

潮汐力と地震発生の相関関係について

宮原義一^{1)*}・三田村徹¹⁾・松井佐久夫²⁾

Correlation between tidal force and occurrence of earthquake

Yoshikazu MIYAHARA,^{1)*} Tohru MITAMURA¹⁾ and Sakuo MATSUI²⁾

Abstract

The ocean ebb and flow is induced by the tidal force due to the tractive force between the earth and the moon or the sun, which varies in a sinusoidal manner twice a day. At the same time, the force deforms the elastic rock plate of the earth surface, which could be a trigger of an earthquake. In the present statistical investigation of past earthquakes around the world, it was found that the occurrence of earthquakes has the highest event rate at the phase of the force minimum. In addition, there are some partial distributions of the events in the world with regard to the occurrence phase and the direction of the tidal force, which suggests a matched condition proper to the respective regions. In a simple model calculation of earthquakes, the tidal force is nearly the same with or somewhat lower than the increment per day of the shear stress of the rock plate at the critical state, being caused by the plate movement due to the mantle convection, which is sufficient for the triggering. The ratio between the tidal force and the stress increment is higher in a bigger earthquake, and the occurrence is limited in a narrower phase of the force variation, which provides a more intimate correlation. The direction of the tidal force at a time of an earthquake can be explained by the friction law between the adjacent rock plates.

Keywords : earthquake, tidal force, correlation, statistics, friction law

はじめに

太陽と月と地球の間に働く引力によって地球と月の公転運動が決まる。この引力は地球の自転にともなって副次的に潮の干満を引き起こす。それとともに、地球の岩盤も弾性体として変形する。これらの現象はそれぞれ海洋潮汐 (ocean tide)、地球潮汐 (earth tide) と呼ばれている。これを引き起こす引力のことを潮汐力 (tidal force) といっている。岩盤の変形によって地震が発生する可能

性がある。このため潮汐力と地震発生の相関についての研究が19世紀末に始まり、その後、多数の研究がなされた。

群発地震や余震活動、あるいは火山性地震など局所的な地震では潮汐力との相関が多数確認されている、例えば、片尾 (2002) は兵庫県南部地震の後になってから月齢 (潮汐力) と余震活動に相関が現れることを示した。三宅島の火山性地震については海底地震計と海底温度計によって潮汐力の影響が観測された (Kasahara and Sato,

1) 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 ニュースバル放射光施設 〒678-1205 赤穂郡上郡町光都1-1-2 University of Hyogo, Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, New SUBARU Synchrotron Radiation Laboratory. Koto 1-1-2, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo-ken, 678-1205 Japan

2) 高輝度光科学研究センター 〒678-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1 SPring-8. Koto 1-1-1, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo-ken, 678-5198 Japan

*Corresponding author : miyahara @lasti.u-hyogo.ac.jp

2001). バンクーバー沖合の海底尾根では群発地震が2か月間、干潮時に増大した (Wilcock, 2001). 総合報告が Glasby and Kasahara (2001) に出ている. これらの地震では潮汐力の変動に伴って発生件数が増減するので, 相関関係が明確に確認される.

他方, 大地震や地球規模の地震活動の潮汐力との関係についての研究は少なく, どちらかといえば, 相関はないとされてきた. 例えば, 逆断層型の地震では相関があるかに見えたが (Heaton, 1975), データ数を増やすと相関がなくなった (Heaton, 1982). 地下70 km 以下の深発地震では潮汐力との相関は見られなかった (Curchin and Pennington, 1987). 横ズレ断層で知られるカリフォルニア地域の地震では潮汐力との相関はなかった (Vidale *et al.*, 1998).

大地震は群発地震などと異なり, 稀にしか起こらないので, 潮汐力の時間変化と直接比較できないという難しさがある. そこで潮汐力のどんな位相で発生したか, 過去の地震データでヒストグラムを作り, 統計的に検討することになる. 大地震については, 歪み, 応力, 発生位置の深さの影響などいろいろな角度から検討されたが, その中で重視されたのが断層面の応力成分である (Heaton, 1975). また, 当然ながら地震件数も多いほど信頼性が高いとされた. さらに, 相関がないとされた正断層型の地震で海洋潮汐の影響を考慮すると相関が少し現れた. ただし, 逆断層の地震では現れなかった (Tsuruoka *et al.*, 1995).

Tanaka *et al.* (2002) は地球全域の地震データについて断層面と新海洋潮汐項を考慮した解析を行った. その結果, 大量のデータでは相関がなかったのに, 逆断層型と正断層型の地震に区別すると相関が現れ, かつ, 規模別に分類すると大地震ほど相関が高いことを示した. この研究で相関関係の存在が確定されたように思われる. ただし, 横ズレ断層型の地震ではやはり相関は見られなかった.

これらの研究では, 潮汐力の断層面成分が最大のときが地震発生に最適として, 潮汐力との相関を考えている. しかし, これには問題がある. 地震の本質的な考え方として, 地殻プレート間の摩擦による間欠的な滑り運動とする地震摩擦説がある (Scholtz, 1998). 同様な考え方が岩石破壊実験では古くから知られていた (宇津, 2001). この説では, 潮汐力の断層面成分とともに法線成分も反摩擦力として協力作用があると考える. この説の逆断層型地震への適用により, 摩擦係数 $\mu_s = 0.4$ として強い相関が得られた (Cochran *et al.*, 2004). この説は以前に中国地域の大地震 (70件) に適用され, かなりの相関が報告されている (Ding *et al.*, 1983). また, 潮汐力による周期的な応力変動に着目して, バネと摩擦のある滑り板を使った振動実験や, 岩石を使った振動破壊実験をもとに,

地震への影響が検討された. しかし, 潮汐力の周期は短いためにカリフォルニア地震の引き金にはなりえないとされた (Dieterich, 1987; Beeler and Lockner, 2003).

他方, プレート移動に伴う剪断応力の変化速度に対する潮汐力の影響がシミュレーションで検討された. その比が0.1以上であれば相関が現れ, 1以上では強い相関になることが示された. しかし, この比の地震規模との関係は示されていない (鶴岡・大竹, 2002).

最近の研究では, スマトラや東海地方など特定地域における地震発生と潮汐力の相関の時間変化に着目し, 大地震発生を含めた相関度の周期的パターンが示された (Tanaka *et al.*, 2006; Tanaka, 2010), また, 土木工学の立場から地震波解析により地震発生に伴う応力降下量が算出された (佐藤, 2003).

ところで相関の判定には, ほとんどの研究でSchuster (1897) の方法が使われる. これは凸凹のヒストグラムを滑らかなサイン曲線に置き換え, その湾曲度で相関度を p 値で表示する. 僅かな湾曲度の相違でも p 値が大きく変化するという便利さがあるので, 相関が判然としない従来の研究で重宝された. ただし, 最適位相が2つ以上あると, この方法の信頼性が下がる. 本件ではヒストグラム上で明確な相関が目視されたのでこの方法は用いなかった.

本研究では, 1991–1996年に発生した世界の大地震130件について潮汐力との相関を検討した. 地震データは理科年表から得た (国立天文台編, 1991, 1998). 本研究では, 地震の型に関係なく, 断層面も考慮せず, 海洋潮汐の影響も考慮せず, 単に潮汐力のどの位相で地震が発生したかを検討した. このことがかえって幸いし, 地震の型による違いが地震発生時の潮汐力の位相と方向成分の違いとなって現れた. 地震ごとの断層面の方向についてのデータは持ち合わせていない. また, 地震データがほとんど大地震であったことも幸いし, 潮汐力との相関が明白に現れた.

本研究では, まず, 潮汐力というものを正確に把握し (附録参照), 地震データごとに発生時の潮汐力の位相と方向成分を求めた. 地震発生は潮汐力が地球中心を向くとき, すなわち干潮時に際立って多いことが分かったので, ここを位相の基準にした. 第2に, 地震発生時の潮汐力の位相と方向成分を世界地図上にプロットしたところ, 地域によって特徴的な偏りがあることが分かった. これは地震の型による違いと考えられるので, それぞれの地域で潮汐力との密接な関係を反映しているといえる. この“地図へのプロット”は相関関係について新しい視点をもたらす. 第3に, 潮汐力が地震の引き金になるためには, プレートの1日当たりの剪断応力の増分に対して, 潮汐力の変化量が少くとも同程度である必要がある. また, 地震規模が大きいほど潮汐力との相関が強くなる

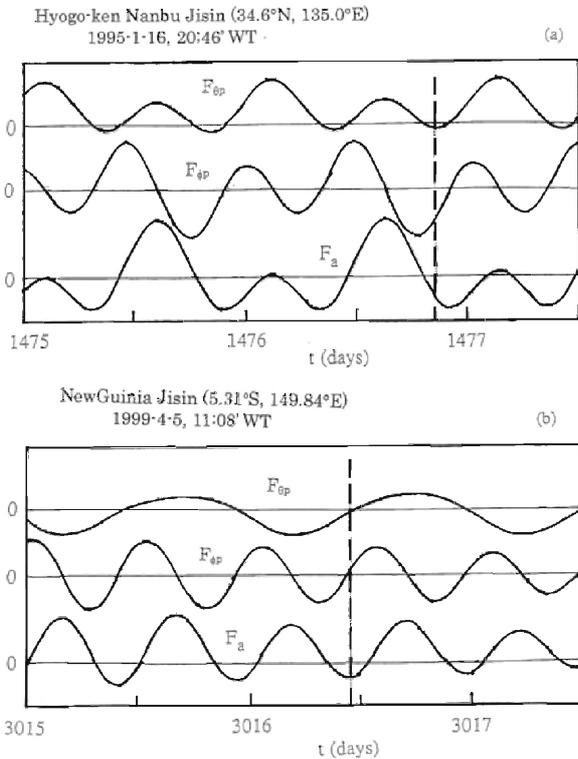


図1 地震の震源地における潮汐力(天頂成分 F_a , 天頂角成分 $F_{\theta p}$, 方位角成分 $F_{\phi p}$) の計算例。(a)は兵庫県南部大地震, (b)はニューギニア地震の場合。縦線は地震発生時刻を表す。

のは何故か。これらの問題を地震モデルで定量的に検討した。第4に、潮汐力極小のとき地震発生が最多になるのは何故か。地震摩擦説を適用してこれを検討した。

以下では、第2節で潮汐力と地震発生の関係について統計的検討結果を述べる。第3節で地震発生のメカニズムを簡単なモデルで考え、潮汐力との関係と影響について検討する。第4節にまとめを述べる。なお、附録Aで潮汐力の基本的考え方について整理し、地球に対する太陽と月の位置関係について述べる。文字記号などの定義については必要に応じて附録を参照していただきたい。特に図A-1と図A-3。

潮汐力と地震発生の統計

図1-aと1-bは刻々と変化する潮汐力の3つの成分の計算例である。それぞれ兵庫県南部地震(1995年1月16日20時46分世界時)と、この問題を検討中に起きたニューギニア地震(1999年4月5日11時8分世界時)の発生前後の様子を示している。潮汐力は1日2回ピークが現れ、いずれの地震も天頂成分 F_a が極小の近傍で発生している。 $F_{\theta p}$ と $F_{\phi p}$ はそれぞれ地震発生地Pでの天頂角成分と方位角成分である(図A-3)。また図2-aと2-bは2つの地震発生時における太陽と月と発生地との位置関係を表している。いずれの場合も月と発生地の経度差がおおよそ90度になっている。このような条件下では潮汐力は地球

