

TSUBAME 共同利用 令和元年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 GPGPU による巨大地震の長周期地震動シミュレーション  
英文: Long-period ground motion simulation for mega-earthquakes using GPGPU

藤原広行  
Hiroyuki Fujiwara

国立研究開発法人 防災科学技術研究所  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience  
<http://www.bosai.go.jp>

発生が想定されている巨大地震であってもその詳細な震源像を事前に予測しモデル化することは極めて困難であるため、震源像の不確実性を考慮した多数のシナリオに基づく地震動シミュレーションを行い、予測結果のばらつきを定量的に評価することが必要である。本研究では、主要な海溝型および活断層型地震である南海トラフ地震、糸魚川静岡構造線、および上町断層帯を対象として、申請者らが TSUBAME の GPU 環境に対応させた地震動シミュレータ GMS により地震波伝播シミュレーションを実施し、周期 1-2 秒以上の長周期地震動を計算した。47 ケースの震源破壊シナリオについてシミュレーションを実施し、それらの計算結果の統計処理によって長周期地震動ハザード評価を行った。

Long-period ground motion for the anticipated mega-earthquakes at the Nankai Trough and major active faults were simulated by the 3-D finite-difference computation of seismic wave propagation, using a software called the Ground Motion Simulator (GMS) adopted to GPU on TSUBAME. Simulations for a total of 47 cases were conducted, considering different rupture scenarios for each earthquake. Based on the statistical analysis of the simulation results, we evaluated the probabilistic seismic hazard for each earthquake.

*Keywords:* 長周期地震動, 三次元差分法, 南海トラフ地震, 活断層型地震

#### 背景と目的

巨大地震による長周期地震動(長周期とは、ここでは周期 1 秒~20 秒程度以上とする)には、大きく分けて 2 種類の現象が知られている。一つは、地震波の長周期成分が減衰せずに遠方まで伝わり、100km~数 100km 程度離れた平野部で、振幅の大きい長周期の揺れが長時間続く現象である。2011 年東北地方太平洋沖地震発生時には、東京や、大阪においても観測され、超高層ビルでの揺れやエレベータ停止などが報告された。来るべき南海トラフ巨大地震の発生時には震源が陸地に近い分、大都市圏において長周期長周期地震動がさらに顕著になることが危惧される。

もう一つは、巨大地震の断層ごく近傍における断層破壊による長周期パルスである。1995 年兵庫県南部地震や 2016 年熊本地震で見られたように、内陸の活断層型地震発生時に、断層近傍の都市部において構造物に直接大きな被害を及ぼし、数 m の顕著な地表変位(地面のずれ)を伴うこともある。

#### これら長周期地震動のハザード評価(危険度評価)

のためには震源破壊シナリオを模した震源モデルと 3 次元地下構造モデルを用いた波動伝播シミュレーションによる数値計算が有効である。巨大地震の震源モデルを事前に予測することは極めて困難であることから、破壊シナリオの不確実性を考慮して多数の震源モデルを設定し、個々の震源モデルに対する予測に加え、予測結果がどの程度のばらつきを持つかを定量的に評価することが重要となる。そのためには計算コストの高い大規模シミュレーションを多数行う必要がある。

本課題では、主要な海溝型地震と活断層地震である南海トラフ地震、糸魚川静岡構造線断層帯(静岡、長野、新潟県)および上町断層帯(大阪府)の地震について、TSUBAME の GPU 環境を利用することで多数回の大規模地震波伝播シミュレーションを実施し、それに基づいた地震ハザード評価を行った。南海トラフ地震と糸魚川静岡構造線断層帯の地震はマグニチュード 8 クラスの巨大地震である。上町断層帯の地震はマグニチ

ュード 7 程度であるが、大都市の直下に存在する活断層であり、注視すべき極めて重要な地震である。

## 概要

南海トラフ地震、糸魚川静岡構造線、上町断層帯の地震を対象として、震源パラメータの不確実性や破壊不均質性を考慮して複数ケースの震源モデルを設定した。図 1, 2, 3 にそれぞれの震源モデルの例を示す。

