

海域調査とともに歩むプレートテクトニクス史

海域地震火山部門 火山・地球内部研究センター

吉田 品樹

はじめに

JAMSTECはプレートテクトニクス理論のほぼ50年の歴史とともに歩んできたのだと思います。本稿では、プレートテクトニクスを地球物理学的な手法で研究する筆者の立場から、その研究史を簡単に振り返りつつ、プレート運動のメカニズムや原動力の理解に必要ないくつかの重要な話題について触れます。最後に、構造地質学的手法による海域での総合調査が、プレートテクトニクスに残された課題に与える役割についても触れたいと思います。

プレートテクトニクス理論の誕生

ドイツの気象学者、Alfred Wegener(1880–1930)によって提唱された「大陸移動説」は、1920年代には日本にも広く知れ渡りました。イギリスの地質学者であったArthur Holmes(1890–1965)は、大陸移動の原動力がマントル内の放射性熱源によって駆動される熱対流運動であり、それによって海洋底が移動すると考えましたが、当時はその直接的な証拠はありませんでした。しかし、第二次世界大戦後に状況が一変しました。それは、1950年代初頭に作成された地球全体の地形図により、海洋底に中央海嶺と呼ばれる海底山脈があることが知られるようになり、50年代～60年代に開花した古地磁気学により、海洋底の地殻の岩石が過去の地磁気の方角を記録していることが確かになったことから始まります。つまり、海域調査がもたらした知見が、プレートテクトニクス理論の萌芽になったのです。

地球の歴史で地磁気が過去に何度も逆転し、それが海洋底に地磁気の縞異常として記録されていることは、イギリスのFrederick Vine(1939–)とDrummond Matthews(1931–1997)が発見し、1963年に『Nature』誌に発表しました。この発見は、彼らに先立って発見したカナダのLawrence Morley(1920–2013)にもちなみ、「ヴァイン・マシューズ・モーリー仮説」として知られ、米国のRobert Dietz(1914–1995)や、Harry Hess(1906–1969)が提唱した「海洋底拡大説」の裏付けとなりました。また、Hessは、1962年に米国地質学会の論文集に発表

した論文で、海洋底がマントル対流によって移動すること、そして、対流の上昇域で海洋地殻が新しく生まれ、下降域で海洋底がマントル内に沈み込むという、現在のマントル対流モデルの原型となる説を提唱しました。

地球上のプレート運動が球面上の剛体回転運動によって表現されるという「本来の」プレートテクトニクス理論は、海洋底拡大説の提唱後まもなくの1967～68年に、固体地球科学の金字塔とも言える3編の論文が雪崩を打ったように発表されて確立しました。それらは、Dan McKenzie(1942–)とRobert Parker(1942–)による1967年の『Nature』誌の論文、そして、William Morgan(1935–)とXavier Le Pichon(1937–)の各氏それぞれによる1968年の『Journal of Geophysical Research』誌の論文です。したがって、プレートテクトニクス理論が誕生したのは、JAMSTECの創立よりも数年前ですが、地球上のプレートに働く力が分類され、それぞれの力の大きさが定量的に議論されるようになったのは、1970年代以降です。

プレートに働くさまざまな推進力や抵抗力の相対的な大きさの推定に特に重要な貢献を果たした研究は、上田誠也博士(現、東京大学名誉教授)とDonald Forsyth博士が1975年に『Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society』誌に発表した論文です。この論文で、プレートに関するさまざまな観測データを用いた解析によって導き出した大きな結論の1つは、海洋プレートの運動の主要な原動力が「スラブ引っ張り力」(マントルに沈み込むプレート＝スラブが地表のプレートを引き込む力)であり、ほかの力はそれよりも圧倒的に小さいというものでした。なお、上田博士はプレートテクトニクスや古地磁気学の世界的第一人者であるだけでなく、日本における海底地殻熱流量測定の実験者でもあります。「しんかい6500」にも調査潜航開始当初から期待を寄せていたようです¹。

トランスフォーム断層の概念

プレートテクトニクス理論の確立には、カナダの地球物理学者、John Wilson(1908–1993)が1965年に『Nature』誌

に発表した、トランスフォーム断層の概念も貢献しました。トランスフォーム断層は地学を一度でも学んだことがある方には馴染みがあると思いますが、そのタイプを大きく分類すると、中央海嶺を横切るように発達する断裂帯と呼ばれる断層(図1)と、大陸プレートや海洋プレートが互いにすれ違う場所で必然的に発達する断層に分けられます。後者のタイプのうち、地球上で最も顕著なトランスフォーム断層は北米プレート西岸のサンアンドレアス断層で、長さが約1,300 kmにもわたって北米プレートと太平洋プレートが横ずれ運動をしています。米国の Tanya Atwater が1970年に『Geological Society of America Bulletin』誌に発表したサンアンドレアス断層の形成過程を議論した論文は、その後の研究で細かい修正が加えられたものの、あまりに有名です。