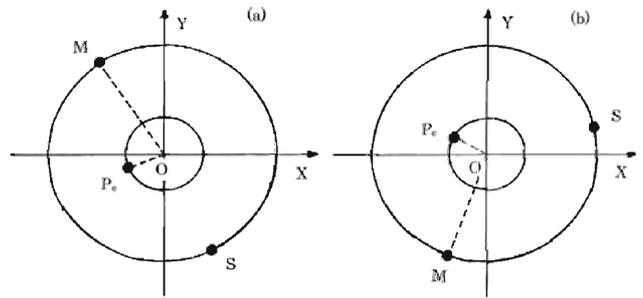


図2 兵庫県南部大地震(a)とニューギニア地震(b)発生時における太陽と月と震源地の位置関係。

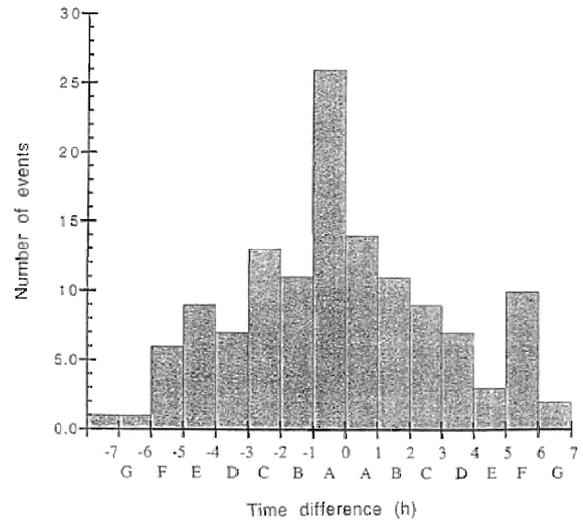


図3 潮汐力と地震発生の時間的関係を表す統計。横軸は地震発生時刻から潮汐力(天頂成分)の極小までの時間差、縦軸は1991年から1996年までに世界で発生した大規模地震の件数を表す。

中心へ向かう成分が大きい。特に兵庫県南部地震(図2-a)では太陽と月と地球が一直線になった満月の日の明け方に発生しているため、地球中心成分が最大になっている。

上の2例を見る限りでは潮汐力と地震発生はかなり密接な関係がありそうである。他の場合はどうであろうか。過去の地震例として1991年始めから1996年終わりまでに世界で発生した大地震(マグニチュード5以上、ただし、大部分がマグニチュード7.0~7.5。理科年表による)の130例について調べてみると図3のようになる。横軸は天頂成分 F_a の極小から測った地震発生との時間差で、縦軸は地震の件数である。明らかに潮汐力極小で地震の頻度は目立って高く、時間当たり平均頻度の2.6倍である。したがって、潮汐力と地震発生は相関があるといえそうである。

ただし、全ての地震が潮汐力極小だけに集中するわけではなく、前後に広がっている。これには意味があるのだろうか、それとも無関係の程度を表しているのだろうか。他方、極小から5~6時間後にも目立ったピークがある。これは天頂成分が極大になるあたりである。これらのことはどのような意味を持つか、より詳細な検討が

必要である。

図3の横軸の下側に潮汐力極小からの時間差にA, B, ..., Gの記号をつけて時間帯と呼ぶことにする。時間差は絶対値をとる。地震を時間帯毎に分類し、その地震の発生地を地球上にプロットしたのが図4である。発生地の目印として著名な地名も載せたので、どのあたりで起こった地震か分かるであろう。図4に見るとおり、AからGまで地球の地震帯に沿って分布しているが、同じ記号が地域的に集まっているのが注目される。すなわち、ペルーのA, BとF, メキシコのC, 日本のB, フィリピンのA, ニューギニアのD, ヒマラヤ南東部のA, ヒマラヤ北部と西部のEである。

次に、震源地の深度と発生時間帯A, B, ..., Gとの関係を調べてみる(表1)。表中の数字は地震件数を表す。この表から2つのことが分かる。第一に、地震は大部分10~40 kmのところでは発生し、40~100 kmでは非常に少なく、100~700 kmの深いところで少なからず発生する。第二に、10~40kmの地震はA, ..., Gの時間帯におおむね一様に分布するが、100~700kmの深発地震はA, E, Fに偏っている。

このような地震の地域と深度による分散集中は、地震と潮汐力との間の特殊な関係を示唆している。すなわち、Aだけでなく、B, C, ..., Gの地震もそれぞれの地域で潮汐力の最適条件で発生している可能性がある。例えば、ヒマラヤ南部でAが多いのは、インド亜大陸のプレートがユーラシア大陸に沈み込むとき地震が起きやすいためと想像される。また、潮汐力は天頂成分だけでなく水平成分もある。

そこで、地震発生と水平成分との関係を調べてみる。潮汐力の天頂角成分 $F_{\theta p}$ と方位角成分 $F_{\phi p}$ から水平面における潮汐力の方向と大きさが求まる。図1から分かるよ

表1 地震発生時間帯と震源地の震度との関係(数値は地震件数)。

| 深度(km) | A | B | C | D | E | F | G |
|---------|----|---|---|---|---|---|---|
| 0-10 | 1 | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 10-20 | 12 | 5 | 5 | 4 | 3 | 5 | 3 |
| 20-30 | 7 | 9 | 9 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| 30-40 | 8 | 3 | 5 | 3 | 2 | 2 | 0 |
| 40-50 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 50-60 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 60-100 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100-700 | 6 | 0 | 1 | 1 | 3 | 4 | 0 |

うに、兵庫県南部地震のときの潮汐力の水平成分は西向きであり、この地方の断層の向きとほぼ一致する。図5は震源地ごとに地震発生時の潮汐力の天頂成分と水平成分を時計の針のように二つの棒線で示したものである。針の軸にあたる部分が震源地である。縦方向の棒線は下向きが地球中心方向、上向きが天頂方向を表わす。角度のついた棒線は水平面内での方向を表わす。この図を見ると、地震発生時の潮汐力の方向と大きさはまちまちのように見える。しかし、子細にみると地域ごとに多少の集中と傾向が見られる。これを表2に示す。特に、トルコ、ヒマラヤ北部、メキシコ、ニューギニア付近では水平成分が大きい。他方、日本、フィリピン、スマトラ、トンガ付近では地球中心成分が大きい、明らかにこれらの集中と傾向は時間帯の分布と対応している。例えば、メキシコ付近では特にCが多い。トルコ近辺を更に細かく見ると、経度30~120度の範囲で、緯度~30度より高緯度側では東向き、低緯度側では西向きの成分が大きく、かつ、両方とも天頂成分が小さい。

以上述べたように、時間帯Aだけでなく、B, C, ..., G

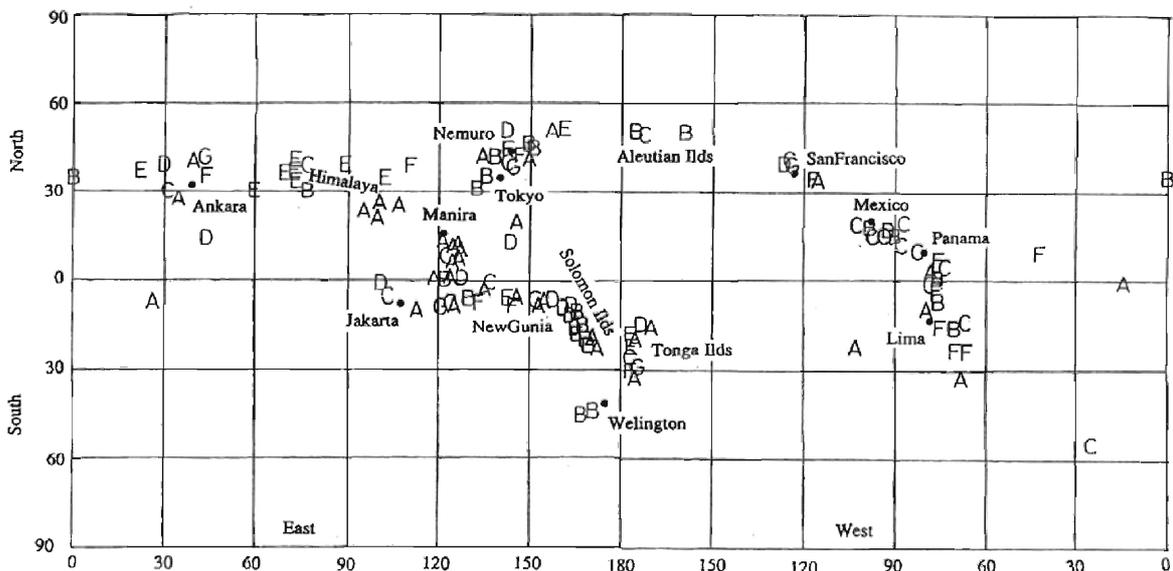


図4 潮汐力(天頂成分極小)に対する地震の発生時間帯A, ..., Gの地球上の分布。縦軸と横軸はそれぞれ緯度と経度を表す。

表2 地域別にみた潮汐力成分の特徴(方向と大きさ).

| 地域名 | 時間帯 | 天頂方向 | 水平方向 |
|--|----------------|------------|----------------|
| トルコ付近 ヒマラヤ (北部, 西部) E (南東部) A | | 下 大 | 南西 大 東, 西 大 |
| フィリピン セレベス ソロモン | A D | 下 大 | 東 東, 西 大 |
| トンガ 日本 メキシコ | A, F B C | 上 大 下 大 | |
| ペルー | F | 上 大 | 西 大 |

も潮汐力が地震発生に密接に関係している可能性がある。したがって、時域ごとに断層の方向や地震の型などの特徴と潮汐力の方向との関係を考慮して検討する必要がある。これは今後の発展が予想される検討課題である。

地震発生のメカニズムと潮汐力の関係

1. 地殻の移動

潮汐力と地震発生の中に相関があるからといって、潮汐力が地震の主たる原因であるかという答えは否である。地震のエネルギーは巨大であり、潮汐力だけで地震を起こすことはない。しかし、引き金になることはないだろうか。ところで火山性の地震は別として、大部分の地震は、海洋底プレートが少しずつ移動して大陸に衝突

し、大陸の下に沈み込むときの摩擦でできる地殻の歪(ひず)みが長年のうちに蓄積し、その歪みが臨界値に達したとき地殻が破断することによって発生すると考えられる。従って歪みが臨界値直前にあるときに、潮汐力の変動が加わると臨界値に達して地震が発生する、というメカニズムが想定される。潮汐力が地震発生の引き金になるためには、地震発生直前においてプレート移動による剪断応力の1日当たりの増分に対して、潮汐力による1日の変化量が同程度かそれ以上である必要がある。このことについて簡単なモデルで検討してみる。

