

## 特集 南海トラフ巨大地震

## プレート境界領域の新しい媒質評価

鳥海光弘\*1・桑谷立\*2

\*1 とりうみ みつひろ 東京大学新領域創成科学研究科特任教授、海洋科学開発機構上級研究員。

\*2 くわたに たつ 東京大学新領域創成科学研究科特任研究員

プレート境界のダイナミクスを記述するには、境界領域の物質とその状態、そして境界に加わる力や出入りする物質を知らなければならない。とくにプレート境界型巨大地震やそれらの同期による連動型超巨大地震のダイナミクスを知るためには、力学的な挙動に直接関与する物質の不均質分布や、応力と歪みやすべり挙動に敏感な開口クラックとせん断クラックなどの密度分布および水量などを決める必要がある。これらを総合的に媒質とよぶ、媒質を評価し、巨大地震のダイナミクスを明らかにするためには、プレート境界の物質であった変成岩から得られる媒質情報の取得と、それを応用して、きわめて豊富に取得されつつある地震情報、電磁気的な情報、重力分布などを総合的に解読する手法が必要である。今回ここで示すのは、時系列を含めた多量の微小地震や小地震密度をどのように媒質評価と破壊挙動、水などの流体挙動と結合させるかについての試論である。

\* \*

プレート境界は最も活動的な領域であり、そこで起こる現象は人間にとって重大な脅威であるとともに大きな恵みをもたらす。プレート境界は物質的には地球上のどこにでもある、ありふれた岩石から構成されている。それにもかかわらず、プレート境界がきわめて活動的であるのは、そこにさまざまな力や作用が存在しているためであり、さらにそのような力・作用の複合的な働きによって、プレート境界の物質が変化していることがその理由である。したがって、プレート境界のダイナミクスを理解するには、物質変化と力学過程の両方を扱う必要がある。

従来の観測科学的な研究では、地球全体に張り巡らした観測点網を使って、多数の自然地震波から地球内部の地震波速度の分布を描き出すトモグラフィ法がおもな方法であった。この方法は1990年ごろから行われ始め、地殻やマンツルの実体を明らかにしていった。そのなかでも、日本列島の地下の楔<sup>くさび</sup>マンツルにみられる不均質さや、沈み込むプレートの不均質な地震波速度の分布は驚くべき発見であり、それが岩石に含まれる水の分布やマグマの分布を示しているに違いないという推定ともあわせて、地球科学の各方面に与えた影響は大変に大きかった。

一方、人工的に強力な振動を地下に与え、地下の音速が急変する層からの反射波を捉える反射法地震波探査研究も驚くべき結果をもたらした。プレート境界や日本列島などの地下深部に強い反射層が見出されたのである。その反射は、深いところで地震波速度が急減することによって引き起こされたものであった。深いところで速度が速くなるのはわかりやすいことであるが、その逆は、水が岩石に散在していると考えられるほかないものであった。

このような観測科学からの新事実は、地震発生過程の理解を大いに勇気づけたと言ってよい。すでに境界型巨大地震は、力学的に結合の強いアスペリティと呼ばれる領域が不安定すべりを起こし、大きなエネルギーを放出することであると推定されていた。つまり、プレート境界では物質は同じであっても何かしら状態が異なるためにアスペリティとそうでない領域に分かれるということになる。ところがトモグラフィからみると、地震波速度の

遅い領域や、地震波の反射が強い部分は、アスペリティではない領域である。そしてアスペリティ領域では地震波速度の急変がみられないのである。つまり、水が岩石の中に散在している領域とそうでない領域があり、かつ、前者は境界型巨大地震が発生しない部分ということになる。逆に言えば、通常の巨大地震は水が散在していない領域で発生するということになる。では、水が散在している領域では何が起きているのか。最近わかったことは、そのような領域では非常にゆっくりとしたすべりが起こっていた。そのすべりは1カ月から数年に及ぶ不安定なすべりであるらしい。通常の大きな地震は、1秒前後でプレート境界の大きな領域が一気にすべる運動であり、エネルギーの放出速度が大変大きい。しかし、1年もかけてゆっくりすべるとエネルギーの放出速度が大変小さいのである。

