

### 1.3. 短期的スロースリップ・深部低周波微動

小原 一成 (独立行政法人防災科学技術研究所)

#### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震・阪神淡路大震災を契機として発足した地震調査研究推進本部によって、地震に関する基盤的調査観測計画が策定され、その計画に基づいて国土地理院ではGPS観測網GEONET、防災科学技術研究所(以下、防災科研という)では高感度地震観測網Hi-net、広帯域地震観測網F-net、基盤強震観測網KiK-net等の基盤的地震観測網の整備を進めてきた<sup>1)</sup>。10年前は、これらの新たな観測網が概成しつつある段階であったが<sup>2)</sup>、その後の10年間で、これらの観測網から生成される大量の高品質データの蓄積に基づき、検知能力と観測精度が飛躍的に向上するとともに、様々な地震現象が発見され、地震調査研究は目覚ましい発展を遂げている。その中で最も顕著なものひとつとして、深部低周波微動・短期的スロースリップの発見が挙げられる。本稿では、これらの現象の発見の経緯及び現象の特徴について述べる。

#### 2. 現象の発見と主な特徴

##### 2.1 深部低周波微動発見の経緯

深部低周波微動とは、西南日本のフィリピン海プレートの沈み込み境界付近において発生する、通常の地震よりも非常に長く継続する微弱な振動現象であり、同規模の通常の地震の波形に比べて卓越周波数が低いという特徴を有する。これは、火山の存在していない地域で発生することから、非火山性微動(Non volcanic tremor)とも呼ばれる。この現象を「微動」と捉え、その全体像を明らかにし、最初に論文公表したのはObara(2002)<sup>3)</sup>であるが、その微動の一部を構成する「低周波地震」が、火山以外の場所で発生していることを初めて報告したのは、西出・他(2000)<sup>4)</sup>である。低周波地震とは、同程度の振幅を示す通常の地震に比べて低周波成分に卓越する地震のことであり、以前から火山周辺のモホ面近傍に発生していることが知られていた<sup>5) 6)</sup>。

一方、1995年に制定された地震防災対策特別措置法に基づき、防災科研や大学等各機関の高感度地震観測データが気象庁に一元化されたことに伴い、微小地震に対する検知能力は飛躍的に向上した。その結果として、火山近傍に発生する低周波地震と同様の地震が、火山から離れた愛知・三重県内において、検出されたはじめてのものである。気象庁では、通常の地震とは明らかに異なり低周波成分に卓越するこれらの地震について、「低周波地震」というフラグを付与して一元化カタログに掲載することとした<sup>4)</sup>。

その後、防災科研による高感度地震観測網Hi-netの整備が全国的に進み<sup>7)</sup>、順次、気象庁の一元化処理に加えられてさらに微小地震に対する検知能力が向上し、全国的な「低周波地震」の発生状況が明らかになってきた。その結果、火山から離れた場所に発生する低周波地震は、愛知・三重県内だけではなく、紀伊半島南部から四国全域に至るまで、帯状に発

生していることが明らかにされた<sup>8) 9)</sup>。それ以外に、2000年鳥取県西部地震震源域などの活断層深部にも、深部低周波地震の存在が確認されている<sup>10) 11)</sup>。

一方、防災科研では、高感度地震観測網Hi-netの整備・運用業務の一環として、全観測点における連続波形モニタリングの可視化を2000年から開始し、その直後から、人為的雑微動にも似た微弱振動が、西南日本の複数観測点で同時に観測されることを把握した。この振動は、火山近傍の深部低周波地震と同様の周波数特性を有するが、P波やS波などの明瞭な位相を伴わず、しかも非常に長期間継続するため、地震というよりも微動として認識された。Obara(2002)<sup>3)</sup>は、この微動の発生源をエンベロープ相関法(後述)にて決定し、微動源がフィリピン海プレートの等深線に平行に、長野県南部から豊後水道に至る全長約600kmの範囲に分布していることを明らかにした<sup>12)</sup>。

##### 2.2 深部低周波微動の特徴と震源決定

深部低周波微動の活動継続時間は、数時間から数週間に及び、その中で消長を繰り返す。微動の振幅は数100nm/sで、雑微動レベルの高い観測点では検知が困難である。つまり、Hi-netボアホール観測の低ノイズ環境が、この微振動現象を検出する上で大変効果的であったことを示すものである。微動の周波数特性は単色的ではなく1.5~5Hzの幅を有するランダム波群(図1)であるが、時には約2Hzに卓越する孤立的位相が含まれる。この位相をS波として検出することで震源決定可能な場合があり、上述したように気象庁では、これを「低周波地震」として一元化カタログに掲載している。

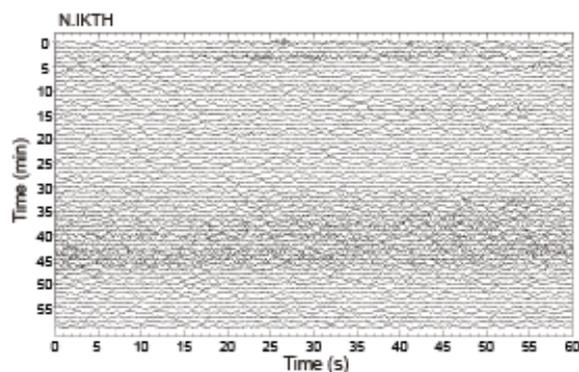


図1 深部低周波微動を含む1時間分の連続波形記録。

しかし、このような検出可能な位相が出現する頻度は少なく、深部低周波微動のほとんどについて通常の震源決定手法を適用することは非常に困難である。そもそも、微動の振幅は小さく、その発生を認識すること自体困難であったが、Obara(2002)<sup>3)</sup>は、エンベロープ(RMS:二乗振幅平方根)に変換することで、隣接観測点の波形を長時間にわたって同時に比較することを可能とし(図2)、微動活動の全体像が把握

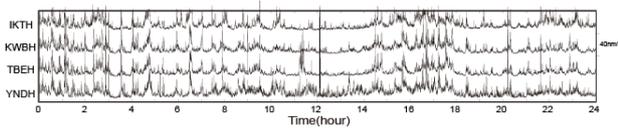


図2 四国西部における24時間のエンベロープ波形記録.

しやすくなることを示した. さらに, エンベロープ波形が隣接観測点で相似である性質を利用し, 個々の位相ではなくエンベロープ形状の相関処理から微動源を推定する, エンベロープ相関法と呼ばれる手法を開発した. つまり, 2 観測点におけるエンベロープ波形の相互相関を計算し, 相関係数が高い場合にその時間差を求め, 複数の観測点ペアで求められた時間差から, 微動の震源決定を行うものである. この手法の利点は, 位相の検出が困難でも微動源を推定し, しかも連続的処理を可能とすることにあるが, 相関処理を行う時間窓内では単一微動源を仮定するため, 複数個所で同時に微動が発生する場合には対応しない. また, エンベロープの時間差は, 微動のS波エネルギーの伝播時間の違いに相当し, S波走時のみで震源決定を行うことになるため, 深さ方向に誤差楕円が伸びる傾向にある. しかし, 微動活動時系列の全体概要や, おおよその位置を自動的に把握するには大変有効である. エンベロープ相関法によって誤差1km以内に震源決定された微動源分布を図3に示す.