まず、おおよその値を検討してみる。地球の半径は潮汐力の変動によって20cm位伸縮しているといわれている。これに伴って地殻は1日2回、長さの割合にして 3×10^{-8} 位伸縮する。実際、このことはSPRing-8蓄積リングの周長の変動として観測されている (Date and Kumagai, 1999)。蓄積リングの周長 (1500m) は1日2回の周期で約 $30 \mu\text{m}$ 変動する。この変動割合は 2×10^{-8} である。他方、太平洋プレートは年に約9cm移動する。これは1日あたり0.25mmである。かりに地殻の歪みが硬いバネのようなものとする、大規模地震では断層の長さは100km位あるので、1日あたりの変動割合は 2.5×10^{-9} になる。潮汐力による変動割合の方が一桁大きい。潮汐力は地震の引き金になりそうである。

太平洋の周辺にはユーラシア大陸、南北アメリカ大陸およびオーストラリア大陸に接する環太平洋火山帯があり、ここはまた地震多発地帯でもある。これは周知のように東太平洋海底で上昇したマグマが海洋地殻として付加し、厚さ20km位のプレートになって、マンツルの対流作用に乗って太平洋海底を東または西に移動し、大陸の端に衝突して地球内部に沈み込む際に発生する発熱作用と摩擦作用の結果である。

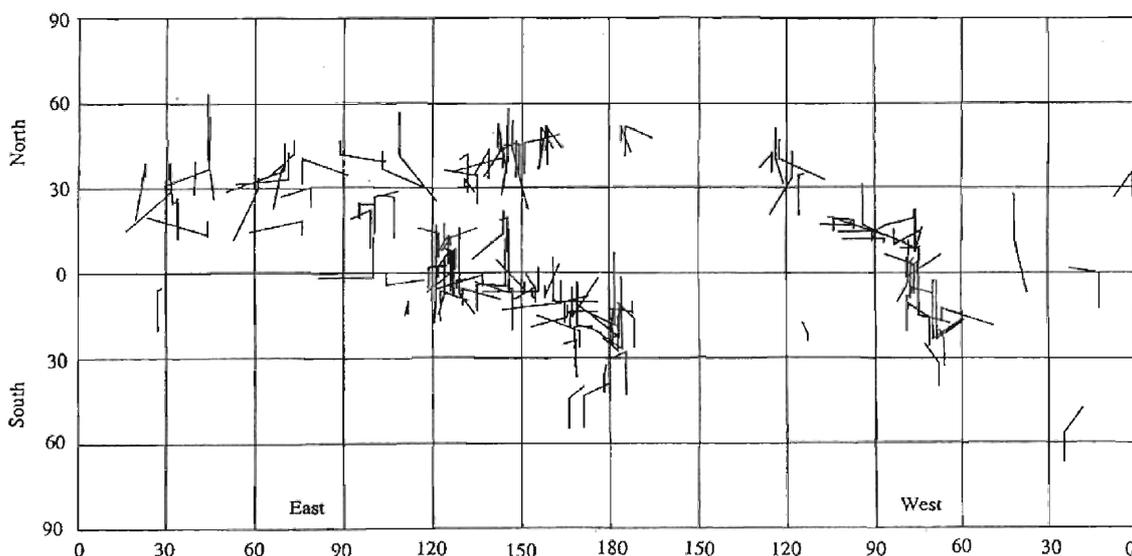


図5 地震発生時における震源地での潮汐力(大きさ)と向き)の地球上の分布。縦棒は潮汐力の天頂成分で、上向きは天頂方向、下向きは地球中心方向を表す。角度のついた棒は水平成分を表す。

上昇したマグマは海水で冷却されて玄武岩（比重2.7）となる。大陸地殻の成分は花崗岩(比重2.6)で玄武岩やマントルより軽いので、大陸地殻はマントルの上に浮いた軽石とイメージされる。太平洋プレートの移動速度は年に9cm位の超低速であるが、広大なプレートが確実に押し寄せてくるので（100年では約10m, 1000年では約100m）、長年の間には大陸端とプレート間の摩擦でそこに大きな歪みとそれに伴って大きな歪み応力（剪断応力）が生じる。太平洋プレートはまず大陸端にある深さ10km位の海溝に沈み込む。大陸端に沈み込んだプレートは $\theta = 20 \sim 40$ 度位の角度で深部へとゆっくりと進行する。さらに歪みが大きくなると大陸地殻とプレート間の摩擦は保持できず、急激に破断する。こうして地震が発生する。

2. 地震モデル I

一般に、鉱物は結晶構造が理想的であれば剪断応力に対して非常に強いので破断しにくい。しかし、結晶不整のひとつである結晶転移は結晶面に沿って移動しやすいので、転移を含む結晶は剪断応力で破断しやすい。ただし、極端に結晶不整が多いと転移の滑り面がないので破断しにくい。いま、図6のように単結晶の両端面に外力 F （張力または圧力）をかけて、次第に増大していくと、ある臨界値 F_c で、結晶は突然、結晶面に沿って破断する。破断面の断面積を A 、外力の破断方向成分を F_t として、剪断応力 τ が

$$\tau = \frac{F_t}{A} \tag{1}$$

と定義される。図6は一軸性の張力や圧力によって任意の結晶面の両側でズレが引き起こされることを端的に示していて、地震のもとである地殻あるいは岩盤の破断を

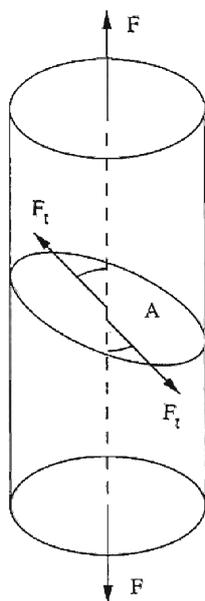


図6 結晶棒に外力 F をかけたときの断面積 A の破断(剪断)面と外力の破断面方向成分 F_t 。

理解する上で示唆に富んでいる。剪断（ズレ破断）のために外力は必ずしも剪断方向を向いている必要はないが、そのとき最も有効である。また、外力は結晶全体にかかる力の総和であることに留意する。

岩石は多数の微結晶（鉱物）の集合体で、隙間が多いので図6のように一軸性の外力をかけると、粉々に破壊する。しかし、3軸方向から数百MPa程度の異なる圧力をかけると、結晶面ほどきれいではないがある面に沿って破断する。圧力のベクトル和をとれば、上に述べた一軸性の外力がある方向にかかっているのと同等である。この場合、高压によって岩石全体が均一な結晶状態に近くなってきて、結晶と同様な剪断破断がおこっていると思われる。

プレート内部（厚み約100km）は数百度の高温、数百MPa程度の高压下にあるので、一体化して結晶状態に近い岩盤になっていると考えられる。そこで図7-aのような直方体の岩盤 [長さ L , 幅 W , 厚み(高さ) H]を切り出し、その左端の上半分（斜線部）にストッパーをかけて、岩盤の右端に外力 F_t を左向きにかけると、図7-bのように歪んでくる。下半分が左向きに移動してくる海洋プレート、上半分が大陸プレートで、直方体の左上方に大陸が覆い被さっていると想定する。このとき剪断応力は歪み D/H に比例し、

$$\tau = \mu \frac{D}{H} \tag{2}$$

と定義される。ここで μ (N/m²)は剛性率である。外力が増大し臨界値 F_{tc} に達すると図7-cのように破断する。ここで外力 F_t は上半分、下半分にかかる力の総和であるが、上端と下端にかかる力 F_t と置き換えても等価である。この方が図7の歪みを理解しやすい。臨界点では $\tau_c / \mu = D_c / H$ になる。左辺は物質に固有の量であるから、一定である。よって $H = \alpha D_c$ ($\alpha = \mu / \tau_c$)とする。

破断後のズレ量 D_c は臨界状態の歪みに等しく、臨界状態の外力のモーメント M_o (Nm)は

$$M_o = F_{tc} H = \mu D_c L W \tag{3}$$

になる。これは地震でいえば、岩盤破断の幅 W , 長さ L , ズレ量 D_c および岩盤の剛性率 μ に比例し、かつ、それらだけで定義されているので、地震の震源の規模を表す

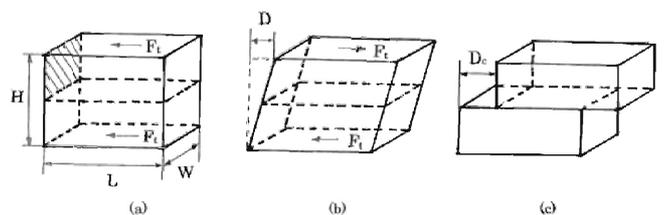


図7 直方体の擬結晶(a)に剪断応力 F_t をかけたときの歪み(b)と破断後の状態(c)。ただし、(a)の斜線部は半固定とする。

表3 地震の規模と潮汐力 (モデル1) ($\alpha = 10^4$, $\beta = 3 \times 10^4$).

| | | | | |
|---------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ズレ量 | D_c (m) | 1 | 3 | 10 |
| 長さ | L (km) | 30 | 90 | 300 |
| 幅 | W (km) | 30 | 90 | 300 |
| 厚さ | H (km) | 10 | 30 | 100 |
| モーメント | M_0 (Nm) | 2.8×10^{19} | 7.6×10^{20} | 2.8×10^{22} |
| エネルギー | E (J) | 1.4×10^{15} | 3.8×10^{16} | 1.4×10^{18} |
| マグニチュード | M | 6.9 | 7.8 | 8.9 |
| 月潮汐力 | F_m (N) | 6.7×10^9 | 1.8×10^{11} | 6.7×10^{12} |
| 剪断応力 | F_t (N) | 2.8×10^{15} | 2.5×10^{16} | 2.8×10^{17} |
| 力比 | $\zeta \equiv F_m/F_t$ | 2.4×10^{-6} | 7.2×10^{-6} | 2.4×10^{-5} |
| 剪断応力変化率 | dF_t/dt (N/day) | 6.9×10^{11} | 2.1×10^{12} | 6.9×10^{12} |
| 対変化率比 | $\xi \equiv F_m/(dF_t/dt)$ | 0.0097 | 0.087 | 0.97 |

式として過不足がなく適切である。実際には、地震の規模を表すものとしてマグニチュード M というものが使われる。これはモーメントと次の関係がある。

$$\log M_0 = 1.5M + 9.1 \quad (4)$$

\log は常用対数である。もともとマグニチュード M は地震計で測定される最大振幅の対数をとって定義されてきたものであるが、モーメント M_0 と(4)式の関係で結びつけているという訳である。

マグニチュードに関係する量として地震のエネルギー E というのがあり、

$$\log E = 1.5M + 4.8 \quad (5)$$

で与えられる。ところで地震のエネルギーというのは何か。エネルギー保存の考えによれば、地震の際に発生する振動エネルギーは臨界値まで蓄積された剪断応力のエネルギーに等しい。ただし、岩盤破断で摩擦熱は無視できるものとする。臨界状態での剪断エネルギーは

$$E = \frac{\mu}{2} \frac{LW}{H} D_c^2 = \frac{M_0 D_c}{2H} \quad (6)$$

になる。(4)と(5)式により $\log(M_0/E) = 4.3$ であるから、(6)式により $H = \alpha D_c$, ($\alpha = 1 \times 10^4$) になる。

