地震動経時特性の特徴抽出と自己組織化マップによる評価

久世　益充[1]・能島　暢呂[2]・髙島　拓也[3]

[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

[3]学生会員　岐阜大学博士前期課程　工学研究科社会基盤工学専攻（〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1）
E-mail: u3121016@edu.gifu-u.ac.jp

地震動の特徴を的確に捉えて地震動特性を評価することは，地震工学における基本的な課題である．本研究では地震動の経時特性に着目し，加速度波形の累積パワー曲線に基づいて，4 次元の特徴ベクトル（平均，標準偏差，歪度，尖度）に縮約する方法を提案する．2011 年東北地方太平洋沖地震の波形記録より特徴ベクトルを算出した結果，地震動の経時特性を的確に評価できることを確認した．さらに，自己組織化マップを用いて 4 次元の特徴ベクトルを 2 次元平面にマップ化した．特徴ベクトルの各パラメータが規則性を持ってマップ化されたことで，地震動の経時特性や波形の特徴を系統的に整理することがきた．

Key Words : *Self-Organizing Maps，Duration characteristics，Husid plot，The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake*

1.　はじめに

地震規模，断層の破壊過程，地震波の伝播経路，表層地盤の増幅などの影響により，観測地震動はその波形ごとに，それぞれ異なる特徴を有する．これらの特徴は，地震動の振幅特性，周期特性，経時特性として現れる．例えば，2011 年東北地方太平洋沖地震では，複雑な震源過程により，複数の波群が伝播しており，複数の大きな振幅を有した地震動波形が多地点で観測された[例えば 1)]．こうした地震動の特徴を的確に捉えた評価は，地震工学における基本的な課題である．さらに，近年，K-NET, KiK-net[2)]強震観測網の整備により，全国各地で観測された膨大な地震動記録を入手できる状況において，これらの波形記録を系統的に分類できることは重要と思われる．

田村ら [3)]は，地震波形の周波数成分における振幅の大きさを重みとする振幅の差の和を加重平均振幅差と定義し，これを用いて地震波形の相似性を評価した．田中・高田 [4)]は，マグニチュードや震源距離などで地震動波形を整理し，この中から想定地震の条件に適合する波形群を抽出して設計地震動を求める手法を提案した．宮本・本田 [5)]は，地震動の非類似度を構造物の非線形応答に基づいて定量化し，地震動波形の集合をクラスター化する手法を提案した．以上のように，地震動に含まれる情報に着目し，複数の情報を考慮した分類手法がいくつか提案されている．

一方，地震動の経時特性に関するパラメータの一つとして，群遅延時間が挙げられる．群遅延時間は地震動の位相特性を評価する指標であるが，その平均値は波形の重心位置，分散は継続時間の情報を有しており，これを考慮した経時特性モデルの検討も行われている [6)]．ただし，平均・分散は原点まわりの 1 次，2 次モーメントであり，経時特性をより的確に評価するためには，高次のモーメントについて考慮する余地が残されている思われる．そこで本研究では，地震動の経時特性に着目し，累積パワー曲線に基づいて波形の 4 次までのモーメント量を求め，これに基づく特徴ベクトルを提案する．さらに，特徴ベクトルを系統的に整理するために自己組織化マップ [7)]を適用し，地震動経時特性の全体像を評価すると共に，評価の有効性について考察する．

2. 地震動経時特性の特徴抽出

2.1 特徴ベクトルの定義

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．

$$P_c(\tau) = \frac{100\int_0^{\tau} A^2(t)\ dt}{\int_0^{t_{end}} A^2(t)\ dt} \tag{1}$$

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．

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

基準時間を t_1 として，t_i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 **d** を求める．

$$\mathbf{d} = \{d_j\} = \{d_1, \ldots, d_{98}\} \tag{3}$$

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

d を用いると，式(3)の $P_c(d)$は階段状の関数となる．両端(1%および 99%)では切断されているため，この範囲を再度 0～100%に正規化し，隣り合う d_jの平均値に等確率 p_j =1/98 を付与することで，離散確率変数としての確率質量関数 $f(d')$および確率分布関数 $F(d')$を定義することができる．

