



観測地震波形を利用した模擬地震動の作成

玉置哲男¹⁾、田辺 章²⁾、中村雅彦³⁾

佐々木文夫⁴⁾、水町 渉⁵⁾、山田道夫⁶⁾

1)正会員 アイテル技術サービス(株)新型炉・サイクルグループ、工博

e-mail : tetsuo1a.tamaoki@glb.toshiba.co.jp

2)正会員 アイテル技術サービス(株)

e-mail : akira1a.tanabe@glb.toshiba.co.jp

3)正会員 清水建設(株)建築事業本部建築構造技術部

e-mail : masahiko.nakamura@shimz.co.jp

4)正会員 鹿島建設(株)ITソリューション部、博(数理)

e-mail : fsasaki@kajima.com

5)正会員 (財)原子力発電技術機構

e-mail : mizumachi@nupec.or.jp

6)正会員 東京大学・数理科学、理博 (現 京都大学・数理解析研究所)

e-mail : yamada@kurims.kyoto-u.ac.jp

要 約

確率論的耐震設計評価等において従来より大きな地震動を想定する場合、構造物の応答が強い非線形領域に入ることが考えられるため、より観測地震波形に近い位相特性を持った模擬地震動が必要となる。このため観測地震波形の時間一周波数特性を用いて、目標応答スペクトル特性を満たす模擬地震動を作成する、簡明でノンパラメトリックな方法を開発した。提案方法では、観測地震波形をウェーブレット変換して得られる周波数帯域毎のウェーブレット係数列を、複数の波形について加重加算し、これを模擬地震動のウェーブレット係数列とする。このとき、係数列を逆変換した時刻歴データから求めた応答スペクトルと目標応答スペクトルとの誤差が目標値以内になるように、ウェーブレット係数列の重みを繰り返し計算して模擬地震動を得るものである。震源距離の範囲を指定し、複数の地震で観測された地震波形から無作為に選出した20波を元に模擬地震動を作成し、その応答スペクトルと目標に設定した大崎スペクトルとの比が設計条件を満たすようにすることができた。作成した模擬地震動に対して入力した観測地震波形の周波数領域毎の寄与を調べ、模擬地震動には各波の特性が含まれていることを確認した。作成した模擬地震動は群遅延時間の平均値と分散値が入力した観測地震波形群のほぼ中央値となっており、複数の観測地震波形の平均的な時間一周波数特性を示した。

キーワード：模擬地震動、Wavelet 解析、群遅延時間、時間一周波数特性、応答スペクトル、観測地震波形

1. はじめに

模擬地震動は機器・構造物の耐震評価や耐震設計を行うときに使われる。この場合基本的かつ重要な課題は地震動の設定である。模擬地震動の作成方法には様々なものがあるが、従来多く用いられているのは、正弦波の重ね合せによって目標とする応答スペクトルに適合するように作成する方法であり、位相を一様乱数で与え、時間特性を振幅包絡線で与えてきた^{1), 2)}。しかしながら、原子力発電所の地震P S A (Probabilistic Safety Assessment) では、頻度は非常に少ないが設計用地震動より更に大きな地震動による応答解析を行う必要がある。設計用地震動に対する構造物の応答は線形または弱非線形領域であるが、地震P S Aでは強非線形領域まで及ぶことが考えられる。このような状況では、比較的振幅の大きい波がどのような周波数特性を持ち、どのタイミングで何秒間来るかが構造物にとって重要になってくる。言い換えれば、振幅だけではなくその時間一周波数特性すなわち位相との関係が重要になってくる。このような背景もあって、最近地震波の位相に特に注目し、位相を取り入れた模擬地震動のモデル化が進んでいる。本論文では、目標とする応答スペクトルを満たすと言う制約の下で、従来の位相を乱数で与える方法に対してより実際の観測地震波形に近い位相特性を与えることを目的に、観測された複数の地震波形に含まれている時間一周波数特性及び振幅特性をそのまま取り入れて模擬地震動を作成する方法を提案する。

2. 位相情報に注目した模擬地震動作成

設計用の入力地震動の時刻歴波形を作成する方法としては、多数の実測地震波より求めた回帰式により最大振幅やスペクトル特性を与え、また位相を一様乱数で与えて計算した定常波形に予め規定した時刻歴包絡線²⁾をかけて模擬地震動を作成する方法がよく用いられてきた¹⁾。また、特定の実地震観測波の位相をそのまま用いることも行われている³⁾。しかし、位相をランダムに設定したり、特定の1つの波の位相特性を利用するこれらの方法では、多くの観測地震波形の持つ位相特性が反映されたものにはならない。大崎ら⁴⁾が位相差分布と時刻歴波形の包絡線との類似性を指摘して以来、地震波のフーリエ位相の情報により地震波の非定常性を明らかにしようとする検討がなされてきた。そして和泉⁵⁾らはフーリエ位相の角振動数領域の傾き、即ち群遅延時間、に注目し、その平均値と標準偏差により地震波の時刻歴波形の重心の位置と広がりを変現できることを示した。その後も群遅延時間とマグニチュードや震央距離の関係について様々な研究が盛んに行われている^{6)~9)}。さらに、ウェーブレット解析を用いた、観測記録に基づく位相特性の経験的モデル化が佐藤、室野らによって行われており¹⁰⁾、これらを用いて鉄道橋、道路橋などの土木工学における設計地震動のシミュレーションが提案されている^{11), 12)}。これらは複数の観測地震波形から求めたパラメトリックな回帰モデルを用いる方法である。ウェーブレット解析を用いた模擬地震動の作成方法に関しては、他に伊山・桑山らによる研究¹³⁾がある。正規直交ウェーブレットのウェーブレット係数の2乗和がエネルギーに対応することに注目し、累積エネルギー入力、エネルギー入力卓越時刻、エネルギー入力率のモデル化により、ウェーブレット係数列を発生させ模擬地震動を作成している。前田・佐々木・山本ら¹⁴⁾は、振動数領域での重なりを領域端部でしか持たないSinc ウェーブレットをマザーウェーブレットに採用し、地震動の基本物理量をウェーブレット係数で直接モデル化することにより模擬地震動を作成している。曾根・増田ら¹⁵⁾は、1質点系の速度インパルス応答の時間反転波形をアナライジングウェーブレットとしたときに、速度応答スペクトルの周期Tにおける値が模擬地震動加速度波形のスケールTにおけるウェーブレット変換値の最大絶対値に等しいことを利用し、任意の時間一周波数特性の初期値をウェーブレット係数上で設定して目標応答スペクトルを満たす模擬地震動を作成している。

