

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：34509

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04242

研究課題名(和文) 土木工学における非ガウス確率現象の検出とその解析法に関する研究

研究課題名(英文) Detection of the Non-Gaussian Phenomena in Civil Engineering Field and Development of Their Analytical Methods

研究代表者

佐藤 忠信 (SATO, Tadanobu)

神戸学院大学・現代社会学部・研究員

研究者番号：00027294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：構造工学における非正規確率現象を発見し、それを解析するために、近代確率過程論の枠組みを超越する新しい確率過程を構築するのが本研究の目的であった。まず、非正規確率現象の候補として、地震動位相過程を取り上げ、それが円振動数を媒介変数とする連続過程とするため、アンラップ操作を必要としない位相の計算法を確立した。さらに、群遅延時間の近似値である位相平均勾配の確率特性が、分散の定義できないレヴィフライト分布で記述されることを明らかにした。位相過程を確率過程として模擬するため、レヴィフライトノイズ過程の構成法を確立し、それをを用いて、非整数レヴィフライト過程と命名する新しい確率過程を定義した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、土木工学における非ガウス現象を抽出し、その模擬法を確立することにある。もし成功すれば、物理や工学現象の世界における新しい事象の解明に画期的な成果になるとともに、今後の物理・工学事象の解明に広く利用されることになる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to discover non-Gaussian phenomena and a method for analyzing the discovered phenomena. We have developed a stochastic process transcend the modern stochastic theory. As a representative of non-Gaussian phenomena we concentrate on the earthquake motion phase, first we develop a method to obtain the continuous phase with respect to the circular frequency without unwrap procedure. Then we define the mean phase gradient (MPG), which is approximation of a group delay time. Regardless of the interval of circular frequency the probability density function (PDF) of MPG is expressed by a unique PDF expressed by the Levy-flight distribution, which means the MGP has a fractal characteristic.

We develop a new stochastic process, in which the PDF of MGP obeys to the Levy-flight distribution. To do this we also defined the Levy-flight nose process.

研究分野：土木工学における非ガウス現象の抽出とモデル化

キーワード：非ガウス現象 アンラップ操作を行わない地震動位相の計算法 位相平均勾配の確率特性 フーリエ変換実数部のモデル化 因果性に基づく虚数部の再現 ヒルベルト変換 観測記録からの確率特性の抽出 多数の加速度時刻歴の模擬

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

申請者は、1990年代から、地震動位相の円振動数に関する一階微分である群遅延時間のモデル化を行ってきた。当時は、群遅延時間の確率分布特性が正規分布で規定されるものと考え、その分散値を地震動のマグニチュード・震央距離・局所的な地盤特性の関数とした回帰式を求めた上で、群遅延時間を円振動数に関する無相関過程と考え、正規乱数列で表現できるものと仮定し、模擬された群遅延時間を円振動数に関して積分することにより位相のサンプル過程を計算していた。しかし、位相差分の確率特性が円振動数間隔に依存することが発見され、位相が円振動数に関して相関性を有し長期記憶過程になることが判明し、位相を非整数ブラウン運動過程で模擬することを提案した。その後、位相差分の確率特性が正規分布に従わないこと、確率過程として見る位相差分には中心極限定理の成立しないことが判明し、そのモデル化に関する努力を継続的に行っている。その過程で、中心極限定理の成立しない確率過程を構築しなければならないことに気付いた。また、近年、塩害やアルカリ骨材反応によるコンクリート部材に発生するひび割れやそれに基づく構造物の劣化問題を確率過程として取り扱ったうえで、劣化過程が確率微分方程式で表現できるとして、金融商品の価格決定理論を準用して、構造物のライフサイクルコストを論じる研究もおこなわれるようになってきている。しかし、対象としている確率過程は正規系に属するものであった。構造物の劣化過程を正規分布に従う理論だけでは表現できないのではないかと疑義も出されるようになってきており、中心極限定理に従わない確率過程論の構築が切望されている。

