

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18700281

研究課題名（和文） 地球潮汐による応力変動と地震活動度に関する時空間統計モデル

研究課題名（英文） Statistical modeling to investigate the spatiotemporal relation between seismicity and stress changes caused by earth tide

研究代表者

岩田 貴樹（IWATA, Takaki）

早稲田大学・国際教養学院・助教

研究者番号：30418991

研究成果の概要：

応力変動と地震活動との関係を調べることは、地震発生予測といった社会的に重要な課題に大きな関わりがある。本研究では、地球潮汐による応力変動、特に月齢に起因する応力変動に着目し、「点過程解析」と呼ばれる統計的手法を用い、それと地震活動との関連を調べた。その結果、応力状態が臨界状態に近く、地震が起きやすい状態になっている時、地球潮汐による応力変動と地震活動との間に相関が見られることが分かった。また、解析手法の改善により、広範囲な時空間領域データを同時に解析出来るようなアプローチの端緒を示すことも出来た。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,300,000	0	1,300,000
2007 年度	900,000	0	900,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	330,000	3,630,000

研究分野： 総合領域

科研費の分科・細目： 情報学・統計科学

キーワード： 時系列解析、地震、固体地球物理学、大規模ベイズモデル、点過程解析

1. 研究開始当初の背景

地殻における応力変動と地震活動との関係に関する研究が注目を集めている。両者の関係を調べることは、究極的には、地震発生の予測という単なる科学的興味に留まらない、社会的に重要な課題と大きな関わりがある。研究開始時においては「応力の増加（または減少）に伴い、地震活動が増加（または減少）する」という両者間の定性的関係の議論が中心であり、両者の定量的モデル化に向

けた研究が徐々に行われつつある状況であった。

また、地殻応力変動の例として、大地震等の断層運動がその周辺域に与えるステップ的なものや、遠地で起きた地震波による動的なものに注目が集まっているが、これらは再現性がないという問題がある。これに対し、地球潮汐による応力変動は繰り返し起きているため、統計的解析に向いていると考えられる。

加えて、近年の地震観測網の能力向上により、日本では非常に小さい地震まで捉えられるようになってきている。この大量データを用いれば、応力変動の繰り返しに伴う地震活動の増減の繰り返しを統計モデルに基づいて検出し、解析することが可能であると考えた。

2. 研究の目的

点過程解析を用いて、地球潮汐による応力変動による地震活動の増減を定量的に表現する統計モデルを構築することを試みる。地球潮汐による応力変動は約半日周期・約1日周期など、複数の周期成分の重ね合わせで構成されるが、ここでは月齢に対応する周期成分に着目して解析を行う。モデルは時間領域のみを対象としたものから時空間領域を対象としたものへと拡張すると同時に、パラメトリックモデルから、ベイズ的アプローチによるノンパラメトリックな手法へと発展させることで、多様な時空間変動に対応できるような柔軟なモデリングが可能となるよう、手法の改善についても考える。

3. 研究の方法

(1) 月齢と地震活動との相関を調べるために、地震発生の時系列に対する点過程モデルの構築を行う。

具体的には、地震活動全体が「長期的な地震活動変化(トレンド)」「クラスター」「月齢に対応する周期性」の3成分で構成されると仮定し、周期性を考慮した・しないモデルを実際の地震活動へと適用する。モデルの適合度を、AICを用いて比較することにより、周期性の有無について議論を行う。各成分は地球物理学および統計学の観点から鑑みて適当なパラメトリック関数で表す。

また、「周期性」の強度が時間変化している可能性が大いにあり得る。これについて検討するために、「周期性」を表現する三角関数の係数が時間変動するようなモデルも考慮する。係数の時間変動はやはり適当なパラメトリック関数で表すこととし、時間変動を考慮する・しないモデルをAICに基づいた評価を行うことで、「周期性」の時間変化についても検討する。

(2) (1)で行った手法を発展し、ベイズモデルによる解析を行う。(1)の段階では、「トレンド」や「周期性」の時間変動を表現するにあたり、パラメトリックモデルを用いる。これは、アルゴリズムの簡便であるという利点があり、「周期性」の有無を統計的に検討する目的であれば、有用なアプローチではある。しかし、このようなパラメトリックなモデルは柔軟さには欠け、実際のデータに含まれる

