

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14年度業務目的

(2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 三次元強震動波形計算手法の検討
 - 2) 想定する地震の選定と地震動情報の収集
 - 3) 三次元強震動波形計算に必要な地震環境情報の収集・整理
 - 4) 三次元強震動波形計算と既往地震による検証
- (c) 業務の成果
 - 1) 三次元強震動波形計算手法の検討
 - 2) 想定する地震の選定と地震動情報の収集
 - 3) 三次元強震動波形計算に必要な地震環境情報の収集・整理
 - 4) 三次元強震動波形計算と既往地震による検証
- (d) 結論ならびに今後の課題
 - 1) 結論
 - 2) 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15年度業務計画案

- (a) 業務計画
- (b) 実施方法
- (c) 目標とする成果

(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
京都大学防災研究所 地震災害研究部門強震動地震学分野	所長 (教授)	入倉 孝次郎

(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おこない、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：

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おこなう。

大阪平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理をおこなう。

大阪平野を対象とした三次元強震動波形の推定をおこなう。

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する。

濃尾平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理をおこなう。

濃尾平野を対象とした三次元強震動波形の推定をおこなう。

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：

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。

関東平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理をおこなう。

関東平野を対象とした三次元強震動波形の推定をおこなう。

大阪平野・濃尾平野を対象とした三次元強震動波形の推定を補足する。

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。

(e) 平成14年度業務目的

三次元強震動計算手法の調査検討と推定手法の構築

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、特に上下動を含む3次元地震動を評価することを前提に、対象地域の条件に最適な方法論の調査検討をおこない、適用条件などをとりまとめる。

大阪平野における検証

上記計算手法に基づき、大阪平野内の地盤構造（表層および深層）が既知の対象サイトにおいて、内陸活断層・プレート境界・スラブ内の3タイプの既往地震を選定し、シミュレーション結果と観測波形あるいは震度の比較をおこない、上記計算手法の妥当性を検証する。

(2)平成14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

- 1) 大阪平野を対象として上下動を含む3次元強震動波形を推定するため、現段階で適用し得る強震動シミュレーション法について調査検討し、大阪平野の特徴に沿った手法を選択した。
- 2) 内陸活断層・プレート境界・スラブ内の3タイプの既往地震からシミュレーションに適した地震を選択し、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。
- 3) 大阪平野における既往の震源断層モデル、地震観測記録、地盤構造（表層および深層）など地震環境に関する情報を収集して調査検討をおこなうことにより、強震動シミュレーションに必要なモデルを構築する。
- 4) 以上の基礎情報に基づき、大阪平野における内陸活断層・プレート境界・スラブ内の3タイプの既往地震の3次元強震動波形をシミュレーションし、観測事例を用いた検証をおこなった。

(b) 業務の実施方法

1) 3次元強震動波形計算手法の検討

a) 強震動波形計算の概要

強震動波形計算手法の考え方について、震源断層面を小分割した要素断層に起因するグリーン関数をどのように評価するかの観点から整理をおこなった。

b) 経験的グリーン関数法

a)で整理した手法のうち、小地震観測記録をグリーン関数として大地震を合成する経験的グリーン関数法について、長所・短所を整理した。

c) 統計的グリーン関数法

a)で整理した手法のうち、震源理論に基づく人工地震波をグリーン関数として大地震を合成する統計的グリーン関数法について、長所・短所を整理した。

d) 3次元差分法

a)で整理した手法のうち，断層面上の点震源（群）から発して3次元地盤構造内を伝播する地震動を逐次追跡する3次元差分法について，長所・短所を整理した。

e) ハイブリッド法

主に b)，c)の手法を組み合わせるハイブリッド法について，その長所・短所を整理した。

f) 適用手法の検討

b)，c)，d)の手法について，大阪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。

2) 想定する地震の選定と地震動情報の収集

a) 内陸活断層地震

大阪平野に影響を及ぼした内陸活断層地震から対象地震を選定し，その震源情報・強震動観測波形・震度情報を収集・整理した。

b) プレート境界地震

大阪平野に影響を及ぼしたプレート境界地震から対象地震を選定し，その震源情報・震度情報を収集・整理した。

c) スラブ内地震

大阪平野に影響を及ぼしたスラブ内地震から対象地震を選定し，その震源情報・震度情報を収集・整理した。

3) 三次元強震動波形計算に必要な地震環境情報の収集・整理

a) 深層地盤構造

大阪平野において強震動シミュレーションを実施する際に必要となる深層地盤構造情報を収集・整理した。

b) 浅層地盤構造

大阪平野において強震動シミュレーションを実施する際に必要となる浅層地盤構造情報の考え方について検討した。

c) 伝播経路特性

大阪平野において強震動シミュレーションを実施する際に必要となる伝播経路特性に関する情報を収集・整理した。

4) 三次元強震動波形計算と既往地震による検証

a) 内陸活断層地震

1995年兵庫県南部地震について経験的グリーン関数法によるシミュレーションを実施し，観測波形・震度との比較・検証を行った。

b) プレート境界地震

1707年宝永地震を対象に経験的グリーン関数法によるシミュレーションを実施し，推定震度との比較・検証を行った。

c) スラブ内地震

1952年吉野地震を対象に経験的グリーン関数法によるシミュレーションを実施し，推

定震度との比較・検証を行った。

(c) 業務の成果

1) 三次元強震動波形計算手法の検討

a) 強震動波形計算の概要

地震現象は、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都市の構造物を揺らせるものである(図1)。大地震に比べて小地震の震源は小さく、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(グリーン関数)と近似的に考えることができる。また、大地震は大きな断層面上を次々に破壊が伝播した小地震の集合として評価することができる(図2)。

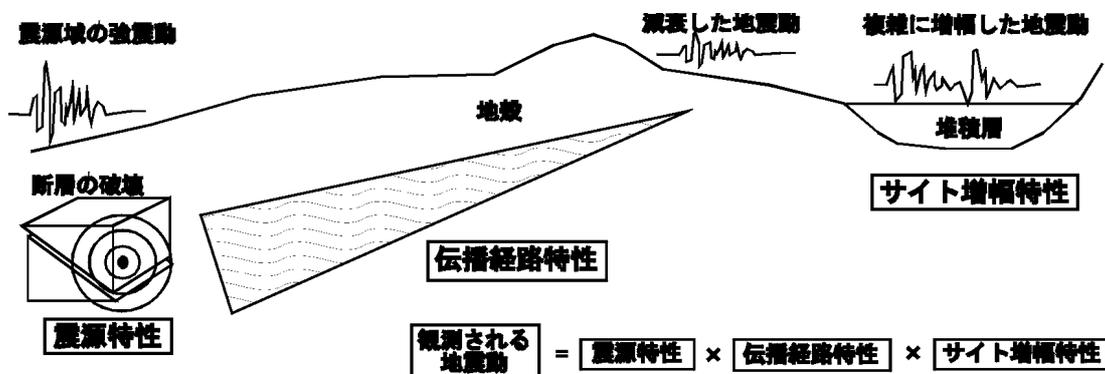


図1 地震動を構成する要因

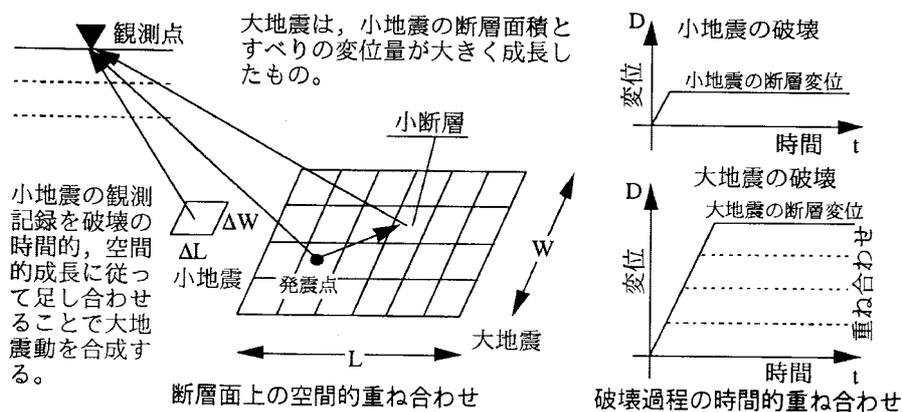


図2 小地震から大地震が合成されるイメージ

小地震の断層面積とすべり量が既知であれば、ある場所で小地震を連続的に複数個発生させることで、大地震のすべり量を満たす地震波を生成することができる。次に、大地震の断層破壊の進行に応じてこの地震波を連続的に複数個発生させることにより、大地震の断層面積を満たす地震波を合成することができる。大地震の地震波シミュレーションは、基本的にこのような考え方に基づいて実施され、小地震波形に対応するグリー

ン関数をどのように評価するかが三次元強震動波形計算手法の違いとなる。以下にその代表例を示す。

b) 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えて合成に用いる手法である [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り，信頼性が高い。しかし，本来は図2の要素断層毎に異なるべき地震波放射やサイト応答の方位依存性が十分に考慮されない点が弱点となる。また，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が，1995年兵庫県南部地震のように既往地震の再現には条件が整っていることが多い。

c) 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。このときのサイト増幅特性の評価法として，地盤構造モデルを設定して理論的に計算する方法と対象サイトの地震観測記録から経験的な増幅特性を抽出する方法 [例えば，鶴来・他(1997)] が用いられる。後者の経験的サイト増幅特性は対象断層に必ずしも起因しない地震観測記録からも導くことができる。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。

d) 3次元差分法

大阪盆地のように3次元的な形状を有する地盤では，3次元的な波動伝播を考慮した地震動評価が重要となる。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る。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。

e) 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)] 短周期帯域を経験的グリーン関数法とすることも可能である。一般的に用いるハイブリッド法のフローを図3に示す。3次元差分法の計算制約より、ハイブリッド合成をおこなう接続周期帯は1秒より長周期に設定されることが多い。しかし、地震動の決定論的な面と統計的な面の遷移域はより短周期に存在すると考えられており、それに対応できることが目下の課題である。

