

[研究成果]

連鎖反応モデルから想定される深部低周波微動の特徴

- Character of deep low-frequency tremors based on chain reaction model -

#有吉 慶介*1・堀 高峰*1・金田 義行*1

Jean-Paul Ampuero*2

松澤 暢*3・日野 亮太*3・長谷川 昭*3

*1 独立行政法人 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

*2 カリフォルニア工科大学

*3 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

1. はじめに

防災科学技術研究所が展開する高感度地震観測網 (Hi-net) は、全国の約 800 地点で日本全土をほぼ網羅するかたちで地面の揺れを常時観測している。Obara (2002) [1] では、その膨大なデータを用いて地震波形の解析を進めたところ、日本周辺の沈み込み帯のうち、西南日本において、深さ 30km 付近のプレート境界面に沿って、低周波性の微動が発生していることを発見した (図 1)。この微動は火山帯での活動とは関係がないことから、深部低周波微動と呼ばれ、近年では世界各地の沈み込み帯で発見されている [2]。

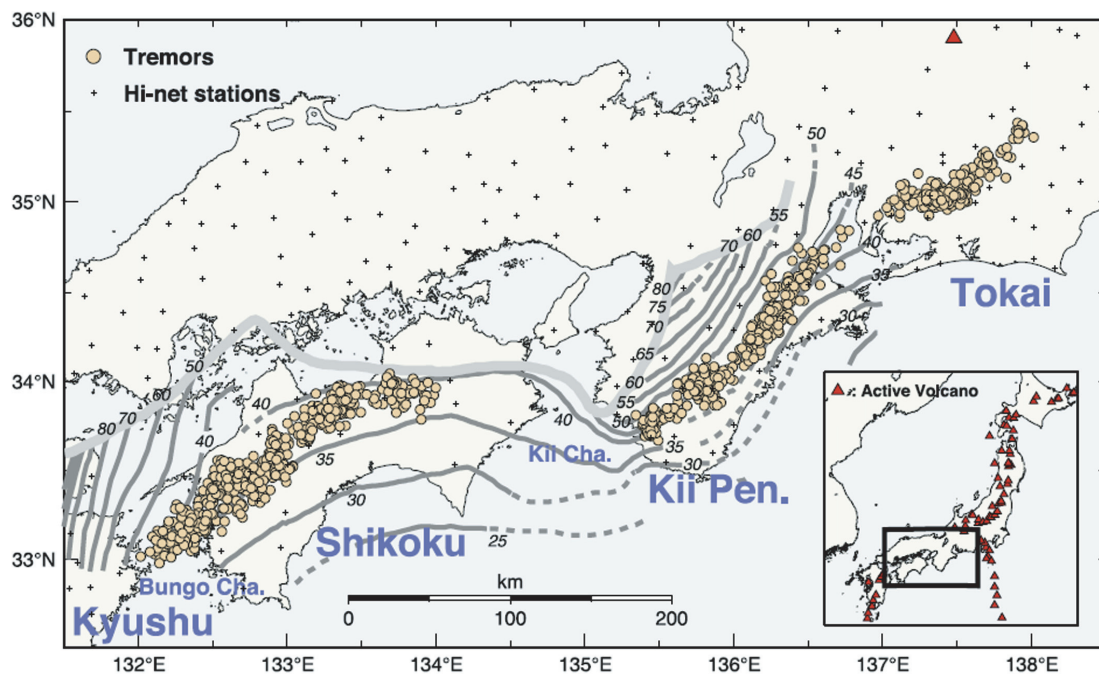


図 1. 深部低周波微動の震源分布. 数値はプレート境界面の等深線 [1].

微動活動の大きな特徴として、その多くは、5~15 km/day の移動速度を伴い、等深線に沿って移動していることが挙げられる [3] (図 2)。そのパターンは複雑で、区分化されているものもあるが、たまに区分を突き抜けて移動しているものもみられる。また、移動方向も単方向のみならず、双方向に伝播しているものもある。発生間隔は、四国地方で短く、紀伊半島~東海地方の方が相対的に長い傾向がみられるが、深さ 30km より浅いところでは、東海・東南海・南海地震発生帯が存在するので、大地震発生前に活動の変化がみられる可能性も考えられる。

