

プレート境界におけるアスペリティと地震予知

東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター 松澤暢

1. はじめに

地球の表面は「プレート」と呼ばれる十数枚の薄い「板」で覆われており、このプレート同士が衝突したり、すれ違ったり、あるいは一方が他方の下に沈み込んだりして、そこで大きな地震が発生しています。発生が心配されている「宮城県沖地震」もこのような地震です。地震というのは世界的に見ても一様に発生しているのではなくて、上記のようなプレートとプレートの境界またはその近傍でほとんどが発生しています。

しかしプレート境界といっても千差万別です。東海・南海沖のように M8 級の巨大地震が繰り返し発生しているところもあれば、福島県沖のように巨大地震が過去に発生した記録の無い領域もあります。

これについて、「(a) 大地震の発生する場所はあらかじめ決まっている」とする考え方と、「(b) 大地震はどこでも発生しうる」という考え方の二通りがあり、どちらが正しいかは長らく論争がありました。最近の研究により、(b) よりは (a) のほうが正しそうだ、ということがだんだん分かってきました（ただし、後述のとおり、どこでも完全に同じ地震が繰り返すというわけでもないことにご注意ください）。ここではそのような最近の研究についてご紹介いたします。

2. 大地震のポテンシャル評価とアスペリティ・モデル

地震とは、地下の断層が急激にすべることによって大地を揺らす現象です。「プレート境界型地震」というのは、二つのプレートの境界が断層面としてすべることによって生じる地震のことです。しかし、そのすべり方には、非常に単純な場合と複雑な場合があるようだということが地震波の解析からわかりました。

このような地震発生の多様性を説明するために、金森博雄先生（現カリフォルニア工科大）は 1980 年頃に「アスペリティ・モデル」と呼ばれる仮説を提唱されました。

「アスペリティ (asperity)」というのは、本来は物体表面の凹凸や出っ張りを意味する英語です。二つの物体の表面をくっつけたとき、実際に接触しているのはそれぞれの面の凸の部分だけであり、凹の部分は接触していません。摩擦実験の分野では、この実際に接触している凸の部分（出っ張りの部分）をアスペリティと呼んでいます。

金森先生はこのような摩擦分野の研究を地震学に導入されて、「プレート境界には、ところどころ強度（摩擦抵抗）の大きな部分が存在しており、それがすべった時に大地震になる」と考えられたのでした。これが「アスペリティ・モデル」です。

このモデルが正しければ、大地震はプレート境界上で大きなアスペリティの存在している場所のみで繰り返し発生することになり、しかも、地震時に大きくすべる領域は毎回同

一であることとなります。しかし、このモデルの検証はそう簡単ではありませんでした。大地震が繰り返し発生していると考えられている領域においても、その繰り返し間隔は長く、また古い地震については観測の質・量とも現在よりも劣るため、同じ場所が本当に繰り返し大きくすべったかどうかの検証はそう簡単ではなかったのです。

このような状況を打破したのが、2年前（2003年）に亡くなられた菊地正幸先生（当時東京大学地震研究所）と先生が指導されたグループによる研究でした。

日本は世界的に見ても古い地震波形記録が残っている国です。菊地先生らは日本の過去の気象庁の地震記録を注意深く解析され、極力同じ観測点のデータを同じ手法で解析することにより、過去の大地震時にプレート境界で大きくすべった領域の相対位置を精度良く推定することに成功したのです。

菊地先生らの結果は、「大地震時に大きくすべる領域は決まっているが、その組み合わせは必ずしも毎回同一というわけではない」ということを示していました。このことは、「アスペリティは永続的に存在しているが、大地震時にすべるアスペリティの組み合わせは毎回必ずしも同一ではない」と解釈すれば、金森先生らが提唱されたアスペリティ・モデルと整合することがわかります。このようにして、アスペリティ・モデルはその提唱から20年を経過して、その基本的な正しさが証明されたのです。

つまり、プレート境界型大地震の発生する場所は基本的には決まっていることとなります。その位置を規定するのはアスペリティの分布です。アスペリティが隣接している場所では、地震時にすべるアスペリティの組み合わせが必ずしも毎回同一ではないということになりますので、完全に毎回同じ地震が繰り返すとは限りません。しかし、基本的に有限のアスペリティの組み合わせを検討すれば良いので、将来の大地震像はいくつかの候補に絞り込むことができます。

「大地震はどこでも発生しうる」とするモデルでは、将来の大地震像の候補の数は無限となります。それが（唯一ではないにしろ）有限の数の候補を検討すれば良いということがわかったのは、地震の長期予測やポテンシャル評価にとって画期的なことでした。

このような地震学の進展を受けて、この次の十勝沖地震は1952年の地震時にすべったアスペリティが再度すべるか、またはその東側のアスペリティと一緒にすべる、と予測した「千島海溝沿いの地震活動の長期評価について」が、地震調査研究推進本部地震調査委員会によって2003（平成15）年3月24日に発表されました。その半年後の2004（平成16）年9月26日に予想通りの位置に十勝沖地震が発生し、アスペリティ・モデルによる予測の正しさがさらに裏付けられたのです。

3．小繰り返し地震（相似地震）と中・長期予測

上記のアスペリティ・モデルが正しいとすると、プレート境界には小さなアスペリティが存在していても良いこととなります。そのような小さなアスペリティが存在しているところは、小さな地震が繰り返し発生することとなります。そのアスペリティ同士の間隔が

離れていれば、アスペリティは常に単独ですべり、まったく同じような地震が繰り返し発生することになります。しかも、地震の規模が小さいために再来間隔が短いので、その繰り返しの検証は容易です。

