁化方位を報告した($D=4.4^\circ$, $I=59.6^\circ$, $\alpha_{95}=6.3^\circ$, $n=9$ サイト; Fig. 5a)。この方位は正逆両極性データを含み、褶曲テストにも合格した。この方位は地心軸双極子磁場(GADF; geocentric axial dipole field)を仮定した場合にこの地域で期

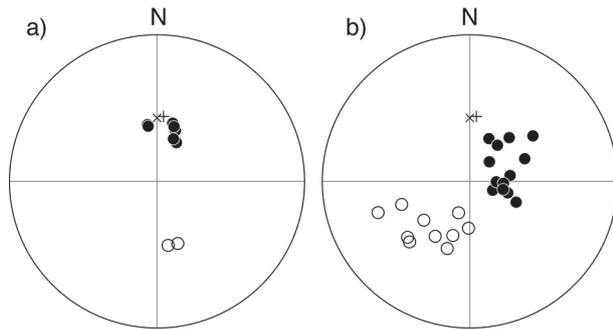


Fig. 5. Equal-area projections showing site-mean remanent magnetization directions for early Miocene sediments from the Kakegawa area, reported by (a) Hayashida (1994) and (b) Hiroki and Matsumoto (1999). Solid circles indicate directions on the lower hemisphere, while open circles indicate directions on the upper hemisphere. All directions are corrected for tilt. The 'x' represents the GADF direction ($D = 0^\circ$, $I = 54.3^\circ$), and the '+' denotes the expected early Miocene paleofield direction ($D = 5.7^\circ$, $I = 53.3^\circ$) when the remanent magnetization direction from the North China Block in the Asian continent (Zhao et al., 1994) is taken as a reference.

待される地磁気方位 ($D=0^\circ$, $I=54.3^\circ$; 以下, GADF 方位) と区別できない。また, アジア大陸の北中国地塊 (NCB; North China Block) から報告された前期中新世残留磁化方位 (Zhao et al., 1994) をレファレンスとした場合の古地磁気方位 ($D=5.7^\circ$, $I=53.3^\circ$; 以下, NCB 方位) とも区別できない。したがって, この地域では倉真層群上部の堆積から現在までの間に北中国地塊に対する回転が起こっていないことになる。

一方, Hiroki and Matsumoto (1999) は倉真, 西郷両層群から正逆両極性を含む残留磁化データを報告した (Fig. 5b)。この研究では層群平均磁化方位が求められておらず, 褶曲テストや逆転テストも行われていないが, 傾動補正後のサイト磁化方位は全体的に北東向きであった。この論文に記載された 24 サイトのデータのうち, 正極性データは地層の傾動を補正する前 (*in situ*) の状態で GADF 方位に近いものが多く, それらは二次磁化の影響を受けている可能性がある。逆極性データのうち倉真層群から得られた $\alpha_{95} < 20^\circ$ のサイト残留磁化方位を使って層群平均磁化方位を計算すると $D=32.7^\circ$, $I=58.3^\circ$, $\alpha_{95}=14.9^\circ$ ($n=6$ サイト) が求められる。この平均方位は GADF 方位および NCB 方位と異なる。NCB 方位と比較すると, この地域の地殻は倉真層群堆積後にアジア大陸に対して $25\sim 30^\circ$ ほど時計回りに回転したことになる。この時計回り回転は掛川の西に位置する一志 (Hayashida and Ito, 1984) や師崎 (Hayashida, 1986), 北西に位置する瑞浪 (Hoshi et al., 2015b) や可児 (Hayashida et al., 1991) などの結果と調和的である (Fig. 1)。

このように, 現状では掛川における回転運動の有無について判断が難しい。筆者は基盤である三倉・瀬戸川両層群の卓越走向が北東～東北東であることに注目している。瑞浪や可児では基盤の一部である美濃帯構成岩の卓越走向が北東～東

北東で, 前期中新世残留磁化方位は東偏を示す。したがって, Hayashida (1994) の結果を信じれば, 掛川は瑞浪や可児に対して反時計回りに回転したことになり, 回転前の基盤走向が瑞浪・可児と大きく異なっていたことになる。一方, Hiroki and Matsumoto (1999) の結果を信じれば, 掛川と瑞浪・可児との間で相対回転がほとんどなかったことになり, 基盤走向もほぼ同じだったことになる。倉真, 西郷両層群の残留磁化は再検討が必要である。

3. 富草

長野県南部の富草地域では下部中新統である富草層群が領家帯の变成岩と花崗岩類を不整合に覆っている。变成岩と花崗岩類の卓越走向 (岩体の分布や面構造) は北東である。この地域の東には MTL が通り, その平均走向は $N23^\circ E$ である (Fig. 1)。MTL の走向が西南日本主部や関東山地と大きく異なっているため, この地域の回転運動を明らかにすることは対曲構造の形成の理解において重要な意味を持つ。

富草層群の残留磁化方位は林田 (1992) が最初に報告し, その後酒向・星 (2014) が再検討した。酒向・星 (2014) が報告した残留磁化方位は $D=5.4^\circ$, $I=57.9^\circ$, $\alpha_{95}=5.5^\circ$ ($n=22$ サイト) である。この方位は GADF 方位および NCB 方位と区別できない。逆転テストと熱接触テストの結果から, 酒向・星 (2014) はこの北向き残留磁化を地層堆積時に獲得された初生的な残留磁化である可能性が高いと考えた。また, 磁気極性層序の検討結果より, 彼らは富草層群の年代をクロン C5Dn の上限年代 (約 17.2 Ma) よりも古くクロン C5Er の下限年代 (約 18.7 Ma) よりも新しいと解釈した。彼らは, 富草では約 17.2 Ma 以降に地軸およびアジア大陸に対する回転が起こっていないと結論した。この地域の地殻は一志, 師崎, 瑞浪, 可児などに対して反時計回りに 40° ほど回転したことになる。

4. 設楽

愛知県南東部の設楽地域では中新統分布域の南縁に MTL が通り, その平均走向は西南日本主部における走向よりやや北寄りの $N57^\circ E$ である (Fig. 1)。中新統は 18~17 Ma 頃の堆積岩からなる北設垂層群と 15~13 Ma 頃の設楽火山岩類に区分される (例えば, 星ほか, 2006)。設楽火山岩類はいわゆる瀬戸内火山岩類のメンバーの一つとされる (沢井・設楽団体研究グループ, 1985; 杉原・藤巻, 2002)。

北設垂層群の残留磁化方位は Torii (1983) と星・小川 (2012) によって報告された。両者の残留磁化方位は北東向きという点で共通しているが, 前者 ($D=48.0^\circ$, $I=50.0^\circ$, $\alpha_{95}=14.0^\circ$, $n=4$ サイト) と後者 ($D=30.1^\circ$, $I=48.3^\circ$, $\alpha_{95}=3.9^\circ$, $n=6$ サイト) の間には偏角に無視できない違いがある。ここで Torii (1983) の 30 年以上前のデータを筆者が棄却しないのは, 筆者が設楽北部で現在行っている調査において北設垂層群から Torii (1983) の方位と星・小川 (2012) の方位の中間的な残留磁化方位を得つつあるためである (松尾・星, 2017)。なお, 星・齋田 (2009) は北設垂層群の磁気層序とそれに基づく堆積年代を報告した。