まず、南海トラフ地震については地震調査研究推進本部（地震本部）の長期評価（[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou\\_pdf/nankai\\_2.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf)）で例示された 15 の震源域のうち、マグニチュード 8 程度に相当する二つの震源域についてアスペリティの配置や破壊開始点を変えた計 7 通りを設定した。南海トラフ地震について同様の検討を試行してきたが、本年度は周期 1 秒以上の地震動をより適切に表現できるよう、破壊不均質性を付与した震源モデルに更新した。

糸魚川静岡構造線断層帯、上町断層帯については、地震本部の全国地震動予測地図（[https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/shm\\_report/shm\\_report\\_2018/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2018/)）の断層モデルを基礎として、アスペリティは一、破壊開始点、断層上端深さ等を変えた 20 通りをそれぞれの地震に対して設定した。

地下構造モデルは防災科学技術研究所で作成している全国 3 次元地下構造モデルに地震本部によるプレート構造を付与した。それぞれの地震の計算領域の大きさ、差分法の格子サイズ、格子数を表 1 に示す。一般に、地表に近づくほど地震波速度が遅く、剛性率が小さくなるため、地表付近まで断層が達する活断層型の地震については計算精度が保たれるよう留意する必要がある。特に上町断層帯は大阪堆積盆地内に位置し、地震波速度が遅いため、安定して計算を行うために計算格子サイズや時間刻み幅（サンプリング）を調整した。

地震波伝播シミュレーションでは、地下構造モデルを水平方向に 8×6 に分割し、それぞれの部分領域に 1 つの GPU を割り付けて計算処理を行った。計算された地震動速度の東西、南北、上下の 3 成分をそれぞれ出力した。出力ファイルには、陸域に約 2km 間隔で設定した観測点（南海トラフの場合、約 5 万点）での毎タイムステップの速度値が記録されており、南海トラフの場合

1ファイルで約 40GB である。

TSUBAME3.0 の 48GPU (24 ノード) を使用した実行時間は平均 3 時間程度であった。

## 結果および考察

出力された速度値に対して、バンドパスフィルタ、ダウンサンプリングのポスト処理を行い、各ケースについて速度応答スペクトル (SV) や最大速度値 (PGV) の空間分布を求めた。図 4, 5, 6 に PGV 分布図の例を示す。南海トラフ地震や糸魚川静岡構造線断層帯の地震では、破壊シナリオ（例えば破壊開始点位置）によって地震動強さの空間分布が大きく異なることが分かる。一方、上町断層帯の地震は、堆積盆地構造をなす大阪平野内での地震動の増幅が大きい、詳細に見るとやはり破壊シナリオにより地震動強さの分布は異なる。

それぞれの地震について、代表地点における SV、PGV の条件付き超過確率を求めた。地震動の超過確率とは、ある地震（例えば上町断層帯の地震）が発生する条件下で、ある地点（例えば大阪市役所）における予測地震動はケースごとにばらつきがあるので、それぞれのケースの確からしさを考慮した場合の、ある一定の地震動強さ（例えば PGV で 50 cm/s）以上の揺れになる確率である。ここでは、それぞれのケースは同程度に確からしいと仮定した。横軸に地震動強さ、縦軸に超過確率をプロットするとハザード曲線になる。例として、図 7 に大阪市、神戸市、京都市における上町断層帯についての PGV のハザード曲線を示す。

## まとめ、今後の課題

TSUBAME3.0 の GPU 環境を用いて、南海トラフ、糸魚川静岡構造線断層帯、上町断層帯の地震を対象とした多数の震源モデルに基づく長周期地震動シミュレーションを行い、震源モデルの違いによるばらつきを含んだ長周期地震動のハザード評価を行った。

今回は海溝型地震については震源モデルのアップデートを行い、また活断層型地震についても複数ケースの計算を始めることができた。今後、より計算効率を高め、ハザード評価に十分なばらつきを有する母集団となるケースの計算を進めたい。

