

## 公開講演会要旨

# 月の引力と地震活動

東北大学大学院\* 大 竹 政 和

(1996 年 11 月 6 日, 統計数理研究所 講堂)

### 1. はじめに

月や太陽の引力によって、地球を覆う海水は毎日干満を繰り返している。この起潮力は地球の内部にも作用し、固体地球の弾性変形をもたらす。これが「地球潮汐」である。地球潮汐によって、起震応力場は常に準周期的な微小な変化にさらされている。起潮力のポテンシャルは約 70% が月が担っているため、古くから地震と月の運行との関係に関心もたれてきたのは、科学的にみても意味のあることだった。

月と地震発生との関係については、Schuster (1897) 以来数多くの統計的研究が行われ、両者の間に有意な相関が見いだされた事例も少なくない (例えば、安芸 (1956)、田中 (1985))。研究の初期の段階では、地震発生時刻と月齢、月の時角、海洋潮汐等との関係に関心が向けられてきた。図 1 は、1930 年の伊東群発地震時の海洋潮位と地震発生数とを比べたものである。干潮時前後に地震が多発している様子が見え、読み取れる。近年は、地球潮汐に起因する歪みや応力の変化を理論的に計算し、これと地震発生時刻とを対比する解析がいくつか行われている。日本の比較的規模の大きな地震について、地球潮汐による歪みの主軸がテクトニックな地殻歪と一致するときに地震が起こりやすいという、興味ある結果も報告されている (三浪・山崎 (1990))。

しかし、これまでに地震発生と月の相関関係が報告されている事例は、群発地震、余震群な

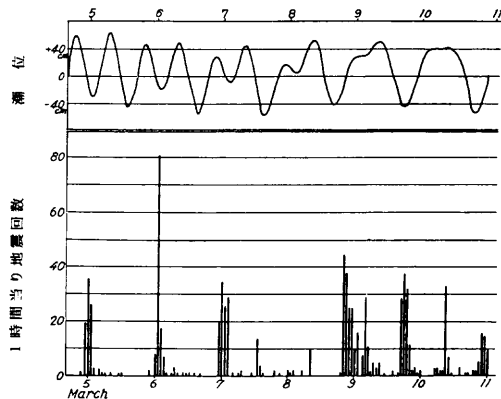


図 1. 1930 年伊東群発地震時の海洋潮位の変化 (上) と 1 時間当り地震回数 (下) (Nasu et al. (1931)).

\* 理学研究科地球物理学専攻：〒980-77 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉。

ど時間的、空間的に局限された地震活動に関するものが大部分である。全世界の長期間の地震データからは、むしろ否定的な結果が得られている。Heaton (1982) は、世界の 328 個の地震データを解析して、地震と地球潮汐との相関は見られないと結論した。だが、この結論は実は正しくない。Tsuruoka et al. (1995) は、これまでの研究の問題点を踏まえて信頼度の高い解析方法を開発し、Heaton (1982) と全く同じデータセットから逆の結論が得られることを示した。この新手法を用いて、月・太陽の引力が地震の発生に無視できない影響を与えていることが明らかにされつつある。

## 2. 解析方法

われわれの方法は、地球潮汐による応力の変化を理論的に計算し、これと地震発生時刻とを比較して、地震が地球潮汐の特定の位相付近で多発しているかどうかを統計的に検定するものである。従来の研究では、理論地球潮汐を計算する際に月・太陽の引力が固体地球に作用する直接項だけが考慮されていた。しかし、海洋潮汐に起因する地表荷重変化の影響も大きく、特に海域周辺ではこの間接項を無視することができない。間接項まで含めた理論地球潮汐の計算は、地表についてはすでに行われていたが、地震が発生する地下深部については Tsuruoka et al. (1995) によって初めて可能になった。

われわれはまた、地震発生時刻と対比すべき理論地球潮汐として応力の変化に着目し、特に、地震断層面上のせん断応力、法線応力、クーロン破壊関数の経時変化を重視している。地球潮汐の影響の現象論的な議論にとどまらず、その物理的メカニズムの解明を進めるためである。

実際の解析に当たっては、まず、データセットに含まれる全ての地震について、震源位置における、地球潮汐に起因する応力変化の時刻暦を理論的に計算する。これに座標回転を施して断層面上のせん断応力、法線応力等に変換し、地震発生時刻の潮汐位相を与える (図2参照)。従って、データとして用いる地震は、すべて断層面がわかっているなければならない。最後に、求められた潮汐位相が特定の位相付近に集中するか否かを Schuster (1897) の方法で検定する。以下では検定結果を  $p$  というパラメータで表わすが、これは帰無仮説「地震は地球潮汐の位相とは無関係に時間的にランダムに発生する」を棄却する危険率である。 $p$  は 0 と 1 の間の値をとり、 $p$  が小さいほど位相の集中度が著しいことを意味する。

