EGJ Engineering Geology of Japan

古地磁気が語る日本列島・日本海の形成

乙藤 洋一郎 [1)]

要旨　日本列島の形成や日本海の拡大の様子について，古地磁気学研究が探索してきた取り組みを紹介する．日本に分布する 100Ma より若い年代を持つ岩石の古地磁気測定結果は，(1) 東北日本は反時計回りに～ 40 度，西南日本は時計回りに～ 50 度の回転運動を経験し，(2) 両日本の回転の最盛期はともに 15Ma であったことを明らかにした．プレートテクトニクス理論を組み合わせると，日本海が拡大する前には，東北日本と西南日本はそれぞれロシア沿海州と韓半島の沖合に位置していたとの結論に達した．この古位置から，日本海が拡大の最盛期を迎えた 15Ma には，東北日本と西南日本の二つの扉は観音開きのように開いた「観音開きモデル」が導かれた．15Ma の「観音開きモデル」の妥当性は，日本海海底の年代（19Ma ～ 13Ma）や韓半島・東北日本・西南日本に分布する生物種の隔離年代（20Ma ～ 14Ma）から検討されている．

キーワード：古地磁気学，日本列島，日本海，15Ma

1. はじめに

西太平洋には，大陸と島弧に挟まれた，あるいは島弧と島弧に挟まれた海である縁海を数多く見ることができる．日本海は，そのうちの一つで，アジア大陸と日本列島の間にある縁海である．縁海の形成は，地球科学の中でも，研究者が興味を持つ現象の一つである．

大陸が裂けて日本海ができたとの見方は，1927 年に寺田寅彦によって論文として発表された（Terada, 1927）．彼は，日本列島の太平洋沿岸には伊豆七島を除いて島がないのと対照的に日本海沿岸には壱岐，隠岐，佐渡や奥尻などの島々が弧状に並ぶことに着目した．Wegener (1915; 都城・紫藤 (訳), 1981) の大陸移動説に着想を得て，日本海沿岸の島々の成因は，日本海が拡大したとき，移動中の日本列島から取り残されたものであると考えた．先駆的な研究ではあったが，証拠に裏付けられた日本海拡大論ではなかった．

海洋底拡大の様子は，海洋の磁気異常の縞模様から推測することがもっとも正当な方法である（Vine and Matthews, 1963）．日本海でも地磁気観測が行われ，地磁気異常の観測結果は 1973 年から発表されるようになった（Isezaki and Uyeda, 1973; Isezaki, 1975; Seama and Isezaki, 1990）．日本海の地磁気異常は 300nT より小さな振幅を示すのが特徴であり（Isezaki and Uyeda, 1973），そのために磁気異常の縞模様を見出すのは簡単ではなかった．観測データが蓄積されると，日本海盆から海洋底拡大中心の発見（Isezaki, 1975）や日本海盆の南東部から磁気異常の縞模様の発見（Seama and Isezaki, 1990）などの報告があったものの，その縞模様から海底年代を同定するまでには至らなかった．日本海の拡大の様相を，磁気異常の縞模様から推測することはいまだ成功していない．

日本列島が日本海の拡大に伴って大陸から切り離されると，日本列島は移動・回転を経験する．地塊の移動・回転の様子を定量的に見出す方法として，古地磁気学は威力を発揮する．川井直人らは 1961 年に初めて日本列島の白亜紀岩石の古地磁気測定結果を発表した（Kawai *et al.*, 1961）．日本列島の花こう岩の K-Ar 年代値が発表され始めると（河野・植田, 1964），古地磁気測定にも拍車がかかり，古地磁気データは増えていった．それらのデータに基づいて，日本列島の白亜紀の岩石の古地磁気方向は，東北日本は北西向き偏角で，一方西南日本は北東向き偏角で特徴づけられることが分かった（Kawai *et al.*, 1961; 1962; 1971）（図 1）．この異なる偏角値を説明するために川井らは，東北日本は反時計回り回転を，一方西南日本は時計回り回転を白亜紀以降にそれぞれ経験したと主張した．彼らは，日本列島はかつて直線状の形状であったものが，現在の「く」の字型に変形したという「日本列島折れ曲がりモデル」を提唱した．日本列島の変形には言及したものの，

Engineering Geology of Japan, No. 7, 17-25 (2017)

A paleomagnetic tale on formation of Japan Arc and Japan Sea

Yo-ichiro Otofuji[1)]

otofuji@kobe-u.ac.jp

[1)] Research Institute of jGnet (NPO) at Susai
Susai 136, Akaiwa, Okayama 701-2503, Japan

[1)] NPO 法人地球年代学ネットワーク　周匝研究所
〒 701-2503　岡山県赤磐市周匝 136　吉井支所内

2017 年 4 月 21 日受付，2017 年 6 月 8 日受理．© 2017 Hiruzen Institute for Geology and Chronology. All rights reserved.

