

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1272      June 2013

2011年東北地方太平洋沖地震の際に見られた  
表層地盤の非線形挙動の概略的傾向

若井 淳  
野津 厚

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 非線形挙動強さの評価 .....	5
2.1 非線形挙動強さの評価手法 .....	5
2.2 非線形挙動強さの評価結果 .....	24
3. 非線形挙動強さと地震動強さの関係 .....	24
3.1 ピーク周波数比とPGA, PGV及びPSI値との関係 .....	25
3.2 ピーク周波数比とPGA, PGV及びPSI値の関係を表す経験式 .....	25
4. 非線形挙動強さと地震動強さおよび地盤条件の三者の関係 .....	26
4.1 非線形挙動強さと地盤のひずみとの関係 .....	27
4.2 非線形挙動強さのPGVに関する経験式からの偏差と地盤の平均S波速度との関係 .....	28
4.3 非線形挙動強さのPGVに関する経験式からの偏差と サイト増幅特性のピーク周波数との関係 .....	29
5. まとめ .....	29
謝辞 .....	30
参考文献 .....	30
付録A .....	31
付録B .....	32

# **General Tendency of Nonlinear Behavior of Soft Soil Deposits during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake**

**Atsushi WAKAI\***

**Atsushi NOZU\*\***

## **Synopsis**

In order to understand the effects of strong ground motions on engineering structures, it is important to evaluate the effects of soil nonlinearity on strong ground motions. In this report, based on strong motion records obtained in wide area during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, degree of soil nonlinearity was evaluated based on the shift of peak frequencies from linear site amplification factors to observed Fourier spectra during the Tohoku earthquake. Then, the relation between the degree of soil nonlinearity and ground motion indices such as PGA, PGV and PSI was investigated. It was found that the degree of soil nonlinearity was best correlated with PGV and the relation can be approximated with a hyperbolic curve. In addition, it was found that the deviation from this empirical formula is correlated with the peak frequencies of linear site amplification factors.

**Key Words:** nonlinearity, strong motion, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, empirical equation

---

\* Postdoctoral Fellow, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division

\*\* Head, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5085 Fax : +81-46-844-0839 e-mail:wakai-a@pari.go.jp

# 2011年東北地方太平洋沖地震の際に見られた 表層地盤の非線形挙動の概略的傾向

若井 淳\*・野津 厚\*\*

## 要 旨

地震動が構造物に与える影響を正確に理解する上で、表層地盤の非線形挙動が地震動に与える影響を評価することは重要である。2011年東北地方太平洋沖地震では、全国をカバーする強震観測網により、非常に広範な地域で強震記録が得られている。本研究では、これらの観測記録の地表フーリエスペクトルのピーク周波数が線形時サイト増幅特性（地震基盤～地表）のピーク周波数からどの程度移動したかを表す指標に基づいて、非線形挙動強さを評価する。そして、地震動強さを表すいくつかの指標（PGA、PGV及びPSI値）と非線形挙動強さとの関係を調べ、それらの関係を適切に表現する経験式を提案した。その結果、非線形挙動強さはPGVと最も相関が良く、その関係は双曲線モデルで最も適切に表現されることがわかった。また、非線形挙動強さの経験式からの偏差が線形時のサイト増幅特性のピーク周波数と相関があることがわかった。

キーワード：非線形挙動，強震動，2011年東北地方太平洋沖地震，経験式

---

\* 地震防災研究領域 地震動研究チーム 特別研究員

\*\* 地震防災研究領域 地震動研究チームリーダー

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5085 Fax：046-844-0839 e-mail:wakai-a@pari.go.jp

## 1. まえがき

巨大地震による地震動が構造物へ与える影響を正確に把握する上で、地震動を精度良く評価することは重要である。強震時においては、表層地盤の非線形挙動(石原, 1982; Yoshida and Iai, 1998; 翠川, 1993)が顕在化し、地震動の卓越周波数が低周波数側に移動するなど、地震動が非線形挙動の影響を受けることは広く知られている。現在、検討対象地点において強震動評価を行う手法として、経験的グリーン関数法(Irikura, 1983; Irikura, 1986)や統計的グリーン関数法(古和田他, 1998; 野津他, 2009)などが実務で用いられているが、これらの手法自体は、震源から対象地点までの媒質の線形的な挙動を仮定しているため、これらの手法を単独で用いるだけでは、表層地盤の非線形挙動の影響を考慮した地震動評価を行うことはできず、表層地盤の非線形挙動の影響を適切に考慮するための工夫が必要である。

表層地盤の非線形挙動を評価するための方法には、大きく分けて二つの方法がある。一つは、原位置でのサンプリングと室内試験に基づく方法である。この方法には長い歴史があり(石原, 1982; 翠川, 1993; Yoshida and Iai, 1998), そこで得られた結果は、表層地盤を対象とした非線形の地震応答解析などに活用されてきている(例えば, Yoshida and Iai, 1998; Iai *et al.*, 1995)。それに対し、もう一つの方法は、既存の強震観測記録を利用して、広域における地盤の非線形挙動を経験的に評価しようとする方法である。ここで、後者の方法が必要とされる理由としては、主に次の二点を挙げることができる。第一に、広域での地震動の予測という問題を考えたとき、あらゆる地点で原位置でのサンプリングと室内試験を行うことは困難であるから、広域で生じる非線形挙動を大局的に推定するためには経験的な方法の活用も考える必要があり、そのために、過去の地震の際に広域で生じた非線形挙動の情報は有用な資料となり得る。第二に、特定の地点での地震動の予測という問題を考える場合であっても、表層地盤の非線形挙動が地震動に及ぼす影響は、実際に非線形挙動を示す浅部地盤の挙動(例えばS波速度の低下)のみならず、非線形挙動を示さない深部を含めた堆積層全体の平均的な非線形挙動を考慮して評価する必要があり(野津・盛川, 2003; 野津, 2007; 野津・菅野, 2008), この点でも、地震観測記録に基づいて、各地の地盤に実際に生じた非線形挙動強さ(地震動特性の線形時からの乖離の程度をここではこのように表現する)を把握することは非常に重要である。

2011年東北地方太平洋沖地震(M<sub>w</sub>9.0)では、全国をカバ

ーする強震観測網(Kinoshita, 1998; Aoi *et al.*, 2000)により、非常に広範な地域で強震記録が得られている。このような広域の強震観測記録を用い、当該地震の際に各地で実際に生じた非線形挙動強さとその空間的な分布を把握すること、さらに、非線形挙動強さと地震動強さとの関係などについて検討を行うことは極めて有意義であると考えられる。

そこで本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震で得られた広域の強震観測記録に基づき、実際に生じた表層地盤の非線形挙動強さを定量的に把握する。また、その結果を今後の強震動評価に活用することを目的として、非線形挙動強さに関する経験的關係式を構築することを試みる。具体的には、地表フーリエスペクトルと線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)(野津・長尾, 2005; 野津他, 2007)のピーク周波数比を表層地盤の非線形挙動強さの評価尺度とし、地震動強さや地盤条件の代表的な指標との関係を検討する。

なお、強震観測記録を利用した地盤の非線形挙動強さの評価手法としては、地表と地中に観測点を持つ地点において、本震および中小地震の鉛直アレイ観測記録を用いた地表/地中スペクトル比を比較する方法が用いられることがあるが(Iai *et al.*, 1995; Satoh *et al.*, 1995), この方法の場合、地表のみで観測を行っている地点で得られた観測記録を利用できないという問題点がある。また、一般には、この方法で評価される地盤の非線形挙動強さは、地表観測点と地中観測点に挟まれた部分における平均的な非線形挙動強さであり、堆積層全体における平均的な非線形挙動強さに対応しているとは限らない。ここで、「堆積層全体における平均的な非線形挙動強さ」とい

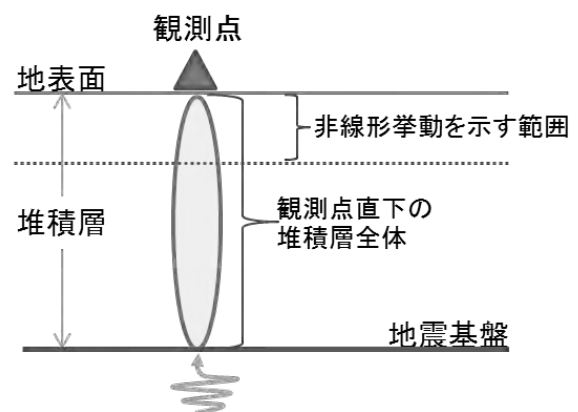


図-1.1 堆積層全体における平均的な非線形挙動強さに関する説明図

う概念について説明する。図-1.1に示すように、地震基盤上に堆積層があり、地震基盤上面でのインピーダンスコントラストが高い場合を考えると、非線形挙動を示すのは一般的に堆積層の浅い部分であり、堆積層全体ではないと考えられる。この場合、非線形挙動を示す範囲でのS波速度の低減率がそのまま地震動の卓越周波数の低減率には対応せず、むしろ、S波速度の低減率を深さ方向に平均化したものが、地震動の卓越周波数の低減率に対応するものと考えられる。本研究では後者に着目しており、これを「堆積層全体における平均的な非線形挙動強さ」と表現する。

一方、既往の研究の中には、強震時および弱震時の水平動と上下動のスペクトル比を用いる方法 (Dimitriu *et al.*, 1999; 野口・笹谷, 2011; 野口・佐藤, 2011), 互いに近接した2地点間のスペクトル比を用いる方法 (池浦・加藤, 2011; 池浦, 2011a; 池浦, 2011b) など、表層地盤の非線形挙動強さを評価する上で有効と考えられる方法が提案されている。しかし、本研究では、既往の研究 (野津・長尾, 2005; 野津他, 2007) で提案されている線形時のサイト増幅特性からの偏差を明らかにすることに主眼があるため、上記の地表フーリエスペクトルと線形時のサイト増幅特性 (地震基盤～地表) のピーク周波数比を用いる方法を採用する。

なお、本研究で用いる線形時のサイト増幅特性は、スペクトルインバージョンで求められたものである。その詳細については野津・長尾 (2005), 野津他 (2007) で述べられているが、概要のみ記せば次の通りである。解析は九州、中国・四国、近畿、中部、関東、東北・北海道の6つのブロックで実施されている。このうち本研究で利用したのは関東と東北・北海道ブロックの結果である。関東ブロックでは、K-NET, KiK-net等の計421地点を対象とし、295の地震による8982の記録 (17964の水平成分) を用いて解析が行われている。東北・北海道ブロックでは、計695地点を対象とし、318の地震による11496の記録 (22992の水平成分) を用いて解析が行われている。解析は二段階で行われている。まず、第一段階では、S波を含む40秒間のデータを対象として観測スペクトルを算出し、既知のQ値を与え、震源スペクトルを求める。第二段階では、S波と後続位相を含む160秒間のデータを対象として観測スペクトルを再度算定し、既知のQ値と先に求めた震源スペクトルを与え、サイト増幅特性を求めている。伝播経路のQ値については、佐藤・巽 (2002) による東日本海溝型地震のQ値 ( $Q=114 \times f^{0.92}$ ) を用いている。解析では、周波数毎に、サイト増幅特性の最も小さい岩盤観測点を基準観測点としている。また、得られた震源スペクトル

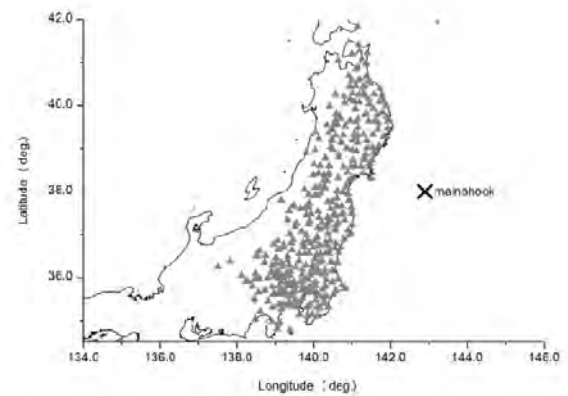


図-2.1 本震時にPGA (3成分合成) 50cm/s<sup>2</sup>以上の記録が得られたK-NET, KiK-netの観測地点

から求めた地震モーメントとF-netの地震モーメントが良く対応することを確認している。

## 2. 非線形挙動強さの評価

### 2.1 非線形挙動強さの評価手法

2011年東北地方太平洋沖地震(M<sub>w</sub> 9.0; 以下、本震という)による地震動の記録は、K-NET (Kinoshita, 1998), KiK-net (Aoi *et al.*, 2000) など日本全国を網羅する高密度強震観測網において非常に広範な地域の観測地点で得られている。本研究では、本震時の記録が得られているK-NET, KiK-net観測地点の中で、本震時に表層地盤が非線形挙動を示した可能性のある観測点を漏れなく対象とするため、地表最大加速度(3成分合成; 以下、PGAという)が50 cm/s<sup>2</sup>以上の観測点をすべて対象とした。なお、これらの観測点の地表最大速度(3成分合成; 以下、PGVという)は2cm/s以上である。図-2.1は本震時にPGA 50 cm/s<sup>2</sup>以上の記録が得られたK-NET, KiK-netの観測地点(396地点)を示している。

1. で述べたように、強震観測記録から表層地盤の非線形挙動強さを評価するための手法がいくつか提案されているが、本研究では本震時における観測記録の地表フーリエスペクトルと線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表) (野津・長尾, 2005; 野津他, 2007) それぞれのピーク周波数を比較する方法を採用する。具体的な手順としては、選定された対象地点それぞれの本震記録のフーリエスペクトルを算定し、それらと当該地点におけるサイト増幅特性のピーク周波数を評価する。ここで、各フーリエスペクトルは水平2成分のベクトル和をとり、バンド幅0.05Hzのパーセンウィンドウを適用したものであ

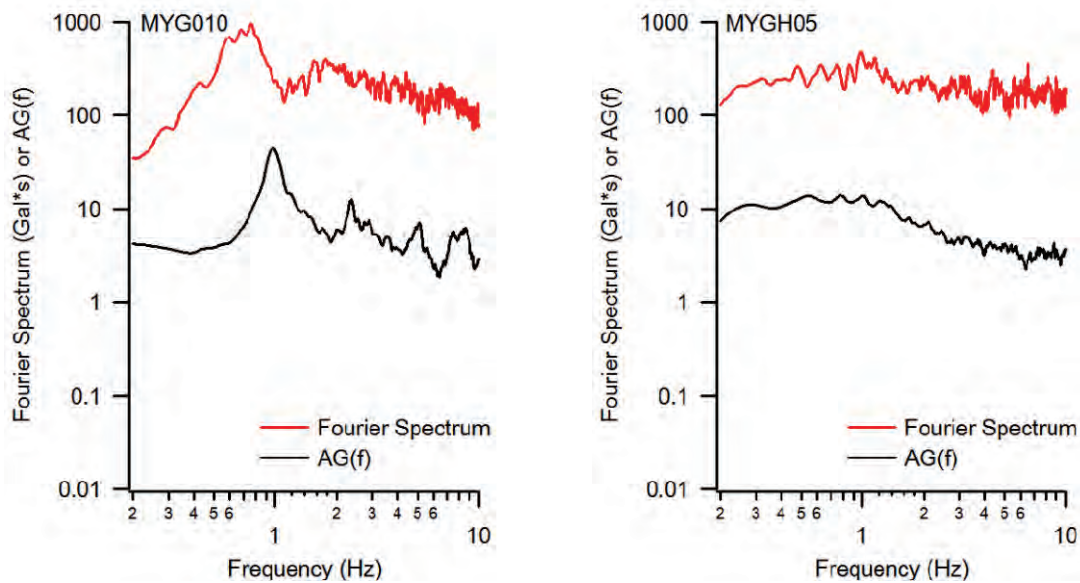


図-2.2 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性に明瞭なピークが存在する例(左図)と存在しない例(右図)

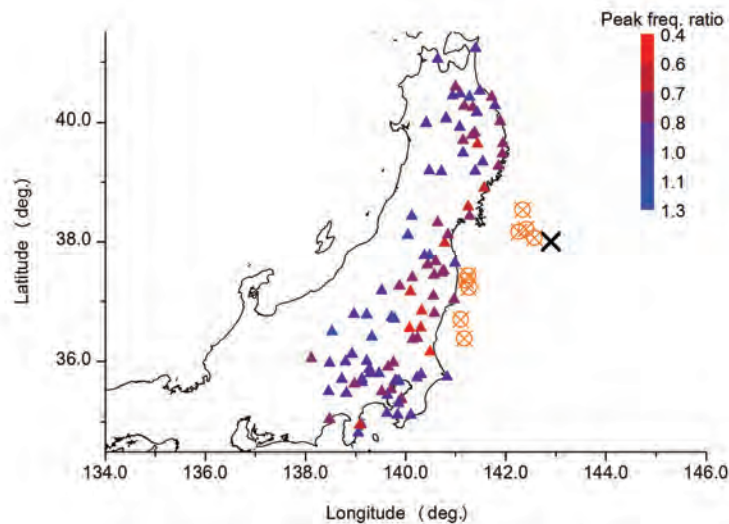


図-2.3 本研究の対象地点 (98 地点) とそこでのピーク周波数比(地表フーリエスペクトル/サイト増幅特性) の評価結果(暖色系：非線形挙動が強い，寒色系：非線形挙動が弱い)．×印は気象庁発表の本震震央位置，○と×を組み合わせた記号は既往の研究(野津他，2012)で推定されている本震の SPGA の位置

る．次に，サイト増幅特性のピーク周波数に対するフーリエスペクトルのピーク周波数の比をとり，これを非線形挙動強さの指標とする．すなわち，ピーク周波数比が1より小さい範囲でゼロに近づくほど，非線形挙動が強いことを意味し，ピーク周波数比が1に近づく程，非線形挙動が弱いことを意味する．ただし，フーリエスペクトル及びサイト増幅特性双方のピーク周波数を決定する際，図-2.2の左図に示すように，目視である程度明瞭なピークが存在すると判断できるもののみを対象にすることと

する．例えば，図-2.2の右図に示すように，どちらか一方でもピークが不明瞭で，ピーク周波数を読み取ることが困難な場合は，対象地点から除外する．このような条件で対象地点をさらに限定すると，図-2.3に示す98地点となる．ピークが不明瞭な地点は，地下にインピーダンスコントラストが明確な境界が存在しない地点や，堆積層厚が水平方向に変化しており特定の周波数成分が卓越しにくい地点に対応するものと考えられる．

なお，液状化した可能性がある地点については，以下

表-2.1 対象地点における地表フーリエスペクトル、サイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数およびそれらのピーク周波数比一覧

