

地表地震断層と地殻変動

-2014年長野県北部の地震と2016年熊本地震を事例に-

熊原康博(広島大)・後藤秀昭(広島大)・廣内大助(信州大)

Relationship between the surface rupture and crustal deformation:

Two cases of 2014 Nagano Earthquake and 2016 Kumamoto Earthquake

KUMAHARA Yasuhiro, GOTO Hideaki (Hiroshima Univ.) and

HIROUCHI Daisuke (Shinshu Univ.)

I. はじめに

過去2年間において、日本では、2014年11月22日に発生した長野県北部地震と2016年4月16日に発生した熊本地震の、2つの大きな内陸地震が発生し、いずれも明瞭な地表地震断層が認められた。本発表では、両者の地表地震断層の特徴を示し、地表地震断層からわかること、今後の調査の進めるべき点を議論したい。

II. 2014年長野県北部の地震及び、地表地震断層の特徴

2014年長野県北部の地震は深さ5km, Mw6.7, 最大震度6弱の地震であった。発震機構と余震の分布からは、起震断層は北西-南西方向に圧縮軸をもつ東傾斜の逆断層と考えられる。余震域は糸魚川-静岡構造線活断層帯神城断層に一致する。活断層としての神城断層は、長さ20km, 西側低下の活断層とされる。地震後の調査に基づくと、確認できる地表地震断層の長さは9kmであるが、中部では明瞭な断層線が確認できていない。北部で最大変位は東側隆起100cm程度、南部では東側隆起40-50cmである。地表地震断層の位置は概ね既存の活断層線に沿っているものの、一部では一致しておらず、過去の活動の累積である変動地形を見落としていた箇所もある。鈴木ほか(2010)による地震前の予測では、1回の鉛直変位量は5m程度であり、その地震規模はMw7.5としていたが、今回の地表地震断層の変位量及び地震の規模は有意に小さいといえる。

III. 2016年熊本地震及び、地表地震断層の特徴

熊本地震では、Mw6.2の直下型地震(深さ11km)が起きた28時間後に、Mw7.0の直下型地震(深さ12km)が続けて発生した。地震の発震機構と余震分布からは、14日の地震の震源断層は、ほぼ垂直な断層面をもつ北北東-南南西走向の右横ずれ断層であった。一方、16日の地震の震源断層は、84度北西に傾斜する断層面をもつ北東-南西走向の右横ずれ断層で、正断層成分を含む。地震調査研究推進本部地震調査委員会によると、14日と16日の地震は、北北西-南南東方向から南北方向に張力が生じた結果であるとしている。

布田川-日奈久断層帶は、平成14年に出された地震調査研究推進本部地震調査委員会の「布田川・日奈久断層帶」の評価によれば、長さ101kmに及ぶ。なお、地震調査研究推進本部地震調査委員会は、平成25年10月にそれまでの一連の断層帶としていた「布田川・日奈久断層帶」を、布田川断層帶、日奈久断層帶と2つに分けて、改めて評価を行った。区分を変更した大き

な理由は、従来の布田川断層より西部において、宇土まで延びる重力異常の急変帯の存在を活断層として認定したことである。しかし重力異常の急変帯は「最近の活動を示す」証拠として不十分であることや、熊本地震に伴って生じた地表地震断層のトレースも新たに認定した範囲では認められないことを考えると、平成14年の評価の方が適切であったと考える。

地表地震断層は、既存の活断層として知られていた日奈久断層北部から布田川断層や出ノ口断層に沿って、ほぼ連続的に生じ、その長さは約31kmである。熊本地震における「前震」及び「本震」の震源は、日奈久断層と布田川断層の接合部及び、断層トレースの形状が複雑な地域にあたっている。多くの地点で右横ずれ変位が認められ、最大右ずれ変位量は益城町堂園で約225cmである。日奈久断層北部沿いでは顕著な鉛直変位は認められなかった。布田川断層沿いの鉛直変位は、南部では南西側上がり、北部では北東側上がりとなり、右横ずれ断層で認められる鉛直変位のパターンと一致する。なお、鉛直変位は最大100cmであった。出ノ口断層に沿っては、一部左横ずれ変位を伴う北西落ちの正断層変位が認められ、最大2mに及ぶ。今回のずれの範囲や変位量からみて、日奈久断層北部から布田川断層の変動地形をつくってきた断層運動が今回生じた可能性が高い。

地表地震断層の位置は概ね既存の活断層線に沿っているものの、一部では一致していない。山地の連続性に基づいて活断層を引いていたところでも地表地震断層が通らず、想定外のところに地表地震断層が通ることや、左ずれ変位を示す共役断層の認定は、事前に行うことは難しかったといえる。地震調査研究推進本部地震調査委員会の予測では、1回の変位量は2m程度、地震の規模をM7.0としており、これらの予測は概ねあってはいたといえる。

IV. おわりに

今回の二つの事例は、いずれも長大な断層帯における一部が破壊した事例である。シンポジウムでは、今回の活動がこの区間における固有の活動なのか？あるいは、特異なものであるのかについて、主に地表地震断層の分岐形状や変位量分布パターンなど地形的な特徴をもとに議論したい。

2つの地震と、それらに伴う地表地震断層

	マグニチュード	断層のタイプ	活断層名	地表地震断層の長さ	最大変位量	活断層と地震断層の関係
長野県北部の地震	Mw6.7	逆断層	糸魚川静岡構造線 活断層系神城断層	9km	100cm	長大な断層帶のごく一部
熊本地震	Mw7.0	右横ずれ +正断層	布田川-日奈久断層、出ノ口断層	31km	225cm	断層帶の北半分

