

地震動予測式を用いた九州地方の地震動に及ぼす火山領域の影響の評価

阿部 空弥

1. はじめに

地震動予測式とは、地震動の振幅を、地震のマグニチュードと震源からの距離などの数少ないパラメータとの関係式で表したものであり、地震動の強さを予測する手法の1つである。国内で開発された地震動予測式は、全国の観測点で得られたデータに対する回帰分析によって導出されているため、予測される地震動は全国の平均的なものとなる。しかし、地震動には地域性があるとの指摘もあることから、その利用には注意が必要である。

例えば、多数の火山が存在する地域の地盤は地震動の減衰が大きいことが指摘されており、これに対応するために、Zhaoらは、火山領域を設定し、地震動がそこを通過する際の水平距離を地震動予測式の説明変数の一つとして採用している^{1) 2) 3)}。九州にも活火山が多いため、九州地方の地震動の地域性として、この火山が影響することが想定される。

そこで本研究では、日本の地震動データを使用して開発された地震動予測式として Morikawa and Fujiwara (2013)⁴⁾を用い、その予測値と九州地方で観測された記録との偏差と、Zhaoらによる火山領域を伝播する距離の関係を分析することで、九州地方の地震動に及ぼす火山領域の影響について検討する。

2. 解析の概要

2.1. Morikawa and Fujiwara (2013) の概要

Morikawa and Fujiwara (2013)による地震動予測式(以降、MF13)が開発された際の条件は以下の通りであり、本研究で使用するデータはこれに準拠して選別した。

- ・ 目的変数は最大加速度 (PGA) と最大速度 (PGV)、周期 0~10 秒のうちの 47 周期の減衰 5% 加速度応答スペクトル。水平 2 成分の 2 乗和平方根の最大値。
- ・ モーメントマグニチュード (M_w) 5.5 以上、震源距離 200 km 以内。
- ・ 5 観測点以上の地表で記録が観測されている。
- ・ Kanno *et al.* (2006)⁵⁾による PGA の予測値が 10 cm/s^2 以上。

本研究では、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net 観測点を対象とし、少なくとも 5 つの九州の観測点で

の記録をもつ地震を対象とし、予測値を求める際の断層最短距離は、1997 年 3 月および 5 月の鹿児島県北西部地震、2005 年福岡県西方沖の地震、2016 年熊本地震の前震および本震の 5 つの地震は、それぞれ断層モデル^{6) 7) 8)}を仮定して断層最短距離を求めたが、その他の地震については震源距離で代用した。

2.2. Morikawa and Fujiwara (2013) の補正項の概要

MF13 は、地震動予測式の開発に際して、予測結果の精度向上のため深部地盤構造、浅部地盤構造、異常震域による補正項をそれぞれ設定している。これらの補正項は PGA が 100 cm/s^2 以下の観測記録から導出されており、さらに、異常震域による補正項は震源深さが 30 km 以深の地震から、残りの補正項については震源深さ 30 km 以浅の地震から導出されている。

深部地盤構造による補正項に使用する S 波速度 1400 m/s 層の上面深度 (D_{1400}) の値は、J-SHIS⁹⁾の深部地盤構造モデルから取得した。浅部地盤構造による補正項に使用する表層から深さ 30 m までの平均 S 波速度 (AVS_{30}) の値は、PS 検層結果から取得した。30 m までの速度構造が得られていない観測点については、表層から深さ 20 m までの平均 S 波速度 (AVS_{20}) が求まる地点については式(1)に示す AVS_{30} と AVS_{20} の換算式⁹⁾を利用し、地盤情報が 20 m 未満の観測点は J-SHIS の表層地盤情報から AVS_{30} の値を取得した。

$$AVS_{30} = 1.13AVS_{20} + 19.5 \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

異常震域現象に対応するための補正項に使用する火山フロントからの距離 (X_{vf} : km) の値は、森川・ほか (2006)¹⁰⁾による火山フロントの位置を用いて算出した。

2.3. 解析に用いる地震データ

本研究では、K-NET および KiK-net¹¹⁾で観測されたデータのうち、瀬戸 (2021)¹²⁾における Morikawa and Fujiwara (2013)に用いた地震動データベースを参照した。図 1、表 1 は解析に用いた 45 地震、223 観測点 (データ数 2603) の分布である。

