

強震観測記録に基づく2016年熊本地震の地震動分布の推定 Shake Map Estimation of the 2016 Kumamoto Earthquake by Observed Strong Motion Records

松岡 昌志¹
Masashi MATSUOKA¹

¹東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系
Department of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology

During the 2016 Kumamoto earthquakes, the JMA seismic intensity 7 was observed at Mashiki and Nishihara, and the events suffered serious damages. The institutions such as JMA and the NIED calculate the earthquake ground motion distribution individually using the strong motion records owned by each institution. However, based on all the strong motion observation records exhaustively, there is no result of calculating the earthquake ground motion distribution by using a unified methodology for the evaluation of site characteristics and the spatial Interpolation method of seismic motion. Therefore, in this report, we estimated the high-reliability strong motion distribution of the main shock by assenbling strong motion records of each institution.

Keywords : PGA, PGV, Seismic intensity, Response spectra, QuiQuake, the 2016 Kumamoto earthquake

1. はじめに

現在、気象庁は全国に設置された約 4,200 地点の地震計を用いて地震時の揺れを各地の震度として報告し、震度 5 弱以上を観測した地震については約 1 km メッシュの推計震度分布を公開している。また、産業技術総合研究所は防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の約 1,700 地点の強震観測網のデータを用いて、最大地表加速度 (PGA), 最大地表速度 (PGV), 計測震度 (INT), 5%減衰の絶対加速度応答スペクトル (Sa) 等を 250 m メッシュで公開し¹⁾, さらに防災科学技術研究所は人口分布と重畳することで、震度暴露人口等を提供している²⁾。2016 年 4 月に発生した熊本地震においても地震動分布が公開されている。しかし、各機関がそれぞれ所有する

強震観測点の記録を用いて個別に地震動分布を計算しており、入手可能なすべての強震観測点を網羅的に用いて、かつ、地盤増幅特性の評価や地震動の空間補間手法について統一的方法で地震動分布を計算した例はない。そこで、本報では、各機関の強震観測記録を統合し、熊本地震本震における信頼性の高い地震動分布を推定した。

2. 地震動分布の計算方法

(1) 概要

地震動分布の計算は産業技術総合研究所の QuiQuake¹⁾ を踏襲する。図 1 に QuiQuake の概略図を示す。なお、本報は、PGA, PGV の値を水平 2 成分合成の最大値から求める点や、地震動強さの距離減衰の評価を、震源距

