

統計的グリーン関数法のベンチマークテスト【ステップ7】・概要

統計的グリーン関数法は高振動数帯域までの強震動波形を簡易に計算できるため、現在、国や自治体による強震動の面的評価や建設地点のサイト波の評価などに広く用いられている。しかしながら、乱數位相を用いた小地震動の作成法や、重ね合わせ法などに関して多様な手法が提案されており、手法間の相違が計算結果に及ぼす影響を把握する必要がある。以上の背景のもと、参加者が各々保有する計算コードを用い、同一条件の震源・伝播・地盤モデルに基づいて強震動計算を行うベンチマークテスト（ステップ1～6）を3年間のプロジェクトとして実施した（加藤ほか、2011、2012、2013）。

これまでは単純化した震源や地盤を対象としており、統計的グリーン関数法を用いて実観測記録をどの程度表現できるかは未検討であった。そこで、2004年紀伊半島南東沖の地震(前震)を対象とし、平面波斜め入射と震源の放射特性の平滑化に焦点を当てたベンチマークテスト（ステップ7）を表1に示すように企画した。対象の観測点は関東、濃尾、大阪平野内に位置するK-NETまたはKiK-netの数点であり、対象地震と観測点は平行して実施中の数値解析手法のベンチマークテストと同一である。以下、ベンチマークテストの検討モデル・提出データ一覧、波形提出時の報告事項、および各検討モデルの概要を記す。

■ 検討モデル一覧

表1 ステップ7の解析条件一覧

	ステップ7：2004年紀伊半島南東沖の地震(前震)			
モデル名	S71	S72	S73	S74*
地盤	多層地盤（岩盤、平野内）			たとえば経験的地盤増幅率 (野津・長尾、2005)
入射角	斜め入射		鉛直入射	
Q 値	振動数依存のQ値			
震源	点震源			
方向性 (SH & SV)	振動数(f)依存	振動数(f)一定		
破壊開始時間				
有効振動数	0～20 Hz			
出力点	関東、濃尾、大阪平野内のK-NET、KiK-net地点(図1)			
出力成分	NS, EW, UDの3成分		NS, EWの2成分	
乱数の設定	各自の乱数 3 パターン			

注*) S74の解析条件は各自が自由に設定可能

■ 提出データ・資料について

ベンチマークテスト参加者は締切日までに下記のデータファイル、および補足説明資料を下記の担当者までに説出する

結果提出の締め切り：ステップ7→2013/9/8

結果の提出：メールの添付ファイルにてデータと説明資料を下記アドレスに送付する。受信した場合、必ず返信があるので、確認されたい

提出・問合せ先：hisada@cc.kogakuin.ac.jp

〒163-8677 新宿区西新宿 1-2 4-2

工学院大学建築学科 久田嘉章

電話：03-3340-3442 FAX：03-3340-0149

■ 提出データファイル（観測点ごとの加速度波形 3 成分：形式は csv）

ターゲット周波数を 0.0～20.0Hz とし、時間刻み 0.01 秒の加速度の時刻歴波形（単位 m/s^2 ）を提出する。乱数位相の設定方法、 ω^2 スペクトルとのフィッティングの方法などを「補足説明資料」に記載し、指定した手法以外の手法を用いる場合には、その設定方法も説明する。計算者は、原則としてフィルターをかける前の原波形を提出するが、25 Hz 以上の高振動数成分のハイカット処理は可能とする。波形処理をした場合、補足説明に内容を記述すること。

提出データは csv 形式で、1 行目は time(s) , $\text{X(NS:m/s}^2\text{)}$, $\text{Y(EW:m/s}^2\text{)}$, $\text{Z(UD:m/s}^2\text{)}$ とし、2 行目以降に対応する時間・加速度（3 成分）のデータを、各モデル（S71～S74）と観測点ごとに乱数を変えて 3 ケース分作成する。提出データのファイル名のつけ方は以下の通りとする。

モデル名(S71～S74)-出力点略号-計算者名.csv

例：S72 の K-NET 津島観測点(AIC003)で久田氏による解析結果のデータは、S72-AIC003-HISADA.csv

■ 補足説明資料

（それぞれ下記項目の補足資料を作成：形式は doc, docx または txt）

氏名（所属）	氏名（所属）、連絡先（メール・電話）を記入
(1)計算モデル	・ S71～S74 まで（計算しないモデルがある場合、その理由）
(2)用いた手法 ソフト名・作成者	・ 手法と概要説明 ・ ソフト名と作成者名、作成年など
(3)参考文献	・ 手法の説明のある論文・参考文献など
(4)有効振動数	・ 0～20 Hz が基本であるが、達成できないときは、有効振動数とその理由（時間刻みは 0.01 秒とする）。
(5)乱数発生法	・ 乱数の設定方法の説明。（一様乱数など使用した乱数の生成手法も説明） ・ ターゲットスペクトルとのフィッティングの判定方法の詳細な説明。
(6)重ね合わせ	・ 今回は点震源のため不要
(7)減衰の導入法	・ 指定した減衰を設定できない場合、使用した手法や有効振動数などを簡単に説明（参考文献なども）
(8)提出波形に施した波形処理	例えば、フィルターを通した（その振動数範囲やフィルター方法）など。
(9)その他	補足説明など必要あれば。特に、S74 にて独自に設定した解析条件があれば、その内容を記述

統計的グリーン関数法のベンチマークテストの実施内容[ステップ7]・詳細説明

ステップ7は2004年紀伊半島南東沖の地震(前震)の、関東、濃尾、大阪平野内に位置する K-NET または KiK-net の観測記録のシミュレーションを各種条件下で実施する。震央と計算点位置を図 1 に示す。

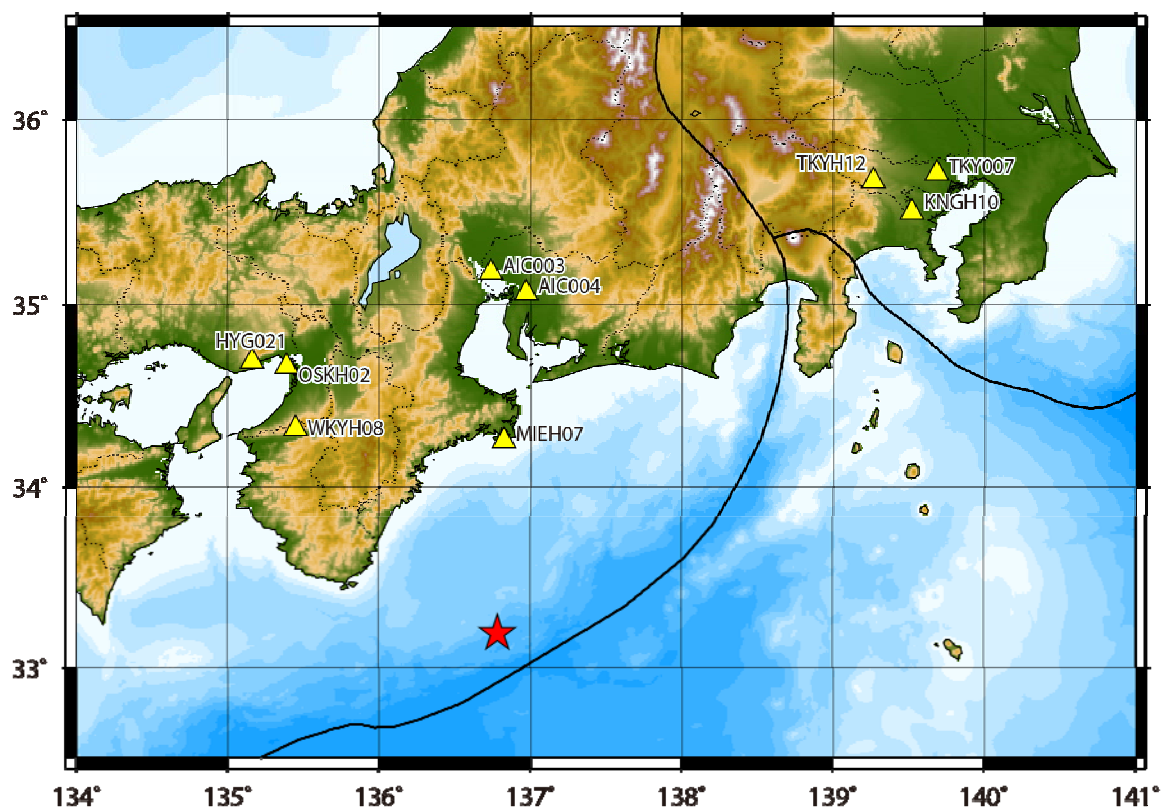


図 1 2004 年紀伊半島南東沖の地震(前震)と計算点位置

1. 震源モデル

山本・吉村(2012)で用いた図 2 に示す震源モデルを基にし、点震源を設定する。具体的には震源位置を北緯 33.03°、東経 136.80°、深さ 15.0km、地震モーメント $M_0=9.8E19[Nm]$ 、走向 71°、傾斜角 56°、すべり角 75° とする。