地点コード	地点名	緯度(deg.)	経度(deg.)	地表フーリエスペクトルピーク周波数(Hz)	サイト増幅特性(地震基盤～地表)ピーク周波数(Hz)	ピーク周波数比	地点コード	地点名	緯度(deg.)	経度(deg.)	地表フーリエスペクトルピーク周波数(Hz)	サイト増幅特性(地震基盤～地表)ピーク周波数(Hz)	ピーク周波数比
AOM007	南通	41.2256	141.3958	1.91	2.24	0.85	IBR005	笠間	36.3851	140.2372	1.64	2.10	0.78
AOM012	八戸	40.5138	141.4805	1.06	1.17	0.91	IBR013	鉾田	36.1587	140.4892	3.69	6.83	0.54
AOM013	南部	40.4124	141.28	5.20	5.30	0.98	IBRH11	岩瀬	36.3701	140.1401	1.83	2.49	0.73
AOM014	子ノ口	40.4371	140.9406	0.54	0.58	0.93	IBRH12	大子	36.8369	140.3181	4.63	7.49	0.62
AOM024	蟹田	41.0473	140.6398	1.21	1.39	0.87	IBRH13	高萩	36.7955	140.575	2.15	2.76	0.78
AOMH11	十和田湖西	40.58	140.995	5.93	8.40	0.71	IBRH15	御前山	36.5566	140.3013	5.18	8.79	0.59
AOMH16	新郷	40.4624	141.0923	1.12	1.22	0.92	TCG009	今市	36.7258	139.7155	3.70	4.32	0.86
IWT001	種市	40.4099	141.7191	3.97	4.76	0.83	TCGH11	今市	36.7084	139.7694	6.82	6.91	0.99
IWT003	普代	40.0083	141.8861	1.57	1.90	0.83	TCGH16	芳賀	36.548	140.0751	2.22	5.27	0.42
IWT005	宮古	39.6472	141.9464	1.10	1.32	0.84	GNM001	片品	36.7722	139.2248	8.89	8.84	1.01
IWT007	釜石	39.2701	141.8561	2.84	3.66	0.78	GNM002	水上	36.7819	138.9695	7.45	8.79	0.85
IWT013	遠野	39.3367	141.5378	2.33	2.73	0.85	GNM009	桐生	36.4106	139.3251	1.74	1.71	1.02
IWT014	石鳥谷	39.4844	141.147	0.87	0.95	0.92	GNM016	万場	36.1162	138.9251	5.87	6.74	0.87
IWT017	門馬	39.6336	141.4376	4.44	6.54	0.68	GNMH08	孺恋	36.4917	138.5244	0.92	0.73	1.26
IWT018	盛岡	39.6953	141.1478	3.55	4.34	0.82	SIT008	春日部	35.9745	139.7526	1.37	1.83	0.75
IWT020	藪川	39.7841	141.3295	1.23	1.49	0.83	SIT010	大宮	35.9065	139.6481	1.42	1.75	0.81
IWT021	西根	39.9203	141.082	1.10	1.22	0.90	SIT013	所沢	35.7965	139.4659	3.08	3.32	0.93
IWTH01	二戸東	40.2383	141.3423	3.96	4.90	0.81	SIT014	中津川	35.9954	138.801	7.25	7.98	0.91
IWTH02	玉山	39.825	141.3826	5.20	6.39	0.81	SITH10	都幾川	35.9964	139.2191	6.60	7.61	0.87
IWTH04	住田	39.1809	141.3909	2.77	3.22	0.86	SITH11	飯能	35.8637	139.2726	3.48	3.81	0.91
IWTH06	二戸西	40.2611	141.1709	5.42	7.49	0.72	CHB005	銚子	35.7358	140.83	1.09	1.12	0.98
IWTH08	久慈北	40.2686	141.7831	2.67	2.85	0.94	CHB006	成田	35.7801	140.3067	1.32	1.39	0.95
IWTH12	九戸	40.1533	141.4245	2.89	3.27	0.88	CHB007	佐倉	35.7234	140.2267	3.13	3.39	0.92
IWTH21	山田	39.4734	141.9336	4.09	4.88	0.84	CHB015	木更津	35.3738	139.9159	1.25	1.61	0.78
AKTH04	東成瀬	39.174	140.7129	3.88	4.27	0.91	CHB019	鉅南	35.1105	139.8351	0.89	0.97	0.92
AKTH13	阿仁	39.9819	140.4072	7.86	8.30	0.95	CHB020	鴨川	35.1155	140.1022	1.28	1.34	0.95
AKTH14	鹿角	40.0622	140.8084	4.44	4.61	0.96	CHB022	富津	35.3083	139.8598	4.77	4.88	0.98
AKTH19	湯沢	39.1913	140.471	0.47	0.49	0.97	TKY003	青梅	35.7968	139.2912	2.58	2.73	0.95
MYG001	気仙沼	38.9015	141.5684	3.53	5.17	0.68	TKY013	砂町	35.6596	139.8343	0.79	0.80	0.98
MYG007	豊里	38.5876	141.251	1.13	1.67	0.68	TKY020	塩浜	35.6657	139.8087	0.79	0.97	0.81
MYG010	石巻	38.4282	141.2809	0.76	0.97	0.78	TKY026	宇喜田	35.6704	139.8635	0.82	0.83	0.99
MYG014	作並	38.3177	140.6357	2.87	3.66	0.78	TKY028	越中島	35.6685	139.7893	0.99	1.12	0.89
MYG017	角田	37.9763	140.7818	0.75	1.14	0.66	TKYH13	檜原南	35.7017	139.1275	8.88	9.71	0.91
MYGH08	岩沼	38.1133	140.8441	0.64	0.78	0.82	KNG001	川崎	35.5291	139.7062	1.20	1.61	0.74
YMT012	長井	38.1074	140.0428	2.69	2.73	0.98	KNG002	横浜	35.4371	139.634	1.25	1.32	0.95
YMTH15	西川東	38.4257	140.1249	1.51	1.51	1.00	KNG004	三崎	35.1441	139.6218	3.94	4.34	0.91
FKS003	福島	37.7613	140.4799	1.08	1.02	1.06	KNGH10	横浜	35.4991	139.5195	1.98	2.59	0.77
FKS005	原町	37.6385	140.9849	0.62	0.66	0.94	KNGH18	藤野	35.6437	139.1283	2.87	3.34	0.86
FKS006	葛尾	37.5031	140.7588	3.44	4.59	0.75	YMN003	富士吉田	35.4648	138.813	1.09	1.14	0.95
FKS008	船引	37.4363	140.5668	3.12	3.95	0.79	YMN004	塩山	35.702	138.7266	0.83	0.97	0.85
FKS013	古殿	37.09	140.5563	2.04	2.66	0.77	YMN009	六郷	35.4965	138.4627	1.90	2.07	0.91
FKS019	二本松	37.603	140.4368	2.76	3.93	0.70	YMNH11	大月	35.6247	138.9777	1.94	2.37	0.82
FKS024	中野	37.3957	140.1325	0.74	1.02	0.72	NGN015	諏訪	36.0454	138.1116	0.53	0.71	0.75
FKSH05	下郷	37.2544	139.8725	4.67	5.56	0.84	NGNH12	南牧	35.9696	138.4797	0.67	0.73	0.91
FKSH06	伊南	37.1723	139.5199	7.00	8.32	0.84	SZO002	伊東	34.9652	139.1031	3.23	3.34	0.97
FKSH10	西郷	37.1616	140.093	5.07	7.25	0.70	SZO003	東伊豆	34.8158	139.0546	3.91	4.07	0.96
FKSH14	いわき東	37.0264	140.9702	0.85	1.22	0.70	SZO013	清水	35.041	138.476	1.06	1.32	0.81
FKSH16	福島	37.7643	140.3766	0.73	0.80	0.90	SZOH35	伊東中	34.9467	139.0855	1.21	1.73	0.70
FKSH17	川俣	37.6636	140.5974	3.35	4.00	0.84							
FKSH19	都路	37.4703	140.7227	2.64	3.32	0.80							



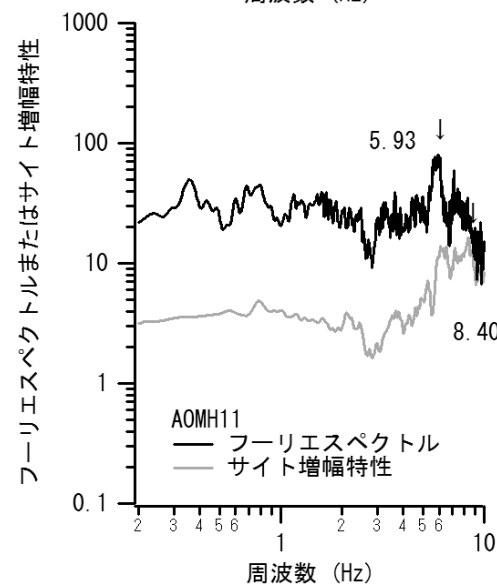
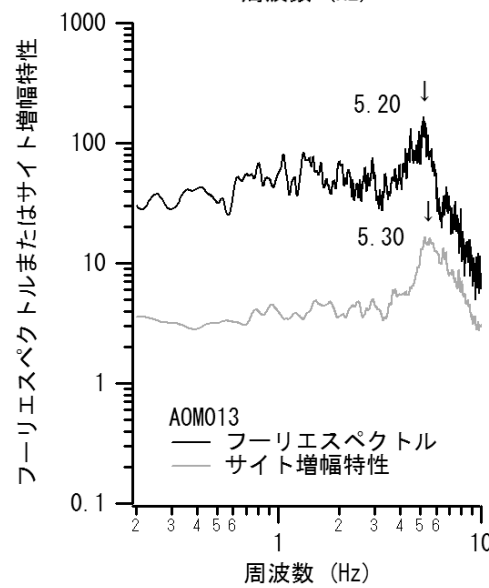
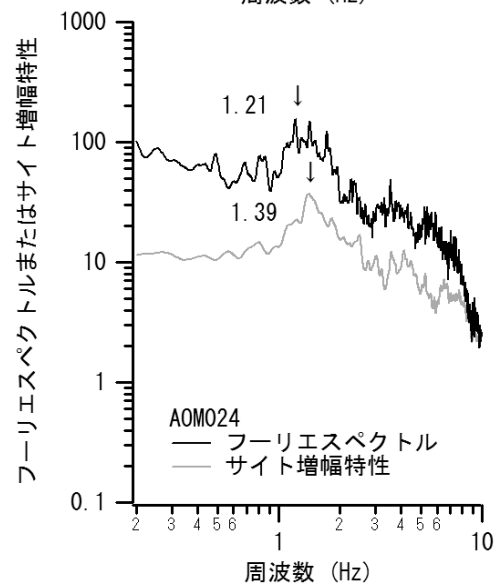
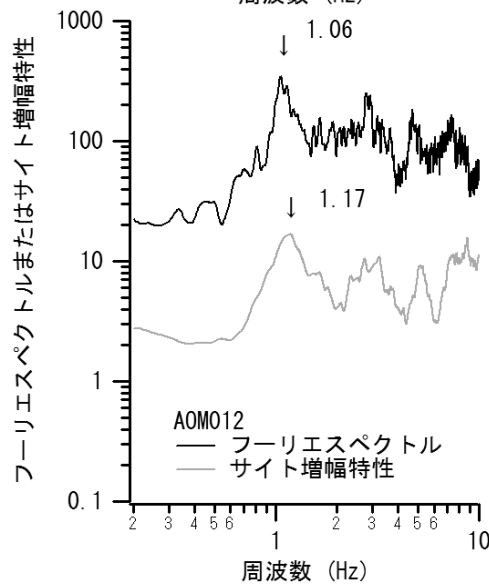
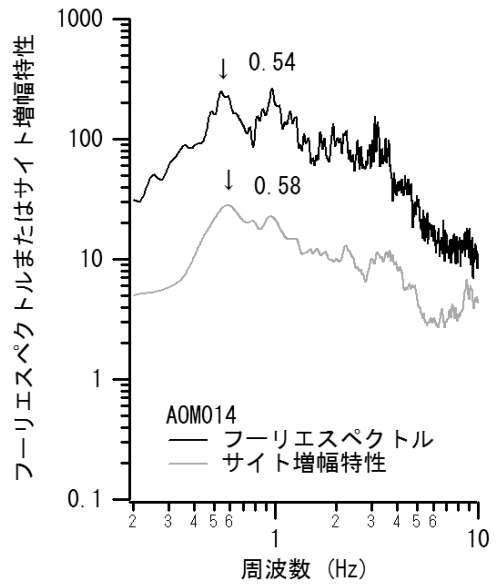
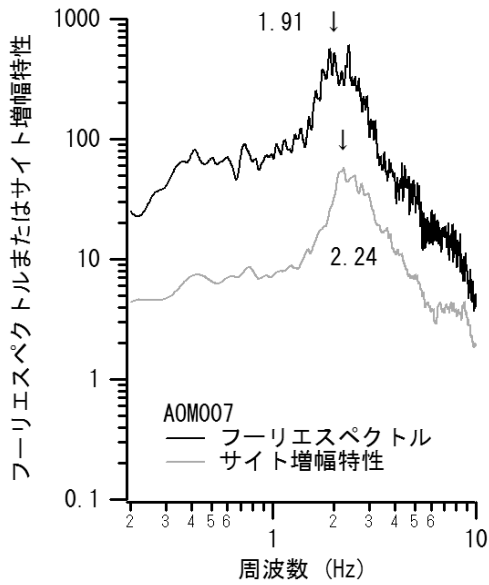


図-2.4 地表フリーエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果

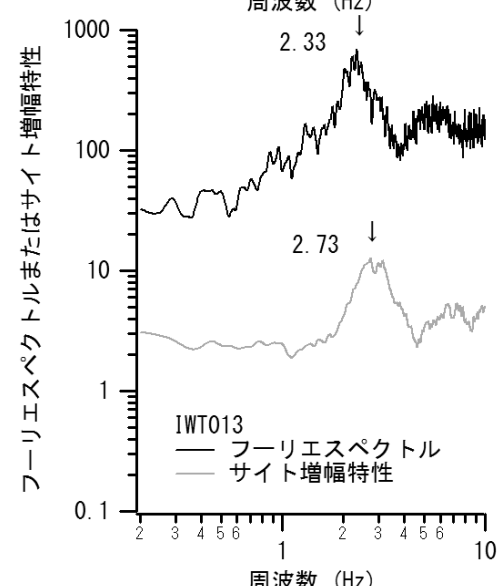
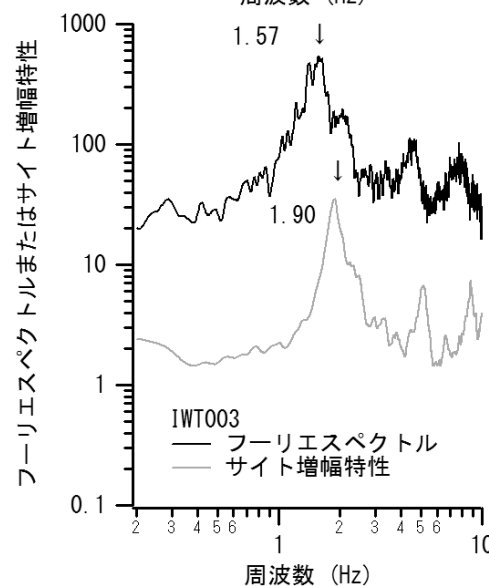
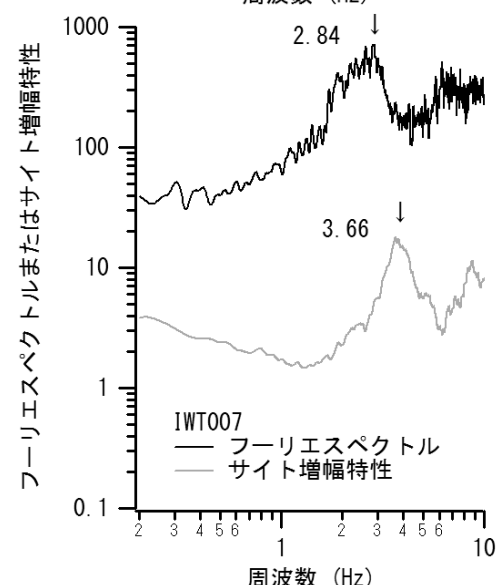
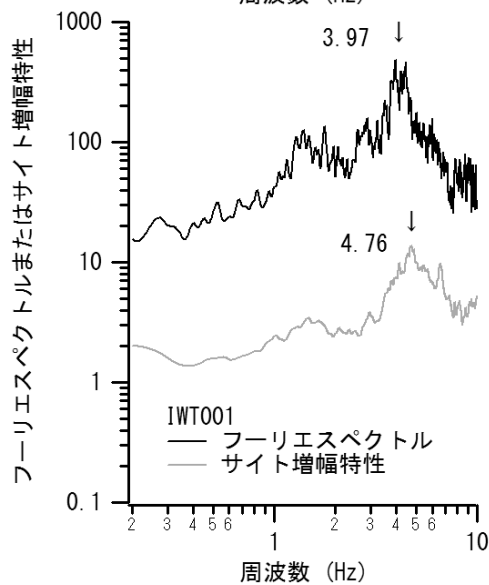
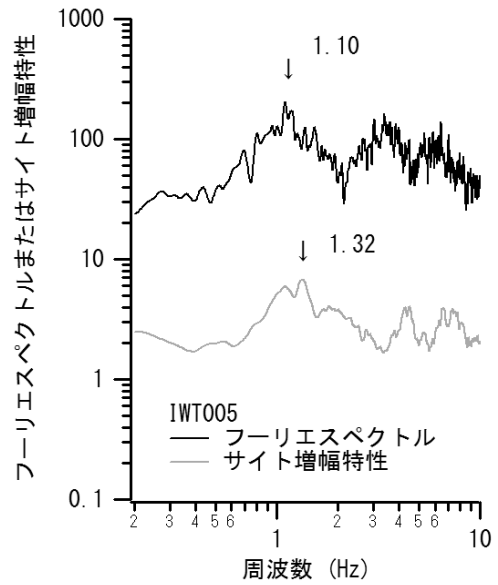
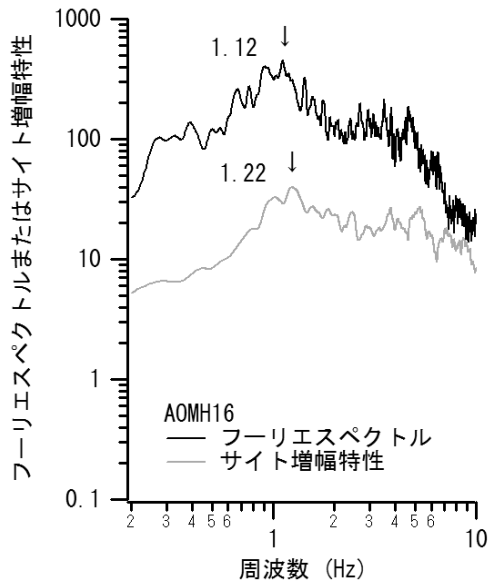


