

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540463

研究課題名(和文)非火山性深部低周波微動の波動特性を利用したメカニズム解決定と微動発生機構の解明

研究課題名(英文) Determination of focal mechanisms of non-volcanic tremors based on their wavefield properties and elucidation of generation mechanisms of tremors

研究代表者

今西 和俊 (Imanishi, Kazutoshi)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門・研究グループ長

研究者番号：70356517

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では非火山性深部低周波微動の運動形態を明らかにするために、微動のS波振動方向を利用したメカニズム解推定法の開発に取り組んだ。S波振動方向はメカニズム解の情報を含んでいるので、複数観測点の振動方向から解を拘束することが可能となる。実際の適用に当たってはS波異方性の補正が不可欠であることがわかったため、その補正方法も確立した。紀伊半島北東部の微動活動に適用した結果、プレート境界面に調和的なメカニズム解が多く推定された。また、横ずれ成分を多く持つ微動が特定の場所で起こっていることも明らかになるなど、プレート境界の詳細な応力場やプレート形状を推定する重要な解析ツールを確立することができた。

研究成果の概要(英文)：We proposed a method to determine focal mechanisms of non-volcanic tremors using S-wave polarization data. Because the shear-wave splitting analysis indicated the need of the correction for splitting effects, we also developed a procedure to recover the source S-wave polarization angle. We applied the present method to a tremor sequence at Kii Peninsula, southwest Japan and confirmed its applicability. Most estimated focal mechanism solutions show low-angle thrust faults, which are basically consistent with the geometry of the plate interface. We also found some events that contain strike-slip components at a specific location, providing us an important tool for inferring detailed stress fields around the plate boundary as well as the geometry of plate interface.

研究分野：地震学

キーワード：非火山性深部低周波微動 振動特性 メカニズム解 臨時地震観測 西南日本

### 1. 研究開始当初の背景

近年急速に整備されてきた地震・地殻変動観測網により、地下で発生する現象に対する検知能力は格段に向上してきた。その結果、2000年頃を境に世界各地の沈み込み帯において数日から数週間かけてゆっくりとずれ動く「ゆっくり地震」が地殻変動観測により検出されるようになってきた。このゆっくり地震は海溝型巨大地震発生域よりも深部の脆性—塑性遷移領域(不安定すべりと安定すべりの中間的性質を有する領域)で周期的に発生しており、その発生機構を解明することは、プレートの沈み込み過程を理解するうえで重要であるだけでなく、巨大地震発生の予測においても重要な意味を持つ。Obara (2002) は西南日本の沈み込み帯において普通の地震よりも低周波で数時間から数週間もの長期間にわたって継続する微弱な振動が高感度地震計に記録されていることを発見した。これは非火山性深部低周波微動(以後、単に微動)と呼ばれており、その後、世界各地の沈み込み帯やサンアンドレアス断層でも発生していることが明らかになった。さらに、一部の地域を除き、微動とゆっくり地震はほぼ同じ場所で同時に発生していることも突き止められた。背後にある物理メカニズムは未だ議論の段階であるが、微動はゆっくり地震と密接に関係した現象であることは間違いなく、地震観測からも脆性—塑性遷移領域におけるゆっくり現象を調べる道が開けたわけである。

微動は P、S 波が不明瞭で断続的に継続する微弱な振動であるため、通常の震源決定法が適用できない。しかし、いち早くエンベロープ相関法(Obara, 2002)(観測点間の地震波振幅形状の類似性から時刻差を求める方法)を初めとした微動に有効な震源決定法が開発されたことにより、発生位置や活動様式についての理解が深まってきた。一方、ゆっくり地震との関係や微動そのものの発生機構に関しては未だに不明な部分が多い。精度の高い震源決定結果に基づき微動はプレート境界面上でのせん断すべりであろうとの推定もなされているが、これは間接的な推察であり、直接的な証拠を得るためにはどのような運動で発生しているのかを表すメカニズム解を個々の微動に対して決定する必要がある。しかし、震源決定と同様、メカニズム解も一般的な方法をそのまま適用できない問題点がある。

これまで微動のメカニズム解を決めた研究は 1 例だけある<sup>注1</sup>。例えば Ide et al. (2007) は多数の微動波形のスタック処理により SN 比を上げ、さらに普通の地震の波形の特徴と