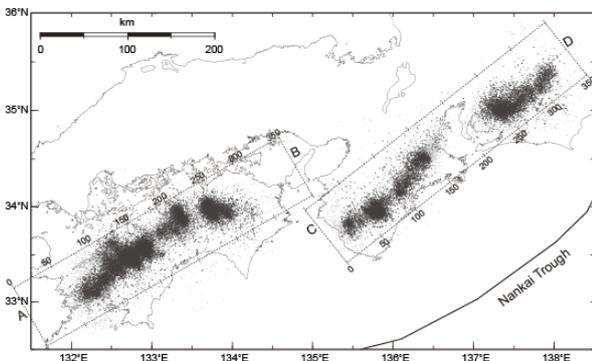


図3 深部低周波微動の震央分布 (2001年から2007年). 微動源はエンベロープ相関法で推定されたもので, 黒色の点は誤差0.5km以内, 灰色の点は誤差1km以内のものを示す. 矩形AB, 及びCDは, 図9の時空間分布の範囲を表す.

深部低周波微動は, 長野県南部から豊後水道に至る全長約600kmの帯状領域に分布し, その場所は巨大地震発生域より背弧側の, 沈み込むフィリピン海プレート境界の等深線30km付近に相当する. また, 帯状領域に沿って発生頻度は必ずしも一様ではなく, 伊勢湾や紀伊水道では不活発であるのに対して, 四国西部や紀伊半島北東部では非常に活発であり, その時空間的特徴から, それぞれ固有の周期性を示すセグメントに分けられる.

エンベロープ相関法による微動源の深さのばらつきは大き

いが, 深部低周波微動のうち気象庁一元化カタログ中に低周波地震として掲載されるものは, 微動の中で震源決定しやすいものを抽出しているため, 震源分布はある程度集中する. 例えば, 四国西部ではフィリピン海プレート内に発生する通常の地震活動より約10km浅い位置に微動源が分布し, それらと平行に背弧側に向かって深くなる (図4). この微動の分布は, 海域における反射法探査から推定されたフィリピン海プレート境界<sup>13)</sup>とも調和的であり, 微動がプレート境界で発生していることを示す. Shelly et al. (2006)<sup>14)</sup>は, 気象庁の

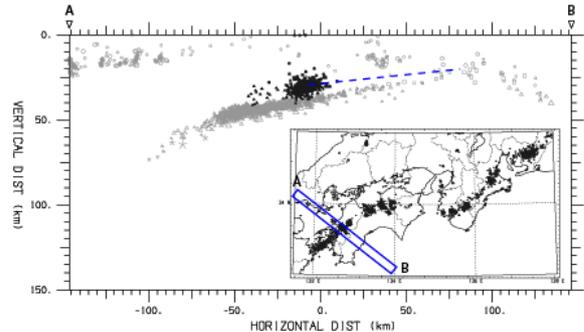


図4 気象庁一元化カタログに基づく深部低周波微動 (低周波地震) の震央分布及び四国西部における深さ断面図 (2001年から2004年). 黒色の点は低周波微動 (地震), 灰色の点は通常の地震を表す.

カタログに従って Hi-net 波形データの相関解析から高精度微動源決定を行い, 微動が薄い層の中に分布することを明らかにした. Ide et al. (2007)<sup>15)</sup>は, この波形相関処理で用いられた微動波形を足し合わせることで SN 比を高めて震源機構解を求め, フィリピン海プレートの沈み込みと調和的な低角逆断層の解を得ることに成功し, 深部低周波微動がプレート境界における地震現象であることを初めて直接的に示した.

### 2.3 短期的スロースリップイベント

深部低周波微動は帯状領域の中で時空間的に集中して発生するが, この微動活動に同期して地殻変動が生じていることが, Hi-net に併設されている高感度加速度計 (傾斜計) で明らかにされた<sup>16)</sup>. 微動が西南日本で最初に発見された当時<sup>3)</sup>, フィリピン海プレートと上盤との境界で発生するスロースリップが豊後水道や東海地方で検出されていた<sup>17) 18)</sup>が, 微動とこれらのスロースリップとの関係は明らかではなかった. 一方, 北米大陸カスケード地方では, ファン・デ・フーカプレートの沈み込みに伴って, 定期的には東向きの変位が観測されるが, それとは逆向きの動きを示すスロースリップイベントがGPSで検出され, そのスリップ源は時間とともに移動することが示された<sup>19)</sup>. さらに, このスロースリップイベントは13~16ヶ月周期で繰り返し発生していることも判明した<sup>20)</sup>. プレート形状の走向に沿って1日10km程度で移動する性質は, 後述する西南日本の深部低周波微動の特徴と似ていることから, カスケード地方において地震記録を見直したところ, 日本と同様に, 通常の地震に比べ低周波に卓越する地震性の微動がスロースリップと同期して発生していたこと

が明らかになったのである<sup>21)</sup>。

以上の結果をもとに、四国西部における Hi-net 観測点で得られた傾斜記録から、Baytap-G<sup>22)</sup> を用いて潮汐成分を除去して詳細に観察したところ、顕著な微動活動に同期して、微動源近傍の日吉観測点 (HIYH) でステップ的な傾斜変化が検出された (図 5)。このような、微動と傾斜変化の同期現象は、2001~2002 年の 2 年間で 4 回、ほぼ 6 ヶ月間隔で観測されている。これらの傾斜変化は 1 週間程度の時定数を有する (図 6)。微動活動については、微動源が移動する特徴を有し 2001 年 1 月及び 2002 年 2 月の活動では北東から南西へ、2001 年 8 月と 2002 年 8 月には南西から北東へ移動した。傾斜変化のパターンも微動の移動方向と密接に関連し、2001 年 1 月及び 2002 年 2 月では、最初は南下がりでありその後南東下がりとなるのに対して、2001 年 8 月と 2002 年 8 月には逆に、南東下がりから南下がりへと変化した。以上の観測事実は、微動の移動に伴って、地殻変動源も移動することを示している。このような傾斜変化は微動源近傍の複数の観測点で捉えられており、微動源の移動を考慮して時期を分けて、遺伝的アルゴリズムを用いたインバージョンによって地殻変動源としての断

