

JAMSTEC Report

沈み込み帯震源地地震の発生メカニズムに迫る

5千万年前の海溝型大地震の痕跡を高知県南部の四万十帯で発見

取材協力

坂口 有人 研究員

固体地球統合フロンティア研究システム
プレート挙動解析研究領域



海洋科学技術センター・固体地球統合フロンティア研究システムと東京大学大学院理学研究科は、プレートの沈み込み帯で発生した地震を記録し、そのメカニズムを知るうえで貴重な手がかりとなる「地震の化石」シュードタキライトを世界で初めて発見した。これまで国内で報告されたシュードタキライトはすべて内陸型の震源断層によるもので、沈み込み帯で生じた例はなかった。今回シュードタキライトが発見されたのは高知県南部。四万十帯の興津メランジュと呼ばれる特徴的な地質体が露出しているところ（露頭）である。かつては沈み込み帯にあった地震断層が、長年の堆積物の付加作用によって隆起したものと考えられる。いわば今はもう動かない古い地震発生装置であるが、これを研究することで海溝型地震発生メカニズムの解明が大きく進展すると期待されている。

沈み込み帯での地震発生は断層の岩石と深く関わる

海洋プレートが陸地の下に沈み込んでいく「沈み込み帯」では、プレートが沈み込む際に応力がかかって地殻にひずみがたまり、約100年に一度くらいの周期で断層が高速ですれ、断層面の岩石同士に摩擦が起きる。これが海溝型大地震の起こる仕組みである。

これはブロックスライダー・モデルという簡単な装置を使った実験で確かめることができる。ブロックを載せバネを接続した「そり」を糸巻きにつなぎ、レーンの上を引っ張る。するとそりは、レーンの上でしばらく止まっては動き、また止まっては動く不連続な滑り方「固着滑り」をする。これが地

震が起こるときの断層岩の滑り方である。

ブロックスライダー・モデルでは、糸巻きがそりを引く力が「プレートからの応力」、バネが「岩石の弾性」、重りのブロックは「沈み込むプレートに乗っている陸地の重さ」を表現する。ブロックを載せたそりが静止している間は地殻がひずみを溜めている状態であり、滑っている状態が地震である。

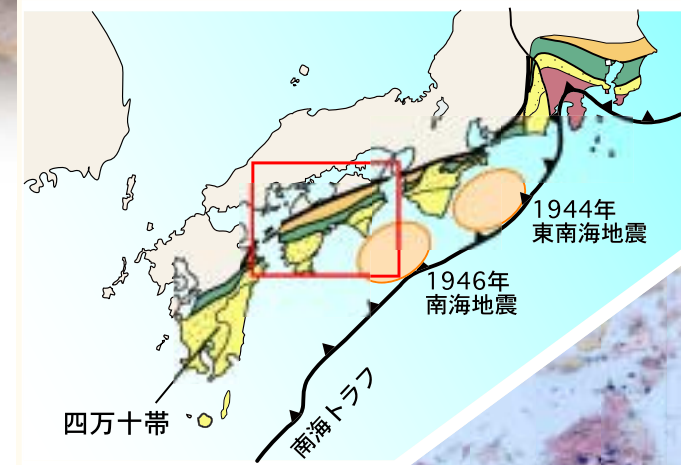
そりの裏面の素材を変えると、同じ糸巻き（応力）、同じバネ（剛性率）、同じ重り（陸地の重さ）でも、滑り方のパターンが変わることが確かめられる。摩擦現象には表面の状態が非常に重要なのだ。つまり断層を構成する岩石が何でできているか、どういう挙動を示

