



京都大学 防災研究所

Disaster Prevention Research Institute

Kyoto University

拠点研究（一般推進）

2023KG-02

地震発生後に利用可能なデータの
逐次変化を考慮に入れた
先進的都市地震リスク軽減
フレームワークの構築に関する研究
Research on the construction of
an advanced urban earthquake risk
reduction framework taking the gradual
changes in data available after an
earthquake occurs into account

令和 6 年 3 月

March, 2024

研究代表者 境有紀

Coordinator Yuki Sakai

1. はじめに

近年の地震災害において様々な地震動データや地盤データ，および都市の被害状況に関するデータが広く収集されるようになってきたが，実際に利用可能なデータは発災後に時々刻々と変化する．本研究はデータが逐次変化するような状況を想定し，各分野の最新の知見を踏まえた上で，都市地震リスク軽減に向けた新たな先進的フレームワークの可能性を検討するものである．

ここでは，得られた成果の中から緊急地震速報の高度化と海外展開，断層破壊過程と強震動特性に関する研究，大阪府北部の地震における茨木市の被害分布を形成した要因について報告を行う．

2. 緊急地震速報の高度化と海外展開

日本の緊急地震速報では、IPF (Integrated Particle Filter) 法を用いて震源を決定している。本研究では、フォーマットに依存しない連続波形データを入力とする拡張 IPF (IPFx) 法を提案し、日本のすべてのリアルタイム地震観測記録を単一の枠組で統合して処理する。

新しい震源決定アルゴリズムは、地震波形を 2 段階で処理する。第 1 段階 (単点処理) では、連続波形からトリガー情報と振幅情報を抽出する。第 2 段階 (ネットワーク処理) では、複数の観測点からの情報を蓄積し、ベイズ推論に基づいて現在進行中の地震の位置とマグニチュードを推定する。オリジナルの IPF 法と IPFx 法の大きな違いの一つは、単点処理である。IPFx 法は連続波形を使用し、中枢計算機でトリガ処理を行うのに対し、オリジナルの IPF 法は各観測点でトリガー情報を計算する。集中処理方式の利点は、他の地震観測網からのデータを容易に取り込めることである。この利点を利用すれば、この手法を他国の地震観測網に適用することも可能である。

2020 年以降、日本の地震データを用いて、この手法をリアルタイムで試験している。その結果、最大震度 3 を超える地震の検出において、気象庁の緊急地震速報よりも優れた結果を得た。複数のネットワークを 1 つの手法に統合することで、現行の気象庁緊急地震速報よりも P 波検出速度、イベント検出速度ともに向上した。検出結果 (推定震源パラメータの時刻歴など) を、イベント検出の数分後に自動的に SNS にアップロードする仕組みを構築した。2020 年以降、オンライン IPFx 法システムの性能を監視し、結果が十分な精度を持たない場合にはデバッグを行っている。

我々は中央気象局と共同で、台湾の 2018 年花蓮連続地震に IPFx 法を適用した (図 1 参照)。170 観測点の 2018 年 2 月からの 1 ヶ月連続波形を使用し、手動カタログと比較することでその性能を評価した。ネットワークの性質 (観測点分布、ノイズレベルなど) は異なるが、本手法は震度 4 以上の地震検出において良好な性能を示した。この手法を海外のネットワークに適用し、ロバストな緊急地震速報システムを提供することが我々の目標である。

