

強震動と津波避難に関するハイブリッド評価手法 の琵琶湖・竹生島への適用

Application of hybrid evaluation between strong motion prediction
and tsunami evacuation for Chikubu Island, Lake Biwa, Shiga Prefecture, Japan

○山田桂吾¹, 秦吉弥², 荒木進歩², 山内政輝²
Keigo YAMADA¹, Yoshiya HATA², Susumu ARAKI² and Masaki YAMAUCHI²

¹ 大阪大学 工学部

School of Engineering, Osaka University

² 大阪大学 大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

Chikubu Island in Lake Biwa, Shiga Prefecture, Japan is a manned detached island for temporary tourism. In recent years, occurrence of *Biwako Tsunami* are concerned based on the damage experiment induced by the historical earthquakes such as the 1662 West Coast of Lake Biwa Earthquake with M 7.5. It is important to extract the difficult zone for the evacuation in Chikubu Island by *Biwako Tsunami*. In this study, strong motion prediction was carried out in order to evaluate the difficult time for tsunami evacuation. Walking experiment was also performed to evaluate the required time to the original evacuation facilities. Finally, hybrid evaluation based on these two times for extraction of the difficult zone against *Biwako Tsunami* in coastal area of Chikubu Island.

Keywords: strong motion, walking experiment, time management, hybrid evaluation, *Biwako Tsunami*

1. はじめに

我が国における津波避難困難区域の評価は、太平洋沿岸や日本海沿岸に主眼が置かれており、湖を対象とした検討^{1),2),3)}は殆ど実施されていない。しかしながら、滋賀県の琵琶湖沿岸の遺跡^{4),5)}では、平安時代後期の神社跡から見つかった柱が様に湖面とは逆の方角に傾いていたことが近年明らかになっており、元暦二年(1185年)八月に発生した大規模地震によって琵琶湖で津波が発生し、湖岸に波が押し寄せた可能性が指摘されている。さらに、琵琶湖津波については、方丈記などの古典文献においてもその発生について記載が残されている。一方で、琵琶湖周辺には非常に数多くの活断層が存在し(図-1 参照)、各々の活断層地震による琵琶湖津波の発生に伴う津波来襲時間などに関する基礎的な検討⁶⁾がなされている。津波避難困難区域の評価を行う上では、津波来襲時間のほかに強震動作用中の避難困難時間⁷⁾や強震動作用後の避難所要時間⁸⁾などをそれぞれ評価する必要がある。

この点に関して著者ほか⁹⁾は、湖上に浮かぶ我が国唯一の有人離島である琵琶湖・沖島(図-1 参照)を対象に、避難困難区域の抽出を試みている。一方で、琵琶湖には、沖島のほかに有人離島ではないものの、定期的にはほぼ毎日、環境客が日中に渡航する竹生島(図-1 参照)が存在する。本稿では、観光客が立ち入り可能な竹生島の沿岸域を対象に、強震動予測と歩行実験に関するハイブリッド評価を施すことで、琵琶湖津波に対する避難区域の抽出を試みた結果について報告する。

2. 避難困難時間の評価

著者ほか¹⁰⁾は、竹生島の沿岸域において常時微動計測を高密度に行い(図-2 および写真-1 参照)、得られた計測記録に基づき、沿岸域におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)を図-3 に示すように評価している。一方で、図-4

および表-1 は、竹生島に最も大きな影響を及ぼすと考えられる西岸湖底断層系(北部)による断層モデル(特性化震源モデル)とそのモデルパラメータの一覧である。ここに、アスペリティの配置やパラメータは、現行の港湾基準¹¹⁾や沖島を対象とした既往研究^{12),13)}などを参考に設定した。

本稿では、構築した西岸湖底断層系(北部)による想定地震の断層モデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法¹⁴⁾の組合せを用いて、竹生島における想定地震時の地震動を推定した。強震波形計算手法では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{o(f)}{|o(f)|_p} \quad (1)$$

