

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1284 March 2014

表層地盤の非線形挙動を考慮した
2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション

野津 厚
若井 淳
長坂 陽介

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. はじめに	4
2. 本研究における表層地盤の非線形挙動の取り扱い方	4
3. 解析対象地点および解析条件	6
4. 解析結果	8
5. 予測問題におけるパラメータ設定方法に関する一検討	22
6. まとめと今後の課題	25
謝辞	25
参考文献.....	25

Strong Motion Simulation for the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake - With Considerations of Soil Nonlinearity -

Atsushi NOZU*

Atsushi WAKAI**

Yosuke NAGASAKA***

Synopsis

To predict strong ground motions for future large earthquakes including huge subduction earthquakes, it is important to take into account the effects of soil nonlinearity. One of the authors has been developing methods to simulate strong ground motions taking into account the effects of soil nonlinearity (e.g., Nozu and Morikawa, 2003). The methods, however, have been validated only for limited amount of strong motion data, partly because there was only a limited amount of strong motion data affected by soil nonlinearity. Therefore, in this article, making use of strong motion data for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and the source model developed for the same earthquake by the authors (Nozu and Wakai, 2012), strong motion simulation with considerations of soil nonlinearity was conducted and its effectiveness was studied. In particular, strong motion records with the evident effects of soil nonlinearity was selected and they are simulated using the source model and taking into account empirical site amplification and phase effects (Nozu and Sugano, 2008). Soil nonlinearity was considered using the method of Nozu and Morikawa (2003). The method uses two parameters to represent the effects of soil nonlinearity; one representing the reduction of averaged shear wave velocity within the sediment (ν_1) and the other representing the increase of averaged damping factor within the sediment (ν_2). In the simulation, ν_1 was basically determined based on Wakai and Nozu (2013) and ν_2 was determined so that the observed ground motion can be simulated as accurately as possible. As a result, it was found that, the duration of strong ground motion tended to be overestimated if the parameter ν_2 was not used for the sites with the effect of soil nonlinearity. In each of the target sites, by using these two parameters, the simulation result was improved. Thus, the effectiveness of strong motion simulation with considerations of soil nonlinearity was confirmed. Based on the results, the application of the method for future earthquakes was also discussed.

Key Words: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, soil nonlinearity, strong motion simulation, source model

* Head of Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division

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

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

Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

表層地盤の非線形挙動を考慮した 2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション

野津 厚*・若井 淳**・長坂 陽介***

要 旨

海溝型巨大地震などの想定地震に対する強震動予測を行う場合に、表層地盤の非線形挙動の影響を考慮することは重要であり、そのための方法についてはこれまでも提案を行ってきた（例えば野津・盛川，2003）。しかしながら、これまでは、表層地盤の非線形挙動の影響を受けた強震記録に限られていたことなどから、手法の検証は断片的なものに留まっていた。そこで、本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に取得された強震記録、および、著者らが開発した震源モデル（野津・若井，2012a）を活用して、表層地盤の非線形挙動を考慮した強震動シミュレーションを行い、その有効性の確認を行った。具体的には、東北地方太平洋沖地震の際に得られた強震記録のうち、表層地盤の非線形挙動の影響が明確に表れているものに着目し、上述の震源モデル、および、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法（野津・菅野，2008）を用いた強震動評価を行った。その際、表層地盤の非線形挙動の影響を既往の方法（野津・盛川，2003）により考慮した。この方法は、堆積層における平均的なS波速度の低下率を表すパラメーター（ v_1 ）および堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメーター（ v_2 ）を用いる方法である。これらのパラメーターのうち v_1 については主に既往の研究（若井・野津，2013）で整理されているものを用い、 v_2 については、観測波形を最もよく説明するように設定した。表層地盤の非線形挙動の影響を受けた地点において、パラメーター v_2 を考慮せずに強震動評価を行うと、強震動の継続時間を過大に評価する傾向が見られた。検討したいずれのケースでも、これら二つのパラメーターを考慮した解析を行うことにより、観測記録の再現性は向上した。このことから、非線形性を考慮した強震動シミュレーションの有効性が確認できたと考えられる。この結果に基づき、予測問題におけるパラメーター設定方法についても検討を行った。

キーワード：2011年東北地方太平洋沖地震，表層地盤，非線形挙動，強震動シミュレーション，震源モデル

* 地震防災研究領域 地震動研究チームリーダー
** 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 研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

1. はじめに

強震時においては、表層地盤の非線形挙動（石原，1982；翠川，1993；Yoshida and Iai, 1998）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。海溝型巨大地震などの想定地震に対する強震動予測を行う場合に、表層地盤の非線形挙動の影響を考慮することは重要である。

表層地盤の非線形挙動を考慮して地震動を計算する手法としては、工学的基盤での地震動（2E波など）を所与のものとして与え、それより上の地盤の地震応答解析を実施する手法は、当然ではあるが、これまで多数開発されてきている（例えば Schnabel *et al.*, 1972; Iai *et al.*, 1992）。しかしながら、震源モデルから出発して、伝播経路特性・サイト特性から表層地盤の非線形挙動までを考慮して地震動を計算する手法に関する研究はいまだに少ないのが現状である。

震源モデルから出発して、伝播経路特性・サイト特性を考慮し、対象地点での地震動を計算する手法として、経験的グリーン関数法（Irikura, 1986）や経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法（古和田他，1998；野津・菅野，2008；野津他，2009）が実務で多く用いられている。しかし、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ない。

なお、震源モデルから出発して地震動を計算する際、工学的基盤での地震動は表層地盤の非線形挙動の影響を受けていないとの仮定の下、まず工学的基盤での地震動を線形の条件で計算し、これを入力して表層地盤の地震応答計算を実施する方法も実務では多く用いられているが（例えば中央防災会議事務局，2001）、この方法は多重非線形効果を考慮できないという問題点が残されている。この点については既往の研究（野津・盛川，2003）で議論を行った。また、本稿の第2章でも補足説明する。

そこで、著者らはこれまで、表層地盤の非線形挙動の影響を考慮するための手法として、多重非線形効果を考慮する手法（野津・盛川，2003）を提案している。この方法は、第2章で説明する通り、堆積層における平均的なS波速度の低下率を表すパラメータ（ v_1 ）および堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメータ（ v_2 ）を用い、点震源からの地震波（グリーン関数）を補正する方法である。この方法を経験的グリーン関数法

（Irikura, 1986）や経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法（古和田他，1998；野津・菅野，2008；野津他，2009）と組み合わせることで、震源モデルから出発し、伝播経路特性・サイト特性・表層地盤の非線形挙動を考慮して地震動を計算することができる。表層地盤の非線形挙動を考慮する方法はこれ以外にも提案されているが、応答スペクトル等を対象としたものが多く（例えば池田他，2013）、構造物の時刻歴応答解析に必要な地震動の時刻歴波形を計算することができる方法は著者らの方法以外に見当たらない。

著者らの方法の適用性については、1995年兵庫県南部地震や2000年鳥取県西部地震を対象としてこれまでも調べてきているが（例えば野津・盛川，2003）、これまで、表層地盤の非線形挙動の影響を受けた強震記録が限られていたことなどから、手法の検証は断片的なものに留まっていた。

そこで、本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に取得された強震記録、および、著者らが開発した震源モデル（野津・若井，2012a）を活用して、表層地盤の非線形挙動を考慮した強震動シミュレーションを行い、その有効性の確認を行った。

具体的には、東北地方太平洋沖地震の際に得られた強震記録のうち、表層地盤の非線形挙動の影響が明確に表れているものに着目し、上述の震源モデル、および、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法（野津・菅野，2008）を用いた強震動評価を行った。その際、表層地盤の非線形挙動の影響を上述の方法（野津・盛川，2003）により考慮した。非線形性を表すパラメータのうち v_1 については主に既往の研究（若井・野津，2013）で整理されているものを用い、 v_2 については、観測波形を最もよく説明するように設定した。また、解析結果に基づき、予測問題におけるパラメータ設定方法についても検討を行った。

2. 本研究における表層地盤の非線形挙動の取り扱い方

本研究において表層地盤の非線形挙動を取り扱う際にどのようなことを念頭に置いているか、さらに、具体的な計算式の中でそれをどのように取り入れているかについて本章で説明する。

図-1に直達S波および後続位相に対応する地震波の堆積層内における波線経路の概念図を示す。この図に示すように、直達S波は最短経路でサイトに到達するが、後続位相は、堆積層内で反射を繰り返す、表層地盤を複数

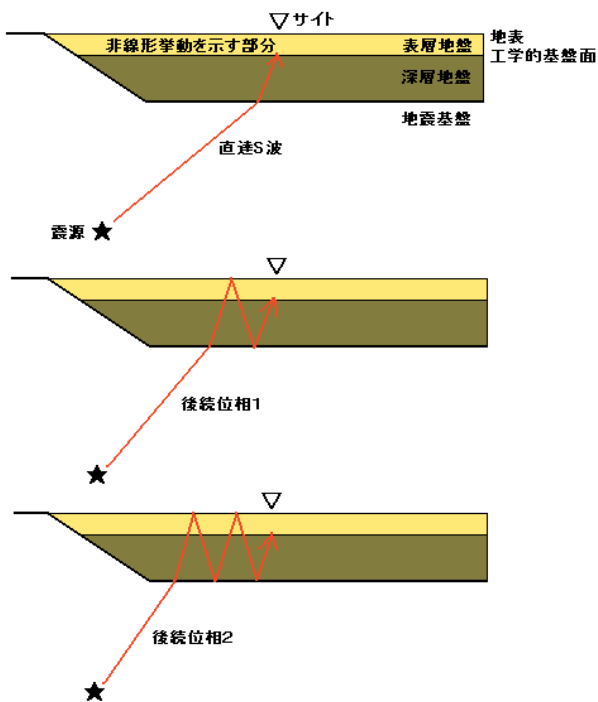


図-1 多重非線形効果の概念図

回横切ってからサイトに到達すると考えられる。従って、大地震の際に表層地盤が非線形挙動を示せば、地震波はその波線経路において非線形挙動の影響を複数回受けることになる。このことを著者らは多重非線形効果と呼んでいる。なお、図-1は地震基盤上面での反射を想定した図になっているが、反射の生じる面は地震基盤上面以外のインピーダンス比の高い面であっても良い。

多重非線形効果の影響を考えれば、サイトの工学的基盤に下方から入射する地震波は、図-1に示すように、表層地盤の非線形挙動の影響をすでに受けていることになる。サイトの工学的基盤に下方から入射する地震波のうち、表層地盤の非線形挙動の影響を受けていないと考えることができるのは直達S波だけである。従って、第1章で述べたように、工学的基盤での地震動を線形の条件で計算する方法では、表層地盤の非線形挙動の影響を完全には考慮できていないことになる。特に波形の後半部分に対して、線形の条件での計算は誤差が大きくなるものと考えられる。

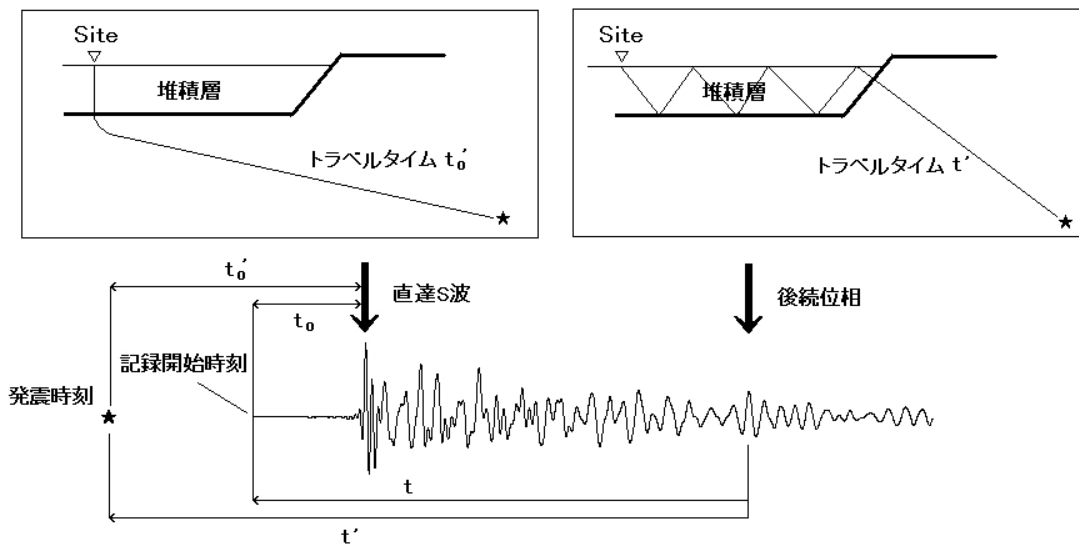


図-2 点震源からの地震波（グリーン関数）に含まれる直達S波および後続位相の例

これに対し、著者らは、多重非線形効果の影響を考慮して強震動評価を簡便に実施するための方法の提案を行ってきた。これは、表層地盤と深層地盤を含む堆積層における平均的なS波速度の低下率 (v_1) および堆積層における平均的な減衰定数の増分 (v_2) を用い（これらを「非線形パラメータ」という）、波形合成の過程で、点震源からの地震波（グリーン関数）に対してあらかじめ補正を加えておくというものである。

図-2は点と見なせるような小さな震源からの地震波（グリーン関数）の例である。グリーン関数上で直達S波の到来時刻を t_0 、波形後半のある位相の到来時刻を t としたとき（図-2）、 $t-t_0$ は両位相に対応する波が震源からサイトにまで到達するのに要した時間の差 $t'-t_0'$ に等しく（図-2）、さらにそれは、近似的には、波形後半の位相が堆積層内に留まっていた時間を示すと考えることができる。

さて、表層地盤の非線形挙動が生じた場合には、S波速

度の低下により、後続位相の到来時刻は遅くなるはずである。いま、堆積層における平均的な S 波速度が v_1 倍になるとしているため、後続位相の到来時刻は $t_0 + (t - t_0) / v_1$ となるはずである。このような考え方でグリーン関数の時刻 t_0 以降の部分を $1/v_1$ 倍に引き延ばす。

同時に、表層地盤の非線形挙動が生じた場合には、減衰定数の増加により、後続位相の振幅が低減されるはずである。一般に減衰定数 h の地盤を角振動数 ω の地震波が時間 t だけ伝播する間に振幅は $\exp(-h\omega t)$ 倍となる。地盤の非線形性により減衰定数が h から $h + v_2$ に変わったとすれば、堆積層内を時間 $t - t_0$ だけ伝播した後では、地震波の振幅は線形時と比較して $\exp(-v_2\omega(t - t_0))$ 倍となる。

以上の考えに基づき、著者らの手法ではグリーン関数を次式により補正する。

$$\begin{aligned} g_n(t) &= g(t) & (t < t_0) \\ g_n(t_0 + (t - t_0) / v_1) &= g(t) \exp(-v_2\omega(t - t_0)) & (t > t_0) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに $g(t)$ は補正前のグリーン関数、 $g_n(t)$ は補正後のグリーン関数である。そして、補正後のグリーン関数を大地震の震源モデルに従って重ね合わせることにより、大地震時の地震動を計算する。

なお、式 (1) の右辺を計算する際、グリーン関数に含まれる振動数成分が狭帯域であれば、その振動数に対応した ω を用い、広帯域であれば、まず $g(t)$ から帯域通過フィルタにより特定の帯域 (バンド幅 f_b) をとりだし、この時間関数に $\exp(-v_2\omega(t - t_0))$ を乗じた上で、すべての帯域について加え合わせる。バンド幅 f_b は本研究の応用例では 0.1Hz としている。