本論文で提案する模擬地震動作成方法は、複数の観測地震波形の時間一周波数特性をそのまま利用するノンパラメトリックな方法である。

3. 複数の観測地震波形を用いた模擬地震動の作成法

ここで提案する方法は原子力発電所等を対象とした地震PSAに用いる模擬地震動の作成を主な目的としたものである。地震PSAでは可能性のあるあらゆる震源特性の模擬地震動により機器・構造物の応答を求めの必要があり、活断層が不特定な直下型地震等を想定する場合には、異なる震源特性を持つ観測地震波形を合成して模擬地震動を作成することも考えられる。本章では提案方法の具体的な処理の流れを説明し、模擬地震動の振幅・時間一周波数特性が特定の大きな地震の観測波に偏って影響されないように工夫した点、観測地震波形の選定基準、設定スペクトルについて述べる。

3.1 観測地震波形のウェーブレット変換

周波数領域を複数の小領域に分割して地震波の特性を見る場合、例えばフーリエ変換によって振幅スペクトルあるいはパワースペクトル密度と言った形で周波数-振幅特性を表現することができる。従ってフーリエ係数の情報があれば、これを基に従来の正弦波合成法によって所定の周波数-振幅特性を持つ地震波を作成することができる。一方、始めに指摘したように機器・構造物の耐震設計評価においては地震波のどのような周波数成分がどのタイミングで大きくなるかと言った時間一周波数特性が重要な要素となるが、フーリエ係数には時間領域での局所的な挙動に関する情報が含まれていないため、フーリエ係数のみから所定の振幅・時間一周波数特性を持つ地震波を作ることはできない。これに対して、後述する周波数スケールと時間シフトと言う2つの変数を持つウェーブレットを用いて元の波を展開したウェーブレット係数には、周波数スケール毎の位相情報が一定の時間分解能を持って保存されている。このことから、筆者らは観測地震波形のウェーブレット係数をそのまま用いて模擬地震動を作成することとした。また、次節で示すように本論文では複数個の観測地震波形のウェーブレット係数を合成した後に逆変換して時間領域の模擬地震動を求めるために、次式で定義される離散ウェーブレット変換、逆変換を用いた。

$$\alpha_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{j,k}^*(t) \cdot x(t) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

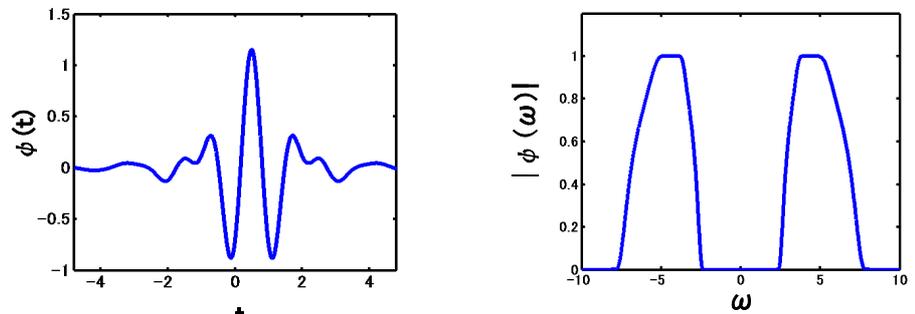
$$x(t) = \sum_j \sum_k \alpha_{j,k} \cdot \phi_{j,k}(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1) 式が関数 $x(t)$ のウェーブレット変換、(2) 式が逆変換である。ただし

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k), \quad j, k \in Z \quad \dots\dots\dots (3)$$

であり、*は複素共役を表わす。(3) 式からわかるように、パラメータ j は周波数スケールを表すファクタとなっており、以下スケールファクタあるいは単にスケールと呼ぶ。パラメータ k は時間軸上の位置を表すファクタとなっており、以下時間シフトと呼ぶ。(2) 式の逆変換が存在するとき、 $\phi(t)$ をアナライジングウェーブレットまたはマザーウェーブレット、積分核 $\phi_{j,k}(t)$ をウェーブレットと呼ぶ。本論文ではウェーブレットの集合 $\{\phi_{j,k}(t)\}$

が完全正規直交基底となる関数系として Meyer のウェーブレット¹⁶⁾を用い、Yamada & Ohkitani¹⁷⁾ あるいは佐々木ら¹⁸⁾による計算スキームを用いた。図1(a)に Meyer のアナライジングウェーブレット $\phi(t)$ 、同図(b)にそのフーリエ変換 $\phi(\omega)$ の絶



(a) アナライジングウェーブレット $\phi(t)$ (b) アナライジングウェーブレットのフーリエ変換 $\phi(\omega)$ の絶対値

図1 模擬地震動作成処理ブロック図

対値を示す。 $\phi(t)$ は実関数で $t=0.5$ に関して対象となっている。図1から明らかなように、Meyerのウェーブレットは時間と周波数の両方の領域で局在化の程度が比較的良く、ことに周波数領域でコンパクトなサポートを持っていることが特徴である。ウェーブレット $\phi_{j,k}(t)$ のサポート区間は $x(t)$ の時間長を T_d とすると周波数領域で $\{f \mid 2^j/3T_d \leq f \leq 2^{j+2}/3T_d\}$ となっている。