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフー

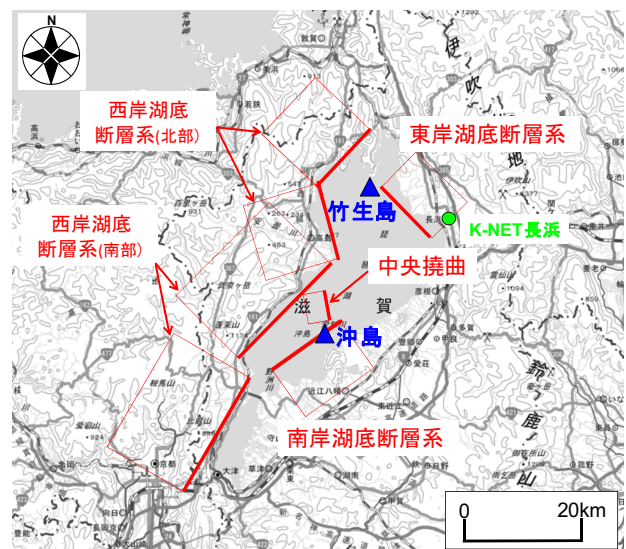


図-1 竹生島周辺の内陸地殻内断層の分布



写真-1 竹生島観光地域での常時微動計測状況の一例

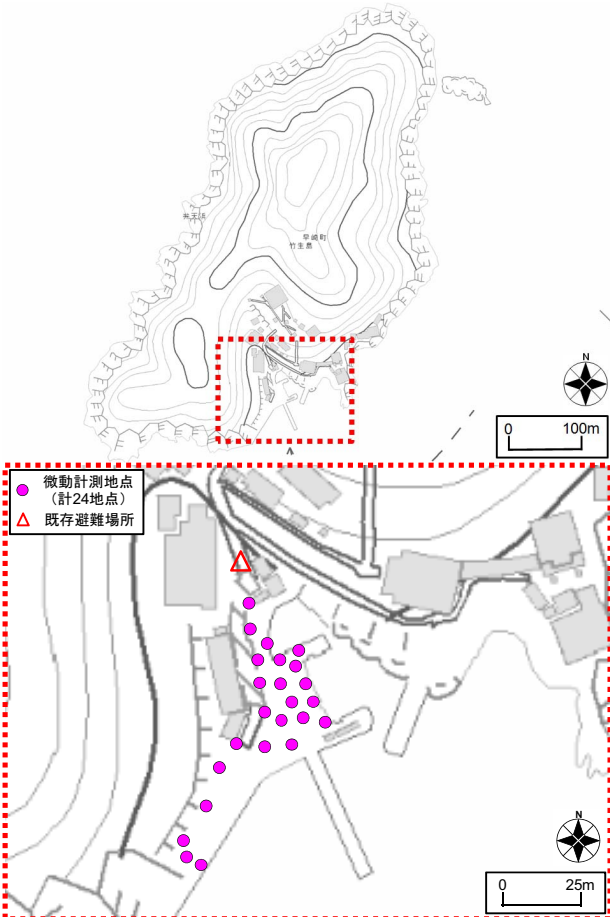


図-2 琵琶湖・竹生島概観(上)と、観光地域での高密度常時微動計測地点の分布(下)

リエ変換で複素数, $S(f)$ は中小地震の震源特性¹⁵⁾で実数, $P(f)$ は伝播経路特性¹⁶⁾で実数, $G(f)$ は地震基盤～地表相当のサイト増幅特性(図-3 参照)で実数, $O(f)$ は中小地震観測記録(後述)のフーリエ変換で複素数, $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅 0.05Hz の Parzen Window を適用したものである。式(1)に示すとおり, 本手法では, 統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め, 統計的グリーン関数のフーリエ位相としては現地でも得られた地震記録のフーリエ位相を用いる。式(1)をフーリエ逆変換し, 経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせを行うことで, 大地震に

