

東日本大震災

～ 余震のエネルギーの大きさと発生頻度の関係 ～

2007MI250 恒川 弥士 2008MI004 会場 文裕

指導教員：尾崎俊治

1 はじめに

地震とは、断層と呼ばれる地下の岩盤のずれが生じることで発生する。

断層のずれによって生じた振動は、地面を媒質とした地震波となり地中を伝わって地表にまで影響を及ぼす。

地震には本震、前震、余震の3つがあり、そのエネルギーを表すマグニチュードと揺れの大きさを表す震度というものがある。また、マグニチュードは世界共通の尺度だが、震度は日本独自の尺度であり、海外にはまた違った尺度がある。

昨年起こった東日本大震災は、東日本に甚大な被害を及ぼした。その被害は主に余震の影響である。現在でも余震への警戒を解くことは出来ない。

そこで、今回起こった東日本大震災の主に余震に注目し、地震のマグニチュードの統計を取り、余震がグーテンベルグ・リヒター則に近い数値になるか、また、地震がランダムな現象を記述するポアソン過程（各過程で起こる割合 個/時間）に従うかどうかを検証したいと考えた。

2 地震の種類

2.1 本震とは

本震とは地震の発生において、ある地域で一定の期間内に連続して発生した地震のうち、最も規模の大きな揺れのことをいう。本震は群れをなして起こる一連の地震のうち一つだけ格段に大きい。

一般に、本震は最大余震に比べてマグニチュードが1程度大きい。また、本震発生後には余震が頻繁に発生するため、本震を決定することは容易とされているが、稀に同じ程度の規模の地震が複数回発生して本震が決定しにくいこともある。

地震学的には本震が複数あると考えるか、規模の大きな前震や余震が発生したと考えるか、判断が分かれる。

2.2 前震とは

前震とは本震の前に、本震の震源近くに発生する小さな地震のことである。

本震後に起こる余震よりも規模が小さく数も少ない。前震以外の地震と目立った違いがないため、本震の前に前震と認識することは難しい。規模の大きな地震でも、前震が観測されない場合も少なくない。

前震は、本震の数時間から数日前に起こることが多いが、数分前、数ヶ月前に起こることもある。さらに、比較的大規模な地震でも、前震が観測される確率はおよそ

1割程度である。

2.3 余震とは

余震とは、本震とは同時に起こらず、時間が経ってから続発する地震のことである。

規模としては、本震より小さいことが多いが、稀に本震に匹敵するぐらいの地震が起こることがある。

また、地震によって期間も回数もまちまちで、体に感じるものだけで数10回から1000回ほどあると言われている。

ごく小規模の余震は本震発生から100年以上続くこともあり、今でも1891年の濃尾地震や1945年の三河地震、2011年の東日本大震災での余震が観測されている。

2.3.1 余震の性質

一般的な余震の特徴[1]は以下のとおりである。

- 余震の数は本震直後に多く、時間とともに次第に減少する。
- 規模が大きい余震は少なく、規模が小さい余震は多く発生する。
- 最大余震のマグニチュードは、平均してみると本震のマグニチュードより1程度小さくなる。
- 最大余震は多くの場合、内陸では本震から約3日以内に発生し、海域では約10日以内に発生する。
- 大きな余震の余震域の端とその周辺で起きやすい傾向がある。
- 大きな余震による揺れは、場所によっては本震の揺れと同じ程度になることがある。

余震が発生するメカニズムについては諸説があるが、本震発生による地下の応力状態の変化が余震を発生せしめているというのが基本的な考え方となっている。

3 震度とマグニチュード

3.1 震度とは

震度とはある地点での地震の揺れの程度を表した指標である。

ある地点での揺れは、地震エネルギー規模(マグニチュード)だけでなく、震源からその地点までの距離、震源の深さ、伝播経路、その地点周辺の地盤条件等に左右される。

一般的には震源に近いほど震度は高くなるが、その土地の地盤の状態や水分の含み具合などによって違う。

かつては、震度は体感および周囲の状況から推定して

いたが、1996年4月以降は、計測震度計により自動的に観測している。

3.1.1 震度階級とは

震度階級とは、震度を数個から数十個の階級(レベル)で表したものである。この震度階級にはいくつかの種類があるが、現在日本では「気象庁震度階級」が使用されており、西欧、アメリカでは「改正メルカリ震度階級」、東欧では「MSK(メドヴェーデフ・シュボンホイアー・カルニク)震度階級」が使用されている。

