

2024能登半島地震の強震動の特徴

Characteristics of Strong Ground Motion of the 2024 Noto Peninsula Earthquake

○鈴木 崇伸¹
Takanobu SUZUKI¹

¹東洋大学
Toyo University

This paper reports the results of analysis of available strong-motion seismic data from the Noto Peninsula earthquake that occurred in January 2024. The shaking in the Okunoto area is similar to the former data observed in the epicenter area, with large amplitude acceleration and a period of 1 to 2 seconds. This shaking is thought to have caused damage to aging wooden houses. In the plains near the epicenter, it was found that the vibration seemed to be caused by liquefaction with a long period in the middle of the shaking. Because housing damage is caused not only by damage from shaking, but also by subsidence and tilting due to liquefaction, it is necessary to carefully evaluate the ground.

Keywords :2024 Noto-Hantou Earthquake, Strong ground motion, Wave characteristics, Liquefaction

1. はじめに

2024年1月に発生した能登半島地震は半島の北部を震源域とするマグニチュード (Mj) 7.6 の地震であり、複数の町で震度 7 の揺れが観測された。地震発生から3か月経過した3月末の時点において死者は245人、全壊家屋数は約9千棟となっている。人的被害は能登半島北部地域に集中しており、数少ない道路の損壊が多く発生しており、また水道や電気などの都市ライフラインの脆弱さを露呈した災害となった。被災原因の詳細な解明と今後の対策強化が望まれている。

本報告は公開された強震記録の分析速報として地震動の加速度振幅と変位振幅の時間変化に注目したグラフにより被災地域の揺れの特徴を概観した結果を報告する。能登半島では2007年能登半島地震があり、2022年と2023年にも石川県能登地方を震源とする地震が発生しており、過去の揺れと対比してみる。

2. 公開地震データの概要

2024年1月1日に起きた能登半島地震の強震記録が気象庁と防災科学技術研究所から公開されている。被害のあった地域に関連する強震データの概要を表1にまとめている。気象庁の発表では輪島市と志賀町で震度7とされているがこれらのデータは公開されていない。

奥能登地域に分類した輪島市、珠洲市、志賀町、能登町、穴水町では震度6弱～6強の揺れが観測されており、K-NET 富来では3成分合成加速度が2828Galであり、震度相当値は6.6となっている。奥能登地域では全体的に1G以上の揺れが記録されている。半島南部に位置する七尾市、羽咋市では震度5強～6弱の揺れとなり、およそ0.5G程度の加速度となっている。

平野部において被害があった富山県と新潟県についても数値を整理している。七尾市に隣接する氷見市では震度相当値は5.4、加速度は0.4G程度となっている。富山平野に置かれた地震計は0.2G程度の揺れを記録している。また山間の町である小矢部市では平野部よりも大きな揺れとなっている。

地盤の液状化の発生が報告されている新潟市では震度5弱～5強の揺れとなっている。最大加速度は0.2G程度であり、経験的に液状化が起きる下限値を超えている。新潟県内の日本海沿岸の低地部にある糸魚川町、上越市、柏崎市、刈羽村、出雲崎町、三条市、燕市においても震5弱～5強の揺れとなっており、地盤の良くないところでは液状化が起こりうるレベルの揺れとなっている。

表1 主な強震記録のリスト

	気象庁震度計	計測震度	最大加速度 [Gal]	K-Net	震度相当値	最大加速度 [Gal]
奥能登	輪島市鳳至町	6.2	796	ISK003輪島	6.2	1632
	輪島市門前町走出	6.5	787			
	珠洲市三崎町	6.1	1194	ISK001大谷	6.2	1469
				ISK002正院	6.2	917
				ISKH01珠洲	6.2	1007
志賀町富来領家町	5.9	626	ISK006富来	6.6	2828	
			ISKH03富来	5.9	1221	
能登町宇出津	5.8	592	ISKH02柳田	5.8	791	
			能登町松波	6.2	733	
			能登町松波	6.2	733	
			能登町柳田	5.8	855	
半島南部	七尾市本府中町	5.8	645	ISK007七尾	5.8	459
	七尾市能登島向田	6.2	643			
	中能登町末坂	5.9	345			
	中能登町能登部下	5.7	346			
	羽咋市柳田町	5.3	565	ISK008羽咋	5.4	540
	金沢市西念	5.0	198	ISK010金沢	4.6	224
富山	高岡市伏木	5.1	334			
	小矢部市泉町	5.0	382			
	氷見市加納	5.3	280	TYM002氷見	5.4	432
	富山市新桜町	5.3	396	TYM005新湊	5.1	213
	富山朝日町道下	4.7	174	TYM007富山	4.4	139
	富山市石坂	4.7	143	TYMH03富山	5.0	289
新潟	新潟空港	4.8	173	NIG010新潟	4.5	88
	新潟中央区美咲町	5.1	179	NIG011新津	4.8	130
	新潟南区白根	5.2	187	NIG014三条	5.0	151
	新潟西区寺尾東	5.4	245	NIG018柏崎	5.0	123

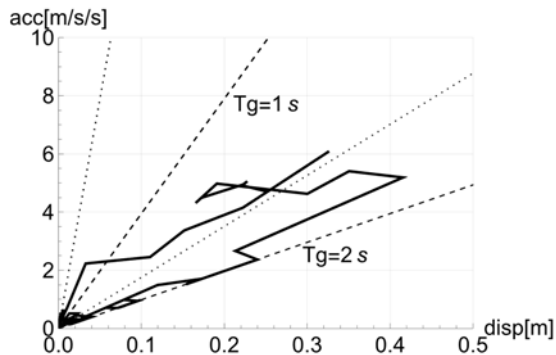


図 1(a) JMA 輪島

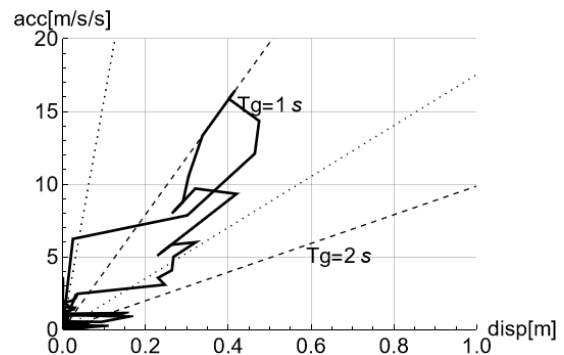


図 1(b) K-NET 輪島

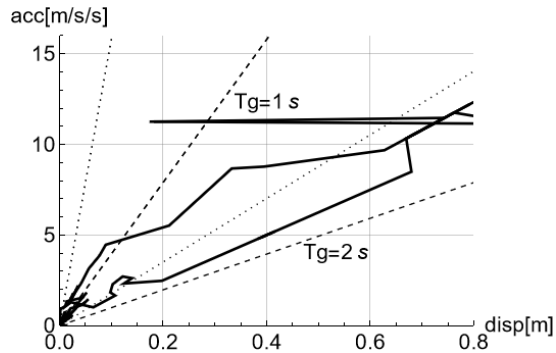


図 2(a) K-NET 穴水

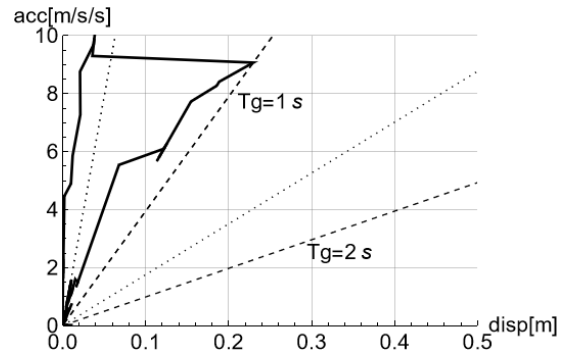


図 2(b) K-NET 大町

3. 強震記録の分析方法

震度と最大加速度は揺れの大きさの 1 次尺度として有用であるが、どのような揺れ方であったかを示すことはできない。3 成分の加速度データを積分して速度波形・変位波形に変換すれば揺れの特徴をイメージしやすくなるがデータ数が多くなり煩雑になる。揺れ方の特徴は構造物の応答で見る方が便利なので水平動に注目して応答スペクトルに変換する方法が一般に用いられている。地震記録の有している振幅と振動数の情報を 1 質点系の振り子のフィルターをかけて取り出す方法といえる。振り子の固有周期ごとの最大振幅が計算され、構造物の耐力と比較すれば被害の状況を推定することができる。しかしこの方法では揺れの時間変化を無視することになる。

鈴木は強震動記録の時刻ごとの加速度振幅と振動数の変化をグラフ表示する方法を提案している。注目する時刻ごとの加速度振幅と卓越振動数を組み合わせて相対変位に変換し、両者を連続プロットすることにより、地震動の揺れ方の変化を観察することができる。計算手順は以下となる。

- ①注目時刻を中心に地震記録を切り出して窓関数をかけて注目時刻付近を強調する。
- ②切り出したデータの最大振幅を決める (A)。
- ③切り出したデータをフーリエ変換して卓越振動数を決める (f)。
- ④ある時刻の相対変位を計算する $U = A/(2\pi f)^2$ 。
- ⑤時刻を移動して同じ計算を繰り返す。
- ⑥(U,A)を 2 次元プロットすれば、振幅と振動数の変化を追跡できる。

揺れの方向性を考えない場合には、卓越振動数の変化は水平 2 方向において差異はないので 2 方向の平均とし、

加速度振幅は 2 方向を合成した最大振幅を採用して 1 枚のグラフに整理することができる。加速度記録を加工した図形の特徴を利用して震源地の揺れ方を分析する。

4. 震源地の強震記録の特徴

震源地となった奥能登地域は山地形であり、川が海に流れ出た場所に平野ができています。山間部にも集落があるが、被害の大きかった平野部の地震記録に注目して前述の分析を行っている。今回は速報であり、計算した結果の一部を紹介する。

奥能登地域で観測点が近接している場合の計算結果を示す。図 1 は輪島市中心部にある気象庁と K-NET の観測データをグラフ化している。気象庁の地震計は低平地にあり、K-NET は丘陵際にある。最大加速度は K-NET が 2 倍以上であり、原点から遠い位置までグラフが伸びている。図中に 1 秒と 2 秒の補助線を書き入れているが、揺れ始めは短周期で途中から 1 秒以上の振動に変化して徐々に収束していくのがわかる。K-NET のグラフは 2 段に分かれており、周期の変化も大きくなっている。この変化が地盤の非線形化の影響か断層運動成分の影響かは不明であるが、1 G 程度の振動の間に何か起きていたと考えられる。

図 2 は穴水町中心部にある 2 点の K-NET の分析結果である。K-NET 穴水は川沿いの低地であり、K-NET 大町は丘陵地際に位置している。2 地点の距離は約 1 km である。K-NET 穴水の土質調査結果によれば軟弱な腐食土層が堆積しており、揺れ始めから 1 秒程度の周期となっている。1 秒から 1.5 秒以上に周期を大きくしながら加速度振幅が大きくなり、最大加速度の 1.2 G に達してから振幅が減少している。振幅減少時に 1.5 秒よりも長周期になっているのは地盤の非線形化の影響と考えられる。一方 K-NET 大町の土質調査結果によれば表層に 2 m 程度の表土と砂

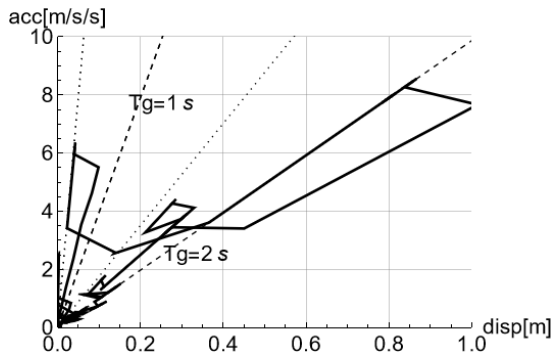


図 3(a) K-NET 正院 (2024/1)

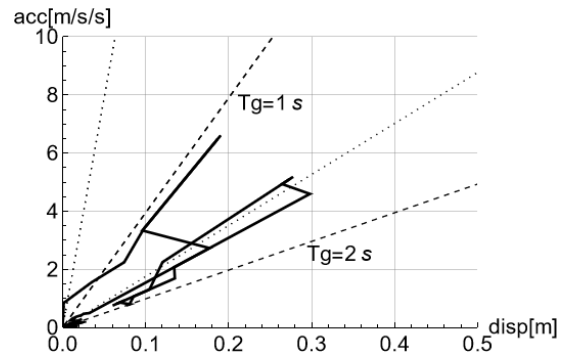


図 3(b) K-NET 正院 (2023/5)

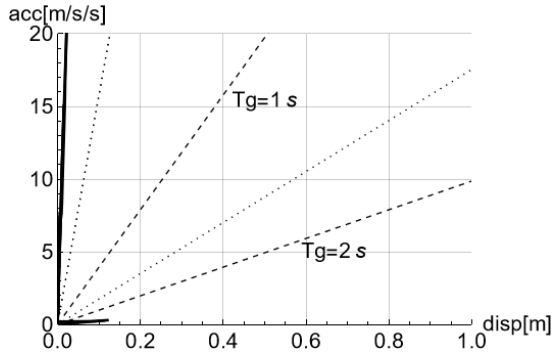


図 4(a) K-NET 富来 (2024/1)

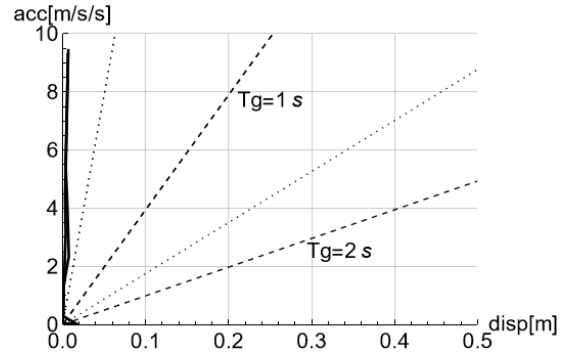


図 4(b) K-NET 富来 (2007/3)

層が存在する。揺れ始めは短周期であり、加速度振幅が 9 m/s^2 に達すると振幅はそのまま周期 1 秒程度まで長周期化している。その後長周期化した状態で加速度は小さくなっていくのがわかる。地盤の非線形化の要因として地表付近の砂層の液状化が考えられ、周辺に噴砂があった事実ともあう。ボーリングデータがあるので解析的に確認する必要があるが、液状化の有無を見るのにも便利な方法となる。

図 3(a)は珠洲市中心部にある K-NET 正院の分析結果である。この地点の地盤調査結果によれば地表から 10 m までにはよく締まった砂層があり、その下には軟弱なシルト層となり、基盤の位置は不明である。揺れ始めの周期は 1 秒以下であり、加速度が 6 m/s^2 に達すると長周期化して 2 秒程度の揺れとなり、さらに振幅が大きくなっている。最大で加速度振幅が 8 m/s^2 、変位振幅が 1.0 m となって以降は長周期のまま振幅が小さくなっていく。N 値が 20 以上の砂層であるが、液状化の可能性が考えられる。図 3(b)は 2023 年 5 月の珠洲市内を震源とする地震記録の分析結果である。よく似た変化となっているが、加速度は 5 m/s^2 、周期は 1.5 秒程度であり 2024 年よりも小さくなっている。強震時に振動特性がこのようなかたちになる原因に関してボーリングデータを使って砂層とシルト層の非線形化を分析する必要がある。

図 4(a)は今回の地震で最大加速度を記録した K-NET 富来の分析結果である。この観測点は標高 75 m の高台に設置されている。振動中は 0.1 秒程度の短周期の揺れを繰り返しており、地表層のない岩盤であることがわかる。図 4(b)は 2007 年能登半島地震の時の K-NET 富来の分析結果である。この記録の最大加速度は 1/3 程度の大きさであるが、グラフ形状は相似になっている。地表層が無い場合の例として 2013 年東北地方太平洋沖地震の最大加速度を記録し、震度 7 相当となった K-NET 築館も同様の形状となっている。

5. 能登半島南部の平野部の強震記録の特徴

奥能登地域が山地であるのに対し、半島南部は低地と丘陵地形となり、半島の付け根に呂知湯地溝帯があり低地が連続している部分もあるため奥能登に比べて人口も多い。地震の最大加速度は奥能登地域の半分程度となり、300 Gal から 600 Gal の揺れが観測されており、震度 5 強から 6 弱となっている。

近接した観測点の例として七尾市中心部の分析結果を図 5 に示す。図 5(a)は気象庁の観測点の分析結果、図 5(b)は K-NET 七尾の分析結果である。2 地点の距離は約 1 km である。両者ともに原点を頂点とした逆三角形になっており、よく似た形状となっているのがわかる。K-NET 七尾の地盤調査結果によれば表層 2 m は有機質土とシルト、2 m から 10 m までにはやや締まった砂層と砂質土層、その下にシルト層があり、さらに砂層が続いている。揺れが大きくなれば砂層において液状化することが予想される層構成となっている。K-NET 七尾の分析結果では $(0.01\text{m}, 4.4\text{m/s}^2)$ において液状化し始め、 $(0.15\text{m}, 4.5\text{m/s}^2)$ まで液状化が進行したと考えられる。市役所内の緑地の盛土部分に置かれているが、液状化による長周期化と考えられる。気象庁の観測点は市民会館の駐車場の一角にあり土質調査結果はないが、距離的にもほぼ同じ地盤条件になっていると考えられる。加速度振幅と変位振幅の分析図はこのような類似性を見る際にも役立つことができる。

能登半島南部の平野部の記録として羽咋市と氷見市の分析結果を紹介する。図 6 は K-NET 羽咋の分析結果であり、ほとんど直角三角形になっている。この観測点は羽咋市役所内にあり、標高 15 m の砂丘上に置かれている。地盤調査結果は 20 m まで砂層であり、地表から 3 m までは緩く、3 m から 11 m までにはやや締まっており、その下はよく締まった砂層となっている。速度波形を計算すると周期 3 秒程度の揺れが連続している。砂層ごとの液状化程

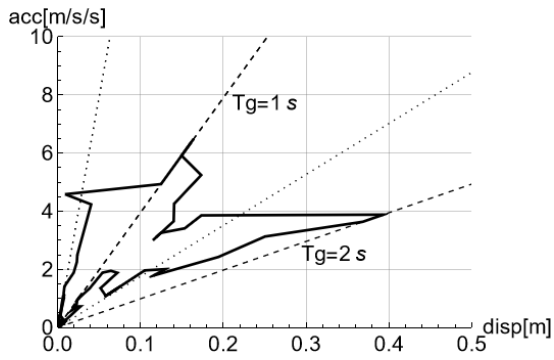


図 5(a) JMA 七尾

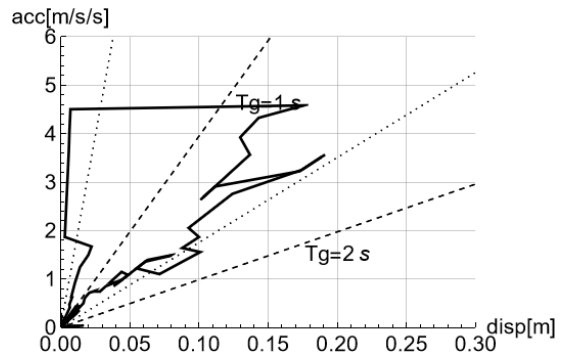


図 5(b) K-NET 七尾

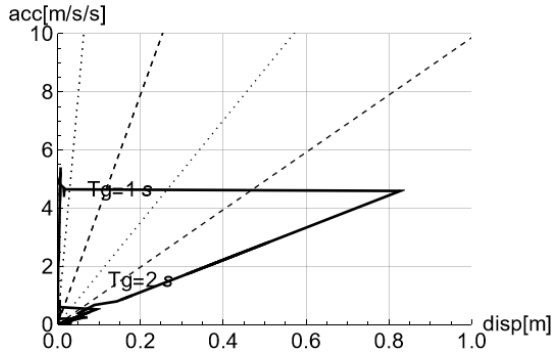


図 6 K-NET 羽咋

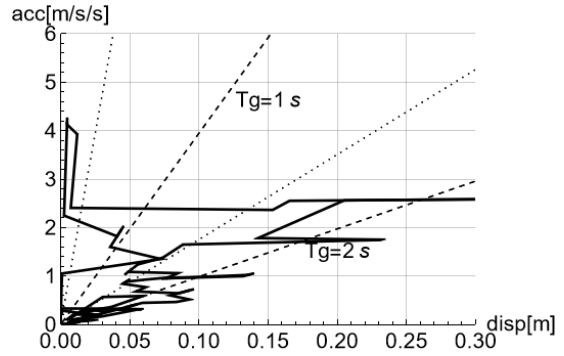


図 7 K-NET 氷見

度は明確に判別できないが、揺れ始めは短周期の揺れとなっているが、途中から周期が非常に長くなっていることから地盤調査結果における 11 m までの層が液状化したと推定される。最大振幅は(0.8m, 4.5m/s²)であり長周期の高層ビルのような揺れが起きていたと推定される。しかし市役所内で噴砂後は見つけることができなかった。これは砂丘上でのことであり、砂丘周辺の低地では顕著な液状化があったと推定される。市役所周辺において家屋被害は多くはなく、長周期化による水平外力の低下が関係していたかもしれない。

図 7 は富山県氷見市内にある K-NET 氷見の分析結果を示している。この観測点は平野部の水田地帯の中の消防署の敷地内にあり、観測点の近くに砂を寄せ集めた跡が残っており、相当量の噴砂があったと推定される。この観測点の地盤調査結果は地表から 9 m までが N 値 10 程度の砂層、その下がシルト・粘土層となっている。羽咋に比べて乱れはあるが 3m/s²になった時点で液状化し始め、1.8 秒まで長周期化している。氷見消防署の周辺は家屋も少なく被害との対応はできないが、揺れは 0.3 G 程度で頭打ちになっており、低減された地震の揺れの影響はあったものと考えられる。なお氷見消防署の近くに気象庁の観測点が置かれており、よく似た形状になっていることを付記しておく。

6. まとめと今後の予定

本稿は 2024 年 1 月に起きた能登半島地震の公開強震データの分析結果を報告している。Mj7.6 の大地震であり甚大な被害が発生しているが、揺れの特徴には地域性が見られる。奥能登地域の揺れは 1995 兵庫県南部地震の神戸市、2004 年新潟県中越地震の川口町、2007 年新潟県中越沖地震の柏崎市、2016 年熊本地震の益城町、2018 年北海道胆振東部地震のむかわ町の揺れとよく似ており、大振幅の加速度と 1 秒～2 秒の周期になっていることが確認

された。この揺れが老朽化した木造家屋の被害に影響したと考えられる。

震源地に近接する地域の平野部では揺れの途中で長周期化する液状化とみられる振動であったことが明らかになった。七尾市、羽咋市、氷見市の観測点の情報による推定になるが、低平地では大規模な液状化が発生して住宅被害に影響していたと考えられる。住宅被害は揺れによる損壊だけでなく液状化による沈下や傾斜によっても起こるため地盤の評価を綿密に行う必要がある。

本稿では能登半島で得られた強震記録の分析結果を報告したが、今回の地震では富山平野や高田平野、越後平野においても液状化による被害が報告されている。本報告と同じ分析手法を用いて揺れの分析を行い、地盤調査結果と対比する研究を進めるとともに、大地震時に被害が多く発生すると予想される地域の被害予測情報の研究を行っていく予定である。

謝辞

この報告では防災科学技術研究所と気象庁の観測記録を使用しました。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 内閣府：防災情報のページ。
- 2) 気象庁：各種データ・資料のページ。
- 3) 防災科学技術研究所；強震観測網（K-NET, KiK-net）の公開ページ。
- 4) 鈴木崇伸：地震記録から地盤の非線形特性を検出する方法，土木学会論文集，Vol.71, No.4, pp.1_502-I_510, 2015。

P波初動部分を用いて推定したサイト増幅特性のばらつき

The variations of the Site amplification factors estimated by using P-waves

○井上 晏菜¹, 山田雅行², 羽田浩二³, 藤野義範³, 東宏幸¹, 小田義也¹
 Haruna INOUE¹, Masayuki YAMADA², Koji HADA³, Yoshinori FUJINO³,
 Hiroyuki AZUMA¹ and Yoshiya ODA¹

¹ 東京都立大学大学院 都市基盤環境学域

Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University

²(株) ニュージェック 研究開発グループ

Research Laboratory, NEWJEC Inc.

³(株) ニュージェック 建築グループ

Architecture Group, NEWJEC Inc.

In this paper, the variations of the site amplification factors were estimated by using the P-waves. The Fourier spectrum of the seismic record at the ground surface divided by the Fourier spectrum of the seismic record underground at the KiK-net stations was used as the site amplification factor, and the variation of the site amplification factor was calculated for a large number of earthquakes. The variations were calculated for the S-waves and the whole waveforms as well, and compared with the case of the P-waves. As the result, it is suggested that the Site amplification factors may differ depending on whether the seismic wave comes from the west or east of the observation point, especially in the case of P-waves.

Keywords : Site amplification factor, Twofold spectral ratio method, KiK-net, P-waves

1. はじめに

筆者らは二重スペクトル比法¹⁾²⁾により、観測点間（ペア）の P 波減衰特性の推定を行っている。そのなかで多数のペアで二重スペクトル比（減衰特性を表す値）が 1 を超える、すなわち観測点間を伝わる P 波がその途中で増幅するという結果が得られた。一般的に地殻中を伝わる波は減衰するため、これが真の減衰特性であるとは考えにくい。また、Hi-net の地中観測データを用いて算定した二重スペクトル比は 1 を超えていないのに対して、付近の地表観測点のデータを用いて算定した場合には 1 を超えることが多かったことから、サイト増幅特性に原因があるのではないかと考えた。

通常、サイト増幅特性は地震に依存せずほとんど一定とされることが多く、二重スペクトル比法でもその仮定に基づいて計算を行っている。そのため、 $G_{1A}(f) = G_{2A}(f)$, $G_{1B}(f) = G_{2B}(f)$ となり、サイト増幅特性に関する後ろの項は除去されて TSR として減衰特性のみを抽出できる。しかし、サイト増幅特性が地震波の到来方向に依存すると仮定した場合は(1)式のようにサイト増幅特性が除去できずに残り、それによって二重スペクトル比が 1 を超える可能性が考えられる。

$$TSR = \sqrt{\frac{P_{1B}(f) \cdot P_{2A}(f)}{P_{1A}(f) \cdot P_{2B}(f)}} \times \sqrt{\frac{G_{1B}(f) \cdot G_{2A}(f)}{G_{1A}(f) \cdot G_{2B}(f)}} \quad (1)$$

そこで本研究では、P 波初動部分のサイト増幅特性が地震によりどのくらいばらつくのか、複数の観測点において詳しく検討することを目的とする。

2. サイト増幅特性の算出方法

(1) 解析に用いた地震と観測点

本研究では、KiK-net 観測点の地表データおよび地中データを用いて解析を行った。観測点は鳥取県内の TTRH02, TTRH03, TTRH07, 島根県内の SMNH01 の合計 4 点である。観測点位置と解析に用いた合計 26 地震の震央位置を図-1 に示す。なお、2013 年に対象観測点の地震計が変更されたため、観測機器の違いが推定するサイト増幅特性に影響を与える可能性があると考えて、使用する地震は 2014 年以降に観測されたものとした。また、後述する手順で地震波形の切り出しを行うため、P 波と S

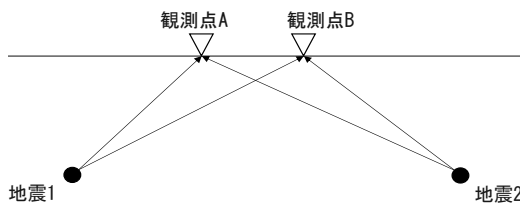


図-1 二重スペクトル比計算に用いる観測点と地震の配置

二重スペクトル比法により、図-1 に示すような地震 1, 2 の記録を用いて観測点 AB 間の減衰特性を求めるときを考える。 $P_{ij}(f)$ を減衰特性、 $G_{ij}(f)$ をサイト増幅特性とすると、観測点 AB 間の二重スペクトル比は(1)式のように表すことができる（ i は地震、 j は観測点を表す添字）。

波の立ち上がりが明確に読み取れ、かつ P~S 時間が 6 秒程度以上となる地震を選んで、表-1 に解析に用いた地震の数を観測点ごとに示す。

表-1 解析に用いた地震数

観測点	TTRH02	TTRH03	TTRH07	SMNH01
地震数	18	11	6	8

(2) 地震波形の切り出しとサイト増幅特性の算出

本研究では、KiK-net 観測点において地表の地震記録のフーリエスペクトルを地中の地震記録のフーリエスペクトルで除した値をサイト増幅特性とした。また、P 波初動部分に加えて、比較対象として S 波初動部分と波形全体についてもサイト増幅特性を推定した。具体的には、まず P 波初動と S 波初動の読み取りを手動で行い、P 波初動部分、S 波初動部分、波形全体のデータの切り出しを行った。次に切り出した波形の両端に cos 型のテーパをかけてフーリエスペクトルを算出した。そのあとバンド幅 0.8Hz の Parzen ウィンドウで平滑化を行い、フーリエスペクトル比を計算した。地震波形の切り出しの様子を図-2 に示す。P 波および S 波の初動部分は山田・小田 (2018) が P 波初動を使って二重スペクトル比計算をした際に切り出した時間を参考に、読み取った初動到達時刻の 0.5 秒前から 5.12 秒間とし、波形全体は、P 波初動到達時刻の 0.5 秒前から 40.96 秒間とした。

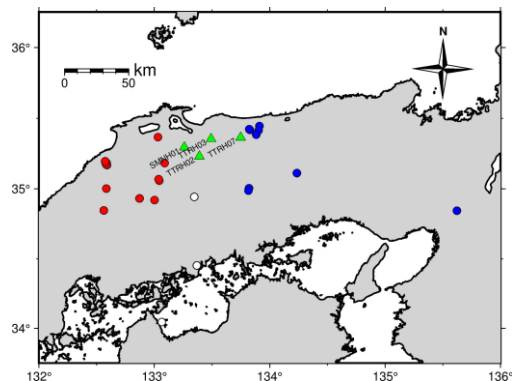


図-2 観測点と震央の位置
(凡例の色は 3. (2) の検討と対応している)

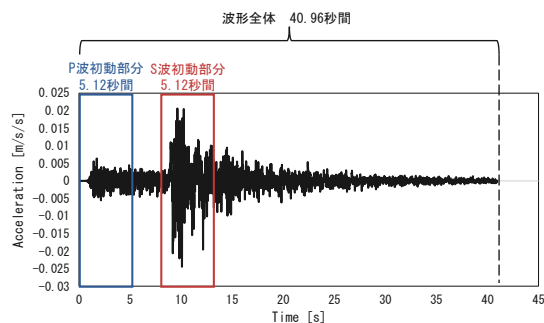


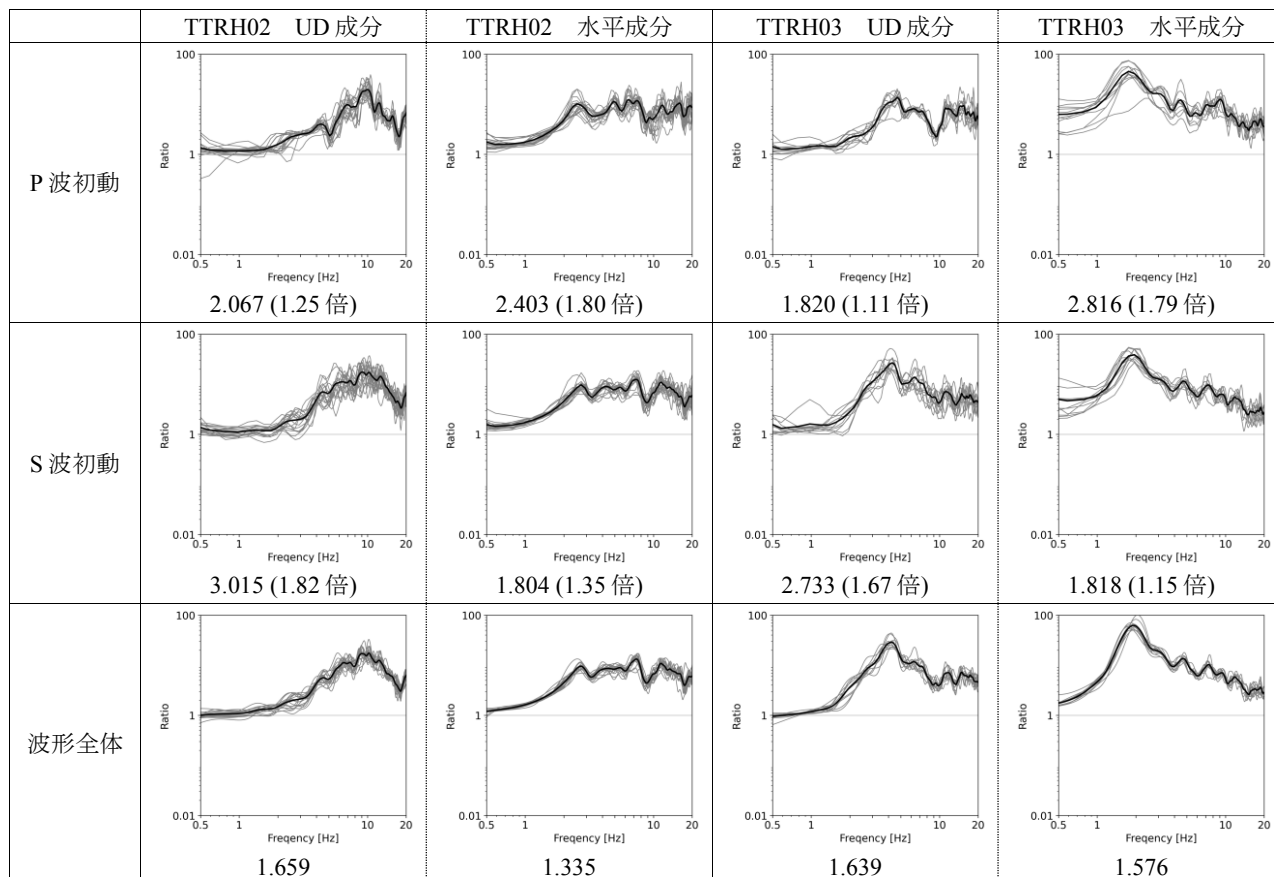
図-3 地震波形の切り出し

3. サイト増幅特性の算出結果

(1) サイト増幅特性のばらつき

観測点ごとに、P 波初動・S 波初動・波形全体のデータを用いて算出したサイト増幅特性を図-3 に示す。なお水平成分は、水平 2 成分のフーリエスペクトルをベクトル

合成し算出したものである。また、グラフ下の数値はばらつきの指標であり、各周波数でサイト増幅特性の標準偏差を求め、それらを平均した値を示す。ばらつきを評価する周波数帯域は 0.5Hz~20Hz とした。()内の値は、各ばらつきを波形全体の場合のばらつきで除した値である。



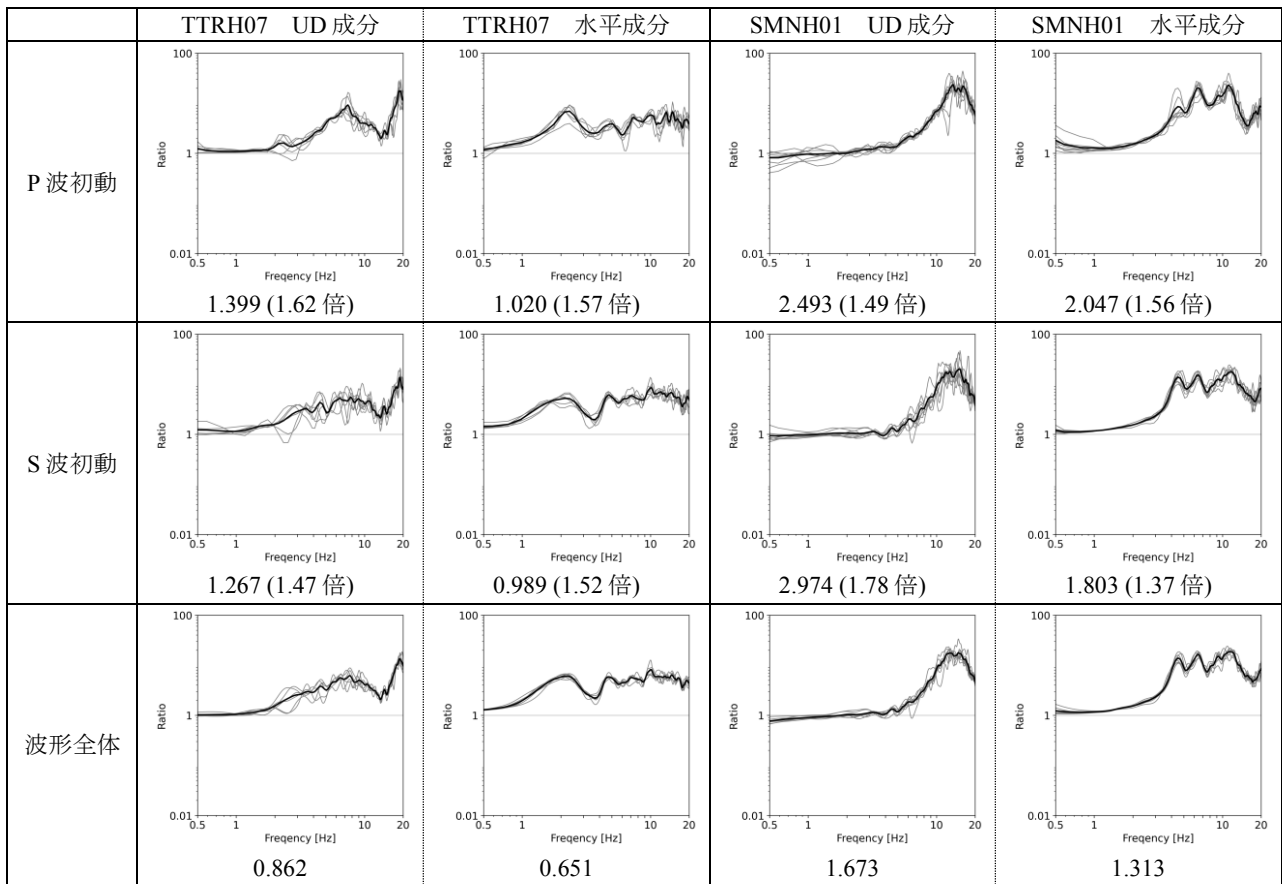


図-4 算出したサイト増幅特性のばらつき

(2) 地震波の到来方向によるサイト増幅特性の違い

次に、P波初動と波形全体（UD成分）についてサイト増幅特性を地震波の到来方向ごとに整理した。図-5のグラフは、地震を観測点の西側と東側で分け、片側ずつサイト増幅特性を平均したものを示す。青線が観測点東側、