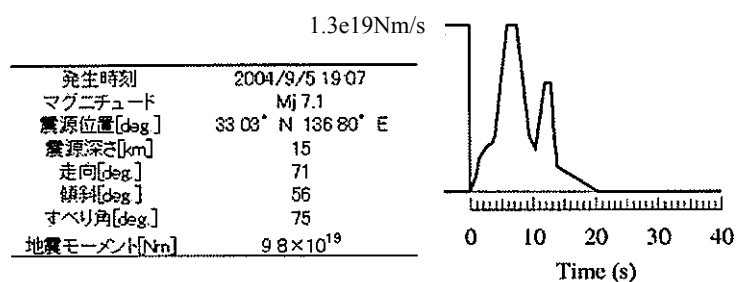


図 2 2004 年紀伊半島南東沖の地震(前震)の諸元と震源時間関数 (山本・吉村(2012))

震源緯度経度を第 6 系(大阪平野、濃尾平野用)および第 9 系(関東平野用)の直角平面座標に変換した値を表 2 に示す。

表 2 震源緯度経度直角平面座標に変換した値

	第 6 系	第 9 系
北緯 33.03 度	X(+北)= -329150m	-325343 m
東経 136.8 度	Y(+東)= 74731m	-283405 m

2. 計算対象地点

計算対象地点を表 3 に示す。大阪・濃尾平野の計算地点の地下構造モデルを表 4～表 5 に示す。地盤物性値は「長周期地震動予測地図」の 2009 年度版と 2012 年度版を統合した地盤モデルを用いる。関東平野の計算地点の地盤モデルを表 6 に示す。地盤物性値は 2012 年度版の西日本モデルの地盤モデルの地表を平らにした値を用いる。KiK-net 地点については、地表と地中の 2 地点を計算対象とする。

大阪・濃尾平野の地震基盤は $V_s=2.9\text{km/s}$ の層、関東平野の地震基盤は $V_s=3.2\text{km/s}$ の層に対応している。しかしながら、大阪・濃尾平野の計算対象地点の $V_s=2.9\text{km/s}$ の層厚は 2～44m と薄いため、大阪・濃尾平野においても関東平野と同様に地震基盤を $V_s=3.2\text{km/s}$ の層とする。

伝播経路の Q 値は、中央防災会議(2001)が東海地震の計算に用いた $Q(f)=100^{0.77}$ を全層について用いる。

表 3 計算対象地点の諸元

Region*	Code	名称	Lat.(deg)	Lon.(deg)	平面直角座標系		
					X(+北, m)	Y(+東, m)	系
大阪平野	OSKH02	此花	34.6628	135.3896	-148200	-55900	第6系
	HYG021	神戸	34.6898	135.1583	-145000	-77100	
	WKYH08	那賀	34.3228	135.4483	-185900	-50800	
濃尾平野	AIC003	津島	35.1732	136.7404	-91500	67400	第6系
	AIC004**	名古屋	35.0632	136.9737	-103500	88800	
	MIEH07	志摩	34.2544	136.8216	-193300	75700	
関東平野	TKYH12	八王子	35.6701	139.2650	-36500	-51500	第9系
	TKY007	新宿	35.7107	139.6859	-32100	-13300	
	KNGH10	横浜	35.4991	139.5195	-55500	-28500	

注*) 大阪・濃尾平野は浅い部分は2009年度長周期地震動予測地図の地下構造モデルを、深い部分は2012年度長周期地震動予測地図の地下構造モデルを使用。関東平野は2012年度長周期地震動予測地図の西日本モデルの地表を平らにして地下構造を使用。

注**) 20041027に移設

表 4 大阪平野の計算地点の地盤モデル

(a) OSKH02(此花):観測点 GL-0m、GL-2008m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
1	0	323	1.8	0.5	1.95	$100f^{0.77}$
3	323	467	2.0	0.6	2.00	
7	790	881	2.4	1.0	2.15	
14	1671	∞	5.5	3.2	2.65	

(b) HYG021(神戸):観測点 GL-0m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
1	0	1	1.8	0.5	1.95	$100f^{0.77}$
3	1	2	2.0	0.6	2.00	
7	3	23	2.4	1.0	2.15	
8	26	9	2.7	1.3	2.20	
13	35	2	5.0	2.9	2.60	
14	37	∞	5.5	3.2	2.65	

(c) WKYH08(那賀):観測点 GL-0m、GL-112m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
4	0	302	2.1	0.7	2.05	$100f^{0.77}$
10	302	835	3.2	1.7	2.30	
11	1137	230	3.5	2.0	2.35	
14	1367	∞	5.5	3.2	2.65	

表 5 濃尾平野の計算地点の地盤モデル

(a) AIC003(津島):観測点 GL-0m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
1	0	91	1.8	0.5	1.95	$100f^{0.77}$
3	91	564	2.0	0.6	2.00	
8	655	533	2.7	1.3	2.20	
14	1188	∞	5.5	3.2	2.65	

(b) AIC004(名古屋):観測点 GL-0m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
1	0	6	1.8	0.5	1.95	$100f^{0.77}$
3	6	534	2.0	0.6	2.00	
8	540	191	2.7	1.3	2.20	
14	731	∞	5.5	3.2	2.65	

(c) MIEH07(志摩):観測点 GL-0m、GL-207m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
1	0	6	1.8	0.5	1.95	$100f^{0.77}$
7	6	8	2.4	1.0	2.15	
8	14	31	2.7	1.3	2.20	
9	45	2	3.0	1.5	2.25	
10	47	85	3.2	1.7	2.30	
12	132	8	4.2	2.4	2.45	
13	140	44	5.0	2.9	2.60	
14	184	∞	5.5	3.2	2.65	

表 6 関東平野の計算地点の地盤モデル

(a) TKYH12(八王子): 観測点 GL-0m、GL-147m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
2	0	19	1.8	0.5	1.95	$100f^{0.77}$
6	19	26	2.3	0.9	2.10	
9	45	99	3.0	1.5	2.25	
14	144	∞	5.5	3.2	2.65	

(b) TKY007(新宿): 観測点 GL-0m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
2	0	413	1.8	0.5	1.95	$100f^{0.77}$
6	413	1386	2.3	0.9	2.10	
9	1799	1385	3.0	1.5	2.25	
14	3184	∞	5.5	3.2	2.65	

(c) KNGH10(横浜): 観測点 GL-0m、GL-2000m

存在層番号	上端深度(m)	層厚(m)	Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Qs
2	0	140	1.8	0.5	1.95	$100f^{0.77}$
6	140	797	2.3	0.9	2.10	
9	937	1829	3.0	1.5	2.25	
14	2766	∞	5.5	3.2	2.65	

3. 解析条件

1) 震源パラメータ

計算点の加速度フーリエスペクトル $F(\omega)$ は、Boore(1983)に従い下式で評価する。

$$F(\omega) = S(\omega) \cdot Z(\omega) \quad (1)$$

$$S(\omega) = \frac{F_s \cdot R_k^s \cdot P_{RTTN}}{4\pi\rho V_s^3} \{\omega^2 \dot{M}(\omega)\} \quad (2)$$

$$Z(\omega) = \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{\omega \cdot r}{2V_s Q_s}\right) \quad (3)$$

$S(\omega)$ は震源項、 $Z(\omega)$ は伝播経路による減衰項である。また ω は円振動数、 r は震源距離、 ρ は密度 (震源では 2.7t/m^3 、地震基盤では 2.65t/m^3)、 Q_s は伝播経路の S 波の Q 値であり、ここでは $Q_s = 2000 f^{1.0}$ を用いる。 V_s は S 波速度を表し、震源(2 式)では 3.4km/s 、伝播経路(3 式)では 3.2km/s を用いる。 F_s は観測点の地盤増幅係数であり地盤モデルから重複反射理論により評価する。その際、S71 と S72 は斜め入射を考慮する。 P_{RTTN} は波動エネルギーを水平 2 成分に分割するための係数であり、SH 波と SV 波の振幅から評価する。 R_k^s は S 波の放射係数であり、S71 は Pitarka *et al.*(2000) による振動数依存の値を用いる。具体的には震源から計算点直下の地震基盤を結ぶ波線方向に対し、0 ～1Hz は SH 波と SV 波の理論値の R_k^s を、3Hz 以上は射出角方向に ± 30 度、方位角方向に ± 60 度の範囲の R_k^s を平滑化した値を、1～3Hz は理論値の R_k^s から平滑化した R_k^s への遷移帯域とした。詳細は付録 1 に記載した。地震基盤のスペクトルを求める際は、(1)式に震源から地震基盤までの増幅として、インピーダンスの比 $[(3.53 \times 2.7)/(3.2 \times 2.65)]^{0.5}$ を考慮する。

$\dot{M}(\omega)$ は Moment Rate 関数であり、振幅スペクトルは下式で表示される (f は振動数、 $\omega = 2\pi f$)。

$$|\omega^2 \dot{M}(f)| = \frac{\omega^2 M_0}{1 + (f/f_c)^2} P(f, f_{\max}) \quad (4)$$