すが、地震発生の鍵を握る。地震について研究するには断層の岩石（断層岩）について知る必要があるのだ。

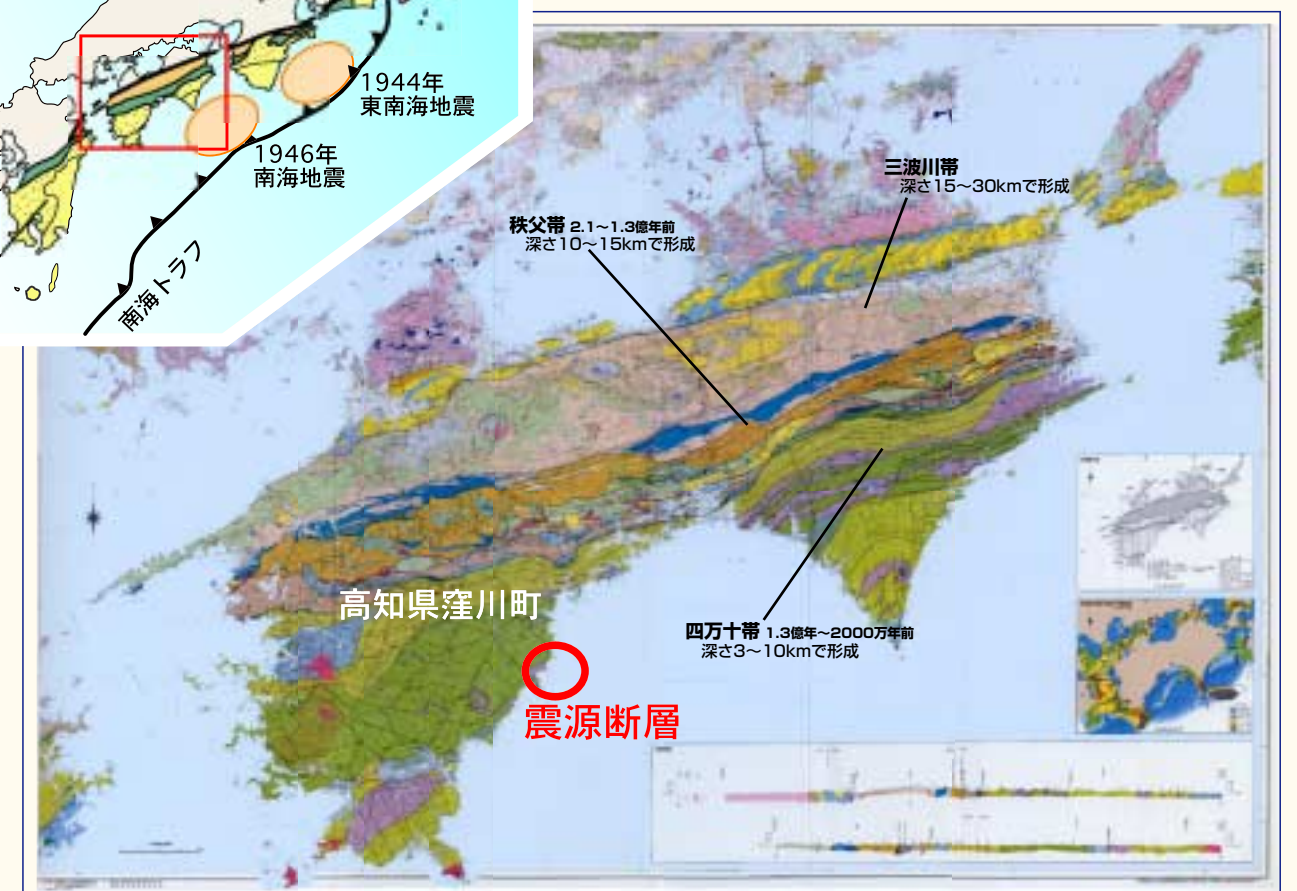
なぜ沈み込み帯の断層が重要なのか

断層岩については内陸型の震源断層研究が積み重ねられてきた。沈み込み帯でかかった応力は内陸部に伝播され、その結果内陸で地表に近い断層がずれる。これが内陸型の震源断層である。