$$d_j' = \frac{d_j + d_{j-1}}{2} \quad (\text{ただし } d_0=0) \tag{4}$$

$$F(d') = P_j = \frac{j}{98} \quad (j = 1,\ldots,98) \tag{5}$$

$$f(d') = p_j = \frac{1}{98} \quad (j = 1,\ldots,98) \tag{6}$$

これを用いて，4 次までのモーメント(1 次は原点周り，2～4 次は平均値周り)を求める．

$$\text{平均値：} \mu_d = \sum_{j=1}^{98} p_j \cdot d_j' \tag{7}$$

$$\text{標準偏差：} \sigma_d = \sqrt{\sum_{j=1}^{98} p_j \cdot (d_j' - \mu_d)^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^{98} p_j \cdot d_j'^2 - \mu_d^2} \tag{8}$$

$$\text{歪度：} \nu_d = \frac{\sum_{j=1}^{98} p_i \cdot (d_{j\,i}' - \mu_d)^3}{\sigma_d^{\ 3}} \tag{9}$$

$$\text{尖度：} \kappa_d = \frac{\sum_{j=1}^{98} p_j \cdot (d_j' - \mu_d)^4}{\sigma_d^{\ 4}} - 3 \tag{10}$$

(正規分布の尖度 3 で基準化した定義)

式(7)～(10)より，経時特性を 4 次元に縮約したベクトル **x**={μ_d, σ_d, ν_d, κ_d}を $P_c(\tau)$の特徴ベクトルと定義する．

2.2 特徴ベクトルの算出例

本研究では，2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された K-NET[2] 波形記録を対象とした．局所的な地盤の影響と思われるデータを除外した 691 地点の加速度波形(EW 成分)を台形バンドパスフィルター処理(0.08, 0.10, 12.0, 15.0Hz)し，特徴ベクトル **x** を算出した．各パラメータの散布図と度数分布を**図-1** に示す．度数分布より，歪度が大きい(右側の裾が長くなる)波形が多いことや，尖度が正(正規分布よりも中心部が尖っているとともに裾が長い形状)の波形が多いことがわかる．各パラメータの相関を見ると，平均と標準偏差は正の相関が見られる．さらに，平均・標準偏差が大きなデータは，尖度・歪度は 0 付近に分布している傾向が見られる．尖度と歪度を比較すると，0 付近を境に，負の相関から正の相関に変化する傾向が見られる．

図-2 に，四分円で表示した特徴ベクトルの空間分布を示す．特徴ベクトルは各パラメータごとに正規化し，波形ごとの相対的な違いを扇形の面積で表している．特徴的な 3 地点については，加速度波形，累積パワー曲線

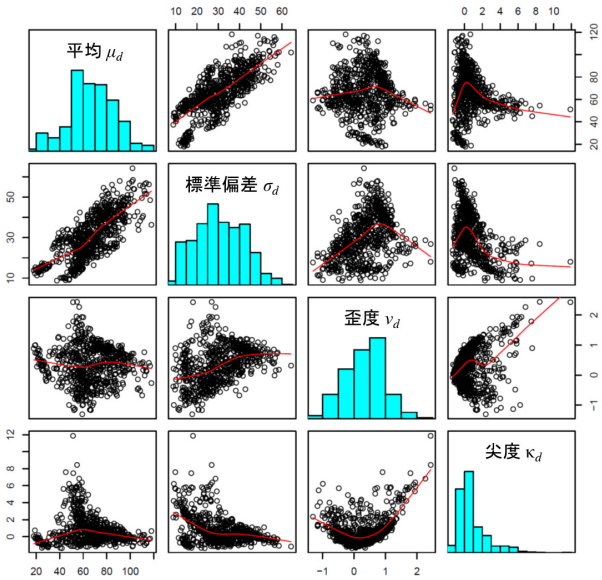

図-1 特徴ベクトル **x** のパラメータ比較

$P_c(\tau)$，経時特性をあわせて示す．**表-1** には，3 地点の特徴ベクトル，継続時間(累積パワーの 5～95%，5～75%)の値を示す．**図-2**，**表-1** に示す加速度波形と特徴ベクトルを比較すると，NIG013 は振幅に明瞭なピークが見られず，5～95%(前後の小振幅を除外した，波形全体の時間)，5～75%(おおよそ主要動に相当する時間)継続時

