

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.42    NO.1    March 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 卷 第 1 号 (Vol. 42, No. 1), 2003 年 3 月 (March 2003)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 透水層埋設による海浜安定化工法の開発  
…柳嶋 慎一・佐藤 勝弘・原 隆・齋藤 正文・岩佐 直人・堀 謙吾・長谷川 巖  
長谷川 準三 ..... 1  
(Development of Beach Stabilization by Gravity Drainage System  
… Shin-ichi YANAGISHIMA, Katsuhiko SATO, Takashi HARA, Masafumi SAITO, Naoto IWASA, Kengo HORI  
Iwao HASEGAWA, Junzo HASEGAWA)
2. 沿岸域の高粘度油高濃度回収システムの研究開発  
..... 吉江 宗生・佐藤 栄治・白井 一洋 ..... 115  
(Study and development of oil recovery system at the site of coastal shallow water with a skimmer and hoses for  
special high viscous oil  
..... Muneo YOSHIE, Eiji SATO, Kazuhiro SHIRAI)
3. 半経験的な強震動予測手法の改良に関する提案  
..... 野津 厚・深澤 清尊・佐藤 陽子・菅野 高弘 ..... 139  
(Modification of the Empirical Green's Function Method  
..... Atsushi NOZU, Kiyotaka FUKAZAWA, Yoko SATO, Takahiro SUGANO)
4. サクション基礎構造物の安定性に関する模型実験  
..... 山崎 浩之・森川 嘉之・小池 二三勝・出野 雅和・矢沢 岳 ..... 167  
(Model Tests of Suction Foundations for Stability  
..... Hiroyuki YAMAZAKI, Yoshiyuki MORIKAWA, Fumikatsu KOIKE, Masakazu IDENO, Gaku YAZAWA)

## 半経験的な強震動予測手法の改良に関する提案

野津 厚\*  
深澤 清尊\*\*  
佐藤 陽子\*\*\*  
菅野 高弘\*\*\*\*

### 要 旨

従来より強震動予測の分野で用いられてきた経験的グリーン関数法に対し、大地震の滑り速度時間関数をより適切にモデル化できるようにすることと、媒質の非線形挙動の影響をより適切に反映できるようにすることの二点を念頭において改良を試みた。

経験的グリーン関数法に用いる滑り速度時間関数の補正関数については、従来のもの（入倉他、1997）をより一般化した式を提案した。提案式は、振幅スペクトルの  $1/T$  (Hz) での落ち込み防止という入倉他（1997）の補正関数の利点をそのまま引き継いでいるだけでなく、大地震の滑り始めの急激さを表現するパラメタ  $\alpha$  を含むので、動力学モデルへのフィッティングという点ではより好都合である。提案式から計算される大地震の滑り速度時間関数を中村・宮武（2000）の滑り速度時間関数にフィッティングさせることを試みたところ、 $\alpha$  の最適値は断層幅  $w$ 、 $f_{max}$  および大地震と小地震の立ち上がり時間の比  $N$  の影響を受けることがわかった。ただし、いずれのケースにおいても、 $\alpha$  の最適値は 0.51 ~ 1.58 の範囲に収まった。

一方、媒質の非線形挙動の取り扱いについては、経験的グリーン関数法において多重非線形効果を考慮するためのパラメタ  $\nu_1$  と  $\nu_2$  を新たに定義し、その物理的意味について述べるとともに、2000年鳥取県西部地震および1995年兵庫県南部地震への適用事例を示した。提案するパラメタは、簡易なものであるにも関わらず、非線形性の影響を受けたサイトでの本震地動の合成結果を著しく改善するものである。

キーワード：経験的グリーン関数法、滑り速度時間関数、多重非線形効果、2000年鳥取県西部地震、1995年兵庫県南部地震

\* 地盤・構造部 主任研究官

\*\* 地盤・構造部 構造振動研究室

\*\*\* 科学技術振興事業団重点研究支援協力員

\*\*\*\* 地盤・構造部 構造振動研究室長

〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：0468-44-5058 Fax: 0468-44-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

## Modification of the Empirical Green's Function Method

Atsushi NOZU\*  
Kiyotaka FUKAZAWA\*\*  
Yoko SATO\*\*\*  
Takahiro SUGANO\*\*\*\*

### Synopsis

Two proposals have been made to improve the empirical Green's function method. The first proposal concerns modeling the initial part of the slip velocity time function of a large event. The second proposal concerns modeling soil nonlinearity.

A new correction function for the slip velocity is proposed, with a new parameter  $\alpha$  representing the abruptness of the initial part of the slip of a large event. The correction function has a preferable spectral characteristic and is more versatile in representing the initial part of the slip velocity time function of a large event. By means of fitting the slip function obtained with this correction function to Nakamura and Miyatake's (2000) slip function, it is found that the best  $\alpha$  value is affected by parameters such as  $w$ , the width of the fault,  $f_{max}$ , and  $N$ . For all cases considered, the best  $\alpha$  value ranges between 0.51-1.51.

On the other hand, when the empirical Green's function method is applied to seismograms recorded at a site which is located on soft soil layers, it is necessary to take into account the nonlinear behavior of the soft soil layers. In practice, it has often been assumed that the seismic wave is affected by soil nonlinearity only after its incidence to the local soft soil layers. If we consider a seismic ray connecting the source and the site, however, it might be true that the ray crosses the soft soil layers several times. Therefore, it is reasonable to assume that the seismic wave is affected by soil nonlinearity several times during the transmission from the source to the receiver. This potential phenomena is referred to as "multiple nonlinear effects" in this article. Taking into account these effects in the empirical Green's function method, the authors propose new parameters  $\nu_1$  and  $\nu_2$ , which represent the deviation of material properties of the sediments due to soil nonlinearity from linear status and which are used to modify Green's functions. The parameters are applied to the simulation of the 2000 Tottori-ken Seibu and the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake ground motions. It is found that, although the new parameters are quite simple, they greatly contribute to the improvement of the simulation results.

**Key Words:** The empirical Green's function method. Slip velocity time function, Multiple nonlinear effects.  
The 2000 Tottoriken-seibu Earthquake. The 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake.

---

\*Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Member of Structural Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\*\*Technological Supporting Staff of Priority Research, Japan Science and Technology Corporation

\*\*\*\* Head, Structural Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka 239-0826, Japan

Phone: +81-468-44-5058 Fax: +81-468-44-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	139
1. 序 論 .....	143
2. 滑り速度時間関数の補正関数の一般化 .....	146
2.1 提案式 .....	146
2.2 動力学モデルへのフィッティング .....	147
2.3 フィッティングの結果 .....	148
3. 多重非線形効果の取り扱い .....	150
3.1 2000 年鳥取県西部地震の境港市の地震動に見られる地盤の非線形性の影響 .....	150
3.2 非線形パラメタの導入とその物理的意味 .....	155
3.3 2000 年鳥取県西部地震への適用 .....	156
3.4 1995 年兵庫県南部地震への適用 .....	157
3.5 非線形パラメタの相互比較 .....	160
4. 結 論 .....	161
5. あとがき .....	161
謝 辞 .....	161
参考文献 .....	162
記号表 .....	164
付録 既存の手法における非線形性の取り扱い .....	165

## 1. 序論

一般に、ある場所での地震動（地震の揺れ）の性質は、その地震を引き起こした震源の性質（震源特性）、震源から基盤に至るまでの伝播経路の性質（伝播経路特性）、基盤から地表に至る地盤の性質（サイト特性）の三者によって決まるとされている（図-1）。土木構造物の耐震性評価（新規構造物の耐震設計や既存構造物の耐震性評価）を行う場合には、建設地点（以下、サイトという）の周辺で想定される地震の震源特性に加え、伝播経路特性とサイト特性を考慮してサイトにおける強震動を評価し、これに基づいて耐震性の評価を行うことが望ましいと言える（例えば土木学会，2000）。

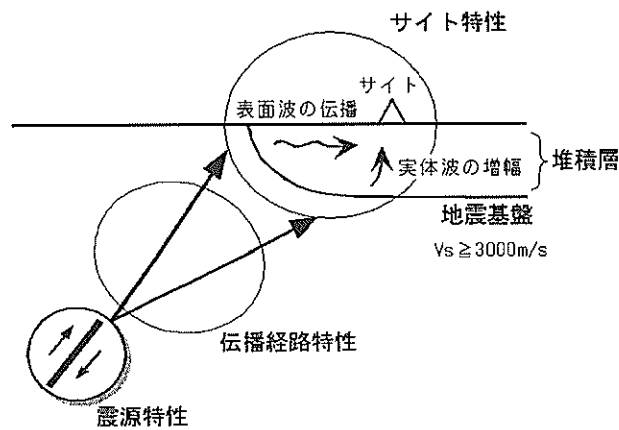


図-1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

現在、様々な強震動評価手法が提案されており、それらは理論的手法、半経験的手法および経験的手法の三者に分類されることが多い（例えば理論地震動研究会，1994）。このうち理論的手法は、震源からサイトに至るまでの媒質を弾性体としてモデル化し、弾性波動論に基づいてサイトにおける地震動を評価する方法である。半経験的手法のうち経験的グリーン関数法は、発震機構や伝播経路を大地震と共有する中小地震の観測波形をグリーン関数とみなし、これを重ね合わせて大地震の波形を合成する方法である（Irikura, 1986; Takemura and Ikeura, 1988; Dan et al., 1989）。このとき用いるべき適切な中小地震記録が存在しない場合に、中小地震記録を人工的に作成してこれを重ね合わせる方法（統計的グリーン関数法，釜江他，1991）が提案されているが、これも半経験的手法に分類される場合がある。経験的手法は、最大加速度や応答スペクトルに関する距離減衰式を用いる方法である。この他、地震動の長周期成分を理論的手法で計

算し、短周期成分を半経験的手法や経験的手法で計算して重ね合わせる広帯域ハイブリッド法がある（例えば Kamae et al., 1998）。強震動評価手法の分類を表-1に示す。この中で、半経験的手法に属する経験的グリーン関数法について改良を試みた結果について述べたものが本資料である。なお、以下の各章では「経験的グリーン関数法」の用語を用いるが、同様の改良は統計的グリーン関数法にも適用することができる。

経験的グリーン関数法は、Hartzell (1978) により提案され、Irikura (1983), Irikura (1986), Takemura and Ikeura (1988), Dan et al. (1989), 入倉他 (1997) 等により改良がなされてきたものである。

経験的グリーン関数法では、まず、大地震の震源を多くの要素に分割する（図-2）。このとき、各々の要素で発生しサイト（▼で示した）で観測される地震動をなんらかの方法で評価できれば、これをすべての要素について重ね合わせるにより、大地震によるサイトでの地震動を評価することができる。ところで、各々の要素で発生しサイトで観測される地震動を評価するためには、本来、震源からサイトに至る媒質の情報（弾性波速度、密度、Q値）が必要である。この種の情報は現在積極的に収集が図られているとは言え（例えば科学技術庁，2000）、信頼性の高い情報が3次元的に得られている地域は限られているのが現状である。経験的グリーン関数法は、この難点を回避できる巧妙な方法である。すなわち、将来発生するであろう大地震と発震機構や伝播経路の似ている中小地震の記録がサイトで得られている場合に、これを利用して、大地震の各要素からの地震波を評価する方法である。中小地震の記録には、震源からサイトに至る媒質の影響が自然な形で含まれているので、それらを陽な形で考慮しなくても、媒質の影響を反映した地震動評価が可能である。経験的グリーン関数法には種々のものがあるが、例えば現在標準的な手法の一つである入倉他 (1997) では次のような計算を行う。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r_i / r_{ij}) \cdot f(t) * (Cu(t - t_{ij})) \quad (1)$$

$$f(t) = \delta(t) + \left\{ 1 / n' / (1 - e^{-1}) \right\} \\ \times \sum_{k=1}^{(N-1)n'} [e^{-(k-1)/(N-1)/n'} \\ \cdot \delta\{t - (k-1)T / (N-1) / n'\}] \quad (2)$$

$$t_{ij} = (r_{ij} - r_0) / V_s + \xi_{ij} / V_r \quad (3)$$

式(1)において  $U(t)$  は大地震による地震動、 $u(t)$  は小地震による地震動、 $C$  は大地震と小地震の応力降下量の

比,  $f(t)$  は大地震と小地震の滑り速度時間関数の違いを補正するための関数で式 (2) で定義されるもの,  $r$  は小地震の震源からサイトまでの距離 (図-2),  $r_{ij}$  は  $ij$  要素からサイトまでの距離 (図-2),  $N$  は大地震と小地震の断層長さの比である. 式 (2) において  $T$  は大地震の立ち上がり時間 (ライズタイム),  $n$  は波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための任意の整数, 式 (3) において  $r_0$  は大地震の破壊開始点からサイトまでの距離 (図-2),  $\xi_{ij}$  は破壊開始点から  $ij$  要素までの距離,  $V_s$  は基盤の S 波速度,  $V_f$  は破壊伝播速度である.

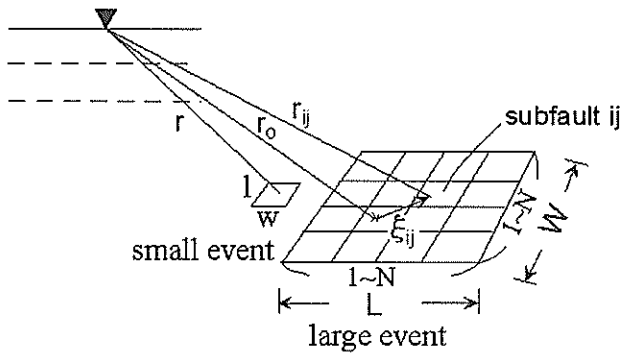


図-2 経験的グリーン関数法

さて, 式 (2) で定義された補正関数  $f(t)$  はデルタ関数  $\delta(t)$  と指数関数  $\exp(-t/T)$  を組み合わせた形状である ( $T$  は大地震の立ち上がり時間). この補正関数は, フーリエ変換が容易であること, 合成波の振幅スペクトルの  $1/T$  (Hz) での落ち込みを防止できること, それ以前に用いられていた補正関数 (Irikura, 1986) よりも合成後の大地震の滑り速度時間関数が動力学モデルの滑り速度時間関数に近いことなど優れた特性を有している (入倉他, 1997; 三宅他, 1999). しかし, 動力学モデルへのフィッティングという観点から見たとき, 式 (2) で計算される大地震の滑り始めの急激さが最適のものであるかどうかは不明である. 震源近傍の強震動評価には最大滑り速度が重要であるとも指摘されており (松島・川瀬, 2000), 滑り速度時間関数の滑り始めの急激さを適切にモデル化することは重要であると考えられる. そこで, 本研究では大地震の滑り速度時間関数の滑り始めの急激さを規定するパラメタ  $\alpha$  を含む新たな補正関数を提案する. 提案する補正関数は, 後述するように入倉他 (1997) の補正関数を拡張したものとなっており, 合成波の振幅スペクトルの  $1/T$  (Hz) での落ち込みを防止するという入倉他 (1997) の補正関数の利点を失っていないばかりでなく, 滑り速度時間関数の動力学モデルへの

フィッティングという点ではより好都合である. 以下においては, この  $\alpha$  をコントロールすることにより, 滑り速度時間関数を中村・宮武 (2000) のすべり速度時間関数にフィッティングさせ, 最適な  $\alpha$  の値を求める. 以上が本研究で実施した改良の第一点である.