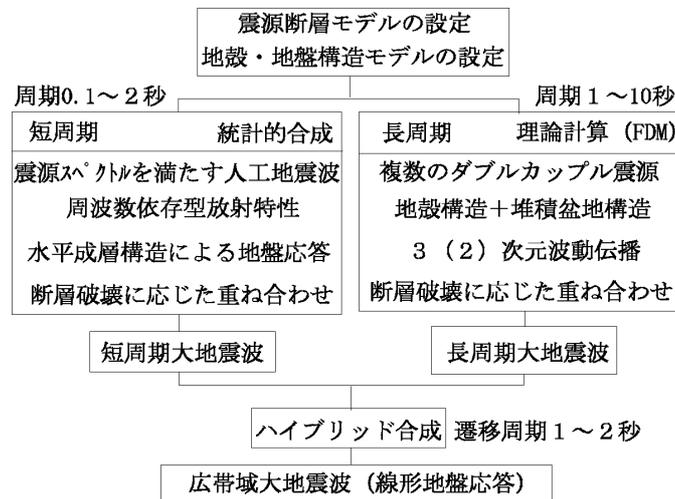


図3 一般的なハイブリッド法のフロー図

f) 適用手法の検討

大阪平野は2)で示すように地盤構造情報が多いサイトである。したがって、b)、c)、d)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b)の経験的グリーン関法が第1近似的な予測に便利であるし、詳細な地盤構造モデルを用いたd)のハイブリッド法の適用も可能である。状況に応じて使い分ければ良い。

2) 想定する地震の選定と地震動情報の収集

a) 内陸活断層地震

大阪平野に大きな影響を及ぼした既往の内陸活断層地震には、1596年慶長地震と1995年兵庫県南部地震がある。このうち震源域における強震動波形や詳しい震度分布が得られている1995年兵庫県南部地震を対象地震として選定した。

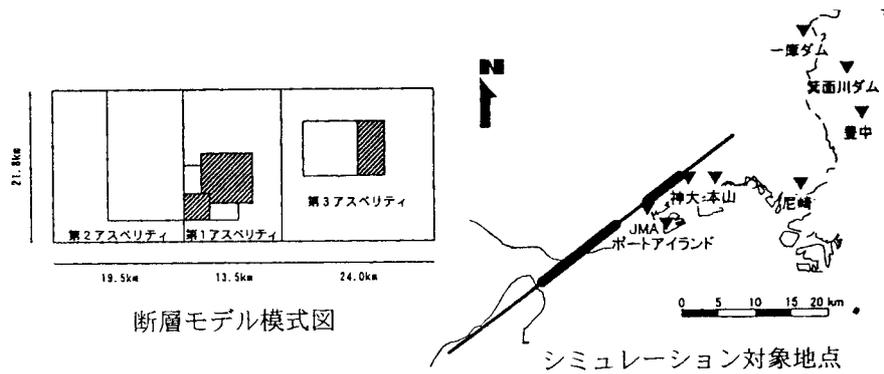


図4 山田・他(1999)の特性化震源モデル

兵庫県南部地震の震源断層破壊モデルは幾つか提案されているが、ここでは矩形のアスペリティで震源をモデル化した特性化震源モデルを用いる。具体的には、Sekiguchi et al.(1996)の波形インバージョン解を特性化した釜江・入倉(1997)を改良した山田・他(1999)のモデル(図4, 表1)を用いた。

表1 山田・他(1999)の特性化震源パラメータ

	Mo(Nm)	A(km ²)	τ(s)
Asperity 1	8.5×10 ¹⁸	189.2	0.6
Asperity 2	1.1×10 ¹⁸	23.0	0.4
Asperity 3	2.3×10 ¹⁸	51.2	0.5
Asperity 4	3.7×10 ¹⁸	102.4	0.6
Total	1.56×10 ¹⁹	365.8	

b) プレート境界地震

大阪平野に大きな影響を及ぼした既往のプレート境界地震は、約150年周期で繰り返している南海・東南海地震で代表される。このうち、南海地震と東南海地震が連動し過去最大の地震であったと推定されている1707年宝永地震を対象地震として選定した。この地震の震度分布は図5のように推定されている[宇佐美(1985)]

また、1707年宝永地震を対象とした震源断層破壊モデルが中央防災会議から提案されており(表2)、ここではそれを4枚の断層面で近似的にモデル化した(図6, 表3)。

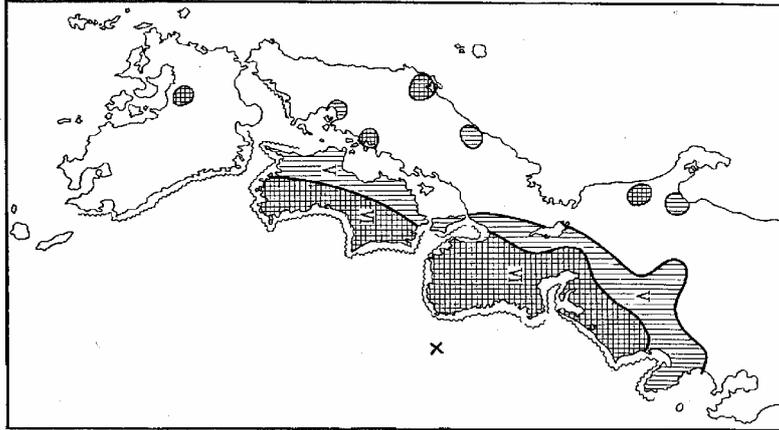


図5 1707年宝永地震の推定震度分布

c) スラブ内地震

大阪平野に大きな影響を及ぼした既往スラブ内地震の事例は少ないが、1952年吉野地震(M7.0, 深さ70km)がそのひとつと考えられる。この地震の震源断層モデルは解析されていないが、沈み込む太平洋プレート内部の破壊と考えられる。ここでは、1993年釧路沖地震と同じように、ほぼ水平な正断層を想定する(図7)。この地震の震度分布は図8のように評価されており[宇佐美(1985)],震源の西側の震度が大きくなっている。そこで、図9に示すように、破壊開始点をアスペリティの東側に置いた。

この地震の地震モーメントを、気象庁マグニチュードから換算[武村(1990)]すると $1.26 \times 10^{19} \text{N}\cdot\text{m}$, モーメント・マグニチュードは6.7である。壇・他(2003)は深さに応じたスラブ内地震の応力降下量を,

$$(\text{bar}) = 0.66 \times H + 314$$

とモデル化している。これに深さ70kmを適用すると36MPaを得る。背景領域の応力降下量はその0.2倍[入倉・三宅(2001)]の7.2MPaとした。Somerville et al.(1999)に従い、アスペリティ部の面積を全体の0.22倍、平均に対するすべり量比を2.01倍とすると、断層全体の平均応力降下量は7.9MPaとなる。平均応力降下量と全地震モーメントから円形クラックの式[Eshelby(1953)]を用いて断層面積を求めると 246km^2 となる。

表 2 中央防災会議による南海・東南海地震の巨視的断層モデル

	南海地震		東南海地震	
	西部	東部	西部	東部
基準点緯度 (°)	32.630	32.810	33.830	34.160
基準点経度 (°)	135.100	135.950	136.990	138.120
断層走向角 (°)	245.0	270.0	215.0	235.0
断層傾斜角 (°)	7.0	14.0	14.0	10.0
すべり角 (°)	120.0	145.0	90.0	100.0
断層上端深度 (km)	10.0	10.0	10.0	10.0
断層長さ (km)	220	170	120	130
断層幅 (km)	160	100	80	110
断層面積 (km ²) : トリミング後	36500		15800	
応力降下量 (MPa)	3.0		3.0	
地震モーメント (N·m)	8.37E+21		2.38E+21	
	1.08E+22			
平均すべり量 (m)	5.61		3.69	
モーメントマグニチュード	8.55		8.18	
	8.62			
破壊伝播速度 (km/sec)	2.70			

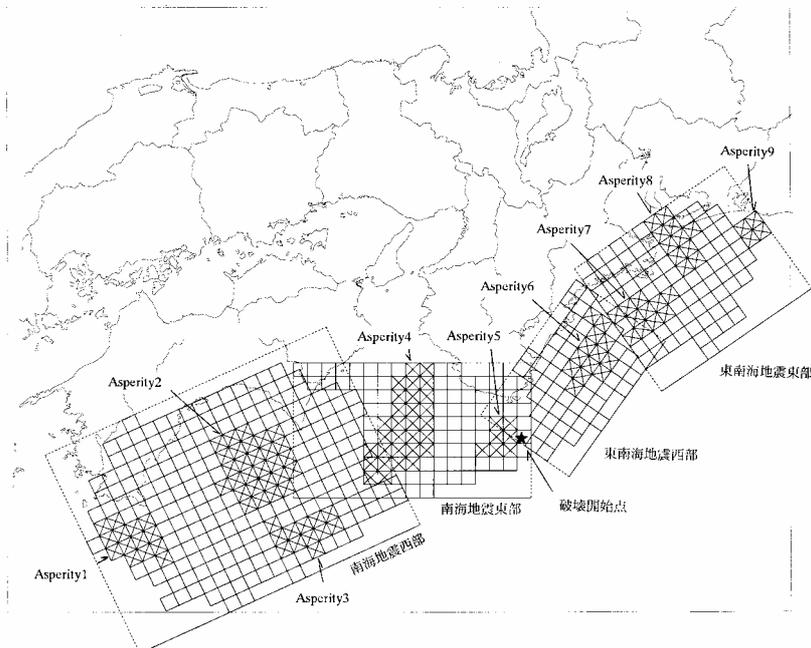


図 6 中央防災会議による南海・東南海地震を4枚の矩形断層でモデル化したもの

表3 中央防災会議による南海・東南海地震の非一様すべりモデル

	南海地震	東南海地震
アスペリティの個数	7	4
アスペリティの面積 S_a (km ²)	9100	3900
アスペリティでの総モーメント M_{oa} (N·m)	4.17×10^{21}	1.18×10^{21}
面積 (km ²)	1400	1300
地震モーメント (N·m)	5.14×10^{20}	4.31×10^{20}
すべり量 (m)	8.98	8.11
応力降下量 (MPa)	23.9	22.4
立ち上がり時間 (s)	6.9	6.7
	アスペリティ2	アスペリティ7
面積 (km ²)	2800	1100
地震モーメント (N·m)	1.45×10^{21}	3.36×10^{20}
すべり量 (m)	12.70	7.46
応力降下量 (MPa)	23.9	22.4
立ち上がり時間 (s)	9.8	6.1
	アスペリティ3	アスペリティ8
面積 (km ²)	1200	1100
地震モーメント (N·m)	4.08×10^{20}	3.36×10^{20}
すべり量 (m)	8.31	7.46
応力降下量 (MPa)	23.9	22.4
立ち上がり時間 (s)	6.4	6.1
	アスペリティ4	アスペリティ9
面積 (km ²)	3000	400
地震モーメント (N·m)	1.61×10^{21}	7.36×10^{19}
すべり量 (m)	13.15	4.50
応力降下量 (MPa)	23.9	22.4
立ち上がり時間 (s)	10.1	3.7
	アスペリティ5	
面積 (km ²)	700	
地震モーメント (N·m)	1.82×10^{20}	
すべり量 (m)	6.35	
応力降下量 (MPa)	23.9	
立ち上がり時間 (s)	4.9	
背景領域		
面積 (km ²)	27400	11900
地震モーメント (N·m)	4.20×10^{21}	1.20×10^{21}
すべり量 (m)	3.75	2.48
応力降下量 (MPa)	2.2	2.2
立ち上がり時間 (s)	8.9	5.8