日本は1990年前後に、地面の揺れの強さ(加速度、速度等)と震度の関係の研究が進み、地震計の計測値から自動的に震度を求めて表示する震度計が開発されたため、いち早く震度階級を確立することが出来た。そのため、日本は他国の震度階級を使用することなく、現在まで日本独自の震度階級を用いている。

気象庁震度階級は震度計に基づいているのに対し、改正メルカリ震度階級は主に地震による被害に基づいている。

各震度階級を詳しく表したものが以下の表1[2]、表2[3]、表3[4]である。

表 1: 気象庁震度階級

震度	説明
0	人体に感じない
1	屋内で静かにしている人の中には、わずかに感じる人がいる。
2	屋内で静かにしている人の大半が、揺れを感じる。
3	屋内にいる人が驚く。 眠っている人の大半が目覚ます。
4	ほとんどの人が驚く。 眠っている人のほとんどが目覚ます。
5弱	大半の人が恐怖を覚え、物につかまらなさと感じる。
5強	大半の人が物につかまらなさと歩くのが困難。
6弱	立っているのが困難。
6強	立っていることが出来ない。 固定していない家具のほとんどが倒れる。
7	立っていることが出来ない。 固定していない家具のほとんどが倒れたり、飛ぶことがある。

表 2: 改正メルカリ震度階級

メルカリ震度	説明
	ほぼすべての人が感じない。
	安静時に少数の人だけが感じる。
	屋内にいる多くの人が感じるが、それを地震とは思わない。
	屋内にいるほとんどの人が感じる。 眠っている人のいくつかが目覚ます。
	ほぼ全員が感じる。 眠っている人のほとんどが目覚ます。
	すべての人が感じる。 重い家具が移動することがある。 建物に軽く損傷が見られる。
	建物が損傷。家具が倒れる。 建物にかなりの被害が見られる。 部分的な崩壊が見られる。
	大抵の建物が全壊する。
	丈夫な建物が全壊、橋も崩落する。 あらゆるものが崩壊する。

表 3: MSK震度階級

MSK震度	説明
	地震計のみ検知。
	高い建物の上層階にて、 静止している人が感じる。
	屋内にいる少数の人が感じる。 屋内にいるほとんどの人が感じる。 屋外の少数の人が感じる。
	屋内のすべての人、屋外の多くの人が感じる。 眠っている人の多くが目覚ます。
	すべての人がほぼ感じる。 少数の人は平衡を失う。
	多くの人が立ってられない。
	重い家具が移動し、一部は転倒する。 家具にかなりの被害が見られる。 道路にも被害が生じる。
	ダムや堤防にも致命的な被害。 アスファルトの道路が波打つ。 丈夫な建物に重大な被害。 あらゆるものが崩壊する。

3.2 マグニチュードとは

マグニチュードとは、地震が発するエネルギーの規模を表した指標値である。1935年にアメリカの地震学者チャールズ・F・リヒターによって初めて定義された。

一般に使われるマグニチュードでは、8を超えると数値が頭打ちになるため、より正確に地震の規模を表す指標として、モーメント・マグニチュードなどが考案されている。これに対して日本で使用される震度は地震の揺れの程度を示す数値である。マグニチュードが必ずしも震度の数値に直結しない。

3.2.1 マグニチュードと地震のエネルギー

地震が発するエネルギーの大きさ E (単位:ジュール)、マグニチュードを M とすると、

$$\log_{10} E = 4.8 + 1.5M \quad (1)$$

という関係性がある(マグニチュードの計算に用いる対数は常用対数である)。

式(1)を変形していくと

$$\log_{10} E = \log_{10} 10^{4.8} + \log_{10} 10^{1.5M} \quad (2)$$

$$\log_{10} E = \log_{10} (10^{4.8} \times 10^{1.5M}) \quad (3)$$

$$E = 10^{(4.8+1.5M)} \quad (4)$$

となる。

式(4)と一般的な波動の性質から、マグニチュードが1増えるとエネルギーは $10^{1.5}$ 倍(約31.62倍)になる。ちなみに、マグニチュードが0.1増えると、エネルギーは $10^{0.15}$ 倍(約1.413倍)、マグニチュードが2増えると、エネルギーは 10^3 倍(1000倍)、マグニチュードが3増えると、エネルギーは $10^{4.5}$ 倍(約31623倍)になる。つまり、マグニチュードが1増えると地震のエネルギーは32倍になり、M8の地震はM7の地震の32個分のエネルギーを持っていることになる。

一般にM9程度以上の地震を超巨大地震、M8程度以上の地震を巨大地震、M7以上の地震を大地震と呼ぶ。[5]

