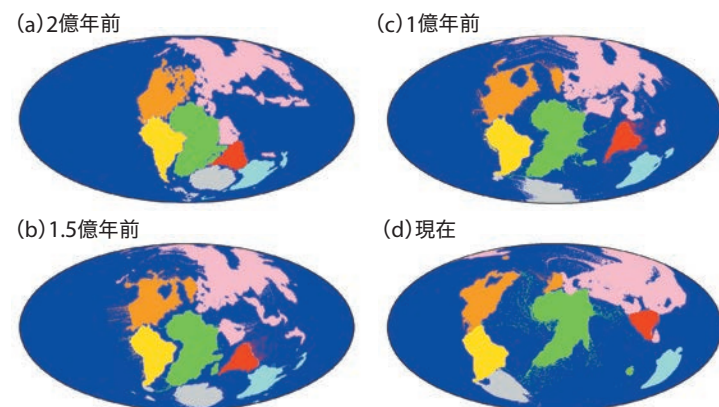


# マントル対流シミュレーションが明らかにした大陸移動の原動力

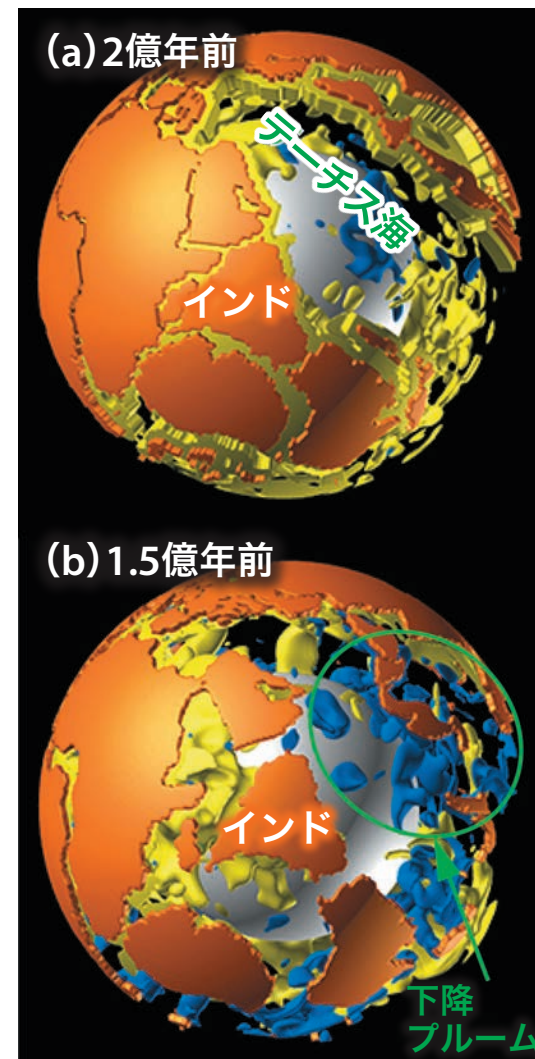
JAMSTECでは、地球深部探査船「ちきゅう」を用いた海洋掘削や、海底地震計などによる地下構造探査（地震波探査）を実施し、地球内部の活動の解明に取り組んでいる。だが、地球表層の動きやマントルの大規模な熱・物質循環（マントル対流）の長期的変動を詳しく理解するためには、地球内部で起きている対流運動をスーパーコンピュータを用いたシミュレーションによって再現し、海洋掘削などによる地球物理観測で得られた成果を補完することが重要といわれている。さらに、マントル対流は地球46億年の歴史を通じて地球表層の運動の駆動力として大きな役割を果たし、また、地球表層の運動の歴史も地球内部の構造やダイナミクスの進化に大きな影響を及ぼしてきたと考えられるため、プレート運動や大陸移動の原動力を正しく理解することは地球内部研究の根幹といえる。

こうしたなか、地球深部ダイナミクス研究分野の吉田晶樹主任研究員は、マントル対流の数値シミュレーションによって大陸移動を再現する研究を進めてきた。大陸移動説は、ドイツの気象学者、アルフレッド・ウェゲナーにより1912年に提唱された。地球に陸地が誕生してから今日まで、合体や分裂を繰り返しながら陸地は移動し続けたとされ、現在の配置になるまでには、超大陸と呼ばれる広大な大陸が形成されたこともあった。超大陸パンゲアもその1つだ。岩石に残された過去の地磁気の情報や、化石や現生の生物種の分布などから、パンゲアは今からおよそ3億年前に形づくられ、その約1

