

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26350483

研究課題名（和文）臨界現象から捉えた多種の地震先行現象と地震との因果性に関する検討

研究課題名（英文）Causation between various earthquake precursors and an earthquake on the critical phenomena

研究代表者

上田 誠也 (Uyeda, Seiya)

東京大学・地震研究所・名誉教授

研究者番号：60011459

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：臨界現象の時系列解析手法であるナチュラル・タイム解析を用いて地震発生前の臨界状態の時系列解析を行った。日本の地震については大地震の前には、先行的変動つまり臨界状態の開始時が本解析手法で検知できることがわかった。また、その臨界状態は震央付近に発生していることもわかった。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震については、約2ヶ月前から臨界状態になっていると判断でき、他の先行現象が発生し始めた時期と同期していることがわかった。

研究成果の概要（英文）：We investigated how to identify the onset of critical state before large earthquakes, by applying the natural time analysis method, which is useful for analysis of critical phenomena, to the time series of seismicity. For large earthquakes in Japan, we found it was possible by this method to identify the time of entry to the precursory stage, i.e. the beginning of the critical state. The regions entering the critical state were located around the epicenters of the impending large earthquakes. In addition, we can be justified to consider that the critical state was found starting about two months before the 2011 M9.0 Tohoku earthquake, which was coincident with the appearance of other precursory phenomena.

研究分野：地球物理学

キーワード：地震 臨界現象 ナチュラル・タイム

1. 研究開始当初の背景

近年、我々の共同研究者、アテネ大学物理学の Varotsos らは、時間はイベントが起こるたびに進むという新時間概念“Natural Time” (ナチュラル・タイム) を提唱した (Varotsos et al., Phys. Rev. E., 2002)。この時間概念を臨界現象に適用すると、2 次相転移における臨界点の到達時を認識することができる。著例としては、地震に先行する地電流異常 (SES) がこの臨界点認識法と適合して発生することが実証された。また、この概念は一般性に富み、物性物理のみならず生物物理や医学にも応用でき、心筋梗塞まで予測可能とされている。従って、もし地震発生もが臨界現象であるとすれば、短期予知とは地殻内の stress level が臨界点に達したかどうかの認識と同義となる。一方、地震現象は自己組織化臨界現象であるとする視点は一部先進的研究者によって、1980 年代から唱えられてきた。しかし、現実には臨界点到達時点の認識が困難であるため、短期予知研究などには直接役立ってこなかった (Bak and Tang, J. Geophys. Res., 1989; Main, Rev. Geophys., 1996)。ナチュラル・タイムの登場はここに突破口を開きつつあるといえよう。

2. 研究の目的

地震予知は科学的にも、社会的にも極めて重要であり、1960 年代以降、国家的規模での研究が進められ、一定の成果を上げてきたが、依然として地球科学に残された最大難題の一つである。特に、短期地震予知については、方法論すら明確化されていない。本研究計画の目的は、我々が 1980 年代半ば以来進めてきた地震電磁気学的研究にナチュラル・タイムなる新しい時間概念を導入し、地震先行電磁現象のみならず地震現象そのものを、物性物理学での臨界現象として考察し、それらの発生機構を明らかにするとともに、短期地震予知実現をはかることである。

3. 研究の方法

臨界現象に関する近年の統計物理学関係の重要文献をくまなく再検討し、ナチュラル・タイム解析が臨界点同定を可能にすることの一般理論を明確化する総合報告の執筆を最終目標とする。この総合報告では広汎な分野の理論・実験・観測結果と整合する統一像を提示するもので、世界の学界への作業仮説提出と位置づけられる。同時に各種の地震自己組織化臨界説との理論的相関を明らかにする。また、ナチュラル・タイム解析を日本・ギリシャをはじめ各地のデータに適用し、臨界現象としての地震先行電磁現象・地震現象の上記統一像を検証・確立し、短期地震予知精度を画期的に高め、論文を執筆する。

4. 研究成果

ナチュラル・タイム概念は、臨界状態判別パラメータとなる κ_1 が 0.07 に収束すること

によって臨界現象における臨界点の発生時を認定できるとされている。本科研費の開始前において κ_1 の分布 (β 値) の変動に着目し、時間変化を調べたところ、1983 年以降の日本の大地震の前ではほぼ常に β 値の低下があり、特に 2011 年東北地方太平洋沖地震前では最小の β 値となった (Sarlis et al., PNAS, 2013)。本科研費では、これらの β 値の空間的相関について調べた。その結果、日本の大地震の前には、震央の付近のみに β 値変動が見られたため、この結果も米国科学アカデミー紀要に論文発表した (Sarlis et al., PNAS, 2015)。

先行研究では、 κ_1 をどの期間から解析をすれば臨界点を判定できるかは、臨界状態の開始点から解析を開始すればよいとされている。もし系が臨界状態になり始めたとするならば、地震・測地学的、地球化学的、地球電磁気的などの多種の先行現象が同時期に発生している可能性がある。2011 年東北地方太平洋沖地震においては、1 月上旬から κ_1 算出の開始時とすると本震直前に β という κ_1 の分布を示すパラメータが最小になることがわかっていて (Sarlis et al., PNAS, 2013)。一方、その最小時においては、地磁気の変動、測地的変動が開始するという報告があり、整合的な結果が得られていることがわかった。現在この成果は、投稿準備中である。