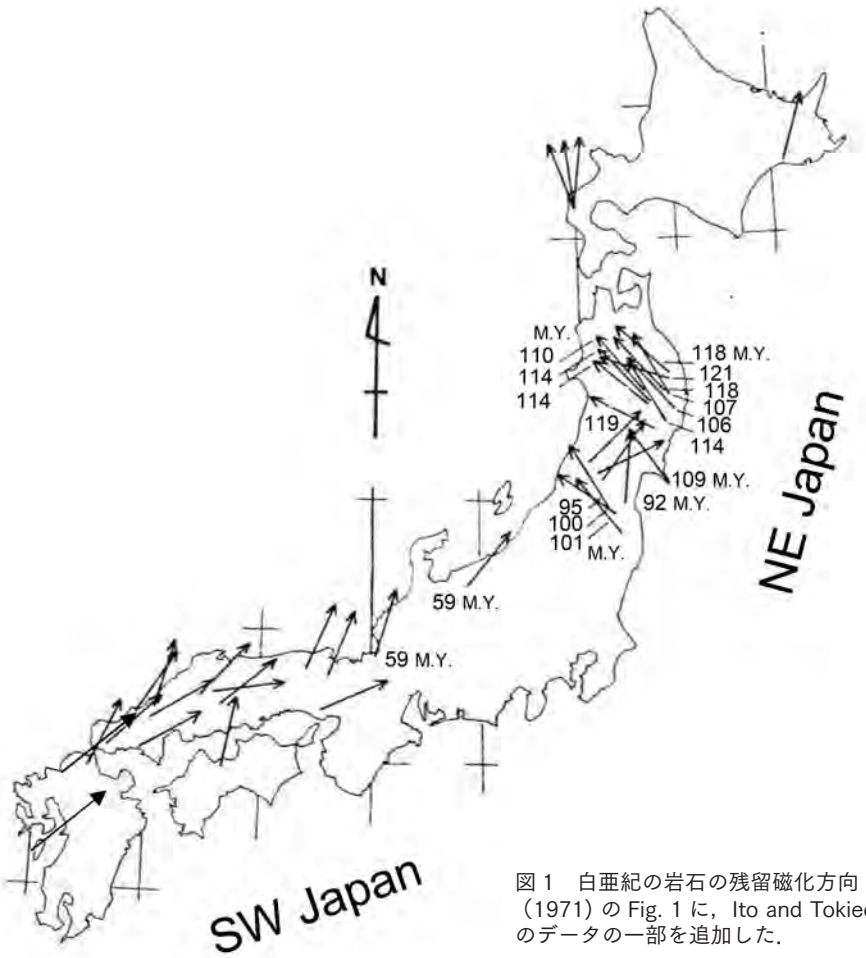

図 1　白亜紀の岩石の残留磁化方向（偏角；矢印）．Kawai *et al.*（1971）の Fig. 1 に，Ito and Tokieda (1986), Ishikawa (1997) のデータの一部を追加した．

日本海の拡大との関連は論じなかった．

日本海拡大とそれに伴う日本列島の南下を，Yaskawa (1975) は古地磁気データのうち伏角値を用いて論じた．韓半島と西南日本の白亜紀の伏角値の比較から，西南日本は韓半島に対し緯度で 4 度南下したと主張し，この南下は日本海が拡大したことに帰因すると指摘した．ここで初めて，日本海拡大研究に古地磁気データが用いられたことになる．

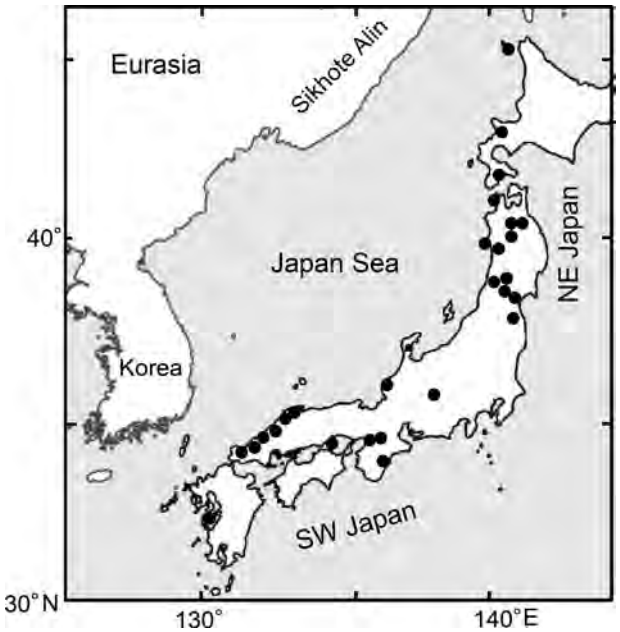

図 2　1980 年代以降に古地磁気学研究が行われた地域（黒丸）．東端は利尻島（植木・近藤，2010），西端は天草（Ishikawa, 1997）から研究結果が報告されている．

1980 年代に入ると，日本列島の古第三紀～新第三紀の岩石の古地磁気測定が盛んになった．日本列島の古地磁気データを，日本列島の変形だけでなく，日本海の成因と絡めて論ずる研究が始まった．この小論文では，古地磁気学が日本列島の古地磁気データから，日本海の拡大時期と拡大様式を解き明かしてきた試みを紹介する．

2. 東北日本と西南日本の回転

東北日本・西南日本の回転運動は白亜紀以降に起こった現象であると川井ら（Kawai *et al.*, 1971）は指摘しているので，次の古地磁気学の研究のステップは，この回転運動が白亜紀以降のいつ起こったのか，またどのように起こったのかを明らかにすることである．この目的のためには，白亜紀より新しく生成された岩石の古地磁気を測定することに尽きる．

白亜紀より新しい岩石の古地磁気学の研究には，溶結凝灰岩が研究対象岩石に選ばれた．従来の研究対象岩石は花こう岩が多かった．古地磁気方向を求めるためには，岩石生成後の地殻変動による岩石の傾きを補正しなければならない（傾動補正）．ところが花こう岩からはこの傾きの様

子を知ることが難しい．この問題の解決法は，溶結凝灰岩に古地磁気学を適用することであった．溶結凝灰岩は，600℃を超える熱い火山灰が固化したものであり，火山灰中の軽石がつぶれて溶結レンズ（フィアメ）を形成し，それが水平面の情報を残している．溶結凝灰岩は，その磁化が熱残留磁化起源であるため残留磁化測定が簡単なだけでなく，軽石がつぶれた様子から傾動補正もできるため，古地磁気学にはとても有益な岩石である．1980 年代以降の古地磁気学研究にとって，溶結凝灰岩の残留磁化のデータの寄与が大きい．

2. 1. 西南日本

山口県から島根県に広く分布している 100Ma ～ 10Ma の火成岩層に，古地磁気学研究が適用された（図 2）．100Ma ～ 80Ma の周南（しゅうなん）層群・阿武（あぶ）層群, 80Ma の邑智（おおち）層群, 60Ma の桜江（さくらえ）層群，30Ma の山陰コールドロン（田万川（たまがわ），浜田，川内（かわうち），そして 20Ma ～ 10Ma の石見（いわみ）層群・出雲（いずも）層群の溶結凝灰岩や安山岩が研究対象岩石となった．山陰コールドロンについては新たに 77 個の年代測定値が発表され，それらの生成年代は 43Ma ～ 30Ma であることが分かった（Imaoka *et al.*, 2011）．

採取した岩石試料に熱消磁を施し，傾動補正を行った結果，100Ma ～ 20Ma の残留磁化の偏角の方向 (D; Declination) は，74°～ 60°であった（Otofuji and Matsuda, 1983; 1984; 1987）（図 3）．100Ma: D=64.6°, 80Ma: D=73.4°, 60Ma: D=74.1°, 30Ma: D=65.9°, 20Ma: D=60.0°．一方 13.9Ma の岩石の偏角値は -8.5° (D=351.5°) であり，現在の地球磁場の偏角値とほぼ同じであった．川井らが指摘した西南日本の白亜紀の岩石に観測できた東振りの大きな偏角値は，古第三紀や中新世初期の岩石にも見ることができた．

ユーラシア大陸で観察される極移動の影響を取り去ると，西南日本の時計回り回転量を見積もることができる（Otofuji and Matsuda, 1987）（図 4）．100Ma ～ 20Ma の岩石から求めた回転量は 60°～ 53°であった．一方 14Ma の岩石から求めた回転量はほぼゼロであった．これらのことは，西南日本の 60°～ 53°の回転が 20Ma と 14Ma の間に起こったこと，またその回転が起こる前の 100Ma ～ 20Ma の間には回転をほとんど経験しなかったことを強く示している．100Ma ～ 20Ma にほとんど回転がなかったことは，その後の白亜紀のデータの集積から確認された（Uno *et al.*, 2017）．