長期評価の考え方とその変遷
島崎邦彦（東京大学）

Long-term evaluation of a large earthquake on active faults in Japan:
Historical review
Kunihiro Shimazaki (UTokyo)

1995年阪神・淡路大震災後に議員立法でつくられた地震調査研究推進本部（地震本部）は、全国を概観する地震動予測地図を大震災後10年に完成することを目標とした（地震本部, 1999, <http://www.jishin.go.jp/main/suihon/honbu99a/suishin990423.pdf>）。その基本資料として、活断層で発生する地震の大きさ（M:気象庁マグニチュード）、位置、および発生確率を評価するため、地震本部地震調査委員会長期評価部会に活断層分科会（松田時彦主査）がつくられた。このような経緯の発端は、要注意断層とされた野島断層（Matsuda, 1981, M. Ewing Ser., 4, 279）で震災後ただちに地震のずれが報告されたためと思われる。「全活断層についての地震サイクル上の位置の調査」（島崎, 1995, 太田・島崎『古地震を探る』, 36）を提案した筆者は、1995年12月に設置された長期評価部会長を2012年3月までつとめ、その間、確率評価手法検討分科会主査、活断層評価手法等検討分科会主査を兼ねた。

活断層調査は、地震に関する基盤的調査観測の一つと位置づけられ（地震本部政策委員会, 1997）詳細な位置、平均ずれ速度、過去の活動時期、地震時のずれの量と断層長、周辺の地下構造の調査が行われた。調査観測計画部会（長谷川昭部会長）は1995年に設置され、活断層ワーキンググループ（岡田篤正主査）は1996年6月から10月まで7回の会合を開き、活断層調査対象の98断層帯を選んだ。断層帯の長さは20km以上で、松田（1975, 地震, 28, 269）によればM7.0以上の地震に対応する。活動度と確実度（活断層研究会, 1991, 『新編日本の活断層』）がそれぞれB級以上、II以上の活断層。対象断層帯には複数の活断層が含まれ、活動区間（発生する地震）も一つとは限らない。調査によりさらに活断層が見いだされ、2005年時点で159の活動区間が認められたが、多数活動区間のパラメーターは不明であった。その後、追加調査、補完調査が行われ、陸上では重点的調査観測に加えられ、さらに沿岸海域活断層調査が行われている。これらは、『地震に関する総合的な調査観測計画における調査対象活断層について（一部改訂）』（地震本部政策委員会調査計画部会, 2016）としてリスト化されている。初期には地震関係基礎調査交付金により、各地方自治体に活断層調査（研究）委員会等がつくられ活断層調査が進められた。地方交付金の停止によってこの体制は終わり、その後は産業総合技術研究所等に委託されて活断層調査事業が行われている。

評価の手法は予め定められたものもなく、いわば判例主義的に行われ、その結果は最初の98断層帯の評価後に『「基盤的調査観測対象活断層の評価手法」報告書-これまでの長期評価

手法のとりまとめ-』（地震本部調査委長期部会, 2005）としてまとめられた。それぞれの活動区間における最大地震（固有地震）について、M、先史時代・歴史時代の活動、平均活動間隔、発生確率などを評価した。地震発生の可能性について最初は地震調査委員会により、糸魚川-静岡構造線断層系について「今後数百年以内にM8規模の地震が発生する可能性が高い」と評価された。数百年という期間について社会的な時間感覚との乖離が問題となり、防災上は数十年間での確率的表現が望ましいとされた。このため1997年11月に長期評価確率手法検討分科会が設置され、試案および改訂試案について意見公募が行われ、2001年6月に『長期的な地震発生確率の評価手法について』（地震本部調査委, 2001）がまとめられた。その後、要注意、注意などのランク付けが欲しいとの要望から、地震発生確率ランク（林・島崎, 1999, 地震学会1999年度秋季大会予稿集, C39）を用い、確率上位1/4を可能性が「高い」、次の1/4を「やや高い」とし、地震本部ホームページでも「高い」「やや高い」を強調して表示した。しかしメディアは確率の数字使用を止めず、防災関係者の誤った解釈を許した。本年熊本地震に至った後、別の定性表現が提案されている。

98 断層帯の評価を2005年までに終了するため、1999年11月には北日本活断層分科会（東郷正美主査）、中日本活断層分科会（中田高主査）、西日本活断層分科会（佐藤比呂志主査、初期は米倉伸之主査）が設置された。ある地域を主に研究する専門家には、その地域の活断層評価で自説にこだわる傾向があることから、評価に加わらないことを原則とした。三分科体制での評価が偏りを生じないように検討し、2000年8月にはデータの信頼度が高い（90%以上正しい）、中程度（70-90%程度）、低い（50-70%程度）のそれぞれの場合に、◎、○、×を付し、文末表現をそれぞれ、「考えられる」、「推定される」、「可能性がある」とした。2001年11月信濃川断層帯及び養老-桑野-四日市断層帯の評価の公表時に、内閣府から、「活断層による地震については、（中略）防災対策上は全国どこにでも起こりうるものとして、（中略）地震防災対策を推進しているところである」と気象庁など複数の記者クラブで同時に発表された。2002年7月の日本海溝沿いの津波地震に関する長期評価の公表前後に内閣府から圧力がかかり、海溝型だけでなく、活断層の地震の発生確率にも信頼度が要求された。これを受けた2003年3月の三方・花折断層帯の長期評価公表以後、内閣府記者発表は止んだ。