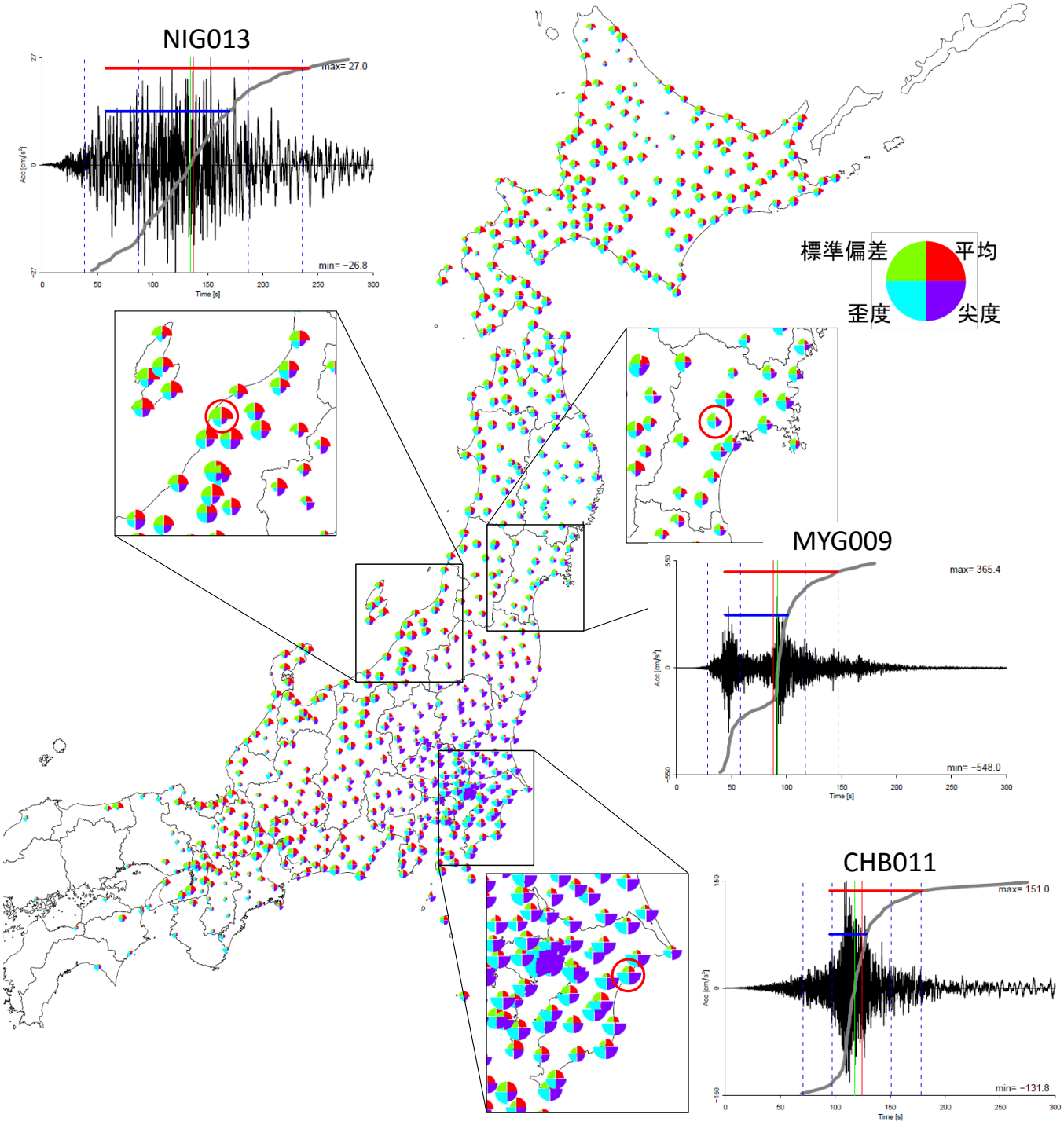

図-2　特徴ベクトル **x** の空間分布(赤丸は波形の地点，灰線は 1～99%の累積パワー曲線 $P_c(\tau)$，赤・青の太線はそれぞれ $P_c(\tau)$の 5～95%，5～75%，緑線は $P_c(\tau)$の中央値，赤線，青点線はそれぞれ μ_d と$\pm\sigma_d$，$\pm 2\sigma_d$を示す)

表-1 3 地点の特徴ベクトルと継続時間の比較

地点名	平均 μ_d	標準偏差 σ_d	歪度 ν_d	尖度 κ_d	累積パワー曲線$P_c(\tau)$ 5～95%継続時間(s)	累積パワー曲線$P_c(\tau)$ 5～75%継続時間(s)
NIG013	92.06	49.52	0.45	−0.14	184.04	111.99
CHB011	54.81	26.91	2.44	8.45	83.28	33.11
MYG009	48.39	29.70	0.32	0.04	102.04	57.30