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

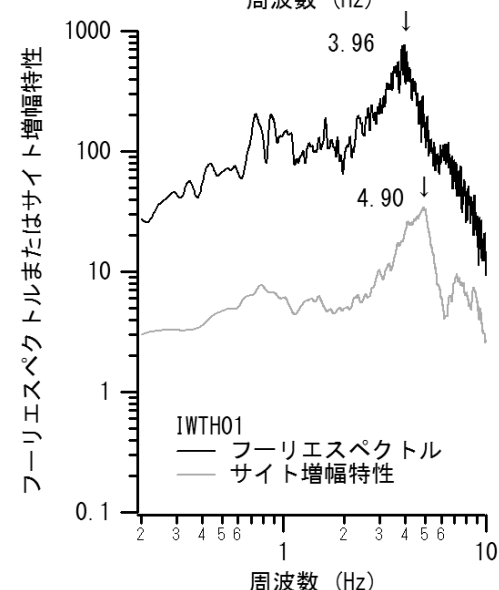
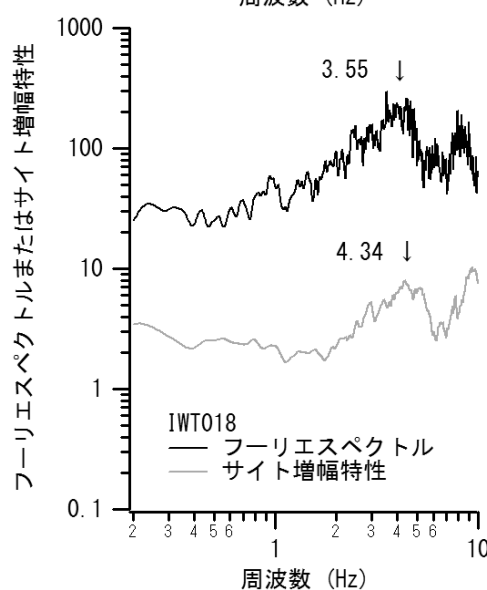
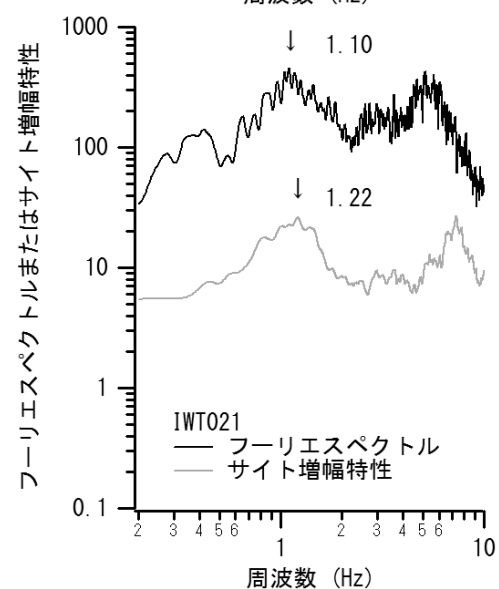
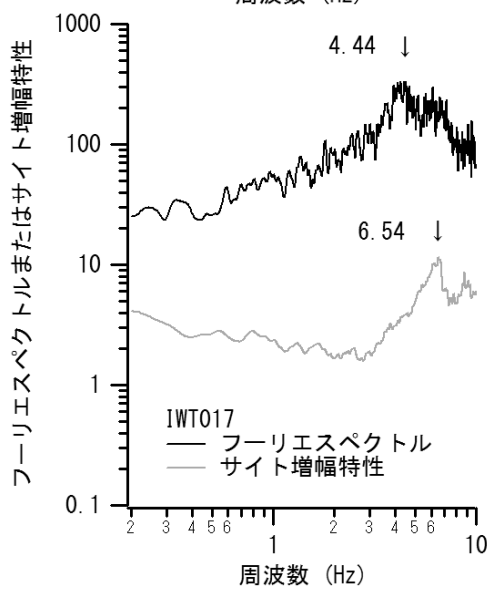
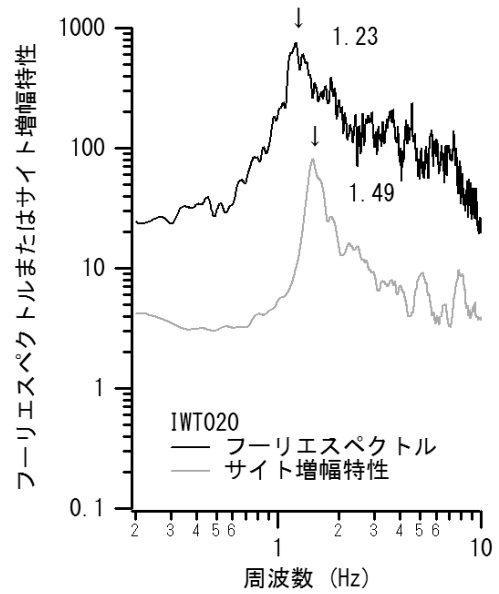
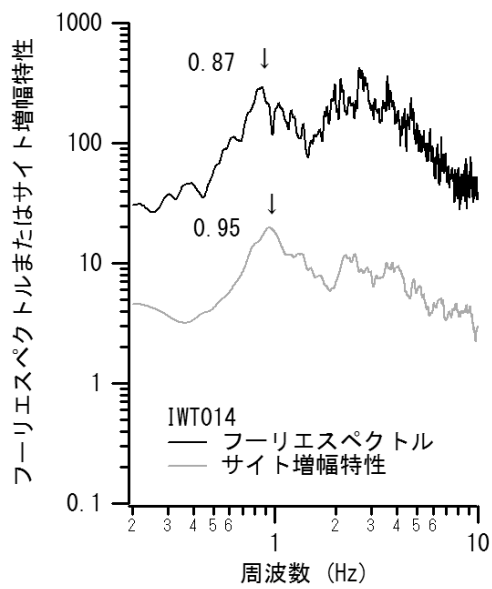


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

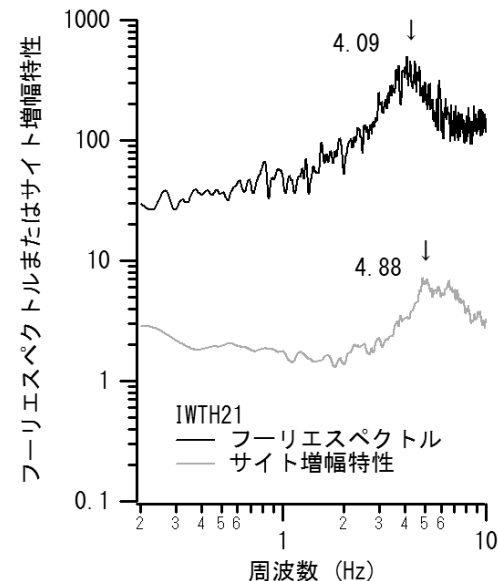
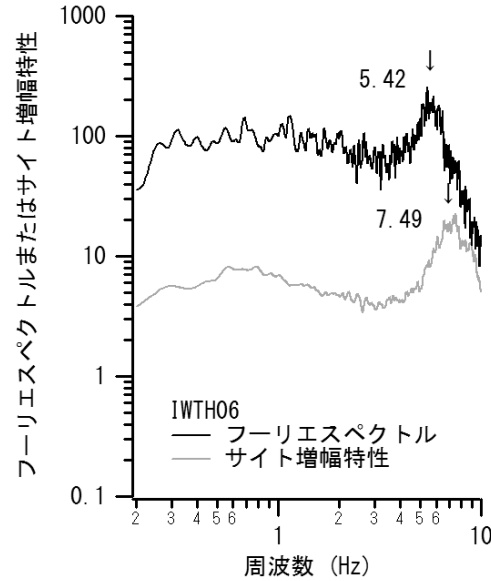
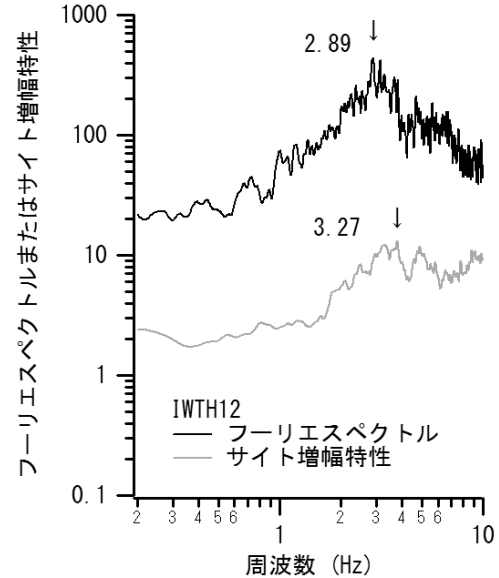
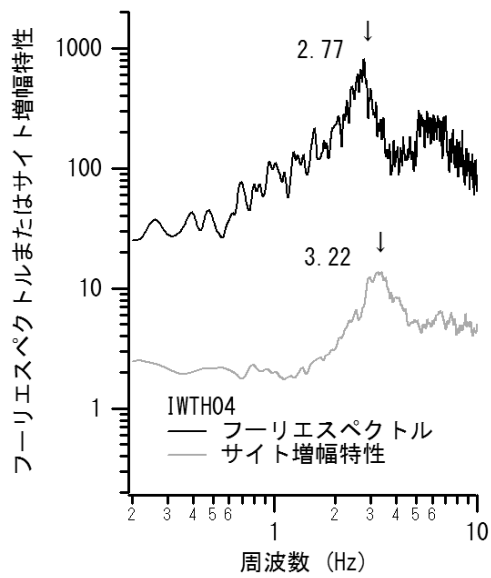
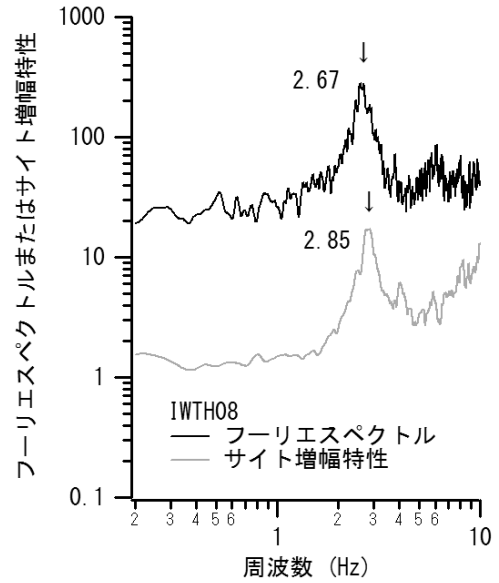
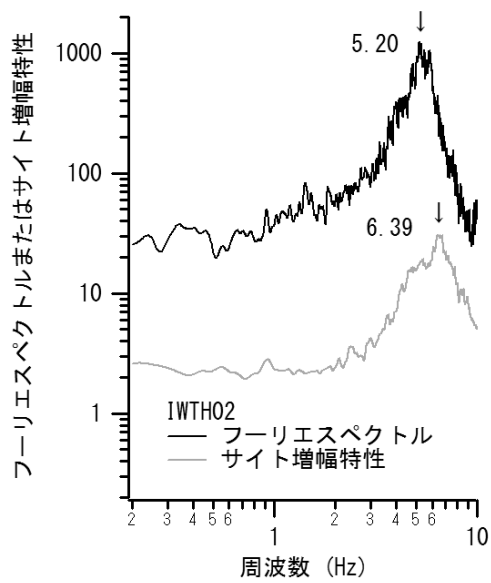


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

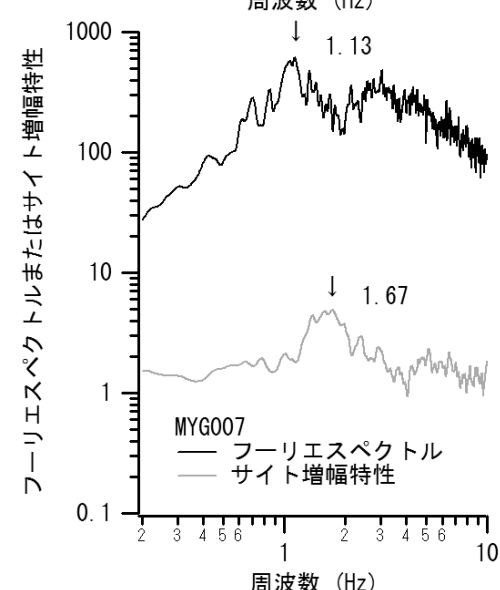
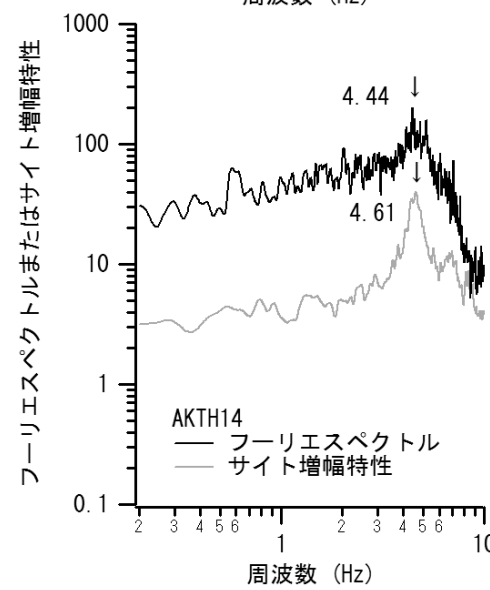
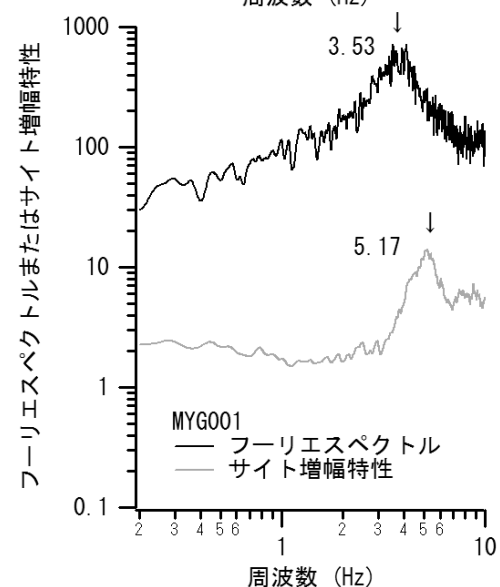
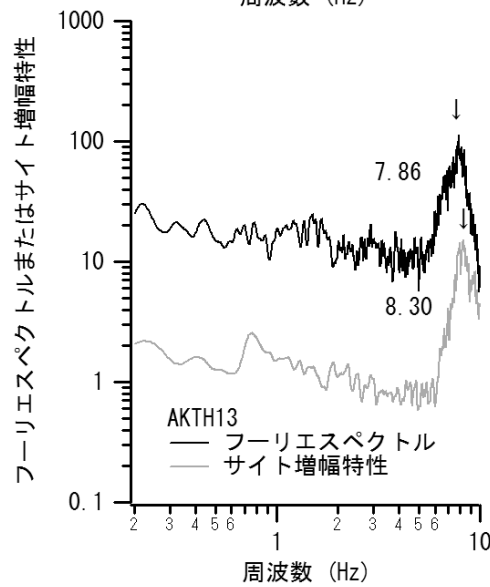
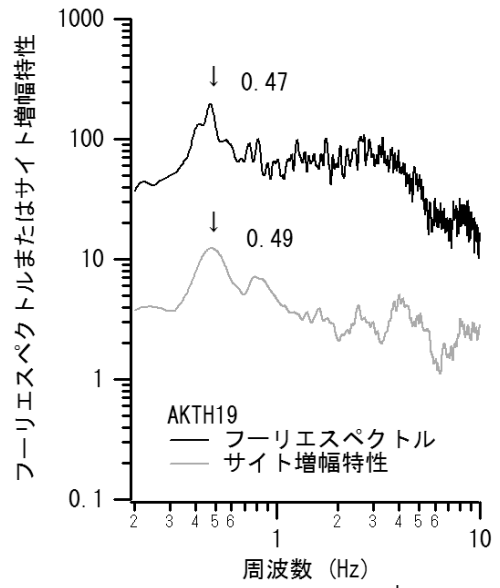
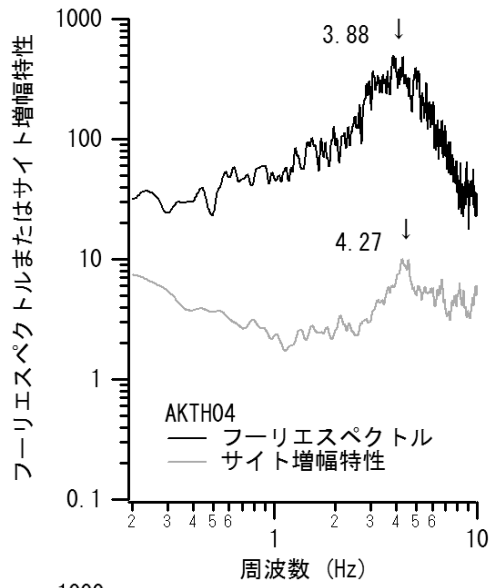


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

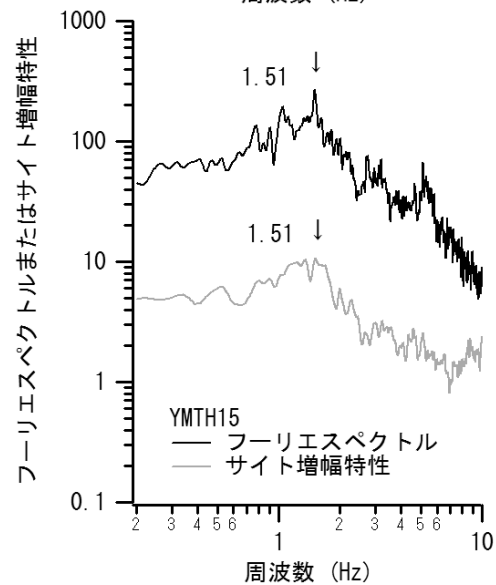
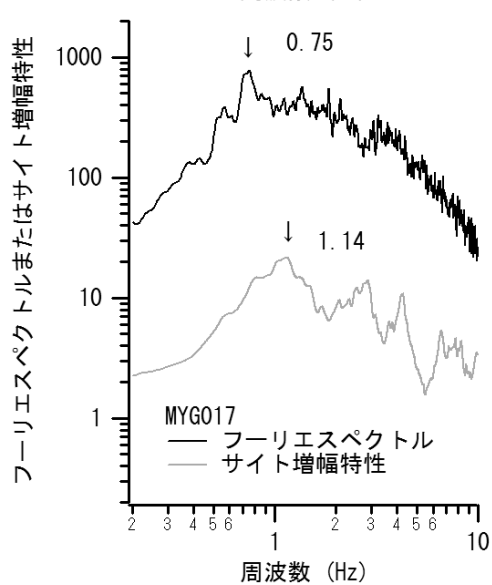
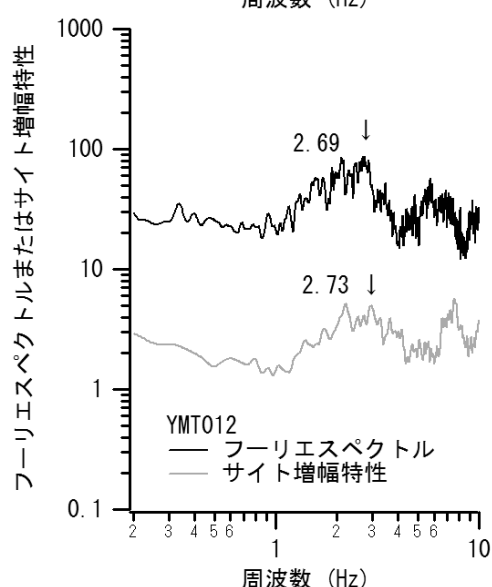
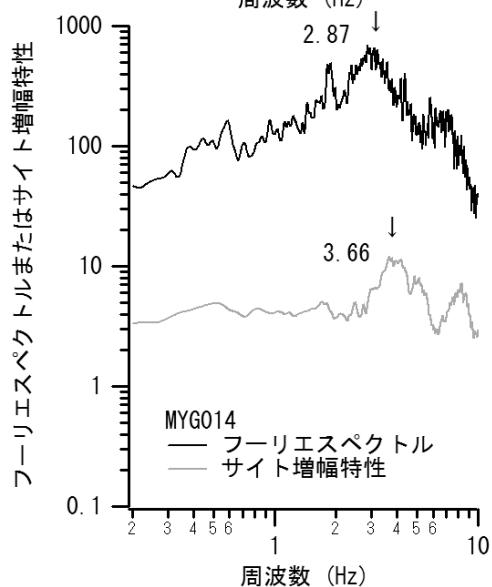
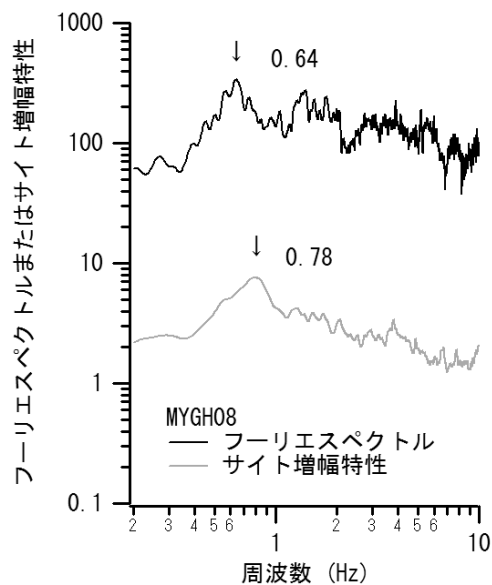
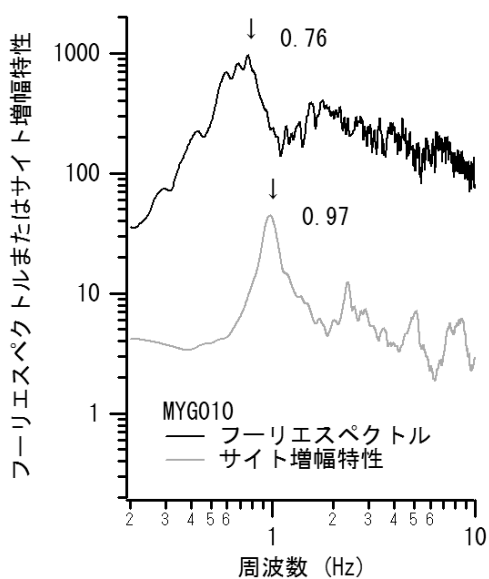