次のステップは正確な回転時期を見積もるために 20Ma と 10Ma の間に生じた岩石の年代と古地磁気を測定するこ

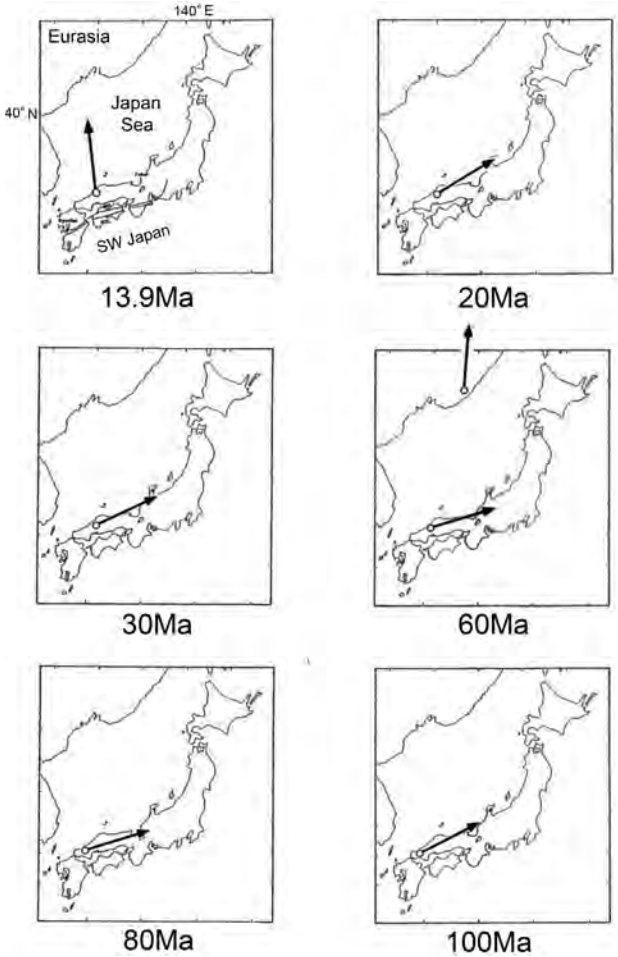

図 3　西南日本に分布する 100Ma から 13.9Ma までの年代を持つ岩石の残留磁化方向（偏角；矢印）（Otofuji and Matsuda, 1987 のデータに基づく）．Sikhote Alin の矢印は 66 Ma and 46 Ma の年代を持つ岩石の偏角（Otofuji *et al.*, 1995）．

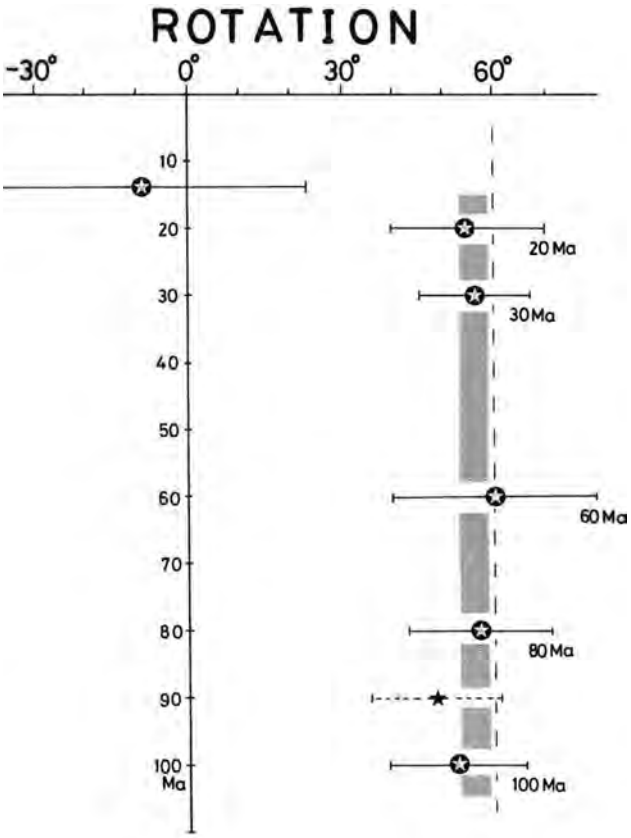

図 4　西南日本の回転量と年代（Otofuji and Matsuda, 1987 の Fig. 4 による）．回転量は，西南日本で観測された偏角値と，ユーラシアや韓半島で求められた磁極（Lin *et al.*, 1985; Otofuji *et al.*, 1983）から計算した西南日本での予想される偏角値との比較から，推測された．✪：ユーラシアに対する回転量，★：韓半島に対する回転量，灰色のゾーン：100Ma ～ 20Ma のユーラシアに対する回転量の平均値と標準誤差（56° ± 3°）．

とである．出雲・小豆島・室生・熊野・福井に分布する溶結凝灰岩や安山岩が，研究対象となった（図 2）．中新世の年代と信じられた岩石に対して K-Ar 年代測定法が適用され，20Ma ～ 10Ma の年代を示す放射年代データが蓄積された（Otofuji *et al.*, 1991; 中島ほか, 1990; Tatsumi *et al.*, 2001）．それらの岩石の古地磁気結果は，15Ma より古い岩石の偏角は 39°～ 78°を示し，それより若い岩石の偏角値は 0°であった（図 5）．このことから，西南日本の回転の主要部は，15Ma に起こったと結論できる（Baba *et al.*, 2007）．

2. 2. 東北日本

西南日本の回転の主要時期は 15Ma なので，東北日本でも回転時期を 15Ma 前後に起こったとの作業仮説が立てられ，50Ma ～ 10Ma の年代を持つ岩石の古地磁気学研究が行われた．従来の東北日本の古地磁気データは花こう岩から求められてきた．一方 1980 年代以降の研究は溶結凝灰岩に焦点があてられた．東北日本の 50Ma ～ 10Ma の年代を示す溶結凝灰岩は，北海道の積丹半島から山形にわたって離散的に分布しているので，渡島半島，津軽，二戸，八幡平，男鹿半島，大平山，秋田，湯沢，朝日山地，山形の 10 地域で研究対象岩が採取された（Otofuji *et al.*, 1985b; 1994）（図 2）．