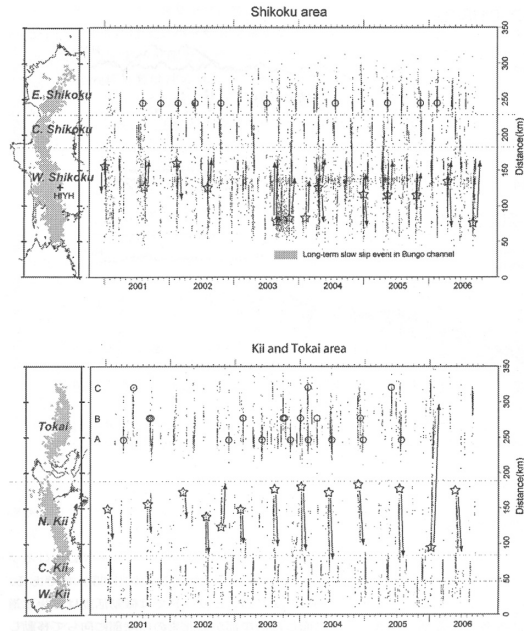


図 2. 深部低周波微動震源の時系列 [3].

では一体、なぜ深部低周波微動が発生するのだろうか？そのメカニズムの候補として、【仮説—1】流体の移動 [1]、【仮説—2】摩擦特性の不均質性 [4]、などが挙げられる。具体的には、【仮説—1】では温度・圧力条件によって、岩石の相転移に伴う含水鉱物の脱水反応が生じ、水の流動に伴って発生したというモデルであり、【仮説—2】は、深部低周波微動が発生するところでは、東海・東南海・南海地震といった巨大地震が発生する領域とは摩擦特性が少し異なって、小規模な地震しか発生しないというモデルである (図 3)。

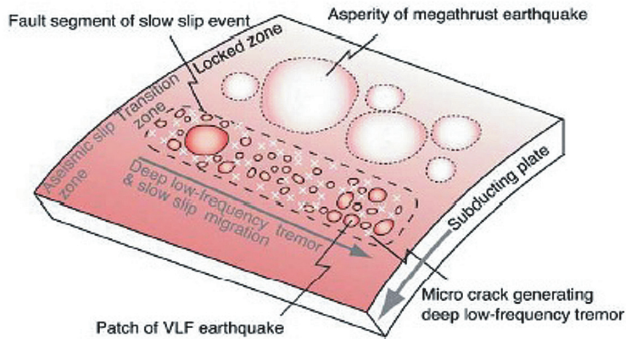


図 3. 【仮説—2】に基づく深部低周波微動のモデル概念図 [4]。アスペリティサイズが大きいところで巨大地震が発生し、小さいところで低周波微動・超低周波微動が発生すると考えたもの。

一方で、地震発生後にアスペリティ周辺に余効すべりと呼ばれる地震波を伴わず、人間では揺れを感じないほどゆっくりしたすべりが広がり、そのすべりが他の小さなアスペリティを飲み込むと次々と連鎖的に破壊するというモデルも提唱されている [5] (図4). 特に小アスペリティが深部に存在する場合、連鎖して発生した地震は、通常よりもゆっくりすべる低周波性の傾向がみられることが、数値シミュレーションから示された [6]. このような連鎖破壊過程が低周波微動を励起する原因の一つとなっている可能性もある.

そこで、本研究では、巨大地震発生帯の深部側にある小アスペリティ同士の連鎖破壊によって深部低周波微動が発生するという新たな【仮説-3】を数値シミュレーションから説明することを試みる.

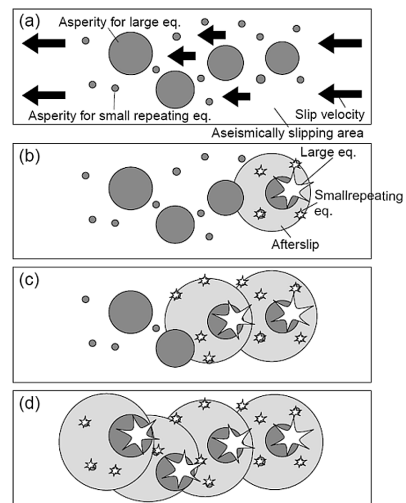


図4. 連鎖破壊過程の模式図 [5].

2. 3次元沈み込みプレート境界モデル

東海～東南海～南海沖にかけてみられる深部低周波微動の発生現象について、連鎖破壊によるものと想定したモデルを図5に示す. プレートの傾斜角は 15° , 計算領域の外側は、 4cm/year で定常的に沈み込みプレート運動が続いているものとする. また、海溝軸 (Strike) 方向に沿って、周期的境界条件を与え、東海～東南海～南海沖のように巨大アスペリティが続いている場合を想定した. また、深さ $27\text{-}33\text{km}$ の範囲では、流体 (主に水) が存在するため有効法線応力が 51MPa と低くなる、高い間隙水圧が生じているという説 [7] を採用した.