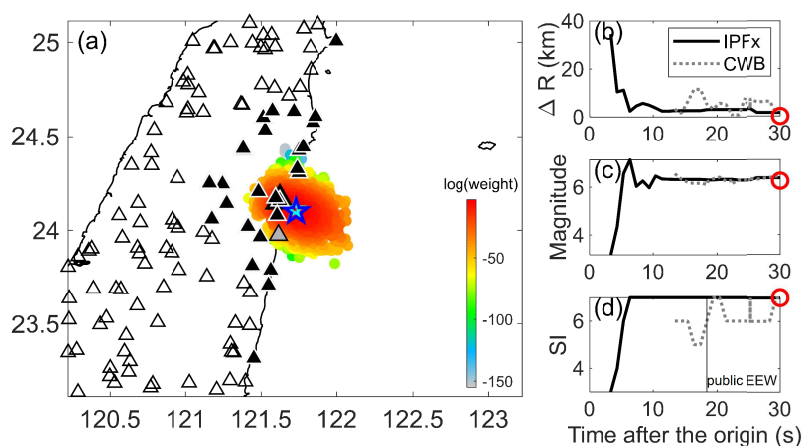


図 1 2018 年花蓮連続地震に IPFx 法を適用した例

3. 断層破壊過程と強震動特性に関する研究

被害地震発生後に公開された地震動波形データをもとに、大地震の震源での断層破壊過程と強震動特性について検討した。今年度は、主に、石川県能登地方で発生した被害地震（2023年5月5日 M6.5, 2024年1月1日 M7.6）及び2023年トルコ・シリア地震を検討対象とした。このほか、大学院生とともに動的震源インバージョン手法の開発と数値実験に関する研究を進めた。

2023年2月6日に発生したトルコ・シリア地震 ($M_w 7.8$) については、地震直後に AFAD から公開された震源近傍強震記録を分析し、断層直交成分の変位波形（加速度波形を2回積分）のパルスのピーク時刻から、地震断層の破壊伝播の推定を行った（図2）。比較的単純な条件設定での数値実験結果も参照しつつ、長大な横ずれ断層に沿った破壊伝播速度の空間変化を議論した。震源域南西部の Amanos セグメントでは、平均的な破壊伝播速度は 3.2 km/s と推定されたが、地表地震断層の線形性の高い区間で局所的に supershear 破壊（S波速度を超える破壊伝播速度での破壊）となっていることが分かった。

2023年度中に石川県能登地方で発生した2つの被害地震（2023年5月5日 M6.5, 2024年1月1日 M7.6）について、強震・震度観測網の記録を用いて震源破壊過程の分析を行った。2023年5月5日に発生した M6.5 の地震の大きなすべりは、それ以前の群発地震活動で、小さな地震が活発に発生していた深さよりも浅部に推定された（図3）。また、2024年1月1日に発生した M7.6 の地震の破壊開始点は、上記の M6.5 の地震の大きなすべり域の南西端に位置しており、M7.6 の地震は複数の断層が連動して破壊した複雑な地震であったものの、初めの破壊は M6.5 の地震と同一の断層面で生じたと考えられ、地震活動の推移を考える上でも重要な知見が得られた。2つの被害地震の震源破壊過程とそれによって生成された強震動の特性について、引き続き研究を進めていく必要があると考えている。

