

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：34509

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04334

研究課題名（和文）構造工学における中心極限定理に従わない確率現象の探索と確率過程の導出

研究課題名（英文）Exploration of stochastic phenomena disobeying the central limit theorem and development of innovative stochastic processes in the structural engineering

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） 3,300,000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開発するのが本研究の目的である。その候補として、地震動位相過程を取り上げる。まず、位相平均勾配が非正規確率特性を有していることを明確にする。それを用いて、位相平均勾配過程がレヴィフライト過程で模擬できることを明らかにする。さらに構造系の非線形応答特性に及ぼす位相の影響を明確にする。さらに、加速度時刻歴の時間に関する一階微分であるジャークを加速度振幅で除した値を新しい確率変数とし、それがレヴィフライトノイズ過程を駆動項とする確率微分方程式として展開できることを示し、その解法を考究する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主要目的は、構造工学の分野において、中心新極限定理に従わない確率事象を探索し発見すること、ならびにそれら事象を説明できる新しい確率過程を創出することである。前者はウイナー過程で説明できない工学・物理現象を発見することと同義であり、非ガウス確率則に従う物理現象を発見することであり、見つければ、工学のみならず物理学的観点から強い関心を浴びるものである。まず、非ガウス系の物理現象として、地震動位相の差分過程に着目し、その確率特性が非ガウス性を示すことを明確にする。

研究成果の概要（英文）：The purposes of this research are to discover phenomenon that is expressed by the non-Gaussian stochastic feature and to develop a new stochastic process transcends the frame of the modern stochastic theory. The candidate to detect the non-Gaussian feature is the phase spectrum of acceleration time history. There are three topics in this theme. The first is to make clear the non-Gaussian stochastic characteristic of the mean gradient of phase (an approximation of the group delay time). The next is to develop an algorithm to simulate the phase process, which is called as “the Levy flight process”. We applied this phase process to simulate design response spectrum compatible acceleration time histories. Using the simulated acceleration time history we evaluate nonlinear response characteristics of the structural system. The third is to develop a non-Gaussian stochastic differential equation for simulating the time history of acceleration. We discuss a method to solve this equation.

研究分野：地震工学

キーワード：非ガウス確率過程 フラクタル 位相過程 レヴィフライト確率密度 位相平均勾配過程 応答スペクトル  
トル準拠地震動 設計水平震度 降伏震度スペクトル

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。

## 1. 研究開始当初の背景

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」。媒介変数 $s$ に関して連続な確率過程 $X(s)$ を考える。いま媒介変数を離散間隔 $\Delta s$ で離散化し， $s_l = l \cdot \Delta s$ と表現すれば，離散確率過程は $\{X_l\} = \{X(s_l)\}$ と表現される。  $X(s)$ が $s$ に関して連続なので，確率過程 $X$ の離散増分値 $\Delta X_l = X_l - X_{l-1}$ はランダム性を有しながら $\Delta s \rightarrow 0$ のとき， $\Delta X_l \rightarrow 0$ を満たさなければならない。離散過程のランダム性は，特定の確率密度関数 $p(X)$ から独立同分布で生成された乱数列 $\{Z_l\}$ を増分過程 $\{\Delta X_l\}$ へ導入することによって，実現される。これは，離散確率過程の媒介変数に対する連続性を満たすために，20世紀頭にウイナーによって導出されたウイナー増分(ブラウンノイズ)<sup>1)</sup>を用いて，離散確率過程の増分 $\Delta X_l$ を $\Delta X_l = \sigma \sqrt{\Delta s} Z_l$  ( $\sigma$ は増分過程の振幅を規定する定数)と記述すればよい。この場合， $\Delta s$ はいくらでも小さく取ることができるので，中心極限定理により，確率密度関数 $p(X)$ を任意に設定することはできず，正規確率密度関数に収束することが分かっている。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ウ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<sup>2)</sup>されている。しかし，ウイナー増分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，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。」と言う条件を満たさない確率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(媒介変数に対する相関距離の長い現象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<sup>3)</sup>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。