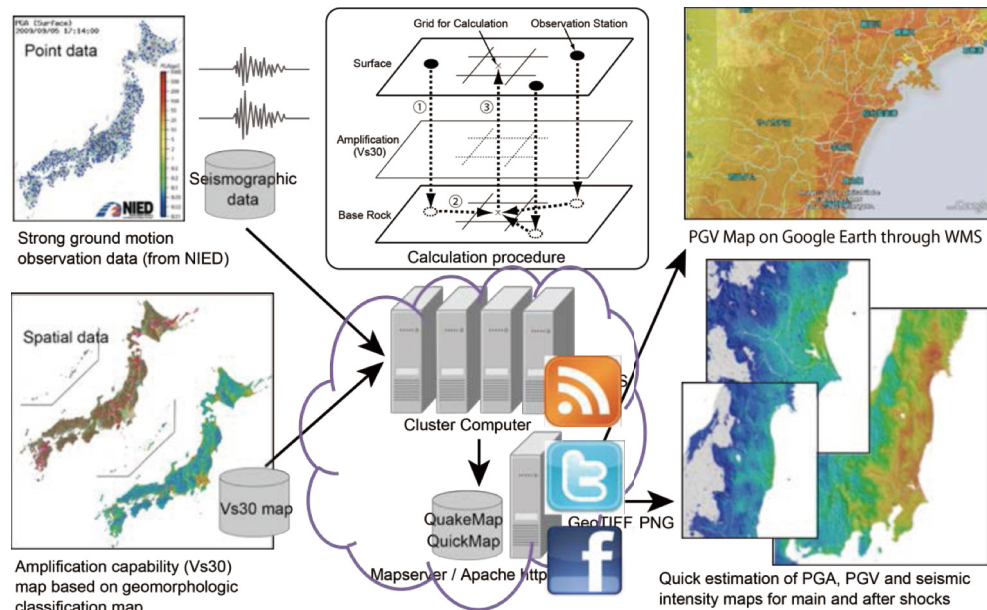


図 1 QuiQuake¹⁾の概要

離ではなく、地震断層からの最短距離を用いている点が QuiQuake とは異なる。

地震動分布の推定手順について、まず強震観測記録から地震動指標 (PGA , PGV , INT , Sa) を計算する。 PGA , PGV , Sa は 2 成分合成値の最大値である。これらの値は地震計が設置されている表層地盤の増幅の影響を受けているため、ここでは、地形・地盤分類 250 m メッシュマップから求まる地盤の平均 S 波速度 ($Vs30$)³⁾ を介して各地震動指標の増幅度を推定し⁴⁾⁶⁾、硬質地盤 ($Vs30$ が 600 m/s 相当) での地震動指標を推定した。そして、硬質地盤での地震動推定は、地震断層からの距離減衰特性をトレンド成分とした Simple Kriging (指数型の共分散モデル、相関距離は 10 km) による空間補間により行う。 PGA , PGV , INT については観測記録に基づいて構築した距離減衰式を用い、 Sa については既往の距離減衰式⁷⁾ を用いている。そして、硬質地盤上における地震動指標に 250 m メッシュ単位にて地盤の増幅度を乗じることで地表の地震動分布が得られる。

(2) 地盤増幅度の非線形の考慮

熊本地震では、震源域で震度 7 を観測するなど地盤の非線形化が無視できない。QuiQuake¹⁾ は地盤の非線形化についてを疑似有効ひずみに依存して増幅度を低減する方法を用いている。その考え方を以降に示す。

単純な 2 層地盤における表層地盤の有効ひずみ γ_{eff} は地表の PGV から概略的に推定でき⁸⁾、 V_0 を表層地盤の S 波速度とした時に式(1)で推定できる⁹⁾。

$$\gamma_{eff} = 0.4 PGV / V_0 \quad (1)$$

そして、表層地盤の $Vs30$ を用いて式(2)で表される疑似有効ひずみ γ'_{eff} は、非線形性状の変数として PGA , PGV , Sa の増幅度の低減評価に用いられている。

$$\gamma'_{eff} = 0.4 PGV / Vs30 \quad (2)$$

例えば、山口・翠川¹⁰⁾ は近年の多数の強震記録を用いて γ'_{eff} と応答スペクトルを含む各種の地震動指標の増幅度の関係について検討し、 γ'_{eff} が 3.0×10^{-4} を超えると地盤の非線形化が起こり始めることを明らかにしている。 γ'_{eff} が大きくなるに従い短周期においてとくに増幅が低減する。

具体的な計算方法は次のとおりである。観測記録の PGV と $Vs30$ から γ'_{eff} を算出し、 3.0×10^{-4} を超えていれば非線形化しているとみなして、低減化した増幅率で PGA , PGV , Sa の値を硬質地盤に戻す。硬質地盤での地震動には非線形性は含まれない。なお、 INT については非線形を考慮していない。そして、硬質地盤上で空間補間により地震動分布を計算する。その後、各種地震動指標に線形の増幅率をかけて地表での地震動を計算する。ここで得られた線形の PGV_0 から暫定的に $\gamma'_{eff-tmp}$ を算出し、 3.0×10^{-4} 以下であれば線形とみなして、 $\gamma'_{eff-tmp} = \gamma'_{eff}$ として各地震動指標値の計算は終了する。一方、 $\gamma'_{eff-tmp}$ が 3.0×10^{-4} を超えた場合には非線形化したとみなして、 PGV_0 と $Vs30$ から $\gamma'_{eff-tmp}$ を再推定して増幅率の低減分を考慮した値に各地震動指標値を補正する。この手順により地盤の非線形を考慮した PGA , PGV , INT , Sa が計算できる。