トランスフォーム断層は、中央海嶺と中央海嶺や、海溝と海溝のように同じ種類のプレート境界を繋ぐ役割があるだけではなく、アゾレス三重会合点より東に伸びる海嶺からイベリア半島沖の海溝までを東西に横断する断層のように異なる種類のプレート境界を変容(まさに、トランスフォーム)させる役割を果たす場合があります²。トランスフォーム断層では、おそらく間隙水圧の上昇によってすべり摩擦抵抗力が小さくなるため、大きな地震が繰り返し起こりやすく、それが陸上にある場合は人的被害をもたらします。例えば、サンアンドレアス断層では100年以上前の1906年にM7.8の大地震(サンフランシスコ地震)が起きました。また、トルコ北部を約1,200 km にわたって東西に横断する北アナトリア断層も典型的な陸上のトランスフォーム断層であり、直近では1999年にMw7.4のイズミット地震が起きました。さらに、南半球のヒクラング海溝の南端からニュージーランドの南島を横断して、ピュイゼギュール海溝に繋がる長さ約500 km のアルパイン断層も太平洋プレートとオーストラリアプレートの境界となるトランスフォーム断層です。2016年11月にMw7.8のカイコウラ地震が起きたことは記憶に新しいですが、2010年9月にもMw7.0のカンタベリー地震(ダーフィールド地震)、2011年2月(東北地方太平洋沖地震の約半月前)と6月にもM6クラスの地震が相次いで起きました。

プレートの陣取り合戦

トランスフォーム断層の概念は、プレートテクトニクス理論の確立に貢献しただけではなく、地球内部の運動の理解にも重要な役割を果たしました。プレート運動の原

動力となるマントル対流は、地表面と地球深部の温度差によって「軽い物が浮き上がり、重い物が沈む」ことで起こります。しかし、そういったマントル対流の上下運動だけでは、地球上のプレート運動は駆動されません。プレート運動が起こるためには、固体地球の最も外側にある低温で粘性の高いリソスフェアが何らかのきっかけで破壊され、それが拡大して割れ目となってプレート境界が作られることが必要です。プレート境界のタイプのうち、海嶺は生成されたプレートが左右に発散する場所で、マントル対流が能動的に上昇する場所です。一方、海溝はプレート同士が収束する場所ですが、プレート運動とマントル対流を一つの熱対流システムとして考えれば(プレートは地球内部の熱を逃がすために運動している!)、マントル対流の下降域でもあります。したがって、プレート同士がすれ違うタイプのプレート境界であるトランスフォーム断層は、マントル対流の上下運動とは直接関係ありません。

一般的にベクトル場である速度場は、ポロイダル成分とトロイダル成分の二つの成分に解析的に分解することができます。ポロイダル成分は、流れの発散と収束に関係し、トロイダル成分は流れのねじれ運動に関係します。地球表面の速度場も、観測によって各プレートの運動方向と運動速度が決まっていますので(後述)、これらの二つの成分の組み合わせで説明できます。地球上に20数枚ある主要なプレートが、限られた空間で、まるで人間社会のように「無駄な衝突」をさけながら「陣取り合戦」を行うためには、プレート同士が「適度」にすれ違う必要があります。それに必要なエネルギーがトロイダル成分

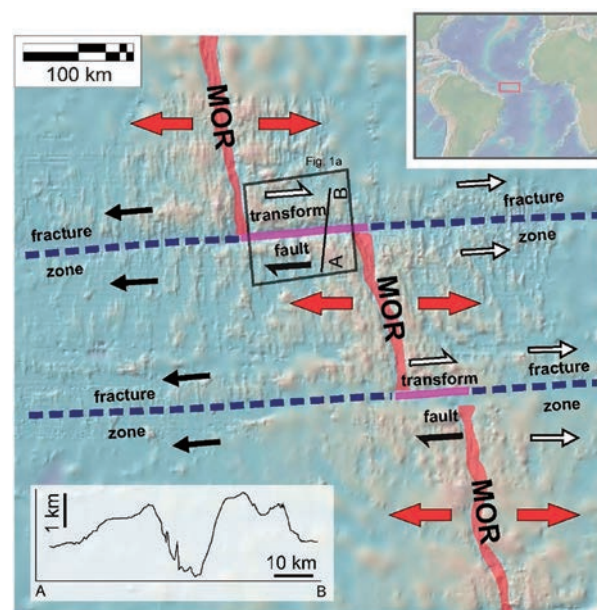


図1 大西洋中央海嶺を横切る断裂帯とトランスフォーム断層²。

です。実際、全地球のマントル流れの理論モデルで有名な、米国の Bradford Hager 博士と Richard O'Connell (1941–2015)が1978年に『Tectonophysics』誌に発表した解析によると、ポロイダル成分と同程度のトロイダル成分のエネルギーが地球のリソスフェアに存在するとのことでした(ただし、結果は扱うデータや解析方法によりやや異なる)。