なお、本研究では、グリーン関数を計算する方法として、経験的サイト増幅・位相特性を考慮する方法 (古和田他, 1998; 野津・菅野, 2008; 野津他, 2009) を用いる。

3. 解析対象地点および解析条件

本研究では、東北地方太平洋沖地震の際に得られた強震記録のうち、表層地盤の非線形挙動の影響が明確に表れているものに着目し、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法 (野津・菅野, 2008) を用いた強震動評価を行った。その際、表層地盤の非線形挙動の影響を既往の方法 (野津・盛川, 2003) により考慮した。また、震源モデルとしては、当該地震を対象に著者らが開発した SPGA モデル (野津, 2012; 野津他, 2012; 野津・若井, 2012a) を用いた。これは、図-3 に示すように、宮城県沖から茨城県沖にかけて 9 つの SPGA (Strong-motion Pulse

Generation Area) からなる震源モデルである。震源モデルの詳細については上記の文献を参照していただきたい。

解析対象地点としては、まず、次の 1) ~3) の地点を選定した。

- 1) 当該地震の震源モデルを作成した際 (野津, 2012; 野津・若井, 2012a) に、すでに表層地盤の非線形挙動を考慮していた地点
- 2) 震源モデルの作成には用いなかったが、その後、震源モデルの検証のために強震動シミュレーションの対象とした地点のうち、計算結果のフーリエスペクトルのピーク周波数と観測結果との間に顕著なずれがあり、表層地盤の非線形挙動の影響が考えられた地点 (野津・若井, 2012a)
- 3) 中小地震記録の解析から得られたサイト増幅特性 (野津・長尾, 2005) のピーク周波数と、東北地方太平洋沖地震の際の観測記録のピーク周波数との間に顕著なずれがあり、表層地盤の非線形挙動の影響が考えられた地点 (若井・野津, 2013)

以下に述べる解析では、非線形性を考慮しない解析結果と観測結果との間に誤差が存在した場合に、この誤差が (震源モデルに起因するものではなく) 表層地盤の非線形性によるものと考えて解析を進めている。従って、上記の震源モデルにより十分な精度で地震動が計算できる地域から対象地点を選ぶことが望ましい。このような観点から、1) ~3) のいずれかに該当する地点のうち、宮城県、福島県東部、茨城県の地点を選択した。

また、線形時のサイト増幅特性 (野津・長尾, 2005) のピーク周波数が 5Hz 以上の地点は、堆積層が薄く、堆積層による後続位相の発達は少ないと考えられる。従って、第 2 章で述べた手法による高精度化が期待できないと考えられるため、解析対象から除外した。さらに、観測記録にサイクリックモビリティによると見られる特異な波形が見られる地点を除外した。

以上により、解析対象地点は図-3 および表-1 に示す 13 地点となった。

解析条件は以下の通りである。

グリーン関数の計算には、震源モデルの設定 (野津, 2012; 野津・若井, 2012a) を行った時と同様、経験的サイト増幅・位相特性を考慮する方法 (古和田他, 1998; 野津・菅野, 2008; 野津他, 2009) を用いた。すなわち、グリーン関数のフーリエ振幅は中小地震の震源特性、伝播経路特性、経験的サイト増幅特性の三者の積として求めた。

中小地震の震源特性と伝播経路特性の計算方法も、震源モデルの設定を行った際と同様とした。すなわち、震源特性を計算する際、ラディエーション係数 (Boore, 1983) と

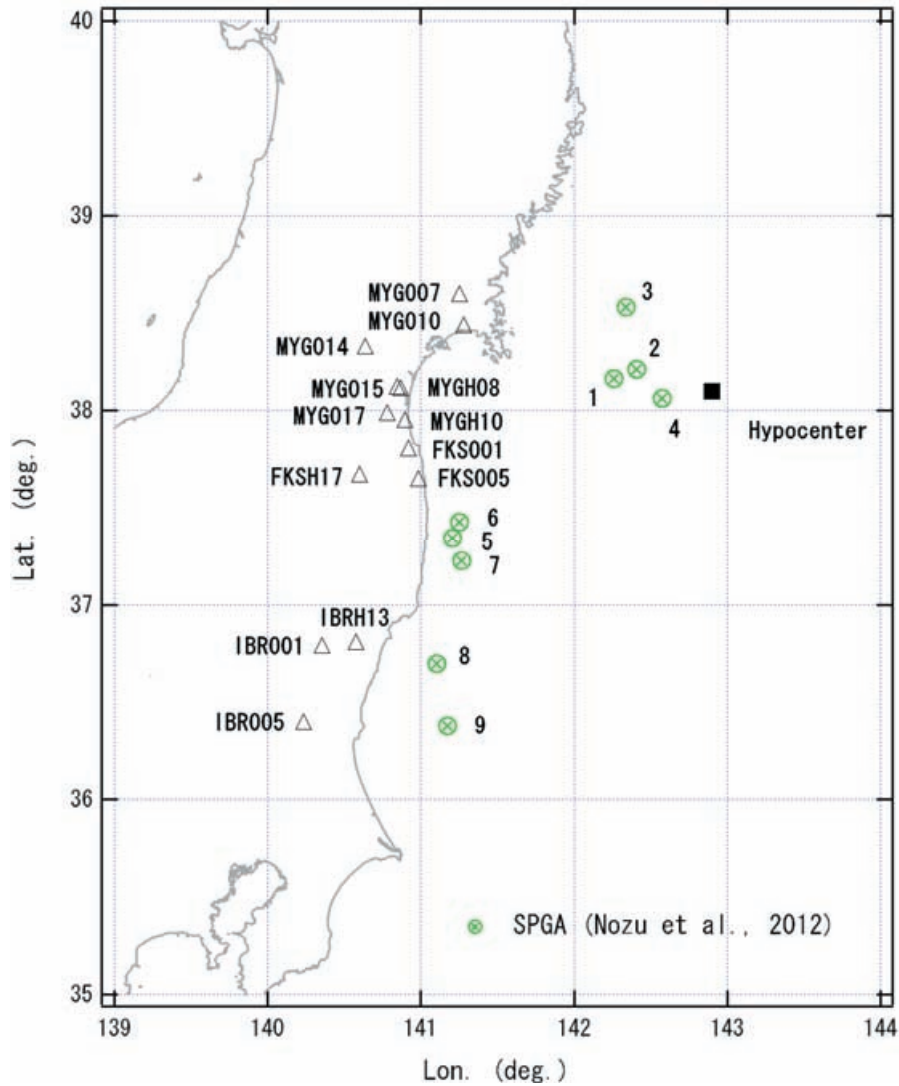


図-3 本研究における解析対象地点および震源モデル

表-1 解析対象地点と設定した非線形パラメーターの値

記号	地点名	ν_1	ν_2	備考
MYG007	K-NET豊里	0.68	0.002	
MYG010	K-NET石巻	0.71	0.030	
MYG014	K-NET作並	0.78	0.003	
MYG015	K-NET岩沼	0.67	0.014	野津(2012)では $\nu_2=0.010$
MYG017	K-NET角田	0.66	0.015	
MYGH08	KiK-net岩沼	0.82	0.006	
MYGH10	KiK-net山元	0.47*	0.006	野津(2012)では $\nu_2=0.008$
FKS001	K-NET相馬	0.90	0.005	野津(2012)では $\nu_2=0.005$
FKS005	K-NET原町	0.90	0.006	野津(2012)では $\nu_2=0.005$
FKSH17	KiK-net川俣	0.84	0.002	
IBR001	K-NET大子	0.78	0.006	
IBR005	K-NET笠間	0.78	0.024	
IBRH13	KiK-net高萩	0.78	0.005	

(MYGH10 では SPGA1~3 に対して $\nu_1=0.80$, SPGA4~9 に対して $\nu_1=0.47$ を設定)

しては、全方位への平均値である 0.63 を用いた。また、地震動のエネルギーの水平 2 成分への分散を表す係数である *PRITIN* (Boore, 1983) は、各地点の実際の観測記録に基づいて設定した。震源付近および伝播経路における S 波速度としては 3.9km/s を用いた (地震調査研究推進本部, 2002 ; 地震調査研究推進本部, 2005)。震源付近における媒質の密度としては $3.1 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ を用いた (地震調査研究推進本部, 2002 ; 地震調査研究推進本部, 2005)。伝播経路における Q 値は東日本の海溝性地震に対して求められている値 (佐藤・巽, 2002) を用いた。経験的サイト増幅特性としては、野津・長尾 (2005) によるものを用いた。

一方、グリーン関数のフーリエ位相としては、対象地点における中小地震記録のフーリエ位相を用いた。対象地点で複数の中小地震記録が利用できる場合は、(鉛直面内での) 入射角および (水平面内での) 方位角という点で、対象とする SPGA とできるだけ類似している中小地震記録を用いることが望ましい。本研究では、震源モデルの作成 (野津, 2012 ; 野津・若井, 2012a) に用いられた中小地震記録を参考に、解析に使用する中小地震記録を選定した。

4. 解析結果

各地点における計算結果を図-4~図-42 に示す。

このうち図-4~図-6 は MYG007 における計算結果を示したものである。まず、非線形性を考慮せずに計算を行った結果のフーリエスペクトルを観測結果と比較したものが図-4 (左) である。なお、ここに示す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 Parzen ウィンドウを適用したものである (以下、本稿に示すフーリエスペクトルはすべて同様)。計算結果のフーリエスペクトルは観測結果に対し、ピーク周波数が高周波側にずれている。これは、計算結果のフーリエスペクトルのピーク周波数は堆積層の線形時の固有周波数で決まっているのに対し、実際には、堆積層の平均的な S 波速度が低下し、その結果、堆積層の固有周波数が低下したためであると考えられる。このとき、堆積層の平均的な S 波速度の低下率と固有周波数の低下率は等しい。

そこで、次に、堆積層における S 波速度の低下率を表すパラメータである ν_1 のみを考慮した解析を行った。その際、 ν_1 の値としては、野津・若井 (2013) で求められている値 ($\nu_1=0.68$) を用いた。その結果が図-4 (中) である。堆積層における S 波速度の低下を考慮することにより、計算結果のフーリエスペクトルのピーク周波数はほぼ観測結果と一致した。なお、本稿における ν_1 の設定は、ここで行ったように、基本的に、線形時のサイト増幅特性のピ

ーク周波数と東北地方太平洋沖地震時の観測スペクトルのピーク周波数の比率 (野津・若井, 2012a ; 野津・若井, 2013) に基づくものとし、それによるスペクトルの再現性が良好でない場合に限り、 ν_1 の値を再調整することとした。

ただし、このときの速度波形の計算結果 (図-5) を見ると、後続位相の継続時間が過大評価となっている。なお、ここに示す速度波形は 0.2-1Hz の帯域の速度波形である (以下、本稿に示す速度波形はすべて同様)。継続時間の過大評価は、表層地盤の非線形挙動による減衰定数の増加を無視したことによると考えられる。そこで、次に、堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメータである ν_2 を設定する。パラメータ ν_2 を設定すると後続位相の継続時間が短くなる。そこで、本稿では原則として、観測結果と計算結果の PSI 値 (水平 2 成分の平均値) が等しくなるように ν_2 を設定することとし、それによる波形全体の特徴の再現性が良くない場合に限り、 ν_2 の値を再調整することとした。図-6 に ν_2 を設定した場合の速度波形の計算結果を示す。 ν_2 を設定することにより、後続位相の継続時間が調整され、観測波形の再現性が向上したことがわかる。

他の地点における結果を図-7~図-42 に示しているが、いずれの地点においても、MYG007 と同様の傾向が表れている。すなわち、パラメータ ν_1 を設定することによりピーク周波数のずれが解消され、次に、パラメータ ν_2 を設定することにより、後続位相の継続時間の過大評価が改善されている。また、最終的に設定した (ν_1, ν_2) に対する速度波形およびフーリエスペクトルの計算結果は、MYG010 において速度波形が適切に再現できていない点を除けば、観測結果を良く再現するものとなっている。

最終的に設定した (ν_1, ν_2) の値を表-1 に示している。MYGH10 では、SPGA1~3 に対して $\nu_1=0.80$ 、SPGA4~9 に対して $\nu_1=0.47$ を設定した (野津・若井 (2012a) でもそのように設定していたが、その点が記述されていなかったため訂正したい)。それ以外の地点では、簡単のため、すべての SPGA に対して同一のパラメータを設定した。

いずれの地点においても、非線形パラメータを考慮することにより観測波形の再現精度が向上しており、非線形パラメータを考慮した強震動シミュレーションの有効性を確認することができた。

ここで、非線形性を考慮しない場合、 ν_1 のみを考慮する場合、および ν_1 と ν_2 を考慮する場合の PSI 値の計算結果を観測結果と比較して図-43 に示す。非線形性を考慮しない場合と ν_1 のみを考慮する場合は PSI 値を過大評価する傾向があるが、 ν_1 と ν_2 を考慮する場合は観測結果と計算結果との間に整合性が見られる。

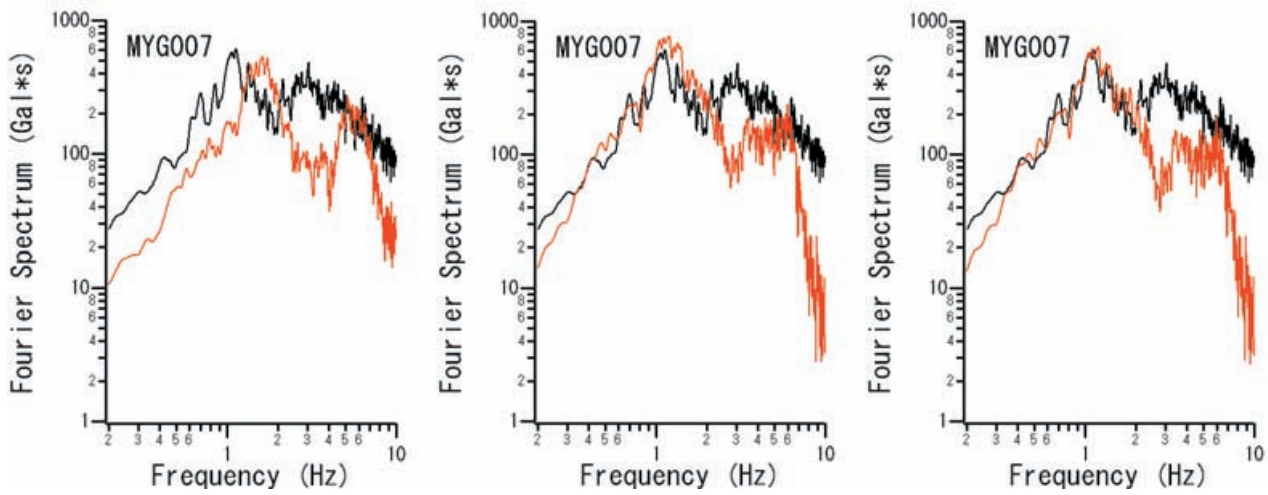


図-4 MYG007 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 ν_1 のみを考慮した場合の計算結果、 ν_1 と ν_2 を考慮した場合の計算結果。