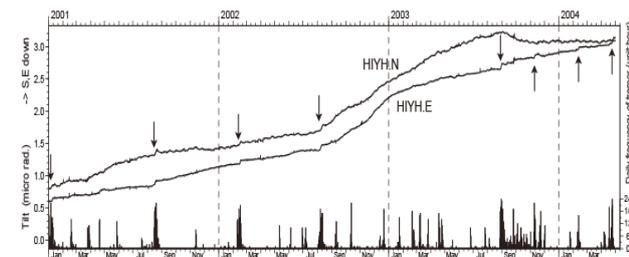


図 5 四国西部における深部低周波微動活動と愛媛県日吉観測点 (HIYH) の傾斜変化。2001 年から 3 年半について示す。下段の微動活動時系列は 1 時間単位とした 1 日毎の微動発生状況である。微動活動に対応した傾斜変化を矢印で示す。

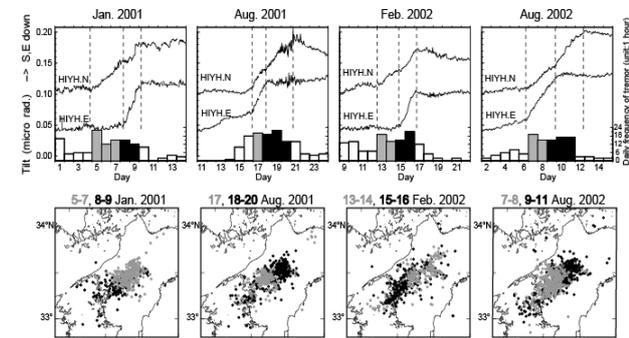


図 6 (上) 深部低周波微動発生時における傾斜変化と微動活動度。横軸は 2 週間。破線は傾斜ベクトルの変化した時間を示す。灰色と黒色は、活動の前半と後半を表す。(下) 微動源分布。灰色と黒色は、活動の前半と後半を表す。

層パラメタを推定したところ、フィリピン海プレート境界における逆断層メカニズム解を有するスロースリップイベントで、さらに微動源とほぼ一致することが示された (図 7)<sup>16)</sup> <sup>23)</sup> <sup>24)</sup> <sup>25)</sup>。

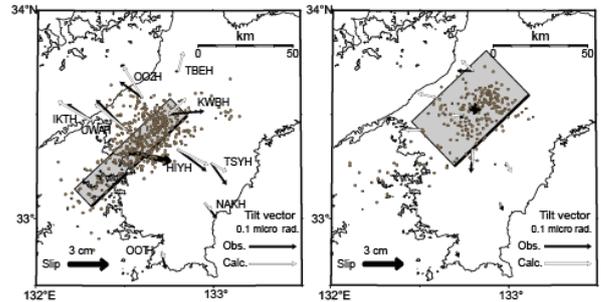


図 7 2002 年 8 月の短期的スロースリップイベント断層モデル。左が前半、右が後半の期間で推定した結果であり、黒矢印と白矢印はそれぞれ傾斜ベクトルの観測値及びモデルから計算される理論値である。

## 2.4 深部超低周波地震

深部低周波微動活動が特に活発化する際に、やや長周期の波動を放出するスロー地震が、Ito et al. (2007)<sup>26)</sup> によって検出された。このスロー地震は「深部超低周波地震」と呼ばれ、 $M_w$  3.0~3.5 で、その波動は周期約 20 秒の radial 成分に卓越する (図 8)。この周期帯では、脈動によるノイズ振幅が非常に大きく、有意なシグナルの検出が大変困難であったが、Tsuruoka et al. (2008)<sup>27)</sup> によって開発された Grid-MT を採用し、格子状に配置した数多くの仮想震源と発震機構解を基に理論波形を計算し、高感度地震観測網 Hi-net に併設されている高感度加速度計や広帯域地震観測網 F-net の観測波形と照合することによって、その検出及び震源と発震機構解の推定が可能となった。震源位置は、深部低周波微動の活動域にほぼ一致し、発震機構解は逆断層型で、断層面の傾きやその深さがプレート境界とほぼ一致することから、この地震も深部低周波微動と同様、プレート境界現象であると判断される。最近、Ide et al. (2008)<sup>28)</sup> は卓越周期約 80 秒という、さらに低周波の地震の存在を指摘した。

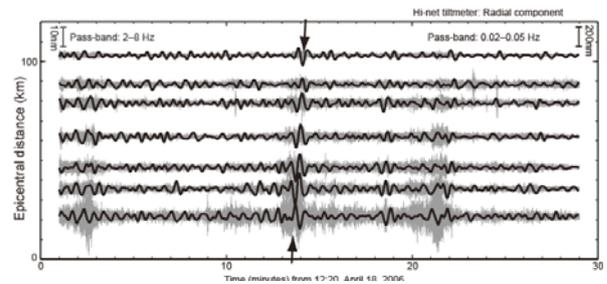


図 8 深部超低周波地震波形例。

### 3. 深部スロー地震群の活動の特徴

巨大地震震源域深部の遷移領域で発生する以上の3種類のスロー地震は、いずれもプレート境界を震源とし、低角逆断層型のメカニズム解を示すことから、時定数の異なるプレート間すべり現象であると考えられる。これらのスロー地震については、通常の地震とは異なるスケリング則に従うモデルが、Ide et al (2008)<sup>29)</sup>によって提唱されているが、現象間の因果関係はまだ解明されていない。しかし、現象発生の同相性を考慮すると、同一の、あるいは非常に強い相互作用の元で発生する現象であると考えられる。いずれも、観測網が稠密に展開されてようやく認識されたものであるが、現象の検出は現時点でも容易ではない。

短期的スロースリップイベントによる地殻変動は、北米カスケード地方ではGPSで検出可能であるが、西南日本ではイベントの規模が小さく、GPSでは明瞭には検出されていない。ボアホール傾斜計や歪計は感度が高く、西南日本の短期的スロースリップイベントはこれらのセンサーで検出されているが、一方では降雨や気圧変化などの影響を受けやすく、ノイズのために現象の発生を認識できない場合もある。深部スロー地震群の中では深部低周波微動が最も検出しやすく、また移動現象などを捉えやすいため、以下では主に微動活動に基づいて深部スロー地震活動の特徴を示す<sup>30) 31)</sup>。

#### 3.1 周期性とセグメント構造

深部低周波微動活動は、定常的に発生することはほとんど無く、時空間的に集中しエピソード的に発生する(図9)。それぞれのエピソードは、発生する地域によって活動範囲が限定されており、その活動域の広がりやそれぞれの地域における活動の周期性を考慮すると、固有の活動周期を有するいくつかのセグメント(東海地域、紀伊半島北東部、紀伊半島中部、紀伊半島南西部、四国東部、四国中部、四国西部・豊後水道)に領域分けされる。四国西部・豊後水道域では、およそ6ヶ月周期で微動活動が発生し、同時に短期的スロースリップイベントによる傾斜変化が検出される。紀伊半島北東部でも、微動活動の再来周期は約6ヶ月で、短期的スロースリップイベントが傾斜変化として検出される場合が多い。これらのセグメントは長さ約100kmに及ぶのに対して、四国東部や中部では50km以下であり、微動活動の再来周期は約3