3.2 提案する方法

(1) 処理の流れ

本論文で提案する方法は、目標とする応答スペクトルデータと観測地震波形の時刻歴データベースを基に、以下の処理を行って模擬地震動を作成するものである。即ち、

- ① 複数の地震のデータから予め与えた制約条件の範囲にある波を検索し、該当する N 地震 R 波の中から無作為に L 個の波を選択する。このとき $L \leq N$ であれば L 個の地震から1波ずつ、 $L > N$ であれば N 個の地震から少なくとも1波を選択する。
- ② Meyerのウェーブレットを用いて観測地震波形 $x^i(t)$ を展開し、各スケール(j)の係数列 $\alpha_{j,k}^i$ を得る。
- ③ 次式で定義される、スケール(j)毎の観測地震波ウェーブレット係数列の加重和 $\beta_{j,k}$ を模擬地震動のウェーブレット係数列とする。

$$\beta_{j,k} = \sum_{i=1}^L W_j^i \cdot \alpha_{j,k}^i \quad \dots\dots\dots (4)$$

- ④ 前記係数列 $\beta_{j,k}$ をウェーブレット逆変換して得られる時刻歴 $y(t)$ を模擬地震動として、応答スペクトルを計算する。
- ⑤ 目標の応答スペクトルとの誤差が小さくなるように各スケールのウェーブレット係数列の重み W_j^i を補正し、誤差が目標値以内になるまで③～⑤を繰り返す。

ステップ②～⑤の処理の流れを図2に示した。ステップ①で述べた観測地震波形の選択方法は、できるだけ多くの異なる地震記録から選ぶことを意図したものである。制約条件については(3)で述べる。ステップ②は、データベース上の観測地震波形の時刻歴を予めウェーブレット変換して係数列を保存しておくことも可能である。重み W_j^i については次項で述べる。

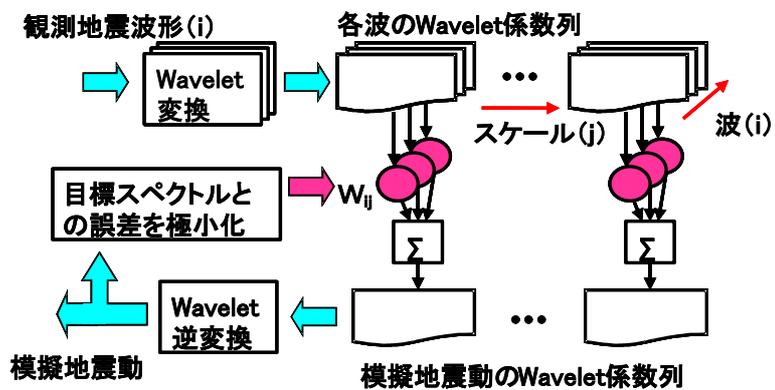


図2 模擬地震動作成処理ブロック図

(2) スペクトル強度の規格化

前項(1)の①で選択された L 個の観測地震波形の応答スペクトル $\{S_i, i=1 \sim L\}$ を計算し、次式の C_i を目標応答スペクトル S_0 への規格化定数として求める。

$$C_i = \overline{S_0} / \overline{S_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで $\overline{S_0}$ 、 $\overline{S_i}$ はそれぞれ S_0 及び S_i の解析周期範囲内での平均値である。そして、前項③の重み W_j^i を次式のように規格化定数 C_i と純粋な重み w_{pj}^i との積で定義し、純粋な重みの初期値はランダムに設定する。

$$W_j^i = C_i \cdot w_{pj}^i \quad \dots\dots\dots (6)$$

このようなスペクトル強度の規格化を行う理由は、後に実例を示すようにマグニチュードの大きく異なる複数の地震の観測波を用いた場合に、模擬地震動の特性がマグニチュードの大きな観測地震波形のみの特性で支

配されることを避けるためである。

(3) 設定スペクトルと観測地震波形の選択基準

以上に示したアルゴリズムにおいては観測地震波形に対して何らかのモデルを仮定すると言った処理は一切行っておらず、観測地震波形の持つ時間-周波数特性をウェーブレット係数の形でそのまま用いるノンパラメトリックな方法となっている。従って、目標として設定する応答スペクトルに対する制約は無く、観測地震波形の応答スペクトルの形状とかけ離れたものでない限り任意に設定することができる。次章では原子力発電所の設計に用いられている大崎スペクトル¹⁾を目標速度応答スペクトルに設定した場合の例を示すが、例えば複数の観測地震波形の応答スペクトルの上側包絡線を目標に設定することも可能である¹⁹⁾。一方、観測地震波形については、どのような観測データを使うかについて、提案方法の与える制約は特に無い。しかしながら、目標とするマグニチュード (M) と震源距離 (D) に対応して、使用する観測地震波形にある程度の制約を設ける必要があると考えられる。マグニチュードについては、目標とするM以下で、かつ目標とするMよりも3以上小さくないMの地震の観測記録、震源距離については、目標とするDの前後一定の範囲内にある観測記録を選択するのが妥当であろう。表層地盤の増幅特性の影響を低減するため、岩盤あるいはS波速度が300m/s程度以上と判断される硬質地盤の観測点での記録に限定することが必要と考えられる。

本論文では、表1に示すように1999年8月～2002年1月の間に収録されたKiK-netデータの中から震源深度が130km以下で震源距離が800km程度までの強震記録を選択し、これに兵庫県南部地震の観測波を加えた計1306波の水平動データを模擬地震動の作成に使用するデータベースとした。兵庫県南部地震のデータは、

100Hzでサンプリングされた関西地震観測研究協議会の速度計記録を微分したデータと、50Hzでサンプリングされた気象庁の加速度計記録データを、いずれもKik-Netと同じ

地震	マグニチュード*1	利用可能な記録数
兵庫県南部地震 1995/ 1	7.3	地表面・水平動 8波
鳥取県西部地震 2000/10	7.3	岩盤・水平動 436波*2
芸予地震 2001/ 3	6.4	岩盤・水平動 484波*2
その他 22 地震 1999/8～2002/1	5.1～7.3	岩盤・水平動 378波*2
		計 1306波

*1) 気象庁マグニチュード, *2) KiK-net データ

200Hz サンプリングのデータに変換した上、トリガー時刻の15秒前からの記録データとして時間をシフトして使用した。なお、兵庫県南部地震の観測記録は表層地盤の影響を受けているが、上記の制約は、利用可能な観測地震波のデータベースが充実された時点では当然適用すべきものの、本論文では対象とした観測地震波の量が充分とは言えないことから、ここでは次のように震源距離に対してのみ制約を設けた。すなわち、震源距離が一定の範囲にある波を選択し、その中から更に指定したL個の波を使用する。大崎スペクトルを目標スペクトルとして設定する場合、マグニチュードMと震央距離 Δ を与えるが、このときに使用する観測地震波形は、例えば震源距離が $0.67\Delta \sim 1.5\Delta$ にある波、あるいは震源距離が $\Delta \pm (10 \sim 20\text{km})$ にある波の中から選択する。