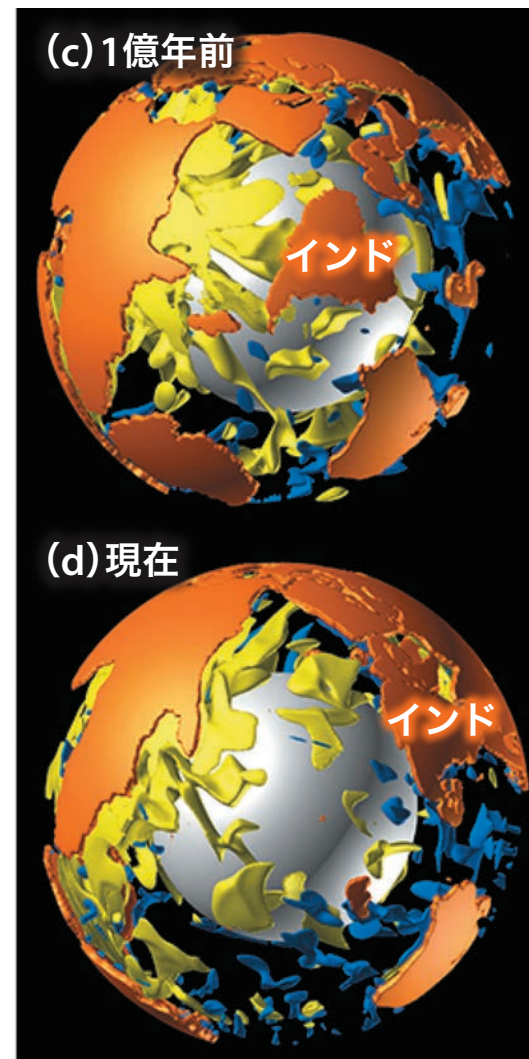
億年後に分裂を開始し、2億年という長い年月をかけて、現在の地球の大陸配置になったことが科学的に明らかになっている。しかし、大陸を移動させる原動力については、ウェゲナーが大陸移動説を発表して100年が経つ今日まで、明かな解答が得られていなかった。吉田主任研究員は、地球内部のマントル対流のシミュレーションモデルを構築し、JAMSTECのスーパーコンピュータを用いて、2億年前から現在まで超大陸パンゲアが分裂する様子の再現を試みた。



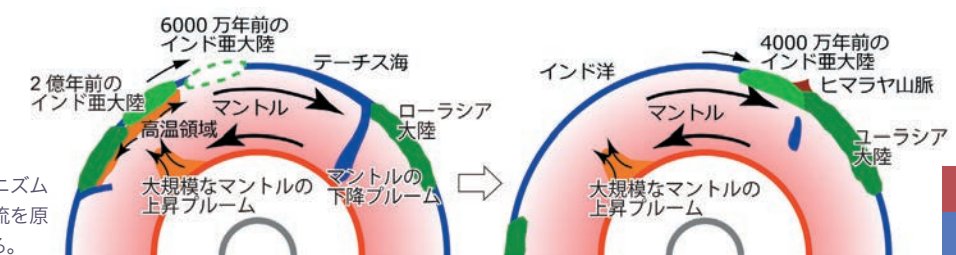
シミュレーションによる地球表層の大陸分布の時間変化。これまでの古地磁気学や地質学的データから復元された大陸移動をよく再現しており、2億年前の超大陸パンゲアが分裂して大西洋が広がる様子、パンゲアの南半分を構成する Gondwana 大陸の一部だったインド亜大陸（赤色）がテチス海を北上し、北半分のローラシア大陸に衝突する様子なども見てとれる。



シミュレーションによる各年代（左図）に対応するマントル内部の温度構造の三次元プロット。青色の等値面は各深さの平均温度よりも250℃温度が低く、黄色の等値面は100℃温度が高いことを示す。表層のオレンジの領域は大陸の位置。



