

## 12-13 最大地震について

### What is the largest earthquake we should prepare for?

松澤 暢 (東北大学大学院理学研究科)

Toru Matsuzawa (Graduate School of Science, Tohoku University)

#### 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震が発生するまで、我々はM9の地震がこの地域に発生するとは思っていなかった。地震や津波に対する対策において「想定外」という事態が発生してしまったのは、地震学者がM9の可能性を指摘して来なかったからである。M9を考えなかった理由は数多くあるが、一番の原因は最近百年のデータを見る限り、この地域で長期に渡って歪エネルギーを蓄積しているように見えなかったことにある。

我々にわかるのは歪エネルギーの現時点の増加率だけであり、歪エネルギーそのものではない。このため、前回のM9の地震のあと、数百年にわたって歪エネルギーを貯め続けても、最後の百年間における歪エネルギーの増分と放出量が釣り合ってしまうと、最近の百年のデータを見ても歪エネルギーが蓄積していないように見えてしまう。今回の地震は百年のデータだけでM9のポテンシャル評価を行うことの危険性を明確に示した。M9が想定されていれば、仮に事前に対策は取れなくても、地震が起こった直後の初動体制はかなり異なっていたはずであり、被害をもっと軽減できたはずである。

今、我々は、このM9の地震が最大だと思っている。しかし上記の反省を踏まえれば、本当にそれが最大なのかどうか、十分な検証を行う責任が地震学者にはあるはずである。なお、以下の検証において、M10の可能性を否定できないとしているが、日本の近くでM10が必ず起こる、ということをも主張するものではないことに注意してほしい。

#### 2. 世界で起こりうる最大の地震

自己組織化臨界現象 (SOC) の研究の大家である Bak は、その著書において、M12 の地震すら起こりうることを述べている<sup>1)</sup>。地球のサイズから考えて、断層サイズが約 10,000 km まで大きくなれると考え、通常のスケーリング則がそこまで適用可能であれば、確かに M12 となりうる。しかし、通常のスケーリング則では、断層面の幅と長さの比は概ね 1/2、断層の滑り量と幅の比は概ね  $10^{-4}$  程度になるので、M12 となるためには、長さ 10,000 km の断層の幅は 5,000 km、滑り量は 500 m にもなる。実際、これで剛性率を 50 MPa と仮定すれば、地震モーメントが  $1.25 \times 10^{24}$  Nm となり、Mw は確かに 10.0 となる。

しかし、地球の半径は約 6,400km、流体である外核の表面 (CMB) までの深さが約 2,900km であるので、断層の幅が 5000 km というのは、たとえ断層面が傾斜していたとしても、リソスフェアはおろか下部マントルまでを含むマントルすべて破壊する地震に相当するので、このようなことは物理的にありえないと考えて良いだろう。

断層の幅がもっとも広くできるのは沈み込み帯であり、そこでは 200 km くらいの幅でプレート境界型地震が発生しうる。プレート境界型地震の平均的な応力降下量として 3 MPa、剛性率を 30 GPa とすれば、断層の幅が 200 km なら滑り量は 200 m 程度となる。この場合、断層長が 10,000 km あれば、Mw 10.0 の地震となる。プレートの沈み込み方向が変化せずに海溝が連続的につながってい

る領域の最大は、マリアナ海溝－伊豆・小笠原海溝－日本海溝－千島・カムチャッカ海溝－アリューシャン海溝の 8,800 km にわたる海溝列である。これが仮に断層幅 200km で 20m の滑りが生じた場合、Mw 9.9 の地震となる。

このようなくつもの海溝が連鎖して壊れる可能性は考えにくい、隣り合った二つの海溝が同時に滑ることくらいは有りうるかもしれない。そう考えた場合、仮に応力降下量が 10 MPa 程度であれば、滑り量は 60 m にもなる。これは、東北地方太平洋沖地震の最大滑り量に匹敵し、そのような巨大な滑りが断層全体で生じると仮定した場合には、日本海溝から千島・カムチャッカ海溝までの 3,000 km が一気に滑れば Mw 10.0 の地震となる。日本近傍では単独で 3,000 km を越えるような海溝はないが、例えば長さ 3,400 km のアリューシャン海溝が 60 m 滑れば Mw 10.0 の地震になり、また、長さ 5,300 km のペルー・チリ海溝が 60 m 滑れば Mw 10.3 にもなる。

それでは、実際にはどこまで大きくなれるのであろうか？まず、断層の幅について最大を見積もって 300 km と仮定する。応力降下量としては最大規模の 20 MPa を仮定すると滑り量は 200 m くらいになる。さらに断層の長さとしては、環太平洋のすべての沈み込み帯が同時に滑ったというありえないくらい巨大な規模を考えても 20,000 km というところであろう。これらから期待される Mw は 10.9 となり、ここまでとんでもない値を選んでも M11 には届かない。

