

# Geo-Diagnosis

## (後編) 地球のひび割れ診断

*Produced by Working Group 0*

学生編集委員会 (WG0) では、企画立案から取材、記事執筆にいたるまで、学生が主体となり活動を行っています。記事は1月号と6月号の年2回発行しています。今年度からはHPを開設し<sup>1)</sup>、過去の記事も閲覧可能になりました。本年度のテーマはGeo-Diagnosis (地球診断) です。前編では「空から見た地球の形」と題して、地球表層の形状測定技術を紹介しました。後編では、地震予知などに重要となる「地球のひび割れ診断」、つまり活断層の評価技術について紹介します。

### ○○○はじめに○○○

—「太郎さん、授かったみたい。とうとうお父さんね」  
「本当に!? ありがとう花子さん」「太郎さん、花子さん、おめでとうございます。元気な赤ちゃんですね。ほら、超音波画像をごらんください」—人体の診断技術はますます発展し、CTやMRIなどによって体内であっても鮮明に観察をすることも可能になってきています<sup>2)</sup>。

今年度、学生編集委員会では、人でなく、われわれの住む地球にフォーカスし、Geo-Diagnosis (地球診断) と題して前編 (1月号)<sup>3)</sup>では、地球の表層部の測定技術を紹介しました。本編では、地球内部を検査/測定する最新技術について紹介します。近年、防災やエネルギー・鉱物資源探査など、地球内部を調査する技術の重要性はますます高まっています。よく知られているように、地球内層では地殻プレートが常に活動しており、地震や火山活動としてわれわれの生活に影響を及ぼしています。その予兆や名残は活断層という形で現れるため、この理解は大変重要です。例えば医療では、X線レントゲンやMRIなどさまざまな観察/診断方法があるように、地球の診断計測技術も脈々と発展を遂げてきました。今回は、その活断層の探査技術を中心に紹介していきます。

### ○○○活断層とは○○○

地震はなぜ起こるのでしょうか。地下の岩盤に力が加わり発生したひずみが臨界点を超えることによって生じる、断層面に沿った急速な断層運動によって起こるとされています。プレートの動きによって岩盤にひずみが生じるのですが、日本の周囲には4枚のプレートがあるため、地震が起きやすい環境におかれているといえます。実際地球上で起こる地震の実に10%は日本周辺で起こっているのです。わが国における生命・財産の保護のためには地震というリスクに上手く対応することが必須といえるでしょう。地震の発生メカニズムを理解し、地震に耐えうる社会システム

を構築すること、また可能であるならば地震を予測することは非常に重要であり、日本において活断層に研究が行われています。

断層運動はそれが生じる場所によって3種類に分けられます。一方のプレートにもう一方のプレートが沈みこむ位置で起こる断層運動による地震はプレート間地震と呼ばれます。また単一のプレート内においても蓄えられたひずみを解消する形で断層運動が生じます。この断層運動は陸のプレートと沈み込む海のプレート双方において起こります。3種類の断層のうち直接観測できる断層は陸のプレートに存在するものが大半のため、断層運動を理解するために主に地上の活断層の調査が行われています。

活断層とは最近の地質時代に繰り返し活動し、今後も活動する可能性の高い断層のことです。長さは主に10~20 kmです。日本で最長の活断層は長さ400 kmの中央構造線です。しかし長い活断層は断層運動においてすべての領域が一度にずれるわけではなく、一回の地震で数十 km 程度がずれるとされています。また、20 km 程度の活断層のずれによってM7以上の地震が起こるといわれています。活断層の活動間隔は短いもので千年程度、長いもので数万年にもなります。岩盤にかかる力の方向などの違いにより正断層、逆断層、横ずれ断層など断層のずれ方向に違いが生じます。日本は4枚のプレートが互いに近づいている位置にあるため、岩盤は圧縮され逆断層が生じやすく、実際に逆断層が多く存在します。現在までのところ全国110の活断層調査が行われていますが、最近数年間に発生した内陸地震は未調査の活断層で発生しており、残念ながらデータの蓄積はされていません。活断層の理解のためにはデータの蓄積が不可欠ですが、必ずしも毎回データが取得できるわけではないというのが研究者にとって悩ましいところです。活動周期が千年以上と非常に長期であることも研究を困難にしています。日本に限らずあらゆる場所で発生した地震の調査によりデータを蓄積することや、物理モデルを推定しシミュレーションを行うことなどにより活断層を