(4)式の地震モーメント M_0 は図 2 から $M_0 = 9.8\text{E}19(\text{Nm})$ とした。コーナー振動数 f_c は、Brune(1970) による下式から $f_c = 0.074(\text{Hz})$ に設定した。

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 V_s \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (5)$$

ここで、 V_s は震源層のせん断波速度($=3.4$)で単位は km/s 、 M_0 の単位は dyne-cm を用いる。 $\Delta\sigma$ は応力降下量であり、池田(2005)による $\Delta\sigma = 86\text{bar}$ ($1\text{ bar} = 0.1\text{ MPa}$) を用いた。本ベンチマークの対象観測点にも用いている MIEH07 を対象とし、観測記録から評価した震源スペクトルと、池田(2005)による $\Delta\sigma$ と M_0 から評価した震源スペクトルを比較した結果を図 3 に示す。1Hz 以下は赤線が過大評価となっているが、1Hz 以上の高周波帯域はよく対応している。参考までに、山本・吉村(2012)による震源時間関数(図 2)から求めた震源スペクトルと、池田(2005)による $\Delta\sigma$ と M_0 から評価した震源スペクトルを比較した結果を図 4 に示す。両者もよく対応している。

(4)式の P は f_{max} によって高振動数成分の振幅を減少させるためのフィルター関数であり、下式が与えられている。ここで、佐藤・他(1994b)に従い $f_{max}=13.5\text{Hz}$ 、 $n=4.2$ とした。

$$P(f, f_{max}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_{max})^{2n}}} \quad (6)$$

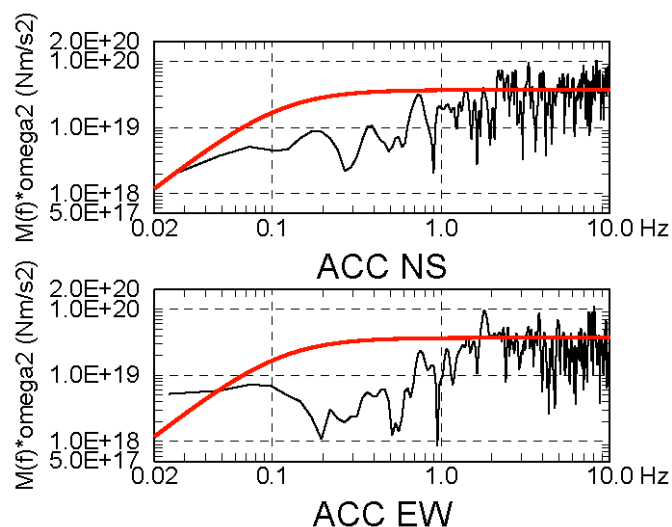


図 3 KiK-net の MIEH07 の観測記録から評価した震源スペクトル(黒線)と、池田(2005)による $\Delta\sigma$ と M_o から評価した震源スペクトル(赤線)の比較

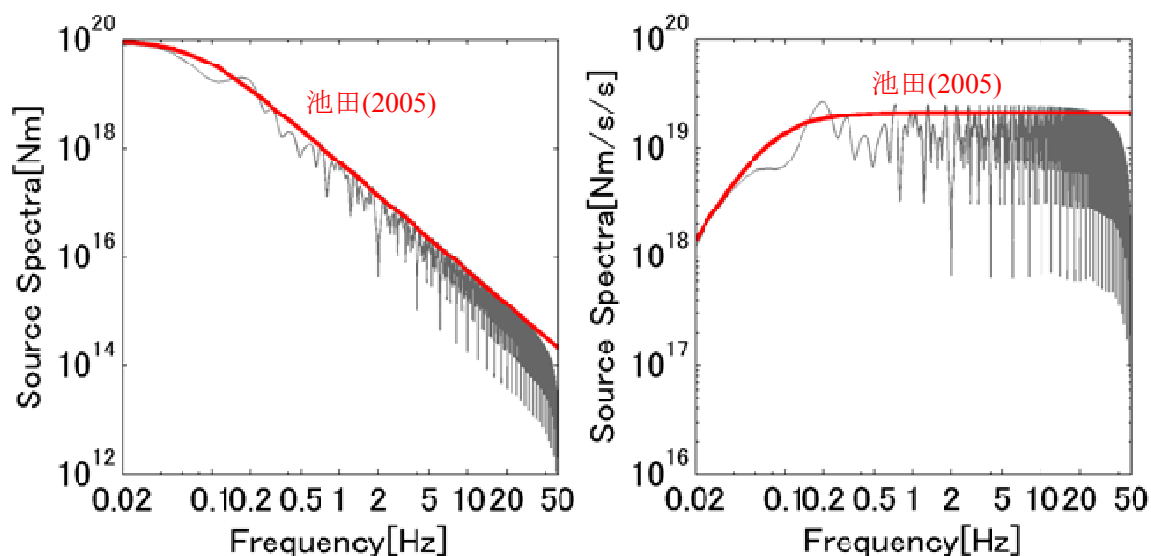


図 4 山本・吉村(2012)による震源時間関数(図 2)から求めた震源スペクトル(黒線)と、池田(2005)による $\Delta\sigma$ と M_o から評価した震源スペクトル(赤線)の比較
左図：変位スペクトル、右図：加速度スペクトル

2) 経時特性

時刻歴波形の経時特性関数は佐藤・他(1994a)に従い、気象庁マグニチュード M7.1 と震源距離 X により下式で与える。

$$\begin{aligned} E(t) &= [(t-t_a)/(t_b-t_a)]^2 \quad (t_a \leq t \leq t_b) \\ E(t) &= 1 \quad (t_b \leq t \leq t_c) \\ E(t) &= \exp[-(\ln 10)(t-t_c)/(t_d-t_c)] \quad (t_c \leq t \leq t_d) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで

$$\begin{aligned} \log[t_b(s)-t_a(s)] &= 0.229M - 1.112 \\ \log[t_c(s)-t_b(s)] &= 0.433M - 1.936 \\ \log[t_d(s)-t_c(s)] &= 0.778 \log X (km) - 0.340 \end{aligned} \quad (8)$$

3) 位相乱数の設定

モデル S71～S72 の位相乱数の設定は、(7)式の経時特性を満足し、有効周波数の帯域で(2)式の震源スペクトルに最もよくフィットするものから 3 ケース選択する。なお、SH 波と SV 波の変位波形の最大値は同符号とすることを基本とする。加速度スペクトルのフィッティング方法は提出する「補足説明資料」に記載すること。SH 波と SV 波は異なる位相乱数を用いて生成する。

4) 計算波形の出力

- ・時間刻み 0.01 秒、継続時間 163.84 秒の水平 2 成分(X, Y)の加速度の時刻歴波形（単位 m/s^2 ）を提出する。波形には震源から計算点までの S 波の到達時間による開始時間の遅れを考慮すること。
- ・波形計算の際のデータ数は 16384 個とする。
- ・提出データは csv 形式で、1 行目は time(s), X(NS: m/s^2), Y(EW: m/s^2), Z(UD: m/s^2)とし、2 行目以降に対応する時間・加速度（3 成分）のデータを、各モデル・観測点ごとに乱数を変えて 3 ケース分作成する。

4. 特記事項

1) 観測記録

対象観測点で得られた加速度波形とその擬似速度応答スペクトルを付録 2 に示す。計算結果と観測結果の比較は事務局で実施予定である。

2) S74 モデル

S74 は各自が独自に設定した計算条件の適用を可能としている。例えば、S71～S73 モデルは地下構造の制約から工学的基盤上の波形が出力されるため、地表観測波との対応は良くないことが予想される。そこで、K-NET や KiK-net などによる公開 PS 検層結果等を活用し、地表位置の計算波形に変換するのも一つの方法である。

また、野津・長尾(2005)はスペクトルインバージョン解析により、K-NET や KiK-net 地表地点の経験的地盤増幅率を評価しており、その結果も付録 2 に示してある。この地盤増幅率を地震基盤で評価した計算結果に適用し、地表の計算波を求めるのも一つの方法である。野津・長尾(2005)

の地盤増幅率はデジタル値が公表されているため、その値をまとめた以下ファイルを同封した。
また、サイト上にも以下のファイルを格納している。

表 7 野津・長尾(2005)による地盤増幅率のデジタル値

サイト	http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Open/Benchmark/step7/stochastic
ファイル名	130711 Nozu-Nagao_G(f).xlsx