表-1 港湾基準(2007)に基づき設定した西岸湖底断層系(北部)による断層モデルパラメータの一覧

	Asperity-1	Asperity-2
走向(deg.)	164	224
傾斜(deg.)	45	45
地震モーメント(dyne·cm)	1.50×10^{25}	1.50×10^{25}
アスペリティの長さ(km)	7.2	7.2
アスペリティの幅(km)	7.2	7.2
ライズタイム(s)	0.74	0.74
分割数	10×10×10	10×10×10
破壊開始点の位置	N_ 35.348	N_ 35.484
	E 135.972	E 135.978
破壊開始点の深さ(km)	8.9	8.9
Q 値	$180 \times f^{0.7}$	
密度(kg/m ³)	2.7×10^3	
せん断波速度(km/s)	3.4	
破壊伝播速度(km/s)	2.4	

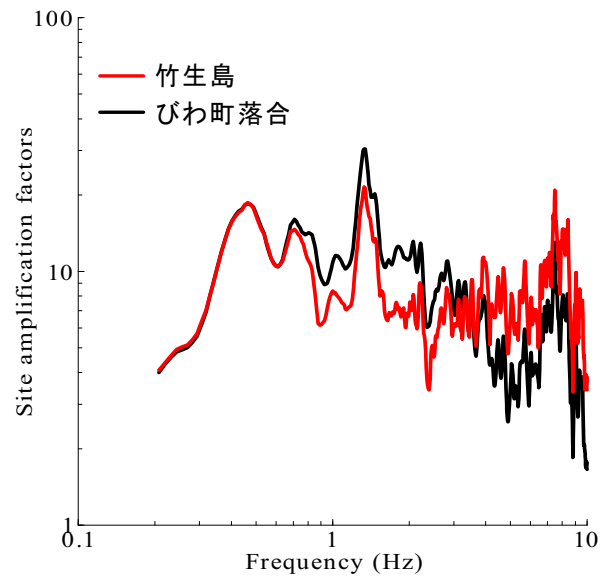


図-3 竹生島の観光地域におけるサイト増幅特性

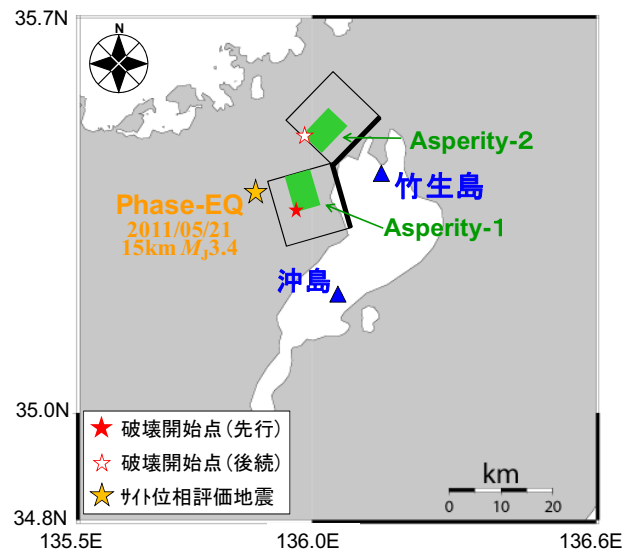


図-4 西岸湖底断層系(北部)による特性化震源モデル

よる波形が求まる。なお, Parzen Window(添字 p)は因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている¹⁴⁾。なお, 竹生島では地震観測を行っていないため, 想定

