

### 3.3.11 三次元強震動波形の推定に関する研究

## 目 次

### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5 ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成 17 年度業務目的

### (2) 平成 17 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
  - 1) 三次元強震動推定手法の構築
  - 2) 三次元強震動の試算
  - 3) 地域波の収集・整理
  - 4) 三次元地震動波形 D B 登録のための情報整理
- (c) 業務の成果
  - 1) 三次元強震動推定手法の構築
  - 2) 三次元強震動の試算
  - 3) 地域波の収集・整理
  - 4) 三次元地震動波形 D B 登録のための情報整理
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

### (3) 平成 18 年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 三次元強震動波形の推定に関する研究

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名	メールアドレス
財団法人 地域 地盤 環境 研究所	特別研究員	入倉孝次郎	irikura@geor.or.jp

(c) 業務の目的

将来発生する可能性の高い地震を想定して3次元強震動を推定する方法を構築し、最大規模の強震動試算をおこなう。また、設計に用いられている地域波についても調査し、これらを3.3.10で検討される三次元地震動データベースに大地震強震動波形およびその前提資料として提供する。

(d) 5カ年の年次実施計画

1)平成14年度：

三次元強震動波形の推定手法に関する調査と大阪平野を対象とした推定手法の検討を行った。

大阪平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行った。

大阪平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行った。

2)平成15年度：

濃尾平野を対象とする三次元強震動波形の推定手法を検討した。

濃尾平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行った。

濃尾平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行った。

大阪平野を対象とした三次元強震動波形の推定を補足した。

3)平成16年度：

関東平野を対象とする三次元強震動波形の推定手法を検討した。

関東平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行った。

関東平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行った。

大阪平野・濃尾平野を対象とした三次元強震動波形を補足した。

三次元強震動波形を三次元強震動データベースに反映した。

4)平成17年度：

3次元強震動計算手法を適用条件毎に整理し、その解説を作成する。

過去の地震の大被害域ではあるが記録の得られていない地点において、強震動の試算を行う。

地域波の収集・整理を行う。

三次元地震動シミュレーション波形を三次元地震動データベースに登録するための情報整理とフォーマット変換を行う。

5)平成18年度：

3次元強震動計算手法およびそれに付随する周辺技術についての解説を追加作成し、これまでに作成した手法解説とともに、ユーザーが参照できる形式（PDFあるいはHTML）で整理する。

既往3次元強震動波形について、必要油量など3次元震動台の限界性能に関わる物理量を計算し、限界性能に対する位置付けを評価する。

3次元震動台の限界性能（必要油量など）を考慮し、その能力を最大限活用する強震動を策定する。対象はパルス波的な震源近傍強震動とやや長周期地震動を含む継続時間の長い地震動の2タイプとする。

(e) 平成17年度業務目的

1) 三次元強震動波形推定手法の検討

昨年度は経験的グリーン関数法の手法解説を作成した。経験的グリーン関数法の考え方はシンプルであるものの、適用にあたって考慮すべきことが多い。そこで、今年度は手法を適用するにあたっての留意点、条件を整理し、その解説を作成する。

2) 三次元強震動の試算

過去の地震において、大被害域ではあるが記録の得られていない地点で、どのような地震動が生じていたか、興味深いものがある。またそのような地震動は既往観測記録を上回る規模となる可能性がある。そこで、観測記録の無い任意地点に適用可能な統計的グリーン関数法と離散化波数法のハイブリッド法を用いて、強震動の試算をおこなう。対象として、1995年兵庫県南部地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震を想定する。

3) 地域波の収集・整理

全国各地で設計用入力地震動として利用されている地域波も、三次元震動台への入力のひとつとして整備しておくべきものであると考えられる。そこでそのような目的で合成され、実際に用いられている波形を収集・整理し、その解説を作成する。対象とする地域は、東京、名古屋、大阪を想定する。

4) 三次元地震動波形DB登録のための情報整理

前年度までに実施した地震動シミュレーション波形について、三次元地震動データベースに登録するための情報整理とフォーマット変換を行う。

また、その際の、断層・地盤の設定に関する諸元を三次元地震動データベースに登録できる形式で整理する。

(2)平成17年度の成果

(a) 業務の要約

平成17年度は次の各項目を実施した。

#### 1) 三次元強震動推定手法の構築

強震動シミュレーション法について整理し、経験的グリーン関数法の位置付けを明確にした。また、経験的グリーン関数法実際に適用にあたっての留意点、条件を整理し、その解説を作成した。

#### 2) 三次元強震動の試算

1995年兵庫県南部地震，2003年十勝沖地震，2004年新潟県中越地震について、統計的グリーン関数法と離散化波数法のハイブリッド法を用いて震源域の強震動を評価した。まず観測記録の得られている地点において、手法および想定したモデルの妥当性を検証し、次に記録の得られていない大震動域の地震動を推定した。

#### 3) 地域波の収集・整理

東京、名古屋、大阪において、設計用入力地震動として利用されている地域波を調査し、必要に応じてそれらを収集した。また、各地震動がどのような経緯で作成されたかについて、解説を作成した。

#### 4) 三次元地震動波形DB登録のための情報整理

前年度までに実施した地震動シミュレーション波形を三次元地震動データベースに登録するため、波形を共通フォーマット（K-NET形式）に変換するとともに、断層・地盤の設定に関する諸元を三次元地震動データベースに登録できる形式で整理した。

### (b) 業務の実施方法

#### 1) 三次元強震動推定手法の構築

##### a) 強震動波形計算手法の概要

強震動波形計算手法の考え方についての再整理を行った。

##### b) 経験的グリーン関数法の検討

経験的グリーン関数法について、その適用条件および留意点について整理し、解説を作成した。

#### 2) 三次元強震動の試算

##### a) 1995年兵庫県南部地震の検討

統計的グリーン関数法と離散化波数法のハイブリッド法を用いて、観測記録の得られている地点において手法および想定したモデルの妥当性を検証した上で、記録の得られていない大震動域の地震動を推定した。

##### b) 2003年十勝沖地震の検討

a)と同様の検討を、2003年十勝沖地震について実施した。

##### c) 2004年新潟県中越地震の検討

a)と同様の検討を2004年新潟県中越地震について実施した。

#### 3) 地域波の収集・整理

##### a) 大阪平野におけるシミュレーション波

大阪平野において用いられている大阪府土木部による検討波を、許可を得た上で入手し、波形想定の際緯について解説を作成した。

b) 濃尾平野におけるシミュレーション波

濃尾平野において用いられている国土交通省中部地方整備局などによる検討波について、a)と同様の検討を実施した。

c) 関東平野におけるシミュレーション波

関東平野において用いられる検討波について、文献著者に了解を得た上で、a)同様の検討を実施した。

4) 三次元地震動波形DB登録のための情報整理

a) フォーマット変換

前年度までに実施した地震動シミュレーション波形について、必要なヘッダ情報を盛り込んだ共通フォーマット（K-NET形式）への変換をおこなった。

b) 計算諸元の整理

計算に用いた断層・地盤の設定に関する諸元を、三次元地震動データベースに登録できる形式（PDF形式）で整理した。

(c) 業務の成果

1) 三次元強震動推定手法の構築

a) 強震動波形計算手法の概要

地震とは、震源断層の破壊によって発生した地震波動が伝播し、サイト近傍の地盤構造の影響を受けて対象構造物を揺らす現象である。このとき、規模の小さい地震の震源は断層面積およびすべり量が小さく、規模の大きい地震は大きな面積の断層が大きくすべることになる（図1）。

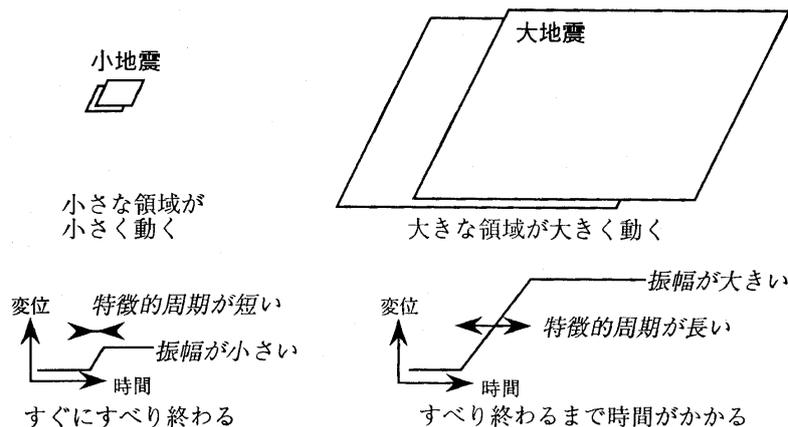


図1 大地震と小地震

大地震に比べて小地震の震源断層は小さく、その観測記録は点に力が加わった場合の伝播経路およびサイト周辺地盤の応答と近似的に考えることができる（物理用語ではグリーン関数）。大地震の断層面を幾つかの小断層に分割すると、断層全体が破壊す

る大地震は小断層がそれぞれ破壊する小地震の集合として評価することができる。すべりの成長と断層破壊の伝播による時間遅れと、地震波が生じた場所（小断層）から地震動を評価する地点との距離による震幅の違いを考慮して小地震による波形を順に足し合わせると、大地震による波形を合成することができる。これが強震動評価の基本的な考え方である。このとき、適用条件に応じて小地震の記録（グリーン関数）をどのように仮定するかにより、

- 1) 経験的グリーン関数法（観測小地震波形を用いる：Irikura(1986)<sup>1)</sup>など）
- 2) 統計的グリーン関数法（スペクトルに適合させた人工地震波を用いる：釜江・他(1990)<sup>2)</sup>など）
- 3) 理論計算法（波動伝播理論に基づく計算波を用いる：3次元差分法 [Graves(1996)<sup>3)</sup>] など）
- 4) ハイブリッド法（2）、3)の長所を活かし短所を補うように合成）

の各種法が用いられている。平成16年度には、このうち経験的グリーン関数法について解説を行った。今年度は、その使用にあたっての留意点を以下に解説する。

#### b) 経験的グリーン関数法の検討

ここでは、経験的グリーン関数法を実際の問題に適用する際の留意点について整理する。経験的グリーン関数法は簡便に強震動が合成できる便利な手法であるが、利用にあたっては以下に述べるように幾つかの注意事項がある。

##### ・記録の精度を吟味する

合成結果の精度は、要素地震として用いる観測記録の精度に依存する。波形およびスペクトルを良く検討し、できるだけ高精度の記録を用いることが望ましい。それが適わない場合は、記録の適用限界をわきまえて用いる必要がある。特に、加速度記録は長周期（低周波）成分がノイズの影響を受けているものが多いので、ローカット・フィルター処理を施して用いることが望ましい。図2に見られる記録では、周期2秒以上（周波数0.5Hz以下）にノイズの影響が見られる。

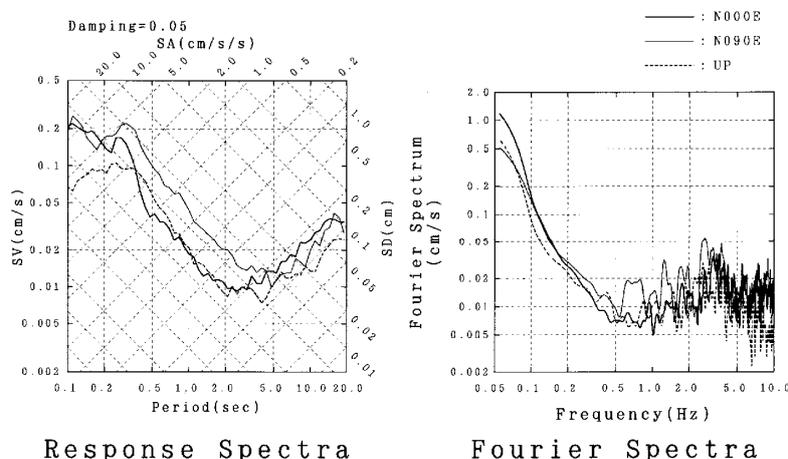


図2 長周期（低周波）成分がノイズの影響を受けた記録

・震源メカニズムのあまりに違うものを使わない

経験的グリーン関数で用いる要素地震は、対象地震の震源特性を反映したものである必要がある。そのため、震源メカニズム（インターネットで公開されているモーメント・テンソル解など）を調査し、対象地震と同様のメカニズムを持つものを用いるべきである。震源メカニズムの大きく異なるものは、特に長周期帯域で Radiation pattern による影響が異なることが危惧される。ただし、後述するように、長周期帯域を理論的手法で置き換えたハイブリッド法により Radiation pattern の違いを補償できれば、その限りではない。

