

3.6.3 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) 3ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成16年度業務目的

(2) 平成16年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 三次元強震動波形推定手法の検討
 - 2) 関東平野における検証
 - 3) 大阪平野・濃尾平野における補足
 - 4) 三次元強震動データベースへの反映
- (c) 業務の成果
 - 1) 三次元強震動波形推定手法の検討
 - 2) 関東平野における検証
 - 3) 大阪平野・濃尾平野における補足
 - 4) 三次元強震動データベースへの反映
- (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17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
京都大学防災研究所	非常勤研究員	入倉孝次郎	irikura@egmdpri01.d pri.kyoto-u.ac.jp

(c) 業務の目的

将来大地震を引き起こす可能性の高い活断層や海溝域に震源断層を想定し、都市を対象としたサイトにおける三次元強震動を推定する方法を構築するとともに強震動の試算を行い、3.6.2で検討される三次元強震動データベースに大地震による強震動波形を提供する。

(d) 3ヵ年の年次実施計画

1)平成14年度：

- ① 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う。
- ② 大阪平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行う。
- ③ 大阪平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行う。

2)平成15年度：

- ① 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する。
- ② 濃尾平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行う。
- ③ 濃尾平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行う。
- ④ 大阪平野を対象とした三次元強震動波形の推定を補足する。

3)平成16年度：

- ① 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する。
- ② 関東平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行う。
- ③ 関東平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行う。
- ④ 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する。
- ⑤ 三次元強震動波形を三次元強震動データベースに反映する。

4)平成17年度：

- ① 3次元強震動計算手法の構築
- ② 3次元強震動の試算
- ③ 地域波の収集・整理

5)平成18年度：

- ① 総合評価を行う。
- ② 全体のまとめを行う。

(e) 平成16年度業務目的

1) 三次元強震動波形推定手法の検討

震源近傍域に発生した中小地震の記録が存在するときは経験的グリーン関数法、適当な記録がないときは統計的グリーン関数法および3次元有限差分法を組み合わせたハイブリッド法など、対象地震断層・サイトの組み合わせに最適の推定手法が選定されることになる。これらの各手法について、3次元地震動を評価することを前提に、対象とする濃尾平野地域の条件に最適な方法論の調査検討を行い、適用条件などをとりまとめる。

2) 関東平野における検証

上記計算手法に基づき、関東平野内の対象サイトにおいて、1923年関東地震を対象として強震動シミュレーションを実施し、その結果と観測波形あるいは震度の比較を行い、計算手法の妥当性を検証する。

3) 大阪平野・濃尾平野における補足

大阪平野・濃尾平野においては、設計業務などを目的としてシミュレーション波が利用されており、これらを三次元強震動データベースに登録すべく、その概要と入手法についての調査を実施する。データ整備状況とリンクした個別被害推定シミュレータのプロトタイプを試作を開始する。

4) 三次元強震動データベースへの反映

得られた計算波形を三次元強震動データベースに反映するためには、波形とその諸元だけではなく、対象地震の震源破壊モデルなどを登録しておく必要がある。それらデータベースに必要なパラメーターについて検討を実施する。

(2)平成16年度の成果

(a) 業務の要約

平成16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

関東平野における三次元強震動をシミュレーションする手法として、対象サイトの地盤応答特性、対象震源からの伝播経路特性を合理的に反映し得る、経験的グリーン関数法を選定した。また、その計算の核となるサブルーチンを提示した。

2) 関東平野における検証

関東平野における検証のために1923年関東地震を選定し、シミュレーションに必要な震源断層モデルの構築と検証に利用できる観測波形、震度分布などの情報を収集した。次に、対象地震の三次元強震動波形を経験的グリーン関数法によってシミュレーションし、観測事例を用いた検証を行った。

また、2004年10月23日に発生した新潟県中越地震についても、同様の検討を実施した。

3) 大阪平野・濃尾平野における補足

三次元強震動データベースには、観測記録および代表的な地震のシミュレーション波だけでなく、設計実務などで実際に利用されているものも登録されていることが望ましい。そこで、大阪平野・濃尾平野を対象としてそのようなシミュレーション波の調査を行い、その概要と入手法についてまとめた。

4) 三次元強震動データベースへの反映

得られた計算波形を三次元強震動データベースに反映するために登録しておくことが必要となるシミュレーションの諸元について検討を行った。

(b) 業務の実施方法

1) 三次元強震動推定手法の構築

平成14年度に実施した各種計算手法のレビューに基づき、関東平野および既往実施の大阪平野・濃尾平野におけるシミュレーションに適した手法について検討した。

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整理を行った。

b) 適用手法の検討

a)で整理した手法について、関東平野および大阪平野・濃尾平野におけるシミュレーションに適した手法について検討した。

c) 計算サブルーチンの検討

a)で整理した手法について、計算の核となるサブルーチンを提示した。

2) 関東平野における検証

a) 検討対象地震の選定

関東平野および周辺域における検証対象として、1923年関東地震および2004年新潟県中越地震を選定した。

b) 1923年関東地震の検討

関東平野に影響を及ぼした地震として1923年関東地震を選定し、シミュレーションに必要な震源断層モデルの構築と検証に利用できる観測波形などの情報を収集した。次に、対象地震の三次元強震動波形を経験的グリーン関数法によってシミュレーションし、観測事例を用いた検証を行った。

c) 2004年新潟県中越地震の検討

b)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) 大阪平野・濃尾平野における補足

a) 大阪平野におけるシミュレーション波

大阪平野においては大阪府土木部による検討波が設計業務などを目的として利用されていることが分かった。利用されている波の概要と、三次元強震動データベースに登録する際の問題点と入手法について検討を行った。

b) 濃尾平野におけるシミュレーション波

濃尾平野においては愛知県設計用入力地震動研究協議会による検討波が利用されていることが分かった。a)と同様に、その概要と問題点、また入手法について検討を行った。

4) 三次元強震動データベースへの反映

a) 三次元強震動データベースへの反映

シミュレーション波形を三次元強震動データベースに登録するために必要となるシミュレーション諸元の抽出を行った。

(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

平成 14 年度に検討した、各種計算手法の特徴を以下にまとめる。

① 経験的グリーン関数法

対象断層系において小地震の観測記録が得られていれば、それを経験的に得られたグリーン関数と考慮して合成に用いることができる [例えば, Irikura(1986)]。観測記録にはモデルでは表現し得ない情報が含まれていることが有利である。しかし、地震波放射やサイト応答の方位依存性の要素断層毎の評価が困難な点と、予測に適した小地震記録が大地震の前に得られることが少ないことが欠点となる。

② 統計的グリーン関数法

人工的に生成した小地震記録を合成する手法[釜江・他(1990)]であり、乱数時系列に震源理論によるスペクトル特性を持たせたものが震源波形として用いられる [Boore(1983)]。これに伝播経路特性とサイト増幅特性を加味することで対象サイトにおける地震動を生成する。この手法では要素断層毎に異なる地震波放射やサイト応答の方位依存性を考慮できる点が強みとなる。ただし、距離による地震動継続時間の増大のモデル化や高周波遮断特性 (f_{max}) など高精度化のために検討すべき課題も多い。

③ 3次元差分法

3次元差分法は地盤構造を格子状にモデル化し、そこに3次元地盤構造を割り当て、その上で震源格子に力を加えた場合の波動の伝播を逐次追跡し、モデル全体の地震動を計算してゆく手法である [例えば, Graves(1996)]。その際、断層面の破壊進行の効果も震源格子群の逐次破壊として表現することができ、震源破壊から地盤応答までをトータルに計算することが可能である。ただし、モデル化の限界および計算機能力の限界(実用的な範囲で)から、現状での実用的な計算では周期1秒程度に対応するよりも長い波長の計算にしか対応できない。

④ハイブリッド法

長周期に強いが短周期が計算できない3次元差分法と、原理的には広い周期帯の計算が可能だが3次元効果や地震波放射の方位性の影響が大きい長周期で不利となる統計的グリーン関数法の利点を活かし、3次元差分法の長周期帯域と統計的グリーン関数法の短周期帯域とをお互いが相補するようにハイブリッド合成することによって広い周期帯域で有効な地震動を予測する手法である [例えば, Kamae et al. (1998)、Sato et al. (1999)]。

b) 適用手法の検討

関東平野は大阪平野・濃尾平野と同様に地盤構造情報が比較的多いサイトである。したがって、①～④のいずれの手法も適用が可能である。適切な観測記録が得られておれば①の経験的グリーン関法が利用可能であり、詳細な地盤構造モデルを用いた④のハイブリッド法の適用も可能であり、状況に応じて使い分けることができる。ただし、S波主要動部の三次元地震動に自然に対応できること、対象サイトの地盤応答特性、対象震源からの伝播経路特性を合理的に反映し得ることから、適切な観測記録が得られている場合には経験的グリーン関数法の利用が便利である。

c) 計算サブルーチンの検討

小断層に起因する小地震記録を $u(t)$ 、想定大地震記録を $U(t)$ とし、経験的グリーン関数法 [Irikura(1986)] の合成法を数式で表現すると以下のようなになる。

$$U(t) = \sum_{m=1}^{NL} \sum_{n=1}^{NW} \frac{r_0}{r_{mn}} \cdot u(t - t_{mn}) + \sum_{m=1}^{NL} \sum_{n=1}^{NW} \sum_{k=1}^{(ND-1)n'} \frac{r_0}{r_{mn}} \cdot \frac{1}{n'} \cdot u\left(t - t_{mn} - k \cdot \frac{\tau}{(ND-1)n'}\right) \quad (1)$$

$$U(\omega) = \sum_{m=1}^{NL} \sum_{n=1}^{NW} \frac{1}{r_{mn}} \left(e^{-i\omega t_{mn}} + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(ND-1)n'} e^{-i\omega \left[t_{mn} + \frac{(k-1)\tau}{(ND-1)n'} \right]} \right) \cdot U_{mn}(\omega) \quad (2)$$

$$t_{mn} = \frac{(r_{mn} - r_0)}{V_s} + \frac{\xi_{mn}}{V_R}$$

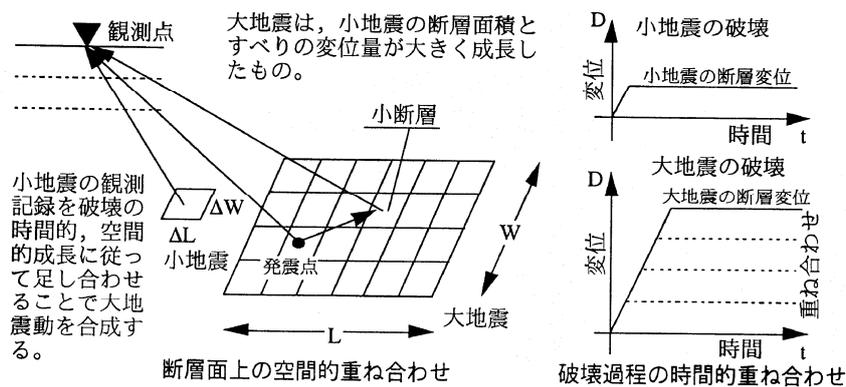


図1 経験的グリーン関数合成法の概念

ここで、小地震の震源と対象地点との震源距離を r_0 、断層面を $NL \times NW$ に分割し、すべりの足し合わせ数を ND としている (図1)。また、(1)式 (時間領域) と(2)式 (周波数領域)

