

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

宮本 崇¹・本田 利器²

¹正会員 山梨大学大学院 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail: tmiyamoto@yamanashi.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 国際協力学専攻 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: rhonda@k.u-tokyo.ac.jp

耐震性能照査に用いられる設計地震動の設定プロセスでは、与えられた条件を満たす波形が一意に定まらず無数の設計地震動の候補が想定されう問題がある。これに対し、想定される地震動群の性質を反映した代表波を合成する代表波の開発を行っているが、その初期段階としてこれまでに地震動波形をその性質に応じてクラスタ化する手法を構築しており、本稿ではこの手法を観測地震動記録群に適用した。10波形からなる観測記録群を提案手法により分類した結果、ディレクティビティや距離減衰、サイト増幅といった、地震動特性に大きな影響を与える要素に基づいて分類された。また、位相変調により波形の数を増やした検証からも、おおむね属性別のクラスが形成される結果を得ることができ、提案手法の妥当性が確認されたほか、ディレクティビティ効果が地震波形に与える影響が相対的に大きいことが示唆された。

Key Words : seismic ground strain, sediment layer, 3D nonlinear ground response analysis

1. はじめに

社会基盤構造物の耐震性能照査に用いられる設計地震動には、設計用応答スペクトルへの適合波や、強震動シミュレーションから生成される波形が利用されている。一方、波形の位相特性の任意性やシミュレーション上のパラメタの不確実性に起因して、こうした手法から生成される波形は一意に定まらず、構造物に与える影響が互いに異なる多数の設計地震動の候補が想定されうという問題がある。これに対し、著者らは地震動波形が有する特性を抽出して1つの波形に学習させることにより、想定される地震動群の多様な特性が反映された代表波を合成する手法の開発を行ってきた。一方、性質の大きく異なる波形の特性を1つの波形に集約させることは必ずしも合理的でない。

この問題を回避する方法として、性質の類似度に応じて地震動波形をグループ化し、グループ毎に代表波を合成することが考えられる。このような方法を構築するための最初の段階として、これまでに地震動波形群を構造物の非線形応答に与える影響に基づいてクラスタ化する手法を提案してきた。本稿では、異なる属性を有した波形の混在した地震観測記録群に適用し、クラスタリング結果の分析を行う。

2. 地震動波形のクラスタリング手法

本節では、本稿で用いる地震動波形群のクラスタリング手法の概要を説明する。手法の詳細と有効性の検証に関する基礎的な検討結果は、別途の文献¹⁾を参照されたい。

(1) 地震動波形の非類似度評価

ある集合へクラスタリング手法を適用するためには、集合の要素間の非類似度を定量的に評価する必要がある。ここでは、地震動波形の集合を対象に、設計地震動としての性質の差異に基づいてグループ化することが目的である。これには、地震動波形が構造物に与える影響、特に非線形応答に与える影響の観点からその性質の表現や非類似度の評価が行われるべきであることから、ここでは次のように地震動の非類似度を定義する。

ある地震動 $f(t)$ の性質を、構造物に与える影響の観点から表現するために、設計の対象構造物を単純化した非線形モデルの n 個の応答値 $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ を用いることを考える。応答値の例としては、簡単な非線形1自由度系

表 - 1 クラスタリングの対象とした観測地震動記録群.

ID	地震名称	観測点	指向性	震源距離 [km]	表層固有周期 [s]
1	2000 年鳥取県西部地震	江府	直角方向	17	0.07
2	2000 年鳥取県西部地震	日南	直角方向	17	0.1
3	2000 年鳥取県西部地震	赤碕	直角方向	38.6	0.21
4	2004 年新潟県中越地震	小千谷	進行方向	14.8	0.11
5	2004 年新潟県中越地震	小出	直角方向	17	0.13
6	2004 年新潟県中越地震	津南	直角方向	38.3	0.05
7	2005 年福岡県西方沖地震	鎮西	直角方向	37.1	0.04
8	2008 年岩手・宮城内陸地震	川尻	直角方向	34	0.05
9	2011 年福島県浜通り地震	日立	直角方向	39.5	0.31
10	2011 年福島県浜通り地震	小野	直角方向	37.5	0.17

