

平成 22 年 6 月 20 日現在

研究種目：基盤研究

研究期間：平成 19 年度～平成 21 年度

課題番号：19360209

研究課題名（和文） 地震動の位相制御に基づく設計用地震動の革新的設定法と新しい性能設計規範の提案

研究課題名（英文） Innovative method to simulate design earthquake motions by controlling earthquake motion phase and proposal of new performance design criterion

研究代表者

佐藤忠信（Tadanobu Sato）

研究者番号：00027294

## 研究成果の概要（和文）：

設計された構造物の耐震性能を照査するためには地震動の振幅と位相特性が重要な情報となる。この研究では、群遅延時間（円振動数に関する地震動位相の一階微分）とウェーブレット解析を利用して地震動の位相特性をモデル化する簡便な方法を提案する。既存の地震観測データとウェーブレット解析を用いて地震動の群遅延時間を計算し、用いたウェーブレットの振動数帯域ごとに群遅延時間の平均値と標準偏差を求め、それらの回帰式を地震動のマグニチュードと震源パラメータ、震源距離、ならびに局所的な地盤条件の関数として求めた。群遅延時間の不確実性が正規分布で表現できることを確かめた後、群遅延時間の模擬法を開発した。この方法に基づく煩雑性を避けるため、群遅延時間を一階の確率微分方程式で模擬するための方法を開発した。地震動位相のサンプルは群遅延時間を円振動数で積分することにより求められる。

このサンプル位相を用いて設計応答スペクトル準拠の地震動を模擬し、その特性を必要降伏強度スペクトルにより調べた結果、必要降伏強度スペクトルは解析に用いた位相スペクトルに強く依存することが明らかになった。模擬された地震動が同じ設計用弾性応答スペクトルを満たしていても、異なったサンプル位相スペクトルを用いると必要降伏震度スペクトルが異なることが分かった。この問題を解決するために、与えられた設計用弾性応答スペクトルと必要降伏強度スペクトルの両者を同時に満たすことのできる唯一の設計用地震動を模擬するための方法論を提案した。

さらに、地震動位相情報のみから実際の地震動を模擬するための方法論を開発した。

## 研究成果の概要（英文）：

Both the amplitude and phase characteristics of earthquake motion provide key information needed to evaluate the aseismic capacity of designed structures. In this research we proposed a simple method for modeling the phase characteristic of earthquake motion based on group delay time (the first order derivative of an earthquake motion phase with respect to the circular frequency) and wavelet analysis. Existing data sets of observed earthquake motions and wavelet analysis are used to calculate the group delay time of each earthquake motion. Regression equations for the mean group delay time and standard deviation of group delay time in each frequency band defined in the used wavelet are obtained as functions of the earthquake's magnitude and several source parameters, hypocenter distance as well as local soil conditions. After confirming that the uncertainty of the group delay time could be expressed by the normal distribution, we developed a simulation method of group delay time. To reduce complexity of this method we also developed a method to simulate the group delay time based on a first order of the stochastic differential equation. A sample phase spectrum was obtained by integrating a sample group delay time with respect to the circular frequency.

Using the sample phase spectrum an earthquake motion compatible with the elastic design response spectrum is then simulated, and its characteristic is investigated using the yield strength demand spectrum. Through this investigation we found that the yield strength demand spectrum was strongly affected by the phase spectrum used for an analysis. If we used a different sample phase spectrum a

different yield strength demand spectrum produced even though its elastic response spectrum satisfies the same design elastic response spectrum. To solve this problem we therefore proposed a method to simulate a unique design earthquake motion, which is simultaneously compatible with both the given elastic response spectrum and the yield strength demand spectrum.