【参考文献】

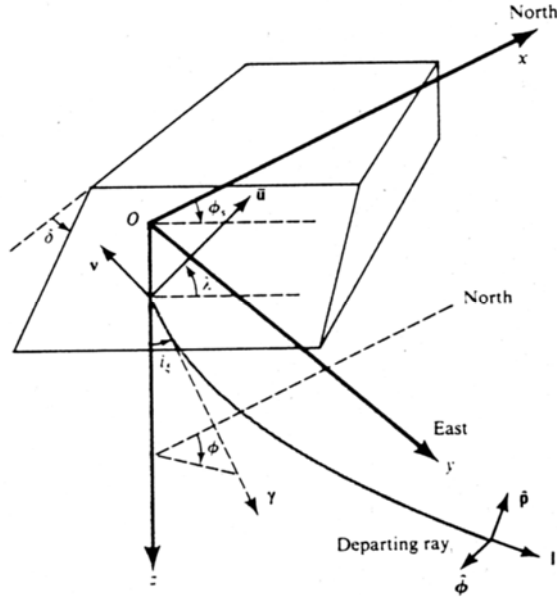
- Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.73, 1865-1894, 1983.
- Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J. Geophys.Res.*, 75: 4997-5009, 1970
- 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会、第8回説明資料、2001
- 池田孝：2004年伊半島南東沖の地震における高振動数成分の励起特性 他の地域で発生した大規模スラブ内地震との比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、107-108、2005.
- 加藤研一・久田嘉章・川辺秀憲・大野晋・野津厚・野畑有秀・森川淳・山本優：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：統計的グリーン関数法の場合（その1）、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、49-54、2011年2月.
- 加藤研一・久田嘉章・大野晋・野畑有秀・森川淳・山本優：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：統計的グリーン関数法の場合（その2）、日本建築学会技術報告集、第18巻、第38号、67-72、2012年2月.
- 加藤研一・久田嘉章・大野晋・野畑有秀・森川淳・山本優：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：統計的グリーン関数法の場合（その3）、日本建築学会技術報告集、第19巻、第41号、37-42、2013年2月.
- 野津厚・長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性、港湾空港技術研究所資料、No.1112、2005.
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明：ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性、日本建築学会構造系論文集、461、19-28、1994a.
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明：表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性 —仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析—、日本建築学会構造系論文集、462、79-89、1994b.
- 山本優・吉村智昭：3次元大規模FEMによる東海・東南海・南海連動地震の長周期地震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第677号、1055-1064、2012.

付録 1：振動数依存のラディエーションの考慮

本年度のベンチマークテストでは、点震源と観測点の位置関係を考慮し、振動数依存のラディエーションパターン係数を用いる。震源を原点とした付図 1-1 の座標系を用いると、 SH 波および SV 波に関するラディエーションパターン係数 F_{SH} および F_{SV} は以下のように与えられる(Aki and Richards,1980)。

$$\begin{aligned}
 F_{SH} &= \cos \lambda \cos \delta \cos i_{\xi} \sin(\phi - \phi_s) + \cos \lambda \sin \delta \sin i_{\xi} \cos 2(\phi - \phi_s) \\
 &\quad + \sin \lambda \cos 2\delta \cos i_{\xi} \cos(\phi - \phi_s) - (1/2) \sin \lambda \sin 2\delta \sin i_{\xi} \sin 2(\phi - \phi_s) \\
 F_{SV} &= \sin \lambda \cos 2\delta \cos 2i_{\xi} \sin(\phi - \phi_s) - \cos \lambda \cos \delta \cos 2i_{\xi} \cos(\phi - \phi_s) \\
 &\quad + (1/2) \cos \lambda \sin \delta \sin 2i_{\xi} \sin 2(\phi - \phi_s) \\
 &\quad - (1/2) \sin \lambda \sin 2\delta \sin 2i_{\xi} [1 + \sin^2(\phi - \phi_s)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで付図 1-1 に示しているように、 ϕ_s , δ , λ は断層の走向, 傾斜角, すべり角, i_{ξ} は地震波の射出角, ϕ は観測点の方位角である。



付図 1-1 断層面を基準にした座標系(Aki and Richards,1980)。

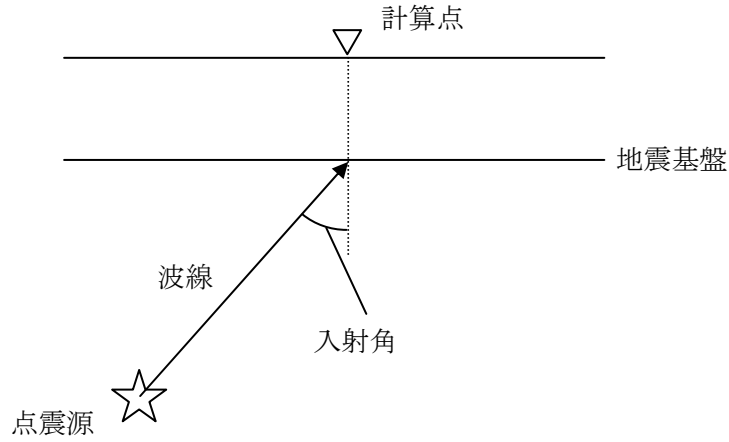
$\hat{x}$ は北方向, $\hat{y}$ は東方向, $\hat{z}$ は下方向を正に定義されている。

ただし、ラディエーションパターンが高周波で不明瞭となるという種々の観測事実を考慮し、次式 [Boore & Boatwright (1984)] に基づく射出角 θ , 方位角 ϕ に対する SH 波と SV 波の $R_{i_{\xi}\phi}$ の平滑化を行うことを基本とする。 $R_{i_{\xi}\phi}$ の符号は付図 1-2 に示す震源と計算点直下の地震基盤を結ぶ波線の方法を用いることとする。

$$\langle R_{i_{\xi}\phi} \rangle = \frac{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} [W(i_{\xi}, \phi) R_{i_{\xi}\phi}] \sin i_{\xi} d\phi di_{\xi}}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} [W(i_{\xi}, \phi)] \sin i_{\xi} d\phi di_{\xi}} \tag{2}$$

$$W(i_{\xi}, \phi) = [H(i_{\xi} - i_{\xi_1}) - H(i_{\xi} - i_{\xi_2})] [H(\phi - \phi_1) - H(\phi - \phi_2)] \tag{3}$$

ここで、 $H()$ は単位ステップ関数を表す。



付図 1-2 計算点直下の地震基盤と震源を結ぶ波線

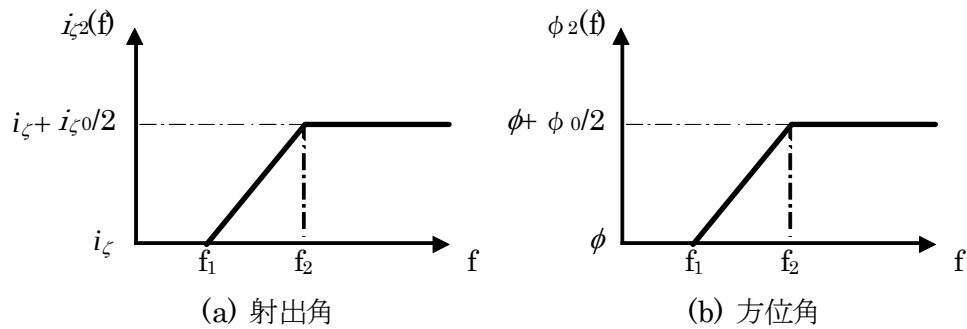
(1)式～(3)式は振動数 f をパラメータとしておらず，係数 $R_{i_\zeta\phi}$ が全振動数に対して共通に与えられる。これに対し，ここでは以下の式を用いて(Pitarka *et al.*, 2000)，平滑化する i_ζ と ϕ の範囲を振動数に応じて変動させることを基本とする。平滑化範囲の概念図を付図 1-3 に示す。 i_ζ に対して最大 $\pm(i_{\zeta 0}/2)$ 、 ϕ に対して最大 $\pm(\phi_0/2)$ の範囲を平滑化する。

$$i_{\zeta 1}(f) = i_\zeta - \frac{i_{\zeta 0}}{2} \cdot \frac{f - f_1}{f_2 - f_1}, \quad (f_1 < f < f_2) \quad (4)$$

$$i_{\zeta 2}(f) = i_\zeta + \frac{i_{\zeta 0}}{2} \cdot \frac{f - f_1}{f_2 - f_1}, \quad (f_1 < f < f_2) \quad (5)$$

$$\phi_1(f) = \phi - \frac{\phi_0}{2} \cdot \frac{f - f_1}{f_2 - f_1}, \quad (f_1 < f < f_2) \quad (6)$$

$$\phi_2(f) = \phi + \frac{\phi_0}{2} \cdot \frac{f - f_1}{f_2 - f_1}, \quad (f_1 < f < f_2) \quad (7)$$