の最大変位や累積エネルギーが挙げられる．また，地震動の性質の表現をロバストなものとするために， $\mathbf{x}$ の評価に用いる非線形モデルのパラメタにばらつきを与え，地震動 $f(t)$ に対する応答値 $\mathbf{x}$ の確率分布 $p(\mathbf{x})$ を得る．構造パラメタのばらつきに対する地震応答の感度は地震動の性質に応じて異なり，したがって $p(\mathbf{x})$ の形状が変化するため，単一の応答値を用いる場合に比較してより詳細に地震動特性の差異を表現できると考えられる．

今，地震動 $f(t)$ と $g(t)$ に対して，構造物応答の確率分布 $p(\mathbf{x})$ ， $q(\mathbf{x})$ が対応付けられているものとする．このとき， $f(t)$ と $g(t)$ の非類似度を定量化するために，次式に示すJSダイバージェンス $D_{JS}(p, q)$ を用いる．

$$D_{JS}(p, q) = \frac{1}{2} D_{KL}(p, M) + \frac{1}{2} D_{KL}(q, M) \quad (1)$$

ここで M は

$$M(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} p(\mathbf{x}) + \frac{1}{2} q(\mathbf{x}) \quad (2)$$

として定義される確率分布であり，また $D_{KL}(p, q)$ は次式で定義される，確率分布間のKLダイバージェンスである．

$$D_{KL}(p, q) = \sum p(\mathbf{x}) \log \frac{p(\mathbf{x})}{q(\mathbf{x})} \quad (3)$$

ダイバージェンス関数とは一般に，微小距離で多様体上の厳密なリーマン距離と一致する関数であり， $D_{JS}(p, q)$ や $D_{KL}(p, q)$ は確率分布のなす多様体上でのダイバージェンス関数である． $D_{JS}(p, q)$ は， $D_{KL}(p, q)$ が有する非対称性などの難点を克服するため， $D_{KL}(p, q)$ を対称化・平滑化したものである²⁾．

(2) クラスタリング手法

ある集合をクラスタ化する手法は一般に，非類似度の最も小さいクラスタ同士を併合する過程を反復していく階層型手法と，空間上の n 個の中心点からの距離に基づいて n 個のクラスタを一度に構築する非階層型手法に大

別される．個々の地震動に対して座標値が与えられていない本手法では，要素間の非類似度のみを用いてアルゴリズムを構築できる，以下の手続きからなる階層型手法³⁾を採用する．

- 各要素を1つのクラスターとみなす．
- 非類似度が最小となるクラスターの対を併合する．併合の結果，クラスターが所定の数になれば終了し，そうでなければ次のステップへ進む．併合によって生じた新しいクラスターと，他のクラスターとの間の非類似度を評価し，ステップii)へ戻る．

本研究では，地震動間の非類似度をJSダイバージェンスによって評価し，2つ以上の要素からなるクラスター同士の非類似度は群平均法によって評価する．

3. 観測地震動記録群への適用

(1) 解析条件

上記のクラスタリング手法の妥当性を確認するために，地震観測記録群 10 波形に対して本手法を適用した．クラスタリングの対象とした観測記録群を表-1に整理する．これらの記録は，K-NETの公開するデータから以下の条件を満たすように選定したものである．

- ・ Mw6.4以上の内陸地殻内地震
- ・ 断層破壊の進展方向に対し直角に位置する観測地点
- ・ 観測地点の表層固有周期が0.25s以下

これらの条件を満たした上で，震源距離が20km未満の地点における記録 (ID 1, 2, 5) と，30-40kmにある地点における記録 (ID 3, 6, 7, 8, 10) の，大きく近地・遠地の2つのグループからなる観測記録群を設定した．また，これらとは別に，条件の異なる以下の2波形を混入させた．

- ・ 断層破壊の進展方向にある地点の観測記録 (ID 4)
- ・ 表層固有周期が他より長い地点の観測記録 (ID 9)

