

地震動特性の特徴ベクトルを用いた 類似波形の抽出手法

久世 益充¹・能島 暢呂²

¹正会員 岐阜大学准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

E-mail:kuse@gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

E-mail:nojima@gifu-u.ac.jp

地震動の振幅・周期・経時特性を表す特徴量を次元縮約した特徴ベクトルを用いて、任意の地震動波形に類似した波形抽出方法について検討した。具体的には、経時特性として Husid plot に基づく 98 次元特徴ベクトル、振幅・周期特性として減衰定数 5% の速度応答スペクトルに基づく 101 次元特徴ベクトルをそれぞれ定義した。特徴ベクトルを用いて、波形相互の非類似度を評価した。振幅・周期特性の評価では、振幅特性を考慮可能な重みを設けることで、速度応答スペクトルのピークを重視した非類似度評価を実現した。2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いたケーススタディでは、任意の基準特徴ベクトルに対する非類似度評価を行い、非類似度の最小化に基づく波形抽出手法の妥当性について考察した。

Key Words: feature vector, Husid plot, velocity response spectrum, the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, dissimilarity

1. はじめに

筆者らは、地震動の特徴量抽出を目的に、地震動の振幅特性・周期特性・経時特性を的確に評価可能な特徴ベクトルを提案した^{1,2)}。さらに、時刻歴波形を次元縮約した特徴ベクトルに含まれる種々の地震動特性について考察し、その有用性について検討した。一方、我が国では全国規模の地震動観測網³⁾が整備されており、観測された膨大な波形記録を容易に入手できる。この膨大な波形データベースを活用し、地震動分析や被害との関連などの分析・解析を実施するには、目的の地震動特性を有した波形記録を容易に抽出できるようなデータ整備が望ましい。田中・高田⁴⁾は、マグニチュードと震源距離をパラメータとした波形インベントリを整備し、これを用いた地震動予測法を提案した。宮本・本田⁵⁾は、地震動波形の特徴量として、構造物の非線形応答に基づいて地震動波形をクラスター化する手法を提案した。具体的には、非線形応答値の確率分布に基づいて、波形間距離を JS ダイバージェンスによって定量化し、地震動波形のクラスタリングを提案した。

筆者らも、経時特性に着目した地震動波形のクラスタリング⁶⁾について検討したが、地震動の工学的特徴を的

確に分類するには、振幅・周期・経時特性を捉えた評価ができることが重要である。そこで本研究では、これらの工学的特徴を有した特徴ベクトル^{1,2)}を活用して、多数の波形群からなるデータベースより任意の地震動特性を有した波形抽出方法について基本的な検討を行い、手法の妥当性について考察した。

2. 特徴量の抽出

(1) 経時特性の特徴量抽出

経時特性の特徴抽出には、水平成分の 1 成分ごとの地震動加速度波形 $A(t)$ の全パワーで正規化された累積パワー曲線(Husid plot) $P_c(\tau)$ を用いる。

$$P_c(t) = \frac{100 \int_0^t A^2(\tau) d\tau}{\int_0^{t_{\text{end}}} A^2(\tau) d\tau} \quad (1)$$

ただし t_{end} は全記録長である。

式(1)の $P_c(\tau)$ を 1% 刻みで離散化し、次式により 99 個のパーセンタイル値を求める。

$$t_i = P_c^{-1}(\tau) \quad (i=1, \dots, 99) \quad (2)$$

基準時間を t_1 として、 t の t_1 に対する時間差 d_j を定義して 98 次元のベクトル $\mathbf{d}$ とする。

$$\mathbf{d} = \{d_j\} = \{d_1, \dots, d_{98}\} \quad (3)$$

$$d_j = t_{j+1} - t_1 = P_c^{-1}(j+1) - P_c^{-1}(1) \quad (j=1, \dots, 98)$$

(2) 振幅・周期特性の特徴量抽出

振幅・周期特性の特徴抽出には、線形 1 自由度系の固有周期 $T=0.1 \sim 10$ s の区間を対象に、対数軸上で 100 等分した $N=101$ 点の周期を用いる。

$$T_i = 0.1 \times 10^{\left(\frac{2}{100}\right)(i-1)} \quad (i=1, \dots, 101) \quad (4)$$

式(4)における 101 点の周期 T_i ごとに算出した、減衰定数 5% の速度応答スペクトルを $S_v(T_i)$ として、101 次元の特徴ベクトル $\mathbf{Sv} = \{S_v(T_1), \dots, S_v(T_{101})\}$ とする。