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

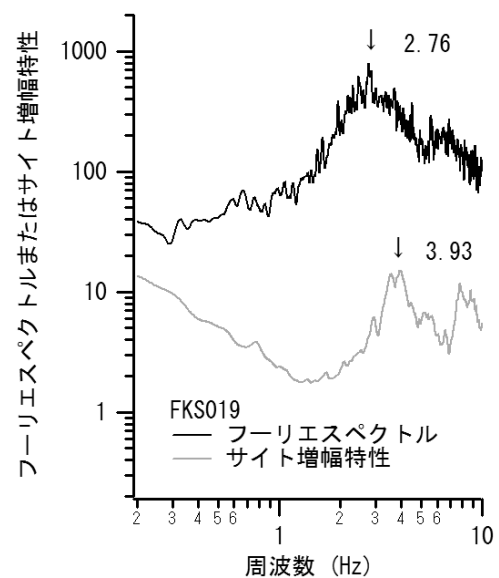
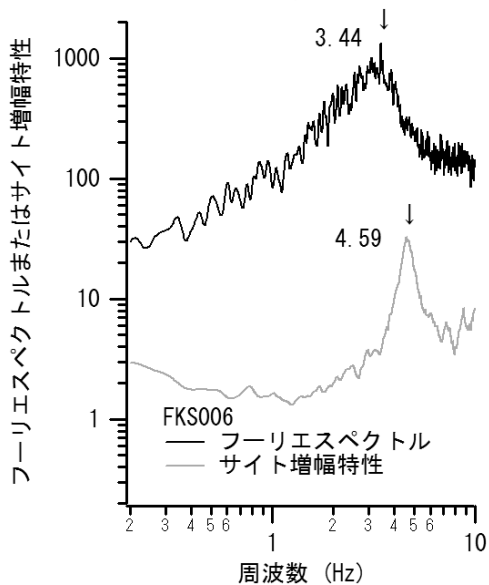
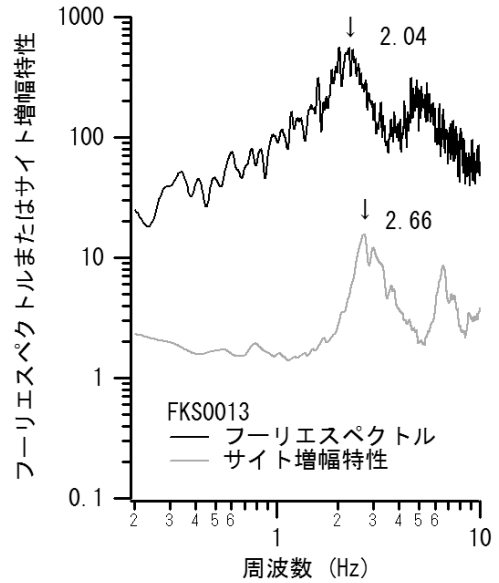
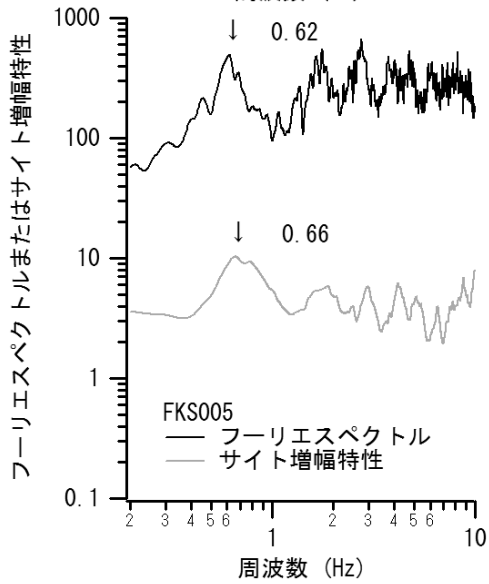
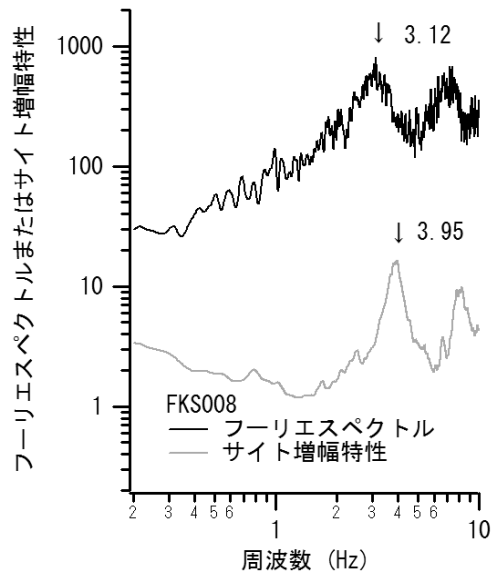
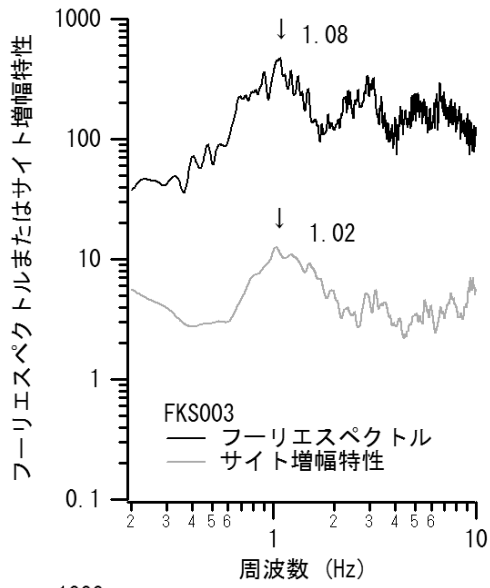


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

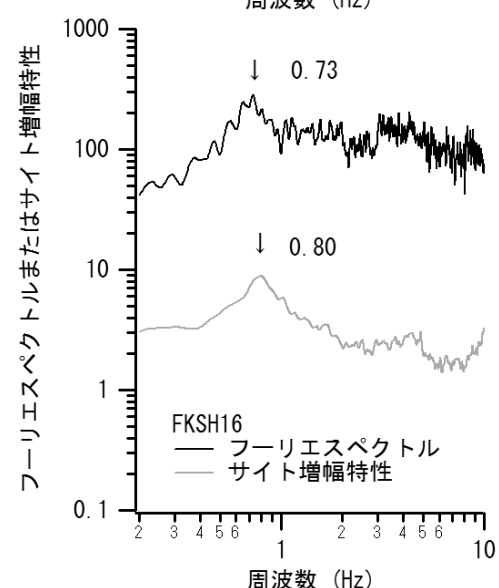
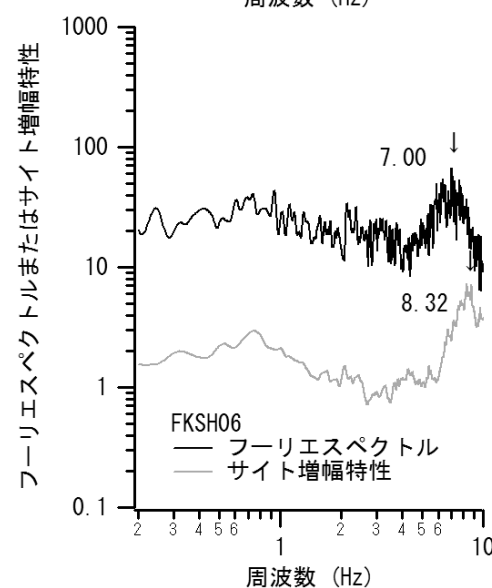
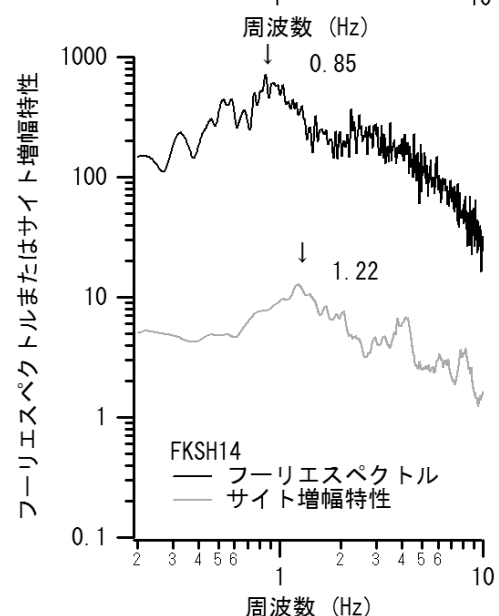
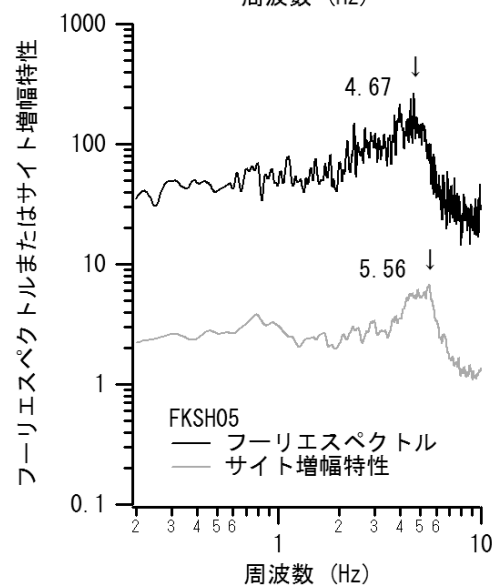
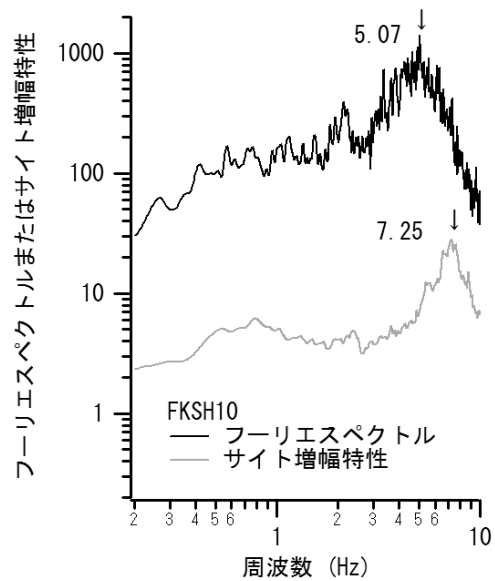
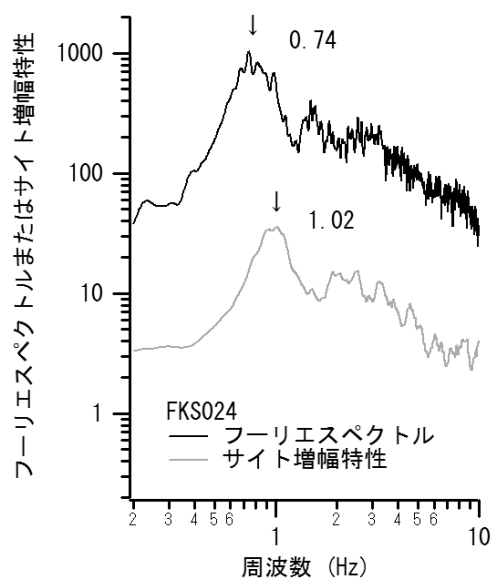


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)



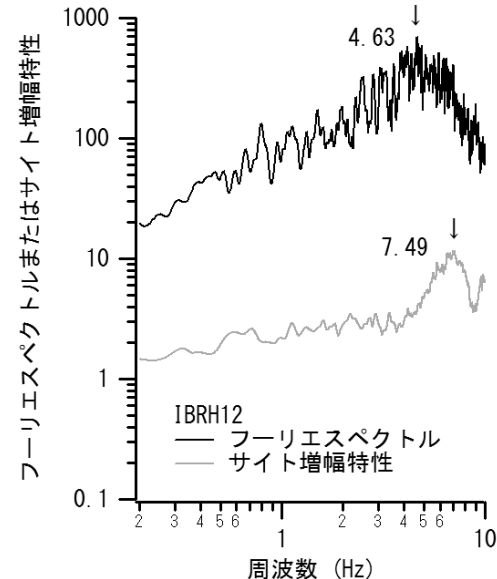
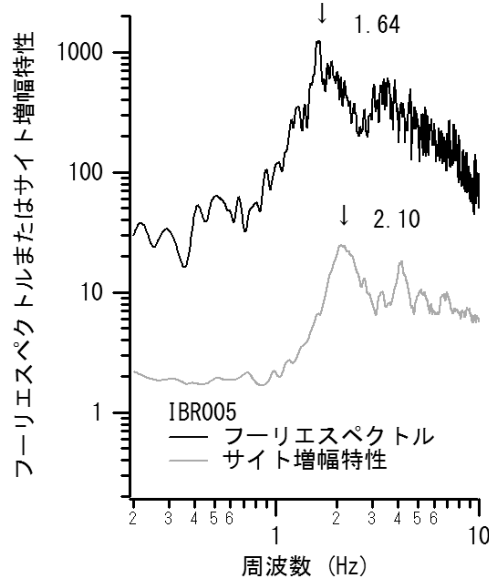
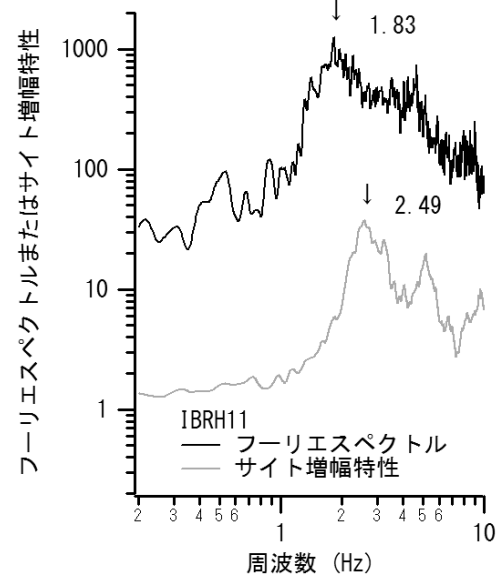
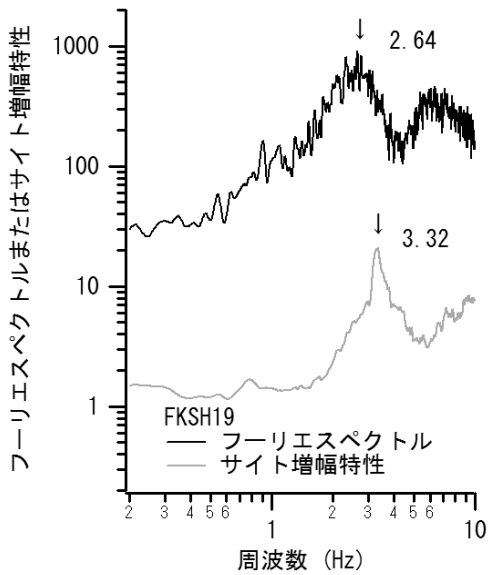
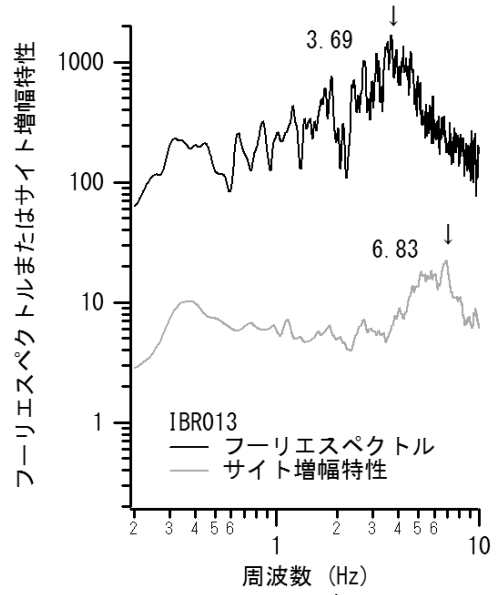
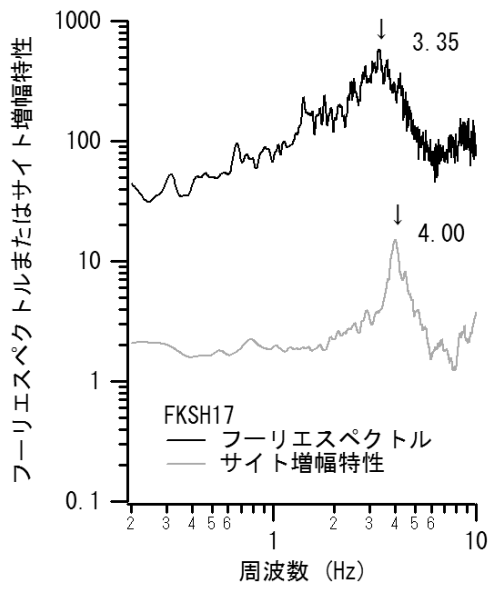


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

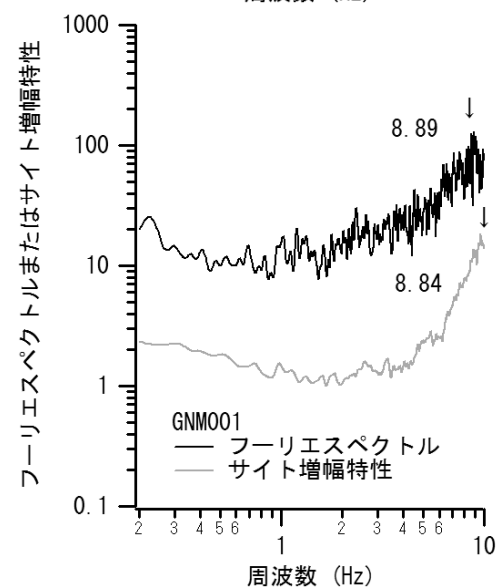
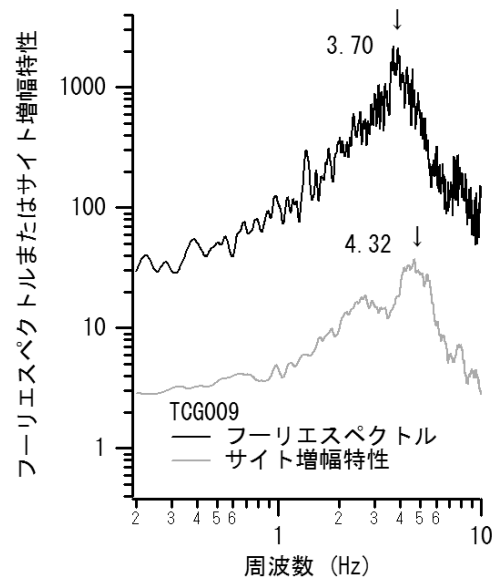
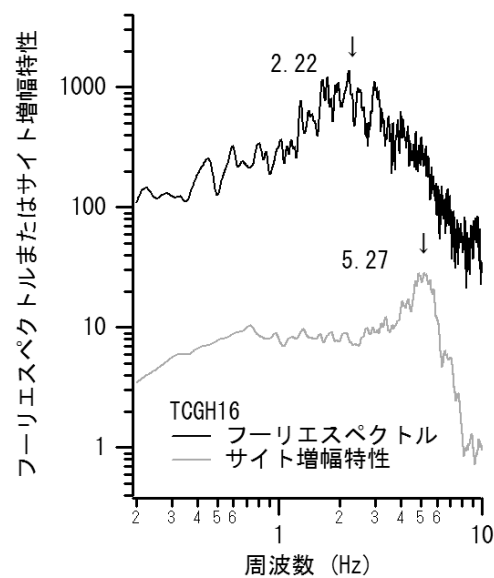
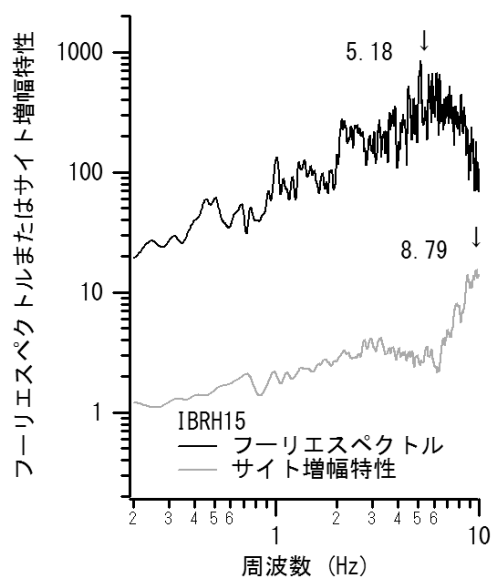
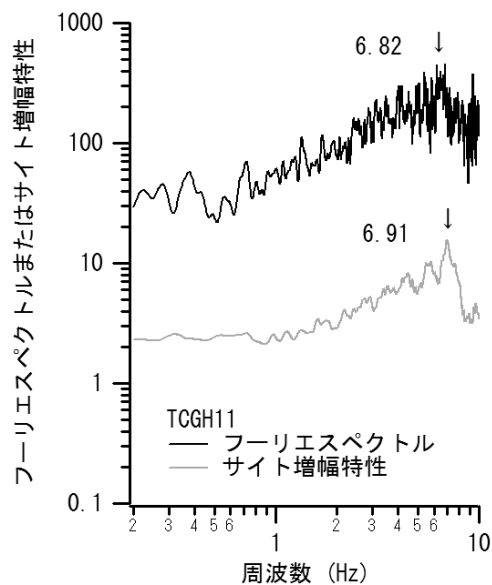
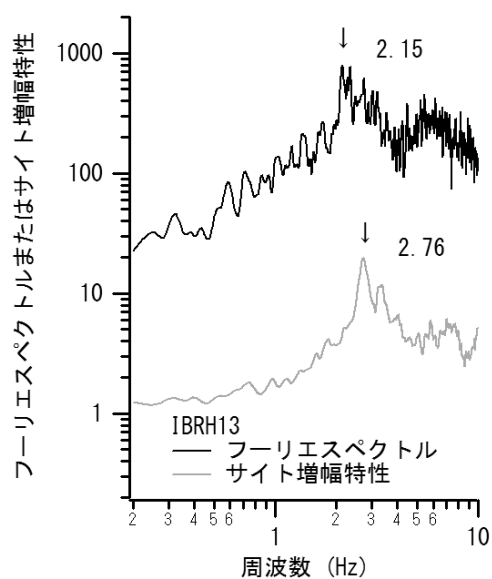