ここで、大きな問題が浮かび上がる。岩石のなかで水はどのように散らばっているのか。そしてその散らばり方はゆっくりした地震と高速な地震の起こり方をどのように支配しているのか。岩石に水が散在しても鉱物組成は変化しないのか。物質とその状態についての情報は、プレート境界の活動をj知るために重要である。そこで、プレート境界から地表に姿を現した岩石、すなわち変成岩からプレート境界の媒質についての情報を探ってみることからはじめよう。

## プレート境界の岩石と水のレンズ

沈み込みプレート境界の特徴は、一方に島弧や陸弧などの火山弧および背弧があって、他方に海洋プレートが沈み込んでいるという非対称構造にあり、ダイナミクスもそれに伴い非対称である。そして、海洋プレートが沈み込むために、海洋地殻やマンツルの一部が温度と圧力を変化させること、さらにそれらの物質に引きずられて、海溝堆積物や付加体岩石、そして島弧や大陸の一部もマンツル深部に引きずり込まれることが特徴である。こうしたプレート運動の結果、境界部の岩石は

大きなせん断ひずみを受け、高い温度と圧力を経験することになる。そのような環境変化に対応して、海洋地殻や島弧地殻の岩石は変成岩に変化する。その基本的な変化は鉱物の化学反応であり、変形である。変形には長周期の粘性的変形と、さまざまなクラックによる破壊的変形や摩擦すべりなどの短時間変形がある。一方、化学反応は温度変化と圧力変化に励起されるので、非常にゆっくりとしたものであり、化学平衡状態に近い状態で反応が進行すると考えられている。

実際の変成岩から、一般的な海洋地殻や堆積岩を大本として、さまざまな温度と圧力の範囲に対応した安定な鉱物の組み合わせやそれらの化学組成をモデル化することが可能となっている。その関係から、沈み込むプレート上面の温度構造が既知であれば、プレート沈み込みにともなう境界領域の鉱物変化をモデル化できる。たとえば、日本列島に沈み込んでいるフィリピン海プレートの上面では、深さ20 km程度までは玄武岩の吸水反応により沸石や緑泥石などが生成され、10重量%以上もの水が結晶中に取り込まれることになる。ところが、深さ30 kmほどになると、大量の結晶水を含む鉱物は不安定となり、代わって、角閃石や緑帘石、アルバイト、石英などが生成される。この反応は脱水反応であり、8重量%ほどの水を放出する。さらに深さ40 kmほどになると、温度が400°Cほどにもなるので、泥質岩では10重量%を超える結晶水をもつ緑泥石が脱水分解反応をおこして、ザクロ石を作り始める。この反応は岩石から2~3重量%ほどの水を放出する。

以上のように、プレート境界部の岩石は、海洋底部もしくは沈み込み境界の浅い位置で、吸水反応によって10重量%の水を吸収し、その後吸収した結晶水を放出していく。こうした水は島弧の下部地殻や上部マンツル部分にしみ込み、楔マンツルのかんらん岩に吸水されて蛇紋岩をつくる。一方、火山フロントの下部のマンツルでは高温のためにかんらん岩は吸水してマグマを作り出す。つまりプレート境界における重大なダイナミクスのひとつは、プレート運動によって引き起こさ

れた水の複合的な循環であり、それがプレート本体の鉱物組成を変化させ、島弧地殻とマンツルの鉱物組成を変化させる。そしてその変化は海溝からの距離と深さによって規則的に変化することがわかっている。

こうした基本的なプレート境界ダイナミクスである脱水、吸水、流体移動、そして岩石のなかの水の様態の実際は、どのようであろうか。この問題は観測地球科学の情報をどうモデル化するかにかかわっている。そしてそれは理論的にも、現実の変成岩からも、答が要求される。

