

# 西南日本の深部低周波微動とスロースリップイベント

廣瀬仁・小原一成 (防災科学技術研究所)

## Deep low-frequency tremors and slow slip events in southwest Japan

Hitoshi Hirose and Kazushige Obara (NIED)

### 1. はじめに

南海トラフに平行な帯状の領域でその活動が発見された深部低周波微動は、沈み込んだフィリピン海スラブからの脱水反応によって供給された水が関与する現象と考えられており (Obara, 2002)、海洋プレート沈み込みに伴う水の循環や物質の移動、またそれらが巨大地震発生に与える影響を考察する上で大変重要な現象である。最近、この深部低周波微動の活発な活動に同期して、沈み込んだフィリピン海プレートの上面付近でのスロースリップイベント (SSE) によると考えられる地殻傾斜変動が観測された (Obara et al., 2004)。ここでは、深部低周波微動の特徴を概観し、それと時間空間的に同期して発生した SSE の断層モデルを紹介する。さらに、我々がこれらの現象のモニターを開始した 2001 年以降での活動の推移について述べ、観測事実から考えられる現象の発生メカニズムについて考察する。

### 2. 深部低周波微動の特徴

ここでは、西南日本で観測される深部低周波微動について、これまでに分かっていた特徴を概観する。詳しくは Obara (2002); 小原 (2003a,b); Obara and Hirose (2005) を参照されたい。

深部低周波微動の観測波形には、(1)P, S 相が不明瞭; (2)ランダム的な連続波動; (3)同規模の通常地震に比べ低周波 (約 2 Hz) に卓越; (4)緩やかな微動振幅の変化; といった特徴がある。波の振幅は低周波地震に比べてさらに小さい。そしてこのような波動が、消長を繰り返しながら長い場合では 2-3 週間も継続することがある。

通常の震源決定法では微動源の位置を推定することは難しいため、エンベロープ波形の相互相関に基づく新しい手法を開発し適用した。その結果、微動源は (1)長野県南部から豊後水道に至る長さ約 600 km の範囲で存在し、沈み込むフィリピン海プレートの走向に平行で帯状に分布すること; (2)微動源の深さは約 30 km で、同地域のプレート内地震の発生場所よりは上部に位置すること; などが分かった。また、微動は帯状領域の中で必ずしも一様に発生しているのではなく、いくつかの活動集中域 (クラスター) が認められる。これらのクラスターでは、活発な微動活動が周期的に発生していることが分かってきた。

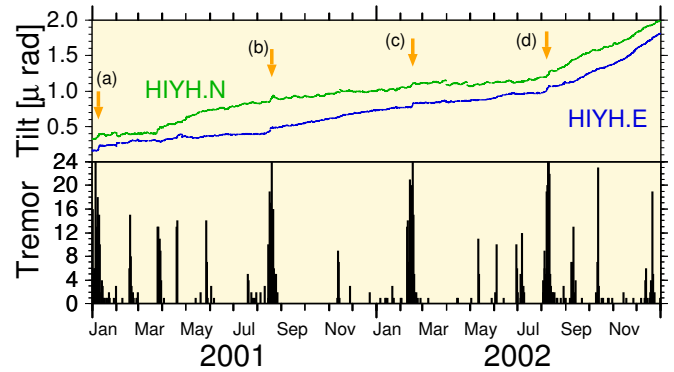


図 1: 四国西部における 2 年間の微動回数分布 (下段) と愛媛県日吉観測点 (HIYH) での傾斜変化 (上段). 観測点の位置は図 3a に示した. 微動回数は 1 時間毎に求められた結果による. 傾斜時系列は 'N', 'E' と記したのがそれぞれ南北・東西成分で、図の上方向の変化がそれぞれ南・東下がりの傾斜を示す. BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) により潮汐成分を取り除いた後の記録を表示した. この期間では、微動の活発化に伴う傾斜変化が矢印で示す時期に 4 回観測されている: (a) 2001 年 1 月; (b) 2001 年 8 月; (c) 2002 年 2 月; (d) 2002 年 8 月.