間が長い傾向の波形である．このような波形は，**図-2**, **表-1** に示すように，標準偏差，歪度が大きく，尖度は若干小さい．このような特徴の波形は，東北地方日本海側から北陸地方に見られる．NIG013 に対して CHB011 は，5～75%継続時間が短い．すなわち，単峰形で振幅のピークが鋭く，小振幅が長く継続している波形は尖度が大きい．このような波形は関東平野を中心とした地域に広く見られる．さらに，MYG009 のように，継続時間が長く，大振幅の波群が分離しているような波形では，他の 2 地点と比べ，5～95%継続時間は長いが，5～75%継続時間は短い．このような波形では，標準偏差と歪度が大きな値をとり，東北地方の太平洋側に多数見られる．

１．に前述したように，当該地震では複雑な震源過程により，MYG009 のように複数の大振幅が見られる波形や，CHB001 のように振幅の鋭いピークが見られる波形など，様々な特徴を持つ波形が観測されている．本文では各地の波形図示は省略するが，前述した考察と**図-2** の分布より，累積パワー曲線より算出した特徴ベクトル $\mathbf{x}$ が地震動の経時特性，振幅特性を評価できる事が確認できた．

３．自己組織化マップに基づく経時特性の評価

3.1 自己組織化マップの手法

特徴ベクトル $\mathbf{x}$ に，自己組織化マップ(SOM: Self-Organizing Maps)を適用して経時特性を分類する．SOM は，Kohonen が開発した教師なし学習のアルゴリズムを用いるニューラルネットワークモデルである[7]．SOM を用いると，多次元データの情報を 2 次元平面上に写像する事でデータを要約して可視化することができる．以下にアルゴリズムを概説する．

(1) 2 次元平面の座標 j に重みベクトル $\mathbf{m}_j$ をランダムに設定する．

(2) 離散時間座標 t において，特徴ベクトル $\mathbf{x}(t)$ と $\mathbf{m}_j(t)$ の差が最小となる座標 j を探索し，$\mathbf{m}_c(t)$ とする．

$$\left\|\mathbf{x}(t)-\mathbf{m}_c(t)\right\| = \min_j \left\|\mathbf{x}(t)-\mathbf{m}_j(t)\right\| \tag{11}$$

(3) $\mathbf{x}(t)$ に最も近い重みベクトル $\mathbf{m}_c(t)$ に着目し，時間座標 $t+1$ における $\mathbf{m}_j(t+1)$ を次式のように更新する．

$$\mathbf{m}_j(t+1) = \mathbf{m}_j(t) + \alpha(t)\, h_{cj}(t)\left\{\mathbf{x}(t)-\mathbf{m}_j(t)\right\} \tag{12}$$

ここで，$\alpha(t)$ は学習率係数，$h_{cj}(t)$ は近傍関数であり，それぞれ 0～1 の範囲である．式(12)において，$\alpha(t)=1$, $h_{cj}(t)=1$ の場合，$\mathbf{m}_j(t+1)=\mathbf{x}(t)$ となる．すなわち，$\alpha(t)$, $h_{cj}(t)$ は，$\mathbf{m}_j(t+1)$ に対する $\mathbf{x}(t)$ の重み関数であり，3.2 に後述する計算では，$\alpha(t)$ は t に伴い，0.05 から 0.01 まで減少する線形関数，$h_{cj}(t)$ はマップの 2/3 の範囲を初期値とした減少関数を与える[8),9)]．

(4) 式(12)を座標 j より $h_{cj}(t)$ の範囲にある $\mathbf{m}_j(t)$ に対して適用し，これを全ての $\mathbf{x}(t)$ に対して所定の繰り返し回数 T 回行うことで，特徴ベクトル $\mathbf{x}$ は 2 次元平面上にマップ化できる．