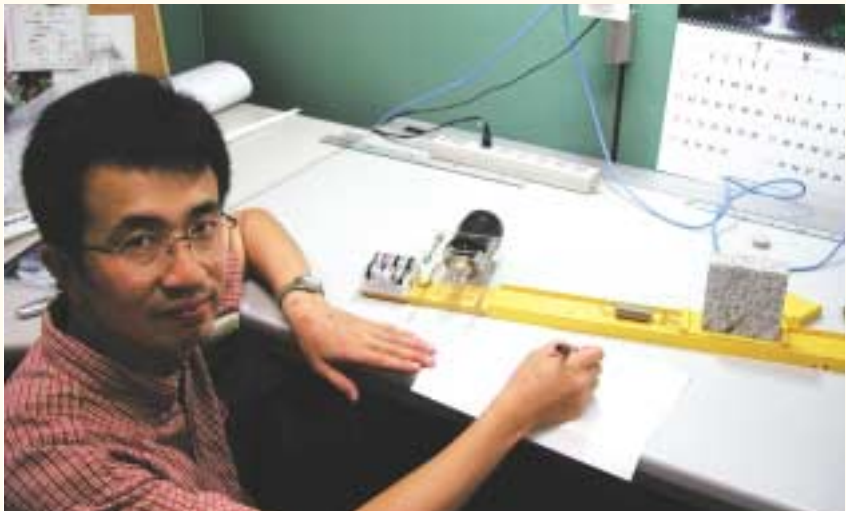
しかし実は、貯えられたエネルギーのほとんどは沈み込み帯で解放される。ここ100年くらいの地震計による地震波観測の蓄積によると、地球表層の地震エネルギーの85%は沈み込み帯で発散されている。これに沈み込み帯以外



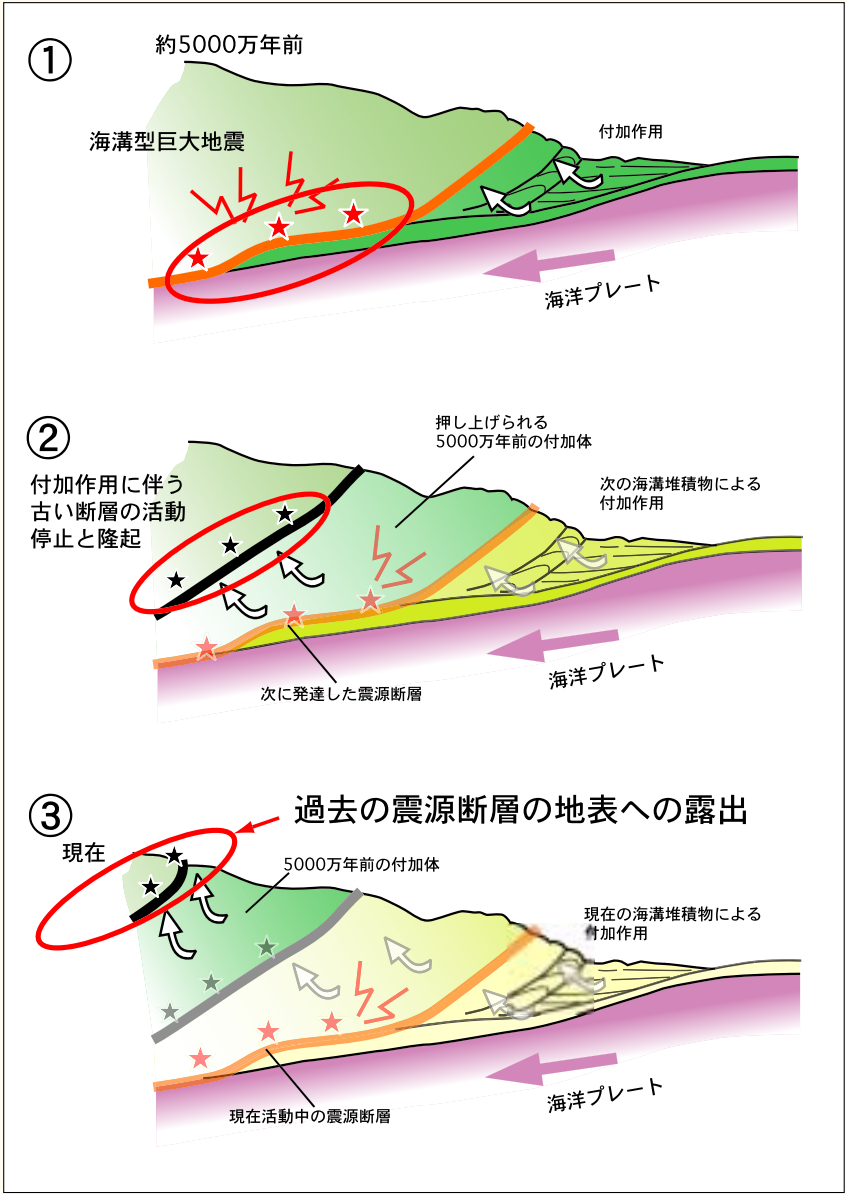
白亜系四万十帯 興津メランジュで過去の震源断層が発見された



沈み込み帯の震源断層が発見された四国の地質は、地表に近いほうから「領家帯（高温変成帯）」、「三波川帯（高压変成帯）」、「秩父帯（ジュラ紀の付加体）」、「四万十帯（白亜紀から第三紀の付加体）」の順で並んでいる。高知市あたりよりも室戸岬の方が地層が若く、さらに四国沖には南海トラフには現在の震源断層が存在する。（出典：四国地方土质地質図）



