U-Netを用いた旧版地図からの水域の抽出

Extraction of water areas in historical topographic maps using U-Net

○荻田 亜美[1]，修 浩毅[1]，篠原 崇之[2]，松岡 昌志[1]
Ami Ogita[1], Haoyi Xiu[1], Takayuki Shinohara[2] and Masashi Matsuoka[1]

[1] 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院
School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
[2] 株式会社パスコ 経営戦略本部 総合研究所
Innovation Technology Office Research Center, Pasco Corporation

Historical topographic maps are valuable documents that provide information on past topography and land use. In particular, water areas such as rivers and ponds on such maps are important for hazard assessment because they are strongly related to current ground conditions. Therefore, to smoothly utilize such information in hazard assessment, this study attempted to automatically extract water areas from historical topographic maps of the Meiji period by using U-Net, one of the models of deep learning.

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

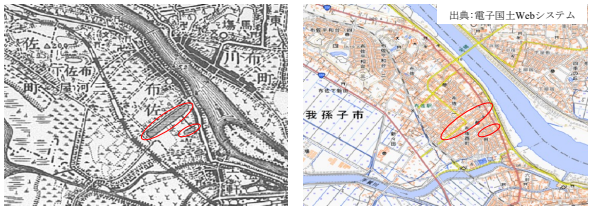
１．はじめに

土地改変が進んでいない，過去の土地利用状況は，現在の地盤状況や地盤災害と密接に関係している．土地利用の中でも，水域は特にその関連度が高い．例えば，図1 に示すように，かつて池沼や河川だったところが現在は埋め立てられている場合，軟弱地盤で液状化の危険がある可能性が高い[1)]．図1の(i)における丸は水域（沼），(ii)における丸は，平成 23 年東北地方太平洋沖地震によって液状化被害が生じたエリア[2)]を示している．

したがって，液状化や土砂崩れ等の地盤災害のハザード評価を行うためには，過去の水域の情報は非常に重要なものとなる．そのため，過去の水域の分布を正確に把握することが求められている．しかし，水域の位置が精度高く記録されているものは，最も古くとも近代測量が始まった明治期以降のものしか存在しない．また，明治期以降の旧版地図の中でも，正規の測量法である三角測量に基づいていない「迅速測図」（明治 13~23 年測量）と，三角測量に基づいている「基本測図」（明治 16 年以降に測量）の2種類が存在する[3)]．ハザード評価に活用するためには，より位置精度が高い過去の水域分布を把握した上で，現代の地図と重ね合わせて定量的な分析を行う必要がある．そのため，本研究では明治期以降の縮尺 5 万分の 1 の基本測図を対象とする．

明治期以降の縮尺 5 万分の 1 の基本測図は，現在の地図と座標系が異なり，そのままでは現代の地図に重ね合わせられない．しかし，筆者らは日本全国の基本測図 1337 枚について，既に日本測地系から世界測地系への座標変換と，現在の地図と重ね合わせて位置合わせを行っている．そのため，本研究ではこの点は問題とならない．また，明治期以降の縮尺 5 万分の 1 の基本測図は，全国各地の最も古いものを集めただけでも 1300 枚以上と膨大な量が存在する．すなわち，日本全国についてそれらを１枚ずつ目視で判読することは困難である．国土地理院により公開されている「明治期の低湿地データ」[4)]においても，目視で判読されたものであるため一部の地域のデータしか公開されていない．そのため， 明治期の 5 万分の 1 の基本測図における水域をハザード評価に活用するためには，基本測図の判読の自動化が必要である．

以上より，本稿では深層学習モデルを使用した基本測図からの水域の抽出手法の提案を行う．



(i)明治期の千葉県我孫子市　(ii)現在の千葉県我孫子市

図１　埋立地で液状化が生じた事例

２．手法

水域を抽出するために，画像に対しセマンティックセグメンテーションを行う深層学習モデルである U-Net[5)]を用いる．セマンティックセグメンテーションとは画像のピクセルごとにクラス分類を行うアルゴリズムであり，U-Net はセマンティックセグメンテーションのタスクで多用されるモデルである．そのため，本稿では U-Net を用いて，入力した基本測図に対し，そのピクセルごとに水域か否かという 2 クラス分類を行う．表 1 に 学習の条件，図 2 に水域の抽出のフローを示す．

表１　学習の条件

項目	設定
Loss関数	Cross Entropy Loss
最適化アルゴリズム	Adam
学習率	0.001（初期値）
スケジューラー	ReduceLROnPlateau
バッチサイズ	8

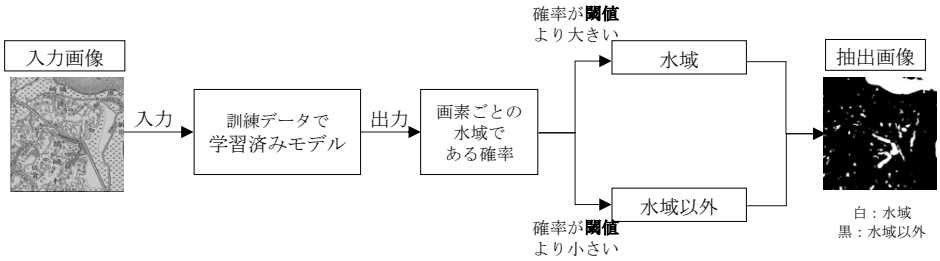


図 2　水域抽出の手順

３．実験

(1) 概要

5 万分の 1 の基本測図においては，水域は主に図 3 に示す 6 種類が確認できる．これら全てを一度に U-Net に学習させ，2 クラス分類を行うと，ハッチング状（河川・池沼・海面），線状（小川・水域），地図記号状（湿地）とそれぞれ特徴が異なるため，モデルが上手く学習を進めることができなかった．そのため，水域を①河川・池沼・海面②水路・小川③湿地の 3 つに分けて，モデルの学習を行った．

実験に用いた図幅は，「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 図幅である．これら 6 図幅は第 1 章で述べたように，座標変換と位置合わせを行ったものである．また，6 図幅全てを合わせたときの 3 つの水域の割合を図 4 に示す．

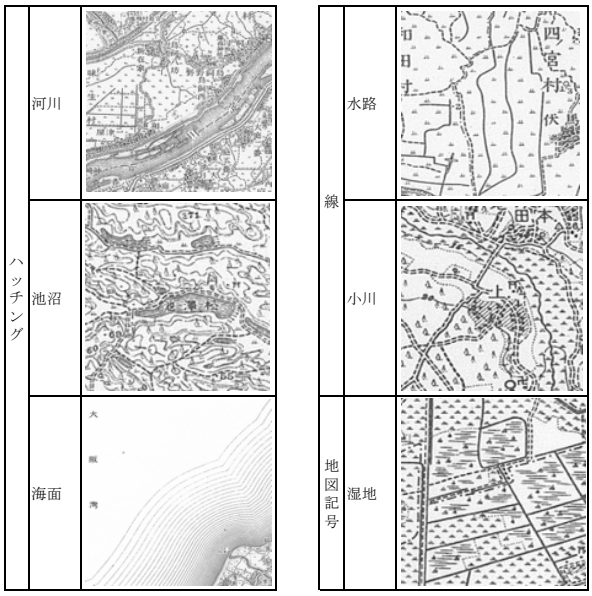


図 3　水域の種類

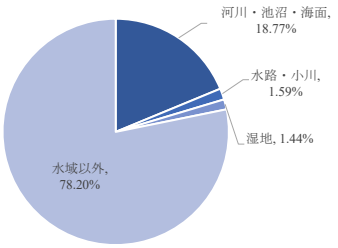


図 4　6 図幅における水域の割合

(2) データセットの作成方法

図幅とその教師画像を 2 等分し，その後 6:2:2 で分割して訓練・テスト・検証データとした（図 5）．

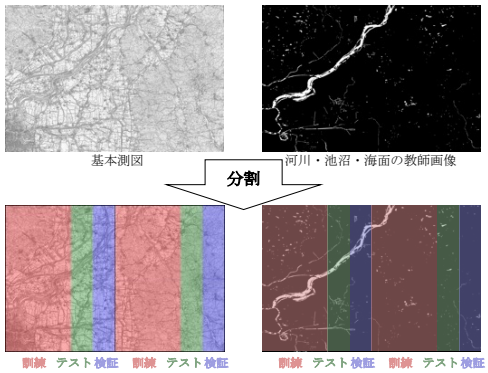


図 5　データセットの分割方法

一般にモデルの十分な学習には，大量かつ多様な訓練データが必要である．しかし，本研究では，モデルの学習に必要な教師画像を手作業で作成しており，作成に時間がかかるため，用意できる訓練データの量・種類が限られている．したがって，訓練データに対して，縦横に等間隔に重複しながら 512×512px に切り出し，それをさらに回転・水平反転するという量・種類ともに増やすことのできるデータ拡張を行った（図 6）．

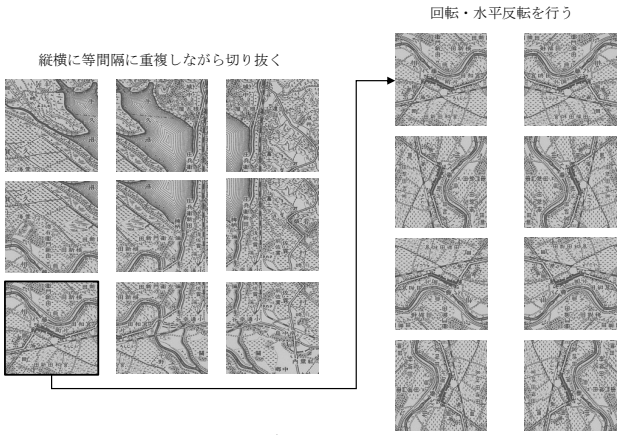


図 6　データ拡張の方法

また，①河川・池沼・海面については，データ拡張によりクラス間がより不均衡になることによって，モデルの学習が上手く進まないことが確認できたため，データ拡張の際に「512×512px の画像の中で，水域が 1000 ピクセル以下のものは訓練データに含まない」という処理を行った．この処理により，512×512px 中に水域が占めるピクセルの割合が，処理を行わなかったときの 10.95%か

ら 13.56%に上昇した．

②水路・小川と③湿地については，図 4 で示されているようにデータ全体に対してそれらが占める割合が非常に小さいため，先述の処理を行うと 512×512px 中に水域が占めるピクセルの割合は上昇するが，訓練データ数が大幅に落ち込む．そして，訓練データ数が大幅に少なくなるとモデルの学習が上手くいかないと予想されたため，先述の処理を行わなかった．なお，それぞれのデータセットの構成を表 2 に示す．

表 2　データセットの構成

	①河川・池沼・海面	②小川・水路	③湿地
訓練データ数	6040	7488	7488
検証データ数	312	312	312
テストデータ数	312	312	312

4．実験結果

(1) 河川・池沼・海面

河川・池沼・海面をまとめて 1 つの水域というクラスとして，「水域（河川・池沼・海面）」か「否」か 2 クラス分類を行うモデルを作成した．このとき閾値は，検証データを学習済みモデルに入力したときの ROC 関数から求め，TPR（表 3 の式(2)）の高さと FPR（表 3 の式(3)）の低さのバランスが最も良い左上の点（図 7 において点で示す)のときの閾値である 0.38 とした．

表 3 混同行列

		Predicted	
		Negative	Positive
Actual	Negative	TN (True Negative)	FP (False Positive)
	Positive	FN (False Negative)	TP (True Positive)

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad \cdots (1)$$

$$Recall = TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad \cdots (2)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad \cdots (3)$$

$$F1score = \frac{2Precision \cdot Recall}{(Precision + Recall)} \quad \cdots (4)$$

$$IoU = \frac{TP}{TP + FN + FP} \quad \cdots (5)$$

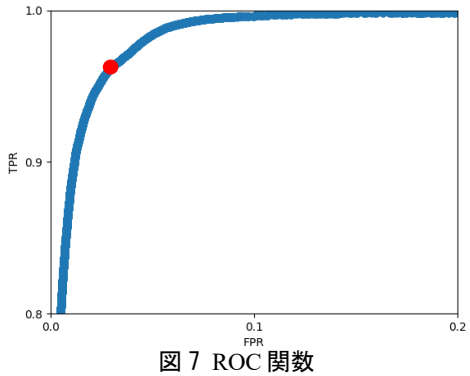


図 7 ROC 関数

モデルが訓練データを一通り学習した回数である，エポック数が 100 回と 200 回の，2 つの学習済みモデルの結果を比較する．それぞれにテストデータを入力したときの結果を表 4 と図 8 に示す．

表 4 によると，エポック数 100 回のモデル（以下，モデル I と呼ぶ）の方がエポック数 200 回のモデル（以下，モデルIIと呼ぶ）の抽出精度を上回っている．しかし，図 7 を見ると，モデルIIの方が精度良く抽出できていることが分かる．これはモデルIIが，図 8 の海面(c)のような 512×512px の画像領域全てが海面である画像（以下，全海面画像と呼ぶ）から，水域の抽出ができないモデルになっていることが原因である．表 4 の評価指標はピクセルベースで計算されているため，512×512px というピクセル数の大きい水域を抽出できていないことが精度に大きく影響している．

実際に，全海面画像を除いた場合の各モデルの精度は，モデルIIの方がモデル I を上回っている（表 5）． そのため，河川・池沼と陸部を一部含む海面については，モデルIIは非常に良好に抽出ができることが確認できる（図 8 の河川・池沼・海面(a)(b)）．

また，モデルIIは全面が海面でない限り水域と認識することができる（図 8 の海面(b)）ため，海面の境界線は抽出することができる．ハザード評価の際には，海岸線等の陸地と水域の境界が重要であるので，すなわちモデルIIは河川・池沼・海面の全てにおいて十分に有効なモデルだと言える．

表 4 河川・池沼・海面の抽出精度

	モデル I (Epoch=100)	モデル II (Epoch=200)
Precision	0.797	0.771
Recall	0.914	0.786
F1score	0.852	0.779
IoU	0.741	0.637

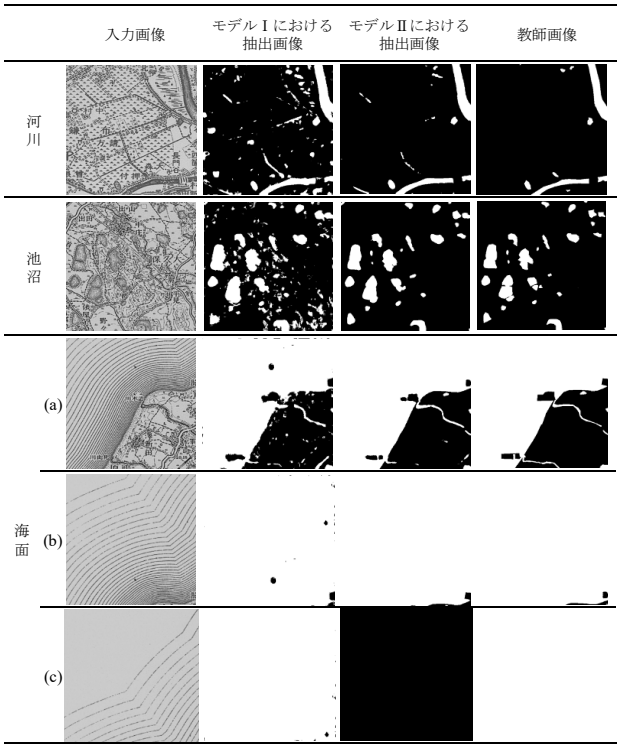


図 8 河川・池沼・海面の抽出結果

表 5 河川・池沼・海面の抽出精度（全海面画像を除く）

	モデルⅠ (Epoch=100)	モデルⅡ (Epoch=200)
Precision	0.695	0.909
Recall	0.850	0.935
F1score	0.765	0.921
IoU	0.619	0.854

表 6 水路・小川と湿地の抽出精度

	水路・小川 (Epoch=100)	湿地 (Epoch=100)
Precision	0.509	0.412
Recall	0.519	0.487
F1score	0.514	0.446
IoU	0.346	0.287

(2) 水路・小川

「水域（水路・小川）」か「否」か 2 クラス分類を行うモデルを作成した．閾値は0.4を採用し，エポック数は100回である．表6より抽出精度が良くないことが分かる．これは，道路・文字や山間部における等高線と，水路・小川を見分けることがモデルにとって難しいためだと考えられる．筆者が教師画像を作成した際も，それらの区別に苦労したため，人間がかろうじて出来る程度の識別をすることは，深層学習モデルにとっては難しいということが分かった．なお，図 9 における丸は文字や等高線，道路の誤抽出を示す．

(3) 湿地

「水域（湿地）」か「否」か 2 クラス分類を行うモデルを作成した．閾値は0.8を採用し，エポック数は100回である．表 6 から，水路・小川と同様に湿地も抽出精度が良くないことが分かる．これは湿地と U-Net の相性が悪いためだと考えられる．U-Net は領域として閉じているものの抽出は得意だと思われるが，それに対して湿地は地図記号の周りに余白があり点線で囲まれている曖昧な領域である．そのため，湿地含め地図記号状の土地利用には深層学習の中でも U-Net 等のセマンティックセグメンテーションではなく，YOLO[6]等の物体検出の手法が有効だと思われる．筆者らは古典的な画像処理手法であるテンプレートマッチングを用いて，地図記号の抽出に取り組んでおり [7]，物体検出の地図記号に対する有効性は確認済みである．

5．まとめと今後の課題

水域を特徴ごとに3つに分け，それぞれについて U-Net を用いて学習を行い，基本測図からの水域の抽出を試みた．水域の中でも特に，地盤状況に強い影響を与える河川・池沼・海面については良好に抽出することができた．しかし，水路・小川と湿地については，ハザード評価に活用できるほどの精度に達することはできなかった．これらの精度を向上させるには，それぞれの特徴にあった深層学習モデルが何かを検討していく必要がある．特に湿地については，河川・池沼・海面と同様に地盤災害ハザードと強く関連がある土地利用である．したがって，率先してその抽出精度の向上に努める．具体的には，「河川・池沼・海面」か「湿地」か「否」かの 3 クラス分類に取り組むことを考えている．湿地は河川や池沼の周りに多く見られるため，3 クラス分類のモデルにすることで，河川や池沼の近くにあるものが湿地であるといった，クラス間の依存関係を考慮したモデルになり，より精度良く湿地を抽出できるのではないかという仮説を立てている．

また，これまでに河川・池沼・海面と市街地 [8]については，精度よく抽出できることを確認した．そのため，今後はそれらの土地利用をハザード評価に活用するために，基本測図から日本全国の明治・大正期の水域分布図・市街地分布図を GIS 上で作成することに取り組む．

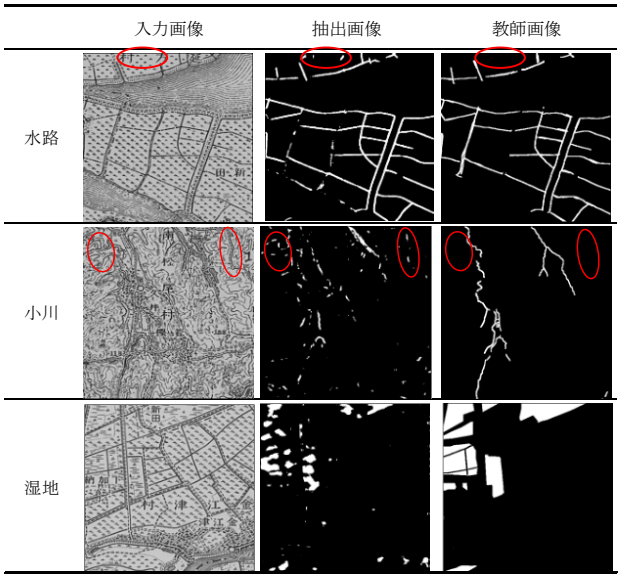


図 9 水路・小川と湿地の抽出結果

謝辞

本研究は東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME3.0 を利用して実施した．

参考文献

1) 若松加寿江，「そこで液状化が起きる理由−被害の実態と土地条件から探る」，東京大学出版会, 2018
2) 宇根寛, 青山雅史, 小山拓志, 長谷川智則，「我孫子市の液状化被害とそれを教訓としたハザードマップの改訂」，地学雑誌, No.124, p.287–296, 2015
3) 日本地図センター編;建設省国土地理院監修，「地図記号のうつりかわり−地形図図式・記号の変遷−」，日本地図センター, 1994
4) 国土地理院,「明治期の低湿地データ」,2021-09-01, https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/lc_meiji.html, (参照 2022-04-15)
5) Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox, “U-Net:Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation”, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) Vol. 9351, pp234-241, Springer, LNCS, 2015
6) Joseph Redmon,Santosh Divvala,Ross Girshick,Ali Farhadi, “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, p.779-788,2016
7) 荻田亜美, 松岡昌志，「旧版地図の土地利用分類に向けた画像処理の試み」，日本建築学会大会学術講演梗概集, 都市計画, p.757-758, 2021-09
8) 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, p.39-42, 2021-10

岐阜市における複数河川を考慮した地点ごと洪水危険度評価の試み

An Attempt to Evaluate Flood Hazard Levels
at Each Site Considering Multiple Rivers in Gifu City

前島　莉樹[1]，小山　真紀[2]
Riki MAEJIMA[1] and Maki KOYAMA[2]

[1] 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科
Graduate School of Natural Science and Technology, Gifu University
[2] 岐阜大学 流域圏科学研究センター
River Basin Research Center, Gifu University

Heavy rainfall disasters are becoming increasingly severe due to climate change. From the viewpoint of disaster prevention, it is important to know the risk points that will be severely affected by floods before a disaster occurs. Existing hazard maps either show the flood envelopes of all target rivers or provide information on flooding by some rivers, but they do not provide much assessment of inundation hazard and occurrence risk by site. In this study, floods were evaluated on a river-by-river basis for Gifu city, and the probability of occurrence by inundation depth rank was estimated for each location. This may clarify the locations with high frequency and high inundation depth, and enable land use considerations based on the risk of inundation.

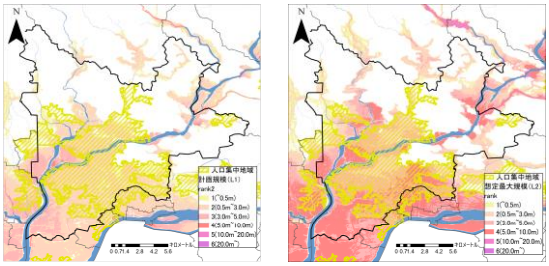
Keywords *: probability, flood, risk, depth, inundation*

1. 背景

近年，地球温暖化に伴う気候変動，局所的な豪雨等の増加により，洪水災害の被災リスクが高まっている．また，岐阜市は濃尾平野の北端に位置し，多くの河川が市内，及び周辺市町村に存在しているという地理的条件から，市内の広範囲が洪水浸水想定区域となっている．

浸水想定区域内に人を住まわせないようにすれば，たとえ洪水が発生したとしても被害を少なくすることが出来る．しかしながら，浸水あるいは土砂災害の危険区域以外の面積は限られており，ここに全ての人が居住することは不可能である．しかも，岐阜市の平野部，すなわち浸水想定区域内の多くは居住地や商業地等の人口集中地域となっており，全ての人を浸水想定区域外に居住させるのは，費用及び代替地等の関係から現実的ではない．このような現状を踏まえると，利便性と水害リスクのバランスを取った対策が求められる．

2020年の都市計画法・都市再生特別措置法等の改正では，頻発・激甚化する自然災害に対応するため，災害ハザードエリアにおける開発抑制，移転の促進，立地適正化計画と防災との連携強化など，安全なまちづくりのための総合的な対策を講じることが謳われており，これを実現するためには地点ごとの危険度評価が必要である．



(a) 計画規模（L1）　(b) 想定最大規模（L2）

図 1. 浸水想定図と人口集中地域図

2. 目的

国土交通省や岐阜県が作成，公表している浸水想定図や，岐阜市が作成，公表している浸水想定図等の情報が記載された洪水ハザードマップによって，住民は浸水想定区域の情報を得ることが出来る．しかし，浸水想定図は浸水想定区域，及びその区域における浸水深や浸水継続時間等のみの情報であり，その地点の被災確率を考慮したリスク情報は不明である．本研究では地点ごとの危険度評価の実現にむけて，既往の浸水想定データに基づいて，複数河川を考慮した地点ごとの浸水深ランク別浸水発生確率の試算を行うことを目的とする．

3. 使用したデータ

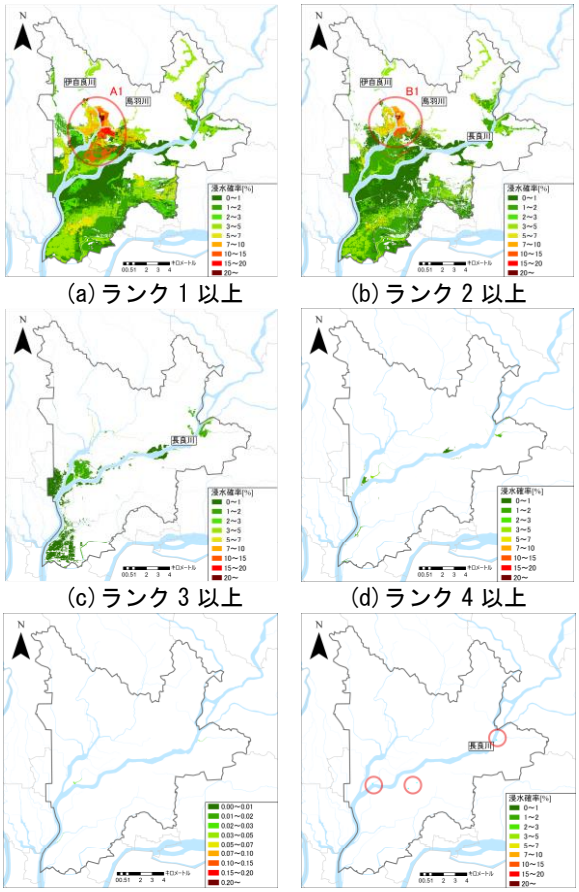
本研究では，岐阜県岐阜市を対象として，岐阜県ホームページの「洪水浸水想定区域図・水害危険情報図一覧[1)]」及び国土交通省中部地方整備局木曽川上流河川事務所「木曽川水系洪水浸水想定区域図[2)]」に記載されている河川のうち，岐阜市に洪水を引き起こす恐れのある河川を対象河川とする．岐阜県では，「ぎふ山と川の危険箇所マップ（https://kikenmap.gifugis.jp/）」において，洪水浸水想定区域図と水害危険情報図における浸水深を包絡線で示した情報が記載されている．本研究では，分析にあたり，ぎふ山と川の危険箇所マップの作成に用いられた河川ごとの浸水想定データ（以下このデータを浸水想定図と呼称），国土数値情報の人口集中地域（2015年），(株)Esri ジャパンの全国市区町村界データ（2021年）を用いた．地理情報システム(以下 GIS と呼称)は，Esri 社の ArcGIS Pro2.7 を用いた．

ここで，本研究の対象地域である岐阜市の浸水想定図（L1，L2）と人口集中地域図を GIS によって重ね合わせた図を図 1 に示す．

4. 地点ごとの浸水発生確率

地点ごとに，「浸水ランク 1 以上(0m 以上)」，「浸水ランク 2 以上(0.5m 以上)」，「浸水ランク 3 以上(3m 以上)」，「浸水ランク 4 以上(5m 以上)」，「浸水ランク 5 以上(10m 以上)」，及び「浸水ランク 6(20m 以上)」の浸水深となる浸水が発生する確率をそれぞれ求める．浸水発生確率は，L1 は河川によって異なるが，L2 はすべての河川で 1/1,000（1000 年に 1 回相当）である．地点ごとの洪水発生確率は，その地点に洪水を引き起こす河川別の発生確率を足し合わせることで計算することができる．本来であれば，重ね合わせる河川ごと，破堤地点ごとの浸水想定シナリオの発生確率を合わせた上で地点別の確率を計算すべきであるし，同時に発生する確率が高い氾濫も考慮すべきであるが，現状，これを満たす岐阜市のデータは存在しない．そのため，今回は試行的に，L1, L2 それぞれについて，既往の河川別浸水想定データの発生確率を地点ごとに足し合わせることで，地点別発生確率を推計した．紙面の都合上 L1 のみを図 2 に示す．

図中の着色地点が洪水浸水想定区域であり，緑から赤になるほど浸水発生確率が高いことを示す．ランク 2 以上（床上浸水以上）となる洪水浸水想定区域が市内広範囲に広がっているが，ランク 3 以上（2 階以上浸水）となる洪水浸水想定区域はかなり限定されている．(f)で，ランク 6（20m 以上）の浸水深となる地点の場所を赤い丸で示しているが，極めて限られた地点であることが分かる．また，浸水発生確率に着目すると，(a)の A1，及び(b)の B1 で示す区域で浸水発生確率が高くなっていることが分かる．2 つはほとんど同じ地点であり，最大で浸水発生確率が 22%（100 年に 22 回相当）となる．



(a) ランク 1 以上　(b) ランク 2 以上

(c) ランク 3 以上　(d) ランク 4 以上

(e) ランク 5 以上　(f) ランク 6

図 2. 地点ごと浸水発生確率(L1)

5. B1 区域に着目した水害リスクの考察

ランク 2 は浸水深が最大で 3m になるため，洪水被災時には，2 階以上に避難する必要がある．健常な人であれば，2 階に避難することに困難はないが，2018 年の 7 月豪雨時，倉敷市真備地域では高齢者が建物の 1 階部分で死亡したという事例があり [3]，上階に自力で避難できない避難行動要支援者にとっては，ランク 2 以上（床上浸水以上）でも命の危険に曝されることがある．ここでは図 2(b)における B1 区域に着目し，浸水発生確率，浸水ランクおよび居住状況について考察する．

2015 年国勢調査における基本単位区ごとの人口を重ねた図を図 3 に示す．この区域には複数の地区があるが，その中で城田寺地区は浸水発生確率が高く，かつ人口も多いため，水害対策が重要となる地区であることがわかる．下土居地区は浸水発生確率が高いが，人が居住していない地区であるため，水害対策の必要がない．また，柳戸地区はほぼ大学のみの地区であるため，大学関係者に対して，浸水の危険度の周知と，避難訓練の実施の促進をする必要があると考えられる．

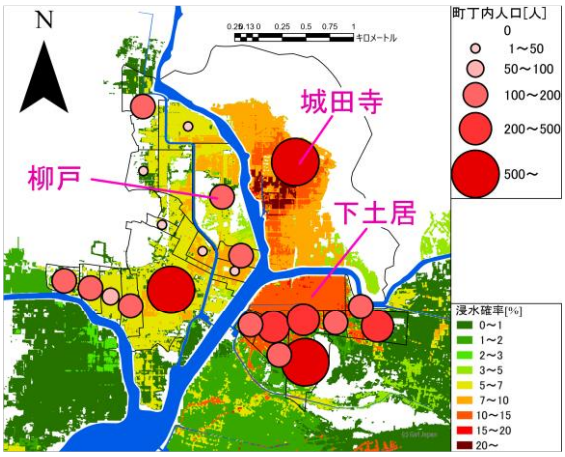


図 3. B1 区域に着目した浸水発生確率と人口

5. まとめ

本研究では，河川ごとの浸水想定区域，浸水ランク，及び浸水発生確率を考慮することにより，岐阜市における地点ごとの水害危険度評価を試みた．最大浸水深のみで洪水の危険度を評価するのではなく，発生確率を考慮することにより，最大浸水深だけでは見られなかった危険度を評価することが出来た．これらの結果を自治体の立地適正化計画に組み込むことで，安全な住まい方の検討，避難戦略の検討が可能になる．今回は試行的に河川ごとの洪水推計の条件が異なるものを重ね合わせるという手法をとったが，本来は河川別洪水推計の条件を合わせることが必要である，今後は河川別洪水推計の条件を合わせた重ね合わせの方法についても検討する予定である．

参考文献

1) 岐阜県　県土整備部河川課：洪水浸水想定区域図・水害危険情報図一覧，https://www.pref.gifu.lg.jp/page/20630.html（最終閲覧日 2022.4.12）

2) 国土交通省　中部地方整備局　木曽川上流河川事務所：木曽川水系洪水浸水想定区域図，https://www.cbr.mlit.go.jp/kisojyo/shinsuisoutei/index.html（最終閲覧日 2022.4.12）

3) 朝日新聞　犠牲 51 人、8 割超が 1 階部分で発見　真備町の豪雨被害，https://www.asahi.com/articles/ASL885F8LL81PTIL00L.html（最終閲覧日 2022.4.12）

Deep Learningを用いた 簡易型河川監視カメラ画像における越水検知の検討

Detection of Changes in Water Level from River Monitoring Images Using Deep Learning

○上岡 洋平[1]，浜田 秀敬[2]
Yohei UEOKA[1] and Hidetaka HAMADA[2]

[1] 日本ミクニヤ株式会社
Mikuniya Corporation
[2] 日本工営株式会社
Nippon Koei Co., Ltd.

Flood control measures are urgently needed due to the increase in riverine floods caused by heavy storms and weather fronts. Although the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism promotes the installation of river monitoring cameras for efficient river management, it is difficult to manually monitor multiple cameras during emergencies. In this study, we use deep learning technology to detect changes in water level from river monitoring images.

Keywords *: river monitaring, deep learning, semantic segmentation, flood*

１．はじめに

近年，前線や局地的な大雨に伴う河川洪水や内水氾濫が増加傾向にあり，水害対策が急務となっている．その対策の一つとして，国土交通省では，平常時および非常時において，河川流況や河川管理施設等の状況を的確に把握し，河川管理業務を円滑に遂行するため[1)]や住民の避難行動を強く促すこと[2)]などを目的に多数の河川監視カメラの設置を進めている．令和2年2月時点で，約4,400台の河川監視カメラの設置が進められている[2)]．特に出水時においては，河川の越水等による早期の対策や被害把握などの対応が求められる．しかし，非常時において設置している多数のカメラを目視で監視することは多くの労力がかかり困難であるため，その有効活用が望まれる．

近年，防災分野においてもDeep Learning技術を用いた研究が多く行われている[3),4)]．窪田ら[5)]では，セマンティックセグメンテーション技術を用いることで，旧版地図からの市街地の抽出を行っている．

セマンティックセグメンテーション技術を用いた河川越水等の検知を行う先行研究として，川添ら[6)]では，河川監視カメラ（CCTV）を用いて水面領域の抽出を行っており，越水検知の検討を行っている．しかし，本検討では河川監視カメラ1台を対象としており，他河川への汎用性については検討されていない．

そこで本稿では，Deep Learningの画像認識手法の一つであるセマンティックセグメンテーションを用いて，簡易型河川監視カメラ画像から河川の水面領域の抽出を行い，複数河川への適用について検討する．さらに，河川越水等を検知する手法についても検討した．

２．方法

2.1　学習モデルの構築

本稿では，セマンティックセグメンテーションのアルゴリズムの一つであるU-Net[7)]を用いた．U-Netは，Encoder-Decoder構造であり，Encoder部分とDecoder部分の対応した特徴マップをつないでいるため，画像を復元する際に位置情報も含めることができるといった特徴がある．

画像の入力サイズは1280×704とし，出力層はSigmoid関数を用いた．最適化手法にはAdam[8)]，学習のバッチサイズを4，エポック数を300回として，学習済みモデルを作成した．学習済みU-Netモデルを用いた河川の水面領域の検出フローは，図1のとおりである．

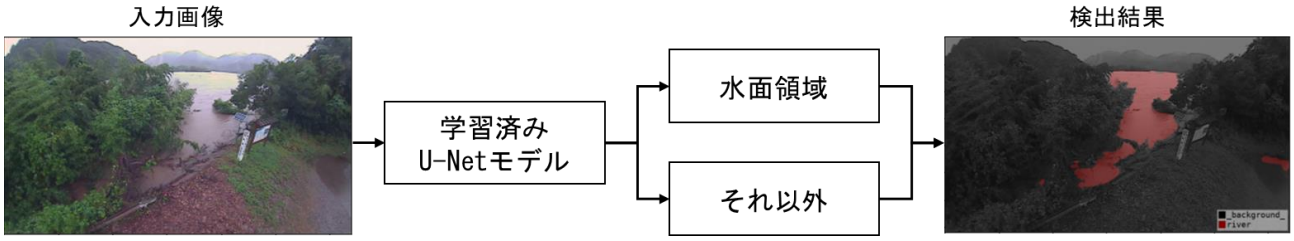


図1　セマンティックセグメンテーションによる河川の水面領域の検出

2.2　評価指標

評価指標は，Dice損失およびIoUとした．Dice損失は，2つの要素の類似度を評価するために使われているDice係数を損失として用いたものであり，学習の収束を確認するのに用いた．

IoUは，2つの領域がどれぐらい重なっているかを表す指標である．IoUの計算には，表1に示す混同行列が用いられる．本稿においては，正しく水面を抽出した場合はTP，正しく水面を検出できなかった場合はFN，水面を誤検出した場合はFP，水面以外の領域を抽出した場合はTNとし，以下の式でIoUを求めることができる．また，複数画像による予測結果（IoUの平均値）については，本稿ではmIoUと示す．

表1　混同行列

		予測	
		Positive	Negative
事実	Positive	TP：水面を抽出	FN：水面を検出できなかった
	Negative	FP：水面を誤検出した	TN：水面以外を抽出

$$IoU = \frac{TP}{TP+FN+FP} \quad \cdots \quad (1)$$

2.3　データセットの構築

(1) データの収集

データの収集は，中国地方整備局が設置している簡易型河川監視カメラの画像を川の防災情報[9]より取得させていただいた．図2に川の防災情報の閲覧HPを示す．

中国地方整備局管内に設置されている10台のカメラを対象とし，収集期間は2021年4月1日から2021年8月31日とした．収集した画像は，晴天時だけではなく降雨時や降雨による河川の増水時の静止画を収集した．夜間については，月明かりや照明で河川が目視で確認できる画像を対象とした．図3に収集した画像を示す．

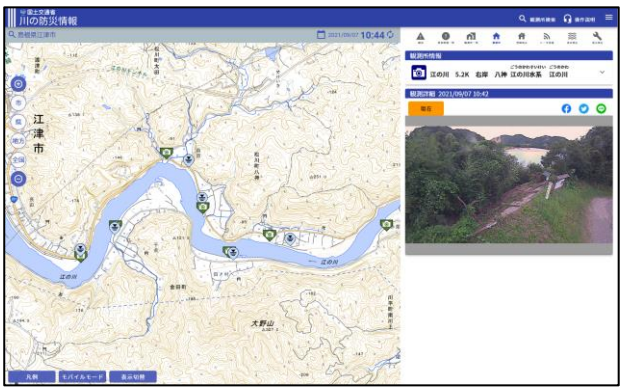


図2　川の防災情報による河川カメラ画像の例[9]

(2) マスク画像の作成

セマンティックセグメンテーションでは，予測したい領域のマスク画像を作成する必要がある．本稿では河川の水面領域とそれ以外の領域を識別することとし，著者らが手作業でマスク画像を作成した．図4に作成したマスク画像を示す．

図3　平常時および豪雨時における河川カメラ画像例
（上：平常時，下：増水時）

図4　マスク画像の作成
（右：元画像，左：マスク画像）

(3) データセットの作成

本稿では，2021年3月から2021年7月までに撮影したデータを学習データおよび検証データとし，2021年8月に撮影されたデータをテストデータとした．表2に作成したデータセットを示す．10台の河川監視カメラのうち，カメラ1からカメラ8までの8台のカメラは学習データ，検証データおよびテストデータに使用した．カメラ9およびカメラ10の2台のカメラについてはテストデータのみ使用した．

学習データは4,017枚，検証データは160枚，テストデータは45枚とした．

表2　作成したデータセット

カメラ No	学習（枚）	検証（枚）	テスト(枚)
1	229	20	5
2	275	20	5
3	267	20	5
4	84	20	5
5	191	20	5
6	1,028	20	0
7	986	20	0
8	957	20	0
9	0	0	10
10	0	0	10
合計	4,017	160	45

また，汎用性を高めるために，学習データに対してランダムにデータ拡張を行った．データ拡張は，鏡像反転，ランダムクロップ，拡大・縮小，ノイズ処理を行った．

３．結果

3.1　学習結果および検証データによる精度検証

作成したデータセットにU-Netを適用し，学習済みモデルを作成した．図5に学習曲線を示す．

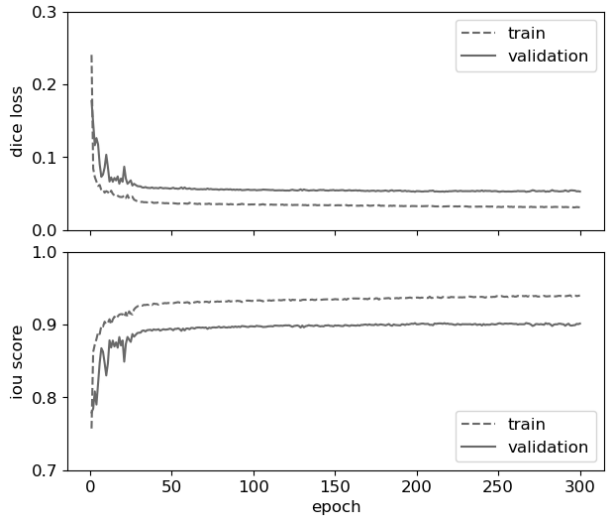


図5　学習結果（上：Dice損失，下：IoU）

作成した学習モデルを用いて，検証データによる精度検証を行った．その結果，mIoUは0.9004と非常に高い精度が得られ，概ね河川水面を予測できていることが分かった．図6に検証データによる予測結果を示す．平常時や増水時，夜間において，概ね検出できた．夜間については，日中の画像と比較すると少し精度が低下していた．水面の一部分に草木が写り込んでいるような画像では，正しく検出できない画像もあった．これは，河川カメラ画像の解像度が低いため，細かな領域の検出についてはできなかったと考えられる．

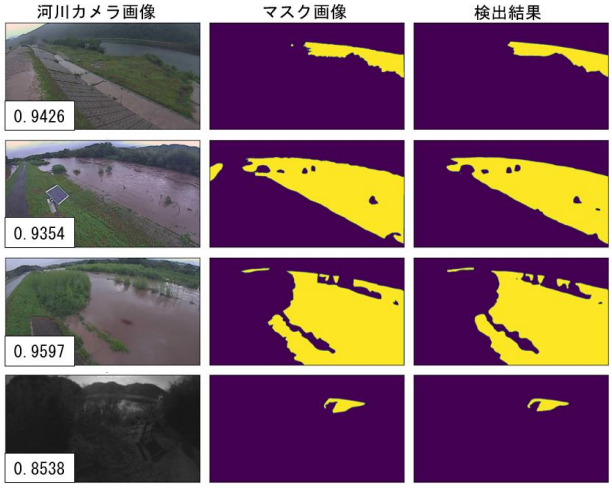


図6　検証データを用いた予測結果の一例（数字はIoU）

3.2　テストデータによる精度検証

(1) 学習済み河川による検証

学習にも用いた河川監視カメラ1からカメラ6までの6台のカメラ画像を用いて精度検証を行った．その予測結果の一例を図7に示す．平常時においては，検証データと同様にIoUが高い精度が得られており，概ね河川の水面領域を検出できていた．増水時においては，IoUが0.7411と平常時より低かったが，概ね水面が検出できていた．学習時において増水時の画像も学習したが，増水時の画像データやパターンの少ないことから精度が低くなっていると考えられる．

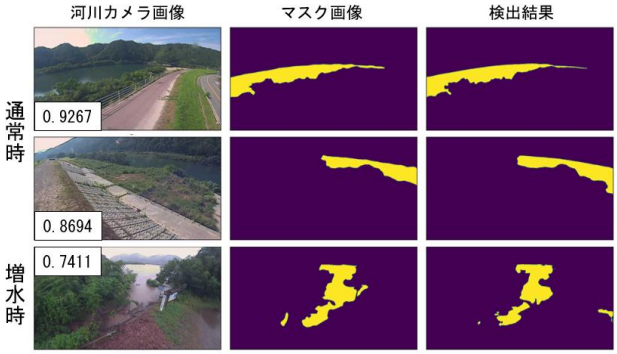


図7　河川監視カメラ1～6による予測結果の一例（数字はIoU）

(2) 未学習河川による検証

次に，学習に用いていない河川監視カメラ9,10の画像を用いて精度検証を行った．その予測結果の一例を図8に示す．カメラ9,10については，道路の冠水前，冠水後の画像である．その結果，IoUが0.8238と高い精度が得られた画像もあったが，多くの画像においてIoUが低い結果となった．特に，冠水後の検出結果では，適切に検出できていない結果となった．未学習の河川監視カメラを使用したこと，冠水時の学習データがなかったことが精度低下の要因として考えられる．

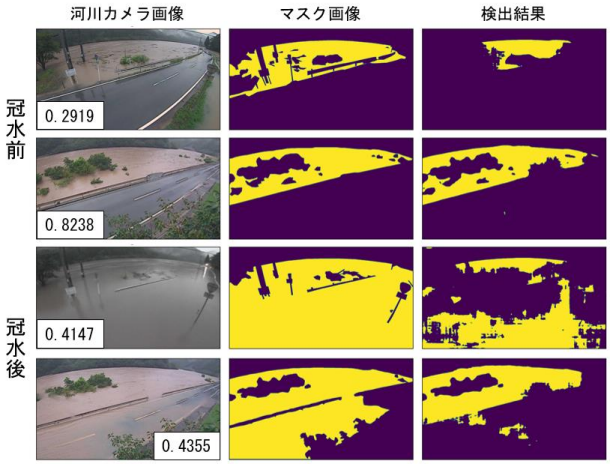


図8　河川監視カメラ9,10による予測結果の一例（数字はIoU）

４．河川越水等の検知手法の検討

前項までに，セマンティックセグメンテーションを用いることで，河川の水面領域を抽出することができた．本項では，水面領域の抽出から河川越水等の検知手法について検討を行った．

図9に河川越水等の検知手法について示す．事前に河川カメラ画像ごとに越水検知ラインを設定することで，学習済みモデルによる検出結果の範囲が越水検知ラインを超える場合において，越水等を検知することが可能となる．

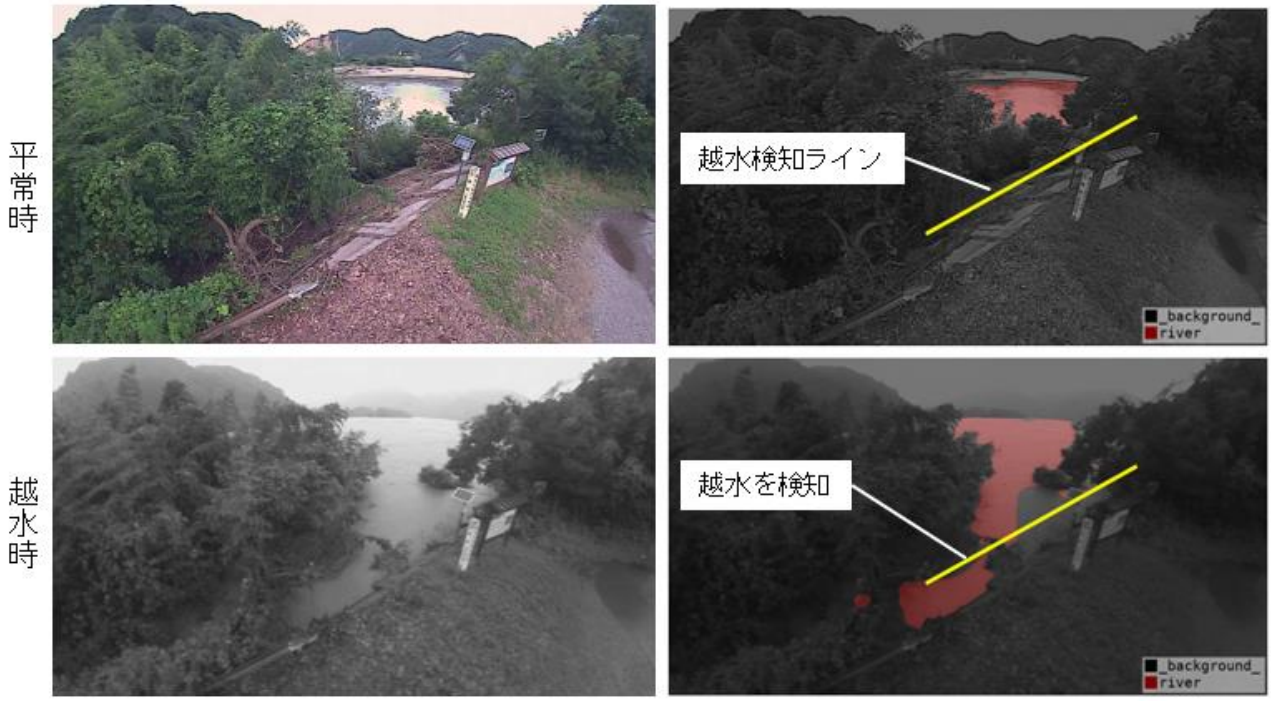


図9　河川越水等の検知手法
（左：河川監視カメラ画像，右：解析結果）

５．まとめ

本稿では，Deep Learningの画像認識手法の一つであるセマンティックセグメンテーションを用いて，簡易型河川監視カメラ画像から河川の水面領域の抽出を行った．その結果，平常時では高い精度で水面領域を検出することができた．一方で，増水時や冠水時等においては，正しく検出することができない画像もあった．特に，未学習の河川監視カメラ画像を用いた検証では，精度が低い結果となった．増水時または越水時等の学習データの少なさが主な要因として考えられる．

河川越水等の検知手法については，河川の越水検知ラインを設定することで，検出結果が越水検知ラインを超えると，越水を検知することが可能になる．

今後の課題として，増水時や越水時等のデータを学習させて，精度向上を図る必要がある．また，汎用性を高めるために，他河川の河川監視カメラ画像の学習も必要である．また本稿では，夜間時の精度検証については，検討できなかった．夜間においては，河川監視カメラに投光器等を設置し，河川状況をカメラ画像で撮影できるようにすることで，河川の水面領域を検出することが可能と考える．

参考文献

1) 国土交通省関東地方整備，「ライブ映像運用指針」，https://www.ktr.mlit.go.jp/tonejo/m/m-bousai/live/1421.htm.
2) 国土交通省報道資料，https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_001010.html.
3) 上岡洋平，田中聡：深層学習を用いた航空写真および地上写真による建物被害判別の検討，地域安全学会梗概集，No.42，2018.
4) 石井唯嵩，広兼道幸，倉本和正，西原尚輝：社会的要因を考慮した土砂災害警戒区域設定に対する深層学習の適用，土木学会論文集F6(安全問題)，2020.
5) 窪田亜美，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.49，2021.
6) 川添祐，上山晃：CCTVカメラ映像から得られる画像解析サービスに係る研究開発，国土文化研究所年次報告，vol.19，2021.
7) Olaf Ronneberger, Philipp Fischer and Thomas Brox: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, arXiv:1505.04597, 2015.
8) Diederik P. Kingma and Jimmy Lei Ba: Adam: A Method for Stochastic Optimization, arCiv:1412.6980, 2017.
9) 川の防災情報，https://www.river.go.jp/index.