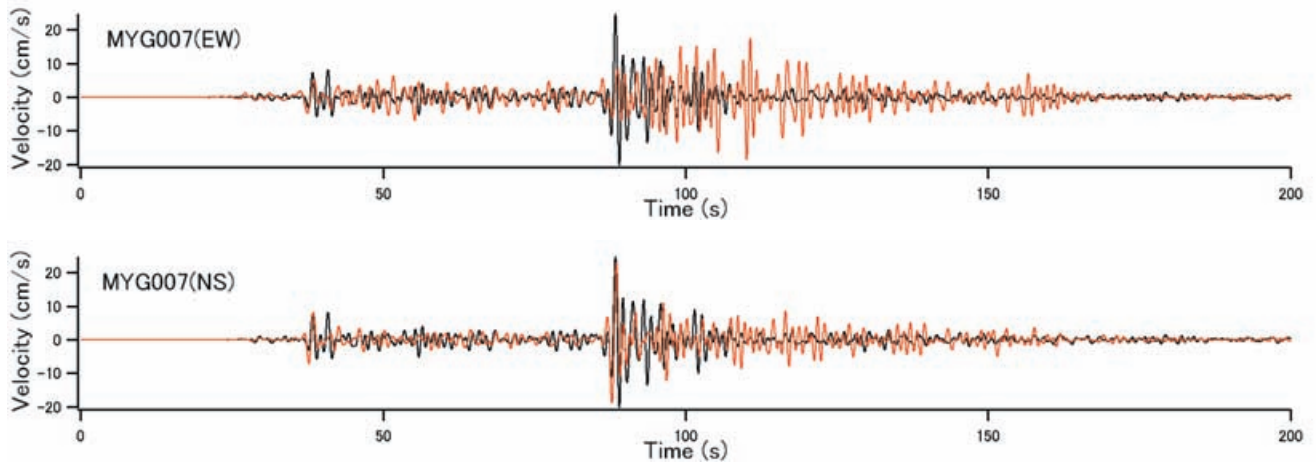


図-5 MYG007 において ν_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

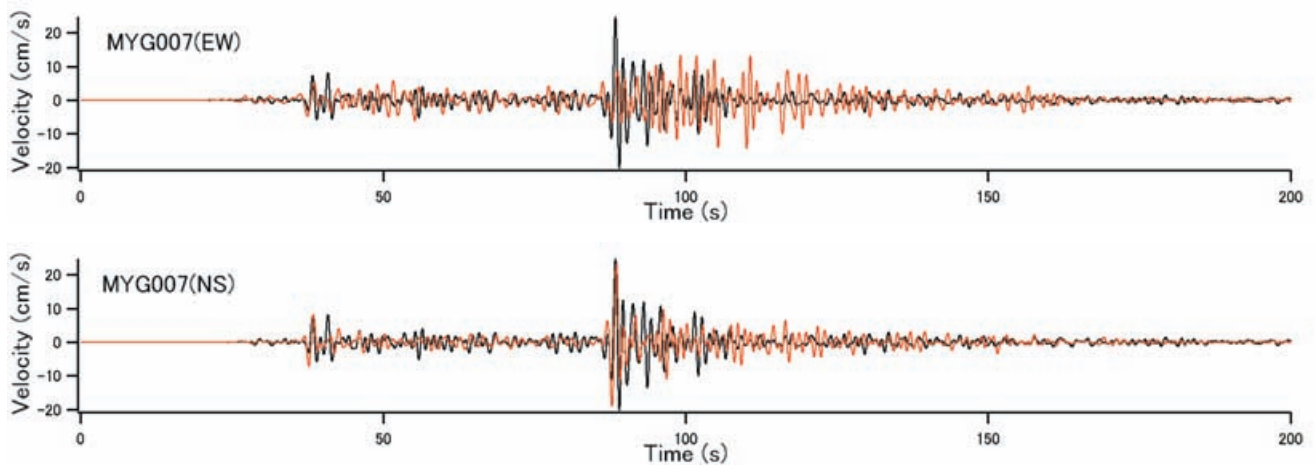


図-6 MYG007 において ν_1 と ν_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

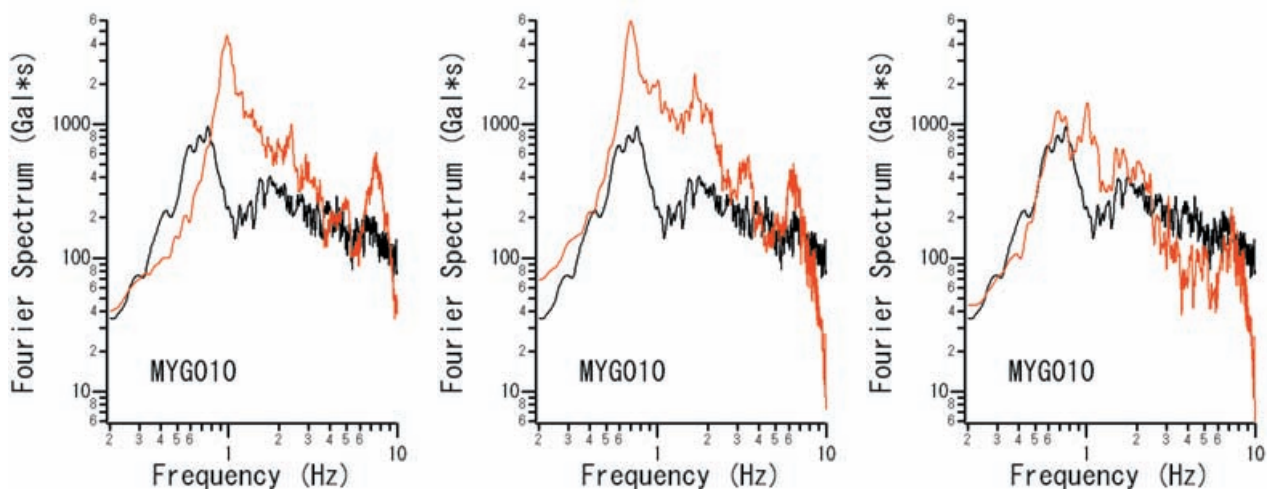


図-7 MYG010 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 v_1 のみを考慮した場合の計算結果、 v_1 と v_2 を考慮した場合の計算結果。

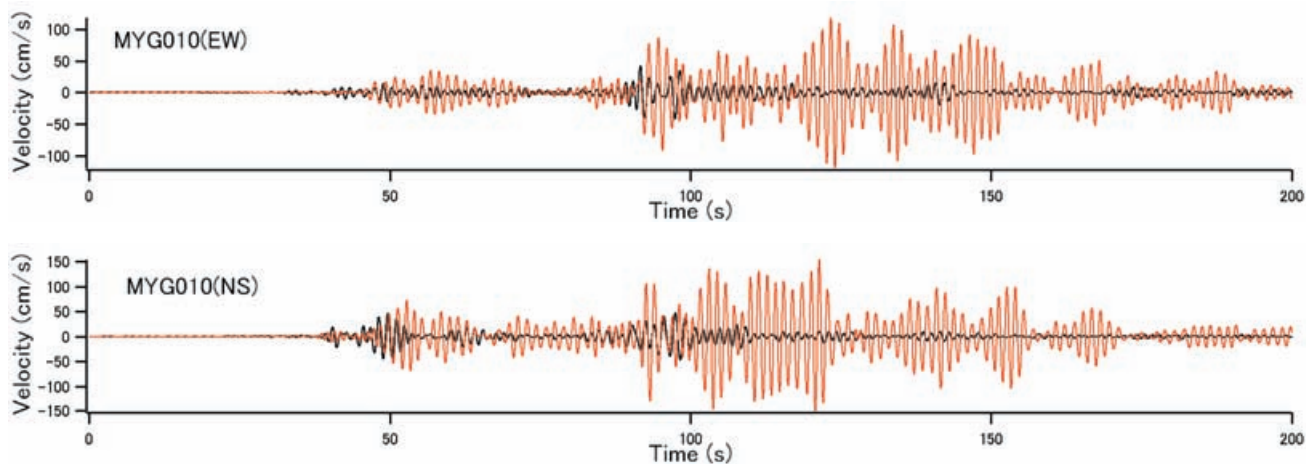


図-8 MYG010 において v_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測、赤が計算）

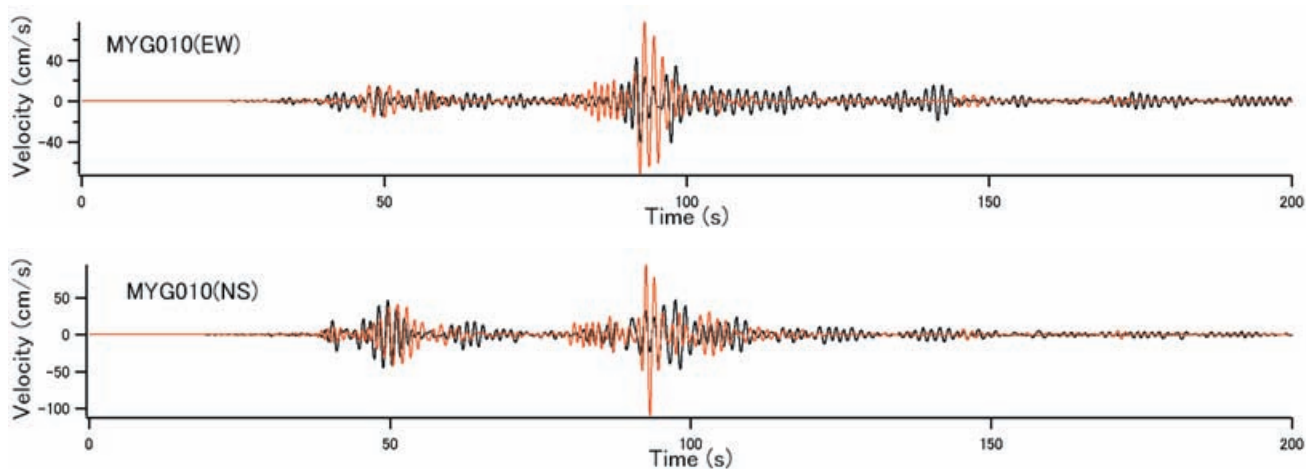


図-9 MYG010 において v_1 と v_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測、赤が計算）

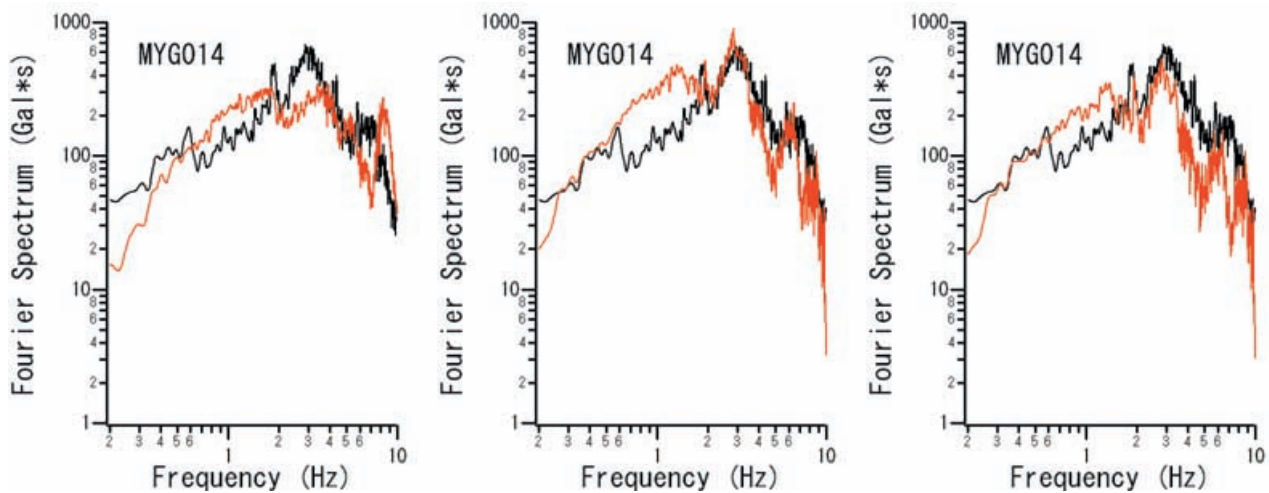


図-10 MYG014 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 ν_1 のみを考慮した場合の計算結果、 ν_1 と ν_2 を考慮した場合の計算結果。

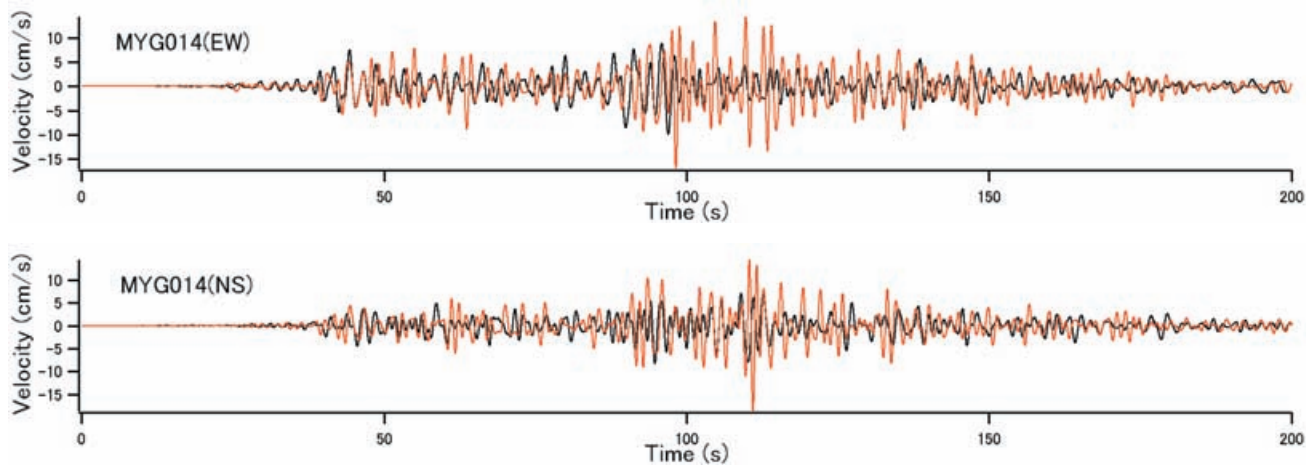


図-11 MYG014 において ν_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測、赤が計算）

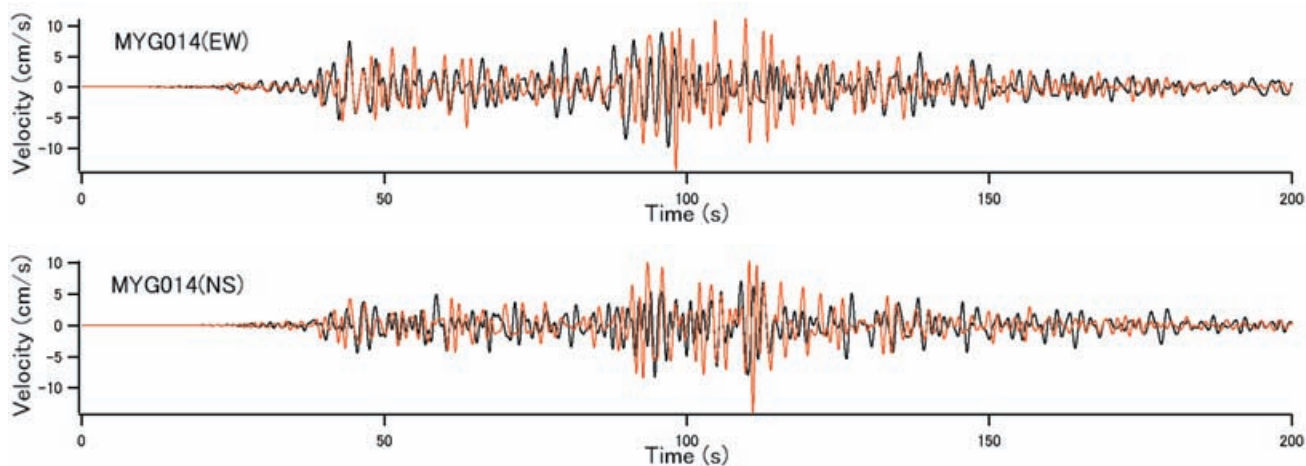


図-12 MYG014 において ν_1 と ν_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測、赤が計算）

