

2011年東北地方太平洋沖地震におけるK-NET 茂木での
強震観測記録に関する一考察A preliminary study on observed strong motion at K-NET Motegi site
during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(日本工営(株)中央研究所)
王 功輝	Gonghui WANG	(京都大学防災研究所)
釜井俊孝	Toshitaka KAMAI	(京都大学防災研究所)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)では、震源から約300km離れた強震観測点(K-NET 茂木)において、1Gを超える非常に大きな地震動が観測された。K-NET 茂木では、山間部の長大斜面の法肩に地震計が設置されていることから、本震時に斜面内において地震動が増幅していた可能性が高い。そこで本研究では、同斜面の小段および法尻において臨時の余震アレー観測を実施した。そして得られた余震観測記録に基づいてサイト特性を評価し、本震時における小段および法尻での地震動を推定した。その結果、K-NET 茂木での観測地震動は、法尻での推定地震動と比較すると計測震度で0.5程度の差異があり、地形効果による地震動の増幅の影響を強く受けていることを示した。

キーワード：地震動，余震観測，サイト特性，2011年東北地方太平洋沖地震 (IGC：E08)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)では、震源から約300km離れた栃木県芳賀郡茂木町の並松運動公園内の強震観測点(以後、K-NET 茂木(TCG014)¹⁾と呼ぶ：図-1 参照)において、1Gを超える非常に大きな地震動が観測された。ここに、本震の震源域とK-NET 茂木周辺の対象域との関係については、後述(図-10)を参照されたい。図-2 および表-1に本震時においてK-NET 茂木と、茂木町役場における震度観測点(以後、SK-net 茂木²⁾と呼ぶ：図-1 参照)で得られた地震動の時刻歴加速度波形およびその地震動指標(気象庁計測震度、PGA、PGV、加速度パワー³⁾、SI値⁴⁾)をそれぞれ比較したものを示す。これらの図表よ

り、K-NET 茂木とSK-net 茂木は1.3km程度しか離れていないにも関わらず、SK-net 茂木での観測地震動に対してK-NET 茂木での観測地震動は、全ての地震動指標において大きく上回っているのが読み取れる。さらに、本震前の地震(2008/05/08 01:45 茨城県沖の地震(M_w 6.8))においても、SK-net 茂木では震度3を示したのに対し、K-NET 茂木では震度5弱と極端に大きな震度が観測されている。この茨城県沖の地震による観測実績を踏まえて、気象庁⁵⁾では、崖等の段差付近での地震計の設置により過大な震度が観測されているとして、K-NET 茂木を震度情報発表対象から除外している。図-3、図-4、写真-1、写真-2に示すとおり、K-NET 茂木は長大斜面の法肩付近に地震計が

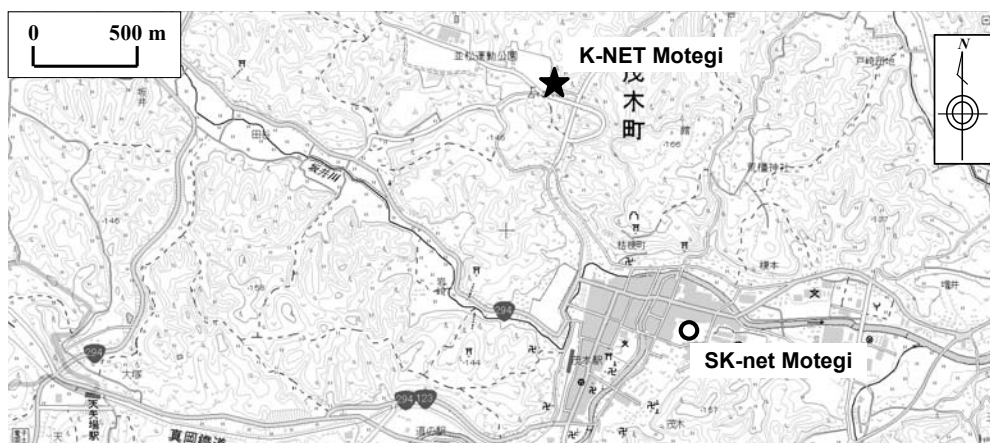


図-1 K-NET 茂木とSK-net 茂木の位置関係

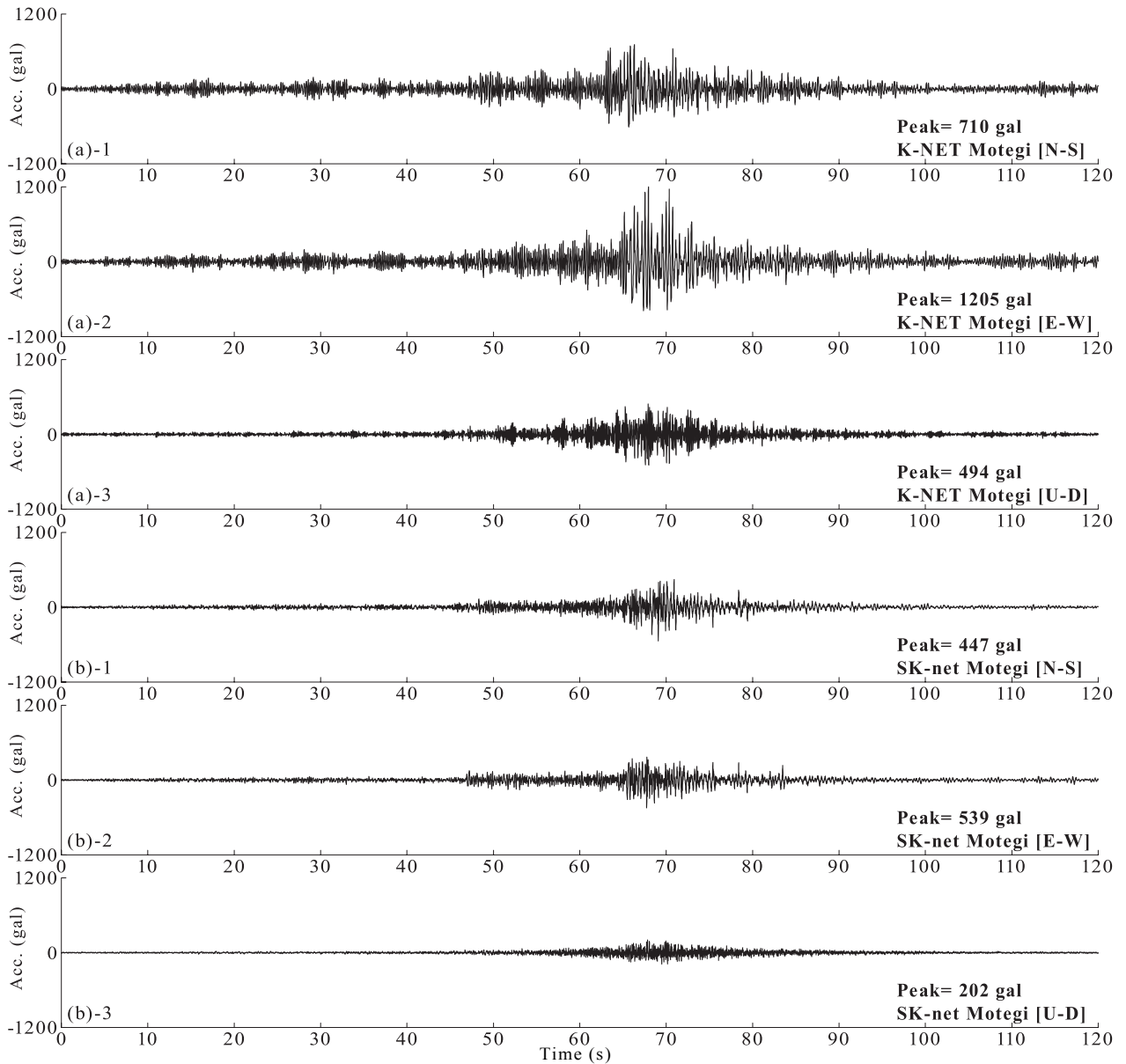


図-2 2011年東北地方太平洋沖地震における K-NET 茂木と SK-net 茂木での観測波形(2011/03/11 14:47:40～)

表-1 K-NET 茂木と SK-net 茂木での本震観測記録の比較

	K-NET Motegi	SK-net Motegi
JMA Seismic Intensity	6.3	5.5
PGA (gal)	N-S	710
	E-W	1205
	U-D	494
PGV (cm/s)	N-S	52
	E-W	61
	U-D	19
Acc. Power (cm ² /s ³)	N-S	1,237,944
	E-W	2,047,656
	U-D	532,991
SI Value (cm/s)	N-S	56
	E-W	75
	U-D	19

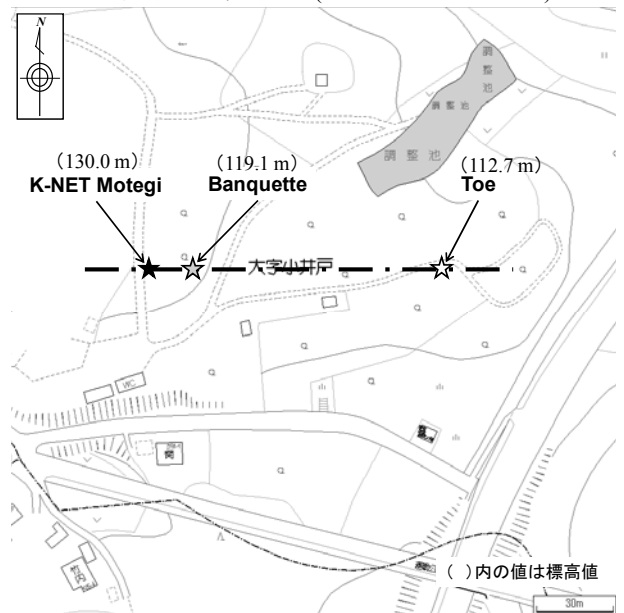


図-3 法肩(K-NET 茂木)～小段～法尻での観測点平面図

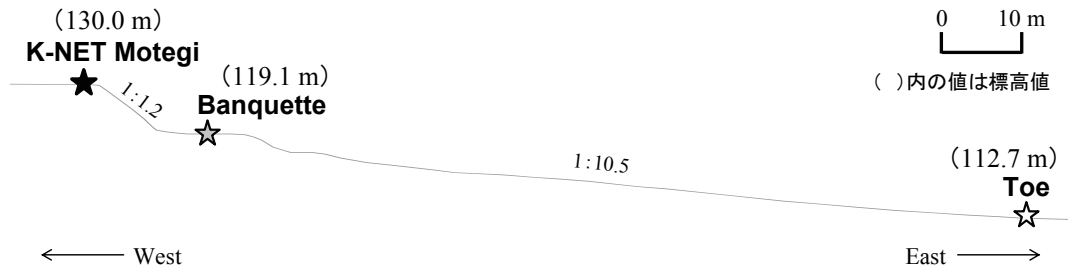


図-4 法肩(K-NET 茂木)～小段～法尻での観測点断面図 (注：各サイトにおける地盤構造については図-7 参照)