一方, 式 (1) ~ (3) に示す経験的グリーン関数法では, 大地震時と中小地震時で媒質の性質が異なること, すなわち, 媒質の非線形挙動を無視していることになる. そこで, 経験的グリーン関数法を強震動予測の実務に適用する際, 非線形挙動の生じるような地盤の場合には, 非線形挙動について別途考慮する必要がある (例えば香川他, 1998). この非線形挙動を取り扱う際の従来のアプローチは, サイト直下の堆積層を非線形性を示す浅い部分 (表層地盤) と, それより深い部分 (深層地盤) に区分し, 表層地盤に下方より入射する地震波は地盤の非線形挙動の影響を受けていないと仮定するものであった (例えば大阪府土木部, 1997; 中央防災会議事務局, 2001). その仮定が正しければ, 式 (1) ~ (3) を用いた地表での合成結果から, 表層地盤に下方より入射する地震波を逆算で求め, これを入力して表層地盤の非線形の地震応答計算を行うことで, 非線形の影響を含んだ地表での合成波を求めることができる. しかしながら, 後述するように, 震源とサイトを結ぶ波線を考えたとき, これが非線形挙動を示す表層地盤を何度も横切る場合があり, この場合地震波はその伝播の過程で表層地盤の非線形挙動の影響を何度も受けることになる. この多重非線形効果を経験的グリーン関数法において考慮するため, 本研究では新たにパラメタ  $\nu_1, \nu_2$  を経験的グリーン関数法に導入して, 媒質の非線形挙動の影響をよりよく反映した波形合成を行うことを試みる. 以上が本研究で実施した改良の第二点である.

以上を要約すると, 本研究は, 従来より強震動予測の分野で用いられてきた経験的グリーン関数法に対し, 大地震の滑り速度時間関数をより適切にモデル化できるようにすること, 媒質の非線形挙動の影響をより適切に反映できるようにすることの二点を念頭において改良を試みたものである.

表-1 強震動評価手法

方法	概要	
理論的方法	離散化波数法	与えられた断層運動に対する水平成層媒質の波動場を理論的に求める方法。Bouchon (1981), Luco and Apsel (1983), Saikia (1994), 久田 (1997), 野津 (2002) 等の方法がある。媒質を水平成層と考えるので盆地生成表面波や basin edge effect を考慮できない点に注意を要する。久田(1997)のプログラムはインターネットで公開されている。野津 (2002) のプログラムは当該文献の付録 CD に収録されている。
	差分法	不整形媒質を対象とした手法。3次元問題への適用事例として San Bernerdino 盆地 (Frankel, 1993), Los Angeles 盆地 (Wald and Graves, 1998), 神戸周辺(松島・川瀬, 2000), 関東平野 (Sato et al., 1999) 等がある。計算には不整形地下構造の情報が必要である。このような情報が利用できる地域は限られているのが現状であるが、情報収集のための努力が関係機関により続けられている (例えば科学技術庁, 2000)。また、現状では計算機のメモリ容量や計算時間の制約を受ける場合も多いが、こうした点については計算機の性能やアルゴリズムそのものの向上により克服されつつある。
	有限要素法	不整形媒質を対象とした手法。3次元問題への適用事例として Bielak et al. (1998) 等がある。差分法と比較した場合のメリットとして、要素のサイズを媒質の弾性波速度に応じてフレキシブルに決めることができる点が挙げられる。地下構造の情報、計算機のメモリ容量や計算時間については差分法について述べた内容がそのままあてはまる。
	境界要素法	媒質の支配方程式を境界積分方程式に置き換えて数値計算を実施する方法であり、不整形媒質に適用可能である。3次元問題への適用事例として Fujiwara (2000) 等がある。地下構造の情報、計算機のメモリ容量や計算時間については差分法について述べた内容がそのままあてはまる。
	Aki-Larner 法	Aki and Larner (1970) により提案された手法で、不整形媒質に適用可能である。3次元問題への適用事例として上林他 (1990) 等がある。地下構造の情報、計算機のメモリ容量や計算時間については差分法について述べた内容がそのままあてはまる。
半経験的方法	経験的グリーン関数法	発震機構や波動伝播経路を大地震と共有する中小地震の観測波形をグリーン関数と見なし、これを重ね合わせて大地震の波形を合成する方法。Irikura (1986), 入倉他 (1997), Takemura and Ikeura (1988), Dan et al. (1989) 等の方法がある。本手法の利用は適切な中小地震記録が当該サイトで得られている場合に限られる。
	統計的グリーン関数法	経験的グリーン関数法で用いるべき適切な中小地震記録が存在しない場合に、中小地震記録を人工的に作成してこれを重ね合わせる方法であり、釜江他 (1991) により提案された。経験的グリーン関数法の有利さは失われているが、地震動の指向性等を考慮できる。サイト増幅特性については必要に応じ岩田・入倉 (1986), 鶴来 (1997) 等の方法で別途考慮する。
経験的方法	地動最大値予測手法	最大加速度, 最大速度等の地動最大値を経験式(距離減衰式)により予測する。Joyner and Boore (1982), Fukushima and Tanaka (1990), Ohno et al. (1993), 野津他 (1997) 等により提案されている。
	スペクトル予測手法	応答スペクトル, フーリエ振幅スペクトル等を経験式により予測する。応答スペクトルを予測する安中他 (1997) の経験式, フーリエ振幅スペクトルを予測する Boore (1983) の経験式等がある。
広帯域ハイブリッド法	長周期側では与えられた断層運動に対する地震動を理論的方法により求め、短周期側は半経験的手法や経験的手法で計算して、両者を重ね合わせる方法である。Kamac et al. (1998) のハイブリッドグリーン関数法では短周期側の計算に統計的グリーン関数法を用いる。	



## 2. 滑り速度時間関数の補正関数の一般化

ここでは、まず、入倉・他 (1997) の補正関数を拡張した新たな補正関数を提案する。提案する補正関数は、合成波の振幅スペクトルの  $1/T$  (Hz) での落ち込みを防止するという入倉・他 (1997) の補正関数の利点を失っていないばかりでなく、大地震の滑り速度時間関数の滑り始めの急激さを規定するパラメタ  $\alpha$  を含むので、滑り速度時間関数の動力学モデルへのフィッティングという点ではより好都合である。この  $\alpha$  をコントロールすることにより、合成後の滑り速度時間関数を中村・宮武 (2000) のすべり速度時間関数にフィッティングさせることを試みる。その結果に基づいて、補正関数の一般化の必要性について考察する。

### 2.1 提案式

ここで提案する滑り速度時間関数の補正関数はデルタ関数  $\delta(t)$  と指数関数  $\exp(-\alpha t/T)$  を組み合わせたものである。式で表現すると、

$$f(t) = \delta(t - t_{ij}) + \left\{ \alpha / n' / (1 - e^{-\alpha}) \right\} \times \sum_{k=1}^{(N-1)n'} [ e^{-\alpha(k-1)/(N-1)/n'} \cdot \delta\{t - t_{ij} - (k-1)T/(N-1)/n'\} ] \quad (4)$$

となる。ここで  $\alpha$  は大地震の滑り速度時間関数の滑り始めの急激さを規定する正のパラメタである。  $\alpha$  以外のパラメタは式 (2) と同じである。大地震の滑り速度時間関数  $V(t)$  は、小地震のすべり速度時間関数  $v(t)$  と補正関数  $f(t)$  の合積で与えられる。すなわち

$$V(t) = v(t) * f(t) \quad (5)$$

である。

式 (4) の時間関数を  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\alpha = 2$  の3つの場合について図-3に示す。式 (4) の  $\alpha$  を大きくするほど、大地震の滑り速度時間関数の滑り始めがより急激となる。言い換えれば、  $\alpha$  を大きくするほど、滑り速度時間関数の重心が左による。式 (4) で  $\alpha \rightarrow 0$  の極限をとると、補正関数  $f(t)$  は Irikura (1986) の補正関数に収束する。一方、  $\alpha = 1$  とすると、補正関数  $f(t)$  は入倉他 (1997) の補正関数 (すなわち式 2) に一致する。従って、式 (4) の補正関数は、Irikura (1986) と入倉他 (1997) の補正関数を包含し、これをさらに一般化したものであると言える。

はじめに、式 (4) の補正関数が、合成波の振幅スペクトルの  $1/T$  (Hz) での落ち込みを防止するという利点を失っていないことを確認しておく。式 (4) のフーリ

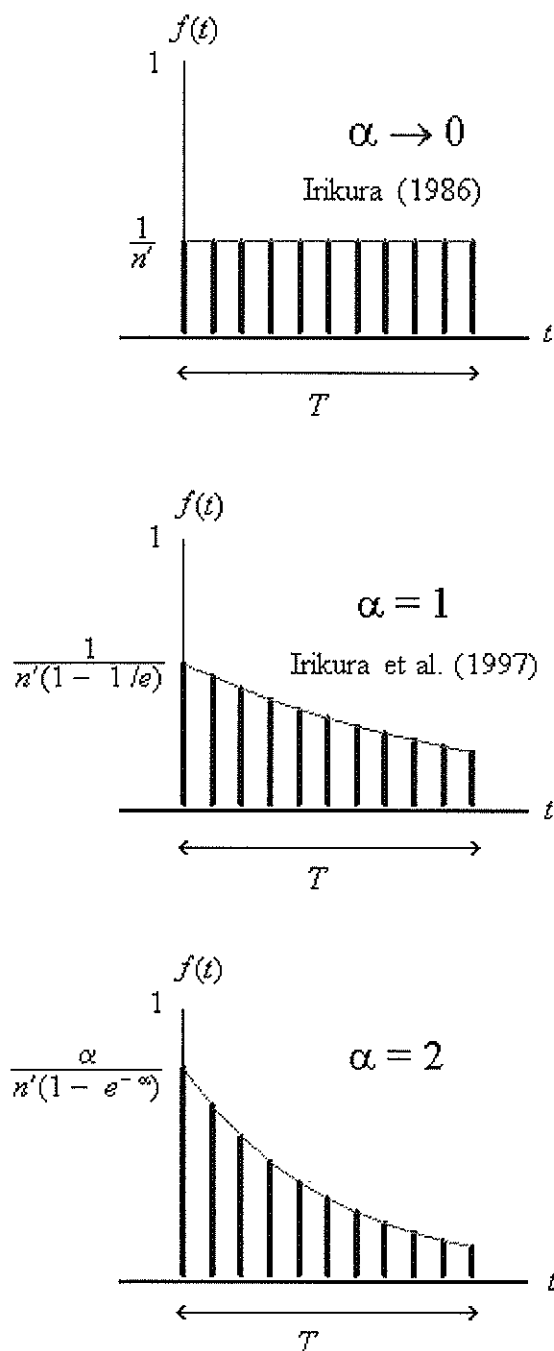


図-3 補正関数  $f(t)$

エ振幅スペクトルは次式で与えられる。

$$|F(\omega)| = \left| 1 + \alpha / n' / (1 - e^{-\alpha}) \right. \\ \left. \times (1 - e^{-(\alpha+i\omega T)}) / (1 - e^{-(\alpha+i\omega T)/(N-1)/n'}) \right| \quad (6)$$

時間領域の合積は周波数領域の積であるから、式 (6) は大地震と小地震の滑り速度時間関数の振幅スペクトル比そのものである。式 (6) を  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\alpha = 2$  の 3

つの場合に対して描いたものを図-4に示す。ここでは三宅他(1999)の例に倣い  $T=0.6s$ ,  $N=5$ ,  $n=100$  としている。図-4から, Irikura(1986)の補正関数に見られた  $1/T$  (Hz) での落ち込み ( $\alpha=0.01$ ) が, 入倉他(1997)の補正関数では解消されていること ( $\alpha=1$ ),  $\alpha$  をさらに大きくしても,  $1/T$  (Hz) での落ち込みを防止できるメリットに変わりはないことがわかる。

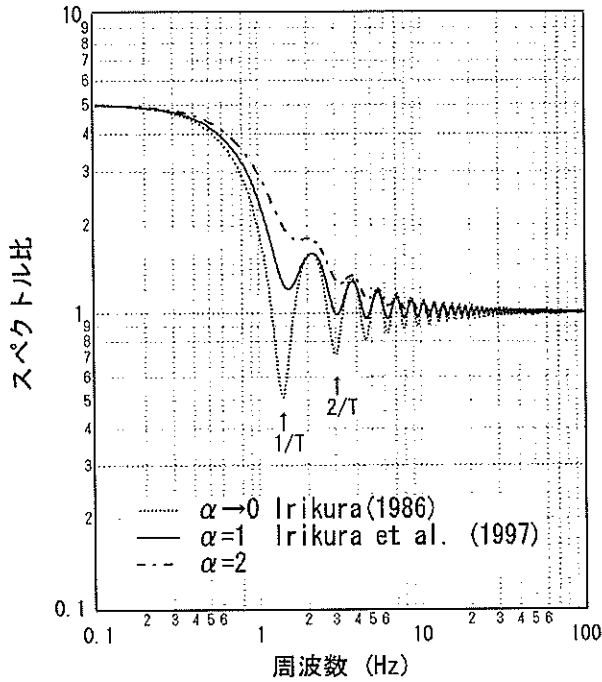


図-4 補正関数  $f(t)$  のフーリエ振幅スペクトル

なお,  $\alpha$  の値を入倉他(1997)の値 ( $\alpha=1$ ) から他の値に変更しても, 合成波の変位スペクトルの低周波側のフラットレベル  $U_0$  や加速度スペクトルの高周波側のフラットレベル  $A_0$  は影響を受けないことも図-4からわかる。その意味では, 一般化後の補正関数が経験的グリーン関数法の広帯域モデリングの利点を損ねることはない。 $\alpha$  の値の選択によって影響が及ぶのは, 合成結果の  $1/T$  (Hz) を中心とする中間的な周波数帯域だけである。この周波数帯域は, 地動速度の振幅と密接な関係があると考えられるので,  $\alpha$  の値を拘束できるような情報を得ることは, 工学的にも重要である。