Phase angle  $\theta$

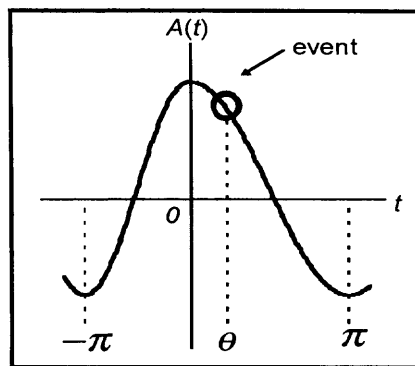


図2. 地球潮汐の位相角の定義。地球潮汐の時刻暦上で、地震発生時刻直近のピークを0, その直後及び直前のトラフを  $\pm\pi$  とし、間を等分割して位相角  $\theta$  を与える。

### 3. グローバルな地震データの解析

鶴岡 (1995) は、世界中の 7509 個の浅発地震 (深さ 70 km 以浅) を対象に、上記の方法で地震発生と地球潮汐との関係を系統的に調査した。これらの地震は、1977 年から 1992 年 6 月までの 16.5 年間に発生したモーメントマグニチュード ( $M_w$ ) 5.0 以上の地震で、ハーバード大学のグループによって震源のモーメントテンソル解 (CMT 解) が求められているものである。

断層面上の応力成分は、この CMT 解を用いて計算される。CMT 解からは 2 つの直交する節面のうちどちらが断層面か確定できないが、応力テンソルの対称性から、せん断応力は一意的に定まる。法線応力については、地震学的知見から断層面の選択を行う必要がある。

図 3 に、全地震の潮汐位相 (せん断応力成分) の頻度分布を示す。世界中の地震を一括すると、特定の位相への集中は全くみられない。 $p$  値は 25% という大きな値になっている。しかし、全世界のデータを地震区ごとに区分すると、地域的な違いが現われる。図 4 は、せん断応力に対する  $p$  値のグローバルな分布である。地域の区分は Flinn et al. (1974) に基づいている。

図からわかるように、世界のほとんどの地域では  $p$  が 10% 以上で、地球潮汐と地震発生との間に有意な相関関係があるとはみなせない。一方、アリューシャン、ニュー・ブリテン、南米の北西部など、 $p$  のかなり小さな地域がいくつか認められる。特に、アリューシャン地域では