(3) 非類似度の算出

特徴ベクトル $\mathbf{d}$, $\mathbf{Sv}$ を用いて、波形間の非類似度を算出する。基準となる特徴ベクトルを $\mathbf{d}_a$, $\mathbf{Sv}_a$, 任意波形の特徴ベクトル $\mathbf{d}_b$, $\mathbf{Sv}_b$ として、経時特性の非類似度は、ユークリッド距離を用いて評価する。

$$D_d(a, b) = \|\mathbf{d}_a - \mathbf{d}_b\| = \sqrt{\sum_{j=1}^{98} (d_{aj} - d_{bj})^2} \quad (5)$$

振幅・周期特性の特徴ベクトル $\mathbf{Sv}_a$, $\mathbf{Sv}_b$ は、振幅特性を考慮可能な非類似度を算出する。ユークリッド距離を参考に、後述の重み係数 w_i を導入する。次式に示すように、本研究では、 $S_v(T_i)$ またはその常用対数 $\log S_v(T_i)$ の 2 ケース算出することとした。

$$D_{Sv}(a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^{101} (S_{v_{ai}} - S_{v_{bi}})^2 w_i^2} \quad (6)$$

$$D_{\log Sv}(a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^{101} (\log S_{v_{ai}} - \log S_{v_{bi}})^2 w_i^2} \quad (7)$$

w_i は重み係数であり、次式に示すように基準特徴ベクトル $\mathbf{Sv}_a$ の振幅の大きさより定義する。

$$w_i = \frac{(S_{v_{ai}})^k}{\sum_{i=1}^{101} (S_{v_{ai}})^k} \quad (8)$$

$k=0$ は重みを考慮せず、全周期を等しい重みで距離を算出する。 k が大きな値であるほど、振幅のピークを重視した重み係数を与える。なお $k=1$ の場合は、式(7)は KL ダイバージェンス (Kullback-Leibler divergence) と同等の形式となるが、KL 情報量においては物理量の確率密度関数を対象とするのに対して、式(7)では物理量自体を扱っており、意味合いが異なる。また、 $k=0$ 以外の場合は、

式(6), (7)の非類似度はいずれも対称性を満たさず、

$$D_{Sv}(a, b) \neq D_{Sv}(b, a), D_{\log Sv}(a, b) \neq D_{\log Sv}(b, a) \text{ となるため}$$

「距離の公理」を満たさない。あくまで基準となる $\mathbf{Sv}_a$ から見た場合の非類似度を定義するものであり、非対称性が問題になることはない。このため、距離の対称性を保証するような指標 (例えば KL ダイバージェンスを改良した JS ダイバージェンス (Jensen-Shannon divergence) ⁹⁾ にあたる指標) は定義しない。

式(6)~(8)により、振幅・周期特性は、速度応答スペクトルの振幅の大きな周期帯を重視して非類似度を算出する。さらに、係数 k により重みの程度を決定する。

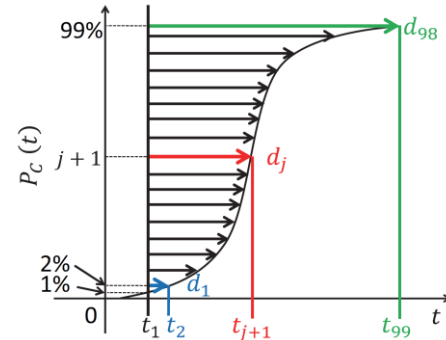


図-1 経時特性を表す特徴ベクトル 1) の概念図

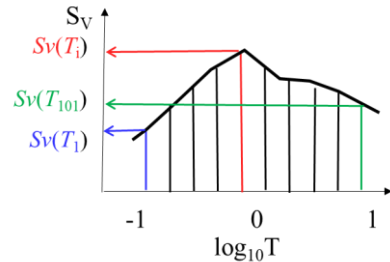


図-2 振幅・周期特性を表す特徴ベクトル 2) の概念図

3. 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録における特徴ベクトルの非類似度の比較

(1) 観測記録の概説

2011 年東北地方太平洋沖地震において防災科学技術研究所 K-NET⁹⁾で観測された 691 地点の波形記録(EW 成分)を用いて $\mathbf{d}$, $\mathbf{Sv}$ を算出し、波形間の非類似度を比較した。波形記録より算出した $\mathbf{d}$, $\mathbf{Sv}$ を波形インベントリーとして、波形選定した

図-3 に、 $\mathbf{d}$, $\mathbf{Sv}$, $\log \mathbf{Sv}$ の箱ひげ図を示す。同図では、全記録の中央値、ボックス幅で第 1 四分位点、第 3 四分位点を示し、ボックス外の破線の両端は四分位点範囲の 1.5 倍以内のデータ中の最大・最小値であり、外れ値は