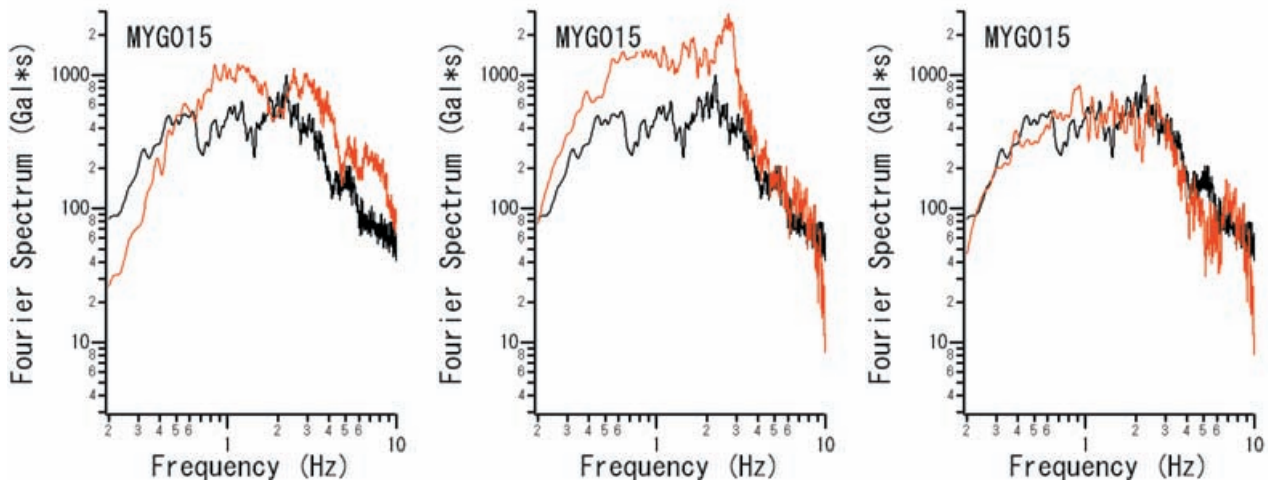


図-13 MYG015 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 v_1 のみを考慮した場合の計算結果、 v_1 と v_2 を考慮した場合の計算結果。

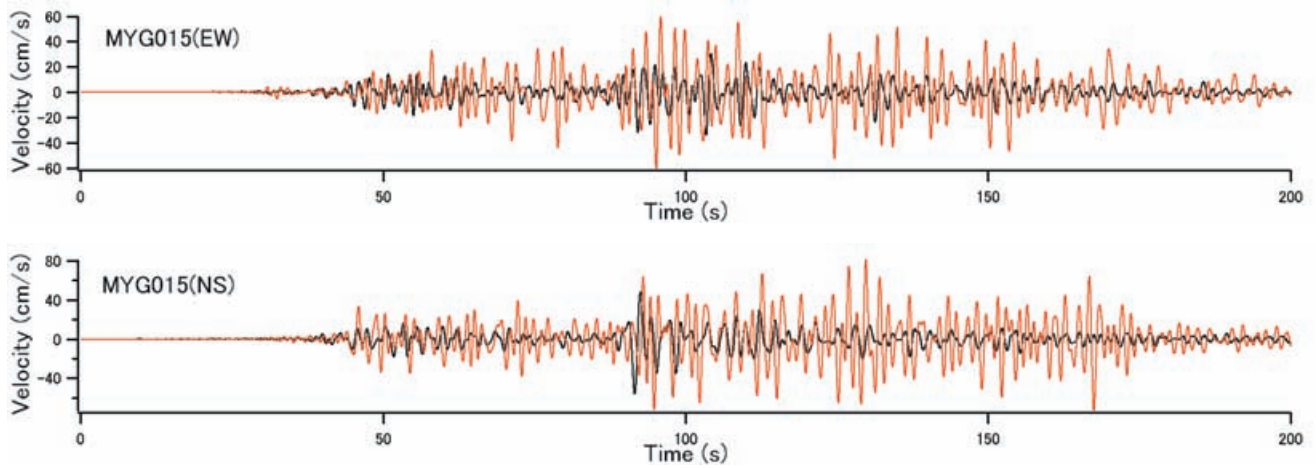


図-14 MYG015 において v_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

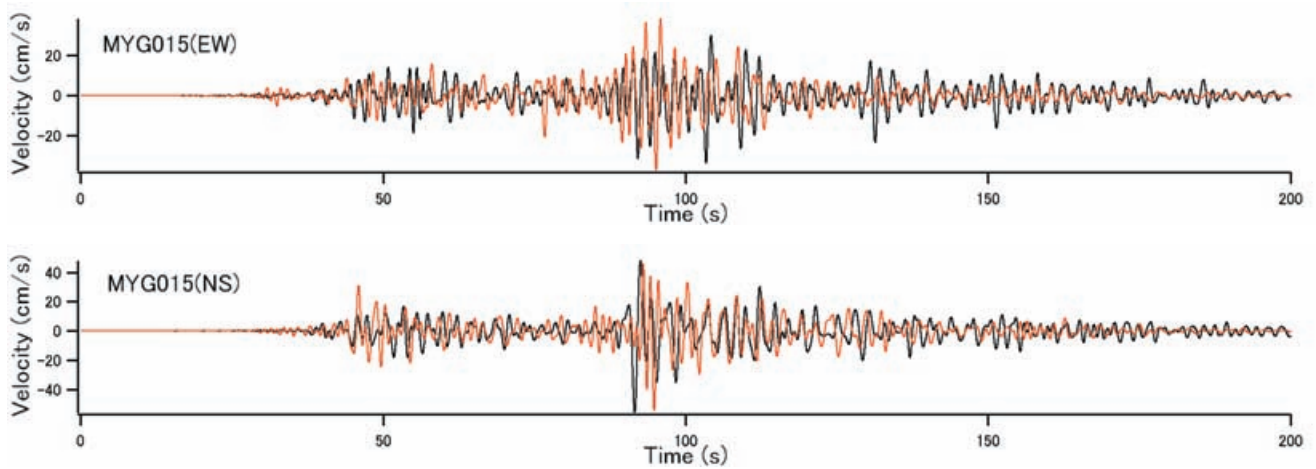


図-15 MYG015 において v_1 と v_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

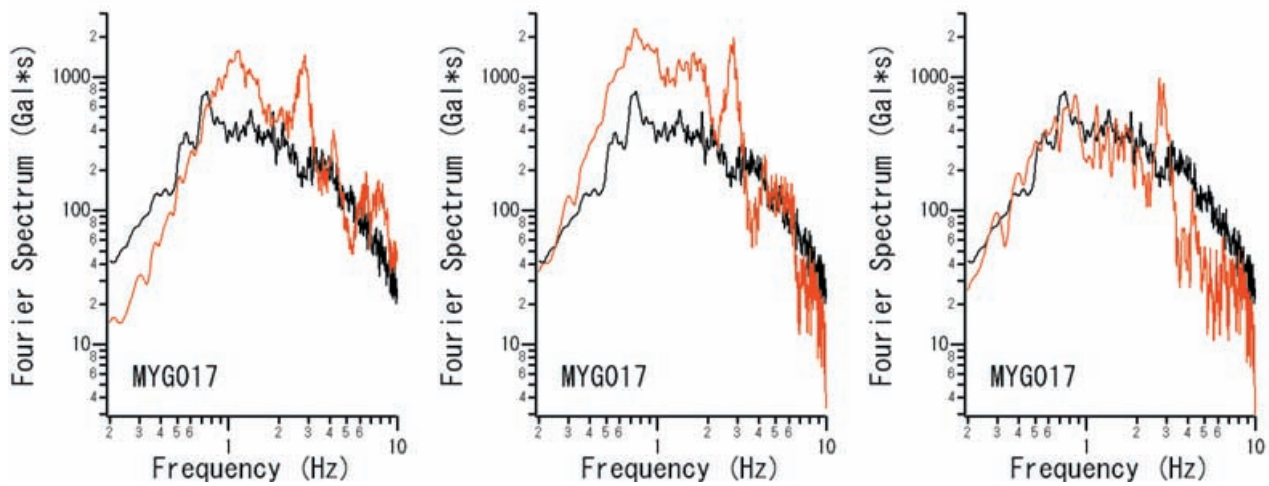


図-16 MYG017 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 ν_1 のみを考慮した場合の計算結果、 ν_1 と ν_2 を考慮した場合の計算結果。

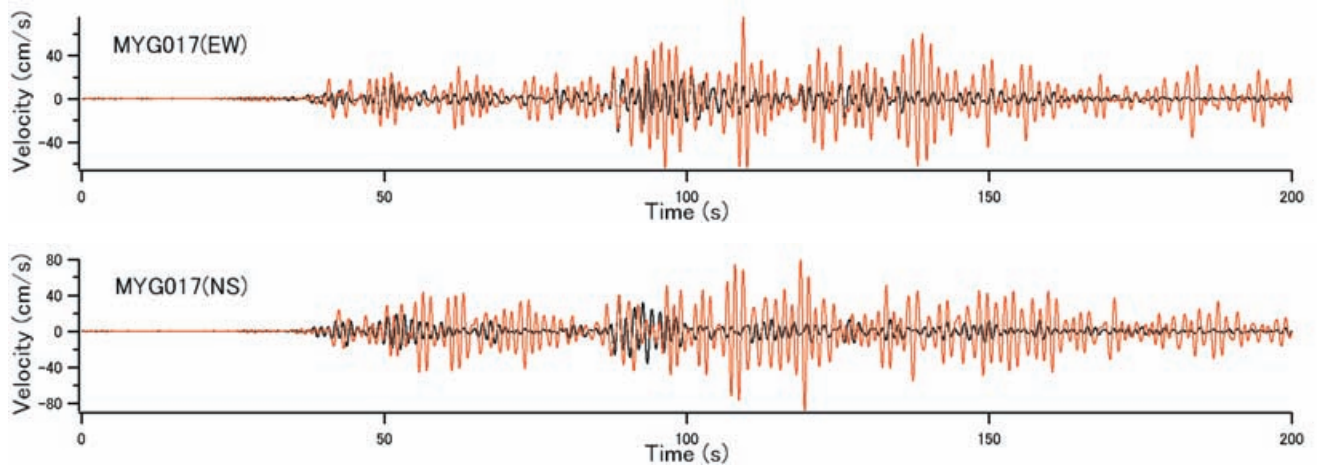


図-17 MYG017 において ν_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測、赤が計算）

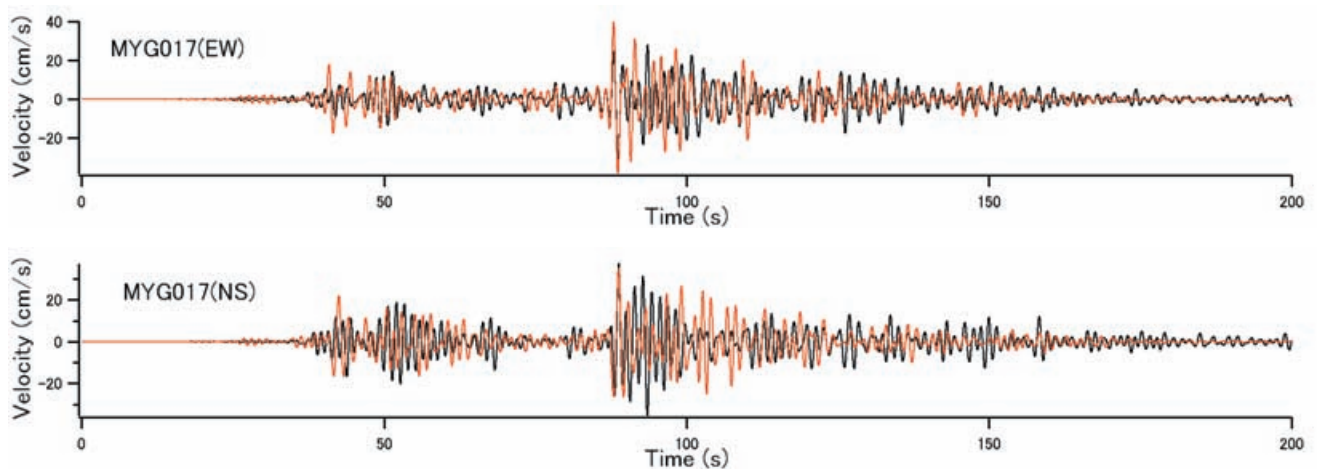


図-18 MYG017 において ν_1 と ν_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測、赤が計算）

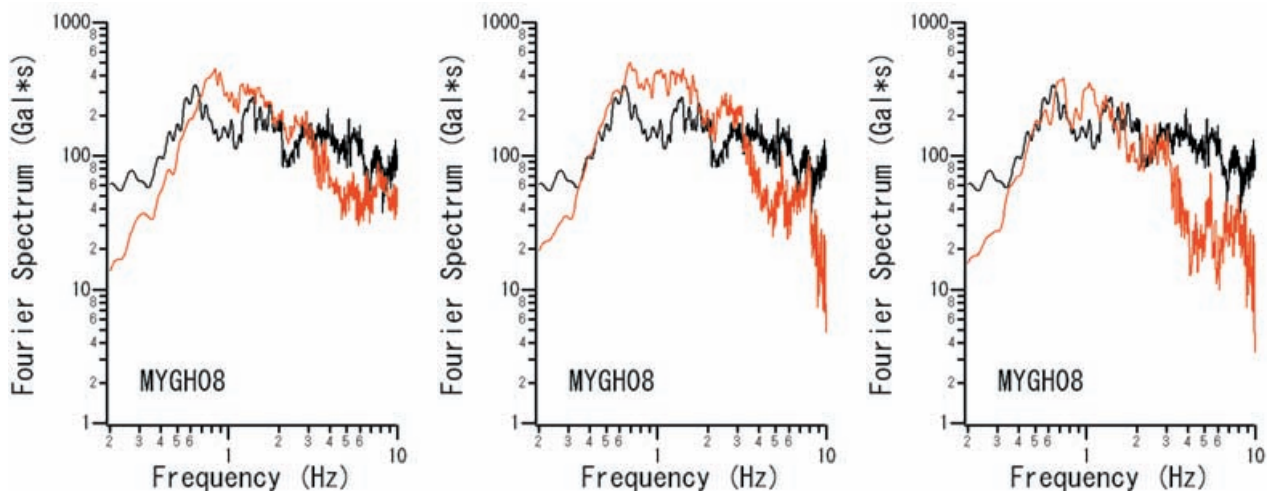


図-19 MYGH08（地表）における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 ν_1 のみを考慮した場合の計算結果、 ν_1 と ν_2 を考慮した場合の計算結果。