赤線が西側の地震の平均サイト増幅特性である。地震波の到来方向によるサイト増幅特性の違いを数値化するため、周波数ごとに東側地震の平均サイト増幅特性と西側の平均サイト増幅特性の差の二乗の平方根を計算し、0.5Hz～20Hzでその平均値を求めた。（グラフ下の数値）

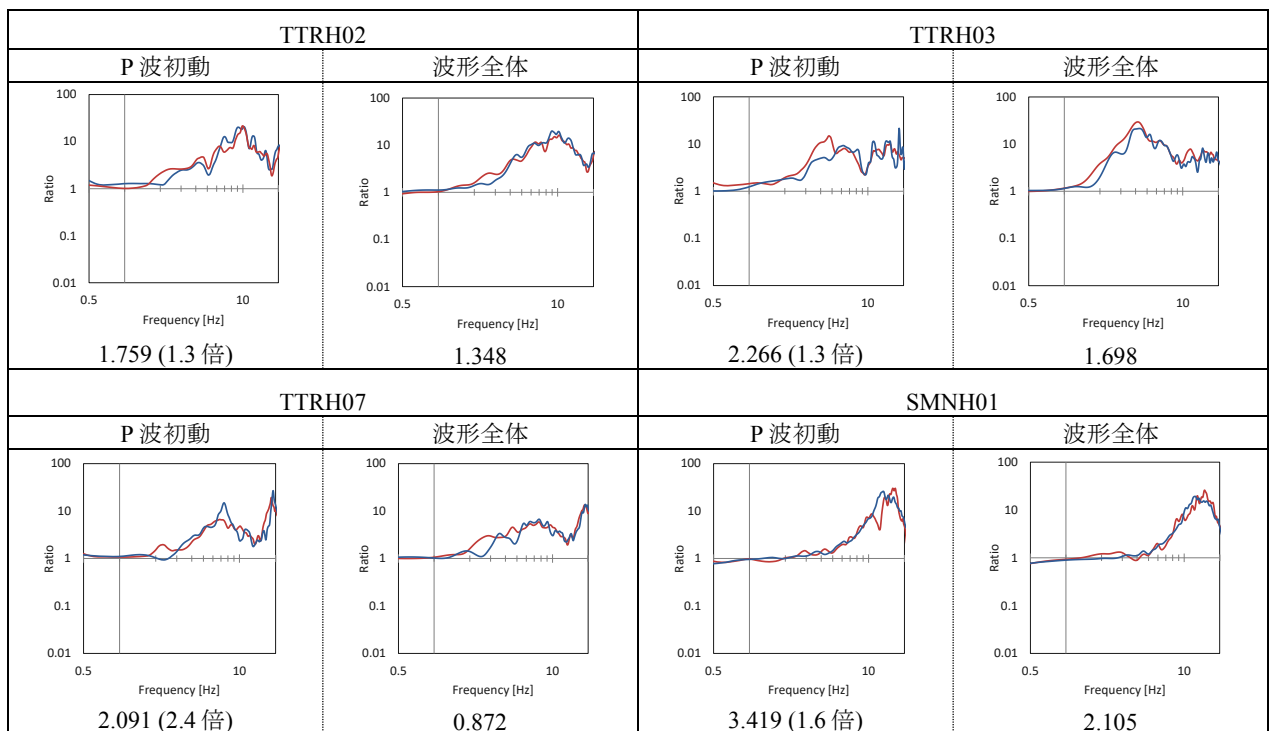


図-5 観測点の両側の地震それぞれに対するサイト増幅特性

4. 考察

(1) 切り出し部分および成分とばらつきの関係

図-4 より、どの観測点においても、波形全体を利用した場合と比べて P 波初動部分を利用した場合のサイト増幅特性の方がばらつきが大きいことが分かる。P 波初動部分を利用したサイト増幅特性のなかで最もばらつきが大きいのは TTRH03 水平成分で、波形全体を利用した場合と比べて 1.79 倍大きい。P 波初動部分では水平成分の振幅が極端に小さいためにこのようにばらつきが大きくなると考えられる。同様に、S 波初動部分を利用したサイト増幅特性についても、波形全体を利用した場合と比べてばらつきが大きく、特に UD 成分のばらつきが大きいことが分かる。S 波初動部分では水平成分に比べて UD 成分の振幅が小さいためばらつきは大きくなると考えられた。

(2) 二重スペクトル比に与える影響

図-5 より、P 波初動部分を用いた場合には、波形全体を用いた場合と比べて地震波の到来方向の違いによるサイト増幅特性の差が大きい傾向があることが分かった。この差が二重スペクトル比算出時にどのくらい影響を及ぼす可能性があるかについて考察する。

図-5 で特に東西での違いが大きかった SMNH01 と TTRH07 のペアを対象にばらつきの影響を計算した。具体的には、SMNH01 の西側地震の平均サイト増幅特性を $G_{1A}(f)$ 、東側平均サイト増幅特性を $G_{2A}(f)$ 、TTRH07 の西側平均サイト増幅特性を $G_{1B}(f)$ 、東側平均サイト増幅特性を $G_{2B}(f)$ として、(1)式の後ろの項を計算した。なお、実際に二重スペクトル比計算に用いる地震は、様々な制約のもと選ぶべきであり、また 2 観測点で同一地震のデータを使う必要があるが、本検討ではサイト増幅特性のばらつきが二重スペクトル比にどのくらい影響を及ぼすかという点のみ着目した参考値を算出するため、地震の選定は行わなかった。

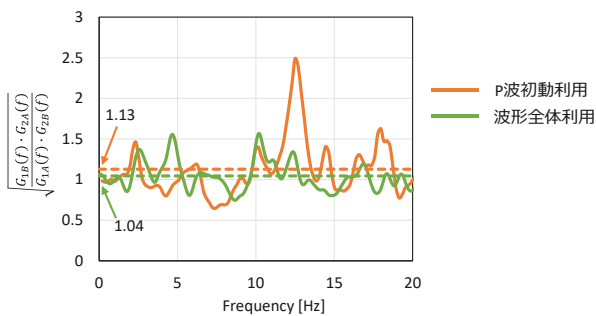


図-6 サイト増幅特性の影響 (ペア SMNH01_TTRH07)

図-6 に、サイト増幅特性の項を計算した結果を示す。この値が 1 ならば (サイト増幅特性が地震に依存しないならば)、サイト増幅特性が二重スペクトル比に及ぼす影響はなく、1 より小さいならば、二重スペクトル比を過小評価していることになる。0.5Hz~20Hz での平均値は、P 波初動の場合 1.13、波形全体の場合は 1.04 であり、本検討のケースでは P 波初動を用いると平均値で 13%ほど二重スペクトル比が大きく評価されることがわかった。

5. まとめ

本研究では、KiK-net の地中および地表の地震観測記録を用いて、鳥取県・島根県の地震観測点 4 点で P 波初動部分におけるサイト増幅特性のばらつきについて検討を行った。これにより得られた知見を以下に示す。

- P 波初動部分を用いて推定したサイト増幅特性は、地震波形全体を用いて推定した場合と比べて、地震ごとのばらつきが大きかった。
- P 波初動部分では水平成分よりも UD 成分の方がサイト増幅特性のばらつきが小さい傾向があった。S 波初動部分では、UD 成分よりも水平成分の方がばらつきが小さかった。
- UD 成分について P 波初動では、波形全体の場合と比べて、地震波の到来方向によるサイト増幅特性の違いが大きかった。
- 上記の違いが二重スペクトル比に与える影響について検討したところ、SMNH01 と TTRH07 のペアでは 0.5Hz~20Hz の平均値で 13%程度二重スペクトル比が大きく算出されることが分かった。

これらの結果から、P 波初動部分に対して二重スペクトル比法を適用する際には、地震波の到来方向ごとにサイト増幅特性を区別して考える必要がある可能性が示された。また、サイト増幅特性が地震の到来方向によらず一定であるという仮定に基づいて算出された二重スペクトル比については、地震ごとにサイト増幅特性の影響を補正することができれば、より正確な減衰特性を得ることができると考えられる。

謝辞

解析には防災科学技術研究所 KiK-net の地震観測記録、気象庁の一元化震源リストを使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山田雅行・小田義也：二重スペクトル比法で推定した主要活断層の減衰特性，日本地震工学論文集，18，pp.59-76，2018。
- 2) Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Takagi, A.: Qp Structure beneath the Northeastern Japan Arc Estimated from Twofold Spectral Ratio Method, Tohoku Geophys. J, Vol.32, pp.21-33, 1989。

250mメッシュの地震動強度を用いた機械学習による建物の損傷推定

Estimation of Building Damage using Machine Learning with 250m Mesh Seismic Intensity

○古川 大志¹, 高井 剛¹, 永田 茂²

Taishi FURUKAWA¹, Tsuyoshi TAKAI¹ and Shigeru NAGATA²

¹鹿島建設株式会社 技術研究所

Kajima Technical Research Institute

²国立研究開発法人防災科学技術研究所 災害過程研究部門

Disaster Resilience Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Using 250m mesh seismic intensity data from QuiQuake and the Japan meteorological agency, this study developed machine learning models for damage estimation of structural and non-structural components. It found that PGV data is crucial for accurate predictions, highlighting the need for reliable PGV sources as QuiQuake has ended.

Keywords : Seismic Intensity, Machine Learning, Decision Tree, Damage Estimation, Non-Structural Components

1. はじめに

地震発生後に建物の損傷の程度を素早く把握することは、応急復旧をする上で重要である。建物の簡易構造損傷推定を行う研究はこれまでも数多く行われてきており¹⁾など、地震動強度指標には、産業技術総合研究所が QuiQuake²⁾として公開してきた 250m メッシュの推計震度や PGV がしばしば利用されてきた。

QuiQuake は 2023 年 3 月に停止されたが、気象庁（以下、JMA と記す）は 2023 年 2 月から 250m メッシュの推計震度の提供を開始した³⁾。QuiQuake と JMA の推計震度の算出方法は異なるため^{2), 3)}、JMA の震度で損傷推定を行う場合は、新たに推定モデルを構築する必要がある。

筆者らは、QuiQuake と JMA のそれぞれを対象として、近年発生した 5 つの地震の建物被害調査結果を用い、機械学習により「構造部材および非構造部材の損傷推定モデル」を構築した。本報では、その概要と推定精度の違いを報告する。

2. 機械学習に用いるデータ

2.1 データの概要

機械学習には 2726 棟の建物被害調査データを使用した。このデータには被害ランクと地震動、竣工年、構造種別、建物用途、推計震度、PGV の情報等が含まれている。

被害ランクの区分と建物棟数は、被害無（1626 棟）、仕上・設備に被害有（895 棟）、仕上・設備・構造に被害有（140 棟）、仕上・設備・構造に甚大な被害有（65 棟）である。地震動は、東北地方太平洋沖地震（927 棟）、熊本地震（111 棟）、大阪府北部地震（1121 棟）、2021 年福島県沖地震（397 棟）、2022 年福島県沖地震（170 棟）の 5 波で、竣工年は 1971 年 6 月以前（35 棟）、1971 年 7 月～1981 年 5 月（80 棟）、1981 年 6 月～2000 年 5 月（626 棟）、2000 年 6 月以降（1054 棟）、不明（931 棟）の 5 区分である。構造種別は S 造（824 棟）、RC 造（656 棟）、SRC 造（255 棟）、その他（299 棟）、不明（692 棟）の 5 区分で、木造の区分はなく、免震の建物がその他に 9 棟含まれている。建物用途は 20 区分あり、官公庁舎（31 棟）、教育・研究施設（197 棟）、文化・社会施設（68 棟）、医療・福祉施設（209 棟）、体

育・スポーツ施設（55 棟）、その他公共施設（8 棟）、流通関係施設（134 棟）、交通・運輸施設（36 棟）、通信施設（23 棟）、事務施設（385 棟）、金融施設（68 棟）、商業施設（157 棟）、レジャー施設（17 棟）、宿泊施設（65 棟）、生産施設（31 棟）、発電・エネルギー施設（23 棟）、住宅（170 棟）、工場建屋（384 棟）、その他（101 棟）、不明（564 棟）である。

2.2 地震動強度の比較

QuiQuake と JMA の推計震度の比較を図 1 に示す。(1) は全建物データの震度の比較で、実線は 1 対 1 の直線を表す。QuiQuake と JMA の震度の差は、点線で示すように概ね ±0.5 には収まっている。(2) は各地震動に対する推計震度の平均値の比較である。2021 年福島県沖地震と大阪府北部地震では、QuiQuake の震度の平均が JMA の平均より 0.2 程度大きい。

QuiQuake は PGV も提供していたが、JMA はしていない。そこで PGV を JMA の震度から藤本・翠川の換算式⁴⁾で求め、学習用データとして使用した。これらの PGV の比較を図 2 に示す。換算式を使用しているため、PGV は震度と比べてばらつきが大きい（図 2(1)）。図 2 (2) に各地震動に対する PGV の平均値の比較を示す。最も大きな差は、2021 年福島県沖地震の 4.7kine であった。

3. 機械学習による損傷推定

3.1 機械学習方法

損傷推定モデルとしてはバギング木⁵⁾を使用し、5 分割交差検証によって学習した。以下に説明変数を様々に変えた場合の損傷推定の結果を示す。

3.2 説明変数を震度と PGV のどちらか 1 つにした場合

説明変数を震度にした場合の結果を図 3 に示す。(1) は、QuiQuake、(2) は JMA の結果である。D1 は被害無、D2 は仕上・設備に被害有、D3 は仕上・設備・構造に被害有、D4 は仕上・設備・構造に甚大な被害有を表す。推定結果が調査結果と一致した欄を青色で示している。図中に示す正解率は、推定結果と調査結果が一致した建物数を全建物数で除したものである。

図 3 の(1)と(2)の結果には大きな乖離がなく、推定結果のほとんどが D1 か D2 となっており、構造被害の推定精

度が低い。一方、説明変数を PGV とした図 4 の結果では、D3 と D4 を推定できている建物数が(1)は 49 棟、(2)が 0 棟となっている。(1)は構造被害をある程度推定できているものの、D3 と推定した場合の適中率は 27.5% (= 33/120) , D4 と推定した場合の適中率は 32.7% (= 16/49) であり、十分な精度を有しているとは言いがたい。

3.3 説明変数を震度と PGV の 2 つにした場合

図 5(1)は説明変数を QuiQuake の震度と PGV に、(2)は説明変数を JMA の震度と換算式より得た PGV にした場合の結果である。(1)の正解率は 94.0%と(2)の正解率と比べて 10%以上高い。また D1 と推定した場合の適中率も、(1)が 96.0%、(2)が 88.7%と(1)の方が高く、D2,3,4 も同様の傾向を示している。

以上のことから、損傷推定の精度には震度だけでなく PGV も大きな影響を与え得ると考えられる。JMA は PGV を提供しておらず、高精度な PGV データの入手方法が今後の課題である。

3.4 説明変数を 3 つにした場合

図 6 は説明変数を QuiQuake の震度、PGV と(1)竣工年、(2)構造種別、(3)建物用途、(4)免震層の有無にした場合の結果である。図 5(1)の正解率 94.0%よりも上昇しているものは(3)と(4)であった。(1)竣工年と(2)構造種別が推定精度の向上にあまり起因しておらず、説明変数の設定に関して、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

近年発生した 5 つの地震の建物被害調査結果を用い、QuiQuake と JMA のそれぞれについて機械学習により「構造部材および非構造部材の損傷推定モデル」を構築し、その推定精度の違いを報告した。PGV の精度が推定精度に大きな影響を与え得ることを示した。

参考文献

- 1) Kazuaki T., Masashi M., Kei H., Munenari I., Fumio Y.. "Development of Fragility Curves for Japanese Buildings Based on Integrated Damage Data from the 2016 Kumamoto Earthquake." Journal of Disaster Research, Vol. 17, pp464-474, 2022.
- 2) 松岡昌志, 山本直孝. "250mメッシュVs30と強震記録に基づく地震動マップの即時推定システム (QuiQuake)." 地域安全学会梗概集, No.25, pp.107-108, 2009年11月.
- 3) 気象庁. "推計震度の求め方について."
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eww/data/suikui/motomekata.html>
- 4) 藤本一雄, 翠川三郎. "近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法." 地域安全学会論文集, No.7, pp.241-246, 2005年11月.
- 5) University of California. "Bagging Predictors.", Springer link, Vol. 24, pp. 123-140,1996.

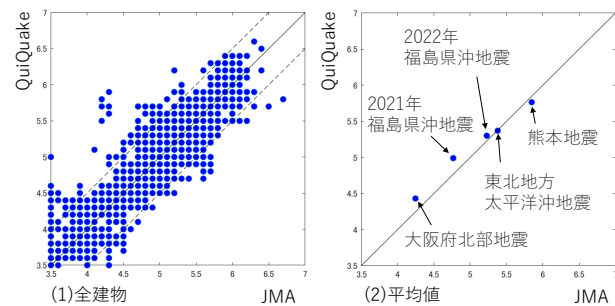


図 1 推計震度の比較

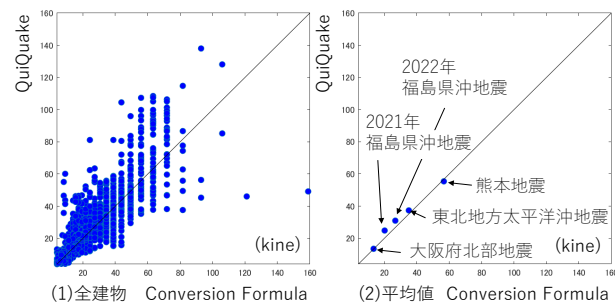


図 2 PGV の比較

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1523	103	0	0	1626
D2	181	712	2	0	895
D3	8	130	2	0	140
D4	5	59	1	0	65
計	1717	1004	5	0	2726

(1) QuiQuake

正解率82.1%

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1486	140	0	0	1626
D2	219	674	1	1	895
D3	12	126	1	1	140
D4	6	58	0	1	65
計	1723	998	2	3	2726

(2) JMA

正解率79.3%

図 3 推定結果 (説明変数: 震度のみ)

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1462	153	8	3	1626
D2	185	611	73	26	895
D3	9	93	33	4	139
D4	4	39	6	16	65
計	1660	896	120	49	2726

(1) QuiQuake

正解率77.9%

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1469	157	0	0	1626
D2	234	660	1	0	895
D3	15	124	0	0	139
D4	4	61	0	0	65
計	1722	1002	1	0	2726

(2) JMA

正解率78.1%

図 4 推定結果 (説明変数: PGV のみ)

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1592	31	2	1	1626
D2	64	822	7	2	895
D3	1	28	110	1	140
D4	2	20	3	40	65
計	1659	901	122	44	2726

(1) QuiQuake

正解率94.0%

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1523	103	0	0	1626
D2	181	712	1	1	895
D3	8	130	1	1	140
D4	5	59	0	1	65
計	1717	1004	2	3	2726

(2) JMA

正解率82.1%

図 5 推定結果 (説明変数: 震度, PGV)

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1563	63	0	0	1626
D2	68	816	7	4	895
D3	5	25	110	0	140
D4	2	11	3	49	65
計	1638	915	120	53	2726

(1) + 竣工年

正解率93.1%

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1576	47	1	2	1626
D2	70	815	4	6	895
D3	5	27	106	2	140
D4	1	12	1	51	65
計	1652	901	112	61	2726

(2) + 構造種別

正解率93.5%

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1581	43	2	0	1626
D2	55	832	5	3	895
D3	1	20	117	2	140
D4	2	13	1	49	65
計	1639	908	125	54	2726

(3) + 建物用途

正解率94.6%

推定調査	D1	D2	D3	D4	計
D1	1589	33	3	1	1626
D2	58	824	8	5	895
D3	1	26	111	2	140
D4	4	17	2	42	65
計	1652	900	124	50	2726

(4) + 免震層の有無

正解率94.1%

図 6 推定結果 (説明変数: 震度, PGV, + α)

モバイル空間統計を利用した令和6年能登半島地震発生時の
七尾市における住民避難行動
-高台・避難場所等の有無および避難者の属性に注目して-
Analysis of Evacuation Behavior of the Public in Nanao City in the Event of 2024 Noto
Peninsula Earthquake, Using Mobile Spatial Statistics
-With a Focus on the Presence of High Ground and Evacuation Sites, Shelters and
Buildings and Attributes of Evacuees-

○近藤 拓夢¹, 根本 豪己¹, 浅海 瑞貴¹, 加藤 美奈², 鈴木 俊博², 四井 早紀³,
大津山 堅介³, 廣井 悠³

Takumu KONDO¹, Goki NEMOTO¹, Mizuki ASAMI¹, Mina KATO²,
Toshihiro SUZUKI², Saki YOTSUI³, Kensuke OTSUYAMA³ and U HIROI³

¹ 東京大学 工学部 都市工学科

Department of Urban Engineering, The University of Tokyo

² (株)ドコモ・インサイトマーケティング エリアマーケティング部

Department of Area Marketing, DOCOMO Insight Marketing, INC

³ 東京大学 先端科学技術研究センター

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

This study investigates the evacuation behavior of people staying in Nanao City at the time of 2024 Noto Peninsula earthquake, focusing on the presence of high ground and evacuation sites, etc. and attributes of people. The results suggest that, in Nanao City, there was no tendency to evacuate to designated emergency evacuation sites in low-lying areas in the immediate aftermath of the earthquake, while evacuees preferred to go to tsunami evacuation buildings or higher ground. Furthermore, by age group, the results show that the evacuation tendencies directly after the earthquake of people in their 20s, 50s, and 80s were weak, and that the population in their 50s increased significantly on the day after the earthquake had occurred.

Keywords : 2024 Noto Peninsula Earthquake, evacuation site, evacuation building, evacuation behavior by age, Mobile Spatial Statistics, GIS

1. 序論

(1) 背景・課題意識

令和6年能登半島地震は、能登地方を中心として甚大な被害をもたらした。本地震では東日本大震災以来初となる津波警報も発令され、被災者は地震発生直後に津波からの避難を余儀なくされた。

被害が大規模であった石川県の7市町(珠洲市、輪島市、穴水町、能登町、七尾市、志賀町、羽咋市)ではおよそ半数の町丁において高齢化率が5割を超えており、また発災が元日であったゆえに同地域に多くの人々が観光や帰省の目的で来訪していたと考えられる。迅速な避難に困難を抱える人々が比較的多かったという点において、本地震では津波からの避難行動における課題がより顕在化した可能性があり、具体的な地域特性や年齢層に着目した詳細な分析が求められる。

また、例えば本研究の対象地区である七尾市においては、東日本大震災を契機に制定された「津波対策の推進に関する法律」に基づく七尾市津波避難計画²⁾にて徒歩での避難を前提として算出した避難可能範囲を公開し、避難が困難であると考えられる地域では津波避難ビルの設置や津波避難経路の整備支援等の施策を行ってきた。

津波からの避難を目的としてとられてきたこれらの施策が実際にもたらした効果を検証する必要もあるだろう。

(2) 本研究の位置づけと研究目的

高齢者の津波避難行動を分析した研究としては、東日本大震災における釜石市³⁾、大槌町赤浜地区⁴⁾、山田町・石巻市⁵⁾、茨城県全域⁶⁾を対象にした避難実態調査等がある。これらの研究では、高齢者では自宅からの避難途中または避難先での被災が多く、このとき避難途中での寄り道が被災の有無を決定づけたケースが多かったこと³⁾、家族血縁の救助、特に若い世代による高齢者世代の見回りや連れ帰り等で避難行動が遅れたケースが見られたこと⁴⁾等が指摘されているほか、自宅に留まるという行動選択に関して、高齢・体の不自由な家族との同居という要因が指摘されている⁵⁾⁶⁾。また、東日本大震災において、道路交通上のボトルネックとなるような地点における渋滞や、方形の街路における超渋滞現象(グリッドロック)の発生により、人々の円滑な避難が妨げられたり、その結果として安全な避難場所や高台にたどり着くことなく津波の犠牲となったりした事例が多く発生した⁷⁾。居住者の年齢構成が東日本大震災の被災地と近い能登地方

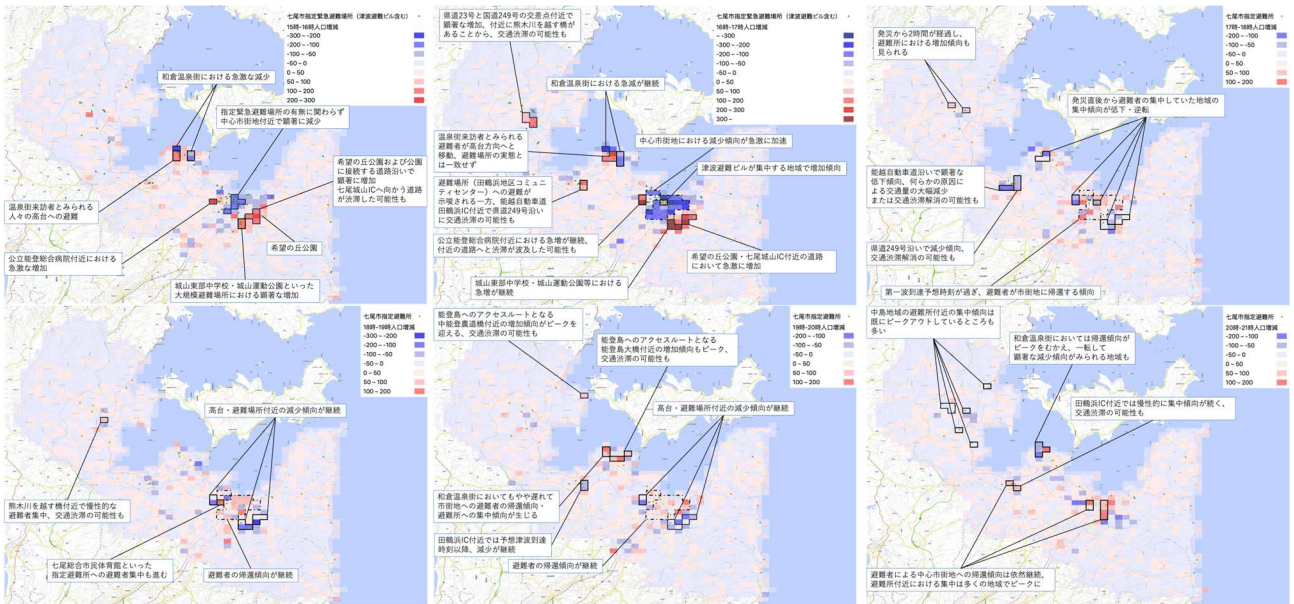


図1 七尾市における地震発生前後（16時）から津波警報解除後（21時）にかけての1時間毎四次メッシュ別人口増減

においても同様の事象に着目した避難行動の分析を実施し、地域性を比較する必要がある。

一方で、観光地・観光客における津波避難対策を論じた研究としては、東南海・南海地震による津波被害が想定される4地域を対象にし、同地域の海水浴場利用者の津波防災意識・避難意思決定に至る要因を検討したもの⁸⁾や、和歌山県・白良浜海水浴場にて実施された津波避難訓練の結果を分析したもの⁹⁾等があるが、実際の津波避難行動を分析した研究の集積は乏しい。

これら既往研究に対し、本研究では前述の課題意識に基づいて令和6年能登半島地震に伴う津波避難行動分析を行い、蓄積されてきた津波避難動向に関する知見との類似性・相違性を検証することを目的とする。

2. 分析方法

上記を目的として、株式会社NTTドコモの「モバイル空間統計」を利用した津波の避難行動の分析を実施した。具体的には「低地に立地する指定緊急避難場所における人口動態」「低地の人口集中地区における人口動態」「幹線道路上のボトルネックにおける人口動態」の3点に着目して分析を行った。

対象地は、沿岸部低地に中心市街地・観光地（和倉温泉街）という特性の異なる二つの人口集中地区が位置し、それらの比較を同地域内で実施することが可能な点、また各々の沿岸部低地を内陸側で接続するように幹線道路（能越自動車道・国道249号）が整備されており、それが避難行動に大きく影響したと考えられる点を鑑みて七尾市に設定した。同地域の低地には津波避難ビル・津波一時避難場所に加えて指定緊急避難場所も多く立地しており¹⁰⁾、指定の避難場所が避難行動に与えた影響を明らかにすることも期待される。

3. 分析結果

(1) 総論

七尾市内の能登島地域を除く四次メッシュにおいて、能登半島地震発災前後（2024年1月1日16時～16時59分の1時間データ）から発災約5時間後（2024年1月1日21時～21時59分の1時間データ）のデータをそれぞれ1時間前と比較して人口増減を示した（図1）。地理的

特徴・都市の特性により各メッシュは様々な人口動態を示しており、それらを（図2）のように類型化した。また本分析において、低地は「最低海拔が10m以下のメッシュ（以降、海拔10m以下メッシュ）」と定義した。

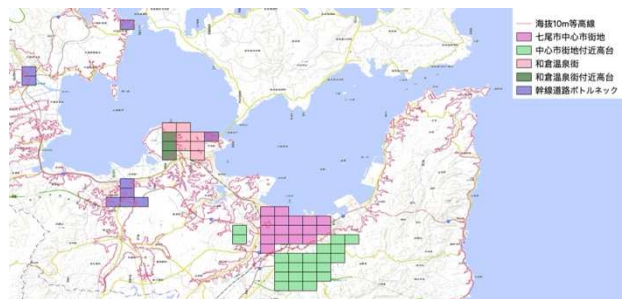


図2 海拔10m等高線とメッシュ分類（七尾市一部拡大）

(2) 低地に立地する指定緊急避難場所における人口動態

- 1) 海拔10m以下メッシュにおける緊急避難による人口変化が顕著と思われる15時（発災前）データと17時（発災直後）データについてメッシュ内に存在する指定緊急避難場所の収容人員とメッシュ内の人口増減の相関を調べた結果、 $r \approx -0.068$ となり（ $n=466$ ）、両者には相関が見られなかった。これは海拔10m以下に位置する指定緊急避難場所への避難傾向がないことを示唆している。
- 2) 一方、海拔10m以下メッシュと高台メッシュ⁽¹⁾においては15時-17時の人口増減に有意な差があった（表1）。

表1 海拔10m以下メッシュと高台メッシュの（17時人口-15時人口）平均および仮説検定結果

海拔10m以下メッシュにおける(17時人口-15時人口)平均	-11.401288
海拔10m以下メッシュのサンプル数	466
高台メッシュにおける(17時人口-15時人口)平均	13.6879195
高台メッシュのサンプル数	298
F検定結果 (p値, 両側)	0.52763186
studentのt検定結果 (p値, 両側)	1.1133E-05

海拔10m以下メッシュ内の人口は17時データにかけて減少しており、高台メッシュにおいては人口増加する傾向にあった。これは、発災時に海拔10m以下メッシュに滞在していた人々は、海拔10m以下の避難場所よりも付近の高台へと避難したことを示唆している。

3) 海拔 10m 以下メッシュにおける避難動向を年齢層ごと^②に分析した結果、次のことが示唆された(図3)。

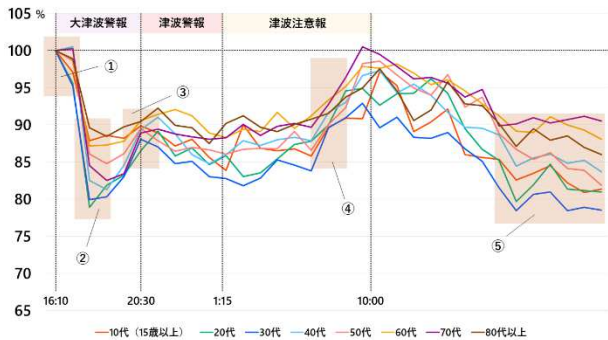


図3 年齢層ごとの人口推移^③(七尾市・10m以下)

地震発生直後において、人口増減が主に「20代・30代」「40代・70代」「50代・60代・70代」で一致した(図3①)。

40代以降の年代で、自力での避難が難しい親世代との同伴避難が生じ、その際「40代・70代」の避難が遅れる傾向にあった可能性がある。また、18時～19時時点において、40代・50代・70代・80代は人口減少が継続するが、10代・20代・30代は人口増加に転ずる。なお、10代・80代の人口減少率は10%ほどと比較的低い(図3②)。

40代以降の年代で、地震発生直後の避難行動が比較的長期に及んでいたと考えられる。さらに、20時から22時にかけて、全年齢層で人口が増加している(図3③)。

20時30分に大津波警報が津波警報に切り替わったことが関係していると考えられるが、それ以前から一部で帰還行動が確認されている。若年層を中心として、震災後2時間が経過した時点から帰還の傾向が大きくなっていったと考察される。翌朝7時頃になると、全年齢層の大部分で帰還行動が見られ、10時頃には対象メッシュにおいて地震発生時の90%ほどの人口となった(図3④)。

これは夜明けに伴う帰還行動であると考えられるが、10時頃を境にして人口は減少傾向に転じ、海拔10m以下メッシュへの滞在時間は短かったものと考えられる。このとき、10時17分に約14時間ぶりの大きな地震(最大震度5弱:七尾市で震度4)が発生し、緊急地震速報も発表された。これが人口を減少傾向へと転じさせた一因である可能性がある。1月2日の夜間では10代から60代において、前日よりも顕著に人口が少なくなっている(図3⑤)。

自宅やその付近の避難所に滞在していた人のうち、高齢者が多くの割合を占めていたと考えられる。

4) 上記と、海拔10m以下メッシュのうち指定緊急避難場所を含むものに対象を絞った人口動態(図4)とでは、次のような違いが見られた。

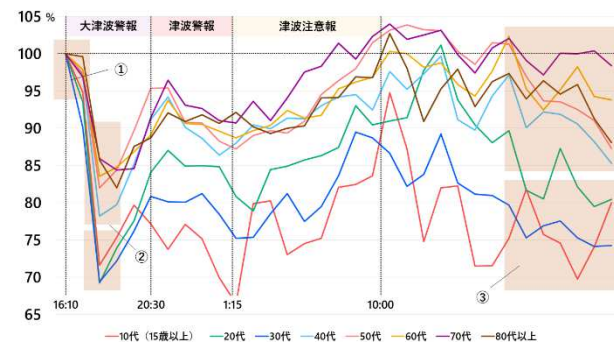


図4 年齢層ごとの人口推移^③(七尾市・10m以下・緊急避難場所を含むメッシュのみ)

地震発生直後において、前述の「20代・30代」「40代・70代」「50代・60代・70代」で避難行動が一致するというトレンドは緊急避難場所を含むメッシュでは見られなかった(図4①)。

また、若年層を中心として、緊急避難場所を含むメッシュにおいて人口がより減少していることが明らかになった。さらに、18時～19時時点の緊急避難場所を含むメッシュにおいて、30代以下の世代の人口減少率と50代以上の世代の人口減少率とで10%以上の差があった(図4②)。

若い世代を中心として「緊急避難場所ではなく、付近の標高の高い地点を初期の避難先として選択した」ことが部分的に示唆される。海拔10m以下メッシュ全体の人口動態とは異なり、緊急避難場所を含むメッシュでは50代以降の世代において1月2日10時以降の人口減少が見られない(図4③)。

対象地域において緊急避難場所が避難所を兼ねているケースが多く見られることから、1月2日の夜間は高齢者を中心に避難所に滞在し、若い世代は海拔10m以下メッシュの地域外に滞在する傾向があった可能性がある。

(3) 低地の人口集中地区における人口動態

七尾市における低地には、主に中心市街地と和倉温泉街という二つの人口集中地区がある。中心市街地は七尾市の中で唯一津波避難ビルが整備されている地区であり、また和倉温泉街は元日という地震発生時の時間的特徴から来訪者の多さが推測される。特性の異なる両者において、該当メッシュの人口増減を分析した。

1) 七尾市中心市街地メッシュ^④においては、地震発生直後に大きく人口の減少が見られたが、例外的に津波避難ビルが集中するメッシュでは、大津波警報発令下においても人口の集中が見られた(図5)。

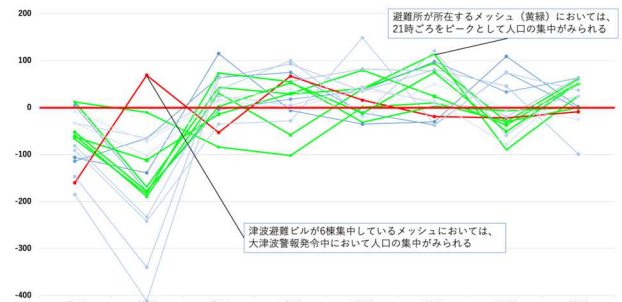


図5 七尾市中心市街地メッシュの各メッシュにおける1時間毎の人口増減

2) 七尾市中心市街地付近の高台メッシュ^⑤においては、大規模な避難場所かつ避難所である城山東部中学校・城山運動公園付近では、大津波警報発令下に急激な人口集中が見られ、大津波警報解除(20時30分)後も一定の人口が滞在した(図6)。

希望の丘公園付近でも大津波警報

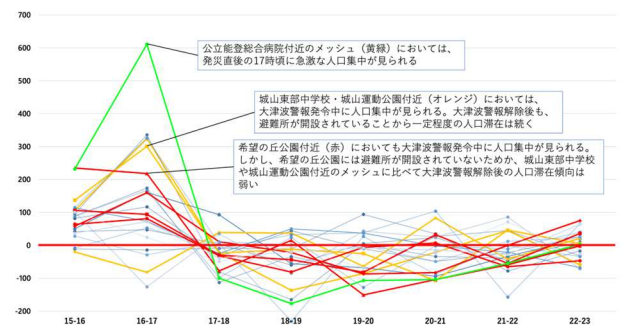


図6 七尾市中心市街地付近の高台メッシュの各メッシュにおける1時間毎の人口増減

報発令下で急激な人口集中が見られたが、前者と比較して大津波警報解除後の人口滞在傾向は弱い。また、避難場所ではない公立能登総合病院が位置するメッシュでは、発災直後の17時頃に急激な人口集中が見られた。

3) 和倉温泉街メッシュ⁽⁶⁾では、後述のようにメッシュ内の人々が地震発生後に高台等に避難したことが示唆されるが、海岸から近くでも大津波警報発令下において人口集中が見られるメッシュが存在した。海拔10m以下における避難場所への避難傾向がないという先述の結果も踏まえると、この集中は内陸部や高台へと向かう車両渋滞が一因である可能性がある。

4) 和倉温泉街付近の高台メッシュ⁽⁷⁾においては、温泉街での人口減少と同時に人口が顕著に増加し、また温泉街に人口が回帰した時間帯では減少傾向が見られた。地震発生後に温泉街来訪者が高台へと避難したことが示唆される。なお、このメッシュ群に含まれる避難場所3ヶ所全てが立地しているメッシュにおいては、予想津波到達時刻(16時30分)以降も人口集中が続いた。これは、土地勘の乏しい来訪者による混乱した避難行動に伴う交通渋滞や、自主的な避難行動等の来訪者特有の避難行動が関係している可能性がある。

(4) 幹線道路上のボトルネックにおける人口動態

能越自動車道・国道249号といった幹線道路上には河川・水道上にかかる橋や自動車専用道路IC等が存在する。緊急避難時、特に自動車交通にとってのボトルネックが位置し、かつ発災直後の人口変化が顕著であったメッシュについても、人口動態の分析を実施した。

1) 能越自動車道田鶴浜IC・高田IC付近、および国道249号沿いのメッシュにおいて、車両渋滞と思われる人口集中が生じた(図7)。地震直後より能越自動車道や能登島への連絡ルートは通行止めとなっており、これが地震発生後の自動車交通に混乱を与えたものと思われる。人口集中のピークは、大津波警報発令中と解除後の2回に分けて見られ、津波からの緊急避難と警報解除後の帰還行動の双方に交通上のボトルネックが影響を及ぼした可能性が考えられる。

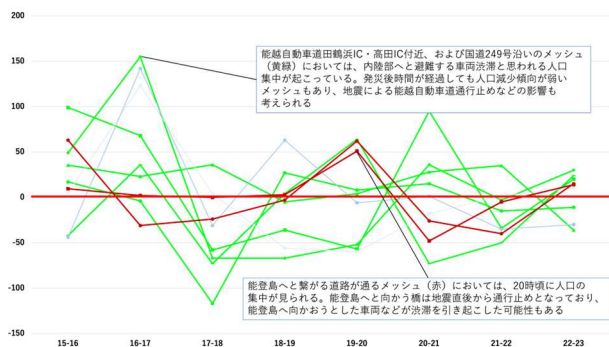


図7 幹線道路上のボトルネックの各メッシュにおける1時間毎の人口増減

4. 結論

本研究における特に重要な結果の一つとして、東日本大震災において見られた津波避難動向の一部が今回の地震においても確認されたことが挙げられる。具体的には高齢者とその子供世代の同伴避難と考えられる傾向が生じ、避難初期および帰還のタイミングにおけるボトルネックの影響が確認された。また、観光地である和倉温泉街付近では中心市街地と比して高台への人口集中が長期化したことが明らかになり、さらなる研究が求められる。

最後に、指定緊急避難場所への避難行動傾向が統計的に見られず、かつそれが若年層においてより顕著であったことに関しても原因究明が必要であろう。

補注

- (1) 最低海拔が10mより高く、かつ海拔10m等高線のメッシュから1km以内に座標を有するメッシュ
- (2) 「10代(15~19歳)」「20代(20~29歳)」「30代(30~39歳)」「40代(40~49歳)」「50代(50~59歳)」「60代(60~69歳)」「70代(70~79歳)」「80代(80歳以上)」の8つ
- (3) 15時~16時の各人口を100としたときの比を示した
- (4) 海岸沿いの低地に位置する七尾市中心部の市街地が広がり、なおかつ発災直後の人口変化が顕著であったメッシュ
- (5) 最低海拔が10mより高く、なおかつ中心市街地付近(七尾駅から半径3km程度)に位置し、発災直後の人口変化が顕著であったメッシュ
- (6) 温泉地として多くの観光施設や観光客向け商業店舗、旅館等が集積し、発災直後の人口変化が顕著であったメッシュ。七尾市元町、和倉町、和倉町ひばり3丁目、石崎町香島1, 3丁目、光陽台が概ね含まれる
- (7) 和倉町の南部に位置する海拔10m程度の高台に位置し、なおかつ発災直後の人口変化が顕著であったメッシュ

参考文献

- 1) 朝日新聞(2024). 能登半島の被災地、地区の半数が高齢化率5割以上 珠洲市は7割超. 朝日新聞デジタル, <https://www.asahi.com/articles/ASS1M5VX4S1LULLI001.html>, (参照 2024-04-14).
- 2) 七尾市(2021). 七尾市津波避難計画.
- 3) 金井昌信・片田敏孝(2013). “津波から命を守るための教訓”の検証～岩手県釜石市を対象とした東日本大震災における津波避難実態調査から～. 災害情報, No.11, pp.114-124.
- 4) 神原康介他(2013). 東日本大震災時における岩手県大槌町赤浜地区住民の避難行動調査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.655-656.
- 5) 三上卓(2014). 東日本大震災の津波犠牲者に関する調査分析～山田町・石巻市～. 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.908-915.
- 6) 田村誠他(2013). 津波発生時の避難行動解析: 2011年東北地方太平洋沖地震における茨城県での津波避難. 日本地震工学会論文, Vol.13, No.4, pp.19-37.
- 7) 阿部博史(2014). 「震災ビッグデータ」から見えてきた東日本大震災の姿. 放送メディア研究, No.11, pp.271-289.
- 8) 増本憲司・川中龍児・石垣泰輔・島田広昭(2010). 観光地海岸利用者の津波に対する避難行動と避難意思決定に関する研究. 土木学会論文集 B2, Vol.66, No.1, pp.1316-1320.
- 9) 照本清峰(2013). 観光地における津波避難体制の課題とあり方に関する一考察 - 白浜町・白浜地域における津波避難訓練をもとにした検討 -. 都市計画論文集, Vol.48, No.3, pp.795-800.
- 10) 七尾市(2018). 津波ハザードマップ 七尾市全域版.