この計算で応力降下量を 20 MPa と仮定しているが、これは、東北地方太平洋沖地震のように応力をすべて解放してしまうような地震に相当すると考えられる。つまり、初期応力が約 20 MPa で地震後の残留応力がほぼ 0 MPa の場合に相当する。このとき、地震時の平均応力は 10 MPa となるから、この地震によってなされる仕事、つまり放出されるエネルギーは、 $1.2 \times 10^{22}$  J となる。残留応力がゼロより大きければ、このエネルギーはさらに大きくなる。これは、恐竜絶滅の原因となった、メキシコのユカタン半島にある Chicxulub Crater を作った小惑星衝突のときのエネルギー ( $2.2 \times 10^{22}$  -  $7.4 \times 10^{22}$  J)<sup>2),3)</sup> に匹敵する。

以上見てきたように、ありえないほどの長さを仮定しても M11 という規模の地震は発生せず、またその有りえないことが実際に発生したとしても、それは日本の減災対策という枠組みではなく人類が生き残れるか否かという次元の問題であり、実質的には通常の減災対策や初動体制を検討しても意味が無いと考えられる。

以上の検討により、我々が考慮すべき最大規模は M10 と考えられる。このような規模の地震が過去に起こった記録はなく、地質学的にも証拠はない。しかし、M10 が生じたときに何が起こるのかを検討してみなくては、地質学的に何を調べればよいのかも見当がつかないだろう。

起こる可能性が極めて小さい場合、それに備えた対策を普段から用意しておくことは行政的には困難である。しかし、それでも仮に発生した場合に何が起こるのかをシミュレーションしておくことは、緊急時の迅速な判断に繋がり、それが減災に役立つはずである。たとえば、M9 が起こった場合の地震動や津波のシミュレーションが十分になされて、その結果が広く伝えられていれば、今回の地震の際にも、より早く、より正しい津波警報が出せたはずであるし、また住民も既往最大ではなくて、最悪の事態としてどこまで津波が来る可能性があるのかわかっていれば、経験したことの無い大きな揺れに見舞われたときに、最悪の事態が生じたと判断して、より高所に避難できていたはずである。

仮に上記のシナリオで M10 が発生した場合、地震の継続時間は 20 分～1 時間程度続くことになる。これは、地震動がおさまってから避難したのでは間に合わない可能性が高いことを意味している。滑り量が 60 m とした場合、断層上の各点での滑りの継続時間は 1～3 分程度と見積もられる。

基本的には震源に近い海岸から津波が到着し始めるが、地震の滑り域は時間とともに震源から遠ざかるはずであり、地震動は長時間継続するものの、時間とともに地震動は小さくなることが期待される。このため、数分間は待機して、そのあと、地震が継続していても避難することが最も適切な行動となるだろう。今回の地震についても、実際には巨大な余震が数分おきに発生した中で住民は避難しており、それと同様だが振動が少しずつ小さくなりつつも絶え間なく何十分にもわたって続くという状況で避難する必要があることを知らせておく必要がある。また、巨大な津波は複数の国を襲うはずであり、太平洋全域に被害をもたらす、かつ津波の継続時間は極めて長くなる。このような場合、他国からの援助は期待できない可能性も考えられる。

また、このような最悪 1 時間も破壊が継続するような巨大な地震の場合、現在のやり方では短時間に規模を正しく推定するすべはない。まずはどこまで断層破壊が広がったのかという推定をいち早くかつロバストに行う手法の開発が一番重要のように思う。

過去の地質学的証拠を調べようにも、M10 が起こった時に何が生じるのかわからなければ調べようがない。M10 の具体的なイメージを得るためには、そのような地震・津波のシミュレーションを行ってみることがまず必要だろう。

### 3. 巨大な地震の発生頻度

M9 以上の地震はめったに発生しないため、個々の沈み込み帯での再来間隔の推定は極めて難しい。そのため、全世界の統計から先験確率を求め、そこからベイズ推定で求めるのが一番合理的と考えられる。全世界の統計といっても、データが限られているため、極めて大雑把な推定にしかならないが、それでもまったくないよりはましであろう。

まず仮定として、M9 の地震の典型的な断層サイズを 500 km x 200 km とする。この場合、平均すべり量を 20 m、剛性率を 30 GPa と仮定すれば Mw 9.1 となる。このように断層幅が大きいことが必要になるので、M9 の地震は沈み込み帯にのみ発生すると仮定して問題ないだろう。世界の海溝の全長は約 40,000 km と考えられるため、M9 の地震を起こす長さ 500 km の断層が 80 箇所は存在しうることになる。ここではこの 80 箇所の断層が独立に M9 の地震を起こすことができ、またその平均発生間隔は場所によらず同じと仮定する。