500mメッシュ地理空間情報を用いた 21世紀日本全土の居住地災害リスク

Disaster Risk of Residential Areas throughout Japan in the 21st Century Using 500m Mesh Geospatial Information

○藤原 叶多[1]，村尾 修[2]
Kyota FUJIWARA[1] and Osamu MURAO[2]

[1] 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻
Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University
[2] 東北大学 災害科学国際研究所
International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

Aiming to understand disaster risk distribution of residential areas throughout Japan in the 21 century, this study quantitatively analyzed risks of earthquake, flood, and sea-level rise using 500m geospatial grids with population, asset, ground amplification, and topographic classifications. As a result, the following became clear: (1) 25.5% of the residential area, 50.9% of the population, and 36.9% of the assets are located in the areas with altitude of less than 25m, (2) Areas with low altitude have a high flood risk with high ground amplification ratio, and (3) The rate of population decline was lower in places with higher disaster risk in 2050.

Keywords *: urban disaster risk, 500m mesh data, geospatial information, exposure, population estimation, elevation*

１．はじめに

(1) 研究の背景

世界では地球温暖化に伴い海面上昇が進行すると予測されており，IPCC(国連気候変動に関する政府間パネル)第 5 次評価報告書 [1)]の中で，2100 年における温室効果ガス排出量の最大排出量に相当する RCP8.5 シナリオでは，21 世紀の世界平均海面水位の上昇幅が 0.52~0.98m の間で推移していくとされている．日本列島は海に囲まれた島国で，低地に多くの人口や資産が集積しており，海面上昇や洪水に対して潜在的な浸水リスクが高まっている．また世界の国々と比較して地震が頻発する国でもあり，日本はあらゆる自然災害に対して，将来の都市リスクを抑えることが求められている．

(2) 研究の目的

本研究の目的は，21 世紀海面上昇を考慮し，日本の低地にどのような影響があるのかをリスクの観点から明らかにすることである．また，日本の人口減少社会の中で人口変動予測を踏まえた将来の各都市リスクがどのように変遷していくのかを明らかにする．

(3) 既往研究と本研究の位置付け

海面上昇に関する研究は，日本各地の標高の低い沿岸域を対象に様々な観点で行われている．鈴木(2008)[2)]の研究では，九州地方を対象に海面上昇と台風の巨大化によって高潮が大きくなった場合，どれだけの浸水面積と浸水人口になるかを定量的に評価した．桑原ら(2008)[3)]の研究では，全国の主要河川下流域を対象に海面上昇と洪水を考慮し，護岸や堤防が無い条件の下で氾濫危険性のある土地の土地利用と人口への影響を分析した．信岡ら(2010)[4)]の研究では，茨城県を対象に海面上昇と高潮によって影響を受ける土地利用別の浸水面積と将来の人口減少を考慮した浸水人口を分析した．

日本全体を対象に，統一した分析方法で 21 世紀海面上昇による潜在的な浸水影響がある場所のリスク評価をした研究は多くない．また，その浸水影響が懸念される場所の海面上昇以外のハザードを考慮したリスクや，将来人口推計をもとにした将来のリスクについて分析した研究も少ない．これらのことから，日本全体を俯瞰して見た時に，21 世紀海面上昇やその他のハザードを踏まえた将来の都市リスクがどのように推移していくのかを明らかにしていく必要がある．

２．研究の方法

本研究で使用した日本全体にかかる 500m メッシュは，それぞれ露出度としての人口と住宅地平均価格をもとにした資産のデータを持つ．また，本研究で考慮するハザードは，地震と洪水と海面上昇である．本研究における都市リスクの考え方を図 1 に示し説明する．

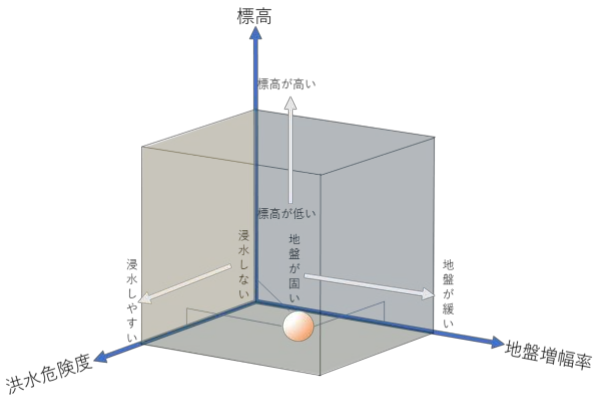


図 1 都市リスクの考え方

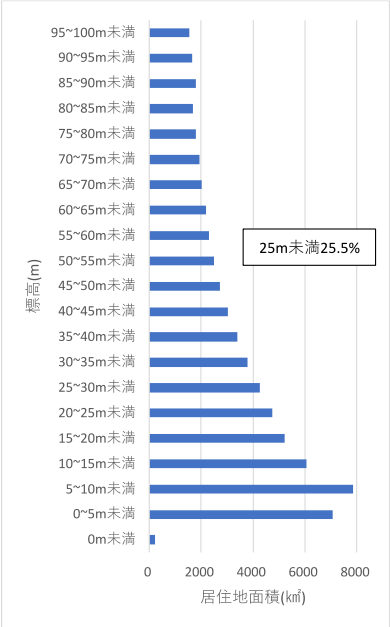


図 2　標高別居住地面積

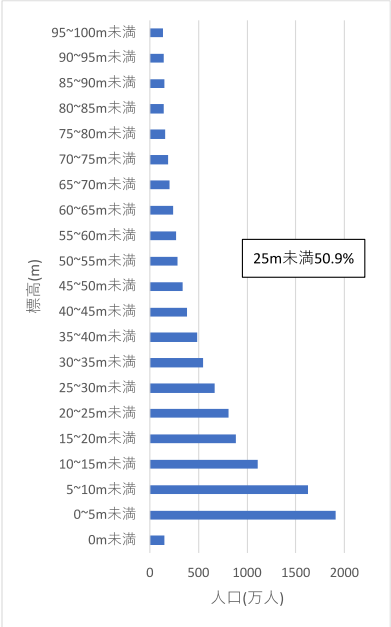


図 3　標高別人口

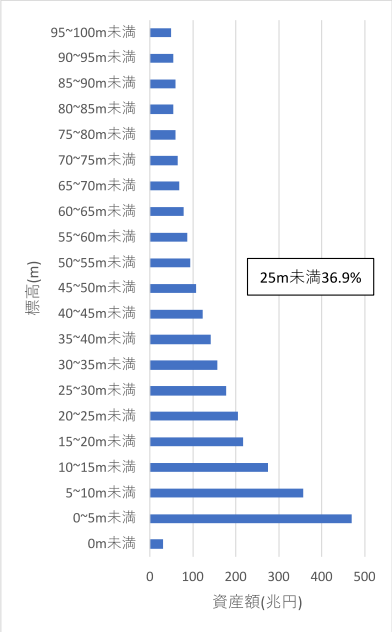


図 4　標高別資産

それぞれのハザードに対する脆弱性の要素として，地震は地盤増幅率による地盤の緩さ，洪水は地形分類をもとにした地質の排水のしやすさによる洪水危険度，海面上昇は標高値と海水面の高さの比較による浸水ポテンシャルのデータをメッシュで整理する．人口と資産を抱えるメッシュが標高，地盤増幅率，洪水危険度の三つの軸が示す座標内にどのように分布するかを分析し，現状の都市リスクを把握する．さらに，将来の都市リスクを考察する際には，露出度要素である将来人口の増加減少の推計を踏まえて，露出度が図 1 に示す立体内の場所に応じてどのように変化するかをもとにし，都市リスクの変遷を分析する．

３．日本における現状の居住地分布傾向の分析

500m メッシュの標高，人口，住宅地平均価格をもとにした資産のデータを使用し，標高ごとの居住地分布傾向を分析した．標高 25m 未満の低地には日本全体の 25.5%の居住地面積，50.9%の人口，36.9%の資産が存在し，低地は狭い居住地面積のわりに多くの人口と資産が集積していることが図 2 から図 4 より確認できる．また図 3 より，現状の海水面未満の海抜ゼロメートル地帯と呼ばれる標高 0m 未満には京都市の総人口とほぼ同数の約 147 万人が居住している．

４．3つのハザードから見た都市リスクの現状把握

各ハザードから見た都市リスクの現状把握をした．まず，地震について地盤増幅率別に居住地面積，人口，資産を分析した表を表 1 に示し，日本全体の地盤増幅率分布を図 5 に示す．地盤の緩い地盤増幅率 1.6 以上の場所に住む人口は 42,564,418 人で日本全体の 33.5%にあたる．居住地面積は全体の 16.1%であることから，多くの人口が地盤の緩い土地の上に密集している．

洪水について地形分類をもとに 4 段階の洪水危険度別に居住地面積，人口，資産を分析した表を表 2 に，危険度分布を図 6 に示す．危険度中以上の洪水時に浸水するエリアの居住人口は 40,606,608 人で日本全体の 32.0%であった．海面上昇について，低地標高 3m 以下の範囲における居住地面積，人口，資産を分析した表を表 3 に示す．将来海水面以下になるとされる浸水ポテンシャルを持つ標高 1m 以下に居住する人口は日本全体のわずか 3.03%であるが，その総数は横浜市の総人口とほぼ同等の 3,857,100 人である．曝露量の観点で都市リスクを考察すると，海面上昇より地震や洪水に関する都市リスクが大きいと言える．

表1　地盤増幅率別居住地面積、人口、資産

地盤増幅率	居住地面積(㎢)	人口(人)	資産(兆円)
~1.0	64,331 (52.6%)	28,870,088 (22.7%)	1,647 (39.2%)
1.1~1.5	38,268 (31.3%)	55,657,753 (43.8%)	1,503 (35.8%)
1.6~1.9	10,912 (8.9%)	22,904,733 (18.0%)	576 (13.7%)
2.0~	8,792 (7.2%)	19,659,685 (15.5%)	474 (11.3%)

()は全体に対する割合

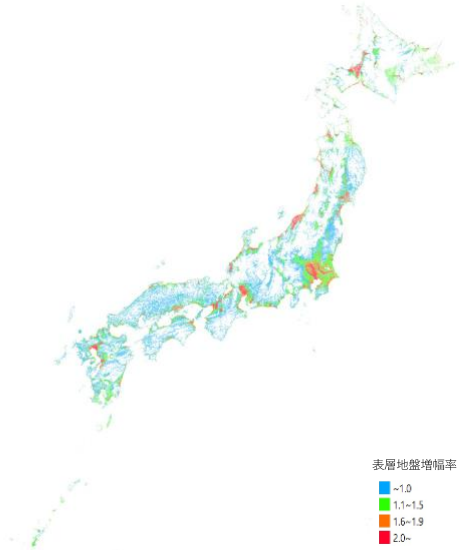


図 5　地盤増幅率分布

表2 洪水危険度別居住地面積、人口、資産

洪水危険度	居住地面積(km)	人口(人)	資産(兆円)
危険なし (山地、山麓地、丘陵、火山地、火山山麓地、火山性丘陵、岩石台地、砂丘)	61,364 (50.2%)	27,252,331 (21.4%)	1,593 (37.9%)
危険小 (砂礫質台地、ローム台地、扇状地、自然堤防、埋立地、砂州・砂礫州)	33,073 (27.1%)	59,200,293 (46.6%)	1,548 (36.7%)
危険中 (三角州・海岸低地、谷底低地)	17,592 (14.4%)	21,965,964 (17.3%)	614 (14.6%)
危険大 (後背湿地、旧河道、干拓地)	10,181 (8.3%)	18,640,644 (14.7%)	457 (10.8%)

()は全体に対する割合

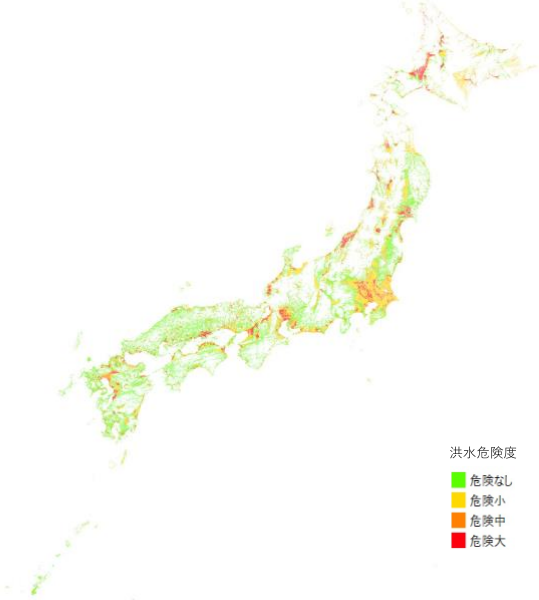


図 6 洪水危険度分布

表3 低地標高別居住地面積、人口、資産

標高	居住地面積(km)	人口(人)	資産(兆円)
2.1~3.0m	1,645 (1.34%)	4,384,974 (3.45%)	108 (2.57%)
1.1~2.0m	1,117 (0.91%)	3,212,905 (2.53%)	86 (2.05%)
0.1~1.0m	663 (0.54%)	1,983,788 (1.56%)	60 (1.41%)
~0m	307 (0.25%)	1,873,312 (1.47%)	41 (0.98%)

()は全体に対する割合

都市リスクの現状整理として，洪水危険度ごとの地盤増幅率と標高の関係を図 7 から図 10 に示す．洪水危険なしの地盤増幅率中央値は0.9をとり，洪水危険大の地盤増幅率中央値は1.9をとる．ここで中央値を比較すると，数値に約 2 倍の差が生じ，洪水時に浸水しやすい場所ほど地盤が緩い．また，洪水危険なしから洪水危険度が高くなるにつれて，標高の中央値は順々に低い値を示す．洪水危険が大きいほど地盤増幅率は大きく，標高は低い傾向が読み取れる．

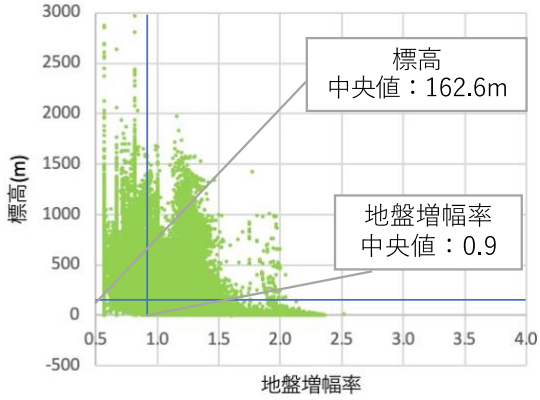


図 7 洪水危険なしの地盤増幅率と標高の散布図

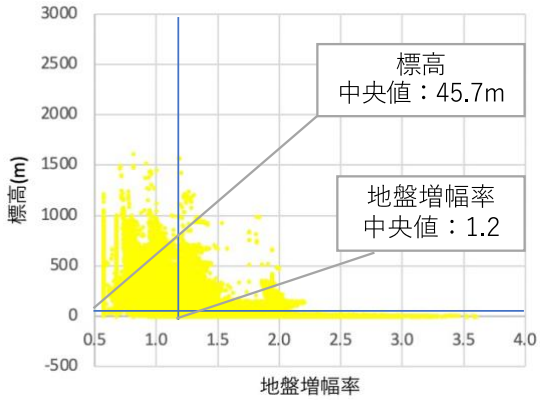


図 8 洪水危険小の地盤増幅率と標高の散布図

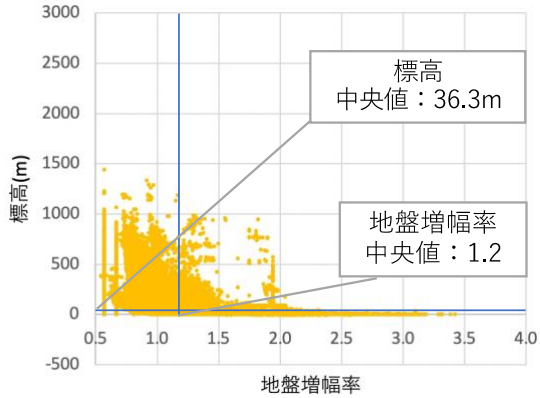


図 9 洪水危険中の地盤増幅率と標高の散布図

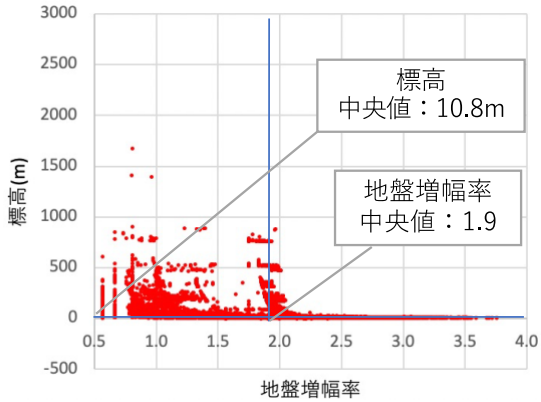


図 10 洪水危険大の地盤増幅率と標高の散布図

5. 人口の将来予測に基づく各都市リスクの変遷

日本全体は 2015 年から 2050 年にかけて人口減少を続け，この 35 年間に 19.8%人口減少すると予測されている．ここでは，この人口減少社会の中で人口の将来予測に基づく各都市リスクの変遷を分析した．

地震に対しては図 11 より，地盤増幅率 1.0 以下の地盤が固い場所は 30.5%の高い人口減少率を示す一方で，軟弱地盤の地盤増幅率 2.0 以上の人口減少率は 15.5%にとどまる．洪水に対しては図 12 より，洪水危険なしは 28.5%の高い人口減少率，洪水危険大は 17.0%の人口減少率であり，洪水時に浸水する可能性が高い場所は，洪水の危険がない場所よりも人口減少率が低い．海面上昇に対しては図 13 より，標高が低い場所はいずれも人口減少率が低く，特に標高 0m 以下の人口減少率は 9.7%の一桁台に抑えられている．

3 つののハザードにおいて，脆弱性が高い場所は，日本全体の人口減少率より低い率で推移する．

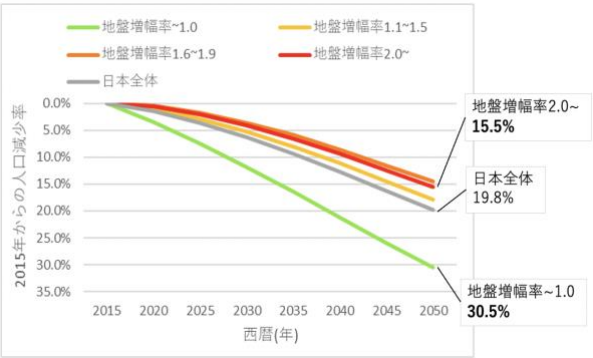


図 11　5 年ごとの地盤増幅率別人口減少率

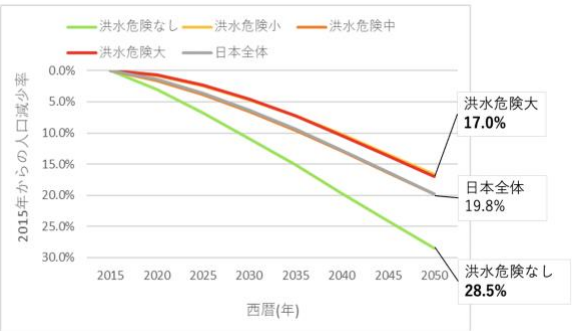


図 12　5 年ごとの洪水危険度別人口減少率

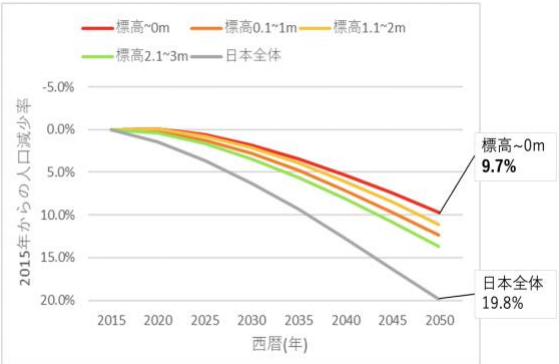


図 13　5 年ごとの低地標高別人口減少率

6. 人口減少による都市リスクの変化に関する考察

地震，洪水，海面上昇それぞれに対して脆弱な場所と，その脆弱地の重複する場所を重複ハザードのリスクがある場所として，ハザード別の人口減少率を図 14 に示す．ここで地震に対する脆弱地は地盤増幅率 1.6 以上，洪水に対する脆弱地は洪水危険度中・大，海面上昇に対する脆弱地は標高 1m 以下の場所と設定した．

洪水のみの影響が大きい場所や，海面上昇のみの影響が大きい場所といった，単体ハザードのリスクが大きい場所の人口減少率は，日本全体より高いことが読み取れる．一方，地震，洪水，海面上昇のうち複数の影響がある場所の人口減少率はいずれも日本全体の人口減少率を下回る．とくに 3 つのハザードの影響が大きいとされる場所の 2015 年から 2050 年までの人口減少率は，10.7%に抑えられ，重複ハザードの中で最も低い率を示す．多くの災害リスクを抱える場所ほど人口減少率が低い．

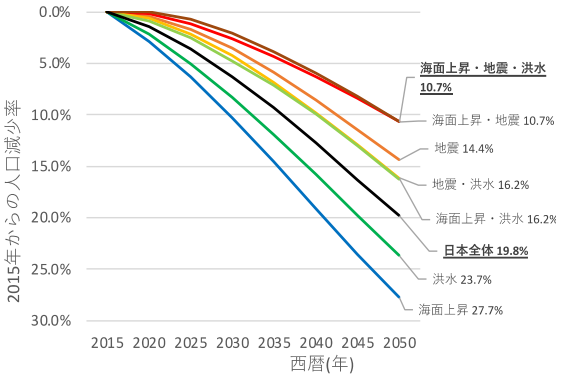


図 14　5 年ごとのハザード別人口減少率

7. まとめ

本研究は500mメッシュごとのデータを使用し，日本全体を俯瞰して，現状と将来の海面上昇のハザードを含む都市リスクについて分析した．標高 25m 未満には日本全体に対して居住地面積は 25.5%，人口は 50.9%，資産は 36.9%が集積している．洪水危険度が高い場所は地盤増幅率が大きく，標高は低いという傾向を確認した．また，将来の人口推計を踏まえ曝露量の観点から各都市リスクの変遷を示した．結果として，各都市リスクは，脆弱な土地ほど人口減少率が低く，さらに，多くの災害リスクを抱える場所が最も人口減少率が低いことが分かった．

本来であれば災害リスクが大きい場所ほど居住人口を減らすことで都市リスクを抑えていかなければならないが，災害リスクが大きい場所の人口は一定数を維持し続ける特徴が見られることから，将来の都市リスクは高い状態で推移していくと結論づけられる．

参考文献

1) 国連気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書，https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf
2) 鈴木 武：九州地方における地球温暖化による高潮浸水リスクの変化，地球環境研究論文集 Vol.16， No.13，2008年8月
3) 桑原 祐史・郡司 美佳・横木 裕宗・三村 信男・小柳 武和：大規模河川下流域を対象とした海面上昇による氾濫リスク推定のための基礎的分析，地球環境研究論文集 Vol.16，No.13，2008年8月
4) 信岡 尚道・奈良 直樹：茨城沿岸における人口成長と海面上昇の複合影響評価，土木学会論文集B2(海岸工学) Vol.66，No.1，2010. 1336-1340

多時期の衛星SAR画像を用いた2016年熊本地震からの益城町の復興モニタリング

Monitoring of the reconstruction process in Mashiki Town after the 2016 Kumamoto earthquake based on multi-temporal satellite SAR data

○山崎 文雄[1]，劉 ウェン[2]
Fumio YAMAZAKI[1] and Wen LIU[2]

[1] 国立研究開発法人 防災科学技術研究所
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED)
[2] 千葉大学 大学院工学研究院
Graduate School of Engineering, Chiba University

The reconstruction process in Mashiki Town from the April 2016 Kumamoto earthquake was monitored using multi-temporal ALOS-2 PALSAR-2 data and the results were compared with optical images from Google Earth and our field survey data. Significantly changed areas, such as construction of temporary housing complexes, demolition of large buildings, and new construction of public apartment buildings, were recognized from the SAR data because the backscattering intensity increased or decreased significantly for these areas. Thus, remote sensing is considered to be useful for monitoring wide areas in a long term after a natural disaster strikes.

Keywords *: Synthetic Aperture Radar, Google Earth, demolition, reconstruction, housing, PALSAR-2*

1．背景と目的

人工衛星や航空機からのリモートセンシング技術は，自然災害による被害や影響の把握に広く使われている．なかでも合成開口レーダ（SAR）は，プラットフォームに搭載されたアンテナからマイクロ波を地上に照射しその反射波（後方散乱）を観測する仕組みであり，天候や昼夜の時間帯に依らず観測が可能なため，自然災害の影響把握には極めて有効である．多くの場合，災害前後に同じ撮影条件で得られた SAR 画像を比較し，変化抽出によって地盤変状や浸水域の把握，さらには構造物被害の把握を行うことが多い [1), 2)].

またリモートセンシング技術は，長期間にわたる災害復興過程のモニタリングにも使用されている．例えば吉原・羽柴は [3)]，10 年間にわたり観測された高分解能光学衛星画像を用いて，2004 年スマトラ島沖地震からの Banda Ache の土地地用の変化を求め，市街地の復元および拡大状況を調べている．また Hoshi らは [4)]，2007 年ペルー・ピスコ地震後の 5 年間における建物再建の推移を航空写真と光学衛星画像を用いて抽出している．この他，2003 年アルジェリア地震による建物被害特性と復興状況を調査した研究や [5)]，2003 年イラン・バム地震からの市街地復興を衛星画像と現地調査から評価した研究もある [6)]．これらの復興を観る研究では，画像を誰でも理解しやすいことおよびセンサが変わってもほぼ同じ情報を有するなどの理由で，全て光学画像が使われていた．

一方，衛星 SAR 画像を用いた市街地復興に関する研究はほとんど見当たらない．これは SAR 衛星のセンサの特性（マイクロ波の波長，空間解像度，偏波）や撮影条件が異なると多時期比較が困難であり，また長期間稼働する SAR 衛星が少ないなどの理由が考えられる．我が国では長期にわたり波長の長い L バンドの SAR 衛星が稼働してきた．JERS-1 衛星(ふよう 1 号)は 1992 年から 1998 年まで稼働し，1995 年兵庫県南部地震による地殻変動の検出 [7)]などに利用された．その後は，2006 年に打ち上げられた ALOS 衛星には PALSAR センサが搭載されており，2011 年 4 月に稼働を停止するまで，東北地方太平洋沖地震をはじめとする数多くの自然災害における SAR 画像を提供した [8)]．ALOS の後継機の 2014 年に打ち上げられた ALOS-2 には，機能が向上した PALSAR-2 センサが搭載され，日本や世界各地の数多くの災害に貴重な SAR 画像を提供し続けている [9)].

したがって，もし我が国の自然災害からの復興を同一の SAR センサで観測しようとすると，PALSAR-2 が最適であるが，データが提供されるようになった 2015 年以降に発生した災害に限定される．そこで本研究では，2015 年以降で，市街地に最も甚大な被害をもたらした 2016 年熊本地震を対象として，被害の最も大きかった益城町の 6 年間における復興状況を PALSAR-2 画像から把握することにした．また，比較用のデータとして，Google Earth の光学画像および筆者らによる現地調査データを用いてその検証を行う．

2．熊本地震による益城町の建物被害と SAR 画像

2016 年 4 月 14 日（前震，M_J6.5）および 4 月 16 日（本震，M_J7.3）に発生した一連の熊本地震では，大規模な斜面崩壊やインフラ施設の被害に加えて，多数の建物が甚大な被害を受けた．最も揺れが大きく，建物被害が甚大だった益城町では，行政による建物被害認定調査 [10)]に加えて，多数の機関が独自の建物被害調査を行った [11), 12)]．筆者らのグループは，益城町の建物調査結果を用いて建物特性に基づく被害の分析と建物被害関数の構築 [13)]などを行っている．**図 1** は益城町による被災度判定結果 [10)]を町全域と，中心市街地に関して表示したのものである．本研究では，被害が集中した中心市街地において，地震後 6 年間において，行われてきた復旧・復興事業を衛星データ等より観察する．

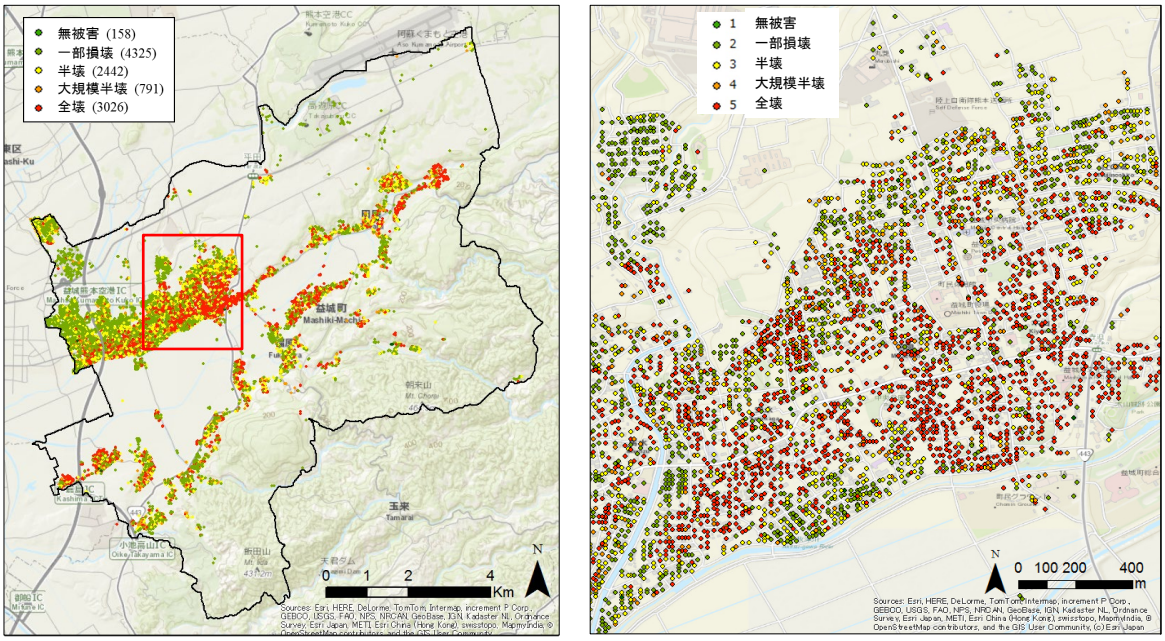
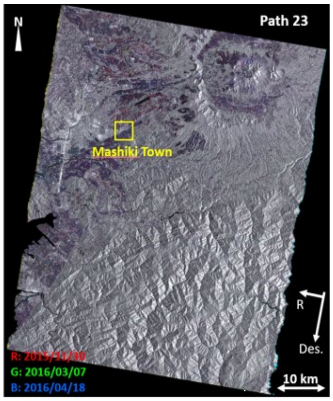


図 1 熊本地震による益城町の被災度判定結果[10]とその町中心部の拡大図



Observation Condition

Off-nadir angle	32.4
Polarization	HH
Ascending node	Descending
Node ID	301
Observation Mode	SM1
Observation Direction	Right
Beam No.	U2-7

Observation Time (UTC)

2015-11-30T03:17:50Z
2016-04-18T03:17:54Z
2016-11-14T03:17:45Z
2017-11-13T03:17:43Z
2018-11-12T03:17:44Z
2019-11-11T03:17:45Z
2020-11-09T03:17:46Z
2021-09-13T03:17:46Z

図 2 ALOS-2 強度画像（後方散乱係数）の地震前後カラー合成，撮影条件，および同条件で撮影された 8 時期

熊本地震の前後には多数の人工衛星が被災地域の観測を行った．中でも ALOS-2 は（阿蘇山の観測が主目的と思われるが）震災後も継続的に観測を行っており，本研究ではデータが豊富な**図 2** に示す観測条件の SAR 画像を 8 シーン使用することにした．これらの画像は，下降軌道から HH 偏波により右向観測された高分解能モード(SM1)のもので，解像度は約 3m，ピクセルサイズ 2.5m にリサンプリングして使用した．SAR 画像による地震被害把握[14]は既に行っているため，本研究では地震後の復旧・復興過程のモニタリングを主たる目的としている．

植生などの季節変化の影響は，最も波長の長い L バンドの SAR 画像といえどもかなり大きい．そのため毎年 11 月に撮影した画像を用いて変化抽出を行なうことにした．地震から約半年後の 2016 年 11 月とその 4 年後の 2020 年 11 月に撮影した画像の変化を**図 3** に示す．カラー合成では 2020 年の強度画像にシアン色を，2016 年に赤色を与え，この間に建物が取り壊されると赤く，新築されるとシアン色に見えるようにした．同様にこれら 2 時期の間の後方散乱係数の差分，相関，それにコヒーレンスを計算し図示した．これらの変化指標のうち，市街地の建物の解体撤去や新築が視覚的に最もよく分かるのは，カラー合成と差分であった．変化が明瞭に観察される 4 つの地区に関して，以下に詳細に状況を観察する．

3. 主な中心市街地における復旧・復興状況

益城町の中心市街地の 4 地区の 4 年間における変容を**図 4** に示す．図には，PALSAR-2 画像のカラー合成の拡大図に加えて，ほぼ該当する時期における Google Earth の光学画像を比較する．

(1) 木山地区

図 3 の範囲 A は，中心市街地の北方に位置する田園地帯で，もともと畑やビニールハウスなどが広がっていた．建物が少ないこともあって，地震による被害は比較的少なかった．地震後の大きな変化は，画像中央北の農地に，町内で 2 番目の規模の木山仮設団地(220 戸)が建てられたことである．このプレハブ団地は地震発生後 3.5 ヶ月程度で完成し[10]，現在も残っているため（2020 年末にすべての仮設住宅は木山団地に集約された），SAR 画像の 2 時期間では変化は見られない．また，益城幼稚園の東側の農地には，2017 年に仮設の町役場庁舎が建てられた．この建設は 2016 年 11 月以降だったため，カラー合成図ではシアン色に表示されている．仮設庁舎の更に南には，恒久復興住宅（木山下辻団地[15]，120 戸，2020 年 3 月完成）の 5 階建 4 棟が建設されたことが光学画像より分かる．その他のカラー合成図における着色部は，農地利用の変化と考えられる．

(2) 馬水・安永地区

図 3 の範囲 B は，農地の中に新しく住宅地が開発されていった地域である．ここでも馬水東道仮設団地（56 戸，西側上）と馬水仮設団地（77 戸，西側下）が，地震約 3 か月後に農地を転用して造られたが[10]，2020 年にはすでに解体撤去され農地に戻っている．また，農地を転用して 2 カ所の復興住宅[15]（馬水団地(108 戸)，安永団地(93 戸)，2020 年 3 月完成，各 5 階建 2 棟）が建設されたことが光学画像より分かる．しかしこれらの変化は，農地の改変などもあり，SAR 画像上でさほど明確ではない．

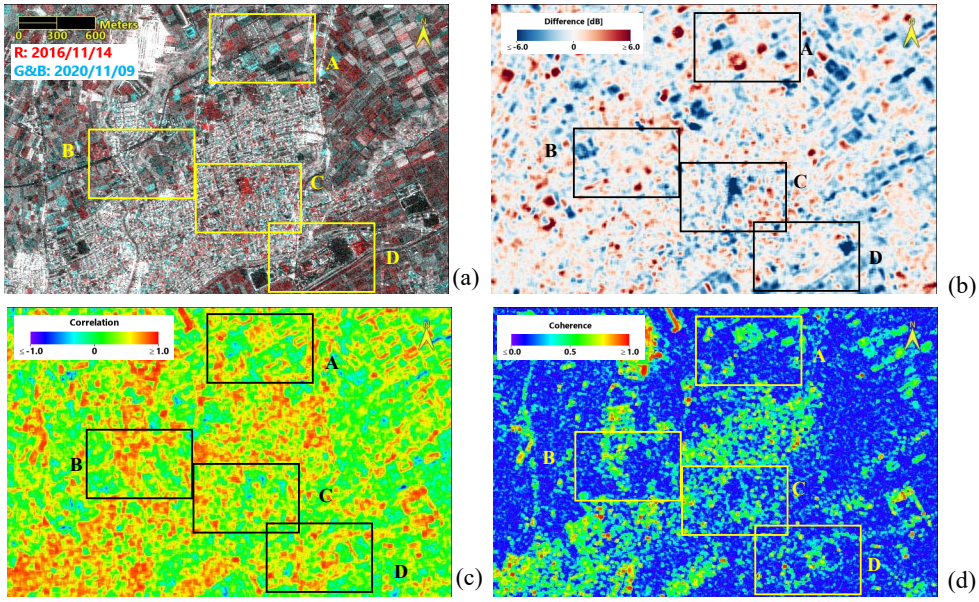


図 3 益城町中心部の ALOS-2 画像による 2016/11/14 から 2020/11/09 の間の変化抽出結果
（左上：カラー合成，右上：差分，左下：相関，右下：コヒーレンス）

図 4 益城町 4 地区の 4 年間における変容（左：SAR カラー合成，中央：Google Earth 2016 年，右：同 2020 年）

(3) 宮園地区

図 3 の範囲 C は，益城町役場などが立地する町の中心部であるとともに，地震による被害が最も大きかった地区である．役場庁舎は地震直後には災害対応に使用されていたが，基礎杭などの被害が大きく復旧困難との判断となり，2017 年 12 月から 2018 年 7 月にかけて解体撤去された．新庁舎は同じ場所に 2021 年 3 月から建設が始まり現在工事中である [16]．撮影 2 時期の間で建物から更地に変化したため，SAR 画像上で明瞭な変化（強度低下，赤色）が見られる．役場庁舎の南側の県道 28 号線に沿った住宅・商業地は，地震で最も被害が大きかった地域である．地震後 4 年半を経過しても更地が多く，SAR 画像上で取り壊した建物（赤色）と新築した建物（シアン色）が混ざった状態である．役場庁舎の道を挟んだ東側には，復興住宅 [15]の市ノ後第 2 団地（40 戸， 2020 年 3 月完成，鉄筋コンクリート 5 階建 1 棟）が建設されている．

(4) 総合運動公園地区

益城町総合体育館を含む総合運動公園は，地震後の最大の避難所および応急対応基地となった場所である．総合体育館は，1998 年に竣工した比較的新しい建物であったが，基礎杭の破損などの被害により 2017 年 9 月から 18 年 3 月にかけて解体された．新体育館は同じ場所に 2018 年 9 月から 2020 年 7 月にかけて再建された．形は異なるが同じ場所に再建されたため，SAR 画像上での変化は小さい．陸上競技場を挟んだ東側の敷地は，震災後は瓦礫置き場になっていたが，その後は駐車場や空地となったため SAR 画像上での変化が大きい．また，敷地南側の木山川では堤防護岸の大規模改修が行われたため，SAR 画像上でも変化が明瞭である．

益城町の被災状況とその後の復旧・復興状況を観察するために筆者らはこれまでに延べ 7 回の現地調査を行った (2016/4/16-17, 6/6-7, 7/3-4, 8/8-9, 2018/4/19-20, 2020/7/21, 2021/12/23-24)．**図 5** は 2021 年 12 月の調査時に撮影した UAV 空撮画像である．いまだ更地が多く広がっており，復興まで時間がかかるものと思われる．

図 5 秋津川南方からの UAV 空撮画像（上：宮園地区(北方)を望む，下：総合運動公園(東方)を望む）

4. まとめ

本研究では，2016 年熊本地震以降に撮影された多時期の ALOS-2 画像を用いて，益城町における復興状況のモニタリングを行った．植生などによる季節変動の影響が大きいため，地震後毎年 11 月に撮影された画像に基づいて，市街地の変化を後方散乱係数のカラー合成，差分，相関，コヒーレンス等の指標を用いて観察した．その結果，被災建物の撤去，仮設住宅の建設，復興住宅の建設などの 6 年間の変化を把握することができた．またこの結果を現地調査や光学画像により検証した．今後とも復興の進展を継続的に見守っていきたいと考えている．

謝辞　本研究で使用した ALOS-2 画像は，JAXA の大規模災害衛星画像解析支援チーム課題別研究を通して提供を受けた．また，本研究の実施にあたり，科学研究費補助金(21H01598)の助成を受けた．

参考文献

1) 松岡昌志，山崎文雄：人工衛星 SAR 強度画像を用いた被害地域検出手法の最近の地震への適用とその妥当性の検討，日本建築学会構造系論文集，No. 558, pp. 139-147, 2002.
2) リュウ・ウェン，山崎文雄，郷右近英臣，越村俊一：高解像度 SAR 画像を用いた東北地方太平洋沖地震における津波湛水域と建物被害の抽出，日本地震工学会論文集，Vol. 12, No. 6(特集号), pp. 73-85, 2012.
3) 吉原 弘一郎, 羽柴 秀樹：複数の高分解能衛星画像を用いたスマトラ島沖地震の長期的な被災地再開発の特徴分析，土木学会論文集，F3, 73(2), pp. 338-346, 2017.
4) Hoshi T, Murao O, Yoshino K, Yamazaki F, Estrada M, Post-disaster urban recovery monitoring in Pisco after the 2007 Peru earthquake using satellite image, Journal of Disaster Research, 9(6), pp. 1059-1068, 2014.
5) Meslem A, Yamazaki F, Maruyama Y, Benouar D, Kibboua A, Mehani Y, The effects of building characteristics and site conditions on the damage distribution in Boumerdes after the 2003 Algeria earthquake. Earthquake Spectra, 28(1), pp. 185–216, 2012.
6) Hashemi-Parast SO, Yamazaki F, Liu W, Monitoring and evaluation of the urban reconstruction process in Bam, Iran, after the 2003 Mw6.6 earthquake, Natural Hazards, 85(1), pp.197-213, 2017.
7) 村上亮，藤原智，斉藤隆：干渉合成開口レーダーを使用した平成 7 年兵庫県南部地震による地殻変動の検出，国土地理院時報，83, pp 24-27, 1995.
8) 加藤圭太，山崎文雄：ALOS/PALSAR 画像を用いた 2008 年岩手・宮城内陸地震による水域の変化抽出,日本地震工学会論文集，Vol. 10, No. 3, pp. 1-11, 2010.
9) JAXA EORC web サイト：ALOS-2 プロジェクト / PALSAR-2, https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/about/jpalsar2.htm
10) 熊本県益城町：平成 28 年熊本地震　益城町による対応の検証報告書，2017.
11) 国土技術政策総合研究所，建築研究所：平成 28 年(2016 年)熊本地震建築物被害調査報告（速報），国総研資料 第 929 号（建築研究資料 第 173 号），2016.
12) Naito S, Hao KX, Senna S, Saeki T, Nakamura H, Fujiwara H, Azuma T, Investigation of damages in immediate vicinity of co-seismic faults during the 2016 Kumamoto Earthquake, Journal of Disaster Research, 12(5), pp. 899-915, 2017.
13) 須藤巧哉，山崎文雄，松岡昌志，井ノ口宗成，堀江啓，劉ウェン：益城町の罹災証明データに基づく 2016 年熊本地震に対する建物被害関数の構築，日本地震工学会論文集， 19(4), pp. 13-31, 2019.
14) Liu W, Yamazaki F, Extraction of collapsed buildings due to the 2016 Kumamoto earthquake based on multi-temporal PALSAR-2 data, Journal of Disaster Research, 12(2), pp. 241-250, 2017.
15) 益城町 Web Page：町営住宅位置図. https://www.town.mashiki.lg.jp/kiji0032591/index.html
16) 益城町 Web Page：新庁舎建設事業. https://www.town.mashiki.lg.jp/list01078.html

常時微動観測による地震動の補正と木造住宅の倒壊シミュレーションを用いた道路閉塞率の算出

Correction of Seismic Motion by Microtremor Observation and Calculation of Road Blockage Rate Using Collapse Simulation of Wooden Houses

○中村 友紀恵[1]，山田 雅行[2]，羽田 浩二[3]，原 忠[4]
Yukie NAKAMURA[1]， Masayuki YAMADA[2]， Koji HADA[3]， and Tadashi HARA[4]

[1] (株)ニュージェック原子力耐震グループ
Seismic Engineering Group, NEWJEC Inc.
[2] (株)ニュージェック研究開発グループ
Research and Development Group, NEWJEC Inc.
[3] (株)ニュージェック建築グループ
Architecture Group, NEWJEC Inc.
[4] 高知大学防災推進センター
Center for Disaster Prevention Promotion, Kochi University

In coastal plains, building collapse and tsunami damage are predicted due to the Nankai megathrust earthquakes. The purpose of this research is to identify roads that may be blocked by the collapse of wooden houses in order to achieve rapid evacuation from tsunami. We observed microtremors in coastal plains of Kochi prefecture and created seismic motions in each 50 m-size mesh. Using the seismic motion, we conducted collapse simulations by the distinct element method for areas crowded with wooden houses. And the road blockage rate is calculated from the amount of movement and the direction of the elements constituting the house model. As a result, it is clarified where the road with high possibility of evacuation difficulty is located and the main factor of the road blockage is the width of the road.

Keywords *: Microtremor Observation, Distinct Element Method, Road Blockage*

１．はじめに

近い将来の発生確率が高まる南海トラフ巨大地震では，西日本一帯で甚大な被害が予測されている．特に，海岸平野部では強い揺れによる住宅の倒壊や津波の来襲が予測され，迅速な津波避難を実現するため道路閉塞箇所を事前に把握することが求められている．

筆者ら [1),2)]は，南海トラフ地震発生時に大きな揺れと津波被害が予測されている高知県の軟弱な海岸平野部に立地する木造住宅を対象に，個別要素法を用いた倒壊シミュレーションを実施してきた．これまでに，地盤の局所的な堆積構造の違いを結果に反映させるため，50m メッシュ毎の常時微動観測の結果を用いて地震動の補正を行い，作成した地震動に基づく倒壊シミュレーションを検討してきた [3)].

本報では，既往研究 [3)]と同手法を用いて，広域な範囲の住宅モデルを作成し，50m メッシュ毎の地震動に基づく倒壊シミュレーションを実施した．さらに，得られた結果よりモデル化した住宅を構成する要素の移動量や方向から道路閉塞率を算出し，閉塞率の高い道路の特徴について考察する．

２．木造住宅のモデル化

(1) 対象地域の概要

対象地域は高知県の中西部に位置する高岡郡中土佐町久礼地区である．南海トラフ地震の被害想定(L2)[4)]によると，震度6強～7，津波浸水深10～15m，浸水予測時間10～20分と短く，地震発生後の迅速な津波避難が求められる地域である．倒壊シミュレーションの住宅件数は，旧耐震住宅1,035軒，新耐震住宅244軒，S造9軒，RC造23軒の合計1,311軒である(図-1)．道路閉塞率の算出対象となる住宅と近接する道路の本数は206本で，道路幅は4m未満の狭い道路が多くみられる事が特徴である．

(2) 住宅モデルの概要

住宅のモデル化は，広域な範囲を対象とするため，個別要素法を用いて直径3mの球要素の集合体を実在する住宅形状に合わせるように作成し，球要素の接触バネを梁・柱とみなした(図-2-a))．

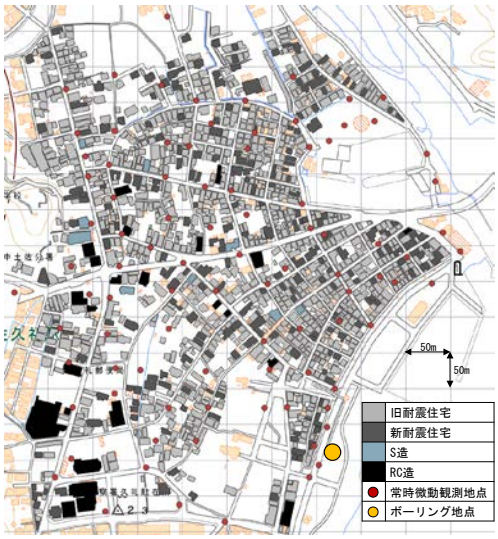
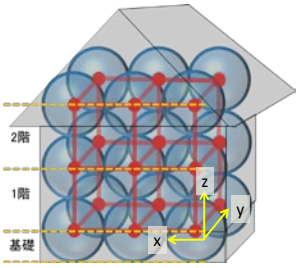


図-1　対象住宅と常時微動観測位置（地理院地図 [5)]に加筆）

住宅モデルに与えたパラメーターは，要素の単位質量，梁・柱の剛性と強度(新耐震，旧耐震)を設定した．既往の研究[6]で実測とモデルの固有周期を比較し実測の固有周期にモデルの固有周期が近似した値を得られたことにより，球の大きさ，質量，剛性に関しての妥当性が確認されたものと等しい値を用いた(図-2-b)).