深層学習を用いた明治期の旧版地図からの低湿地抽出 Extraction of Lowland Wetlands in Historical Topographic Maps Using Deep Learning

○細田 桃¹, 押尾 晴樹¹, 松岡 昌志¹
Momo HOSODA¹, Haruki OSHIO¹ and Masashi MATSUOKA¹

¹ 東京工業大学 環境・社会理工学院
School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

The correlation between historical land use as depicted in historical topographic maps and contemporary disasters has been noted. Therefore, to utilize such information for hazard assessment, this study focuses on automatically extracting land use patterns using deep learning. We aimed to extract water areas, wetlands, paddy fields, and muddy fields associated with liquefaction and water-related hazards.

Keywords : historical topographic maps, land use, deep learning, U-Net, feature extraction

1. はじめに

明治・大正期の旧版地図は土地の人工改変前の地形や土地利用を知ることができる貴重な資料である。防災分野においては、旧版地図における土地利用と現代の液状化や洪水といった自然災害との関連が指摘されており、ハザード評価への活用が求められている。

しかし、土地の改変履歴を判読するには膨大な時間がかかり、広域における判読を手作業で行うことは難しい。そこで、土地利用分類の自動抽出が求められている。既往研究では、荻田ら¹⁾が明治・大正期の5万分の1地形図から「集落」と「水域」の自動抽出に取り組んでいる。本研究では、既往研究と同様の地図を用い、液状化や地震災害と関連がある³⁾が既往研究では抽出できなかった「湿地」、さらに液状化や地震災害、水害と関連がある「水田」「泥田」⁴⁾を加えて「水域」「湿地」「水田」「泥田」の4つの領域を自動抽出することに取り組む。

2. 手法

実験は荻田らが水域を抽出する際に用いた「熱田町(明治24年測量)」「鹿島(明治36年測量)」「竜崎(明治36年測量)」「佐原(明治39年測量)」「大阪東北部(明治41年測量)」「岸和田(明治42年測量)」の6図幅を対象に行った。水域・湿地は荻田らの作成したアノテーションデータを使用し、水田・泥田についてそれぞれアノテーションデータの作成を行った。使用した図幅における対象とする土地利用の地図記号を図1に示す。

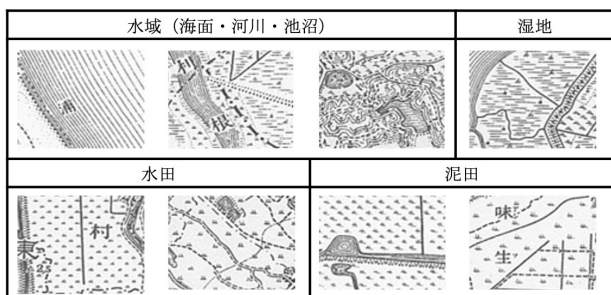


図1 対象とする土地利用の地図記号

対象図幅から図郭を切り抜いて輝度の正規化を行い、訓練・検証・テストデータを6:2:2に分割した。その後、256 px×256 pxのパッチを間隔128 pxで切り抜いた。また、本実験のデータは不均衡であり、少数派クラスにより高精度な抽出に取り組むため、地図記号の向きを考慮したデータ拡張を行った。処理の概要を図2、データ拡張後の訓練データの構成を表1に示す。

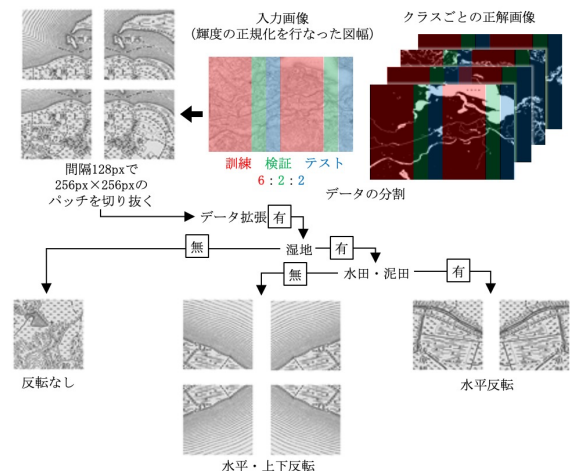


図2 訓練データの拡張方法

表1 データ拡張後の訓練データの構成

データ枚数	ピクセル数の割合			
	水域	湿地	水田	泥田
5329	0.170	0.024	0.178	0.042

モデルのベースには画像のピクセルごとのクラス分類タスクで代表的な深層学習ネットワークである U-Net を用いる。荻田らの研究²⁾ではU-Netを用いた湿地の抽出は困難であったが、Wuらの研究⁵⁾ではスイスの旧版地図から湿地を抽出している。彼らは U-Net に ASPP(Atrous Spatial Pyramid Pooling)を追加し、損失関数は荻田らが Cross Entropy Loss を用いたのに対して Dice Loss, 不確実

性推定などを用いて土地利用を抽出している。日本の旧版地図がモノクロ印刷であるのに対して、Wuらが対象としたスイスの地形図はカラーであり、土地利用の表現も異なるため、日本の旧版地図に対しても彼らの手法が有効であるかは明らかでない。本実験では、荻田らの手法をベースに多クラス分類モデルを作成し、Wuらとの比較からバッチ正規化、Dice Loss、不確実性推定、ASPPについて検討を行った。実験に使用したモデルを表2にまとめる。なお、バッチサイズ等のハイパーパラメータは一律に設定して実験を行なった。

表2 検討したモデルの構成

モデル	ネットワーク	損失関数
O	U-Net + Dropout	Cross-Entropy Loss
H0	U-Net + Dropout + Batch Normalization	Cross-Entropy Loss
H1	U-Net + Dropout + Batch Normalization	Dice Loss
H2	U-Net + Dropout + Batch Normalization + ASPP	Dice Loss
H3	U-Net + Dropout + Batch Normalization	Dice Loss + 不確実性推定

3. 実験結果と考察

本実験のテストデータにおける多クラス分類の結果と出力の例を表3、図3に示す。モデルOとH0の比較から、バッチ正規化を追加することで学習が安定し、湿地を含む土地利用の抽出精度が向上する大きな効果が確認できた。また、Dice Lossを損失関数としたH1ではH0に比べて精度の向上が確認できた。Wuらの研究ではASPPにより結果が大きく向上していたが、本実験のデータではH1とH2に大きな差は見られずその効果は見られなかった。Wuらの対象とした地図はカラーであること、また、本実験ではWuらが分類した河川・池沼を水域で1クラスにしていることもWuらのような効果が見られなかった原因と考えられる。H3でも精度の差は小さいが、図3(b)のように他モデルで誤抽出している山間部などを正しく抽出している画像もあり不確実性推定の効果が確認できた。しかし、いずれのモデルでも図3(c)のような細かい河川が抽出されない、訓練に使用していない図幅における出力では図4(e)-(g)のように等高線・市街地・線路等を誤抽出するなどの問題が見られた。

また、H1と同様の構成でそれぞれのクラスを対象と背景の2クラス分類で学習させたモデルの精度を表4に示す。水域・水田は2クラス分類の精度が高くなったが、湿地・泥田は表3に示す多クラス分類の精度が高い結果となり、少数派クラスでは多クラス分類を行うことでデータの不均衡が改善し精度が高くなったと考えられる。

表3 各多クラス分類モデルの抽出精度

土地利用	評価指標	O	H0	H1	H2	H3
水域	Precision	0.695	0.968	0.986	0.985	0.979
	Recall	0.776	0.986	0.968	0.970	0.981
	F1score	0.733	0.977	0.977	0.977	0.980
湿地	Precision	0.141	0.872	0.944	0.949	0.946
	Recall	0.520	0.929	0.890	0.871	0.889
	F1score	0.221	0.900	0.916	0.908	0.916
水田	Precision	0.479	0.823	0.892	0.890	0.897
	Recall	0.527	0.953	0.896	0.897	0.900
	F1score	0.502	0.883	0.894	0.894	0.899
泥田	Precision	0.151	0.857	0.945	0.939	0.949
	Recall	0.643	0.982	0.950	0.956	0.949
	F1score	0.245	0.915	0.948	0.947	0.949
平均	Precision	0.367	0.880	0.942	0.941	0.943
	Recall	0.616	0.962	0.926	0.923	0.930
	F1score	0.425	0.919	0.934	0.932	0.936

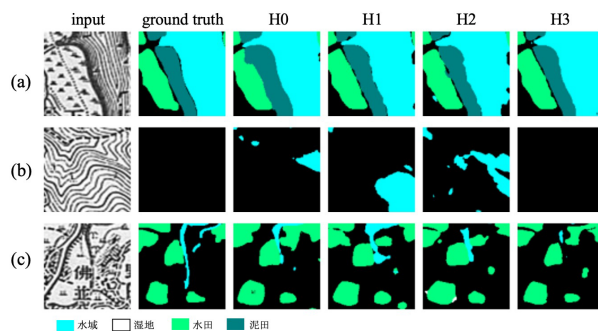


図3 各多クラス分類モデルの出力例

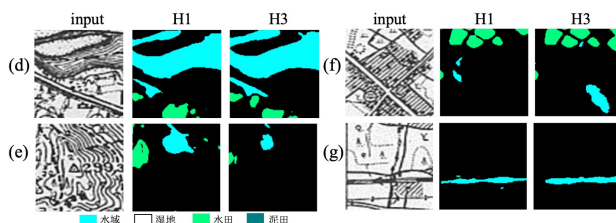


図4 未知の図幅における出力例,(d)(e)小千谷(明治44年測量),(f)(g)東京東北部(明治42年測量)

表4 2クラス分類モデルの抽出精度

土地利用	水域	湿地	水田	泥田	平均
Precision	0.984	0.961	0.905	0.958	0.952
Recall	0.983	0.846	0.906	0.912	0.912
F1score	0.984	0.900	0.906	0.935	0.931

4. 結論と今後の課題

本研究では、明治期の旧版地図から、水域・湿地・水田・泥田を同時に自動抽出するモデルを作成した。水田・泥田の結果から、既往研究で取り込まれていたハッチングで表される領域に加え、地図記号と境界線で表される領域についてもU-Netを用いて抽出可能であることを確認できた。

今後の課題として、モデルの精度向上、適応可能範囲の調査を行う。図4で示されるように、モデルのデータセットに含まれない図幅に対して性能を発揮できる範囲は明らかではなく、広域で適応可能か調べる必要がある。また、GIS上で分布図の作成し、現代の災害についての分析に実用できるようにする。

参考文献

- 1) 荻田亜美,松岡昌志,篠原崇之,修浩毅,“U-Netを用いた旧版地図からの市街地抽出”,地域安全学会梗概集, No.49, pp.39-42,2021-10
- 2) 荻田亜美,修浩毅,篠原崇之,松岡昌志,“U-Netを用いた旧版地図からの水域の抽出”,地域安全学会梗概集, No.50, pp.1-4, 2022-5
- 3) 青山雅史,小山拓志,宇根寛,“2011年東北地方太平洋沖地震による利根川下流低地の液状化被害発生日の地形条件と土地履歴”,地理学評論SeriesA,87(2),pp.128-142,2014
- 4) 古場杏奈,山本晴彦,松岡光美,兼光直樹,“福岡県久米市合川地区における土地利用の変遷と水害リスクの評価”,時間学研究学会誌,第13号, pp.73-89, 2022
- 5) Sidi Wu, Magnus Heitzler, Lorenz Humi, “Leveraging uncertainty estimation and spatial pyramid pooling for extracting hydrological features from scanned historical topographic maps”, GIScience & Remote Sensing, 59, 1, pp. 200-214, 2022

建物被害認定調査における調査員の損傷程度の判断に関する考察

Inspectors' Judgment of the Degree of Damage in Building Damage Inspection

○辻 翔平¹, 小泉 沙樹², 林海希², 田中 聡³
 Shohei TSUJI¹, Saki KOIZUMI², Kaiki HAYASHI² and Satoshi TANAKA³

¹元 常葉大学大学院 環境防災研究科

Faculty of Graduate school of Environment and Disaster Research, Tokoha University

²元 常葉大学 社会環境学部

Faculty of Social and Environmental Studies, Tokoha University

³常葉大学大学院 環境防災研究科

Graduate school of Environment and Disaster Research, Tokoha University

Building damage inspection is conducted after an earthquake disaster. It is well known that there are wide variations in inspection results because they are conducted visually by local government officials, but the details of these variations have not been clarified. This paper analyzes such damage inspection process, focusing on how the inspector evaluate the level and area of damages. The results categorized the variation into several types and analyzed the factors contributing to each type.

Keywords : building damage inspection, damage degree, damage classification, visual inspection

1. はじめに

近年の日本は地震や洪水、台風など多くの災害に見舞われている。これら災害によって建物に被害が発生すると、さまざまな被害状況の調査が実施される。このうち建物被害認定調査は、被災者の生活再建支援を目的に、原則自治体職員によって実施され、その結果に基づいて災証明書が発行される。

建物被害認定調査は、災害時の自治体の業務ではあるが、通常業務とは大きく異なるため、調査員ごとの結果のばらつきによる調査結果の公平性や妥当性の問題など、さまざまな課題が指摘されている^{1) 2)}。

建物被害認定調査には、現場で建物の“どこ”に“どのような”損傷が発生したかを目視で確認し記録する「被害の調査」と、調査結果をもとに損傷情報を分析してその程度を評価する「被害の評価」の2つの作業がある。「被害の調査」では、平面図に被害箇所を記入するとともに、その損傷程度(I~V)を記録する。損傷程度(I~V)については、内閣府によってすべての部位の損傷程度の判定基準と例示が定められているため、調査員は基準と例示を参考に損傷程度を決定する(表1、図1)³⁾。しかし、損傷程度の基準と例示だけでは全ての被害を網羅的に説明することができないため、調査員が損傷程度の判定する際に混乱し、調査員ごとに損傷程度のばらつきが発生することが、課題として指摘されている。

しかしながら、調査員ごとにどの程度のばらつきが発生しているのか、またばらつきが発生する原因や、それらの損傷の特徴分析などの基本的な検討は、これまでほとんどなされてこなかった。

そこで本研究では、自治体職員を対象に被害画像から外壁の損傷程度の判定をしていただき、その結果の分析から、自治体調査員が損傷程度を判断する際の傾向やその要因について検討した。

表1. 損傷程度の基準(外壁)³⁾

程度	損傷の例示		損傷程度
	【モルタル塗り仕上等】	【ボード】	
I	・開口隅角部週りにわずかなひび割れが生じている。	・目地部にわずかなずれが生じている。	10%
II	・仕上の剥離が生じている。	・仕上面の目地部にひび割れやずれが生じている。	25%
III	・仕上材が脱落している。	・目地部に著しいずれ、面材釘打部の部分的な浮き上がり、ボード隅角部の破損が生じている。	50%
IV	・仕上材が脱落しており、下地材にひび割れが生じている。	・釘の浮き上がり、ボードの脱落が見られる。	75%
V	・仕上材が脱落しており、下地材に破損が生じている。		100%

図1. 損傷程度の例示(外壁)⁴⁾



2. 損傷程度の判定の概要

(1) 調査方法

本研究で使用した被害写真は、2016年に発生した熊本地震で著者らの研究チームが撮影した木造住宅の写真である。これらの写真から、損傷部分の拡大写真ではなく、建物の1階又は2階部分の全景が写っている写真50枚を使用した。各被害写真には、著者が事前に損傷がある箇所を四角で囲い(損傷枠)、あらかじめ損傷の存在を明示した。損傷枠は、1枚の被害写真に複数個設定した。

損傷の記入方法は、①損傷箇所を赤マジックで囲う。②損傷箇所に算用数字で損傷程度を記入する。③損傷枠

で囲われている被害のうち、複数の損傷枠が損傷が重なっていたり、繋がっていたりする場合は、1つの損傷としてまとめることも可能。注意事項として、赤マジックでは、損傷枠で囲われている被害がすべて囲われるように記入する、損傷程度が異なる場合は、別の損傷として別の四角で囲うこととした。

記入方法

- ①建物に被害が生じているところを細い赤枠で囲んでいます。
- ②すべての被害箇所を評価する必要はありませんが、被害箇所には下図のように赤マジックで囲ってください。
- ③その部分の損傷程度を、下図のように算用数字で赤マジックを囲った個所に記入してください。
- ④複数の赤枠が重なっている、あるいは繋がっている場合（写真右）、一つの損傷と認めた場合には、まとめて1枠で囲ってください。



注意事項

- ・建物に被害が生じている細い赤枠が囲われるように赤マジックで記入してください。
- ・記入方法④であるが、損傷程度が異なる場合は、別の被害として赤マジックで記入してください。



図2. 説明資料(上：記入方法、下：注意事項)

(2) 調査対象者

本研究では、「中越大震災ネットワークおぢや」で開催された建物被害認定調査実地研修会を受講した行政職員47人(以下ネットワークおぢやとする)、奈良県で実施された建物被害認定調査研修会に参加した行政職員28名、静岡地方税滞納整理機構課税研修(以下静岡県とする)の行政職員12名の計87名である。

3. 分析結果

(1) 分析方法

調査対象者87名に対してpicture1-50の損傷写真について、被害箇所別の損傷程度の判断にどれだけのばらつきがあるのかを検討した。まず、損傷枠ごとに損傷程度の正解を検討する。この損傷程度の正解の決定は著者らにとっても難しい課題である。そこで本研究では、各損傷枠について、回答の最頻値を正解とした。ただし、全ての損傷枠について回答が得られたわけではない。そこで無回答の割合が50%以上の損傷枠については、確認されにくい損傷として、分析から除外した。また、損傷程度IV、Vについては、十分な量のデータないため、今回は損傷程度I-IIIについて分析・考察した。

(2) 分析結果

まず、損傷程度別の平均正解率は、Iが67.5%、IIが55.4%、IIIが53.0%であった。最も正解率が低い損傷枠は、どの損傷程度でも約30%であった。次に損傷程度別にI~IIIのばらつきをヒストグラムの型で分類した。その結果、損傷程度Iは「がけ型、丘型、ツイン型(I or II)」、損傷程度IIは「がけ型、丘型、ツイン型(II or III)」、損傷程度IIIは「がけ型、丘型、平坦型、ツイン型(II or III)、ツイン型(III or IV)」のタイプに分類することができた(図3)。本研究では、損傷程度I~IIIで共通で正解率が75%以上の「がけ型」を正解のタイプとした。タイプ別の正解率の内訳を表2から表4に示す。

表2. 損傷程度Iのタイプ別の内訳

	被害箇所数	正解率の平均(%)	最大正解率(%)	最小正解率(%)
がけ型	36	85.8	96.8	75.0
丘型	43	57.5	74.6	35.9
ツイン型(I or II)	13	51.1	56.4	47.4

表3. 損傷程度IIのタイプ別の内訳

	被害箇所数	正解率の平均(%)	最大正解率(%)	最小正解率(%)
がけ型	2	82.7	87.0	78.5
丘型	30	55.8	70.7	36.5
ツイン型(I or II)	7	49.4	55.8	41.7
ツイン型(II or III)	10	52.6	59.8	45.9

表4. 損傷程度IIIのタイプ別の内訳

	被害箇所数	正解率の平均(%)	最大正解率(%)	最小正解率(%)
がけ型	2	77.6	77.8	77.4
丘型	20	57.6	74.4	47.0
平坦型	5	35.0	43.8	28.3
ツイン型(II or III)	6	45.7	50.6	42.9
ツイン型(III or IV)	6	51.6	54.9	47.5

4. 損傷程度のばらつきが発生する要因の考察

4-1. 損傷程度の判断

(1) 同一写真内に存在する他の損傷との比較

ばらつきの要因の1つ目は、同一写真内にある別の損傷との比較が考えられる。例えば図4では、Picture27-1、Picture27-2ともに損傷程度Iが正解であるが、2つの損傷を比較して見てしまうと、27-1より27-2の方がヒビの幅が広く見える。そのため、Picture27-2の損傷程度を1段階高く判定したと考えられる。

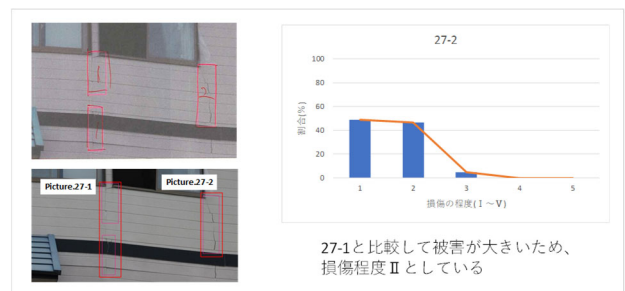


図4. 同一写真上に存在する他の損傷との比較の例

(2) 損傷の代表が「最大面積」または「最大損傷程度」

ばらつきの要因の2つ目は、一つの損傷枠の中に損傷程度の異なる損傷が存在する場合、損傷面積が広い損傷程度を採用するか、損傷程度の大きい損傷を採用するかの違いによると考えられる。例えば図5では、損傷面積が広いひび割れ(損傷程度I)と範囲は狭いが剥離(損

		図面 (被害番号)	図面 (調査者の結果)	ヒストグラム
損傷の程度 I	がけ型			6-3
	丘型			21-8
	(ツイン型)			17-3
損傷の程度 II	がけ型			5-2
	丘型			7-6
	(ツイン型)			31-3
	(ツインIII型)			14-3
損傷の程度 III	がけ型			9-5
	丘型			4-3
	平坦型			29-3
	(ツインIII型)			7-5
	(ツインIV型)			40-1

図 3. 損傷程度 (I ~ III) 別のばらつきの分類

傷程度Ⅱ)が一つの損傷枠に存在している。この場合、s損傷枠に付与される損傷程度には、損傷面積の広いひび割れを採用すると損傷程度Ⅰとなり、範囲は狭いが剥離を採用した場合は損傷程度Ⅱとなり、評価が分かれる結果となる。

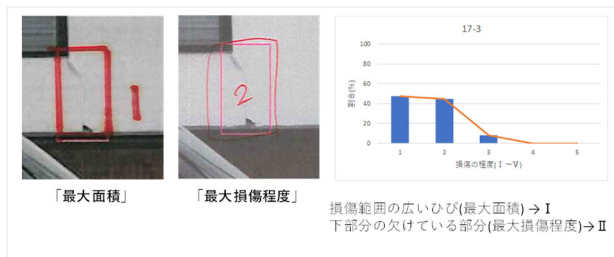


図5. 「最大面積」または「最大損傷程度」の例

4-2. 損傷範囲の判断

損傷枠の囲い方について、図2で指示をしたが、図6のように、損傷範囲を広く囲う事例と狭く囲う事例が混在した結果、評価のばらつきが発生したと考えられる。損傷範囲の基準について定められていないため、統一する基準を設ける必要がある。



図6. 損傷箇所の囲い方の例

4-3. 考察

損傷程度の判断によるばらつきの発生要因は、1)同一写真内の他の損傷との比較、2)損傷程度の代表を「最大面積」か「最大損傷程度」とするか、3)認識した損傷範囲の大小、の3つが考えられる。同一写真内の他の損傷との比較については、損傷程度「ⅠまたはⅡ」や「ⅡまたはⅢ」のように判定が1段階ずれることはあっても、ⅠとⅢでばらつきが発生する事例はなかった。この理由として、損傷程度Ⅲ以上では「外壁の下地材が見える」状態という基準があり、下地材が見えていなければ、損傷程度ⅠまたはⅡで判断される。

実際の調査現場では、さまざまな程度の損傷は当然調査員の目に入るため、単に内閣府の資料をみて判断するだけではなく、損傷間の比較によっても判断されていると推察される。

5. まとめ

本研究では、建物被害認定調査における調査員の損傷程度の判断のばらつきの現状とその要因について検討した。ばらつきが発生する要因として3つの要因を指摘した。これらの要因は、それぞれ単独で発生している場合もあるが、対象によっては組み合わせられて発生している場合もある。特に近接する損傷と比較してしまう要因は、人間の調査員にとっては避けることができない。これを回避するためには、AIの画像認識技術などを活用し、対象とする損傷のみに着目して判定するしくみの構築が有

効であろう。あるいは、現行の5段階の損傷程度の分類は、そもそも人間には判別不能ではないかとも考えられる。そこで、判定する基準の段階を例えば3段階に減らせば、調査員の判定結果にばらつきが減り、調査結果の公平性を保つことも可能になると考えられる。

6. 今後の課題

本研究では、損傷程度のばらつきについてⅠ～Ⅲを要因分析したが、ⅣとⅤのデータが不足していたため、分析をすることができなかった。今後は、ⅣとⅤの損傷データを追加し、再度分析する必要がある。

また、ばらつき発生の要因について、考察した3つの要因に加えて、調査員の経験や、技術職なのか事務職なのかなど職務の違いなど、調査員の個別事情の違いによる影響も分析する必要がある。このような点をあきらかにすることは、調査員への効果的な研修方法の開発につながると考えている。

参考文献

- 1) 辻翔平・田中聡、自治体職員を対象とした研修結果から見た建物被害認定調査における課題：北九州市役所における事例から、地域安全学会梗概集 No. 50, pp.207-210. (2022年5月)
- 2) 辻翔平・田中聡、建物被害認定調査における被災地外からの支援の試み：2022年福島県沖地震における南相馬市の事例、地域安全学会梗概集 No. 52, pp.13-16. (2023年5月)
- 3) 内閣府(防災担当)、災害に係る住家の被害認定基準運用指針、(2021年3月)
https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r303shishin_all.pdf
- 4) 災害に係る住家の被害認定基準運用指針 参考資料(損傷程度の例示)、(2021年5月)
https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r305sonsho_all.pdf

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(B))「機械学習に適した損傷分類ルールの構築と建物被災度評価の自動化手法の開発(研究代表者：田中聡)」および2021年度常葉大学共同研究「ポスト・コロナ時代における建物被害調査・研修のデジタル化手法の開発(研究代表者：田中聡)」による。

RFID管理による災害時流出LPガス容器のドローン探索

Drone Search for Spilled LP Gas Containers during Disasters with RFID Management

熊崎康文¹, 岡田愛梨², 笠原幸治³, 永井信夫⁴

Yasufumi KUMAZAKI¹, Airi OKADA², Kouji KASAHARA³, Nobuo NAGAI⁴

- 1 岐阜女子大学 文化創造学部 准教授
Faculty of Cultural and Creative Studies, Gifu Women's University
- 2 岐阜女子大学 文化創造学部 学部生
Faculty of Cultural and Creative Studies, Gifu Women's University
- 3 有限会社笠原商事 代表取締役
Limited company Kasahara Trading Company
- 4 ナガイネット有限会社 代表取締役
Nagai-net Limited Company

Information on LP gas containers as social infrastructure is managed by each filling and inspection company using bar codes, but this information is not shared by the LP gas industry. Issues such as management costs and productivity under normal circumstances, and the search and identification of spilled containers in the event of a disaster, have been pointed out. This time, a demonstration experiment was conducted using a platform based on RFID management and a drone equipped with an RFID reader, and a search experiment using a drone was conducted on the assumption that an LP gas container with an RFID tag attached would leak out during a disaster.

Keywords: RFID, LP Gas Containers, Disaster Outflow, Unmanned Aerial Vehicles, DX

1. はじめに

LPガス容器は重要な社会インフラであるが、その取扱いには注意を払うべき容器であるため、厳格な個体管理が必要である。LPガス容器は平均20年のライフサイクルで使用され、充填事業者、販売事業者、検査業者、ユーザーとしての事業所や家庭などの間を循環している。現在、個体管理にはバーコードが活用されることが多く、検査情報や充填期限等の情報が照会できる。しかし、業界全体としてバーコードが統一されておらず、充填事業者ごとに異なるバーコードとデータベースで管理されている。

災害時に電力や都市ガスが停止しても、LPガス容器は燃料として迅速に供給、使用できる良さがある。反面、土石流や津波などで流出してしまうと、二次被害のリスクがある危険物となり、早期の回収が必要となる。ところが、現在の管理手法の限界や制約により、容器個体の探索や識別に多大な時間が必要¹となっている。また、回収できても管理元が特定できないLPガス容器にはガスの充填が行えず、エネルギーインフラ復旧の弊害にもなっている。これもバーコードが共通化されていないためといえる。

津波や大規模な河川氾濫、土砂崩れ等でLPガス容器が流出した災害時、その探索を行い、流出したLPガス容器の回収を円滑に行うことが業界全体の長年の課題であり、経済産業省からの要請²もある。しかし、二次災害、二次被害の恐れから容易に現場に近づくのは困難な場合がある。

近年、災害時におけるインフラ整備の観点から、LPガス容器にガスを緊急充填できる「中核充填所³」が整備されている。しかし、各社ではそれぞれ異なるバーコードで管理を行っているため、対応できないバーコードが貼付されていると中核充填所で充填できないこともある。また、容器に複数のバーコードが貼られるなど煩雑な管理がなされている状況もある。

バーコードでの管理は、各社の業務内ではある程度有効であっても、ひとたび広域での管理が必要になった場合や災害時の大規模流出の際には役に立たないと考えられる。

今回、岐阜県DX推進コンソーシアムワーキンググループ事業費補助金事業の支援を受けた幹事企業の有限会社



図1 平成30年西日本豪雨時の流出容器回収の様子
LPガス災害対策マニュアル第3次改定版参考資料より

笠原商事は、通常取引を超えた管理の可能性を検証する以下の3点に取り組んだ。現在のバーコードしか対応できない入出荷・検査結果を管理するシステムから、災害時に共有できるRFIDに対応した「試作システム」を作成すること。管理コードが共通化されたRFIDと「試作システム」のデータベースとが照会できること。本学と連携して災害時の流出容器の個体識別の実験を行うこと。である。

この「災害時共有プラットフォーム」となる検証を通して業界への波及を意図している。

RFIDによる管理を導入することは、LPガス容器製造時に振られる固有の識別記号をRFIDに紐づけ管理することが可能となり、広く管理コードの共通化を図ることができると。そして、大規模災害等での流出時、容器に貼り付けたRFIDタグを読み取るリーダーをドローンに搭載し探索することで、効果的な探索が可能となるのではないかと。今回はドローンによる探索の実証実験を中心に報告する。

2. 実証実験の事前準備

2.1 RFIDリーダーと探索用ドローン

今回使用したRFIDリーダーは株式会社キーエンスの「ハンディターミナルDX-W600」で、「高出力ユニットDX-RH1」で拡張し、読取り距離の拡大を期待した。カタログ等には明確な到達距離の記載は無かったが、販社担当者からは15～20m程度届くことを聞いた。



図2 ハンディターミナルを高出力ユニットで拡張

ドローンはDJI製の産業機「Matrice 350 RTK」(以下M350)に撮影用のカメラ「Zenmuse H20」(以下H20)をペイロードした。これにリーダーとそのペイロード用の自作ユニットを含めてペイロード許容重量内に収め、最大離陸重量の範囲内とした。その分、最大飛行時間(ペイロード無しで55分)がやや短くなっている。



図3 実証実験で使用するドローンにカメラとハンディターミナル・高出力ユニットをペイロードし飛行する様子

2.2 実験試験局(無線局)の開設

RFIDを業務で使用する場合、電波法第27条の29第2項の規定により、「920MHz帯移動体識別用陸上移動局」の構内無線局の登録が必要である。

今回の実証実験にあたり、想定する使用方法の場合について東海総合通信局に問い合わせたところ、規定の無線局ではない実験試験局⁴の免許手続きを行うこととなった。

東海総合通信局及び総務省本省の指導を受け、2024年7月から実験内容、使用する機器の電波規格、岐阜女子大学の対応、RFIDリーダーメーカーとの連絡、確認、調整を経て、「実験計画書」を約4か月かけて作成した。これと「実験試験局無線局免許申請書」「実験試験局無線局事項書」「実験試験局無線局工事設計書」とともに東海総合通信局に11月に提出、11月末日に「実験試験局無線局免許状」の交付を受けた。

2.3 RFIDの読取有無の検証パターン

災害時の流出を想定したとき、RFIDタグを貼り付けたLPガス容器がどこにどのような状態となっているかは不明なことが予想される。従って、ドローンを飛行させながらRFIDリーダーで読み取る場合、一定の範囲をマッピングによるフライトプランを立て、自動飛行させながら探索する方法が想定された。

そのため、RFIDタグ(LPガス容器)の状態がどのような場合ならドローンに搭載したRFIDリーダーから読み取れるかの想定パターンを作成した。

2.3.1 測定限界の検証(屋外で容器から何mまで離れて読めるか:最大20mを想定)

以下の各状態での読み取り可能距離の測定。

- ・タグが視認できる(正面)
- ・タグの一部が視認できる(側面等:角度による検証)
- ・タグが視認できない(背面)
- ・電波の反射が期待できる(密集)
- ・電波の反射が期待できない(孤立・端)

2.3.2 災害時を想定した探索境界線の検証

転倒している状態、土砂に埋もれている状態、水没している状態での各場合について、以下の状態での読取り状況。

- ・タグが視認できる(正面:水深)
- ・タグの一部が視認できる(側面等・斜方向:水深)
- ・タグが視認できない(背面・水没)
- ・電波の反射が期待できる状態(水没状況:浅瀬・水底の状態:岩・石・砂…)
- ・電波の反射が期待できない(水没状況:水底の視認不可の水深…)
- ・流れや波がありタグが見え隠れする(探索継続時間:どの程度探索を継続できるか)
- ・流れている場合(探索継続時間・距離:どの程度追跡・探索を継続できるか)

*検証の内容と状況によって、検証の範囲等を調整する場合ありとした。

3. 実証実験と考察

3.1 実証実験の概要

2.3の検証パターンで読み取れたかどうかの実験では、RFIDリーダーが読み取ったタイムコードとカメラH20が撮影した動画のタイムコードをつき合わせることで、LPガス容器の流出場所を特定できるのではないかと考えた。

まずは地上にRFIDタグを貼り付けたLPガス容器を散乱させた。実験場が見渡せる広さだったので手動操縦で飛行させ、各容器の異なる方向と角度から探索が可能かを検証した。