表1 計算領域と格子数

	計算領域：南北 × 東西 × 深さ [km]	最小格子サイズ：南北 × 東西 × 深さ方向 [m]	格子数 [億個]	サンプリング [Hz]	タイムス テップ[回]
南海トラフ	763 × 868 × 100	105 × 105 × 100	68	160	80600
糸魚川静岡構造線	411 × 422 × 100	105 × 105 × 100	14	160	49600
上町断層帯	322 × 261 × 100	45.5 × 45.5 × 100	46	260	49600

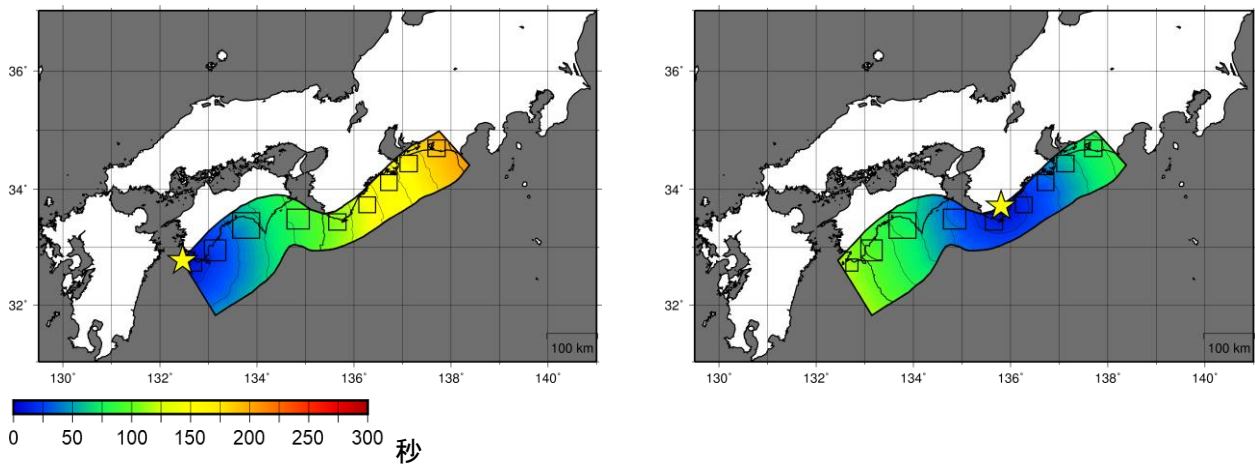


図1 南海トラフ地震の震源断層モデルの例. 色は破壊時刻分布を表す.