付図 1-3 射出角($i_\zeta \sim i_{\zeta 2}$)と方位角($\phi \sim \phi_2$)の平滑化範囲の概念図

式(4)～式(7)に与えるパラメータは，Pitarka *et al.* (2000)を参考に下記の値を用いることを基本と

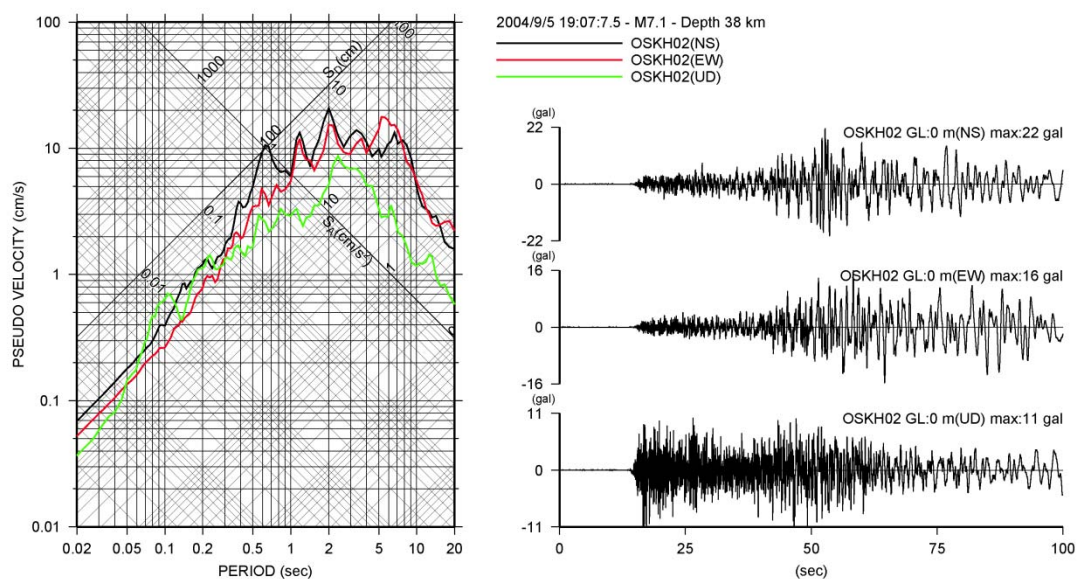
する。使用ソフトの都合などで、以上の記述と異なる計算条件の場合は、その手法の詳細も説明すること。

$$i_{\xi_0} = \frac{\pi}{3}, \quad \phi_0 = \frac{2\pi}{3}$$
$$f_1 = 1Hz, \quad f_2 = 3Hz$$

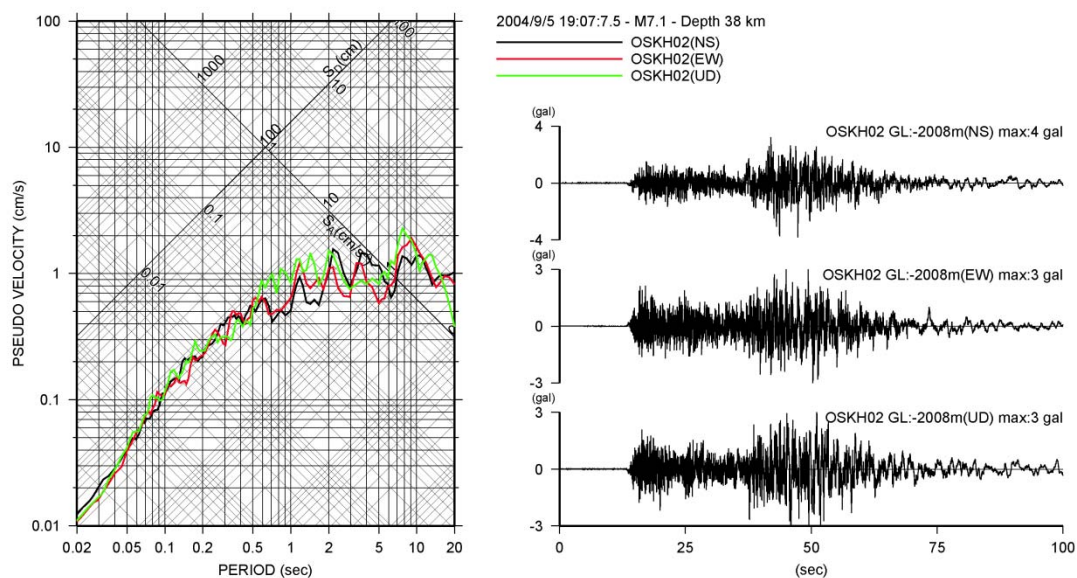
付録の参考文献

- Aki, K. and P. G. Richards, Quantitative Seismology, 2 volumes, W. H. Freeman and Co., San Francisco, California, 932pp, 1980.
- Boore, D. M. and J. Boatwright: Average body-wave radiation coefficients, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 1615-1621, 1984.
- Pitarka, A., P. Somerville, Y. Fukushima, T. Uetake and K. Irikura: Simulation of near-fault strong-ground motion using hybrid Green's functions, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 90, 566-586, 2000.

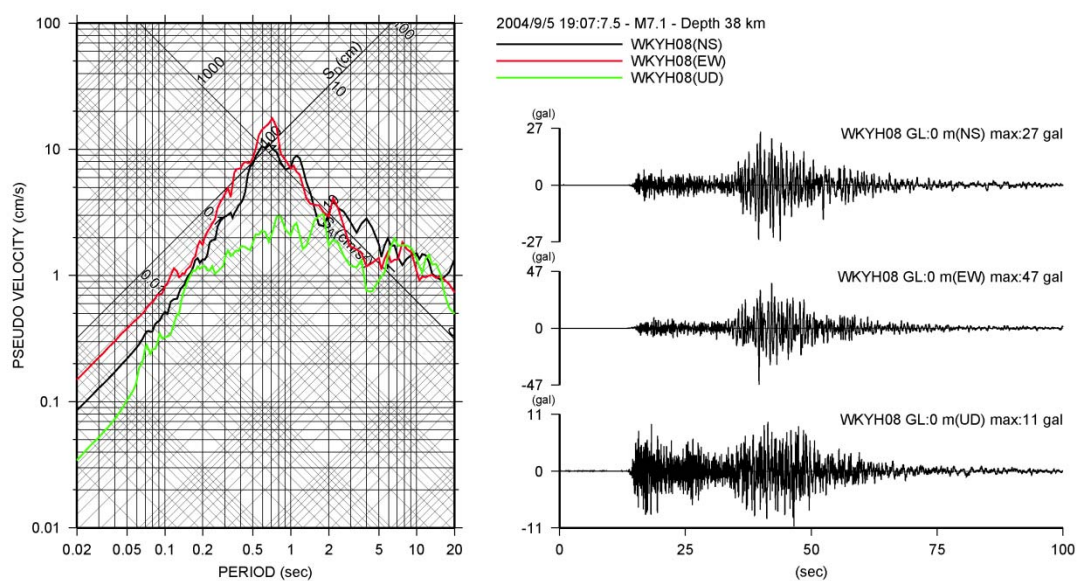
付録2：2004 年伊半島南東沖の地震(前震)の観測記録、および野津・長尾(2005)の地盤増幅率



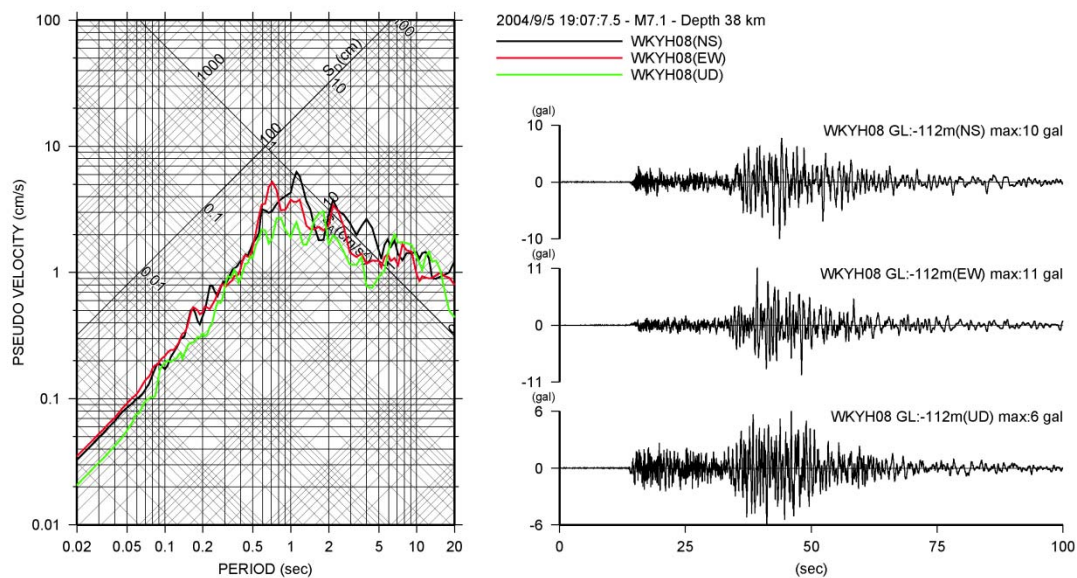
付図 2-1 此花：OSKH02(地表)