この Hager らの結果は、ポロイダルエネルギーしかないはずのマントル対流に、強いトロイダルエネルギーが存在することを示唆します。それでは、なぜそれが生まれるかという、原理的には、地殻やマントルを構成する岩石が非線形性の強い流動則(レオロジー)を持ち、結果的に、それらの歪速度や粘性率が水平方向かつ局所的に大きく変化するためだと考えられます。しかし、この問題は、筆者が大学学部4年次の卒業論文研究のテーマであったものの、さまざまな難しい問題は未だ決着がついていません。この理解を深めることは、プレート運動の原動力の定量的理解だけでなく、これから述べるプレート運動の「モデル化」の改良にも繋がります。

プレート運動の再現

隣接するプレート間の相対運動は、地磁気縞異常から推定されるプレートの拡大速度や、トランスフォーム断層の走向、地震断層のすべりの大きさと方向(スリップベク

トル)から決定することができます。1970年代には、世界の主要なプレート10枚の運動が決定されたプレート運動モデルが米国から初めて発表され、90年代前半に新しいモデルが発表されるまで、プレート運動の代表的モデルとして長年使われてきました。一方、80年代中頃からはGPSなどによるプレート運動を実測する宇宙測地技術が急速に発達し、2000年前後になると、GPSデータのみで主要なプレートの運動が決定されるようにさえなりました。同時に、90年代頃から現在に至るまでの、地殻やマントルを構成する岩石の物質科学的研究の発展に加え、計算機能力や数値計算技術の進展も相まって、プレート運動の原動力に関する定量的理解や、プレート運動の数値モデル化もかなり進展してきました^{3,4}。なお、ここでいう、数値モデル化とは、プレートテクトニクスに関わるさまざまな地質現象や構造地質を直接、説明するモデルの構築というよりも、観測されるプレート運動が再現されるモデルを構築する作業と言ったほうが、わかりやすいと思います。

例えば、図2は、数値解析によるプレート運動研究の第一人者で、O'Connellの流派を受け継ぐ、Clinton Conrad 博士(当時、米国ハワイ大学マノア校)らの比較的最近の研究結果です⁵。この研究は、マントル流れの地球物理モデルを用いて、低粘性のアセノスフェアの存在と、観測や調査からははっきりとわからないクラトン(太

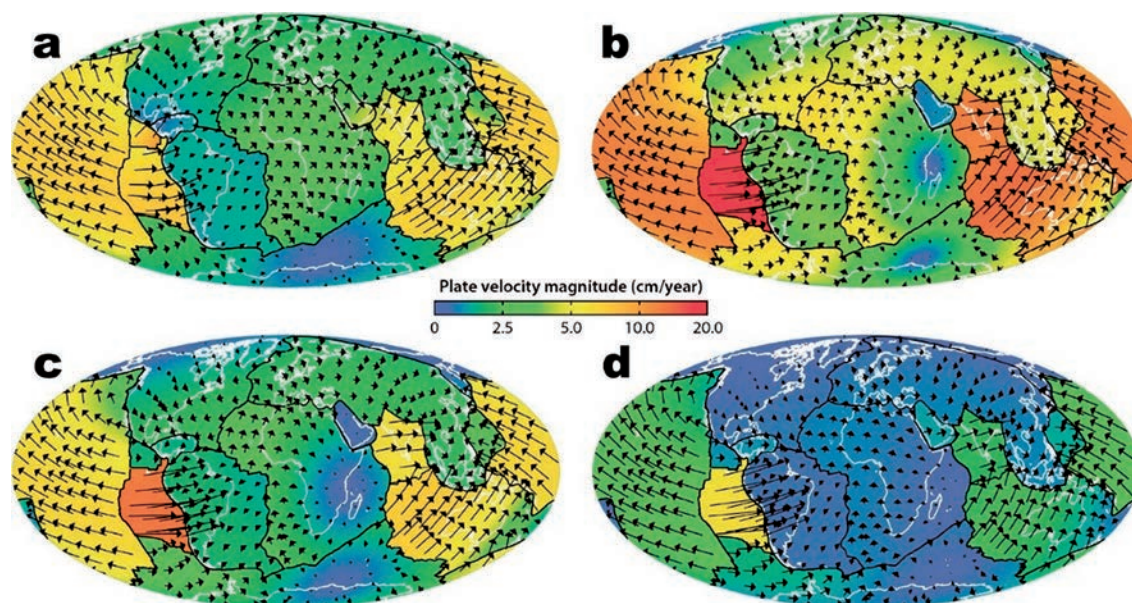


図2 (a) 観測されるプレート運動と、(b–d) マントル流れの地球物理モデルによって求まるプレート運動^{5,6}。カラーコンターと矢印はそれぞれプレート運動の速度と方向を表す。bは低粘性のアセノスフェアがある場合。cはアセノスフェアがあり、クラトンの根が比較的浅い場合。dはアセノスフェアがあり、クラトンの根が深い場合。