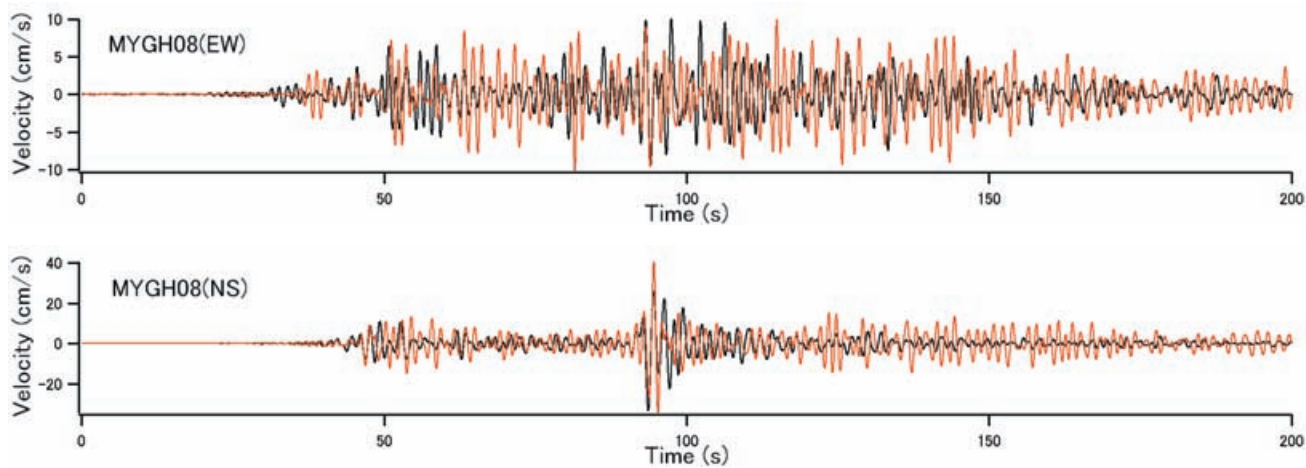


図-20 MYGH08（地表）において ν_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

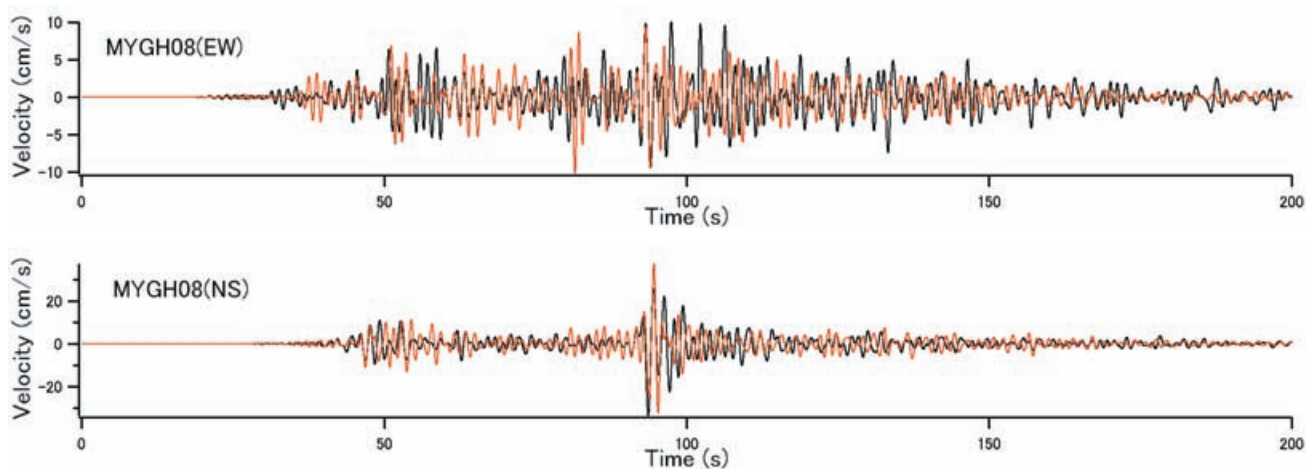


図-21 MYGH08（地表）において ν_1 と ν_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

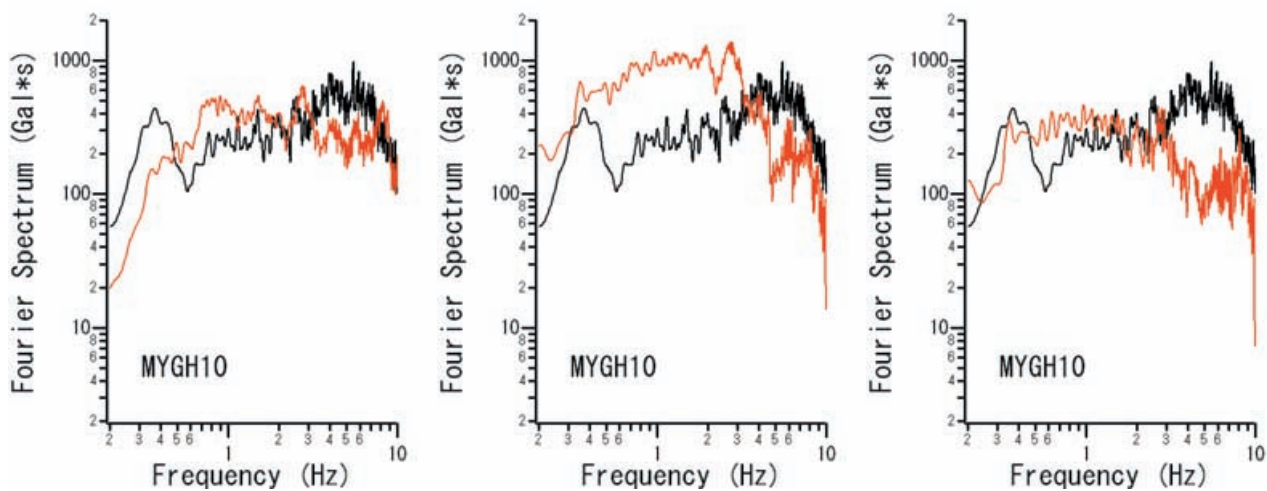


図-22 MYGH10（地表）における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 ν_1 のみを考慮した場合の計算結果、 ν_1 と ν_2 を考慮した場合の計算結果。

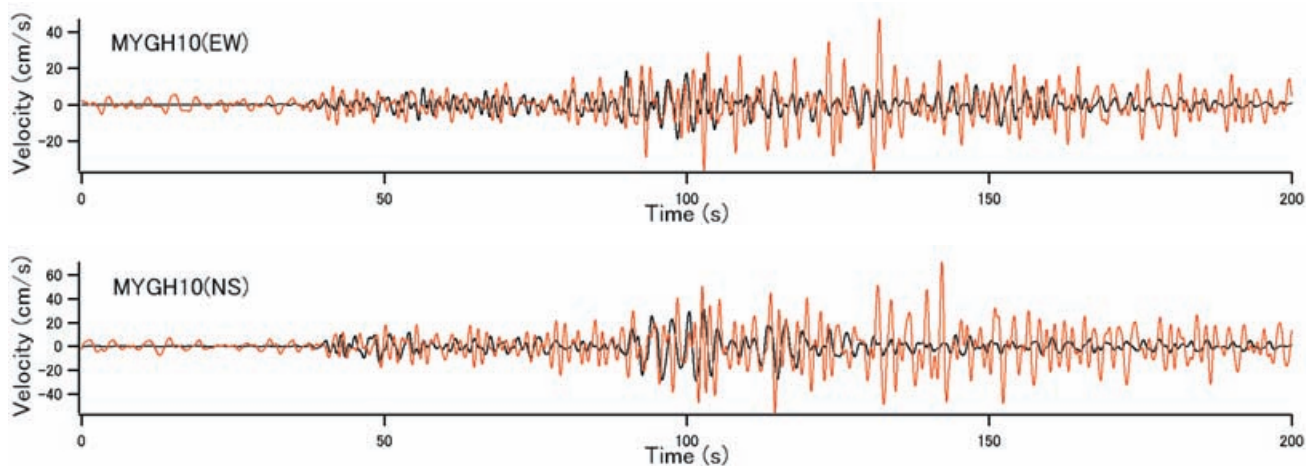


図-23 MYGH10（地表）において ν_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

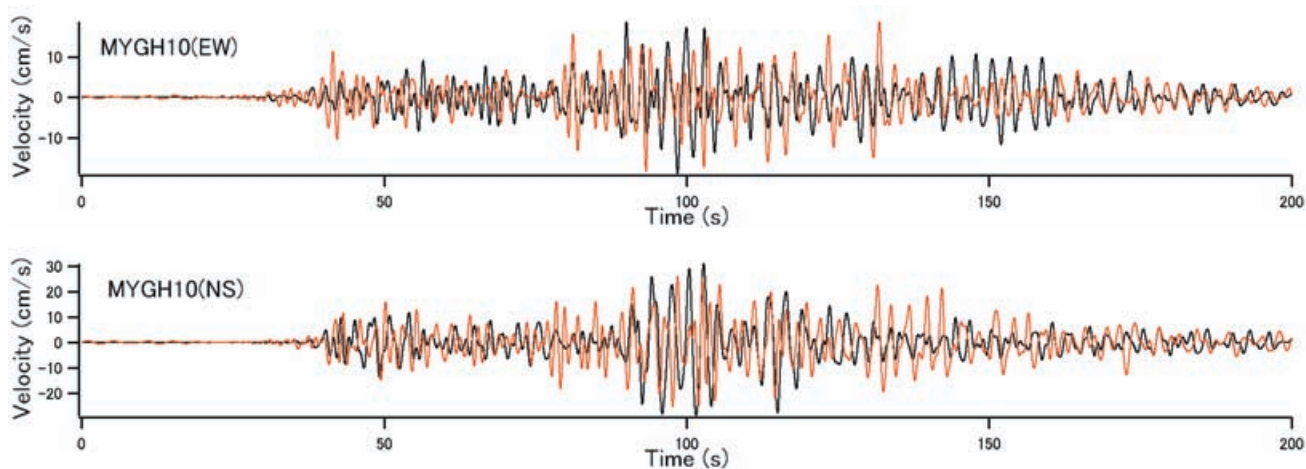


図-24 MYGH10（地表）において ν_1 と ν_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

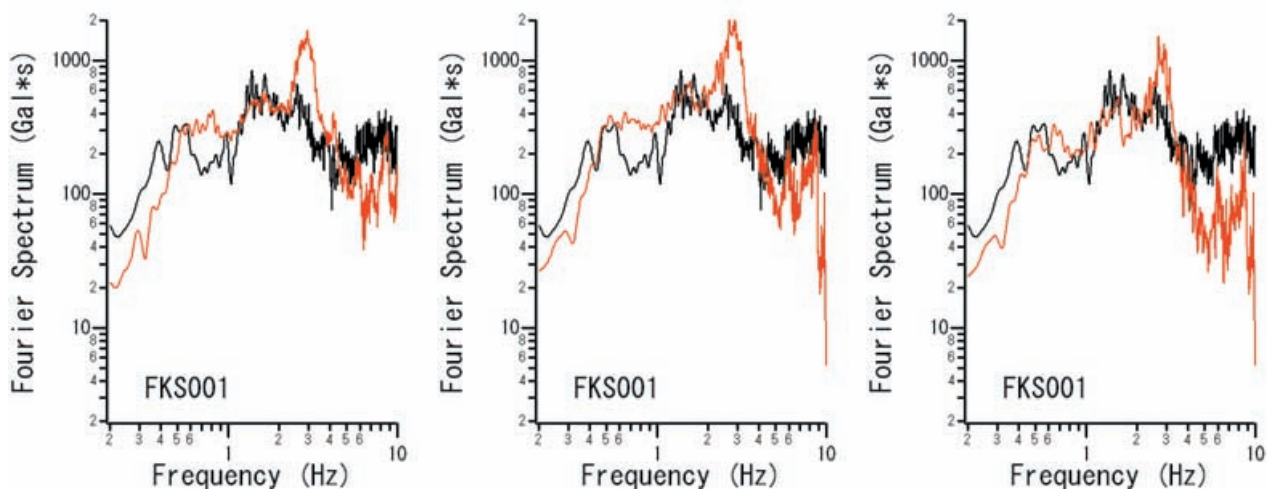


図-25 FKS001 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 v_1 のみを考慮した場合の計算結果、 v_1 と v_2 を考慮した場合の計算結果。

