

- ・実施機関 (代表機関) 名
京都大学防災研究所
- ・研究目的

[研究目的の概要] 地球物理・地質学の知見を総合して、断層への応力集中機構のモデル化および断層の強度低下のメカニズム解明を行うこと、および、地震活動変化のメカニズム解明を行い、これらの知見を長期的な発生予測手法の改善につなげることが本研究の主な目的である。より具体的には以下のとおりである。西南日本の横ずれ型の内陸断層への応力集中機構について、断層直下の下部地殻の不均質構造の実態を解明して、物理モデルを構築する。さらに、1. 不均質構造の水平方向の拡がり、2. 断層両端部の不均質構造の実態、3. 震源断層と地表との間の変形機構、4. アスペリティの実態の解明を進め、物理モデルの高度化を計る。断層の強度低下のメカニズム解明のために、5. 地震発生における流体の役割、6. 「弱い」断層の強度モデルの解明を目指す。これらの知見を内陸大地震のポテンシャル評価につなげるとともに、発生時期の予測に向けて、7. 西南日本の地震活動期、8. 地震活動変化のメカニズム解明を行う。

また、中部地方中北部の活火山の地下構造と地震活動の時間変化の研究については、火山噴火に関する課題であるが、跡津川断層の両端部という共通のフィールドで実施するので、この課題に含めるものとする。これについての目的は、中部地域の焼岳、立山、および白山を対象に、地下構造の時間変化の検出および、精密な地震活動の把握を行い、これらの比較を行うことで火山活動推移予測に資することである。

[研究目的の詳細]

0. 断層直下の下部地殻の不均質構造の実態の解明

跡津川断層周辺における GPS による変位速度場の特徴は、跡津川断層近傍、断層の両側それぞれ幅 30km 程度の領域において、変位速度ベクトルが断層走向(N60° E)にほぼ平行なことである(例えば、Ohzono et al., 2011)。このことは、直感的には、跡津川断層直下の下部地殻において、変形が断層帯に局所化されていることを示していると思われる。一方、跡津川断層周辺の下部地殻の地下構造については、主に断層の北西側、牛首断層との間の幅広い領域に低速度異常が(Nakajima et al., 2010)、断層の南東側に低比抵抗異常が見出されている(Yoshimura et al., 2009)。跡津川断層と牛首断層の間の下部地殻に推定されている低速度異常域が、流体の影響のためにやわらかくなった領域だとすると、それは幅を持った領域であるため、全体的に変形する可能性が考えられる。メカニズム解から推定された最大圧縮応力の方向はこれらの断層の走向から 40~50° なので、その方向に短縮変形するとすると、変形は断層に平行な方向だけではなく、断層に鉛直な方向にも生じるはずである。ところが、GPS による変位速度ベクトルは、2つの断層近傍、特に北西側で断層走向に直交する成分が小さいように見える(Ohzono et al., 2011)。

これらのことから、跡津川断層とその周辺の変形機構に関する 2 次元的な取扱いでは、以下のような可能性が考えられる。

- 1) 下部地殻の低速度異常域および低比抵抗異常域の端に、幅の狭い断層帯が存在し、そこに変形が局所化している。
- 2) 低速度異常域およびあるいは低比抵抗異常域の上端に detachment 断層が存在し、そこでは上部地殻と下部地殻がデカップルしている。断層に鉛直な方向の変形は detachment 断層の端付近の上部地殻のやわらかい部分でまかなわれ、断層に平行な成分は、断層周辺の広い領域でまかなわれる。

これらは跡津川断層周辺で得られた知見に基づくものであるが、下部地殻の不均質構造と断層との位置関係については、他地域においても、不均質構造の端付近に断層が存在すると見なすことができる場合が多く、普遍的特徴である可能性が高い。内陸地震の断層への応力集中過程について様々な可能性が指摘されてきたが、2 次元的な取扱いでは上記の 2 つの可能性に絞られたと考えられ、2 つの仮説の検証を行うことが重要である。一方、濃尾地震断層では 2) の可能性が高いかも知れない。