We also developed a method to simulate realistic earthquake motions using only the information of a phase spectrum taking into account the causality criterion of earthquake motions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
20年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
21年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

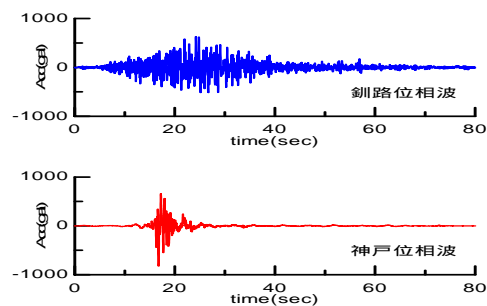
キーワード：設計用地震動、群遅延時間、位相差分、確率微分方程式、フラクタル、弾性応答スペクトル、降伏震度スペクトル、モンテカルロシミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

地震動の位相情報が設計用の地震動設定する上で重要であることは、これまでわが国のみならず諸外国においても、幾度となく指摘されてきたが、的確なモデル化手法は提案されていなかった。

構造物の耐震設計では、地震動の強さを弾性応答スペクトルで規定したうえで、設計された構造物の耐震性能を弾性応答スペクトル準拠の地震動により動的解析に基づいて照査するのが一般的である。弾性応答スペクトル準拠の地震動を模擬するには、位相を典型的な地震動位相に固定し、模擬された地震動の弾性応答スペクトルが設計応答スペクトルに一致するようにフーリエ振幅を調整する。したがって模擬される地震動の振幅特性は、耐震設計用の弾性応答スペクトルを規定するときの種々の工学的判断を反映して、合理的に規定されていると考えられるが、位相特性は典型的なサンプルを用いているので、動的解析による耐震性能照査は旧態依然として、観測された典型的な地震動を用いた照査の域を超えていない。

図1は鉄道の耐震設計標準に規定されている弾性応答スペクトルIに準拠した地震動の加速度時刻歴の例である。上が釧路地方気象台で観測された位相を、下が神戸海洋気象台で観測された位相を用いた場合の加速度波形である。両者の差は歴然としている。



こうした問題点があるため、わが国のほとんどの基準・指針では既存の代表的な観測記録の位相特性を利用していた。1999年9月に刊行された、鉄道構造物の耐震設計標準では研究代表者が過去に提案した方法論を用いて位相特性のモデル化を試みていた。本研究は、そのとき明らかになった問題点を解決し、それをさらに発展させようとしたものであった。

### 2. 研究の目的

地震動位相の周数領域における1階微分で定義される群遅延時間を円振動数領域で

モデル化し、地震動の位相スペクトルの模倣法を確立するのが第一の目的である。そのために、観測された地震動を収集し、それを用いて、適当な周波数帯域を有するバンドパスフィルターを通過する時系列を計算し、その群遅延時間の平均値と標準偏差を求め、群遅延時間の統計的なモデルを作成する。さらに群遅延時間を周波数領域における1階の確率微分方程式としてモデル化し、フーリエ位相スペクトルを合理的に模倣できるようにした。

しかし模倣されたフーリエ位相スペクトルは確率過程の出力であり、あくまでサンプルであるので、数多くのサンプルの中から適切なフーリエ位相スペクトルを抽出しなければならない。そこで、モデル化されたフーリエ位相スペクトルの確率特性を制約条件として、模倣された地震動を用いて計算される弾性応答スペクトルと所要降伏強度スペクトルが設計用に定義されている両スペクトルに一致するように、模倣地震動のフーリエ振幅と位相スペクトルを調整できる最適化アルゴリズムを開発するのが第二の目的である。これはモンテカルロシミュレーション法により解決を図った。

### 3. 研究の方法

本研究を実施するにあたり、以下の6項目からなる研究実施計画を立てた：地震動記録の収集、群遅延時間の経験的モデル化ならびに確率微分方程式に基づく表現とそれを利用した位相のモデル化、位相スペクトルからフーリエ振幅スペクトルを決定するための理論、提案手法の妥当性の検証、表層地盤の動特性が位相特性に及ぼす影響評価、構造物の応答特性に及ぼす位相の不確定性の影響評価。

各項目ごとに、具体的な年次計画を立て、それにしたがって研究を推進した。

### 4. 研究成果

#### 4.1 地震動位相のモデル化

地震動のような非定常特性を有している時刻歴信号を模倣するためには、振幅特性と位相特性のモデル化が必要であるが、これまでは振幅特性に重点がおかれ、位相のモデル化についてはあまり焦点が当てられなかったようである。振幅特性についてはパワースペクトルの非定常性をモデル化することが一般的で、モデル化された非定常パワースペクトルから時刻歴を模倣するためにはランダム位相が用いられてきた。しかし、位相の持つ物理的な意味が明確でなかった。大崎らはフーリエ位相差分布と時刻歴包絡形との類似性を指摘し、和泉・勝倉はフーリエ位相の角振動数軸上での傾き（群遅延時間）に注目して、その平均値と標準偏差により地震波