設楽火山岩類については 80 年代に Tosha and Tsunakawa (1981) と Torii (1983) によって北向きの残留磁化データ

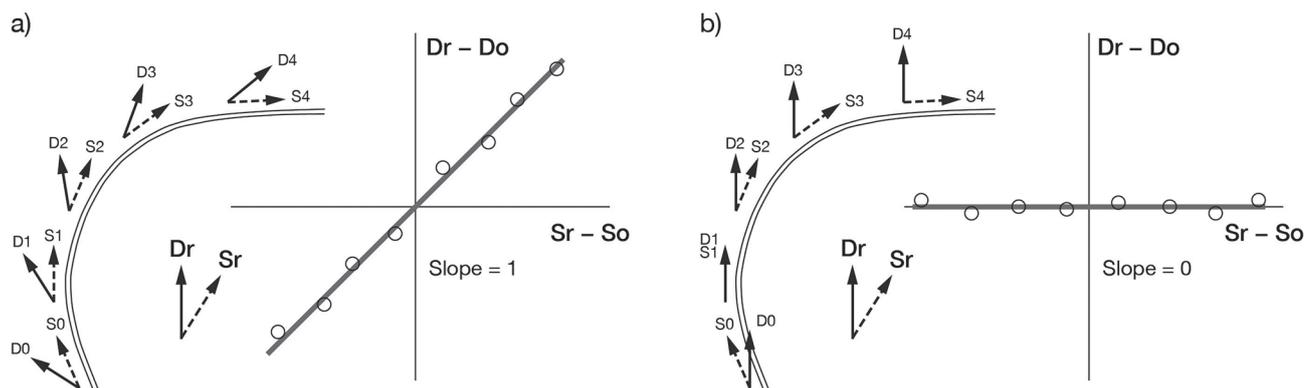


Fig. 6. Schematic illustration of the paleomagnetic orocline test for a curved orogenic belt (after Weil and Sussman, 2004). On these diagrams, the deviations of the observed remanent declination (solid arrows) from a reference declination (D_r-D_o ; ordinate) are plotted against deviations of the regional strike (dashed arrows) from a reference strike (S_r-S_o ; abscissa). A linear regression line is also shown (thick gray line). (a) Positive orocline test indicating formation of an orocline (rotational arc) after acquisition of remanent magnetization. (b) Negative orocline test suggesting formation of a non-rotational arc.

が報告され、その後 Hoshi and Yokoyama (2001), 星 (2012), Hoshi and Sano (2013) も同様の残留磁化方位を報告した。Tosha and Tsunakawa (1981) と Torii (1983) の北向き残留磁化は設楽地域南部に分布する設楽火成複合岩体から得られた。この岩体からは星ほか (2006) が多数のフィッシュ・トラック年代を決定し、それらの加重平均値 (15.0 ± 0.1 Ma, $n=23$) がこの岩体の形成年代を近似するものと考えられた。Hoshi and Sano (2013) は約 15 Ma の平行岩脈群 (Hoshi and Yokoyama, 2001) と津具火山岩類 (いずれも設楽火山岩類に属する) の残留磁化データから $D=9.7^\circ$, $I=52.5^\circ$, $\alpha_{95}=4.8^\circ$ ($n=30$ サイト) という平均磁化方位を算出した。ここで約 15 Ma という年代は岩脈と溶岩から報告された 5 つの K-Ar データに基づいている (星ほか, 2006 を参照)。この平均方位と北設置層群の北東向き残留磁化方位との間には偏角に 20° 以上の違いがある (Hoshi and Sano, 2013)。一方、この平均方位と NCB 方位との間には有意な差がない。Hoshi and Sano (2013) はこれらの結果から、設楽では北設置層群の堆積から設楽火山岩類の形成までの間に時計回り回転があったこと、および平行岩脈群と津具火山岩類の形成以降アジア大陸に対して有意な回転は起こっていないことを指摘した。ここで注目したいのは後者の指摘である。西南日本主部に分布する瀬戸内火山岩類の残留磁化方位も北向きなので (星, 2018 を参照)、設楽では 15 Ma 以降、西南日本主部に対しても古地磁気データで検出できるほどの回転運動が起こっていない。これは約 12 Ma 以降も時計回り回転が継続した関東山地と対照的である。

5. 高根

対曲構造西翼の中新世残留磁化方位は東海地方と北陸地方で得られたものが多く (Fig. 1), それらの間に位置する飛騨地方からは報告されていなかった。最近、杉崎・星 (2017) は岐阜県高山市東部の高根地域に分布する前期中新世安山岩岩脈群から残留磁化方位を報告した。岩脈母岩は美濃帯の堆積岩類とそれに貫入する斑れい岩で、美濃帯堆積岩類の走向は東～東北東である。岩脈群の残留磁化は東海と北陸から報

告された前期中新世残留磁化方位と同様、北東向きであった ($D=51.2^\circ$, $I=57.9^\circ$, $\alpha_{95}=5.7^\circ$, $n=31$ サイト)。この残留磁化は逆転テストに合格し、複数地点で試みられた熱接触テストの結果も初生的な熱残留磁化である可能性を示唆するものであった。杉崎・星 (2017) は、日本海拡大時に高根を含む東経 137.5° より西側の地殻が巨視的には剛体的に時計回りに回転したこと、および伊豆弧衝突による回転を伴う地殻変形が高根には及んでいないことを指摘した。

6. 古地磁気オロクライン・テスト

関東対曲構造を最も特徴づける地質表現は MTL のハ型に屈曲した地表トレースである (Fig. 1)。MTL の地表トレースがもともと直線状だったかどうかは、MTL の走向と周辺岩石の残留磁化方位を地域間で比較することによって解明できると考えられる。新妻信明は 80 年代にこの点に注目して対曲構造の形成について論じた (Niitsuma and Akiba, 1985; Niitsuma and Matsuda, 1985; Hyodo and Niitsuma, 1986)。

最近、酒向・星 (2014) は古地磁気オロクライン・テスト (例えば、Schwartz and Van der Voo, 1983; Weil and Sussman, 2004) の手法を用いてこの問題を定量的に検討した。古地磁気オロクライン・テストについては日本語で書かれた解説がほとんどないため、ここで詳しく紹介する。オロクライン (orocline; Carey, 1955) という用語は研究者によって異なる意味で用いられているが (Weil and Sussman, 2004 のレビューが詳しい)、本来の意味は Carey (1955, p. 257) によると「an orogenic system which has been flexed in plan to a horse-shoe or elbow shape」, すなわち、もともと直線だった、または直線的に伸びていた造山帯が後の変動によって馬蹄状や肘状などの曲線の形状になったと考えられるものである。したがってオロクライン形成は造山帯の回転を伴う。オロクラインは rotational arc や secondary arc と呼ばれる (Marshak, 1988; Zweigel et al., 1998)。それに対して、はじめから曲線状に発達した造山帯はオロクラインではなく non-rotational arc や primary arc と呼ばれる。

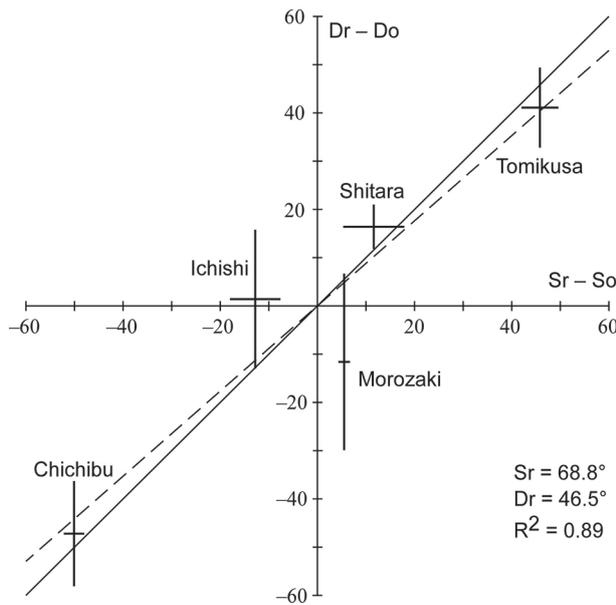


Fig. 7. Diagram showing a paleomagnetic orocline test for the Kanto Syntaxis (Sako and Hoshi, 2014). S_r = reference strike, S_o = observed strike, D_r = reference declination, D_o = observed remanence declination. Error bars on the observed strikes are the standard deviation, and those on the observed declinations are the 95% confidence limit (see Sako and Hoshi, 2014 for numerical data). The dashed line is a best-fit line calculated by linear regression. The solid line represents ideal “orocline” bending (see Fig. 6).