かもしれない短期的な細かい変動や、急激な変動をパラメトリックモデルで捉えることは難しい。そこで、より柔軟なアプローチとして、ベイズ的な手法に基づくノンパラメトリックなモデルを用いて、「周期性」などの時間変動を表現することを試みる。各地震の起きた時刻を節点とし、節点間を直線で結ぶようなスプライン関数を考え、各節点におけるパラメータを求める(最適化する)ことを行う。この場合、決めるべきパラメータの数が膨大となり安定的に解を求めることは難しい。そこで、パラメータの時間変動が滑らかになるような制約を、事前分布として課し事後分布推定を行う、いわゆるベイズ推定を行う。滑らかさに関する拘束をどの程度強くするかは、ABICを指標として用いることで、統計的に適切と思われるものを選ぶことにする。

(3) (1)(2)においては、地震活動の時系列だけに基いたモデリングを行ったが、実際の地震活動は空間的に大きく異なっている。これを考慮し、モデルを3次元時空間(空間2次元、時間1次元)へと拡張する。(1)で得た時間発展モデルを「トレンド」「クラスター」「周期性」の各成分について、従来の地球物理学的知見を加味しつつ、空間変動も時間変動と同時に解析出来るようモデルを改善し、これを用いて、周期性の空間変動について議論する。

4. 研究成果

(1) 「研究の方法」の(1)で述べた方法を丹波山地の微小地震活動に適用した解析を行った。この地域は、1995年兵庫県南部地震の震源域に隣接している。

まず、兵庫県南部地震発生直後約2年間について、解析を試みた。

「トレンド」は多項式とし、次数選択はAICで行った。余震活動がベキ減衰に従うことがよく知られており、これに基づくETASモデル[Ogata, JASA, 1988]を「クラスター」について用いた。「周期性」として表される月齢に伴う応力変動に対する地震活動の応答は三角関数で表現する。この際、1月齢周期(朔望月)と半月齢周期(半朔望月)周期の両方を考慮することとし、それらの有無をAICで評価した。なお、「トレンド」「クラスター」「周期性」3成分の線形和で全体の地震活動が説明されると仮定した。

解析の結果、両方の周期を考慮したモデルが最適モデルとして選択された。AICの値は、両方を「ない」としたモデルに比べ、約8~10(解析領域の取り方による)小さく、朔望月・半朔望月両周期の有意性が示された。

続いて、「周期性」の強度が時間変化し

ているかどうかについて調べた。「周期性」を表す三角関数の係数に多項式を用い、「トレンド」の場合と同様、AICに基づく次数選択を行った。時間変動を抽出し易くするために、解析期間を兵庫県南部地震発生後4年間と延長して解析を行った。その結果、周期性が一切ないとしたモデルに対し約9~13、周期性があったとしてもその強度が時間一定としたモデルに対し約8~14、AICの値が小さいモデルが得られた。即ち、「周期性があり、またそれが時間変動を伴っている」としたモデルが有意によいという結果が得られた。他方、兵庫県南部地震発生前の丹波山地の地震データについても同様の解析を行ったが、これについては周期性が見られなかった。

時間変動を考慮したモデルより得られた周期成分の強度(三角関数で表された周期成分の振幅)の時間変化を図1に示す。これから分かることは、1朔望月、半朔望月周期とも、兵庫県南部地震の直後、周期性が最も強く、その後、2年程度かけて減衰しているということである。上述の通り、解析地域は兵庫県南部地震の震源断層のごく近傍にあり、兵庫県南部地震の断層運動により正の応力変動を受けたことが他研究により示されている。月齢に伴う潮汐の応力変動量は微小であり、通常地震活動はこの程度の応力変動では変化しない。しかし、兵庫県南部地震の発生により、丹波地域の応力が臨界状態に近づいた結果、このような微小な応力変動であっても、地震活動が応答するようなことになったと考えられる。その後、時間が経つにより、例えば地殻の粘弾性など地球物理的な要因により応力が緩和することで、徐々に潮汐と地震活動との相関が弱まっていったと解釈できる。

このことから、潮汐と地震活動との相関の有無から、地殻応力がどの程度臨界状態に近づいているかを測る可能性が示唆される。言い換えると、相関の有無に基づき、地震が起きやすい状態になっているかどうかを知ることが出来、短期的な地震活動予測への応用が考えられる。