活断層評価の対象に相当する地震が発生しないまま、M6.8程度の地震による被害が続き、2005年1月活断層評価手法等検討分科会が設置され、地下構造（地下の弱面）を考慮した評価が加えられ、個別断層評価に替わるM6.8以上の地震の地域評価が提案された（長期評価部会, 2010, 『暫定「活断層の長期評価手法」報告書』）。活断層分科会（今泉俊文主査）で地域評価が開始され、2013年2月に『九州地域の活断層の長期評価（第一版）』（地震調査委, 2013）が公表された。従来一つの断層帯として評価されていた布田川・日奈久断層帯は、宇土区間を含む布田川断層帯と日奈久断層帯に分離され評価されるようになった。

固有地震モデル再考 破壊開始点・連動・活動間隔のゆらぎの本質を探る

◦ 遠田晋次（東北大学災害科学国際研究所）

Reconsideration of characteristic earthquake model:
Clues to seek mechanism for nucleation, contiguous rupture, and
coefficient of variation in seismic cycle on active fault system

Shinji Toda (IRIDeS, Tohoku University)

1. はじめに

固有地震モデルとは、ある活断層で発生する地震規模（マグニチュード、M）と活動間隔が断層サイクル毎に”おおよそ”一定というものである。地震ハザード評価の根底をなし、地震調査研究推進本部（地震本部）でも採用されている。実際には、1つの活断層帯に対して複数の活動パターンや確率幅・信頼性を検討するなど、さまざまな工夫も行われているが、固有地震モデルが基本であることには変わりはない。そのような状況で、最近発生した2014年長野県北部の地震（M6.7）と2016年熊本地震（M6.5, M7.3）は、地震本部の抽出した主要活断層帯で発生した貴重な地震である。わずか2例とはいえ、固有地震モデルを再考する上できわめて重要である。一方で、これまでの大量の古地震データと諸外国での研究の進展により、活断層の複雑な挙動も明らかになりつつある。以下、本発表では、長期評価手法の改善につながる内陸地震発生メカニズムの本質を議論したい。

2. 活動間隔のゆらぎ

活動間隔の変動の程度については、変動係数（ α ）で扱われ、近年多数の議論が行われている。 $\alpha=0$ で完全周期的、 α が大きくなるほど周期性が失われ、 $\alpha \geq 1$ で顕著な時間クラスター（temporal clustering）を示す。地震調査研究推進本部は1998年当時の4つの主要活断層から得られたデータをもとに $\alpha=0.24$ という値を採用している。準周期的ともいえる値である。

ところが最近の国内外の調査結果をみると、活動間隔は $\alpha=0.24$ では到底説明できないほどばらついていることがわかつってきた（例えば、石関・隈元、2007）。例えば、2014年長野県北部地震を引き起こした神城断層の1つ前の地震はわずか300年前の1714年小谷地震であることがわかり、国内最短の活動間隔が報告されている（近藤ほか、2015；遠田ほか、2016）。1000-1500年前後と推定されていた平均活動間隔よりも極端に短い。活動間隔の顕著な変動は国外の陸域プレート境界型横ずれ断層でも顕著である（例えば、Berryman, 2012）。また、国内でも古地震データをもとにしたベイズ統計解析によって、 α が小さい断層でも0.24を下回らないことが分かった（野村、2015）。そのうえで、変動係数に地域性があり、中部地方から近畿地方の活断層で α が大きいことが分かった。両地域とも活断層の分布密度が高く、断層間相互作用が周期性を乱している可能性が指摘されている。

3. 活断層型地震のトリガリング

最近発生した内陸地殻内地震では、最終的に15km～40kmもの破壊長をもたらすきっかけとなった震源（破壊開始点）で、直前に地震活動が高かったことがわかる。典型例は2016年熊本地震、2014年長野県北部地震、2011年福島県浜通りの地震である。これらの地震活動を必然的な「前震」活動とする解釈もあるが、むしろ、活断層面および極近傍で増えた小地震の1つが断層の動的破壊を促したとみる方が自然であろう。

動的破壊モデルの研究では、一旦断層面のどこかで変位が起こると、あとはカスケード的（雪崩的）に破壊の進展が起こる（例えば、Kase and Kuge, 2001）。つまり、活断層を動かすには、応力蓄積がある程度進んだ状態で、それを連鎖的に破壊させるための「きっかけ」となる小変位があれば良い。活断層沿いでの地震活動が高まるほど、多数の震源核形成（nucleation）が起こり、大地震の確率も高まる。

したがって、カスケード的な断層破壊過程を考慮すると、複雑な活断層での破壊開始点は断層分布形態だけではなく、震源核形成場の位置で決まると考えられる（図1）。このような震源核形成は近傍の大地震によって局所的に生じる場合だけではない。他の要因（間隙流体や断層クリープ、火山活動、ステップ・屈曲部等での応力集中）による地震活動上昇によっても、活断層上に地震活動の時空間クラスターが形成され、破壊開始点になる可能性がある。