東北日本に分布する 30Ma ～ 18Ma の年代を示す岩石は，～ 320°の西振り偏角値を示した（図 5）．従来報告されてきた 100Ma の年代の岩石の持つ西振り偏角値は，より若い 30Ma ～ 18Ma の岩石にも観察されることが分かった．さらに 15Ma より若い岩石の偏角値が 0°となることも分かった．しかしながら，16Ma の年代を示す岩石には，大きな西振り偏角値を示すものもある一方，やや小さい偏角値を示すのも見つかった．反時計回り回転終了時期は 16Ma である可能性も残った．

15Ma 近辺の年代を持つ岩石の古地磁気方向を求めるために，宮城県に分布する高館層と福島県に分布する霊山層に焦点をあて，K-Ar 年代学と古地磁気学が行われた（Baba *et al.*, 2007）（図 2）．その結果，16.5Ma の年代が求められた霊山層の偏角値は 333.5°を示し，14.4Ma の年代が求まった高館層の偏角値は 355.3°を示した．この研究から，東北日本は，16.5Ma にはまだ回転は終了していないことが分かった．古地磁気データと年代学のデータを編集して，16.5Ma は回転の途中であり，14.4Ma には終了していたと結論できた（Baba *et al.*, 2007）（図 5）．このことから東北日本も回転の最盛期は 15Ma であったと記述することができる．

2. 3. 東北日本・西南日本まとめ

日本列島の 1970 年代までの古地磁気データは，白亜紀の岩石から求められてきた．このデータからは，東北日本

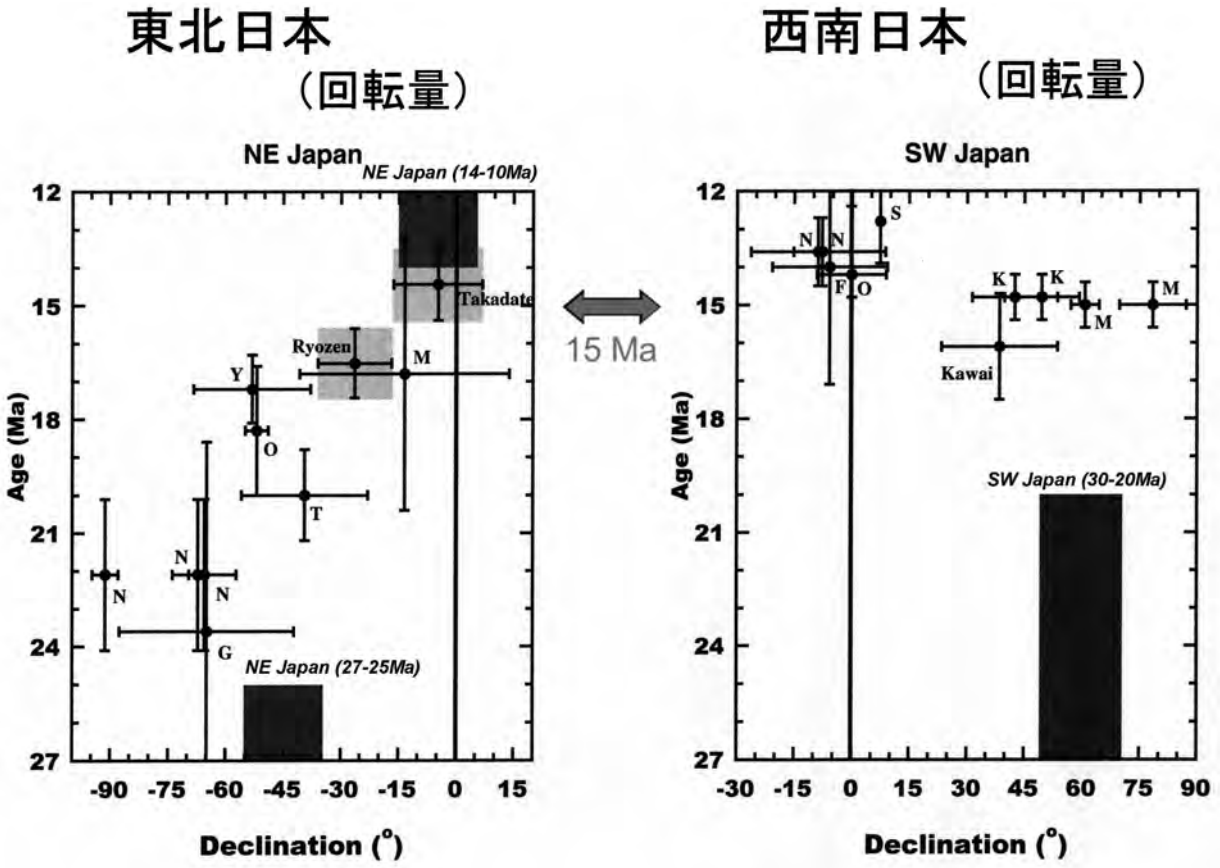

図 5　東北日本と西南日本の偏角値の時間的変化．Baba *et al.*（2007）の Fig. 5 に加筆．東北日本と西南日本の偏角とも，15Ma に大きく変化している．暗灰色のゾーン：東北日本の 14-10Ma と 27-25Ma の偏角の平均値と標準誤差，西南日本の 30-20Ma の偏角の平均値と標準誤差．

では反時計回り回転運動が，西南日本では時計回り回転運動が起こったことを示すことができた．この運動が白亜紀以降に起こったらしいことは示唆されたものの，いつどのような回転が起こったかははっきりしなかった．

1980 年以降の古地磁気研究は，従来よりも精緻な結果を提出した．東北日本・西南日本の回転は次のようにまとめることができる．

	東北日本	西南日本
(1) 回転	反時計回り	時計回り
(2) 回転角度	～40°	～50°
(3) 回転領域	利尻―日立	天草―岐阜
(4) 回転時期	～15Ma	～15Ma

領域については，Otofuji *et al.* (1985b; 1994; 1999), Ishikawa (1997)，植木・近藤 (2010) を参考にした．

3. 観音開きモデルと日本海拡大

古地磁気学は，東北日本と西南日本が 15Ma 頃に回転のクライマクッスを迎えたことを示した（図 5）．この回転を説明するテクトニクスについて，古地磁気学そのものから提案することはできない．なぜならば，古地磁気データは回転するメカニズムが何であれ，単に回転が起こったことのみを宣言しているからである．