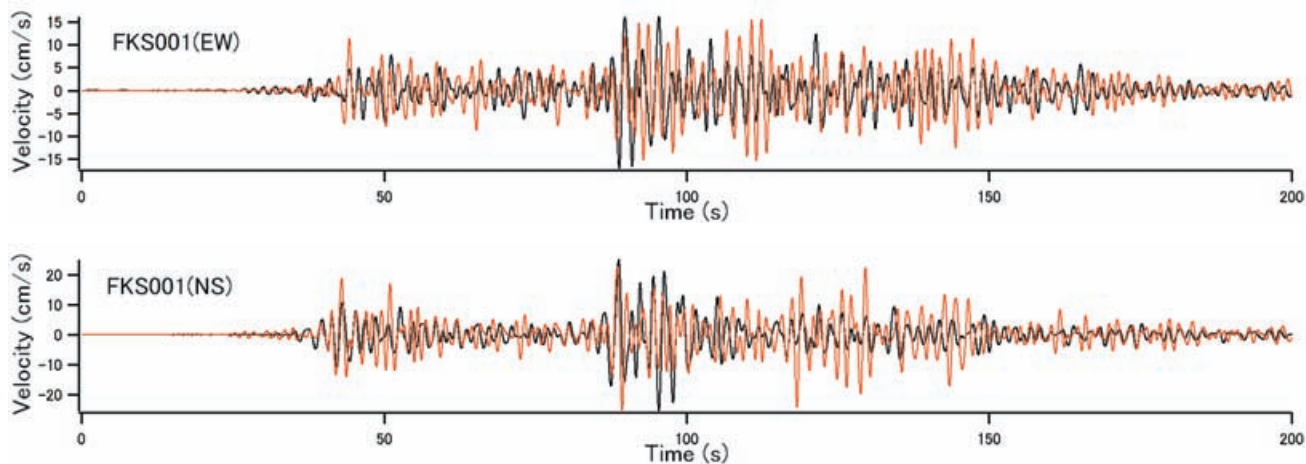


図-26 FKS001 において v_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

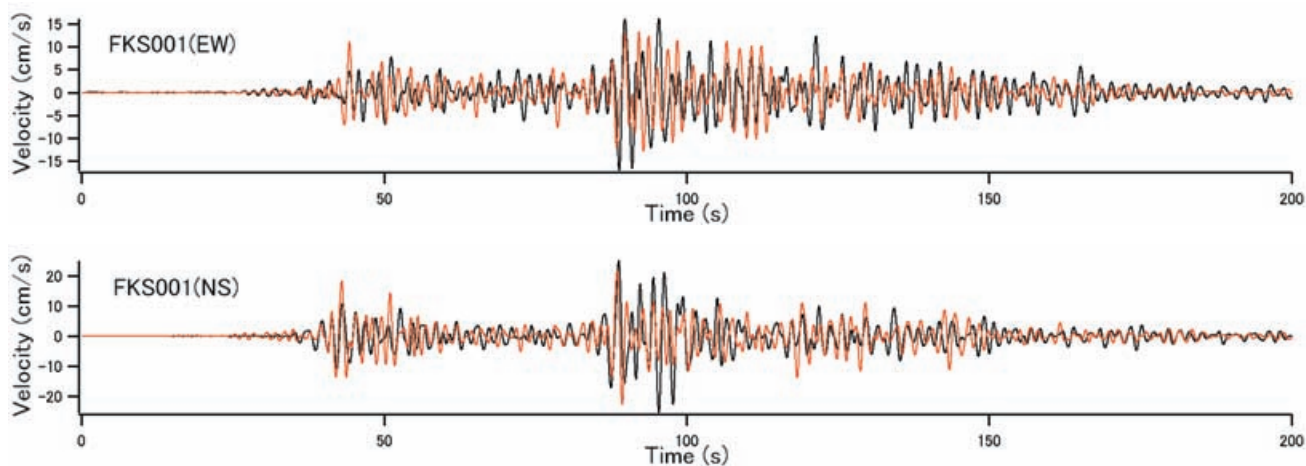


図-27 FKS001 において v_1 と v_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

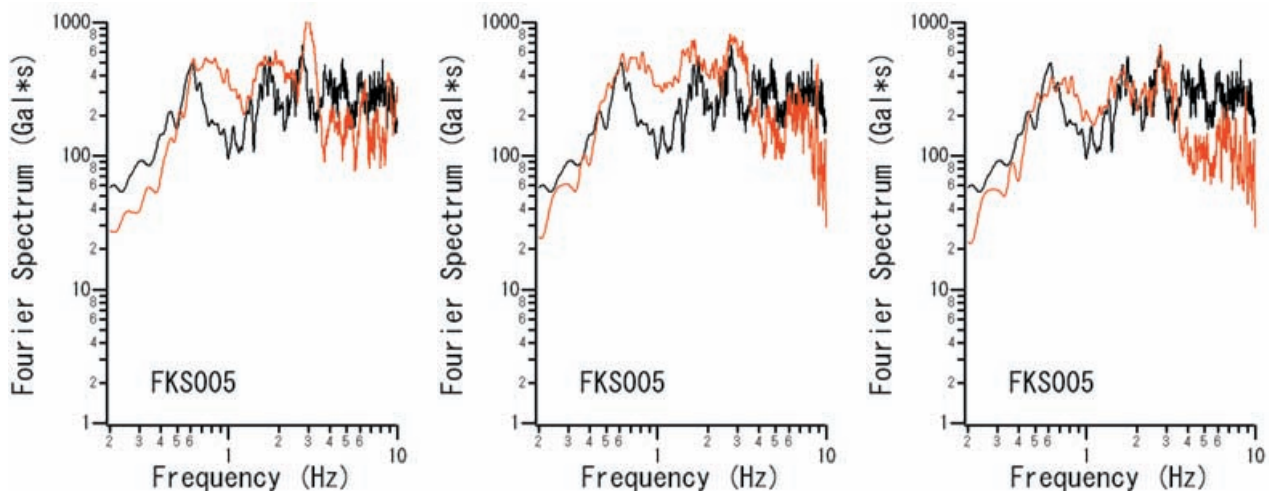


図-28 FKS005 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 v_1 のみを考慮した場合の計算結果、 v_1 と v_2 を考慮した場合の計算結果。

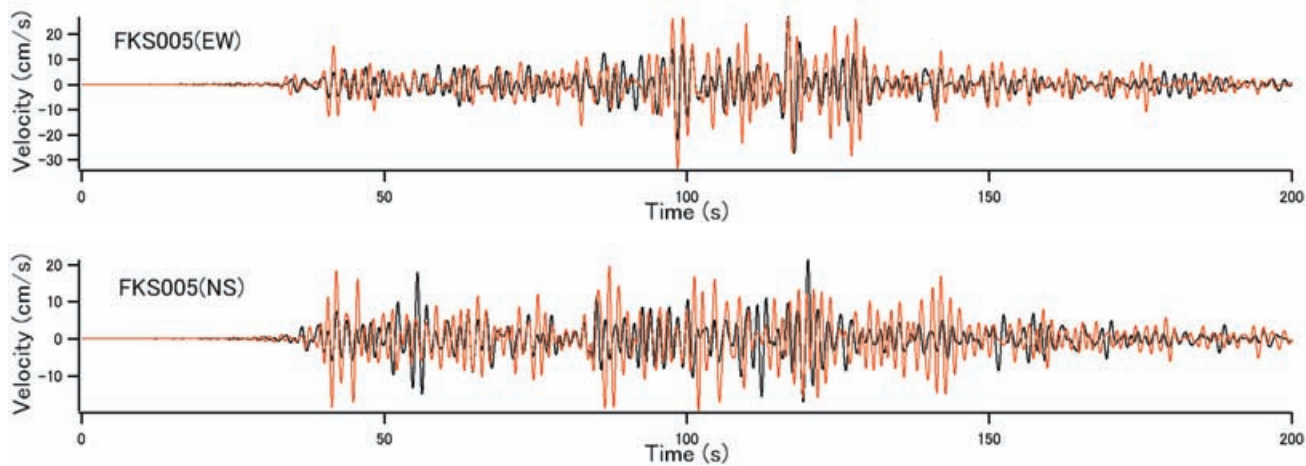


図-29 FKS005 において v_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

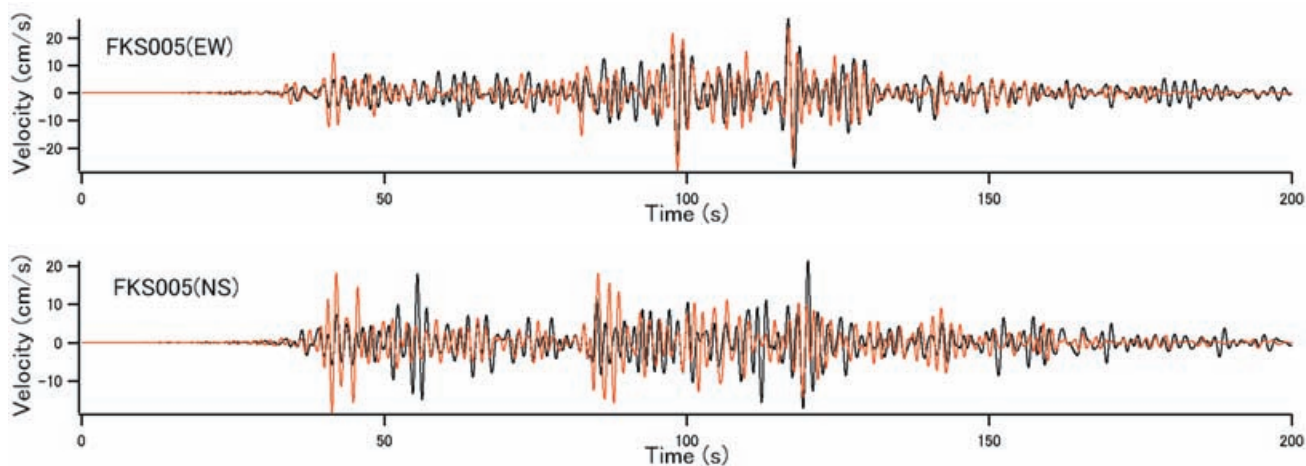


図-30 FKS005 において v_1 と v_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

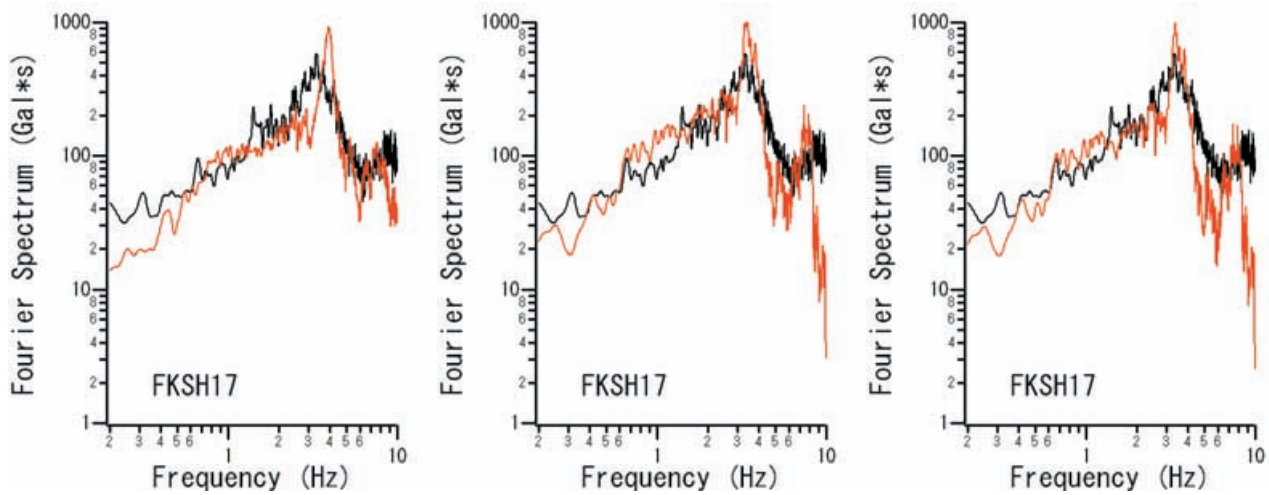


図-31 FKSH17（地表）における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 ν_1 のみを考慮した場合の計算結果、 ν_1 と ν_2 を考慮した場合の計算結果。

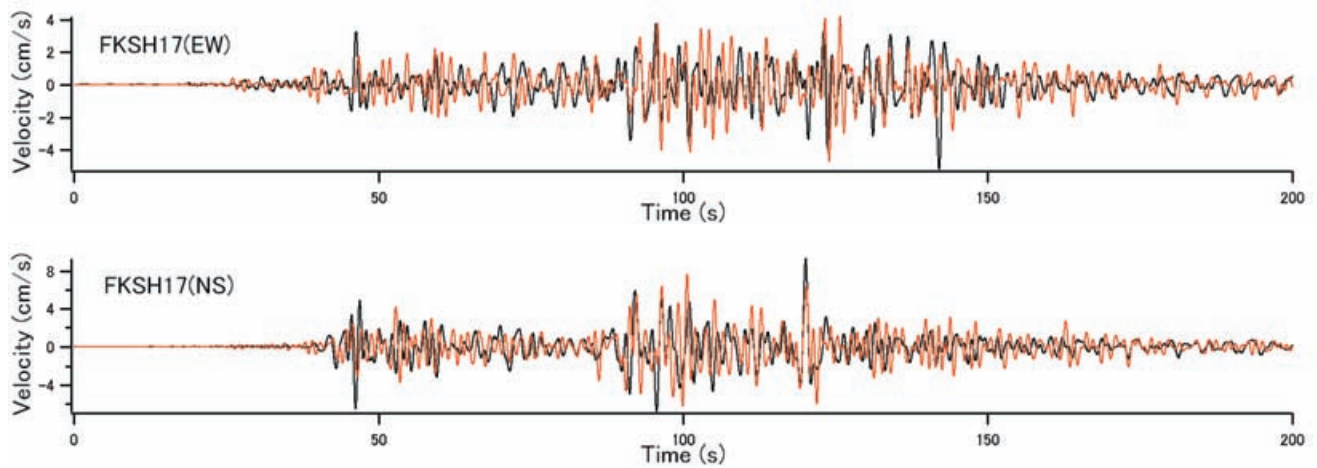


図-32 FKSH17（地表）において ν_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

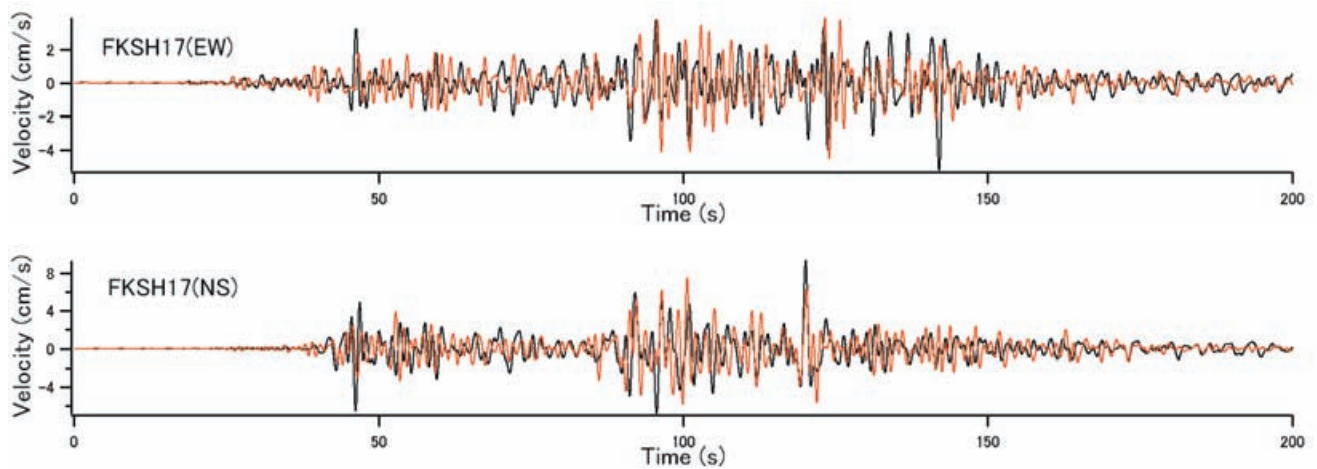


図-33 FKSH17（地表）において ν_1 と ν_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

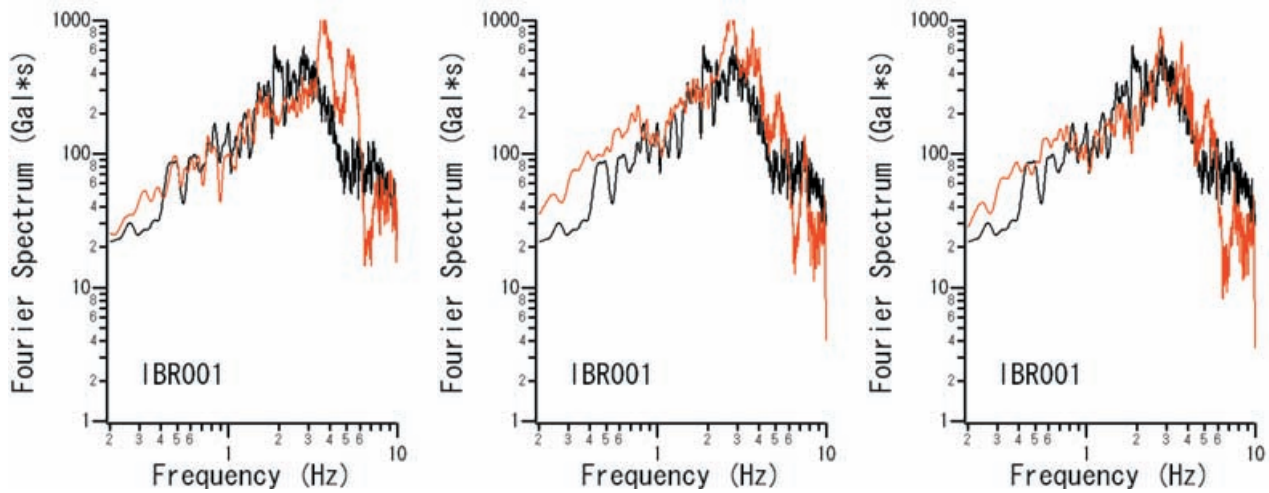


図-34 IBR001 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 v_1 のみを考慮した場合の計算結果、 v_1 と v_2 を考慮した場合の計算結果。