図1 活断層写真(中越地震, 2004)<sup>4)</sup>

理解しようとする試みが続けられています。

### ○●○活断層の見つけ方○●○

日本には多くの活断層がありますが、いったいどのようにして活断層は発見されるのでしょうか。調査方法は、空中写真を用いる方法、弾性波などによる物理探査や、実際に地面を掘るなど、多岐にわたっています。また、海底にも活断層は存在するため、そのような活断層も調査する必要があります。実際には一つの方法で活断層の全容を知ることが不可能なので、これらの方法を組み合わせて活断層を探します。ここでは一般的な調査方法から最新技術を用いた方法まで、いくつかの方法を紹介します。

#### ➤ 航空写真判読<sup>5)</sup>

最もシンプルな方法として挙げられるのは地形から活断層を見分ける方法で、下向きにカメラを取り付けた航空機から、前後で60%重なるように撮影した2枚の連続的な写真を、左右それぞれの目で見えて実体視する方法です。地表面に活断層があれば、直線的な地形の不連続境界や直線谷などが見られます。実体視には実体鏡と呼ばれる、レンズと鏡を組み合わせた装置を用います。

#### ➤ 干渉 SAR<sup>6)</sup>

SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダー) とは、陸域観測技術衛星「だいち」や地球資源衛星「ふよう1号」などの人工衛星に搭載されたアンテナから電波を地表に送信し、その反射波を捉えて地形などを画像化する技術です。一度に数十 km もの広範囲を測定でき、人が立ち入ることのできない場所も観測できます。太陽の反射光を利用しないため、24時間観測が可能です。また、日本の SAR 衛星が用いる電波は雲だけでなく木の葉・枝を透過するので、天候に左右されない上、森林地帯の多い日本

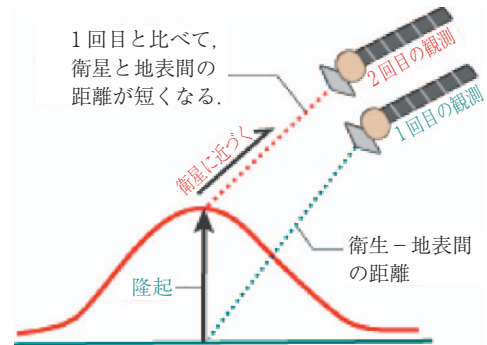


図2 干渉 SAR の原理<sup>6)</sup>

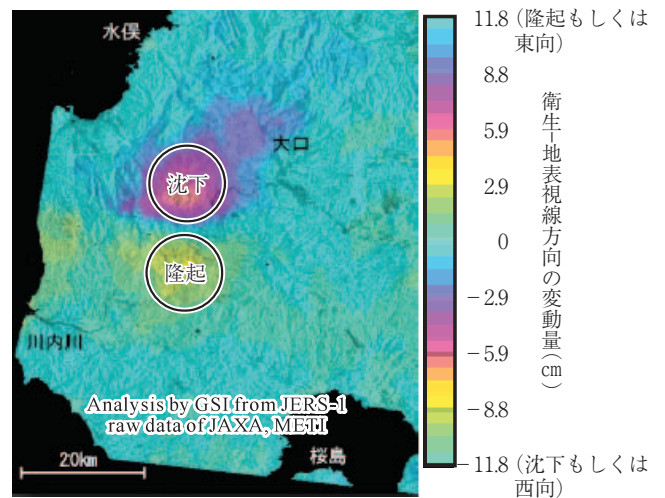


図3 干渉 SAR 画像 : ふよう1号 (1997.3~1997.4)<sup>7)</sup>

で力を発揮できます。

得られた画像には衛星と地表との距離の情報を含みます。図2のように、同じ場所を時間間隔を空けて再び測定し、2枚の画像を比べることでこの期間に起きた地形の変化を知ることができます。この手法を干渉 SAR といいます。