・非線形応答

経験的グリーン関数法では、小地震と大地震で地盤の応答が等しいと仮定している。このことは、地震動の大きさによらず地盤応答特性が同じ、つまり線形応答を仮定していることになる。一般に、大地震動を受けた地盤は非線形特性を示すので、この影響を何らかの形で取り入れる必要がある。よく用いられる方法は、経験的グリーン関数法で合成した地表面地震動を線形の地盤応答を仮定して非線形挙動を考慮しなくても良いほど硬質な深層まで戻し、非線形の地盤応答を考慮して再び地表面に上げるものである（図3）。

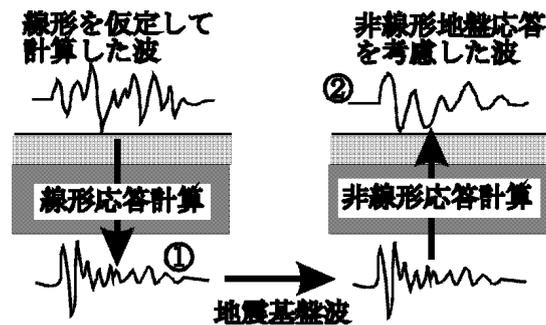


図3 非線形応答の補正法

・Nの設定

断層分割数（重ね合わせ数）は、対象とする大地震と要素小地震の地震モーメント比から設定する。対象とする大地震が既に発生したもので観測記録が得られている場合、公表されている地震モーメント値をそのまま使うだけでなく、図4に示すように大地震と小地震のスペクトル比を取り、実際の重ね合わせ数を検討することが望ましい。図では複数の観測点によるスペクトル比を平均し、それに対応する理論スペクトル比をフィッティングすることにより、両地震のモーメント比および応力パラメータ（応力降下量）比を推定している。応力パラメータの補正係数をCとすると、低周波数のスペクトル比が  $C \cdot N^3$  に対応し、高周波数のスペクトル比が  $C \cdot N$  に対応することになる。この例では  $C=1.48$  で、大地震の方が大きな応力パラメータとなるような合成が必要であることが示されている。このようにして重ね合わせパラメータを設計することにより、対象地震記録に対応した合成が容易となる。

また、Irikura(1986)<sup>1)</sup>の重ね合わせでは、Nが10程度よりも大きい場合に、大地震と小地震のコーナー周波数の中間周波数帯が小さくなる（落ち込む）現象が見られる

ことがある。あまり大きな重ね合わせ数を用いる場合には、中間規模の地震を一旦合成し、それを用いて大地震を合成する2段階合成法を用いることが望ましい。この落ち込みを軽減する合成法 [入倉・他(1997)<sup>4)</sup>] も提案されている。逆に  $N$  を小さくし過ぎ、小断層間を破壊が伝播する時間が立ち上がり時間に比べて大き過ぎる設定では、計算波形が連続せずに串団子のような包絡形状となる場合がある。そのような状況にならないように、適切な  $N$  を設定することが望ましい。 $N$  を断層長さ方向 ( $NL$ )、断層幅方向 ( $NW$ )、すべり量方向 ( $ND$ ) でそれぞれ設定する場合、横長の断層などでは必ずしも  $NL=NW=ND$  とならない場合がある。その際、断層面積の重ね合わせ数とすべり量の重ね合わせが整合している必要があるため、

$$ND = \sqrt{NL \times NW}$$

の関係を満たしている必要がある。

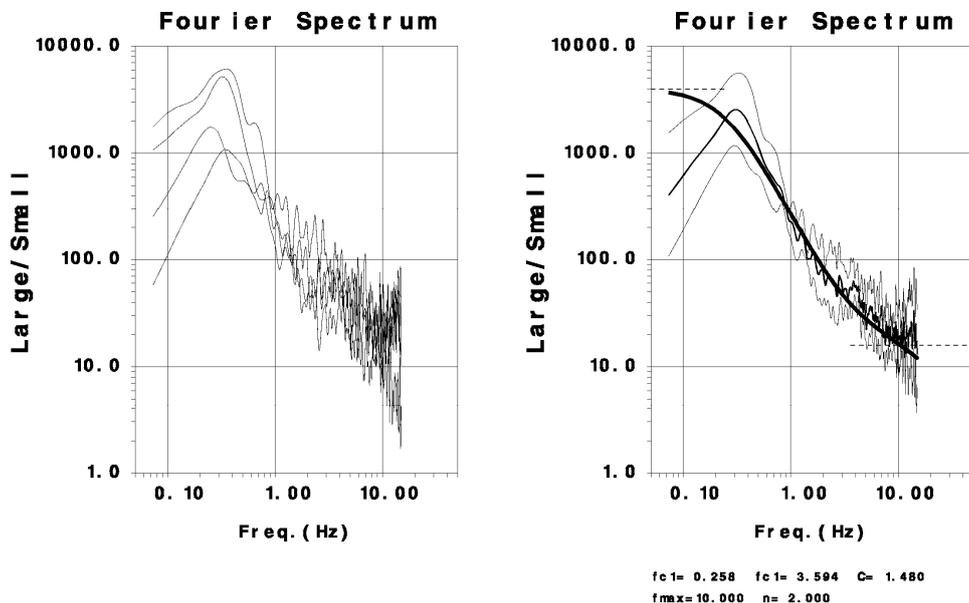


図4 重ね合わせパラメータの設計

・  $n$  の設定

$n$  は、前述のように  $n^{-2}$  則に従う重ね合わせをコントロールするパラメータである。再分割をおこなった重ね合わせの時間間隔を波形のサンプリング間隔 ( $\Delta t$ ) 程度にすることが良いので、立ち上がり時間を  $\tau$  として、

$$\Delta t = \frac{\tau}{(ND-1) \times n'}$$

となるように設定することが望ましい (こうすると、再分割した部分の重ね合わせが BOXCAR になる)。また、分割数  $ND$  を大きくした場合、 $n$  が 1 に近い値となる場合がある。この場合は、Irkura(1986)<sup>1)</sup> のモデルを外れ、高周波数が過大評価される可能性があるため、注意が必要である。

## 2) 三次元強震動の試算

### a) 1995年兵庫県南部地震の検討

震源モデルとして、表 1 および図 5 に示すフォーワードインバージョンによって推定された松島・川瀬(2000)<sup>5)</sup>の震源モデルを用いる。まず、観測記録の得られている関西地震観測研究協議会の MOT サイトにおいて、モデルの検証をおこなった。表 2 に示すように、堆積層は大阪堆積盆地構造モデル [ 宮腰・他(1999)<sup>6)</sup> ] を参照し、基盤岩深度は松島・川瀬(2000)<sup>5)</sup>の地盤構造モデルを参照して与えた。図 6 に観測記録とシミュレーション波形の比較を示す。なお、同地点の観測地震動の粒子軌跡は水平面に対してほぼ 45 度傾いている。これは盆地端部において S 波の波面が曲げられた効果と考えられるが、水平成層構造を仮定した計算では反映されない。そこで、六甲山系に直交する NS-UD 面を 45° 傾け、NS 成分の一部を UD 成分に加えることで、上下動に見られるパルス波を再現している。

表 1 松島・川瀬(2000)<sup>5)</sup>の断層パラメータ

subfault		1	2	3	4
セグメント		六甲山			
断層走行	(°)	53	53	53	233
断層傾斜	(°)	90	90	90	85
すべり角	(°)	180	180	180	180
アスペリティ長さ	(km)	4.5	4.5	8.0	8.0
アスペリティ幅	(km)	5.0	5.0	10.0	10.0
アスペリティ面積	(km <sup>2</sup> )	22.5	22.5	80.0	80.0
地震モーメント(subfault)	(dyne-cm)	$0.62 \times 10^{25}$	$1.07 \times 10^{25}$	$2.59 \times 10^{25}$	$4.83 \times 10^{25}$
地震モーメント(セグメント)	(dyne-cm)	$0.91 \times 10^{26}$			
総地震モーメント	(dyne-cm)	$0.91 \times 10^{26}$			
応力降下量	(bar)	234	156	86	86
立ち上がり時間	(s)	0.42	0.66	1.20	1.50
破壊伝播速度	(km/s)	2.8			

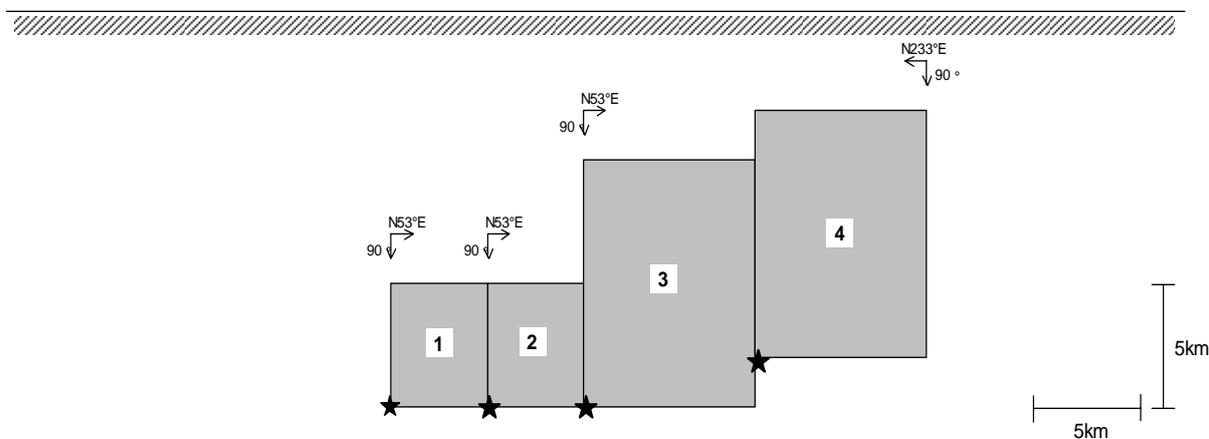


図 5 松島・川瀬(2000)<sup>5)</sup>の断層モデル

表3 MOTの地盤構造モデル

No.	Depth(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	(kg/m <sup>3</sup> )
1	0	1600	350	1700
2	77	1800	550	1800
3	437	2500	1000	2100
4	969	5400	3200	2700
5	5070	6000	3460	2700
6	18000	6700	3870	2800
7	34500	7500	4330	3000

次に、図7に示すa00～a03の各地点でMOTの速度構造モデルを仮定して計算した波形例を図8に示す。

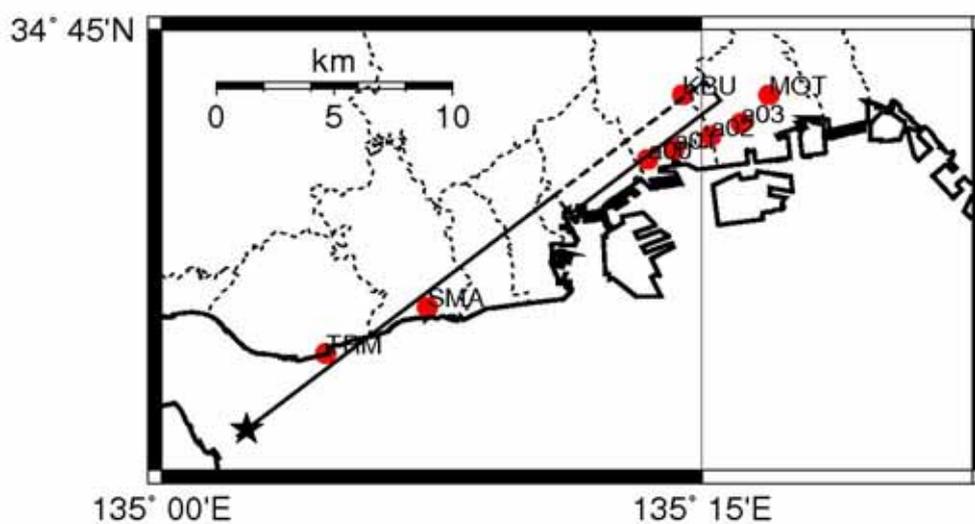


図7 ハイブリッド法による強震動評価地点(a00～a03)