変成岩には脱水反応や吸水反応が鉱物の化学組成として記録されている。最近では、圧力変化にともなう温度がどのように変化したのか、また脱水量や吸水量がどのように変化したのかを解説することが可能となり、時間的に間欠的な脱水過程が示された<sup>(1)</sup>。それは一定の流体移動ではなく不均質な水の移動、つまり透水係数が変動していることを示していたのである。変成岩にみられる流体移動の物理化石は、シールドクラックと、鉱物粒子間の境界である。鉱物粒子間の境界を電子顕微鏡などでみると、流体移動があれば微細なレンズ状の流体の痕跡としてみられる。一方のシールドクラックは、クラックを埋めてあらたに鉱物が成長していること自体が流体移動を示しており、その成長の方向からクラック壁の相対的な移動方向がわかるという、優れたプレート境界部の物理化石である。

一般的に、岩石などの固体に大きな応力が働くと、大きく分けて開口クラックとせん断クラックが生じる(図1)。開口クラックは引っ張り応力の方向に割れ目が開いてできるクラックであり、せん断クラックは引っ張り応力軸や圧縮応力軸に高角に割れ目ができ、その面に平行にずれが発生するクラックである。せん断クラックでも、われ面に凹凸があるとそこに隙間ができる。開口クラックやせん断クラックの一部の隙間には水が流入することで、地球の内部でもつぶれないでいられる。そして、流入した水溶液から石英や長石、方解石などの鉱物が沈殿することでそのような隙間がシ

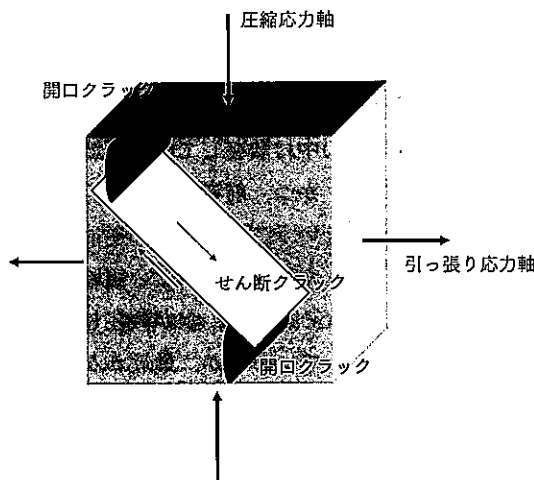


図1—固体地球内部の開口クラックとせん断クラック。これらのクラックの隙間に鉱物が沈殿することにより、シールドクラックが形成される。

ールされる。これがシールドクラックの起源である。200~400°C、5000~1万気圧程度の条件での石英やアルバイトの溶解度から推定すると、現在みられるシールドクラックの1万倍ほどの体積の水が流れたと推定される。つまり、水の移動はほとんどこのようなクラックを通じて行われたのだ。

シールドクラックはプレート境界部ではどのような空間分布をしているだろうか。三波川変成帯での測定例がある。その結果をみると、クラックは非常に集中した分布をしている。さらにクラックの幅、もしくは長さの頻度分布は正規分布ではなく、小さいサイズと大きいサイズが急減したべき分布に近いものであった。このようなべき分布は地震頻度のグーテンベルク・リヒター則として知られるべき分布と酷似する。ここで測定されたシールドクラックは開口クラックであり、地震の原因であるせん断クラックとはタイプが違うが、両者はほとんどの場合、随伴するものと考えられる。

プレート境界変成岩にみられるシールドクラックのもうひとつの興味深い事実は、開口シールドクラックの方位である。開口クラックはその面に垂直な最小主応力軸(引っ張り軸)があることをあらわす。そのような開口シールドクラックには2つないし3つの方向がある。最も多量に存在す

