

総説 REVIEW PAPER

古地磁気, プレート運動, および極移動 PALAEOMAGNETISM, PLATE MOTION AND POLAR WANDER

David PRATT
dp@ davidpratt.info

(山内 靖喜・小坂 共栄・小泉 潔・久保田 喜裕・矢野 孝雄 [訳])

要旨：本論では古地磁気データに関連した仮定，不確実さと問題点及びそれらの解釈を検査し，プレート運動と極移動の関連した理論を吟味する．古地磁気データに基づいた理論はしばしば地質学と地球物理学の証拠によって否定されている．このことは，古地磁気データが地球の地理学的極の過去の位置についての信頼できる導きでないことを示唆している．さらに，少なくとも後期新生代以降の古気候と古生物のデータは，大陸と極の安定性に合致している．
キーワード：古地磁気，プレート運動復元，極移動，海洋底年代，大陸の根，古気候，サージテクトニクス，横ずれテクトニクス

地磁気と古地磁気 (Geomagnetism and palaeomagnetism)

地球の磁場 (Earth's magnetic field)

地球の北と南の磁気の伏角極 (dip pole)^{*1}- コンパスの針が鉛直方向を指す地球表面の場所 - は現在 85.9°N, 147°W と 64.4°S, 137.1°E とにある．従って，それらは地球上の正反対側にはない．地球磁場の約 90%—主要磁場—は地球の中心に位置する仮想双極子磁石によって作られるであろう磁場に一致している．しかし，その軸は地球の自転軸から約 10° ずれている．双極子軸が地表と交差する 2 つの位置は北と南の地磁気極として知られている．近年，双極子磁場は地理学的極の周りを西に向かって約 0.08°/年の平均速度で動いており，他方，非双極子磁場は 0.18°/年のより速い平均速度で動いてい

る (McElhinny & McFadden, 2000)．図 1.1 は，南北の磁気極 (非双極子磁場) と地磁気極 (双極子磁場) の位置と 1900 年以降のそれらの動きを示している．図 1.2 は過去 2000 年間の北地磁気極の位置を示している．

*1：図 1.3 右下部で等偏角線が集中している位置をいう．(訳者注)

地磁気の磁場は地球表面の各地点においてその強さと方向によって明確に示される．その方向を示すのに必要な 2 つの用語がある．つまり，一つは偏角 (地磁気の北—コンパスの北の針が指す) と真の北の間の角度，二つ目は磁気的伏角 (それぞれの地点でのコンパスの針と水平面がなす角度) である．

地球は一律に磁化した球とは大きく違っている．このこ

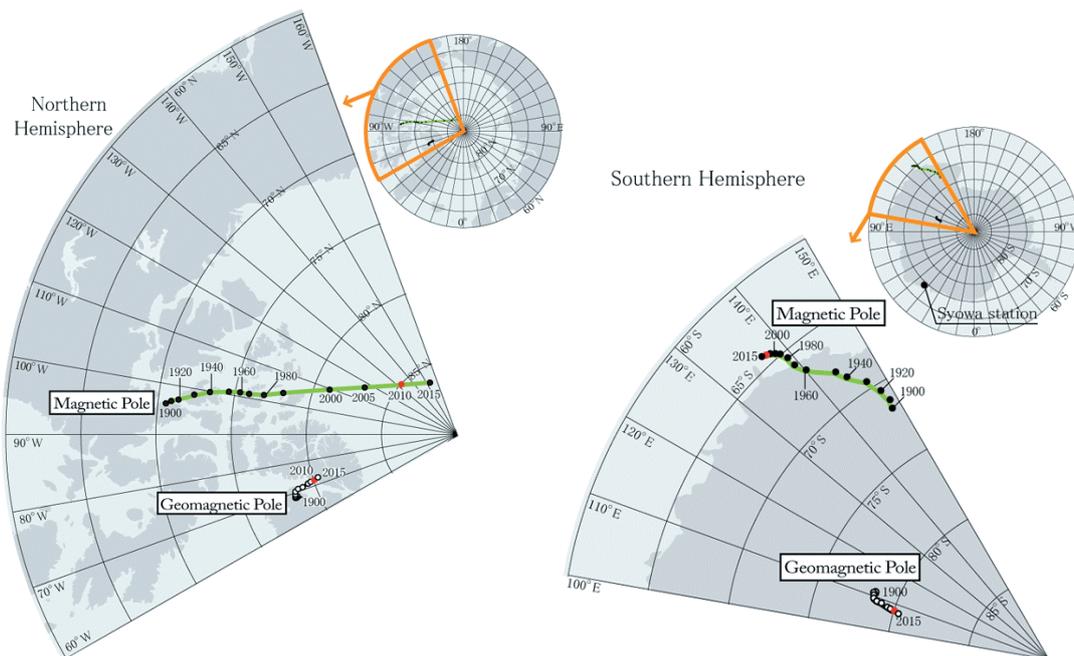


図 1.1. 1900 年以降の磁気極 (非双極子場) と地磁気極 (双極子場) の動き. (wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp)

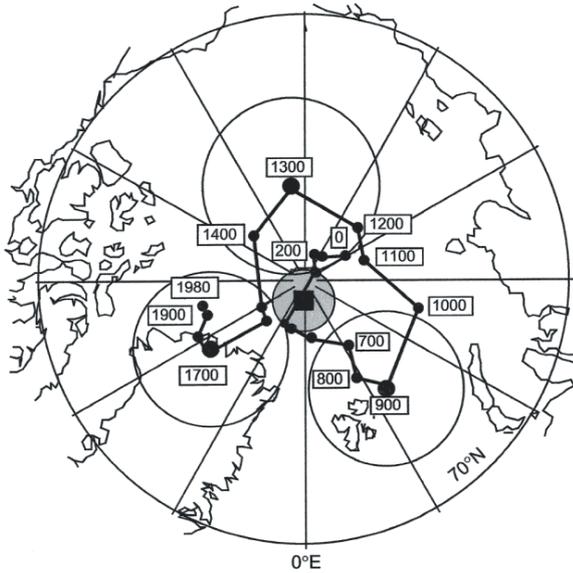


図 1.2. 過去 2000 年間の地磁気北極の位置. 各データ地点の黒丸は 100 年間の平均地磁気極である. 数字は西暦で示した年代. 900 年, 1300 年及び 1700 年の地磁気極を取り巻く円は 95% 信頼範囲である. 過去 2000 年間の平均地磁気極の位置は四角で, その 95% 信頼範囲を打点部で示した. (Butler, 2004, 図 1.9)

とは, コンパスの針はめったに最も近い磁極の方向を指さないことを意味している. 例えば, 北磁極方向に旅行するため, モスコワから出発した人は北から 0.5° 東に向かう必要があるが, 他方コンパスは北から 10.4° 東を指している (www.ngdc.noaa.gov; www.movable-type.co.uk). 最後には, コンパスは旅行者を北磁極に導くが, それは最短のルートではない. 同じように, 磁気的伏角はまれに磁気緯度と正確に一致する. 図 1.3 と 1.4 は偏角と伏角の最近の地球規模での違いを示している. 現在の地磁気磁場は完全な地心軸双極子^{*2}(GAD) とは明らかに大きくずれている.

*2: 地球の中心にあり, 自転軸と一致した軸をもつと仮想された双極子. 地心双極子ともいう. 地球磁場の約 90% がこれによってつくられるであろう磁場と一致する. (訳者注)

Tauxe (2013) によれば, 地磁気磁場を記載する私たちの能力は “その起源の理解をはるかに超えている”. その磁場は主に地球の液体的外核中での電気伝導性流体の運動によってつくられていることは一般的な考えであり, 外核は自立した磁性流体力学のダイナモ (発電機) を創

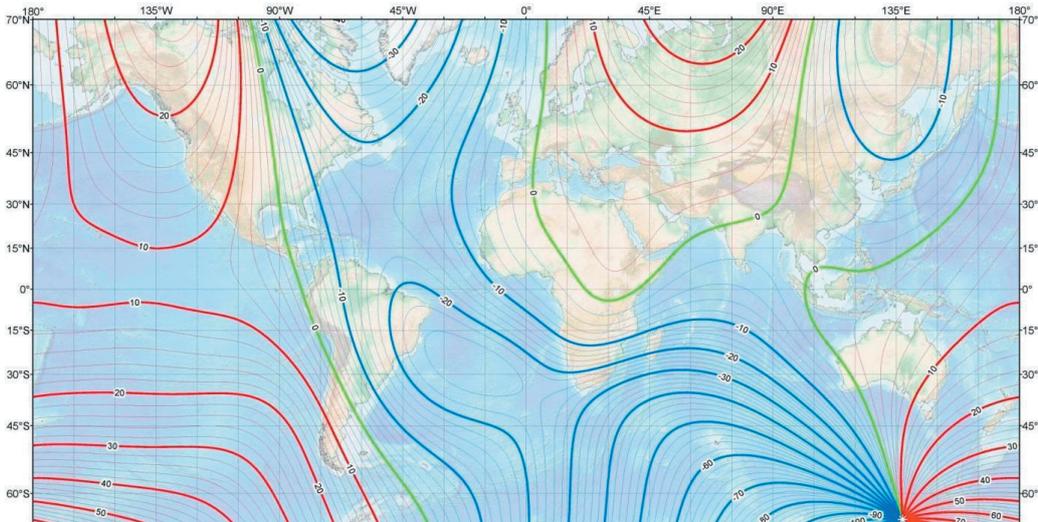


図 1.3. 米国・英国磁気モデル 2010.0 の主要磁場の偏角分布図 (D) (<http://ngdc.noaa.gov>)

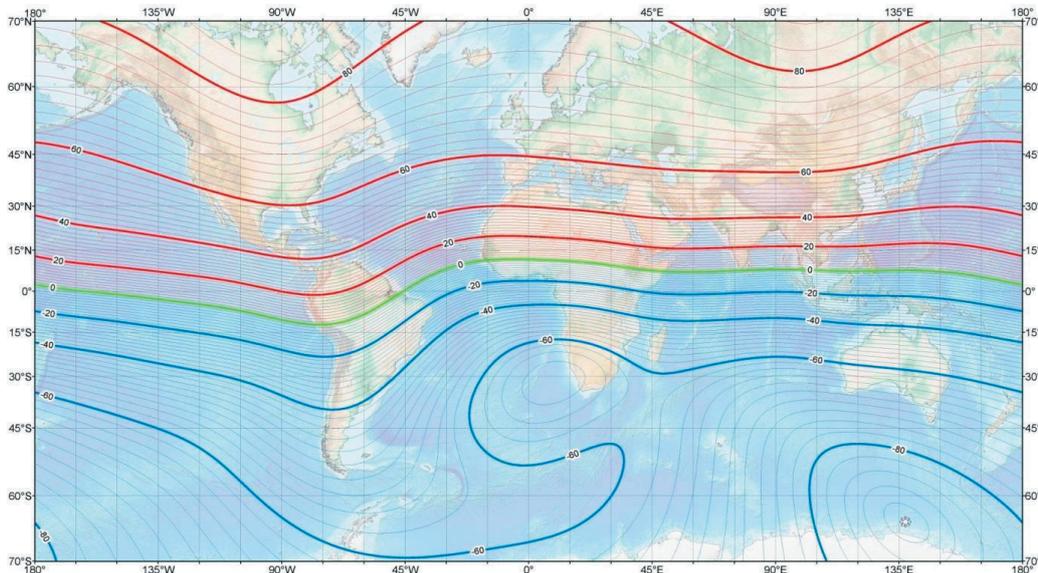


図 1.4. 米国・英国磁気モデル 2010.0 の主要磁場の伏角分布図 (I) (<http://ngdc.noaa.gov>)

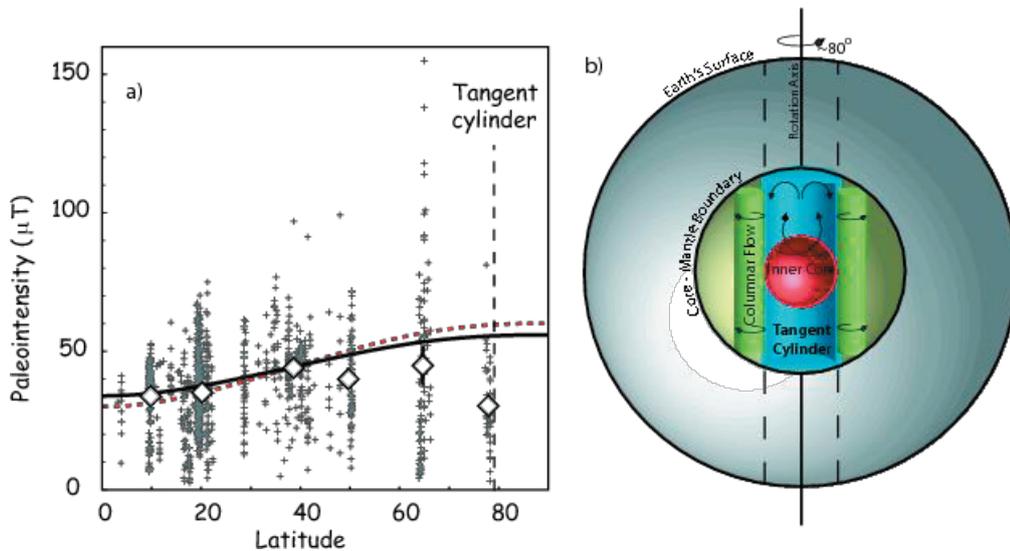


図 1.5. (a) 過去 500 万年間の緯度毎の古地磁気の磁力. 平均古磁力結果(◇印)は緯度 15° 区間について 95% 信頼範囲をもって計算された. 南半球のデータは北半球へ移した. 黒線は 2005 年国際標準地球磁場モデル係数によって定義されている今日の磁場に関する平均磁力を表しており, 他方, 赤色の点線は 30 μT (マイクロテスラ)の双極子をもつ地心軸双極子に関連した強度を示す. (b) 理論上の外核での流れ図.

造する. 磁場全体のその他の源は, イオン化した上部大気圏中を流れている電流, 地殻中流れている電流及び磁化した地殻岩石である. 公式的理論によれば平均的地磁気の磁場強度は緯度とともに増加(ほぼ二倍)しなければならないが, しかし入手されたデータによればそれは 65° 上で弱まっている(図 1.5).

古地磁気の仮定 (Palaeomagnetic assumptions)

古い時代の岩石と堆積物中の含鉄鉱物の化石磁性の研究から, 検討中の試料の位置と関連して仮想磁極を決定することができる. 平均が一般的の変差に落ち着くのに十分なだけの多数の仮想磁極の平均は古地磁気極として知られている. それは過去の地理学的(自転の)極に対応すると仮定されている. 特定の大陸の古地磁気極の位置を地図上に記入したら, 採集された岩石単位の年代が古くなるほどそれらは回転軸から離れるように移動する傾向がある. もし古地磁気データが信頼できるもので, 基礎をなす仮定が妥当であれば, 極が固定され続けているにもかかわらず問題の大陸が移動していることを, あるいは大陸は固定しているが磁極が地理学的極が移動しているか, あるいは両者の組み合わせをこれは意味しているに違いない

いろいろな大陸がいろいろな極移動の軌跡をもたらしている(例えば, ヨーロッパの古生代と中生代の岩石から求められた極は, 北アメリカの対応する岩石から求められた極とは系統的に東方に変位している), 地球の表面上を移動したのは磁極や地理学的極ではなく主に大陸であると 1950 年代の多くの古地磁気学者は結論した. 現在の全体的な合意では, ある程度の真の極移動もあったとされている - 例えば, 地球全体(あるいは少なくともその外殻)に関連した回転軸の移動である. 古地磁気極は古緯度を求めるのに使われているが, 古経度は古磁極だけからは決められない.

Alfred Wegener (1912, 1929) の理論は, 大陸(シアルすなわち珪素とアルミニウムからなる)はより重い海

洋地殻(シマすなわち珪素とマグネシウムからなる)の中をゆっくりと進むというものであるが, 新しいリソスフェアが“拡大している海嶺”でつくられて, “沈込み帯”で消費尽くされており, 動いているリソスフェアプレートが大陸と一緒に運んでいることは現在のプレートテクトニクス的前提である. 見かけ極移動軌跡(APWPs)は鋭い曲がり角あるいは“突端”でつながれた長く, 緩やかな曲線からなる傾向にある. 曲線状の軌跡は一定のプレート運動の時期に一致すると仮定されており, 一方では突端はプレート運動における急激な変化(“プレート再編成”)に対応すると仮定される. 2つの相対的運動はオイラー回転極(Euler rotation pole)の周りでの回転によって表すことができる. いろいろな軌跡はいろいろな極の周りでのプレート回転を表すと言う.

従って, 古地磁気データの慣習的な解釈は2つの基本的な仮定に基づいている. すなわち, ①岩石が形成されたとき, それらはその時, その場に存在した地磁気磁場の方向に磁化され, 獲得された磁性は地質時代を通して少なくとも部分的に岩石中に保持される, ②210 万年規模のいかなる時代(磁帯磁期を除く)の平均された地磁気磁場は地球の自転軸に沿うような双極子場である, という2つの仮定である. この2つの仮定は問題である. 事実, 古地磁気は不確実さに苦しめられている. Merrill et al. (1996, p.69) は次のように述べている.

岩石形成時に, 岩石は周囲を取り巻く磁場(地球磁場と一般に推定されている)に平行に磁化を獲得するが, これは初生磁化とよばれている. その後, この初生磁化はその岩石形成時の磁場の方向と強さについての情報を与える. しかしながら, 不注意なものを待ち受けている無数の落とし穴がある. 第一に, 二次磁化(形成後に獲得した)から初生磁化のより分けにおいて, 第二に, 初生磁化の特質を地球の磁場の特質に外挿するときである.

今や再磁化は一般的な現象として受け入れられており, とくに堆積岩においてそうであり, この問題は岩石の年代とともに増加する. もう一つの複雑に入り組んだ要因

は、過去のどんな特定の時代における地磁気の場合が正極性か逆極性(すなわち、どの方向が北か南か)かは常に確かであるとは限らないことである。このことは、とくに古生代前期と先カンブリア代の岩石に関して問題である。岩石磁気はまた風化作用、熱効果、変成作用、化学変化及び構造変形による変更を受けやすい。伏角が浅くなること(堆積物の圧密による)と、鉛直と水平でのブロック回転及びその他の地殻運動は、誤差の潜在的な原因とみなされている(Butler, 2004)。磁気歪み—作用した応力によって磁化の方向が変わること—もそうである(Graham et al., 1957; Jeffereys, 1976)。

どんな特別な時代でも地磁気の磁場は地心軸双極子(GAD)から著しくそれているけれども、磁場の長期間にわたる変動(たとえば、西方への移動)は時間で平均された磁場が地心軸双極子に非常に近似するであろうことを意味する、と古地磁気研究者は論じている。この仮定は古地磁気学において基本的である。一般的な観点は、過去500万年間の時間平均の磁場はほぼ地心軸双極子であり、それは全磁場の約2~6%を表す補助的な地心軸四極子(quadrupole)³と全磁場の最高5%までを表す持続的帯状の八極子(octupole)を伴う(Basse & Courtillot, 2002; Domeier et al., 2012)。これらの非双極子磁場はたいていは帯状であったと考えられており(すなわち、自転軸の周りで対称である)、約5°の古緯度の誤差をもたらすと見積もられている(Van der Voo, 1998)。

*3: 四極子: モーメントが等しい2つの双極子が逆向きに並列した単極子の配列をいう。同じく、八極子は4つの双極子が立方体状に配列しているような単極子の分布をいう。(記者注)

試料採集地点からみたとき、古地磁気極は双極子の右側に向かって位置するという持続的な傾向がある。Gordon (1987)は、このことは採集によるゆがみと組み合わさった極移動によるかも知れないと指摘した。同じく、浅い伏角は古地磁気の伏角の頻度分布における表現のしすぎの傾向がある(Andrews, 1985; Kent & Smethurst, 1998)。Kent & Smethurstは、堆積岩における伏角の平坦化は本源的な原因ではなく、先カンブリア代と古生代の古地磁気の場合が強い帯状の四極子と八極子の成分(それぞれ10%と25%と見積もられている)を含んでいたであろうと論じている。この考え方では、古緯度は中緯度において最大約15°低く見積もられる。地心軸双極子モデルで計算された古緯度は真の古緯度とは最大で18°違うことがありうるし、2つの同時代の古地磁気の場合の位置間の相対的な古緯度差には30°以上の誤差がありうる。Van der Voo(1998)は述べている。

Tauxe (2013, 16.8)は次のように述べている。“逆転頻度における訳の判らない変化はさておいて、磁場が古代には大いに違った方法で作用したという有無を言わせない証拠はまったくない。”例えば、125~84Maの時代(白亜紀正磁極スーパークローン)において、磁場は4000万年間に単一の極性であったが、最後の500万年間に

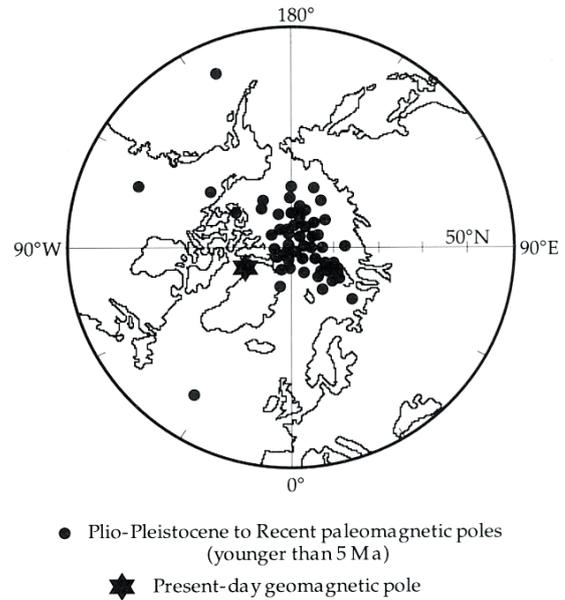


図 1.6. 過去 500 万年間の古地磁気極 (●) と現在の磁極 (★) (<http://web.ics.purdue.edu>)

における平均的逆転頻度は 4.0/100 万年である (Briggin et al., 2008)。

すでに述べたように、地球の磁気軸は今のところ自転軸に対して約 10° 傾いている。木星の磁場も同じ量だけ傾いている。外惑星のいくつかについてもっと大きな傾きが見つかる。すなわち、海王星の場合 47°、天王星の場合 60° である (Russell & Dougherty, 2010)。地球の磁極も、過去において地理学的極から相当にはずれた可能性がある。その上、もし過去の地質時代において現在の東アジア異常と同じ強さ(あるいは僅かにより大きな強さ)の安定した磁気異常があったならば、地心軸双極子仮説を無価値にする(図 1.7 参照)。

過去において仮定された地心軸双極子が地球の自転軸と一直線であったかどうかを調べるため、古緯度を別々に求めることが要求され、古気候の指示物が最も有効であると考えられている(Butler, 2004)。古生物学的データの他にいくつかの主要な古気候の指示物が大陸と極の大規模な移動を除いた地球モデルと十分に合していることを私たちは後ほどみるであろう。

古磁極の信頼性と分散 (Palaeopole reliability and scatter)

1925 年以來 10,000 個以上の古地磁気の場合の磁極が出版されてきた。IAGA 全地球古地磁気データベースにはノルウェー地質調査所のウェブサイト www.ngu.no/geodynamics/gpmdb で自由にアクセスできる。古地磁気の場合の文献は不一致で充満しているといわれている(Storetvedt, 1997, p.79)。Tauxe (2013, 16.2)によれば、“公表されたデータから有意義な極を見分けることは古地磁気学の芸術の一部である”。他の芸術形式と同様に、それは高度の主観性をともなう。

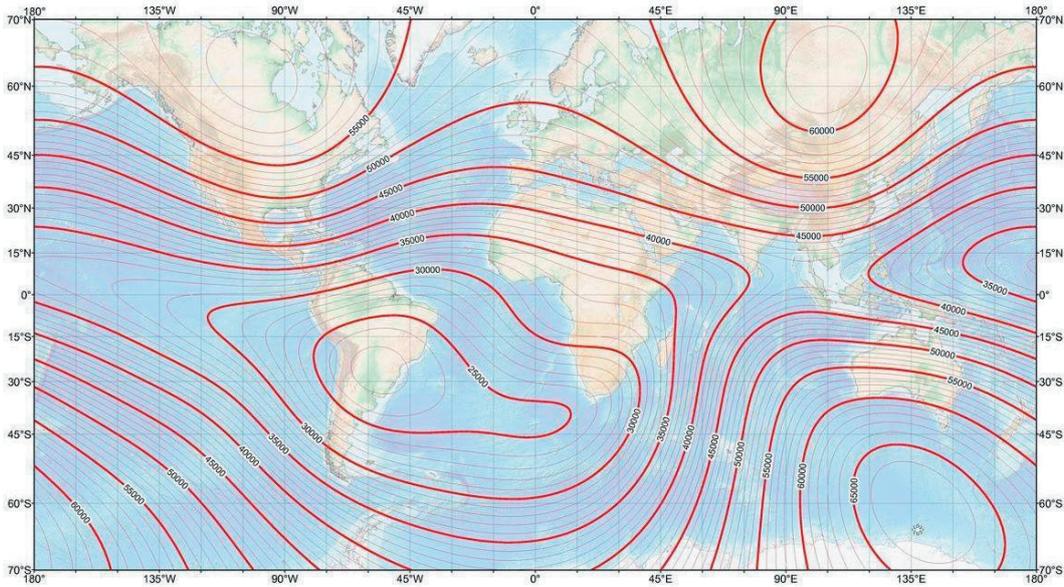


図 1.7. 米国・英国
磁気モデル 2010.0
の主要磁場の全磁力 (F)(<http://ngdc.noaa.gov>)

信頼できるとされた磁極決定の研究に基づいて、Rezanov (1968, p.772) は次のように述べている。"任意のある地域に関しての古地磁気測定数が増えれば増えるほど、まったく同一の大陸において、またはまったく同一の地域においてさえ、ある特定の時代の岩石から求められた古地磁気極の分散は広がる。" いかなる地質時代でも、磁極の最小分散は 5,000 ~ 6,000km であり、石炭紀より古い地質時代における分散は 10,000km であることを彼は見つけた。複数個のかなり大きな地塊が同じ時代に同じ場所に存在することを古地磁気データはときには意味する、たとえば、中期白亜紀のアゼルバイジャンと日本である。彼は以下のような結論をだした。"古地磁気データは未だとてもあてにならないし、矛盾しているので、大陸あるいはその一部の相対的な移動の仮説の賛成あるいは反対のどちらの証拠としても使うことはできない"(p.775)。

シベリア台地のオルドビス紀の古地磁気極の間の 6,000 ~ 9,000km の食い違いが再磁化によることを、Rezanov は指摘した。"もし、90° の違いがシベリアの場合には誤差によるものと信じられるならば、オーストラリアの場合には同じ違いが石炭紀初期の大陸の膨大な再配置および新生代での再度の再配置の証拠としてなぜ取り上げられなければならないのか?" と彼は質問している (p.773)。N.A. Khranov はヨーロッパとシベリアのオルドビス紀の磁極の違いをシベリア台地、あるいはロシア台地とウラル山脈に関係したその一部の相対的な移動に因るものとした。辻褄を合わせるために、シベリアの一部の回転と移動をペルム紀以後にも仮定したが、しかしシベリアの大半はペルム紀までにはすでに固結しており、さもなければ "現実を見る目を故意に閉ざすことを意味している" と信じられると Rezanov は指摘した。大陸やその一部のすさまじい水平移動や回転を結論づける前に、古地磁気の不一致の原因が研究されるべきである、と彼は力説した。

Rezanov と同様に、Meyerhoff(1970a) は、特定の時代についての平均化された極位置よりむしろ個々の古地磁気極の位置を地図上にプロットしたならば、単一の地点や地質区からのデータでさえその分散は典型的に大変大きく、更新世と完新世に関してさえ誤差の円は大西洋より広いという事実を強調した。その結果、古地磁気データは大陸移動あるいは極移動のどちらの証明にも使えなくなった。Northrop & Meyerhoff(1963) は次のような指摘をしている。もし、特定の時代の特定の大陸のすべての古磁極を平均化することによる見かけ上の極移動軌跡をつくる替わりに、さまざまな地域に関するさまざまな見かけ極移動軌跡が決められたならば、結果として求められた曲線は地質学的に隣接する区域の移動し、回転した別の部分によって一致させることができるだけであり、信じやすさを乱用するように要求される回転は大変複雑で、風変わりになる。

古地磁気学は "どちらかといえば不正確な道具" であり、"正確な復元を行うためには使うことができない", と Barron et al. (1978) は考えた。彼等は以下のように述べている。"古地磁気極決定の誤差は、とくに個々の地層の結果に関して、経度の不確定性原理すら考慮しないで 1,000 ~ 1,600km 程度の転移を意味することができる"(p.437)。地質時代の同じ「紀」の間の同じ大陸からの個々の古地磁気極の位置の誤差が最大 16° にも達することが一般的である。その上、アイスランドの東部と西部での磁極の位置は 14.3° ずれており、これらのデータの厳密な解釈は "途方もない量の回転" を必要とするであろうと、彼等は述べている。これらの結果が一般的にどのようなにしても異常な古地磁気の結果にあることを信ずる理由はなにもないと彼等はつけ加えている。

古地磁気学のデータベースを信用しないのはあまりにも安易すぎる、と Tarling (1982a) は述べている。不確かさは広大であり、主観的な評価を必要とする。"不幸なことに", "分散したデータは点検され、以前の観測に近い

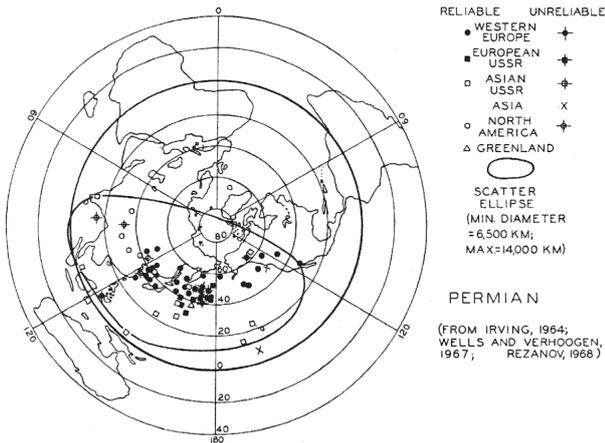


図 1.8. 北方系大陸におけるペルム紀古地磁気極の位置図。信頼性の最小基準を満たしていない極も示している (Meyerhoff & Harding, 1971 の図 1)。

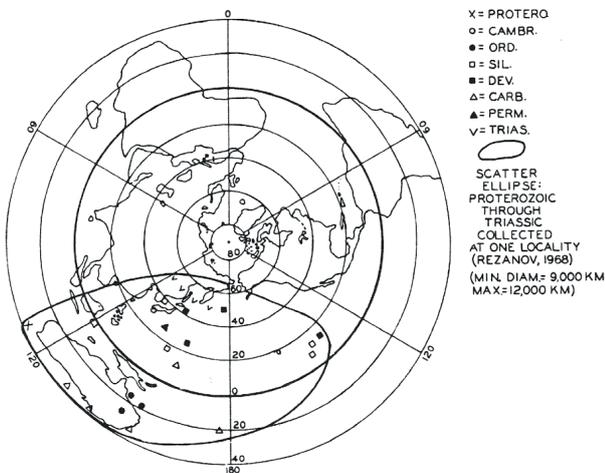


図 1.9. 楕状地の単一地域における原生代～トリアス紀末の古地磁気極の位置図。これは一事例や“例外”ではない (Meyerhoff & Harding, 1971 の図 3)。

奇妙な点が公表され、残りは公表されるとしても入手できにくい論文の付録中に示されるという行動様式がとられる”と彼は述べている。

Van der Voo (1990) は、古地磁気データの信頼度を測るための 7 つの基準を提案している。もし、古磁極が次の基準をすべて満たした場合には最高点 (Q=7) が与えられる。①適切に求められた岩石年代；②十分な数の試料；③十分な実験装置の消磁；④野外調査で検証された磁化年代；⑤関係するクラトンあるいはブロックとの構造規制と構造運動の一貫性；⑥逆転の存在；⑦古磁極が極移動軌跡の若い部分の上に決して落ちない。Van der Voo は、7 つの基準の多くがしばしば満たされないことを指摘した。すなわち、ごく僅かの磁極しか 7 つの基準のすべてを満たしていない。多くの著者は Q>2 の磁極を使っており、幾つかの Q=4 の結果は再磁化作用に因ることが知られている。そして、最高点は、その結果がより低い点の磁極より磁場のより良い指示物であるという保証では全くない。出版物のデータに従ってデータを単純に取り除くことは不相当であるとも、彼は述べている。そして、“1960 年代に公表された幾つかの結果は今日でさえ

大変有効であり、この 10 年間に発表されたその他の結果は、例えば、その年代決定、構造的対比あるいは特徴的な方位の決定において、不正確であることがすでに示されている”(p.1)。

古地磁気学の研究の基本的な教義はつぎのことである、“古代の磁場の信頼できる指示物を考えるために、区別がつかない年代の複数の岩石のからの磁化は良くまとまった方位を作るであろう”(Cottrell & Tarduno, 2000)。矛盾するデータあるいは、質の悪さのために、または再磁化作用、伏角が浅くなる作用、構造運動による回転や変形、非双極子磁場の成分などによって、理論的予想に当てはまらないデータが取得されるのは必然的な傾向である。これらの問題のいくつかあるいはすべてが良く適合するが、精選と主観性に関して大変大きな自由度をもつ余地が広く残されている。

プレートテクトニクス：失敗した革命 (Plate tectonics : a failed revolution)

地球表層部の岩石中には、不規則な間隔で生じた過去の磁極の変化が残されている。この古地磁気データの、これまで 50 年以上にわたって地磁気タイムスケールとして使われ、海洋底拡大やプレートテクトニクス説の確固たる証拠、消滅した超大陸が再集合した証拠、などとされてきた (Torsvik et al., 2012, p326)。

大陸が大規模に漂移するというアイデアそのものは 200 年も昔からあったのだが、詳細な理論と言えるほどのものが現れたのは、1912 年の Alfred Wegener によるもの以来である。Wegener は、そもそも大陸は Pangea と呼ばれる超大陸として一つのもが存在していて、それがその後分裂して漂移し始めたと考えた。彼は軽くて塑性的な sial 的な大陸が、重力や自転力の影響のもとで、重い海洋地殻の中へゆっくりと侵入していくと考えた。彼のこの考えは、大論争を巻き起こし、多くの反対論に立ち向かわざるを得なかった (Le Grant, 1998)。

この大陸漂移説は、1950 年代になると極移動や大陸の移動を支持する古地磁気学という学問の出現によってふたたび息を吹き返すことになる。1960 年代初めになると、海洋調査データから海洋底拡大というアイデアが導かれ、その数年後にはそれに関係する考えがプレートテクトニクスというモデルに統一される。1970 年代初め頃にはそれがグローバルテクトニクスの研究分野で正統なものとされてゆく。Le Grand (1998, p.229) は、プレートテクトニクスを、《それまでに残されていた、ありとあらゆる抵抗するものをすべて破壊しつくしてしまう巨人》と表現している。今日でも、プレートテクトニクス説は地球科学の世界では支配的な理論である。それにもかかわらず、それは基本的な点で重大な疑問を呼びこしている (たとえば、Meyerhoff et al., 1996a ; Stretvedt, 1997 ; Pratt, 2000, 2001)。

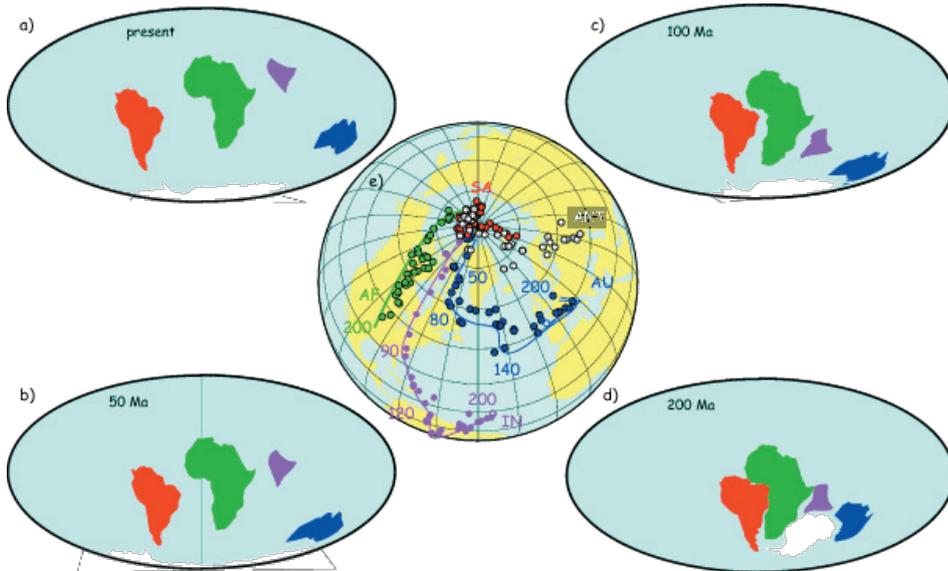


図 2.1. (a) ~ (d) は古地磁気データに基づく大陸の復元. (e) は 5 つの大陸の過去 200Ma 間の極の移動 (間隔は 5Myr). (Tauxe, 2013 の図 16.8).

海洋底の年代 (Age of the seafloor)

海洋底拡大説によれば、新しく誕生した海洋リソスフェアは大洋の中央海嶺 (互いに拡散する別々のプレート同士の境界とされている) において、マントルから湧昇する溶融体が冷却とともにそのリッジから拡散することによって生産される、という。水平方向へ移動するプレートは、海溝あるいは沈み込み帯と呼ばれる場所 (収束プレート境界) で再びマントルへ沈み込んでいくと考えられている。

古地磁気学のデータによれば、現在のすべての大陸は今から 250Ma 前、古生代 Permian 末までは巨大な超大陸 Pangaea の一部をなしていた。Pangaea はその後 180Ma 前の中生代ジュラ紀になると分裂を始めた。その結果、海洋底の年代はこれよりも古いものはないと考えられている。ところが、この基本的な主張 (図 2.5 参照) に対して、それを否定する数十にも達する事実が出てきたのである。

現在では、大西洋・太平洋・インド洋などで 180Ma よりも古い年代を示す岩石が多数発見されている (Vasiliev & Yano, 2007; Vasiliev & Choi, 2008; Yano et al., 2011 などの概説を参照のこと)。これらの事実だけでも、大陸が地球表層部を数千マイルも移動するという古地磁気データにもとづく空虚な漂移説を否定するのに十分である。またそれらの事実、地球が 200Mys 前には今よりも小さくて、現在のような海洋は存在していなかったとする地球膨張論者 (earth expansionist) にとっても致命的なことである。プレート論者たちは、このような海洋域での古い年代の岩石の発見に対しては、その場しのぎの反論のために実にさまざまな説明を持ち出してきた。例えば、それは氷河が運んだ迷子石であるとか、船が捨てたバラストであるとかである (Heezen et al., 1959)。また、リフティングの間にトランスフォーム断層が原因となって拡大に取り残されたブロックであるとの考えも持ちだされた (例えば、Bonatti & Honnorez,

1971; Bonatti & Crane, 1982; Bonatti, 1990; Pilot et al., 1998)。しかし、プレートテクトニクスの体系を根本から否定するような発見という事実はことさらに、また全くといっていいほどに無視された。例を上げれば、Carlson et al. (2008) のテキストでは、『海洋域のリソスフェアの年代は若い』とまるでマントラのように繰り返し述べ、これに反する事実に対しては全く触れてもいない。Tauxe (2013) の古地磁気学の最新のテキストでも、読者に対して『最も古い海洋底の年代は、180Ma である』と堂々と述べているのである。しかし、事実はこれと全く異なっている。大西洋中央海嶺とパーミューダ海膨における DSDP Leg37 と 43 での掘削コアから、古生代と原生代の火成岩が採取されている (Reynolds & Clay, 1977; Houghton et al., 1979)。Reynolds & Clay (1977) は、大西洋中央海嶺のクレスト付近で採取された岩石の年代 ($635 \pm 102\text{Ma}$) は、そこでの逆帯磁した地磁気からして 10Ma より古い岩石は含まれているはずもないので、年代値は誤りだとレポートしている。

Aumento & Loncarevic (1969) は、大西洋中央海嶺の北緯 45° に位置する Bald mountain 西側でドレッジされた 84 ヶの岩石のうち 74% は大陸起源タイプの岩石だと報告し、「注目すべきことだ」としたが、それらは氷河によって運ばれた岩石 (漂礫) だとみなしてそれ以上の注意を払わなかった。Bald mountain は約 80km^3 の体積をもっており、それらをつくる岩石が氷河によって陸から運ばれたり、船がそこに捨てたものと考えられることは到底出来ない。それらの岩石は、年代的には 1,690 ~ 1,550Ma までの花こう岩~珪質変成岩などからなり、785Ma の年代の塩基性岩の貫入を受けているのである (Wanless et al., 1968)。それらは 10Ma かそれよりももっと若いと考えられていたのである。Kane fracture zone 付近の大西洋中央海嶺の下のはんれい岩の中から 330 ~ 1,600Ma という年代の zircon が見つかった (Pilot et al., 1998)。赤道のすぐ北の大西洋中央海嶺のクレスト付近にある St Peter and Paul's Rocks の年代は 35Ma と予想されていたが、Nelson et al. (1972) は、350, 450Ma

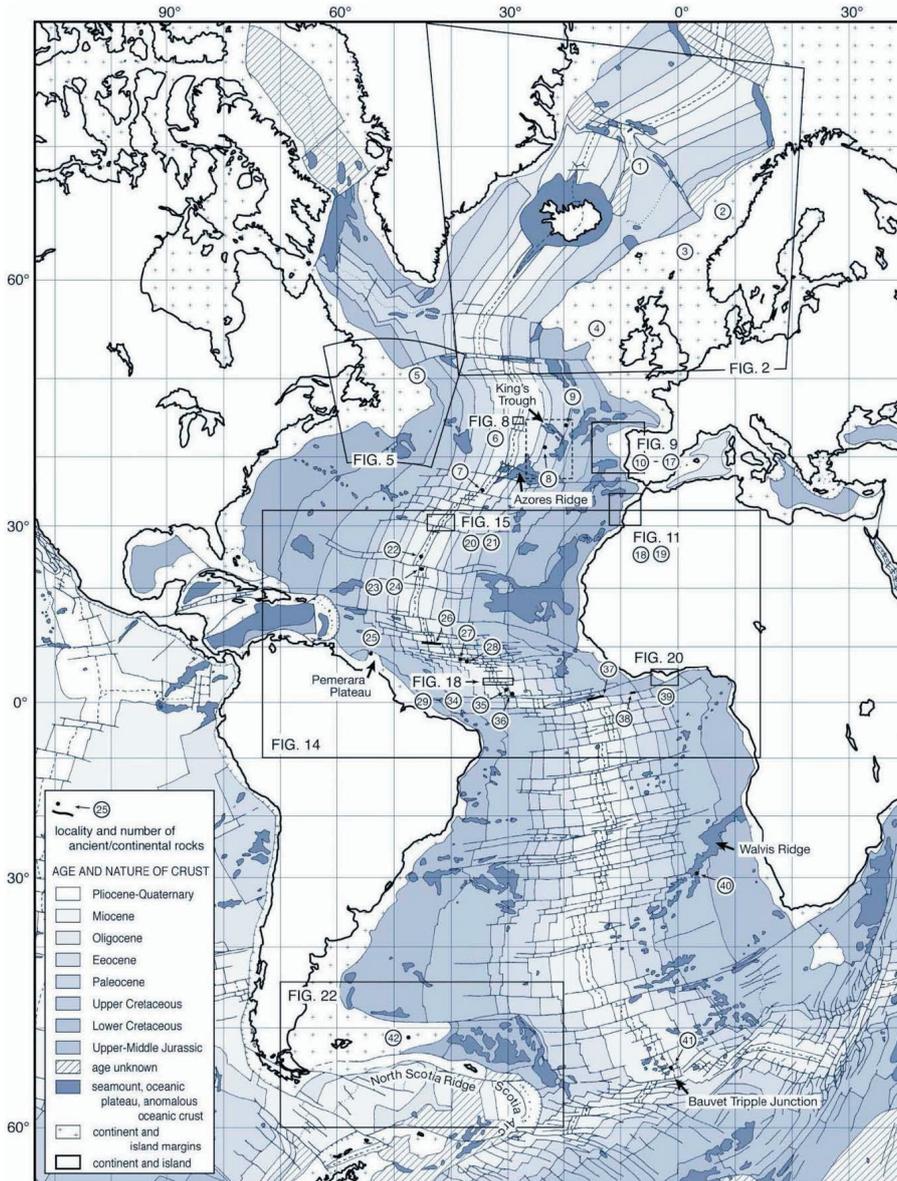


図 2.2. 大西洋において大陸的で〈異常に〉古い岩石の発見された地点。この地点は、プレートテクトニクスによって理論上表現されている年代の上に重ねて示されている (Yano et al., 2009 の図 1)

の年代を示す岩石とともに 835Ma の年代を示すかんらん岩を発見している。

現在の浅海域の堆積物の広がりや掘削データからみた岩石の垂直方向の重なり方は、海洋底拡大説による考えと矛盾している (Ruditch, 1990 ; Orlenok, 1986)。現在の海洋は、中生代ジュラ紀以降に大規模な沈降を被っているが、それは海嶺から等距離で規則的に生じたと言うよりはモザイク状に起こっている。海嶺軸から遠方のところほど若い堆積物が見られることもしばしばであり、地域によって海域は変化に富んだ沈降や隆起を起こしたように見える。

一般に基盤とみなされている玄武岩質層のさらに下に古い堆積岩が存在するか否かを明らかにするためにも、もっと深部までの掘削が必要であろう。なぜなら、玄武岩を覆うようにしてその上にみられる堆積物が玄武岩によって焼かれている事実や、玄武岩に chilled margin がみられる事実、堆積物と玄武岩が互層しているような事

実などがあるからである。また、堆積物が dike や sill などの貫入岩に貫かれている事実もある (Meyerhoff et al., 1992a ; Choi, 2001)。玄武岩は、実際はその下にある真の海洋基盤の上を覆って、その上に流れ出した溶融物である。そのことは中央海嶺上で掘削された Site 10 で明確に認められている。ここでの最深部の堆積物は白亜紀 (約 80Ma) のものである。玄武岩の sill (誤って基盤とされているが) の fission track 年代は 15.9Ma である (Macdougall, 1971)。

海洋底からの岩石の採取、掘削、震探などのデータ、古流向や堆積物の後背地に関するデータ、海洋底から得られる植物や動物に関するデータなど、どれも今は水中に没してはいるが、かつてはそこに大きな大陸地塊が存在していたことを示している (Dickins et al., 1992 ; Dickins, 1994b ; Choi et al., 1992 ; Choi, 1999, 2001)。海域にみられる準大陸的な地殻をもった島々や海台などは、より大きなかつての陸の名残であり、そもそもの大陸地殻がさまざま過程で海洋地殻化したことを示している。

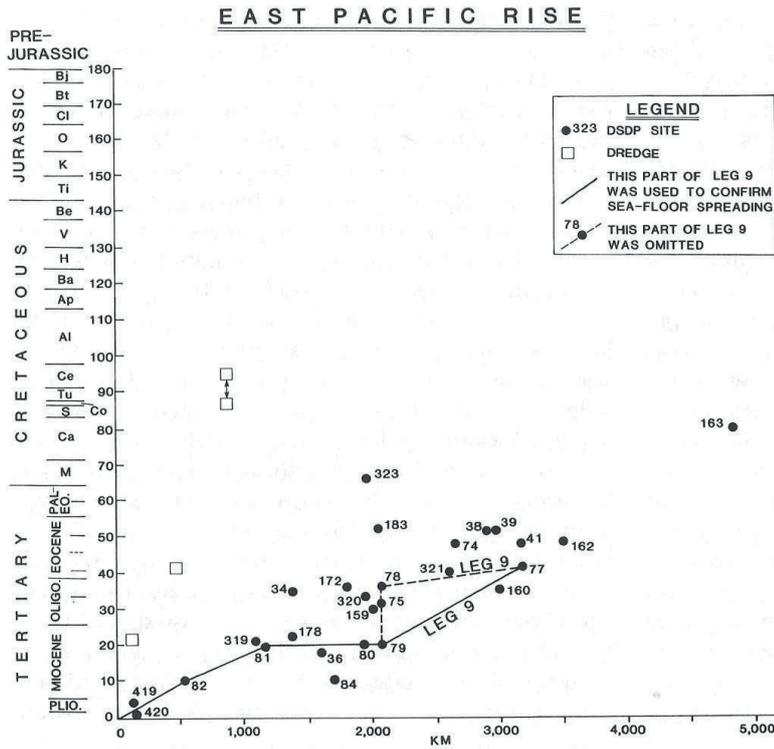


図 2.3. DSDP の Legs 1-54(1969 ~ 1980 年の間) の掘削コアのデータにもとづく、East Pacific Rise のクレスト部分からの距離を横軸にして示した岩石の年代。太平洋東部での海洋底拡大にもとづく Leg 9 のデータが示されている。ドレッジ (Budinger & Enbysk, 1967 ; Ozima et al., 1968) された新生代～白亜紀の岩石の年代は、海洋底拡大の考えで言われる拡大軸からの距離と年代との間の直線的な関係がまやかしてであることを示している。Shipboard Scientific Party は、Site 78 のデータがプレートテクトニクス論に合わないためにそれを除外している (Meyerhoff et al., 1992a の図 25)。

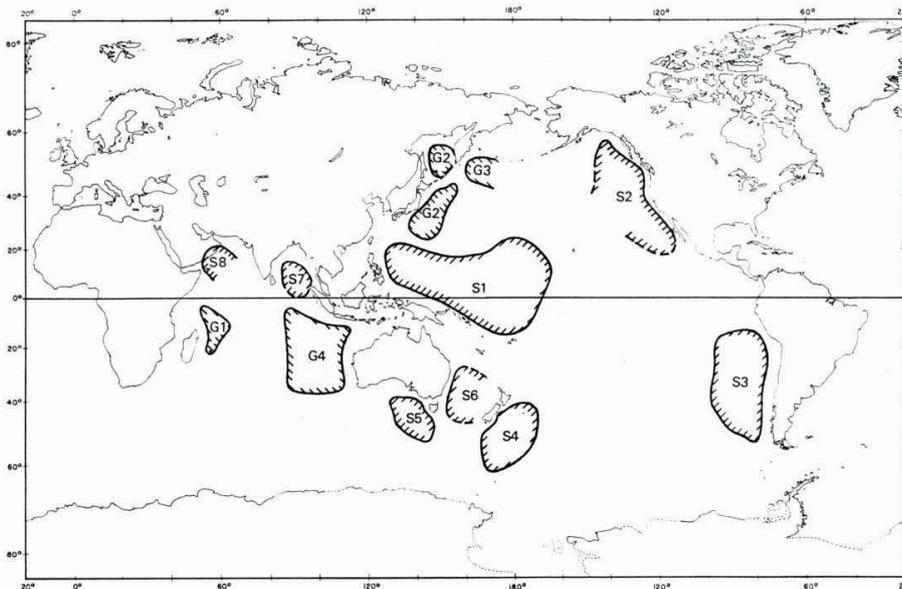


図 2.4. 太平洋やインド洋でかつて存在した陸地。それらには、陸地が存在したことを示す十分な証拠がすでに存在する。そのアウトラインについてはまだ十分に明らかではない。G1: セイシェル地域, G2: Great Oyasio land, G3: Obruchev Rise, G4: Lemuria, S1: Ontong-Java Plateau, Magellan Seamounts, Mid-Pacific Mountains 地域, S2: Northeast Pacific, S3: Chatham Rise と Champell Plateau を含む Southeast Pacific 地域, S4: Southwest Pacific, S5: South Tasman Rise を含む地域, S6: East Tasman Rise と Lord Howe Rise, S7: Northeast Indian Ocean, S8: Northwest Indian Ocean (Dickins, 1994b の図 1)。

海洋底拡大説が誤りであるなら、プレートの沈み込み説も誤りということであり、そのことについては豊富な事実がある。Benioff zone についての一つの見方は、それを地球のかつての冷却によって形成された fracture とみなすものである。

海域の磁気異常 (Marine magnetic anomalies)

海洋地殻を、地質学的には新しい時代に大陸の大規模な移動によって形成されたとするプレートテクトニクスは、海洋域の地磁気異常という事実—海嶺の両側での古地磁気の強弱の縞模様は、グローバルな地磁気の反転に対応した海洋底の拡大によって形成されたこととみなすのであるが—に支えられてきた。しかし、地磁気異常の直線

的な縞模様は、地震活動の活発な中央海嶺の 70% の部分に見られるにすぎない。そして、多くのプレートテクトニクスの出版物中に描かれている対称的な地磁気異常の縞模様は実際とはかけ離れたものである。海嶺軸にみられる磁気異常の中で、軸に対称的な縞構造は全体の 50% 以下にすぎない。また、そのうちの 21% は海嶺軸に斜交している。直線状の磁気異常の縞模様が、海嶺の全く存在しないところでも認められる。さらにそれらは、海洋地殻物質だけに特有のものでもないのである (Meyerhoff, 1974b ; Grant, 1980 ; Choi et al., 1990, 1992)。

海洋での地磁気異常の起源を説明するための、最初の単純な海洋底拡大モデルは、海洋掘削によって誤りであることが明らかにされた (Hall & Ryall, 1977 ; Rebinson,

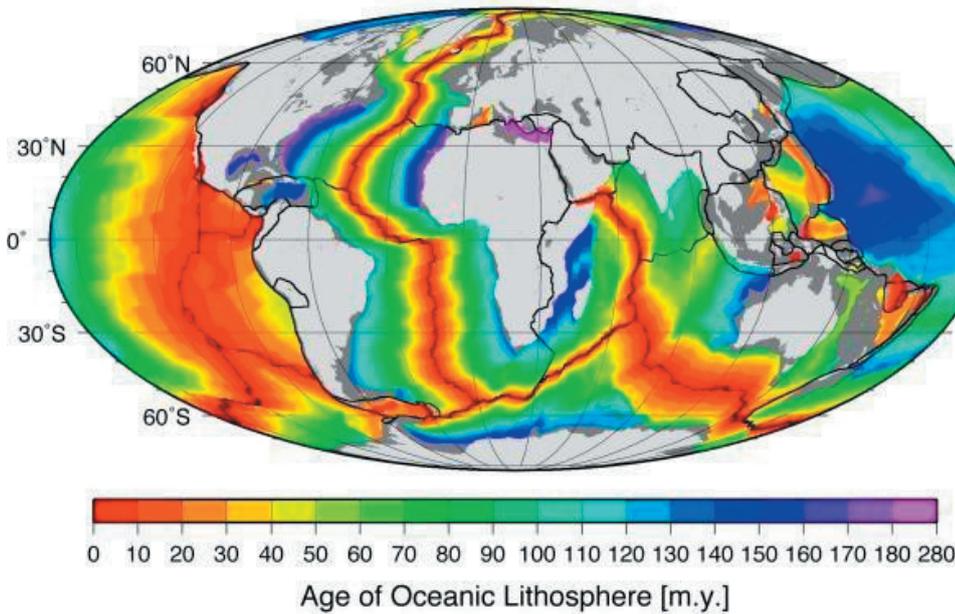


図 2.5. 海域の磁気異常にもとづく海洋底の年代. (Mullr et al., 2008 ; www.ngdc.noaa.gov)

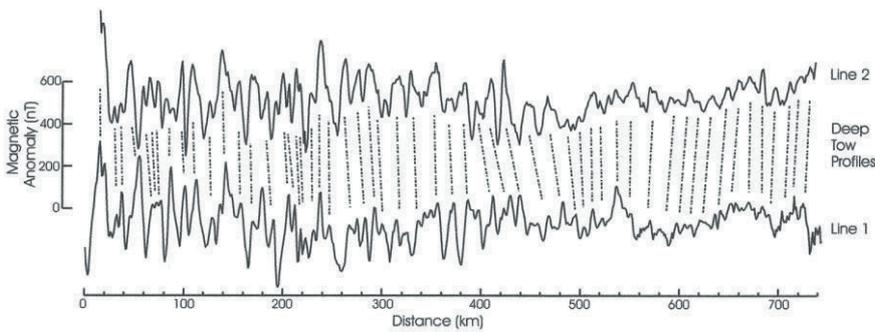


図 2.6. 太平洋西部の Jurassic Quiet Zone における深海の deep-tow profile の主観的な対比 (Sager et al., 1998 の図 5 : American Geophysical Union による転載許可済み)

1979 ; Pratsch, 1986 ; Storetvedt, 2010). 磁気異常は、当初は海洋地殻の上部 500m の部分に限定的に認められるとされてきた。深さによって異なる磁気強度、極位置方向などは、磁気異常の起源が海洋地殻のより深いところに由来することを示唆している。また海嶺にそって存在が予想していた貫入岩がないことや、豊富な大陸性岩石と動力変成岩の存在などは、海洋底拡大や地球膨張という考えに矛盾するものである。

上述のとおり、矛盾している多くの事例が存在する。磁気異常のバンドが 16 地点では大陸の内部に向かっていて、新生代ないしそれより若い岩石の下へ潜り込んでいる。それらは始生代楯状地の周辺に集中している。このことは、それらが一部新生代に形成され、その後再活動したものであることを示している (Meyerhoff & Meyerhoff, 1974b)。

磁気異常や海洋底の年代が実際に測定された岩石の年代と海嶺両側の磁気の縞模様や、異なる海域どうしの広域的な対比は、定性的・主観的に行われるため極めて疑わしいものである。実際、それらを極に対して動かすことによって定量的に検証しようとの努力は何もなされていない。Reykjanes Ridge の磁気異常は、海嶺に平行する対称的異常だとされた最初の事例だが、定量的で詳細な検討の結果、Agocs et al. (1992) は海嶺両側の磁気異常

の相関性は非常に小さいと結論づけた。ちなみに、軸方向の相関係数は 0.31、直交する方向では 0.17 である。一方、磁気異常と海底地形との間の相関係数は 0.42 である。この磁気異常はむしろ岩石中の断層に関係した帯磁率の違いとして説明できるのである (Agocs et al., 1992 ; Choi et al., 1992 ; Storetvedt, 2010)。海洋地域の岩石の磁性に関する報告は、磁気異常の報告よりもっと多数である (Luyendyk&Melson, 1967 ; Opdyke & Hekinian, 1967)。

Side scan radar 画像は、中央海嶺が軸に平行で長い直線状の割れ目や断層で切られる様を示している。このことは、海嶺部分ではその下の比較的浅い部分に軸に平行して水平方向に延びるマグマチャネル—そこでは流動的な溶岩が水平方向に動くのであるが—が存在することを強く示している (Meyerhoff et al., 1992a, b)。磁気異常は、この海嶺軸に平行する割れ目に関係しているのであるが、このような考えは異なった場所での異なった時代、異なった方向の拡大軸の存在を仮定することを必要としない。たとえば、Larson & Chase (1972) は、西太平洋におけるさまざまな磁気異常パターンを 5 つの spreading center が二つの 3 重点で会合しているという考えで説明した。これに対し、サージテクトニクスが主張するように、磁気異常が 1 つの活動的 magma-channel によって形成されるものと考えれば、その場における内

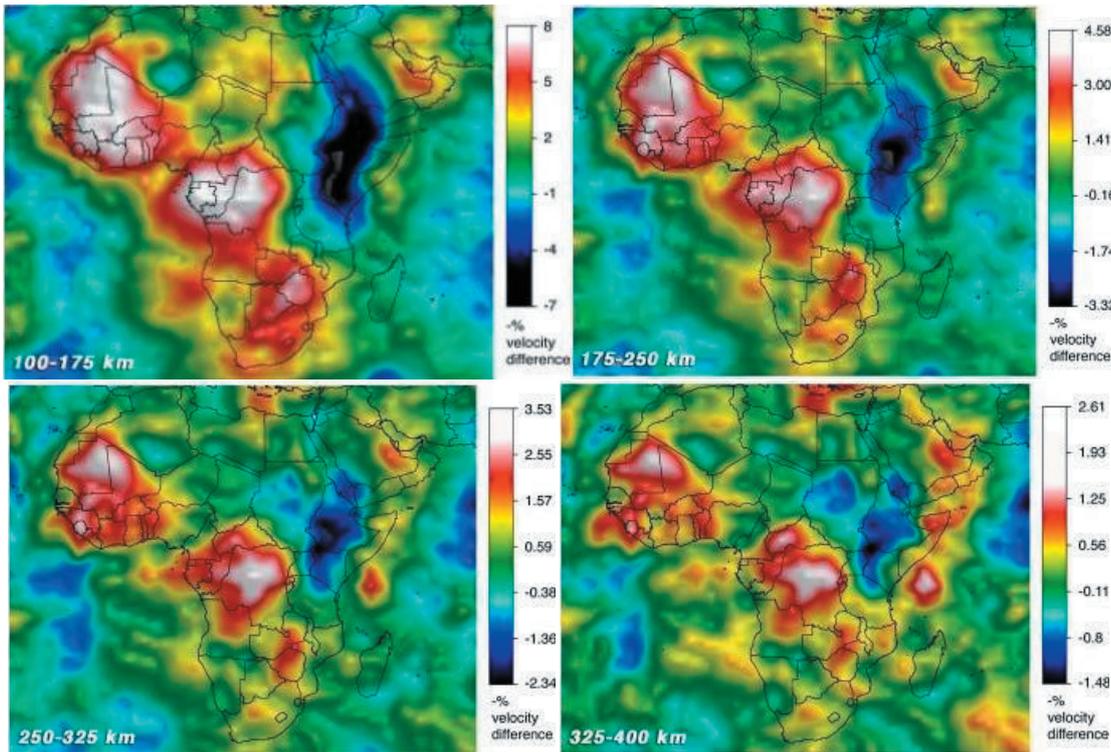


図 2.9. 4つの深さに分けて示されたアフリカ大陸の地下の地震トモグラフィーによるイメージ画像 (Vsモデル). 赤—白色系の色は地震波が高速であること, 青—緑系の色は低速を示す. アフリカ大陸の地震波速度の高速領域は 300 ~ 400km の深さにまで延びている (O'Reilly, 2009 の図 3).

