

地域特性を考慮した津波避難困難区域の評価 —能登半島北方沖の想定地震による 石川県輪島市舳倉島を例として—

山内 政輝¹・秦 吉弥²・村田 晶³・楯田 泰子⁴・
小山 真紀⁵・中嶋 唯貴⁶・宮島 昌克⁷・常田 賢一⁸

¹学生会員 大阪大学 工学部 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: myamauchi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 大阪大学 准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 金沢大学 助教 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: murata@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 神戸大学 准教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

⁵正会員 岐阜大学 准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: maki_k@gifu-u.ac.jp

⁶正会員 北海道大学 助教 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: nakashima@eng.hokudai.ac.jp

⁷正会員 金沢大学 教授 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

⁸フェロー会員 (一財)土木研究センター 技術研究所 (〒300-2624 茨城県つくば市西沢2-2)

E-mail: tokida@pwrc.or.jp

石川県輪島市の北約50kmの日本海上に浮かぶ舳倉島は、能登半島北方沖の想定地震が発生した際、巨大津波の来襲により、島全体の浸水が予想されている。本稿では、まず、島内全域にわたり常時微動計測を高密度に実施し、得られた記録に基づき地盤震動特性を評価した。次に、評価した地盤震動特性とアスペリティモデルを組合せた強震波形計算を実施し、強震動作用中の避難困難時間を評価した。さらに、島内において避難歩行実験を実施することで、既設の避難施設までの避難所要時間を評価した。最後に、津波来襲時間から避難困難時間や避難所要時間等を差し引くことで、島内における避難困難区域を抽出した。

Key Words : strong motion, tsunami evacuation, time management, walking experiment, Hegura Island

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)の発生を受け、南海トラフにおいても、 M_w 9.0程度の巨大地震(以後、南海トラフ巨大地震と呼ぶ)を想定した強震動の予測が内閣府¹⁾により行われている。その予測結果によれば、南海トラフ巨大地震の震源域では、震度6強～震度7の非常に大きな強震動の作用が予想されている。一方で、内閣府²⁾によれば、震源域近くの沿岸部では、南海トラフ巨大地震の発生後数分で巨大津波の来襲が予想されており、上述した強震動の作用が住民等の津波避難に影響を及ぼすことが予想される。この点に関して著者ほか^{3,4)}は、

2011年東北地方太平洋沖地震による津波来襲地域において得られた観測地震動の作用が津波避難に及ぼした影響(津波来襲前の強震動による揺れによって津波避難のための行動を起こすことができない時間帯の程度)について検討を行うために、強震動作用中の避難困難時間の算定を試みている。また、著者ほか^{5,12)}は、南海トラフ巨大地震の発生によって津波の早期来襲が予想されている静岡県⁵⁾、和歌山県^{7,8)}、高知県¹⁰⁾、宮崎県¹¹⁾の沿岸域を対象として、津波来襲予想地域において強震動を高密度に予測し、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について検討を行っている。さらに、著者ほか¹²⁾は、1993年北海道南西沖地震の巨大津波の早期来襲により甚大な被害

が発生した北海道奥尻島青苗地区を対象に本震時に作用した強震動を推定し、推定地震動に基づく避難困難時間を算定している。一方で、著者ほか^{13,14)}は、和歌山県串本町および北海道奥尻島青苗地区において避難歩行時間に関する計測実験を行い、避難所要時間を評価することで、避難困難時間・避難所要時間・津波来襲時間などの時間に基づいて評価される避難余裕時間に基づく手法を用いて、津波避難困難区域の抽出を試みている。

上述した一連の先行研究^{9,14)}では、我が国の太平洋沿岸における津波来襲地域もしくは津波来襲予想地域を主に対象フィールドとしていること、強震動を対象とした断層モデル^{11,15)}が既に提案・評価されていることから対象フィールドでの強震動の推定・予測が比較的容易であること、などが大きな特徴として挙げられる。これを言い換えれば、日本海沿岸における津波来襲予想地域を対象フィールドとした津波避難困難区域の抽出は、これまで十分に行われているとは言い難い。

上述した背景を踏まえ本稿では、石川県輪島市舳倉島(図-1参照)を対象フィールドとした津波避難困難区域の抽出を行った結果について報告する。具体的には、まず、想定地震による強震動予測を行い、得られた予測地震動に基づいて避難困難時間を評価した。次に、島内全域にわたって避難歩行時間に関する計測実験を行い、避難所要時間を評価した。最後に、避難困難時間や避難所要時間などを組合せることによって、避難余裕時間に基づく手法を用いて島内における津波避難困難区域を抽出した。

2. 想定地震の選定

舳倉島(図-1参照)は、石川県輪島市街地の北約50kmの日本海上に浮かぶ島である。特に、舳倉島の北約250mに位置する小瀬と北約200mに位置する大黒瀬の二つの小島は日本の排他的経済水域(EEZ)の基点となっており、国防等の観点からも舳倉島における地震・津波防災についてそれぞれ検討を行うことは非常に有意義である。図-2に示すように、舳倉島の標高は比較的低いことから、1983年日本海中部地震の津波来襲による深刻な被害が報告¹⁶⁾されている。

石川県津波想定地震検討会¹⁷⁾では、石川県沿岸域に比較的大きな影響を及ぼす津波想定地震として、図-1に示すように、日本海東縁部、能登半島東方沖、能登半島北方沖、能登半島西方沖をそれぞれ震源とする四つの地震を検討対象としている。ここに、能登半島を境として輪島以北とその西側では走向や傾斜などといった断層タイプが大きく異なることに留意されたい。図-3は、これら四つの地震による舳倉島での津波浸水深の分布¹⁷⁾である。図-3に示すように、能登半島北方沖を震源とする地震の