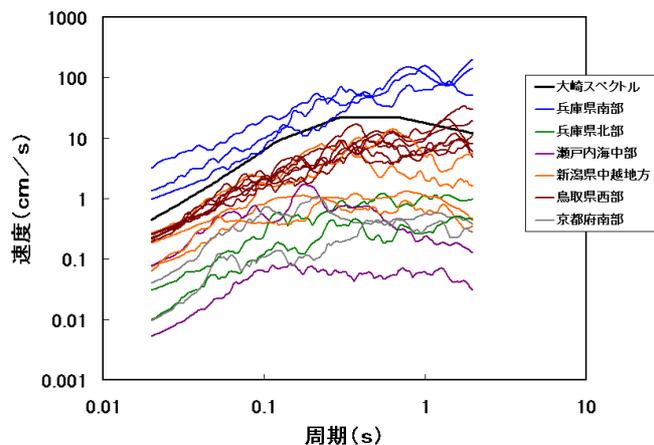


図3 大崎スペクトル (M=7、 $\Delta=30\text{km}$) と観測地震波形 (震源距離 20～40km) の応答スペクトルの例

4. 作成結果

ここでは原子力発電所の耐震設計に用いられる大崎スペクトルにおいて、マグニチュード $M=7$ 、震央距離 $\Delta=30\text{km}$ の速度応答スペクトルを目標に設定し、震源距離が $20\sim 40\text{km}$ で観測された観測地震波形 20 波を用いて、提案した方法により模擬地震動を作成した。このケースを含めて、マグニチュードと震央距離をパラメータとして計 5 ケースの大崎スペクトルを目標に設定し、それぞれ異なる組合わせの観測地震波形 20 波を用いて模擬地震動を作成した。使用するデータは何れも $2^{14}=16384$ 点、即ち $T_d=81.92$ 秒とした。

4.1 大崎スペクトル ($M=7$, $\Delta=30\text{km}$) を満たす模擬地震動

表 1 に示した地震波データベースの中に、指定した震源距離 $20\sim 40\text{km}$ で観測されたものは 6 地震 50 波あり、各地震から少なくとも 1 波を含む計 20 波を無作為に選択した。選択された観測地震波形の応答スペクトルを、設定した大崎スペクトルと共に図 3 に示す。同図から、選択された 20 波の応答スペクトルは設定スペクトルに比べて 1 桁近く大きい波から 2 桁以上小さい波まで様々な振幅を示していることがわかる。このように振幅の大きく異なる観測地震波形を用いて、(6) 式の通り重み W_j^i をスペクトル強度規格化定数 C_j と純粋な重み $W_{P_j}^i$ の積で与え、純粋重みのみを調整して得られた模擬地震動のウェーブレット係数列 $\beta_{j,k}$ をスケール $j=2\sim 13$ の範囲で図 4 に示す。図中には各スケールのサポート区間を周期で示した。同図のウェーブレット係数を逆変換して得られた模擬地震動の時刻歴を、使用した観測地震波形 20 波中の 5 波と共に図 5 に示した。この図から、観測地震波形と良く似た時間一周波数特性を持つ模擬地震動が得られていることが確認される。

作成された観測地震波形による応答スペクトルを大崎スペクトルと比較して図 6 に示した。解析した $0.02\sim 2$ 秒の周期範囲で大崎スペクトルとの比の平均値は 1.00、標準偏差は 0.036、最小値は 0.92、最大値は 1.09 であった。原子力発電所の耐震設計技術指針¹⁾ では大崎スペクトルとの比の最小値が 0.85 を下回らないことが規定されているが、提案した

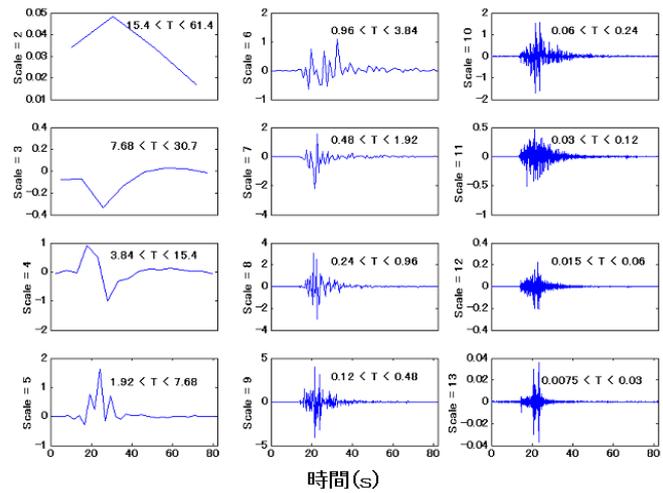


図 4 模擬地震動のウェーブレット係数列の例 ($j=2\sim 13$)

