

東西日本の地質学的境界【第八話】

日本分裂

高橋雅紀¹⁾

1. 東北日本弧 - 海溝系

前期中新世の火山フロントは、東北日本では太平洋の沿岸に沿って復元される。したがって、当時の火山フロントは、現在の脊梁山脈に沿う火山フロントに比べて明らかに海溝寄りにシフトしている。実は、地質時代を通じて火山フロントが海溝側に前進したり背弧側に後退したりすることは、火山活動が活発な東北日本弧において正確に復元されている (Yoshida, 2001)。この火山フロントの移動の原因として、直感的には沈み込む太平洋プレートのスラブの傾きが、年代と共に変化してきた可能性が示唆される。スラブの傾きが大きくなれば火山フロントは海溝寄りに前進するし、反対に傾斜が緩くなれば背弧側に後退するからである。ただし、火山フロントの移動にはさまざまな原因があり、またいくつかの要因が複合的に関与することもあるので、一義的に決めることはなかなか難しい。

日本海の拡大が終了した 1,500 万年前以降、日本海溝に沿っては付加体がほとんど成長していない。大陸から隔離され、大量の陸源碎屑物が供給されないからである。さらに、1,500 万年前以降は東北日本弧の広い範囲が水没し、わずかな陸地から排出された碎屑物のほとんどは、前弧堆積盆にトラップされて海溝まで供給されない。付加体が成長するためには、材料である大量の碎屑物が必要で、その供給源である広大な陸地が必須なのである。

一方、日本海溝に沿っては付加体が成長していないどころか、造構性浸食 (tectonic erosion) が進行している可能性が指摘されている (Von Huene and Culotta, 1989)。造構性浸食とは、海洋プレートの沈み込みに伴い、上盤の地殻が削り取られ地下深部に持ち去られていることを意味する。この場合、スラブの傾きが変わらなければ海溝と火山フロントの距離は一定になるので、陸上に記録される火山フロントは、海溝の移動と同調するように背弧側に移動する。火山フロントの移動は、沈み込む海洋プレートの傾きだけに起因するわけではない。

とはいえ、東北日本の東方沖の太平洋海底下には白亜紀

以降の前弧堆積盆が保存されていることから、白亜紀以降に大規模な造構性浸食があったとは思えない。さらに、上盤である東北日本弧の地殻が大規模に削り去られたとしたならば、その上に堆積していた前弧堆積盆の地層は大きく変形していると予想されるが、実際には顕著な地殻変動を被った様子はない。そもそも、前弧域の地殻の下には、冷たい太平洋プレートに冷却され続けた固いマントルリソスフェアが存在し、前弧域をしっかりと堅持している。造構性浸食は地殻を削り込みながら海溝が陸側に移動する現象であるが、海溝の移動は地殻の下のマントルリソスフェアも削り去る必要がある。カンナで板を削るように、容易に造構性浸食が進行するとは思えない。

これらのことから考えて、東北日本弧とその東端である日本海溝の位置関係は、現在と前期中新世で大きく異なっていたとはいなかったであろう。したがって、前期中新世の火山フロントが現在の火山フロントに比べて海溝側に大きくシフトしていたのは、当時沈み込んでいた太平洋プレートの沈み込み角度 (太平洋スラブの傾き) が、現在よりも大きかったからだと考えられる。実際に、背弧 (マリアナトラフ) が拡大しているマリアナ弧では、東北日本弧に比べて太平洋スラブの傾斜が大きく、その結果、海溝から火山フロントまでの距離が短くなっている。日本海の拡大はマリアナトラフ (背弧) と同様の背弧拡大であり、前期中新世に太平洋スラブの傾斜角が大きくなっていたことは容易に想像がつく。その後、太平洋スラブは徐々に傾斜角を減少させ、火山フロントが脊梁山脈に向かって西に移動していったのであろう。

2. 西南日本弧 - 海溝系

これに対し、西南日本弧の前期中新世の火山フロントは、日本海の沿岸に沿って復元される。現在の西南日本弧には典型的な島弧火山が少なく、明瞭な火山フロントを認定することは難しいが、少なくとも前期中新世の火山フロントは、^{だいせん}大山など現在の島弧火山の位置にほぼ一致している。

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

キーワード：火山フロント、スラブウインドウ、日本海の拡大、四国海盆、フィリピン海プレート

これは、前期中新世の火山フロントが現在の火山フロントに比べて海溝側に大きくシフトしていた東北日本弧とは対照的である。

東北日本弧と同様に、弧-海溝系の視点で西南日本弧の前期中新世火山フロントを考察しようとする、いくつかの問題点が浮かび上がる。まず、当時の西南日本弧の南端である海溝と、現在の沈み込み境界である南海トラフが一致するかどうかの判断は難しい。西南日本弧では1,500万年前以降も付加体が成長していることから、海溝が沖側に後退した可能性が考えられる。日本海の拡大によって大陸から隔離された西南日本弧は、水没した東北日本弧とは対照的に広い範囲が隆起し陸化した。それらから供給された砕屑物は浅い沈み込み境界(南海トラフ)を埋積し、その後のフィリピン海プレートの沈み込みに伴って変形しつつ陸側に付加した。例えば、四国の室戸岬には前期中新世の付加体が露出しているが、そこから南海トラフまでの範囲には、より新しい付加体が海底下に伏在しているはずである。したがって、前期中新世の沈み込み境界(海溝)の位置は、1,500万年前以降に成長した付加体を削除して考えなければならない。