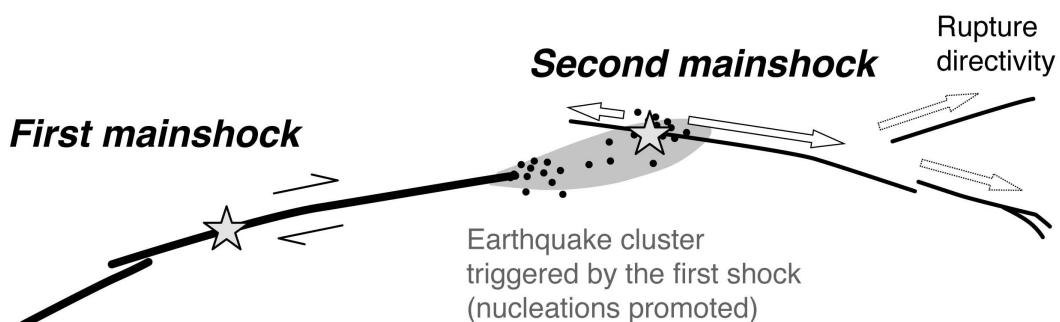


図1 断層間の地震誘発作用の概念図。最初の本震が近傍の活断層上での地震活動を促し、そこが次の大地震の破壊開始点となる。

4. 変位予測モデルと応力トリガリングとの親和性

活動間隔や地震規模（断層変位量）の複雑なゆらぎを説明する代表モデルとして、時間予測モデル（time-predictable model）、変位予測モデル（slip-predictable model）がある（Shimazaki & Nakata, 1980, 図2）。時間予測モデルは、南海トラフ沿いの巨大地震の繰り返しに当てはまりが良く、地震本部の予測に使われている。その後さまざまな事例に両モデルが検討されてきたが、平均変位速度（歪速度）自体に変化があるという議論もある（Weldon et al., 2004）。

地震活動の連鎖性やトリガリングという視点に立つと、発生時間が限定される。その意味で、変位予測モデルと親和性がある。図2に示されるように、変位予測モデルは変位欠損モデル（slip-deficit model）と言っても良く、最後の地震から地震発生の時点での変位欠損が地

震時の変位量を決める。活断層型地震の場合には変位量=地震規模ではないが、地震規模へ影響する可能性が高い。また、変位予測モデルにおいては特定の降伏応力レベルが無い、いわゆる歪の「満期」状態前でも発生する。その意味において、経過率（最新活動期からの経過時間／平均活動間隔）が0.5程度の段階でも、状況次第では近傍の地震に誘発されるかもしれない。

変位予測モデルが活断層型地震で成り立つかどうか、どう証明するか。例えば、2014年長野県北部地震は当初の固有地震モデルによる評価（Mw7.2-7.5）よりも顕著に小さかったが（Mw6.2, Mj6.7），これは先行する1714年的小谷地震から300年しか経過していないためと解釈することができる。しかし、逆に小谷地震の規模（M6 1/4）が小さかったため次の長野県北部地震がわずか300年で発生した、とみることもできる（時間予測モデルに当てはまる）。つまり、この議論を決着させるには、ある程度詳細な活動時系列と変位量計測が必要である。

もう1つの検討方法として、変位予測モデルは過去に遡ると「逆時間予測モデル」が成り立つことに注目することもできる。つまり、断層系内の大規模な運動や大変位量は、それ以前に長期的な静穏化があるとみなす考え方である。したがって、古地震の変位量データが不完全でも、発生の時空間パターンから、ある程度の議論は可能であろう。

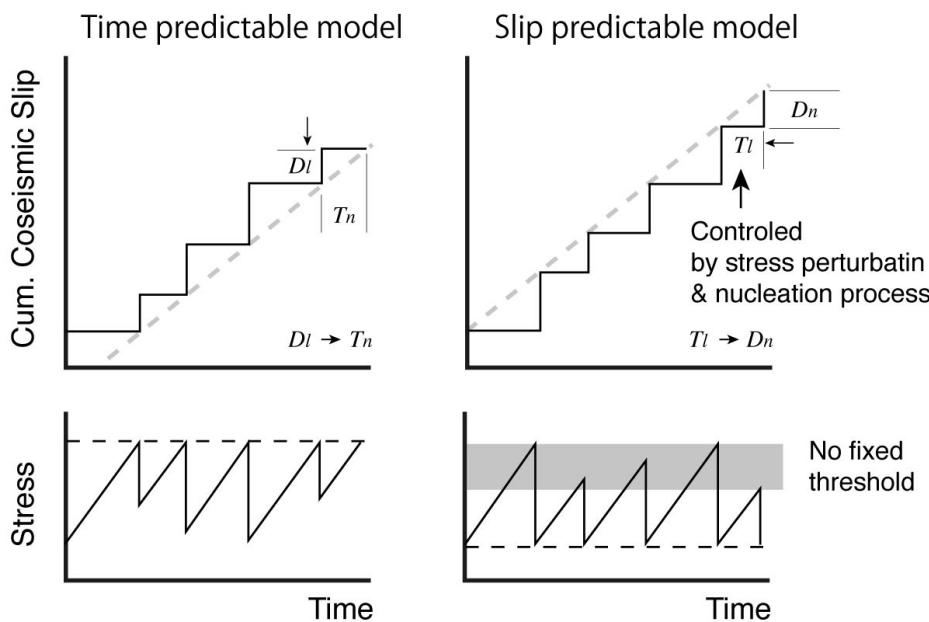


図2 時間予測モデルと変位予測モデル (Shimazaki & Nakata, 1980)。変位予測モデルにおいて地震発生時間をコントロールするものが周辺の地殻変動や地震活動なのではないか。