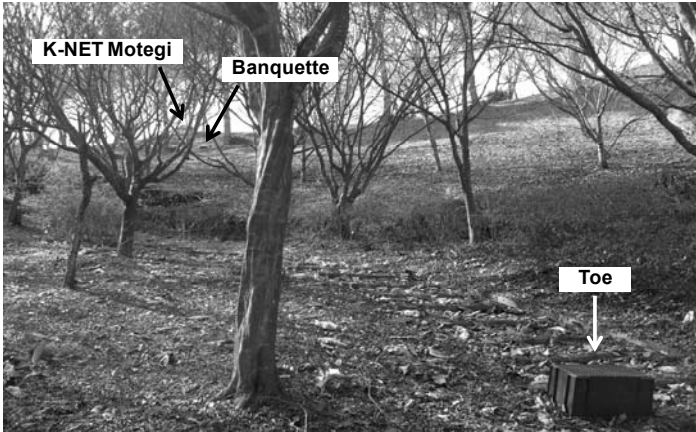


写真-1 法肩(K-NET 茂木)～小段～法尻での余震観測状況



写真-2 法肩(K-NET 茂木)～小段での余震観測状況

設置されており、本震時に斜面内において地震動が増幅していた可能性がある。地すべり地などの長大斜面では、地震アレー観測⁶⁾や数値解析^{7),8)}に基づいた標高の増加に伴う地震動(主に高周波帯域の地震加速度)の増幅現象(以後、地形効果と呼ぶ)が報告されている。

これまで著者らは、道路盛土^{9),10)}や地すべり地^{11),12),13)}などを対象に中小地震観測や微動アレー計測を実施し、斜面の地震応答特性などについて研究を行っている。しかしながら、大規模地震による強震動が実斜面において観測されている事例^{14),15)}は、人工的な盛土に限られている。そのため、前述した2011年東北地方太平洋沖地震におけるK-NET茂木での観測記録(図-2参照)は、自然斜面内で得られた非常に貴重な強震波形データであると考えられ、本震時における長大斜面全体(K-NET茂木が設置されている法肩付近を除く法面)での地震動を評価することは重要である。

そこで本研究では、図-3、図-4、写真-1、写真-2に示すとおり、長大斜面の小段部(以後、Banquetteと呼ぶ)および法尻部(以後、Toeと呼ぶ)において地震計を設置し、余震観測を実施することで、当該地点におけるサイト特性を評価した。そして、サイト特性置換手法¹⁶⁾を用いてSK-net茂木での本震観測記録を再現した。そして、地震動推定手法の適用性を確認した上で、BanquetteおよびToeにおける本震時の強震動を推定し、対象とする長大斜面内での地震動の増幅に関する基礎的な検討を行った。

2. サイト特性の評価

2.1 余震観測の実施

長大斜面におけるサイト増幅・位相特性を評価するため、余震観測を行った。観測期間は、2012年1月3日～15日である。表-2に、K-NET茂木(即時公開データを含む)、SK-net茂木、Banquette、Toeの対象4地点で同時に得られた余震観測記録の一覧を示す。写真-1、写真-2に示すように、BanquetteとToeに1台ずつ計2台の地震計を同時に設置してアレー観測を行った。地震計は、2台ともに同種の加速度計(一体型微動探査兼地震計機器¹⁷⁾)を採用し、サンプリング周波数は100Hzとした。トリガー加速度レベルは設定せず、常時観測を継続した。観測方向は、N-S、E-W、U-D方向の計3成分とした。

2.2 長大斜面における地盤震動特性の分析

図-5は、観測地震(表-2参照)によるフーリエスペクトル(0.05HzのParzen Windowを考慮)の比率を比較したものである。スペクトル比は、4つの組合せ(K-NET茂木/Toe、Banquette/Toe、K-NET茂木/Banquette、K-NET茂木/SK-net茂木)を3成分(N-S、E-W、U-D方向)について算定した。なお、これらのスペクトル比は、K-NET茂木を基準とした両地点の距離の違いによる補正^{18),19)}を考慮したものとなっている。図-5に示すとおり、長大斜面内ではToe～Banquette～K-NET茂木と標高が高くなる

表-2 対象4地点（K-NET 茂木，SK-net 茂木，Banquette，Toe）で同時に観測された余震記録の一覧

No.	Year/Month/Day	Hour : Min. (JST)	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Depth (km)	Source region	JMA Mag.
EQ-01	2012/01/03	03:28	36.377	141.898	60	Off Ibaraki Pref.	Mj5.0
EQ-02	2012/01/07	19:43	37.230	141.422	56	Off Fukushima Pref.	Mj4.7
EQ-03	2012/01/09	17:50	36.708	141.428	50	Off Ibaraki Pref.	Mj4.7
EQ-04	2012/01/12	10:40	36.438	141.192	52	Off Ibaraki Pref.	Mj4.7
EQ-05	2012/01/12	12:20	36.967	141.303	33	Off Fukushima Pref.	Mj5.9
EQ-06	2012/01/12	18:37	36.392	140.965	54	Off Ibaraki Pref.	Mj3.8
EQ-07	2012/01/15	00:45	36.427	140.658	53	Off Ibaraki Pref.	Mj3.8

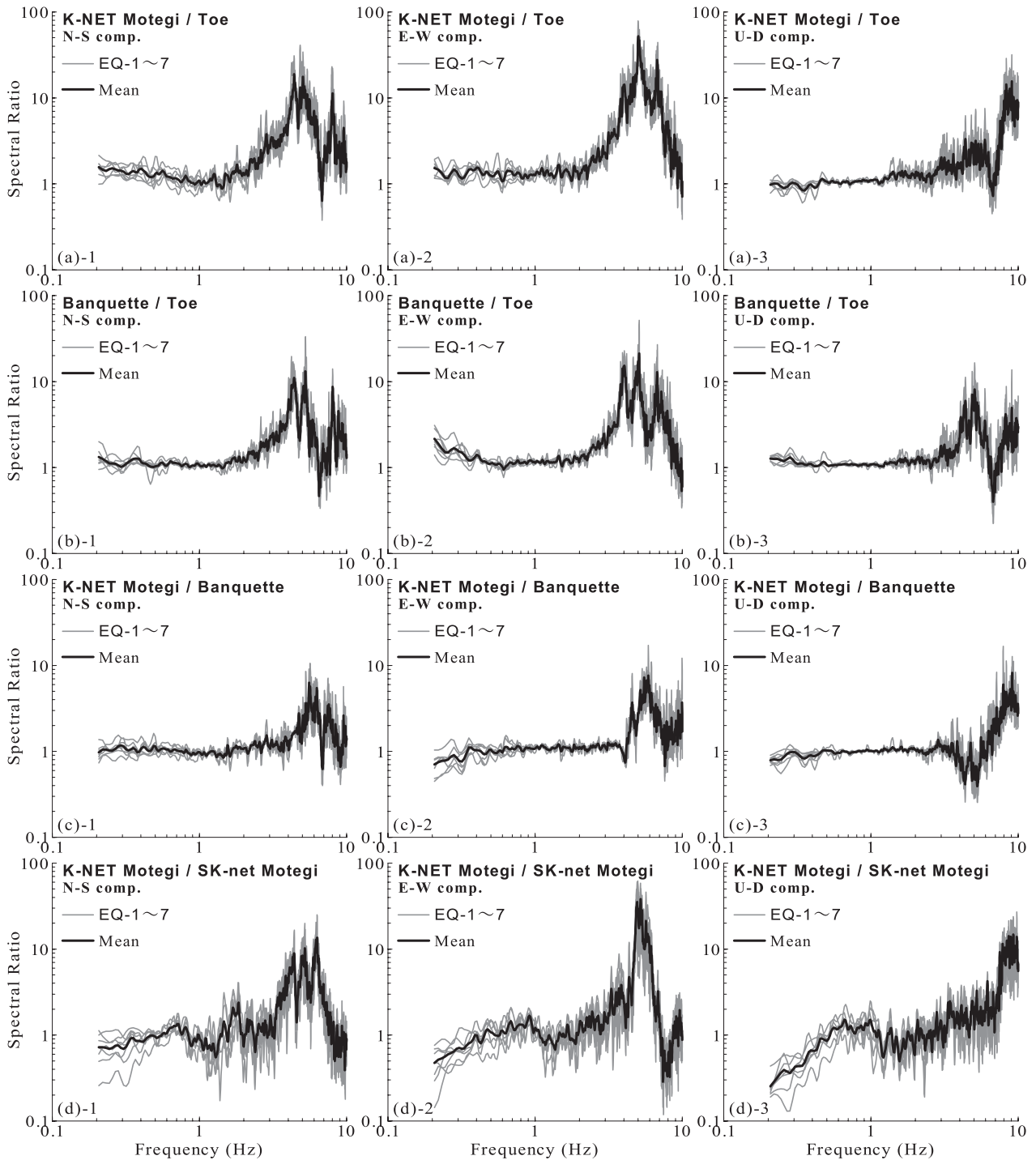


図-5 フーリエスペクトル比に基づく地震動の増幅特性

につれて主に 5Hz 付近の比較的高周波帯域において地震動が増幅している傾向が確認でき、その傾向は水平動(NS および EW 成分)でより顕著に表れている。一方で、K-NET 茂木/SK-net 茂木のスペクトル比についても同様に、5Hz 付近にピーク周波数を有するスペクトル形状が確認できる。さらに、図-5 に示すとおり、4 つの組合せによるスペクトル比は、3 成分ごとにスペクトル形状がそれぞれ異なっているのが読み取れる。特に、水平 2 成分 (N-S と E-W 成分) では、スペクトル形状が異なっている傾向が強いことから、工学的基盤から地表までの地盤、すなわちごく表層の地盤における地盤構造の差異に起因した地震応答の違いだけではなく、Toe~Banquette~K-NET 茂木での標高増加を伴う地震動増幅(地形効果)の影響が示唆される。