3.2 経時特性の比較と考察

2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録より算出した特徴ベクトル $\mathbf{x}$ を用いて，12×12 の六角形にグリッドを配置し，SOM によりマップ化した結果を**図-3**, **図-4** に示す．**図-3** は，3.1 に前述したアルゴリズムで T 回繰り返した結果の重みベクトル $\mathbf{m}_j(T)$ の分布である．初期配置の重みベクトルはランダムであるが，SOM により，平均が大きな特徴は**図-3** の右側，標準偏差の大きな特徴は右下，歪度・尖度の大きな特徴は左下に布置されており，規則性を持ったマップになっていることが確認できる．**図-4** は，**図-3** の $\mathbf{m}_j(T)$ に対応する各波形(地点名)の分布である．各波形の特徴ベクトル $\mathbf{x}$ は，最も近い $\mathbf{m}_j(T)$ のグリッドに布置されている．なお，グリッド内の地点名は，表示が重ならないようにランダムに配置しており，グリッド内の分布には意味はない．**図-4** に示すように，一部に見られる空白グリッドを除いて，各波形がマップ全体に分布していることがわかる．**図-2** の 3 波形については，歪度と尖度が大きな CHB011 は**図-3** 左下，平均と標準偏差が大きく，歪度・尖度も若干大きな NIG013 は右下，両者よりも標準偏差・歪度・尖度が比較的小さい MYG009 は中央付近にそれぞれ布置された．

図-5 に，**図-3** の重みベクトルの配置に対応する加速度波形を示す．地震動の経時特性と縮約した特徴ベクトルを比較するため，**図-5** には，前述した**図-2** 中の波形図と同様に，$P_d(\tau)$ や μ_d, $\pm\sigma_d$ などの 経時特性に関するパラメータも示す．**図-5** では，標準偏差の小さい特徴(5～95%，5～75%継続時間が短い波形)が左側に見られ，標準偏差が大きな特徴(5～95%，5～75%継続時間が長い波形)が右側に現れている．**図-2** に前述した MYG009 は，**図-5** の YMT002 左上に隣接したグリッドに布置されている．このような大振幅が複数見られ，5～95%継続時間と 5～75%継続時間に差がある波形のほとんどは，マップの中央付近に分布している．尖度の大きな特徴(単峰形の鋭い振幅のピークが見られる波形)で，5～95%継続時間と 5～75%継続時間に差がある波形は左下に見られ，右に行くに従って尖度が小さく標準偏差が大きい特徴(振幅の明瞭なピークが見えにくく継続時間が長くなる波形)の傾向が見られる．また，左下から上に行くに従って全てのパラメータが減少している．これらのグリッドには単峰形の波形が見られるが，上に行くに従い，

5～95%，5～75%継続時間の差が小さくなる傾向が見られた．その他，左下から右上の歪度の減少(ピークが後ろにずれ込み左側の裾が長くなる波形)の傾向が現れているなど，SOM により高次の特徴ベクトル **x** を縮約し，

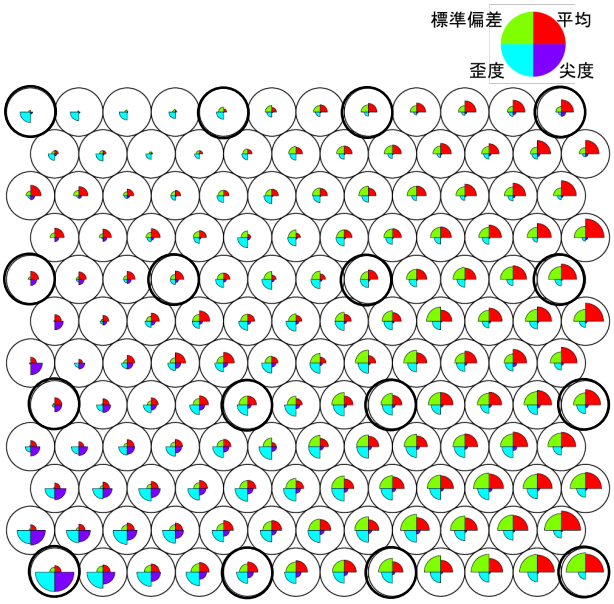

図-3 SOM 上に展開された重みベクトルの分布
(図中の太い黒丸は図-5 に示す波形のグリッド)