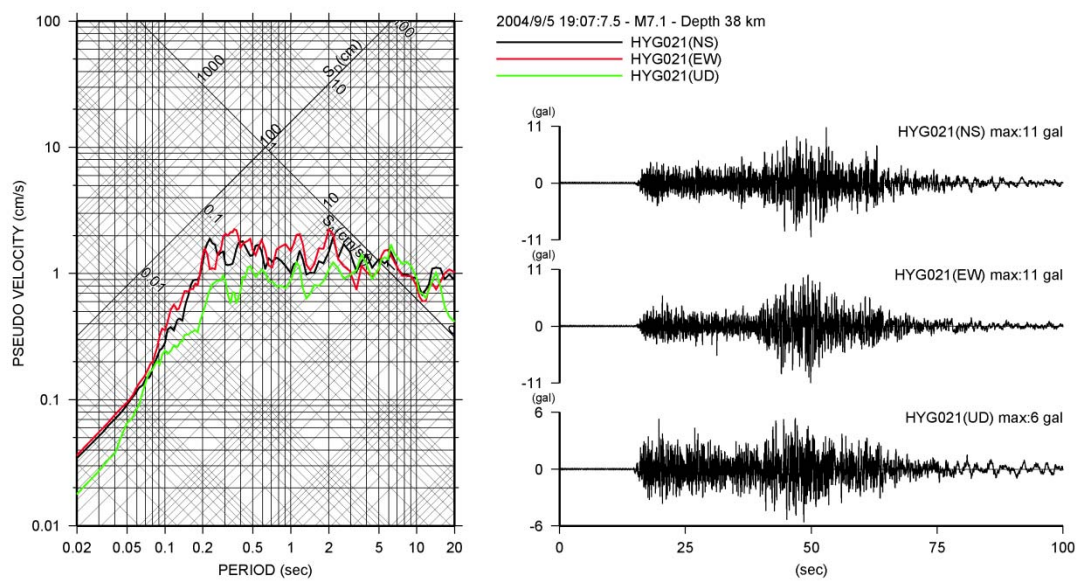
付図 2-2 此花：OSKH02(地中)



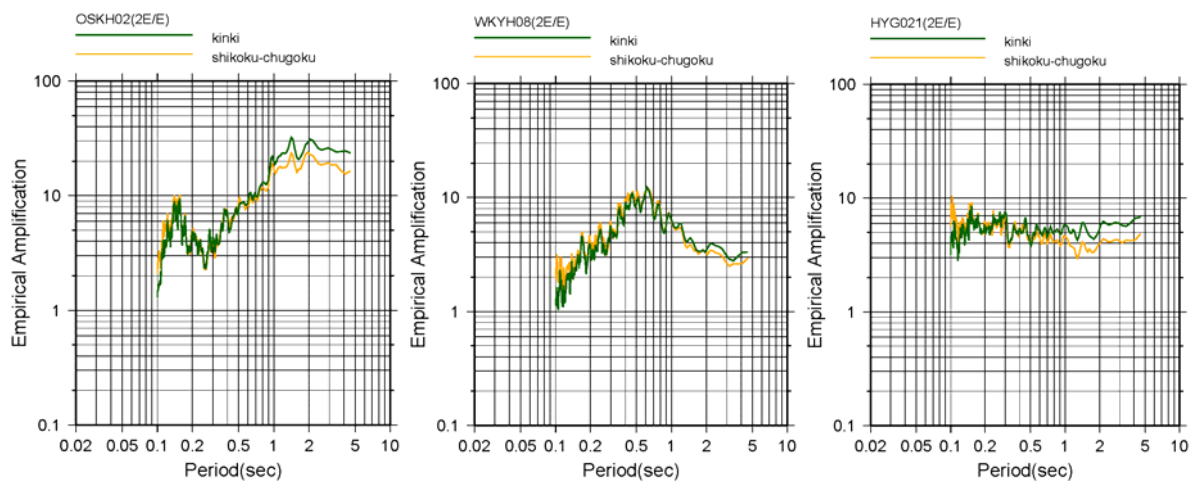
付図 2-3 那賀：WKYH08(地表)



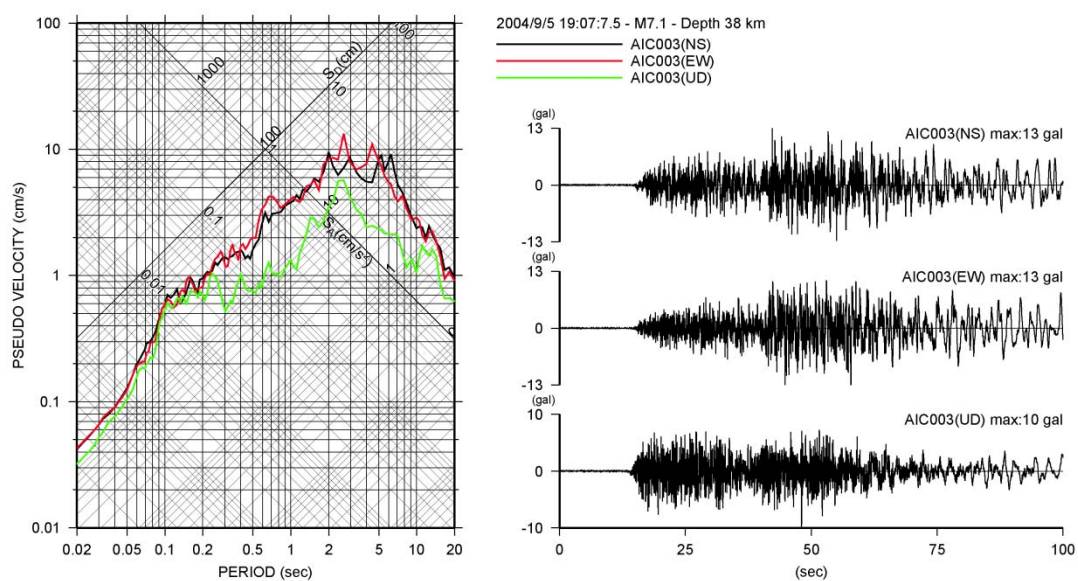
付図 2-4 那賀：WKYH08(地中)