検証のためには、まず精度と分解能の高い変形速度場を推定することが重要であり、InSAR などを活用して、さらに分解能の高い歪み速度分布を明らかにする。

モホ面直下に活発な地震活動でも無い限り、下部地殻における地震波トモグラフィーの分解能には限界があると思われるが、断層帯が下部地殻全体を切っている場合、モホ面に段差が出来る可能性がある。近畿地方中北部において、レーザー関数によりモホ面に段差がある可能性が指摘され、段差の位置は S 波の発射面の端に位置していると推定された。S 波の反射面が、下部地殻の Weak Zone の上面を反映しているとしたと、不均質構造の端に断層帯が形成された解釈可能である。鳥取県西部地震の余震域(Doi and Nishigami, 2007)や山陰地方の地震帯でも下部地殻の不均質構造の端に地震帯が位置しているように見える(Shiozaki et al., 2006)。これらの不均質構造の推定において、さらに精度や分解能を上げることが重要である。

下部地殻の断層帯に変形が局所化している場合は、ある幅を持った不均質構造の上部がデカップルしている場合に比べて、断層近傍の応力集中の幅が狭くなると考えられるので、断層近傍における応力場を明らかにすることは非常に重要である。長野県西部地域では、断層近傍の幅 1~2km の領域のみに応力集中していることが指摘されており、さらに解析の精度を上げることが重要である。そのためには、広域の応力場を把握する必要がある。温度構造を反映したやや広域の不均質構造と応力集中の関係が九州中部などで指摘されているが、西南日本の広域的な応力場の成因に関しては、まだ不明な点が多い。近畿地方の南北圧縮の弱い横ずれ型から九州の南北引っ張りに変化する原因などはまだ未解明である。地震活動が活発な領域における精力的な観測・解析が重要である。

1. 不均質構造の水平方向の拡がり

モデルを 3 次元的に拡張する場合、断層両端部の不均質構造に関して、跡津川断層と 2007 年能登半島地震との比較が重要である。能登半島地震の震源域は跡津川断層周辺と違ってひずみ速度が非常に小さいことが特徴的である(Sagiya et al., 2000)。断層周辺の不均質構造については、余震域の中央部直下に低速度異常が(Kato et al., 2008)、同じ領域に低比抵抗異常が見出されている(Yoshimura et al., 2008)、不均質構造が余震域に比べて小さいことが特徴である。跡津川の例から推定すると、この下部地殻の不均質構造の端付近に断層帯がある可能性があるが、不均質構造が小さいことは、余震分布がお椀型であることと調和的である(iio et al., 2009)。一方、跡津川断層とその周辺においては、下部地殻内の異常域は大規模なものであり、断層直下だけでなくその両端部直下を含めて Weak Zone となっている(Nakajima et al., 2008; Yoshimura et al., 2009)。さらに、Weak Zone は跡津川断層を超えて新潟神戸歪集中帯の方向に連続していると考えられる。

ここで、上部地殻を無視して下部地殻のみの変形を考えると、想定している時間スケールにおいて Weak Zone 以外の領域が弾性的に振る舞うと仮定すると、Weak Zone が、「対象とする領域」の端から端までつながっていない場合、一度静的な釣り合い状態が達成されるとそれ以上の変形は起こらず、必然的に歪速度がゼロに(非常に小さく)なる。一方、Weak Zone が、対象とする領域の端から端までつながっていると、静的な釣り合い状態は達成されず、定常的に変形が続くと考えられる。上部地殻も考慮すると、断層運動と断層両端部での何らかの変形が起こることにより、長期的にはブロック運動が引き起こされ、短期的にはひずみ(速度)集中帯となると考えられる。つまり、下部地殻の不均質構造が個々の断層を超えて

拡がっているかどうか、ひずみ集中帯が形成されるかどうかを決めている可能性があり、下部地殻の不均質構造の水平方向の拡がりを捉えることが重要な課題となる。

跡津川断層(新潟-神戸歪集中帯)と能登半島地震が両極端の場合であると考えられるが、山陰地方の地震帯は、その中間的な性質を持っている可能性がある。そこでは、地震帯に沿った低速度異常(Nakajima et al., 2007)が見出されているが、ひずみ速度は大きくない。低速度異常の空間分解能をあげたり、地震帯に直交する多数の測線で見出されている低比抵抗異常(Shiozaki et al., 2006)の地震帯に沿った変化を明らかにすることが重要である。