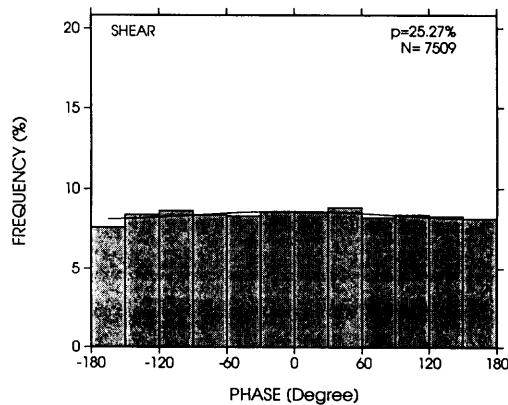


図 3. 全世界の地震 7509 個に対する地球潮汐位相の頻度分布 (せん断応力成分)。

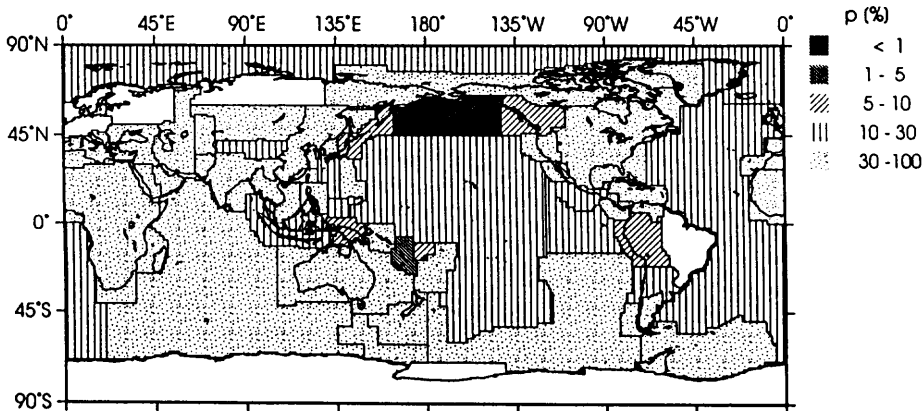


図 4. 1977 年～1992 年 6 月の期間における  $p$  値の地域分布 (せん断応力成分)。

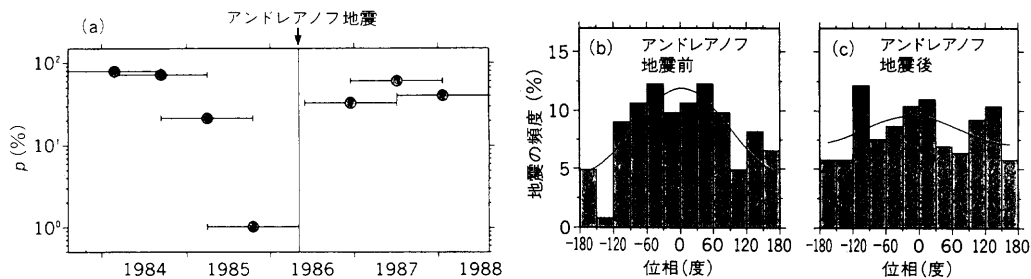


図5. アリューシャン地域における地球潮汐(せん断応力成分)と地震発生時刻の関係。(a) 400日幅の移動時間ウィンドウで見た $p$ 値の時間的推移, (b)・(c) 1986年アンドレアノフ地震 ( $M_w=7.9$ ) の発生前 (b) と発生後 (c) における地球潮汐位相の頻度分布。

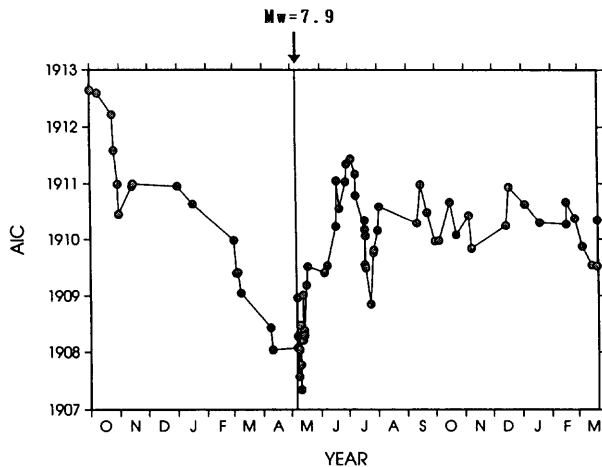


図6. AICを用いた地球潮汐位相選択性の転換時点の検出(説明は本文を参照)。

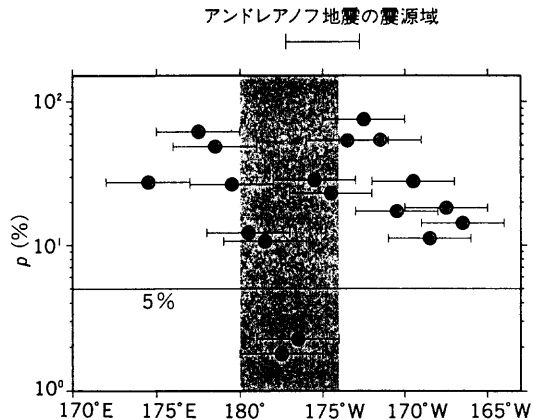


図7. アリューシャン地域における $p$ 値の空間分布(せん断応力成分)。1986年アンドレアノフ地震(震源域を図の上端に示す)の発生前4年間のデータによる。

$p=0.28\%$  という小さな値が得られ、特定の位相付近で地震が多発する傾向が著しい。

#### 4. アリューシャン地域の詳細解析

アリューシャン列島は、太平洋プレートの沈み込みに伴う地震活動の活発な地域である。データ期間の 16.5 年間には、1986 年 5 月にアリューシャン中部のアンドレアノフ諸島付近で  $M_w=7.9$  の巨大地震が起きている。

図 5(a) は、横棒で示す 400 日の期間にアリューシャン地域で起きた地震を取り出し、時間ウインドウを移動させながら、せん断応力成分の  $p$  値の時間的変化を追跡したものである。 $p$  値は地震の前から徐々に減少し、大地震の直前に極小 ( $p=1.03\%$ ) に達した。地震の発生後、 $p$  値は再び大きくなり無相関の状態に戻っている。図 4 でみたアリューシャン地域の顕著な位相選択性は、常に存在するのではなく、アンドレアノフ地震の直前 1 年程度の期間に集中していたことがわかる。

鶴岡(1995)は、位相選択性の変化時点を客観的に特定するために、AIC を用いて検討を行った。図 6 は、位相選択性がある時点を境に以前はあり、以後はなしとするモデルを設定し、両者を区分する時刻を移動させながら AIC 値の変化をみたものである。アンドレアノフ地震の発生時に AIC 値が最小となり、これを境に地球潮汐の顕著な影響が消滅したことが明瞭に読み取れる。

それでは、地震が多発したのは地球潮汐のどのような位相の時期だったのだろうか。図 5 には、地震発生時刻の地球潮汐位相 (せん断応力成分) の頻度分布が示されている。(b) がアンドレアノフ地震発生前、(c) が発生後の期間である。図 5(b) に見るように、地震の発生時刻は、位相角  $0^\circ$ 、すなわち、地震の発生を促進する方向に地球潮汐が作用する時期を中心に分布している。