2.4. 解析に使用する火山距離の概要

Zhaoらによる火山領域は、火山距離を震央と観測点を結んだ震央距離のうち、火山領域内を通過する水平距離 (x^v : 火山距離 km) と定義される (図 2)。ここ

では、火山領域を通過する正確な傾斜距離を計算するには、詳細な火山領域境界モデルが必要であるが入手が困難なため、近似的な距離指標として水平距離を用いている。

2.5. 火山距離と予測値の関係の評価方法

本研究では、解析に用いた全データのうち、Zhaoらによって定義された火山領域のうち、図1に示す九州地方での火山領域を通過するすべての観測データ（1821データ）について、MF13による予測値と、観測値の常用対数をとった値との差による偏差を、PGAおよびPGV、加速度応答スペクトルの周期0.2秒、0.5秒、1.0秒、2.0秒、5.0秒について求め、地震タイプや M_w 、震源深さ毎に、火山距離への依存性について検討した。

3. 解析結果

3.1 地震タイプ毎の特性

図3に火山領域を通過する全ての観測データにおける地震タイプ、 M_w 、震源深さで分類した震央分布と火山領域の位置関係を、図4に、火山領域を通過する全ての観測データにおける、地震タイプ別のPGAとPGVの x^p と偏差の関係を一例としてそれぞれ示す。地殻内地震、プレート境界地震では、データ数の多い $10 \leq x^p \leq 100$ kmでは、 x^p が長くなるほど偏差が小さくなる。また、プレート境界地震の火山距離1 km未満においては観測記録が1つのみであり、各区間における偏差の平均値から火山距離の影響を考慮する際には検討の

対象外とした。なお、スラブ内地震においては、火山距離の偏差への顕著な影響は見られず、平均値も0付近にまとまっている。

3.2 偏差に対する各パラメータの依存性

図5に、地震タイプおよび M_w 別の、PGAとPGVの火山距離と偏差の関係を示した一例をそれぞれ示す。なお M_w の区分けは、 $5.5 \leq M_w < 6.5$ 、 $6.5 \leq M_w < 7.5$ の2区間に分けた。プレート境界地震では $6.5 \leq M_w < 7.5$ の地震で偏差が正の値となる場合が多く、スラブ内地震では反対に負の値となる場合が多い。しかし、図3に示す通りこれらは一つの地震から得られたものであり、一概に地震タイプと M_w との間に依存性が見られると断定することは難しい。

また、図6に、地震タイプおよび震源深さ別の、PGAとPGVの火山距離と偏差の関係を一例としてそれぞれ示す。なお震源深さ(d : km)の区分けは、 $0 < d \leq 10$ 、 $10 < d \leq 30$ 、 $30 < d \leq 50$ 、 $50 < d \leq 100$ 、 $d > 100$ の5区間とした。偏差のばらつきに対しての震源深さ毎の特徴は特には見られないが、スラブ内地震における火山距離が1 km前後の記録において、偏差の低い位置に震源深さが100 kmより深い地震の記録が見られる。この観測記録は図3から、火山領域内で発生している地震から得られた記録だと分かる。よって、この記録の偏差の低下には、水平距離で定義された火山距離が実際に火山領域を通過する距離に比べて極端に小さいことが原因だと考えられる。

表1 解析に用いた地震データ
(地震タイプは、1：地殻内地震、2：プレート境界地震、3：スラブ内地震をそれぞれ表す)