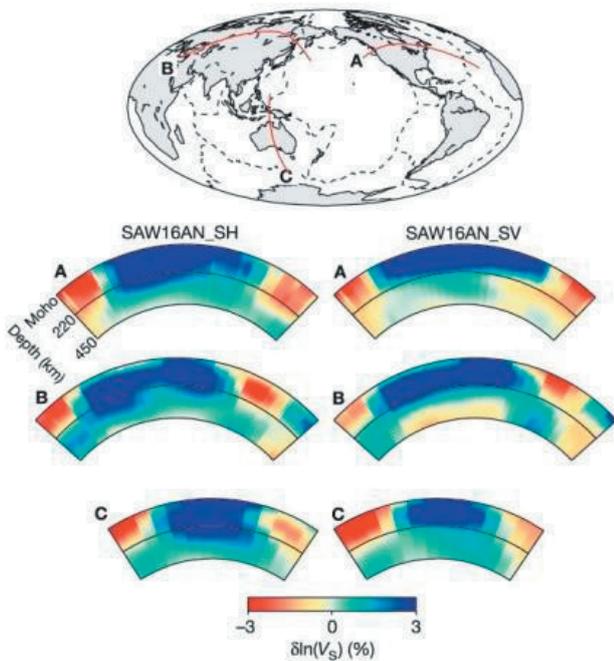
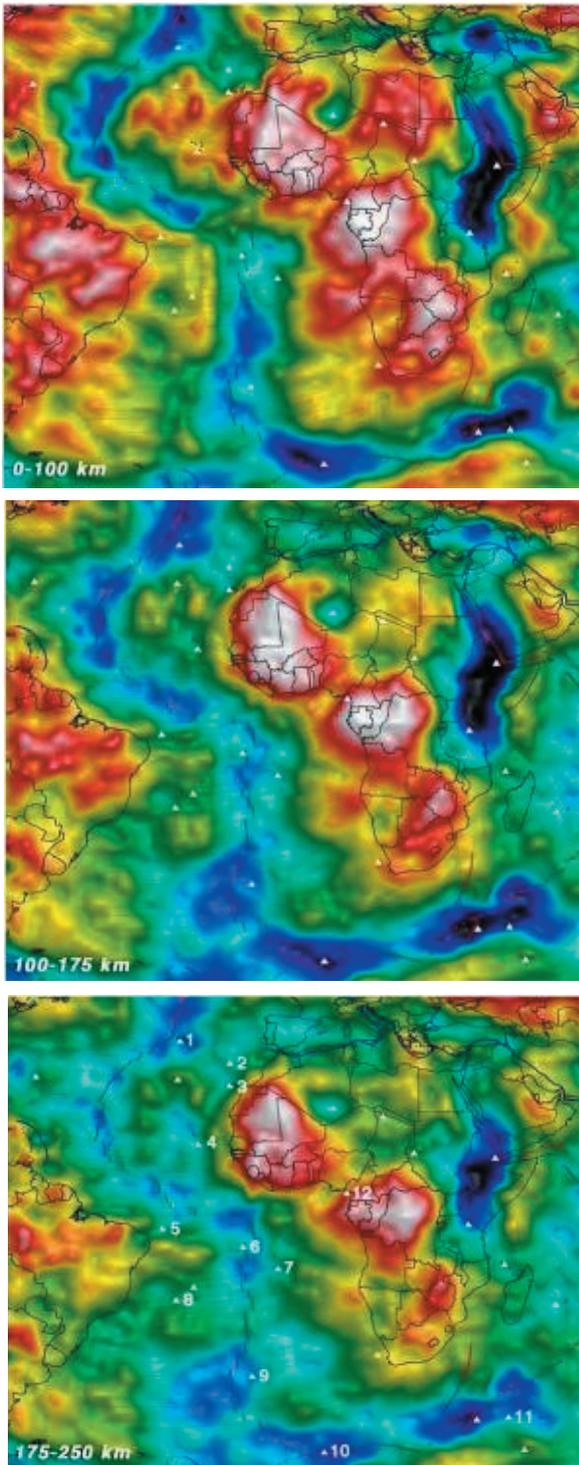


図 2.10. 地震トモグラフィーによる3つの大陸を横断する地殻断面 (位置は上図). 左はSH波によるもの. 右はSV波によるもの. SH断面では, 220kmの深さまで連続的に高速帯が伸びていることが示されているが, SV断面ではそれがみられない (Gung et al., 2003 の図 4).

このような結果は, それまでの地震学の観測手法とは違う方法から得られたものであり, また異なったモデルから得られたものであるため, 受け入れられていない. あるプレート論者たちは, リソスフェアの最大の厚さを 200 ~ 250km と限定的に見ている (Cung et al., 2003 ; Van Summeren et al., 2012 ; Yuan & Romanowicz, 2010). Cung et al. (2003) は, 水平方向の S 波 (SH) 速度構造から得られる大陸の根の深さは, 鉛直方向のそれ (SV) から得られる値より 100km 以上も深いという

ことに注目している (図 2.10). 彼らはこれを, 安定大陸の深さ 250 ~ 400km では水平方向の S 波が, 垂直方向の S 波に比べて伝播速度が大きく異方性を持っているためとした. 同じような異方性は, 海洋域下の 80 ~ 250km の深さのところでも見つかっている. 彼らは, 大陸・海洋双方での地殻の異方性はアセノスフェアのグローバルな低速帯に起因するとみなしている. 彼らはまた, ほとんどの大陸下 200 ~ 250km で認められる Lehmann discontinuity, 海洋下 60 ~ 80km に認められる Gutenberg discontinuity について同意し, それらはアセノスフェアからリソスフェアへの遷移現象を示しているとしている. しかし, この主張に対しては O'Reilly et al. (2009) が反論している. すなわち, 彼らは大陸塊深部での高 S 波速度構造は単純な異方性によって説明できず, クラトンのリソスフェアと対流を起こしているマントルとの境界を表すとされる Lehmann discontinuity が存在するという確かな証拠は何もないと述べている.

アセノスフェアは均一的で連続的な層構造であるが, そこから遠く離れた熱流量の高い地域でのみ不連続的なレンズ構造が認められる. 地震波による研究は, 上部マントルが強度 (固さ) の異なる高い速度構造と低い速度構造の層の繰り返しからなっていることを明らかにした. この構造は, 造構作用が活発な地域で特に顕著であるが, 古い楕状地の下でも認められる. アセノスフェアに伴ってその内部にみられる個々の低速層は, ささまざまな地域, ささまざまな深さで認められるが, それらは単一で連続的なものではない. しかもそれらは, 表層部の地質学的性質や地殻構造・熱流量・ジオイド異常などに強い関係性を持っている. また, 上部ならびに下部マントルの不均質性とも関係をもっている. このような表層



部と深部との関係性は、リソスフェアのプレートがマン
トル深部の構造に関して水平に移動するという考えに
反して、地質学的にも長期間にわたって安定的である
(Pavlenkova, 1990, 1995, 1996)。

表面波の平均的な観測結果では、アセノスフェアは海洋
地域の下に広く存在すると考えられている。しかし、こ
こでアセノスフェアにレンズ状の構造のあることを思い
起こさなければならない。海洋域のマントル中にはいく
つかの低速度帯が存在する。しかしこれが中央海嶺から
の距離や深さの点で規則的であるとみなすことはできな
い。さらに、中央海嶺との関係でみると、マントルの構
造は海洋底拡大のプロセスに反して、海嶺軸を境にして
非対称であり、ブロック状構造をなしている (Pavlenkova,
1990, 1996)。

リソスフェアがプレート状だとする証拠があいまいなこ
と同様、プレート境界なるものもあいまいであり、存
在すらしていないものもある。たとえば、太平洋プレ
ートと北米プレート、ユーラシアプレート間の太平洋北西
部での境界や、北米プレート・南米プレートとカリブプレ
ートの境界、南米プレート・南極プレートと Scotian
プレート境界 (Oard, 2000a) などのようにである。プレ
ート境界は、当初はごく幅の狭いものと考えられていたが、
現在では数百キロメートルから 1,000km の幅までさま
ざまである。拡大境界が占める面積は、今では全地球表
面の 15% を占めるまでになっている (Gordon & Stein,
1992)。

地殻は定常的な動きを保っている。表面の形で見れば海
水準の上 8.8km から下 10.8km までの凹凸をなしている。
マントル内の熱流や物質移動が地殻の厚さや組成・密度
の変化をもたらしていることを示す豊富な証拠が存在す

図 2.11. 3つの深さに分けて示された大西洋の地下の地震トモグラ
フィーによるイメージ画像。赤・白色系の色は地震波が高速であること、青・緑系の色は低速度を示す。数字のついた地点は、海洋性玄武岩
のみられるところ。地震波の高速帯のあるものは、大陸地域のそれと
連続的であるが、中には海洋盆地内に孤立して点状に存在する高速領域がある。
(このような高速領域は、太平洋地域でも不規則的であるが集中的にみ
られる)。O'Reilly et al. は、「このような高速領域は、かつてそこに
存在した大陸が海洋盆地のリフティングの過程で分裂したり合体したりし
たリソスフェアの残滓である」と述べている。

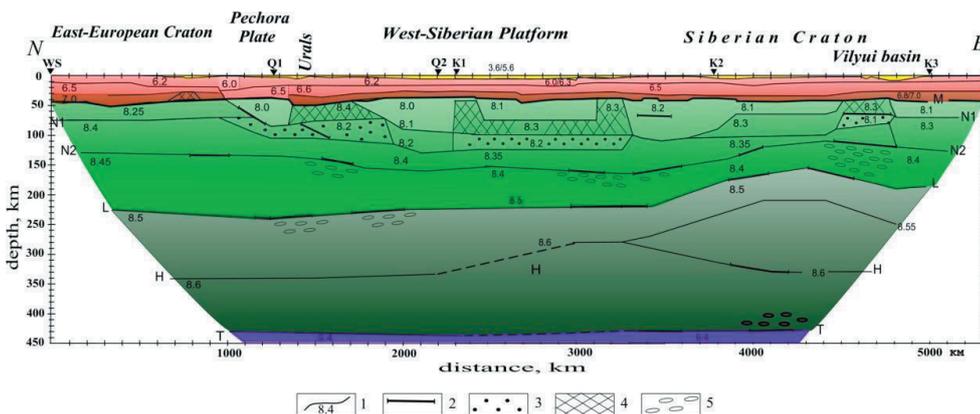


図 2.12 古い East European platform から、Urals, young
Siberian platform, Siberian craton まで横断する震探断面。
これは平和時の核爆発の際の地震を利用したものである。
Legend1: 等速度線 (km/s), 2:
強い反射波が得られていた地震
波境界, 3: 低速度層, 4: 高速
速度領域, 5: 高速ブロック。こ
の断面図は、Northern Eurasia
の下には部分的に溶融している
アセノスフェアが存在しないこ
を示している (Pavlenkova,
2012 の図 6)。

る。そしてそれらがプレートの衝突や沈み込みなどを必要とすることなく隆起や沈降などの現象を引き起こしているのである (Pratt, 2000)。鉛直方向の変位量は、山脈地域での海成層の一般的な厚さが 10km, 時には 23km にも達している事実から見積もることができる (Bucher, 1933)。水平方向の移動に関してのみ、野外での事実によれば、地殻をつくる層は数十キロ (数百キロではない!) の衝上を引き起こし、それによる地殻の伸長や短縮量は 100km を超える。ある横ずれ断層沿いでも 100km を超える変位を起こしている。しかし、リソスフェアの厚さの変化が広域で起きていること、大陸の根が深いこと、アセノスフェアが不連続的であること、プレート境界のあるものが存在しないこと、表層部とマントル深部との関係性等々を考えると、リソスフェアの断片が、固い物体として 100km や 1,000km を超えて動くことなど土台不可能なものである。それでもなお、プレート論者たちは、彼らのプレート運動モデルが古地磁気データや海洋磁気異常データ、重力異常データ〈それらがプレートテクトニクスモデルと矛盾しているにも拘わらず〉によって支持されていると固く信じ込んでいるのである (Pratt, 2001)。

**プレートテクトニクスによる復元
(Plate-tectonic reconstruction)**

今日、地質学者と地球物理学者は、構造が特別なモデルを満足させるものについては何でも勝手に使って、部屋いっぱいの家具のように地殻の一片を扱う傾向がある。あいにく、地殻が地質データと同じように物理法則に従っているとすると、地殻はそれほど容易にコントロールすることはできない。その代わりに、堅い地殻と最上部マントルは、巨大な組み合わせたモザイク、リソスフェア を形成している。

リソスフェアモザイク内の物体が、垂直的にも水平的にも十分な距離を動くことを、我々は地質調査から分かっている。しかしながら、それぞれの厚さが 50 ~ 200km で、すべての方向に数 1,000km の広がりを持ち、測定不能な重量を持つ巨大なリソスフェアプレートが地球表面を自由に系統的に移動するという議論は、すべての物理法則や一般常識に反している (Meyerhoff et al., 1996a, p.1-2)。

超大陸 (Supercontinents)

特に古地磁気データは、現在のほとんどの大陸ブロックが集合してできた少なくとも三つの超大陸が、地球史上に存在したことを信じるようにプレートテクトニクス論者を導いてきた。それらは、コロンビア・ロディニア・パンゲアと名付けられた (Meert, 2012)。それらの復元は、いずれも、著しく多様である。

コロンビアの最終的な合体は約 18 億年前に起きたということになっており、そして約 16 億 ~ 12 億年前に分

裂した (Zhao et al., 2004 ; Hou et al., 2008 ; Rogers & Santosh, 2002)。さまざまなブロックが分離し回転し、そして 13 億 ~ 9 億年前に超大陸ロディニアを形成するように再集合した。さらに、7.5 億年前に分裂しはじめ、その過程でいくつかの断片が連結し、 Gondwana 大陸を形成した (Li et al., 2008 ; Evans, 2009 ; Dalziel et al., 2000)。

パンゲア超大陸は 3 億 ~ 2.5 億年前に形成されたとされ

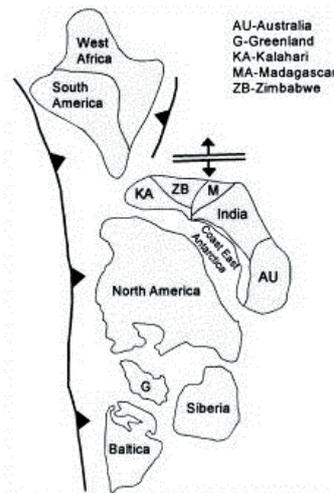


図 3.1. コロンビアの復元図。左: Rogers & Santosh (2002)。下: Zhao et al. (2004)の図 1。

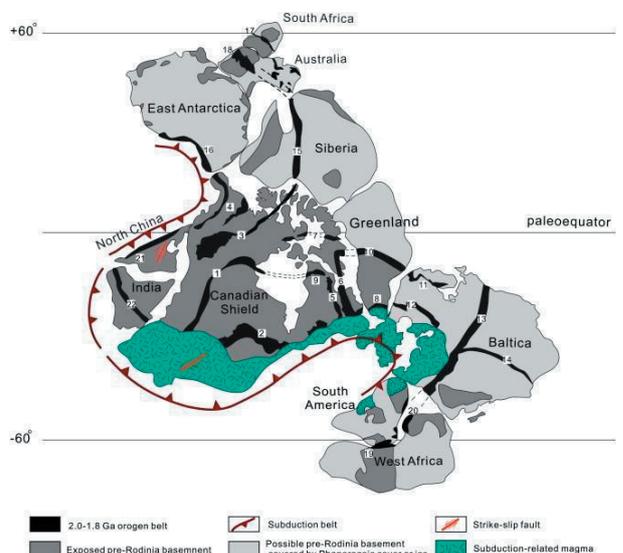
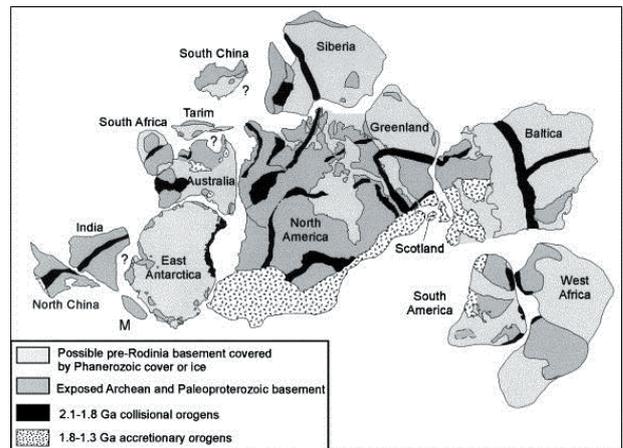


図 3.2. コロンビアの復元図。Hou et al. (2008) の図 7。



図 3.3. Dalziel et al. (2000) によるロディニアの復元図。G= グリーンランド; RP= リオデラプラタ; SF= サンフランシスコ; WAF= 西アフリカ。

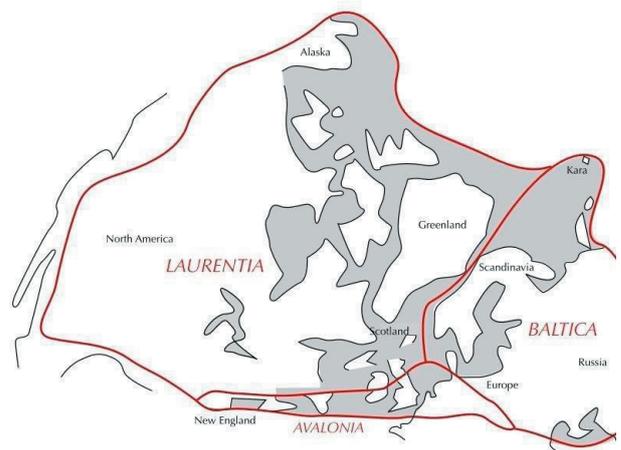


図 3.6. デボン紀のローラシア (ユーラメリカあるいは古赤色大陸として知られている)(<http://en.wikipedia.org>). プレート境界は赤で示されている。ローラシアが仮に Baltica と Avalonia に衝突した時 (4.3 億年以上前), 現在のブリテン島とアイルランドの北半と南半部の間に作られた同時に起こるびつたりな組み合わせ方に注意。

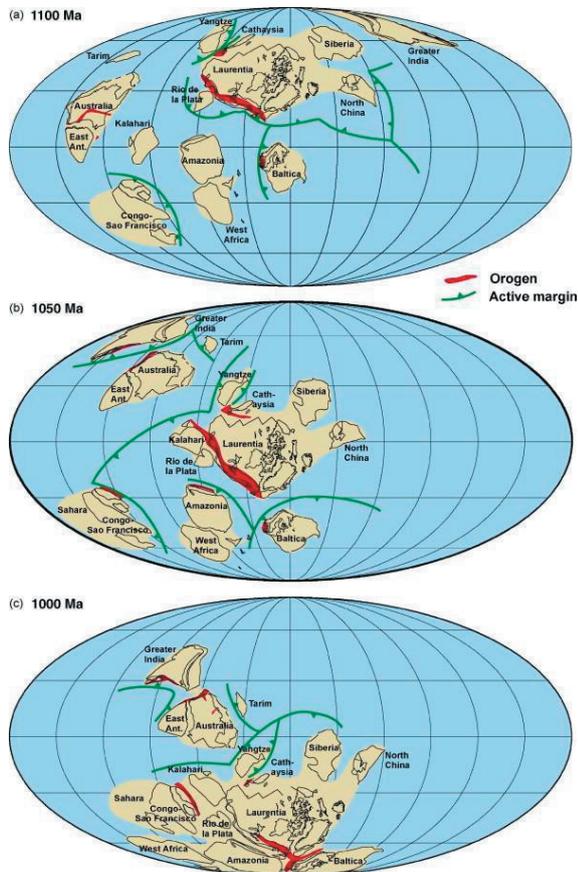


図 3.4. 復元されたロディニアの集合。Li et al. (2008) の図 9。

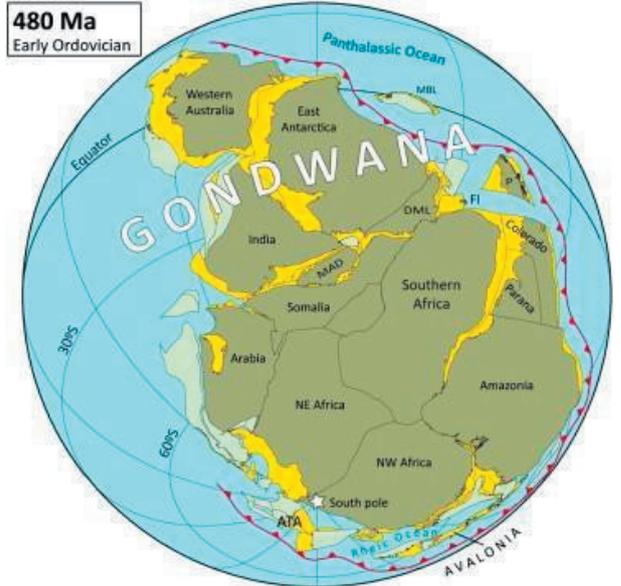


図 3.7. 暗緑色の地域の古地磁気データに基づく前期オルドビス紀 (4. 8 億年前) の Gondwana と周 Gondwana テレイン。ATA=American テレイン集合体; MBL= マリーバードランド; FI= フォークランド諸島; DML=Dronning Maud ランド; MAD= マダガスカル。(Torsvik et al., 2012 の図 10)

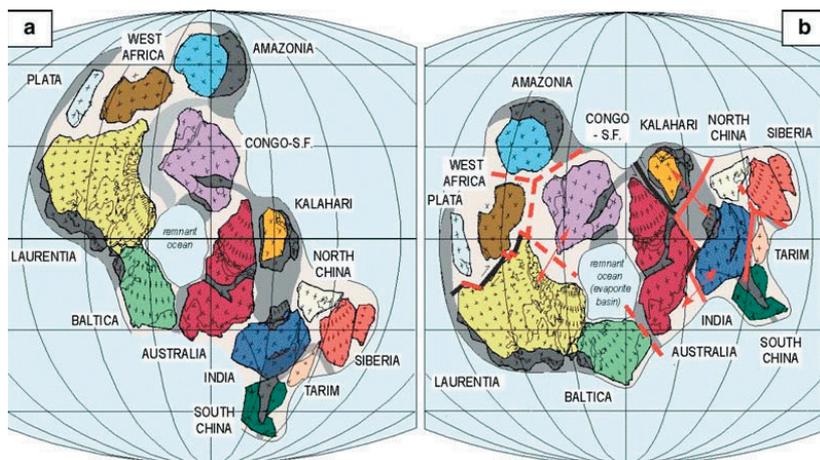


図 3.5. ロディニアの復元図: Evans (2009) の図 11: (a) 集合直後 (10.7 億年前); (b) 分裂直前 (7.8 億年前). 初期の分裂リフトマージン (赤) とトランスフォーム断層 (黒) を示す。

ている。Torsvik et al. (2012, p.340) によると、'パンゲアはいくらかでも信頼できるモデルをつくることのできる地球史における唯一の超大陸である'。プレートテクトニクス神話では、パンゲアの形成は次のようなことを起こしてきた。中期シルル紀(4.3億~4.2億年前)に、クラトンの北米・グリーンランド・エルズミア及び現在のヨーロッパの部分(スコットランド・北西アイルランドとスバルバル諸島など)よりなるローレンシアは、Baltica(北東ヨーロッパ内部)と Avalonia(現在の大ブリテン島と北米東岸より構成される)に衝突され、カレドニア造山運動を起こしている。その結果、ローレンシアはローラシアの西側の一部になった。後期カンブリア紀と前期オルドビス紀には、 Gondwanaは南極(北部アフリカ)から赤道(オーストラリア)へ引かれた;大きさはほぼ1億 km²で地球表面の約20%を占めた。巨大なパンゲアは、Gondwana・ローレンシアとその間のテレインが衝突し後期石炭紀に形成され、西ヨーロッパにヘルシニア造山運動を引き起こした。後期ペルム紀から、シベリアがBalticaに加わり、他のヨーロッパとアジアの要素とともに、パンゲアと連結した北半分がローラシアとなった。最初の大分裂は前期ジュラ紀に中央大西洋の開裂とGondwanaとローラシアの分離で生じた。

移動速度は10cm/年より大きいことは稀であったといわれており、回転速度は普通4°/100万年より小さかった(Torsvik et al., 2012)。例えば、カンブリア紀には、中央アフリカは10cm/年あるいはそれ以上の速度で南方へ漂移し、2°/100万年の速度で反時計回りに回転したとい

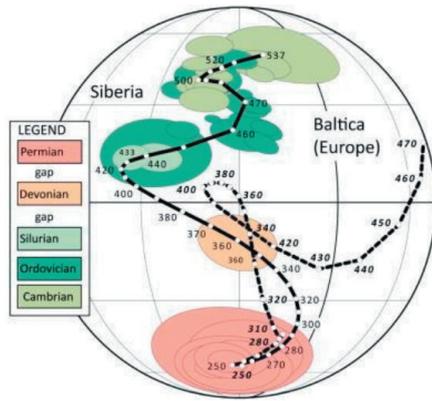


図 3.8. Baltica の【spline<細長い??>】経路と比較された、シベリア(中には間違っている楕円がある)のAPWの【spline<細長い??>】経路. それらの假定された衝突を示している。(Torsvik et al., 2012) の図 12.

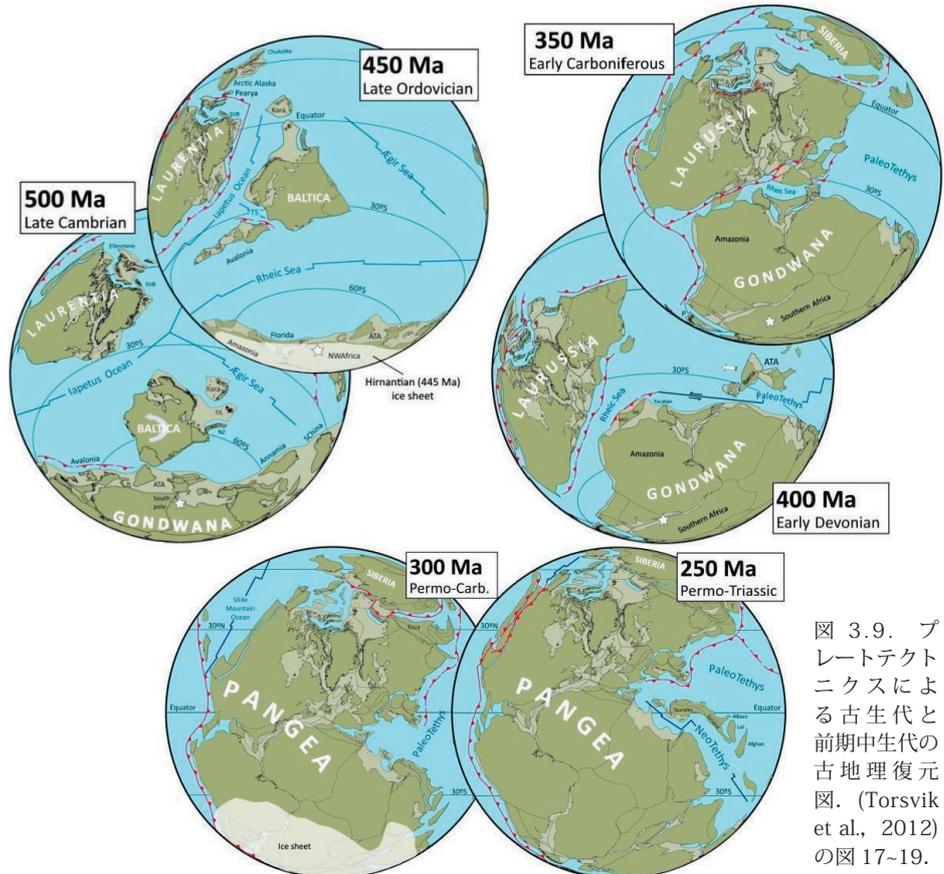


図 3.9. プレートテクトニクスによる古生代と前期中生代の古地理復元図。(Torsvik et al., 2012) の図 17-19.

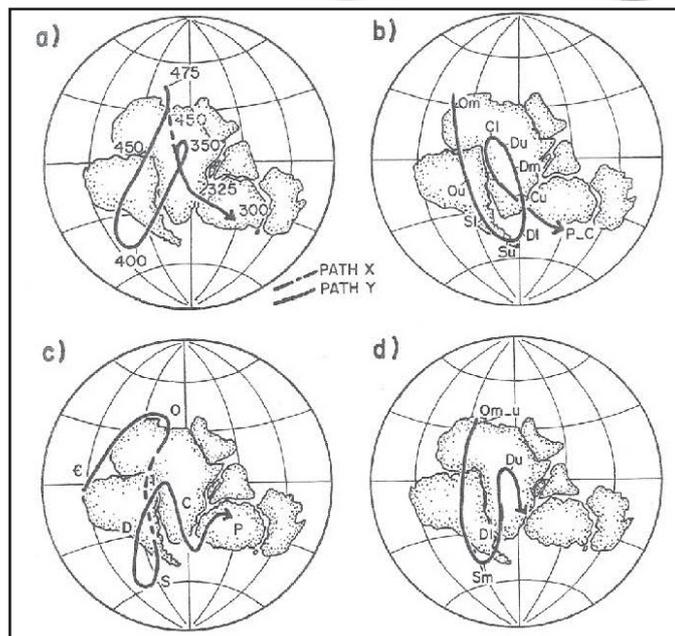


図 3.10. Gondwana大陸における古生代のさまざまな見かけの極移動経路(南極点)(Van der Voo, 1993の図 5. 15;ケンブリッジ大学出版の許可を得て転載). T= 第三紀, K= 白亜紀, J= ジュラ紀, Tr= 三疊紀, P= ペルム紀, C= 石炭紀, D= デボン紀, S= シルル紀, O= オルドビス紀, C+= カンブリア紀, l= 前期, m= 中期, u= 後期. (a) Morel & Irving (1978). 経路 X とさらに複雑な経路 Y. (b) Bachtadse & Briden (1990). (c) Schmidt et al. (1990). (d) Kent & Van der Voo (1990).

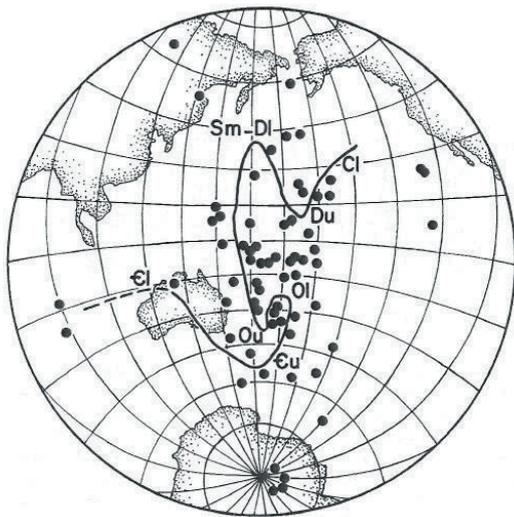


図 3.11. ギンドワナにおけるカンブリア紀～石炭紀の個々の極点(北極)：西アフリカ座標に回転投影。見かけ上の極移動の最適経路が重ねて表示される。

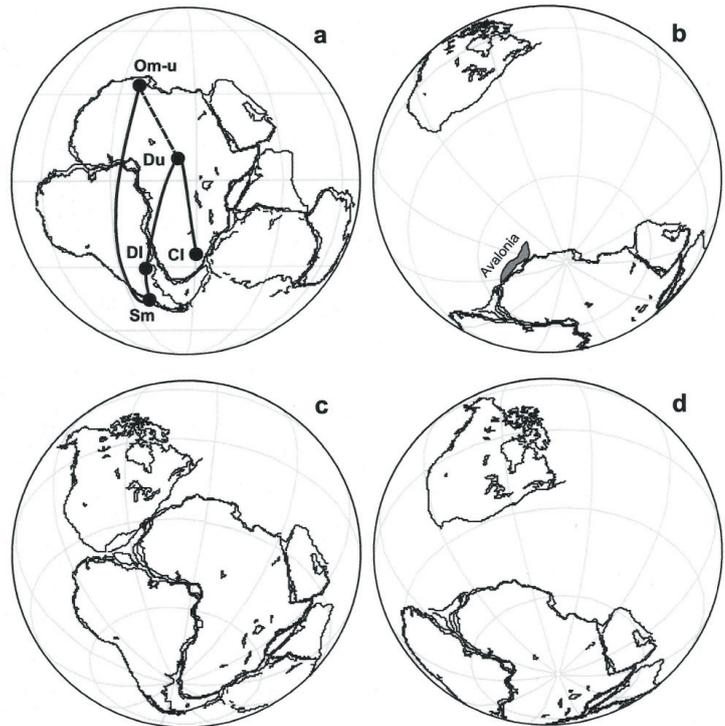


図 3.12. (a) ギンドワナにおける古生代の見かけ上の極移動経路は、シルル紀～前期デボン紀のループを含んでいる；APWPのシルル紀から前期デボン紀の位置の‘伝統的な’原文改竄が破線で示されている；古地磁気南極が、アフリカに固定された現在の地理的グリッドに記入されている。(b) ギンドワナと北米のオルドビス紀の古地理図。(c) 前期デボン紀の古地理図。(d) 後期デボン紀の古地理図。(Butler, 2004 の図 10・図 11)

われている。Baltica はカンブリア～デボン紀に反時計回りに $1^{\circ} \sim 2^{\circ}/100$ 万年 (5 億～4 億年で合計 160° まで) 回転した。デボン紀から、ギンドワナは大きく時計回りに回転 (3.6 億年前に最大になった [$4^{\circ}/100$ 万年以上]) するとともに、北方へ漂移した。

古地磁気データ (Li et al., 1990) によると、オーストラリアは前期オルドビス～中期シルル紀の間に急激に時計回りに 130° 、前～中期デボン紀には反時計回りに 30° 、そしてさらに後期デボン紀に反時計回りに 15° 回転した。この時代には、オーストラリアは低緯度の赤道地域に留まっており、そしてこれが中期石炭紀に南方へ急激に移動し続けた。Laing (1998) は、このシナリオは古地磁気データがあまり役立たず地質学的にありそうにもないことと結論づけた。

パンゲアは 2.5 億年前には 1.6 億 km^2 の地域、あるいは地球表面の 30% を占めていたといわれている。パンゲアは‘全陸地’を意味しているが、プレートテクトニクス論者はそれがすべての大陸地殻を含んでいると信じている。例えば、南北中国ブロックはその一部ではなく、パンゲア集合体の前期ペルム紀段階には新テチス海が開き、Lut・Helmand・Qiangtang (北部チベット) や Sibumasu のような Cimmerian テレーンが、北東ギンドワナ縁からはるか遠くに漂移した。

連結したギンドワナ大陸についての公表された APW 経路には、大きな違いがあり、著者のデータ選択 / 拒否基準に大きく左右され、その形態やループにみられる大き

な多様性の原因となっている (図 3.10)。

図 3.12 に示されている古地磁気に基づいた復元によると、ギンドワナ大陸はおそらく前期デボン紀に北米と衝突し、現在のニューヨークからニューファンドランドにかけて Acadian 造山運動を引き起こし、Avalon テレーンを北米 (そこは今はアパラチア山脈の一部) に移動させている。それからギンドワナ大陸は南方へ再び移動し、パンゲアの分裂の間に再び引き裂かれる前に、ついには石炭 / ペルム紀に北米と再びドッキングした。Scotese & Barrett (1990) はオルドビス末期～前期シルル紀のギンドワナの北方への急激な移動を認めているが、続くデボン紀の南方への移動については認めていない。

海陸分布 (Distribution of land and sea)

現在の海陸分布を特徴づける顕著な規則性と上記の仮想的超大陸の時代間の非常に不均衡な海陸配置を比較することは興味深い。第一に、大陸は南方に頂点をもつ三角形の形を持つ傾向がある。第二に、北極海はほぼ完全に南方の三つの大陸に囲まれている。それに対し、南極の大陸塊は北方の三つの海に囲まれている。第三に、海洋と大陸は正反対の位置に配列している—例えば、地球の一地域に大陸があると、地球の反対側の対応する地域に海洋がある傾向がある (Gregory, 1899; Bucher, 1933; Steers, 1950)。北極海は南極大陸の正反対の位置にある；そして北米はインド洋の正反対の位置に；ヨーロッパとアフリカは太平洋の中央部と対蹠の位置に；オーストラリアは北大西洋の小海盆の正反対の位置に；

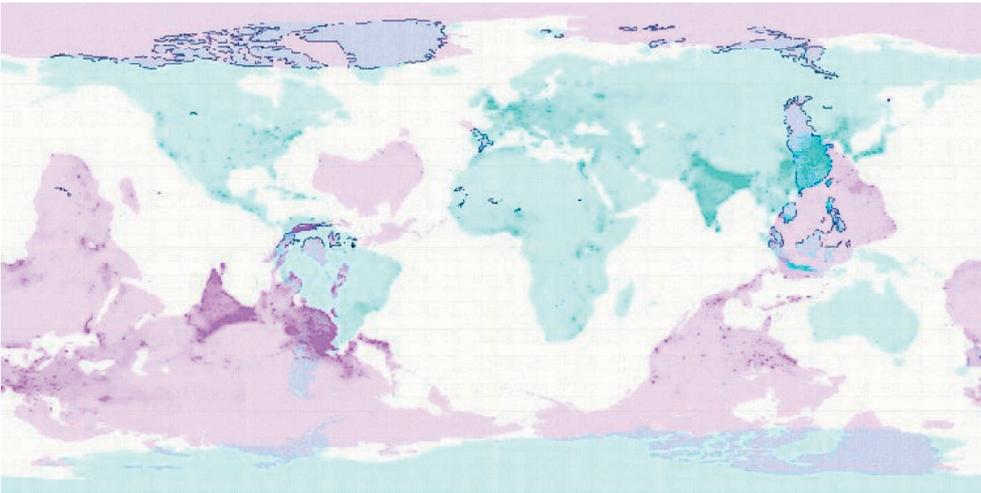


図 3.13. 対蹠的な海陸分布. 北半球における重複部の輪郭が描かれている. (<http://nwwhyte.livejournal.com>)

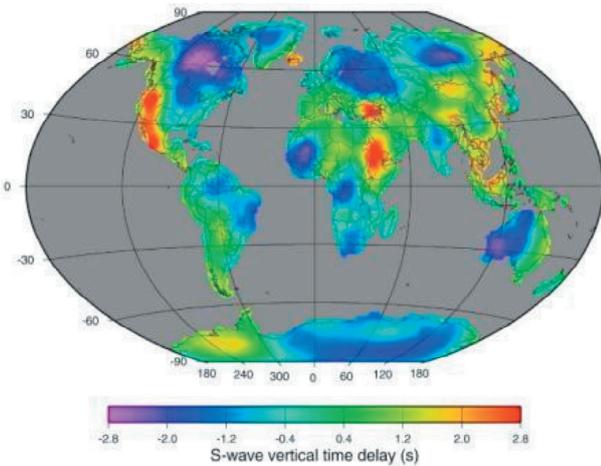


図 3.14. 深度 250km での鉛直方向の地震波移動時間の遅れの分布図. CUB2. 0 全地球トモグラフィーモデルから計算. 青色は速い地域 (古代のクラトン) に相当し, 赤色は遅い地域に相当する (Poupinet & Shapiro, 2009 の図 2).

そして南大西洋は一余り正確ではないが—アジアの東半部に対応する。地球表面のわずか 6% のみがこの規則性に従わないだけである。Harrison et al. (1968) はこの配列の確率を 14 分の 1 と計算した。

大陸と海洋の対蹠的配置は四面体一面が頂点の常に反対側にある正多面体を想起させる (Umbgrove, 1947 ; Bucher, 1933)。仮想的な四面体が南極点の南極に一つの頂点を持つ地球に設定すると, 他の三つの頂点は北半球の非常に古い始生代の岩体の三つの巨大なブロック: カナダ盾状地・フェノスカンジナビア盾状地とシベリア盾状地が横たわっていることになる。そして三つの境界は, 大陸の三つのペア: 南北アメリカ・ヨーロッパとアフリカを通る三つの子午線にほぼ相当する南極で途切れている。Umbgrove が指摘したように, 大陸と海洋の対蹠的で軸対象である '四面体' 的な配列は, 単なる偶然の一致として退けられない限り, 極移動と大陸漂移両方と相いれないものである。

Gregory (1899) は, 後期古生代には四面体が北極に一つの頂点を持っており, 現在と反対になっていたと推測した。連続的な南の海洋地帯が大陸の三つの頂点を分離し

ている代わりに, その時には三つの大きく離れた頂点によって支持された南の大陸地帯があった: すなわち南米・南アフリカとオーストラリアである。一方, Meyerhoff (1995, p.172) は, 海洋と大陸の対蹠的配置は, 地球の大陸が地球創成期の溶けた状態の時に現在の位置に到達し, おそらく地球の自転に対して表面物質を回転安定性に多少なりとも軸対称に分布するようにした反応と考えた。より多くのデータが蓄積し, 大雑把には大陸と海洋が対蹠的に分布することが, 現在の大陸が海中に没し, 大陸塊が現在の海洋の部分に存在していた地質学的過去に適応できるかどうかは興味あるところである。

古地磁気 対 地質 (Palaeomagnetism versus geology)

パンゲアにともなう問題 (Problems with Pangaea)

図 4.1 は, パンゲアの 4 つの違った復元を示している。パンゲア A (あるいは A-1) は Smith & Hallam (1970) によって拡大適用されたコンピュータでつくられた Bullard et al. (1965) のはめ絵 (水深 500 尋) である。ジュラ紀の大西洋の開裂は, その出発点として広く受け入れられており, ヨーロッパと北米の古極点とよく一致することで支持されている。しかしながら, 大陸がこの方法で集合していた時にローラシアと Gondwana が提供している石炭紀・ペルム紀と三畳紀の古極点の間で不一致がある (Kent & May, 1987)。不一致を最小限にするために, 代換案として Gondwana を北方の大陸に対して, パンゲア A-2 では約 20° (Van der Voo & French, 1974) からパンゲア B では 35° (Irving, 1977 ; Morel & Irving, 1981), さらにパンゲア C ではもっと大きく (Smith et al., 1981), 時計回りに回転させている。

パンゲア A-2 のはめ絵では, 南米の北西がメキシコ湾にきつく合わされている。メキシコの北部がなくなり, その隣の大陸ブロックとなっている (Yucatán, Cuba など)。A タイプモデルの経度方向の制約では, パンゲアの復元は西 Gondwana とローラシア間の地殻の重複は 1,000km 以上にもなるだろう (Domeier et al., 2012)。

パンゲア B のはめ絵は、古地磁気による復元では経度方向の特異性がないということは有利であり、北米東部に隣接して南米北西部が位置する。ほとんどの大陸の(前期)ペルム紀の極点がパンゲア B のはめ絵と一致しているが、ヨーロッパのものはまったく一致していない (Tauxe, 2013, 16.5)。Morel & Irving は、パンゲア B が石炭紀末期～前期ペルム紀の間存在しており、後期ペルム紀から三畳紀の間に Gondwana はパンゲア A の配置に対して反時計回りに回転したと提案した。これは Gondwana とローラシアの間に 3,500km 以上の右ズレの巨大な剪断を必要とするが、そのような証拠はない (Domeier et al., 2012)。

パンゲア C では、Gondwana はパンゲア B の位置に比べてさらに東方に動かされた。そして大陸間の重なりを除くと古地磁気データと一致させるように Gondwana を北方に動かしている。パンゲア C はパンゲア B と同じ問題を抱えている、しかし Gondwana とローラシアの間のより大きなオフセットを悪化させている。パンゲア C が

ペルム紀あるいは三畳紀にパンゲア A に変わったとすると、6,000km 以上の大きな剪断が必要になるだろう (Domeier et al., 2012)。パンゲア B と C の復元は、ローラシアの影響がある間、Gondwana を一時的に動かすことによって古地磁気データと完全に一致させることができる。

前述したプレートテクトニクスのシナリオは、後期三畳紀にパンゲア A の配置に進化する初期の石炭紀とペルム紀のパンゲア A-2 の配置である。Domeier et al. (2012) はローラシアと Gondwana からの後期古生代～前期中生代の古地磁気データが、それを引き起こす代換手段の復元あるいは非双極子磁場なしに、Euler 変数を精緻化した最新の古地磁気データによって A タイプのパンゲアとより戻すことができることを示し、そして理論的な伏角減少補正 (inclination shallowing corrections) を適用している。

すべての他のパンゲアの復元は役に立たない課題である：それらは現在の海洋下の地殻が数十億年以上古く、他にも多くの明白な欠陥を含んでいることを示すたくさんある証拠を無視している。例えば、Bullard et al. (1965) のはめ絵では、古生代と先カンブリア紀の大陸性岩石の広大な分布地域がそこに存在するという事実があるにもかかわらず、中米の全体とメキシコ南部が除かれている。およそ 2,100,000km² のこの地域は、少なくとも 20 億年前のクラトン地域で、南米と重複している。西インド諸島全体がまた除かれている。要するに、多くのカリブ海地域の下には古い大陸地殻が存在し、全地域は 300,000km² を含み、アフリカと重なり合っている；重なり合いは東西方向に 1,500km にも広がっている。カーボベルテ諸島—セネガル海盆にもまた、古い大陸性地殻が下であり、800,000km² のさらなる重なりをつくっている (Meyerhoff & Meyerhoff, 1974a ; Meyerhoff & Hatten, 1974)。中米とカリブ海との重なりは、A-2 復元ではなおさらダメである。いくつかの Bullard 後のモデルは、メキシコ湾—メキシコ南西部に平行している位置の大陸ブロックマヤ (ユカタン半島) とチオルティ (ホ

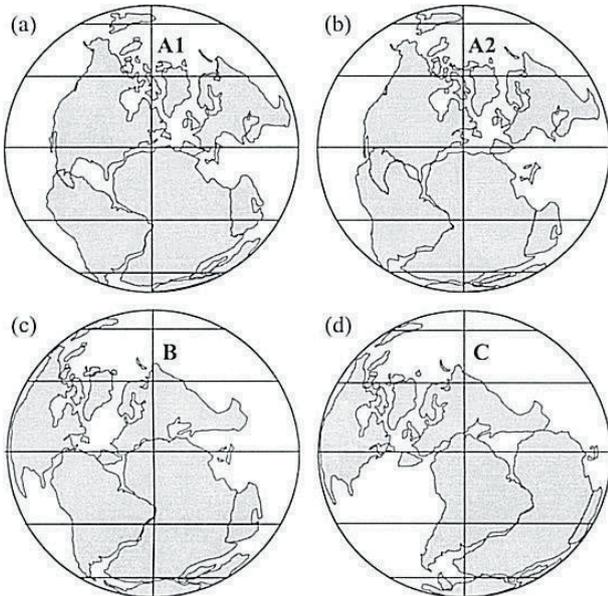


図 4.1. パンゲアについての 4 つの復元図 (McElhinny & McFadden, 2000 の図 7.10)

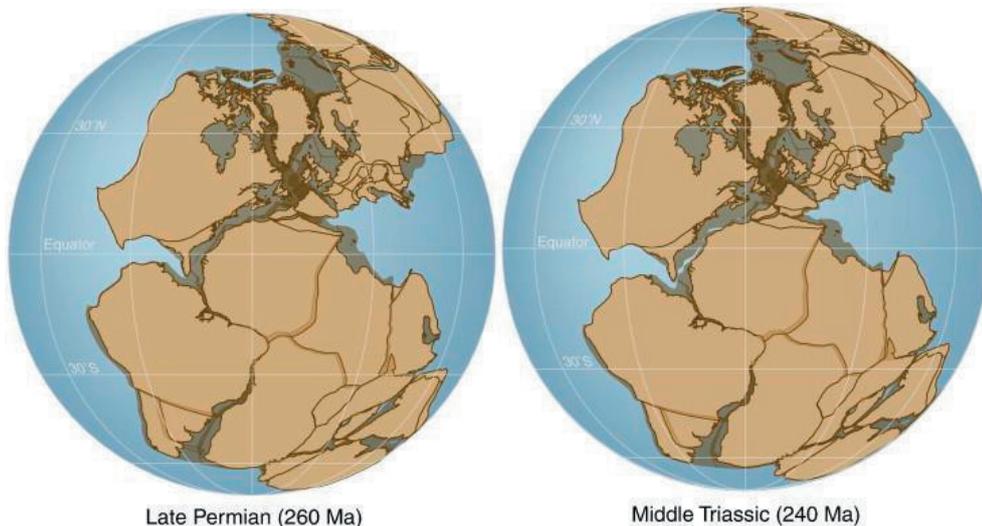


図 4.2. 古地理の復元図。Domeier et al. (2012) の図 23。

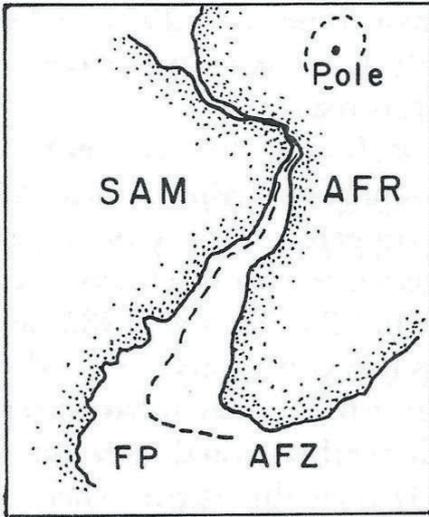


図 4.3. アフリカ (AFR) と南米 (SAM) の間の不一致 (実線は現在の形). Van der Voo は、先白亜紀のアフリカの外形が破線で示されているように、この不一致は「アフリカ内に仮定されているプレート境界によって修正されるべきである」と述べている. FP=フォークランド台地, AFZ=Aguilhas 断

裂帯. Euler 回転軸が示されている. (Van der Voo, 1993 の図 6.7: ケンブリッジ大学出版の許可を得て転載)

ンジュラスーニカラグア—ジャマイカ) を判別することによって中米で独創的に復元された. そこでは、現在の位置からそれぞれ 135° と 180° 回転している. しかし、地質的データはこれと矛盾している (James, 2012).

すべてのパンゲアの復元は、フェロー諸島—アイスランド—グリーンランド海嶺・ヤンマイエン海嶺・Vøring 台地・Walvis 海嶺・リオグランデ海嶺及びフォークランド台地を含む大陸起源のように見える大西洋のいくつかの大海底構造を無視している. しかし、Rockall 台地は「くり込まれる」唯一の理由に含まれている. ゴンドワナ大陸の Smith & Hallam (1970) 復元では、南オークニー諸島と南ジョージア諸島がインド洋の Kerguelen のように除かれており、オーストラリアの西に大きなギャップがある. 他のはめ絵のように、オーストラリアにインドを合わせることは、西インド洋に相当するギャップをそのままにしておくことである (Hallam, 1976). 図 4.3 に示すように、南米とアフリカのさらなるよく知られた絵合わせは質が悪く、アフリカの海岸線の特別な問題だけの調整を必要とする.

