

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 24 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05484

研究課題名(和文) カタストロフ複雑系現象としての地震活動：相関、ダイナミクス及びネットワーク表現

研究課題名(英文) Seismicity as Complex Phenomenon with Catastrophes: Correlation, Dynamics and Network Representation

研究代表者

鈴木 徳一 (SUZUKI, Norikazu)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：60246824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：複雑系科学の視点から、火山性群発地震の研究を行った。地震の震源の時間的成長が劣拡散であることを示した。火山性地震の活動は噴火前には必ず活発化するが、逆にその活発化は必ずしもその後には噴火が起こることを意味しない。我々は、地震の複雑ネットワークが噴火に向かうときにのみ共通の特異的な振る舞いを見出した。一般に地震活動にはGutenberg-Richter 則などいくつかのベキ乗則が伴う。ベキ乗則は他の多くの複雑系にも見られるが、分布の類似性はそれらの背後にある間欠的現象が記憶を有するか否かを我々に教えない。我々は、(非)Markov性を定量的に区別する新しい数学的な理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震活動に対する理解をカタストロフ複雑系現象という新たな視点から深めることを目的とする。前半は、火山性地震の震源が時間と共に広がる様子が、水にたらししたインクの広がり方とは異なる異常拡散であることを明らかにした。また、火山性地震は必ずしも噴火に至る予兆現象と見なすことはできないが、噴火に至る場合のみ地震の複雑ネットワークに特異的な振る舞いが現れることを明らかにした。地震活動には、他の多くの複雑系と共通のいくつかのベキ乗則が存在する。後半は、ベキ乗則を示す複雑系のダイナミクスが記憶を引きずるか否かを判定する数学的な理論を展開した。この成果は、系の未知のダイナミクスの理解に新たな光をあてるものとなる。

研究成果の概要(英文)：From the view point of science of complexity, we studied volcanic seismicity. We showed that the growth of the seismic region in time is subdiffusive at both Mt Etna in Sicily and Eyjafjallajökull in Iceland. Although the volcanic seismicity always occurs before eruption, eruption may not necessarily take place even if the seismicity occurs. We found that the complex earthquake networks constructed from the seismic datasets taken in Iceland and Japan exhibit a common structural change prior to their large-scale eruption. The Gutenberg-Richter law shows that the distribution of earthquake energy asymptotically decays as a power law with no characteristic scale. Although the power law like this also can be seen widely in the complex systems, the similarity in the distribution does not directly tell us if the process underlying these intermittent phenomena are memoryless (i.e., Markovian) or not. We constructed a new simple method for quantitatively evaluating (non-)Markovianity.

研究分野：理論物理学

キーワード：地震活動 カタストロフ 複雑系科学 火山性地震 時空間相関 Markov過程 複雑ネットワーク 異常拡散

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

火山性地震は、群発地震の特別なタイプである。この地震は、火山の噴火時だけでなく、噴火前にも起こり、噴火の予兆現象としての重要性をもつ。

火山性地震への地球物理学的アプローチは、断層のストレス蓄積に関わる高いレベルの複雑性を含んでいる。例えば、マグマの伝搬や拡大に関わる岩脈(ダイク)のダイナミクス、マグマ貫入の分岐構造にみられる非自明な幾何学、ポーラス媒質中の水の輸送現象などである。従って、この問題は、複雑なアーキテクチャ上の複雑なダイナミクスの問題になる。

火山性地震のダイナミクスの複雑性は、その震源の拡散現象にみることが出来る。多くの複雑系に見られる異常拡散やそれに伴う非自明なスケーリング現象を記述する非整数運動学は、拡張された確率過程・異常輸送現象をもつ半導体やナノ系・カオス力学系・フラクタル・無秩序系などとの関連において盛んに議論されている。

研究開始当初、報告者は、イタリア、エトナ山の火山性群発地震の統計力学的研究を行っていた。特に火山性地震の拡散現象、すなわち、地震が起こる空間的領域の成長の度合いを解析した。そこでは、震源の拡散は劣拡散的であり、かつ、空間的ジャンプ確率分布は指数関数に従うが、待ち時間分布は、広いレンジでベキ則的であることを見出していた。これらの結果は、劣拡散現象を記述する主な運動学的理論である、連続時間ランダムウォーク、分数次 Brown 運動、フラクタル上のランダムウォーク、非線形動力学のいずれによっても記述できないことを示していた。

一方で、断層型地震においては、特に、アメリカ、カリフォルニアのいくつかの巨大地震において、余震の Omori 則と待ち時間分布のベキ指数が、Bardou らが定式化した、特異 Markov 過程が満たすべきスケーリング則 [1] に従わないことを見出していた [2]。このことは、余震のダイナミクスが確率過程として非 Markov 的であり、長期記憶をもつことを示している。しかしながら、Bardou らの理論は、有効なベキ指数に限界があり、適用可能な地震が限られるという問題点があった。