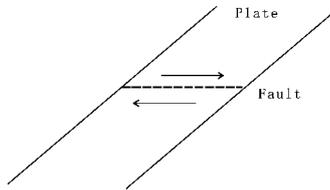


図8 1952年吉野地震の震源断層のイメージ

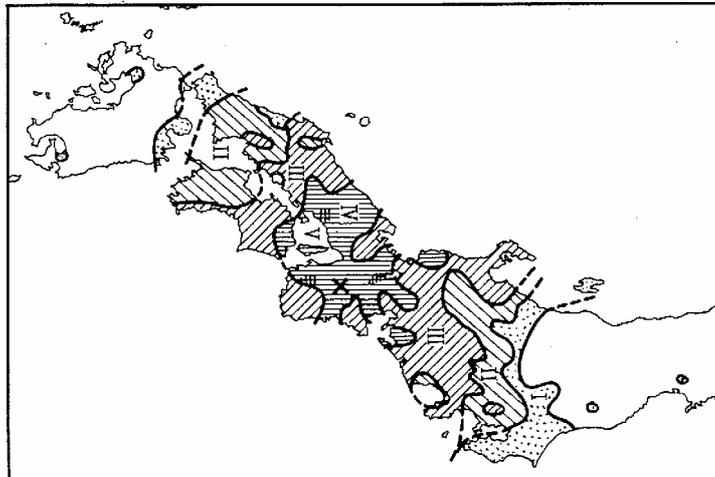


図9 1952年吉野地震の推定震度分布

3) 三次元強震動波形計算に必要な地震環境情報の収集・整理

a) 深層地盤構造

大阪堆積盆地内では，反射法探査結果に基づく局所的なものから重力異常に基づくやや広域なものまで，いくつかの構造モデルが提案されている。

表 4 大阪堆積盆地の物性値モデル

Layer	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ ($\times 10^3$ kg/m ³)
A	1.60	0.35	1.7
B	1.80	0.55	1.8
C	2.50	1.00	2.1
D (Baserock)	5.40	3.20	2.7

そのような中で，宮腰・他(1999)は長周期帯域において実用的な強震動予測を実施するため周囲の岩盤山系を含む大阪平野全体をモデル化し(図 10)，香川・他(1998)は堆積層を3層とした物性値モデル(表 4)を与えている。ただし，宮腰・他(1999)のモデルは構造をスプライン関数で滑らかに近似しており，盆地端部等の構造急変部にやや難がある。そのため，神戸市域の強震動計算用に複雑な詳細モデルがいくつか提案されており，大阪府域でも詳細モデルが提案されている[堀川・他(2003)]。3次元差分法による強震動評価にあたっては，これらを組み合わせて利用することができる。

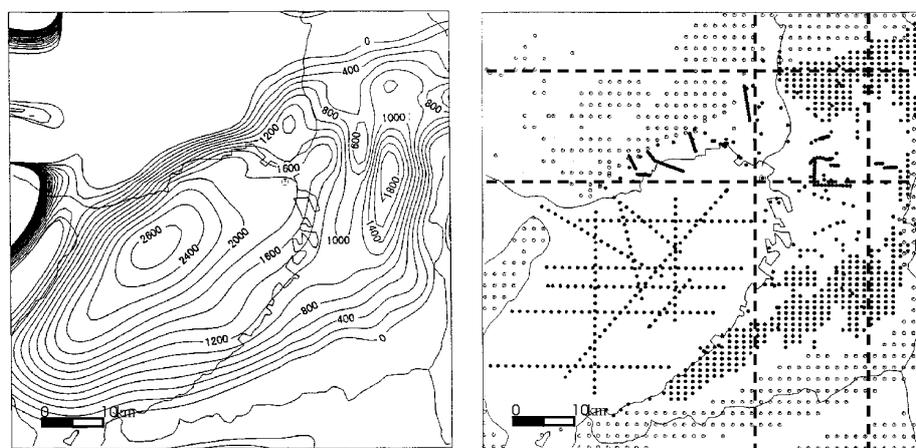


図 10 大阪堆積盆地の基盤岩深度分布(左)と用いた基盤岩深度データ点(右)

b) 浅層地盤構造

統計的グリーン関数法で短周期地震動を評価する場合，より浅層部の地震動応答に配慮する必要がある。浅層地盤構造の情報としては，建築確認用のボーリング調査結果等が用いられる。大阪平野ではこのようなボーリング情報がデータベース化されており，サイト近傍での調査結果が利用し易い環境にある。大阪平野では基盤岩と堆積層，沖積基底層(洪積層上面)と沖積層のふたつの境界が表現する速度コントラストと構造のスケールが堆積層の地震応答を特徴付ける大きな要因となっており，水平成層構造の深層部 a) の情報で大まかにモデル化した上に，詳細な表層地盤構造を載せることにより広い

周波数範囲で実用的な地盤応答が得られることが示唆されている [香川(2002)]

このような考え方により、短周期地震動評価用の地盤構造モデルを作成することが可能である。ただし、非常に大きい地震動の得られたサイトにおいて非線形地盤応答の影響が懸念されるが、このような特性の調査結果が充実しているとは言い難い。

サイト増幅特性に関しては、この他にも観測スペクトルと理論基盤スペクトルの比から経験的に評価する手法 [鶴来・他(1997)] が用いられる。このような手法は、S波で基盤に至った地震動が上下動に転換したと仮定することで上下動の評価にも利用することができる [古和田・他(1998)]

c) 伝播経路特性

スペクトル・インバージョン手法 [岩田・入倉(1986)] を用いた地域の減衰特性の検討が大阪域でも実施されており、

A) $Q(f) = 187 \times f^{0.77}$: 近畿地方一円のサイト・地震による [田居・他(1994)]

B) $Q(f) = 37 \times f^{0.87}$: 兵庫県南部地震余震と近傍サイトによる [田居・他(1996)]

などの結果が得られている。このうち A) は震源が深く遠い場合、B) は震源が浅い場合の震源近傍の計算に適したものと考えられる。

4) 三次元強震動波形計算と既往地震による検証

a) 内陸活断層地震

2)a)に述べたように、山田・他(1999)のモデルに準じて断層破壊モデルを設定した。山田・他(1999)はアスペリティ部のみで強震動を評価しており、各アスペリティの応力降下量は面積と地震モーメントから円形クラック [Eshelby(1953)] を仮定して算出した。

経験的グリーン関数としては、1999年7月15日の地震(明石海峡付近、深さ14km、M3.8)を用いた。やや小さめではあるが、K-netで記録が得られていること、F-netで震源パラメータが決定されていることを条件として選定した。F-netで得られている地震モーメント($4.73 \times 10^{14} \text{N}\cdot\text{m}$)を既知とし、神戸大学サイト(関西地震観測研究協議会 [Toki et al.(1995)])の記録を用いて応力降下量を3.4MPaと見積もった(図11)。このとき、鶴来・他(2002)を参考に、神戸大学サイトには3倍の増幅特性があるものと仮定している。

この小地震から本震を合成するため、表5に示す合成パラメータを設定した。要素断層は0.7km×0.7kmとしている。神戸大学サイトで合成された本震波形を、観測記録と対比して図12に示す。図の左の波形がおよび破線のスペクトルが観測、右の波形および実線のスペクトルが計算結果である。結果には釜江・入倉を参照に $f_{\max}=6\text{Hz}$ 、2乗落ちの高周波遮断フィルターを施している。波形、応答スペクトルとも概ね良好な結果が得られていることがわかる。

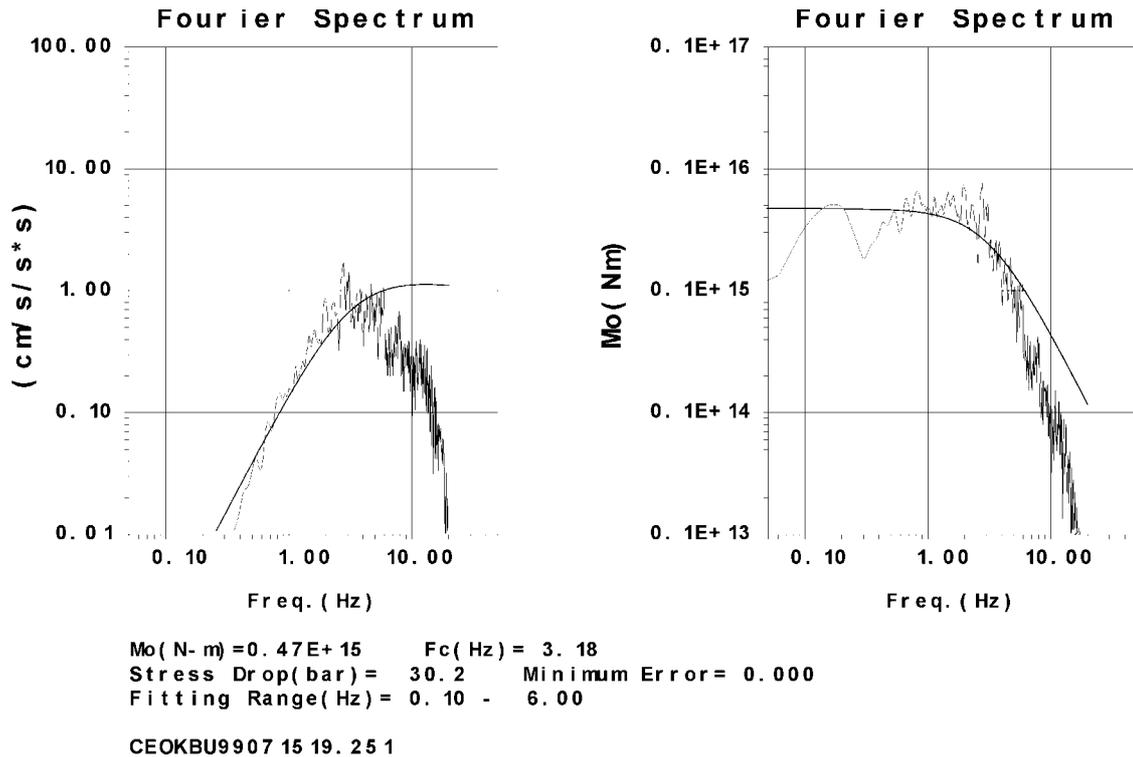


図 11 関西地震観測研究協議会神戸大学サイトにおけるスペクトル・フィッティング

表 5 小地震から兵庫県南部地震を合成するパラメーター

	兵庫県南部地震				
	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	
面積	189.2km ²	23.0km ²	51.2km ²	102.4km ²	
地震モーメント	8.5 × 10 ¹⁸ N·m	1.1 × 10 ¹⁷ N·m	2.3 × 10 ¹⁸ N·m	3.7 × 10 ¹⁸ N·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 × 10 ¹⁴ N·m				
小地震の応力降下量	3.4MPa				
要素地震 (中間地震) 重ね合わせパラメーター	NL	16	7	10	19
	NW	24	7	10	11
	ND	18.8	6.7	10.9	14.5
	C	2.4	7.1	4.5	2.6