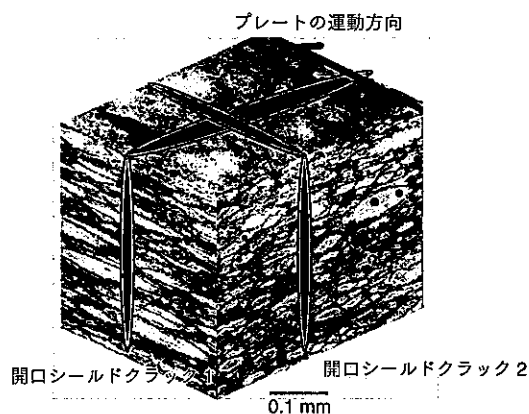


図2—プレート境界変成岩にみられる2方向のシールドクラックとプレートの運動方向。岩石中にみられる白い楕円は球状の放散虫化石が塑性変形したもの。

るのは、塑性変形の最大伸張方向に垂直な面の開口シールドクラック(図2)である。同様なクラックは四万十付加体にも多くみられ、その面は付加体を受けたせん断塑性変形は伸び方向、つまりプレート運動方向に垂直である。この方向とは直角に近く交差する方向の開口シールドクラックも多数あるのは注目される。それは伸張軸方向に平行な面をもつシールドクラックであり、最小主応力軸が前述のものに対して直角に近い方向を示す。狭い範囲でみられる2方向の最小主応力軸を最も説明しやすいのは、それらに垂直な方向に最大主応力軸(圧縮応力軸)が共通にあり、中間主応力軸と最小主応力軸(引っ張り応力軸)とがスイッチするような応力システムである。この場合の最大

応力軸は変成岩の塑性歪みの縮み方向に近いのである<sup>(2)</sup>。

開口シールドクラックに対して高角なせん断シールドクラックも多数みられる。それがせん断クラックであることは、その隙間を占める石英や長石あるいは方解石の伸びた方向がクラック面に平行であることからわかる。これらのせん断クラックの一部が開口するとき、石英や長石、あるいは方解石に飽和した水溶液がクラック内部に浸透し、クラック面を支える。そして、その水溶液からそれらの鉱物が沈殿し成長する。このとき成長方向がせん断運動の方向を示すのである。すなわち、隙間を発生させるせん断シールドクラックと開口シールドクラックは、岩石中の水の存在形態を示すとともに、岩石中の水量をもあらわすのである。つまり、シールドクラックはプレート境界の煤質状態を指示しているのである(図3)。

地震活動から煤質の状態を探る

プレート境界において岩石はどのように鉱物変化するのか。煤質の性質やその状態を探るために、脱水、吸水変化と水の存在状態、そして水の移動形式などを、プレート境界域の直接的な観測量、とくに時間変動する観測量から推定してみよう。微小地震から巨大地震まで岩石から放出されるエ