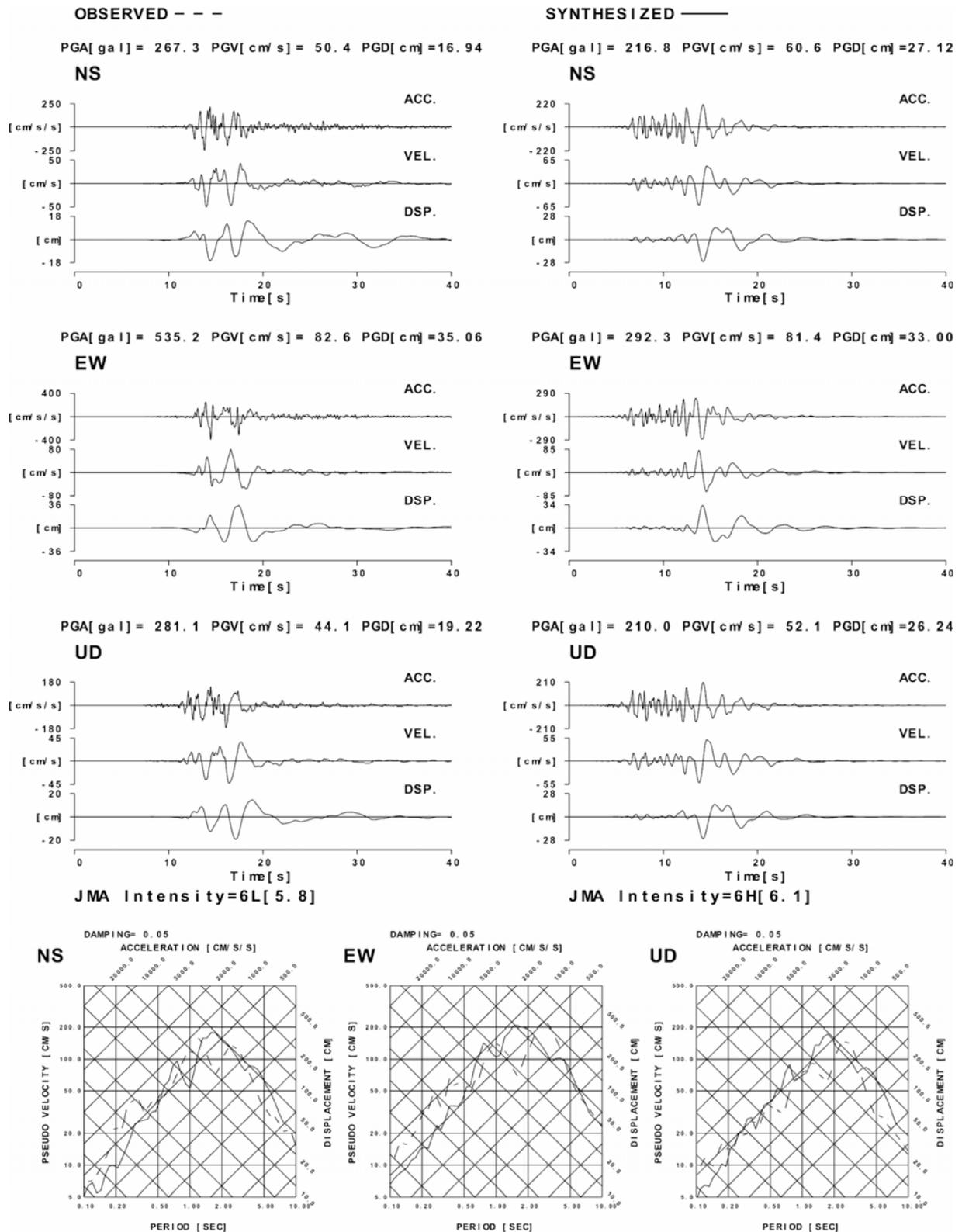


図6 MOTにおけるハイブリッド合成結果（右波形と実線スペクトル）と観測記録（左波形と破線スペクトル）の比較。

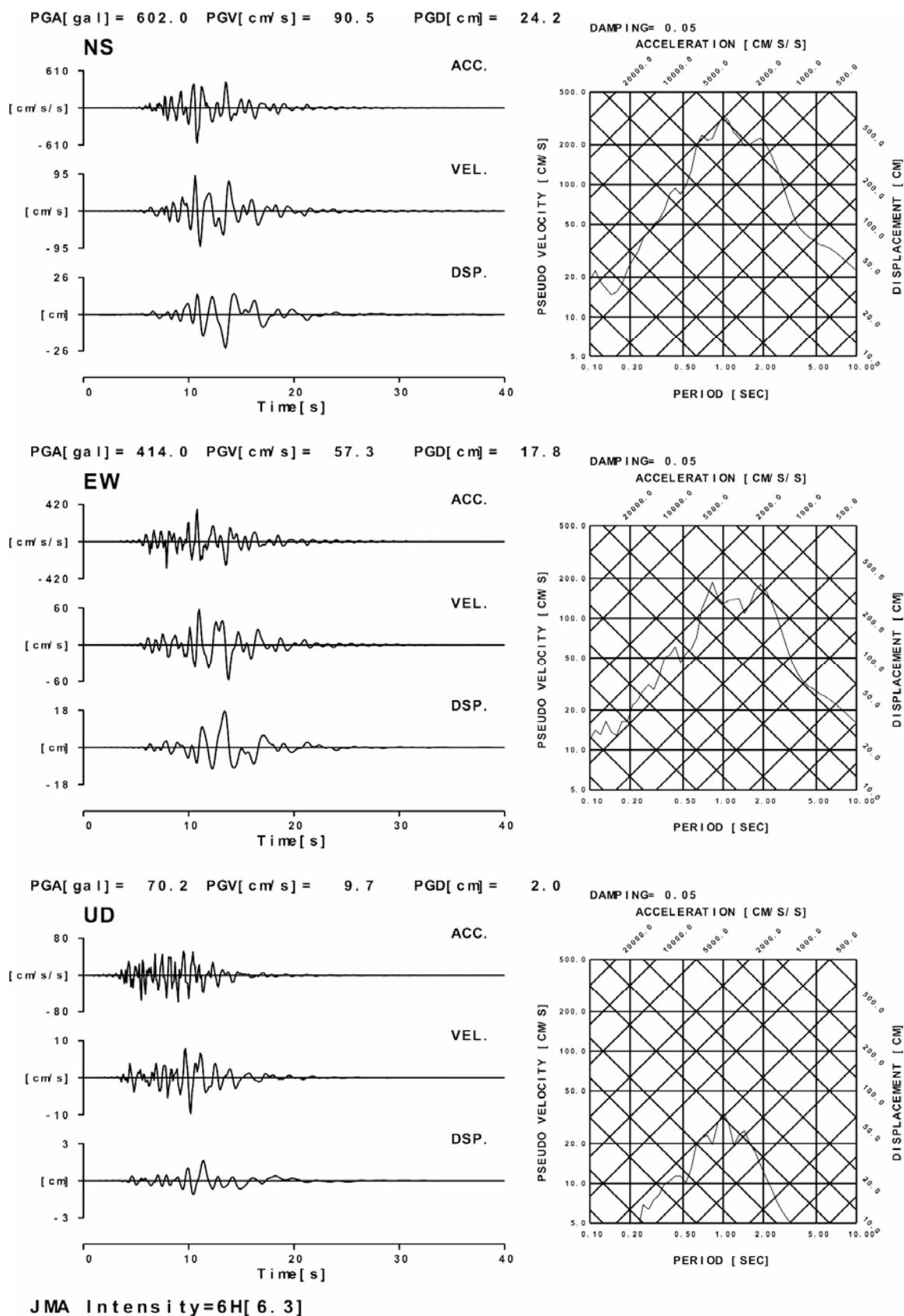
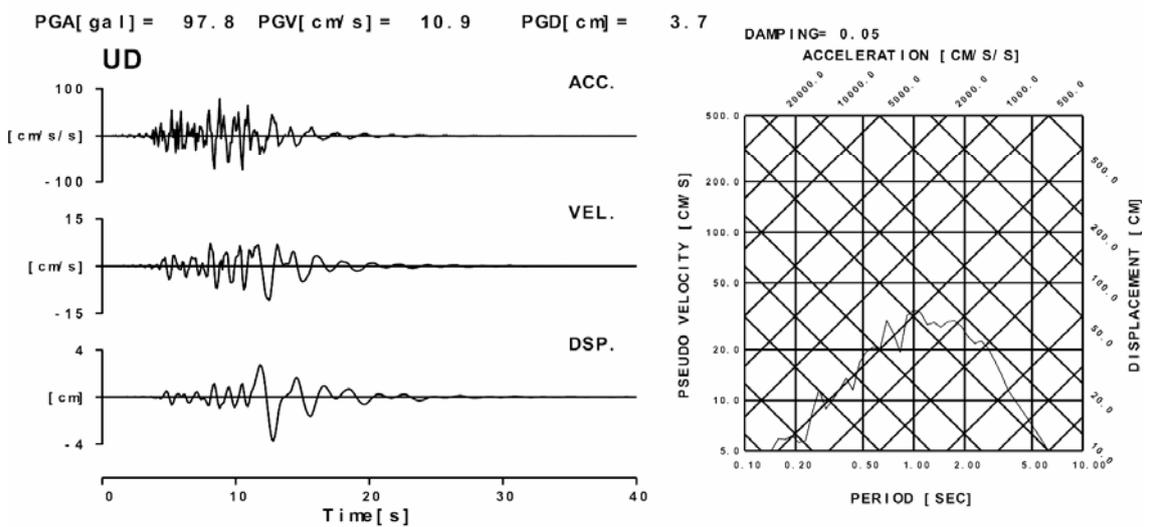
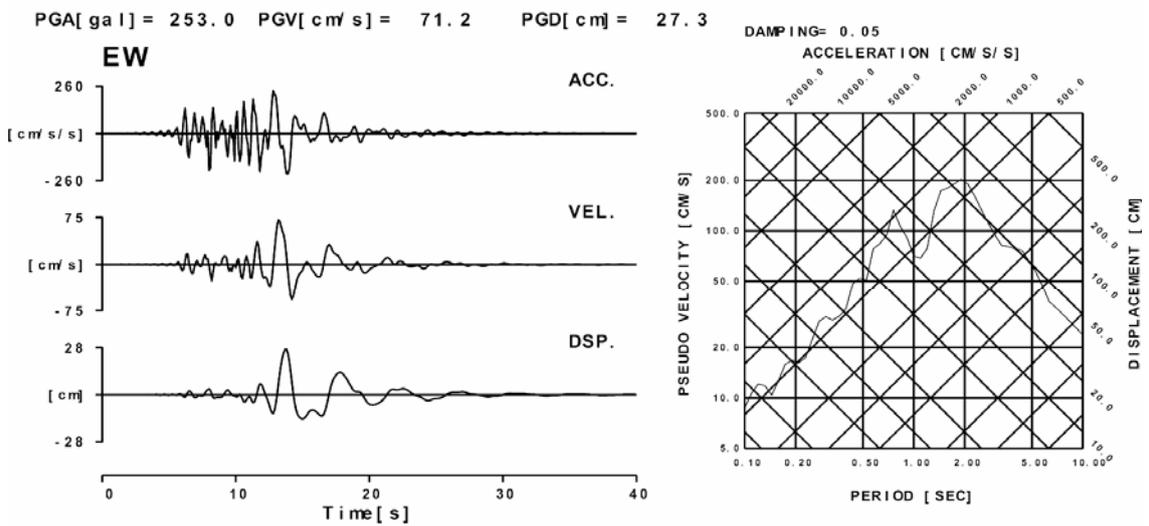
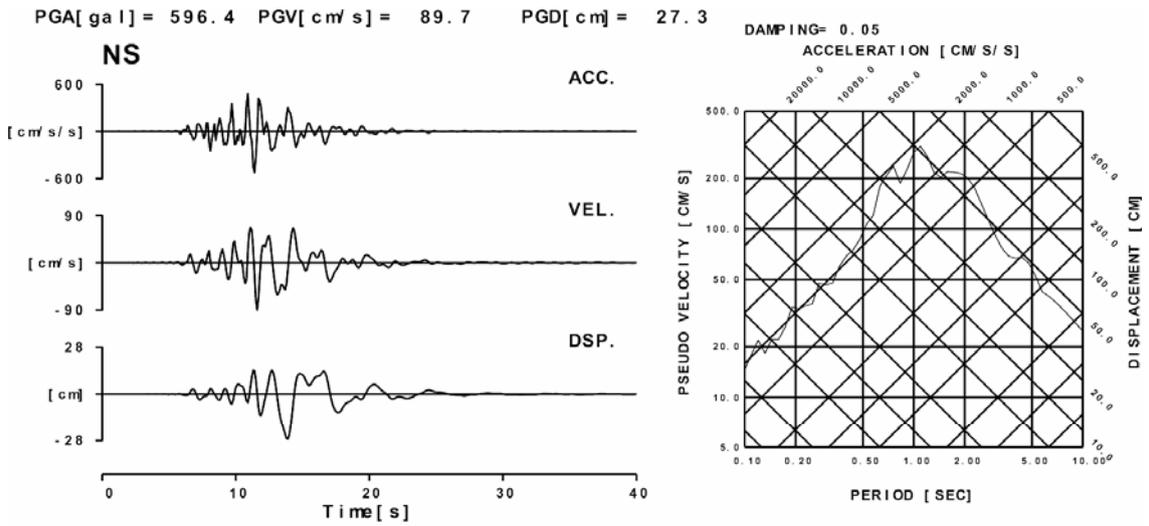


図 8 (1) サイトa00における推定波形



JMA Intensity=6H[ 6.2 ]