ただし、付加体における1,500万年前の物質境界の位置と、当時の火山フロントに対する海溝の位置は、必ずしも一致する必要はない。物質境界がその後の付加体の成長によって陸側に押し込められたとするなら、当時の海溝はずっと沖に位置していたことになるからである。すなわち、1,500万年前の物質境界は、現在は室戸半島の近傍にあるが、当時の海溝が現在の南海トラフの位置に位置していたことも否定できない。

前述したように、東北日本弧では白亜紀以降に成長した厚い前弧堆積盆の地層が、太平洋の海底下にさほど変形せず保存されている。だから、造構性浸食によって、東北日本弧の地殻が大きく削り去られてはいないだろうと推定した。これに対し、西南日本弧では白亜紀の海成層が断層によってことごとく分断され、著しい変形を被っている。しかしながら、紀伊半島に分布する田辺層群や熊野層群などの前期中新世から中期中新世の地層の変形は軽微であること、また海溝が海側に後退したとする積極的証拠が見当たらないことから、ここでは1,500万年前の海溝も、現在の南海トラフとほぼ同様の位置にあったと推定して議論を進めよう。

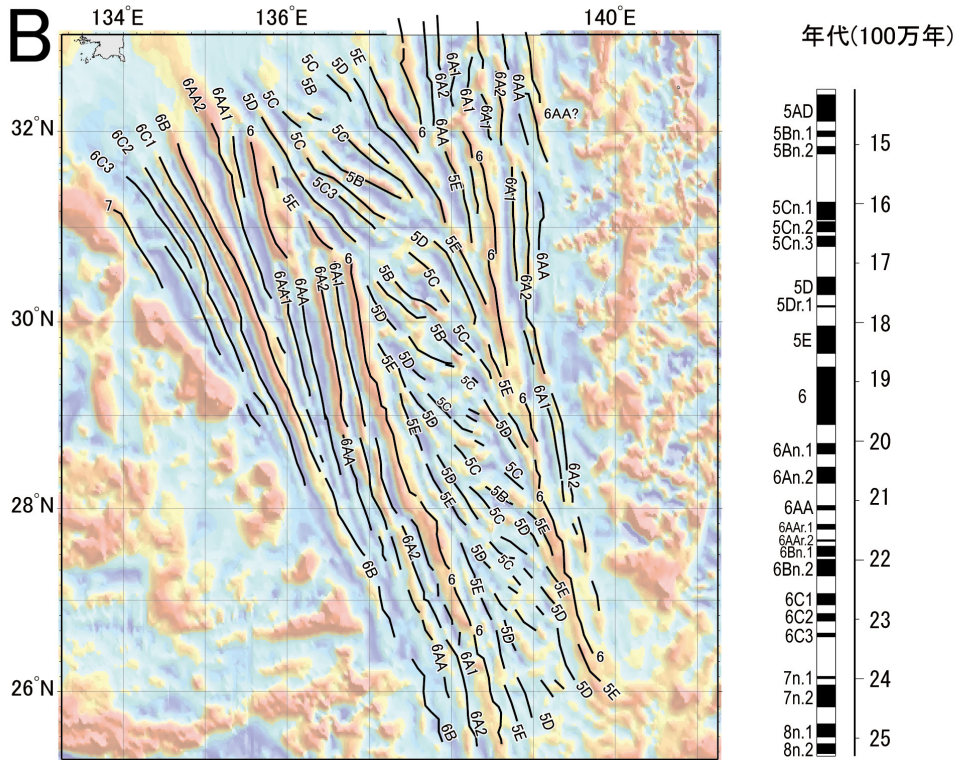
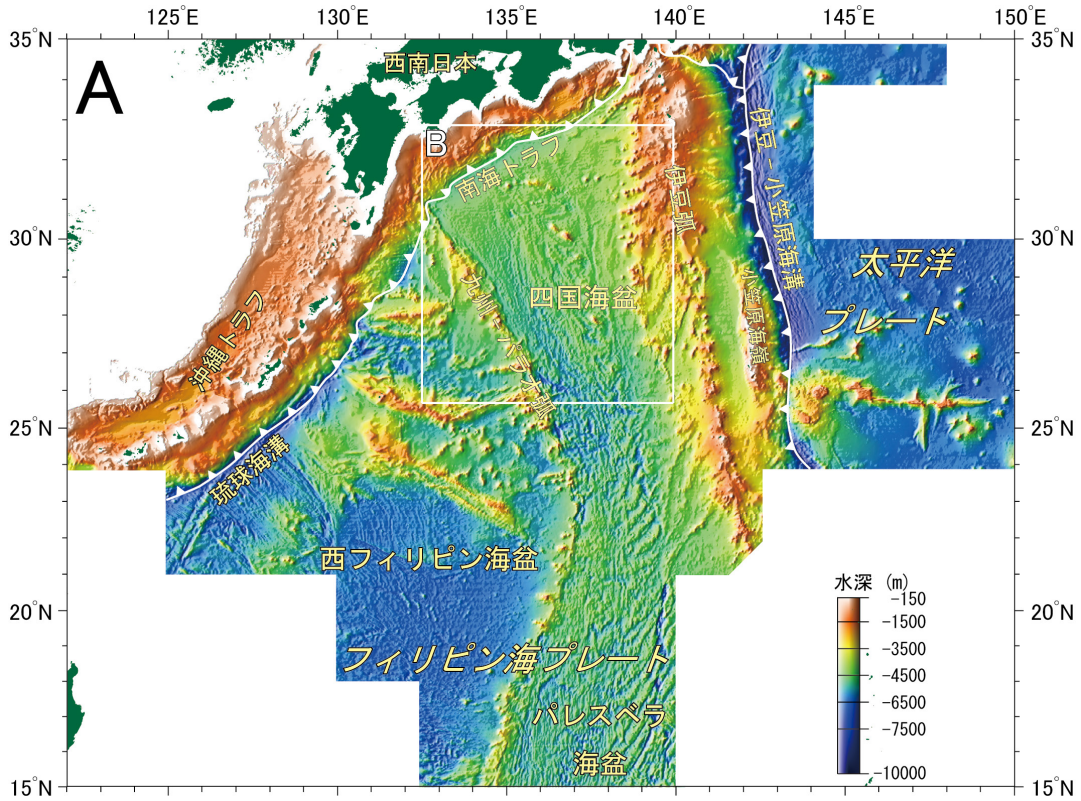
3. 鍵は四国海盆