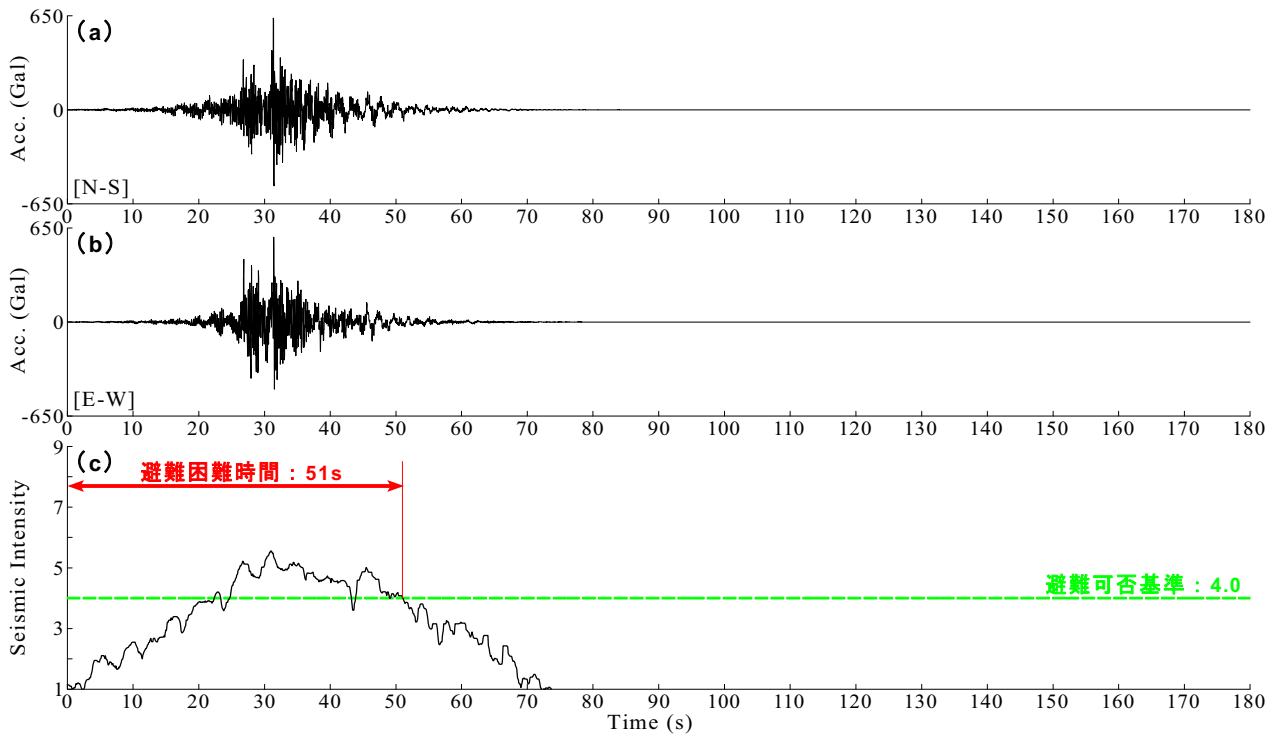


図-5 西岸湖底断層系(北部)による想定地震に対する竹生島での予測地震動(上・中)と、瞬間計測震度の時刻歴(下)



写真-2 竹生島観光地域での歩行実験実施状況の一例

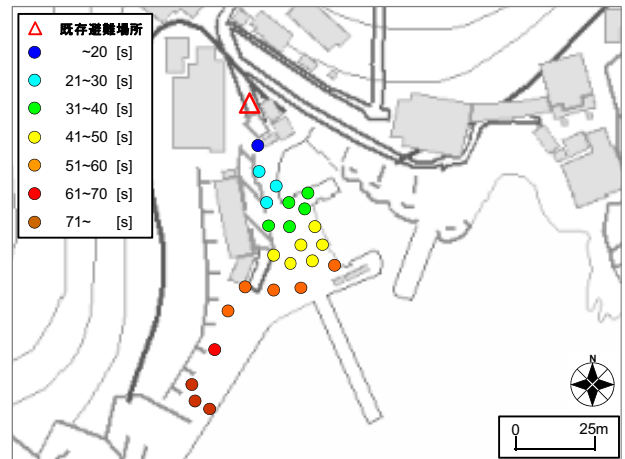


図-6 竹生島観光地域における避難所要時間

地震の断層内を震源とする中小地震による記録は得られていない。そこで上記 $O(f)$ の取り扱いとして、想定断層近くに震源を有する地震 (Phase-EQ : 図-3 参照) によって K-NET 長浜 (図-2 参照)¹⁷⁾ で得られた記録を援用した。