図 8 (2) サイトa02における推定波形

b) 2003年十勝沖地震の検討

2003年十勝沖地震では、表4<sup>7), 8)</sup>に示す諸元の断層破壊モデルが得られている。その際の断層面を図9、10に示す。この断層モデルを用いて、図11に示す各点の地震動を想定する。このうち、S-0点は記録の得られているK-NET広尾(HKD100)に相当する。

表4 2003年十勝沖地震で想定されている断層破壊パラメータ<sup>7), 8)</sup>

地震モーメント	$2.9 \times 10^{21} \text{N}\cdot\text{m}$	本多・他(2003)
$M_j$	8.0	気象庁
断層面積	140km × 161km	本多・他(2003)
平均応力低下量	2.1MPa	
断層傾斜	20度	山中(2003)
断層上端深さ	13.5km	本多・他(2003)
震源(破壊開始点)深さ	29km	F-NET
破壊伝播速度	3.4km/s	本多・他(2003)
アスペリティ1	21km × 21km	森川・他(2004)
	$1.12 \times 10^{20} \text{N}\cdot\text{m}$	森川・他(2004)
	29.9MPa	森川・他(2004)
	=1.8s	森川・他(2004)
アスペリティ2	28km × 28km	森川・他(2004)
	$2.66 \times 10^{20} \text{N}\cdot\text{m}$	森川・他(2004)
	29.9MPa	森川・他(2004)
	=2.4s	森川・他(2004)
アスペリティ3	21km × 28km	森川・他(2004)
	$0.72 \times 10^{20} \text{N}\cdot\text{m}$	森川・他(2004)
	12.2MPa	森川・他(2004)
	=1.8s	森川・他(2004)
アスペリティ面積比	8.10%	
背景領域	20727km <sup>2</sup>	
	$2.45 \times 10^{20} \text{N}\cdot\text{m}$	
	2.0MPa	円形クラック
	=5.9s	Somerville et al. (1999)

まず、S-0(HKD100)における地震動を計算した。その際、表5に示す地殻構造モデルでまず基盤地震動を算出し、次に表6に示すK-NET観測点の地盤モデルを用いて地表地震動を算出した。観測記録との比較を図12に示す。

次に、表5、6の構造モデルを用いて計算したS-1地点の地震動例を図13に示す。

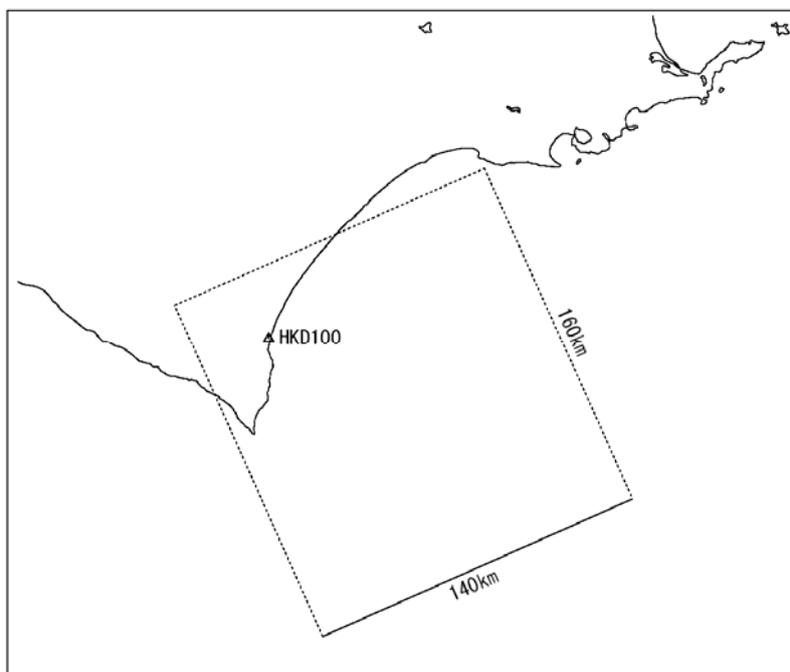


図9 2003年十勝沖地震の震源断層

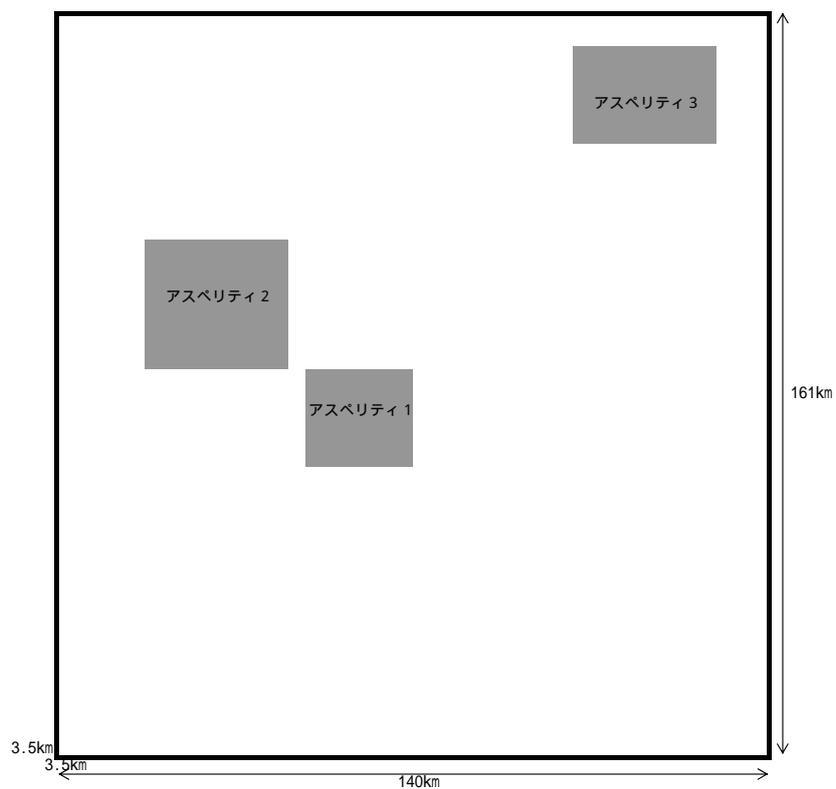
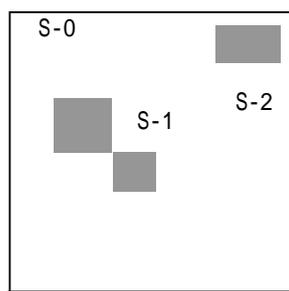


図10 2003年十勝沖地震のアスペリティおよび破壊開始点



○ : 計算ポイント

▭ : 断層面

○ : 破壊開始点

■ : アスペリティ

図11 2003年十勝沖地震の地震動評価地点

表 5 2003年十勝沖地震のシミュレーションに用いた地殻構造モデル

depth(km)	Vp(km/s)	Vs (km/s)		Q <sub>s</sub>	Q <sub>p</sub>
0.0 ~ 2.5	4.5	2.6	2.4	130	260
2.5 ~ 20.0	6	3.5	2.7	250	500
20.0 ~ 30.0	6.7	3.9	2.8	400	800
30.0 ~	7.7	4.4	3.2	500	1000

表 6 2003年十勝沖地震のシミュレーションに用いた表層地盤モデル

depth(m)	Vp(m/s)	Vs (m/s)		ref	h <sub>max</sub>
0.0 ~ 1.0	1010.0	100.0	1.09	0.0025	0.10
1.0 ~ 2.0	1010.0	100.0	1.11	0.0025	0.10
2.0 ~ 3.0	1010.0	126.0	1.08	0.0025	0.10
3.0 ~ 4.0	2180.0	126.0	1.18	0.0025	0.10
4.0 ~ 5.0	2180.0	126.0	1.40	0.0025	0.10
5.0 ~ 6.0	2180.0	126.0	1.52	0.0025	0.10
6.0 ~ 7.0	2180.0	126.0	1.61	0.0025	0.10
7.0 ~ 8.0	2180.0	126.0	1.76	0.0025	0.10
8.0 ~ 9.0	2180.0	331.0	1.81	0.0025	0.10
9.0 ~ 10.0	2180.0	331.0	1.73	0.0025	0.10
10.0 ~ 11.0	2180.0	331.0	1.62	0.0025	0.10