ところが、さらに大きな問題がある。日本列島の配置を

日本海の拡大前まで復元するために採用した前期中新世の火山フロントが、東北日本弧と西南日本弧でそもそも連続していたのか、あるいはもともと不連続であったのか不明なのである。現在では、東北日本弧には太平洋プレートが沈み込んでいるが、西南日本弧にはフィリピン海プレートが沈み込んでいる。すなわち、現在の東北日本弧と西南日本弧は別個の沈み込み帯、言い換えるならば異なる弧-海溝系であるので、それらの火山フロントが連続する必然性はない。そのため、前期中新世の火山フロントを日本海拡大前の配置に復元するためのマーカーとして採用するためには、当時の東北日本弧と西南日本弧には、同一の海洋プレートが沈み込んでいたことが前提条件となる。ところが、日本海の拡大前の西南日本弧に、太平洋プレートとフィリピン海プレートのいずれのプレートが沈み込んでいたのか、それ自身が未解決の地質学的難題である。その主たる理由は、フィリピン海プレートの過去の運動が不明であることだが、さらに日本海の拡大時期に四国海盆も拡大していたことが問題をさらに複雑にしている。

四国海盆は西南日本の南方に広がり、伊豆-小笠原弧と九州-パラオ弧に挟まれた海洋底である(第1図のA)。伊豆-小笠原弧と九州-パラオ弧はかつて単一の海洋性島弧であったが、2,500万年前に分裂が始まり、1,500万年前まで海洋底が拡大して、海洋性地殻からなる背弧海盆(四国海盆)が形成された。その際、九州-パラオ弧と太平洋プレートの沈み込み位置(伊豆-小笠原海溝)は、四国海盆の拡大に伴い徐々に離れていった。その結果、島弧-海溝系から遠ざかってしまった九州-パラオ弧では、島弧の火山活動が停止し、古島弧(remanent arc)としてフィリピン海プレートの中央部に地形的高まりとして残されているのである。一方、伊豆-小笠原弧には四国海盆の拡大以降も太平洋プレートが沈み続けたため、伊豆-小笠原弧は現在でも活動的火山列島として成長を続けている。九州-パラオ弧に比べて伊豆-小笠原弧の海底地形が幅広く盛り上がっているのは、1,500万年前以降の島弧の成長分を表している。