2.3 サイト増幅特性

図-6 は、対象 4 地点 (K-NET 茂木, SK-net 茂木, Banquette, Toe) における 3 成分 (N-S, E-W, U-D 方向) のサイト増幅特性を比較したものである。なお、これらのサイト増幅特性は、全て地震基盤~地表の増幅特性に対応する。3 地点 (SK-net 茂木, Banquette, Toe) における水平方向 (N-S, E-W 成分) のサイト増幅特性は、K-NET 茂木における水平方向 (N-S および E-W 成分で共通) の既存のサイト増幅特性²⁰⁾を、図-5 で示した対応するスペクトル比 (K-NET 茂木/Toe, K-NET 茂木/Banquette, K-NET 茂木/SK-net 茂木) で除することによって算定した。一方で、鉛直方向 (U-D 成分) のサイト増幅特性は、余震観測記録 (表-2 参照) によるフーリエスペクトル比 (鉛直/水平) を対象 4 地点 (K-NET 茂木, SK-net 茂木, Banquette, Toe) ごとにそれぞれ計算し、得られた 7 観測地震によるスペクトル比の平均を、上述した水平方向のサイト増幅特性 (図-6 参照) に乗じることによって設定^{21),22)}した。

図-6 に示すとおり、サイト増幅特性は対象地点ごとに異なっており、特に水平成分では、余震アレー観測によるスペクトル比の違いに起因して、主に 2Hz 以上の高周波帯域においてサイト増幅特性が 3 成分 (NS, EW, UD 成分) ごとにそれぞれ大きく異なっている。これは、Banquette および Toe における本震時の地震動は、サイト増幅特性を考慮して推定する必要性が高いことを改めて示唆するものである。

3. 地震動推定手法

3.1 概要

本研究では、サイト特性置換手法¹⁶⁾を用いて、SK-net

茂木, Banquette, Toe (以後、推定点と呼ぶ) における地震動の推定を行った。この手法は、推定点周辺における強震観測点 (以後、基準観測点と呼ぶ) で得られた本震記録に対し、サイト増幅特性の補正を行うことにより推定点における本震時の地震動のフーリエ振幅を推定し、一方、推定点における本震時の地震動のフーリエ位相には、推定点で観測された余震によるフーリエ位相を採用することにより、推定点における本震時の地震動を推定する手法¹⁶⁾である。基準観測点としては、Banquette および Toe の極近傍にあたる K-NET 茂木を選定した。ただし、K-NET 茂木の地盤 (図-7(a) 参照) は、本震時に非線形挙動を示していたと考えられる。そこで、K-NET 茂木での本震観測記録から表層地盤の非線形挙動の影響を取り除くための処理を最初に行った。このことを含め、地震動推定の一連の手順を示したものを図-8 に示す。次節以降では、図-8 に示す手順に沿って説明する。

3.2 非線形挙動の影響の除去

図-9 は、サイト増幅特性 (図-6 参照) と本震観測記録によるフーリエスペクトル (0.05Hz の Parzen Window を考慮) を同じ図面上で比較したものである。図-9 に示すとおり、SK-net 茂木ではサイト増幅特性とフーリエスペクトルのピーク周波数が比較的良好一致を示しているのに対して、K-NET 茂木ではフーリエスペクトルのピーク周波数が低周波側に移動している。これは、K-NET 茂木の地盤 (図-7(a) 参照) における本震時の非線形挙動を示唆している。そこで、K-NET 茂木の本震観測記録に対して非線形/線形の重複反射理論を適用し、表層地盤の非線形挙動の影響を除去することを試みた。

具体的には、まず、非線形の重複反射理論^{23),24)}により、K-NET 茂木の地表での観測記録を工学的基盤 (深度 11m : 図-7(b) 参照) の地震動に変換した。次に、線形の重複反射理論²³⁾を用いて、工学的基盤相当の地震動を K-NET 茂木の地表における線形時の地震動に変換²¹⁾した。なお、鉛直地震動については、P 波による重複反射理論²³⁾を適用²²⁾した。図-9 に変換した地表における線形時の地震動のフーリエスペクトル (0.05Hz の Parzen Window を考慮) と線形時のサイト増幅特性 (図-6 参照) の比較結果を示すが、フーリエスペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数やスペクトル形状が比較的良好一致を示しており、非線形挙動の影響を概ね除去できたと推察される。さらにこれは、K-NET 茂木の工学的基盤 (深度 11m 以深・せん断波速度 $V_s=500\text{m/s}$) における本震時の線形応答の妥当性を示唆するものである。

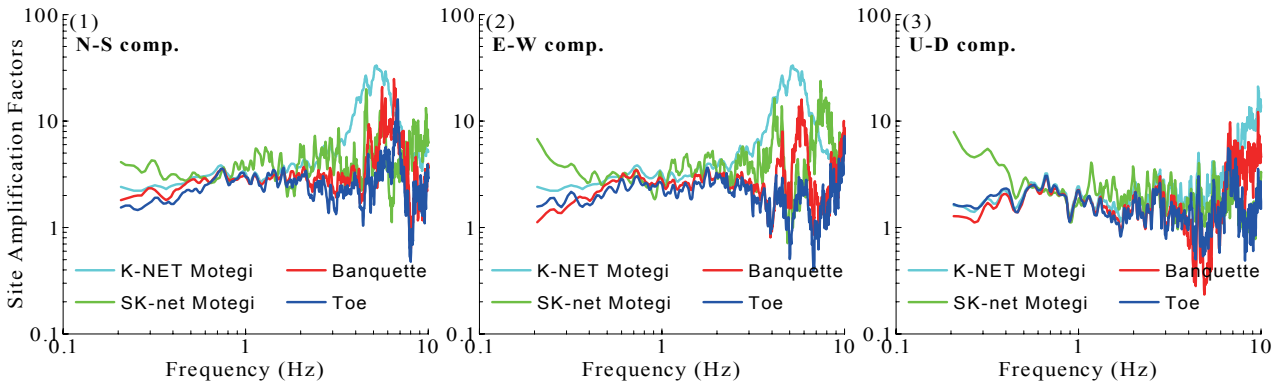
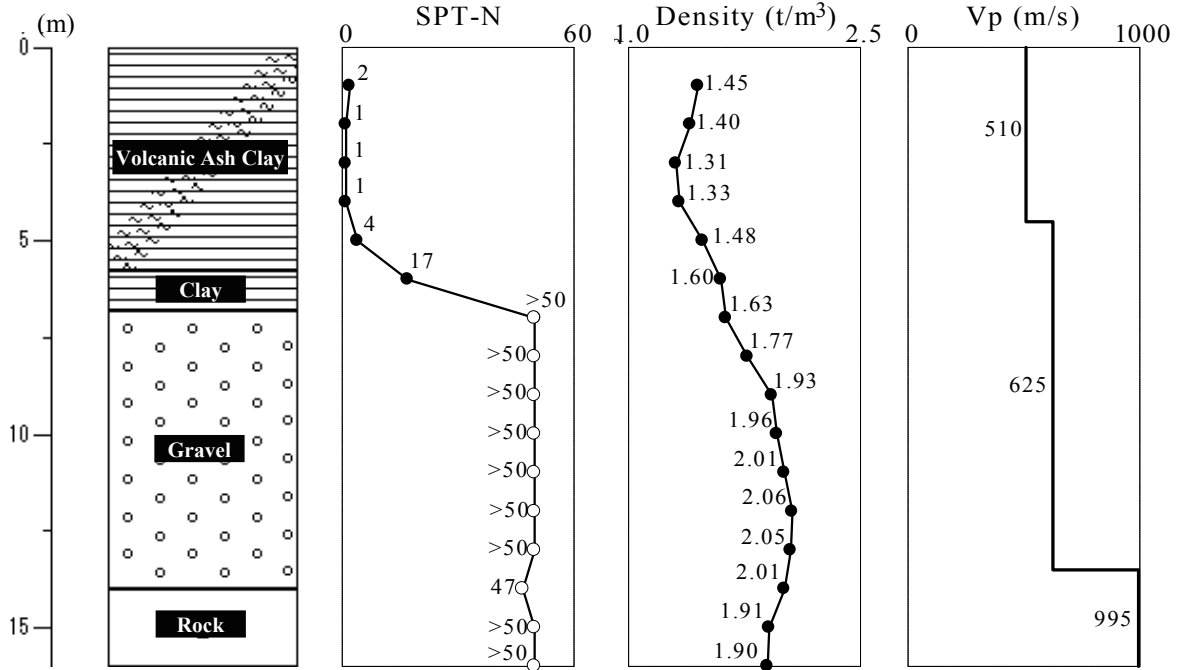
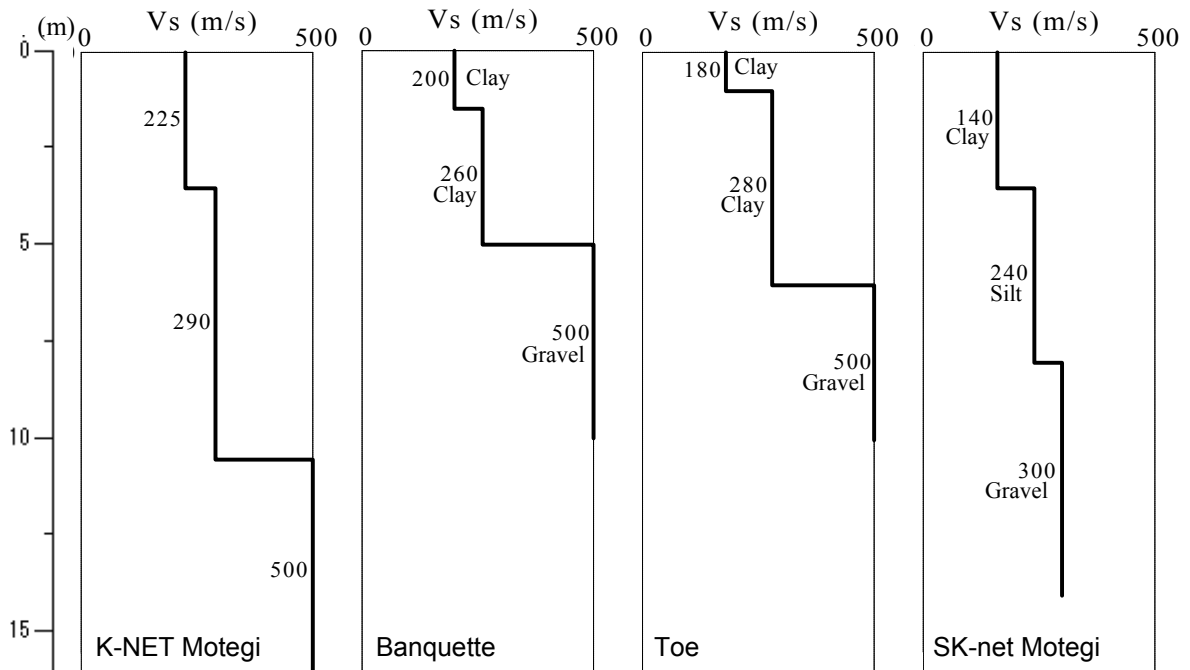


