

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18106

研究課題名(和文) データ駆動科学を駆使した、想定地震動の集合の情報を集約した設計地震動の合成

研究課題名(英文) Synthesis of representative design input motion reflecting possible ground motions based on data scientific scheme

研究代表者

宮本 崇 (MIYAMOTO, Takashi)

山梨大学・大学院総合研究部・助教

研究者番号：30637989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、社会基盤構造物を設計する地点において想定される、様々な性質を有する多数の強震動波形に対して、それらの性質を集約・反映させた代表波形を合成する手法の開発を行った。このような代表波形に対する安全性を検証することにより、当初の多数の強震動波形に対する安全性が同時に確保されるかどうかを検証した。想定される強震動波形を、その性質に応じてグループ化するクラスタリング手法を開発した。次に、各グループの中で、波形が有する重要な性質を自動的に抽出し学習する、強震動波形の機械学習アルゴリズムを開発した。このような2段階の手法からなる、想定地震動を代表する波形の合成手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this project, it was developed a scheme to synthesize a input motion that represents a set of possible ground motions based on data scientific methods. First, possible ground motions are divided into several clusters considering their effects on nonlinear structural response values. Second, In each cluster ground motions' characteristics are integrated to one artificial wave through the developed iterative learning procedure. These schemes were verified through numerical simulations.

研究分野：地震工学，応用力学，データ科学

キーワード：設計地震動 非線形応答 階層型クラスタリング データ駆動 ウェーブレット変換 機械学習

### 1. 研究開始当初の背景

これまで研究の段階に留まっていた強震動予測技術は、観測網の整備等に伴う理学的知見の蓄積や計算機科学の発達により、耐震設計実務において設計地点の実態に応じた設計用入力地震動を定める手段として応用されるようになってきている。近年はこの考え方をさらに推し進め、震源過程や地盤物性等のパラメタが有する不確実性を考慮した強震動シミュレーションのモンテカルロシミュレーションを行い、生成される多数の想定地震動、すなわち、想定地震動の集合を工学的に利用しようとする研究が進められている。このような手法は、地震外力の想定において不確実性に起因する「想定外」が生じることを防ぐ有力なアプローチであり、耐震設計においても同様の手法に基づいて想定地震動の集合を利用することは重要である。

一方で、耐震設計の実務では、数多くの想定地震動を構造物の性能照査に直接用いることはコストの多大な増加につながり現実的ではない。そのため、耐震設計時には上記の多数の想定地震動の中から、集合を代表する少数の具体的な地震動波形を選定・合成する必要がある。ここで地震動波形の代表性とは、概念的にはその波形に対する性能照査によって構造物の耐震安全性が確認されれば、想定した地震動集合の全て、もしくは大部分の波形に対する安全性が同時に保証されることを意味している。具体的には、構造物に対して想定する地震動集合の中のどの波形よりも大きな応答値を与えるような波形が、そのような代表性を持った波形となりうる。各種の構造物の耐震設計コードでは、設計に用いる波形の設定の仕方には留意すべきであるとされながらも具体的な手段については明記されておらず、強震動予測上の不確実性に対して十分な根拠を持った設計地震動の設定が難しい現状にある。

### 2. 研究の目的

地震工学上は、上記の問題は非線形系に対する地震動の影響の最大化としてとらえられ、個々の地震動が構造物に与える影響の強さを表した地震動強度指標 (Intensity Measure, IM) を利用する方法が広く研究されてきた。ある地震動集合の個々の要素を IM に基づいてランク付けし、設計上要求される信頼性に適ったランクの波形を設計外力として選定する手法や、ある制約の下で IM を最大化する人工的な模擬波形を最適化問題としての定式化から得る手法はその代表例である。しかし、こうした手法はいずれも、構造物の挙動が強い非線形性を有する場合に、IM の値の大きさと実際に地震動が構造物に与える影響の強さが十分に一致しないという問題を抱えており、両者の相関性を高めようとする新たな IM の開発も行われているものの解決には至っていない。これは、実構造物に与える影響に与える地震動特

性は、振幅の程度や継続時間、周波数成分やその経時変化など多岐に渡ることに対して、少数の IM ではそのような複雑な地震動の性質を十分に表現し得ないことに問題の本質があると考えられる。