(注 1) 本課題申請時は微動のメカニズム解の推定事例は Ide et al. (2007) の 1 例だけであったが、現在では Ide et al. (2007) のように波形スタックによるアプローチにより北米カスケード沈み込み帯において決定事例がある。

の比較を丹念に行うことで、四国西部で発生した微動 1 個のメカニズム解を推定することに成功した。推定結果は低角逆断層型であり、プレート境界面上におけるせん断すべりという結果を支持するものであった。しかし、微動活動は時空間的発生パターンに地域的特徴があることが知られており、微動の発生機構の解明のためには、微動活動全域に渡ってメカニズム解の特徴を調べることが不可欠である。Ide et al. (2007) のアプローチは巧妙であるが、解析には非常に手間が掛かり多くの微動に適用することは現実的とは言えない。簡便で有効な微動のメカニズム解推定法の開発が必要である。

### 2. 研究の目的

研究代表者は 2009 年頃から産業技術総合研究所(産総研)の鉛直地震計アレイ(Imanishi et al., 2011)を用いて微動の波動特性を調べていた。鉛直アレイの波形相関解析の結果によると、上下動成分の記録には P 波の影響が含まれているが、水平動成分の記録はほとんどが S 波で構成されているとみなして問題ないことがわかった。従って、水平 2 成分記録を使えば P 波の混入を気にすることなく S 波の振動方向を忠実に求めることができることになる。特に S 波の振動方向はメカニズム解の情報を含んでいることから(P 波の振動方向は波の進行方向を向き、メカニズム解の情報は含んでいない)、微動のメカニズム解推定に利用できるのではないかと考えた。実際に振動方向を調べてみると、微動の信号が来ている時間帯になると振動方向のばらつきが小さくなるとともに直線性(実体波であることを示すパラメータ)も高くなり、SN 比の良くない信号であっても意外に安定した結果が得られることがわかった。周辺の観測点においても同様に振動方向の時系列を求めれば、グリッドサーチにより最適なメカニズム解を連続的に推定することができることになる。

このように、複数観測点の微動の波動特性(S 波の振動方向)を使うことで、連続的に微動のメカニズム解を決定できる道が開けた。しかし同時に、メカニズム解を一意に決定するためには定常観測点の配置・密度は必ずしも十分ではないことも予察的な解析により明らかになった。定常観測点を補完する臨時的な地震観測を行いつつ微動のメカニズム解推定法を確立し、微動の発生機構を解明することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 紀伊半島での臨時観測の立ち上げ

日本には世界に誇る稠密な地震観測網があるが、それでも観測点間隔は平均して 20km 程度である。予備的な数値実験を行ったところ、S 波の振動方向からメカニズム解を一意に決定するためには、観測点間隔を少なくとも 10km 程度まで狭めること、活動域

の直上にできるだけ観測点を配置させることが必要であることがわかった。本研究では臨時地震観測は紀伊半島北東部の三重県松阪市および津市周辺で行うことにした。ここは紀伊半島でも特に微動活動が活発な地域であることに加えて、産総研の鉛直アレイ観測点も充実しており、本研究の目的に適している。また、事前の予備調査によりこの地域一帯はノイズレベルが低く、微弱なシグナルである微動を研究する上で適した場所であることもわかっている。地震計（高感度地震計）は1m程の穴に埋設し、できるだけ雨や風などによるノイズを避ける工夫をする。データは現地収録とする。設置作業を半年程度で終われば、初年度に最低1回は微動活動を全観測点で記録することが期待できる。この臨時観測データに定常観測データを加えることによって微動のメカニズム解決定を実施する。

#### (2) 定常地震観測データの解析

##### 微動の震源カタログの作成

産総研では定常地震観測網のデータにエンベロープ相関法を適応して微動の震源をリアルタイムで自動決定している。決定された震源の中には誤決定されているものも含まれるため、目視による識別を行い、本研究で使用する微動カタログを整備する。

##### S波の振動方向の決定

臨時観測データの取得後すぐにメカニズム解決定に移行できるように、の結果に基づき、微動活動が観測された時間帯について、S波の振動方向をあらかじめ決定しておく。

##### 通常地震を用いた推定結果の比較

振動方向は地下構造の影響を受けて理論値からずれてしまう場合もあり得る。そこで、気象庁等でメカニズム解が報告されている通常地震に本手法を適用し、推定結果を比較することで、問題点を洗い出す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 研究の主な成果