強度は耐力壁の面内せん断試験[7] の結果から耐力の平均値(17.29kN)を参考に，内閣府中央防災会議[8]の建物の被害率曲線の範囲に入るように旧耐震住宅を平均値の1.25倍，新耐震住宅を平均値の2倍の値に設定した．本研究は木造住宅を対象としているため，S造，RC造の住宅は倒壊しないものとし，柱の強度を木造住宅の100倍の値に設定した．



要素(直径3m)
・梁(長さ3m)

a)住宅モデルのイメージ

要素(球)	
直径	3.0m ※高さ方向に関しては平屋2球，2階建て3球
単位質量	0.066ton/m³
梁・柱	
梁・柱の長さ	3.0m
せん断剛性	8800kN/m²
強度　新耐震住宅 旧耐震住宅	34.59kN 21.62kN

b)入力パラメーター

図-2　住宅モデルの概要[6]

3．50mメッシュの地震動作成

(1)常時微動観測

常時微動観測は微動計 JU210 を用いた．各地点 11 分間の観測を行い，得られたデータから H/V スペクトル比を算出した．常時微動 H/V スペクトル比の算出は，11 分間の記録から 40.96 秒間のデータを 5 区間抽出し，その平均値とした．水平成分に関しては，直交する 2 成分(NS，EW)の相乗平均とした．算出した H/V スペクトル比の振幅が最も卓越するピーク周波数とその振幅を読み取ることを基本とした．同等の卓越するピークが 2 つ以上ある場合は，1 次固有周波数と考えられる低周波数側のピークを読み取った．観測地点は図-1 の赤丸で示す 92 地点で 50m メッシュに 1 地点の観測点を設けた．

(2)50m メッシュの地震動作成方法

図-3 は高知県南海トラフ地震対策課提供の浅部地盤モデルより算出した伝達関数(図中，浅部地盤モデルの伝達関数)とボーリングデータより算出した線形の伝達関数(図中，既知点の伝達関数)，ボーリング地点近傍の H/V スペクトル比(図中，既知地点の H/V スペクトル比)を比較した結果である．既知地点の伝達関数のピーク周波数と既知地点の H/V スペクトル比の低周波側のピーク周波数はいずれも 2.4Hz で一致している．しかし，浅部地盤モデルの伝達関数のピーク周波数は 4.9Hz で既知地点の伝達関数のピーク周波数と一致していない．すなわち，浅部地盤モデルはリスクの低い検討であると考えられる．そこで，対象地域の地盤の堆積構造を反映させた地震動を用いた倒壊シミュレーションの実施を検討した．

地震動の作成方法は既往研究 [9]と同手法であるため，ここでは図-4 のフローを用いて概要を述べることとする．

はじめに，対象地域の線形の伝達関数と非線形の伝達関数を算出した(図-4-①)．伝達関数の算出に用いる地盤モデルは，柱状図から層厚，土質区分，S 波速度を読み取った．動的変形特性，湿潤密度，減衰定数はボーリング地点の高知県の浅部地盤モデルを参照し，土質区分に対応する値とした．工学的基盤の地震波形は，高知県想定(H25)L2_南海トラフモデル工学的基盤の地震動を用いて線形解析，等価線形解析(SHAKE)により求めた．

次に，地盤の非線形性を考慮するため，既知地点の H/V スペクトル比と未知地点の H/V スペクトル比を低周波側へシフトした(図-4-②)．H/V スペクトル比のシフト量はボーリング地点の線形の伝達関数と非線形の伝達関数のピーク周波数より 0.27 倍とした．H/V スペクトル比のシフトの例を図-5 に示す．

次に，地震動算出に用いる未知地点の伝達関数をピーク周波数を変更して算出する方法と，ピーク周波数と振幅を変更して算出する方法の 2 通りで算出した(図-4-③)．高知県想定(H25)L2_南海トラフモデル工学的基盤の地震動にそれぞれの未知地点の伝達関数を乗じて地表面の地震動を算出し(図-4-④)，算出した地震動の震度階級が大きくなる方法を採用した(図-4-⑤)．

ただし，ピーク周波数と振幅を補正する方法で，未知地点の伝達関数のピーク周波数が未知地点の H/V スペクトル比のピーク周波数と一致しない場合は，震度階級の大小に関わらず，ピーク周波数のみを補正する方法を採用した．なお，住宅密集地内で常時微動観測を実施していない地点では，周りの補正結果から計測震度の平均に最も近い値を用いて補間を行った．

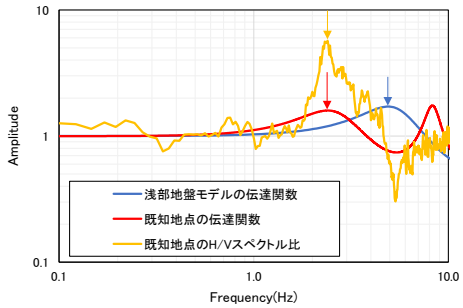


図-3　各伝達関数と H/V スペクトル比の比較

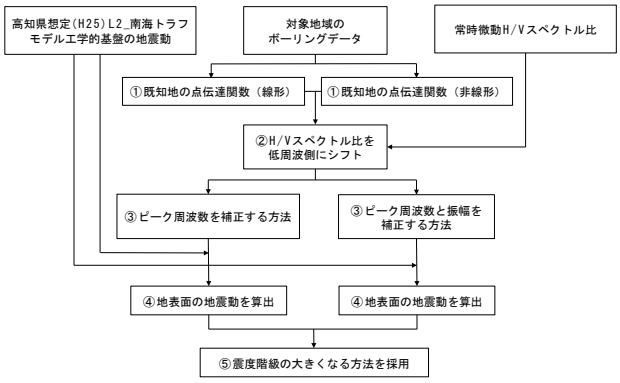


図-4　未知地点の算出フロー[9]

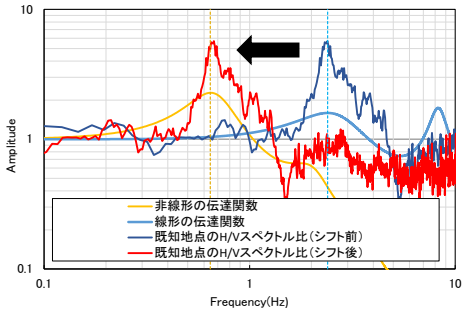


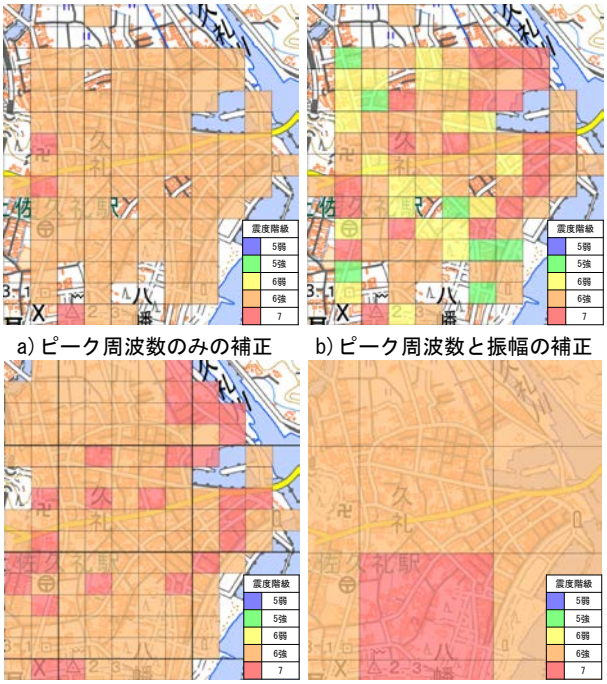
図-5　非線形を考慮したシフトの例

(3) 50m メッシュの地震動作成結果

2 通りの補正方法で未知地点の地震動を算出し，震度階級で整理した結果を**図-6-a)**，**図-6-b)**に示す．

図-6-a)はほぼ全域で震度 6 強を示し，中西部や南部の一部で震度 7 が確認できる．**図-6-b)**は震度 5 強～7 までが点在する．**図-6-c)**の採用値の震度分布は広範囲で震度 6 強，北東の河川沿いで震度 7，中部や南部では震度 7 が点在する．**図-6-d)**の高知県想定 [4]の震度分布は 250m メッシュで表されており，中部から南部にかけて震度 7 を示しそのほかの地域は震度 6 強を示している．

図-6-c)の採用値の震度分布と**図-6-d)**の高知県想定 [4]の震度分布を比べると，地域内で確認できる震度階級は 6 強～7 であるが，震度 7 を示す箇所はほとんどが一致していないことが分かる．



a) ピーク周波数のみの補正　b) ピーク周波数と振幅の補正

c) 採用値　d) 高知県想定 [4]

図-6　震度分布図(地理院地図 [5]に加筆)

4．木造住宅の倒壊シミュレーション

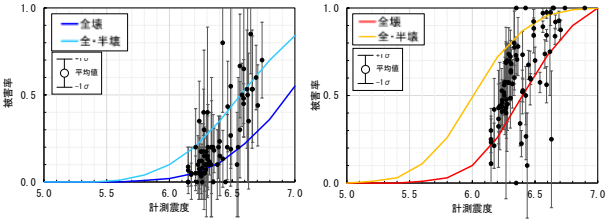
(1) 倒壊シミュレーションの概要

広域な範囲を対象とした倒壊シミュレーションを実施するにあたり，各住宅の物性を正確に再現することは難しい．本研究では木造住宅が倒壊する要因は地震動の影響が大きいと考え，木造住宅の平均的な壊れやすさを検討することで住宅の倒壊割合を算出することとした．住宅ごとの物性の違いは，耐力壁の面内せん断試験 [7]の結果から強度の標準偏差を算出し，正規乱数を用いて住宅ごとにバラツキを与えることとした．さらに，各住宅に与える強度をケースごとに変更し，10 ケースの倒壊シミュレーションを実施した．倒壊シミュレーションのケース数は一部区画の道路を対象に 100 ケースの倒壊シミュレーションを行い，道路閉塞率を算出することで最適なケース数を検討した．結果からケース数を増やした場合でも 10 ケースの道路閉塞率とほぼ同じ値が得られたため，最適なケース数は 10 ケースと判断した．

住宅モデルを倒壊と判断する基準は，各住宅モデルの 1 階と 2 階のそれぞれの柱の本数に対して，破壊した柱の本数が半数以上確認される場合とした．したがって，倒壊と判断されるパターンは 1 階のみ倒壊，2 階のみ倒壊，1 階と 2 階ともに倒壊の 3 パターンとなる．

倒壊シミュレーションの結果より 50m メッシュの地震動ごとに被害率を算出した．被害率は住宅の倒壊軒数を全住宅軒数で除すことにより算出した．算出した計測震度と被害率の関係を**図-7** に示す．図中の曲線は過去の大地震の被害率から内閣府中央防災会議 [8]により作成された，計測震度と全壊率・半壊率の相関曲線(建物の被害率曲線)である．図中のプロットは 10 ケースの倒壊シミュレーション結果より算出した被害率の平均値で，値のバラツキを示すため±1σ(エラーバー)を表記している．

新耐震住宅(**図-7-a)**)は，計測震度が 6.2 から 6.7 へと高くなるにつれて，被害率の平均値はややばらつきはあるものの，0.1 から 0.5 へと上昇する傾向を示した．旧耐震住宅(**図-7-b)**)は，計測震度が 6.2 から 7 へと高くなるにつれて，被害率の平均値は 0.2 から 1 へと高くなる傾向を示した．住宅の築年数(新耐震・旧耐震)を比較すると，計測震度が等しい値でも新耐震住宅の被害率が低い値を示した．すなわち，住宅の倒壊は築年数(新耐震・旧耐震)や地震動の大きさが影響していると考えられる．



a) 新耐震住宅　b) 旧耐震住宅

図-7　50m メッシュの地震動ごとの計測震度と被害率の関係
(建物の被害率曲線 [8]を加筆)

(2) 道路閉塞率の算出方法

道路閉塞は倒壊した要素の移動量が道路幅の 50%以上を占める場合を閉塞と判断し，道路閉塞率は各道路の閉塞回数を解析ケース数(10 ケース)で除した値とした．

久礼地区の一部地域では 3m 程度(住宅の 1 階部分に相当)の高低差が確認されたため，高低差の考慮を行った．具体的には，該当住宅モデルの柱の破壊位置を確認し，2 階の柱が破壊している場合に限り，閉塞と判断した．

(3) 道路閉塞率の算出結果

図-8は道路閉塞率ごとの道路本数を道路幅別(4m以上，4m未満)に示しており，棒グラフ上に記載の数字は道路本数を表している．**図-9**は道路閉塞率の算出結果を示し，住宅は新耐震，耐震，S造，RC造を区別している．両図は道路閉塞率が0%から19.9%区切りで低いものを青色，高くなるにつれて赤色を示すよう色分けを行った．

図-8の結果から道路本数206本のうち，道路閉塞率が40%未満の道路は125本で全道路本数の6割が該当し，道路閉塞率が80%以上の道路は21本で全道路本数の1割が該当する結果となった．道路閉塞率が40%未満の道路のうち82本が道路幅4m以上で，道路閉塞率が80%以上の道路のうち19本が道路幅4m未満であることから，幅員の広い道路では閉塞率が低くなり，幅員の狭い道路で道路閉塞率が高くなるといえる．

図-9の結果から道路閉塞率が低い値を示している箇所は中央を通る県道や左側を通る主要な生活道路などの幅員の広い道路であることが分かる．幅員が4m以下でも新耐震住宅が隣接している道路は閉塞率が比較的低い傾向を示した．一方，道路閉塞率が高くなる傾向を示したの

は，対象地域内の南東部や中央を通る県道よりやや北側の対面通行が困難であるような狭隘な道路であった．

道路閉塞率が高い値を示す箇所のうち，南東部(ボーリング地点より100m北側)では幅員が4m以上の道路も見られた．幅員が4m以上の道路で倒壊確率が高い値を示した要因は，震度階級が震度7と大きく該当道路近傍の住宅，特に旧耐震住宅が高確率で倒壊したためと考えられる．

震度階級に着目すると，北東を流れる河川沿いや中部に点在して震度7を示す地域の道路閉塞率はやや高くなる傾向を示している．しかしながら，震度7を示す地域でも中東部の新耐震住宅が多く隣接する箇所や中央を通る県道，左側を通る主要な生活道路のように特に幅員の広い道路では道路閉塞率が低い箇所も見られた．震度6強の地域でも隣接する住宅が旧耐震住宅のみの道路では道路閉塞率が高くなる傾向を示した．

住宅の築年数(新耐震・旧耐震)に着目すると，道路に隣接する住宅に旧耐震住宅が存在するとその住宅の影響により閉塞率が高くなる道路が見られた．該当する道路は少ないものの，新耐震住宅が多く隣接する道路は前述した通り道路幅や震度階級に関わらず道路閉塞率が低くなる傾向を示すため，道路に隣接する住宅の耐震化が進めば，道路閉塞率が低下する可能性が高いと考えられる．

道路閉塞の要因は，道路の幅員，地震動の違い，住宅の築年数(新耐震・旧耐震)，階数等が挙げられるが，対象地域内の約 9 割が木造 2 階建てで約 8 割が旧耐震住宅であることや，震度 7 を示す地域でも，幅員の広い箇所では道路閉塞率が低くなることを考慮すると，道路幅が道路閉塞の主要因であることが推察できる．

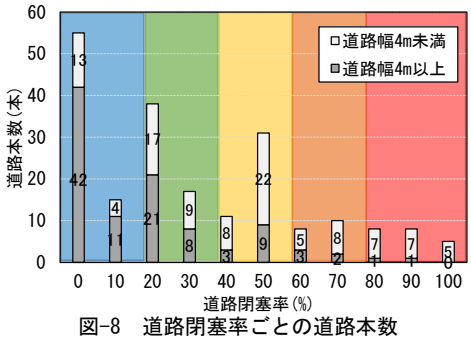


図-8　道路閉塞率ごとの道路本数

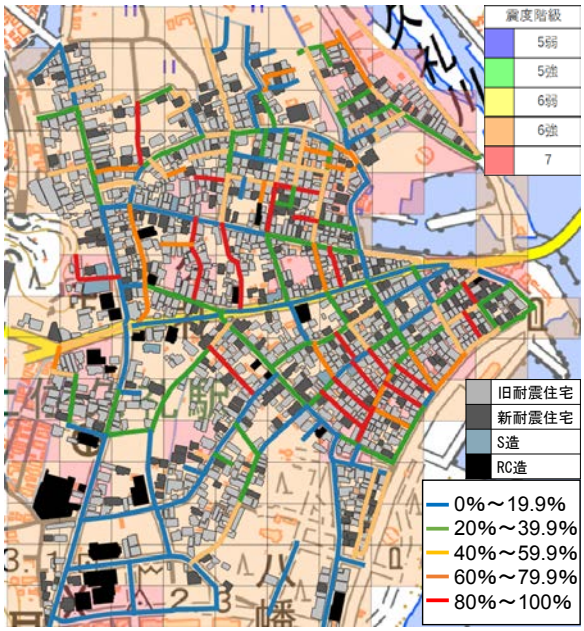


図-9　道路閉塞率の算出結果（地理院地図[5]に加筆）

広域な範囲の倒壊シミュレーションを実施することで，対象とする地域内の道路閉塞による避難困難の可能性が高い道路を明確にし，住宅の耐震化の促進や道路閉塞率の低い道路を優先した避難路の提案等に役立てることができる．

５．まとめ

南海トラフ巨大地震発生時に強い揺れと津波被害が予測される地域の木造住宅を対象に，50m メッシュごとの地震動を作成した．作成した地震動を用いた個別要素法による倒壊シミュレーションを実施し，道路閉塞率を算出した結果，以下の知見が得られた．

1. 50m メッシュごとに地盤の堆積構造を反映させた地震動を作成することで，対象地域内の震度階級の違いを明確にすることができた．
2. 被害率の結果から，住宅の倒壊は築年数(新耐震・旧耐震)や地震動の大きさが影響していると考えられる．
3. 倒壊シミュレーションの結果を地図上で表すことで，閉塞率が高くなる道路を明確にすることができた．
4. 道路閉塞率は幅員が 4m以上の道路では低くなり，幅員が 4m 未満の道路では高くなる傾向を示した．
5. 道路閉塞の要因は道路幅の影響が大きいと考えられるが，幅員が 4m 以上または 4m 未満でも地震動の違いや，新耐震住宅の有無により道路閉塞率が異なる結果を示した．

謝辞

本研究を実施するにあたり，中土佐町危機管理課 小松賢介氏，岩瀬和廣氏，市川大介氏，中土佐町にお住いの方々の協力を得ました．作図には，QGIS3.8.1 を使用しました．ここに記して深謝の意を表します．

参考文献

1) 原ら：個別要素法による海岸平野部に立地する木造住宅の倒壊予測，第 54 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1615-1616，2019.

2) 中村ら：個別要素法を用いた木造住宅の倒壊シミュレーションによる道路閉塞率の算出，地域安全学会梗概集，No.44，pp.21-22，2019.

3) 西村ら：常時微動 H/V スペクトルに基づく想定地震動を用いた木造住宅の倒壊予測，第 56 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.13-9-5-04，2021.

4) 高知県防災マップ：[高知県版第 2 弾]南海トラフの巨大地震による震度分布・津波浸水予測(http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/)，2012/12/10 公表.

5) 国土地理院：電子地形図(https://88sekaiisan.org/map/#8/34.200445/133.879395/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1)(2022.3.14 閲覧) .

6) 原ら：道路閉塞率の算出を目的とした木造住宅の倒壊シミュレーション(その 1)－実在住宅とモデルの固有周期の比較－，地盤工学会四国支部平成 30 年度技術研究発表会講演概要集，pp.103-104，2018.

7) 山辺豊彦：ヤマベの木造構造 増補改訂版，株式会社エクスナレッジ，2013.

8) 内閣府中央防災会議：南海トラフの巨大地震建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要建物被害の計算方法，2017.

9) 原ら：常時微動 H/V スペクトルに基づいた地震動の推定の試み，地盤工学会四国支部令和 2 年度技術研究発表会講演概要集，pp.27-2，2020.

個別要素法を用いた土砂災害による木造家屋倒壊メカニズムの基礎的検討
Collapse Mechanism of Wooden House by Landslide Disaster Using Distinct Element Method

○小林 純平[1], 中嶋 唯貴[2], 小松 陸歩[3]
Jumpei KOBAYASHI[1], Tadayoshi NAKASHIMA[2], Rikuho KOMATSU[3]

[1] 北海道大学大学院工学院建築都市空間デザイン専攻
Department of Architecture and Urban Space Design, Graduate School of Engineering, Hokkaido University
[2] 北海道大学大学院工学研究院 准教授・博士（工学）
Associate Professor, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Dr.Eng.
[3]元・北海道大学工学部
Former Hokkaido University

36 people were killed by landslides in Atsuma due to the 2018 Hokkaido earthquake. It was found that most of the fatalities occurred on the ground floor, and it should be possible to significantly reduce the risk of death depending on the collapse process. Therefore, this study attempted to reproduce the collapse process of a building caused by a landslide disaster using the Distinct Element Method. The analysis was performed by setting the tangential contact force, normal contact force, and friction force between the elements of the building model and varying the height and velocity of the sediment.

Keywords *: Distinct Element Method, Building Collapse Process, landslide Disaster, Building Damage*

1. はじめに

2018 年北海道胆振東部地震が発生し厚真町において土砂災害により 36 名の死者が発生した。近年においても土砂災害において多数の死者が本邦において発生しているが、国土交通省によれば、土砂災害危険地域に人口の 4.9%[1)]が住んでいると推定されており、これだけの規模を移住や避難のみで対策を行うには無理が生じる。また、土砂災害に関する住宅における対策は土砂災害特別警戒区域に指定された場所における性能規定だけとなっており住まい手側から取れる対策はほぼ皆無である [2)] 。しかし、厚真町における全世帯アンケート調査によると死者 36 名のうち 10 名の死者発生世帯から回答を得ており、1 階と 2 階に 11 名と 9 名とほぼ同数の在宅者がいたにもかかわらず[3)]、回答者世帯の中では2階では死亡者が発生していない。このように住まい手が発生時に在宅している場所や敷地内における住宅建設の配置、住宅の居室の空間構成などで人的被害発生リスクを減少させる可能性を有している。そしてこれには土砂災害に伴う建物崩壊メカニズムが大きく関係していると考えられる。

土砂災害に対する被害の研究については、三浦ら [4)]による木造住宅倒壊解析ソフトウェア wallstat を用いたものがあり土石流の高さから被害評価を行っている。本研究では、1 階・2 階における死亡リスクの差異が土砂災害による建物倒壊のメカニズムに関係していると仮定し、個別要素法を用い土砂災害による土砂スピードと土砂圧を変化させることにより、建物崩壊過程を個別要素法で再現することを試みる。

2. 土砂崩れに伴う建物崩壊シミュレーション

2.1. 建物・土石流モデルの作成

本解析には Itasca 社の 3DEC5.2 を使用する。本解析では縦横 4.16m 高さ 6.1m の木造建物モデルを作成し、建物密度は松本 [5)]を参考に柱を 0.38 g/cm^3、天井スラブには屋根等の重量が加算されているとして 1.0g/cm^3 とした。なお、今回使用するソフトウェアの性質上、梁は設けずスラブにほぞを設けることで崩壊時の粘りを再現する。

土砂の密度は厚真町における斜面崩壊地の土砂密度より 2.5g/cm^3 とし土石モデルの高さは 1m,1.8m,2.6m,3.4m の 4 パターンを、土砂の速度は国土交通省による土砂速度 20～40km/h[6)]という数値を参考に速度 10km/h と 30km/h を用いた。

2.2. 使用パラメータ

本解析では 2 つ以上の要素に対してそれらが接触した場合に用いる境界パラメータを設定した。境界パラメータは要素間における接線方向の接触力jknと法線方向の接触力 jks と摩擦力の 3 つである。作成した要素を 1 階柱などの項目に分け項目間に境界パラメータを設定した。表 1 に値を示す。jkn 及び jks は 2 種類のパラメータを変更しながらシミュレーションを行った。通常部位ごとにばね係数摩擦力を変化させることが必要となるが、本論においては倒壊メカニズムのみを対象にしているためすべての接合部で値を同じとしている。

表 1　設定パラメータ

	jkn	jks	摩擦力
1階柱・1階床	1.0×10^8	1.0×10^8	0.9
1階柱・2階床	1.0×10^8	1.0×10^8	0.9
2階柱・2階床	$1.0\times10^8/1.0\times10^9$	$1.0\times10^8/1.0\times10^9$	0.9
2階柱・2階天井	$1.0\times10^8/1.0\times10^9$	$1.0\times10^8/1.0\times10^9$	0.9
1階柱・土砂	1.0×10^8	1.0×10^8	0.9
2階柱・土砂	1.0×10^8	1.0×10^8	0.9
1階床・基礎	1.0×10^8	1.0×10^8	0.9

3. シミュレーション結果

最初に、jkn 及び jkn をすべて 1.00×10^8 に設定し、速度 10km/h,30km/と高さ 1.0m,1.8m,2.6m,3.4m を組み合わせた合計 8 パターンに関してシミュレーションを行った。崩壊の定義を建物モデルの 2 階の天井が土砂に接触した段階とした。その結果 8 パターン中 7 パターンで建物が崩壊した。土砂高さ 2.6m,速さ 30km/h の場合のみ 2 階部分が土砂の上に乗り形状を保った。土砂速度が遅いパターンにおいて倒壊したのは、土砂速度が遅い場合、1 階部の接合部の摩擦力が二階へ伝播し 2 階が傾き始めるからであることが図 1 より見て取れる。土砂高さが低い 1.0m の場合だと 1 階が崩れた段階で 2 階の形状は保たれているが 2 階が土砂に衝突したときに崩れており 2 階部の接合部の強度が生存空間確保に影響することが考えられる。また倒壊までの時間は、長くて2.5秒ほどと土砂災害発生後においては、避難の余裕などないことが分かる。加えて、土砂速度が速くなると崩壊時間は短くなり、土砂高さが高くなると、倒壊時間は 1 秒を切っている。

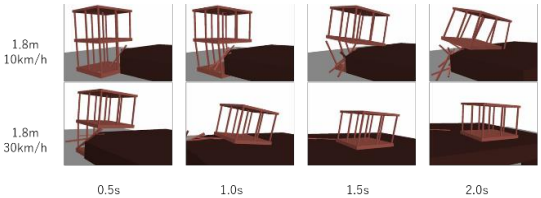


図 1　2 階部残存時における建物崩壊過程の比較

2 階部の生存空間を保持するため、建物の 2 階部分のみを補強すべく、2 階柱・2 階床、2 階柱・2 階天井の jkn 及び jks を 1.00×10^9 に変更し、土砂モデルは同じとし 8 パターンに関してシミュレーションを行った。2 階部の補強前と補強後の結果に関して崩壊した場合を×、2 階部分が残存した場合を○として表 2 にまとめた。補強の結果、8 パターン中 5 パターンで 2 階部分が残存した。2.6m での 10km/h の場合も 2.0s の段階で 2 階は残っているが柱が少し外れその後倒壊した。2 階部の空間が保たれた場合は、図 2 下部のように 1 階は倒壊するが、2 階は土砂の上に落下するものの剛性が高く、2 階部分は最後まで倒壊することがなかった。土石流高さ 3.4m の場合では土砂の高さが 2 階スラブの高さを超えており、すべてのパターンで崩壊した。2 階部が十分な耐力を有している場合、2 階床よりも土砂が低ければ、2 階部分の空間損失率は 0 に近く死者が発生しないであろうことが推測できる。

表 2　2 階部の崩壊と残存

1.00×10^8			2階のみ1.00×10^9		
	10km/h	30km/h		10km/h	30km/h
1m	×	×	1m	○	○
1.8m	×	○	1.8m	○	○
2.6m	×	×	2.6m	×	○
3.4m	×	×	3.4m	×	×

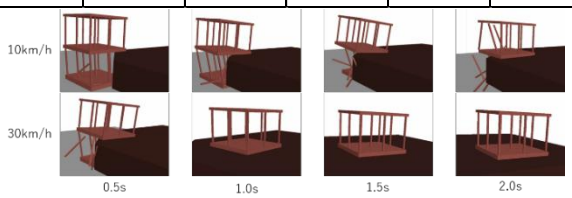
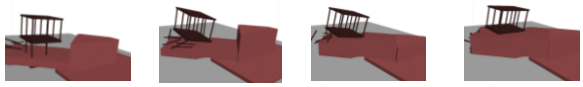


図 2　ばね定数 1.00×10^9, 土砂高さ 2.6m での崩壊過程

次に、土砂を細分化し、上記の条件と同様に土砂高さ、速度、jkn 及び jks を変化させた結果を表 3 に示す。崩壊の定義として、2 階床が大きく傾いた時・部材同士が非接触状態になった時を崩壊とした。結果 jkn 及び jks が 1.00×10^8 の時、8 パターン中 7 パターンで 2 階部分が崩壊したが、土砂高さ 1.0m 速度 30km/h（パターン①）の場合は細分化をしていない時と比べて 2 階部が落下せず残存した。2 階部の jkn 及び jks を 1.00×10^9 とした場合は、8 パターン中 3 パターンで崩壊した。土砂高さ 1.0m 速度 10km/h（パターン②）の場合崩壊しているが、2 階部分が他パターンに比べて土砂までの落下高さが大きく、傾きを持って土砂に接触し、細分化された土砂に次第に埋まっていき、傾きが大きくなるためそのまま床と柱が非接触状態となる。より本来の土砂に近い本解析では 2 階部分の剛性を大きくしたとしても、傾きが大きくなれば崩壊する結果となった。また傾きの発生が小さかった土砂高さ 1.8m 速度 10km/h（パターン③）、土砂高さ 2.6m 速度 10km/h（パターン④）の時は 2 階の形状を保ったまま土砂に埋まることで崩壊を免れる。

表 3　土砂細分化時の 2 階部の崩壊と残存

1.00×10^8			2階のみ1.00×10^9		
	10km/h	30km/h		10km/h	30km/h
1m	×	○	1m	×	○
1.8m	×	×	1.8m	○	○
2.6m	×	×	2.6m	○	○
3.4m	×	×	3.4m	×	×



パターン①　パターン②　パターン③　パターン④

図 3　土砂細分化時の建物残存・崩壊過程

4. まとめと今後の課題

個別要素法を用い、土砂災害時の建物倒壊を再現することで、2 階部の空間の残存には、土砂速度、土砂厚さ、2 階部の耐力が影響していることが明らかとなった。今後は、壁や開口部をモデルに加え、室内の生存空間のより詳細なシミュレーションを検討するとともに、居室の用途や敷地内における住宅建設位置の違いによる人的被害軽減効果の検討を実施していく所存である。

謝辞

本研究の実施に際し、本研究の一部は JSPS 科研費 21K1875701 の支援を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

1) 国土交通省第 4 審議会第 4 回計画部会・配布資料:資料 2-3 安全・安心で持続可能な国土の形成について　2014 年 11 月 14 日

2) 国土交通省 HP: 土砂災害防止法の概要（2020/01/20）

3) 西嘉山純一朗，中嶋唯貴，岡田成幸，寺西祐平:2018 年北海道胆振東部地震の被害調査 一厚真町全世帯アンケート調査の基礎解析－地域安全学会論文梗概集研究発表要旨 2019 年 11 月

4)三浦 弘之, 白川 隼也, 土石流高さに注目した数値解析に基づく木造家屋の倒壊危険度評価, 地域安全学会論文集, 2021, 39 巻, p. 73-79

5) 松本将武・岡田成幸・中嶋唯貴・田守伸一郎:地震時の木造建物崩壊過程における人的被害発生機構の推定, 地域安全学会論文集(CD-ROM) 33 259 – 266,2018

6) 国土交通省 HP:土石流とその対策
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/dosekiryuu_taisaku.html
（2020/01/20）

高精度位置・角度情報を用いた被写建造物の被災部位判定

Determination of the damaged part of a building in a photo using high-precision position and attitude information

冨永佳吾[1]，中嶋唯貴[2]，西嶋一欽[3]，友清衣利子[4]
Keigo TOMINAGA[1], Tadayosi NAKASHIMA[2],
Kazuyoshi NISHIJIMA[3], and Eriko TOMOKIYO[4]

[1] 北海道大学工学院 都市防災学研究室
Department of Urban Disaster Prevention, Faculty of Engineering, Hokkaido University
[2] 北海道大学工学研究院 建築都市部門 先端空間性能 准教授
Associate Professor, Department of Advanced Spatial Performance, , Department of Architecture and Urbanism
Hokkaido University Graduate School of Engineering
[3] 京都大学 防災研究所 准教授
Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
[4] 熊本大学 大学院先端科学研究院 准教授
Associate Professor, Graduate School of Advanced Science, Kumamoto University

In the aftermath of a disaster, a large amount of image data containing disaster information, including satellite images, aerial photos, drone images, and images taken on the ground, is collected by many organizations during their surveys. If there were a system that enables automated mapping of the the locations of the buildings with their damage degrees from the collected image data, the efforts required to organize each of these images manually would be greatly reduced. In this study, we attempted to construct such a system that automatically determines which buildings are included in the images and which parts were photographed, using highly accurate location and attitude information obtained by RTK module with 9-axis sensor.

Keywords *: RTK, Posture Estimation, damage assessment, automation*

1. はじめに

災害後において、被害の迅速把握は重要な問題となってきている。そのため、衛星画像、航空写真、ドローン画像、地上撮影画像など、災害情報を含んだ多くの画像データが震災後多数の団体や調査から提供される。一方、各自の調査や各種機関から提供されるデータを利用者が各々整理しなければならず地域全体の状況把握や詳細な分析には多大なる労力が必要になる。このような現状に対し、撮影された写真にどの建物が写っているかはもとより、被災部位が自動的に判定できれば各建物の詳細な被害把握が容易となる。収集された画像データから建物の被害と被災部位、位置情報を一元化できるようなシステムがあれば、このような各画像の整理及び被害状況の把握までにかかわる時間を格段に短縮できる。著者らはこのような過程を自動化するシステムの開発を行っている [1)]が、撮影時のカメラの姿勢（角度）情報を用いた場合のシステムの精度が低かったため手法を見直し、9軸センサおよびRTK測位機器をを搭載したドローンや撮影機材により取得した高精度な位置・角度情報を用いて撮影画像上に映る建物とその撮影部位を自動判定するシステムの構築を試みた。

2. 被写建造物判定システム

2.1. システム概要

9軸センサを内蔵したRTK測位機器（DG-PRO1RWS）用いて取得した建物の撮影および位置・角度情報を Exif データの撮影時間を基準に抽出・整理し、撮影時の姿勢推定、撮影範囲内建物の判定、被写建物の被災部位判定を行った後に GIS 上に撮影地点と撮影された建物を描画するという構成になっている。以下にその概要を示す（図 1）。

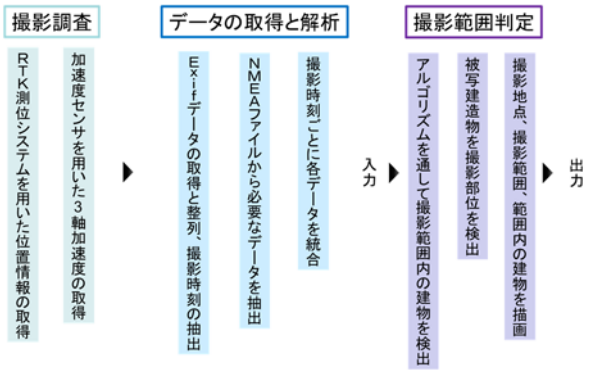


図１　システム構成概要

2.2. 使用デバイス・ソフトウェア

RTK測位の移動局となるレシーバ（DG-PRO1RWS）にアクティブアンテナを装着、それをカメラ搭載のタブレットPC（NEC LAVIE11T 112K1）に固定し、加えてモバイルバッテリー、モバイルWi-fiを使用して撮影調査を行った。撮影調査用のデバイスセットを図 2 に示す。撮影用のタブレットPC内には、位置情報の記録を取得するための RTK 測位レシーバに対応した「Drogger GPS」、タ

ブレット PC 内蔵センサを用いて 3 軸加速度を計測する「G-Sensor Pro」というアプリケーションをインストールした。本研究では RTK レシーバから取得した姿勢情報を利用している。

図 2　調査デバイスセット

3.　位置情報の測位と姿勢推定

3.1.　高精度位置情報の取得

RTK 測位 [2] は衛星、基準局、移動局によって構成される。基準局では衛星からの電波を受信して搬送波位相の積算値データを測定し、測位用データを移動局に送信する。移動局では同様に搬送波位相の積算値データを測定し、基準局から伝送されてきた測位用データと共に使用することで移動局の三次元位置が cm 単位で算出される。

3.2.　必要となるデータの取得

著者らの研究 [1]では時刻、位置情報は DG-PRO1RW、Drogger GPS 、3 軸加速度は G-Sensor Pro を用いて CSV 形式で書き出したが、本研究では位置・角度情報は DG-PRO1RW、Drogger GPS により NMEA 形式（使用した NMEA センテンスは GGA、PRDID、RMC）で 10Hz ずつ取得した。また撮影時刻を取得するため、タブレット PC に標準搭載されているカメラアプリケーションで位置情報取得の項目をアクティブにして Exif データを取得した。

書き出した CSV 及び NMEA 形式のデータから得られる時刻と Exif データから得られる時刻との間にはおよそ 3 秒のずれがあったため修正した。デバイスによって個体差があるようなので取得したデータを照らし合わせて修正する必要がある。

4.　アルゴリズム

4.1.　撮影姿勢の推定

カメラにローカル座標系を設定する。これは右手座標系であり、奥行き方向を X 軸、左右方向 Y 軸、高さ方向を Z 軸とする。また、X 軸周りの回転を roll、Y 軸周りの回転を pitch、Z 軸周りの回転を yaw とし、各軸に対して右ねじ方向を正とする。ここで、観測によって得られた 3 軸加速度をa_{sensor}、重力加速度 g が鉛直にのみはたらくとしたものa_{world}とすると、

$$a_{sensor} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}, \quad a_{world} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \tag{1}$$

また、変換行列 R を Z-Y-X(yaw-pitch-roll)の順にそれぞれの回転行列を掛けたものとすると、(1)を用いて、

$$a_{world} = R \cdot a_{sensor} \tag{2}$$

pitch 角をθ、roll 角をφとおき、(2)を展開すると、

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\dfrac{a_y}{a_z} \\ -\tan^{-1}\dfrac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

以上より、3 軸加速度から roll 角と pitch 角の値を算出することができる。（3）の方程式を観測方程式 [3]という。著者らの研究 [1]では G-senor で得られた値と式（3）を用いて姿勢推定を行っていたが、本研究は DG-PRO1RW 内蔵が処理した姿勢情報を用いた。

4.2.　撮影範囲内外判定

カメラの撮影範囲を四角錐として仮定する（図 3）。この四角錐は範囲内の建物を透視投影する面（以下投影面）を底面に持つ。撮影地点から投影面の各頂点に伸ばしたベクトルについて、隣り合うベクトル同士がなすそれぞれ 4 つの外積（四角錐の側面に対して鉛直外向き）と、撮影地点から 1 つの任意の点 A に伸ばしたベクトルの内積がすべて負である場合、点 A は撮影範囲を表す四角錐の内側に存在する。

撮影地点の位置・姿勢情報を入力しカメラのローカル座標系を移動・回転させる。移動・回転させたローカル座標系における撮影範囲について、辺ベクトル及びローカル座標系原点 O から判定対象となる点 P に伸ばしたベクトルを取得し、生成した点群についてそれぞれ撮影範囲内外判定を行う。建物ポリゴン内に均一にランダム配置した点群について、そのうちの一つでも以上の条件を満たせば撮影範囲にその建物が含まれると判定する。点群の密度が小さすぎると判定精度の低下につながり、逆に密度が高すぎると計算時間が増大するため、建物ポリゴンの体積などに応じて適切な密度の点群を設置することが好ましい。本研究では竹内ら [4] の手法によって構築された点群データから建物ポリゴンを生成し、各ポリゴンの内部に点群をランダム生成して判定を行った。

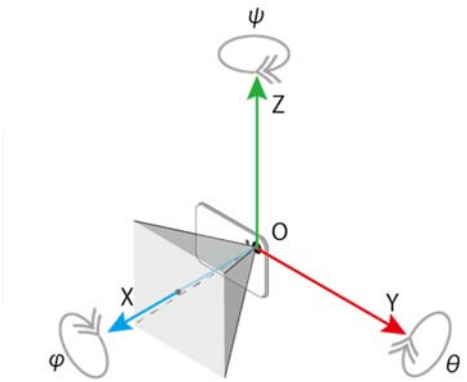


図 3　カメラのローカル座標系と撮影範囲

4.3.　建物同士の重なりの考慮

撮影範囲内の建物について、それぞれの前後大小関係によっては他の建物と重なり映らない建物が存在する場合があるため、これらを取り除く必要がある。撮影範囲内の建物ポリゴンの頂点全てを投影面に透視投影し、投影されたそれぞれのポリゴンの頂点群について凸包を取

る。凸包とはある点の集合 A について、A のすべての要素を含むように A 内の点で形成された最小の凸多角形のことを指す。ある建物ポリゴン P について、P のすべての頂点がそれより撮影地点に近い建物のいずれかのポリゴンの凸包に内包されていた場合、ポリゴン P が表す建物は前方に建つ他の建物に隠されるため、撮影範囲から取り除く。この反復処理を模式的に表したものが図 4 である。この処理を画像内の建物すべてに行うことによって画像内の建物重複が解決される。

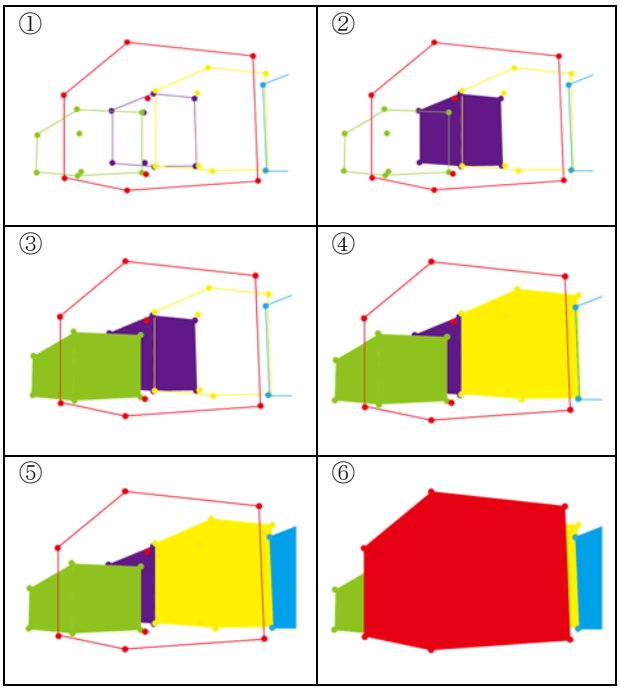


図 4　重複排除アルゴリズムの模式図

4.4. 撮影部位の判定

被災した建物を撮影する際、多くの場合は被災部位が中心に写るように撮影する。判定簡単のため画像中心部に写る部位を被災部位として撮影部位の判定を行う。

建物ポリゴンの頂点ごとに、高さ方向へ一定間隔で点群を生成する。これらの点群に対して撮影位置から伸ばしたベクトル Vp と画角フレームの中心に伸ばしたベクトル V のなす角度を θ とする。V については調査で得られた姿勢情報を用いて X 軸方向の単位ベクトルを回転させることで得る。V の延長線上の周囲にある建物ポリゴンの壁面上に生成された点群のうち、どの範囲の点群まで判定に用いるのかを図 5 の円錐が示すように θ について制限を設けることで設定する。以下この θ の値を許容範囲と呼称する。

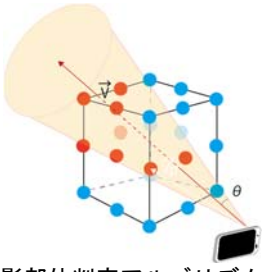


図 5　撮影部位判定アルゴリズムの模式図

許容範囲を入力した後、θ が許容範囲内にある点群（図 5 中の赤点）について、撮影地点からの距離 d の大小について順位をつける。この順位が高いポリゴンの点が撮影部位であると判定するが、この際にどの順位までの点群を判定に用いるかを定める。これを以下取得範囲と呼称する。取得範囲内の点の中で画像に写る部位と同一なものがあれば正解とする。

4.5. 地図上での表示

撮影地点と撮影範囲内の建物のポリゴンの座標を shp ファイルとして書き出すことで、GIS 上で撮影地点とその地点での撮影画像に写ると判定された建物の一元管理が可能となる（図 6）。GIS 上に出力した判定結果を図に示す。また、各建物ポリゴンの属性に本システムから得られた位置情報や日時、その建物が撮影されている画像ファイル名、撮影部位などの判定結果を格納することで集積した画像データの管理が容易となる。

図 6　GIS 上での実行画面

5. 調査データを用いた実験

5.1. 館山市での撮影調査

2019 年に大きな台風被害を受けた千葉県館山市で 2021 年 11 月 23 日~11 月 25 日 [1]、2022 年 4 月 9 日から 10 日にかけて撮影調査を行った。2.2 で説明したデバイスおよびアプリケーションを使用し、一度目の調査では位置情報と共にタブレット PC の内蔵センサを用いて 3 軸加速度を取得しながら撮影を行った。二度目の調査では位置・角度情報、撮影時刻を取得しながら撮影を行った。なお、一度目の調査では公開されている基準局の中で館山市から最も近い千葉県君津市の「人見の基準局」、二度目の調査では前述の基準局が利用できなかったため東京都小金井市の「法政大学小金井キャンパス（理工学創生科学科）」を利用した [5]。

5.2. 3 軸加速度を用いた場合のシステム精度の概要

一度目の調査 [1]で得られたデータを用いて 3 軸加速度から姿勢推定を行い、被写建造物の判定を行った。各画像に映る建物のうち、主たる建物を 1 つ設定する。主たる建物とは画像内の中心、あるいは画像の多くを占めるような建物をその画像の被写体として選択したものを指す。主たる建物の設定に関しては筆者が撮影画像を確認して恣意的に行った。点群データが用意された建物は 362 棟で、それぞれ個別に 0～361 の識別番号を与え、撮影時刻とその時刻に撮影した画像内の主たる建物の識別番号を紐づけて抽出したデータと結合した。判定結果と撮影画像を比較し、被写建造物判定の精度がどの程度であるかを写真内の主たる建物が含まれるか否かで確かめた。判定の際、ポリゴン内には 100 個の点群を生成した。また、

建物ポリゴンは全て同じ平面上に屹立していると仮定した。

撮影した写真 259 枚のうち、撮影地点から 30m 圏内に建物がない場合を除いた 227 枚を用いて判定精度の確認を行ったところ 71.8%（163 枚）は主たる建物が含まれると判断された。また、3 軸加速度による姿勢推定を行った場合その割合は 59.5%まで低下した。実験結果から本システムに 3 軸加速度による姿勢推定を適用することは不適切であることが確認できた。

5.3. 9 軸センサを用いたシステム精度の確認

5.2.の結果を踏まえてレシーバ（DG-PRO1RWS）に内蔵されている 9 軸センサから得られた 3 軸加速度に加え各軸周りの角加速度により導出される姿勢情報を NMEA 形式でファイルに書き出し、その情報を用いて判定を行った。判定の際、ポリゴン内には 300 個の点群を生成した。また、5.2 と同じく建物ポリゴンは全て同じ平面上に屹立していると仮定し、撮影高さは一律で 1.7m に設定した。5.2 と 5.3 の判定精度の比較を表 1 にまとめる。

撮影した写真 249 枚のうち、撮影地点から 30m 圏内に建物がない場合を除いた 246 枚を用いて被写建造物の判定精度の確認を行ったところ、姿勢推定をしない場合で 85.4%、姿勢推定した場合でも 76.8%まで向上した。このことから、9 軸センサによる計測値を用いた判定では比較的高精度な結果が得られることが分かった。正しく判定されていない画像について、原因として撮影地点とポリゴンの重複、障害物等により衛星や基準局との交信がうまくいかないことによる位置情報やヘッディングのずれがあることを確認した。

表 1　被写建造物判定の精度

調査日	条件	撮影数	除去数	判定数	正解数	正解率
2021/11/23~25	姿勢推定無し	259	32	227	163	71.8%
	姿勢推定あり（3軸加速度）				135	59.5%
2022/04/9~10	姿勢推定無し	249	3	246	210	85.4%
	姿勢推定あり（6軸加速度）				189	76.8%

5.4. 撮影部位の判定

5.3 において姿勢推定を加味した判定結果のうち、正しく判定が行われていた画像に対して撮影部位の判定を行った。撮影中心にある建物について 4.4 で述べたように建物ポリゴン頂点の高さ方向へ 100mm ごとに区分するように点群を生成する。基礎部、壁部、屋根部の高さ範囲を表 2 のように設定する。基礎と屋根に関しては上下 10,000mm 拡張した。これらの点群に加えてポリゴン内にランダムな点群生成し、撮影位置から各点に伸ばしたベクトルと画角フレームの中心に伸ばしたベクトルのなす角度、および撮影地点からの距離の大小を評価することによって、画像中心に写る部位を特定する。表のように許容範囲と取得範囲を変化させ、部位判定システムの精度を確認した。許容範囲を θ=5°、取得範囲を 10 とした場合、許容範囲内に点が存在しない場合を含めた正解率は 55.0%、除いた場合の正解率は 66.7%となった。許容範囲が小さいほど、また取得範囲が大きいほど正解率は高くなる傾向にあることが確認できた。また θ=30°まで許容範囲を広げると、すべての画像において許容範囲の中に点が存在することを確認した。位置・角度情報のずれ、仮想空間上のポリゴンには建物の大まかな形状しか反映されていないこと、建物部位の範囲設定を均一にしていることなどが精度低下の要因として考えられる。

表 2　建物ポリゴンの部位設定

部位	範囲
基礎部	-10,000 ＜ h ≦ 300
壁部	300 ＜ h ≦（階高2500+天井高500）×階数－(1500－300)
屋根部	(階高2500+天井高500)×階数－(1500－300)＜ h ≦ 最高高さ＋10,000

6.　まとめ

本研究において、撮影画像に含まれる建物の認識およびその前後関係の判定アルゴリズムは仮想空間化では実現している。実際の被災地で使用した結果、一度目の調査では 71.8%にとどまっており、さらに姿勢推定を考慮した判定精度に関しては 59.5%とさらに低下した。原因として、姿勢推定において 3 軸加速度のみを考慮し撮影時に静止していると仮定して姿勢を算出したことが最も問題であったと考えられたため、二度目の調査では RTK 測位用レシーバ内蔵の 6 軸センサを用いて動的状況下での姿勢情報を計測して撮影を行った。これにより被写建造物システムの精度が明らかに上昇し、姿勢推定した場合でも 76.8%の精度を確保できていることが確認できた。

加えて、本論においては姿勢推定結果を使い撮影した建物の部位まで判定するシステムの開発を試みた。結果、その精度は約 6 割強となった。このことから、一度目の調査よりも位置情報・角度情報を高精度に記録できており、6 割強ではあるが部位判定の自動化が可能になったことを確認した。今後は、部位判定精度を向上させるべく、基準局の近隣設置により位置情報精度の向上を図る。また、角度情報においては撮影者の撮影時の動きによる誤推定を防ぐため被害調査前に撮影方法の統一を図ることとする。判定アルゴリズムについては、点群データからポリゴン作成時に発生するポリゴンの凹凸の影響をうけるため壁面にフィルターをかけるなどの対応が必要となる。今後も本システムの開発・改善を継続していく所存である。

謝辞

本研究の一部は京都大学防災研究所（2021G-10）の成果である。また、国土地理院の電子地図情報を利用した。ここに記して謝意を示す。

参考文献

1) 中嶋唯貴・冨永佳吾・友清衣利子・西嶋一欽：高精度位置・角度情報を用いた被害写真と被災建物の自動統合，令和 3 年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概 2022,C121
2) 浪江宏宗・樊春明・臼井澄夫・安田明生：ネットワークRTK-GPS 測位制度の測位位置依存性に関する実験的研究 電学論 D, 125 巻 7 号, 746, 2005
3) James Diebel：Representing Attitude：Euler Angles, Unit Quaternion, ans Rotation Vectors, Retrived Octob er20, 2006. available from https://www.astro.rug.nl/soft ware/kapteyn-beta/_downloads/attitude.pdf
4) 竹内崇・友清衣利子・高橋徹・西嶋一欽：被害調査及び分析のためのドローン空撮写真に基づく建物輪郭抽出 令和 3 年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概 2022,C123
5) 善意の基準局掲示板 https://rtk.silentsystem.jp/ 閲覧日：2021 年 4 月 10 日

リモートセンシング画像と火災保険損害データに基づく台風による住宅損害割合の推定

Loss Rate Estimation for Residential Houses Damaged by Typhoons Based on Remote Sensing Imagery and Fire Insurance Data

○村田 雄亮 [1]，三浦 弘之[1]，若狭 弘幸[2, 3]，多嘉良 朝恭[4]
Yusuke MURATA [1], Hiroyuki MIURA [1], Hiroyuki WAKASA [2,3] and Tomotaka TAKARA[4]

[1] 広島大学　大学院先進理工系科学研究科
Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University
[2] 広島大学　オープンイノベーション事業本部
Open Innovation Platform, Hiroshima University
[3] あいおいニッセイ同和損保　マーケット開発部　地方創成戦略室
Market Development Department, Aioi Nissay Dowa Insurance Co., Ltd.
[4] あいおいニッセイ同和損保　損害サービス業務部　企画グループ
Claims Administration Division, Aioi Nissay Dowa Insurance Co., Ltd.