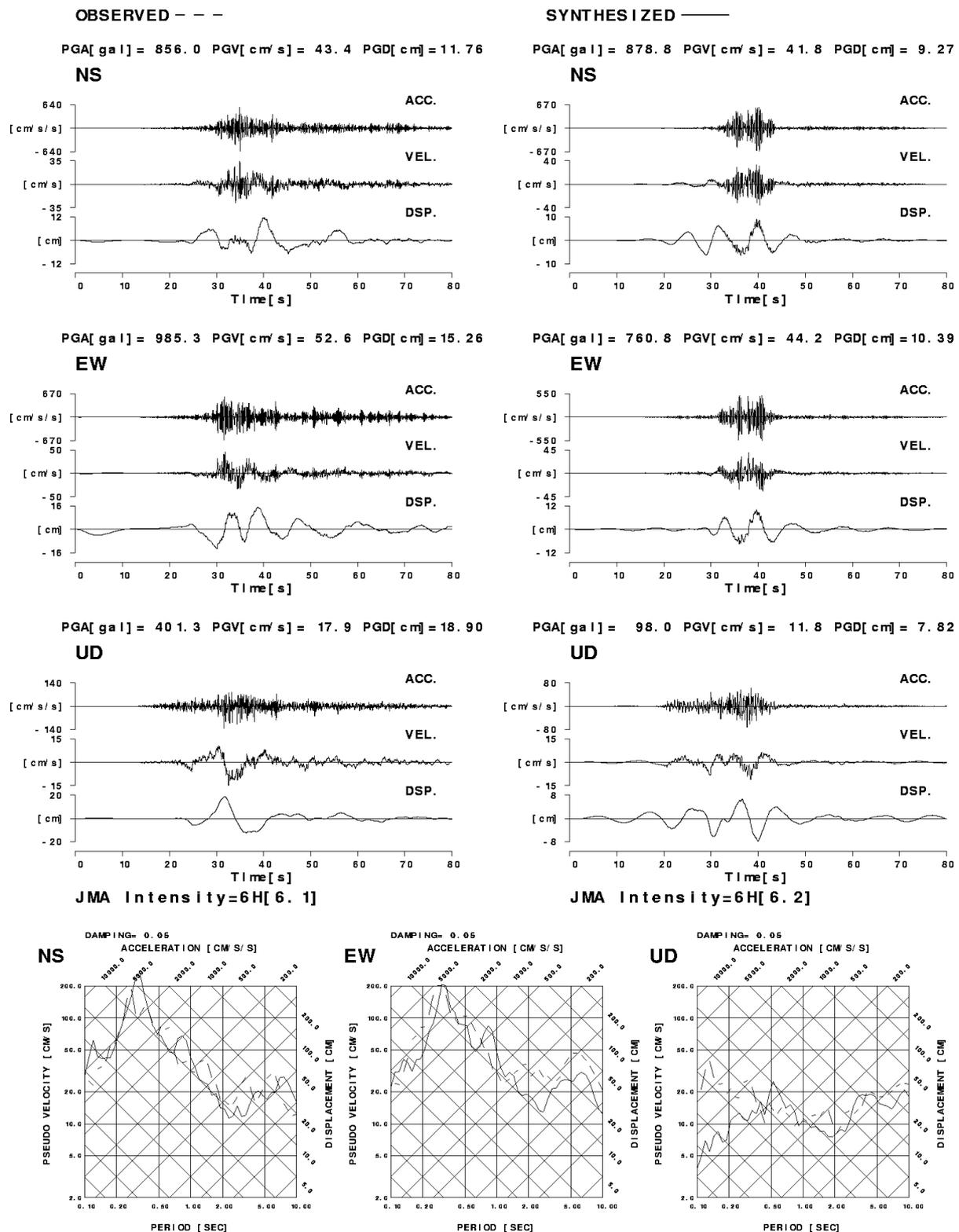


図12 HKD100サイト（広尾：S-0）での観測波形との比較

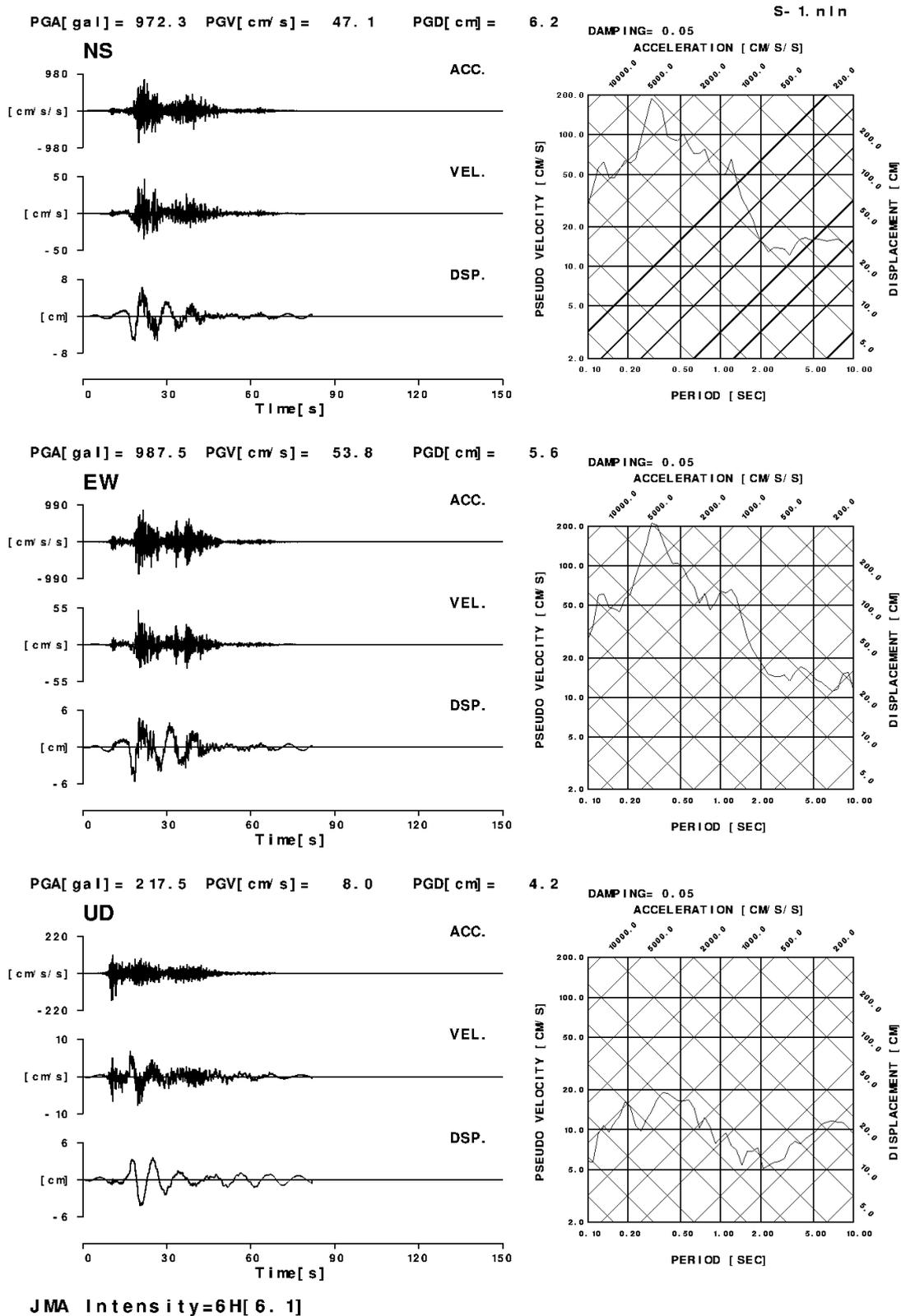


図 13 サイト S-1 での計算波形

c) 2004年新潟県中越地震の検討

経験的グリーン関数法を用いたKamae et al.(2005)<sup>9)</sup>の震源モデル(図14)を参考に表7に示す震源パラメータを設定した。

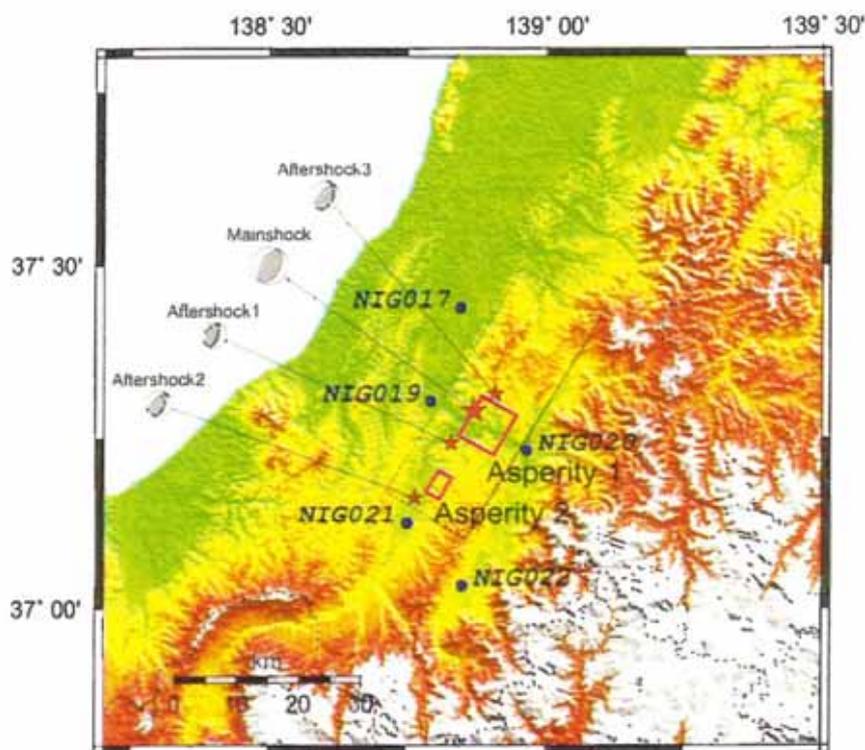


図14 Kamae et al.(2005)<sup>9)</sup>のモデル

表7 新潟県中越地震で想定した震源破壊パラメータ

subfault		1	2
断層走行	(°)	211	211
断層傾斜	(°)	52	52
すべり角	(°)	90	90
アスペリティ長さ	(km)	8.0	4.0
アスペリティ幅	(km)	10.0	4.0
アスペリティ面積	(km <sup>2</sup> )	80.0	16.0
地震モーメント(subfault)	(dyne-cm)	0.26×10 <sup>26</sup>	0.53×10 <sup>25</sup>
地震モーメント(セグメント)	(dyne-cm)	0.31×10 <sup>26</sup>	
総地震モーメント	(dyne-cm)	0.31×10 <sup>26</sup>	
応力降下量	(bar)	89	201
立ち上がり時間	(s)	0.80	0.60
破壊伝播速度	(km/s)	2.0	

浅部地盤構造モデルは K-NET あるいは KiK-net の地盤情報(表8中の\*1に対応)を参考に、また、深部構造モデルは山中・他(2006)<sup>10)</sup>および Honda et al.(2005)<sup>11)</sup>地下構造モデル(それぞれ表8中の\*2,\*3に対応)を参考に地盤構造モデルを設定し、その中間層を試行錯誤で観測速度波形を説明できるようにチューニングした。

以上の仮定で計算した湯ノ谷地点(NIGH12)における計算波形を観測波形とともに図15に示す。この地点での一致は比較的良好。

表 8 NIGH12(湯之谷)の地盤構造モデル

No.	Depth(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	(kg/m <sup>3</sup> )
1*1	0	2250	780	2000
2	200	4180	2170	2400
3	530	5380	2950	2600
4*2	6000	5900	3400	2700
5*3	13000	6200	3500	2700
6*3	17000	6400	3700	2700
7*3	26000	6700	3900	2700

次に、図16に示すb00~b93までのサイトで強震動評価をおこなった。評価地点は、いずれも断層西側に位置しており、東側のNIGH12(湯之谷)に比べて堆積層が厚いと考えられる[酒井・他(2006)<sup>12)</sup>]。このため各地点での地盤構造モデルは堆積層の厚いNIG021(十日町)の速度構造モデルを仮定している。図17に計算波形の例を示す。

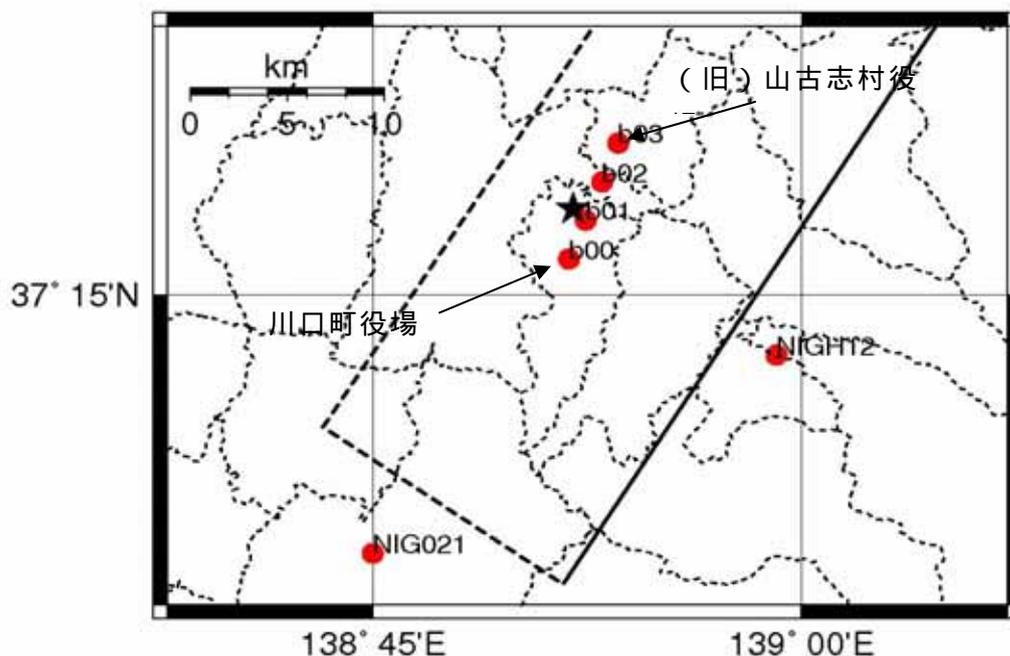


図 16 ハイブリッド法による強震動評価地点(b00~b03)

いずれの計算地点でも震度は5強止まりとなり、実地震動よりも過小となっている可能性があり、今回のモデルでは十分に取り込めなかった現地地盤構造の調査・検討、および震源モデルについては応力降下量の検討が必要でとされる。