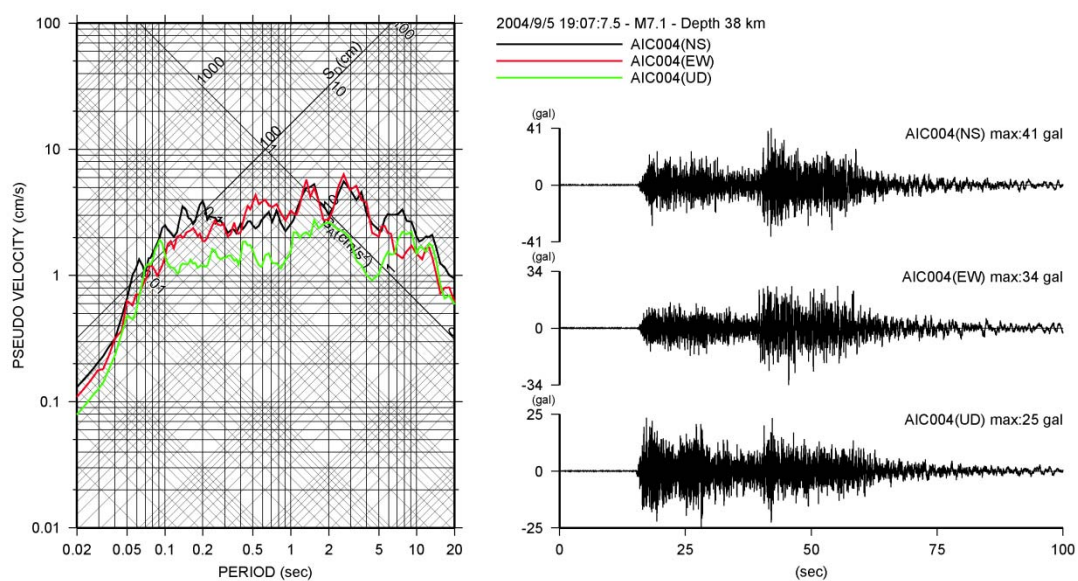
付図 2-5 神戸：HYG021



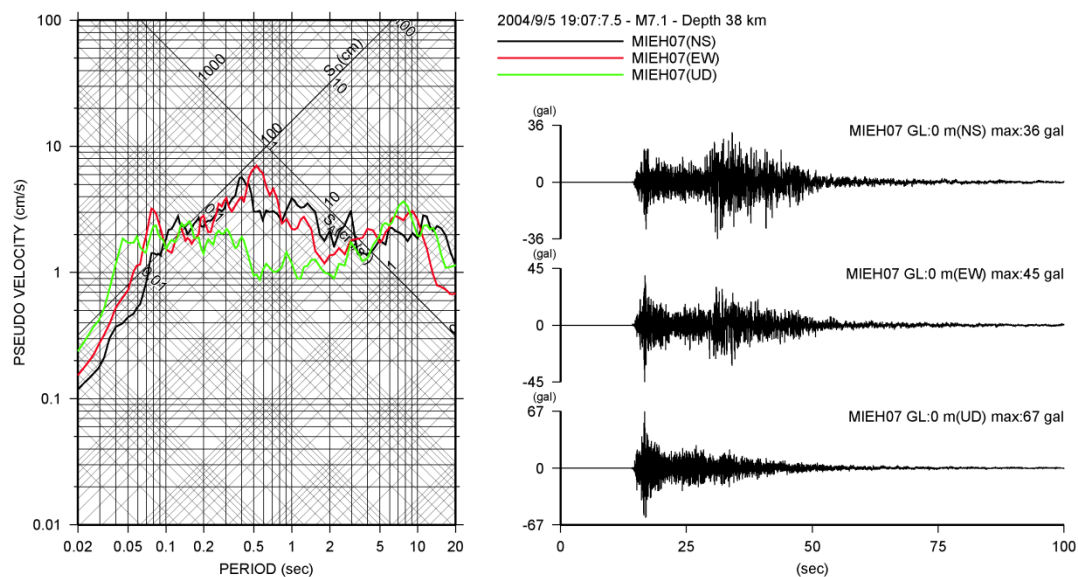
付図 2-6 野津・長尾(2005)による地盤増幅率



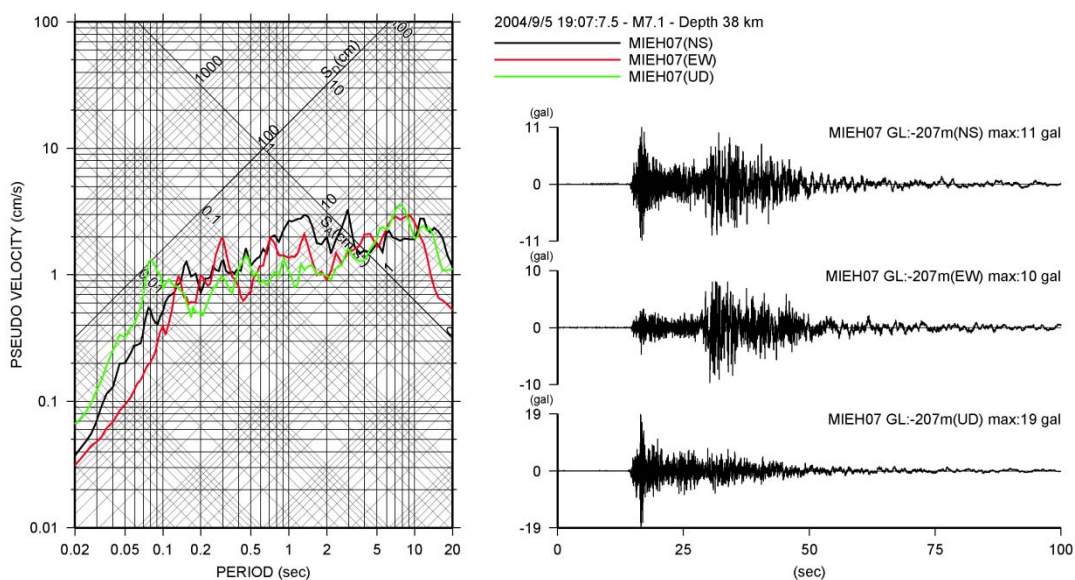
付図 2- 7 津島：AIC003



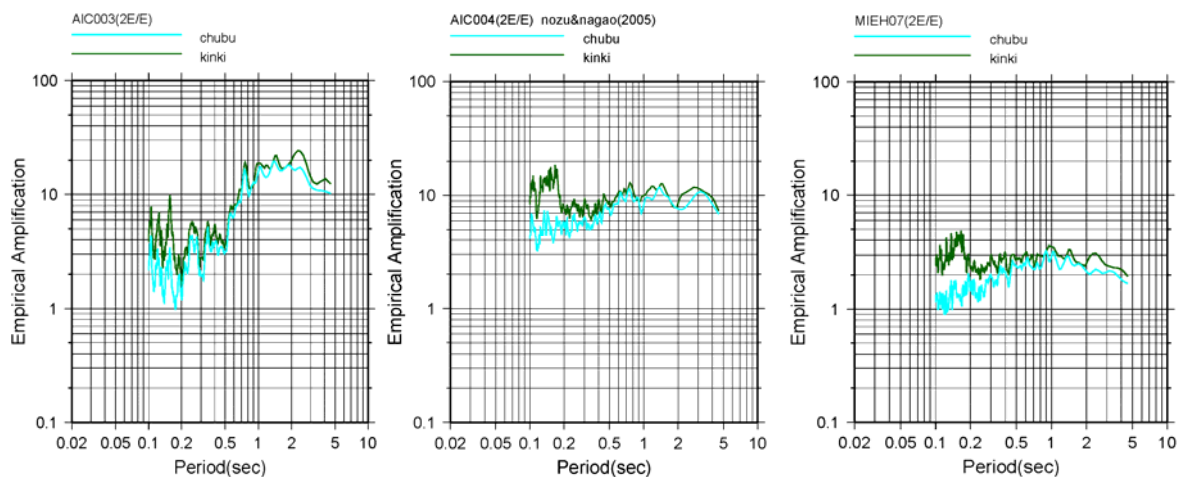
付図 2- 8 名古屋：AIC004



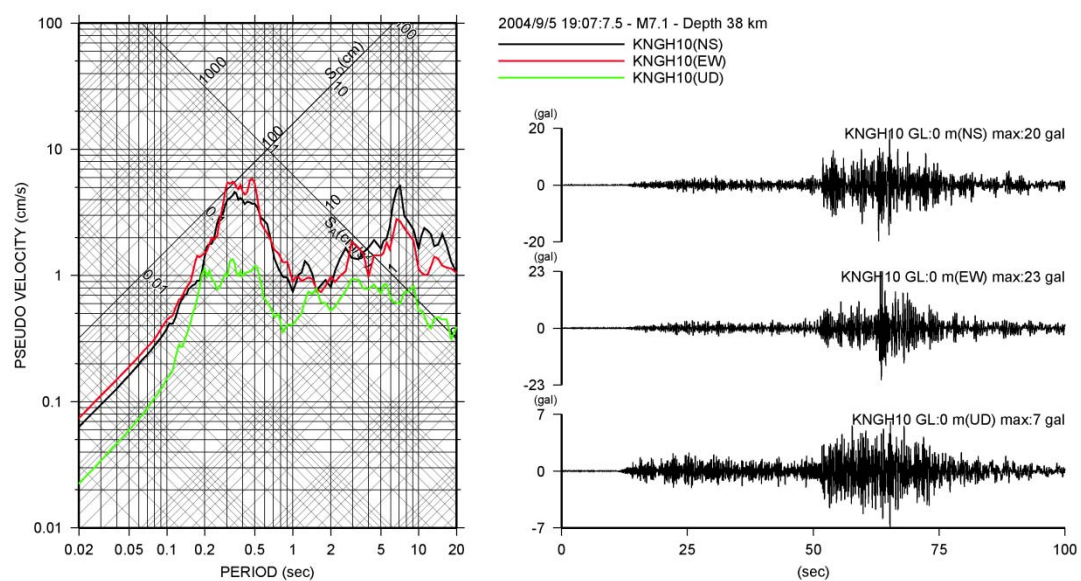
付図 2-9 志摩：MIEH07(地表)



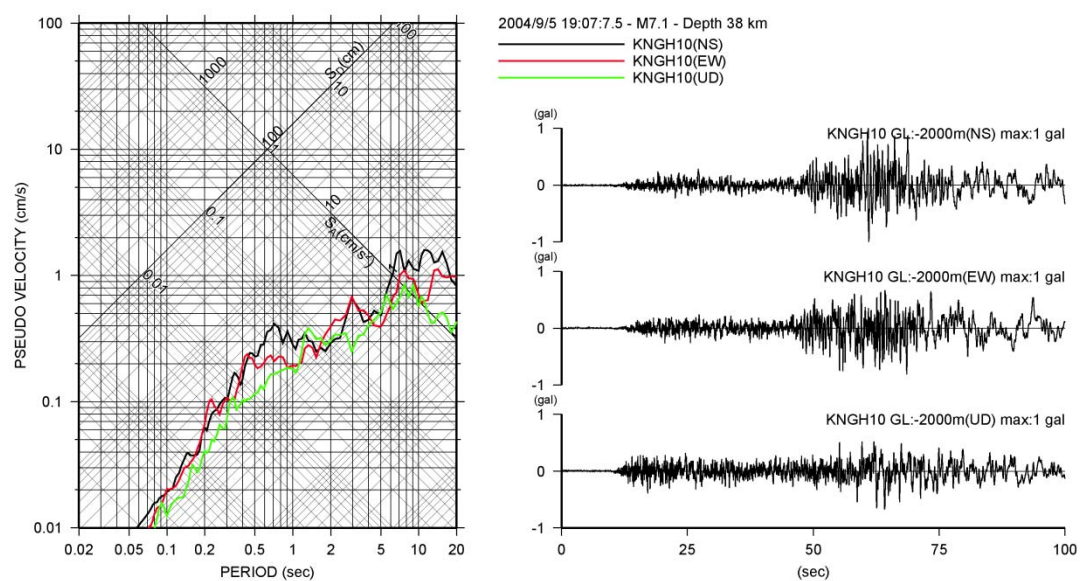
付図 2-10 志摩：MIEH07(地中)



