

## 干渉 SAR による地殻変動マッピングとお付き合い地震断層

藤原 智 (国土地理院)

Crustal deformation mapping by SAR interferograms and linear surface displacements caused by large earthquakes

Satoshi Fujiwara (GSI)

### 1. はじめに

大きな地震が発生すると、地表ではさまざまな位置のずれ（地殻変動、変位）が現れる。見ることのできない地下で地震がどのように発生していて、将来どのように発生するのかを解明するには地殻変動を詳細に観測することが有効である。

ここでは、人工衛星を用いて平成 28 年熊本地震での地殻変動を詳細に求めることで、自ら動いて地震を発生させた「動く断層」だけでなく、お付き合いで他律的に「動かされる断層」が非常に数多く存在したことについて明らかにし、断層というものの多様さを紹介する。

### 2. 地下の断層の動きと干渉 SAR による地殻変動観測

地震を引き起こす断層のほとんどの部分は地下に埋もれていて、その形状や運動の詳細を直接捉えることは難しい。そこで、間接的ではあるが、地下の断層の運動によって周囲の岩盤等が引きずられて動くことを利用し、断層を地殻変動という形で観察する。

JAXA が打ち上げた人工衛星「だいち 2 号」(ALOS-2) の合成開口レーダー (SAR) を利用して地殻変動を抽出し、熊本地震の動きを宇宙から捉えた。その結果を元に、地下で動いた震源断層の位置をモデル化したのが図 1 (四角形の点線) である。既知の活断層である布田川断層と日奈久断層が動いたことに加えて、阿蘇カルデラ内に食い込むように未知の断層が動いたことで熊本地震が発生していた。

### 3. お付き合いで動かされる断層

熊本地震では 1m を超える地殻変動が広範囲に地表に現れた。これらの大部分は図 1 で示した震源断層の運動の結果を表しているものの、こうした震源断層の動きでは説明のできない、より複雑な変位や地表付近での断層の変位（変位が直線でつながるリニアメント）も数多く捉えられた。

地表に現れた断層には、震源断層やその分岐断層が地表に直接出現したものだけではなく、力学的な弱面が誘発されて動いているものもある。これらの中でも特徴的なのは、阿蘇カルデラの北西部や熊本市内に現れた、お互いにほぼ平行な断層群である（図 1 の変位のリニアメント）。これらの中には、過去に繰り返し発生した地殻変動が累積して、その地形から活断層であると認識されていたものもある。しかし、今回の地震で大きな地震動を出した形跡はなく、熊本地震に誘発されて何らかの形で動かされた「お付き合い地震断層」であった。つまり、地震の原因となる断層だけではなく、地震によって動かされた結果にしかすぎない断層も存在しそうである。

### 4. お付き合い地震断層の特徴

お付き合い地震断層は、単独に活動して大きな地震を引き起こしたものではなく、他の大きな地震の結果として断層が動いたもの、という考え方であり、熊本地震だけではなく、最近では 2018 年の大坂府北部の地震や北海道胆振東部地震でも確認されている。

お付き合い地震断層に共通な特徴には下記が挙げられ、その全体像の解明が必要である。

- (1)標準的な長さは数 km で、直線もしくはゆるやかな曲線状の変位が連続しており、断層を挟む変位量は数 cm から数 10cm 程度である。
- (2)大きな地震動を出したとする証拠は確認されていない。
- (3)他の地震をトリガーとして動いたと考えられ、地震の原因ではなく結果としての変位である。
- (4)地形と変位分布に相関があり、その地形的特徴から活断層と認識されていたものもあるため、過去から類似の運動が蓄積している可能性がある。
- (5)走向や変位の向きは周辺の応力場と整合的であり、長期間のひずみを解放した可能性がある。

**謝辞** だいち 2 号 (ALOS-2) データの所有権は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) にあります。

**参考文献** Fujiwara *et al.* (2016) *Earth, Planets and Space*, doi:10.1186/s40623-016-0534-x.

Kobayashi *et al.* (2018) *International Association of Geodesy Symposia*, doi:10.1007/1345\_2018\_37.