曲線状に伸びる造山帯がオロクラインか否かは構造地質学や古地磁気学の手法によって検討されてきた (Schwartz and Van der Voo, 1983; Eldredge et al., 1985; McWilliams and Li, 1985; Tait et al., 1996; Zweigel et al., 1998; Lamb, 2001; Hnat et al., 2006; Cawood et al., 2011 など多数). 研究事例は Sussman and Weil (2004) の論文集にも多数掲載されている.

古地磁気オロクライン・テストの概要を Fig. 6 に示す. ここには湾曲した造山帯があり, その地表トレースが二重線で示されている. 破線矢印は各地域における造山帯の走向 S_o を示す. 実線矢印は各地域で明らかになった同年代の残留磁化偏角 D_o である. 造山帯のレファレンス走向 S_r とレファレンス偏角 D_r を任意に設定し, 各地域でレファレンス走向と実際の走向との差 ($S_r - S_o$) およびレファレンス偏角と実際の残留磁化偏角との差 ($D_r - D_o$) を求め, 横軸 x を $S_r - S_o$, 縦軸 y を $D_r - D_o$ とする x - y 散布図を作成する. データが正の傾きを持つ一次関数として表される場合, 造山帯は残留磁化獲得後に湾曲したオロクラインと判定できる (Fig. 6a). 傾きが 1 に近いほどオロクラインはもともと直線に近かったことになる. 一方, データが x 軸に平行に並ぶ場合 (傾き 0), 造山帯は残留磁化獲得時には既に湾曲していた non-rotational arc と判断できる (Fig. 6b).

関東対曲構造は造山帯内部に生じた構造であるが, 酒向・星 (2014) はその形成過程の解明に古地磁気オロクライン・テストが有効と考えた. 彼らは一志 (一志層群), 知多半島

(師崎層群), 設楽 (北設垂層群), 富草 (富草層群), 秩父盆地 (赤平層群) の 5 地域について, 17 Ma 頃の残留磁化方位 (Fig. 1) と近傍を通る MTL の走向を用いてテストを試みた. その結果, 傾きが 1 に近くなったことから (0.88; Fig. 7), 彼らは MTL が 17 Ma 頃には直線状だったと結論した. 彼らの検討結果は対曲構造が約 17 Ma よりも後に形成されたことを示唆している.

15 Ma 頃はどうか? ハ型に屈曲した MTL 周辺で約 15 Ma の残留磁化方位が報告されているのは対曲構造西翼の設楽だけである. そのため 15 Ma 頃の対曲構造の形状を古地磁気オロクライン・テストによって調べることはできない. しかし, MTL 走向が北東の設楽において 15 Ma 以降に回転運動が起こっていないことから, Hoshi and Sano (2013) は西翼における MTL のノ型湾曲のうち少なくとも設楽付近の湾曲形成 (西南日本主部に対する反時計回り相対回転) が 15 Ma までに起こったと結論した. すでに述べたように東翼の関東山地でも 17~16 Ma 頃 (秩父盆地赤平層群) から約 12 Ma (内山地域の火山岩類) までの間に 20° 程度の時計回り回転が起こったと考えられており (Takahashi and Watanabe, 1993), この時計回り回転も西翼と同じく 15 Ma までに起こった可能性がある.

7. まとめ

古地磁気データに基づく以上の議論より, 関東対曲構造の形成は約 17 Ma から 15 Ma までの間のある時期に始まった可能性が高い. 先述のように伊豆衝突帯の地質学的データの解釈からは伊豆弧衝突が 17 Ma 頃には始まりつつあり (ただし ±1 Ma 程度の不確定さがあると筆者は推測), その後衝突が本格化したと考えられる (青池, 1999). 地質データから推定される年代と古地磁気データから推定される年代が整合することから, 約 17 Ma から 15 Ma までの間のある時期に本州弧と伊豆弧の衝突が始まり, 衝突開始と同時に対曲構造の形成も始まったと筆者は結論する.

ところで関東山地周縁では中期中新世初期の広域不整合の存在が知られており, 庭谷不整合 (大石・高橋, 1990) と呼ばれている. この不整合については伊豆弧衝突に関連して生じた可能性が指摘されてきた (高橋, 1992). 2000 年代に報告された詳細な層序学的データから, この不整合は浮遊性有孔虫化石層序の N.8 帯 /N.9 帯境界年代 (15.1 Ma; Gradstein et al., 2012) の直前と考えられ (Hayashi et al., 2003; 高橋・林, 2004), 関東山地北東縁に分布する海成中新統の珪藻化石層序からはおよそ 15.3~15.2 Ma と推定されている (高橋・柳沢, 2004). この推定は伊豆弧衝突と対曲構造形成の開始が約 17 Ma から 15 Ma までの間のある時期とする上記の筆者の解釈と整合する.

小論のはじめに触れたように, 日本列島における前期~中期中新世のテクトニクスと火成活動を考えるとき, 海溝型三重点が現在とほぼ同じ位置にあった (例えば, Yamazaki et al., 2010) と仮定するか, それとも海溝型三重点が東に移動していた (例えば, Kimura et al., 2014) と仮定するかが重要な問題になる. 伊豆弧を含むフィリピン海プレートと本州弧との間に楔形の太平洋プレート (Hibbard and Karig, 1990;

Wu et al., 2016)あるいはマイクロプレート(Yamaji and Yoshida, 1998)が存在したと考えるモデルもある. この問題でも, 15 Maにはすでに伊豆衝突帯で伊豆弧北端が本州弧と衝突していたことを制約とするプレート復元が必要である. フィリピン海プレート全体の時計回り回転(例えば, Hall et al., 1995a, b, c)と四国海盆拡大(Okino et al., 1994, 1999)が相まって伊豆弧が東進したとしても, それは15 Maまでに終了していたと考えられる.

今後検証すべき問題

1. 関東対曲構造の発達過程

関東対曲構造が約17 Maから15 Maまでの間のある時期に形成され始めた後, 対曲構造はどのようにして現在の姿に発達してきたのだろうか? これは今後解明に向けて取り組むべき重要な課題である. 丹沢地塊のような火山噴出体(かつての海山や火山島)の衝突・付加が対曲構造の形成・発達に重要な役割を果たしたとする見方もあるが(例えば, Niitsuma, 1989), 筆者は次のように違う見方をしている. 島弧衝突域での上盤側島弧の大規模変形には大陸性地殻(Suyehiro et al., 1996; Taira et al., 1998)を持つ島弧スリバー(slider)が衝突・突入することが重要である. 突入する大陸性島弧スリバーの地殻上部に乗っている海山や火山島は, その噴出物の厚さが島弧地殻全体の厚さ(現在の伊豆弧北部で30 km前後; Kodaira et al., 2007)の数分の一程度かそれ以下である. 島弧規模では小さなボリュームしか持たないそうした個々の海山や火山島の衝突・付加は, 上盤側島弧地殻の成長には寄与するが(Kimura, 1996; Taira et al., 1998), 島弧スケールの地殻変形にはほとんど寄与しないのではないか? この見方は櫛形山, 御坂, 丹沢, そして伊豆半島という過去の火山噴出体の断続的な多重衝突・付加(天野, 1986; Amano, 1991)に対応して対曲構造の屈曲が段階的に強化されたのかどうかを古地磁気学的手法で調査することによって検証可能だろう.

この検証に向けて, 前期中新世以降の異なる年代の岩石から残留磁化方位を取得する必要がある. 特に, 対曲構造の頂部(cusp)とも言える長野県中部に分布する中新統(牧本ほか, 1996)や, 関東山地北縁~北東縁に分布する中新統(大石・高橋, 1990)は重要であろう. また, 約6 Maの秩父石英閃緑岩の残留磁化方位を再検討し, 6 Ma以後の関東山地の時計回り回転の有無を明らかにすることも重要である.