実験の仕掛けに使うのは木製のレーンとレーンの上を滑らせるそり、そりに載せるブロック、パネ、テグスを巻いた糸巻き。その裏の一方にはテーブルクロス用のビニール、もう片方はガムテープを貼り、レーンに接する面の摩擦の状態を変えている。



過去の震源断層の隆起・概念図
古い地質体は新たな付加作用で押し上げられて上昇し、地表面は風雨で削られ、古い震源断層が地表に露出することになる。

のプレート境界（衝突帯）で発散されるものを合わせると90%を超え、内陸型の震源断層で発散されるのはわずか10%弱である。

プレートが深く沈み込んでいく途中では、高圧による高圧変成帯ができる。またプレートの沈み込みにともなって海底に溜まった堆積物が陸側に押し付けられ、付加体が形成され陸を隆起させる。深さ110kmでは、沈んだプレートから滲出する水分によってマグマが生まれ、上昇してきて花崗岩となる。このようにして日本列島のような島弧が形成されるのだ。

内陸、沈み込み帯に関わらず、巨大地震が発生するのは5kmから数10mの深さなので、今まさに震源となっている部分を直接調査することはできない。そこで過去の地質体を見て現在の地下深部と比較する研究が行われてきた。

だが、これまで沈み込み帯の断層露頭は未発見で、非常に重要であるにもかかわらず研究されてこなかった。内陸型の地震断層は、花崗岩があるような比較的地表面に近くて固い部分にある。しかし沈み込み帯のすぐ上は付加体で、堆積物の泥や砂に水が含まれた状態のはずだ。内陸型の地震断層とは岩石のタイプがまったく違うため、内陸型の地震発生メカニズムを沈み込み帯の地震に適用することはできない。そこで今回、沈み込み帯の断層岩が発見されたことの意義は非常に大きいのである。

四万十帯が注目されたわけ

これまでどこかに沈み込み帯の震源断層が露出しているはずだと考えられていたが、秩父帯や四万十帯に震源断層はないとされていた。100年間ひずみをためて地震を起こすには、それだけの強度が必要である。深度の浅いところで付加した秩父帯や四万十帯のようなやわらかい地層では地震エネルギーを蓄積できないだろうし、深部で



断層露頭は高知県高岡郡窪川町の海岸に露出している。

高圧変成された三波川帯に震源断層があるのではないかとされていたのだ。

しかし近年海洋調査が進み、南海トラフで1944年の南海地震、1946年の南海地震を起こした震源断層の温度領域が150℃から300℃であったこ

とがわかってきた。三波川帯は300℃を超え、岩石がゆっくりと変形するようになり固着滑りが起きない。また、海溝にたまったばかりの泥や砂は崩れやすく、浅すぎても地震は起こらない。「固着滑り」を起こすには、適度な深さ

で温度が上がりすぎず、適度に岩石化して強度があることが必要なのだ。

一方90年代くらいから、四万十帯でも岩石形成時の温度や圧力を定量的に求める研究がなされ、四万十帯の年代、構造、温度、圧力は、付加体のなかでもっとも詳細に調べられている。それによって四万十帯の温度は、最低でも150℃は超えていることがわかってきた。今回の「地震の化石」も、付加体はどうやってできたのかを解明するため四万十帯の温度を詳細に調べている過程で発見された。これまでの内陸の地震断層に関する研究の蓄積と、付加体に関する地道な研究の積み重ねが今回の発見につながったのだ。

四万十帯の震源断層の特徴

地震の化石が発見された興津メランジュは、四万十帯の中でも周囲に比べて飛びぬけて高い温度で作られたものである。メランジュはフランス語が語源で「かき混ぜられた」という意味だ。