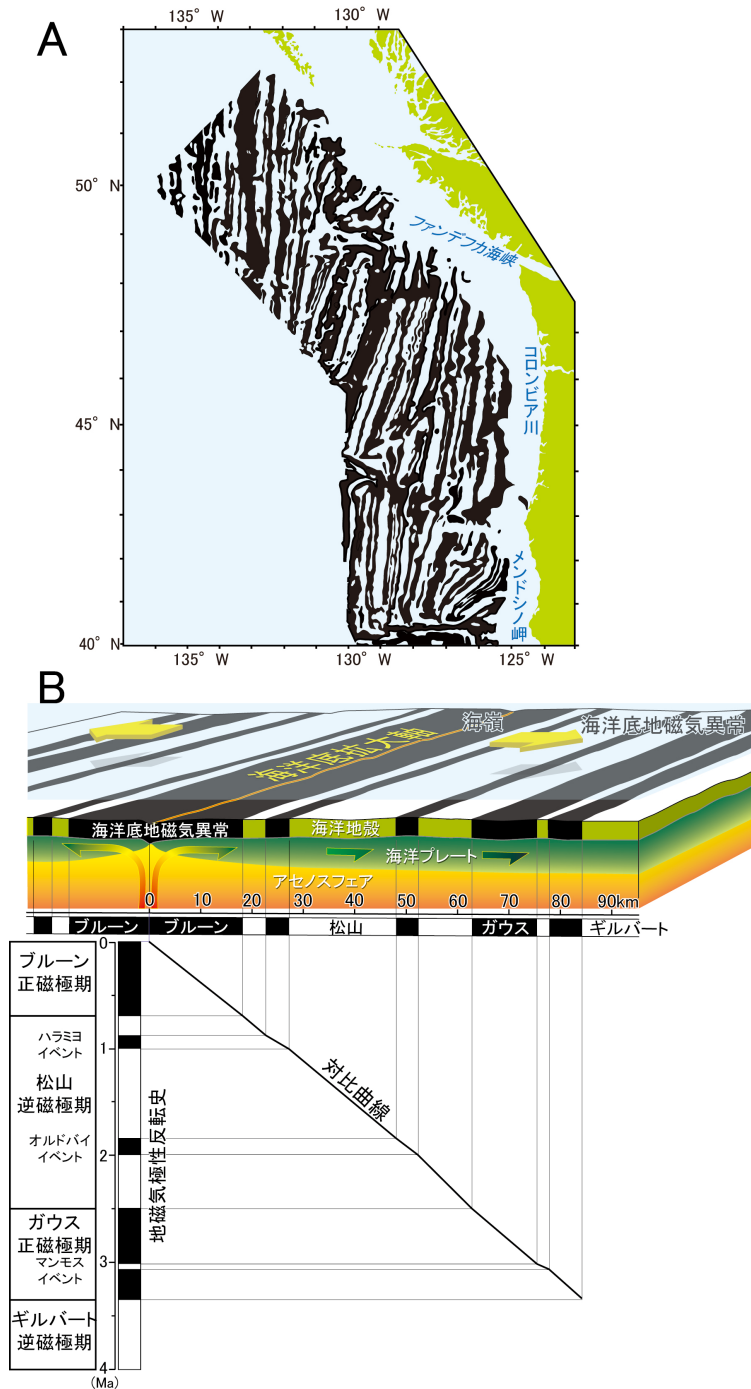
ところで、四国海盆の海洋底地磁気異常(第1図のB)を見ると、南北に伸びる縞模様が見事である。海洋底地磁気異常は海洋底が海嶺を対称に拡大する過程で地球磁場の極性が反転することにより形成されるもので、プレートテクトニクス確立に大きく寄与する大発見であった(第2図のA)。もちろん、地磁気が反転することは、プレートテクトニクスが確立される以前には明らかにされていた。数百万年前以降に噴出した溶岩の放射年代と古地磁気極性を組み合わせることにより、地球磁場の反転史が確立され



第1図 四国海盆の海底地形と海洋底地磁気異常 (Okino et al., 1999 及び沖野, 2015 に文字等を加筆)。

ていたのである。しかし、放射年代に含まれる誤差は年代が古くなるほど増大し、数百万年前より古くなると、地磁気の反転期間よりも誤差の方が大きくなってしまふ。そのため、地磁気の反転史は過去数百万年間が限界であった。

ところが、海洋底には遙かに長期間の地球磁場の反転史が記録されている。海洋底から得られた岩石の放射年代や、海洋底に堆積した堆積物に含まれる微化石年代を統合することにより、海洋底地磁気異常に基づく過去 8,000 万



第2図 A：バンクーバー島沖の海洋底地磁気異常 (Raff and Mason, 1961) と、B：海洋底地磁気異常の形成メカニズム (ヴァイン・マシューズ仮説) とコックスらが確立した地磁気反転史との対比 (Cox and Dalrymole, 1967 ; Vain, 1966 をもとに作成)。海嶺で上昇してきたマグマがキュリー温度まで冷却すると、海洋地殻はそのときの地球磁場を獲得する。海洋底が拡大しつつ地磁気が反転すると拡大軸に対称な海洋底地磁気異常が形成される。

年間の地磁気反転史が復元された (Heirtzler *et al.*, 1968)。そして、海洋底地磁気異常による地磁気反転史は、陸上の火山から求められていた古地磁気層序と見事に統合され、一度は葬り去られたウェーゲナーの大陸移動説から海洋底拡大説を経て、プレートテクトニクスという科学革命をもたらしたのである (第2図のB)。

さて、四国海盆に記録されている海洋底地磁気異常は、四国海盆が典型的な海洋底拡大を経て形成されたことを示している。中央の地形的高まりは、拡大を停止した段階の海嶺、すなわち最後の拡大軸である。海洋底地磁気異常