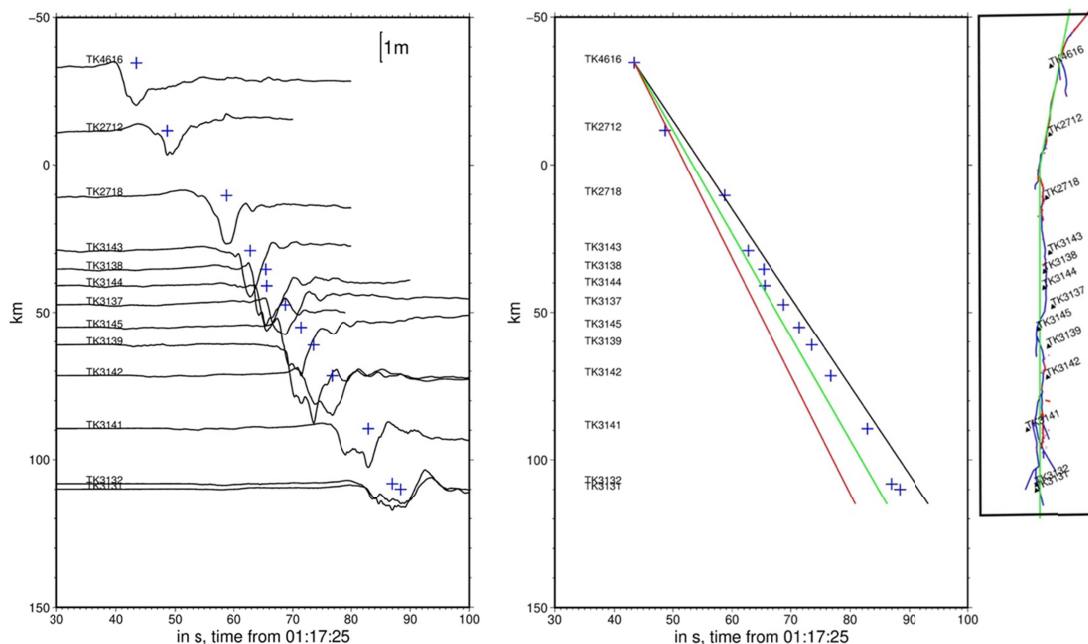


図2 2023年トルコ・シリア地震 ($M_w7.8$) の Amanos セグメントでの破壊伝播速度推定。
 (左) 各強震観測点での変位波形の断層直交成分。+印は波形から読み取った最大変位出現時刻。(中) 各強震観測点での最大変位出現時刻 (+) 及び破壊伝播速度 (黒: 3.0 km/s、緑: 3.5 km/s、赤: 4.0 km/s) の比較。(右) 観測点地図と地表地震断層のトレース。

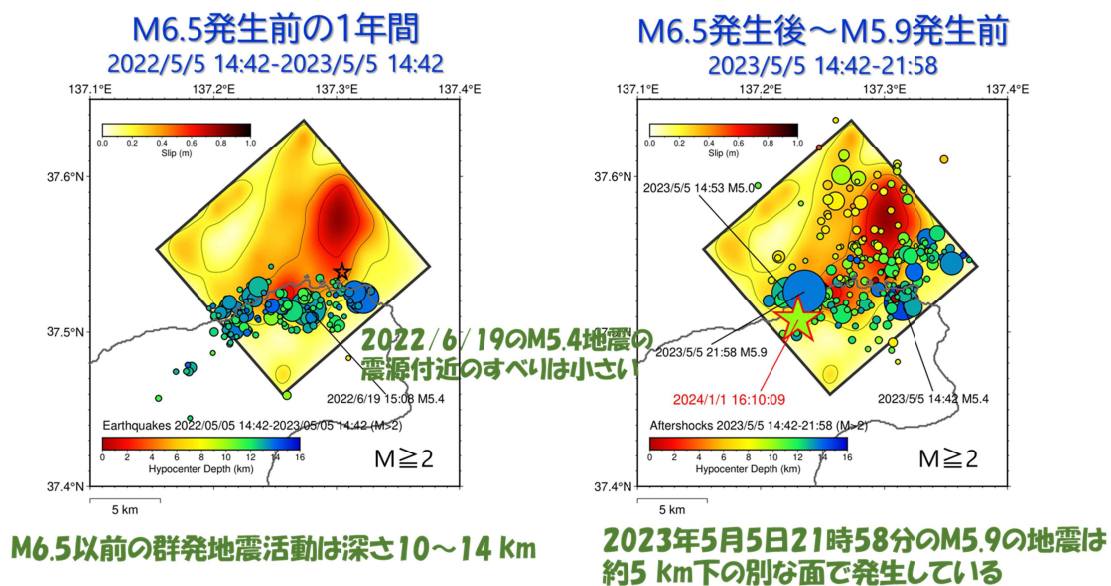


図3 2023年5月5日石川県能登地方の地震 ($M6.5$) の最終すべり分布と関連する地震活動の比較

4. 大阪府北部の地震における茨木市の被害分布を形成した要因について

2018 年大阪府北部の地震では、高槻市や茨木市を中心として建物被害が広く発生した。建物被害の程度は主に一部損壊であったが、その空間分布は震源距離に対して一様ではなく複雑であったことが知られている。将来、都市で発生する地震災害を理解する上で、このような被害分布を形成した要因を明らかにすることは重要である。過去の研究（浅野他，2022）により、この空間分布は建築年代で説明できないことが明らかになっていることから、ローカルな地盤震動の違いによるものである可能性を考えた。しかし、J-SHIS 等で公表されている地盤増幅度は、建物被害率の高い地域ほど低く、被害率の低い地域は増幅度が大きく評価されており、実態と逆である。このため、地盤震動の影響を詳細に検討する必要がある。

