

2004年紀伊半島南東沖の地震 (M7.4)時の大阪平野での長周期地震動

釜江克宏

京都大学原子炉実験所 kamae@kuca.rri.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)から10年が過ぎた。その間日本各地でマグニチュード7を超える地震が多発している。ここ数年でも2000年鳥取県西部地震(M7.3)、2003年宮城県沖地震(M7.1)、2003年十勝沖地震(M8.0)、2004年紀伊半島南東沖の地震(M7.4)、2004年新潟県中越地震(M6.8)などである。特に新潟県中越地震では震度7が観測されるなど、兵庫県南部地震以来の甚大な被害が生じ、内陸直下型地震の脅威が再現されてしまった。一方、海溝型巨大地震の発生も危惧されている。まず今後30年間の発生確率が約60%と言われる東南海地震、約50%と言われる南海地震がある。いずれもフィリピン海プレート境界で発生するマグニチュード8を超える巨大地震である。同様な海溝型巨大地震である十勝沖の地震の発生確率は60%と言われていたが、2003年9月にM8の地震として既に発生してしまった。この結果からも想定される東南海・南海地震はいつ発生しても不思議ではないと言える。そんな中、昨年9月に紀伊半島南東沖でM6.9、約5時間後にM7.4の地震が発生し、前者が前震、後者が本震として位置づけられた。巨大地震の場合、M7クラスの地震とは異なり、断層面でのすべり量が大きいことやすべりに要する時間が長いことなどから周期の長い地震波(長周期地震動)がより強く放出され、またそうした長周期地震動は減衰しにくく、震源から遠く離れていてもその強さは維持される。2003年十勝沖地震(M8.0)時にも200km以上も離れた苫小牧においてその長周期地震動による石油タンクのスロッシング現象

により石油が溢流し、タンクの全面火災を引き起こした。もちろん、苫小牧周辺の深い堆積盆地構造によって長周期地震動が成長し、大振幅で継続時間の長いものとなったことが大きな原因ではある。同様な海溝型巨大地震である南海・東南海地震が発生した場合、震源域から100km以上も離れた大阪平野や濃尾平野などの大規模堆積盆地では、より強い長周期地震動に襲われる可能性が大である。その脅威を知らしめたのが昨年発生した紀伊半島南東沖の地震である。規模はM7.4で想定されている東南海や南海地震に比べ小さいものの、大阪平野内のみならず、濃尾平野や関東平野でも強い長周期地震動が観測された。ここでは、2004年紀伊半島南東沖の地震時に観測された長周期地震動の特長や構造物への影響などを主として大阪平野を対象として紹介するとともに、想定東南海や南海地震時に予測される地震動との違いなどについて紹介する。

2. 2004年紀伊半島南東沖の地震時における長周期地震動

2.1 長周期地震動の特徴

この地震(2004年9月5日、19時07分の前震、23時57分の本震)時の揺れについてはまだ記憶に新しいところであろう。震源域は想定されている東南海地震より南東側(図1に示す)にあり¹⁾、そのメカニズムも東南海地震のようなプレート境界の地震ではなく、図2のポンチ絵にもあるようにプレートの内部で起こった地震(スラブ内地震)と言われている。ただ、想定東南海地震(M8.1)より規模は小さいものの、地震波の伝播方向などから考えて、想定

東南海地震時の揺れを予測する上で貴重な示唆を与え得る地震である。ここでは、この地震によって観測された記録を紹介し、後に想定東南海地震時の揺れとの比較を試みる。図3には防災科技研によるK-NET, KiK-netによる最大速度の分布を示す。本震時には関東平野での揺れも強かったことを示している。もちろんこの強い揺れは長周期地震動によるものである。図4には大阪平野内と関東平野内での観測加速度波形を積分した速度波形を示す。関東平野では非常に距離が遠いため、長周期地震動のみが卓越し、その振幅は大阪平野内での結果とも大きな違いはなく、想定東南海地震時の長周期地震動は関東平野にとっても重要な検討事項であることを示唆するものである。大阪平野内の周期ごとの揺れの強さについては京大防災研究所強震動地震学分野：岩田教授のHPから引用し、図5に示す。大阪平野の深部地下構造の複雑さを反映して揺れやすい周期に地点ごとの特徴が見て取れる。図6には本震時の大阪市内における関震協観測点の一つである福島(FKS)と奈良盆地の東縁の岩盤露頭に近い桜井初瀬(HSD)における観測波形と擬似速度応答スペクトルを示す。周期1秒以下の短周期領域での両観測点での相違は顕著ではないが、周期が長くなるに従い、FKSでの増幅は非常に大きくなり、周期6秒あたりではNS成分で十数倍に増幅されていることがわかる。図7には関震協観測点のいくつかの地点での観測記録の擬似速度応答スペクトルを前震、本震についてそれぞれ示す。図から、4秒～6秒あたりの応答振幅は前震、本震ともに大きい。両者の違いは非常に顕著である。短周期領域ではほぼ同程度であることも含め、規模の増大とともに長周期地震動がより強く生成されると言う地震動のスケールリング則を示す結果である。