3.2 使用したRFIDタグの読取りとCSV出力

実証実験にあたって、笠原商事で準備されたタグは図4で、専用プリンタで出力している。表面は実験用の試作システム用共通バーコードで、パッシブタイプのRFIDタグが内蔵されている。



図4 共通バーコード(表面)と裏面(RFIDタグは内蔵)

これを今回のLPガス容器のRFID管理用に開発されたアプリが内蔵されたリーダー(図5の右が初期画面)で、ドローン飛行ではCSV出力のモードで読み取る。(図5の右がCSV出力画面:サンプル)CSV出力はタグ番号と読取り時のタイムコードが記録される仕様になっている。

アプリ起動後、CSV出力モードで高出力ユニットの電波発出トリガーボタン押すと電波の発出と読取りが始まり、



図5 リーダーによる読取りアプリ画面(左)と CSV 出力による読取り結果画面(右)

再度トリガーボタンを押すと電波発出が停止する仕様であるため、トリガーONにしてから飛行を開始した。

読み取ったタグの情報は画面の「CSV出力」(図5右) ボタンでCSVデータとしてリーダー本体の専用フォルダに保存される。

3.3 ドローンの飛行とカメラ映像の記録

ドローンM350に搭載したカメラH20を真下に向け、RFIDリーダーと同じ角度で動画撮影を行った。動画にはタイムコードを記録する仕様とした。(図6)



図6 ドローンからの撮影画像(高度5mで飛行・撮影時のスクリーンショット:タイムコードは拡大表示)

RFIDリーダーのCSVデータとドローンのカメラ映像のタイムコードは、リーダーの時計とドローンの時計とでタイムラグがあるので補正を行った。

3.4 実証実験の結果

2024年1月に陸上で行った実証実験では、8本の容器を図7のように散乱させ、その上空を高度5mで飛行し読み取りを行った。この時は表1の5本を読み取ることができた。

読み取り状況を検証した結果(図7)、各容器に貼り付けたタグNo.(緑字)をどの順に読み取ったのか(赤字①~⑤)。カメラ映像から読み取ったドローンの飛行航路(青色矢印)において、どの位置とタイミングでタグを読みとったか(ドローンアイコンと赤色矢印)で表示している。

高度については、検証パターンの2.3.1で検証した結果、今回のリーダーとドローンの組み合わせでは、タグが正面また

表1 RFIDリーダーの読取りタグと動画のタイムコード1

	高度	RFIDタグNo.	リーダー時間	タイムラグ	カメラ時間
①	5m	JOK42260	14:57:16	0:00:34	14:56:42
②	5m	JGV48712	14:57:58	0:00:34	14:57:24
③	5m	JEW09429	14:58:10	0:00:34	14:57:36
④	5m	JGV53876	14:58:35	0:00:34	14:58:01
⑤	5m	JOA16435	14:58:43	0:00:34	14:58:09

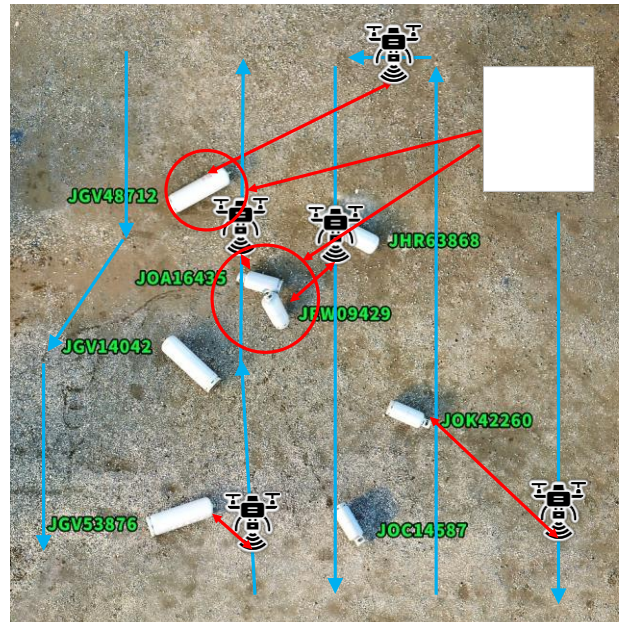


図7 ドローンによる読取り状況

は一部がカメラから視認できれば、5mがほぼ読み取りできる高度と判断したことによる。

先述の15~20mという到達距離とならなかったのは、リーダーをドローンに搭載したときの電波干渉や振動の影響を考えた。しかし、RFIDリーダーをドローンに搭載せず、単独で検証しても、屋外では同様に5m程度であった。

屋内での到達距離の検証では、壁や床、天井等の反射のため電波がやや遠くまで届き、10m前後で読み取れた。屋外では電波が拡散し、反射が期待できないのではないかと考えられる。

できるだけ読み取ることを前提としたので、手動操縦で飛行させたため、航路はやアバウトとなり、飛行速度も秒速0.5~1m前後の低速で飛行した。

図7中のJOC14587, JHR63868, JGV14042の3本はタグの貼り付け位置が上もしくは横から視認できる状態であったが読み取れなかった。反面、JGV48712

(図8), JEV09429, JOA16435は、タグの貼り付け位置が下向きで、上空のドローンからは視認できない状態だったが読み取ることができた。電波が地面等で反射したのではないかと考えられる。

図7の読取り後、探索航路の方向及び飛行高度による読取り



図8 上空から視認しにくいタグ位置の容器(JGV48712)

の違いを検証した(表2, 図9)。図7の探索方向に対し、約90度方向を変え、まずは高度5mで全体の上空を一通り飛行した後、4mに高度を下げて探索した。

表2 RFIDリーダーの読取りラグと動画のタイムコード2

	高度	RFIDタグNo.	リーダー時間	タイムラグ	カメラ時間
①	5m	JOC14587	15:26:26	0:00:38	15:25:48
②	5m	JEW09429	15:26:52	0:00:38	15:26:14
③	5m	JOK42260	15:27:13	0:00:38	15:26:35
④	5m	JOA16435	15:27:34	0:00:38	15:26:56
⑤	5m	JHR63868	15:27:37	0:00:38	15:26:59
⑥	5m	JGV48712	15:27:48	0:00:38	15:27:10
⑦	4m	JGV14042	15:28:58	0:00:38	15:28:20

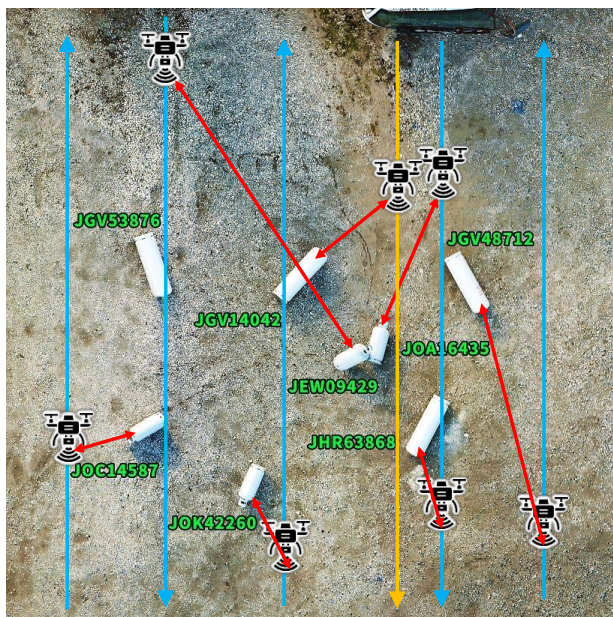


図9 図7の飛行航路の横方向からの読取り

図中の記号や矢印は図7に準じ、オレンジ色の航路は高度4mの飛行航路である。図9の飛行では図7で読み取れなかったJOC14587, JHR63868, JGV14042を読み取れたが、図7で読み取れたJGV53876は読み取れなかった。

3.5 実証実験の考察

RFIDタグを貼り付けたLPガス容器をドローンに搭載したRFIDリーダーで読み取る実証実験は、一定の条件や制約下ではあるが、可能であることがわかった。

今回の事業の期限的な制約と実験試験局の手続きに時間をとられ、検証期間は1ヶ月半程度となり、2,3の検証パターンは未検証の部分がある。特に、水上での読取りなどは検証には至っていないが、陸上なら地面やLPガス容器同士の反射で、タグがドローンから視認できなくても読み取ることができるようである。反面、視認できる位置でも読み取れない場合、ドローンの飛行方向や高度を低くする(距離を縮める)ことで読み取れる場合もあった。また、5mを越えて読み取れる場合もあるようである。

実際の災害時の流出範囲を想定した場合、広範囲の探索が想定される。今回使用したドローンの場合、安全等を考慮した1回のフライト可能時間は30~40分前後と仮定すると、1度に探索できる範囲はその飛行速度によって異ってくる。そのため、検証パターンにドローンの飛行速度を加える必要があると考える。

当初想定していた高度15~20mでの探索は現状では難

しく、高度5mの場合、陸上で探索する場合は周辺の樹木や構造物等の障害物の影響を考慮する必要があり、自動飛行には限界が生じると考えられる。

こうした課題に対し、広範囲の探索場所の全体を、ある程度の高度(20~30m)で映像のみの記録で飛行させ、その映像を画像解析した後、LPガス容器と判別された個所をある程度特定し、その場所へRFIDリーダーで再探索を行う2段階の探索が有効だと考えられる

4. おわりに

現在、東海総合通信局へ水上での実験のため、笠原商事近くのため池と広範囲の探索を想定し、本学構内を実験試験局における無線の移動範囲の追加申請をおこなっている。許可が下り次第、これらの探索を検証したい。

本年1月1日に発生した能登半島地震においても、令和6年1月5日付で「令和6年度能登半島地震により埋没・流出したLPガス容器による事故防止について」(注意喚起)⁵が経済産業省産業保安グループから出ている。

近年の大規模災害の頻発状況から、災害におけるドローンの各方面での活用への期待が大きくなっている。LPガス容器流出による社会問題の解決に、本実証実験が貢献できることを期待している。

謝辞

本実証実験は岐阜県DX推進コンソーシアムワーキンググループ事業費補助金事業の支援を受けている。ここに記して謝意を表す。

補注

- 第13回 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 高圧ガス小委員会, 資料3-2 平成30年7月豪雨に係る対応(LPガス充てん所からの容器流出), 2018.11.1, 経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/koatsu_gas/pdf/013_03_02.pdf (2023.04.11 参照)
- 経済産業省・高圧ガス保安協会, LPガス災害対策マニュアル第3次改訂版[改]更新・参考資料, 令和5(2023)年3月, https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/lpgas/anzen_torikumi/file_itakujigyou/2022_7_s.pdf (2024.2.27 参照)
- 経済産業省 資源エネルギー庁 資源・燃料部 石油流通課, 東日本大震災を踏まえた今後のLPガス安定供給の在り方に関する検討会 中間取りまとめ, P12, 社団法人日本LPガス協会, https://www.japanlpg.or.jp/biz/data/20111109_2.pdf, (2024.2.27 参照)
- 総務省, 1.実験試験局とは, 実験試験局関係, 電波利用ホームページ, <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/exp/> (2024.2.28 参照)
- 経済産業省, 令和6年能登半島地震により埋没・流出したLPガス容器による事故防止について(注意喚起) https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2024/01/20240105-01.html (2024.2.28 参照)

参考文献

- 経済産業省・高圧ガス保安協会, LPガス災害対策マニュアル第3次改訂版[改]更新・参考資料, 令和5(2023)年3月
- 高圧ガス保安協会, 令和3年度石油・ガス供給等に係る保安対策調査等委託事業 災害時におけるLPガス設備の情報収集の迅速化に関する調査検討 事業報告書, 令和4年3月
- 日本液化石油ガス協議会, 充てん容器等の流出防止に関する解説, 一般社団法人全国LPガス協会 保安・業務グループ, 2021.6.25
- RFIDシステムの基礎やバーコードとの違いがわかるRFIDの基本, 株式会社キーエンス

公共土木施設災害復旧事業における土木行政による応急対応と課題

Public Works Administration's Emergency Response and Issues in Disaster Recovery Projects for Public Civil Engineering Facilities

○太田 和良¹, 近藤 伸也²
Kazuyoshi OTA¹ and Sinya KONDO²

¹株式会社 豊工業所 (宇都宮大学地域デザイン科学部)

Yutaka Industrial Plant Corporation (School of Regional Design, Utsunomiya University)

²宇都宮大学大学院地域創生科学研究科

Graduate School of Regional Development and Creativity, Utsunomiya University

This paper reviews the disaster response of local administrative agencies as a disaster recovery project, and then summarizes the response situations and issues of the local government agencies in the case of disasters that occurred in Wakayama, especially those that cannot be handled under the Act on National Treasury's Sharing of Expenses for Project to Recover Public Civil Engineering Works Damaged by Disaster. The paper also examines the situation assessment and decision-making process in the field, and organizes the decision-making process by applying the OODA loop as a management method. Furthermore, based on the five elements necessary for disaster response extracted from the experience of the Kii Peninsula flood disaster, the diversity of issues that arise in disaster response is presented.

Keywords : the disaster response of local administrative agencies, the situation assessment and decision-making process in the field, the OODA loop, the five elements necessary for disaster response

1. はじめに

本研究は2011年に発生した紀伊半島大水害の経験をきっかけに、和歌山県における紀伊半島大水害への対応や栃木県における2019年東日本台風災害への対応を、公共土木施設災害復旧を担当する県庁の出先機関による現場対応の視点から調査を進めたものである。

従来、県庁組織は本庁を中心に一括りに捉えられ、出先機関の活動に焦点があてられることはあまりなかった。しかし、災害対応は現場での活動が重視されることはもとより、出先機関が自律した組織として活動しなければならない場面も多く存在する。

そこで、地方における行政機関の災害対応を災害復旧事業として概観した上で、和歌山で発生した災害事例として、特に負担法(第3章参照)では対応しきれない事例を対象に、出先機関の対応状況や課題を整理した。また、現場における状況判断や意思決定過程の検証を行うとともに、マネジメント手法としてOODAループを適用して意思決定過程を整理する。さらに、紀伊半島大水害の経験から抽出された災害対応に必要な5つの要素を踏まえ、災害対応で発生する課題の多様性を提示する。

2. 既往研究

大規模災害発生直後、地方自治体では災害対策本部が開設される。災害対策本部のマネジメントに関し、近藤ら¹はICSの「目標による管理(Management by Objective)」の視点からその組織・体制や運営・機能を分析し、蛭間ら²は新潟県において組織の分化によって危機的環境に適応した事例を紹介している。また、緊急・応急対応時の人的運用に関し、被災自治体への人的支援としてはひょうご震災記念21世紀研究機構研究調査本部の報告書³や内閣府のガイドライン⁴が公表されているほか、受援側、支援側の双方から、主として組織論の立場で様々な

研究されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

さらに災害対応マネジメント力の向上に関し、土木学会建設マネジメント委員会⁸⁾では東日本大震災における東北地方整備局の対応を例として、被災市町村への広範な資機材の緊急支援について取りまとめている。あるいは消防庁⁹⁾では危機管理における市町村長の責任や心構えなどについてまとめている。

これらの既往研究では組織全体のマネジメントに着目しているが、現場で発生する課題等の解決までの過程に関して十分な議論がなされていないものと考えられる。

3. 負担法の概要と負担法で対応しきれない事例

公共土木施設の災害復旧事業では「公共土木施設災害復旧事業費国庫負担法」(略称「負担法」)という法律がある。自然災害の発生により、地方公共団体が管理する公共土木施設に被害が発生した場合、負担法に基づいて対応することが前提となっている。

負担法は、第1条(目的)に「この法律は、公共土木施設の災害復旧事業費について、地方公共団体の財政力に適応するように国の負担を定めて、災害の速やかな復旧を図り、もって公共の福祉を確保することを目的とする」とあるとおり、自然災害の発生により、地方公共団体が管理する公共土木施設に被害が発生した場合、国の支援によって速やかに復旧できるように定められた法律で、図1は負担法に基づく災害復旧事業の流れについて示したものである。通常の道路建設事業とか河川整備事業であれば予備設計から工事着手まで早くても3年かかるような手続きが、災害復旧事業の場合はおよそ3か月で進められる。だからこそ被災状況を把握し、地域の実情を理解する現場の責任は重いと言える。

負担法による災害復旧事業の採択要件には「④異常な

天然現象、②公共施設、③地方公共団体等の施行」という3つの条件がある。これらの条件に対し、現実にはその条件にそぐわない事象が多々あり、例えば、雨の降っていないときに土砂災害が発生する、河川水位がそれほど上がっていないけれども橋の橋脚が倒れる、あるいは公共施設と民間施設（民間管理地）がそれぞれ適正に維持管理されていたとしてもそれぞれの被害が相互に影響を及ぼす場合などがある。さらに被災箇所の隣接地で民間施設が被災し、同時に復旧しなければ機能回復が難しいとか、あるいは被災箇所が複数の所管にまたがるなどにより調整が困難な場合などがある（表1）。そうした場合には、個別の対応が求められることとなる。

4. 振興局制度と土木事務所制度

土木系部署の出先機関の組織形態として、振興局制度と土木事務所制度がある。全国的には47都道府県のうち、振興局制度をとっているのは16、土木事務所制度は31（著者調べ）となっている。それぞれの制度の組織的な違いは、振興局制度の場合は振興局を介して平時より地域ステークホルダーをはじめとする関係機関との連携が図られやすいのに対し、土木事務所制度の場合は本庁の指揮の下、個別行政が強力に推進される。一方、災害時

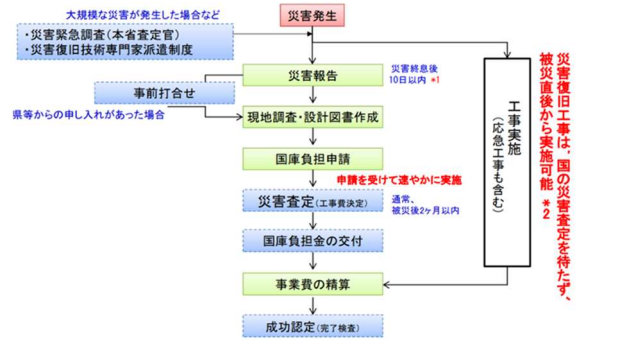


図1 災害復旧事業の流れ

表1 負担法で対応しきれない事象

負担法による採択要件	負担法では対応しきれないと想定される事象
1) 異常な天然現象	1) 雨が降っていないのに土砂災害が発生
2) 公共施設で現に維持管理されている	2) 河川氾濫注意水位を超えているわけではないのに橋脚が被災
3) 地方公共団体又はその機関が施行	3) 公共施設の被災が民間に影響（住家被害や人身被害の発生）
	4) 民間管理施設（管理地）が公共施設に影響
	5) 公共施設の被災箇所の隣接地で民間施設の復旧が必要
	6) 他省所管との調整において、維持管理度合いの差の影響あるいは民間の介入



写真1 橋脚の変位による路面の屈曲

には現場における意思決定に大きな違いが生じるものと考えられる。本論文では、振興局制度における出先機関の意思決定過程を調査するため、振興局制度をとる和歌山県における災害事例のうち、災害復旧制度の適用外であった事例における意思決定過程を調査した。

5. 負担法で対応しきれない災害事例の調査

(1) 災害対応マネジメントとしてのOODA ループ

災害対応マネジメントでよく用いられる手法としてPDCA サイクルが知られている。PDCA サイクルはもともと品質管理から生まれた手法で、業務の継続的な改善を図る意思決定モデルとして、災害対応では津波防災計画や業務継続計画などの策定・運用で用いられる。一方、OODA ループは、もともとアメリカ空軍の軍事戦略家が提唱したモデルであり、変化する状況を「観察（Observe）」し、それぞれの状況に応じて「状況判断（Orient）」のうえ、随時かつ柔軟に行動の「意思決定（Decide）」を行い「行動（Act）」する概念とされ、限定的な情報しか得られない環境下での意思決定手法として危機管理などの場面で多く引用されている^{10) 11)}。災害という不確実性下で状況判断や瞬時の行動に重点をおく手法として、また県の権限を執行するにあたり迅速な意思決定を行うという観点からも、現場対応のマネジメントを扱う今回の検証に適切であると考えられる。（図2）

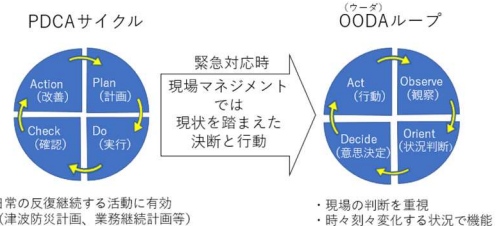
(2) 調査した災害事例

調査の対象としたのは和歌山県における3件の事例である。1件目は2017年10月22日、台風21号の豪雨に伴い、和歌山県紀の川市西脇地区で斜面崩落が発生した。崩落した斜面の上部には供用前の広域農道が建設されており、道路も含めて被災した。また、崩落土の移動先に家屋があり、住民1名の死亡が確認されたほか、人的・物的被害が発生した。発生当初から農道が被害の原因であるとの指摘があり、被災原因の究明と責任の所在についての判断が求められた。

2件目は県道橋「恋野橋」の橋面変状を発見したことが発端となる被災事例の現場対応である。

恋野橋は和歌山県北部を流れる一級河川紀の川に架かる車道橋である。2018年10月30日に道路の定期パトロールで橋面の変状を確認し、その後、橋脚の傾斜を確認したため（写真1）、11月2日から全面通行止めとした。並行して新恋野橋の建設が進められていたが、完成には1年半ほどかかる予定であり、地域の交通手段を確保する対策が求められた。

3件目は2019年7月28日、和歌山県田辺市上秋津で県道田辺龍神線沿いの山腹が崩壊し、道路が崩土と巨石で塞がれ通行止めとなった。崩壊した山腹は保安林に指定され、以前より治山事業が行われており、地すべりの兆候が確認されているところであった。山腹は更なる崩壊がいつ起こってもおかしくない状況で崩土除去のみによる通行再開は見込めず、早期通行確保のための対策についての判断が求められた。



・日常の反復継続する活動に有効（津波防災計画、業務継続計画等）

・現場の判断を重視
・時々刻々変化する状況で機能

図2 マネジメント手法

(3) OODA ループを適用した意思決定過程の検証

本稿の3事例における意思決定過程を整理した。ここでは事例2を参考に図3に示す。この事例では災害復旧過程として1過程、OODAループとして4過程の計5過程を考えている。災害復旧過程としては、そのまま放置すると危険であり、新橋の建設にも影響しかねない被災した旧橋の撤去を意思決定し、工事を推進する過程である。OODAループの過程ではまず緊急対応の過程、次に県としての方針を決定する過程、三つ目は関係者との調整の過程、四つ目は調整後の執行に向けての意思決定過程である。それぞれのループの中で単純に完結しているわけではなく、ループ間で共通した活動がなされている、あるいは新たな意思決定に以前の状況判断が影響しているなどの状況があることも見てとれる。つまり、事例が異なれば、あるいは状況が変化すれば意思決定過程が変動するのではないかという予想ができる。

災害復旧過程及び緊急対応過程と方針決定の過程は県全体の災害対応の中においてはPDCAサイクルの一部として計画策定から実行への過程であると見ることもできる。一方、課題の顕在化については次のOODAループの観察の段階であると見ることもできるが、あくまで課題は次のマネジメントのきっかけにとらえ、また、確認・改善といったマネジメントの過程を踏まえたものでもないことからこの図の中ではOODA ループの外付けに整理するものである。

県の出先機関にとって地域ステークホルダーと想定されるものとして、市町村、建設業事業者、教育関係組織など様々な組織が考えられるが、本事例における3つ目の調整の過程において最も重要な地域ステークホルダーと想定されるのは地元自治会である。

地元自治会は地域の社会環境を熟知しているのみならず、事業を進めるにあたり必要な借地等において、地権者と最も近い存在でもある。そのため、県の計画を理解してもらうことはもちろんであるが、災害対応という急を要する事業の中では県と地元自治会との協働関係は欠かせない。本事例においては県の提示した仮橋の計画が地元説明会で否定された後、速やかに地元としての意見がまとめられ、県に対し要望書という形で逆提案されたという経緯がある。従来地域ステークホルダーは組織にとって外部環境として認識され、そのストレスを組織内部でどのように処理されるかが組織マネジメントの要素

と理解されている。しかし災害対応では、本来は相互に自律的である組織間において相互に依存的である場合がある。

6. 5つの要素から見た災害対応の課題

(1) 災害時に必要な5つの要素

太田ら¹²⁾は2011年紀伊半島大水害の災害復旧における現場対応の課題を整理することを目的とし、県の出先機関として災害復旧を担当する機関の長である建設部長の経験者に対するアンケートやヒアリング調査を実施した。そしてアンケート調査の結果として、紀伊半島大水害の経験、特に人員体制に関する意見から組織マネジメントの問題を抽出するとともに、建設部長時代に「うまくできた」と思うところから、スピード、コミュニケーション、インフォメーション、プランニング、プレゼンテーションという災害対応に必要な5つの要素を抽出した。

(2) 5つの要素から見た出先機関の課題

OODA ループで整理されたマネジメントの状況をさらに詳しく検証するため、災害時に必要な5つの要素に即して課題を整理したものが表2である。また、表3は3件の災害事例の総括である。表中の◎と○は表2の備考欄で同じ記号の記載された課題があることを示すもので、その他の課題は△としている。今回の3つの事例では災害対応に必要な5つの要素それぞれで何らかの課題が示されている。災害事例1で重要なポイントが被災者とのコミュニケーションに見られたように、災害事例2では工費・工期の検討や社会環境への影響（交通弱者への対応）などを踏まえた仮設ルートでのプランニングが最重要課題であり、また、災害事例3では幹線道路の利用者に対して、地元要望を踏まえた復旧計画を提示していくことが最重要課題であった。

7. 考察

災害対応を5つの要素に振り分けて整理することにより、災害対応で発生する課題の多様性と、それぞれの課題に対して、そもそもの重要度や対応の難易度、他組織や社会への影響度などに濃淡・強弱のある具体的内容が明らかとなり、ポイントを押さえた対応が求められる、また組織間関係の対象者や関係を構築する方法が変化することを理解しなければならないと考えられる。

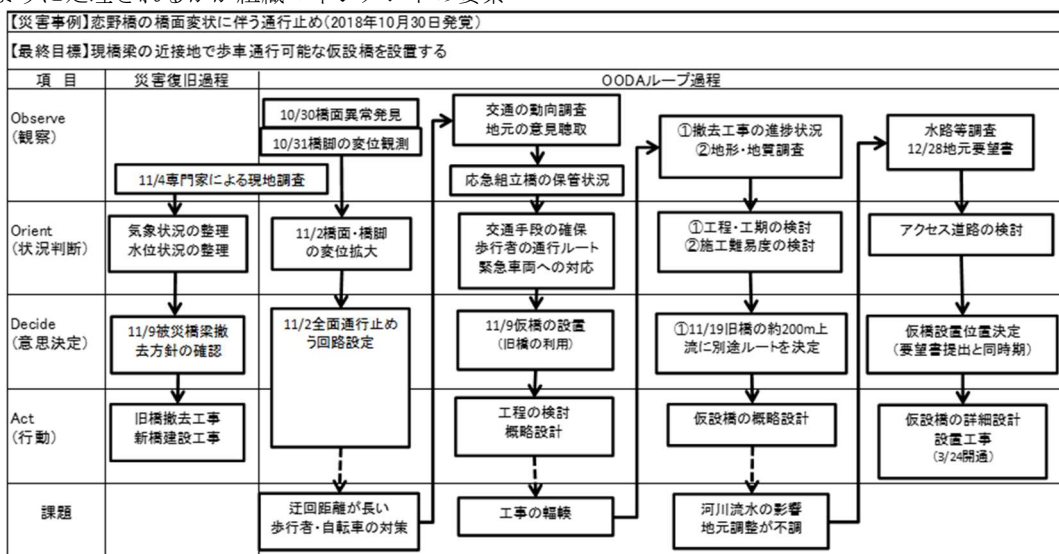


図3 災害事例（県道橋の被災）における意思決定過程

表2 災害事例（県道橋の被災）における課題の整理

災害対応の要素	課題	具体的内容	備考
スピード	資機材調達	・無人機材の調達 ・仮設橋の調達 ・作業道のための盛土材料の調達	○
	仮設ルート決定	・迂回、現道位置での復旧、作業道の利用、仮設橋の設置等検討	
コミュニケーション	地元調整	地区自治会の意見集約	○
	地権者 教育関係	調査への理解と了解、土地使用への理解と了解 生徒の通学状況、課外活動	
インフォメーション	被災原因	管理者→地域ステークホルダー、建設業界（気象状況、河川の流況）	
	応急対応 社会状況	施工者→管理者→地域ステークホルダー 地域→管理者：通勤・通学・通院の状況（社会機能の地理的配置）	
プランニング	仮設ルート決定	工費・工期の検討、社会環境への影響、新橋工事への影響	◎
	応急対応	専門家による調査 被災橋の撤去（作業場の安全確保、新橋工事の継続）	
プレゼンテーション	応急対応	当面の代替措置を含む管理者としての取り組み、行政としての支援 近接水管橋の利用の可否（対教育関係者）	
	仮設ルート決定	安全性、利用制限、周辺集落への影響	

表3 災害対応に必要な要素に即した課題整理（総括）

	災害対応の要素					コメント
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	
事例① (農道)	○	◎	△	△	○	ポイントは責任の所在と被災者への補償の可否 ⇒被災者とのコミュニケーションが最大の課題であり、良好な意思疎通のためには第三者による調査検討会を速やかに設立し、調査、検討の過程を明確に平易に伝えることが必要
事例② (橋)	○	○	△	◎	△	ポイントは緊急車両をはじめとする地域発生交通及び交通弱者への対応 ⇒仮設ルートの計画案を決定することが最大の課題であり、その計画案を実施するためには地元意見を集約する必要があり、さらに実行にあたり必要な資機材を速やかに確保しなければいけない
事例③ (県道)	△	△	○	○	◎	ポイントは幹線道路としての通過交通への対応 ⇒地すべり対策が継続する中で、監視と調査により通過交通の安全を確保しつつ、資機材の調達の可否を踏まえた応急対策の計画を立て、将来的な対応を含め地域要望を踏まえた復旧計画を提示していくことが重要

(a) スピード (b) コミュニケーション (c) インフォメーション (d) プランニング (e) プレゼンテーション

8. 今後の研究

今回の調査研究では、振興局制度をもつ和歌山県の出先機関の調査を基に現場での課題の多様性と組織間関係の変化が明らかとなった。このことが土木事務所制度の場合はどのように表れてくるのか、さらに他府県の事例を調査していく必要がある。災害という不確実性下の下で、出先機関が自律した組織として、地域のステークホルダーと如何に対峙し、組織としてどのような行動を起こしていくか、組織行動論からのアプローチに期待される。

参考文献

- 1) 近藤民代, 越山健治, 林春男, 福留邦洋, 河田恵昭: 新潟県中越地震における県災害対策本部のマネジメントと状況認識の統一に関する研究—「目標による管理」の視点からの分析—, 地域安全学会論文集, No.8, pp.183-190, 地域安全学会, 2006
- 2) 蛭間芳樹, 秦康範, 目黒公郎, 近藤伸也: 新潟県庁の危機管理における環境適応と組織能力の「カイゼン」—2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震の事例から—, 地域安全学会論文集, No.14, pp.123-132, 2011
- 3) (公財) ひょうご震災記念21世紀研究機構研究調査本部: 災害時における広域連携支援の考察, 2016
- 4) 内閣府(防災担当): 地方公共団体のための災害時受援体制に関するガイドライン, 2017
- 5) 佐藤翔輔, 今村文彦, 林春男: 東日本大震災における被災自治体の人的資源運用に関する分析—宮城県石巻市を対象として—, 地域安全学会論文集, No.21, pp.169-177, 2013

- 6) 本荘雄一, 立木茂雄: 初動期から応急対応期における自治体による人的支援の規定要因に関する外的妥当性の研究—東日本大震災時に支援を受けた被災自治体による評価—, 地域安全学会論文集, No.21, pp.89-98, 2013
- 7) 本荘雄一, 野田隆: 緊急対応・応急対応期での自治体間の人的応援における応援自治体(拡張型組織)の特性—熊本地震時における神戸市からの職員派遣の事例から—, 地域安全学会論文集, No.31, pp.249-259, 2017
- 8) 土木学会建設マネジメント委員会, 災害対応マネジメント力育成研究小委員会: 被災市町村への広範な資機材等の緊急支援—地方整備局災害対策本部による臨機の対応—, ケースメソッドによる災害対応マネジメント力育成シリーズ vol.1, 土木学会, 2014
- 9) 消防庁: 市町村長による危機管理の要諦—初動対応を中心として—, 2020
- 10) 李泰榮, 永松伸吾, 松川杏寧: 地域防災活動のファシリテーションにおける「形」の提案, 地域安全学会論文集, No.39, pp.325-333, 2021
- 11) 藤本一雄: OODAループの観点から見た緊急対応時の校長の意思決定に影響を与える要因—東日本大震災での岩手・宮城・福島県の小・中学校の事例研究—, 自然災害科学 JJSNDS, Vol.36, No.4, pp.399-408, 2018
- 12) 太田和良, 近藤伸也: 2011年紀伊半島大水害の経験を踏まえた公共土木施設災害復旧における現場対応の課題について, 地域安全学会論文集, No.39, pp.133-143, 2021

地形データの精度に着目した小規模河川の 氾濫危険箇所推定に関する考察

Consideration on Estimation of Flood Hazard Areas of Small Rivers in Focus on Accuracy of Topographic Data

○鮫島 皓介¹, 加登 文学², 平子 遼³
Kousuke SAMEJIMA¹ Yoshinori KATO² and Ryo HIRAKO³

¹ 舞鶴工業高等専門学校 総合システム工学専攻 建設工学コース
Department of Multidisciplinary Engineering, Civil Engineering and Architecture Course, NIT Maizuru College
² 舞鶴工業高等専門学校教授 建設システム工学科
Professor, Department of Civil Engineering and Architecture, NIT, Maizuru College
³ 舞鶴工業高等専門学校助教 建設システム工学科
Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Architecture, NIT, Maizuru College

Recently, flood hazard maps have become necessary for small rivers. In E River in the northern part of Kyoto Prefecture, which is the subject of this study, flood hazard maps have not been prepared and the flood hazard areas are unclear. To study the estimation method of flood hazard areas, the influence of topographic data on two-dimensional flood inundation analysis and the effectiveness of LiDAR topographic data acquisition were discussed. As a result, the two-dimensional inundation analysis was able to reproduce realistic flood inundation phenomena by reflecting the surveyed river channel data in the existing data. In addition, LiDAR acquired accurate information on the length and width, although the positional information needed to be modified.