ケースでは、巨大津波の来襲により舳倉島全体が浸水すると予測されているのが読み取れる。

そこで本稿では、舳倉島における地震・津波防災について検討を行う上で、その影響が最も大きいことが予想される能登半島北方沖の地震を想定地震として選定した。

3. 断層モデルの構築

図-4に構築した能登半島北方沖の地震の断層モデルと舳倉島の位置関係、表-1にモデルパラメータの一覧をそれぞれ示す。以下、表-1の上から記載順に、パラメータの設定根拠について述べる。

まず、巨視的パラメータである断層の走向および傾斜については、石川県津波想定地震検討会¹⁷⁾による津波を対象とした断層モデルの形状に関する特性値をそれぞれ採用した。次に、微視的パラメータであるアスペリティ

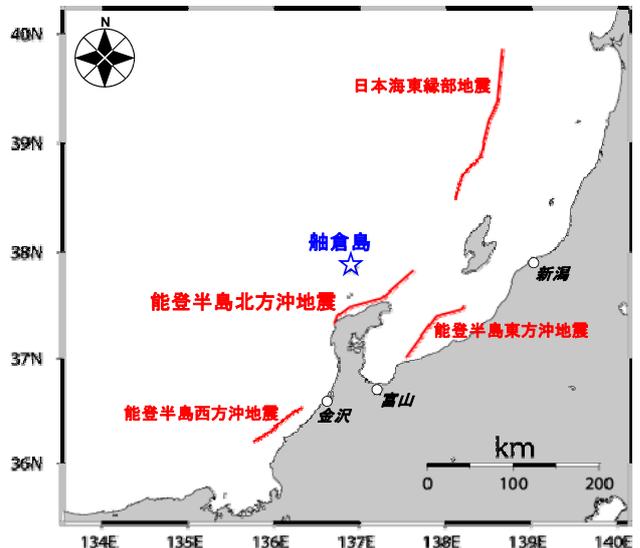


図-1 舳倉島周辺において想定されている地震断層トレース

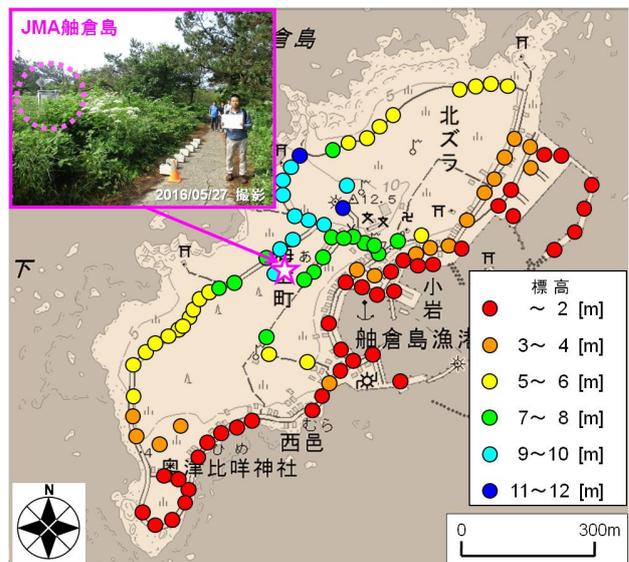


図-2 舳倉島における既存観測点(JMA舳倉島)と標高値の分布

表-1 設定した断層モデルパラメータの一覧

	Asperity-1	Asperity-2	Asperity-3	Asperity-4
Strike (deg.)	49	75	53	21
Dip (deg.)	60	60	60	60
Seismic moment (Nm)	1.32×10^{20}	1.32×10^{20}	0.82×10^{20}	0.50×10^{20}
Length (km)	17.5	17.5	13.8	10.8
Width (km)	17.5	17.5	13.8	10.8
Rise time (s)	1.29	1.29	1.01	0.79
Partition number	3×3×3	3×3×3	3×3×3	3×3×3
Source location	N_37.605, E_137.495	N_37.473, E_137.259	N_37.413, E_136.921	N_37.372, E_136.830
Source depth (km)	15.2	15.2	12.0	9.4
Q value		$Q=166f^{0.76}$		
Density (kg/m ³)		2.7×10^3		
Shear wave velocity (km/s)		3.5		
Rupture velocity (km/s)		3.4		