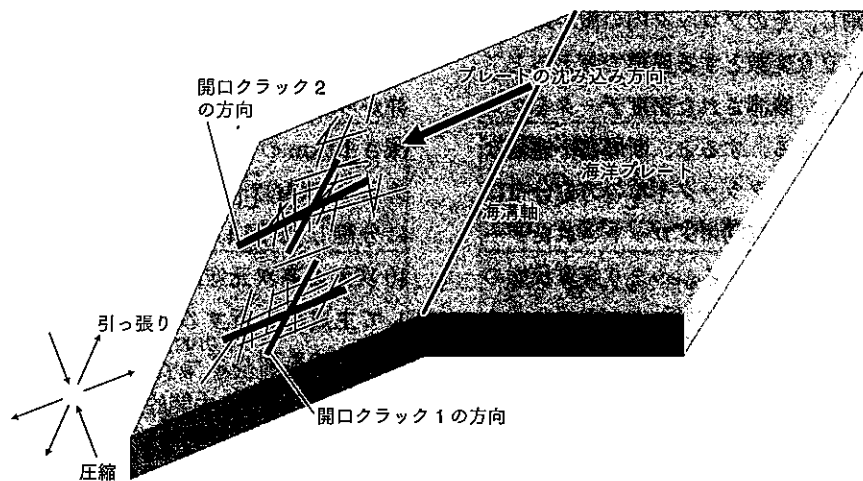


図3—プレート境界領域に推定されるシールドクラックの方位と海洋プレートの沈み込み方向。斜めに沈み込む海洋プレートの上には島弧地殻とマンツルがある。

プレート境界のダイナミクス

プレート境界のダイナミクス

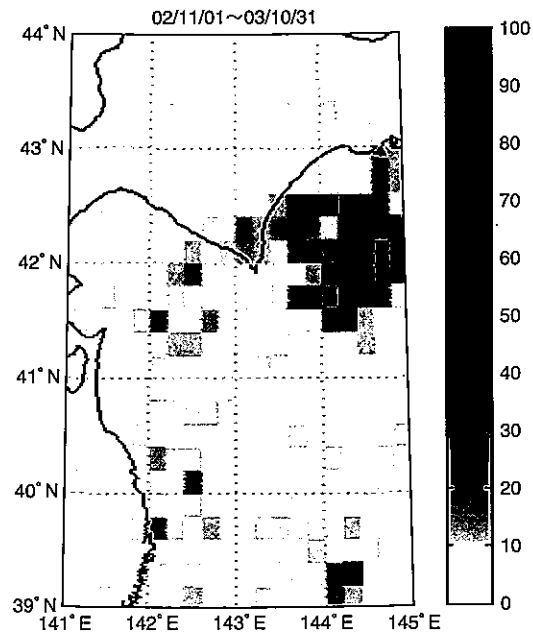


図4—十勝沖から岩手沖にかけての太平洋プレート上部10 km領域のM2~3の小地震密度を濃淡で表現したもの。2002年から2003年の1年間の地震密度である。

エネルギーは1億倍もの変動幅があるが、それは1 m程度から100 km以上のせん断クラックが原因である。せん断クラックはクラック内部に水溶液をためているし、せん断クラックに随伴して水溶液を貯めた開口クラックも多数形成されているに違いない。すると、微小地震の時間と体積あたりの発生数、それを微小地震密度とすると、それは煤質領域の岩石の歪み状態を示すとともに、水の存在状態または水の量を反映しているだろう。そして煤質を分割し、そのブロック内の微小地震密度を見かけ上独立な変数とする座標で考えると、その高次元空間に、観測された密度データをプロットすることができる。すると、断層に不連続な応力分布があったり、クラックやその方位分布に偏りがあれば、高次元空間にプロットされたデータ点は超平面上の雲をつくる。つまり煤質状態の不均質分布や構成関係は、データ点の雲をつくる超平面の構造を解析することで明らかにできるだろう。

この操作は、一般の高次元の基底ベクトルの間の線形関係を推定するために、データを低次元パラメタあるいは低次元の位相に縮約することに対

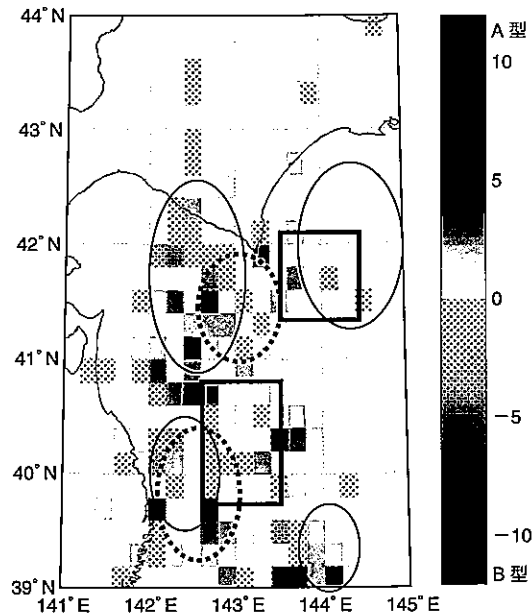


図5—調査範囲を横20分割、縦25分割した領域のM2~3の小地震密度を1年で時間分割し(1998年から2006年)、それを10次元空間上で500サンプルを主成分分析して得た時系列パターン(A型とB型)の空間分布を示す。丸の領域は2002~2003年の地震密度の大きい領域、四角はアスペリティ領域、そして点線の丸領域は高ポアソン比の領域<sup>(4)</sup>を示す。

応する。これには高次元多量データの主成分分析法が用いられる。ここでは、1998~2007年までの年あたりの微小地震密度時系列(筆者はスパイク密度時系列と呼ぶ)を年ごとに区別して高次元ベクトルデータとし、多数領域についてデータをもちて次元圧縮し、時間発展の様相を区分してみよう<sup>(3)</sup>。