は同じものを表している。式中、 τ はすべりの立ち上がり時間であり、小断層上がすべり始めてからすべり終わるまでの継続時間を表している。 r は小断層の中心から対象地点までの震源距離、 V_s は媒質（地殻）のS波速度である。 ξ は小断層中心と破壊開始点（震源）との距離であり、 V_R は断層面上における破壊の伝播速度である。したがって、 t_{mn} は小断層で生じた破壊が対象地点で観測される際の時間遅れを表していることになる。

n' はすべりの足し合わせの時間間隔を更に細かくするためのパラメーターで、すべり量の足し合わせのみ図1で簡単に示したものより複雑になっている。その概念を図2に追加している。図1では振幅1でND個実施している足し合わせを、振幅1の1個と振幅($1/n'$)の $(ND-1) \times n'$ 個で実施していることになる。立ち上がり時間(すべり継続時間)は変化せず、その分足し合わせの時間間隔が短くなっていることが特徴である。

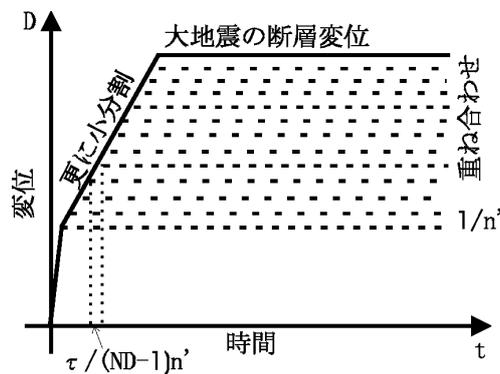


図2 経験的グリーン関数合成法によるすべり合成概念

経験的グリーン関数法による計算では、(3)式を評価するための断層面上の小断層中心位置とサイトとの幾何的な位置関係の設定が重要となる。図3に示すような断層を想定し、断層基準点位置を原点と仮定すると、小断層(i, j)の中心の座標 (x_f, y_f, z_f) は、

$$\begin{aligned} x_f &= rl * \sin(\text{strike}) + rw * \cos(\text{dip}) * \sin(\text{strike} + 90) \\ y_f &= rl * \cos(\text{strike}) + rw * \cos(\text{dip}) * \cos(\text{strike} + 90) \\ z_f &= tdep + rw * \sin(\text{dip}) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} rl &= (i - 0.5) * DL \\ rw &= (j - 0.5) * DW \end{aligned} \tag{5}$$

と導かれる。これらを用いて(1)～(3)式を評価すれば、経験的グリーン関数法が実施される。

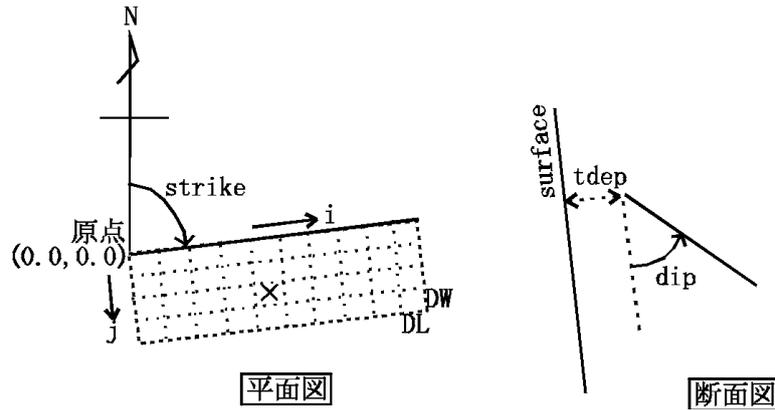


図3 断層面の幾何的位置関係

上記の概念を FORTRAN のサブルーチンとして表したものを以下に示す。ただし、計算は周波数領域で実施しており、サブルーチン fft は高速フーリエ変換（順変換が引数 - 1、逆変換が 1）に対応している。

```

c *****
  subroutine irkr86(maxtim, csmall, clarge, cd, wsmall, wlarge, ntim, dt,
    &                nf1, nf2, vs, vr, nl, dl, nw, dw, nd, riset, ndd,
    &                strike, dip, tdep, sitex, sitey, hl, hw, xg, yg, zg)
c *****
  dimension wsmall(maxtim), wlarge(maxtim)
  complex  csmall(maxtim), clarge(maxtim)
  complex  cd(maxtim)

c
  pai=2.0*acos(0.0)
  tim=real(ntim)*dt

c
c  /// To Frequency Domain ///
  do 1 i=1, ntim
    csmall(i)=cplx(wsmall(i), 0.0)
1 continue
  call fft(maxtim, ntim, csmall, -1)

c
c  /// Set Fault Geometry ///
  stsin=sin(pai*strike/180.0)
  stcos=cos(pai*strike/180.0)
  sdsin=sin(pai*(strike+90.0)/180.0)
  sdcos=cos(pai*(strike+90.0)/180.0)
  dpsin=sin(pai*dip/180.0)
  dpcos=cos(pai*dip/180.0)

c
c  /// Location of Rupture Starting Point ///
  xh=hl*stsin+hw*dpcos*sdsin
  yh=hl*stcos+hw*dpcos*sdcos
  zh=tdep+hw*dpsin

c

```

```

c   /// Distance between Site and hypocenter of EGF ///
r0=sqrt((sitex-xg)**2.0+(sitey-yg)**2.0+zg**2.0)
c
c   /// Set Delay for Dislocation Sum. ///
do 2 i=1,ntim
  cd(i)=(0.0,0.0)
  clarge(i)=(0.0,0.0)
2 continue
  ttt=real((nd-1)*nnd)
do 3 id=1,1+(nd-1)*nnd
  if(id.eq.1) then
    www=1.0
    delay=0.0
  else
    www=1.0/real(ndd)
    delay=risset*real(id-1)/ttt
  end if
do 4 i=nf1,nf2
  frq=real(i-1)/tim
  omg=2.0*pai*frq
  cd(i)=cd(i)+cplx(www,0.0)*cexp(cplx(0.0,-1.0*omg*delay))
4 continue
3 continue
c
c   /// Loop along Length ///
do 5 il=1,nl
  rl=real(il-1)*dl+0.5*dl
c
c   /// Loop along Width ///
do 6 iw=1,nw
  rw=real(iw-1)*dw+0.5*dw
c
c   /// Location on Fault Plane ///
xf=rl*stsin+rw*dpcos*sdsin
yf=rl*stcos+rw*dpcos*sdcos
zf=tdep+rw*dpsin
c
c   /// Distance between Site and Subfault ///
r=sqrt((sitex-xf)**2.0+(sitey-yf)**2.0+zf**2.0)
c   /// Distance between hypocenter and Subfault ///
d=sqrt((xh-xf)**2.0+(yh-yf)**2.0+(zh-zf)**2.0)
c
c   /// Loop for Frequency ///
delay=d/vr+(r-r0)/vs
do 7 i=nf1,nf2
  frq=real(i-1)/tim
  omg=2.0*pai*frq
  clarge(i)=clarge(i)+csmall(i)*cd(i)*cplx(r0/r,0.0)
&          *cexp(cplx(0.0,-1.0*omg*(delay)))
  clarge(ntim+2-i)=conjg(clarge(i))
7 continue

```

```

c
6 continue
5 continue
c
c   /// To Time Domain ///
do 8 i=1, ntim
  cd(i)=clarge(i)
8 continue
  call fft(maxtim, ntim, cd, 1)
do 9 i=1, ntim
  wlarge(i)=real(cd(i))
9 continue
c
  return
end

```

2) 関東平野における検証

a) 検討対象地震の選定

関東平野に影響を及ぼした地震として、最も大きな被害を生じた1923年関東地震を選定した。震源モデルとしては、波形および地殻変動に基づいた最も新しいインバージョンによる知見であり、かつシミュレーションによる検証が実施されている、Wald and Somerville(1995)による結果(図4)を用いることとする。

