

3 地震とは何か

3.1 地震とは破壊である

3.1.1 法線応力と接線応力

3.1.2 モール円

3.2 地震とは断層である

3.2.1 摩擦の影響

2章のノート参考.

3.3 地震の幾何学

3.3.1 応力と断層

3.3.2 断層の記載

3.3.3 断層と地震メカニズム解(ビーチボール解)

3.4 地震の力学

ここでは地震が起きる, すなわち急激な断層運動が地球の中の一部で起きるということは, 力学的には(力のやりとりとしては)どういうことなのかを考えてみよう. 図 4-1 のように, 地球の一部で面上でのくいちがいすべりが起きるとき, 遠くでみていると震源にどのような力が働いているように見えるだろうか. このように断層運動を, それと等価な実体力に置き換えることができる. そのような力を「等価実体力」と呼ぶ.

図 4-1

まず, 地球が宇宙空間に静止しているとしよう(もちろん実際の地球は自転軸に沿って回転してる). 静止した地球どこかである瞬間地震が起きて断層が動いたとしよう. 地震の最中, 地球は震動して我々は地表でその揺れを感じているに違いない. では, 時間がたって震動がおさまった後, 地球はどのような状態にあるだろう? 断層の周辺ではすべった分の変異が「永久変位」として残っているはずである. そのように変形してしまった地球は, 地震前と同じように宇宙空間に静止しているだろうか? それとも地震が起こったせいで少しでも回転をするようになっただろうか?

この答えは, 物理学の基本法則「角運動量の保存」から容易に得られる. 地球に隕石がぶつかって地震が起きたのなら別だが, 宇宙空間に浮かんでいる地球内部のどこかで勝手に地震が起きたのだから, 地球の持つ角運動量は地震によって変化することはない. 従って, 静止していた地球が地震によって回転しだしたり, 動き出したりする事はあり得ない. これは別の言葉で言うと, 地震は地球に対して角運動量を変化させるようなトルク(回転モーメント)を与えることはない, ということである.

以上の考察から, 地震と等価な力は全体として回転モーメントを持たない, という地震の力学についての基本的な性質が明らかになる. では, そういう力のシステムはどのようなものなのかをさらに考えてみよう.

3.4.1 力としての断層運動

では、以下のような思考実験をしてみよう。

思考実験：断層を作る（図 4-2）

図 4-2

- (1) 岩石圧下のみで剪断応力ゼロの地球の一部を切り出し、そこに小さな切れ目を入れる。
 - (2) 力を加え切れ目に沿って面をずらす（この際切り取った部分の周りをささえる）。この力は逆向きの一組の力で、偶力とよばれる。
 - (3) ずらした部分を糸で縫い合わせる（周りはささえたまま）
 - (4) 面をずらすために加えた偶力を取りのぞく。
 - (5) (4)の結果として、加えていた偶力と釣り合うように「断層」は少し回転するはずである。
 - (6) 周りのささえを取り去る。
- さてこの状態が地震が起きる直前の地球の状態と考えよう。次に地震を起こす。

思考実験：断層を壊す（図 4-3）

図 4-3

- (7) リモート・コントロールで糸を瞬間的に溶かす
- (8) 面に摩擦が働かないとすれば、力で無理矢理ずらした分だけ「断層」は元に戻るために動く。
- (9) このとき外から見てみると、思考実験で断層に働いた力（二つの偶力、double couple）が解放される（ように見える）

思考実験のころ（図 4-4）：以上の思考実験からわかることは、断層運動（面を境にした瞬間的な変位のくいちがい）は、トルク（回転モーメント）の働く方向が逆向きの二つの偶力が働いたのと等価ということである。

すなわち、

$$\text{断層運動} = \text{ダブル・カップル（二つの偶力）}$$

となる。地震学ではこの事実を使い、断層運動の代わりにの力が働いたとして、弾性体の運動方程式を解くのがふつうである。

断層運動と等価な力 さてこの断層運動と等価な力のシステムは、図 4-4 のように純粋剪断応力と同じような性質を持ち、座標軸を 45 度回転させることで、主応力（のようなもの）で書き表せる。このことは、図にあるように、震源周辺での力のシステムが、震源に対して圧縮の力が働くように見える領域と、引っ張りの力が働くように見える領域に分かれることを意味し、二つの領域は、断層面とそれと直交する面で 4 象限にわけられる（図 4-5）。地震学の観測は、この力のシステムを観測することになるので、力の領域を分ける二つの面を決めることは容易いが、そのどちらが実際の断層面なのかを決定するのはそれほど簡単で自明なことではない。