そこで報告者は、複雑系科学に基づき、火山性地震と断層型地震がもつ普遍的性質を探求することに興味をもち研究を進めた。

### 2. 研究の目的

報告者の研究目的は、イタリア、エトナ山の地震データを用いて行った火山性群発地震の拡散現象に関する 2015 年の研究 [3] に基づき、その結果の普遍性を追究することであった。他の火山性地震のデータとあわせて解析することにより、連続時間ランダムウォーク理論、非線形 Fokker-Planck 理論、非整数 Brown 運動、フラクタル上のランダムウォークの適用可能性を検証した [4]。

火山性群発地震は、一般に噴火前に活発化する傾向にある。一方でその活発化は必ずしも噴火に結びつかず、地震活動が終息する場合もある。このことが、噴火の予兆を捉えることを困難にする 1 つの大きな要因となっている。報告者は、これまで断層型地震の研究において開発してきた地震の複雑ネットワークの方法 [5] を火山性地震に適用し、噴火前に特異なネットワーク構造の変化を捉える試みを行った。これは、災害予防の点からも明白な意義をもつ。

火山性地震と断層型地震は、一般的には地震発生の直接的なメカニズムが大きく異なると考えられている。一方、両者はともにその起源をプレートテクトニクスにもち、かつ、Gutenberg-Richter 則のような共通のベキ法則に従うという類似点もある。この地震活動における普遍性をより明らかにするために、「ベキ則を有する複雑系のダイナミクスのもつ記憶」という点に着目した。Bardou らの理論のベキ指数に関する適用限界といった問題点を解消し、系の(非)Markov 性を判定する、新たな理論の構築を目指した。

### 3. 研究の方法

地震のデータ解析においては、いずれも無料で公開されているデータを用いた。

火山性群発地震の拡散現象の普遍性を追究するために、以前解析したイタリア、エトナ山のデータと、新たに、アイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山のデータ解析を行った。エイヤフィヤトラヨークトル火山の震源の拡散も、エトナ山と同様に劣拡散現象を呈しており、劣拡散を記述する 4 つの代表的な運動学的理論の適用可能性について検討した。さらに、データの有限サイズの効果について吟味した。

火山が噴火に向かう過程で起こる火山性地震の特異的挙動に関する研究は、震源の時空間情報を地震の複雑ネットワークに写像する方法を活用して行った。この手法は、報告者らが、断層型地震の研究において独自に開発したものである [5]。様々なネットワーク特性量の時系列を構成し、その振る舞いを追跡した。特にネットワークの階層構造の深化を表す特性量に着目し、噴火に向かう場合のみに現れる特異な挙動を自動検出する方法を開発した。

ベキ則的確率分布を呈する複雑系が長期記憶をもつか否かを判定する一般的な数学的理論を構築した。この理論は、ベキ則のスケール不変性を最大限に活用することにより、Bardou らの理論がもつような有効なベキ指数に対する制限の問題を回避できるものである。

### 4. 研究成果

本研究の成果は、以下の(1)~(3)に大別される

- (1) 火山性群発地震の異常拡散
- (2) 火山が噴火に向かう過程の地震の複雑ネットワークの特異的挙動
- (3) ベキ則に従う複雑系の(非)Markov性の判定

#### (1) 火山性群発地震の異常拡散

まず、火山性群発地震の拡散現象に関する研究において進展があった。ここでの目的は、以前、イタリア、エトナ山の地震データを用いて行った火山性群発地震の拡散現象に関する研究に基づき、その結果の普遍性を追究することであった。連続時間ランダムウォーク理論、非線形 Fokker-Planck 理論、非整数 Brown 運動、フラクタル上のランダムウォークの適用可能性を他の火山性地震のデータとあわせて解析することにより検証した。

ここでは、地球上で最も火山活動の激しいといわれるアイスランドの火山に注目した。アイスランドはマントルが湧き上がってくる中央大西洋海嶺の地溝帯上(地球の裂け目)に位置する。そのため、その火山生成及び噴火の詳細なメカニズムは、エトナ山のそれとは著しく異なっていると考えられる。それにも拘わらず、両火山はその火山性地震の拡散現象において共通の普遍的な性質をもつことが本研究から明らかになった。

新たにアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山のデータを解析し、エトナ山との比較検討を行った。その結果、両者は拡散現象として以下のような極めて類似した物理的性質をもつことがわかった。まず地震の震源領域の広がり方は劣拡散的であり、そのベキ指数は両者で非常に近い値をとることがわかった。そこで、火山性群発地震を確率論的プロセスとみなし、その空間時間的な性質を詳細に研究した。その結果、連続して起こる地震の距離間隔の確率分布が指数法則に従い、一方で待ち時間分布はベキ則に従うことが示された。また平均自乗変位の時間平均がエイジングを呈することもわかった。このことから、エイヤフィヤトラヨークトル火山の群発地震は、エトナ山と同様に劣拡散現象を記述する上述の4つの代表的な理論のいずれによっても記述することができないと考えられた。