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

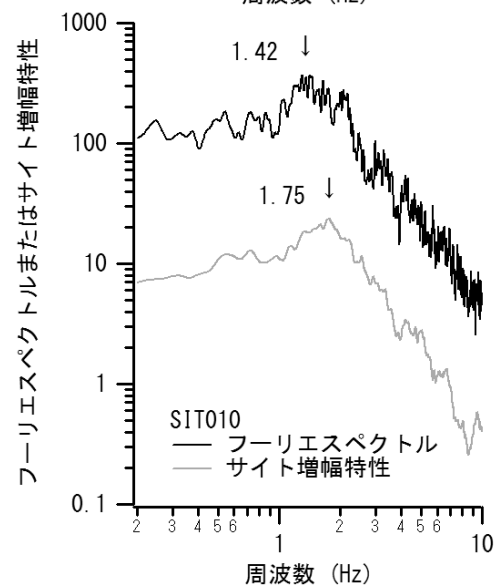
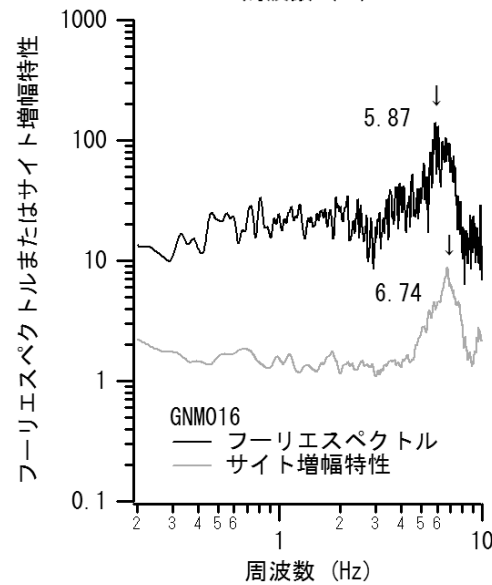
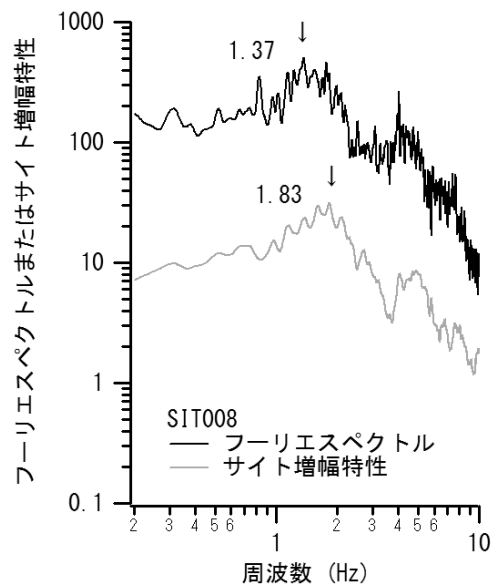
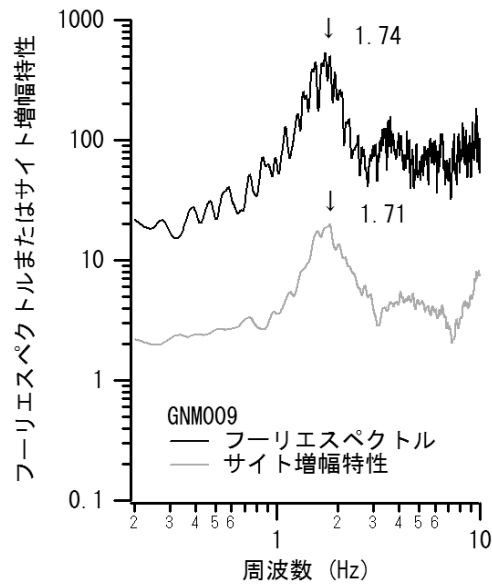
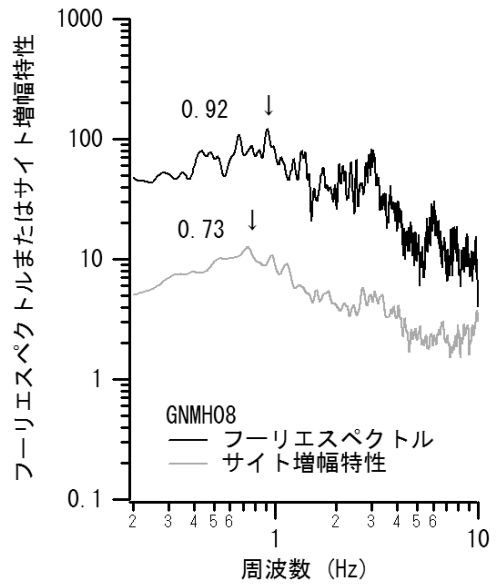
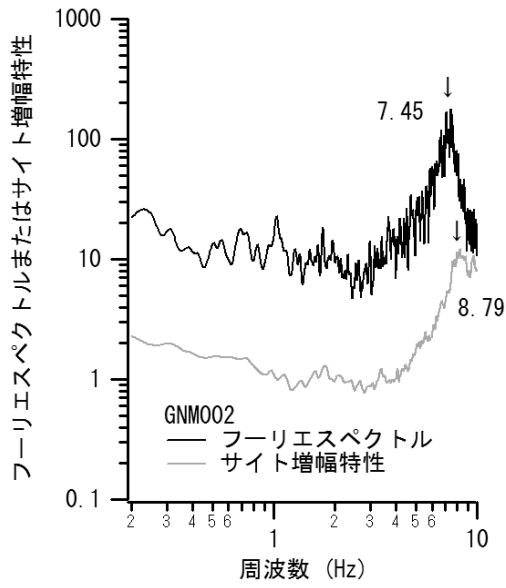


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

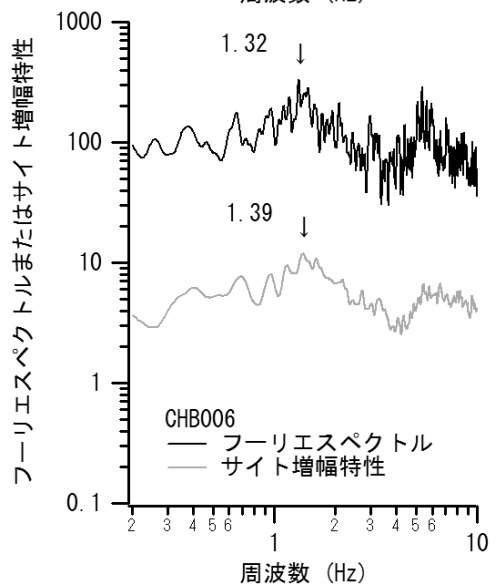
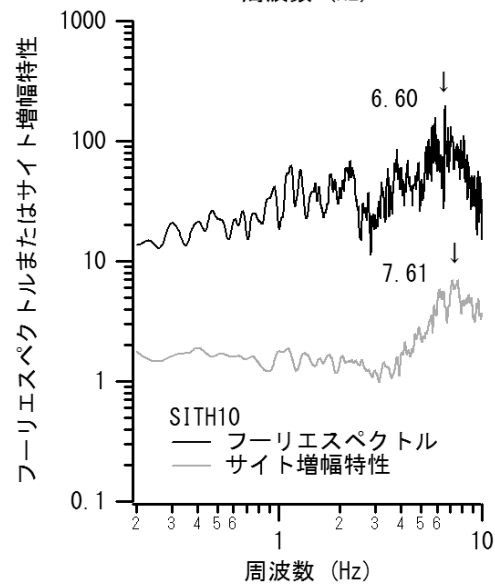
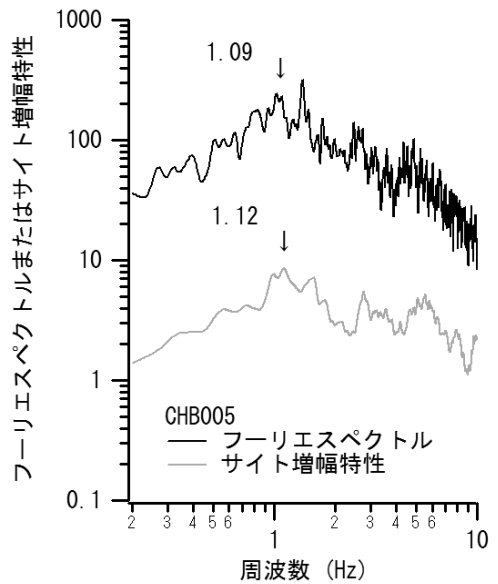
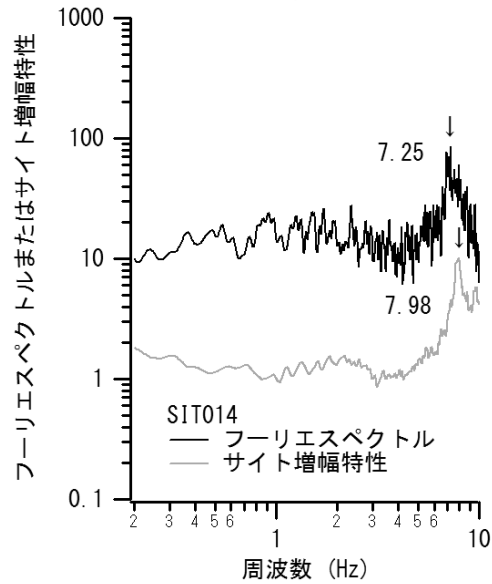
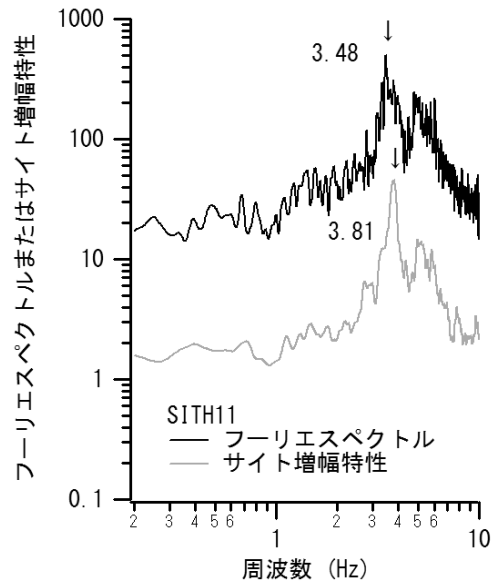
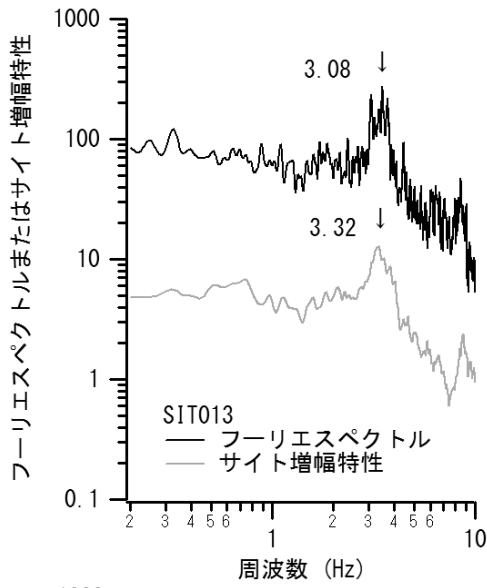


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

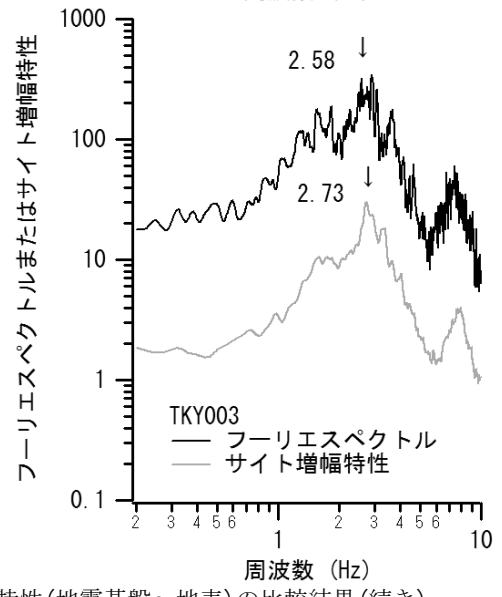
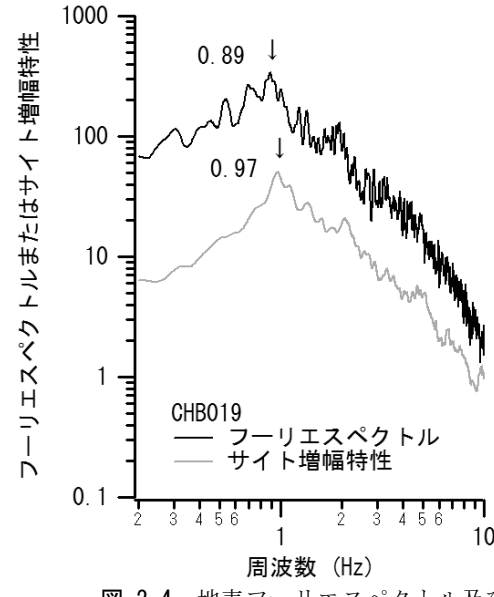
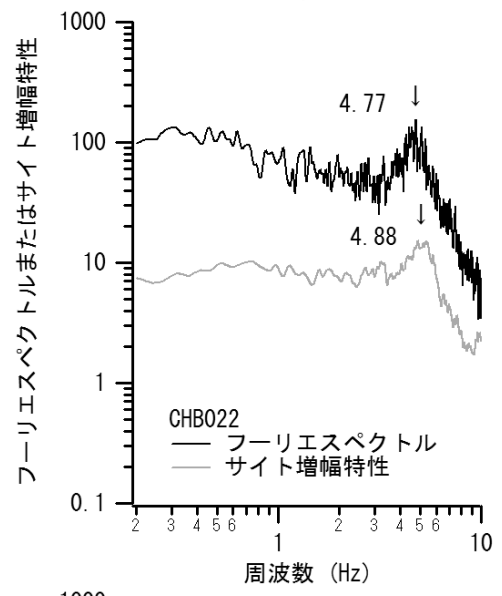
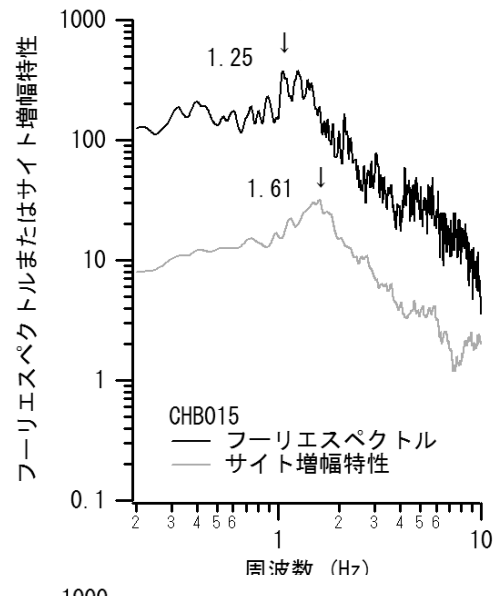
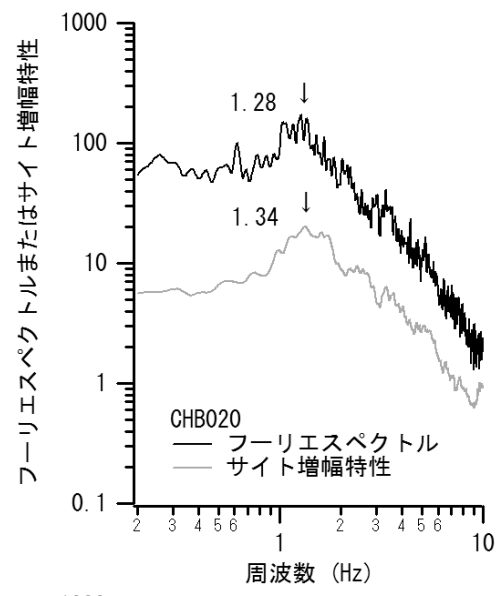
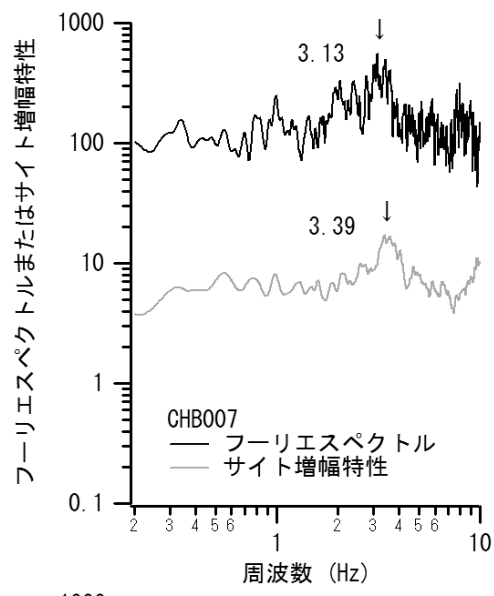