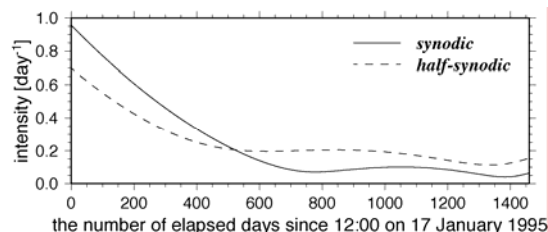


図1: 時間変動を考慮したモデルより得られた、周期性成分の強度の時間変化。実線が1朔望月周期に、点線が半朔望月周期にそれぞれ対応する。横軸は兵庫県南部地震発生(1995年1月17日)からの経過日数を表す。

また、ここで検出した相関は、いわゆる周期性の検出に相当し、古典的にはスペクトラムを調べる手法がよく知られている。地震活動には様々な周期性が存在する可能性が示唆されており、それらについて調べることは地震の物理に迫る上で必要なことの一つである。但し、地震活動には余震活動などに代表されるクラスター性が非常に強いいため、周期性を調べるには、何らかの方法でクラスターを除去することが行われていた。しかし、絶対的な除去方法が確立されていないため、妥当な除去を行っているかどうかという問題が常に残る。本研究により、クラスター性もモデル内で考慮し、デクラスターリングを行わないで周期性を調べる手法の有効性を示すことが出来たことには意義がある。また、地震活動以外の種々のデータ解析にも応用可能であるという点でも、価値があると考えられる。

「トレンド」「クラスター」「周期性」の3成分をどのように組み合わせるのが適当であるかについて考察を行った。に示したように、これらを線形和で表するのが最も単純ではある。しかし、最近の地震学の知見からは、「応力変動以外の要因による地震活動」に「応力変動による地震活動の変化分」を掛け合わせるモデルが適切である可能性が示唆されている。この考え方に従えば、「(トレンド+クラスター)×周期性」という「積」の形のモデルが、より実際の地震活動に適合する可能性がある。

これを確かめるために、で用いた「和」モデルと、「積」モデルのどちらが適当かAICを用いた検討を行った。解析の結果、「積」モデルのAICは「和」モデルのそれに比べ、約5~11小さく、地球物理学の見地からもっともらしいとされるモデルの方が、実際によいことが確認出来た。

応力変動による地震活動度変化における「積」モデルの妥当性を「和」モデルと比較して示した研究事例はない。この結果により、応力変動と地震活動度の定量的関係について、有用な情報を示すことが出来たと考えられる。実際、Seismological Society of America 2007 annual meetingでは招待講演され、他の研究者へのインパクトもあったと思われる。

(2) 「研究方法」(2)で記したように、スプラインに基づくノンパラメトリックベイズモデルによる解析を用い、改めて「研究成果」(1)で検出した周期性の時間変動をモデル化することを試みた。この際、周期性だけでなく、トレンドについても同様にスプライン関数を適用することで、周期性の時間変動と同様に柔軟なモデリングを試みた。「研究成果」(1)において、「積」モデルの方が「和」

モデルよりよいことが分かっているが、前者は尤度の計算において数値積分が必要となり、ベイズモデルにおいて計算時間が多大なものとなることが予想された。そのため、「和」モデルを基盤とした解析を行った。

解析の結果、「研究成果」(1)同様、周期性を考慮したモデルがもっともよいものとなった。また、ABIC の値を(1)のモデルで得た AIC の値と比較すると、約 8~24 小さくなっており、このようなモデリングが、よりよく実際の地震活動を説明していることが分かった。

パラメトリックモデルとノンパラメトリックモデルを用いた場合の比較例を図2に示す。ここでは、トレンド項についての結果を示してあるが、周期性の時間変動についても同様な傾向が得られている。パラメトリックモデルにおいては、1300 日程度まで地震発生率が下がり、その後ごく僅かではあるが上昇に転じている。常識的な地震活動では、このようなリバウンドは考えづらく、パラメトリックモデルで用いた多項式が、現実の地震活動に対応し切れていない可能性が考えられる。これに対し、ノンパラメトリックモデルから得られた結果では、パラメトリックモデルによるものと似た様相を示しつつも、全体的に減少傾向が続き、900 日以降概ね一定となっている。これは、地震学の観点からは納得し易い結果である。但し、非常に細かい変動が見られる点については今後の精査が必要である。