以上簡単に紹介した大阪平野内での長周期地震動は震源域から伝播してくる表面波や堆積盆地内で2次的に生成された盆地生成表面

波も含めた表面波であり、その特性と震源が異なった場合との違いについて簡単に紹介する。図1でも示したように、今回の地震の震源域は想定東南海地震のそれとは異なっており、今後東南海地震時の予測精度を向上させる上でも特性の違いや原因などを理解しておく必要がある。図8にはここで検討の対象とした2000年10月31日に発生した三重県中部の地震(M5.5)や紀伊半島南東沖の本震、前震、余震の震央位置と地震観測点(FKS)の位置を示す。方法としては各観測波形に3種類(0.1～0.5Hz、0.5～1.0Hz、1.0～2.0Hz)のバンドパスフィルターをかけ、それぞれの波形の包絡形(エンベロープ)を求め、後続波(表面波)の励起状況を調べることにした。図9にはそれぞれの最大値で基準化したエンベロープを示す。図から0.1～0.5Hzの帯域における長周期地震動は、紀伊半島南東沖地震の本震、前震、余震とも規模は異なるものの、エンベロープの形状(特に減衰特性)は非常によく似た結果となっている。この結果は比較的遠い地震では主として表面波(盆地生成表面波も含む)からなる長周期地震動のエンベロープ形状は地震の規模にそう依存せず、震源から盆地までの伝播経路と盆地構造に依存して決まることを示唆するものであり、地震動予測に必要なグリーン関数の評価(経験的グリーン関数法を用いる場合は実地震の震源位置が重要)にとって重要な情報となる。もちろんまったく地震の規模に依存しないことはないため、ここでは三重県中部の地震(M5.5)とほぼ同じマグニチュードを持つ2004年9月8日の余震(M5.4)との比較をする。図9に示した赤と黄色のとの比較をすると、0.5Hz以上では両者はほぼ同じエンベロープの特徴を有するが、それ以下の長周期地震動では明瞭な違いが見られる。三重県中部の地震は紀伊半島南東沖地震と同じスラブ内地震(深さ40km程度)だと言われており、深さについての違いは大きくないものと推定される(余震の深さに

についてはここでは断定できないが) . この違いは堆積盆地への地震波の入射特性にも関係するが, 仮に堆積盆地内での特性が同じだとすると, 盆地内に入る前から伝播経路 (距離は大きく異なる) による寄与の違いとして解釈することができる. この解釈は大阪平野の3次元堆積盆地構造と差分法を使った理論的地震動評価からもある程度検証されている. 想定東南海地震の震源域 (特にアスペリティ) は現在陸側の深い場所に設定されており, 表面波の励起特性としては三重県中部の地震に近いのかもしれない. 非常に重要な課題でもあり, 今後数値計算により, 盆地内部のみでなく, 伝播経路のモデル化による表面波の生成・成長への影響を定量的に把握する必要があるものと考えられる.

2.2 長周期地震動によるスロッシングの観測事例

前述したように, 紀伊半島南東沖の本震時には大阪平野内の多くの場所で周期4~6秒 (特に6秒) あたりで大きく地面が揺れた. 大阪湾岸には2003年の十勝沖地震時に苫小牧で火災を引き起こしたような石油タンク群が多数存在している. ここでは大阪湾岸地域に存在するある石油タンク群でのスロッシング (液面の揺動現象) の観測事例を紹介する. 図10には前震、本震時のスロッシングによる波高をタンクの固有周期を横軸に表したものである. 本震時には約6秒の固有周期を持つタンクで最大1.5m程度 (測定位置にもより, 最大とは限らない) のスロッシングを起こしていたことを示している. 特にスロッシングによるトラブルはなかったようである. もちろん火災も発生していない. 現在消防庁など関係機関では十勝沖地震や紀伊半島南東沖地震を受け, 設計基準の見直しや, タンクの構造の改良など, 災害軽減に向けた取り組みが進められているようである. このような観測されたスロッシング現象と地面の揺れとの関係について若干検討を行った. 残念

ながら当該場所での地震動観測記録は得られなかったため, 最も近いと思われる関震協観測点である堺 (SKI) と忠岡 (TDO) における記録から得られる速度応答スペクトルと波高から推定される地動の速度応答スペクトルとを比較した. 図11はその結果を示したものであり, 地震動の卓越周期と波高から得られるピーク周期との整合性は良く, また波高から得られる値には大きなバラツキがあるものの両者の振幅の一致度も同一場所ではないことも考慮すればそう悪くない.