関東対曲構造の発達過程に関連して, Otofujii et al. (1999)が提唱した仮説も検証が必要である. 彼らは濃飛流紋岩とその北東に分布する大雨見山層群と笠ヶ岳流紋岩の残留磁化測定結果に基づき, 濃飛周辺の地殻が西南日本主部に対して反時計回りに20°程度回転したと推定した. 彼らはMTLを伊勢湾口より西のセグメントI(走向が東~東北東), 伊勢湾口から静岡県水窪付近までの間のセグメントII(走向が北東), 水窪付近より北のセグメントIII(走向が北北東)に区分した上で(それぞれIchikawa, 1980のセグメントIIIA, IIIB, IIICに対応), 次のようなモデルを提示した. 濃飛周辺における20°程度の反時計回り相対回転は中新世西南日

本の時計回り回転の末期に起こった. その反時計回り相対回転は, 赤石構造帯(ATZ; Akaiishi Tectonic Zone)とその北方延長であるセグメントIIIに沿って変位量60 km以上に達する左横ずれ断層運動が起こり, それによって断層近傍(セグメントII周辺)の地殻が巨視的には延性的に引きずり変形を受けた結果である.

このOtofujii et al. (1999)のモデルは, 西南日本時計回り回転における西南日本東部の地殻変形にATZとその北方延長であるセグメントIIIの左横ずれ運動が重要な役割を果たした点, および対曲構造西翼のMTLノ型湾曲はセグメントIIIがセグメントIに対して40°以上反時計回りに回転したために生じたわけではないことを示唆している. ATZでは構造帯の地域地質と赤石裂線断層ガウジのK-Ar年代測定から15 Ma頃の左横ずれ運動が推定されている(狩野ほか, 1993; Tanaka et al., 1995). MTLセグメントIIIでも, 断層破砕帯の構造地質学的調査とK-Ar年代測定から15~11 Ma頃もしくはそれよりも若い断層活動が推定されている(高木ほか, 1991; 田中ほか, 1996). しかし, 西南日本時計回り回転の末期に相当する17 Maあるいは16 Ma頃の断層活動を示す証拠は報告されていない. また, セグメントIII周辺の回転運動の評価では富草層群の北向き残留磁化方位(林田, 1992; 酒向・星, 2014)の解釈が鍵になるが, この北向き方位について彼らはATZとセグメントIIIの左横ずれ断層運動に伴うローカルな回転運動を受けたためと考えているようである.

Otofujii et al. (1999)のモデルの検証には, セグメントIII周辺で中新世古地磁気データを増やすことが有効と考えられる(現在, 富草しかデータがない). 例えば, 富草北方の高遠花崗岩に貫入する17 Ma頃の苦鉄質火山岩(Hoshi et al., 2015a)の残留磁化方位を調べれば, このモデルの検証が可能かもしれない.

2. 付加体中の屈曲構造の形成

近畿・東海的美濃-丹波帯には根尾対曲(例えば, 狩野, 2002b)に代表される屈曲構造が発達している. Kano et al. (1990)はこれらの屈曲が東西方向の圧縮によって形成された変形構造(メガキンク)で, その圧縮変形が関東対曲構造の形成と密接に関連して起こった可能性を指摘した. その後, 狩野・竹田(1999)と狩野(2002b)は詳細な地質調査によって屈曲構造のいくつかがほぼ鉛直な回転軸を持ち, 東西方向の圧縮によって形成された座屈変形であることを示した. Kano et al. (1990)の解釈が正しければ, 伊豆弧衝突に起因する地殻変形の影響は根尾屈曲西縁部である琵琶湖西方の花折断層付近まで及んだことになる(狩野, 2002a). しかし, 狩野(2002a)も述べているように, 琵琶湖北東の貝月山花崗岩のように屈曲構造のヒンジ部を切って白亜紀火成岩が貫入しているように見える部分もあり, これは屈曲が白亜紀以前に形成された可能性を示唆する. 山北・大藤(2002)は関東北部の足尾帯の屈曲構造も同様のメガキンクで, その形成が伊豆弧衝突に起因する南北圧縮によるものと解釈している.

こうしたKano et al. (1990)や山北・大藤(2002)の仮説

には80~90年代に報告された古地磁気データが考慮されているが、その仮説の検証を目的とした古地磁気学的研究を行うことは伊豆弧衝突と関東対曲構造の形成をより深く理解する上でも重要と考えられる。

謝 辞

高木秀雄氏(早稲田大学)には本州中部のMTLに関する最近の見解についてご教示いただいた。磁化方位の等積投影(Figs. 4, 5)には渋谷秀敏氏(熊本大学)のソフトウェアを使用した。小論で紹介した筆者と共同研究者の最近の古地磁気研究成果の多くは高知大学海洋コア総合研究センター共同利用研究(10A007, 10B007, 12A004, 12B003, 13A003, 13B003, 14A014, 14B012, 15A004, 15B004, 16A003, 16B003, 17A001, 17B001)の支援を受けて実施されたものである。本研究の一部にはJSPS科研費(26400488, 17K05680)を使用した。査読者の岡田 誠氏(茨城大学)と松原典孝氏(兵庫県立大学)からいただいたコメントによって小論は改善された。担当編集委員の天野一男氏(日本大学文理学部自然科学研究所)には特集号への投稿を勧めていただき、また小論のハンドリングの労もっていただいた。以上の方々ならびに関係機関に感謝します。