Keywords : Hazard map, Small river, Inundation analysis, LiDAR, Manning's formula

1. はじめに

近年、小規模河川において洪水ハザードマップの作成が求められている。令和元年東日本台風¹⁾では宮城県丸森町を流れる阿武隈川支川の内川・新川・五福谷川の3つの小規模河川において浸水被害が発生している。これらの河川では水防法²⁾による洪水浸水想定区域の指定義務がなく、浸水の想定に含まれていなかった。これを踏まえて「小規模河川の氾濫推定図作成の手引き」³⁾がとりまとめられた。この手引きにおいて氾濫解析に用いられる河道測量データは、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデルや航空レーザー測量から得た表面の三次元計測データである。しかし、これらのデータは整備されていない箇所があることや川幅が狭い場合、既存の手法で

は河道形状を十分に捉えられないなどの課題が同手引きでも述べられており、小規模河川における氾濫危険箇所を推定するための実用的な手法の開発が必要といえる。

そこで本研究では京都府北部を流れる小規模河川を対象として、(1)二次元氾濫解析に及ぼす地形データの影響、及び、(2)LiDARによる小規模河川の地形データ取得の有効性について考察する。

2. 対象河川

本研究では京都府北部を流れる小規模河川(本稿ではE川と表記する)を対象とする。E川の概要を図1に示す。本河川では洪水ハザードマップが作成されおらず、氾濫時の危険箇所が不明瞭である。また川幅が4~5mと狭い

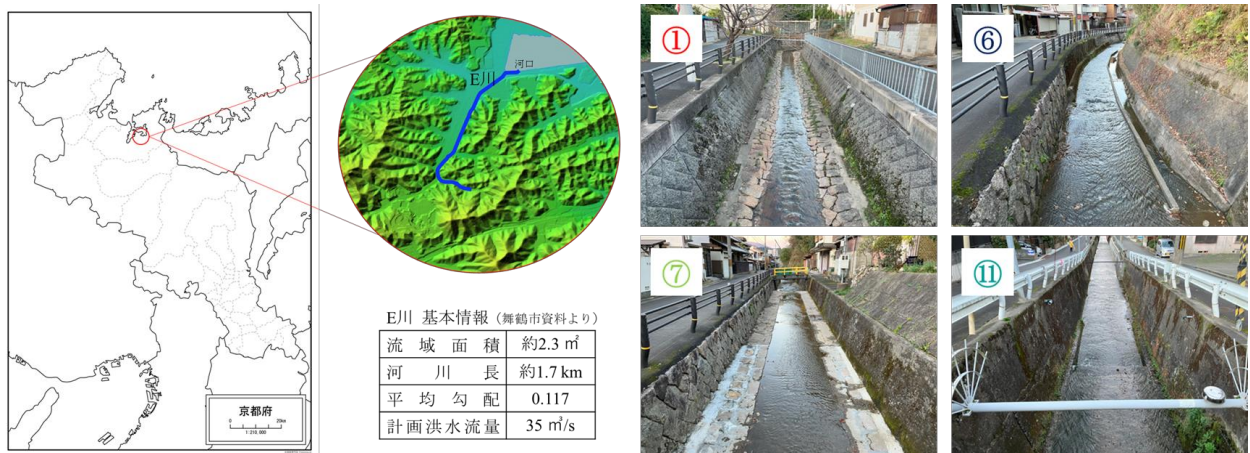


図1 対象河川

為、既存の標高データの基盤地図情報数値標高モデルの5mメッシュ⁴⁾(以下、5mDEM)のみでは河道をシミュレーション上で再現することは難しいと考えられる。なお、図中右に配置している写真はE川の上流から下流方向に向かって撮影しており、右手が右岸、左手が左岸となっている。写真左上の数字は4章で述べる計測区間の番号である。

3. 二次元氾濫解析による氾濫危険箇所の推定

3.1 氾濫解析

本研究ではiRIC・Nays2DFlood⁵⁾を用いた二次元氾濫解析を行う。本ソフトでは河道及び氾濫域を平面二次元モデルで計算することによって河道形状を考慮した解析が可能である。解析メッシュサイズは概ね1m×1mとし、粗度係数はコンクリート水路の標準値⁶⁾として0.015を与えた。流入流量は河道計画時に用いられていた再現期間10年計画洪水流量を参考に30m³/sに設定した。また、氾濫域においては家屋等の建築物が分布している。本解析では家屋を障害物セルとして解析メッシュに設定した。

3.2 河道データの反映と解析ケース

図2に本解析での対象範囲を示す。E川の上流部(約1.68km²)はほとんどが山地であり、下流部(約0.59km²)は大部分を平地が占め、家屋等の建築物が分布している。また、解析範囲の上流部には河道が90度折れ曲がる地点(以下、直角カーブ)が存在しており、一次元のモデルでは流れに対する直角カーブの影響を考慮できない為、二次元のモデルで計算する必要がある。よって氾濫した際の危険性を把握する為に、5mDEMを地形データとして用い、iRIC・Nays2DFloodで家屋等が分布する下流部において解析メッシュを図3の左図のように作成した。さらに、この解析メッシュに対してGNSS測量及び簡易レーザー測量で取得した河道データを反映したものを図3の右図に示す。河道がはっきりと確認でき、1m×1mのメッシュデータに反映できていることがわかる。河道データを反映していない解析メッシュをCASE-1、河道データを反映したものをCASE-2として、それぞれ二次元氾濫解析を実施する。



図2 解析範囲

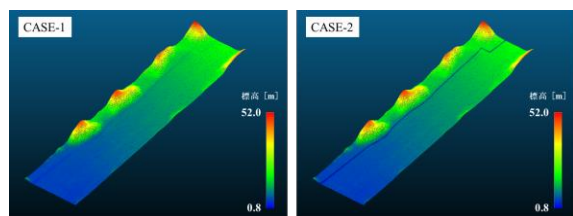


図3 解析メッシュ(標高コンター図)

3.3 解析結果と考察

図4にCASE-1、CASE-2の河道内及び氾濫域の最大水深コンター図を示す。図より、CASE-1の河道データなしの解析では図中の赤枠に示した箇所で氾濫していることが確認できる。一方、CASE-2の河道データありの解析では、直角カーブでの氾濫を除いて氾濫箇所を確認できな

い。河道データの有無によって氾濫挙動に差が生じたことが明白である。解析に使用した地形データは5mDEMであり、E川のような川幅が狭い場合は河道がシミュレーション上で再現されず、計画洪水流量を下流させることができていない。川幅が狭い河川を対象とする際は、5mDEMだけでなく河道データを測量で取得し、解析メッシュに反映する必要がある。

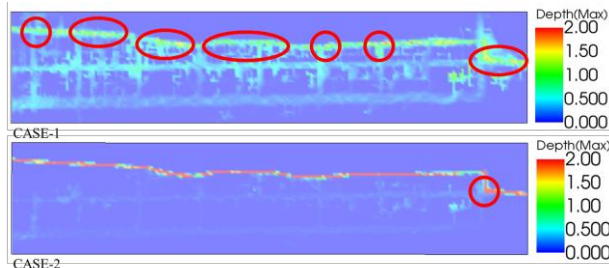


図4 河道データの有無による氾濫挙動の違い

図5にCASE-2の直角カーブにおける最大水深と流速ベクトルを示す。河道データありの解析では直角カーブでの氾濫が確認できる。直角カーブでの氾濫が発生した原因としては、流れの滞留と考えられる。この部分での流速ベクトルは図中の赤枠に示すように渦巻いており、流れの滞留が発生している。これによって水位が上昇し、直角カーブでの水深が河道深さを上回ったと考えられる。また、図の左下あたりには障害物として設定した家屋間に河川水が滞留している様子も見て取れる。以上より、5mDEMのみを用いた解析メッシュでは氾濫解析の精度が低いが、河道データを反映させることができれば、二次元氾濫解析の信頼性が向上できるといえる。

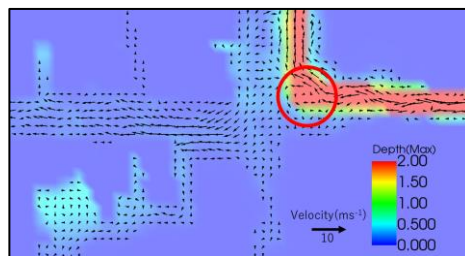


図5 最大水深と流速ベクトル

4. LiDARによる小規模河川の測量

LiDAR機能を利用した測量技術は、1960年代には開発されており、それほど新しいものではないが、近年、スマートフォンにLiDAR機能が搭載される等、誰もが容易に使用できる状況となっている。本研究で対象とする小規模河川に対して、容易に入手できるレベルのLiDAR機器を用いた測量を実施し、その有効性について考察する。

4.1 使用機器

本研究ではiPad Pro(第3世代)のLiDAR機能を用いた。使用アプリはScaniverse⁷⁾である。このアプリでは最大5m先までの範囲を計測できる。E川では計測地点から対岸の距離は4~5mであり、河道内にも立ち入ることができた為、河道全体の計測ができた。計測の際にはiPadの内蔵GPS/GNSS機能による位置情報も同時取得される。

4.2 河道形状の計測

計測区間については河道全体を一度のスキャンで計測

するとデータ容量が大きくなり、処理の時間が長くなる。そこで、下流部から上流部を図 6 に示す①から⑫の区間に分割して計測した。また、E 川に架かる橋を計測データの重ね合わせ作業の際の目印とし、区間境界に当たる橋をオーバーラップさせて計測した。



図 6 計測区間

図 7 は区間②の計測データを位置情報付きの点群データ(LAS 形式(WGS84/UTM zone 53))で出力し、点群処理ソフトの Cloud Compare[®]で表示したものである。河道形状や橋が高精度で再現されており、任意の位置での河川断面形状の抽出が可能となった。

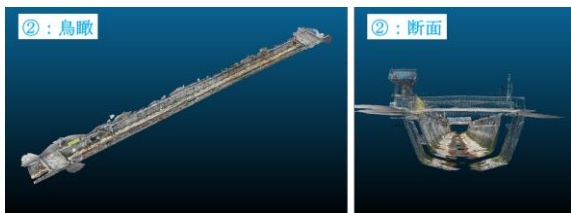


図 7 計測データ(区間②)

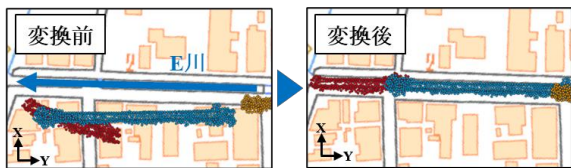


図 8 計測結果(変換前・変換後)

次に、計測データの位置情報を確認する為、得られた点群データを GIS ソフト(QGIS[®])で地理院地図上に表示した。図 8 の左図はその結果であり、位置情報は地図上の河川の位置とのずれが大きい。これは iPad の位置情報を用いていることが原因であると考えられる。一般的にスマートフォンなどで用いられている位置情報の測定方法は単独の受信機で 4 つ以上の GPS や GNSS の衛星から電波を受信し、位置を算出する単独測位である。その為、衛星の位置誤差によって約 10 m の誤差で位置が決定される¹⁰⁾。一方、右図は計測データを式(1)により XY 平面上で座標変換(回転と移動)をした結果である。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix} \quad (1)$$

X' : X 座標の変換値 [m], Y' : Y 座標の変換値 [m]
 X : X 座標の計測値 [m], Y : Y 座標の計測値 [m]
 ΔX : X 座標の移動値 [m], ΔY : Y 座標の移動値 [m]
 θ : 回転角 [°]

なお、式(1)の X , Y 座標は測定区間ごとに平均座標を原点とした座標である。表 1 は、移動量 ΔX , ΔY と回転角度 θ である。この表より各区間において座標変換の設定値がばらついており、iPad の位置情報は誤差が大きく、誤差の程度は測定の度に異なるといえる。

しかしながら、図 8 より変換後の点群の位置は地図上の河川と一致していることから、LiDAR で得られた点群の相対的な位置関係は信頼できるものであるといえる。

表 1 座標変換の設定値

区間	θ [°]	ΔX [m]	ΔY [m]
1	19	18	-1
2	-2	4	-26
3	-1	2	-6
4	-1	10	-28
5	-5	17	-21
6	-2	18	5
7	-13	31	-8
8	-7	21	-28
9	-4	19	-18
10	-3	15	-8
11	-1	15	18
12	-3	10	-17

4.3 一次元等流計算

LiDAR により得られた河川断面を用いて、マンニングの式による一次元等流計算によって満水時の流速及び流量を求める。そして、計算結果から E 川において最も流下能力が小さく、氾濫の危険性が高い箇所を推定する。

河道断面の抽出には Cloud Compare の断面図作成機能を用いた。抽出した断面の例を図 9 に示す。作成した断面図に雑草などのノイズがある場合は、この部分を削除し修正する。また、抽出した断面は開断面である為、閉断面として処理する。兩岸で高低差がある場合は低い方の岸を基準とした閉断面として扱う。これは兩岸に高低差がある場合、低い方の岸が満水時に先に溢れ出すからである。また、河床での点群データが空白の部分は水面の為、LiDAR 計測が出来なかった区間である。ただし、観測を行った時期の E 川の水深は深くても 20 cm 程度であった為、空白の前後の座標を直線で繋いでいる。河道断面は基本的に 5 m ごとに作成した。マンニングの式を式(2)に示す。

$$Q = A \frac{1}{n} \left(\frac{A}{S} \right)^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Q : 流量 [m³/s], A : 断面積 [m²]
 n : マニングの粗度係数, S : 潤辺 [m], I : 勾配

ここで断面積 A は図 9 に示すような座標点で囲まれる多角形の面積として求める。マンニングの粗度係数 n はコンクリート水路の標準値である 0.015 とする。潤辺 S は図 9 の断面を構成する点群において、連続する 2 点間の距離の総和である。勾配 I は GNSS 測量により得られた標高を用い(一部区間はデータ欠測のため地理院地図の標高値を代用)、その区間の平均勾配を用いた。

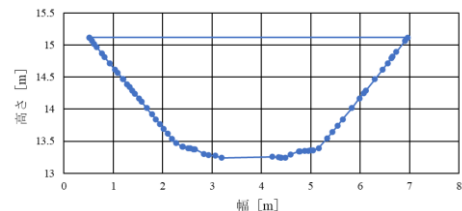


図 9 断面図

4.4 計算結果と考察

図 10 に起点からの距離に対する各区間の標高・断面積・流速・流量の変化を示す。⑫の区間は河道が 90 度折れ曲がっている為、下流・上流の 2 つの区間に分割して表示している。また、図中の破線部は断面を抽出できなかった区間であり、線形で補間している。

断面積は区間同士がほぼ連続的に繋がっているが、流

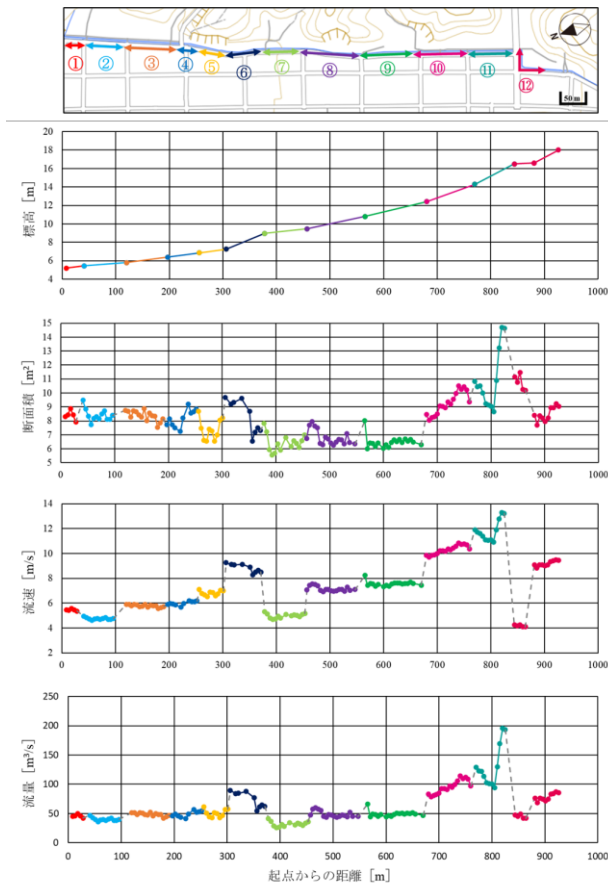


図 10 E 川の各区間の標高・断面積・流速・流量

速においては区間境界で大きく変化している。これは、流速を求めるための勾配の値として、区間ごとの平均勾配を用いていることが原因である。

以下に図から得られる主な考察を記す。

区間①は E 川において平均的な最大流量を有している区間である。③, ④, ⑤, ⑧, ⑨などの区間も 40~60 m³/s の流量で推移しており、流量的に安定した区間であるといえる。

区間⑥は前後の区間と比較して、最大流量が大きくなっている。断面積の値は前後の区間との差はあまり見られないが、勾配が前後に比べて大きく、その為、流量が大きくなっていることが確認できる。

区間⑦は本研究での一次元等流計算の結果で最大流量が全区間において最も小さい区間である。よって、最も氾濫の危険性が高い箇所であると考えられる。この区間は断面積と勾配の双方が小さいことが原因であると考えられる。

区間⑩は断面積・流速及び流量が急激に増加している箇所が見られる。これは上流方向に比較的急な勾配となっており、これに沿って断面積及び流速が増加している為である。

5. 結論

本研究では京都府北部を流れる小規模河川を対象として、(1)二次元氾濫解析に及ぼす地形データの影響、及び、(2)LiDAR による小規模河川の地形データ取得の有効性について考察した。以下に得られた知見を示す。

(1)二次元氾濫解析に及ぼす地形データの影響

1) 河道データの有無によって氾濫域の差が大きいことを確認することができた、測量によって河道データを取得

し、既存の地形データに反映させることによって、より現実的な洪水氾濫現象を再現することが可能となった。

2) E 川直線部分では計画洪水流量を流下させることができたが、上流部の直角カーブにおいて氾濫が確認された。氾濫の原因としては、直角カーブにおける流れの滞留に伴う水位上昇による越水である。

3) 建物を障害物セルとして設定することによって、家屋間における氾濫した河川水が溜まりやすい箇所をシミュレーション上で可視化することができた。

(2)LiDAR による小規模河川の地形データ取得の有効性

1) LiDAR による河道形状の計測によって、位置情報に関しては修正が必要であるが、長さ及び幅方向に正確な情報を取得することができた。

2) 計測した各区間の点群データから作成した 3D モデルによって河道の様子を視覚的に把握することができた。

3) 一次元等流計算を計測データから抽出した連続的な断面を用いて計算したことにより、断面積・流速・流量の変化を詳細に確認できた。そして最大流量の観点から氾濫の危険性が高い箇所を推定することができた。

今後の展開として、LiDAR で得られた高精度の地形データを二次元氾濫解析で使用する地形データへ反映させることで、小規模河川の氾濫危険箇所の推定精度が向上することが考えられる。ただし、氾濫解析で用いる地形データ(解析メッシュ)に得られた点群データをすべて反映することは、計算機能力等の鑑定から現実的ではない。解析結果に及ぼす地形データの精度については今後さらに検討する必要がある。

謝辞

本稿の作成にあたって、E 川の基礎資料の提供をいただいた舞鶴市役所の東山直様をはじめとする職員の皆様には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 宮城県, 令和元年東日本台風, 宮城県の災害対応の記録とその検証, p.18, https://www.pref.miyagi.jp/documents/9059/842408_1.pdf (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- e-GOV 法令検索, 水防法, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=324AC000000193> (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- 国土交通省, 小規模河川の氾濫推定図作成の手引き, https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/tyusokasen/pdf/manual.pdf (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- 国土地理院, 基盤地図情報ダウンロードサービス, https://fgd.gsi.go.jp/download/ref_dem.html (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- iRIC, ソルバー, Nays2DFlood, <https://i-ric.org/solvers/nays2dflood/> (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- 国土交通省, 近畿地方整備局, 設計便覧(案), 第 2 編, 河川編, 第 11 章, 水路, p.4, https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/jigyousya/technical_information/consultant/binran/etsuran/qg18v10000005eb1-att/sekkei02_11.pdf (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- Scaniverse-3D Scanner with LiDAR for iPhone and iPad, <https://scaniverse.com/> (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- Cloud Compare, 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project, <https://www.cloudcompare.org/> (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- QGIS, <https://qgis.org/ja/site/> (2024 年 3 月 5 日閲覧)
- 国土地理院, GNSS を使用した測量のいろいろ, <https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi45009.html> (2024 年 3 月 5 日閲覧)

SfM/MVS を用いた被害認定に向けた住家の傾斜抽出

Estimation of Building Inclination Damage Assessment of Residences Using SfM/MVS

○杉本 満¹, 岩切 宗利², 藤原 匠²
Michiru SUGIMOTO¹, Munetoshi IWAKIRI² and Takumi FUJIWARA²

¹ 防衛大学校 理工学研究科応用システム工学

Graduate School of Applied Mathematics, National Defense Academy of Japan

² 防衛大学校 サイバー・情報工学科

Department of Cyber and Computer Science, National Defense Academy of Japan

This study proposes a method for assessing the damage status of disaster-stricken houses remotely by municipal surveyors. Three-dimensional models are generated from models generated from images captured by residents of the building's exterior, and the inclination is calculated using sensor values from the image data. While conventional methods require precautions to ensure that only gravity, not other acceleration, is present during image capture, this method considers factors such as camera shake during capture. Furthermore, data is sorted, unnecessary data is removed, and the model is regenerated and recalculated. This approach aims to classify damage assessment surveys of houses in accordance with future standards.

Key Words : Structure from Motion, Multi View Stereo, Accelerations Sensor, disaster-stricken houses, Inclination

1. はじめに

令和 6 年能登半島地震¹⁾などのように、国内で災害が発生した際、被災者に対して義援金の支給や税の減免などの支援²⁾は、住家の被害程度に応じて実施される。その区分は、全壊、大規模半壊、中規模半壊、半壊、準半壊、準半壊に至らない(一部損壊)の 6 段階である。その区分は内閣府が定めた調査基準³⁾に基づいて認定される。被災者への支援内容は、その調査に従って交付された罹災証明とその区分により異なる。この被害認定調査は、通常、災害が発生した自治体の職員等によって実施されるが、大規模災害では調査対象も多く、対応人員は限られるため、調査が長期的になる点に課題⁴⁾がある。

各自治体は、被害認定調査を迅速に行うため、航空写真等の活用^{5),6)}や、被災者が撮影した写真等を活用した「半壊に至らない」物件の確認方式(自己判定方式)⁵⁾を導入している⁶⁾。調査員等が現地での確認を行わずに済む方法を採用することで、被害認定の迅速化が可能になる。自己判定方式は、準半壊に至らない(一部損壊)レベルの判定のみ認められており、準半壊以上の判定には適用できない。現在では、国土地理院で取得した写真等を用いた自治体職員等の目視による簡易判定を行うことも可能となっている^{3),5)}。

建物の形状変化や被害の程度を数値化できる最も高精度な手法は、車両に搭載した MMS などの地上測量器材を使用してレーザ測量を行い、精度の高い三次元モデルを作成して測量する手法である。その次に挙げられる手法は、衛星、航空機、ドローンを活用した航空測量データ(光学画像以外の測量情報を含む)の分析による手法である。これらは高額な器材及び専門的な知識、技術が必要であり、交通網などの地上の状況によってその調査範囲が制限される可能性が高いため、自治体や調査に関する団体等でこれらの測量を速やかに実施するのは難しい。

建物や物体の三次元計測技術の基本は、複数視点から対象物を撮影した画像を用いて三次元モデルを生成する SfM/MVS (Structure from Motion/Multi View Stereo)^{6),7)} 技術である。この技術は、スマートフォンで取得した写真等にも活用できる。最近のスマートフォン⁸⁾は、多くのセンサ類を搭載しており、その世帯保有率¹⁰⁾は、2022 年度の段階で約 90%である。スマートフォンは、建物の被害状況を確認するためのデバイスとしても有用と考えられる。

玉川ら¹¹⁾は、固定して撮影した際のスマートフォン内蔵の加速度センサデータと、SfM/MVS により生成した 3 次元モデルを分析して建物の傾斜を計測する手法を提案し、誤差平均 0.10° 程度の高精度傾斜推定を達成した。玉川らの手法¹¹⁾は、スマートフォンを固定して撮影した画像と、スマートフォン内蔵の加速度センサを用いて壁平面の傾斜角度を算出するものである。

本研究では、玉川ら¹¹⁾のようにスマートフォンを固定することなく、手持ちの状態で撮影し、得られた画像群から建物の傾斜度を推定する方法について検討した。本報告では、法令等の基準に基づく精度の評価方法を明らかにするとともに、提案方式の性能を実験的に評価した結果について示す。

2. 提案手法

2.1 提案方式の概要

図 1 は玉川らの手法¹¹⁾と提案手法の処理フローを比較したものである。玉川らの手法¹¹⁾は、スマートフォンを固定して撮影した画像群から 1 つの 3D モデルを生成し、加速度センサの値を参照して建物の傾斜を計測するものである。

スマートフォンを手持ちで撮影した際の加速度センサの値は、手振れなどの影響を受けることになる。その対

策として、提案手法は、使用する画像群からの組み合わせ選択による複数の3Dモデルを生成し、得られた傾斜値を統計処理して、その影響を低減させるものである。

2.2 画像群の組合せ選択法

提案手法では、3Dモデルを複数生成するために、全 n 個の撮影画像から k 個を抽出した画像群を用いることにした。図2は撮影画像から得られた加速度センサの値 $g=(x,y,z)$ である。この組み合わせにより最大で nC_k 個の3DモデルがSfM/MVSにより生成できる。

2.3 SfM/MVSの概要

SfM/MVS^{(6),(7)}は、対象物体の3次元形状を得るため、入力画像間の特徴点を抽出し、その対応関係から画像の撮影位置と姿勢を推定し、3次元のモデル空間に各画素位置に関する点群を射影する技術である。図3はその処理の概要図であり、図4は入力画像群とSfM/MVSによる生成点群である。SfMは、複数のカメラからの画像データを使用して、画像の特徴となる角、色の境目などの特徴点に関するタイポイントを推定し、それらを用いたバンドル法により得られたカメラの位置と姿勢の推定結果から特徴点(タイポイント)の3次元座標を算出するものである。MVSは、SfMによって得られたカメラの位置姿勢推定を基準に、多視点画像解析による座標推定(Dense Stereo Matching)によって高精細な色付き点群を得る手法である。

2.4 複数の3Dモデル生成

複数の3Dモデルは、全 n 個の撮影画像から k 枚を抽出した画像群を用いたSfM/MVSにより生成できる。これにより得られた複数の3Dモデルは、形状や撮影位置の推定の異なる別の3Dモデルである。

2.5 壁面の傾斜推定

本手法では、加速度センサの値を、3次元モデルの座標系に変換しなければならない。図5は、撮影に用いた端末の位置姿勢の座標系からカメラ座標系に加速度センサから得た重力方向ベクトルを変換する様子である。図中の推定重力方向ベクトル g' は回転行列 R_1 とカメラの座標系からモデルの座標系に変換する回転行列 R_2 を用いてカメラ座標系に変換できる。得られた画像群毎の傾斜値 α は、推定した壁平面の法線ベクトル Pv と推定重力方向ベクトル g' との内積から算出できる。

$$g' = R_2 \cdot R_1 \cdot g \quad (1)$$

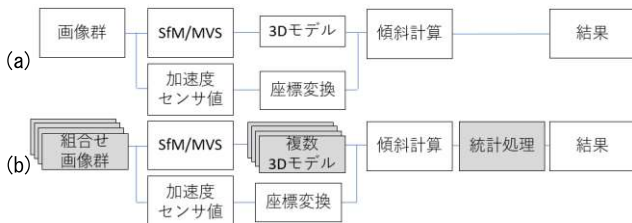


図1 傾斜推定手法の概要 (a: 玉川ら¹¹⁾, b: 本提案)

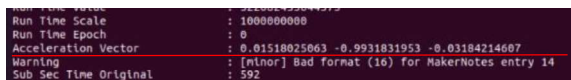


図2 EXIFT00Lで取得した加速度センサの値



図3 SfM/MVSの処理概要

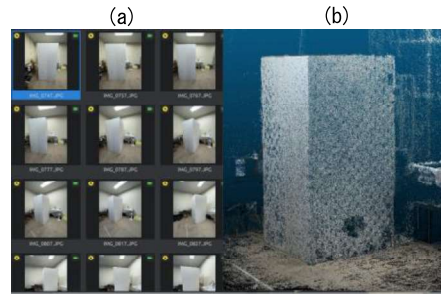


図4 a: 入力画像群 b: 生成点群

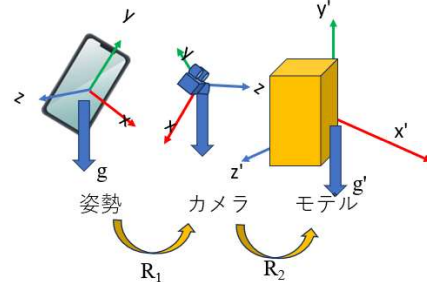


図5 座標系の変換

2.6 統計処理

物体の傾斜推定値は壁平面の法線ベクトルと推定重力方向ベクトルから、画像の組合せ選択法を用いて最大で $n \times nC_k$ 個得られる。

傾斜の推定は、その際の撮影位置推定による影響を受ける。提案手法はその影響を利用した中心極限定理によって、傾斜推定精度を向上させるものである。

手持ちによる撮影画像は、手振れによる加速度センサの値変化が著しいため、被写体がうまく撮影できていないなど有効でない場合もある。提案手法では、傾斜推定の値が平均値から最も離れた画像を除去することで高精度化する。収束判定は、推定値の分布に関する標準偏差が精度評価基準以下となるまで繰り返すことにした。

3. 実験結果と考察

3.1 手持ち撮影による傾斜度推定

スマートフォンの加速度センサの値は、撮影姿勢を固定から手持ちにすることによって影響を受ける。この影響は玉川らの手法¹¹⁾による傾斜の推定値にも影響を与える可能性がある。本実験では撮影姿勢の変化が傾斜推定にどのような影響を及ぼすか比較・確認し、手持ちで撮影した時の有効性と課題を明らかにした。

実験条件として推定傾斜値は被害認定基準³⁾から傾斜 $1/60$ 以上(表1, 約 0.96°)の判定に用いるものである。この基準では、測定の許容誤差範囲に関する定めがないため、本研究での精度目標は、誤差の範囲を国土交通省の瑕疵可能性¹²⁾から $3/1000$ 未満(表2, 約 0.17°)とした。表3は実験に用いた機材である。点群生成ソフトはMeshroomのデフォルト設定を使用し、高密度点群(形式は.ply)をConvertSfMFormatで取得した。平面推定は3D RANSACアルゴリズムで取得した。本実験では $2.0 \times 1.0 \times 1.0$ mの直方体の発泡スチロールを撮影姿勢、高さ、距離を変えて撮影し、面Aの傾斜推定値を得た。

図6は、直方体とスマートフォンの撮影位置と距離を表したものである。図7は、直方体の面Aについて、得られた傾斜推定値を箱ひげ図にしたものである。

本実験ではスマートフォンを固定/手持ち、高さ $1.4/0.7$ m、距離 $1.0/2.0$ mの組み合わせによる10パターンで

撮影した（横持ち撮影 2 パターン含む）。面 A の傾斜計による測定値は、90.0°であった。

表 4 は、撮影パターン毎の推定傾斜値をリスト化したものである。固定の場合は誤差平均が 0.20°以下となり、玉川らの結果¹¹⁾と同様、有効性が確認できた。手持ちの場合は、誤差平均が 1.11°以上となることもあり、その有効性に改善の余地があることがわかった。

3.2 中心局限定理による推定傾斜値の高精度化

本実験では、先述の実験で明らかになった課題を解決するため、組合せ画像群から複数の 3D モデルを生成し、統計処理を行って物体の傾斜を推定する提案手法の有用性を評価した。得られた精度は提案手法を行わない傾斜推定と比較した。

本実験は表 4-No. 5 の実験で使用した 14 個の画像を用いた。本実験では、14 個の画像から 13 枚個の画像を選択することにした。これにより生成された 14 個のモデルで測定できる傾斜は、合計 182 (=14×13) 個ある。その 182 個のデータからランダムに 5 個のデータを取り出し、その平均値を 10000 回算出した。

表 1 傾斜とその判定（下げ振りをを用いたもの）
（出典：災害に係る住家の被害認定基準運用指針³⁾p35)

傾斜		判定
傾斜(d/h)	h=1,200mmの場合	
$(d/h) \geq 1/20$	$d \geq 60\text{mm}$	住家の損害割合を 50%以上とし、「全壊」とする。
$1/60 \leq (d/h) < 1/20$	$20\text{mm} \leq d < 60\text{mm}$	傾斜による損害割合を 15%とし、部位による判定を行う。
$(d/h) < 1/60$	$d < 20\text{mm}$	傾斜による判定は行わず、部位による判定を行う。

表 2 住宅の瑕疵可能性¹²⁾

レベル	壁または柱の傾斜	構造上主要な部分の瑕疵
1	3/1000 未満	瑕疵可能性は低い
2	3/1000 以上 6/1000 未満	瑕疵可能性は一定程度存する
3	6/1000 以上	瑕疵可能性は高い

表 3 機材の諸元

撮影機材	iphone14
解像度	4032x3024
傾斜計	SPI-TRONIC PR03600
生成ソフト	Meshroom
デスクトップ PC の諸元	OS : Ubuntu22.04LTS CPU : Intel core-i9-13900KF GPU : NVIDIA GeForce RTX-4090 メモリ : 32GBx2

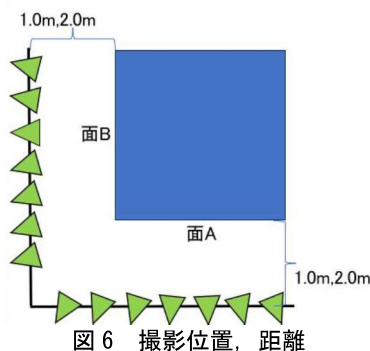


図 6 撮影位置、距離

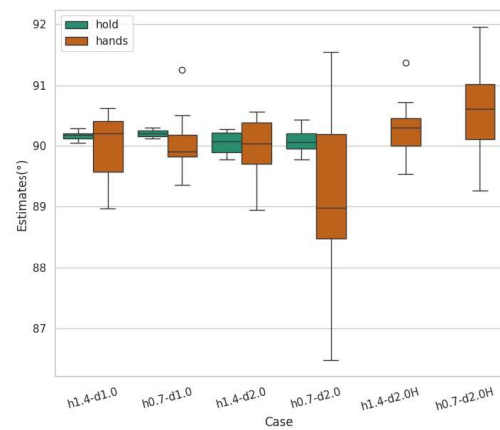


図 7 h(高さ)-d(距離) 毎の傾斜値の散らばり

表 4 撮影パターン毎の結果（測定値：90.0°）

No	向き/保持	距離/高さ	平均値	誤差平均	MSE
1	縦 / 固定	1.0m/1.4m	90.109°	0.109	0.014
2	縦 / 固定	2.0m/1.4m	90.073°	0.180	0.041
3	縦 / 固定	1.0m/0.7m	90.118°	0.152	0.031
4	縦 / 固定	2.0m/0.7m	89.937°	0.117	0.016
5	縦 / 手持	1.0m/1.4m	89.659°	0.575	0.492
6	縦 / 手持	2.0m/1.4m	90.418°	0.518	0.487
7	縦 / 手持	1.0m/0.7m	90.099°	0.367	0.175
8	縦 / 手持	2.0m/0.7m	89.006°	1.114	1.528
9	横 / 手持	2.0m/1.4m	90.240°	0.624	0.625
10	横 / 手持	2.0m/0.7m	90.412°	0.617	0.480

外れ値として除去する画像は、推定傾斜値が、平均値から最も外れた値を示したのから選定した。図 8 は、本実験結果をグラフ化したものである。推定値は、89.696°、誤差の平均値は、0.339°であった。同じ画像群から生成された 1 モデルでの推定値は、89.659°、誤差の平均値は 0.589°である。これらの結果から、推定精度は、向上しているが、推定値が実計測値の 90.0°とも 0.3°程低く、精度目標となる 3/1000 未満を満たすことができなかった。

画像を除去するための収束処理に平均値から最も離れたものを除去し、再計算した後、標準偏差が 3/1000 未満になるまで繰り返したところ、傾斜の推定値が 89.696°から 89.764°、標準偏差 0.145°、誤差の平均値は 0.0853°となった。傾斜の推定に使用した画像枚数は 5 枚である。計測値との誤差は、約 0.24°であり、精度目標を達成できなかった。

3.3 実験結果のまとめ

本実験では、玉川らの手法¹¹⁾でスマートフォンを固定した場合と手持ちの場合での推定傾斜値と有効性を比較した。結果は固定した場合は有効であるが、手持ちの場合は有効性に改善の余地があった。本実験では、提案手法による画像の組合せの選択法、中心局限定理を用いた統計処理が推定精度の向上につながるということがわかった。本実験で除去した画像は、3D モデルの生成段階では使用しているため、この画像を取り除いて再度モデル生成し、繰り返すことで、より正確になると考えられる。また、この処理方法は、最初に求めた平均値と分布に大きく依存してしまうため、除去画像の判定方法と収束判定には改善の余地がある。

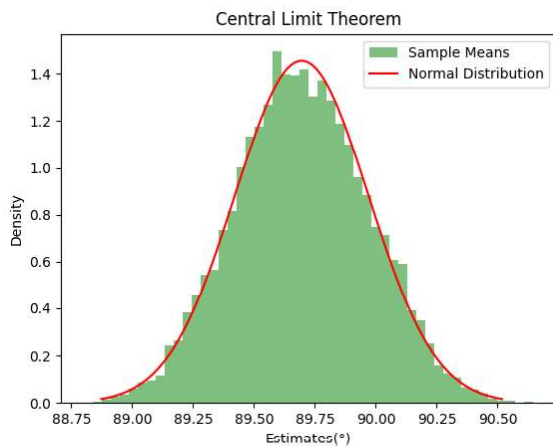


図8 傾斜推定手法への中心極限定理の適用

4. おわりに

本研究では、使用する画像群からの組み合わせ選択による複数の3Dモデルを生成し、得られた傾斜値を統計処理することにより推定傾斜値の精度を高める手法について提案した。

本実験では、玉川らの手法¹¹⁾を用いることで、スマートフォンを固定して撮影した場合に、玉川らの結果¹¹⁾と同様、傾斜推定の有効性が確認できた。手持ちで撮影した場合、加速度センサの値が手振れなどの影響を受けて、傾斜推定値の有効性に改善の余地があることがわかった。その対策として、使用する画像群からの組み合わせ選択による複数の3Dモデルを生成し、得られた傾斜値に統計処理を行うことにより、壁面の傾斜推定値の精度が向上した。また、推定精度の向上のため、外れ値としての画像の除去を行った。しかし、その精度はまだ被害認定を行うための目標を達成できていないと考える。

今後は、モデル生成と除去の手法について検討を進めるとともに、他のスマートフォンデバイスでも玉川らの手法¹¹⁾と提案手法を活用できるか確認し、被害認定での判定に活用できる方法を検討する。

参考文献

- 1)内閣府：令和6年度能登半島地震による被害状況等について、<https://www.bousai.go.jp/updates/r6010Inotojishin/r6010Inotojishin/index.html> (2023.3.27閲覧)。
- 2)内閣府：被災者支援に関する各種制度の概要、https://www.bousai.go.jp/taisaku/hisaisyagyousei/pdf/kakusyuseido_tsuujuu.pdf (2023.3.27閲覧)。
- 3)内閣府：災害に係る住家の被害認定、https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r303shishin_all.pdf (2023.3.27閲覧)。
- 4)藤生慎，森崎裕磨，高山純一：地震災害語の住家被害に対する調査の整合性に関する分析，AI・データサイエンス論文集，3巻，J2号，2022。
- 5)内閣府：令和6年能登半島地震に係る罹災証明書の迅速な交付に向けた留意事項について，事務連絡，2024。
- 6)仙台市：東日本大震災 仙台市 震災記録紙一発災から1年間の活動記録一，<https://www.city.sendai.jp/shinsaifukko/shise/daishinsai/fukko/hassai.html> (2023.3.27閲覧)，2015。
- 7) M. Pollefeys, L. Van Gool, M. Vergauwen, F. Verbiest, K. Cornelis, J. Tops, and R. Koch. Visual modeling with a hand-held camera. IJCV 2004.
- 8)織田和夫：解説：Structure from Motion (SfM) 第一回 SfMの概要とバンドル調整，写真測量学会写真測量とリモートセンシング 55(3)，pp.206-209，2016。

9) Ashraf I, Hur S, Park Y.: Smartphone Sensor Based Indoor Positioning: Current Status, Opportunities, and Future Challenges. Electronics. 2020.

10)総務省：令和5年度版情報通信白書，2023。

11)玉川大暁，山本寛：SfM/MVSを活用した被災住宅の三次元構造診断システムの開発と評価，IEICE NS2021-40 2021。

12)国土交通省：建設省告示第1653号，2000。

動力的断層破壊シミュレーションによる自発的破壊停止条件

Study of a model condition for spontaneous rupture stopping by dynamic fault rupture simulation

○山田 雅行¹, 羽田 浩二¹, 今井 隆太², 藤原 広行³
Masayuki YAMADA¹, Koji HADA¹, Ryuta IMAI² and Hiroyuki FUJIWARA³

¹(株)ニュージェック 研究開発グループ

Research Laboratory, NEWJEC Inc.

²みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)サイエンスソリューション部

Science Solutions Division, Mizuho Research & Technologies, Ltd.

³(国研)防災科学技術研究所 マルチハザードリスク評価研究部門

Multi-hazard Risk Assessment Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

The model condition for spontaneous rupture stopping was discussed by dynamic fault rupture simulation. The dynamic fault rupture simulation was conducted using the three-dimensional finite difference method without giving a priori rupture starting area by changing the coefficient of friction or changing the frictional constitutive law. It was conducted on condition that the shear rigidity was changed along the fault plane and that the shear stress on the fault plane was loaded by forced displacement of model edges. Spontaneous rupture stopping was clearly represented by giving the non-uniform forced displacements.