## 2.2 動力学モデルへのフィッティング

パラメタ  $\alpha$  には, 大地震の滑り速度時間関数の滑り始めの急激さという物理的な意味がある。そこで, 補正関数から得られる大地震の滑り速度時間関数と, 動力学モデルの滑り速度時間関数を, 滑り始めの急激さの観点から比較すれば,  $\alpha$  の値を拘束するための情報が得られる

はずである。そうして求めた  $\alpha$  を入倉・他(1997)の値 ( $\alpha=1$ ) と比較すれば, 補正関数を一般化することの必要性について議論できるだろう。このような考えから, ここでは動力学モデルへのフィッティングを行う。

図-4に示すように,  $\alpha$  の値によって差が生じるのは, 大地震の滑り速度時間関数の  $1/T$  (Hz) を中心とする中間的な周波数成分であるから,  $\alpha$  の最適化はこの帯域の情報に基づいて行うべきである。特に  $1/T$  (Hz) と  $2/T$  (Hz) で差が大きいため, それらの周波数をカバーすることを念頭におき, 大地震の滑り速度時間関数の  $5/2T$  (Hz) 以下の周波数成分を用いてフィッティングを行う。

動力学的背景を有するすべり速度時間関数として, ここでは, 取り扱いやすさも考慮し, 中村・宮武(2000)によるすべり速度時間関数の近似式を用いる。この近似式には slip-weakening 摩擦則が反映されている。

中村・宮武(2000)のすべり速度時間関数の近似式は最終滑り量  $D_0$ , 最大滑り速度振幅  $V_m$ , 最大滑り速度到達時間  $t_r$  およびライズタイム  $t_l$  の4つのパラメタにより記述される。さらに, 同じ文献の中に, 剛性率  $\mu$ , 動的応力降下量  $\Delta\sigma$ , 破壊領域の幅  $w$ , 破壊伝播速度  $v$  および  $f_{max}$  の5つのパラメタから, 近似式を規定する4つのパラメタのうち最終滑り量  $D_0$  以外の3つを決定する手順が示されている。一方, 最終滑り量  $D_0$  は, 文献中には記述がないが,  $D_0=(\Delta\sigma/\mu)*w$  により定めることができる(中村, 私信)。従って, 先に述べた5つのパラメタが決まれば滑り速度時間関数が定まることになる。さて, 5つのパラメタのうち剛性率  $\mu$  と破壊伝播速度  $v$  は, 他のパラメタに比べれば変域が小さいので, ここでの検討では一定値としておく。また, 5つのパラメタのうち  $\Delta\sigma$  を変更しても, それに比例して近似式の振幅が変わるだけで, 近似式の形状には影響しない。以上の考察から, 近似式の形状に影響するのは, 主に  $w$  および  $f_{max}$  の2つのパラメタである。ここでは,  $w$  および  $f_{max}$  について実際にあり得る値を想定し, その結果得られる滑り速度時間関数の近似式  $V_1(t)$  に式(5)で計算される滑り速度時間関数  $V_2(t)$  をフィッティングさせることを試みる。 $w$  の値としては, 5km, 10km, 20kmの3通りを考え,  $f_{max}$  の値としては 5Hz, 10Hz, 20Hzの3通りを考えた。剛性率  $\mu$  は 30GPa に, 破壊伝播速度  $v$  は 2.0km/s に,  $\Delta\sigma$  は 10MPa にそれぞれ固定しておく。

まず, 式(4)の補正関数  $f(t)$  で  $\alpha$  の値を  $0 < \alpha < 4$  の範囲で仮定する。このとき立ち上がり時間  $T$  は中村・宮武(2000)のライズタイム  $t_l$  に等しいとしておく。大地震と小地震の立ち上がり時間の比  $N$  としては 5, 10, 20 の

3通りを考える。

次に補正関数  $f(t)$  と小地震の滑り速度時間関数  $v(t)$  との合積を計算し  $V_2(t)$  を求める。このとき畳み込む小地震の滑り速度時間関数は大地震の滑り速度時間関数と自己相似であるとしておく。  $V_1(t)$  と  $V_2(t)$  の双方に  $5/2T$  (Hz) のローパスフィルタを作用させる。最後に、  $0-t_c$  の範囲において  $V_1(t)$  と  $V_2(t)$  の残差を次式により計算する。

$$S = \sqrt{\int_0^{t_c} (V_1(t) - V_2(t))^2 dt / \int_0^{t_c} V_1(t)^2 dt} \quad (7)$$

以上の操作を様々な  $\alpha$  に対して行い、式 (7) の値を最小とする  $\alpha$  の値を探すこととした。

さて、式 (7) の  $t_c$  の定め方については事前に試行錯誤を行った。  $t_c=t_c$  とすることも試みてみたが、後述する地動速度の算定結果も考慮し、ここでは一定値 ( $t_c=t/5$ ) を用いることとした。すなわち、ここでは滑り速度時間関数の滑り始めの振幅の大きい部分に注目してフィッティングを行っていることになる。地動速度を良好に再現するためにはこのような配慮が必要であると思われる。

### 2.3 フィッティングの結果

図-5に、  $N=10$  で  $(w, f_{max}) = (5\text{km}, 5\text{Hz}), (10\text{km}, 10\text{Hz}), (20\text{km}, 20\text{Hz})$  の3つの場合について、式 (7) の  $S$  と  $\alpha$  との関係を示す。同図から、それぞれ  $\alpha=0.86, 1.30, 1.41$  のときに  $S$  は最小値  $0.20, 0.09, 0.08$  をとることがわかる。

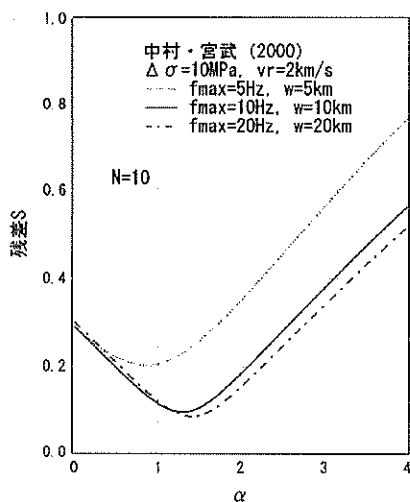


図-5  $S$  と  $\alpha$  との関係 ( $N=10$ )

図-6に、3 ケースの中村・宮武 (2000) の滑り速度時間関数  $V_1(t)$  を実線で、最適な  $\alpha$  に対応する式 (5) の滑り速度時間関数  $\bar{V}_2(t)$  を破線で示す。縦軸の値は、  $V_1(t)$

の取り囲む面積が1になるように正規化されている。また  $V_1(t)$  と  $\bar{V}_2(t)$  には  $5/2T$  (Hz) のローパスフィルタを作用させてある。それぞれ  $0-T/5$  の範囲でフィッティングを行っているので、滑り速度時間関数全体としての一貫度は良好でない場合もあるが、滑り始めの振幅の大きい部分の残差は小さい。

次に、  $V_1(t)$  を  $\bar{V}_2(t)$  に置き換えることが地動速度の計算結果にどの程度影響するか簡単に検討する。この検討は次の方法で行う。一般に地動速度は、遠地項のみ考慮する場合、破壊伝播関数の一階微分と滑り速度時間関数の合積で表現される。そこで、  $V_1(t)$  と  $\bar{V}_2(t)$  の2つの滑り速度時間関数と破壊伝播関数との合積を計算する。破壊伝播関数としては中村・宮武 (2000) に倣い、一辺が  $w$  の正方形の破壊領域 (横ずれ) を仮定して、破壊領域の中心の直上で得られる破壊伝播関数を考える。破壊伝播関数のパルス幅は、  $w=5\text{km}, 10\text{km}, 20\text{km}$  に対応してそれぞれ  $0.2\text{s}, 0.4\text{s}, 0.8\text{s}$  となる。得られる地動速度の比較を図-7に3つのケースのそれぞれについて示す。同図に示すように、地動速度の計算に用いる滑り速度時間関数として中村・宮武 (2000) のものに代えて式 (5) を用いても、  $\alpha$  が適切に選択されていれば、地動速度の振幅の大きい部分にはあまり影響がない。ただし、振幅の比較的小さい波形の後半部分には不一致も見られる。

表-2に  $w$  および  $f_{max}$  と  $\alpha$  の最適値との関係を示す。ここでは、  $N=5, 10, 20$  の3つの場合について示している。

表-2を見ると、  $w$  が大きいほど、また、  $f_{max}$  が大きいほど、  $\alpha$  の最適値は大きくなる傾向のあることがわかる。これは、  $w$  が大きくなると中村・宮武 (2000) の滑り速度時間関数でライズタイム  $t_r$  が大きくなり、また、  $f_{max}$  が大きくなると最大滑り速度到達時間  $t_m$  が小さくなるので、いずれにしても、滑り速度時間関数の重心が相対的に左に寄るためである。

一方、  $N$  の影響については、  $N$  が小さいほど  $\alpha$  の最適値は小さくなる傾向が認められる。これは次のような理由によると思われる。式 (4) の補正関数はデルタ関数  $\delta(t)$  と指数関数  $\exp(-\alpha t/T)$  の組み合わせであるが、図-3に示すように両者とも滑り速度時間関数の滑り始めの急激さと関連している。前者と後者の担う地震モーメントの比は  $1:N-1$  なので、  $N$  が比較的大きいときデルタ関数の寄与は小さく、滑り速度時間関数の滑り始めを急激にするためには  $\alpha \rightarrow$  大とする必要がある。しかし、  $N$  が比較的小さいときには、滑り速度時間関数の滑り始めを急激にすることにデルタ関数が寄与するので、  $\alpha$  の値はさほど大きくする必要がない。

全体として、  $\alpha$  の最適値は  $0.51 \sim 1.58$  の範囲に求ま

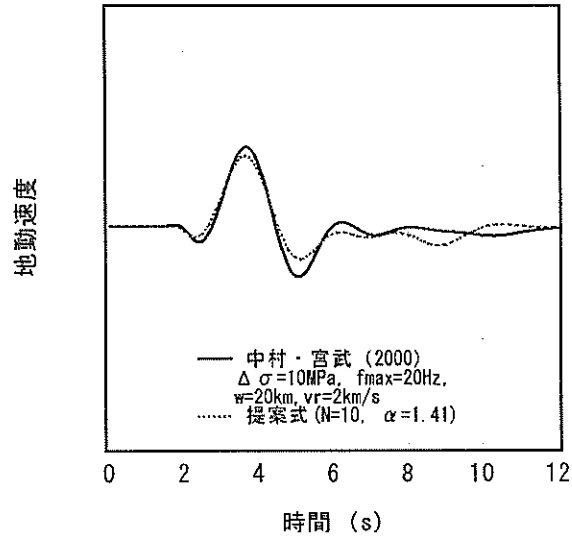
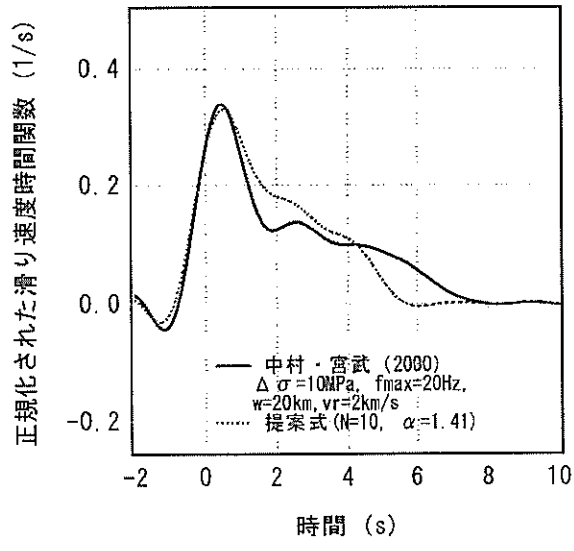
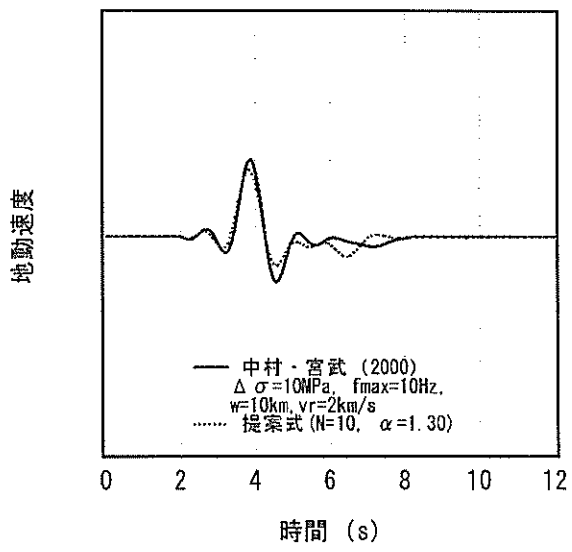
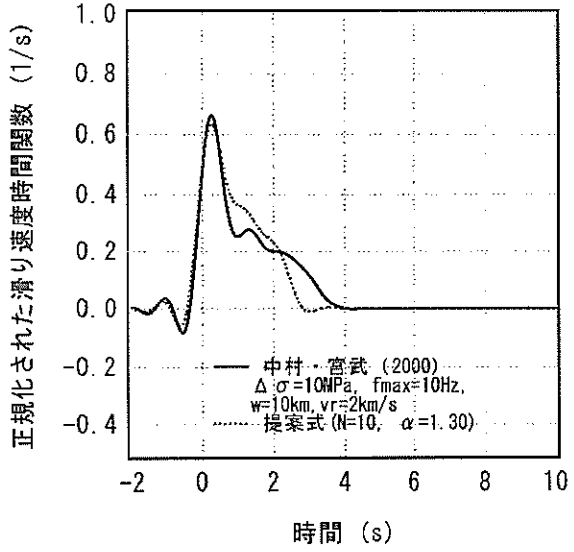
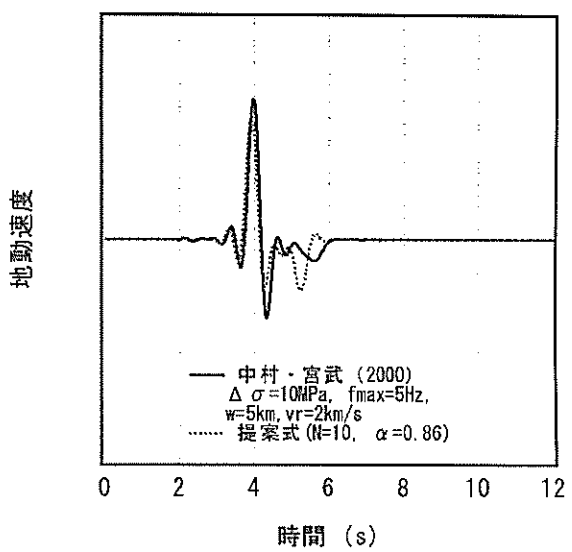
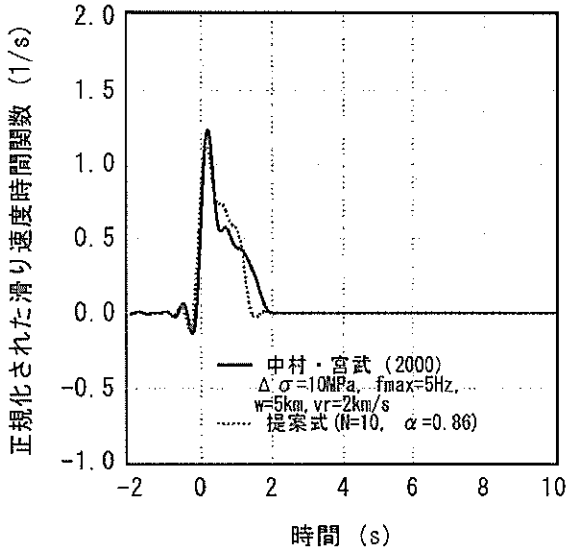