の重心位置と広がりを表現できることを示した。

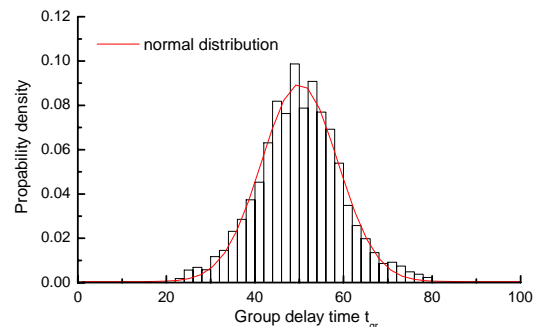
研究代表者も、地震動の位相特性のモデル化の意義について述べるとともに、モデル化について一連の研究を行ってきた。地震動の時刻歴  $x(t)$  のフーリエ変換は、角振動数を  $\omega$  とし、そのフーリエ振幅と位相を各々  $A(\omega)$  と  $\phi(\omega)$  とすれば、 $A(\omega)\exp[i\phi(\omega)]$  と表される。位相のモデル化には次式で定義される群遅延時間を用いている。

$$\zeta(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega}$$

群遅延時間は時間の次元を持つ角振動数の関数である。

地震動  $x(t)$  を適当な周波数帯域を持つバンドパスフィルターで処理した後の時刻歴  $w(t)$  の群遅延時間を計算し、帯域内の群遅延時間の平均値と標準偏差を求めると、平均値は  $w(t)$  の主なエネルギーの到達時間を、標準偏差は  $w(t)$  の継続時間を評価できる。そこで、Meyer のウエーブレットを用いて、多数の観測地震動を分解し、ウエーブレットの各振動数帯域内の群遅延時間の平均値と標準偏差を求めた後、それらを用いて、群遅延時間の平均値と標準偏差を地震のマグニチュード、震央距離と断層の破壊過程のパラメータの関数として表現した。結果の一例は研究成果文献(3)に与えられる。

群遅延時間の平均値と標準偏差が与えられたときに群遅延時間のサンプルを模倣するためには、その分布特性が必要となる。そこで、ウエーブレットの振動数帯域内の群遅延時間の分布特性を調べたところ、正規分布で表現できることが経験的に明らかになった。図2はその一例である。



また、離散化された角振動数ごとの群遅延時間は独立ではなく、相関性を有しているはずなので、角振動数  $\omega_k$  と  $\omega_l$  間の群遅延時間の相関  $R(\Delta\omega)$  が次式のような簡単な関数で表現できると仮定し、ウエーブレットの振動数帯域内の相関性を調べた。

$$R(\Delta\omega) = \sigma^2 \cdot \exp\left(-\frac{|\Delta\omega|}{b}\right), \quad \Delta\omega = \omega_k - \omega_l$$

ここに、 $\sigma^2$  は  $\omega_k$  における  $R(\Delta\omega)$  の値であり、 $b$  は相関の強さを表す係数である。

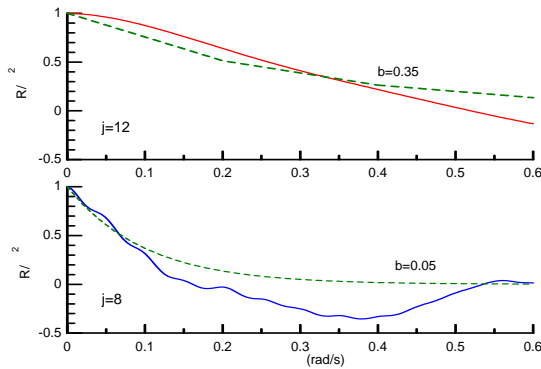


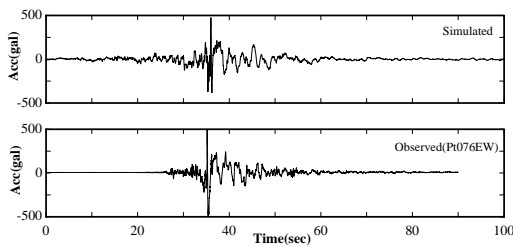
図3はこの式の  $b$  の値を決定した例である。図中の  $j$  はウエーブレットの振動数帯域を表す指標で、この値が大きいほど帯域の振動数が高いことを表している。