次に、本震観測記録が得られていないが西宮の被災域内に設置された K-NET 西宮サイト (HYG022) における合成結果を図 13 に示す。震度 6 強におよぶ波形が得られている。ただし、用いた小地震観測記録が加速度計によるものであり長周期の信頼性に欠けるものである。このため周期 2 秒以上をフィルターで落としている点に注意されたい。この点についてはハイブリッド法などによる検証を並行しておこなっておくことが望ましい。また、堆積層上の非常に大きな地震動であるため、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。

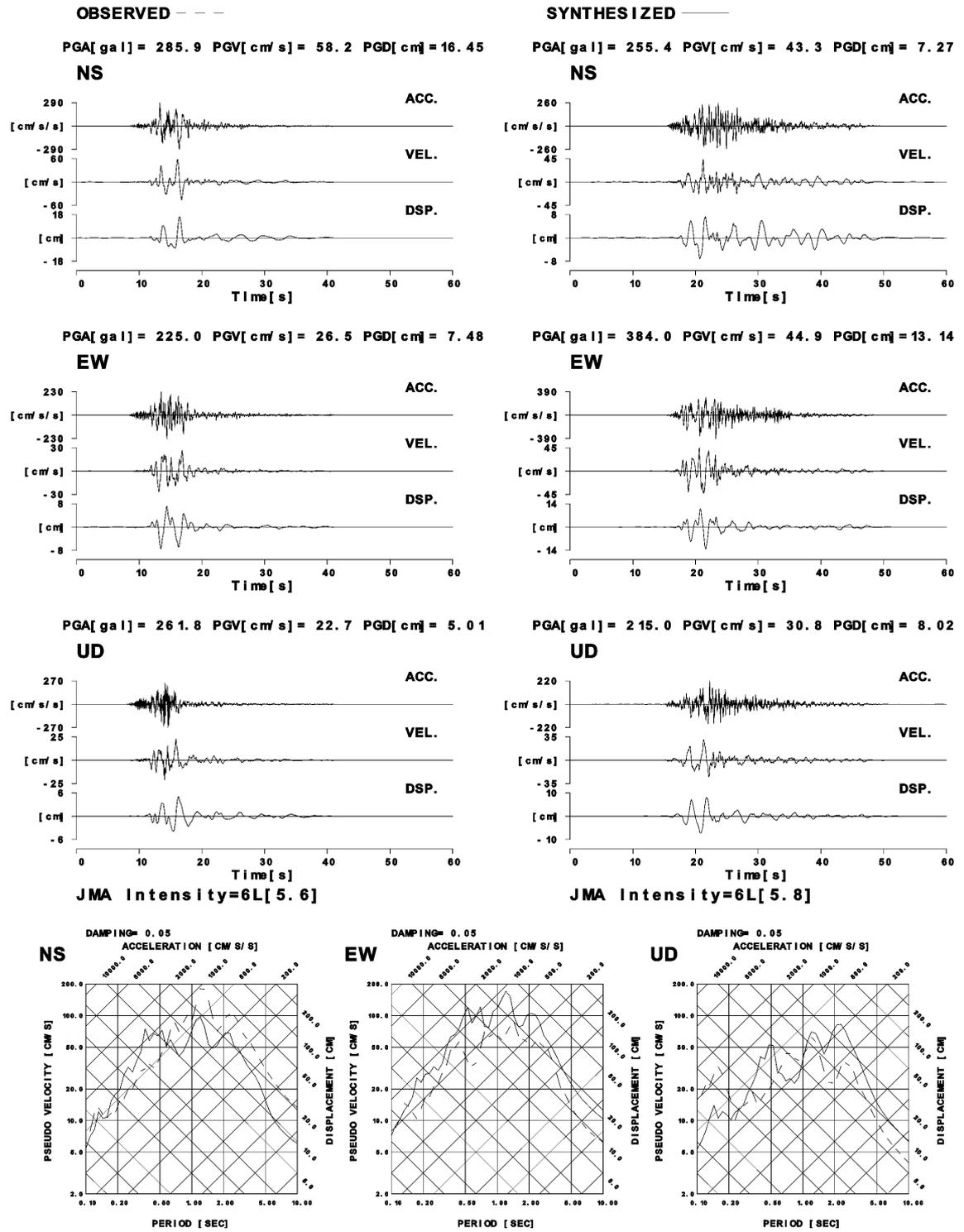


図 12 関西地震観測研究協議会神戸大学サイトの兵庫県南部地震観測波と合成波

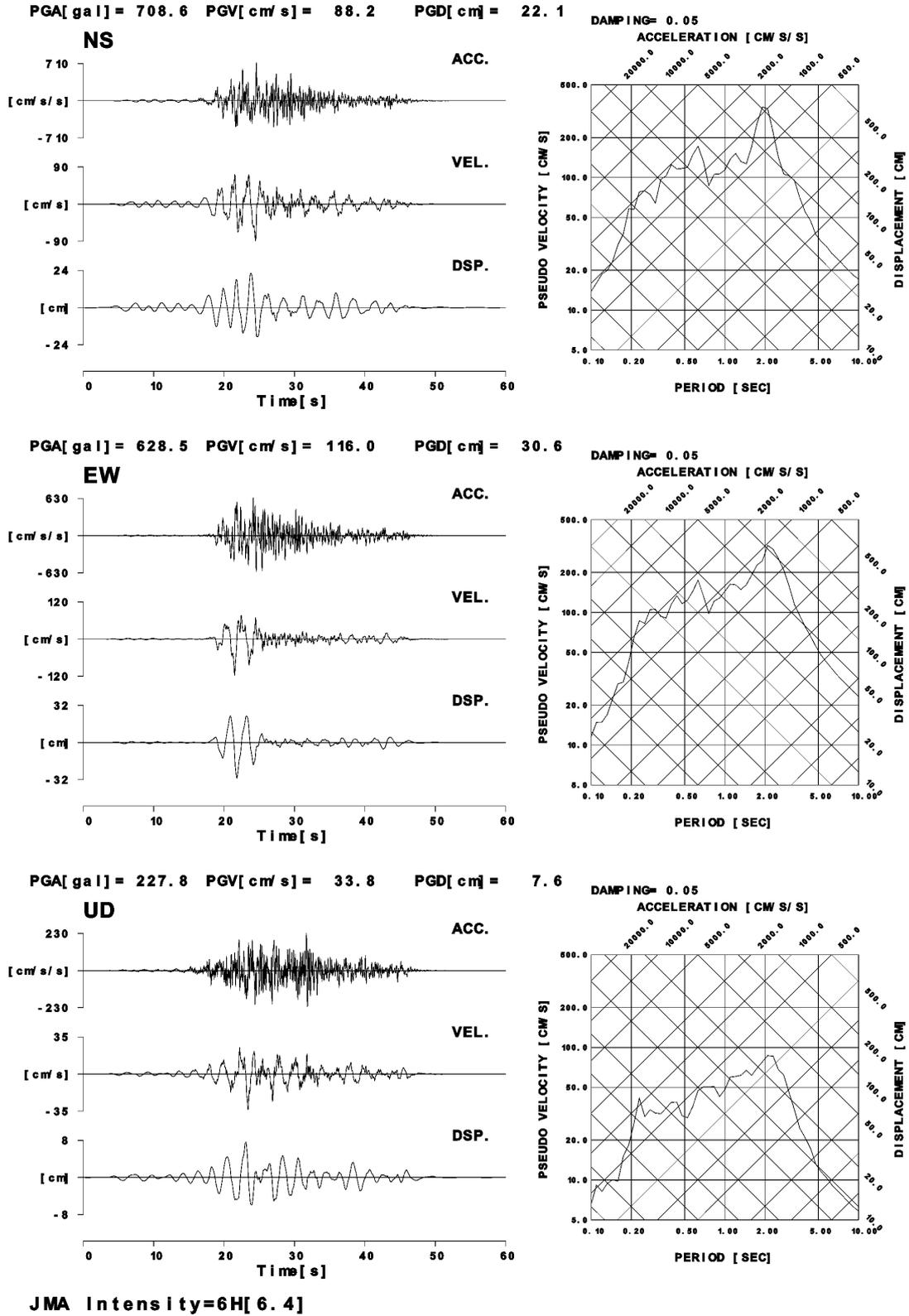


図 13 K-NET 西宮サイト (HYG022) で合成された兵庫県南部地震波

b) プレート境界地震

2)b)に述べたように、中央防災会議の設定に準拠した断層破壊シナリオを設定し、入倉・三宅(2002)に基づいて、非一様すべりに関するパラメータを設定した。なお、背景領域の立ち上がり時間については、全断層の地震モーメントから Somerville et al.(1999)による経験式を用いて求めた。

経験的グリーン関数としては、2000年10月31日三重県南部の地震(深さ44km, M5.4)を用いた。この要素地震は広範囲の地震観測点で観測されており、硬質岩盤サイト(関西地震観測研究協議会の醍醐)において地震モーメント($2.1 \times 10^{17} \text{N}\cdot\text{m}$)と応力降下量(16.7MPa)が見積もられ(図14)、マグニチュードに対して妥当な値と考えられる。ただし、この地震はフィリピン海プレートではなく太平洋プレートの地震と考えられるので、利用にあたってはメカニズムの補正など前処理が重要となる。また、要素地震と対象大地震の規模差が大きく、通常経験的グリーン関数法では適用に難がある。そこで、以下に述べる方針で2段階の合成を実施し、その1段目で各アスペリティおよび背景領域に応じた地震モーメント・応力降下量・メカニズムの補正(周波数依存型)を施した。