地震データは気象庁の統一地震データ(JMA1)の1998~2007年のデータを用いた。北海道十勝沖から岩手沖にかけての太平洋プレート上面から深さ10 kmの領域を500分割し、小地震(マグニチュード(M)2~3)の地震密度時系列を1年ごとに分割した(図4)。分割された時系列データを10次元の高次元空間上で500個の領域データにして主成分分析する。その結果、ほぼ500点の領域の時系列パターンは3つの主要なもので表現され、そのうち中間的な寄与の大きなパターンを第2主成分として、その強さによってA型からB型へ擬似表現すると、図5のようになる。図では小地震密度の大きな範囲を丸で表し、巨大

地震のアスペリティを四角で示した。A型はほぼ2~3年周期で地震密度を変化させるパターンであり、B型はA型と逆位相の変動パターンである。

一見してわかるように、地震密度の大きいところがそのままA型やB型に類別される時系列パターンではないこと、そして巨大地震のアスペリティの領域とも重なっていないことがいえる。また、縦波と横波の地震波速度比(ポアソン比)が高い領域<sup>(4)</sup>とA型やB型が近接している。多くの場合にA型とB型の領域が対となっていることもいえよう。つまり、2~3年で変動する地震密度の異なる位相の領域が東西に配置している様子がみられ、それが地震波速度比の高い領域と重なっているということである<sup>(4)</sup>。

以上のことから、次のような推測が成り立ちうる。小地震スパイクは数百m程度のせん断クラックのずれ運動でおこると考えられるので、そのクラックの成長に伴い、水を吸い込みながら随伴する開口クラックが多数形成され、その結果、地震波速度比が高くなるような煤質状態になる。そしてその領域が東西あるいは南北に2~3年で水の移動とともに移動し、再びもとの領域に戻る。

このような開口クラック密度の振動に同期した水量の振動が、A型とB型の東西あるいは南北に対となった配置の意味ではないだろうか。想像をたくましくして言えば、その移動速度は2年で10 km程度となり、10 m/日程度である。これは速いというべき速度であり、その領域の透水係数がかなり大きいことを示唆するだろう。

\* \*

このほかに、筆者らは神経統計力学の岡田真人 東京大学教授や画像処理科学の高橋成雄准教授とともに、機械学習や脳機能探査、そして画像処理科学で近年著しい成果を収めているベイズ統計を用いた地球科学情報の確率過程解析を試み始めた。これは隠された物理過程そのものを多量の情報から定量的に導く手段としてきわめて有望であることを述べておこう。

文献

- (1) M. Toriumi & M. Inui: Bull. ERI, Univ. Tokyo., 76, 367(2001)
- (2) 鳥海光弘・山口はるか: 地学雑誌, 109, 600(2000)
- (3) M. Toriumi: Jour. Disaster Res., 4(2), 209(2009)
- (4) D. Zhao et al.: Bull. Seismol. Soc. Am., 97, 1121 (2007)

■ 編集部へ届いた本から

トーマス・ハイガー著  
**大気を変える錬金術**  
 ハーバー、ポッシュと化学の世紀

渡会圭子訳  
 白川英樹解説  
 みすず書房 2010年  
 四六判 344頁 3570円(税込)

ポッシュの着眼こそイノベーションの名に値するのではないか。彼は窒素肥料に続いてナチス下でガスリン合成を率いる。卓越した先見性と悲劇との交差、不況下の政治と科学の状況は、考えさせられる。硝石をめぐる戦いから世界史を駆けぬける物語。

久馬一剛著  
**土の科学**  
 いのちを育むパワーの秘密

PHPサイエンス・ワールド新書 024  
 PHP研究所 2010年  
 新書判 208頁 840円(税込)

イオンと養分の動態から土の力を丁寧に解説。水田の生産性が高いわけ、マングローブを切り開くと失敗するわけなど、科学に基づくことの大切さがわかる。中国の砂漠化とリン資源の行方が気にかかる。本誌08年2月号、07年6月号も参照。