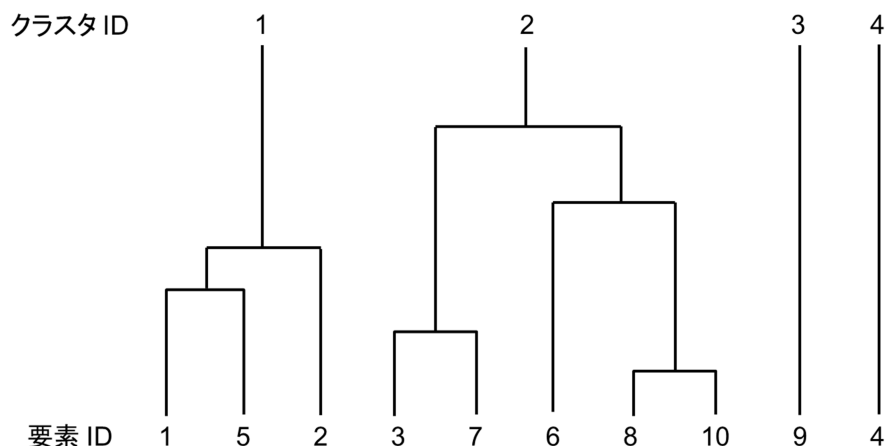


図 - 1 クラスタ形成過程を示すデンドログラム. 図の下部から上部へと, クラスタ数が4になるまでの要素の併合の進展を表している.

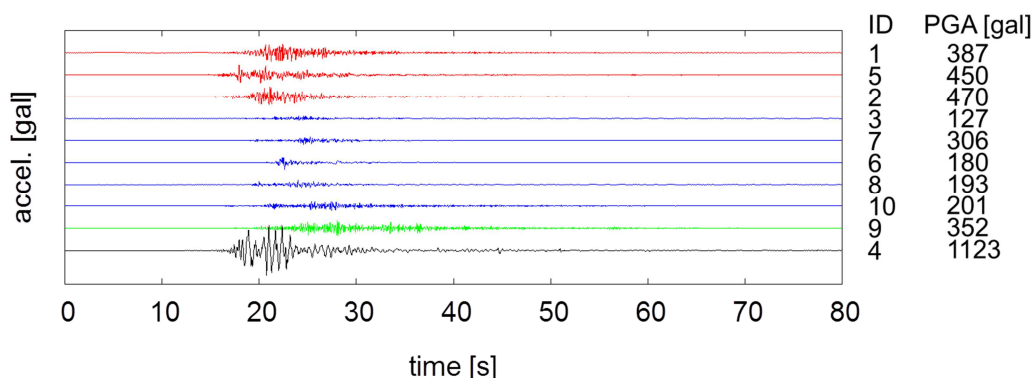


図 - 2 クラスタリング対象とした観測記録群の時刻歴波形. 図 - 1中の4クラスタへの分類に対応して, 波形を色分けしている.

個々の波形群の特性はバイリニア1自由度系に与える最大変位と履歴吸収エネルギーの2値の結合確率分布によって評価した. 地震動間の非類似度を式(1)によって定義し, 群平均法による階層型クラスタリング手法を適用した.

(2) 解析結果

図-1に, クラスタ数が4となるまでのクラスタ形成過程を示す. 図からは, クラスタの併合が進行するに連れ, 要素ID8と10の波形, 3と7の波形など, 震源距離の値が類似した波形同士がグループ化されていく様子が確認できる. 最終的には, 近地波形群(要素ID1, 5, 2), 遠地波形群(要素ID3, 7, 6, 8, 10), 断層との位置関係やサイト特性の異なる特異な2種の独立した波形(要素ID9および要素ID4)という, 波形の属性別に分類された結果となっている. また, 図-2に示す各観測地震動記録の時刻歴波形からも, ID 4の波形は他の波形と比べて振幅が大きく特異な波形であることや, 最大振幅や経時特性のよく似た波形同士がグループ化されていることが確認できる. このように, ディレクティビティや距離減

衰, サイト増幅といった, 地震動特性に大きな影響を与える要素に基づいてクラスタが形成されるという結果になっており, 提案手法により地震の属性の違いに応じた適切なクラスタが形成されていることが分かる.

4. 波形数を増やした場合の検証

次に, 地震動波形の性質がよりばらついた, 多量のデータ群に対する本手法の適用性を検証するために, 表 - 1に示した各観測記録群に位相変調をランダムに与え, 波形数を10倍に増やした検証を行った. 位相変調は, 各周波数成分の位相に対して独立に 最大5%の範囲でランダムな値を加えることにより行った. 本操作によって得られる波形群の例を図 - 3に示す. 波形の経時特性に大きな変化は加わっていないものの, 最大振幅には明らかな差が見られ, 波形の性質に差異が生じていることが分かる.