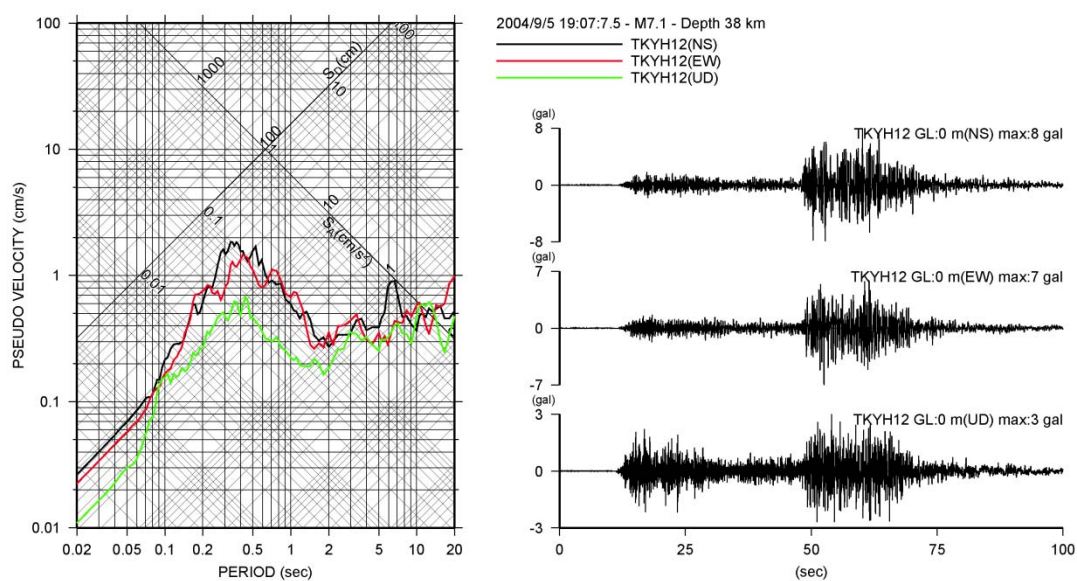
付図 2-11 野津・長尾(2005)による地盤増幅率



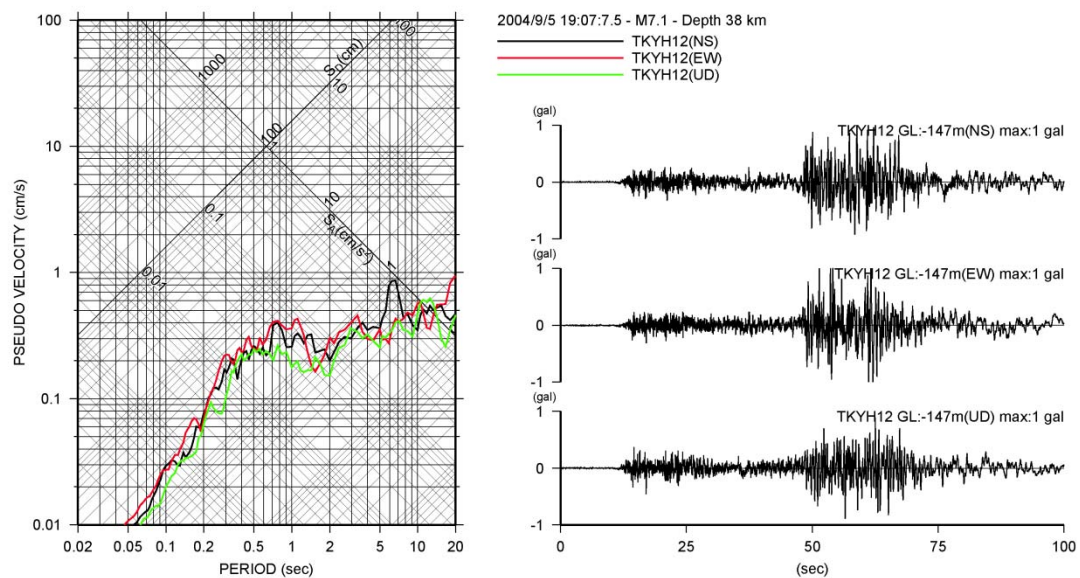
付図 2- 12 横浜：KNGH10(地表)



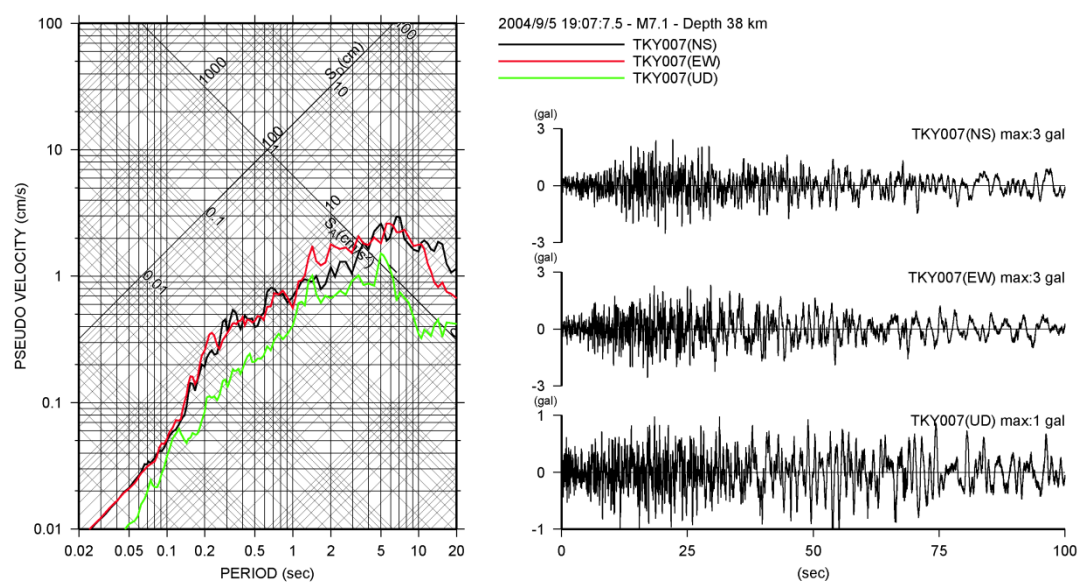
付図 2- 13 横浜：KNGH10(地中)



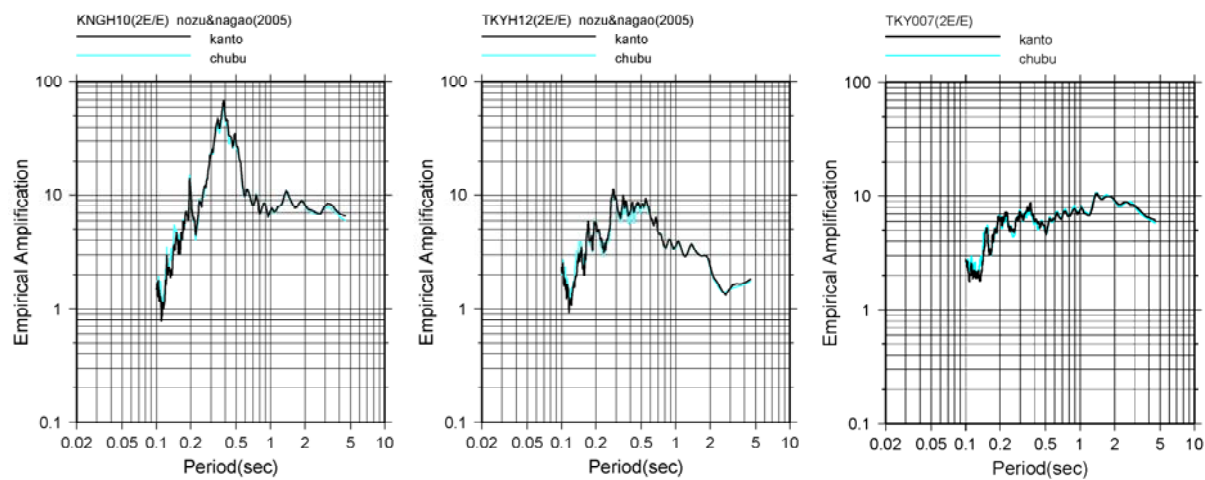
付図 2- 14 八王子：TKYH12(地表)



付図 2- 15 八王子：TKYH12(地中)



付図 2- 16 新宿：TKY007



付図 2- 17 野津・長尾(2005)による地盤増幅率