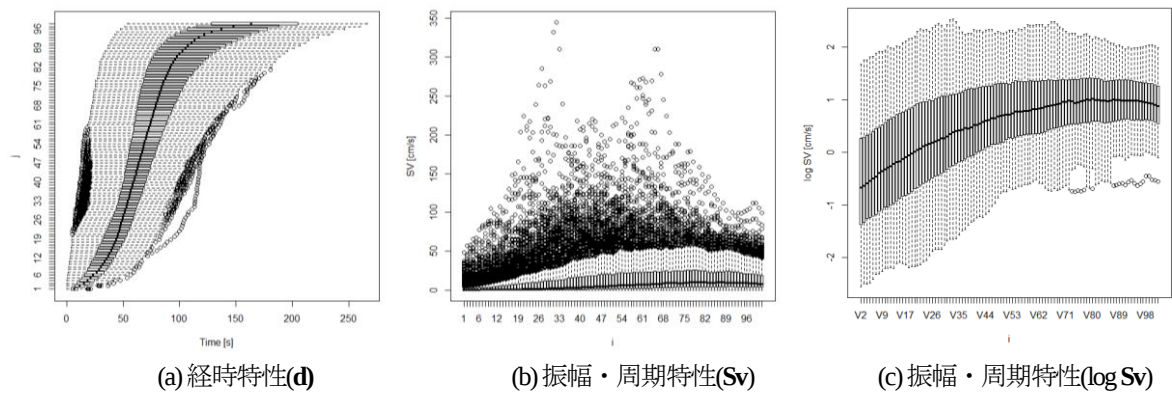


図-3 2011年東北地方太平洋沖地震の波形記録(EW成分)の特徴ベクトルを用いた箱ひげ図

丸印でプロットされている。図-3(a)に示すように、経時特性の特徴ベクトル $\mathbf{d}$ の幅が広いことが確認できる。同様に図-3(b), (c)に示す振幅・周期特性の特徴ベクトル $\mathbf{Sv}$ の幅も非常に広く、波形により速度応答値が大きく異なるため、図-3(b)の算術軸で比較すると、外れ値が多い傾向が見られる。

(2) 非類似度の算出と特徴ベクトルの比較

経時特性、振幅・周期特性の特徴ベクトルより非類似度を算出し、非類似度 $D_d(a, b)$, $D_{Sv}(a, b)$, $D_{\log Sv}(a, b)$ が低い特徴ベクトルを抽出した。その一例として、NIG014(K-NET 三条)を基準特徴ベクトル $\mathbf{d}_a$, $\mathbf{Sv}_a$ として非類似度を比較した結果を示す。加速度波形を図-4に示す。2011年東北地方太平洋沖地震では、振幅の時間変動が特徴的な波形記録が観測されているが、ここでは、地震動が長く、比較的標準的な波形記録とした。

図-4 の波形記録より算出した特徴ベクトル $\mathbf{d}_a$ より、経時特性の非類似度より波形選定した結果を図-5に示す。同図では、黒線で示した NIG014 の特徴ベクトルに対して、類似度の高い上位10波形を示したが、上位7波形は NIG014 にほぼ等しい経時特性であることが確認できる。

次に、振幅・周期特性の基準特徴ベクトル $\mathbf{Sv}_a$ より、非類似度評価により波形選定した。図-6に、NIG014の重み係数 w_i を、係数 $k=0.0, 0.5, 1.0, 2.0$ の4ケースを比較して示す。 w_i は $\mathbf{Sv}_a$ より算出するため、 $k=1$ の形状は、図-7黒線で示す NIG014 の $\mathbf{Sv}_a$ と同じ形状となる。

図-7, 図-8に波形選定結果を示す。同図では、図-6に前述した係数 $k=0.0, 0.5, 1.0, 2.0$ の4ケースとして、各ケース別の上位5波形を示した。図-7(a), 図-8(a)は、振幅特性の重みを考慮しないので、黒線で示した基準特徴ベクトル $\mathbf{Sv}_a$, $\log \mathbf{Sv}_a$ (NIG014の速度応答スペクトル)の波形形状に最も類似した AKT008 が選定され、順位が下がると、徐々に NIG014 の波形形状と差が見られる傾向を確認できる。 $\log \mathbf{Sv}_a$ を用いた図-8(a)では、 $\mathbf{Sv}_a$ を用いた図-7(a)

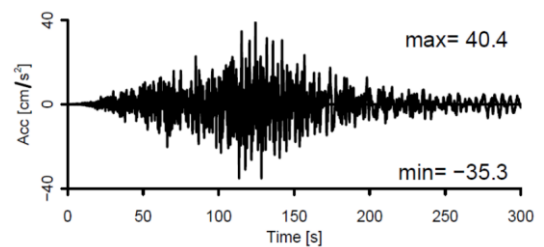


図-4 加速度波形(NIG014, EW成分, K-NET 三条)