No.	発生日時	M_w	震源位置			地震タイプ	No.	発生日時	M_w	震源位置			地震タイプ
			北緯	東経	深さ(km)					北緯	東経	深さ(km)	
1	2019/5/15/14:24	5.7	29.743	130.685	36	2	24	2009/09/03/22:26	6.2	31.126	130.301	166.69	3
2	2019/05/10/08:48	6.2	31.8	131.973	25	2	25	2009/04/05/18:36	5.8	31.929	131.894	27.95	2
3	2019/05/10/07:43	5.6	31.785	131.992	25	2	26	2008/07/08/16:42	6	27.465	128.547	45.14	2
4	2019/01/08/21:39	6.3	30.573	131.165	30.05	2	27	2007/04/21/04:38	5.6	27.439	128.605	41.67	2
5	2018/06/12/04:54	5.5	31.189	131.56	28.11	2	28	2006/12/11/00:28	5.8	29.726	130.681	53.68	2
6	2017/04/29/21:32	5.7	30.778	131.483	43.82	3	29	2006/06/12/05:01	6.4	33.135	131.436	145.17	3
7	2016/09/26/14:20	5.6	27.429	128.621	44.28	2	30	2006/03/27/11:50	5.5	32.602	132.157	34.76	2
8	2016/04/18/20:42	5.5	33.002	131.2	8.64	1	31	2005/12/04/01:10	5.9	29.214	130.439	68.76	3
9	2016/04/16/03:55	5.5	33.027	131.191	10.89	1	32	2005/11/22/00:36	6.2	30.947	130.337	145.69	3
10	2016/04/16/03:03	5.5	32.964	131.087	6.89	1	33	2005/05/31/11:04	5.7	31.306	131.545	28.63	2
11	2016/04/16/01:46	5.7	32.863	130.899	10.55	1	34	2005/03/20/10:53	6.6	33.739	130.176	9.24	1
12	2016/04/16/01:25	7.1	32.755	130.763	12.45	1	35	2002/11/04/13:36	5.7	32.413	131.87	35.19	2
13	2016/04/15/00:03	6	32.701	130.778	6.71	1	36	2001/12/09/05:29	6.1	28.25	129.489	36	3
14	2016/04/14/21:26	6.1	32.742	130.809	11.39	1	37	2001/04/25/23:40	5.7	32.799	132.339	39.3	3
15	2015/07/13/02:52	5.5	32.993	131.855	58.04	3	38	2001/03/24/15:28	6.8	34.132	132.694	46.46	2
16	2014/10/22/09:15	5.7	27.442	128.57	50.56	2	39	2000/06/25/15:34	6	31.043	131.631	35.99	2
17	2014/08/29/04:14	5.8	32.141	132.146	18.18	2	40	1999/01/24/09:37	6.5	30.569	131.29	39.97	3
18	2014/03/14/02:07	6.3	33.692	131.891	78.04	3	41	1998/12/16/09:18	6.1	31.301	131.589	24.13	2
19	2013/03/11/18:34	5.5	31.575	131.858	24.52	2	42	1998/05/23/04:49	5.5	33.704	131.842	85.57	3
20	2012/07/10/04:25	5.5	29.327	130.228	50.64	2	43	1997/06/25/18:50	5.8	34.442	131.667	8.29	1
21	2011/04/09/21:58	5.8	30.016	131.839	61.6	3	44	1997/05/13/14:38	6	31.948	130.303	9.24	1
22	2010/01/25/16:15	5.5	30.874	131.151	48.65	3	45	1997/03/26/17:31	6.1	31.973	130.359	11.85	1
23	2009/10/30/16:03	6.7	29.167	129.937	60.25	2							