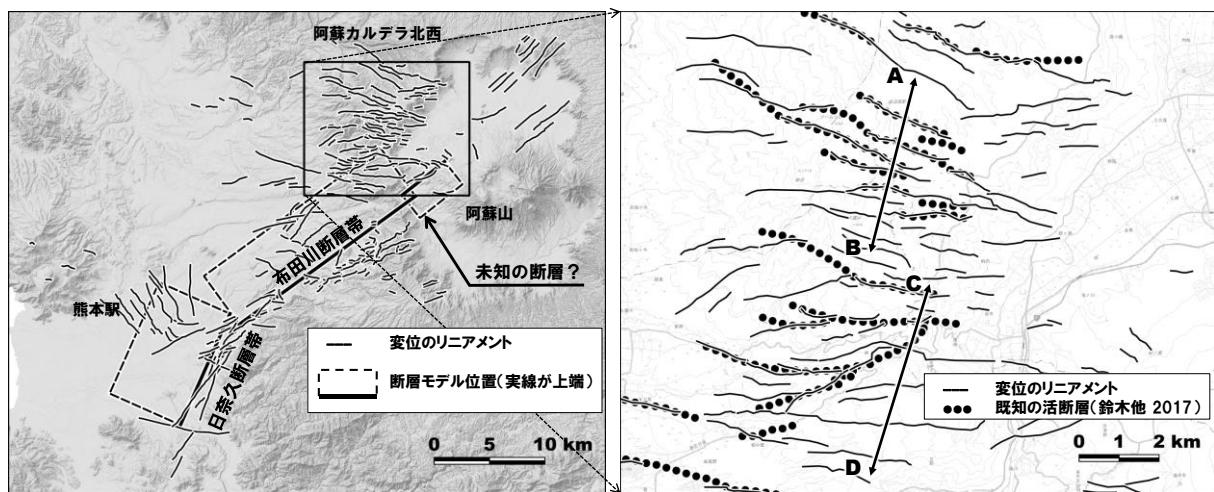


図1 地殻変動観測によって求められた熊本地震の断層モデルと変位のリニアメントの位置  
右図は阿蘇カルデラ北西部を拡大し既知の活断層を追記したもの。

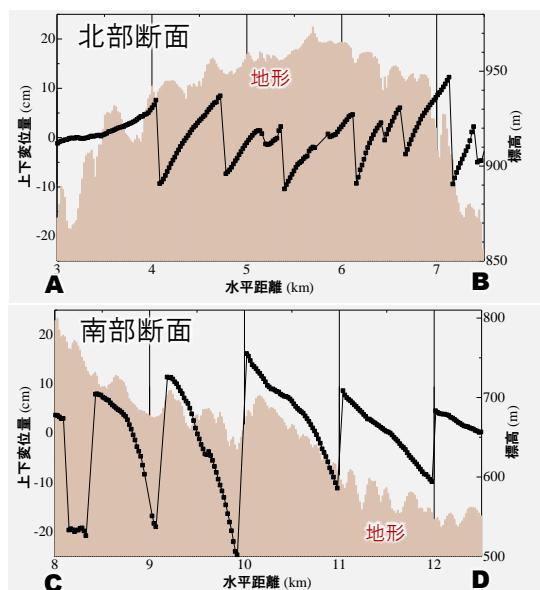


図2 図1右図AB、CDの変位と地形の断面図  
北部断面では変位のリニアメントを挟んで南落ち、南部断面では北落ちと対称的。

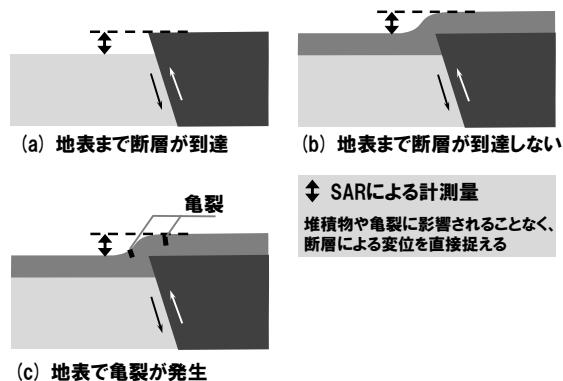


図3 SARによる断層変位計測の特徴の模式図

## S-2

### UAV-SfM による活断層分野の教育研究および地域社会への貢献

内山庄一郎（国立研究開発法人防災科学技術研究所）

Utilization of UAV-SfM for education and research on tectonic geomorphology as science for society

Shoichiro Uchiyama (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

#### 1. はじめに

技術の発展は、時として分野の発展にパラダイムシフトをもたらす。UAV-SfM (Unmanned aerial vehicle and Structure from Motion) は、データ取得の適時性と連続性、高い空間分解能による三次元情報の取得を低コストで実現し、これに代替する実用的な観測手法は、今のところ存在しない。近年、研究の推進のみならず、防災をはじめとした地域社会への貢献など、研究者の役割は多様化している。この文脈において、新しいツールのもたらす意義を考察する。

#### 2. UAV-SfM の概要

##### 2.1 既存の観測手法に対するメリット

地表環境の変動メカニズムを理解しようとするとき、対象とする現象の形状の計測や属性の分析が行われる。この観測手法には、人工衛星や航空機による撮影やセンシング、人間による現地踏査の 3 種類が挙げられる。一般的に、観測対象との距離が大きくなるほど広域を観測できるが、空間分解能は低下する。また、上空からの観測の実施内容は、すべて他者に委ねられている。このため、ユーザー自身が観測対象と時期を決めて、高い空間分解能で観測できる手法が欠落していた。加えて、観測コストの制約も大きな課題であった。

このような中、高い空間分解能と機動性を持ち、低コストで簡略な観測手法として、無人航空機 (UAV) と SfM 多視点ステレオ写真測量を統合した観測手法が注目されている。UAV-SfM のメリットを既存手法の課題に対応させて整理すると、適時性、連続性、高分解能性、三次元情報、非代替性の 5 つの要素を挙げることができる。

##### 2.2 UAV の課題

近年の市販 UAV は、性能向上の傾向にあるとはいえ、航空機としての本質的課題については、必ずしも大きな進展はみられない。この課題を、次の 3 点に整理した。

(1) 安全性の定量的評価の不在：UAV の飛行安全性について、定量的なリスク評価が行われていない。リスクが不明であるために、いわゆる「第三者上空の飛行」が法的に制約される（許可されない）主たる理由となっている。この進展には、工学的アプローチによるリスク評価が求められるが、それに必要な事故実績の網羅的収集は十分とはいえない。

(2) 航続時間の短さ：これは、あらゆる用途において大きな制約要因となる。いくつかの技術的挑戦が見られるが、いずれも一長一短の状況にある。この課題の本質的解決には、バッテリーの技術ジャンプが必要と思われる。付随して、操縦装置と機体の通信距離の問題がある。現在のギガヘルツ帯による直接通信の限界もあり、携帯電話網を介した間接通信インフラの整備も求められるだろう。

(3) 汎用性の不足：撮影専用に最適化された機体は、飛行性能が保証される中での搭載物の変更は限定される。この解決には、機体の最大離陸重量と機体制御技術の向上が必要と考えられる。

##### 2.3 SfM 写真測量の留意点

SfM 写真測量は、低コストで習得が容易であるため導入障壁が低い。一方で、その精度管理の難し

さや観測対象の制約など、観測者による適切な対処が求められる点も多い。ここでは、代表的な留意点を、次の5つに整理した。

- (1) 精度管理：SfMは写真測量の一派であり、内部および外部標定要素の高精度化が必須となる。低空飛行では、機体と対象物の距離の差が大きくなりやすく、キャリブレーション済みの内部標定要素が必ずしも最良の結果を生まない可能性がある。加えて、撮影設定、地上基準点の計測精度と分布、対象物の画から抽出される画像特徴点の量と精度の影響により、観測領域内で異なる精度を示す。さらに、高精度な地上基準点およびグランドトゥルース計測の難しさがある。GNSSならば最良でセンチメートル精度、光波測量ではミリメートル精度も可能だが視通の問題がある。多時期の変化を捉える場合、グランドトゥルースの計測精度よりも精密な変化を知ることはできない。
- (2) 対象物の性質：草や葉、水面などの動くものは、計測が不可能あるいは精度不安定になる。動くものとは、ペア写真間において、得られる空間分解能の1/2を超える動きがある対象物であり、これは、分解能を高めるほど顕在化する。
- (3) 非等時性：UAV-SfMの飛行には一定の時間を要するため、土石流など常時変化する現象を対象とすることはできない。また、飛行に時間要することは、全域で等しい光量が求められる赤外画像の撮影などにおいて、写真間の反射強度が一致しないことを意味する。撮影時の入射光を計測するセンサーが利用されるが、反射率補正の難しさは避けられない。
- (4) 非均質性：植生や建物の存在、地形の傾斜と太陽との位置関係および雲の存在により、画素ごとに自然光の入射強度が異なる（例えば、影と日向）。このため、可視画像では明暗部の画質低下により情報量が減る。赤外画像の場合、明暗部での反射率補正は、原理的に困難となる。さらに、周辺光量低下のように、内部標定要素で補正できない光学的性質の影響も受ける。
- (5) グラウンドスマア：撮影プラットフォームが飛行するため、動かない対象であっても、本節(2)と同様に、撮影露光中に地上分解能の1/2を超えて機体が移動するとカメラブレを生じ、計測精度が低下する。これは、カメラの大画素化や低高度の飛行で顕在化する。多くの場合、飛行速度を落とさざるを得ず、作業効率が大幅に低下する。