図-6 対象4地点 (K-NET 茂木²⁰, Banquette, Toe, SK-net 茂木) におけるサイト増幅特性 (地震基盤～地表) の比較



(a) K-NET 茂木における地盤特性



(b) 対象地点におけるせん断波速度構造の比較

図-7 対象4地点 (K-NET 茂木, Banquette, Toe, SK-net 茂木) での地盤構成の比較

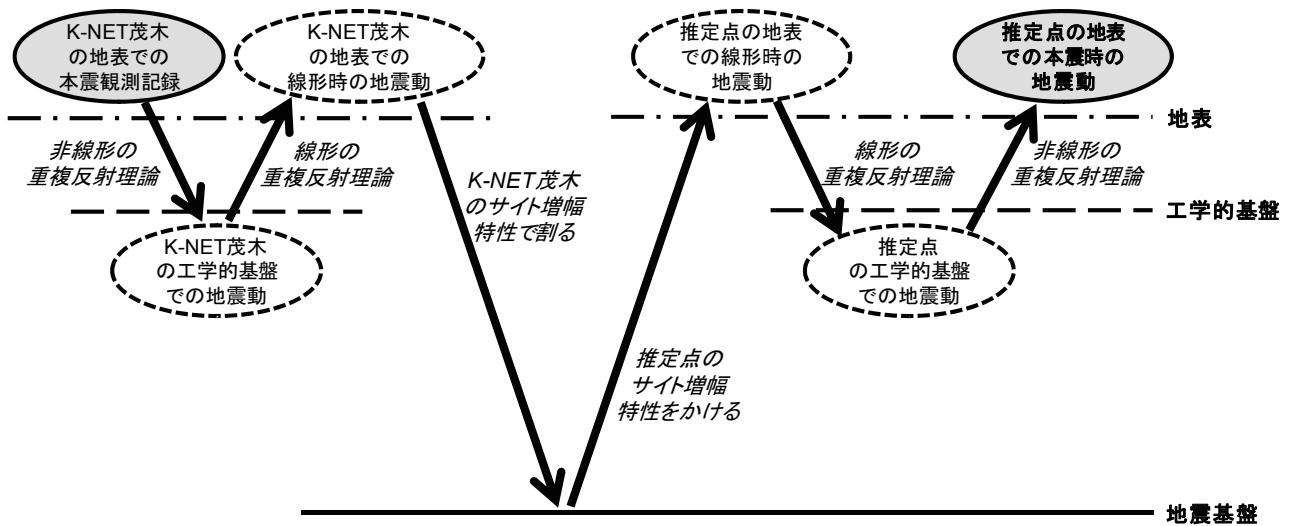


図-8 表層地盤における非線形挙動を考慮したサイト特性置換手法による強震動の推定

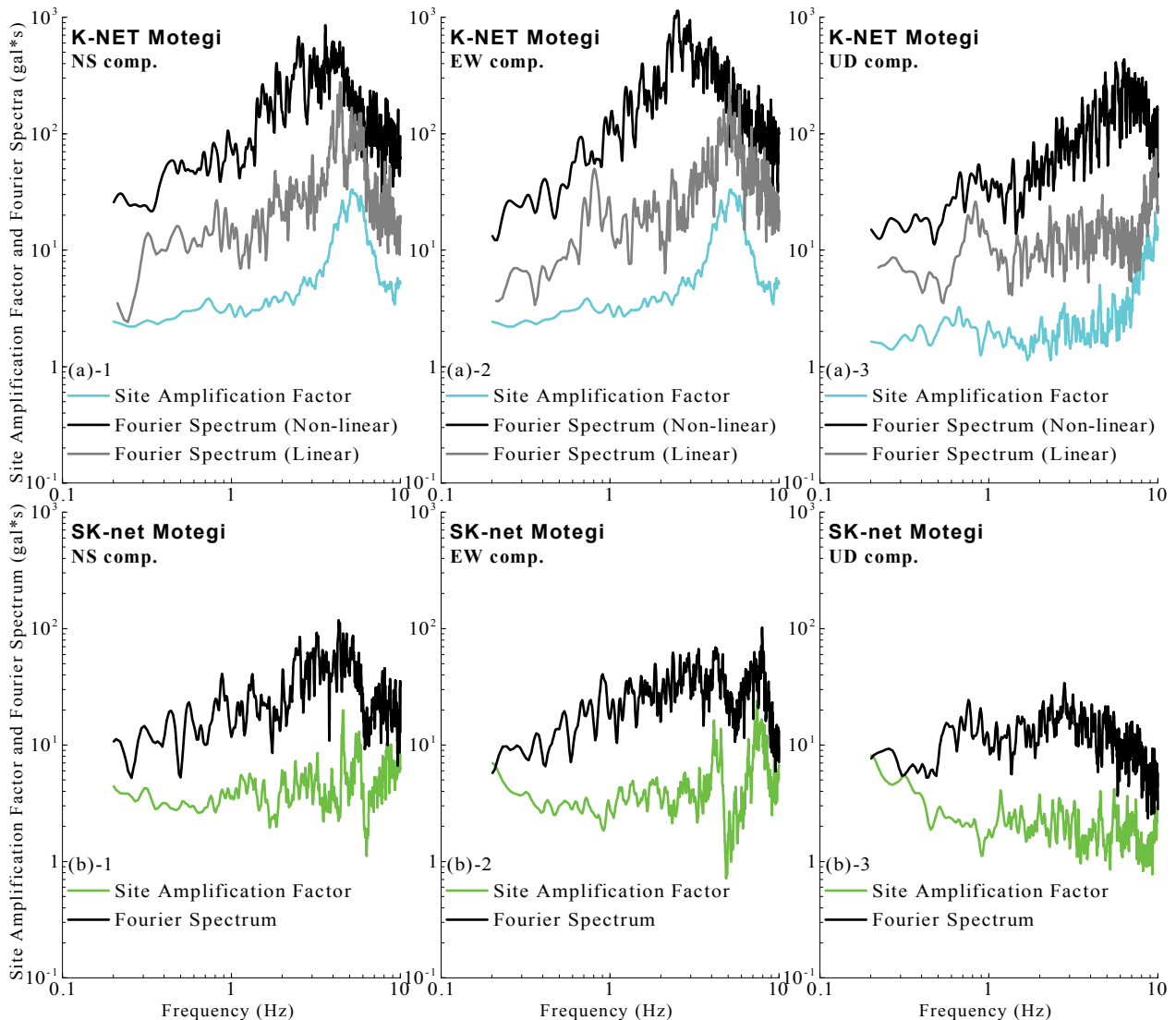


図-9 本震観測記録によるフーリエスペクトルとサイト増幅特性の比較

3.3 推定点における地震動（線形時）の推定

前節で述べた K-NET 茂木における線形時の地震動のフーリエスペクトル (図-9 参照) に対して、K-NET 茂木と推定点の距離の違いによる補正^{18),19)}を施し、さらに、

K-NET 茂木と推定点のスペクトル比 (図-5 参照) で除することにより、推定点における線形時のフーリエ振幅を評価した。その際、対象 3 成分 (N-S, E-W, U-D 方向) それぞれについて同様の計算を行った。なお、K-NET 茂木

での本震時の観測地震動（特に速度波形のパルス）は、茨城県沖のスーパーアスペリティ (SA4 および SA5 : 図-10 参照) の影響を受けていたことが報告²⁵⁾されている。そのため、距離の違いによる補正については、SA4(K-NET 茂木)に最も近いスーパーアスペリティ(図-10 参照)からの距離に基づいて実施した。

