

12 - 11 階層的アスペリティを前提とした短期前兆のメカニズムについて

On possible mechanisms of short-term precursors while admitting hierarchical asperities

中谷 正生 (東京大学地震研究所)

Masao Nakatani (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

1. 震源核 — 「壊れ始め」

地震のように、外部からのさらなる载荷に頼らずに弾性波速度に近いスピードで自発的に広がる破壊現象（滑りも、変形によって強度が低下するという意味で破壊と呼ぶことにする）が開始するには、新たに拡大する滑り域で摩擦の滑り弱化に消費される破壊エネルギー G_c [J/m^2] を上回るレート G (破壊伸展力 [J/m^2]) で、既に破壊フロント近傍に溜っている弾性エネルギーが供給される状況がととのっていなければならない（グリフィスのエネルギー規準）。 G はその時点での滑り域の 1 次元サイズ (L) に比例することが弾性計算で示されている¹⁾。

断層の応力や強度の分布は大なり小なり不均質であるから、滑りはまずどこか弱い場所で始まる。滑り域が小さく G が G_c より小さいうちは自発的に拡大することはできず、テクトニックな外部载荷の上昇によって、応力が摩擦強度に達した領域が新たに滑り域に加わるだけの準静的な拡大しかおこらない。やがて滑り域のサイズが、臨界条件 $G(L) = G_c$ の解である L_c に到達すると、滑り域は外部载荷の上昇を必要とせず自発的に拡大を始め、フロントの拡大速度はあっという間に弾性波限界まで加速する²⁾。

以上の考察からだけでも、地震には有限の大きさの「たね」が先行するはずだが、現実の物質の摩擦のキレの悪さ、すなわち、いわゆる摩擦強度以下の応力でもゆっくりは滑るという観察事実（レートステート摩擦³⁾）を加味すると、 L が L_c に達する少し前からテクトニックな载荷の増加を要せず自発的に滑り域が拡大・加速するフェーズが期待される。これが、地震前兆と絡めて議論される震源核あるいはプレスリップであるが、このフェーズは、 L の成長に伴う G の増大、および、プレスリップによる強度の低下という 2 つのポジティブフィードバック機構により爆発的な破壊に向かって自発的に加速するから、「壊れ始めプロセス」と呼ぶにふさわしい。ポジティブフィードバックだから、一旦このフェーズに入れば最後まで行きそう（空振りしにくい）し、応力が限界値に近付くという段階をスキップして応力が限界値に達することはできないから見逃しもない。よって、決定論的予知は原理的には可能だと、少なくとも筆者は考えていた。

レートステート摩擦によって議論が定量的になった 80 年代後半からは、現実の大断層の G_c は観測可能な L_c をもたらすほど高いのか？ という点に議論が集中したが、この点に関しては以下のコロンブスの卵のような考察⁴⁾ から楽観的な示唆が得られる。

少なくとも沈み込み型プレート境界の巨大地震に関しては、その直接の载荷機構がインターサイスミックな期間の深部の定常クリープの累積であることが測地観測から示されている。よって地震サイクルの後半では、深部クリープ域に累積した数メートル以上の食い違い変位が、その浅部延長で滑り遅れている固着域に巨大な応力集中を作っている。固着域はこの巨大な G に耐えられているわけで、これはとりもなおさず固着域の G_c が相当高いということである。それに対応する L_c は本震破壊域サイズの $O(1/10)$ 程度で、測地観測網のととのった地域ではプレスリップは十分捕捉しうる大きさと考えられる。

2. 階層的アスペリティ説と cascade-up

にもかかわらず、現在、筆者を含め多くの地震学者は、たいていの巨大地震は、そのような大きなプレスリップの段階をスキップして起きていると考えている。これには、以下に述べるようにまっとうな理由があるが、最も重要な観測的根拠は、巨大地震の震源域の一部だけが破壊したと思われる小地震がたくさん存在することである。巨大地震の震源域が一様に高い G_c をもっていれば、上述した、巨大地震の断層で期待される震源核サイズ L_c^* 以下の破壊サイズしかもたない小地震は起きえないはずなのに、実際には日常茶飯事なのだ。

