Meyer-Yamada のウェーブレットを利用した 非定常地盤増幅特性の経験的評価

EMPIRICAL ESTIMATION OF NON-STATIONARY SITE EFFECTS USING THE MEYER-YAMADA WAVELET

赤澤 隆士*, 入倉 孝次郎**
Takashi AKAZAWA and Kojiro IRIKURA

A technique for empirically estimating non-stationary site effects in time domain is proposed by ingeniously averaging out the wavelet coefficients to improve Birgören and Irikura procedure (2005). They developed a method for estimating site effects in amplification and phase using the Meyer-Yamada wavelet. An advantage of the method is an equalization of the wavelet coefficients for multiple seismic records. However, it requires accurately synchronized records. In this study, an automated phase identification algorithm to synchronize the S-wave phases is proposed. The applicability of the proposed method is demonstrated for the observed seismic records.

Keywords : Site Amplification Effects, Non-stationarity, Wavelet Analysis, Spectral Analysis, Coherent Part, Equalization

地盤増幅特性, 非定常性, ウェーブレット解析, スペクトル解析, コヒーレント成分, 平均化

1. はじめに

震源断層から放射されたエネルギーは、波動として地球内部を伝播し、表層地盤で増幅されて地表に到達する。強震動予測を行う上で、これらの過程を適切に評価することは非常に重要であり、将来発生する大地震時の被害軽減に寄与する。これまでに、これらの特性を震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性に分類し、各特性に対して多くの研究が行われてきた。とりわけ、地盤増幅特性が地表での地震動特性に与える影響は大きく、例えば、2003年十勝沖地震や2004年の紀伊半島南東沖の地震での平野部における長周期成分の卓越は、堆積地盤の増幅効果に起因するものである^{1)~3)}。

地盤増幅特性を評価する手段として、地盤情報を利用して解析的に求める方法があるが、解析に利用できるだけの情報を得るには限界があるため、観測記録のみを利用することで経験的に評価する方法がよく利用される。この経験的評価手法には、(1) 常時微動記録の水平動成分と上下動成分のスペクトル比を利用する方法⁴⁾や、(2) 岩盤上で得られた水平動地震観測記録とのスペクトル比を利用する方法^{例えば5)~8)}、(3) 複数地点における複数地震の水平動地震観測記録を利用して震源特性・伝播経路特性と共に地盤増幅特性を分離する方法⁹⁾などがある。最初の方法は、地震観測記録や地盤情報が無い場合に非常に有効かつ簡便に求めることができる手法である。2 番目の方法は、地震観測記録から共通項である震源項と伝播経路項を直接除去しようという考え方に基づいており、基盤岩上に設置された地中地震計の地震観測記録と地表記録のスペクトル比を地盤増幅特性とする方法^{例えば5)~7)}や、地表の岩盤観測点における

地震観測記録とのスペクトル比を用いる方法⁸⁾がある。前者は、地表—地中のアレー観測を行っている観測点が限られているために、利用可能な場所に制約がある一方、後者は、両観測点が近接し、かつ、参照点として利用する岩盤観測点を適切に選定する必要がある。3 番目の方法は、回帰計算によって3 特性の同時抽出を可能としているが、地表の岩盤観測点記録とのスペクトル比を用いる方法⁸⁾と同様、得られる地盤特性は岩盤観測点に対する相対的な評価として表現されるため、岩盤観測点の選定には十分注意する必要がある。これに対して、山本・他¹⁰⁾は、地震観測記録から震源特性と伝播経路特性を独立して抽出・分離することで地盤増幅特性の評価を試みており、鶴来・他^{11),12)}によりその適用性が確認され、地盤増幅特性評価手法として確立した（以下、山本—鶴来の方法と称する）。

このように地盤増幅特性の抽出手法は数多く提案されているが、そのほとんどが対象地点における地震動の振幅スペクトルに基づくものであり、地震動の継続時間（非定常性）と密接に関係する位相情報は反映されていない。強震動予測手法の一つである統計的グリーン関数法¹³⁾を適用する際には、一般的に、対象とする地点での地震動の振幅特性は考慮されるが、位相特性は無視されて一様乱数が仮定される。これに対し、Birgören and Irikura¹⁴⁾は、位相に依存した時間領域での地盤増幅特性を評価する経験的手法を提案した。この手法は、対象とする観測点で得られた地震観測記録に対して Meyer-Yamada のウェーブレット^{15),16)}を利用した離散ウェーブレット変換を行い、得られたウェーブレット係数から震源特性と伝播経路特性を取り除くことで地盤増幅特性を抽出するものであり、位相情

* 助地域 地盤 環境 研究所 工修

** 愛知工業大学 客員教授・理博

Geo-Research Institute, M. Eng.

Adjunct Prof., Aichi Institute of Technology, Dr. Sci.