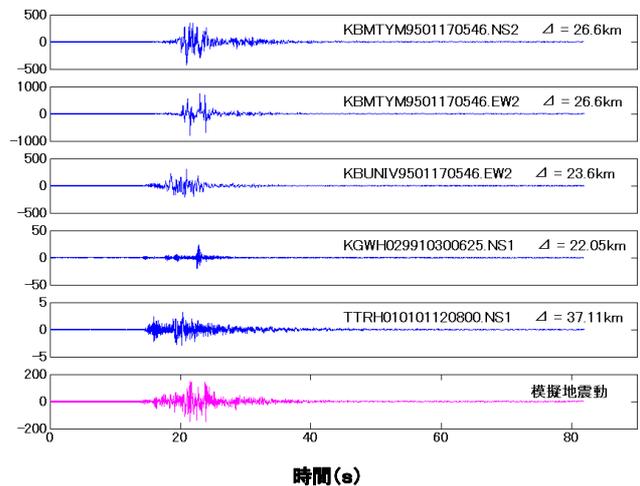


図 5 観測地震波形と模擬地震動の時刻歴

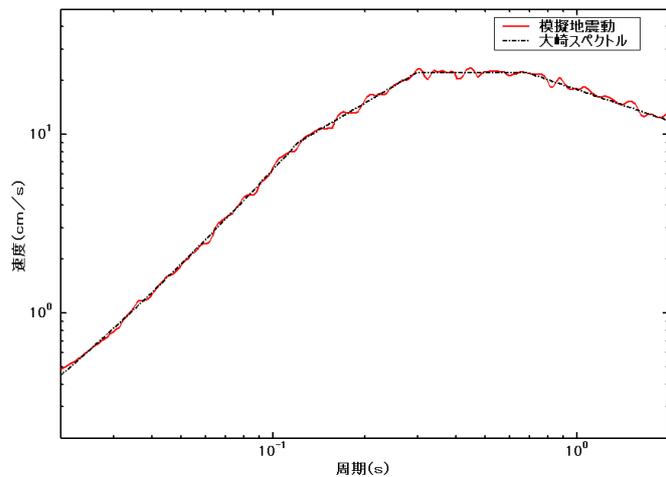


図 6 大崎スペクトル ($M=7$, $\Delta=30\text{km}$) と模擬地震動の応答スペクトル

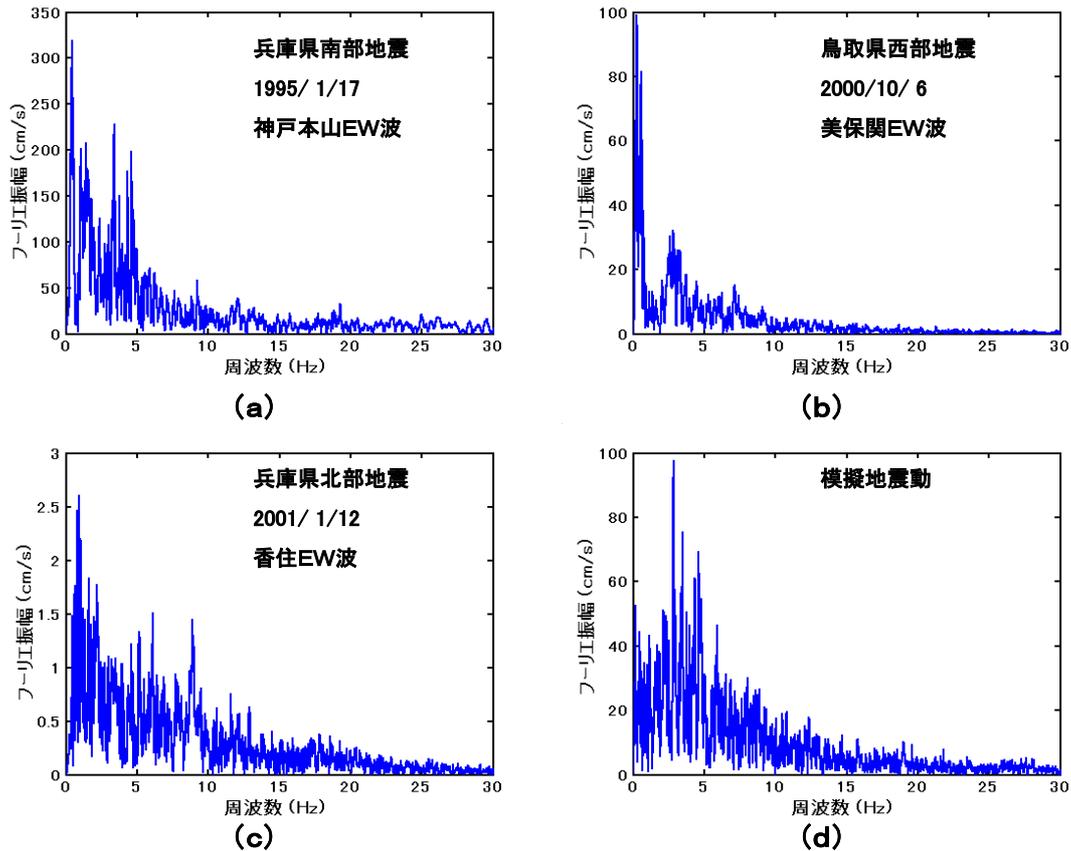


図7 観測地震波形 (a) ~ (c) 及び模擬地震動 (d) のフーリエ振幅スペクトル

方法によりこの指針を満たす模擬地震動が作成されている。

図7(d)には模擬地震動のフーリエ振幅スペクトルを、観測地震波形のフーリエ振幅スペクトルの例(a)~(c)と比較して示した。この結果は時刻歴データ 16384 点を高速フーリエ変換(F F T)して得たもので、同図(a)はマグニチュード M=7.3 の兵庫県南部地震の神戸本山で観測された EW 波、(b)は M=7.3 の鳥取県西部地震の美保関での EW 波、(c)は M=5.4 の兵庫県北部地震の香住での EW 波のフーリエ振幅スペクトルである。模擬地震動のフーリエ振幅スペクトルは観測地震波形と同様のバラツキを示している。

使用した 20 波の観測地震波形が、できあがった模擬地震動に対してどの程度寄与しているかを確認する目的で、ここでは先ず調整された重みの分布を確認した。図8は、周波数スケール j 毎に純粋な重み W_{Pj}^i の絶対値を 20 波の純粋重みの絶対値の和で規格化した、次式で定義される相対重みを示したものである。

相対重み =

$$\frac{|W_{Pj}^i|}{\left(\sum_i |W_{Pj}^i|\right)} \quad \dots \dots \dots (7)$$