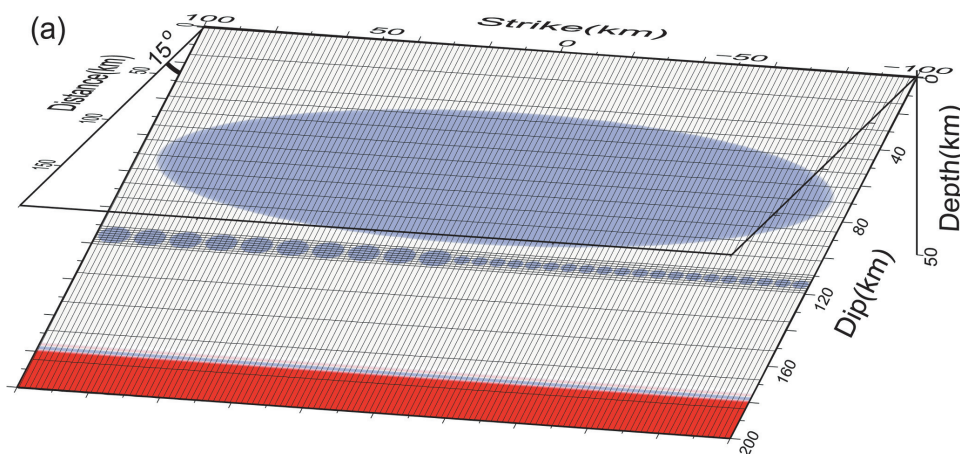


図5. 沈み込みプレート境界面上の摩擦特性分布図. 赤色系が粘性のように速度増加と共に摩擦力が増大する安定すべり域, 青色系が速度増加 (低下) と共に摩擦力が低下 (増大) する不安定すべり (地震が発生しやすいアスペリティ) 領域を示す. 計算メッシュは8倍ほど拡大したもので、実際には約 22 万個ある.

本研究で適用する数値シミュレーションは、均質半無限弾性体中にある3次元プレート境界面にすべり速度/状態依存摩擦構成則を用いたものであり、東北大学サイバーサイエンスセンターとの共同研究によって開発された、SX-9 向けに最適化されたプログラムコードを適用することで、時空間に関して高い分解能を有した大規模な計算を実行することが可能となっている [6].

3. 連鎖反応モデルから予想される深部低周波微動の特徴

深部低周波微動が連鎖破壊しながら伝播する過程の一例を図6に示す。(a)~(e)まで時間を追ってみると、小アスペリティ (No. 10) で低周波性の微動が発生し、その後は左(東)側に連鎖的に伝播している様子がみられる。一方 (b) では、小アスペリティ (No. 2) から低周波微動が発生し、その後は右(西)側へゆっくりした伝播速度で進んでいる。(e) では、小アスペリティ (No. 3) で両者が交差し、低周波微動よりも高速すべりをもつ、通常の地震に近い性質をもつイベントが発生していることが分かる。