報がそのまま解析中に保存される。この手法を適用することで、例えば統計的グリーン関数法ではこれまで位相を一様乱数で仮定していたものを、対象地点固有の位相特性で評価することが可能となる。

Birgören and Irikuraの方法¹⁴⁾では、複数の記録で得られた地盤増幅特性を示すウェーブレット係数を適切に平均化することが一番の課題であり、これが、この手法が有する「地盤増幅特性の振幅・位相特性」の信頼性を大きく左右する。本報では、まず、山本・鶴来の方法とBirgören and Irikuraの方法について概説する。次に、Birgören and Irikuraの方法により得られる地盤増幅特性を示すウェーブレット係数の特性について考察する。そして、Birgören and Irikuraの方法の信頼性向上を目的として、地盤増幅特性を示すウェーブレット係数を適切に平均化する方法を提案する。最後に、これを関西地震観測研究協議会¹⁷⁾の福島観測点（以下、FKS観測点と称する）で得られている地震観測記録に対して適用し、同地点における地盤増幅特性の振幅・位相特性の抽出を試みると共に、提案手法の適用性を検証する。

2. 山本・鶴来の方法^{10), 11)}による地盤増幅振特性の算出

地震観測記録の直達S波部分のフーリエスペクトル $Fa_i(f)$ は、次式で表すことができる⁹⁾。

$$Fa_i(f) = S_i(f)P_i(f)G(f) \quad (1)$$

ここで、 i は地震に対する添え字を示す。 $S_i(f)$ は震源特性、 $P_i(f)$ は伝播経路特性、 $G(f)$ は対象地点の地盤増幅特性を示す振幅スペクトルである。（観測点を表す添え字 j を付けて、例えば伝播経路項を $P_j(f)$ 、地盤増幅項を $G_j(f)$ と表すことが多いが、ここでは、後述するBirgören and Irikuraの方法¹⁴⁾に揃えるために、これを省略している。）伝播経路項は次式で表される。

$$P_i(f) = \frac{1}{R_i} \exp\left(\frac{-\pi R_i f}{Q(f)V_s}\right) \quad (2)$$

R_i は震源距離、 $Q(f)$ は周波数依存を考慮したQ値、 V_s は震源域から地震基盤までの媒質の平均的なS波速度である。一方、震源項は次式¹³⁾でモデル化されている。

$$S_i(f) = M_{oi} \frac{R_{\theta\theta} F_s P_{RTTN}}{4\pi\rho V_s^3} \frac{2\pi f}{1+(f/f_c)^2} \quad (3)$$

ここで、 M_{oi} は地震モーメント、 $R_{\theta\theta}$ はラディエーションパターン係数、 F_s は自由地表面の効果を表す定数、 P_{RTTN} は水平2成分へのエネルギー分配を表す定数、 ρ は震源域から地震基盤までの媒質の平均的な密度、 f_c はコーナー周波数である。なお、(3)式は、検証に利用するFKS観測点の地震観測記録（速度記録）に合わせて、速度振幅で示した。

山本・他¹⁰⁾は、震源項と伝播経路項の積 $S_i(f)P_i(f)$ を「基準スペクトル」（ここでは、鶴来・他(1997)¹¹⁾に揃えて「基盤スペクトル」と称する）として別途抽出することとし、これと地震観測記録のスペクトル $Fa_i(f)$ との比を、地盤増幅特性 $G(f)$ と定義した。

$$G(f) = \frac{Fa_i(f)}{S_i(f)P_i(f)} \quad (4)$$

鶴来・他(1997)は、(4)式を複数の地震に対して適用し、それらを平均化することで対象地点における経験的な地盤増幅特性とした。以下に、鶴来・他(1997)による抽出手順をまとめる。

- ① 各地震観測記録の水平2成分のフーリエスペクトルをそれぞれ計

算し、そのrms値 $Fa_i(f)$ を求める。

- ② 振幅スペクトル $Fa_i(f)$ を基盤スペクトル $S_i(f)P_i(f)$ で除することで、地震 i に対する地盤増幅特性を表す振幅スペクトル $G_i(f)$ を抽出する（(4)式）。基盤スペクトルの震源項（(3)式）を規定するパラメータ（ M_0 と f_c ）は、同時記録が得られている観測点で最も地盤増幅特性が小さい地点のスペクトルにより求める。
- ③ 地盤増幅特性を表す振幅スペクトル $G_i(f)$ を全地震で平均化することで、対象地点の経験的地盤増幅特性を示す振幅スペクトル $G(f)$ を抽出する。

$$G(f) = \sum_{i=1}^{N_e} \frac{G_i(f)}{N_e} \quad (5)$$

ここで、 N_e は利用地震数を示す。

3. Birgören and Irikuraの方法¹⁴⁾による非定常地盤増幅特性の算出

前述した山本・鶴来の方法でも利用されるフーリエ解析^{例えば18)}は、定常振動関数を基底関数としており、時刻歴波形のような非定常信号はその線形結合で表されると仮定した解析手法である。この手法は、周波数解析手法としてよく利用されるが、その仮定の性質上、時間の情報が解析中に保存されないため、時間領域において時々刻々変化する信号の情報の解析は困難である。一方、近年、工学的見地から地震動特性の解析にも利用^{例えば19)~21)}されるウェーブレット解析^{例えば22)~24)}は、時間領域、周波数領域上で局在化したウェーブレットを基底関数とすることでフーリエ解析の問題を克服し、時間周波数解析を可能としており、逆変換も可能である。一般に、データを時間領域と周波数領域で相互に利用する場合には、基底を完全正規直交系とする離散ウェーブレット変換が利用される。これにより、両領域におけるデータの独立性が保たれ、例えば、データを変換領域で加工した場合でも、逆変換により元の領域に戻した場合のデータの精度が保証される^{25), 26)}。