このようにして得られた,

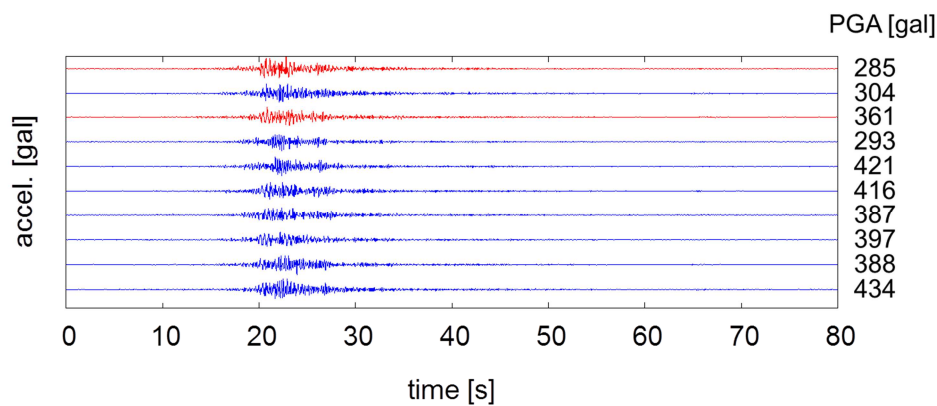


図 - 3 観測記録 (ID 1) に対する位相変調から生成された波形群. 表-2 に示す, 4 クラスタへの分類結果に従い波形を色分けした (赤: クラスタ ID2, 青: クラスタ ID3) .

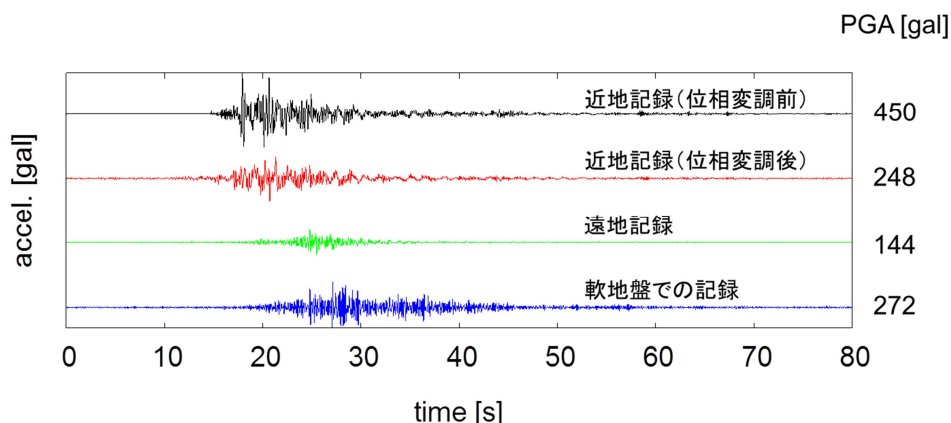


図 - 4 位相変調前後の近地記録 (波形 ID 5) と近地記録 (波形 ID 7) , 軟地盤での観測記録 (波形 ID 9) の時刻歴波形例の比較. 位相変調により, 近地記録の有するパルス性が失われ PGA が小さくなり, 遠地記録や軟地盤での記録に形状が近づいている.

表 - 2 位相変調によって得られた 100 波形を 4 クラスタに分類した際の構成.

クラスタID	クラスタを構成する波形の属性種別				最大占有率 Ω [%]
	α (近地地震)	β (遠地地震)	γ (軟地盤)	δ (ディレクティビティ)	
1	3	50	5	0	862
2	7	0	5	0	583
3	20	0	0	1	952
4	0	0	0	9	100

- α : 近地記録群 30波
 - β : 遠地記録群 50波
 - γ : 地盤が相対的に軟らかい地点の記録 10波
 - δ : ディレクティビティ効果を受けた記録 10波
- の4種の属性 (以降では, 簡単のために各属性を文頭に付したギリシャ文字によって称する) から構成される全 100波に対し, 前節と同様の条件によるクラスタリングを実施した.

100波形を階層型クラスタリングによって最終的に4つのクラスタに分類した際の, 各クラスタの構成を表 - 2 に示す. 表には, 各クラスタが単一の属性で占められている割合を表す指標として, 以下のように定義した最

大占有率 $\Omega_{\max}$ を併記している.

$$\Omega_{\max} = \max_{i=\{\alpha, \beta, \gamma, \delta\}} \left\{ \frac{100 \cdot n_i}{N} \right\} \quad (4)$$

ここで, N , n_i はそれぞれクラスタの全要素数, クラスタ内のある属性の波形数を表す. 表 - 2 からは, ID 2 のクラスタ以外は $\Omega_{\max}$ が高い値を示しており, 属性別のクラスターが形成されていることが分かる.