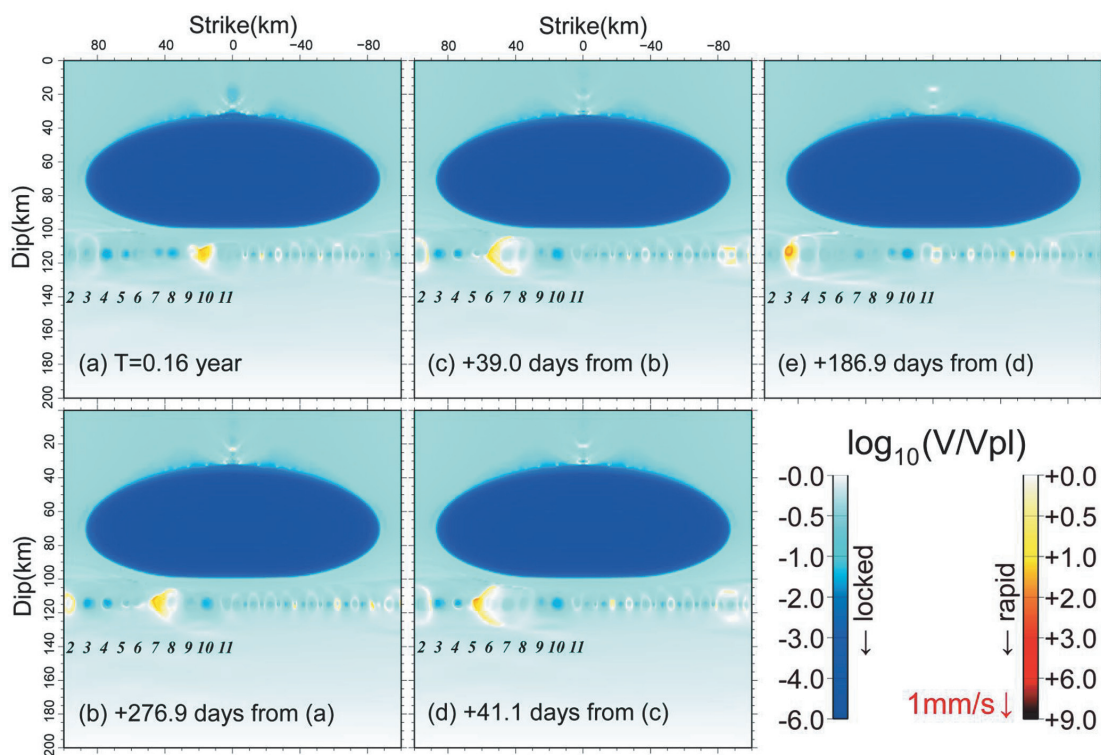


図6. 図5の沈み込みプレート境界面上におけるすべり速度のスナップショット (連鎖破壊過程の例). V_{pl} は定常的な沈み込み速度 4cm/year に対応し、暖色系が高速すべり、寒色系が固着を示す. イタリアック体の番号は、アスペリティの指標に対応する.

次に、隣接するアスペリティが固着している場合の例を図7に示す。ここで、小アスペリティ (No. 4) に注目すると、隣接する小アスペリティ (No. 3, 5) と破壊のタイミングが交互にずれるため、No. 4 が破壊する時には No. 3, 5 は固着しているため、すべりが阻害されてしまい、結果として通常の低周波微動よりもさらにゆっくりとした超低周波微動 [4] が発生していることが分かる。

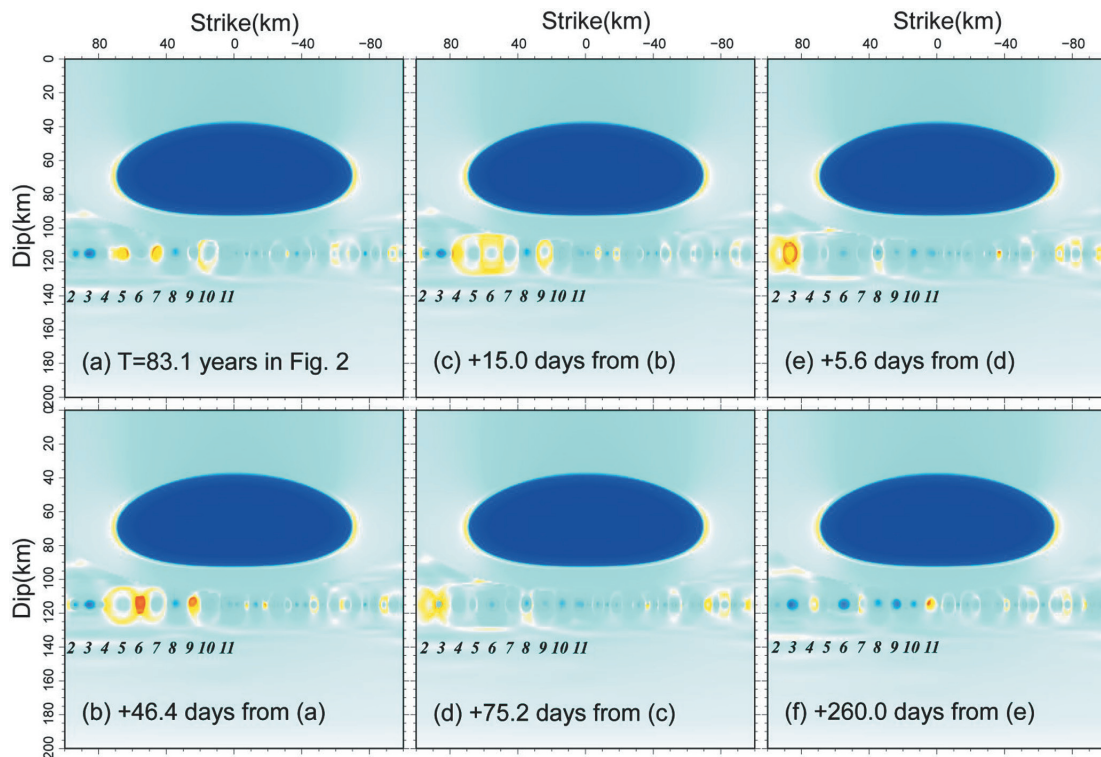


図7. 超低周波微動の発生過程の一例。図の見方は図6を参照。

これらの結果より、沈み込みプレート境界面上の深さ 30km 付近で通常の地震・低周波微動・超低周波微動といった様々なタイプのイベントが発生する要因として、摩擦特性が異なるという物性的な要素の他に、小アスペリティ間のすべりの相互作用（応力擾乱）によっても発生するということが数値シミュレーションから示された。