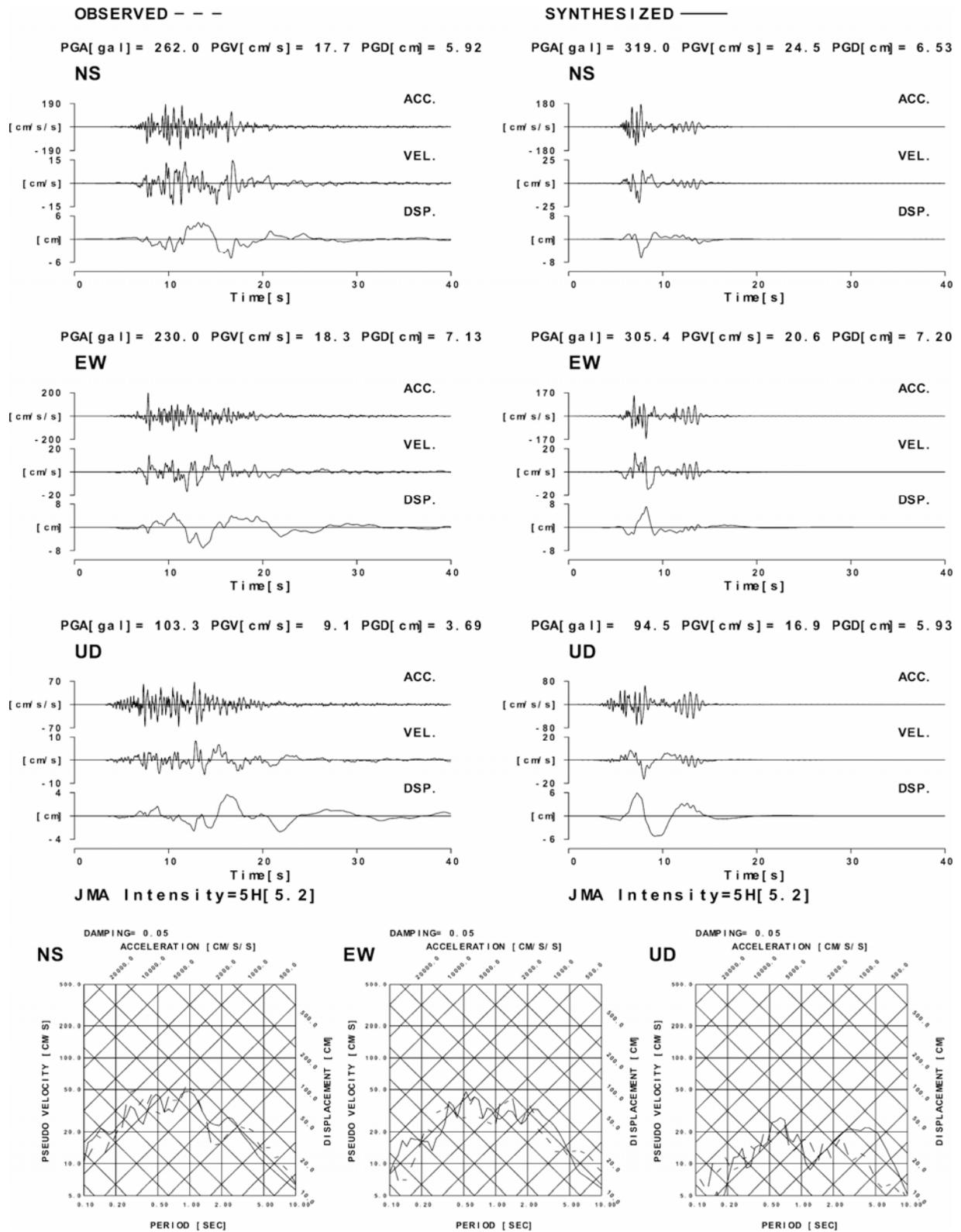
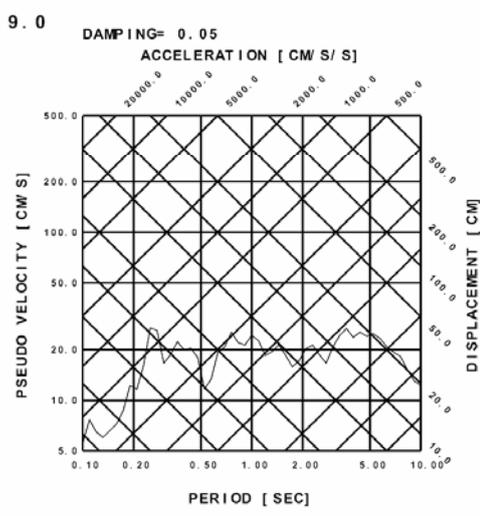
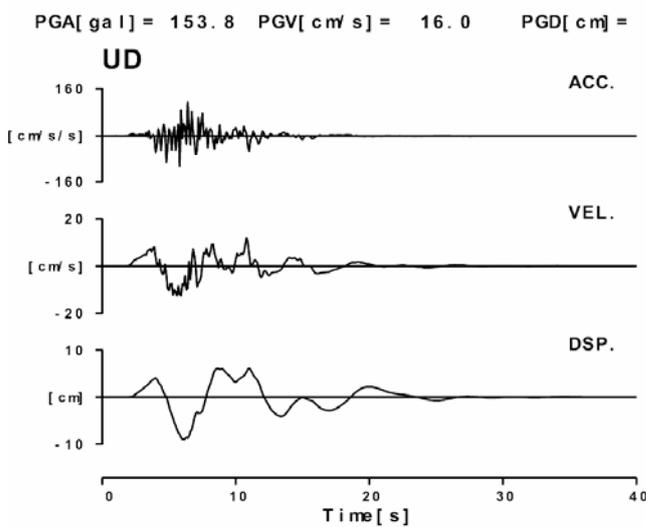
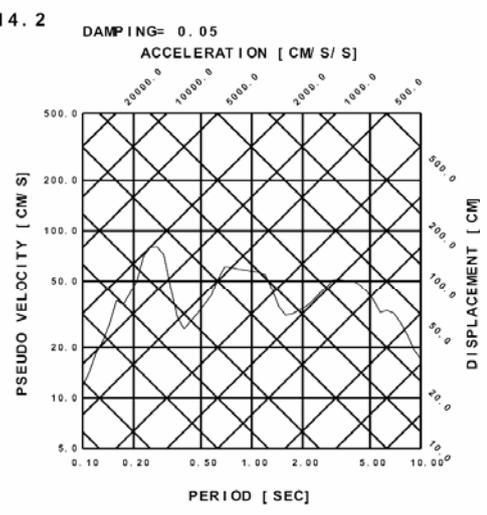
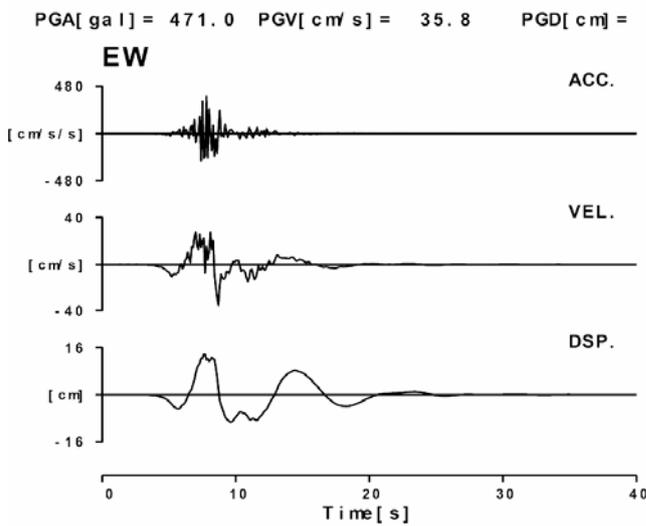
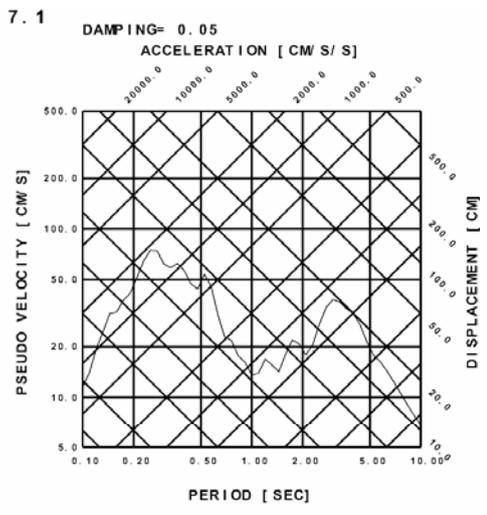
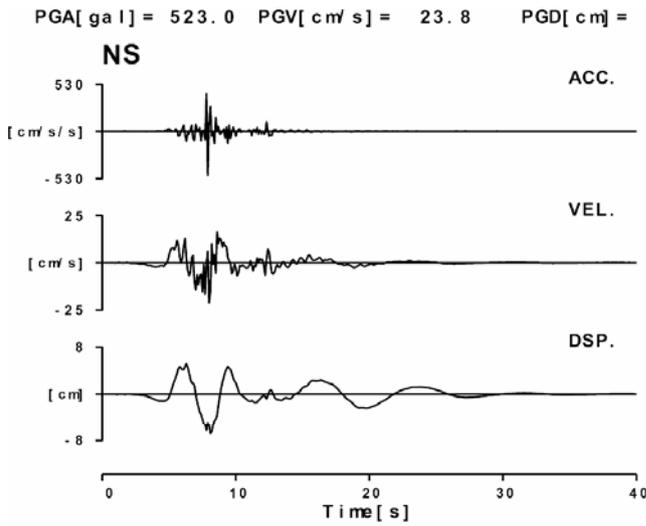
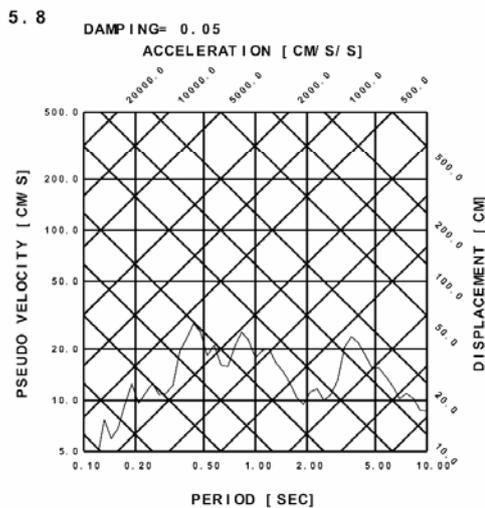
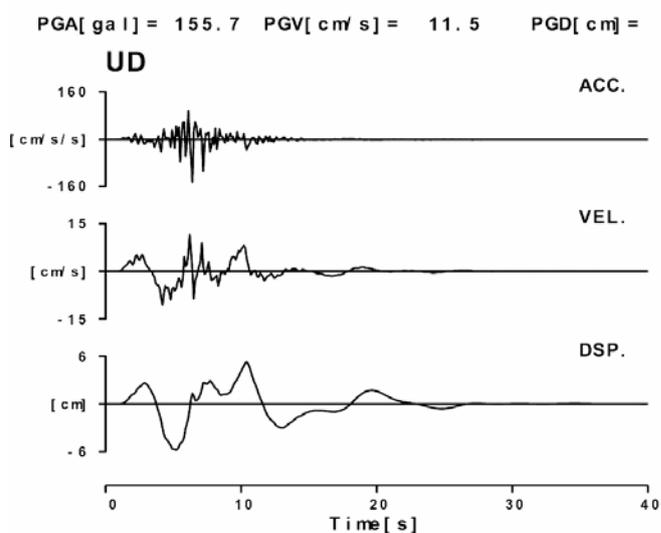
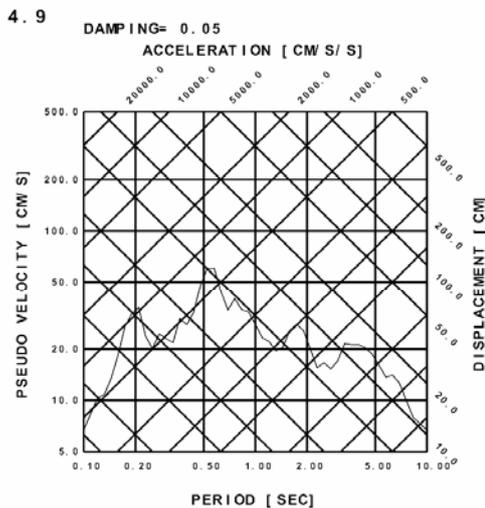
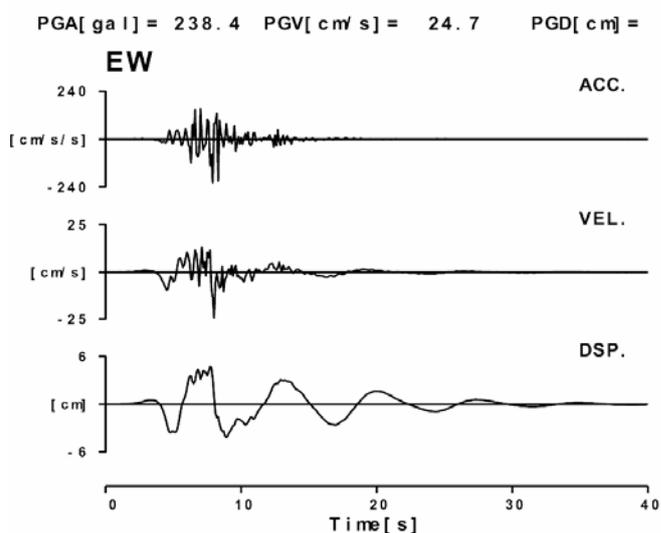
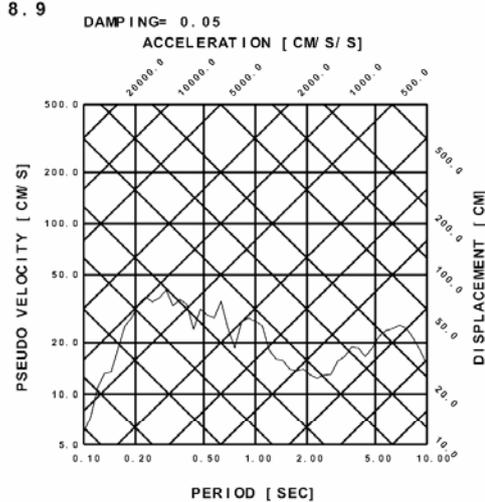
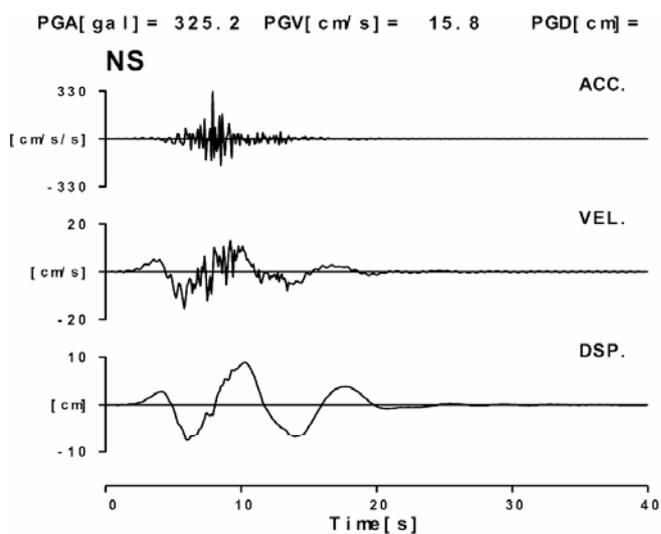