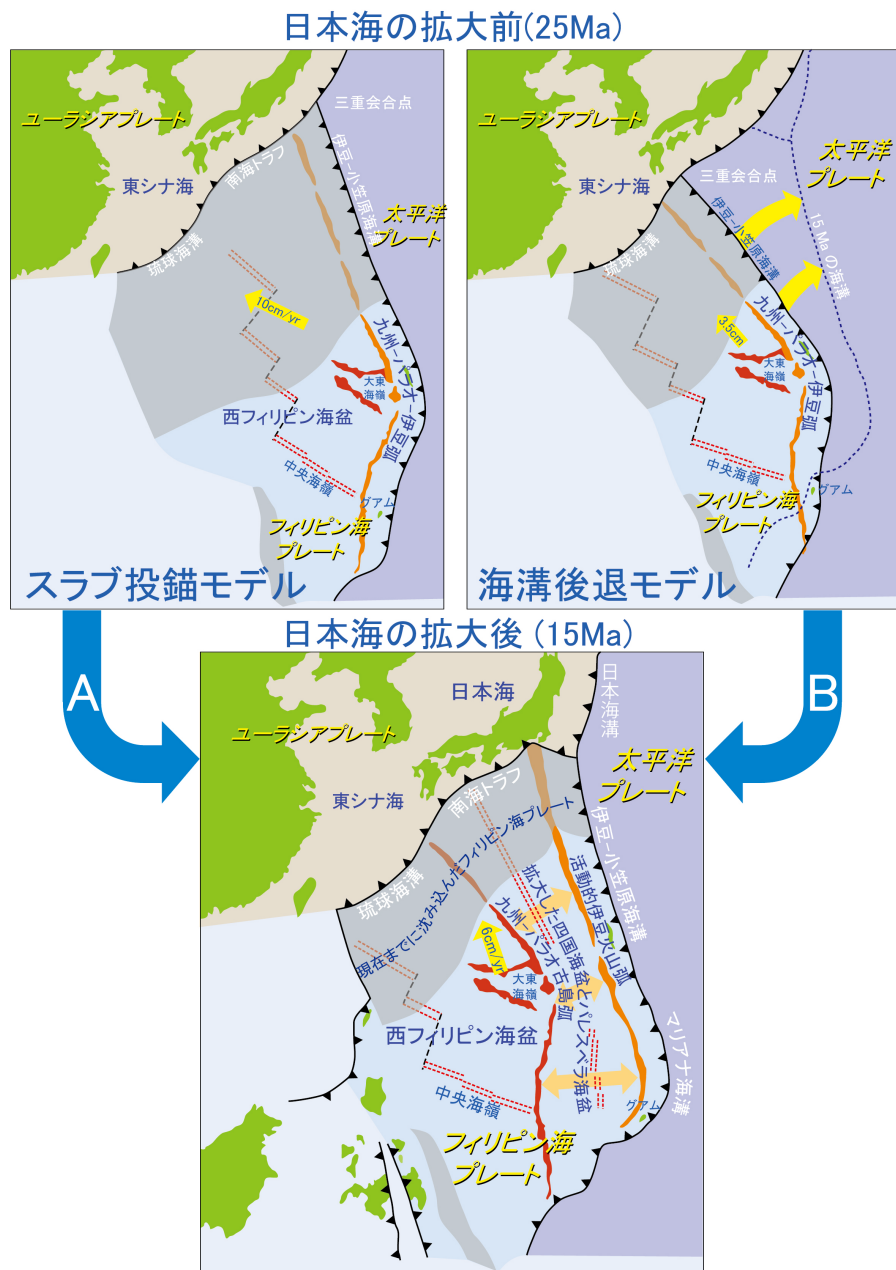
の解析により、四国海盆がおおよそ2,500万年前から拡大し、1,500万年前に拡大を停止したことが明らかにされている。ということは、四国海盆は日本海の拡大に先立って開始した海洋底の拡大で、日本海の拡大が停止した1,500万年前には同時に拡大を停止した。このことは、四国海盆の拡大が日本海の拡大と密接に関わっていることを強く示唆している。

このように、四国海盆は典型的な海洋底拡大により形成された背弧海盆で、拡大過程そのものは正確に復元されている。ところが、フィリピン海プレートの過去の運動が不

明であるため、四国海盆の拡大過程は、あくまでもフィリピン海プレートを基準とした系の中で明らかにされているに過ぎない。そして、ほぼ固定系とみなされるユーラシア大陸に対する四国海盆の拡大過程は、フィリピン海プレートの当時の運動如何によって大きく異なってしまう。換言するなら、ユーラシア大陸に対して回転・移動した東北日本弧と西南日本弧に対する四国海盆の配置は全く不明で、フィリピン海プレートの過去の配置が未解明であることが、日本列島の地殻変動とプレート運動が容易には繋がらない原因となっている。