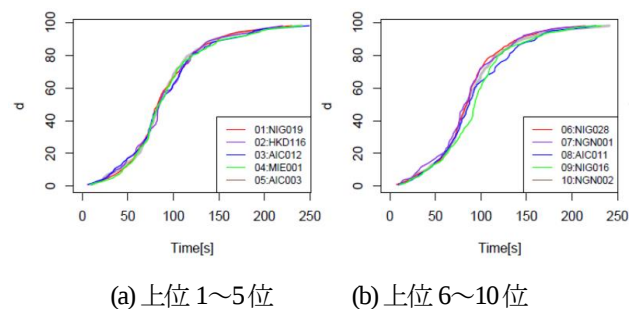


図-5 経時特性の特徴ベクトルによる波形選定結果

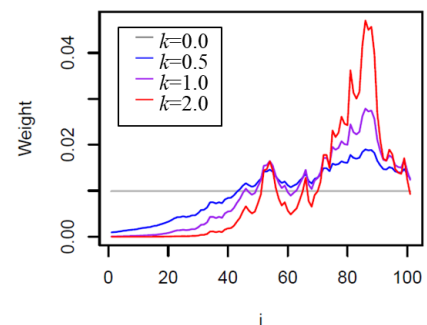


図-6 重み係数の比較(NIG014)

に対して振幅の変動が緩やかであるが、図-7(a)と同様に基準特徴ベクトル $\mathbf{Sv}_a$, $\log \mathbf{Sv}_a$ に類似した波形が上位となっている。

重みを考慮した図-7(b), (c), (d)では、図-6に示すように、 w_i が大きな $i=55, 90$ 付近(それぞれ固有周期 1.2 秒, 6 秒付近)を重視して波形選定されている。また、 k の増加に従い、 $i=90$ 付近にある振幅のピークに近い波形が選定され

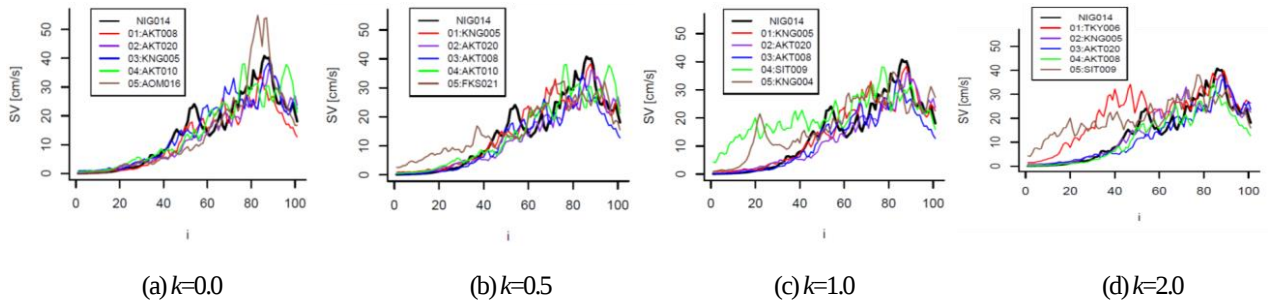


図-7 振幅・周期特性の特徴ベクトル S_v による波形選定結果の比較(NIG014. 図中の番号は距離の近い順位)

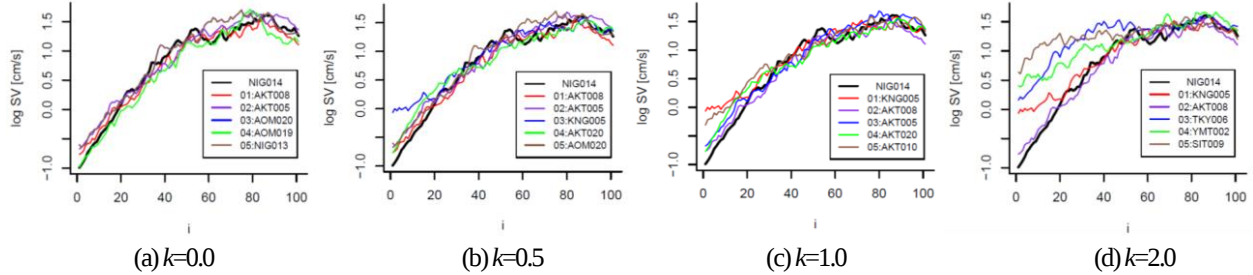


図-8 振幅・周期特性の特徴ベクトル $\log S_v$ による波形選定結果の比較(NIG014. 図中の番号は距離の近い順位)

るため、最も距離に近い波形は、図-7(b)($k=0.5$)、図-7(c)($k=1.0$)では KNG005 が選定され、図-7(d)($k=2.0$)では TKY006 が選定された。ただし、図-7(d)では、 i が 50 未満(固有周期 0.96 秒未満)では大きな差が見られる、図-7(b), (c)でも、非類似度が大きくなる下位の波形は、 $i=90$ 付近で S_{v_a} に近い傾向を有した波形が選定されているが、上位の波形と比べ、振幅の小さな固有周期帯での違いが見られる。 $\log S_{v_a}$ を用いた図-8(b), (c), (d)でも同様であり、 i が 55~90(固有周期 1.20~6.03 秒)の範囲では $\log S_{v_a}$ に類似した波形が選定されており、それより低い固有周期では、 $\log S_{v_a}$ の形状と異なる波形が選定された。