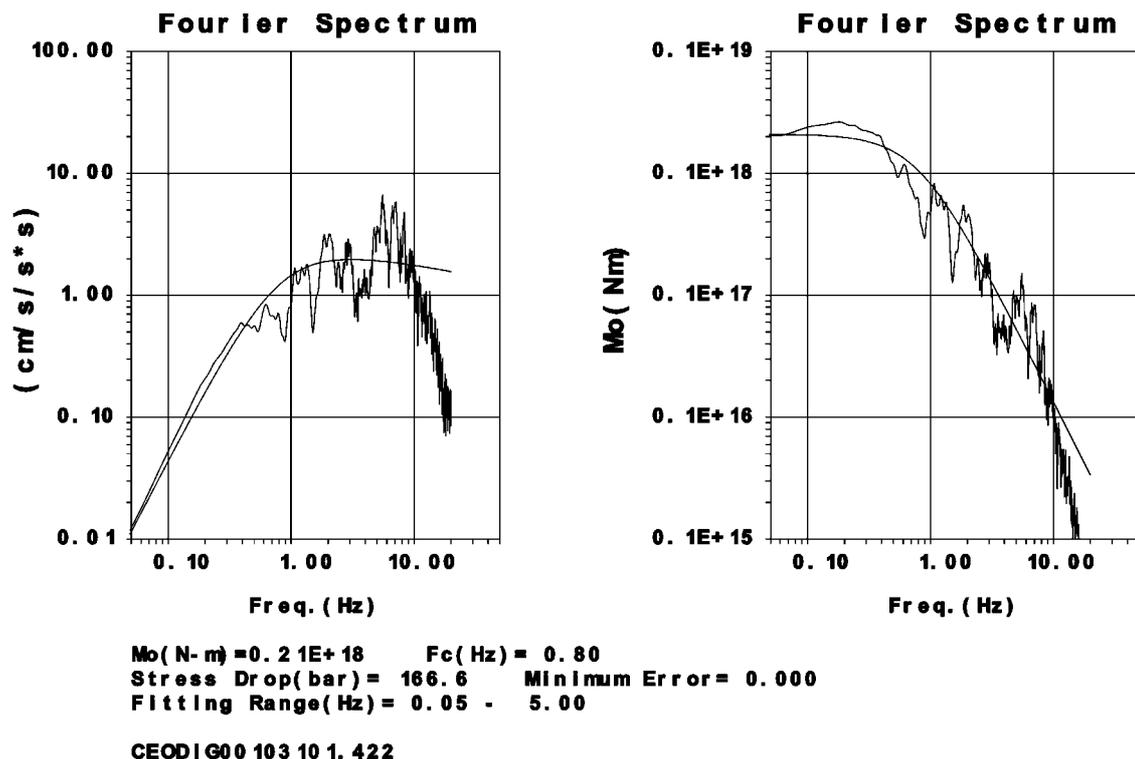


図14 関西地震観測研究協議会醍醐サイトにおけるスペクトル・フィッティング

[1 段目の合成]

- 1) 三重県南部の地震の観測点における記録を、各断層セグメントの中央で発生した地震による記録として距離補正を施す。
- 2) 三重県南部の震源位置に対する地震観測点およびメカニズムと断層セグメント中

央に対する対象橋梁と対象セグメントのメカニズムが異なることによる Radiation Pattern 補正（周波数依存型）を小地震記録に施す。

- 3) 表 6 に示す合成パラメーターに従って、10km×10km の要素断層（図 6）に対応する中間地震動波形を、各アスペリティ・背景領域についてそれぞれ合成する。
- 4) 合成した波形の S 波主要動がすべて同じ時間から始まるとして、各波形の時間をずらせる。

[2 段目の合成]

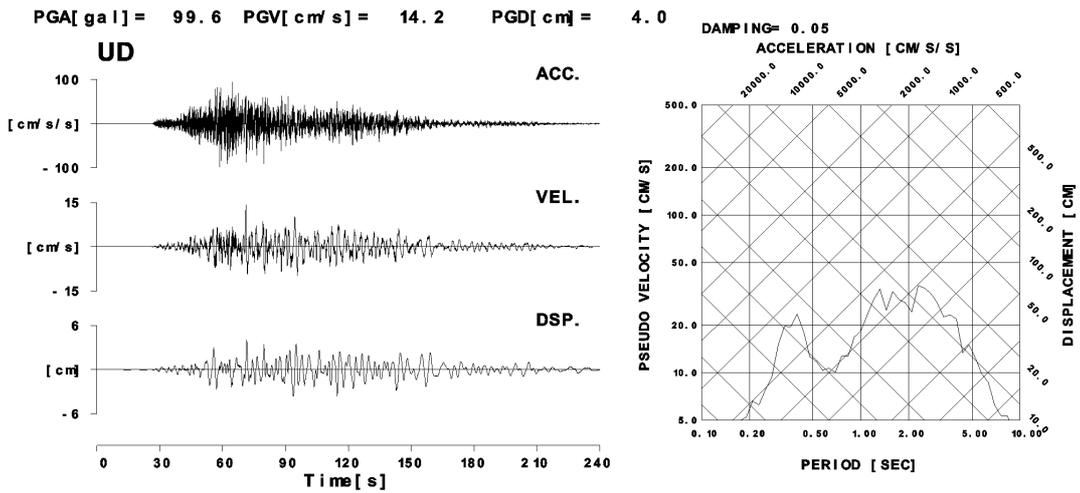
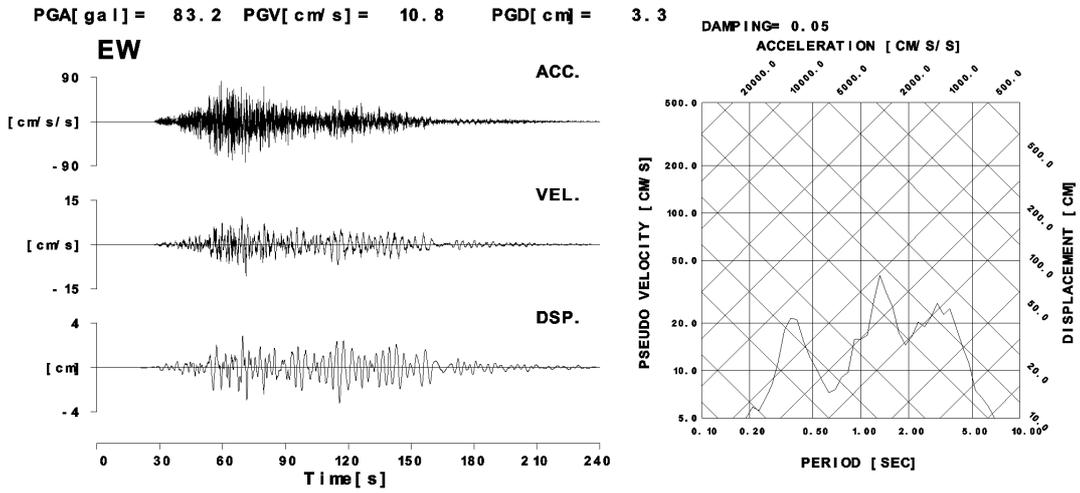
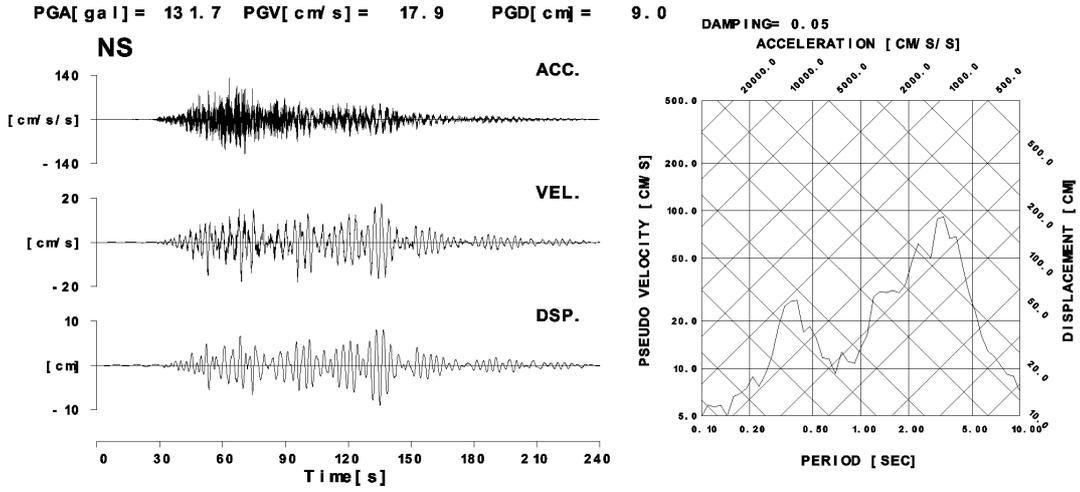
- 1) 合成された中間地震動波形を経験的グリーン関数とし、断層破壊の進行に応じた各アスペリティ・背景領域の大地震波形を合成する。この時は、要素断層毎にメカニズム補正は施さない。
- 2) 各アスペリティ・背景領域の大地震波形を足し合わせ、南海・東南海地震（宝永地震）の地震動波形を得る。

表 6 小地震から 10km 四方の中間断層に相当する地震を合成するパラメーター

	南海地震		東南海地震		
	アスペリティ部	背景領域	アスペリティ部	背景領域	
要素断層の大きさ	10km×10km				
要素地震の地震モーメント	$9.8 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$	$9.3 \times 10^{17} \text{N}\cdot\text{m}$	$9.8 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$	$9.3 \times 10^{17} \text{N}\cdot\text{m}$	
要素地震の応力降下量	23.9MPa	2.2MPa	22.4MPa	2.2MPa	
小地震の地震モーメント	$2.1 \times 10^{17} \text{N}\cdot\text{m}$				
小地震の応力降下量	16.7MPa				
要素地震（中間地震） 重ね合わせパラメーター	NL	3	3	3	
	NW	3	3	3	
	ND	3.26	3.77	3.63	3.77
	C	1.43	0.13	1.34	0.13
	τ	0.94s	0.43s	0.94s	0.43s