地質的関連 (Geological connections)

大西洋の開裂はユーラシアとアメリカプレートが割れることによってジュラ紀に始まったと言われている. しかし、地球の反対側で、北東アジアはベーリング—Chukotsk 大陸棚によって北米と結合した. そこにはアラスカからシベリアに連続する先カンブリア紀の大陸地殻が下に横たわっている. 地質的にこれらの地域は単一のユニットを構成しており、それらがかつては数 1,000km もの大西洋の開裂を相殺して閉じた海に隔てられていた、との想定は非現実的である. 縫合線がそこにあれば、それはユーラシアあるいは北米に見つかるはずであるが、そのような縫合は存在しないようである (Shapiro, 1990). ベーリング—Chukotsk 大陸棚とロモノソフ海嶺間の地質的な連続性は、原生代以来の北極海における

海洋底拡大あるいは大陸移動を不可能にしている. シベリアが後期古生代に現在のウラル山脈の線に沿ってヨーロッパに衝突したというアイデアは、シベリアと東ヨーロッパ (ロシア) 卓状地が始生代から前期原生代を通じて単一の大陸を形成したことを示す多くの証拠から否定されている. 東ヨーロッパの Timan 領域の構造と岩石ユニットは、ウラル山脈の下で繋がり、東側で再び現れており、そして西シベリア卓状地を覆う中生界の下に横たわっている (Meyerhoff & Meyerhoff, 1974a).

バフィン湾とラブラドル海がグリーンランドと北米の分裂で形成されたのであれば、グリーンランドとエルズミア島の間のネアーズ海峡を横切って数 100km の横方向オフセットが生じているはずであるが、地質の野外調査ではそのようなオフセットを明らかにされていない (Grant, 1980, 1992). グリーンランドは 1000 尋の等深線ではたった 50 ~ 75km, ヨーロッパからスピッツベルゲンの西に分離しただけであり、大陸性のフェロー諸島—アイスランド—グリーンランド海嶺によってヨーロッパと繋がっている. 要するに、北大西洋の北緯 60° と 82° の間の海水に覆われた地域の 60% 以上は、大陸地殻が下に横たわっているようである (Meyerhoff, 1974; Meyerhoff & Meyerhoff, 1974a). すべてのこれらの事実は北半球において東西方向の漂移の可能性を排除している.

プレートモデルは、地中海の長軸に沿って走る縫合帯を必要としているが、ヨーロッパとアフリカの間に層序的な連続性がある. 少なくとも古生代末期以降、一方はジブラルタルと Rif 帯及び他方ではカラブリアとシシリー帯を横切るヨーロッパとアフリカの間に直接的で構造的な繋がりがあがる. この時代を通じてヨーロッパとアフリカの間の数 km の横ズレがあるというプレートテクトニクスの主張とは矛盾している (Kent, 1969; King, 1971; Trümpy, 1971; Belousov, 1990). 古地磁気データに基づく、プレートテクトニクス論者はビスケー湾が 40° 程度反時計回りに回転したイベリア半島によって形成されたと主張してきたが、これは地質的にも地球物理的にも矛盾している (Kent, 1969; Jones & Ewing, 1969; Bacon & Gray, 1971; Maxwell, 1970).

プレートテクトニクス論者は、中東地域で幅広くいろいろな見解を維持してきた. 一部は一つあるいはそれ以上のプレートの存在を以前から支持し、一部はいくつかのマイクロプレート (Reilinger et al., 2006 によると 19 個) を自明のこととして仮定し、もう一つは島弧の解釈を支持し、そして多くは大陸—大陸間の衝突の位置を記す少なくとも一つの縫合帯 (と沈み込み帯) の存在に賛成している. Kashfi (1992, p.119, 128) は次のようにコメントしている: それらの仮説のほぼすべては、互いに排他的である. 野外のデータが高く評価されるなら、ほとんどは存在しえないだろう. 中東の遺跡からアラビア—アフリカの過去に起きた分離を支持する地質学的記録は何もない

イラン高原・南西イランやアラビアは、次の事実を示されるように、原生代に始まって以来、単一の地質帯であった。すなわち、(1) 後期原生代から第三紀までイランと全中東を横断しインドからイエメンおよびヨルダンにかけて層序的な対比と連続性、(2) 中東からアジアにかけての生層序対比、(3) より広域なペルシャ湾地域を横断する構造的単一性、(4) 西インド・パキスタン・イラン・ペルシャ湾とアラビアに沿う先カンブリアーカンブリア紀の岩塩の連続性、(5) 主張されている沈み込み帯から離れた大地震活動の存在、(6) 中東におけるオフィオライトと火山岩のランダムな分布、がそれらの事実である。

中東(イラン・イラクとアラビアを含む)に厚い蒸発岩や炭酸塩岩が広がり、横方向に連続するという事実は、数1,000kmの構造的な移動を必要とする縫合帯が古生代あるいは中生代にこの地域を通ることは絶対になかったことを示す(Meyerhoff et al., 1996b)。地質的・地球物理的データは、アフリカ-アラビabloックと南西アジアの間の地殻の水平的(接線方向)圧縮を単純に指摘しているに過ぎない。

東南アジア (Southeast Asia)

プレートテクトニクス論者と古地磁気論者は、大陸を切り刻み、個別の断片としてあちこちに移動させることを溺愛している。このことは中国にも当てはまる。北部と南部中国のブロック(微小大陸)はおそらくかつては遠く離れていた;ひとつの見方として、それらの東端が後期二畳紀にまでには衝突したが、その後、両者は相互に67°回転した(Zhao & Coe, 1987)。それとは対照的に、Meyerhoff ほか(1991)は、詳細な層序と古地理の

研究にもとづいて、一体性(cohesion)が、中国だけでなく、巨大なアジアの広い地域を30億年もの地質学的時間を通して特徴であった、と結論した。アジアがかつては離散して、後に衝突したマイクロプレートないしは微小大陸の寄せ集めであるという考えは、多くの詳細な野外のデータから完全に否定される。野外研究にもとづくと、多くの'縫合線'は衝突帯ではなく、塩基性~超塩基性岩が引張性のリフト型造構場で形成された断裂系に沿って地表へ上昇してきた地帯なのである(Meyerhoff, 1995)。

氏の東南アジアのサージテクトニクス研究にもとづいて、Meyerhoff(1995)は、先カンブリア時代後期以降の東南アジアにおけるサージ流を示す図を提出した。この図によると、地球自転のために全般的な流動方向は東向きになっているが、この地域の西部ではサージチャンネルは、北(アンガラ)と南(Gondwana)の卓上地の間に存在するさまざまな地塊の間を縫うように通り抜けていくが、チャンネルの東半分ではチャンネルが北東と南東へ向かって扇状に広がる(図4.4および4.5参照)。西太平洋海盆における古期剛塊域とベニオフ帯は、おそらくマントルに根をもつサージチャンネルに対する障壁としてふるまっているようにみえる。

全体像は、左から右(西から東)へ移動する液体が幅の狭い隙間から、より大きな容器の中へひろがっていくときに形成されるパターンに類似している。チャンネルの位置とチャンネル網は時間とともに多少は移動するものの、それらはわずかである。局所的な小規模チャンネルは行ったり来たりするが、全体的パターンは変化しない。Meyerhoff (1995, p. 159) はこう述べている:

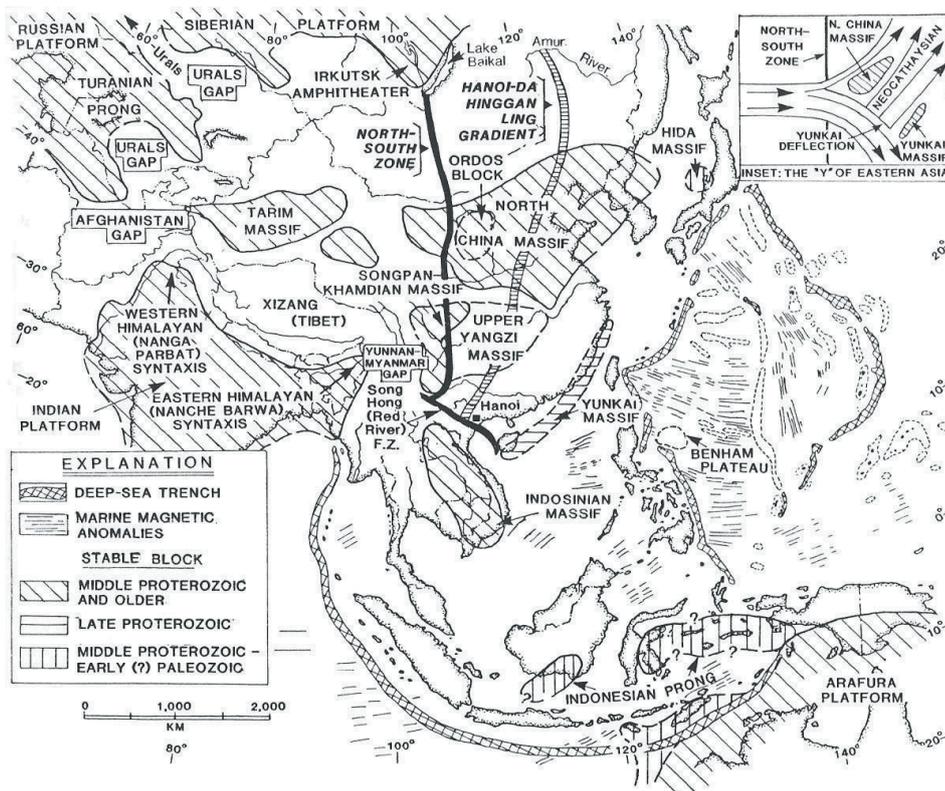


図 4.4. 東南アジアの卓状地、地塊、主な不連続部 (principal gaps)、北-南帯、ハノイ-大興安嶺 gradient、および海底磁気異常を示した図。挿入図はアジアにおけるサージテクトニクス概念の基本的 'Y' 字構造を示している (Meyerhoff et al., 1996a の図 5.2.; Springer Science+Business Media BV の許可を得て転載)。

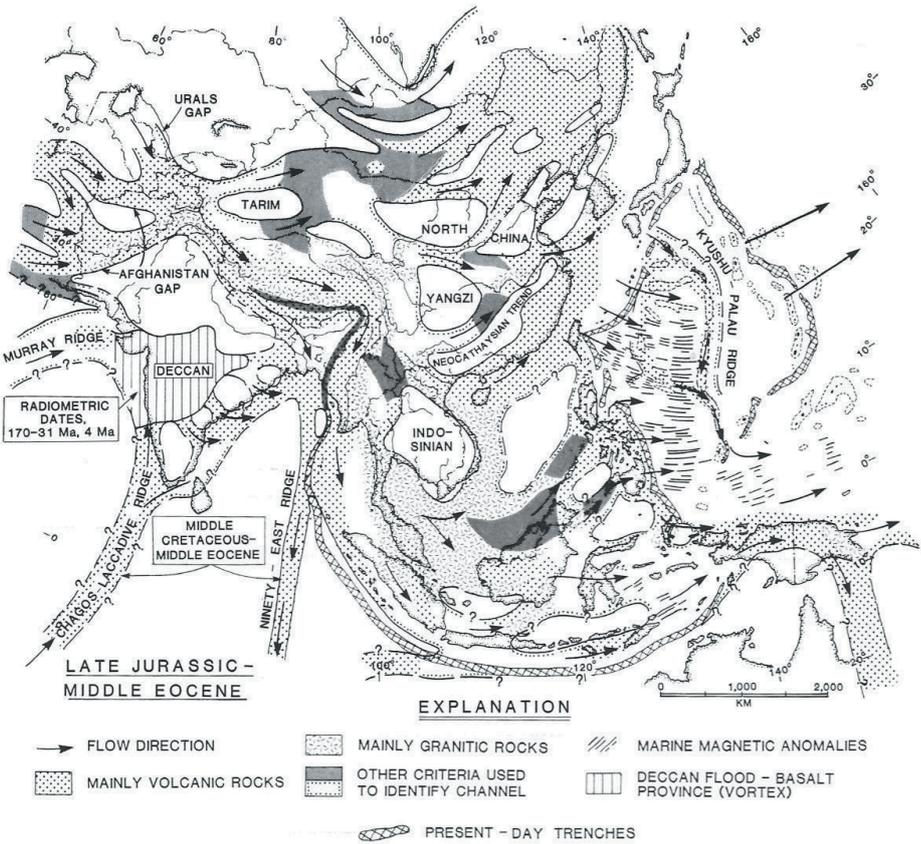


図 4.5. 東南アジアにおける後期ジュラ紀～中期始新世の古造構 (サージチャンネル) 図 (Meyerhoff et al., 1996a の 図 5.17.; Springer Science+Business Media BV の許可を得て転載).

「サージチャンネルと安定ブロック (地塊と卓状地) の網状 (anastomosing) パターンは... それら自身が語っている。大陸あるいは微小大陸などと夢想されたパターンは存在せず, “衝突” は, このパターンが基本的には流動模様であることの単純性を説明するにすぎない」。少なくとも中生代後期以来, 東南アジアの主要な流動パターンの安定性は, その地域の地質発達を説明するプレートテクトニクスモデルとは矛盾し, 大規模な極移動にも疑問を投げかける。

インドとテーチス (India and Tethys)

インドは少なくとも中生代以降, アジアを構成する不可欠な部分として存在し続けてきたという, 圧倒的な地質学的・古生物学的証拠がある (Chatterjee and Hotton, 1986; Ahmad, 1990; Saxena et al., 1985; Saxena & Gupta, 1990; Meyerhoff et al., 1991)。しかし古地磁気データや海底地磁気異常に基づいて, プレートテクトニクスは, インドは中生代のある時期に南極から分離し, 北東方へ 18cm/yr の速度で 7,500km も漂よい, 始新世 (55 Ma) についてアジアに衝突し, ヒマラヤ山脈とチベット高原を押し上げた, と主張している。アジアの凹部が挿入されたインドとほぼ同じ形状と規模をもち, ぴったりの位置にあることは, たしかに特筆すべき一致である (Mantura, 1972)。衝突モデルは一般的に, チベット高原の隆起は前期始新世以降に始まったと想定するが, 古生物学的, 古気候学的, 古資源学的, および堆積学的データからは, 主要な隆起は前期鮮新世 (5 Ma) に始まり, 約 2 Ma までは現在の隆起速度 (5 mm/yr) に

達していないことが確実に示されている。

なぜ想定された衝突帯の両側の地層があまり乱されていなく緩傾斜のまま残っているのか, 衝突モデルでは説明できない。そうではなく, ヒマラヤ山脈は, 数 100 km 離れたチベット高原北部のクンルン (崑崙) 山脈とともに隆起してきた結果であろう。ヒマラヤ山脈のさまざまな場所の河岸段丘はほぼ完全なまでに水平であり, 傾動していない。このことはヒマラヤ山脈が, 水平圧縮よりもむしろ, 鉛直方向に隆起したことを示唆している (Ahmad, 1990)。衝突帯はオフィオライトで特徴づけられると考えられているが, これらは '縫合帯' の中では連続せず, Yarlung Zangbo 谷に沿って不規則に露出している。オフィオライト帯は, 実際は, Xizang (チベット) のかなり北方の二つの地帯に並走していて, これらの事実は, 一般に言われているプレートテクトニクスモデルとは矛盾している。フィールドのデータは, 中国中央部とインド亜大陸間の地殻短縮が最大でも 300 ~ 700km を超えないことを示している (Saxena et al., 1985)。

図 4.6. に示されたアジア横断リニアメントは, 先カンブリア期に端を発しているように見え, そのいくつかはインド洋に延びている。これは, インドが長距離にわたって移動したとするプレートテクトニクスモデルに反している (Raiverman, 1992)。

もしインドの長距離移動が実際に起こったとしたら, 数百万年間もの期間—白亜紀や前期第三紀という, 他とは全く異なる固有の動物群に進化するには十分な時間—に

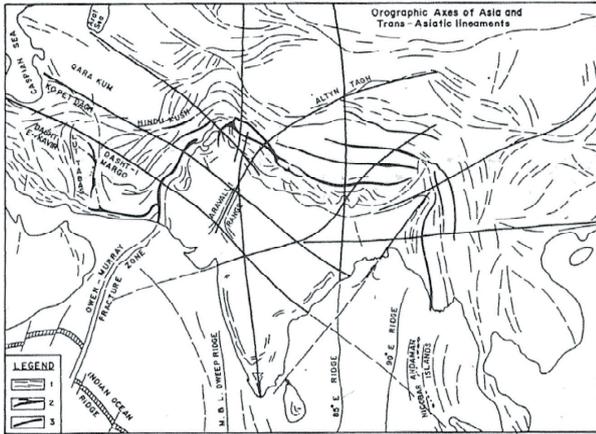


図 4.6. アジア横断リニアメント. 凡例: 1. 造山帯の軸, 2. オフィオライト, 3. リニアメント. (Raiverman, 1992 の図 2)

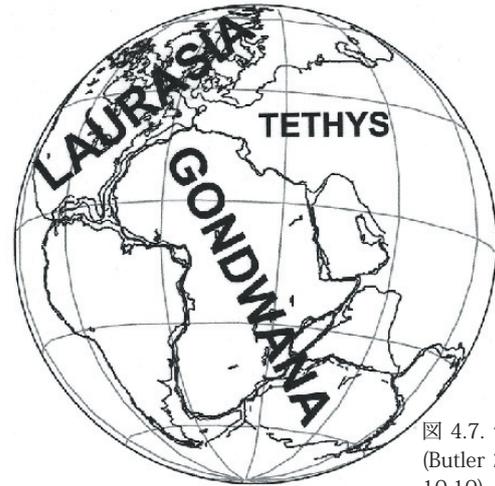


図 4.7. テチス海. (Butler 2004 の図 10.10)

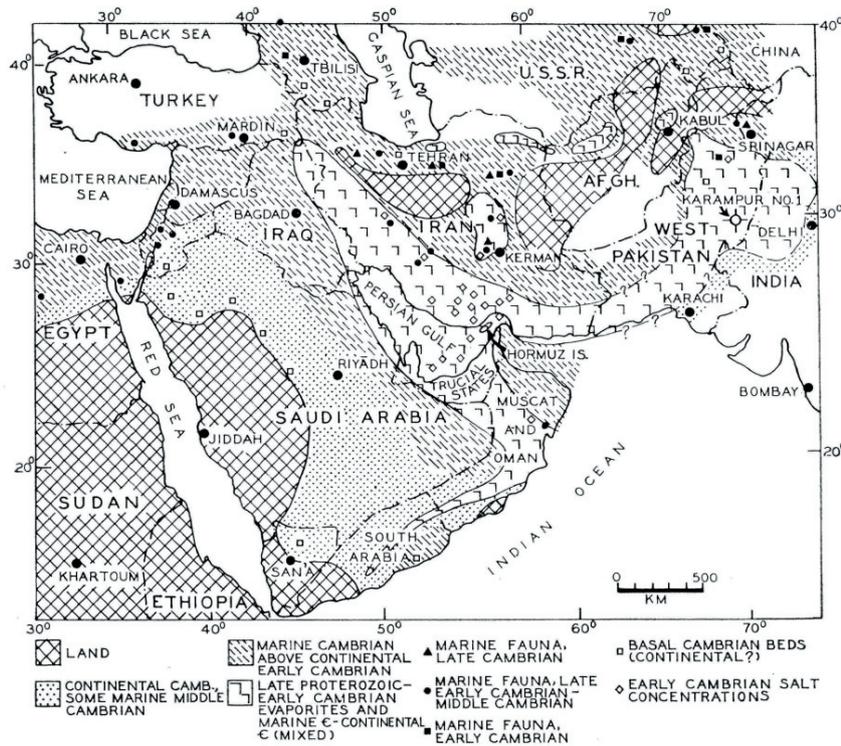


図 4.8. テチス, 西インド, 東地中海におけるカンブリア紀の生物古地理. (Meyerhoff & Meyerhoff, 1974a の図 21, Wolfart, 1967; Urban-Verlag から許可を得て転載).

わたって、孤立した大陸島であったはずだ。しかし、中生代や第三紀動物群は、そのような固有種がないことを示しているだけでなく、インドがこの期間を通して、オーストラリアや南極大陸ではなく、アジアに近接していたことを示している (Chatterjee & Hotton, 1986 ; Meyerhoff et al., 1996b)。インドのは虫類と両生類の 60% は北半球にのみ知られる種属に一致し、残り種属は両半球に知られている。

Meyerhoff & Meyerhoff (1978) は、プレートテクトニクスが「南アジア全域にわたって連続する先カンブリア紀～新生代の地質層序や生層序, ならびに、 Gondwana とテチス, さらにはソビエトやチベットの一部にさえみられる生物相と地層の指交状態 (intertonguing) について納得のいく説明ができない限り, 南極大陸やオーストラリアからの "インドの長大な北方逃避 (flight)" は空想以外の何物でもないように思われる」と記している。

プレートテクトニクスによれば、三角形のテチス海が、南方のアラビア、インド、オーストラリアから、北方のユーラシア中～東部を隔てていた。この考えは、Bullard et al. (1965) が大西洋をはさんだ大陸を一致させようとした際に (最小面積を基準に用いた), ユーラシアを北アメリカに対して反時計回りに、南アメリカに対しては時計回りに回転させなければならなかったことに起因する。得られた古生物学的データにもとづいて、Dietz & Holden(1970) は、テチス海の南岸沿いに、北東アフリカ、アラビア半島、インド、マダガスカル、南極およびオーストラリアだけを配置した。それに比べて、Drewry et al. (1974) はトルコや、中東のイラクやイランも Gondwana 大陸に含めた。というのは、これらの地域である Gondwana 生物相の隔離分布が報告されていたからである。多くの異なった筋書きが提案され、さまざまな大きさの大陸塊がはるか北方へ移動し、中国～西ヨーロッパにいたるユーラシアに衝突・付加した、と主張した。

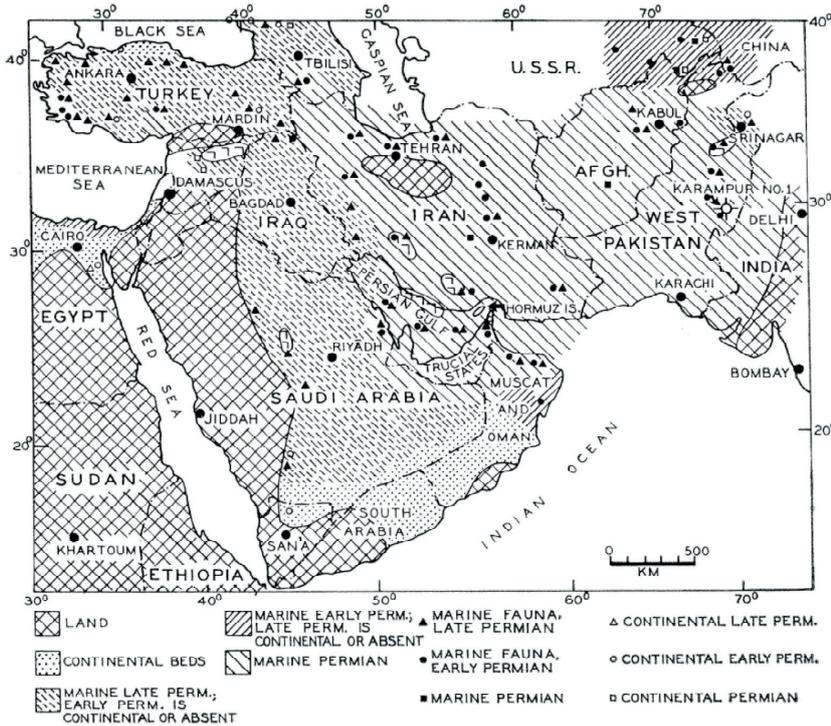


図 4.9. 西インド、東地中海におけるテチスの二疊紀古地理図。(Meyerhoff & Meyerhoff, 1974a の 図 22, Wolfart, 1967; Urban-Verlagから許可を得て転載).

Meyerhoff et al. (1996b) は、ローラシア地域の 30 ~ 50% はさまざまな年代の Gondwana 生物相を含み、Gondwana 大陸の 50 ~ 80% はさまざまな年代のローラシア生物相を含んでいること、カンブリア紀~前期白亜紀のすべての年代で、生物の広域的遷移帯が Gondwana 大陸とローラシア間に存在していることを示した。ここでは、これら両地域の生物相は指交しており、多くの場合、同じ地層中に混在している。このことは広域的テチス海という概念を支持しない。現在のアルプス-ヒマラヤ造山帯にあたるテチス海は決して深くて広い海洋でもなく、むしろ、幅が狭く、大部分は浅い大陸内水路であったことを示す膨大な事実がある (Bhat, 1987; Dickens, 1987, 1994c; McKenzie, 1987; Stöcklin, 1989; Brinkmann, 1972; Trümpy, 1971)。すべての生層序学的事実は、すべての地層が浅海で形成されたことを明示する (Meyerhoff, 1991)。

Meyerhoff & Meyerhoff (1974a) は、次のように記した：

「岩石の記録は、テチス海が原生代 (おそらくは始生代) からずっと、ジブラルタル海峡西部の大西洋からニューギニア-オーストラリアにいたる地質単元を構成し続けてきたことを示している。北アフリカの岩石は地中海ヨーロッパに連続し、アラビアの東方でせん滅する。アラビアとイランの岩石の連続性 (sequence) はインド亜大陸に達し、中央・東アジア-南北ヒマラヤ帯 (低ヒマラヤ) までたどることができる。.....

もし温度が動物群の分布を決定するものであるならば ... テチス海は東-西方向にのびた地帯の典型例であるはずで、その緯度は原生代の前期ないし中期以降に大きくは変化していない。」

外来テレーン (Exotic terranes)

もうひとつの疑わしい、古地磁気主義に染まった概念は '異地性構造層序テレーン' であり、'外来テレーン' や '疑わしいテレーン' として知られている (Frisch & Meschede, 2011)。断層で境されたテレーンの大きさは、100km² に満たない小地塊から数 1,000km² の微小大陸片までさまざまである。それらが地質学的に付近の地殻ブロックとは別のものであることは明らかだが、古地磁気データにもとづいて、多くのものが現在の位置からかなり離れた場所に由来したと信じられている。それらはおそらく、別のテレーンやより大きい大陸地塊に衝突して接合・付加され、あるプレートから別のプレートにうけわたされるまで、移動プレートに乗せられて、時として数 1,000km もの距離を、海洋底を横切って運ばれてきた。付加後、それらはたぶん大陸の縁に沿って、数 100 ~ 数 1,000km も横すべりするようなことも想定される。海台-それはたいてい半大陸地塊からなるが-今もって地球表層を移動していて、大きすぎるために、沈み込み帯で消え去ることはないだろうと考えられている。島弧もまた、付加テレーンになる可能性をもつ。

ほとんどの造山帯-アパラチア、アルプス、およびヒマラヤ山脈を含む-の大部分は異地性テレーンで構成されている、という。アパラチア造山運動は '困惑するほどの数と種類の外付けテレーン' からなりたっているとされる (Williams & Hatcher, 1982)。北米コルディレラの 70% 以上が '疑わしいテレーン' の寄せ集めと考えられ、それらのほとんどは太平洋の遙か彼方から移動してきたと信じられている。テレーンの数は多くの場合 50 以上と見積もられているが (Coney et al., 1980)、それらの数と移動距離については意見が分かれている (Carlson et

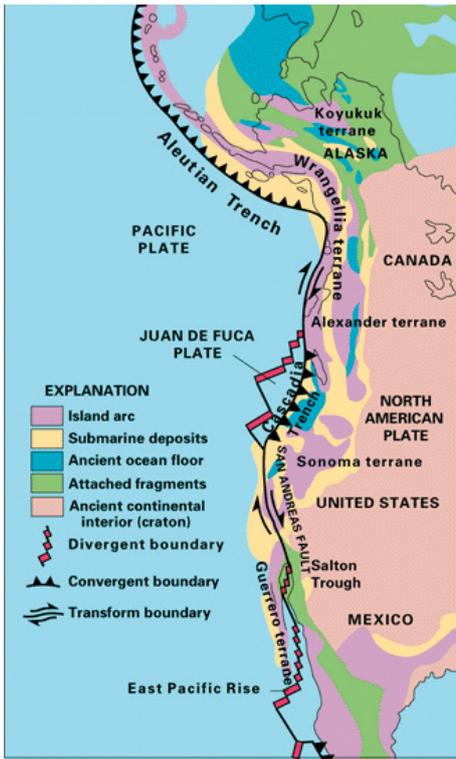


図 4.10. 北米卓状地の西縁へ付加したとされるテレーンを示した図。(http://pubs.usgs.gov)

al., 2008 ; Colpron et al., 2007). 環太平洋テレーンマップには、太平洋岸に 300 以上のテレーンが示されている (Howell et al., 1983).

プレートテクトニクス論者の中には、古地磁気にも不都合な結果 (すなわち、大陸に対する見かけの極移動 [APW path: Apparent polar wander] が一致しないという問題) を長距離水平移動で説明する代わりに、鉛直方向でのブロック回転、傾動運動、褶曲作用、そして / あるいは、伏角の減少を提案した (例えば Butler et al., 1989 ; Butler et al., 1991 ; Butler et al., 2002 ; Calderwood, 1991 ; Irving & Archibald, 1990 ; Hodych & Bijaksana, 1993). 多くの場合、野外データはテレーンの長距離移動に矛盾している (例えば Laubscher, 1975 ; Donovan & Meyerhoff, 1982 ; Parnell, 1982 ; McDowell et al., 1984 ; Saul, 1986 ; Seiders, 1988 ; Hansen, 1988 ; Newton, 1988).

幾人かの地質家による入念な研究によると、シエラネバダからコルディレラ西部のロッキー山脈中央・南部の構造層序帯は本来現地性で、おそらくスラスト運動を除くと、長距離移動はないという。研究者の中には、1 世紀以上も前にヨーロッパアルプスで提唱された岩相帯やナップの概念に戻りつつある者もいる (Meyerhoff et al., 1996a). Sengör (1990) は、この古いヨーロッパの概念と、現存する異地性テレーンの概念が放棄された理由をまとめた。Dickinson (2003) が指摘したように、'古緯度の信頼できる記録として、変形した岩石の古地磁気記録への過度の依存は、架空の考えにお墨付きを与えるもので、不必要な拘束だろう'。テレーンの運動の評価は、多面的な方策をとることによってのみ、信頼できるものになる。

ウエゲナーと大陸移動 (Wegener and continental drift)

アルフレッド ウェゲナーは大陸移動説の時代を先取りした予言者で、保守的で教条的な地質家によって邪魔され、プレートテクトニクスは彼の多くの洞察力によって確たるものになったという、今日広く知れ渡った神話がある。例えば、Hal Hellman (1998, p. 158) は、次のように美しく塗り固めている。「彼 [Wegener] が 1930 年に死去した際、彼の学説は科学的にどっちつかずの状態におかれたままであった。しかしながら、彼の遺産は、彼が思っていたよりも、より大きく、壮大で、より包括的で、威厳あるものとして生きている。」このような見方は、実際とはかけ離れている。ウェゲナーの学説に反対の意見の多くは完全に根拠のあるもので、そのいくつかは、プレートテクトニクスにも適用することができる。

Charles Schuchert (1928, p. 111) は「ウェゲナーは、地球の固定した地殻について途方もない特権を得たために、アメリカ大陸を北南に 1,500 マイルも引き伸ばすという柔軟なものにした」と述べた。Philip Lake (1922, p. 344) は、もし大陸塊が移動することに加えて、「我々がそれらを思いどおりの形にするようなことを許したなら、それはもうかつての真実から離れた想像力の産物になってしまう」と述べている。

大西洋兩岸の地質学的類似性について、J.W. Gregory (1929) は次のように記している。「最も顕著な類似性がニューファンドランドとイギリス諸島南部の間や、アンチルス島列と地中海の間、さらに南アフリカと南米などの兩岸にみられる。これらの類似性は、同程度に離れているユーラシアの山脈列に沿って見られるものほどは大きくはない。ニューファンドランドとアイルランド間、南アフリカと南米間の細かい相違点、.....そしてベネズエラとアトラス間の類似点は、それらの国々が同じ一般的地理変化を受けてきたにもかかわらず、遠く離れていなくてはならないことを強く示している。その類似性は、その地域が同様の造構帯におかれてきた地域であることに起因する。そして、その相違点はその地域が造構帯の異なる場所に位置していたことを示すに十分である」(p. 116).

Gregory は次のようにも記した。

「アパラチアおよび Armorican 山地は、実際に接近することなく、これまでずっと連続する山地帯に属してきたが、同じように、ピレネーやコーカサスは、常に全ヨーロッパの幅ほど離れていたが、一つの山地系の一部と見なされてきた。事実、西ヨーロッパのアパラチア類似山地との違いは、おそらくある程度離れた場所で形成されたことを示唆している。」

問題は、大西洋の対岸にある類似の構造が、中間地帯の 2 マイルの沈降によって引き離されてきたか、あるいはアメリカの 2,000 ないし 3,000 マイルもの水平移動によ

るものかどうかである (1925, p. 256).

Lake (1922) は、注目すべき事実としてアパラチア褶曲帯と Armorican 褶曲帯が 1 つの大円上に位置し、それらはかつて連続的な褶曲系として形成されたが、それらの元々の位置に現在も存在することを示す、と考えている。

Schuchert (1928) も、大西洋岸の大陸の地質学的類似性は、もし移動説が正しいとしても、期待されるよりもはるかに少ないと述べた。ブラジルと西アフリカは、例えば、少なくともシルル紀以降は、無関係にかなり離れて存在していた。ウェゲナーは、北西ヨーロッパのカレドニア帯の地殻構造方向が北ニューファンドランドのそれに連続するという点では正しかったが、それらを直接に接続させたことは誤りであった。ニューファンドランドは決してアイルランドの一部ではなく、それぞれの大陸はかなり異なった性格の地質区に属している。

Longwell (1944) は、ウェゲナーが主張する大陸移動の '説得力のある' 証拠として、南方大陸のグロッソプテリス植物相 (シダ絶滅種) の広い分布域は「人気のある学説を支持するために、事実を取捨選択するという非科学的な行為もどきであり、危険に思える」と反論した。Lake (1922), Gregory (1925, 1929), Berry (1928), Simpson (1943) および他の研究者は、大陸移動は動植物相分布の説明の解答になるわけではなく、より多くの問題を生みだしていることを示した。さらに、古生物学的な事実、大西洋を横断する陸橋 (land connection) がしばしば造られては壊されてきたことを示している。したがって、アメリカは西方へどんどん移動するのではなく、アコーディオンのように行き来したはずである。

Schuchert (1928) は、もし大陸移動説が正しいとしたら、多くの海生化石動物は、5% どころか、50~75% の同一種をもつであろう。大西洋が閉じると、シベリアとアラスカの間、600 マイルもの隙間ができる。Schuchert はウェゲナーの学説に対し、化石の事実から、ベーリング海域がカンブリア紀前期以降、ずっと浅海ないしは陸橋であったため、太平洋岸ではアジア側とアメリカ側の間で、さらには大西洋までも移動が可能なるという決定的な結果を記した。地質年代の動植物群の放散を説明するために、Schuchert は、風や海流、渡り鳥によるもの、陸棚海域に沿う拡散も含めて、さまざまな時期のさまざまな陸橋の存在 (例えば、ベーリング海峡、ブラジルと北米間、南米と南極間、南極とオーストラリア間、オーストラリアとボルネオ・スマトラ間など) を仮定した。

ウェゲナーの支持者のひとり、Alexander du Toit (1937) は、南米とアフリカの海岸線は 400~800km 以内に近づいたことはない主張することによって、大陸移動は対岸との層相や動物相にかなりの類似性が必要であろうとの議論に応酬した。このことはある困難を回避できるが、層序学的類似性にもとづく大陸移動の場合は、幾人かの移動論者たちが我々を信じさせようと望んでいるほ

どの説得力はない (Longwell, 1944).

ウェゲナーは大陸の西方移動だけでなく、石炭紀以降に 60°, そして、後期鮮新世以降でも 15° におよぶ大規模な極移動を想定した。大陸移動と極移動によって古気候を説明しようとする Köppen & Wegener (1924) の試みは、厳しく批判された (例えば, Berry, 1927, 1928; Brooks, 1949). Brooks (1949) は、彼らの学説の欠点を入念に調べ、彼らが自らの主張に反する事実を捨て去る傾向があることを記した。彼は「移動仮説は、それに適合しない事実は、適合しないがゆえに誤りであると主張できるほどの実証された段階に到達していないことは確かである」(p. 234) と述べている。

ウェゲナーが提案したように、もし現在のすべての大陸がパンゲア超大陸として相互に接合していたとするならば、石炭紀~二畳紀前期に氷河作用を被った地域の多くは互いに連続して並んでいたであろう。ある科学者は、これを大陸移動の説得力のある証拠と考えていた。しかし、Coleman (1925, 1932) が指摘したように、寒冷であることだけでは氷床はできず、暖海からの湿潤な風が必要である。復元されたパンゲアには、いくつかの氷河域はかなり内陸深くに存在していて、湿気をたっぷりふくんだ風の到達範囲の外に位置していただろう。これは、シベリアが北極海のすぐそばにありながらも、更新世に氷河が大きく広がることがなかった理由である。

Lake (1922, p. 338) は、ウェゲナーは「真実を探し求めたのではない。彼はひとつの原因を擁護するあまり、それに反するすべての事実や反対意見に盲目であったのである」と述べた。Berry (1928) は、移動仮説に対する主な反論は、ウェゲナーの手法が「科学的でなく、最初の思いつきを大切に取る手法をとり、調和的証拠を求めて文献を選択的に研究したため、その考えに反する事実のほとんどを無視するようになり、主観的な考えを客観的事実とみなす自己陶醉に終わった」という。

真の極漂移 (True polar wander)

極運動 (Polar motion)

地軸の位置は、地殻に関して完全に固定しているわけではなく、わずかに変動している。この極運動はふたつの要素からなりたっている。その 1 つは、チャンドラー変動 (Chandler wobble) として知られていて、約 435 日間の周期と約 0.1~0.2 弧度秒の振幅をもつ自由振動である。もう 1 つは年周期の強制振動で、ほぼ一定の振幅 (約 0.1 弧度秒) をもつ。この振動は、主に海洋や大気的作用による (www.iers.org; Gross, 2000)。極は外側や周囲に螺旋形を描き、約 6.5 年間の平均的位置からずれていて、その周辺を移動し、そこへ戻ってくる。この期間、実際の地軸と平均的位置との最大の隔離は平均すると約 0.25 弧度秒である (www.britannica.com)。1990 年以来、平均極は、全体的には 79°W 方向に、約 107mm/年の

速度で不規則に移動している (Besse et al., 2011 ; <http://hpiers.obspm.fr>). 数百万年もの間、極が同一方向へ移動し続けてきたという証拠はない。

極運動は、地球の自転軸が、最大慣性モーメントをもつ地軸 (あるいは形状軸), すなわち、惑星内部の質量分布によって決定される地球回転楕円体の対称軸に自らを一致させようとする傾向をもつことを示している。一般に、自転軸あるいは地形極は、地球内部や地球上の質量の再分配に応じて移動し、それには気候システム、大気・水塊の季節変動、地殻の鉛直・水平運動、さらにマントル・核内部の運動と密度変化が影響する (Dickman, 2000)。プレートテクトニクスの用語でいうと、これにはプレート運動やマントル対流、マントルプレューム、プレートのもぐり込みが影響している。

幾人かの研究者は、回転軸の長期的定常移動の3/4は、最終氷期末の融氷河作用に由来すると信じている (Cambiotti, 2012 ; Peltier & Wu, 1983)。Gordon (1995)によると、過去 1,000 ~ 2,000 万年間における極移動はチベット高原と他の山脈の隆起に関連するという。

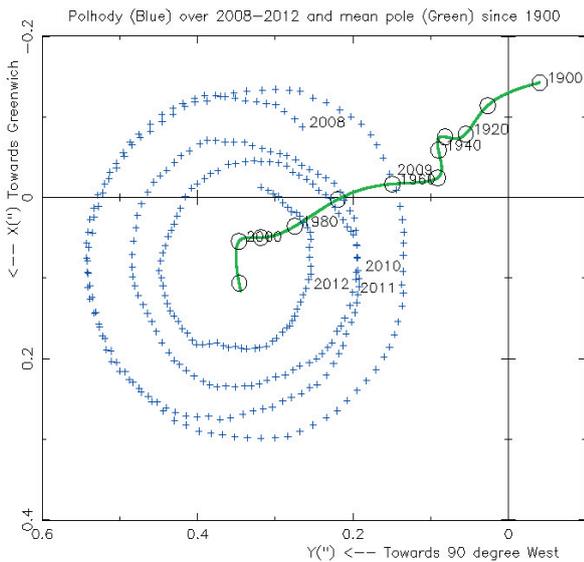


図 5.1. 青：2008-2012 年における地理極の軌跡。緑：1900 年以来的の中間極の位置。 (<http://hpiers.obspm.fr>)

真の極移動のさまざま (Variants of true polar wander)

これらの極の周期的運動と長期にわたる移動は、真の極移動 (TPW) の例で、それは常に、自転軸に対して地球 (地殻、マントル、核) が移動することを意味すると解釈されている。その結果、地軸の傾きはかわらなものの、地球表面における地理極と赤道の位置が変化する。真の極移動 (TPW) には他のいくつかの異なるタイプが考えられ、そのなかには地球全体が移動するのではなく、次の部分が移動すると想定される：①地殻、②マントル、③リソスフェア (地殻+上部マントル)、④リソスフェアとサブリソスフェアマントルのすべてないしは一部¹。

1 何人かの著者は、少なくとも、変化しやすい①と②については '真の極移動' ではなく、'見かけの極移動' とよぶだろう (Northrop & Meyerhoff, 1963 参照)。'見かけの極移動' は、もちろん、個々のリソスフェアプレートが自転軸のまわりを移動するという、プレートテクトニクスの筋書きにもあてはまる。

表層侵食がきっかけとなって起きる、モホ面あるいはその上面での地殻全体の急速な滑動は、Gussow (1963) によって提案された。Hargraves & Duncan (1973) は、リソスフェアと核の間、すなわちサブリソスフェアマントルだけの運動を提案し、'マントル回転 mantle roll' と呼んだ。Damian Kreichgauer (1902) および Charles Hapgood (1958, 1970) は、動くのはリソスフェア全体だと提案し、この考えは、幾人かの通俗的な天変地異論者たちの間で流行っている (例えば、Hancock, 1995)。彼らはそれを '地殻変位 crust displacement' と呼んだ。Hapgood は、過去 10 万年間に 3 回の地殻変位が発生し、最新の変位では 1.7 ~ 1.2 万年前に、北極が現在の位置に向かって 30° (3,300km) 移動したと信じている。このような 3 回の真の極移動 (TPW) の様式は、いずれも全く不可能だろう。

プレートテクトニクス論者たちの一般的な見方では、真の極移動 (TPW) には、自転軸を基準に、惑星全体の方向が相対的に変化することが含まれている。しかしながら、幾人かは、地殻とマントルが外核の上を滑動する

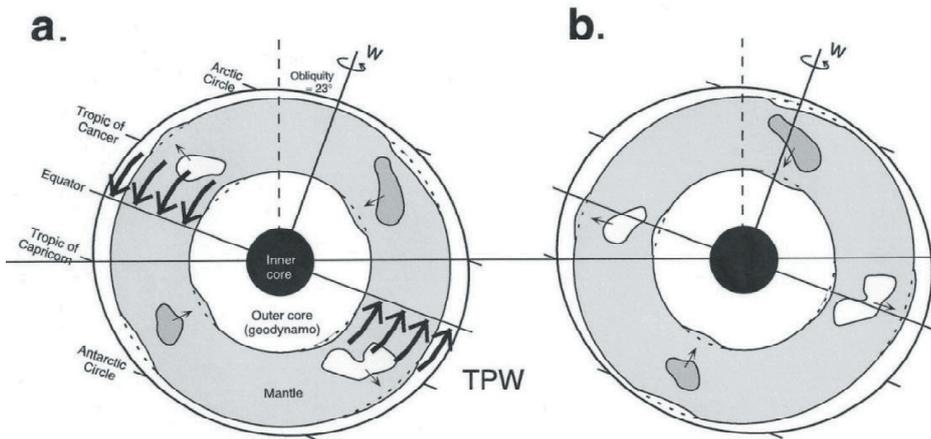


図 5.2. 真の極移動 (TPW) のプレートテクトニクス挿絵 (Evans, 2003 ; Raub et al., 2007)。地球の慣性モーメントの変化は、マントルの質量再配分と表層荷重によって引き起こされる。(a) マントル対流は密度異常の上昇と沈降 (それぞれ、淡灰色と暗灰色) を含む。粘性のため、これらの鉛直運動は、マントルの上部と下部の境界や、内部不連続面を乱す。動的な惑星は、赤道方向へ正の慣性異常 (湧昇) や、真の極移動 (TPW) を通った極方向へ負の慣性異常 (沈み込み) へ変化することによって、安定に回転し、運動量を保存する。(Evans, 2003 の図 1)

と提案している (例えば, Andrews, 1985; Kirschvink et al., 1997; Evans, 2003; Raub et al., 2007; Piper, 2006). Pavlenkova (2012) もこれを提案していて, 彼女は, それ以前には 400km あるいは 600km のマントル不連続面に沿って滑動が生じたであろうと提案していた. 相対的に固定されたホットスポットにかんする古地磁気データとプレートテクトニクス説によれば, Gordon (1987, 1995) と Kent & May (1987) は, 真の極移動 (TPW) が過去 2 億年間に 20° を超えないと考えている. Besse & Courtillot (2002, 2003) は, 過去 2 億年間で 30° の, Steinberger & Torsvik (2008) は過去 3.2 億年間で 56° の真の極移動 (TPW) を見いだしたが, 真の極移動 (TPW) は実質はゼロに等しい.

歴史的背景と理論的議論 (Historical background and theoretical debate)

18 世紀に, フランスの博物学者, Comte Georges-Louis de Buffon と Georges Cuvier は, 極地域の著しい温暖化や赤道付近の凍結のような, 現在とはまったく異なる過去の気候を極移動で説明できそうだと考えた. この見方は, 19 世紀の地質研究者 Henry James (1860) や天文研究者 John Evans (1866), John Lubbock (1848) および Giovanni Schiaparelli (1889) のによって受け継がれた. 極移動は, 極へ向かって移動する領域では圧縮を, 赤道へ向かって移動する領域では引張をひきおこし, その結果, 離水あるいは沈水が起こるだろうと考えられた.

真の極移動が起きる可能性については, 長期にわたって議論されてきた. George Airy (1860) は, もし地球が完全な剛球であるなら, 赤道域の膨らみをつくる質量の 1/1,000 の質量の山地が形成されたところで, わずか 2-3 マイルの極移動しか起こさないだろうと述べた. James Croll (1886) は, 地球の表層全体の 1/10 が 10,000 フィートの高さまで上昇したとしても, 極は 3°17' しか移動せず, また, もしヨーロッパ大陸ほどの大きさの大陸が 10 倍上昇しても, 2 マイルしか移動しないだろう, と述べた. このことは, ロンドンをせいぜいエディンバラの緯度まで, あるいは, その逆の移動しかもたらさないことを意味する.

George Darwin (1877, 1878) は, もし地球が多少とも塑性的であれば, 極は自在に移動するだろうが, 剛体であればそうはいかない, と考えた. 彼は, 極はどの地質時代でも 3° まで移動しうるが, 地球の固化以降, おそらく '曲がりくねった路' を最大 10° ~ 15° ほど移動し, その結果, 元の位置の近くまで戻っている可能性がある, とした. ダーウィンの見解にしたがって, William Thomson (Lord Kelvin) は地球が実際に剛体であることを示した. Thomson (1876) は, 地球の剛体外殻が内部の液体を封じ込めているとの考え方を否定し, 極の突然の大規模移動は不可能であると考えた. 彼は, 'いかなる地質時代でも, 陸や海がかなり突然に変動することなく', かつての地理上の極は, 40° あるいはそれ以上にわ

たって徐々に, 現在の位置にまで移動したと信じていた.

Chandler は 1891 年に約 428 日周期の極のゆらぎを発見し, 地球は完全な剛体でないことを示した. この地軸の自由振動の存在は, Isaac Newton の Principia Mathematica (1687, bk. 1, prop. 66, cor. 20-22) および, Leonhard Euler の 1765 年の著作によって予測されていた. Euler は, 剛体でできた回転楕円体では, もし自転軸が形状軸に完全に一致していなくても, 自転軸は形状軸のまわりを回転するだろう, と指摘した. そして, 地球の扁平率にもとづいて, の周期が 305 日間であると予測した. Newcomb は 1892 年に, 予測された周期と実際の周期との不一致は, 地球が完全剛体でないことに起因することを示した. この相違は, 地球が鋼鉄と同様の弾性をもつが, 塑性はもっていないことを意味する.

20 世紀の初めに, Germans のグループは 次のような '極振動' 学説を提案した. 極はおそらく 10°E の子午線に沿って往復振動し, 振動軸はエクアドルとスマトラを通過し, その緯度が変化することはなかった (Reibisch, 1901; Simroth, 1907). 他方, Kreichgauer (1902) は, 先カンブリア紀に北極が, 南極から太平洋を通過してアラスカとグリーンランドを横断して, 現在の位置へ移動したと主張した. しかし Jacobitti (1912) は, 北極はカンブリア紀には南大西洋にあり, その後, 南アフリカやインド, オーストラリア, 太平洋, カナダ, そしてグリーンランドを横切り, 現在の位置に到達したと考えた. 1912 年, Alfred Wegener は大陸漂移だけでなく, 北極が古生代以降, ハワイ付近から現在の位置まで移動したことを古気候を根拠に提案した (Wegener, 1912, 1929; Köppen & Wegener, 1924).

Barrell (1914) は, いろいろな極移動学説に矛盾するさまざまな古気候・古生物データを引用したが, 「そのような反論は常にあることであり, 十分な才ある支持者によって克服されるのが常である」と記した. 幾人かの支持者は, いくつかの地域における地殻伸長 (赤道方向への移動が主張された) と他の地域における圧縮を引用して, さまざまな時代の極移動を実証しようとした (極方向への移動を主張した) が, Barrell は納得するまでには多くの障害があると述べた.

Gold (1955) は, 地球が塑性変形しうる場合には, 地質時代を通じて大規模な極移動が生じ得る, と仮定した. すなわち, もし地球が扁平楕円体ではなく, 完全球体であったら, 「その上を這い回る小さなカプトムシが随意に, 自転軸に対してとても大きな角度変化をもたらすだろう. その場合にも, 宇宙空間での自転軸は, わずかな角度しか変化しないだろう」, と. Gold は チャンドラー振動の減衰から, もし南米サイズの大陸が 100 万年間に 3m 上昇したら, 地球の方位に, 同時代の自転軸を対して '大きな角度変化' がもたらされるだろう, と推測した. 彼は, 地球史に比べて, 'それほど長くないだろう 10⁵ 年 ~ 10⁶ 年オーダーの時間' のうちに '気候の劇的変化' をひ

きおこしたであろう 90° に達する移動が自転軸に何回か発生したと信じた。Jeffreys (1976) は、もしこの仮説が却下されたなら、'極移動についてのすべての解釈がだめになってしまう' (p. 481) ということをつけ加え、チャンドラー振動の減衰の原因を弾粘性に求めるのははかかなり難しいと述べた。

Gold は、地球が限定的な強度をもつという Kelvin-Voigt (強粘性 firmoviscous) モデルよりも、地球が限定された強度をもたないという Maxwell (弾粘性 elastoviscus) 地球モデルを考えた。Maxwell 地球では、地球構成物質は任意の小さな応力差のもとでの流れによって降伏し、いかなる励起力によっても (Gold のカプトムシによって引き起こされることを含む、小さな力によっても) 極移動が生じる。しかしながら、もし地球が限定的強度 (ゼロではない降伏応力) をもっていれば、その巨大な慣性モーメントが打ち勝ち、極移動は励起応力が閾値を超えた時にのみ起きることになる。

地球がある強度をもつ証拠として、深さ 700km に達する地震発生があげられる (Northrop & Meyerhoff, 1963)。さらに可能性のある根拠は赤道方向の膨らみで、それは地球自転の結果と信じられているが、静水圧的地球で起こる膨らみよりも約 200m 大きい。MacDonald (1963, 1965) および McKenzie (1966) は、この膨らみが地球がより速く自転していた約 10^7 年前に生じたことと述べた。この 10^7 年の地球の応答の遅れは、 10^{25} Pa s (pascal-seconds) オーダーの下部マンツルの粘性を意味し、後氷期隆起運動の研究から推定された上部マンツルの $10^{20} \sim 10^{21}$ Pa s の値と比較され、大規模極移動の可能性を排除するであろう。

Goldreich & Toomre (1969) は、地球の赤道方向の膨らみにみられる過剰な (非静水圧的) 成分は明らかに三軸的で、それゆえ、かつての高速の地球自転に起因するものではないという理由から、MacDonald の化石膨張論に幕を引いた。地球は準剛性的 (quasi-rigid) で、マンツルは極移動を妨げる十分な粘性や永続的強度をもたないと仮定して、マンツル対流による地球内部における適度な質量再配分が、4 億年間に 90° に達する大規模な、そして、高速になることがある極移動をもたらしただろうと、彼らは考えた。彼らは、地球は永続的強度をもたないことは決してないことを容認した。

Munk & MacDonald (1975) は、マンツルが大規模極移動が可能ほど非弾性的であれば、極は赤道上の膨らみの頂部に移動する可能性があるだけでなく、大陸上へも配置するように移動するであろう。大陸の現在の配置を考えれば、地理的北極はハワイの近くに位置するか、少なくともその方向へ移動しなくてはならないだろう。そうではない事実は、地球 (あるいは少なくとも外殻) が大陸-海洋系がもたらす応力に耐えられるような十分な有限の強度をもっていることを意味する。Munk & MacDonald は、問題の応力が、マンツル不均質性に

よって相殺されていると推定することによって、この結論を回避できると指摘した。地球には大陸による励起作用に対して極移動を妨げる 10 bars (1 MPa) の有限強度が必要であろう。マンツル不均質性に起因する励起作用は、大陸のそれよりもはるかに大おおきなものだろう。Munk & MacDonald は、地球は 100 bars の強度を確実にもつだろう、と述べている。さらに、大規模な重力異常は古生代の山脈にともなっているという事実は、大きな差応力がきわめて長期間にわたって存続し、上部 600 km では 150-300 bars の強度に相当することを示している。それゆえ、著しい極移動に起因する惑星表層~内部の物質配置の変化を妨げるのに十分な強度を地球はもっている、という。もし極移動が薄い外殻だけで起きている場合、Munk & MacDonald は、古気候と古生物データは、古地磁気データから推測された規模の極移動を支持する '積極的証拠になることはほとんどない' と述べた。彼らの全体的結論によると、極移動の問題は '未解決である' という。

弾粘性マンツルは、プレートテクトニクスの基本的主張になっている。単純な Maxwell (弾粘性的) 地球、マンツルの平均粘性は 3×10^{22} Pa s、マンツル対流セルの存在。および、赤道の膨らみの非静水圧成分がマンツル対流に起因すると仮定して、Tsai & Stevenson (2007) は真の極移動 (TPW) の最大値を 1 億年で 61° 、1,000 万年で 8° と見積もった。彼らは、TPW の最大速度は $2.4^\circ/\text{Myr}$ であると述べたが、この値は TPW イベントの中頃の比較的短期間に限って達成される。彼らは、TPW の見積もりにおいてもっと大きな不確実性はマンツルの粘性構造であると考え、下部マンツルが現在信じられているよりもはるかに大きな粘性をもつとみている。

対流とアイソスタシー (Convection and isostasy)

プレートテクトニクスでは、マンツル対流はプレート運動の大規模な駆動力と考えられたが、今日ではその妥当性がかなり疑わしくなり、'スラブの引き (slab-pull)'、'海嶺の押し (ridge-push)' や '海溝の引き込み (trench-suction)' が強調されている (Lowman, 1986 ; Keith, 1993)。すでに述べたようにマンツル対流は極移動の基本的要因と考えられているが、大規模な対流の存在はか

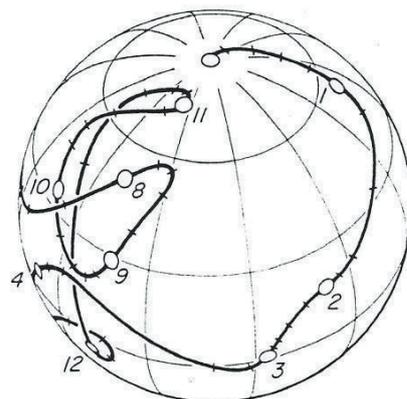


図 5.3. 極移動模擬曲線 (Goldreich and Toomre, 1969 の図 3)。子午線および緯度の大円は両者とも 30° 離れて描かれている。経路に沿う印は '時刻' $t = 0.2, 0.4, 0.6, \dots$ を意味する。

なり不確かである。プレートテクトニクス論者は、マンツルの深部対流が中央海嶺直下から湧き上がり、海溝（もぐり込み帯）で沈み込むと提案した。マンツル内における層構造の存在は全マンツル対流に疑問を投げかけ、二層対流モデルの発展に導いた。しかし、地震波トモグラフィは、上部および下部マンツルのいずれにおいても、プレートを動かす大規模な対流セルの明白な証拠を得ることができなかった (Anderson et al., 1992; Jordan et al., 1993)。上部マンツルにおける大規模水平対流が深度 400km に達するマンツルの根の存在と整合するのは困難であろう (O' Reilly et al., 2009)。さらに、Sandwell & Renkin (1988) は、幾何学的な対流セル形状はジオイドに何ら反映されていないことを見いだした。

Meyerhoff (1995, p. 165) は、つぎの問題を強調した：

ほとんどすべての論理的取り扱い方は... 実験室での Rayleigh-Bénard のセル状対流 (cellular convection) に全体的に類似した形態をとると記している... 仮定されたすべてのセルの鉛直壁は、緩く湾曲しているだけで、比較的直線的である。これまで提案されたどんなセル対流モデルも、いかに想像をひろげようとも、東南アジアにみられる現在および過去の島弧のうねった渦状のねじ曲がり方を説明することはできない。そうするためには、インド西方から Banda 弧を通過してフィリピン弧までの間のいくつかの地点で、それ自体に 180° の回転をもたすねじ曲がった壁をもつ対流セルを構成することが必要であろう。東南アジア地域の実際の地形は、提案されたすべての対流モデルを明瞭に否定している...