断層帯のなかでも特に強い変形を受けている部分。中心部を斜めに横切る層には、岩片や鉱物脈とともにシュードタキライトが含まれている。比較のため置かれたハンマーは横幅が約20cm。

興津メランジュは幅1 kmくらいのゾーンで、泥の層の中にいろいろな岩体が混じっている。メランジュにはさまざまな成因が考えられ、すべてが震源断層ということではない。しかし興津メランジュは飛びぬけて温度が高かった。なかでもメランジュ最北の断層付近が最も高温で、そこからシュードタキライトが発見されたのである。

シュードタキライトは摩擦熱で岩石が融けてガラス質になったもので、つまり地震が起きた証拠となるものである。

断層岩断面の白い岩石は鉱物脈で、かつて大量の熱水が通った跡だ。岩石も水に溶け、食塩水から食塩が沈殿するように熱水の中から鉱物が沈殿する。地下深部では高温高圧力のため水が移動しにくい、断層は熱水の通り道となり得る。興津メランジュの温度が高かったのは熱水の通過によって温度が上昇したからだと考えられるのだ。

特徴的なのは、鉱物脈とシュードタキライトがセットになっていることだ。

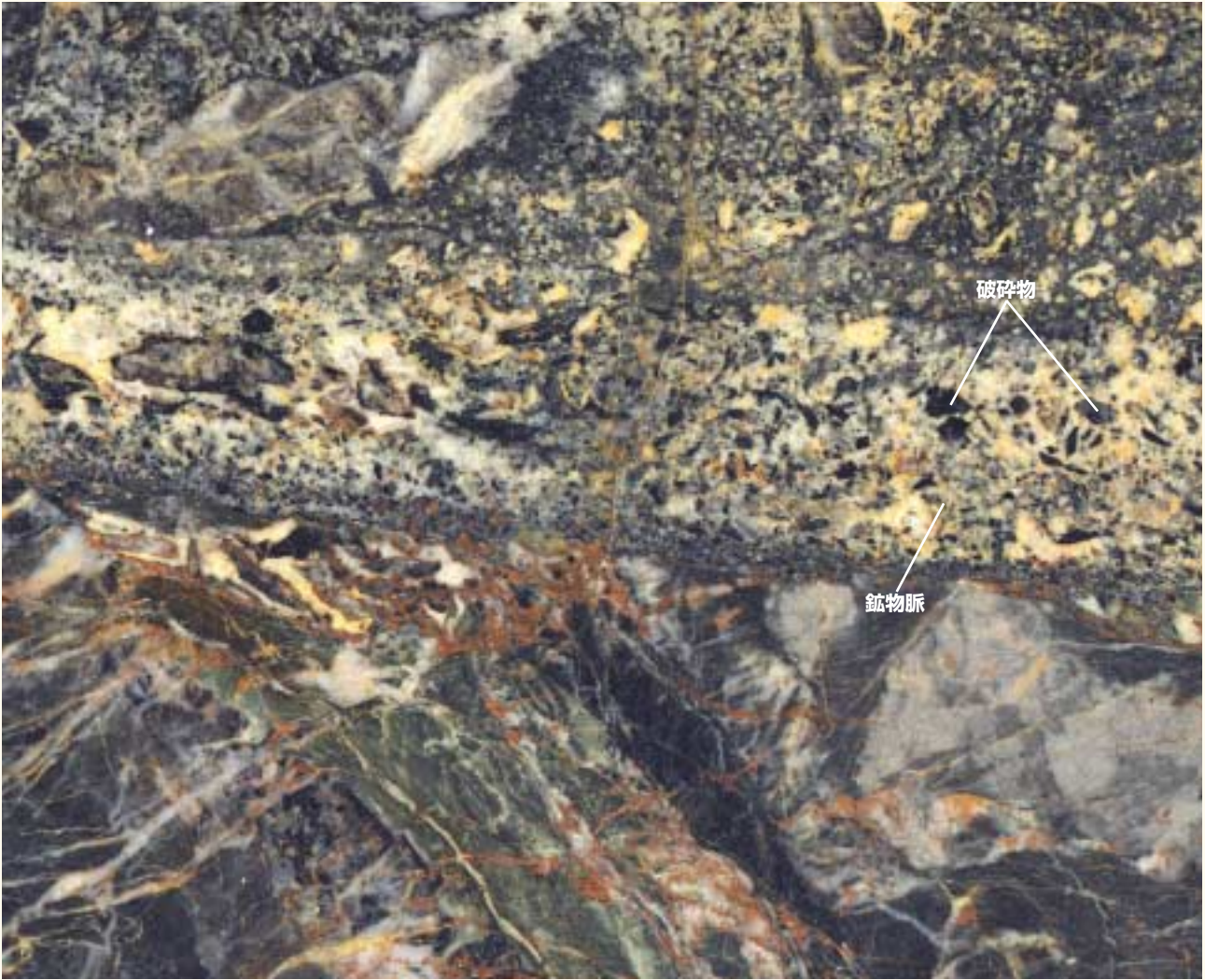
鉱物脈をさらによく見ると、断層運動に伴って岩石が粉碎され、しかも粉碎された破片が白い鉱物脈に沈まずに浮いているのがわかる。時間がたつと破片は沈むため、粉碎された直後に鉱物脈の沈殿によって瞬間的に固定されたのではないかと考えられる。粉碎されて弱くなったままであれば次の地震に備えてエネルギーを蓄えることができないが、熱水が割れ目に入り込んで沈殿すると断層をセメント化して強度を回復し、地震を繰り返すのではないか。そう考えると非常に都合がよい。沈み込み帯は水が多く、深部の水はたくさんの鉱物を溶け込ませているので、断層に入り込んで上昇すると急激な温度変化により沈殿して固着するだろう。それが鉱物脈の生成につながるのではないと思われる。今後さらに同種のサンプルが見つければ、この考えを検証することができる。