さらに、得られた線形時のフーリエスペクトルと余震観測記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換 (Parzen Window を利用した因果性を考慮²⁶⁾)を実施することにより、推定点における線形時の地震動を評価した。なお、このとき用いる余震観測記録としては、茨城県沖の地震 (EQ-04 : 表-2 参照) による推定点での加速度波形 (図-11 参照) を採用した。ここに、余震 EQ-04 の選定理由としては、図-10 に示すとおり、観測余震の中で茨城県沖のスーパーアスペリティ (SA4 ならびに SA5) に最も近い位置で発生した余震であること、震源メカニズムが本震と比較的類似していることなどが挙げられる。図-12 は、K-NET 茂木における本震観測記録のフーリエ位相と余震観測記録のフーリエ位相の類似性を検討したものである。図-12 に示すとおり、観測波(振幅および位相:本震)と置換波(振幅:本震・位相:EQ-04)による速度波形(ともに0.2~10Hz のバンド・パスフィルタを考慮)が良く一致しており、EQ-04 によるフーリエ位相の適用が妥当であることを示唆している。

3.4 SK-net 茂木における地震動 (本震時) の推定

前節で述べた推定点における線形時の地震動に対して、線形の重複反射理論²³⁾を適用し、工学的基盤 (せん断波速

度 $V_s=300\text{m/s}$ 以上 : 図-7(b) 参照) での地震動を求めた。推定点における表層地盤モデル (図-7(b) 参照) は、既存の土質調査結果および表面波探査結果等に基づいて設定した。そして、非線形の重複反射理論^{23),24)}を用いて、工学的基盤相当の地震動を推定点の地表における本震時 (非線形時) の地震動に変換した。

図-13 に SK-net 茂木における本震時の観測波と推定波を比較したものを示す。なお、ここでは、速度波形 (0.2~10Hz のバンド・パスフィルタを考慮) および加速度波形 (フィルタなし) について比較している。図-13 に示すとおり、SK-net 茂木における観測波と推定波は時刻歴全体において概ね良い一致を示しており、推定精度²⁷⁾は比較的高いと推察できる。しかしながら、40s 付近の波群(図-13 参照)については再現性が低下している。これは、茨城県沖には 2 つのサブイベント(スーパーアスペリティ)が近

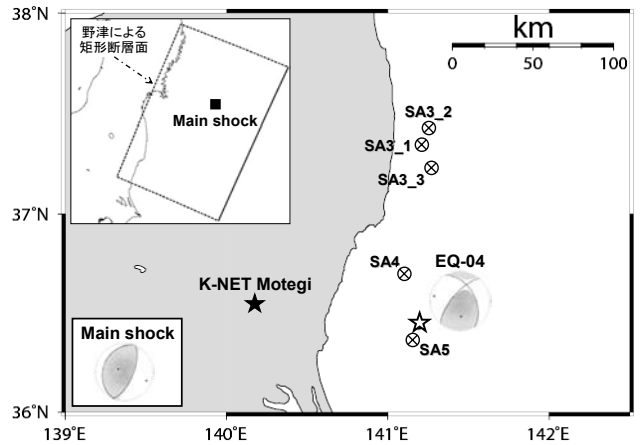


図-10 茨城県沖のスーパーアスペリティ²⁵⁾と余震 EQ-04

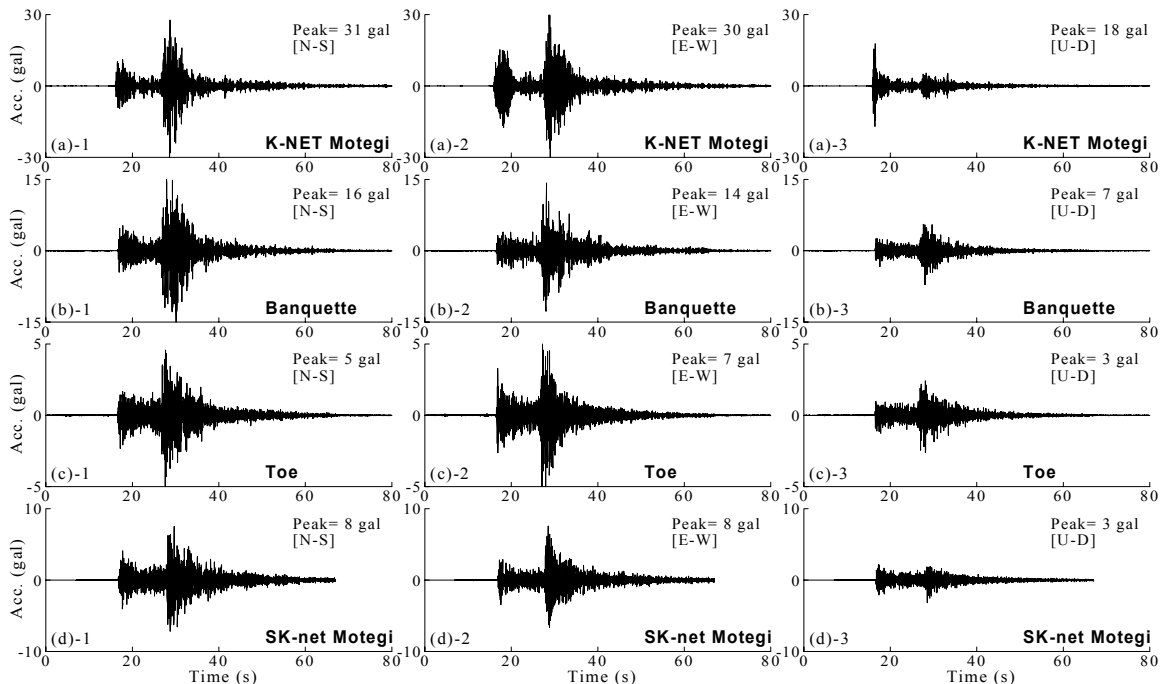


図-11 サイト位相特性の評価に用いた余震 EQ-04 による観測加速度波形 (2012/01/12 10:40:04~)

