

M10は起こりうるか

京大名誉教授 梅田康弘

1. はじめに

日本で起こる最大の地震はM8クラスとわれてきましたが、2011年にはM9が起きてしまいました。あるマグニチュードの地震が10回起こると、そのひとつ上のマグニチュードの地震が1回起こるというG-R則（Gutenberg – Richter's formula, 2012年1月の基礎講座）に従えば、M8が10回起こればM9が1回、M9が10回起こるとM10が1回起こる勘定になります。この法則の数学的な面だけを見ればM11でもM12でも起こりうることになります。

しかし、地球が真っ二つに割れる以上の地震は起こりようもありませんので、物理的に考えれば当然、地震の規模には上限があります。さらに地球物理的に考えれば、上限はもっと制約されます。地球上で地震はどこまで大きくなりうるのか、すなわちマグニチュードの上限について考えてみます。

タイトルは「M10は起こりうるか」になっていますが、この基礎講座では、起こるか否かの議論ではなく、マグニチュードの上限はどのような条件で決まるのかについて考えていきます。もっとも条件に関する学説とか定説と言ったものはありませんので、基礎資料を基に、各自で最大マグニチュードを考えていただきたいと思います。

2. 海溝とプレート境界

マグニチュードは断層の長さ（L）と幅（W）、それに断層のずれ（D）を掛け合わせたものに比例することは、第1回の基礎講座で述べました（2011年6月1日）。従ってマグニチュードの上限を求めるには、L（Length）、W（Width）、D（Dislocation）、それぞれの上限を求めることになります。

理由は次節で述べますが、M9を超えるような巨大地震は、内陸では発生しにくく、大抵は沈み込むプレート境界で発生します。地図上で沈み込むプレート境界がよくわかるのは海溝です。プレートの沈み込みによって海が深くなっているからです。Google earth から北西太平洋の半球を示したのが図1です。海の色が濃いところが海溝で、そこから太平洋側のプレートは沈み込んでいます。

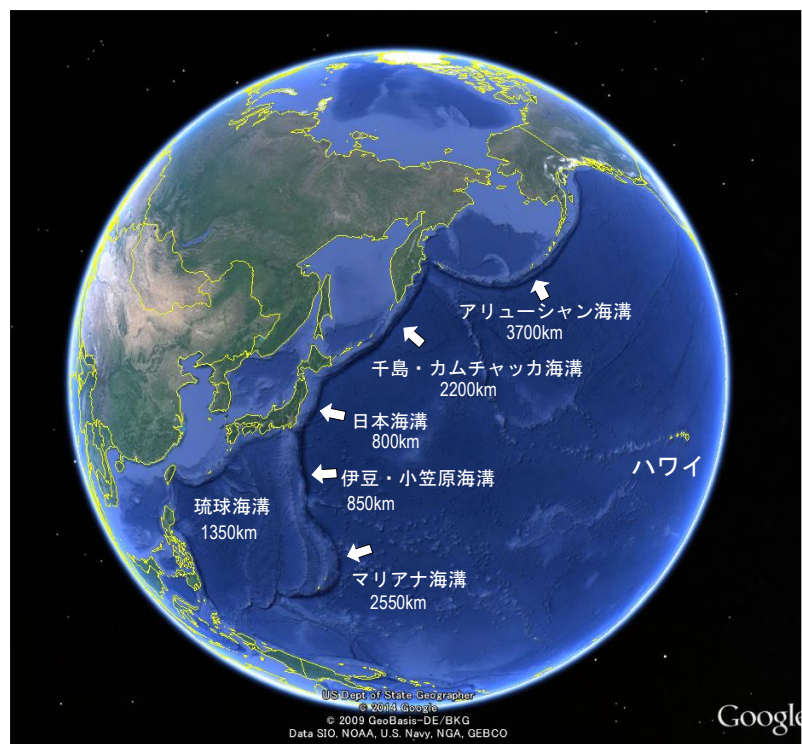
どの海溝も弧状になっているのは、球の表面が球の中に沈み込んだとき、表面と同じ面積を保つためには、表面の縁は弧にならざるを得ないからです。柔らかいゴムボールの表面を指で押さえると、へこんだ周りが弧状になることを想像してもらえばいいと思います。

太平洋プレートを生み出しているのはハワイ付近にある巨大なホットブリュームで、マ

ントルから湧き上がってきて、太平洋の縁で沈み込んでいきます。このため、太平洋の縁でのプレートの運動方向は、図 I の白矢印で示しましたように、ハワイ付近を中心として放射状になっています。

図 1 北西太平洋の海溝 (Google earth より).