図-6  $V_1(t)$ と最適な  $\alpha$  に対応する  $\bar{V}_2(t)$  の比較

図-7  $V_1(t)$ と  $\bar{V}_2(t)$  から計算される地動速度の比較

っており、経験的グリーン関数法において、 $\alpha$ の値を従来の入倉他(1997)の値( $\alpha=1$ )から変更する必要性はさほど高くないものと判断される。

表-2  $\alpha$ の最適値

$w$	$f_{max}$	$\alpha(N=5)$	$\alpha(N=10)$	$\alpha(N=20)$
5	5	0.51	0.86	1.06
5	10	0.81	1.13	1.32
5	20	1.00	1.28	1.47
10	5	0.86	1.16	1.34
10	10	1.01	1.30	1.47
10	20	1.10	1.36	1.54
20	5	1.01	1.30	1.47
20	10	1.09	1.36	1.53
20	20	1.15	1.41	1.58

### 3. 多重非線形効果の取り扱い

経験的グリーン関数法では震源からサイトに至る媒質の線形的な挙動を前提としているので、大地震の際に想定される地盤の非線形挙動(例えば翠川, 1993)については別途考慮する必要がある(例えば香川他, 1998)。この非線形挙動の取り扱いについては、改良の余地があると著者らは考えている。

これまで、耐震設計等の実務においては、サイト直下の堆積層を非線形性を示す浅い部分(表層地盤)と、それより深い部分(深層地盤)とに区分し、地震波は下方より表層地盤に入射してから初めて地盤の非線形挙動の影響を受けると仮定することが普通であった(例えば大阪府土木部, 1997; 中央防災会議事務局, 2001)。しかしながら、図-8に示すように、震源とサイトを結ぶ波線を考えたとき、これが非線形挙動を示す表層地盤を何度も横切ることがある。この場合、地震波は、その伝播の過程で、表層地盤の非線形挙動の影響を何度も受けることになる。このことをここでは多重非線形効果と呼ぶこととする。ここで、図-8の波線は盆地生成表面波に対応する可能性もあるが、このことについては後に詳しく述べる。Nozu and Uwabe(2000)は、1995年兵庫県南部地震およびその余震の際に神戸市内の埋立地で得られた記録に経験的グリーン関数法を適用し、上述の多重非線形効果を考えなければ、本震地動の後半部分を著しく過大評価してしまうことを指摘している。多重非線形効果を考慮した場合には、仮に深層地盤が非線形挙動を示さないとしても、サイト直下の表層地盤と深層地盤の境界面に下方から入射する地震波は、すでに地盤の非線形挙動の影響を受けていることになる。

ここでは、経験的グリーン関数法に多重非線形効果を

表現するためのパラメタ(以下においては「非線形パラメタ」と呼ぶ)を新たに導入し、その物理的意味について述べるとともに、2000年鳥取県西部地震および1995年兵庫県南部地震への適用事例を示す。提案するパラメタは、簡易なものであるにも関わらず、非線形性の影響を受けたサイトでの本震地動の合成結果を著しく改善するものである。

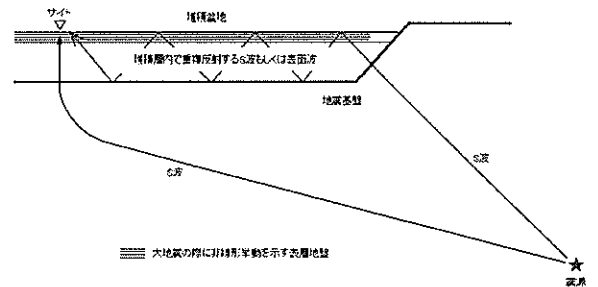


図-8 多重非線形効果の概念図

#### 3.1 2000年鳥取県西部地震の境港市の地震動に見られる地盤の非線形性の影響

非線形パラメタの導入に先立ち、2000年鳥取県西部地震の際に境港市内で得られた地震動に経験的グリーン関数法を適用することにより、地震動が地盤の非線形挙動の影響を受けているかどうかを確認する。

まず、経験的グリーン関数を用いたインバージョンにより、鳥取県西部地震の震源モデルを構築する。本震(2000年10月6日13時30分,  $M_{max}7.3$ )の震央と気象庁による余震分布を図-9に示す。またグリーン関数として用いる2000年11月3日16時33分の余震( $M_{max}4.5$ )の震央(北緯35.357度, 東経133.295度)を図-9に同時に示す(震源深さは5km)。

インバージョンの対象には図-9に示すK-netおよびKik-netの5つのサイトを選択した。これらのサイトは震源のメカニズム(ほぼ鉛直な横ずれ断層)から判断して比較的SH波のradiationが大きいと考えられるサイトを選択したものである。また、サイトの非線形挙動の影響を避けるため、できるだけ堅固な地盤条件のサイトを選択した。ここでは原則としてtransverse成分をモデル化の対象とした。ただし、震源近傍のサイトであるTTRH02については断層直交成分(N240E成分)を対象とした。余震波形を周波数領域で積分し、0.1-2.0Hzの帯域通過フィルタに通した速度波形をグリーン関数として用いた(図-10)。また本震波形に同様の処理をほどこして得た速度波形をインバージョンのターゲットとした(図-11の上段)。ここでは、本震波形のS波到来時刻

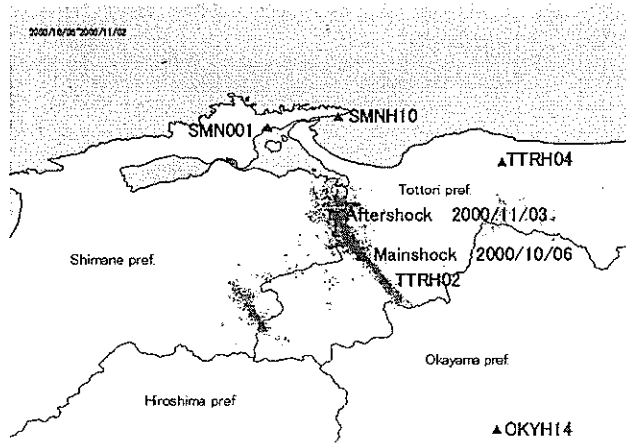


図-9 本震と余震の震央とインバージョン対象地点

の1秒前から15秒をインバージョンのターゲットとした。

インバージョンは Harzell and Heaton (1983) の方法に基づいている。気象庁の震源を含む  $30\text{km} \times 12\text{km}$  の断層面（走向  $150^\circ$ ，傾斜  $85^\circ$ ）を仮定し，この断層面を  $30 \times 12$  に分割して，それぞれの領域では，破壊フロント通過後の2.4秒間に4回のすべりが許されるものとした。各々のすべりによるモーメント解放量が余震モーメントの何倍であるかを未知数としてインバージョンを行う。インバージョンの自由度は  $30 \times 12 \times 4 = 1440$  である。破壊フロントは，気象庁発表の震源時刻の4.0秒後から，気象庁発表の震源を中心として同心円状に速度  $2.8\text{km/s}$  で広がるものとし，基盤のS波速度は  $3.5\text{km/s}$  とした。インバージョンには非負の最小自乗解を求めるためのサブルーチン (Lowson and Hanson, 1974) を用いた。また，すべりの時空間分布を滑らかにするための拘束条件を設けた。ここで対象としたサイトについては本震と余震のラディエーション係数の差は大きくないので，ラディエーションパターンへの補正は実施していない。すべてのサイトについて，記録のヘッダに記入された絶対時刻の情報を参照している。

図-11の下段に，インバージョンの結果として得られた各サイトの合成波を示す。これを観測波（上段）と比較すると，両者の一致はおおむね良好である。特に，震源断層の北に位置する SMN001 及び SMNH10 では，インバージョンで対象としなかった本震波形の後半部分も含め特徴がよく再現されているが，これは，経験的グリーン関数に含まれる各々のサイトの特性が合成結果に生かされているためであると考えられる。

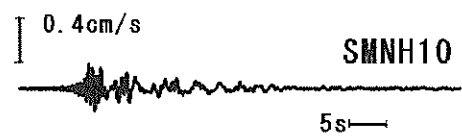
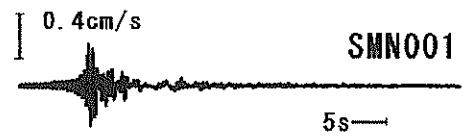
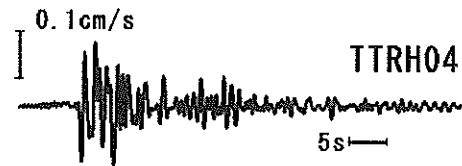


図-10 余震の速度波形（グリーン関数）

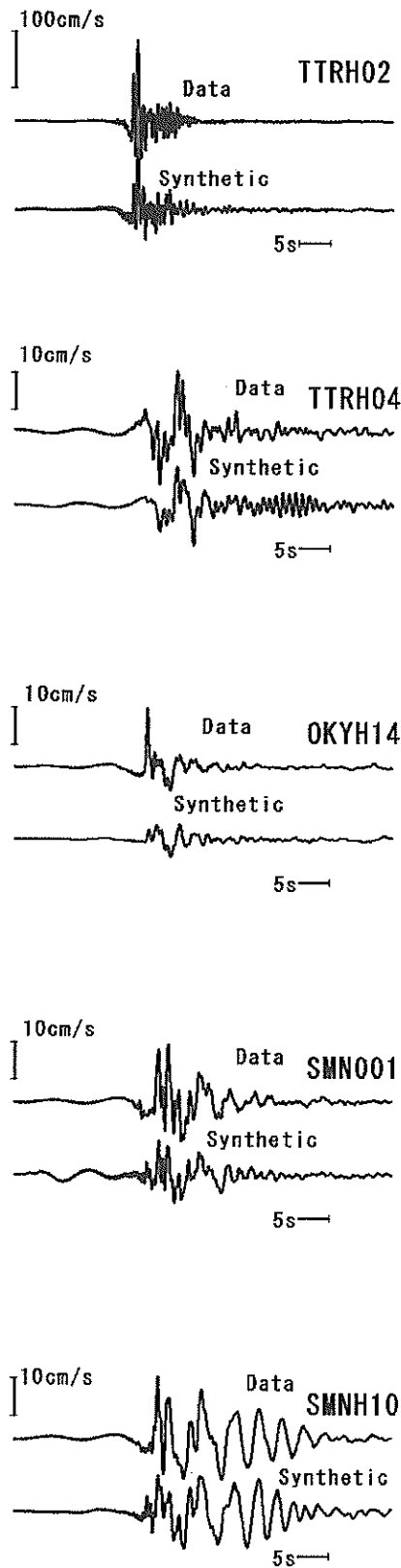


図-11 本震の速度波形，観測波（上）と合成波（下）

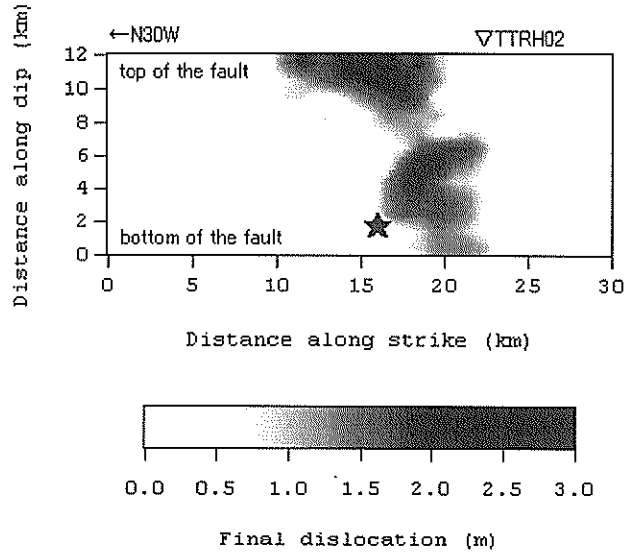


図-12 インバージョンで得られた最終滑り量の分布

図-12に、インバージョンで得られた最終すべり量の分布を示す。ここでのインバージョンでは、直接には各々の震源要素におけるモーメント解放量の余震モーメントに対する比が明らかになるだけであるが、ここでは余震モーメントとして Freesia (Fukuyama et al., 2001) により得られている値 ( $M_0=5.23 \times 10^{15}\text{Nm}$ ) を仮定し、最終滑り量を示している。同図によれば、本震は複数のサブイベントからなることがわかる。1つ目のサブイベントは気象庁発表の震源（図-12の★）よりもやや南の深い位置で生じており、2つ目のサブイベントは震源の真上の浅い位置で生じている。サブイベントの生じている位置は、理論的なグリーン関数を用いて実施されたインバージョンの結果（岩田・関口，2001）とも類似している。

図-13に1秒毎の滑り量の分布を示す。破壊開始後0-3秒に1つ目のサブイベントで、3-6秒に2つめのサブイベントでモーメントが解放されている様子が分かる。

ここで、境港市の地震動の議論に移る前に、ここで得られた断層モデルの性質や適用限界についてあらかじめ議論しておくこととする。

第一に、ここでは図-9に示すように、比較的SH波のradiationが大きいと考えられるサイトを選択して用いた。これは、SH波のradiationの節に近いサイトでは余震のメカニズムのわずかな違いが合成波形に大きく影響するので、ここではインバージョンの結果に関する信頼性を確保するためこれらのサイトを回避することが望ましいと判断したためである。従って、ここで得られた震源モデルがSH波のradiationの節に近いサイトでの波形合成に適しているかどうかは未確認である。後の解析で