図15 湯ノ谷地点 (NIGH12) における計算波形と観測波形の比較



JMA Intensity=5H[ 5.5 ]

図17(1) b00における計算波形



JMA Intensity=5H[ 5.1 ]

図17(2) b03における計算波形

### 3) 地域波の収集・整理

#### a) 大阪平野におけるシミュレーション波

大阪府では、震源断層の破壊を考慮した強震動シミュレーション波形（ハイブリッド法）を用いた土木構造物の耐震補強を全国に先駆けて実施しており、その波形を委員会報告書（1997）<sup>13</sup>で公開している。図18に一例を示す。概要については昨年度に紹介している。

今回、大阪府土木部に承認を得て三次元震動台での利用を前提として地震動波形を入手した。ただし、ユーザーが記録を利用してその成果を公表する場合は、別途承認を得る必要がある。

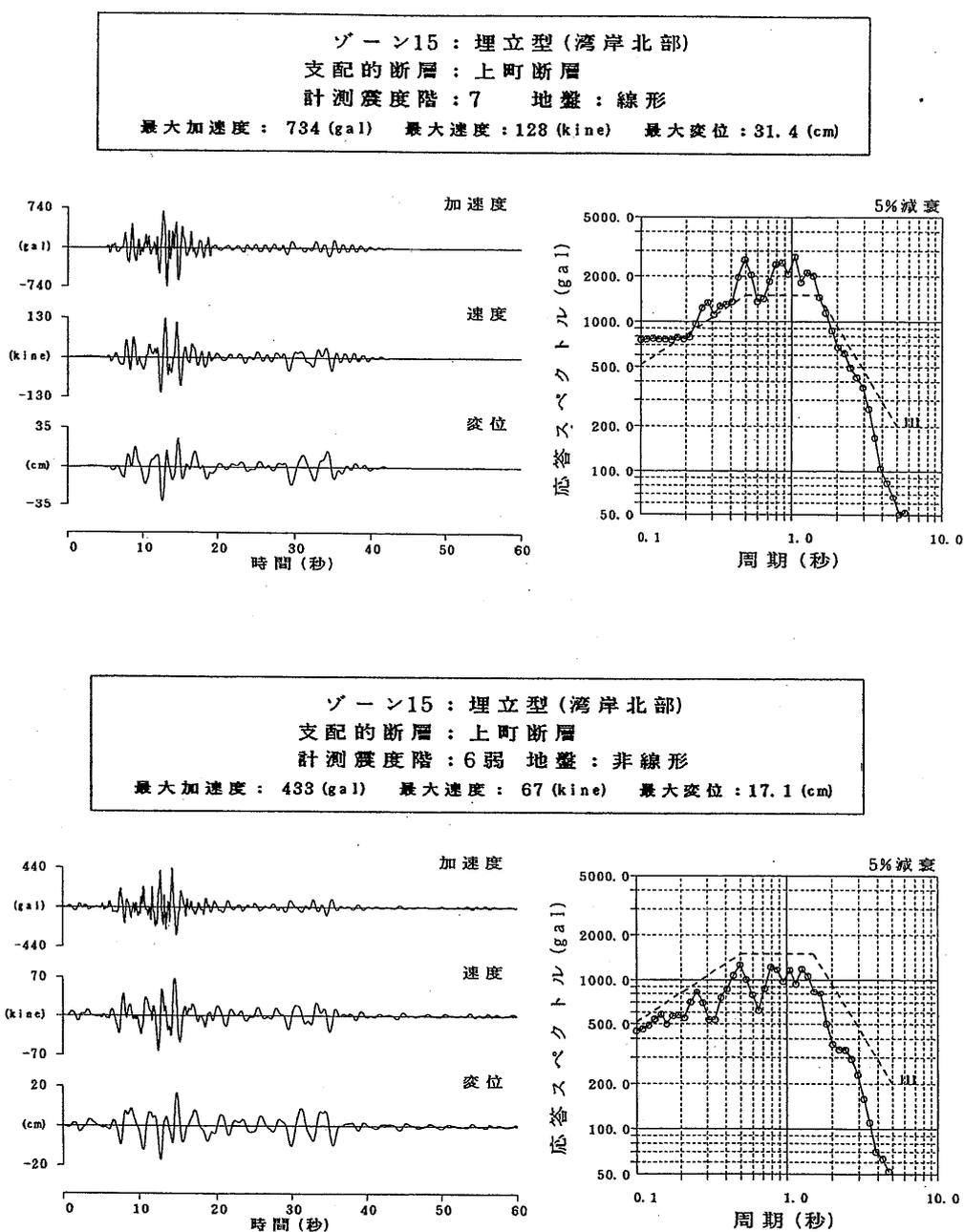


図18 大阪湾岸における想定標準地震動の例

シミュレーションは水平 2 成分を対象として実施されているが、「想定標準地震動」としては大きい方の 1 成分を用いている。このため、3 次元強震動波形として利用するためには工夫が必要である。

上記検討は特定の断層の非一様破壊を想定するなど当時としては画期的なものであったが、国の主導による活断層調査・地盤構造調査と並行して実施されたため、検討終了時点において対象域の活断層および地下構造に対する情報が大幅に刷新された。そのため、大阪府・市では地域地震防災計画の見直しのための地震ハザード評価の見直しを平成 16 年度（16 年度は予備調査）から実施しており、上記想定標準地震動についても見直しが行われる可能性がある。

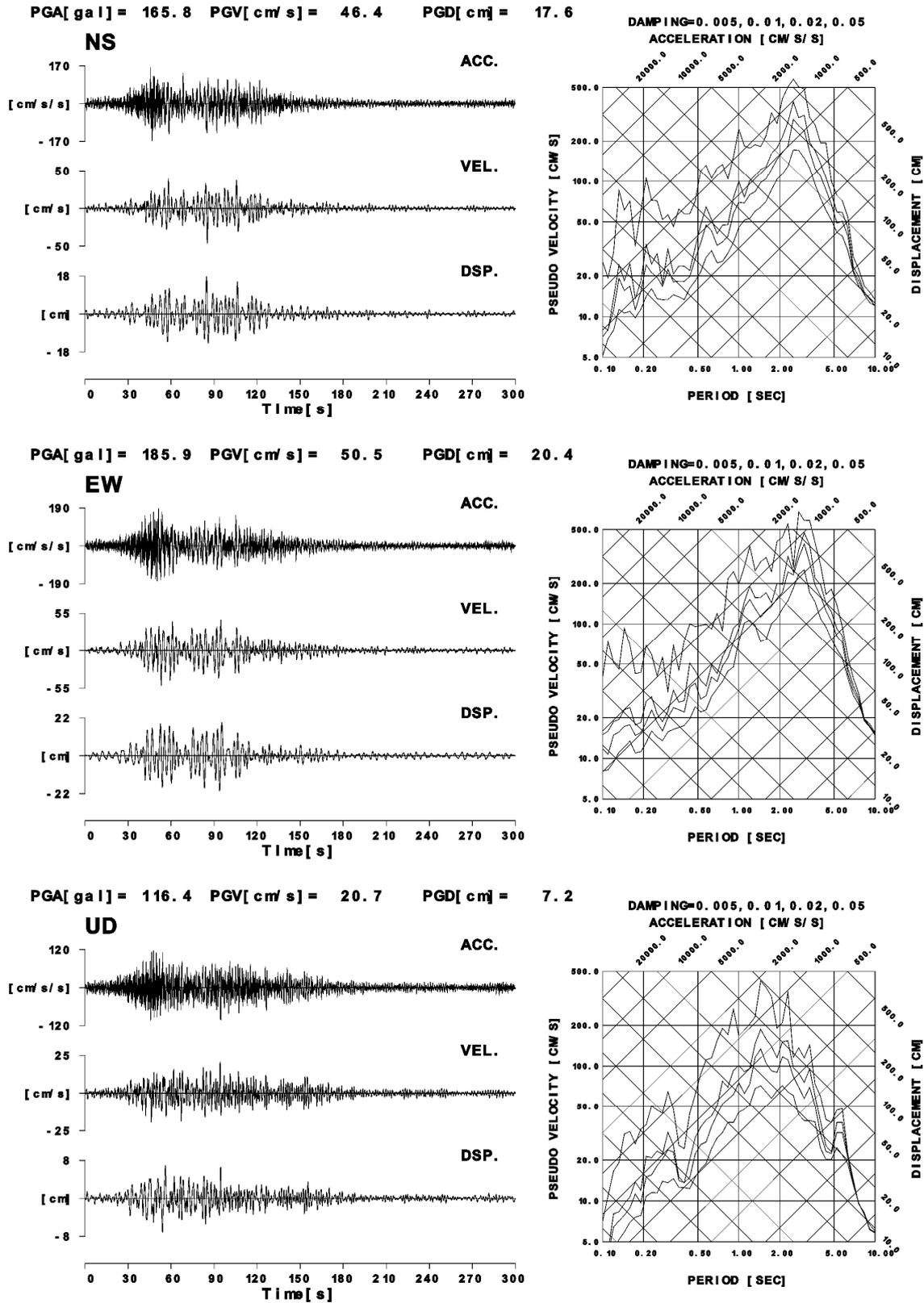
#### b) 濃尾平野におけるシミュレーション波

名古屋市三の丸地区における耐震改修設計（免震を含む）のための設計用入力地震動を、国土交通省、愛知県、名古屋市の 3 者が検討した波形（通称「三の丸波」[愛知県建築住宅センター（2004）<sup>14)</sup>]）をこの地域の既往予測波として収集した。今回は国土交通省中部地方整備局営繕部建築課より承認を得て地震動波形を入手したが、ユーザーが記録を利用してその成果を公表する場合は、別途承認を得る必要がある。

震源断層モデルとして想定新東海地震（政府中央防災会議の東海地震と東南海地震の同時発生）、想定濃尾平野西縁地震、想定伊勢湾地震、想定猿投山北地震、想定伏在断層地震、想定名古屋浅発直下地震を設定し、周期 0.1～5 秒の範囲で精度のある 3 成分波形をシミュレーションしている。基本的には経験的グリーン関数法が用いられ、地表面観測記録を工学的基盤面に引き戻して利用されている。図 19 に、想定新東海地震の波形例を示す。

設計入力地震動のシミュレーションは、2 ステップで行われている。第 1 ステップは経験的グリーン関数法を用いた強震動の計算である。断層面に対して複数の小地震をランダムに配置した 11 ケースの計算を行い、入射方向や Radiation Pattern の影響を軽減するとともに、各 11 ケースに対して要素断層内の地震波放射位置をランダムに与えた 11 ケースの計算を行い、要素断層からの地震波放射が周期的にならないように工夫している。結果として、 $11 \times 11 = 121$  ケースの地震動が計算される。第 2 ステップでは、対象とする断層モデルによる平均的な大きさ・卓越周期・位相を有する 1 組の模擬地震動（3 成分）を作成している。まず、各成分 121 ケースの地震動の減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルの平均値を計算する。位相に関しては、最大速度が最も大きくなる成分に着目し、その成分の平均応答スペクトルと 121 ケースの位相から 121 個の模擬波を作成する。その際、フーリエ振幅スペクトルを修正しながら目標とする応答スペクトルに適合するように収束計算を行って作成している。得られた 121 個の模擬波から、最大速度が中央値となるケースを選定し、その 3 成分の位相を用いて 3 成分の模擬波を作成している。

また、各想定断層の生起確率の評価をおこなっていることもこの地域波の特徴である。



JMA Intensity=5H[ 5.2 ]

図 19 三の丸地点における想定新東海地震による設計地震動

c) 関東平野におけるシミュレーション波

日本建築学会免震構造指針に取り上げられている [ 佐藤・壇(2001)<sup>15)</sup> ]、1923年関東地震による関東地域の再現波形を、著者に承諾を得てこの地域の既往予測波として収集している。

地震動の計算は、統計的グリーン関数法あるいは経験的グリーン関数法と3次元差分法のハイブリッド法で実施され、水平2成分が提示されている。震源破壊モデルは地殻変動および遠地波形を用いたインバージョン解析 [ Wald and Somerville(1995)<sup>16)</sup> ] に準拠し、中小地震の観測波形で妥当性を検証した3次元地盤構造モデル [ Sato et al.(1999)<sup>17)</sup> ] を用いた長周期波動伝播が考慮されている。ただし、得られた波形は工学的基盤上のものであり、表層地盤の影響は考慮されていない。