5. 連動型内陸地震

熊本地震でのM6.5とM7.3の28時間差発生や阿蘇・別府・大分での誘発地震活動は観測史上初とみなされている。しかし、活断層型地震の広域連動については、1586年天正地震、1596年慶長伊予・豊後・伏見地震など複数の歴史地震で証明されている。内陸地震の場合は、定

常的な歪速度が小さいため、1つの大地震による応力変化のインパクトは大きい。またその影響継続時間も長い（Dieterich, 1994）。そのため、今後も近畿や中部地方など活断層密集域での連動型内陸大地震の可能性が憂慮されるべきであろう。また、その際に地震後経過率が低いことが地震発生確率の低下に必ずしも繋がらないことも重要で、経過率がそれほど高くなくとも固有地震よりも一回り小さな地震が誘発される可能性がある。

6. おわりに

活断層による地震の発生確率は、平均活動間隔と最後の地震からの経過時間で決められる。しかし、これは断層運動が準周期的に繰り返されるという固有地震モデルの前提に基づく。長野県北部地震を引き起こした神城断層など、最近のデータをみると、その前提自体に問題があるように思われる。活断層が密に分布する日本列島では、断層間相互作用も強く、単純な地震繰り返しモデルは通用しない。むしろ待機状態の活断層は多く、熊本地震のように、先行する地震活動などをきっかけに活動し、その破壊域・変位量・マグニチュードはその時点での歪蓄積状態に左右されるのではないだろうか。その意味で、経過率などによる評価の見直しが今後の課題になる。また、地形・地質データのみを頼りにした活断層評価だけではなく、地殻変動や地震活動を加味した経時的（time-dependent）地震ハザード評価が求められる。

【文献】Berryman et al., Science, 336, 1690-1693 (2012) ; Dieterich, J. Geophys. Res., 99, 2601-2618 (1994); 石関・隈元, 活断層研究, 27, 63-73 (2007) ; Kase & Kuge, Geophys. J. Int., 147, 330-342 (2001) ; 近藤・勝部, 科学, 85, 313-317 (2015) ; 野村, 統計数理, 63, 83-104 (2015) ; Shimazaki & Nakata, Geophys. Res. Lett., 7, 270-282 (1980) ; 遠田ほか, 日本地球惑星科学連合大会, 講演要旨 (2016) ; Weldon et al., GSA Today, 14, 9, 4-9 (2004)

沈み込み帯地震発生モデルの構築に向けて

佐藤比呂志・石山達也・橋間昭徳（東京大学地震研究所）

Toward the construction of earthquake generation model in subduction zone

Hiroshi SATO, Tatsuya ISHIYAMA and Akinori HASHIMA (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、地震調査推進本部を中心として、活断層の活動履歴の調査が進められ、主要活断層帯での地震発生確率は、活動履歴をもとに評価されている。ただし、こうした手法で求められる発生確率は、30年確率として表現しても、基本的には数千年間の平均的なものである。他方、2011年東北太平洋沖地震の発生前に立て続いた内陸地震は、沈み込み帯プレート境界の巨大地震と、その上に重なる陸側プレートの地震活動が大きく関連していることを示している。すなわち、陸側プレートの内陸被害地震は、プレート境界の巨大地震と密接な関係を有し、一つのシステムである沈み込み帯として理解が欠かせない。地震調査推進本部の長期予測が、30年確率として公表されていることは、社会的な必要性を考慮したものであり、陸側プレートのM7クラスの地震発生の長期予測の精度を実質的に向上させていく必要がある。こうしたモデルには統計的なアプローチと、決定論的なアプローチがある。こでは統計的モデルに対しても拘束条件を与える可能性がある力学的なモデルについて述べる。

震源断層のモデル化

活断層のマッピングは80年代にとりまとめられ、その後も精力的に継続されている。地震発生ポテンシャルの評価や、強震動・津波波高予測には地震発生層中の形状を考慮した震源断層モデルが必要になる。断層モデルの構築に際しては、反射法地震探査などの他、屈折法による地震波速度断面や、重力・電磁気などのポテンシャルデータなどの地球物理学的データは重要な役割を果たす。

震源断層の多くは、第四紀後期の現在の応力場のもとで形成されたものではなく、地質時代に現在とは異なる応力状態で形成され、その後、再活動を通じて現在の応力場まで引き継がれている。2007年の能登半島沖地震(M6.9)はその一つの典型である。能登半島沖地震の場合は、震源断層は南に60度傾斜し断層が右横ずれ成分とほぼ同量の逆断層成分をもっていた。地表地質からこの断層は、日本海形成期に正断層として形成されたものであり、M6.9の地震はそれらの断層の再活動として発生した(佐藤ほか, 2007)。こうした斜め方向の滑りは最近地質時代においても繰り返し発生したもので、斜めすべりに対応して断層の西側では、海底面に撓曲が発生したが、震源域の東半に相当する。

通常、断層の深部形状は地表近傍の傾斜から外挿されることが多いが、こうした推定はいつも成立するものではない。とくに背弧中絶リフトである新潟・北部フォッサマグナ、秋田