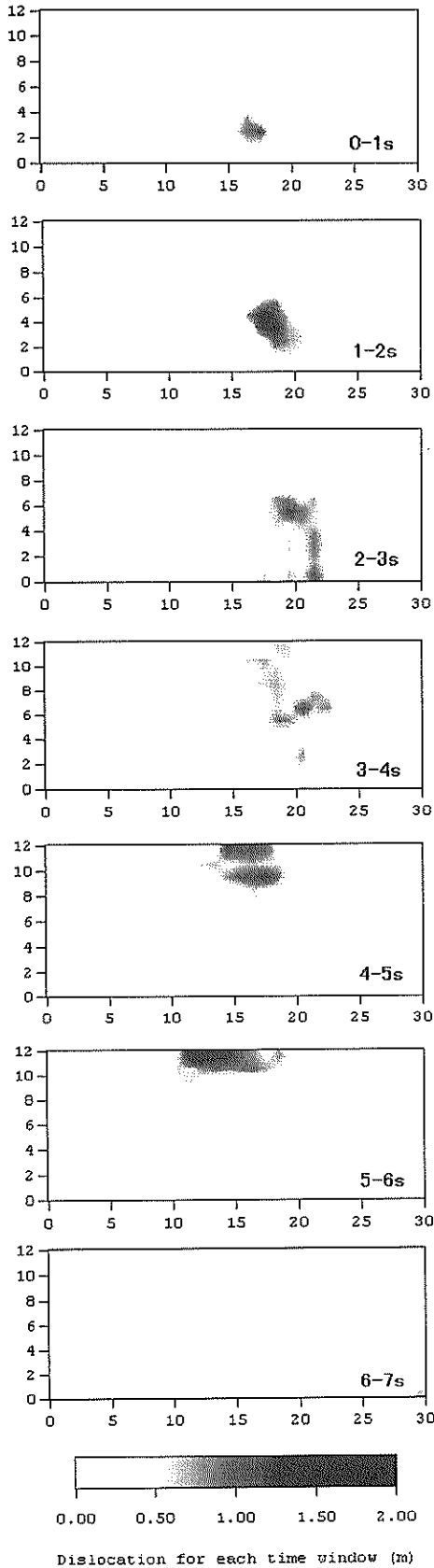


図-13 1秒毎の滑り量の分布

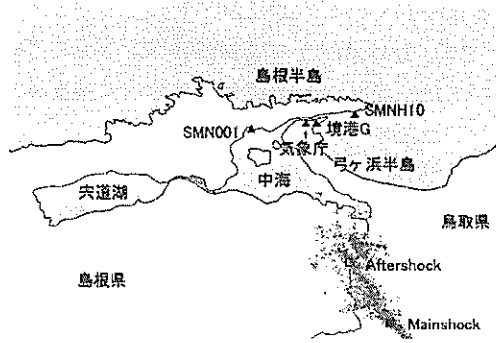


図-14 境港周辺の強震観測地点

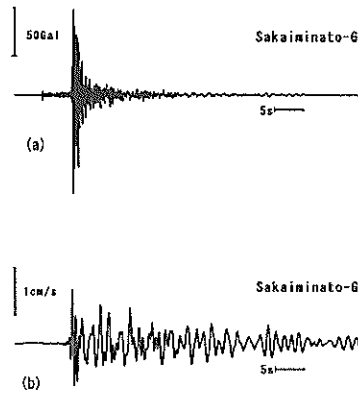


図-15 境港-Gにおけるグリーン関数  
加速度 (a) と速度 (b)

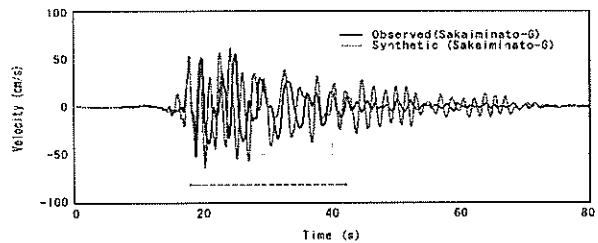


図-16 線型性を仮定した合成結果 (境港-G)

は、境港市内の地震動に注目して議論を進めるが、境港市は震央から見て SMN001 と SMNH10 に挟まれた位置にあるため、本震源モデルを用いても、radiation の節に関わる問題は顕在化しない。

第二に、図-11に示すように、震源断層の南に位置する OKYH14 の合成結果が思わしくない。OKYH14 に近い他のサイトについても同様の結果となるので、記録の精度などの問題ではないと考えられる。OKYH14 の本震波形が、断層面のうち破壊開始点から見て南側の部分に主に支配されていることは、別途フォワードモデリン



グにより確認している。したがって、ここでのインバージョンでは、断層面のうち破壊開始点から見て南側の部分については、滑りの時空間分布がさほど精度良く得られていない可能性がある。

第三に、震源近傍のサイトである TTRH02 の非線形挙動の問題がある。このサイトは、地表と地中に強震計が設置されていて、それらのスペクトル比から、本震時には非線形挙動を示していたことが明らかにされている(八幡, 2001)。さて、TTRH02 は破壊開始点の 5km ほど南に位置するが、TTRH02 の本震波形は、断層面のうち破壊開始点と TTRH02 に挟まれた 5km ほどの区間に主に支配されていることを別途フォワードモデリングにより確認している。したがって、ここでのインバージョンでは、断層面のうち破壊開始点と TTRH02 に挟まれた 5km ほどの区間については、TTRH02 の非線形挙動の影響を受けており、滑りの時空間分布がさほど精度良く得られていない可能性がある。

ここで得られた断層モデルは、以上に述べたような適用限界を有するものの、境港市内の地震動の再現ということに目的を限定すれば十分に精度を有すると考えられる。

さて、ここで得られた震源モデルを用い、境港市の港湾地域強震観測の観測点 (Sakaiminato-G) で得られた余震波形をグリーン関数として本震波形を計算する。ここでは、地盤の非線形挙動を一切考慮せずに計算を行う。Sakaiminato-G の位置を図-14に示す。Sakaiminato-G は境港市の平野部に位置しており、本震時には過剰間隙水圧の上昇を含む表層地盤の強い非線形挙動が生じたと考えられている(三輪他, 2002)。Sakaiminato-G における余震の加速度記録の transverse 成分を図-15(a)に、これを周波数領域で積分して 0.1-2.0Hz の帯域通過フィルタに通した速度波形を図-15(b)にそれぞれ示す。図-16に、Sakaiminato-G における合成波と観測波(余震波形と同様の処理を施したもの)の比較を示す。同図に示すように、合成波の前半には周期約 2 秒のパルスが数波見られるが、このうち第 3 波は観測波に見られない。また、合成波の後半部分において、位相は観測波と比較して系統的に早く、振幅は観測波と比較して系統的に大きくなっている。また、振幅と位相の差異は、波形の後半部分ほど顕著に表れていることも注目される。

Sakaiminato-G のように堆積盆地上に位置するサイトでは、直達 S 波の他に、堆積盆地を重複反射しながら伝播する S 波や盆地生成表面波に起因する位相が到来する。事実、Sakaiminato-G の観測波(transverse 成分)の後半部分には、S 波の重複反射もしくは盆地生成表面

波(この場合には Love 波)によると見られる顕著な位相が見られる(図-16に矢印で示した部分)。川瀬(1993)がレビューしているように、波線理論では、盆地生成表面波は盆地端部の斜面となっているところから入射した S 波が角度を持って全反射を繰り返すことによって生じると解釈できる。この波線を追跡することによって得られる堆積層の応答は、有限要素法等で求めたものと良く一致することが Kohketsu(1987)により示されている。このことは、盆地生成表面波のうち少なくとも Kohketsu(1987)が検討の対象とした Love 波については、堆積層内で全反射を繰り返す S 波の重なり合ったものと見なせることを示すものである。そこで、波動場が盆地生成表面波であれ、通常の S 波であれ、図-8に示すような S 波の波線に置き換えて以下の考察を行う。ただし、上述の議論は盆地生成表面波のうち Rayleigh 波にはそのまま適用しにくい。Rayleigh 波である限り必ず P 波に関する物性(P 波速度と  $Q_p$ )が関わってくるはずである。よって、後続位相に Rayleigh 波が多く含まれる場合には、以下に述べる手法の適用性は十分でない面があるかも知れない。

さて、波線理論により堆積層の応答を求めようとすれば、波線経路における透過/反射の係数を計算条件として与える必要がある。しかし、ここでは経験的グリーン関数法の長所を生かして、図-8の波線や、それに伴う透過/反射の係数は本震と余震の間で共有されていると考える。このように考えれば、各々の波線の寄与は余震記録に含まれているので、適切な震源モデルを用いて余震記録を重ね合わせることで、波線経路における透過/反射の係数を陽に考慮しなくても、本震波形を再現できるはずである。

ただし、以上は媒質が線形であるとした場合の議論である。本震時には図-8に示すように波線経路における媒質の一部が非線形挙動を示すものと考えられる(多重非線形効果)。地盤の非線形挙動としては、通常、剛性の低下(すなわち S 波速度の低下)と減衰定数の増加が想定される(例えば翠川, 1993)。従って、波線経路における媒質の一部が非線形挙動を示すことの本震波形への具体的な影響としては、S 波速度の低下により位相の到来時刻が遅くなることと、減衰定数の増加により振幅が減少することの 2 点が考えられる。

媒質の線形性を仮定した合成波を観測波と比較した図-16においては、(1)観測波の後半部分の位相が合成波と比較して系統的に遅い、(2)観測波の後半部分の振幅が合成波と比較して系統的に小さい、(3)観測波と合成波の差異が波形の後半部分ほど顕著である等の傾向が認

められるが、これらについては、多重非線形効果により少なくとも定性的には説明することができる。

なお、一般論として言えば、本震と余震の震源位置の違いも観測波の後半部分に影響を及ぼすことが考えられる。しかし、ここでの解析に則して言えば、SMNH10で波形の後半部分が問題なく再現されていることから、仮に本震と余震の震源位置の相違の影響があるとしても、その影響は震源モデルに押しつけられていて、Sakaiminato-Gでの波形の不一致を説明する要因にはならないと考えられる。本研究では、Sakaiminato-Gにおける観測波が多重非線形効果の影響を受けていると考え、以下においては経験的グリーン関数法に多重非線形効果を取り込む方法を検討する。

なお、既存の手法、すなわち、サイト直下の表層地盤に下方から入射する地震波は媒質の非線形挙動の影響を受けていないと仮定し、サイト直下の表層地盤の非線形挙動を1次元問題として評価する手法も試みてみたが、観測波を十分に説明することはできなかった。このことについて付録で報告する。

### 3.2 非線形パラメタの導入とその物理的意味

経験的グリーン関数法の最大の利点は、震源からサイトに至る地下構造についての知識を前提としないことである。経験的グリーン関数法に多重非線形効果を取り込む際には、上述のような利点が失われることのないよう、できるだけ簡便な方法を用いることが望ましい。そこで、ここでは以下の2つの非線形パラメタ $\nu_1$ と $\nu_2$ を導入することを提案する。

$\nu_1$ は堆積盆地内の媒質の平均的なS波速度の低下率を示すパラメタである。すなわち $\nu_1 = V_s/V_{s0}$ である。ここに $V_s$ は非線形時のS波速度、 $V_{s0}$ は線形時のS波速度である。余震記録上で直達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-17)、 $t-t_0$ は両位相に対応する波が余震の震源からサイトまで到達するのに要した時間の差 $t-t_0$ に等しく(図-17)、さらにこれは、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。なぜなら、余震の場合、破壊に要する時間は十分に短いから、波形に見られる各位相は震源を同時にスタートしたと見なすことができるからである。同様の考え方は震源時間の長い本震波形には適用できないことに注意する必要がある。さて、非線形時にはS波速度が $\nu_1$ 倍になるのであるから、当該位相の到来時刻は $t_0 + (t-t_0)/\nu_1$ となるはずである。このような考え方で経験的グリーン関数の時刻 $t_0$ 以降の部分 $1/\nu_1$ 倍に引き延ばす。

一方 $\nu_2$ は堆積盆地内の媒質の平均的な減衰定数の増分を意味するパラメタである。一般に減衰定数 $h$ の地盤を角振動数 $\omega$ 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 $h + \nu_2$ 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 $\exp(-\nu_2 \omega (t-t_0))$ 倍となる。

実際には堆積盆地内の媒質のうち非線形挙動を示すのは地表に近い部分だけであると考えられる(図-8)。また、一般には堆積盆地内の媒質は水平方向にも不均質であり、地震動の振幅も水平方向に一樣でないことから、表層地盤の非線形挙動も水平方向に一樣に生じるわけではない。しかし、ここで定義する $\nu_1$ 、 $\nu_2$ といったパラメタは深さ方向と水平方向に平均化された値である。これら2つの非線形パラメタを用いて経験的グリーン関数は次式により補正される。

$$g_v(t) = g(t) \quad (t < t_0)$$

$$g_v(t_0 + (t-t_0)/\nu_1) = g(t) \exp(-\nu_2 \omega (t-t_0)) \quad (t > t_0) \quad (8)$$

ここに $g_v(t)$ は補正後の経験的グリーン関数、 $g(t)$ は補正前の経験的グリーン関数である。これらの式は、以下のように書き換えることもできる。

$$g_v(t) = g(t) \quad (t < t_0)$$

$$g_v(t) = g(\nu_1(t-t_0) + t_0) \exp(-\nu_1 \nu_2 \omega (t-t_0)) \quad (t > t_0) \quad (9)$$

式(8)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 $\omega$ を用いれば良いし、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 $\exp(-\nu_2 \omega (t-t_0))$ を乗じた上で、すべての帯域について加え合わせればよい。以下の解析では、 $f_b = 0.08\text{Hz}$ に統一している。

ここで導入した非線形パラメタの概念は、地盤工学の分野で用いられてきた等価線形の概念(例えば Schnabel et al., 1972)を発展させたものであると考えることもできる。等価線形解析では、ひずみレベルによらず、地盤は線形の粘弾性体として表現できると考える。粘弾性体を記述するパラメタである剛性と減衰定数は、地震動継続時間中には一定値をとると考えるが、小地震時と大地震時では異なる値をとると考える。上述の非線形パラメタの考え方は、このような等価線形の概念を参考にしたものであるが、等価線形解析では特定の地盤要素ないし地層に対して定義された剛性と減衰定数の変化を取り扱うのに対して、ここで導入した非線形パラメタは、堆積層全体についての平均的な剛性と減衰定数の変化を取り扱うことが特徴である。