他方、岩盤の剛性率 μ は岩盤中の横波 (S波) の伝搬速度 V_s と次の関係がある。

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (7)$$

ここで ρ は岩盤の密度である。地下10~40 kmで $V_s = 3.4$ km/s, $\rho = 2.7$ kg/m³ と仮定して、 $\mu = 3.1 \times 10^{10}$ N/m² になる。ところで上に述べたように、 $H = \alpha D_c$ であるから、剪断応力は $\tau = (\mu/\alpha)(D/D_c)$ であり、ズレ量 D ととも

に増大し、臨界点で $\tau_c = \mu/\alpha = 3.1 \times 10^6$ (N/m²) となる。実験室における高圧下の岩石の臨界剪断応力がいくらか分からないが、金属結晶では $\tau_c = 10^5 \sim 10^6$ N/m² であり、冷間加工で増大する。岩石は酸化物で堅くもろいから、上の値は妥当なところである。

ここで地震の規模についておおよその数値をまとめておく。 $M = 7$ クラスの地震では $D_c = 1 \sim 3$ m, $W =$ 数10 km, また、 $M = 8$ クラスでは $D_c = 3 \sim 10$ m, $W =$ 数100km といわれている。

他方、大規模地震では経験的に $L = \beta D_c$ ($\beta \approx 3 \times 10^4$) の関係が知られている。 W と D_c の関係も上記により $W \approx \beta D_c$ とおける。以上の検討により、 $M = 7, 8, 9$ クラスの地震に対して $D_c = 1, 3, 10$ m と仮定すると、 $\alpha = 10^4$ と $\beta = 3 \times 10^4$ を用いて L, W, H が決まり、かつ、地震のマグニチュードやエネルギーが表3のようになる。ちなみに $M = 7$ の地震のエネルギーは広島型原爆 (TNT換算で15キロトン = 6.3×10^{13} J) の約20倍である。

次に、プレート移動に伴って岩盤に作用する外力の変化は1日当たりどのくらいか求めてみる。この外力は $F_t = \mu D L W/H = \mu(\beta^2/\alpha) D D_c$ と表されるから、時間で微分して

$$\frac{dF_t}{dt} = \frac{\mu\beta^2}{\alpha} \frac{dD}{dt} D_c \quad (8)$$

なる。 $dD/dt = 0.09/365$ m/day はほぼ一定であるから、 dF_t/dt も一定である。この変化率は D_c すなわち地震の規模とともに増大する。

他方、潮汐力は岩盤にどのように作用するであろうか。簡単のために月だけの潮汐力を考える。図7の直方体の上半分と下半分にそれぞれ F_m の力が共に左向きに作用するとみなすと、上半分の左端にストッパーがあるという仮定により、 $M_m = F_m H$ のモーメントが上記の M_0 と同じ向きに作用することになる。潮汐力は (A-3-a)式に

表4 地震の規模と潮汐力 (モデルII).

| | | | | |
|---------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 臨界ズレ量 | D_c^* (m) | 3 | 6 | 10 |
| ズレ量 | D_c (m) | 1 | 3 | 10 |
| 長さ | L (km) | 30 | 90 | 300 |
| 幅 | W (km) | 30 | 90 | 300 |
| 厚さ | H^* (km) | 30 | 60 | 100 |
| モーメント | M_0 (Nm) | 2.8×10^{19} | 7.6×10^{20} | 2.8×10^{22} |
| エネルギー | E (J) | 2.3×10^{15} | 5.7×10^{16} | 1.4×10^{18} |
| マグニチュード | M_E | 7.0 | 8.0 | 8.9 |
| 月潮汐力 | F_m (N) | 2.0×10^{10} | 3.6×10^{11} | 6.7×10^{12} |
| 剪断応力 | F_t (N) | 9.4×10^{14} | 1.3×10^{16} | 2.8×10^{17} |
| 力比 | $\zeta \equiv F_m/F_t$ | 2.2×10^{-5} | 2.9×10^{-5} | 2.4×10^{-5} |
| 剪断応力変化率 | dF_t/dt (N/day) | 2.3×10^{11} | 1.0×10^{12} | 6.9×10^{12} |
| 対変化率比 | $\xi \equiv F_m/(dF_t/dt)$ | 0.087 | 0.35 | 0.97 |

より $F_m = (a/R) F_0$ くらいの大きさで1日2回変化する。下半分の質量は $m = (\rho/2)HLW$ であるから

$$F_m \approx kHLW = k\alpha\beta^2 D_c^3 \quad (9)$$

となる。ここで $k = (1/2)(a\rho GM_m/R^3)$ である。潮汐力は D_c の3乗に比例することに注意する。潮汐力には歪みの全範囲の質量が寄与するからである。この結果、潮汐力と剪断応力1日変化量の比は

$$\xi \equiv \frac{F_m}{dF_t/dt} = \frac{k\alpha^2/\mu}{dD/dt} D_c^2 \quad (10)$$

となる。この比は D_c の自乗に比例して増大するから、規模が大きいほど潮汐力の影響は大きくなる。逆のような感じがするが、(8)と(9)式を比較すると明らかである。また、 ξ の M 依存性は (6)と(10)式使って(5)式に適用することにより

$$\xi = 10^{M+3.2} (\eta\gamma^{-2/3}) = 1.24 * 10^{-9} * 10^M \quad (11)$$

になる。ここで $\eta = (k\alpha^2/\mu) / (dD/dt)$ および $\gamma = \mu\beta^2 / (2\alpha)$ である。従って ξ は M とともに急速に増大することが分かる。最後に、潮汐力と剪断応力の比は臨界点で

$$\zeta \equiv \frac{F_m}{F_t} = \left(\frac{k\alpha^2}{\mu}\right) D_c \quad (12)$$

になる。

これらの関係式により $M = 7, 8, 9$ クラスの地震に対する ξ と ζ が表3のようになる。まず、(12)式の力の比は、これらのクラスで $\zeta = 10^{-6} \sim 10^{-5}$ であり、非常に小さい。しかし、対変化率比は $\xi = 0.0097 \sim 0.97$ であるから、潮汐力は地震発生引き金になり得る大きさである。 $M = 7$ クラスの $\xi = 0.0097$ はやや小さめであるが、簡単

なモデル計算でこのようにまともな数値が得られたのは驚きである。また、潮汐力が剪断応力より極めて小さいにもかかわらず、地震発生でその位相が選択されるということは、剪断応力の増大が極めて静かに進行し、かつ、潮汐力よりも大きな擾乱が少ないことを示している。

3. 地震モデルII

$M = 7$ 以下の場合、 ξ の値が少し小さいという難点は救えないだろうか。できるだけ簡単にということ念頭において、少しモデルを考え直してみる。ところで地震のエネルギーは歪みが臨界点を越えたとき全てが一気に放出されず、一部分のみ放出されることが考えられる。ただし、 $M = 9$ クラスの超大型地震はめったに起こらないので、このような大型地震では全エネルギーが放出されると考える。

そこで新たな臨界点を D_c^* とし、歪みの解放される範囲を $D = D_l \sim D_c^*$, ($D_c = D_c^* - D_l$) とする。臨界点では $H^*/D_c^* = \mu/\tau_c = \alpha$ と表わされるから、歪みの範囲は $H = \alpha D_c$ ではなく、 $H^* = \alpha D_c^*$ であり、 $H^* > H$ になる。剪断応力は $F_t = \mu(LW/H^*)D$ であるから、その変化率は $dF_t/dt = \mu(LH/H^*)dD/dt$ となり、分母の H^* により少し減少する。他方、潮汐力は $F_m = kH^*LW$ により少し増大する。その比は

$$\xi = \frac{F_m}{dF_t/dt} = \frac{k\alpha^2/\mu}{dD/dt} D_c^{*2} \quad (13)$$

であるから、 D_c^{*2} に比例して大きくなる。また、 $\zeta = F_m/F_t = (k\alpha^2/\mu)(D_c^{*2}/D_c)$ である。

表4に示すように、 $D_c^* = 3, 6, 10$ m と仮定する。 D_c, L, W は表3と同じとする。対変化率比 ξ は期待されたように、マグニチュードの小さい方で大幅に増大

している．すなわち $M = 7.0$ で $\xi = 0.087$ である．ところで岩盤歪みの厚さは， $M = 7, 8, 9$ クラスの地震に対して，モデル I では $H = 10, 30, 100$ km であるが，モデル II では $H^* = 30, 60, 100$ km である．海洋プレートの厚みはどの地域でもおおよそ同じと考えられるから，その移動で生じる岩盤歪みの厚さも地震の規模によって極端に違うことはないと考えられる．

ところで，地震のエネルギーは $D = D_i \sim D_c^*$ で積分して $E = (\mu/2)(LW/H^*)D_c^2 \Omega$ になる．ここで $\Omega = 1 + 2D_i/D_c$ である．地震で解放されるモーメントは $M_0 = \mu LW(D_c^* - D_i) = \mu LWD_c$ になり，表 3 の場合と同じである．ところで(4)と(5)式を使ってマグニチュードを求めると両者は異なるので，一致するように(4)式を少し修正する．というのは，地震のマグニチュードは解放エネルギーの大きさの尺度であるから，(5)式から求めるのが妥当と思われるので，これを M_E とする．

他方，上の E と M_0 の式から $\log(M_0/E) = \log 2 \alpha + \log(D_c^*/D_c \Omega)$ になる．ここで $\log 2 \alpha = 4.3$ である．また，表 4 の値をもとに $\log(D_c^*/D_c \Omega)$ の M_E 依存性をプロットすると， $\log(D_c^*/D_c \Omega) = 0.119 M_E - 1.08 \equiv \Phi(M_E)$ が得られる． $M = M_E$ として(5)式を用いると

$$\log M_0 = 1.5 M_E + 9.1 + \Phi(M_E) \quad (14)$$

になる．ただし，この $\Phi(M_E)$ は表 4 で仮定した D_c^*/D_c の M_E 依存性を基にしているため，仮定の仕方によって異なる．

ところで，逆断層型の断層面の方向はプレートの沈み込む角度と同じであるのに対して，前節の統計で得られた地震に対する潮汐力の最多方向は，ほぼ地球中心方向である．このような角度の違いは大きな疑問であるが，前節の地震モデル I と II では，あたかも平行であるかのように想定して力の比較を行った．そして次節でも同様の仮定で検討を進める．しかし，後節の地震モデル III で述べるように，地震摩擦説により，潮汐力の断層面成分のほかに法線成分の寄与も考慮すると，断層面でのその和は潮汐力の天頂成分の大きさにほぼ等しい．従って，力の大きさについては，潮汐力が断層面に平行とみなしても，ほとんど結果に変わりはない．

4. 地震の規模と潮汐力の位相

前節で，簡単な地震モデルにより，相当地に粗い評価ながら，潮汐力の大きさはプレート移動による剪断応力の一日の増分とおおよそ同程度または少し小さい程度であることを示した．従って，潮汐力が地震発生の引き金になることは十分にあり得ることである．ところで，表 3 と表 4 の対変化率比 ξ で示したように，地震規模が大きいと潮汐力の影響は大きいですが，逆に，地震規模が小さいと，潮汐力の影響は次第に小さくなるので，潮汐力が引