2. 断層両端部の不均質構造の実態

長期的にブロック運動が起こるためには、上部地殻の断層の両端部も変形しなければならない。深部延長の変形だけでなく両端部の変形によっても断層に応力集中が生じると、そこは1回の地震のすべりの領域を限るところであるので、両端部の性質は非常に重要である。しかしながら、変形機構など、その特性の解明が遅れている。

能登半島地震で見られたお椀型の余震の深さ分布は、2000年鳥取県西部地震、2005年福岡県西方沖地震など多くの内陸地震で共通に見られるが、余震域中央部の直下に非常に柔らかい領域があると仮定して説明することが可能である(Iio et al., 2009)。一方、1995年兵庫県南部地震については、余震の深さ分布はお椀型ではなく矩形に見えるが、六甲・淡路断層帯は新潟-神戸歪集中帯に属しており、その断層直下の広い範囲にWeak Zoneが拡がっていると考えていた。しかしながら、典型例として最初に解析した新潟県中越地震も歪集中帯の中で発生した地震であり、観測事実は必ずしも単純ではない。

断層直下のWeak Zoneが広く拡がっている場合にお椀型の余震分布となるためには、これから活動する断層の両端部において、地震前に応力緩和が起こっていると都合がよい。上部地殻が均質であればWeak Zoneの変形による応力集中が断層の深部全体で生じていると考えられるが、両端で応力緩和が起こると、そこでの応力と強度の深さ分布は、Weak Zoneが一部分にしか存在しない場合と同様になるからである。

余震域の端における不均質構造や応力緩和を示唆する知見は近年多数得られている。長野県西部地震について、断層東端部の速度や比抵抗の不均質が断層を区切っている可能性が指摘されているが、西端部は地震活動が無く今後の比抵抗構造調査が重要である。Yukutake et al.(2007)は鳥取県西部地震の断層南端部で地震すべりによる応力変化と同様なP軸の分布を見出したし、島根・鳥取地域では、鳥取県西部地震やそれにより誘発されたM5.5地震の断層の両端部に低速度異常が見出されている。跡津川断層に関しては、東側は飛騨山脈であり、立山など火山が存在する。地殻熱流量が高く地震の下限も浅くなっていると考えられるが、その変形機構など詳細はよく分かっていない。西側は、白山の手前に応力緩和域が有るかもしれないが、その詳細もほとんど分かっていない。兵庫県南部地震については、その南側の延長部でM6クラスの大地震が2013年になって発生したが、どうしてお椀型になっていないか検討が必要である。福岡県西方沖地震については、お椀型の典型例として上げたが、南側の深部で地震活動が起こっている。断層両端部の不均質構造の解明、変形場や応力場の推定が重要である。

もう一つの問題は、強度の深さ分布はそのままにのみ減少するようなメカニズムが存在するかどうかであるが、これについては6の「弱い」断層帯の強度モデルと共通の課題となる。地震発生域の応力緩和については、圧力溶解クリープが可能性として上がられる。これらの課題は、大規模な実験やフィールドワークを必要とするため、他の大型プロジェクトと連携して、その成果を活用する予定である。

3. 震源断層と地表との間の変形機構

内陸地震の長期予測は、現在のところ、活断層の地表への現れに依拠して行われている。したがって、地下の震源断層とその地表への現れとの関係を正しく理解することは非常に重要である。

能登半島地震では、陸上に地表地震断層は現れなかったが、海岸線においては上下変動が見出され、そのパターンは海岸段丘の高度分布と調和的であった。このことから、約12.5万年間に83回、約1500年間隔で同様な地震が発生した可能性も指摘されている(浜田・他, 2007)。この発生間隔は、新潟-神戸歪集中帯に属する六甲・淡路断層帯や有馬高槻断層帯などA級の活断層と同程度であり、地表に痕跡の残らないような活断層にしては、非常に頻繁に大地震を起こしていることになる。