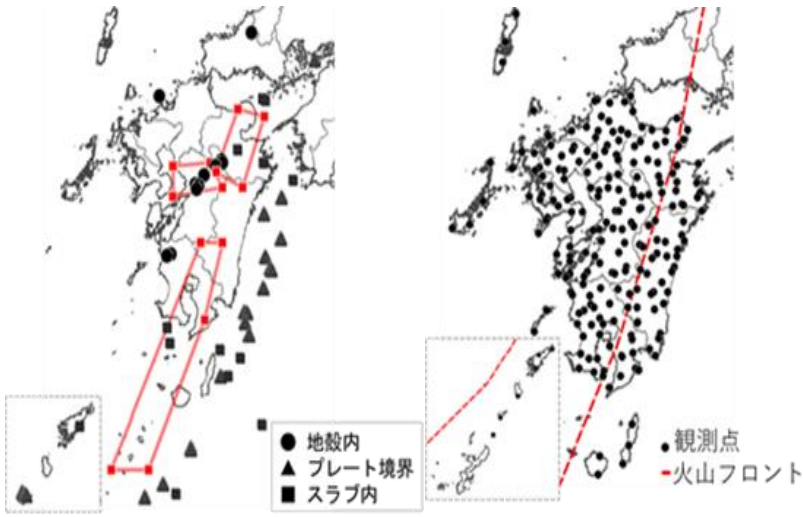


図1 震央分布と火山領域（左）と観測点分布と火山フロント（右）

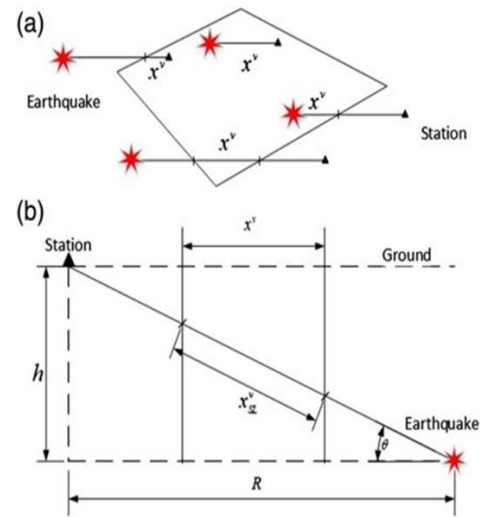


図2 Zhao による火山距離の定義

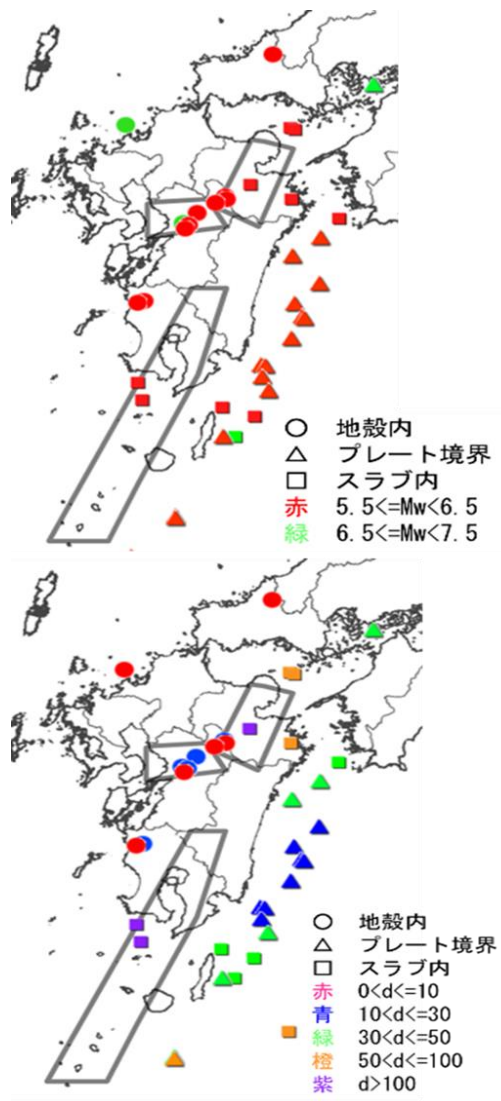


図3 地震タイプ・ M_w ・震源深さ毎の震央分布と火山領域

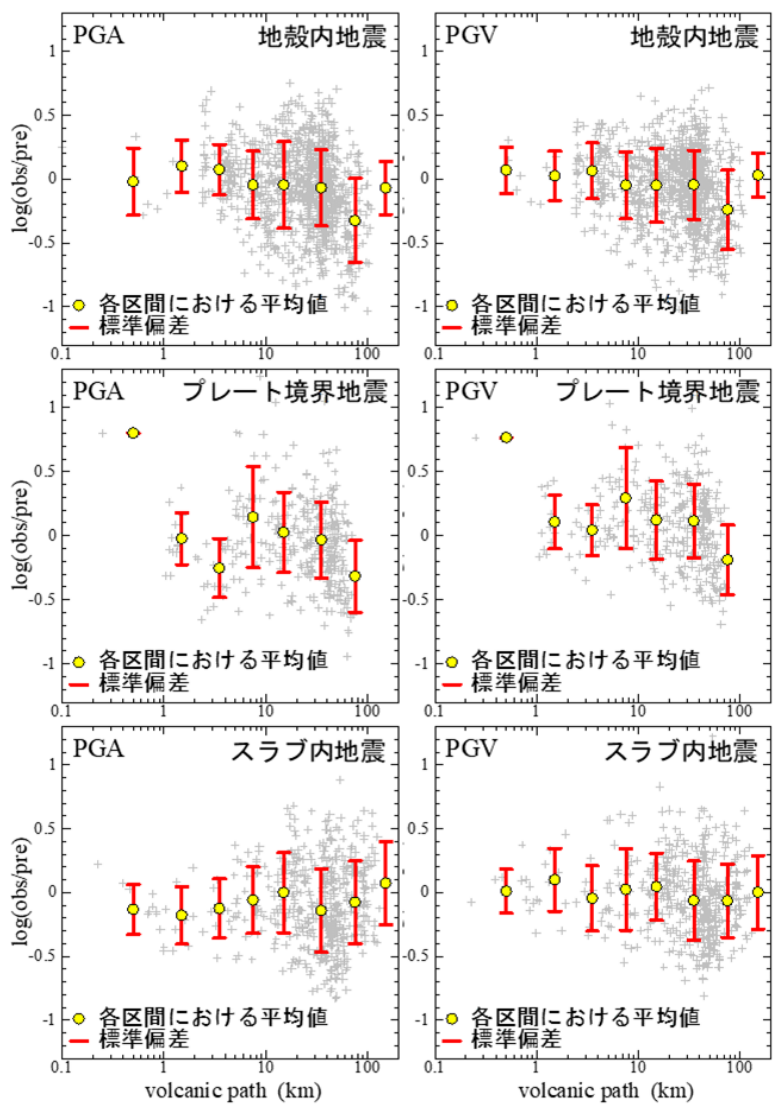