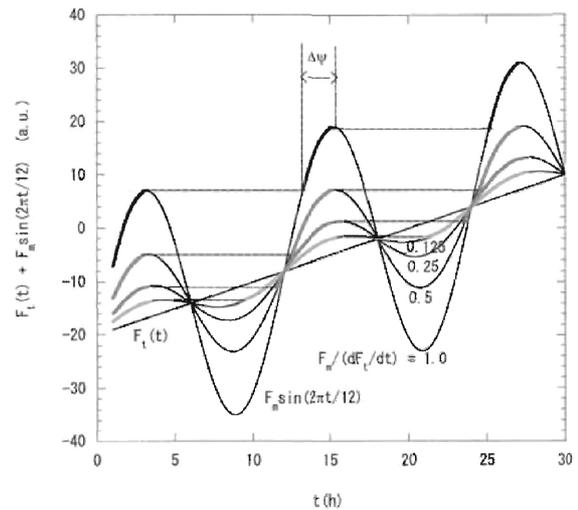


図 8 プレート移動に伴う岩盤の剪断応力 $F_t(t)$ と潮汐力 $F_m \sin(2\pi t/12)$ の和が岩石破壊の臨界値以上になったとき，地震が発生する．発生の位相を太線で示す．

き金になる可能性は減少し，潮汐力の特定の位相で地震が発生することもなくなる．すなわち相関関係が弱くなることは容易に想像できる．

このことを模式的に図 8 に示す．すなわち，時間とともに単調に増大するプレート移動の剪断応力 $F_t(t)$ に，サイン関数的に変動する潮汐力 $F_m \sin(2\pi t/12)$ が重畳すると，岩盤破断の臨界値に遭遇する位相は同図の太線で示された部分になる． $F_m / (dF_t/dt)$ の比が大きいと破断の位相幅 $\Delta\phi$ は狭くなり，この比が小さいと広がる．従って，この比の大きい地震だけに注目すると，潮汐力の位相に対する地震発生の頻度には，図 3 のようなピークが現れ，この比の小さい地震も加えると，次第に平坦な分布になると考えられる．小規模地震は数が多いので，この傾向が一層強くなる．今回，図 3 の作成に用いたデータは理科年表に記載されたもので，おおむね大規模地震 ($M = 7.0 \sim 7.5$) が集められている．また，図 8 を見ると， $F_m / (dF_t/dt) \approx 0.1$ で地震発生の位相が限定されはじめ， $F_m / (dF_t/dt) \approx 0.5$ 以上で相当に限定されるようになる．表 4 の計算では $M_E = 7.0$ と 8.0 のときこの比はそれぞれ 0.087 と 0.35 である．

ところで，図 8 によれば，地震発生の位相は潮汐力のピークより以前の時間に限定されている．しかし，図 3 を見ると，地震の頻度は中央からほぼ左右対称であり，このような傾向は見られない．図 8 では，最も単純にプレート移動の剪断応力と同方向の潮汐力だけを仮定した．実際には潮汐力の天頂成分とともに水平成分も効いてくる．また，断層の方向の影響などさまざまな要因が重なっていると思われるので，これほど単純ではない．あるいは，全く異なる要因がからんでいることも考えられる．このピーク前位相限定の問題を解く糸口はまだ見えていない．地震と潮汐力の方向を考慮して詳細に検討する必要がある．

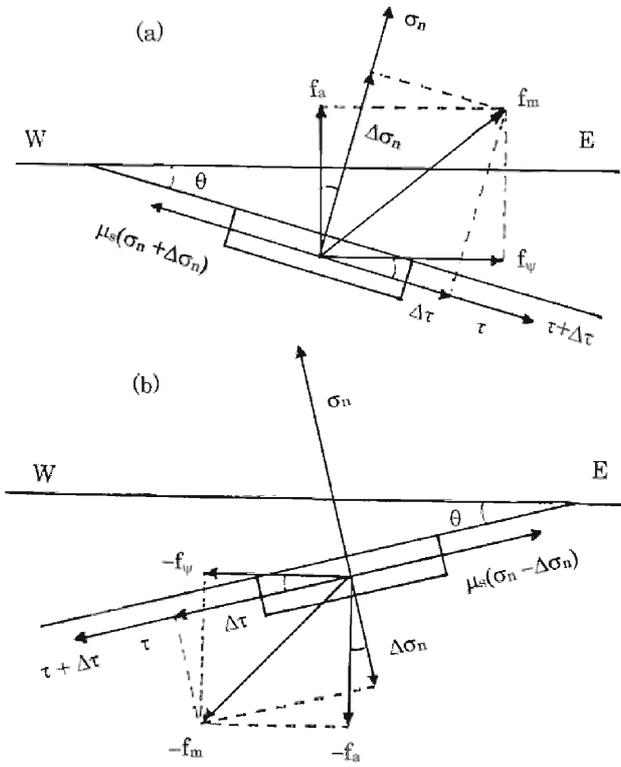


図9 海洋プレートの沈み込みに対する剪断応力, 摩擦抵抗, 潮汐力の関係。(a): 西から東への沈み込み, (b): 東から西への沈み込み。

5. 地震モデル III (摩擦則)

環太平洋地震帯の逆断層では地殻プレートは $\theta = 20 \sim 40$ 度の角度で沈み込むから、地震発生のための潮汐力の最適方向はこの角度になりそうであるが、地震の統計ではおおむね地球中心方向が最多である。これは何故か。プレート間に摩擦則を適用してみる。

大陸プレートの下に潜り込んだ海洋プレートは地震のたびに同じ方向に少しずつ進行する。この様子から、地震の発生は斜面上に置かれた鉄板が、ある角度で小刻みに滑り落ちると同様の現象と考えられる。海洋プレートは東または西に移動するので、この方向で大陸プレートの下に沈み込み、断層面もこの方向に形勢されるものとする。さらに潮汐力は断層面に対して垂直な面内にあるとする。すなわち、応力は全て二次元で考えることにする。潮汐力 F_m の成分 (F_a, F_ψ) は (A-3-a) と (A-3-b) 式で表わされる。プレートが東または西に沈み込む場合をそれぞれ図9-aと9-bに示す。ここで f_a と f_ψ は (F_a, F_ψ) を面積 LW で割ったものである。また、 τ はプレート移動による剪断応力、 σ_n は両プレート間の圧力である。 $\Delta\tau$ と $\Delta\sigma_n$ はそれぞれ潮汐力の断層面成分と法線成分である。 $\mu_s(\sigma_n \pm \Delta\sigma_n)$ は抵抗応力、 μ_s は摩擦係数である。

図9-bにおいて、斜面上の鉄板の滑りと同様に考えると、 $\tau + \Delta\tau > \mu_s(\sigma_n - \Delta\sigma_n)$ のとき、プレートは滑り始める。すなわち地震発生条件は

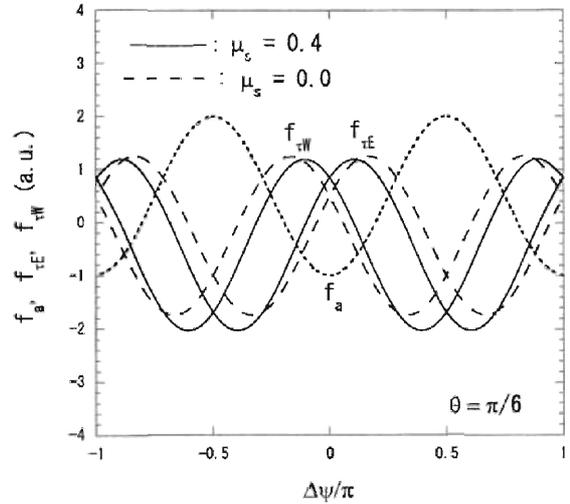


図10 海洋プレートの東から西への沈み込みに対する潮汐応力の角度依存性。文字記号については本文参照のこと。

$$\Delta\tau + \mu_s \Delta\sigma_n > \mu_s \sigma_n - \tau \quad (15)$$

となる。左辺は潮汐力だけで決まり、地震発生以前は右辺に比べて非常に小さい。図9-aの場合も応力の符号を考慮して、同様に考えられる。

まず、(15)式の右辺について考える。一回の地震でのプレートの移動量 D_c は無視できるので、 σ_n は時間変化しない。剪断応力は $\tau = \kappa t$ ($\kappa = dF_t/dt/LW$) と表わされ、時間とともに増大し、臨界点で $\tau (= \tau_c) = \mu_s \sigma_n$ になる。ところで地震波解析によると、逆断層地震の応力降下量は深さとともに増大し、 $y = 20\text{km}$ で約 $7.8 \times 10^8 \text{N/m}^2$ である (佐藤, 2003)。応力降下量は地震発生による剪断応力の解放であるから、 $\tau_c (= \mu/\alpha)$ に等しい。よって剛性率は $\mu = 7.8 \times 10^8 \text{N/m}^2$ になる。この値はモデル I で用いた値の2.5倍である。

他方、 σ_n は岩石圧と考えると $\sigma_n = gpy$ (g : 重力加速度) であるから、この深さで $\mu_s \sigma_n \approx 200 * 10^6 \text{N/m}^2$ になる ($\mu_s = 0.4$ とした)。一般に、岩盤は水を含むとろくなり、間隙水圧 P により岩石圧は実効的には $\sigma_{n,eff} = \sigma_n - P$ になることが知られている (宇津, 2001)。よって $\sigma_{n,eff}/\sigma_n \approx 0.04$ に減少していることになる。

次に、左辺の潮汐力について。潮汐力の時間変化は角度 ϕ で表わされる (図A-1)。従って図9-bの場合

$$\Delta\tau = -f_a(\psi) \sin \theta - f_\psi(\psi) \cos \theta \quad (16-a)$$

$$\Delta\sigma_n = -f_a(\psi) \cos \theta + f_\psi(\psi) \sin \theta \quad (16-b)$$

である。これにより潮汐力の応力和 $f_\tau \equiv \Delta\tau + \mu_s \Delta\sigma_n$ が求まる。 $\Delta\phi \equiv \phi - \pi/2 = 0$ を基準にして、 $\theta = 30$ 度に対する f_τ と f_a の $\Delta\phi$ 依存性を図10に示す。 $f_{\tau E}$ と $f_{\tau W}$ はプレートの移動方向がそれぞれ東 (図9-a) と西 (図9-b) の場合である。天頂成分 f_a は $\Delta\phi = 0$ で極小であ