Otofuji *et al.* (1985a) は，プレートテクトニクス理論を西南日本に適用して，西南日本の時計回り回転のメカニズムは背弧海盆が拡大することがもっともらしいことを消去法で説明した（図 6）．プレートテクトニクスは，二つのプレートの相対運動においては 3 種類のプレート境界しかないことを提案している．すなわち，収束型，トランスフォーム型そして発散型の 3 種類の境界である．西南日本が時計回り回転する際に，西南日本とアジア大陸（韓半島）は二つの独立したプレートであったと想像してみよう．収束型境界の場合，回転は東京近辺の回転軸周りで起こり，その結果西南日本は韓半島の下に沈み込んだり韓半島と衝突が起こりそれに伴う造山運動が起こることが予想される．しかしながら 15Ma の時代の沈み込みの痕跡や造山運動の証拠は報告されていない．トランスフォーム型境界の場合は，西南日本が南北の小断層で境された短冊状（あるいはボール状）の地塊で構成されたと仮定し，西南日本と韓半島との間で発生したトランスフォーム断層が右横ずれを起こすと，短冊状（ボール状）の地塊が本棚の本が倒れるようにドミノ倒しを起こす（ボールベアリングが回転する）ので，時計回り回転を説明できる．しかしながら西南日本を短冊（ボール状）に切るような小断層は見つけることができない．その結果，残った発散型境界である日本海の拡大（日本海拡大モデル）が，西南日本の時計回り回転を引き起こす最も蓋然性が高いメカニズムであると主張できる．東北日本でも同じ論理を用いて，東北日本の反時計回り運動の原因として，発散型境界である日本海拡大を挙げることができる．

東北日本と西南日本が回転する以前に，東北日本と西南日本が位置していた場を，日本海拡大モデルと古地磁気データを用いて推測した（図 7）．東北日本と西南日本の 30Ma ～ 20Ma の年代を示す岩石の古地磁気方向の平均値を求めたところ，偏角値はそれぞれ -41.2°，65.9° であった（Otofuji *et al.*, 1985c）．日本海拡大モデルを適用し，日本海が拡大する前の状態で，これらの偏角方向が当時のアジア大陸の偏角方向に合うようにすると，東北日本はロシア沿海州の沖合に，西南日本は韓半島の東沿岸沖合に配

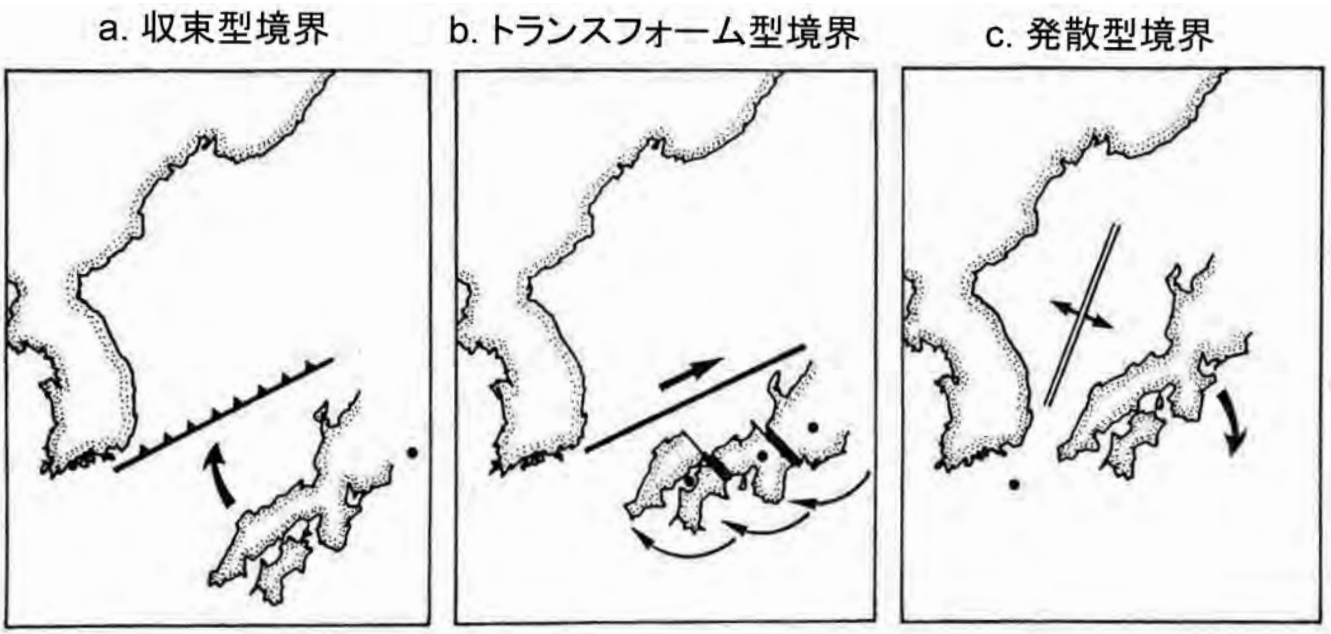

図 6　3 つのプレート境界で起こる西南日本の時計回り回転モデル（Otofuji *et al.*, 1985c の Fig. 6 に加筆）．(a) 収束型境界：西南日本が回転しながら韓半島に近づく，(b) トランスフォーム型境界：右ずれ運動をするトランスフォーム断層によって西南日本を形作る小さな地塊群が回転する，(c) 発散型境界：日本海が拡大し，西南日本は回転しながら韓半島から離れる．● 回転軸，▲▲▲▲ 沈み込み帯，── トランスフォーム断層，═══ 拡大軸．

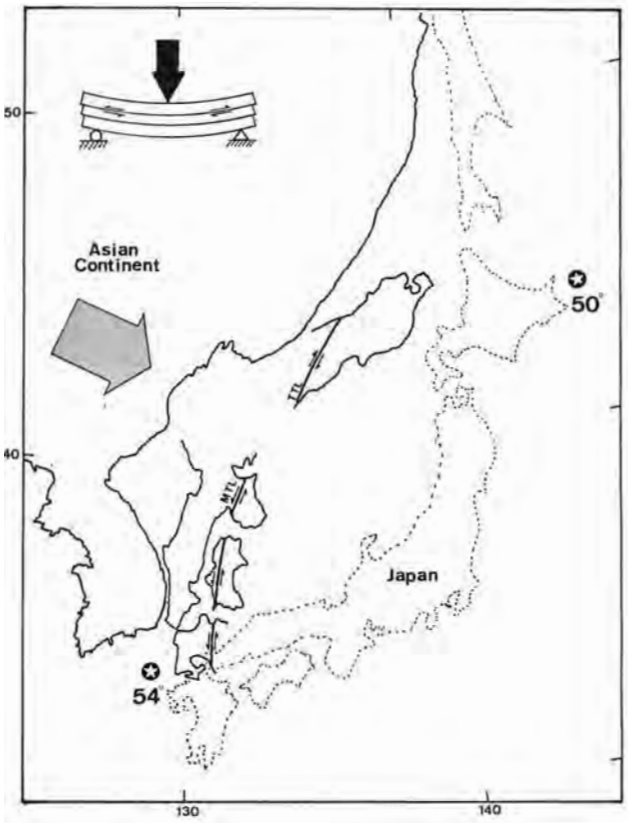

図 7　東北日本と西南日本の日本海拡大以前の復元図（Otofuji *et al.*, 1985b の Fig. 7 による）．日本海の形成は，大陸にあった東北日本と西南日本が，両扉が観音開きするようにして起こった（観音開きモデル）．東北日本は，回転軸✪（146° E, 44° N）の回りに反時計回りに 50°，一方西南日本は（129° E, 34° N）の回りに時計回りに 54° 回転した．観音開き現象に伴って日本海拡大が起こった最盛期は 15Ma であった．TTL：棚倉構造線．MTL：中央構造線．