Keywords : Dynamic fault rupture simulation, three-dimensional finite difference method, spontaneous rupture stopping

1. はじめに

近年、動力的断層破壊シミュレーションは、津田(2016)¹⁾、津田ら(2019)²⁾、加瀬(2016)³⁾、加瀬ら(2002)⁴⁾、壇(2015)⁵⁾、入江(2014)⁶⁾など、断層の物理現象の解明や運動学的地震動シミュレーションのパラメータ設定方法の検証などに広く用いられつつある。

著者らは、摩擦係数を変更したり、摩擦構成則を変更して、事前に破壊開始領域と破壊停止領域を与えることなく、3次元差分法を用いた動的断層破壊シミュレーションを行っている。山田ら(2023)⁷⁾において、実際の地殻内地震断層の条件に近いモデルを用いた動的断層破壊シミュレーションによって、自発的に破壊を開始する条件について考察を行った。本稿では、同様に自発的に破壊を停止する条件について述べる。

2. 動力的断層破壊シミュレーション手法および計算条件

(1)シミュレーション手法とシミュレーションモデル

動力的断層破壊シミュレーションは、3次元有限差分法^{例えは 8)}を用いた。本研究では、差分格子は1辺が0.1 kmの立方体格子、計算時間ピッチは0.005秒とした。

シミュレーションモデルは、断層面の走向方向であるx方向の長さ60 km、断層面の走向方向と直交するy方向の長さ30 km、鉛直方向z方向の高さ18 kmの直方体モデルを作成した(図-2)。シミュレーションモデルのx-z断面を(図-1)に示す。モデルは水平成層構造を想定し、4種類の層を想定した。1つ目の層(図1のB1~B4)は、断層上端より上の表層で、速度が急変しないように厚さ1 kmの層を4層設定した。2つ目の層(A5, B5)は厚さ10 kmの断

層面の層である。3つ目は地震発生層の下に位置する層(B6)で、4つ目は破壊を許さないモデル底部の粘性境界との遷移層(B7)とした。x方向には、破壊を許さない±25.0~30.0 kmの領域D(D1~D7)を設定した。第2層の断層面において、x=-25~0 kmおよびx=+5~+25 kmの領域Bの物性は固定とし、x=0~+5 kmの範囲を、物性を变化させる領域とした。

(2)境界条件とシミュレーションモデルの物性

モデル上端(z=0 km)は応力フリー境界とし、モデル下端(z=18 km)およびx=±30 kmは粘性境界とした。

図-1のモデルに対して、表-1の物性を与えた。第2層はB5に標準的な地震発生層のVp, Vsを与え、x=0~+5kmの範囲についてはVp, Vsを5%増加させたA5の物性を与えた。前報⁷⁾において、この物性変化によって自発的な破壊開始について考察した。

摩擦構成則はすべり弱体化^{例えは 9)}を用いた。静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_d ともに層ごとに一定値とした。静摩擦係数 μ_s は、断層面では一般的な値と考えられる0.8、最表層では0.5と設定した。動摩擦係数 μ_d は静摩擦係数 μ_s の0.875倍に設定した。臨界すべり量Dcは、B5に十分小さい値として0.1 mを与え、剛性が小さければその分変形が大きくなることを考慮し、せん断剛性に反比例する値を与えた。

(3)静岩圧と地殻流体圧

地殻を構成する固体物質による静岩圧を考慮した。静岩圧は図-1のモデルの地震発生層下端(z=14 km)では約350 MPaとなり、静水圧分を除いた有効応力でも200 MPaを超える値となる。地震発生層(z=4~14 km)のせん断剛性が深さ一定であるため、地殻が押されることによって

表-1 シミュレーションモデル各層の物性

Layer type	Depth (km)	Area	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (t/m^3)	μ_s	μ_d	D_c (m)	Rupture
surface	0-1	B1	2.100	0.700	2.00	0.50	0.44	3.27	permitted
		D1	2.100	0.700	2.00	-	-	-	not permitted
	1-2	B2	2.500	1.100	2.10	0.52	0.46	1.26	permitted
		D2	2.500	1.100	2.10	-	-	-	not permitted
	2-3	B3	3.400	1.600	2.30	0.55	0.48	0.54	permitted
		D3	3.400	1.600	2.30	-	-	-	not permitted
	3-4	B4	4.400	2.300	2.45	0.62	0.54	0.25	permitted
		D4	4.400	2.300	2.45	-	-	-	not permitted
fault	4-14	A5	6.300	3.637	2.67	0.80	0.70	0.09	permitted
		B5	6.000	3.464	2.67	0.80	0.70	0.10	permitted
		D5	6.000	3.464	2.67	-	-	-	not permitted
under fault	14-16	B6	6.000	3.464	2.67	0.80	0.80	0.10	permitted
		D6	6.000	3.464	2.67	-	-	-	not permitted
transition for boundary	16-18	D7	6.000	3.464	2.67	-	-	-	not permitted

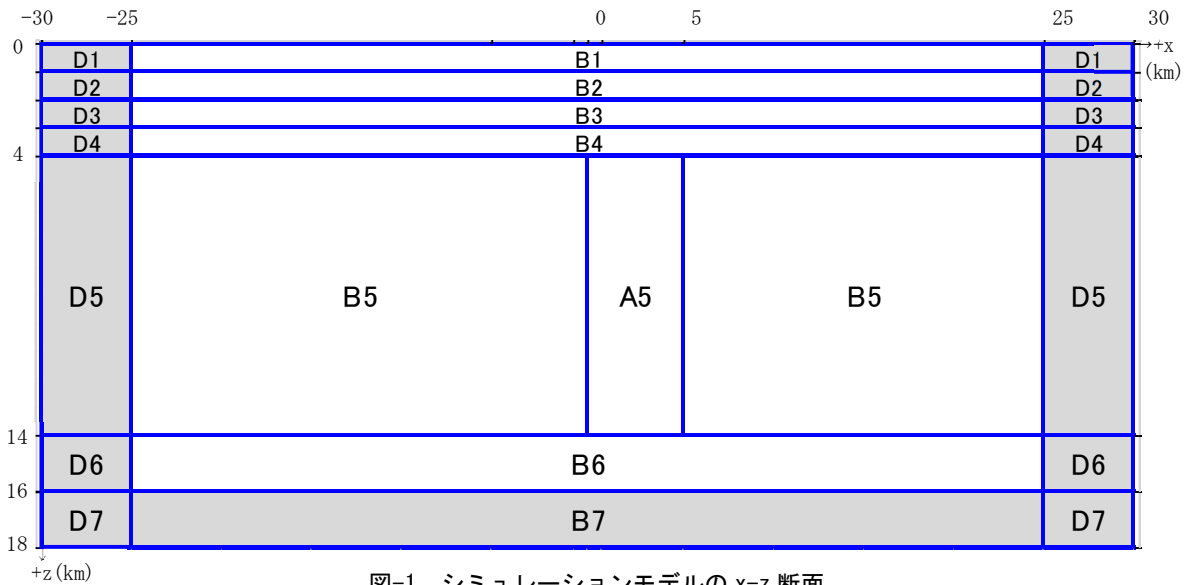


図-1 シミュレーションモデルの x-z 断面

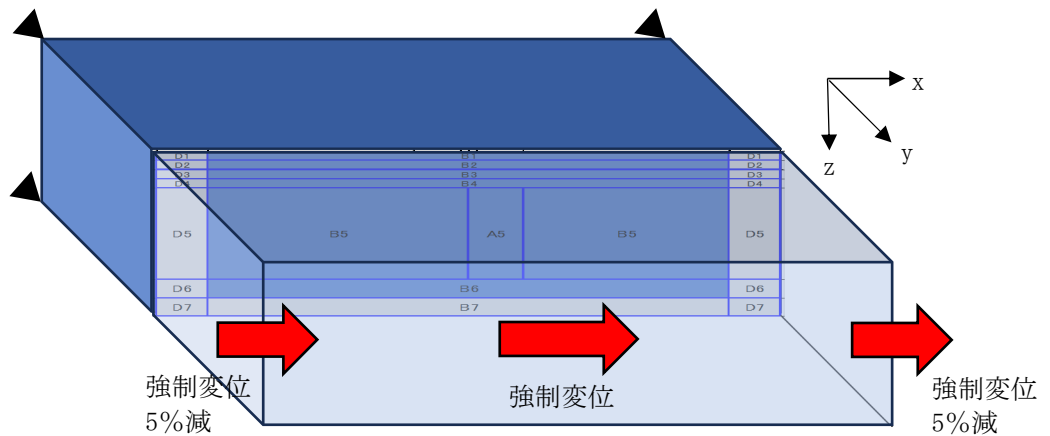


図-2 シミュレーションモデル全体と強制変位のイメージ

生じるせん断応力は、深さ方向に大きな変化がないと考えると、断層は必ず浅部から破壊が生じることとなり、観測事実と整合しない。

一方、地震発生層の下層では地震が発生しないことから、流動的な挙動を示す可能性が考えられている(例えば 10)。また、地殻内に高压の地殻流体の存在も示唆されている

(例えば 16, 17)。そこで、本研究では地震発生層下端($z=14$ km)において、流動的な挙動を示す層と圧力が釣り合うような地殻流体を仮定した。地殻流体が地震発生層を満たしており、その下端では地殻流体圧が静岩圧と一致し、浅くなるにしたがって静水圧に漸近するように設定した。

(4)段階的な载荷条件と载荷範囲

断層面に直交する片側のモデル端部($y = -15 \text{ km}$)を固定とし、反対側のモデル端部($y = +15 \text{ km}$)全面に強制変位を与え、断層面の破壊を促すせん断応力と断層面の破壊を妨げる直応力を発生させた。強制変位は、断層面に最大のせん断応力が発生する方向とした。強制変位は最初の7秒間で滑らかに载荷し、その後の93秒間は断層面の状態を確認するといった合計100秒の計算を単位計算として、断層破壊に至るまで単位計算を繰り返した。また、強制変位のx方向成分が5mの単位計算を繰り返して断層破壊に至った場合、1単位前の破壊前の状態に戻し、強制変位量を減らして単位計算を繰り返した。x方向成分の強制変位量は、5m, 1m, 0.2m, 0.05m, 0.01mの順に減らした。十分に小さいと考えられる0.01mの強制変位量(x方向成分)によって生じる断層破壊を本研究における動的断層破壊シミュレーション結果と考えた。

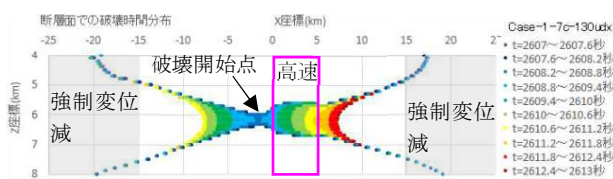
断層面の破壊を促す応力を発生させる強制変位は、 $x = \pm 15 \text{ km}$ から漸減させて、 $x = \pm 30 \text{ km}$ において5%少なく設定した(図-2)。これは、実際の地殻では不均質や周辺の断層の存在によって特定の断層に必ずしも均一な強制変位が作用しないと考えられることを根拠としている。

3. 動力学的断層破壊シミュレーション結果

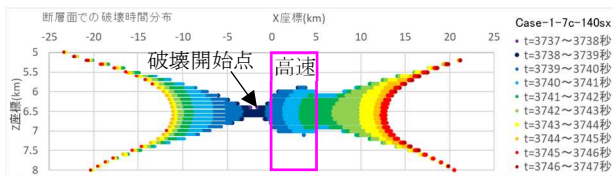
(1)主破壊における破壊時刻分布と破壊開始点

図-3(a), (b)は、それぞれ強制変位を5%減らしたケース、均一のケースの主破壊における破壊時刻分布である。主破壊は深さ $z = 5 \sim 8 \text{ km}$ に集中していたため、 $z = 5 \sim 8 \text{ km}$ の部分拡大して示している。主破壊開始前の時点からさらに100秒間の計算(0.01mの追加変位を与える単位計算)を行った際に生じた広域破壊である。

(b)の強制変位が均一のケースの結果をみると、主破壊は速度差の境界部の低速度側から破壊が始まり $x = \pm 20 \sim 25 \text{ km}$ で停止している。このケースでも破壊はモデル端 $x = \pm 25 \text{ km}$ に至らず、自発的に停止していると考えられる。(a)の端部の強制変位を5%減らしたケースでは、同様に主破壊が速度差の境界部の低速度側から破壊が開始し、 $x = \pm 20 \text{ km}$ 付近で停止している。明らかに自発的に停止していることがわかる。



(a)本研究における破壊時刻分布(強制変位5%減)



(b)既往研究⁷⁾における破壊時刻分布(強制変位均一)

図-3 主破壊における破壊時刻分布

(2)すべり量分布

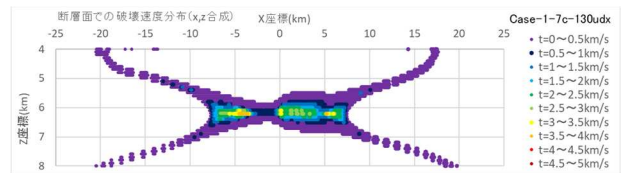
図-4(a), (b)は、それぞれ強制変位を5%減らしたケース、均一のケースの主破壊における破壊伝播速度分布である。

破壊開始直後とモデルの速度が低下する $x = 5 \sim 8 \text{ km}$ 付

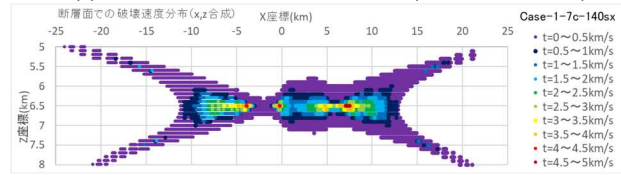
近において局部的に破壊伝播速度が大きい値を示すが、主破壊領域の中央部に着目すると大部分は破壊伝播速度が $1.5 \text{ km/s} \sim 3.0 \text{ km/s}$ で、既往の研究(例えば、Somerville et al.(1999)¹³⁾)による過去の内陸地震の破壊伝播速度 $2.4 \sim 3 \text{ km/s}$ と調和的である。

図-5(a), (b)は、それぞれ強制変位を5%減らしたケース、均一のケースの主破壊におけるすべり量分布である。x方向に0.01mの追加変位を与える単位計算結果であるため、図-5では1cm(0.01m)以上のすべり量の空間分布を示した。

すべり量は破壊開始点に近い領域で最も大きく約 $40 \sim 50 \text{ cm}$ である。(b)の強制変位が均一のケースでは、主破壊が生じた $x = -10 \sim 10 \text{ km}$, $z = 6 \sim 7 \text{ km}$ の範囲で最も大きなすべり量を示し、すべりはモデル端に達せず、主破壊は自発的に停止していると考えられる。(a)の端部の強制変位を5%減らしたケースでは、主破壊が生じた $x = -7 \sim 7 \text{ km}$, $z = 6 \sim 7 \text{ km}$ の範囲で最も大きなすべり量を示し、すべりはモデル端に達せず、均一のケースより明確に自発的に停止していることがわかる。

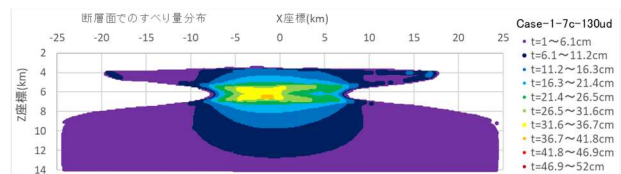


(a)本研究におけるすべり量分布(強制変位5%減)

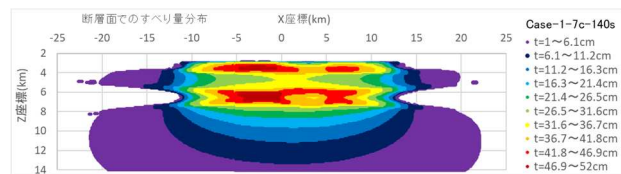


(b)既往研究⁷⁾における破壊伝播速度(強制変位均一)

図-4 主破壊における破壊伝播速度



(a)本研究におけるすべり量分布(強制変位5%減)



(b)既往研究⁷⁾におけるすべり量分布(強制変位均一)

図-5 主破壊におけるすべり量

4. 1995年兵庫県南部地震の震源断層

図-6は、地震調査研究推進本部の「兵庫県の地震活動の特徴」¹⁴⁾の図に、気象庁の「阪神・淡路大震災から20年」特設サイトの第4章資料集¹⁵⁾の1995年兵庫県南部地震のメカニズム解を併記し、中央部の水色で示された兵庫県南部地震の地震断層の南北端に接する東西の黄色線を加筆したものである。

メカニズム解から兵庫県南部地震は、ほぼ東西の圧縮によって生じたことがわかる。図-5の黄色線の北側には

有馬一高槻断層帯や山崎断層帯，南側には中央構造線断層帯があり，東西圧縮による応力は必ずしも六甲・淡路断層帯に集中しない可能性が考えられる．これは，2章で示した断層面の破壊を促す応力を発生させる強制変位が必ずしも特定の断層に均一に作用しないと考えたことと調和的である．

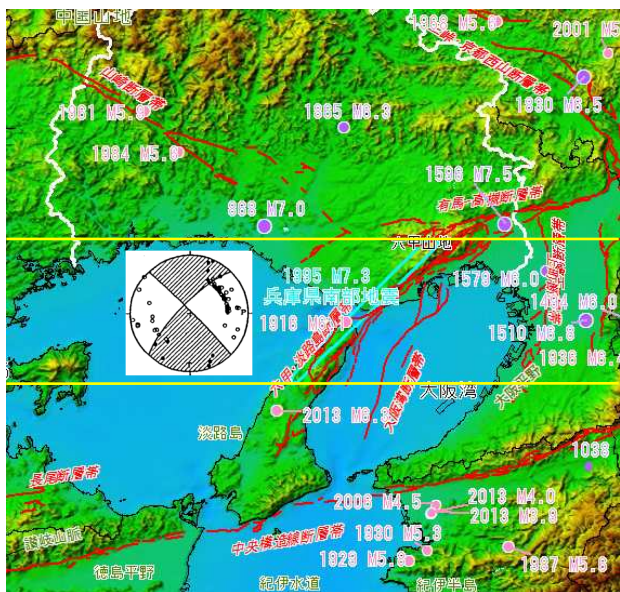


図-6 1995年兵庫県南部地震の地震断層とメカニズム解(地震調査研究推進本部¹⁴⁾および気象庁¹⁵⁾に加筆)

5. おわりに

実際の地殻内地震断層の条件に近いモデルを用いた動的断層破壊シミュレーションによって，自発的に破壊を停止する条件について比較，検討を行った．

本研究では，地殻を構成する固体物質による静岩圧を考慮した．静岩圧とともに，地震発生層下端において，流動的な挙動を示す層と圧力が釣り合うような地殻流体を仮定した．既往研究⁷⁾に従って，主破壊は速度差を有する境界部の低速度側から自発的に開始する条件について加味した．断層面に直交するモデル端部全面に強制変位を与え，断層面を破壊させるせん断応力と断層面の破壊を妨げる直応力を発生させた．この強制変位が均一のケースと端部の強制変位を5%減らしたケースを比較し，自発的な破壊停止状況の違いについて検討を行った．強制変位が均一のケースでも自発的に停止していると考えられるが，端部の強制変位を5%減らしたケースでは，自発的な破壊停止がより明瞭に示された．

すべり量分布，破壊伝播速度を示し，主破壊領域中央部の破壊伝播速度が既往の研究と調和的であり，すべり量の空間分布も実際の地震時に生じるすべり量分布と矛盾しない，本研究における動的断層破壊シミュレーションの妥当性を示した．

また，1995年兵庫県南部地震の地震断層と周辺の活断層との位置関係から，断層面を破壊させる応力を発生させる強制変位が端部で変化する可能性があることに言及した．

本研究における動的断層破壊シミュレーションでは地表面での揺れの時刻歴波形が計算されている．今後，地表面での揺れを用いた震源インバージョンを行うなど，本シミュレーションの妥当性検証をさらに進めていく予定である．

謝辞

本研究は，防災科学技術研究所による断層極近傍地震動評価のための動力的断層破壊シミュレーション解析支援業務の一環として実施したものです．

参考文献

- 1)津田健一：室内実験の結果を組入れた動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーション，清水建設研究報告，第93号，pp.82-88，2016．
- 2)津田健一，宮腰淳一，今任嘉幸，杉山大祐，坪井誠司：プレート境界巨大地震を対象とした室内実験結果を踏まえた動力的断層破壊シミュレーション，日本地震工学会論文集，19巻，4号，pp.4_1-4_12，2019．
- 3)加瀬祐子：2014年長野県北部の地震の動力的震源モデル(その3)，日本地球惑星連合大会，2016．
- 4)加瀬祐子，堀川晴央，関口春子，佐竹健治，杉山雄一：上町断層系の動的破壊過程の推定，活断層・古地震研究報告，No.2，pp.325-240，2002．
- 5)壇一男：長大断層による内陸地震の強震動予測のための断層モデル設定方法の開発ー動力的断層破壊シミュレーションを駆使してー，ORI研究報告，15-01，2015．
- 6)入江紀嘉：動力的断層破壊シミュレーションを用いた内陸横ずれ断層の強震動予測のための震源特性に関する研究，弘前大学大学院理工学研究科博士論文，2014．
- 7)山田雅行，羽田浩二，今井隆太，藤原広行：動力的断層破壊シミュレーションによる自発的初期破壊開始条件の考察，第16回日本地震工学シンポジウム，2023．
- 8)Kase, Y. : Slip-length scaling law for strike-slip multiple segment earthquakes based on dynamic rupture simulations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 100, No. 2, pp. 473-481, 2010.
- 9)大中康譽，松浦充宏：地震発生の物理学，東京大学出版会，2002．
- 10)飯尾能久：内陸地震はなぜ起こるのか？，近未来社，2009．
- 11)加藤愛太郎：稠密地震波観測に基づく地震発生と地殻流体，地球化学，46，191-203，2021．
- 12)岩森光，行竹洋平，飯尾能久，中村仁美：地殻流体の起源・分布と変動現象，地学雑誌，128(5)，761-783，2019．
- 13)Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A. : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, 70, 59-80, 1999.
- 14)地震調査研究推進本部：兵庫県の地震活動の特徴，https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional_seismicity/kin/p28_hyogo.jpg，2024年4月4日閲覧．
- 15)気象庁：「阪神・淡路大震災から20年」特設サイト，第4章 資料集，4.3 地震資料（メカニズム解），https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/1995_01_17_hyogonambu/tech/119_04_datum.pdf，2024年4月4日閲覧．

南海トラフ地震の津波浸水域内の 長期湛水リスク評価のための基礎的検討

Fundamental Study for Assessing the Risk of Long-Term Flooding within the Tsunami Inundation Zone of a Nankai Trough Earthquake

佐藤 史弥¹ 上野 幹大² 山内 勇人³
Fumiya Sato¹ Mikio UENO² and Hayato YAMAUCHI³

¹ 山梨大学地域防災・マネジメント研究センター

Disaster and Environmentally Sustainable Administration Research Center, University of Yamanashi

² 山梨大学工学部土木環境工学科 (現 名工建設)

Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Yamanashi

³ 山梨大学大学院 医工農学総合教育部 工学専攻

University of Yamanashi Faculty of Engineering

Integrated Graduate School of Medicine, Engineering, and Agricultural Sciences

To evaluate the risk of long-term flooding within the tsunami inundation area caused by land subsidence due to the Nankai Trough earthquake, this paper compares the area of the area below 0 m elevation before and after the quake within the tsunami inundation area. The results of the comparative analysis indicate that there are municipalities where the area of the area less than 0 m in elevation becomes more than ten times larger than before the subsidence and that the risk of long-term waterlogging due to the Nankai Trough earthquake may be concentrated in certain cities.

Keywords : Nankai Trough earthquake, Long-Term Flooding, Tsunami

1. 序論

南海トラフ巨大地震のような海溝型地震では、陸域で大規模な地盤沈降が生じ、満潮時の平均海面よりも標高が広いゼロメートル地帯が拡大ことが想定される¹⁾。さらに、拡大したゼロメートル地帯に津波が浸水することで、浸水した海水がそのまま陸地に残り続ける長期湛水による被害地域が拡大することが懸念される²⁾。

長期湛水被害の最大の問題点は、浸水した海水が自然には排水されずその場に留まることで、災害直後の救助・救出活動から、その後の復旧・復興まで、長期間にわたって災害対応の障害となる点にある。例えば、東北地方太平洋沖地震では、地盤沈降により宮城県沿岸部で海拔 0m 以下の面積が 3.4 倍に増加³⁾し、それに伴う長期湛水により、宮城県亘理町の荒浜小学校では約 850 人が 2 日間にわたって孤立した⁴⁾。

南海トラフ地震に伴う地盤沈降による長期湛水について検討した事例として、例えば牧ら⁵⁾は高知市を対象に、津波浸水後の長期湛水の被害について分析し、対応課題の検討を行っている。高知県では南海トラフ地震による長期湛水の発生が想定される場所を公表している⁶⁾。さらに、高知市では 2019 年に長期湛水エリアに取り残された住民の救出計画を作成している⁷⁾。また、兵庫県でも南海トラフ地震に伴う長期湛水被害の推計と対応の検討が行われている⁸⁾。このように、南海トラフ地震に伴う長期湛水への対応は全国で検討されているが、個別の事例に留まっており、南海トラフ地震による津波浸水が想定される市町村のどこに長期湛水のリスクがあるのかは必ずしも明らかになっていない。

そこで本研究では、南海トラフ地震による地盤沈降に

伴う長期湛水のリスクを評価することを最終的な目的とした。そのために本稿では、南海トラフ地震の津波浸水域内において、長期湛水のハザードが相対的に高い市町村を検討することを目的とした。

2. 分析方法

本稿では、南海トラフ巨大地震による津波浸水域内の地盤沈降前後の標高 0m 未満の範囲の面積を市町村毎に比較した。分析に用いたデータは、内閣府の南海トラフ巨大地震モデル検討会が公表する「陸域における津波浸水深データ」である。当該データは、南海トラフ巨大地震で想定される 11 ケースの津波断層モデル毎に算出された津波浸水区域のデータであり、10m メッシュ毎に浸水深、地殻変動後の標高、地殻変動量が格納されている。

本稿では、11 ケースの津波断層モデルの中でも基本的な検討ケースである 5 ケースを分析対象とした。ケース 1 は、「駿河湾～紀伊半島沖」に「大すべり域+超大すべり」域を設定した津波断層モデルである。ケース 2 は、「紀伊半島沖」に「大すべり域+超大すべり域」を設定した津波断層モデルである。ケース 3 は、「紀伊半島沖～四国沖」に「大すべり域+超大すべり域」を設定した津波断層モデルである。ケース 4 は、「四国沖」に「大すべり域+超大すべり域」を設定した津波断層モデルである。ケース 5 は、「四国沖～九州沖」に「大すべり域+超大すべり域」を設定した津波断層モデルである。

また、当該データは各津波断層モデルで、堤防が機能する場合と、地震動により堤防が機能しなくなる場合の 2 種類の堤防条件で津波浸水区域が算出される。つまり、本稿では、津波断層モデル 5 種、堤防条件 2 種の計 10 パ

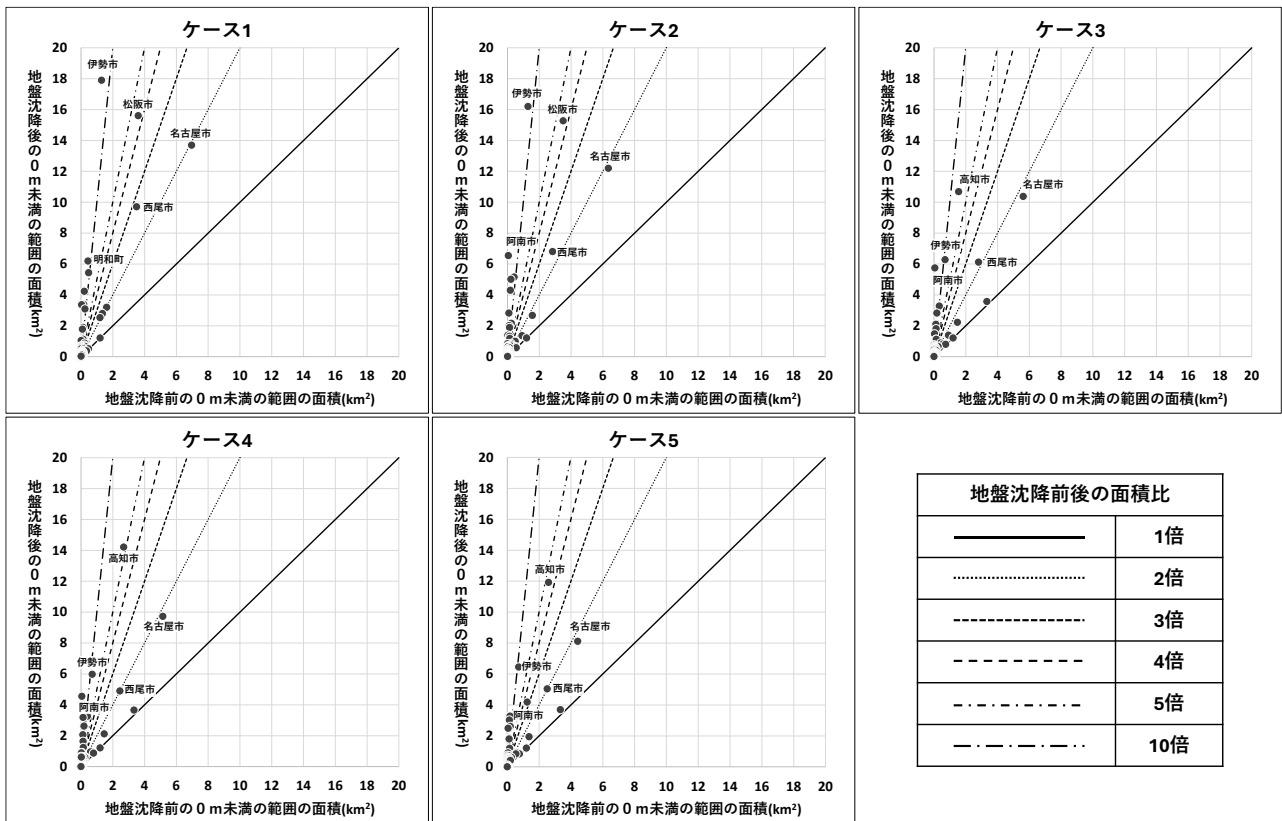


図1 地盤沈降前後の0m未満の範囲の面積の比較（堤防が機能する場合）

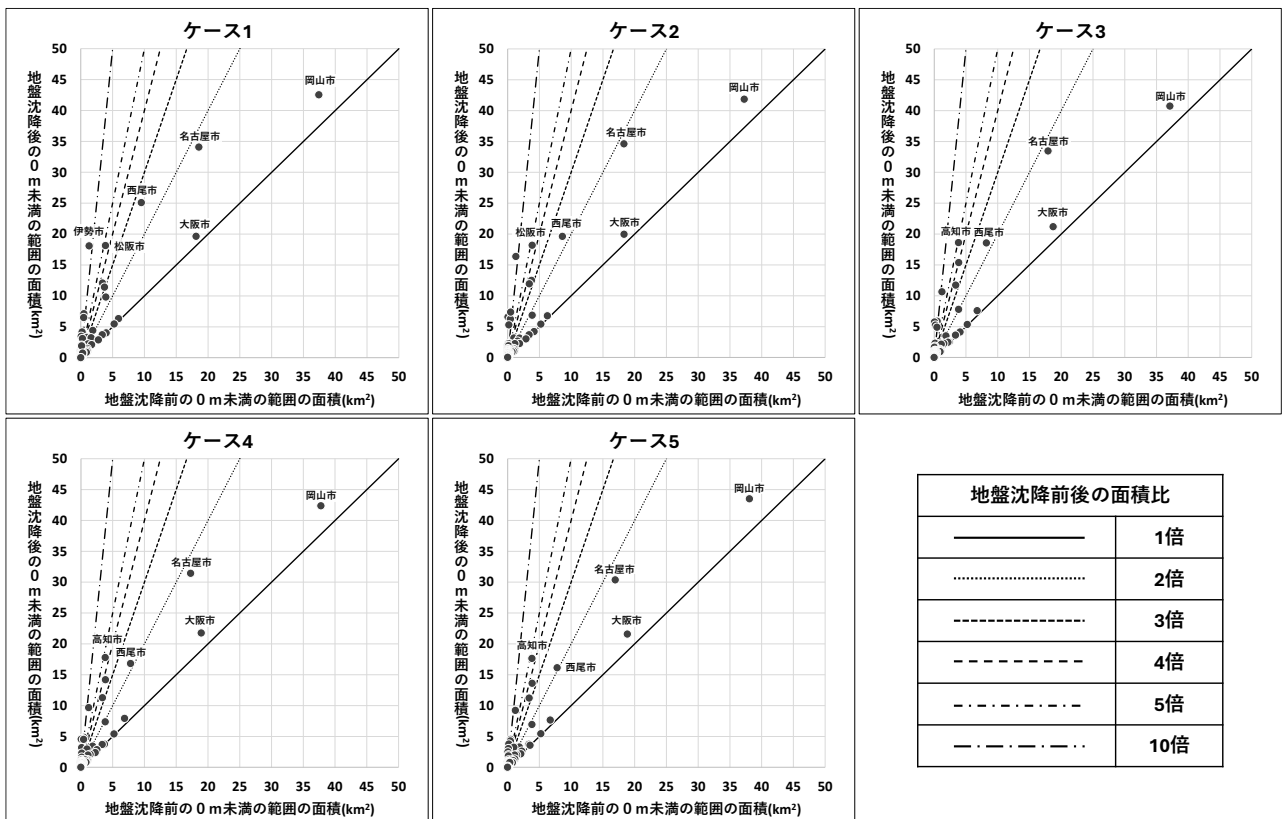


図2 地盤沈降前後の標高0m未満の範囲の面積の比較（地震動により堤防が機能しなくなる場合）

ターンの津波浸水区域を分析対象とした。

3. 分析結果

図1, 2に堤防が機能する場合と地震動により堤防が機

能しなくなる場合、それぞれの堤防条件における地盤沈降前後の標高0m未満の範囲の面積の比較結果を示す。なお、図中の直線は地盤沈降後の標高0m未満の範囲の面積比を示す。また、地盤沈降後の標高0m未満の範囲の面積上位5位の市町村名を示している。まず図1に着目する

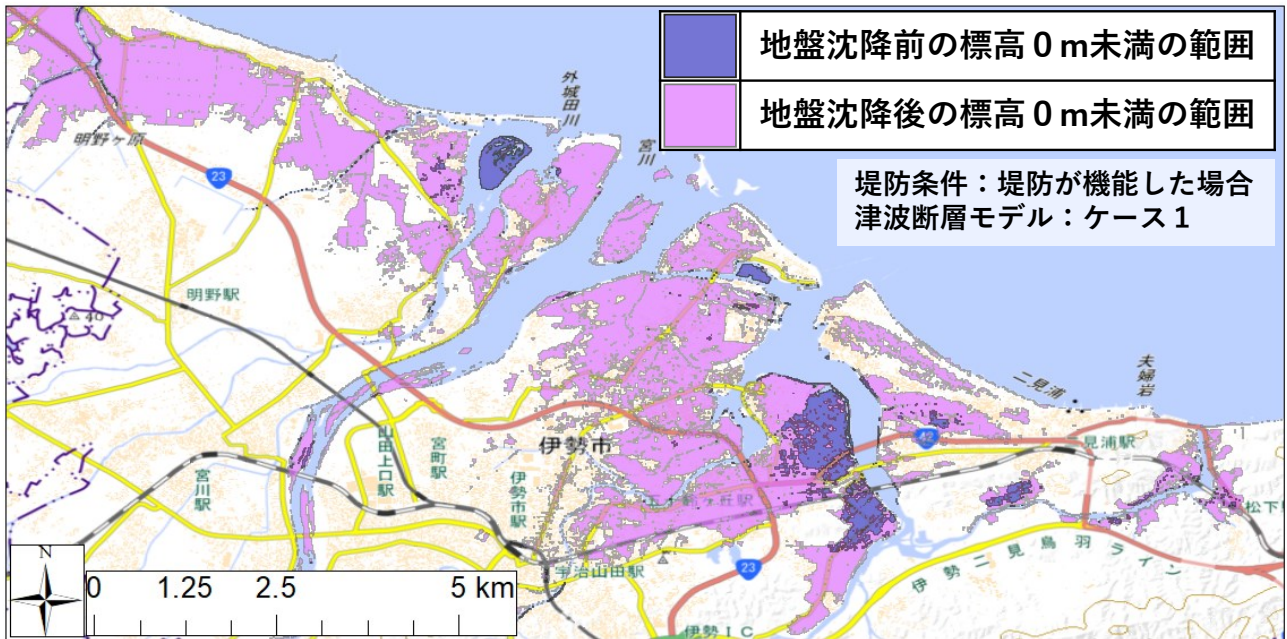


図3 地盤沈降前後の標高0m未満の範囲の空間分布（伊勢市）

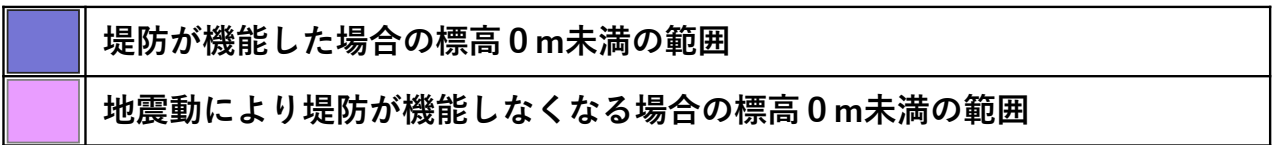
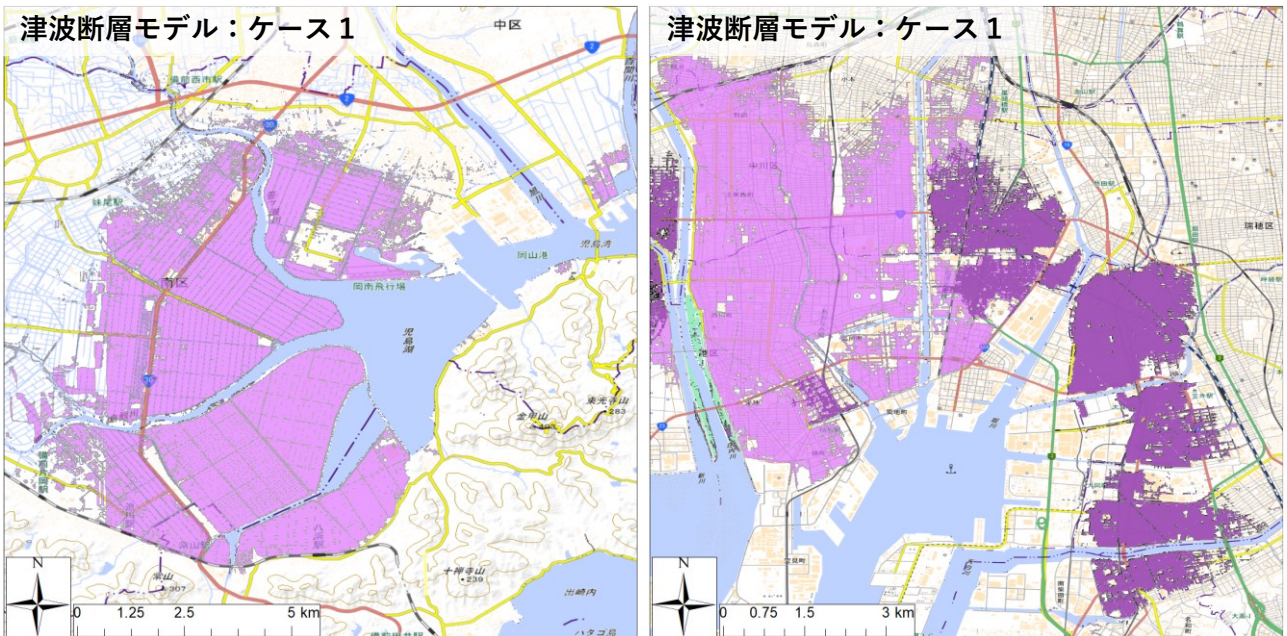