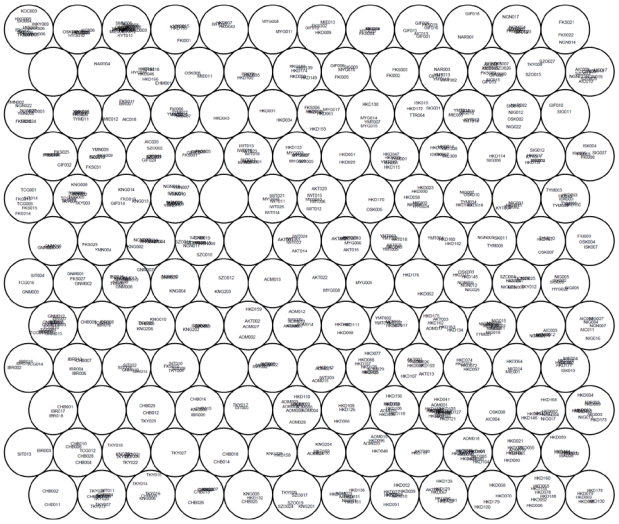

図-4 SOM 上に展開された各波形(地点名)の分布

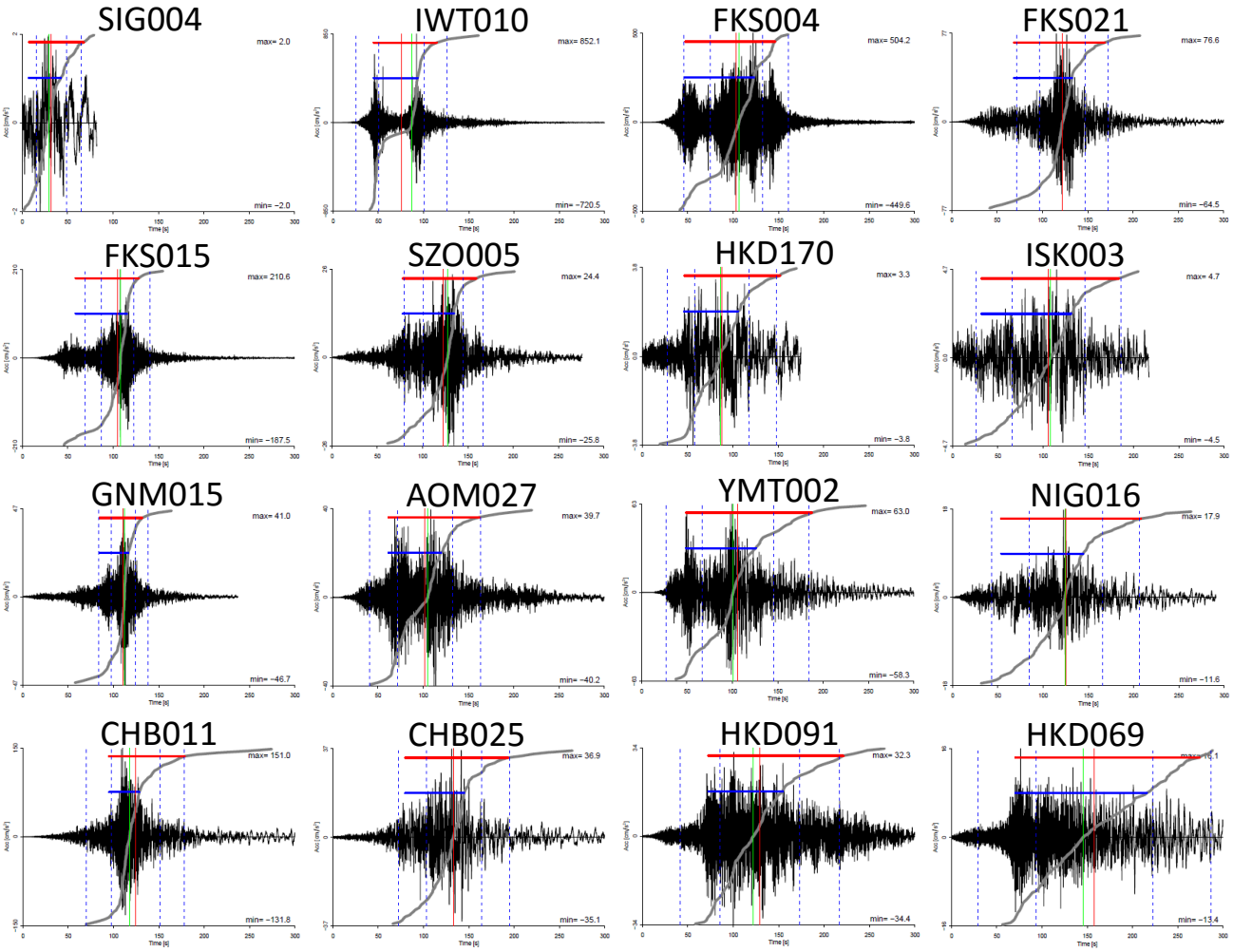

図-5 重みベクトルに対応した加速度波形の比較(灰線は 1～99%の累積パワー曲線 $P_c(\tau)$，赤・青の太線はそれぞれ $P_c(\tau)$の 5～95%，5～75%，緑線は $P_c(\tau)$の中央値，赤線，青点線はそれぞれ μ_d と$\pm\sigma_d$，$\pm 2\sigma_d$を示す)