3.2.2 マグニチュードのエネルギーの例

マグニチュードのエネルギーとTNT(ダイナマイト)のエネルギーを比較したのが表3[6]である(震度1はTNT15グラムに相当する)。ちなみに広島に落ちた原子爆弾の威力をTNT換算をすると約16キロトン相当になる。

表 4: マグニチュードのエネルギーの相当量

マグニチュード	相当するTNTのエネルギー
1.0	TNT火薬480グラムのエネルギー(E)
2.0	TNT火薬15キログラムのE
3.0	TNT火薬1トンのE
4.0	TNT火薬15トンのE
5.0	TNT火薬480トンのE
6.0	TNT火薬1万5500トンのE
7.0	TNT火薬49万トンのE
8.0	TNT火薬15メガトンのE
9.0	TNT火薬480メガトンのE
10.0	TNT火薬160億トンのE
11.0	TNT火薬4900億トンのE
12.0	TNT火薬15兆トンのE

東日本大震災の最大マグニチュードは9.0とされているが、このエネルギーは表4からわかるように広島原爆の約1千万倍の威力に相当する。このことから、いかに東日本大震災が凄まじかったのかがわかる。

3.3 グーテンベルグ・リヒター則

図1は東日本大震災のM4.0~M7.9の余震Mの発生回数 $n(M)$ をまとめたものである。

また、横軸にM、縦軸に $\log n(M)$ をとって、プロットしたのが図2である。

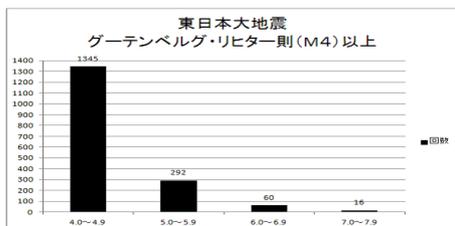


図 1: マグニチュード別発生回数

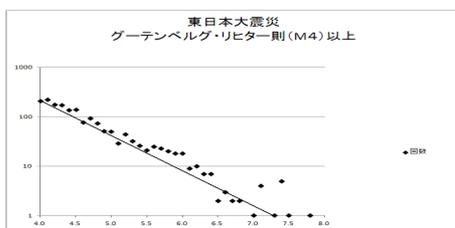


図 2: 両辺対数を取ったグラフ

地震のサイズと個数について場所や時間を任意にとったとしても、この傾向が統計的に成り立つ。

Mをマグニチュード、 $n(M)$ をそのマグニチュードの地

震の発生回数とすると、

$$\log n(M) = a - bM \quad (5)$$

式(5)のような関係が成り立つ(aは縦軸の切片、bはグラフの傾きを表す。bは1に近い数値(0.7~1.0程度の範囲)となる)。

グーテンベルグ・リヒター則によるとマグニチュードが1小さいと発生頻度はおよそ、10倍になる。[7]

ここで図2の直線の傾きbを計算する。

bの計算式は

$$b = \frac{\text{切片(対数)}}{\text{横軸の接点} - 4.0} \quad (6)$$

である。

切片210、横軸の接点7.3を式(6)に代入すると

$$b = \frac{\log 210}{7.3 - 4.0} = \frac{2.32221929...}{3.3} = 0.70370281... \quad (7)$$