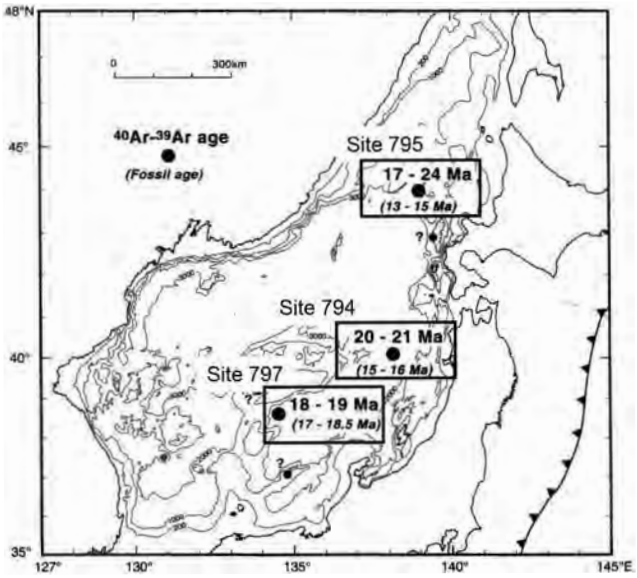

図 8　3 か所（Site 794, 795, 797）の日本海海底の年代（Tamaki *et al.*, 1992 の Fig. 8 に加筆）．（上段）日本海海底を構成する玄武岩の ^{40}Ar-^{39}Ar 年代，（下段）堆積物最下部の化石から推定した年代．

置された．この位置を，日本海拡大以前の東北日本と西南日本の古位置であると主張した．

この古位置は次の 4 つの現象が起こったことを予言している．(1) 西南日本は対馬近辺を回転軸にして時計回り回転運動を行い，東北日本は北海道の東部を回転軸にして反時計回りに回転した．(2) 日本海は，二つの扉が，観音開きをするようにして形成された（観音開きモデル）．(3) 回転に際し東北日本と西南日本の二つの日本のブロックは接することなく，それぞれ異なるブロックとして回転した（日本は二本）．(4) 日本海の拡大のクライマックスは，回転のクライマクッスと同時期の 15Ma だった．古地磁気学が打ち出したこのモデルの妥当性は，予言された 4 項目に関する証拠の有無から検証が可能である．

4. 15Ma の観音開きモデルの検証

観音開きモデルのもっともらしさの検証は，日本海の生成時期が 15Ma である証拠を探すことから可能である．日本海の磁気異常の縞模様から推測される海底の生成年代は一つの証拠を与える．しかしながら磁気異常の縞模様は発見されているものの，残念ながら年代は同定されていない．もう一つの証拠は，日本海の海底直上の堆積物の年代と海底の岩石の年代である．それらが 15Ma に極めて近ければ，観音開きモデルは妥当と主張できる．

1989 年，アメリカの科学掘削船ジョイデス・レゾリューション号が Ocean Drilling Program (ODP) 第 127/128 次航海「日本海掘削」のプロジェクトを掲げて日本海にやってきた．日本海盆で 2 か所（Sites 795/796），大和海盆で 2 か所（Sites 794/797）など計 6 か所で岩石コアを採取した（Burckle, *et al.*, 1992; Tamaki *et al.*, 1992）（図 8）．コアの堆積物の最下部の年代は，化石層序から推測された：Site 794, 15Ma ～ 16Ma; Site 795, 13Ma ～ 15Ma; Site 797, 17Ma ～ 18.5Ma．3 サイトの中でも堆積物の最下部に Blue Tuff が見つかった Site 794 では，凝灰岩中の斜長石 15 試料から，平均値 14.9Ma の ^{40}Ar-^{39}Ar 年代が求まった（Barnes *et al.*, 1992）．Site 794 の堆積物の最下部の予測値 15Ma ～ 16Ma は，化石層序だけでなく放射年代測定からも推測されたことになり，Site 794 の海底の生成年代が 15Ma 近辺の時代である信頼性は高い．

一方，堆積物の底に横たわる玄武岩には，^{40}Ar-^{39}Ar 年代決定法が適用された：Site 794, 20Ma ～ 21Ma; Site 795, 15Ma ～ 25Ma; Site 797, 18Ma ～ 19Ma（Kaneoka *et al.*, 1992）．放射年代の方が堆積物の年代よりもやや古い年代を示した．ここで求まった放射年代 13 試料のうち 9 試料は，その後に提案されたプラトー年代の評価基準（3 つ以上の連続した温度区間で構成され，その範囲で 50% 以上の ^{39}Ar が得られており，かつ年代値が重なり合っていること；McDougall and Harrison, 1999）から外れており，4 試料のプラトー年代のみが基準に合格した：Site 794, 19.9Ma, 21.2Ma; Site 797, 19.0Ma, 20.8Ma.

Nohda (2009) は，Nd 同位体分析結果から，日本海海底を構成する玄武岩層には 2 種類あることを指摘した．Site 797 の玄武岩の上部層のみが MORB 起源であり，そ

の他の Site の玄武岩は SCUM (Sub-continental upper mantle) 起源であること，そして前者は後者より地質学的に若いことを示し，前者の年代に ^{40}Ar-^{39}Ar 年代値の 21.0Ma ～ 14.9Ma をあてた．

堆積物や海底下の玄武岩の年代から，1989 年に掘削された日本海の海洋底は 21Ma ～ 13Ma に作られたことが分かった．掘削された場所は，日本海の縁辺部にあたり，日本海拡大が最初に始まった場所に相当することに留意することが大切である．日本海の海底下のデータからは日本海拡大の開始時期は，21Ma ～ 13Ma と期待でき，これは日本列島の古地磁気から予想した日本海の拡大の最盛の時期（15Ma）とほぼ一致する．