In recent years, typhoon disasters have frequently occurred in Japan. Financial support through non-life insurance is important for affected residents. In this study, we introduced an empirical method to estimate loss estimation for residential houses damaged by typhoons based on remote sensing images and fire insurance data. We analyzed the data obtained in Osaka after the 2018 Jebi typhoon and in Chiba after the 2019 Faxai typhoon. We developed the empirical relationship between the damage ratio visually interpreted by the remote sensing images and loss rates in the insurance records, and confirmed the building loss were accurately reproduced by the method.

Keywords *: Economic loss, Fire insurance, Building damage, Remote sensing , Typhoon disaster*

１．はじめに

近年、日本では水害や風害が頻発している。被災した住民にとって、火災保険や地震保険による経済的支援は非常に重要である。一方で、広域災害では保険金による損害認定のための調査に膨大な労力や時間が必要となるため、簡便かつ迅速な損害額の推定方法が望まれている。このため、近年の台風災害で得られた火災保険損害データの特徴を分析しておくことは、将来の災害における損害額の迅速な推定に有効であると考えられる。

本研究では、近年の台風災害に着目し、リモートセンシングデータから住宅の損害額を推定する方法を検討する。台風災害の場合、主に建物の屋根面に被害が現れることから、屋根面にブルーシートをかけられることが多い。このような場合、リモートセンシング画像から屋根被害を判読することは、他の災害と比べても容易であり、精度の高い被害把握が可能であると考えられる。

具体的には、2018 年台風 21 号（Jebi）による大阪府南部および 2019 年台風 15 号（Faxai）による千葉県南西部を対象として、それぞれの災害で得られた火災保険損害データをもとに、物件数、損害額、損害割合などを整理する。また、航空写真や人工衛星画像といったリモートセンシング画像から、建物被害の判読を行う。両者のデータの関係から、リモートセンシング画像の判読結果を基に台風による住宅の損害割合を推定する方法を検討する。

２．対象とする台風の概要

2018 年台風 21 号は 9 月 4 日 12 時頃、非常に強い勢力で徳島県に上陸した後、速度を上げながら近畿地方を縦断した。台風の接近・通過に伴い、西日本から北日本にかけて非常に強い風が吹き、非常に激しい雨が降った。特に、四国や近畿地方では、猛烈な風が吹き、猛烈な雨が降ったほか、これまでの観測記録を更新する記録的な高潮となった地域がある。大きな被害としては、関西空港連絡橋タンカー衝突・滑走路など浸水、倒木や車の横転、家屋被害、電柱倒壊による大規模停電、コンテナなどの流出、浸水後の車両火災などが発生した。また、全国で 14 人の死者、約 900 人の負傷者が出るなどの人的被害が発生した。この台風では、近畿地方と中部地方を中心として全壊約 70 棟、半壊約 800 棟で、一部損壊約 10 万棟の住宅被害が発生した [1)]。

2019 年台風 15 号は、9 月 7 日から 8 日にかけて小笠原近海から伊豆諸島付近を北上し、三浦半島付近を通過した後、東京湾を進み、9 日に強い勢力で千葉市付近に上陸した。その後、9 日朝には茨城県沖に抜け、日本の東海上を北東に進んだ。全国で死者 13 人、負傷者約 160 人となった。この台風では、関東地方を中心として、全壊約 450 棟、半壊約 5 千棟、一部損壊約 9 万棟の住宅被害が発生した [2)]。

３．使用データの概要

本研究では、あいおいニッセイ同和損保の火災保険損害データを使用する。データに含まれる項目を表 1 に示す。本研究では、戸建住宅の損害を対象とするため、以降の解析では、物件種別が一般、工場、倉庫の物件、および構造種別がマンションの物件については除外するこ

ととした。

本研究では、一般的な住宅を対象とするため、保険価額が 500 万円未満および 5,000 万円以上の物件についても除外することにした。以上の手続きから、千葉県南西部では計約 1,600 件、大阪府南部では計約 8,600 件のデータが得られた。

対象地域における災害発生後のリモートセンシング画像としては、表 2 に示すデータを使用することにした。2019 年の台風 15 号では、朝日航洋社が千葉県南西部の広範囲を撮影していることからこの航空写真を使用することにした。ただし、館山市周辺では、雲がかかっており、被害状況を確認することができなかったため、補助的に国際航業社による航空写真も使用した。前者の分解能は 0.2m、後者の分解能は 0.1m である。2018 年の台風 21 号では、航空写真が取得されなかったことから、フランスの人工衛星 Pleiades-1A および韓国の Kompsat-3A の衛星画像を使用した。これらの地上分解能は約 0.5m である。

４．予備的検討

前項で示したリモートセンシング画像では、建物を 1 棟 1 棟判断できることから、個々の建物の被害状況や損害額、損率を推定できることが理想的である。画像上の被害建物と損率を比較したところ、図 1 に示すように損率が比較的高い建物では、ブルーシートがかけられるものが多くなる傾向が見られた。しかし、損率が高くてもブルーシートの面積が小さいものや、損率が小さくてもブルーシートの面積が大きいというものも多く見られた。

ブルーシートをかける範囲は、被害の大きさそのものだけでなく、予算や十分な量のブルーシートを取得できたかなどの要因も大きいと考えられる。このことから、ブルーシートの面積から損害額を推定することは難しいと考えた。また、一部の物件では、漏水による被害も発生し、屋根面では被害が確認できないものもあった。

以上の予備的検討により、リモートセンシング画像から個々の建物の損率を直接精度よく推定することは困難であると判断した。

表１　火災保険データの主な項目

項目	概要
保険金額	保険会社が支払う保険金の限度額
保険価額	被保険者が被る可能性のある損害の最高見積額
損害額	保険会社による認定損害額
損率(%)	損害額/保険価額
物件種別	住宅、一般、工場
構造種別	非耐火、耐火、マンションなど

表２　使用したリモートセンシング画像の概要

種類	撮影機関・衛星名	撮影日	地上分解能	画像に含まれる主な市町
航空写真	朝日航洋社	2019 年 9 月 27-28 日	0.2m	千葉県富津市，鋸南町，南房総市，館山市，鴨川市
航空写真	国際航業社	2019 年 9 月 19-20 日	0.1m	千葉県南房総市，館山市
衛星写真	Pleiades-1A	2018 年 10 月 9 日	0.5m	大阪府堺市，高石市，泉大津市
衛星写真	Kompsat-3A	2018 年 9 月 19 日	0.55m	大阪府泉佐野市，田尻町，泉南市，阪南市，和歌山県和歌山市

５．解析手順

個々の建物の損率を推定することは、困難であるが、一般的に被害が大きい地域では、損害額の総額も大きくなるものと考えられる。そこで、本研究では、以下の手順で検討することにした。まず、リモートセンシング画像から被害建物を判読し、ある範囲内の総建物数で除すことで、式 1 の通り建物被害率を算出する。

$$建物被害率(\%) = \frac{メッシュ内被害建物棟数}{メッシュ内全建物棟数} \times 100 \quad (1)$$

一方で、火災保険損害データから、範囲内の総保険価額に対する総損害額を求め、式 2 から範囲内における損害割合を算出する。

$$エリア損率(\%) = \frac{メッシュ内総損害額}{メッシュ内総保険価額} \times 100 \quad (2)$$

本研究では、これをエリア損率と呼ぶ。信頼性のあるエリア損率を求めるには、母数となる物件数がある程度必要である。本研究では、南北 1.5km、東西 2km のメッシュ単位を採用し、メッシュ内における火災保険損害データのある物件数が 10 件以上かつリモートセンシング画像に含まれるメッシュを解析対象とした。対象となるメッシュ数は、千葉県のデータで 40 メッシュ、大阪府のデータで 78 メッシュとなった。

６．建物被害率の算出

目視判読では、主にブルーシートの有無に着目し、画像から屋根面のブルーシートが確認されたものを検出した。その他、屋根面の崩壊が確認されたものも検出した。屋根面の青い建物との誤判読を防ぐために、災害前の GoogleMap[3)]による画像とも比較しながら、判読を行った。ブルーシートの面積が小さくても損率が大きくなる場合があることから、ブルーシートの面積に関わらず、ブル

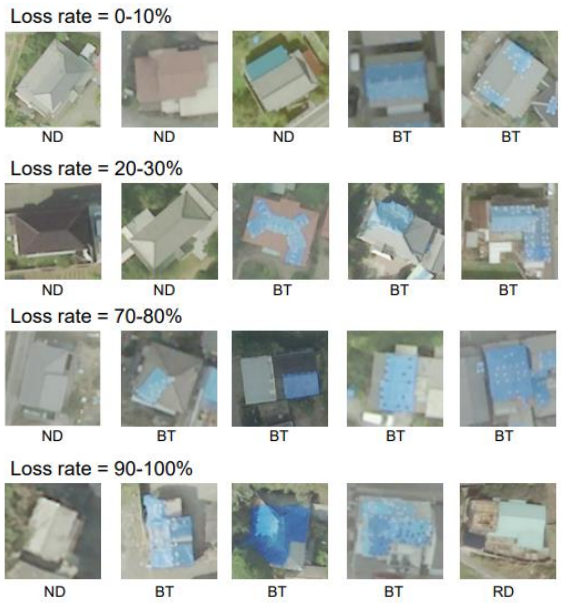


図１　被害建物と損率の関係
ND：無被害建物、BT：ブルーシートに覆われている建物、RD：屋根に顕著な被害がみられた建物

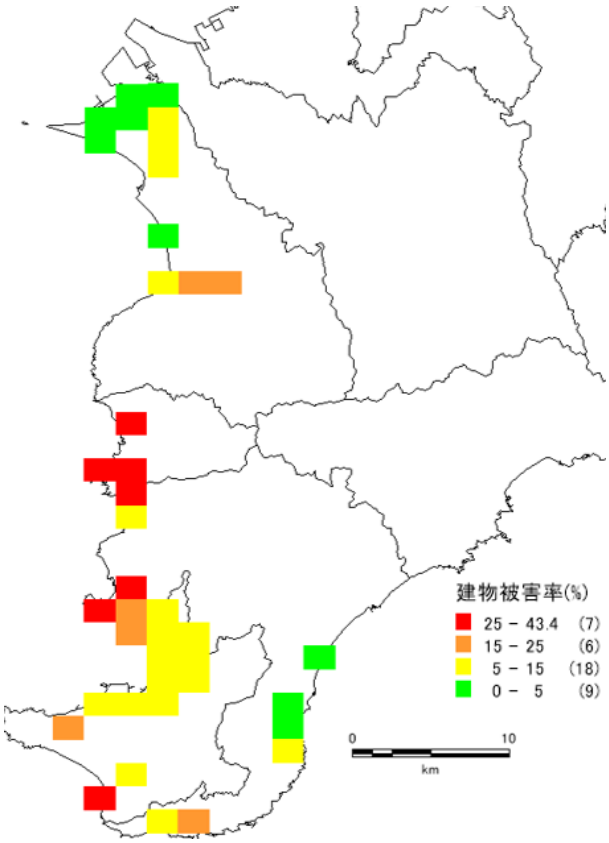


図 2 台風 15 号による千葉県南部の建物被害率

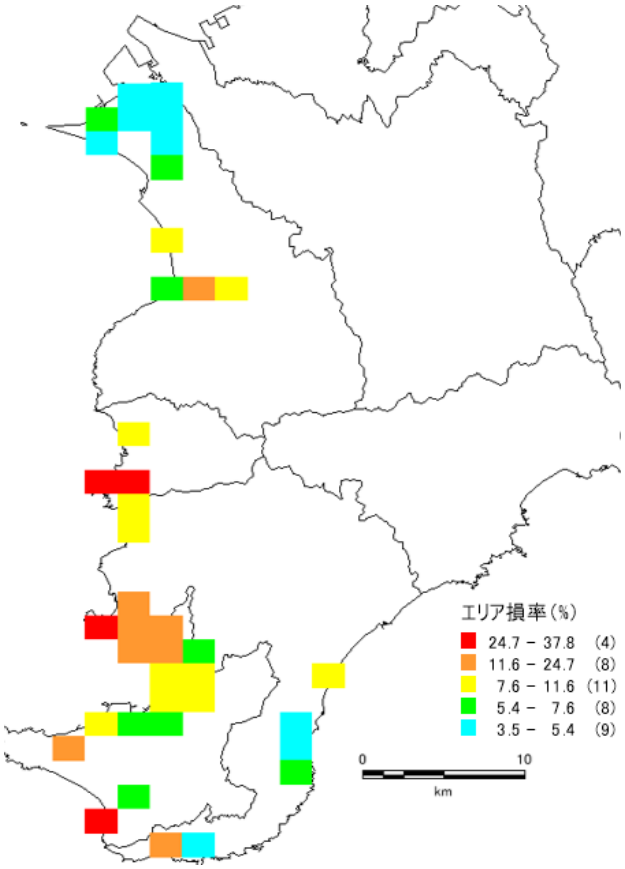


図 3 火災保険損害データによる千葉県南部のエリア損率

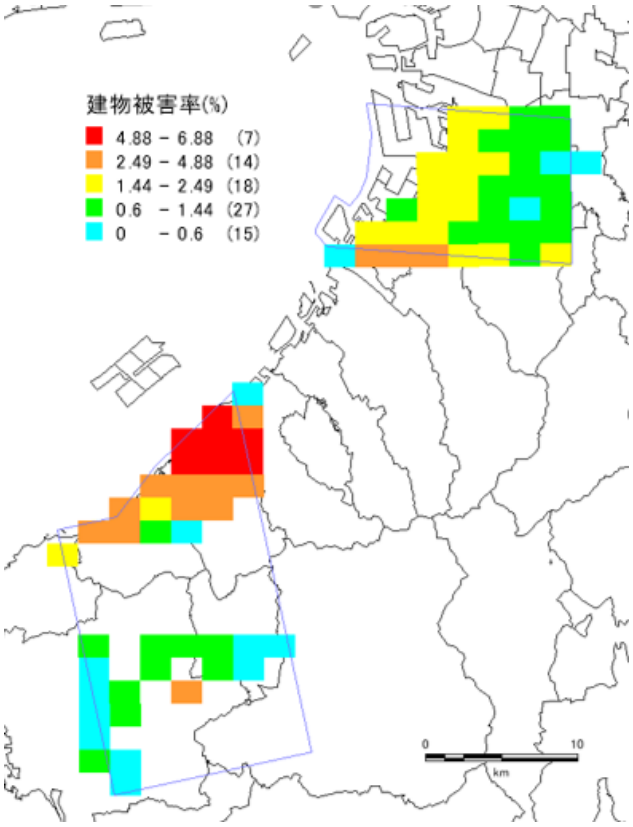


図 4 台風 21 号による大阪府南部の建物被害率

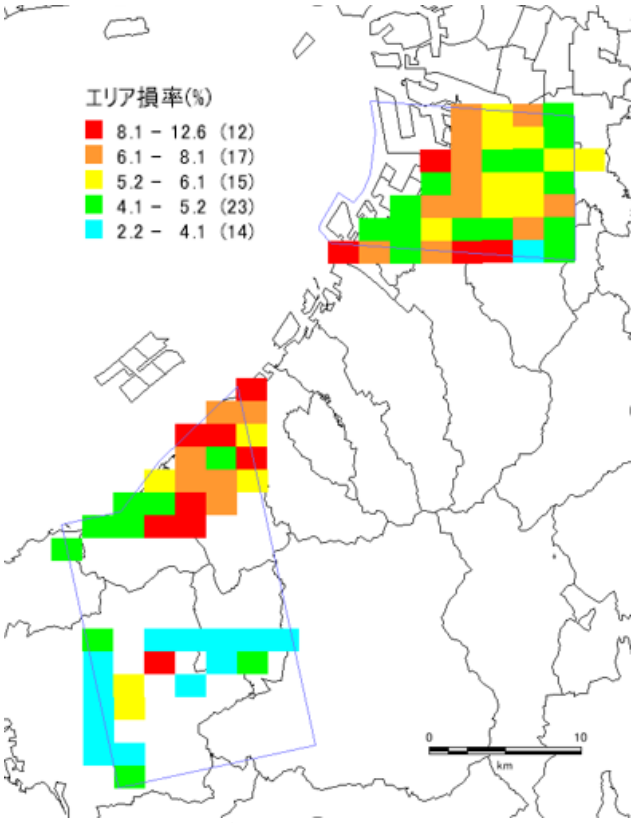


図 5 火災保険損害データによる大阪府南部のエリア損率

ーシートが確認できた場合にはすべて検出した。対象メッシュにおいて、被害建物を判読したところ、千葉県のデータからは約 7700 棟、大阪府のデータからは約 4700 棟が検出された。また、対象メッシュにおける総建物数について、千葉県では、OpenSteetMap[4]の情報を使用し、大阪府では国土地理院の基盤地図情報 [6]を使用した。本研究では、住宅を対象とするため、面積が 30m^2 未満および 500m^2 以上のデータについては除外した。

7．住宅損害割合の推定

前章までの検討で得られた千葉県南部と大阪府南部の建物被害率とエリア損率の分布図を図 2～5 に示す。また、建物被害率とエリア損率の関係について図 6 に示す。大阪では建物被害率・エリア損率ともに小さい点が多かったが、千葉では共に約 40%までデータが得られたことにより両者には相関関係がみられた。両者のデータから最小二乗法で得られた関係を図 6 の直線に示す。相関係数は 0.8 と比較的高いことが確認できる。

また、図 6 で得られた式から推定を行った場合の精度の検証を行った。検証方法としては、図 6 中の関係式の x に本研究で得た建物被害率を当てはめることにより、エリア損率を推定した。損害額で検証を行うため、メッシュ内の総保険価額を掛け合わせ、エリアの総損害額を推定した。検証により得られた、実際の損害額と推定した損害額の関係を図 7 に示す。さらに、実際の損害額と推定値の残差の分布を図 8 に示す。精度よく推定が行えていると考える。また、1 メッシュあたりの推定誤差の平均は約+200 万円、標準偏差は約 1600 万円となった。1 メッシュには 10 棟以上のデータが含まれており、1 棟の建物が 500 万円以上であることを考慮すると、推定誤差は小さいと考える。

これの検討により、リモートセンシング画像から個々の建物の損害額や損害割合を精度よく推定することは難しいが、得られた関係式を用いてメッシュ内の損害割合を推定することで、ある範囲内での損害額の概算値を推定することは可能であることがわかった。

8．結論

本研究では、リモートセンシング画像の判読結果から台風による住宅の損害割合を推定する方法を検討するために、2018 年台風 21 号と 2019 年台風 15 号の被災地を対象として、火災保険損害データおよびリモートセンシング画像による建物被害判読結果の関係を調べた。判読結果からエリア損率と建物被害率に相関関係があることを示した。これによって、リモートセンシング画像から建物被害を推定することで、台風による住宅損害割合を推定できる可能性を示した。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費（22H01741）の助成を受けたものである。

参考文献

1) 消防庁 2019: 成 30 年台風第 21 号による被害及び 消防機関等の対応状況（第 10 報）, https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/40fa100bdc7b7db0e896733faa88c208d8b032ee.pdf
2) 消防庁 2020: 令和元年房総半島台風による被害及び 消防機関等の対応状況（第 41 報）, https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/taihuu15gou41.pdf
3) GoogleMap: https://www.google.co.jp/maps
4) OpenSteetMap:https://www.openstreetmap.org/
5) 国土地理院：基盤地図情報サイト, https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html.

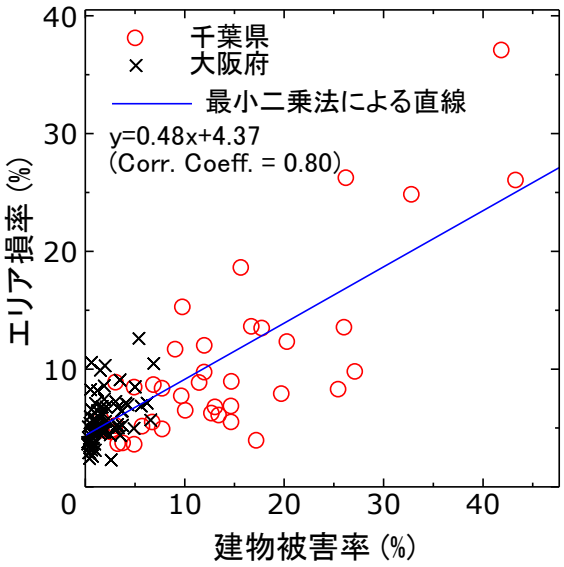


図 6　エリア損率と建物被害率の関係図

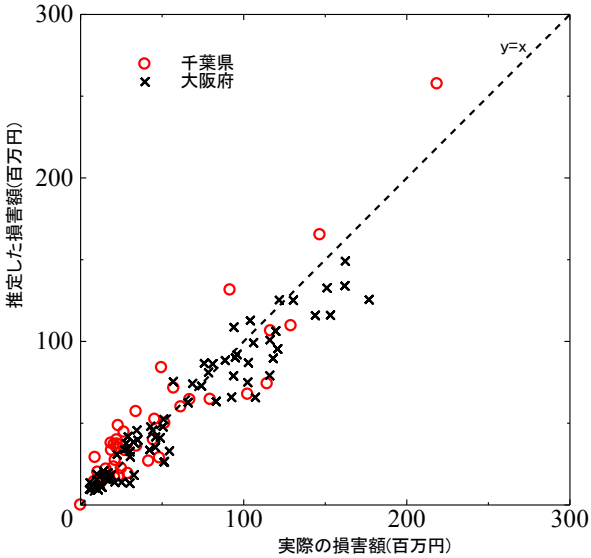


図 7　推定した損害額と実際の損害額の関係

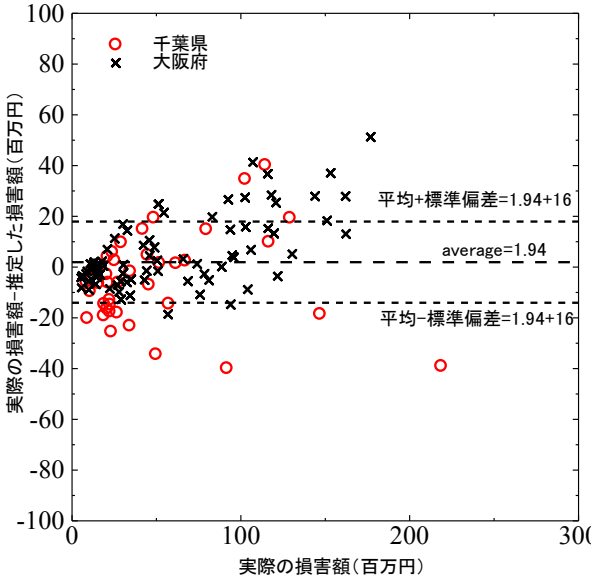


図 8　損害額と推定誤差の関係

災害時避難施設の継続使用性判断方法に関する基礎的研究
—地盤特性と建物固有振動数の検討—

Basic Research on Methods for Determining the Continued Usability of Evacuation shelter in the Event of a Disaster
- Study of the ground characteristics and the natural frequencies of the buildings -

○落合 努[1]，朱牟田 善治[1]，白井 佑樹[1]，涌井 将貴[2]，伊山 潤[3]
Tsutomu OCHIAI[1], Yoshiharu SHUMUTA Yuki SHIRAI Masaki WAKUI[2] and Jun IYAMA[3]

[1] 神奈川大学 建築学部 建築学科
Department of Architecture and Building Engineering, Kanagawa University
[2] 新潟工科大学 工学部工学科
Faculty of Engineering, Niigata Institute of Technology
[2] 東京大学 工学系研究科建築学専攻
Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

A continuous observation system for acceleration and strain was established to provide basic data for determining the continued usability of evacuation shelter in Yokohama City in the event of a disaster. In this section, we first summarized the results of the microtremors observations of the ground and the evacuation shelter before the start of the observations. In addition, from the results of constant observation after the start of observation, we focused on the intrinsic vibration characteristics of the evacuation shelter using the acceleration observation records. These results suggest that the possibility of amplification due to resonance phenomena is small because there is some gap between the natural frequencies of the ground and the evacuation shelter.

Keywords *: structural health monitoring, evacuation shelter, seismic response, microtremors, Yokohama city*

１．はじめに

横浜市では阪神大震災の発生を契機に，市立の小中学校などを中心に震災時避難場所を指定している．この災害時避難場所は，自宅が被災した住民の生活空間となるだけでなく，防災備蓄庫や避難物資の供給拠点など継続した機能維持が求められている．

通常は，地震などの発災後に一級建築士等の資格を有する専門家が現地調査などから被災危険度を判定し，継続利用の判断がなされる．しかし，2016 年熊本地震のように，連続して大きな地震が発生した場合などは，現地調査のタイミングも難しく，余震のたびに専門家が現地調査を行い判断を行うことは難しい．一方で，専門家でない自治体職員などが避難施設の継続利用性の判断などが行えると，即時性や繰り返しの余震活動にも対応可能となる．

そこで，本研究は避難施設を IoT 化し常時監視することで，専門家以外でも継続使用性を判断することが出来るシステムを開発することを目指す．IoT 化することによって，被災後の避難施設への立ち入りで発生する二次災害も最小限に抑えることが出来る．常時観測は，微動あるいは地震時の加速度とひずみ度とした．

本報では，観測設置前に実施した微動計を用いた事前検討と，地震時の加速度記録を用いた建物固有振動数に着目して整理をした．

なお，本検討で用いた観測システムは，従来の 1/10 程度のコストで計測可能な装置を作成している．今後継続して長期間の計測を行うことで，計測装置の安定性や耐久性の検証を進め，安価で実用性の高いシステムの確立も目標としている．

２．対象施設の概要

２.１　地域特性

検討対象は，避難施設となっている横浜市内の小学校の体育館とした．筆者らは，別途横浜市の避難施設を対象としたマルチハザード評価の検討も進めており [1)]，その中でも特に地震災害のリスクが高い避難施設となる．

横浜市の北部の地形区分 [2)]と，同地域の J-SHIS[3)]から求めた地震ハザード（30 年以内に 3%の確率で一定の揺れに見舞われる計測震度の領域）を並べて図 1 に示す．対象施設は，横浜市北東部の鶴見川支流に発達した三角州性低地に位置し，横浜市全域の中でも特に地震ハザードが高い地域であることがわかる．

２.２　建物の概要

建物骨組の全体概要を図 2 に示す．体育館は基礎が鉄筋コンクリート造，上部が鉄骨造であり，桁行方向はブレース構造，梁間方向は山形ラーメン構造である．1977 年に竣工し，1996 年ころの耐震補強工事によって，梁間方向の柱梁接合部への方杖，および桁行方向への補強ブレースとしての円形鋼管の増設がおこなわれている．

図 3 に梁間方向の計測位置を示す．計測位置は，加速度で基礎上面（acc4），キャットウォーク（acc3）と柱上端（acc2），ひずみ度は山形ラーメンの図に示す位置

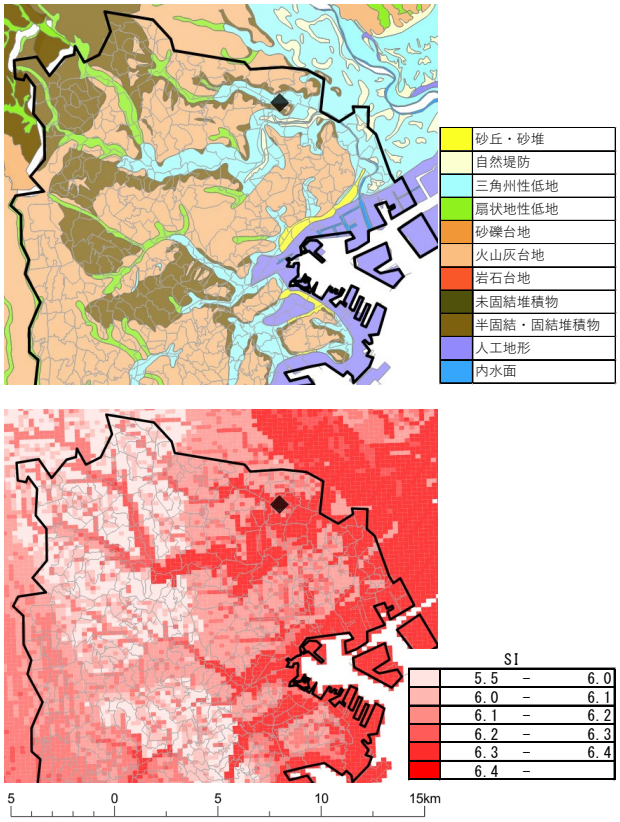


図１　対象地点の地形区分と地震ハザード（◆：対象地点）
（上段：地形区分図，下段：地震ハザード）

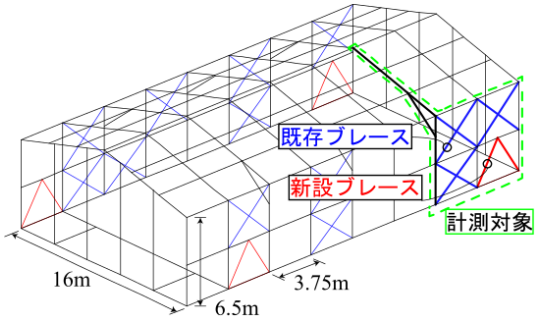


図２　建物骨組の全体概要

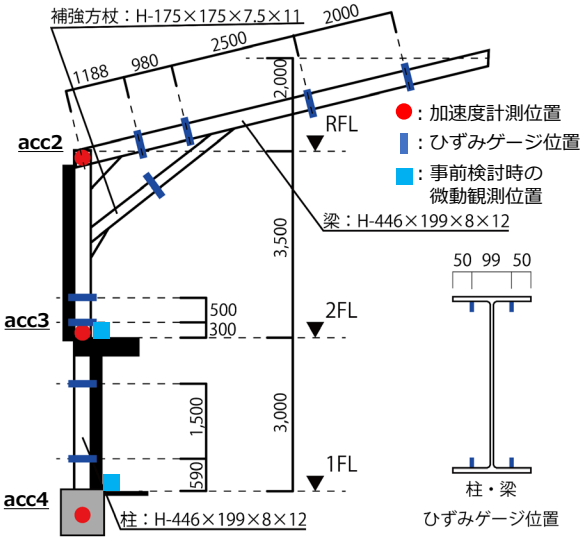


図３　梁間方向の計測位置

とした．桁行方向ブレースのひずみ度の測定も並行して実施しているが，本報では対象外とするため，計測位置は省略する．

３．事前検討

３.１　検討方法

（1）事前検討の概要

観測設備を設置するにあたって，事前に常時微動観測をおこない地盤と体育館の振動特性を確認した．地盤の観測は，単点微動観測による地盤の卓越周期の評価と，微動アレイ探査による地盤構造の推定の 2 つの検討をおこなった．体育館の観測は，床面とキャットウォーク 2 か所の同時観測から，両者の伝達関数を求めた．

（2）地盤の観測

単点微動は，体育館横のグラウンドでサンプリング周波数 200Hz とし，観測時間は 15 分間とした．観測した時刻歴波形からフーリエ変換し，水平成分の相乗平均を上下成分で除して，H/V スペクトル比を算出した [4]．

微動アレイ探査は，半径を変えた 4 つのアレイサイズ（0.6m，7m，15m，30m）で観測をおこなった．サンプリング周波数は単点微動観測と同様に 200Hz とし，観測時間はアレイサイズ 0.6m と 7m では 15 分間，15m と 30m では 1 時間とした．観測記録から分散曲線求め，逆解析から S 波速度構造を推定した [5]．また，得られた地盤構造から重複反射理論より伝達関数を算出した．

（3）体育館の観測

体育館の観測は，床面とキャットウォークの 2 か所で微動観測をおこない，床面と 2 階の伝達関数を算出し，簡易的に建物全体の振動特性の評価をおこなった．なお，サンプリング周波数と観測時間は，地盤の観測に合わせて 200Hz，15 分間としている．微動観測位置を，図 3 に示す．

３.２　検討結果

（1）地盤の観測

微動アレイ観測から推定した S 波構造を図 4 に示す．図には対象地点から 200mほど北型とやや離れるが，横浜市によって公開されているボーリングデータ [6]の N値から換算した [7]せん断波速度も併記している．微動アレイ探査から推定されたせん断波速度は，表層から GL-17m まで 200m/s 以下の低速度の層があり，それ以深は 200m/s とやや大きくなる．この傾向は，ボーリングデータと概ね一致している．また，ボーリングデータでは確認されていないが，GL-80m 以深で 300m/s 以上と概ね工学的基盤相当の層が確認できた．

単点微動から得られた H/V スペクトル比を図 4 に示す．図には，微動アレイ探査から得られた地盤構造を用いて，重複反射理論により算出した伝達関数も併記している．図から，両者に共通して 1.8Hz 付近に大きなピークが確認され，これが工学的基盤程度までを考慮した場合の地盤の卓越振動数と考えらえる．

（2）体育館の観測

体育館の床面と 2 階の伝達関数を図 6 に示す．図から，6Hz と 8Hz 付近に二つのピークが確認できる．後述する地震時の観測結果なども考慮すると，6Hz 付近のピークが建物全体の固有振動数だと推定できる．一方で，8Hz 付近のピークは，地震時の記録からは確認されておらず，この要因については今後検討の必要がある．

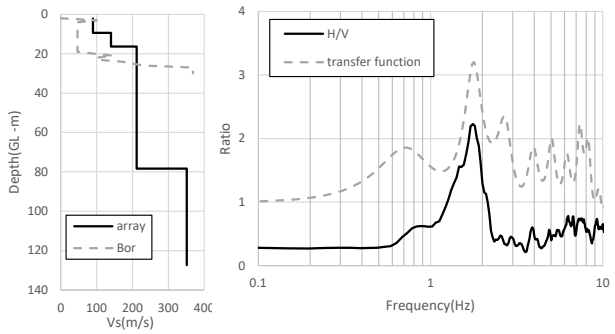


図 4　微動による地盤構造（左）とスペクトル特性（右）

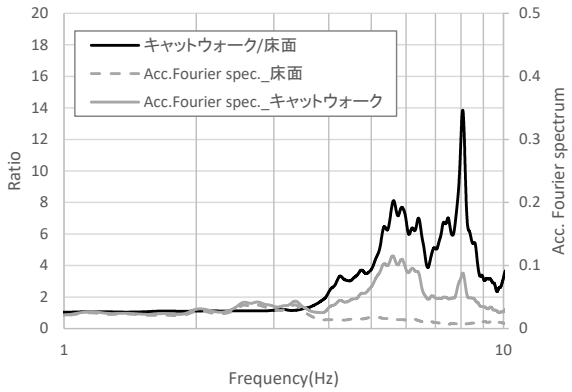


図 5　微動による体育館の伝達関数とフーリエスペクトル

4．常時観測結果

4.1　検討する地震記録

計測を開始した 2020 年 11 月下旬から現在までのなかで，比較的大きな地震記録として 5 つの地震記録を抽出した分析を行った．対象とした地震の一覧を表 1 に示す．表には柱上端（acc2）の最大加速度も併記している．最大加速度は，10～30gal 程度であった．

観測記録な中から検討対象とした梁間方向の時刻歴波形を図 6 に示す．基礎上面（acc4）の記録に対し，キャットウォーク（acc3）や柱上端（acc2）で地震動が増幅していることが確認できる．また，Mj が 6.5 以上の 2 地震と他の 3 地震では，時刻歴波形の包絡特性が異なることも確認できる．

表 1　検討対象の地震記録の一覧

date	Mj	lat.	lon.	depth (km)	acc2_max (gal)
2020/11/22 19:06	5.7	36.59	141.10	45	13.60
2021/3/16 4:56	4.9	36.15	139.82	54	30.30
2021/3/20 18:09	6.9	38.47	141.63	59	23.20
2021/5/1 10:27	6.8	38.17	141.74	51	12.10
2021/11/20 8:57	4.6	35.73	139.53	99	26.20

4.2　建物固有震動数の検討

建物固有振動数は，柱上端（acc2）と基礎上部（acc4）の加速度記録の伝達関数から求めた．減衰定数は，観測記録に対し理論伝達関数とカーブフィッティングするよう同定することで求めた [8]．

一般に，中層から高層の建築物では，建物の固有振動数に振幅依存性があることが知られている[例えば9]．よって，ここでは壁上段（acc2）の最大加速度と，固有振動数の関係を整理し，図 7 に示す．図には事前検討による常時微動観測結果を，最大加速度 0 と仮定しプロットしている．図から，現時点では固有振動数に振幅依存性は確認できない．これは，建物が低層であること，得られた地震記録が全体的に小さいことの 2 つの理由が考えられ，今後継続した観測を行うことでさらなる検討を進めていきたい．

建物の減衰と固有周期については，h=0.02/T の関係があることが知られており [10]，図 8 に整理した．ややばらつきが大きいが，既往の関係とは概ね整合している．

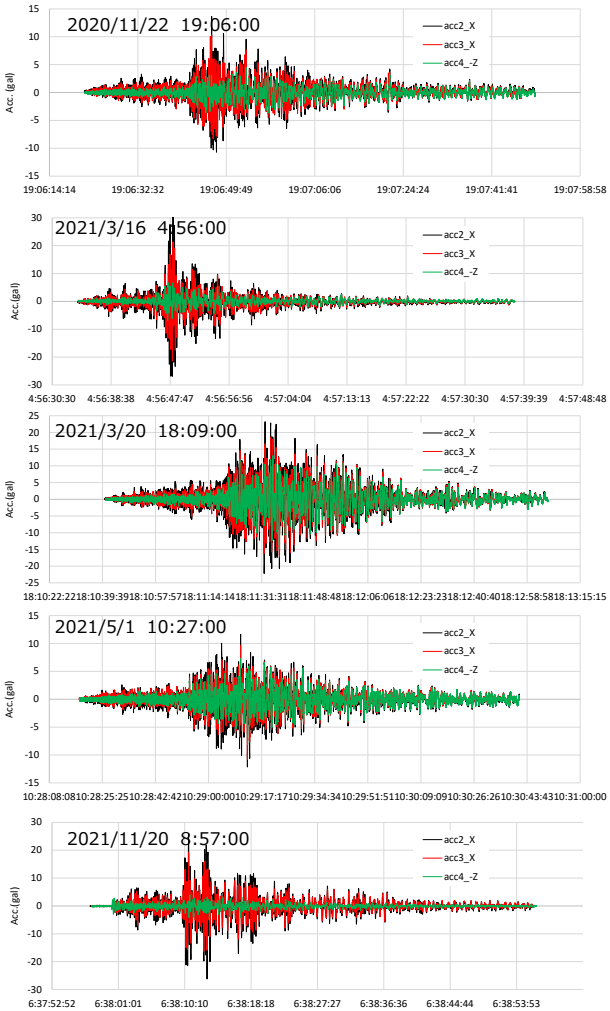


図 6　検討地震動の梁間方向の時刻歴波形

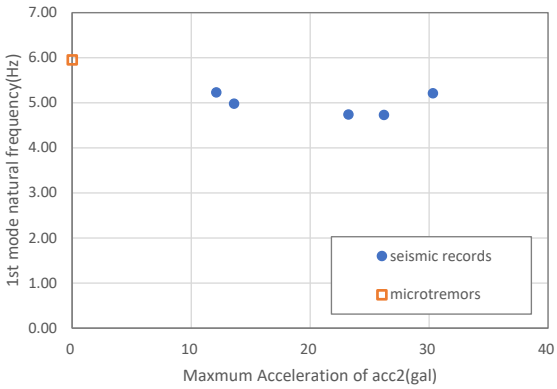


図 7　建物の最大加速度と 1 次の固有振動数の関係

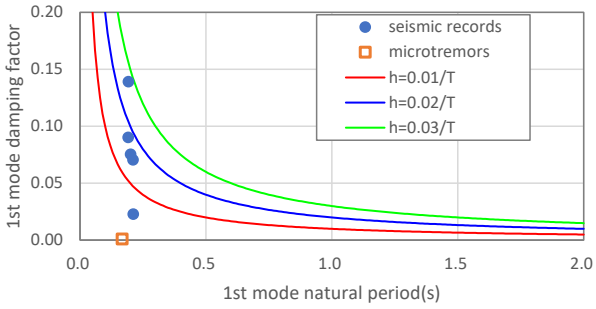


図 8　建物の 1 次の固有周期と減衰の関係

5．まとめ

横浜市災害時避難施設の継続使用性判断方法の基礎的資料とすることを目的に，加速度やひずみの常時観測システムを構築した．ここでは，まず常時観測開始前の地盤や体育館を対象とした事前検討の結果を整理した．また，常時観測開始後の観測結果から，5 地震記録を抽出し分析した．分析は体育館全体の振動特性に着目し，抽出した加速度観測記録を用いて，一次の固有振動数と減衰定数を推定した．

事前観測結果から，工学的基盤程度までに着目した地盤の卓越振動数は概ね 1.8Hz 程度であることが確認できた．これは，常時観測の基礎上面の記録を用いた地震記録のスペクトルによるピークとも概ね整合的である．また，床面とキャットウォークを用いた建物の固有振動数の簡易評価では，6Hz 程度であった．

常時観測結果の中から 5 つの地震記録に対し，柱上端と基礎上面の伝達関数から建物固有振動数を算出した．5 つの記録とも概ね同等であり，5Hz 程度の固有振動数が確認できた．これらの結果から，地盤と建物の固有振動数にはある程度ずれがあるため，共振現象による増幅の可能性は小さいと考えられる．

一方，加速度応答を用いた建物全体の応答特性では，直接的に構造骨組みの性能や損傷の評価が難しいことが知られている．そのためのひずみ度の観測結果を用いた評価検討についても並行して進めている[11), 12)]．

本検討で用いた観測システムは，安価で安定性が高く実用性が高いシステムの確立を目標としている．今後継続して長期間の計測を行うことで，計測装置の安定性や耐久性の検証も進める予定である．

謝辞

本研究は，神奈川大学工学研究所共同研究助成のもと，神奈川大学，新潟工科大学，東京大学，三者での共同研究体制により行いました．計測装置については，科学研究費助成事業(B)20H02293（研究代表者 伊山潤）の支援により制作しています．また，計測に当たっては小学校関係者の皆様に多大なご協力を頂きました．事前検討での観測やデータ整理では，神奈川大学の松本聖氏の協力を得ました．ここに記して謝意を示します．

参考文献

1）落合努，荏本孝久：横浜市の地域防災拠点を対象としたマルチハザード評価　-避難者数に着目した基礎的研究-，地域安全学会梗概集，No.48，2021

2）国土交通省：20万分の1土地保全シームレスデータ

3）防災科学技術研究所：J-SHIS　地震ハザードステーション https://www.j-shis.bosai.go.jp/

4）先名重樹，藤原広行：微動探査観測ツールの開発　その 1-常時微動解析ツール-，防災科学技術研究所研究資料，第 313 号，2008

5）長郁夫，先名重樹：極小微動アレイによる浅部構造探査システム　-大量データの蓄積と利活用に向けて-，Synthesiology，2016

6）横浜市：地盤地図情報「地盤 View」

7）日本道路協会：道路橋示方書・同解説　V耐震設計編，2017

8）笠井和彦，村田真一郎，加藤史人，引野剛，大木洋司：震動台の回転を加味した建築試験体の周期・減衰・モード形の同定法，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 670 号，2011

9）荒川利治，谷口竜紀，中村尚弘，木下拓也，東城峻樹：高次モードを含めた鉄骨造中層建物の地震時における振動特性評価，日本建築学会構造系論文集，第 80 号，第 717 号，2015

10）鹿嶋俊英，北川良和：強震観測記録から推定した建物の振動特性の特徴，日本建築学会技術報告集，第 22 号，2005

11）涌井将貴，伊山潤，本吉弘岐：鉄骨造体育館のひずみ計測に基づく地震時の応力分布評価，鋼構造年次論文報告集，2020

12）涌井将貴，白井佑樹，伊山潤：鉄骨造体育館のひずみ計測に基づく地震時のブレース挙動，鋼構造年次論文報告集，2021

多点同時微動測定に基づく高知県中土佐町旧役場庁舎の振動モード

Mode identification of the former Nakatosa Town Office building in Kochi Prefecture from microtremor measurement records

○栗田哲[1]，羽田浩二[1]，山田雅行[1]，原忠[2]，中村友紀子[3]，
深津宗祐[4]，エルドンオチル[1]，竹本彬人[1]

Satoshi KURITA[1], Koji HADA[1], Masayuki YAMADA[1], Tadashi HARA[2],
Yukiko NAKAMURA[3], Sosuke FUKATSU[4], Eridengaoqier[1] and Akito TAKEMOTO[1]

[1] 東京理科大学
Tokyo University of Science
[2] 高知大学
Kochi University
[3] 千葉大学
Chiba University
[4] (株)ニュージェック
NEWJEC Inc.

To develop a structure health monitoring method, we measured ambient vibration of the former Nakatosa Town Office building in Kochi Prefecture and identified vibration modes using FDD technique. The building is a 3-story RC structure and formed in a both ends core structure. It is found that the cores vibrate by the sway rocking motions of the foundation, and that the office space portion of the building vibrates as if non-rigid slab model..