しかしながらこの研究の過程で、火山性群発地震における有限サイズ効果が極めて重要な役割を果たすことが明らかになった。そこで、エトナ山の地震データの再解析を合わせて行い、有限サイズ効果を詳細に検討したところ、特にベキ則に従う待ち時間分布のベキ指数がデータのサイズに敏感であることが判明した。これは連続時間ランダムウォーク理論に基づく非整数運動学による記述の可能性を再浮上させることになった。

また、事象数の時間減少率のベキ指数の評価と合わせた検討により、特異 Markov 過程が満たすべきスケール則の破れを検証した。このことは、通常の断層地震と同様に、火山性群発地震が点過程として非 Markov 的であることを示している。これらの結果は国際会議で報告し、また、学術論文として発表した[4]。

#### (2) 火山が噴火に向かう過程の地震の複雑ネットワークの特異的挙動

次に、火山が噴火に向かう過程で観測される群発地震活動をカタストロフ複雑系現象として捉える研究を進めた。

火山性群発地震は、一般に火山の噴火中のみならず、噴火前にも多く観測される。火山性群発地震は、マグマチェンバーにあるマグマが、地表に向け上昇を起こす過程で、岩石を破壊しながら貫入していくプロセスで起きると考えられている。その過程には、火山の地下の地殻のストレス分布やポーラス媒質中の水の輸送現象も深く関わってくる。この意味で、火山性群発地震は、複雑なアーキテクチャ上の複雑なダイナミクスに関わる現象である。

火山性群発地震のデータは、火山内部の状態をリアルタイムで我々に知らせてくれる。このデータから有用な情報をどのように抽出するかが課題となる。噴火予測が困難な理由のひとつは、多くの火山性群発地震が観測されたからといって、必ずしも噴火に至らず、地震活動が終息に向かうケースがあることである。このように、火山性群発地震の頻度、すなわち単位時間あたりの地震数の増減の情報だけでは、一般に噴火を予測することはできない。

そこで我々は、火山性群発地震のデータから抽出した、「地震がいつ、どこで起こるか」という時空間情報を進化する複雑ネットワーク[5]に写像し、その幾何学的構造の時間的推移を追跡する研究を行った。

その結果、ネットワークの階層構造の深化に関わる特性量の時系列に、火山噴火に至る過程でのみ2種類の異なる時間スケールでの特徴的な振る舞いがみられることがわかった。1つは、そのネットワーク特性量の長時間に及ぶ緩やかな減少、もう1つは、短時間の間欠的な鋭いピークである。これらのことは、火山が噴火に至る場合にはネットワークの階層構造がより深く、複雑化していくことを物理的に示している。

同時に、この振る舞いには、火山からの噴出物の量をもとに分類される火山の爆発規模を示す火山爆発指数や、噴出する溶岩の物性も深く関わることがわかってきた。

これらの成果を論文にまとめる過程で、ネットワーク構成に関わるデータ数、及びセルサイズといった2つのパラメータに、上述の予兆的挙動がどのように依存するかを慎重に確認する作業を行った。その結果、噴火前に現れるネットワーク特性量の間欠的ピークが、これらのパ

ラメータに強く依存するケースがあることが判明した。このことは、予兆現象として、短時間の間欠的なピークは普遍的なものではなく、噴火前の比較的長い期間のゆるやかな振る舞いがより重要であることを示している。

この結果を踏まえ、我々は、この長い期間のネットワークの階層構造の時間変化を真の予兆現象と捉え、その定量化と、時系列からの自動検出のアルゴリズムの開発研究に取り組んだ。

ここでは、「教師なし機械学習」の手法を用いることで、それまで目視にて捉えていた噴火の兆候をより客観的に検知することに成功した。さらにこの手法は、それまで予兆を捉えることが困難だったケース（ある種の物性を有する溶岩を噴出する火山や爆発指数の小さい噴火）にも適用可能であることがわかってきた。そこで、火山噴火の研究対象を広げ、目下、本手法の普遍的有効性について確認作業を進めている。

このように論文執筆の過程で研究に新展開があったため、結果として論文執筆に遅れがでているが、本研究は自動的な火山噴火予報に繋がる重要な課題である。

### (3) ベキ則に従う複雑系の(非)Markov性の判定

地震活動には、ランダムに起こる現象であるという見方がある一方で、長距離、長時間の相関を伴う非ランダムな現象であるという考え方がある。例えば、2011年の東日本大震災後には、その表面波が地球を少なくとも7周し、その間中国、カリフォルニア、メキシコなど世界の各地の群発地震を誘発したとの報告がある [6]。一般に臨界現象のアナロジーからは、このような長距離、長時間の相関の存在は、地震活動の時系列データから抽出される種々の統計的量のベキ則的振る舞いとして現れると考えられる。