また、微動活動は近地地震や遠地地震、地球潮汐に誘発されて発生しているように見えることがある。このことは、微動発生領域が外部の擾乱に非常に敏感に反応する性質があることを示すものと考えられる。

### 3. 微動と同期したスロースリップ

上述の微動クラスターの中でも特に活動度が高い四国西部では、2001 年からの 2 年間で 4 回、約 6 か月周期で微動が活発化している (図 1)。このほぼ周期的に発生する大規模な微動と同期して、近隣の防災科研 Hi-net 観測点の高感度加速度計水平成分 (傾斜計) の記録にステップ的な変動が毎回観測されている (図 1)。傾斜変化は微動活動と同期して約 5-7 日間ゆっくりと継続する (例えば、図 2) が、より詳しく見ると、微動活動が傾斜変化に先行して現れることが多い。ただしこの期間を通して同じ方向への傾斜変化が続くわけではない。例えば図 2 に示した 2002 年 8 月のエピソードでは、HIYH に注目すると、8 月 9 日までの前半 4 日間では南東下がりの傾斜変化を示している。一方それ以降の約 3 日間では、東下がりの変化はほとんど停止したのに対して (図 2 の 'HIYH.E')、南下がりの変化

はそれ以前と同様に継続している (図2の‘HIYH.N’)。同様の傾斜方向の変化は他の観測点でも見られる。これはスロースリップのソース領域が期間を通して移動したことを反映していると考えられる。

そのようなソースの移動を明らかにするため、各エピソードを前半と後半の2つの期間に分割し、それぞれの傾斜変化ベクトルを求めた。さらにそれらの変化が矩形断層上のすべり (Okada, 1992) によると仮定して、それぞれの期間について断層モデルの推定をおこなった。その結果、観測された傾斜変化は、プレート境界付近の深さに位置する低角逆断層のすべりで説明できることが分かった (図3; Obara et al., 2004)。すべりの方向はプレート間相対運動の逆方向であり、応力解放過程であることを示している。推定されたSSEの断層位置は微動の震央位置と良く対応する。またこの期間を通して、スロースリップは領域の南西側から北東方向へ移動し、これとともに微動源も同様に移動した。このことは、Obara (2002) が指摘した約 10 km/day の速度を持つ微動の移動には、それとともにすべり領域が伝播するSSEが伴っていたことを意味する。さらに興味深いことに、このSSEと微動の移動方向は、2001年からの2年間では季節性を持って変化した (Obara et al., 2004)。すなわち、2001年8月のエピソードでは、ここで見た2002年8月エピソードと同様に、SSEと微動が南西から北東へ移動した (‘夏型’) のに対し、2001年1月と2002年2月のエピソードでは、それらは北東から南西へ移動した (‘冬型’)。このような季節性は2003年以降は観測されていないので、あるいは偶然だったのかもしれないが、この現象の発生メカニズムを考察する上で重要な鍵になる可能性がある。

以上のような、四国西部で観測された微動とSSEの同期現象は、Cascadia沈み込み帯でのEpisodic tremor and slip (ETS; Rogers and Dragert, 2003) と同様の現象であると考えられる。

#### 4. 活動の推移

前節で見たような、約6か月周期で発生する四国西部での同期現象は、2003年以降活動パターンが変化する (Hirose and Obara, 2005)。すなわち、(1) 2003年前半にはこれまでと同規模のイベントはなく、あったとしてもより小規模のイベントだけが発生したと思われる; (2) 2003年8月末に、2001–02年期と同程度の規模のイベントが発生; (3) この短期的なイベントを境に、長期的な傾斜の傾向が変化し、GPSにも大きな変化が現れた; (4) それらの長期的な変化の終わり頃に相当する2003年11月に、再度短期的イベントが発生; (5) その後は2004年2月および4月に発生; という経過をたどった。ここで明らかのように、四国西部での微動とSSEは2003年8月から2004年前半にかけて2-3か月