3. 想定東南海・南海地震時の地震動予測結果との比較

最後に, 紀伊半島南東沖の本震時に観測された地震動と想定南海地震に対して予測された地震動²⁾との比較をOSA及びWOS観測点で行った. 図12には想定東南海・南海地震の震源モデルと予測対象地点を示す. まず図13にOSA, WOSで観測された紀伊半島南東沖の本震時と想定南海地震時の予測結果との比較を擬似速度応答スペクトルで示す. OSAでは周期2秒あたりで4倍, 周期5秒あたりで7倍程度想定南海地震の方が大きくなっている. 当然地震の規模がマグニチュードで1程度違っており, 長周期地震動の生成量が大きく異なることが大きな原因と考えられるが, 震源域の場所や広がりも大きく異なるため, 今後より予測地震動の精度を向上させるとともに, 紀伊半島南東沖の地震の詳細な分析が必要である. 図14にはOSAのみにおける東南海・南海地震単独と場合と, 両者が同時発生した場合における予測地震動とその擬似速度応答スペクトルを示した. 図13と比較すると, OSAにおける東南海地震との差は南海地震ほど大きくない (4~5秒で2倍程度). この予測結果は前述の三重県中部の地震を経験的グリーン関数として用いたもので, 長周期地震動 (表面波) の励起が小さかったことが予測結果との差を小さくした原因と考えら

れる。

4. おわりに

ここでは2004年紀伊半島南東沖で発生した地震(M7.4の本震、M6.9の前震)時に主として大阪平野内で観測された長周期地震動と長周期構造物(石油タンク)でのスロッシングの例を簡単に紹介した。近い将来発生が確実視されている巨大地震(南海・東南海地震)時の地面の揺れ(特に長周期地震動)の精度を向上させる上での貴重な資料である。震源域から200 km程度離れた大都市・大阪では強い長周期地震動に襲われ、その脅威が実証される結果となった。こうした長周期地震動の生成、成長に関する研究には精度の高い観測記録の果たす役割は非常に大きく、今後の継続と発展が望まれる。

近い将来想定されるより規模の大きい巨大地震(東南海・南海地震)に備え、災害軽減に向けた種々の取り組みが必要であり、特に超高層ビル、免震構造物や石油タンクなどの長周期構造物が巨大地震に対して予測される強震動によってどのような被害を受けるかの研究が極めて重要となる。そのためには今回の地震によって観測された長周期地震動の生成メカニズムを解明し、その結果を反映した強震動予測の高精度化も緊急の課題であり、よりいっそう地震学・地震工学と構造工学との緊密な連携が必要である。

謝辞

ここで使用した地震観測記録は関震協、防災技研のK-NET、KiK-netによるものである。また、石油タンクのスロッシングに関するデータは関係者からお借りしたものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 山中：EIC 地震学ノート No. 153、東京大学地震研究所、2004。

2) Kamae, K., H. Kawabe, and K. Irikura: Strong ground motion prediction for huge subduction earthquakes using a characterized source model and several simulation techniques, 13th WCEE, Vancouver, 2004.