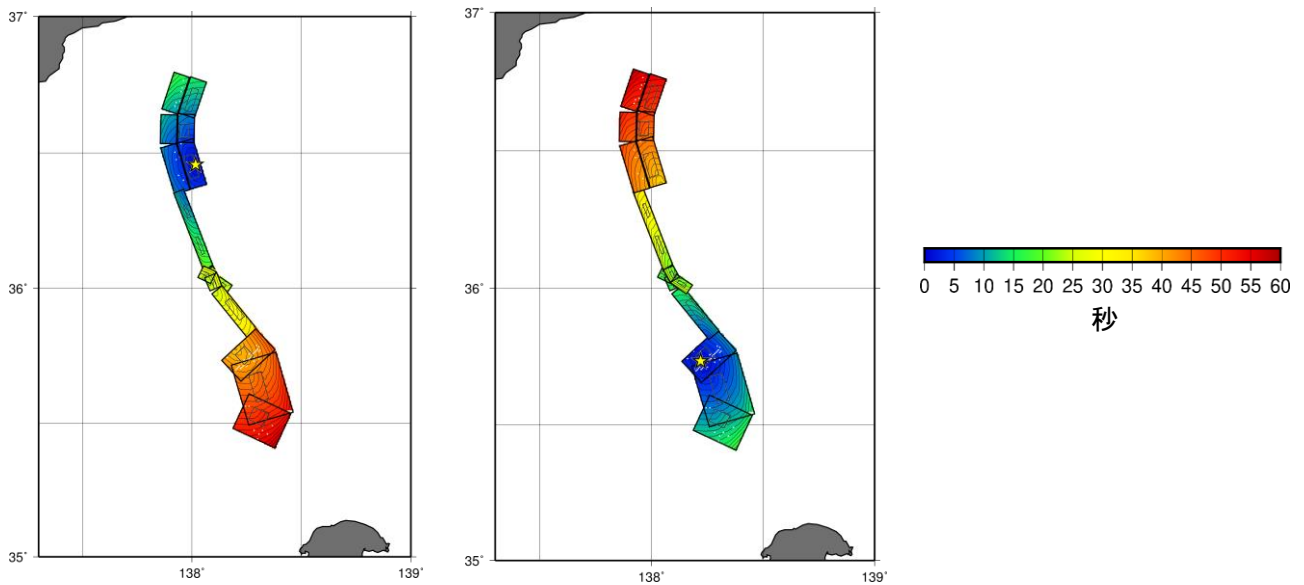


図2 糸魚川静岡構造線断層帯の震源断層モデルの例. 色は破壊時刻分布を表す.

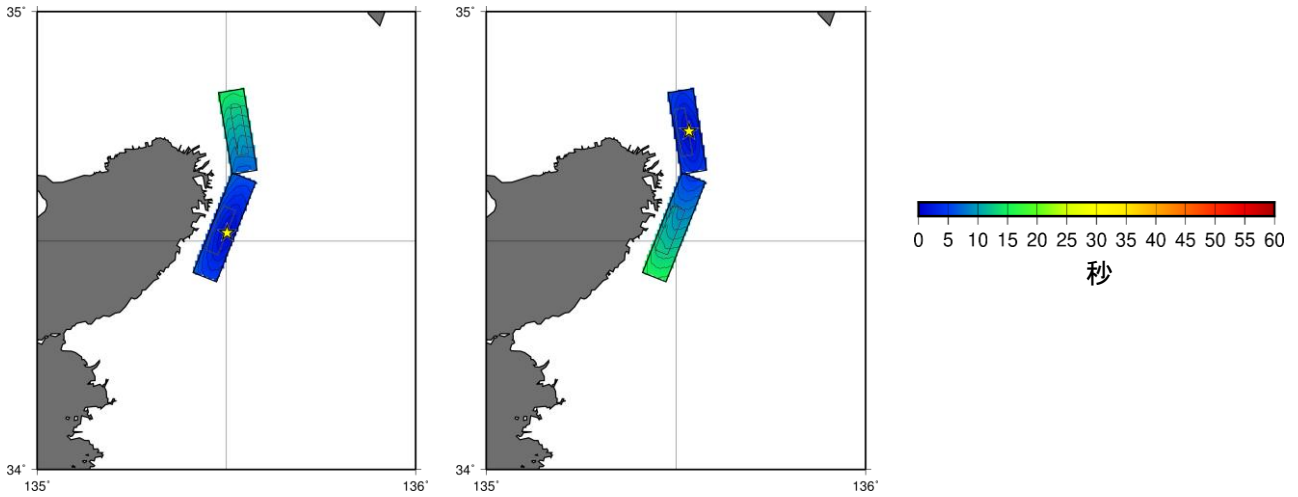


図3 上町断層帯の震源断層モデルの例. 色は破壊時刻分布を表す.