図4 地震タイプ毎のPGAとPGVにおける偏差と火山距離の関係（上から地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震）

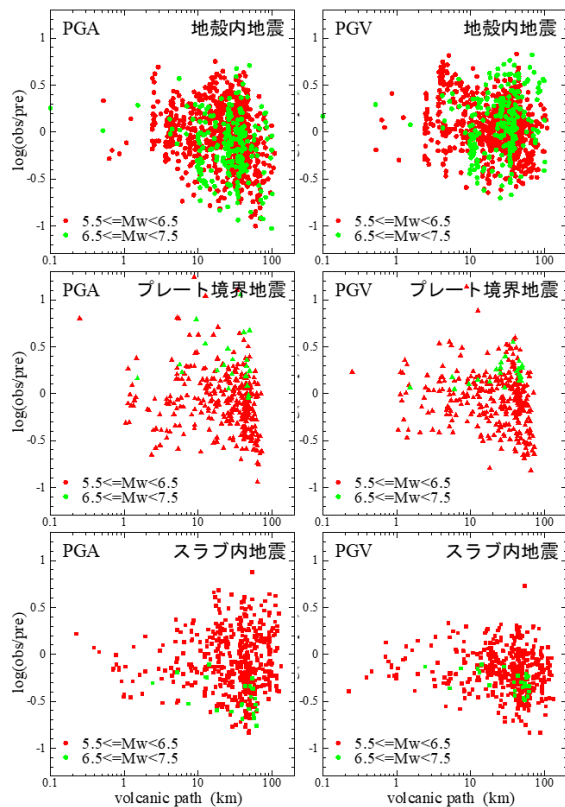


図5 M_w 毎のPGAとPGVにおける偏差と火山距離の関係 (上から地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震)