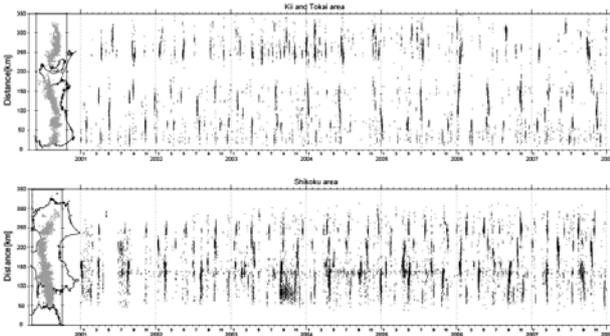


図9 深部低周波微動の時空間分布図。

ヶ月と短く、傾斜変化も検出されない場合も多い。このことは、活動の規模とセグメント長が関係していることを示唆する。

#### 3.2 移動性

周期的に発生する深部低周波微動は、それぞれの活動期間中にセグメント内を移動する性質を有する。移動の開始点や方向性、移動速度には必ずしも固有の特徴が存在するわけではないが、移動速度は、平均的には1日約10kmである。また、移動の方向性については、セグメント毎に若干の傾向性を有する<sup>32)</sup>。四国西部で発生した、短期的スロースリップイベントを伴う主な微動エピソードについて、微動の時空間分布と傾斜変化を比べてみると(図10)、これらの主な微動活動の活発化は傾斜変化の開始とほぼ同時で、移動する微動活動の先端は常にシャープであり、その背後では微動活動がしばらく継続する傾向がある<sup>30)</sup>。

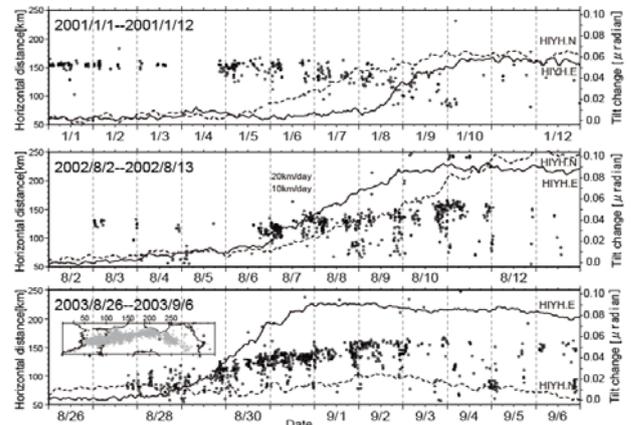


図10 四国西部における深部低周波微動の時空間分布拡大図と愛媛県日吉観測点(HIYH)の傾斜変化。実線がEW成分、破線がNS成分を表す。

#### 3.3 トリガリング

微動は、他の地震にトリガーされて発生する場合がある(図11)<sup>33) 34)</sup>。2004年のスマトラ地震では、表面波による振幅変化に応じて深部低周波微動が20秒間隔で発生した<sup>35)</sup>。また、2003年のアラスカ・デナリ地震では、カスケード地方やサンアンドレアス断層でも深部低周波微動のトリガリングが報告されている<sup>36) 37)</sup>。このようなトリガリング現象は遠地震によってのみではなく、近地地震についても知られており<sup>34)</sup>、トリガーされた微動はすぐに活動が沈静化する場合が多いが、顕著な短期的スロースリップイベントを伴う微動活動に発展することもある。また、数日間以上継続する活発な微動エピソードでは、12時間あるいは24時間周期で活動のピークが見られることがある。これは地球潮汐の影響によるものと考えられ<sup>38) 39)</sup>、微動発生領域のわずかな応力変化に対しても非常に敏感に作用することを示している。

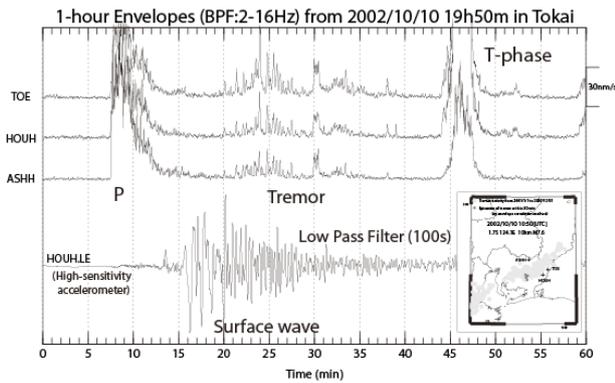


図 11 遠地震によってトリガーされた深部低周波微動と微動源分布。

#### 4. 地域ごとの特徴

##### 4.1 四国東部・中部

四国では、大別すると東部、中部、西部・豊後水道の活動域に分けられる。そのうち、中部と東部の間には明瞭なギャップが存在する。東部では約3ヶ月毎に微動活動が発生し、そのエピソードの半数程度には、微動活動に同期して1つの観測点で2~3日間の時定数を有する傾斜変化が検出されている。しかし、複数観測点で同時に傾斜変化が検出され、断層パラメータが推定された短期的スロースリップイベントは、2001年のモニタリング開始後2008年末までの期間では、2006年11月<sup>40)</sup>、2008年2月<sup>41)</sup>、2008年10月<sup>42)</sup>の3回のみである。中部では、東部同様に約3ヶ月周期で微動活動が発生するが、ほとんどの場合東部の活動とは一致しない。また、中部での微動活動には、同期する傾斜変化が検出されることはあまりない。

##### 4.2 四国西部・豊後水道

この地域は、西南日本の中で最も微動活動が活発であり、小規模な微動は頻繁に発生するが、継続期間が数日以上の大規模な微動活動は約半年毎に繰り返される。この大規模な微動活動に伴って、複数観測点で傾斜変動がほぼ毎回観測され、短期的スロースリップイベントの断層パラメータが推定されている。この地域の微動活動は、明瞭な移動を示す場合が多いが、その方向は特に決まっていない。例えば、上述のように、2001~2002年の2年間では4回の微動・スリップエピソードが半年毎に発生しているが、移動方向は交互に反転し、その移動方向に応じて傾斜ベクトルもエピソードの途中で向きを変える(図6)。これらの短期的スロースリップイベントの規模は、モーメントマグニチュード6.0前後で、すべり量は1~2cmである。2003年の後半には豊後水道にて数ヶ月継続した長期的スロースリップイベントが発生したが、その期間中は短期的スロースリップイベントが加速し、3ヶ月間隔で発生した<sup>23) 43) 44) 45)</sup>。その後は、再び6ヶ月周期で微動及び短期的スロースリップイベントが発生し続けている<sup>46) 47) 48) 49) 50) 51) 41)</sup>。深部超低周波地震も、半年毎の短期的スロースリップイベントに同期して、ほぼ毎回検出されているが、2007年3月には、過去最大となるM3.8のイベントが発生し