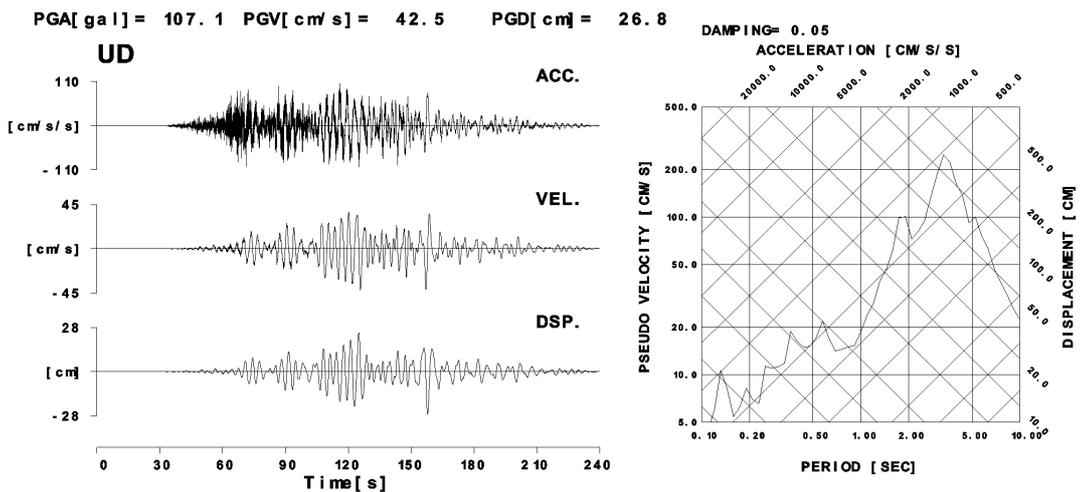
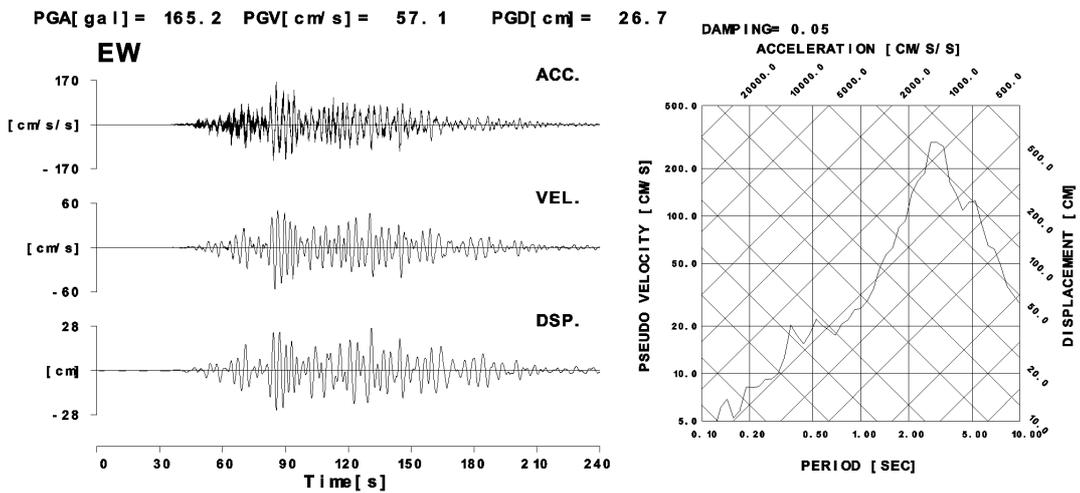
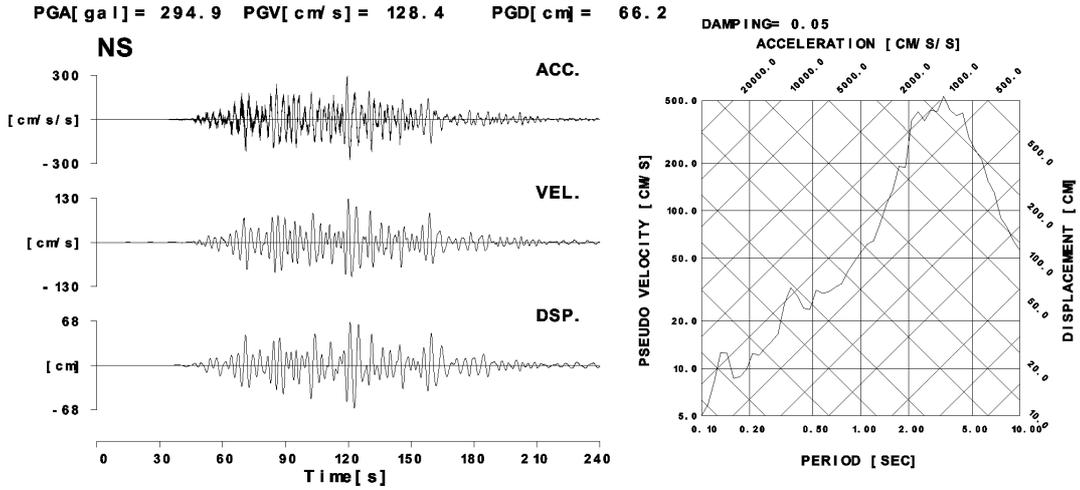
以上の手法によって合成された南海・東南海地震波を図 15 に示す。KiK-net 田尻サイト（図 15(1)）は大阪南部，KiK-net 此花サイト（図 15(2)）は大阪湾岸北部，関西地震観測研究協議会弥栄サイト（図 15(3)）は東大阪に位置するサイトである。弥栄サイトのみ速度型強震計で観測がおこなわれており、用いた小地震長周期記録の長周期成分の精度が最も良いと考えられる。

得られた波形から計算される計測震度は図 5 に示す古文献から推定される同規模の地震（1707 年宝永南海地震）によるものと矛盾しない。ただし，KiK-net 此花サイトの地震動は周期約 5 秒の成分が卓越し，長周期帯域で著しく大きな地震動となっている。この地域では確かに周期 5 秒程度が卓越することが知られているが，長周期成分の精度を考慮した検討が必要であろう。また，広い断層面をひとつの小地震観測記録で表現しているため，補正したとはいえメカニズムの差や堆積盆地への地震波入射方向の差が残っているものと考えられる。これらについては，別途実施されている 3 次元差分法を用いた検討などを参照とした評価が望ましい。



JMA Intensity=5L[4. 6]

図 15(1) Kik-net 田尻サイト (OSKH01) で合成された南海・東南海地震波



JMA Intensity=6L[5.7]

図 15(2) Kik-net 此花サイト (OSKH02) で合成された南海・東南海地震波

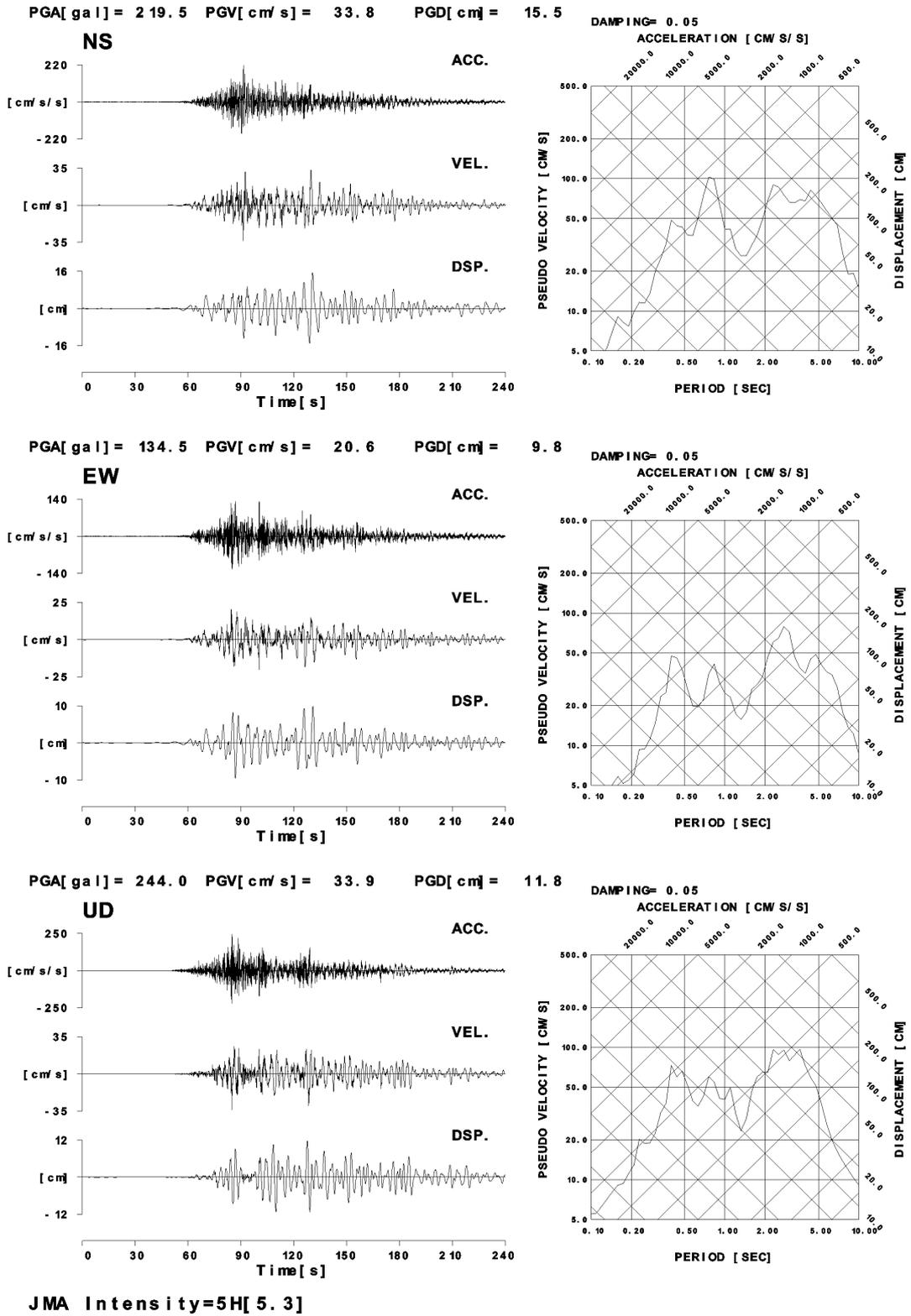


図 15(3) 関西地震観測研究協議会弥栄サイトで合成された南海・東南海地震波

c) スラブ内地震

2)c)に述べたように,1952年吉野地震の断層破壊モデルを,1993年釧路沖地震と同様に水平な正断層と想定し,スラブ内地震に見合った応力降下量(アスペリティ部で36MPa,背景領域で7.2MPa)を与えた。図16に断層面位置と対象サイト位置を示す。