対流はおそらく不可能である。というのは、マンツルは、多くの地球物理学家が考えている弾粘性ではなく、Lomnitz の修正非弾性則にしたがっているようだからである (Jeffreys, 1974, 1976; Wesson, 1974a,b)。このことは、対流は自己抑制過程であることを意味する。もし対流が発生しても、流速はゼロに向かって減少していくだろう。修正 Lomnitz 則は、過去の重力異常や地球の赤道に沿う非静水圧の膨らみ、Chandler 振動の存在と減衰、月の軌道、自転、地球形状、自由秤動に関するデータによって支持されている。

Wesson (1974a,b) は、対流セルはおそらく存在しないだろうと述べた。その理由は、対流とジオイド、対流と熱流量、対流と火山活動度の間に何らの相関もないからである。地球化学や地震のデータにもとづいて提案されたマンツル内の化学的境界は、たとえ流れがマンツルの相変位境界を通過するとしても、対流とは矛盾する。上部マンツルが弾粘性則にしたがい、下部マンツルだけが修正 Lomnitz 則にしたがって挙動するとしても、対流は 700km 以浅で起こり、下部マンツルの著しい高粘性のため極移動は生じないだろう。

アイソスタシーは、地殻が重力的均衡状態を保ったまま、荷重の増加 (例えば、氷河など) や荷重の減少 (例えば、

侵食など) に対応して、それぞれ沈降および上昇する、という学説である。それは、地殻がマンツルの上に、あるいはリソスフェアがアセノスフェアの上に '浮かんでいる' という事実由来するとされる。Jeffreys (1976) は、アイソスタシーは事実に対する一次近似にすぎないと、次のように記している。

「それがもし一般的な事実としたら、すべての正の重力異常域は沈降し、負の重力異常域は隆起するはずだ。削剥されている山系ではどこでも、削剥に同期してアイソスタシー補償が進行するか、系統的なアイソスタシー的の重力異常がみられ、同期できずに負の重力異常が現れるだろう。最近になって荷重がかかった地域でも同様に、重力異常がみられないか、系統的な正の重力異常が出現するだろう。これらの結果は、あらゆる地点において、事実と矛盾する (p. 458-9)」

産学地帯では、しばしば、著しい残留荷重が見られる。それらは、ひどく脆弱な領域 (アセノスフェア) の大きな強度によってのみ支持される荷重である。

スカンジナビアとカナダの一部における後氷期の隆起は 'アイソスタシー回復' の古典的な事例として引用されており、マンツルの弾粘性値を決めるのに使われている。Jeffreys (1974, 1976) は、スカンジナビアとカナダの研究から見積もられた粘性は偽りだと言っている。その隆起はおそらく氷床の融解につづいて起きた粘性回復によるものであるが、フェノスカンジナビア内の隆起速度は重力異常とはほとんど相関しない。それどころか、フェノスカンジナビアは正の重力異常域内に位置しているため、沈降していかるべきである。James (1997) は、リソスフェアは大陸氷床によって押し下げられるのではなく、それを支える十分な強度をもつと述べている。

Jeffreys (1976, p. 459-60) が述べたように、フェノスカンジナビアやカナダより大きな重力異常がインドに存在しているが、そこには系統的鉛直運動はみられない。キプロスは強い正重力異常域にあるが、鮮新世以降隆起しつつづけている。他の地中海域、とくにシシリー (Sicily: シチリア島) には同様の異常が見られるが、ある場所は歴史時代に沈降し、他の場所は隆起し、場合によっては、これらの早期の運動が反転した場所もある。顕著な削剥が長く続いてきた地域とみなされているウェールズ山地とスコットランド高原には、系統的な正重力異常がみられる。大コーカサス山脈は過剰な荷重がかかっているが、沈降しないで、隆起している。いっぽう、北部の前縁沈降帯は荷重が取り除かれているが、隆起ではなく沈降している (Belousov, 1980, p. 260)。

地球は、 10^7 年間にわたって逆向きに大規模に変化してきたという事実があるにもかかわらず、常に完全なアイソスタシー状態に向かっていると、未だに広く考えられている。多くの古期山系は元々はアルプスと同様の高さであったが、高さ約 1km まで削剥された。もし、アイ

ソスタシーがこの過程で維持されていたなら、削剝作用は堆積物をすべて削り去り、花崗岩層まで深く削り込んだはずだ。このようなことは起きていないので、山地は下方へひっぱられてきたにちがいない (Jeffreys, 1976, p. 492). Jeffreys は、「常に完全なアイソスタシーに向かうという '粘性流仮説' は、明白な誤りだ」と結論づけた。大深度の岩石の強度はゼロではなく、粘性流は差応力が岩石強度を超えない限り、無視できる (p. 460-1). 変動場ではアイソスタシー則の顕著な破綻がおきるが、安定した古期楕状地や深海堆積盆地はアイソスタシー状態により近い。

上部マントルの粘性に関する最近の見積もりは、 $3 \times 10^{18} \sim 3 \times 10^{22}$ Pa s である (Sato, 1991; Vermeersen et al., 1997). フェノスカンジナビアにおける地殻変形に基づいて、Zhao et al. (2012) は、上部マントルの粘性が $3.4 \sim 5.0 \times 10^{20}$ Pa s, 下部マントルのそれが $7 \sim 13 \times 10^{21}$ Pa s であることを見いだした。それとは対照的に、MacDonald (1965) によると、衛星観測から得られた地球の形状比較は、地球が静水圧的の均衡にあると仮定して計算すると、マントル内部には 100 bars オーダーの差応力が存在することを示した。もしマントルが弾粘性的であるなら、平均粘性は 10^{25} Pa s 程度でなければならず、大きな重力異常をとともなうかつての地質地形の存在は、この数値さえも小さすぎることを意味している。

プレート運動さらに極漂移 (Plate motions plus polar wander)

プレート論者は、真の極移動は、スラブのもぐり込み、湧昇するプリュームやマントル対流に結びついた質量再配置によって引き起こされた、惑星の慣性モーメントの変化の結果であると信じている (Besse et al., 2011). 赤道の膨らみは地球がのたうちまわらないよう安定させようとしているが、自転軸は 2 ~ 6 Myr の期間で最大主慣性軸に適合しようとする (Greff-Leffitz & Besse, 2011). 過剰な膨らみはマントル対流のせいとされてきた (Cambiotti, 2012).

TPW (真の極移動) の多くの研究は、ホットスポット (長期にわたる活火山) が マントルに関する基準位置になる、という仮定に基づいている。ホットスポットはプリュームの表層での現れで、マントル深部に由来するとすると想定され、それらの上方を通過するプレート上に死火山のほぼ直線的連鎖の痕跡を残してきた。最初は約 20 のホットスポットが提案されたが、今日では、約 6 個の初源的なマントルプリュームと 5200 個ほどの中規模のプリュームがあると言われている。ホットスポットのほとんどが表層の構造要素であるという事実が蓄積されているので、深部由来のマントルプリュームの存在には、プレート論者の間でも異論がある。地震波トモグラフィは、ホットスポット直下の狭長な湧昇流の確実な証拠を見いだせないでいる (Anderson & Natland, 2005; Anderson, 2007). 太平洋のホットスポットは、イン

ド - 大西洋やアイスランドのホットスポットに連動していることが広く認められている。あるグループでは速度 3mm/yr, 別のグループでは 20 mm/yr ないしそれ以上の速度が、主張されている (Gordon, 1995). しかしながら、多くの研究者は、確実なホットスポットは有効な位置基準になる程度に充分固定されている、と未だに信じている。もし大規模なプレート運動が架空のものであったら、ホットスポット上を通過するプレートは無意味になり、ホットスポットの痕跡は他の原因、たとえば伝播性リフトを考えねばならない。

Steinberger & Torsvik (2008) は、古地磁気学的に導かれた過去 320 Myr 以上にわたる大陸移動と回転について研究し、北方への定常的移動と、時限的な時計回りと反時計回りの回転の両者を認め、それを彼らは真の極移動の証拠と解釈した。彼らは、約 250 ~ 220 Ma に、約 18° の反時計回り回転を見だし、195 ~ 145 Ma には時計回りに同程度、145 ~ 135 Ma には時計回りに約 10°, 110 ~ 100 Ma には反時計回りに同程度の回転を見いだした。ところが、この期間全体の実回転はほぼゼロであった。彼らはいくつかの大陸移動はこの図式に適合しないことに気づいたが、その原因を古地磁気データの不足に帰した。彼らは、定常的北方移動が真の極移動を表していることはない考えた。真の極移動の速度は 0.45-0.8°/Myr の規模であるが、両方の期間における時計回りと反時計回りの真の極移動の中心が 0°N - 11°E に位置していたために、後期石炭紀以降に累積された真の極漂移はゼロに近い (Torsvik et al., 2012). (注: 1° ~ 110 km)

図 5.4 は、Besse & Courtillot (2002) によって決定された、ホットスポットを基準にした経時的な真の極移動経路を示している。彼らは、より速い真の極移動の期間と (準) 停止期間が交互に起きることを見いだした。その移動経路は、160 ~ 130 Ma における停止、130 ~ 70 Ma の準環状軌跡 (30 km/Myr), 50 ~ 10 Ma における停止、その後、現在までのより速い移動 (100 km/Myr) を示している。一方 Prévot et al. (2000) は、'厳密に選定された古地磁気データベース' を使って、過去 200 Myr にわたって、現在から 80Ma とおおよそ 150 ~ 200 Ma のふたつの長期にわたる停止と、80 Ma ~ 約 150 Ma 間に起こった唯一の真の極移動 (マントルプリュームの過活動に起因) を見いだした (図 5.5 参照)。後者の期間は約 110 Ma に最高潮になり、極が突然 20° 移動し、その期間には 5°/Myr (0.5 m/yr) を超える速度に達したと思われる。いっぽう、Cambiotti et al. (2011) は、第三紀前期 (50-60 Ma) 以降、極はグリーンランドへ向かって 4° ~ 9° 移動した述べている。ただし、彼らは 10 ~ 50 Ma ないし 0 ~ 80 Ma に (準) 停止期間を設けてはいない。

0.5 m/yr の真の極漂移が白亜紀に起こったという、Prévot et al.'s (2000) の主張とは対照的に、中~新生代の長期間にわたる真の極漂移は約 1 ~ 5 cm/yr と見積もられ、それは 130°E と 310°E の子午線に沿って行った

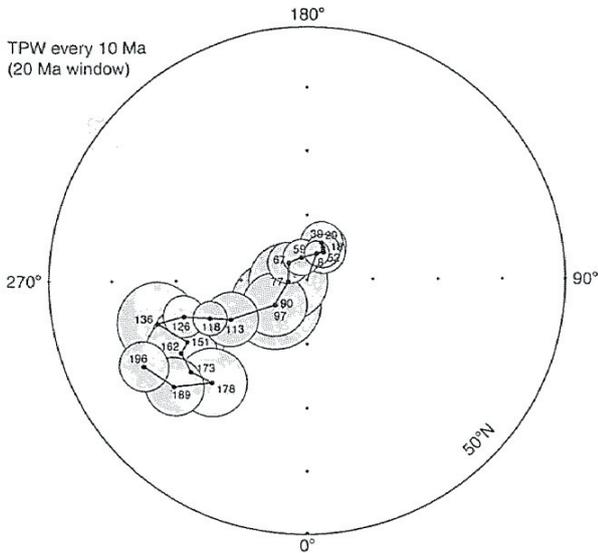


図 5.4. 過去 200 Myr のホットスポットを基本とした真の極移動. 95% 信頼できる楕円に結合. (Besse & Courtillot, 2002; Besse et al., 2011 の図 3, Springer Science+Business Media BV から許可を得て転載)

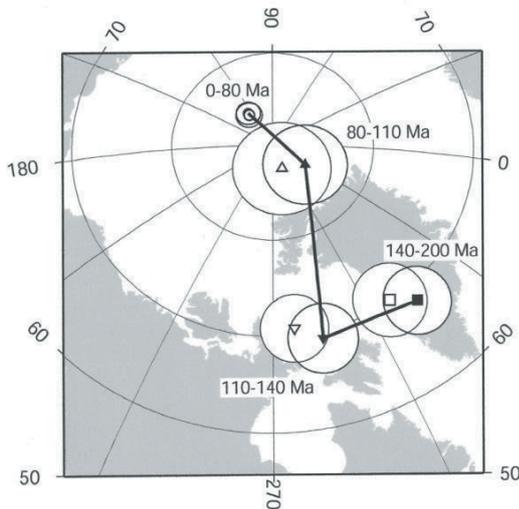


図 5.5. 時間平均された極位置, および 4 つの連続期間におけるインド - 大西洋ホットスポットの基準位置についての 95% 信頼度円. 純粋な双極子磁場モデルに関連した黒印および四極場モデルに双極場を加えた白印. (Prérot et al., 2000 の図 2)

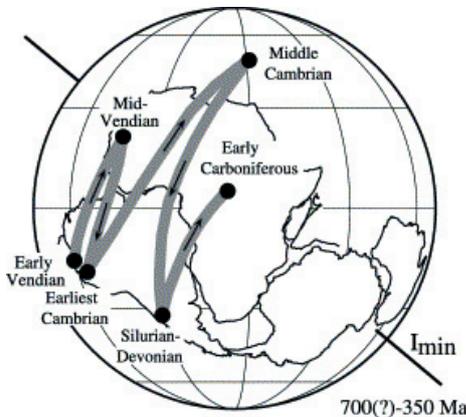


図 5.6. ゴンドワナ (Evans, 2003 の図 3) における原生代末期～古生代後期の見かけ上の極移動 (APW) 軌跡. Evans (2003) および Raub et al. (2007) は, 東オーストラリア付近の一般的に長期間の最小慣性軸 (Imin) を, 見かけ上の極移動 (APW) の振動的回転と解釈した.

り来たりしている (例えば, Besse & Courtillot, 1991). 真の極移動の急速な暴走は, 他の研究者によっても提案されている. Van der Voo (1994) は, 古生代中期のある時期に 70 ~ 110 km/Myr の速度を見いだした. Kirschvink et al. (1997), Evans (2003), Raub et al. (2007) および Piper (2006) は, 地球は慣性主軸のうち, ふたつが劇的に交代したこと (慣性による真の極交代, inertial interchange true polar wander, IITPW), すなわちリソスフェアとマントル全体が数百万年間のうちに 90° も回転した可能性を議論した. プレート論者の大半は, 超高速移動を支持する事実の説得力がないと信じている.

Kirschvink et al. (1997) は, カンブリア紀前期～中期におけるプレートの大規模な造構的再編の結果として, 535 ~ 520 Ma (525 ~ 508 Ma, Evans, 2003 による) の約 90° の真の極移動が 600 km/Myr 以上の速度で生じたと推測した. Torsvik et al. は, より完全な古地磁気データセット解析が '伝統的なプレートテクトニクスの構造系' に適合することに反対した. それに答えて, Kirschvink と彼の共同研究者は, 彼らの結論は 'さらに信頼できるデータのサブセットや真の極移動仮説がカンブリア紀前期の地質記録の多くの特徴を説明する (Torsvik et al., 1998)' ことに気づいた. Tsai & Stevenson (2007) は, Kirschvink et al. の真の極移動の筋書きを信じられないと却下した. それは, 下部マントルの粘性としてはありそうもない 7×10^{21} Pa s 以下の小さい値しか設定しなかったからであろう. Piper (2006) は, デボン紀の 410 ~ 390 Ma 間に起こった 90° におよぶ真の極移動の慣性変換 (4.5°/Myr) について述べ, それは下部マントルへなだれくだる長いリソスフェアに確かに関連しているとした.

プレートテクトニクスの真の極移動の見積もりが著しく矛盾していることは, 明らかである. 彼らがよりどころにした選別された古地磁気データ, およびプレート仮説のほかに, 何らの信頼できるデータもない. もし大規模なプレート運動に関する古地磁気データの説明が誤りであったなら, それらのデータの他の特徴を説明するための極移動仮説も誤らう.

レンチテクトニクス (Wrench tectonics)

極漂移 (Polar wander)

選択された古地磁気データにもとづいて, レンチテクトニクスは大規模な真の極移動と '控えめな' 大陸 / プレートの回転と並進を仮定する (Storetvedt, 1997, 2003). 極移動は, 自転軸に対する地球全体の方向転換を意味し, 主に内部脱ガスとそれに関わる地殻デラミネーション (剥離) に起因する惑星内部の大規模な質量再配置によって引き起こされる, とみられている. 極移動は比較的急速な事変 [複数] として起こり, それらは長期にわたる造構的静穏期によって境されるという. 自転軸は, 古生代中頃～現在まで, 0°/180° の子午線面において地表に

対して緯度で最大約 70° 移動した。始新世 / 漸新世 (E/O) 境界の頃、すなわち約 35Ma に、極は 2 ~ 3 Myr の間に、現在の位置近くまで約 35° 移動したと喧伝されている。

レンチテクトニクス (Storetvedt, 1997, p. 246-50; Storetvedt & Bouzari, 2012) によれば、北極の漂移は、全体的には太平洋へ向かっていたが、方向の反転も生じた。古地磁気データによると、ジュラ紀~白亜紀前期の極は現在と大きく異なることはなく、古赤道はサハラ中央を横切っていた。約 100 Ma に、赤道はアフリカ大陸の北縁に移動したが、その後、80 ~ 60 Ma にはサハラ中央に戻り、第三紀前期に地中海の南縁に移動するという。約 35 Ma における急速な極移動の際に、赤道は地中海から中央アフリカを横断して現在の位置付近に移動し、中新世中頃にアラバマ州中央を横断する位置まで再び北上し、約 5 Ma に現在の位置にもどった。

レンチテクトニクスは、少なくとも 450 Myr にわたって (Storetvedt, 1997, p. 60), 極移動が事実上同じ面に固定されていたと主張する。極移動の期間中に地球が反転する軸は赤道上の 2 地点, 0°N/90°E, そして 0°N/90°W (これは事実上、前述の振動仮説と同様の軸である) を通過する。このことは、地球内部での密度異常が断続的に発生する場合に限り、起こり得る。現在の座標系において、北極が太平洋へ移動するには、180° 子午線上に中心をもつ北半球の四分球、および / あるいは、対蹠的の四分球に正の質量異常が生じるはずであり、これには北緯ないし南緯 45° における質量過剰がもっとも効果的であろう。極移動 (それが起こるにはマンツルの粘性と強度がかなり小さいと思われるが) は、このような過剰質量を赤道へ向かって移動させることになる。ほぼ同じ方向へ移動する極移動 (あるいは、赤道の反対側の四分球における逆方向への極移動) のためには、前述のように、正の質量異常が同じ四分球に発生することが必要であろう。しかしながら、赤道域にすでに存在する正の質量を赤道から除去するためには、赤道上での異常が減少するか、消滅しない限り、新たなより大きな質量異常が必要になり、これらの作用が数億年間続いてきたであ

ろう。極が同一面上で行きつ戻りつするという、このような筋書きはかなり不自然で、まったく信用できない。もし大規模な極移動がおりるとすると、Goldreich & Toomre (1969) (図 5.3. の上図参照) がシミュレートしたようにもっとバラバラの軌跡になるはずである。

レンチテクトニクスによれば、極は、前期石炭紀以降 3 億年にわたって 35° (逆進を除く) 移動し、その後は、わずか 200 ~ 300 万年間にさらに 35°—100 倍の速度で一移動した。Storetvedt (1990, p. 158) は、これは '仮説の想定内' のことであると言ひ、強度ゼロ・低粘性のマクスウェル地球を想定する Gold (1955) を引用した。Tsai & Stevenson (2007) は、真の極移動は 1000 万年間で 8° が限界であると計算した。彼らは、プリュームの上昇と同様に、マンツル対流とスラブのもぐり込みといったプレートテクトニクスの諸作用の存在を想定した上で、マンツルの粘性を 3×10^{22} Pa s と推定した (この推定値は、実際よりも数桁は小さいだろう)。

始新世 / 漸新世境界における 35° の極移動に関する Storetvedt の古地磁気学的証拠が図 6.2 に示され、それはアフリカとヨーロッパにおける選択された中 - 新生代古地磁気極を表している。対称的で反対向きに運動する真の極移動軌跡は、おおよそ 180°E/55°N に位置する共通点まで、2つの大陸が反対方向に回転したことを意味するとされ、共通点に達した時期は始新世 / 漸新世境界とみられている。それにつづく、ほぼ子午線沿いの真の極移動軌跡は、緯度で 35° にわたる急速な極移動期を表すと言われている。この図には年代データが 1 つも表示されていないことに注意されたい。Storetvedt (1992, p. 205) は、古磁極は矢印と反対方向に「年代を遡ることから推論した」と述べただけである。同様の不備は、35° の極移動を示した彼の図のすべてに見られる (例えば、図 6.3)。実際の年代決定データを示し、なぜそれらが不確かであると考えなのか、そして、なぜ想定年代が論理的前提概念にもとづいているのかを説明するほうが、より科学的であろう。この急速な真の極移動が始新世 / 漸新世境界における大規模な気候変動を説明するという主張は、後の節で検証される。

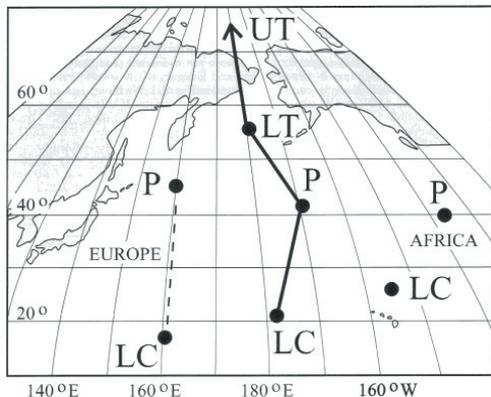


図 6.1. 古生代中期以降の '全球極移動軌跡'。'アルプス期' の大陸移動の事変から見積もられた、ヨーロッパとアフリカにおける選択された古地磁気データによる。UT = 上部第三系, LT = 下部第三系, P = 上部白亜系~二畳系, LC = 下部石炭系。(Storetvedt, 1997 の図 9.5)

極移動に起因する緯度方向への移動には、0°/180° 子午線上にだけ、最大値 (古生代中頃~始新世 / 漸新世境界の 35°, および、その後の 2-3 Myr 以内の 35° の実移動) がみられる。なぜなら、他の位置では、移動量がより小さくなるだろうからである。Besse & Courtillot (2002, 2003) が様々な大陸に対して、また、Beaman et al. (2007) が太平洋プレートに対して、それぞれ示した古地磁気データは、上述のレンチテクトニクスの主張をまったく支持しないように見える。例えば、グリーンランド (想定された極移動の子午線に比較的近い) は、必要とされる大きさの緯度変化を示さない。少なくとも、このことは、データの選別にもとづいてたいへん効果的な結論が導かれたこと、そして、それらがいかに操作され、解釈されたかを示している。

もし古地磁気データが信頼に耐えると考えるのであれば、'グローバルな'極移動軌跡は、ヨーロッパやアフリカだけのデータではなく、グローバルなデータにもとづかなければならない。確たる筋書きを得るために、データがどの程度選択され、処理されたかを知ることは興味深い。図 6.4 は、Besse & Courtillot's (2002) による、アフリカにおける過去 2 億年間の見かけ上の主極移動軌跡を示している。200 ~ 90Ma の期間に軌跡の逆戻りがみられることに注意されたい。このことは、図 6.5 に示さ

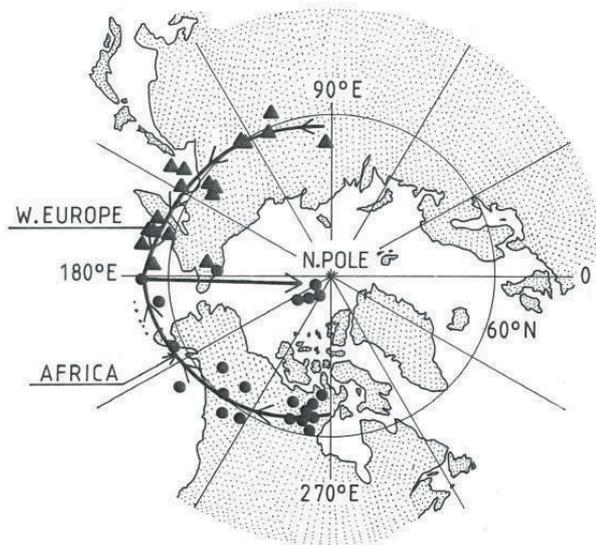


図 6.2 カナリー・ケープベルデ諸島間における中生代～第三紀前期の選択された古地磁気極。(Storetvedt, 1992 の図 2). 西ヨーロッパ (三角) とアフリカ (丸) における関連データと比較。

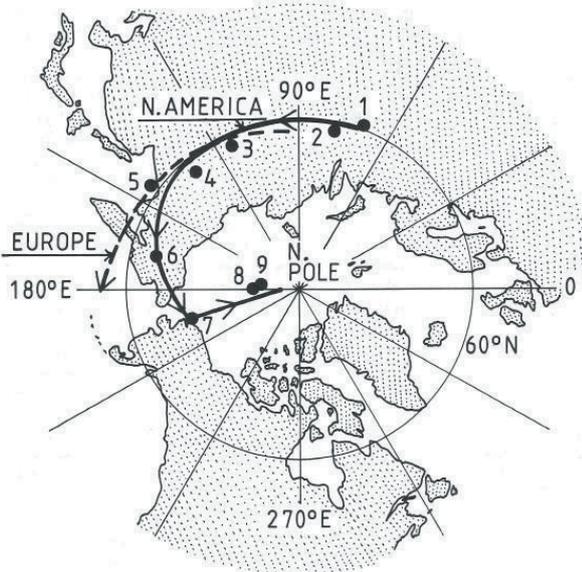


図 6.3 ヨーロッパおよび北米大陸塊における中生代～第三紀前期の古地磁気極の比較。Storetvedt (1992, p. 210) は次のように記している:「古磁極と年代との相関は文字通りに受け止めてはいけなしい、磁化と岩石の物理的年代は、下部第三系におけるアルプスプレートの主時相に起因した再磁化作用により、そう簡単には関連させられなかった」。すなわち、仮定の極に対して決められた年代 (彼は年代を出し損ねている) は、厳密に受け止められなくてはならない。再磁化作用の可能性の理由に代わって、我々は彼自身の連続する '推定' 年代 (矢印で示されている) を厳密にチェックしなくてはならない。(Storetvedt, 1992 の図 8)

れた南アフリカにおける顕生代の APWP にも見られる。図 6.6 は南アメリカの APWP を示していて、見かけ上の極移動がほとんど見られず、大半の極は 80° よりも高緯度に位置している。どのようにして、これら 2 つの大陸における APWP が、レンチテクトニクスが主張する過去 3.5 億年間に北へ 70°, そして約 35 ~ 32 Ma の 35° の TPW とに、いかにして調停されたのか、興味深いことだろう。とくに、大陸回転のはじまりが白亜紀後期にかぎられるというのであれば、図 3.8 に示されたシベリヤとバルティカ (Baltica) の APWP は、レンチテクトニクスにとって、面白い挑戦になるだろう。考慮される古地磁気データが増えれば増えるほど、回転、並進、そして地質学的連続性には分裂が増すことになるだろう。

Storetvedt (1997) は、カレドニア-アパラチア、ヘルシニア、アルプス-ヒマラヤの各褶曲帯 (すくなくとも、その一部) は当時の古赤道に沿って分布する、と主張した (図 6.7. 参照)。彼は、赤道上での造構的活発化は、(脈動的に発生する) マントルプリュームにはたらく遠心力 (赤道で最大) に由来すると主張する。であるとすれば、現在の赤道に沿う造構運動や火山活動が何も見られないことは奇妙である。レンチテクトニクスによれば、現在の赤道と石炭紀前期の赤道との間の地表のすべてが、少なくとも一回は赤道部の膨らみを経験してはならない。極が行きつ戻りつしたので、いくつかの地域では赤道部の膨らみを最大で 4 回経験したはずだ。さまざまな時代の造山帯の地理的分布をみる、その大半はレンチテクトニクスのいう古赤道に一致しないことがわかる (図 6.8 ~ 6.10)。Storetvedt は、造構運動の活性化帯は、ウラル地帯、オスロリフト、ライン地溝の例のように (p. 359) 古赤道にほぼ直交することが予測される、とも述べている。しかし、この例示も印象が悪い。

McKenzie & Priestley (2008) は、大陸の造構変形は大陸 '核' - すなわち、厚く冷たいリソスフェアの分布域 - によって規制されてきたという。これらの地域は、すべての剛塊を網羅しているわけではなく、現在の剛塊の範囲

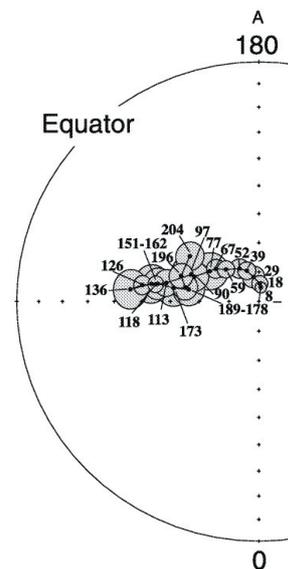


図 6.4. 過去 200 Myr のアフリカの主 APWP. 95% の信頼円 (10 Myr 毎の平均, 20 Myr の移動範囲). 年代毎の平均年代が示されている。(Besse & Courtillot, 2002 の図 1)

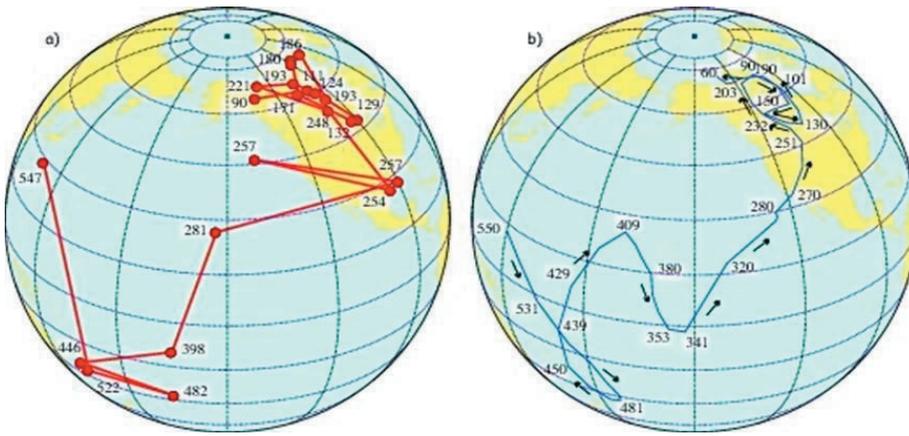


図 6.5. 南アフリカの APWP. (a) 南ア極のみ. (b) ゴンドワナと南アの合体によるなめらかな雲形軌跡路. (Tauxe, 2013 の図 16.10)

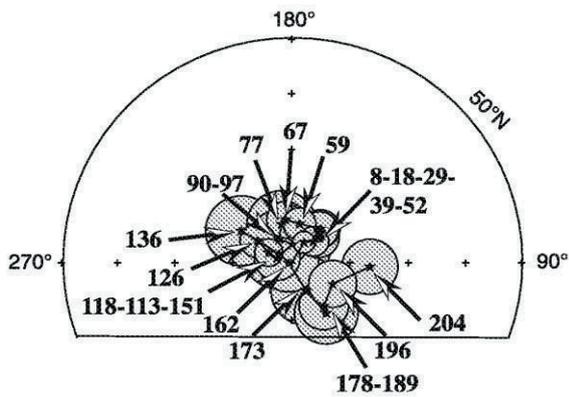


図 6.6. 過去 200 Myr の南アフリカの APWP. (Besse & Courtillot, 2002 の図 9)

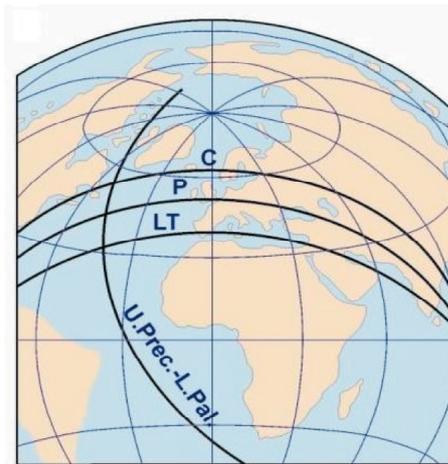


図 6.7. 石炭系, 二畳系, 下部第三系, 上部先カンブリア系~下部古生界のねじれテクトニクスによる古赤道 (Storetvedt & Bouzari, 2012 の図 3)

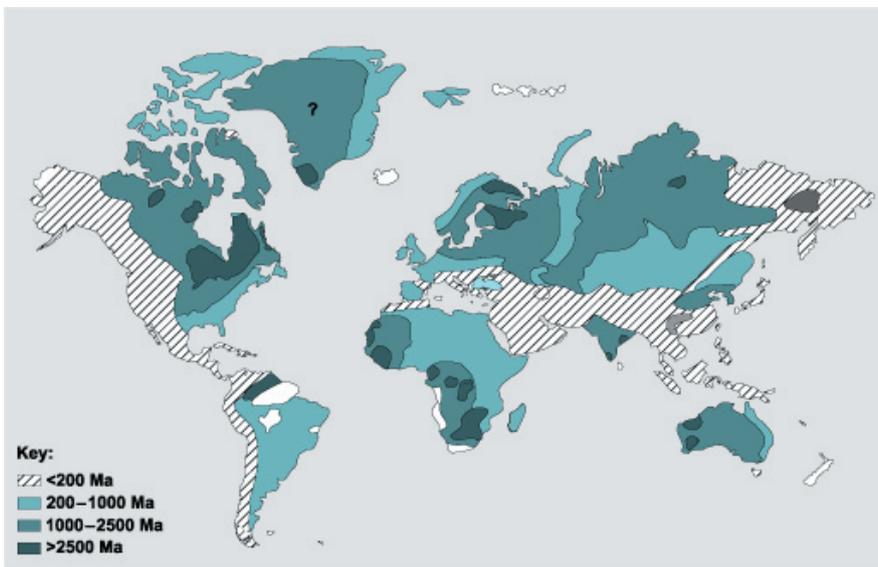


図 6.8. 大陸の造山帯. 主要な造山分布の年代を添えた. (Burchfiel, 1990 ; www.accessscience.com による)

を超えて非剛塊地域が含まれていることもしばしばである。北米の大陸核 (図 6.11.) は, 東をアパラチア山脈, 西をロッキー山脈によって縁取られている。北部ユーラシア大陸核 (バルト楯状地と, ロシアおよびシベリア台地: 図 6.12.) の西部はヨーロッパの構造発達を規制し, そこではカレドニアおよびヘルシニア褶曲帯がその周縁をとりまいて覆っている。大陸核をよこぎるウラル山脈の形成期にはリソスフェアが薄化していたであろう。

加熱された球体が冷却する際には大円に沿って破断する

という説 (Jeffreys, 1976) と室内実験 (Bucher, 1956) は, 注目に値する。先第三紀の造山帯は, ほぼ大円に沿うか, その一部に配置されている。しかし, 今日地球に残っているのは 2 つの大円の一部をなす断裂帯だけであり, それらは, 非常に活動的な環太平洋地震変動帯 (ベニオフ帯), およびほぼ消滅したアルプス - ヒマラヤ (テチス) 帯だけである (Meyerhoff et al., 1996a ; Meyerhoff & Meyerhoff, 1974a)。両地帯はおそらく先カンブリア紀に発生し, 時々再活性化した。



図 6.9. カレドニア/パリスカン変動 (380 ~ 280 Ma) と同年代の造山帯分布. (en.wikipedia.org)

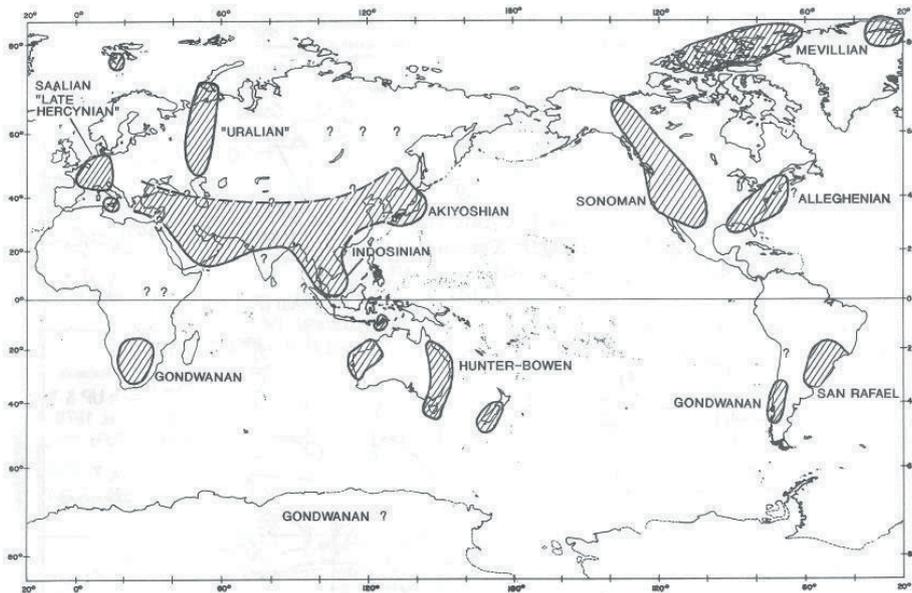


図 6.10. Hunter-Bowen (Indosinian) 造山褶曲時相の開始に関連した二疊紀中頃の褶曲作用および/あるいは特徴的な海進不整合を伴う地域. 世界のさまざまな地域で使われているこの造山時相の呼称が示されている. (Dickins, 1994a の図 2)

(a)



(b)

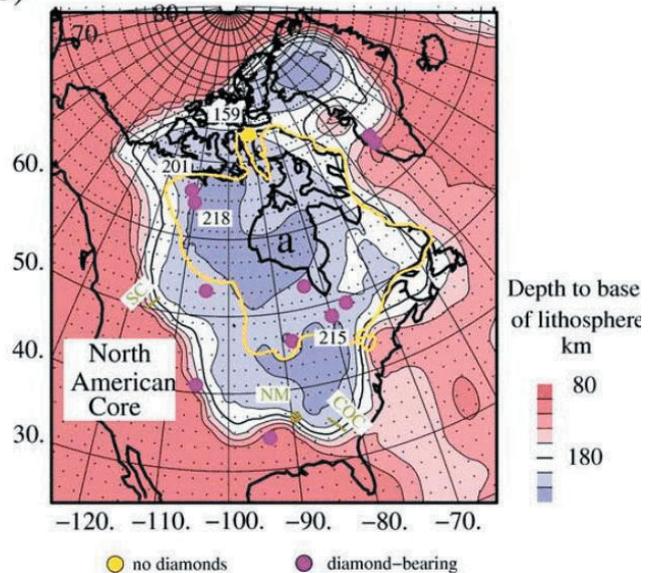


図 6.11. (a) 北米の造構マップ (Holmes, 1965 の図 811). (b) リソスフェアの等層厚線図. 剪断波速度から計算された. マゼンタ色円 = ダイヤモンド含有キンバライト, 黄色色円 = マントルジュールを含むアルカリ岩の位置. 構成鉱物はリソスフェアの厚さの見積もりに使用された. 白色四角の数は見積もられたリソスフェアの厚さ (厚さは Shapiro et al., 2004 によるものより約 100 km 薄い: 図 2.8. 参照). 黄色線は 'a' と付された北米大陸塊のおおよその輪郭を示す. (McKenzie & Priestley, 2008 の図 2)

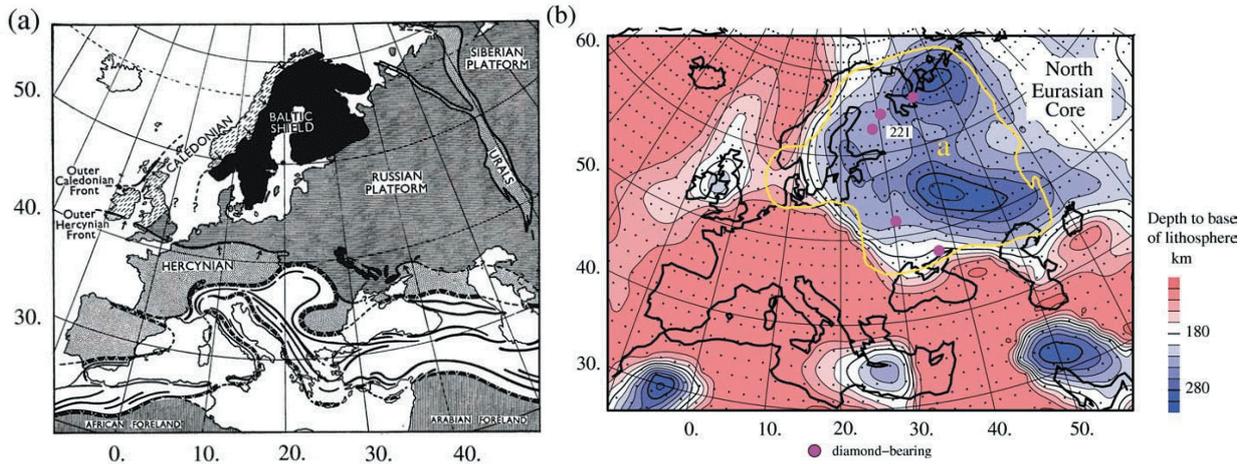


図 6.12. (a) ヨーロッパの造構図 (Holmes, 1965 の図 807). (b) 黄色線は 'a' と付された東ヨーロッパ大陸塊のおおよその輪郭を示す。図 6.11. のキー参照。 (McKenzie & Priestley, 2008 の図 3)

回転する大陸 (Spinning continents)

レンチテクトニクスによると、後期白亜紀以降、大陸はさまざまな程度の回転をおこなった。この回転には、おそらく、周囲の海洋リソスフェアもともなわれ、その範囲は公式の "プレート境界" までとされる。提案された運動は、プレートテクトニクスよりは控えめである。しかし、そのような運動はやはり疑問視され、リソスフェア厚度の劇的变化や汎世界的なアセノスフェアの欠如などが問題になる。レンチテクトニクスが主張する運動は、次のようにまとめられる。古地磁気データが地質学的にもっともな出来事であると私たちに信じるよう求める場合、結局のところ、それらのデータをあまり真剣に考えないことが合理的なのである。

北アメリカは、この大陸の北部に位置するオイラー極を中心に、ヨーロッパ/ユーラシアに対して最大で約 25° 回転した、という (Storetvedt, 1997, p. 72 ; Storetvedt and Longhinos, 2011, p. 21). Storetvedt and Longhinos (2011) は、今では不活発なユーラシア陸塊も約 30° 時計回りに回転したとする。このようにユーラシア陸塊全体は現位置回転をおこない、実回転は内部変形の結果にほかならず、北米大陸南半部での時計回りのねじれはもっと大きく、合計で約 55° に達する。

始新世 - 漸新世境界以前に、ヨーロッパは時計回りに約 25° 回転し、アフリカは反時計回りに同量の回転をおこなった (Storetvedt, 1997, p. 246). アフリカと全ユーラシアは現在も回転を続けているとされるが、Storetvedt (1997, p. 248) はアフリカとヨーロッパの相対的回転が始新世 - 漸新世境界で終了したと述べている。

南アメリカは、おそらく始新世のあいだに、ブラジル北東部のオイラー極に対して時計回りに約 20° 回転した。同時に、この大陸の北半部 (20°S 以北) は反時計回り回転して、中部アンデス山脈の造構屈曲をもたらした (Storetvedt, 1992, p. 211 ; 1997, p. 307-12). それゆえ、南アメリカの回転は約 10° に緩和された。南アメリカ

力は南へ最大 20° 移動したともいわれている (Storetvedt and Longhinos, 2012). 大陸を回転させると想定される慣性力は、南アメリカを反時計回りに回転させるはずだが、比較的狭い赤道大西洋の両岸における "造構的相互作用" が、南アメリカを揺れながら時計回り回転させたと言われながら、この応力場は、同時に、この大陸の北部をゆれながら反時計回りに回転させたというのだ!

大インドは、暁新世前期にほぼ現在の方位をとってアジアと再連結する前に、白亜紀 / 第三紀境界頃に約 135° 回転した (Storetvedt, 1990, p. 141 ; 1997, p. 243).

南極は時計回りに 140° 回転し、オーストラリアは反時計回りに 70° 回転した (Storetvedt, 1997, p. 335, 350). オーストラリアは始新世 / 漸新世境界をすぎても回転しつづけ (1992, p. 209), 南極は今も回転している。さらに、南極 - オーストラリア - ニュージーランド - メラネシアブロックは、アフリカに比べて 1,700km(15°) 移動した。

中部イランは、三畳紀以降に 90° 以上反時計回りに回転した (Storetvedt and Bouzari, 2012). Madeira は、第三紀に約 50° 反時計回りに回転したのち、約 25° 時計回りに回転した (1990, p. 166). イベリア半島は、後期白亜紀の 100 ~ 90Ma にすくなくとも 40° 反時計回りに回転し、つづいて、75 ~ 65Ma には時計回りに約 70° 回転した (1997, p. 281).

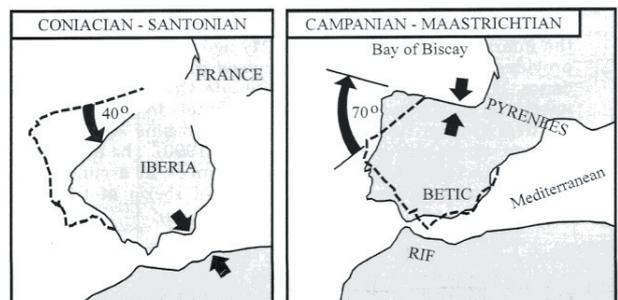


図 6.13. ねじれテクトニクスによる、イベリアのうなずき (Storetvedt, 1997 の図 9.24)

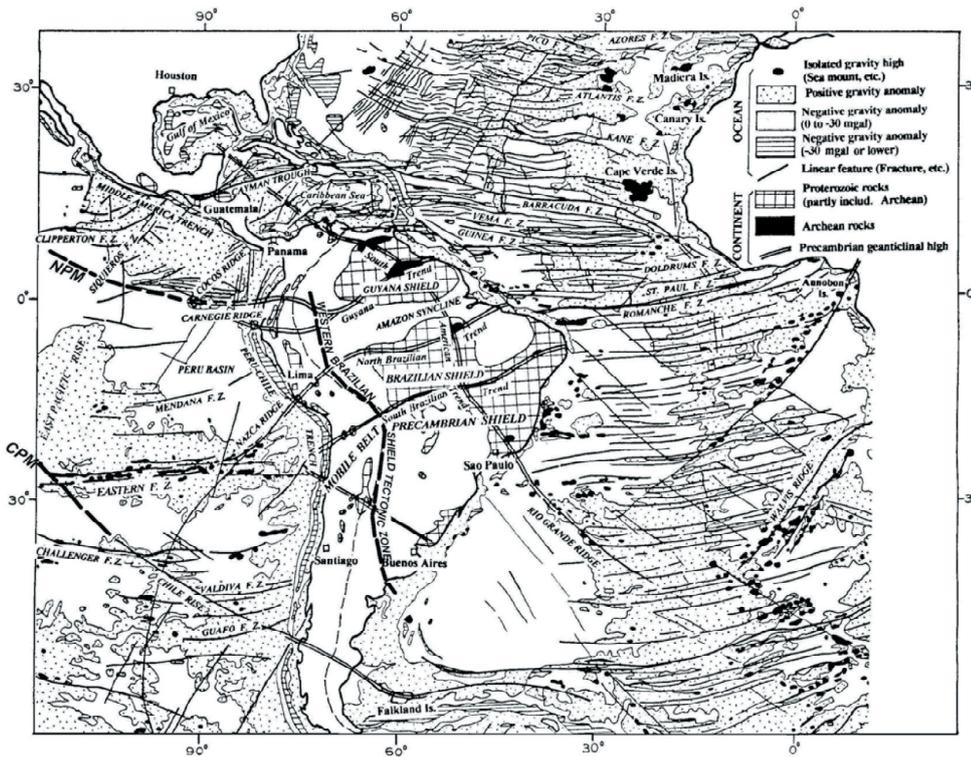


図 6.14. 南アメリカ大陸とその周辺における主要な構造方向。CPM= 中央太平洋主要方向。NPM= 北太平洋主要方向。(Choi, 2002 の図 4)

地球表層は、先カンブリア紀に発生したことが明らかな構造リニアメントによる十字字パターンを示す。これらのリニアメントは海洋盆や大陸を横切ってしばしば数1,000kmにわたって連続していて、プレートテクトニクスに想定されているリソスフェアの移動を論破する。Storetvedt and Longhinis (2012) は、レンチテクトニクスが提案する大陸と海洋底の運動はこれらのリニアメントの連続性をひどく分断することはなかった、という。しかし、それらの運動は、何らかの痕跡を残すはずである。ところが、図 6.14 に示されたリニアメントは、喧伝されている南アメリカの 20° におよぶ南方移動と 10° の時計回り回転や、アフリカの 25° の反時計回転の証拠を何ら示さない。オーストラリアを横切り、海洋域へ連続するリニアメント (図 6.15) は、オーストラリアの 70° 反時計回転に矛盾する。同様に、大インドの約 135° におよぶ時計回り旋回は、図 4.6, 4.8 および 4.9 に示されるリニアメントや層序学的証拠に矛盾する。

図 6.16 の GPS 速度ベクトルは、現在進行中であるはずの、南北アメリカの時計回り回転やアフリカとオーストラリアの反時計回転を示してない。Storetvedt and Longhinis (2012) は、GPS データがユーラシア全体の時計回り回転が現在もつづいていることを支持している、と論じた。彼らは Zemtsov (2007) を引用したが、この論文は次のいくつかの重要な追加情報をもたらした。第 1 に、現在の回転中心は中国の東ヒマラヤ山脈 (95°E/ 30°N) にあり、この大陸の幾何学的中心から遠く離れている。第 2 に、角回転ベクトルは大陸縁辺から回転の中心部へ向かって大きくなっていて、これは、1つの剛体的単位としてユーラシアが回転している場合に予想されることがらとは逆である。最大の大陸が現在も回転 (および変形) しているとすると、いくつかのより小規模な大陸が回転



図 6.15. オーストラリア周辺の海洋底リニアメント (Choi, 1997 の図 2). 主要大陸リニアメント (O'Driscoll, 1986 ; Elliott, 1994) が重さねあわされている。深海掘削地点とドレッジ地点が示される。CLPT F.=Clipperton Fracture Zone.

を終えていながら、周辺部から中心へ向かって速度が増大するのは不思議であろう。

Storetvedt and Bouzari (2012) は、図 6.17 に示される GPS 速度場にもつづいて、現在は中東が反時計回転して

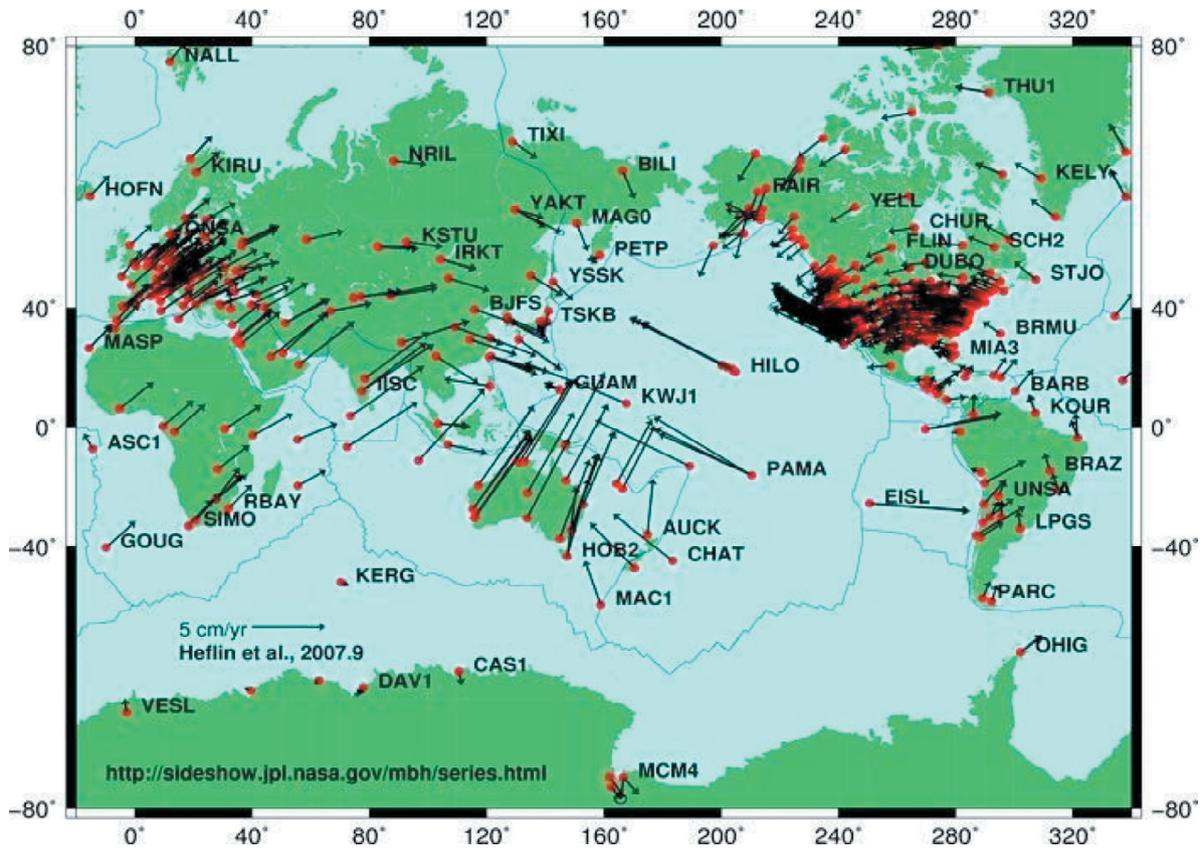


図 6.16. GPS による地殻運動 (<http://en.wikipedia.org>)

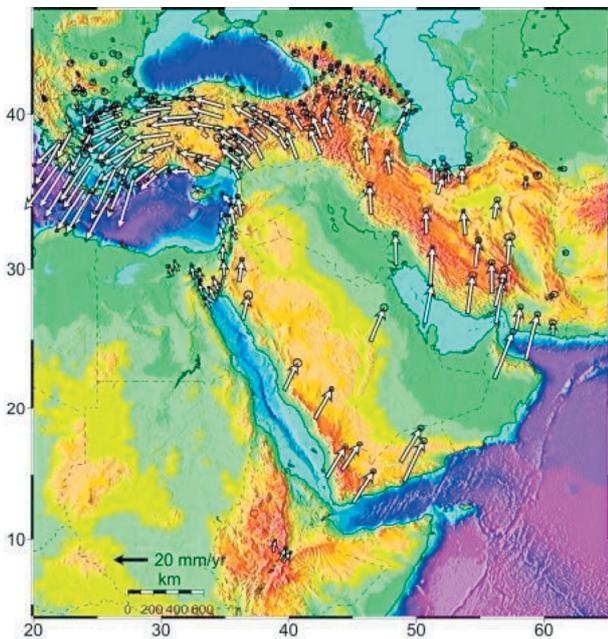


図 6.17. ユーラシアに対する中東の GPS 速度 (1 σ の誤差楕円を含む). Reilinger et al. (2006) の図 2.