海溝名の下の数値は海溝の長さ (理科年表, 丸善, 2010 による)



3. 断層の長さ

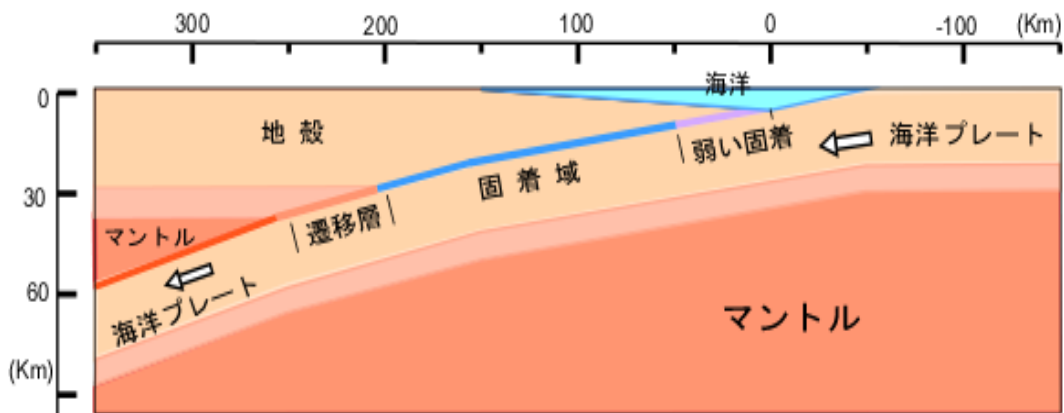
アリューシャン海溝と千島・カムチャッカ海溝の境界は、ふたつの弧が接していることがよくわかりますが、弧の境界はプレートがふたつに分かれているところでもあります。元々はひとつの太平洋プレートだったのですが、図 1 の白矢印のように、北から南へ緯度によって運動方向が違ってきますから、どこかで切れて分離せざるを得ません。この切れ目が海溝の境界です。これより深部では、プレートは断裂しています。この断裂を超えるような超巨大地震は起こりにくいのではないかと、私は考えます。

日本海溝と伊豆・小笠原海溝のように、弧の境が明瞭でなく、プレート運動の方向もほぼ同じ場合は、両海溝をまたがるような地震が発生する可能性は否定できません。弧の成り立ちや、ふたつ以上のプレートが連動する場合については後で述べますが、ここでは図 1 の中では最も長いアリューシャン海溝で、起こりうる最大地震を見積もることにします。アリューシャン海溝の全長は 3700km です。この長さがここで起こりうる地震断層の最大の長さになります。

4. 断層の幅の最大値

内陸で発生する地震の断層面は垂直に近いので、断層の幅は、地殻の厚みである 30km ~40km よりも大きくはなれません。一方、海のプレートは斜めに沈み込みますから、陸のプレートとの接触する幅は大きくなります。沈み込む角度は、沈み込み始め付近では 10 度 ~15 度くらいですから、接触面の幅は 30km の厚みに 15 度で接する場合は 116km, 40km の厚みに 10 度で接する場合は 230km にもなります。

図2 海洋プレートと地殻の接触状態を示す。固着域に弱い固着域と遷移層も加えると、プレートの接触面の幅は 250km に達する。



プレート境界で発生する地震の断層幅 (D) を検討するため、一般的なプレート境界の断面を図2に示しました。図の右から海洋プレートが押し寄せてきて、左側の陸のプレートの下に沈み込んでいる状態を描いています。押し込められた陸のプレートが一挙に跳ね返るときが地震の発生で、普通は「固着域」と示したところが一挙にずれて強力な地震波を放出しますので、地震学的にはこの領域を地震断層の幅としています。しかし M9 を超えるような巨大地震ではこの状況は変わってくるようです。

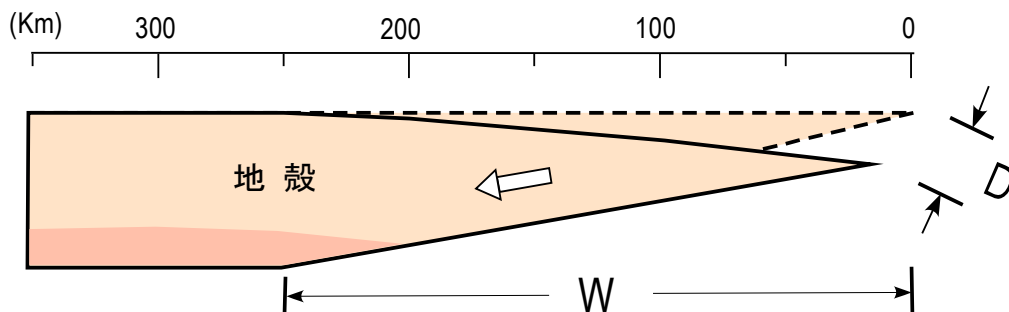
浅い部分の「弱い固着域」は、ずるっと滑るので強力な地震波は出ないのですが、2011年東北地方太平洋沖地震のように、ずるっと滑っても大津波を引き起こしましたので、この部分も断層の幅に入れることにします。「遷移層」もまた、常はずるずると滑っていて強烈な地震波は出ませんが、固着域のずれに引きずられて動く可能性がありますので、断層の幅の最大値にはこの部分も勘定に入れることにします。