1997年3月26日に発生した鹿児島県北西部の地震では、震度5強を記録しましたが、地表面では断層を確認することはできませんでした。ところが、干渉 SAR を用いると図3のように南部が隆起し、北部では沈下していることがわかります。これにより、地下の断層の形や動きを知ることができます。

#### ➤ リモートセンシング

活断層の境界では鉱物種が大きく異なる場合があります。岩石を構成する鉱物を見分けることで活断層を発見できることもあります。衛星や航空機から撮影した画像を解析するリモートセンシングでは、各鉱物特有の反射スペクトルパターンの違いを利用して地質の違いを可視化します。一般的には、植生に覆われた地域では地質の違いは判断できず、岩石が露出している地域で行われます。しかしながら、岩石の化学成分の違いによって生えている植物の種類

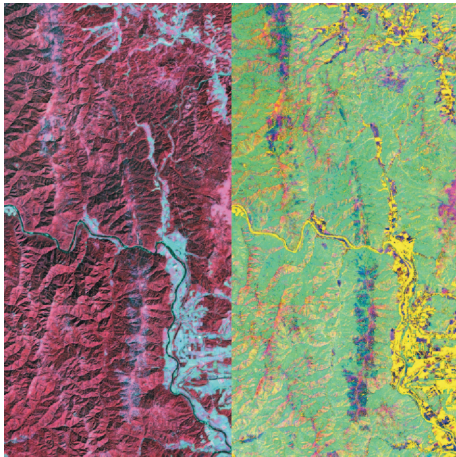


図4 植生地域での反射スペクトル



図5 トレンチ調査の様子(兵庫県加西市 山崎断層帯琵琶甲断層)<sup>9)</sup>

が異なり、その反射スペクトルパターンの違いから植生下の地質の違いを可視化することができる場合があります。

図4の左側は衛星画像の植生の部分を濃色(赤色)で記したもので、右側は植物相の違いをスペクトルパターンの違いで強調した図です。右側の図の中央付近に見える細い縦長の濃色(青色)の帯が蛇紋岩という特殊な超塩基性岩の分布を示しています。このように図の色の違いや地形を判読し、地質調査や断層を探す手段の一つとなっています。

➤ トレンチ掘削法<sup>5)</sup>

断層を横切るように地面にトレンチと呼ばれる深さ数mの溝を掘削し、その壁面の地層を観察します。地層の年代の特定には、放射性炭素(<sup>14</sup>C)年代測定法などを用います。断層がどのくらいの時間間隔で動くかを調べる方法のうち、最も一般的に用いられる方法です。図5の写真はトレンチ調査を行ったときの様子です。壁面に断層による不連続な地層があることがわかります。