いと結論づける。しかし、この速度ベクトルによると、この地域が相対的に剛性的な単位として一体化的に回転してはいないことは明瞭である。この回転の極は、(速度ベクトルの大半に直交して)おそらく地中海東部に位置し、回転極から遠ざかるにつれて速度が増加するはずであるが、そうはなっていないことは明らかである。Reilinger et al. (2006) は、次のように述べている。「速

度場は、変形の集中帯 (幅 $\ll 100\text{km}$) に隔てられた非変形領域群としてうまく特徴づけられる。変形帯は、活断層、歴史地震の活動帯に密接に関係し、剛体的 (coherent) 地帯は地震活動の静穏帯によって特徴づけられる」と。Storetvedt and Bouzani (2012) は、アラビア、イラン、アナトリアおよびエーゲ海のみならず、現在、アフリカも一体として反時計回転している、と図 6.17 から推測されるかぎりのことを論述しつつづけるが、彼らはアフリカに関する速度場を提示していない。図 6.16 にみられるように、反時計回転を強いる証拠は何もない。

GPS データは南極の時計回り回転が進行中であることを証拠づける、という (Storetvedt, 2010)。確かなことは、南極はその内部にある点の回りを回転していないということである。南半球のオイラー極は、図 6.18 のように、周辺の海洋域に位置する (Bouin and Vigny, 2000 ; Donnellan and Luyendyk, 2004 ; Jiang et al., 2009 ; Dietrich et al., 2004)。Jiang et al. (2009) は、全般的には南極プレートは南アメリカプレートに向かって移動していて、オーストラリア大陸からはだいに離れつつある、という。

衛星測地データは、現在進行中の地殻運動と局地的応力場に関する重要な情報をもたらすが、リソスフェア "プレート" 全体の運動に関する一般的結論を導いたり、そのデータを数 100 万年前や数 100 万年後に敷衍することは、ひどく疑わしい行為である。

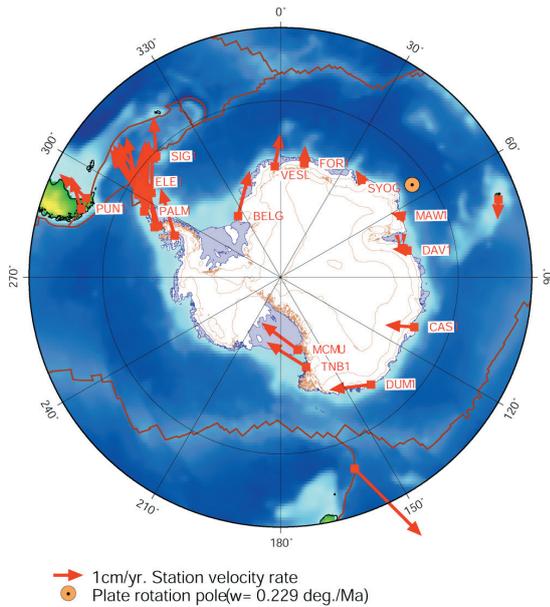


図 6.18. 南極における SCAR GPS ネットワークによる測点の水平速度。回転極の 1 つの解を示す。(Dietrich et al., 2004; <http://rscs.anu.edu.au>)

慣性力 (Inertial forces)

レンヂテクトニクス (Storetvedt, 2007) によると、全球的ねじれ、大陸 / プレートの現位置回転、および造構 - 火成活動帯の形成は、おもに、遠心力、コリオリ力、エトベシュ (Eötvös, Polflucht, 離極 [pole-fleeing]) 力、および潮汐力 (太陽と月の重力性曳力) に起因する。Wegener の学説は、これらの力 (そして、のちにはマントル対流) をもちいて、大陸がより高密度の海洋底の上を西へ向かって移動したと説明した。しかし、これには矛盾がある。すなわち、マントル上部はすくなくとも 10^8 dynes/cm^2 (100 bars) の長時間強度をもつとみられるいっぽう、これらの力はいずれも、大陸底では約 $4,000 \text{ dynes/cm}^2$ 以上の剪断応力をもたらすことはできないのである (Chadwick, 1962 ; Jeffreys, 1976)。

コリオリ効果は、地球自転とその影響下にある物体の慣性に起因する。コリオリ効果は、水平運動している物体に、北半球では右向き、南半球では左向きの偏向をもたらす事実を記述したものである。さらに、上下方向に運動している物体を、それぞれ西または東へ偏向させるが、この効果ははるかに軽微である。「任意の水平運動のうち、もっとも強力な水平方向への偏向は極で起こり、赤道では水平偏向が起きない。鉛直運動では逆になる」(Persson, 1998)。コリオリ効果は、水平成分に加えて、Eötvös 効果として知られる鉛直方向の成分をもつ。Eötvös 効果は、東向きに移動している物体を上向きに偏向させる (軽く感じる) が、西向きに移動している物体を下向きに偏向させる (重たく感じる)。コリオリ効果のこの特徴は、赤道付近で最大になる。"コリオリ効果" という用語は、水平成分だけを示すことがしばしばである。

コリオリ効果は、地球の自転速度と対象物体の運動速度

に比例する。地球自転は 1 日に 1 回だけであるので、この効果は小さいが、大規模な大気や海洋の循環では顕著である。北半球では高気圧の風系が右回りに回転し、南半球では反時計回りである理由を説明する。同様な状況は、海洋還流 (oceanic gyre) にも認められる。すなわち、高圧還流の循環は北半球では時計回り、南半球では反時計回りであり、低圧還流の場合は逆向きになる。

Ricard (2007) は、コリオリ力は重力の 20 兆分の 1 程度、遠心力は 291 分の 1 であり、最大に見積もっても、「慣性とコリオリの加速度は、マントル力学では無視しうる役割しかはたしていない」と述べている。Goldreich and Toomre (1969) も、マントル内では「すべてのコリオリ力はまったく無視することができるにちがいない」と解釈している。いっぽう、Hughes(1973) は、コリオリ力によるマントル対流の擾乱が、地球表層の断裂帯 (太平洋とインド洋、そして、東アフリカリフト系と大西洋中央リフト系を含む) の存在を説明しようとした。しかし、彼のモデルにはさまざまな不合理な仮定がある。たとえば、①四面体配置する 4 つの対流セルを示すマントル規模の二相對流 (極対称性を示す)、②アセノスフェアの過大な流速と過小な粘性、③地表下 100km の全地球的アセノスフェアの存在、などである。

離極 [pole-fleeing] 力 (Eötvös 効果のもうひとつの側面) は、地球自転とアイソスタシー原理の組み合わせ効果であり、1900 年に Kreichgauer が初めて認め (Wegener, 1929, p. 179)、Eötvös によってより詳細に説明された (Eötvös, 1913)[Scheidegger, 1963 参照]。Eötvös 力は、浮遊物体を最小重力域へ向かって移動させる。とくに、アイソスタシー均衡がなりたっている陸塊は赤道へ向かって運動する傾向にある。しかし、Jeffreys(1976) によれば、発生する応力は約 4400 dynes/cm^2 にすぎない。Wegener は、Eötvös 力が浮遊物体を赤道へ向かって移動させ、しかも、自転する惑星上では定常的に西方へ漂移させる、と想定した。Jeffreys (1976, p. 479-483) は、Eötvös 力は地表部にはたらく剪断力であるので、マントル粘性は約 10^{15} Pa s にすぎなく、Chandler 動揺によって 2 ~ 3 日以内に打ち消される、と反論した。緯度変化データにもとづいて粘性を最小に見積もって $5 \times 10^{19} \text{ Pa s}$ とすると、地殻は約 3,000My の間に 1 ラジアン (約 57°) 移動するだろう。フェノスカンディナビア隆起から推定される粘性を仮定すると、この時間は約 100 倍になるはずだ。Eötvös 力が地質学的意味をもつ運動をもたらすことはない、と Jeffreys は結論した。

Gasperid and Chierici(1996) によると、もし境界面が地殻 - マントル境界に位置する場合 (Wegener の学説と同様)、Eötvös 力は 2 ~ 3 mGals にすぎないが、リソスフェア / アセノスフェア境界に位置する場合には 1 桁大きくなる (中緯度で 20 ~ 30 mGals)。Caputo (1986) は、リソスフェア薄片の密度が周囲の岩石の密度よりも小さい場合、このブロックは赤道へ向かって移動 (Polflucht) するだろうが、密度がより大きい場合には、このブ

ロックは極へ向かって移動 (Äquatorfluchtkraft) するだろう、と論じた。Gasperid and Chierici は、離漂流 (Polfuchtkraft) が、喧伝されているようにゴンドワナ大陸を赤道へ向かって 4,000 km も移動させ、その分裂をひきおこしただろうという。

レンヂテクトニクスによると、ねじれ変形はコリオリ力や遠心力などの慣性力に由来し、古赤道帯で最大となる (Storetvedt and Bouzari, 2012)。これらの力は、物理的相互作用に由来するものではなく、非慣性系、すなわち自転する地球の加速度に由来するものであり、"みかけの力"あるいは"偽力"として知られている (Iro, 2010; Price, 2006)。遠心力は赤道で最大であるが、コリオリ力は水平流動に関するかぎり赤道で最小である。Storetvedt (1992, p. 217) は、伏在マントルに対するリソスフェアの可動性は、"マントルにおける熱対流に起因し、.....地軸自転によって制御されている"という。それゆえ、コリオリ力がすべての大陸、最大のユーラシア大陸をも回転させていると想定しているのかどうか、不明である。地球自転はアセノスフェア (そして、リソスフェアのマグマチャネル) 中の全般的東方流動 (Meyerhoff et al., 1992b, 1996a) をひきおこすだろうが、慣性力がアセノスフェア流動に変化をもたらし、個々の大陸や"プレート"を回転させるということは信じがたい。レンヂテクトニクスは、定量的解析において、慣性力をかなり誇張した主張によって支えられている。南アメリカ (と周辺海洋底) を南へ 20°, "南極-オーストラリア-ニュージーランド-メラネシアブロック"を北へ 15° 移動させたと想定されているが、それらの力が何であるか、これらの問題もよくわからない。

回転極は、同一時刻には、1点にのみ存在しうる。大規模なプレート運動を否定したものの、(一部の) 古地磁気データを過大評価する極移動論者たちは、ある特定期間の極位置を決定すると、残りの古地磁気データを個々の大陸や大陸ブロックの回転と並進によって説明するか、間違ったデータであるとせざるをえなくなる^{*2}。レンヂテクトニクスがより広域的な古地磁気データと総合されると、より多くの大陸内ブロックの運動が必要になるだろう。たとえば、北中国と南中国ブロック、シベリア、および"バルチカ"、ブリテン島とアイルランド島の北半部と南半部、そして、数 100 もの"外来テレーン"がすべて独立に回転/並進しなくてはならなくなり、レンヂテクトニクスが想定するように諸大陸が全体として同じ方向に回転する保証は皆無となる。仮想されている運動が地質学的に非現実的で、利用する古地磁気データを独断的に選択せざるをえないのであれば、それは、過去の回転極を求める上で、データ自体が信頼のおけない指標であることを示すものであろう。

*2 その 1 つの極端な例が Pavlenkova (2012) の流体回転モデルであり、彼女は Storetvedt の極移動のシナリオを適用したが、提案されていた大陸/プレートの回転/並進を否定した。彼女は、古地磁気データに示された大陸の全般的な北方移動を認めただ

けで、独断的に経度方向への移動を否定した。彼女は、さまざまな大陸やブロックの古地磁気データにみられる緯度方向の変化さえもが、石炭紀以降の 70° におよぶ極移動に調和しない事実を無視している。

古気候 (Palaeoclimate)

現在の世界の気候帯の境界は赤道に平行ではなく、完全な軸対称でもない (図 7.1)。これは、海陸の分布、大陸の地形、および海底地形によるもので、大気・海洋循環にも関係している。

地質時代にわたって、地球はさまざまな時間スケールをもつ多数の温暖化/寒冷化サイクルを経験してきた。そのなかで、気候帯の幅は大きく変化した。気候変動の全地球的サイクルと気候帯の幅の変化は、Svalbard やアラスカ北斜面 (North Slope) のような高緯度地域に産出する白亜紀の大型恐竜や樹木、グリーンランド西岸中部 Ellesmereland やアラスカ南部における暁新世後期～始新世中頃の森林 (ワニの骨格やヤシの化石を産出)、Hatton-Rockall 海台の貨幣石 (テチス) 石灰岩、ロンドン-パリ盆地のマングローブ沼、および、南極点から 3° 以内の大規模な化石樹木と石炭層、といった存在を説明するのに有用である。鮮新世前期以降でさえも、温帯の幅は、南北両半球で 15° (1,650 km) 以上も変化した (Meyerhoff et al., 1996b)。高解像度のパラメータデータに確認されるように、地球は全体として温暖期と寒冷期を経験するとともに、広域的な古気候変化をもたらしてきた。"全体像"が、図 7.2 と図 7.3 に示される。

全地球的気候は複雑な混沌とした非線形システムであり、その挙動の制御機構に関する理解は未だ初歩的段階にある。太陽要素と軌道要素 (自転軸の傾き、離心率、歳差)、海洋要素、造構要素、正/負のフィードバック、水-炭素循環の間の相対的重要度や力学的相互作用には大きな不確実性が含まれる。おもな不確実性は、地球の温度を調整している雲の力学的役割をめぐる問題である。

黄道の傾斜は、日射 (insolation) の緯度分布、季節変化の較差、赤道帯と極域の幅を決定する。傾斜が大きくなると、季節変化が、とくに高緯度地帯で大きくなる。現在の傾斜は 23.44° であり、ゆっくりと減少している。計算によると、過去 500 万年間に、22.08° と 24.54° の間を約 41,000 年の平均周期で変化した (Berger and Loutre, 1991)。同様な揺らぎは、一般に、地球史の大半にあったと考えられていて、幾人かの研究者はより大きな自転軸の傾きを想定する。Williams (1993) は、傾きが先カンブリア紀のほぼ全期間をつうじて 54° を超えていて、650 ~ 430 Ma の間に約 60° から 26° へ急減したと論じた。いくつかのモデル研究が示唆するところでは、先カンブリア紀を通して大きかった傾き (最大 70°) が、始生代の温暖さと、そして/あるいは、すくなくとも原生代のいくつかの氷河期を説明するという (Hoffman et al., 1998)。

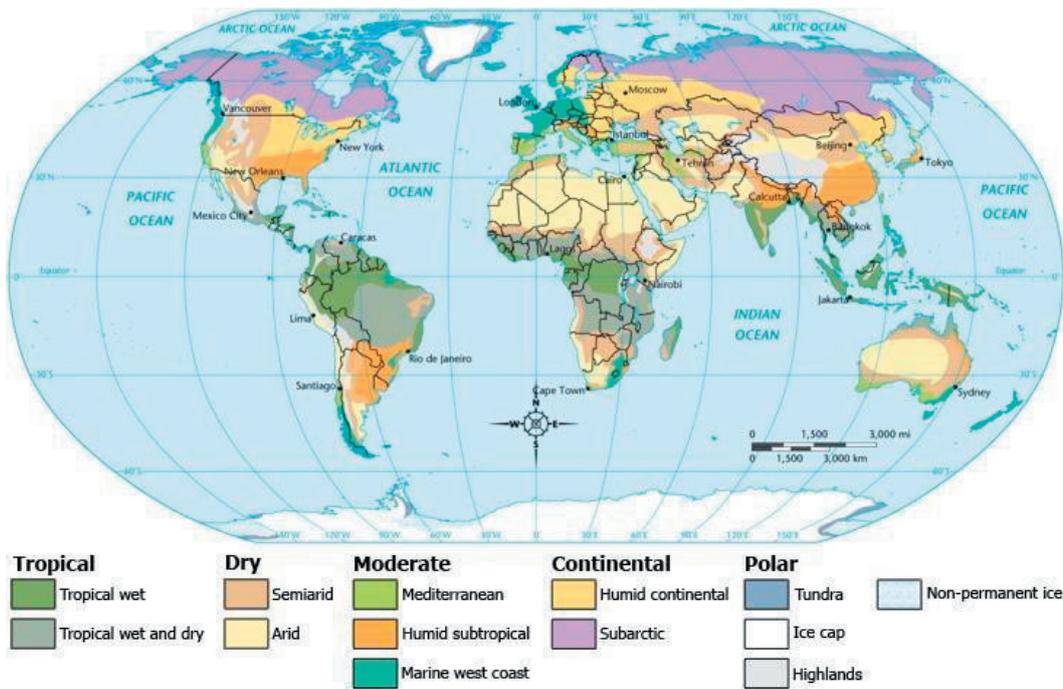


図 7.1. 世界の気候帯 (<http://en.wikipedia.org>).

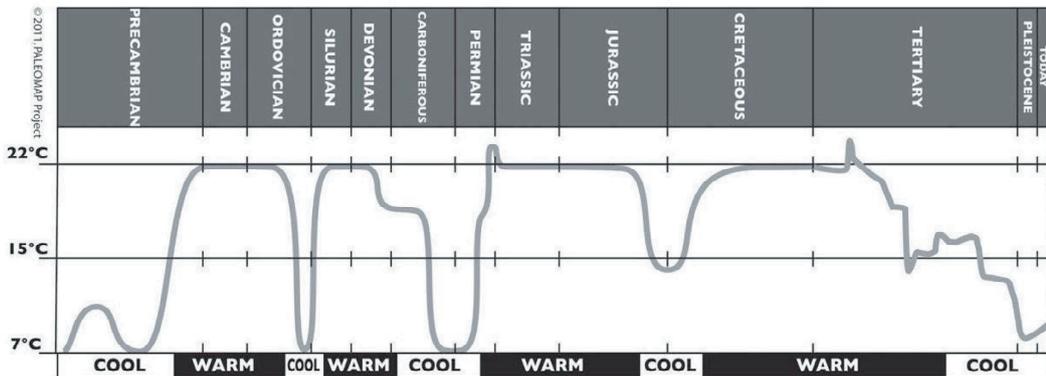


図 7.2. 原生代後期の気候にみられる全地球的な温度 (Scotese et al., 1999 の図 2 : C.R. Scotese によって修正). 新生代の温度は酸素同位体比, 先新生代の温度は岩相的気候指標 (石炭, 蒸発岩, ボーキサイト, ラテライト, など) にもとづく.

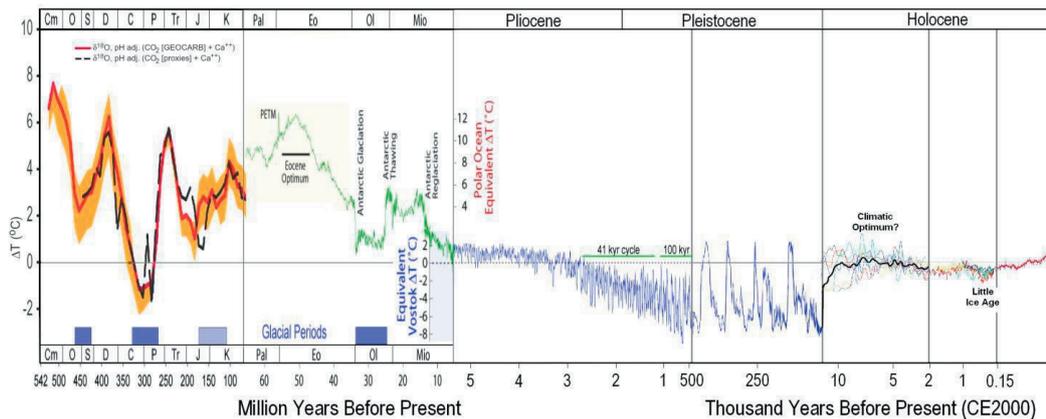


図 7.3. 酸素同位体データにもとづく顕生代の温度 (出典は <http://en.wikipedia.org> を参照).

中生代～新生代前期の全般に暖かく、かなり一様な気候を説明するために、幾人かの研究者は、自転軸の傾きが $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ であったと考えている (Douglas and Williams, 1982 ; Xu Qingqi, 1979 ; 1980 ; Allard, 1948). 古植物の証拠にもとづいて、Wolfe (1978, 1980) は、この傾きが暁新世～始新世中頃に約 10° から 5° まで次第に減少し、つづいて、始新世末までわずかに (そして急速に $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ へ) 増加し、その後はふたたび減少した、と論じた。Barron (1984) によると、自転軸の傾きが小さ

い場合は高緯度地帯で冬期の日射が増大するが、年間平均日射量は減少して極域を寒冷化させる、そして、実際の証拠も中生代～新生代前期には極域が暖かかったことを示す、という。ところが、Wolfe (1978) は、自転軸の傾きにはある臨界値があり、大気循環は (今日ような) おもに cellular (細胞状) 循環から子午線循環に変化し、こうして、高緯度帯における年間日射量の減少を補償し、むしろ増大させると示唆した。

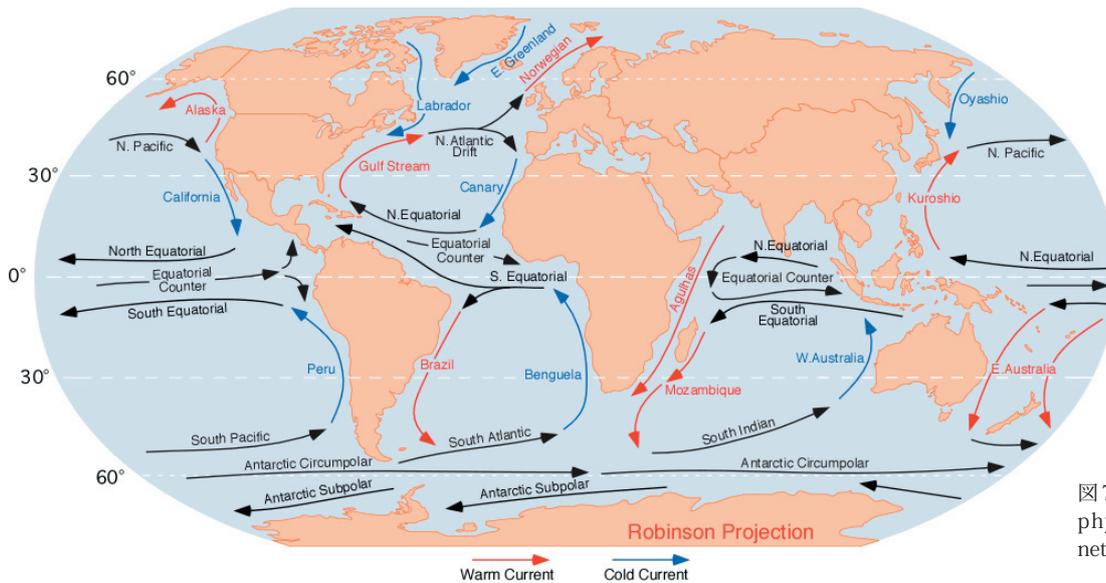


図 7.4. 表層海流 (www.physicalgeography.net).

北半球の約 60% 以上が陸地で、南半球のわずか 20% とは対照的である。水は陸地よりも大きな熱容量をもっているため、温度勾配や極端な気候は北半球で最大になり、南半球はより均一な年間気候を示す。北半球のより広い陸地は、気候学的赤道が、地球の大部分において大半の期間にわたって赤道よりも北に位置する結果をもたらす。赤道収束帯 (Intertropical Convergence Zone : IRCZ) に示されるように、それは北半球の夏期に赤道の北側にあつて、南半球の夏期になって赤道の南側に移動するのはいつくかの地域に限られる。

風系に密接に関係する海流は、広域的気候を理解するうえで決定的要素になる (図 7.4.・図 7.5). それらは、北緯 50° ~ 60° の北大西洋の平均水温が、南緯 50° ~ 60° の南大西洋のそれよりも 7°C 近く高い理由や、北緯 30° と北極循環との間の北大西洋全体が、南緯 30° と南極循環との間の南大西洋全体に比べて平均して約 5°C 暖かい理由を説明する。大西洋の赤道流の 2/3 が北半球へ向きを変え、1/3 だけが南半球へ向かう。大陸移動のない古地理復元によると、ほとんどの地質時代を通じて、実質的にはすべての赤道流が北半球へ向かっていた (Simpson et al., 1930).

過去の海陸分布と過去の大気 - 海流パターンに関する知識は、きわめて少ない。私たちは現在の大陸域をおおっている海についての合理的知識をもっているが、現在の海洋に存在したかつての陸地の規模、分布および進化を解明するために必要なデータを収集する努力は緒についたばかりである (図 2.2.・図 2.4. 参照)。そのような古陸における古気候 - 古生物データは、未だえられない。

Dickins (1994a) によれば、前期二畳紀の " ロッキー山脈 " および " アンデス水道 (seaway) " に沿ってみられる異常に暖かい海水温 (図 7.6) は、南北アメリカの西側に存在した大陸地帯によって説明される。Dickins et al. (1992) は、このような大陸地帯の存在を支持するデータを提示している。

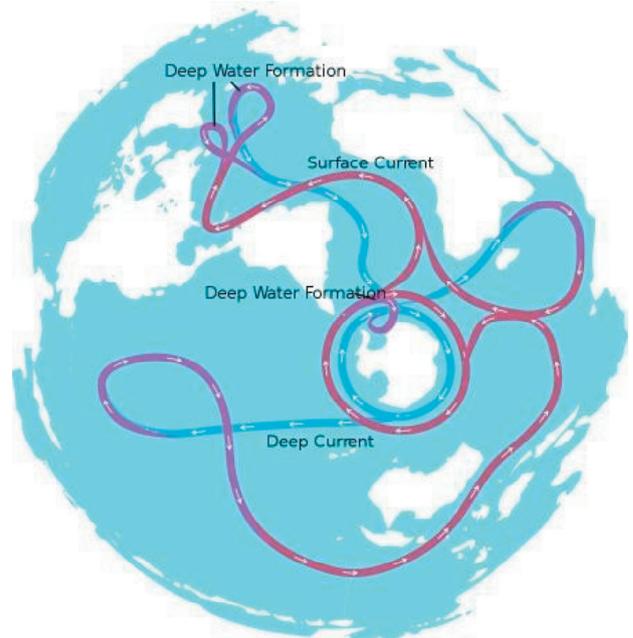


図 7.5. 塩熱循環、あるいは " 巨大海洋コンベア " (en.wikipedia.org).

Brooks(1949) は、後期白亜紀の大きく成長した小型厚歯二枚貝の分布は、図 7.7. に示される海陸分布によって生じる別の海流系で説明される、と論じた。

大陸と極の安定性 (Continental and polar stability)

原生代以降における蒸発岩、炭酸塩岩、サンゴおよび氷縞粘土のような古気候指標の地理的分布は、全地球的温暖や高温から全地球的寒冷へ向かう気候の周期的変化、ならびに、漂移する大陸ではなく安定した大陸によってもっとうまく説明することができる (Meyerhoff and Meyerhoff, 1974a ; Meyerhoff et al., 1996b). 大陸や極の移動は、特定の期間の局所的あるいは広域的な古気候特性を説明するかもしれないが、同じ期間の全地球的気候を説明しえないのは既定の事実である。

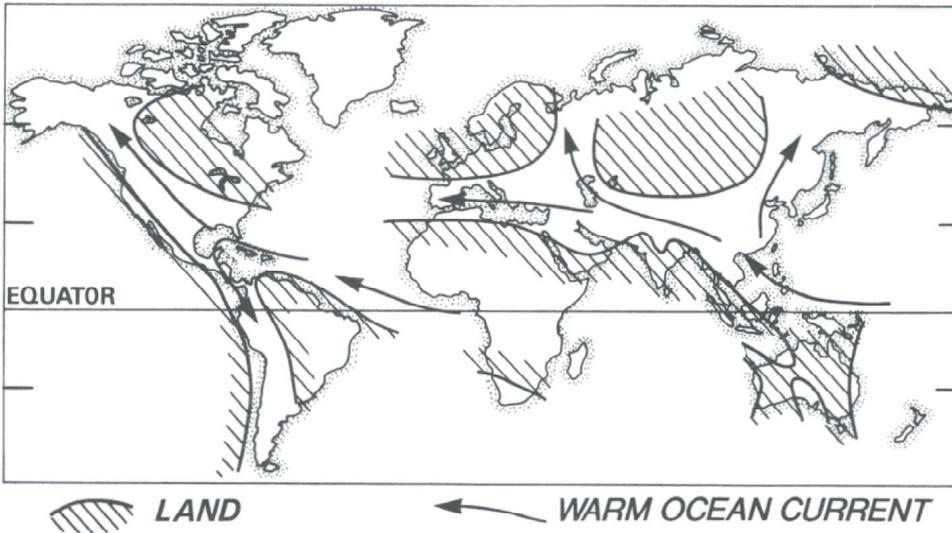


図 7.6. 前期二畳紀の水温分布を説明する仮想海流系 (Dickins, 1994a の図 9).

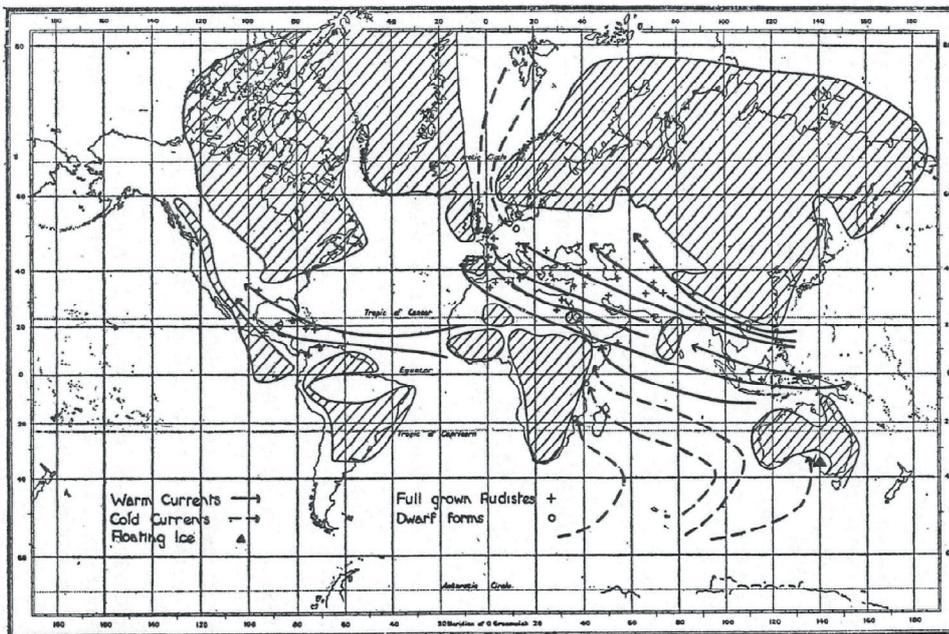


図 7.7. 後期白亜紀の古地理. 海陸分布, 推定海流系, および造礁性厚歯二枚貝の分布を示す (Brooks, 1949 の図 28).

蒸発岩は蒸散が給水をうわまわる温暖あるいは高温気候で形成される, と一般に考えられている. しかし, 気候以外の要素も蒸発岩形成にきわめて重要であることを示すすぐれた地球化学的証拠がある (Hardie, 1990, 1991). Meyerhoff (1970a, b) は, 後期原生代~現在の全蒸発岩の体積および分布面積の 95% が, 今日でいうと年間降水量 100cm 以下, すなわち, 今日の乾燥風地帯に存在することをみいだした. 古生代後期の蒸発岩は礁やフズリナが繁栄していた地帯に関係していて, 後期原生代~古生代前期には蒸発岩が暖流域に隣接して堆積するのが一般的であった (Meyerhoff et al., 1996b).

蒸発岩の分布にもとづいて, Meyerhoff (1970b) は世界的な温暖化や寒冷化を示すグラフをまとめた (図 7.8). 縦軸は地質時代, 横軸は蒸発岩が堆積した地帯の絶対緯度である. 曲線の右への移動は, 地球が均一に温暖化した時代 (たとえば, 原生代後期~カンブリア紀, デボン紀, および二畳 - 三畳紀) を示し, 蒸発岩極大期とよばれる. そのような時代の気候帯は, 幅広い炎熱帯 (幅 90° ~

120°) と, 両極域を占める温帯の 2 つだけであった. 曲線の左への移動は地球が寒冷化した時代を示し, 蒸発岩極小期あるいは氷床極大期とよばれる. そのような時代には (今日と同様に) 3 つの気候帯, すなわち, 1 つの炎熱帯 (幅 60° ~ 70°), 中緯度における 2 つの温帯, および, 極域の凍結帯が存在する. 図 7.8 の曲線は, 図 7.2 や図 7.3 の曲線によく合致することに注意されたい.

このようなさまざまな気候状態は子午線勾配 (ΔT) を反映したもので, この勾配は赤道 - 両極間における熱輸送効率に参与する. Cronin (2010) によると, 現在は, 寒冷な新生代の中では, 比較的温暖な時代であり, ΔT は約 33°C である. 地球全体が温暖であった中生代の ΔT は 19 ~ 23°C で, 同様に温暖であった暁新世 - 始新世の最温暖期 (55Ma) には 15°C であった. ところが, 最終氷期 (21-22 ka) には約 50°C にも達した.

デボン紀以降の大半の期間には, 軸対称に地球をとりまく 2 つの石炭堆積帯が, 蒸発岩地帯の南北両側にそれ

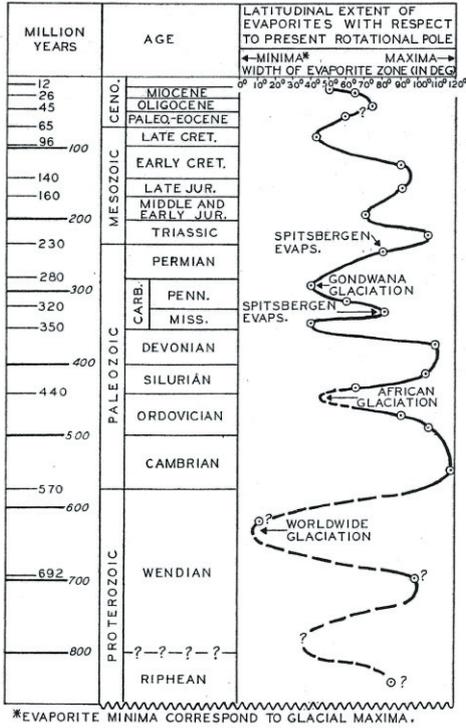


図 7.8. 蒸発岩の最大および最小期間 (Meyerhoff & Meyerhoff, 1974a の図 2).

ぞれ 1 帯ずつ存在した。そして、第 3 の熱帯性石炭地帯がときどき、とくに新生代に存在した。全世界の石炭鉱床の 88% が大陸 [複数] の東側や、北西ヨーロッパおよび北西アジアの北極海沿岸に胚胎し、これらの地域は、今日でいう温帯の最大多雨地域にあたる。北西ヨーロッパとそれに隣接する北極圏アジアは例外的存在である。というのは、北大西洋に限って、主要な含水蒸気風系と暖流 (メキシコ湾流) が、大陸 (北米大陸) 東岸からもう 1 つの大陸 (ユーラシア) 北西岸へ横切っているからだ (Meyerhoff et al., 1996b ; Meyerhoff and Teichert, 1971)。蒸発岩地帯と石炭地帯の両帯が、今日の気候学的赤道から北へ大きく変位していることに注目される。

Meyerhoff (1970a, b) は、デボン紀～中新世の蒸発岩と石炭堆積物の分布が全般的に軸対称性を示す多くの図面を示した。彼は、高緯度の石炭帯と低緯度の蒸発岩帯の軸対称性が先三疊紀と中新世にはあまり明確ではないこと、古生代岩石の世界分布が均一でないこと、そして、北大西洋と北極海の歴史を論じた。

彼は、後期原生代～二疊紀前期の高緯度蒸発岩がカナダ

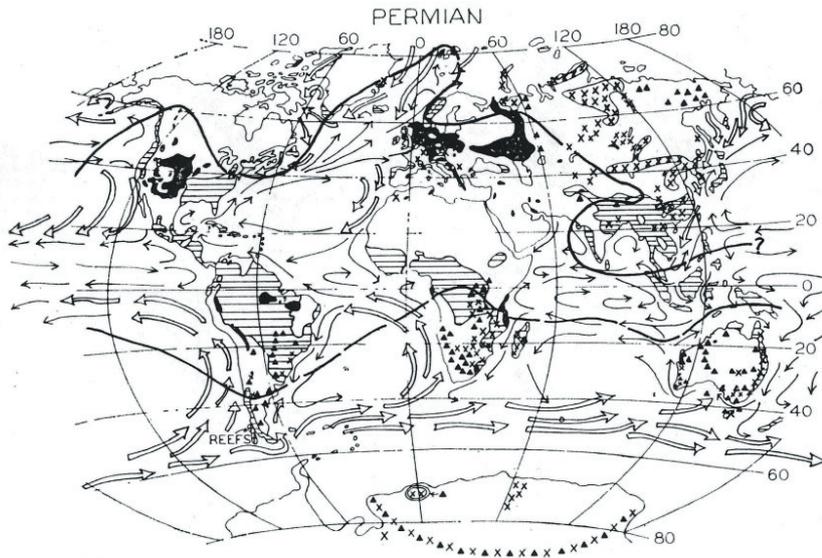


図 7.9. 二疊紀の蒸発岩、石炭、および氷縞粘土の分布。X=石炭、黒塗り=蒸発岩、黒三角=標高粘土。主要な石炭分布域と主要な蒸発岩域は、太黒線で境される (現在のメキシコ湾流の湾曲域では北へ大きく変位していることに注意せよ)。現在の暖流が矢印付一本線で、寒流が矢印付二本線で示されている。水平線ハッチは、現在の年間降水量 >100cm 地帯である。(Meyerhoff, 1973 の図 2 : University of Chicago Press の許可をえて転載)

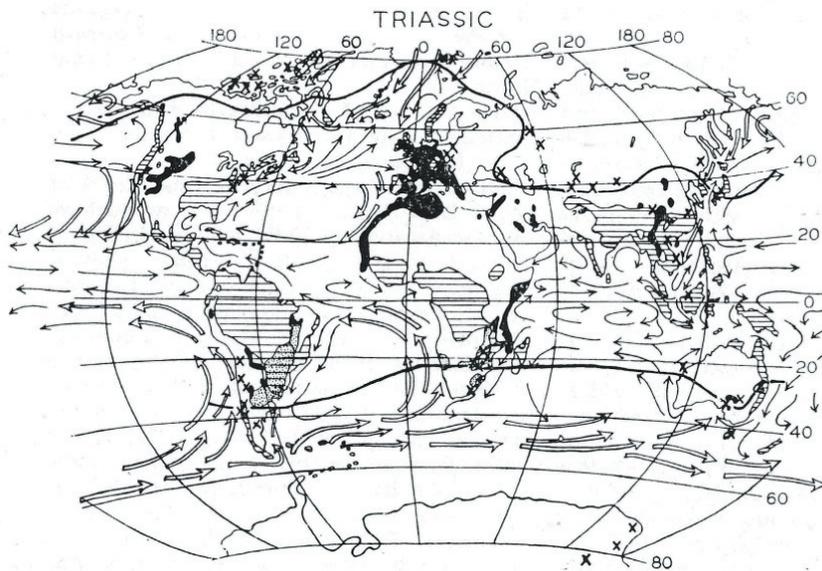


図 7.10. 三疊紀の蒸発岩、石炭、および風成砂の分布。三疊紀は蒸発岩極大期であり、著しく幅広い蒸発岩地帯に注意せよ。凡例は図 7.9 と同じであるが、次の 2 つの相違がみとめられる。(a) 三疊紀の氷縞粘土は知られていない。(b) 風成砂および部分的風成砂堆積物は、砂目模様で示される。(Meyerhoff, 1973 の図 3 : University of Chicago Press の許可をえて転載)

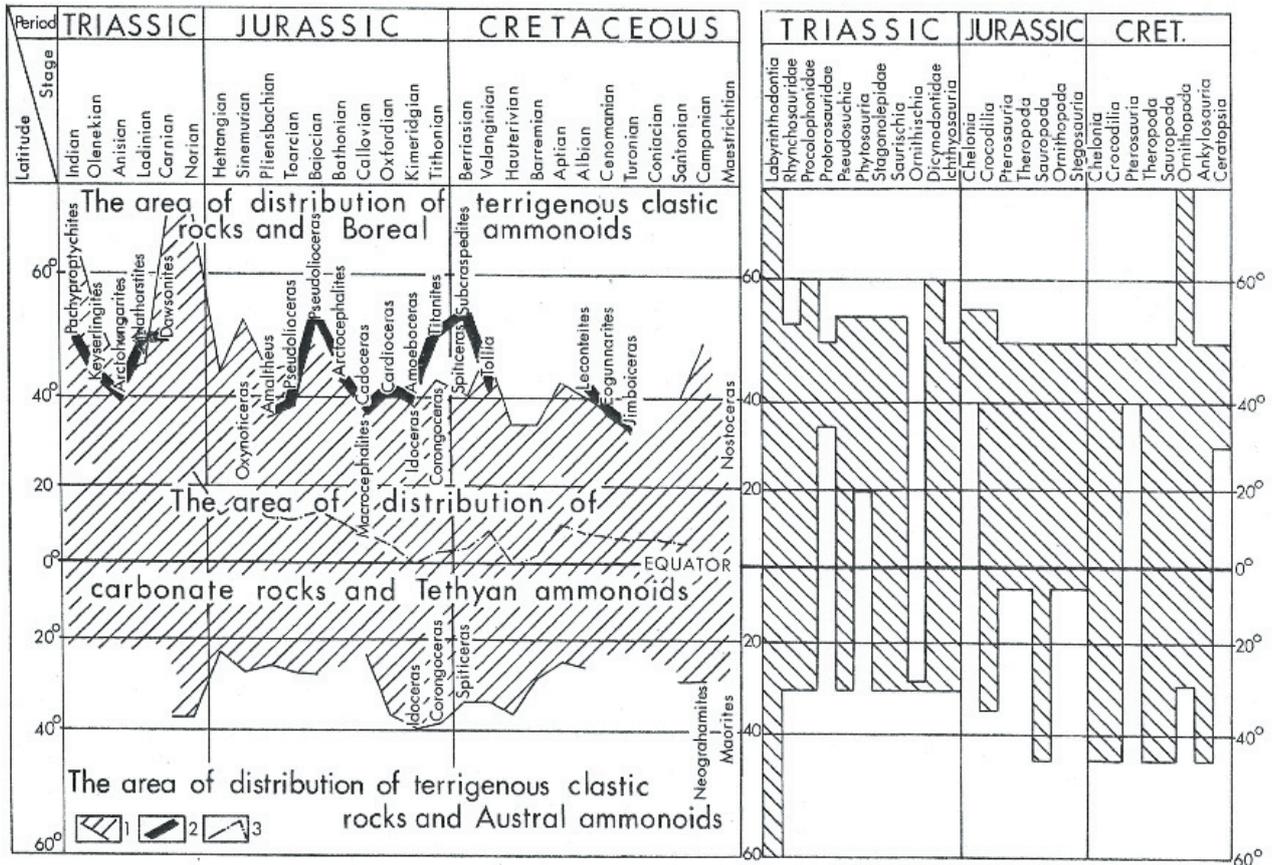


図 7.11. 中生代のアンモナイト類，炭酸塩岩，陸源砕屑岩，および四足動物群の緯度分布。1=炭酸塩岩の南北縁，2=北方型および、いくつかのテチス・太平洋型アンモナイトの分布南限，3=炭酸塩岩帯の中央部（気候的赤道と推定される）。(Khudoley, 1974 の図 1)

やユーラシアに広く分布しているが、同時代の南半球の蒸発岩は原生代よりも後の時代には常に 20° ~ 40° S にほぼ決まって存在することに注目した。過去の高緯度蒸発岩堆積物は、そのほぼすべてが、ユーラシア-北極海盆と北大西洋から大陸へ侵入した海に堆積した海成層に関係して形成されている。しかし、カナダ-北極海盆から侵入した海域とは関係がなく、この海域と上記海域とは、原生界からなる Lomonosov 障壁があるために不連続になっていて、また、始生界からなる Bering-Chukotsk 陸棚によって北太平洋から隔てられていた。デボン紀後には、蒸発岩の堆積中心は大西洋側へ系統的に移動した。大西洋には、Franz Josef および Faeroes-Greenland 障壁があった。原生代後期～中生代の蒸発岩極大期における高緯度蒸発岩堆積物の形成に必要な温度は、原生代中頃以降つづいてきたメキシコ湾流～北大西洋海流系が維持されていたことに由来する。Meyerhoff は、北極海と北大西洋を横断する障壁の発達史を精細に復元し、かつての北半球高緯度帯における蒸発岩の存在、および、それらの南方への漸進に関する説明としては唯一の研究結果となっている。

Khudoley(1974) は、中生代の炭酸塩岩，陸源砕屑岩，アンモナイト（絶滅軟体動物群），および四足動物群の緯度分布が現在の大陸と地理極に調和的であることを明らかにした（図 7.11）。炭酸塩岩は平均して 40° ~ 45° N および ~ 30° S までひろがり，熱的赤道の顕著な北方

偏移を示す。炭酸塩岩帯の幅は、中生代を通じて、三畳紀の 90° から白亜紀の 65° までだいに減少した。炭酸塩岩帯の中央線の北方偏移は、三畳紀では約 24°，ジュラ紀に 19°，白亜紀には 12° となり，全地球的気候変化を反映している。

二畳 - 三畳紀の氷河作用 (Permo-Carboniferous glaciations)

石炭紀と二畳紀の氷床は、南極，Malvinas 諸島，南アフリカ，南アメリカ，インドおよびオーストラリアのすべてではないにしても、それぞれの一部を覆っていた。大陸漂移の支持者たちは、南極付近に存在した Gondwana 大陸という方法でこの氷河作用を説明することができる主張する。しかし、氷河作用は、暖流，湿潤暖気，および、氷床水によって形成された寒冷風の相互作用を必要とする (Coleman, 1925, 1932 ; Brooks, 1949)。大陸氷床を維持するための湿気は 2,500km 以上にもわたって運搬されないにもかかわらず、提案された超大陸の中央部は、水蒸気源となる最寄りの海洋から 3,000 ~ 4,000km も離れている。ローラシア - Gondwana 大陸に関するいずれの復元においても、"超大陸" 内部にはこの水蒸気量の 1/10 さえも届かない (Meyerhoff and Handing, 1971)。氷床はパンゲアの周辺部にだけ形成され、その内陸部は（現在のシベリア内陸部のような）広大な極寒の砂漠地帯であっただろう (Meyerhoff, 1970a ; Meyerhoff &

Teichert, 1971). パンゲアの内部の浅い大陸縁辺海では、必要な湿気を供給しえなかつただろう。というのは、これらの縁辺海は、現在のハドソン湾のように、冬期に全面結氷して蒸散がさまたげられるからである。 Gondwana大陸とローラシア大陸の氷床域の大部分は、オルドビス紀後期にも、湿潤な海洋-大気循環の到達範囲よりはるかに内陸側に位置していただろう。

二畳-石炭紀氷河作用は、大陸の現在の位置においてより容易に説明される。ほぼすべての大陸氷床の中心部が現在の海岸線の近くに、あるいは、現在の海岸線から遠くない高い高原や山地に存在していた。アフリカの南部

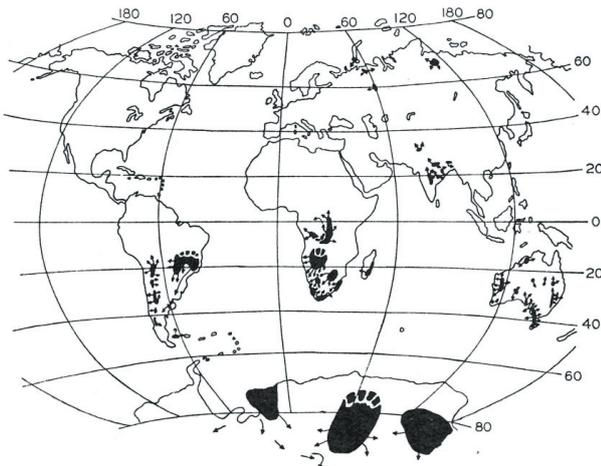


図 7.12. 石炭-二畳紀における本来の氷床中心の位置—それらのほとんどは、高い山地域にある。矢印は推定される流動方向。南極を除くと、いずれの氷床中心部も、北アメリカの更新世 Keewatin 氷床の規模の 1/4 以上はなかつた。(Meyerhoff and Teichert, 1971 の図 3: University of Chicago Press の許可をえて転載)

のいくつかと、中央部のほとんどの氷床、アンデスの多くの氷床、オーストラリアの一部の氷床は、インドとブラジルにおける広域氷床と同様に、山岳氷河が大きく発達したものであろう。北半球に比べて、南半球により大きな氷床中心が存在する。その理由は、二畳-石炭紀の大陸は、南半球でより平均高度が高かったことに求められる。シベリアの北部と東部の一部と現在のウラル山脈を除くと、内海によって暖められた低地が当時の北半球

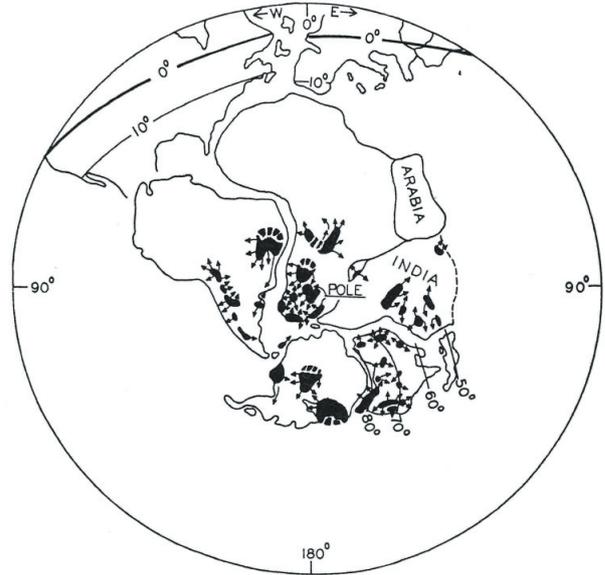


図 7.13. 復元された二畳-三畳紀の Gondwana 大陸。氷床中心域を示す。各氷床の分布は離れていて、個々に識別される。内陸部の氷床 (ブラジル東部、アフリカ、Malagasy、およびオーストラリアの一部) は海岸から 3,000 ~ 4,000km も離れていて、湿潤風の到達範囲をはるかに超えている (Meyerhoff and Teichert, 1971 の図 13: University of Chicago Press の許可をえて転載)。

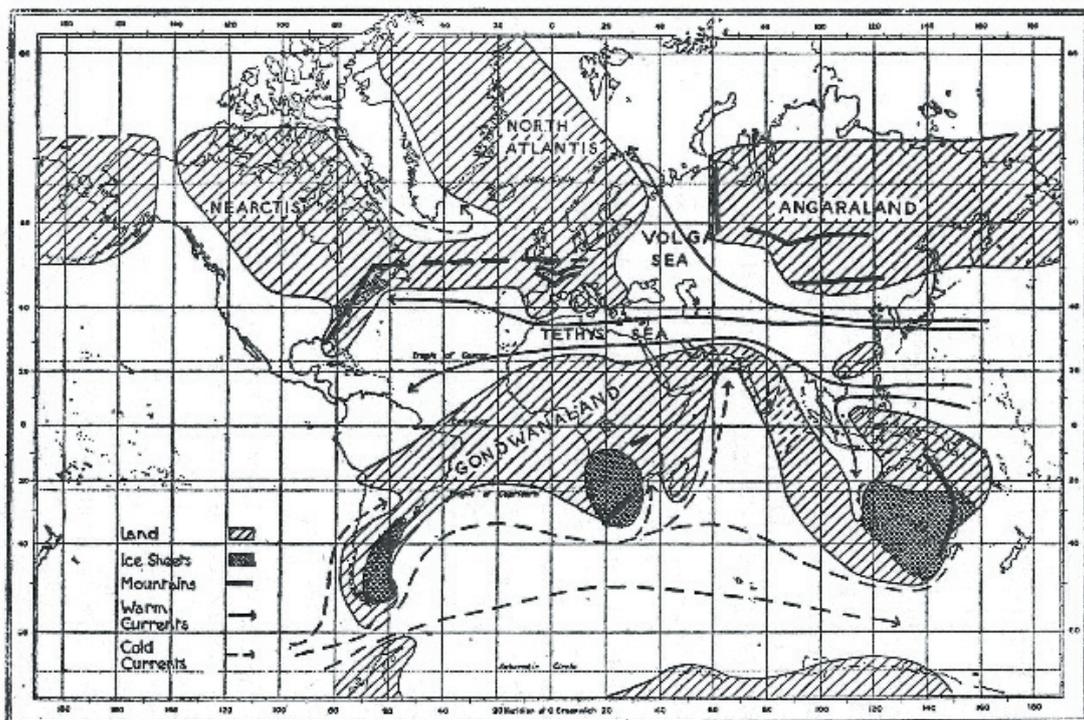


図 7.14. 後期石炭紀の古地理 (Brooks, 1949 の図 29). 前期石炭紀には、Gondwana大陸域のうち破線で示された領域は、海面下にあっただろう。

の特徴であった。二畳 - 石炭紀の南半球における大きな高度 (北半球における小さな高度) から、鮮新世～完新世における北半球における大きな高度 (南半球における小さな高度) への変化は、北極海～北大西洋における障壁の南方移動とともに、二畳 - 石炭紀から鮮新世～完新世までの大陸氷床の位置変化を完全に説明する。

湿潤大気は、 Gondwana大陸の石炭紀以降の堆積層に知られる豊かな生物の繁殖にも必要であった。 Gondwanaおよびローラシア大陸内部の広範囲にわたる石炭紀、二畳紀、およびさらに新しい時代の石炭堆積物の形成には、150～200cmの年間降水量が必要である。したがって、大陸が相互に接合していたならばこれらの堆積物は形成されず、湿地ではなく砂漠が存在したであろう (Meyerhoff and Harding, 1971; Meyerhoff et al., 1996b)。

Brooks(1949) は、石炭紀後期における陸塊の分布と高度 (大陸移動も極移動も仮定されていない) と卓越する風系と海流が、低緯度に氷床を発達させ、比較的温和な気候がより北半球側に存在した原因であったと考察した。当時の南半球から北半球への熱輸送は、それ以降のいかなる時代よりも大きかったとみられる。 Brooksは太平洋へひらいた幅広い漏斗状の海域—テチス海に沿って、海域が大西洋まで連続していた—と想定した (Brooks, in Simpson et al., 1930)。 Brooksは、石炭紀中頃の Gondwana大陸は、南アメリカからオーストラリアまで連続していたわけではなく、南北方向の海峡によって3つか、4つの陸塊に分離されていたであろう、考えている。これは、テチス海と南半球の海域 [Southern Ocean] との間に自由な海水循環をもたらし、南半球の海水温を著しく上昇させ、石炭紀の前期 / 中期境界における大きな気候変化を説明するのに有効である。

始新世 - 漸新世境界 (Eocene-Oligocene boundary)

レンヂテクトニクスによると、始新世 / 漸新世 (E-O) 境界 (33.9 Ma) の前後に、極が約 35° 移動して、

200～300 万年後には現在の位置の近くへ移動した (Storretvedt, 1997, 2003)。これが、その時の劇的な寒冷化を説明するという。こうして、北ヨーロッパ、アイスランド、およびグリーンランドの温暖環境が終了した。中新世中頃になると、両極がふたたび以前の位置にもどった。これによって、ヨーロッパが新しい温暖期を迎え、また、地中海東部における古地磁気伏角が再び水平近くにもどった理由を説明することができる。両極が現在の位置に最終的に移動するのは、約 5Ma である、という (Storretvedt and Bouzari, 2012)。 Storretvedt and Buchardt の同位体古温度曲線 (図 7.15) は、北海南部で得られた底生有孔虫の同位体データにもとづいている。これは、ヨーロッパ北西部で初めて得られた同位体古温度曲線である。それ以降、それに代わる高解像度データが、地球全体の広範囲から入手できるようになった。

Zachos et al. (2001) の底生有孔虫の酸素同位体 ($\delta^{18}O$) 曲線が、図 7.16 に示される。その変化は、全地球的温暖化と寒冷化や、氷床の成長と崩壊を反映する。過去 6,500 万年間に、多くの脈動をとめないながら地球がしだいに寒冷化したことがわかる。いくつかの温暖期 (たとえば、中期始新世気候温暖期、後期漸新世温暖化事件、中新世中頃気候温暖期) が両半球で認められ、対比されてきた。

図 7.16 は、始新世 / 漸新世境界における 4°C 以上におよぶ気温減少と、漸新世後期における同様の気温増加を示す。 Zachos et al. (2001) は、始新世後期に先立つ全般的な $\delta^{18}O$ の増加は深海水温が約 12°C から約 4.5°C に低下したこと由来するという。それ以降のすべての $\delta^{18}O$ の変化、とくに 34Ma の急変は、水量と気温の複合効果を反映する。漸新世初期の寒冷化と南極氷床の急激な拡大後も、深海 $\delta^{18}O$ 値は比較的高いままであり、それは、永続的氷床の形成 (その質量は現在の氷床の 50% に達する) と約 4°C の底層水温を意味している。このような氷床は、温暖化によって南極氷床の縮小した漸新世後期 (26～27 Ma) にも保持された。この時期から中新世