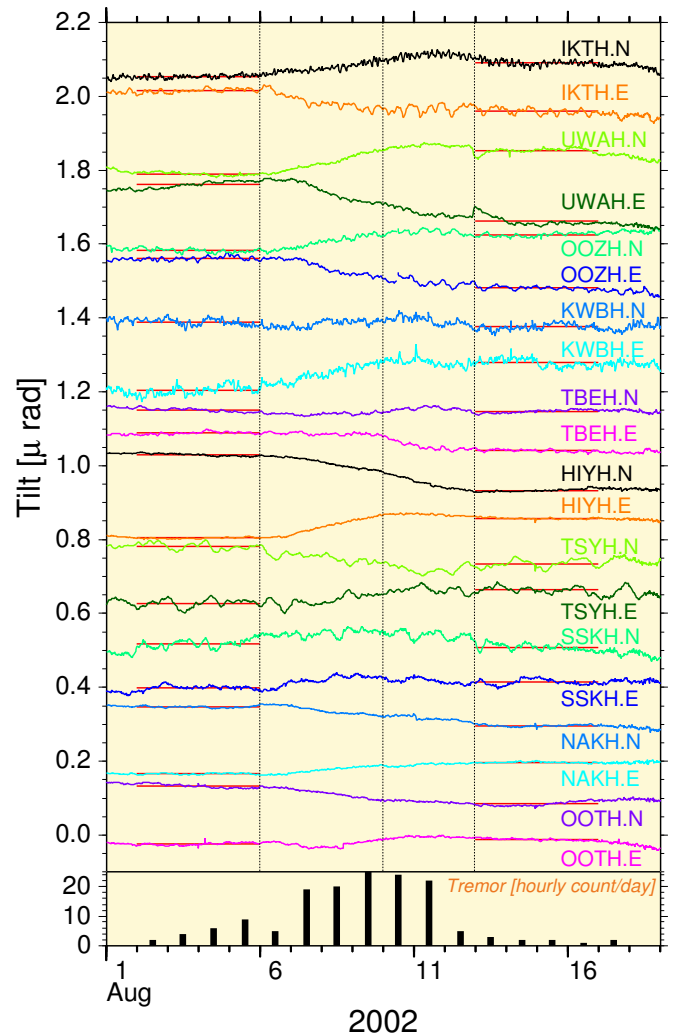


図2: 2002年8月1日から18日までの傾斜時系列 (上段) と微動活動度 (下段). 図1の‘d’に対応. 図の上方向への変化が北・東下がりを示す.

に一度発生した。これはそれ以前の倍の発生頻度である。このような活動度の変化は、豊後水道域で再発した長期的なSSE (Ozawa et al., 2004) が近傍にもたらした応力再配分の影響であると考えられる。

#### 5. 考察

深部低周波微動が初めて報告されて以来、その発生には沈み込んだスラブから脱水反応により供給された水が関与していると考えられている (Obara, 2002)。そのような水がプレート境界に存在すれば、有効法線応力を引き下げるので、相対的に低応力下ですべりが発生できるようになる。低応力下でのすべり速度はより遅くなることが期待される (例えば, Brune, 1970)。このようなメカニズムが、ここで観測された現象を引き起こしている可能性がある。また、第2節で見たように微動源は様々な擾乱に非常に敏感であると推察される。そのような微動源の近傍でスロースリップが発生することにより、微動源に大きな応力変化がもたらされ、活発な微動活動が現れるのかもしれない。