た<sup>51)</sup>。

##### 4.3 2003年豊後水道長期的スロースリップイベントと深部低周波微動・短期的スロースリップイベント

2002年8月までほぼ半年毎に発生していた四国西部の微動・短期的スロースリップ活動は、その後1年近く顕著な活動が無かったが、2003年8月末から、豊後水道で顕著な活動が始まり、北東に移動しながら約1週間継続した。ちょうどそのころから、国土地理院のGEONETにも数ヶ月間継続するGPS地殻変動が観測され、防災科研の傾斜計にも同様の長期的変動が検出された。これは豊後水道を発生源とする長期的スロースリップイベントによる地殻変動であり、Mw6.7と推定されている<sup>52) 23)</sup>。この長期的スロースリップイベントの発生期間中、豊後水道では小規模な微動が頻繁に発生し、他の時期に比べて顕著に活動レベルが高くなっている。また、移動を伴う顕著な微動・短期的スロースリップイベントも約3ヶ月間隔で発生した。同様の長期的スロースリップイベントは、この地域では1996-97年にもGPSで検出されている<sup>17)</sup>が、そのときに微動活動が発生していたかどうかはまだ明らかではない。

##### 4.4 紀伊水道

四国東部から紀伊半島間の紀伊水道では、微動が検出されていない。この原因としては、海域であるが故に検知能力が他地域に比べて低いということもあるが、もし振幅の大きな微動が発生していれば陸域でも十分に観測されるはずであり、四国西部で見られるような比較的大きな振幅を有する微動は発生していないことを示している。これは、四国東部の微動活動が香川・徳島・愛媛県境付近で最も活発であるが、東に向かうほど活動回数も少なくなり、また微動振幅も小さくなることと調和的である。

##### 4.5 紀伊半島西部・中部

紀伊半島では、大別すると南西部、中部、北東部の3つの活動域に分けられる。そのうち、南西部(和歌山県南西部)と中部(奈良県南部)はおおよそ3ヶ月周期で微動活動が発生するが、防災科研の観測網では、これに対応する傾斜変化を検出していない。しかし、名古屋大学・東濃地震科学研究所が和歌山県新宮市に設置したひずみ計では、紀伊半島中部に発生した微動に伴うひずみ変化を捉えている<sup>53)</sup>。さらに、同様のひずみ変化が、後述する2006年1月の大規模な微動の開始前に観測されたことから、微動を伴わないスロースリップを捉えた可能性があることを示唆している。

##### 4.6 紀伊半島北東部

主に三重県中部を中心とした地域では、約6ヶ月毎に顕著な微動活動が発生し、短期的スロースリップイベントによる傾斜変化もしばしば検出される<sup>44) 46) 47) 40) 49) 50) 41)</sup>。スロースリップイベントの断層モデルは逆断層型で、すべり量が約1cm程度であると推定されている<sup>24)</sup>。この地域の微動は、伊勢湾から南西に向かって移動する傾向が多い。微動は、伊勢湾沿岸部よりも内陸部の方が活発であるが、超低周波地震は伊勢湾沿岸部に多く発生し、特に2008年11月の活動では、

顕著な超低周波地震活動が観測された<sup>54)</sup>。しかし、伊勢湾から知多半島の領域では、微動はほとんど検出されていない。

#### 4.7 2006年1月の運動型イベント

2006年1月に発生した微動活動は、紀伊半島北東部の活動領域の中の南端から発生し、その後、北東に1日約10kmの速度で移動した(図12)<sup>55) 56)</sup>。これに同期して、深部超低周波地震の発生域も北東方向に移動し<sup>26)</sup>、傾斜変化が検出される観測点も徐々に北東側に移り変わっていった。これらの活動は、その後伊勢湾を越えて愛知県側に達し、愛知県内をさらに北東方向に移動して、約2週間継続した。これまで、紀伊半島側と愛知県側でほぼ同時期に微動活動が発生することはあったが、移動の方向性が異なるなど、その連続性は明らかではなかった。しかし、今回のように、明瞭な連続的移動現象が観測されたのは初めてである<sup>56)</sup>。短期的スロースリップイベントとしては、連続的に移動した可能性もあるが、傾斜変化パターンや微動の集中度から5つのステージに分け、それぞれ断層モデルを推定した結果、これらのスロースリップイベントによるモーメントマグニチュードの総和はMw6.2であった<sup>55) 56)</sup>。

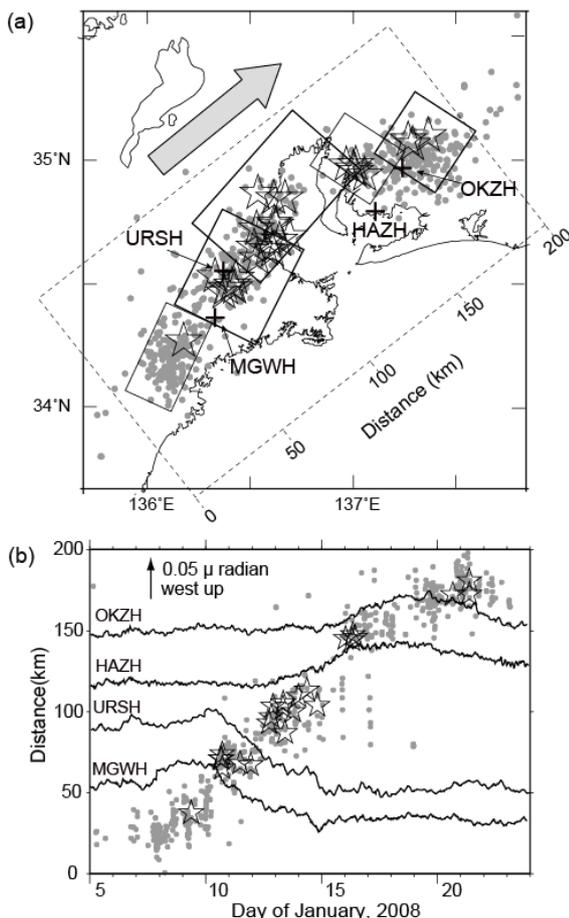


図12 2006年1月における紀伊半島・東海地域の移動性スロー地震の震央分布(a)と時空間分布(b)。灰色点が微動、星印が深部超低周波地震を表す。(a)中の矩形はスロースリップイベントの断層モデル位置、(b)中の線は各観測点での傾斜変化を示す。