この問題は、地震動群の個々の波形が有しているそのような複雑な特性の中から、対象の構造物への影響に与える重要なものを抽出し、これが反映された波形を集合の代表波として用いることにより、解決できると考えられる。多数のデータ群から支配的な因子を抽出・集約するという要請に対しては、データ駆動科学 (data driven science) として統一的手法の開発が近年進められており、工学的にもいくつかの成功を収めている。そこで本研究では、それらの知見を活用し、ある想定地震動の集合に対して、集合中の波形が有する様々な特性が集約された代表波を合成する手法を開発する。これにより、非線形系に対する地震動の影響の最大化という地震工学上未解決の学術的課題に対して新しい視点からの解決手段を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、耐震設計時に想定される多数の地震動の集合に対し、2つのフェーズを経ることで、その代表波の合成を行う。

1つ目のフェーズは、想定する地震動集合のサブ集合への分類である。パラメタの不確実性に起因して生成される多数の地震動は、パルス的な性質を持った波形や相対的に継続時間の長い波形など、その性質にいくつかの類型があると予想され、各類型に対応したサブ集合内で分析を行うことにより効率的に性質の抽出を行うことが出来ると期待される。そこで、研究者の提案する地震動波形の非類似度評価手法に基づいて地震動集合をクラスタリングする手法を構築し、具体的な想定地震動集合の事例に対してその構造の分析やサブ集合への分類を行う。

2つ目のフェーズは、各サブ集合内での情報の抽出と代表波の合成である。各サブ集合に対し、スパース展開の手法を用いてサブ集合を構成する地震動波形の共通因子や個別因子を識別・抽出する。スパースな(疎な)因子抽出の操作により、後述する地震動波形の性質の集約の際に、構造系に与える影響と関係のない要素を除いた本質的な地震動特性のみを考慮することが可能となる。また、サブ集合内で抽出された要素に共通する因子や個別の特徴的な因子を、機械学習の手法により順次1つの波形に学習させることにより、抽出情報が集約された人工波の合成を行う。機械学習のアルゴリズム構築には、地震動を情報幾何空間に射影する研究者の既往研究を発展させ、抽出因子の学習量の評価を空間上の移動量として定式化する。

### 4. 研究成果

本研究の1つ目の研究課題である地震動波形のクラスタリング手法においては、各地震動波形が構造物の非線形応答に与える影響を、構造モデルに与える応答値の確率分布によって表現する手法を提案した(図1)。確率分布間の距離を表す JS ダイバージェンスに基づいて、地震動を分類・グループ化するクラスタリング手法を定式化し、その有効性を観測地震動やスペクトルフィッティング波において検証した(図2)。

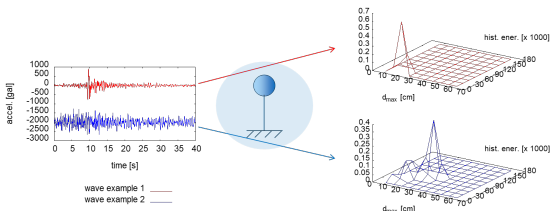


図1：地震動特性の表現法

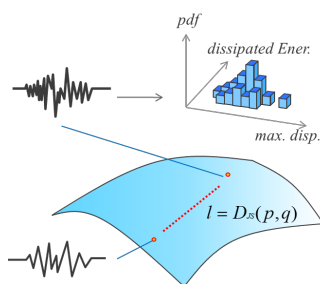


図2：JS ダイバージェンスによる地震動間の距離の表現

次に、本研究の2つ目の課題である、地震動のグループ内における代表波の合成においては、ウェーブレット変換を用いて地震動波形の重要な性質を抽出・学習する機械学習アルゴリズムを、情報幾何空間内における移動問題として定式化・開発した(図3)。提案手法により合成された波形は、様々な応答特性を有する複数の部材に対して高い応答値を与える波形となり、この波形を耐震設計に用いることで、想定される地震動群を直接性能照査に用いずとも高い安全性が確保されることを数値解析から検証した。