偶力 (couple of forces) とは、大きさが等しく互いに平衡で逆向きの二つの力がひとつの物体の異なる点に作用するとき、作用点を結ぶ直線の方法が力の方向とずれている場合のこの一対の力をいう。偶力の大きさは、反対向きの平行な力の距離（腕の長さ）と力の大きさの積で評価され、回転モーメントと呼ばれる。物体に偶力が働くと角運動量が変化する。

図 4-4

図 4-5

3.5 地震の大きさ

地震の大きさに関係した身近な指標としては、震度とマグニチュードがある。このうち震度は、地面がどれだけ激しく揺れたかを示す指標で、地震の起こった場所からの距離に依存する、いわば日常生活のための指標で、地震の大きさそのものを表すものではない。一方、地震のマグニチュードは地震の規模を示す量であるが、地震波の震幅を基になかば経験的に決められたところがあり物理的な意味づけがない。

ここでは「地震＝断層運動」といった観点から地震の大きさを定義し「地震モーメント」という量を導入する。

3.5.1 地震モーメント

前節により、断層運動と等価な力の組み合わせはダブル・カップルであることが示された。従って地震の大きさとしては、このダブル・カップルの大きさを使うのもっともらしい。ダブル・カップルの全体のモーメントはゼロであるが、それぞれの偶力が持つモーメントは有限な値を取り、それはダブル・カップルの大きさを示す指標である。このモーメントこそが断層運動の大きさ、すなわち地震の大きさを規定する物理量で「地震モーメント」と呼ばれる。

断層パラメーターと地震モーメント 次にこの地震モーメントを、断層運動を記述するよりわかりやすいパラメーターを使って書き表そう。図 5-1 のような単純化した断層を考える。地震前に剪断歪みが断層の周辺に蓄積し、地震でその歪みが解放されることとする。この際断層面の大きさを S とし、断層面上のすべり（変位）を D とする。さらに歪みの集中している領域の厚さを H と置くと、断層面に沿った剪断歪みは

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \frac{D}{H} \quad (1)$$

で与えられる。従って地震前の剪断歪みを支えている応力は

$$\tau_{xy} = 2\mu\epsilon_{xy} = \mu \frac{D}{H} \quad (2)$$

である。この応力が断層面全体に働くとしてそのモーメントを計算すると

$$\text{モーメント} = (\text{力}) \times (\text{腕の長さ}) = \tau_{xy} \times S \times H = \mu \frac{D}{H} \times S \times H = \mu DS$$

となり、断層の面積に断層のすべり量を掛け、剛性率をさらに掛けたものであることがわかる。このモーメントを地震の大きさとし、

$$M_o = \mu DS \quad (3)$$

を地震モーメントと定義する。

3.5.2 モーメント・マグニチュード (M_w)

上にも述べたように、マグニチュードはなかば経験的に定義された量で、地震波の震幅の対数を地震からの距離補正などを施して決められている。観測に

図 5-1

使う地震計の特性や、どういう観測網を使うかなどによって決まってくる値が少しずつ異なるのが実状である．例えば日本の気象庁は M_j とよばれるマグニチュードを使うが、このマグニチュードの大きさとアメリカの地質調査所が報告する全世界規模のマグニチュード (M_b , M_s の 2 種類ある) の値は、0.1 の位は異なるのが普通である．このような状況を改善すべく、物理的意味づけがはっきりしている地震モーメントを使ってマグニチュードを定義することが最近一般的である．過去に決められてきたマグニチュードと大体あうように、

$$M_w = \frac{2}{3}(\log M_o - 9.1) \quad (M_o \text{ unit in } N \cdot m) \quad (4)$$

で定義されるマグニチュードをモーメント・マグニチュードと呼ぶ．この定義から明らかなように、マグニチュードが 1 違うと地震の大きさは 30 倍異なることになる．

地震の頻度分布 マグニチュードごとの地震の数をグラフにしてみると、図 5-2 のように対数グラフで直線的になるのが普通である．マグニチュード M の地震が N 個起こるとして

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

の関係がありということである．地震のこのような性質を Gutenberg-Richter の法則と呼ぶが、 b の値は大体 1 程度であることが多い．この b 値の時間・空間的变化は、地殻内の状態の違いに対応している可能性があり、様々な研究がなされている．(5) のような性質をべき乗則というが、地球の様々な幾何学的現象 (例えば地形の凸凹、海岸線の長さ) がそのような性質を持つことが知られており、このような性質を示すものをフラクタルと一般的に呼ぶ．地震がフラクタル的であることが何を意味するのかは、興味深い問題である (即ち、よく分かっていない) ．