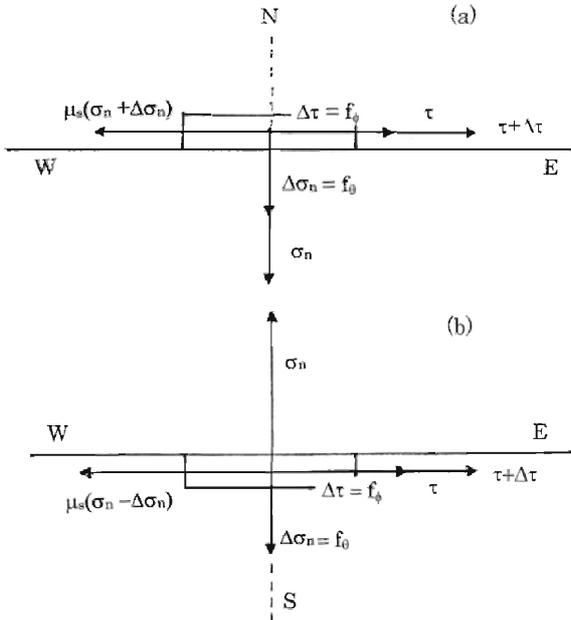


図11 トルコ周辺の横ずれ断層に対する剪断応力，摩擦抵抗，潮汐力の関係。(a)：北緯～30度より北側，(b)：北緯～30度より南側。

る。天頂成分の寄与が無いとき ($\mu_s = 0$) に比べて、有るとき ($\mu_s = 0.4$) は $f_{\tau E}$ と $f_{\tau W}$ のピーク位置が $\Delta\phi = 0$ に近寄っていることが分かる。このとき 両者のピーク位置は $\Delta\phi \approx \pm 20$ 度である。すなわち 応力 f_{τ} は、潮汐力が地球中心方向から少し前、または、過ぎたあたりを向くとき、最も大きい。このとき ピーク値は同図から $f_{\tau} = 1.2 |f_a| = 1.2 f_m$ になる。すなわち断層面方向の応力 f_{τ} は、モデル I と II で仮定した月だけの潮汐力 $f_m = (a/R) F_0 / LW$ にほぼ等しい。

次に、横ズレ断層について考える。トルコ北部（北緯～30度）には東西1200 kmに渡って横ズレ断層がある。図5に示すように、この地域の地震発生は潮汐力が西向き、または、少し南向きのときが多い。また、この東側では（北緯30度より少し北側で）ヒマラヤ北部からシベリヤまで東向きである。かつ、天頂成分は小さい。そこで 簡単のために天頂成分を無視して、断層面に平行な成分（東西）と直交する成分（南北）の2つを考える。このため (A-10-b) と (A-10-c) 式の $(F_{\theta p}, F_{\phi p})$ による応力 (f_{θ}, f_{ϕ}) を用いると、潮汐力による断層面の合成応力は $f_{\tau} = F_{\phi} + \mu_s F_{\theta}$ と表わされる。図11-a は北緯30度より北側、図11-b は南側を表す。

図11-b (南側)において、月の位置を天頂角 $\theta_m = \pi/2$ 、方位角 $\phi_m = 0$ としたときの潮汐力を図12に示す。合成応力 f_{τ} は $\phi_p \approx -3\pi/4, +\pi/4$ (西向き) のとき極小値 $f_{\tau} = -0.7f_m$ となり、 $\phi_p \approx -\pi/4, 3\pi/4$ (東向き) のとき極大値 $f_{\tau} = 1.0f_m$ になる。地震発生は西向きのときである。図中の f_{τ} は $\mu_s = 0.4$ の場合であり、 $\mu_s = 0$ の場合は $f_{\tau} = F_{\phi p}$ であるから、抵抗応力の影響は小さい ($F_{\theta p}$ が小さいから)。さらに f_{τ} が極小のとき、天頂角成分は $f_{\theta p}$

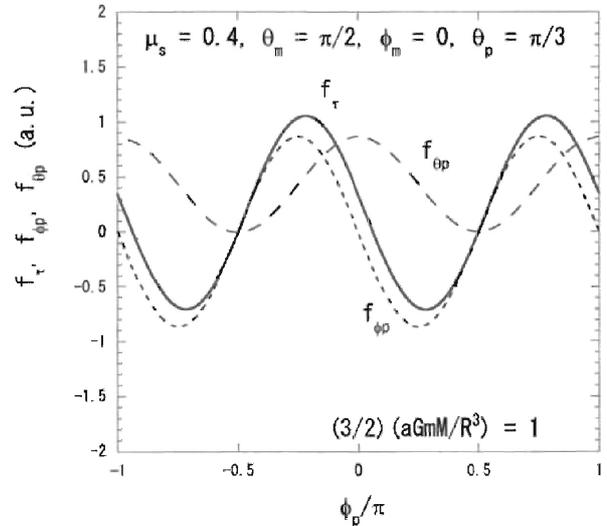


図12 北緯～30度より南側における潮汐力応力成分の方位角 ϕ_p 依存性。

$= 0.3 f_m > 0$ であるから、少し南向きである。他方、図11-a (30度以北) に対する応力も図12に似たようなものになり、東向きのとき極大値になる。

ヒマラヤ北部からシベリヤまで横ズレ断層かどうか詳らかではないが、潮汐力の向きが類似していることから、トルコ近辺と同様に考えられる。他方、カリフォルニアの地震も横ズレ断層型であるが、図5に示すように、この地域の潮汐力の方向はそろっていない。従って 潮汐力はこの地域の地震の主たる引き金ではないといえる。潮汐力の他にどんな引き金の要因があるのか、ないのか、さらに詳細なデータで検討する必要がある。

6. 断層の種類と外力の向き

以上の地震モデルでは図7に示すように、プレート移動による外力は断層面に平行な成分 F_t を念頭においた。ただし、断層面は F_t に平行であるが、断層線はこれに直交している。地表に現れた断層線とそれを引き起こした外力の向きの関係は、次のようになっている。

正断層：水平面内の張力によって縦ズレ断層線が張力に対して直角方向に現れる。

逆断層：水平面内の圧力によって縦ズレ断層線が圧力に対して直角方向に現れる。

横ズレ断層：水平面内のズレ応力によって横ズレ断層線が応力に対して平行に現れる。

地溝：水平面内の張力によって溝状の陥没地帯が張力に対して直角方向に現れる。

地塁：水平面内の張力によって土塁状の隆起地帯が張力に対して直角方向に現れる。

地溝と地塁は正断層の一種とみなせる。逆断層は外力の向きを考えなければ正断層と同様にみなせる。すなわちこれらはまとめて“縦ズレ断層”ともいべきもので、

断層線と外力は直交している。これに対して横ズレ断層では外力と断層線は平行である。従って 潮汐力と断層線の方向を比較するに当たっては、縦ズレ断層か、横ズレ断層か区別する必要がある。

ところで 太平洋周辺の地震帯は海溝の陸側に分布し、おおむね逆断層型である。ここでは図4、5に示したように、地震は時間帯AとBに多く、地球中心方向成分が大きく作用している。しかし、ペルー付近では時間帯A、BとFが混在し、大きな天頂成分も見られ、複雑である。他方、トルコやカリフォルニアでは横ズレ断層型の地震といわれている。特に、トルコ付近では時間帯C、Dが見られ、かつ、東西の断層方向の水平成分が大きい。また、メキシコ近辺では時間帯Cが多く、かつ、潮汐力はほぼ東西成分だけである。これも横ズレ断層型であろうか。ちなみに 西インド諸島(例；ハイチ)の地震は横ズレ断層型あることが知られている。

さらに ニューギニア北東部でも時間帯C、Dが見られ、東西の水平成分とともに、上向き天頂成分も目立つ。ただし、ここには東西に伸びた2つの海溝とともに、マグマが湧きだしてくる発散型プレート境界(海嶺)があるといわれている。海嶺の巨大なものとして、大西洋を東西に分裂させるように南北に延びる大西洋中央海嶺と、チリ沖からカリフォルニアに延びる東太平洋海嶺がある。今回検討した地震データでは、この地域の地震例は少ない。潮汐力との関係を調べるには、この地域の地震データを集める必要がある。

図5に表れた潮汐力の天頂成分と水平成分の分布は、これら断層の種類に深く関係していると思われる。従って地域ごとに断層と潮汐力の関係を検討することにより、さらに密接な関係が描きだされると思われる。この意味で潮汐力は地震発生研究のプロープとみなすことができる。

まとめ

1991年から1996年までに世界で発生した130件の大規模地震について潮汐力と地震発生の関係を調べて、以下のことが見いだされた。

- 1) 潮汐力は1日2回極大と極小になるが、潮汐力の天頂成分が極小のとき地震発生件数は最も多く、極大に向かうにつれて件数は減少する。
- 2) 上記極小からの地震発生時のズレを1時間毎に発生時間帯として分類し、その震源地を地球上に表すと、地域毎に時間帯の偏りが見られる。
- 3) 震源の深度にも時間帯の偏りがある。
- 4) 地震発生時の潮汐力の天頂成分と水平成分を地球上に表すと、発生時間帯と同様な地域ごとの偏りが見られる。

- 5) 逆断層型地震の発生で潮汐力がほぼ地球中心方向を向いていることは、プレートの摩擦則を適用すると説明できる。

これらのことから、潮汐力の大きさと向きによって地震発生の最適条件が地域毎に満たされ、地震発生の引き金になっていると考えられる。

また簡単な地震モデルによれば、潮汐力の1日の変化量は地震発生直前の岩盤の剪断応力の1日あたりの増分と同程度であり、地震発生の引き金となりうる。潮汐力の影響は地震規模が大きいほど大きい、地震規模が小さいと小さくなる傾向があるので、上記1)~4)のような傾向は弱くなる。今後、潮汐力と地震との関係についてこれらの点について留意しながら、さらに詳細に調べれば、両者の関係が一層明確になるとと思われる。

おわりに

本文は1999年に表記のテーマについて非専門的立場で検討し、まとめたものである。その経緯については以下で述べる。本研究の結果、潮汐力と地震発生の関係についてかなりの相関が見出されたが、当時、専門的な研究状況が分からなかったのと、適当な発表の場所と機会がなかったのも、そのままになっていた。ところが今年2月、表記の問題について専門的立場で同様な研究(Tanaka, 2010)がプレス発表されたのをインターネットで知り、遅ればせながら、数値を訂正し一部内容を整理修正して、おおむね元のままの形で本誌に投稿することにした。ただし、投稿段階の文献調査で地震摩擦説があることが分かったので、これを追加検討した。本誌は広範な分野の読者を対象としているので、できるだけ分かりやすくするために、基礎的事柄も削除せず載せることにした。

1999年3月29日、高エネルギー物理学研究所の竹田氏は高輝度光科学研究センター(SPring-8)において、加速器の磁石等の精密設置(アラインメント)の研究に関し、地盤変動の精密測定について講演を行った。講演で示された多数のデータのなかに、太陽と月の引力(潮汐力)による周期的な地盤変動を示すものがあつた。その中でたまたま発生した2つの地震のノイズがいずれも周期的地盤変動のピーク位置に符合しているのをみて、筆者は潮汐力が直接地震に関係している可能性があることを指摘した。というのは火山の爆発による地震は別にして、大部分の地震は海洋プレートの移動で長い年月に蓄積された剪断応力により岩盤が破断して発生するから、潮汐力による地盤変動が地震発生の引き金になっているのではないかと思われたからである。

竹田氏の講演に刺激されて、過去の地震例について潮汐力と地震発生の関係を統計的に調べてみたら面白いの

ではないかと思ひ、潮汐力の基本的考え方の検討とデータの収集を始めた。データとしては過去の地震例とともに、その時の太陽と月の正確な位置を示すものが必要であった。これは計算による太陽と月と震源地の位置関係を確認し、その時の正確な潮汐力を求めるためである。幸いなことに、これらのデータは理科年表に載っていることが分かった。