### 2. 研究の目的

中心極限定理は以下のように述べられている：「平均値と分散の存在する確率密度関数から独立同分布で生成した乱数を足し合わせたものを新しく確率変数とすれば、その確率分布特性は、足し合わせ数が多くなれば、必ず正規分布に漸近する」。この事実から、媒介変数に対して連続な確率過程は、20世紀初頭にワイナーによって導出されたワイナー過程によって記述されることが必須条件となっている。したがって、近代確率過程論では、媒介変数に対して連続な確率過程はワイナー増分過程を駆動過程として記述される確率微分方程式や確率積分方程式として定式化されている。しかし、ワイナー過程を規定する確率特性は正規分布であるので、近代確率過程論で取り扱ってきた確率現象は正規分布に限定されており、中心極限定理を自動的に満たしていた。中心極限定理は確率過程を構成する非常に強い数学的拘束条件であり、「工学や物理現象を支配する事象の確率特性は正規分布で規定される確率過程として記述されなければならない。」という記述を満たさない現象はあり得ないものと考えられてきた。このため、劣化・ヘルスマニタリング・制御・動力学などの構造工学における研究分野において、時間や空間場での不確実性が重要となる解析では、不確実性の元になる要因が正規分布で表現されるものとして、確率微分方程式や確率積分方程式を用いて問題の定式化を行うことが一般的であった。さらに、長期記憶特性(媒介変数に対する現象の相関性と読み替えることも可能)を物理現象に導入するために、非整数ブラウン運動過程を用いて問題をモデル化することも行われるようになってきていた。

しかし、近年、化学反応論・乱流理論・粉体工学・金融工学の分野において、中心極限定理に従わない確率現象の存在することが発見され、尖り度が大きく裾野の厚い非正規分布特性が現象の解明に重要な役割を果たすことが指摘され、長期記憶特性を有する非正規確率過程として、確率現象を見直す機運が高まっている。土木工学においても、

トンネル覆工コンクリートの劣化長分布、コンクリート部材に発生するひび割れ長分布、構造物外壁に作用する風圧分布、流体に発生する乱流長分布などの確率特性は正規分布では説明できないこと、設計点が複数存在する構造系の破壊確率を計算する場合の尤度計算に正規分布を用いると破壊点の探索が困難になること、構造物の破壊現象が関係するような場合の土木構造物のアセット評価では、正規分布族に従う理論体系だけでは不十分なことなどが指摘されるようになってきており、それらを合理的に表現できる確率分布特性を見出す努力がなされている。さらに、こうした確率特性を有する現象の時間・空間に対する変動過程を説明するための物理モデルを構築するには、正規分布に従わない、言い換えれば中心極限定理の成立しない確率過程の開発されることが切望されている。

### 3. 研究の方法

- 1) トンネル覆工コンクリートの劣化過程のデータを収集し、データベース化する。(佐藤・万(海外研究協力者))
- 2) これまでに継続的に実施されてきたコンクリート橋梁のひび割れ長の計測データを収集し、そのデータベース化を図る。(羅(海外協力者)・佐藤)
- 3) わが国のみならず諸外国でデータベース化されている地震動加速度記録データを用いて、地震動の位相を円振動数の連続関数として求め、それをデータベース化する。位相を地震動のフーリエ変換の虚数部と実数部の比の逆正接として求めると、それは主値のみしか求められず位相のアンラップ操作が必要になる。この一般的な方法はないので、地震動位相を円振動数の連続関数として厳密に計算することは困難である。この問題を避けるため、既往の発表成果を利用する。(佐藤・Ahmed(博士課程学生))
- 4) データベース化された地震動位相を線形遅れ部とそこからの変動部に分け、位相変動部の位相差分の確率分布特性を明確にする。この確率分布特性は正規分布に従わないことならびに長期記憶過程となっていることが判明しているため、その特性をLevy-flight 分布関数を用いて再検証する。特に、位相過程を確率過程として考察する観点から、位相差分過程が中心極限定理に従わないことを明確にし、模擬法を確立する。(佐藤・木本)
- 5) 地震動の位相がなぜ中心極限定理の成立しない確率過程となるのかの本質を探るため、岩石材料中を透過する超音波の計測実験を実施し、透過波の位相の確率特性が地震動位相と同じになることを確認する。岩石試料中の不規則構造による透過波動の散乱現象が位相の確率特性に及ぼす影響を明確にし、地震動位相に見られる確率特性の物理的要因を解明する。超音波の透過実験は岡山大学で実施する。(木本)
- 6) コンクリート構造物の劣化過程を非正規系の確率過程として表現するための確率微分法的式の体系を確立する。劣化を制御する変数を確率変数と考え、レヴィフライト増分過程を駆動過程とする確率微分方程式の構築が主体となる。(佐藤)
- 7) 構造同定のアルゴリズムの尤度関数に多峰性を有する非正規系の分布関数を用い、同定点が複数存在するような構造系のパラメータ同定を可能にするとともに、分岐現象が発生する構造劣化過程を追跡可能にする。(万(海外協力者)・佐藤・中村(博士課程学生))
- 8) ここで開発する構造劣化過程を表現できる新しい確率微分方程式と金融工学で開発されている金融価格決定理論とを結合することにより、構造物のライフサイクルコ

ストの解析法を改良し、土木構造物の新しい意アセット評価理論を構築する。(佐藤)