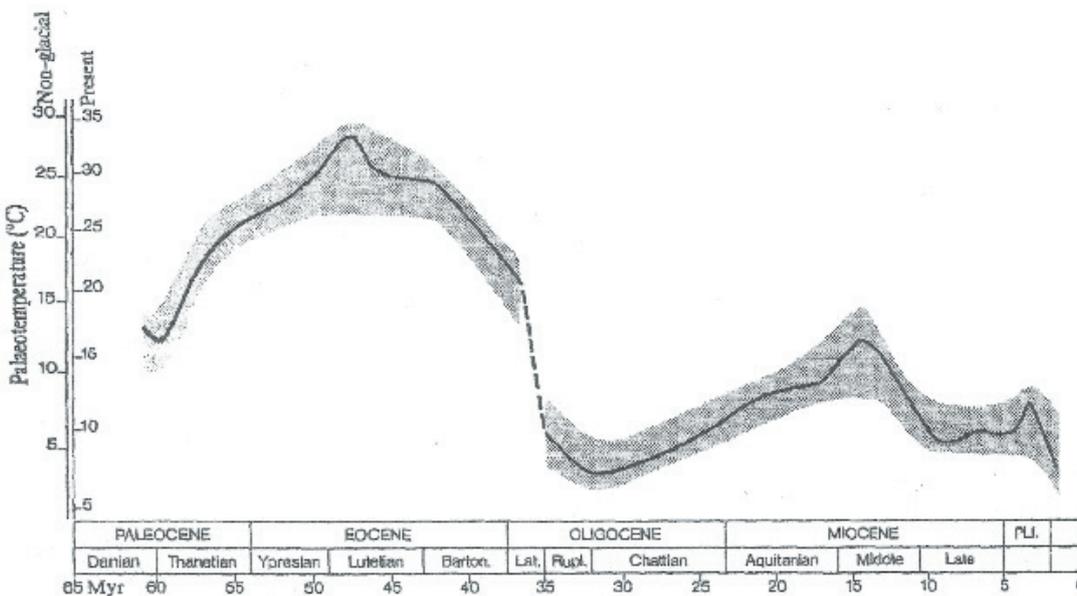


図 7.15. 北海における第三紀の同位体温度曲線。不確定性は、陰影領域によって示される (Buchardt, 1978)。

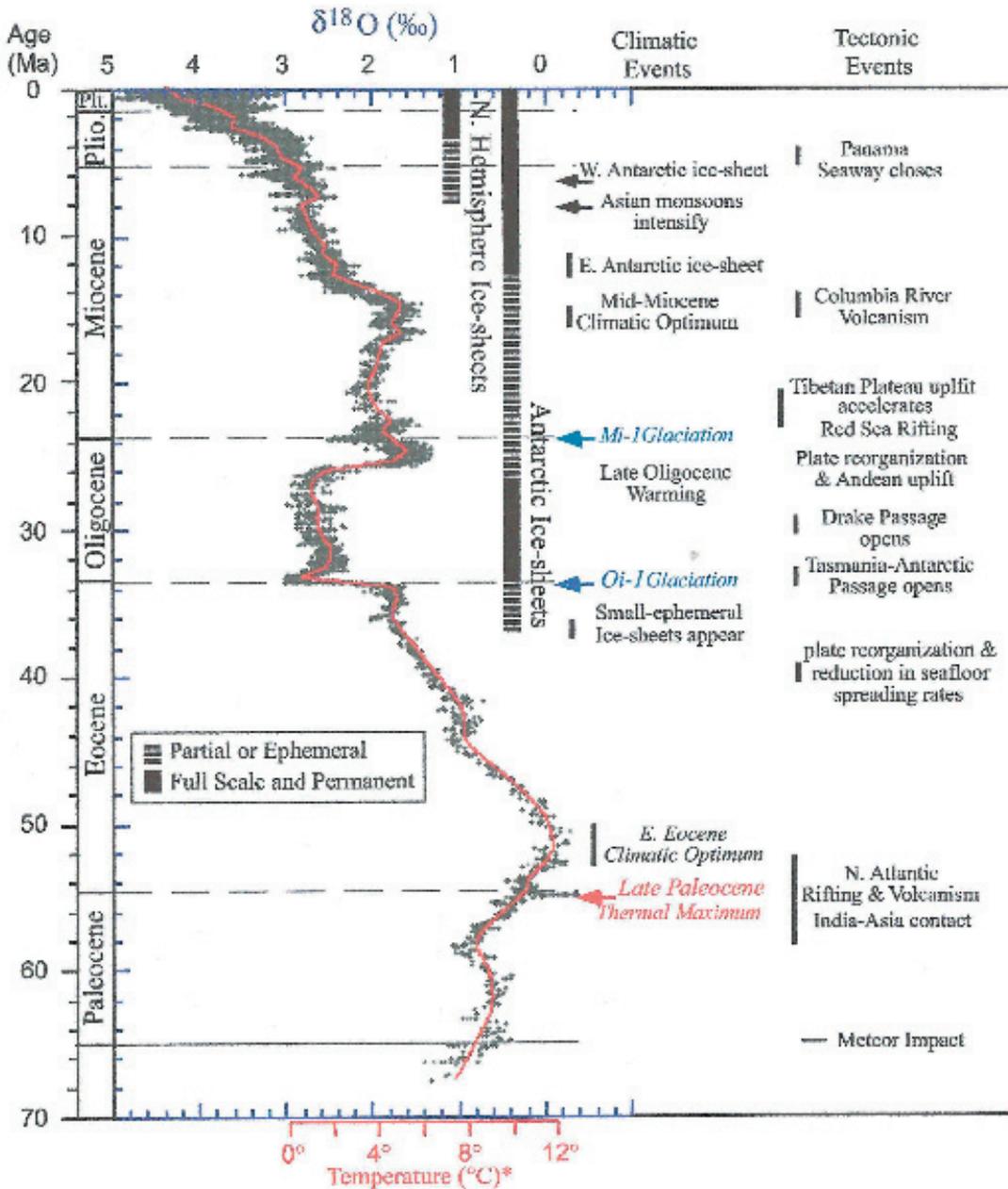


図 7.16. 40 以上の DSDP および ODP 掘削地点のデータにもとづく全地球的深海酸素同位体記録。(Zachos et al., 2001 の図 2)

中頃までの期間には、数回の短かい氷河期間（たとえば、Mi 事件）を除くと、全地球的氷量は少なく、底層水温はいくぶん高めに保たれていた。この温暖期間は中新世中期～後期高温期（17～15 Ma）に最高潮に達し、その後はしだいに寒冷化して、10 Ma までには南極における大規模氷床が復活した。

南極では、始新世後期を通じて小規模な一時的氷床が存在した。漸新世初期に気候的閾値に達したことは明らかで、大規模な氷床が急速に拡大し、その結果、短期間ながらたいへん顕著な Oi-1 氷河作用が生じた。表層海面温度は広い範囲にわたって 4°C 以上低下し、深層水温は 3～4°C まで低下した (Salamy and Zachos, 1999)。Oi-1 事件は 40 万年間つづいた。この事件は、気候/海洋系の再編成をもたらした。たとえば、海洋生物源堆積物分布の全世界的移動、海洋栄養の全般的増大、および、炭酸塩補償深度の大規模な低下、などである (Zachos et al.,

2001)。高解像度同位体記録によると、Oi-1 事件を示す δ¹⁸O の全般的増大が 35 万年未満の期間のうちに起こり、そして、その変化の半分が最後の 4～5 万年間に発生したことを示す。この低温と広大な大陸氷床が維持された期間は、およそ 40 万年間である。この期間には、約 10 万年単位の増減サイクルがすくなくとも 2 回起きていて (Oi-1a と Oi-1b)、おそらく、それらにはより短周期の事件も含まれていたであろう (Zachos et al., 1996)。

北海南部の漸新統についての De Man and Van Simaey (2004) の底生有孔虫古水温曲線は E-O 境界を含まないが、漸新世の Rupelian 期と Chattian 期との境界 (28.1 Ma) における約 25°C の急激な水温上昇を示す。一般に Rupelian の群集には寒冷～冷温群が卓越し、計算された底層水の古水温は 10°C を超えることはない。いっぽう、Chattian 期の始まりは、暖かい海水に生息する豊富な熱帯～亜熱帯群によって特徴づけられ、計算された底層水

の古水温は 20°C を超える。Chattian 期のなかでは、時間とともに温暖水温を示す亜熱帯種が減少し、冷水群がより頻繁に出現するようになる。古気候復元に別の方法を用いた以前の研究も、北西ヨーロッパでは漸新世後期に温暖～熱帯環境が出現したことを確認する。

極移動によって新生代の気候変動を説明しようとするレンチテクトニクスは、まちがって信じられたものである。極を移動させることは、気候帯の位置を全地球的に変化させ、いくつかの地域はより暖かくなり、いくつかはより寒くなる。それが、そのまま全地球的温暖化や寒冷化を発生させることはない。E-O 境界頃にはじまった急速な極移動が Oi-1 氷河作用のひきがねになったと喧伝されるが、氷河作用は 100 万年以内に終了した。ところが、両極はそれらの現在の位置へ向かって移動しつづけてきたと想定されている。著しい温暖化事件が漸新世後期に急速にすすんだが、レンチテクトニクスが極移動に由来する気候変動として次に選んだのは中新世中頃の温暖化である。より多くの極移動事件を追加することもできるが、いずれにしても、全地球的気候変動を説明するためには他の要因を加えることが必要である。両極がヨーヨーのように前進と後退をくりかえせばくりかえすほど、提案されたシナリオはもっともらしさを失う。レンチテクトニクスは確実な古地磁気学的基礎に立脚して主張する以上、これらの追加的事件を支持する全地球的な古地磁気データが発見されなければならない。そのような場合、不都合な古地磁気極の位置と年代測定を除去するという戦術をとることによって、この課題は容易に達成されるだろう。

次の表は、ロモノソフ海嶺 (87.87°N) に関する海洋データから推定された海面温度 (SST) である (O'Regan et al., 2011)。最初の 2 組は暁新世 / 始新世の、次の 9 組は始新世の、最後の 2 組は中新世のデータである。

Age (Ma)	≤55	55	≤53.5	53.5	49	49	48	46	45	44.4	44.4	18	18
SST (°C)	17.5	23	22	26.5	25	9	13.5	15	8.2	4.7	10	19.7	13

レンチテクトニクスの見解によると、ロモノソフ海嶺の掘削地点が現在の位置あるいはその近傍に位置していた最後の 2 つを除くと、これらのいずれの期間においても約 55°N よりも南に位置していただろう。約 35 Ma に突然に発生したとされる 35° の緯度移動は、これらのデータを説明できない。

E-O 境界では、全緯度にわたって寒冷化した証拠がある。Coxall and Pearson (2007) は、低緯度、中緯度と高緯度の陸域での寒冷化を報告している。また Liu et al. (2009) は、多くの海洋観測点から海面温度の同様な記録にもとづいて、高緯度域では E-O 気候変化期 (37 ~ 33 Ma) に海面温度が平均 4.8°C ほど寒冷化したと結論づけた。グリーンランドでは、E-O 境界付近で約 3 ~ 5°C のゆっくりとした長期的寒冷化がはじまった (Schouten et al., 2008)。ノルウェー - グリーンランド海では、E-O 境

界で約 5°C の寒冷化が起きた (O'Regan et al., 2011)。北アメリカ内陸部では、始新世の平均気温は安定していたが、漸新世前期の約 40 万年間で 8 ± 3°C の寒冷化が起こった (Zanazzi et al., 2007)。北半球低緯度地帯における沿岸海棲魚類の耳石と軟体動物殻の酸素同位体は、夏期や年間平均水温にほとんど変化がないが、始新世末よりも後に冬期水温が著しく低下したことを示す (Ivany et al., 2000 ; Kobayashi et al., 2001)。全世界的寒冷化はとくに高緯度で顕著であったが、熱帯の海面温度も約 2.5°C 低下した (Lear et al., 2008)。

南極では、早くも 42 ~ 43Ma に氷床が成長した証拠がある (Tripathi et al., 2005)。伝統的な見方では、北半球における氷床成長がはじまったのは約 15Ma 以降とされる。しかし、氷山由来岩屑にもとづいて、グリーンランド氷河が 44 ~ 38Ma まで遡るとされ (Tripathi et al., 2008 ; Eldrett et al., 2007)、北極海には海水が 46Ma 頃に一時的に形成された (St. John, 2008 ; O'Regan et al., 2011)。レンチテクトニクスによると、当時のグリーンランド中央部 (72°N/40°W) は 40°N よりも高緯度にはなかった。

新生代の全地球海洋は、最初は、表層水・底層水とも比較的温かく、比較的弱く成層していたが、鉛直温度勾配が大きくなったためにより温かい表層水とより冷たい底層水に分離し、強固な成層構造が形成された (Cronin, 2010)。次の 4 つの段階を経て、12°C におよぶ水温低下がおこった: 始新世前期～中頃、E-O 境界、中新世中期～後期、および鮮新 - 更新世。このようなパターンは、深海有孔虫同位体や、他の海陸の記録にもとづいて推定される気候変動と全面的に合致する。

水道 (ocean gateway) の開閉は、海洋循環と熱輸送に大きく影響することが知られている。現在の南極は、強い南極還流 (Antarctic Circumpolar Current: ACC) によって、世界の他の領域から孤立している。南極の孤立と ACC による強い海流帯 (西から東) の形成は 2 つの主要な海洋水道—オーストラリアと南極の間のタスマニア水道、ならびに、南アメリカと南極との間のドレーク海峡—が開口した結果である。とくにタスマニア水道の開口は、E-O 気候転換に関与した。これらの水道の開口と拡幅はふつうはプレート運動と海洋底拡大に起因するとされるが、鉛直テクトニクスも同様な改変をもたらすだろう。

タスマニア陸橋は大きく沈降して、漸新世初期にはタスマニア水道域に浅海性水道を形成し、このときに、ACC 表層流が発生した。深海性 (2,000m) 水道が十分に発達したのは、34Ma 頃かその直後であっただろう。南極と南アメリカの間をつなぐ陸域も、第三紀前期にしだいに沈降して、ドレーク海峡がゆっくりと開口した。始新世後期 (約 50Ma) には、沈降した大陸棚を横切って浅海性水道が発生し、34 ~ 30Ma までに連続的な深海性水道 (1,000 ~ 3,000m) が形成され、南極大陸全体をとりまく還流が完成した (Cronin, 2010)。これらの事件は、

南半球における低緯度から高緯度への子午線方向の海洋熱輸送をさまたげ、南極氷床を育成し、今日と同様な塩熱循環を開始させた (Kennett and Shackleton, 1976 ; Kennett and Exon, 2004).

古生物地理 (Palaeobiogeography)

詳細な研究を行った Meyerhoff et al. (1996b) は、植物群・動物群の分布にもとづくと、もっとも主要な生物地理境界は、プレートテクトニクスによって想定され、また、一部はコンピュータによって描かれたプレート境界に一致しないことを示した。提案されている大陸移動は、生物地理境界に関する既知の、あるいは必須の移動路や方向と適合しない。ほとんどの場合、これらの不一致はたいへん大きく、概略的な一致さえも主張できる状況ではない。著者たちは、次のように注意した。「難題は、プレートテクトニクスの想定と野外データの間の重大な矛盾—それには数 1,000km にもわたるプレート境界も含まれる—が、知らされず、認められず、研究されないまま許容されていることである」(p. 3)。Meyerhoff らの原稿にコメントした地球科学専攻の大学院生たちは、次のように述べたという。「この、全地質時代にわたる生物多様性に関する全地球的研究が正しく、十分に信頼できるものであれば、プレートテクトニクスについて私たちに教えられてきたものは "Globaloney" (globe 地球 + baloney たわごと : 訳者注) と称したほうがよい」と (p. ix)。

Meyerhoff et al. (1996b) は、顕生代のすべてではないが、その大半を通じて、"北方系" および "南方" 系の生物を含む地層が互層する幅広い—数 100km ~ 5,000km—地理的地帯が存在し、同一の地層に北方系と南方系の群集が混在することを確証した。北方起源の温暖帯には古生代後のテチス帯が含まれるが、より寒冷な南方帯には古生代中頃の Malvinokaffric と古生代後期以降の Gondwana 帯が含まれる。

図 8.1 と図 8.2 は、カンブリア紀中頃～白亜紀前期の動植物群集の分布が新生代のそれらにほぼ一致することを確証する。"さしこまれた地帯" の南北縁や、図 8.2 に示される特殊な生物群の南北の分布境界は、カンブリア紀中頃～白亜紀前期の生物分布に顕著な二極性があることを示す。したがって、大規模な大陸漂移や極移動を想定しなくても、現在の地球上における南北移動によって、古生物地理がよりたやすく説明されるのである。完全に緯線に沿ってのびる生物分布や、さまざまな地理的・気候的障壁を示すすぐれた証拠が、過去のいずれの時期にも存在していたのである。

プレートテクトニクスによると、アマゾン川以北の南アメリカ (面積 3,300,000km²) は、オルドビス紀以来、生物地理学的には北アメリカ "プレート" に属している。さらに、もう 1 つの重要な南北方向の生物地理境界が今日のアンデス地帯にあり、西側の暖水生物群と東側の冷水生物群を境する。この境界はカンブリア紀に初めて出

現し、時間とともに東西方向に移動しながらも、二畳紀までつづいた。もしプレートテクトニクスの考え方を適用すると、南アメリカの太平洋岸から 100 ~ 300km 内陸寄りに長さ 7,500km の縫合帯が想定されることになるだろう。プレートモデルは、ヨーロッパとアフリカ間の層序的連続性にもかかわらず、地中海の全長にわたる縫合帯を必要とする。いっぽう、デボン紀以降の生物地理的データは、ダカルからアラビアに至るアフリカ大陸内部に不連続が存在することを示す (Meyerhoff et al., 1996b)。

アジア～南西太平洋をみると、Malvinokaffric 帯と Gondwana 帯を同時代の北方圏 (たとえば、古生代後のテチス帯) から境するために用いられる一般的境界は、インドス-ツァンポー "縫合帯" である。それは、中央アジア南部～東南アジアをよこぎる範囲だけでも 5,000km 以上の長さには達し、さらに西方へはトルコの Taurus 山脈とキプロスの Troodos 山塊へ伸び、南東へはバブアニューギニアまで連続する。多くのプレートテクトニクスモデルでは、それは、北方および南方のプレート群の境界とみられている。Gondwana 生物群がこの縫合帯の北側で発見されると、まずもって、それらの認定が無視される。それらのいくつかが認められると、衝突帯は北方へ移され、アジアの広大な領域をつぎつぎに併呑した。Meyerhoff et al. (1996b) は、次のように述べている。

「テチス生物群は縫合帯以南のインド剛塊と他の地域の多くの産地に知られているが、Gondwana 生物群を収容するために移動をつづけ、決して逆行することはなかった! テチス型化石が縫合帯の南側 ("北側" の誤植? : 訳者) で発見されると、それらは Gondwana 大陸の北海岸を示すとされる。これによって、アンガラ大陸の南海岸が想定されるが、この問題を議論した文献はほとんど存在しない」(p.8)。

同様に、いわゆるニュージーランドの場に代表的なテチス生物群が発見されると、それは外来地帯であることの証拠とされる。しかし、逆の状況—たとえば、Gondwana 生物群がチベット北部で発見されるような状況—が生じると、いかなる年代期間が必要になろうとも、南方大陸と北方大陸の縫合帯全体が北へ移動させられる。

Taurus-ザグロス-インドス-ヤールン境界は Malvinokaffric 帯には有効ではない。というのは、この縫合帯を越えても生物群が変化しないからである。この境界は、おもに新 Gondwana 帯に適用されてきた。しかし、それは、ここでも有効ではない。というのは、Gondwana 要素 (二畳紀前期～白亜紀前期) が北方へはシベリアのツングース盆地、モンゴル、中国東北部、沿海州地域 (ウラジオストク北部)、およびシベリア北東部のコリマ川盆地までひろがっているからである。逆に、北方の、そして、とくにテチス帯の生物群は南方へニュージーランド、オーストラリア西部、オーストラリアの Northern Territory、インド南部、サウジアラビアまでひ

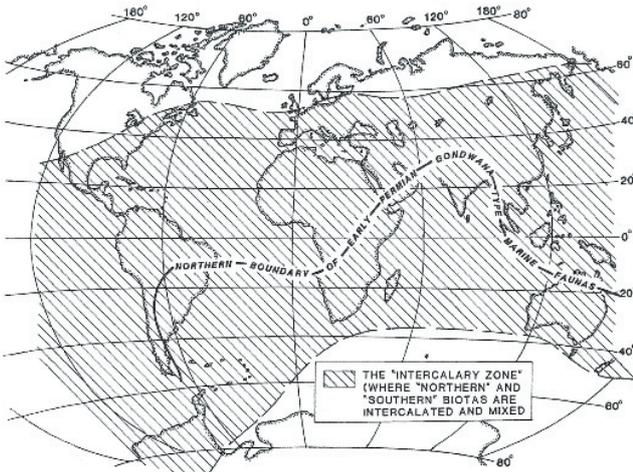


図 8.1. カンブリア紀中頃～白亜紀前期における "さしこまれた地帯" (斜め斜線). それは, 北方型および南方型生物が混在する地帯である. 太線は, 二疊紀初期の Gondwana 型海棲動物化石産地の北限. "さしこまれた地帯" の北限は, 南方型生物群のすべての時代を通じた北限であり, 南限は北方型生物群のすべての時代を通じた南限である. (Meyerhoff et al., 1996b の図 17; アメリカ地質学会の許可をえて転載.)

ろがっている (Meyerhoff et al., 1996b). 南方大陸における *Glossopteris* 植物群の広大な分布がかつての巨大な Gondwana 大陸の存在を支持する, としばしば主張される. しかし, この植物群はがわずかながらも北東アジアでも発見された, との指摘も存在する (Smiley, 1976).

前節で述べたように, インドとアジアの間に幅広く深い海洋を必要とするプレートテクトニクスモデルは支持できるものではない. というのは, 青海-西蔵 (チベット) 高原とヒマラヤ山脈を横切って, 動物群集の急激ではない漸移的变化がみられるからである. とくに, 前期二疊紀よりも前の層序と生物群は, インドがアジアに近接していたことを示す強力な証拠である. プレートテクトニクスによるもっとも普通の (先二疊紀問題を無視した) "説明" は, インドが (北側にひろがっていた古テチス海 Paleothetys を狭めながら: 訳者注) 急速に北へ移動し, 二疊紀に, 現在のインダス-ツアンポー縫合線よりも北にある縫合線に沿って自らをアジアへ付加させ, 二疊紀後期には Gondwana 大陸がアジアに衝突した. つづいて, 三疊紀後期にインダス-ツアンポー縫合線に沿う大陸分裂によって海洋 (新テチス海 Neothetys: 訳者) が開くために, インドが南へ向かって移動し, 最終的には, 再び北へ逆走して始新世にこの縫合線で収束した, というものである (Meyerhoff et al., 1996b).

中生代のアンモナイト類とそれらに関係する堆積物を全世界的に解析した Khudoley (1974, 1988) は, 次のような緯度方向の帯状分布を示す証拠を発見した. それによると, より寒冷型 (北方型) のアンモナイトと碎屑性堆積物の地帯が現在の自転極のまわりに, より温暖型 (テチス型) の地帯が赤道周辺に, そして, 寒冷型 (半北方型) 帯のいくつかの証拠が南半球の高緯度域に, それぞれ分布していた (図 7.11 参照). これらの温度依存的な動物群集-堆積物帯の境界が, 全球的気候変化にともなっ

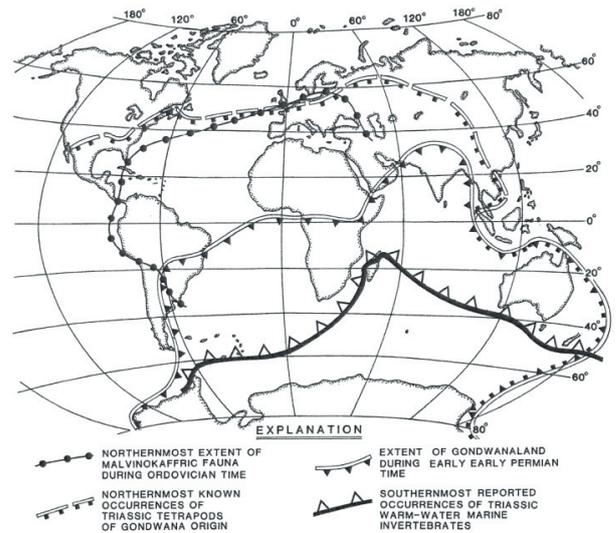


図 8.2. 次のことがらを示す: (1) オルドビス紀の Malvinokaffric 動物群の北限, (2) Gondwana 型三疊紀四足類産地の北限, (3) 二疊紀前期の "Gondwana 大陸" の概形, および, (4) 三疊紀の温帯～暖温帯海棲無脊椎動物化石産地の南限. (Meyerhoff et al., 1996b の図 18: アメリカ地質学会の許可をえて転載.)

て緯度方向に移動したのである. Khudoley は, アンモナイト群の帯状配置と拡散パターンは大規模な大陸漂移と極移動に矛盾する, と結論した.

Smiley (1967, 1974, 1976, 1992) は, 古生代後期, 中生代および新生代の陸上植物と四足脊椎動物, および同時期の海棲動物の分布は大規模な大陸移動も極移動も支持しない, と論じた. 全地球的等温線と動植物の緯度方向の帯状分布は, 過去の古地磁気極ではなく, 現在の自転軸に全般的に整合し, かつての植物帯の境界は現在の等温線にかなり調和的である, というわけである. Smiley は, 特定のデータが全地球的な文脈に用いられると, 全球テクトニクスに関する全く異なった解釈をもたらす可能性を認めている. Axelrod (1963, 1964) も, 古生代後期～中生代後期の植物群は移動する大陸や極ではなく, 安定性を示唆すると論じた.

Stehli and Grant (1971) は, 石炭紀～二疊紀のさまざまなグループの動物群に含まれる多数の種の変化を検証し, それらの数が今日の赤道へ向かうにつれて (あるいは赤道から離れるにつれて) 増加することを実証した (図 8.3). 二疊紀の北極は現在の位置あるいはその近傍にあった, と Stehli (1957) は結論した. Smiley (1967) は, もし極移動が起こったとすると, 一連の植生帯は (すくなくとも極軌跡の近傍では), 極に近づくときには寒冷化し, 極から離れるときには同一地点において温暖化すると予測されるが, 多数の中生代植物群の記録ではそのようなことは明瞭ではない, と述べた. 幾人かの極移動論者は, 第三紀前期には赤道が地中海沿いに存在し, 中部ヨーロッパは熱帯雨林帯にあった (Storetvedt, 2003, p. 48-49), と主張する. しかし, 第三紀後期の海棲動物群をみると, 現在の赤道地帯に加えて, ロンドン・パリ・ボルガ盆地, 北西インド, 日本南部, 南アフリカ, オーストラリア南西部, ニュージーランド南部, およびパタ

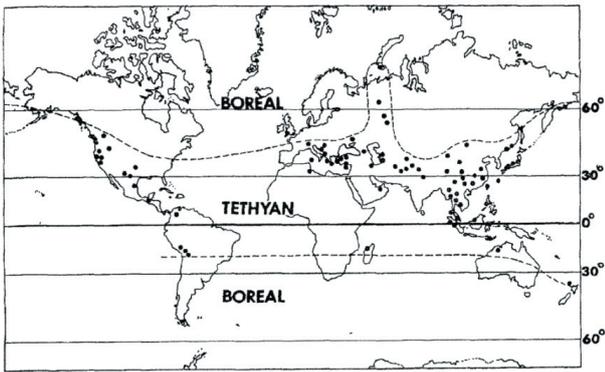


図 8.3. この地図は、二畳紀のテチス海に固有な属が発見された化石産地を示す。テチス帯が今日の赤道に明瞭な関係をもつこと、ウラル水道ではテチス海要素が高緯度まで延びていること、両半球における温度非対称性が強く示唆され、南半球のテチス地帯は北半球ほどは広くないこと、に注意せよ (Shehli and Grant, 1971 の図 4)。

ゴニアに熱帯的要素がみられ、このような配置は現在の極の位置に調和的である (Day and Runcorn, 1955)。

現在のように離れて配置された大陸分布に比べて、過去にそれらが連結したとすると、より多くの移動問題が発生する (Simpson, 1943; Teichert and Meyerhoff, 1972; Teichert, 1974)。2, 3 の指標動物群を選択的に議論するいっぽうで、かつては合体していたと思われるさまざまな大陸における膨大な数の動物群が一致しないことを無視するのは非科学的である。移行的(ecotonal)植物群にもとづいて、Smiley(1992)は、古生代後期にはインド大陸がユーラシアのアンガラおよびカタシヤ大陸の植物区の近くに位置し、オーストラリア-ニューギニア大陸塊はユーラシア南東部のカタシヤ区の近傍にあったことを論じた。古典的なパンゲアの復元では、南半球の高緯度に位置しているインドとオーストラリアは海に隔てられていたはずで、そうであれば生存していた植物群の交流は不可能になるだろう。ユーラシアと北アメリカ西部の間を植物群が往来したことを示す証拠は、すくなくとも古生代後期にはベーリング (Beringian) 地域をつらねる陸域に拡散路があったことを意味する。ところが、プレートテクトニクスは、両地域を隔離する、おそらく数 1,000km におよぶ先新生代海洋を必要とする (Smiley, 1976)。

いくつかの古生物学的証拠は、パンゲアの分裂後にも、想定されている放散のための陸路が離水と沈水をくりかえすことを求めている。たとえば、哺乳動物の分布は、ヨーロッパと北アメリカの間に直接の物理的連絡は、(陸橋上に移動を阻害する障壁がないとすれば) 白亜紀後期～暁新世には存在しなかったが、始新世なって一時的な連絡ができたことを示唆する (Simpson, 1943; Meyerhoff and Meyerhoff, 1974a)。いっぽう、大陸移動は、最初に不連続を形成した後で、再び連絡を生じさせることはできない。

2, 3 の移動論者は、想定される大陸分裂後に間欠的な陸橋の必要性を認めた (たとえば, Du Toit, 1937; Tarling, 1982b; Brigg, 1987)。さまざまな海嶺・海

膨・海台はかつて、さまざまな時代に離水したことが知られているので、陸橋をかたちづくっていた可能性がある (Schuchert, 1932; Willis, 1932; Meyerhoff et al., 1996b; Meyerhoff and Meyerhoff, 1974a)。それらには Faeroe-Greenland 陸橋, 太平洋中央海山群, ココス海嶺, 南マダガスカル, Kerguelen-Gaussberg 海嶺, リオグランデ海膨-ウォルビス海嶺, および大西洋中央海嶺の一部 [複数] が含まれる。地質学・古生物学的データにもとづいて, Gregory (1925, 1929, 1930) は, 世界の海洋には多数の陸塊が存在していたことを論じた。ところが, Simpson (1943) は, 生物移動のための多数の海洋横断大陸の必要性に疑問を投げかけた。これは, かつては広く陸塊—大半は中新世までには消失した—が存在したことを支持する膨大な証拠が存在することを否定するものではない。

結論 (Conclusion)

岩石の化石磁気はさまざまな要素に影響され、ある時期にえられた実際の磁極は大きな分散を示す。平均的磁極が過去の地理極にほぼ一致する、との基本前提は証明されていない。古地磁気データの選択、取り扱い、および解釈にはさまざまな主観性が介在し、地史的なプレート移動や真の極移動の復元に不一致や時々の矛盾をもたらす。プレートテクトニクスの主要教義と大陸の分裂・集合という付随学説は、たくさんの事実と矛盾する。大規模な極移動ならびに "小規模な" プレーートの回転・並進は、選択された古地磁気データにもとづいているので、この学説も深刻な疑念から免れない。地質学的、地球物理学的、古生物学的、および古気候学的データは、大規模なプレート運動や極移動を必要としない。それらのデータは、大陸は漂流しないこと、そして極は安定していることを示し、海陸の分布に周期的変化をひきおこす鉛直造構運動を支持する。

謝辞：私は、重要なコメントを寄せられた Dong Choi, 矢野孝雄ならびに Giovanni Gregori にお礼申し上げる。図面の転載をお許し下さったすべての機関、出版社そして個人にもお礼申し上げる次第である。

文献

- Agocs, W.B., Meyerhoff, A.A., & Kis, K., 1992. Reykjanes Ridge: quantitative determinations from magnetic anomalies. In: Chatterjee, S., & Hotton, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock, TX: Texas Tech University Press, p. 221-238.
- Ahmad, F., 1990. The bearing of palaeontological evidence on the origin of the Himalayas. In: Barto-Kyriakidis, A., ed., *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory*. Athens: Theophrastus Publications, v. 1, p. 129-142.
- Airy, G., 1860. *Change of climate*. Athenaeum, no. 7171, p. 384.
- Allard, H.A., 1948. Length of day in the climates of past geological eras and its possible effects upon changes

- in plant life. In: Murneek, A.E., & Whyte, R.O., eds., *Vernalization and photoperiodism: a symposium*. Waltham, MA: Chronica Botanica, p. 101-119.
- Anderson, D.L., 2007. *New Theory of the Earth*. Cambridge: Cambridge University Press, www.gps.caltech.edu.
- Anderson, D.L., Tanimoto, T., & Zhang, Y., 1992. Plate tectonics and hotspots: the third dimension. *Science*, v. 256, p. 1645-1651.
- Anderson, D.L., & Natland, J.H., 2005. A brief history of the plume hypothesis and its competitors: concept and controversy. In: Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C., & Anderson, D.L., eds., *Plates, Plumes, and Paradigms*. Geological Society of America Special Paper 388, p. 119-145.
- Andrews, J.A., 1985. True polar wander: an analysis of Cenozoic and Mesozoic paleomagnetic poles. *Journal of Geophysical Research*, v. 9, p. 7737-7750.
- Artemieva, I.M., & Mooney, W.D., 2002. On the relation between cratonic lithosphere thickness, plate motions, and basalt drag. *Tectonophysics*, v. 358, p. 211-231.
- Aumento, F., & Loncarevic, B.D., 1969. The Mid-Atlantic Ridge near 45°N. III: Bald Mountain. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 6, p. 11-23.
- Axelrod, D.I., 1963. Fossil floras suggest stable, not drifting, continents. *Journal of Geophysical Research*, v. 68, no. 10, p. 3257-3263.
- Axelrod, D.I., 1964. Reply. *Journal of Geophysical Research*, v. 69, no. 8, p. 1669-1971.
- Bachtadse, V., & Briden, J.C., 1990. Paleomagnetic constraints on the position of Gondwana during Ordovician to Devonian times. In: McKerrow, W.S., & Scotese, C.R., eds., *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*. Geological Society of London, Memoir 12, p. 43-48.
- Bacon, M., & Gray, F., 1971. Evidence for crust in the deep ocean derived from continental crust. *Nature*, v. 229, p. 331-332.
- Barrell, J., 1914. The status of hypotheses of polar wanderings. *Science*, v. 40, p. 333-340.
- Barron, E.J., 1984. Climatic implications of the variable obliquity explanation of Cretaceous-Paleogene high-latitude floras. *Geology*, v. 12, p. 595-598.
- Barron, E.J., Harrison, C.G.A., & Hay, W.W., 1978. A revised reconstruction of the southern continents. *American Geophysical Union Transactions*, v. 59, p. 436-439.
- Beaman, M., Sager, W.W., Acton, G.D., Lanci, L., & Pares, J., 2007. Improved late Cretaceous and early Cenozoic paleomagnetic apparent polar wander path for the Pacific plate. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 262, p. 1-20.
- Begg, G.C., Griffin, W.L., Natapov, L.M., O'Reilly, S.Y., Grand, S.P., O'Neill, C.J., Hronsky, J.M.A., Poudjom Djomani, Y., Swain, C.J., Deen, T., & Bowden, P., 2009. The lithospheric architecture of Africa: seismic tomography, mantle petrology, and tectonic evolution. *Geosphere*, v. 5, no. 1, p. 23-50, doi:10.1130/GES00179.1, <http://geosphere.gsapubs.org>.
- Belousov, V.V., 1990. Certain trends in present-day geosciences. In: Barto-Kyriakidis, A., ed., *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory*. Athens: Theophrastus Publications, v. 1, p. 3-15.
- Berger, A., & Loutre, M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, v. 10, p. 297-317.
- Berry, E.W., 1927. The term Oligocene and certain climatic considerations. *American Journal of Science*, v. 13, p. 252-256.
- Berry, E.W., 1928. Comments on the Wegener hypothesis. In: Waterschoot van der Gracht, W.A.J.M. van, ed., *The Theory of Continental Drift: A symposium*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, p. 194-196.
- Besse J., & Courtillot V., 1991. Revised and synthetic apparent polar wander paths of the African, Eurasian, North American and Indian Plates, and true polar wander since 200 Ma. *Journal of Geophysical Research*, v. 96, p. 4029-4050.
- Besse, J., & Courtillot, V., 2002. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, no. B11, 2300, doi:10.1029/2000JB000050, 6 - 1-31.
- Besse, J., & Courtillot, V., 2003. Correction to 'Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr'. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, no. B10, 2469, 3 - 1-2, doi:10.1029/2003JB002684.
- Besse, J., Courtillot V., & Greff, M., 2011. Paleomagnetism, polar wander. In: Gupta, H.K., ed., *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Springer, p. 945-954.
- Bhat, M.I., 1987. Spasmodic rift reactivation and its role in pre-orogenic evolution of the Himalayan region. *Tectonophysics*, v. 134, p. 103-127.
- Biggin, A.J., Hinsbergen, D.J.J. van, Langereis, C.G., Straathof, G.B., & Deenen, M.H.L., 2008. Geomagnetic secular variation in the Cretaceous Normal Superchron and in the Jurassic. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 169, p. 3-19.
- Bonatti, E., 1990. Subcontinental mantle exposed in the Atlantic Ocean on St Peter-Paul islets. *Nature*, v. 345, p. 800-802.
- Bonatti, E., & Crane, K., 1982. Oscillatory spreading explanation of anomalously old uplifted crust near oceanic transforms. *Nature*, v. 300, p. 343-345.
- Bonatti, E., & Honnorez, J., 1971. Nonspreading crustal blocks at the Mid-Atlantic Ridge. *Science*, v. 174, p. 1329-1331.
- Bouin, M.-N., & Vigny, C., 2000. New constraints on Antarctica plate motion and deformation from GPS data. *Journal of Geophysical Research*, v.105, p. 28,279-28,293.
- Briggs, J.C., 1987. *Biogeography and Plate Tectonics*. Amsterdam: Elsevier.
- Brinkmann, R., 1972. Mesozoic troughs and crustal structure

- in Anatolia. *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, no. 3, p. 819-826.
- Brooks, C.E.P., 1949. *Climate through the Ages: A study of the climatic factors and their variations*. 2nd ed., London: Ernest Benn, Dover reprint 1970.
- Buchardt, B., 1978. Oxygen isotope palaeotemperatures from the Tertiary period in the North Sea area. *Nature*, v. 275, p. 121-123.
- Bucher, W.H., 1933. *The Deformation of the Earth's Crust*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Bucher, W.H., 1956. Role of gravity in orogenesis. *Geological Society of America Bulletin*, v. 67, p. 1295-1318.
- Budinger, T.F., & Enbysk, B.J., 1967. Late Tertiary date from the East Pacific Rise. *Journal of Geophysical Research*, v. 72, no. 8, p. 2271-2274.
- Bullard, E.C., Everett, J.E., & Smith, A.G., 1965. The fit of the continents around the Atlantic. In: *A Symposium on Continental Drift*, Royal Society of London Philosophical Transactions, Series A, v. 258, p. 41-51.
- Burchfiel, B.C., 1990. The continental crust. In: Moores, E.M., ed., *Shaping the Earth: Tectonics of continents and oceans*. New York: W.H. Freeman & Co.
- Butler, R.F., 2004. Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes. Electronic edition, www.pmc.ucsc.edu.
- Butler, R.F., Gehrels, G.E., McClelland, W.C., May, S.R., & Klepacki, D., 1989. Discordant paleomagnetic data from the Canadian Coast Plutonic Complex: regional tilt rather than large-scale displacement? *Geology*, v. 17, no. 8, p. 691-694.
- Butler, R.F., Dickinson, W.R., & Gehrels, G.E., 1991. Paleomagnetism of coastal California and Baja California: alternatives to large-scale northward transport. *Tectonics*, v. 10, p. 561-576.
- Butler, R.F., Gehrels, G.E., & Baldwin, S.L., 2002. Paleomagnetism and geochronology of the Ecstall pluton in the Coast Mountains of British Columbia: evidence for local deformation rather than large-scale transport. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, p. 3-1-13.
- Calderwood, A.R., 1991. No suspect terranes; the case against paleomagnetic data. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, v. 23, no. 5, p. 136.
- Cambiotti, G., 2012. *Modelling the earth: compressible viscoelastodynamics, gravitational seismology and true polar wander* (doctoral thesis). University of Milan.
- Cambiotti, G., Ricard, Y., & Sabadini, R., 2011. New insights into mantle convection true polar wander and rotational bulge readjustment. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 310, p. 538-543.
- Caputo, M., 1986. The Polfluchtkraft revisited. *Bollettino Geofisica Teorica Applicata*, v. 28, p. 199-214.
- Carlson, D.H., Plummer, C.C., & McGeary, D., 2008. *Physical Geology: Earth revealed*. 7th ed., New York: McGraw-Hill.
- Chadwick, P., 1962. Mountain-building hypotheses. In: Runcorn, S.K., ed., *Continental Drift*. New York & London: Academic Press, p. 195-234.
- Chatterjee, S., & Hotton, N., 1986. The paleoposition of India. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, v. 1, p. 145-189.
- Choi, D.R., 1997. Geology of the oceans around Australia, parts I-III. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 3, p. 8-13.
- Choi, D.R., 1999. Geology of East Pacific: Middle America Trench. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 12, p. 10-16.
- Choi, D.R., 2000. Subduction does not exist – from seismic data interpretation. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 15, p. 9-14.
- Choi, D.R., 2001. Submarine geology of the oceans around Australia. *Himalayan Geology*, v. 22, p. 81-90.
- Choi, D.R., 2002. Deep earthquakes and deep-seated tectonic zones. Part 2: South America. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 24, p. 9-21.
- Choi, D.R., Vasil'yev, B.I., & Tuezov, I.K., 1990. The Great Oyashio Paleoland: a Paleozoic-Mesozoic landmass in the northwestern Pacific. In: Barto-Kyriakidis, A., ed., *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory*. Athens: Theophrastus Publications, v. 1, p. 197-213.
- Choi, D.R., Vasil'yev, B.I., & Bhat, M.I., 1992. Paleoland, crustal structure, and composition under the northwestern Pacific Ocean. In: Chatterjee, S., & Hotton, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock, TX: Texas Tech University Press, p. 179-191.
- Coleman, A.P., 1925. Permo-Carboniferous glaciation and the Wegener hypothesis. *Nature*, v. 115, no. 2895, p. 602.
- Coleman, A.P., 1932. Glaciation and continental drift. *The Geographical Journal*, v. 79, no. 3, p. 252-255.
- Colpron, M., Nelson, J.L., & Murphy, D.C., 2007. Northern Cordilleran terranes and their interactions through time. *GSA Today*, v. 17, no. 4/5, doi:10.1130/GSAT01704-5A.1.
- Coney, P.J., Jones, D.L., & Monger, J.W.H., 1980. Cordilleran suspect terranes. *Nature*, v. 288, p. 329-333.
- Conrad, C.P., & Lithgow-Bertelloni, C., 2006. Influence of continental roots and asthenosphere on plate-mantle coupling. *Geophysical Research Letters*, v. 33, L05312, doi:10.1029/2005GL025621.
- Cottrell, R.D., & Tarduno, J.A., 2000. Late Cretaceous true polar wander: not so fast. *Science*, v. 288, 2283a.
- Coxall, H.K., & Pearson, P.N., 2007. The Eocene-Oligocene transition. In: Williams, M., Haywood, A.M., Gregory, F.J., & Schmidt, D.N., eds., *Deep-time Perspectives on Climate Change: Marrying the signal from computer models and biological proxies*. Geological Society, London, Micropalaeontological Society, p. 351-387.
- Croll, J., 1886. *Discussions on Climate and Cosmology*. London: Edward Stanford.
- Cronin, T.M., 2010. *Paleoclimates: Understanding climate change past and present*. New York: Columbia University Press.
- Dalziel, I.W.D., Mosher, S., & Gahagan, L.M., 2000. Laurentia-Kalahari collision and the assembly of Rodinia.

- The Journal of Geology, v. 108, no. 5, p. 499-513.
- Darwin, G.H., 1877. On the influence of geological changes on the earth's axis of rotation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A.*, v. 167, p. 271-312.
- Darwin, G.H., 1878. On Professor Haughton's estimate of geological time. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 27, p. 179-183.
- Day, A., & Runcorn, S., 1955. Polar wandering: some geological, dynamical and paleomagnetic aspects. *Nature*, v. 176, p. 422-426.
- De Man, E., & Van Simaey, S., 2004. Late Oligocene warming event in the southern North Sea Basin: benthic foraminifera as paleotemperature proxies. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw*, v. 83, no. 3, p. 227-239, www.njgonline.nl.
- Dickins, J.M., 1987. Tethys – a geosyncline formed on continental crust? In: McKenzie, K.G., ed., *Shallow Tethys 2*, International Symposium, Wagga Wagga, 1986. Rotterdam: A.A. Balkema, p. 149-158.
- Dickins, J.M., 1994a. What is Pangaea? In: Embry, A.F., Beauchamp, B., & Glass, D.G., *Pangea: Global environments and resources*. Canadian Society of Petroleum Geologists, *Memoir 17*, p. 67-80.
- Dickins, J.M., 1994b. The nature of the oceans or Gondwanaland, fact and fiction. In: *Gondwana Nine, Ninth International Gondwana Symposium*, Hyderabad, India. Rotterdam: A.A. Balkema, p. 387-396.
- Dickins, J.M., 1994c. The southern margin of Tethys. In *Gondwana Nine, Ninth International Gondwana Symposium*, Hyderabad, India. Rotterdam: A.A. Balkema, p. 1125-1134.
- Dickins, J.M., Choi, D.R., & Yeates, A.N., 1992. Past distribution of oceans and continents. In: Chatterjee, S., & Hotton, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock, TX: Texas Tech University Press, p. 193-199.
- Dickinson, W.R., 2003. The place and power of myth in geoscience: an associate editor's perspective. *American Journal of Science*, v. 303, p. 856-864.
- Dickman, S.R., 2000. Tectonic and cryospheric excitation of the Chandler wobble and a brief review of the secular motion of the earth's rotation pole. *IAU Colloquium 178: Polar Motion: Historical and Scientific Problems*, ASP Conference Series, v. 208, p. 421-435.
- Dietrich, R., Rülke, A., Ihde, J., Lindner, K., Miller, H., Niemeier, W., Schenke, H.-W., & Seeber, G., 2004. Plate kinematics and deformation status of the Antarctic Peninsula based on GPS. *Global and Planetary Change*, v. 42, nos. 1-4, p. 313-321.
- Dietz, R.S., & Holden, J.C., 1970. Reconstruction of Pangaea: breakup and dispersion of continents, Permian to present. *Journal of Geophysical Research*, v. 75, no. 26, p. 4939-4956.
- Domeier, M., Van der Voo, R., & Torsvik, T.H., 2012. Paleomagnetism and Pangea: the road to reconciliation. *Tectonophysics*, v. 514, p. 14-43.
- Donnadieu, Y., Ramstein, G., Fluteau, F., Besse, J., & Meert, J., 2002. Is high obliquity a plausible cause for Neoproterozoic glaciations? *Geophysical Research Letters*, v. 29, no. 23, doi:10.1029/2002GL015902.
- Donnellan, A., & Luyendyk, B.P., 2004. GPS evidence for a coherent Antarctic plate and for postglacial rebound in Marie Byrd Land. *Global and Planetary Change*, v. 42, nos. 1-4, p. 305-311.
- Donovan, R.N., & Meyerhoff, A.A., 1982. Paleomagnetic evidence for a large (□2,000 km) sinistral offset along the Great Glen fault during Carboniferous time: comment. *Geology*, v. 10, no. 11, p. 604-605.
- Douglas, J.G., & Williams, G.E., 1982. Southern polar forests: the early Cretaceous floras of Victoria and their palaeoclimatic significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 39, p. 171-185.
- Drewry, G.E., Ramsay, A.T.S., & Smith, A.G., 1974. Climatically controlled sediments, the geomagnetic field, and trade wind belts in Phanerozoic time. *Journal of Geology*, v. 82, p. 531-553.
- Du Toit, A.L., 1937. *Our Wandering Continents*. Edinburgh and London: Oliver and Boyd.
- Eldrett, J.S., Harding, I.C., Wilson, P.A., Butler, E., & Roberts, A.P., 2007. Continental ice in Greenland during the Eocene and Oligocene. *Nature*, v. 446, p. 176-179.
- Elliott, C.I., 1994. Lineament tectonics: an approach to basin analysis and exploration. In: Purcell, P.G., & Purcell, R.R., eds., *Sedimentary Basins of Western Australia*. Petroleum Exploration Society of Australia Conference Proceedings, p. 77-90.
- Eötvös, R. von, 1913. *Verhandlungen der 17 Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung*, Berlin, Part 1, p. 111.
- Evans, D.A.D., 2003. True polar wander and supercontinents. *Tectonophysics*, v. 362, p. 303-320.
- Evans, D.A.D., 2009. The palaeomagnetically viable, long-lived and all-inclusive Rodinia supercontinent reconstruction. In: Murphy, J.B., Keppie, J.D., & Hynes, A., eds., *Ancient Orogens and Modern Analogues*. Geological Society of London Special Publication, v. 327, p. 371-404.
- Evans, J., 1866. On a possible geological cause of changes in the position of the axis of the earth's crust. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 15, p. 46-54.
- Frisch, F., & Meschede, M., 2011. *Terranes*. In: Frisch, F., Meschede, M., & Blakey, R.C., *Plate Tectonics: Continental drift and mountain building*. Heidelberg: Springer, p. 131-138.
- Gasperid, M., & Chierici, F., 1996. The Eötvös force revisited. *Terra Nova*, v. 8, no. 4, p. 356-360.
- Gold, T., 1955. Instability of the earth's axis of rotation. *Nature*, v. 175, p. 526-529.
- Goldreich, P., & Toomre, A., 1969. Some remarks on polar wandering. *Journal of Geophysical Research*, v.

- 74, no. 10, p. 2555-2567.
- Gordon, R.G., 1987. Polar wandering and paleomagnetism. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, v. 15, p. 567-593.
- Gordon, R.G., 1995. Plate motions, crustal and lithospheric mobility, and paleomagnetism: prospective viewpoint. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 24,367-24,392.
- Gordon, R.G., & Stein, S., 1992. Global tectonics and space geodesy. *Science*, v. 256, p. 333-342.
- Graham, J.W., Buddington, A.F., & Balsley, J.R., 1957. Stress-induced magnetizations of some rocks with analyzed magnetic minerals. *Journal of Geophysical Research*, v. 62, no. 3, p. 465-474.
- Grant, A.C., 1980. Problems with plate tectonics: the Labrador Sea. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 28, p. 252-278.
- Grant, A.C., 1992. Intracratonic tectonism: key to the mechanism of diastrophism. In: Chatterjee, S., & Norton, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock: Texas Tech University Press, p. 65-73.
- Greff-Lefftz, M., & Besse, J., 2012. Paleo movement of continents since 300 Ma, mantle dynamics and large wander of the rotational pole. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 345-348, p. 151-158.
- Gregory, J.W., 1899. The plan of the earth and its causes. *The Geographical Journal*, v. 13, p. 225-250.
- Gregory, J.W., 1925. Continental drift (review of *The Origin of Continents and Oceans* by A. Wegener). *Nature*, v. 115, no. 2886, p. 255-257.
- Gregory, J.W., 1929. The geological history of the Atlantic Ocean. *Quarterly Journal of Geological Society*, v. 85, p. 68-122.
- Gregory, J.W., 1930. The geological history of the Pacific Ocean. *Quarterly Journal of Geological Society*, v. 86, p. 72-136.
- Gross, R.S., 2000. The excitation of the Chandler wobble. *Geophysical Research Letters*, v. 27, no. 15, p. 2329-2332.
- Gung, Y., Panning, M., & Romanowicz, B., 2003. Global anisotropy and the thickness of continents. *Nature*, v. 422, p. 707-711.
- Gussow, W.C., 1963. Metastasy. In: Munyan, A.C., ed., *Polar Wandering and Continental Drift*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Spec. Publ. no. 10, p. 146-169.
- Hall, J.M., & Robinson, P.T., 1979. Deep crustal drilling in the North Atlantic Ocean. *Science*, v. 204, p. 573-586.
- Hall, J.M., & Ryall, P.J.C., 1977. Paleomagnetism of basement rocks, Leg 37. In: Aumento, F., Melson, W.B., et al., *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Leg 37*. Washington, DC: US Government Printing Office, p. 425-448.
- Hallam, A., 1976. How closely did the continents fit together? *Nature*, v. 262, p. 94-95.
- Hancock, G., 1995. *Fingerprints of the Gods*. London: Heinemann.
- Hansen, V.L., 1988. A model for terrane accretion: Yukon-Tanana and Slide Mountain terranes, northwest North America. *Tectonics*, v. 7, no. 6, p. 1167-1177.
- Hapgood, C.H., 1958. *Earth's Shifting Crust*. New York: Pantheon.
- Hapgood, C.H., 1970. *The Path of the Pole*. Philadelphia: Chilton Book Company.
- Hardie, L.A., 1990. The role of rifting and hydrothermal CaCl₂ brines in the origin of potash evaporites: an hypothesis. *American Journal of Science*, v. 290, p. 1-42.
- Hardie, L.A., 1991. On the significance of evaporites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 219, p. 131-168.
- Hargraves, R.B., & Duncan, R.A., 1973. Does the mantle roll? *Nature*, v. 245, p. 361-363.
- Harrison, C.G.A., 1968. Antipodal locations of continents and ocean basins. *Science*, v. 153, no. 3741, p. 1246-1248.
- Heezen, B.C., Tharp, M., & Ewing, M., 1959. The floors of the oceans. I: The North Atlantic. *Geological Society of America Special Paper* 65.
- Hellman, H., 1998. *Great Feuds in Science: Ten of the liveliest disputes ever*. New York: John Wiley & Sons.
- Hirth, G., Evans, R.L., & Chave, A.D., 2000. Comparison of continental and oceanic mantle electrical conductivity: is the Archean lithosphere dry? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 1, no. 12, 1030, doi:10.1029/2000GC000048.
- Hodych, J.P., & Bijaksana, S., 1993. Can remanence anisotropy detect paleomagnetic inclination shallowing due to compaction? A case study using Cretaceous deep-sea limestones. *Journal of Geophysical Research*, v. 98, no. B12, p. 22429-22441.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P., & Schrag, D.P., 1998. A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, v. 281, p. 1342-1346.
- Holmes, A., 1965. *The Principles of Physical Geology*. Edinburgh: Nelson.
- Hou, G., Santosh, M., Qian, X., Lister, G.S., & Li, J., 2008. Configuration of the late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: insights from radiating mafic dyke swarms. *Gondwana Research*, v. 14, no. 3, p. 395-409.
- Houghton, R.L., Thomas, J.E., Diecchio, R.J., & Tagliacozzo, A., 1979. Radiometric ages of basalts from DSDP Leg 43, Sites 382 and 385 (New England Seamounts), 384 (J-anomaly), 386 and 387 (central and western Bermuda Rise). In: Tucholke, B.E., Vogt, P.R., et al., *Initial Reports of the Deep Sea Drilling*

- Project, Washington, DC: US Government Printing Office, v. 43, p. 739-753.
- Howell, D.G., Schermer, E.R., Jones, D.L., Ben-Avraham, Z., & Scheibner, E., 1983. Tectonostratigraphic terrane map of the Circum-Pacific region. USGS Open-File Report: 83-716.
- Hughes, T., 1973. Coriolis perturbation of mantle convection related to a two-phase convection model. *Tectonophysics*, v. 18, nos. 3-4, p. 215-230.
- Iro, H., 2002. *A Modern Approach to Classical Mechanics*. Singapore: World Scientific.
- Irving, E., 1977. Drift of the major continental blocks since the Devonian. *Nature*, v. 270, p. 304-309.
- Irving, E., & Archibald, D.A., 1990. Bathozonal tilt corrections to paleomagnetic data from mid-Cretaceous plutonic rocks: examples from the Omineca belt, British Columbia. *Journal of Geophysical Research*, v. 95, no. B4, p. 4579- 4585.
- Ivany, L.C., Patterson, W.P., & Lohmann, K.C., 2000. Cooler winters as a possible cause of mass extinctions at the Eocene/Oligocene boundary. *Nature*, v. 407, p. 887-890.
- Jacobitti, E., 1912. *Mobilità dell' asse terrestre: studio geologico*. Torino: Società Tipografico-Editrice Nazionale.
- James, H., 1860. *Athenaeum*, 25 Aug.
- James, K., 2012. Whence the Caribbean? *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 64, p. 19-23.
- James, P., 1997. Is isostasy a real phenomenon? *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 3, p. 3-4.
- Jeffreys, H., 1974. Theoretical aspects of continental drift. In Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, *Memoir* 23, p. 395-405.
- Jeffreys, H., 1976. *The Earth: Its origin, history and physical constitution*. 6th ed., Cambridge: Cambridge University Press.
- Jenkins, G.S., 2000. Global climate model high-obliquity solutions to the ancient climate puzzles of the faint-young- sun paradox and low-latitude Proterozoic glaciation. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, no. D6, p. 7357-7370.
- Jenkins, G.S., 2004. High obliquity as an alternative hypothesis to early and late Proterozoic extreme climate conditions. In: Jenkins, G.S., McMenamin, M.A.S., McKey, C.P., & Sohl, L., eds., *The Extreme Proterozoic: Geology, geochemistry, and climate*. Washington, DC: American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 146, p. 183-192.
- Jiang, W-P., Dong-Chen, E., Zhan, B-W, & Liu, Y-W., 2009. New model of Antarctic plate motion and its analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, v. 52, no. 1, p. 23-32.
- Jones, E.J.W., & Ewing, J.I., 1969. Age of the Bay of Biscay: evidence from seismic profiles and bottom samples. *Science*, v. 166, no. 3901, p. 102-105.
- Jordan, T.H., 1975. The continental tectosphere. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 13, p. 1-12.
- Jordan, T.H., 1978. Composition and development of the continental tectosphere. *Nature*, v. 274, p. 544-548.
- Jordan, T.H., 1988. Structure and formation of the continental tectosphere. *Journal of Petrology, Special Lithosphere Issue*, p. 11-37.
- Jordan, T.H., Puster, P., Glatzmaier, G.A., & Tackley, P.J., 1993. Comparisons between seismic earth structures and mantle flow models based on radial correlation functions. *Science*, v. 261, p. 1427-1431.
- Kashfi, M.S., 1992. Geological evidence for a simple horizontal compression of the crust in the Zagros Crush Zone. In: Chatterjee, S., & Norton, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock: Texas Tech University Press, p. 119-130.
- Keith, M.L., 1993. Geodynamics and mantle flow: an alternative earth model. *Earth-Science Reviews*, v. 33, p. 153- 337.
- Kennett, J.P., & Shackleton, N.J., 1976. Oxygen isotopic evidence for the development of the psychrosphere 38 Myr ago. *Nature*, v. 260, p. 513-515.
- Kennett, J.P., & Exon, N.F., 2004. Paleooceanographic evolution of the Tasmanian Seaway and its climatic implications. In: Exon, N.F., Kennett, J.P., & Malone, M.J., eds., *The Cenozoic Southern Ocean: Tectonics, sedimentation and climate change between Australia and Antarctica*. Washington, DC: American Geophysical Union, *Geophysical Monograph Series* 151, p. 345-367.
- Kent, D.V., & May, S.R., 1987. Polar wander and paleomagnetic reference pole controversies. *Reviews of Geophysics*, v. 25, no. 5, p. 961-970.
- Kent, D.V., & Van der Voo, R., 1990. Palaeozoic palaeogeography from palaeomagnetism of the Atlantic-bordering continents. In: McKerrow, W.S., & Scotese, C.R., eds., *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*. Geological Society of London, *Memoir* 12, p. 49-56.
- Kent, D.V., & Smethurst, M.A., 1998. Shallow bias of paleomagnetic inclinations in the Paleozoic and Precambrian. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 160, p. 391-402.
- Kent, P.E., 1969. The geological framework of petroleum exploration in Europe and North Africa and the implications of continental drift hypotheses. In: *The Exploration for Petroleum in Europe and North Africa*. London: Institute of Petroleum, p. 3-17.
- Khudoley, K.M., 1974. Circum-Pacific Mesozoic ammonoid distribution: relation to hypotheses of continental drift, polar wandering, and earth expansion. In: Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. American Association of Petroleum Geologists, *Memoir* 23, p.