わずか幅数ミリのシュードタキライトにもたくさんの情報が含まれている。

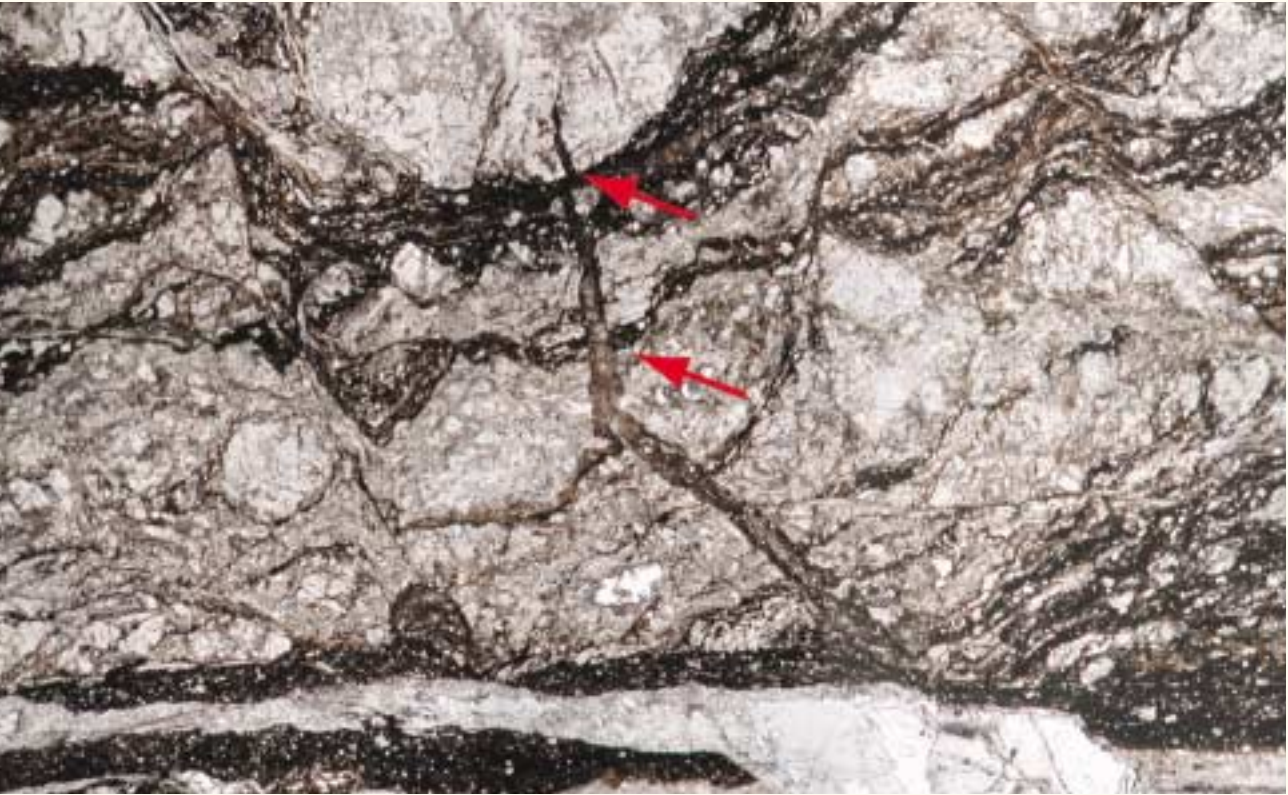
たとえば、破壊が始まると破断部に力が集中するため、断層が動くときの破壊もシュードタキライトに局所化するはずだ。シュードタキライトが解明できれば断層の力学がわかる。地震でも起きると考えられているプレスリップ（物が滑るときに最初に小さく滑ること。それから物体は新しい摩擦を得て本格的に滑り始める）も、シュードタキライトに記録されてるかもしれない。