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

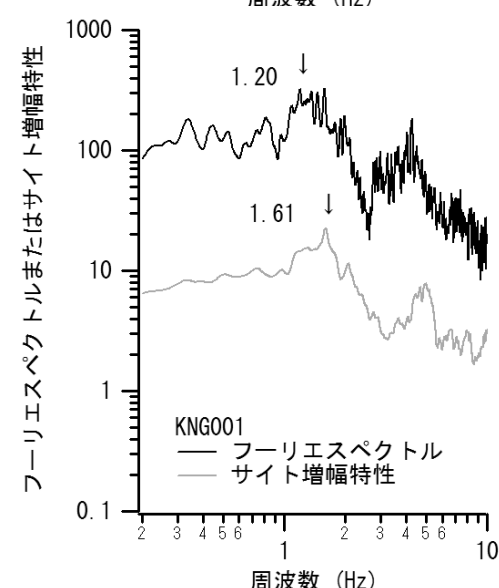
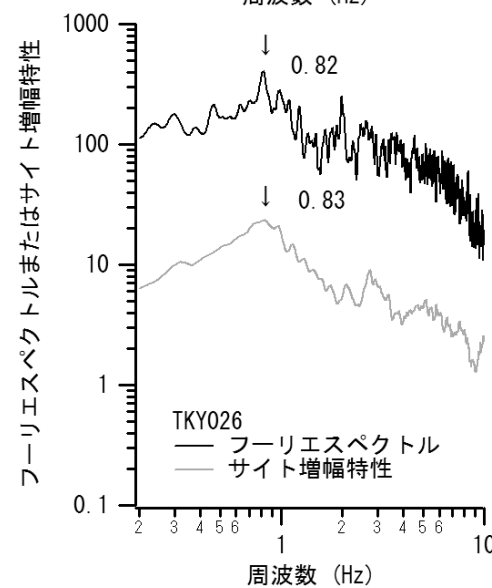
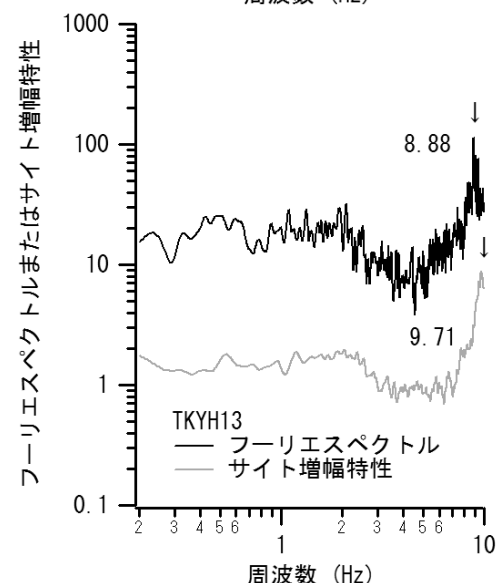
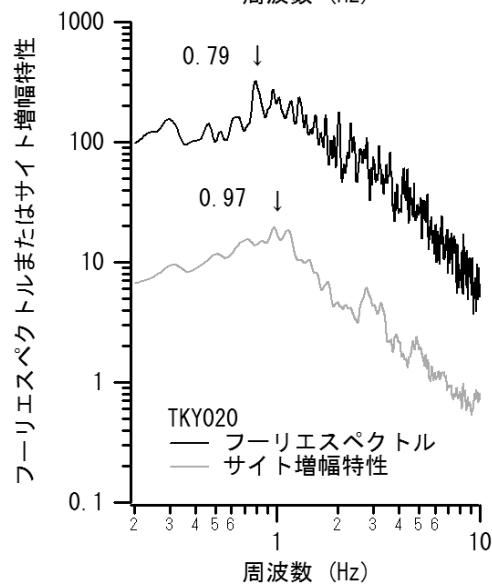
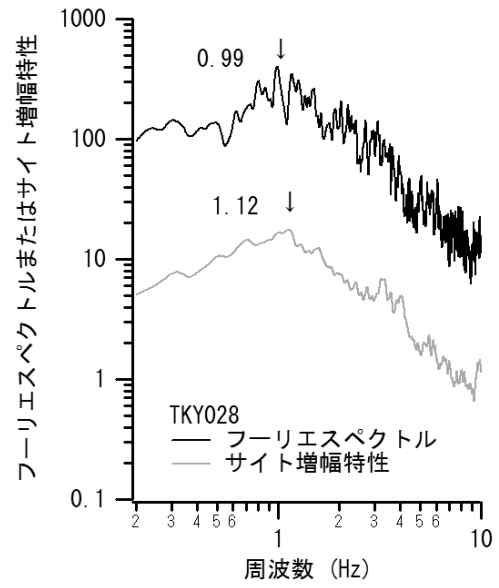
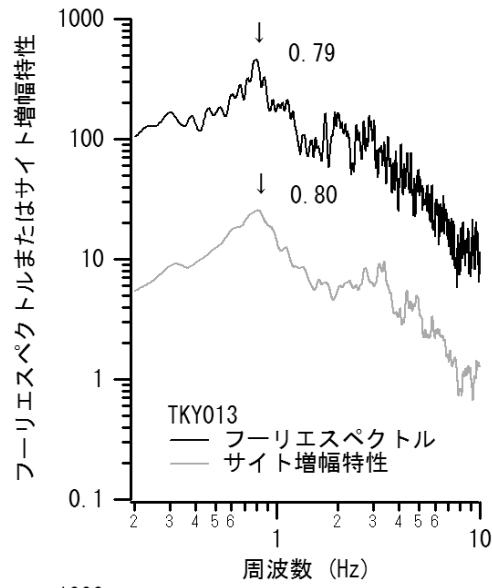


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

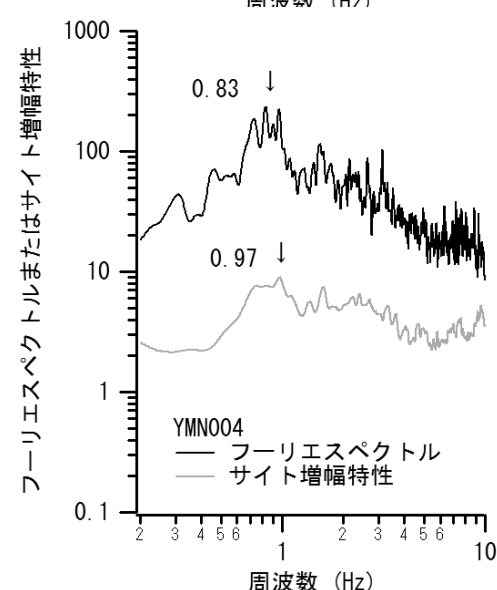
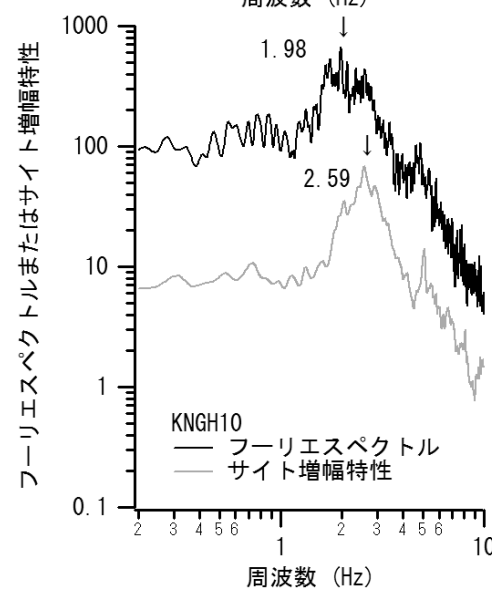
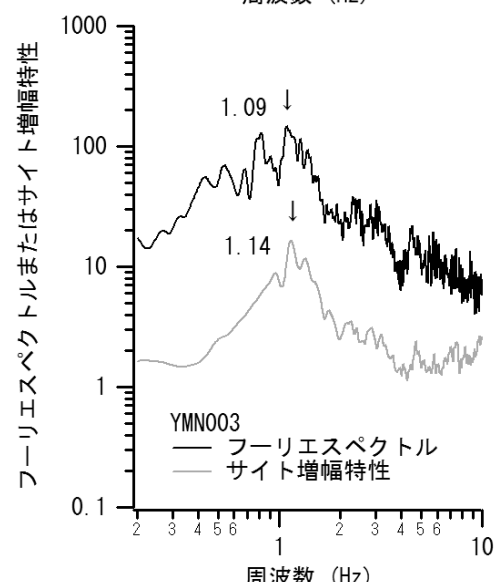
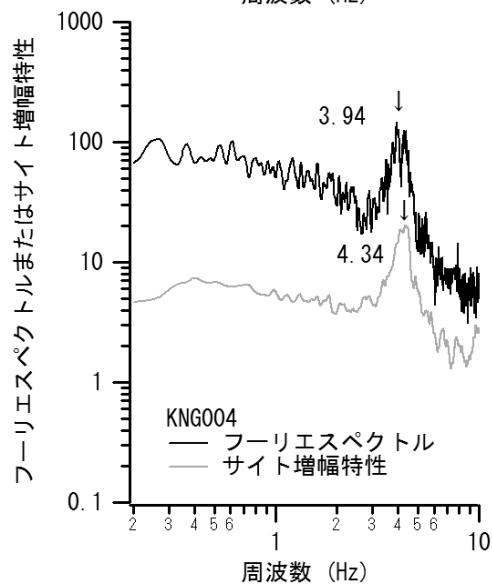
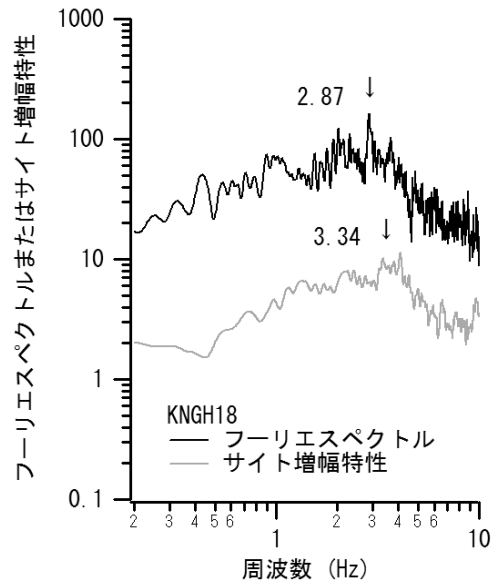
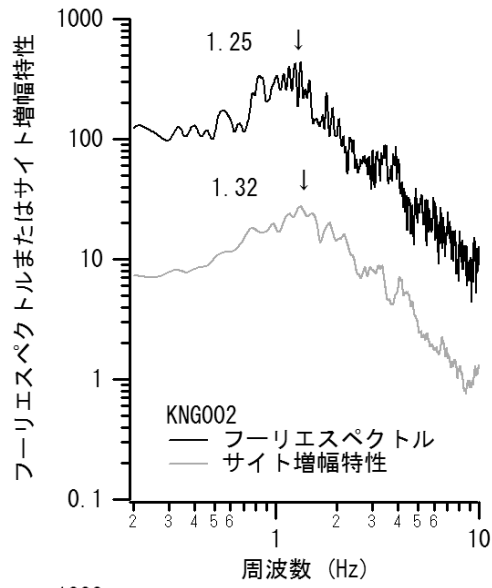


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

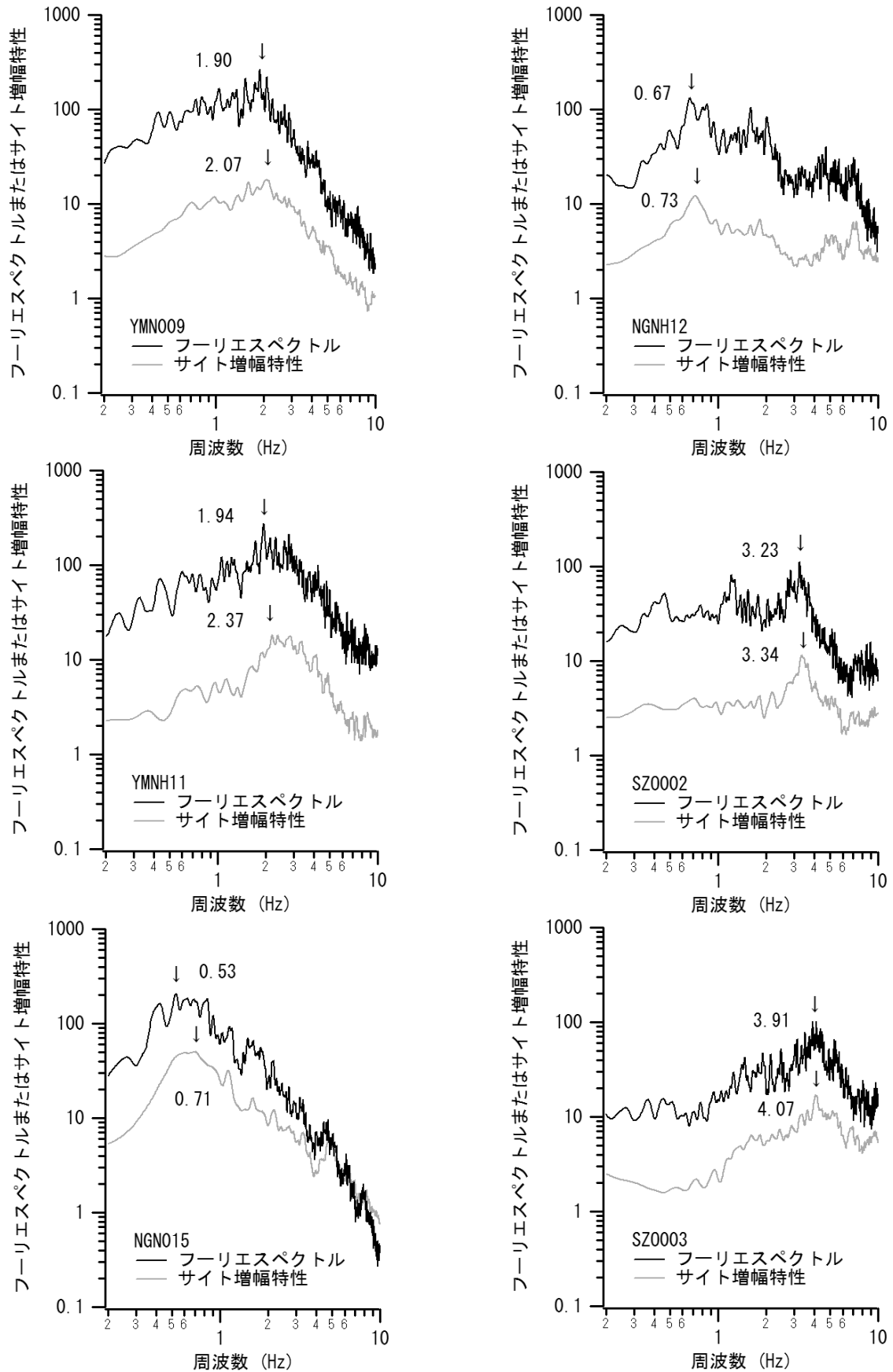


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)



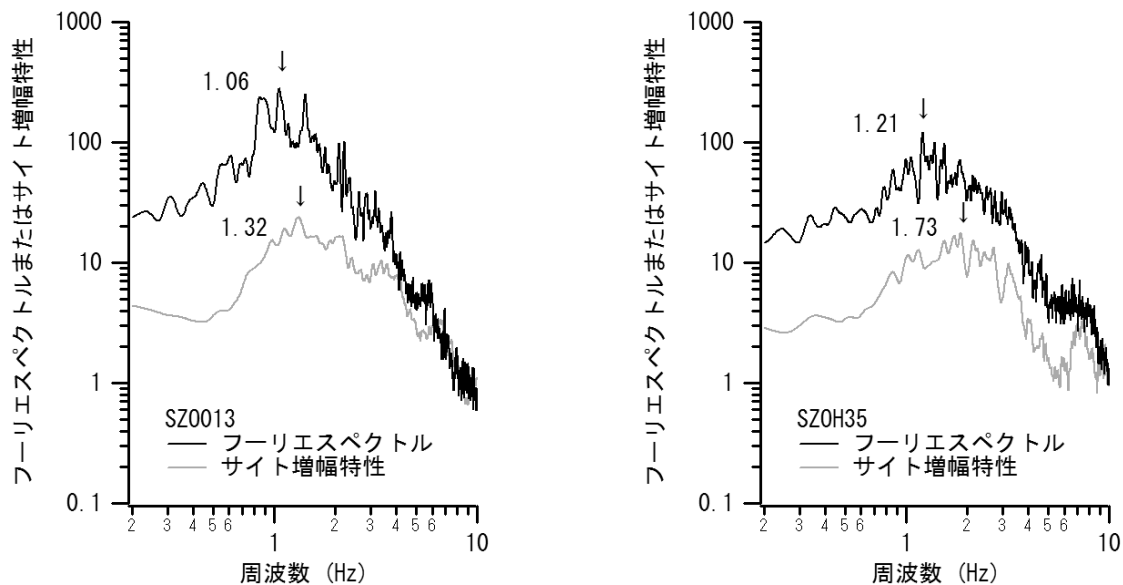


図-2.4 地表フーリエスペクトル及びサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較結果(続き)

のように、本研究での検討対象から除外した。各強震観測地点での加速度波形を調べ、目視でスパイク状の波形を有していると判断できるものについては、液状化したものと判断し、除外した。また、液状化が生じる場合、一般に地盤の剛性は地震動継続時間中に大きく変化するため、フーリエスペクトルのピークが崩れて不明瞭になると考えられる。ここでは、フーリエスペクトルのピークが不明瞭の場合、検討対象から除外しているため、液状化した地盤はこの段階で概ね除外されていると考えられる。

最終的に対象となった98地点について、表-2.1に各地点における地表フーリエスペクトルおよびサイト増幅特性(地震基盤～地表)それぞれのピーク周波数の一覧を、図-2.4に各地点における地表フーリエスペクトルおよびサイト増幅特性(地震基盤～地表)を比較した結果を、それぞれのピーク周波数とともに示す。

さて、一般に地震動のフーリエスペクトルにはサイト特性以外に震源スペクトルの寄与も含まれているため、上記のように本震のフーリエスペクトルそのもののピーク周波数を読みとった場合、それが、本震時の(非線形時の)サイト増幅特性のピーク周波数を読みとっているのではなく、震源スペクトルのピーク周波数を読みとっているのではないかとの懸念が、一般には残る。しかしながら、ここで対象とする記録の中で、地表と地中で観測が行われているKiK-netの記録に着目すると、付録Aに示すように、本震時の地表フーリエスペクトルのピーク周

波数と、地表/地中のスペクトル比のピーク周波数とは、それらのピークが明瞭な場合にはほぼ1:1に対応する。このことから、少なくとも、ここで対象とする記録に関する限り、本震のフーリエスペクトルそのもののピーク周波数を読みとって、震源スペクトルのピークを読みとっている懸念は無いものと考えられる。

## 2.2 非線形挙動強さの評価結果

対象とする98地点に対して、上記の方法でピーク周波数比(地表フーリエスペクトルのピーク周波数比/サイト増幅特性のピーク周波数比)を求めた結果を図-2.3に示す。図-2.3では、暖色系のプロットほど非線形挙動が強く、寒色系のプロットほど非線形挙動が弱いことを意味している。なお、図には、気象庁発表の本震の震央位置を×印で、9つのSPGAで構成される本震の震源モデル(野津他, 2012)を○と×を組み合わせた記号で示している。この図を見ると、SPGAに比較的近い宮城県、福島県、茨城県および栃木県の観測地点で比較的非線形挙動が強くなっていることがわかる。

## 3. 非線形挙動強さと地震動強さの関係

本章では、2.で求めた非線形挙動強さの指標であるピーク周波数比(地表フーリエスペクトルのピーク周波数/サイト増幅特性のピーク周波数)と、地震動強さの指標であるPGA, PGV, PSI値(野津・井合, 2001)との関係