$p$  値の空間分布にも興味深い特徴が見られる。図 7 は、使用する地震データの範囲を東西に移動させながら  $p$  値の空間的分布を見たものである。ただし、ここではアンドレアノフ地震前約 4 年間のデータのみを用いている。小さな  $p$  値が現われた場所は、アンドレアノフ地震の震源域の付近のみに限られている。

#### 5. 考 察

大地震前の  $p$  値の顕著な低下は、アリューシャン地域だけでなく、スマトラ、ペルー、トンガのプレート境界大地震についても認められた。しかも、選択された位相は、いずれも潮汐力が地震の発生を加速する方向に集中している。これは単なる偶然ではなく、潮汐力が実際に地震発生をある程度制御していると考えねばならない。これを「地球潮汐の地震活動変調」(TMS: Tidal Modulation of Seismicity) 作用と呼ぶことにする。

地球潮汐による応力変化量はきわめて小さく、高々  $10^3$  Pa のオーダーに過ぎない。これは地震時の応力降下量の 1000 分の 1 にも及ばず、地球潮汐は地震発生の主因とはなり得ない。しかし、テクトニックな応力場が大破壊寸前の臨界状態まで高まっている条件のもとでは、微少な応力変化が「最後のひと押し」の役割を果たすことができる。地球潮汐は、地震の発生のトリガー要因として理解するのが至当である。大地震発生の直前に限って TMS 効果が顕著に現われるという観測事実は、この考えの正しさを裏書きしている。

TMS の研究はまた、地震発生場の性質に関して重要な情報を与えてくれる。上に述べたように、プレート境界大地震について、それに先行するせん断応力成分の TMS 効果が見いだされたが、法線応力成分には顕著な位相選択性がみられなかった。地震のトリガー作用において、せ

ん断応力の変化が基本的な役割を果たしていることになる。このことは、プレート境界では、断層面の摩擦係数がかかなり小さいことを示唆している。

## 6. おわりに

グローバルな地震データの注意深い解析によって、地球潮汐の地震発生への影響が実際に存在し、その TMS 効果の出現が大地震の発生と、時間的・空間的に密接に関わっていることが明らかになった。この成果は、大地震発生の予測に新たな方法をもたらす可能性を秘めている(大竹・鶴岡 (1995))。普段起きている中・小地震と地球潮汐との相関を系統的に監視することにより、大地震発生の1~2年前に危険地域を特定することができるかも知れない。

最近、中国の研究グループがわれわれとは独立に類似の研究を進め、いくつかの地震の予測に成功したと報告している (Yin et al. (1995))。しかし、彼らの方法は、地球潮汐の間接項が考慮されていないこと、個々の地震の断層面が区別されていないことなど、解析の厳密さを欠くうらみがある。また、異常判断の基準も明確ではない。

地球潮汐を大地震の発生予測に活用する試みはようやく始まったばかりであり、様々な方向からのアプローチが行われるべきであろう。TMS がどこまで普遍的な現象なのか、より多くの事例研究を積み重ねることが当面の急務である。

## 参 考 文 献

- 安芸敬一 (1956). 統計地震学の現状, 地震 2, 8, 205-228.
- Flinn, E. A., Engdahl, E. R. and Hill, A. R. (1974). Seismic and geographical regionalization, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **64**, 771-993.
- Heaton, T. H. (1982). Tidal triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **72**, 2181-2200.
- 三浪俊夫, 山崎義典 (1990). 潮汐力による地殻歪と地震の発生, 月刊地球, **12**, 369-378.
- Nasu, N., Kishinouye, F. and Kodaira, T. (1931). Recent seismic activities in the Izu Peninsula (Part 1), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **9**, 22-35.
- 大竹政和, 鶴岡 弘 (1995). 地震の発生と地球潮汐, 科学, **65**, 285-287.
- Schuster, A. (1897). On lunar and solar periodicities of earthquakes, *Proc. Roy. Soc.*, **61**, 455-465.
- 田中寅夫 (1985). 地球潮汐と地震, 「地震予知 II」(編: 力武常次, 佐藤良輔, 萩原幸男), 287-307, 学会誌刊行センター・学会出版センター, 東京.
- 鶴岡 弘 (1995). 地震発生における地球潮汐の影響とその解釈, 東北大学大学院理学研究科博士論文.
- Tsuruoka, H., Ohtake, M. and Sato, H. (1995). Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: contribution of the ocean tide loading effect, *Geophys. J. Int.*, **122**, 183-194.
- Yin, X., Chen, X., Song, Z. and Yin, C. (1995). A new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory, *Pure Appl. Geophys.*, **145**, 701-715.