### 3. 研究者の役割の多様化

UAV-SfMのメリットは、「知識・情報の質・量・モビリティ等で決まる広い意味でのサイエンスレベルの向上」（第24期日本学術会議地球惑星科学委員会、2019）の道筋に沿うものと考えられ、これを活用した科学的研究の推進が期待される。一方で、変動地形学を含めた地球人間圏科学においては、自然災害の激甚化など、「新たなステージ」（国土交通省、2015）と認識されつつある自然環境の変化に対応した研究も求められる。加えて、都市機能の一極集中、高齢化と人手不足など、社会の変曲点を迎えた今日では、人間社会の駆動力を経済成長にのみ頼るだけでは、解決が困難な課題も多い。このような中では、自然環境の専門的知見を持つ者は、科学の探求のみならず、社会においても多様かつ具体的な役割が期待される。自らの経験を踏まえ、ここでは次の2点に整理した。

- (1) 社会の営為に自然環境の時間スケールの視点を加える：さまざまな想定外を経験する中で、土地利用を含む社会の構築の際には、自然環境の時間スケールにおいて蓋然性の高い自然現象を踏まえた上で、その是非を議論する必要がある。コスト、利便、福祉の視点だけでは、社会は存続できない。
- (2) 研究者自身によるコミュニケーション：コミュニケーションは、科学と人間のインターフェースである。リスク評価は科学の一側面だが、それだけで人間側に変化がもたらされることはない。研究者の最終目標はハザードマップの作成ではなく、それを知り尽くした者がどう伝えるか、までが仕事ではないだろうか。こうした能動性が必要になる仕事は、生身の人間にしかできないものである。

## 宇宙線生成核種を用いた活断層研究の紹介と今後の展望について

白濱 吉起（産業技術総合研究所 地質調査総合センター）

Introductions and future outlook on active fault research  
using cosmogenic nuclides

Yoshiki Shirahama (Geological Survey of Japan, AIST)

活断層研究において地層や地形面の編年は必要不可欠なプロセスである。そのため、放射性炭素年代測定や、広域火山灰を用いたテフロクロノロジーといった年代推定手法が日本国内においては普遍的に用いられている。しかし、対象とする地形面や地層を構成する堆積物が、必ずしも有機物または火山灰を含んでいるとは限らない。これらの手法を補いうる分析手法として筆者が注目しているのが宇宙線生成放射性核種を用いた分析である。

宇宙線生成核種は宇宙線と地球上の元素が相互作用して生成される核種のことであり、よく用いられる核種としては、岩石中の鉱物との相互作用によって生成された Be-10 や Al-26 などが挙げられる (Gosse and Phillips, 2001; 横山ほか, 2005 など)。核種によってターゲットとなる鉱物が異なっており、例えば、Be-10, Al-26 の場合は石英であるため、花崗岩などの岩石が主な試料となる。鉱物中には宇宙線が照射されている期間、核種が蓄積され続けるため、鉱物中の核種蓄積量と宇宙線の照射強度が得られれば、照射されていた期間が推定できる (松四ほか, 2007 など)。分析のためには、化学処理を通して、石英の単離と精製を行い、石英中から Be や Al を抽出する必要がある (Kohl and Nishiizumi, 1992)。そして大型の加速器 (5 MeV) を利用し同位体比が測定される (Matsuzaki, 2007)。これらのプロセス経て結果を得るまでに通常 6~9 ヶ月を必要とする。

試料から得られた宇宙線生成核種蓄積量からは、採取地点によって異なる地質学的情報を得ることができる。その中で、活断層研究へ応用可能な情報としては、表面照射年代、埋没年代、流域平均侵食速度の 3 つが挙げられる (図 1)。

段丘面や扇状地面といった地形面から採取した試料の場合、照射を受けていた期間がそのまま形成年代 (表面照射年代) に読み替えられる。簡易的には表層に露出した礫や巨岩からのみ試料を採取するが、厳密な分析を必要とする場合は、表層から一定深度ごとに試料を採取し、深度ごとの蓄積量の分布を調べる (図 1 ; Siame *et al.*, 2004 ほか) 宇宙線は一定の深度まで減衰しつつ堆積物や岩体を透過するため、深い深度の試料ほど蓄積量が減衰する傾向を示す。この減衰傾向はモデル化できるため、測定結果と計算結果との回帰分析により表面照射年代や照射前の蓄積量、表層の搅乱要因について推定することができる。活断層の活動に伴って変形した地形の編年そのため、乾燥地域を中心に広く適用されている (たとえば

Shirahama *et al.*, 2019 など).

宇宙線の届かない深度から採取した試料から複数種類の核種蓄積量が得られた場合、半減期の違いを利用して、照射を受けなくなつてからの期間（埋没年代）が推定できる（Gosse and Phillips, 2001）。石英さえ得られれば測定できるため、通常年代測定の困難な礫がちな層に適用でき、長期的な変位速度（たとえば沈降速度）の推定に応用できる。

侵食域において採取した試料の場合、核種蓄積量はその地点の侵食速度を反映する。これは地表面における核種が、照射による蓄積と、表層の侵食による除去が継続することにより、侵食速度に応じた一定の蓄積量に収束するためである（松四ほか, 2007 など）。収束までに数千年以上を要するため、少なくとも過去数千年間の平均的な侵食速度を示していると考えられる。尾根上で試料を採取した場合は、その地点の侵食速度を示し、ある流域の流出点において採取した河川堆積物は流域の平均侵食速度を示す（図 1）。侵食と隆起が釣り合うような山地であれば、この値は隆起速度とみなすことができ、山地の隆起過程を議論する上で重要な情報となる。

宇宙線生成核種による分析の最も適した地域は、高緯度または高標高の乾燥地帯であり、こうした地域を対象とする地形学的な研究では普遍的な手法となっている。研究事例は増えているものの、低緯度湿潤地域における適用事例は全体の割合からすると多くない。また、日本のような造山帶においては、侵食速度推定に用いた事例が多く、年代測定を行った事例は少ない。宇宙線生成核種による分析は、これまで普遍的に用いられてきた手法を補う特性を有しており、これまで困難であった地形面や地層の編年ならびに地形形成プロセスの定量化が可能である。これまでの国内における測定事例が少ないとすることは分析手法または精度上の限界に依るところが大きい。研究事例が徐々に増えるにつれ、化学処理や加速器での測定といったそれぞれの工程での精度向上が図られている。適用範囲の広がりと共に、国内での適用事例は増えていくことが期待される。