本研究では、茨木市中心部の 5x3km の地域を対象とし、常時微動の単点観測を 151 点、微動アレイ観測を 10 箇所で行った。単点観測では H/V スペクトルをそれぞれの地点で評価したが、明瞭にスペクトルのピークを特定することができない観測点も多く、卓越周期の空間分布を論じることは難しい。そこで、H/V スペクトルの形状そのものに注目し、その形状を階層型クラスタリングにより恣意性を排除した形で分類した（図 4）。被害率の低い地域（図 4 中の寒色系）と被害率の高い地域（図 4 中の暖色系）とを異なるクラスターに分類することができたことから、地盤震動特性の違いが建物被害率の違いに対応することが明らかとなった。

微動アレイ観測で得られた位相速度分散曲線と周囲のボーリング情報に基づいて、アレイ観測点における S 波速度モデルを構築した。また、各クラスター内は大きな構造の変化がないものと仮定し、H/V スペクトル形状の周波数方向の変化に対応させて地盤モデルを若干修正して S 波速度の稠密なモデルを構築した。

本研究で得られた速度モデルを用いて、実際に大阪府北部の地震の揺れがどのような空間分布であったかを検討した。近接する岩盤観測点である阿武山の地震記録を工学的基盤波と仮定し、これをそれぞれのモデルに入力して地表の地震動を推定した（図 5）。この時、地盤の非線形応答を考慮するため大阪地域の代表的な土質で得られている繰返し特性モデルを採用し、等価線形解析により評価した。推定された地震動の最大速度（PGV）値は、建物被害率の低い地域で小さく、被害率の高い地域で大きく求められ、実際に対応する結果が得られた。本地震の入力地震動は 2-5Hz が卓越しており、Vs30 は大きいものの、被害率の高い地域でこの周波数帯域の増幅が顕著であったことが主たる要因であることが明らかとなった。

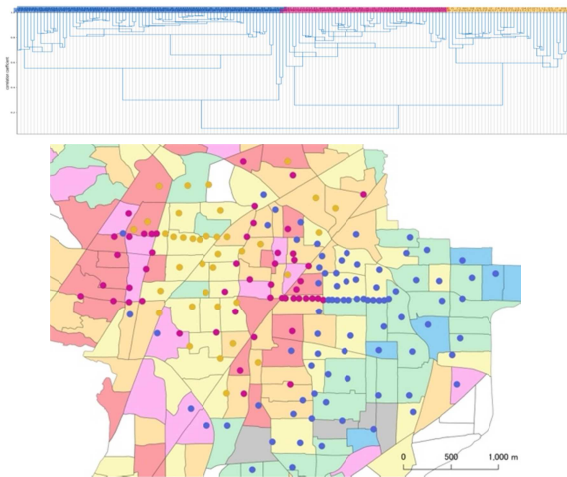


図 4 階層型クラスタリングによる単点微動 H/V スペクトルの分類と建物被害率との関係

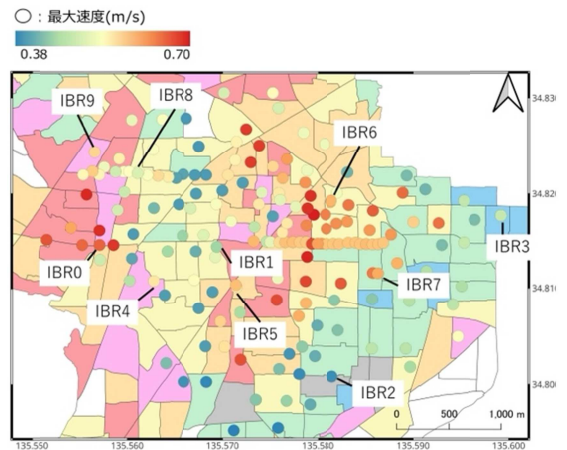


図 5 大阪府北部の地震における推定地震動の PGV 値と建物被害率との関係

5. 2016 年熊本地震の益城町におけるサイト増幅特性を考慮した高精度強震動推定

平成 28 年熊本地震 (M7) 本震後の益城町市街地の建物被害分布は、地域によって大きな違いが見られた。本震時の強震動特性と建物被害率へのサイト増幅特性の影響を分析するため、2016 年と 2018 年の 2 回にわたり微動観測を実施した。この過程で、建物の地震被害と密接に関連する強震動の特徴が見出されることも期待される。