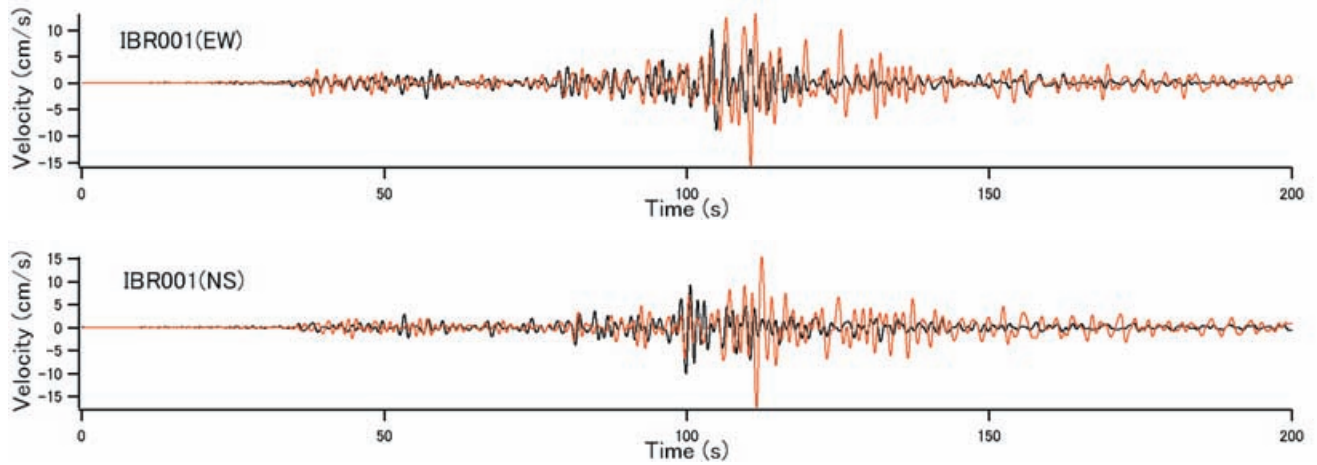


図-35 IBR001 において v_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

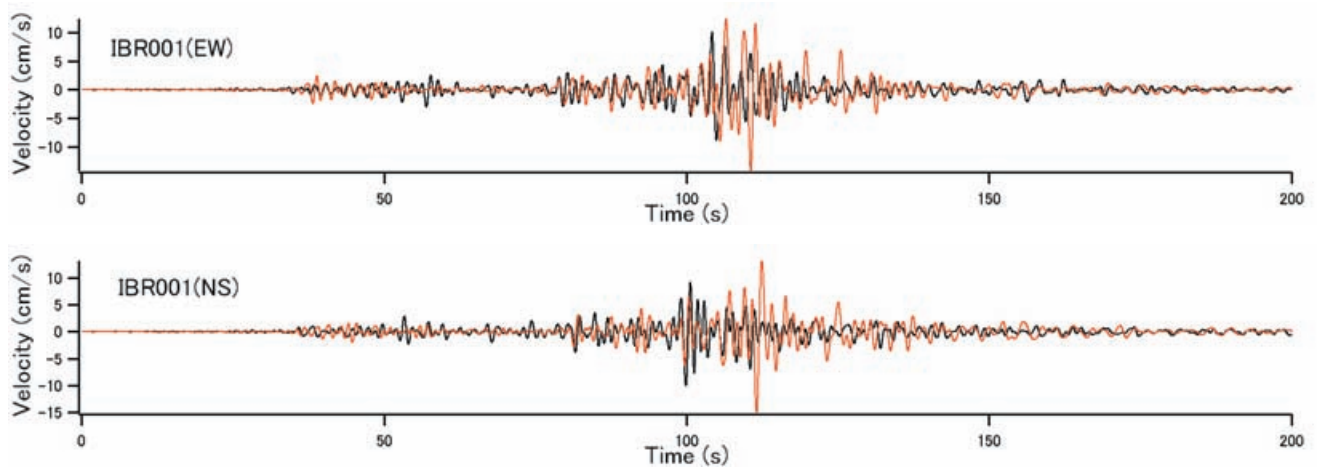


図-36 IBR001 において v_1 と v_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

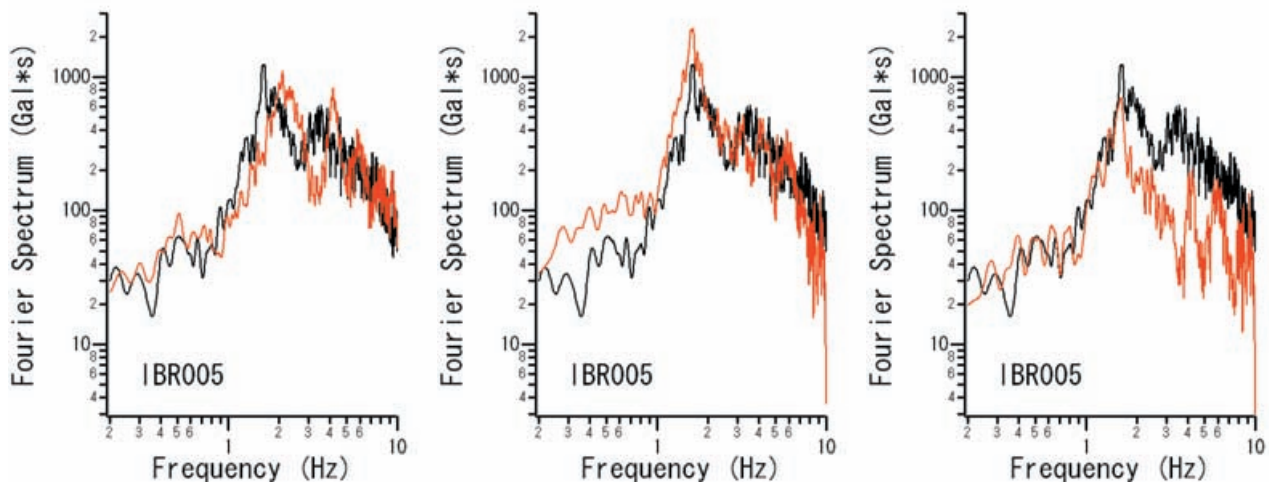


図-37 IBR005 における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 ν_1 のみを考慮した場合の計算結果、 ν_1 と ν_2 を考慮した場合の計算結果。

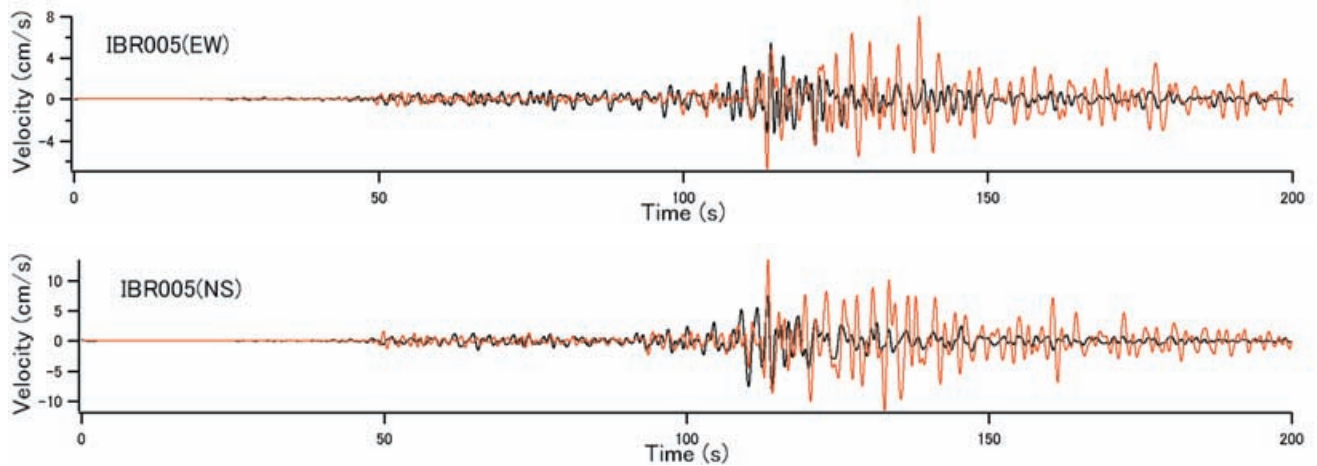


図-38 IBR005 において ν_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

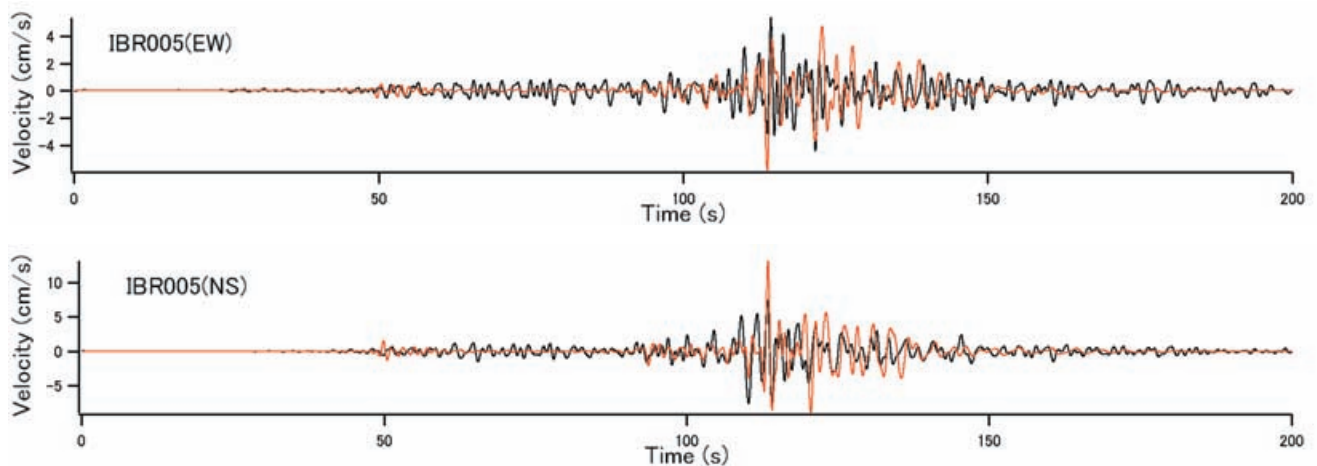


図-39 IBR005 において ν_1 と ν_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

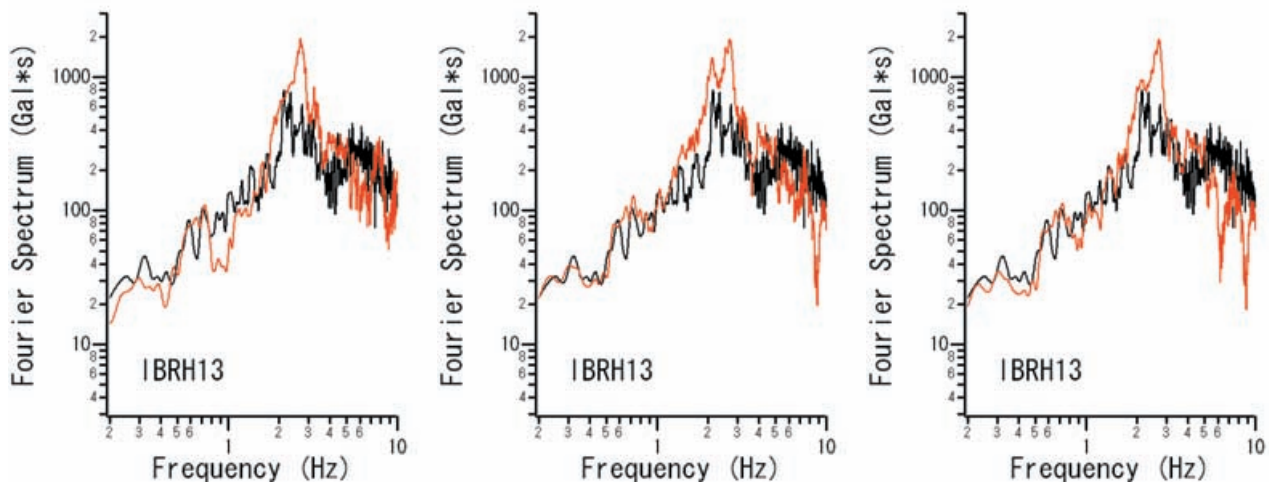


図-40 IBRH13（地表）における観測結果（黒）と計算結果（赤）のフーリエスペクトル。左から順に、線形時の計算結果、 ν_1 のみを考慮した場合の計算結果、 ν_1 と ν_2 を考慮した場合の計算結果。

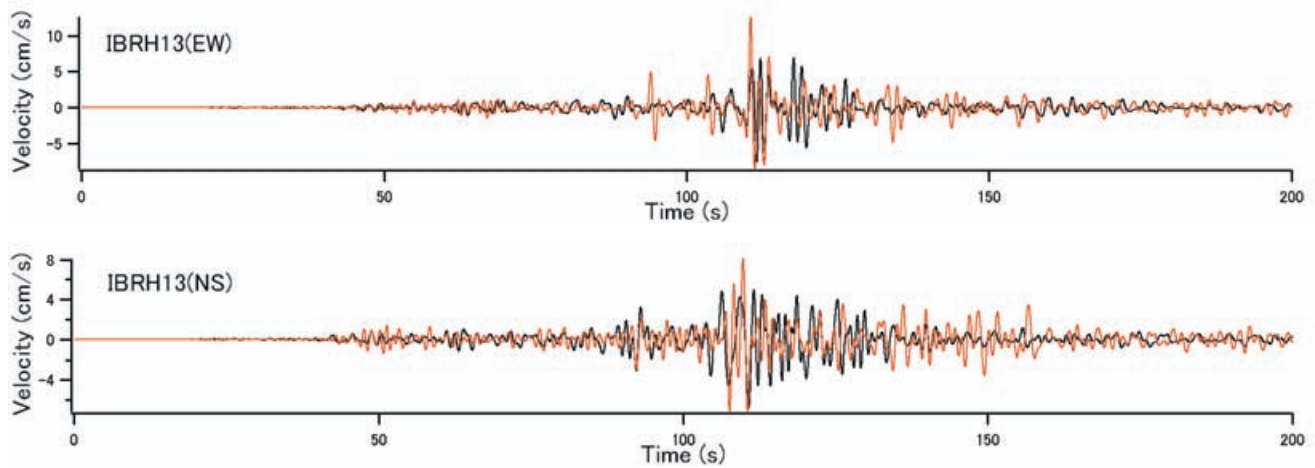


図-41 IBRH13（地表）において ν_1 のみを考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