#### 4.8 東海地域

東海地域では、愛知県から長野県南部にかけて微動が分布するが、活動度としては北東に向かうに従って徐々に低下する。2001年から2008年までの活動を見ると、2003年ごろに頻発し、2004年以降はほぼ半年周期で発生する。この地域では、2004年12月に発生した微動活動に同期した傾斜変化が防災科研 Hi-net によって初めて捉えられた<sup>46) 24)</sup>。これは、東海地震発生域近傍における短期的スロースリップイベントを初めて準リアルタイムで検知したものである。同地域では、その後の2005年7月に発生した微動活動に同期した短期的スロースリップイベント<sup>57)</sup>について、気象庁の歪計にも変化が生じていることが準リアルタイムで把握された<sup>58)</sup>。さらに、産業技術総合研究所の豊橋・豊橋東観測点でも、同様のひずみ変化を観測している<sup>59)</sup>。この短期的スロースリップイベントについては、国土地理院の GEONET では検出されていない。防災科研によって推定された断層モデル<sup>47)</sup>から、GEONET 観測点での地表変位を計算したところ、水平変動で1mm以下、上下変動で1mm程度のみであり、検出限界以下の変動であった<sup>60)</sup>。小林・他(2006)<sup>61)</sup>は、過去の気象庁歪計データを再解析し、同様の現象が1984年から発生していたことを明らかにした。さらに、ひずみ変化のパターンが毎回同じではなく、少なくとも3つのタイプに分類されること、東海地域の深部低周波微動(地震)活動が3つの活動域に分かれ、それぞれの活動がひずみ変化の3つのパターンと調和的であることを示した。

#### 4.9 東海長期的スロースリップイベントとの関係

東海地域の深部低周波微動発生域に隣接した浅部では、浜名湖を中心とした地域で長期的スロースリップイベント<sup>18)</sup>が2000年後半から2005年まで継続したことが、国土地理院の GEONET によって明らかにされたが、特に2003年前後にはすべりが加速していた。このことは、2003年から2004年にかけて小規模な微動が頻発したことと関連がある可能性がある。気象庁では、低周波地震とひずみ観測に基づく短期的スロースリップイベントのモーメント時間変化をモニタリングし<sup>62)</sup>、GEONET による長期的な東海スロースリップイベントのモーメント変化と同様なパターンを示している。以上のことは、浅い側の長期的スロースリップイベントによって、深部のスロー地震群が活性化したものと考えられる。この関係は、既に述べたように、2003年の豊後水道で発生した長期的スロースリップイベントの際にも、さらに顕著に見られている。

#### 5. 最近の取り組み

産業技術総合研究所では、2006年度より東海・東南海・南海地震想定震源域を取り囲むように、地下水等総合観測網の整備に着手した。既に稼働を開始している紀伊半島内の観測点では、例えば、2008年6月の紀伊半島北東部から中部にかけて発生した深部低周波微動活動に伴うひずみ変化を捉えることに成功している<sup>63)</sup>。また、気象庁・気象研究所では東海地域においてレーザーひずみ計の開発・観測を行なっ

ており、2008年8～9月に長野県南部から愛知県にかけて発生した深部低周波微動に伴う短期的スロースリップイベントによるひずみ変化を捉えた<sup>64)</sup>。

## 6. 浅部超低周波地震

以上、プレート境界の固着域深部における新たに検出された現象について述べてきたが、西南日本の南海トラフ沿いの浅い領域でも、やや似たような現象が検出されてきた。この現象は「浅部超低周波地震」と呼ばれ、短周期成分の実体波をほとんど含まず、周期約10秒の長周期表面波のみを励起する地震である。この地震はもともと Ishihara (2003)<sup>65)</sup>によって、防災科研 F-net の連続データを用いて発見されたものであり、通常のイベントトリガー方式では検知されないため、気象庁の一元化カタログには掲載されていない。Obara and Ito (2005)<sup>66)</sup>は、Hi-net 併設の高感度加速度計を利用し、波形相関解析に基づいて震央位置の推定を行った。

その結果、超低周波地震の発生域は日向灘、室戸岬沖の土佐ばえ付近、紀伊水道、紀伊半島南方沖及び紀伊半島南東沖で、時空間的に集中する傾向にあるが、深部スロー地震のように周期的な活動はこれまでのところ見られていない。超低周波地震のうち振幅の大きなものに対して CMT 解析を行った結果、震源は非常に浅く、やや高角の逆断層型メカニズムが得られた<sup>67)</sup>。これより、超低周波地震はプレート境界よりも浅い部分の付加体内部に発達した逆断層系で発生した地震であると考えられる。超低周波地震のメカニズム解は、海溝軸から陸に近づくにつれて断層面の傾斜角が大きくなる傾向を示し、付加体内部におけるアウトオブシークエンススラストや分岐断層の分布形状とも調和的である。さらに、日本列島周辺を対象とした超低周波地震モニタリングの結果<sup>68)</sup>、南海トラフ以外では、2003年9月26日の十勝沖地震の直後から同震源域付近で活発に発生し、その後もバースト的活動を繰り返しながら徐々に活動の程度は弱くなってきた<sup>69)</sup>が、2008年9月の十勝沖の地震の際には再び活発となった<sup>70)</sup>。

## 7. おわりに

防災科研 Hi-net 等の稠密な基盤的地震観測網の整備により、フィリピン海プレートの沈み込みに伴って、巨大地震発生領域より深部の遷移領域で、深部低周波微動、短期的スロースリップイベント等といったスロー地震現象の発生が明らかにされた<sup>3) 16) 25) 26)</sup>。これらの現象の活動範囲、移動の性質を考慮すると、フィリピン海プレートの走向に平行な帯状の震源域はいくつかのセグメントに分かれ、各セグメントではそれぞれ固有の周期性を有し、セグメント内ではすべり破壊伝播が観測され、時には隣接セグメントへの運動破壊を引き起こすこともある<sup>31) 32) 56)</sup>。これらのスロー地震は巨大地震発生領域に隣接することから、巨大地震発生のトリガーとなる可能性があるだけでなく、巨大地震の運動性を解明する手がかりともなる。この現象は、西南日本だけでなく、北米大陸のカスケード地方でも検出されており、現象把握と解明のた

め様々な研究プロジェクトが進行中である。特に、精密な震源決定が困難とされてきた深部低周波微動については、波形相関法やアレイ処理等による技術開発が急速に進められている<sup>14) 15)</sup>。同時に、全世界を対象として同様のスロー地震現象の探索が行なわれ、メキシコやコスタリカ、アラスカなどからの報告もなされている<sup>71)</sup>。また、沈み込み帯以外では、サンアンドレアス断層でも微動が検出され<sup>72)</sup>、さらに遠地震表面波によって複数地点で同時に活発化する<sup>37)</sup>など、その発生メカニズムを考える上で興味深い報告が次々となされている。一方、同様のスロースリップイベントでも付随する地震現象が異なる観測例もある。例えば、房総沖では、1週間程度の継続期間を有する短期的スロースリップイベントが、微動ではなく群発地震を伴って6～7年毎に発生している<sup>73)</sup><sup>74)</sup>など、世界各地で報告される現象には、それぞれの特徴が存在する。様々なケーススタディを重ねることで、テクトニクス環境、地下構造、流体分布、温度圧力条件など、スロー地震発生を規定する条件を絞り込むことにより、スロー地震発生メカニズムを解明、さらには巨大地震発生メカニズムの解明にも繋がることが期待される。