まず、各微動観測地点の水平上下スペクトル比 (MHVR) を標準的な解析プロセスに従って解析した。微動観測した 80%以上の地点で、その微動の水平上下スペクトル比 (MHVR) は 0.5Hz から 5Hz に明確なピークがあることが明らかになった。北東部の一次ピーク振動数は他の地域より高く、南西部の一次ピーク振動数は他の地域より低かった。

図 6 に示すように、観測範囲の南東境界にあるいくつかの地点では、3.0 Hz より高い一次ピーク振動数が観測されている。Kawase et al. (2018)の提案する手法に基づき、各サイトの擬似地震動水平上下スペクトル比 (pEHVR) を算出した。次に、地震の拡散場理論に基づいて益城町の 1 次元速度構造を同定した。その結果から、益城町南部では堆積層が厚いことがわかった。

その後、各サイトの線形解析、等価線形解析、非線形解析の各手法を用いて各サイトの動的シミュレーション解析を行った。その結果、非線形解析による Kik-net KMMH16 の加速度・速度のシミュレーションが観測結果とよく一致したことから、非線形解析が益城町の応答解析に適していることがわかった。線形解析、等価線形解析、非線形解析のピーク地盤速度 (PGV) の分布図を求めた結果、PGV が高いのは主に益城町南西部であり (図 7)、これは建物の大被害分布と類似していた。

一方、PGA の分布は、建物の大被害分布とは異なっている。したがって、PGV が益城町の建物地震被害と関連する重要なパラメータであると考えられる。また、サイト増幅特性も建物の被害分布と大きな関係があることがわかった。

なお、この結果は IAEG2023 (The XIV Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment) にて発表された。