一方で, ID 1 や 2, 3 のクラスタには属性 α (近地記録群) の波形と属性 β (遠地記録群), 属性 γ (軟地盤での記録) の波形が混在している. この理由を検証するために, 位相変調前後の近地記録の例と, 遠地記録, 軟地盤での記録の例を比較した結果を図 - 4 に示す. 位相変調

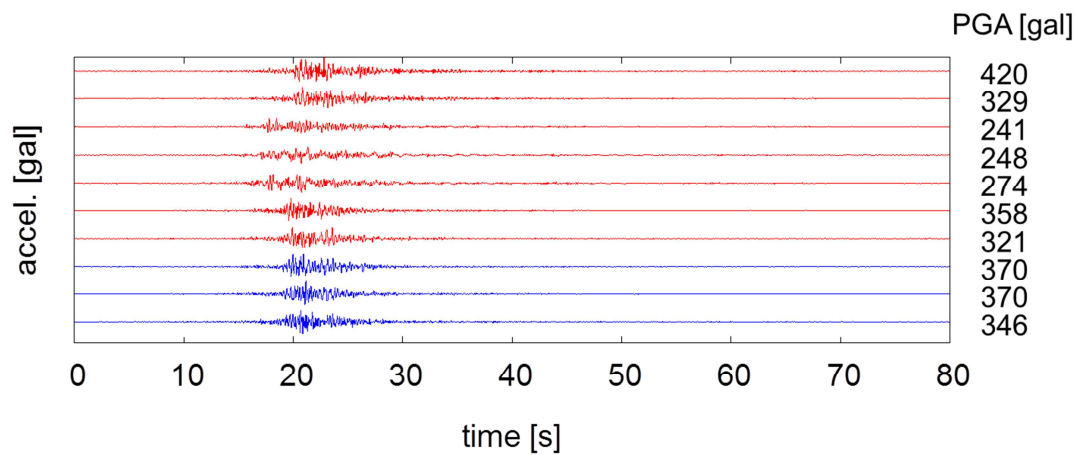


図 - 5 近地記録群の中で、クラスタ 2 に分類された波形群（赤）とクラスタ 1 に分類された波形群（青）。2 つのクラスタに分かれているが、経時特性や PGA に明瞭な差異は見られない。