堆積盆地・富山トラフなどでは、その縁辺域で大規模なウェッジスラストが形成されている。その一つ、下越の新潟平野東縁に位置する月岡断層では、深さ 2km 程度までは平野側に傾斜した逆断層であるが、より深部では東傾斜の主断層と連結し、全体として楔型の逆断層を形成する（加藤ほか, 2013）。このような主断層の形状は、屈折トモグラフィーによる P 波速度構造断面で速度逆転層としてよく把握されている（佐藤ほか, 2010）。この山地側に傾斜する逆断層の形状は、第四紀に短縮変形場の中で著しい沈降運動が進行している新潟堆積盆地北部の構造運動と調和的である。こうした楔状の断層の主断層は、新潟から北部フォッサマグナの堆積盆地では盆地縁辺部でよく発達する。基本的には下部寺泊層や七谷層などの間隙水圧が高い泥岩が層理面に沿ってすべり易くなり、主要な逆断層から泥岩中にデタッチメントが形成され、デタッチメントより上位の地層が褶曲する。こうして形成される断層関連褶曲は第四紀後半にも成長してきたシステムであり、活断層を伴う活褶曲となる。

このような厚い堆積物によって特徴づけられる東北～中部日本の日本海側の背弧海盆は、地殻構造の上からも顕著な特徴を有している。それは、この堆積盆地下の地殻の薄化（モホ面の浅化）と下部地殻の高速度化である。下部地殻の高速度化は、日本海形成時期に下部地殻での大量の苦鉄質岩の貫入によって形成されたもので、この地殻改変プロセスは、リフト軸の外側に傾斜した、リフト前の大陸地殻とリフト期の苦鉄質岩の境界を生み出す。この物質境界は、両者が異なるレオロジー特性を有することから境界部に断層が形成されやすく、前述した第三紀の堆積盆地の外側に傾斜する主要な逆断層となる（佐藤, 2014）。長野盆地西縁断層、六日町断層・魚津断層下の主断層などが、このような大規模な楔型の逆断層を形成している。

関東地震はプレート境界で発生した地震であるが、低角度の逆断層がほぼ走向方向にずれ動いている。西南日本で顕著な活断層となっている中央構造線も、かつてのメガスラストであり、大規模な変位を経験してきた。この震源断層は中角度の北傾斜で、横ずれ断層として挙動してきたと推定される（Sato et al., 2015）。

2008 年岩手宮城内陸地震（M7.2）のように、奥羽脊梁山地の縁の断層が、活断層が短い区間しか認識されていないような場所で活動した震源断層もある。奥羽山脈の地形的な連續性と、第四紀に継続した隆起運動、さらにこの山脈沿いのほとんどの山麓部に活断層が位置することを考慮すれば、その山麓に震源断層があると推定することは、妥当であった。活断層の認定には、様々な特徴が検討され、厳密に行われているが、こうした方法のみでは、2008 年岩手宮城内陸地震（M7.2）の震源断層を推定することは困難である。震源断層の推定は、断層周辺の変動地形学的な特徴のみならず、長波長の地形的特徴にも考慮すべきである。また、2003 年宮城県北部地震（M6.4）は、北上低地帯の西縁を限る大規模な中新世の正断層が、逆断層として再活動したものであった。

こうした状況を考慮すると、日本海形成時に活動した断層群は、今まで、その再活動を通じて震源断層として活動しているものが多く、活断層とは異なる基準での断層の抽出についても考慮されるべきであろう。また、活断層のマッピングに比べ震源断層の形状についての検討は、充分になされていない。

プレート内の長期間の歪分配の解明

上盤プレートは、プレート境界からの規制を受けて、長期間にわたり塑性歪が蓄積されていく。プレート境界からの制約は単純なものであり、対応する上盤の長期変形は、プレート境界からの制約と一致する必要がある。こうした歪分配について、充分な資料が得られていない。例えば、フィリピン海プレートの北端部は伊豆衝突帯を構成し、すでにプレート北端部では、断層が形成され、衝突境界も含めて、フィリピン海プレートの移動によって発生する収束運動は、それぞれの震源断層に分配されている。歪分配が不明なままでは、震源断層の欠損も含め、合理的なシステムとして理解することができない。沈み込み帯においては、合理的なシステムとして歪分配を理解するためには、海溝から背弧に及ぶ海域も含めた資料も必要となり、今後、残されている課題は多い。

力学モデルの構築

日本列島周辺の力学的な地震発生評価モデルを作成するためには、プレート形状・リソスフェアーアセノスフェアー境界・モホ面・脆性延性境界・断層の形状・地殻マントルのレオロジーなどの情報が必要になる。兵庫県南部地震以降、Hi-net の展開など地震観測網が整備され、上記の諸元に対して重要なデータを提供している。制御震源のデータとともに、地震波トモグラフィーにより、高精度のモホ深度マップが作成されつつある。リソスフェアー・アセノスフェアー境界は、ジオダイナミクスを明らかにする上で重要な構造であるが、研究が進んでおらず難しい課題である。後述するように、東北太平洋沖地震に伴う地殻変動を用いて、ウェッジマントルの低粘性領域とコールドノーズと呼ばれる高粘性領域の境界は推定することができた。日本海については、広帶域海底地震計による観測を続けている。地震観測は陸上を中心に展開されており、沈み込み帯全体としてのシステムからみて、とくに海域のデータが不足している。