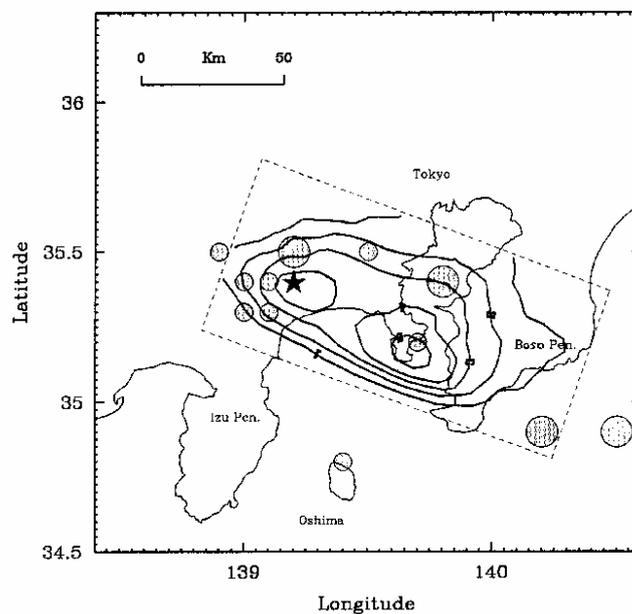


図4 Wald and Somerville(1995)の震源破壊モデル

また、大きな地震動が観測された新潟県中越地震を対象として、経験的グリーン関数法を用いて観測点における地震動シミュレーションを実施する。図5に参照した震源断層のインバージョン解[本田・他(2004)]とそれに利用された観測点の分布を示す。

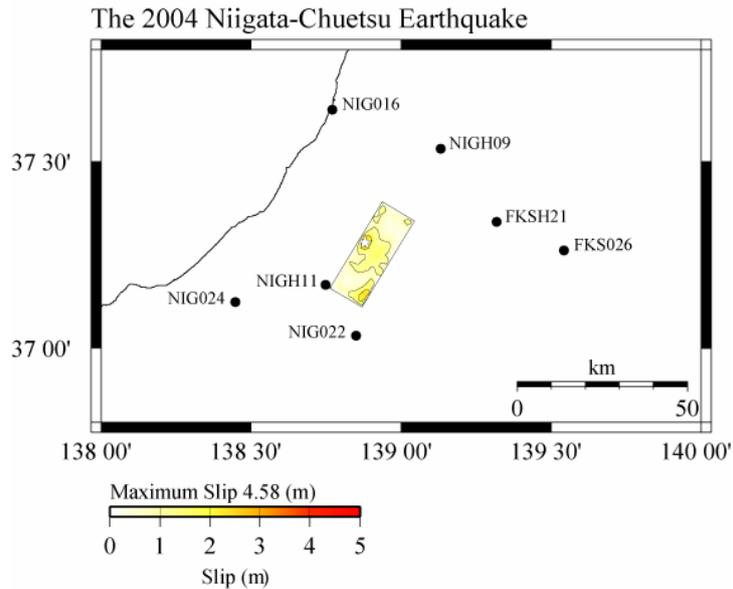


図5 新潟県中越地震の震源破壊モデル例

b) 1923年関東地震の検討

関東地震の非一様すべり分布を解析したWald and Somerville(1995)の結果を特性化し、シミュレーション用の断層破壊シナリオを設定した。表1にその結果を示す。

表1 関東地震の震源破壊パラメーター

	Mo, dyn*cm	Stress drop, bar	Area, km ²	LxW, km	Strike	Dip	Rake	Vr, km/s	Filter, Hz	Q	Rise time, sec
Asp-1	1.88e27	74	1560	39x30	290	25	48	3.0	0.1 - 10	80f ^{-1.0}	2.5
Asp-2	0.47e27	53	780	26x20			32				1.58
Background	3.52e27	15	6760	130x70			36				3.09

経験的グリーン関数として用いる地震は、対象地震の震源域で発生したメカニズムの似たものが望ましい。また、規模の大きい地震が対象となるため、あまりに小さいものよりも、マグニチュードが5を越えるものが適している。そのような条件に適合する地震として、2003年10月15日16時30分東京湾の地震(M5.1)を選定した。図6に用いた小地震の震央と対象サイトの位置を示す。防災科学技術研究所F-NETによる地震モーメント(5.15×10¹⁶N・m)を固定とし、硬質地盤上で得られた同地震の記録を震源に戻した変位スペクトルを、 ω^{-2} 則に沿った理論震源スペクトルでフィッティングすることにより(図7)、要素地震の応力降下量を14MPaと推定した。これらの値と表1に示した対象地震の諸元から、各アスペリティおよび背景領域における波形合成数と補正值を設計し、各地点における強震動シミュレーションを実施した。ただし、地震規模差が大きいことから、表2に示す中間的な地震を作成し、2段階合成を行った。