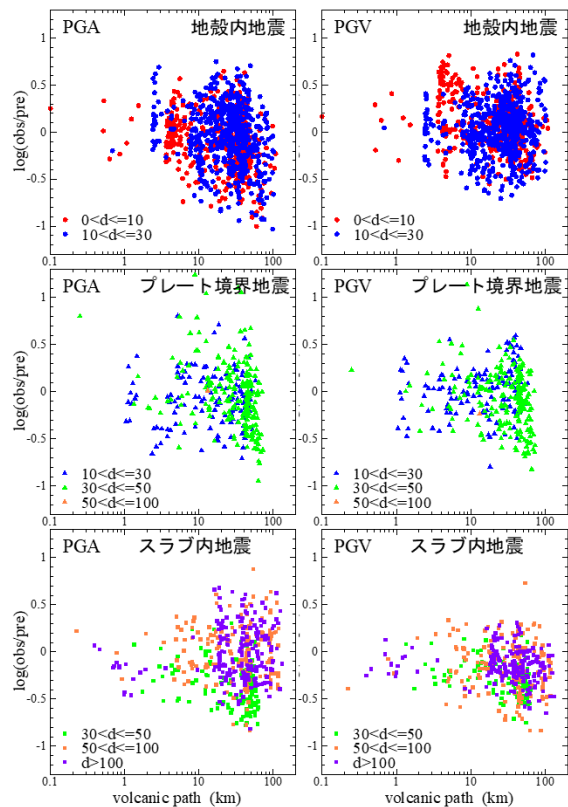


図6 震源深さ毎のPGAとPGVにおける偏差と火山距離の関係 (地震タイプは左図と同様)

4. まとめ

本研究では、Morikawa and Fujiwara (2013)による地震動予測式の予測値と観測値の偏差と、Zhaoらにおいて設定された火山領域を伝播する距離の関係を分析した。その結果、地殻内地震、プレート境界地震では、データ数の多い $10 \leq x^v \leq 100$ では x^v が長くなるほど偏差の減衰傾向が見られた。また、スラブ内地震においては、 x^v による偏差への顕著な影響は見られず、平均値も 0 付近に集まっていた。また、地震タイプ毎に、 M_w 、震源深さそれぞれを区分けした解析では、今回の研究では目立った傾向は見られなかった。したがって MF13 の予測値において、予測精度の向上には火山距離に応じた増幅補正が有効である。また、MF13 では異常震域による補正項の適用対象外となる震源深さ 30 km 以浅の地震についても、火山距離の影響が有意であった点は今後の新たな地震動予測式の開発において更に検討するべきだと考える。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net、J-SHIS のデータを、図面の一部に国土地理院¹³⁾の図面を使用した。記して感謝の意を表す。

参考文献

1) Zhao, J., X. Liang, F. Jiang, H. Xing, M. Zhu, R. Hou, Y. Zhang, X. Lan, D. A. Rhoades, K. Irikura, Y. Fukushima and P. G. Somerville: Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Interface Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 106, No. 4, pp. 1518-1534, 2016.

2) Zhao, J., F. Jiang, P. Shi, H. Xing, H. Huang, R. Hou, Y. Zhang, P. Yu, X. Lan, D. A. Rhoades, P. G. Somerville, K. Irikura and Y. Fukushima: Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Slab Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 106, No. 4, pp. 1535-1551, 2016.

3) Zhao, J., S. Zhou, J. Zhou, C. Zhao, H. Zhang, Y. Zhang, P. Gao, X. Lan, D. A. Rhoades, Y. Fukushima, P. G. Somerville, and K. Irikura: Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 106, No. 4, pp. 1552-1569, 2016.

4) Nobuyuki Morikawa and Hiroyuki Fujiwara: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, J. Disaster Res., Vol. 8, No. 5, pp. 878-888, 2013.

5) Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara and Y. Fukushima: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 96, pp. 879-897, 2006.

6) Haruo Horikawa: Earthquake doublet in Kagoshima, Japan: Rupture of asperities in a stress shadow, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 91, pp. 112-127, 2001.

7) Kimiyuki Asano and Tomotaka Iwata: Source process and near-source ground motions of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, Earth Planet Space, Vol. 58, pp. 93-98, 2006.

8) Kimiyuki Asano and Tomotaka Iwata: Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, Earth Planet Space, 68, 147, 2016.

9) 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション、<https://doi.org/10.17598/nied.0010>, 2019.

10) 森川信之・神野達夫・成田章・藤原広行・福島美光: 西南日本の異常震域に対応するための距離減衰式補正係数、日本地震学会秋季大会講演予稿集, pp. 134, 2006.

11) 防災科学研究所: 強震観測網 K-net, KiK-net、<https://doi.org/10.17598/NIED.0004>, 2019.

12) 瀬戸凌也: 地震動予測式を用いた九州地方の地震動特性の評価、九州大学卒業論文, 2021.

13) 国土地理院: 白地図、<https://maps.gsi.go.jp/> (参照 2022 年 1 月 15 日)