これを説明するためには、第 1 図のように、高い G_c をもつ大地震の震源域（薄い灰色）の中に G_c の低い小領域（濃い灰色）が存在すればよい。これが階層的アスペリティモデル⁵⁾である。第 1 図右のように、この小領域の一部で小規模なプレスリップがおきると、それは、この領域の低い G_c に対応する小さな臨界サイズ L_c^* に成長した段階で地震になり、滑りは、比較的均質である濃い灰色の低 G_c の領域全体に広がる。こうなると、濃い灰色の小パッチのサイズのプレスリップ域ができたのと同程度の G が生じている。したがって、小パッチの大きさが、その外側の大パッチの高 G_c 域の大きな臨界サイズ L_c^* 程度以上である場合には、大パッチにある程度応力が溜っている段階でこれがおきると、引き続いて大パッチの動的な破壊がおきて、大パッチ全体を壊す大地震に cascade-up⁶⁾ してしまう。第 1 図左のような準静的な大きな震源核 L_c^* のプレスリップの発生を待たずに大地震がおきてしまえるのである。なお、仮に L_c^* の小さなプレスリップを観測できたとしても、大パッチでの応力蓄積が十分でない時期であれば cascade-up せず小地震で終わってしまうから、決定論的な予知にはつながらない。

レートステート摩擦を用いたサイクルシミュレーションでは、小パッチが L_c^* と同じ大きさであれば、大地震の約半数が L_c^* の準静的プレスリップに先行されたが、小パッチが L_c^* の 1.5 倍より大きいと、大地震はほぼ毎回 cascade-up で起きた⁶⁾。なお、シミュレーションでは、各パッチの G_c の大きさは、パッチの大きさと正比例、絶対値としては、 L_c がパッチサイズの 1/3 程度になるよう設定した。こうすると、応力降下一定則や、地震のラブチャ速度は弾性波限界の 7 割程度にとどまることが多いという観察が再現できる⁵⁾ からである。この、パッチサイズとそこに割り当てられた G_c （もしくは、臨界滑り距離 D_c ）の比例性が、階層アスペリティモデルが「フラクタル」と言われるゆえんである。断層がフラクタルなのは当たり前と感ずるかもしれないが、実際に G_c のプロファイル（第 2 図）を描いてみると、このモデルで仮定されているのは非常に強烈な不均質であることが実感される。しかし、破壊というものは、いったん走り始めれば G が L に比例するために、尋常の不均質では止めることができない。「地震はいつも止まりかけ」という地震学の観察を説明するには、蛮勇を奮って、これほどにも強烈な不均質を仮定する以外に手はないだろうと、筆者は考える。

3. 「結果的に前兆」 as opposed to 「壊れ始めのサイン」

階層的アスペリティ説を信じれば、準静的な震源核（プレスリップ）の大きさなど「壊れ始め」の情報と、始まった地震がどこまで大きくなるかの相関は薄いと思われる⁷⁾。しかし、対象を M6 以上に絞っても、有意な先行性をもつ（すなわち、1 をこえる確率利得を稼ぐことができる）短期的な先行現象はいくつもある⁸⁾。これらの先行現象の存在を説明するためには、短期先行現象は「壊れ始めのプロセスから派生するサイン」であるという伝統的な準備過程の考え方⁹⁾に拘泥せず、大地震の震源域の準備状況とは関係なくおきる事象が、既に十分な応力が蓄積している時期におきた場合には大地震をトリガしてしまう「結果的に前兆」というシナリオが有力であると筆者は考える。

この考えに至ったのは筆者が初めてではなく、自然発火 vs 引火というたとえが提案され、「壊れ始め」によるものが「真の前兆」、「結果的に前兆になった外的トリガ事象」が「見かけの前兆」と呼ばれている¹⁰⁾。が、筆者はこの表現を避けたい。「結果的に前兆」に過ぎないとはいえ、実際に、その後ほどなく地震がおきたことと物理的な因果関係（トリガ）があり、また統計的に示された確率利得だけ予測に寄与できる¹¹⁾のものであって、確率利得が 1 をこえることが示せていないが、起きた時期が、本当の偶然で大地震の直前だったから地震の前兆だったのではないかと「思い過ぎ」されているにすぎないようなものとごっちゃにされたくないからである。「結果的に前兆」は、決して「ニセ」でも「幻」でもなく、「見かけの前兆」と言ってしまうとミスリーディングである。

第 3 図に、「壊れ始め」と「結果的に前兆」それぞれの、地震発生シナリオにおける役割を図解した。「壊れ始め」（第 3 図 a）については、震源核が代表的であるが、実験室での AE 実験のように、応力が限界強度に近づいたところで微小破壊が急速に増加することに着目したダイラタンシー前兆説¹²⁾などでも論理構造は同じである。応力が断層強度に十分近付いたことによって発生する事象なので、地震サイクルに必然性をもって内在するビルトインプロセスであり、先述したように、原理的には見逃しも空振りもない。