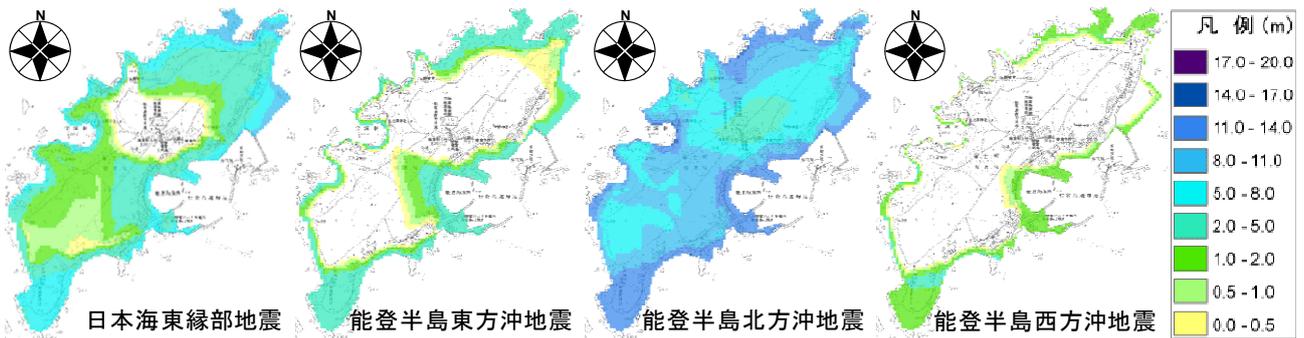


図-3 想定されている大規模地震による舢倉島での浸水深¹⁷⁾の分布

関する諸量(地震モーメント, 長さ, 幅)については, 同じ日本海域を震源とする歴史地震の一つである1983年日本海中部地震の特性化震源モデル(アスペリティモデル)の値¹⁸⁾を採用した. ライズタイムは, 後述する破壊伝播速度とアスペリティ幅の経験式¹⁹⁾に基づいて算定した. アスペリティと破壊開始点の配置(図-4参照)については, 現行の港湾基準²⁰⁾を参考に, アスペリティの破壊が舢倉島に向かって進展するような配置を採用し, アスペリティの中心深さは10kmとした. 最後に, その他のパラメータ(Q値, 密度, せん断波速度, 破壊伝播速度)については, 舢倉島の近傍で近年発生した比較的規模の大きな地震である2007年能登半島地震の特性化震源モデル(アスペリティモデル)の値²¹⁾を採用した.

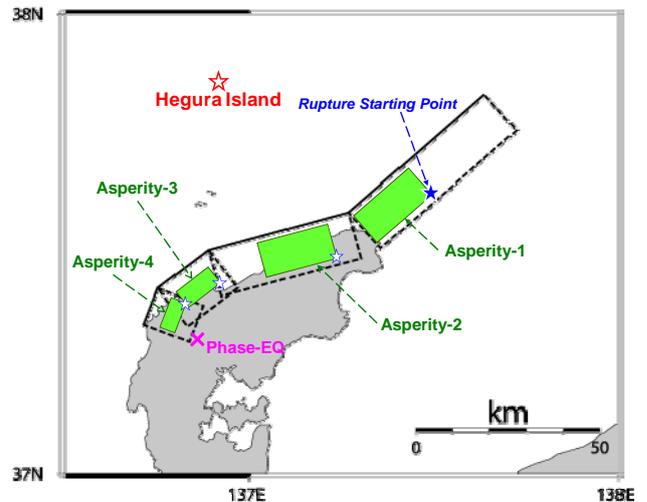


図-4 能登半島北方沖の想定地震による断層モデル

4. 高密度常時微動計測に基づく強震動の予測方針

常時微動計測は, 舢倉島全域(一般に立ち入り可能な区域)の105地点において実施した. 写真-1に常時微動計測状況の一例を示す. 計測期間は, 2015年5月26~27日の二日間である. 計測は主に昼間に実施し, 同型の七台の微動計(七台ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器²²⁾)を採用した. 計測機器の諸元については, 文献²²⁾を参照されたい. 計測方向は水平二成分と鉛直成分の計三成分であり, 後述する常時微動H/Vスペ

クトルの計算²³⁾では, 水平二成分の平均をとった. 計測時間は, 一計測点あたり約30分間の単点計測とした.

常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法²⁴⁾としては, まず, 微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し, 雑振動が比較的小さい163.84秒の区間を七区間抽出し, フーリエスペクトルの計算を行い, バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化した後に, H/Vスペクトルを算出し, 七区間の平均をとった. 評価振動数の範囲としては, 使用した微動計測器の性能²²⁾などを考慮して0.2~10Hzとした.

図-5は、島内の既存強震観測点である JMA 舳倉島(図-2 参照)²⁵⁾における常時微動 H/V スペクトル^{26,27)}と、舳倉島全域(104 地点)の常時微動 H/V スペクトルを重ね合わせたものである。図-3に示すとおり、舳倉島全域の H/V スペクトル(周波数ごとの平均値およびその標準偏差の分布)と JMA 舳倉島における H/V スペクトルの比較において、両者の特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)が良い一致を示している。すなわちこれは、JMA 舳倉島における地盤震動特性が舳倉島全体の地盤震動特性として代表できる可能性も高いことを示唆するものである。

よって本稿では、JMA 舳倉島におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表: 図-6参照)²⁸⁾とサイト位相特性に基づいて舳倉島での強震動予測を実施することとした。ここに、サイト位相特性については、JMA 舳倉島での観測記録の中で、能登半島北方沖の地震の想定震源域¹⁷⁾の比較的近くで2007年3月25日に発生した石川県能登地方を震源とする地震(図-4内にPhase-EQとして震央をプロット)によってJMA 舳倉島で得られた観測地震動(図-7参照)のサイト位相特性を採用した。

5. 強震動の予測手法

本稿では、構築した能登半島北方沖の地震の断層モデル(3.参照)と経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強



写真-1 常時微動計測状況の一例(2016/05/27撮影)

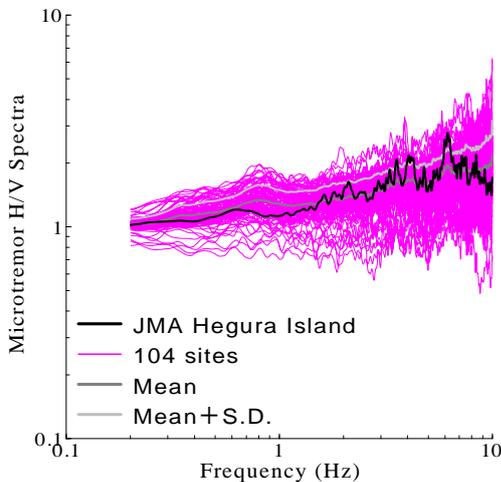


図-5 常時微動H/Vスペクトルの比較

震波形計算手法²⁹⁾の組合せを用いて、舳倉島における想定地震時の強震動を推定した。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²⁹⁾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