世界的には M8.8 以上の地震が過去 60 年間に 7 回発生しており、M9 の地震は約 10 年に 1 度発生していたことになる。この頻度で続けば、80 箇所の断層が全部壊れるまでに 800 年かかることになる。この場合、1 箇所につき平均発生間隔が 800 年程度であれば辻褄はあうことになる。滑り欠損速度が 3 cm/年ならば 800 年たてば 24 m の滑りを起こしうることになり、M9 の地震が起きてもおかしくない。一方、世界中の沈み込み帯すべてで M9 の地震が起こりうるというのはありえないと考えて、実際は 80 箇所ではなくて 50 箇所だとすれば、平均発生間隔は 500 年程度となる。滑り欠損速度が 4cm/年なら 500 年で 20 m となるため、この場合も M9 の地震は起こってもおかしくない。逆に最近の約 10 年に 1 度発生というのがたまたま発生頻度の高い時期を見ていて、実際はもっと頻度が小さいと考えれば、再来間隔は 800 年よりも長くなる。

以上、極めて荒い概算ではあるが、M9 の先験的発生間隔としては 500~1000 年くらいを考えてベイズ推定を行えばよいと考えられる。

使えるデータがあれば、さらに絞り込むことができる。M9 の地震では最大滑りは 20m 以上になるはずなので、最小間隔は  $20\text{m} / \text{【プレート収束速度】}$  で計算できるはずである。たとえば、収束速度が 8cm/年なら、最小間隔は  $20 / 0.08 = 250$  年となる。すべり欠損の推定ができていればさら

に絞り込めるが、陸の観測のみでは海底下のプレート境界については推定誤差が大きいのが普通のため、その推定誤差を考慮して最小値と最大値を推定する必要がある。たとえば、滑り欠損がゼロに見えても、推定誤差が 1cm/年 あるのなら、最小間隔は  $20 / 0.01 = 2000$  年となる。

通常の地震であれば、一回り小さい地震の発生頻度と  $b$  値から大きな地震の発生頻度も推定することができる。しかし、M9 の地震は沈み込み帯の幅全体を破壊しており、それ以上、幅は大きくなりえない。このように幅が飽和してしまえば、M9 より小さな地震の統計を、それより大きな地震に外挿することはできないと考えられる。実際、 $b$  値はほぼ 1 であることが知られており、M9 が 10 年に一度発生するのであれば、M10 は 100 年に一度は世界のどこかで発生してよいはずだが、明らかにそのような地震は発生していない。

M10 は、起こりうるかどうか不明なのであるから、その発生間隔は当然不明であるが、とりあえず、1~10 万年くらいと考えておけば良いように思う。これは、M9 と比べてオーダーで異なる頻度のはず、ということと、火山で言えば、やはり広域に巨大な被害をもたらすカルデラ噴火に対してどのように対応するのか、というのと似たところがあるという意味で、カルデラ噴火と同程度の再来間隔を考えておけば良いと思われるからである。

#### 4. おわりに

本稿で述べたのは、最大規模の地震についての極めて荒い推定にすぎない。学問的には極めて稚拙なレベルの話であり、通常、学会等での検討の俎上に載せられるような話ではない。ましてや M10 が必ず起こると主張しているものではない。しかし、このような検討を無意識のうちに避けてきたことが東北地方太平洋沖地震の被害を大きくしてしまった原因の一つであったという反省のもと、あえて述べさせていただいた。

なお、本稿を書いている最中に米国地球物理学連合 (AGU) の 2012 年秋季大会が開催され、Jackson and Kagan がもっと丁寧な地震統計の解析結果を、「10」という極めてコンパクトなタイトルで発表していた<sup>4)</sup>。彼らは地震の規模別対数頻度分布が、M9.6 以上では G-R 式のような直線では表せなくなるものの、それを考慮しても、M10 の地震の可能性は否定できないと報告した。彼らは「再来間隔」とか「最大規模」といった概念は使わず、「ある期間の間に発生確率が 5% を越える地震の最大」を「その期間中に考慮すべき最大の地震」と定義している。M9 以上はデータが少ないので推定誤差が極めて大きくなるが、彼らはこのような考え方から、M10 が発生する可能性を考慮することが必要となる時間スケールとして、1000 年~10 万年という期間を示している。

#### 引用文献

- 1) Bak, P., "How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality", Copernicus Books, Springer, New York, 212pp., 1996.
- 2) Schulte, P., et al., The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary, *Science*, 327, 1214-1218, doi:10.1126/science.1177265, 2010.
- 3) Ivanov, B. A., Numerical modeling of the largest terrestrial meteorite craters, *Sol. Syst. Res.*, 39, 381-409, 2005.
- 4) Jackson, D. D., and Y. Y. Kagan, 10, Abstract S24A-08 presented at 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 3-7 Dec., 2012.