について検討する。そして、地震動強さと非線形挙動強さの関係を適切に表現する経験式を提案する。なお、ここでのPGAおよびPGVは水平2成分それぞれの最大値のうち、大きい方の値を採用した。また、PSI値は、速度波形の自乗の時間積分の平方根として定義される量であり、重力式岸壁の地震時の被災程度と良い相関を示す量として知られている(野津・井合, 2001)。地震動の継続時間の影響を含む量であるという点で、PGAやPGVとは異なっている。

### 3.1 ピーク周波数比とPGA, PGV及びPSI値との関係

図-3.1にPGA, PGV, PSI値とピーク周波数比の関係を示す。この図から、地震動強さのいずれの指標も、ピーク周波数比とある程度の負の相関をもっており、ピーク周波数比は概ね単調減少していく傾向があることがわかる。すなわち、PGA, PGV, PSI値が大きくなると表層地盤の非線形挙動が強くなる傾向があるといえる。

### 3.2 ピーク周波数比とPGA, PGV及びPSI値の関係を表す経験式

本節では、ピーク周波数比とPGA, PGVおよびPSI値について、それらの関係を適切に表現する経験式をそれぞれ導き、経験式から得られるピーク周波数比の推定値と観測値との適合性が最も高い地震動強さの指標を選ぶ。

まず、候補となる関数形としては、線形式、多項式、有理式、指数関数などがあるが、ここでは、PGA, PGVおよびPSI値がゼロに近づいていくときピーク周波数比が1に収束していき、かつ、PGA, PGVおよびPSI値が大きくなるとピーク周波数比がゼロに収束していくという物理的に必要な拘束条件を満足する関数形として、式(1)に示す双曲線モデルおよび式(2)に示す指数関数モデルを候補とした。ここに、 $a$ ,  $b$ は未知パラメータを表している。

$$y = 1/(1+ax) \quad (1)$$

$$y = \exp(-bx) \quad (2)$$

次に、上式で表される各々のモデルについて、推定値と観測値との残差自乗和を最小とするような未知パラメータを決定した(金谷, 2005)。最後に、最適な未知パラメータを選択した場合の残差自乗和を双曲線モデルの場合と指数関数モデルの場合で比較した結果、表-3.1に示すように、地震動強さのいずれの指標に対しても、双曲線モデルの方が、残差が小さいとの結果が得られた。そ

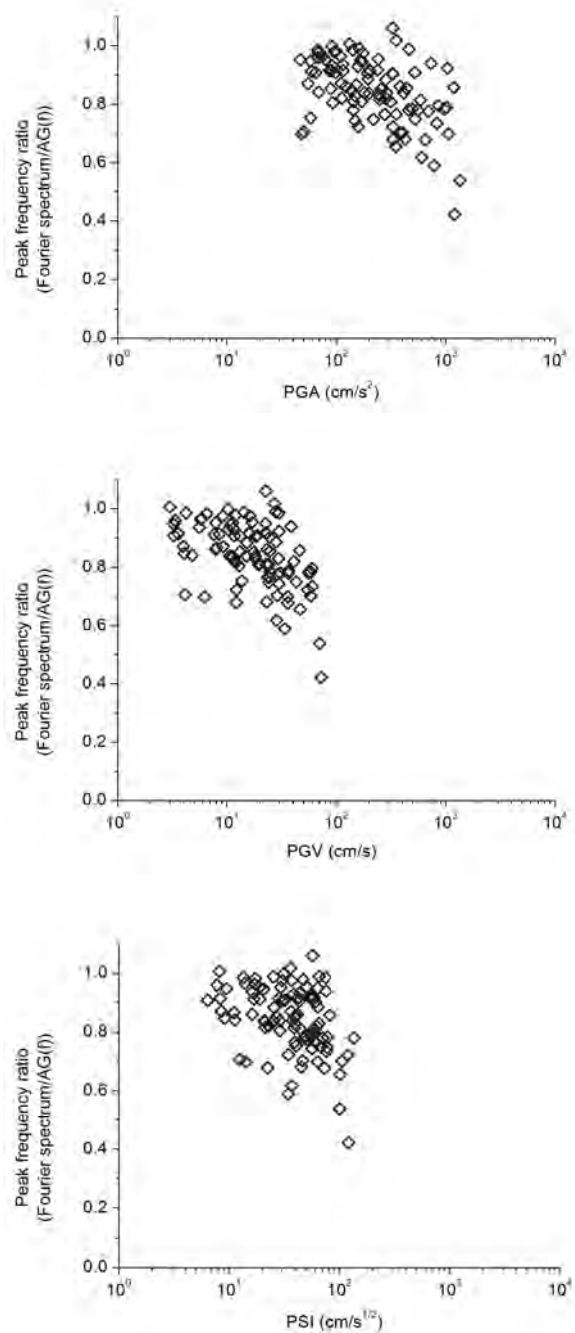


図-3.1 ピーク周波数比(地表フーリエスペクトル/サイト増幅特性)とPGA(上段), PGV(中段), PSI値(下段)の関係

こで、双曲線モデルがより適切なモデルと判断し、先に示したPGA, PGVおよびPSI値とピーク周波数比の関係を示す図-3.1に、上で述べた手順で推定された双曲線モデルによる経験式を実線で重ね書きしたものが図-3.2である。採用した未知パラメータは図-3.2に示す通りである。な

表-3.1 経験式から得られるピーク周波数比の推定値と観測値との残差自乗和（左が指数関数モデル、右が双曲線モデルに対応し、上から PGA, PGV, PSI 値に対応する）

地震動強さ	残差自乗和	
	指数曲線	双曲線
PGA	1.268	1.196
PGV	1.029	1.010
PSI	1.210	1.195

お、図-3.2 に示す未知パラメーターの値は既報（若井・野津, 2012）とわずかに異なっているが、これは一部のデータを精査したためであり、本稿の値がより正確である。

表-3.1 からわかるように、推定された双曲線モデルによる経験式から得られるピーク周波数比の推定値と観測値との残差自乗和は、PGV の場合で最小となる。したがって、非線形挙動強さの指標であるピーク周波数比との対応関係が最も良好な地震動強さの指標は、PGV であると言える。

この結果が得られた理由としては、翠川（1993）で述べられているように、PGA よりも PGV の方が、地盤のひずみと良く対応する量であることが考えられる。また、PSI 値よりも PGV の方が非線形挙動強さと良い相関を示すとの結果が得られたことは、広域で平均的に見れば、地震動の継続時間よりも最大振幅の方が非線形挙動強さとの関係が深いことを意味すると考えられる。

地震動の継続時間が影響する地盤の非線形挙動の代表的なものは液状化である。しかし、本研究では先に述べたように液状化していない地盤を対象としており、その場合、必ずしも地震動の継続時間が地盤の非線形挙動の支配的要因とはならないことを本結果は示唆していると考えられる。

なお、得られた経験式では、非線形挙動強さの説明変数として、非線形挙動の影響を受けていると考えられる地表での地震動強さを用いている。従って、仮にこれらの経験式を予測問題に用いるとした場合には、等価線形化法と同様のイタレーションが必要になると考えられる。

#### 4. 非線形挙動強さと地震動強さおよび地盤条件の三者の関係

3. では非線形挙動強さと地震動強さとの関係を検討したが、一般には、非線形挙動強さは、地震動強さだけで

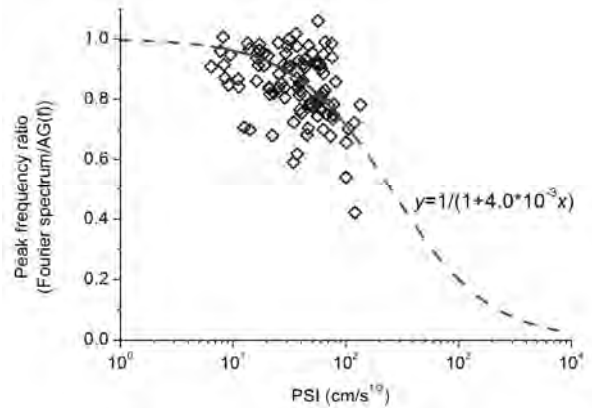
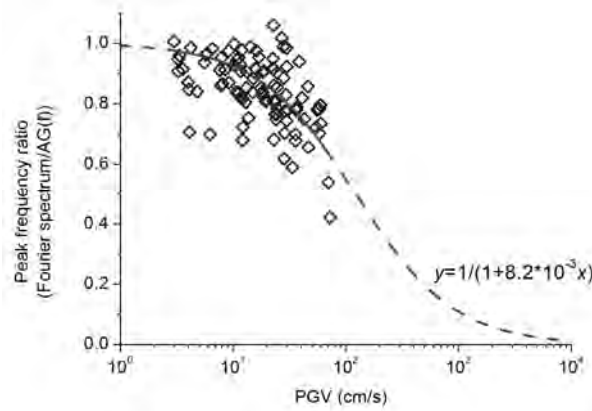
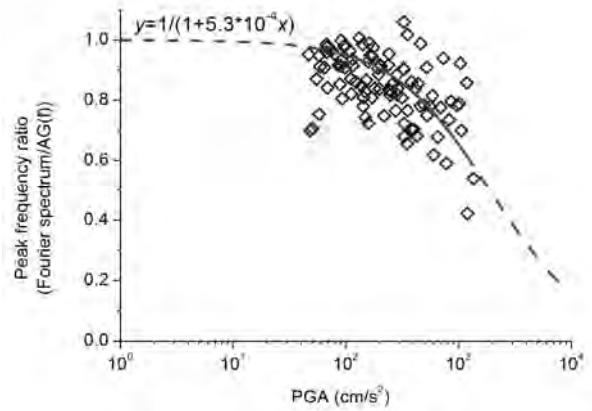


図-3.2 ピーク周波数比(地表フーリエスペクトル/サイト増幅特性)と PGA(上段), PGV(中段), PSI 値(下段)との関係を示す経験式(説明変数  $x$ : 地震動強さ, 目的変数  $y$ : ピーク周波数比)

なく、地盤条件の影響を受けるものと考えられる。従って、地震動強さの指標と地盤条件の指標の双方を説明変数として考慮すれば、図-3.2 に示すような経験式のばらつきをさらに低減できることが期待できる。そこで、こ

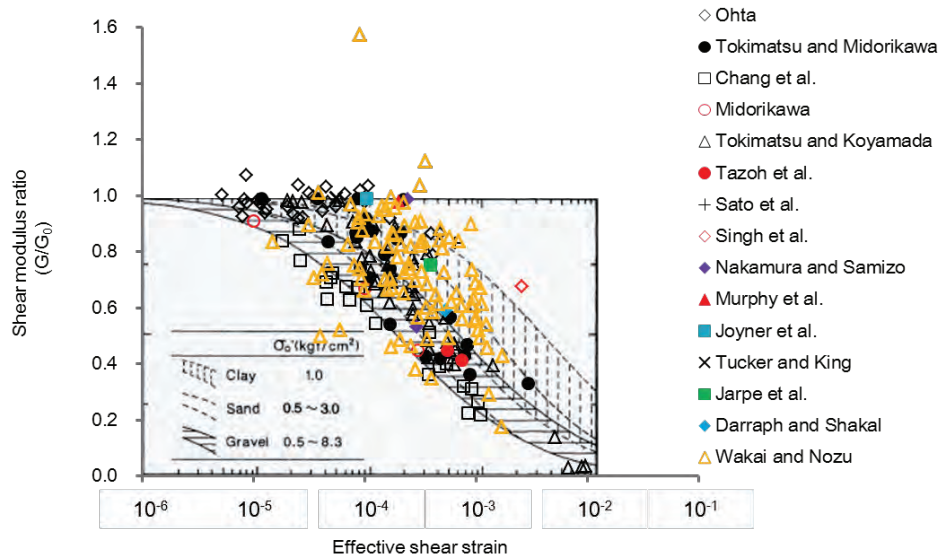


図-4.1 せん断剛性比と有効ひずみの関係(既往の研究(翠川, 1993), 本研究での結果(橙色の△)及び室内土質試験(今津・福武, 1986)による結果(ハッチング)の比較)

ここでは、非線形挙動強さと地震動強さおよび地盤条件の三者の関係について検討を行う。この検討は、以下の二つの観点から行う。一つは、地震動強さと地盤条件を総合する指標である地盤ひずみと非線形挙動強さとの関係を検討する(4.1)。次に、図-3.2中段のPGVに関する経験式に見られるばらつきと地盤条件の関係を検討する(4.2~4.3)。地盤条件の指標としては地盤の平均S波速度およびサイト増幅特性のピーク周波数を考慮する。

#### 4.1 非線形挙動強さと地盤のひずみとの関係

一般に地盤の非線形挙動を支配するパラメータは、地盤内に発生するひずみの大きさであるとされている(翠川, 1993)。既往の研究では、強震記録から推定される地盤内のひずみとせん断剛性比との関係が整理されている(翠川, 1993)。その中で、地盤のせん断剛性比と卓越周期の変化率に関する式(3)及び有効ひずみとPGVおよび表層のS波速度との関係式(4)が用いられている。

$$G/G_0 = (T_0/T)^2 \quad (3)$$

$$\gamma_{eff} = 0.4(PGV/V_{s0}) \quad (4)$$

ここに $G/G_0$ はせん断剛性比、 $T_0$ は線形時の地盤卓越周期、 $T$ は強震時の地盤卓越周期である。また、 $\gamma_{eff}$ は有効ひずみ、 $V_{s0}$ は線形時の表層のS波速度である。式(3)の右辺は本研究の用語で言えばピーク周波数比の自乗に対応する。また、式(4)で求まる有効ひずみは、PGVと表層のS波速度から求まるものであるため、地震動強さと地盤条件を総合

する指標であると言える。

本節では、式(3)、(4)を用いて有効ひずみとせん断剛性比との関係を評価し、既往の研究(翠川, 1993)による結果と比較してみる。ただし、式(4)では $V_{s0}$ として地盤の平均S波速度を用いて有効ひずみを算定する。ここに地盤の平均S波速度に関しては、地表から深さ30mまでの平均S波速度( $V_{s30}$ )が用いられる場合も多いが(翠川・松岡, 1995; 藤本・翠川, 2003)、本研究で利用しているK-NET観測地点の地盤情報は、地表からの深さが20mよりも深いものは存在しない。そこで本節では、K-NET、KiK-netサイトともに地表からの深さ20mまでの平均S波速度(以下、 $V_{s20}$ という)を用いる。 $V_{s20}$ の導出方法は、既往の研究(翠川・松岡, 1995; 藤本・翠川, 2003)に従い、以下の(5)式により算定する。

$$V_{s20} = 20 / \sum_{i=1}^n (H_i / V_{si}) \quad (5)$$

ここに、 $n$ は深さ20mまでの速度層の層数、 $H_i$ は第 $i$ 層の層厚(m)、 $V_{si}$ は第 $i$ 層でのS波速度(m/s)である。

図-4.1では、上で述べた方法で算定した有効ひずみとせん断剛性比の関係を橙色の△マーカーで、既往の研究結果に重ねて示している。また、既往の研究(今津・福武, 1986)で整理されている室内土質試験によるせん断剛性比の範囲をハッチングで示している。

本研究結果の有効ひずみとせん断剛性比は負の相関をもち、概ね単調減少の傾向を示しており、この点では、

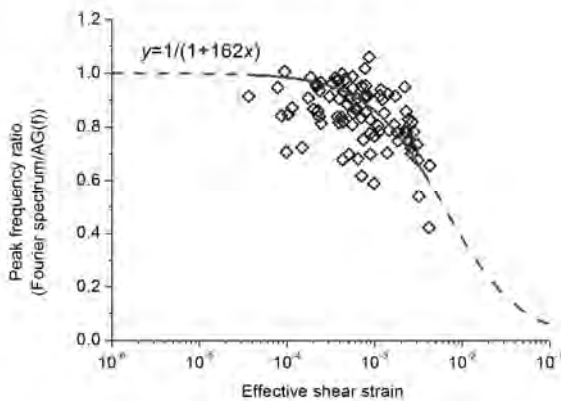


図-4.2 ピーク周波数比(地表フーリエスペクトル/サイト増幅特性)と有効ひずみの関係を示す経験式(説明変数  $x$ : 有効ひずみ, 目的変数  $y$ : ピーク周波数比)

既往の研究での結果と整合的である。一方で、本研究で得られた結果は、既往の研究のものよりもややばらつきが大きく、分布が有効ひずみ軸上の大きい方向にややシフトしていることがわかる。本研究の結果は、有効ひずみが概ね  $6.0 \times 10^{-4}$  を越えると非線形挙動が顕著になり始めることを示している。

本研究のせん断剛性比が、室内土質試験によるせん断剛性比と比較して大きめの値をとる理由は明確である。すなわち、図-1.1 で述べたように、本研究で取り扱っている非線形挙動強さは堆積層全体における平均的な非線形挙動強さであり、浅部地盤のみの非線形挙動強さではないので、本研究のせん断剛性比が室内土質試験のせん断剛性比より大きめの値をとるのは自然なことである。一方で、本研究のせん断剛性比が、地震観測結果に基づく既往のせん断剛性比よりも大きめである理由は明確ではないが、本研究の解析対象地域、とりわけ東北地方は過去に多くの地震が発生し、地盤が多くの履歴を受けている。そのため、他の地域に比べ非線形挙動が生じにくい状況にあった可能性が考えられる。

次に、3.2 と同様に、本研究で得られた有効ひずみとせん断剛性比の関係を示す経験式を求め、そのばらつきの評価を試みる。ただし、その際、せん断剛性比はピーク周波数比の自乗であることから、ピーク周波数比を用いるときよりも経験式のばらつきが大きくなることが予想できる。そこでここでは、有効ひずみとピーク周波数比の関係について、図-4.2 に示すように、双曲線モデルによる経験式を導いた。そして、その経験式から得られるピーク周波数比の推定値と観測値との残差平方和を算定したところ 1.139 となり、表-3.1 における PGV の場合

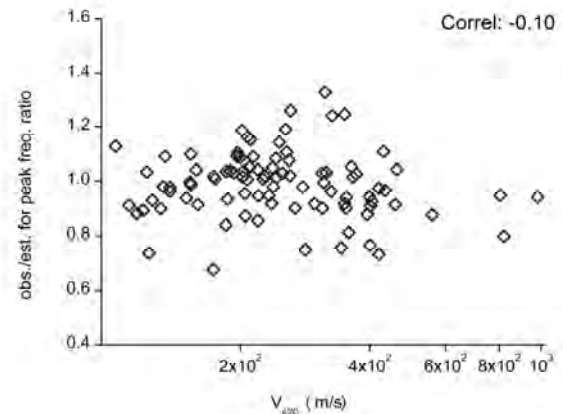


図-4.3 ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比と表層地盤の平均 S 波速度との関係

の残差平方和(1.010)よりも大きい結果となった。このように、地震動強さと地盤条件を総合する指標である有効ひずみを考慮しても、地震動強さの指標である PGV だけを考慮した場合(図-3.2 中段)と比較して、必ずしも経験式のばらつきが小さい結果とはならなかった。その理由としては、次節でも述べるように、地表からの深さ 20m までの平均 S 波速度が、地盤条件を示す指標として必ずしも最適ではないことが考えられる。

#### 4.2 非線形挙動強さの PGV に関する経験式からの偏差と地盤の平均 S 波速度との関係

本節では、4.1 とは異なる立場で、非線形挙動強さと地震動強さおよび地盤条件の三者の関係を調べるため、非線形挙動強さに関して、図-3.2 中段で示されている PGV に関する経験式からの偏差を、ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比として評価し、それと地盤条件の代表的指標の一つである  $V_{s20}$  との関係について検討する。図-4.3 は、式(5)から得られる  $V_{s20}$  と、ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比との関係を示している。この図から、ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比は、地表からの深さ 20m までの平均 S 波速度と相関を示さないことがわかる。この理由としては、強震時のピーク周波数比に対しては図-1.1 で説明したように堆積層全体の平均的な挙動が影響しており、ごく表層の特性を表す  $V_{s20}$  だけでは、必ずしも強震時のピーク周波数比を説明できないことが考えられる。