古代や原生代初期に形成された安定な大陸リソスフェア)の「根」の深さの違いが、プレート運動のパターンに及ぼす影響について調べたものです。彼らの結果によると、アセノスフェアを考慮し、かつ、クラトンの根の深さが比較的浅いと観測データを最もよく説明するそうです。この結果は、アセノスフェアの流れがプレート運動を加速させることと、クラトンの根がアセノスフェアよりも粘性が高い上部マントルに達するほど深いと、プレート(特に大陸プレート)の運動速度が小さくなり、観測データを説明できないことを示唆します⁶。

海域での構造地質学的な総合調査からもたらされる結果は、このようなプレート運動のモデル化を通じてプレートテクトニクスの定量的理解に重要な直接証拠や制約を与えてくれます。例えば、2010年代には、モナシュ大学のイベリア半島沖の海洋底調査によって、収束型の地殻構造が発見され^{2,7}、また、JAMSTECの北海道南東沖の海洋底調査では、古海嶺近傍のマントルの流れがプレートを引きずったことを示す地殻構造が発見されました⁸。前者の成果は、大西洋の大陸縁で将来、新たな沈み込み帯ができる可能性を示唆し、これは「プレートがなぜ沈み込むのか?」という疑問に関係します。後者の成果は、プレートとアセノスフェアの力学的な結合関係に一石を投じ、「プレートがなぜ動くのか?」という疑問に関係します。また、ヘルムホルツ海洋研究センター(GEOMAR)がごく

最近に発表した、トランスフォーム断層の三次元的性質や成因について論じた論文⁹では、解析にJAMSTECの水深データも使用されていますが、「プレートはなぜすれ違うのか?」という問題の解決に近づいているような気がします。

おわりに

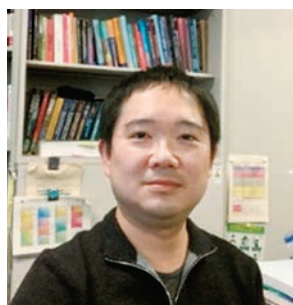
プレートテクトニクスの研究は50年が経った今も終わりが見えません。例えば、ユーラシア大陸南部(東アジアから中東、地中海までの地域)のようにプレート同士が衝突する場所では広範囲でプレートが変形していますが、このような変動帯のプレート運動を決定するには、プレートを剛体として扱う本来のプレートテクトニクス理論の枠を超えます。変動帯をプレート境界の一種(拡散プレート境界)として扱う考えもあり、「地球表面は固いプレートで覆われている」という教科書的な常識が将来覆される可能性があります。今後も世界各地で実施されるであろう、海域や海陸境界域(特に変動帯)における構造調査技術の発展、それによって得られる科学的知見が、プレートテクトニクスにまつわる未解決問題の解決に少しずつでも繋がればと思います。それだけではなく、筆者が今、予想だにしないプレートテクトニクスの難問題が発掘されることを期待し、それを地球物理学的な手法で研究できることを楽しみにしています。

参考文献

- 1 上田 誠也,『地球・海と大陸のダイナミズム』,NHK出版,253ページ,1998.
- 2 Hensen, C. et al., *Front. Earth Sci.*, 7, 39, 2019.
- 3 吉田 晶樹,大陸とプレートを動かす力とは何か,『科学』,85(7),692-704,2015.
- 4 吉田 晶樹,プレート運動の原動力—再考,『地質学雑誌』,121(12),429-445,2015.
- 5 van Summeren, J. et al., *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13(2), Q0AK03, 2012.
- 6 Yoshida, M. and Yoshizawa, K. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 49, 117-139, 2021.
- 7 Duarte, J.C. et al., *Geology*, 41(8), 839-842, 2013.
- 8 Kodaira, S. et al., *Nature Geosci.*, 7, 371-375, 2014.
- 9 Grevemeyer, I. et al., *Nature*, 591, 402-407, 2021.

Tell us a little bit about yourself.

筆者紹介



吉田 晶樹

1974年、徳島県生まれ。2000年、広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻博士課程前期修了。2003年、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士後期課程修了。博士(理学)。2003年、海洋科学技術センター研究員を経て2010年より海洋研究開発機構主任研究員。専門は、地球物理学、地球進化学、地球造構学、数値流体力学。著書に『地球はどうしてできたのか—マントル対流と超大陸の謎』(講談社)、『ジオダイナミクス』(共立出版、共訳)など。