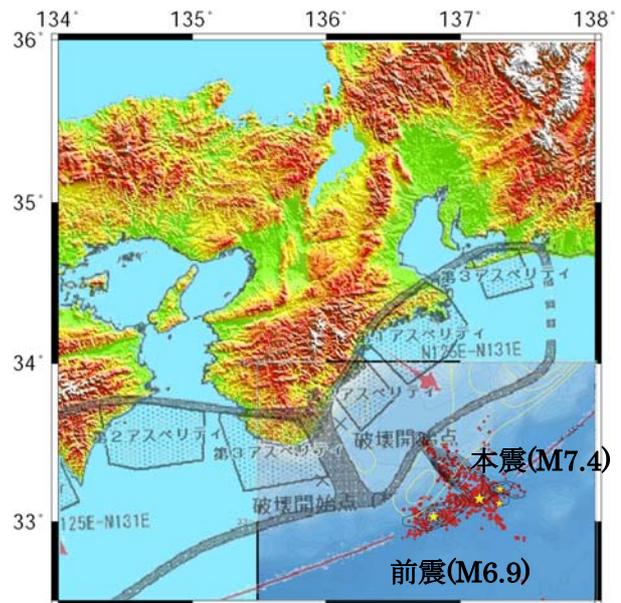


図1 2004年紀伊半島南東沖の地震の震源域(山中,2004)と想定東南海地震の震源モデル(推本)との比較

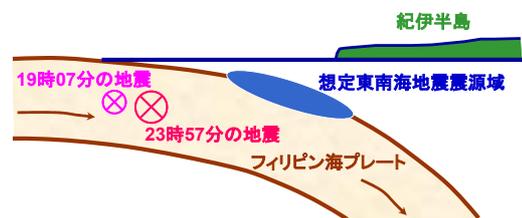


図2 2004年紀伊半島南東沖の地震の震源と想定東南海地震の震源域との違いを示すポンチ絵

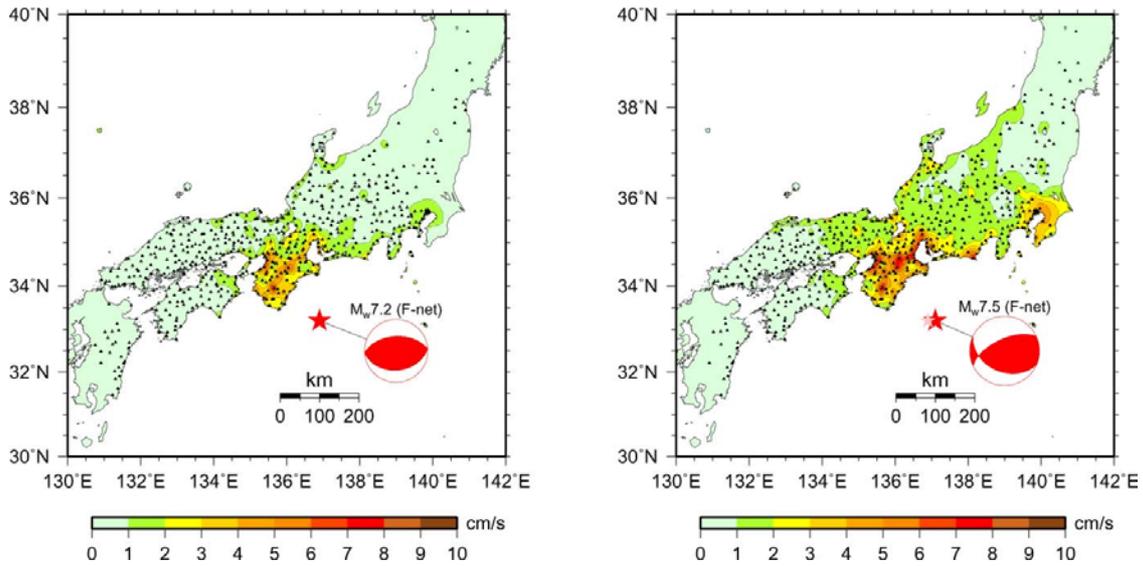


図3 2004年紀伊半島南東沖の地震の前震(左)と本震(右)時の最大速度値の分布

図は京大防災研究所・強震動地震学分野 HP から引用、データは防災科技研・K-NET、KiK-net によるもの

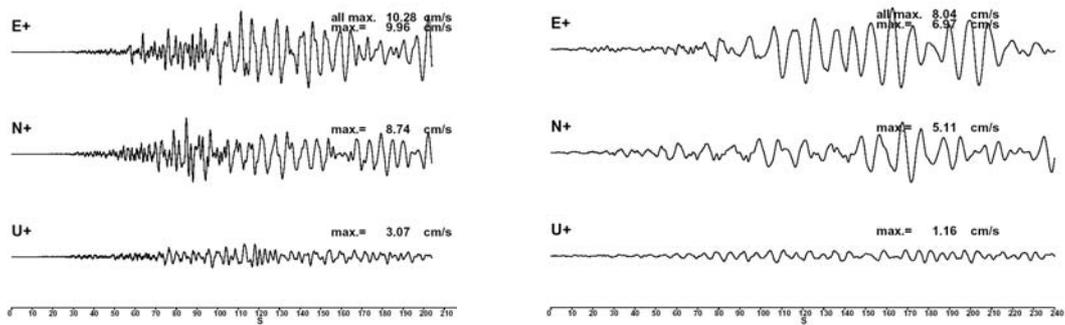


図4 2004年紀伊半島南東沖の本震時において観測された大阪平野 (KiK-net : OSKH02) 及び関東平野 (KiK-net : CHBH10) における長周期地震動