非正規性を有する確率現象は，物理学や金融工学の分野<sup>4)</sup>で，今世紀になって注目され始めた事象であり，現象の存在を見出すことに勢力が注がれており，その数理解釈が精力的に行われているのが現状である。構造工学の分野でも，こうした現象の存在することに気付いている研究者が出始めているという段階であり，国内外において，定量的には無論のこと定性的な研究でさえもほとんど見当たらず，先駆的な研究と位置付けられる。

申請者は，1990年代から，地震動位相の角振動数に関する一階微分である群遅延時間をモデル化してきた<sup>5)</sup>。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，群遅延時間を角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角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角振動数間隔に依存することを発見し，位相が角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たので，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<sup>6)</sup>。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<sup>7)</sup>。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。

## 2. 研究の目的

本研究の主要目的は，構造工学の分野において，中心新極限定理に従わない確率事象を探索し発見すること，ならびにそれら事象を説明できる新しい確率過程を創出することである。前者はウイナー過程で説明できない工学・物理現象を発見することと同義であり，見つければ，工学のみならず物理学的観点から強い関心を浴びるものであり，後者は，数物界でも強い関心が持たれている理論であり，今後長期に渡り，参照される成果となる。

その候補として，地震動位相過程を取り上げる。まず，位相平均勾配が非正規確率特性を有していることを明確にし，位相過程が非整数レヴィフライト過程で模擬できることを明らかにする。さらに構造系の非線形応答特性に及ぼす位相の影響を明確にする。最後に，地震動加速度時刻歴の時間に関する一階微分が非正規確率微分方程式として表現できることを明確にし，その解法について考究する。

地震動のような時刻歴を模擬するためには，時刻歴のフーリエ変換として定義される，振幅スペクトルと位相スペクトルの両者が必要<sup>8)</sup>になる。地震動のような非定常時系列のフーリエ振幅特性に関しては，1980年代までに数多くの研究<sup>9)</sup>が行われ，その非定常特性のモデル化が成書としてまとめられる段階<sup>10)</sup>に達している。しかし，地震動のフーリエ位相に関しては，無相関のランダム位相を用いることが多かったため，あまり注目されなかった。

一方、1995年兵庫南部地震の後、振幅レベルが2G になるような設計用応答スペクトルが設定されるようになり、弾性設計に基づく設計基準では、構造設計が困難になったため、構造物の降伏強度を用いて、応答塑性率を保証するような設計法が採用されるようになった。この場合、設計された構造物の非線形応答特性を照査することが必須になり、照査用地震動の模擬法が設計基準や標準に規定されるようになった。照査用地震動は弾性設計法との整合性を保証するために、設計用応答スペクトル準拠の加速度時刻歴が用いられている。しかし、設計用応答スペクトル準拠の加速度時刻歴を模擬するには、地震動の位相が必要になり、地震動位相を相関性のある確率過程として模擬することが要請されるようになった。

この加速度時刻歴は、フーリエ振幅と位相スペクトルを用いて、フーリエ逆変換によって求められる。具体的には、適切なフーリエ位相スペクトルを設定し、それを固定した上で、初期フーリエ振幅スペクトルを与え、照査用加速度時刻歴から再計算される応答スペクトルが設計用応答スペクトルをほぼ近似できるまで、初期に設定したフーリエ振幅スペクトルを補正することになる。照査用の加速度時刻歴を用いて計算される構造物の弾性応答スペクトルは、設計用の応答スペクトルをほぼ近似するので、構造物の弾性応答は設定したフーリエ位相スペクトルの影響を受けないが、非線形応答特性は大きく異なる。このため、非線形応答特性に及ぼすフーリエ位相スペクトルの不確定性を評価するため、位相の模擬法が必要となる。

### 3. 研究の方法

最初に、地震動加速度時刻歴を規定する位相スペクトルの模擬法について考究する。まず、加速度時刻歴を模擬するために行われてきた位相スペクトルのモデル化に関する歴史を概観する。位相の角振動数に対する相関特性を明確にし、その上で位相差分が相関性を有する正規分布で規定される場合を対象として、修正型非整数ブラウン運動で位相を模擬する。