Keywords *: Reinforced concrete structure , Both ends core structure, FDD technique, Sway rocking ratio, non-rigid slab*

１．はじめに

地方自治体の庁舎は地域防災の重要拠点であり、庁舎の構造健全性を診断することは必要不可欠である。構造健全性診断法を開発するための基礎資料を得るために、高知県中土佐町旧役場庁舎の多点同時微動測定を行った。架構だけでなく床スラブについても、卓越振動数、増幅特性、振動モードを微動測定により調べ、振動モードの空間的な特性や違いについて検討を行った。得られた結果について報告する

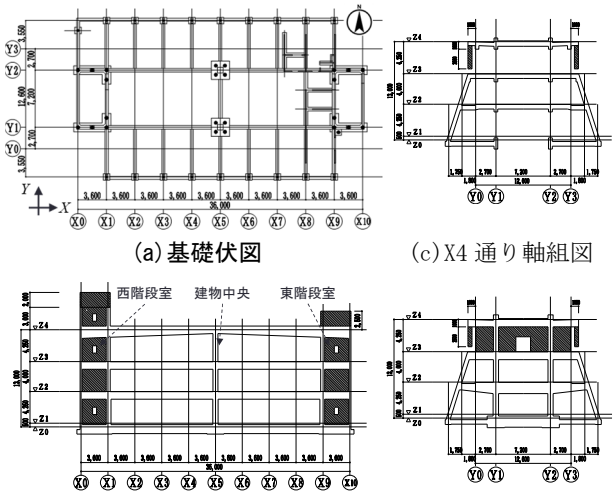
２．建物の構造概要と微動測定

北東から撮影した本建物の全景を写真１に示す。本建物は３階建てRC造で、1971年に竣工された。建物概要を表１に、伏図・軸組図を図１に示す。図１では、長辺方向をX方向、短辺方向をY方向としている。本建物は、東西の妻面に階段室を配し、階段室をコアとした両端コア構造となっている（図(b)）。階段室の壁厚は 300～500mm である。コアに挟まれたオフィス空間の床を、外柱、X5 通りにある内柱、階段室で支えるようにして、広いオフィス空間を創っている。Y1通りとY2通りにある大梁のスパンは 14.4m であり、RC 造としては長いスパンである。外柱が傾いており、X 軸通りの架構は異形ラーメン構造と

写真１　建物外観

表１　建物概要

規模	地下0階・地上3階・塔屋1階
建築面積	551㎡
軒高さ	13m
建物長	X:36m　Y：16.2m



(a) 基礎伏図　(c) X4 通り軸組図

(b) Y2 通り軸組図　(d) X5 通り軸組図

図１　伏図・軸組図

なっている（図(c),(d)）。柱の傾斜角度は約 25 度である。建物中央(X5 通り)の架構には 3 階に厚 200mm の壁がある（図(d)）。建物は杭で支持され、支持地盤は 2 種地盤である。

本建物の試験的な微動測定を2022年1月18～19日に行った。使用した振動計はポータブル加速度計JU210シリーズ（白山工業製、水平2成分・上下1成分）5台で、JUを移動して西階段室、東階段室、X5通りの架構、１階床の測定を行った。

３．振動モード

文献１の方法を使用して、西階段室、建物中央、東階段室、1階床のそれぞれについて振動システムを同定した。振動システムは地盤を含む建物の振動システムで、減衰は比例減衰とした。

(1) X方向振動モード

地表面に対する屋上階床（東階段室は中屋上階床）のX方向の伝達関数の振幅を図2に示す。西階段室、建物中央、東階段室の全てに3.5Hz辺りに卓越振動数がある。同定したX方向１次振動モードを図3に示す。高さ0mの値は地表面のモード変位である。固有振動数とモード形状の両方とも、場所による違いはない。スウェイ・ロッキング率を調べるための測定で得られたデータから同定した振動モードを図中の赤丸（固有振動数は括弧内の値）で示す。この振動モードから求めた西階段室と東階段室のスウェイ・ロッキング率は下表の通りである。

	西階段室(屋上階床)	東階段室（3階床）
スウェイ率	15.7%	22.1%
ロッキング率	59.3%	55.8%

階段室の振動モードは基礎のスウェイ・ロッキング振動による応答で殆ど説明できる。

(2) Y方向振動モード

地表面に対する屋上階床（東階段室は中屋上階床）のY方向の伝達関数の振幅を図4に示す。伝達関数の卓越振動数は5.5～7.5Hzにあり、その値は場所で異なる。同定したY方向１次振動モードを図3に示す。モード同定により固有振動数を特定できたが、西階段室と建物中央の固有振動数はほぼ同じ、東階段室の固有振動数はそれらよりも18%も高いという結果が得られた。建物中央のモード形状は階段室と異なり、3階でのモード変位の変化は僅かである。これは3階にある壁によると考えられる。振動モード（図中の赤丸）から求めた西階段室と東階段室のスウェイ・ロッキング率は下表の通りである。

	西階段室(屋上階床)	東階段室（3階床）
スウェイ率	26.9%	35.7%
ロッキング率	50.2%	43.5%

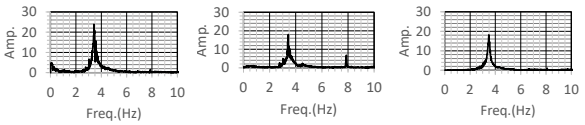
X方向振動モードと同様に、階段室の振動モードは基礎のスウェイ・ロッキング振動による応答で殆ど説明できる。

(3) 1階床の振動モード形状

X方向１次振動モード(3.43Hz)の1階床のX方向のモード変位を図6に示す。西階段室に接続するX1～X2間の床でモード変位が増大しており、床の面内変形が認められる。Y方向１次振動モード(5.71Hz)の1階床のY方向のモード変位を図6に示す。モード変位は直線的に変化しており、１階床が捩じれて回転しているかのように見える。これについては、X6～X9通りの測定を行って検討する予定である。

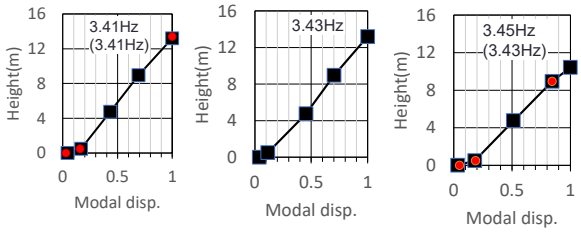
４．まとめ

両端コア構造の庁舎の振動モードについて以下の結果が得られた。



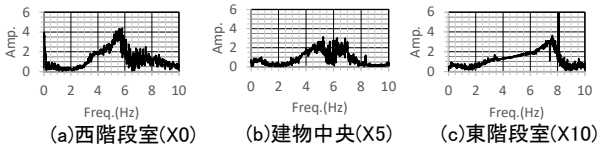
(a)西階段室(X0)　(b)建物中央(X5)　(c)東階段室(X10)

図 2 X 方向の伝達関数の振幅



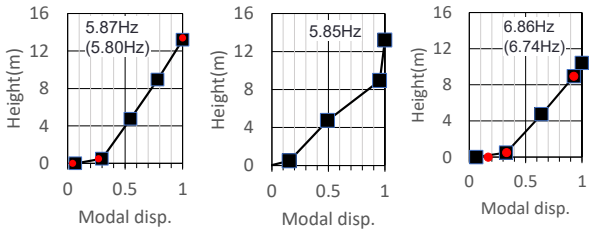
(a)西階段室(X0)　(b)建物中央(X5)　(c)東階段室(X10)

図 3 X 方向 1 次振動モード



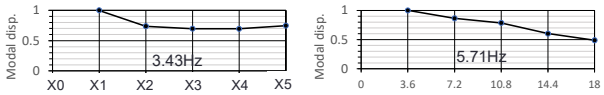
(a)西階段室(X0)　(b)建物中央(X5)　(c)東階段室(X10)

図 4 Y 方向の伝達関数の振幅



(a)西階段室(X0)　(b)建物中央(X5)　(c)東階段室(X10)

図 5 Y 方向 1 次振動モード



(a)X 方向　(b)Y 方向

図 6 １次振動モードの１階床のモード形状

・コアである階段室のX方向とY方向の両方向とも、スウェイ・ロッキング振動が主たる振動である。

・階段室に接す1階床のX方向の変位に関して非剛床が認められる。

・Y方向１次振動モードに関して、建物中央と階段室とではモード形状が異なること、東階段室は西階段室と建物中央より13%程度高い。

謝辞

本微動測定は高知県中土佐町のご協力により行うことができた。また、本研究は科研費基盤研究(C)（一般）「常時微動を用いた実庁舎の杭頭探傷と地震時における杭基礎の危険度判定手法の開発」（課題番号：22K04407、研究代表者：羽田浩二）の一環として行った。ここに記して、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1)飯山かほり，栗田哲：近接モードの影響を考慮したスペクトル分解による FDD 法の理論的背景，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 684 号，pp271-179，2013.2

横断歩道橋に対する常時微動観測で得られた振動特性
Vibration characteristics obtained by micro tremor observation for a pedestrian bridge

○深津 宗祐[1]，江口 拓生[1]，中村 友紀恵[1]，山田 雅行[1]，羽田 浩二[1]
Sosuke FUKATSU[1]，Hiroki EGUCHI[1]，Yukie NAKAMURA[1]，
Masayuki YAMADA[1]，Koji HADA[1]

[1] (株)ニュージェック
NEWJEC Inc.

Most pedestrian bridges in Japan have reached the time of repair and renewal due to aging. In addition, some pedestrian bridges have been damaged due to a large-scale earthquake, that was not expected at the time of construction. In order to increase accuracy of damage expectation and prevention, it is required to properly grasp vibration characteristics of both bridges and surrounding grounds and acquire quantitative data. In this study, we observed micro tremors of many pedestrian bridges and surrounding grounds. We discuss the observed vibration characteristics comparing with the characteristics considered in designing.

Keywords *: Pedestrian bridge, MicroTremor, Vibration characteristics*

１．はじめに

1960 年代より自動車利用の進展とともに交通事故が多発し社会問題化したなか，歩行者の交通安全の確保と自動車交通の円滑化を目的に，横断歩道橋は横断者を道路又は鉄道の面より上方に分離した立体横断施設として全国で整備が進められた．しかし近年は老朽化による修繕・更新の時期を迎え，大規模地震による落橋被害といった被害も出ている．

横断歩道橋では，歩行者に不快感を与えないために，桁の固有振動数が 2Hz 付近にならないような設計をすることが立体横断施設技術基準・同解説 [1)]に規定されている．

しかし，経年劣化による橋梁自体の振動特性の変化や，地盤の固有周期との共振の可能性が考えられるため，歩道橋の設置地点の地盤および橋梁の振動特性を適切に把握しておくためにも，定量的なデータの取得は重要である．

そこで本検討では，横断歩道橋の常時微動観測を行い，観測結果と横断歩道橋の設計時の振動特性との関係について議論を行う．

２．観測概要および観測結果

(1) 常時微動観測の概要

常時微動観測はポータブル加速度計JU210シリーズ（白山工業製 水平2成分・上下1成分）4台を使用する．

横断歩道橋の橋軸方向をNS方向（地盤に設置した加速度計がある側を北側）とし，地盤一か所，桁三か所の15分間同時観測を実施した（**図-1**）．

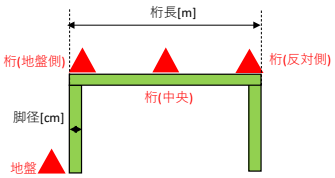


図-1　地震計の配置位置

表-1に対象とした横断歩道橋の一覧を示す．西日本を中心に全26か所において観測を実施し，支間長，橋脚径などを実測した．

なお完成年度，幅員については全国Q地図[2)]を参照した．

表-1　対象とした横断歩道橋の概要

No.	都道府県名	市町村名	完成年度	幅員[m]	桁長[m]	脚周[cm]	脚径[cm]
1	大阪府	大阪市	1967年	1.5	22.3	224	71.3
2	鹿児島県	鹿屋市	1967年	1.5	13.5	162	51.6
3	静岡県	長泉町	1992年	2.1	30.7	220	70.0
4	静岡県	御殿場市	1983年	2.0	33.1	256	81.5
5	山梨県	富士吉田市	1967年	1.5	14.1	192	61.1
6	山梨県	山中湖村	1968年	1.5	14.1	192	61.1
7	奈良県	天理市	1983年	2.3	19.4	192	61.1
8	奈良県	斑鳩町	1967年	1.5	14.4	161	51.2
9	奈良県	生駒市	1975年	1.5	15.0	192	61.1
10	大阪府	大阪市	1970年	1.5	38.7	231	73.5
11	鹿児島県	霧島市	1991年	1.5	32.3	192	75.0
12	鹿児島県	霧島市	1971年	1.5	19.0	192	61.1
13	鹿児島県	姶良市	1968年	1.5	16.3	192	61.1
14	鹿児島県	姶良市	1968年	1.5	11.2	192	61.1
15	高知県	香美市	1987年	1.5	13.4	192	61.1
16	高知県	香美市	不明	1.5	12.2	192	61.1
17	鹿児島県	志布志市	1976年	1.5	13.7	192	61.1
18	鹿児島県	大崎市	1974年	1.5	17.3	192	61.1
19	鹿児島県	鹿児島市	1973年	1.9	14.2	230	73.2
20	鹿児島県	垂水市	1981年	1.5	18.0	192	61.1
21	鹿児島県	鹿屋市	1968年	1.5	17.8	192	61.1
22	大阪府	大阪市	1968年	1.5	21.4	192	61.1
23	高知県	南国市	1969年	1.5	23.5	192	61.1
24	高知県	南国市	1969年	1.5	23.0	192	61.1
25	高知県	高知県	1968年	1.5	16.0	192	61.1
26	高知県	高知県	1973年	1.5	22.9	192	61.1

(2) 観測結果の確認

地盤に設置した加速度計の観測記録から地盤のH/Vスペクトル比を算出し，地盤のピーク周波数を確認した．

算出したH/Vスペクトル比（**図-2**）の振幅が最も卓越するピークの周波数と振幅を読み取ることを基本とし，同等の卓越するピークが2つ以上ある場合は，1次周波数と考えられる低周波数のピークを読み取った．

また，地盤と桁（地盤側および反対側）の観測記録から 橋脚のスペクトル比を，桁（地盤側および反対側）と桁（中央）の観測記録から桁のスペクトル比を，水平2成分・上下1成分それぞれ算出した（**図-3**）．

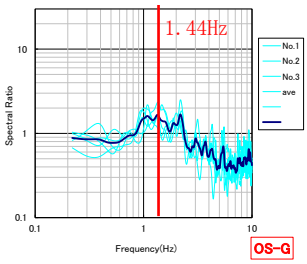


図-2　H/V スペクトル比

橋脚のスペクトル比を見ると，水平2成分・上下1成分ともに明瞭なピーク振幅を確認することができ，地盤側と反対側どちらの観測記録を用いた場合でも同じ傾向を示していることがわかる．

また，桁のスペクトル比を見ると橋軸方向が概ね全周波数帯で1倍となっていることから，橋軸方向に同位な動きをしており，ピーク振幅の倍率から上下動が顕著な揺れとして観測できていることがわかる．

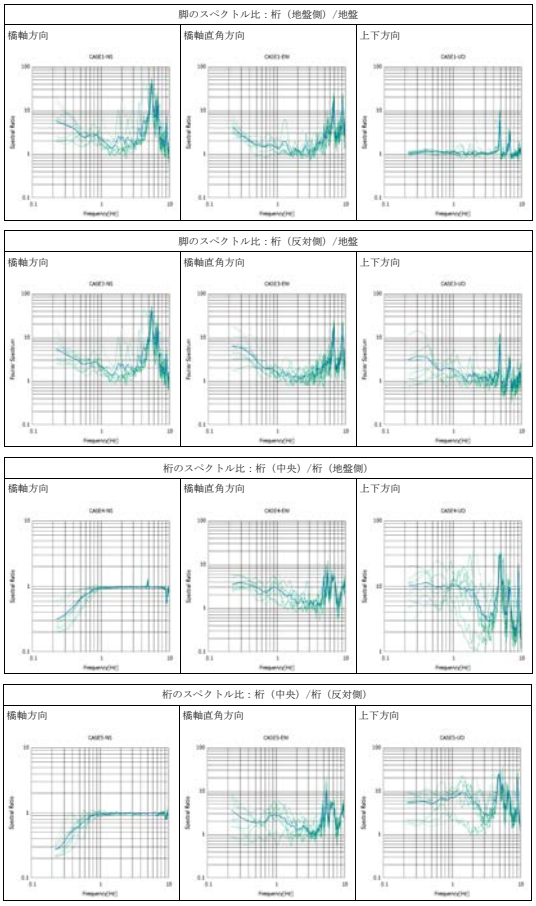


図-3　横断歩道橋の各スペクトル比の算出例

3．観測結果の考察

(1) 観測結果一覧の整理

ピーク振幅の倍率が大きくなる橋脚の橋軸方向の周波数と桁の上下動の周波数，地盤のH/Vスペクトル比から読み取った周波数を**表-2**に整理した．

横断歩道橋では，桁のたわみ振動に対して2Hzを避ける設計をするように規定されているが，橋脚の固有周波数について考慮されることは少ない．そのため，No.16およびNo.25のように地盤と橋脚の固有周波数が一致するようなケースでは，共振により地震発生時の被害が大きくなる可能性が示唆される．

表-2　対象とした横断歩道橋の観測結果一覧

No.	都道府県名	市町村名	完成年度	桁長[m]	周波数(脚)[Hz]	周波数(桁)[Hz]	周波数(地盤)[Hz]
1	大阪府	大阪市	1967年	22.3	5.49	4.96	1.44
2	鹿児島県	鹿屋市	1967年	13.5	3.59	7.62	2.12
3	静岡県	長泉町	1992年	30.7	1.88	4.32	3.93
4	静岡県	御殿場市	1983年	33.1	3.20	4.10	0.40
5	山梨県	富士吉田市	1967年	14.1	5.86	4.35	0.31
6	山梨県	山中湖村	1968年	14.1	5.22	9.74	6.65
7	奈良県	天理市	1983年	19.4	8.37	7.91	0.29
8	奈良県	斑鳩町	1967年	14.4	5.10	5.00	1.59
9	奈良県	生駒市	1975年	15.0	4.91	6.91	0.25
10	大阪府	大阪市	1970年	38.7	3.88	5.35	0.32
11	鹿児島県	霧島市	1991年	32.3	3.64	2.71	1.28
12	鹿児島県	霧島市	1971年	19.0	4.98	5.15	0.25
13	鹿児島県	姶良市	1968年	16.3	5.05	6.59	1.04
14	鹿児島県	姶良市	1968年	11.2	4.17	9.99	1.13
15	高知県	香美市	1987年	13.4	5.91	9.99	8.25
16	高知県	香美市	不明	12.2	5.71	9.99	5.63
17	鹿児島県	志布志市	1976年	13.7	5.83	8.91	3.38
18	鹿児島県	大崎市	1974年	17.3	4.93	5.79	0.60
19	鹿児島県	鹿児島市	1973年	14.2	4.20	8.40	0.27
20	鹿児島県	垂水市	1981年	18.0	4.49	5.62	7.43
21	鹿児島県	鹿屋市	1968年	17.8	8.11	4.13	3.09
22	大阪府	大阪市	1968年	21.4	4.17	4.32	1.23
23	高知県	南国市	1969年	23.5	1.90	6.54	8.18
24	高知県	南国市	1969年	23.0	6.08	9.99	0.34
25	高知県	高知県	1968年	16.0	4.96	8.01	4.67
26	高知県	高知県	1973年	22.9	4.22	3.71	1.80

(2) 観測されたたわみ振動と基準書との比較

立体横断施設技術基準・同解説[1)]にはたわみ振動について横断歩道橋の支間と1次固有振動数の関係が記載されており，支間が長くなればそれに伴い固有振動数は小さくなることが示されている．

図-4のように，基準書に示される支間と1次固有振動数の関係（青線）に桁のスペクトル比から読みとった周波数（赤点）をプロットすると，概ね同じような傾向を示している．このことから，常時微動観測は横断歩道橋の振動特性を捉えていると考えられる．

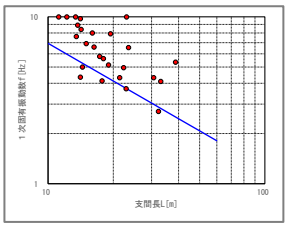


図-4　立体横断施設技術基準・同解説[1)]との比較

4．まとめ

全 26 か所の横断歩道橋に対して常時微動観測を行い，橋脚，桁，地盤の固有周波数を整理した．

また，求められた固有周波数が立体横断施設技術基準・同解説[1)]に示される 1 次固有振動数と支間長の関係と概ね同じような傾向を示しており、常時微動観測が横断歩道橋の振動特性の把握に有用である可能性が示された．

謝辞

本研究を実施するにあたり，国土交通省　国土技術政策総合研究所の石井洋輔研究官に貴重なご意見をいただきました．ここに記して深謝の意を表します．

参考文献

1) 立体横断施設技術基準・同解説(昭和 54 年 1 月):社団法人日本道路協会.

2) 各種地形図・地図情報の統合閲覧サイト 全国 Q 地図(https://maps.qchizu.xyz/#6/37.900865/138.449707/&base=pale&ls=pale%7Cmlit_road2019_footbridge_01&disp=11&lcd=mlit_road2019_footbridge_01&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f2&d=m), (2022.4.5 閲覧).

死者軽減を目的とした積雪荷重の季節変動性に伴う要耐震化木造住居の推定

Estimation of Wood Frame Dwellings Requiring Seismic Strengthening for Minimize the Death Tolls due to Seasonal Variability in Snow Load

村山 凜成[1]，中嶋 唯貴[2]，竹内 慎一[3]，岡田成幸[4]
Rinsei MURAYAMA[1] , Tadayoshi NAKASHIMA[2] , Shinichi TAKEUCHI[3] and Shigeyuki OKADA[4]

[1] 北海道大学大学院工学院 建築都市空間デザイン専攻
Division of Architectural and Structural Design Graduate School of Engineering, Hokkaido University
[2] 北海道大学大学院 工学研究院
Faculty of Engineering, Hokkaido University
[3] 北海道立総合研究機構
Hokkaido Research Organization
[4] 北海道大学大学広域複合災害研究センター
Center for Natural Hazards Research, Hokkaido University

In snowy and cold regions, if an earthquake occurs during a severe winter, casualties may increase due to snow accumulation. There are a large number of faults in Hokkaido, and it is essential to evaluate damage on various faults taking seasonal variability into account. Therefore, in this study, three different regions in Hokkaido are targeted, and human casualties are evaluated for the expected earthquakes in each region, including the effects of snow loads on structural components, in order to evaluate the seasonal variations that occur from month to month. In addition, we estimated the number of houses that would require seismic retrofitting with the goal of reducing the number of fatalities.

Keywords *: Snowy and Cold, Coldest Period, Snow Load, Seismic Performance, Wood Frame Dwellings, Death Tolls*

1. はじめに

積雪寒冷期に地震が発生した場合、積雪の影響を受け住宅被害が増加し、死傷者が増大する可能性がある。内閣府 [1)]による日本・千島海溝地震における被害想定においても、冬季の影響を考慮した被害想定結果が公開され、道内の死者は津波の影響が大半ではあるが最大 13 万 7 千人と未曾有な数となっている。建物被害に関しても、北海道の建物の耐震性能や積雪の影響の有無を考慮した被害関数を用いて評価されている。しかしながら、道内各地の積雪の影響や季節における変動性は評価されていない。道内には多数の断層が存在しており、各地域において積雪の量が大きく異なることから季節変動性を考慮しする必要がある。また、減災戦略においても、冬季の被害状況に即したものにはなっておらず、各種断層における積雪の季節変動を被害評価に即した軽減戦略の検討は必要不可欠である。そこで、本研究では道内における札幌商圏、函館商圏、稚内商圏を対象とし、各地域の想定地震に関して、積雪荷重の構造部への影響を加えた被害評価を実施することにより、死傷者の月毎の季節変化を評価する。加えて、死者軽減を目標とし、耐震改修による耐震性能向上が必要となる家屋数の推定を実施した。

2. 地震情報と積雪データ

本研究の地震動については、北海道防災会議[2)]において想定されている月寒断層地震(M=6.76)、函館平野西縁断層帯地震(M=6.6)、サロベツ断層帯地震(M=7.1)を用いた。また、積雪データとして気象庁[3)]における月毎の最深積雪深の平年値(1991年~2020年)を用いた。図1~図3に月寒断層地震、函館平野西縁断層帯地震、サロベツ断層帯地震の震度分布を示す。図4に各商圏の最深積雪深分布(2月)を示す。人口データは平成27年の国勢調査[4)]、木造住宅率は平成30年の住宅・土地統計調査[4)]を参照した。

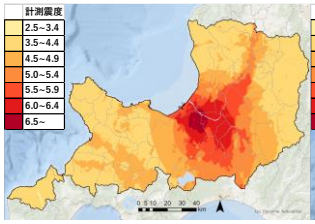


図 1　月寒断層

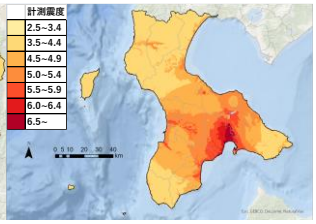


図 2　函館平野西縁断層帯

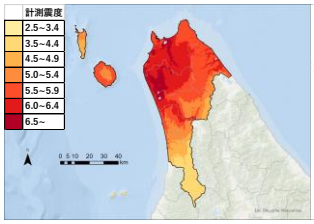


図 3　サロベツ断層帯

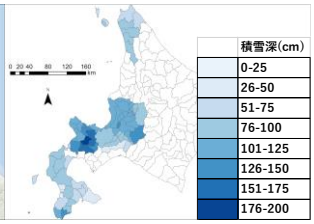


図 4　最深積雪深分布(2 月)

3. 積雪に伴う人的被害推定手法

3.1. 推定の手順

本論においては、人的被害推定に際し木造住居を対象とする。図5に推定手順のフローチャートを示す。

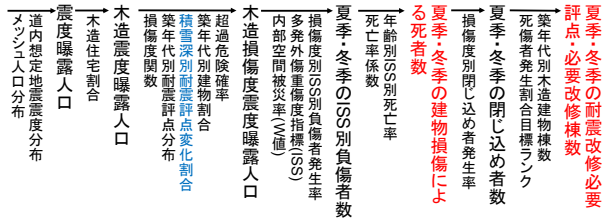


図 5　人的被害推定手順

3.2.　積雪を考慮した人的被害評価

死傷者推定については、積雪時の木造住居の耐力分布の変化を考慮する。積雪荷重によって変化する耐力分布は、中嶋他[5]の手法を参考に、竹内他[6]による木質構造の耐力分布を用いる。また、積雪深による耐震評点の減少割合に関しては式(1)を掛け合わせることで算出した。

$$r=a/(a+b\times H) \tag{1}$$

ここでrは積雪深別耐震評点変化割合であり、積雪深ごとの木造住居の各耐震評点における低減率である。Hは積雪深、a,bは竹内他[7]により、耐震診断時における耐震評点と積雪荷重の関係から定数a=0.81、b=0.33と設定した。積雪深ごとの低減率を図 6 に示す。図 6 より、積雪深が増加するにつれて耐震評点が低減することが分かる。また、札幌市における積雪深による夏と冬の耐力分布の違いを図 7 に示す。図 7 より、最頻値を見ると 0.8 から 0.5 まで減少しており積雪の影響の大きさがわかる。建物倒壊に伴う死傷者数は岡田他[8]より以下の式(2)(3)にて算出した。

$$M_{ISS}(\theta)=\sum_{x=0.6}^{1.0}\sum_{I=0}^{I=7.4} Pw\,(I,\Delta x)\cdot P_{\Delta x}(\theta) \tag{2}$$

$$P_D=\int_0^{75} M_{ISS}(\theta)\times d(\theta)\times E(y)\cdot d\theta \tag{3}$$

ここで$M_{ISS}(\theta)$はISS別負傷者数、$Pw\,(I,\Delta x)$は内部空間被災率W値を加味した木造住家の損傷度別損失空間人口、$P_{\Delta x}(\theta)$は住家の損傷度別で発生する負傷者のISS分布、Iは震度、Δxは建物損傷度[0,1.0]、θはISSの値[0,75]を表す。また、式(2)を基に死者数P_Dを式(3)で算出した。死亡率関数$E(y)$は周辺全壊率yより決まる一様な値であり、$d(\theta)$は年齢別ISS別死亡率である。

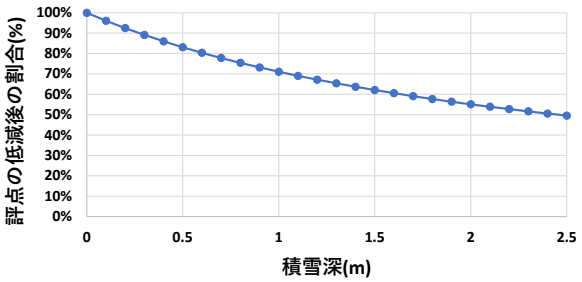


図 6　耐力分布低減率

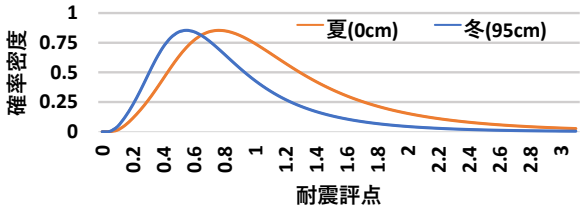


図 7　札幌市-夏季・冬季耐力分布

4.　推定結果と季節における変化

4.1　各商圏における死者数の季節変化

図8から図10に各商圏の人的被害推定における月別の死者数と総人口の内の死者数の割合を示す。3商圏とも夏季の5月から10月までは殆ど変化はなく、冬の始まる11月より積雪の増加とともに死者が増加し2月をピークに4月まで積雪による死者数の増加がみられた。一方、積雪がない夏季の8月から年間で最も積雪の多い2月の死者の増加倍率を比較すると、札幌商圏が約3.3倍、函館商圏が約1.9倍、稚内商圏が約2.9倍であり、各商圏で死者の増加倍率に差がみられた。ここで各商圏における死者の大多数を占める市町村の2月における最深積雪深を比較すると、札幌市(札幌商圏)で95cm、北斗市(函館商圏)で55cm、稚内市と豊富町(稚内商圏)でそれぞれ64cm、88cmである。したがって、主要な市町村における冬季の積雪が多い商圏ほど、死者の増加倍率が大きいことがわかる。

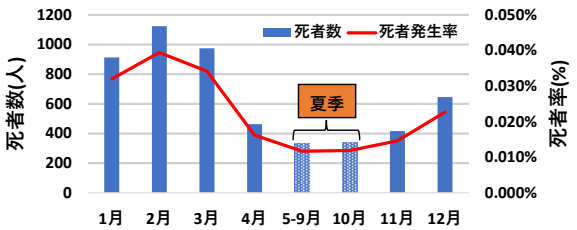


図 8　札幌商圏-死者数の季節変化

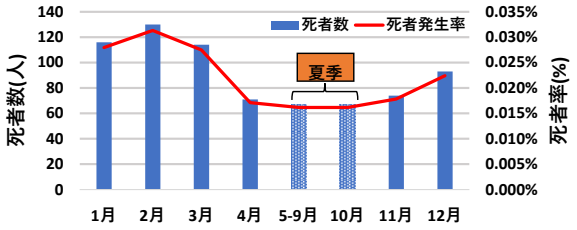


図 9　函館商圏-死者数の季節変化

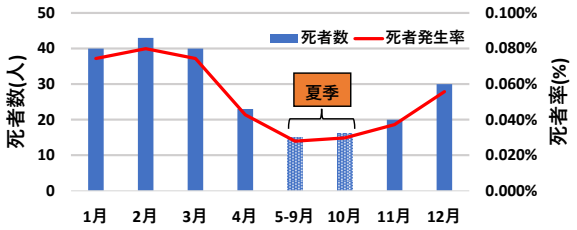


図 10　稚内商圏-死者数の季節変化

4.2　積雪の影響比較

本論における推定方法では、市町村別の建築年代別建物割合と最深積雪深によってそれぞれ耐力分布が作成されるため、夏季・冬季の死者の変化度合いは単に積雪の影響のみでは判断できない。そこで、4.1における結果が積雪の影響によるものなのかを確かめるために、各商圏において死者の大多数を占める札幌市(札幌商圏)、北斗市(函館商圏)、稚内市(稚内商圏)で比較を行った。図11~13に各市における月別の死者数と最深積雪深を、図14~16に各市における建築年代別建物割合と耐力分布の季節変化(2月・8月)を示す。まず、札幌市と北斗市を比較する。図11,12より、札幌市のほうが北斗市より夏季から冬季にかけて死者の増加度合いが大きいことがわかる。ここで図14,15を見ると、死者の主な発生源である1980年代以前の建築年代別建物割合が2市町村で類似していることから積雪が影響しない夏季の耐力分布が類似していることがわかる。一方で、冬季の耐力分布では差がみられ、

札幌市のほうが北斗市より大きく低減している。その原因は2月の最深積雪深が札幌市(95cm)と北斗市(55cm)で大きな差があることに他ならない。以上より、積雪深の大小が冬季の死亡リスク増加に強く影響しているといえるだろう。これを踏まえて、次に札幌市と稚内市を比較する。図16より、稚内市では1980年以前の建物割合が合計50%を超えているため、夏季の耐力分布も最頻値0.75の分布であり、札幌市の最頻値0.8の耐力分布よりも死亡リスクが大きいことが分かる。一方で冬季の耐力分布を比較すると稚内市は最頻値が0.55、札幌市は最頻値が0.5である。図13より、稚内市の2月の最深積雪深は64cmで、札幌市の記録よりも30cm以上小さいことから、冬季では逆転して札幌市のほうが死亡リスクが大きくなる。以上より夏季から冬季への死者の増加倍率も札幌市のほうが大きく、積雪による耐力分布低減の影響力の強さが窺える。

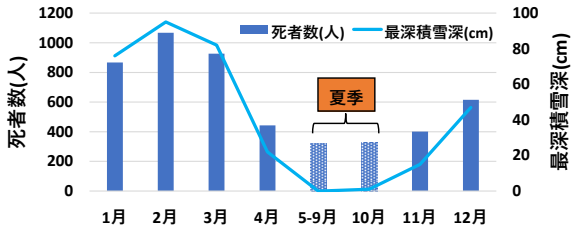


図 11　札幌市-月別の死者数・最深積雪深

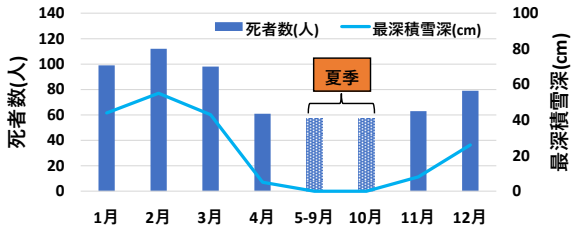


図 12　北斗市-月別の死者数・最深積雪深

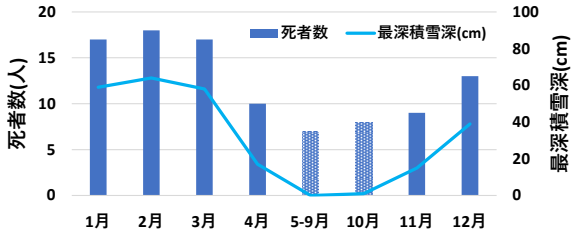


図 13　稚内市-月別の死者数・最深積雪深

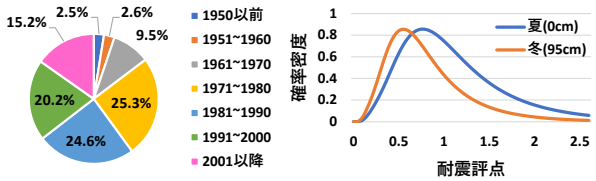


図 14　札幌市-築年代別建物割合と耐力分布季節変化

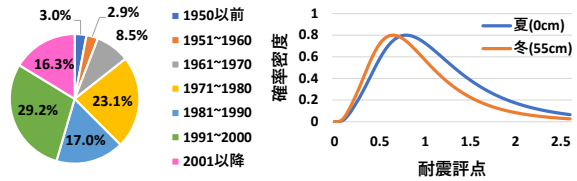


図 15　北斗市-築年代別建物割合と耐力分布季節変化

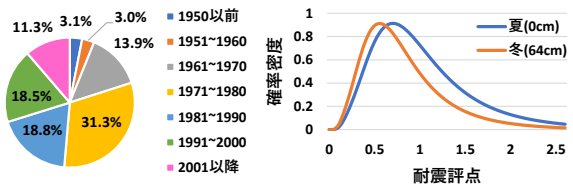


図 16　稚内市-築年代別建物割合と耐力分布季節変化

5.　人的被害軽減のための事前対策

5.1.　積雪による要耐震改修建物の推定

人的被害推定によって算出された死傷者の発生を減らすためには、木造住居の耐震化が必須である。そのため、死傷者数を軽減するためには、木造住居の特定が必要となる。本研究においては、各商圏の被害の多くを占める、札幌市(札幌商圏)、函館市(函館商圏)、北斗市(函館商圏)、稚内市(稚内商圏)、豊富町(稚内商圏)の5市町村を対象に、死者を発生させないために必要な耐震評点とその時の改修棟数を建築年代別、夏季・冬季別に算出した。本論では、4.2のうち札幌市と北斗市について報告する。

5.2.　札幌市-要耐震改修木造住居

人的被害推定において、札幌市で死者の多かった1970年以前の各築年代における耐震評点別の死者発生数を図17~図19に示す。各築年代の死者数の合計を夏季・冬季比較すると、1950年以前で192人、1951年~1960年で133人、1961年~1970年で249人冬季のほうが多い。また、耐震評点sが小さい建物では夏季・冬季で大きな差はないが、s=0.25~s=0.35未満でその差が著しくなり、夏季でほぼ死者発生がなくなるs=0.35以上でも、冬季では死者が発生することがわかる。本論では、各年代の推定における死者が0.5人未満の時、死者が発生しないとし、表1に死者を0人とするために必要な耐震評点を、表2にその時の改修棟数をそれぞれ建築年代別、夏季・冬季別に示す。表1より札幌市では、冬季のほうが必要耐震評点が0.15高く築年代も10年分新しい建物まで改修を行う必要がある。さらに、表2より冬季では耐震改修の総必要棟数が夏季の約2.2倍であり、その差は32,000棟に及ぶことが判明した。耐震性能の高いといわれている北海道の木造住居であるが、積雪により棟数が大きく拡大し得る。特に札幌市は人口約200万人の大都市であるため、必要な改修棟数の絶対数も大きい結果となった。

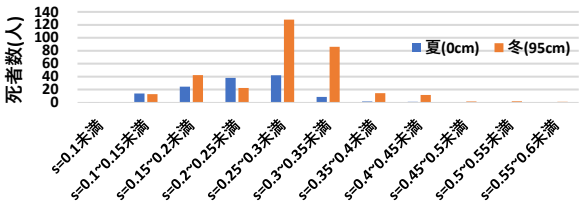


図 17　札幌市-1950 年以前評点別死者発生数

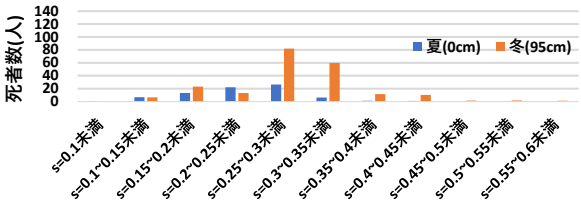


図 18　札幌市-1951 年~1960 年評点別死者発生数

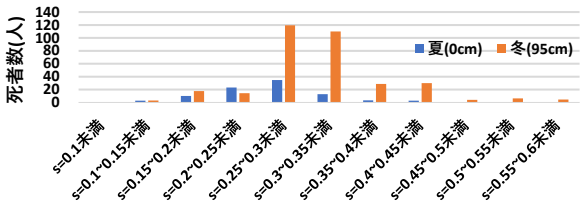


図 19　札幌市-1961 年~1970 年評点別死者発生数

表 1　札幌市-死者を発生させないために必要な耐震評点

	1950以前	1951~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001以降
夏(0cm)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45		
冬(95cm)	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	

表 2　札幌市-死者を発生させないために必要な改修棟数

	1950以前	1951~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001以降
夏(0cm)	4,901棟	3,753棟	8,778棟	7,874棟	1,311棟	0棟	0棟
冬(95cm)	6,378棟	5,416棟	15,352棟	22,611棟	6,791棟	2,115棟	0棟

5.3.　北斗市-要耐震改修木造住居

札幌市と同様に、北斗市で死者の多かった1980年以前の各築年代における耐震評点別の死者発生数を図20~図23に示す。各築年代の死者数の合計を夏季・冬季比較すると、1950年以前で10人、1951年~1960年で8人、1961年~1970年で16人、1971年~1980年で17人冬季のほうが多く、建物割合がより大きい1961年~1970年や1971年~1980年で死者数の季節差が大きいことがわかる。また、北斗市においても札幌市と同じく、冬季では耐震評点s=0.35以上の建物において多くの死者が発生しており、より安全な建物にも被害が及ぶと考えられる。表3に死者を0人(0.5人未満)とするために必要な耐震評点を、表4にその時の改修棟数をそれぞれ建築年代別、夏季・冬季別に示す。表3より北斗市では、冬季のほうが必要耐震評点が高く、1971年~1980年においては冬季では耐震評点0.7の建物まで改修の必要がある。また、築年代も冬季のほうが20年分新しい建物まで改修の必要がある。さらに、表4より冬季では耐震改修の総必要棟数が夏季のちょうど2倍であり、その差は1430棟である。以上より、北斗市も冬季の積雪により棟数が大きく拡大する。同市は人口約3万人のまちであるため被害や必要な改修棟数の絶対数は札幌市に比べて少ないが、人口に対する死者数や総木造棟数に対する必要な改修棟数の割合で考えると札幌市よりその割合が高く、大きな被害が発生するともいえるだろう。

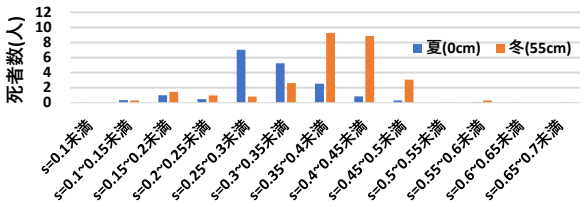


図 20　北斗市-1950 年以前評点別死者発生数

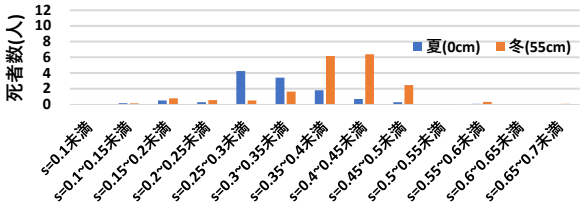


図 21　北斗市-1951 年~1960 年評点別死者発生数

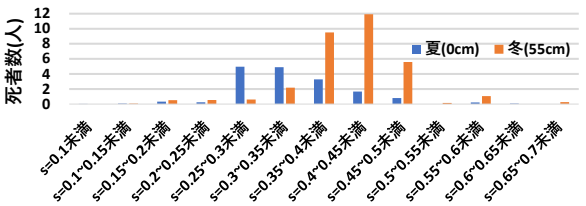


図 22　北斗市-1961 年~1970 年評点別死者発生数

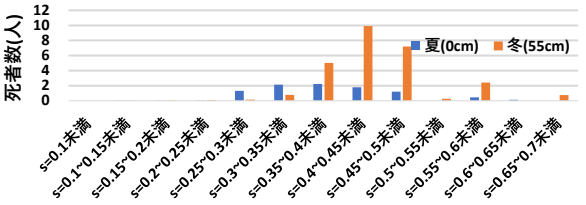


図 23　北斗市-1971 年~1980 年評点別死者発生数

表 3　北斗市-死者を発生させないために必要な耐震評点

	1950以前	1951~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001以降
夏(0cm)	0.45	0.45	0.50	0.50			
冬(55cm)	0.50	0.50	0.60	0.70	0.60	0.50	

表 4　北斗市-死者を発生させないために必要な改修棟数

	1950以前	1951~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001以降
夏(0cm)	264棟	191棟	460棟	515棟	0棟	0棟	0棟
冬(55cm)	295棟	223棟	639棟	1,440棟	218棟	45棟	0棟

6.　おわりに

本論では、積雪深によって変化する人的被害推定を実施し、地域、季節により人的被害発生危険性は大きく変化することを示した。また、被害軽減のための事前対策において冬季を対象として対策を実施しておくことの重要性から、積雪寒冷期に大地震が発生することの脅威と冬季を見据えた事前対策の重要性を示した。今後は、全道において評価を実施し冬季の人的被害発生リスクを把握した後、北海道において地域の自治体に合わせた死者軽減戦略の立案をしていく所存である。

参考文献

1)内閣府中央防災会議：日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震の被害想定について【定量的な被害量】,令和 3 年 12 月 21 日,http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/WG/pdf/211221/shiryo03.pdf (2022-04-18 現在)

2)北海道：平成 28 年度地震被害想定調査結果報告書,平成 30 年 2 月,http://kyouiku.bousai-hokkaido.jp/wordpress/wp-content/uploads/2018/01/h30_jishinsenmon_02-2_1-118.pdf　(2022-04-18 現在)

3)気象庁：https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html　(2022-04-18 現在)

4)総務省統計局：https://www.e-stat.go.jp/ (2022-04-18 現在)

5) 中嶋 唯貴, 岡田 成幸, 高橋 遥, 耐震改修により死者低減を効率的に進めるための木造家屋耐震評点の効果的目標値再設定, 地域安全学会論文集, 2014, 24 巻, p. 11-19

6)竹内慎一、岡田成幸、中嶋唯貴：地域性及び時代性を考慮した木造建築物の地域地震被害率関数構築法の提案－北海道を例とした耐震評点分布を利用する方法－,日本建築学会構造系論文集, 2018

7)竹内慎一、中嶋唯貴、岡田成幸、麻里哲広：北海道の積雪期に対応した建物リスク評価手法の基礎的検討 －その 2 一般診断法による積雪を考慮した被害計算方法－,支部研究発表会,2022

8)岡田成幸、中嶋唯貴：大規模地震に対する地域保健基盤整備実践研究 大地震に伴う人的被害の重症度指標別詳細評価法の提案~想定南海トラフ巨大地震による震動及び津波被害を例に試算~,大規模地震に対する地域保健基盤整備実践研究 平成 26 年度 総括・分担研究報告書, 2015

PIX2PIXを用いた沿岸域におけるDSMからDTMを生成する試み

Attempt to generate DTM from DSM in coastal areas using pix2pix

○八嶋 恵一朗[1]，篠原 崇之[2]，押尾 晴樹[1]，松岡 昌志[1]
Keiichiro YASHIMA[1], Takayuki SHINOHARA[1], Haruki OSHIO[1], Masashi MATSUOKA[1]

[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] 株式会社パスコ 経営戦略本部 総合研究所
Innovation Technology Office Research Center, PASCO Corporation

In terms of disaster mitigation, the Digital Terrain Model (DTM) is used to evaluate tsunami and flood inundation areas and depths and to create hazard maps. However, most of the three-dimensional features obtained from satellites, aircraft, and drones are Digital Surface Models (DSM), which include height information of buildings and trees. Omitting those heigchts and creating DTM from DSM requires an enormous amount of time and technical expertise. For these reasons, there are areas in developing countries where high-resolution DTM is not available, and as a result, the inundation depth estimation and hazard mapping are difficult. Therefore, in this study, we preliminary used pix2pix[3] to generate DTM from DSM in coastal areas.