ところで 1999年の時点で、潮汐力と地震発生の関係はすでに専門家によって十分に調べられ、専門書または専門誌に詳しく載っていると想像されたが、これらの文献が近くにないため、これを見出すことが出来なかった。他方、地震関係の入門書を数冊見た限りでは、地震と潮汐力の関係については記述されていなかった。また、後で見た入門書(宇津, 2001)では、局所的な群発地震や余震については相関を認めつつも、大地震については否定的である。しかし、最初に述べたように竹田氏の観測例からは密接な関係が推測された。もし、潮汐力と地震発生の間に相関が見いだされるならば、それは地震発生の機構についてなんらかの知見や理解の糸口をもたらすと思われた。そこで出来るだけ正確に調査検討し、その結果を整理し記録しておくことにした。その結果は本文に述べたとおりである。

謝 辞

本研究は高エネルギー物理学研究所の竹田繁氏による地盤変動に関する講演が発端となった。地震に関する入門書は兵庫県立大学(前姫路工業大学)工学部図書館と理学部図書館から借用した。ここに改めて謝意を表します。

要 旨

地球と月および太陽の間に働く引力によって発生する潮汐力は、地球の自転によって、一日2回変動し、これによって潮の干満が起こる。それとともに、地球表面の岩盤も弾性変形し、変動するので、地震発生の引き金になる可能性がある。世界における過去の地震と潮汐力との関係を統計的に調べたところ、潮汐力が極小のときに地震発生が最も多いことが分かった。また、地震発生時の潮汐力の位相と方向は世界的な発生地域での分布に偏りがあるので、両者の間にその地域特有の整合条件があるように思われる。簡単な地震モデルで計算したところ、地殻移動による岩盤の剪断応力の臨界状態の一日の増分に対して、潮汐力はほぼ同等か少し小さい程度であるので、地震発生の引き金になりうる。また、大きな地震ほど剪断応力に比べて潮汐力の影響が大きくなるので、地震発生の位相が限定され、相関関係が強くなる。逆断層

型地震の発生時の潮汐力の方向はプレート間の摩擦則により説明できる。

文 献

- Beeler, N. and Lockner, D. (2003) Why earthquakes correlate weakly with the solid Earth tides: Effects of periodic stress on the rate and probability of earthquake occurrence. *J. Geophys. Res.*, 108(B8), 8/1 - 8/17.
- Curchin, J. and Pennington, W. (1987) Tidal triggering of intermediate and deep focus earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 92(B13), 13957 - 13967.
- Cochran, E., Vidale, J. and Tanaka, S. (2004) Earth tides can trigger shallow thrust earthquakes. *Science*, 306, 1164 - 1166.
- Date, S. and Kumagai, N. (1999) A long term observation of the DC component of the horizontal COD in the storage ring of SPring-8. *Nucl. Instrum. Methods*, A 421, 417 - 422.
- Ding, Z., Jia, J. and Wang, R. (1983) Seismic triggering effect of tidal stress. *Tectonophysics*, 93, 319 - 335.
- Dietrich, J. (1987) Nucleation and triggering of earthquake slip: Effect of periodic stress. *Tectonophysics*, 144, 127 - 139.
- Glasby, G. and Kasahara, J. (2001) Influence of tidal effects on the periodicity of earthquake activity in diverse geological settings with particular emphasis on submarine hydrothermal systems. *Earth Sci. Rev.*, 52, 261 - 297.
- Heaton, T. (1975) Tidal triggering of earthquakes. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 43, 307 - 326.
- Heaton, T. (1982) Tidal triggering of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 2181 - 2200.
- 片尾浩 (2002) 月齢と丹波山地の微小地震発生の相関について。地学雑誌, 111(2) 248 - 255.
- 国立天文台(編) (1991, 1998) 理科年表。丸善, 東京, 10 - 11, 844 - 847.
- Kasahara, J. and Sato, T. (2001) Tidal effects on volcanic earthquakes and deep-sea hydrothermal activity revealed by ocean bottom seismeter measurements. *J. Geogr. Soc. Japan*, 45, 424 - 433.
- 佐藤智美 (2003) 中小地震の応力降下量の断層タイプ、震源深さ依存性及び地域性に関する研究。土木学会地震工学論文集, 27, 1 - 8.
- Scholz, C. (1998) Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391, 37 - 42.
- Schuster, A. (1897) On lunar and solar periodicities of earthquakes. *Proc. Roy. Soc.*, 61, 455 - 465.
- Tanaka, S., Ohtake, M. and Sato, H. (2002) Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data. *J. Geophys. Res.*, 107, ESE 1, 1 - 11.
- Tanaka, S., Sato, H., Matsumura, S. and Ohtake, M. (2006) Tidal triggering of earthquakes in the subducting Philippin Sea plate beneath the locked zone of the plate interface in the Tokai region, Japan. *Tectonophysics*, 417, 69 - 80.
- Tanaka, S. (2010) Tidal triggering of earthquakes precursory to the recent Sumatra megathrust earthquakes of 26 December 2004 (Mw, 9.0), 28 March 2005 (Mw, 8.6) and 12 September 2007 (Mw 8.5). *Geophys. Res. Lett.*, 37, L02301, 1 - 4.

Tsuruoka, H., Ohtake, M. and Sato, S. (1995) Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: Contribution of the ocean tide loading effect. *Geophys. J. Int.*, **122**, 183-194.
 鶴岡 弘・大竹政和 (2002) 地震発生における地球潮汐の影響 — 数値シミュレーションによるアプローチ 地学雑誌 **111**(2), 256 - 267.

宇津徳治 (2001) 地震学. 共立出版社, 東京, 216-217, 247 - 249.
 Vidale, J. et al. (1998) Absence of earthquake correlation with Earth tides: An indication of high preseismic fault stress rate. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24567 - 24572.
 Wilcock, W. (2001) Tidal triggering of micro-earthquakes on the Juan de Fuca Ridge. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3999 - 4002.

(2010年5月25日受付)
 (2010年9月9日受理)

附録 A 潮汐力

1. ポテンシャルエネルギー

太陽や月による潮汐力と地震発生の関係調べる場合、潮汐力そのものの性質について正しく理解しておく必要があるため、潮汐力の起源についてまとめておく。図A-1において、Oは地球の中心、P_eは地表点、Sは太陽または月とする。aは地球半径、RとdはそれぞれO-SとP_e-S間の距離とする。φは∠P_eO Sである。さて、点P_eにおいた質量mの物体は質量M_sの点Sに対して

$$U = -\frac{GmM_s}{d} \quad (A-1)$$

のポテンシャルエネルギーをもつ。Gは重力定数で、 $d^2 = a^2 + R^2 - 2aR\cos\phi$ である。表A-1に示すように、 $a \ll R$ であるから、次のように近似できる。

$$U \approx -\left(\frac{GmM_s}{R}\right)\left\{1 + \frac{a}{R}\cos\psi + \frac{1}{2}\left(\frac{a}{R}\right)^2(3\cos^2\psi - 1)\right\} \quad (A-2)$$

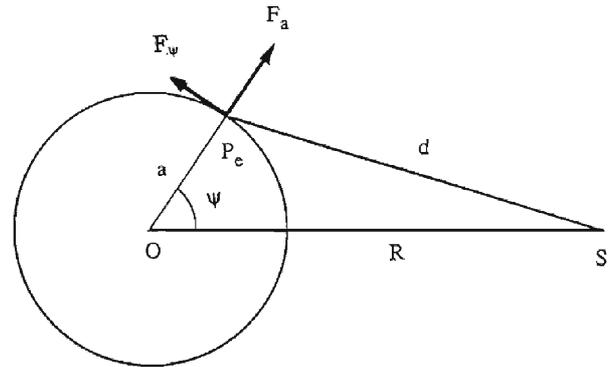
この物体に作用する力は、天頂方向と接線方向でそれぞれ次のようになる。

$$F_a = -\frac{\partial U}{\partial a} \approx F_0 \cos\psi + F_0\left(\frac{a}{R}\right)(3\cos^2\psi - 1) \quad (A-3-a)$$

$$F_\psi = -\frac{1}{a}\frac{\partial U}{\partial \psi} \approx -F_0 \sin\psi - \frac{3}{2}F_0\left(\frac{a}{R}\right)\sin 2\psi \quad (A-3-b)$$

ここで、 $F_0 = GmM_s/R^2$ で、これは質量mの物体を地球中心Oにおいたとき質量M_sの点Sから作用する引力に等しい。F_aとF_ψの第1項は単にF₀の天頂方向と接線方向の成分を表し、これらをベクトルとして合成するとF₀になる。いま、質量mが地球全体に一樣に分布し、あるいは地球の中心のまわりに点対称に分布し、かつ、その総和が地球の質量に等しいとすると、F₀は丁度地球と太陽または月の間に働く引力に等しい。これは地球の公転運動をもたらす、潮汐力とは無関係であるので、以下では無視する。

他方、F_aとF_ψの第2項の角度分布は図A-2のようになり、地殻の変動と海水の流動を引き起こす。すなわち潮汐力である。図A-2により、太陽または月に向かって地球の表と裏側で大潮になること、天頂成分はφ = 0度と180度では地球の外向きであるが、±90度では地球の中心を向くことが分かる。また、切線成分はこれらの角度でゼロであり、φ = ±45度とφ = ±135度で最大になる。ポテンシャルエネルギーUを表す(A-2)式の第



図A-1 地球と太陽（または月）の位置関係。

3項が潮汐力をもたらすので、この項

$$U_t = -\left(\frac{GmM_s}{2}\right)\left(\frac{a^2}{R^3}\right)(3\cos^2\psi - 1) \quad (A-4)$$

は潮汐ポテンシャルエネルギー(tidal potential energy)と呼ばれる。

実際の潮汐力は太陽と月の引力の和によって決まる。潮汐力の比は(A-3-a)と(A-3-b)式と表A-1から

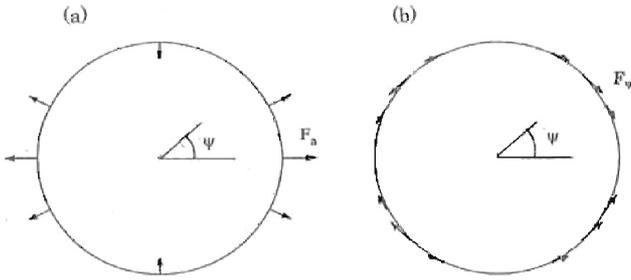
$$\frac{(M_s/R_s^3)}{(M_m/R_m^3)} = 0.46 \quad (A-5)$$

となる。添字のsとmはそれぞれ太陽と月を表す。太陽に比べて月の質量は小さいが、地球までの距離が近いので、潮汐力は主に月の引力で決まる。

2. 天球座標

前節では簡単のために潮汐力を平面上で考えたが、実際には地球と月と太陽と地球上の点P_eの位置関係は3次元的に考える必要がある。さらに、これらの位置関係は地球と月の公転運動と地球の自転運動によって刻々と変化する。太陽と地球と月の運動はいわゆる3体問題であり、細かくいえば非常に複雑な運動である。しかし、ここで潮汐力の問題を検討するに当たっては、最も簡単に、地球は太陽の回りを、月は地球の回りを一定半径で等速円運動すると仮定する。