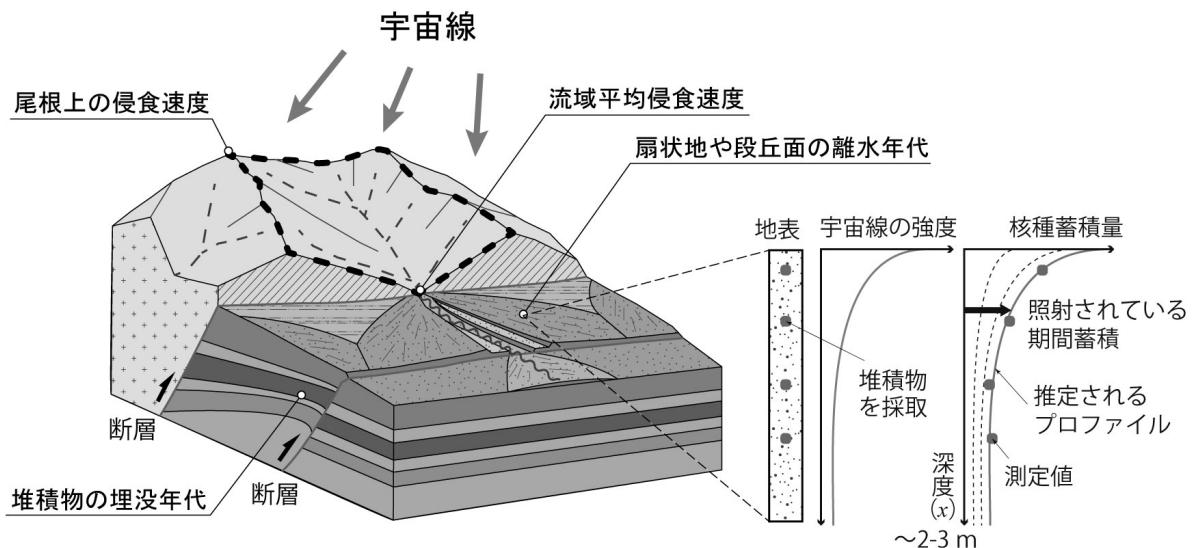


図 1. 得られた宇宙線生成核種蓄積量が示す試料採取位置ごとの地質学的情報についての概念図

## S-4

# 炭素 14 年代法による年代測定 – 日本版較正曲線の未来 – 坂本 稔（国立歴史民俗博物館／総合研究大学院大学） Radiocarbon dating – prospect of Japanese calibration curve – Minoru SAKAMOTO (National Museum of Japanese History / SOKENDAI)

## 1. 炭素 14 年代法とは

炭素 14 年代法（放射性炭素年代法）は、放射壊変によりおよそ 5,700 年で半減する  $^{14}\text{C}$  の性質を用いた年代法である。炭素は自然界に広く分布し、生体を構成する有機物には必ず含まれること、半減期が過去の人々の営みを議論するのに適切な長さであることなどを理由に、考古学・歴史学の分野で広く応用が進んでいる。

自然界の  $^{14}\text{C}$  は、大気圏上層で宇宙線の作用による核反応で生成し、二酸化炭素として大気中を拡散する。炭素は植物の光合成で生物圏に取り込まれ、動物は摂食や排泄・呼吸により炭素を交換する。生物圏の  $^{14}\text{C}$  濃度は放射平衡状態にあるが、生命活動の途絶などで炭素交換が途絶えると、 $^{14}\text{C}$  だけが放射壊変により減少する。すなわち炭素 14 年代法が示すのは、資料が外界と炭素を交換しなくなった年代である。

## 2. 較正曲線と較正年代

$^{14}\text{C}$  の生成に関わる宇宙線の強度は、太陽活動などの影響を受けて変動している。すなわち大気中  $^{14}\text{C}$  の初期濃度が変動しているため、炭素 14 年代法では半減期による年代測定が困難である。そのため未知試料の年代はその  $^{14}\text{C}$  濃度を、炭素交換を行わなくなった年代の判明した試料の  $^{14}\text{C}$  濃度と比較して求める。

$^{14}\text{C}$  濃度の記述には、半減期を 5,568 年と仮定し、経過年数の起点を西暦 1950 年に置いた「炭素 14 年代」が用いられる（単位： $^{14}\text{C}$  BP）。年輪年代法で生育年の判明した樹木年輪などの炭素 14 年代を集成した「較正曲線」が提案されていて、較正曲線と比較して得られるのが「較正年代」である。

較正曲線には誤差があり、また過去の大気中  $^{14}\text{C}$  濃度の変動を反映した凹凸があるため、較正年代は炭素 14 年代と一対一に対応せず、ある確率を持った年代幅で表示される。真の年代はその範囲のいずれかにあるが、これはこの年代範囲にある資料を測定すれば、その確率で得られた炭素 14 年代を示すことを意味する。

## 3. 3 本の較正曲線

自然界の二酸化炭素の多くは海水に溶存するが、海水中の  $^{14}\text{C}$  濃度は海洋大循環などによる滞留時間の経過を受け、放射壊変により同時期の大気よりも低くなる（海洋リザーバー効果）。平均的な表層海水の炭素 14 年代を曆年代に修正する較正曲線「Marine」が用意され、海域ごとに異なる  $^{14}\text{C}$  濃度（ローカルリザーバー効果）を考慮して年代較正を行う。

大気成分の拡散は東西方向には十分に速いが、南北方向には若干の時間差が生ずる。 $^{14}\text{C}$  濃度の低い海洋面積の違いにより、南半球の大気中  $^{14}\text{C}$  濃度は北半球よりも低い値を示す。北半球には「IntCal」、南半球には「SHCal」較正曲線が用意される（Reimer et al. 2013, Hogg et al. 2013）。

IntCal は年輪年代法で生育年の判明した樹木年輪, U-Th 法で年代を測定した鍾乳石, あるいは湖底の年縞堆積物中の植物遺体などの炭素 14 年代に基づく。他方, SHCal は南半球産樹木年輪の測定が（フローティングを除き）過去 2,000 年しか及んでおらず, 大部分の時期は Marine とともに大気循環モデルに基づいて計算されている。IntCal に対し SHCal は 80 炭素年 ( $^{14}\text{C}$  yrs), Marine は 400 炭素年古くなっていて, これは同時期の北半球の陸産資源と比べ, 南半球の陸産資源や表層海水の炭素 14 年代がそれぞれ古い値を示すことを意味する。