Keywords *: DTM, DSM, Deep Learning, Remote Sensing, pix2pix, PNG Evevation Tile*

１．はじめに

減災の観点から，津波，洪水の浸水域や浸水深の予測，ハザードマップの作成にDigital Terrain Model (DTM)が利用されており，近年多発する災害を受け，DTM の需要が高まっている．DTM は，人工衛星や航空機，ドローンから取得する Digital Surface Model(DSM)から木や建物の高さ情報を取り除いて作成されるが，その作業には技術力と膨大な時間を有する．また，途上国等では高精度な地形図が存在しないか，あるいは入手が困難なため，DSM から DTM を作成するニーズが高い．そこで，近年発達している機械学習を用いた DSM から DTM の生成に関する研究が行われている[1][2]．しかし，それらの研究では機械学習モデルの入力として植生情報や RGB 画像を用いたり，予め分類された植生などの高さ情報を DSM から取り除いて地面を補完することにより DTM を作成しており，DTM 作成に必要なデータの多さや補完に際しての高さ情報のズレが問題として考えられる．そこで本研究では，近年研究が進んでいる機械学習の中でも，Generative Adversarial Network(GAN)の一部である pix2pix を利用することで DSM と DTM の関係性を学習させ， DSM から直接的に DTM を生成する手法を提案する．

2. pix2pix

pix2pix[3]は，GAN[4]を利用した画像変換アルゴリズムであり，2 つの画像からなるペア画像間の関係性を学習し，入力画像から学習結果を元に変換した新たな画像を生成する技術である．これまで様々な画像変換問題においてセマンティックセグメンテーションやドメイン変換などでそれぞれに特化した手法が提案されてきた．しかし，pix2pix では統一された層設計と loss 設計で様々な問題への応用性を示し，画像における昼夜の逆転，白黒画像からカラー画像への変換，線画から実物画像への変換など，様々な分野の研究に用いられている．pix2pix は，GAN の中でも cGAN を応用することにより，これらのタスクの実現を可能とした．

GAN は，生成器と識別器という 2 つのニューラルネットワークで構成されている．生成器は，学習データを元にそれらと似た画像(偽画像)を生成し，識別器は生成器が生成した偽画像が本物かどうかを識別する．このように，生成器は生成した画像で識別器を騙すように学習し，識別器は生成器が生成した偽画像を見破るように学習することで，お互いの性能を上げていき，最終的に学習データと似た画像を生成する．cGAN(conditional GAN)[5]は，基本構造は GAN と同じであるが，生成器の入力として，ノイズベクトルだけでなく条件ベクトルを与えている．pix2pix はこのうち，条件に画像を使用した cGAN であり，オリジナルの cGAN と比較して主に以下の３つの違いがある．

① cGAN では，生成器の入力としてノイズを用いていたが，pix2pix では画像そのものを入力として生成器が画像を生成する．
② cGAN では，生成器が生成した偽画像を識別器の入力としていたが，pix2pix では正解の画像ペアと生成器が生成した偽画像を含む画像ペアの両ペアを識別器の入力としている．
③ cGAN において，生成器に入力されるノイズは学習データ以外のペアも確率的に生成できる仕組みになっていたが，pix2pix ではノイズを入力してもそれを打ち消すように生成器の学習が進むため，生成器に含まれるドロップアウト層がノイズの役割を果たしている．

2. 1 目的関数

オリジナルの cGAN の目的関数は以下である．

(1)

$L_{cGAN}(G,D)$
$= \mathbb{E}_{x,y}[logD(x,y)] + \mathbb{E}_{x,z}[\log(1 - D(x,G(x,z)))]$

$D(x,y)$は画像xと画像yのペアが本物であるかどうかを0～1で判断する．右辺の第1項は，識別器Dに本物の画像ペアである(x,y)が与えられた時，本物であると正しく識別できるほど大きくなる項であり，$D(x,y)$=1 と正確に推定できていると最大化される．また，右辺の第 2 項は，識別器Dに画像xと生成器が生成した偽画像$G(x,z)$のペア画像が与えられた時，偽物であると正しく識別できるほど大きくなる項であり，$D(x,y)$=0 と正確に推定できていると最大化される．GAN では，生成器は目的関数を最小化するように，識別器は目的関数を最大化するように学習するため，生成器と識別器の間で競争が発生し，より本物画像に近い画像を生成することができる．しかし，その一方で学習を無視した画像が生成されやすいという問題もある．そこで，pix2pix では以下の式 2 で表される L1 損失関数が追加されている．

$$L_1(G) = \mathbb{E}_{x,y,z}[\|y - G(x,z)\|_1] \qquad (2)$$

L1 損失関数を用いることで，画像全体でより本物に近い画像を生成することができるが，細部がぼやけてしまうといった問題がある．そこで，細部を捉えることのできる cGAN と組み合わせることによってお互いの弱みを補完し合うことができ，より本物に近い画像を生成することができる．よって，最終的な pix2pix の目的関数は，式 1 と係数λをかけた式 2 を足し合わせた以下の式となる(式 3)．

$$G^* = \arg\min_G \max_D + \lambda L_1(G) \qquad (3)$$

図 1 に pix2pix の基本構造を示す．pix2pix は，生成器のネットワークとして U-Net，識別器には PatchGAN を用いている．

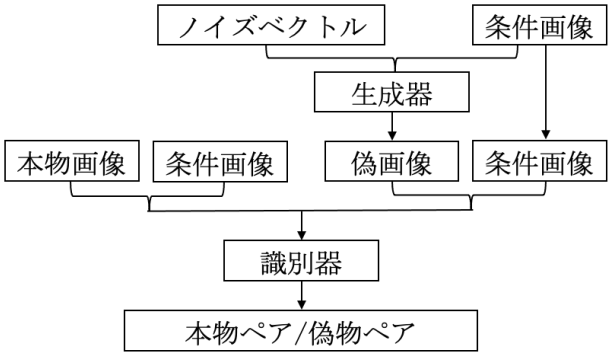


図 1．pix2pix の基本構造

3．pix2pixの層設計

3．1 PatchGAN

PatchGAN[3]とは，より鮮明な画像を生成するためのアーキテクチャである．PatchGAN では，画像を N×N のパッチに分割し，そのパッチ単位で識別器に本物か偽画像かを識別する．このため，生成器は画像全体に対してではなく，パッチ単位という限られた狭い範囲で見て本物らしい画像を生成するため，より鮮明な画像を生成することができる．

3．2 U-Net

U-Net[6]は，図 2 の通り Encorder-Decorder 構造をしたネットワークである．エンコーダ部分では，畳み込みとプーリングにより浅い層ほど特徴は全体的で，位置情報は正確となり，深い層ほど特徴が局所的で位置情報が曖昧となる．デコーダ部分では，畳み込みとアップサンプリングにより，特徴を保ったまま画像を大きく復元することができる．また，U-Net ではエンコーダとデコーダの間に skip-conection が導入されており，ボトルネック層を通過せずに情報を伝搬することができる．これにより，畳み込み後の特徴マップを保持し，後に UP サンプリングする画像に追加できることで，位置情報の保持が可能となり，層が深くなるにつれて位置情報が曖昧になるという問題を解決することができる．

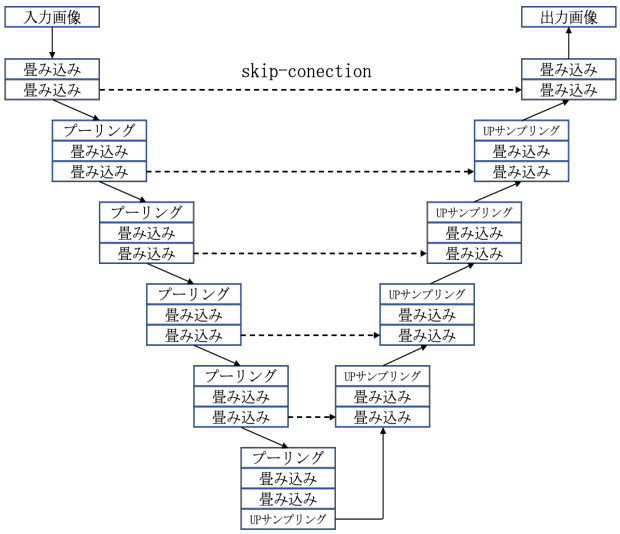


図 2．U-Net の構造図

4．標高タイル画像

pix2pix は画像から画像への変換を行うため，DSM，DTM における各座標点の標高値を色情報に変換する必要がある．標高値から RGB 値への変換方法としては，標高値をデータセットごとに設定する標高分解能で割り，24bit 符号付き整数値に変換する．その後，8bit ずつに分解し，上位から R，G，B にそれぞれ割り当てる．具体的な計算方法を以下に示す．

R：hを(256×256)で除し，少数部を切り捨てた値．
G：hを 256 で除し，少数部を切り捨てた値を 256 で除した余り．
B ：256 で除した余り．

ただし，h：標高値を標高分解能で除した値．

ここで，DSM 標高画像から作成した DSM 標高タイル画像を図 3 に示す．

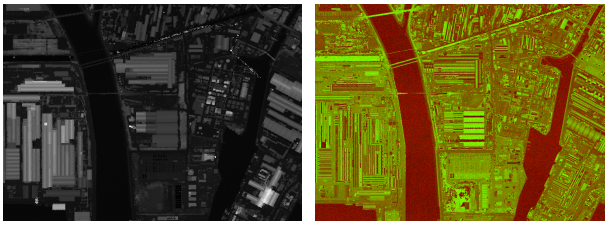


図 3．DSM 標高画像(左)と DSM 標高タイル画像(右)

また，標高タイル画像の各画素の RGB 値(R，G，B＝0～255)から標高値を得るには，まず RGB 値を以下の式か

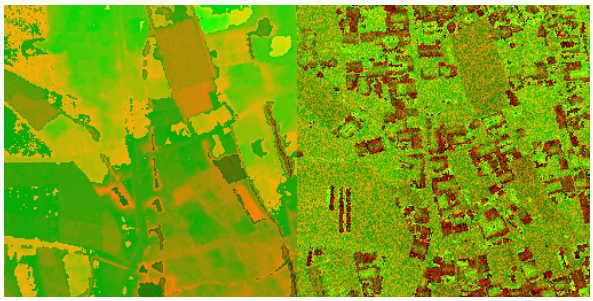
ら 24bit に変換し，符号付き整数値を取得する．それに標高分解能をかけて標高値を算出する．

$$H=\begin{cases} x = 2^{16}R + 2^{8}G + B \\ xu,\ (x < 2^{23}) \\ NA,\ (x = 2^{23}) \\ (x - 2^{24})u,\ (x > 2^{23}) \end{cases}$$

ここで，u：標高分解能．

5. 実験

今回の実験では，津波ハザード評価への応用を目的として，沿岸部の DSM と DTM のデータセットを学習に用いた．まず，兵庫県の DSM と DTM から標高タイル画像を作成し，それらをペア画像としてデータセット を作成した後 pix2pix に学習させ， DTM 標高タイル画像を作成する．その後，DTM 標高タイル画像を DTM に変換することによって，DSM から DTM を作成する．この時，標高分解能uは 1/10,000 に設定した．また，入力として訓練に用いていない兵庫県の DSM を用いて DTM を作成することでモデルの性能評価とし，静岡県の DSM を入力として DTM を作成することでモデルの汎用性を評価した．



DTM(左)と DSM(右)の標高タイルペア画像
図 4. データセット の画像例

今回の実験に使用した DTM，DSM は，G 空間情報センターによって公開されている三次元点群データ[8][9][10]をもとに作成した．公開されている兵庫県の点群データは DSM，DTM ともに 1m 間隔の格子状で、XYZ 座標値を示した高さ分解能 0.01m のテキストデータとなっており，その点群データをラスタ化し，高さ分解能 0.1m の画像を作成した．静岡県では， LAS 形式の点群データと地面の属性情報が公開されており，DSM，DTM ともにラスタ化することで空間分解能 1m，高さ分解能 0.1m の画像を作成した．また，作成した兵庫県と静岡県の画像から標高 100m 以下の地域を選定し，DSM，DTM それぞれの画像サイズが 256×256 ピクセルとなるように画像を作成した．データセットの一例を図 4 に示す．

モデルの評価指標には二乗平均平方根誤差(RMSE)を採用した．RMSE の式を以下に示す．

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}(y_i - \hat{y}_i)^2}$$

ここで，y_i：実測値，$\hat{y}_i$：予測値，n：データ総数

実験における各種学習条件を表 1 に示す．データセットには 13,977 組のペア画像を用い，train : val : test = 7 : 2 : 1 の割合に分割した．

表 1．学習条件

データ数(pair)	13977
エポック数	100
バッチサイズ	32
前処理	平均を0.5、分散を0.5に正規化
データ拡張	1/2の確率で水平方向にランダムフリップ

5.1 兵庫県におけるDTM生成結果

図 5 に作成したモデルの DTM 生成結果を示す．RMSE の値は 0.80m となった．生成された市街地の DTM(②，③，④)に着目した場合，建物の高さ情報を学習し，それらの高さ情報を除去できていることが分かる．しかし，建物が存在した箇所の地盤高にズレが生じている箇所も見受けられる．これは，pix2pix が構造物の高さまでは正確に予測できていないからだと考えられ，部分的に地盤が高い家や低い家などの正確な地表面高さの予測は難しい．

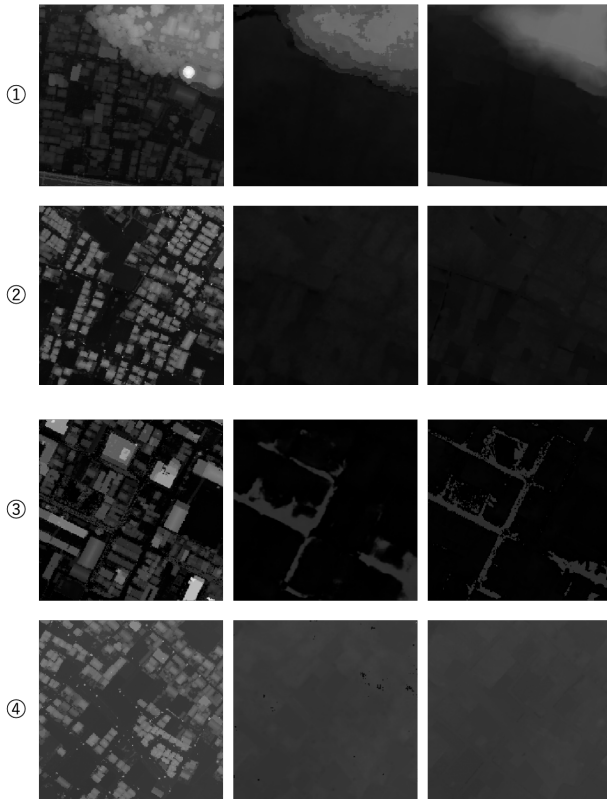


図 5. DTM 生成結果．(a)入力に用いた DSM．(b)生成された DTM．(c)正解 DTM

森林と住宅街を含む DTM(①)の生成結果では，住宅地における高さ情報の除去には成功しているが，森林部分においては高さ情報が等高線のように除去され，正解 DTM のようになだらかな斜面とはならなかった．これは，沿岸部を対象としてデータセットを作成したため，森林を含む訓練画像が少なかったことが原因だと考えられる．沿岸域に存在する森林の DTM 作成の精度向上のために，森林を含む画像，または森林と住宅地が共存する画像の枚数を増やすとともに，精度が向上する森林と住宅地の画像枚数の割合などを求めていく必要がある．

5. 2 静岡県におけるDTM生成結果

兵庫県のデータを学習したモデルに静岡県の DSM を入力として DTM を生成し，モデルの汎用性評価を行った．図 6 に DTM 生成結果を示す．

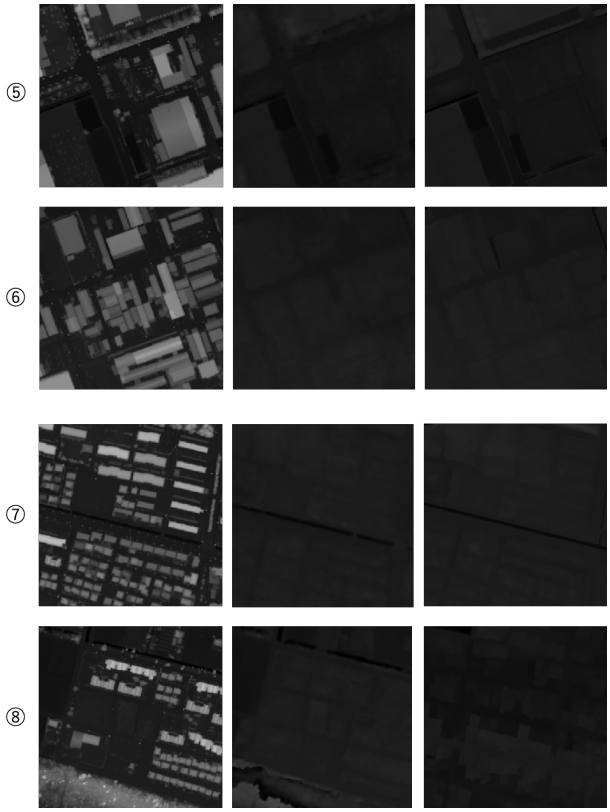


図 6. DTM 生成結果．(a)入力に用いた DSM．(b)生成された DTM．(c)正解 DTM

RMSE は 0.34m となり，日本国内においては本モデルを適用できることが示唆される．また，RMSE が兵庫県のデータセットより低い値が得られた理由として，静岡県のデータセット に含まれる地形が兵庫県のものよりも平坦な面が多く起伏に富んでいないため，DTM 生成に関してズレが生じづらいためだと考えられる．

生成された DTM の構造物に着目した場合，一軒家だけでなく工場やアパートなど高い建築物においてもそれらの高さ情報を取り除くことができている．しかし，⑧の森林においては高さ情報を取り除き切れておらず，精度が悪いことがわかる．この問題においても，森林の学習データが少なかったことが原因だと考えられる．また，④のように森林が見切れている場合など，その物体が何なのかを判断できていない可能性も考えられるため，類似する画像を使っての検証も必要であると考えた．

6. まとめと今後の展望

6. 1 まとめ

本研究では，沿岸域を対象に，津波による浸水深の予測やハザードマップの作成に必要である DTM の作成を目的とし，pix2pix を用いて DSM から DTM の作成を試みた．本手法により，DSM から建物や木の高さ情報を取り除き，DTM を生成することに成功したが，森林部分においては精度の悪い箇所が見受けらる為，データセットの再編が必要である．

6. 2 今後の展望

途上国をはじめ，DTM の整備が進んでいない地域が存在するという問題解決に向けて，全球スケールでの観測が可能な人工衛星から取得した DSM に本手法を適用することによる DTM の作成を今後の課題とする．

今回の実験では，静岡県の DSM を使用して汎用性の評価を行ったが，海外など，日本とは地形や建物の形状，植生の異なる国の DSM を使用して DTM を生成した場合，精度が低下する可能性がある．そこで，本手法により世界各地の DTM を作成することで汎用性の評価を行い，その結果を元にデータセット の再編やモデルの変更などを行う必要がある．

7. 謝辞

今回の実験では，G 空間情報センターによって公開されている三次元点群データと東京工業大学のスーパーコンピュータの TSUBAME を使用した．

8. 参考文献

[1] Gustav Tapper. “Extraction of DTM from satellite images using neural networks” (2016).

[2] Bulent Ayhan, Chiman Kwan, Jude Larkin, Liyun Kwan, Dimitrios Skarlatos, Marinos Vlachos “Performance comparison of different inpainting algorithms for accurate DTM generation” (2020).

[3] Phillip Isola, Jun-Yan Zhu, Tinghui Zhou, Alexei A. Efros. “Image-to-image translation with conditional adversarial networks.” In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017; pp. 1125–1134.

[4] Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville , Yoshua Bengio ,” Generative Adversarial Nets” , Advances in Neural Information Processing Systems 27 (2014).

[5] M.Mirza, S. Osindero, “Conditional generative adversarial nets,” arXiv preprint arXiv:1411.1784 (2014).

[6] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation"In Miccai, Volume 9351, pp234-241(2015).

[7] 西岡芳晴, 長津樹理. PNG 標高タイル-Web 利用に適した標高ファイルフォーマットの考案と実装-. 情報地質 第 26 巻 第 4 号 155-163 頁 2015 年.

[8] G 空間情報センター，兵庫県_全域 DEM（2010 年度～2018 年度），2022/4/18
https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/2010-2018-hyogo-geo-dem

[9] G 空間情報センター，兵庫県_全域 DSM（2010 年度～2018 年度），2022/4/18
https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/2010-2018-hyogo-geo-dsm

[10] G 空間情報センター，静岡県中・西部　点群データ，2022/4/18
https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/virtual-shizuoka-mw

近年の災害検証報告書から見る 大規模水害時の消防運用の現状と課題

The Current Situations and Issues of Firefighting Operations in Case of the Large-Scale Flooding, as Read from Recent Disaster Verification Reports

土橋 弘武[1]，　梅本 通孝[2]
Hiromu TSUCHIHASHI[1] and Michitaka UMEMOTO[2]

[1] 筑波大学 理工情報生命学術院 システム情報工学研究群 リスク・レジリエンス工学学位プログラム 博士前期課程
Master's Program in Risk and Resilience Engineering, Graduate School of Science and Technology Degree Programs in Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
[2] 筑波大学 システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

In order to improve firefighting response to flooding, we found 27 disaster verification reports on flooding from 2015 to 2020 and analyzed their descriptions of the current state of firefighting response capacity, problems, and future possibilities. As a result, numerous descriptions of firefighting were found. And among them, the issues identified included issues related to information sharing among fire departments, the usefulness and ideal nature of evacuation public information as a firefighting activity, and the need for cooperation between fire departments and other agencies and organizations, such as local governments, the Self Defense Forces, or private companies, as well as between fire departments and fire brigades and between fire brigades.

Keywords *: flooding, figherfighting, fire brigades, disaster verification reports, municipality*

１．はじめに

(1) 研究背景

平成30年7月期豪雨による，西日本を中心とした各地での被害の発生以来，台風や地震津波以外の水害発生リスクに対する認識や，激甚化する豪雨災害に対する危機意識が高まってきているところである．それら水害への対応という点において，災害対応を責務とする消防組織を中心に，警察や自衛隊など行政組織による災害防除や人命救助が重要であると言える．特に，消防は管轄地域内での災害に迅速に対応するだけでなく，災害による被害拡大を未然に防ぐという即応性において特に重要である．

消防組織には，消防吏員等により構成され，地方公務員として普段から災害防除やその予防にあたる消防本部と，本業を持ちながら「自らの地域は自ら守る」という精神の基，非常勤特別職の地方公務員として消防防災活動を行う消防団とに大別される[1)]．令和2年現在、全国の消防吏員は約16万人いるのに対し，消防団員は約82万人おり[2)]，大規模災害時には消防吏員の5倍以上にもなるこの消防団員という戦力を最大限活用することが必要である．実際に，平成30年7月期豪雨などの大規模な水害発生時において，京都市[3)]や広島市[4)]などでは消防団の活動による奏功事例がいくつも報告されている．今後消防がその役割を全うできるよう，効果的に活動できる環境を整備することは重要だと言えるが，非常時の消防運用については，地域特性等による影響か，自治体によって任務や扱いが異なり，曖昧な部分が多いのも事実である．

(2) 既往研究

大規模災害時の消防運用に関する研究として田口ら[5)]は，首都直下地震による大規模災害を対象に，効果的な消防運用とそれによる被害低減を目的として研究を行い，同時多発する地震火災への対応として，消防部隊の運用単位を消防署単位から方面単位に切り替えることによる最終的な被害規模を，シミュレーションにより比較し被害の最小化を図った．

また，山田ら[6)]は，1969年から2018年までの風水害における消防団員の人的被害の特徴について研究し，結果として降雨により多くの殉職者が発生しており，消防団員の招集から活動中，活動後に至るまで安全に配意する必要があるとしていた．

これらの研究から，消防組織を適切に広域的に運用することは被害低減に寄与する可能性があることや，消防団員は風水害時に幅広く活動しているが，安全確保が十分でない状況下の活動により多くの殉職者を生んでおり，災害時の安全確保に課題があることなどが明らかになっている．これらの研究は，消防分野の研究ではあるが，非常時の消防の活動実態を明らかにはしておらず，水災時の消防運用の在り方を検討している研究ではない．

(3) 研究目的

現状及び既往研究を踏まえ，近年の気候変動により今後全国的に発生が危惧される集中豪雨などの水災発生時に，消防本部及び消防団が機能的に活動できているのかという事実関係を明らかにするとともに，今後の水害対応時に消防が直面するであろう課題を予め抽出及び検討することにより，各自治体や消防本部，消防団などの各組織が今後の実災害発生時の対策を講じられるような情報を知見として提供することを本研究の目的とする．

２．研究手法

(1) 調査手法

過去に発生した水害における消防本部や消防団の対応や活動について知る術として，過去の大規模災害に対して自治体等が主体となって検証し，報告書としてまとめた検証報告書というものが存在する．この検証報告書において，消防団あるいは消防本部に関してどのような記述があり，検証がなされているかという視点から，報告書をレビューすることにより，課題の抽出を試みた．

(2) 調査範囲

2015年(平成27年)以降，日本国内で災害救助法が適用された災害のうち，台風や豪雨などの水害を対象災害とし，それら災害に関する検証報告書で，発行主体が都道府県，市町村またはそれら行政が元となる委員会等によるものを調査範囲とし，研究の対象とした．

３．結果

(1) 対象範囲となった検証報告書

2015年から2020年の5年間で対象となった災害は12件あり[7]，これらのうち27件の検証報告書の存在を確認することができた[3)-4),8)-32)]．それらの報告書に示されていた特徴的な記述を一部抜粋し以下にまとめた．

なお，消防本部及び消防団に共通して明らかとなった課題等については便宜上，消防本部における現状と課題として以下に示した．

(2) 消防本部における現状と課題

消防本部における現状や課題として抽出されたものを表１にまとめる．

(3) 消防団における現状と課題

消防団における現状や課題として抽出されたものを表２にまとめる．

(4) 抽出された課題のまとめ

上記の結果から，大規模水害発生時における消防の体制や対応についてまとめると以下の課題が抽出された．

- 大規模災害時には，自治体は災害対策本部の運営や避難所の運営，情報の収集などで逼迫しており，消防との情報共有が上手くできていなかったことを実感している．そしてそれは災害の前線で対応にあたる消防本部や消防団の状況を把握できていないことに等しい．
- 非常時の消防団の活動状況について，自治体は詳細に把握できておらず，それは消防本部も把握していない場合があり，消防団員の安全管理が必要である．
- 河川氾濫など，規模が大きな災害対応において，特定の管轄をまたいだ柔軟な対応が消防団に求められることがあり，広域的な連携運用には事前の取り決めや調整が重要である．しかし，非常時に自治体職員が広域連携の先頭に立って連絡調整することは難しい．
- 水害対応は一つの部局で対応できるものではないが，消防は地域防災の要であり，消防本部や消防団の機能強化を目的とした訓練等の推進が求められる．

４．考察

(1) 消防の情報共有に関する課題

課題や提言などを全体的にみると，消防本部に関して，まず情報共有の方法についての言及が多いことが見て取れる．それは特定の災害や地域に限らず，全国的に広く自治体と消防に根深くある課題なのだろうと推察される．

a) 情報共有とリエゾンへの期待

情報共有に関連して，リエゾンの有効性が多く言及されている．しかし，これに対して具体的根拠等は示されておらず，果たしてリエゾンの役割と機能は十分なのか，もっとより良くリエゾンが活躍できる方策があるのではないかという議論は今後必要であろう．また，情報共有と一言でまとめたが，その中には，情報を収集する点における課題と，その情報を集約する手段に関する課題と，集約した情報を整理しまとめる部署における課題と，それらを他の部署などに分配・伝達する際の課題があり，これらを一つ一つ解決することができて初めて情報共有における課題は解消するのだろうと考えられる．これらの課題解消の糸口として，消防に関する部分でリエゾンという存在に期待がされているのではないだろうか．

b) 消防へのICTツールの導入

前述の情報共有等に関する別の提言として，各種ICTの活用や導入が挙げられている報告書がいくつか見られた．ICTの発展による情報収集の効率化は大いに期待できると考えられるが，その導入や強化のためには，専用ツールと扱える技術が必要であり，導入のための予算確保と利用のための技術の習熟が大きな課題となるだろう．水害対応への反省を踏まえて消防団等の訓練の継続と強化を述べている報告書が複数見られ，これまでの水害対応においても訓練が十分でないことが窺える中で，今後従前の対応を定着させることに加え，新規ツールを効果的に扱うための訓練まで手が届くのかが懸念される．もちろん，一般火災などの通常災害への対応なども求められ，消防団員にとって現実的な訓練，見合った資器材が求められるだろう．

(2) 消防による避難広報の有用性と位置づけ

消防本部と消防団に共通して，避難情報の伝達手段としての消防車両による広報や戸別訪問による呼びかけが活動実態としてあり，これらが有効であったという多くの記述と，反対に雨音で広報が聞こえなかったことや広域的に災害が発生している場合は消防が避難誘導等を行うことは難しいなどいくつかの課題点も見られた．この点については，多くの記述から，避難の広報や避難誘導は効果的な手段であり，今後も広く行ってゆくべきではあると考えられるが，非常時は法令で定められた拡声音量を適用除外するなどの改善策も併せて検討すべきだと思われる．また，広域的に災害が発生している場合，消防は広報よりも災害防除を優先すべきであり，あくまでも予備的な活動であるべきだということも忘れてはならないだろう．

(3) 消防と他機関の連携及び消防組織間の連携

いくつかの報告書によれば，消防と他の機関，あるいは消防同士での連携が強く求められており，それらが有効であるという意見が見られた．これは，消防本部に限らず，広島県での実例や常総市での検証のように消防団と消防本部や消防団同士についても当てはまることであり，大規模，あるいは同時多発的な災害時には重要となることが考えられる．この連携における課題や，より効果的な連携とするための要素として消防にできることについては今後の消防組織の在り方に大きく関わり，これらをより詳しく検討・検証してゆくことは非常に重要であると考えられる．

表１　消防本部における現状と課題

記述内容	発行元	記述内容	発行元
防災は一つの部局で対応できるものではない	岡山県	対策本部において，人命救助を担う機関（自衛隊，消防，警察等）は同じ部屋に配置する必要がある	広島県
行政と消防署との意思疎通に課題がある	茅室町		
消防からの情報提供は逐一寄せられ，災害対策本部等への報告も行ったが，今後に備え，情報の集約，共有方法について検討が必要	東松山市	災害対策本部幹部，河川管理者，消防本部幹部，消防団幹部などは定期的に情報交換し信頼関係を構築することが情報連携に必要	常総市
防災危機管理室において，職員が情報収集や電話対応，避難情報の発令等に追われ，県総合防災情報システムへ被害情報入力などを行う暇すらなくなり，リエゾンを派遣していた関係機関以外とは情報共有を十分に行えなかった．対応策として「県からのリエゾン派遣」と「消防局から災害対策本部に派遣する連絡員の増員」が挙げられる	倉敷市 笠岡市	雨が降り始めて，避難指示，避難勧告が出た状況の中で，消防がどう動いたのかよくわからない．消防車がサイレンを鳴らし町中走り回ってもよかったのではないか．地震が起こり，津波がきた時に，消防本部や消防団を広域にどう活動させるのかは重要なマターだ．県がイニシアティブをもって消防と議論する必要がある	岡山県
「越水している」等の重要情報が119番等で消防に入っていたが，県には伝わっておらず，早期に情報共有があれば避難に繋げられたはずだ	岡山県	消防から道路冠水等の情報提供があったが，市の現地調査班などから連絡されたはずだと思い込み，本部へ共有をしていなかった	川越市
情報の収集・集約等を専任する情報担当者が必要	倉敷市	消防本部から市災害対策本部へのリエゾンが有効であった	常総市
住民の避難情報の伝達手段として消防車両による広報が重要	倉敷市	災害広報は降雨状況下で屋内へは聞こえない場合も多い	笠岡市
地域防災計画では消防も避難誘導に当たるものと記載があるが，広範囲に災害が発生した場合は消防に避難誘導を行わせることは困難	熊野町	要支援者の避難支援は消防機関の果たす役割や効果が大きい	岐阜県
行政として事態を早期に把握（主に人的被害等）するために消防と情報共有をしたのが良かった	広島県	住民対応と消防など関係機関との連絡対応との電話回線，対応部署が同じだったため，迅速な対応に支障をきたした	広島県
浸水していない安全なエリアへ救助した後の住民を誰が避難所等へ誘導するのかということで対応に苦慮した	川崎市	大規模・広域化する自然災害に備え，広島市の周辺市町含めた広域的な消防力の一層強化について検討すべき	広島市

表２　消防団における現状と課題

記述内容	発行元	記述内容	発行元
消防団は地域防災の要となる	京都府	河川や堤防の決壊時に備え，水防団（消防団）の育成と強化が必要	岡山県
発災当初の被害情報の収集分析に課題があり，改善策として消防団等によるパトロールとそれによる迅速な被害情報連絡が必要	長野市	消防団及び水防監視班が行う現場確認により消防団自身の命の危険性があり，今後の対応として安全への配慮が必要	東松山市
警報の発令等に応じて警戒パトロールや避難指示等の周知等を実施したが，急激な水位上昇後は活動が困難となった	倉敷市	避難の呼びかけを強化するための地域防災リーダーの養成が必要であり，その中心的存在として消防団はふさわしいのではないか	山口県
活動範囲の幅広さや地域密着性の観点からも消防団の役割の重要性を再認識した	笠岡市	消防団や常備消防による地域コミュニティへの声掛けにより避難を補完する必要がある	広島市
避難所運営の支援者として女性消防隊などほかの地域の消防団による応援が検討された	広島市 京都府	要員が不足する避難所の清掃等を女性団員が支援することで，被災市町職員の負担を大きく軽減することができた	広島県
避難勧告発令前に河川増水に気づいた消防団員が集落を回り，避難を呼びかけ，住民の多くがそれに応じ，命を守ることが出来た事例	京都府	事前にハザードマップを確認していた消防団員が，高齢者を土砂災害警戒区域外の住民宅に避難誘導し安全を確保した共助事例	京都府
市の安全安心課が役割を十分に果たせず，消防団の活動状況等の動向把握・連携及び調整が十分にできていなかった	常総市	消防団は水害対応の現場において，川と住民の両方と直に対応しながら被害を軽減していく重要な役割を担っている	常総市
水防機能（堤防の越水危険個所の早期発見と土のう積み等の水防工法実施），避難誘導機能，情報収集機能の3つの機能強化が望まれる	常総市	団員から位置情報付きの写真を送信してもらうなどの協力によるICT技術を活用した状況把握が有効ではないか	常総市
現地で活動を行う団員が情報を手元から簡単に見られるような仕組みを作るべき	常総市	団員の撮影した河川水位，氾濫，漏水，水防活動の状況を場所情報とともに発信し，誰もが見られるようにするべき	常総市
土のう袋，土，建設機械を必要十分なだけ供給できる体制と近隣の建設会社の協力体制を作っておくべき	常総市	オペレーターが不足する中，団員による重機の活用は極めて効果的であった	広島県
県内の常備消防応援隊のみならず，消防団の応援も行っており，消防組織としての規模が大きい広島市の強みが活かされた	広島市	今後，県庁から離れた地域で災害が発生した場合，県職員が直接現地に出向いて消防団の応援調整を行うことは難しい	広島県
パトロール中に高齢女性に支援を求められ，避難を介助した事例	京都府	消防団への指示等をする際に自治連支部への連絡が必要であった	関市
被災地までの交通アクセス確認の難しい，消防団の応援活動の内容理解が市町によりまちまち，被災市町では応急対策に追われ消防団受援の企画・要請に至らないなど，調整が進まなかったことから，県内広域消防相互応援協定に基づき，県による調整を積極的に行い，県職員が各町を訪問し直接調整して県内消防団の応援を行った	広島県	消防団の河川における水防個所の受け持ち区間を適正化するべきだ．また，消防団員の人員が不足するなら分団の受持ち区間を越えて柔軟な応援体制を取り現場対応人員を増やすという相互の応援が必要．そしてそれを実現するためには他分団からの情報か上からの指示が必要	常総市

５．おわりに

(1) 本研究のまとめ

今回の研究では，例年甚大な被害を発生させている水害への対応機関としての消防の運用に関して，2015年から2020年までの水害に関する27の検証報告書の記述から，消防の対応力の現状と課題，そして今後の可能性などについての分析を行った．その結果，消防に関する多数の記述が見つかり，その中から消防の情報共有に関する課題，消防の活動としての避難広報の有用性やあり方，そして消防本部と自治体や自衛隊，あるいは民間企業など，他の機関や団体と連携することや，消防本部と消防団，消防団同士での連携の必要性などの課題が抽出された．

(2) 結論

分析の結果，水害発生時においては，慢性的に消防組織内，あるいは消防と自治体などとの情報共有体制に課題があることが明らかとなり，その解決の糸口として，リエゾンの活用やICTツールの導入などの解決策が提言されていた．一方で，それらの実現に向けた検討は不十分であり，今後も慎重な検討が必要である．また，災害対応においては，同じく消防組織内，あるいは同自治体外局などとの連携の必要性が明らかとなり，実際に連携運用した自治体では数多くの奏功事例などが確認されたことから，今後もこの効果的な連携や運用について議論がなされてゆくことが期待される．消防の活動内容については，実際の水防活動に加え，消防車両等を活用した避難広報が多くの自治体で実施され，その有効性が報告されていた．消防による避難広報は今後も効果が期待される一方で，広報手段の工夫やその活動自体の優先順位など，改善すべき点があることが明らかとなった．

(3) 今後の課題

今回抽出した課題は，あくまでも報告書から見られるものを抜粋した結果であり，報告書の中で顕在化しているものである．しかし，検証報告書の多くは自治体としての対応に関する検証が中心のものであり，検証委員に消防本部等が参入していない報告書がほとんどであることから，消防に関する検証は限定的なものであることが多く，今回の研究結果をより確かなものとし，発展させるためには直接自治体や消防本部，消防団などの組織にヒアリングなどを行い，調査することが必要である．

参考文献

1)総務省消防庁, 消防団とは, https:/www.fdma.go.jp/relocation/syobodan/, 2021/11/05
2)総務省消防庁, 消防団に関する数値データ, https:/www.fdma.go.jp/relocation/syobodan/data/scale/, 2021/11/15
3)京都府災害対応の総合的な検証会議,平成30年度災害対応の総合的な検証最終報告書,2019/5, http://www.pref.kyoto.jp/kikikanri/documents/30kennsyokaigi-report.pdf, 2021/8/3
4)広島市平成30年7月豪雨災害における避難対策等検証会議,平成30年7月豪雨における避難対策等の検証とその充実に向けた提言,2018/12, https:/www.city.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/54796.pdf, 2021/8/3
5)田口元寿, 糸井川栄一, 熊谷良雄,「首都直下地震における火災被害リスク低減のための戦略的な消防力運用に関する研究－消防力運用方法の切替え時期と被害軽減効果の分析－」(地域安全学会論文集 No.10, 2008.11, P.113-123)
6)山田忠, 後藤雄太, 松枝心路,「風水害における消防団員の人的被害の特徴－1969年から2018年までの災害を事例に－」(土木学会論文集F6(安全問題), Vol.76, No.1, 2020, P.20-27)
7)内閣府政策統括官(防災担当), 災害救助法の概要(令和3年6月18日), 内閣府, http://www.bousai.go.jp/oyakudachi/pdf/kyuujo_a7.pdf, 2022/2/15
8)常総市市水害対策検証委員会, 平成27年常総市鬼怒川水害対応に関する検証報告書, 平成2016/6/13, http://www.city.joso.lg.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/6/kensyou_houkokusyo.pdf, 2021/7/3
9)広島県,平成30年7月豪雨災害における初動・応急対応に関する検証結果,2019/5, https:/www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/life/584928_1773223_misc.pdf, 2021/8/3
10)岡山県「平成 30 年7月豪雨」災害検証委員会,平成30年7月豪雨災害検証報告書, 2019/3, https:/www.pref.okayama.jp/uploaded/life/601705_5031910_misc.pdf, 2021/7/3
11)埼玉県危機管理防災部, 令和元年東日本台風対応に関する検証報告書, 2020/3, https:/www.pref.saitama.lg.jp/documents/175503/200326-0310.pdf, 2021/7/3
12)東松山市, 令和元年東日本台風水害対応に関する検証報告書, 2020/11, http://www.city.higashimatsuyama.lg.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/7/kensyozentai.pdf, 2021/7/3
13)川崎市, 令和元年東日本台風における災害対応検証報告書, 2020/4, https:/www.city.kawasaki.jp/170/cmsfiles/contents/0000111/111602/01kikikannri01.pdf, https:/www.city.kawasaki.jp/170/cmsfiles/contents/0000111/111602/01kikikannri02.pdf, 2021/12/12
14)長野市, 令和元年東日本台風災害対応検証報告書, 2020/7, https:/www.city.nagano.nagano.jp/uploaded/attachment/346440.pdf, 2021/7/3
15)岡山県「平成 30 年7月豪雨」災害検証委員会,平成30年7月豪雨災害検証報告書, 2019/3, https:/www.pref.okayama.jp/uploaded/life/601705_5031910_misc.pdf, 2021/7/3
16)倉敷市,平成30年7月豪雨災害対応検証報告書,2019/4, http://www.bousai.go.jp/fusuigai/suigai_dosyaworking/pdf/kurashikikensyou.pdf, 2021/7/3
17)熊野町「平成30年7月豪雨」災害検証委員会, 平成30年7月豪雨災害検証報告書, 2019/3, http://www.bousai.go.jp/fusuigai/suigai_dosyaworking/pdf/kumanohonpen.pdf, 2021/07/03
18)岐阜県平成30年7月豪雨災害検証委員会,平成30年 7 月豪雨災害検証報告書,2018/8/31, https:/www.pref.gifu.lg.jp/uploaded/attachment/132042.pdf, 2021/8/3
19)山口県,平成30年7月豪雨における課題の検証報告,2019/3, https:/www.pref.yamaguchi.lg.jp/cmsdata/b/b/0/bb0a744f46146699b9af5a77744cb289.pdf, 2021/8/3
20)笠岡市,平成30年7月豪雨災害対応検証報告書,2019/10, https:/www.city.kasaoka.okayama.jp/uploaded/attachment/23204.pdf, 2021/8/3
21)岐阜県関市平成30年7月豪雨災害検証委員会, 平成30年7月豪雨災害検証報告書, 2019/3, https:/view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.city.seki.lg.jp%2Fcmsfiles%2Fcontents%2F0000013%2F13027%2FH30.7_kennsyouhoukoku.docx&wdOrigin=BROWSELINK, 2021/8/3
22)広島県,平成30年7月豪雨災害における初動・応急対応に関する検証結果,2019/5, https:/www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/life/584928_1773223_misc.pdf, 2021/8/3
23)川越市, 台風第 21 号に対する初動対応にかかる内部検証結果報告書, 2018/1, https:/www.city.kawagoe.saitama.jp/anzen_anshin/bousai_jouhou/hisaisyashien/taihudai29gou/gyoseikaikakutaifuu.files/houkokusho.pdf, 2021/7/3
24)常総市市水害対策検証委員会, 平成 27 年常総市鬼怒川水害対応に関する検証報告書, 2016/6/13, http://www.city.joso.lg.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/6/kensyou_houkokusyo.pdf, 2021/7/3
25)伊勢市,平成 29 年台風第 21 号災害対応記録, 2018/10, https:/www.city.ise.mie.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/006/270/h29taifu21gosaigaitaioukiroku.pdf, 2022/1/7
26)松前町, 平成 29 年台風第 18 号に係る災害対応等報告書, 2017/10/25, https:/www.town.masaki.ehime.jp/uploaded/attachment/2115.pdf, 2022/1/9
27)室蘭市総務部防災対策課, 平成 28 年台風第 10 号による被害対応報告書 今後の防災・減災に向けた手引書, 2017/3, https:/www.city.muroran.lg.jp/main/org3250/documents/taihu10go.pdf, 2022/1/9
28)帯広市, 平成 28 年台風第 10 号による災害対応の検証結果,2017/5, https:/www.city.obihiro.hokkaido.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/382/zenbun.pdf, 2022/1/9
29)音更町, 平成 28 年台風 10 号災害対応検証報告書, 2017/8, https:/www.town.otofuke.hokkaido.jp/files/00004200/00004267/heisei28nentaifu10.pdf, 2022/1/10
30)芽室町, 芽室町平成 28 年台風 10 号災害対応検証報告書, 2017/4, http://mgikai.memuro.net/upload/file/g_committee/file2_1493163884.pdf, 2022/1/10
31)新得町台風 10 号大雨災害検証委員会,平成 28 年台風 10 号大雨災害検証報告書, 2017/3, https://www.shintoku-town.jp/file/contents/1419/12985/saigaikensyo.pdf, 2022/1/10
32)北海道「平成 28 年 8 月から 9 月にかけての大雨等災害」に関する検証委員会, 平成 28 年 8 月から 9 月にかけての大雨等災害に関する検証報告書, 2017/3, https:/www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/saigaikenshouH28.html, 2022/2/2

体験談等と氾濫解析による徳島市内の第二室戸台風被害の分析

Examination of damage to the second Muroto typhoon in Tokushima city by experience stories and flood analysis

○中野　晋[1]，徳永 雅彦[2]，廣瀬 幸佑[3]
Susumu NAKANO[1], Masahiko TOKUNAGA[2] and Kosuke HIROSE[3]

[1] 徳島大学 環境防災研究センター
Research Center for Management of Disaster and Environment, Tokushima university
[2] 徳島県県土整備部
Prefectural Land Development Department, Tokushima Prefecture
[3] 徳島県政策創造部
Policy Studies Department, Tokushima Prefecture
.

The actual situation of flood damage in Tokushima City caused by the second Muroto Typhoon in 1961 was examined using testimony by the experiencers, news materials and storm surge inundation analysis. The flooding of the city area due to the storm surge occurred at around noon when the typhoon was closest to Tokushima city, causing it to overflow from the rivers in the city. As a result, the inundation area reached about half of the urban area, and the maximum inundation depth exceeded 1 m. Inundation analysis was able to quantitatively reproduce this inundation process.

Keywords *: the second Muroto Typhoon, storm surge, Tokushima City, inundation analysis, experiencies*

１．はじめに

2018 年台風第 21 号は 9 月 4 日 12 時頃に徳島県南部に上陸した後，紀伊水道を北上し，14 時頃に神戸市付近に再上陸した．この台風により，大阪港では 1961 年第二室戸台風を上回る既往最高潮位 329cm となるなど各所で既往最高潮位を記録し，神戸港や関西国際空港で甚大な高潮・高波被害をもたらした [1)].

近年，日本沿岸の海水温上昇に伴い，台風が勢力を落とすことなく日本列島に接近または上陸する事例が増えつつ．こうした中，2015 年には水防法 [2)]が一部改正され，想定最大規模の高潮に係る浸水想定区域の指定や高潮に係る水位情報の通知や周知について制度化されるなど，高潮水防の強化が図られている．

これを受けて，徳島県 [3)]でも 2020 年 1 月に想定最大規模の高潮による想定浸水区域図の公表が行われ，周知活動が始まっているものの，徳島県内での高潮災害に対する関心度や浸水想定区域図の認知度は必ずしも高まっていない．徳島県内では 2004 年台風第 16 号や 2018 年台風第 21 号などで鳴門市や徳島市の一部で浸水被害が発生したものの 1961 年の第二室戸台風以来，高潮によって広範囲に浸水するような事例が生じていないため，想定浸水区域図が示されても自分事とは感じにくい．また，第二室戸台風から 2021 年で 60 年が経過したことで当時，大きな被害を受けた徳島沿岸地区でもこの災害の記憶が失われつつある．

第二室戸台風は徳島県で発生した自然災害の中でも大きな被害をもたらした台風の 1 つで，**図-1** のように徳島県南部と紀伊水道を通過し，徳島沿岸部で深刻な高潮被害を生じさせた．徳島県自然災害誌 [4)]によると徳島県内で死者 11 名，負傷者 253 名，全壊・流出 622 棟，床上浸水 25,313 棟等の被害が報告されている．本研究では被災体験者からの体験談，新聞やテレビの報道資料などを収集整理するとともに市街地の大半が浸水した徳島市を対象にした高潮氾濫解析により，浸水被害の実態を検証する．

２．研究方法

(1)　体験談，報道資料，公文書等の収集整理

徳島県立図書館所蔵の徳島新聞および全国紙徳島版のマイクロフィルム及びデジタル画像資料に加えて，地元メディア関係者，徳島県，国土交通省の協力を得て，NHK 徳島放送局，四国放送テレビの資料映像，徳島新聞社撮影の報道写真，国土交通省（旧建設省および旧運輸省），気象庁，徳島県関係の公文書等，第二室戸台風関係の資料を収集した．一方，徳島県地域防災推進員や日本防災士会徳島県支部，さらには NHK と四国放送テレビの協力を得て，第二室戸台風の体験談を収集した．

(2)　第二室戸台風による徳島市での高潮浸水解析

平面 2 次元洪水流氾濫解析（ニタコンサルタント AFREL-SR Ver.4 を利用）による高潮浸水過程の再現計算を行った．標高は国土地理院 5mDEM を基礎とし，当時と現在で埋立や道路建設，宅地造成など大幅な地形改変があることを考慮して，1965 年測量の 1/5000 国土基本図に記載の標高で修正した．なお，台風当時と国土基本図の測量時期は 4 年経過しており，その間でも復旧工事等で一部，地形改変が生じているが，1961 年撮影の空中写真と明らかに違う場所（寺島川の埋立等）を除き，1965 年時の値を用いた．降水量は**図-2** に示す徳島での雨量データを内水浸水寄与分として考慮し，海境界水位は小松島港で観測された実測潮位（**図-3**）を与えた．また，高潮・高波による破堤区間等も運輸省報告 [6)]や報道

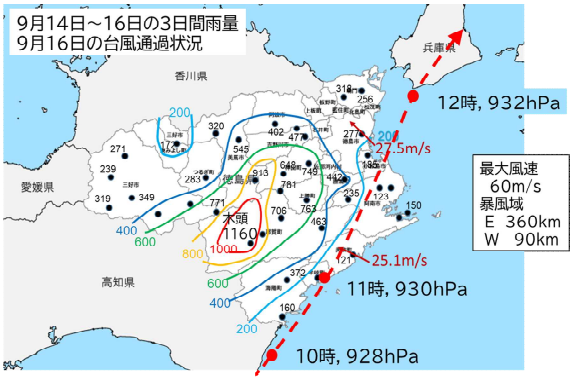


図-1　徳島県付近の台風通過状況と降水量（徳島県自然災害誌 4)，気象庁 5)のデータを用いて作成．）

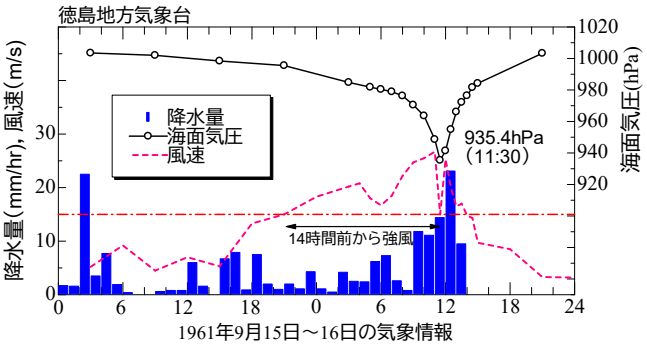


図-2　徳島市付近の気象データ（気象庁 5)のデータを用いて作成）

資料で記載があったものを考慮した．市内の中小河川上流端は壁境界として流量を無視した計算を行った．なお，内水排除のためにすでに排水機場も整備されていたとの情報があるが，詳細は不明であり，考慮できていない．解析範囲は**図-4** の通りで，吉野川南側の市街地部分である．氾濫解析で使用した計算手法は 10m×10m のスタッガード格子を用い，時間方向には風上差分で差分化したもので，9 月 16 日 4 時～14 時までの 10 時間をタイムステップ 0.05s で計算した．

3．結果

(1)　第二室戸台風による徳島市周辺の被害概要

本研究で対象とする第二室戸台風の気象や被害の概要について徳島県に関係する事項について徳島県 4)，気象庁 5)，運輸省 6)の資料から整理して述べる．

9 月 8 日に発生した台風第 18 号（第二室戸台風）は 9 月 12 日に最低気圧 890hPa を記録した後，9 月 16 日 9 時過ぎに室戸岬の西に上陸した．上陸時（直前）の中心気圧は 925hPa で，統計期間以降（1951 年～）では最も低い 7)．**図-1** のように，室戸岬付近を通過後に徳島県南部付近の再上陸し，徳島県南部と徳島県沿岸部を 10 時から 11 時半にかけて通過した．11 時 30 分に徳島市に最接近し，中心気圧は 935.4hPa を記録している（**図-2**）．この台風は徳島県で記録的な高潮災害をもたらしたが，台風上陸の 2 日前の 9 月 14 日から剣山山系で大雨となり，**図-1** の通り，那賀郡木頭の 3 日間雨量は 1160mm に達し，記録的なものである．

小松島港の験潮所記録では台風が最接近した 11 時 30 分頃に最高潮位 2.42m（T.P.），潮位偏差 1.90m を記録した．新町川河口部に設置された徳島港の最高潮位も小松島港と一致している．小松島港では第二室戸台風で記録した潮位が現時点でも既往最高潮位となっている．

この台風による高潮により，海部郡から鳴門市までの太平洋及び紀伊水道に面する地区で浸水被害が発生した．特に鳴門市，松茂町，徳島市，小松島市の浸水被害が激しく，徳島県によると総戸数に対する浸水被害戸数の割合は徳島市と松茂町で 81%，鳴門市で 52%，小松島市で 49%と報告され，運輸省 6)の資料では徳島市内の浸水状況は**図-5** の通りで，徳島市のほぼ中心にある眉山の麓まで浸水が広がっていたことがわかる．また，吉野川中流部と吉野川支流の宮河内谷川周辺では大雨に伴う河川氾濫で浸水被害が発生した．