係数 k の違いによる波形選定について考察するため、基準特徴ベクトル d_a , S_{v_a} が異なる場合の波形選定結果を図-9に示す。同図では、最も距離の近い波形を k 別に示した。

図-9(a)の AKT003 は、黒線で示すように、 $i=70$ 付近(固有周期 2.4 秒付近)と $i=85$ 付近(固有周期 4.79 秒付近)にピークが見られる。 S_v を見ると、 $k=0.0, 0.5$ では SZO008, $k=1.0, 2.0$ では SZO011 が選定されており、どちらも $i=70$ 付近に同程度のピークを有した特徴ベクトルである。SZO011 は AKT003 と同様に $i=85$ 付近にも振幅のピークが見られることから、 k を大きくしたことで、振幅のピークを重視した選定が行われている。 $\log S_v$ で見た場合は、振幅の変動が緩やかであるため、 k の値を変化させたどのケースにおいても、 $i=70\sim85$ 間で類似傾向が見られる SZO009 が選定された。

図-9(b)は、 $i=40$ 付近(固有周期 0.60 秒付近)、 $i=60$ 付近(固有周期 1.51 秒付近)に大きなピークが見られる、特徴的な傾向を有している。 S_v で選定すると、対象の 691 波

形で類似の特徴ベクトルが限定されるため、 $k=0.0$ ではピークを重視した $k=0.5, 1.0, 2.0$ では、 $i=60$ 以上で差が見られるが、振幅のピークの特徴が類似した波形が選定された。 $\log S_v$ で評価すると、 k の違いで選定される波形は異なるが、 S_v で評価した場合と同様、振幅のピーク付近の固有周期帯が概ね類似している特徴ベクトルが選定された。

図-9(c)の MYG012 は、 $i=35$ 付近(固有周期 0.48 秒付近)に大きなピークが見られる。他のケースと同様、 S_v で比較すると、 k の増加に伴い、 $i=35$ 付近のピークに特徴が見られる特徴ベクトルを選定していることがわかる。一方、 $\log S_v$ で評価すると、 k の値にかかわらず、TCG014 が選定されている。MYG012 の速度応答スペクトルの最大値は 187.0cm/s、TCG014 は 345.0cm/s と大きな差があることから、 S_v で評価した場合は距離が大きいが、常用対数にすることでピーク付近の差が小さくなり、 k の値にかかわらず、特徴ベクトル全体の形状が類似したものと選定された。

全ての波形記録に対して、係数 k 別に見た $D_s(a, b)$, $D_s(b, a)$ の比較を図-10, $D_{\log S_v}(a, b)$, $D_{\log S_v}(b, a)$ の比較を図-11 にそれぞれ示す。図中、縦軸は $D_s(a, b)$ または $D_{\log S_v}(a, b)$ 、横軸は $D_s(b, a)$ または $D_{\log S_v}(b, a)$ である。図-10(a), 図-11(a)は $k=0$ であるため、2. で前述したように「距離の公理」を満たしており、非類似度が対称に分布していることが確認できる。一方、振幅特性の重みを考慮した図-10(b), 図-11(b)では対称性を満たさないため、45 度線を中心にはばらつきが見られる。係数 k をさらに大きくした図-10(c), (d), 図-11(c), (d)ではこのばらつきの傾向がより顕著になることが確認できる。