図2では海洋プレートの沈み込む角度は、沈み込み始めは 10 度、固着域の途中からは 15 度、マントルでは 20 度になっています。どのプレートでも沈み込み初めから深さ 50km ~60km までは、このくらいの角度です。そうしますと、図に示しましたように、だいたい「弱い固着域」が 50km, 「固着域」は 150km, 「遷移層」が 50km と、合計で 250km が断層の最大幅となります。

5. 断層のずれの最大値

次に断層のずれの大きさですが、これは無理やり押し込まれた地殻が、どのくらいの変形に耐えられるかに依存します。その様子を図3に示しましたが、断層の幅 (W) に対する変形すなわち、ずれ (D) の比率は、観測結果からおおよそ 10000 対 1 であることが知られています。W が 100km だったら D は 10m という具合で、これ以上の変形には耐えられず、跳ね返って地震になります。前節で断層の幅の最大値は 250km としましたから、この比率を適用しますと、ずれの最大値は 25m となります。

図3 地殻はどのくらい曲げられるか。 W と D の比率は 10000 対 1 程度。
W=250km とすると D は 25m になる。



6. モーメントマグニチュード (M_w)

以上のように断層の幅とずれについては最大値が推定できましたから、長さ 3700km のアリューシャン海溝で起こりうる最大の地震を見積もることにします。

まず地震モーメント (M_0) を求めます。第 1 回の基礎講座で説明しましたように、 $M_0 = \mu LWD$ で、剛性率 (μ) は $3.5 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ (ニュートン/平方メートル) を採用します。断層の幅とずれの大きさは前 2 節の説明のとおり、それぞれの最大値は 250km と 25m ですから、 $M_0 = \mu LWD = 3.5 \times 10^{10} \text{N/m}^2 \times 3700 \text{km} \times 250 \text{km} \times 25 \text{m} = 8.093 \times 10^{23} \text{Nm} \doteq 8.1 \times 10^{23} \text{Nm}$ となります。

モーメントマグニチュード (M_w) は $M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$ が定義ですから、これに上記の M_0 を代入しますと $M_w = 9.87 \doteq 9.9$ となります。これが地震学的な制約を考慮したときのアリューシャン海溝での最大の地震マグニチュードです。

アリューシャン海溝のプレート境界が一挙に滑った場合には、M10 に近い地震が発生しうることがわかりました。

7. その他の海溝沿い地震と連動した場合

マグニチュードは断層の長さ、幅、ずれの大きさに決まりますが、4 節で説明しましたように、幅には限界があります。幅 250km は遷移層まで含めた最大値で、これ以上大きくす

ることには無理があります。幅に上限がありますので、5節で述べたずれの大きさも、おのずから上限があります。そこで、幅は250km、ずれの量は25mとして、断層の長さを変えた場合のマグニチュードを図4に示しました。

5節では断層の幅とずれの大きさの比率を1/10000としましたが、図3のように海洋プレートと接する地殻が三角形で、先端がとんがっている場合は、先端のほうのずれは大きくなる可能性があります。1/10000は平均値ですが、少し大きめに見積もって2/10000も検討してみます。この場合のずれの最大値は、25mの2倍の50mになりますので、D=50mとした場合のMとLの関係を図4に点線で示しました。D=25mに比べ、Mは0.2だけ大きくなり、グラフではその分、上にシフトしています。