図は京大防災研究所・強震動地震学分野 HP から引用

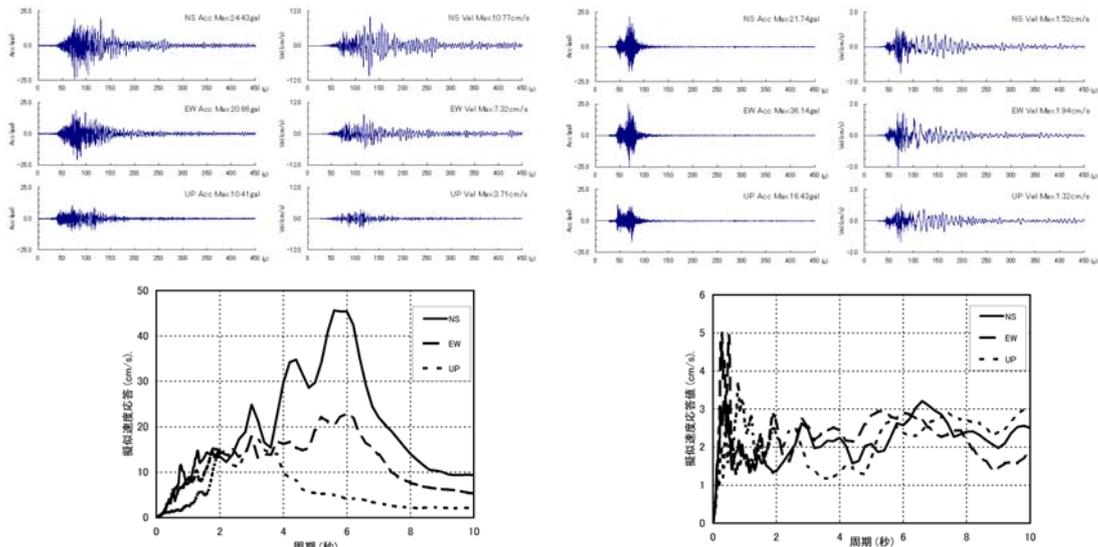


図6 2004年紀伊半島南東沖の本震時において観測された大阪平野内 (FKS : 左) と奈良盆地東縁 (HSD : 右) における観測加速度、速度波形と擬似速度応答スペクトル(5%減衰)