➤ 弾性波探査<sup>8)</sup>

地面に発破等によって弾性波を発生させ、縦波または横波が直接もしくは地層境界で屈折して地層中を伝播する状

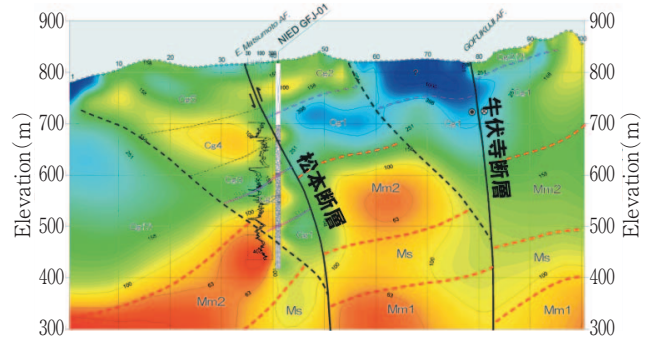


図6 比抵抗分布<sup>10)</sup>

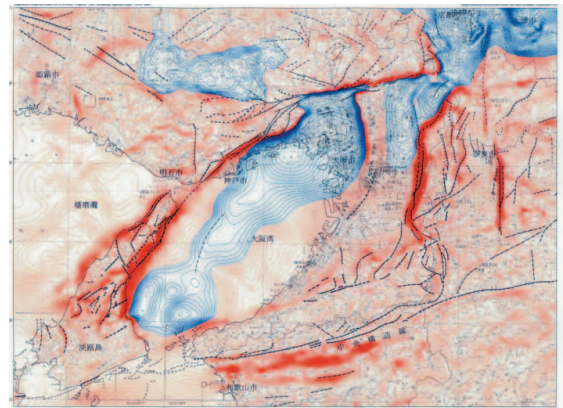


図7 重力分布(文献11)に文献12)の活断層位置を加筆)

況を地表に設置した測定装置で観測し、その結果を解析して地下構造を調べる方式です。高周波の波を用いることで、より微細な構造を知ることができますが、その一方で波が減衰しやすくなり探査深度が浅くなってしまうといった特徴があります。

➤ 電気探査<sup>8)</sup>

地中の電気の流れやすさを示す比抵抗の分布から地盤構造を画像化する手法です。比抵抗トモグラフィは、ボーリング孔を利用して地表や孔内に密な間隔で電極を配置するCTの応用手法で、狭い領域における高い分解能の測定に適しています。図6は電気の流れやすさを表しており、色(赤色と青色)の分布パターンが左右で大きく変化する境界に断層が存在していると考えられています。

➤ 重力探査

地中の岩盤の密度により地上で観測される重力の大きさは若干異なります。したがって、標準的な重力値とは異なる重力異常を観測することによって、地中の断層の位置や傾斜等を知ることができます。図7は大坂湾周囲の重力の高低を示しており、黒色部分が重力異常の境界を表しています。この境界は断層であることが多く、境目が急であるほど断層の落差が大きいと考えられています。

➤ 海上音波探査

海底にある活断層は、主に音波を用いた方法で発見しま

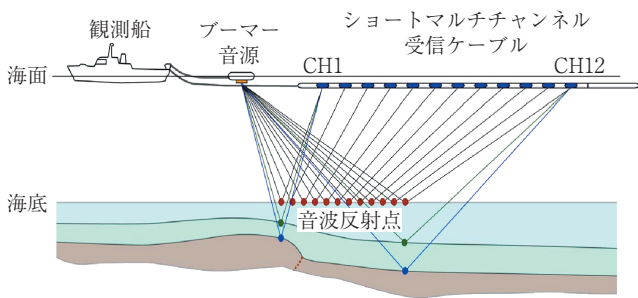


図8 マルチチャンネル音波探査<sup>13)</sup>

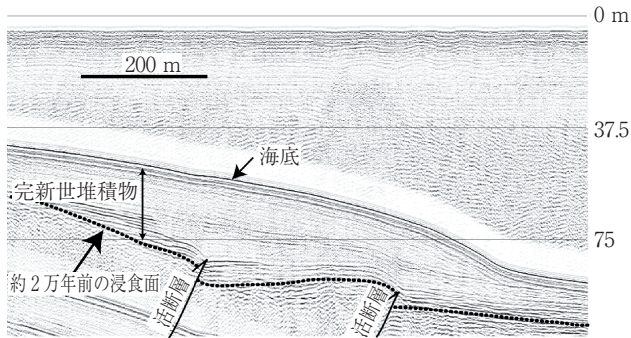


図9 猿山岬沖の反射断面<sup>13)</sup>

す。観測船の音源から海底に音波を発信し、海底の地層の境界からの反射波を受信します。地質により周波数を使い分け、この音波の伝わり方から海底にある断層の様子を知ることが可能です。図8は海上音波探査の一つのマルチチャンネル音波探査<sup>13)</sup>の様子です。ショートマルチチャンネル受信ケーブルで各地盤からの反射波を受信し、海底の様子を画像化します。図9に海上音波探査の一例として猿山岬沖の海底反射断面の様子を挙げます。海底下の地層の様子がこのように可視化されます。