生物地理学からも，日本海の拡大時期を知ることができる．大陸移動の証拠の一つとして，Wegener (1915; 都城・紫藤 (訳), 1981) はミミズや淡水ザリガニの一種が大陸をはさんで隔離分布をしていることを挙げている．同じように，日本海が拡大し日本列島がアジア大陸から切り離された結果，日本列島とアジア大陸に生息する生物の中に隔離した痕跡が残されている．西南日本と韓半島の淡水生のサンショウウオとカゲロウに，隔離分布が起こっていることが分かった．さらに種の隔離の時期を，ミトコンドリアの DNA から推測することができた．その結果，西南日本と韓半島の分離の時期は，サンショウウオによると 19.93Ma (95% 信頼度 : 24.57Ma ～ 15.58Ma)（Li *et al.*, 2011），一方チラカゲロウによると 14.2Ma（95% 信頼度 : 19.8 Ma ～ 9.6Ma）(Saito and Tojo, 2016）となった．ミトコンドリアの DNA から推測する年代値の 95% 信頼度の幅が大きいものの，中心値は古地磁気学から推測された西南日本が時計回りに回転した時期（15Ma）とほぼ一致した．

古地磁気学が打ち出した日本列島の古位置モデルのもう一つの予言は，東北日本ブロックと西南日本ブロックが回転する際に，二つのブロックは互いに離れて「日本は二本」として振る舞うことだった．「日本は二本」も日本列島の生物分布に痕跡が残されている．オサムシの仲間であるマイマイカブリは，東日本系種群と西日本系種群に分かれる．ミトコンドリアの DNA の解析から，二つの系種の分化は，従来信じられていた 2Ma ではなく，約 15Ma であった（Su *et al.*, 1998; Tominaga *et al.*, 2000）．オサムシの DNA の解析は，東北日本と西南日本の二つブロックが 15Ma 頃に二つのブロックに分かれたことを示している．「日本は二本」は，メダカの DNA からも指摘されている（Setiamarga *et al.*, 2009）．北日本のメダカと南日本のメダカが共通の祖先から枝分かれ（分岐）した時期は，約 18Ma（95% 信頼度 : 24Ma ～ 13Ma）とされた．二つの生物から推測された「日本が二本」になった時期は，古地磁気から推測した東北日本と西南日本が回転した時期（15Ma）とほぼ同じであった．

東北日本と西南日本の「観音開きモデル」とその際に東北日本と西南日本は独立した地塊だったという「日本は二本」モデルは，日本海の海底の年代と生物の DNA 解析からも矛盾のないものであることが分かった．

5. 結論と今後の課題

古地磁気学は，地塊の回転運動の検出に効果的であり，この運動に年代値を与えると地塊の回転の運動史を組み立てることができる．日本列島に適用すると，東北日本は反時計回りを西南日本は時計回り回転運動を経験し，東北・西南両日本の回転の最盛期は 15Ma であったと結論できた．プレートテクトニクス論と地塊の回転運動を組み合わせると，回転は日本海拡大が原因であるとの結論に達した．古地磁気データに基づいて，東北日本と西南日本の日本海拡大以前の古地理を復元した．この復元から，東北日本と西南日本は日本海が 15Ma に拡大する時，観音扉が開くように二つの独立した地塊として回転したという「観音開き」と「日本は二本」のモデルが提案された．

古地磁気学は，回転に関して詳細な情報を提供できる．しかしながら，東北日本と西南日本はいつ，どこで，どのように接着したのか，日本海が拡大した原因は何か等の質問に答えを提供することはできない．新しい答えは，古地磁気学のみならず，地質学，地球年代学，同位体地球化学，地球物理学，生物学などの横断的な学問の情報からもたらされるだろう．ちょうどプレートテクトニクスが構築されたときのように．

謝辞

岡山大学教育学部の宇野康司准教授と神戸大学理学部の三木雅子博士には本論文作成に際し，貴重な御助言を頂きました．板谷徹丸博士，藤原　誠博士，曽根原崇文博士による建設的な査読により，本稿の改善がはかられました．ここに御礼申し上げます．

引用文献

Baba, A. K., Matsuda, T., Itaya, T., Wada, Y., Hori, N., Yokoyama, M., Eto, N., Kamei, R., Zaman, H., Kidane, T. and Otofuji, Y. (2007) New age constraints on counter-clockwise rotation of NE Japan. *Geophysical Journal International*, **171**, 1325–1341.

Barnes, D. A., Thy, P. and Renne, P. (1992) Sedimentology, phenocryst chemistry, and age – Miocene “Blue Tuff”: Sites 794 and 796, Japan Sea. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (eds. Pisciotto, K. A., Ingle, J. C. Jr., von Breymann, M.T., Barron, J. *et al.*), **127/128**, Pt. 1, 115–130.

Burckle, L. H., Brunner. C. A., Alexandrovich, J., DeMenocal, P., Briscoe, J., Hamano, Y., Heusser, L., Ingle. J. C. Jr., Kheradyar, T., Koizumi, I., Krumsiek, K. A. O., Ling, H.-Y., Muza, J. P., Rahamn, A., Sturz, A., Vigliotti, L., White, L. D., Wippern, J. J. M. and Yamanoi, T. (1992) Biostratigraphic and biochronologic synthesis of legs 127 and 128: Sea of Japan. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (eds. Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M. *et al.*), **127/128**, Pt. 2, 1219–1228.

Imaoka, T., Kiminami, K., Nishida, K., Takemoto, M., Ikawa, T., Itaya, T., Kagami, H. and Iizumi, S. (2011) K-Ar age and geochemistry of the SW Japan Paleogene cauldron cluster:

Implications for Eocene–Oligocene thermo-tectonic reactivation. *Journal of Asian Earth Sciences*, **40**, 509–533.

Isezaki, N. (1975) Possible spreading centers in the Japan Sea. *Marine Geophysical Researches*, **2**, 265-277.

Isezaki, N. and Uyeda, S. (1973) Geomagnetic anomaly pattern of the Japan Sea. *Marine Geophysical Researches*, **2**, 51-59.

Ishikawa, N. (1997) Differential rotations of north Kyushu Island related to middle Miocene clockwise rotation of SW Japan. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 17729-17745.

Ito, H. and Tokieda, K. (1986) Tilting movements of the Japanese Islands inferred from Cretaceous and Early Tertiary paleomagnetic data. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **38**, 361-386.

Kaneoka, I., Takigami, Y., Takaoka, N., Yamashita, S. and Tamaki, K. (1992) ^{40}Ar-^{39}Ar analysis of volcanic rocks recovered from the Japan Sea floor: Constraints on the age of formation of the Japan Sea. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (eds. Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M. *et al.*), **127/128**, Pt. 2, 819-836.