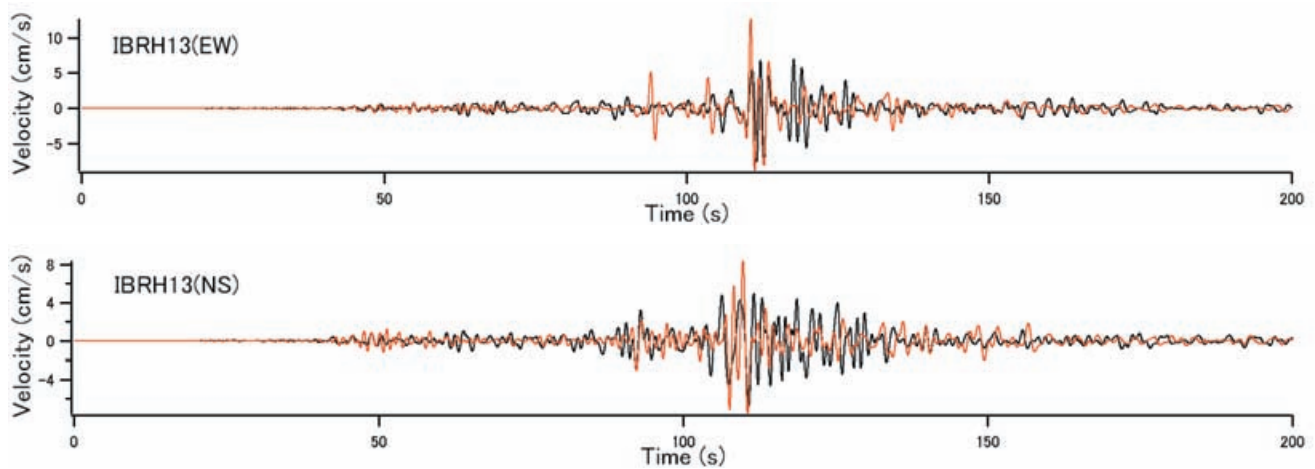


図-42 IBRH13（地表）において ν_1 と ν_2 を考慮した場合の速度波形の比較（黒が観測，赤が計算）

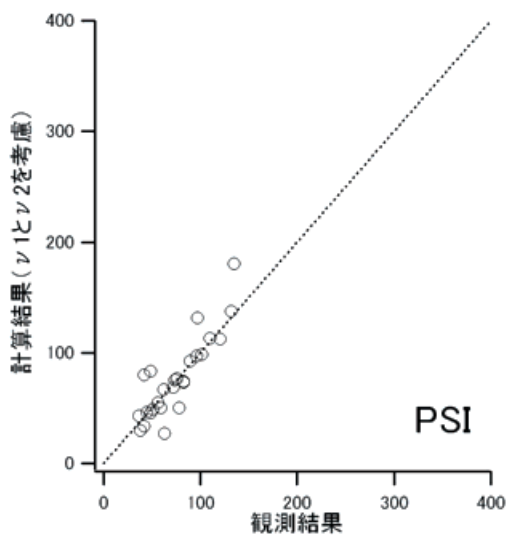
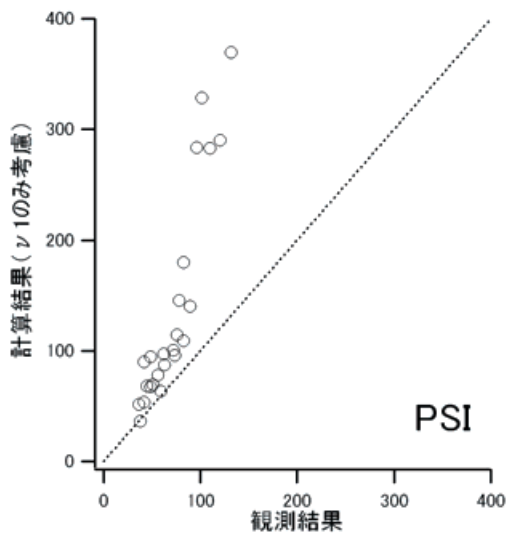
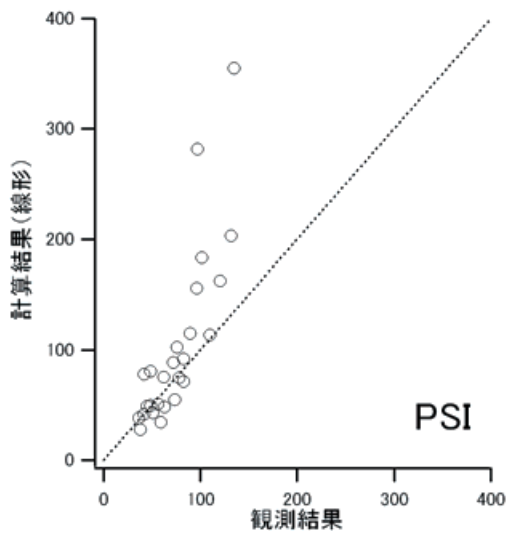


図-43 PSI値の計算結果と観測結果の比較。(上)非線形性を考慮しない場合、(中)ν₁のみを考慮する場合、(下)ν₁とν₂を考慮する場合。

5. 予測問題におけるパラメータ設定方法に関する一検討

前章においては、東北地方太平洋沖地震のデータを用い、非線形パラメータを用いた強震動評価手法(野津・盛川, 2003)の有効性の確認を行ったが、その際、解析に用いた非線形パラメータは、観測記録に適合するものを選択した。過去の地震を対象とする場合にはこのようなパラメータの設定方法が可能であるが、将来の地震を対象とする予測問題においては、非線形パラメータの設定方法を別途考える必要がある。

このうちν₁については、最大速度からν₁を推定するための経験式が若井・野津(2013)により提案されている。これを式(2)に示す。

$$\nu_1 = 1 / (1 + 0.0082 \text{ PGV}) \quad (2)$$

ここにPGVは地動最大速度(cm/s)である。

ν₂については現時点では同様の経験式は提案されていないが、ν₂は地盤の非線形挙動による減衰の増大に関係するパラメータであり、一方、ν₁はS波速度の低下すなわち地盤の剛性の低下に関係するパラメータであるから、それらは互いに無関係ではないと考えられ、ν₁からν₂を決定できる可能性があると考えられる。そこで、第4章の解析に用いたν₁とν₂との関係について検討を行った。その際、速度波形の再現性が良好ではなかったMYG010のデータは除外した。

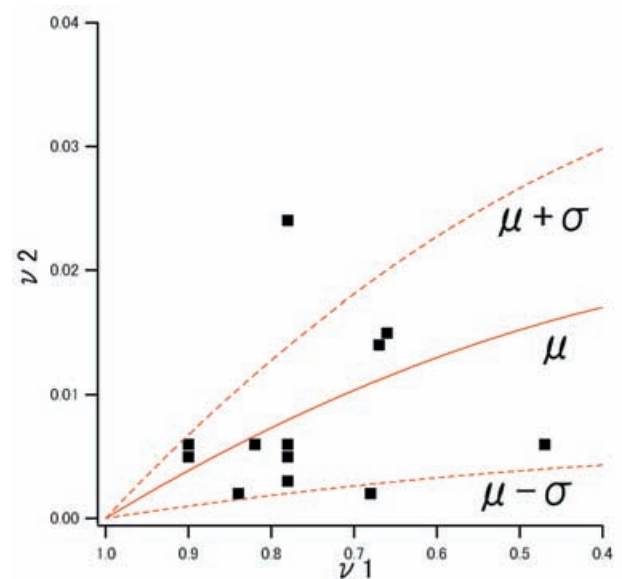


図-44 第4章の解析に用いたν₁とν₂の関係

図-44 に結果を示す。この図からわかるように、 v_1 の減少に伴って v_2 が増加する傾向は認められるが、残念ながら、かなりばらつきが大きい結果となった。このことから、 v_2 の不確実性が予測問題において一つの課題であると言える。ただし、 v_2 に関しては、 v_1 と異なり、小さな値を設定するほど、計算される地震動は安全側となることがわかっている。従って、このことを考慮して、平均的な地震動を設定しようとするケース、あるいは、安全側の地震動を設定しようとするケースなど、場面毎に v_2 の設定方法を使い分けることも考えられるであろう。

ここでは、Hardin-Dreenevich モデル (Hardin and Dreenevich, 1972) における減衰定数の扱いを参考に、 v_1 と v_2 との間に式(3)の関係を仮定した。

$$v_2 = h_{\max} (1 - v_1^2) \quad (3)$$

式(3)で v_1 に自乗がかかっているのは、地盤のせん断剛性は S 波速度の自乗に比例するため、 v_1 の自乗がせん断剛性の低下率となるからである。

式(3)の h_{\max} について、図-44 にプロットしたデータに基づいて平均値を求めると、 $h_{\max} = 0.020$ となった。図-44 の実線は、この平均値に対応した v_1-v_2 関係である。

これらの関係を利用して非線形パラメータを決めようとする場合、非線形パラメータの設定値が地動最大速度の計算結果に依存しているため、繰り返し計算を行うことが必要になる。そこで、地盤の地震応答計算プログラム SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972) などを参考に、繰り返し計算のアルゴリズムを新たに考案した。まず、線形時のパラメータ ($v_1=1$, $v_2=0$) を初期値として強震動シミュレーションを行い、計算結果の地動最大速度を用いて式(2)(3)により非線形パラメータの値を更新し、再び強震動シミュレーションを行う。このプロセスを、新旧の v_1 の誤差が 5%以内となるまで繰り返す。ただし、第 4 章におけるデータの存在範囲から v_1 が小さい領域では信頼性がないため、 v_1 が 0.70 を下回る場合にはそこで繰り返し計算をうち切り、 $v_1=0.70$ でのシミュレーション結果を採用することとした。

この方法を東北地方太平洋沖地震に適用して、第 4 章の 13 地点における地震動を計算し、PSI 値を求め観測結果と比較した結果を図-45 に示す。 h_{\max} は平均値 0.020 としている。この結果を図-43 と比較すると、地点毎に最適なパラメータを選択した場合 (図-43 下) と比較すれば誤差が大きいが、非線形性を考慮しない場合 (図-43 上) と比較すれば誤差が小さくなっている。

ここで、新たなパラメータの導入効果に関して AIC (赤

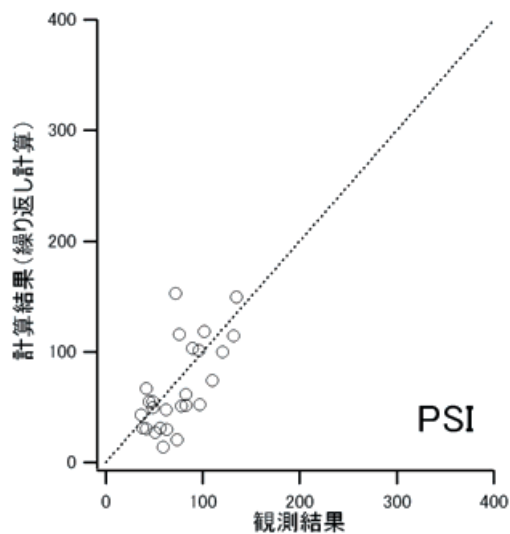


図-45 繰り返し計算で v_1 と v_2 を決めた場合の第 4 章の 13 地点における PSI 値の計算結果と観測結果の比較

池の情報量基準) による評価を試みる。新たに導入されたパラメータは式(2)の分母の 0.0082 および式(3)の h_{\max} の 2 つであると考え、誤差は PSI 値で評価することになると、非線形性を考慮しない場合よりも考慮する場合の方が AIC の値が 35 だけ小さいので、新たなパラメータを導入した効果はあったと評価できる。

以上に述べた予測問題におけるパラメータ設定方法の一つの応用例として、南海トラフの巨大地震を対象とした広域における震度の算定事例を示す。

前報 (野津・若井, 2012b) で報告している通り、著者らは、南海トラフの巨大地震 ($M_w 9.0$) を対象として、SPGA モデルを用い、個々の地点のサイト特性を考慮した強震動評価を行っている。SPGA モデルを用いた強震動評価においては、SPGA の位置の設定が一つの課題である。この点に関して、著者らは、SPGA の位置は事前の予測が困難であるとの立場から、極めて多くのケースについて検討を行い、50%非超過、90%非超過等となる地震動を効率的に計算する手法の開発を行っている。詳細については前報 (野津・若井, 2012b) を参照していただきたい。ここでは、上述の非線形パラメータを考慮した強震動シミュレーション手法を適用して、50%非超過および 90%非超過に対応する地震動を計算し、広域での震度分布を求めることを試みた。その際、式(2)(3)により非線形パラメータの値を設定した。 h_{\max} は平均値 0.020 とした。

図-46 および図-47 に、この方法で計算した 50%非超過および 90%非超過に対応する各地の震度を、内閣府の南海トラフの巨大地震モデル検討会 (2012) による震度 (強震

波形 4 ケースと経験的手法の震度の最大値) と比較して示す. 内閣府の予測震度は地点毎のサイト特性を詳細に反映したものではないため, 個々の地点では, 内閣府の予測震度とサイト特性を考慮して計算した地震動の震度は一致しないが, 広域における震度の傾向は比較が可能である. そのような観点で比較を行うと, 全体として, SPGA モデルによる 50%非超過の地震動は南海トラフの巨大地震モデル検討会による予測震度と概ね調和的な震度となっていること, 90%非超過の地震動はそれよりはるかに大きい震度となっていることがわかる.

6. まとめと今後の課題

本研究では, 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に取得された強震記録, および, 著者らが開発した震源モデルを活用して, 表層地盤の非線形挙動を考慮した強震動シミュレーションを行い, その有効性の確認を行った. 具体的には, 東北地方太平洋沖地震の際に得られた強震記録のうち, 表層地盤の非線形挙動の影響が明確に表れているものに着目し, 上述の震源モデル, および, 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を用いた強震動評価を行った. その際, 表層地盤の非線形挙動の影響を, 非線形パラメータを用いる方法により考慮した. この方法は, 堆積層における平均的な S 波速度の低下率を表すパラメータ (v_1) および堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメータ (v_2) を用いる方法である.

検討の結果, いずれの地点においても, 非線形パラメータを考慮することにより観測波形の再現精度が向上し, 非線形パラメータを考慮した強震動シミュレーションの有効性を確認することができた.

さらに, この結果に基づき, 予測問題におけるパラメータ設定方法についても検討を行った.

今後の課題としては, 内陸地殻内地震のデータ, スラブ内地震のデータなども活用し, 非線形パラメータの設定方法について総合的にとりまとめていくことが必要である.

(2013 年 11 月 8 日受付)

謝辞

本研究を実施するにあたり, (独) 防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の強震記録を利用しました. 感謝の意を表します.

参考文献

池田隆明・小長井一男・釜江克宏・入倉孝次郎・清田隆・

目黒公郎 (2013): 広域的な地震動評価のための地盤の非線形性の簡易補正方法, 土木学会第33回地震工学研究発表会講演論文集, 1-490.

石原研而 (1982): 土質動力学の基礎, 鹿島出版会.

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, No.556, pp.15-24.

地震調査研究推進本部 (2002): 宮城県沖地震を想定した強震動評価手法について, http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/02oct_miyagi1/index.htm.

地震調査研究推進本部 (2005): 宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)について, http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05dec_miyagi/index.htm.

中央防災会議事務局 (2001): 東海地震に関する専門調査会(第11回)とりまとめ資料.

南海トラフの巨大地震モデル検討会 (2012): 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)強震断層モデル編, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/2012_0829_2nd_report05.pdf.

野津厚 (2012): 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.

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・若井淳 (2012a): 強震動を対象とした2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル, 港湾空港技術研究所報告, Vol.51, No.1, pp.23-53.

野津厚・若井淳 (2012b): 南海トラフの地震 ($M_w9.0$) を対象とした強震動評価へのSPGAモデルの適用, 港湾空港技術研究所資料, No.1271.

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, Vol. 12, No. 4 (特集号), pp. 209-228.
- 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.
- 若井淳・野津厚 (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, 港湾空港技術研究所資料, No.1272.
- Boore, D.M. (1983): Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894.
- Hardin, B.O. and Drenevich, V.P. (1972): Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Proc. of the American Society of Civil Engineers, Vol.98, No.SM7, pp.667-692.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992): Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15.
- Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, 7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.151-156.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972): SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, Col. of Eng., University of California at Berkeley.
- Yoshida, N. and Iai, S. (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.

港湾空港技術研究所資料 No.1284

2014.3

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 株式会社シーケン

Copyright © (2014) 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。



古紙配合率70%再生紙を使用しています