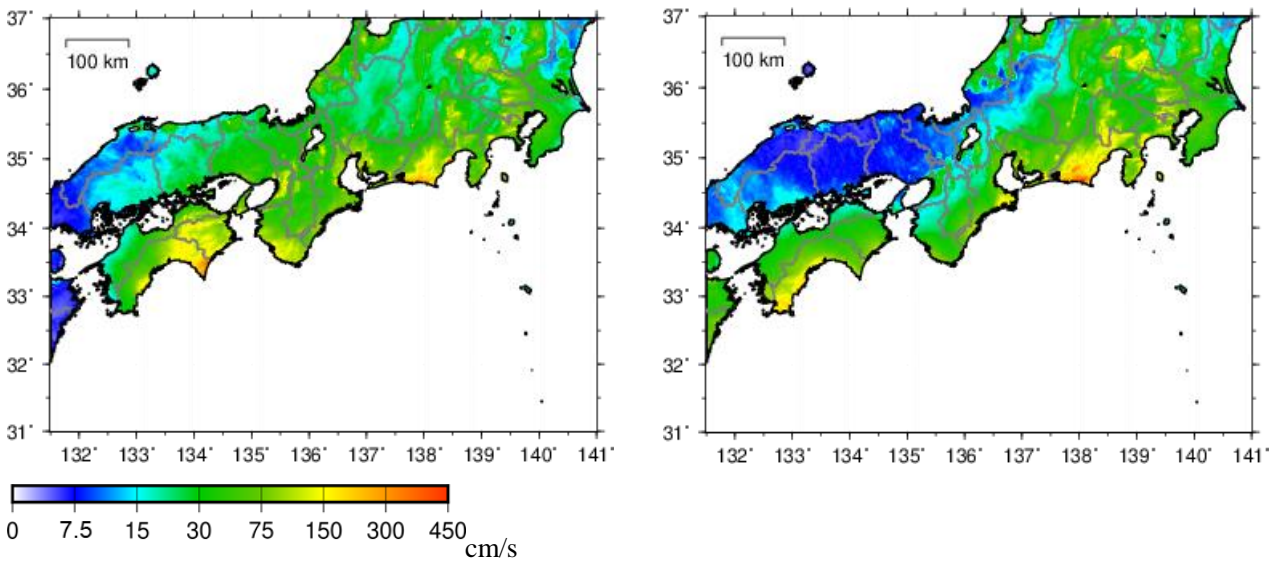


図4 南海トラフ地震の予測地震動(PGV 分布)の例.

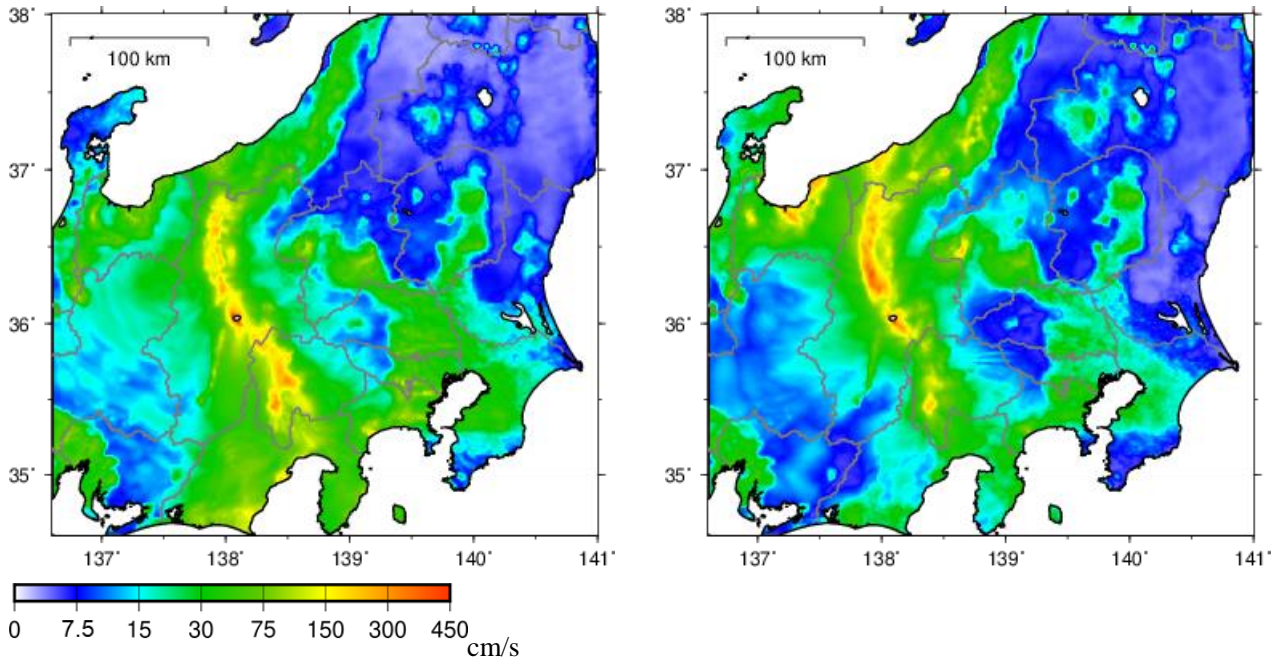


図5 糸魚川静岡構造線の予測地震動(PGV 分布)の例.