次に、位相平均勾配あるいは位相差分の非正規確率特性を抽出する。最も簡単な方法は、分散値の定義できない確率密度関数を用いて、位相差分又は位相平均勾配の確率分布特性を再検証することである。分散の定義できない確率密度関数には、Cauchy, Log-Cauchy, Generalized Pareto, Geometric stable, Holtsmark, Inverse-chi-squared, Inverse-gamma, Landau, Levy, Linnik, Log-Laplace, Log-logistic, Lomax, Mittag-Leffler, Multivariate stable, Pareto, Q-exponential, Q-Gaussian, Q-Weibull, Skewed generalized t, Slash, Stable (Levy-flight), Student-t, Tallis, Tukey lambda, Voigt, Zrta 分布などが有る。その中でも、確率分布特性を規定するパラメータ数が多く、それらを適切に設定することにより、多様な確率分布特性を評価できるレヴィフライト確率密度関数<sup>11)</sup>を採用する。その上で、位相差分又は位相平均勾配を対象として、その確率密度関数をレヴィフライト確率密度関数で表現できるかどうかを再検証する。対象とする確率現象の確率分布特性をレヴィフライト確率密度関数に変更すると、現象の数理がどれほど変わるかを再検証する。この場合、中心極限定理が成立しないので、レヴィフライト確率密度関数に従い、媒介変数に関して連続な確率過程を定義することができない。そのためには、レヴィフライト確率密度関数に従い、ウイナー増分(ブラウンノイズ)過程に準ずるような基本確率過程が必要である。基本確率過程の一つであるウイナー増分過程用いれば、媒介変数に関して連続となる古典的な確率過程が数多く定義できる。ウイナー増分過程の確率密度関数は正規分布であるので、分散値を媒介変数の距離に比例するよう規定すればよい。しかし、レヴィフライト確率密度関数には、分散値は存在しないので、レヴィフライト確率密度関数から独立同分布で生成される乱数列の和からなる確率変数の確率法則は定義できない。そこで、Genedenko が提案している拡張型中心極限定理<sup>12)</sup>を用いて、レヴィフライト確率密度関数に従う基本確率過程を構成し、レヴィフライトノイズ過程と名付ける。この確率過程は、レヴィフライト確率密度関数に従う確率過程の基本確率過程となる。その上で、近代確率過程論の範疇を超える確率過程を構成するため、レヴィフライトノイズ過程を用いて非整数レヴィフライト確率過程を定義するとともに、レヴィフライトノイズ過程を駆動項とする確率微分方程式や確率積分方程式の設定法を模索し、その理論を体系化するのに必要となる基本原理を考究する。

まず、位相平均勾配を模擬するため、非整数レヴィフライト確率過程と名付けたアルゴリズムを構築する。次に、設計応答スペクトル準拠加速度時刻歴の模擬法を確立し、位相の不確定性が設計用応答スペクトル準拠加速度時刻歴の不確定性に変換されることを明確にし、構造物の非線形応答特性に及ぼす地震動位相の不確定性の影響を評価できる方法論を構築する。最後に、加速度時刻歴の時間に関する一階微分であるジャークを対象として、それが時間に関する非正規確率微分方程式として表現できることを明かにし、その解法を攻究する。なお、花崗岩供試体中を透過・伝播する実体波と表面波の計測実験を通して、透過波の位相特定を解明する。本研究は以下の計画に従って遂行する。

- 1) 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、地震動の位相を角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偏角として計算すると、主値のみしか求められないので、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、地震動位相を角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、既往の方法論<sup>13)</sup>を利用する。(研究代表者・佐藤；Ahmed(中国・東南大学博士課程学生))
- 2) 地震動位相差分の確率特性が正規分布で表現できると仮定した上で、位相を模擬できるよう

に、非整数ブラウン運動を修正し、それを修正非整数ブラウン運動と名付ける。その結果を用いて位相を多数模擬し、構造物の非線形応答特性に及ぼす位相の不確定性を考究する。(佐藤・Ahmed・万(海外研究協力者・中国東南大学副教授))