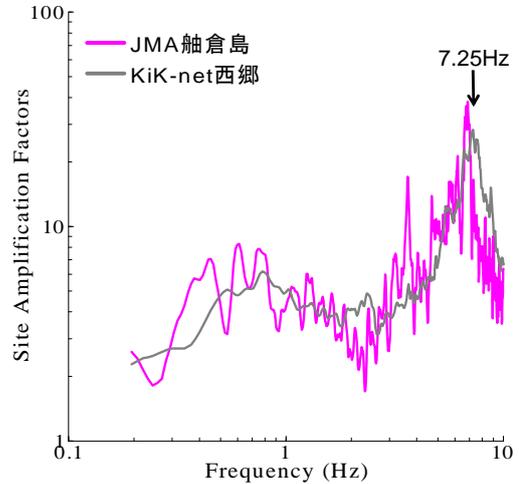


図-6 JMA舳倉島などにおけるサイト増幅特性^{28,32)}

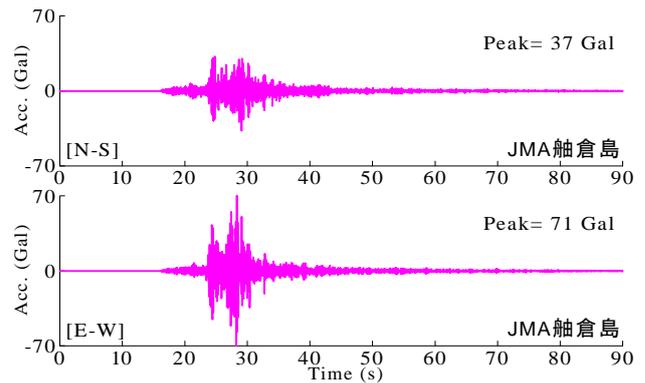


図-7 サイト位相特性の評価に用いたJMA 舳倉島での観測地震動(2007/03/25 18:11 $M_j5.3$)の加速度時刻歴

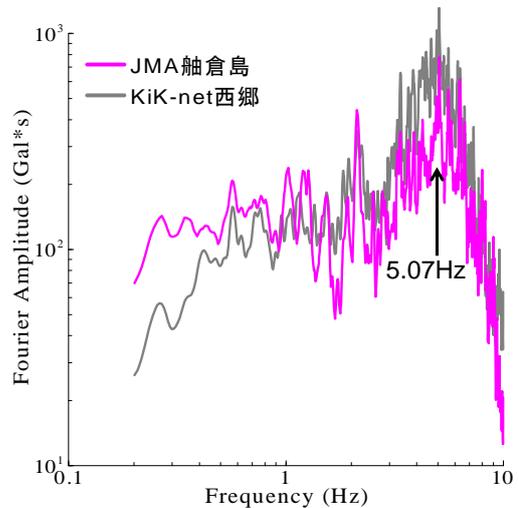


図-8 2011年東北地方太平洋沖地震によるKiK-net西郷での観測地震動と能登半島北方沖の想定地震による舳倉島での予測地震動に基づくフーリエ振幅の比較

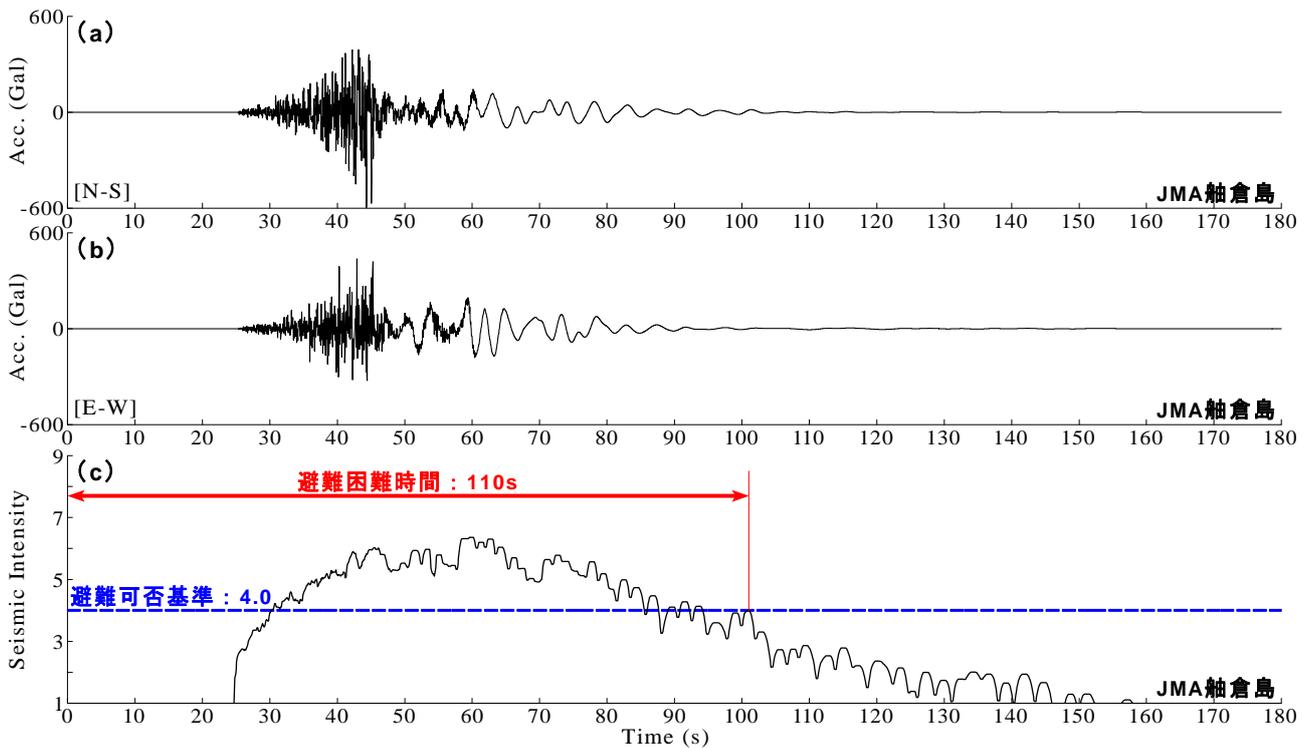


図-9 能登半島北方沖の想定地震による舢倉島での推定地震動と瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難困難時間の評価

リエ変換で複素数, $S(f)$ は中小地震の震源特性³⁰で実数, $P(f)$ は伝播経路特性³⁰で実数, $G(f)$ はサイト増幅特性(図-9参照)で実数, $O(f)$ は中小地震観測記録(図-10参照)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)からわかるように, 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中小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²⁹.

図-4に示すように, 舢倉島は, 能登半島北方沖の想定震源域の近くに位置していることから, 想定地震時に地盤が非線形挙動を示す可能性が高いと考えられる. そこで本稿では, 表層地盤の非線形挙動の効果を考慮してグリーン関数を補正する方法³¹を採用し, S波速度の低下率を表すパラメータ v_1 (非線形性の影響が大きいほど低下)と堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメータ v_2 (非線形性の影響が大きいほど増加)をそれぞれ設定した. 