震源断層が地表へ現れるかどうかは、断層への応力集中過程と地表付近の物性に大きく依存すると推定されるが、よくわかっていない。1984年長野県西部地震や鳥取県西部地震、福岡県西方沖地震は、深さ数kmに大すべり域があるにも関わらず、顕著な地表地震断層が現れなかったが、長野県西部地域では、高分解能の地震波トモグラフィーにより、地表近くのVp/Vsの大きな領域では地震がほとんど起こっていないことが明らかになりつつある。問題の解明へ向けて、地表付近の物性等をより定量的・物理的に解明することが重要である。

4. アスペリティの実態

強震動予測においてアスペリティの位置や大きさを推定することは非常に重要であるが、地震発生前にそれを知ることは大変難しい。

アスペリティは、そうでない部分に比べて高速度となっているという結果が多数得られているが(例えば、Okada et al., 2006)、断層のすべり速度依存性が負になるところがアスペリティの候補であるとする、それは断層面上の性質の問題であり、バルクの速度構造とアスペリティの物理的な因果関係はよく分かっていない。

鳥取県西部地震の余震のメカニズム解のインバージョンにより推定された応力分布と地震による応力変化を比較し、アスペリティでは両者が一致しないのに対して、その周辺では調和的である可能性が指摘されている。このことは、アスペリティで強度が大きく、その周辺では逆に強度が小さいことを示唆していると考えられ重要である。これらの解析、特にメカニズム解を用いたインバージョンでは、地震数が多くないと推定結果の精度が上がらないため、応力場の空間分解能を上げるためには大量の精度の良いデータを必要とする。条件の良いフィールドで徹底的な観測研究が必要である。

5. 地震発生における流体の役割

地震の発生は応力と強度の兼ね合いで決まり、断層に加わる応力が一定でも断層の強度が低下すれば地震は起こり得る(例えば、Terakawa et al., 2013)、東北地方太平洋沖地震に関連して、断層や地殻の強度は非常に小さい可能性が指摘されている(Yoshida et al., 2012)。これらは流体が関与していると考えられ、地震発生に関する間隙流体圧の役割の解明が極めて重要であるが、その実体はよく分かっていない。東北地方太平洋沖地震後に内陸で地震活動が誘発されたところが多数あるが、そこでは、地震活動の移動現象が見られることが多い(例えば、Okada et al., 2011)。このことは、誘発地震活動に流体が関与していることを示唆しているが、地震活動の移動以外には、そのことを示す証拠は今のところ得られていない。

地震のメカニズム解の詳細な解析から間隙流体圧を推定する、地震メカニズムトモグラフィー法(Terakawa et al., 2010)が近年開発された。間隙流体圧は時間的に変化すると考えられるので、他の要因との切り分けのために、この手法を進展させ、間隙流体圧の時間変化を三次元的に推定する手法の開発を行うことが重要である。断層強度の時間変化をモニターし、地震破壊の特徴を直接比較することにより、断層強度の時間変化と地震の発生との関係を解明出来る可能性がある。

長野県西部地域でも、地殻流体の実体を解明するため、地震活動や地震波速度構造の時間変化を検出する試みが行われている。2000年以降に浅い地震の数が激減したように、地震活動の時空間変化は顕著であるが、速度構造の時空間変化に関しては、現時点では信頼出来る結果は得られていない。

い、静的な構造に関しては、クラック中の水の量が相対的に少ないと解釈される、 V_p/V_s の小さなどころで地震活動が多い傾向が見られている。流体の効果は、断層の摩擦係数を下げてそこで地震を起りやすくする直接的な効果というよりも、非地震性すべりを起こして周辺に応力集中を発生させる可能性も指摘されている。

内陸で発生する深部低周波地震・微動が上部地殻に与える影響も重要である。沈み込み帯のプレート境界やサンアンドレアス断層においては、深部低周波微動・微動とゆっくりすべりの関係が解明されつつある。内陸においても、2000年鳥取県西部地震に関して、モホ面近傍の低周波地震と上部地殻の地震発生の関連が下部地殻の変形に関連して議論されている(Ohmi et al., 2004)。一方で、内陸において上部地殻で顕著な地震活動がないにもかかわらず、深部低周波地震が発生している事例がある。たとえば近畿地方の中北部で捉えられたS波の反射面の下でも深部低周波地震が発生している。下部地殻におけるWeak Zoneの原因が流体であるという推定があるが、下部地殻における地殻流体の実体と変形過程に及ぼす影響もよく分かっていない。このように内陸においても、地殻流体の存在を反映していると考えられる深部低周波地震・微動の研究は、その浅部の上部地殻における断層運動のポテンシャルを評価する上で重要である。