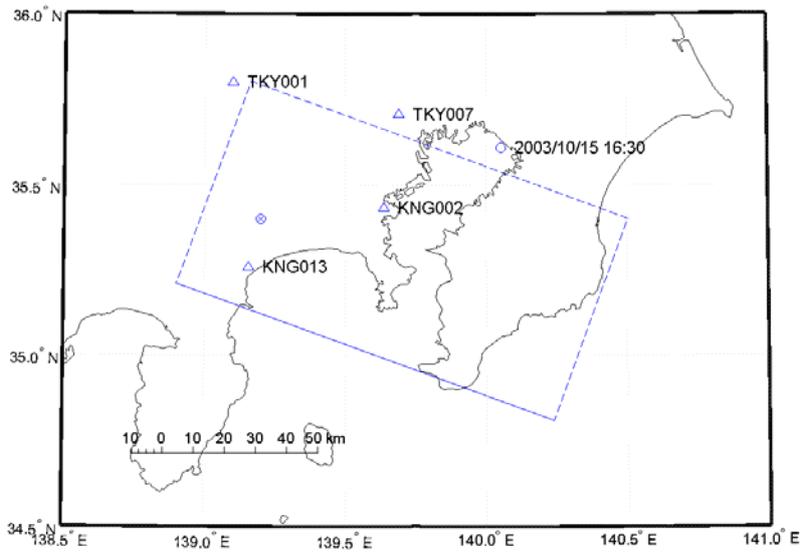


図6 対象サイトと小地震の位置

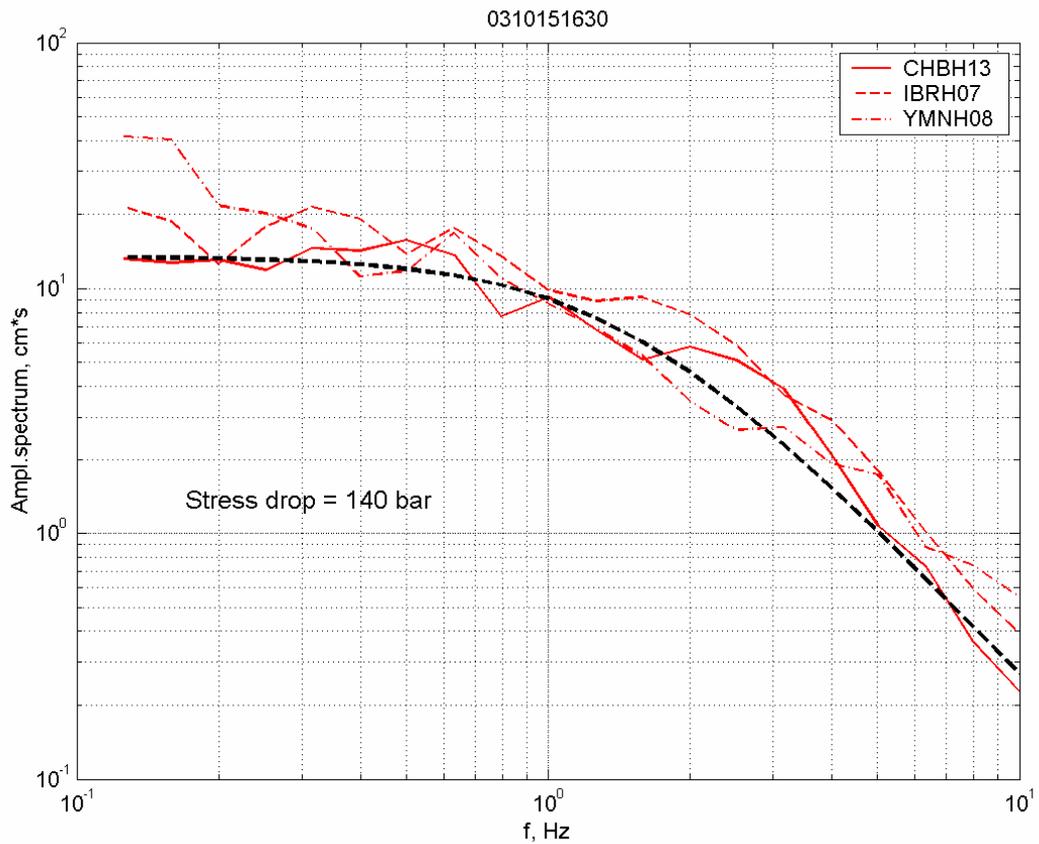
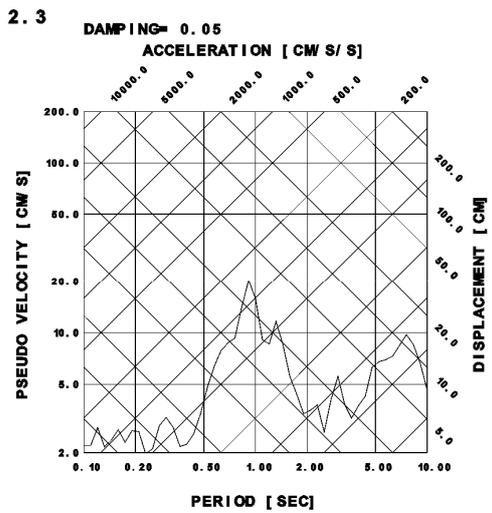
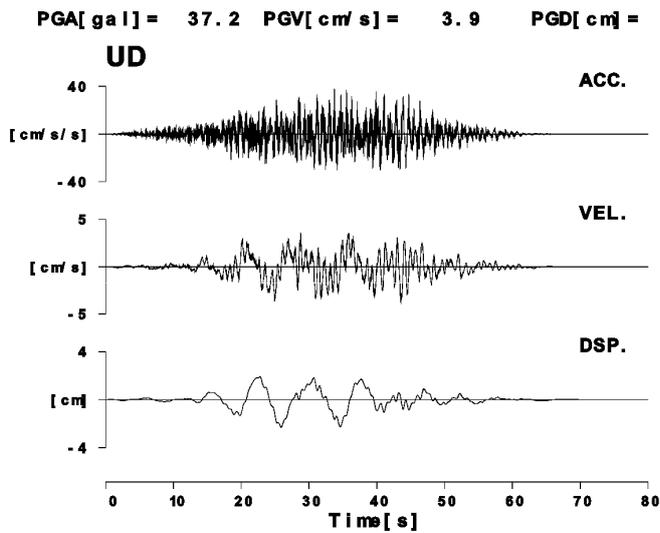
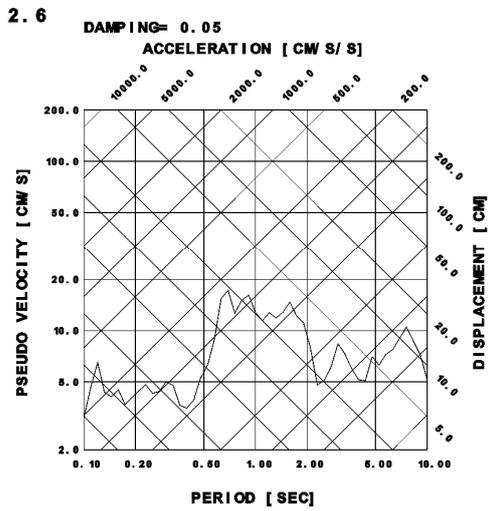
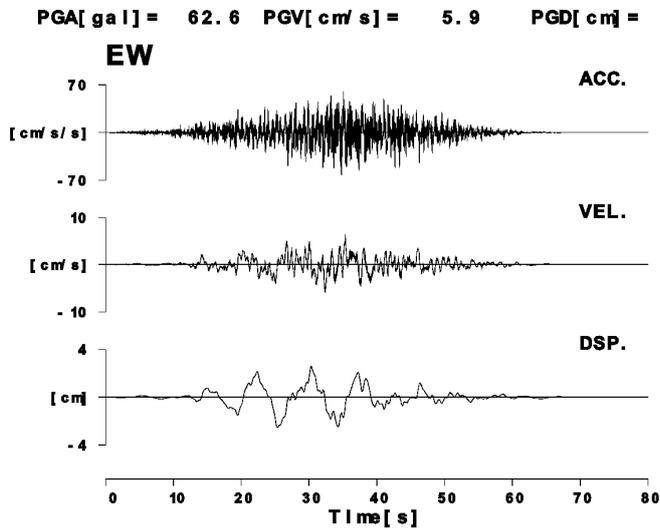
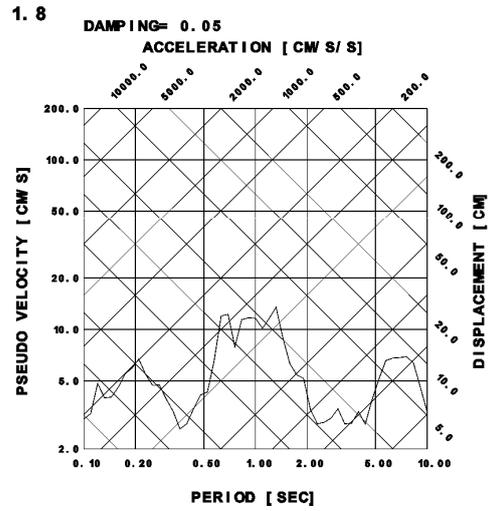
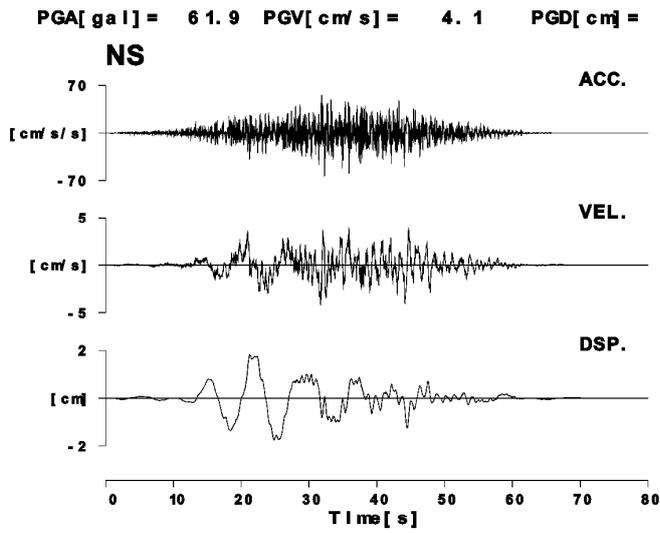


図7 要素地震のコーナー周波数を介した応力降下量の推定

表 2 関東地震を 2 段階シミュレーションする際の間地震のパラメター

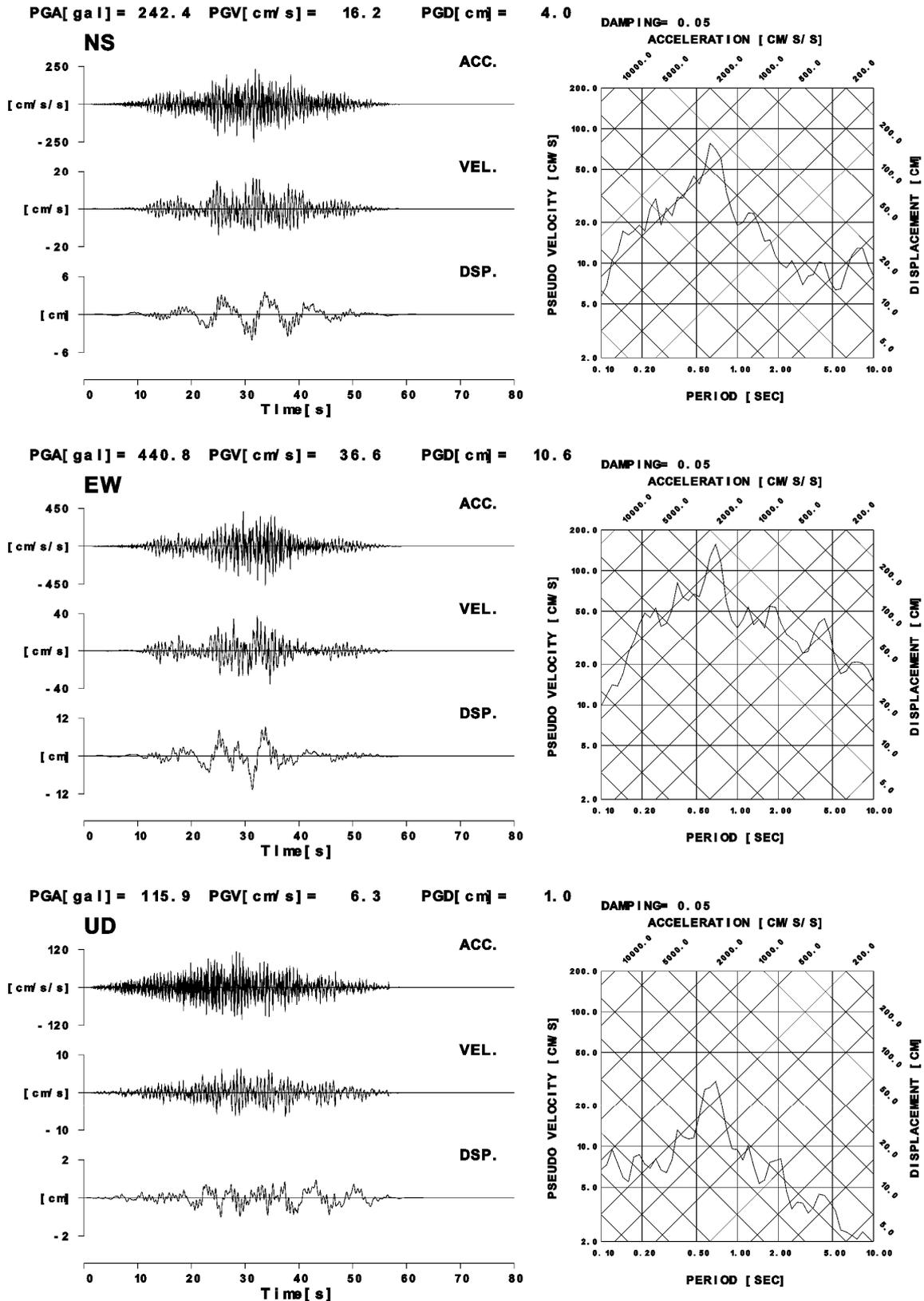
Strike, deg	Dip, deg	Rake, deg	Mo, dyn*cm	Coordinates	Stress drop, bar	LxW	Area	Vr	Rise time
290	25	40	1.28e25	139.2 35.4 13.2	23.1	11x11	122	2.52	0.47

以上の結果得られた氷川 (TKY001)、新宿地点 (TKY007) および横浜 (KNG002)、小田原 (KNG013) 地点における計算波形を図 8 に示す。波形から計算される計測震度は氷川 4 (4)、新宿 6 弱 (5 強)、横浜 6 強 (6 強)、小田原 6 強 (7) であり、括弧内に示した当時の推定震度 [武村(2003)、宇佐美(1985)] とともに大きくは矛盾しない。