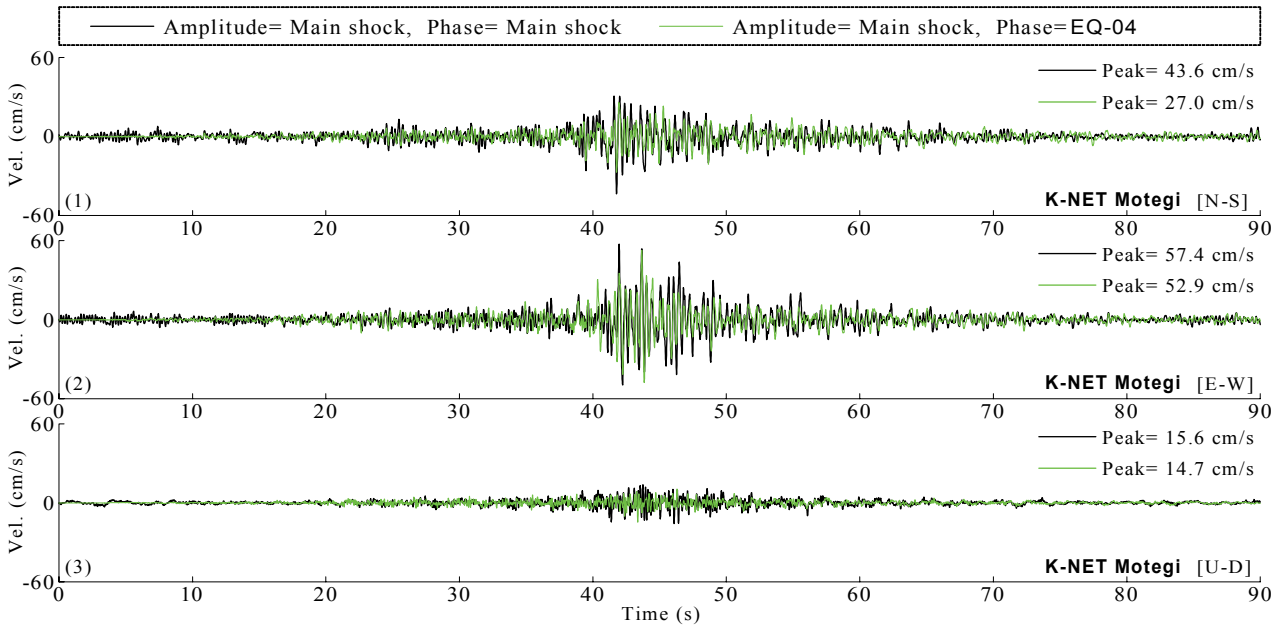


図-12 サイト位相特性の評価に用いた余震EQ-4の適用性の確認

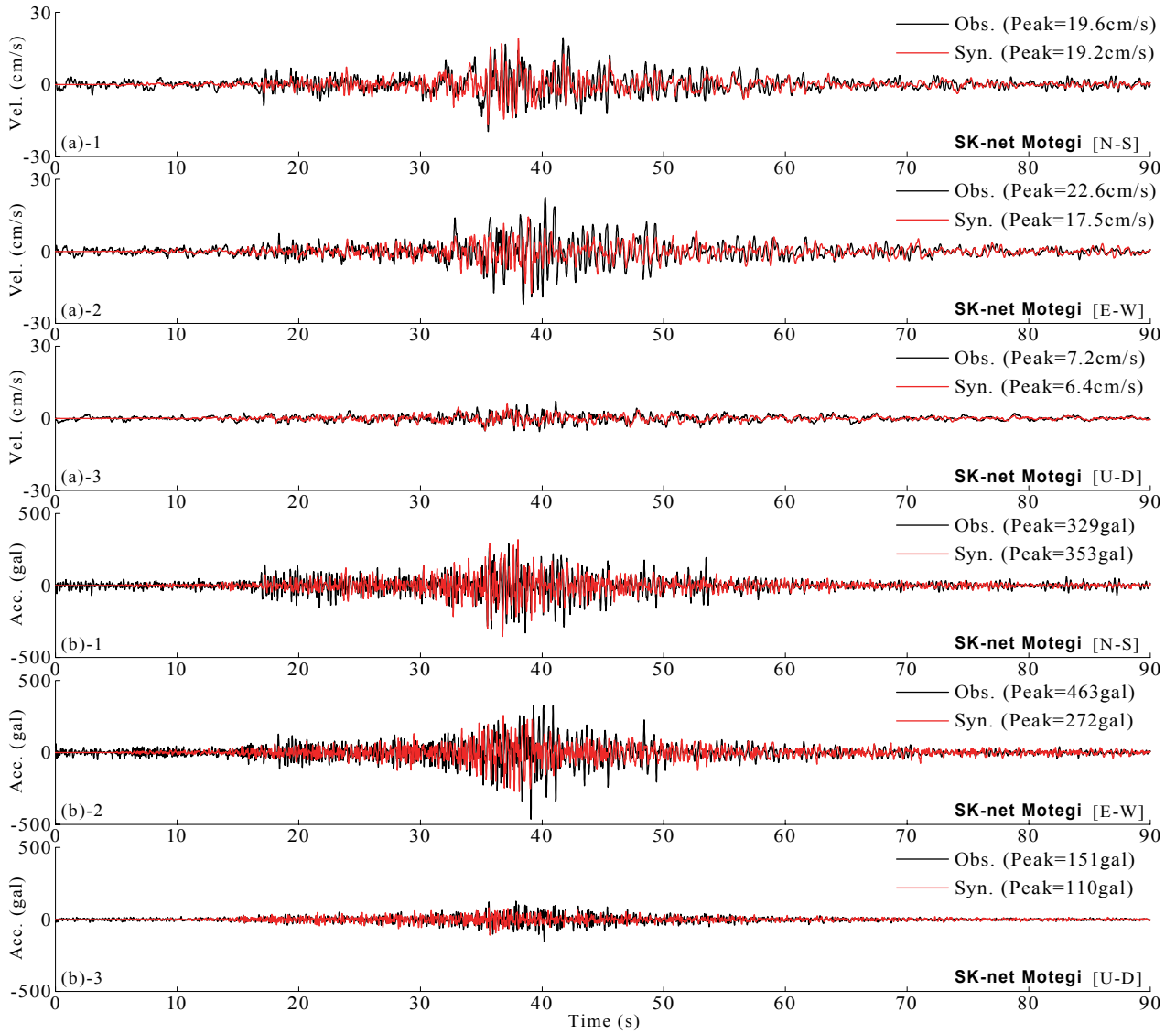


図-13 表層地盤における非線形挙動を考慮したサイト特性置換手法の妥当性確認[SK-net 茂木] (1: 速度波形)

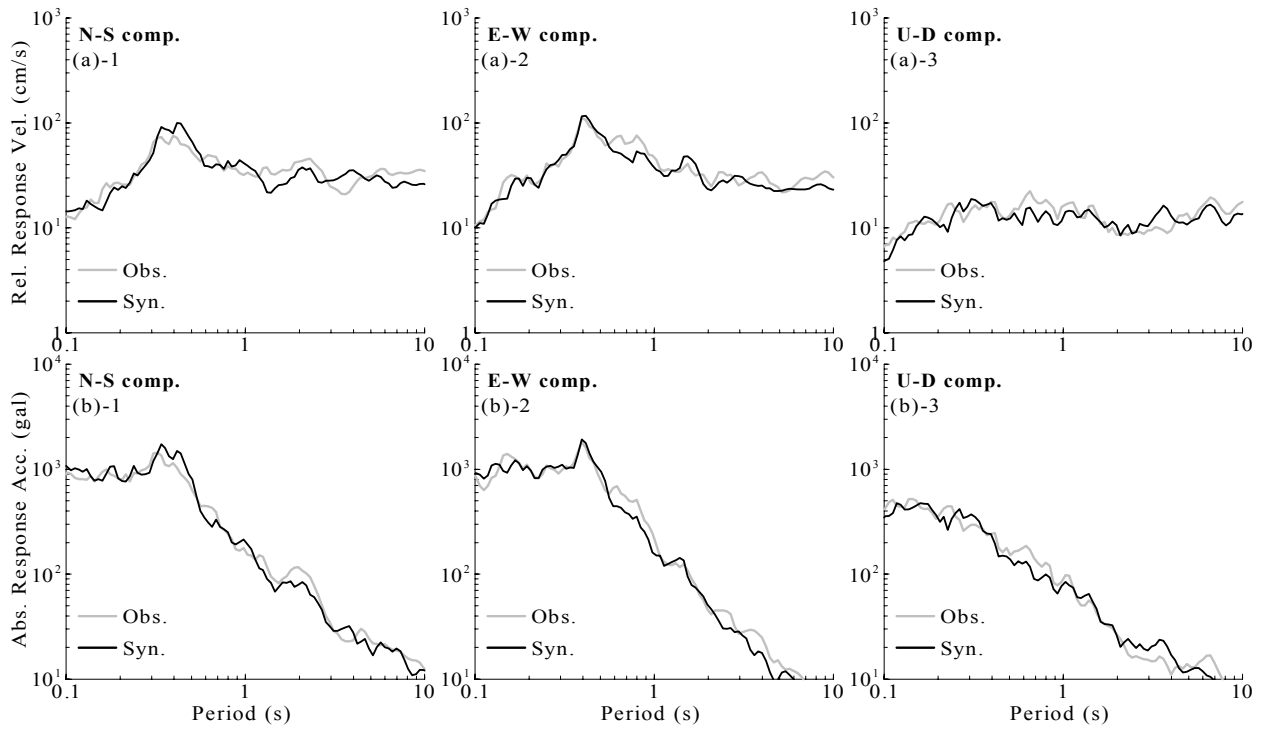


図-14 表層地盤における非線形挙動を考慮したサイト特性置換手法の妥当性確認[SK-net 茂木] (2: 応答スペクトル)

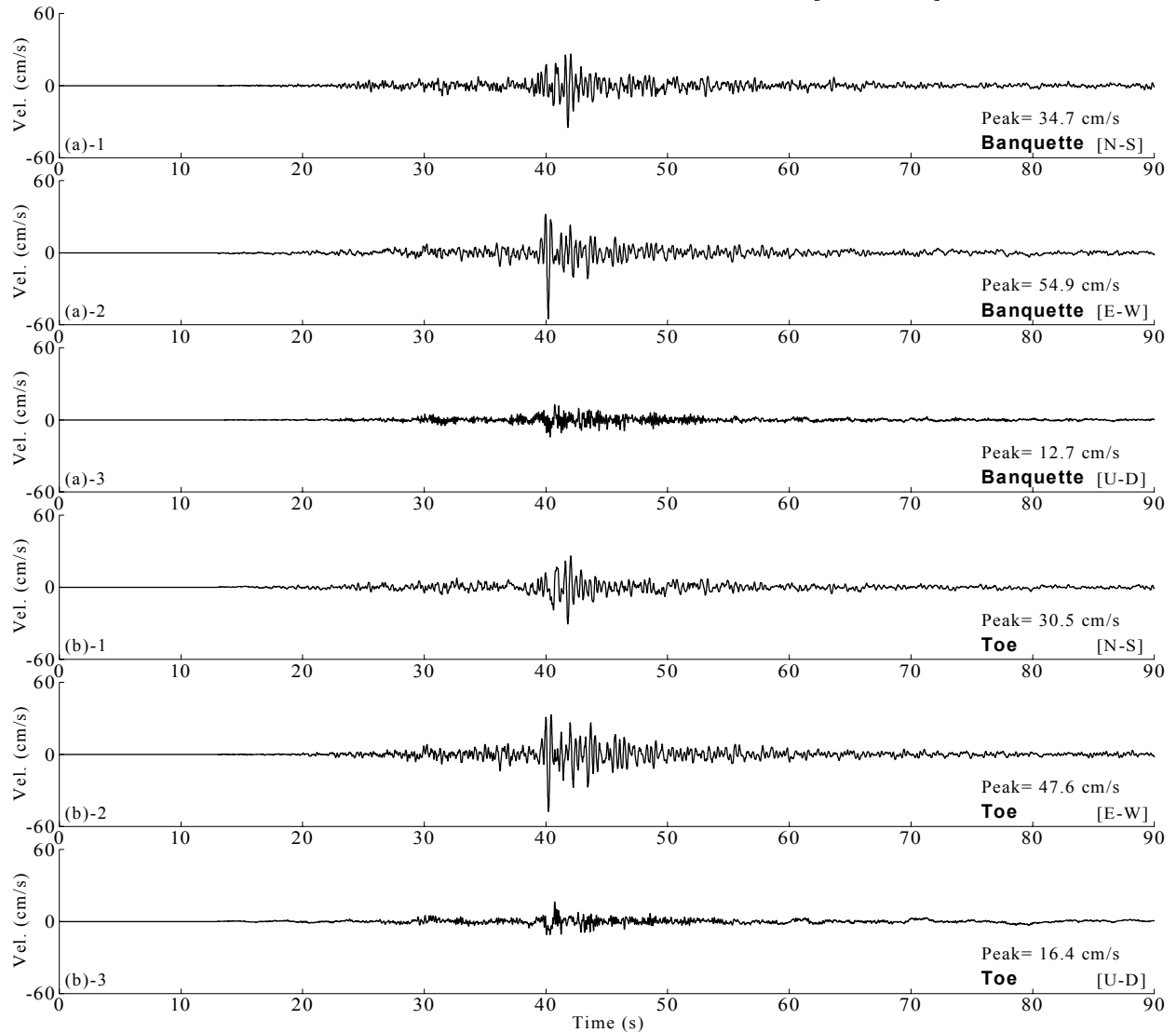


図-15 小段および法尻での推定地震動 (速度波形: 0.2~10Hz のバンド・パスフィルタ)