前項のアスペリティの解明と同様に、これらの解明には、大量の精度の良いデータを必要とするため、条件の良いフィールドで徹底的な観測研究が必要である。

6. 「弱い」断層の強度モデル

東北地方太平洋沖地震に関連して、内陸の地殻において、地震前から強度が小さい可能性が指摘されている(Yoshida et al., 2012)。もしそうであれば、長期間にわたって強度が低いことを意味しており、高間隙流体圧でそれを説明するためには、非常に長期間にわたって高間隙流体圧を維持することが必要になる。深部からの流体の供給が長期間にわたって継続的に行われれば可能であるが、東北地方太平洋沖地震の直後には存在した可能性があるが、一般的には難しいかもしれない。その場合、高間隙流体圧を断層の強度を下げる必要がある。Yamamoto et al.(2001, 2002)は、断層破砕帯では、突起以外の部分を充填している断層物質が、法線応力は支えるがせん断応力は支えないと仮定すると、接触部の面積を小さくすることにより摩擦係数を小さくできることを示した。このような仕組みが内陸の断層で働いていれば、高間隙流体圧を仮定しなくても、摩擦係数を小さくすることが可能である。新たな断層のモデルを構築する必要があると考えられる(飯尾, 2012)。これについては、2の課題と同様に、圧力溶解クリープの解明が重要であり、大規模な実験やフィールドワークを必要とするため、他の大型プロジェクトと連携して、その成果を活用する予定である。

7. 西南日本の地震活動期のメカニズム解明

西南日本では、今後南海トラフの巨大地震が発生し、その前後で内陸の地震活動が活発化するとされている。どこで次の内陸大地震が発生する可能性が高いかを示すことが出来れば、災害軽減に役立つと期待される。過去の地震活動を見ると、昭和東南海・南海地震の前後で西日本内陸各地で地震活動の変化が見られているほか(例えば、Ogata, 2004)、過去の南海地震の50年前から10年後までのM6-7級の内陸被害地震の発生が多いことが知られており(例えば、Hori and Oike, 1999)、次の南海地震でも同様な活発化が起こる可能性は高い。南海トラフと内陸地震活動の相互作用のメカニズムについては、弾性的な静的応力変化の影響(Hori and Oike, 1999)や、粘弾性応答を含めた地殻のレスポンス(例えば、Hyodo and Hirahara, 2004)などのモデルが提唱されているが、これらの研究では、南海トラフにおけるプレート境界滑りや地殻構造について単純なものを用いているため、より現実的なモデルを用いたメカニズムの解明が極めて重要である。

8. 地震活動変化のメカニズム解明

地震活動は、応力や間隙流体圧など、様々な要因に敏感に反応して変化しうる可能性のある重要なパラメーターである。尾形らは一連の研究により(尾形, 2008)、大地震の数年前から地震活動の相対的な静穏化や活発化が起こり、その空間パターンが震源断層あるいはその周辺で地震前に発生したゆっくりすべりによる応力変化(ΔCFS)で説明できることを示した。さらに、GNS S観測データにゆっくりすべりと調和的な基線長の変化が表れていることを述べている。地震活動変化においては、余震系列の時間変化が有益であり、1944年の東南海地震の前に多くの余震系列で相対的静穏化が見られたことや、静穏化が見られた活動から200km以内で大地震が発生する可能性が高いことが報告されている(Ogata, 2004, 2001)。

近年発生したほとんどの内陸大地震について、発生前の地震活動変化が報告されており、一般的に起こる現象である可能性がある。また、GNS S観測データからも地震活動変化と調和的な地殻変動の変化が報告されている。最近、GNSS観測データの詳細な解析(Nishimura et al., 2013)により、プレート境界深部におけるSSEが検出されているが、その手法を改良して、内陸部における大地震前の地殻変動の変化を網羅的に検証することが可能であると考えられる。そして、positiveな結果が得られた場合は、地殻変動と地震活動のジョイント・インバージョンも検討する。また、これらの内陸大地震に関しては、合同観測などにより震源域の詳細な構造や応力場などについての情報が得られているので、これらも合わせて検討することが重要である。