- 295-330.
- Khudoley, K.M., 1988. The paleobiogeography of the Atlantic Ocean in the Jurassic period. *International Geology Review*, v. 30, p. 623-634.
- King, R.E., 1971. Geology and history of Sicily. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 55, no. 6, p. 901-902.
- Kirschvink, J.L., Ripperdan, R.L., & Evans, D.A., 1997. Evidence for a large-scale reorganization of early Cambrian continental masses by inertial interchange true polar wander. *Science*, v. 277, p. 541-545.
- Kobashi, T., Grossman, E.L., Yancey, T.E., & Dockery, D.T., 2001. Reevaluation of conflicting Eocene tropical temperature estimates: molluscan oxygen isotope evidence for warm low latitudes. *Geology*, v. 29, p. 983-986.
- Köppen, W., & Wegener, A., 1924. *Die Klimate der geologischen Vorzeit*. Berlin: Gebrüder Bornträger.
- Kreichgauer, P.D., 1902. *Die Äquatorfrage in der Geologie*. Steyl: Druck und Verlag der Missionsdruckerei; 2nd ed. 1926.
- Kustowski, B., Ekström, G., & Dziewonski, A.M., 2008. Anisotropic shear-wave velocity structure of the Earth's mantle: a global model. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, B06306, doi:10.1029/2007JB005169.
- Laing, A.C.M., 1998. The myth of plate tectonics. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 6, p. 14-24.
- Lake, P., 1922. Wegener's displacement theory. *Geology Magazine*, v. 59, p. 338-346.
- Larson, R.I., & Chase, C.G., 1972. Late Mesozoic evolution of the western Pacific Ocean. *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, no. 2, p. 3627-3643.
- Laubscher, H.P., 1975. Plate boundaries and microplates in Alpine history. *American Journal of Science*, v. 275, no. 8, p. 865-876.
- Lear, C.H., Bailey, T.R., Pearson, P.N., Coxall, H.K., & Rosenthal, Y., 2008. Cooling and ice growth across the Eocene-Oligocene transition. *Geology*, v. 36, no. 3, p. 251-254.
- Legendre, C.P., Meier, T., Lebedev, S., Friederich, W., & Viereck-Götte, L., 2012. A shear wave velocity model of the European upper mantle from automated inversion of seismic shear and surface waveforms. *Geophysical Journal International*, v. 191, no. 1, p. 282-304.
- Le Grand, H.E., 1998. *Drifting Continents and Shifting Theories*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Li, Z.X., Powell, C.McA., Thrupp, G.A., & Schmidt, P.W., 1990. Australian Palaeozoic palaeomagnetism and tectonics- II. A revised apparent polar wander path and palaeogeography. *Journal of Structural Geology*, v. 12, p. 567-575.
- Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., Davidson, A., et al., 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, v. 160, p. 179-210.
- Liu, Z., Pagani, M., Zinniker, D., DeConto, R., Huber, M., Brinkhuis, H., Shah, S.R., Leckie, R.M., & Pearson, A., 2009. Global cooling during the Eocene-Oligocene climate transition. *Science*, v. 323, no. 5918, p. 1187-1190.
- Longwell, C.R., 1944. Some thoughts on the evidence of a continental drift. *American Journal of Science*, v. 242, p. 218-231.
- Lowman, P.D., 1986. Plate tectonics with fixed continents: a testable hypothesis - II. *Journal of Petroleum Geology*, v. 9, p. 71-87.
- Lubbock, J., 1848. On change of climate resulting from a change in the earth's axis of rotation. *Quarterly Journal of the Geological Society*, v. 4, p. 4-7.
- Luyendyk, B.P., & Melson, W.G., 1967. Magnetic properties and petrology of rocks near the crest of the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, v. 215, no. 5097, p. 147-149.
- MacDonald, G.J.F., 1963. The deep structure of continents. *Reviews of Geophysics*, v. 1, p. 587-665.
- MacDonald, G.J.F., 1965. Continental structure and drift. In: *A Symposium on Continental Drift*. Royal Society of London Philosophical Transactions, Series A, v. 258, p. 215-227.
- Macdougall, D., 1971. Deep sea drilling: age and composition of an Atlantic basaltic intrusion. *Science*, v. 171, p. 1244-1255.
- Mantura, A.J., 1972. New global tectonics and 'the new geometry'. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 56, p. 2451-2455.
- Masters, G., Johnson, S., Laske, G., & Bolton, H., 1996. A shear-velocity model of the mantle. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, v. 354, p. 1385-1411.
- Maxwell, J.C., 1970. The Mediterranean, ophiolites, and continental drift. In: Johnson, H., & Smith, B.L., eds., *The Megatectonics of Continents and Oceans*. Rutgers, NJ: Rutgers University Press, p. 167-193.
- McDowell, F.W., Lehman, D.H., Gucwa, P.R., Fritz, D., & Maxwell, J.C., 1984. Glauconite schists and ophiolites of the northern California Coast Ranges: isotopic ages and their tectonic implications. *Geological Society of America Bulletin*, v. 95, no. 11, p. 1373-1382.
- McElhinny, M., & McFadden, P., 2000. *Paleomagnetism: Continents and oceans*. San Diego, CA: Academic Press.
- McKenzie, D.P., 1966. The viscosity of the lower mantle. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, v. 14, p. 297-305.
- McKenzie, D., & Priestley, K. 2008. The influence of lithospheric thickness variations on continental

- evolution. *Lithos*, v. 102, nos. 1-2, p. 1-11, <http://bullard.esc.cam.ac.uk>.
- McKenzie, K.G., 1987. Tethys and her progeny. In: McKenzie, K.G., ed., *Shallow Tethys 2*, International Symposium, Wagga Wagga, 1986. Rotterdam: A.A. Balkema, p. 501-523.
- Meert, J.G., 2012. What's in a name? The Columbia (Paleopangaea/Nuna) supercontinent. *Gondwana Research*, v. 21, no. 4, p. 987-993.
- Melson, W.G., Hart, S.R., & Thompson, G., 1972. St. Paul's Rocks, equatorial Atlantic: petrogenesis, radiometric ages, and implications on sea-floor spreading. In: Shagam, R., Hargraves, R.B., Morgan, W.J., Van Houten, F.B., Burk, C.A., Holland, H.D., & Hollister, L.C., eds., *Studies in Earth and Space Sciences*. Boulder, CO: Geological Society of America, Memoir 132, p. 241-272.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., & McFadden, P.L., 1996. *The Magnetic Field of the Earth*. San Diego, CA: Academic Press.
- Meyerhoff, A.A., 1970a. Continental drift: implications of paleomagnetic studies, meteorology, physical oceanography, and climatology. *Journal of Geology*, v. 78, p. 1-51.
- Meyerhoff, A.A., 1970b. Continental drift. II: High latitude evaporite deposits and geologic history of Arctic and North Atlantic oceans. *Journal of Geology*, v. 78, p. 406-444.
- Meyerhoff, A.A., 1973. Origin of Arctic and North Atlantic oceans. In: Pitcher, M.G., ed., *Arctic Geology*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 19, p. 562-582.
- Meyerhoff, A.A., 1974. Crustal structure of northern North Atlantic Ocean – a review. In: Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 23, p. 423-433.
- Meyerhoff, A.A., 1995. Surge-tectonic evolution of southeastern Asia: a geohydrodynamics approach. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, v. 12, p. 143-247.
- Meyerhoff, A.A., & Harding, J.L., 1971. Some problems in current concepts of continental drift. *Tectonophysics*, v. 12, p. 235-260.
- Meyerhoff, A.A., & Hatten, C.W., 1974. Bahamas salient of North America. In: Burk, C.A., & Drake, C.L., eds., *The Geology of Continental Margins*. Berlin: Springer-Verlag, p. 429-446.
- Meyerhoff, A.A., & Meyerhoff, H.A., 1974a. Tests of plate tectonics. In: Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 23, p. 43-145.
- Meyerhoff, A.A., & Meyerhoff, H.A., 1974b. Ocean magnetic anomalies and their relations to continents. In: Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 23, p. 411-422.
- Meyerhoff, A.A., & Teichert, C., 1971. Continental drift. III: Late Paleozoic glacial centers and Devonian-Eocene coal distribution. *Journal of Geology*, v. 79, p. 285-321.
- Meyerhoff, A.A., Kamen-Kaye, M., Chen, C., & Taner, I., 1991. China – Stratigraphy, Paleogeography and Tectonics. Dordrecht: Kluwer.
- Meyerhoff, A.A., Agocs, W.B., Taner, I., Morris, A.E.L., & Martin, B.D., 1992a. Origin of midocean ridges. In: Chatterjee, S., & Norton, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock: Texas Tech University Press, p. 151-178.
- Meyerhoff, A.A., Taner, I., Morris, A.E.L., Martin, B.D., Agocs, W.B., & Meyerhoff, H.A., 1992b. Surge tectonics: a new hypothesis of earth dynamics. In: Chatterjee, S., & Norton, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock: Texas Tech University Press, p. 309-409.
- Meyerhoff, A.A., Taner, I., Morris, A.E.L., Agocs, W.B., Kaymen-Kaye, M., Bhat, M.I., Smoot, N.C., & Choi, D.R., 1996a. *Surge Tectonics: A new hypothesis of global geodynamics* (D. Meyerhoff Hull, ed.). Dordrecht: Kluwer.
- Meyerhoff, A.A., Boucot, A.J., Meyerhoff Hull, D., & Dickins J.M., 1996b. Phanerozoic Faunal & Floral Realms of the Earth: The intercalary relations of the Malvinokaffric and Gondwana faunal realms with the Tethyan faunal realm. Boulder, CO: Geological Society of America, Memoir 189.
- Meyerhoff, H.A., & Meyerhoff, A.A., 1978. Spreading history of the eastern Indian Ocean and India's northward flight from Antarctica and Australia: discussion and reply. *Geological Society of America Bulletin*, v. 89, p. 637-640.
- Morel, P., & Irving, E., 1978. Tentative paleocontinental maps for the early Phanerozoic and Proterozoic. *Journal of Geology*, v. 86, p. 535-561.
- Morel, P., & Irving, E., 1981. Paleomagnetism and the evolution of Pangea. *Journal of Geophysical Research*, v. 86, no. B3, p. 1858-1872.
- Müller, R.D., Sdrolias, M., Gaina, C., & Roest, W.R., 2008. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.
- Munk, W.H., & MacDonald, G.J.F., 1975. *The Rotation of the Earth: A geophysical discussion*. 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press.
- Newton, C.R., 1988. Significance of 'Tethyan' fossils in the American Cordillera. *Science*, v. 242, no. 4877, p.

- 385-391.
- Northrop, J.W., & Meyerhoff, A.A., 1963. Validity of polar and continental movement hypotheses based on paleomagnetic studies. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 47, no. 4, p. 575-585.
- Oard, M.J., 2000a. Literature criticisms of plate tectonics. In: Reed, J.K., ed., *Plate Tectonics: A different view*. St. Joseph, MO: Creation Research Society Books, p. 25-64.
- Oard, M.J., 2000b. Subduction unlikely – plate tectonics improbable. In Reed, J.K., ed., *Plate Tectonics: A different view*. St. Joseph, MO: Creation Research Society Books, p. 93-145.
- O' Driscoll, E.S.T., 1986. Observations of the lineament-ore relation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, v. 317, p. 195-218.
- Opydyke, N.D., & Hekinian, R., 1967. Magnetic properties of some igneous rocks from the Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Geophysical Research*, v. 72, no. 8, p. 2257-2260.
- O' Regan, M., Williams, C.J., Frey, K.E., & Jakobsson, M., 2011. A synthesis of the long-term paleoclimatic evolution of the Arctic. *Oceanography*, v. 24, no. 3, p. 66-80, <http://www.tos.org>.
- O' Reilly, S.Y., Zhang, M., Griffin, W.L., Begg, G., & Hronsky, J., 2009. Ultradeep continental roots and their oceanic remnants: a solution to the geochemical 'mantle reservoir' problem? *Lithos*, 211S, p. 1043-1054.
- Orlenok, V.V., 1986. The evolution of ocean basins during Cenozoic time. *Journal of Petroleum Geology*, v. 9, p. 207-216.
- Ozima, M., Ozima, M., & Kaneoka, I., 1968. Potassium-argon ages and some magnetic properties of some dredge submarine basalts and their geophysical implications. *Journal of Geophysical Research*, v. 73, no. 2, p. 711-723.
- Parnell, J., 1982. Paleomagnetic evidence for a large (~ 2,000 km) sinistral offset along the Great Glen fault during Carboniferous time: comment. *Geology*, v. 10, no. 11, p. 605.
- Pavlenkova, G.A., & Pavlenkova, N.I., 2006. Upper mantle structure of the Northern Eurasia from peaceful nuclear explosion data. *Tectonophysics*, v. 416, p. 3-52.
- Pavlenkova, N.I., 1990. Crustal and upper mantle structure and plate tectonics. In: Barto-Kyriakidis, A., ed., *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory*. Athens: Theophrastus Publications, v. 1, p. 73-86.
- Pavlenkova, N.I., 1995. Structural regularities in the lithosphere of continents and plate tectonics. *Tectonophysics*, v. 243, p. 223-229.
- Pavlenkova, N.I., 1996. General features of the uppermost mantle stratification from long-range seismic profiles. *Tectonophysics*, v. 264, p. 261-278.
- Pavlenkova, N.I., 2012. The earth's degassing, rotation and expansion as sources of global tectonics. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 63, p. 49-71.
- Pedlosky, J., 1979. *Geophysical Fluid Dynamics*. New York: Springer-Verlag.
- Peltier, W.R., & Wu, P., 1983. Continental lithospheric thickness and deglaciation-induced true polar wander. *Geophysical Research Letters*, v. 10, p. 181-184.
- Persson, A., 1998. How do we understand the Coriolis force? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, no. 7, p. 1373-1385, www.aos.princeton.edu.
- Pilot, J., Werner, C.-D., Haubrich, F., & Baumann, D., 1998. Paleozoic and Proterozoic zircons from the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, v. 393, p. 676-679.
- Piper, J.D.A., 2006. A ~ 90° late Silurian-Early Devonian apparent polar wander loop: the latest inertial interchange of planet earth? *Earth and Planetary Science Letters*, v. 250, nos. 1-2, p. 345-357.
- Pollack, H.N., & Chapman, D.S., 1977. On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness. *Tectonophysics*, v. 38, p. 279-296.
- Poupinet, G., & Shapiro, N.M., 2009. Worldwide distribution of ages of the continental lithosphere derived from a global seismic tomographic model. *Lithos*, v. 109, nos. 1-2, p. 125-130, 10.1016/j.lithos.2008.10.023.
- Pratsch, J.-C., 1990. Relative motions in geology: some philosophical differences. *Journal of Petroleum Geology*, v. 13, p. 229-234.
- Pratt, D., 2000. Plate tectonics: a paradigm under threat. *Journal of Scientific Exploration*, v. 14, no. 3, p. 307-352, www.scientificexploration.org.
- Pratt, D., 2001. Problems with plate tectonics. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 21, p. 10-24.
- Prévot, M., Mattern, E., Camps, P., & Daignières, M., 2000. Evidence for a 20° tilting of the earth's rotation axis 110 million years ago. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 179, nos. 3-4, p. 517-528.
- Price, J.F., 2006. A Coriolis tutorial. Woods Hole Oceanographic Institute, version 3.3, www.whoi.edu.
- Priestley, K., & McKenzie, D., 2006. The thermal structure of the lithosphere from shear wave velocities. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 244, p. 285-301, www.seg2.ethz.ch.
- Raiverman, V., 1992. Trans-Asiatic lineaments and Himalayan orogeny. In: Sinha, A.K., ed., *Himalayan Orogen and Global Tectonics*. International Lithosphere Programme, publication no. 197, p.

- 121-155.
- Raub, T.D., Kirschvink, J.L., & Evans, D.A.D., 2007. True polar wander: linking deep and shallow geodynamics to hydro- and bio-spheric hypotheses. In: Schubert, G., ed., *Treatise on Geophysics*. Amsterdam: Elsevier, v. 5, ch. 14, p. 565-589.
- Reibisch, P., 1901. Ein Gestaltungsprinzip der Erde. 27. Jahresbericht des Vereins für Erdkunde zu Dresden, p. 105-124.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., et al., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, no. B5, doi:10.1029/2005/JB004051.
- Reynolds, P.H., & Clay, W., 1977. Leg 37 basalts and gabbro: K-Ar and ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating. In: Aumento, F. Melson, W.G., et al., *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*. Washington, DC: US Government Printing Office, v. 37, p. 629-30.
- Rezanov, I.A., 1968. Paleomagnetism and continental drift. *International Geology Review*, v. 10, p. 765-776.
- Ricard, Y., 2007. Physics of mantle convection. In: Schubert, G., ed., *Treatise on Geophysics*. Amsterdam: Elsevier, v.7: Mantle dynamics.
- Rogers, J.J.W., & Santosh, M., 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, v. 5, p. 5-22.
- Ruditch, E.M., 1990. The world ocean without spreading. In: Barto-Kyriakidis, A., ed., *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory*. Athens: Theophrastus Publications, v. 2, p. 343-395.
- Rudnick, R.L., McDonough, W.F., & O'Connell, R.J., 1998. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. *Chemical Geology*, v. 145, p. 395-411.
- Russell, C.T., & Dougherty, M.K., 2010. Magnetic fields of the outer planets. *Space Science Reviews*, v. 152, p. 251-269.
- Sager, W.W., Weiss, C.J., Tivey, M.A., & Johnson, H.P., 1998. Geomagnetic polarity reversal model of deep-tow profiles from the Pacific Jurassic Quiet Zone. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, no. B3, p. 5269-5286.
- Salamy, K.A., & Zachos, J.C., 1999. Latest Eocene-early Oligocene climate change and Southern Ocean fertility: inferences from sediment accumulation and stable isotope data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 145, p. 61-77.
- Sandwell, D.T., & Renkin, M.L., 1988. Compensation of swells and plateaus in the north Pacific: no direct evidence for mantle convection. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, no. B-4, p. 2775-2783.
- Sato, H., 1991. Viscosity of the upper mantle from laboratory creep and anelasticity measurements in peridotite at high pressure and temperature. *Geophysical Journal International*, v. 105, no. 3, p. 587-599.
- Saul, L.R., 1986. Pacific west coast Cretaceous molluscan faunas: time and aspect of changes. In: Abbott, P.L., ed., *Cretaceous stratigraphy, western North America*. Los Angeles, CA: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, Book 46, p. 131-135.
- Saxena, M.N., & Gupta, V.J., 1990. Role of foredeep tectonics, geological and palaeontological data, gravity tectonics in the orogeny and uplift of the Himalayas, vis-a-vis continental drift and plate tectonics concepts. In: Barto-Kyriakidis, A., ed., *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory*. Athens: Theophrastus Publications, v. 1, p. 105-128.
- Saxena, M.N., Gupta, V.J., Meyerhoff, A.A., & Archbold, N.W., 1985. Tectonic and spatial relations between India and Asia since Proterozoic time. In: Gupta, V.J., ed., *Contributions to Himalayan Geology*, v. 3: *Geology of Western Himalayas*. Delhi: Hindustan Publishing Corporation, p. 187-207.
- Scheidegger, A.E., 1963. *Principles of Geodynamics*. 2nd ed., New York: Academic Press.
- Schiaparelli, G.V., 1889. De la rotation de la terre sous l'influence des actions géologiques. St. Petersburg: Imprimerie de l'Académie Impériale des Sciences.
- Schmidt, P.W., Powell, C.McA., Li, Z.X., & Thrupp, G.A., 1990. Reliability of Palaeozoic palaeomagnetic poles and APWP of Gondwanaland. *Tectonophysics*, v. 184, p. 87-100.
- Scotese, C.R., Boucot, A.J., & McKerrow, W.S., 1999. Gondwanan palaeogeography and palaeoclimatology. *Journal of African Earth Sciences*, v. 28, no. 1, p. 99-114.
- Schouten, S., Eldrett, J., Greenwood, D.R., Harding, I., Baas, M., & Sinninghe Damsté, J.S., 2008. Onset of long-term cooling of Greenland near the Eocene-Oligocene boundary as revealed by branched tetraether lipids. *Geology*, v. 36, no. 2, p. 147-150.
- Schuchert, C., 1928. The hypothesis of continental displacement. In: Waterschoot van der Gracht, W.A.J.M. van, ed., *The Theory of Continental Drift: A symposium*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, p. 104-144.
- Schuchert, C., 1932. Gondwana land bridges. *Geological Society of America Bulletin*, v. 43, p. 875-915.
- Scotese, C.R., & Barrett, S.F., 1990. Gondwana's movement over the south pole during the Palaeozoic: evidence from lithological indicators of climate. In: McKerrow, W.S., & Scotese, C.R., eds., *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*. Geological Society of London, Memoir 12, p. 75-85.

- Seiders, V.M., 1988. Origin of conglomerate stratigraphy in the Franciscan assemblage and Great Valley sequence, northern California. *Geology*, v. 16, no. 9, p. 783-787.
- Sengör, A.M.C., 1990. Lithotectonic terranes and the plate tectonic theory of orogeny: a critique of the principles of terrane analysis. In: Wiley, T.J., Howell, D.G., & Wong, F.L., eds., *Terrane Analysis of China and the Pacific Rim*. Houston, TX: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, v. 13, p. 9-44.
- Shapiro, M.N., 1990. Is the opening of the Atlantic manifested in the structure of the northern framing of the Pacific Ocean? Barto-Kyriakidis, A., ed., *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory*. Athens: Theophrastus Publications, v. 1, p. 179-196.
- Shapiro, N.M., Ritzwoller, M.H., Mareschal, J.C., & Jaupart, C., 2004. Lithospheric structure of the Canadian Shield inferred from inversion of surface-wave dispersion with thermodynamic a priori constraints. In: Curtis, A., & Wood, R., eds., *Geological Prior Information: Informing science and engineering*. Geological Society of London, Special Publication, v. 239, p. 175-194.
- Simpson, G.C., Seward, A.C., Gregory, J.W., Mitchell, P., Brooks, C.E.P., Tate Regan, C., & Thomas, H., 1930. Discussion on geological climates. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, v. 106, no. 744, p. 299-317.
- Simpson, G.G., 1943. Mammals and the nature of continents. *American Journal of Science*, v. 241, p. 1-31.
- Simroth, H., 1907. *Die Pendulationstheorie*. Leipzig: Grethlein.
- Smiley, C.J., 1967. Paleoclimatic interpretations of some Mesozoic floral sequences. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 51, p. 849-863.
- Smiley, C.J., 1974. Analysis of crustal relative stability from some late Paleozoic and Mesozoic floral records. In: Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 23, p. 331-360.
- Smiley, C.J., 1976. Pre-Tertiary phytogeography and continental drift – some apparent discrepancies. In: Gray, J., & Boucot, A.J., eds., *Historical Biogeography, Plate Tectonics, and the Changing Environment*. Corvallis: Oregon State University Press, p. 311-319.
- Smiley, C.J., 1992. Paleofloras, faunas, and continental drift: some problem areas. In: Chatterjee, S., & Horton, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock: Texas Tech University Press, p. 241-257.
- Smith, A.G., & Hallam, A., 1970. The fit of the southern continents. *Nature*, v. 225, p. 139-144.
- Smith, A.G., Hurley, A.M., & Briden, J.C., 1981. *Phanerozoic Palecontinental World Maps*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Smoot, N.C., 1997. Aligned buoyant highs, across-trench deformation, clustered volcanoes, and deep earthquakes are not aligned with plate-tectonic theory. *Geomorphology*, v. 18, p. 199-222.
- Steers, J.A., 1950. *The Unstable Earth*. 5th ed., London: Methuen.
- Stehli, F.G., 1957. Possible Permian climatic zonation and its implications. *American Journal of Science*, v. 255, p. 607-618.
- Stehli, F.G., & Grant, R.E., 1971. Permian brachiopods from Axel Heiberg Island, Canada, and an index of sampling efficiency. *Journal of Paleontology*, v. 45, no. 3, p. 502-521.
- Steinberger, B., & Torsvik, T.H., 2008. Absolute plate motions and true polar wander in the absence of hotspot tracks. *Nature*, v. 452, p. 620-623.
- St. John, K.E.K., 2008. Cenozoic ice-rafting history of the central Arctic Ocean: terrigenous sands on the Lomonosov Ridge. *Paleoceanography*, v. 23, PA1505, doi:10.1029/2007PA001483.
- Stöcklin, J., 1989. Tethys evolution in the Afghanistan-Pamir-Pakistan region. In: Sengör, A.M.C., ed., *Tectonic Evolution of the Tethyan Region*. Dordrecht: Kluwer, p. 241-264.
- Storetvedt, K.M., 1990. The Tethys Sea and the Alpine-Himalayan orogenic belt; mega-elements in a new global tectonic system. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 62, p. 141-184.
- Storetvedt, K.M., 1992. Rotating plates: new concept of global tectonics. In: Chatterjee, S., & Horton III, N., eds., *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock: Texas Tech University Press, p. 203-220.
- Storetvedt, K.M., 1997. *Our Evolving Planet: Earth history in new perspective*. Bergen, Norway: Alma Mater.
- Storetvedt, K.M., 2003. *Global Wrench Tectonics: Theory of earth evolution*. Bergen, Norway: Fagbokforlaget.
- Storetvedt, K.M., 2007. Review of Tectonic Consequences of the Earth's Rotation by R.C. Bostrom. *Journal of Scientific Exploration*, v. 21, no. 2, p. 405-412.
- Storetvedt, K.M., 2010. World magnetic anomaly map and global tectonics. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 57, p. 27-53.
- Storetvedt, K.M. & Longhinos, B., 2011. Evolution of the North Atlantic: paradigm shift in the offing. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 59, p. 9-48.
- Storetvedt, K.M., & Longhinos, B., 2012. The Atlantic and its bordering continents – a wrench tectonic analysis: lithospheric deformation, basin histories and major hydrocarbon provinces. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 64, p. 30-68.

- Storetvedt, K.M., & Bouzari, S., 2012. The Tethys configuration and principal tectonic features of the Middle East: a wrench tectonic survey. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 65, p. 103-142.
- Tarling, D.H., 1982a. A Proterozoic Pangaea? *Nature*, v. 299, p. 207.
- Tarling, D.H., 1982b. Land bridges and plate tectonics. *Geobios, Mémoire Spécial* 6, p. 361-374.
- Tauxe, L., 2013. *Essentials of Paleomagnetism*. University of California Press, 2010; 2nd web edition, 2013, http://magician.ucsd.edu/Essentials_2.
- Teichert, C., 1974. Marine sedimentary environments and their faunas in Gondwana area. In: Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 23, p. 361-394.
- Teichert, C., & Meyerhoff, A.A., 1972. Continental drift and the marine environment. 24th International Geology Conference, Montreal, p. 339-349.
- Thomson, W., 1876. Presidential Address, British Association for the Advancement of Science. Reprinted in *Mathematical and Physical Papers*, 3, Cambridge University Press, p. 320-335.
- Torsvik, T.H., Meert, J.G., Smethurst, M.A., Evans, D.A., Ripperdan, R.L., & Kirschvink, J.L., 1998. Polar wander and the Cambrian (comment by Torsvik, Meert & Smethurst, and reply by Evans, Ripperdan & Kirschvink). *Science*, v. 279, no. 5347, p. 9.
- Torsvik, T.H., Van der Voo, R., Preeden, U., Niocaill, C.M., et al., 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews*, v. 114, nos. 3-4, p. 325-368.
- Tripati, A., Backman, J., Elderfield, H., & Ferretti, P., 2005. Eocene bipolar glaciation associated with global carbon cycle changes. *Nature*, v. 436, p. 341-346.
- Tripati, A.K., Eagle, R.A., Morton, A., Dowdeswell, J.A., et al., 2008. Evidence for glaciation in the northern hemisphere back to 44 Ma from ice-rafted debris in the Greenland Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 265, nos. 1-2, p. 112-122.
- Trümpy, R., 1971. Stratigraphy in mountain belts. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, v. 126, p. 293-318.
- Tsai, V.C., & Stevenson, D.J., 2007. Theoretical constraints on true polar wander. *Journal of Geophysical Research*, v. 112, B05415, doi:10.1029/2005JB003923, www.gps.caltech.edu.
- Umbgrove, J.H.F., 1947. *The Pulse of the Earth*. 2nd ed., The Hague: Martinus Nijhoff.
- Van der Voo, R., 1990. The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, v. 184, p. 1-9.
- Van der Voo, R., 1993. *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Van der Voo, R., 1994. True polar wander during the middle Paleozoic? *Earth and Planetary Science Letters*, v. 122, nos. 1-2, p. 239-243.
- Van der Voo, R., 1998. A complex field. *Science*, v. 281, p. 791-792.
- Van der Voo, R., & French, R.B., 1974. Apparent polar wandering for the Atlantic-bordering continents: late Carboniferous to Eocene. *Earth-Science Reviews*, v. 10, no. 2, p. 99-119.
- Van Summeren, J., Conrad, C.P., & Lithgow-Bertelloni, C., 2012. The importance of slab pull and a global asthenosphere to plate motions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 13, Q0AK03, doi:10.1029/2011GC003873.
- Vasiliev, B.I., & Yano, T., 2007. Ancient and continental rocks discovered in the ocean floors. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 43, p. 3-17.
- Vasiliev, B.I., & Choi, D.R., 2008. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean. Part 3: Structure and composition of the basement. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 48, p. 23-51.
- Vermeersen, L.L.A., Fournier, A., & Sabadini, R., 1997. Changes in rotation induced by Pleistocene ice masses with stratified analytical earth models. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, no. B12, p. 27,689-27,702, doi:10.1029/97JB01738.
- Wanless, R.K., Stevens, R.D., Lachance, G.R., & Edmonds, C.M., 1968. Age determinations and geological studies. K-Ar isotopic ages, report 8. Geological Survey of Canada, Paper 67-2, pt. A, p. 140-141.
- Wegener, A., 1912. Die Entstehung der Kontinente. *Geologische Rundschau*, v. 3, p. 276-292.
- Wegener, A., 1929. *The Origin of Continents and Oceans*. English translation of 4th German edition, New York: Dover, 1966.
- Wells, J.M., & Verhoogen, J., 1967. Late Paleozoic paleomagnetic poles and the opening of the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 72, no. 6, p. 1777-1782.
- Wesson, P.S., 1974a. Problems of plate tectonics and continental drift. In: Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 23, p. 146-154.
- Wesson, P.S., 1974b. Lomnitz law versus elasticoviscous controversy. In: Kahle, C.F., ed., *Plate Tectonics – Assessments and Reassessments*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 23, p. 448-462.
- Williams, G.E., 1993. History of the earth's obliquity. *Earth-Science Reviews*, v. 34, p. 1-45.
- Williams, H., & Hatcher, R.D., 1982. Suspect terranes and accretionary history of the Appalachian orogen. *Geology*, v. 10, p. 530-536.

- Willis, B., 1932. Isthmian links. Geological Society of America Bulletin, v. 43, p. 917-952.
- Wolfart, R., 1967. Zur Entwicklung der paläozoischen Tethys in Vorderasien. Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, v. 20, no. 3, p. 168-180.
- Wolfe, J.A., 1978. A paleobotanical interpretation of Tertiary climates in the northern hemisphere. American Scientist, v. 66, p. 694-703.
- Wolfe, J.A., 1980. Tertiary climates and floristic relationships at high latitudes in the northern hemisphere. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 30, p. 313-323.
- Xu Qinqi, 1979. On the causes of ice ages. Scientia Geologica Sinica, v. 7, p. 252-263.
- Xu Qinqi, 1980. Climatic variation and the obliquity. Vertebrata Palasiatica, v. 18, p. 334-343.
- Yano, T., Choi, D.R., Gavrilov, A.A., Miyagi, S., & Vasiliev, B.I., 2009. Ancient and continental rocks in the Atlantic Ocean, New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 53, p. 4-37.
- Yano, T., Vasiliev, B.I., Choi, D.R., Miyagi, S., Gavrilov, A.A., & Adachi, H., 2011. Continental rocks in the Indian Ocean. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 58, p. 9-28.
- Yuan, H., & Romanowicz, B., 2010. Lithospheric layering in the North American craton. Nature, v. 466, p. 1063-1068, doi:10.1038/nature09332.
- Zachos, J.C., Quinn, T.M., & Salamy, K.A., 1996. High-resolution (104) deep-sea foraminiferal stable isotope records of the Eocene-Oligocene climate transition. Paleoceanography, v. 11, no. 3, p. 251-266, www.mbari.org.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., & Billups, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. Science, v. 292, no. 5517, p. 686-693, www.essc.psu.edu.
- Zanazzi, A., Kohn, M.J., MacFadden, B.J., & Terry, D.O., 2007. Large temperature drop across the Eocene-Oligocene transition in central North America. Nature, v. 445, p. 639-642.
- Zemtsov, V.A., 2007. Influence of earth rotation on continental motions. Journal of Gondwana Research, v. 12, no. 5, p. 242-251.
- Zhao, G., Sun, M., Wilde, S.A., & Li, S.Z., 2004. A Paleoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. Earth-Science Reviews, v. 67, nos. 1-2, p. 91-123.
- Zhao, S., Lambeck, K., & Lidberg, M., 2012. Lithosphere thickness and mantle viscosity inverted from GPS-derived deformation rates in Fennoscandia. Geophysical Journal International, v. 190, p. 278-292, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05454.x.
- Zhao, X., & Coe, R.S., 1987. Paleomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China. Nature, v. 327, p. 141-144.
- Zhou, Y., Nolet, G., Dahlen, F.A., & Laske, G., 2006. Global upper-mantle structure from finite-frequency surface-wave tomography. Journal of Geophysical Research, v. 111, B04304, doi:10.1029/2005JB003677.

コメントと討論 COMENTS AND DISCUSSION

太平洋の「火の輪」の起源

—D. Pratt 論文 " 古地磁気学, プレート運動, および極移動 "(NCGT Journal, v. 1, n. 1. p. 66-152, 2013) へのコメント—

ORIGIN OF THE PACIFIC RING OF FIRE

Comment on D. Pratt's paper, "Palaeomagnetism, plate motion and polar wander"
NCGT Journal, v. 1, no. 1, p. 66-152, 2013.

矢野孝雄

鳥取大学地域学部地域環境学科, 日本, 680-8551, 鳥取, E-mail: yano@rstu.jp

(矢野 孝雄 [訳])

まえがき

Pratt (2013) は, 19 世紀に遡って世界中の幅広いデータを詳細に検討し, 「地質学, 地球物理学, 古生物学, および古地磁気学データは大規模なプレート運動や極移動は無用で, 非漂流大陸と安定した極を支持する」と結論した. さらに, 大陸移動や極移動といった学説はデータの選択方法とそれらの処理および解釈内容にひどく依存していることを, 氏は明らかにした.

氏の論文は, 地球科学のさまざまな研究分野に論理性という光を照射する. この観点から, 私は, 太平洋の「火の輪 Pacific Ring of Fire [PRF]」に関する簡単なコメントを行いたい. というのは, このリングにおける最近の凄惨な災害—日本で発生した 2011 年の東北地震 (M 9.0) を含む—は, リングの起源を理解することを私たちに求めているからである.

PRF は, 太平洋をとりまくほぼ連続的な地帯であり, 約 40,000km の地球大円に沿う. この地帯に集中的に供給される内因的エネルギーは, 多くの破壊的な火山噴火や地震をひきおこす. この輪の起源については, 2 つの異なる見方が知られてる.

固定論の観点

1958 年に, 井尻正二は, 太平洋の起源を解明することを目的として, 日本の地学団体研究会の中心的研究課題—『太平洋問題』—を提起した (井尻, 1960). 氏は, 太平洋における海洋底地質調査の基本的重要性のみならず, 環太平洋変動帯 Circum-Pacific Mobile Belt [CPMB] に関する地質研究の実践的重要性を強調した. というのは, この太平洋をとりまく変動帯は, 太平洋の形成史を記録しているはずであり, 陸上地質調査は相対的に容易であるからだ.

太平洋の火の輪

地学団体研究会のさまざまな団体研究の成果にもとづい

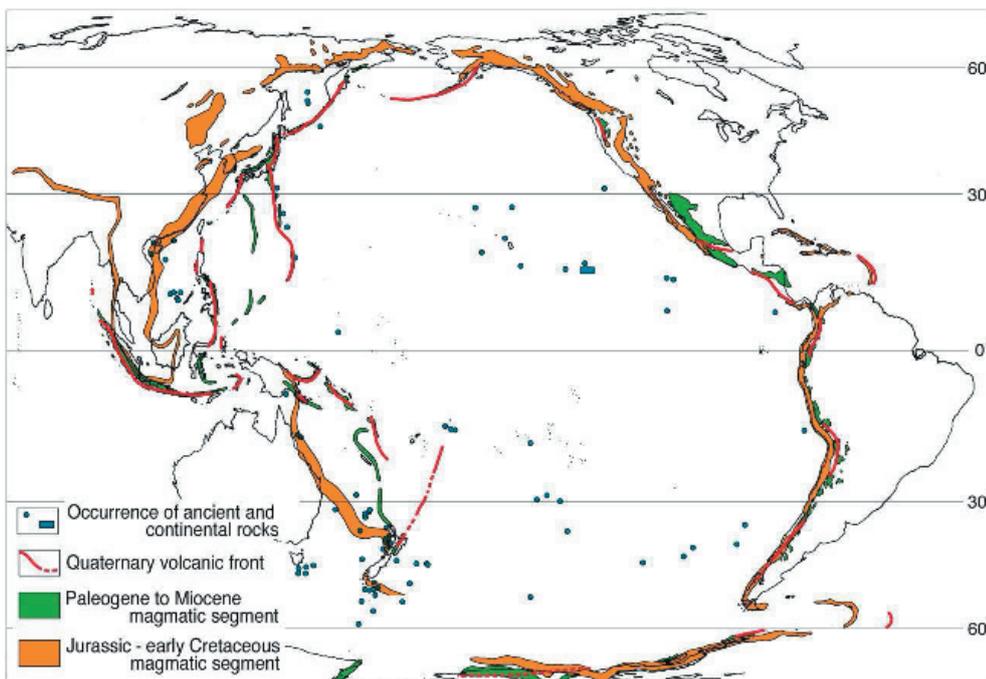


図 1 CPMB の火成活動帯 (矢野・足立, 2006 を修正) と太平洋底の古期・大陸性岩石 (Vasiliev et al., 2012 にもとづく) の分布. ジュラ紀～白亜紀前期火成活動帯, 古第三紀～中新世火成活動帯, および, 第四紀火山フロントは, それぞれ, 燕山, ポニン-グリンタフおよび島弧変動 (本文参照) を代表する.

て、藤田 (1990) は CPMB の中生代～新生代の造構 - 火成活動史を総括して、それを環太平洋変動系列 "Circum-Pacific Tectonic Movement" と命名した。この変動系列は、次の3つの造構ステージで構成される (図 1) : 燕山 - 広島変動 (ジュラ紀～白亜紀), ポニン - グリントフ変動 (古第三紀, 新第三紀) および島弧変動 (中新世末～第四紀)。燕山 - 広島変動は、大陸縁の非対称アーチング (幅 1,000 ~ 2,500km) と中軸火成活動 (大量のイグニプライトと大規模バソリスを形成する中性～珪長質火成作用) によって特徴づけられる (Yano and Wu, 1997)。それにつづくポニン - グリントフ変動は先行隆起につづいて多数のコールドロンや地溝を形成し、ここでは苦鉄質～中間質火山活動によって厚い火山岩層 (熱水変質を被って緑色に変質) が堆積した (Fujita, 1972)。西太平洋縁では、これらの火山活動につづいて海成盆地の広域的沈降が起こり、縁海が形成された。島弧変動 (藤田, 1970) は、大陸縁 (幅 1,000 ~ 3,000km) の非対称アーチングと軸部火成活動に特徴づけられる (Yano and Kubota, 2002 ; 矢野, 2009)。軸部火成活動は中新世末と鮮新 - 更新世に珪長質火砕流をもたらし、中期更新世以降は中性の火山錐を形成した。同時に、背弧～大陸内部の広大な範囲に散点的なアルカリ玄武岩をもたらした

(矢野ほか, 2009b)。

これらの3ステージの火成活動帯はすべて、CPMB を縦走している (図 1)。ただし、それらが互いに完全に連続しているわけではない。この事実は、現在の PRF がすくなくともジュラ紀に遡る長くつづく歴史をもっていることを示す。火成活動帯は、西太平洋縁では最大 2,000 ~ 4,000km, 東太平洋縁では最大 200 ~ 300km にわたって、段階的に東方へ移動する (図 1)。この経時的移動は、地球自転に起因していると思われる (Yano and Wu, 1997 ; Yano et al., 2001 ; 矢野・呉, 2006)。東太平洋縁における東へ凸の2つの島弧、すなわち Antilles 弧と Scotia 弧も、大陸間隙における東向きのアセノスフェア流動に起因するという (Alvarez, 2001)。

移動論の観点

対照的に、プレートテクトニクスモデルは、ジュラ紀～白亜紀前期火成活動帯が時間とともに移動してきたことを示し (130 ~ 0 Ma: 図 2), PRF に移動的で刹那的本性をもたらす。これらの火成活動帯は、もともとは、ローラシア大陸の西部と南東部、およびゴンドワナ大陸の北

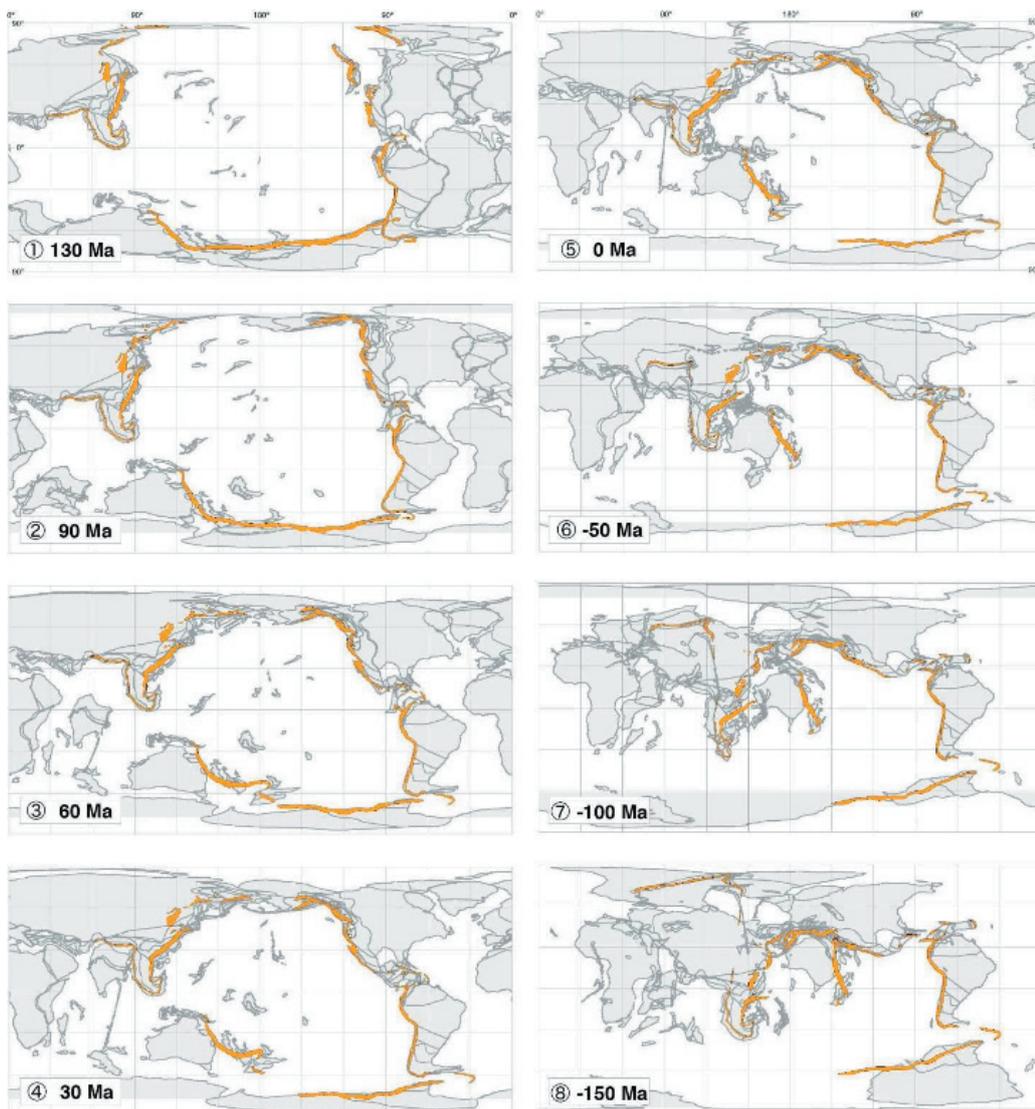


図 2 ジュラ紀～前期白亜紀火成活動帯 (図 1 と同様にオレンジ色で表示) の経時的移動。130Ma ~ -150Ma のプレート片の全地球配置の上に重ねあわせられている。-50 ~ -150Ma のプレート片配置は最近 1Ma の平均的移動が単純に敷衍されたものである。この地図は ODSN ウェブサイト (<http://www.odsn.de/>) で作成され、ODSN の許可をえて加筆・編図。

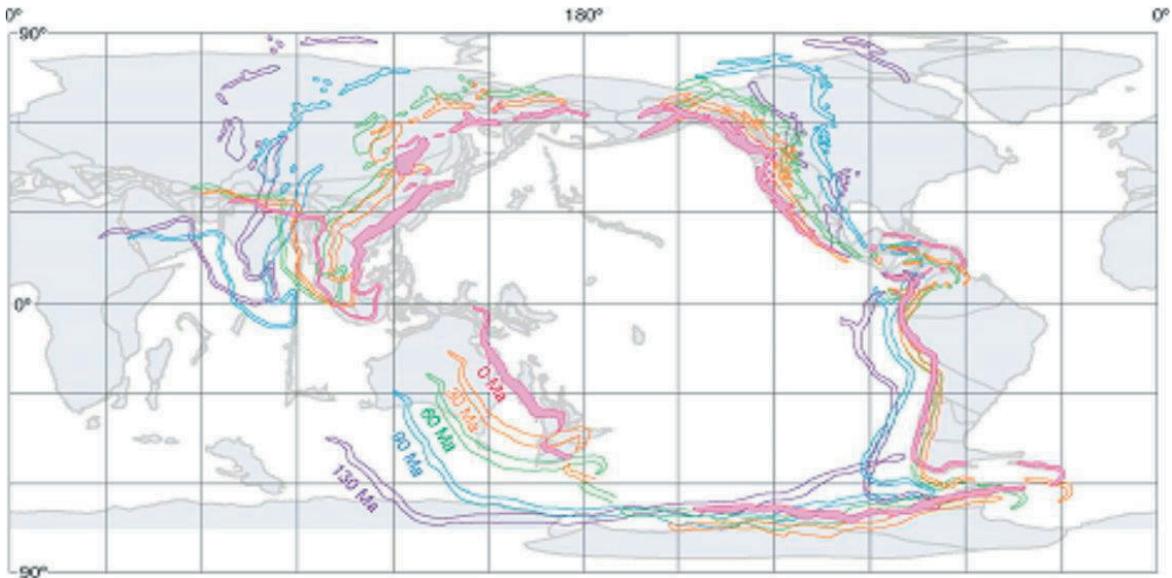


図3 ジュラ紀～前期白亜紀火成活動帯の経時的移動跡 (130～0 Ma). 現在のプレート片配置は ODSN ウェブサイト (<http://www.odsn.de/>) で作成.

東部～西部におけるいくつかのプレート収束境界で別々に形成されたものである (図 2-1～図 2-5). それらは、130m.y. にわたる最大 5,500km に達する漂移の末、現在は大円にそって配置している.

ODSN (Ocean Drilling Stratigraphic Network, <http://www.odsn.de/>) が提供するデジタル化プレート運動 (Hay et al., 1999) にしたがえば、今後、ジュラ紀～白亜紀前期火成活動帯は、この大円から離散していくことが予測されている (図 2-6～図 2-8).

討 論

移動論の観点は、PRF が次の 3 つの偶然的産物であることを意味する：①ジュラ紀～白亜紀前期火成活動帯は、長大な時間にわたって別々に長距離移動してきた末に、まったく偶然に地球大円に沿って配列した (図 3), ②この配列は、45 億年の地球史のなかで知的動物の出現に遭遇した、そして、③ CPMB の個々の収束縁は偶然にも類似した 3 つの造構 - 火成活動ステージをたどった. このような偶然的現象が発生する確率は、極度に小さい.

Pratt (2013) は、大陸は漂移せず、極の位置は安定していることを明らかにした. 世界の海洋底から報告された古期・大陸性岩石 [ancient and continental rocks: ACRs] (Meyerhoff et al., 1992 ; Pratt, 2000 ; Vasiliev and Yano, 2007 ; Vasiliev and Choi, 2008 ; Vasiliev et al., 2012 ; Yano et al., 2009a, 2011) は海洋底拡大と矛盾する. これらは、移動する火成活動帯の偶然的配列 (図 3) が PRF の起源になった確率がほんのわずかであることを意味している. しかしながら、PRF に関するさまざまな科学研究、教育、そして地震・火山噴火の予知と対策は、現状では、そのようなわずかな確率に依拠している.

地球科学の革新には、大陸移動や海洋底拡大といったブ

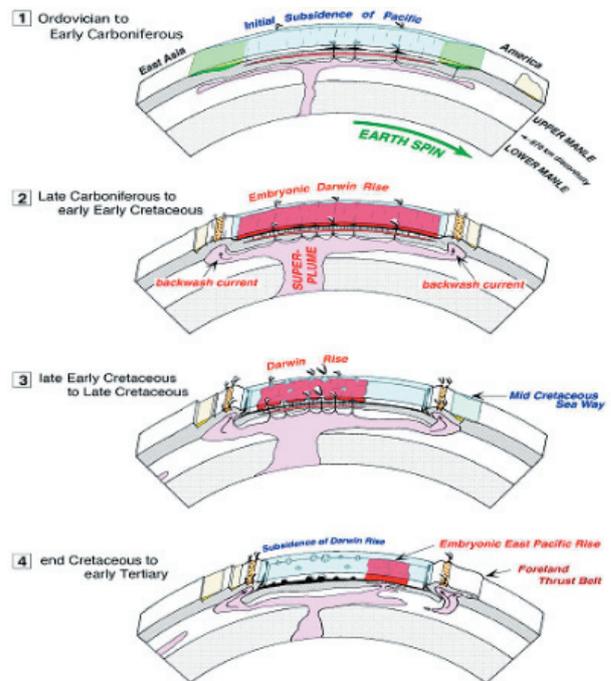


図4 太平洋形成の造構モデル (矢野・呉, 2006 ; Yano et al., 2001). 造構過程は、地球自転による東向きの造構性流動の影響下で、太平洋規模のスーパープルーム頭部とリソスフェア上載荷重の重力不安定、ならびに、海洋化作用によって駆動される.

レートテクトニクス仮説の前提命題をみなおすことが本質的に重要である. それと同時に、復活するであろう海洋化仮説 (Belousov, 1960, 1990) は、そのメカニズムを解明する必要がある. このメカニズムは未解明ながら、太平洋の発生についての固定論モデルが図 4 に提案されている. それは、太平洋の形成を説明する統一的メカニズムになる可能性があり、非漂移大陸 (Pratt, 2013) や太平洋底の ACRs の存在 (図 1, Vasiliev et al., 2012) と調和的である.