2011年東北太平洋沖地震前後の地殻活動

東北太平洋地震は、M9 の超巨大地震で、中国東北部におよぶ広範な地域で、大規模な地殻変動を発生させた。こうした地殻応答にはマントルの粘性構造も関連しており、地殻変動を利用して粘性構造を明らかにすることが可能になる。三次元粘弾性有限要素法を用いて、日本列島周辺の構造をモデル化し、地殻変動情報をもとに、断層面上での滑り分布を求めた (Hashima et al., in press)。この滑り分布をもとに、構造要素をパラメータとして、粘弾性緩和を含む数値実験を行い、地震後三年後の水平ならびに垂直変動を説明する三次元粘弾性構造を明らかにした (Freed et al., in review)。このモデルでは、粘弾性緩和と同程度の予効変動を与えている。得られた粘性構造は、背弧域の 400 km までの深さに 10-18 の低粘性層と、アウターライズ下の海洋プレートの下半に同様の低粘性領域を置いたモデルである。粘性構造の解明は、長期間の地殻変動や応力状態の推定にとって重要である。このような粘弾性構造をもとに、M9 の東北太平洋沖地震のすべり分布から固着域を推定し、地震前の応力蓄積速度を推定した。過去 100 年間に東北地方で発生した M6 以上の内陸地震の震源は、この計算で求めた水平圧縮領域で生じている。東北太平洋沖地震前の東北日本中部の水平短縮の卓越は、Sagiya (2000) や Suwa et al. (2007) によって記載されており、測地学的ならびに地震活動の特徴は、超巨大地震の発生前に関連する地学現象を示していたことになる。また、粘性緩和を仮定した粘弾性モデルにおける東北地方沖の日本海東縁の震源断層に作用す

るクーロン応力は、今後、数 10 年間に渡る減少を示し、内陸被害地震の発生が抑制される応力環境が予想される。

南海トラフ巨大地震と内陸地震

こうしたプレート境界における巨大地震と内陸地震の発生については、2011 年東北太平洋沖地震のみならず、強い相関が指摘されている。今後、30 年間の内陸地震の発生確率の高精度化を進めるためには、三次元粘弾性モデルを構築し、地殻変動を充たす応力状態を推定し、震源断層面に作用する応力を評価していく必要がある。この方法の妥当性の検討のためには、過去の南海トラフ巨大地震に伴って発生した、その前後の内陸被害地震をいかに復元していくかということが重要な鍵になる。

数値モデルによる長期予測

東北太平洋沖地震は甚大な被害をもたらしたが、同時に沈み込み帯びの粘性構造の解明にとって重要な機会を提供した。これらの粘性構造を用いてプレート境界地震と内陸被害地震を一つのシステムとして、理解するための数値モデルが構築できる可能性が明らかになってきた。今後、必要、データを収集するとともに、数値実験を行ってその妥当性を検討していく予定である。

基本的なモデルの妥当性は過去地震の解明の程度に大きく依存する。現在、メガスラストの地質時代における活動履歴は、津波堆積物などの情報に限られているが、今後、高周波数を用いたメガスラスト先端部のイメージングと、コアリングと組み合わせて、メガスラストの活動履歴の解明が必要である。また、陸上の古地震イベントの決定精度も、メガスラストイベントとの対比が可能な精度を確保することが重要になる。

文献

- Freed, A. et al., Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, EPSL in review.
- Hashima, A. et al., Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku-oki earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, EPSL, in press.
- 加藤直子ほか, 月岡断層を横切る高分解能反射法地震探査, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究(平成 24 年度)成果報告書, 274-178, 2013.
- Sagiya, T. et al., Continuous GPS Array and present-day crustal deformation of Japan, Pure and Appl. Geophys., 157, 2303-2322, 2000.
- Sato, H. et al., Reactivation of an old plate interface as a strike-slip fault in a slip-partitioned system: Median Tectonic Line, SW Japan, *Tectonophysics*, 644-645, 58-67, 2015.
- 佐藤比呂志ほか, 反射法地震探査・余震観測・地殻変動から見た2007年能登半島地震の特徴について, 東京大学地震研究所彙報, 82, 369-379, 2007.
- 佐藤比呂志ほか, 会津-佐渡地殻構造調査, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究(平成 21 年度)成果報告書, 181-230, 2010.
- 佐藤比呂志, 日本列島の生い立ちと長期地殻応力・歪の起源, 地震予知連絡会会報, 92, 431-443, 2014.
- Suwa, Y., et al., Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field, *Jour. Geophys. Res.*, 111, B04402, doi:10.1029/2004JB003203, 2007.

GNSS データから見出される日本列島のひずみ集中帯と
活断層及び内陸地震
西村卓也（京都大学防災研究所）

Strain concentration zone of the Japanese Islands deduced from GNSS
data and its relationship with active faults and inland earthquakes
Takuya Nishimura (DPRI, Kyoto Univ.)

1. はじめに

日本列島では、1994年から国土地理院によりGNSS(GPS)観測が開始され、現在では国土地理院の観測網(GEONET)だけでも全国で約1300か所の観測点が整備されている。顕著な地震活動がない平常時にも地殻変動は進行しており、ひずみ速度分布の詳細がわかっているが、このような観測・研究を通して、日本列島の中でも特に地殻変動の進行速度が大きい「ひずみ集中帯」がいくつか見出されている。本講演では、GNSSデータによって得られた日本列島の地殻変動及びひずみ分布とその解釈、活断層や内陸地震との関係について述べる。