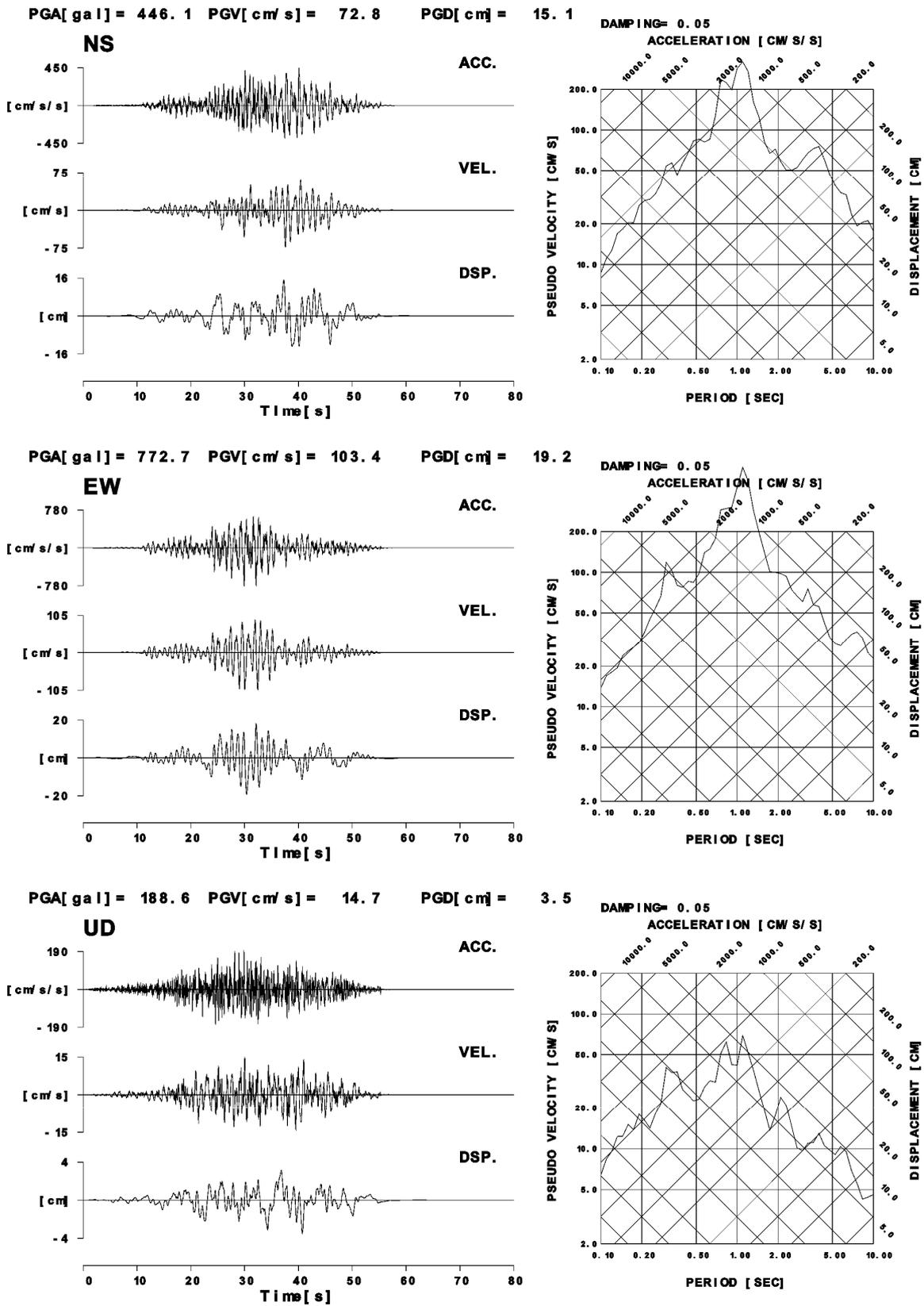
JMA Intensity=4 [3.9]

図 8 (1) 氷川地点 (TKY001) における計算波形



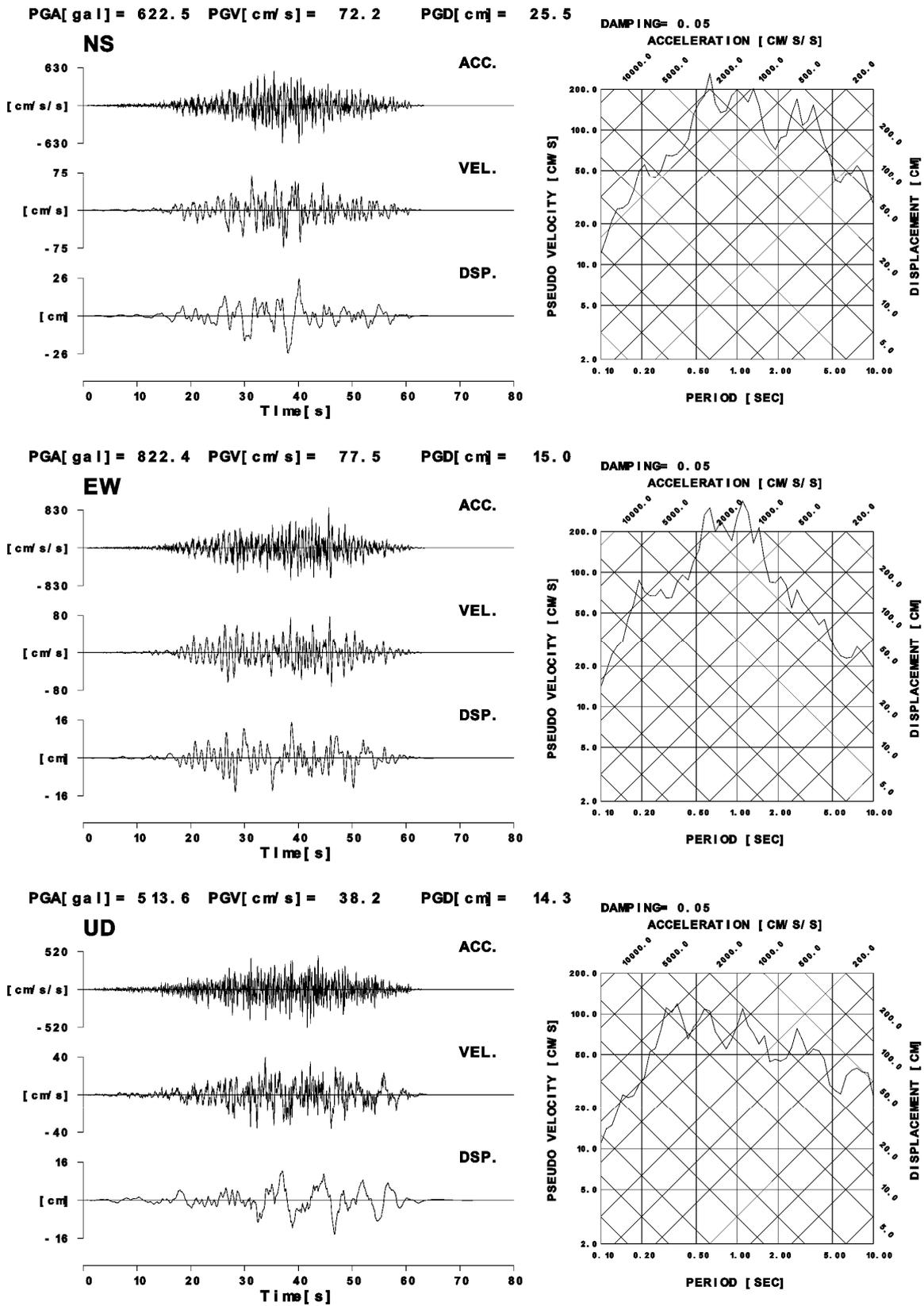
JMA Intensity=6L[5. 6]

図 8 (2) 新宿地点 (TKY007) における計算波形



JMA Intensity=6H[6.4]

図 8 (3) 横浜地点 (KNG002) における計算波形



JMA Intensity=6H[6.3]

図 8 (4) 小田原地点 (KNG013) における計算波形

c) 2004年新潟県中越地震の検討

本田・他(2004)による新潟県中越地震の非一様すべり分布を特性化し、シミュレーション用の断層破壊シナリオを設定した。表3にその結果を示す。

表3 新潟県中越地震の震源破壊パラメーター

	Mo, dyn*cm	Stress drop, bar	Area, km ²	LxW, km	Strike	Dip	Rake	Vr, km/s	Filter, Hz	Rise time, sec
Asp-1	2.600e25	98	75	7.5x10	211	52	93	2.0	0.1 - 10	0.6
Asp-2	0.528e25	201	16	4x4						0.35
Background	4.402e25	2.6	1189	50.45x25.38						0.7

経験的グリーン関数として用いる地震は、対象地震の震源域で発生したメカニズムの似たものが望ましい。そのような条件に適合する地震として、10月24日9時28分の地震(M4.8)を選定した。図9に用いた小地震の震央と対象サイトの位置を示す。防災科学技術研究所F-NETによる地震モーメント(9.85×10¹⁵N・m)を固定とし、硬質地盤上で得られた同地震の記録を震源に戻した変位スペクトルを、 ω^{-2} 則に沿った理論震源スペクトルでフィッティングすることにより(図10)、要素地震の応力降下量を1MPaと推定した。これらの値と表2に示した対象地震の諸元から、各アスペリティおよび背景領域における波形合成数と補正値を設計し、各地点における強震動シミュレーションを実施した。