和歌山地域や北摂・丹波地域では、定常的な活発な微小地震活動が続いており、地震活動変化の検出には適したフィールドである。北摂・丹波地域では、兵庫県南部地震の前に静穏化したことも報告されているが、兵庫県南部地震の後は地震活動が活発化した。その後も活発化と静穏化を繰り返しているが、大地震との関係や活動変化の原因はまだよく分かっていない。北摂・丹波地域には、満点システムの微小地震観測網が設置され、現在83点が稼働している。非常に密な観測網と空間的に分布する地震活動を活用して、地震メカニズム解や地下構造を詳細に推定し、地殻変動と合わせて地震活動変化のメカニズムを明らかにすることが重要である。

さらに、これらの検証を進めるとともに、地震活動の異常性をオペレーショナルに捉えられるようなモデル(時空間または非定常E T A Sモデル)とそのソフトウェアを開発し、retrospectiveな実験等を行って、確率予測が可能になるような統計モデルの構築を目指す。

本研究では基盤的な比抵抗構造調査を行い、地殻・マントル上部の空間的構造不均質性を明らかにすることを通して、地震・火山現象の解明に寄与する。これにより、南海トラフ巨大地震の発生場であるフィリピン海スラブ周辺の物性状態の解明、歪み集中帯外・山陰地方における定量的な内陸地震発生モデルの構築に資する地殻不均質構造の解明、同時に、比較的長い期間噴火記録のない第四紀火山の地下物性状態の解明を目指すことを通して、地震・火山噴火による災害の軽減に貢献することを目的とする。

島弧海溝系における地震・火山噴火現象を理解する上で流体の分布状況やその挙動が無視できないと考えられている。本研究で取り上げる岩石の電気比抵抗はその流体の存在に強く影響を受けること、地震波速度構造とは異なる感度依存性を持つことが確認されているので、地震学的な研究に比抵抗研究を加えることで、より正確な深部流体に関する知見が得られることが期待できる。しかしながら、西南日本弧(中国・四国地方)において、大局的な3次元比抵抗構造を議論できるデータはない。そこで本研究計画を立案した。

具体的な研究内容は、比抵抗構造と流体分布状況に関連づけ、次に示す2つの観測研究課題(a), (b)に取り組み、次期研究計画において中国・四国地方で行われる他の関連する地震学的研究等と密に連携することにより、地震・火山噴火による災害の軽減に貢献することである。

(a) 【四国東西方向での比抵抗構造と地殻地震や中央構造線の傾斜形態、深部低周波微動やスロー地震の発生様式、海洋プレート構造等との関連を検討し、流体分布の観点から、フィリピン海スラブ周辺の物性状態及びMPLの深部延長形状を提示するとともに流体の地震活動への関与を明確化する】

(b) 【西南日本の横ずれ型の内陸断層への応力集中機構について、断層直下の物理モデルの構築へ寄与する。さらに、地震空白域としての比較的長い期間噴火記録のない大山火山の地下物性状態を明らかにすることにより長期的な火山現象過程に関する資料を提出する】

超大容量の地震・火山観測データを効率的に観測・処理するシステムの高度化を計ることが本研究の目的である。次世代型稠密観測システム(通称満点システム)が稼働して約5年が経過し、観測・データ処理についての細かなノウハウを蓄積してきた。多数のオフライン点の設置やメンテナンスを効率よく行い、かつ、安定して記録をとり続けるために、使用している機材、メンテナンスやトラブルのログなどの観測点情報を一元的に管理するためのデータベースシステムのプロトタイプを構築した。読み取りに関しては、人間に匹敵するような自動読み取りシステムを開発してきた。本研究では、これまでに得られた知見を総合し、さらなる省力化と効率化を図り、超多点の観測とデータ処理を容易に行うことができるようなシステムを構築する。これにより、超多点の観測および処理解析が容易になり、地震・火山の発生場や発生過程の研究が飛躍的に進展するものと期待される。