4. 今後の課題と展望

イベントに伴う応力降下量やアスペリティ内の平均的なすべり速度についてシミュレーション結果と GPS 観測で推定された結果を比べると、ほぼ一致している (表1)。このことは、余効すべり伝播速度という別の物理過程から推定された”高い間隙水圧の存在”という説 [7] によって、深部低周波微動が説明できる可能性を示唆するものである。

表 1 : 小アスペリティ(半径 2.5km, 5km)内で平均した応力降下量とすべり速度の比較

	Recurrence Time (year)	Stress Drop (MPa)	Slip Velocity (m/sec)
Simulation	0.5~0.8 (r=2.5km)	0.02~0.08	10^{-8} ~ 10^{-6}
	1.1~1.7 (r=5km)		
Observed	1.2 [8]	0.04~0.06 [9]	3.2×10^{-8} [9]

3章では数値シミュレーションから確実に結論づけられるものだけを述べたが、他にも面白いことが見えてくる。その一つとして破壊の伝播方向を挙げると、図6に示したように半径5kmの小アスペリティの方が半径2.5kmの微小アスペリティ(図5参照)よりも片側方向に伝播する割合が多くなる傾向がみられ、双方向伝播の頻度は微小アスペリティの方が相対的に高い傾向がみられる。この傾向を図2の観測結果に当てはめると、紀伊半島沖の深部低周波微動の伝播方向が片側に伝播するイベントが卓越しており、四国沖では双方向伝播が卓越していることから、紀伊半島沖の方が四国沖よりもアスペリティのサイズが相対的に大きいと考えられる。この推定を発生時間間隔について照らし合わせると、図2では紀伊半島沖の方が相対的に発生時間間隔が短くなっているが、低周波イベントの発生時間間隔はアスペリティが大きいほど長くなること(簡単に言うと、大地震の方が発生間隔は長くなる)とも調和する。

一方で、本研究で示された移動伝播速度は0.03~3 km/dayとなっており、観測から推定された5~15 km/day [1,2,10]よりも有意に遅いため、伝播速度も定量的に再現できるようなモデルを構築することが、発生頻度について定量的に議論する上で必要となろう。

一般に、アスペリティのサイズが小さいほど応力擾乱に対して敏感に連鎖反応する。一方で、地震に伴う前駆的な応力擾乱は、地震の規模が大きいほど増大する。従って、東海・東南海・南海地震のような巨大地震発生帯の近傍にある低周波微動の活動についても変化が生じ、図2とは異なる移動現象がみられると期待される。本研究の最終目的はまさにそこにあり、スーパーコンピューターを用いた大規模な数値シミュレーションによる現象の再現によって、深部低周波微動を大地震発生前の検知ツールとして活用する手法を見出すことが、今後取り組むべき大きな研究目標である。

[1] Obara, K., 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science* **296**, 1679-1681.

[2] Rogers, G., Dragert, H., 2003. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: the chatter of silent slip. *Science* **300**, 1942-1943.

[3] 小原一成, 2007. スロー地震と水, *地学雑誌*, **116**, 114-132.

[4] Ito, Y., Obara, K., Shiomi, K., Sekine, S., Hirose, H., 2007. Slow earthquakes coincident with

episodic tremors and slow slip events. *Science* **315**, 503–506.

[5] Matsuzawa, T., Uchida, N., Igarashi, T., Okada, T., Hasegawa, A., 2004. Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan. *Earth Planets Space* **56**, 803–811.

[6] 有吉慶介・松澤暢・長谷川昭, 2006. 相似地震震源域における非相似地震発生の可能性, *SENAC* **39**, 131-138.

[7] 有吉慶介・松澤暢・長谷川昭, 2005. 沈み込みプレート境界における余効すべり伝播速度の空間分布, *SENAC* **38**, 3-11.

[8] Miller, M. M., Melbourne, T., Johnson, D. J., Summer, W. Q., 2002. Periodic slow earthquakes from the Cascadia subduction zone. *Science* **295**, 2423.

[9] Miyazaki, S., Segall, P., McGuire, J., Kato, T., Hatanaka, Y., 2006. Spatial and temporal evolution of stress and slip rate during the 2000 Tokai slow earthquake. *Journal of Geophysical Research* **111**, B03409.

[10] Hirose, H., 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** (10), 961-972.