3. 熊本地震の地震動分布

熊本地震の本震 (2016 年 4 月 16 日) の被災地域における地震動分布を高精度に推定する目的で、QuiQuake で利用している K-NET, KiK-net の強震観測記録 (698 地点) に加えて、気象庁の観測記録 (316 地点)、気象庁から公開されている自治体の観測記録 (111 地点)、さらに、西部ガスが設置している地震計の観測記録 (16 地点) を収集した。これにより、観測地点数は QuiQuake よりも 443 地点増加している。熊本県を含む範囲 (北緯: $32^\circ 5' 30'' \sim 33^\circ 12' 00''$, 東経: $130^\circ 21' 00'' \sim 131^\circ 20' 00''$) においては、QuiQuake が 36 地点なのに対し、本報では 133 地点に増えている。

2 章で述べた計算手法に従い、地盤の非線形増幅を考慮した地震動分布を計算した。地震断層は国土地理院の断層モデル¹¹⁾を用いた。図 2 に推定した震度 (INT) 分布を示す。益城町から西原村、南阿蘇村、阿蘇市にかけて震度 7 の範囲が広く分布する。震度 6 強の範囲は震度 7 の範囲を包含するだけでなく、その北部にも広く分布している。図 3 には益城町中心部と熊本市東区の一部を拡大したものを示す。益城町の多くの住宅は震度 7 の揺れに見舞われたことがわかる。

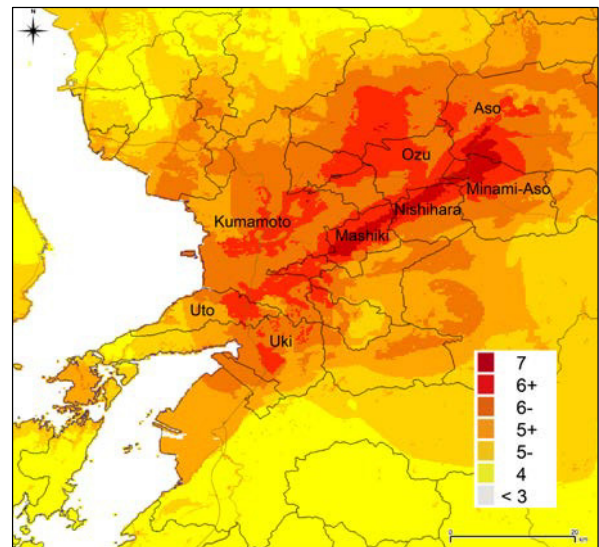


図 2 熊本地震本震の震度分布

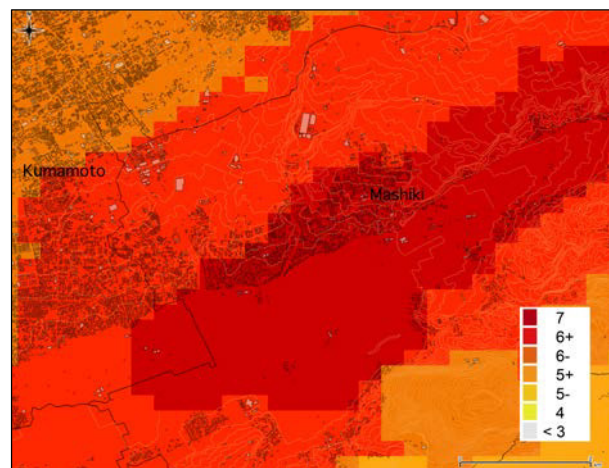


図 3 熊本地震本震の震度分布 (益城町の拡大図)

益城町の中心部について、より詳細に地震動指標値の分布を考察するために、北東から南西に測線を引き（図4参照）、測線上の10点におけるPGA, PGV, INTの値を250mメッシュから抽出した。防災科学技術研究所のKiK-net観測点（KMMH16）は地点3の近く、気象庁（自治体）の観測点（益城町J93051）は地点5と6の間に位置している。