#### 4. 較正曲線の地域差

較正曲線の元データの多くは複数年を 1 試料とした炭素 14 年代で, 統計処理により平滑化されている。近年は加速器質量分析法による炭素 14 年代測定 (AMS- $^{14}\text{C}$  法) が普及し, 微量の試料から精度の高い炭素 14 年代が効率的に得られるようになった。それに伴い, これまで較正曲線に隠されてきた、「地域効果」とも呼ぶべき  $^{14}\text{C}$  濃度の挙動が明らかになってきた。

北半球に位置する日本列島周辺の資料の炭素 14 年代は, 本来は IntCal に基づいて較正される。ところが樹木年輪の測定から, 日本列島周辺の大気中  $^{14}\text{C}$  濃度が SHCal に近い挙動を示す時期のあることが明らかになった。アジアモンスーンなどの影響により, 南半球の大気が日本列島周辺まで進入したことが想定される。この傾向は紀元前後から 2 世紀にかけて特徴的だが (尾崎ほか, 2011), IntCal と SHCal の中間, あるいは IntCal に近い時期も見られる (Nakamura et al. 2013, Sakamoto et al. 2017)。

これが南半球大気の影響とすれば, 炭素 14 年代のずれは大きくとも 80 炭素年程度である。ただし精密な年代測定を実施するためにも, 日本産樹木年輪の炭素 14 年代を蓄積する必要がある。日本産樹木の年輪年代法は, スギ・ヒノキなどの年輪幅による方法は過去 3,000 年程度であるが, この 10 年ほどで実用化された年輪セルロース酸素同位体比による方法が, 樹種を選ぶことなく過去 5,000 年に到達しようとしている。今後は埋没木などの酸素同位体比と炭素 14 年代の測定を進めることで, 日本版較正曲線の整備が期待される。

#### 5. 較正曲線の未来

樹木年輪の炭素 14 年代測定は, 宇宙線の強度変動やそれに関わる太陽活動の解明を目的として進められることが多い。屋久スギの単年輪測定で, 774 年から 775 年にかけて大気中  $^{14}\text{C}$  濃度が急激に上昇していたことが見出され, 太陽表面で大規模フレアが発生したことが示唆されている (Miyake et al. 2012)。この挙動は世界各地の樹木年輪に確認され, これを鍵層とした年代法が提案されている。例えば, 白頭山の噴火に伴って埋没した樹木年輪の炭素 14 年代測定により, その噴火年代が 946 年と特定された (Oppeheimer et al. 2017, Hakozaki et al. 2017)。

同様なイベントの検出を目的とした樹木年輪の炭素 14 年代測定が各地で進められ, それに伴い較正曲線の元データが急速に充実しつつある。現在, 2019 年度版となる較正曲線の整備が進められていて, 樹木年輪の及ばない時期も, 中国の Hulu 洞窟 (葫芦洞) 石筍の炭素 14 年代などを反映した見直しが行われている。較正曲線は数年ごとに改訂されていて, 較正年代もその度に更新が必要になる。同時期の資料は (地域差はあるとしても) 同じ炭素 14 年代を示すことを前提に, 年代の新旧関係はまず炭素 14 年代で検討し, その上で暦上の年代に修正すべきである。

## 海底活断層調査における技術革新

—時間・空間分解能の向上と高分解能三次元探査—

大上 隆史（産業技術総合研究所）

Innovation and advance in recent offshore active-fault survey:

3-D seismic survey and resolution improvements

Takashi Ogami (AIST)

沿岸海域における海底活断層を対象として、その分布・性状と活動性を明らかにするための調査研究が重点的に実施されてきた（例えば、沿岸海域における活断層調査、2009年度～2014年度；内陸及び沿岸海域の活断層調査、2016～2018年度）。堆積場である沿岸海域においては、断層崖等の海底地形が埋積されてしまう一方で、断層変位が堆積構造として累積的に保存される可能性が高いため、海域における海底活断層調査によって、平均変位速度や断層活動履歴についての情報が精度良く取得できることが期待される。本講演では、具体的な調査事例を通じて、近年の海底活断層調査における調査技術についてレビューする。

沿岸域における活断層調査の多くは、海底地形、高分解能音波探査装置によって取得した音波探査記録断面、および底質採取調査を組み合わせて実施してきた。ブーマーを音源とした高分解能マルチチャンネル反射法音波探査（例えば、村上・他、2004）の開発・普及に伴って、断層の活動性を検討可能な高い垂直分解能を有する高品質な探査記録断面が取得可能となった。さらに、稠密な測線網を配置してブーマーを音源とした三次元探査を実施することによって（猪野・他、2018），陸域における高精度DEMや空中写真判読と比較可能な水平分解能（5 m程度）で断層形状を三次元的に捉えることができる。例えば、熊本県八代海に分布する日奈久断層帯海域部を対象として実施した三次元音波探査では、断層の詳細な三次元形状の把握にもとづいて、海底活断層の水平横ずれ運動が確認された。

また、音波探査に海底活断層の具体的な活動性や活動履歴を解明するためには、底質採取調査を実施して堆積環境に関する具体的な情報や堆積年代を決定して、それらを探査記録断面に加える必要がある。原理的には、堆積速度が大きい海域ほど、高い時間分解能で活動履歴を検討可能である。しかし、通常の海底活断層調査で用いられるピストンコアやバイブルコアリングで採取可能な堆積物は海底面下数m～約10 m程度まで（堆積速度が3～5 mm/年に達するような海域では、カバーできる年代幅は2000～3000年間以下）である。一方で、活動間隔が数百～数千年の活断層の活動履歴に関する情報を得るために、少なくとも完新世をカバーするような堆積物試料（数十m）を採取する必要がある。海底活断層調査において、そのような深度に達する海上ボーリングを海底活断層調査で実施した事例は限られたものであるが、具体的な事例としては新潟県の角田・弥彦断層帯海域部（大上・他、2018）における調査研究がある。さらに、前述の日奈久断層帯海域部においては、三次元音波探査と海上ボーリングを組み合わせた海底活断層調査（“サイスマックトレーニング”）が実施された（大上・他、2019）。海上ボーリングを実施することによって、断層活動履歴および活動性について信頼性

の高いデータを取得可能であること実証する研究事例が蓄積されつつある。

海底活断層調査における一連の技術革新に伴って、海域においても陸上の活断層調査と同等な時間・空間分解能で、断層の活動性評価に資するパラメータを取得する道具立てが整いつつある。これらの新手法を含む調査手法を、対象断層に合わせて適切に選択・活用して海底活断層調査を推進することにより、社会的基盤が集中する沿岸海域の活断層について、精度の高い活動性評価が進むことが期待される。

### 文献

- 村上・他 (2004) 浅海域音波探査用 12 チャンネル受信ケーブルの作成と海域実験結果, 海洋調査  
技術学会第 16 回研究発表会要旨集, 45-46.
- 猪野・他 (2018) 超高分解能三次元地震探査 (UHR3D) – 日奈久断層帯海域部における実施例 –,  
物理探査, 71, 33-42.
- 大上・他 (2018) 角田・弥彦断層海域園長部の活動履歴 – 完新世における活動性と最新活動 –,  
地震第 2 輯, 71, 63-85.
- 大上・他 (2019) 日奈久断層帯海域部におけるサイスミックトレーニング – 横ずれ海底活断層の  
三次元構造と活動履歴の解明 –, JpGU2019, SSS15-18.