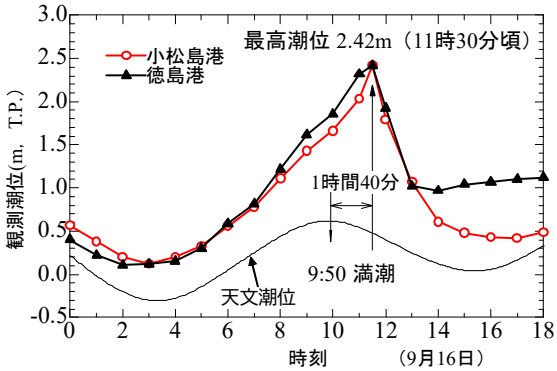


図-3　徳島港・小松島港の潮位変化 6)

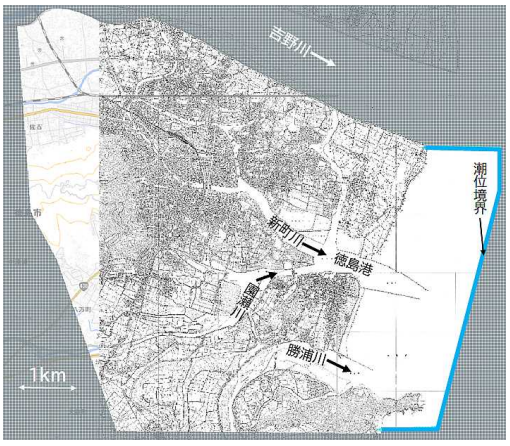


図-4　解析範囲

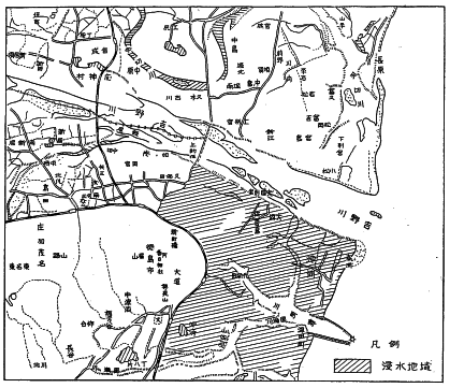


図-5 徳島市周辺の浸水状況（運輸省 6)）

(2) 収集された体験談等の資料

徳島市関係で収集した体験談等の要約を**表-1** に示す．徳島市以外でも鳴門市，松茂町，小松島市，阿南市，吉野川市でも体験談を収集した．60 年前の体験であり，地表からの浸水深が数値として表されたものは徳島市内の 4 件（T6，T7，T8，T18）で，T2 のように床上約 1m（T2）や腰くらい（T1）といった表現のものが多かった．定量的なデータが少ないことを考慮し，証言や記述内容から地表からの浸水レベルを浸水なし，0～0.3m，0.3～1.0m，1.0～2.0m，2.0～3.0m の 5 段階に整理して，解析結果と比較することにした．なお，強風による被害や船が打ち上げられたなど浸水状況が含まれていないものもあり，それらは浸水情報なしと分類する．

浸水のタイミングについては正確に記憶されている事例は少ないが，T1「お昼ごろにひざ下まで冠水」，T3「風が落ち着いて来てから浸水」，T4「吹き返しの風が吹き始めてから水が来た」，T12 「8 時頃に道路冠水」，T15「7 時頃，護岸が延長 10m にわたってくずれ」の証言がある． T1，T3，T4 からは台風が徳島市に最接近して，風が弱まるか，吹き返しが始まる 12 時前後に高潮による浸水がピークになったこと，T12 の津田地区付近は河川堤防の決壊で朝 8 時には浸水が始まっていたことがわかる．

(3) 氾濫解析結果と考察

計算から得られた各地点の最大浸水深と証言から推定した浸水レベル値の比較を**図-6** に示す．計算に用いた各地点の標高データの信頼性が低いため，証言から推定した浸水レベルと計算による最大浸水深との一致度は十分とは言えないが，運輸省の報告書に示される浸水エリア（**図-5**）とは概ね整合している．当時の堤防高や護岸高は一部で高潮潮位（T.P.2.42m）を下回っていたことから，複数の地点で市内河川から大量の海水が流入したことで広範囲に浸水したものと考えられる．なお，浸水が始まった時間帯である 9 時から 14 時に大雨が降ったことによる内水の影響も無視できない．

図-7 に 16 日 9 時，11 時，13 時の浸水状況を示す．これによると河川からの外水が始まっていない時間帯である 9 時時点でも T3，T4，T5 付近でも 0.3m 以上の浸水が確認され，これは計算開始の 4 時から 9 時までの雨水が地区内の低地に滞留している状況を示していると思われる．実際にはその一部が都市下水路や排水施設を介して排水されていると考えられ，浸水深は過大評価となっている．また，各地区を囲む堤防高を国土基本図から読み取っているが，これの精度も十分とは言えず，さらなる検討が必要である．高潮ピークに近づいた 11 時の時点には小松島港や徳島港の潮位はすでに約 2.3m となっており，河川堤防の低い所から海水の流入が始まり，一気に浸水が広がっている．一方，13 時に 11 時時点より，水深が大きい所と小さい所が混在しており，一部では水が引き始めていることがわかる．

図-8 は旧消防庁舎前の浸水痕跡をもとにして，設置された第二室戸台風浸水水位標（浸水深 0.91m，浸水位 2.36m）付近の浸水深変化を示す．計算では最高潮位が記録される 11 時 40 分直後に最大の 0.80m に達している．

図-9 は新町川の堤防が約 100m にわたって決壊し，決壊箇所近くに陸置きされていた材木が大量に流れ着いた旧国道 55 号線の三叉路付近での計算結果を示す．最高潮位を記録した 11 時 40 分時点での海水流入状況を示すもので，新町川近くの材木センターから南西方向にある三叉路方向への流れが生じていることがわかる．また，T9 の民家では現在も床上約 30 ㎝の壁に浸水痕跡が残っており，最大で 1m 近くの浸水があり，定量的にも妥当な結果となっている．

表-1　体験談等の要約

地点番号	主な被害状況	情報の入手方法	浸水レベル
T1	お昼ごろにひざ下まで道路が冠水. 父親の背中におぶさって近くの支所に避難. 避難時は父親は腰くらいまで水に浸かっていた.	インタビュー	3
T2	床上約1m も浸水し, 天井板を外して天井裏に避難する準備もした. その後, 地域の人が助けに来てくれてバスで小学校へ避難した.	インタビュー, 手記, NHK映像	3
T3	中学校の旧校舎1階の用務員室に住み込んでいた. 強風で破られないよう用務員室の戸を手でおさえていた. 風が落ち着いてきた後に浸水が始まったので, 新校舎2階に移動.	インタビュー	2
T4	台風が通過して吹き返しの風が吹き始めてから水が来た. 床が濡れて畳が水浸しになったところで水が止まった.	インタビュー	2
T5	両親が近くのポンプ場の管理を行っていた. 胸まで浸水する中, 父が泳いで帰ってきた.	インタビュー	3
T6	自宅付近は20㎝くらいで助任小学校では1mを超えていた.	インタビュー	1
T7	自宅付近は浸水しなかったが, 周辺は1mくらい浸水しているところがあった.	インタビュー	0
T8	旧市消防庁舎前で1m近く浸水し, 出勤できなくなった. 浸水深を伝えるために浸水痕跡を参考に浸水標を設置した. 浸水標で示される浸水深は91㎝(T.P.2.36m , 著者測量)	インタビュー, 浸水標, JRT映像	2
T9	10時に家族が経営する店舗が約10m飛ばされた. 昼前に自宅が床上浸水. 近くの交差点では材木が多量に流れ着いた.	インタビュー	2
T10	近くの材木センターに積まれていた多量の材木が流れ着いて, 道路をふさいだ.	インタビュー, 徳島新聞, JRT映像	情報なし
T11	船溜まりに上荷船が数隻以上避難していた. 石積みの堤防が決壊して, 自宅の畑に3隻, 南隣の畑に2隻の船が上がってきたため, 近くの家の2階に避難した. 自宅は床上30㎝くらい浸水.	インタビュー	2
T12	8時頃にバイクで出勤する際に道路冠水し動かなくなったため, バイク店で自転車を借りて出勤した. 高潮後には園瀬川から流入した船と材木が多量に堆積していた.	インタビュー, 徳島新聞, JRT映像	情報なし
T13	朝早くに避難命令が出されてトラックで中学校に避難した. 翌朝自宅へ帰ると玄関先に漁船が打ちあがっていた. 床上1mくらい浸水した.	インタビュー	3
T14	新町川右岸にあった石油タンクが倒壊し, 油が渭東, 沖洲地区に流入したため, 火を使わないように警戒広報を行った.	インタビュー, 徳島新聞	情報なし
T15	午前7時頃, 護岸が延長約10mにわたってくずれ, 高潮に洗われた. くずれた護岸に警察職員, 地元消防団員が土のうを築いた.	徳島新聞, NHK映像	情報なし
T16	停泊中の大阪航路の旅客船が高潮で乗り上げるのを防ぐために木材などで固定作業を行った.	JRT映像	情報なし
T17	強風で体育館, 校舎が全半壊した.	JRT映像	情報なし
T18	徳島県庁玄関の水深が75cmに達した	徳島市史[8]	2

浸水レベル(0: 浸水なし, 1: 0.3m 未満, 2: 0.3-1m, 3: 1-2m, 4: 2-3m)

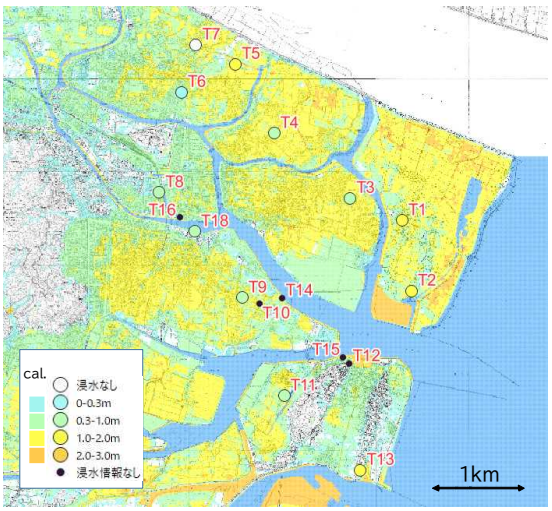


図-6　被災状況確認場所と浸水状況（徳島市）

4．おわりに

西日本各地で深刻な高潮災害をもたらした第二室戸台風から 2021 年が 60 年目にあたることから，第二室戸台風による徳島市内の高潮災害の実態について，体験者による証言，災害報告書，ニュース映像や新聞記事などの

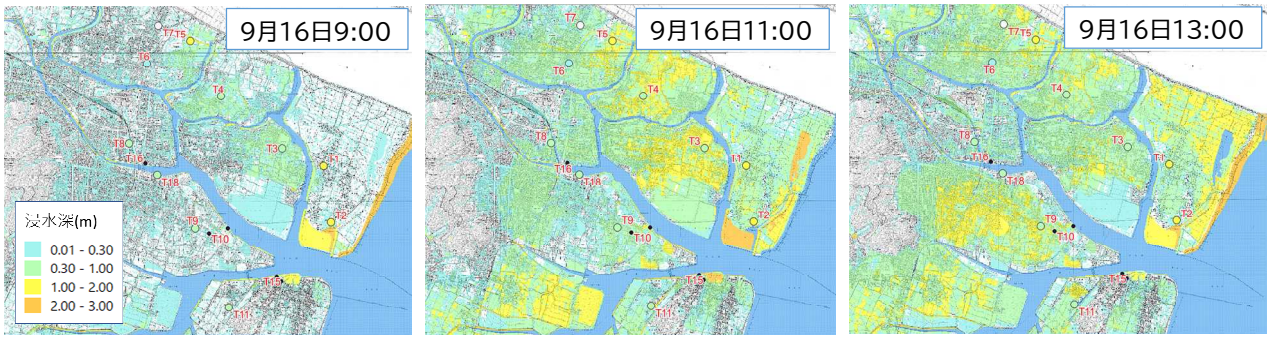


図-7　第二室戸台風による徳島市内における浸水の進展状況

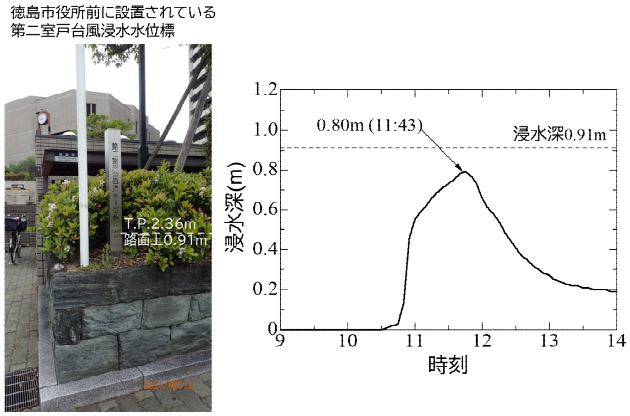


図-8　旧消防庁舎前（T8）の浸水深変化と浸水水位標（地表から 0.91m の位置に水位位置を表示）

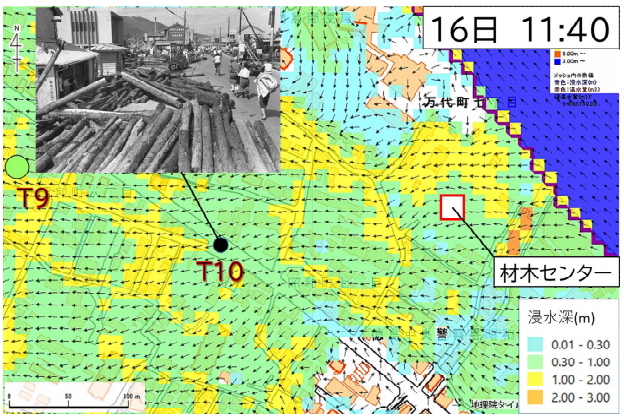


図-9　木材が流れ着いた国道 55 号三叉路（T10）付近の海水流入状況（11:40 時点）と木材滞留状況（図中の写真は徳島新聞社提供）

報道資料の収集，さらに高潮氾濫解析を行うことを通して分析した．

高潮解析は吉野川以南の徳島市中心部を対象に実施し，排水施設を考慮していない点，標高や堤防高などの精度が十分でないなど，問題点は残されているものの徳島県内に唯一残る浸水水位標（徳島市旧消防庁舎前，T.P.2.36m）の値とは近い最大浸水深の計算結果を得た．また，旧国道 55 号線で大量の材木が集積した被害は，近くの材木センターからの流出が原因であると推察できた．第二室戸台風は徳島市付近を 9 月 16 日 11 時 30 分頃に最接近したが，市街地へ浸水は台風の通過時またはその直後であったことが証言などから確認された．このように証言や数値解析結果を通して，記憶から失われつつあった大規模高潮災害の様相の一部を明らかにすることができた．

これらの調査結果に加えて，徳島県高潮浸水想定区域等をわかりやすくまとめたパネルを制作し，2021 年 9 月 16 日から 11 月 7 日の間に県有施設 3 か所，大型商業施設 1 か所でパネル展示会を延 50 日間開催した．展示会の開催期間中にはパネル説明会も 4 回開催した．パネル展示会場への来場者は計 1361 名で，この取り組みにより一定の啓発効果はあったと推察される．しかし，南海トラフ地震災害や洪水災害に比べると認識度は低く，さらなる啓発が必要である．高潮災害を自分事ととらえて，関心を持ってもらうためにもタイムライン作成のためのワークショップ開催なども実施する必要がある．

謝辞：本調査を行うにあたり，貴重なご体験をお話しいただきましたインタビュー調査への協力者の方々に厚く御礼申し上げます．また，公文書関係の収集では国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所，徳島県県土整備部，徳島県立文書館，徳島県立図書館，報道資料の収集では NHK 徳島放送局，四国放送，徳島新聞社の協力を得た．NHK と四国放送については第二室戸台風関係の特別番組作成も兼ねてインタビュー調査の機会を提供いただいた．インタビュー調査への協力者の募集は徳島県内の防災士関係団体（日本防災士会徳島県支部，徳島県地域防災推進員）の協力を得た．ここに記して，本調査に協力いただいた多くの方々に謝意を表します．

参考文献

1) 内閣府：平成 30 年台風第 21 号に係る被害状況等について，平成 30 年 10 月 2 日，46p.，2018.
2) 国土交通省：水防法等の一部を改正する法律，https://www.mlit.go.jp/river/suibou/suibouhou.html, 2017
3) 徳島県：徳島県高潮浸水想定区域図について，https://www.pref.tokushima.lg.jp/ippannokata/kendozukuri/kasen/5034011，2020.
4) 徳島県：1961 年（昭和 36 年）9 月 16 日 第二室戸台風（18 号），徳島県自然災害誌，pp.123-126.，2017.
5) 気象庁大阪管区気象台：第 2 室戸台風報告，大阪管区異常気象調査報告，第 9 巻，第 3 号，191p.，1962.
6) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：第二室戸台風による港湾災害調査報告書，199p.，1962.
7) 気象庁：中心気圧が低い台風，気象庁ホームページ，https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/ranking/air_pressure.html
8) 徳島市：徳島市史，第 6 巻，pp.807-808，2020.

土石流による被災箇所でのドローン観測と崩壊土砂量の推定

UAV Observations for Estimating Soil Volumes of Debris Flows

○谷崎巧朗[1]，三浦弘之[1]
Takuro TANIZAKI [1] and Hiroyuki MIURA [1]

[1] 広島大学　大学院先進理工系科学研究科
Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

Debris flows induced by heavy rains have brought severe damage in residential areas of Japan. It is important to quickly identify the affected areas and evaluate soil volumes produced by debris flows in order to consider post-disaster debris management and recovery plans. In this study, we conducted UAV observation of affected areas by debris flows in Hiroshima city on August 2021, and generated digital surface models (DSM) and ortho-rectified images. Soil volumes of the debris flows were estimated from the difference of elevations between pre-evend DEM and post-evend DSM. The relationship between collapsed areas and volumes in this study agree with the relationships obtained in the previous debris flow events.

Keywords *: UAV,Debris flow, Volume, Digital surface model, Ortho-rectified images*

１．はじめに

近年、我が国では多くの自然災害が発生しており、特に広島県では2014年の広島豪雨災害、2018年の西日本豪雨災害と大規模な土石流災害が頻発している。これらの自然災害に対して災害把握を行うことは、避難計画や復旧計画を立てる上で重要である。特に、土石流災害では、膨大な量の土砂が崩壊するため、その処理方法や処理計画を立案する上で、できるだけ早い段階で崩壊土砂量を把握することが重要である。

災害把握の方法には、現地調査や航空機からの空中写真撮影が用いられる。しかし現地調査では、実際に現地に足を運ぶことから危険が伴うことと、航空機による調査ではコストが掛かるというデメリットが挙げられる。一方で、ドローンのような UAV（Unmanned Aerial Vehicle）による計測は、現地付近に赴く必要はあるが、機動的かつ低コストに実施することができる。本研究ではより簡便な災害把握を目的とし、ドローンを使用することにした。2021 年 8 月に広島県広島市で起きた豪雨による土石流災害を対象として、ドローンによる計測を実施し、観測された画像から数値表面モデル（Digital Surface Model: DSM）とオルソ（正斜投影）画像を作成した。さらに、国土地理院による災害前の数値標高モデル（Digital Elevation Model：DEM）と災害後の DSM との標高差分から地形の変化を定量的に捉え、崩壊土砂量を推定することを目的とする。

２．対象地域

2021 年 8 月 12 日から 15 日にかけて、梅雨前線が西日本付近に停滞し、広い範囲で大雨となった。これにより広島県で土石流が発生し、建物や道路などに大きな被害をもたらした。そのうち図 1 に示す広島県広島市西区己斐上、田方と安佐南区上安の 3 地域を本研究の対象とした。図 1 中の気象庁観測地点での 1 時間当たりの降雨量と累積降雨量の変化[1)]を図 2 に示す。いずれの地点でも土石流が発生した 8 月 14 日夜には累積降雨量が 400mm を越えていたことがわかる。

また、これらの地域における空撮画像[2)]を図 3 に示す。土石流の発生に伴う植生や土砂の流出により、土壌が地表に現れている様子が確認できる。また、特に己斐上や田方での土石流発生箇所の下流側には住宅地が広がっており、多くの家屋に土砂が流入し、建物被害が発生した。

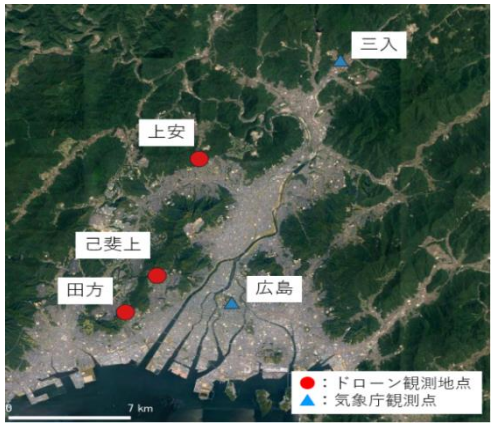


図 1　ドローン観測地域と気象庁観測地点の位置関係図

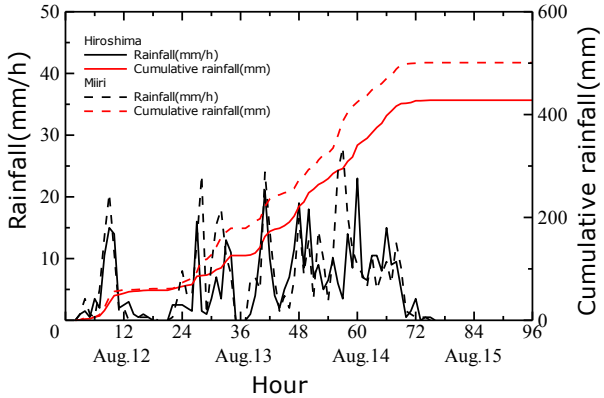


図 2　気象庁観測点における 1 時間当たりの降雨量と累積降雨量（広島と三入）

３．ドローン計測による DSM とオルソ画像の作成

対象とする 3 地域において 2021 年 9 月下旬および 10 月下旬にドローンによる撮影を行った。計測には DJI 社の Mavic 2 Pro を用いて、高度 100m 前後から直下視による撮影を行った。撮影した動画データから Agisoft 社の Metashape[3]を利用して、数秒間隔に切り取り複数枚の画像に変換した。これらの画像に緯度、経度などの 3 次元情報を与え、ステレオマッチングにより、互いの画像の視差情報を利用して対象物までの距離を計算することで、建物や樹木等の地物の高さも含む標高データを表す DSM とオルソ画像を作成した。DSM の地表解像度は 0.1m、オルソ画像の解像度は 0.05m と既存のデータに比べて高解像度なデータが得られた。

図 4～6 にそれぞれの地域で作成した災害前の GoogleMap 画像、国土地理院による災害前 DEM（5m メッシュ）、ドローン計測で作成したオルソ画像と DSM の比較を示している。オルソ画像から土砂の崩壊によって植生が流出し，土壌が表面に現れている様子が明瞭にみられることが確認できる。さらに、災害後 DSM をみると，植生の流出した箇所では周囲に比べて標高が顕著に低くなっていることも確認できる。

図 3　土石流発生箇所における航空写真 [2]

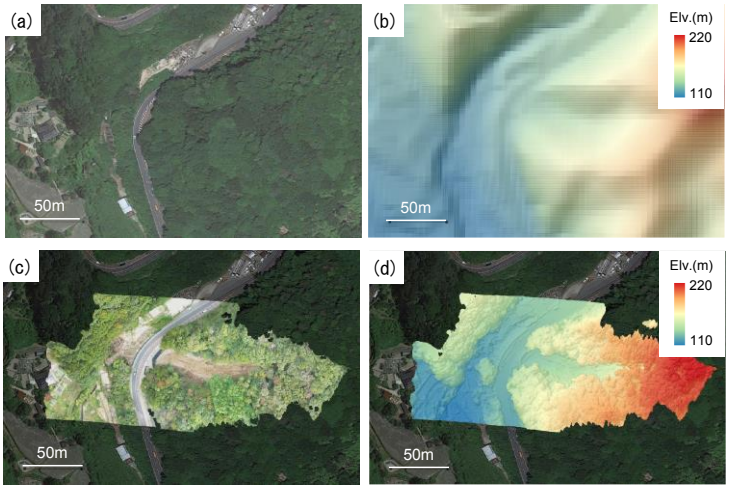


図 4　上安：(a)災害前 Googlemap 画像，(b)災害前 DEM，(c)災害後オルソ画像，(d)災害後 DSM

４. 標高差分の誤差評価

土砂崩壊などの地形変化が生じていない箇所では、災害前後の標高差分は理想的には 0 になるはずである。しかし、災害前 DEM との解像度が異なること、災害後 DSM にも誤差が含まれることから、標高差分にも多少の誤差が含まれる。それぞれの対象地域から土砂崩壊の影響のない道路の一部分（非変化地域，図 8 中の白枠内）を取り出し、その中に含まれる標高差分ヒストグラムを図 7 に示す。また各地域の標高差値の標準偏差と平均値を表 1 に示す。ここから 3 地域とも平均的にはゼロに近い値となっていることがわかる。ただし、標準偏差は 0.2～0.7m となっており、用いた標高データには数 10cm 程度の誤差が含まれることに注意が必要である。

５．崩壊土砂量の推定

図 4～6 に示す作成したオルソ画像より、目視判読で土砂崩壊地域を判読した。ただし，田方に関しては土砂崩壊地域が植生に覆われており、判別が困難であったため崩壊土砂量の推定からは除外した。上安においては、道路を挟んで上流側と下流側で土砂の崩壊がみられたため、この 2 つに分けて考えた。次に災害後 DSM から災害前 DEM を差し引き、標高差分を求めることで土砂崩壊による侵食深さを算出した。

図 8(a)～(c)に標高差分布を示す。算出した浸食深さにメッシュ面積を掛け合わせ、崩壊範囲内の合計を求めることで、崩壊土砂量を推定した。推定された崩壊土砂量は、己斐上で約 2340m^3、上安で約 720m^3 となった。崩壊面積 A(m^2)と崩壊土砂量 V(m^3)の関係を図 9 に示す。2014 年広島豪雨災害および 2018 年西日本豪雨災害での広島県内の土石流データの分析 [5]から、崩壊土砂量は崩壊面積に平均

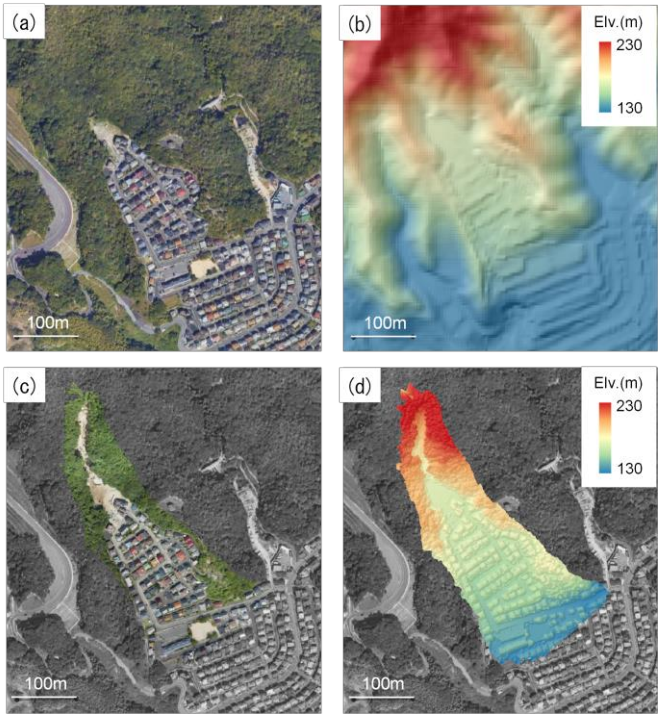


図 5　己斐上：(a)災害前 Googlemap 画像　，(b)災害前 DEM，(c)災害後オルソ画像，　(d)災害後 DSM

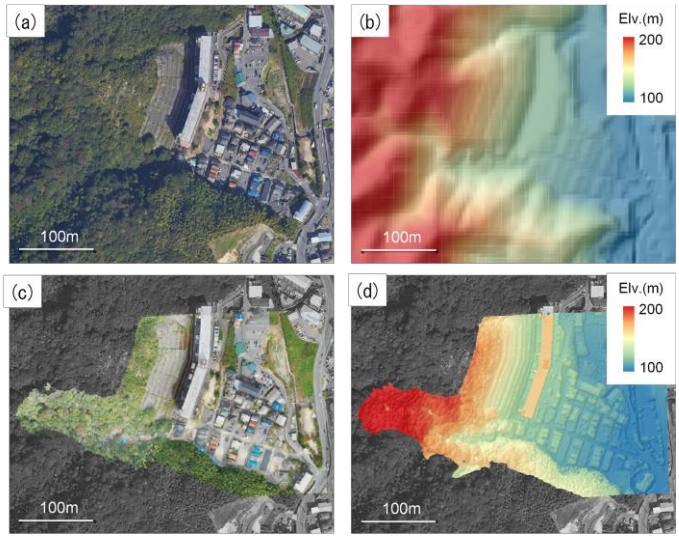


図 6　田方：(a)災害前 Googlemap 画像，　(b)災害前 DEM，
(c)災害後オルソ画像，(d)災害後 DSM

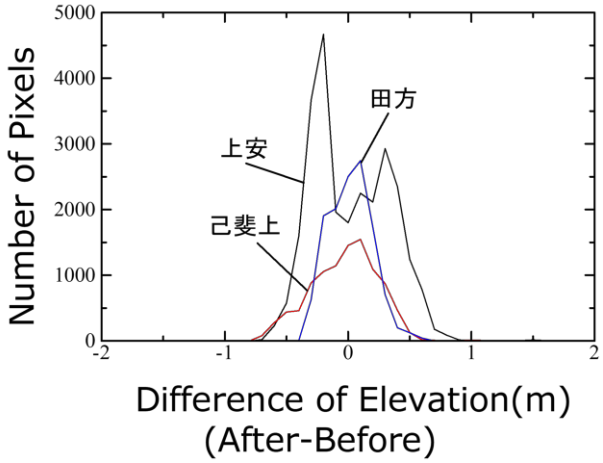


図 7　非変化地域での標高差分値のヒストグラム

表 1　非変化地域での標高差分の平均と標準偏差

	上安	己斐上	田方
平均値	−0.018	−0.042	−0.08
標準偏差	0.72	0.60	0.17

的な侵食深さを掛けた V=0.78A で近似できるものと示されている。また、国内外の土石流による A と V の　関係式 [6~11]も図中に併せて示している。本研究で得られた値は、既存の関係式に近い値となっていることがわかる。また、V を A で除した値を侵食深さ D(m)とし、これと A の関係を表したものを図 10 に示す。図から 2 地域とも侵食深さは1m前後であり、既存のデータに近いことがわかる。これらの結果から、既存の関係式は今回対象とした土砂災害による値とも調和的であり、崩壊面積から土砂量を予測するが適用できることが示された。また、今回対象とした土石流の規模は、2014 年広島豪雨災害、2018 年西日本豪雨災害のデータと比べて平均的かつ中間的な規模であったことがわかった。

６．結論

本研究では 2021 年 8 月に発生した広島市での土石流災害箇所においてドローンによる計測を実施し、ステレオマッチングにより災害後の DSM とオルソ画像を求めることで、被災地の詳細な地形データや空撮画像を取得することができた。さらに、災害前の地形データとの標高差分から崩壊土砂量を算出した上で、崩壊面積と崩壊土砂量の関係を求めたところ、本研究で求めた値は、過去の土石流データと概ね調和的であることが確認された。

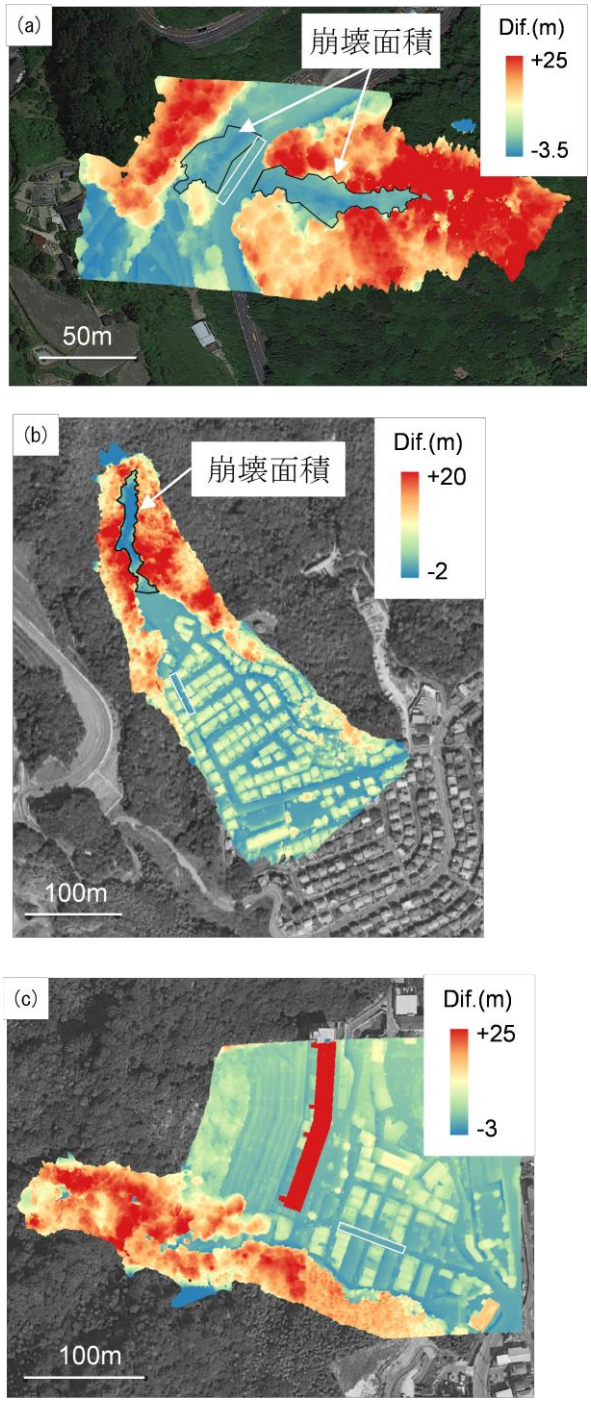


図 8　標高差分の分布（災害前 DEM－災害後 DSM）
(a)上安、(b)己斐上、(c)田方

謝辞：
本研究は、JSPS 科研費（19H02408）の助成を受けたものである。

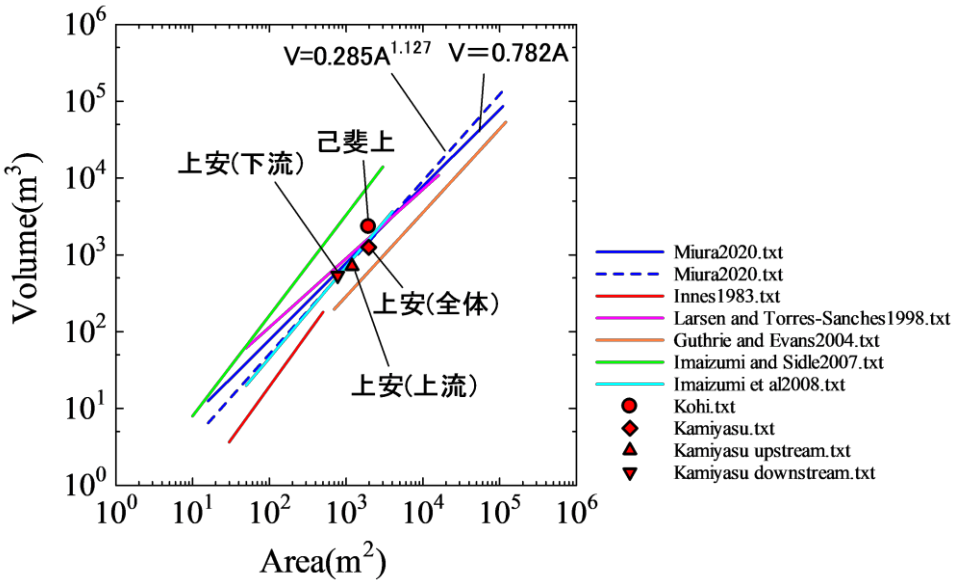


図 9　崩壊面積と崩壊土砂量の関係

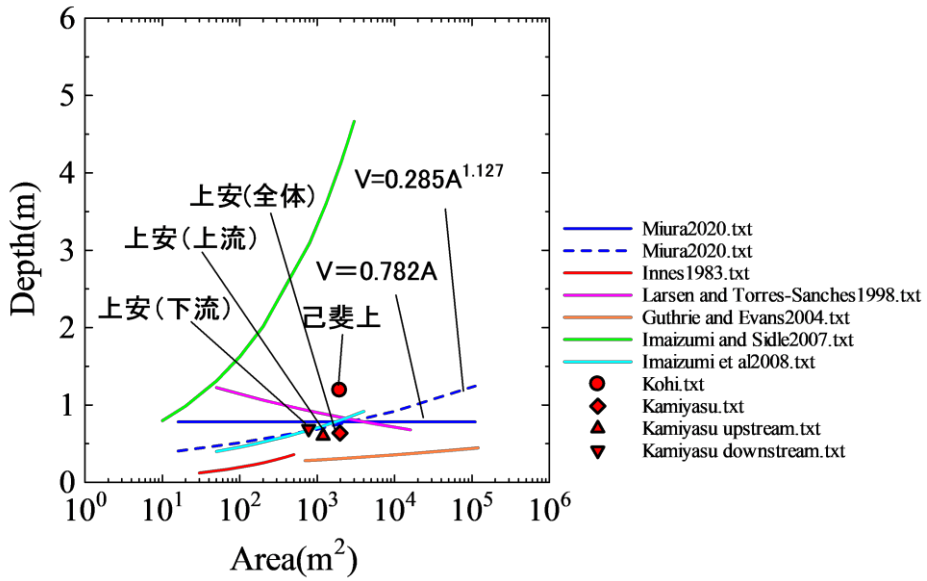


図 10　崩壊面積と浸食深さの関係

参考文献

1) 気象庁：過去の気象データ検索，https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php.
2) アジア航測株式会社：停滞前線による大雨の被害状況（2021 年 8 月）第 1 報　広島，https://www.ajiko.co.jp/news_detail/1209.
3) Agisoft: Metashape, https://www.agisoft.com/.
4) 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/menu.php.
5) Miura, H.: Fusion analysis of optical satellite images and digital elevation model for quantifying volume in debris flow disaster. *Remote Sens.,* 11, 1096, 2019.
6) Innes, J. N.: Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Highlands. *Earth. Surf. Process. Landf.*, 8, 579–588, 1983.
7) Larsen, M. C. and Torres-Sahchez, A. J. : The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico. *Geomorphology*, 24, 309–331, 1998.
8) Guthrie, R. H. and Evans, S. G.: Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia, *Earth. Surf. Process. Landf.*, 29, 1321–1339, 2004.
9) Imaizumi, F. and Sidle, R. C.: Linkage of sediment supply and transport processes in Miyagawa Dam catchment, Japan, *J. Geophys. Res.* 12, 3012, 2007.
10) Imaizumi F. *et al.*: Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan, *Earth. Surf. Process. Landf.* 33, 827–840, 2008.

基礎調査データに基づく土石流による建物被害予測と土砂氾濫域の推定

Estimation of Debris Flow-Induced Inundation Areas of and Building Damage Based on Basic Survey Data

○橋本 裕輝 [1]，三浦 弘之 [1]
Yuki HASHIMOTO [1] and Hiroyuki MIURA[1]

[1] 広島大学　大学院先進理工系科学研究科
Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

Designation of warning zones for sediment-related disasters is an important issue to increase citizen's counsiousness for natural disasters. Inundations of the 2018 debris flow events in Hiroshima brought severe damage to residential houses and spreaded over the warning zones. We estimated the amount of building damage and predict possible inundation areas by anticipated debris flow events at the central part of Kure city, Hiroshima. The building damage was estimated by the predicted flow depths in the basic survey by the local government and fragility curve. The inundation areas were evaluated by the debros flow propagation analysis using DEM. The estimated inundation areas were discussed by comparing with the affected areas in the 1945 Makurazaki typhoon.

Keywords *: Debris flow, Building damage, Inundation area, Basic survey*

１．はじめに

日本では豪雨による土砂災害被害が数多く発生している．土砂災害に対する対策のひとつとして，土砂災害警戒区域（以下，警戒区域）の指定があり [1)]，ハザードマップ等に利用されている．土砂災害警戒区域とは，急傾斜地の崩壊等が発生した場合には住民等の生命又は身体に危害が生ずるおそれがあると認められる土地の区域で、当該区域における土砂災害を防止するために警戒避難体制を特に整備すべき土地の区域のことである．また警戒区域のうち、急傾斜地の崩壊等が発生した場合には建築物に損壊が生じ住民等の生命又は身体に著しい危害が生ずるおそれがあると認められる土地の区域を土砂災害特別警戒区域と指定される．しかし，2018 年西日本豪雨災害では，警戒区域外にも土砂が氾濫したため，多くの建物が土砂や浸水による被害をうけた [2)]．このため，同じ警戒区域内でも被害が発生する可能性が高い地域や比較的低い地域が存在すること，大規模な土砂災害が発生した場合には警戒区域よりも広い範囲で土砂が氾濫する可能性が高いこと，がある．本研究では上記の問題について検討することを試みた．

警戒区域を指定するために，自治体は対象地域に対して基礎調査を実施している．この基礎調査データには，土石流の崩壊開始点や想定される土石流高さなどの情報が記載されている．広島県全域の指定区域数は 46,546 区域であり，呉市は3,940区域が指定されている．本研究では，呉市中心部を対象として，基礎調査データに基づき土石流高さの分布を求め，警戒区域内に存在する建物の被害発生確率を推定する．さらに，崩壊開始点と数値標高モデル（DEM）による土石流氾濫シミュレーションを実施し，想定される氾濫域と警戒区域の関係を議論し，1945 年枕崎台風による被災範囲との比較を行う．

２．対象地域と使用するデータ

本研究では図 1 に示す呉市中心部を対象とし，土石流による警戒区域 88 箇所について分析する．まず，警戒区域のポリゴンデータ [3)]および基礎調査データを取得した．基礎調査データには，想定される崩壊開始点，警戒区域の範囲や想定される土砂量，警戒区域内の代表的な地点の土石流高さ，警戒区域内の家屋数などに関する情報が含まれる．また，本研究では，国土地理院による5mメッシュの DEM および建物ポリゴンデータ [4)]を使用した．

３．基礎調査データからの土石流高さの読み取り

土石流高さの面的な分布を求めるために，基礎調査データに記載されている土石流高さの位置と高さを読み取り，GIS 上に入力した．ただし，下流側の地点では高さが記載されていない地点があった．このような地点や警戒区域の境界部は高さ 0.1m と仮定した．土石流高さが求められている地点は限られていることから，逆距離荷重法（Inverse Distance Weighting）による空間補間により，警戒区域内全ての点において土石流高さを推定した．逆距離荷重法とは，対象地点の近くに存在する別の地点のデータ値の平均をとることで，対象地点のデータ値を推計する手法のことである．推定する中心にポイントが近いほど荷重が大きくなる．式で表すと，

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x,x_i)^p} \tag{1}$$

で表される．p の値を大きくすることで，近傍点の値の影響は大きくなる．p の値を大きくすることにより詳細に表示され，逆に小さくすることでより滑らかに表示される．本研究では，p=10 を使用した．

空間補間によって求められた土石流高さデータを図 2 に示す．ほとんどの警戒区域では土石流高さ 0.5m 以下の範囲が多かったが，警戒区域の上流部や河川などの水路

周辺部では予測される土石流高さが高くなることが分かった．

４．土石流高さに基づく建物被害率の推定

一般に，土石流高さが高くなると，建物に襲来する土砂量が多くなるため，建物に被害が生じる可能性が高まる．土石流高さと建物の被害発生確率の関係については，筆者らの既往の研究 [5]で検討している．これによると，一般的な 2 階建て木造住宅の場合，土石流高さが 70cm 以下であれば被害が発生する確率は低く，1m を越えると被害が発生確率が高くなる傾向がみられた．この傾向は，2011 年東日本大震災での津波による津波高さと建物の大破率の関係 [6]と非常に近いことが指摘されている．このため，本研究では Suppasri et al. [6]による木造 2 階建ての建物に対する津波被害関数を用いて，土石流高さに対する被害発生確率を推定した．本研究で使用した建物被害関数を図 3 に示す．

特に土石流高さが高かった北側の地域における土石流高さの拡大図を図 4 に示す．計約 140 棟の建物に対して高さ 1m以上の土石流が想定されていることがわかる．さらに，各建物ポリゴンに与えられた土石流高さと図 3 に示す被害関数を用いて，各建物の被害発生確率を算出した．推定された被害確率の分布を図 5 に示す．警戒区域の多くの範囲は土石流高さが 50cm 未満と比較的低いことから，被害発生確率は 10%以下の建物が多い．しかし，上流側の地域や水路があり谷状の地形となっている地域では，確率が 50%以上の高い建物も約 100 棟あった．また，建物被害発生率 50%以上の建物 94 棟のうち 35 棟が特別警戒区域の外側に存在していることが確認できた．

５．シミュレーションに基づく土砂氾濫域の推定

次に，土石流氾濫シミュレーションを行い，推定される氾濫域と土砂災害警戒区域の比較を行った．シミュレーションには Flow-R[7]と国土地理院による DEM[4]を用い，基礎調査データを基にして崩壊開始点を与えることで，氾濫域を推定した．崩壊開始点は，基礎調査の資料に掲載されている 0 次谷流域内の開始点とすることにした．0 次谷流域内では，土壌の集中・堆積現象が活発に起こり，地中・地表が形成されると同時に，崩落発生点・土石流形成場でもあり，地形の形成と崩落が繰り返し発生している地点でもある．

計算条件は，2018 年西日本豪雨災害で警戒区域よりも広い範囲で氾濫がみられた地域の氾濫域を再現するパラ

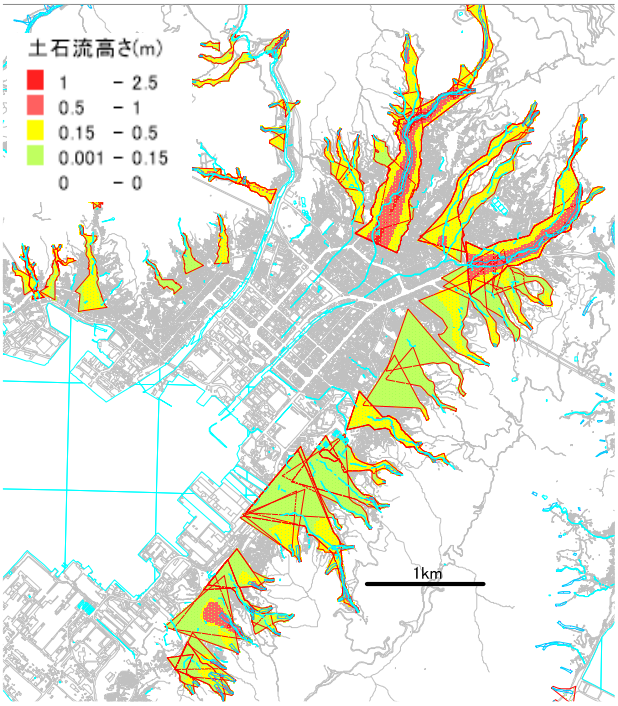


図 2　警戒区域内の土石流高さ分布

図 1　呉市中心部の土砂災害警戒区域

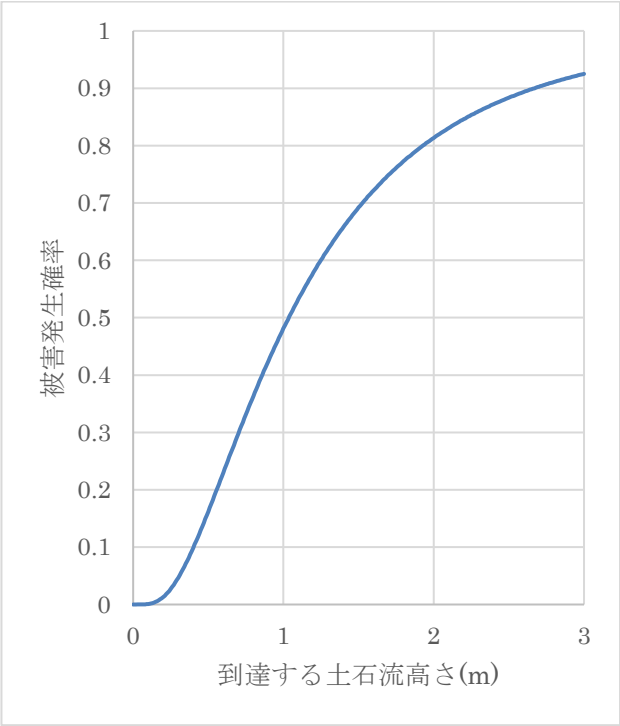


図 3　使用した建物被害関数 [6]