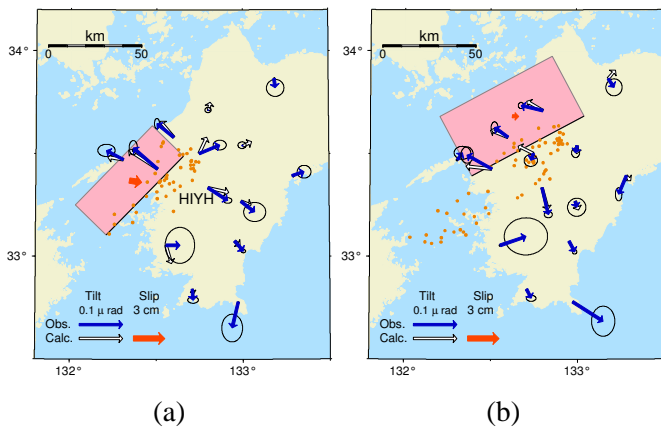


図 3: 2002 年 8 月エピソードの傾斜変化ベクトル (青矢印) とそのデータから推定されたスロースリップの断層モデル (赤矩形・赤矢印)、このモデルから計算される傾斜変化ベクトル (白抜き矢印). (a) 8 月 6 日–9 日の期間; (b) 8 月 9 日–12 日の期間.

微動が観測されている他の地域でも、同様な同期現象が発見されつつある。ここで触れた四国西部以外では、これまでに四国中部・三重県北部・愛知県西部で検出されている。このことは、帯状に分布する微動源 (Obara, 2002) に沿う領域では、普遍的に、短期的なスロースリップも発生している可能性があることを意味する。よって、まだ微動に同期した SSE が見つからない地域でも、今後発見される可能性は高いと考えられる。

ここで見たように、西南日本の多くの場所で、微動と短期的 SSE の同期現象が検出されてきた。既に述べたように、同様な現象は Cascadia 沈み込み帯でも観測されている (Rogers and Dragert, 2003)。この事実は、微動と SSE の両者が密接に関係していることを示唆している。このような現象は若い年代のプレート沈み込み帯では普遍的な現象なのかもしれない。

豊後水道では約 1 年も継続するような長期的 SSE が 1997 年にも観測されており (Hirose et al., 1999)、2003 年に同様のイベントが再び発生した (Ozawa et al., 2004; Hirose and Obara, 2005)。すなわちこの長期的な SSE が約 6 年周期で繰り返している可能性がある。その繰り返しサイクルを通して短期的 SSE と微動活動を観測することで、この現象の真の規則性が明らかになり、さらにプレート境界浅部で発生する巨大地震の発生サイクルへの示唆も得られると期待される。

#### 謝辞

国立天文台の田村良明氏には、潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を提供していただき、解析方法についてご教示いただきました。本研究で使用した GPS データは国土地理院で収集・処理されたものです。また気象庁より、各気象台・測候所での気象

観測データを提供していただきました。以上の方々に記して感謝いたします。

#### 文献

- Brune, J. N., Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4997–5009, 1970.
- Hirose, H., and K. Obara, Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around Bungo channel region, southwest Japan, 2005. (revised)
- Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, and S. Miyazaki, A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **26** (21), 3237–3240, 1999.
- Obara, K., Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679–1681, 2002.
- 小原一成, 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, 2003.
- 小原一成, 西南日本沈み込み帯に発生する深部低周波微動, 物理探査, **56**, 415–425, 2003.
- Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, and K. Kasahara, Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, **31** (23), doi: 10.1029/2004GL020848, 2004.
- Obara, K., and H. Hirose, Non-volcanic deep low-frequency tremors accompanying slow slip in the southwest Japan subduction zone, 2005. (revised)
- Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018–1040, 1992.
- Ozawa, S., Y. Hatanaka, M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire, and Y. Ishigaki, Aseismic slip and low-frequency earthquakes in the Bungo channel, southwestern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **31** (7), doi:10.1029/2003GL019381, 2004.
- Rogers, G., and Dragert, H., Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: the chatter of silent slip, *Science*, **300**, 1942–1943, 2003.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, M. Ishiguro, A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507–516, 1991.