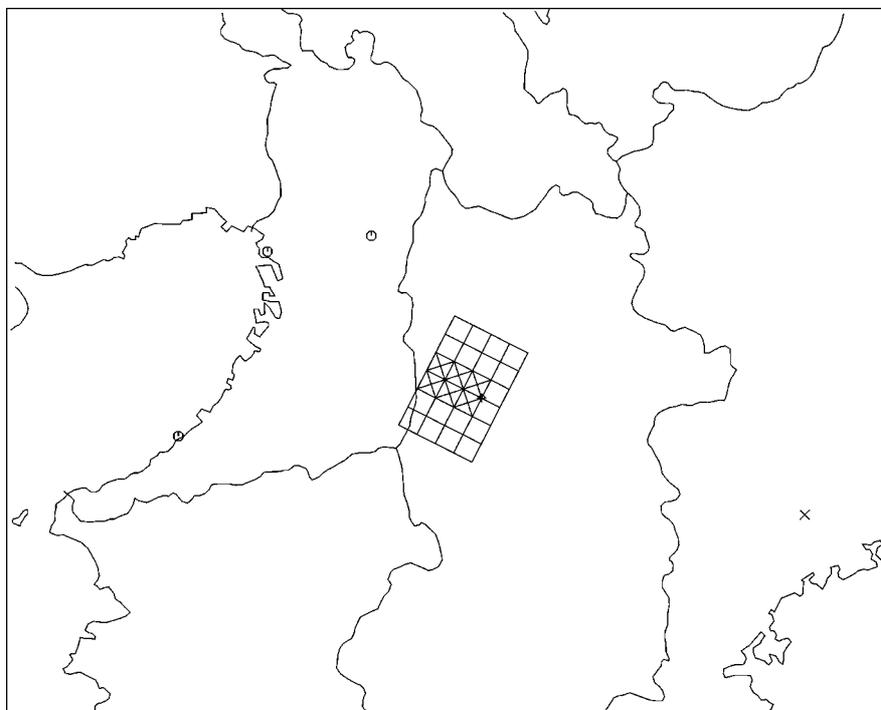


図16 想定した震源断層モデルと対象サイト

表7 小地震から本震を合成するパラメーター

	吉野地震		
	アスペリティ部	背景領域	
面積	61.44km ²	184.32km ²	
地震モーメント	5.6×10 ¹⁸ N・m	7.0×10 ¹⁸ N・m	
応力降下量	36.0MPa	7.2MPa	
立ち上がり時間	0.5s	0.5s	
小地震の地震モーメント	2.1×10 ¹⁷ N・m		
小地震の応力降下量	16.7MPa		
要素地震(中間地震)重ね合わせパラメーター	NL	2	18
	NW	3	
	ND	2.1	3.9
	C	2.16	0.47

経験的グリーン関数としては,プレート境界地震と同じ2000年10月31日三重県南部の地震(深さ44km,M5.4)を用いた。この小地震から本震を合成するため,表7に示す合成パラメーターを設定した。要素断層は3.2km×3.2kmとしており,断層面積は245.76km²である。