#### 4. 研究成果

科学研究費の交付期間の研究成果には番号を付けてまとめたが、その特徴と成果を概観すると以下のものである。

地震動位相の非ガウス性を明確にするための力を継続した。そのため、アンラップ操作を必要とせず、地震動位相を角振動数の連続関数として表現する方法を確立し、地震動位相を線形位相遅れとそこからの変動部に分解した。位相変動部の差分を取り、それを角振動数間隔で割ったものを、位相平均勾配と定義した。差分を取る角振動数間隔によらず、位相平均勾配の確率密度関数が Levy-flight 分布に従うことを発見した。さらに、位相平均勾配の確率密度関数が、角振動数間隔によらずに同一の確率密度関数になることから、位相平均勾配がフラクタルな特性を有することも明らかにした。こうした特定を有する非カウス型の確率過程を模擬するための方法論を構築した[12,4,3,2]。これらは、研究方法の3.4に相当する成果である。また、岩石材料中を伝播する表面波の伝播特性を計測し、計測された波動の位相特性にフラクタル性や非ガウス性が見られることを検証した[10]。これは、研究期間内の成果ではないが、研究方法の5に相当する成果である。地震動位相が確率過程として模擬できるので、多数の地震動位相を模擬して、設計用応答スペクトル準拠の地震動加速度時刻歴を模擬する方法論を構築し、地震動位相の不確定性が構造物の非線形応答特性に及ぼす影響を検証した[7]。なお、観測された加速度時刻歴が因果性を有していることに着目して、フーリエ変換の実数部の模擬法を確立し、模擬された実数部からヒルベルト変換を用いて虚数部を模擬し、両者を合わせて因果性を有する加速度時刻歴を多数模擬する方法論を確立した[9,8,6]。これ等の成果は研究方法3,4に関するものである。なお、加速度時刻歴のジャークが従う確率微分方程式を誘導し、その特性を明確にした[11]。これは、地震動そのもの確率過程を確率微分方程式として体系化する試みで、研究方法6,8に関する成果である。こうしたことを踏まえて、構造物系に地震加速度時刻歴が入力する場合に、構造部材に作用する地震外力の確率密度関数が非ガウス特性を有することから、新しい非ガウス形の地震時信頼性解析法を提案した[1]。こうした成果を纏めて、土木学会論文集に投稿する。これは、研究方法8に関する成果である。一方、コンクリート構造物の劣化過程のデータを収集し、それを確率微分方程式としてモデル化するという研究方法1,2,6に関する研究成果を上げることができなかったが、コンクリート構造物を斜張橋と読み替えると、斜張橋のケーブルの劣化過程がケーブルの引張強度として計測できることに着目し、ケーブルの引張強度の確率密度関数が Levy-flight 分布で表現できることを見出し、斜張橋の非ガウス形の地震時信頼性解析法を確立した。これは研究成果[1]とも関連しており、研究方法6に関する成果となる。なお、この科研費研究期間内には研究方法7に関する成果を挙げることはできなかったが、それには[12]を上げることが可能である。

#### 2024年

- [1] 地震加速度時刻歴を入力とする構造系の新しい信頼解析法(シンポジウム講演概要)  
佐藤忠信、第27回応用力学シンポジウム、論文番号21001-06、岡山大学津島キャンパス。5月25-26日、2024
- [2] WCEE2024(Proceedings of World Conference of Earthquake Engineering) paper No.2707  
Tadanobu SATO  
On a new non-Gaussian phenomenon in the earthquake motion phase obtained from observed acceleration time history. Milano, Italy, 2024

#### 2023年

- [3] A non-Gaussian algorithm to simulate the earthquake motion phase difference.

Tadanobu SATO

8<sup>th</sup> International symposium on life-cycle civil engineering (under the Ialcc2023),  
Paper number 1569, Milano, Italy, July2-7, 2023, ISBN 978-1-003-32302-0

- [4] 土木工学分野における新しい非ガウス現象について(シンポジウム講演概要)  
佐藤忠信、第 26 回応用力学シンポジウム、論文番号 C000147, 中央大学後楽園キャンパス。5月27-28日、2023