具体的には, JMA 舢倉島とKiK-net西郷(FKSH10)のサイト増幅特性^{28,32}が比較的類似していること(図-6参照), 2011年東北地方太平洋沖地震によるKiK-net西郷での観測地震動と能登半島北方沖の想定地震による舢倉島での予測地震動の大きさ(フーリエ振幅スペクトル)が比較的類似していること(図-8参照), などを

踏まえて, 2011年東北地方太平洋沖地震によるKiK-net西郷での実績値($v_1=0.70, v_2=0.02$)³¹を採用した.

6. 強震動作用中の避難困難時間

図-9(a),(b)は, 能登半島北方沖の想定地震における舢倉島(JMA舢倉島)での推定地震動(水平動)の加速度時刻歴である. 図-9(c)は, 舢倉島(JMA舢倉島)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-9(a),(b)参照)において瞬間計測震度(水平二成分合成)³⁹の時刻歴を計算し(図-9(c)参照), 先行研究³⁹による知見を参考に, 瞬間計測震度が4.0を下回るまでの連続時間とした. 図-9(c)に示すように, 想定地震時における舢倉島(JMA舢倉島)での避難困難時間は, 101sと算定され, 舢倉島では約二分弱にわたって避難行動に移ることができない可能性が高いことが読み取れる.

ここに, 上述した経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法²⁹に基づいた統計的グリーン関数法による予測地震動には, 位相波(図-7参照)の時刻遅れが入力されているため, 本来, 震源(破壊開始点: 図-4参照)からの絶対時刻とはならない. なお, 避難困難時間の原点として, 緊急地震速報等による覚知時間あるいは初期微動の覚知時間などを採用することも考えられるが(内陸地殻内地震を対象としているため本稿では単純にS波の覚知時間となるが), 既往の研究成果³⁵によれば