Meyer¹⁵⁾は、完全正規直交となるアナライジング・ウェーブレットを提案した。図1に、Meyerの同ウェーブレットの時刻歴波形 $\psi(t)$ と、そのフーリエ変換の絶対値を示す。今、時系列データ $f(x)$ のデータ数を $N=2^n$ 個と仮定すると、離散ウェーブレット変換は

$$f(t) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{2^n-1} \alpha_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

で与えられる¹⁶⁾。このとき、ウェーブレット $\psi_{j,k}(t)$ は

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{2^{j/2}}{\sqrt{T_d}} \psi\left(\frac{2^j}{T_d}t - k\right), \quad (j, k \in \mathbb{Z}) \quad (7)$$

となる。ここで、 $\alpha_{j,k}$ はウェーブレット係数、 t は時間、 j と k はそれぞれウェーブレットのスケールと位置（時間遅れ）を示す整数、 T_d は解析する地震観測記録の長さ(秒)である。このときのアナライ

図1 Meyerのアナライジング・ウェーブレット

ジング・ウェーブレット $\psi(2^j T_d^{-1}t)$ は、以下の周波数範囲をサポートする。

$$\frac{2^j}{3T_d} \leq |f| \leq \frac{2^{j+2}}{3T_d} \quad \left(\frac{2^{j+1}}{3T_d} \pi \leq |\omega| \leq \frac{2^{j+3}}{3T_d} \pi \right) \quad (8)$$

このウェーブレット (Meyer-Yamadaのウェーブレット) には、

$$E_j = \sum_k |\alpha_{j,k}|^2 \quad (9)$$

で表される各スケールのエネルギー E_j が、ウェーブレット・レベル j の代表周波数 ($2^{j+1}/3T_d$) に対応するパワースペクトル $Pa(f)_j$ と非常によい対応を示すという特徴があり、これが、Birgören and Irikuraの方法でこのウェーブレットを採用する拠り所となっている。

$$We_j = \frac{T_d}{2^j} E_j \equiv Pa(f)_j \quad (10)$$

ここで、 We_j はウェーブレットスペクトルである。

Birgören and Irikuraの方法では、地震観測記録のウェーブレット係数から震源および伝播経路特性を取り除くことで、対象地点の地盤増幅特性を成分毎に抽出する。以下に、抽出手順をまとめる。

- ① 各地震観測記録 $f_i(t)$ に対してそれぞれ離散ウェーブレット変換を実行し、ウェーブレット係数 $\alpha_{j,k,i}^o$ を求める。

$$\alpha_{j,k,i}^o = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{j,k}^*(t) f_i(t) dt \quad (11)$$

- ② ウェーブレット係数 $\alpha_{j,k,i}^o$ を、ウェーブレット・レベル j の代表周波数 f_j に対応する基盤スペクトル $S(f)_{j,i} P(f)_{j,i}$ で除することで、地盤増幅特性を示すウェーブレット係数 $\alpha_{j,k,i}^G$ を求める。

$$\alpha_{j,k,i}^G = \frac{\alpha_{j,k,i}^o}{S(f)_{j,i} P(f)_{j,i}} \quad (12)$$

ここでは、 $\alpha_{j,k,i}^G$ を地盤増幅ウェーブレット係数と称する。(12)式は、同じような震源破壊時間である近地の小地震に対して有効である。この場合、震源および伝播経路による位相遅れは、地盤増幅による遅れと比較して無視できるほど小さいと仮定できる。

- ③ 各地震に対して得られた地盤増幅ウェーブレット係数 $\alpha_{j,k,i}^G$ を全地震で平均化することで、対象地点に対する経験的な地盤増幅ウェーブレット係数 $\alpha_{j,k}^G$ を抽出する。

$$\alpha_{j,k}^G = \sum_{i=1}^{N_e} \frac{\alpha_{j,k,i}^G}{N_e} \quad (13)$$

ここで、 N_e は利用地震数を示す。ただし、精度が不足している周波数範囲に対応するウェーブレット・レベルは、平均化には利用しない。

- ④ 地盤増幅ウェーブレット係数 $\alpha_{j,k}^G$ を逆変換して得られる時刻歴波形 $G(t)$ を、対象地点の経験的地盤増幅特性とする。

図2 ウェーブレット振幅スペクトルとフーリエスペクトルの比較

$$G(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} \alpha_{j,k}^G \psi_{j,k}(t) \quad (14)$$