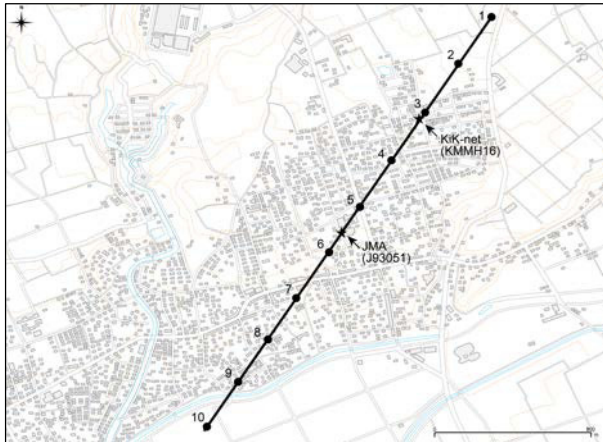


図4 益城町中心部と測線

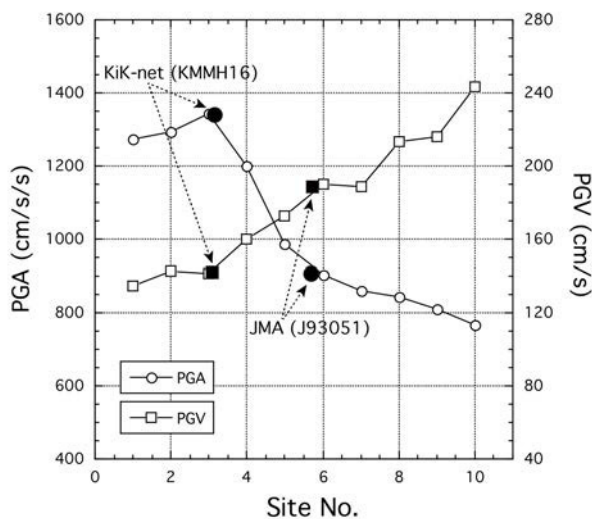


図5 測線におけるPGAとPGVの値

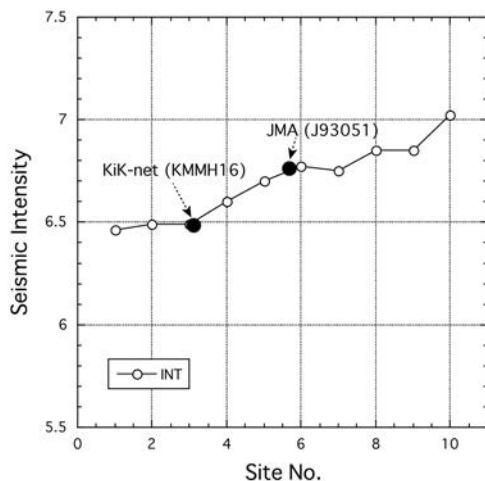


図6 測線における震度 (INT) の値

図5に測線におけるPGAとPGVの値を示す。図中、黒丸と黒四角のシンボルは上記の2つの観測点での値であり、測線での値と対応する。地震動分布の計算結果が妥当であることを示している。PGAは、地点1から地点10にかけて（北東から南西にかけて）値が減少しているのに対し、PGVは増加していく傾向がみられる。これは、地盤の非線形性によりPGAの増幅が軽減されたことが原因と考えられる。図6に測線における震度 (INT) の値を示す。PGVと同様に地点1から地点10にかけて値が増加していく傾向がみられる。地点1から地点3までは震度6強、地点4から地点10までは震度7相当になる。

図7には測線における5%減衰の絶対加速度応答スペクトル (Sa) を示す。どの地点でも周期0.2秒と1秒付近にピークがみられるが、周期0.2秒のピークについては地点1から地点10にかけてSaの値が減少しているのに対して、周期1秒のピークについては値が増加している。PGAと同様に、短周期においては地盤の非線形性による増幅度の低減が大きい。また、地点6から地点9にかけて1秒付近のピークが長周期化していることがわかる。