潮汐力について考える場合、地球上の点P_eに対する太陽と月の角度関係が重要であるから、地球を中心とする天球座標を使うのが便利である。そうすると太陽も月も地球の回りを等速円運動することになる。天球座標はあまり馴染みがないが、これは3次元極座標と同等であり、地球の中心を原点とし、太陽と月の



図A-2 平面座標における潮汐力の天頂方向成分Faと接線方向成分Fの角度分布。

位置は (r, θ, ϕ) で表され、太陽も月も r 一定の天球上を運行する。こうして求めた太陽と月の位置がどのくらい正しいかを評価するために、後で理科年表に載っている値と比較する。理科年表でも天球座標を用いて、太陽と月の1年分の位置が1日毎に記載されている。

天球座標はX, Y, Z軸の取り方で多少の種類があるが、ここでは図A-3に示すように、地球の自転軸をZ軸とし、天の黄道(天球上の黄道)が天の赤道を上向きに横切る(すなわち、太陽が北半球に寄ってくる)点SPを春分点と呼び、この方向をX軸とする。Y軸はこれらの軸に直交するように決まる。天の赤道はX-Y平面上にあり、天の黄道はX-Y平面と $\epsilon_s = 23.33$ 度の傾きをなす。図A-3において、Oは地球の中心、Pは地球上の点 P_e を天頂方向の天球上に移したものである。点Sは天球上の太陽の位置を示す。

通常、地球上の点 P_e の位置は緯度と経度で表わされる。緯度は赤道を基準にして南北に取り、経度はロンドンのグリニッチを通る子午線を基準にして東西に取る。これに対して天球座標では、天球上の点Pの位置は赤緯($\delta_p = \pi/2 - \theta_{pe}$)と赤経($\phi_p = \phi_{pe}$)で表される(図A-3)。赤緯はX-Y平面を起点とし、赤経は前述の春分点を起点とする。ただし、赤緯は北半球でプラス、南半球でマイナスである。同様に太陽Sの位置は赤緯(δ_s)と赤経(ϕ_s)で表される。月の位置も赤緯(δ_m)と赤経(ϕ_m)で表される。天球の球面座標では $\angle POS (= \phi_s)$ について次の関係がある。

$$\cos \psi_s = \cos \theta_p \cos \theta_s + \sin \theta_p \sin \theta_s \cos H_s \quad (A-6)$$

ここで $H_s = \phi_s - \phi_p$ は時角と呼ばれる。この $\cos \phi_s$ を(A-4)式に代入することにより、その時刻での潮汐ポテンシャルエネルギー U_t が得られる。

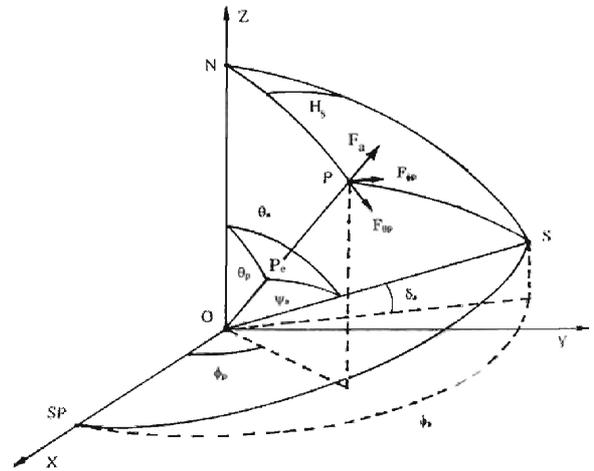
ところで、点Pは地球の自転に伴って1平均恒星日 $T_e = 0.9972769$ 日で天球上を1回転する。太陽は1恒星年 $T_s = 365.2564$ 日で1回転する。月は1恒星月 $T_m = 27.321662$ 日で1回転する。いずれも地球の自転と同じ方向に回転する。ただし、月の軌道面(白道)は太陽の軌道面(黄道)に対して $\epsilon_m = 5.13$ 度傾いていて、その軌道面は $T_{mr} = 18.6$ 年 = 6793.46日の周期で地球の自転と反対方向に回転する。

具体的には1991年1月1日0時00分を時間の原点 $t = 0$ として、天球上の点P、太陽、月の位置は以下になる。 t の単位はdayとする。

1) 天球上の点P (δ_p, ϕ_p)は

$$\delta_p = \text{const}, \quad \phi_p = \omega_e t + \phi_{p0} \quad (A-7)$$

で決まる。 $\phi_{p0} = \phi_{*p0} + \phi_{*pe}$ である。 $\phi_{*p0} = 100.94$ 度は $t = 0$ のときのグリニッチの位置で、 ϕ_{*pe} はグリニッチからの方位角



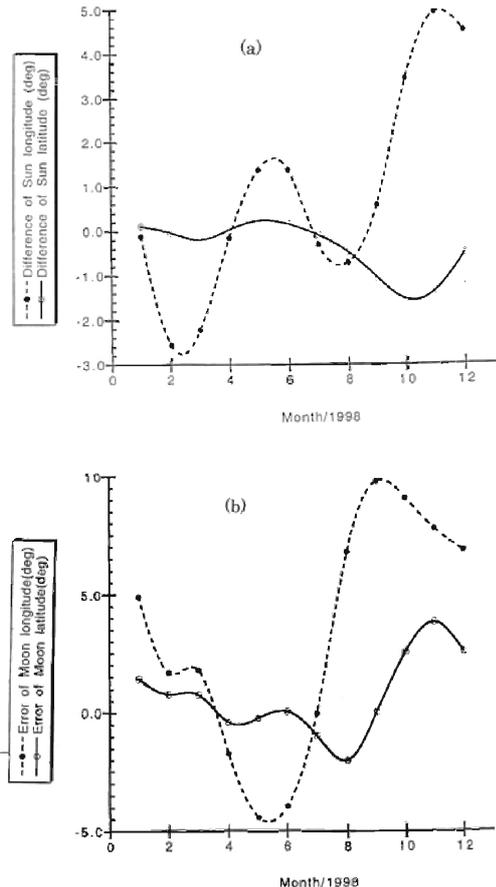
図A-3 天球座標における地球と太陽(または月)の位置関係。

である。 $\omega_e = 2\pi / T_e$ である。

2) 太陽の位置点S(δ_s, ϕ_s)は

$$\delta_s = \epsilon_s \sin[\omega_s(t - t_{sp})], \quad \phi_s = \omega_s t + \phi_{s0} \quad (A-8)$$

で決まる。ここで $t_{sp} = 79.22$ daysは太陽が春分点を通過する時刻である。 $\phi_{s0} = 280.94$ 度は $t = 0$ における太陽の位置である。 $\omega_s = 2\pi / T_s$ である。



図A-4 天球座標における太陽(a)と月(b)の位置(赤緯と赤経)の計算誤差(1998年1月から12月まで)。

3) 月の位置(δ_m 、 ϕ_m)は

$$\delta_m = [\varepsilon_s + \varepsilon_m \cos(\omega_{mr}t + \alpha_1)] \sin(\omega_m t + \alpha_2), \quad \phi_m = \omega_m t + \phi_{m0} \quad (A-9)$$

で決まる。ここで $\omega_{mr} = 2\pi/T_{mr}$ および $\omega_m = 2\pi/T_m$ である。

$\alpha_1 = 54.32$ 度, $\alpha_2 = 260.0$ 度である。また, $\phi_{m0} = 104.52$ 度は $t = 0$ における月の位置である。

図A-4-a, bは7年後の1998年1月から12月まで, 毎月の初日の0時00分(世界時)における太陽と月の位置について, (A-7)と(A-8)と(A-9)式を用いて計算した値と理科年表の値との差である。太陽についての誤差は経度で5度以内, 緯度で2度以内である(図A-4-a)。月についての誤差は経度で10度以内, 緯度で3度以内である(図A-4-b)。地球の自転は1時間で15度であるから, 月の位置については時間にして最大で40分の誤差がある。図A-4のような形の誤差は毎年同じように現れる。この誤差は主に, 楕円軌道とすべき地球の公転運動を円軌道で近似したことによる。これは少し補正を加えることでかなり軽減できると予想されるが, 今回は割愛した。

3. 潮汐力の方向成分

以上により, 天球上における太陽と月と地球の位置関係が3次元的に決まる。潮汐力の3次元的な成分を, 図A-3に示すように, 天頂(a)方向と天頂角(θ_p)方向および方位角(ϕ_p)方向に分ける。これは(A-4)式の潮汐ポテンシャルエネルギー U_t と, 角度の関係式(A-6)を用いて次のように微分すれば求まる。以下では添字 s は太陽または月を表すものとする。

$$F_a = -\frac{\partial U_t}{\partial a} \quad (A-10-a)$$

$$F_{\theta_p} = -\frac{1}{a} \frac{\partial U_t}{\partial \theta_p} = -\frac{1}{a} \frac{\partial U_t}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial \theta_p} \quad (A-10-b)$$

$$F_{\phi_p} = -\frac{1}{a \sin \theta_p} \frac{\partial U_t}{\partial \phi_p} = -\frac{1}{a \sin \phi_p} \frac{\partial U_t}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial \phi_p} \quad (A-10-c)$$

よって天頂方向成分 F_a は

$$F_a = F_0 \frac{a}{R} (3 \cos^2 \psi_s - 1) \quad (A-11)$$

である。天頂角成分 F_{θ_p} と方位角成分 F_{ϕ_p} については, まず次式を求め。

$$\frac{1}{a} \frac{\partial U_t}{\partial \psi_s} = \frac{3}{2} \frac{aGmM}{R^3} \sin 2\psi_s \quad (A-12)$$

(A-6)式により ϕ_s が, 従って上式の値が決まる。

また, (A-6)式を微分して

$$-\sin \psi_s \frac{\partial \psi_s}{\partial \theta_p} = -\sin \theta_p \cos \theta_s + \cos \theta_p \sin \theta_s \cos(\phi_s - \phi_p) \quad (A-13-a)$$

$$-\sin \psi_s \frac{\partial \psi_s}{\partial \phi_p} = \sin \theta_p \sin \theta_s \sin(\phi_s - \phi_p) \quad (A-13-b)$$

が決まる。これらを用いて, (A-10-b)と(A-10-c)式から F_{θ_p} と F_{ϕ_p} が求まる。最後に(A-5)式の太陽と月の潮汐力の比を考慮して, 太陽と月の潮汐力の和が求まる。

ところで図A-3をみれば分かるように, 点Pにおける潮汐力の天頂角成分 F_{θ_p} は正のときその点における北から南への成分であり, 方位角成分 F_{ϕ_p} は正のとき西から東への成分である。すなわちその点における水平面上の南向きと東向きの成分を表す。また, この図でS(太陽または月)はZ軸に対して右回りで西から東に進む。しかし, 太陽と月の回転速度に比べて地球の自転速度(1日1回転)は遙かに早いので, 地上の点 P_0 から見れば太陽も月も東から昇って西に沈むことになる。