インド亜大陸の高速北進のメカニズムを示した模式図。マントルの対流を原動力として北進したと考えられる。



大陸に裂け目が生じたのだ。さらに、その高温のマントルはパンゲアを水平方向に引き裂くようなマントルの流れをつくった。

一方、パンゲアの南半分を構成する Gondwana 大陸の一部だったインド亜大陸がパンゲアの南海だったテチス海を高速に北上し、北半分のローラシア大陸に衝突する様子も、シミュレーションによって再現された。その原動力になったのは、パンゲアの分裂直後からテチス海北部に発達したマントルの下降ブルームだった。この下降ブルームは、パンゲア直下のマントルの高温領域と Gondwana 大陸の下部にあった大規模な上昇ブルームによって生じたマントルの流れにより、自然に形成された。このマントルの流れに引きずられるようにして、インド亜大陸はテチス海を北上してローラシア大陸に衝突し、現在のヒマラヤ・チベット山塊をつくり出した。吉田主任研究員がこう続ける。「大陸移動の原動力については、1970年代から、海洋プレートが沈み込むことによって生じる『スラブ引っ張り力』が最も重要で、マントル対流が海洋プレートや大陸プレートの底を引きずる『マントル曳力』はスラブ引っ張り力よりもずっと小さいのではないかと考えが主流でした。しかし、今回のマントル対流シミュレーションによって、マントル曳力も大陸移動の主要な原動力となっていることが実証できたと考えています」。

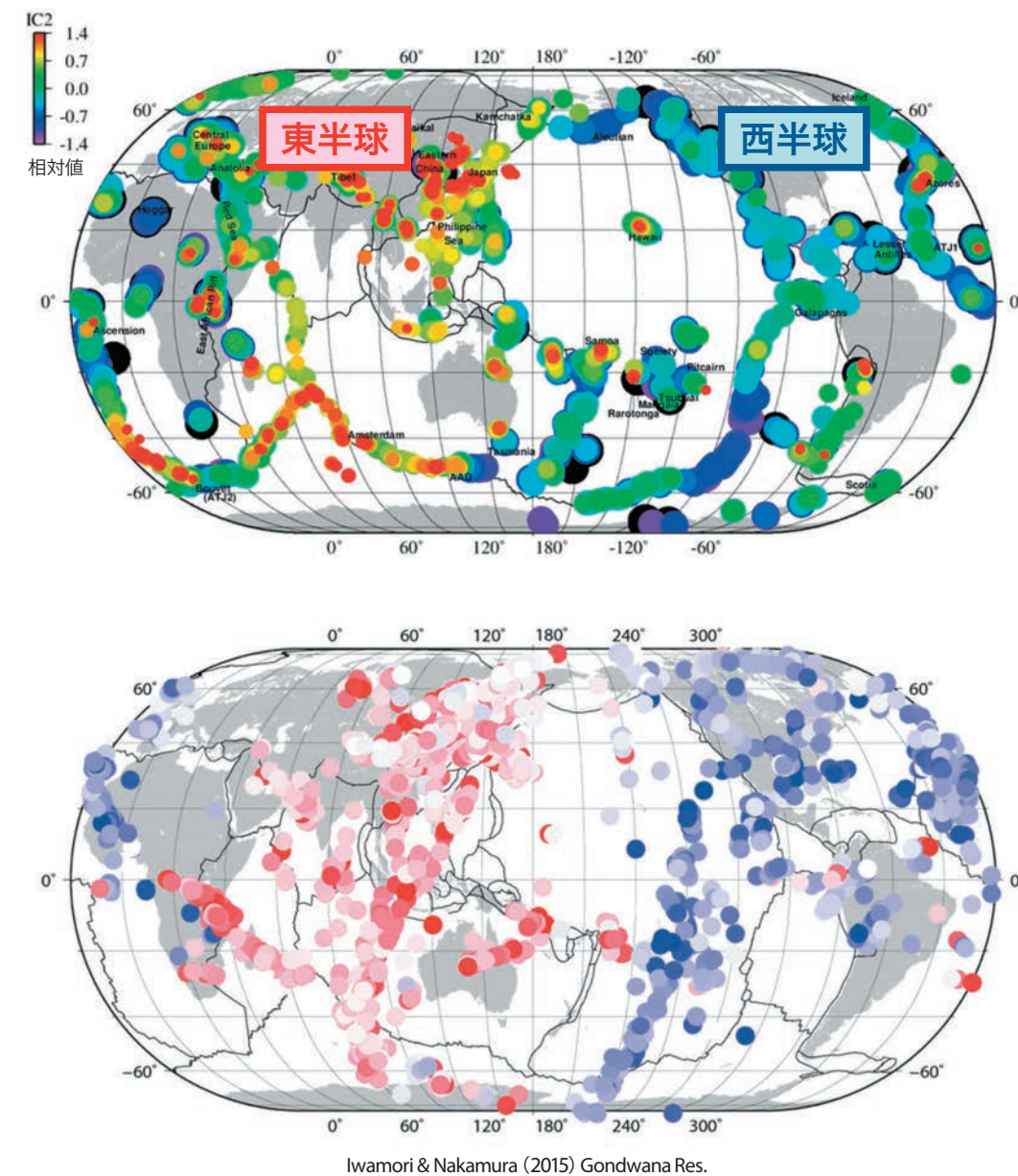
ウェゲナーが大陸移動説を発表してから100年もの間謎とされていた超大陸分裂の直接的な原動力が毛布効果であること、そして大陸移動の主要な原動力がマントル曳力であることが示されただけでも、吉田主任研究員によるシミュレーション研究は大きな成果だが、さらに、このマントル対流シミュレーションを活用すれば、未来の大陸の配置についても予測できるはずだ。現在は分裂した状態にあるが、やがて大陸が集合して、次の超大陸ができるのではないかとされている。そこで、問題になるのが太平洋と大西洋のどちらが閉じて超大陸ができるかということ。太平洋が閉じてできる「アメイジア」か、大西洋が閉じてできる「パンゲア・ウルティマ」かという2つの説が提案されているが、これについて、吉田主任研究員は、「すでにシミュレーションを進めています。現在の地球プレート運動の様子から予測した結果、太平洋が閉じる可能性が高い」と話す。吉田主任研究員のシミュレーション研究は、地球の未来の姿まで予測しようとしている。