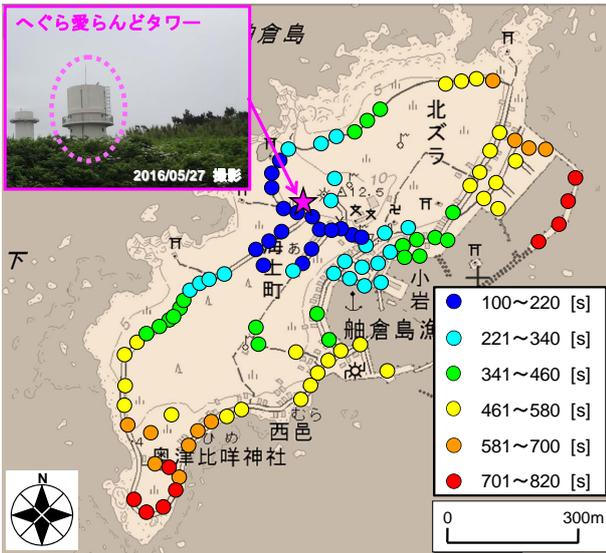


図-10 歩行計測実験に基づく避難所要時間の分布

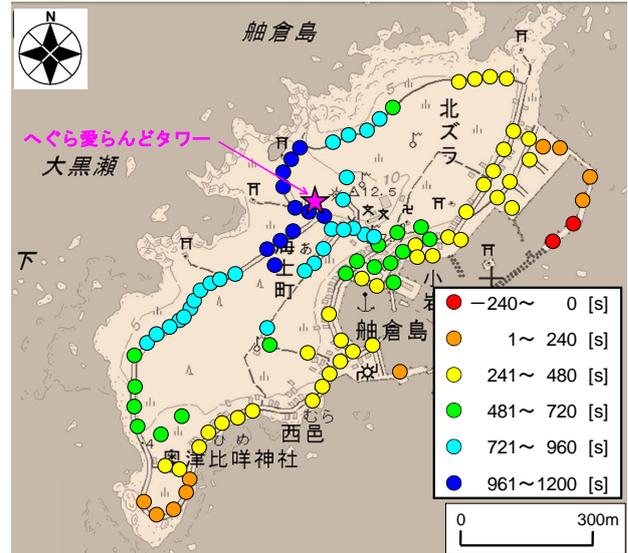


図-11 ハイブリッド評価に基づく避難余裕時間の分布 (舳倉島内での津波避難困難区域の抽出・評価)



写真-2 津波避難に関する歩行計測実験の実施状況

避難行動の開始は地域コミュニティに大きく依存することなどを考慮すれば、初期微動等によって避難を開始するとは考えにくい。

そこで本検討では、破壊開始点に最も近い陸地において同じサイト位相波(ならびにサイト増幅特性)を用いて推定した地震動の時刻ゼロを、図-9における時刻ゼロとして採用³⁰⁾することで、時刻ゼロに対する差分を絶対時刻として表すこととした。

7. 強震動作用後の避難所要時間

4.で述べた常時微動計測地点から舳倉島で唯一の既存の避難施設(へぐら愛らんどタワー: 図-10の枠内写真参照)までの歩行時間(避難所要時間)に関する計測実験を行った(写真-2参照)。

図-10に避難所要時間の分布を示す。図-10に示すとおり、島内における避難所要時間の分布に有意な差異が確認できる。ここに、歩行計測実験では、避難パターン(単独・群衆・要支援者歩行など)を考慮する方法³⁷⁾と考慮しない方法³⁹⁾に大別されるが、本稿では、舳倉島現地

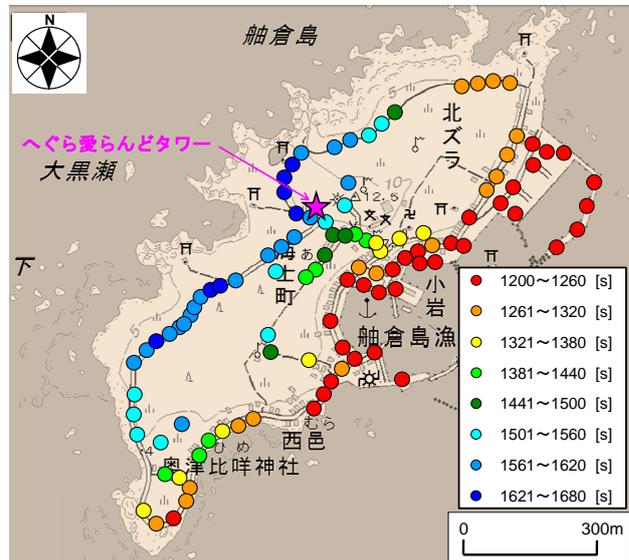


図-12 能登半島北方沖の想定地震における舳倉島内での津波来襲予想時間¹⁷⁾の分布

で全ての条件に見合った被験者を参集することができなかったため、後者の方法を採用した。よって、歩行計測実験は本稿の第一著者(22歳男性)の単独歩行とした。ここに、被験者の年齢層の設定が避難余裕時間(後述)に影響を及ぼすことが予想されるが、本稿では、津波避難困難区域の抽出を目的としているため、避難所要時間が比較的短くなる年齢層の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85m/minが得られた。この歩行速度は、津波避難想定で一般的に用いられる78m/min³⁹⁾に比較的近い値であることを付記しておく。ここに、今後の検討課題の一つとして、高齢者避難(高齢者の手を引いて避難するパターンなども含む)などの避難パターンのバリエーションを追加していく必要があると考えている。

8. 津波避難困難区域の抽出・評価

図-11は、舢倉島全域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、能登半島北方沖の想定地震発生後の津波来襲予想時間(図-12参照)¹⁸⁾に対して、以下に示す所定の時間を差し引いたものである。

- ・強震動作用中の避難困難時間
- ・強震動作用後の避難開始時間
- ・強震動作用後の避難所要時間

ここに、避難困難時間は、6.で述べた101sを舢倉島全域に適用した。避難開始時間は、1993年北海道南西沖地震による奥尻島青苗地区におけるサバイバルカーブの構築実績¹⁴⁾を踏まえて300sとし、これを舢倉島全域に適用した。避難所要時間は、7.で述べた歩行計測実験によって得られた結果を適用した。すなわち、避難余裕時間が正の値であれば津波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津波避難に対して時間的余裕がないことを意味している。

図-11に示すように、舢倉島における避難余裕時間の分布は一様ではなく、津波避難パフォーマンス(島内の各地点が潜在的に有している津波避難に関する余裕時間)に有意な差異があることが確認できる。特に、舢倉島の東端部(突堤付近)において避難余裕時間が比較的小さな値あるいは負の値を示していることが読み取れる。舢倉島の東端部は、突堤を利用した釣りが住民や観光客などによって昼間・夜間問わず盛んに行われている区域であることから、今後何らかの津波避難対策が必要であることが示唆される。