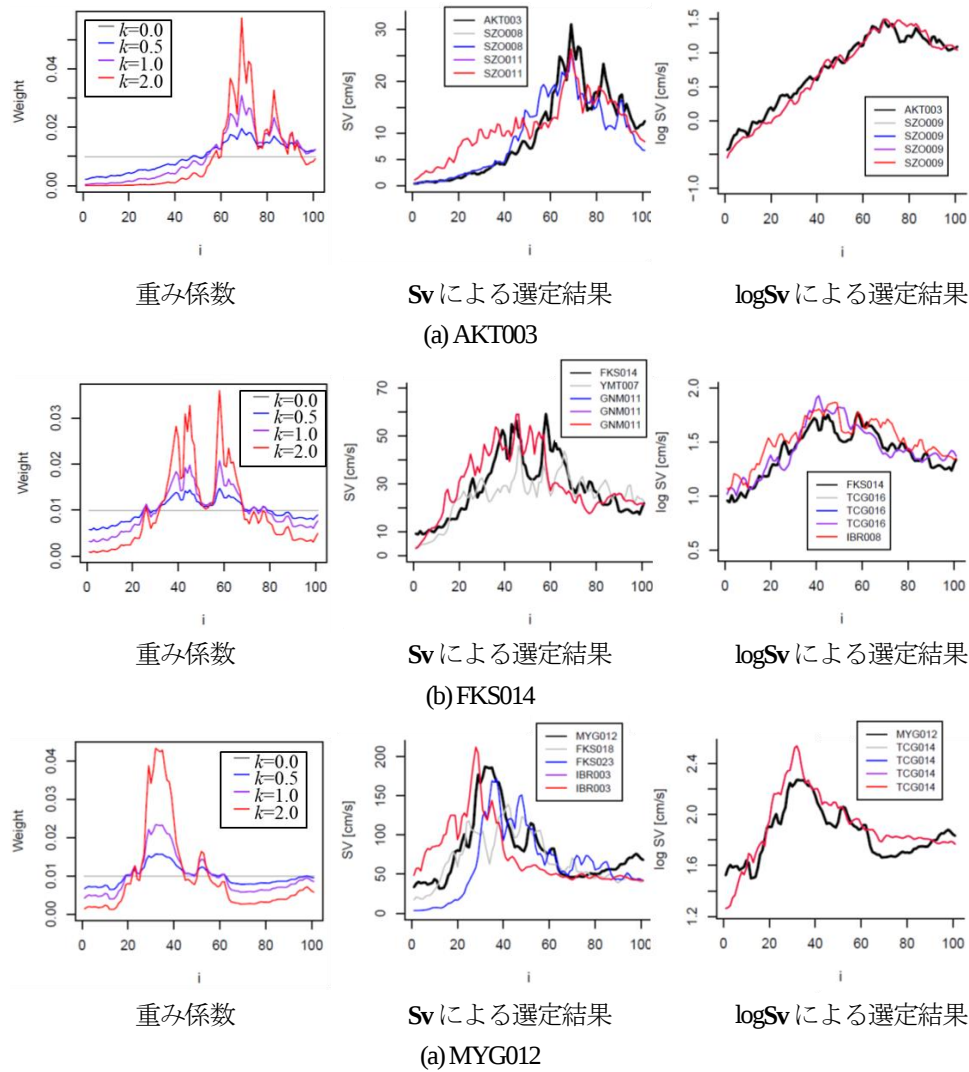


図-9 振幅・周期特性の特徴ベクトルによる波形選定結果の比較

(3) 非類似度評価により抽出した波形の比較

経時特性、振幅・周期特性の特徴ベクトルより非類似度をそれぞれ算出し、両者を比較した結果を図-12に示す。基準特徴ベクトル $\mathbf{d}_a$, $\mathbf{Sv}_a$ は前出図-4に示したNIG014である。図-12左には、縦軸に経時特性の非類似度 $D_t(a, b)$ 、横軸に振幅・周期特性の非類似度 $D_{Sv}(a, b)$ または $D_{\log Sv}(a, b)$ をプロットし、番号は各ケースにおいて、 $\mathbf{Sv}_a$ に近い順位を示した。図-12右には、上位5波形の特徴ベクトル $\mathbf{d}$ を示した。図-12左では、縦軸、横軸に近いほど、それぞれ基準特徴ベクトル $\mathbf{d}_a$, $\mathbf{Sv}_a$ に近い特徴を有している。図-12では、振幅・周期特性の評価の違い ($\mathbf{Sv}$ または $\log \mathbf{Sv}$)、 k の値が異なるそれぞれの条件で非類似度を算出し、比較したが、どのケースにおいても、AKT008, AKT020, KNG005 は、非類似度 $D_{Sv}(a, b)$, $D_{\log Sv}(a, b)$ が比較的小さく、 $D_t(a, b)$ も小さいことから、NIG014に類似した波形であると言える。なお、振幅のピークを

重視し、 $k=1.0$ または 2.0 で評価した場合は、KNG005, AKT008, TKY006 が類似した波形であった。

4. まとめ

本研究では、筆者らが提案した特徴ベクトルを用いて、波形インベントリ構築のための基礎的な検討を行った。以下に結果を要約する。

- 1) 経時特性を表す特徴ベクトルとして正規化累積パワー曲線に基づいた98次元特徴ベクトル、振幅・周期特性を表す特徴ベクトルとして速度応答スペクトルに基づく101次元特徴ベクトルをそれぞれ用いて、基準特徴ベクトルに対する非類似度を評価する手法を提案した。
- 2) 非類似度の評価は、経時特性はユークリッド距離