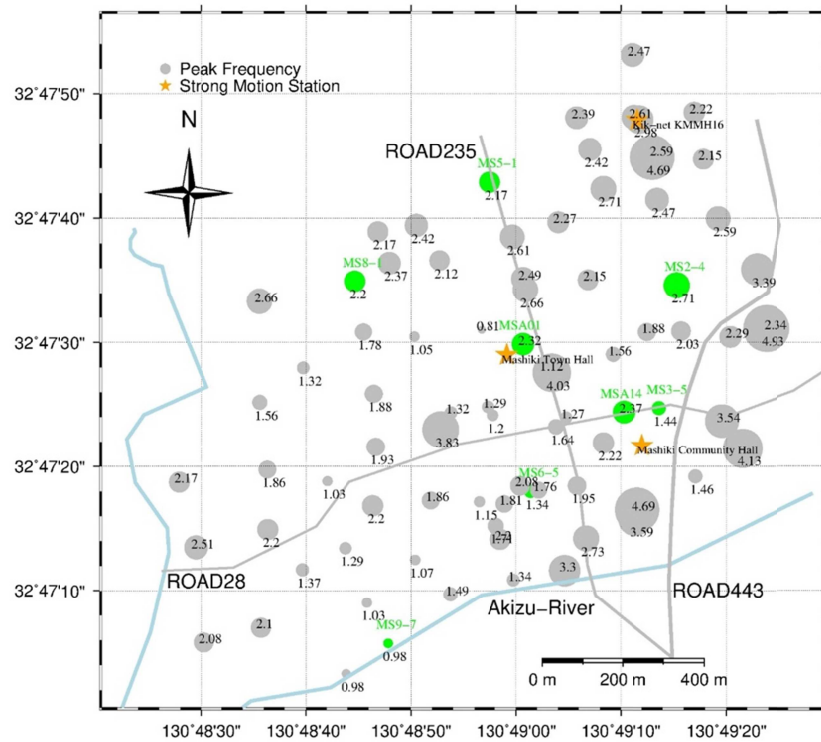


図 6 益城町における微動水平上下スペクトル比の一次ピーク振動数分布

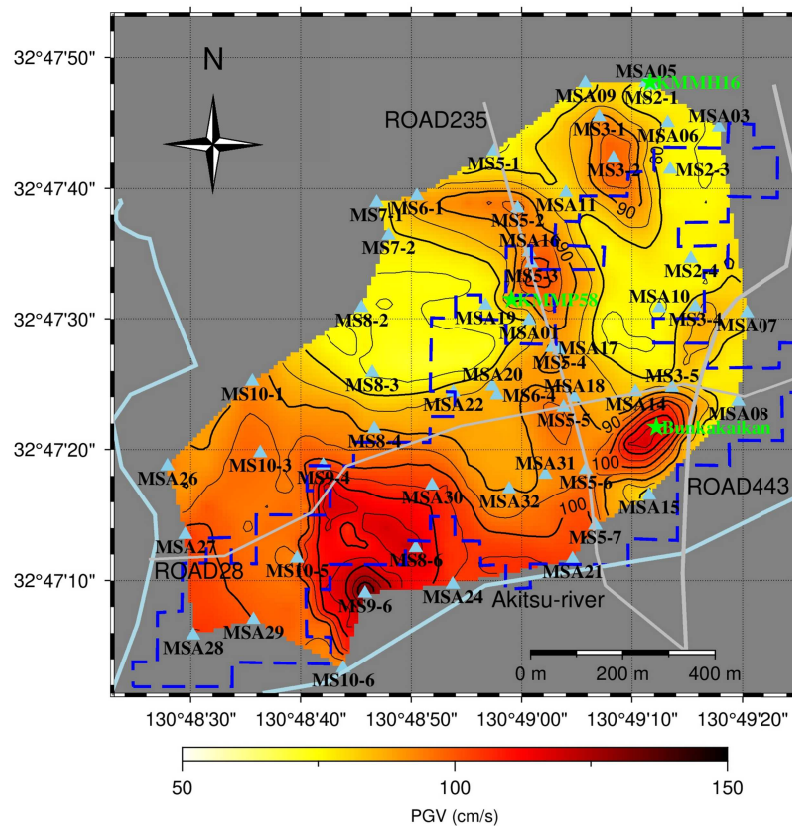


図 7 非線形解析による EW 成分の PGV 分布

6. 京都府宇治市五ヶ庄周辺の地下速度構造と常時微動の水平上下スペクトル比や位相速度の方位依存性に関する研究

日本では一般的に地盤構造は局所的に変化し空間的な不均質性が高く、詳細な強震動予測を行うためにはこの不均質な地盤構造モデルを高精度に求めることが必要である。しかし、地盤の不均質性を観測記録から抽出・評価する方法はいまだ確立されていない。本研究では、図 8 に示すように京都府宇治市五ヶ庄周辺において常時微動を観測し、不整形地盤と微動水平上下スペクトル比 (MHVR) や位相速度の方位依存性との関係について検討した。微動アレイ観測はアレイサイズを変えて 20 時間と 6 時間の 2 回行い(図 8 中▼と■)、より長周期の位相速度まで計測を試みた。

アレイ観測点の各観測点における MHVR は 0.3~0.6Hz にピークを持ち、対象地域の基盤が西から東に向かって浅くなるのに対応して、ピーク振動数も西から東に向かって高くなる傾向が見られた。また、どの観測点でも図 9 に示すように最もピーク振幅が大きくなる方角は N160° E から N180° E となり、近傍の黄檗断層により生じたと考えられる周囲の地形の走向と一致する結果が得られた。

アレイ観測記録から f-k 法により各周波数・時間帯での Rayleigh 波の位相速度を求めた。また、FK パワースペクトルの卓越する方位を波の到来方向とした。全時間帯の平均的な位相速度は 0.7~3.0Hz で得られ、既往研究の PS 検層記録より求まる理論位相速度と 0.8~1.2Hz では整合的であったものの、1.2~3.0Hz では観測がやや大きな位相速度となった。図 10 に示すように 1.2~3.0Hz では波の到来方向は特に西と南に集中し、西から波が到来する場合の方が南から波が到来する場合と比べて位相速度が大きくなることが分かった。このことから、アレイ南側の 1.2~3.0Hz に対応する地盤構造は西側の地盤構造に比べ速度が遅い可能性が示唆された。