図 5-2

3.5.3 地震の相似則

地震の大きさとその意味が明らかになったとして、実際に起きている地震のデータからどのようなことがいえだろうか．図 5-3 では世界中で起きた様々な大きさの地震について、地震モーメントと断層の面積をパラメータにして対数プロットしてある．ほとんどの地震が傾き $\frac{2}{3}$ の直線状に並んでいるのが分かる．傾きを $\frac{2}{3}$ として最小二乗法的に関係を求めると

$$M_o \sim 1.23 \times 10^{22} S^{3/2} \text{ dyne} \cdot \text{cm} = 1.23 \times 10^7 S^{3/2} N \cdot m \quad (S \text{ in } \text{km}^2) \quad (6)$$

となる．地震モーメントと断層の面積の間のこの単純な関係は、どのような地震の性質を反映しているのだろうか？

図 5-3

地震のストレス・ドロップ 地震とは、いわば応力・歪みの解放過程であり、地震の前後で震源周辺の応力は降下する．(6) の関係はこの応力降下 (stress drop) 量が地震によらず大体の一定であることを示している．

面積 S の亀裂 (crack) 領域に、平均変位量 D のすべりが起きた場合の応力降下量 ($\Delta\sigma$) は、弾性力学から以下のように与えられることが知られている．

$$\Delta\sigma = c \frac{\mu D}{\sqrt{S}}, \quad c \sim 2.5 \quad (7)$$

ここで c は亀裂の形状によって変わる定数だが、大体 2.5 程度の値を取る。この式と、地震モーメントの式 (3) から

$$\Delta\sigma = \frac{5}{2} \frac{M_o}{S^{3/2}} \quad (8)$$

を得る。この式と (6) を比べると (S は km で与えられていることに注意)、図 5-3 のデータが意味するところは、応力降下量が大体一定で

$$\Delta\sigma \sim \frac{5}{2} \times 1.23 \times 10^6 \text{ Pa} \sim 3 \text{ MPa} \quad (9)$$

であるということが分かる。

応力降下量が一定ということは、式 (7) より、すべり量 D と断層の長さ ($L \sim$ 面積の平方根) に比例関係があることになる。すなわち

$$D \sim L \quad (10)$$

であり、断層の大きな (長い) 地震のすべり量は、長さに比例して大きくなる。さらに応力降下量一定から、歪み降下量も一定で

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} \sim \frac{3 \text{ MPa}}{2 \cdot 30 \text{ GPa}} \sim 0.5 \times 10^{-4} \quad (11)$$

が得られる。この歪み降下量は、2 章で求めた限界剪断歪み 10^{-4} とおおよそ同じ値を示している。

ストレス・ドロップ一定など地震のこのような性質を「地震の相似則」と呼ぶ。より最近の詳細な研究からは、地震のストレス・ドロップは、海溝沿いに起きる巨大地震などの「プレート間地震」の場合は 3 MPa 、そのほか日本の内陸で起きるような「プレート内地震」の場合は平均 10 MPa 程度であることが分かっている。これはプレート境界は他の地震発生領域に比べて、「弱い」ことを示していると考えられる。

3.5.4 地震のエネルギー

地震が起きたことにより放出されるエネルギーは、断層面状でなされた仕事

$$W = (\text{力}) \times (\text{長さ}) = \bar{\sigma} S \times D \quad (12)$$

によって評価できる。今断層上での平均剪断応力 ($\bar{\sigma}$) が、ストレス・ドロップの半分とすると、断層がした仕事は、

$$W_0 = \frac{1}{2} \Delta\sigma D S = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} M_o = \Delta\epsilon \times M_o \quad (13)$$

となる。このように地震モーメントはエネルギーと同じ単位を持ち、モーメントに歪み降下量を掛けることでエネルギーに変換できることが分かる。

ストレス・ドロップ一定 3 MPa の条件をいれると

$$E_s \sim 0.5 \times 10^{-4} M_o \quad (14)$$

を得る。

$\bar{\sigma} = 1/2 \Delta\sigma$ の仮定は、地震によって応力が完全に解放されることを意味している。完全に解放されない場合は $\bar{\sigma} > 1/2 \Delta\sigma$ なので、ここで評価しているエネルギーは最小の評価である。

例えば，神戸地震（兵庫県南部地震）のモーメントは $M_o = 0.25 \times 10^{20} Nm$ である．従ってエネルギーに換算すると

$$E_s = 0.5 \times 10^{-4} \times 0.25 \times 10^{20} Nm \sim 10^{15} J$$

広島に投下された原爆のエネルギーは $8.5 \times 10^{13} J$ 程度とされているので，神戸の地震によって解放されたエネルギーは 10 倍以上大きいことになる．

3.6 地震の起こり方

3.6.1 世界の巨大地震

3.6.2 地震破壊の伝播

問題

1.

参考文献：なし