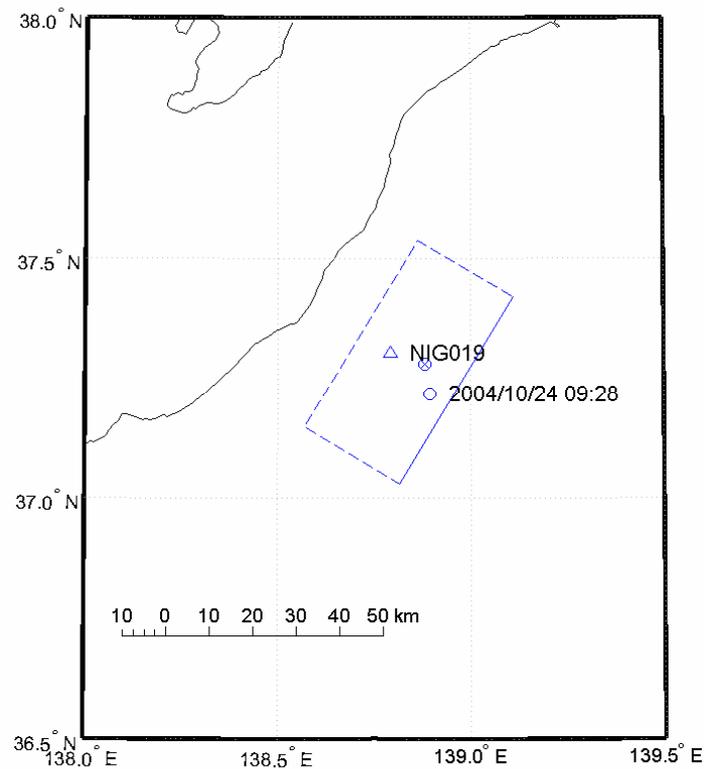


図9 対象サイトと小地震の位置

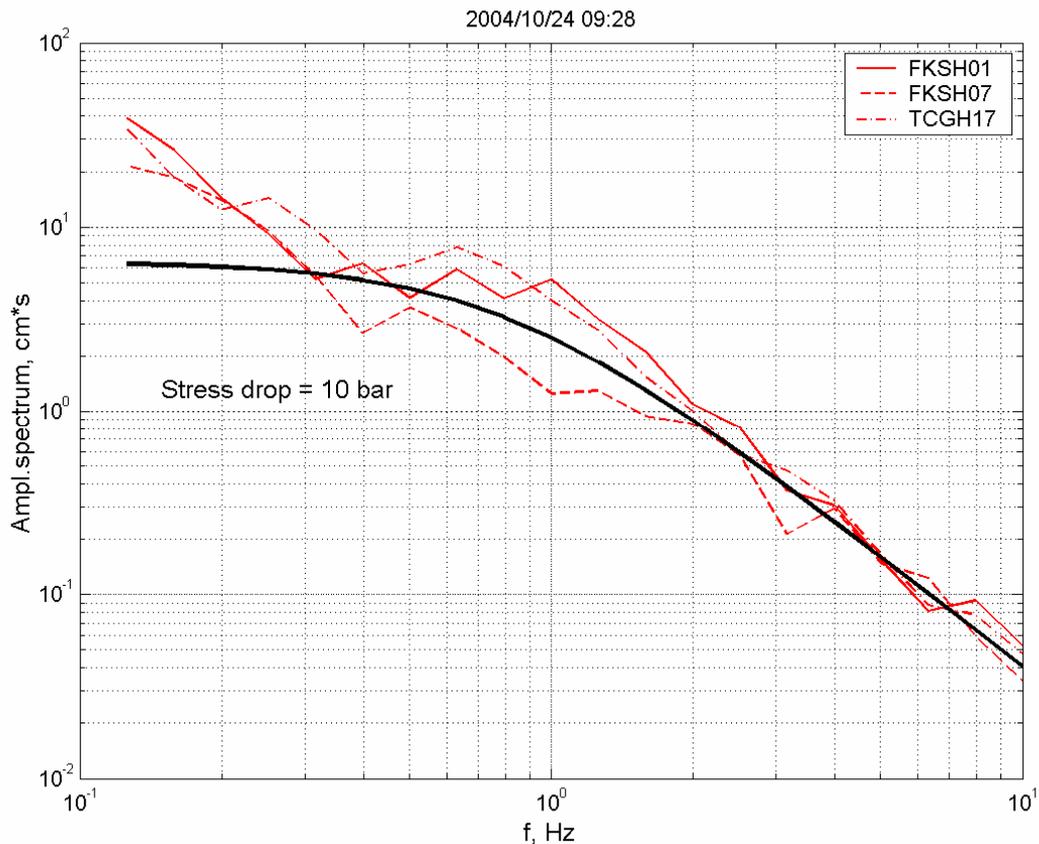


図10 要素地震のコーナー周波数を介した応力降下量の推定

以上の結果得られたK-NET小千谷地点（NIG019）における計算波形を観測波形とともに図11に示す。波形から計算される水平最大加速度は約 2200cm/s^2 （観測はフィルター処理無しで約 1500cm/s^2 ）、水平最大速度は約 180cm/s （観測は約 130cm/s ）計測震度は7（7.3）（観測は7（6.7））であり、実際の観測記録よりもやや過大となっている。応答スペクトルの比較では、計算の方が特に短周期で観測よりも大きくなっている。これは、線形地盤応答を反映した小地震記録を合成したことにより、線形地盤応答による大地震動となっているためと考えられる。大地震動下における非線形地盤応答の考慮が、経験的グリーン関数法の課題のひとつである。

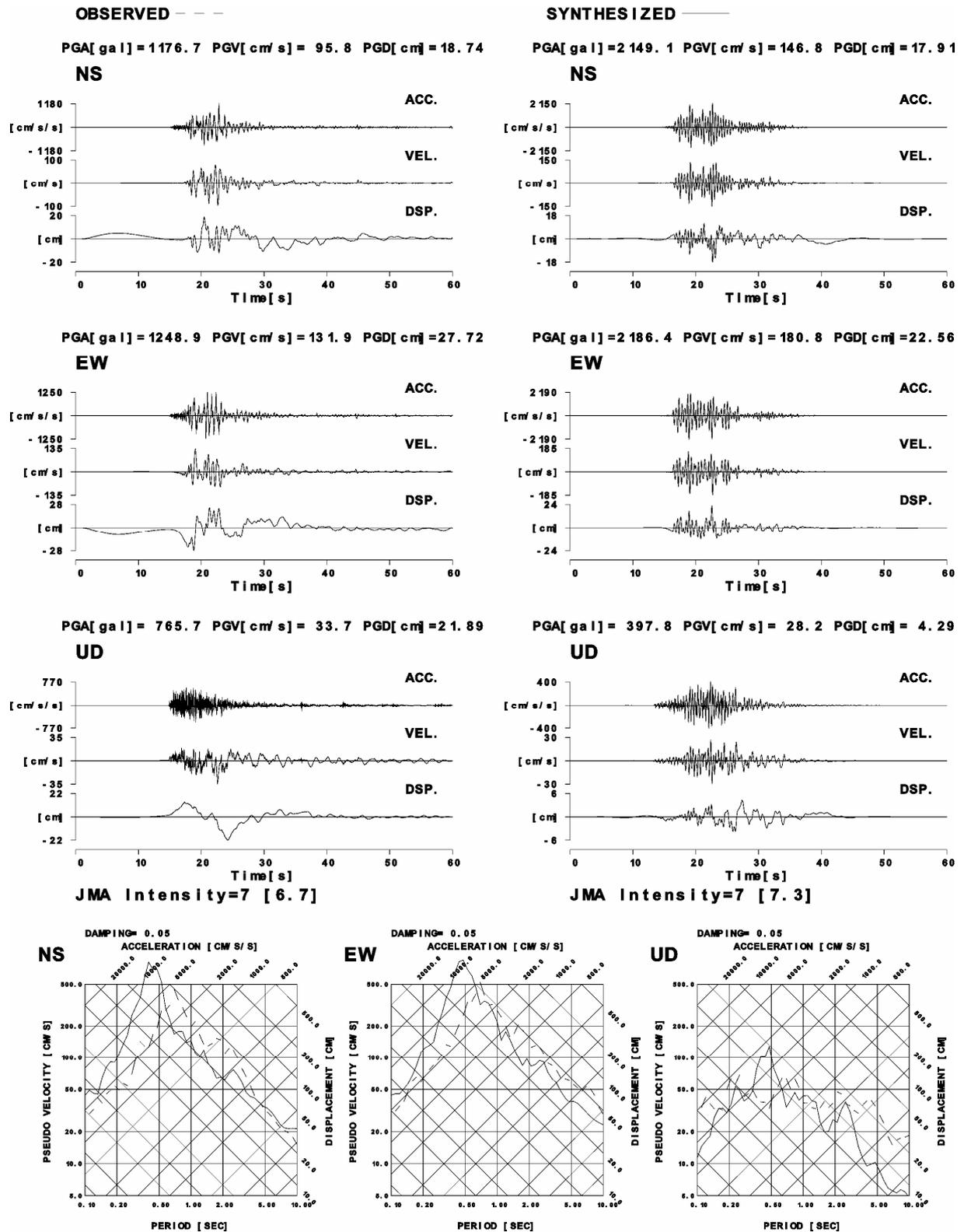


図11 小千谷地点 (NIG019) における計算波形と観測波形の比較

3) 大阪平野・濃尾平野における補足

a) 大阪平野におけるシミュレーション波

大阪府土木(1997)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）を用いた耐震補強を、大阪府で全国に先駆けて実施しており、その波形を公開している。ここでは、その概要を紹介する。

・ 計算方法

大阪府土木内の広範囲で強震動を評価する必要があるものの、全ての想定地点で経験的グリーン関数合成法に用いるべき観測記録が得られてはいない。そこで、ハイブリッド法が計算のベースとして利用されている。また、臨海部などの軟弱地盤を対象とした予測波においては、必要に応じて地表面波形を工学的な地震基盤相当層（非線形応答を考慮しなくても良い程度の層）まで線形計算ではざと、これに非線形地盤応答を施して非線形の地表面波形を設定している。地震動計算にあたっての大きな流れを図12に示す。