以上の結果を一般化すると群遅延時間の分布特性は、離散化角振動数ごとにその平均値と標準偏差が定義され、かつ互いに相関を有する正規分布で表現してもよさそうである。具体的に書き下すと次式のようになる。

$$p(\xi) = \frac{1}{(2\pi)^j |\mathbf{S}|^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\xi - \mu)^T \mathbf{S}^{-1}(\xi - \mu)\right\}$$

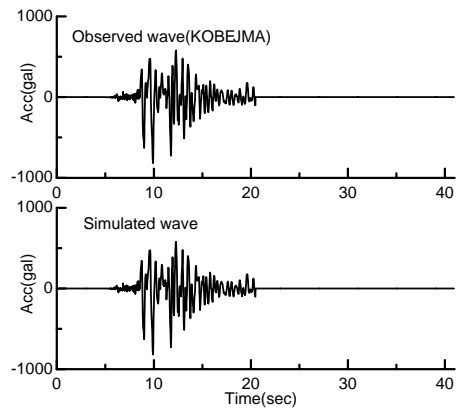
ここに、 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j)^T$ 、 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_j)^T$  で、 $\xi_k$  を離散角振動数  $\omega_k$  における群遅延時間とすれば  $\xi_j = \zeta_j 2\pi\Delta f$ 、 $\mu_k$  を離散角振動数  $\omega_k$  における群遅延時間の平均値とすれば  $\mu_k = \bar{\mu}_k 2\pi\Delta f$  で、 $\Delta f$  は離散化振動数間隔、 $\mathbf{S}$  は共分散マトリクスである。

上式に基づけば群遅延時間の模擬が可能になるので、それを積分することによって、地震動の位相が模擬できることになる。このモデルにより模擬された位相が地震動の特性をどの程度表現できるかを検証した例が図4に示されている。下図は観測された記録の波形を、上図は観測されたフーリエ振幅と上に述べた方法で模擬された位相を用いて再現した地震波形である。主要動の到達時間や継続時間が良く再現されていることが分かる。



#### 4.2 地震動の因果律

位相がモデル化できれば、耐震設計で用いられる応答スペクトルに適した波形を合成できるが、フーリエ振幅特性は設計用の応答スペクトルで調整するので、振幅スペクトルと位相スペクトルが独立に定義されたことになる。しかし、振幅と位相を各々独立にモデル化して、非定常な地震波形を合成する方法は本質的な矛盾を抱えている。それは、因果性を有する時系列のフーリエ変換の実数部と虚数部は独立ではなく、ヒルベルト変換の関係で結び付けられているためである。したがって、振幅スペクトルをモデル化した場合には、位相スペクトルに何らかの制限が



設けられなければならない。こうした問題点を矛盾なく解決するため、位相スペクトルの情報のみに着目した波形の合成方法が研究代表者により提案されている。

この場合、位相は地震動のフーリエ変換の虚数部と実数部の比で定義されるので、位相から求められる地震動の時刻歴の絶対振幅は決められないが、波形は位相から求めることが可能となる。図5にその一例を示す。1995年兵庫県南部地震の際に神戸気象台で記録された地震動の波形とその位相のみから再現した波形を比較したものである。

#### 4.3 確率微分方程式による群遅延時間のモデル化

群遅延時間  $\zeta$  を相関性のあるガウス過程で表現するためには、確率微分方程式による次の表現が便利である。

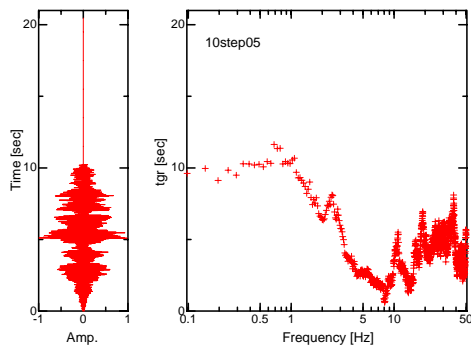
$$d\zeta = \{c_1(\omega)\zeta + c_2(\omega)\}d\omega + \{\sigma_1(\omega)\zeta + \sigma_2(\omega)\}dB_\omega$$