4. 地盤増幅ウェーブレット係数の特性

(10)式は、ウェーブレット係数 $\alpha_{j,k}$ の絶対値の二乗の合計として表されるウェーブレットスペクトル We_j はパワースペクトル $Pa(f)_j$ にほぼ相当する (特性1) ことを示しているが、同様に、ウェーブレット係数の絶対値の合計はフーリエスペクトル $Fa(f)_j$ にほぼ相当する (特性2) ことが、経験的に明らかとなっている。

$$Wa_j = \frac{T_d}{2^j} \sum_k |\alpha_{j,k}| \equiv Fa(f)_j \quad (15)$$

ここでは、 Wa_j をウェーブレット振幅スペクトルと称する。図2に、一例として、2004年9月5日23時57分に紀伊半島南東沖で発生した地震をFKS観測点で捉えたNS成分記録のウェーブレット振幅スペクトルとフーリエスペクトルを重ねて示す。(15)式より、(12)式で示した地震観測記録から求められるウェーブレット係数 $\alpha_{j,k,i}^o$ について、次式が成り立つ。

$$Fa(f)_{j,i} \equiv \frac{T_d}{2^j} \sum_k |\alpha_{j,k,i}^o| \quad (16)$$

(12)式と(16)式より、地盤増幅特性を示すウェーブレット振幅スペクトル $Wa_{j,i}^G$ は、(4)式で表される振幅スペクトル $G(f)_{j,i}$ に対応する。

$$Wa_{j,i}^G \equiv G(f)_{j,i} \quad (17)$$

ここでは、 $Wa_{j,i}^G$ を地盤増幅ウェーブレット振幅スペクトルと称する。

(17)式は、水平2成分の地盤増幅ウェーブレット振幅スペクトルを計算し、そのrms値を全地震で平均して得られるスペクトルが、山本一鶴来の方法^{[10],[11]}により得られる振幅特性 ((5)式) にほぼ相当する (特性3) ことを意味する。この妥当性を確認するために、ここでは、鶴来・他(2002)^[12]で求められているFKS観測点に対する経験的地盤増幅特性の振幅スペクトルを利用する。結果の差違を明確にするために、解析には、鶴来・他(2002)で利用された地震観測記録、および基盤スペクトルの各パラメータをそのまま利用する。すなわち、表1に示す地震、地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_c を利用することとし、 $R_{\theta\theta}$ 、 F_s 、 P_{RTTN} 、 ρ 、 V_s はそれぞれ0.63、2、1、2.7t/m³、3.6km/sとする。また、Q値は、鶴来・他(2002)で求められた

$$Q(f) = 63.8 f^{1.00} \quad (18)$$

を利用する。図3に、水平2成分に対する地盤増幅ウェーブレット振幅スペクトルのrms値の平均値と平均値 $\pm 1\sigma$ を、鶴来・他(2002)の結果と重ねて示す。ここで、鶴来・他(2002)に掲載されている図は平滑化されているが、図3では、比較のために平滑化しない場合を示している。全周期帯域において両者は非常によい対応を示しており、特性3の妥当性を確認することができる。

(12)式で得られたウェーブレット係数を逆変換すると、地震 i に対する地盤増幅特性を示す時刻歴波形が得られ、そのフーリエスペクトルは(4)式で表される振幅スペクトル $G(f)_i$ に対応することが、(15)～(17)式より導き出される。したがって、水平2成分に対して地盤増幅特性を示す時刻歴波形のフーリエスペクトルを計算し、そのrms値を全地震で平均して得られるスペクトルは、山本一鶴来の方法により得られる振幅特性 ((5)式) にほぼ相当する (特性4) ことになる。図4(a)に、特性3の検証で利用した地震観測記録と基盤スペクトル

の各パラメータを利用して求めた同スペクトル（図では「本検討」としている）を鶴来・他(2002)の結果と重ねて示す。また、図4(b)に両者の比を示す。1Hz以下で本検討による結果が比較的大きめに求められる周波数帯があるが、その大きさは最大でも1.5倍程度であり、特性4の妥当性を裏付けるには十分である。

5. 地盤増幅ウェーブレット係数の平均化手法の提案

ウェーブレット係数は、正または負の符号を有する実数値である。したがって、符号・絶対値が共に同じである2つのウェーブレット係数を平均した場合には、元の2係数と同じ係数が得られるが、絶対値は同じだが符号が異なる2係数を平均すると、得られる係数は

表1 鶴来・他(2002)¹²⁾における利用地震一覧

地震番号	発震時	震源位置	震源深さ (km)	M_J	M_0 (dyne·cm)	f_c (Hz)
1	1995.07.24 04:00:01.3	KYOTO OSAKA BORDER REG	14.0	4.1	8.98×10^{21}	2.38
2	1996.05.29 17:37:45.9	KYOTO OSAKA BORDER REG	17.0	3.8	3.24×10^{21}	3.16
3	1999.02.12 03:16:45.8	KYOTO OSAKA BORDER REG	15.0	4.0	1.19×10^{22}	3.06
4	2000.05.16 04:09:25.9	KYOTO OSAKA BORDER REG	16.0	4.3	3.50×10^{22}	1.20
5	2000.05.20 23:39:12.7	KYOTO OSAKA BORDER REG	16.0	3.7	2.91×10^{21}	3.94
6	2000.05.21 10:42:34.8	KYOTO OSAKA BORDER REG	15.0	3.8	1.21×10^{22}	2.87
7	2000.08.27 13:13:13.7	OSAKA PREF	11.0	4.1	1.38×10^{22}	2.39