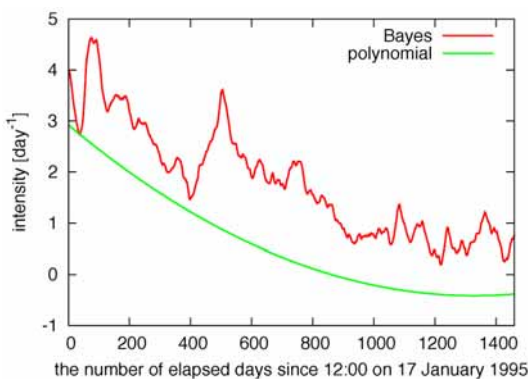


図2: 時間変動にパラメトリックモデル(多項式)を用いた場合(緑)と、ノンパラメトリック(スプライン関数を用いたベイズ解析)を用いた場合(赤)の比較例。「トレンド」に対する結果。

ともあれ、ベイズ的なアプローチを用いることで、より現実のデータに近いモデリングが示唆されたことが重要である。パラメトリックモデルでは、どのような関数をモデルとして使用するかが解析者の主観に委ねられ、それが結果へと大きく影響する。その上、地震活動のように複雑な挙動を示すデータに対して、適切な関数を探し出すことは簡単ではない。また、多項式のように、次数選択の

ようなモデル選択を必要とする場合、複数回の計算を繰り返す必要があるため、計算時間や解析者の手間が多大なものとなる可能性がある。ここで用いたベイズ的な解析では、客観的に結果が得られるという利点や、1回の計算時間は多大ではあるが、その計算1回で結果が得られ、結果的には計算時間の節約となる。また、ここで示したアプローチも、周期性の解析以外の様々なタイプの点過程解析に応用・発展可能である。

(3) 「研究方法」(3)で示した方法で、周期性の時空間モデリングを試みた。「周期性」だけでなく、「トレンド」「クラスター」についても、時空間への拡張を行い、解析を遂行した。「クラスター」は ETAS モデルを時空間へと拡張した時空間 ETAS モデル [Ogata, AISM, 1998] を導入し、「トレンド」および「周期性」における三角関数の係数部には「2変数多項式」×「1変数多項式」を用いることとした。前者が空間変動、後者が時間変動に相当する。

「研究成果」(1)(2)同様、周期性の有無は AIC を用いて調べ、有意に周期性が存在することを確かめた。一方、空間変動については、それを考慮しないモデルが最適なものとして選択された。

注意すべきことは、この結果のみから、周期性の空間変動が否定することは難しいことである。多項式によるパラメトリックモデルを用いたことが結果に影響している可能性があり、これを確認するためには、やはりベイズ的なアプローチが必要となる。

ベイズ的なアプローチを適用するには、現時点では、数値解析上の困難さが大きく、研究期間を考慮すると、現実的ではないと判断してパラメトリックモデルに立ち返って解析を行ったが、今後の展開としては、やはりノンパラメトリックモデルによる柔軟なモデリングにより詳細に調べることが必要と考えられる。また、そうすることにより、長期間・広範囲にわたる地震カタログをまとめて解析し、潮汐と関連のある時期・場所を抽出するという発展が期待出来る。

(4) ここまでに述べてきたような地震活動解析においては、地震カタログの完備性がしばしば問題となる。言い換えると、観測網による地震検知能力を見積もる必要があり、これは大きな問題である。それだけでなく、検知能力の時間変化について調べることも、地震カタログの基礎的な性質を知る上で必要である。大地震の発生直後、多数の余震がごく短い時間に発生し、それらの地震波形が重なり合うために、全ての震源位置・時刻を決めることが出来ず、結果として一時的に検知能力が下がる現象はよく知られている。しか

し、大地震発生による検知能力への影響はそれだけではない。大地震の地震波は全地球へと広がり、数十分から数時間の間、何周も回っている。この間、他の地震を検知しにくくなっている可能性が高い。これを確かめるため、全世界で起きた地震をカバーする地震カタログの1つである Harvard カタログにおいて、大地震発生後の検知率がどのように変動しているかを調べた。