# 地球化学的な解析研究で見えてきた マントル組成の東西半球構造

地球内部は、地球表面を覆う地殻、その下から深さ約2,900kmまでのマントル、さらに中心までの核と、大きく3つの部分に分けられる。それぞれ物質の化学組成や構造が違ふと同時に、深くなるほど圧力・温度が高くなり、中心部は360万気圧、5,000度に達すると考えられている。この3つのなかで、マントルは地球全体の70%の質量を占める。また、発熱量でも地球全体の50%以上を占め、冷めにくさの指標となる熱容量も非常に大きい。従って、マントルは、核から地表までの熱循環に大きな影響を及ぼし、地球ダイナミクスを理解

する上で最も重要なサブシステムである。地球深部探査船「ちきゅう」がマントル掘削を推進し、マントル物質の採取を目指す最大の理由もそこにある。

マントルを含む地球内部構造の推定に広く活用されているのが地震波トモグラフィーだ。地震波の伝わり方から地球内部の構造を明らかにする技術で、かたい物質や低温・高圧では地震波が速くなる、地震波速度が急激に変化すると反射波が出るといった地震波の性質を利用して、高い空間解像度で内部構造を描き出すことができる。しかし、マントルを構



マントル中の「水溶液濃集成分」濃度（上 マントル同位体組成）と内核の地震波速度（下 赤は地震波速度が遅く、青は地震波速度が高いことを示す）。マントル同位体組成の東西半球構造がはっきりと現れているだけでなく、よく似たパターンが内核の地震波速度構造にも見てとれる。かつての超大陸への集中沈み込みが、組成だけでなく、マントル・核の温度を同時に低下させている可能性が示唆される。

成する物質の組成や年代を調べるのには限界がある。そこで注目されているのが、マントル由来のマグマの成分やマグマに含まれる地球深部の岩石や鉱物を調べる地球化学的な解析手法（地球化学プローブ）だ。地球化学プローブの研究を進める地球内部物質循環研究分野の岩森光分野長は、「医療技術にたとえると、地震波トモグラフィーはCTスキャン。骨や内臓に相当する地球内部の構造を明らかにできますが、その組成を調べることはできません。一方、地球化学プローブは血液検査。体内の血液を取り出して調べるように、火山から噴出したマグマ、いわば地球の血液に含まれるさまざまな元素、同位体、鉱物などを詳しく分析することで、地球内部についての多くの情報を得ることができます」と説明する。地球化学プローブでは、年代測定も可能だという。たとえば、マントル由来のマグマが冷え固まってできた火山岩に含まれるストロンチウム、ネオジウム、鉛といった半減期の長い放射性同位体を調べることで、数億年単位で起こるマントル対流を推測することができる。

この手法を活用することで、岩森分野長らは地球内部の驚くべき特徴を見つけ出すことに成功した。世界各地の火山岩組成データベースを構築し、岩石に含まれるストロンチウム、ネオジウム、鉛、ルビジウムなどの7元素に関わる5つの同位体比率を詳しく調べた結果、マントルの化学組成が地球の東半球と西半球で2つに分けられることが明らかになった。2ページ上図（マントル中の「水溶液濃集成分」濃度）に示す通り、日付変更線および欧州－アフリカ大陸あたりを境界に、化学組成の分布が東半球と西半球にはっきりと分かれることが見てとれる。