図3 地盤増幅ウェーブレット振幅スペクトルと鶴来・他(2002)¹²⁾の結果の比較

(a) 重ね合わせ

(b) 比(本検討/鶴来・他)

図4 本検討で得られた地盤増幅特性と鶴来・他(2002)¹²⁾の結果の比較

*) ③～⑦は、全ての組み合わせに対する計算が完了するまで繰り返す

図5 提案手法のフロー

ゼロとなる。第3章で紹介したBirgören and Irikuraの方法¹⁴⁾の手順③において地盤増幅ウェーブレット係数の平均を求めているが、これは、ノイズのような非コヒーレント成分を消去し、コヒーレント成分である地盤増幅特性をより明瞭にさせることを目的としている。しかし、ウェーブレット係数中のコヒーレント成分の符号が揃っていない場合、平均されたウェーブレット係数中のコヒーレント成分は全体的に小さくなり、最終的に求めるべき経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形の振幅も過小評価となることは想像に難くない。このように、Birgören and Irikuraの方法では、地盤増幅ウェーブレット係数を適切に平均化することが一番の課題であり、これが、この手法が有する「地盤増幅特性の振幅・位相特性」の信頼性を大きく左右する。記録毎に波形が異なる以上、ウェーブレット係数を平均化することによる損失は避けられないが、係数の符号を適切に評価することでそれを最小限に止めることが、最終的に得られる結果の信頼性向上のためには不可欠である。

本検討では、第4章で示した地盤増幅ウェーブレット係数の特性に着目し、特性4で示した手順により得られる振幅スペクトル（以下、ターゲット・スペクトルと称する）と、Birgören and Irikuraの方

表2 本検討における利用地震一覧

地震番号	発震時	震源位置	震源深さ (km)	M_J	FKSからの震源距離(km)	M_0 (dyne-cm)	f_c (Hz)	M_0 と f_c の導出に利用したKiK-net観測点
1	1999.02.12 03:16:45.8	KYOTO OSAKA BORDER REG	15	4.0	37	9.68×10^{21}	2.6	HYGH04, OSKH04
2	1999.03.12 23:24:25.9	KYOTO OSAKA BORDER REG	15	3.9	36	5.46×10^{21}	2.1	HYGH04, OSKH04
3	1999.07.15 19:25:46.2	OSAKA BAY REGION	14	3.8	34	4.73×10^{21}	2.2	HYGH04
4	1999.08.02 04:58:14.4	OSAKA BAY REGION	14	3.9	33	5.10×10^{21}	1.8	WKYH02, WKYH03
5	2000.05.16 04:09:25.9	KYOTO OSAKA BORDER REG	16	4.3	34	2.64×10^{22}	1.5	HYGH04, OSKH04
6	2000.05.16 05:43:11.1	KYOTO OSAKA BORDER REG	15	3.6	35	1.59×10^{21}	3.0	OSKH02, OSKH04
7	2000.05.20 23:39:12.7	KYOTO OSAKA BORDER REG	16	3.7	33	1.96×10^{21}	3.0	HYGH04, OSKH02, OSKH04
8	2000.08.27 13:13:13.7	OSAKA PREF	11	4.1	26	6.92×10^{21}	1.8	OSKH04, WKYH02
9	2001.03.30 04:50:10.5	KYOTO OSAKA BORDER REG	16	3.7	39	1.62×10^{21}	3.1	HYGH04, OSKH02, OSKH04
10	2003.10.08 23:35:11.7	SE HYOGO PREF	14	4.2	34	6.83×10^{21}	2.3	HYGH04, OSKH01, OSKH02
11	2004.11.30 16:02:06.3	SE HYOGO PREF	9	3.3	23	7.00×10^{20}	3.9	HYGH04, OSKH01, OSKH02
12	2005.02.14 00:22:05.1	SE HYOGO PREF	13	4.1	33	7.04×10^{21}	2.0	HYGH04, OSKH01, OSKH02

図6 利用地震の震央位置

法により得られる経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形のフーリエスペクトルとの誤差を最小にすることで、平均化による損失を最小限に抑えることを提案する。すなわち、ターゲット・スペクトルを真の「地盤増幅特性を示す振幅スペクトル」と定義し、Birgören and Irikuraの方法により得られる時刻歴波形のスペクトルがそれに最も近くなるように、各地震観測記録の波形の符号(=ウェーブレット係数の符号)を調整する。この操作は、物理的にはS波の極性の違いを同一極性に合わせることに対応する。スペクトルの比較は、各成分に対して実施する。また、両スペクトルの直接的な比較のため、両者共に同じウェーブレット・レベルのウェーブレット係数を利用することとする。したがって、ターゲット・スペクトルの計算に際しても、Birgören and Irikuraの方法に倣い、精度が不足しているウェーブレット・レベルの同係数は利用しない。図5に、ここで提案する平均化手法のフローを示す。