2. GNSS データにもとづく日本列島のひずみ速度分布

2005年4月から2009年12月までの国土地理院、海上保安庁、京大防災研のGNSS観測点の座標値の線形近似により、各観測点でのこの期間の平均的な変位速度を推定し、Shen et al.(1996)の手法を用いて 0.02° グリッド毎のひずみ速度分布を推定した(図1)。大局的なパターンとしては、先行研究(例えば、Sagiya et al., 2000)と同様、四国や伊豆半島周辺、日高山地周辺などの太平洋側で大きく、海洋プレートの沈み込み帯におけるプレート間カップリングで説明される。しかし、内陸や日本海側においても、新潟から神戸にかけての領域(新潟-神戸ひずみ集中帯)や、別府・阿蘇地域、東北地方中軸部、北海道東部中軸部などに代表されるような地域でひずみ速度が大きい領域があり、ひずみ集中帯と言える。プレート境界から遠い内陸部にひずみ集中帯を形成するためには、その場所が極度に軟らかいなどの不均質性か、プレート運動の一部がその地域で解消されているようなひずみ分配(Strain partitioning)を考える必要がある。

3. プレート間カップリングによる弾性変形を除去した西南日本のひずみ分布

GNSS観測によって観測されたひずみは、プレート境界地震などの発生によって解消される弾性ひずみと内陸大地震の発生に係わる弾性ひずみ、断層クリープや活褶曲、中小地震によって生じる非弾性ひずみが含まれる。このうちプレート境界地震に関する弾性ひずみは広域にわたっていると考えられるため、西南日本を対象にその分離と除去を試みた。

ここでは、西南日本を14枚のブロック(マイクロプレート)に分割して、GNSS変位速度のデ

ータから個々のブロックの剛体運動とブロック境界の弾性変形を推定し、南海トラフのプレート間カップリングによる弾性変形のみを観測変位速度から差し引いて、図1と同じ手法で最大剪断歪み速度を推定した（図2）。最大剪断ひずみ速度の大きい場所は、概ね活断層に対応しており、熊本地震で地震活動が活発化した地域も顕著なひずみ集中帯といえる。一方、山陰地方や九州南部など活断層が存在しないとされる場所にもひずみ集中帯は存在する。また、最大剪断歪み速度の大きい場所は、近年の微小地震やM6以上の内陸大地震の多発域とも概ね対応する。

測地学的に計測されるひずみ速度は、非弾性ひずみも含んでおり、将来の大地震を発生させる弾性ひずみをそのまま見ているわけではない。また、GNSSデータが得られるようになってから20年しか経っていないため、ひずみ速度の時間変化についても不明であるという問題点がある。現在、国の地震長期評価には、活断層と地震活動のデータが用いられているが、測地学的地殻変動データについても上記のような欠点はあるものの、活断層と地震活動のデータとは独立の情報を与えるものであり、今後は地殻変動データを組み込んだ長期評価手法の開発が望まれる。

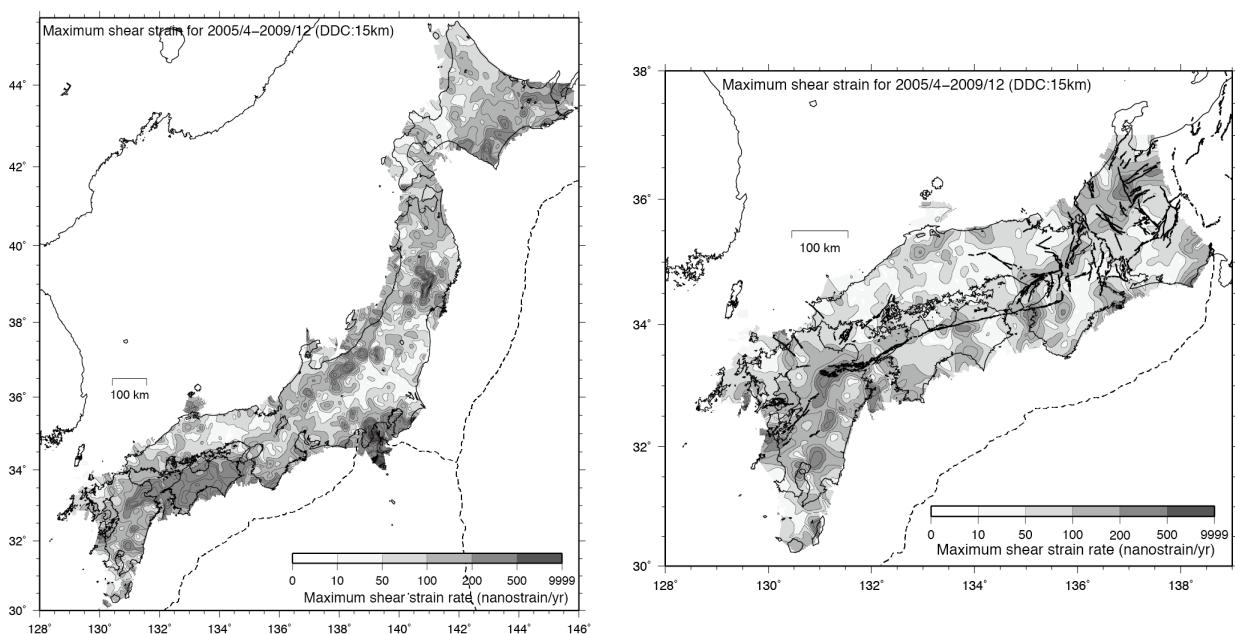


図1（左） GNSSデータから計算した最大剪断ひずみ速度分布

図2（右） 南海トラフ沿いのプレート間カップリングの影響を除去した西南日本の最大剪断ひずみ速度分布

謝辞：GNSS観測データには、国土地理院GEONET及び海上保安庁GPS連続観測データ提供サービス、活断層データには、地震調査研究推進本部の長期評価のデータを用いました。ここに記して感謝いたします。