ここに、 $c_1, c_2, \sigma_1, \sigma_2$  は微分方程式の係数であり角振動数の関数として定義され、 $B_\omega$  はウィナー過程である。この場合、群遅延時間の平均値  $\mu_\zeta$  と分散  $\sigma_\zeta^2$  は次式で与えられるので、

$$d\mu_{\zeta} = \{c_1(\omega)\mu_{\zeta} + c_2(\omega)\}d\omega$$

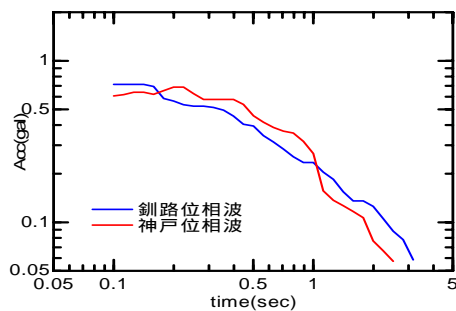
$$d\sigma_{\zeta}^2 = \{\sigma_1^2\sigma_{\zeta}^2 + 2(c_2 + \sigma_1\sigma_2)\mu_{\zeta}\}d\omega$$

地震記録から求められる  $\zeta$  をもとに、確率微分方程式の係数を同定できることになる。確立微分方程式の係数を地震のマグニチュード、震源距離、局所的な地盤条件の関数として決定した例は研究成果(2)にある。確率微分方程式の係数が一定値で与えられるときの例として、 $c_1 = 0.05, c_2 = 0.25, \sigma_1 = 0.1, \sigma_2 = 0.5$  の場合に対して、群遅延時間(右図の縦軸)とそれを角振動数で積分して求められる位相スペクトルから求めた因果性のある非定常時系列(左図)の一例を図6に示す。



#### 4.4 応答スペクトル準拠地震動の問題点とその解決法

耐震設計用に定義された応答スペクトルを用いて設計された構造物が弾性応答をするときには、その最大応答値は地震動の時刻歴特性の違いによらず、弾性応答スペクトルの定義から、同じになるが、構造物が非線形応答をするときには、応答特性が大きく異なってくる。その一例として、Clough 型のバイリニア特性を有する 1 自由度非線形系の最大応答変位を降伏変位で割った塑性率を 4 になるように制御したときの、降伏加速度の値を弾性固有周期に

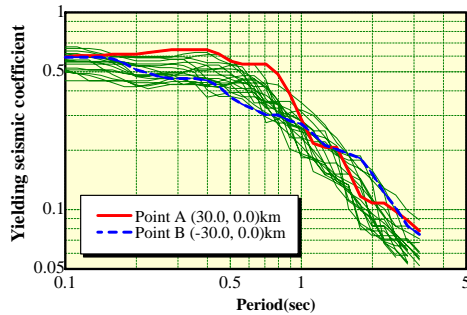


対してプロットした所要降伏加速度スペクトルを図7に示した。固有周期が 0.17 から 1 秒の範囲では神戸の位相を用いた場合の方が大きな降伏加速度(固有周期 0.8 秒の構造物では、釧路の位相を用いた場合は降伏加速度が 250gal であるが、神戸の位相では 350gal となる)の必要なことがわかる。

このように、地震動の位相特性は波形のみならず構造物の非線形応答特性に大きな影響を及ぼす。構造物のねばりを期待して耐震設計を行う性能設計では、所要降伏震度(降伏加速度を重力の加速度で割ったもの)スペクトルが設計の基本となる。耐震設計用の所要降伏震度スペクトルを満たすように設計された構造物の性能は動的解析で照査されるが、そのとき用いるべき地震動の位相特性の設定法が解明されていないので、現行の耐震設計法では、照査に用いた地震動によって再計算された所要降伏震度スペクトルが設計用の所要降伏震度スペクトルと一致しないという矛盾を抱えている。

こうした問題を解決するには、耐震設計のために規定される弾性応答スペクトルと所要降伏震度スペクトルの両者を満たす設計用地震動のシミュレーション法を開発する必要がある。弾性応答スペクトル準拠の地震動がフーリエ振幅スペクトルを調整することによってシミュレートできるので、所要降伏強度スペクトルを加えれば、フーリエ位相スペクトルが調整でき可能性がある。このためには、群遅延時間の確率分布特性を満たすようにフーリエ位相を調整しなければならないので、新しい最適化手法の開発が必要となる。