このような状況で、大陸から分離してきた日本列島と拡

大してきた四国海盆の配置については古くから議論されてきた。例えば、Seno and Maruyama (1984) は、四国海盆の拡大により、太平洋プレートの沈み込み口である伊豆-小笠原海溝が、九州付近から東に現在の位置まで移動したモデル(海溝後退モデル)と、伊豆-小笠原海溝は移動せず、伊豆-小笠原弧から分離した九州-パラオ弧が西に移動していったモデル(スラブ投錨モデル、あるいは海溝固定モデル)の2つの可能性を提案した(第3図)。このうち、海溝後退モデルでは、四国海盆の拡大前の西南日本弧には太平洋プレートが沈み込んでいたが、四国海盆の拡大以降はフィリピン海プレート(四国海盆)が沈み込んだことに



第3図 四国海盆の拡大に関する2つのモデル (Seno and Maruyama, 1984 より作成)。伊豆-小笠原海溝が移動しなかったスラブ投錨モデル (A) と、西から東に海溝が移動した海溝後退モデル (B)。

なる。一方、海溝固定モデルでは、四国海盆の拡大以前も拡大以降も、西南日本弧にはフィリピン海プレートが沈み込み続けたことになる。

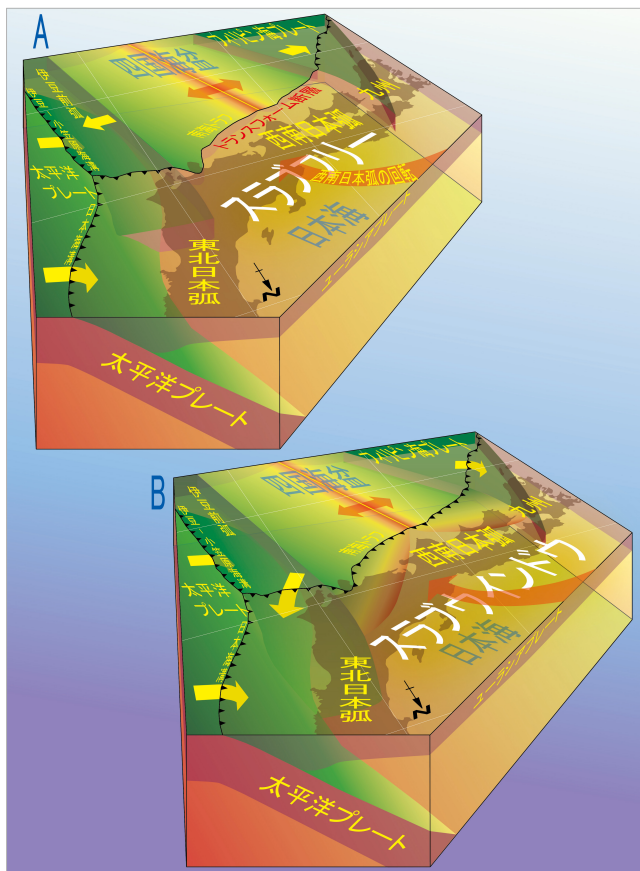
ということは、海溝後退モデルでは、日本海の拡大以前には、東北日本弧だけでなく西南日本弧にも太平洋プレートが沈み込んでいたことになるので、当時の火山フロントは連続していたと考えられる。これに対し、海溝固定モデルでは、日本海の拡大以前には、東北日本弧と西南日本弧にはそれぞれ別個の海洋プレートが沈み込んでいたことになるので、当時の火山フロントが連続する必然性はない。それでは、どちらのモデルが妥当なのであろうか。

4. 火山フロントの連続性

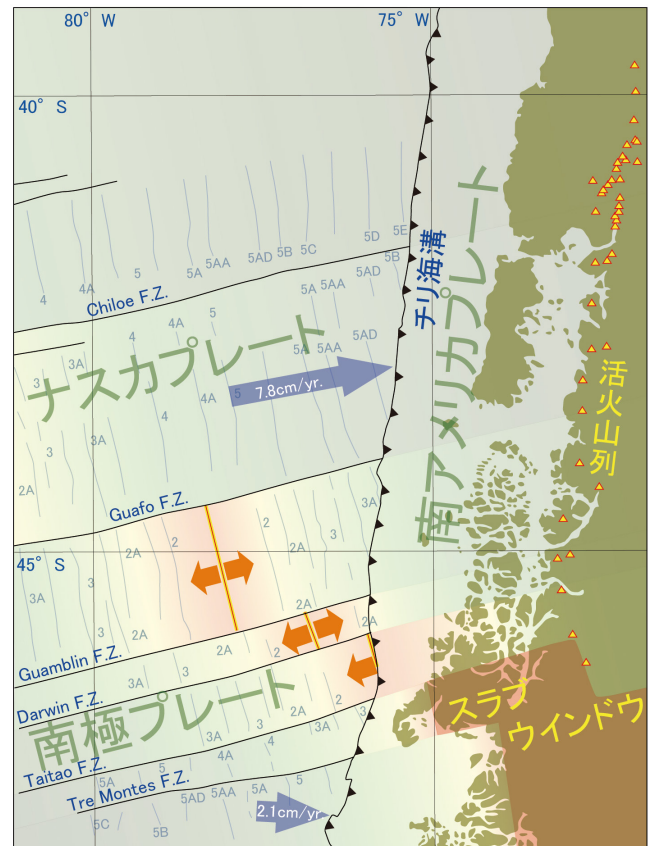
「四国海盆の拡大が 25 ~ 15Ma であることから、日本海拡大直前の西南日本弧に対し拡大中の四国海盆に沈み込み成分があったとしても、拡大軸に対称なスラブウインドウが形成されてしまうため、西南日本弧下にはほとんどス