また、本科研費では、複数の地震学的先行現象抽出解析をナチュラル・タイム解析との比較のために 2016 年熊本地震について研究した。先行現象抽出手法として、 b 値、 Z map, RTM, 地震発生数密度解析の解析手法を採用した。いずれの手法でも先行的変動の存在の指摘は行えた (Nanjo et al., 2016)。本報告では、事例として、地震発生数密度解析について以下に報告する。

Lippiello らは、カリフォルニアの地震発生数密度を本震前後について統計的に解析し、余震の分布と前震の空間分布パターンはほとんど同一という結果を公表した (Lippiello et al., SREP, 2013)。本科研費ではこの結果に基づき、まず気象庁一元化地震カタログを用い、震央を中心として余震および前震の発生密度がどのような空間分布をしているかを日本の地震について検証した (Nanjo et al., 2016)。その結果、Lippiello らのカリフォルニアのケースと同様に、日本の余震と前震の空間パターンはほとんど同一という結果を得た。さらに、そのパターンはアスペリティのサイズに関係することも分かった。このことから、テクトニクスが異なる日本とカリフォルニアに関わらず、地震は自分の大きさを本震前に知っていた事という仮説を支持する。図 1 は特徴的な距離 Δr_c と本震のマグニチュード m の関係を示す。次に、事例解析として本手法を 2016 年熊本地震に適用させたところ図 2 のようになった。図 1 に示す統計的結果とは異なり、前震発生領域のほうが、若干余震発生領域より大きくなるという結果を得た。また本手法を応用して先行現象の検知

を試みたところ 2013 年ごろから前震活動としての先行現象が判別できた。

次に、ナチュラル・タイム解析において 2016 年熊本地震の解析を行った。 κ_1 および β の時系列解析を行ったところ 2014 年ごろから、臨界状態への変化が見られ始めた(図 3)。一方、ETAS カタログでは顕著な臨界状態への変化は見られなかった。以上の結果は、Sarlis et al. (2013)と類似した結果となる。本成果については現在論文執筆中である。

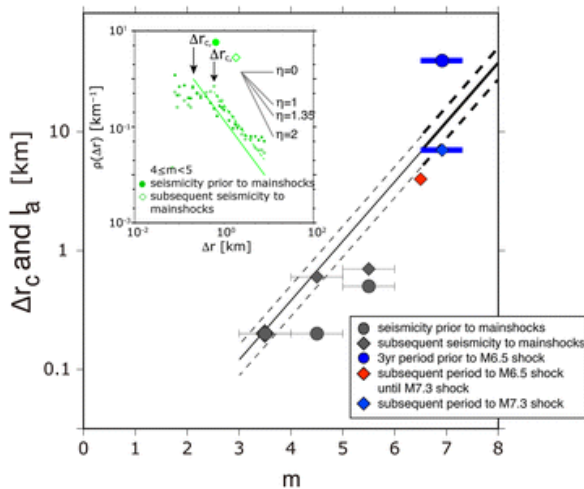


図 1. 特徴的な距離 Δr_c と本震のマグニチュード m の関係。丸印は本震に先行する地震活動、菱形印は本震に引き続く地震活動。熊本地震は青色のデータで示す。青色の丸印は M6.5 の前震より前の地震活動、青色の菱形印は M7.3 の本震より後の地震活動。参考として、M6.5 から M7.3 までの地震活動のデータを赤色の菱形印で示す。直線はアスペリティの半径と地震の m の関係を示す (Somerville et al. (2015)に基づく)。挿入図は、地震発生数密度 $\rho(\Delta r)$ と本震 ($m=4-5$) からの距離 Δr の関係。緑色の丸印は本震に先行する地震活動、緑色の菱形印は本震に引き続く地震活動。冪乗関係 $\rho(\Delta r) \sim \Delta r^{-\eta}$ をデータにフィッティングさせている ($\eta=1.35$)。フィッティングから逸脱する距離を特徴的な距離 Δr_c として矢印で示す (Nanjo et al., 2016)。