図8で、各観測地震波形の相対重みはマグニチュードの大きい地震の

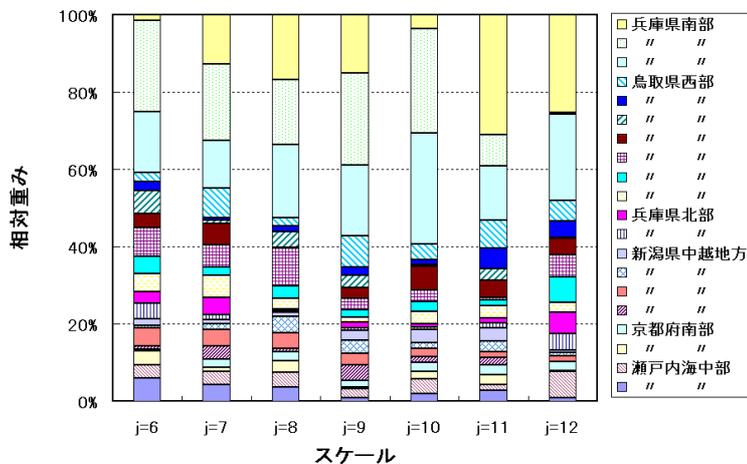


図8 純粋な重みの相対値 $|W_{Pj}^i| / \left(\sum_i |W_{Pj}^i|\right)$ (j = 6~12)

順に上から並べてあり、周波数スケールは大崎スペクトルを与えた 0.02~2 秒周期に対応する $j = 6 \sim 12$ の範囲で表示されている。この図より、全ての周波数スケールにおいて絶対値の大小はあるものの 20 波全てのウェーブレット係数が使われていること、中でも兵庫県南部地震の観測波 3 波の重みが大きいこと、が指摘される。

次に、次式で定義されるエネルギー寄与率を同様の形式で図 9 に示した。

$$\text{エネルギー寄与率} = (W_j^i)^2 \cdot \sum_k (\alpha_{j,k}^i)^2 / [\sum_i (W_j^i)^2 \cdot \sum_k (\alpha_{j,k}^i)^2] \quad \dots\dots\dots (8)$$

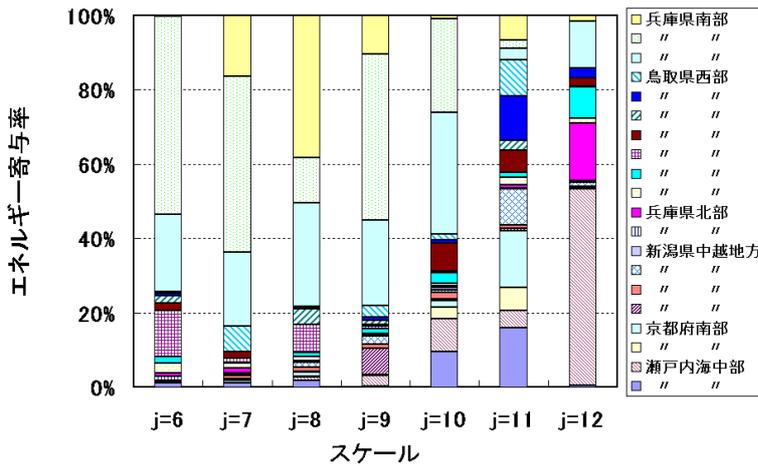


図 9 より、周波数スケールが $j = 6 \sim 10$ の長周期領域では兵庫県南部地震の 3 波の寄与が模擬地震動のエネルギーの 60% 以上を占めていること、 $j = 11, 12$ の短周期領域では各地震波が同程度の寄与を示すばかりでなく、マグニチュードが相対的に小さい瀬戸内海中部地震 ($M=5.1$) や兵庫県北部地震 ($M=5.4$) の観測波が大きな寄与を示す結果となっている。先に図 5 に時刻歴を示した観測地震波形は何れもエネルギー寄与率の大きな波を選択したものである。このような相対重みとエネルギー寄与率の結果となっ

図 9 模擬地震動の周波数スケール毎のエネルギーに対する観測地震波形の寄与率 ($j = 6 \sim 12$)

た理由として、図 3 に示した大崎スペクトルの形状と良く似た形状の応答スペクトルを持つ観測地震波形に対する重みが大きくなることが考えられる。

作成された模擬地震動の特性を表す別の量として、時刻歴 $x(t)$ を周波数スケール j 毎の成分波に分解した $x^{(j)}(t)$ から、次式で定義される群遅延時間 $t_{gr}^{(j)}(\omega)$ の標準偏差 $\sigma_{t_{gr}^{(j)}}$ を求め、使用した観測地震波形の群遅延時間標準偏差の分布との比較を行った。なお、群遅延時間の標準偏差は、地震動エネルギーの時間的広がりを示す指標であり、各周波数スケール毎の成分波に分解して得られた群遅延時間の標準偏差は、地震動の時間一周波数特性を表す有力な指標である^{9) - 11)}。

$$\sigma_{t_{gr}^{(j)}} = \left[\sum_{i=1}^{N^{(j)}} \{t_{gr}^{(j)}(\omega_i) - \mu_{t_{gr}^{(j)}}\}^2 / N^{(j)} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、群遅延時間 $t_{gr}^{(j)}(\omega)$ はフーリエ位相スペクトル $\phi(\omega)$ の微分として

$$t_{gr}^{(j)}(\omega_i) = \frac{d\phi}{d\omega} = - \frac{\phi(\omega_i) - \phi(\omega_{i+1})}{\Delta\omega} \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表わされ、(9) 式の $\mu_{t_{gr}^{(j)}}$ はスケール j の振動数領域での $N^{(j)} = 2^j$ 点の平均値

$$\mu_{t_{gr}^{(j)}} = \sum_{i=1}^{N^{(j)}} t_{gr}^{(j)}(\omega_i) / N^{(j)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。 $\phi(\omega)$ の計算は、 2^{14} 点の各スケール成分波の後に「0」を追加して $2^{17}=131072$ 点のデータとし、これをFFT解析して得た位相にアンラップ処理を行って求めた。

図10に、使用した観測地震波形20波の群遅延時間標準偏差 $\sigma_{\text{tgr}}^{(j)}$ のスケール毎の平均値とそのバラツキ(1 σ)の範囲を示し、作成された模擬地震動の $\sigma_{\text{tgr}}^{(j)}$ の値を比較して示した。同図より、模擬地震動の群遅延時間の標準偏差は、長周期側(小さなj)で長く、短周期側で短くなっており、観測地震波形の $\sigma_{\text{tgr}}^{(j)}$ 値の分布のほぼ中央値を示している。