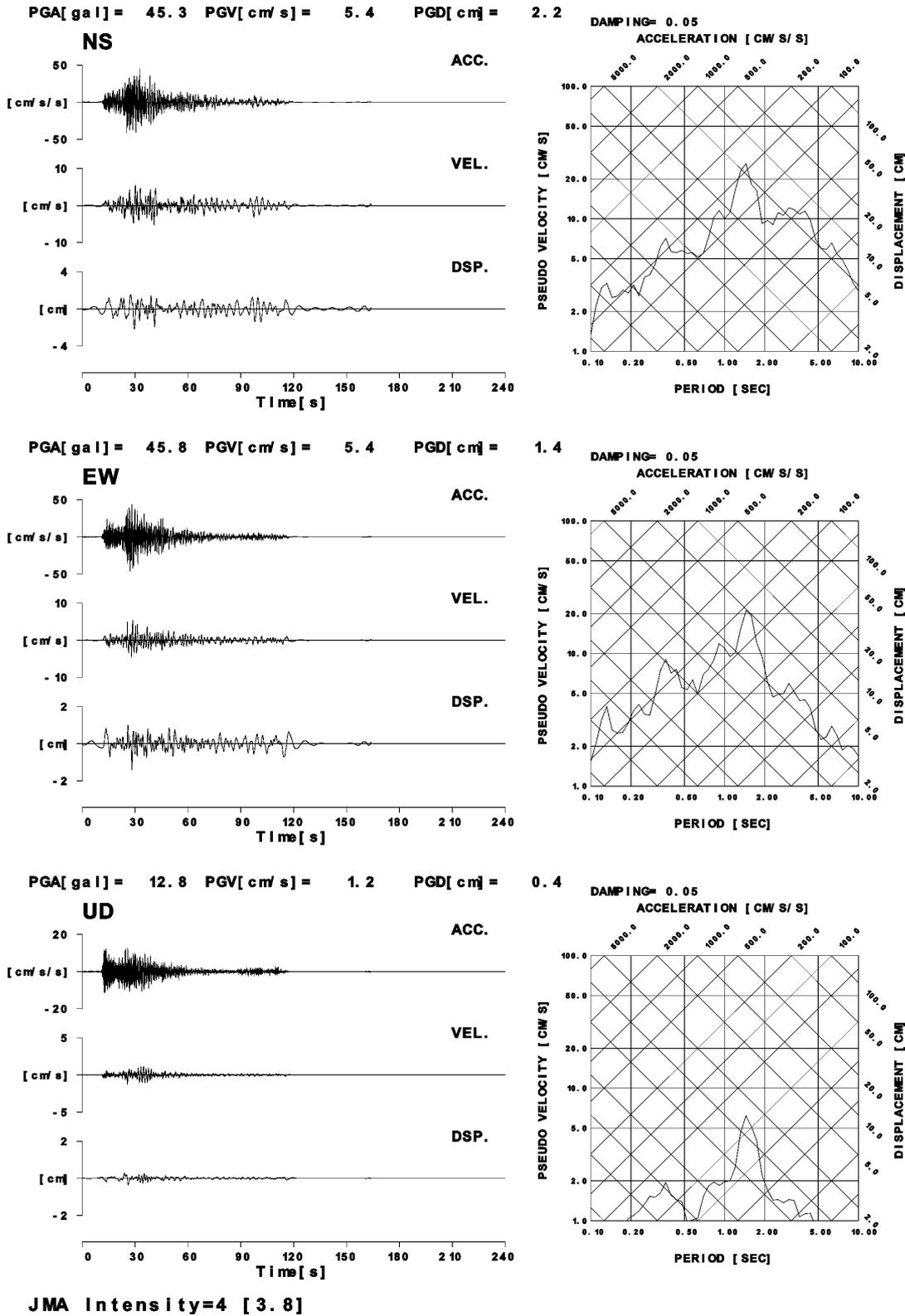


図 17(1) Kik-net 田尻サイト (OSKH01) で合成された吉野地震波

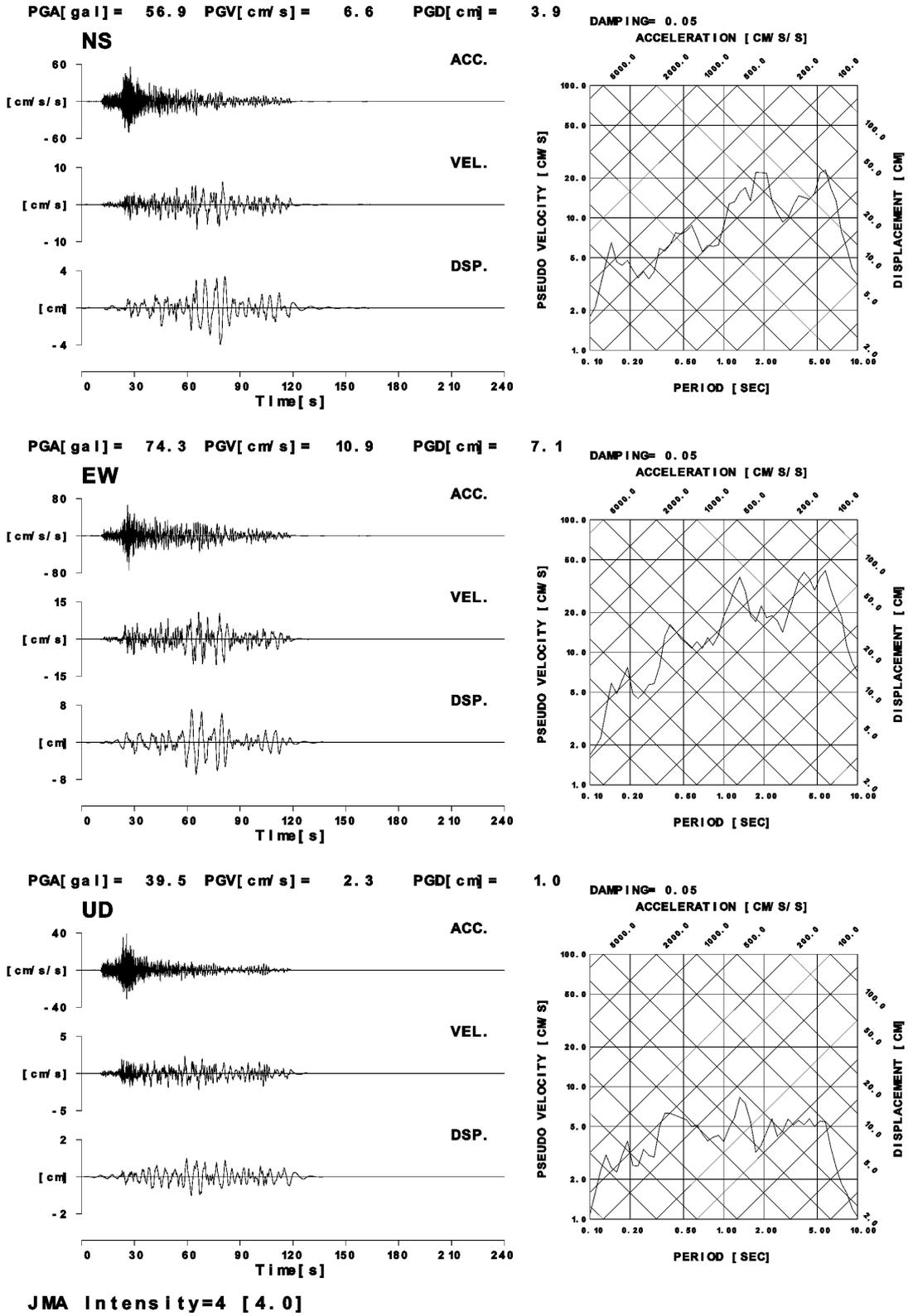


図 17(2) Kik-net 此花サイト (OSKH02) で合成された吉野地震波

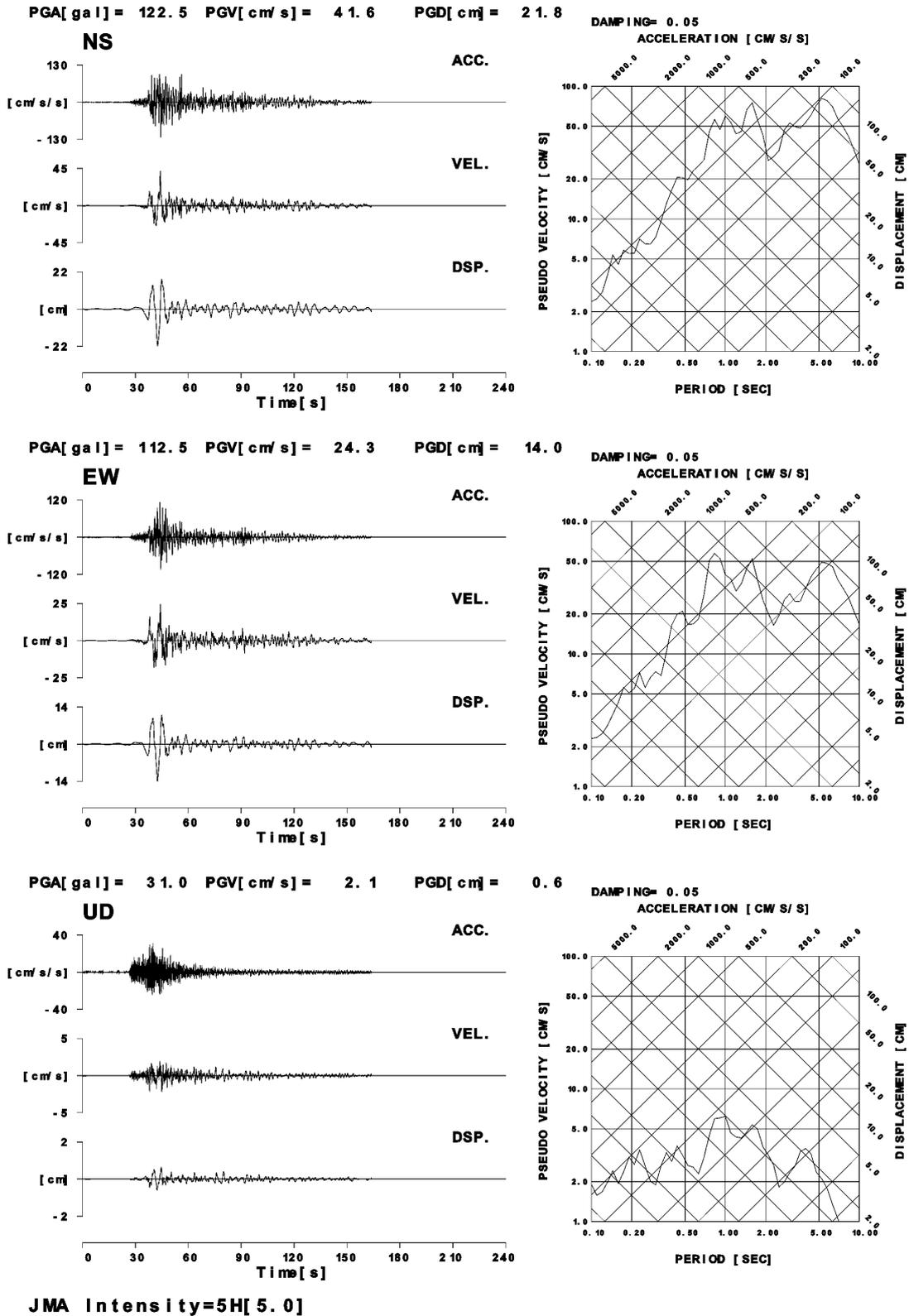


図 17(3) 関西地震観測研究協議会弥栄サイトで合成された吉野地震波

以上の手法によって合成された南海・東南海地震波を図 17 に示す。KiK-net 田尻サイト（図 17(1)）は大阪南部，KiK-net 此花サイト（図 17(2)）は大阪湾岸北部，関西地震観測研究協議会弥栄サイト（図 17(3)）は東大阪に位置するサイトである。得られた波形から計算される計測震度は図 9 に示した推定震度分布と矛盾しない。ただし，ただし，弥栄サイトの地震動が著しく大きくなっており，これが堆積盆地端部のエッジ効果によるものか，3次元差分法を用いたハイブリッド法によって評価しておくことが望ましい。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 結論

既往の三次元強震動波形計算手法を調査し，大阪平野における 1995 年兵庫県南部地震（内陸活断層地震），1707 年宝永地震（プレート境界地震），1952 年吉野地震（スラブ内地震）に適用する手法として経験的グリーン関数法を採用した。

1995 年兵庫県南部地震（内陸活断層地震）について神戸市域の本震観測波形で検証した後に西宮市被害域での三次元強震動波形を推定し，既往地震による地震動（波形・スペクトル・計測震度）と矛盾しない結果を得た。

1707 年宝永地震（プレート境界地震）について大阪平野内の三次元強震動波形を推定し，既往地震による推定震度と矛盾しない結果を得た。

1952 年吉野地震（スラブ内地震）について大阪平野内の三次元強震動波形を推定し，既往地震による推定震度と矛盾しない結果を得た。

得られた強震動波形は，地域の地震環境を反映した地震動として，三次元震動台への入力地震動として用いることができる。

2) 課題

1995 年兵庫県南部地震（内陸活断層地震）については用いた余震のメカニズムが本震と異なっている。観測波形・スペクトルと良い一致が見られているものの，統計的グリーン関数法と 3次元差分法による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。また，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。

1707 年宝永地震（プレート境界地震）については用いた余震が震源断層域の端部に近いことにより，メカニズムの違いおよび堆積盆地への入射方向の違いによる影響が懸念される。統計的グリーン関数法と 3次元差分法による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。

1952 年吉野地震（スラブ内地震）については既往研究による明確な震源断層破壊モデルが無く，不確実性が残っている。この地震については，震源モデルの詳細検討に加えて，統計的グリーン関数法と 3次元差分法による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。

(e) 引用文献

- 1) 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.
- 2) Bouchon, M.: A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, Bull. Seism. Soc. Am., 71, 959-971, 1981.
- 3) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proc. Roy. Soc., A241, 376-396, 1957.
- 4) 壇一男, 渡辺基史, 宮腰淳一: 既存のスペクトルインバージョン結果と震源インバージョン結果から推定されるアスペリティの実効応力と断層タイプおよび深さとの経験的關係, 日本建築学会構造系論文集, 565, 55-62, 2003.
- 5) Graves, R. W.: Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1091-1106, 1996.
- 6) 堀川晴央, 水野清秀, 佐竹健治, 関口春子, 加瀬祐子, 杉山雄一, 横田裕, 末廣匡基, Pitarka, Arben: 大阪平野の3次元地盤構造モデルの作成, 活断層・古地震研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2, 291-324, 2003.
- 7) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., 63-104, 1986.
- 8) 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.
- 9) 岩田知孝・入倉孝次郎: 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, 第2輯, 39, 579-593, 1986.
- 10) 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 南荘淳: 常時微動アレ観測による大阪堆積盆地深部S波速度構造のモデル化, 地震2, 51, 31-40, 1998.
- 11) 香川敬生: 広帯域地盤応答のための堆積地盤構造のモデル化, 日本地震学会講演予稿集, 1999年度秋季大会, B70, 2002.
- 12) 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.
- 13) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 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, 29-36, 1997.
- 14) 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.
- 15) 古和田明, 孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 514, 97-104, 1998.
- 16) 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地盤構造のモデル化(その3), 第25回地震工学研究発表会, 185-188, 1999.
- 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.
- 18) Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi and M. Hoshiba: Minute locating of fault planes and source process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu(Kobe), Japan Earthquake from the waveform inversion of strong ground motion, J. Physics of the Earth, 44, 473-488, 1996.
 - 19) 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.
 - 20) 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎, 岡崎敦: JMA87 型記録による震源, 伝播, サイトの地域特性の検討, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, 751-756, 1994.
 - 21) 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 大阪地域における地震動アレー観測による震源・伝播・サイト特性の分離, 地球惑星関連学会 1995 年度合同大会予稿集, 605, 1995.
 - 22) 武村雅之: 日本列島およびその周辺域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震 2, 43, 257-265, 1990.
 - 23) Toki, K., K. Irikura, and T. Kagawa: Strong Motion Records in the Source Area of the Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, January 17, 1995, Japan, Journal of Natural Disaster Science, 16, 23-30, 1995.
 - 24) 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.
 - 25) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦勝: 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 土木学会構造系論文集, 48A, 577-586, 2002.
 - 26) 宇佐美龍夫: 新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 1985.
 - 27) 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.

(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 15 年度業務計画案

(a) 業務計画

1) 三次元強震動推定手法の構築

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，特に上下動を含む3次元地震動を評価することを前提に，対象地域の条件に最適な方法論の調査検討をおこない，適用条件などをとりまとめる。

2) 濃尾平野における検証

上記計算手法に基づき，濃尾平野内の地盤構造（表層および深層）が既知の対象サイトにおいて，内陸活断層・プレート境界の2タイプの既往地震を選定し，シミュレーション結果と観測波形あるいは震度の比較をおこない，上記計算手法の妥当性を検証する。

3) 大阪平野における補足

平成14度実施した大阪平野における計算・検証結果について，新たに得られた知

見に基づいた補足検討を実施する。

(b) 実施方法

- 1) 濃尾平野（大阪平野）において、内陸活断層地震（濃尾地震）・プレート境界地震（昭和東南海地震）を対象とした三次元強震動シミュレーションを実施することを前提に、地盤構造（表層および深層）・地震観測記録（経験的グリーン関数となり得るもの）の収集・調査検討を実施する。
- 2) 得られた地盤構造・地震観測記録の制約の中で、三次元強震動シミュレーションに最も適した計算手法を選択する。
- 3) 上記条件で三次元強震動シミュレーションを実施し、対象サイトに適した三次元強震動波形を推定する。

(c) 目標とする成果

濃尾平野において、内陸活断層地震（濃尾地震）・プレート境界地震（昭和東南海地震）による三次元強震動波形を推定する。また、大阪平野における三次元強震動波形のより高精度化を図る。