- 3) 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<sup>14)</sup>となっていることが判明している<sup>13)</sup>ので、その確率特性をレヴィフライト確率密度関数<sup>11)</sup>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)
- 4) 観測された地震動加速度時刻歴を時間に関して一階微分した加加速度(ジャーク)の確率特性が非正規性を示すこと明らかにし、ジャークが非正規確率微分方程式で表現できることを誘導する。その上で、非正規確率微分方程式の解法を考究する。(佐藤)
- 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、岩石供試体中を透過する超音波の実体波計測実験を実施し、透過波の位相の確率特性が地震動位相と同じ特性を有することを確認する。岩石供試体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。なお、表面波の伝播実験も計画期間中に実施する。(研究分担者・木本)

#### 4. 研究成果

観測された地震動加速度時刻歴を対象とし、その位相スペクトルの確率特性を明確にすると共に、媒介変数に対する相関特性を解明して、位相スペクトルを模擬するための確率過程を構築した。また、地震動加速度時刻歴を直接模擬するための方法論についても考究した。なお、花崗岩供試体中を伝播・透過する超音波の計測実験を実施した。得られた成果を列挙すると以下のようである。

1. 角振動数を $\omega$ とし、これを媒介変数とすれば、地震動の位相スペクトルは角振動数の関数として $\phi(\omega)$ と表現できる。まず、位相のアンラップ操作をすることなく、位相スペクトルを角振動数の連続関数として表現できる計算法<sup>13)</sup>を紹介した後、地震動位相を線形遅れ部 $(-\omega t_0)$ とそこからの変動部 $\psi(\omega)$ に分解する。以下、この変動部を位相と呼ぶことにする。離散間隔 $\Delta\omega$ での位相差分を $\Delta\psi$ とする。さらに、エルゴード仮説が成立するものとするれば、 $\Delta\psi$ の分散値 $\sigma_{\Delta\psi}^2$ は角振動数の離散点 $i$ 上で計算される位相差分 $\Delta\psi_i$ の2乗平均値として求めることができる。このようにして求めた $\sigma_{\Delta\psi}^2$ が $\Delta\omega$ のかかなり広い範囲に亘り、 $\sigma_{\Delta\psi}^2 = \sigma_0^2(\Delta\omega)^{2H}$ と表現できるべき乗則に従うことが判明した。差分過程の分散値がべき乗則従う確率過程は、正規過程の場合には、非整数ブラウン運動で表現できるので、 $\psi(\omega)$ が非整数ブラウン運動としてモデル化できるかどうかを議論した。しかし、位相は媒介変数に対して原点逆対称であるので、 $\psi(\omega)$ を模擬するのに、非整数ブラウン運動過程を修正する方法論を提案し、それを修正非整数ブラウン運動過程と名付けた。
2. 修正非整数ブラウン運動過程で模擬された位相を用いて、設計用応答スペクトル準拠加速度時刻歴を多数模擬し、位相の不確定性が、Clough型構成式を有する一自由度系の降伏震度スペクトルに及ぼす影響を明確にした。設計用応答スペクトルとしては中国の耐震コードGB50011-2020に規定されているものを用いた。その上で、性能形設計に用いることができる設計用降伏震度スペクトルの設定法を提案した。
3. 位相差分過程を離散角振動数間隔で除した位相平均匀配過程の確率密度関数が、離散角動数間隔がある程度の範囲内では、離散間隔によらず、非正規性を示し、それがレヴィフライト確率密度関数で表現できることを明らかにした。この事実を用いて、地震動の位相平均匀配過程をレヴィフライト確率密度関数から独立同分布で生成した乱数列の重み付き和として表現できるアルゴリズムを構築した。さらに、位相平均匀配が単峰性の確率密度関数で表現される場合のアルゴリズムを修正することにより、多峰性を有する確率密度関数で規定される位相平均匀配過程の模擬アルゴリズムを確立した。
4. 設計用応答スペクトル準拠の加速度時刻歴は、フーリエ位相スペクトルの与え方により、その形状の異なることが指摘されている。そこで、観測加速度時刻歴から位相平均匀配の確率特性を抽出し、それを用いて模擬されるフーリエ位相スペクトルを用い、応答スペクトル準拠の加速度時刻歴を模擬する方法論を確立した。設計用応答スペクトルとして、鉄道の耐震標準に規定されているスペクトルIIを採用した。また、初期フーリエ振幅スペクトルの与え方にも任意性が有るので、その設定法についても考察を加えた。これらの結果に基づいて、多数の設計用応答スペクトル準拠の加速度時刻歴を模擬し、それらを用いて、フーリエ位相スペクトルの不確定性が構造物の非線形応答特性に及ぼす影響を評価した。フーリエ位相の不確定性が、一定の応答塑性率を有する非線形応答スペクトルを用いて設計された構造物の非線形応答特性や応答塑性率特性に、及ぼす影響を考究した。
5. 時間間隔 $\Delta t$ で離散化された加速度時刻歴 $\{a_i\}$ を考える。この後退差分を $\Delta t$ で除した値は加加速度時刻歴 $\{j_i\}$ でありジャークと呼ばれている。このジャークを離散点の加速度振幅値の平均値 $\bar{a}_i = 0.5 \cdot (a_i + a_{i-1})$ で標準化した $B_i = j_i / \bar{a}_i$ の確率密度関数が $\Delta t$ の広範囲に亘って、レヴィフライト確率密度関数によって表現されることを明確にした。この結果から、標準化ジ