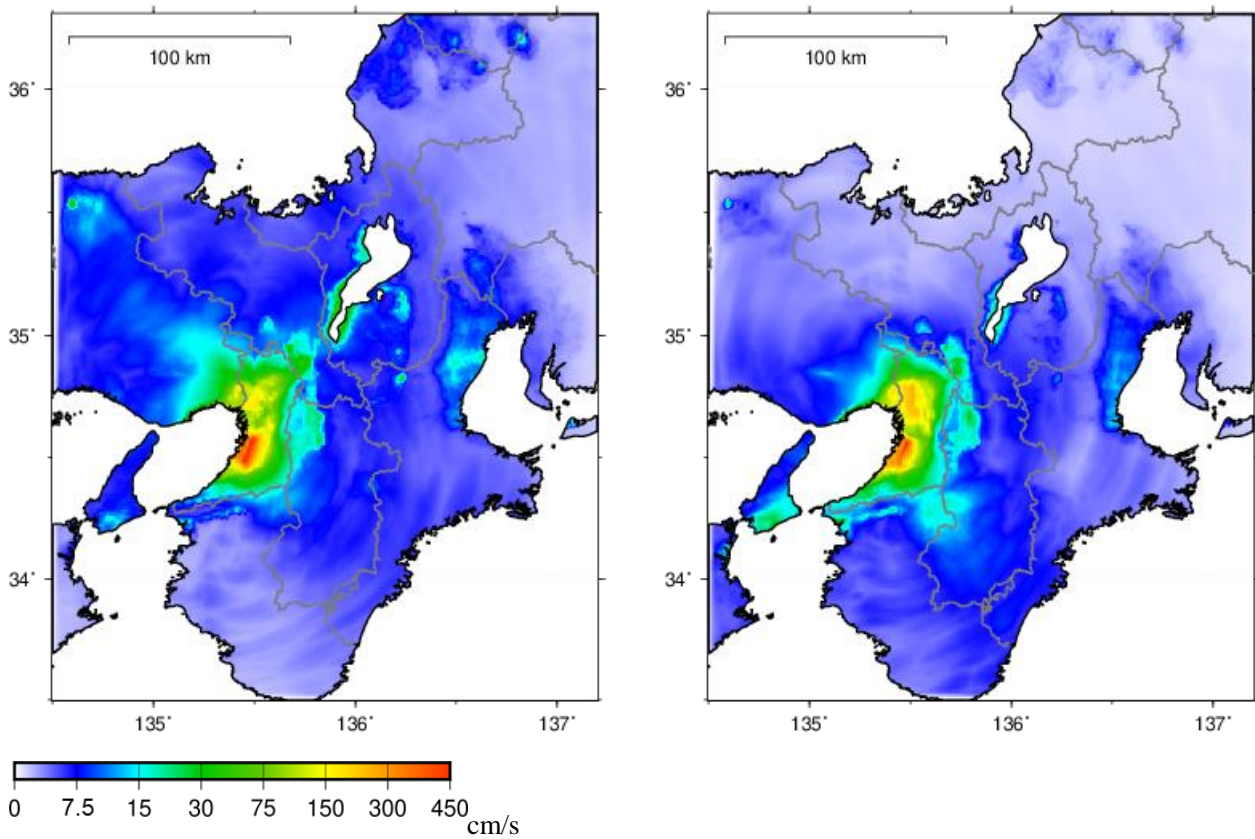


図6 上町断層帯の予測地震動(PGV 分布)の例.