図4 堤防条件毎の地盤沈降後の標高0m未満の範囲の空間分布（左：岡山市 右：名古屋市）

と、標高0m未満の範囲の面積が最も広い市町村がケースによって異なる結果であった。ケース1, 2では伊勢市、ケース3~5では高知市が標高0m未満の範囲の面積が最も広い。また、名古屋市、西尾市、伊勢市はすべてのケースで上位5位内に入る結果であった。特に伊勢市は、どのケースにおいても地盤沈降後の標高0m未満の範囲の面積が沈降前の10倍以上拡大する結果であった。

一方で図2に着目すると、どのケースにおいても標高0m未満の範囲の面積上位5位に出現する市町村が概ね同じであることが見て取れる。図2ではどのケースにおいても、1位が岡山市、2位が名古屋市である。またケース

1以外のケースでは、3位に大阪市がランクインしている。また、図2の地盤沈降後の標高0m未満の範囲の面積は、図1の堤防が機能する場合の面積に比べ広い。

図3に伊勢市における、地盤沈降前後の標高0m未満の範囲の空間分布を示す。なお、津波断層モデルはケース1の場合を示している。図3から宮川や伊勢田川等の河口周辺で地盤沈降後に標高0m未満の範囲が拡大することが見て取れる。

図4に岡山市及び名古屋市における堤防条件毎の地盤沈降後の標高0m未満の範囲の空間分布を示す。なお、両市、津波断層モデルがケース1の場合を示している。

岡山市は堤防が機能する場合は、標高0m未満の範囲が分布しない結果であった。しかし、地震動により堤防が機能しなくなる場合は、主に南区において標高0m未満の範囲が分布する結果であった。名古屋市では、堤防が機能する場合は南区に、標高0m未満の範囲が分布する結果であった。一方で、地震動により堤防が機能しなくなる場合は港区を含む名古屋市の広い範囲に標高0m未満の範囲が分布する結果であった。

4. 考察

分析の結果、地盤沈降により、標高0m未満の範囲の面積が地盤沈降前の10倍以上広がる市町村が存在することが明らかになった(図1・2)。特に、伊勢市はどの津波断層モデルにおいても、標高0m未満の範囲の面積が10倍以上広がる結果であった。このような市町村では地盤沈降を考慮した災害対応計画の検討の必要があると考えられる。

また、堤防が機能する場合の条件では、標高0m未満の範囲の面積の最も広い市町村が異なっていた(図1)。これは、各ケースの津波断層モデルの位置に依存していると考えられる。震源に近い市町村では津波の浸水面積も広いいため、標高0m未満の範囲の面積の最も広がったと考えられる。

一方で、津波断層モデルによらず、どのケースにおいても、標高0m未満の範囲の面積が広い市町村が存在していた。特に、地震動により堤防が機能しなくなるケースでは、分析対象とした5ケースで上位5位に入る市町村が概ね同じであった(図2)。特に、すべての津波断層モデルで上位2位であった岡山市と名古屋市は、の空間分布から、堤防条件の違いにより標高0m未満の範囲の分布が大きく異なる結果であった(図4)。このような結果になった要因として、堤防条件による津波浸水区域の違いが挙げられる。堤防が機能する場合は、堤防により津波の浸水が防がれるため、浸水範囲が狭くなる。特に岡山市は堤防が機能する場合は、市内に津波はほとんど浸水してこないシミュレーション結果となっている。地震動により堤防が機能しなくなる条件は、津波の浸水に対して無防備な条件であるため、標高の低い場所はどんな津波断層モデルの条件だろうと津波が浸水する結果になると推察される。そのため、全国有数のゼロメートル地帯である岡山市や名古屋市、大阪市が上位にランクインしたと考えられる。

なお、岡山市に分布する標高0m未満の範囲の土地利用は主に田んぼや農地である。一方で、名古屋市は人口が集積した工業地帯や住宅地域である。このことから、長期湛水が発生した際の被害の様相は異なると考えられる。そのため、南海トラフ地震時の長期湛水リスク評価をする際は、長期湛水域内の土地利用や人口も考慮する必要があると言える。

5. 結論

本稿では南海トラフ巨大地震に伴う地盤沈降によって生じる津波浸水域内の長期湛水リスクを評価するための基礎的検討として、津波浸水域内の地震前後の標高0m未満の範囲面積を比較した。分析には内閣府が公表する南海トラフ巨大地震の津波浸水区域データを使用し、基本的な検討ケース(計5ケース)を対象に分析を行った。比較分析の結果から、地盤沈降により、標高0m未満の範囲の面積が地盤沈降前の10倍以上広がる市町村が存在すること、南海トラフ地震による長期湛水のリスクは特

定の都市に集中して発生する可能性があることを明らかにした。今後は長期湛水域内の人口や土地利用を考慮したリスク評価分析を実施する予定である。

謝辞

本研究の一部は前田工学記念財団による研究助成によるものであることを記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 内閣府：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 ー津波断層モデルと津波高・浸水域等についてー, 2012.
- 2) 内閣府：資料2-1 南海トラフ巨大地震の被害想定について(第二次報告) ー施設等の被害【被害の様相】ー, 2013.
- 3) 国土交通省：【記者発表】宮城県沿岸部における地震に伴う地盤沈下について, 2011.
- 4) 亙理町：亙理町東日本大震災活動等記録集, 2013.
- 5) 牧紀男, 陳海立, 馬場俊孝, 澤田雅浩, 鈴木進吾, 佐藤栄治, 能島暢呂：長期湛水被害からの災害対応, 復旧対策の基礎的検討, pp. 195-202, 地域安全学会論文集13巻, 2010.
- 6) 高知県：南海地震長期浸水対策検討結果, 2013.
- 7) 高知市：高知市救助救出計画基本方針, 2019.
- 8) 兵庫県：兵庫県応急対応行動シナリオ[南海トラフ地震・津波], 2017.

2023年トルコ・カフラマンマラシュ地震による室内環境被害の分析と評価

Analysis and Assessment of Indoor Environmental Damage Caused by the 2023 Kahramanmaraş Earthquake in Türkiye

○四井 早紀¹, 小山 真紀², 阪本 真由美³,

Nurcan Meral Ozel⁴, Dilek Kepekçi⁴, Yasemin Korkusuz Ozturk⁵, 村上 ひとみ⁶

Saki YOTSUI¹, Maki KOYAMA², Mayumi SAKAMOTO³,

Nurcan Meral Ozel⁴, Dilek Kepekçi⁴, Yasemin Korkusuz Ozturk⁵ and Hitomi MURAKAMI⁶

¹ 東京大学先端科学技術研究センター

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

² 岐阜大学環境社会共生体研究センター

Center for Environmental and Societal Sustainability, Gifu University

³ 兵庫県立大学

University of Hyogo

⁴ ボアジチ大学

Bogazici University

⁵ ボアジチ大学(調査当時), 現: エルジンジャン・ビナリ・ユルドゥルム大学

Bogazici University (at the time of survey), Erzincan Binali Yildirim University

⁶ 山口大学

Yamaguchi University

The 2023 Kahramanmaraş Earthquake in Türkiye killed 50,339 people and caused extensive damage in a wide area of Türkiye and Syria. In this study, a questionnaire survey was conducted among the residents of the seven affected provinces in Türkiye. This paper summarizes the responses to the questionnaire survey in terms of indoor environmental damage and discusses the casualties and rescues. The damage in Hatay Province was large, and a similar trend to the 2016 Kumamoto Earthquake can be seen with regard to damage from furniture overturns. In addition, there were many rescues by family members, relatives, and neighbors, which is similar to the trend observed in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake.

Keywords : 2023 Kahramanmaraş Earthquake, Türkiye, questionnaire survey of residents, indoor environmental damage

1. はじめに

(1) 研究背景

2023年2月6日1時17分(UTC)にトルコ共和国南東部にて発生した Mw7.8 のトルコ・カフラマンマラシュ地震では、1999年イズミット地震の死者数約1万5000人¹⁾を上回る50,339人が亡くなり(2023年3月20日現在²⁾、トルコ・シリアの広範囲で甚大な被害をもたらした。米国地質調査所(United States Geological Survey, USGS)によると、この11分後に Mw6.7 の余震、その約9時間後に Mw7.5 の余震が発生したとされている。この地震は、人的被害発生要因・地震動評価・構造物被害などの観点から、国際的にも重要な位置づけとなる地震災害であり、この被害発生メカニズムを解明することは、トルコおよび世界の地震防災・減災に資するとともに、日本においても重要な示唆を与えるものとなる。

(2) 本研究の位置づけと研究目的

近年、内陸型地震の中で多くの人的被害・建物被害が発生した日本の災害である1995年兵庫県南部地震や2016年熊本地震に対して、住民を対象とした室内環境被害の把握や揺れ、救助の有無等のアンケート調査が実施されてきた。既往研究として、岡崎ら³⁾・太田ら⁴⁾・著者の一部ら⁵⁾の1995年兵庫県南部地震に対する住民アンケート調査がある。これらの研究は、死傷者の発生要因を住居

環境や住居被害、室内被害と変容等から整理した。2016年熊本地震に関して、気象庁が同様の調査を実施している⁶⁾。さらに、日本に限らず、地震大国であるトルコや台湾においても、同様のアンケート調査が実施されてきた。USGSもアンケートによる震度調査手法を開発しており、Did You Feel It?というインターネットベースで調査する仕組みを運用している⁷⁾。したがって、室内環境被害の状況の把握を含む、このようなアンケートによる震度調査は、震度や被害状況を適切に評価できる方法論である。

著者等の研究グループでは、カフラマンマラシュ地震を対象としたアンケートによる震度調査を実施した。震度評価においては、現在検討中であるものの、本論文では、アンケートの回答のうち、「室内環境被害」の観点からまとめ、死傷者の発生や救助の有無について考察する。さらに、兵庫県南部地震や熊本地震での室内被害の特徴との比較を通して、トルコの被害の特徴を考察する。

2. 2023年トルコ・カフラマンマラシュ地震概要

(1) 地震の概要

USGSは、MM震度階級での震度マップ⁸⁾を公開しており、最大MMはIXであった(図1)。国立研究開発法人産業技術総合研究所の地質調査総合センター⁹⁾は、トルコ内

務省災害緊急事態対策庁のウェブサイトで公開されている強震記録を使用し、日本で使用する震度階級を計算した結果を公開しており、震度6弱以上の強い揺れが150 km 近くにわたって分布していると報告している。図2に被災地周辺の県の位置関係を示す。南西側のハタイ県のアンタキヤ市周辺は震度6強、カフラマンマラシュ県周辺は震度5弱から震度6強の揺れが観測されていた。

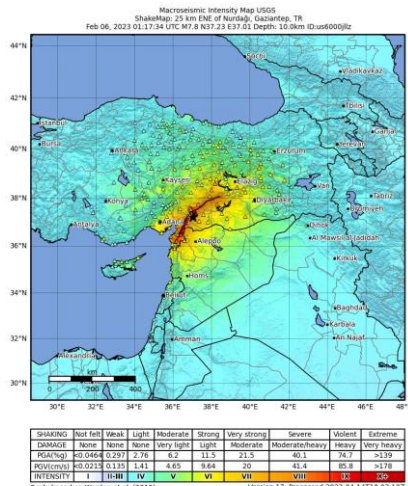


図1 USGSによる震度マップ⁹⁾

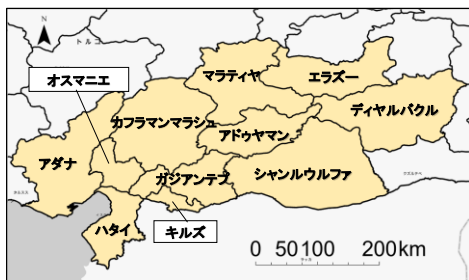


図2 被災地11県の位置関係

(2) 建物被害・人的被害の概要

トルコの建物は、RC造住宅やレンガの組積造住宅が主である。特に被害が甚大であった被災7県(アドウヤマン、ガジアンテプ、ハタイ、カフラマンマラシュ、マラティヤ、オスマニエ、シャンルウルファ)の建物被害(2023年2月19日時点)と人的被害(2023年2月24日時点)を図3に示す¹⁰⁾。気象庁震度で震度6強と推測される地震断層沿いのハタイ県で建物被害が多く、人的被害も最も多い。次に多いのは、震度5弱から震度6強と推察されているカフラマンマラシュ県であった。

3. アンケート調査の概要

(1) 質問票の構成

本調査で使用した質問項目は、1999年コジャエリ地震調査¹¹⁾と2015年ネパール・ゴルカ地震調査¹²⁾を基に作成した、アンケートによる震度調査票である。アンケート調査は、Google FormとSurvey123を用いたオンライン方式であり、トルコ語版と英語版を準備した。質問項目は表1に示す32問であり、地震時の回答者の場所と問32以外選択回答形式である。2023年4月に実施されたパイロット調査¹³⁾にて把握された地鳴りの大きさや、今回の被災地の特徴である屋上の温水器の被害の有無を追加した質問になっている。

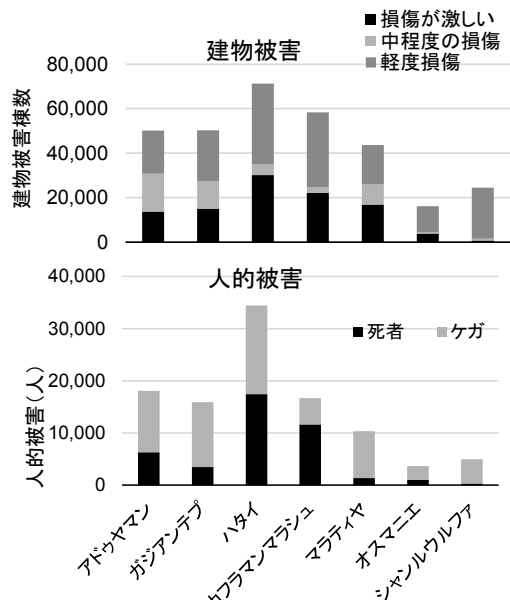


図3 2023年トルコ・カフラマンマラシュ地震での建物被害と人的被害¹⁰⁾

表1 アンケートの質問項目

番号	質問項目	分類
1	地震発生時、どこにいたか?	地震時の場所
2	地震にどのように気づいたか?	揺れの感じ方
3	地面の揺れをどう感じたか?	
4	地震発生時、どこにいた? 屋内か屋外か?	地震時の場所
5	建物の主な材質は?	
6	建物は何年前のもの?	建物種別
7	建物は何階建て?	
8	建物の何階で地震を感じたか?	
9	地震で目が覚めたか?	起きたか
10	ベッドは動いたか?	
11	建物の中で、怖かったか?	
12	壁の絵や照明など、ぶら下がっているものはどうなったか?	家の中の状況
13	棚の上の物はどうなったか?	
14	家具はどうなったか?	
15	地震でどんな音が聞こえたか?	音・地鳴り
16	地下などから轟音が聞こえたか?	
17	あなたがいた建物の漆喰はどうなったか?	
18	外壁はどうなったか?	
19	あなたがいた建物の倒壊は?	建物被害
20	屋上の太陽熱温水器の被害は?	
21	近所の煙突の被害は?	
22	近所の石垣やレンガ塀の被害は?	
23	レンガ造の建物の被害は?	
24	近所の鉄筋コンクリート建物の被害は?	
25	道路はどうなったか?	道路・地盤
26	地盤の変形は?	
27	あなたやご家族は建物の中に閉じ込められたか?	ケガ・救助
28	あなたやご家族の地震によるケガは?	
29	地震発生時、自動車に乗っていた方は、地震をどのように感じたか、または地震によってどのような影響を受けたか?	自動車
30	性別	属性
31	年齢	
32	揺れを感じた時、感じたこと(自由記述)	

(2) 調査の実施

今回は、特に被害が多かった被災7県に着目して分析を進める。共同研究者かつ著者の一部であるOzelから、トルコの被災7県の国民教育庁教育長を通して調査の許可を得て実施した。回収期間は2023年10月～11月末と設定した。オンライン方式でのアンケート調査であり、フォーム上で被験者(公立小・中・高校生徒の保護者)に回答への同意を確認している。本調査内容は愛媛大学の研究倫理申請の承認を得て実施されている¹⁴⁾。回収数は14,737、有効調査票数は12,798であった。

(3) 回答者の位置情報の特定

トルコの行政単位は、大きい方から il(県), ilce(郡), mahalle(マハレ: 住区)の3つの単位に分節されている。質問票では、地震時にいた県・郡、行政の最小単位であるマハレ名称の記入を必須としている。あわせて、地図

上で地震当時に行った場所を指定してもらっている(任意)。それらの情報をもとに、位置情報を特定し、OCHA が提供する行政界データ¹⁴⁾と入力された県・郡・マハレおよび位置情報を照らし合わせ、それらに齟齬があるかどうかを確認し、位置情報の精査を実施した。表 2 に分析に使用する被災 7 県の有効回答数を示す。

(4) 本報告での分析の狙い

本論文では、アンケートによる震度調査票の設問項目のうち、室内環境に関する結果について報告する。

表 2 県別の有効回答数

県名	有効回答数	全体回答数に占める割合
アドゥヤマン	835	6.5%
ガジアンテブ	4,747	37.1%
ハタイ	2,120	16.6%
カフラマンマラシュ	617	4.8%
マラティヤ	3,097	24.2%
オスマニエ	1,082	8.5%
シヤンルウルフア	228	1.8%

4. 室内環境被害の分析と評価

表 1 の問 10~14(家の中の状況), 問 19(建物被害), 問 28(負傷の有無), 問 29(救助の有無)の結果(図 4)に着目し、トルコと日本における室内環境被害の違いから、死傷者の発生や救助の有無について考察する。

(1) 室内のベッドの動き

本設問は、インタビューによるパイロット調査の際に、

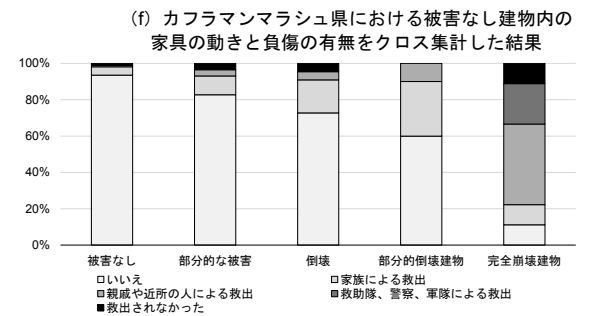
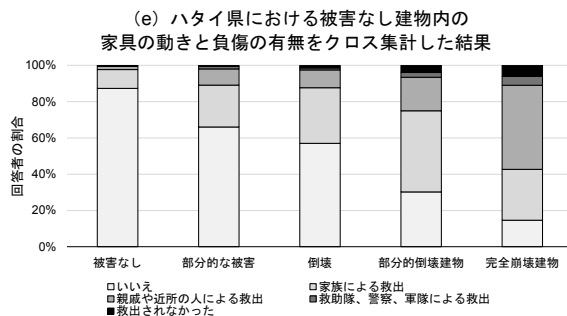
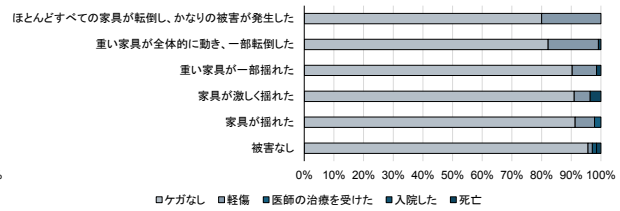
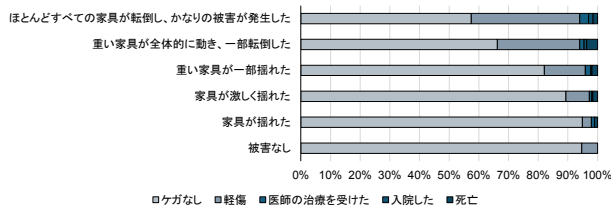
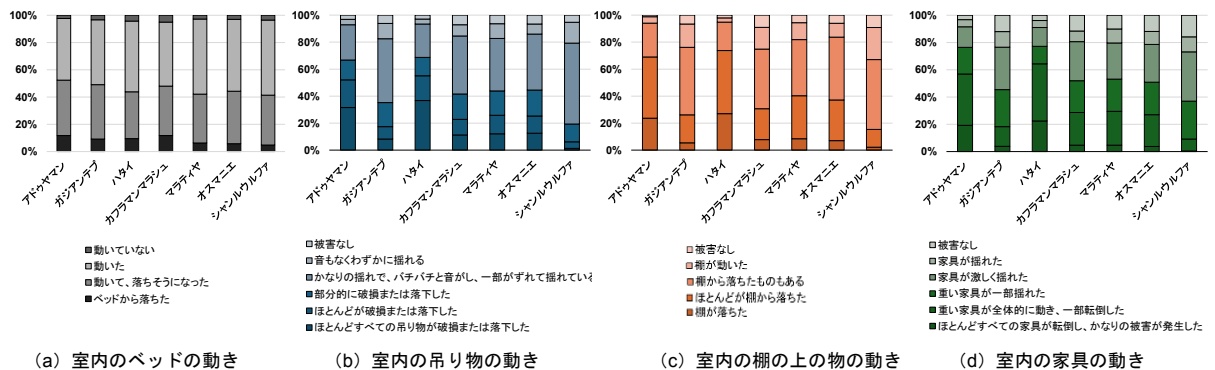


図 4 アンケート調査による室内環境被害と負傷の有無, 救助の有無との関係

質問項目とは別に言及が多かった内容であるため、今回加えた設問である。地震発生時が就寝時間帯ということもあり、図 4(a)より、どの県においても、回答者の約半数がベッドが動いたと回答し、その他の回答者がベッドが動いた、動いて落ちそうになった、ベッドから落ちたと回答し、室内は相当の揺れであったことが窺える。

(2) 室内の吊り物の動き

図 4(b)より、ほとんどすべての吊り物が破損または落下したとの回答は、ハタイ県が最も多く、2 番目はアドゥヤマン県であった。

(3) 室内の棚の上の物の動き

図 4(c)より、ハタイ県の被害が大きい結果となった。特に、棚が落ちたとの回答者はやはりハタイ県が最も多く、ハタイ県の回答者のうち 27%を占める。一方で、アドゥヤマン県の被害も大きいことが把握された。

(4) 室内の家具の動き

図 4(d)より、ほとんどすべての家具が転倒し、かなりの被害が発生したとの回答者はハタイ県が最も多く、ハタイ県の回答者のうち 22%を占める。ハタイ県内では、重い家具が全体的に動き、一部転倒したとの回答が最も多く、42%であった。カフラマンマラシュ県でも家具が激しく揺れたが 29%、重い家具が一部揺れたが 23%、重い家具が全体的に動き一部転倒したが 25%という結果になった。今回の調査では、具体的にどのような重い家具が動いたのか特定すること難しいが、上記の結果より、転倒または移動した割合が高いことが注目される。2016 年熊本地震⁶⁾では、固定していない家具の被害について、

家具の移動なしが 8%，それ以外は移動したり倒れた家具もあった。ハタイ県でも似たような傾向が見て取れる。

(5) 負傷の有無

ハタイ県とアドゥヤマン県を除く 5 県では、負傷なしが約 90%を占める。ハタイ県では、負傷なしは 61%，アドゥヤマン県では、負傷なしは 67%であり、死亡した方がいると回答したのは、ハタイ県で 94名(4%)，アドゥヤマン県で 48名(6%)となった。

(6) 救助の有無

負傷の有無と同様、ハタイ県とアドゥヤマン県を除く 5 県では、救助の必要なしが約 90%を占める。家族や親戚、近所の人による救助は、ハタイ県のうち 23%，アドゥヤマン県のうち 20%であった。さらに、救助隊、警察、軍隊により救助されたとの回答は、ハタイ県のうち 1%，アドゥヤマン県のうち 1%であった。

(7) 室内環境被害と建物被害、負傷・救助の有無の関係

建物が部分的に倒壊したり、完全崩壊すれば、室内環境被害が発生し、負傷・死者の発生は否めない。ここでは、建物被害がない回答に着目し、室内環境被害と負傷の有無、救助の有無について、ハタイ県とカフラマンマラシュ県に注目し考察をする。アドゥヤマン県での室内環境の被害も大きい、この回答は、その後発生した Mw7.5 の余震も反映されている可能性もある。現状、アドゥヤマン県における日本で使用する震度階級の情報や、この被害が本震または余震によるものなのか判断できないため、上記 2 県に絞り考察する。

問 19 で建物被害なしと回答したのは、ハタイ県のうち 63%，カフラマンマラシュ県のうち 88%であった。建物被害なしにおける、室内の家具の動きと負傷の有無をクロス集計した結果を図 4(e, f)に示す(不明の回答は除く)。その結果、ハタイ県において、重い家具の被害が重度であればあるほど、負傷の有無も増加する結果となった。カフラマンマラシュ県では、ハタイ県と同様の傾向を示す一方で、全体的な負傷の発生割合はハタイ県よりも低い結果となった。さらに、建物被害なしにおける、家具の動きと救助の有無をクロス集計した結果、ハタイ県では、1,344名の287名が救助され、そのうち221名が、重い家具が全体的に動き一部転倒した以上の被害状況で救助されたことが把握された。また、カフラマンマラシュ県でも、544名のうち47名が救助され、21名がハタイ県同様の状況で救助された。

次に、ハタイ県とカフラマンマラシュ県に注目し、建物被害と建物の中に閉じ込められた人の救助の有無をクロス集計した結果(不明は除く)を図 4(g, h)に示す。両県において、建物被害が大きくなるにつれて、倒壊建物に閉じ込められる傾向にあることがわかる。また、誰が救助をしたのかという観点から見ると、両県において家族や親戚、近所の人であったという回答が多く、救助隊や警察、軍隊との回答は少ない。しかし、カフラマンマラシュ県において、完全崩壊した建物において、ハタイ県と比較すると相対的に救助隊や警察、軍隊によって救助された回答が多い。これは、被災地の被害の規模やアクセスの問題、救助隊の数等にも左右されると考えられる。また、建物被害なしであっても、ハタイ県では家族による救出が 10%行われていた。建物被害と救助の有無の結果に関する傾向は、1995 年兵庫県南部地震でも同様の傾向が報告されている。トルコの室内家具の耐震に関する取り組みの実施や、防災教育、住民に対する救出訓練の有無等について、更なる分析を進める必要がある。

5. まとめ

2023 年トルコ・カフラマンマラシュ地震における被災 7 県の住民を対象としたアンケート調査を実施した。本論文では、室内環境の被害を明らかにし、死傷者の発生や救助の有無について考察を行った。その結果、震度 6 強とされているハタイ県の被害が大きく、家具の転倒被害に関して、ほとんどすべての家具が転倒したとの回答はハタイ県で 2 割を占める。また、1995 年兵庫県南部地震の傾向と同様に、建物被害が大きくなるにつれて、倒壊建物に閉じ込められる人数を増加し、家族や親戚、近所の人によって救助された事例が確認された。今後、日本とトルコにおける室内の家具の様相やレイアウト等も踏まえ、考察を進める。

謝辞

本地震で亡くなられた方々に弔意を、また被災された方々にお見舞いを表します。アンケート調査にご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。

補注

(1) 本論文は、国立研究開発法人科学技術振興機構のカフラマンマラシュ(トルコ南東部)地震関連国際緊急共同研究・調査支援プログラム(J-RAPID)のプロジェクト(代表:愛媛大学森伸一郎教授)の一部であるため、倫理審査を愛媛大学で実施している。

参考文献

- 1) アジア防災センター: トルコ:地震 1999/08/17, https://www.adrc.asia/view_disaster_jp.php?NationCode=&Lang=jp&Key=65 (参照 2024.4.20)
- 2) 国連人道問題調整事務所: Türkiye: 2023 Earthquakes Situation Report No. 13, As of 6 April 2023, 2023.
- 3) 岡崎信弘, 太田裕, 井宮雅宏: 兵庫県南部地震激震域—北淡町—における人間行動と死傷, 地域安全学会論文報告集, No. 7, pp. 384-387, 1997.
- 4) 太田裕, 小山真紀, 岡崎信弘: 資料: 兵庫県南部地震に伴う人間行動のアンケート調査—淡路島淡路町—, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No. 11, pp. 159-180, 2003.
- 5) 村上ひとみ, 竹田宏樹, 鎌田泰子, 高田至郎: 兵庫県南部地震における東灘区の住屋倒壊と閉じ込めに関する実態追跡調査, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No. 7, pp. 101-123, 2001.
- 6) 気象庁: 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震調査報告, 気象庁技術報告, No.135, 2018.
- 7) Wald D.J., Quitoriano V., Worden C.B., Hopper M., Dewey J.W.: USGS “Did You Feel It?” Internet-based macroseismic intensity maps. *Annals of Geophysics*, 54(6): 688-707, 2011.
- 8) USGS: <https://earthquake.usgs.gov/> (参照 2024.4.20)
- 9) 国立研究開発法人産業技術総合研究所の地質調査総合センター: 2023 年 2 月 6 日に発生したトルコ南部の地震 (Mw 7.8, Mw 7.5) について, <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/turkey2023/turkey20230317.html> (参照 2024.4.20)
- 10) DEEP: Türkiye Earthquake, February 2023, Bi-weekly Highlights - 24/02/2023
- 11) Shiono, K., and Koyama, M.: Questionnaire Survey of Seismic Intensity (Its Application to the 1999 Kocaeli Earthquake), Notes for discussion, (personal communication), 2000.
- 12) 村上ひとみ, 他: 2015 年ゴルカ・ネパール地震のアンケート震度と人的被害調査結果, 2015 年ネパール地震と地震災害に関する総合調査報告書, 科研費報告書, 2016.
- 13) Murakami, H., et al.: Preliminary field survey on seismic intensity by interview and structural damage by observation in the 2023 Kahramanmaraş, Turkey earthquakes, *Proc, 16JEEs*, 2023
- 14) UNHCR and OCHA: Türkiye - Subnational Administrative Boundaries, <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-tur?> (参照 2024.4.20)

Sentinel-1衛星による山口県上関大橋の段差事故のモニタリング

Monitoring of Girder Step Accident on the Kaminoseki Bridge, Yamaguchi, Using Sentinel-1 Satellite

○松岡 昌志¹, 大串 文誉²

Masashi MATSUOKA¹ and Fumitaka OGUSHI²

¹東京工業大学 環境・社会理工学院

School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

²株式会社テラフェーズ

Terra Phase, Inc., Japan

On November 14, 2020, at around 8 p.m., the end of the main girder on the Murotsu side of the Kaminoseki Bridge in Yamaguchi Prefecture was lifted, causing a step in the road surface and resulting in a collision with a passenger car. In this study, a time-series interferometric analysis of synthetic aperture radar (SAR) images taken by a Sentinel-1 satellite that had been observing the bridge since before the step accident occurred, was conducted to examine whether the occurrence of the step could have been predicted.

Keywords: displacement, bridge girder, synthetic aperture radar, times-series interferometric analysis

1. はじめに

2020年11月14日午後8時頃に山口県の上関大橋において、室津側の主桁端部が浮き上がったことで路面に段差が発生し、乗用車1台が衝突事故を引き起こした。1969年に完成したこの橋のように、高度経済成長期に建設されたインフラ施設は我が国に数多くあり、維持管理が課題になっている。老朽化だけでなく人口減少に伴う労働力の減少などにより、点検には多大なコストと労力がかかっており、管理者の負担になっている。平常時から都市のインフラ施設をモニタリングし、老朽化に起因した事故や被害を事前に防ぐことは、安全・安心な社会を維持する上で重要である。多くのセンサを必要な箇所に設置して異常を監視するシステムの構築などが考えられるが、対象となるインフラ施設を多く抱えている我が国では限界があるため、補完的なモニタリング技術が望まれている。本研究では、段差事故の前から上関大橋を観測しているSentinel-1衛星の合成開口レーダ(SAR)画像の時系列干渉解析(NN-PSI)を行い、段差発生を予測できたのかについて考察を行った。

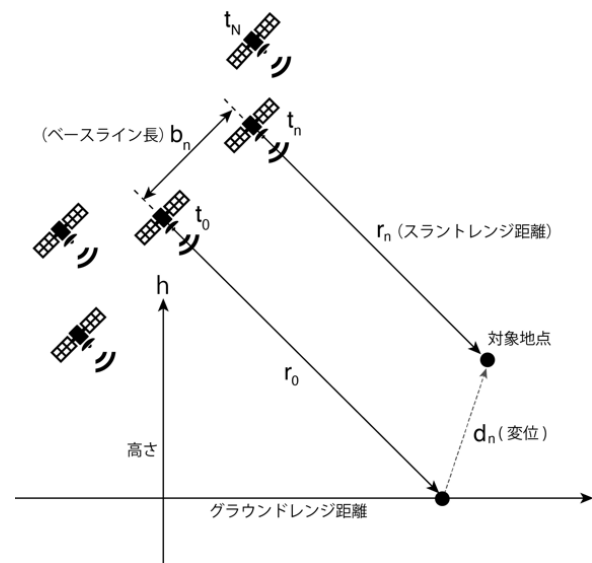


図1 時系列 SAR 観測による変位計測の模式図

2. NN-PSI (Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry)

NN-PSI¹⁾は既往の時系列干渉解析の問題であった非線形的な挙動および2πアンビギュエティを生じる大きな変位が推定できない点を改良し、マイクロ波が持続的に強く散乱するピクセルについて視線方向(スラントレンジ方向)の時系列変位を計測する方法である。解析には多時期の人工衛星のSAR画像を用意する必要がある。観測の模式図を図1に示す。変位計測の精度はマイクロ波の波長に依存する。ここで用いるSentinel-1衛星はCバンド(波長:約5.5 cm)のSARセンサ搭載し、位相情報から変位を計測するので、精度はミリメートル相当になる。一方、空間分解能は画像ピクセルの大きさ(Sentinel-1衛星は約2 m × 約14 m)に依存する。

3. SAR画像

2014年に打ち上げられたSentinel-1衛星は2基体制にて運行され、それぞれ下降軌道と昇降軌道から上関大橋を観測している。すべての観測画像が無償で利用できる点が他の人工衛星とは異なる。本報告では、2017年1月9日から段差事故が生じた後の2020年12月19日までの下降軌道の121シーン(1440日間)のデータを用いた。送受信偏波はVVである。図2(a)に上関大橋のSAR画像を、図2(b)には光学センサ画像(Google Earth)を示す。本来の橋は1本なのにSAR画像では3本の線が映る。これは、橋桁が海面よりも高い位置にある場合に起こる現象で、衛星から照射したマイクロ波が橋桁に直接当たったもの(1回散乱)、橋桁と海面との反射(2回散乱)、そして、橋桁の下側と海面との複数反射(3回散乱)が記

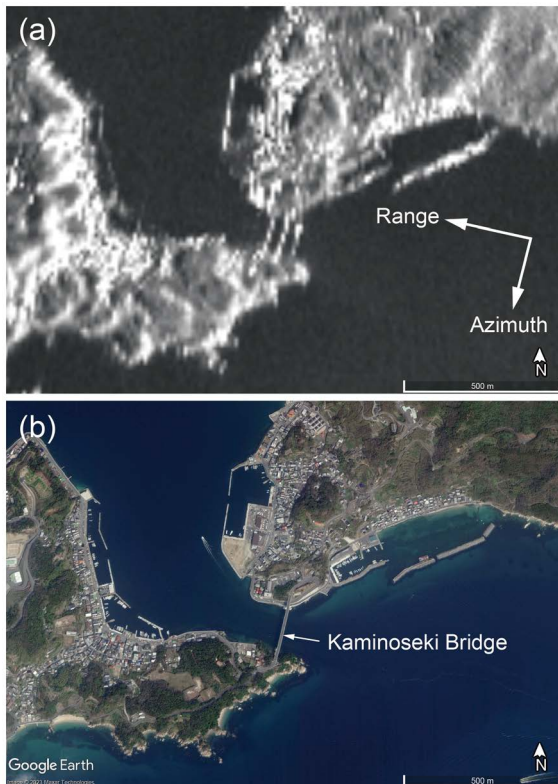


図2 上関大橋の衛星画像, (a) Sentinel-1 SAR 画像, (b) Google Earth の光学センサ画像

録されるために発生する²⁾. 本研究では橋桁の変位計測が目的なので, 1 回反射のところを用いる. つまり, 衛星に近い側 (図 2(a) の SAR 画像においては東側) に映る橋について視線方向の時系列変位を推定する.

4. 上関大橋の時系列変位と考察

上関大橋とその周辺において, NN-PSI から推定したマイクロ波の散乱体の高さ (参照 DEM からの高さ) および位置を地図 (グラウンドレンジ) に投影した結果を図 3 に示す. 図中の赤点は散乱体の位置を示す. ただし, この点は散乱体があると思われるピクセルの北東端である. 室津側を拡大した図には段差が生じた付近 (girder-1) およびやや南側 (girder-2) の散乱体の推定高さを示している. そして, 高さの値を参考にして選択した橋桁と考えられる散乱体のピクセルを青色矩形で示している.

girder-1 と girder-2 のピクセルの時系列変位 (平均) を図 4 に示す. 正の値は衛星に近づく方向, 負の値は衛星から遠ざかる方向に変位していること意味する. 図より girder-1 と girder-2 共に 1 年ごとの周期的な変位がみられ, これは夏季の気温上昇に伴う部材の膨張に起因している. girder-2 においてその変化が大きい. そして, 1095 日 (2020 年 1 月) 頃から girder-2 は衛星から遠ざかるように, 1300 日 (2020 年 8 月) 頃からは girder-1 が衛星に近づき始め, 段差発生直前まで徐々に変位が大きくなっている. なお, 実際の段差の大きさは室津側で最大約 200 mm³⁾とマイクロ波の波長の 4 分の 1 よりもかなり大きいので, 段差発生後の推定変位には信頼性がない. 橋の水平変位がほぼゼロだとすると, 視線方向の変位は鉛直方向の変位に変換できる. 段差発生直前の変位は夏季の材料膨張に伴う変位より大きく, 視線方向の変位が約 10 mm とするとマイクロ波の入射角を考慮した鉛直変

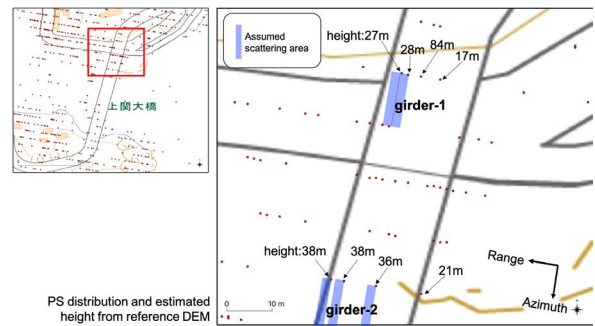


図3 上関大橋付近の散乱体の位置 (数値は NN-PSI から推定した参照 DEM からの高さ, 青色矩形は橋桁と考えられるピクセル) 背景: 地理院地図

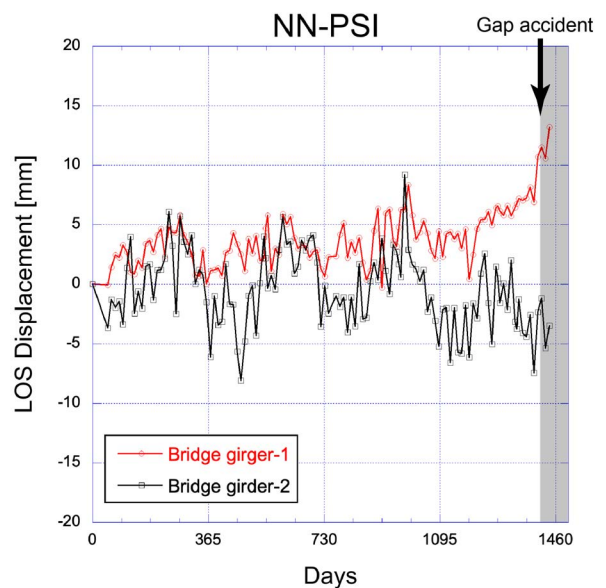


図4 NN-PSI から推定した視線方向の時系列変位

位は約 15 mm だったことが推察される.