2022 年

- [5] 加速度時刻歴のフーリエ変換実数部における非定常性のモデル化と確率特性の抽出  
杉山 佑樹, 佐藤 忠信, 室野 剛隆, 坂井 公俊  
土木学会論文集 A1, 2022 年 78 巻 4 号 p. I\_459-I\_467 DOI: [https://doi.org/10.2208/jscejsee.78.4\\_I\\_459](https://doi.org/10.2208/jscejsee.78.4_I_459)
- [6] 測加速度時刻歴から決定されるフーリエ変換実数部の確率特性をモデル化する —ヒルベルト変換を用いた因果性を満足する加速度時刻歴の模擬—  
土木学会論文集(A1)、Vol.78, No.2, pp.203-212, 佐藤 忠信, 杉山 佑樹, 室野 剛隆, 坂井 公俊 DOI: [https://doi.org/10.2208/jscejsee.78.2\\_203](https://doi.org/10.2208/jscejsee.78.2_203)
- [7] Simulation of Design Response Compatible Acceleration Time Histories Considering the Fourier Phase Uncertainty and Their Application for Dynamic Analysis of Structure System. Tadanobu SATO, September 4-7, 2022, ISRERM2022, Hannover, 2022
- [8] SIMULATION OF MANY ACCELERATION TIME HISTORIES WITH CAUSARITY FROM AN OBSERVED EARTHQUAKE MOTION—Modeling of real part and reproduction of imaginary part by Hilbert transform—, Tadanobu SATO, September 5-7, 2022, SEMC2022, Cape Town, 2022

2021 年

- [9] 加速度時刻歴から求められる実数部の非定常性と確率密度関数ならびにベキ乗則、杉山 祐樹・佐藤 忠信・室野 剛隆・坂井 公俊, 第 41 回地震工学研究発表会論文集, 9月16-17日、土木学会, 2021
- [10] 超音波計測に基づく花崗岩中の表面波、伝播特裁に関する研究, 木本和志・岡野蒼・斎藤隆泰・佐藤忠信・松井裕哉, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.75, No.2(応用力学論文集 Vol.23), I\_97-I\_108, 2020. (査読・有) DOI: [https://doi.org/10.2208/jscejam.76.2\\_I\\_97](https://doi.org/10.2208/jscejam.76.2_I_97)
- [11] Non-Gaussian Characteristic of Acceleration Time History, Tadanobu SATO, Ikumasa Yoshida and Yoshitaka Murono, Proceedings of the 17WCEE, paper No.1d-0074, September, 2020 (査読・有)
- [12] Particle relaxation method of Monte Carlo filter for structure system identification, Tadanobu SATO, Journal of Civil Structural Health Monitoring, Vol.3(4) 325-334, 2013(査読・有) <https://doi.org/10.1177%2F1550147718786888>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Tadanobu SATO
2. 発表標題 Simulation of Design Response Compatible Acceleration Time Histories Considering the Fourier Phase Uncertainty and Their Application for Dynamic Analysis of Structure System
3. 学会等名 ISRERM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadanobu SATO
2. 発表標題 SIMULATION OF MANY ACCELERATION TIME HISTORIES WITH CAUSARITY FROM AN OBSERVED EARTHQAKE MOTION Modeling of real part and reproduction of imaginary part by Hilbert transform
3. 学会等名 SEMC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadanobu SATO
2. 発表標題 A non-Gaussian algorithm to simulate the earthquake motion phase difference
3. 学会等名 IALCCE2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤忠信
2. 発表標題 土木工学分野における新しい非ガウス現象について(シンポジウム講演概要)
3. 学会等名 第26回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tadanobu SATO
2. 発表標題 Simulation of Design Response Compatible Acceleration Time Histories Considering the Fourier Phase Uncertainty and Their Application for Dynamic Analysis of Srtucture System
3. 学会等名 The International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM/SM9) Hanover 9/2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadanobu SATO
2. 発表標題 SIMULATION OF MANY ACCELERATION TIME HISTORIES WITH CAUSARITY FROM AN OBSERVED EARTHQAKE MO-TION Modeling of real part and reproduction of imaginary part by Hilbert transform
3. 学会等名 8th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation(SEMC2022/SS12) Cape Town 9/2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉山祐樹・佐藤忠信・室野剛隆・坂井公俊
2. 発表標題 加速度時刻歴のフーリエ変換実数部における非定常性のモデル化と確率特性の抽出
3. 学会等名 第41回地震工学研究D13-2344
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤忠信
2. 発表標題 地震加速度時刻歴を入力とする構造系の新しい信頼解析法(シンポジウム講演概要)
3. 学会等名 第27回応用力学シンポジウム 岡山大学
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tadanobu SATO
2. 発表標題 On a new non-Gaussian phenomenon in the earthquake motion phase obtained from observed acceleration time history.
3. 学会等名 18thWCEE2024: Proceedings of World Conference of Earthquake Engineering paper No.2707 (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中国南京に在る東南大学とはこれまで相手方との合意に基づき、相手方の公費を使用して、10年間に亘「土木工学における非ガウス現象の発見と解析方法の開発」と題した国際共同研究を実施してきた。これまでに、コンクリートのひび割れ長の分布に関するデータが蓄積されており、そのデータに基づいて、土木工学の社会インフラシステムのライフサイクルコスト考慮した解析が可能になりつつある。

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	木本 和志  (KIMOTO Kazushi)  (30323827)	岡山大学・環境生命科学学域・准教授    (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------