他の音波探査法としては、海の空中写真にあたる、マルチナロービーム測深器<sup>5)</sup>による調査方法があります。指向性の高い音波を、船の真下だけでなく船を中心とした扇形に発射させます。この方法の利点として、航路直下だけでなくその周辺の地形も同時に測定することができます。

### ●●●活断層の評価●●●

活断層は繰り返し活動するので過去の活動を調査することで、ある程度将来を予測することが可能です。大地震により地表に現れた断層のずれなどの地殻変動を調査し、メカニズム解明の資料にします。大地震発生層である地下深部(内陸地震では深さ約15 km)における岩石の挙動、断層周辺の応力を解明し、図10のようにモデル化し、シミュレーションにおけるパラメータにします。地下深部の断層運動と表層における地形変形との相互作用を考慮して計算し、地震による地形変形を評価、シミュレーションをします。

活断層は繰り返し活動するために、平均活動間隔と最新活動時期が判明すれば、将来の活動時期を予測することが

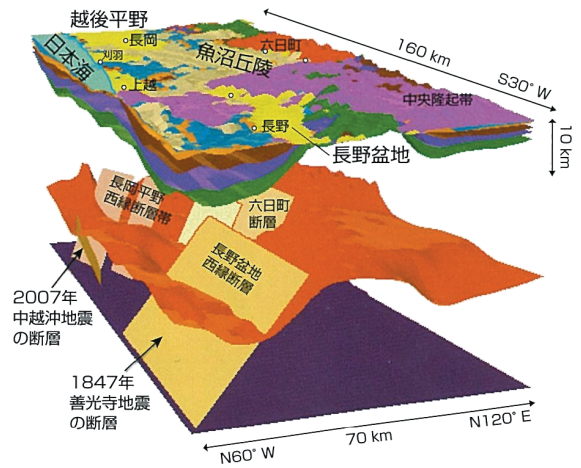


図10 地下構造モデル(新潟県中越地域)<sup>4)</sup>

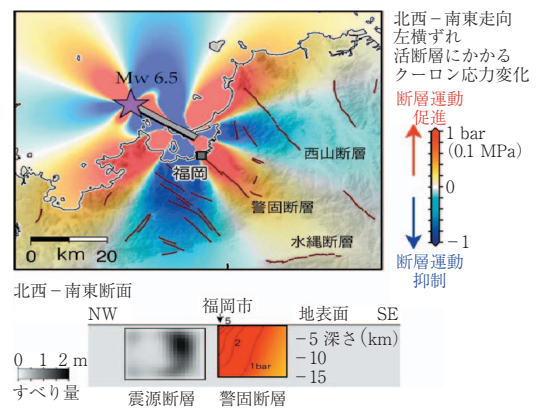


図11 地震による周辺断層への影響<sup>9)</sup>

可能となります。しかしながら、実際の活動間隔にはさまざまな要因によるばらつきがあることが知られています。このばらつきを考慮して、将来の一定期間内に活動する可能性を確率で示したものが将来活動確率です。BPT (Brownian Passage Time) 分布モデルを用い、活動間隔のばらつきを考慮し、将来活動確率(何年後に何%の確率で地震が起こるか)を計算します。モデルの曖昧さを考慮し、さまざまなモデルで数値シミュレーションを行い、高精度な確率予測を目指しています。

日本には多くの活断層があり、絡み合うように分布しています。大地震による周辺の活断層への影響(図11)について、加わった力を計算して次の地震を予測する研究もあります。

### ●●●活断層の地図とその活用●●●

地震に関する地質図は、産業技術総合研究所地質調査総合センターから「50万分の1活構造図」(活構造とは活断層や活褶曲などの比較的新しい活動による構造です)、「構造図(活断層ストリップマップ)」が提供されており、地質調査総合センターのホームページの地質図カタログ<sup>14)</sup>に詳細が記載されています。国土地理院のホームページからは都市圏活断層図<sup>15)</sup>を見ることができます。また、産業技術総合研究所のホームページからも、300以上もの活断層