地震動の経時特性や振幅特性を系統的に整理したマップが作成できた．なお，**図-3** 左上の平均・標準偏差・尖度が小さな特徴の波形は，**図-5** の SIG004 のように継続時間が短い．左上端のグリッド付近に布置された波形に共通して見られる特徴であるが，これは，波形全体の振幅レベルが小さく，トリガレベル未満の地震動を記録できていないと思われる．

4. まとめ

本研究では，2011 年東北地方太平洋沖地震の波形記録を対象に，SOM により地震動の経時特性をマップ化した．得られた成果を以下に示す．

1) 地震動の経時特性を，累積パワー曲線に基づいて 4 次元の特徴ベクトルに縮約する方法を提案した．各パラメータと加速度波形を比較して，平均，標準偏差，歪度が大きな波形は継続時間が長い傾向が見られることと，歪度の大きな波形は，振幅の偏りが見られることを確認した．以上のことから，特徴ベクトルが地震動の経時特性を的確に評価できることと，おおまかな振幅特性を比較可能なことが確認できた．
2) 特徴ベクトルを用いて，SOM によるマップ化を行った．特徴ベクトルの各パラメータが規則性を持って布置されることで，経時特性や波形の特徴を系統的に整理することができた．
3) 多次元情報を次元縮約できる主成分分析や多次元尺度構成法による 2 次元布置表示では，主要な 2 成の特性が取り上げられ，それ以外の情報は同時には表示できない．SOM では，多次元情報を維持したまま 2 次元平面への写像を行うため，特徴ベクトルに含まれる 4 次元の情報を比較・考察することができた．

以上のように，特徴ベクトル $\mathbf{x}$ を SOM によりマップ化することで，地震動の経時特性を比較，整理することが確認できた．今後は他の既往地震で観測された加速度波形に対しても SOM を適用して，特徴を比較する方針である．

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ました．記して謝意を表します．

参考文献

1) 功刀卓，青井真，鈴木亘，中村洋光，森川信之，藤原広行：2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動，防災科学技術研究所主要災害調査，第 48 号，pp.63-72，2012.
2) (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/
3) 田中浩平，高田毅士：既往観測波形インベントリー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.
4) 田村重四郎，小長井一男，鄭京哲：地震波相似性についての考察，地震工学研究発表会講演概要集，Vol.21，pp.157-160，1991.
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) 佐藤智美：群遅延時間のインバージョンと散乱理論に基づく地震動の経時特性モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 586 号，pp.71-78，2004.
7) 大北正昭，徳髙平蔵，藤村喜久郎，権田英功：自己組織化マップとそのツール，シュプリンガー・ジャパン(株)，2008.
8) The Comprehensive R Archive Network，http://www.r-project.org/
9) Package ‘kohonen’ Reference manual，https://cran.r-project.org/web/packages/kohonen/kohonen.pdf

(2016. XX. XX 受付)

APPLICATION OF THE SELF-ORGANIZING MAPS FOR DURATION CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE MOTION

Masumitsu KUSE, Nobuoto NOJIMA and Takuya TAKASHIMA

The evaluation of earthquake motion is basic problem in the earthquake engineering. In this study, the four-dimensional feature vector representing characteristics of duration of earthquake motion is defined based on the discretized probability mass function form of husid plot of acceleration time histories. The feature vector is composed of average, standard deviation, skewness and kurtosis corresponding to first raw moment and second to fourth central moment of the PMF, respectively. As a case study, the proposed method was applied to the earthquake motions observed from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. It was confirmed that the feature vectors well represented the duration characteristics. Next, the algorithm of SOM (Self-Organizing Maps) was applied to the set of feature vectors. The duration characteristics were visualized in a systematic way by the two-dimensional mapping using SOM.