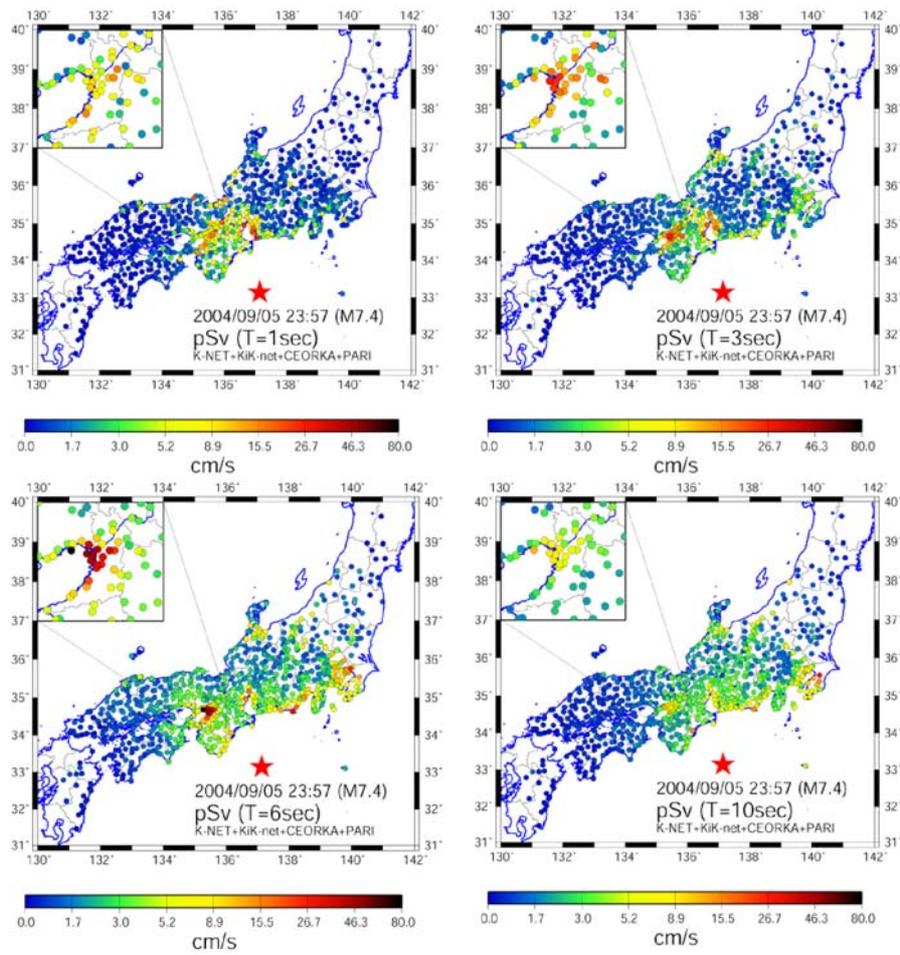


図5 2004年紀伊半島南東沖の本震時において観測された地震動の擬似速度応答値の周期ごとの分布
京大防災研究所・強震動地震学分野 HP から引用

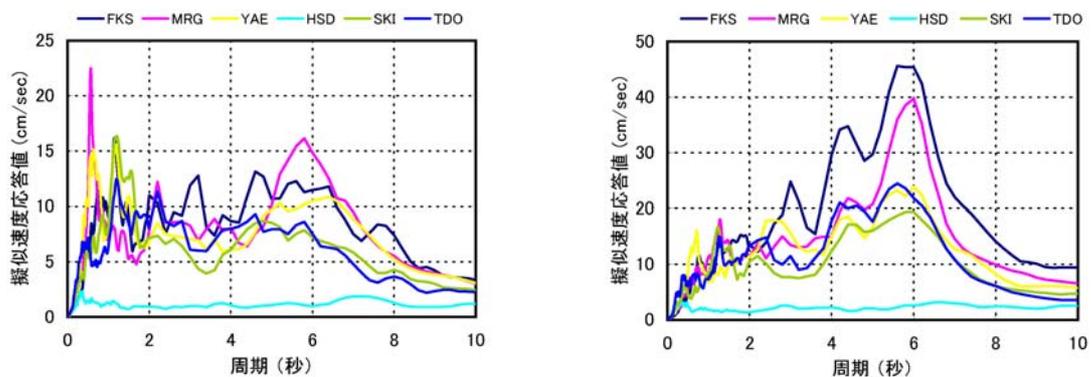


図7 2004年紀伊半島南東沖の本震時において観測された大阪平野内などにおける観測地震動の擬似速度応答スペクトル(5%減衰) 左：前震 右：本震

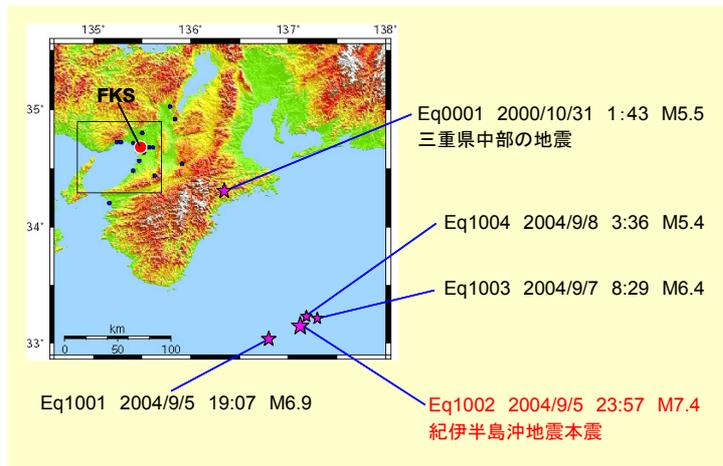


図8 震源の位置の違いなどによる地震波の後続波（表面波）の特徴の違いを調べた地震の震央位置と大阪平野内の観測点（FKS）の位置

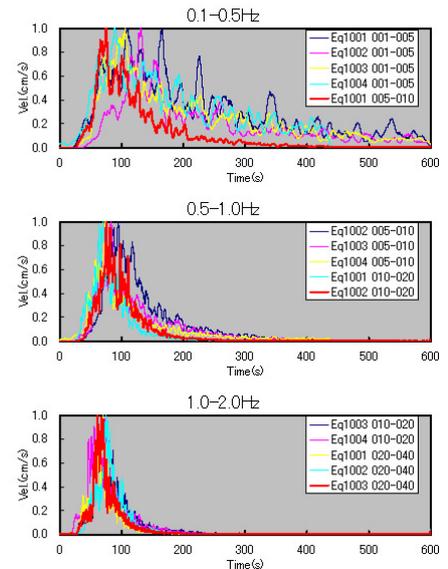


図9 観測地震波の周期領域ごとの後続波のエンベロープの違い