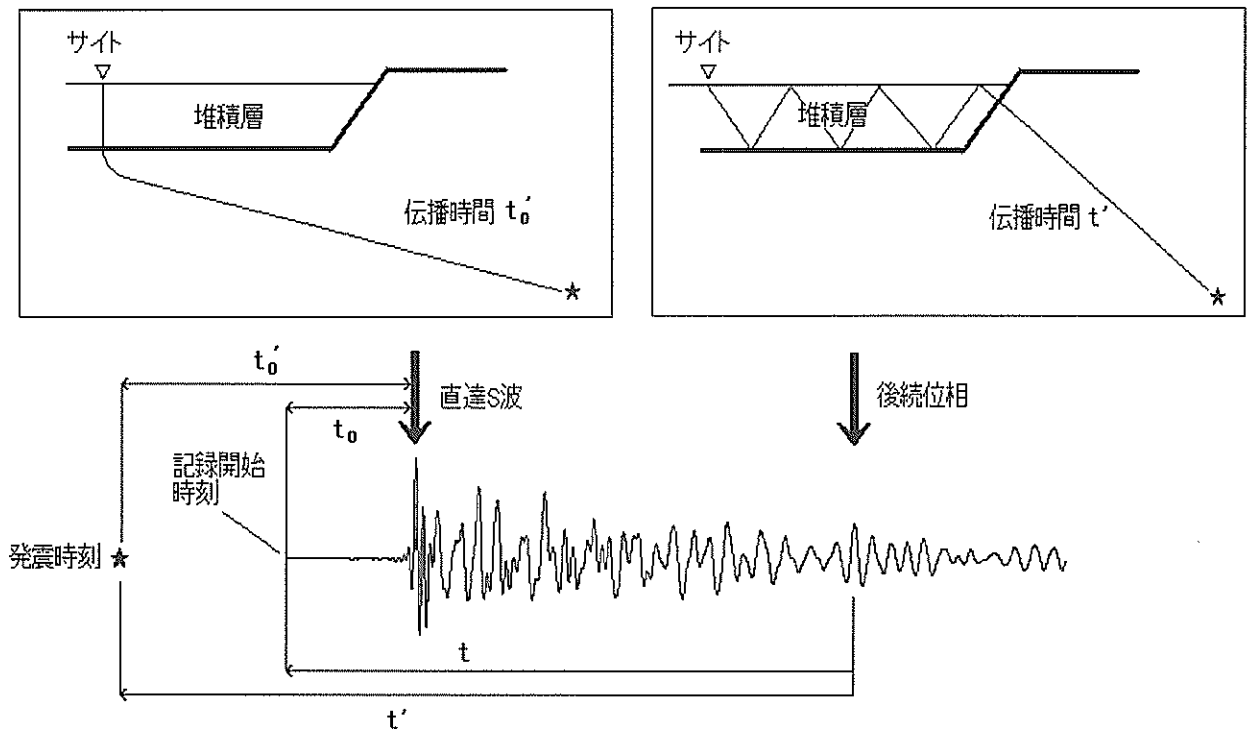


図-17 直達S波と後続位相に対応する波線

### 3.3 2000年鳥取県西部地震への適用

上述の非線形パラメタを Sakaiminato-G の経験的グリーン関数に適用して補正し、3.1で述べた震源モデルに基づいて重ね合わせ、改めて Sakaiminato-G における本震波形を合成した。非線形パラメタは試行錯誤により  $\nu_1=0.93$ ,  $\nu_2=0.02$  とした。これは堆積層内のS波速度が平均的には線形時の93%であること、堆積層内の減衰定数が平均的には線形時より0.02大きいことを意味する。図-18(a)に結果を示す。同図に示すように、非線形パラメタを用いることにより合成結果は著しく改善される。観測波においては、まず周期約2秒のパルス状の波形が数波続き、周期約5秒の後続位相がこれに続くが、各々の位相の到来のタイミングと振幅が、かなり良好に再現されている。また、継続時間の過大評価も、ここでは回避できている。ここで、Sakaiminato-G の波形は震源モデルの構築には全く用いられていないことをあらためて指摘しておきたい。なお、合成波にみられる周期約2秒のパルス5波のうち第3波が観測波に見られない点については、非線形パラメタを導入しても解決することはできなかった。非線形パラメタは、波形後半の振幅や位相の補正には有効であるけれども、ここに見られる第3波の不一致のように、波形の部分的な不一致を改善することには不向きである。

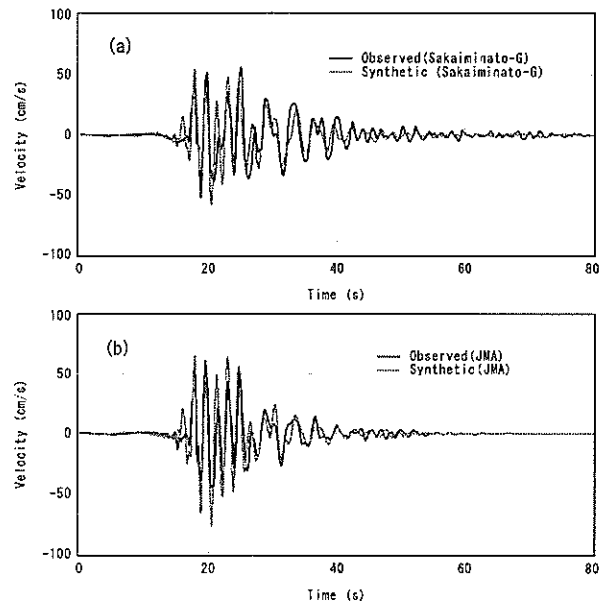


図-18 非線形パラメタを用いた合成結果  
(a) 境港-G, (b) 気象庁観測点

図-18(b)には同じく境港市の気象庁観測点 (JMA) における合成結果を示す。JMA は図-14に示すように Sakaiminato-G から西に 1.2km ほど離れており、やはり平野部に位置している。当該地域の地盤構造に関する最近の研究結果 (吉川他, 2002) によると、2つの観測点

におけるやや深い地盤構造には共通性が見られる。JMAでも、最初に非線形パラメタを用いない波形合成を行ったが、その結果は観測と一致せず、媒質の非線形挙動の影響は明らかであった。そこで Sakaiminato-G での合成に用いたのと同じ非線形パラメタ ( $\nu = 0.93$ ,  $\nu = 0.02$ ) を用いて合成を行ったところ、図-18(b)に示すように合成波と観測波は良く一致した。

さて、波形の一致の程度を比較すると、Sakaiminato-G では、合成波にみられる周期約 2 秒のパルス 5 波のうち第 3 波が観測されておらず、JMA よりも一致の程度がやや劣る。この理由は明らかにできていないが、不一致が Sakaiminato-G だけで見られることを考慮すると、理由を局所的な地盤条件に求めることが妥当ではないかと考えられる。Sakaiminato-G では過剰間隙水圧の上昇を含む表層地盤の強い非線形挙動が見られたとされている(三輪他, 2002) こと、このような表層地盤の強い非線形挙動は今回導入した非線形パラメタでは必ずしも説明がつかない面もあると考えられることなどから、不一致の原因を表層地盤の強い非線形挙動に求めることが妥当ではないかと考えられる。

3.4 1995年兵庫県南部地震への適用

非線形パラメタの適用性をさらに検討するため、1995年兵庫県南部地震の記録に、非線形パラメタを用いた経験的グリーン関数法を適用する。兵庫県南部地震の場合、経験的グリーン関数法のための震源モデルがすでに提案されている。ここでは釜江・入倉(1997)のアスペリティモデルを改良した山田他(1999)のモデルを用いる。

図-19に山田他(1999)のアスペリティモデルの平面図を示す。図-20にアスペリティモデルの断面図を示す。これらの図に示すように、山田他(1999)のアスペリティモデルは淡路側から神戸側にかけて4つのアスペリティを配したモデルである。表-3にアスペリティモデルの詳細を示す。図-19に、グリーン関数として用いる余震の位置を示す。表-4に余震のパラメタを示す。

このアスペリティモデルを用いて、KBU, MOT, AMG, FKS の 4 つのサイト(図-19)での速度波形(NS成分とEW成分)を合成する。4つのサイトのうちKBUとMOTは震源モデルの構築に用いられている。ここでは余震の観測波を0.2-2Hzの帯域通過フィルタに通したものをグリーン関数として用い、合成結果を、同じく0.2-2Hzの帯域通過フィルタに通した観測波と比較する。

まず、図-21では、非線形パラメタを用いずに合成を行った結果を示す。震源モデルの構築に用いられた神戸大学(KBU)と神戸本山(MOT)の2つのサイトでは、

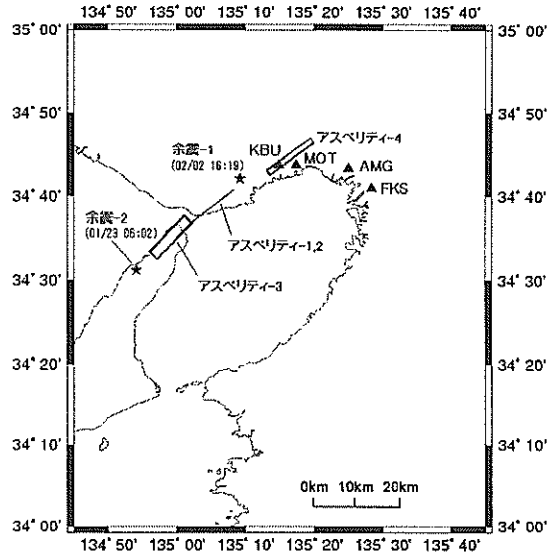


図-19 山田他(1999)のアスペリティモデルと余震および観測点の位置

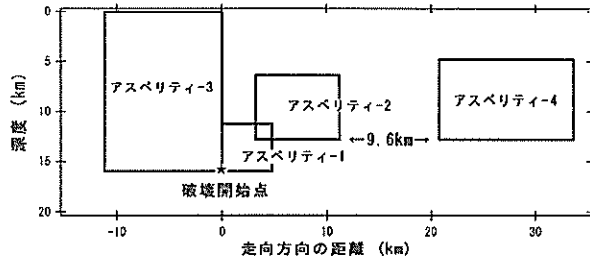


図-20 山田他(1999)のアスペリティモデルの断面図

表-3 山田他(1999)のアスペリティモデルの詳細

	アスペリティ-1	アスペリティ-2	アスペリティ-3	アスペリティ-4
走向(度)	N53E	N53E	N45E	N233E
傾斜(度)	90	90	90	90
長さ(km)	4.8	8.0	11.2	12.8
幅(km)	4.8	6.4	16.0	8.0
応力降下量 (bars)	234	156	86	86
モーメント ( $\times 10^{15}$ Nm)	0.11	0.23	1.00	0.36
ライズタイム (s)	0.4	0.5	0.6	0.6
破壊開始時刻 (s)	0.0	1.8	0.0	6.9
破壊開始点	左下	左下	右下	左下
破壊伝播様式	同心円状	同心円状	同心円状	同心円状
破壊伝播速度 (km/s)	2.8	2.8	2.8	2.8
使用した余震*	1	1	2	1

\*表-4参照

表-4 余震のパラメタ

日時	北緯 (度)	東経 (度)	深さ (km)	M <sub>JMA</sub>	M <sub>0</sub> ( $\times 10^{15}$ Nm)	$\Delta\sigma$ (bars)
余震-1 1995/02/02 16:19	34.695	135.150	17.9	4.2	1.7	86
余震-2 1995/01/23 06:02	34.530	134.907	15.0	4.5	4.5	82