また前回の地震が大きいと次の地震が起きるまでの期間が長くなる。ブロックスライダーモデルでいえば、そりは毎回同じ間隔で同じだけすべるわけではない。そりが滑りきる前に何かがブレーキをかけている。そのブレーキとなっているのが断層の摩擦面ではないかと考えられる。摩擦して断層面が溶ける時に、粉碎物が一部溶け始めると摩擦挙動がまったく変わってしまう。摩擦溶解の際に何が起きたのかも、この部分を分析するとわかることだろう。

また断層岩には、古い断層が変形し



中ほどを横切る白い鉱物脈は熱水が通過した痕跡。粉碎された岩石片が瞬間的にセメントされ、沈殿せず浮いているのがわかる。



黒い線すべてがシュードタキライト

下の方のシャープな直線は比較的新しいが古いものほどその後の変形を受けて曲がっている。断層にシュードタキライトの線が何本も入って、中には古いものを横切っているものがあるのは、繰り返しかえし地震が発生したことを示している。

て規則的に並んでいる部分がある。ここでは沈み込み帯に存在する水によって「圧力溶解」という現象が起こったと考えられる。粒子の隙間に水があると粒子は点で接して部分的にひずんでゆく。ひずんだところが水に溶けやすくなるため、接点が溶けて粒子同士が食い込み、ちょうど歯車がかみ合ったように力のかかったところがさらに溶ける。溶けた鉱物は周囲に沈殿していき、やはり断層をセメント化する。このように地震と地震の間に長い時間をかけて起こる現象も、断層の強度を増しているのではないか。このように、どんな鉱物がどのような挙動を示しているかを調べると、地震の最中だけでなく、地震と地震の間に何が起きているのかもわかるはずである。

今まで震源断層がないと信じられてきた付加体でのシュードタキライトの発見のおかげで、今後は海溝型震源断層の物質化学的分析が可能になり、新たな知見が期待される。

沈み込み帯の震源断層全体像
解明にむけての今後の取り組み

今回採取された断層岩は重要な情報を与えてくれるが、5千万年くらい前のものなので、実際に活動していたときに、どれくらい水を含み強度はどうだったか等はわからない。ちょうど壊れた地震発生装置を分解して、装置の仕組みを探るようなものだ。

次のステップは、活動中の地震発生域をじかに調べることである。IODP（統合国際深海掘削計画）で現在活動中

の「生きた」断層岩を採取するとともに震源断層のデータを採取し、ひずみ系、水圧系、温度系、化学成分などを調べていく。一方では活動を停止したものについても、これから四万十帯の多様性に富んだ断層岩を調べて蓄積する予定だ。これをIODPの掘削から得られるデータとあわせて見ていくことによって初めて震源断層の構造全体がわかってくることだろう。

現在IODPには1944年の東南海地震の震源エリアが浅いところまで延びていて掘削が可能な熊野沖の掘削プロポーザルを出している。東南海地震から60年経っているため、かなりひずみをためて十分な強度を持った地震の準備過程を見ることができるとは思う。