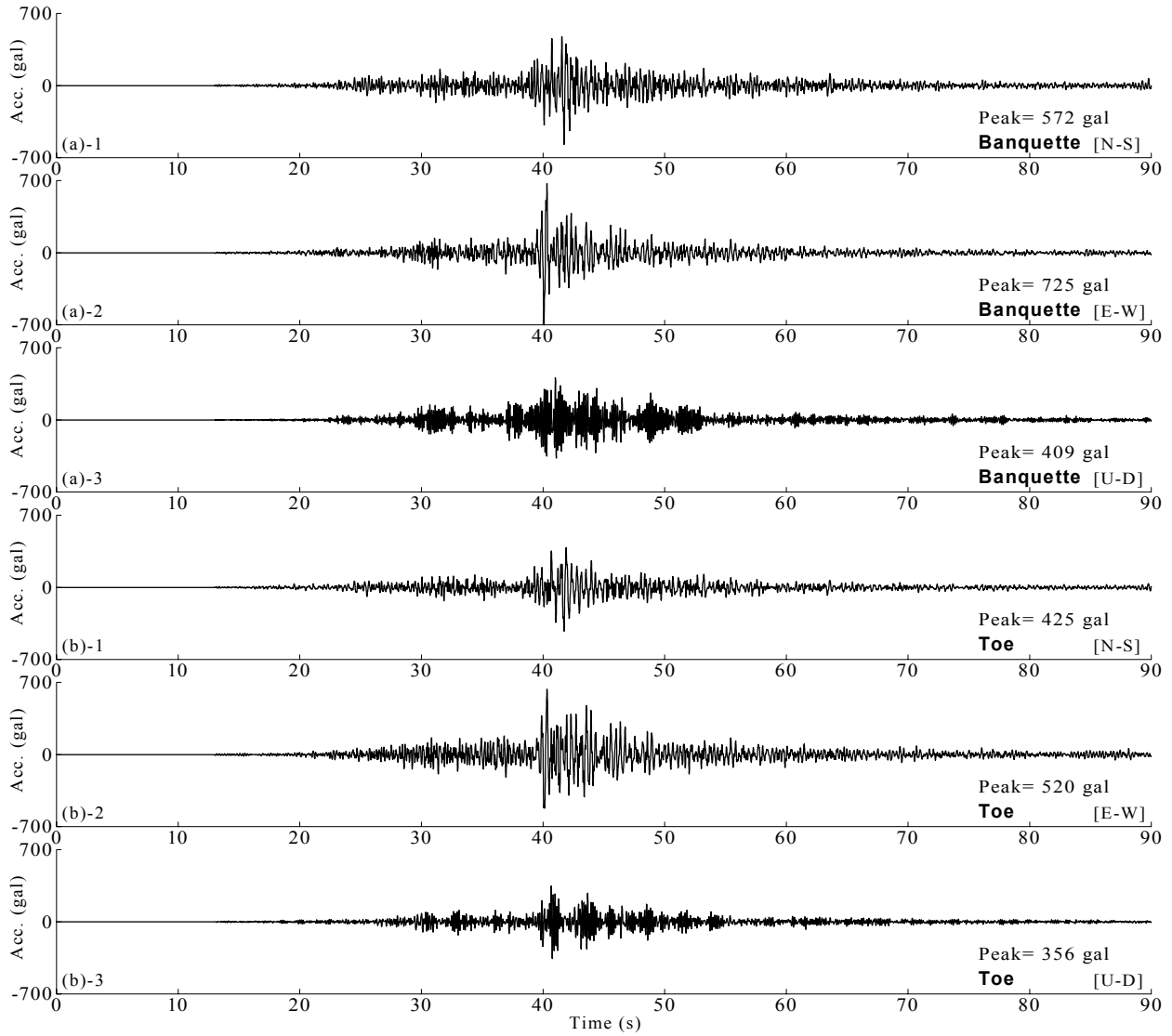


図-16 小段および法尻での推定地震動（加速度波形：フィルタ処理なし）

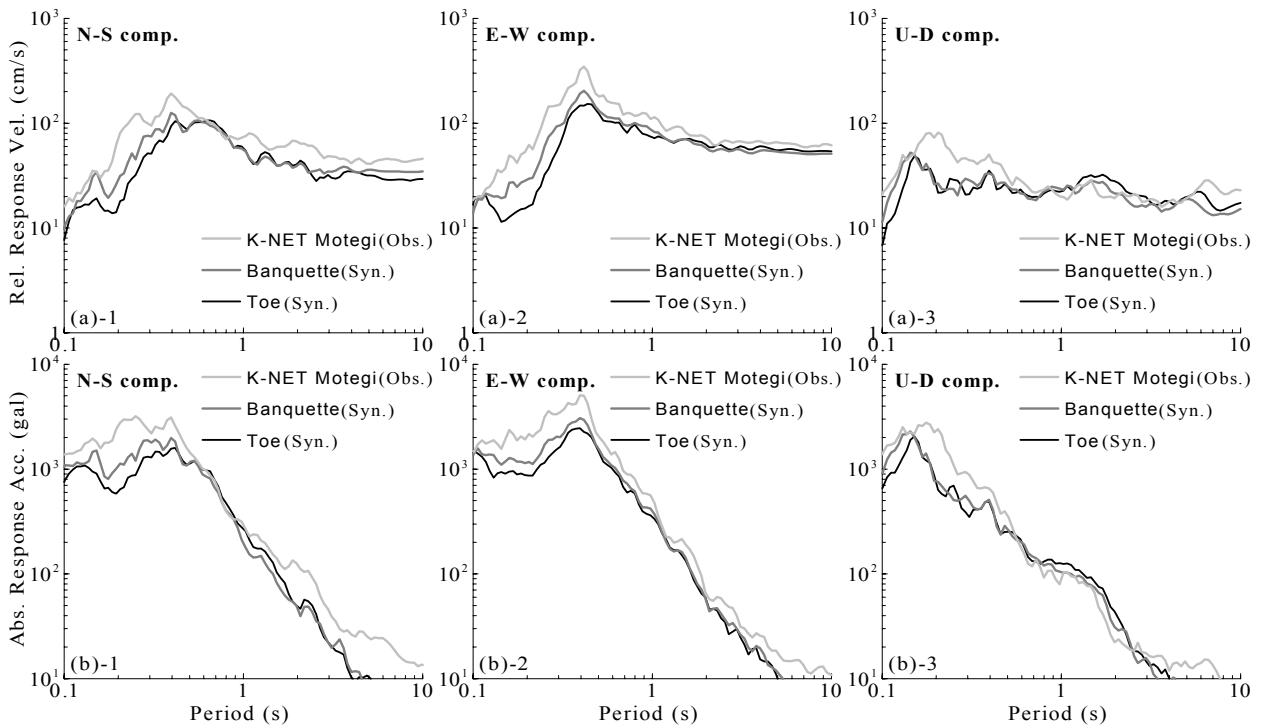


図-17 観測地震動（K-NET 茂木）と推定地震動（小段・法尻）での応答スペクトルの比較[地盤地表面]

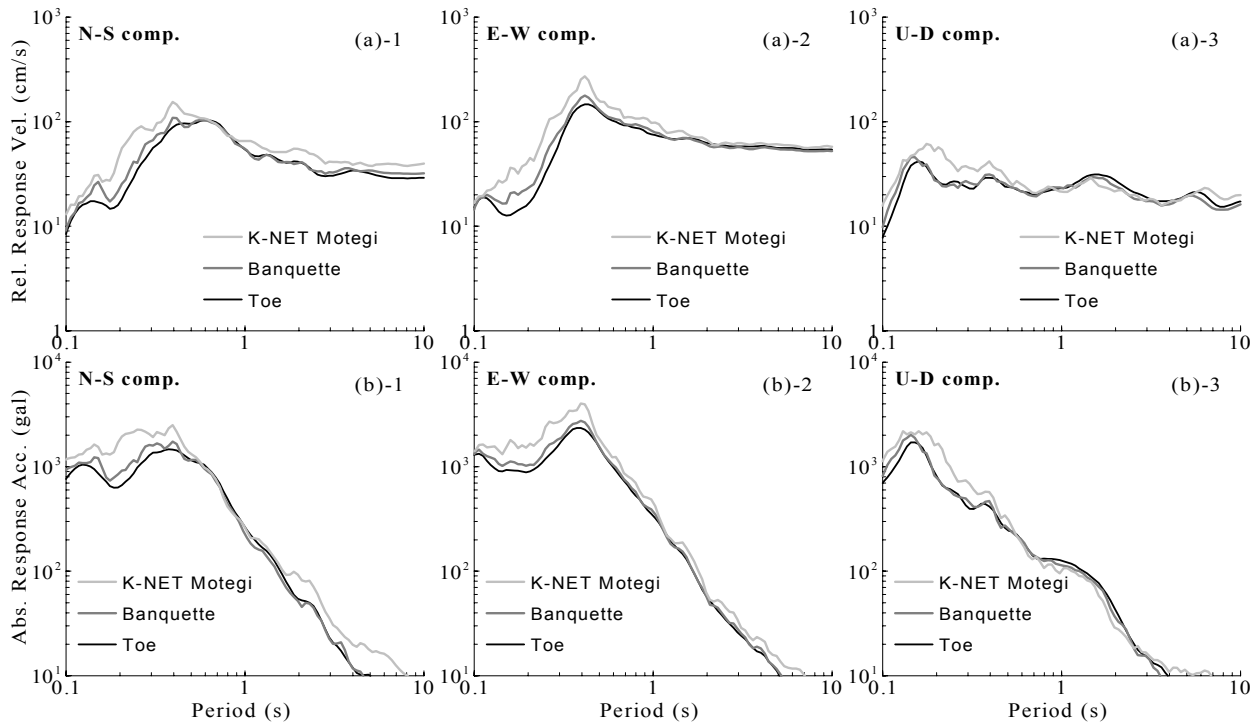


図-18 観測地震動 (K-NET 茂木) と推定地震動 (小段・法尻) での応答スペクトルの比較[工学的基盤面]

表-3 小段と法尻における推定地震動の特性比較

		Banquette	Toe
JMA Seismic Intensity		5.9	5.8
PGA (gal)	N-S	572	425
	E-W	725	634
	U-D	409	356
PGV (cm/s)	N-S	35	31
	E-W	55	48
	U-D	14	16
Acc. Power (cm ² /s ³)	N-S	286,851	174,335
	E-W	422,256	295,773
	U-D	247,281	129,035
SI Value (cm/s)	N-S	39	37
	E-W	61	57
	U-D	18	20

接しているものの(図-10 参照), 本稿ではオリジナルのサイト特性置換手法¹⁶⁾を用いて地震動を推定しているため, 単一のサブイベントの影響しか考慮していないのが原因であると考えられる. 今後の検討課題として, 疑似点震源モデルによる地震動推定手法²⁸⁾や拡張型サイト特性置換手法²⁹⁾などの採用が挙げられる.