文 献

- Akimoto, K., Hattori, M. and Oda, M., 2002, Late Cenozoic paleobathymetry and paleogeography in the South Fossa Magna and Enshunada regions, Japan, based on planktic and benthic foraminifera. *Mar. Geol.*, **187**, 89–118.
- 天野一男(Amano, K.), 1986, 多重衝突帯としての南部フォッサマグナ(The Fossa Magna region as a multiple collision zone). 月刊地球(*Chikyu Monthly*), **8**, 581–585.
- Amano, K., 1991, Multiple collision tectonics of the south Fossa Magna in central Japan. *Modern Geol.*, **15**, 315–329.
- 天野一男・伊藤健二(Amano, K. and Ito, K.), 1990, 南部フォッサマグナの形成: 堆積物からみた島弧の衝突付加テクトニクス(Construction of the South Fossa Magna: Collision and accretion tectonics of arcs deduced from the sedimentary sequences). 地質学論集(*Mem. Geol. Soc. Japan*), **34**, 45–56.
- 天野一男・高橋治之・立川孝志・横山健治・横田千秋・菊池 純(Amano, K., Takahashi, H., Tachikawa, T., Yokoyama, K., Yokota, C. and Kikuchi, J.), 1986, 足柄層群の地質: 伊豆微小大陸の衝突テクトニクス(Geology of Ashigara Group: collision tectonics of Izu micro-continent with Eurasian plate). 中川久夫・小高民夫・高柳洋吉編, 北村 信教授退官記念地質学論文集(*Essay in Geology: Professor Nobu Kitamura Commemorative Volume*), 北村 信教授退官記念事業会(Professor Nobu Kitamura Taikan Kinenjigyokai), 7–29.
- 青池 寛(Aoike, K.), 1999, 伊豆衝突帯の構造発達(Tectonic evolution of the Izu collision zone). 神奈川県博調研報, 自然科学(*Res. Rep. Kanagawa Pref. Mus., Nat. Hist.*), **9**, 113–151.
- Arai, R. and Iwasaki, T., 2014, Crustal structure in the northwestern part of the Izu collision zone in central Japan. *Earth Planets Space*, **66**, 21, doi: 10.1186/1880-5981-66-21.
- Carey, S.W., 1955, The orocline concept in geotectonics, Part I. *Pap. Proc. Roy. Soc. Tasmania*, **89**, 255–288.
- Cawood, P. A., Pisarevsky, S. A. and Leitch, E. C., 2011, Unraveling the New England orocline, east Gondwana accretionary margin. *Tectonics*, **30**, TC5002, doi: 10.1029/2011tc002864.
- Clift, P. D., Carter, A., Nicholson, U. and Masago, H., 2013, Zircon and apatite thermochronology of the Nankai Trough accretionary prism and trench, Japan: Sediment transport in an active and collisional margin setting. *Tectonics*, **32**, 377–395.
- Eldredge, S., Bachtadse, V. and Van der Voo, R., 1985, Paleomagnetism and the orocline hypothesis. *Tectonophysics*, **119**, 153–179.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター(Geological Survey of Japan), 2015, 20万分の1日本シームレス地質図2015年5月29日版(*Seamless Digital Geological Map of Japan 1: 200,000, May 29, 2015 version*). 産総研地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST).
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M., eds., 2012, *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, Amsterdam, 1144p.
- Hall, R., 2002, Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Jour. Asian Earth Sci.*, **20**, 353–431.
- Hall, R., 2012, Late Jurassic-Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, **570-571**, 1–41.
- Hall, R., Ali, J. R. and Anderson, C. D., 1995a, Cenozoic motion of the Philippine Sea Plate: Palaeomagnetic evidence from eastern Indonesia. *Tectonics*, **14**, 1117–1132.
- Hall, R., Ali, J. R., Anderson, C. D. and Baker, S. J., 1995b, Origin and motion history of the Philippine Sea Plate. *Tectonophysics*, **251**, 229–250.
- Hall, R., Fuller, M., Ali, J. R. and Anderson, C. D., 1995c, The Philippine Sea Plate: Magnetism and reconstructions. In Taylor, B. and Natland, J., eds., *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*(*Geophysical Monograph 88*), Am. Geophys. Union, Washington, DC, 371–404.
- Hayashi, H., Kurihara, Y., Horiuchi, S., Iwashita, T. and Yanagisawa, Y., 2003, Planktonic foraminiferal biostratigraphy of the Miocene sequence in the Iwadono Hills, central Japan: an integrated approach. *Palaaios*, **18**, 176–191.
- Hayashida, A., 1986, Timing of rotational motion of southwest Japan inferred from paleomagnetism of the Setouchi Miocene series. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, **38**, 295–310.
- 林田 明(Hayashida, A.), 1992, 中新統富草層群の古地磁気方位(Paleomagnetic data from the Lower Miocene Tomikusa Group, central Japan). 瑞浪市化石博研報(*Bull. Mizunami Fossil Mus.*), **19**, 67–74.
- Hayashida, A., 1994, Paleomagnetism of Miocene sedimentary rocks in the Kakegawa area and implication for tectonic rotation in central Japan. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, **46**, 1051–1066.
- Hayashida, A., Fukui, T. and Torii, M., 1991, Paleomagnetism of the Early Miocene Kani Group in southwest Japan and its implication for the opening of the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1095–1098.
- Hayashida, A. and Ito, Y., 1984, Paleoposition of Southwest Japan at 16 Ma: Implication from paleomagnetism of the Miocene Ichishi Group. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **68**, 335–342.
- Hibbard, J. P. and Karig, D. E., 1990, Alternative plate model for the early Miocene evolution of the southwest Japan margin. *Geology*, **18**, 170–174.
- 平田大二・山下浩之・鈴木和恵・平田岳史・李 毅兵, 昆 慶明(Hirata, D., Yamashita, H., Suzuki, K., Hirata, T., Li, Y.-B. and Kon, Y.), 2010, プロト伊豆-マリアナ島弧の衝突付加テクトニクス: レビュー(Collision accretion tectonics of the proto-Izu-Mariana Arc: a review). 地学雑(*Jour. Geogr. (Chigaku Zasshi)*), **119**, 1125–1160.
- Hiroki, Y. and Matsumoto, R., 1999, Magnetostratigraphic correlation of Miocene regression-and-transgression boundar-