以上、宇治地区での微動観測から MHVR の方位依存性および位相速度の到来方向依存性を観測できた。今後は地盤の不整形構造と観測記録に見られた方位依存性についてより詳細な検討を行う。

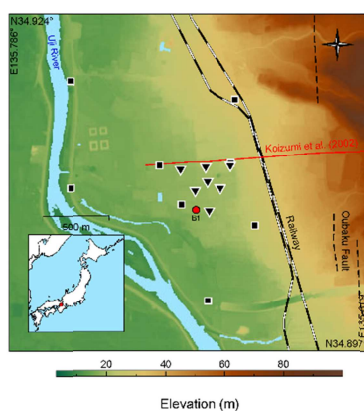


図 8 観測点分布

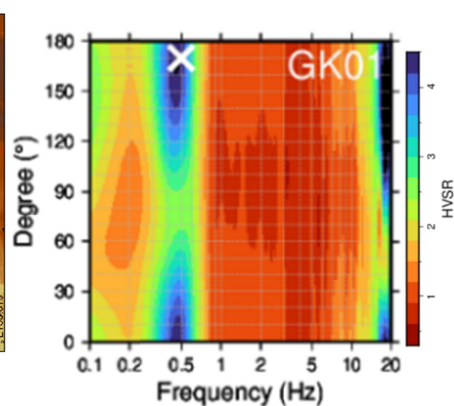


図 9 方位別 MHVR

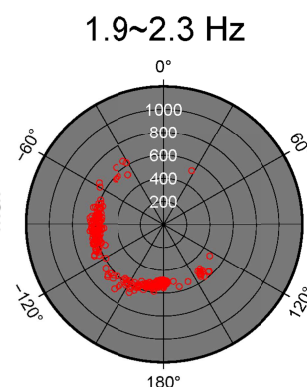


図 10 到来方向別位相速

7. 京都盆地 3 次元地盤構造モデルの修正のための地震動再現波形の分析

京都盆地の 3 次元地盤構造モデルの地震波再現性能を検証することを目的に、近傍で発生した中規模地震を対象に差分法 (Pitarka, 1999) により 2Hz までの地震動再現シミュレーションを行った。対象とする 3 次元地盤構造モデルは、文部科学省委託研究『奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測』で作成されたものである。ここでは、地盤構造モデルの修正に資する情報を得るため、シミュレーション結果の分析を進めた。

盆地内部の波動場は、地震基盤と地表の間で反射を繰り返す多重反射波や盆地縁部で発生した表面波により複雑になる。直達波は主に地点直下の地下構造の影響を受けていると考えられる。多重反射波はそれに加えて周囲の地震基盤形状の影響を、表面波は盆地縁の形状や伝播経路の地震基盤形状の影響を強く受けていると考えられる。そこで、これらの影響をおおよそ区別するため、地震観測点直下の 1 次元速度構造モデルによる地震動計算を行い、観測波形、3 次元地盤構造モデルによる計算波形（以降、3 次元計算波）、1 次元地盤構造モデルによる計算波形（以降、1 次元計算波）を比較した。なお、1 次元地盤構造モデルによる地震動計算は、離散化波数積分法 (Bouchon, 1981) と反射透過係数行列法 (Kennett and Kerry, 1979) を組み合わせた手法を用いた。今回のケースでは、計算手法が異なることによる計算波形への影響は振幅で 10% 程度であった。以下に分析結果の一部を示す。

京都府震度情報ネットワークの KYTP31 は盆地西縁に近い観測点であるが、1 次元計算波の 1 回基盤反射波までは 3 次元波よりも 1 次元波のほうが再現がよい (図 11)。3 次元計算波では初動直後から振幅が過大になっているが、盆地端での回折波の到来が早すぎている可能性が考えられる。3 次元地盤構造モデルにおける盆地端の位置を再検討する必要がある。基盤強震観測網 KiK-net の KYTH07 は、盆地中央部付近に位置し宇治川断層帯の南 3km ほどにある。直達波部分は 1 次元波と 3 次元波はほぼ同じで、ともに観測に比べ振幅がやや小さい。1 回基盤反射は観測では直達波と震動方向が異なっているが、3 次元波はその卓越方向を再現できていない。震央と観測点の間の基盤形状をみると (図 11：上)、KYTH07 の北西方向にある宇治川断層帯付近の地震基盤形状が 4:1 程度の傾斜を持った段差構造になっており、この傾斜した基盤面により 1 回基盤反射波の震動方向が影響を受けている可能性が考えられる。