図-5 の上段・中段は、想定地震における竹生島沿岸の観光地域での予測地震動(水平動)の加速度時刻歴である。図-5 の下段は、竹生島沿岸の観光地域における強震動作用中の避難困難時間である。避難困難時間は、予測地震動の加速度波形(図-5 の上段・中段参照)において瞬間計測震度(水平二成分合成)¹⁸⁾の時刻歴を計算し(図-5 の下段参照)、既往研究¹⁹⁾による知見を参考に、瞬間計測震度が 4.0 を最終的に下回るまでの連続時間とした。図-5 の下段に示すように、竹生島沿岸の観光地域における避難困難時間は、100 秒となっていることが読み取れる。

3. 避難所要時間および避難余裕時間の評価

竹生島沿岸の観光地域における常時微動計測地点(図-2 参照)から周辺の既存避難場所(図-2 参照)までに要する時間(避難所要時間)に関する歩行実験を行った。ここに、

歩行実験は先行研究⁸⁾と同様のアプローチを採用した。避難所要時間が比較的短くなる 22~25 歳(本稿の第二著者(当時 22 歳男性))を被験者として選定し、被験者が通常通りの歩行を行うことで平均的な歩行速度 60m/min が得られた。写真-2 に歩行実験状況の一例を示す。なお、この歩行速度(60m/min)は、土地勘のない被験者(観光客を想定)によって得られたものであり、津波避難想定で一般的に用いられる 78m/min²⁰⁾よりも若干遅いため、後述する避難余裕時間の評価において安全側の結果が得られていることを予め付記しておく。ただし、今後の課題の一つとして、歩行速度が更に遅くなる高齢者などの避難パターンの変異を追加していく必要がある。

図-6 は、竹生島沿岸の観光地域における避難所要時間の分布である。図-6 に示すように、観光地域における避難所要時間の分布に大きな違いが確認できる。

図-7 は、観光地域内における避難余裕時間の分布である。ここに、避難余裕時間は、想定地震による津波来襲予想時間(5 分)⁹⁾に対して、強震動作用中の避難困難時間(図-5 参照)と強震動作用後の避難所要時間(図-6 参照)を

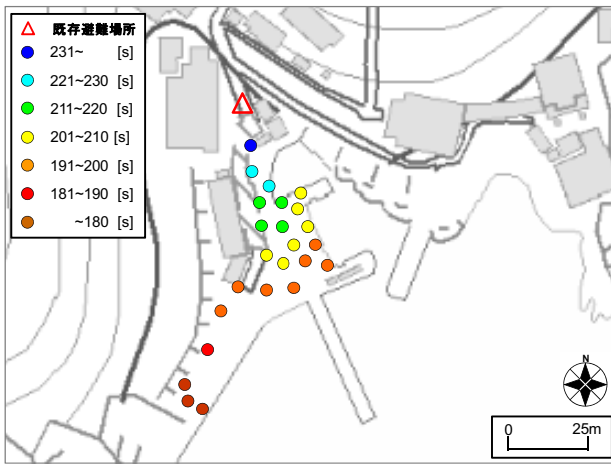


図-7 竹生島観光地域における避難余裕時間

差し引くことによって算定した。すなわち、避難余裕時間が正の値であれば避難に対して時間的余裕があるのに対し、避難余裕時間が負の値であれば避難に対して時間的余裕がないことを意味している。図-7 に示すように、観光地域における避難余裕時間の分布には明らかな差異があるものの、概ね正の値となっていることが読み取れる。この正の値による分布は、想定地震による地震動(揺れ)が収まった直後に、竹生島の高台などの既存施設への避難を開始すれば、琵琶湖津波による人的被害を免れる可能性が高いことを示唆するものである。

4. まとめ

本稿では、琵琶湖・竹生島沿岸の観光地域を対象に、強震動予測と歩行実験を実施し、その結果得られた、観光客が本来持ち合わせている持ち時間(得られた避難困難時間と避難所要時間)を、津波来襲時間からそれぞれ差し引くことによって、沿岸の観光地域における避難余裕時間を評価した。その結果、避難余裕時間の分布が概ね正の値を示すことから、強震動による強い揺れが収まった直後に、観光客が既存の高台に向かって避難を開始すれば、人的被害が免れる可能性が高いことがわかった。