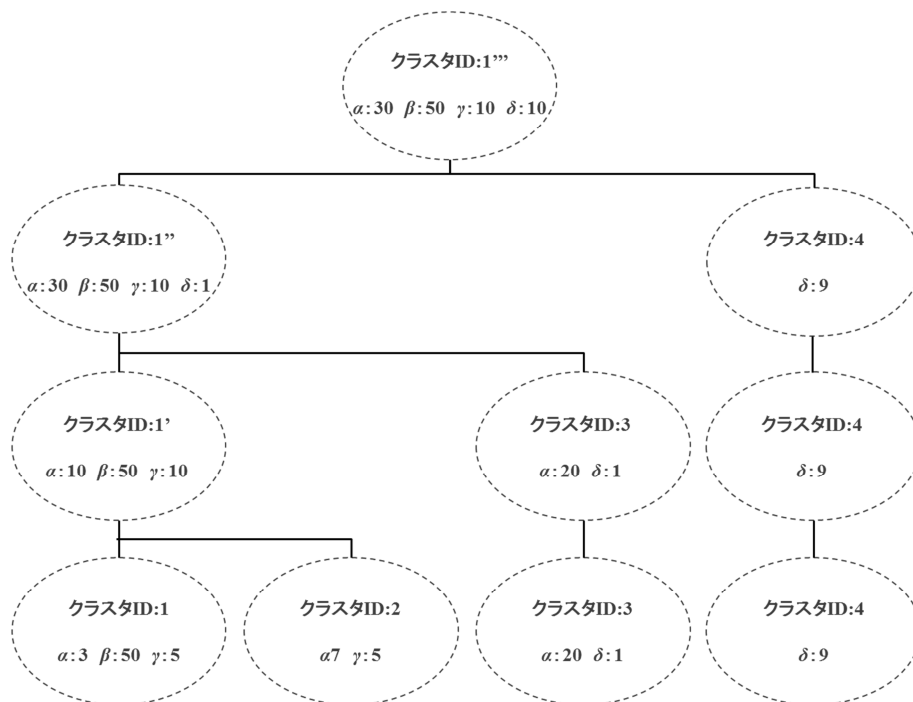


図 - 6 位相変調波形群のクラスタ形成過程を示すデンドログラム。

前の近地記録は、時刻20s前後でパルス性の成分を有していることに対して、位相変調後の波形はそのような成分が失われている。位相にランダムな変調を与えることは、地震動波形の群遅延時間がランダムなものとなり、波形をパルス性のないホワイトノイズに近づけることを意味しているため、このような波形形状の変化は自然な結果である。位相変調のこのような性質により、近地記録の波形は最大加速度が小さく継続時間の長い、遠地記録や軟地盤の記録に形状が近づいている。このように、位相変調による近地記録のパルス性の喪失が、クラスタ ID 1や2, 3において近地記録と遠地記録、軟地盤の記録が混在した理由であると考えられる。

また、近地記録はクラスタ1と2, 3に分かれているが、図-3や図-4、図-5に示すように、近地記録間や他の近地

記録と他の属性の波形間に明瞭な差異は見られないため、クラスタ数は実質的にはより少ない数が適切であると考えられる。そこで、階層型手法によりクラスタ数を更に減らしていくと、図-6に示すデンドログラムのように、一部の近地記録群と遠地記録群、軟地盤での記録群というクラスタが形成され、残った近地記録群と（クラスタID 3）とディレクティビティ効果を受けた記録群（ID 4）はそれぞれ独立したクラスタが得られる結果となった。これは、前述のように位相変調に伴い、近地記録としての地震動特性を失った波形が、遠地記録や軟地盤の記録や同一のクラスタに併合された結果と解釈できる。また、ディレクティビティ効果を受けた波形群が最後まで独立したクラスタとして識別されている結果は、ディレクティビティ効果が他の属性よりも相対的に地震動波形に大

きな影響を与えていることを示唆している。

5. まとめ

本稿は、著者らの提案した地震動記録のクラスタリング手法の妥当性の確認を目的として、観測地震動記録群のクラスタリングを実施した。震源距離において近地記録と遠地記録の2種に大別されて観測記録群に加え、観測地点の地盤特性や震源効果が他と異なる特異な波形を混入させた全10波形のクラスタリング結果からは、特異な波形が識別され、属性別に分類された適切なクラスタが生成されることが確認できた。また、位相変調により波形の数を増やした検証からは、おおむね波形の属性に応じたクラスタが形成された一方で、近地記録と遠地記録、軟地盤での波形が同一のクラスタに分類されたケースも見られた。これは本稿で波形の数を増やすために採った手法である、波形の位相変調の性質によるものであると推察される。また、ディレクティブ効果を受けた波形群はそうした波形に与えられた乱れによらず独立したグループとして識別されたことから、ディレクティブ効果は他の属性よりも地震動特性に与える影響

が相対的に大きなものであることが示唆された。

今後は、実際の耐震性能照査を想定した、観測記録の参照や強震動シミュレーションから得られる設計地震動の集合に対して本手法を適用することにより、適切な設計地震動を設定するための知見を得たいと考えている。また、本研究で目指す、入力地震動群の性質を反映する代表波の合成手法として、本手法の利用法を検討していく。

謝辞：本研究は、JSPS科研費24360177、15K18106の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 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, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.508-517, 2014.
- 2) Fuglede, B. and Topsøe, F.: Jensen-Shannon divergence and Hilbert space embedding, *Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory*, pp.31-36, 2004
- 3) 金田行雄, 笹井理生, 古橋武: 統計・多変量解析とソフトコンピューティング, 共立出版, 2012

APPLICATION OF CLUSTERING SCHEME OF GROUND MOTIONS USING JS DIVERGENCE TO SEISMIC RECORDS

Takashi MIYAMOTO and Riki HONDA

When a number of ground motions having different characteristics are considered as candidates of design input motions, it is difficult to select or synthesize a representative wave among those waves. In order to avoid this problem, a scheme for clustering ground motions considering their effects on nonlinear structural response values has been proposed by the authors. In this paper, we verified the proposed scheme through its application to a set of seismic records. Numerical results show that the scheme classifies seismic records according to their properties such as source distance and site amplification, which supports validity of the scheme.