6. 提案手法の適用性

本章では、Birgören and Irikuraの方法¹⁴⁾に、第5章で提案した地盤増幅ウェーブレット係数の平均化手法を導入し、FKS観測点における経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形を求めることで、提案手法の適用性を検証する。検証は、Radial成分とTransverse成分に対して実施する。地震観測記録は、S波到達の1秒前から40.96秒間を利用する。Birgören and Irikuraの方法では、S波到達の読み取りは非常に重要な要素であり、そのずれは、計算結果として得られる位相情報の誤差を増大させる。本検討では、ずれを極力小さくするために、読み取りに、確率構造の変化を精密に検出することが可能な方法である局所定常ARモデルのAIC (Akaike²⁷⁾, 北川²⁸⁾)を利用する。

6.1 地震の選定と M_0 , f_c の導出

経験的地盤増幅特性の算出に利用する地震は、FKS観測点からの震源距離を40km以下、震源深さを20km以下、気象庁マグニチュード M_J を3.0~5.0とする。ただし、地盤増幅ウェーブレット係数(12式)を計算する際に必要とする震源項(3式)のパラメータ(M_0 と f_c)の導出が困難な地震は利用しない。

地震観測記録に地盤増幅が無い場合には、そのフーリエスペクトルを伝播経路特性(2式)で除することで震源特性が抽出されることとなる。ここで導出する震源項のパラメータは、このようにして得られたスペクトルと理論式(3式)によるスペクトルが最も良くフィッティングする場合の値とする。本検討では、震央距離が50km以内かつボーリングデータからS波速度が2,000m/s以上の地中に埋設されていると考えられるKiK-net²⁹⁾の地中強震計で得られた観測記録を利用し、0.8~10Hzで両スペクトルが最もフィッティングする場合

図7 得られた震源スペクトル

の値を導出する。ただし、この周波数範囲で地盤増幅が見られる観測点の記録は利用しない。複数地点の観測記録がある場合には、山本・鶴来の方法^{10),11)}では最も地盤増幅特性が小さい地点で得られた地震観測記録のフーリエスペクトルを利用しているが、ここではスペクトルの平均を利用することで観測点固有の特性を抑える。

鶴来・他(2002)¹²⁾のQ値((18式)を利用した場合、 M_0 はF-net³⁰⁾による値より最大2倍程度大きく求まることが指摘されている¹²⁾ため、本検討では、近畿地方の上部地殻で発生した地震に対して有効とされるPetukhin et al.³¹⁾により求められた次式を利用する。

$$Q(f) = 86.0f^{0.82} \quad (19)$$

上式により得られる M_0 は、F-netの値と整合することが予備計算より明らかとなっている。そこで、F-netにおいて M_0 が求まっている場合にはそれを拘束条件とし、震源項のもう一つのパラメータである f_c を試行錯誤によるフォワードモデリングにより求める。ただし、F-netで M_0 が求まっていない場合には、 M_0 と f_c の両パラメータを観測記録から求める。その他の震源項(3式)と伝播経路項(2式)の各パラメータは、第4章と同じ値を利用する。

表2に、本検討で利用する地震、および各地震に対応する M_0 と f_c を示す。また、図6に利用地震の震央位置を示す。地震の期間は、1997年のKiK-netにおける観測開始から2005年12月31日までを対象としている。ここで、記録中にノイズが含まれているなどして M_0 あるいは f_c の導出に支障を来す記録は利用していない。また、利用可能な観測記録が無いためにこれらのパラメータを求めることができない地震は、地震の選定の段階で除外している。図7に、表2の M_0 と

f_c を理論式(3式)に代入して求められる震源スペクトル(太線)と、2パラメータの導出に利用した地震観測記録から求められる震源スペクトルの平均(細線)を重ねて示す。

6.2 ウェーブレット係数の選定

Birgören and Irikuraの方法¹⁴⁾では、精度が不足している周波数範囲に対応するウェーブレット・レベルの地盤増幅ウェーブレット係数

を平均化から除外することで、得られる結果に、より高い精度を与えている。本検討では、ウェーブレット係数においてS/N比が非常に小さいと判断される高周波数側のウェーブレット・レベル、および、フーリエスペクトルにおいて精度が低いと判断される周波数域を中心周波数とするウェーブレット・レベルを、その対象とする。

本検討で利用するFKS観測点記録のRadial成分とTransverse成分の

図8 利用地震観測記録の時刻歴波形

図9 利用地震観測記録のフーリエスペクトル

図10 利用地震観測記録のウェーブレット係数

時刻歴波形, およびそれらのフーリエスペクトルとウェーブレット係数を, 図8~10に示す。ここで, 図8と図10の振幅は, 各記録の最大値で正規化している。また, 図10の影を付けたウェーブレット係数は, 精度が不足しているために, 今回の検討では利用しない係数を示す。低周波数域は, 図9よりいずれの記録も0.1Hz以下で精度が不十分であると判断し, また高周波数側は, 図10より $j=11$ でいずれの記録もS/N比が非常に低いと判断した。

6. 3 ターゲット・スペクトルの算出

図11に, 図10で示した地震観測記録のウェーブレット係数から求められるターゲット・スペクトルを示す。ここで, 地盤増幅ウェーブレット係数の算出に際して利用する基盤スペクトルのパラメータのうち, M_0 と f_c は表2の値を, Q 値はPetukhin et al.³¹⁾の式(19)式を, その他のパラメータは第4章と同じ値を利用している。また, 提案手法での誤差評価の精度を上げるために, スペクトルにウィンドウ幅0.1HzのParzenウィンドウを施し, バラツキを抑えている。