謝辞：常時微動計測や臨時地震観測の実施にあたっては、竹生島の関係者の皆様などにお世話になりました。本研究の遂行にあたって、(一財)伊藤忠兵衛基金による研究助成の一部を使用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木猛康：2011年東北地方太平洋沖地震で発生した西湖のサイスミック・セイシュ、土木学会論文集 A1, Vol.68, No.4, pp.152-160, 2012.
- 2) 大平幸一郎, 柴山知也：長周期地震動による震源遠隔地での波の発生、土木学会論文集 B3, Vol.68, No.2, pp.155-59, 2012.
- 3) 原田昌武, 板寺一洋, 行竹洋平：2011年東北地方太平洋沖地震によって励起された芦ノ湖のセイシュ(静振)、神奈川県温泉地学研究所報告, Vol.46, pp.9-16, 2014.
- 4) 濱修：出土文字資料に近江古代史を求めて—付表「滋賀県下の発掘調査で検出した地震跡」—、(公財)滋賀県文化財保護協会紀要, 第30号, pp.18-25, 2017.
- 5) 濱修：地震考古学の発展に向けて、(公財)滋賀県文化財保護協会紀要, 第25号, pp.1-7, 2012.
- 6) 滋賀県防災危機管理局：湖底断層の変位を仮定した琵琶湖

- 琵琶湖における津波高さの考察(平成26年度報告書)、滋賀県防災ポータル HP, 14p, 2014.
- 7) 例えば、秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 鋏田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一：強震動作用中の津波避難困難時間に関する評価精度とその向上策—南海トラフ巨大地震における駿河湾沿岸域を対象として—、構造工学論文集, 土木学会, Vol.62A, pp.259-272, 2016.
- 8) 例えば、湊文博, 秦吉弥, 常田賢一, 鋏田泰子, 山田雅行, 魚谷真基：ウォーキング実験に基づく津波避難困難地域の評価—和歌山県串本町を例として—、地域安全学会秋季大会梗概集, No.35, pp.17-20, 2014.
- 9) 山田桂吾, 秦吉弥, 荒木進歩, 山田雅行, 山内政輝：琵琶湖・沖島における津波避難困難時間の評価を目的とした強震動予測, 第37回地震工学研究発表会講演論文集, Paper No.1083, 2017.
- 10) 山田桂吾, 秦吉弥, 荒木進歩, 山内政輝：琵琶湖に浮かぶ有人離島と琵琶湖を取り囲む既存強震観測点におけるサイト増幅特性の評価, 日本地震工学会第12回年次大会梗概集, Paper No.21, 2017.
- 11) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
- 12) 山田桂吾, 秦吉弥, 荒木進歩, 山内政輝：臨時地震観測に基づく琵琶湖・沖島における強震動予測とその応用, Kansai Geo-Symposium 2017 論文集, 地盤工学会, pp.139-144, 2017.
- 13) 秦吉弥, 山田雅行, 羽田浩二, 山田桂吾, 荒木進歩, 山内政輝：常時微動の高密度単点計測とアレイ計測に基づく琵琶湖・沖島における地盤震動特性に関する評価, Kansai Geo-Symposium 2017 論文集, 地盤工学会, pp.145-150, 2017.
- 14) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 15) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
- 16) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S. and Kagawa, T.: Estimation of Q -values in the seismogenic and aseismic layers in the Kinki Region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.4, pp.1498-1515, 2003.
- 17) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 18) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
- 19) 鋏田泰子, 齊藤栄：瞬間計測震度を用いた揺れ最中の避難行動可能時間の定量化, 日本地震工学会論文集, Vol.10, No.5, pp.52-65, 2010.
- 20) 国土交通省都市局 都市安全課・街路交通施設課：津波防災まちづくりの計画策定に係る指針(第一版), 日本都市計画学会・土木学会協力, 国土交通省ホームページ, 2013. <http://www.mlit.go.jp/common/001000488.pdf> (2017年10月4日閲覧)