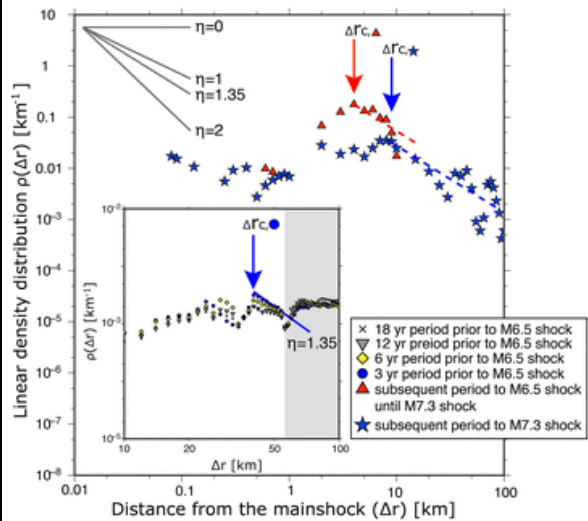
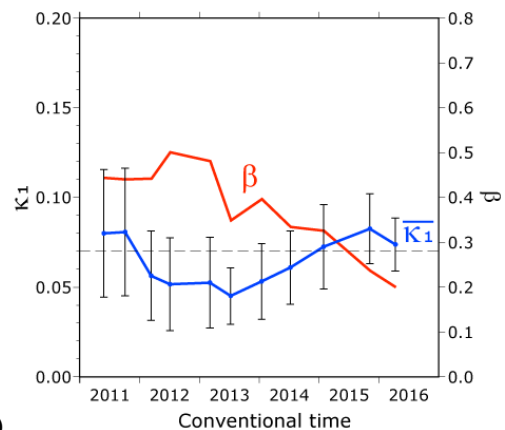
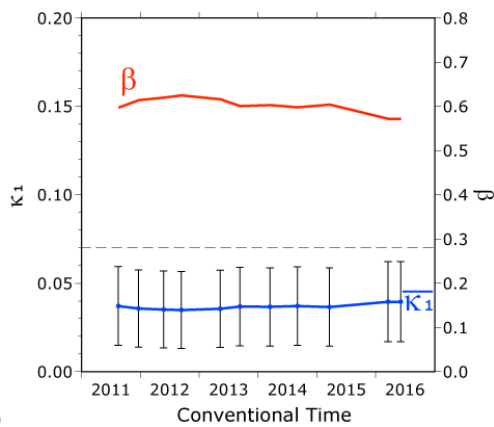


図 2. 熊本地震における地震発生数密度 $\rho(\Delta r)$ と距離 Δr の関係。青星印は、M7.3 の本震より後の地震活動。参考として、M6.5 から M7.3 までの地震活動のデータを赤三角印で示す。冪乗関係 $\rho(\Delta r) \sim \Delta r^{-\eta}$ をデータにフィッティングさせている ($\eta=1.35$)。フィッティングから逸脱する距離を特徴的な距離 Δr_c として矢印で示す。挿入図は、M6.5 の前震より前の地震活動についての $\rho(\Delta r)$ と Δr の関係を示す。ばつ印は M6.5 より前の 18 年間の地震活動に基づくデータを示す。同様に、灰色の三角印、黄色の菱形印、青色の丸印は、それぞれ、12 年間、6 年間、3 年間の地震活動のデータを示す。M6.5 より前の 3 年間の地震活動のデータに冪乗関係 $\rho(\Delta r) \sim \Delta r^{-1.35}$ をフィッティングさせ、フィッティングから逸脱する距離 Δr_c を矢印で示す。 $\Delta r=55\text{km}$ より長い距離 (灰色の領域) での $\rho(\Delta r)$ は、バックグラウンドレベルの地震活動密度を示す (Nanjo et al., 2016)。



(a)



(b)

図3 β 値および κ_1 分布の時系列図。時刻はそれぞれのカタログにおける κ_1 解析開始時を通常時間軸の時刻とした。(a) 熊本地震の実地震カタログ、(b) ETAS カタログ。

(1)研究代表者

上田 誠也 (UYEDA, Seiya)
 東京大学・地震研究所・名誉教授
 研究者番号：60011459

(2)研究分担者

鴨川 仁 (KAMOGAWA, Masashi)
 東京学芸大学・教育学部・准教授
 研究者番号：00329111

上嶋 誠 (UYESHIMA, Makoto)
 東京大学・地震研究所・准教授
 研究者番号：70212154

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

K. Z. Nanjo, J. Izutsu, Y. Orihara, N. Furuse, S. Togo, H. Nitta, T. Okada, R. Tanaka, M. Kamogawa, T. Nagao, Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, Earth Planet Space, 68:187, DOI 10.1186/s40623-016-0558-2 (2016).

Sarlis, N. V., E. S. Skordas, P. A. Varotsos, T. Nagao, M. Kamogawa, and S. Uyeda, Spatiotemporal variation of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations, Proc. Nat. Acad. Sci., 112, 4, 986-989 (2015)

Seiya Uyeda, Current affairs in earthquake prediction in Japan, J. Asian Earth Sci., 114, 431-434 (2015).

Nagao, T., Y. Orihara, and M. Kamogawa, Precursory Phenomena Possibly related to the 2011 M9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, J. Disaster Res., Vol.9, No.3, 303-310 (2014)

〔図書〕(計1件)

Togo, S., K. Miyata, H. Nitta, S. Takahashi, K. Tanaka, T. Okada, Y. Suzuki, Y. Orihara, and M. Kamogawa, Microsatellites observing atmospheric and space electricity for the science of serious natural disasters: A Challenge to their mitigations, Innovative Ideas on Micro/Nano Satellite Missions and Systems – Report on Deorbit Device Competition (DDC) and Mission Idea Contest (MIC4) IAA Book Series - Volume 1 Number 7 Small Satellites - Programs, Missions, Technologies and Applications, Paris, ISBN: 978-2-917761-55-7, pp. 100-112 (2017)

6. 研究組織