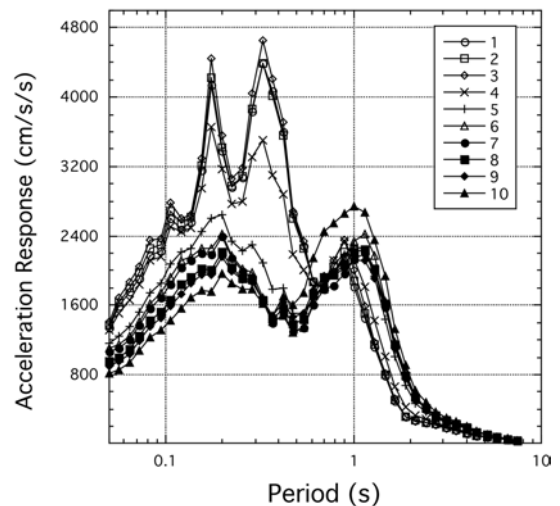


図7 測線における絶対加速度応答スペクトル (Sa)

4. まとめ

2016年4月16日の熊本地震の本震を対象に、強震観測記録を多数収集して、QuiQuakeが採用している計算手法を踏襲することで被災地における地震動分布を推定した。その結果、益城町中心部では多くの住宅が震度7相当の揺れに見舞われたが、最大地表加速度 (PGA) は $850 \text{ cm/s}^2 \sim 1,350 \text{ cm/s}^2$ 、最大地表速度 (PGV) は $130 \text{ cm/s} \sim 240 \text{ cm/s}$ と値にやや幅があった。また、短周期の地震動については、地盤の非線形性による増幅の低減がみられた。

謝辞

防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの強震観測記録、気象庁が公開している地震観測記録（自治体が設置している地震計を含む）を利用している。また、西部ガスからは熊本市にて設置している地震計の記録を提供いただいた。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Matsuoka, M. and Yamamoto, N.: Web-based Quick Estimation

- System of Strong Ground Motion Maps Using Engineering Geomorphologic Classification Map and Observed Seismic Records, Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering, PaperID:4016, 10p., 2012.
- 2) 防災科学技術研究所：J-RISQ地震速報，<http://www.j-risq.boSai.go.jp/report/>（2018年4月20日閲覧）
 - 3) Wakamatsu, K. and Matsuoka, M.: Nationwide 7.5-Arc-Second Japan Engineering Geomorphologic Classification Map and V_s30 Zoning, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.5, pp.904-911, 2013.
 - 4) 藤本一雄，翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係，日本地震工学会論文集，Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.
 - 5) 翠川三郎，駒澤真人，三浦弘之：横浜市高密度強震計ネットワークの記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係，日本地震工学会論文集，Vol.8, No.3, pp.19-30, 2008.
 - 6) 山口亮，翠川三郎：地盤の平均S波速度を用いた地盤増幅率の推定手法の改良，日本地震工学会論文集，Vol.11, No.3, pp.85-101, 2011.
 - 7) 内山泰生，翠川三郎：地震記録および非線形応答解析を用いた地盤分類別の地盤増幅率の評価，日本建築学会構造系論文集，No.571, pp.87-93, 2003.
 - 8) Tokimatsu, K., Midorikawa, S. and Yoshimi, Y.: Dynamic soil properties obtained from strong motion records, Proc. the 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, pp.2015-2018, 1989.
 - 9) 翠川三郎：強震時にみられる地盤特性の非線形性，地震，第2輯，Vol.46, pp.207-216, 1993.
 - 10) 山口亮，翠川三郎：観測記録に基づく地盤増幅率の非線形特性のモデル化，日本地震工学会論文集，Vol.14, No.1, pp.56-70, 2014.
 - 11) 国土地理院：平成28年4月16日の熊本県熊本地方の地震（Mj7.3）震源断層モデル（暫定），平成28年4月16日の熊本県熊本地方の地震の評価，地震調査研究推進本部，2016.