6. 4 経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形の算出

第5章で提案した手法の精度に影響を与える要因は, 経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形のフーリエスペクトルとターゲット・スペクトルとの誤差を計算する方法である。最も簡単な方法は, スペクトル値が得られている周波数での差を求め, 計算対象とする周波数範囲での合計を両スペクトルの誤差とする方法であるが, 図11のように周波数を対数軸で見る場合, 評価の対象が高周波数側に偏ってしまう。ここでは, 経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形のフーリエスペクトルの方がターゲット・スペクトルの振幅値よりも基本的に小さくなるという特性に着目し, 対象とする周波数範囲において両スペクトルで挟まれた領域の面積を誤差と定義する。このとき, 周波数は対数軸で評価する。一方, 振幅は, 大きな誤差をより際立たせるために, 実軸かつ差の2乗に対して評価する。また, 計算対象とする周波数範囲の設定も重要であるが, ここでは, 多くの地震観測記録において良好な精度を有する周波数範囲をその対象とする。本検討では, 図10より, 周波数範囲の下限および上限を, それぞれ $j=3, 10$ の中心周波数 (0.13Hz, 16.67Hz) とする。

図12に, このようにして得られた誤差が最小および最大になる場合の経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形のフーリエスペクトルを, ターゲット・スペクトルと重ねて示す。両成分共, 誤差最小の場合は, 全体的にターゲット・スペクトルより過小評価となっているものの, スペクトル形状は似通っている。一方, 誤差最大の場合, 低周波数域では誤差最小の場合よりもさらに過小評価となっているが, Radial成分で2Hz, Transverse成分で3Hz以上では大きな違いは無く, 逆に誤差最小の場合よりターゲット・スペクトルに近い場合も少なくない。これは, 特に低周波数側で位相評価が理想的に行われていることを示すものである。したがって, これらの周波数を誤差評価の周波数範囲の上限とすることで, 提案手法の精度が向上すると期待される。ちなみに, 本検討で利用している地震観測記録では, これらの周波数を上限とした場合でも, 図12と全く同じスペクトルが得られた。図13に, 誤差最小の場合, すなわち提案手法の適用により得られたウェーブレット係数を, $j=4 \sim 6$ についてピックアップして示す。また, 図14に, 算出された経験的地盤増幅特性の時刻歴波形を示す。本検討において期待される経験的地盤増幅特性の時刻歴波形は, 地震基盤にインパルス波が入射した際に, 対象

図11 ターゲット・スペクトル

図12 経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形のフーリエスペクトルとターゲット・スペクトルとの比較

図13 提案手法の適用により得られたウェーブレット係数

図14 算出された経験的地盤増幅特性の時刻歴波形

地点に現れる波形である。堆積地盤が水平成層構造であれば多重反射波だけが現れることになるが、実際には、水平方向の不連続性により回折して現れる表面波も含まれた波形となる。図14に示した波形には、S波到達時の大振幅波やその直後の多重反射波、さらに表面波が表現されていることから、本検討において得られた時刻歴波形は、振幅・位相共に期待される形状が得られていると言える。一方、誤差最大の場合は、本来振幅が大きくなるべき時間帯の振幅が小さく、高周波成分が卓越した結果が得られた。これは、ウェーブレット係数の平均化が適切に行われていないことに起因すると考えられる。これらの結果は、提案手法により、地盤増幅ウェーブレット係数の平均化が適切に行われたことを示唆している。

7. おわりに

本研究では、位相に依存した時間領域での地盤増幅特性を評価する経験的手法であるBirgören and Irikuraの方法¹⁴⁾の信頼性向上を目的として、地盤増幅特性を示すウェーブレット係数を適切に平均化する方法を提案した。提案手法では、地盤増幅特性を示す時刻歴波形のフーリエスペクトルを各地震観測記録に対して計算し、それを全地震で平均して得られるスペクトルを真と定義した。そして、このスペクトルとBirgören and Irikuraの方法により得られる経験的地盤増幅特性を示す時刻歴波形のフーリエスペクトルとの誤差を最小にすることで、平均化による損失を最小限に抑えることを可能とした。この操作は、物理的にはS波の極性の違いを同一極性に合わせることに対応する。提案手法の適用性は、関震協のFKS観測点で得られている地震観測記録に対して提案手法を適用し、同地点における地盤増幅特性の時刻歴波形を抽出することで確認された。

提案手法の適用により、コヒーレント成分の適切な抽出が可能となった。しかし、平均化によりインコヒーレント成分が消失したため、得られた地盤増幅特性の時刻歴波形の振幅値が本来必要な振幅値より過小評価となる問題が残っている。今後、失われたインコヒーレント成分を評価する方法について、さらに検討する必要がある。