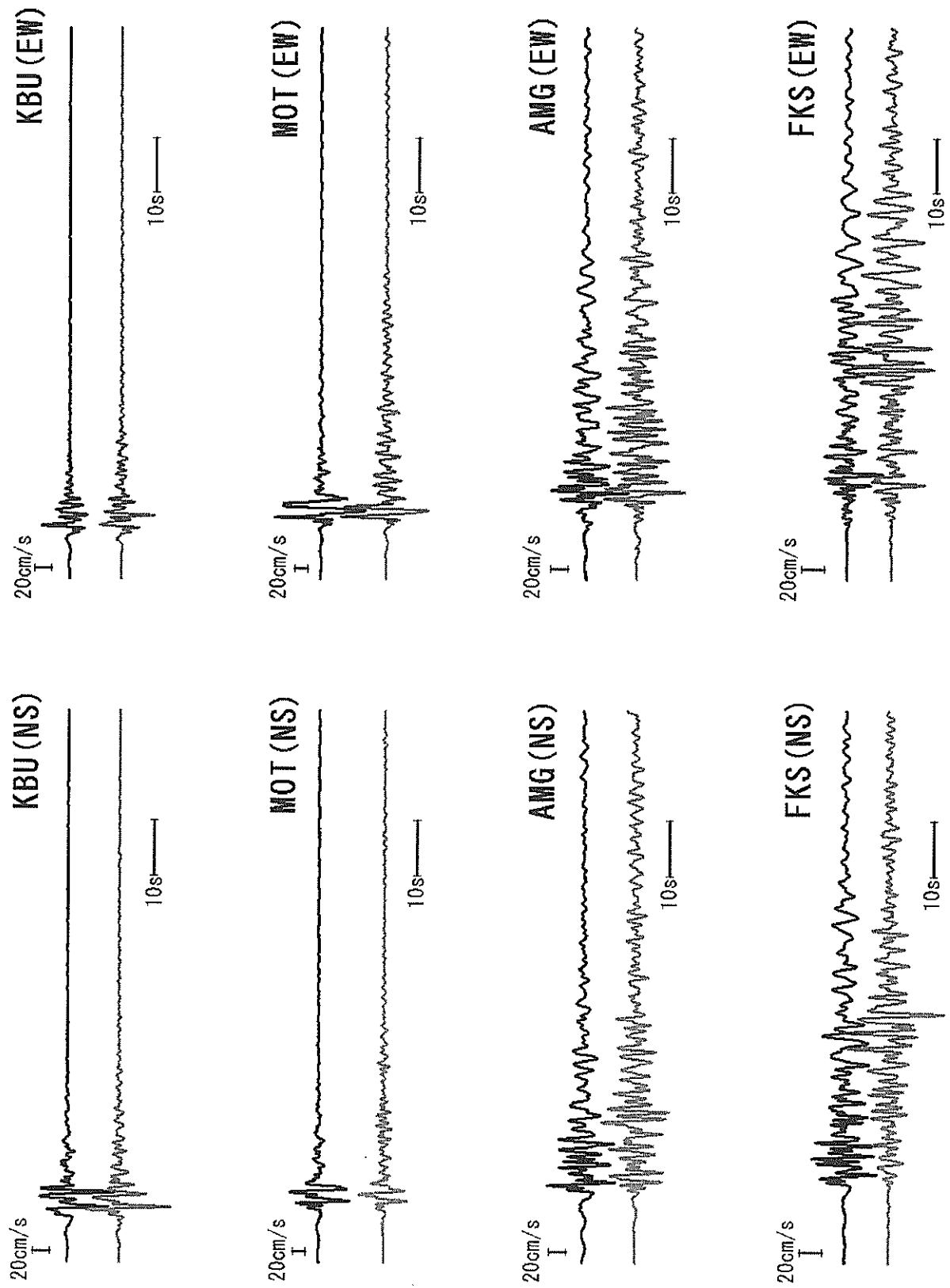


図-21 線型性を仮定した合成結果。黒は観測波，灰色は合成波。

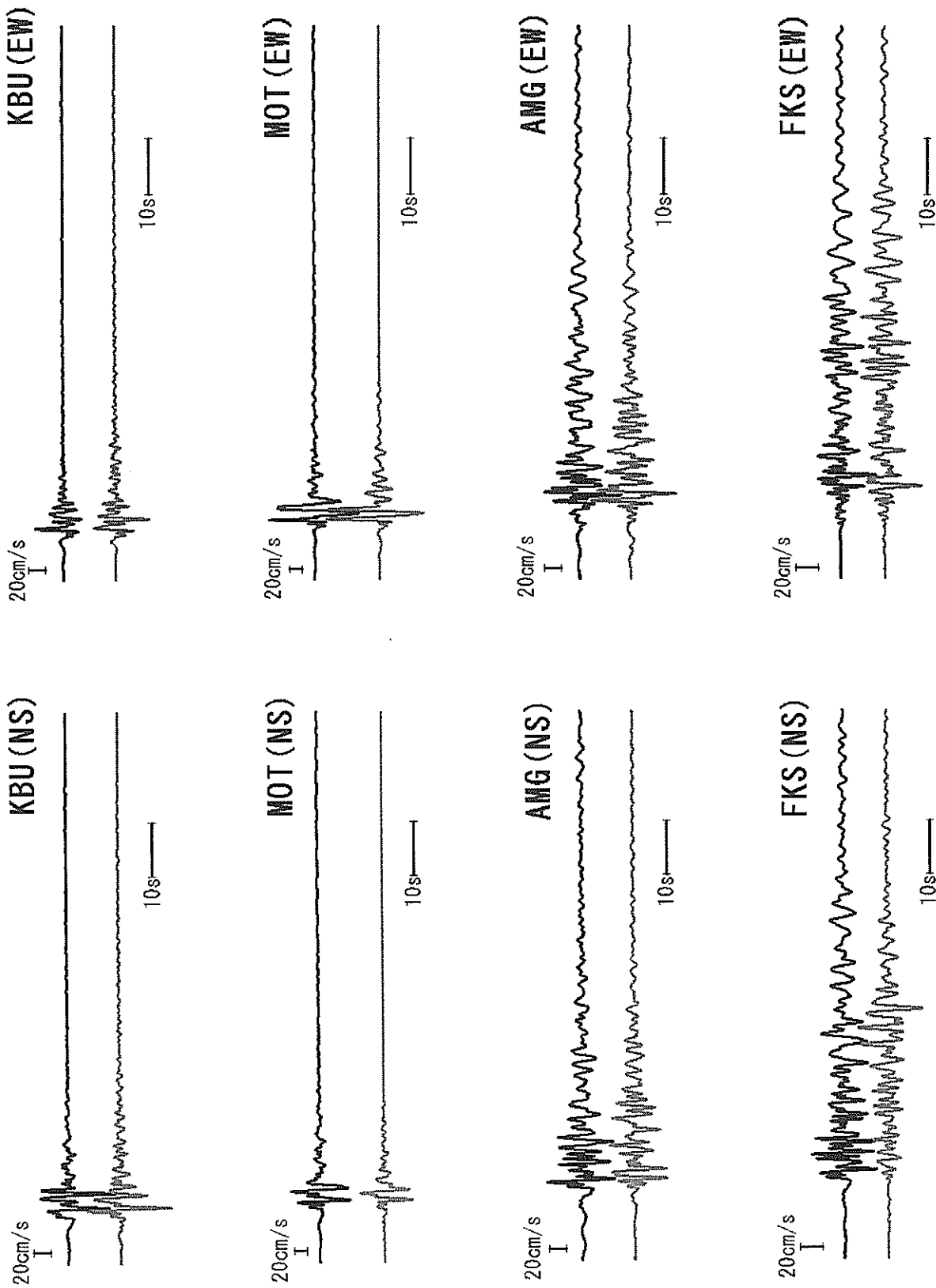


図-22 非線形パラメタを用いた合成結果。黒は観測波，灰色は合成波。

当然ではあるが、本震波形の再現性は良好である。しかし、子細に見ると、洪積地盤上の MOT の合成波においては、先頭の S 波パルスに続いて周期 2 秒程度の振動が長く続いており、観測波と一致していない。震源モデルの構築に用いられなかった尼崎 (AMG) と福島 (FKS) では、合成波と観測波の差異はより明瞭である。合成結果は明らかに過大評価となっており、また位相についても、合成波の位相は観測波の位相より系統的に早くなっている。AMG と FKS の観測波は、直達 S 波の後に数十秒におよぶ後続波を含むものである。このような長い後続波を経験的グリーン関数法で再現した例は多いとは言えない。しかし、例えば壇 (1991) は、Irikura (1986), Takemura and Ikeura (1987), Dan et al. (1989) の 3 種類の経験的グリーン関数法を用い、1980 年伊豆半島東方沖地震の御前崎の速度波形が、直達 S 波の後の 50 秒ほどの後続波を含め、良好に再現できることを示している。このような例を見る限り、経験的グリーン関数法は、本来、直達 S 波に続く数十秒におよぶ後続波にも適用可能であると考えられる。AMG と FKS において、合成波と観測波に差異が見られることと、AMG と FKS が沖積地盤上に位置することを考えあわせると、合成波と観測波の差異は非線形効果の影響であると考えられる。

次に、観測波が非線形挙動の影響を受けていると考えられる神戸本山、尼崎、福島の 3 地点について、非線形パラメタにより補正されたグリーン関数を用いて波形合成を行う。ここでは、非線形パラメタの値として、試行錯誤により表-5に示す値を用いることとした (神戸大学については非線形パラメタを用いない)。結果を図-22に示す。神戸本山の合成波では、先頭の S 波パルスに続く後続位相の過大評価が解消され、合成波は観測波に一層近づいた。尼崎と福島では、振幅の過大評価が著しく改善され、また、位相についても、かなりの改善が見られる。なお、ここでは山田他(1999)の震源モデルに一切手を加えずに用いていることを指摘したい。波形の改善は震源モデルのチューニングによるものではなく、もっぱら非線形パラメタの導入によるものである。

表-5 非線形パラメタの値 (兵庫県南部地震の場合)

	$\nu_1$	$\nu_2$
MOT	0.90	0.030
AMG	0.95	0.010
FKS	0.98	0.005

### 3.5 非線形パラメタの相互比較

ここで、波形合成に用いた非線形パラメタの値について

議論する。

1995 年兵庫県南部地震について得られた 3 地点での非線形パラメタ (表-5) を比較すると、震源から遠いサイトほど、 $\nu_1$  は大きく  $\nu_2$  は小さい傾向がある。これは、図-8に示すように、ここで用いる非線形パラメタは震源からサイトに至る過程で地震波が経由する堆積層の平均的な非線形性に対応しているためであると考えられる。実際には、震源に近い堆積層ではひずみレベルが大きいから非線形性が強く、震源から遠い堆積層ではその逆が成り立つ。震源から遠いサイトに到来する後続位相は、ひずみレベルが大きい部分とひずみレベルが小さい部分を經由するので、それらの効果を平均化した非線形パラメタを用いるときに、観測波との差異が最も小さくなるのではないかと考えられる。

図-23は 2000 年鳥取県西部地震および 1995 年兵庫県南部地震の波形合成のために用いた非線形パラメタを縦軸に  $\nu_1$ 、横軸に  $\nu_2$  をとって示したものである。 $\nu_1$  と  $\nu_2$  はもともと合成波と観測波の比較から独立に定めたものであるが、図-23を見ると  $\nu_1$  と  $\nu_2$  は互いに相関があるように見える。これは、地盤材料の剛性の低下 (すなわち S 波速度の低下) と減衰定数の増加は、ひずみレベルを介して互いに関係があるためであると考えられる (ただし、MOT のように継続時間のあまり長くない波形の場合、非線形パラメタのわずかな変化に対する合成結果の変化が小さいという事情もあり、MOT での非線形パラメタの値は今回の合成結果から十分に拘束されているとは言えない)。

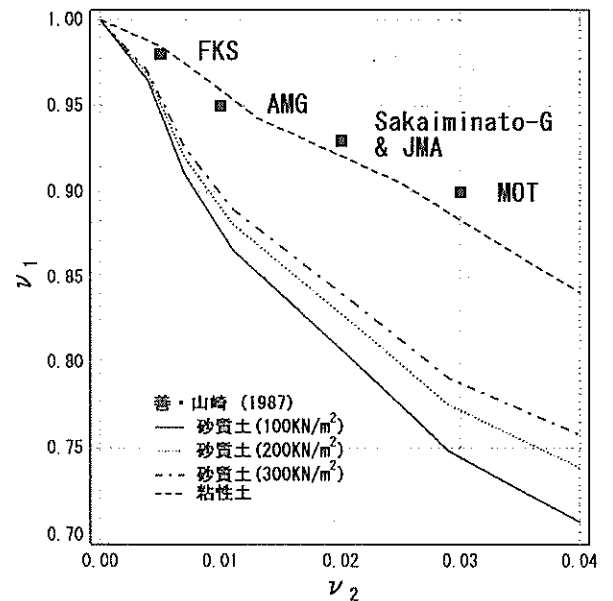


図-23 本研究で得られた非線形パラメタの値 (■)

要素レベルでは、地盤材料の剛性の低下（すなわち  $S$  波速度の低下）と減衰定数の増加をひずみレベルと関連づける実験式が提案されている。ここでは、その一つである善・山崎(1987)の実験式を図-23に重ね書きしている。上述のように、波形合成から求めた  $v_1$  と  $v_2$  は堆積層全体についての平均的な剛性と減衰定数の変化に対応するものであるから、それらの関係が要素レベルでの実験式と整合する必要はないが、実際にプロットしてみると両者の差は意外に小さく、波形合成から求めた  $v_1$  と  $v_2$  の関係は粘性土に対する善・山崎の実験式に近いことがわかる。

本稿では非線形パラメタを用いた postdiction を実施して比較的良好な結果を得ることができたが、同様の手法を prediction に用いるためには非線形パラメタの適切な設定方法が確立されねばならず、そのためには多くの課題が残されているのが実状である。非線形パラメタに影響を及ぼす要因としては、まず、表層地盤の物性とひずみレベルが考えられる。このとき、図-8により、サイト直下の表層地盤だけでなく、震源とサイトを結ぶ波線が横切る範囲での表層地盤の平均的な物性とひずみレベルが関連する。例えば、比較的震源に近いサイトでは、震源とサイトを結ぶ波線が横切る範囲での平均的な表層地盤のひずみレベルが大きいから、非線形性が比較的強くあらわれるものと考えられる（このとき  $v_1$  は比較的小さな値をとり  $v_2$  は比較的大きな値をとる）。一方、提案するパラメタは深さ方向についても平均化された値であるから、非線形性を示す表層地盤と、そうでない深層地盤との層厚の比も関連するであろう。このように、非線形パラメタに影響すると思われる要因が少なからず存在する中で、非線形パラメタの適切な設定方法を確立するためには、より多くの地震と観測点の組み合わせに対して非線形パラメタを用いた postdiction を実施することが今後必要になってくるものと考えられる。なお、図-23に示すように、2つのパラメタ間には地盤のひずみレベルを介して一定の関係があるものと期待されるが、このことはパラメタを設定する上では助けになるものと思われる。

#### 4. 結論

本研究では、従来より強震動予測の分野で用いられてきた経験的グリーン関数法に対し、大地震の滑り速度時間関数をより適切にモデル化できるようにすることと、媒質の非線形挙動の影響をより適切に反映できるようにすることの二点を念頭において改良を試みた。

経験的グリーン関数法に用いる滑り速度時間関数の補正関数については、従来のもの（入倉他，1997）をより一般化した式を提案した。提案式は、振幅スペクトルの  $1/T$  (Hz) での落ち込み防止という入倉他（1997）の補正関数の利点をそのまま引き継いでいるだけでなく、大地震の滑り始めの急激さを表現するパラメタ  $\alpha$  を含むので、動力学モデルへのフィッティングという点ではより好都合である。提案式から計算される大地震の滑り速度時間関数を中村・宮武（2000）の滑り速度時間関数にフィッティングさせることを試みたところ、 $\alpha$  の最適値は断層幅  $w$ ,  $f_{max}$  および大地震と小地震の立ち上がり時間の比  $N$  の影響を受けることがわかった。ただし、いずれのケースにおいても、 $\alpha$  の最適値は 0.51 ~ 1.58 の範囲に求まっており、経験的グリーン関数法において、 $\alpha$  の値を従来の入倉他（1997）の値 ( $\alpha=1$ ) から変更する必要性はさほど高くないと判断される。

一方、媒質の非線形挙動の取り扱いについては、経験的グリーン関数法において多重非線形効果を考慮するための「非線形パラメタ」を新たに定義し、その物理的意味について述べるとともに、2000年鳥取県西部地震および1995年兵庫県南部地震への適用事例を示した。提案するパラメタは、簡易なものであるにも関わらず、非線形性の影響を受けたサイトでの本震地動の合成結果を著しく改善するものである。

#### 5. あとがき

本研究で提案した非線形パラメタを、将来的には postdiction だけでなく prediction にも用いたいというのが著者らの希望である。しかし、これまでのところ、非線形パラメタの具体的な値としては本研究の2つの地震の計5箇所のサイト（鳥取県西部地震が2箇所、兵庫県南部地震が3箇所）について求められているだけであり、データの蓄積としては十分とは言えないだろう。今後、さらにデータを蓄積するとともに、非線形パラメタの値が地盤のひずみレベルとの関係においていかに説明されるかについても検討していく必要があると考えている。

(2002年11月15日受付)

#### 謝辞

東京工業大学の盛川仁助教授には本研究を実施する上で適切な助言をいただきました。東京大学地震研究所の武井康子氏、防災科学技術研究所の木下繁夫氏（当時）と福山英一氏からいただいたサジェスションにより本研究の内容は大きく改善されました。（株）ニュージェツ