## 参考文献

- 1) 小原一成, 2009. 独立行政法人防災科学技術研究所. 地震予知連絡会 40年のあゆみ (本誌), 72-77.
- 2) 岡田義光, 1999. 防災科学技術研究所. 地震予知連絡会 30年のあゆみ, 71-78.
- 3) Obara, K., 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, **296**, 1679-1681.
- 4) 西出則武・橋本徹夫・舟崎淳・中澤博志・岡正善・上野寛・山田尚幸・笹川巖・前田憲二・杉本和信・高嶋鉄也, 2000. 地震データの一元的処理により把握された地殻下部の低周波地震活動. 地球惑星科学関連合同大会講演予稿集, Sk-P002.
- 5) 鶴川元雄・小原一成, 1993. 関東地方の火山フロント下のモホ面付近に発生する低周波地震. *火山*, **38**, 187-197.
- 6) Hasegawa, A. and Yamamoto, A., 1994. Deep, low-frequency microearthquakes in or around seismic low-velocity zones beneath active volcanoes in northern Japan. *Tectonophysics*, **233**, 233-252.
- 7) 汐見勝彦・小原一成・針生義勝・松村稔, 2009. 防災科研 Hi-net の構築とその成果. *地震* **2**, **61**, 印刷中.
- 8) 気象庁地震予知情報課, 2001. 地殻下部付近の低周波地震. *地震予知連絡会会報*, **67**, 388-389.
- 9) Katsumata, A., and Kamaya, N., 2003. Low-frequency continuous tremor around the Moho discontinuity away from volcanoes in the southwest Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1020.
- 10) 大見士朗, 2002. 西南日本内陸の活断層に発生する深部低周波地震 ～鳥取県西部地域を中心として～. *地震予知連絡会会報*, **70**, 538-543.

- 11) Ohmi, H. and Obara, K., 2002. Deep low-frequency earthquakes beneath the focal region of the Mw 6.7 2000 Western Tottori earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(16), 10.1029/2001GRL014469.
- 12) 小原一成, 2001. 西南日本で発見された地殻底部低周波微動—Hi-net における観測結果—. 地震予知連絡会会報, **67**, 422-428.
- 13) 馬場俊孝, 2002. 沈み込むフィリピン海プレートの形状 月刊地球, 号外 **38**, 77-81.
- 14) Shelly, D. R., G. C. Beroza, S. Ide, and S. Nakamura, 2006. Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan and their relationship to episodic tremor and slip. *Nature*, **442**, 188-191.
- 15) Ide, S., D. R. Shelly, and G. C. Beroza, 2007. The mechanism of deep low frequency earthquakes: Further evidence that deep non-volcanic tremor is generated by shear slip on the plate interface. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L03308, doi:10.1029/2006GL028890.
- 16) Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, and K. Kasahara, 2004. Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L23602, doi:10.1029/2004GL020848.
- 17) Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, and S. Miyazaki, 1999. A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3237-3240.
- 18) Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yari, and T. Nishimura, 2002. Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan. *Science*, **298**, 1009-1012.
- 19) Dragert, H., K. Wang, and T. S. James, 2001. A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface. *Science*, **292**, 1525-1528.
- 20) Miller, M. M., T. Melbourne, D. J. Johnson, and W. Q. Sumner, 2001. Periodic slow earthquakes from the Cascadia subduction zone. *Science*, **295**, 2423.
- 21) Rogers, G. and Dragert, H., 2003. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip. *Science*, **300**, 1942-1943.
- 22) Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro 1991. A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.
- 23) Hirose, H. and Obara, K., 2005. Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan. *Earth Planets Space*, **57**, 961-972.
- 24) Hirose, H. and Obara, K., 2006. Short-term slow slip and correlated tremor episodes in the Tokai region, central Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L17311.
- 25) Obara, K. and Hirose, H., 2006. Non-volcanic deep low-frequency tremors accompanying slow slips in the southwest Japan subduction zone. *Tectonophysics*, **417**, 33-51.
- 26) Ito, Y., K. Obara, K. Shiomi, S. Sekine, and H. Hirose 2007. Slow earthquakes coincident with episodic tremors and slow slip events. *Science*, **315**, 503-506.
- 27) Tsuruoka, H., H. Kawakatsu, and T. Urabe, 2008. GRiD MT (Grid-based Realtime Determination of Moment Tensors) monitoring the long-period seismic wavefield. *Phys. Earth Planet. Inter.*, in press.
- 28) Ide, S., K. Imanishi, Y. Yoshida, G. C. Beroza, and D. R. Shelly, 2008. Bridging the gap between seismically and geodetically detected slow earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L10305.
- 29) Ide, S., G. C. Beroza, D. R. Shelly, and T. Uchide 2007. A scaling law for slow earthquakes. *Nature*, **447**, 76-79.
- 30) 小原一成, 2007. スローと水. 地学雑誌, **112**, 837-849.
- 31) 小原一成, 2009. フィリピン海プレート沈み込みに伴う西南日本のスロー地震群の発見. 地震2, **61**, 印刷中.
- 32) 小原一成, 2007. 深部スロー地震群の時系列的特徴とセグメント構造. 月刊地球, **29**, 465-472.
- 33) 小原一成, 2003. 西南日本の沈み込み帯で発生する深部低周波微動の特徴. 地震予知連絡会会報, **70**, 524-532.
- 34) 小原一成, 2003. 深部低周波微動の時系列的特徴—トリガー現象と周期性—. 地学雑誌, **112**, 837-849.
- 35) Miyazawa, M. and J. Mori, 2006. Evidence suggesting fluid flow beneath Japan due to periodic seismic triggering from the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L05303.
- 36) Rubinstein, J. L., J. E. Vidale, J. Gomberg, P. Bodin, K. C. Creager, and S. D. Malone, 2007. Non-volcanic tremor driven by large transient shear stresses. *Nature*, **448**, 579-582.
- 37) Gomberg, J., J. L. Rubinstein, Z. Peng, K. C. Creager, J. E. Vidale, and P. Bodin, 2008. Widespread triggering of nonvolcanic tremor in California. *Science*, **319**, 164.
- 38) Nakata, R., N. Suda, and H. Tsuruoka, 2008. Non-volcanic tremor resulting from the combined effect of Earth tides and slow slip events. *Nature Geoscience*, **1**, 676-678.
- 39) Rubinstein, J. L., M. L. Rocca, J. E. Vidale, K. C. Creager, and A. G. Wech, 2008. Tidal modulation of nonvolcanic tremor. *Science*, **319**, 186-189.
- 40) 関根秀太郎, 2007. 西南日本の短期的スロースリップ活動(2006年6月~11月). 地震予知連絡会会報, **77**, 358-365.
- 41) 廣瀬仁・関根秀太郎・小原一成, 2008. 西南日本における短期的スロースリップイベント(2007年11月~2008年3月). 地震予知連絡会会報, **80**, 426-433.
- 42) 廣瀬仁・関根秀太郎・小原一成, 2009. 西南日本における短期的スロースリップイベント(2008年5月~2008年10月). 地震予知連絡会会報, **81**, 539-548.
- 43) 小原一成・廣瀬仁, 2004. 豊後水道付近のスロースリップ