ラブは形成されなかったはずである。したがって、日本海拡大直前ならびに拡大時に西南日本弧に沈み込んでいたプレートがフィリピン海プレート（四国海盆）であったと仮定すると、西南日本の日本海側に連続する前期中新世火山フロントを説明することは困難である。したがって、前期中新世に西南日本弧に沈み込んでいたプレートは、東北日本弧と同様に太平洋プレートであったと考えられる」（高橋，2006 の 27 ページより抜粋）。

実は、第八話を迎えるこのシリーズは、2006 年の地質学雑誌（日本地質学会発行）に公表した論文「日本海拡大時の東北日本弧と西南日本弧の境界」（高橋，2006）の内容を、わかりやすくまとめ直したものである。論文は専門家向けに書かれたものであり、また多岐に亘る内容をわずか 19 ページに無理矢理に押し込んだため、論文を読みこなせる研究者は 10 名もいないのではないと思われる。学部生や大学院生にはあまりにも難しすぎることは、当初から危惧していた。機会があったら改めて解説し直そうと、少しずつ準備していた。その中でとくに重要な上記に



第 4 図 四国海盆拡大時期の西南日本弧の地下深部のスラブの存否概念図。回転していた西南日本弧と拡大中の四国海盆がトランスフォーム断層で接していたとするケース (A) と、両者が収束していたとするケース (B)。



第 5 図 南アメリカプレートに沈み込む活動的の海嶺によって推定されるスラブウインドウと火山活動の停止 (Corvalan, J. ed., 1981 を元に作成)。

ついて、以下に詳しく説明しよう。

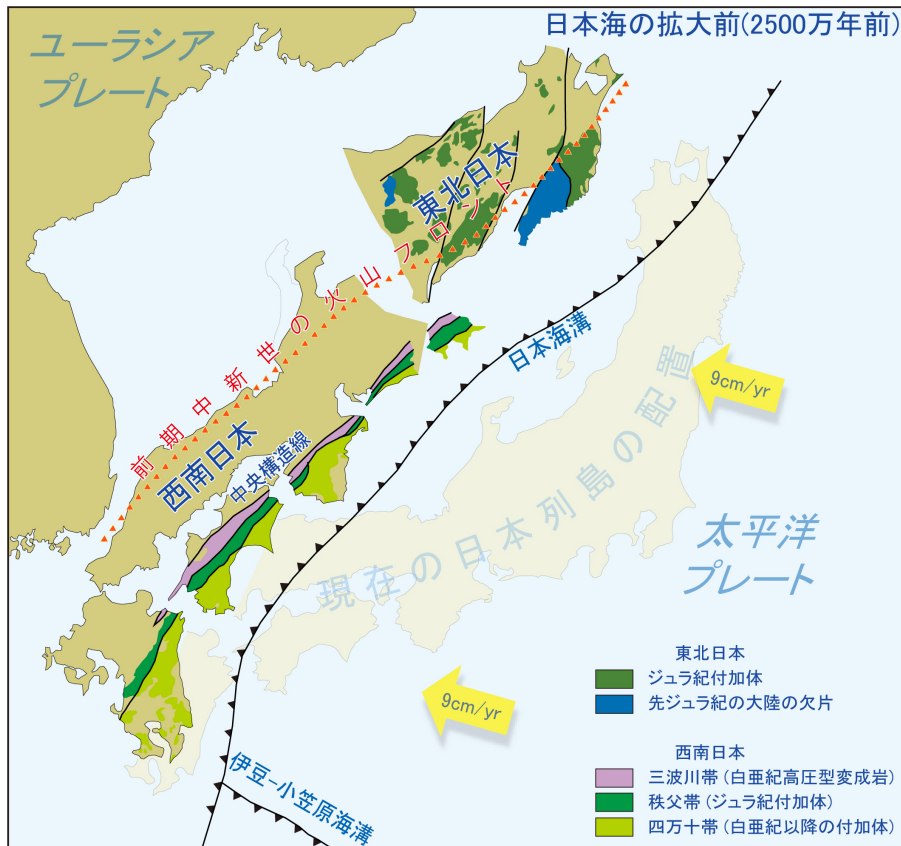
島弧や陸弧火山が形成されるためには、海洋プレートの沈み込みが必要である。反対に、沈み込む海洋プレートがなければ火山はほとんど形成されないことは、活動を停止した九州-パラオ弧を見れば明らかであろう。換言するならば、島弧や陸弧の火山帯の地下には、連続するスラブが存在している。千島弧から東北日本弧、さらに伊豆-小笠原弧が典型的な火山帯を有し、明瞭な火山フロントをトレースすることができるのは、それらの地下深部に連続する太平洋プレートのスラブが存在しているからである。