「結果的に前兆」となる外部トリガ（第 3 図 b）は、近所の断層の地震や震源域外でおきる SSE などによる震源域への急速な载荷を例にとり示してある。そのようなアドホックな外部事象に頼らずとも、テクトニック载荷によりいつか地震はおきるし（その場合は前兆なしに地震がおき、見逃しになる）、また、外部からの载荷は、ことさら震源域の応力が強度に近付いているときを狙って起きるわけでもないのだから、たいていは空振りになるようなものである。

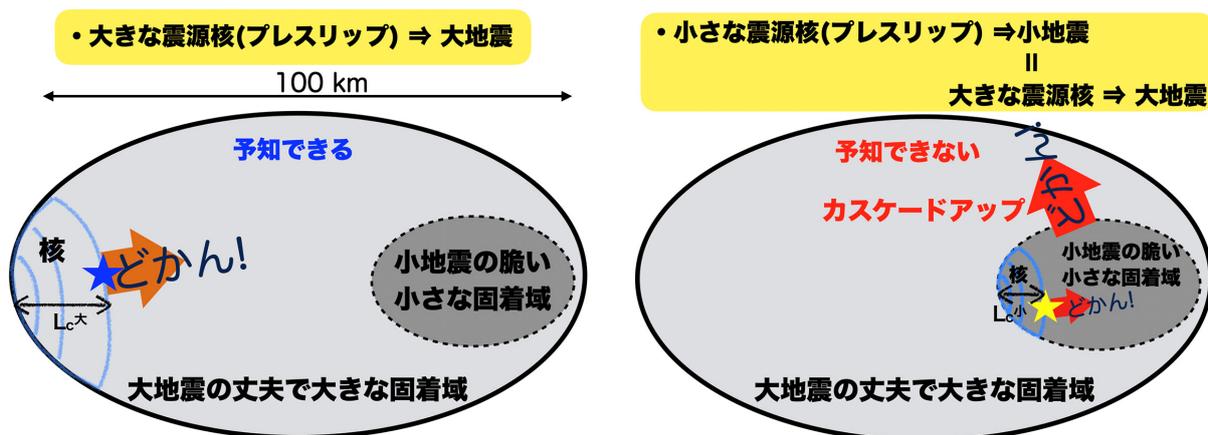
このような外部トリガの観測によって確率利得 1 をこえる予測はできるが、原理的に決定論的な予知には結びつかない¹³⁾。しかし、それでも相当な確率利得を稼ごうことに注意する必要がある。例えば、以下に述べるように、短期的な地震活動の高まり（そのあと大地震がおきれば、前震だったと見なされる現象である）に基いてアラームを立てると、 $O(百-万)$ の高い確率利得で本震の予測ができるが、以下に述べるように、その予測能力の大部分は「結果的に前兆」のシナリオで説明できる。

地震は地震を大森一宇津則に従う余震としてトリガするということを認めれば、最近の地震活動度が高ければ、近い将来の地震発生確率は、全てのマグニチュードの地震について、そのマグニチュードクラスの地震のベースレートから、ETAS¹⁴⁾ 式で算出される同じ倍数だけ上がることになる。このことによって、ETAS を用いて作成された人造カタログの解析¹⁵⁾においても、また自然地震の ETAS 解析¹⁶⁾においても、 $O(百-千)$ の確率利得が得られる。実際の前震活動から得られる予測の確率ゲインが全て ETAS 効果によるとは限らないが、現在知られている前震識別法について解析した結果では、ETAS トリガリングの効果もたらす $O(百-千)$ の利得に、ETAS からは出てこないエキストラな数倍の利得がかかっているように見うけられる¹⁷⁾⁻¹⁸⁾。