クの山田雅行氏には 1995 年兵庫県南部地震の震源モデルの詳細について教えていただきました。派遣研究員の宮内慶一朗さんには図面の作成を手伝っていただきました。また本研究では関西地震観測研究協議会、K-net、Kik-net および気象庁の強震記録を使用しています。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 安中正・山崎文雄・片平冬樹 (1997) : 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164.
- 入倉孝次郎・香川敬生・関口春子 (1997) : 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B25.
- 岩田知孝・入倉孝次郎 (1986) : 観測された地震波から震源特性, 伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, Vol.39, pp.579-593.
- 岩田知孝, 関口春子 (2001) : 2000 年鳥取県西部地震の震源断層の実体, SEISMO, 50, pp.5-7.
- 上林宏敏・堀家正則・竹内吉弘 (1990) : 断層震源による不規則境界を有する三次元堆積盆地の地震動特性, 大阪府土木部 (1997) : 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書.
- 科学技術庁 (2000) : 第 1 回堆積平野地下構造調査成果 香川敬生, 入倉孝次郎, 武村雅之 (1998) : 強震動予測の現状と将来の展望, 地震 2, 51, pp.339-354.
- 釜江克宏・入倉孝次郎 (1997) : 1995 年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 500, pp.29-36.
- 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長 (1991) : 地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文集報告集, 第 430 号, pp.1-9.
- 川瀬博 (1993) : 表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション, 地震 2, 46, pp.171-190.
- 壇一男 (1991) : 半経験的波形合成法による震源域における強震地動の推定, 東京大学学位論文.
- 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.
- 鶴来雅人・田居優・入倉孝次郎・古和田明 (1997) : 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震 2, Vol.50, pp.215-227.
- 土木学会地震工学委員会レベル 2 地震動研究小委員会 (2000) : レベル 2 地震動研究小委員会の活動成果報告書, 第 3 章, 耐震設計に用いるレベル 2 地震動 (案), pp.7-51.
- 中村洋光・宮武 隆 (2000) : 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震 2, 53, pp.1-9.
- 野津厚 (2002) : 水平成層構造の地震波動場を計算するプログラムの開発-周波数に虚部を含む離散化波数法の計算精度-, 港湾空港技術研究所資料, No.1037.
- 野津厚・上部達生・佐藤幸博・篠澤巧 (1997) : 距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係, 港湾技研資料 No.893.
- 久田嘉章 (1997) : 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集, 第 501 号, pp.49-56.
- 松島信一・川瀬博 (2000) : 1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 534, pp.33-40.
- 翠川三郎 (1993) : 強震時に見られる地盤特性の非線形性, 地震 2, 46, pp.207-216.
- 三宅弘恵・岩田知孝, 入倉孝次郎 (1999) : 経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日 ( $M_{All}6.5$ ) 及び 5 月 13 日 ( $M_{All}6.3$ ) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, 地震 2, 51, pp.431-442.
- 三輪滋・池田隆明・綾部孝之・沼田淳紀 (2002) : 2000 年鳥取県西部地震における境港市の地盤の地震時挙動, 構造工学論文集, 48A, pp.445-455.
- 山田雅行・平井俊之・岩下友也・釜江克宏・入倉孝次郎 (1999) 兵庫県南部地震の震源モデルの再検討, 日本地震学会講演予稿集.
- 八幡夏恵子 (2001) : 鳥取県西部地震における日野の観測地点の地盤増幅特性に対する非線形性の影響, 第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2345-2346.
- 吉川大智, 盛川仁, 赤松純平, 野口竜也, 西田良平 (2002) : 余震, 微動, 重力を用いた弓ヶ浜半島における 2 次元基盤構造の推定, 地震 2, 55, pp.61-73.
- 理論地震動研究会 (1994) : 地震動-その合成と波形処理, 鹿島出版会.
- 善功企・山崎浩之・梅原靖文 (1987) : 地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 1 号, pp.41-113.
- Aki, K. and Larner, L. (1970) : Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.933-945.
- Bielak, J., Ghattas, O. and Bao, H. (1998) : Ground motion modeling using 3D finite element methods, *The Effects of*

- Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, pp.121-133.
- Boore, D.M. (1983) : Stochastic simulation of high frequency ground motion based on seismological models of radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894.
- Bouchon, M. (1981) : A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.71, pp.957-971.
- Dan, K., T. Watanabe and T. Tanaka (1989) : A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, *J. Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 396, pp.27-36.
- Frankel, A (1993) : Three-dimensional simulation of ground motions in the San Bernardino Valley, California, for hypothetical earthquakes on the San Andreas Fault, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.83, pp.1020-1041.
- Fujiwara, H. (2000) : The fast multipole method for solving integral equations of three-dimensional topography and basin problems, *Geophysical Journal International*, Vol.140, Issue 1, pp.198-210.
- Fukushima, Y and Tanaka, T. (1990) : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.84, pp.757-783.
- Fukuyama, E., M. Ishida, S. Horiuchi, H. Inoue, S. Hori, S. Sekiguchi, T. Eguchi, A. Kubo, H. Kawai, H. Murakami and K. Nonomura (2001) : NIED seismic moment tensor catalogue January-December, 2000, Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 217, pp.1-131.
- Hartzell, S.H. (1978) : Earthquake aftershock as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.*, 5, pp.104.
- Hartzell, S.H. and T.H. Heaton (1983) : Inversion of Strong Ground Motion and Teleseismic Waveform Data for the Fault Rupture History of the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, pp.1553-1583.
- Irikura, K. (1983) : Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, 32, pp.63-104.
- Irikura, K. (1986) : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, pp.151-156.
- Joyner, W.B. and Boore, D.M. (1982) : Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.71, pp.2011-2038.
- Kamae, K., Irikura, K. and Pitarka, A. (1998) : A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.88, pp.357-367.
- Kohketsu, K. (1987) : Synthetic seismograms in realistic media: A wave-theoretical approach, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 62, pp.201-245.
- Lowson, C.L. and R.J. Hanson (1974) : Solving Least Squares Problems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Luco, J.E. and Apsel, R.J. (1983) : On the Green's functions for layered half-space, Part I, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.909-923.
- Nozu, A. and T. Uwabe (2000) : Applicability of empirical Green's function method to strong motion records on man-made island in Kobe, *Proc. 12th WCEE*, 538/4/A.
- Ohno, S., Ohta, T., Ikeura, T. and Takemura, M. (1993) : Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, *Tectonophysics*, 218, pp.69-81.
- Saikia, C.K. (1994) : Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature: modeling of Lg waves in eastern North America, *Geophys. J. Int.*, Vol.118, pp.142-158.
- Sato, T., Graves, R.W. and Somerville, P.G. (1999) : Three dimensional finite difference simulation of long period strong motions in the Tokyo metropolitan area during the 1990 Odawara earthquake and the great 1923 Kanto earthquake in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.89, pp.579-607.
- Schnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed (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.
- Takemura, M. and T. Ikeura (1988) : A semi-empirical method using a hybrid stochastic and deterministic fault models: Simulation of strong ground motions during large earthquakes, *J. Phys. Earth*, 36, 89-106.
- Wald, D.J. and Graves, R.W. (1998) : The seismic response

of the Los Angeles Basin, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.88, pp.337-356.

記号表

$A_0$  : 加速度スペクトルの高周波側のフラットレベル  
 $C$  : 大地震と小地震の応力降下量の比  
 $D_0$  : 最終滑り量  
 $f(t)$  : 滑り速度時間関数の補正関数  
 $f_b$  : バンド幅  
 $f_{max} : f_{max}$   
 $g(t)$  : 補正前の経験的グリーン関数  
 $g_c(t)$  : 補正後の経験的グリーン関数  
 $h$  : 減衰定数  
 $N$  : 大地震と小地震の断層長さの比  
 $n'$  : 波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための任意の整数  
 $r$  : 小地震の震源からサイトまでの距離  
 $r_0$  : 大地震の破壊開始点からサイトまでの距離  
 $r_{ij}$  :  $ij$  要素からサイトまでの距離  
 $S$  :  $V_1(t)$  と  $V_2(t)$  の残差  
 $t$  : 余震記録上で波形後半のある位相の到来時刻  
 $T$  : 大地震の立ち上がり時間 (ライズタイム)  
 $t'$  : 波形後半のある位相が震源からサイトまで到達するのに要した時間  
 $t_0$  : 余震記録上で直達 S 波の到来時刻  
 $t_0'$  : 余震記録上で直達 S 波が震源からサイトまで到達するのに要した時間  
 $t_c$  : 式 (7) における積分区間の上端  
 $t_d$  : 最大滑り速度到達時間  
 $t_{ij}$  : 破壊フロントが  $ij$  要素を通過する時刻  
 $t_r$  : ライズタイム  
 $u(t)$  は小地震による地震動  
 $U(t)$  : 大地震による地震動  
 $U_0$  : 変位スペクトルの低周波側のフラットレベル  
 $v(t)$  : 小地震の滑り速度時間関数  
 $V(t)$  : 大地震のすべり速度時間関数  
 $V_1(t)$  : 動力学モデルによる滑り速度時間関数の近似式  
 $V_2(t)$  : 式 (5) で得られる滑り速度時間関数  
 $\bar{V}_2(t)$  : 最適な  $\alpha$  に対応する  $V_2(t)$   
 $V_m$  : 最大滑り速度振幅  
 $V_s$  : 基盤の S 波速度 (1. で)  
 $V_s$  : 堆積層の非線形時の S 波速度 (3. で)  
 $V_{s0}$  : 堆積層の線形時の S 波速度  
 $v_r$  : 破壊伝播速度

$V_r$  : 破壊伝播速度  
 $w$  : 破壊領域の幅  
 $\alpha$  は大地震の滑り速度時間関数の滑り始めの急激さを規定する正のパラメタ  
 $\Delta \sigma$  : 動的応力降下量  
 $\mu$  : 剛性率  
 $v_1$  : 堆積盆地内の媒質の平均的な S 波速度の低下率  
 $v_2$  : 堆積盆地内の媒質の平均的な減衰定数の増分  
 $\xi_{ij}$  : 破壊開始点から  $ij$  要素までの距離  
 $\omega$  : 角振動数

## 付録 既存の手法における非線形性の取り扱い

ここでは、既存の手法、すなわち、サイト直下の表層地盤に下方から入射する地震波は伝播経路の非線形挙動の影響を受けていないと仮定し、サイト直下の表層地盤の非線形挙動を1次元問題として評価する手法による場合、Sakaiminato-G で観測された本震波形を十分に再現できないことを示す。

Sakaiminato-G 直下の表層地盤の非線形挙動は、過剰間隙水圧の上昇を含むような強い非線形挙動であったとされている(三輪他, 2002)。そこで、ここではこのような強い非線形挙動に対応できる手法として、有効応力解析プログラム FLIP (井合他, 1990) を用いることとした。有効応力解析のモデルパラメタのうち、S 波速度と密度については、ボーリング調査の結果(一井他, 1999)に基づいて定めた。モデルパラメタのうち液状化特性を規定するパラメタ(液状化パラメタ)については、簡易設定法(森田他, 1997)により初期値を定め、以下に述べる検証計算の結果を踏まえて若干の調整を行った。最終的に用いた液状化パラメタの値を表-A.1に示す。モデル下端には粘性境界を用いている。

有効応力解析の精度はモデルパラメタの精度に大きく依存するので、経験的グリーン関数法と組み合わせた解析を実施する前に、モデルパラメタの妥当性を確認するための検証計算を実施することが望ましい。ここでは、この検証を次のように実施する。まず気象庁観測点(JMA)での観測波(transverse成分)からS波速度440m/s相当の工学的基盤に入射した地震波を逆算する。気象庁観測点は、表層地盤の非線形挙動の影響はあるが、Sakaiminato-G と異なり過剰間隙水圧の上昇の影響は小さいと考えられている(三輪他, 2002)。そこで、気象庁観測点の表層地盤の非線形挙動は等価線形解析により十分に追えるものと考え、三輪他(2002)と同様、等価線形解析プログラム FDEL (杉戸他, 1994) を用いて逆算を実施する。このときの地盤定数は三輪他(2002)を参考に定めた。次に、ここで得た入射波を入力して、表-A.1のモデルパラメタを用い、Sakaiminato-G の表層地盤に関する有効応力解析を実施した。その結果得られた地表での速度波形の transverse 成分(2Hz以下)を観測波と比較したものが図-A.1である。計算結果は観測波と良く一致しており、ここで用いている有効応力解析プログラムと表-A.1のモデルパラメタの組み合わせにより、Sakaiminato-G 直下の表層地盤の非線形挙動は十分に再現できているものと判断される。

次に、経験的グリーン関数法により線形の状態で合成した波形から、線形の重複反射理論により S 波速度

440m/s 相当の工学的基盤に入射した地震波を逆算し、これを上記の有効応力解析モデルに入力して、地表での速度波形を求める。このようにして求めた波形を観測波と比較したものが図-A.2であるが、計算された速度波形は波形後半部分において観測波を過大評価していることがわかる。以上のことから、既存の手法、すなわち、サイト直下の表層地盤に下方から入射する地震波は媒質の非線形挙動の影響を受けていないと仮定し、サイト直下の表層地盤の非線形挙動を1次元問題として評価する手法による場合、Sakaiminato-G で観測された本震波形を十分に再現できないことがわかる。

表-A.1 FLIP の解析に用いた液状化パラメタ

深度	S1	W1	P1	P2	C1	$\phi_f$	$\phi_p$
G.L.-2~4m	0.005	2.3	0.5	1.12	1.6	39.0	28.0
G.L.-4~12m	0.005	11.0	0.5	1.02	1.6	40.0	28.0

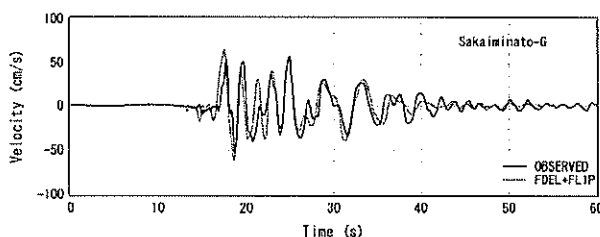


図-A.1 有効応力解析のパラメタの検証のため、気象庁の記録から逆算した入射波を入力した解析結果(波線)と観測結果(実線)との比較

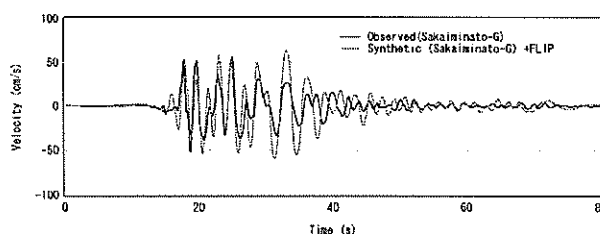


図-A.2 経験的グリーン関数法と1次元の有効応力解析を組み合わせた境港-Gの本震波形の計算結果(波線)と観測結果(実線)との比較

## 参考文献

- 井合進・松永康男・亀岡知弘(1990): ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第4号, pp.27-56.
- 一井康二・佐藤幸博・佐藤陽子・星野裕子・井合進(1999): 港湾地域強震観測地点資料(その6), 港湾技術研究所資料, No.935.
- 杉戸真太・合田尚義・増田民夫(1994): 周波数依存性

を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, 493/II-27, pp.49-58.

三輪滋・池田隆明・綾部孝之・沼田淳紀(2002): 2000年鳥取県西部地震における境港市の地盤の地震時挙動, 構造工学論文集, 48A, pp.445-455.

森田年一・井合進・H. Liu・一井康二・佐藤幸博(1997): 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技術研究所資料, No.869.