日本海はおよそ2,000～1,500万年前に拡大した。その結果、東北日本弧は反時計回りに回転し、一方、西南日本弧は時計回りに回転して現在の弧状列島が完成した。すなわち、日本海の拡大に伴い時計回りに回転していた西南日本弧の前面で、四国海盆が拡大していたわけである。ここで、仮に回転していた西南日本弧と拡大していた四国海盆の関係がトランスフォーム断層であった場合、言い換えるならば両者に収束成分(沈み込み)がなかった場合、西

南日本弧の地下で拡大した範囲にはスラブが形成されない(第4図のA)。プレートが形成されるには、離れていったプレートの間を埋めたアセノスフェアが冷却されなければならないからである。その結果、西南日本弧の日本海側に連続する前期中新世の火山フロントは形成されないであろう。

一方、回転していた西南日本弧に対して、四国海盆が拡大しながら沈み込んでいた場合は、拡大軸を対称とするスラブウインドウ(Thorkelson, 1996; Thorkelson and Taylor, 1989等)が形成されてしまう(第4図のB)。この場合も、西南日本弧の日本海側に連続する前期中新世の火山フロントは形成されないであろう。実際、チリ海嶺が沈み込む南米大陸西岸のタイタオ半島の周囲では、想定されるスラブウインドウの範囲で陸弧の火山活動が停止している(第5図)。

このように、日本海の拡大に伴い回転していた西南日本弧に対して、たとえ拡大中の四国海盆(フィリピン海プレート)が沈み込んでいたとしても、西南日本弧には火山フロ



第6図 日本海拡大前(2,500万年前)の東北日本弧と西南日本弧の配置。西南日本弧には東北日本弧と同様に太平洋プレートが沈み込んでいた。

ントが形成されないであろう。しかしながら、西南日本弧の日本海側には、前期中新世の火山岩類からなる明瞭な火山フロントをトレースすることができる。したがって、前期中新世の西南日本弧に沈み込んでいたのは、フィリピン海プレート(四国海盆)ではなく太平洋プレートであったと考えられる。つまり、日本海拡大前の東北日本弧と西南日本弧には、太平洋プレートが沈み込んでいた(第6図)。

ということは、同一の海洋プレートの沈み込みによって形成された前期中新世の火山フロントは、もともとは連続していたはずである。そして、日本海の拡大に伴い、西南日本弧は時計回りに、東北日本弧は反時計回りに回転しながら南下していった。その際、これまで考えられていた単純な“観音開きモデル”ではなく、西南日本弧の東端と東北日本弧の西端が大きく右横ずれにずれながら、それぞれが回転・移動していったのである。言い換えるなら、東北日本弧と西南日本弧は関東地方を蝶つがいとして折れ曲がったのではなく、大きく分裂していった。その境界断層が、関東平野の地下深部に潜む利根川構造線なのである。

(第九話につづく)

文 献

- Corvalan, J. ed. (1981) Plate-Tectonic Map of the Circum-Pacific Region (southeast quadrant panel). *Am. Assoc. Petrol. Geol.*
- Cox, A. and Dalrymple, G. B. (1967) Statistical analysis of geomagnetic reversal data and the precision of potassium-argon dating. *Jour. Geophys. Res.*, **72**, 2603-2614.
- Heirtzler, J. R., Dickson, G. O., Herron, E. M., Pitman III, W. C. and Le Pichon, X. (1968) Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals, and motion of the ocean floor and continents. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 2119-2136.
- 沖野郷子 (2015) フィリピン海の磁気異常とテクトニクス. *地学雑誌*, **124**, 729-747.
- 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.
- Seno, T. and Maruyama, S. (1984) Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea. *Tectonophysics*, **102**, 53-84.
- 高橋雅紀 (2006) 日本海拡大時の東北日本弧と西南日本弧の境界. *地質学雑誌*, **112**, 14-32.
- Raff, A. D. and Mason, R. G. (1961) Magnetic survey off the west coast of North America, 40 ° N. latitude to 52 ° N. latitude. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **72**, 1267-1270.
- Thorkelson, D. J. (1996) Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation. *Tectonophysics*, **255**, 47-63.
- Thorkelson, D. J. and Taylor, R. P. (1989) Cordilleran slab windows. *Geology*, **17**, 833-836.
- Vain, F. J. (1966) Spreading of the ocean floor: New evidence. *Science*, **154**, 1405-1415.
- Von Huene, R. and Culotta, R. (1989) Tectonic erosion at the front of the Japan Trench convergent margin. *Tectonophysics*, **160**, 75-90.
- Yoshida, T. (2001) The evolution of arc magmatism in the NE Honshu arc, Japan. *Tohoku Geophys. Jour.*, **36**, 131-149.

TAKAHASHI Masaki (2017) Geological problem for the tectonic boundary between Northeast and Southwest Japan -Displacement between NE and SW Japan arc-

(受付:2016年6月30日)