実際に、地震活動にはいくつかの漸近的ベキ乗則が存在する。代表的なものは、地震の頻度と規模とのベキ則的関係を表す Gutenberg-Richter 則や余震の単位時間あたりの頻度と経過時間とのベキ則的関係を示す Omori 則である。以前我々が行った研究では、2つの引き続いて起こる地震の時間間隔の確率分布が漸近的ベキ乗則に従い、また地震の複雑ネットワークの次数分布や、周期分布などがベキ乗則に従うことも示されている [5,7-9]。

しかしながら、分布がベキ乗則であることは、系に長距離、長時間相関があることの十分条件にはならない。例えば Lévy 分布はベキ乗則を呈するが、基本的確率変数は独立同一分布(いわゆる i.i.d.) に従い各プロセスに相関はない。そこで我々は、漸的にベキ乗則を呈する系が、長距離、長時間相関を持つか否かを判定する新しい数学的理論の開発に取り組んだ。この問題は、地震以外の様々なベキ乗則分布を呈する複雑系にも関係すると考えられる。

この結果は論文にまとめられ、目下、学術専門誌の査読過程にある。

### <引用文献>

- [1] F. Bardou et al., Lévy Statistics and Laser Cooling (Cambridge University Press, Cambridge, 2002).
- [2] S. Abe and N. Suzuki, "Violation of the scaling relation and non-Markovian nature of earthquake aftershocks", Physica A 388, 1917-1920 (2009). (査読有)
- [3] S. Abe and N. Suzuki, "Anomalous diffusion of volcanic earthquakes", EPL 110, 59001-p1-p5 (2015). (査読有) (Highlights of 2015 - EPL (Europhysics Letters) (The Best Paper))
- [4] S. Abe and N. Suzuki, "Subdiffusion of volcanic earthquakes", Acta Geophys. 65, 481-489 (2017). (査読有)
- [5] S. Abe and N. Suzuki, "Scale-free network of earthquakes", Europhys. Lett. 65, 581-586 (2004). (査読有)
- [6] H. Gonzalez-Huizar et al., "Remote triggered seismicity caused by the 2011, M9.0 Tohoku-Oki, Japan earthquake", Geophys. Res. Lett. 39, L10302 (2012).
- [7] S. Abe and N. Suzuki, "Scale-free statistics of time interval between successive earthquakes", Physica A 350, 588-596 (2005). (査読有)
- [8] S. Abe and N. Suzuki, "Scale-invariant statistics of period in directed earthquake network" Eur. Phys. J. B 44, 115-117 (2005). (査読有)
- [9] S. Abe and N. Suzuki, "Universal law for waiting internal time in seismicity and its implication to earthquake network", EPL 97, 49002 p1-p5 (2012). (査読有)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sumiyoshi Abe, Norikazu Suzuki	4. 巻 65
2. 論文標題 Subdiffusion of volcanic earthquakes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Acta Geophysica	6. 最初と最後の頁 481-489
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11600-017-0029-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Norikazu Suzuki
2. 発表標題 Non-Markovianity and subdiffusion of volcanic seismicity
3. 学会等名 XXXIX Dynamics Days Europe 2019 (September 2-6, 2019, University of Rostock, Rostock, Germany) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norikazu Suzuki
2. 発表標題 Universal law for waiting internal time in seismicity and its implication to earthquake network
3. 学会等名 Statistical Physics of Complex Systems (May 7-11, 2019, Nordita, Stockholm, Sweden) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norikazu Suzuki
2. 発表標題 Universal law for waiting internal time in seismicity and its implication to complex network of earthquakes
3. 学会等名 19th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences-IAMG2018 (September 2-8, 2018, Olomouc, Czech Republic) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Norikazu Suzuki
2. 発表標題 Universal law for waiting internal time in seismicity and its implication to complex network of earthquakes
3. 学会等名 2018 Joint meeting of the DPG and EPS Condensed Matter Divisions- Berlin18 (March 11-16, 2018, Berlin, Germany) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Norikazu Suzuki
2. 発表標題 Dynamical evolution of the community structure of complex network inherent in seismic time series
3. 学会等名 International work-conference on Time Series-ITISE 2017 (September 18-20, 2017, Granada, Spain) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Norikazu Suzuki
2. 発表標題 Complex-network description of seismic time series
3. 学会等名 International work-conference on Time Series-ITISE 2016 ( June 27-29, 2016, Granada, Spain) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	阿部 純義 (ABE Sumiyoshi) (70184215)	三重大学・工学研究科・教授  (14101)	