## 地下構造可視化に向けた地震探査技術の進展と活断層研究への貢献

阿部 進(株式会社地球科学総合研究所)

Recent advances in reflection seismology to delineate subsurface structures  
for contribution to active fault studies

Susumu Abe(JGI, Inc.)

### 1. はじめに

地震探査技術は、石油・天然ガス資源探鉱における地下構造推定と貯留層物性評価を目的として発展してきたが、地下構造を可視化する観点で、適用対象は資源開発・土木インフラ分野に止まらず、二酸化炭素地中貯留、地熱開発、海底鉱物資源開発及び地震防災の多岐に及んでいる。日本における地震防災分野では、1995年兵庫県南部地震以後に全国各地の地方自治体において、文科省交付金による活断層調査が継続的に実施され、地形・地質構造の形成過程、活断層の構造形態を含め、後期新生代テクトニクスの解明に資する貴重なデータが蓄積された。さらに、2000年代前半より、日本列島に沈み込むスラブの詳細形状、プレート収束帯における堆積盆の基本構造、陸域震源断層の位置・形状把握等の理解に向けた深部地殻構造探査が積極的に進められ、震源断層・活断層システムのイメージングの重要性が指摘されてきた(佐藤他,2001)。

本稿では、震源断層・活断層システムを理解する上で、地震探査データ取得及び解析技術に関する近年の技術進展と今後の動向と共に、解像度向上に向けた課題に関して議論する。

### 2. マルチスケール型地震探査データ取得

近年、独立型データ収録システムの小型化・WiFi伝送の導入に伴って、有線テレメトリー方式の陸域及び浅海域における受振システムとの複合化による長大稠密測線(測線長 100km 以上)の設定が可能となり、多様な異種震源を併用した反射法・屈折法複合型データの取得が実現した。また、低周波領域における有効発震エネルギーの確保によって、地震発生層基底層等の探査深度を持つ地殻スケール構造探査が、相対的にノイズレベルの高い日本国内においても実施されるに至った(例えば、Sato et al., 2005)。こうした地殻スケールデータに加えて、受発震点密度、受振展開長及び発震パラメータの最適化を通じて、堆積盆スケールの反射法データ、さらには、断層関連褶曲解析等、活断層活動履歴の把握に必要な浅部高分解能反射法データが、多様な探査対象及び分解能を前提とする「マルチスケール型地震探査」の一環として、同一調査期間の内で効率的に取得されることが可能となった(阿部他, 2011)。

### 3. 速度構造推定技術の高度化による高精度深度イメージング

マルチスケール型地震探査データを通じて、屈折波、反射波及び'Pre-critical'広角反射波を対象とする複合型速度推定が適用できる。反射波速度解析では、高密度解析点を設定することで短

波長構造変化に対応した速度不均質を推定できるが、データ S/N の影響を受け易い。一方、屈折トモグラフィ解析に関しては、ランダム化初期モデル手法の採用によって、客観指標による長波長の速度構造推定と誤差評価(白石他(2010))が有効であり、稠密長大展開が実現されている場合、堆積盆スケールの深度に至る屈折トモグラフィ解析が可能である。さらに、近年、Full Waveform Inversion(FWI)解析の陸上難地域データへの適用が徐々に進展している。一般に、長波長から短波長の速度不均質の順に、ランダム化初期モデル法による屈折トモグラフィ解析、FWI 速度解析、重合前マイグレーション(PSTM/PSDM)を主体とする速度解析が複合的に組み合わされ、最終速度モデルが構築・改訂される。但し、FWI 解析において、解の収斂性、安定性及び解像度を担保するには、5.0Hz 以下の有効低周波成分が原データに必要となる。近年、受発震システム応答の広帯域化によって、時間分解能の向上と深部への伝播エネルギーの拡充がもたらされ、マルチスケール型地震探査は、震源断層・活断層システムの解明に必要な客観的データの取得に寄与している。

#### 4. 今後の課題

活断層の複雑な形状と形成過程を把握するために、空間分解能の向上と三次元データ取得の効率化・低コスト化は課題である。また、広帯域化を通じた深度分解能の改善を図ると共に、S 波探査データや Nom-seismic データ(重磁力・電磁)との対比検討を通じた統合地質モデルの構築が望まれる。さらに、今後、速度構造推定技術と深度イメージング技術の加速的進展が、震源断層・活断層システムの解明に大きく寄与することが期待できる。図 1 にその技術要素に関する模式図を示す。

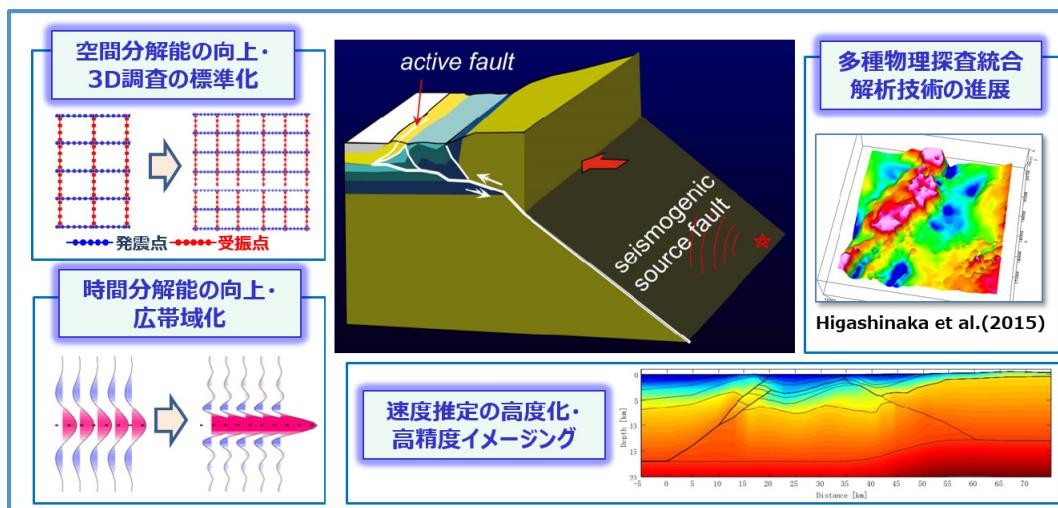


図 1 震源断層・活断層システムのイメージング向上に寄与する物理探査技術要素(概念図)

#### 参考文献

- 阿部 他, 2011, マルチスケール・マルチモード型反射法地震探査-：物理探査学会 学術講演会論文集.
- Higashinaka, et al., 2015, Estimation of pre-Neogene basement- : ILP Expanded Abstracts.
- 佐藤比呂志・他, 2001,震源断層・活断層システムのイメージングの意義と現状 : 地質学雑誌, 110.
- Sato, H., et al., 2005, Earthquake source fault beneath Tokyo: Science, 309.
- 白石 他, 2010, 屈折初動走時トモグラフィ解析における初期モデルランダム化-：物理探査, 63.