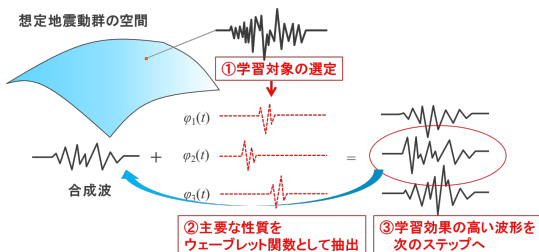


図3：地震動波形の合成アルゴリズム

また、本研究の遂行にあたって、地震動特性

の抽出が大きなテーマとされたため、1次元時系列信号としての入力地震動の局所的な特徴を抽出する、フィルタを自動設計するAI手法の開発を行った。入力信号の特徴を自動抽出する深層学習モデルの1種である、畳み込みニューラルネットワークを1次元時系列信号に適用するために定式化を行った。同手法を、入力地震動と同様のデータ形式や物理的意味を有する常時微動波形に適用することにより、ノイズとみなされる信号部分と地盤の定常震動とみなされる信号部分に自動的に分類する機械学習モデルを設計し、その手法の有効性を検証した。

## 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5件)

- 1) 宮本崇, 古屋貴彦, 盛川仁: 深層学習を用いた常時微動記録からの解析対象区間の自動抽出, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.73, No.2, pp.I\_321-I\_331, 2017. DOI:10.2208/jscejam.73.I\_321
- 2) Miyamoto, T. and Honda, R.: Synthesis of representative wave of spectrum-fitting input motions based on iterative learning procedure, Int. J of Earthquake and Impact Engineering, Vol.1, No.1/2, pp. 159-173, 2016. DOI:10.1504/IJEIE.2016.10000978
- 3) 宮本崇, 本田利器: JS divergence に基づく地震動波形のクラスタリング手法による観測地震動記録群の分類, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, pp.I\_810-I\_820, 2016. DOI:10.2208/jscejsee.72.I\_810
- 4) 宮本崇, 本田利器: Jensen-Shannon divergence を用いた構造物の非線形応答値に基づく地震動波形の集合のクラスタリング, 日本地震工学会論文集, Vol.16, pp.3\_41-3\_52, 2016. DOI:10.5610/jae.16.3\_41
- 5) 宮本崇, 本田利器: JS divergence を用いた地震動波形のクラスタリング手法のスペクトル適合波への適用性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.71, pp.I\_799-806, 2015. DOI:10.2208/jscejsee.71.I\_799

(学会発表)(計8件)

- 1) 宮本崇, 古屋貴彦, 盛川仁: 深層学習を用いた常時微動記録の自動処理手法の開発, 土木学会第72回年次学術講演会, 講演番号 CS15-005, 九州大学(福岡), 9月, 2017.
- 2) 宮本崇, 古屋貴彦, 盛川仁: 物理探査における常時微動記録の深層学習処理について, 第22回知能メカトロニクスワークショップ, 山梨大学(山梨), 講演番号

- 3A1-2, 8月, 2017.
- 3) Takashi Miyamoto, Takahiko Furuya and Hitoshi Morikawa (2017) End-to-end Processing of Microtremor Data on Geophysical Exploration Using Deep Learning, The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, Tokyo(Japan), July 2017.
  - 4) 宮本崇, 古屋貴彦, 盛川仁: 深層学習を用いた常時微動記録からの解析対象区間の自動抽出, 第20回応用力学シンポジウム, 講演番号 C000116, 京都大学(京都), 5月, 2017.
  - 5) Takashi Miyamoto and Riki Honda (2017) Setting Design Ground Motion Reflecting Information of a set of Observed and Simulated Ground Motions based on Data-Driven Approach, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago(Chile), January 2017.
  - 6) 宮本崇, 本田利器: JS divergence に基づく地震動波形のクラスタリング手法による観測地震動記録群の分類, 第35回地震工学研究発表会, 講演番号 B21-854, 東京大学生産研究所(東京), 10月, 2015.
  - 7) 宮本崇, 本田利器: JS divergence を用いた構造物の非線形応答値に基づく地震動波形のクラスタリング, 土木学会第70回年次学術講演会, 講演番号 I-483, 岡山大学(岡山), 9月, 2015.
  - 8) 宮本崇, 本田利器: JS divergence に基づく地震波クラスタリング手法の実観測記録への適用性の検証, 第18回応用力学シンポジウム, 講演番号 100139, 金沢大学(石川), 5月, 2015.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~tmiyamoto/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮本 崇 (MIYAMOTO, Takashi)  
山梨大学・大学院総合研究部・助教  
研究者番号: 30637989