- ies in central Honshu, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **105**, 87–107.
- Hnat, J. S., Van der Pluijm, B. A. and Van der Voo, R., 2006, Primary curvature in the Mid-Continent Rift: Paleomagnetism of the Portage Lake Volcanics (northern Michigan, USA). *Tectonophysics*, **425**, 71–82.
- 星 博幸 (Hoshi, H.), 2012, 愛知県新城市老勢地区に産する中期中新世安山岩岩床の古地磁気と岩石磁気 (Paleomagnetism and rock magnetism of a Middle Miocene andesite sill in Kuroze, Shinshiro City, Aichi Prefecture). *名古屋地学 (Nagoya Jour. Space Earth Sci.)*, **74**, 21–30.
- 星 博幸 (Hoshi, H.), 2018, 中新世における西南日本の時計回り回転 (Miocene clockwise rotation of Southwest Japan). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **124**, 675–691.
- 星 博幸・檀原 徹・岩野英樹 (Hoshi, H., Danhara, T. and Iwano, H.), 2006, 西南日本の中新世テクトニクスに対する新たな年代制約: 愛知県設楽地域におけるフィッション・トラック年代測定 (New age constraints on the Miocene tectonic evolution of southwestern Japan: fission track ages from the Shitara district, Aichi Prefecture). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **112**, 153–165.
- Hoshi, H., Iwano, H., Danhara, T. and Iwata, N., 2015a, Dating of altered mafic intrusions by applying a zircon fission track thermochronometer to baked country rock, and implications for the timing of volcanic activity during the opening of the Japan Sea. *Isl. Arc*, **24**, 221–231.
- Hoshi, H., Kato, D., Ando, Y. and Nakashima, K., 2015b, Timing of clockwise rotation of Southwest Japan: constraints from new middle Miocene paleomagnetic results. *Earth Planets Space*, **67**, 92, doi: 10.1186/s40623-015-0266-3.
- 星 博幸・小川晃一 (Hoshi, H. and Ogawa, K.), 2012, 愛知県設楽地域に分布する北設垂層群 (下部中新統) の古地磁気方位と本州中部における屈曲構造形成 (Paleomagnetic direction of the Lower Miocene Hokusetsu Subgroup in the Shitara area, Aichi Prefecture, and implications for the formation of the cusped geologic structure in central Honshu). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **118**, 748–761.
- 星 博幸・齋田卓哉 (Hoshi, H. and Saida, T.), 2009, 愛知県設楽地域に分布する北設垂層群 (下部中新統) の磁気層序 (Magnetostratigraphy of the Lower Miocene Hokusetsu Subgroup in the Shitara district, Aichi Prefecture, central Japan). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **115**, 193–205.
- Hoshi, H. and Sano, M., 2013, Paleomagnetic constraints on Miocene rotation in the central Japan Arc. *Isl. Arc*, **22**, 197–213.
- Hoshi, H. and Takahashi, M., 1997, Paleomagnetic constraints on the extent of tectonic blocks and the location of their kinematic boundaries: Implications for Miocene intra-arc deformation in Northeast Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **103**, 523–542.
- Hoshi, H. and Takahashi, M., 1999, Miocene counterclockwise rotation of Northeast Japan: a review and new model. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **50**, 3–16.
- Hoshi, H. and Yokoyama, M., 2001, Paleomagnetism of Miocene dikes in the Shitara basin and the tectonic evolution of central Honshu, Japan. *Earth Planets Space*, **53**, 731–739.
- Hyodo, H. and Niitsuma, N., 1986, Tectonic rotation of the Kanto Mountains, related with the opening of the Japan Sea and collision of the Tanzawa Block since middle Miocene. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, **38**, 335–348.
- Ichikawa, K., 1980, Geohistory of the Median Tectonic Line of Southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 18, 187–212.
- Itoh, Y., 1988, Differential rotation of the eastern part of southwest Japan inferred from paleomagnetism of Cretaceous and Neogene rocks. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 3401–3411.
- Itoh, Y., Amano, K. and Kumazaki, N., 2006, Integrated description of deformation modes in a sedimentary basin: A case study around a shallow drilling site in the Mizunami area, eastern part of southwest Japan. *Isl. Arc*, **15**, 165–177.
- 伊藤康人・土志田正二・北田数也・檀原 徹 (Itoh, Y., Doshida, S., Kitada, K. and Danhara, T.), 2001, 石川県に分布する鷺走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩の古地磁気とフィッション・トラック年代 (Paleomagnetism and fission-track ages of the Mt. Wasso moonstone rhyolitic welded tuff in the Ishikawa Prefecture, central Japan). *地調研報 (Bull. Geol. Surv. Japan)*, **52**, 573–579.
- Itoh, Y. and Ito, Y., 1989, Confined ductile deformation in the Japan arc inferred from paleomagnetic studies. *Tectonophysics*, **167**, 57–73.
- Itoh, Y. and Kitada, K., 2003, Early Miocene rotational process in the eastern part of south-west Japan inferred from paleomagnetic studies. *Isl. Arc*, **12**, 348–356.
- 岩城啓美・伊藤康人 (Iwaki, H. and Itoh, Y.), 2000, 富山県東部魚津地域に分布する新第三系の古地磁気学的研究 (Paleomagnetic study of Neogene rocks around the Uozu area, eastern part of Toyama Prefecture). *地調月報 (Bull. Geol. Surv. Japan)*, **51**, 229–236.
- 金丸龍夫・高橋正樹 (Kanamaru, T. and Takahashi, M.), 2005, 帯磁率異方性からみた丹沢トータル岩体の貫入・定置機構 (Anisotropy of magnetic susceptibility of tonalite in the Tanzawa plutonic complex and its implications for emplacement mechanism). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **111**, 458–475.
- Kanamaru, T. and Herrero-Bervera, E., 2006, Anisotropy of magnetic susceptibility and paleomagnetic studies in relation to the tectonic evolution of the Miocene-Pleistocene accretionary sequence in the Boso and Miura Peninsulas, central Japan. *Tectonophysics*, **418**, 131–144.
- 狩野謙一 (Kano, K.), 2002a, 伊豆弧衝突に伴う西南日本弧の地殻構造 改 変 (Re-arrangement of the shallow-level structure of Southwest Japan Arc due to the collision of the Izu-Bonin Arc). *東京大地震研彙報 (Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo)*, **77**, 231–248.
- 狩野謙一 (Kano, K.), 2002b, 美濃—丹波帯に発達する急傾斜した軸を持つ地質図規模の褶曲: 基盤構造からみた柳ヶ瀬断層の起源 (Steeply-plunging, map-scale folds in the Mino-Tanba Belt, Southwest Japan: origin of the Yanagase Fault as viewed from the basement structures). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **108**, 591–605.
- Kano, K., Kosaka, K., Murata, A. and Yanai, S., 1990, Intra-arc deformations with vertical rotation axes: the case of the pre-Middle Miocene terranes of Southwest Japan. *Tectonophysics*, **176**, 333–354.
- 狩野謙一・竹田正司 (Kano, K. and Takeda, M.), 1999, 美濃—丹波帯に発達する急傾斜した軸をもつ地質図規模の褶曲: 琵琶湖北方の野坂山地に見られる例 (Steeply-plunging, mappable-scale folds in the Mino-Tanba Belt, Southwest Japan: examples in the Nosaka Mountains, north of Lake Biwa). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **105**, 435–449.
- 狩野謙一・田中秀実・吉田智治・松井信治 (Kano, K., Tanaka, H., Yoshida, T. and Matsui, N.), 1993, 赤石構造帯の形成過程: 中新世における西南日本弧東部の地殻改変と関連して (Formation of the Akaishi Tectonic Zone and its significance on the crustal reconstruction of the eastern part of Southwest Japan Arc during the Miocene). *地質学論集 (Mem. Geol. Soc. Japan)*, **42**, 203–223.
- Kawate, S. and Arima, M., 1998, Petrogenesis of the Tanzawa plutonic complex, central Japan: Exposed felsic middle crust of the Izu-Bonin-Mariana arc. *Isl. Arc*, **7**, 342–358.
- Kimura, G., 1996, Collision orogeny at arc-arc junctions in the Japanese Islands. *Isl. Arc*, **5**, 262–275.
- Kimura, G., Hashimoto, Y., Kitamura, Y., Yamaguchi, A. and Koge, H., 2014, Middle Miocene swift migration of the TTT triple junction and rapid crustal growth in southwest Japan: A review. *Tectonics*, **33**, 2014TC003531, doi: 10.1002/2014tc003531.
- Kimura, J., Stern, R. J. and Yoshida, T., 2005, Reinitiation of