## 三次元有限要素法による断層変位計算 —糸魚川-静岡構造線断層帯を対象として— 竿本英貴(産総研 活断層・火山研究部門)

Faulting simulation for Itoigawa-Shizuoka tectonic line fault zone using three-dimensional finite element method  
Hidetaka Saomoto (AIST IEVG)

### 1 はじめに

糸魚川-静岡構造線断層帯に対する断層モデルの高度化および断層変位分布を把握することを目的として、有限要素法を用いた数値シミュレーションを2017年度より実施している。本シンポジウムでは、(1)最新の地形地質調査結果を反映させた断層モデル(北部・中北部まで)、(2)断層面を含む領域に対して推定された最大圧縮応力の方位、(3)断層面上および地表での変位分布、の各項目について発表する。

### 2 断層モデルの概要

糸魚川-静岡構造線断層帯のうち、北部の神城断層から中北部の諏訪湖南岸断層までを今回の解析対象とし、9枚の矩形面を組み合わせることで断層モデルを構築した(図1)。神城断層と松本盆地東縁断層(北部)のそれぞれについて、地中に折れ曲がり点を設定しているのが特徴である。断層面下端深さについては、全ての断層面について15kmと設定した。また、より精緻に既往の調査結果を模擬することを目的として、この矩形面を組み合わせたモデルを滑らかに連結したモデル(図2)も別途作成した。

### 3 結果と考察

最大主応力 $\sigma_1$ の方位は、牛伏寺断層(図1中の⑦)が大きく左横ずれしていること、神城断層は逆断層であった(2014年長野県神城断層地震)こと等の情報を統合的に勘案して設定する必要がある。検討の結果、最大主応力の方位をN60°Wと設定することで、既往研究で得られている断層変位のセンスと調和的になる(図2)。また、既往研究(近藤・木村(2018)、近藤ほか(2006)、奥村ほか(1994))ではトレンチ調査等によってずれ変位の大きさが報告されている。今回用いた図2の断層モデルでは、既往研究に比べて小さい変位が算出された。今後、断層面上物性の検討、断層面の滑らか度に関する検討等を通じてより精緻に調査結果を模擬したい。

### 4 まとめ

最新の調査結果を反映させた断層モデルを構築し、広域応力場の最大主応力方位を推定した(N60°W)。調査結果で得られた断層変位との定量的な比較から、断層モデルは引き続き改良を加える必要があるものの、断層変位のセンスについては調査結果と数値解析結果は定性的に一致した。変位量の比較に関する課題はまだ残るが、有限要素解析を援用することで一定レベル以上の合理性を有する断層モデルが構築できたと考える。

謝辞:本研究は、文部科学省 科学技術基礎調査等委託事業「活断層帯から生じる運動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究(課題A)」の一部として実施しました。ここに記して謝意を表します。

北部：神城1 (①, ②)  
 北部：神城2 (③, ④)  
 北部：松本盆地東縁北部 (⑤, ⑥)  
 中北部：松本盆地東縁南部～  
 牛伏寺～岡谷断層群 (⑦)  
 中北部：諏訪湖南岸 (⑧, ⑨)

	北端座標	南端座標	断層長 (km)
①, ②	36.789079 137.905755	36.664632 137.849278	18.4
③, ④	36.658987 137.85825	36.541295 137.839537	16.5
⑤, ⑥	36.531295 137.85765	36.356748 137.900219	24.6
⑦	36.346517 137.92048	36.057010 138.052998	42.6
⑧	36.052846 138.05231	36.008215 138.093596	7.7
⑨	36.008215 138.09360	35.993147 138.134708	5.0

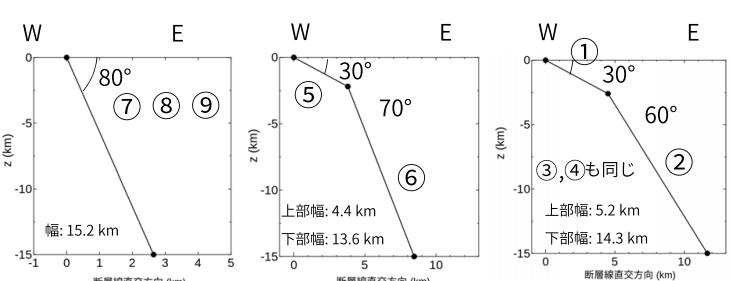
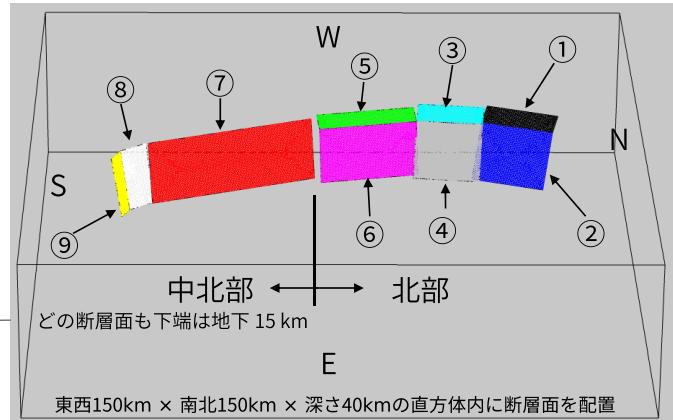