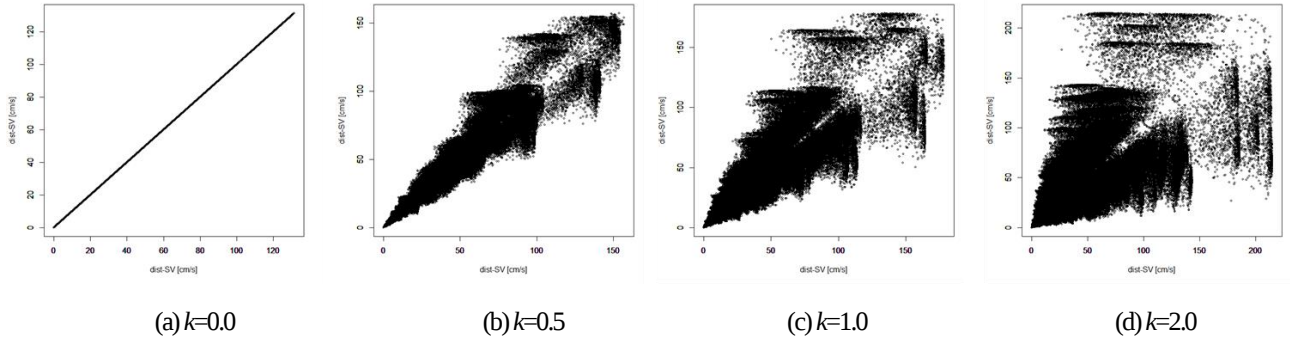


図-10 係数 k の違いによる振幅・周期特性の非類似度 $D_s(a, b)$ の比較

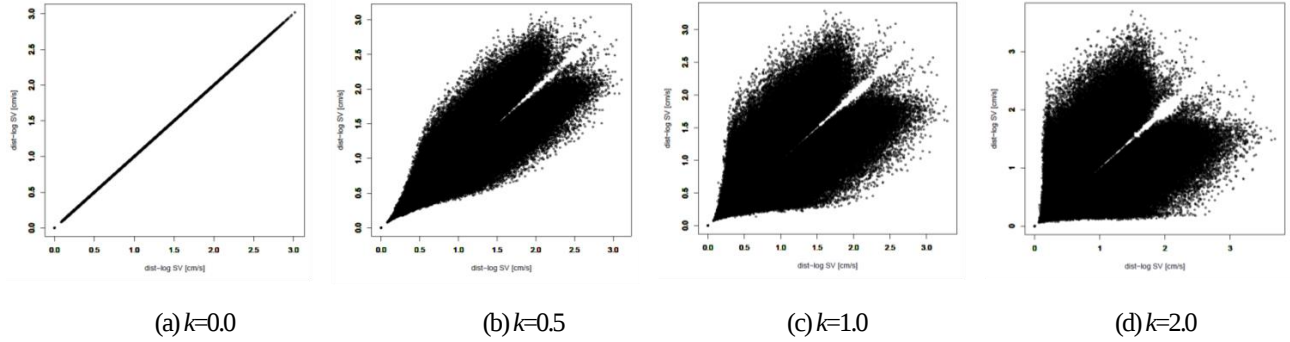


図-11 係数 k の違いによる振幅・周期特性の非類似度 $D_{\log}(a, b)$ の比較

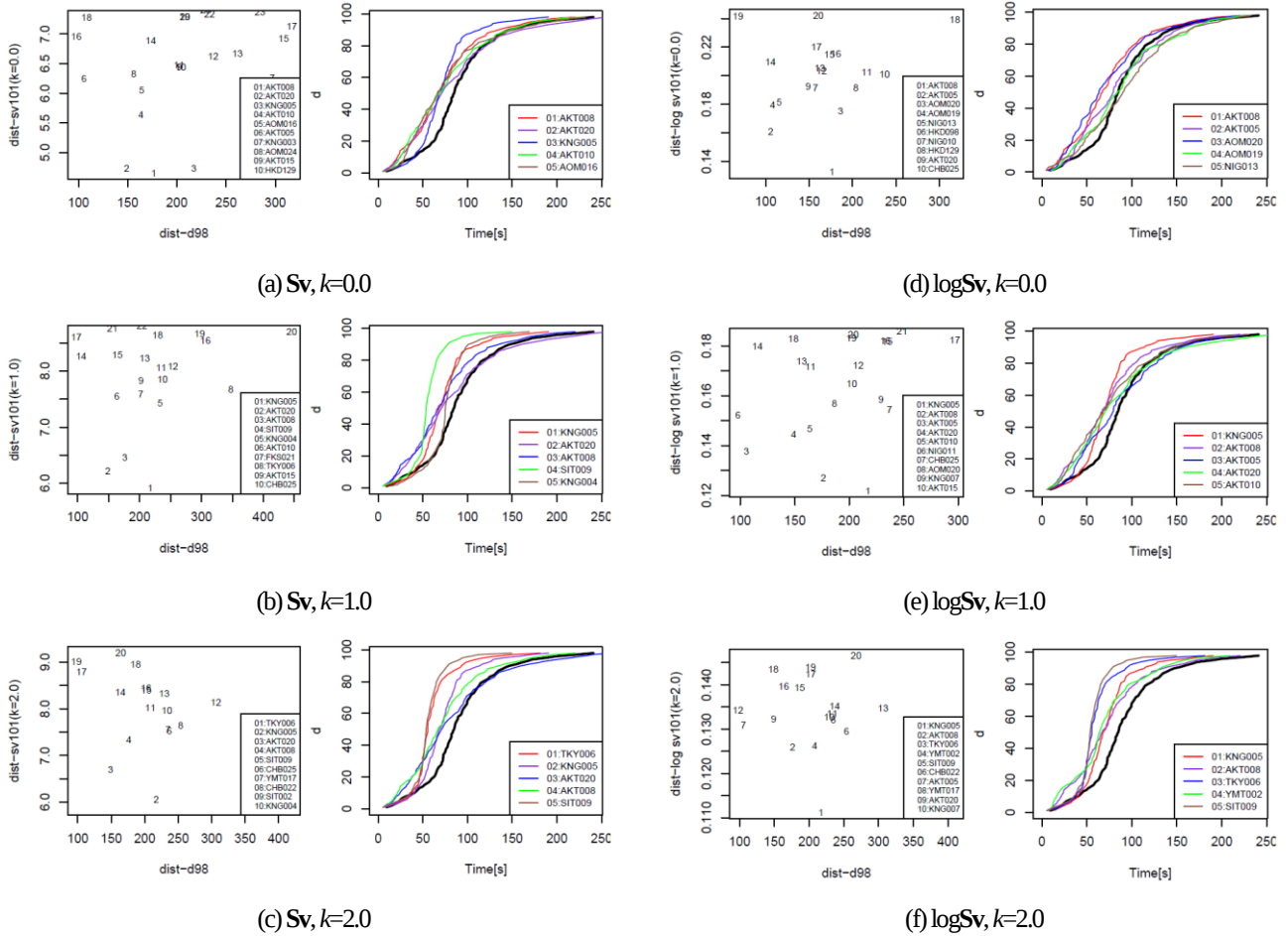


図-12 経時特性，振幅・周期特性で見た非類似度の比較(NIG014を基準波形とした場合，図中の番号は各ケースで基準の S_v または $\log S_v$ に近い順位)

を用いた．振幅・周期特性については，振幅特性考慮可能な重みを導入した非類似度を定義した．

- 3) 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いたケーススタディでは，任意の基準特徴ベクトルに類似した地震動特性を有した波形を抽出することができた．

本報では，2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録に対して，当該地震の任意の波形を基準特徴ベクトルとした．今後は，地震規模や震源距離の異なる観測記録を波形インベントリとして整備し，手法の妥当性について検証を進める予定である．

謝辞：本研究では(国研)防災科学技術研究所 K-NET の強震記録を使用した．記して感謝の意を表する．

参考文献

- 1) 能島暢呂，久世益充，高島拓也：地震動の経時特性の特徴抽出と階層的クラスター分析による分類，日本地震工学会論文集，Vol. 17, No. 2, pp. 2_128-2_141, 2017.
 - 2) 能島暢呂・久世益充：KL 変換と離散コサイン変換による応答スペクトルのモード分解と合成，土木学会論文集 A1, Vol.74, 2018. (印刷中)
 - 3) (国研)防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-net) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2018 年 8 月 30 日閲覧)
 - 4) 田中浩平，高田毅士：既往観測波形インベントリを用いた地震動予測のための波形選定手法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 646 号，pp.2219-2225, 2009.
 - 5) 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，第 16 巻，第 3 号(特集号)，pp.41-52, 2016.
 - 6) 能島暢呂，久世益充，高島拓也：地震動の経時特性の特徴抽出と階層的クラスター分析による分類，日本地震工学会論文集 第 17 巻，第 2 号，pp.2_128-2_141, 2017.
- 1) 能島暢呂，久世益充，高島拓也：地震動の経時特性

EXTRACTION OF SIMILAR WAVEFORM BASED ON FEATURE VECTOR OF EARTHQUAKE GROUND MOTION CHARACTERISTICS

Masumitsu KUSE and Nobuoto NOJIMA

The waveform extraction method has been proposed by use of feature vectors of earthquake ground motion characteristics. The feature vectors are composed of the 98-dimensional vector representing the temporal characteristics based on Husid plot and the 101-dimensional vector representing the amplitude and frequency contents in terms of velocity response spectra. In this study, dissimilarity of a pair of waveforms is evaluated as Eudcidian distance using the 98-dimentional feature vector and weighted Euclidean distance using the 101-dimensional feature vector. The criterion for extraction of similar waveform is minimization of dissimilarity. As numerical examples, the acceleration records observed from the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake are used. It has been shown that similar waveforms can be extracted on the basis of dissimilarity among arbitrary acceleration records.