- subduction and magmatic responses in SW Japan during Neogene time. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **117**, 969–986.
- Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Miura, S., Tamura, Y., Tsumi, Y.,...Kaneda, Y., 2007, New seismological constraints on growth of continental crust in the Izu-Bonin intra-oceanic arc. *Geology*, **35**, 1031–1034.
- 小坂共栄・角田史雄(Kosaka, T. and Tsunoda, F.), 1969, 山梨県南部, 巨摩山地第三系の地質(Geology of the Koma Massif in the western part of Yamanashi Prefecture). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **75**, 127–140.
- 小竹信宏・小山真人・亀尾浩司(Kotake, N., Koyama, M. and Kameo, K.), 1995, 房総半島南端地域に分布する千倉・豊房層群(鮮新-更新統)の古地磁気および微化石層序(Magnetostratigraphy and biostratigraphy of the Plio-Pleistocene Chikura and Toyofusa Groups, southern most part of the Boso peninsula, central Japan). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **101**, 515–531.
- 小山 彰(Koyama, A.), 1984, 山梨県早川沿いの糸魚川-静岡構造線: 特に断層帯の形成について(The Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line along the River Haya-kawa, Yamanashi Prefecture, central Japan: with special reference to the formation of the fault zone). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **90**, 1–16.
- Koyama, A., 1991, Collision of the Kushigatayama block with the Honshu arc during the middle Miocene. *Modern Geol.*, **15**, 331–345.
- 小山 彰(Koyama, A.), 1993, 中期中新世における南部フォッサマグナ北西部櫛形山ブロックの衝突(Collision of the Kushigatayama block during the Middle Miocene, northwestern part of South Fossa-Magna, central Japan). *地質学論集(Mem. Geol. Soc. Japan)*, **42**, 245–254.
- Lamb, S., 2001, Vertical axis rotation in the Bolivian orocline, South America: 1. Paleomagnetic analysis of Cretaceous and Cenozoic rocks. *Jour. Geophys. Res., Solid Earth*, **106**, 26605–26632.
- 牧本 博・高木秀雄・宮地良典・中野 俊・加藤碩一・吉岡敏和(Makimoto, H., Takagi, H., Miyachi, Y., Nakano, S., Kato, H. and Yoshioka, T.), 1996, 高遠地域の地質: 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅) (*Geology of the Takato District, with Geological Sheet Map at 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 114p.
- Marshak, S., 1988, Kinematics of orocline and arc formation in thin-skinned orogens. *Tectonics*, **7**, 73–86.
- Martin, A. J. and Amano, K., 1999, Facies analyses of Miocene subaqueous volcanoclastics in the Koma Mountains, South Fossa Magna, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **105**, 552–572.
- 松原典孝・天野一男(Matsubara, N. and Amano, K.), 2010, 南部フォッサマグナ丹沢山地における中新世ペペライトの産状と形成過程(Occurrence and genesis of Miocene peperites in the Tanzawa area, South Fossa Magna, central Japan). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **116**, 134–150.
- 松田時彦(Matsuda, T.), 1993, 中部日本の新生代後期テクトニクス: 1970~80年代の展開(Late Cenozoic tectonics of the central Japan areas: a review for the 1970'–1980' s). 日本地質学会編, 日本の地質学100年(*Hundred Years of Geology in Japan: Centennial Volume of the Geological Society of Japan*), 日本地質学会(Geol. Soc. Japan), 231–236.
- 松尾卓郎・星 博幸(Matsuo, T. and Hoshi, H.), 2017, 西南日本東部, 天狗棚地域の北設垂層群の古地磁気方位(Paleomagnetic direction of the Hokusetsu Subgroup in Tengudana in eastern SW Japan). 日本地質学会第124年学術大会講演要旨(124th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 208.
- McWilliams, M. and Li, Y., 1985, Oroclinal bending of the southern Sierra Nevada batholith. *Science*, **230**, 172–175.
- 中島正志・沢田順弘・中川登美雄・林 昌代・板谷徹丸(Nakajima, T., Sawada, Y., Nakagawa, T., Hayashi, A. and Itaya, T.), 1990, 福井県北部新第三系の K–Ar 年代と古地磁気: 西南日本ブロックの回転に関して(Paleomagnetic results and K–Ar dating on Miocene rocks in the northern part of Fukui Prefecture, central Japan: with reference to the rotation of Southwest Japan). *岩鉱(Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.)*, **85**, 45–59.
- Niitsuma, N., 1989, Collision tectonics in the South Fossa Magna, central Japan. *Modern Geol.*, **14**, 3–18.
- Niitsuma, N. and Akiba, F., 1985, Neogene tectonic evolution and plate subduction in the Japanese Island Arcs. In Nasu, N., Uyeda, S., Kobayashi, K., Kushiro, I. and Kagami, H., eds., *Formation of Active Ocean Margins*, Terrapub, Tokyo, 75–108.
- Niitsuma, N. and Matsuda, T., 1985, Collision in the South Fossa Magna area, central Japan. *Recent Progr. Nat. Sci. Japan*, **10**, 41–50.
- 大石雅之・高橋雅紀(Oishi, M. and Takahashi, M.), 1990, 群馬県高崎地域に分布する中新統: とくに庭谷不整合形成過程について(Miocene formations in the Takasaki district, central Japan: with special reference to the developmental process of the Niwaya Unconformity). 東北大地質古生物研報(*Contr. Inst. Geol. Paleontol., Tohoku Univ.*), **92**, 1–17.
- Okino, K., Ohara, Y., Kasuga, S. and Kato, Y., 1999, The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2287–2290.
- Okino, K., Shimakawa, Y. and Nagaoka, S., 1994, Evolution of the Shikoku Basin. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, **46**, 463–479.
- Otofujii, Y., Enami, R., Yokoyama, M., Kamiya, K., Kuma, S., Saito, H. and Matsuda, T., 1999, Miocene clockwise rotation of southwest Japan and formation of curvature of the Median Tectonic Line: Paleomagnetic implications. *Jour. Geophys. Res.*, **104**, 12895–12907.
- Otofujii, Y., Hayashida, A. and Torii, M., 1985a, When was the Japan Sea opened? : Paleomagnetic evidence from Southwest Japan. In Nasu, N., Uyeda, S., Kobayashi, K., Kushiro, I. and Kagami, H., eds., *Formation of Active Ocean Margins*, Terrapub, Tokyo, 551–566.
- Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S., 1985b, Paleomagnetic evidence for the Miocene counter-clockwise rotation of Northeast Japan: rifting process of the Japan arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **75**, 265–277.
- Pickering, K. T., Underwood, M. B., Saito, S., Naruse, H., Kutterolf, S., Scudder, R.,...Slagle, A., 2013, Depositional architecture, provenance, and tectonic/eustatic modulation of Miocene submarine fans in the Shikoku Basin: Results from Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment. *Geochim. Geophys. Geosys.*, **14**, 1722–1739.
- Saito, S. and Tani, K., 2017, Transformation of juvenile Izu-Bonin-Mariana oceanic arc into mature continental crust: An example from the Neogene Izu collision zone granitoid plutons, Central Japan. *Lithos*, **277**, 228–240.
- 酒向和希・星 博幸(Sako, K. and Hoshi, H.), 2014, 本州中部, 中新統富草層群の古地磁気とテクトニックな意義(Paleomagnetism and tectonic significance of the Miocene Tomikusa Group in central Honshu, Japan). *地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **120**, 255–271.
- 沢井 誠・設楽団体研究グループ(Sawai, M. and Collaborative Research Group for the Shitara Basin), 1985, 設楽地域からみた瀬戸内火山岩類(On the characteristics of the Setouchi volcanic rocks as referred by the studies of the Shidara volcanic rocks). 糸魚川淳二・桑原 徹・牧野内猛・松岡敬二・中島経夫・中山勝博ほか編, 瀬戸内区の特長(*Characteristics of the Setouchi Geologic Province, Southwest Japan*), 地学団体研究会(Assoc. Geol. Collab. Japan), 131–142.
- Schwartz, S. Y. and Van der Voo, R., 1983, Paleomagnetic evaluation of the orocline hypothesis in the central and southern Appalachians. *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 505–508.
- Soh, W., 1986, Reconstruction of Fujikawa Trough in Mio-Pliocene age and its geotectonic implication. *Mem. Fac. Sci.*