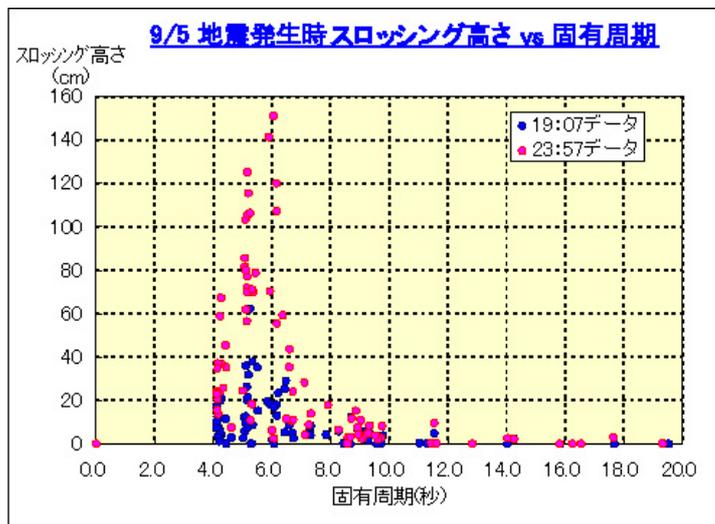


図10 紀伊半島南東沖の前震、本震時に観測された大阪湾岸での石油タンクのスロッシング事例
青：前震時 赤：本震時

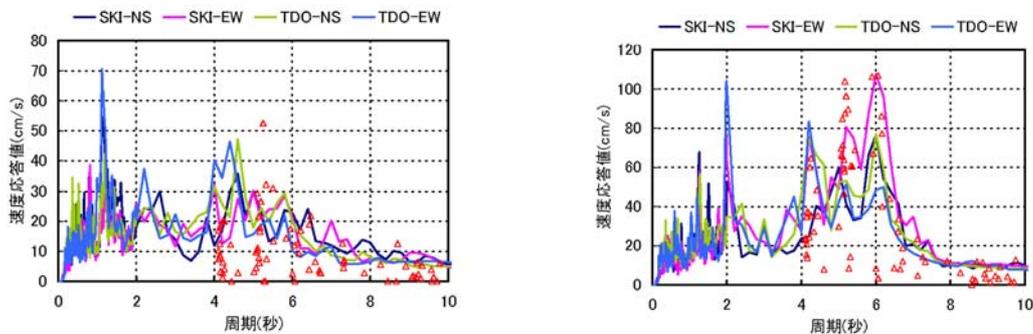


図11 紀伊半島南東沖の前震、本震時に観測されたスロッシングの波高から評価した地動の速度応答値（△）と近傍2地点での地動観測地震動から求めた速度応答スペクトル（1%減衰）との比較
左：前震 右：本震

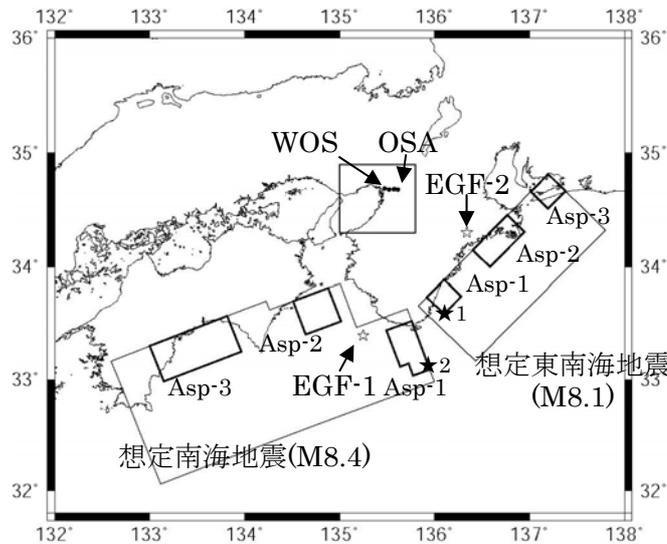


図12 想定東南海、南海地震の震源モデル (推本) と地震動予測地点 (OSA、WOS)
 ★1,2はそれぞれの破壊開始点、同時発生の場合は、★1から破壊が開始し、破壊が★2に到達した後、再度破壊が伝播(円状)すると仮定した。