謝辞

本研究では、関西地震観測研究協議会および独立行政法人 防災科学技術研究所による地震観測記録を使用しました。ウェーブレット解析の基本ツールとして、京都大学の山田道夫先生よりご提供頂いたプログラムを使用しました。震源位置図の描画には、GMT³²⁾を使用しました。(財) 地域 地盤 環境 研究所の鶴来雅人氏には、鶴来・他(2002)¹²⁾の成果であるFKS観測点の地盤増幅振特性の生データを提供して頂きました。同研究所の香川敬生氏には、執筆にあたり貴重なご意見を頂きました。記して感謝します。

参考文献

- 1) Koketsu, K., Hatayama, K., Furumura, T., Ikegami, Y. and Akiyama, S.: Damaging long-period ground motions from the 2003 Mw8.3 Tokachi-oki, Japan, earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, Vol.76, No.1, pp.67-73, 2005.
- 2) Miyake, H. and Koketsu, K.: Long-period ground motions from a large offshore earthquake: The case of the 2004 off the Kii peninsula earthquake, Japan, *Earth Planets Space*, Vol.57, pp.203-207, 2005.
- 3) 岩田知孝, 浅野公之: 2004年9月5日紀伊半島沖・東海道沖の地震による地震動, 地震, 第2輯, 第58巻, pp.273~279, 2005.
- 4) 中村豊, 上野真: 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み, 第7回日本地震工学シンポジウム, pp.265-270,

- 1986.12.
- 5) 田居優, 岩崎好規, 吉川宗治, 入倉孝次郎, 永野徹, 尾崎昌彦: 岩盤内で観測された加速度波形を用いた震源, 伝播, サイト特性のインバージョンと震源パラメータの評価, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, 第1分冊, pp.163-168, 1990.12.
- 6) Kinoshita, S.: Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of the southern Kanto area, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.1387-1396, 1994.
- 7) Aguirre, J., and Irikura, K.: Nonlinearity, liquefaction, and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.87, pp.1244-1258, 1997.
- 8) Borchardt, R.D.: Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.60, pp.29-61, 1970.
- 9) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震, 第2輯, 第39巻, pp.579~593, 1986.
- 10) 山本みどり, 岩田知孝, 入倉孝次郎: 釧路地方気象台における強震動と弱震動に対するサイト特性の評価, 地震, 第2輯, 第48巻, pp.341~351, 1995.
- 11) 鶴来雅人, 田居優, 入倉孝次郎, 古和田明: 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震, 第2輯, 第50巻, pp.215~227, 1997.
- 12) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦勝: 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.577~586, 2002.3.
- 13) Boore, D.M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 14) Birgören, G. and Irikura, K.: Estimation of site response in time domain using the Meyer-Yamada wavelet analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.95, pp.1447-1456, 2005.
- 15) Meyer, Y., *Orthonormal wavelets*, in *Wavelets*, Springer, pp.21-37, 1989.
- 16) Yamada, M. and Ohkitani, K., *Orthonormal wavelet analysis of turbulence*, *Fluid Dyn. Res.* 8, pp.101-115, 1991.
- 17) 関西地震観測研究協議会. (オンライン), 入手先 <<http://www.ceorka.org/>>, (参照2006-07-01).
- 18) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 19) 曾根彰, 山本鎮男, 増田新: 常時微動と強震記録のウェーブレット解析による構造物の動特性推定とその変化の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.65-72, 1996.12.
- 20) 伊山潤, 桑村仁: ウェーブレット変換による地震動の時間一周波数解析, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.59-64, 1998.12.
- 21) 瀬川柳太郎, 山本鎮男, 曾根彰, 増田新, 濱洲忠: 地震観測値のウェーブレット解析によるバイリニア型復元力特性を有する構造物の塑性率の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第522号, pp.29-35, 1999.8.
- 22) 山口昌哉, 山田道夫: ウェーブレット解析, 科学, 岩波書店, Vol.60, No.6, pp.398-405, 1990.6.
- 23) 榊原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1995.
- 24) 戸田浩, 章忠, 川畑洋昭: 最新ウェーブレット実践講座 入門と応用 信号処理の基礎から最新理論まで, ソフトバンククリエイティブ, 2005.
- 25) 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, 1992.3.
- 26) 佐々木文夫, 前田達哉: データ解析におけるウェーブレット変換の基本的性状の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, pp.197-206, 1993.11.
- 27) Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 2nd International Symposium on Information Theory, eds. B.N. Petrov and F. Csaki, Akademia Kiado, Budapest, pp.267-281, 1973.
- 28) 北川源四郎: 時系列解析入門, 岩波書店, 2005.
- 29) 防災科学技術研究所. 基盤強震観測網 KiK-net. (オンライン), 入手先 <<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>>, (参照2006-07-01).
- 30) 防災科学技術研究所. 広帯域地震観測網 F-net. (オンライン), 入手先 <<http://www.fnet.bosai.go.jp/>>, (参照2006-07-01).
- 31) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S. and Kagawa, T.: Estimation of Q-values in the seismogenic and aseismic layers in the Kinki region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, pp.1498-1515, 2003.
- 32) GMT. (online), available from <<http://gmt.soest.hawaii.edu/>>, (accessed 2006-07-01).

(2006年9月7日原稿受理, 2007年1月23日採用決定)