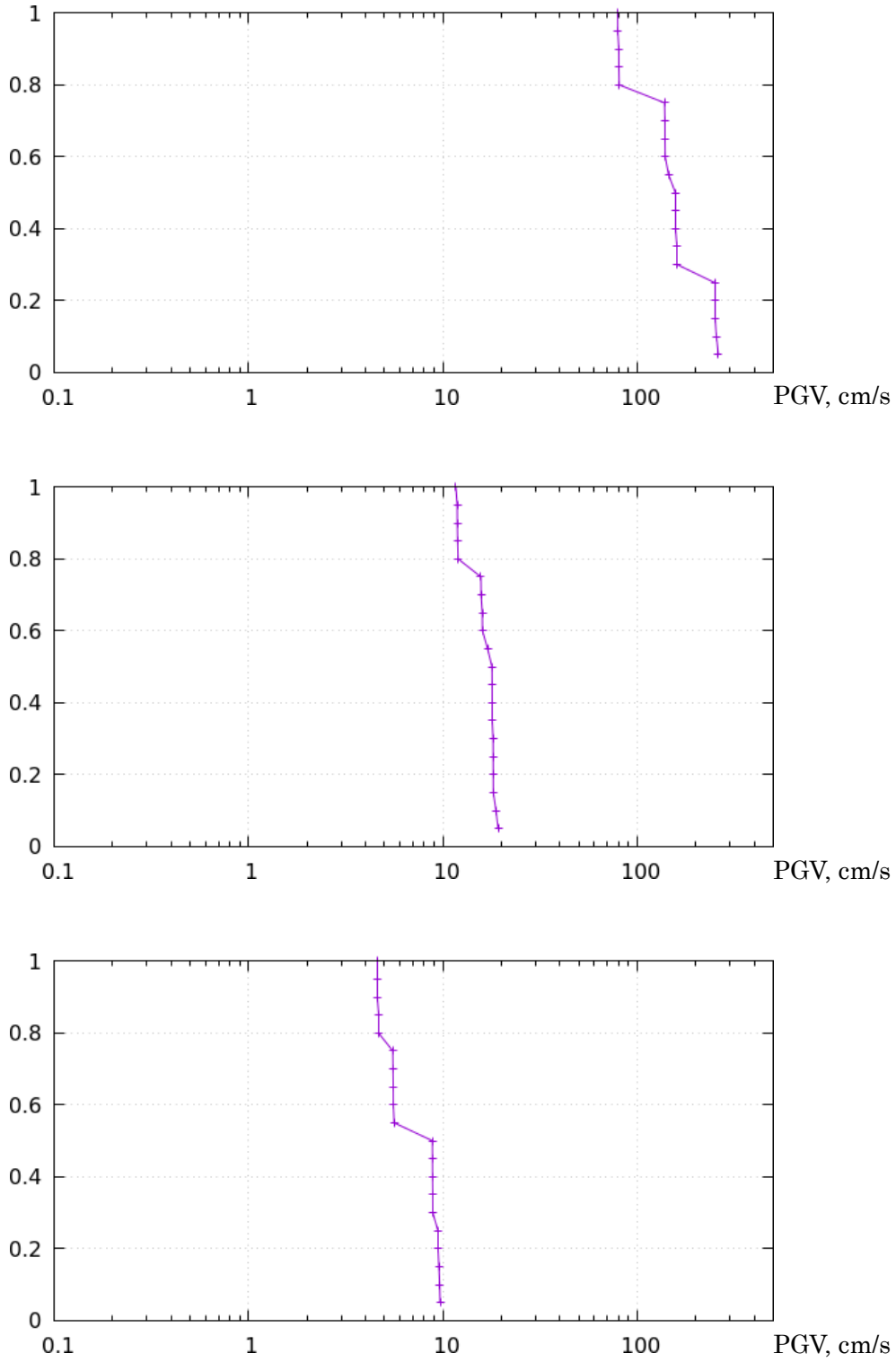


図7 上町断層帯の地震に対する主要地点(上から大阪市, 神戸市, 京都市)における PGV のハザード曲線.