5. まとめ

2020 年 11 月 14 日に山口県の上関大橋において発生した路面段差発生を未然に予測できたのかを考察するために, 2017 年 1 月から段差発生後まで上関大橋を観測した Sentinel-1 衛星の時系列干渉解析 (NN-PSI) から橋桁の変位を推定した. その結果, 室津側の橋桁においては 2020 年に入ってからそれ以前とは異なる変位挙動を示していたことを明らかにした.

参考文献

- 1) F. Ogushi, M. Matsuoka, M. Depilippi, P. Pasquali: Implementation of non-linear non-parametric persistent scatterer interferometry and its robustness for displacement monitoring, *Sensors*, 21(3), 1004, 2021.
- 2) X. Chen, Y. Zheng, J. Peng, M. Floris: Monitoring river water level using multiple bounces of bridges in SAR images, *Advances in Space Research*, 68, 4016-4023, 2021.
- 3) 山口県: 上関大橋復旧検討会議報告書, 2021. <https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/soshiki/128/142697.html>

非常時に役立つ防災倉庫 — 3か所の防災倉庫の比較 —

Disaster prevention warehouse useful when a disaster occurs
- Comparison of three disaster prevention warehouses -

石原貴代
Tkayo ISHIHARA

名古屋学芸大学
Nagoya university art and science

At the neighborhood association, we toured the disaster prevention warehouse and interviewed the neighborhood association president. In order to review stockpiles and make improvements, it is necessary to learn about disasters from the government.

Key words: Disaster prevention warehouse, stockpiles, serve the purpose

1. 研究の背景と目的

日本で多発する災害、「ひとたび災害が起こると、避難所は『住まいを失い、地域での生活を失った被災者の拠り所』となり、また『在宅で不自由な暮らしを送る被災者の支援拠点』となる。」¹⁾ 避難所運営ガイドラインの「平時から実施すべき業務」では「避難所生活は住民が主体となって行うべきものですが、その運営をバックアップする体制の確立は、市町村の災害対応業務の根幹の一つと言えます。」²⁾と避難所生活は住民が主体になって行うべきと記している。

避難所リーダーをはじめとする人材育成により、地域では自主防災会が結成されており、「自主防災組織について」自主防災会等の推移³⁾において、平成7年から平成19年までの間、組織率(全国)が上昇し続けていることが示されている。

内閣府の防災のページ「特集 災害の備え、何をしていますか」においては自治体における備蓄について「市区町村等の自治体では、災害発生時に避難所となる公立小中学校や自治体所有の施設等に災害に備えた備蓄倉庫を設け、水や食糧、生活必需品、医薬・医療品、また防災資機材を配置・管理している。」³⁾と東京都港区の例に配置・管理している備蓄品を挙げている。さらに「超高層マンションの災害に備えた備蓄」についても事例紹介をしている。

そこで、本研究では、住民主体の避難所生活づくりに必要な備蓄について、自治会等の防災倉庫を見学し、自治会長等の聞き取りをしたので、報告する。

2. 防災倉庫の見学および聞き取り調査の対象と結果

防災倉庫の見学・聞き取りが出来た3か所の自治会等の調査時期、地域は、2020年愛知県A市⁴⁾、2021年名古屋市中区高層マンション⁵⁾、2024年愛媛県C市で、調査は、案内役が同行し、見学しながら自治会長等から説明を受けた。聞き取り結果は、表1～3に聞き取り項目ごとに比較表を作成した。

(1) 見学・聞き取り内容等の比較

調査日・調査対象の概要・調査対象の予想される災害(表1)、自治会等の地域の様子(表2)、防災倉庫の様子とその備え・備蓄品の使用状況(表3)と3つの表にまとめた。

(2) 特筆すべき点

3か所の防災倉庫を比較して特筆すべきと考えた点を挙げる。①自治会長等の任期、②備蓄品の使用・管理者、③備蓄経費の出どころ、④復旧への視野の4つと考えられる。

説明頂いた3か所の自治会長等は、1年毎で交代、調査時に20年めと着任期間が大きく違った。備蓄品の使用者は各自治会等であるものの、その管理を市の専門職員が行っているところもみられた。備蓄品購入や施設の増設等に関する費用の出どころは、市や県の補助金や自治会等費が中心となるものの、自治会で宝くじの申込みを行い当選した費用を施設改善の経費とするところもみられた。当面の地域被災者の支援を想定して備蓄等を進めている2自治体等に対して、復旧を視野に入れ保険加入し、設備が損壊した際に備えている自治会等もみられた。

(3) 備蓄の有無・管理状況

今回見学した3か所の防災倉庫の備蓄内容は、Aでは先述の自治体における備蓄の「配置・管理」している項目の全てが備蓄され、Bでは医薬品が、Cでは飲料水・食糧、医薬・医療品の備蓄が無かった。「自主防災会組織の手引き」⁶⁾では、①情報収集・伝達用②初期消火③水防用④救出用⑤救護用⑥避難所・避難用⑦給食・給水用⑧訓練・防災教育用⑨その他と目的別の主な防災資機材(例)を挙げている。見学したの全ての自治会等で⑧訓練・防災教育用は見当たらなかった。Cではさらに④救出用防災資機材が無かったが、この地域は農業従事者も多く④の救出用防災資機材のうち何かしらは自宅に持っていると思われる。

資機材は管理・保有していれば良いという事ではなく、非常時にすぐ使えるよう点検整備や試用を繰り返す必要がある。Aでは、使わないや何に使うか分からないとされていたり、使ったが調子が悪い備蓄品もある一方で、Cでは同じ備蓄品でも地域内の業者が日常使用している様子もみられた。

3. 考察

3か所の自治会等においては、その場所で予想される災害、地形・地目、住民の様子、自治会等の様子など大きく異なる状況で、それぞれが災害に備えることに尽力していたことは言う

までもない。しかしながら、Aにおいては、行政が主導している様子が見られ自治会長は備蓄品を機会を得て使っているもののその用途が分からなかったり、使えないと認識している状況がみられた。Bにおいては、単年で入れ替わる理事長の下、理事が住民のもつ問題を共有し、解決方法を探ろうとする姿勢がみられた。Cにおいては、20年間自治会長に就き、自治会として整備すべき点を考え近年の災害の様子から学び、毎年工夫をし備蓄等をしている様子が見られた。防災倉庫の見学・聞き取りから、備蓄されていても用途不明と認識していたり、使用機会が少なく、整備方法を理解していない機器があったり、備蓄が必要とされているにもかかわらず備蓄されていない物があった。これらは、災害に関し学ぶ機会を持つことで改善されるのではないかと

非常時に役立つ防災倉庫とは、個人の備えとは別に自治会として誰でもに使える物を備え、誰でもが直ぐに使えるようにしておくことが必要であると考え。そのため、備蓄品の選定・機器の整備・経費の調達等、防災に関して知識や対応能力を向上させるため「避難所運営ガイドライン」¹⁾に記されているように、日常の行政等支援が必要だと考え、行政が行う防災リーダー養成研修や、「内閣府(防災担当)『防災に関する標準テキスト』」を用いた講習などを受講することも必要だと思われる。

表1. 調査日・調査対象の概要・調査対象の予想される災害

項目	A	B	C
1 調査日	2020年1月24日	2021年7月18日	2024年2月17日
2 場所	愛知県A市A自治会	名古屋B区高層マンション	愛媛県C市C学区西自治会
3 調査地域について	A市は愛知県のほぼ中央、西三河地域の北西部に位置。各市のHPより名古屋市や豊田市のベッドタウン、農村地域と豊かな自然、産業・自然・文化など調和のとれた、住環境に恵まれたまち。	B区は名古屋市の東南部に位置し、東西、西部区界、南部に川が流れ、平地とゆるやかな丘陵地帯で形成され、恵まれた自然環境。広い範囲で土地区画整理事業が行われ、発展を遂げつつある。	C市は平成16年4月1日に2市1町1村が合併して誕生。愛媛県の東部、四国の高速道路の中央結節点に位置。市街地が瀬戸内海に面し、法皇山脈と四国山地との間に吉野川を流し、町・海・山と多様な表情をもつ。
4 南海トラフ地震想定過去地震最大モデルHP防災(ハザード)マップより	震度：6強～5弱 原田別死者数 建物倒壊等：5人未満 浸水・津波：5人未満 急傾斜地崩壊等：5人未満 火災：5人未満	震度：最大6弱、最大6強 浸水面積：浸水1cm以上割合2.8% 死者 建物倒壊等：約20 津波：約30	揺れ：最大震度7 最高津波水位：3.6m、404分後 人的被害(冬深夜) 死者数：1,043人(建物倒壊：756人、津波：26人)
5 その他の災害の可能性(調査地)	A市防災マップ A学区 無し	名古屋B区 洪水ハザードマップ Bマンション付近 洪水浸水予測：1～2m未満 内水氾濫浸水予測：0.2m～0.5m未満	愛媛県C市C学区西自治会 土砂災害警戒区域(土石流)

表2. 自治会地域の様子

項目	A	B	C
6 周囲の様子	A市を通る鉄道(市内の駅は2つの駅に近く、高層マンションと戸建ての混在する住宅地。近くに小学校が見える。調査地は公民館横。	高層マンションが多く、戸建てもある地域。 調査地は高層マンション。近くに2級河川の堤防があり、支流との間。 過去の地目は田。	海側に工場、主要道路が海に並行し、その周辺は密集した住宅地や田圃。山側へ向かうにつれ畑や敷地の広い戸建て。高速道路が山と住宅を分けるように走る。調査地は畑や敷地の広い家がある地域の公民館。
7 住民の様子	子どもから高齢者まで様々な世帯が生活する様子が見られた。	理事会長によると、108世帯。平均年齢75歳。住民の高齢化。独居高齢者宅約1割。一部賃貸となり子育て世代の入居も。自主管理。管理作業は住民が実施。1基のエレベーターでは、住民が挨拶を交わす様子も見られた。	子どもから高齢者まで様々な世帯が生活している様子が見られたが、自治会長によると、住民数とその構成は「500人くらいいる。年齢は高いかな。」とのこと。
8 管理	昭和56年から11年をかけて、住宅・都市整備公園により開発。 街びらき：1988年3月 5行政区：人口16,400人、約6,300世帯。 全ての建物が、新耐震強度基準(昭和56年)を満たす。 地区のHPより	築45年 地上9階 エレベーター1基 各戸は3LDK。非常ベルボタンと非常ベルと連動した玄関外の非常灯あり。 理事会では、防災関係目標と課題を設定し取り組んでいる。	二本二級河川に挟まれた急傾斜地の地区。 1学校区の自治会のうちの1つ。 海から山側までの環境差の大きな地区。 工場や低層住宅もしくは戸建てや農地が混在する。

表3. 防災倉庫の様子とその他の備え、備蓄品の使用状況

項目	A	B	C
8 防災倉庫の様子	集会所の玄関前に大型の倉庫型防災倉庫が3基設置。鍵は、集会所事務員と区長が持つ。「OO行政区防災倉庫」と書かれ、それぞれABCと表示。Aは工具、Bは食品、Cは避難所開設用品。担当者しか中身が分からない。	集会所下1階に建物内倉庫室。自治会使用の様々な道具・備蓄品が収納されている。各階エレベーター横ベランダに物置型防災倉庫あり。その階の住民用飲料水・携帯トイレ。	集会所は傾斜地に建っており、玄関下がピロティ。ピロティ側面に倉庫、マンホールトイレや大型クーラーボックス、ブルーシートなどが複数。倉庫にはポリタンク。
10 管理者	A市危機管理課職員(機器整備等は専門職員が行っている) 自治会	理事会	自治会
11 説明者	A市危機管理課職員3名(うち2名は専門職員)	理事長をはじめとする理事	自治会長
12 説明者の任期	-	理事長1年 理事12名	現自治会長は20年
13 購入経費	市の補助金	-	自治会費 県の補助金 宝くじ
14 使用者	自治会	理事会	自治会
15 備蓄内容	倉庫ごとに整理され工具、食品、避難所開設用品。 中には整理と整理され、ぎっしりと水や食品、調理道具、資機材、発電機、燃料、毛布、トイレ、パーテーション等が入っていた。	集会所下の倉庫室に、工具や作業用具、炊き出し資材、食糧、燃料、照明、トランシーバーなどが保管。当年度購入予定品として簡易トイレやブルーシート、マスクなどが挙げられていた。	寮小屋にマンホールトイレ6基(他2基)、集会所ピロティに大型クーラーボックス、ブルーシート500枚、ポリタンク。生活用水給水場(地下水)が区内3か所。移動できる調理機器。米は各家庭で備蓄。発電機。役員各戸に無線設置。
16 その他の備え	-	-	災害後の復旧のために保管加入。 福祉避難所、独自契約。
17 日常の使用	地区長からの聞き取り チェーンソーとか使わない、発電機も普段使っていない。この前使ったけど、調子が悪い。/工具はいつ買ったか、誰が買ったか、何に使うか分からない(ツルハシ、スコップ、土嚢袋)ここでは水害もないから要らない。	理事12名を対象としたアンケートより ・実体験を年に1回くらいは必要のがあるが ・高齢化で使いにくい。 ・保管されている物品が管理されているが緊急時の場合に冷静に扱うことが出来るか ・必要物の使用技術	自治会長からの聞き取り 祭りに集会場を使用。台所など集会所の施設も使用。/発電機は、土間関係者が通常業務で使用。/生活用水水道(地下水)も農作業のために日常使用。/自由に持ち帰り使用可の土嚢を常備。/マスクとか見寄ったら、みんなが困らんようにと考えるとかなかんやうと、小さいことから次々してきたんやけど。

謝辞：

防災倉庫の見学・聞き取りにあたり長時間、何か所もの倉庫のご説明をいただきました自治会・理事会、行政の皆様にご感謝申し上げます。

引用・参考文献

- 1)内閣府(防災担当)：避難所運営ガイドライン，平成28年4月，p1.p0 20240421取得
https://www.bousai.go.jp/taisaku/hinanjo/pdf/1604hinanjo_guideline.pdf
- 2) 総務省消防庁：自主防災組織について，20240421取得
https://www.fdma.go.jp/singi_kento/singi/items/200118_pdf/200118-4s1.pdf
- 3) 内閣府 防災情報のページ：特集 災害の備え、何をしていますか，20240403取得
https://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h22/09/special_01.html
- 4) 石原貴代：防災倉庫の現状と防災倉庫を活用した学校での防災教育の可能性，名古屋学芸大学研究紀要 教養・学際編 第17号 2021年
- 5) 石原貴代：高層住宅の防災倉庫の整備と防災活動，名古屋学芸大学研究紀要 教養・学際編 第18号 2022年
- 6) 総務省消防庁：自主防災会組織の手引き，令和5年3月改定，P50 0240403取得
https://www.fdma.go.jp/mission/bousai/ikusei/items/bousai_R5_3.pdf

応援職員を含めた業務運営体制構築過程の実態解明
-輪島市の住家被害認定調査（第1次調査）を対象として-
 Clarification of the Actual Situation of the Process of Building a Business Operation
 System Including Disaster Support Staff
 : A Case Study of the First Residential Damage Certification Survey in Wajima City

○藤原 宏之¹ , 上杉 英一²
 Hiroyuki FUJIWARA¹, Eiichi UESUGI²

¹伊勢市役所

Ise City Local Government

²輪島市役所

Wajima City Local Government

In order to clarify the process of building a business operation system including disaster support staff in disaster response, action research was conducted on the practical process of the residential damage certification survey in Wajima City during the 2024 Noto Peninsula Earthquake. As a result, it was found that the establishment of a business operation system was possible by delegating the authority to create manuals to support staff. Based on these results, we considered that the key to delegating authority lies in the sharing of goals and the division of roles toward achieving those goals, based on a unified recognition of the situation.

Keywords : The 2024 Noto Peninsula Earthquake, Wajima City, building damage, disaster operation

1. はじめに

(1) 研究背景

2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震（以下「能登半島地震」とする。）では多くの建物被害が発生した。2024年2月20日に全壊住家数が平成28年熊本地震を超えたことが報道されたことから、その被害の甚大さが示唆される¹⁾。住家の被害が発生すると、被災自治体は、被災者からの申請に対して、被害の程度を証明する罹災証明書を交付しなければならない。罹災証明書は災害対策基本法第90条の2に基づき、被災自治体が被害を受けた住家を調査（以下「被害認定調査」とする。）し、被災者に交付する。罹災証明書は、被災者が各種生活再建に関する制度を利用するために用いられる。

罹災証明書の交付が遅れたことに対して、平成28年熊本地震の対応を基に、その原因が指摘されている。古賀ら²⁾は、益城町が熊本市などの他の被災自治体と比較して罹災証明書の交付が遅れた理由を、被害が大きく役場機能が低下したことに加え、事前準備や訓練が実施されていないことと指摘している。総務省九州管区行政評価局³⁾の調査結果では、被害認定調査の開始が遅れた理由の一つとして、自庁職員または応援職員に罹災証明書の交付に関する知見を有する職員がいなかったことが報告されている。さらに、平成28年熊本地震で支援を行った多くの団体からは、被災自治体の調査体制の確立や、人員の確保が課題として報告されている³⁾。

被害認定調査を効率的に進めるための新たな取り組みが能登半島地震で行われた。輪島市では、被災建築物応急危険度判定の結果を利用し、遠隔地からの評価が行われた⁴⁾。珠洲市ではドローンで撮影した写真を用いて被害認定調査の評価が行われた⁵⁾。しかし、能登半島地震で行われた被害認定調査の大部分は、応援職員を受け入れ、現地調査を主として被害認定調査が行われているの

が実態である。では、被災自治体職員と応援職員の間で、どのような役割分担や調整が行われているのであろうか。

(2) 先行研究

本研究の議論に関連する応援職員と被災自治体職員の調整に関する先行研究を確認する。新谷ら⁶⁾は、倉敷市の平成30年7月豪雨の事例を対象に、どのようなスキームで支援が入ったのかを定量的に評価し、受援担当部署のマネジメント機能の確保が受援体制の課題であることを指摘している。しかし、本研究で対象とする個別業務を対象とした被災自治体職員と応援職員の役割分担について分析したものではない。永松ら⁷⁾は東日本大震災の南三陸町の対応において、応援職員がどのような指揮命令系統の基で活動を行ったのかを明らかにしている。本研究に関連する結果が、応援職員への質問紙調査を通じて以下の2点が判明している。1点目は、応援職員の支援チームリーダー以外の職員であっても、支援チームリーダーからの指示より、南三陸町職員からの指示で活動していることが多かったこと。2点目は、複数自治体によって構成された支援チームほど、南三陸町の職員の指示を受けて活動が行われたこと。これらの結果から、応援職員を運用するためには、被災自治体の指示がなければ活動できないことが示唆される。また、結果を踏まえて、「受援側としては、自律的に活動できる部隊の派遣を要請し、かなりの程度権限移譲して丸投げする勇気と備えが必要かもしれない」と考察されている。河本ら⁸⁾も東日本大震災の対応で応援を行った自治体職員へのヒアリング調査の結果から、受援側自治体は、流動的な状況下での対応を柔軟に行うために、応援職員による引き継ぎ完結型を前提として、現場（応援職員）に権限委譲することを提案している。一方で、これらの提案を災害発生直後の応援職員の派遣を通じて検証された事例を確認することはできなかった。

次に、応援職員の派遣記録から被災自治体の実態を確認する。熊本地震で被害認定調査の支援を行った福岡市⁹⁾によると、派遣先の熊本市では被災自治体と応援自治体の役割分担の明確化が教訓として報告されている。

これらを踏まえ、災害直後から被災自治体へ派遣される応援職員の受け入れに関しては、課題および改善の方向性は示されているものの、実際に応援職員への権限委譲が可能であるのかは不明確である。

(3) 研究目的

本研究の目的は、能登半島地震で甚大な被害を受けた輪島市を対象に、被害認定調査に関する運営体制がどのような調整の基に構築されたのか明らかにすることである。つまり、本研究は被害認定調査に関する新たな手法を提案するものではなく、被害認定調査を事例として、多くの応援職員を受け入れる業務において、どのように応援職員に権限委譲を行い、応援職員と共に業務運営体制を構築するのかに主眼を置くものである。結果を踏まえて、応援職員への権限委譲に関する要点を考察する。

2. 研究方法

本研究では、筆頭著者「以下「著者」とする。」が輪島市職員と共に災害対応を行うアクションリサーチを通じて研究目的を達成する。草郷¹⁰⁾はアクションリサーチを「常に変化していく社会が抱えているさまざまな問題に対して、研究者と一緒に個々の当事者が自身の解決策を考え、その解決策の有効性について検証し、検証結果をもとにして、自身の解決策を修正し改善して行くことで問題解決を目指す調査活動手法」と定義している。防災関連の研究では、菅野¹¹⁾が平成28年熊本地震の対応においてアクションリサーチを実施している。本研究で対象とする業務は被害認定調査とし、対象期間は業務開始から1次調査開始までの期間とする。分析に用いるデータは、業務を進めるために著者が作成し輪島市へ提供した一次資料と、著者の送受信メール、著者が記録したフィールドノートである。これらの資料から本研究に関連するデータを抽出し分析を行う。

3. アクションリサーチの経緯

著者は、総括支援チーム⁽¹⁾を構成する災害マネジメント支援員としての派遣要請を三重県から受けて輪島市の支援に携わることとなった。総務省の応急対策職員派遣制度による調整で、三重県が輪島市へ総括支援チームを派遣することが2024年1月2日に決定された。著者は三重県の総括支援チームの構成員として、2024年1月3日から4月10日までの期間で、延べ57日間の派遣の命を受けた。1月3日から5日までの間は、三重県以外の対口支援団体と輪島市の間で行う調整のスキーム設計や、輪島市の避難所運営に対して助言が行えるNPOの参画調整などのため石川県庁で活動した。輪島市役所での活動は1月6日からである。著者が実施した活動のうち、本研究に関連する具体的な活動は、被害認定調査に関連する業務の企画・調整・資源調達である。なお、輪島市役所を離れている期間は、遠地から資料作成や関係機関との調整などの活動を継続的に行った。著者が企画した施策や方針は輪島市職員を通じて、輪島市の決定を得るよう働きかけた。意思決定にあたっては輪島市の意向を尊重するよう心がけた。決定した施策を実行するために必要となる対口支援団体への説明や調整は著者が担った。なお、対口支援団体へ説明する資料は、全て輪島市職員に

事前確認を行なったうえで提示した。

4. 結果：業務運営体制構築過程の概観

本章では、業務の開始から1次調査の業務運営体制構築まで期間の概観から、応援職員に対して実施した権限委譲の過程を確認する。表1に時系列で、主な支援内容とイベントを示す。前提条件として、輪島市で主に被害認定調査に携わることができる職員は税務課資産税係の3名に、主に現場調査業務を担うために他部署から一時的に動員を行った3名を加えた合計6名と限られている。

著者が輪島市役所で活動を開始した1月6日時点では、被害認定調査の実施計画を確認することはできなかった。そこで、平成19年能登半島地震の対応において輪島市は全棟調査を行ったことを踏まえ、全棟調査をベースに対象となる建物数に対して編成するチーム数と調査に要する日数を推計することとし、翌7日に輪島市へ推計結果を含めた業務のロードマップを提示した。

被害認定調査の詳細な実施計画を作成する前に解決すべき課題が判明した。6日に到着した避難所運営に従事する対口支援団体のリエゾンから、総括支援チームに対して、継続的に応援職員を派遣するためには、職員が寝泊まりできるスペース（以下「ベースキャンプ」とする。）を確保して欲しい旨の要望を受けた。この時点では著者も含め、応援職員は市役所の廊下などで寝泊りしていた。被害認定調査でも同様の課題が生じることが推測できたため、著者はベースキャンプを確保するための調査、調整を優先して行うこととした。輪島市職員は、令和5年度に石川県の主導で導入した被害認定調査を行うためのシステムを稼働させるためのデータセットアップを進めた。

17日に総括支援チームから石川県リエゾンを通じて、被害認定調査に関する対口支援団体の追加を要請し、翌18日に6団体（北九州市、福岡市、熊本県、高知県、山口県、広島県）が決定した。被害認定調査の実施計画について輪島市の合意を得ることができたことに加え、システム稼働のためのデータセットアップが完了し、さらにベースキャンプとして利用するためのキャンピングカー20台が18日に到着することが決定したことから要請に至った。

19日に、北九州市および福岡市の先遣隊が到着した。輪島市では、被害認定調査に従事できる職員に限られていることから、段階的に被害認定調査員を増員し、運営体制を構築することを計画していた。計画を対口支援団体の調整窓口に送付していたが、両市の先遣隊は把握していなかった。両市の派遣計画は段階的に派遣職員を増やすものではなく、当初から概ね1クールあたりの最大数を派遣する計画であることが判明した。また、同日に輪島市職員による被害認定調査と、火災により全焼した区域の罹災証明書発行が開始された。

20日に、両市の被害認定調査員が22日に到着することが判明した。同日に残り4団体の被害認定調査員が24日に到着することが判明した。また、4団体も当初から派遣可能な職員数での派遣が行われることが判明した。つまり、2日後(22日)に26名が到着し、4日後(24日)に66名が加わり、総勢92名の応援職員が集結することが判明した。

これらの判明した事実から、総括支援チームと輪島市職員だけで、運営体制構築に関する準備を完了させることができないことが推察された。このため、22日に被害

表 1 主な支援内容とイベント

日	事項	詳細
1月6日	被害認定調査担当者・関係者への挨拶・情報収集	平成19年能登半島地震で被害認定調査を担当した職員から、①応急危険度判定のデータを用いて被害認定調査を行う計画があること②平成19年能登半島地震では全棟調査を実施したことを確認した。
1月7日	被害認定調査（第1次調査）のロードマップ提示 ベースキャンプの確保	事務所での役割および人員数と対象家屋数を基に編成するチームによって、全棟を対象として1次調査の完了までに、どの程度の日数を要するのかを提示した。 被害認定調査に従事する応援職員を要請するために、ベースキャンプの確保に関する調査・調整を開始した。
1月17日	被害認定調査に従事する対口支援団体の追加を要請	総括支援チームから石川県庁リエゾンに対して被害認定調査等に従事する対口支援団体の追加派遣について説明・依頼した。
1月18日	被害認定調査に関する対口支援団体の決定	総務省から全国知事会・政令都市市長会に対して対口支援団体の追加依頼が行われた。11時30分に広島県、山口県、高知県が決定し、18時に熊本県、北九州市、福岡市が追加で決定された。
1月19日	対口支援団体への資料提供 輪島市職員による被害認定調査開始	総括支援チームから対口支援団体に輪島市の被害認定調査に関する現状・応援職員の派遣スキーム・シフト表を送付した。 輪島市職員6人体制で被害認定調査を開始し、火災による全焼地域の罹災証明書発行が開始された。
1月20日	北九州市、福岡市の先遣隊到着	輪島市役所に北九州市・福岡市の職員が到着した。先遣隊に被害認定調査に関する資料が届いていないことを確認し、現状および送付した資料を説明した。
1月21日	広島県先遣隊到着	輪島市役所に広島県の職員が到着した。先遣隊に被害認定調査に関する資料が届いていないことを確認し、現状および資料を説明した。
1月22日	「24日100人受け入れ大作戦」開始	北九州市16名、福岡市10名の被害認定調査担当が到着した。現状の説明後にマニュアル作成担当を北九州と、福岡市で分担し作成を開始した。
1月23日	マニュアル作成継続・24日の集結の延期を決定	北九州市16名、福岡市10名は継続してマニュアル作成を行なった。輪島市、三重県総括支援チーム、北九州市、福岡市の協議の結果以下の3点を決定。①雪のため集結を25日に延期、②出発式の実施、③幹事団体をおくことを出発式後に協議
1月25日	自治体応援職員100人体制による輪島市被害認定調査の開始式 マニュアル説明・調査開始	市長挨拶、応援自治体の紹介、総括班長（北九州市）挨拶の順で式が進められた。開始式の終了後に、対口支援団体に対して著者から輪島市における被害認定調査の実施方針を説明し、北九州市から作成したマニュアルの説明を行った。北九州市の一部と福岡市の職員は並行して被害認定調査を開始した。

認定調査員が到着する北九州市および福岡市の職員を運営体制構築に参画させる方針を執った。

21日に、両市の先遣隊に対して現状の説明と「24日100人受け入れ大作戦」と称した被害認定調査の運営体制を構築するために必要な準備を行うプロジェクトへの参画を依頼し承諾を得た。

22日に到着した北九州市（16名）、福岡市（10名）の被害認定調査員に対して、現状を説明したうえで「24日100人受け入れ大作戦」への参画を依頼し承諾を得た。承諾を得る過程で、一部の被害認定調査員から、「被害認定調査に従事するために派遣されており、過去の被災自治体では被災自治体の職員が担ってきた調査箇所の割り当て、被害認定調査の運営体制構築、評価方法に関するマニュアルの作成などを担うことについて事前に説明を受けていない」旨の不満を示す意見が出された。不満の原因は、現場で活動する職員に、被災自治体の状況および計画が共有されていなかったことと推察される。

「24日100人受け入れ大作戦」は、北九州市、福岡市と輪島市が、24日に約100人体制での被害認定調査員を受け入れる共通の目標を達成するために実行したプロジェクトである。図1は、対口支援団体と輪島市のそれぞれが実施すべき業務を整理し、先遣隊および被害認定調査員に示したものである。調整の結果、シフト係を福岡市が担い、評価手順係と被害認定調査事務所係を北九州市が担うこととなった。「24日100人受け入れ大作戦」への参画が承諾された後は、両市に割り振られたマニュアル作成が開始され、半日ごとに進捗状況を確認するための時間が設けられた。

23日には、輪島市、総括支援チーム、北九州市、福岡市の協議を通じて次の3点が決定された。1点目は、集結予定日である24日に、降雪が予測されたため集結を25日に延期すること。2点目は、集結時に「自治体応援職員100人体制による輪島市被害認定調査の開始式」を実施することである。3点目は、6つの対口支援団体を取りまとめる幹事団体を置くこととし、25日からはまず、北九州市が担い、2週間ごとに交代することを6団体の集結後に議論することである。

25日には「自治体応援職員100人体制による輪島市被害認定調査の開始式」が行われた（写真1）。式は、輪島市長の挨拶、応援自治体の紹介、対口支援団体の代表（北九州市）挨拶の順で進められた。式の終了後に北九州市の一部と福岡市の職員は1次調査を開始した。その他の職員に対しては、著者から被害認定調査に関する輪島市の状況および完了目標などの説明を行った。続いて、

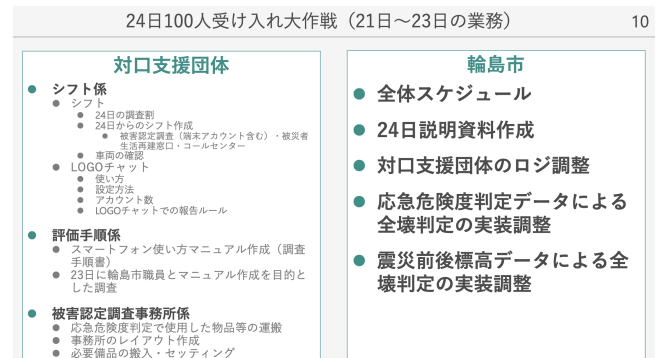


図 1 対口支援団体へ示した資料（著者作成）



写真1 自治体応援職員100人体制による
輪島市被害認定調査の開始式の様子（著者撮影）

マニュアル作成に携わった北九州市の職員からマニュアルの説明が行われた。これらの説明が終了した後に、運営体制に関する打ち合わせが行われた。参加者は、輪島市職員、総括支援チーム、6つの対口支援団体の代表者である。打ち合わせの結果、持ち回りで幹事団体を受け持つことが決定した。

5. 考察：応援職員への権限委譲の可能性

被害認定調査業務を例に、第4章で業務運営体制構築過程の概観を確認した。「24日100人受け入れ大作戦」での権限委譲を通じて、被災自治体職員が担う業務量を低減することができた。本事例を通じて、被災自治体の職員のみで業務運営体制を構築できない場合には、業務運営体制の構築から応援職員へ権限委譲する選択肢があることを提示できた。本研究で実施した権限委譲は、太田ら¹²⁾が5つの類型に分類する権限委譲の類型Ⅲに分類されるものと考えられる。類型Ⅲの例として、緊急消防援助隊の単独チームに特定の地域の特定業務の執行を委任することを挙げており、本研究では、北九州市と福岡市の2つのチームにマニュアル作成を任せた。

「24日100人受け入れ大作戦」を完了できた要点は、関係者で状況認識の統一を行い、目標と進捗状況を共有し、目標達成に向けた権限委譲を行えた結果と考えられる。これは、近藤ら¹³⁾が「目標による管理」として説明する「災害対応にかかわるすべての組織が応急対策における同一の目標を共有し、それを達成するために業務を遂行すること」が実践されたものである。

「24日100人受け入れ大作戦」に参画した職員から、業務運営体制構築に携わることは初めての経験であったことから、派遣元へ知見として還元できる旨の発言を確認できた。島崎¹⁴⁾は、応援職員派遣の目的は、被災自治体を助けることであるが、職員のスキルアップもできることが望ましいと指摘している。応援職員の発言からは、本研究で実施した業務運営体制構築に関する権限委譲を通じて、職員のスキルアップに繋がる副次的な効果が生まれたことが示唆される。

6. まとめ

本研究では、能登半島地震で被害を受けた輪島市を対象に、被害認定調査に関する、業務運営体制構築過程をアクションリサーチを通じて明らかにした。結果を基に、応援職員への権限委譲の要点を考察した。今後は、異なるフェーズの事例を分析対象に加えて、応援職員の業務運営体制への携わり方に関する検討を深めたい。

補注

(1) 総括支援チームとは、総務省の応急対策職員派遣制度により派遣される被災市区町村が行う災害マネジメントの支援を担うチームである。マンパワーが不足する場合には、災

害対応業務を担う「対口支援チーム」が派遣される。

謝辞

本稿執筆にあたり、能登半島地震での災害対応にあたってご協力いただいた皆様、輪島市役所の皆様には多大なご尽力をいただいた。ここに明記して謝意を表したい。また、本稿の執筆時点では、輪島市の被害認定調査は完了していない。一日も早い業務の進行および復旧・復興を願ってやまない。

参考文献

- 1) 毎日新聞：能登半島地震の全壊住宅8795棟に 熊本地震を超える、2024。
(<https://mainichi.jp/articles/20240220k0000m/040221000c>：2024.2.21 閲覧)
- 2) 古賀元也，森下功啓，大庭知子，辛島一樹：熊本地震後の住宅再建プロセスにおける再建費用と再建期間の実態と課題 熊本県益城町を対象とした被災者の意識調査の分析，日本建築学会会計系論文集，第88巻，第806号，pp.1302-1312，2023。
- 3) 総務省九州管区行政評価局：大規模災害時における罹災証明書の交付等に関する実態調査-平成28年熊本地震を中心として-結果報告書，2018。
- 4) 東京都総務局総合防災管理課：令和6年能登半島地震への都の対応（第37報）（住家被害認定調査のリポートによる応援について），2024。
(<https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/taisaku/topics/1000019/1023177/1028619.html>，2024.3.8 閲覧)
- 5) 熊本市固定資産税課：令和6年能登半島地震におけるドローン等を活用した住家被害認定調査および遠隔判定支援の実態について，2024。
(https://www.city.kumamoto.jp/hpKiji/pub/detail.aspx?c_id=5&i_d=53819&class_set_id=3&class_id=535，2024.3.8 閲覧)
- 6) 新谷歳三，馬場美智子：災害時の人的支援スキームの受入実態に基づく基礎自治体の受援体制の課題分析，土木学会論文集，Vol.79, No.7，論文ID22-00163，2023。
- 7) 永松伸吾，越山健治：自治体の災害時応援職員の現場でどのように調整されたか-2011年南三陸町の事例-，地域安全学会論文集，29巻，pp.125-134，2016。
- 8) 河本尋子，重川希志依，田中聡：ヒアリング調査による災害応援・受援業務に関する考察-東日本大震災の事例-，地域安全学会論文集，20巻，pp.29-37，2013。
- 9) 福岡市：「平成28年熊本地震」支援活動記録，2017。
- 10) 草郷好，（編者）小泉潤二，志水宏吉：アクションリサーチ，実践的研究のすすめ人間科学のリアリティ，有斐閣，2007。
- 11) 菅野拓：借上げ仮設を主体とした仮設住宅供与および災害ケースマネジメントの意義と論点-東日本大震災の研究成果を応用した熊本市におけるアクションリサーチを中心に-，地域安全学会論文集，31巻，pp.177-186，2017。
- 12) 太田和良，近藤伸也：公共土木施設の災害復旧における組織間関係論と組織行動論に着目した権限委譲に関する検討，土木学会論文集（F6）安全問題，Vol.78，No.2，I_43-I_54，2022。
- 13) 近藤民代，越山健治，林春男，福留邦洋，河田恵昭：新潟県中越地震における県災害対策本部のマネジメントと状況認識の統一に関する研究-「目標による管理」の視点からの分析-，地域安全学会論文集，8巻，pp.183-190，2006。
- 14) 島崎敢：派遣職員の技能と応援業務の適合の実態と課題，熊本地震における応援職員派遣の実態と課題，国立研究開発法人防災科学技術研究所，2017。