ここでは、モンテカルロシミュレーション法を利用して、提案する方法により多数の群遅延時間のサンプルを模擬し、それを円振動数で積分することにより、多数の位相スペクトルを得た後、この位相スペクトルを用いて弾性応答スペクトル準拠地震動を多数作成し、おのこの地震動に対し所要降伏強度スペクトルを作成し、これらの全てを包絡するような所要降伏強度スペクトルを与える位相スペクトルを最悪位相と定義し、その位相を持つ地震動を設計用の地震動とする方法を提案した。図8は図7と同じ Clough 型のバイリニア特性を有する 1 自由度非線形系の最大応答変位を降伏変位で割った塑性率を 4 になるように制御したときの、応答スペクトル準拠地震動から求まる所要降伏加速度スペクトルを図示したものである。図中の太い線で示されているのが、ほぼ全ての所要降伏加速度スペクトルを包絡するものである。



#### 4.5 新しい発見(位相のフラクタル性)

本研究を遂行する過程で、地震動の位相差分が分数ブラウン運動で表される可能性を見出した。断層の破壊面は岩石破壊過程の結果として現れるので、破壊の時間的な経過はフラクタル特性を有しているので、地震動の位相にフラクタル特性が潜んでいることになる。観測結果を用いて地震動の位相差分が分数ブラウン過程でモデル化できることを明にした。研究成果口頭発表文献(1)にその詳細を述べた。

#### 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9件)

1. C. Zhang, T.Sato and L. Lu: A phase model of earthquake motions based on stochastic differential equation, KSCE Journal of Civil Engineering, KSCE-D-09-00319, 2010
2. T.Sato, C. Zhang and L.Lu: Method to simulate phase spectrum of earthquake motion by using a stochastic differential equation, Reliability and Risk of Structures Infrastructures and Engineering System, 3333-3336, 2009.
3. T.Sato, T.Kawanishi, Y.Murono, W.Isaka, H.Furuta: Modeling of phase spectrum of earthquake motion using the concept of group delay time, Reliability and Risk of Structures Infrastructures and Engineering System, 3326-3332, 2009.
4. L.Lu and T.Sato: Analytical solution of structural response under stochastic excitation with phase uncertainty, 1799-1803, 2009.
5. Jian Zhang, Tadanobu Sato and Susum Iai: Novel Support Vector Regression for Structural System Identification, Structural Control and Health Monitoring, 14:609-626, 2008.
6. Jian Zhang, Tadanobu Sato and Susum Iai: Non-linear system identification of the versatile-typed structures by a novel signal

processing technique, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 36:909-925, 2007.

7. Tadanobu Sato: Topics to define seismic design earthquake motions, Tuchi-to-Kiso, Japan Society of Geotechnical Engineering, 55(2), pp.18-21, 2007.
8. Yuan Di., Jun Yang. and Tadanobu Sato: An operator-split ALE model for large deformation analysis of geomaterials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31, 1375-1399, 2007.
9. Masahiro Shinoda, Tadanobu Sato and Yoyoji Yonezawa: Effective calculation of limit state exceed ANCE probability of earth slopes potentially having multiple critical slip surfaces, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, C, Vol.63, No.1, pp22-32, 2007

[学会発表](計2件)

1. 佐藤忠信: 地震動位相のモデル化に関する試み、第28回自然災害研究発表会、11-5-1, 2009.
2. Tadanobu Sato: Current efforts to define design earthquake motion in Japan, Proceedings of the International Symposium on Advances in Urban Safety (SAUS2007), pp121-132, 2007

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤忠信 (Tadanobu Sato)

神戸学院大学・学際教育機構・教授

研究者番号: 00027294

(2)研究分担者

吉田郁政 (Ikumasa Yoshida)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号: 3267840420

室野剛隆 (Yoshitaka Murono)

(財)鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部・主任研究員

研究者番号: 8265899924

船木伸江 (Nobue Funaki)

神戸学院大学・学際教育機構・講師

研究者番号: 3450990322

(3)連携研究者

なし