まとめ

Pratt(2013) が解明したように、きたるべき地球科学の

革新には、新しい概念、より多くの確かなデータ(とくに、大洋における岩石記録)、適切なデータ処理、正確で合理的な論理が必要である。Storetvedt (1999) は、新概念の成立には maxi-theory [最大論理] が重要であることを次のように指摘した。すなわち、「地球にかんする真の学説 (maxi-theory) はいずれも、できれば簡明な物理学の原理によって結びつけられた 1 つの論理体系でもって、地球の主要な事実(力学、造構運動、古気候、古地理など)のすべてを即座に説明しなくてはならない」と。PRF の起源の解明は、そのような学説の創造と破壊的災害への対策に貢献するだろう。

謝辞 私は、コメントの投稿を勧められて下さった編集長 Dong Choi 氏に、また、ODSN ウェブサイトで "plate fragments" デジタルマップを作成し、加筆・編図して公表することをご許可下さった Ocean Drilling Stratigraphic Network [ODSN] に、厚く御礼申し上げます。

文献

- Alvarez, W., 2001. Eastbound sublithosphere mantle flow through the Caribbean gap and its relevance to the continental undertow hypothesis. *Terra Nova*, v. 13, p. 333-337.
- Belousov, V.V., 1960. Tectonic map of the Earth. *Geol. Rundschau*, v. 50, p. 316-324.
- Belousov, V.V., 1990. Tectonosphere of the Earth: upper mantle and crust interaction. *Tectonophysics*, v. 180, p. 139-183.
- Fujita, Y., 1970. Crustal movements around island-arcs in Northwest Pacific since Late Cretaceous. In: *Island Arc and Ocean*, eds. by M. Hoshino and H. Aoki, Tokyo, Tokai University Press, p. 1-30. **
- Fujita, Y., 1972. On the law of the Green-tuff Movement and geosyncline. *Pacific Geol.*, v. 5, p. 89-116, Tsukijishokan, Tokyo.
- Fujita, Y., 1990. *Genesis of Japanese Islands (new edition) — Circum-Pacific Tectonic Movement*. Tokyo, Tsukijishokan, 259p. *
- Hay, W.W., DeConto, R., Wold, C.N., Wilson, K.M., Voigt, S., Schulz, M., Wold-Rosby, A., Dullo, W.-C., Ronov, A.B., Balukhovskiy, A.N. and E. Soeding, 1999. Alternative global Cretaceous paleogeography. In: *The Evolution of Cretaceous Ocean/Climate Systems*, eds. by Barrera, E. and Johnson, C., Geological Society of America, Special Paper no. 332, p. 1-47.
- Ijiri, S., 1960. Green tuff movement — Structural development of the Pacific Ocean. *Chikyu Kagaku (Earth Science)*, no. 50-51, p. 6-8. *
- Meyerhoff, A.A., Taner, I., Morris, A.E.L., Martin, B.D., Agocs, W.B. and Meyerhoff, H.A., 1992. Surge tectonics: a new hypothesis of earth dynamics. In: *New Concepts in Global Tectonics*, Chatterjee, S. and Hotton, N. III, (eds.), p. 309-409, Texas Tech University Press, Lubbock, TX.
- Pratt, D., 2000. Plate tectonics: a paradigm under threat. *Jour. Scientific Exploration*, v. 14, p. 307-352.
- Pratt, D., 2013. Palaeomagnetism, plate motion and polar wander. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, v. 1, no. 1, p. 66-152.
- Storetvedt, K.M., 1999. On the significance of theories and my communication with Arthur Meyerhoff. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 12, p. 25-27.
- Vasiliev, B.I., and Choi, D.R., 2008. Geology and tectonic development of the Pacific Ocean. Part 3: Structure and composition of the basement. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 48, p. 23-51.
- Vasiliev, B.I., & Yano, T., 2007. Ancient and continental rocks discovered in the ocean floors. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 43, p. 3-17.
- Vasiliev B.I., Yano T. and Choi, D.R. (2012). Progress report of the study of ancient continental rocks in the Pacific Ocean. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 63, p. 80-81.
- Yano, T., 2009. Mechanism for arc-trench genesis in Northeast Japan—Kinematics and dynamics of Island Arc Movement. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, v. 63, p. 249-265. **
- Yano, T. and Adachi, H., 2006. Green tuff on the Andes. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, v. 60, p. 175-178. * Yano, T., Choi, D.R., Gavrilov, A.A., Miyagi, S. and Vasiliev, B.I., 2009a. Ancient and continental rocks in the Atlantic Ocean. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 53, p. 4-37.
- Yano, T. and Kubota, Y., 2002. Arc-trench genesis in Japan, driven by inclined upwelling of thermal walls. *Proceedings of International Symposium on New Concepts in Global Tectonics*, p. 137-156, La Junta, Colorado (5-11 May).
- Yano, T., Matsumoto, Y. and Wu, G., 2001. Pacific genesis induced from Phanerozoic reheating of upper mantle. *Himalayan Geology*, v. 22, p. 51-64.
- Yano, T., Vasiliev, B.I., Choi, D.R., Miyagi, S., Gavrilov, A.A. and Adachi, H., 2011. Continental rocks in the Indian Ocean. *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*, no. 58, p. 9-28.
- Yano, T. and Wu, G., 1997. Late Mesozoic geodynamics relating Circum-Pacific mobile belt and Darwin Rise. *Jour. Geol. Soc. Philippines*, v. LII, p. 235-271.
- Yano, T. and Wu, G., 2006. A tectonic model for Pacific genesis. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, v. 60, p. 197-211. **
- Yano, T., Yoshitani, A. and Slobodin, S., 2009b. Major relief and volcanic area on East Asian continent. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, v. 63, p. 195-198.*

(* : in Japanese, ** : in Japanese with English abstract)

N. Pavlenkova の地球造構命題 : " グローバルテクトニクスの起源としての地球脱ガス, 自転および膨張 " に関するさらなる議論

FURTHER DISCUSSION OF N. PAVLENKOVA'S GEOTECTONIC PROPOSITION: "THE EARTH'S DEGASSING, ROTATION AND EXPANSION AS SOURCES OF GLOBAL TECTONICS"

Karsten M. STORETVEDT

Institute of Geophysics, University of Bergen, Norway
karsten.storetvedt@gfi.uib.no

(矢野 孝雄 [訳])

要旨：流体回転仮説の批判に対して、Nina Pavlenkova は彼女の全地球論文を擁護するが、仮説された内部脱ガス/運搬システムにいかなる解明も行っていない—いうなれば、ロシア語の著作は西側の読者の大半をより賢くしていない。さらに、NP の回答は、過度に単純化した 2, 3 の巨大規模の地表構造—それらに、彼女がもっとも大きな関心を寄せている—を正そうとする努力を行っていないばかりか、残りの顕著な造構的事実を基本的に無視している。私は、彼女の研究に関するいくつかの重大な疑問について議論する。

まえがき

この雑誌に掲載された最近の論文 (#63, p. 49-71) で、Nina Pavlenkova (NP) は、彼女の地球造構運動の流体-回転モデルについての概略的説明を行い、地球の内部構造に関するロシア的な新しい見通しがこれまで未解明であると喧伝される第 1 級の地球テクトニクス課題を解明すると主張する。しかし、NCGT の同じ号 (#63, 95-104) で、筆者は、幅広いデータにもとづいて NP の進化モデルを批判し、それは多くの主要な地質学および造構的事実を合理的に説明するものではないと議論した。すなわち、地表部の " 最終生成物 " に対する遠近法的説明は、惑星内部作用に関するあらゆる描像を検証するための厳格な条件である、と。彼女の地球造構モデルは、現状では、" 第 1 級 " のもっとも顕著な造構特性を明確に説明するものでさえなく、さらに、地史を説明できるものでもないことは明白だ。

NP の回答 (NCGT #64) で、彼女は、私が指摘した見解のいくつかに賛成し、彼女の独自の主張を和らげる。いっぽう、彼女は、提案したモデルの有効性を評価するうえで決定的に重要な地表の造構的・地質学的事実を無視しつつける。彼女がそのような事実に目をつぶる理由は、①それらが、この雑誌で私が以前に [別の造構的文脈から] 取り上げたことからであるか、あるいは、②それらが、彼女の元々の論文で議論されていなかったかのいずれかである。私をもっとも驚かせたのは、地表の事実を人智によって説明してしまおうとする、彼女の姿勢である。驚いたことに、それにもかかわらず、彼女の回答 (NCGT #64) で、彼女は「私のモデルの主要目的は、大洋中央海嶺や地震の環などの規則的造構系といった全地球的現象を説明することにある。恐縮ながら、KS はこれらの現象を重要な現象とは考えていない」と論述する。

に本質的に重要である。しかし、究極的疑問は、それらがどのようにして、いつ形成されたのか、そして、形成後にそれらはどの程度まで修正されたのか、という問題である。私の 2003 年の著書で、私はこれらの問題をある程度詳しく議論した。NP の全地球的憶測への私の基本的批判は、彼女が選択した巨大構造に関するうわべだけの、過度に簡略化された視点であり、さらに、他の地表造構系がほぼ完全に無視されていることである。たとえば、太平洋の東西のベニオフ帯は、造構的にも、地勢的にも重要な相違を示す。この相違は、それらの起源と後生のリソスフェアの変形に関係していることは明らかであり、この重要な観点を彼女は見落としている。つづいて彼女は、顕著な造構的不規則性と複雑な形成史を議論することなく、「[太平洋] 縁と地震の環の規則的形状」について語る。これは良くない。

南極を中心とする不均等な地球膨張という提案が、拡大海嶺の北方への移動に関連づけられて喧伝される。しかし、高温湧昇物質の地表における造構-熱的表現という大洋中央海嶺についての周知の観点は、(この雑誌の多くの箇所ですばしば議論されたように) 実際の観察ではいささかも支持されてこなかったという事実には沈黙している。さらに、地球史を通じて全地球的に移動しつづけてきた褶曲帯の位置・配列、剪断造構作用の複雑性、そして、海洋域から豊富に発見され採取された変成岩という物証も、彼女の構想に含まれていないことは明らかである。それゆえ、彼女の論文では、提案された造構モデルが地表テクトニクスを無視していることに私たちはしばしば直面する。彼女の一層の推敲を予防するために、次の論文の刊行予告があれば、私は彼女の仮説に関する何らかの批判的小論をまとめようと思う。

海洋地殻の状態

当然のことながら、彼女が論じた構造は地球進化の研究

現在えられている証拠にもとづくと、比較的厚い大陸

地殻は、かなり薄く、組成的にも変化に富む海洋地殻とは明白に起源を異にする不活発な地球表層である。この事実を、現在流布している考え方と並立させることは困難もしくは不可能である。この伝統的描像とは逆に、NPはユーラシア内部の剛塊地域から北大西洋北部までの地殻の層厚変化を比較的スムーズに描きだしている (NCGT #64, fig. 1, p. 85)。大洋を横断している浅い大陸状の Shetland-Faeroes-Iceland-Greenland 海嶺など、全般的に比較的厚い広域的海洋地殻の存在にもとづいて、また他の証拠にもとづいて、NPは北大西洋北部はかつて大陸であったはずであり、その後、沈降したと結論する [彼女はこの沈降を地殻下部の薄化作用に関連づけていると、私は理解している]。NPは、太平洋西部も同様の起源をもつとみなしているが、東部は別の表層状態 "regime" をもつと考えている。そのような場当たりの行為—同一の大洋盆の中で、1つの説明から他の説明への飛躍—は、機能しない仮説であることを露呈するようなものである、というのが私の意見である。

にもかかわらず、彼女は「下部地殻のエクロジャイト化と地殻全体の塩基性化は、大陸縁の薄化とそこでの深い

堆積盆地の形成にとってきわめて重要な作用である」と述べる。私はこの論述に全面的に賛成するが、なぜ彼女は多くの大洋深部域における地殻薄化を退けるのであろうか？ 全地球にわたる地殻の厚度変化は1つの同一の作用に由来すると考えること—地殻厚の変化が一般にかなりスムーズであると考えた限りこの考え方は合理的であろう—は、納得できることではないだろうか？ 現在のモホ面と超塩基性上部マントルが形成されたのは、永続的な惑星脱ガス (元素の上方移動) とそれに関連するグラニュライト質下部地殻のエクロジャイト化/デラミネーション (剥離-脱落) による、と私は主張した (Storetevd, 2003, Ito and Kennedy, 1970 も参照)。このように、漸進的な地殻薄化は、Nina Pavlenkova らが観測したように、不明瞭なモホ面とその深部遺存面のいずれをも説明しうるモホ面の周期的上方移動をもたらしてきた、考えられる。

地殻の海洋化が進展すると、表層を平坦化させ、残存する被覆層の層厚を均一化させるだろう。しかし、脱ガスによる最上部マントルの蛇紋岩化は、地震波速度を減少させ、地殻であるかのような誤解を容易に招く。深海掘削データは、白亜紀以前には、海洋盆が微塵も存在しなかったことを確認する。それゆえ、それに関与した地殻物質の上部マントルへの地球規模での移行は、当然のことながら惑星自転を変化させ、リソスフェアのねじれ変形を引き起こし、アルプス造構革命をもたらした (Storetevd, 2003)。さらに、中央海嶺に沿う引き延ばしによって地殻が異常に薄いか欠如しているということは重要な観測事実であり、地球の表層は化学的に不安定であり、長期間にわたって不安定であったことを示唆する (Storetevd, 2003; Storetevd and Longhinos, 2011 参照)。Nina Pavlenkova は、彼女のモデルに矛盾することが明らかな地殻欠如という事例を検討していない。

これらの観察を額面どおりにうけいれれると、世界中で大きく変化する地殻厚度は、地殻下部における (マントル脱ガス作用による) 薄化作用の広域的变化の結果であることになる。海洋中央のリフト帯に沿う多くの場所で、地殻が完全に除去されているようにみえる。レンチテクトニクスによると、地殻下部の薄化度に影響を与える主な原因は、リソスフェアを切断する断層帯の広域的分布である。北大西洋における最近の地殻厚度異常に関する調査 (Wang et al., 2011) によって、異常に薄い地殻 (<4km) が顕著な断層帯に沿ってみられることが解明された。それとは別に、ブラジルの南大西洋縁における研究 (Unternehner et al., 2010) で見いだされたのは、予想された顕著な断層規制縁堆積盆地と鮮明な海洋-大陸境界ではなく、海洋性物質とも大陸性物質ともいづれの特性も示さない漸移型地殻に適合するデータであった。

大陸縁を横切る漸移的な地殻変化は、元々の汎地球的先カンブリア紀地殻の漸次的崩壊という考え方に調和的である。進化する大陸縁は、おそらくは基本的深部断層帯に沿って形成され、それらに沿って、揮発性物質に由

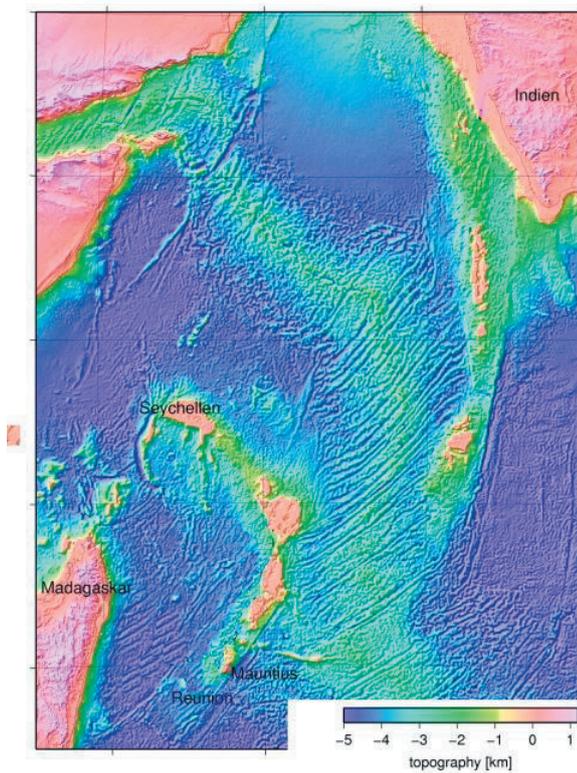


図1 この図はインド洋北西部の造構-地形図である。中程度に薄化した大陸片と見なされる Mascarene および Laccadive-Chagos 海嶺の厚度 20 ~ 30km の大陸地殻を描きだしている。これらの海嶺は広く剪断された薄い海洋地殻に取り囲まれているが、それらの構造パターンは大陸性海嶺の断面を示す。ねじれテクトニクスの説明にしたがうと、弧状の大陸性海嶺と深海構造は、慣性力に駆動された南アルプス時相の古リソスフェアの反時計まわりのねじれ変形に由来する (Storetevd, 2003)。この図は、Torsvik et al.(2013) にもとづいて、GFZ/Steinberger によって簡略化されている。ただし、著者らが提案した人為的に加えられたプレート運動は消去されている。

来する地殻下部のエクロジャイト化作用が著しく効果的に作用したと考えられる (Storetvedt, 2003; Storetvedt and Longhinos, 2012). それゆえ、断層規制大陸縁沿いでは、重力によって地殻が上部マントル中へきわめて活発に沈降したために、そこには、異様に薄い地殻と異常に深い堆積盆地の組み合わせ (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/sedthick9.jpg> を参照) と正の重力異常がもたらされた (議論と文献は、Storetvedt, 2003; Storetvedt and Longhinos, 2011, 2012 を参照).

多くの深部断層大陸縁に密接に関係しているのは、泥火山にともなうガスハイドレートの集中である。深部地殻/上部マントルの物理条件において、水を含む流体は超臨界状態になり、さまざまな特性を示すが、固体岩石を岩石泥に変化させる能力をもつことが注目される。結晶質岩石に浸透するマントル由来気体に関する多くの研究は、アルカン炭化水素 (おもにメタン)、水素硫黄化合物、水素および水蒸気が集中することを示している。流体による地殻下部のエクロジャイト化とそれに伴う重力駆動デラミネーションに加えて、主要断層帯に沿う過度の地殻薄化をひき起す重要な因子として、超臨界流体の分解能力が重要視される。Gakkei 海嶺の中央リフト盆地沿いの長さ 300km の区間に沿って、地殻が完全に失われているように見える (議論は、Storetvedt and Longhinos, 2011 参照)。世界の海洋における他の領域においても、異常に薄い地殻がしばしば報告されてきた (たとえば、Barth and Mutter, 1996; Hooft et al., 2000; Singh et al., 2011)。しかし、少なくともこれらの研究事例のいくつかの場合には、地殻はまったく残存せず、より低密度の蛇紋岩化した上部マントルが地殻片として間違っただけで解釈されている可能性がある。

Rudithch (1990) は、大洋深部における浅海性堆積物の空間的分布の研究にもとづいて、海洋底の形成に関する海洋底拡大メカニズムを論破し、中生代中～後期以降、かつての大陸地殻の大規模な沈降の結果として海洋凹地が形成されたことを議論した。大西洋、インド洋および太平洋の多数の深海掘削コアにもとづいて、彼はさらに、最初は個々別々であった盆地がつながって世界の海洋が形成されたことを論じた。Rudithch の結論には、いかさかの疑問も存在しない。中生代後期以降の加速された地殻下部の薄化とそれに関連する塩基性化作用に呼応して、アイソスタシー沈降が増大して、初源的な全地球的大陸地殻の多くの領域がしだいに深化し、深化が側方へ拡大して、最終的に深い海洋が形成された。世界の海洋の大陸地殻は、地殻下部の著しい薄化作用と化学的改変を被った。しかし、大西洋、インド洋および太平洋の中央海嶺で採取された岩石の証拠は、大陸性動力変成岩の残留物質が依然として大量に残存していることを示す (たとえば、Kashintsev and Frikh-khar, 1978; Yano et al., 2009, 2011)。したがって、海洋表層部の火山岩被覆層の下位には、もともとの先カンブリア紀地殻の残留物が広く存在していると結論するのが合理的であろう。そのような発達史にしたがえば、報告が増大している海洋

玄武岩のいわゆる Dupal 地球化学異常は、たちどころに説明することができる。

インド洋の表層玄武岩の下に推定される先カンブリア紀大陸基盤の 1 例が、最近、Torsvik et al. (2013) によって発表された。これらの研究者たちは、Mauritius 島に露出する若い溶岩流に挟まれた玄武岩質砂資料からジルコン外来結晶の U-Pb 年代測定を実施した。その結果、2つの原生年代群—約 20 億年と 6.6～8.4 億年—が得られた。彼らは、これらのジルコンは Mauritius 島の下に存在するかつての大陸リソスフェア片から同化を受けたもので、新期の火山活動によって地表へ運搬された、と提案する。この提案をさらに検証するために、Torsvik et al. は、インド洋北西部の広範囲にわたる重力インバージョンから地殻厚度を計算した。これらの結果は、Seychelle 諸島の地震探査で見積もられたモホ面深度—速度構造にもとづく約 32km の地殻厚度が大陸性であると解釈された—と比較された。彼らの重力インバージョンは、Mascarene 海嶺の全体—Seychelle 諸島～Mauritius 島—にわたって厚度 20～30km の連続的な地殻が存在するとの結論に達した。

この新しい結果にもとづいて、Torsvik et al. は、Mascarene 海嶺は先カンブリア紀の大陸地殻であると結論した。図 1 は、大陸性の Mascarene 海嶺および Laccadive-Chagos 海嶺の地形-構造特性を示す。上述の議論から、かつて現在のインド洋を横切って存在していた高く隆起した大陸地殻が、地殻薄化によって、白亜紀後期～古第三紀までには、現在のモザイク状の深海盆と中程度まで低下した大陸性海嶺に深化したと推論される。これらの海嶺の全体的な弧状の形状は、私のレンチテクトニクスでは、慣性力に駆動されたリソスフェアのねじれの結果とみなされる。インド洋では、深海盆をとりまく地殻と同様に、海嶺もアルプス期の反時計回りのねじれ変形を被ったであろう。この変形によって、南側の古リソスフェアが、地中海～中東に位置していた当時の古赤道に向かって移動した (Storetvedt and Longhinos, 2011; Storetvedt and Bouzari, 2003 と比較せよ)。

南大西洋の地球物理学的横断面

Nina Pavlenkova は、彼女の回答のなかで、アンゴラ～ブラジル間のロシアの地球物理学的断面に注目した。図 2 に、その図面を再録する。彼女は、地震波速度見積もりの分散を無視し、地殻厚度見積もりの精度—とくに中央部において—を明らかに過大評価している。図 2 から私が注意深く導いた結論は、上部マントルの低速度層 (asthenolites) がこの海洋の全幅にわたって広がっているように見えるということだけである。NP の地震波速度と岩石組成に関する無条件的論考は、上部マントルの物理学的および組成的条件がともに著しく仮定的であるために、理解困難である。Kola 半島とドイツ南部における大陸深層掘削は多くの予期しない結果—たとえば、すべての伝統的考えに反して、深部ほど断層密度が (速度の

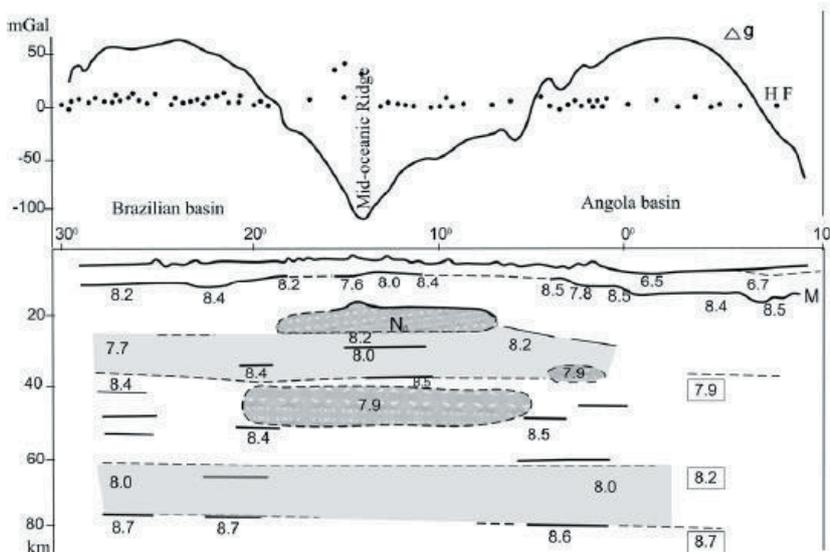


図 2 この図は Nina Pavlenkova et al. (1993) による南大西洋の地震探査断面図である。数値は地震波速度 (km/s) を、上部マントルの灰色帯は低速度層を示す。上図は、重力異常 (g) と熱流量 (HF) をそれぞれ示す。中央海嶺の境界部を横断してもかなり一定の熱流量と比較的大きな負の重力異常がみられることに注意せよ。提示された速度構造からは、低速度層が海洋の全幅にわたってひろがっていて、深度 30km 付近にマントルアセノライトがみられることがわかる (ブラジルおよびアンゴラ海盆の下の上部マントルにおけるセノライトに 7.7 ~ 7.9km/s の値が与えられていることに注意せよ)。

影響によって [velocity-affecting] 顕著に増大すること—をもたらしただけを、ここで述べておいたほうがよいだろう。

横断層沿いと同様に、大西洋中央海嶺に沿って行われた岩石採取によって、蛇紋岩化した上部マントルかんらん岩、圧砕蛇紋岩、角閃岩、および変はんれい岩が、海洋底基盤から大量に採集された (たとえば, Bonatti, 1976; Bonatti and Honnorez, 1976; Cannat, 1993; Robinson et al., 1989; Gracia et al., 2000; Beard et al., 2009; 他多数)。時には、4km 以上の厚さの蛇紋岩に富む地質断面から試料が採取された (Bonatti, 1978)。その結果として生じた疑問は、南大西洋中央部の主要な構成岩石がほんとうに玄武岩であるのかどうか?、地殻と呼ぶものがほんとうに存在するのか否か?、という問題である。上述したように、大陸残留物質と混在する蛇紋岩化した上部マントル物質が海洋中央部に多量に存在することは、もともとの大陸地殻が上部マントルの作用によって大規模に除去されたことを意味する。そのために変質した上部マントル最上部の一部は地殻型の地震波速度を示し、それによって見積もられたこれまでの地殻厚度はまったくの幻想にすぎない。もともとの厚さの大陸地殻が今日の海洋構造に変化することは、深部断裂密度に強く支配されている。海洋化メカニズムによれば、大陸縁と大洋中央海嶺の間に根本的相違はないように思われる。NP は「低速度層は大洋中央海嶺の下でのみ観測される」と述べているが、この記述は南大西洋の横断面に調和しない (図 2 参照)。「大陸地殻は地球の全表面を覆ったことがない」との NP の提案はまったくの空理空論であり、実際の証拠に支持されていない。

レンジテクトニクスでは、大洋中央海嶺に沿う幅広い地帯が剪断帯であり、それに沿って、帯磁率差モデル [参考のために、また、総括的考察については Storetvedt (2010) を参照] に示される海洋底の線状磁気システムが発達する。その筋書きによると、幅広い中央海嶺帯は、広範囲にわたるリソスフェアの斜め引張剪断を被っている

(Storetvedt, 2003)、含水流体の上昇路になっている。このような場では、地殻物質と上部マントルかんらん岩の蛇紋岩化作用とともに、流体による地殻下部のエクロジャイト化とそれに関連するデラミネーションが発生する。大西洋中央海嶺で採取された変形した蛇紋岩に関する最近の研究で、Ribeiro da Costa et al. (2008) は、強力な剪断応力によって溶解 - 再結晶作用が引き起こされやすいという。慣性力に駆動されたレンジテクトニクスでは、そのような状況が海洋中央海嶺に沿って発生しやすい。これらの海嶺では火山活動はごくまれにしか発生せず (かなり平坦な熱流量構造を参照・比較せよ)、南大西洋海嶺に沿う顕著な低重力異常 (図 2 の上図) は、過度の断裂作用、含水流体の集中的放出、および、関連する蛇紋岩化作用をたちどころに説明する。こうして、超塩基性最上部マントルのかんらん石と輝石は反応して浮揚性蛇紋岩を形成する (Wenner and Taylor, 1971)。こうして、上部マントル蛇紋岩が、もともとの大陸地殻を徐々に置換していくのであろう。

成層マントルと地殻デラミネーションを引き起こす作用に関して、Anderson (2005) は、ある環境では、組成によっては、グラニュライト質下部地殻が高密度のエクロジャイトに転移して剥離・脱落し、その後は浮力の中立深度まで沈降し、そこではエクロジャイトが低速度層を形成するだろう、と論じた。さらに、エクロジャイトの融点は、上部マントルかんらん岩よりもかなり低く、それは最終的には加熱され、トモグラフィ画像では熱プルームと間違われてしまう、という。いっぽう、グラニュライト/エクロジャイト転移の自然発生にもとづいて、Leech (2001) は、変成作用でえられる含水流体の量によって—発生する密度変化を調整することによって—地殻の薄化が起きていると結論づけた。

Leech モデルは、エクロジャイト化、上方へ進行する地殻デラミネーション、および、最終的な地殻の造構的崩壊 [私見では、このメカニズムは地殻薄化全般を説明するように思われる] を引き起こすには温度よりも流体が

重要であるとする。エクログャイト化作用のもう1つの特徴は、断裂や剪断帯に沿って進行することであり、同化 metasomatic 作用のフロントでは、グラニュライト相からエクログャイト相へ急激に転移する (Austrheim and Griffin, 1985)。古典的な大陸縁は顕著な断裂帯を伴っていて、しばしば、著しく深い堆積盆地に覆われたたいへん薄い結晶質地殻がこれらの地帯を特徴づける。十分な含水流体があればエクログャイト化反応は急速に進行し、岩石の容量を 10～15% 減少させる (Austrheim et al., 1996)。容積減少によって断裂間隔が増すにつれて、流体侵入を促進し、より加速された変成反応が維持されるだろう。

南極および、喧伝された南半球膨張

彼女の回答 (NCGT #64, p. 91) で、Nina Pavlenkova は「造構圏形成の3つの基本ステージが、私の概念で識別される。始生代-原生代の古地磁気データから判断すると、南半球にはいくつかの大陸が形成されていた。南半球における厚い大陸リソスフェアの形成は、地球半球に不均衡をもたらした。その結果、古生代に第2ステージが始まった。この変位は、地球の質量中心に新しい不均衡をもたらし、第3ステージの造構圏の発達史をひきおこした。それは、南極を中心に対称であった。流体回転モデルは、このようにして、「南半球のより大きな膨張の原因と、南極に対して対称的な海洋中央海嶺系の形成を説明する」と述べている。

私は、彼女の無遠慮な次の記述に当惑する。すなわち、先カンブリア紀前期には大陸が、南極を中心にして地球全体に不規則に分布していた、というものである(彼女は、陸塊は活力のない地殻単元であるという19世紀の考え方を墨守しているようだ)。地球の残りの部分は、海洋域という低位にあるもう1つの地球表面 "regime (状態)" に広く覆われていた、と喧伝する。しかし、彼女は古地磁に関する文献を1つも引用していない。ひじょうに古い岩石の化石磁気形成についての多くの実験的および磁氣的複雑性に、彼女は気づいていないのだろう。先カンブリア紀前期の岩石は、重複した磁気記録をもたらす多重造構事件を経験している。ここで、側方漂移とプレートテクトニクスが1950年代後半と1960年代に生まれたときに、思弁的論理に依拠した古地磁気測定結果の取り扱いが始まるという"帰結"がすでに準備されていたことを述べておくのが適切であろう。ますます流行する大陸漂移という考え方を確認したと喧伝する研究が採用され、頻繁に引用されるいっぽう、信仰モデルに適合しないデータは最初から無視されたのである。

書籍や論文で、私はコア/マントル境界の隆起部と地球表層の世界的海洋分布とが密接に関係していて、外核からの主要脱ガス域の外側延長が表層部の海洋化に直接かかわっていること、すなわち、かつての厚い汎地球的地殻が、薄い地殻の海洋域に囲まれたさまざまな大きさの残存大陸モザイクに分割されたことを指摘してきた。

この案は、NPの力学仮説に大きく矛盾する。彼女の論文を支持するために、彼女はロシア語論文 (Syvorotkin, 2002) を引用するが、その研究の詳細にはまったくふれていない。しかし、彼女は「地球脱ガスは今日ではオゾン層構造から研究されている。それは、水素流動がオゾン層を破壊しているからである」と述べながら、その記述にいかなる科学的検証も行っていない。にもかかわらず彼女は「主要な脱ガス域は、現在では(おそらく過去においても)南半球である」という。こうして彼女は、陸塊がもともとは南極の周辺に集まっていたとの自らの考え、すなわち、彼女の原点にある「脱ガスによって形成された大陸 "regime [状態]"」を支援しようと試みる。

おそらく窒素酸化物が存在する環境では、酸化炭素や、不完全酸化のメタンや他の炭化水素の光化学酸化は、広域的にも、また、全地球的規模でも、対流圏オゾンの主要な供給源であると考えられている(たとえば、Steinbrecht et al., 2003; Varotos et al., 2005)。しかし、最近数10年にわたって南極上空で観測されてきたオゾンの顕著な減少は、OH, NO および Cl のような多くの不活性触媒に起因する可能性がある。南極オゾンホールは季節変化を示し、とくに南極の春(9月～12月)に顕著になる。この時期には、南極起源の大気 container [貯蔵庫] の周囲を循環する強い西風が吹き始める。この大気渦の内部では、下部成層圏の広域的オゾン量が50%以上も減少する (Sparling, 2001)。大気と気候の効果が、おそらくはオゾン破壊作用に重要な役割を果たしていることは明らかである。しかしながら、人為的原因—おもに、含塩素起源気体(塩化炭素)—が、これまでは格段の関心をあつめてきた。人間活動は不活性触媒を確実に増大させているが、大気成分のなかでもっとも活動的物質は現在のところ自然源物質である。次なる疑問は、南極のリソスフェアが、南極大陸上空のオゾンホールをもたらす化学物質をきわめて長期的にわたって放出してきたかどうか、という問題である。

古地磁気、古気候および造構運動の複合的考察にもとづくと、南極と周辺海域のリソスフェアは、アルプス時相の極相期以降、慣性力に駆動された顕著な時計まわり回転を被ってきた (Storetvedt, 2003, 2010)。衛星測地による地点速度は、この運動が現在も進行中であることを示す。この運動に対応して、影響されたリソスフェアの古期対角断裂系が活性化され、強化されてきたであろう。こうして、マントルガスはいずれも上方流動が容易になった。結晶質地殻を通じて水素、メタン、二酸化炭素、水および塩化水素を含む天然気体が流出することが、この文献に報告されている。それゆえに、南極と周辺域におけるアルプス期以降の造構場では、現在の南極域の地殻を通じて反応性化学物質が放出されてきたことがわかる。したがって、レンチテクトニクスの視点からみると、少なくともアルプス変動極相期以降の1億年間にわたって、南極は自然オゾンにずっと枯渇してきた地域であったわけである。

文 献

- Anderson, D.L., 2005. Eclogite in the mantle; the layered mantle revisited. www.MantlePlumes.org, 9p.
- Austrheim, H. and Griffin, W.L., 1985. Shear deformation and eclogite formation within granulite-facies anorthosites of the Bergen Arcs, western Norway. *Chem. Geol.*, v. 50, p. 267-281.
- Austrheim, H. et al., 1996. Garnets recording deep crustal earthquakes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 139, p. 223-238.
- Barth, G.A. and Mutter, J.C., 1996. Variability in oceanic crustal thickness and structure: Multichannel seismic reflection results from the northern East Pacific Rise. *Jour. Geophys. Res.*, v. 101, no. B8, p. 17.951-17.975.
- Beard, S.B. et al., 2009. Onset and Progression of Serpentinization and Magnetite Formation in Olivine-rich Troctolite from IODP Hole U1309D. *Jour. Petrology*, v. 50, p. 387-403.
- Bonatti, E., 1976. Serpentinite protrusion in the oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 32, p. 107-113.
- Bonatti, E., E., 1978. Vertical tectonism in oceanic fracture zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 37, p. 369-379.
- Bonatti, E. and Honnorez, J., 1976. Sections of the earth's crust in the equatorial Atlantic. *Jour. Geophys. Res.*, v. 81, p. 4104-4116.
- Cannat, M., 1993. Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. *Jour. Geophys. Res.*, v. 98, p. 4163-4172.
- Gràcia, E. et al., 2000. Non-transform offsets along the Mid-Atlantic Ridge south of the Azores (38°N-34°N: Ultramafic exposures and hosting of hydrothermal vents). *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 177, p. 89-103.
- Hooft, E.E.E., 2000. Crustal thickness and structure along three contrasting spreading segments of the Mid-Atlantic Ridge, 33.5°-35°N. *Jour. Geophys. Res.*, v. 105, p. 8205-8226.
- Kashintsev, G.L. and Frikh-khar, D., 1978. Structure of the oceanic crust in the Eltanin Fault Zone (Pacific Ocean) based on petrographic data. *Oceanology*, v. 18, p. 39-42.
- Leech, M.L., 2001. Arrested orogenic development: eclogitization, delamination, and tectonic collapse. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 185, p. 149-159.
- Ribeiro da Costa, I. et al., 2008. Antigorite in deformed serpentinites from the Mid-Atlantic Ridge. *Eur. Jour. Mineral.*, v. 20, p. 563-572.
- Robinson, P.T. et al., 1989. Initial Reports ODP Leg 118. College Station, TX, Ocean Drilling Program.
- Ruditch, E.M., 1990. The world ocean without spreading. In: *Critical Aspects of Plate Tectonic Theory I*, Theophrastus Publ, Athens (Greece), p. 343-396.
- Singh, S.C. et al., 2011. Extremely thin crust in the Indian Ocean possibly resulting from Plume-Ridge Interaction. *Geophys. Jour. Int.*, v. 184, p. 29-42, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04823.x
- Sparling, B., 2001. Antarctic Ozone Hole, <http://www.nas.nasa.gov/About/Education/Ozone/antarctic.html>
- Steinbrecht, W. et al., 2003. Global distribution of total ozone —nd lower stratospheric temperature variations. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 3, p. 1421-1438, www.atmos-chem-phys.org/acp/3/1421/
- Storetvedt, K.M., 2003. *Global Wrench Tectonics*, Fagbokforlaget, Bergen, 397p.

出版 物 **PUBLICATIONS**

全地球の気候状況報告 (GCSR) **GLOBAL CLIMATE STATUS REPORT (GCSR)**

Edition 1-2013, March 2013. Published by Space and Science Research Corporation (SSRC), Orlando, Florida.
www.spaceandscience.net. US\$12.95. 51p.

(窪田 安打 [訳])

目次

1. 編集者の就任挨拶
2. 全地球の気候状況報告 - まえがき
3. 気候概要の評価
4. 特定の気候パラメータ評価
 - a. 地球大気の気温の状況及び動向
 - b. 世界の海洋温度の状況と傾向
 - c. 極温度, 氷河と海氷範囲
 - d. 海面および海面変化速度
 - e. 太陽活動の状況

5. 将来の気候変化予測
6. 破滅的な地球物理学のイベント上の特記事項 (CGE)
- 7.S pace and Science Research 社と報告編集者

下記は, GCSR のエディターからの特別の就任挨拶です.

6年前に, 私は「わかった!」と叫んだ瞬間, とても幸運であった. 突然の知識の滝に出会うようなことは, 人生でめったにない出来事の一つであり, 難解で, 過去に知られていない, とても重要な課題の理解に繋がる.

私にとって、これは2007年4月26日午後2時に発生した。私は太陽物理学研究に関する本の執筆に数週間を費やしていた。本は、気候変動とは何の関係もなかった。しかしながら、ある日、私は太陽に固有の二百年サイクルが、長い地球温暖期から、深く危険な寒冷期に逆戻りすることを認識した。新しい知見の発見は、私の人生の方向を変えた。これにより、Space and Science Research社(SSRC)を創設し、米国の人々や我々のリーダーに対して、寒冷化に向かう危険な気候変動時代が開始したことを警告することになった。この探求は、国連、元副大統領のアル・ゴア前副大統領、強力な環境団体、特別な利害関係をもつ主流メディア、およびバラク・オバマ大統領に信頼されていることとは全く対照的である。

2007年初頭に、公共性の高い方法で私の調査研究結果の発表を行った後、私は予想通り、政治関係者、メディア、および科学界のほぼすべての分野から、批判、嘲笑、中傷、または明白な無視を受けた。コミュニティ外の無名の研究者が既存の定説に反対するときに、科学の歴史上、このような反応は良く知られている。私の研究に関するプレスリリースは最悪のタイミングであった。2007～2008年の間に、米国の大統領選候補者の両者は、期待されるすべての票を獲得しようとしていた。したがって、彼ら双方が言っていた地球温暖化は、修正するべき本物の脅威であった。その期間は、気候変動のヒステリー的熱狂の頂点だった。Al Goreと国連のDr. Rajendra Pachauriは、人為的な地球温暖化や気候変動を人々が"自覚"するための彼らの努力に対してノーベル賞を受賞した。人為ではなく、太陽による気候変動であり、地球温暖化が終了していること、我々は記録的寒さの数十年間を迎えようとしていることを述べた私のメッセージは、かつての多くの友人を含めて、誰も聞きたくない歓迎されない情報であった。

それ以来、幸いにも、多くは変わった。今、他の研究者も私が言ったことを公式に発言している。太陽について同じ発見ことをした過去の研究者の仕事は、抑制または隠蔽されていたが、最終的に日の目を見ている。連邦政府の気候変動問題に対する不信任により、人為的地球温暖化について一般国民の懐疑的見方が増えている。"Climategate"事件は、気候変動に関する国連レポートの背後にある主流科学者グループが改ざんや、操作、実際のデータの隠蔽などを行ったことを示している。そして、気候の真実のために戦って、気候変動の詐欺を暴露する、勇敢な騎士も現れている。たとえば、上院議員のJames Inhofe (R-OK), Marc Morano, Dr. Roy Spencer, Dr. Roger Pielke Jr., Dr. John Christy, Joseph D' Aleo, John Coleman, Alan Caruba, Tim Ball, ハートランド研究所、および他の多くの方であり、彼らは'温暖化論者 warmists' への継続的な戦いを戦っている。しかしながら、私が属する新しいグループは別の議論を行っている。人為的気候変化についての賛成・反対に関するものではなく、新しい気候の現実についてである。我々の議論は、太陽が原因となる新しい寒冷気候であり、

「太陽の冬眠」を主張する。そして、それへの緊急な準備の必要性である。また、ほぼ未知数なことは、この記録的寒冷期に一般的である記録的な地震と火山に関するリスクの増加である。私は、人為的気候変動との戦いを行っている同盟国に対して、その戦いを一斉に止めて、代わって、はるかに重要で急速に接近している寒冷気候に力を集中させようとさえした。私たちのグループは主要な研究者、支持者を含む。David Archibald(オーストラリア), Dr. H. Abdussamatov(ロシア), Dr. Boris Komitov(ブルガリア), Dr. Ole Humlum(ノルウェー), Dr. Dong Choi(オーストラリア), Dr. Fumio Tsunoda(日本), Dr. Masashi Hayakawa(日本), Dr. Giovanni Gregori(イタリア), Dr. N.Venktanathan(インド), Dr. Arun Bapat(インド), Valentino Straser(イタリア), Bruce Leybourne(アメリカ), Dr. Zanghao Shou(アメリカ), Dr. Robert Willisroft(アメリカ), Jason Willisroft(アメリカ), Robert Walker(アメリカ, 科学者代表委員会の前議長), Stephen Foley(アメリカ), Dr. Rich Swier(アメリカ), Carole Hemingway(アメリカ)およびRobert Felix(アメリカ, 『温暖化ではなく寒冷化である』の著者)等である。

更に重要なことには、2011年に、NASA、国立太陽観測所およびUS空軍は、私および少数の他のものが予言したように「太陽の冬眠」あるいは「極小期」に太陽が入ると発表した。地球温暖化が終了しており、地球を次の寒冷気候に導いているのは、この太陽の変化である。残念ながら、太陽のこの歴史的で不吉な変化は、まだそれが我々生命全体にどんな影響を引き起こすか、一面または夕方のニュースに間に合っていない。

この新しい寒冷気候時代があらゆる過去の世界大戦よりも多くの死と破壊をもたらすかもしれないが、それはまだ伏せられていて、主要メディアに無視され、誤解され、我々のリーダーからは退けられている。しかし、他の積極的な変化も起きている。人が次の『寒冷気候時代』に関する情報を捜すとき、SSRCと私の仕事はインターネット上で引合いに出されている。重要なことに、私の大規模気候変動の予測はそれらのすべてが起こったか、起こりつつある。今日さえまだNASA、NOAAと国連気候変動に関する政府間パネル(国連-IPCC)による予測が起きていないことは、私たちの気候予報が成功であることの証拠である。しかしながら、太陽説を信頼しているのは、私だけではない。気候変動予測に、温室効果ガス論を想定する人々は、一貫して間違っている。太陽を考える人々は、一貫して正しいのである。

気候変動の真実を探求するための着実な進歩にもかかわらず、人々の多くは、まだ人類が気候変動を制御し、地球温暖化が未だに温暖化であると信じている。彼らは、新たに始まった寒冷気候を、まったく知らない。さらに、たとえ彼らがそれがもはや存在しないということを知ったとしても、米国政府と国連は地球温暖化を止めるという見せかけの下で我々の生活へのより多くの政府規制を

再度促進するだろう。政府機関は、欠陥のある温室効果ガスの理論と、誤解を招く虚偽の気候レポートを発行し続けている。そして、政治制度は州および連邦レベルの両方へもたらされている。それは、気候の事実を我々に告げる政府をもはや信じる事ができず、我々自身が気がつく状況に至っている。しかし、それは私たち多くの人々の状況である。私達はまだ真実を告げられていない！ 彼らは、新しい寒冷の時代の準備ができていない！

来るべき気候変動という事実の広報ができていないので、Global Climate Status Report(GCSR) とその仲間のまとめ役をつくることを、SSRC で知り合った優秀な科学者とスタッフの勇敢な支持により、私は決断した。この定期的に刊行されるレポートは、地球の気候状況をありのままを伝える唯一の情報源として提供されるものである。それは科学的な研究論文、国際科学機関や私たちの惑星の毎日の監視だけでなく、SSRC における推論的意見や研究、また、衛星観測された地球の気候に関する最新の正確なデータや何百もの査読された科学的研究を統合したレポートである。

続版を続けている GCSR の初期のレポートには、明瞭な特徴があった。人為的温室効果ガス排出が気候変動へ影響したことにに関する分析が無かった。過去 25 年にわたり、人為的気候変動が喧伝されたため、これが衝撃的な声明になったのは当然である。国連や米国政府だけでなく、SSRC や、他の多くの科学者や世界中の研究者が関係する気候変動の報告書によると、気候変動測定は唯一ではない。この結論に関する直接的な理論的根拠は、不運にも、指導者、メディア、情報をそれら 2 つのグループに依存するほとんどの人々は受け入れられなかった。

本質的には、惑星上の CO₂ の人為的生産は、考慮に値しないほどきわめて小さい。それは地球上の CO₂ の自然生産よりもずっと小さく、およそ 7,000 年の間、人類の産業活動によらず増加してきた。このより大きな自然

の CO₂ の生産は、人が制御したものではなく、どんなに多くの気候規則が出されようとも、それらは、まったく関与しない。さらに、数十年の努力と数 10 億ドルが国連や米国と他国の政府により、人類の CO₂ への関与という 38 以上もの全地球的気候モデルの試行に費やされた。我々は、そのために何を示さなければならないか？ 機能しない 38 かそれ以上のグローバルな気候モデル！ 彼らは一度も過去または現在の気候変動を予測することができなかった。全く機能しない。たしかに、人類がつくる CO₂ は大気の温暖化に関与する。しかし、大規模な気候変動予測を目的とするときには、非常に小さい影響しかもたない。

もう一つ質問しなければならない。「人為的気候変化のために浪費された何十回もの数 10 億ドルが、他のより価値のある目的に割り当てることができたなら、人類はどんな利益を得たのだろうか。大勢の人が毎年苦しみ、死んでいるガン患者を治すことが出来たかもしれない？ 我々は最初の月面コロニーへの片道を建設していたかもしれない？ 原子力施設で生産される膨大な量の放射性廃棄物を太陽へ放出することで、大きな国家問題を解決し始めることができたかもしれない？ それは、もちろん最終的な核廃棄物処理サイトである。これらは、無理なことであろうか？ そうではない。私は、才能のある Dr. Henry Kolm と一緒に、20 年前、ちょうどそのプロジェクトのためにロケットシステムの概略を設計した。市民の任意のグループに対して、人類の熱意を満足させることへお金を使うことがよりよいか、それとも、地球温暖化のエゴと言うべきか。更なる指摘は、今ある気候変動だけでなく、次なる寒冷気候への研究に基金をふりむけて、より価値のある、適切な気候研究をおこなうことができないものだろうか？

John Casey
President
Space and Science Research Corporation

傾動, グローバルテクトニクスと地震予知 TILTS, GLOBAL TECTONICS AND EARTHQUAKE PREDICTION

著者 : Pavel Kalenda, Libor Neumann, et al..

(窪田 安打 [訳])

- | | |
|---|--|
| 1. はじめに | 7. 振り子計測の解釈 (Kalenda, Neumann) |
| 2. 地震予知の可能性 / 予知できない可能性 (Kalenda) | 8. 他の方法による振り子計測の比較 (Kalenda) |
| 3. 外部応力の概念 (Neumann, Kalenda, Skalský, Kopf, Wandrol) | 9. プレート運動のメカニズム (Kalenda, Neumann, Procházka, Ostřihanský) |
| 4. 地震実験と効果試験 (Kalenda, Málek, Skalský, Ostřihanský) | 10. 地震予知 (Kalenda, Neumann) |
| 5. 鉛直方向の静的振り子 (Neumann) | 247 ページ, 124 図 |
| 6. 振り子計測結果 - 傾斜 (Kalenda, Neumann) | 推奨価格 : 33 € / 45 USD + pp |

専門書の注文の連絡先; p.kalenda@volny.cz.
 プラハでの専門書購入連絡先; ceskageologie@volny.cz.

主な結果:鉛直静的振り子による地殻構造上の応力測定は、たとえ中央ヨーロッパだけで実行されただけでも、世界中で発生した大部分の強い地震 ($M \geq 7$) の前 (通常、数週間前) に異常がみられた。異常な応力の発生領域は、単独又は複合の振り子の測定によって位置を把握することができ、予知の可能性をもたらす。それは、リソスフェアのプレートの運動が、地球表面の太陽照射の支配的な役割を持つ外部応力によって引き起こされており、これはマントル対流を証明しない。

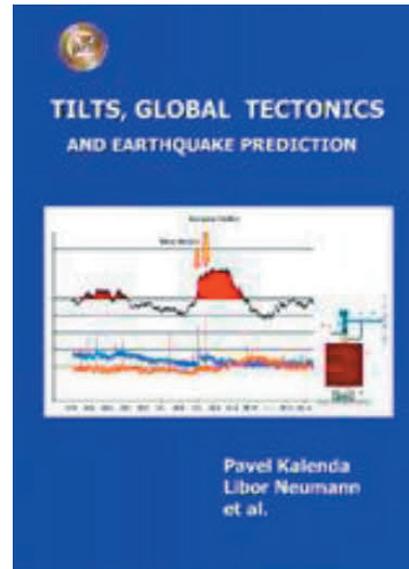
レビュー:この本の著者は、P. Kalenda, L. Neumann, J. Málek, L. Skalský, L. Ostřihanský, T. Kopf, V. Procházka と私である。Wandrol は、地震予測のような最大の難しい問題に対する非常に革新的な貢献/解決を示した。最新の教科書や研究論文とは異なり、著者の出発点は、現在のプレートテクトニクスの概念ではない。これは、間違っただ概念からの解放をすすめ、地球の自転、地球潮汐、太陽活動などの忘れられ、不当に無視されてきた力を発見するようにさせた。提案された解釈は、チェコ共和国とスロバキア共和国の複数の地下の振り子測定地で得られた非常に革新的な経験的データセットによって立証された。

そのような研究が過去 50 年間行なわれていないので、

あらゆる代替の視点によるメカニズムをもたらす概念が大変望ましい。現在のプレートテクトニクス概念では、成功裏に地震や揺れを予測することは不可能である。しかし、地球の核の性質と機能、マントルと地殻の運動に対する貢献の程度は、未だに大きな未知の領域である。

地震と地震活動予測を扱うことに興味をもつ教員、学生、科学者に、私は、この重要な本をお勧めする。

Dr. Petr Rajlich, CSc.



ニュース NEWS

(矢野 孝雄 [訳])

ヨーロッパ地球科学連合 全体会議 2013 EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2013

2013 年 4 月 7 ~ 12 日
 オーストリア ウイーン

PSD11.1 ポスター要旨と討論セッション SM3.2 地震前兆, 地震先駆生物異常と予知

天体の影響, 生物異常, および地震. この 3 つの組み合わせが解決できるならば, 地震危険度を地球規模で緩和するための固有モデルを構築して, 今後の研究に新しい方法をもたらさう。

私たちは、要旨集の刊行とともに、ポスター要旨と討論セッション (PSD11.1) が SM3.2 につづいて開催されることをお知らせできることを喜んでいる。このセッションでは、研究内容の要旨発表 (約 5 分, PDF ファイル) と、それにつづいて討論が行われる。ポスター発表とは異なる

り、この発表の主目的は研究結果に焦点を絞ることが求められる。

開催期日・時間帯および部屋:2013 年 4 月 12 日 (金)
 12:15 ~ 13:15, 第 4 室
 SM3.2 のための PSD11.1: 地震前兆, 地震先駆生物異常, および地震予知
 議長:Valentino Straser and Gabriele Berberich
 副議長:Viktor Stolc and Rachel Grant

■ 12:15-12:25 EGU2013-1948

アペニン山脈北西部 (イタリア) でみられた M5+ 地震に先立つ脊椎動物と昆虫のいくつかの異常行動。Valentino Straser

■ 12:25-12:35 EGU2013-1133

Vrancea 地震活動区における応力予知に起因する生物移動。Andrei Apostol and Iren Adelina Moldovan

■ 12:35-12:45 EGU2013-8624

Vrancea(ルーマニア)における大規模な下部地殻地震に先行する動物の異常行動。Angela Constantin and

Aurelian Pantea

■ 12:45-12:55 EGU2013-13863

地震前変化による地下および半水棲無脊椎動物にみられる応答挙動に関する実験的シミュレーション. Hilary Conlan and Rachel Grant

■ 12:55-13:05 EGU2013-8358

Santorini 地震活動区における潮汐が引き金になった可能性がある最近の地震活動の検証. Michael E. Contadakis, Mimitros N. Arabelos and George Vergos

■ 13:05-13:15 EGU2013-2510

インド-オーストラリア Teodosio Chavez(イスラエル)のプレートテクトニクスと春分点. Chavez-Sumarriva and Nadia Chavez

興味をお持ちの仲間にこの情報を伝えてほしい. みなさまの参加を, 心待ちにしている.

- Valentino Straser: 国際地震火山予知センター (招聘者)
- Gabriele Berberich:Duisburg-Essen 大学 (招聘者)
- Friedemann Freund:Seti 研究所 (副招聘者)
- Rachel Grant:Anglia Ruskin 大学 (副招聘者)
- Viktor Stolc:NASA(副招聘者)

ロシア会議 :
全地球テクトニクスと地球の海洋化
Russian conference:
Global tectonics and Earth oceanization

期日 :2013 年 9 月 9-10 日

会場 :Immanuel Kant バルト共和国大学, ロシア地理学会 (カリーニングラード支部) 世界海洋博物館
会議の公式言語 : ロシア語と英語

地球の海洋化にかかわる全地球テクトニクスと海岸における緊急事態をテーマとする国際会議「全地球テクトニクスと地球海洋化」に関する第 2 回サーキュラーをお届けする.

会議のテーマ

- プレートテクトニクスの未解明問題
 - 全地球火山活動における冥王代と新生代
 - 顕生代に海洋区が発生する領域におけるアセノスフェアの形成
 - 深海盆底における浅海性堆積物—広大な海洋域における新生代沈降の証拠
 - 地球海洋化ステージにおけるアセノスフェアの脱水と減圧
 - 地史における地球水圏の photolytic 消散
 - 全地球的海水準上昇と内因的水供給の危険度評価
- 会場住所

世界海洋博物館. ロシア, カリーニングラード, Embankment of Peter the Great str. 1

組織運営責任者

Vladimir V. ORLENOK 博士 (地質学 - 鉱山学), 教授, ロシア名誉科学者

組織委員会

名誉議長 :G.B. UDINTSEV(ロシア科学アカデミー準会員)
V.V. ORLENOK 教授 (議長), E.V. KRASNOV 教授 (副議長), G.M. FEDOROV(Immanuel Kant バルト共和国大学), R.K KLIGE(モスクワ州立大学), B.A. BLUMAN 博士 (地質学 - 鉱山学 :Immanuel Kant バルト共和国大学), S.G. SIVKOVA(世界海洋博物館)

運営委員会

議長 :B.S. KARRYEV 教授 (Immanuel Kant バルト共和国大学), SOLOVYEV(KUBAN 州立大学), A.V. POKROVSKY 教授 (Immanuel Kant バルト共和国大学), B.I. VASILIEV 教授 (ロシア科学アカデミー極東支部太平洋海洋学研究所), O.I. RYABKOVA 講師 (Immanuel Kant バルト共和国大学), D.S. SOTNIKOV 研究員 (Immanuel Kant バルト共和国大学), E.V. FILIPPOVA 技術員 (Immanuel Kant バルト共和国大学)

講演要旨

あなたの講演要旨には, 発表者全員の氏名, 報告の主題, 教育機関あるいは他の組織の名称 (この情報は, 用紙右上に右詰めで太字表記). 要旨集は A4 用紙 6 ページ, Times New Roman 12pt フォント, シングルスペース, 余白 (上 2cm, 下 - 左 2 ~ 3cm, 右 2cm), 脚注ページ, ロシア基準 (GOST)r 7.0.5(a)-2008 に調整, ページ番号を記入.

会議ウェブサイト

<https://sites.google.com/site/geokantianascience/home>. に掲載予定の " レポート " の項目を参照されたい. 訂正・追加などについては, できるだけ早急に私達に連絡されたい.

事前登録

会議参加のためには, 事前登録が必要である. すべての会議参加者は, 滞在日程と部屋タイプを 2013 年 5 月 15 日までに連絡されたい. この登録は参加を拘束するものではなく, 暫定的申請である. 到着日, 出発空港, 航空便番号, 出発 - 到着時刻もあわせて知らせていただきたい.

ビザ

ほとんどのロシア訪問者は, 入国ビザが必要である. ビザ支援は, 組織委員会が行う. あなたのパスポートには, 旅行終了後 6 ヶ月の有効期間が必要である.

問い合わせは, 次の運営委員へ.

VOrlenok@kantiana.ru; seism_147@mail.ru; EkaFilippova@kantiana.ru

会議組織委員会

Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia, Kaliningrad, Universitetskaya Str. 2, Phone: 8(4012)595575