- Kyoto Univ., Ser. Geol. Mineral., **52**, 1–68.
- 杉原孝充・藤巻宏和(Sugihara, T. and Fujimaki, H.), 2002, 愛知県設楽地域に分布する瀬戸内火山岩類の K–Ar 年代(K–Ar ages for the Setouchi volcanic rocks in Shitara district, central Japan). 岩鉱物科学(*Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.*), **31**, 15–24.
- Sussman, A. J. and Weil, A. B., eds., 2004, *Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses*. GSA Spec. Pap. 383, Geol. Soc. Am., Boulder, 271p.
- 杉崎雄一・星博幸(Sugisaki, Y. and Hoshi, H.), 2017, 飛騨地方の中新生岩脈群から得られた古地磁気方位の地質学的意味(Geological implications of a paleomagnetic direction obtained from a Miocene dike swarm in the Hida region, central Japan). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **123**, 953–967.
- Suyehiro, K., Takahashi, N., Ariie, Y., Yokoi, Y., Hino, R., Shinohara, M.,...Taira, A., 1996, Continental crust, crustal underplating, and Low-Q upper mantle beneath an oceanic island arc. *Science*, **272**, 390–392.
- Taira, A., Saito, S., Aoike, K., Morita, S., Tokuyama, H., Suyehiro, K.,...Klaus, A., 1998, Nature and growth rate of the Northern Izu-Bonin(Ogasawara) arc crust and their implications for continental crust formation. *Isl. Arc*, **7**, 395–407.
- Tait, J. A., Bachtadse, V. and Soffel, H., 1996, Eastern Variscan fold belt: Paleomagnetic evidence for oroclinal bending. *Geology*, **24**, 871–874.
- 高木秀雄・柴田賢・内海茂(Takagi, H., Shibata, K. and Uchi-umi, S.), 1991, 中部地方における中央構造線の断層ガウジとフェルサイト岩脈の K–Ar 年代(K–Ar ages of fault gouges and felsite dykes from the Median Tectonic Line in Chubu Region, central Japan). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **97**, 377–384.
- 高橋雅紀(Takahashi, M.), 1992, 中部日本の新第三紀テクトニクスにおける中新世秩父盆地の地質学的位置(Geologic setting of the Miocene Chichibu basin in the Neogene tectonics of central Japan). 埼玉県立自然史博研報(*Bull. Saitama Mus. Nat. Hist.*), **10**, 29–45.
- 高橋雅紀(Takahashi, M.), 2008, 秩父盆地(Chichibu basin). 日本地質学会編, 日本地方地質誌 3 関東地方(*Regional Geology of Japan, Vol 3, Kanto Region*), 朝倉書店(Asakura Publ.), 143–152.
- 高橋雅紀・林広樹(Takahashi, M. and Hayashi, H.), 2004, 群馬県富岡地域に分布する中新統の地質と複合年代層序(Geology and integrated chronostratigraphy of the Miocene marine sequence in the Tomioka area, Gunma Prefecture, central Japan). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **110**, 175–194.
- Takahashi, M., Hoshi, H. and Yamamoto, T., 1999, Miocene counterclockwise rotation of the Abukuma Mountains, Northeast Japan. *Tectonophysics*, **306**, 19–31.
- Takahashi, M. and Nomura, S., 1989, Paleomagnetism of the Chichibu Quartz Diorite: Constraints on the time of lateral bending of the Kanto Syntaxis. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, **41**, 479–489.
- Takahashi, M. and Saito, K., 1997, Miocene intra-arc bending at an arc-arc collision zone, central Japan. *Isl. Arc*, **6**, 168–182.
- Takahashi, M. and Watanabe, Y., 1993, Paleomagnetism of the Miocene igneous rocks in the Uchiyama area, central Japan. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, **45**, 89–101.
- 高橋雅紀・柳沢幸夫(Takahashi, M. and Yanagisawa, Y.), 2004, 埼玉県比企丘陵に分布する中新統の層序: 複合年代層序に基づく岩相層序の総括(Stratigraphy of the Miocene Series in the Hiki Hills, Saitama Prefecture, central Japan: Synthesis of the lithostratigraphy based on integrated geochronology). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **110**, 290–308.
- Takeshita, T., 1995, Dynamic analysis of deformed quartz grains from the folded Middle Miocene Momonoki Subgroup of central Japan: origin of healed microcracks. *Tectonophysics*, **245**, 277–297.
- Tamaki, M., Itoh, Y. and Watanabe, M., 2006, Paleomagnetism of the Lower to Middle Miocene Series in the Yatsuo area, eastern part of southwest Japan: clockwise rotation and marine transgression during a short period. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **57**, 73–88.
- 田村淳一・金子剛・新妻信明(Tamura, J., Kaneko, T. and Niitsuma, N.), 1984, 山梨県西部・巨摩山地南部の地質(Geology of the southern part of the Koma Mountains, western part of Yamanashi Prefecture, central Japan). 静岡大地球科学研報(*Geosci. Rep., Shizuoka Univ.*), **10**, 23–53.
- Tamura, Y., Ishizuka, O., Aoike, K., Kawate, S., Kawabata, H., Chang, Q.,...Fiske, R. S., 2010, Missing Oligocene crust of the Izu-Bonin Arc: Consumed or rejuvenated during collision? *Jour. Petrol.*, **51**, 823–846.
- 田中秀実・高木秀雄・井上良(Tanaka, H., Takagi, H. and Inoue, M.), 1996, 中部地方中央構造線に伴う断層破碎岩類の変形・変質様式と断層活動史(Mode of cataclastic deformation and hydrothermal alteration of the fault rocks and history of fault activity along the Median Tectonic Line, central Japan). 構造地質(*Jour. Tect. Res. Gr. Japan*), **41**, 31–44.
- Tanaka, H., Uehara, N. and Itaya, T., 1995, Timing of the cataclastic deformation along the Akaishi Tectonic Line, central Japan. *Contr. Mineral. Petrol.*, **120**, 150–158.
- Tani, K., Dunkley, D. J., Kimura, J. I., Wysoczanski, R. J., Yamada, K. and Tatsumi, Y., 2010, Syncollisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone: Evidence from the tanzawa plutonic complex, Japan. *Geology*, **38**, 215–218.
- Torii, M., 1983, *Paleomagnetism of Miocene Rocks in the Setouchi Province: Evidence for Rapid Clockwise Rotation of Southwest Japan at Middle Miocene Time*. PhD thesis, Kyoto Univ., 126p.
- Tosha, T. and Tsunakawa, H., 1981, Paleomagnetism of the Shidara dike swarm, central Japan: an estimation of paleointensity in Miocene. *Rock Magn. Paleogeophys.*, **8**, 28–33.
- Ueno, H. and Tonouchi, S., 1987, Paleomagnetic evidence for the timing of formation of the Chichibu pyrometamorphic deposits, Japan. *Econ. Geol.*, **82**, 1723–1731.
- Weil, A. B. and Sussman, A. J., 2004, Classifying curved orogens based on timing relationships between structural development and vertical-axis rotations. In Sussman, A. J. and Weil, A. B., eds., *Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses*(GSA Spec. Pap. 383), Geol. Soc. Am., Boulder, 1–15.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F., 1998, New, improved version of generic mapping tools released. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, **79**, 579.
- Wu, J., Suppe, J., Lu, R. and Kanda, R., 2016, Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods. *Jour. Geophys. Res., Solid Earth*, **121**, 2016JB012923, doi: 10.1002/2016JB012923.
- Yamaji, A. and Yoshida, T., 1998, Multiple tectonic events in the Miocene Japan arc: The Heike microplate hypothesis. *Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **93**, 389–408.
- 山北聡・大藤茂(Yamakita, S. and Otoh, S.), 2002, 伊豆弧衝突に伴う西南日本弧・東北日本弧の地殻変形と日本海拡大以前の両弧の連続性の復元(Intra-arc deformation of Southwest and Northeast Japan Arcs due to the collision of Izu-Bonin Arc and reconstruction of their connection before the opening of the Japan Sea). 東京大地震研彙報(*Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*), **77**, 249–266.
- Yamamoto, S., Nakajima, J., Hasegawa, A. and Maruyama, S., 2009, Izu-Bonin arc subduction under the Honshu island, Japan: Evidence from geological and seismological aspect. *Gondwana Res.*, **16**, 572–580.
- Yamamoto, Y. and Kawakami, S., 2005, Rapid tectonics of the Late Miocene Boso accretionary prism related to the Izu-

- Bonin arc collision. *Isl. Arc*, **14**, 178–198.
- Yamazaki, T., Takahashi, M., Iryu, Y., Sato, T., Oda, M., Takayanagi, H.,...Ooka, T., 2010, Philippine Sea Plate motion since the Eocene estimated from paleomagnetism of sea-floor drill cores and gravity cores. *Earth Planets Space*, **62**, 495–502.
- Yoshida, S., Shibuya, H., Torii, M. and Sasajima, S., 1984, Post-Miocene clockwise rotation of the Miura Peninsula and its adjacent area. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, **36**, 579–584.
- Zhao, X., Coe, R., Zhou, Y., Hu, S., Wu, H., Kuang, G.,...Wang, J., 1994, Tertiary paleomagnetism of North and South China and a reappraisal of late Mesozoic paleomagnetic data from Eurasia: Implications for the Cenozoic tectonic history of Asia. *Tectonophysics*, **235**, 181–203.
- Zweigel, P., Ratschbacher, L. and Frisch, W., 1998, Kinematics of an arcuate fold-thrust belt: the southern Eastern Carpathians (Romania). *Tectonophysics*, **297**, 177–207.

(著者プロフィール)



星 博幸 愛知教育大学自然科学系、専門分野は地質学および古地磁気学。

(要 旨)

星 博幸, 2018, 関東対曲構造の形成はいつ始まったか?. 地質雑, **124**, 805–817. (Hoshi, H., 2018, Kanto Syntaxis: when did it begin to grow?. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 805–817.)

筆者は「関東対曲構造の形成はいつ始まったか」という問題について主に地質と古地磁気の両面から最近の研究をレビューし、現状の到達点について整理した。伊豆衝突帯の橢円山地塊の地質より、伊豆弧と本州弧の衝突は 17 Ma 頃には始まりつつあったと考えられる。対曲構造の東西両翼から得られた古地磁気データは、対曲構造の形成が約 17 Ma から 15 Ma までの間のある時期に始まった可能性が高いことを示す。地質から推定される年代と古地磁気から推定される年代が整合することから、約 17 Ma から 15 Ma までの間のある時期に本州弧と伊豆弧の衝突が始まり、衝突開始と同時に対曲構造の形成も始まったと考えられる。伊豆弧衝突と対曲構造の形成開始を約 15 Ma と考える研究者が多かったが、実際には 15 Ma には衝突も対曲構造形成もすでに始まっていたようだ。小論では対曲構造形成に関連する検証可能な仮説についてもいくつか紹介した。