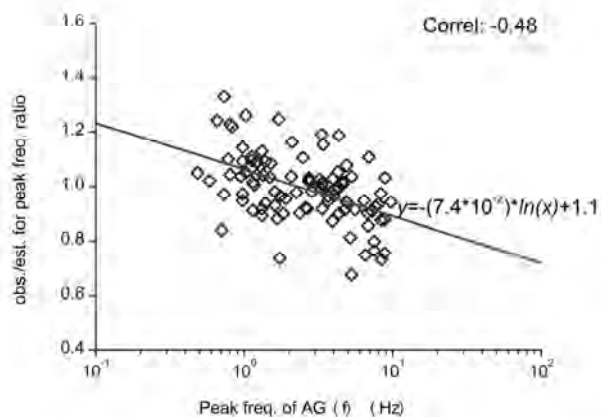


図-4.4 ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比とサイト増幅特性のピーク周波数の関係

#### 4.3 非線形挙動強さの PGV に関する経験式からの偏差とサイト増幅特性のピーク周波数との関係

本節では、4.2と同様の目的で、地盤条件に関する他の指標として線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数を考え、これと、ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比との関係を検討する。図-4.4はその検討結果を示したものである。同図に示すように、ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比と、線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数とは負の相関を示す。この理由は次のように考えられる。図-4.5に示すように、線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数が低い地盤とは、堆積層が全体として厚い地盤であり、ピーク周波数が高い地盤とは、堆積層が全体として薄い地盤であると考えられる。いま、これらの地盤に対して強震動が作用した場合、表層付近の地盤は非線形挙動を示すが、深部の地盤は非線形挙動を示しにくい。従って、図-4.5の左側に示すような堆積層の厚い地盤では、堆積層全体における平均的なS波速度の低下率は小さく、逆に図-4.5の右側に示すような堆積層の薄い地盤では、堆積層全体における平均的なS波速度の低下率は大きくなる傾向がある。線形時のサイト増幅特性のピーク周波数が高い地盤が、ピーク周波数比が小さくなる傾向にあるのはそのためであると考えられる。

また、以上のことから、この場合、地盤条件に関連する説明変数としては、地表からの深さ20mまでの平均S波速度よりも、線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数の方がより適していると考えられる。地盤の非線形挙動強さに対しては、図-1.1で述べたように、深さ方向の地質分布が影響していると考えられる。深さ

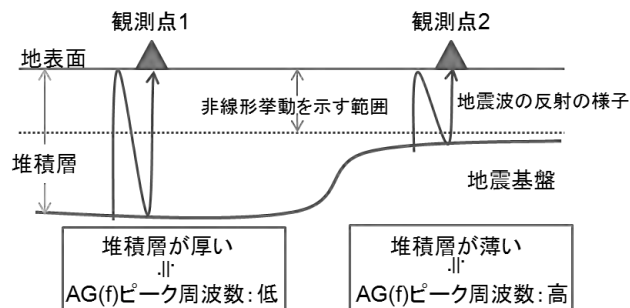


図-4.5 線形時のサイト増幅特性 AG(f)のピーク周波数が高くなるほどピーク周波数比が小さくなる理由の説明図

方向の地質分布を表現する指標の一つであるサイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数が非線形挙動強さと関わりがあるのはそのためであると考えられる。

なお、ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比と、サイト増幅特性のピーク周波数との平均的な関係を表す式を図-4.4に示す。この式の利用方法としては、図-3.2中段の式でPGVから求まるピーク周波数比を、図-4.4の式で与えられる倍率で補正することが考えられる。それにより、図-4.4を用いない場合よりも精度良くピーク周波数比を求めることができると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震で得られた広域の強震観測記録に基づき、強震時に顕著となる地盤の非線形挙動について、地表フーリエスペクトルのピーク周波数と線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)のそれとの比をとることで、その強さの程度を評価した。そして、地盤の非線形挙動強さの指標であるピーク周波数比と、地震動強さの代表的指標であるPGA、PGV及びPSI値との関係を検討した。その結果、いずれの指標についても、その値が大きくなると非線形挙動が強くなる傾向があるが、非線形挙動強さと最も相関の高い指標はPGVであることを明らかにした。また、双曲線モデルと指数関数モデルでは、双曲線モデルの方が、非線形挙動強さとPGVとの関係をより適切に表現できることがわかった。この結果に基づき、PGVから非線形挙動強さを推定するための経験式を提案した。

次に、地盤の非線形挙動強さは、地震動強さだけでなく地盤条件にも依存することが考えられるため、地震動強さと地盤条件を総合的に表す指標と考えられる地盤ひ

ずみと非線形挙動強さとの関係を表す経験式を求めたところ、地震動強さの指標であるPGVだけを考慮した場合と比較して、必ずしも経験式のばらつきが小さい結果とはならなかった。その理由としては、地表からの深さ20mまでの平均S波速度が、地盤条件を示す指標として必ずしも最適ではないことが考えられる。最後に、表層地盤の非線形挙動強さの(PGVに関する)経験式からの偏差を、ピーク周波数比の観測値の(PGVに関する)経験式に対する比として評価し、これと線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数との関係を検討したところ、両者は負の相関を示すことがわかった。したがって、この場合、地盤条件に関連する説明変数としては、地表からの深さ20mまでの平均S波速度よりも、線形時のサイト増幅特性(地表～地震基盤)のピーク周波数の方がより適していると考えられる。さらに、ピーク周波数比の観測値の経験式に対する比と線形時のサイト増幅特性(地震基盤～地表)のピーク周波数との関係を表す式を求めた。

今後は、本研究で提案したPGVと非線形挙動強さの関係を示す経験式について、地盤の非線形挙動を考慮した強震動評価手法に具体的に適用し、その適用性を検証していくことが課題である。また、広く知られているように、地盤の非線形挙動には剛性の低下と減衰の増大がある。本研究では、剛性低下のみに着目して検討しており、減衰増大に関する経験式については今後の検討課題である。

(2013年1月25日受付)

## 謝辞

本研究では、(独)防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの強震記録を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 池浦友則 (2011a) : 2011年東北地方太平洋沖地震・本震時におけるKiK-net地点のサイトファクターの変化, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, pp.57.
- 池浦友則 (2011b) : 2011年東北地方太平洋沖地震・本震時におけるK-NET地点のサイトファクターの変化, 日本地震工学会大会梗概集, pp.442-443.
- 池浦友則・加藤研一 (2011) : 隣接2地点ペアのネットワークに基づく相対地盤増幅率の広域評価—東北地方太平洋側のK-NET・KiK-netサイトへの適用—, 日本地震工学会論文集, 第11巻, 第4号, pp.48-67.
- 石原研而 (1982) : 土質動力学の基礎, 鹿島出版会.
- 今津雅紀・福武毅芳 (1986) : 砂礫材料の動的変形特性,

- 第21回土質工学研究発表会発表講演集, pp.509-512.
- 金谷健一 (2005) : これなら分かる最適化数学—基礎原理から計算手法まで, 共立出版.
- 古和田明・田居優・岩崎好規・入倉孝次郎 (1998) : 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.97-104.
- 佐藤智美・巽誉樹 (2002) : 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, 第556号, pp.15-24.
- 野口科子・笹谷努 (2011) : 2003年宮城県沖スラブ内地震における表層地盤の非線形応答とその強震動への影響, 地震2, 第63巻, pp.165-187.
- 野口科子・佐藤浩章 (2011) : 2011年東北地方太平洋沖地震の強震データに基づく表層地盤の非線形応答特性, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, pp.58.
- 野津厚 (2007) : 非線形パラメータと有効応力解析を併用した強震動評価手法, 土木学会地震工学論文集, 第29巻, pp.114-122.
- 野津厚・井合進 (2001) : 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19.
- 野津厚・盛川仁 (2003) : 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震2, 第55巻, pp.361-374.
- 野津厚・長尾毅 (2005) : スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112.
- 野津厚・菅野高弘 (2008) : 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—, 港湾空港技術研究所資料, No.1173.
- 野津厚・長尾毅・山田雅行 (2007) : 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, pp.215-234.
- 野津厚・長尾毅・山田雅行 (2009) : 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, pp.808-813.
- 野津厚・山田雅行・長尾毅・入倉孝次郎 (2012) : 海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第4号, pp.209-228.
- 藤本一雄・翠川三郎 (2003) : 日本全国を対象とした国土

数值情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第3巻, 第3号, pp.13-27.

翠川三郎 (1993): 強震時にみられる地盤特性の非線形性, 地震2, 第46巻, pp.207-216.

翠川三郎・松岡昌志 (1995): 国土数值情報を利用した地震ハザードの総合的評価, 物理探査, Vol.48, No.6, pp.519-529.

若井淳・野津厚 (2012): 広域の強震記録から推定される2011年東北地方太平洋沖地震の表層地盤の非線形挙動, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第4号, pp.160-176.

Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara, and Y. Okada (2000): New strong-motion observation network: KiK-net, Eos. Trans. Am. Geophys. Union, 81, 329.

Dimitriu, P., I. Kalogeras, and N. Theodulidis (1999): Evidence of nonlinear site response in HVSR from near-field earthquakes, Soil Dyn. Earthquake Eng., Vol.18, pp.423-436.

Iai, S., T. Morita, T. Kameoka, Y. Matsunaga, and K. Abiko (1995): Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-oki Earthquake, Soils Found., 35, pp.115-131.

Irikura, K. (1983): Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.32, pp.63-104.

Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, 7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.151-156.

Kinoshita, S. (1998): Kyoshin Net (K-NET), Seim. Res. Lett., Vol.69, pp.309-322.

Sato, T., T. Sato, and H. Kawase (1995): Nonlinear behavior of soil sediments identified by using borehole records observed at Ashigara Valley, Japan. Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, pp.1821-1834.

Yoshida, N. and S. Iai (1998): Nonlinear site response and its evaluation and prediction, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion: Recent Progress and New Horizon on ESG Study, Proceedings of the Second International Symposium, A. A. Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.71-90.

## 付録A

一般に地震動のフーリエスペクトルにはサイト特性以外に震源スペクトルの寄与も含まれているため, 2. で述べたように本震のフーリエスペクトルそのもののピーク

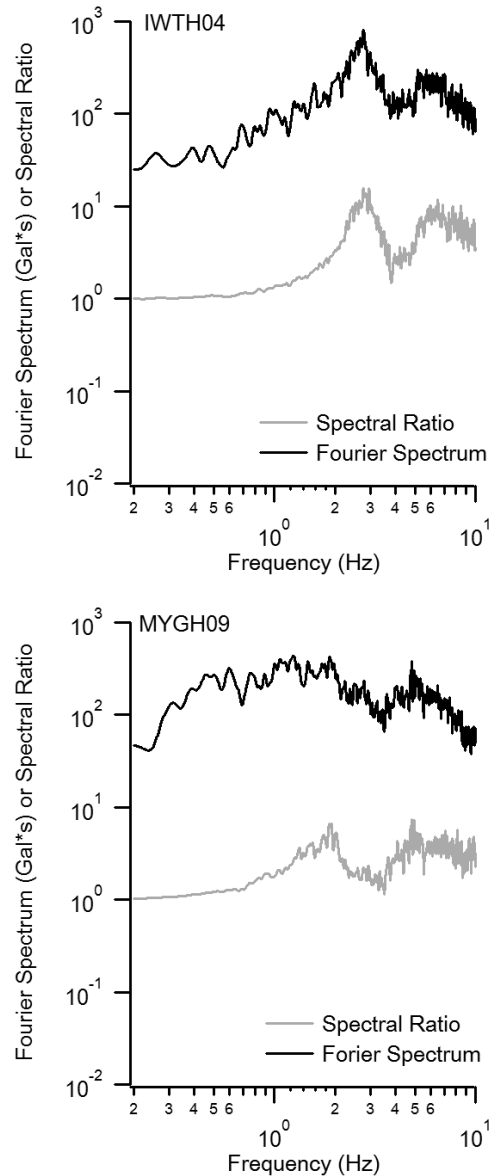


図-A.1 地表フーリエスペクトル及び地表/地中スペクトル比に明瞭なピークが存在する例(上段)と存在しない例(下段)

周波数を読みとった場合, それが, 本震時の(非線形時の)サイト増幅特性のピーク周波数を読みとっているのではなく, 震源スペクトルのピーク周波数を読みとっているのではないかとの懸念が, 一般には残る.

そこで, ここでは, KiK-net観測地点の鉛直アレイ観測記録を用いて, 当該地点における本震時の地表/地中フーリエスペクトル比と地表フーリエスペクトルのピーク周波数を比較し, それらのピーク周波数の関係の評価することで, 2. で述べた手法で非線形挙動強さを評価することの妥当性を検証する. 具体的な検討方法は以下のとお



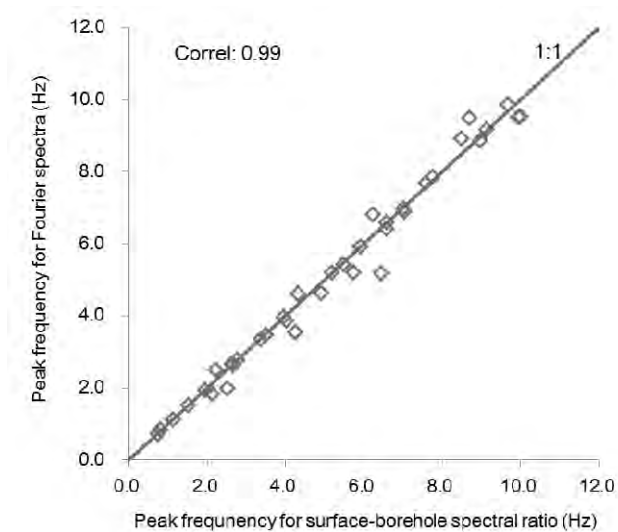


図-A.2 KiK-net 観測地点における地表フーリエスペクトルおよび地表/地中スペクトル比のピーク周波数の関係

りである。図-2.1で示された検討対象地点のうちKiK-net観測地点に対して、本震時におけるその鉛直アレイ観測記録の地表フーリエスペクトルおよび地中フーリエスペクトルを算定し、地表フーリエスペクトルと地表/地中スペクトル比のピーク周波数を読みとる。この時、図-A.1の上段のように、地表フーリエスペクトル及び地表/地中スペクトル比双方ともに明瞭なピークが存在するもののみを対象とし、図-A.1の下段に示すように、両者のうちどちらか一方でもピークが不明瞭なものは対象から除外する。そして、地表フーリエスペクトルと地表/地中スペクトル比のピーク周波数の関係进行评估する。

図-A.2は、検討対象のKiK-net観測地点における地表フーリエスペクトルのピーク周波数および地表/地中スペクトル比のピーク周波数の相関関係を示している。実線は双方が一致する場合を意味している。図中左上に示されているように相関係数は0.99であり、マーカーは概ね実線上もしくはその近傍に位置していることがわかる。このことから、少なくとも地表フーリエスペクトル及び地表/地中フーリエスペクトル比のピークが明瞭である場合、それらのピーク周波数は概ね一致していると見ることができる。

以上から、少なくともピークが明瞭な場合に限れば、本震のフーリエスペクトルそのもののピーク周波数を読みとって、震源スペクトルのピークを読みとっている懸念は無いものと考えられる。

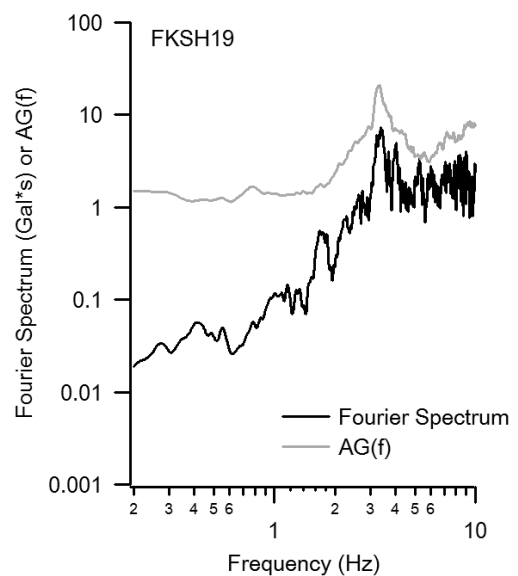
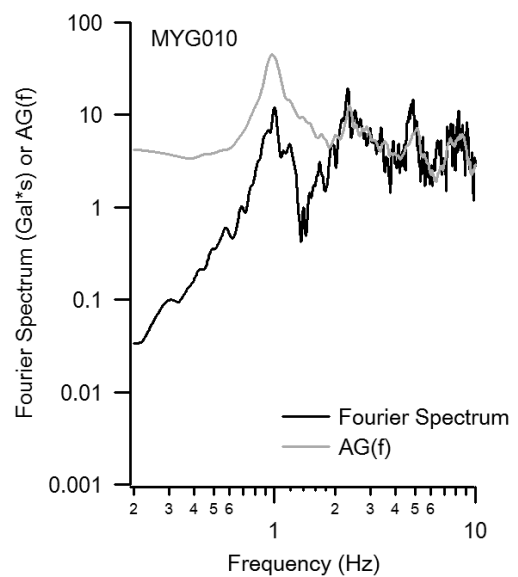


図-B.1 余震による地震動の地表フーリエスペクトルおよび線形時サイト増幅特性の比較例

## 付録B

ここでは、本研究で非線形挙動強さを評価するために用いた方法、すなわち、地表フーリエスペクトルと線形時のサイト増幅特性（地震基盤～地表）（野津・長尾，2005；野津他，2007）のピーク周波数比をとる方法の妥当性を別の観点から検証する意味で、表層地盤が線形の範囲内で挙動すると考えられる余震を用いて、それによる地震動の地表フーリエスペクトルと線形時サイト増幅特性のピーク周波数を比較し、それらが一致するかどうか

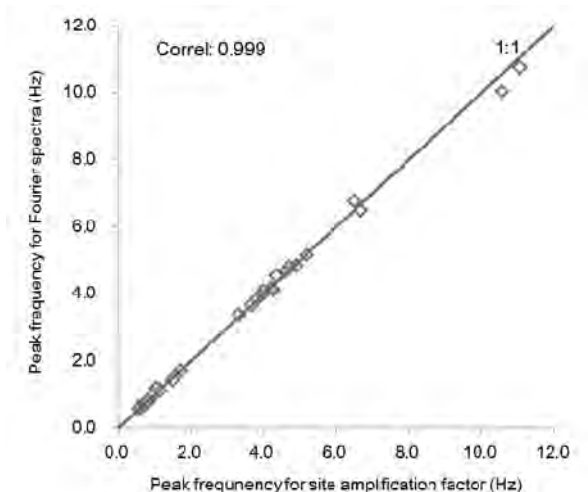


図-B.2 余震による地震動の地表フーリエスペクトルおよび線形時サイト増幅特性のピーク周波数の関係

かの検証を行う。具体的な検討方法は以下のとおりである。2012年6月30日に宮城県沖で発生した $M_J4.8$ の余震による地震動が観測された地点に対して、地表フーリエスペクトルを算定し、それと既往の研究（野津・長尾，2005；野津他，2007）で与えられている線形時サイト増幅特性のピーク周波数を比較する。この時、地表フーリエスペクトル及び線形時サイト増幅特性双方ともに明瞭なピークが存在するもののみを対象とする。図-B.1は、地表フーリエスペクトルと線形時サイト増幅特性の比較例である。両者のピーク周波数がほぼ一致していることがわかる。

図-B.2は、地表フーリエスペクトルのピーク周波数および線形時サイト増幅特性のピーク周波数の相関関係を示している。実線は双方が一致する場合を意味している。図中左上に示されているように相関係数は0.999であり、マーカーは概ね実線上もしくはそのごく近傍に位置していることがわかる。この図のように、いずれの評価対象地点でも両者のピーク周波数はほぼ一致しており、この場合、地盤は線形の範囲で挙動していたと評価される。このことは、地表フーリエスペクトルと線形時のサイト増幅特性（地震基盤～地表）（野津・長尾，2005；野津他，2007）のピーク周波数比をとる方法の妥当性を示している。

港湾空港技術研究所資料 No. 1272

2013.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2013) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。