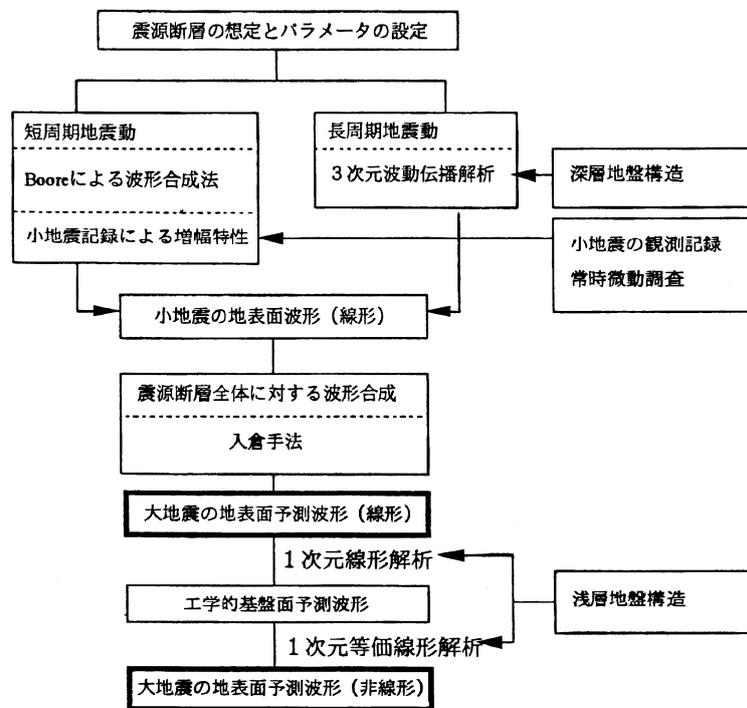


図12 大阪府土木部の地震動計算フロー

・ 震源断層の設定

大阪府域に影響を与える断層として、有馬－高槻構造線、生駒断層系、上町断層系、中央構造線の内陸活断層、および海溝型地震として南海トラフが想定されている。また、これらの地震断層の規模から経験的に断層パラメータを表4のように推定し、計算に用いている。断層面上でのすべり量については非一様すべりモデルが想定され、表に示した断層パラメータの一部とともにパラメトリック・スタディ（感度分析）が実施され、そのばらつきの影響も検討されている。

表4 大阪府土木部の対象地震断層の諸元

活断層名	長さ	幅	走向	傾斜角	すべり角	地震モーメント	断層変位量	立ち上がり時間	断層タイプ
記号および単位	L(km)	W(km)	$\phi_s(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	$M_0 \times 10^{24}$ (dyne · cm)	D(cm)	τ (sec)	
有馬・高槻構造線	44	21	260	82.5	180	3.04	97	1.2	右横ずれ断層
上町断層 北部	20	24	350.5	60	90	1.44	88	0.8	縦ずれ逆断層
南部	12	24	30.5	60	90	0.87	88	0.8	縦ずれ逆断層
生駒断層	28	24	0	60	90	1.89	83	1.0	縦ずれ逆断層
中央構造線 根来断層	40	21	258	82.5	180	3.23	113	1.4	右横ずれ断層
五条谷断層	20	21	245	82.5	180	1.62	113	1.4	右横ずれ断層
南海道地震断層	360	180	250	10	117	390	120	6.5	低角逆断層
東南海地震断層	270	180	240	15	117	200	82	4.7	低角逆断層

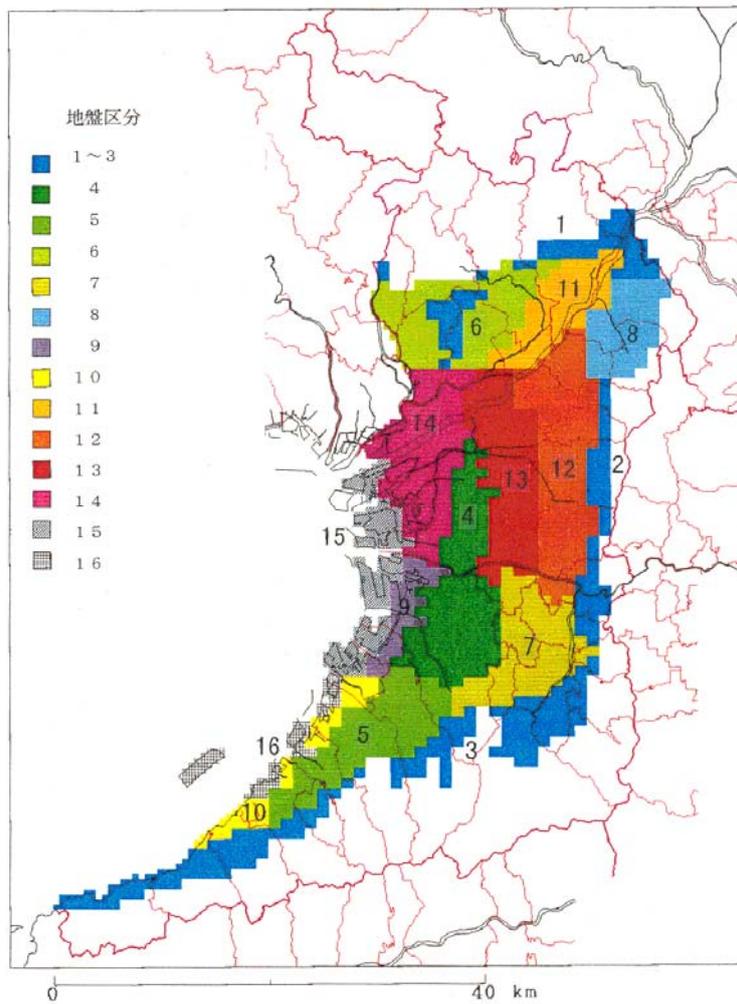


図13 大阪府土木部のゾーン分割

・対象地点

大阪府域で実施された常時微動観測データによる地盤増幅特性および想定震源断層からの距離に基づいて、府域をゾーン1～16（盆地部）、ゾーンB1～B3（山地部）の計19のゾーンに分類している（図13）。具体的には、山地境界型がゾーン1（北部）、2（東部）、3（南部）、洪積地盤型をゾーン4（中南部）、5（南部）、6（北西部）、7（南東部）、8（北東部）、沖積地盤型をゾーン9（南西部）、10（南部）、11（北東部）、12（東部）、13（中東部）、14（中西部）、埋立地盤型をゾーン15（湾岸北部）、16（湾岸南部）、露頭岩盤型をゾーンB1（北部）、B2（東部）、B3（南部）としている。このうち、ゾーン9～16の沖積・埋立地盤では、標準地盤を用いた等価線形地盤応答解析を実施し、非線形想定標準地震動を参考として計算している。

各ゾーンにおける短周期の地盤増幅については、そのゾーン内あるいは同様の地盤特性を有すると考えられる地点における観測記録から経験的な地盤増幅特性を求めて利用している。長周期地震動を検討するための地盤モデルは、既往調査結果をまとめた大阪深部地盤モデルに、必要に応じて地質学的な知見を加味して利用している。

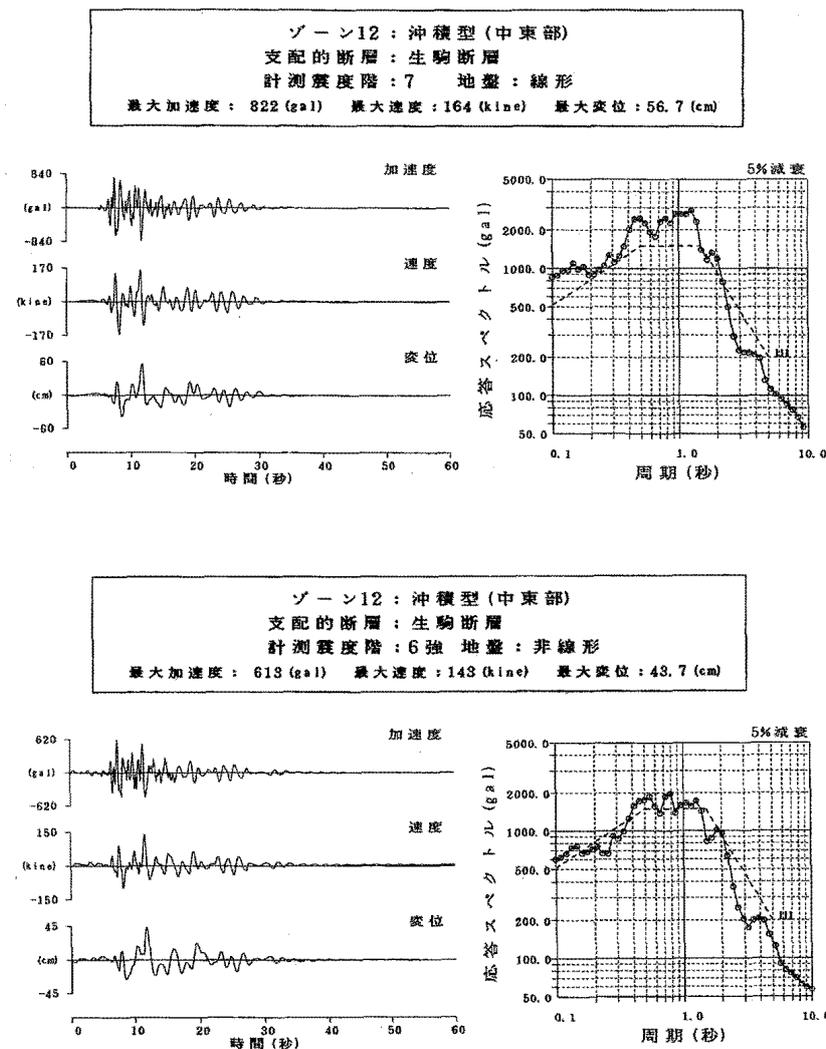


図14 大阪府土木部(1997)による想定標準地震動の例

- ・適用

以上の設定で想定断層毎に各ゾーン内の複数点における強震動を計算し、そのうちで震源断層ごく近傍の特異点を除き、各ゾーン内で最大となるものを採用している。つまり、各ゾーンでは、そのゾーンに最も影響する地震断層に起因する、そのゾーン内で最大の地震動が「想定標準地震動」として与えていることになる。ただし、最大地震動の抽出には、線形地盤応答を仮定した地表面地震波形に対して、周期0.1～1.5秒の応答スペクトルの平均強度を指標として実施している。

- ・入手方法

大阪府土木部に承認を得た後、地震動予測計算を実施した(財)地域地盤環境研究所（当時は(財)大阪土質試験所）に問い合わせることにより、各ゾーンの「想定標準地震動」を入手することができる。