9. まとめ

本研究では、能登半島北方沖の想定地震における舢倉島を対象フィールドとし、地域特性を考慮した避難困難区域の抽出を目的とした強震動予測や歩行計測実験を行い、得られた結果などに基づいた複合評価を実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 高密度常時微動計測によるH/Vスペクトルの特徴を踏まれば舢倉島での地盤震動特性は概ね一様であり、島内の既存強震観測点であるJMA舢倉島におけるサイト増幅・位相特性を利活用することが可能である。
- (2) JMA舢倉島でのサイト特性を考慮した能登半島北方沖地震の強震動シミュレーションを行った結果、舢倉島に作用する地震動の大きさは最大加速度PGAが600Gal程度および気象庁計測震度の値が6.3(震度6強)であると推定される。
- (3) 能登半島北方沖の想定地震における舢倉島での強震動作用中の避難困難時間は、100s程度である。
- (4) 舢倉島における避難所要時間は、100～800s程度で

あり、既存の避難場所であるへぐら愛ランドタワーとの位置関係などによって各々の地域が潜在的に有している津波避難に関する困難の度合いに有意な差異が存在する。

- (5) 舢倉島での津波来襲予想時間に対して、上記(1)の避難困難時間、奥尻島青苗地区の避難開始時間、上記(2)の避難所要時間をそれぞれ差し引くことによって、避難困難区域を抽出した結果、舢倉島東端部において避難余裕時間が集中的に小さな値(負の値)を示す。
- (6) 上記(3)の傾向は、舢倉島の東端部は、突堤を利用した釣りが住民や観光客などによって昼間・夜間問わず盛んに行われている区域であることから、今後何らかの津波避難対策が必要であることが示唆される。今後は、本稿で採用した避難余裕時間に基づく手法を、日本海に浮かぶ他の離島に対しても同様に適用することによって、地域特性を考慮した津波避難困難区域の抽出を継続的に進めていきたいと考えている。

なお、本稿では、石川県津波想定地震検討会¹⁷⁾によって指摘されている海溝・トラフに起因した大規模地震に伴う津波を背景に考えているが、日本海においては海域断層(活断層)に起因する津波が想定⁴⁰⁾されていることから、今後はこれらの活断層を対象にした追加検討を進めていきたいと考えている。

謝辞: 常時微動計測および歩行計測実験の実施にあたっては、舢倉島の住民の皆様などに大変お世話になりました。常時微動計測の高密度実施では、湊文博氏(大阪大学大学院工学研究科学生)および大川雄太郎氏(大阪大学工学部学生)の支援を仰いだ。本研究の遂行にあたり、公益財団法人鹿島学術振興財団2015年度研究助成「地域特性を考慮した津波避難困難区域の抽出～強震動予測と歩行実験によるハイブリッド評価～」の一部を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)、強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—、内閣府防災情報ホームページ, 2012. <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/> (2016年10月25日閲覧)
- 2) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)、津波断層モデル編—津波断層モデルと津波高・浸水域等について—、内閣府防災情報ホームページ, 2012. (last accessed: 2016/10/25)
- 3) 湊文博, 秦吉弥, 藤木昂, 山田雅行, 鉢田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一：津波避難困難時間に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する評価—仙台市沿岸域を例として—, 第51回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1901-1902, 2016.
- 4) 湊文博, 秦吉弥, 藤木昂, 山田雅行, 鉢田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一：津波避難困難時間に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する評価—石