図-14 は, 観測波と推定波による相対速度応答スペクトルおよび絶対加速度応答スペクトル(ともに減衰定数は5%)を比較したものである. 図-14 に示すとおり, SK-net 茂木では, 観測波と推定波のスペクトルが非常に良い一致を示している. すなわち, 図-13 および図-14 で確認できる一致度は, Banquette および Toe におけるサイト増幅・

位相特性を入力として, サイト特性置換手法を適用すれば, 本震時における Banquette および Toe での強震波形や応答スペクトルを一定の精度で推定できる可能性が高いことを示唆している.

4. 小段部および法尻部における推定地震動

図-15 および図-16 は, 前章で示した手順に従って評価した本震時(非線形時)の Banquette および Toe における推定速度波形および推定加速度波形である. なお, 速度波形(図-15 参照)については, 図-13 と同様に 0.2~10Hz のバンド・パスフィルタを施している. 図-15 および図-16 に示すとおり, 特に水平成分では Toe から Banquette にかけて若干の速度・加速度振幅の増幅が見受けられる. また, Banquette と Toe の推定波形の形状に着目すると, 速度波形ならびに加速度波形ともに顕著な差異は確認できない.

表-3 は, 本震時の Banquette および Toe における推定波形(図-16 参照)に対する地震動指標を表-1 と同様の項目について一覧にしたものである. 表-3 に示すとおり, 鉛直方向の PGV および SI 値を除いて, Toe から Banquette にかけて若干ではあるものの, 各地震動指標が大きくなっているのが読み取れる. 一方で, 表-3 と表-1 を比較すると, Toe~Banquette (東西水平距離 110m・標高差 17m: 図-4 参照)における地震動の増幅割合と比較して, Banquette~K-NET 茂木(東西水平距離 15m・標高差 6m:

図-4 参照)における地震動の増幅割合が極端に大きくなっていることが読み取れる。

図-17は、Banquette と Toe での推定地震動（地盤地表面：図-16 参照）、K-NET 茂木での観測地震動（地盤地表面：図-2 参照）による相対速度応答スペクトルおよび絶対加速度応答スペクトル（ともに減衰定数 5%）を比較したものである。図-17 に示すとおり、Toe～Banquette～K-NET 茂木と標高が高くなるにつれて、主に 0.2s および 0.4s 付近の短周期帯域において大きな応答スペクトルを示す傾向があり、この傾向は、水平方向（N-S および E-W 成分）においてより顕著に表れている。

さらに、図-18 に示す対象斜面 3 地点（K-NET 茂木、Banquette, Toe）における工学的基盤相当の地震動（図-8 参照）による応答スペクトル（減衰定数 5%）の比較においても、図-17 と同様の傾向を示していることから、対象 3 地点における表層地盤（工学的基盤～地表）の違いが地震動に及ぼす影響は比較的小さく、斜面内での地震動の増幅の影響が大きいと推察できる。

したがって、長大斜面の法肩に地震計が設置されている K-NET 茂木で観測された本震時の地震動は、標高の増加を伴う地形効果による地震動の増幅の影響を大きく受けていたと考えられ、法尻（Toe）と法肩（K-NET 茂木）における地震動の比較では、気象庁計測震度で 0.5 程度の差異（表-3 参照）があったものと推察される。

5. まとめ

本研究では、法肩に K-NET 茂木が設置されている長大斜面を対象にして、斜面の小段および法尻において地震計を設置し、2011 年東北地方太平洋沖地震による余震のアーレー観測を実施した。そして、サイト特性置換手法を用いて、本震時における小段ならびに法尻での強震動を推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 余震観測記録によるスペクトル比に基づくと、長大斜面内では法尻～小段～法肩と標高が高くなるにつれて、主に 5Hz 付近の周波帯域において 3 成分ともに地震動が増幅を示す。ただし、同地点においても 3 成分ごとにスペクトル形状に差異が生じているため、サイト増幅特性も各成分でそれぞれ異なっている。
- (2) K-NET 茂木の本震観測記録は表層地盤の非線形挙動の影響を受けているため、非線形／線形の重複反射理論の考慮により非線形挙動の影響を除去することで、K-NET 茂木を基準観測点としたサイト特性置換手法を用いた強震動評価において、サイト増幅・位相特性

の補正が可能であることがわかった。

- (3) 非線形／線形の重複反射理論を考慮したサイト特性置換手法を利用すれば、2011 年東北地方太平洋沖地震による SK-net 茂木における本震観測記録を一定の精度で再現することができた。
- (4) K-NET 茂木における本震観測記録は、斜面内における地震動の増幅の影響を大きく受けていたと考えられ、法尻における推定地震動と法肩（K-NET 茂木）における観測地震動の比較では、気象庁計測震度で 0.5 程度の差異があったものと考えられる。

今後は、観測地震動（法肩）ならびに推定地震動（小段・法尻）を利用した長大斜面の動的解析などを実施していきたいと考えている。

謝辞

本研究では、(独)防災科学技術研究所 K-NET および首都圏強震動総合ネットワーク SK-net による地震観測波形データ、F-net の CMT 解、気象庁の震源データをそれぞれ使用しました。茂木町の住民の皆様には、余震観測の実施などにおいて多大なるご支援をいただきました。科学研究費補助金・基盤研究 B「ダイナミック地すべり現象学の新展開」(23310125)の一部を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 2) 鷹野澄, 額綱一起, 工藤一嘉, 古村孝志, 山中佳子, ト部卓, 土井恵治: 首都圏強震動総合ネットワーク SK-net, 記念シンポジウム「日本の強震観測 50 年」—歴史と展望—講演集, 防災科学技術研究所資料, No.264, pp.119-122, 2005.
- 3) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝, 柴尾享, 今村孝志: 常時微動計測に基づく高速道路盛土の入力地震動設定法の検討, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.4, pp.529-541, 2009.
- 4) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault, *Proc. of 3rd WCEE*, Auckland, New Zealand, pp.94-115, 1965.
- 5) 気象庁: 震度計設置環境調査結果（一部）の公表について, 報道発表資料平成 21 年 8 月 7 日, 2009.
- 6) たとえば, 秦吉弥, 釜井俊孝, 王功輝, 野津厚: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における白石市緑が丘団地での強震波形の評価, 第 51 回日本地すべり学会研究発表会講演集, No.3-06, pp.111-112, 2012.
- 7) 若井明彦, 田中頼博, 阿部真郎, 吉松弘行, 山邊康晴, 渡邊泰介: 中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム, 日本地すべり学会誌, Vol.45, No.3, pp.21-32, 2008.

- 8) 鳥居宣之, 沖村孝: 山腹斜面における地震動応答特性に及ぼす地形形状ならびに表土層厚の影響, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.369-382, 2008.
- 9) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克, 常田賢一: 常時微動計測を利用した道路盛土のせん断波速度の評価—2007年能登半島地震で被災した能登有料道路を例として—, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.6, pp.318-325, 2011.
- 10) 秦吉弥, 一井康二, 山田雅行, 常田賢一, 竹澤請一郎, 柴尾享, 満下淳二, 村田晶, 古川愛子, 小泉圭吾: 中小地震観測および常時微動計測に基づく道路盛土の地震応答特性の評価, 土木学会論文集 A1 (地震工学論文集 31-b), Vol.68, No.4, pp.I_407-I_417, 2012.
- 11) 釜井俊孝: 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による斜面災害, 自然災害科学 *JJSNDS*, Vol.27, No.2, pp.189-198, 2008.
- 12) 王功輝, 末峯章, 福岡浩, 笹原克夫, 釜井俊孝, 張帆宇: 東日本大震災時に発生した流動性の高い地すべりについて, 第50回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.13, 2011.
- 13) 秦吉弥, 王功輝, 釜井俊孝, 末峯章, 野津厚: サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における葉ノ木平地すべり地での地震動の推定, 日本地すべり学会誌, Vol.49, No.3, pp.109-118, 2012.
- 14) 林宏親, 西川純一, 谷口啓二郎: 地盤および道路盛土におけるアレー観測, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.117-120, 1997.
- 15) 井合進, 一井康二, 佐藤幸博, 桑島隆一: 高盛土の地震応答解析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.10, pp.1557-1562, 1998.
- 16) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake, based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
- 17) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 地球惑星連合大会2006 予稿集(CD-ROM), S111-P002, 2006.
- 18) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 19) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.556, pp.15-24, 2002.
- 20) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 21) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用—2007年能登半島地震での道路被災を例として—, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 22) 秦吉弥, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克: サイト特性置換手法に基づく2011年長野・新潟県境地震における栄村横倉集落での地震動の評価, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.2, pp.60-77, 2012.
- 23) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3 pp.205-222, 2002.
- 24) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演概要集, pp.539-542, 1985.
- 25) 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.2, pp.21-40, 2012.
- 26) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 27) たとえば, 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 本震観測記録を利用した2008年岩手・宮城内陸地震における震源域での地震動の推定とその信頼度の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.1, 2013. (in press)
- 28) 野津厚: 強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試み, 第47回地盤工学研究発表会講演概要集, No.839, pp.1669-1670, 2012.
- 29) Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto, H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.418-429, Tokyo, Japan, 2012.

(2012年6月25日 受付)