Kawai, N, Ito, H. and Kume, S. (1961) Deformation of the Japanese Islands as inferred from rock magnetism. *Geophysical Journal International*, **6**, 124-130.

Kawai, N., Kume, S. and Ito, H. (1962) Study on magnetization of the Japanese rocks. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **13**, 150-153.

Kawai, N., Nakajima, T. and Hirooka, K. (1971) The evolution of the island arc of Japan and the formation of granites in the circum-Pacific Belt. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **23**, 267-293.

河野義礼・植田良夫 (1964) 本邦産火成岩の K-A dating (I). 岩石鉱物鉱床学会誌 , **51**, 127-148.

Li., J., Fu, C. and Lei, G. (2011) Biogeographical consequences of Cenozoic tectonic events within East Asian margins: A case study of Hynobius Biogeography. *PLoS ONE*, **6**, e21506. doi:10.1371/journal.pone.0021506.

Lin, J., Fuller, M. and Zhang, W. (1985) Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. *Nature*, **313**, 444-449.

McDougall, I. and Harrison, T. M. (1999) Geochronology and thermochronology by the ^{40}Ar/^{39}Ar method. 2nd ed., Oxford University Press, Oxford, 269p.

中島正志・沢田順弘・中川登美雄・林　昌代・板谷徹丸 (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―. 岩鉱 , **85**, 45–59.

Nohda, S. (2009) Formation of the Japan Sea basin: Reassessment from Ar–Ar ages and Nd–Sr isotopic data of basement basalts of the Japan Sea and adjacent regions. *Journal of Asian Earth Sciences*, **34**, 599-609.

Otofuji, 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: Pleomagnetic implications. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 12895-12907.

Otofuji, Y., Hayashida, A. and Torii, M. (1985a) When was the Japan Sea opened?: Paleomagnetic evidence from Southwest Japan. In *Formation of Active Ocean Margins* (eds. Nasu, N. *et al.*), Terrapub, Tokyo, 551-566.

Otofuji Y., Itaya T. and Matsuda T. (1991) Rapid rotation of southwest Japan—palaeomagnetism and K–Ar ages of Miocene volcanic rocks of southwest Japan. *Geophysical Journal International*, **105**, 397–405.

Otofuji Y., Kambara, A., Matsuda, T. and Nohda, S. (1994) Counterclockwise rotation of Northeast Japan: Paleomagnetic evidence for regional extent and timing of rotation. *Earth and Planetary Science Letters*, **121**, 503-518.

Otofuji, Y. and Matsuda, T. (1983) Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of Southwest Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, **62**, 349–359.

Otofuji, Y. and Matsuda, T. (1984) Timing of rotational motion of Southwest Japan inferred from paleomagnetism. *Earth and Planetary Science Letters*, **70**, 373–382.

Otofuji, Y. and Matsuda, T. (1987) Amount of clockwise rotation of Southwest Japan—fan shape opening of the southwestern part of the Japan Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, **85**, 289–301.

Otofuji, Y., Matsuda, T., Itaya, T. Shibata, T., Matsumoto, M., Yamamoto, T., Morimoto, C., Kulinich, R. G., Zimin, P. S. Matunin, A. P. and Sakhno, V. G. (1995) Late Cretaceous to early Paleogene paleomagnetic results from Sikhote Alin, far eastern Russia: implications for deformation of East Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, **130**, 95-108.

Otofuji 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 and Planetary Science Letters*, **75**, 265-277.

Otofuji, Y., Matsuda, T. and Nohda, S. (1985c) Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan arc. *Nature*, **317**, 603-604.

Otofuji, Y., Oh, J. Y., Hirajima, T., Min, K. D. and Sasajima, S. (1983) Paleomagnetism and K-Ar age of Cretaceous rocks from Korean Peninsula - Gyeongzang Supergroup in South Korea. In *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Pt 2* (ed. Hayes, D. E.), American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, **27**, 388-396.

Saito, R. and Tojo, K. (2016) Complex geographic- and habitat-based niche partitioning of an East Asian habitat generalist mayfly *Isonychia japonica* (Ephemeroptera: Isonychiidae) with reference to differences in genetic structure. *Freshwater Science*, **35**, 712–723.

Seama, N. and Isezaki, N. (1990) Sea-floor magnetization in the eastern part of the Japan Basin and its tectonic implications. *Tectonophysics*, **181**, 285-297.

Setiamarga, D. H. E., Miya, M, Yamanoue, Y., Azuma, Y., Inoue, J. G., Ishiguro, N. B., Mabuchi, K. and Nishida, M. (2009) Divergence time of the two regional medaka populations in Japan as a new time scale for comparative genomics of vertebrates. *Biology Letters*, doi:10.1098/rsbl.2009.0419.

Su Z.-H., Tominaga, O., Okamoto, M. and Osawa, S. (1998) Origin and diversification of hindwingless Damaster ground beetles within the Japanese islands as deduced from mitochondrial ND5 gene sequences (Coleoptera, Carabidae).

Molecular Biology and Evolution, **15**, 1025–1039.

Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle, J. C. Jr. and Pisciotto, K. A. (1992) Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* (eds. Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M. *et al.*), **127/128**, Pt. 2, 1333–1348.

Tatsumi, Y., Ishikawa, N., Anno, K., Ishizaka, K. and Itaya, T. (2001) Tectonic setting of high-Mg andesite magmatism in the SW Japan arc: K-Ar chronology of the Setouchi volcanic belt. *Geophysical Journal of International*, **144**, 625–631.

Terada, T. (1927) On a zone of islands fringing the Japan Sea coast with a discussion on its possible origin. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **3**, 67–85.

Tominaga, O., Su, Z.-H., Kim, C.-G., Okamoto, M., Imura, Y. and Osawa, S. (2000) Formation of the Japanese Carabina fauna inferred from a phylogenetic tree of mitochondrial ND5 gene sequences (Coleoptera, Carabidae). *Journal of Molecular Evolution*, **50**, 541–549.

植木岳雪・近藤玲介 (2010) 北海道北部，利尻島，港町層の溶岩の K-Ar 年代と古地磁気方位 . 地質学雑誌 , **116**, 437-440.

Uno, K., Furukawa, K. and Hatanaka, Y. (2017) An analysis of apparent *polar* wander path for southwest Japan suggests no relative movement with respect to Eurasia during the Cretaceous. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **267**, 19–30.

Vine, F. J. and Matthews, D. H. (1963) Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, **199**, 947-949.

Wegener, A. (1915) Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. (都城秋穂・紫藤文子 (訳) (1981), 大陸と海洋の起源 , (上) 大陸移動説 . 岩波書店 , 東京 , 244p.)

Yaskawa, K. (1975) Paleolatitude and relative position of Southwest Japan and Korea in the Cretaceous. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **43**, 835-846.