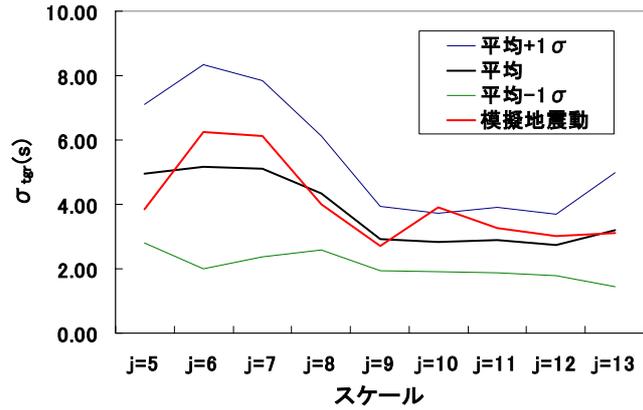


図10 観測地震波形20波の群遅延時間標準偏差 $\sigma_{\text{tgr}}^{(j)}$ の分布と、模擬地震動の $\sigma_{\text{tgr}}^{(j)}$ の比較

4.2 大崎スペクトルを満たす模擬地震動作成結果のまとめ

マグニチュードと震央距離をパラメータとして、前節の条件を含む計5ケースの大崎スペクトルを設定し、それぞれ異なる観測地震波形20波の組み合わせを用いて模擬地震動を作成した。何れの場合もスペクトル強度の規格化を行った結果、使用した観測地震波形全てのウェーブレット係数列が模擬地震動の特性に寄与していることが確認された。また、作成された模擬地震動のエネルギーに対しても、マグニチュードの相対的に小さい地震の観測波形が寄与していることも確認された。

作成された模擬地震動の時刻歴を図11に、また応答スペクトルと大崎スペクトルとの比を表2にまとめて示した。図11から、何れの場合も観測地震波形の位相特性に近い模擬地震動が作成されている。全てのケースで大崎スペクトルとの比の最小値は0.85以上であり、原子力発電所の耐震設計技術指針の定める条件を満たしている。

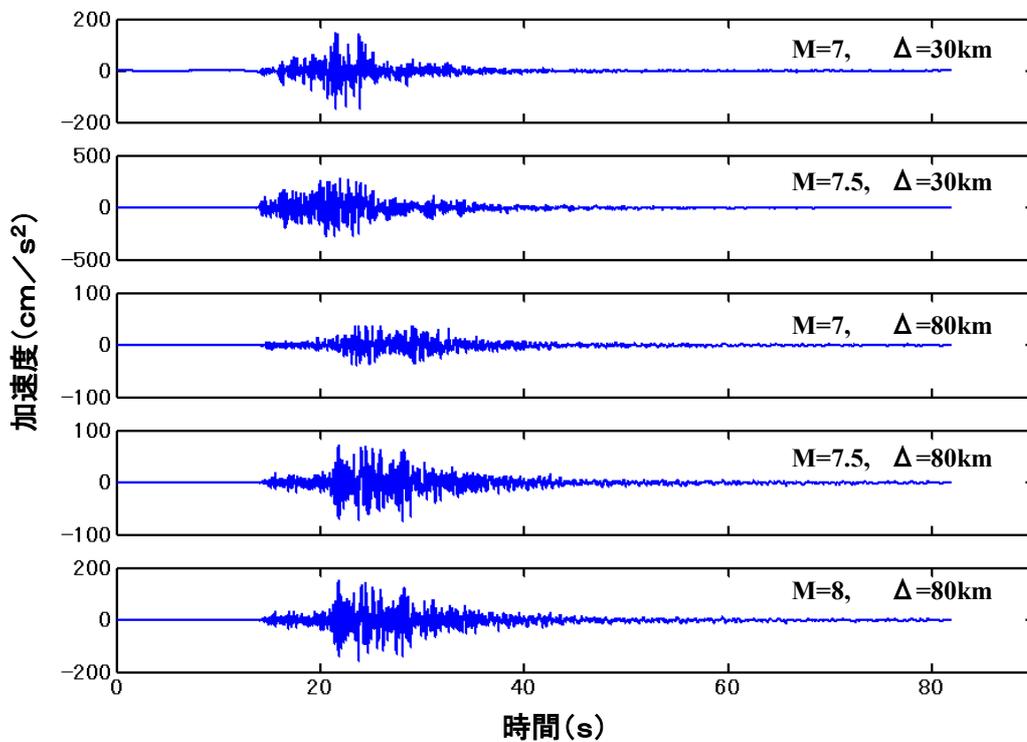


図11 大崎スペクトルを満たす模擬地震動の時刻歴の例

表2 大崎スペクトルを満たす模擬地震動作成結果

ケース	マグニ チュード	震央距離 Δ (km)	模擬地震動の応答スペクトルと大崎スペクトルとの比			
			平均値	標準偏差	最小値	最大値
1	7	30	1.00	0.036	0.92	1.09
2	7.5	30	1.00	0.033	0.90	1.07
3	8	80	1.00	0.028	0.93	1.08
4	7.5	80	1.00	0.019	0.93	1.04
5	8	80	1.00	0.033	0.88	1.09

5. 結論

本論文では、実測された地震波形を用いて、目標応答スペクトルを満たす模擬地震動を作成する、新たな方法を提案した。この方法は回帰モデル等のパラメトリックなモデルを仮定せず、観測地震波形の持つ振幅・位相特性をウェーブレット係数という形でそのまま利用する簡明な点を特徴としている。ここでは、震源距離の範囲を指定して複数の地震記録から無作為に選んだ20波の観測地震波形を用いて、大崎スペクトルを満たす模擬地震動が作成できることを示した。また、作成された模擬地震動の特性が、利用した観測地震波形の中の特定の波だけに影響されることなく各波の特性を含むこと、群遅延時間も観測地震波形の持つ値の範囲に含まれること、従って複数の観測地震波形の平均的な時間一周波数特性を持つことを示した。

ここで提案した方法により作成した模擬地震動は、そのまま耐震設計評価用のサンプル波として利用することが可能である。今後、さらに広範囲のマグニチュードと震源距離に対応できるように観測地震波形のデータベースを拡充すると共に、作成された模擬地震動の特性の範囲を明らかにして行く予定である。