図20に、本郷地点における波形例を示す。この地点で得られた観測記録の特徴が再現されていることが確認されている。

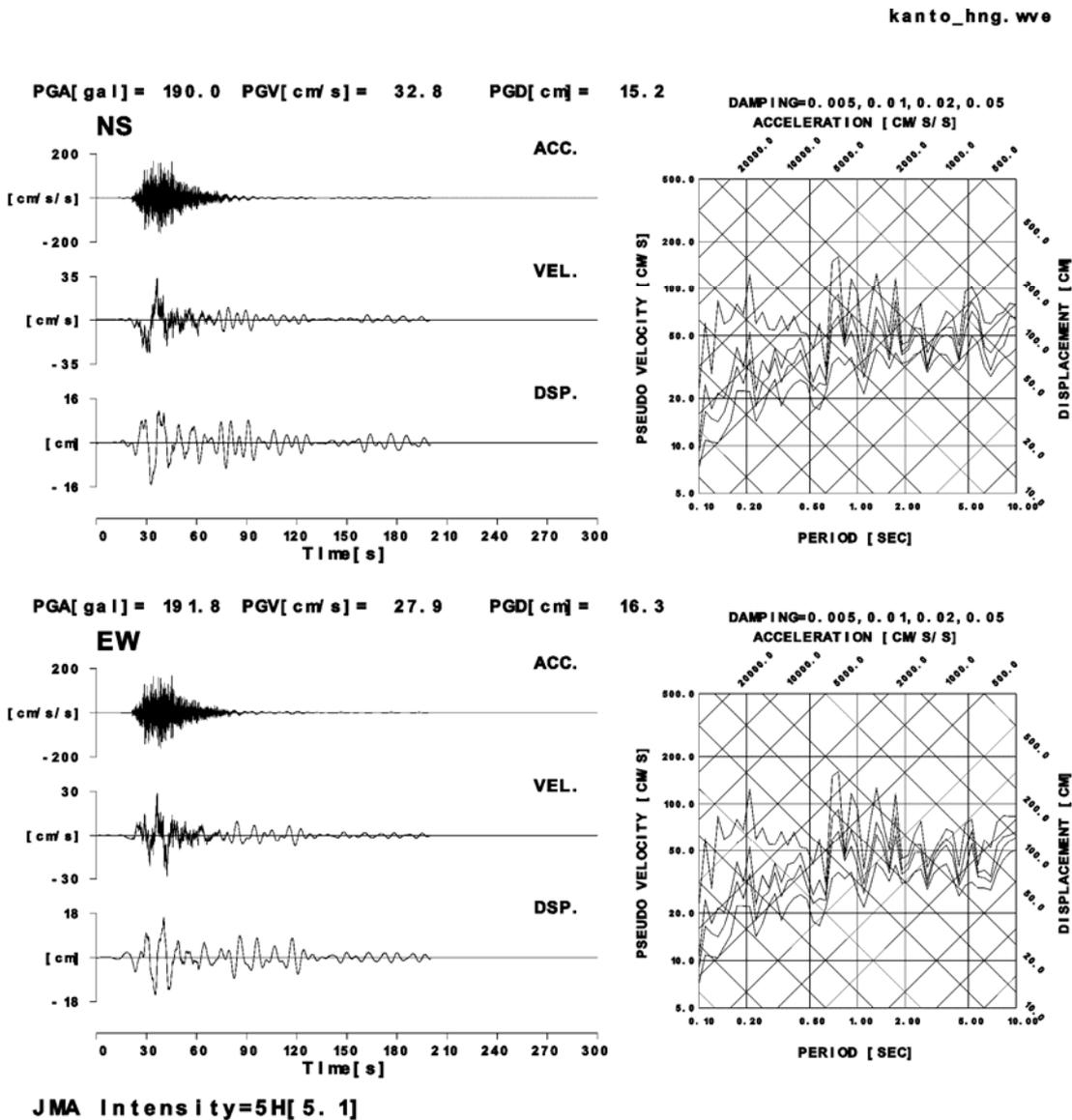


図20 関東地震による本郷の再現地震動

#### 4) 三次元地震動波形DB登録のための情報整理

##### a) フォーマット変換

平成14年度から16年度に実施した強震動シミュレーション全波形をK-NETフォーマットに変換し、DBへ提供した。K-NETフォーマットでは、ヘッダ部に地震および観測点（ここでは地震動計算点）の情報が付記されるので、最低限の情報はファイル本体に取り込まれている。

##### b) 計算諸元の整理

また、シミュレーションの基礎となった情報についてもDBに登録すべく、ほぼ共通のフォーマット（図21）で整理し、デジタル・ファイル（PDF形式）で提供している。

【1995年1月17日 05:46 兵庫県南部地震 M<sub>j</sub>7.3】

##### ○シミュレーション手法

経験的グリーン関数法

要素地震：1999年7月15日、M3.8、深さ14km、明石海峡付近

##### 参考文献

入倉孝次郎・香川敏生・関口春子、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、1997年度秋季大会、B25、1997。

##### ○地震動計算位置

地表面（地震観測地点）

##### ○地盤増幅の考慮

要素地震観測記録に含まれるものと仮定。地表付近の非線形応答特性は補正せず。

##### ○震源破壊モデル

山田・他(1999)が経験的グリーン関数法によって周辺観測記録を満たすように求めた震源破壊モデルを採用。総地震モーメントは $1.56 \times 10^{19} \text{N}\cdot\text{m}$ 。破壊開始点は明石海峡下。このモデルでは、神戸市域に影響の小さい淡路島側の断層を考慮していない。

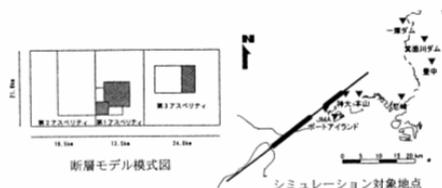


図 山田・他(1999)による震源断層破壊モデル

表 山田・他(1999)による震源破壊パラメーター

	Mo(Nm)	A(km <sup>2</sup> )	τ(s)
Asperity 1	$8.5 \times 10^{18}$	189.2	0.6
Asperity 2	$1.1 \times 10^{19}$	23.0	0.4
Asperity 3	$2.3 \times 10^{18}$	51.2	0.5
Asperity 4	$3.7 \times 10^{18}$	102.4	0.6
Total	$1.56 \times 10^{19}$	365.8	

##### 参考文献

山田雅行・平井俊之・岩下友也・釜江克宏・入倉孝次郎：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、1999年度秋季大会、A14、1999。

##### ○特記事項

要素地震と想定地震の地震モーメント比が大ききく、また地震モーメントおよび応力降下量を調整するため、以下の諸元により2段階合成を実施している。

表 2段階合成のパラメーター

	兵庫県南部地震			
	アスベリティ1	アスベリティ2	アスベリティ3	アスベリティ4
面積	189.2km <sup>2</sup>	23.0km <sup>2</sup>	51.2km <sup>2</sup>	102.4km <sup>2</sup>
地震モーメント	$8.5 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$	$1.1 \times 10^{19} \text{N}\cdot\text{m}$	$2.3 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$	$3.7 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$
応力降下量	8.0MPa	24.3MPa	15.3MPa	8.7MPa
立ち上がり時間	0.6s	0.4s	0.5s	0.6s
小地震の地震モーメント	$4.7 \times 10^{14} \text{N}\cdot\text{m}$			
小地震の応力降下量	3.4MPa			
要素地震（中部地震） 重ね合わせパラメーター	NL	10	7	10
	NH	24	7	10
	ND	18.8	6.7	10.8
	C	2.4	7.1	4.5

図 21 シミュレーション諸元の解説例

#### (d) 結論ならびに今後の課題

##### 1) 結論

合理的に三次元強震動をシミュレーションする手法である経験的グリーン関数法について、現実問題に適用するに際しての条件および留意点を整理し、解説を作成した。

1995年兵庫県南部地震、2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震において、統計的グリーン関数法と離散化波数法のハイブリッド法を用いて、観測記録の得られていない強震域でのシミュレーションを実施した。その際、記録の得られている地点でもシミュレーションを実施し、整合性の確認を行った。

大阪平野、濃尾平野、および関東平野について、設計地震動などとして利用されている地域波の収集・整理をおこない、解説を作成した。

得られた強震動波形を三次元強震動データベースに登録するため、既往検討波についてフォーマット変換をおこない、登録すべき計算諸元を整理したファイルを作成した。

##### 2) 課題

今年度、経験的グリーン関数法に加えて統計的グリーン関数法および離散化波数法を用いた検討を実施しているため、これらの手法解説を追加することが望まれる。既往地震の大震動域で実施したシミュレーション結果は必ずしも大きな地震動とはなっていない。特に、2004年新潟県中越地震の再現波は現地地盤構造を十分に反映していないために実地震動よりも過小となっている可能性がありこの点について調査・検討を経た再検討が望まれる。また、三次元震動台の性能を限界まで活用できる大地震動を、別途生成しておく必要がある。

地域波として用いられている地震動は必ずしも三次元地震動ではなく、1成分あるいは2成分のものであるため、三次元震動台の入力として用いる場合の条件を検討しておく必要がある。

強震DBに結果を提供した波形は地震観測点におけるもののみであるが、地震記録のない任意地点の予測波形をDBに登録する際に追加すべき情報を整理し、新たに今期の成果をDB登録する必要がある。

#### (e) 引用文献

- 1) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., 63-104, 1986.
- 2) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福和保長: 地域的な震源スケーリング則を用いた大地震(M7級)のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 416, 57-70, 1990.
- 3) Graves, R. W.: Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1091-1106, 1996.
- 4) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測

- 方法の改良，B25，日本地震学会講演予稿集，1997.
- 5) 松島信一，川瀬博：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，534，33-40，2000.
  - 6) 宮腰研，香川敬生，趙伯明，徳林宗孝，澤田純男：大阪堆積盆地における深部構造モデルのモデル化（その3），第25回地震工学研究発表会講演論文集，185-188，1999.
  - 7) 本多亮，青井真，森川信之，関口春子，功刀卓，藤原広行：近地強震動記録による2003年十勝沖地震の震源インバージョン，地球惑星科学関連学会2003年合同大会，CD-ROM，2003.
  - 8) 森川信之，青井真，本多亮，藤原広行：2003年十勝沖地震の広帯域強震動評価のための特性化震源モデル，地球惑星科学関連学会2003年合同大会，CD-ROM，2003.
  - 9) Kamae, K., T. Ikeda, and S. Miwa: Source model composed of asperities of the 2004 Mid Niigata Prefecture, Japan, earthquake ( $M_{JMA}=6.8$ ) by the forward modeling using the empirical Green's function method, Earth Planets Space, 57, 533-538, 2005.
  - 10) 山中浩明，元木健太郎，瀬尾和夫，福元俊一，高橋寿幸，山田伸之，浅野公之，岩田知孝：2004年新潟県中越地震の余震観測と微動観測，月刊地球「2004年新潟県中越地震」，号外53，172-177，2006.
  - 11) Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi, and H. Fujiwara: Ground motion and rupture process of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Planets Space, 57, 527-532, 2005.
  - 12) 酒井慎一，加藤愛太郎，蔵下英司，平田直，岩崎貴哉，金沢俊彦：緊急余震観測から見た2004年新潟県中越地震の断層面分布，月刊地球「2004年新潟県中越地震」，号外53，49-54，2006.
  - 13) 大阪府土木部：大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書，1997.
  - 14) 愛知県建築住宅センター：名古屋市三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成（概要版），2004.
  - 15) 佐藤俊明，壇一男：関東地震による首都圏の広帯域強震動予測，免震構造設計指針，日本建築学会，263-274，2001.
  - 16) Wald, D. J. and P. G. Somerville: Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan earthquake: geodetic and body-waveform analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 159-177, 1995.
  - 17) Sato, T., R. W. Graves and P. G. Somerville: Three-Dimensional Finite-Difference Simulations of Long-Period Strong Motions in the Tokyo Metropolitan Area, Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 579-607, 1999.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1)論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2)口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
なし			

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

名称	機能
なし	なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成 18 年度業務計画案

平成 18 年度には、以下に示すように 3 次元強震動計算手法に補足を加えた完成を図るとともに、現在までに計算した強震動波形の E - ディフェンスの能力に対する位置付けを評価し、その能力を最大限に発揮するような強震動の検討を行う。

3 次元強震動計算手法およびそれに付随する周辺技術についての解説を追加作成し、これまでに作成した手法解説とともに、ユーザーが参照できる形式（PDFあるいはHTML）で整理する。

既往 3 次元強震動波形について、必要油量など 3 次元震動台の限界性能に関わる物理量を計算し、限界性能に対する位置付けを評価する。

3 次元震動台の限界性能（必要油量など）を考慮し、その能力を最大限活用する強震動を策定する。対象はパルス波的な震源近傍強震動とやや長周期地震動を含む継続時間の長い地震動の 2 タイプとする。