- イベントと深部低周波微動. 地震予知連絡会会報, **71**, 671-679.
- 44) 小原一成・廣瀬仁, 2004. 深部低周波微動とスロースリップイベント. 地震予知連絡会会報, **72**, 575-581.
- 45) 廣瀬仁・小原一成, 2004. 2004年4月に四国西部で再発した, 深部低周波微動を伴う短期的スロースリップイベント. 地震予知連絡会会報, **72**, 585-586.
- 46) 廣瀬仁・小原一成, 2005. 西南日本の深部低周波微動に同期する短期的スロースリップイベント. 地震予知連絡会会報, **74**, 440-448.
- 47) 廣瀬仁・小原一成, 2006. 2005年10月に再発した四国西部の微動とスロースリップイベント. 地震予知連絡会会報, **75**, 517-519.
- 48) 関根秀太郎・小原一成, 2006. 四国西部における深部低周波微動を伴うスロースリップ活動(2006年4月). 地震予知連絡会会報, **76**, 555-556.
- 49) 関根秀太郎, 2007. 西南日本の短期的スロースリップ活動(2007年2月~2007年4月). 地震予知連絡会会報, **78**, 495-499.
- 50) 廣瀬仁・関根秀太郎・小原一成, 2008. 西南日本における短期的スロースリップイベント(2007年5-10月). 地震予知連絡会会報, **79**, 574-581.
- 51) 前田拓人, 2007. 短期的スロースリップに同期して発生した超低周波地震活動(2007年3月). 地震予知連絡会会報, **78**, 522-524.
- 52) Ozawa, S., Y. Hatanaka, M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire, and Y. Ishigaki, 2004. Aseismic slip and low-frequency earthquakes in the Bungo channel, southwestern Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **31**(7), doi:10.1029/2003GL019381.
- 53) 福田真人・鷲谷威・伊藤武男・山内常生・浅井康広・石井紘, 2008. 新宮ボアホール観測点で検出された短期スロースリップに伴う歪み変化. 地震予知連絡会会報, **80**, 446-449.
- 54) 防災科学技術研究所, 2009. 西南日本の深部低周波微動・短期的スロースリップ活動状況(2008年11月~2009年1月). 第180回地震予知連絡会資料, 22-25.
- 55) 関根秀太郎・小原一成, 2006. 東海地域における深部低周波微動と短期的スロースリップの連続的な移動(2006年1月). 地震予知連絡会会報, **76**, 407-412.
- 56) Obara, K., and S. Sekine, 2009. Characteristic activity and migration of episodic tremor and slow-slip events in central Japan. *Earth Planets Space*, in press.
- 57) 廣瀬仁・小原一成, 2006. 東海地域における短期的スロースリップイベントと深部低周波微動活動. 地震予知連絡会会報, **75**, 375-379.
- 58) 気象庁・気象研究所, 2006. 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ. 地震予知連絡会会報, **75**, 431-437.
- 59) 北川有一・松本則夫・小泉尚嗣, 2006. 愛知県東部の低周波地震に関連した産総研豊橋・豊橋東観測点の歪変化. 地震予知連絡会会報, **75**, 410-416.
- 60) 国土地理院, 2006. 東海地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, **75**, 288-374.
- 61) 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋, 2006. 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ(1984~2005年). 地震, **59**, 19-28.
- 62) 気象庁, 2008. 低周波地震活動とスロースリップ. 第269回地震防災対策強化地域判定会委員打合せ会, 7.
- 63) 板場智史・北川有一・小泉尚嗣・高橋誠・松本則夫・佐藤努・大谷竜, 2008. 紀伊半島におけるSSEに伴う歪変化(2008年6月及び11月). 地震予知連絡会会報, **81**, 502-521.
- 64) 気象庁気象研究所, 2008. レーザー式変位系によって捉えられた短期的スロースリップ(2008年8~9月)による地殻変動. 地震予知連絡会会報, **81**, 465-466.
- 65) Ishihara, Y., 2003. Major existence of very low frequency earthquakes in background seismicity along subduction zone of south-western Japan. *Eos Trans. AGU*, **84**(46), S41C-0107.
- 66) Obara, K. and Ito, Y., 2005. Very low frequency earthquake excited by the 2004 off the Kii peninsula earthquake: A dynamic deformation process in the large accretionary prism. *Earth Planets Space*, **57**, 321-326.
- 67) Ito, Y., and Obara, K., 2006. Dynamic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02311.
- 68) 浅野陽一・伊藤喜宏, 2007. 西南日本の超低周波地震活動. 地震予知連絡会会報, **77**, 348-352.
- 69) Asano, Y., K. Obara, and Y. Ito, 2008. Spatiotemporal distribution of very-low frequency earthquakes in Tokachi-oki near the junction of the Kuril and Japan trenches revealed by using array signal processing. *Earth, Planets and Space*, **60**, 871-875.
- 70) 防災科学技術研究所, 2008. アレイ解析によって検出された日本周辺の超低周波地震活動. 第179回地震予知連絡会資料, 27.
- 71) Schwartz, S. Y., and J. M. Rokosky, 2007. Slow slip events and seismic tremor at circum-Pacific subduction zones. *Rev. of Geophys.*, **45**, RG3004/2007.
- 72) Nadeau, M. R., and D. Dolenc, 2005. Nonvolcanic Tremors Deep Beneath the San Andreas Fault. *Science*, 307, doi: 10.1126/science.1107142.
- 73) 山本英二・大久保正, 2003. 地殻傾斜の連続観測で捉えた2002年10月に発生した房総半島東方沖のスロースリップ. 地震予知連絡会会報, **69**, 198-204.
- 74) Ozawa, S., S. Miyazaki, Y. Hatanaka, T. Imakiire, M. Kaidzu, and M. Murakami, 2003. Characteristic silent earthquakes in the eastern part of the Boso peninsula, Central Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(6), doi: 10.1029/2002GL016665.