謝辞

本研究を進めるに当たり適切な助言を頂いた京都大学防災研究所・佐藤忠信教授、鉄道総合技術研究所・室野剛隆副主任研究員に感謝します。また、本研究に用いた兵庫県南部地震の観測地震波形には関西地震観測研究協議会の速度計記録と気象庁の加速度計記録を、その他の地震の観測波形には防災科学技術研究所のKiK-netのデータを利用したことを記して感謝します。

参考文献

- 1) 電気技術基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針、JEAG4601-1987、(社)日本電気協会、1987、pp. 56-68.
- 2) Jennings, P.C, G.W. Housner, and N.C. Tsai : Simulated earthquake motions, E. E. R. L., California Institute of Technology, Pasadena, 1968.
- 3) 荒川直士、川島一彦、相沢 興：応答スペクトル特性を調整した時刻歴地震応答解析用入力地震動波形、土木技術資料、第26巻、第7号、1984.
- 4) 大崎順彦、岩崎良二、大川 出、政尾 享：地震波の位相特性とその応用に関する研究、第5回日本地震工学シンポジウム、1978、pp. 201-208.
- 5) 和泉正哲、勝倉 裕：地震動の位相情報に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、第327号、1983、pp. 20-26.
- 6) 沢田 勉、永江正広、平尾 潔：位相差分による地震動継続時間の定義とその統計解析、土木学会論文報告集、第368号/I-5、1986、pp. 373-382.
- 7) 石井 透、渡辺孝英：地震動の位相特性と地震のマグニチュード・震源距離・深さの関係、日本建築学会学術講演会梗概集、1987、pp. 385-386.

- 8) 佐藤智美、植竹富一、菅原良次：群遅延時間を用いた長周期地震動の経験的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 493 号、1997、pp. 31-39.
- 9) 佐藤忠信、室野剛隆、西村昭彦：震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化、土木学会論文集、No. 612/I-46、1999、pp. 201-213.
- 10) 佐藤忠信、室野剛隆、西村昭彦：観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化、土木学会論文集 No. 640/I-50、2000、pp. 119-130.
- 11) 室野剛隆：強震時の非線形動的相互作用を考慮した杭基礎の耐震設計法に関する研究、鉄道総研報告、特別第 82 号、1999.
- 12) 佐藤忠信、室野剛隆：位相情報を用いた地震動のシミュレーション法、土木学会論文集、No. 675/I-55、2001、pp. 113-123.
- 13) 伊山 潤、桑村 仁：ウェーブレット逆変換による模擬地震動の作成、日本建築学会構造系論文集、第 502 号、1997、pp. 47-54.
- 14) 前田寿朗、佐々木文夫、山本佳史：Sinc ウェーブレットを用いた非定常性を有する模擬地震動作成手法の研究、日本建築学会構造系論文集、第 553 号、2002、pp. 33-40.
- 15) 曾根 彰、増田 新、秋山 修、橋本唯人：ウェーブレット変換を用いた模擬地震動の作成、日本機会学会、Dynamic and Design Conference 2001、2001. 8. 6-9 東京、513.
- 16) I. Daubechies : Ten Lectures on Wavelets, CBMS61, SIAM, 1992.
- 17) Michio Yamada and Koji Ohkitani : Orthonormal Wavelet Analysis of Turbulence, Fluid Dynamics Research, Vol.8, 1991, pp.101-115.
- 18) 佐々木文夫、前田達哉、山田道夫：ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析、構造工学論文集、Vol. 38B、pp. 9-20、1992.
- 19) 玉置哲男、田辺 章、中村雅彦、水町 渉、佐々木文夫、山田道夫：Wavelet 解析による人工地震波の作成（その 1. 鳥取県西部地震の震源近傍地震波を用いた人口地震波の作成）、第一回日本地震工学研究発表・討論会、2001. 11. 28-30 東京、99.

(受理：2003 年 1 月 17 日)

(掲載決定：2003 年 7 月 11 日)

Generation of Artificial Earthquake Motion using Observed Earthquake Motions

TAMAOKI Tetsuo ¹⁾, TANABE Akira ²⁾, NAKAMURA Masahiko ³⁾,
SASAKI Fumio ⁴⁾, MIZUMACHI Wataru ⁵⁾ and YAMADA Michio ⁶⁾

1) Member, Advanced Reactor & Fuel Cycle Group, Aitel Corporation, Dr. Eng.

2) Member, Aitel Corporation

3) Member, Technology Department, Building Division, Shimizu Corporation

4) Member, I.T. Solutions Department, Kajima Corporation, Ph. D.

5) Member, Nuclear Power Engineering Corporation

6) Member, Graduate School of Mathematical Sciences, The University of Tokyo, Ph. D.
(Present address: Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University)

ABSTRACT

In probabilistic seismic hazard analysis, severer ground motions than those used in usual design is very important to estimate a damage frequency of structures and components. An artificial ground motion of such a severer earthquake is required to have nonlinear response spectral properties similar to those of real motions. In this paper we propose a new simple non-parametric method to generate an artificial earthquake motion which has a target response spectrum. In this method, the artificial earthquake motion is generated in the form of the orthogonal wavelet expansion, in which the wavelet coefficients of the artificial earthquake motion are given by weighted sums of wavelet coefficients of observed earthquake motions in each frequency range. The weights of observed earthquakes are adjusted to reduce the difference between the response spectrum of the artificial earthquake motion and the target response spectrum, to a tolerance level. We apply this method to generate an artificial earthquake motion subject to the Ohsaki spectrum, from randomly selected 20 observed motions in a given range of hypocentral distance. Each of these 20 observed motions is found to contribute appreciably to the generated motion in all frequency ranges. The average and standard deviation of group delay time of the generated motion are, respectively, nearly at the central values of those for the observed motions. These results show that the artificial earthquake motions have average time-frequency characteristics of those for the observed motions.

Key Words : Artificial Earthquake Motion, Wavelet Transform, Group Delay Time, Time-Frequency Characteristics, Response Spectrum, Observed Earthquake Motion