このような小さなアスペリティの繰り返し破壊によって生じると考えられる地震（小繰り返し地震；small repeating earthquake）は、カリフォルニアにおいて実際に発見され、その後、東北大学によって三陸沖でも多数発見されました。このような小繰り返し地震は、同じ観測点で見ると毎回非常に良く似た地震波形を示すため、「相似地震」とも呼ばれています。

三陸沖では日本海溝から太平洋プレートが沈み込んでおり、その沈み込み速度は基本的に一定であると考えられます。このことから推理すると、小繰り返し地震も再来間隔は一定になりそうです。しかし、実際に観測された小繰り返し地震の発生間隔は、時間変化していることがわかりました。

このような観測から、我々東北大のグループやカリフォルニアのグループは金森先生のオリジナルの「アスペリティ・モデル」に若干の修正を加えました。オリジナルのモデルでは、プレート境界のアスペリティ以外は「強度の小さな領域」でした。新しいモデルでは、アスペリティ以外は基本的に「準静的すべり域（地震波を出さずにゆっくりとすべる領域）」として解釈されています（実際には両者の中間の性質を持つ領域、つまり地震時には高速にすべるが普段もゆっくりとすべっている領域も存在するはずですが、ここでは話を簡単にするために「アスペリティ」と「準静的すべり域」の二つに分類します）。

このモデルでは、アスペリティは普段は固着しているのに、そのまわりの準静的すべり域ではゆっくりとしたすべりが進行します（図1(a)）。そうするとアスペリティには歪が蓄積して、やがては耐えられなくなって高速にすべります（図1(b)）。これがプレート境界型地震の発生になります。まわりがいつもズルズルとすべっているのに、アスペリティは普段は固着しているため、アスペリティは周りより「すべり遅れた」分だけ地震時に一気にすべると考えられます。そうであれば、小さなアスペリティのすべり（つまり小繰り返し地震のすべり）を積算すれば、その小さなアスペリティのまわりの準静的すべりの積算と一致するはずですが。

このような考え方から、プレート境界上のゆっくりとしたすべり（準静的すべり）が小繰り返し地震からモニターできるようになりました。同じことはGPSでもできますが、小繰り返し地震のほうが場所によってはGPSよりも高分解能で調べることができます。

プレート境界で発生する大地震も上記と同様の機構で発生しているはずですが、つまり、アスペリティのまわりの準静的すべりよりもすべり遅れた分が、ある程度の量に達するとアスペリティが耐え切れずにすべり出してしまおうと考えられるため、このアスペリティのまわりの準静的すべりをモニターしていれば、アスペリティがそろそろすべり出しそうか、つまり大地震の発生が近いかどうかをある程度は予測できると期待されます。そして、この準静的すべりのモニターは、上記のとおり、GPSや小繰り返し地震ですでに

ある程度可能となっているのです。

残念ながら、今の我々の知見では、この「すべり遅れ」がどの程度になったら地震が発生するのか高精度で推定することはできません。しかし、前回のすべり量と同程度になったら、そろそろ地震発生が近づいているということ是可以するはずで

すが、決定論的な地震予知は困難であっても、GPS と小繰り返し地震のデータが蓄積され、大地震の解析から大きなアスペリティの位置が明確になり、さらに海底地殻変動観測も軌道に乗れば、確率論的な中・長期予測はかなり高度化できそうだという目処がつきつつあります。

4. おわりに

プレート境界型地震については、上記のように原理的には中・長期予測を高度化できる目処がつきつつありますが、実際問題としては、大地震の1サイクルを経験しなければ十分なデータは蓄積できません。

東北地方の青森県東方沖～宮城県沖は、M7 級の地震が繰り返し発生し、その再来間隔は 30～40 年程度で他よりは短い

ため、まずはこの領域で経験を積み、モデルの高度化を行うのが効率良いと我々は考えています。それでも最低でも 30 年はかかりそうです。M8 級になると 1 サイクルに 100 年程度かかります。大地震という低頻度大災害の研究というのは、どうしても時間がかかるものだということに、ご理解をいただければありがたく存じます。

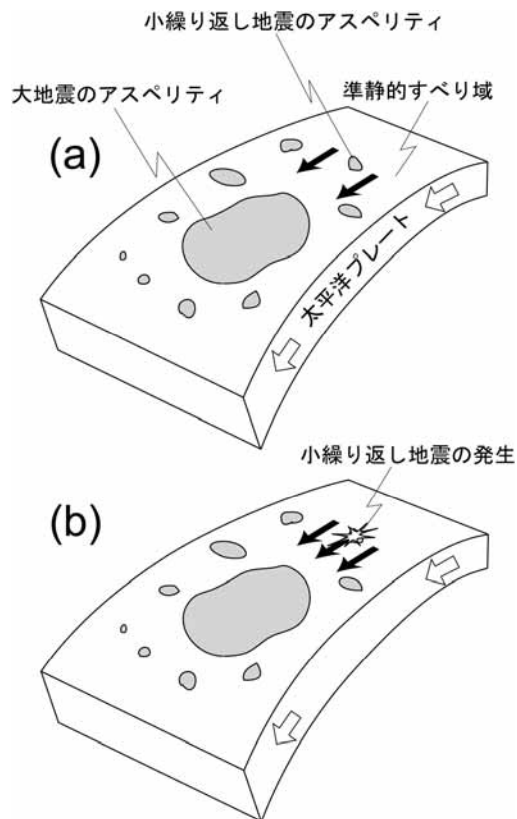


図1. 小繰り返し地震発生概念図。(a) アスペリティのまわりはズルズルとすべっている。(b) やがてアスペリティが耐え切れなくなってすべる。これが地震となる。この地震のすべり量の積算はまわりのズルズルとしたすべり(準静的すべり)の積算と一致するはずである。