「研究方法」(2)に示したようなスプライン関数を用いたノンパラメトリックモデルを適用し、検知率を特徴付けるパラメータ μ の時間変化について推定を試みた。 μ は地震検知率が 50% となっているマグニチュードに対応し、その値が大きければ大きいほど、検知能力が悪くなっていることを表す。推定の結果、例えば、マグニチュード 7 以上の地震が起きた場合、約半日にわたり、検知率の顕著な低下が見られることが分かった(図 3)。また、 μ の地震変化を仮定しないモデルとのモデル適合度比較を ABIC に基づいて行ったところ、時間変化を仮定したモデルの方が有意によい (ABIC の値で 10 程度よい) ことも示された。

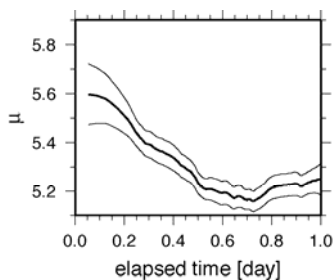


図3: 大地震 (マグニチュード7以上) が発生した後の経過時間 (横軸) と、地震検知率を特徴付けるパラメータ μ (縦軸) との関係。太線が推定値、細線は 2σ の誤差幅を表す。

ここで用いた統計モデルでは欠測率を定量的に見積もることが出来るので、その欠測がどの程度、地震活動解析に影響を及ぼすのかわかることも出来る。Harvard カタログの場合、欠測率そのものはさほど大きなものではなく、地震検出率の一時的な低下の影響を無視しても、ある程度長い時間の地震活動を解析する上で実質的な影響は殆どない。しかし、地震活動解析の種類または地震カタログによっては、何らかの影響が出る可能性もある。いずれにしても、地震カタログの完備性について、これまで考えられていなかった要因を示したという点で着目に値する研究と考えられる。

(5) 「研究成果」の(1) に記した「和」モデルと「積」モデルについて、近年の動向も含めた考察を行い、レビュー論文として報告した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

岩田貴樹, 地震活動の時空間分布を表すための定量的モデルの展開, 地震, 2009(印刷中), 査読有

Iwata, T., Low detection capability of global earthquakes after the occurrence of large earthquakes: investigation of the Harvard CMT catalogue, Geophysical Journal International, 第174巻, 849-856, 2008, 査読有

岩田貴樹, 点過程モデルによる地震活動と月齢との相関解析 ~ 丹波山地に関する例~, 統計数理研究所共同研究レポート, 第211巻, 151-156, 2008, 査読無

Iwata, T., and H. Kato, Correlation between the phase of the moon and the occurrences of microearthquakes in the Tamba region through point-process modeling, Geophysical Research Letters, 第33巻, doi:10.1029/2005GL025510, 2006, 査読有

[学会発表](計5件)

Iwata, T., S. Toda, and Y. Ogata, Modelling of the spatio-temporal distribution of aftershocks based on rate-and state friction law, America Geophysical Union 2007 fall meeting, モスコーン国際会議場, サンフランシスコ, アメリカ, 2007年12月10日

岩田貴樹, 点過程モデルによる地震活動と月齢との相関解析 ~ 丹波山地に関する例~, 統計数理研究所共同研究集会 19-共研-5002「地震活動のモデルと予測に関する研究」, 統計数理研究所, 2007年11月8日

Iwata, T., and H. Kato, A comparison of the two statistical model to represent the lunar triggering, Seismological Society of America 2007 annual meeting, ヒルトン・ワイコロア・ビレッジ, コナ, アメリカ合衆国, 2007年4月12日(招待講演)

岩田貴樹, 片尾 浩, 月齢と丹波山地の微小地震発生の相関 ~ 改良した強度関数による解析~, 日本地震学会 2006年秋季大会, 2006年11月2日, 名古屋国際会議場

岩田貴樹, 片尾 浩, 月齢と微小地震活動の相関に関する点過程解析, 2006年度統計関連学会連合大会, 2006年9月7日, 東北大学川内キャンパス

6 . 研究組織

(1)研究代表者

岩田 貴樹(IWATA TAKAKI)
早稲田大学・国際教養学院・助教
研究者番号：30418991