- ・問題点

短周期地震動の計算の際に経験的な地盤増幅特性（S波）を用いているため、計算結果は水平2成分のみであり、また「想定標準地震動」として公開されている波形は大きい方の成分を用いている。図14に一例を示す。

a) 濃尾平野におけるシミュレーション波

濃尾平野では、愛知県設計用入力地震動研究協議会(2002)による、周辺活断層・想定東海地震の高精度地震動予測がおこなわれている。協議会の構成を図15に示す。

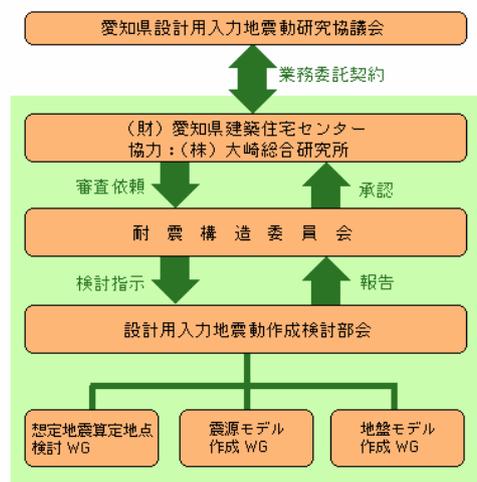


図15 愛知県設計用入力地震動研究協議会

- ・計算方法

計算にはハイブリッド法が用いられ、長周期帯域は3次元差分法、短周期帯域は地盤モデルに基づいた統計的グリーン関数法である。地盤モデルは地震による地盤の卓越周期の再現などを通じて検証されている。

- ・震源断層の設定

対象とした地震は、想定東海地震（東海＋東南海）、想定濃尾平野西縁断層地震（養老＋桑名）、想定伊勢湾地震（伊勢湾断層）、想定猿投山北断層地震（猿投山北断層）、想

定名古屋市浅部直下地震 (M6.5) である。いずれも、最新の知見に基づいて非一様断層破壊モデルが設定されている。

・対象地点

名古屋市内の代表的地盤上の9サイトを対象地点として選定している。各地点には対応するボーリング調査が実施されており、液状化解析までが可能なように土質特性が設定されている。

・入手方法

協議会の事務局となっている (財)愛知県建築住宅センターが窓口となっている。

・問題点

協議会形式のため、会員の利用を前提としている。最近になって、中部地方整備局・愛知県・名古屋市の三者が愛知県設計用入力地震動研究協議会と提携して実施した名古屋市三の丸地点における予測地震波 (経験的グリーン関数法) が公開されようとしている [中田・他 (2004)、武藤・他 (2004)、松島・他 (2004)]。図16に想定新東海地震 (東南海・東海) および伏在断層による計算例を示す。

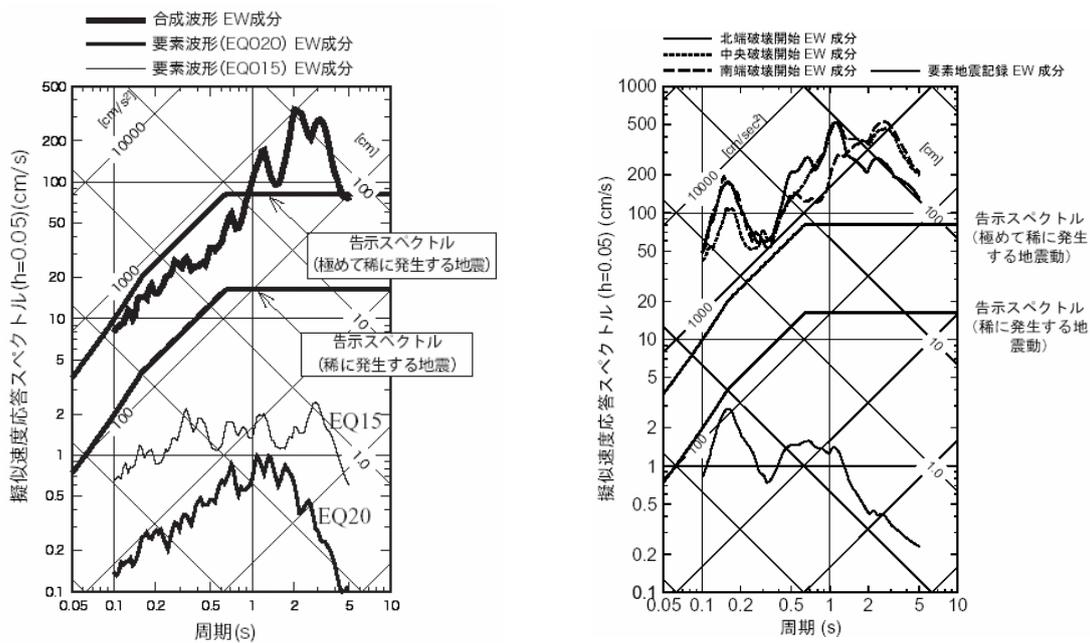


図16 想定新東海地震 (左: 武藤・他、2004)

4) 三次元強震動データベースへの反映

a) 三次元強震動データベースへの反映

シミュレーション波を強震動データベースに組み込むにあたり、登録が必要な情報について検討する。まず、通常の地震では以下の諸元が対象となる。

- ・発震時 (年月日時間秒)
- ・震源位置 (緯度、経度、深さ)
- ・地震規模 (マグニチュード (地震モーメント))
- ・観測点位置 (緯度、経度、標高)

- ・観測点地盤情報
- ・地震動特性値（震度、最大値、スペクトルなど）

これらのうち、既往地震の再現波であれば全てのパラメーターを設定できるが、想定地震については発震時を設定することができない。また、特に既往地震の場合、観測記録とシミュレーション記録の違いがはっきり分かるように配慮しておくことが望まれる。

次に、シミュレーション波に特有のパラメーターを以下に列挙する。

- ・計算手法（手法に特有なパラメーターを含む）
- ・震源断層破壊モデル（基準位置、長さ、幅、走向、傾斜、すべり方向、地震モーメント、アスペリティ・モデル、破壊開始点など）
- ・地盤モデル（深層、浅層、非線形）
- ・手法、モデルの参考文献

これらの情報は、強震動データベースの備考あるいは関連ファイルとして登録されることが合理的であると考えられる。規模が大きく解析事例が蓄積されている地震については、既往地震であっても震源断層破壊モデルが登録されていれば便利である。また、地盤モデルについても同様で、可能であればシミュレーション波に限らず参考資料としてデータベースに登録されておれば望ましいと考えられる。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 結論

- ① 既往の三次元強震動波形計算手法を調査し、合理的に三次元強震動をシミュレーションする手法として経験的グリーン関数法を採用し、その核となるサブルーチンを提示した。
- ② 関東平野において1923年関東地震のシミュレーションを実施し、当時の震度と矛盾しない結果を得た。
- ③ 2004年新潟県中越地震のシミュレーションを実施し、観測事例と矛盾しない結果を得た。
- ④ 大阪平野および濃尾平野について、設計地震動などとして利用されている強震波形の調査を行い、利用上の問題点と入手法を示した。
- ⑤ 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ことを前提として、必要なパラメーターを抽出した。

2) 課題

- ① 経験的グリーン関数法を用いた内陸活断層地震およびプレート境界地震による評価では、用いた小地震のメカニズムが対象とする地震と異なっており、その地震も断層面のごく一部を代表したものであり、断層面全体で変化する方位角を反映してはいない。特に、メカニズムや方位角の影響が大きい長周期帯域において、3次元差分法を反映したハイブリッド法を用いた検証をおこなっておくことが望ましい。

- ② 非常に大きい地震動の得られたサイトにおいては、非線形地盤応答に関する補正を実施しておくことが望ましい。
- ③ これまでは主に既往地震記録の再現を中心として検討を実施したが、大型三次元震動台の性能を有効活用するためには、その限界性能を狙った想定大地震記録の合成を試みることも必要である。

(e) 引用文献

- 1) 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成 想定地震による強震動予測、2002.
- 2) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiation spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, 73, 1865-1894, 1983.
- 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) 本多亮, 青井真, 関口春子, 森川信之, 功刀卓, 藤原広行：近地地震動記録による新潟県中越地震の震源インバージョン, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net>, 2004.
- 5) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., 63-104, 1986.
- 6) 入倉孝次郎, 三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849-875, 2001.
- 7) 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（M 7 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.
- 8) Kamae, K., K. Irikura and A. Pitarka, 1998, A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 357-367, 1998.
- 9) 松島信一, 宮腰淳一, 武藤尊彦, 森川和彦, 壇一男, 佐藤俊明, 福和伸夫, 中田猛：名古屋市三の丸地区における耐震改修用の地震動作成（その3）想定伏在断層に起因する想定地震の強震動予測, 日本建築学会学術講演梗概集B-2, 構造Ⅱ, 533-534, 2004.
- 10) 武藤尊彦, 宮腰淳一, 壇一男, 藤川智, 早川崇, 佐藤俊明, 福和伸夫, 中田猛：名古屋市三の丸地区における耐震改修用の地震動作成（その2）想定新東海地震による強震動予測, 日本建築学会学術講演梗概集B-2, 構造Ⅱ, 531-532, 2004.
- 11) 中田猛, 福和伸夫, 藤川智, 壇一男, 佐藤俊明, 柴田昭彦, 白瀬陽一, 齊藤賢二：名古屋市三の丸地区における耐震改修用の地震動作成（その1）全体概要, 日本建築学会学術講演梗概集B-2, 構造Ⅱ, 529-530, 2004.
- 12) 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.
- 13) Pitarka, A. : 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered-grid with non-uniform spacing, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 54-68, 1999.
- 14) 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.

15) Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, 70, 59-80, 1999.

16) 武村雅之：関東大震災 大東京圏の揺れを知る，鹿島出版会，2003.

17) 鶴来雅人，田居優，入倉孝次郎，古和田明：経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討，地震2，50，215-227，1997.

18) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧，東京大学出版会，1985.

19) 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.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	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 17 年度業務計画案

1) 3次元強震動計算手法の構築

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。

2) 3次元強震動の試算

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。（対象：兵庫県南部地震，十勝沖地震，新潟県中越地震）

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を、その解説と併せて収集・整理する。（対象：東京，名古屋，大阪）