図1 糸魚川-静岡構造線断層帯 北部・中北部の断層モデル

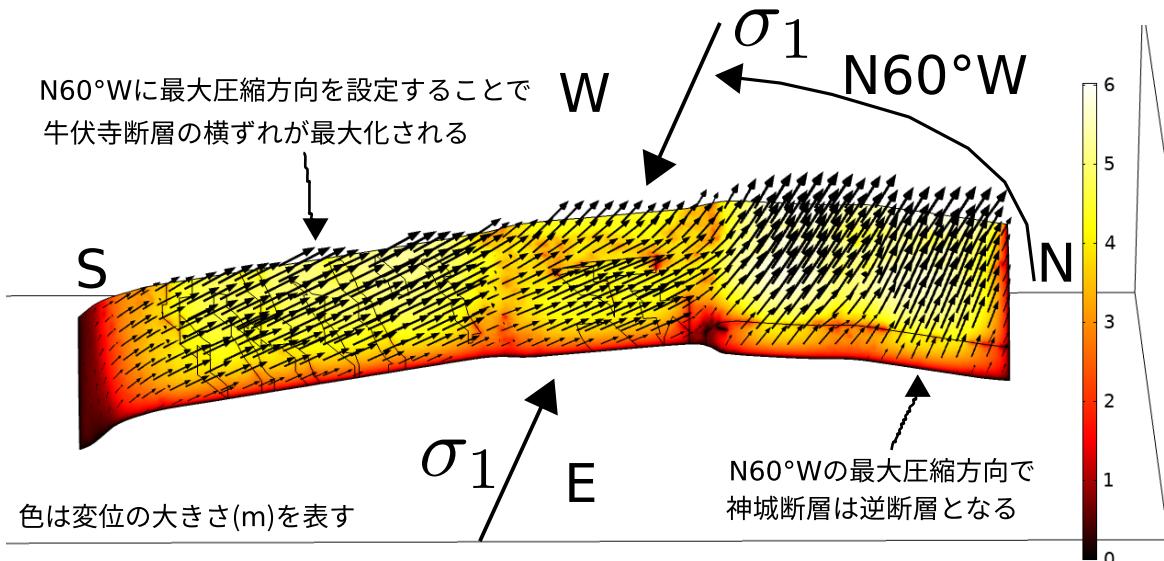


図2 図1のモデルを改変した滑らかな断層面上の滑り変位分布

2011 年東北沖地震による上盤プレート内の震源断層における  
クーロン応力変化のモデリング

°橋間昭徳, 佐藤比呂志, 石山達也(東京大学地震研究所), A. M. Freed  
(Purdue University), T. W. Becker (Texas University at Austin)

Modeling of Coulomb stress change on source faults due to  
the 2011 Tohoku-oki earthquake, Japan

°A. Hashima, H. Sato, T. Ishiyama (ERI, University of Tokyo), A. M. Freed  
(Purdue University), and T. W. Becker (Texas University at Austin)

2011 年 M9 東北沖地震は陸域で最大 5 m、海域で数十 m もの変動を引き起こし、余効変動も引き続き観測されている。東日本の全域で顕著な地震活動の変化が見られ、巨大地震後の応力変化の影響と考えられる。このような地震活動の変化を説明することは、今後の地震活動予測にとっても重要である。そのためには、まず巨大地震により応力がどのように変化するのかをモデル化する必要がある。本研究では、日本列島域の有限要素モデルを構築し、それを用いて巨大地震に伴う応力場を計算する。モデルの拘束条件として、地殻変動データを用いる。得られた応力場を震源断層形状モデルに適用し、断層面上の応力変化を求める。

本研究で用いたモデルは、日本列島全域を含み、観測に基づく太平洋・フィリピン海プレート上面の形状を取り入れた (Hashima et al., 2016)。弾性構造は地震波トモグラフィーによる構造を与えた。断層すべりは、断層面の上面と下面に相対変位を与える拘束条件により表現した。また、境界条件はモデル領域の側面と底面で変位固定条件とした。余効変動を引き起こすメカニズムは、本震震源域の延長部における余効すべりとアセノスフェアにおける粘弹性緩和の 2 つが考えられている。本研究では、両者の効果を考慮し、以下のように粘性構造と余効すべり分布を求めた (Freed et al., 2017)。

まず、既存研究にもとづき、可能な様々な粘性構造を仮定して粘弹性緩和による 3 年間の変位を計算する。東北沖地震後 3 年間の観測変位データから粘弹性緩和による計算変位を差し引いた残差変位をインバージョンし、プレート境界面上の余効すべりを求める。そして、粘弹性緩和と余効すべりによる計算変位と観測変位の残差の自乗和を最小にするようなモデルを最適モデルとする。粘性構造としては、簡単な一様粘性構造から出発し、陸側マントルウェッジの成層構造、海側マントル、陸側マントル先端の低温部 (Cold nose)、フィリピン海プレートの深さの下限、太平洋プレート下部の低粘性領域の効果を段階的に追加した構造モデルを検討した。

解析の結果得られた最適粘性構造では、低粘性領域が大陸側の深さ 150-300 km と沈み込

む海洋プレートの屈曲部分の下部に存在し、大きな粘性緩和を起こす。大陸側の弾性層の厚さは 25 km、Cold nose の存在領域は海溝から 200 km まで、フィリピン海プレートの沈み込みの下限は 100 km となった。海域で観測されている西向きの変位は、太平洋プレート下部の低粘性層における粘弹性緩和を考慮しなければ説明できない。また、得られた余効すべりは本震すべり域の北端と南端に過去の津波地震の波源域との間に挟まれるように存在する。

粘弹性緩和と余効すべりによる地震後変動の大きさは同程度だが空間分布が異なる。粘性緩和は東北地方南部、余効すべりは関東地方と東北地方北部の変位に寄与する。両者の寄与は相補的で、両者を合わせて全域の観測変位を水平・上下成分ともに説明することができる。

以上で得られた最適モデルを用いて、地殻応力の時間変化を計算した。東北日本における応力変化は基本的に震源域方向への 0.1~1 MPa オーダーの東西伸張応力である。時間とともに、応力変化は西方に広がる一方、応力パターンは正断層タイプから横ずれタイプへと変化する。東北地方の震源断層は基本的に南北走向の逆断層であり、このような応力変化は断層運動を抑制するように働く（佐藤ほか 2015）。また、粘弹性緩和完了後の解は、負の係数を乗じれば、東北沖地震前の固着時の応力速度場と読み換えることができる。固着時の応力は陸域に東西圧縮場を作り出し、20 世紀以降の東北地方の地殻内地震の発生分布はその圧縮場と強く関連することが示唆される（佐藤ほか 2016）。

- 1) Hashima, A., T. W. Becker, A. M. Freed, H. Sato, and D. A. Okaya (2016), Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku-oki earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, *Earth Planets Space*, 68, 159, 1-15.
- 2) Freed, A. M., A. Hashima, T. W. Becker, D. A. Okaya, H. Sato, and Y. Hatanaka (2017), Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 459, 279-290.
- 3) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 橋間昭徳, 加藤直子 (2015), 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備, 日本海地震・津波調査プロジェクト 平成 26 年度成果報告書, 267-278.
- 4) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 橋間昭徳, 加藤直子 (2016), 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備, 日本海地震・津波調査プロジェクト 平成 27 年度成果報告書, 299-310.