- ヤークが非ガウス確率微分方程式を満たすことが明確になるので、その解法を考究した。
6. 岩石中に内在する亀裂や結晶構造の不規則性は、サイズの累積度数がベキ乗則に従う<sup>15),16)</sup>ことで知られている。この分布特性を規定するベキ乗指数を推定するための方法論を考究する第一歩として、花崗岩供試体中を透過する超音波の実体波を計測し、透過した実体波の位相が有している特異な確率特性を明確にした。透過波のフーリエ位相を線形遅れ部とそこからの変動に分解し、位相変動部の位相差分の2乗和平均特性が、離散角振動数間隔のベキ関数で表現されることを明らかにした。さらに、差分間隔の異なる位相差分をその2乗和平均の平方根で標準化した変数の確率密度関数がレヴィフライト分布で表現できることを示し、レヴィフライト分布を規定する指標値を同定した。
  7. ランダ不均質媒体中における表面波の伝播挙動を、超音波計測と波動解析によって調べた。花崗岩供試体を対象として、線収束型の圧電探触子で励起した表面波をレーザードップラー振動計で計測した。フェルマーの原理に基づいて、各波形観測点での到達時間を求めた。その結果、伝播距離に応じた到達時間の揺らぎは、おおむね伝播距離の-0.5乗と平均到達時間の積に比例することが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) Karatzas, I. and Shreve, S. E. (1991): *Brownian Motion and Stochastic Calculus*. Springer-Verlag, New York, Inc.
- 2) Mikosch, T. (1998): *Elementary Stochastic Calculus with Finance in View*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- 3) Mandelbrot, B. B. and van Ness, J.W.: Fractional Brownian Motions. *SIAM Review*, Vol.10, No.4, pp.422-427.
- 4) Voit, J. (2010): *The Statistical Mechanics of Financial Markets*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 5) 佐藤忠信・室野剛隆・西村昭彦(2000): 観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, Vol.I-50, No.640, pp.119-130.
- 6) Sato, T. (2013): Fractal characteristics of phase spectrum of earthquake motion, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 7(2), 1350010-1-17.
- 7) 佐藤忠信(2017): 地震動位相差分の特異な確率特性と確率過程一分散の定義できない群遅延時間のモデル化ー, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.73, No.2, pp.344-363.
- 8) Papoulis, A. (1962): *The Fourier Integral and its Application*. McGraw-Hill, New York.
- 9) Priestley, M. B. (1981): *Spectral Analysis and Time Series-Part II*. London, Academic Press
- 10) Cohen, L. (1995): *Time-Frequency Analysis*, Prentice-Hall, Inc.
- 11) Nolan J. P.: *Stable Distribution: Models for Heavy Tailed Data*, (<http://academic2.american.edu/~jpnolan/stable/chap1.pdf>) 2015年11月13日閲覧.
- 12) Gnedenko, B.V. and Kolmogorov, A.N. (1968) : *Limit Distribution for Sums of Independent Random Variables*, English translation by K.L. Chung, revised 1968, Addison- Wesley.
- 13) 佐藤忠信(2016): 確率過程として見た地震動位相の不可解性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4(地震工学論文集 35 巻), I\_831-I\_841.
- 14) 松葉育雄(2007) : 長期記憶過程の統計ー自己相似な時系列の理論と方法ー, 共立出版社.
- 15) Bonnet, E. B., O., Odling, N.E., Davy, P. M., Cowie, I. P. and Berkowitz B. (2001): Sailing of Fracture Systems in Geological Media, *Reviews of Geophysics*, Vol.39, No.3, pp.347-383.
- 16) Jerram, D.A., Cheadle, M.J. and Philpotts, A.R. (2003): Quantifying the Building Block of Igneous Rock: Are Clustered Crystal Frameworks the Foundation?, *Journal of Petrology*, Vol.14, No.11, pp.2033-2051.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 A.A. Abdelrahman, T. Sato, C. Wan and L. Zhao	4. 巻 23(11)
2. 論文標題 Simulation of Earthquake Motion Phase Considering Its Fractal and Auto-covariance Features	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 KSCE Journal of Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12205-019-0348-z	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 該当する