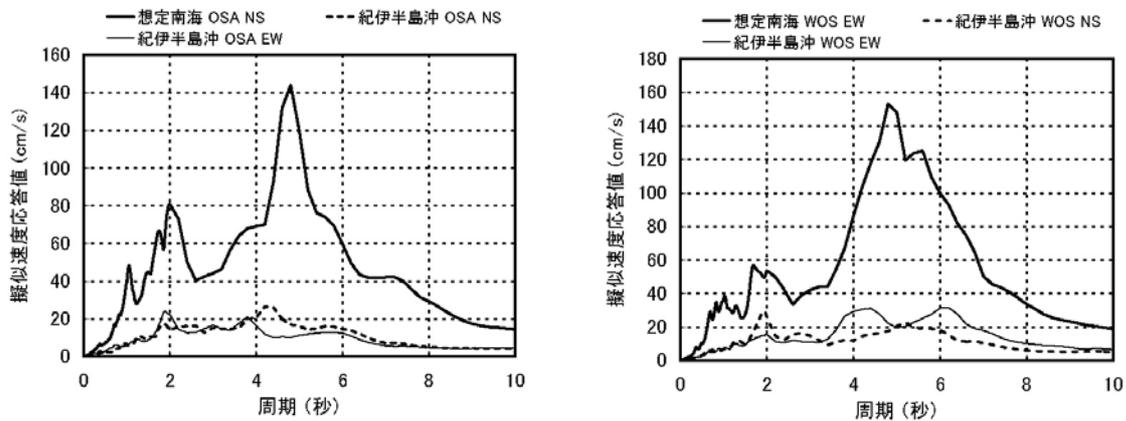


図13 紀伊半島南東沖地震の本震時に観測された OSA と WOS による観測波形の擬似速度応答スペクトルと想定南海地震時における両観測点で予測された地震動の擬似速度応答スペクトル(5%減衰)での比較

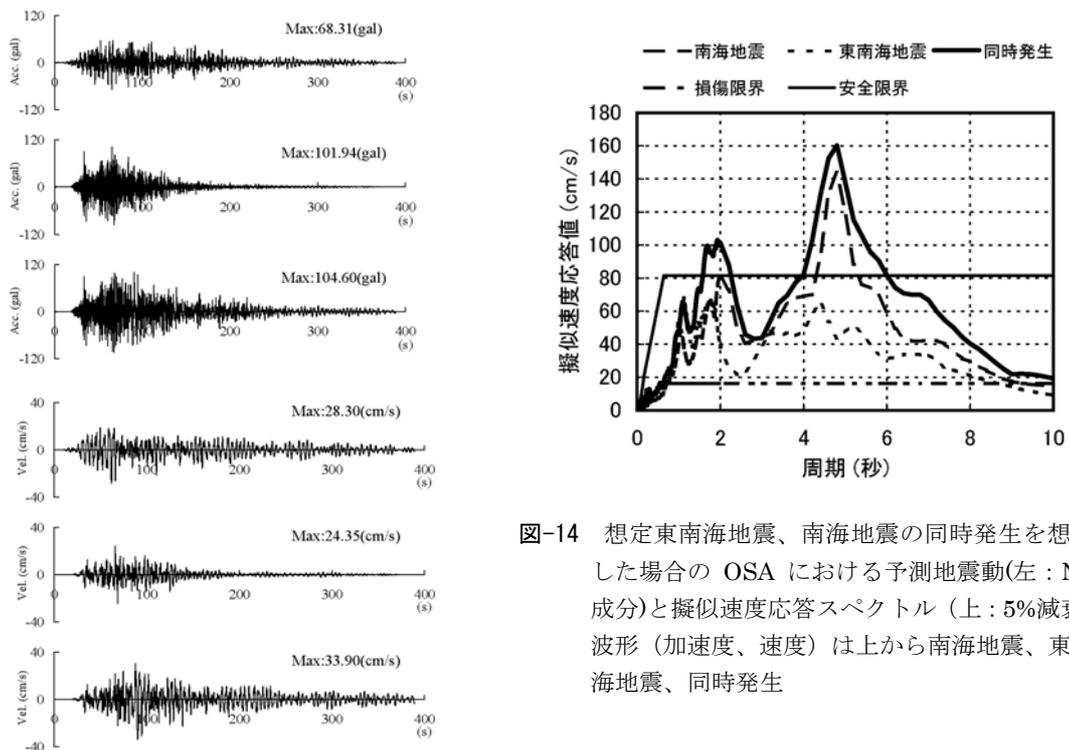


図-14 想定東南海地震、南海地震の同時発生を想定した場合の OSA における予測地震動(左: NS成分)と擬似速度応答スペクトル(上: 5%減衰)波形(加速度、速度)は上から南海地震、東南海地震、同時発生