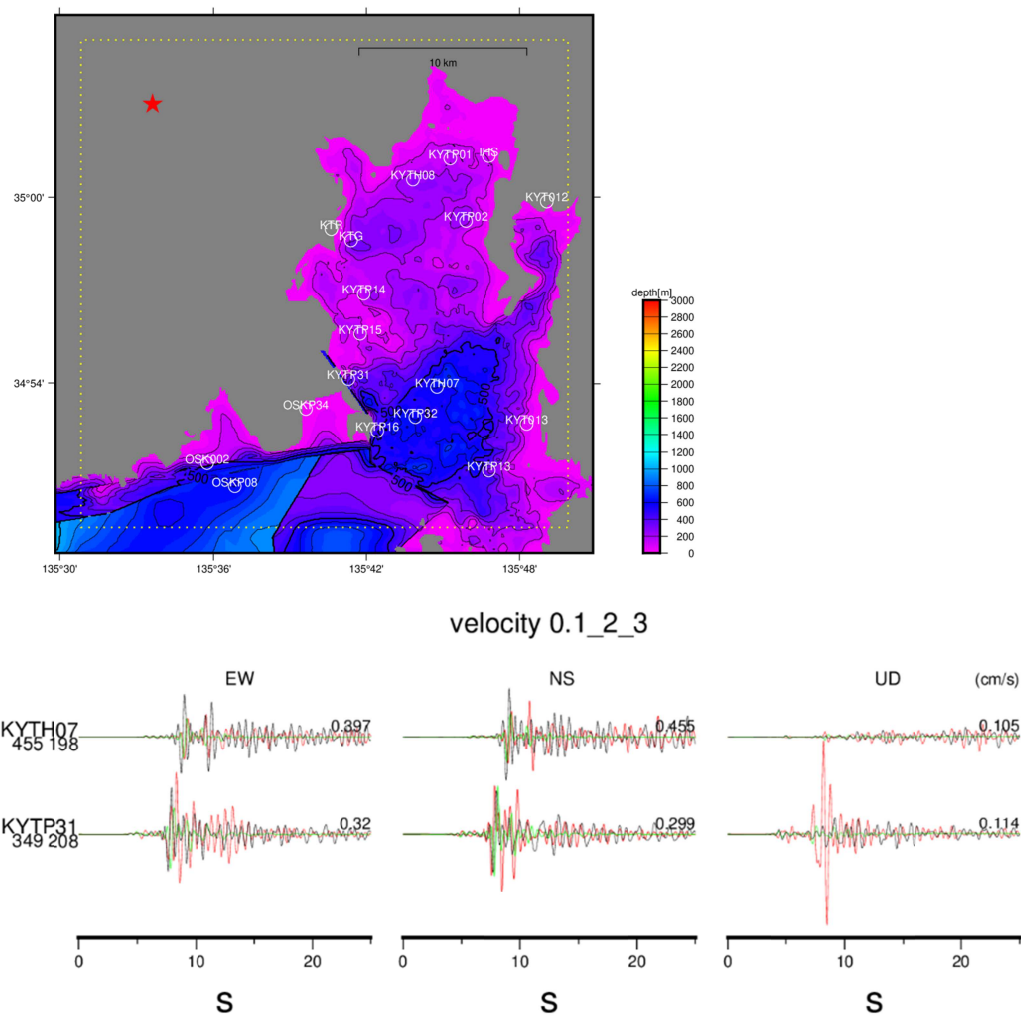


図 11 上) 文部科学省委託研究『奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測』で作成された 3 次元地盤構造モデルの基盤深度分布。○は地震観測点。星印は 2022 年亀岡地震の震央位置。下) 2022 年亀岡地震の KYTP31 および KYTH07 観測点における観測と計算の速度波形 (0.1~2Hz) の比較。黒：観測波形、赤：3 次元地盤構造モデルによる計算波、緑：観測点直下の 1 次元地盤構造による計算波形。