1. 著者名 A.A. Abdelrahman, T. Sato, C. Wan and Z. Wu	4. 巻 9(11)
2. 論文標題 Definition of Yield Seismic Coefficient Spectrum Considering the Uncertainty of the Earthquake Motion Phase	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2254-2272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9112254	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 佐藤忠信・室野剛隆	4. 巻 74(2)
2. 論文標題 地震動観測記録に見る位相平均勾配の特異な確率特性とそのモデル化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1(構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 229-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.74.229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐藤忠信・田中浩平・室野剛隆・西村隆義	4. 巻 74(2)
2. 論文標題 地震動位相の不確実性が構造物の非線形応答特性に及ぼす影響評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_213-I_224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.74.I_213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐藤忠信	4. 巻 74(4)
2. 論文標題 地震動加速度時刻歴のフーリエ変換に内在する微分不可能性の本質を探る	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1(構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 I_452-I_463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.74.1_425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐藤忠信・木本和志	4. 巻 73(2)
2. 論文標題 岩石材料中を透過する波動の位相特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_73-I_84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.73.1_73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Songtao Xue, Bo Wen, Rui Huang, Liyuan Huang, Tadanobu Sato, Liyu Xie, Hesheng Tang and Chunfeng Wan	4. 巻 24(7)
2. 論文標題 Parameter identification for structural health monitoring based on Monte Carlo method and likelihood estimate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Distributed Sensor Networks	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/11550147718786888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 木本和志・岡野蒼・斎藤隆泰・佐藤忠信・松井裕哉	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 超音波計測に基づく花崗岩中の表面波,伝播特異に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_97-I_108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_1_97	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 佐藤忠信・吉田行政
2. 発表標題 観測加速度時刻歴の非ガウス性と非正常性の抽出
3. 学会等名 2019年応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤忠信
2. 発表標題 地震動位相を模擬するための非整数レヴィフライト確率過程の構成
3. 学会等名 第30回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sato, L. Zhao and C. Wan
2. 発表標題 Structural damage identification based on parameter identification using Monte Carlo method and likelihood estimation
3. 学会等名 The Seventh International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tadanobu Sato
2. 発表標題 Stochastic process of earthquake motion phase and its inherent features
3. 学会等名 6th European conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Tadanobu Sato
2. 発表標題 Non-Gaussian Stochastic Features Hidden in Earthquake Motion Phase
3. 学会等名 Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kouhei Tanaka and Tadanobu Sato
2. 発表標題 Evaluation of inhomogeneous structures in seismic propagation path in Japan based on the fractal characteristic of observed earthquake motion phase
3. 学会等名 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago Chile (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadanobu Sato, Ikumasa Yoshida and Yoshitaka Murono
2. 発表標題 Non-Gaussian Characteristic of Acceleration Time History
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 佐藤忠信・室野剛隆
2. 発表標題 地震動位相差分の相関性に着目した位相の模擬
3. 学会等名 第40回地震工学研究発表会
4. 発表年 2020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	木本 和志  (KIMOTO Kazushi)  (30323827)	岡山大学・環境生命科学研究科・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
---------	---------