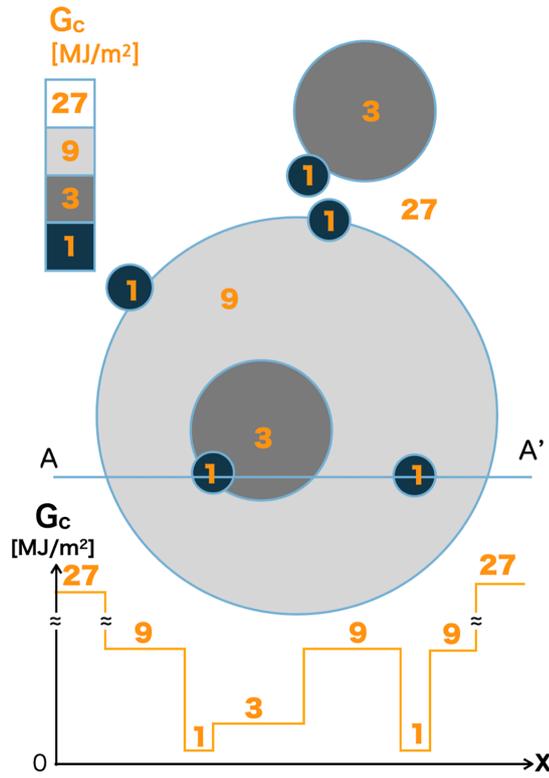
参考文献

- 1) Lawn, B. (1993), *Fracture of Brittle Solids - 2nd Edition*, Cambridge Univ. Press.
- 2) Andrews, D. J. (1985), *BSSA*, **75**, 1-21.
- 3) 中谷正生・永田広平 (2009), *地震* **2**, **69** 特集号, S519-S526.
- 4) Kato, N. (2012), *EPSL*, **353-354**, 190-197.
- 5) Ide, S. and H. Aochi (2005), *JGR*, **110**, B11303.

- 6) Noda, H., M. Nakatani, and T. Hori (2013), *JGR*, **118**, 2924-2952.
- 7) 吉田真吾・加藤尚之 (2005), *地震* **2**, **58**, 231-246.
- 8) 中谷正生 (2018), *予知連会報*, **99**, 465-469.
- 9) Scholz, C. H. (2002), *The Mechanics of Earthquakes and Faulting - 2nd Edition*, Cambridge Univ, Press.
- 10) 津村 健四郎 (2019), *地震ジャーナル*, **67**, 52-53.
- 11) Nakatani, M. (2020), *JDR*, **15**, 112-143.
- 12) Scholz, C. H., L. R. Sykes, and Y. P. Aggarwal (1973), *Science*, **181**, 803-810.
- 13) 中谷正生 (2019), *パリティ*, **34**, No. 2, 84-88.
- 14) Ogata, Y. (1989), *Tectonophysics*, **169**, 159-174.
- 15) Helmstetter, A., D. Sornette, and J. -R. Grasso (2003), *JGR*, **108**, No. B10, 2457.
- 16) Hardebeck, J. L. (2013), *USGS Open-File Rep. No.2013-1165-S*.
- 17) Lippiello, E. et al. (2012), *Sci. Rep.*, **2**:846.
- 18) 前田憲二・弘瀬冬樹・溜瀧功史 (2020), *予知連会報*, **103**, 356-360.

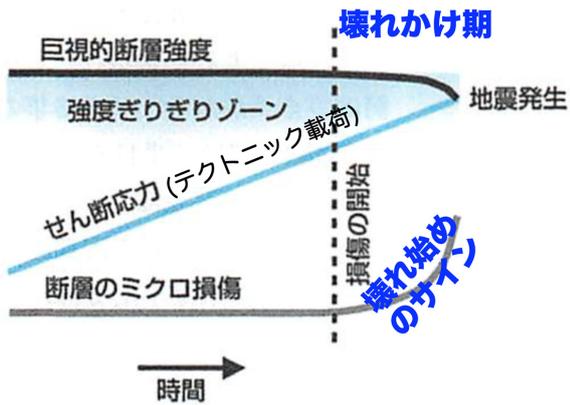


第 1 図 最も単純化した階層的アスペリティと cascade-up の概念図。Noda et al. [2013] にもとづく。
 Fig. 1 Very simplified cartoon of hierarchical asperity and cascade-up. After Noda et al. [2013].

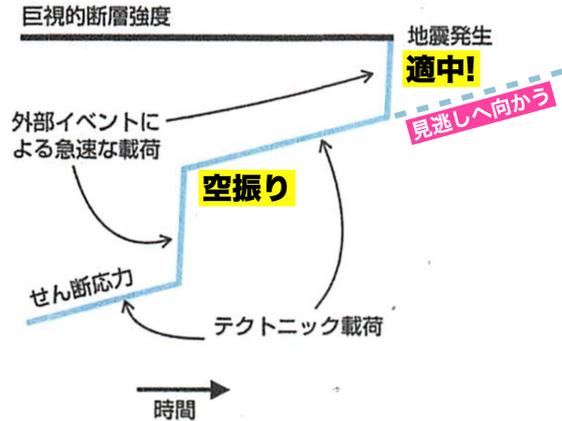


第 2 図 フラクタル的階層アスペリティモデルにおける G_c の空間分布. 下は AA' に沿う G_c のプロファイル.
 Fig. 2 Spatial distribution of G_c in a hierarchical, fractal asperity model. At the bottom is the profile of G_c along AA'.

a) 伝統的な短期前兆のシナリオ



b) 結果として前兆になる(外部からの)トリガ事象



第 3 図 地震発生シナリオと短期前兆の関係. 中谷 [2019] に加筆.
 Fig. 3 Role of precursors in seismogenesis scenarios. Added to Nakatani [2019].