図4 断層の長さとのマグニチュード。実線は25mずれた場合、点線は50mずれた場合

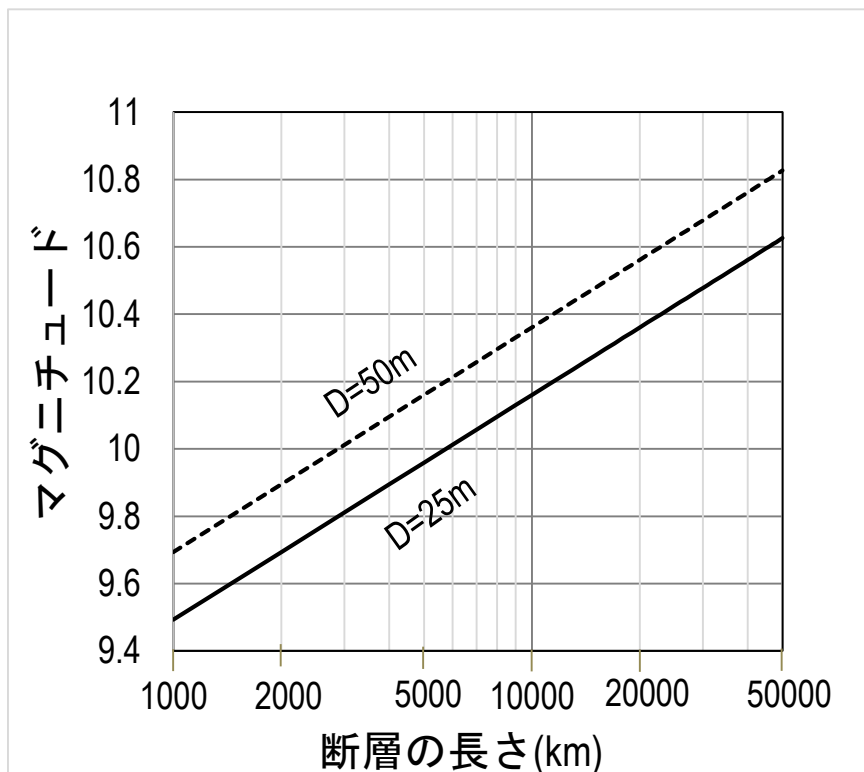


図1に示した以外の、世界の主な海溝の長さは表1に示しておきました。地図上で海溝を見て、ふたつ以上連動した場合の長さを求め、図4からマグニチュードを推定してみてください。例えば、千島・カムチャッカ海溝－日本海溝－伊豆・小笠原海溝－マリアナ海溝が連動したとしますとその全長は6400kmで、マグニチュードは10.0から10.2になります。

世界中の海溝の長さを足し合わせた全長は約40000kmとされています。ちょうど地球の全周と同じです。これがいっせいに破壊したとしますと、図4からM10.6～M10.8と推定されます。これ以上のマグニチュードは地球物理学的には考えられません。

表1 海溝名と海溝の長さ

ジャワ海溝	4500km
チリ海溝	3400km
ペルー海溝	1800km
中米海溝	2800km
トンガ海溝	1400km
ケルマデック海溝	1500km

理科年表 (2010) 丸善より

8. おわりに

地球上で起こりうる「最大地震について」は、東北大学の松沢暢教授が、2012年11月の地震予知連絡会において発表されました。論文は予知連絡会報 89 巻 12-13 に掲載されています。松沢先生は、M10 が起こった場合にどんなことが起こるかも検討されています。また M9 の発生頻度についても興味ある考察を行なっておられます。

1 節のはじめにでもお断りしましたように、マグニチュードの上限を決める条件に関する定説はありません。ただ、ここで述べた条件を推定する手法については、大方の地震学者の考えるところだと思います。

複数の海溝に沿ったプレートが連動するかどうかについては、議論の余地は大いにあります。7 節では、千島・カムチャッカ海溝からマリアナ海溝まで連動することを考えましたが、そのうち日本海溝と伊豆・小笠原海溝は、もともと日本列島に沿って弧状になっていたのですが、フィリピン海プレートの誕生で、伊豆・小笠原海溝以南が東に押しやられ、今の形状になっています。こういう背景がわかっていると、海溝に沿った4つのプレートが連動すると考えることには大いに抵抗があります。このようにそれぞれのプレートの生まれ育ちまで調べると、地球物理的な理解がいつそう深まると思います。

過去にM10、あるいはそれを超える地震があったかどうかは興味あるところですが、残念ながら、そういう証拠は見つかっていません。図3の跳ね返りが、角度15度でD=50m変動したとしますと、隆起量は13m近くになります。地質学的にそのような隆起が認められたとしても、地震波を出すような急激な変動だったかどうかの証明はできません。もしM10ならばその隆起は3000kmにわたって続くはずですが、そのような証拠もありません。地殻の隆起・沈降が比較的良好にわかるのは、海水位と比べられる海岸ですが、M10の発生頻度が数万年以上だったら、気候変動による海進・海退の影響と区別がつかないかもしれません。

2014年7月15日 梅田