式(7)から、bの値は1に近い結果を得ることが出来た。また以下の図3、図4はマグニチュードを限定してプロットしたものである。

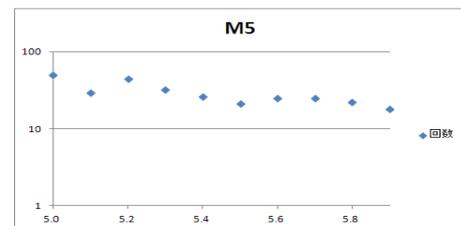


図 3: M5

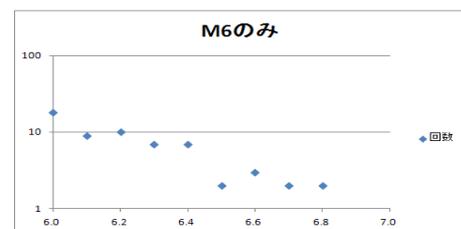


図 4: M6

3.3.1 考察

本来余震はMが1小さくなると発生頻度は10倍になると言われている。図1を見ると10倍とまではいかないが、それに近い数値になっていることがわかる。

また図2のグラフは完璧とは言い難いがかなり直線に近い結果となり、傾きであるbの値も定められている範囲におさまった数値を得ることが出来た。

このことからグーテンベルグ・リヒター則に従っていると言える。

マグニチュードを限定して調べた図3、図4でも、どち

らとも直線に近い結果が得られた。

4 地震の発生確率

4.1 ポアソン分布

地震はある間隔を置きながら不規則に発生する。このような時間的にまったく不規則に起こる独立事象の発生過程は、ポアソン過程と呼ばれている。

ここで、東日本大震災のM4以上の余震の発生から次に起こった余震までの時間の間隔を調べ、グラフにしたものが図5(横軸は1時間間隔)である。

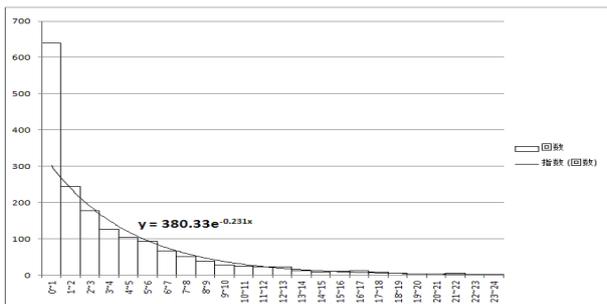


図 5: 余震の間隔

4.2 考察

図5からわかるように、余震は不規則に発生する性質をもつということが言える。

また、ポアソン過程の λ の値は0.231(約 $\frac{1}{5}$)であるという結果が得られた。これは長い目で見ると矛盾してしまうが、 λ を一定として考えた場合、平均1日に5回程度の頻度で余震が起きていることを意味する。

5 補足

余震の特徴の一つである「余震の数は本震直後に多く、時間とともに次第に減少する」が東日本大震災でも成り立っているかどうかを調べるため、時間の経過と余震回数を取り、グラフに表したものが図6である(時間軸は20日間隔)。

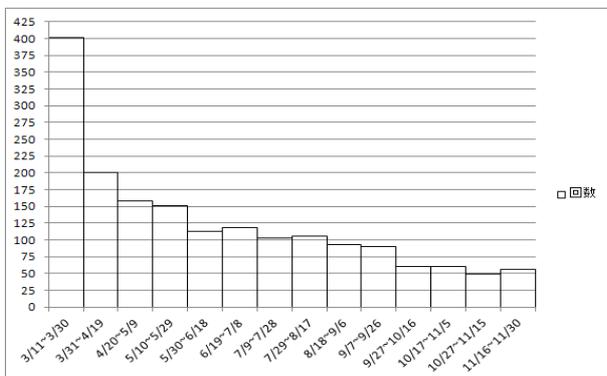


図 6: 余震の回数と時間の関係

時間軸を20日間隔として検証した図6から、余震の発生が時間が経つにつれ減少傾向にあることがわかる。すなわち、東日本大震災の余震でも一般的な余震の特徴である「余震の数は本震直後に多く、時間とともに次第に減少する」が成り立っていることが検証できた。

6 まとめ

ゲーテンベルグ・リヒター則、ポアソン過程の2つの法則から東日本大震災を検証してきたが、各法則共に法則にある程度従った結果を得ることが出来た。

法則に従った結果を得られたゲーテンベルグ・リヒター則、ポアソン過程から以下の事が言える。

- マグニチュードが1小さくなると、発生頻度は約10倍に増加する。
- 余震は不規則に起こるものであり、予測することは難しい。
- 時間が経つにつれて、余震の発生頻度は緩やかになっていく。

余震のエネルギーの大きさと発生頻度には極めて深い関係にあることが分かった。そこには時間も大きく関わっている。

大規模な地震と言われている東日本大震災ではあるが、地震の法則にしっかりと従っていることが、今回の研究で検証できた。

参考文献

- [1] 気象庁 余震とは 余震の基礎知識
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/aftershocks/kiso_aftershock.html#yoshin_seishitsu
- [2] 気象庁 気象庁震度階級関連解説表
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/kaisetsu.html>
- [3] 改正メルカリ震度階級の規模
<http://earthquake-report.com/ja/2011/06/28/MMI>
- [4] MSK震度階級-ATOMICA-
http://www.rist.or.jp/atomica/dic/dic_detail.php?Dic_Key=100
- [5] マグニチュードとは-はてなキーワード
<http://d.hatena.ne.jp/keyword/>
- [6] マグニチュード・メガトン・キロワット・KWH・質量欠損・換算表・変換表.地震・火山噴火・核爆弾・隕石衝突・電力量・エネルギーの比較.
<http://magnitude-megaton.blogspot.com/>
- [7] ゲーテンベルグリヒター則
<http://www.nda.ac.jp/cc/users/iwase/OLD/EDU/JUGYO/SUURIMODEL/suurimodel/node5.html>