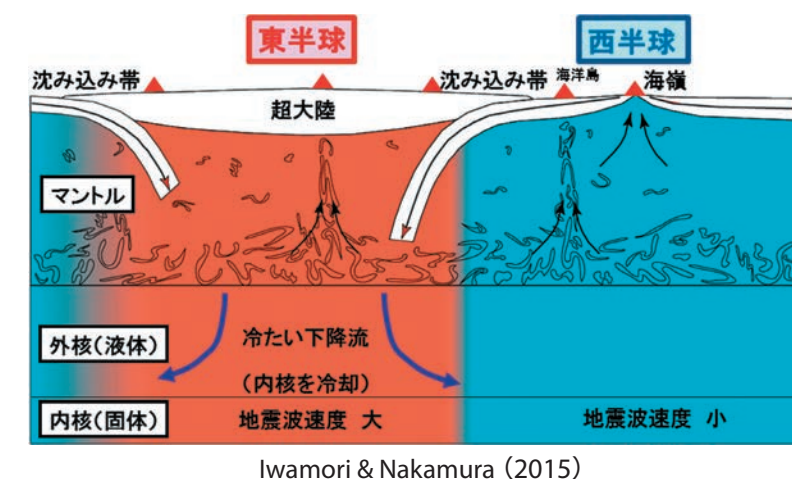
地震波トモグラフィーの結果から、内核の東半球と西半球で地震波の伝わり方が異なることは明らかにされていたが、これに対応するように、マントルで東西半球の化学組成が異

なるという解析結果が得られたのは世界で初めてだ。「岩石に含まれる成分の同位体比そのものでは、東西半球の組成の特徴を区別することはできませんが、独立成分分析という統計解析手法を用いることによって、東西半球でマントルの組成に違いがあることが明らかになりました。また、同位体比からこの構造の生い立ちを過去数億年～10億年前まで遡ることができます。かつて東半球に存在した超大陸と沈み込み帯で起きた出来事の痕跡が、東西半球構造に現れているのではないかと推定しています」と岩森分野長は話す。

地球上には、7～10億年前にはロディニア、3億年前にはパンゲアと呼ばれる超大陸が存在し、その周囲に沈み込み帯が集中していたと考えられている。沈み込み帯ではマントルに水が供給されやすく、超大陸の地下深部には含水率の高いマントル物質があったはずだ。しかも、水にはルビジウムや鉛などの物質（水溶液濃集成分）が溶け込んでいるため、これらの比率が高まった。同時に、マントルの東半球の冷却が進行し、それに伴って核も東西半球構造をもつようになった。一方、沈み込み帯のない海洋底深部のマントルは含水率が低く、ルビジウムや鉛といった元素の比率も比較的少なかったと考えられる。

超大陸は離合集散を繰り返して、現在の大陸配置になったが、かつて超大陸があったところに沈み込み帯で起きたマントルへの水の供給の痕跡が、現在、世界各地で採取された岩石試料の水溶液濃集成分を分析することにより、東西半球構造という形で現れたのだ。

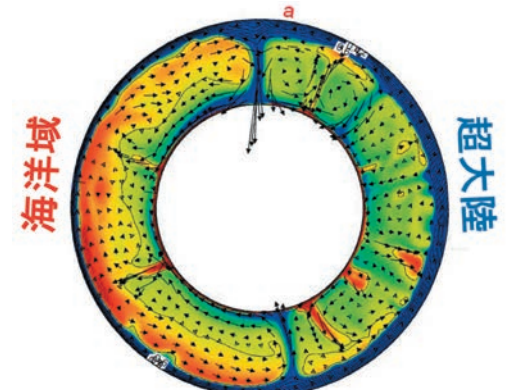
岩森分野長らが発見したマントル組成の東西半球構造は地球化学プローブという手法で明らかにされた地球内部の一面でしかない。今後の研究の進展により、思いもよぬ地球内部の真実が明かされるに違いない。



Iwamori & Nakamura (2015)

東西半球構造の成因を示す超大陸域が存在したときの地球内部構造のイメージ。超大陸域に沈み込み帯が集中し、水とともに水溶液濃集成分がマントルに供給された。さらに超大陸下では冷却が進行し、その影響は核にも及んだと推察される。

超大陸形成時の温度



超大陸形成時の地球内部の温度分布に関する数値シミュレーション結果。超大陸域に集中した沈み込み帯によって超大陸下で冷却が進行し、海洋底下と比較して相対的に温度が低くなっている。

Yoshida (2013) Geophys. Res. Lett.