- 卷市街地を例として一, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, Paper No.0321, 2016.
- 5) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 鍛田泰子, 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一, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.62A, pp.259-272, 2016.
 - 6) 秦吉弥, 湊文博, 常田賢一, 青木伸一, 鍛田泰子, 小山真紀: 南海トラフ巨大地震における静岡県沿岸域での推定地震動の作用が津波避難に及ぼす影響, 土木学会論文集 B3, Vol.72, No.2, pp.I_1-6, 2016.
 - 7) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 常田賢一, 鍛田泰子, 魚谷真基: 高密度常時微動計測に基づく和歌山県串本町における南海トラフ巨大地震の強震動評価と津波避難に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp.I_123-135, 2015.
 - 8) 湊文博, 秦吉弥, 常田賢一, 鍛田泰子, 小山真紀, 植田裕也: 高密度常時微動計測・臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における和歌山県広川町での津波避難不可能時間算出のための強震動評価, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4, pp.I_68-81, 2016.
 - 9) 秦吉弥, 湊文博, 小山真紀, 鍛田泰子, 中嶋唯貴, 常田賢一: 津波避難施設の新設場所の選定に関する一考察—南海トラフ巨大地震を対象とした和歌山県広川町を例として一, 土木学会論文集 B3, Vol.72, No.2, pp.I_503-508, 2016.
 - 10) 秦吉弥, 中嶋唯貴, 湊文博, 鍛田泰子, 小山真紀, 常田賢一: 高密度臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における高知県南国市津波来襲予想地域での強震動の予測, 第 36 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No.920, 2016.
 - 11) 湊文博, 秦吉弥, 村上啓介, 山田雅行, 鍛田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一: 高密度臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における宮崎市沿岸部での津波避難困難時間算出のための強震動予測, 地域安全学会論文集, No.29, pp.53-62, 2016.
 - 12) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 鍛田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一: 高密度常時微動計測に基づく1993年北海道南西沖地震における奥尻島青苗地区での強震動と避難不可能時間の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4, pp.I_884-894, 2016.
 - 13) 秦吉弥, 湊文博, 常田賢一, 小山真紀, 鍛田泰子, 山田雅行: 強震動予測および歩行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一, 土木学会論文集 B3, Vol.71, No.2, pp.I_671-676, 2015.
 - 14) 湊文博, 秦吉弥, 中嶋唯貴, 小山真紀, 鍛田泰子, 山田雅行, 常田賢一: 避難余裕時間に基づく津波避難困難区域の抽出手法に関する適用性の評価—1993年北海道南西沖地震による奥尻島青苗地区を例として一, 土木学会論文集 B3, Vol.72, No.2, pp.I_509-514, 2016.
 - 15) 野津厚: 1993年北海道南西沖地震(M7.8)の特性化震源モデル, 海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所地震防災研究領域ホームページ, 2015. http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/source_model_jpn.html (2016年10月25日閲覧)
 - 16) 三好寿: 概論_日本海中部地震津波, 月刊海洋科学, 海洋出版(株), Vol.16, No.9, pp.490-495, 1984.
 - 17) 石川県津波想定地震検討会: 石川県における津波想定について, 石川県危機管理監室ホームページ, 2012. https://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/kikikanri_g/tsunami_info.html (2016年10月25日閲覧)
 - 18) 野津厚: 1983年日本海中部地震(M7.7)の特性化震源モデル, 海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所地震防災研究領域ホームページ, 2015. http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/source_model_jpn.html (2016年10月25日閲覧)
 - 19) 片岡正次郎, 日下部毅明, 村越潤, 田村敬一: 想定地震に基づくレベル 2 地震動の設定手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.15, 2003.
 - 20) 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.
 - 21) 野津厚: 内陸地殻内地震によるやや短周期地震動の再現に適した震源のモデル化手法, 港湾空港技術研究所報告, Vol.50, No.4, pp.133-196, 2011.
 - 22) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第 115 回物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.
 - 23) 例えば, 中村豊, 上野眞: 地表面での常時微動測定による表層地盤の振動特性の推定, 土木学会第 41 回年次学術講演会講演概要集, I-417, pp.833-834, 1986.
 - 24) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 和歌山県串本町における高密度常時微動計測, 物理探査, Vol.68, No.1, pp.83-90, 2015.
 - 25) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
 - 26) 山内政輝, 秦吉弥, 村田晶, 鍛田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 宮島昌克, 常田賢一: サイト特性を考慮した津波避難困難区域の抽出—能登半島北方沖の想定地震による石川県輪島市舳倉島を例として一, 第 36 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No.916, 2016.
 - 27) 山内政輝, 秦吉弥, 村田晶, 鍛田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 湊文博, 大川雄太郎, 宮島昌克, 常田賢一: 高密度常時微動計測に基づく能登半島北方沖の想定地震による舳倉島での強震動予測, *Kansai Geo-Symposium 2016* 論文集, 地盤工学会, pp.13-18, 2016.
 - 28) 秦吉弥, 村田晶, 湊文博, 宮島昌克: 1993年能登半島沖地震の震源域における地盤震動特性の評価, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, I-151, pp.301-302, 2016.
 - 29) 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.
 - 30) 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.
 - 31) 若井淳, 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震の際に見られた表層地盤の非線形挙動の概略的傾向, 港湾空港技術研究所資料, No.1272, 2013.
 - 32) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
 - 33) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous instrumental

- seismic intensity and evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
- 34) 鉦田泰子, 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.
- 35) 例えば, 土肥裕史, 奥村与志弘, 小山真紀, 湯浅亮, 清野純史: 津波避難初期過程におけるコミュニティのシミュレーションモデルの構築, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, I-350, pp.699-700, 2014.
- 36) 例えば, 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 鉦田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一: 強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について—1993 年北海道南西沖地震による奥尻島青苗地区でのケーススタディから学ぶべきこと—, *Kansai Geo-Symposium 2015 論文集*, 地盤工学会, pp.235-240, 2015.
- 37) 湊文博, 秦吉弥, 常田賢一, 鉦田泰子, 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—, 地域安全学会梗概集, No.35, pp.17-20, 2014.
- 38) 秦吉弥, 湊文博, 小山真紀, 鉦田泰子, 中嶋唯貴, 常田賢一: 南海トラフ巨大地震を対象とした津波避難施設の新設場所の選定に関する試み, 第 6 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.1-6, 2016.
- 39) 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 1 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> (2016 年 10 月 25 日閲覧)
- 40) 国土交通省: 日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書, 国土交通省ホームページ, 43p., 2014. http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinhousa/ (2017 年 1 月 5 日閲覧)
- (2016.10.26受付, 2017.2.27修正, 2017.3.7受理)

EVALUATION OF DIFFICULT AREA FOR TSUNAMI EVACUATION
IN HEGURA ISLAND, WAJIMA CITY, JAPAN,
BASED ON STRONG MOTION ESTIMATION AND WALKING EXPERIMENT
DURING THE NORTHERN NOTO PENINSULA SCENARIO EARTHQUAKE

Masaki YAMAUCHI, Yoshiya HATA, Akira MURATA,
Yasuko KUWATA, Maki KOYAMA, Tadayoshi NAKASHIMA,
Masakatsu MIYAJIMA and Ken-ichi TOKIDA

During a northern Noto peninsula scenario earthquake, not only strong motion but also huge tsunami is attacked in Hegura Island, Wajima City, Japan. In this study, first, seismic waveforms in Hegura Island were estimated based on the asperity models with consideration of ground shaking characteristics by microtremor measurements. Next, walking times from the sites of interest to designated refuge place were measured based on in-situ investigation. Finally, using the non-evacuation time during the earthquake and the required evacuation time after the earthquake, we evaluated the difficult area for tsunami evacuation in Hegura Island taking into account the tsunami travel time.