図 12 活断層地図 (東北地方の主要な活断層)<sup>16)</sup>

に関する調査データや文献データを含んだ、活断層データベース<sup>16)</sup>が公開されています。活断層データの一例を図 12 に示します。

●●おわりに●●

平成 19 年 10 月 1 日より気象庁による緊急地震速報のサービスが始まり、ますます地震予知の技術の重要性が高まっています。実際、本編で述べた技術を用いて活断層の理解はこの 10 年で飛躍的に進んでいるようです。しかしながら、地中はさまざまな物質が混じりあい、大容量のうちの微量変化を検出する必要があるため、この診断/探査計測は宇宙や海洋に比してはるかに難易度が高いとのことでした。しかし、インタビューをさせていただいた方々の輝く目を見てみると、これからも技術は間違いなく向上していくという希望をもつことができました。

今回は、地球の診断—Geo-Diagnosis—をテーマに調査・取材を進めてきました。1 トンあたりの鉱石に含まれる 5 g の金資源を検出するというように、普段の精密工学会誌や講演会ではあまり見慣れないものでした。しかし、地球という遥か大規模なものを対象に、超高精度な測定または検出というエッセンスは精密工学と非常にかかわりの深く、精密工学を理解するうえでも大変参考になると思います。

最後になりましたが、取材および資料の提供にご協力くださった独立行政法人産業技術総合研究所 吉岡敏和氏、濱崎聡志氏、ならびに国土交通省国土地理院 遠藤悦夫氏、雨貝知美氏、住鉱コンサルタント株式会社 千葉昭彦氏には大変お世話になりました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) [http://www.jspe.or.jp/iinkai/henshu\\_wg0/index.html](http://www.jspe.or.jp/iinkai/henshu_wg0/index.html), 精密工学会学生編集委員 WG0.
- 2) 大野良治, 他: 肺癌の画像診断の基礎: CT・MRI の最新技術, J.J. Lung Cancer, **45**, 1 (2005) 63-73.
- 3) 編集委員会: Geo-diagnosis—空から見た地球の形—, 精密工学会誌, **76**, 1 (2010).
- 4) 産業技術総合研究所: 活断層・地震研究センターのパフレット (2009 年 7 月): 第 60635500-A-20091008-001 号.
- 5) 池田安隆, 島崎邦彦, 山崎晴雄: 活断層とは何か, 東京大学出版会, (1996).
- 6) <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/index.html>, 国土地理院干涉 SAR ホームページ.
- 7) 国土地理院: 干涉 SAR パフレット.
- 8) 災害科学研究所, トンネル調査研究所: 地盤の可視化と探査技術, 鹿島出版会, (2001).
- 9) 産業技術総合研究所: 地質調査総合センターのパフレット「産業技術総合研究所の地震研究—地質学を基礎に地震に挑む—」: 第 60635500-A-20091008-001 号.
- 10) 千葉昭彦, 他: 活断層掘削と物理探査を利用した活断層構造調査—牛伏寺断層を例として—, 物理探査学会, (2003).
- 11) Gravity Research Group in Southwest Japan: Gravity Anomaly Map in and around the Focal Area of 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake, (2001).
- 12) 活断層研究会: 新編日本の活断層, 東京大学出版会, (1991).
- 13) 産業技術総合研究所: 地質調査総合センター速報, 平成 20 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告 No.49 (2009): 第 60635500-A-20100121-002 号.
- 14) <http://www.gsj.jp/Map/index.html>, 産業技術総合研究所地質調査総合センター/地質図カタログ.
- 15) <http://www1.gsi.go.jp/geowww/bousai/menu.html>, 都市圏活断層図.
- 16) <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>, 産業技術総合研究所: Web 活断層データベース: 第 60635500-A-20091008-001 号.

—会誌編集委員 WG0 メンバー (平成 21 年度)—

岩瀬勇人 (千葉大学 M2), 遠藤崇訓 (埼玉大学 M1), 小川幸子 (同志社大学 D3), 工藤良太 (東京大学 D1), 近藤余範 (東京工業大学 D3), 高野広樹 (埼玉大学 M1), 道畑正岐 (大阪大学 D3)