臨時観測点は合計4カ所に設置した。研究期間中に観測網直下の微動活動を合計7回捉えることができた。可能な限りノイズの少ない場所を選んだことにより、データの質は良好であった。これにより、本研究の遂行に不可欠なデータセットを得ることができた。

微動の信号はSN比が良くないため、一般的には振動方向の推定は困難と思われる。しかし、微動はその発生場所を急には変えないで連続的に波を出し続けているという性質があるので、振動方向の推定には通常地震よりも長い時間長データ（本研究では1分を採用）を利用できる。これは振動方向のスタック処理を行っていることとなるため、結果として安定した推定値を得られることがわかった。まさに微動の性質を有効に利用した解析方法である。

通常地震のS波振動方向を使ってメカニズ

ム解推定を行ったところ、正しい結果が得られなかった。色々検討した結果、S波振動方向からS波異方性の影響を除去しないと、正しい結果が得られないことがわかった。そこで本研究では、震源放射に関係したS波の振動方向を正しく求めるために、微動波形から異方性パラメータを推定し、そのパラメータを用いて異方性の影響を補正する手法を確立させた。

複数観測点のS波振動方向（S波異方性の影響の補正後）を用いて、グリッドサーチで微動のメカニズム解を推定する方法を確立させた。観測条件の一番良かった2013年4月の活動に適用したところ、北西側が低角で南東側が高角の節面を持つ解が多く決定された。振動方向には180度の曖昧性があるためP軸とT軸を拘束できないが、周辺で起こっている超低周波地震の結果（Ito et al., 2007）等も考慮し、北西傾斜の低角逆断層型と見なすのが妥当であると判断した。プレート境界モデルと比較したところ、プレート形状に調和的な走向と傾斜角を持つことがわかり、微動はプレート境界面におけるせん断すべりであるという先行研究を支持する結果となった。

一方、推定誤差を考慮しても横ずれ成分を多く持つ微動が特定の場所で起こっていることも明らかになった。この場所はプレート形状が少し屈曲している場所に対応しているようであり、局所的な応力擾乱の影響を受けている可能性が示唆された。

S波異方性解析により推定されたLSPD（早いS波の振動方向）はプレートの沈み込み方向にほぼ直交するものと平行なものの2パターンが卓越しており、それぞれ明瞭な空間分布を示すことがわかった。もしLSPDが $S_{Hmax}$ （最大水平圧縮方位）を反映しているとする、LSPDの空間パターンからプレート境界の固着率を議論できる可能性がある。特に微動は一旦活動するとしばらく継続して発生するので、通常地震よりも短時間に多くの異方性解析の結果が得られる利点がある。また、微動の活動は定期的に発生することから、固着率の時間変化の検出にも有効な手段になる可能性がある。一方、DT（早いS波と遅いS波の時間差）には明瞭な空間分布は認められなかったが、どの観測点でも0.1秒ほどあり、震源放射に関係した振動方向を求めるためには、異方性の補正が不可欠であることが改めて示された。

##### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

これまでの微動に関する研究は、多くが微動の震源データに基づくものであった。本研究では、そこに新たにメカニズム解の情報を加えて微動の発生機構を解明する道筋をつけたところに重要な意義がある。特に本研究

で提案した手法は、先行研究のように同じ場所が発生した微動データを数多くスタックする必要は無く、より現実的で適用範囲が広い利点がある。本手法は今後、世界中の様々な地域の微動活動に適用されることが期待される。

### (3) 今後の展望

本研究では手法開発に重きを置き、紀伊半島の一部の微動活動に適用するとともに、手法の有効性を示した。今後は西南日本全体の微動活動に適用し、時間的・空間的なメカニズム解分布を明らかにしていく予定である。これらの結果から、プレート境界における応力場の詳細な時空間分布の推定や精密なプレート形状の提案に繋がることを期待でき、さらに巨大地震発生プロセスのモデル化への寄与が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

Imanishi, K., T. Uchide, and N. Takeda, Determination of focal mechanisms of non-volcanic tremors based on S-wave polarization data corrected for the effects of anisotropy, American Geophysical Union 2014 Fall meeting, 2014.12.19, San Francisco (USA).

今西和俊・内出崇彦・武田直人, S波の振動方向を用いた深部低周波微動の発震機構解推定 - S波プリッティングの補正 -, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, 2014年4月30日, パシフィコ横浜(横浜).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今西 和俊 (IMANISHI, Kazutoshi)

産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門・研究グループ長

研究者番号: 70356517