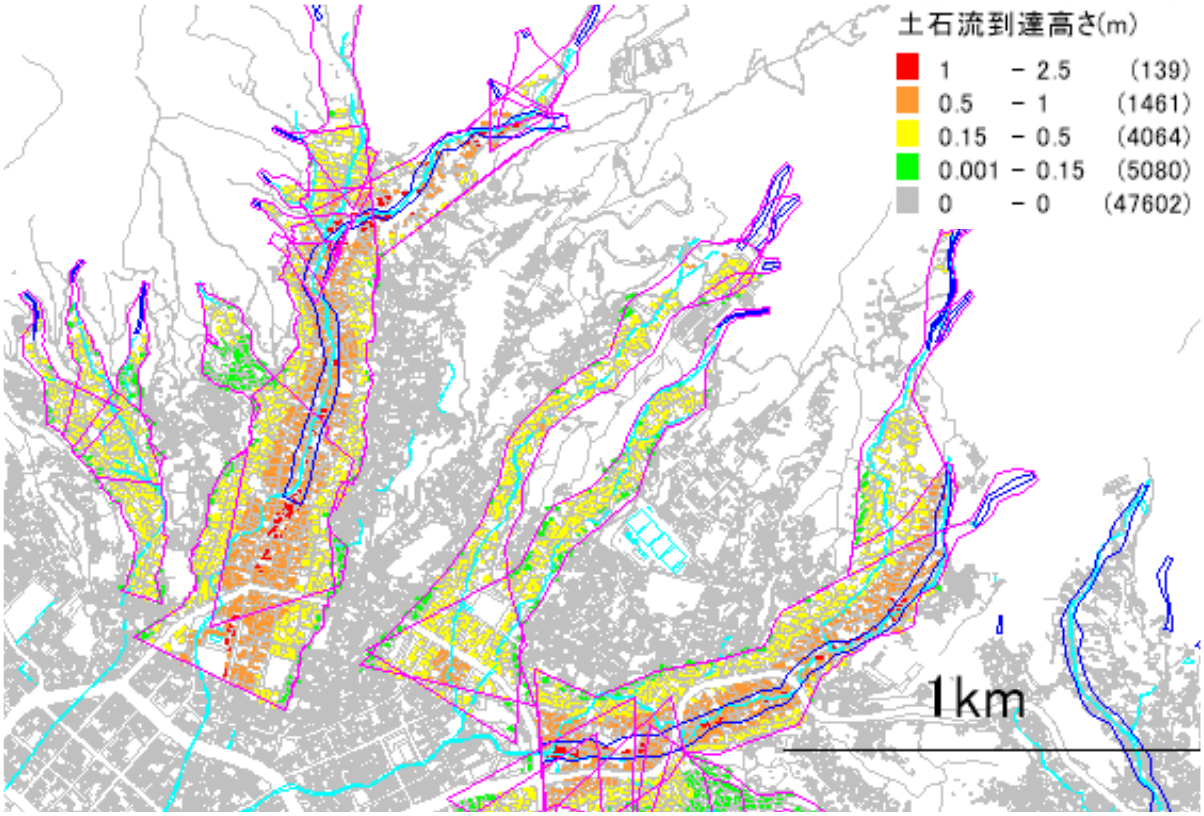


図 4　土石流到達高さ

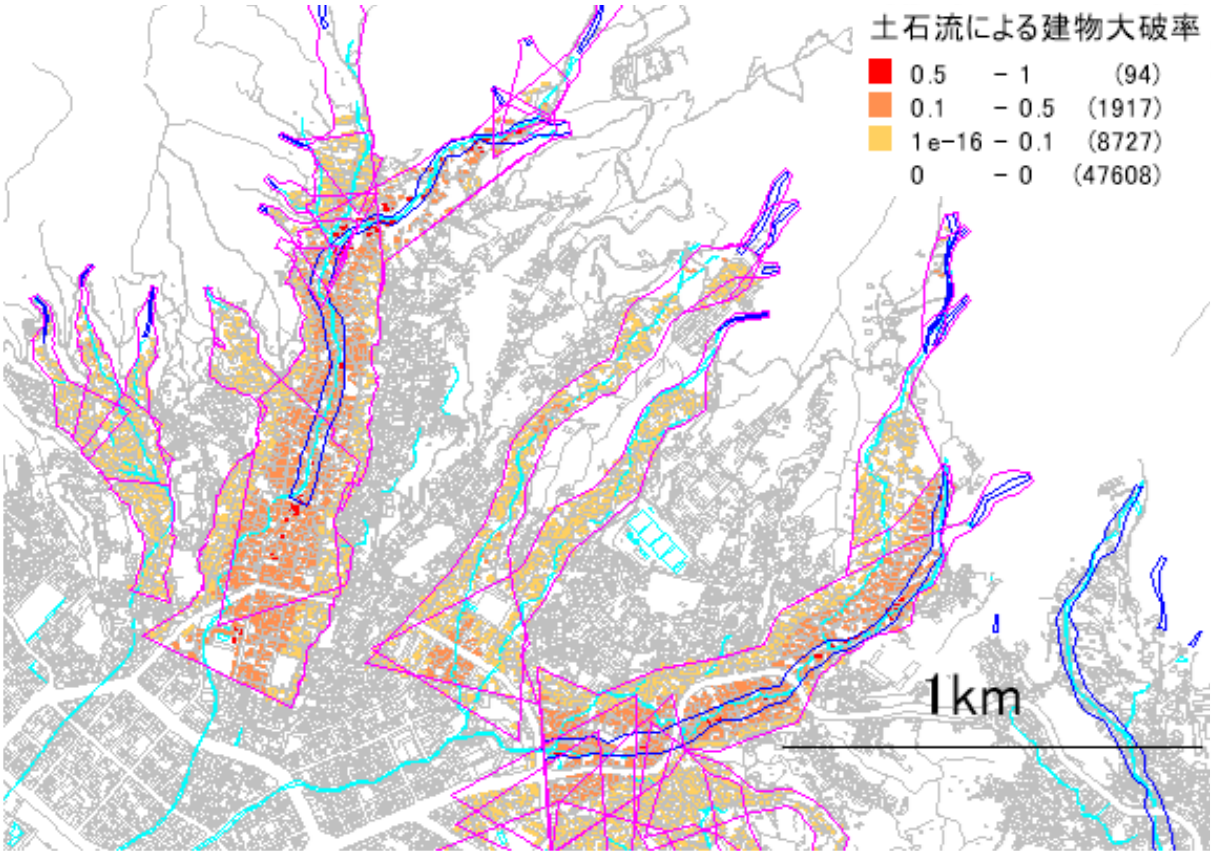


図 5　推定された建物被害確率の分布

メータ [2]を使用した．この計算条件は，呉市天応西条や坂町小屋浦，広島市安芸区矢野東などでみられたように，土砂氾濫域に河川が存在し，土砂による河道閉塞が発生することで，広域に土砂が氾濫した地域をカバーするように設定されたものである．

この条件での計算結果を図 6 に示す．この条件は，土

砂が広域に氾濫する設定であるため，警戒区域よりもさらに下流側に土砂が氾濫するものと推定された．対象地域の警戒区域には河川などの水路が存在するケースが多い．つまり，西日本豪雨災害の同程度の規模の土砂災害が発生した場合，図 6 に示すように，警戒区域外にまで土砂が到達する可能性が高いことを表している．

対象地域では，1945 年 9 月枕崎台風による土砂災害・河川氾濫が発生しており，呉市で死者 1000 名以上，1162 戸の家屋流出の被害が発生した [8]．対象地域全域での土砂氾濫シミュレーションの結果を図 7 に，枕崎台風による浸水・土砂氾濫域の分布 [8]を図 8 に示す．これをみると，枕崎台風では警戒区域やシミュレーションによる氾濫域よりもさらに下流側にまで土砂や水が到達していたことがわかる．当時とは地形や都市条件が異なるものの，本研究によるシミュレーション結果は過大評価とはいえず，大規模な土石流が発生した場合，被災範囲はより広域に広がる可能性が高いものと考えられる．

６．結論

本研究では，広島県による基礎調査データに基づき警戒区域内の土石流高さ分布の把握およびそれに基づく建物被害確率の推定を行った．その結果，対象地域内では約 100 棟の建物に 1m 以上の高さの土石流が到達すること，さらにこれらの建物では大破程度の被害が発生する可能性があることがわかった．特に被害発生率が 50%以上の建物 94 棟のうち 35 棟は特別警戒区域の外側に位置していることがわかった．また，土砂氾濫シミュレーションから，西日本豪雨災害の同程度の規模の土砂災害が発生した場合，警戒区域外に土砂が氾濫する可能性があること，1945 年枕崎台風ではより広い範囲に氾濫がみられたこと，を示した．

謝辞

本研究は，JSPS 科研費（19H02408，20H02331）の助成を受けたものである．基礎調査の資料は，広島県土木建築局から提供いただいた．期して謝意を表する．

参考文献

1) 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律，2021，https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=412AC0000000057.
2) 三浦弘之、池奥和歩：2018 年 7 月豪雨災害における広島県での土石流による被害地域と土砂災害警戒区域の空間分析，地域安全学会論文集, Vol.37, pp.11-19, 2020.
3) 土砂災害ポータルひろしま，2021，https://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/top.aspx
4) 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス, 2021, https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php
5) 三浦弘之，白川隼也：土石流高さに注目した数値解析に基づく木造家屋の倒壊危険度評価, 地域安全学会論文集, Vol. 39, pp.73-79, 2021.
6) Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Imai, K., Fukutami, Y., Abe, Y., Imamura, F.: Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami, *Natural Hazards*, Vol.66, pp.319-341, 2013.
7) Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B, Zimmermann, M.: Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale, *Natural Hazards and Earth System Science,* Vol.13, pp.869-885, 2013
8) 広島県土木部砂防課: 昭和 20 年 9 月 17 日における呉市の水害について, 1951.

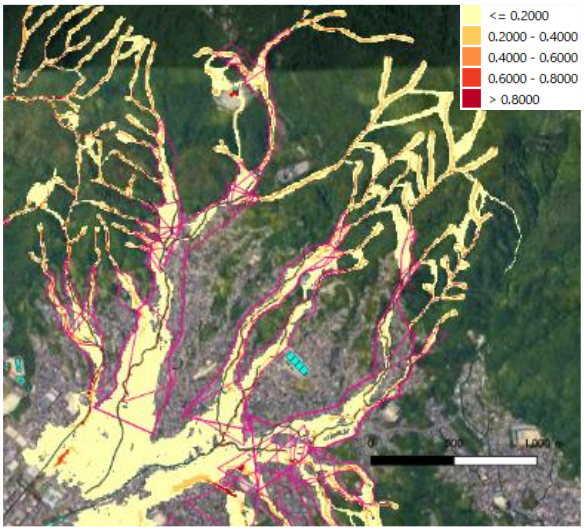


図 6　土砂氾濫シミュレーション結果

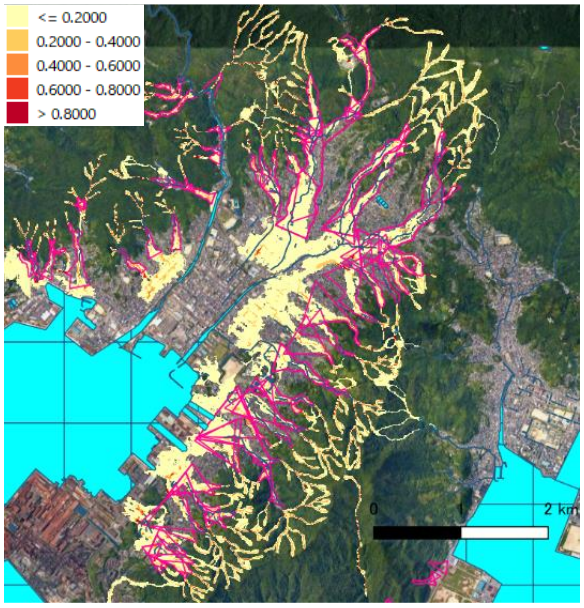


図 7　対象地域全域での土砂氾濫シミュレーション結果

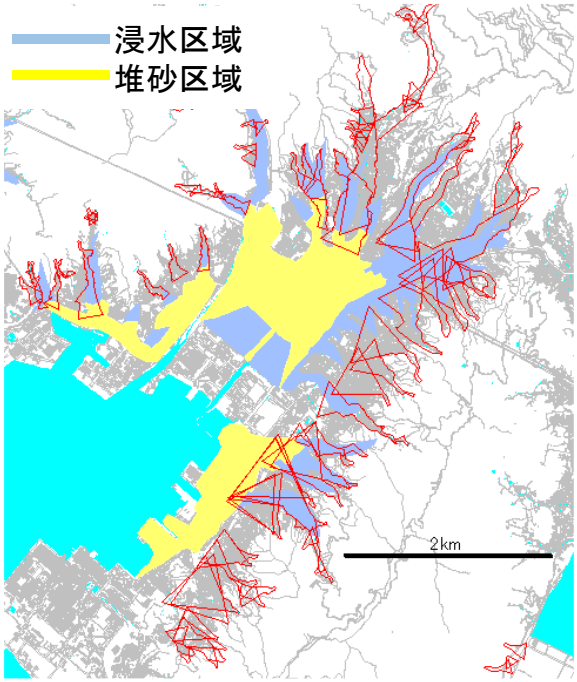


図 8　1945 年枕崎台風による被災範囲と警戒区域

常時微動による複数の火口縁の振動特性の比較

Study on Vibration Characteristics of the Crater Rim of Two Mountains by Microtremor Observation

○山田 雅行[1,2]，栗田 哲[1]，羽田 浩二[1,2]，深津 宗祐[2]，江口 拓生[2]，藤野 義範[2]，吉見 雅行[3]

Masayuki YAMADA[1,2], Satoshi KURITA[1], Koji HADA[1,2], Sosuke FUKATSU[2], Hiroki EGUCHI[2], Yoshinori FUJINO[2] and Masayuki YOSHIMI[3]

[1] 東京理科大学 工学部
Faculty of Engineering, Tokyo University of Science
[2] (株)ニュージェック
NEWJEC Inc.
[3] (国研)産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門
Geological Survey of Japan/AIST

Eight points of microtremor observation were performed at each rim of the two crater lakes, Onami-ike and Byakushi-ike Lake. It was shown that the crater rims do not oscillate as a whole, but that there are some parts that vibrate significantly at a specific frequency. Especially at the rim of Byakushi-ike Lake, a place with large vibration was found and the ground is probably unstable. The need for detailed investigation and safety measures was suggested.

Keywords *: Vibration characteristics, crater rim, Onami-ike Lake, Byakushi-ike Lake, microtremor observation*

１．はじめに

著者らは，硫黄岳(鹿児島県)の火口縁が円周直交方向に大きく振動することを見つけた [1)]．これに端を発して，吾妻小富士（福島県）において８点（４点同時）の微動観測を行い，火口縁の一部分が特に大きく振動している可能性を示唆した [2)]．今回新たに火口湖である大浪池（鹿児島県），白紫池（宮崎県）の火口縁において微動の同時観測を実施し，火口縁の揺れ方を比較し，振動特性の解明を試みた．

図-1　大浪池と白紫池（地図：地理院地図に加筆）

２．大浪池と白紫池における常時微動観測

九州南部の鹿児島県と宮崎県の県境付近に広がる火山群である霧島連山の中に位置し，大浪池は最高標高が1412m，直径約 1.2km，周囲約 4km のほぼ円形の火口縁を有し，白紫池は最高標高が 1363m，直径約 600m，周囲約 2km のほぼ円形の火口縁を有する火山である．いずれも火口に水がたまってできた火口湖を有している．(図-1).

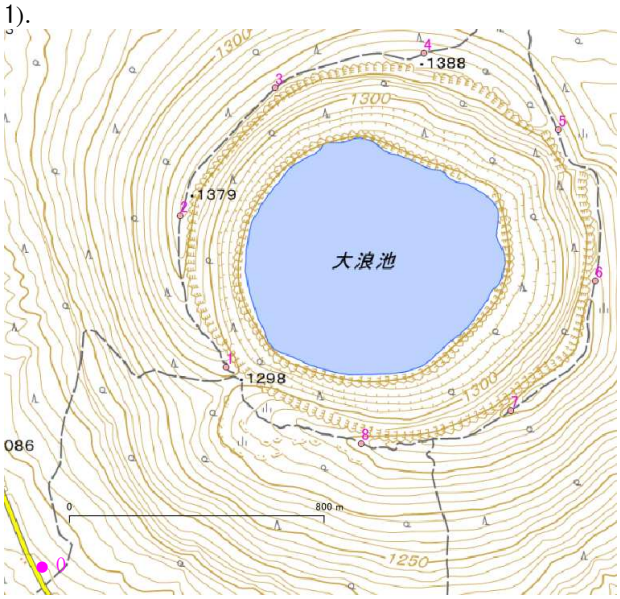


図-2　大浪池の常時微動観測点（地理院地図に加筆）

表-1　大浪池の観測点概要

観測回	観測日	観測開始時刻	観測時間	観測点No. 0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2021 4.22	11:02	15分	○		○		○		○		○
2		11:41	15分	○			○	○	○	○		
3		12:33	15分	○	○		○		○		○	
4		13:13	15分	○	○	○					○	○

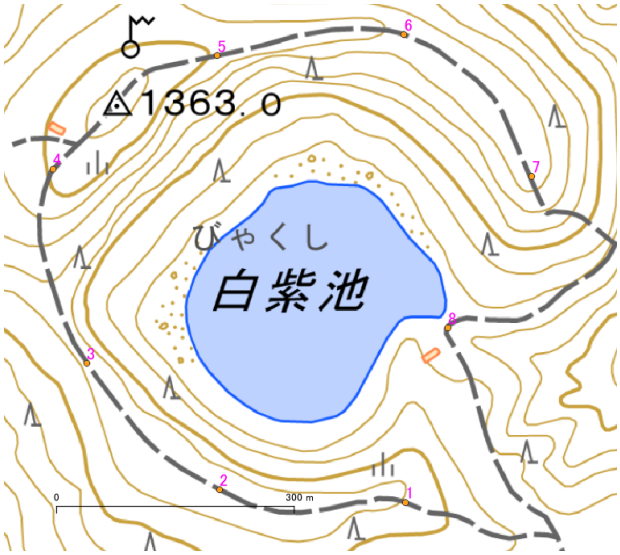


図-3　白紫池の常時微動観測点（地理院地図に加筆）

表-2　白紫池の観測点概要

観測回	観測日	観測開始時刻	観測時間	観測点No. 0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2021 4.23	10:15	15分	○	○	○				○	○	○
2		10:50	15分	○	○		○		○		○	○
3		11:30	15分	○			○	○	○	○		○
4		12:05	15分	○		○		○	○	○		○

大浪池，白紫池における微動観測は，2021 年 4 月 22，23 日に実施した．観測点を**図-2**，**図-3**，観測概要を**表-1**，**表-2** に示す．**図-2**，**図-3** の No.1～8 が微動観測点である．**表-1**，**表-2** の No.0 は定点観測点で大浪池では登山口付近の駐車場(**図-2** に併記)，白紫池では南に約 1km 離れたえびのエコミュージアムセンター駐車場に設置した．**表-1**，**表-2** に示すように火口縁 4 点(白紫池では 5 点)の同時観測を 4 回実施した．観測には，(株)ニュージェックが所有する白山工業株式会社製の微動計 JU210 を用いた．

３．大浪池と白紫池火口縁の卓越周波数

観測点 No.0 を基準として，同時記録の水平成分(円周直交方向)のスペクトル比(H/H スペクトル比)を計算した．大浪池と白紫池の結果をそれぞれ**図-4**，**図-5** に示す．15 分間の記録から重複の無い 40.96 秒×5 区間を 100 通り作成し，同時刻の基準点とのスペクトル比を計算し，その分散が最も小さい組み合わせの平均値を示した．なお，白紫池の観測時に No.0 の NS 成分が不調であったため，EW 成分のみを用いた．

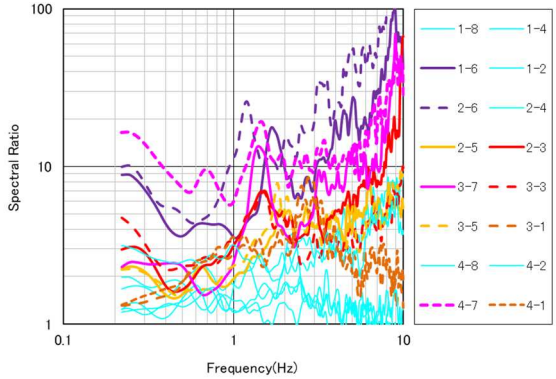


図-4　大浪池の H/H スペクトル比（基準点 No.0）

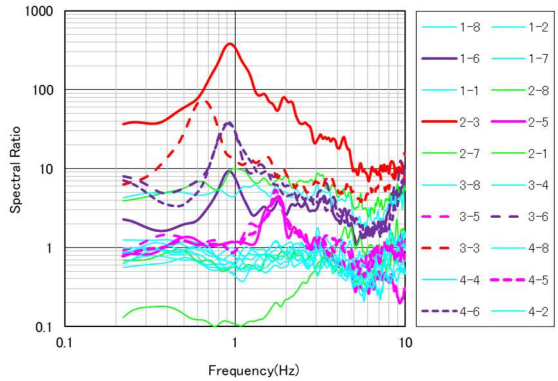


図-5　白紫池の H/H スペクトル比（基準点 No.0）

図-4，**図-5** の凡例は左側の数字が観測回，右側の数字が観測点 No.を示す．例えば，「1-8」は 1 回目の観測の観測点 No.8 である．基準観測点の位置がスペクトル比に及ぼす影響については十分評価できていない．したがって，このスペクトル比の卓越周波数は，後述する変位分布図の着目周波数を決めるために主として用いた．

大浪池のスペクトル比をみると，観測点 No.1 は 3Hz，No.3 は 1.5Hz，No.5 は 1.8Hz，No.6 は 1.1Hz および 1.7Hz，No.7 は 1.4Hz 付近に明瞭なピークが見られた(**図-4** の暖色系の線)．一方，観測点 No.2，4，8 では明瞭なピークが見られなかった(**図-4** の水色の線)．これより大浪池の変位分布図の着目周波数は 1.0～3.5Hz と考えた．また，一概には言えないが，ピークが明瞭な観測点と不明瞭な観測点がみられることや，観測点ごとに卓越周波数が異なることから火口縁は縦横に伸び縮みするような全体が振動するモードではなく，部分的に揺れやすい箇所が存在することを示唆していると考えられる．

白紫池のスペクトル比をみると，観測点 No.3 は 0.6Hz および 0.9Hz，No.5 は 1.8Hz，No.6 は 0.9Hz 付近に明瞭なピークが見られた(**図-5** の暖色系の線)．大浪池に比べて低周波数が卓越することに加えて，No.3 ではオーダーが異なる振幅となっている点は特筆すべきである．一方，観測点 No.1，2，4，7，8 では明瞭なピークが見られなかった(**図-5** の水色および緑色の線)．ピークが不明瞭であるがスペクトル比の値が 1 とは大きく離れた値が見られたが，必ずしも異なる観測回の同一観測点が同じ傾向を示していないことから，観測点のごくローカルな影響や観測時の特異な現象とみなした．白紫池の変位分布図の着目周波数は 0.5～2.5Hz と考えた．また，一概には言えないが，大浪池と同様にピークが明瞭な観測点と不明瞭な観測点がみられることや，観測点ごとに卓越周波数が異なることから火口縁は縦横に伸び縮みするような全体が振動するモードではなく，部分的に揺れやすい箇所が存在すること示唆されていると考えられる．

４．大浪池と白紫池火口縁の微動変位分布

図-6，**図-7** には火口縁観測点の各観測における全観測時間の水平変位を 0.1s 刻みで，その位置に○印をプロットした．前述のとおり大浪池の記録は 1.0～3.5Hz のバンドパスフィルタ，白紫池の記録は 0.5～2.5Hz のバンドパスフィルタを通した．**図-6**，**図-7** の凡例は左側の数字が観測回，右側の数字が観測点 No.を示す．例えば，3-1 は 3 回目の観測の観測点 No.1 の結果であることを示す．

なお，**図-7** の白紫池の観測点 No.3 の 2-3，3-3 の値は他の地点に比べて変位が大きすぎたため，1/10 の値にして○印をプロットした．

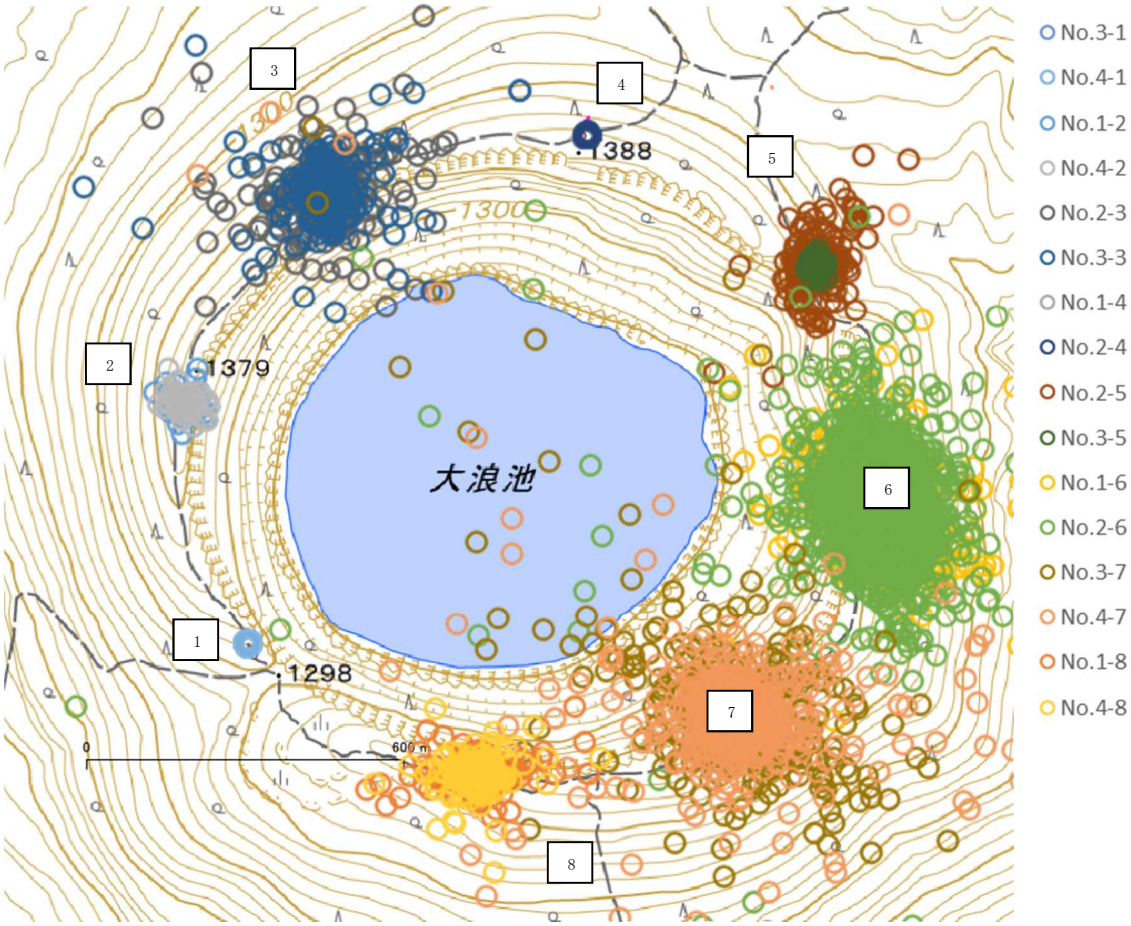


図-6　大浪池の火口縁観測点の変位分布図（地理院地図に加筆）

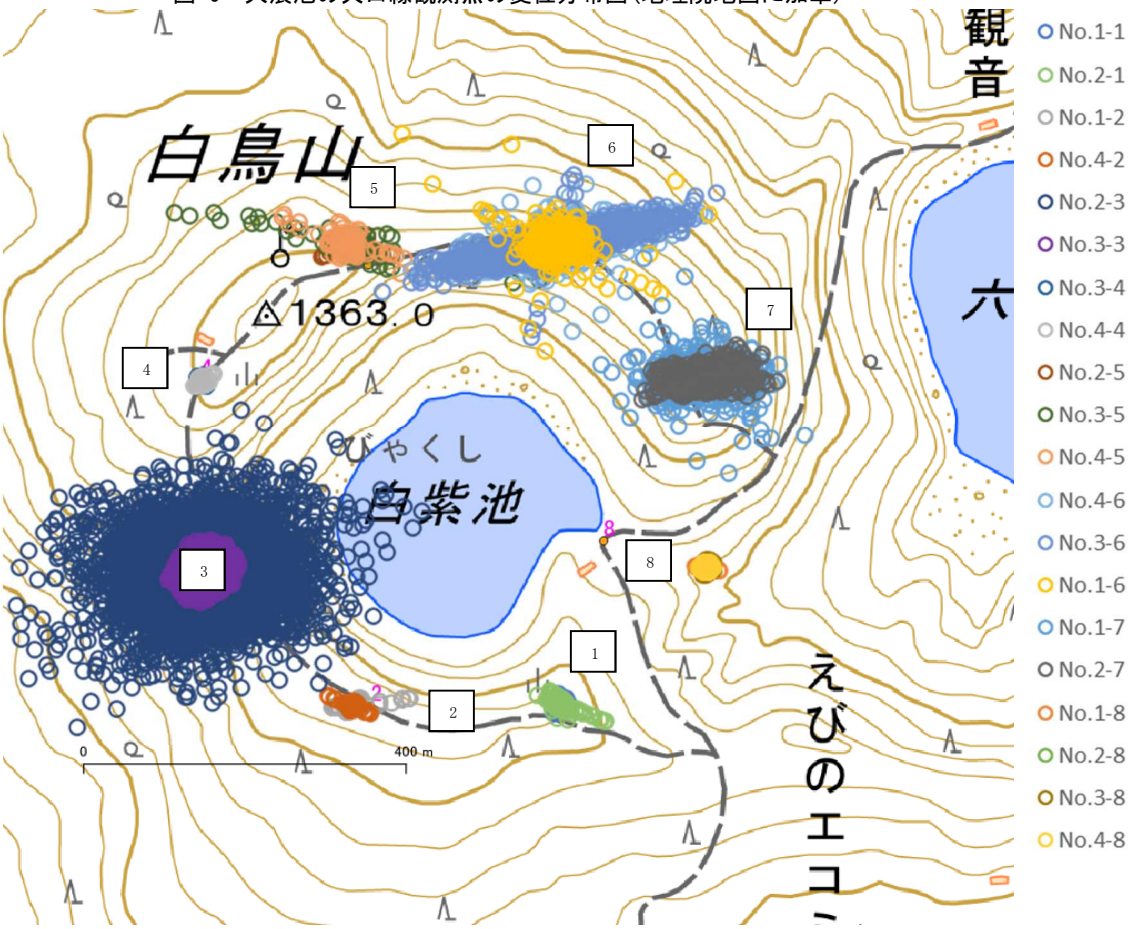


図-7　白紫池の火口縁観測点の変位分布図（地理院地図に加筆）

図-6 の大浪池の変位分布図をみると，観測点 No.1，No.2，No.4 の揺れは小さく，観測点 No.3，No.5，No.6，No.7，No.8 の揺れが大きいことがわかる．観測点 No.6，No.7 は中でも最も大きく揺れていることがわかる．**図-2** の等高線から観測点 No.6，No.7 は最も標高が高い位置に対応しているが，揺れやすい要因となりうる地形は読み取れない．

変位分布図から火口縁は縦横に伸び縮みするような全体が振動するモードではなく，部分的に揺れやすい箇所が存在すること示唆されていると考えられる．揺れの大きい部分は風化などにより弱化している，あるいは山体から分離し，不安定となっている可能性が考えられる．

図-7 の白紫池の変位分布図をみると，観測点 No.1，No.2，No.4，No.8 の揺れは小さく，観測点 No.3，No.5，No.6，No.7 の揺れが大きいことがわかる．前述のように観測点 No.3 の変位は他の地点に対して 1/10 の値を示しているにもかかわらず，火口縁の円周方向および円周直角方向ともに著しく大きく揺れていることがわかる．**図-8**，**図-9** にそれぞれ観測点 No.3 および No.2 の地震計設置状況写真を示す．観測点 No.3 の地震計設置状況が著しく不安定であるとは考えにくい．

(a)No.2-3

(a)No.3-3

図-8　白紫池の観測点 No. 3 の地震計設置状況

図-3 の等高線をみると観測点 No.3 はやせ尾根に位置していることも一因と考えられるが，円周方向および円周直角方向ともに著しく大きく揺れていることを勘案すると，風化による剛性低下や部分的な盛土などの可能性も考えられる．変位分布図から白紫池においても火口縁が縦横に伸び縮みするような全体が振動するモードではなく，特に揺れやすいやせ尾根部を含んで部分的に揺れやすい箇所が存在すること明らかとなった．揺れの大きい部分は風化などにより弱化している，あるいは山体から分離し，不安定となっている可能性が考えられる．

図-9　白紫池の観測点 No. 2 の地震計設置状況 (No. 4-2)

５．おわりに

2 つの火口湖である大浪池，白紫池を対象として，それぞれ 8 点の微動観測を行い，火口縁の振動特性の分析を行った．

両方の火口縁ともに全体として振動するわけではなく，部分的に特定の周波数で大きく振動する箇所の存在が示された．白紫池の観測点 No.3 付近以外は形状が急変するような箇所とは考えられないことから，火口縁の一部が弱化している，あるいは山体から分離し，不安定となっている可能性が考えられる．白紫池の観測点 No.3 付近はやせ尾根に位置しているが，円周方向および円周直角方向ともに著しく大きく揺れていることから，観測点付近の地盤の風化による剛性低下や部分的な盛土などの可能性が考えられる．観測点 No.3 付近においてさらに詳細な調査を行い，安全性を確保するための対策を行うことが必要なのかもしれない．

今後の課題として，対象火口を追加すること，より長期間の観測を実施することと共に，今回の振動特性のメカニズムを解明するための手法について検討を行うことが重要であると考えている．

最後に，研究者や実務者等からの要請があれば，本観測の生データ(win 形式)を提供することが可能である．

謝辞

大浪池（鹿児島県），白紫池（宮崎県）において微動観測を行わせていただいたことに感謝いたします．

参考文献

1)山田雅行，羽田浩二，藤野義範，深津宗祐，栗田哲，吉見雅行，大岩根尚，増野雄基：微動観測による硫黄岳(薩摩硫黄島)と開聞岳の振動特性について，第 44 回(令和元年度)地域安全学会研究発表会(春季)，2019.

2)山田雅行，羽田浩二，長谷東子，八木悟，栗田哲，吉見雅行，藤野義範，深津宗祐：常時微動による吾妻小富士火口縁の振動特性の分析，第 48 回(令和 3 年度)地域安全学会研究発表会(春季)，2021.

災害時の寒冷曝露に起因した低体温症被害評価手法の構築

Assessment Method of Accidental Hypothermia Risk
with Cold Exposure in Disasters

○飯田 彬斗[1]，中嶋 唯貴[2]，岡田成幸[3]
Akito IIDA[1] , Tadayoshi NAKASHIMA[2] and Shigeyuki OKADA[3]

[1] 株式会社エイト日本技術開発　EJイノベーション技術センター
EJ Innovation Technology Center, Eight-Japan Engineering Consultants Inc.
[2] 北海道大学　大学院工学研究院 建築都市部門 先端空間性能分野
Division of Architecture, Faculty of Engineering, Hokkaido University
[3] 北海道大学　広域複合災害研究センター
Center for Natural Hazards Research, Hokkaido University

One of the characteristics of human casualties by a disasters in severe winters is the presence of people who freeze to death due to the onset of accidental hypothermia. In fact, a large number of accidental hypothermia patients were reported in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. In order to take measures to reduce these frozen deaths, it is necessary to estimate the number of people frozen to death due to disasters in severe winters. In the step of this study, we tried to construct a function that takes into account the clothing and behavior of victims to evaluate the Duration Limited Exposure from exposure to cold to inaction and from inaction to cardiopulmonary arrest for victims by applying the Coldness index "Duration Limited Exposure" shown in the international standards ISO11079.

Keywords *: Human Casualty, Thermal Control of Human Body, Coldness Index, Accidental Hypothermia*

１．はじめに

厳冬期の災害においては、夏であれば助けられたはずの生命が失われる可能性がある。2018 年北海道胆振東部地震では、各世帯の暖房の生命線である灯油タンクが転倒した。このような被害が冬期に発生した場合、建物被害が皆無であっても屋外と同程度の寒冷環境に晒されることとなり、多数の偶発的低体温症（以下、低体温症）患者が発生する。

実際に東北地方太平洋沖地震では、門廻・今村(2018)[1)]が、検死結果を用いて要因分析を実施し、宮城県内で 23 名の凍死者の発生が報告されている。また、Furukawa ら[2)]により宮城県内で 91 名の低体温症患者についての調査結果が報告されており、津波に被爆せずに自宅内で発症した低体温症患者も報告されている。

令和3年、この事態に鑑み内閣府[3)]において積雪寒冷特有の影響を踏まえた被害想定手法が検討され、低体温症要対処者が初めて被害想定の被害項目として取り上げられた。しかしながら、この評価手法は冬期において屋外に避難する人員を低体温症要対処者として扱う簡易なものである。よって、実態に基づくより具体的減災対策を提示すべき地方自治体における被害想定等において、屋内や市街地等の様々な状況（例えば周辺環境温度）や個々人の服装や負傷程度等に影響される低体温症リスクの算出には活用できない。

そこで本研究では、国際規格の ISO11079[4)]において定義されている寒冷指標 DLE (Duration Limited Exposure)を用いることで、課題であった被災者の寒冷環境曝露時における服装や行動等を考慮できる指標の開発を目指した。

DLE の防災への適用については外間 [5)]により考察がなされており、「対象者が置かれた、あるいは置かれていると想定される環境条件や状況から、生理学的に危険なゾーンに入るか否かを、衣服量や時間といった具体的な数値によって判断を下すことができる一つの手法であり、これらの防災への活用は有益であると考える。」と結論付けている。本論では、DLE を導入することにより、寒冷環境下における対象者の服装や行動といった状況を考慮した滞在可能時間に着目し、建物被害により閉じ込められた生存者や屋外避難者等、寒冷な屋外と同環境下に晒された被災者が、生理学的な危険ゾーンである低体温症を発症することによって、悪環境からの自律での離脱行為不可能となるまでの経過時間及び心肺停止に至り医学的救命措置不能となる致死時間の評価関数を構築した。

２．寒冷指標の導入

(1) 体内蓄熱量

村山ら [6)7)8)]は、海洋暴露環境下の作業における人体の熱量について、環境気温、輻射に影響する水温、湿度、風速等の環境要因と、衣服の熱抵抗および透湿抵抗、代謝熱量に影響する作業量、発汗などによる身体の濡れ率等の人体の温熱要因を用いて、人体の蓄熱量 S[W/m^2]を評価している。

$$S = M\{(1-\varepsilon) - 1.7\times10^{-5}(5867-\psi_a P_a) - 0.0014(34.0-T_a)\} - 0.0165\alpha(0.06+0.94W_{rsw})h_c \times F_{pcl}(P_{sk}-\psi_a P_a) - h(T_{sk}-T_0)F_{cl} \quad (1)$$

ここに、εは代謝熱量と作業量の比で表される作業効率であり、西ら [9)]により$\varepsilon = 0.18$とする。低温域において湿度が蓄熱量に与える影響は少ないため、相対湿度は$\psi_a = 0.6$を代表値として使用する。また、P_a：環境温度における飽和水蒸気圧[Pa]、T_a：環境温度[℃]、α：衣服を通した蒸発潜熱の放出修正係数（$\alpha = 0.25$）、h：総合熱伝達率（$h = h_c + h_r$）、h_r：放射熱伝達率（$= 4.652$）である。T_0は作用温度[℃]であるが、本論においては屋外環境と

同様の環境下であるため、$T_0 = T_a$とする。

以下、式(1)の導出に係る関係式を示す。

代謝熱量M[W/m²]は、身体活動時のエネルギー消費量/安静時エネルギー消費量MET[10]を用いて、次式(2)で表す。

$$M = 1.163\{1.2(MET - 1) + 1.2\} \cdot 60/A \qquad (2)$$

A は日本人の平均体表面積として 1.63m² とする。

皮膚表面温度T_{sk} [℃]は、Burton[11]により提案された衣服の伝熱効率$F_{cl} = 1/(1 + 0.155 \times h \times I_{clo})$と、総合熱伝達率を用いて次式で表す。

$$T_{sk} = 36.3 - 0.055\beta h F_{cl}(36.3 - T_0) \qquad (3)$$

ここに、$\beta = 1/(1 + 0.05hF_{cl})$である。

P_{sk}は平均皮膚温における飽和水蒸気圧で式(3)より、

$$P_{sk} = a_{sk}T_{sk} + b_{sk} \qquad (4)$$

となる。なお、a_{sk}及びb_{sk}は平均皮膚温での飽和水蒸気圧の線形近似に関する係数であり、それぞれ、$a_{sk} = 0.314$、$b_{sk} = -5.23$である。

発汗や降雨等による身体の濡れ面積率W_{rsw}は、松岡[12]によって皮膚表面温度T_{sk}の関数を用いて、式(5)で提案されている。なお、発汗による濡れ率は、衣服の熱抵抗が$I_{clo} = 1.5$以下で、風速に拘わらず、気温 0℃以下では$W_{rsw} = 0$とする。

$$W_{rsw} = \{(T_{sk} - 32.5)a + 0.5\}/2.5a(35.5 - T_{sk}) \qquad (5)$$

aは風速に僅かながら依存する係数であり、約 0.7 である。

本論においては、村山ら[8]により、寒冷地においては人体熱量に対する飽和水蒸気圧の影響は小さく、人体の濡れ率が 0 になることから、$W_{rsw} = 0$として扱う。

対流熱伝達率h_c[W・m⁻²・℃⁻¹]は西ら[13]により、次式で表現される。

$$h_c = 8.61{V_{fw}}^{0.53} + 1.98{V_a}^{0.86} \qquad (6)$$

ここに、V_a：風速(気流)[m/s]、V_{fw}：気流に向かう方向の歩行速度[m/s]である。なお、ここでは、$V_{fw} = 0$とする。

皮膚表面温度[℃]は、西ら[14]により、次式(7)となる。

$$F_{pcl} = 1/(1 + 0.143V_a I_{clo}) \qquad (7)$$

I_{clo}は衣服の熱抵抗[clo]であり、表 1 にその一例を示す。

表 1.　衣服の熱抵抗（I_{clo}）の例

clothing	Thermal Insulation	Insulation of Clothing
nude	0	0
night wear	0.032	0.2
light street clothes	0.16	1.0
winter clothes with coat	0.3	2.0
polar clothes	0.45	3.0

(2) 限界滞在可能時間

DLE は、寒冷環境の評価を対象とした寒冷指標であり、ISO11079[4]で定義されている。

衣服の熱抵抗が小さく、かつ寒冷な環境下において、進行性の身体冷却のリスクが発生する状態にあるとみなされた時、冷却の進行を防ぐために寒冷環境での滞在（暴露）時間を制限する必要があり、DLE は、この推奨される滞在限界時間として、熱損失の限界値を表す指標 Qlimを用いて、次式で定義される。

$$\mathrm{DLE} = \mathrm{Qlim}/\mathrm{S} \qquad (8)$$

ここに、Qlimは ISO11079[4]において、推奨される滞在に係る最大熱損失の限界値として 144KJ/m²、村山ら[6)7)8)]においては、激しい不快感を感じる熱損失限界値として、174.5KJ/m² とされている。

衣服の熱抵抗の過不足は、必要着衣量指数 IREQ(Required Clothing Insulation)により評価される。Holmer[15]は IREQ について、代謝熱量 M、作用温度$T_0(= T_a)$及び衣服の熱抵抗I_{clo}の間の関係を図 1 で示した。なお、図 1 は$V_a = 0.5m/s$の微風環境における関係を示しており、強風下においては、更に作用温度が高い環境において、衣服の熱抵抗の不足が発生する。

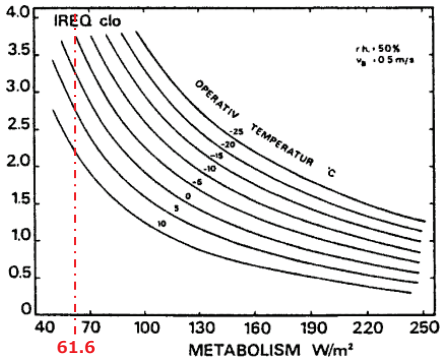


図 1.　身体の活動、作用温度と必要着衣量指数の関係
（B.W.Olesen[16]に著者一部加筆）

本論では、被災者はその場に座り込んで移動等ができない状況を仮定しており、その際の代謝熱量は後述のとおり、おおよそ 61.6W/m² となる。この時、$V_a = 0.5m/s$の微風環境下において、$I_{clo} = 3.0$で$T_a = 4.0$、$I_{clo} = 2.5$で$T_a = 8.0$程度が、対象衣服における熱抵抗の不足が生じる閾値となる。

被害想定では、日常生活を送っている際に被災した者を対象とするため、基本的に、$I_{clo} \leq 2.0$の範囲で用いることを想定し、IREQ の検証を省略するものとする。

なお、DLE については、環境条件として、次の範囲での適用が推奨されている。

- $T_a \leq 10.0$ ℃
- $0.4m/s \leq V_a \leq 18.0m/s$
- $I_{clo} \geq 0.5clo$

３．寒冷環境における限界曝露時間の検証

(1) 状況毎の熱損失限界値の設定

本論においては、ISO11079[4]にて定義されている「推奨される最大滞在時間」や、村山ら[6)7)8)]による「低温域における温熱的作業限界時間（激しい不快感を感じる場合）」とは状況が異なり、低体温症による「行動不能まで」及び「行動不能から心肺停止まで」を評価対象とするため、求める最大熱損失限界値を「低体温症により行動不能に陥る危険性のある熱損失限界値Q_{limB} (limit value for body heat loss of a Body Rigidity) [KJ/m²]」及び「低体温症により行動不能に陥った際に、更に心肺停止に陥る危険性のある熱損失限界値Q_{limC} (limit value for body heat loss of a Cardiopulmonary Arrest) [KJ/m²]」と定義する。

(2) 行動不能までの限界曝露時間の決定

寒冷環境における限界曝露時間DLE_F (Duration Limited Exposure in Frigid Environment)を「寒冷曝露状態における心肺停止までの限界曝露時間[h]」と定義する。その分析結果が、内閣府[3]において、「山岳遭難における体感温度と寒冷曝露から心肺停止時間」として掲載されている（図 2 に対象図引用）。

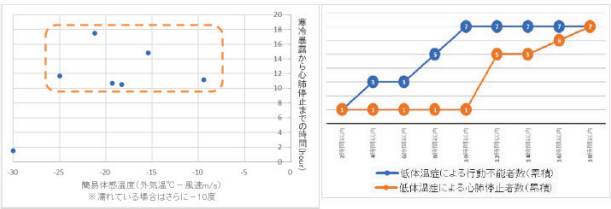


図 2.　山岳避難における体感温度と寒冷曝露から行動不能・心肺停止時間（内閣府）[3]

この分析結果との比較検証より、「行動不能までの限

界曝露時間DLE_B(Duration Limited Exposure of a Body Rigidity)」関数を構築する。（以降本論では、低体温症による行動不能までの限界曝露時間を「DLE_B」、行動不能時間から心肺停止までの限界曝露時間を「DLE_C (Duration Limited Exposure of a Cardiopulmonary Arrest)」とする。）

なお、簡易体感温度-30℃、寒冷曝露から心肺停止までの時間が 2 時間弱とされている標本については、外れ値として比較対象からは除外する。また、遭難時の風速は、8m/s から 15m/s と仮定して、平均の 11.5m/s を採用する。

Q_{limB}を決定するため、説明変数を1/S、目的変数を各遭難者の行動不能時間として回帰分析を行った。式(8)より、回帰分析の切片は 0 とする。なお、先述の通り、内閣府 [3]におけるデータは山岳遭難時であるため、極寒地仕様の防寒着（$I_{clo} = 3.0$相当）を着用した場合でのDLE_Bを用いて、比較を行った。

回帰分析の結果、重相関 R=0.9764、P-値= 0.0001621<0.05 であり、回帰係数より$Q_{limB} = -227.5$となる。

式(8)と算出したQ_{limB}を用いて、DLE_B関数を構築する。以上より、構築したDLE_B曲線と内閣府 [3]による行動不能時間の関係を図 3（黒線）に、設定したパラメータを表 2 に示す。概ね、山岳避難の分析結果を表現できている。

(3) 全身が水に濡れた状態における限界曝露時間

全身が冷水に浸水した後に寒冷環境に曝露した場合を想定し、DLE_Bにおける濡れ面積率を$W_{rsw} = 1.0$として、同様にDLE_Bの推定を行う。

水濡れの有無を比較するため、パラメータは表 2 と同様とする。推定結果を図 3（青点線）に示す。水濡れ時のDLE_Bは、概ね水濡れなしの半分以下の時間となり、気温 0℃においては、約 40%程度となる。

表 2.　冬期・山岳遭難を想定したパラメータ

指標	値	備考
MET	1.2	（遭難により動けず）座り込んだ状況
Iclo	3.0	登山用（極寒地使用）の防寒着を着用

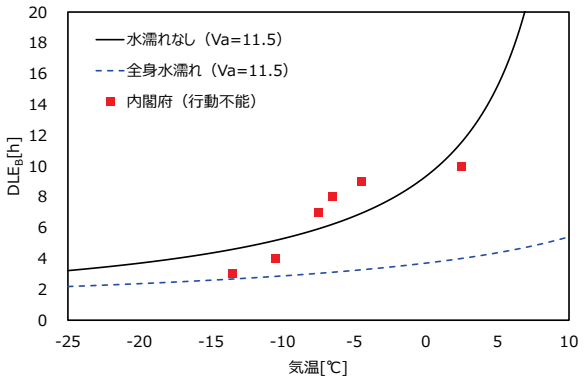


図 3.　行動不能までの限界曝露時間DLE_B及び全身が水に濡れた状態における限界曝露時間

4．寒冷環境における限界曝露時間の提案

(1) 行動不能状態以降の状態設定

人体は低体温症に陥り行動不能状態となると、交感神経の働きが急激に低下し、体温維持が困難となる。この時、代謝熱量$M = 0$と仮定して、心肺停止時間を推定する。いま、偶発性低体温症ガイドライン 2018[17]等を参照すると、低体温に陥った被災者の体温が 32℃を下回った時、被災者は行動不能に陥る。この時、低体温症による行動不能状態から心肺停止までの時間を対象とするため、Q_{limC}についての検討を行った。

前節のQ_{limB}算出と同様に、説明変数を1/S、目的変数を各遭難者の行動不能から心肺停止までの時間として回帰分析を行った。結果、重相関 R=0.9474、P-値= 0.001183<0.05 であり、回帰係数より$Q_{limC} = -197.2$となり、式(8)よりDLE_C関数を構築する。

(2) 心肺停止までの限界曝露時間の決定

以上よりDLE_Fは、寒冷環境曝露から心肺停止までの時間の総和であるため、次式で表される。

$$DLE_F = DLE_B + DLE_C \tag{9}$$

寒冷環境における限界曝露時間と内閣府 [3]のデータを比較検証する。結果は、図 4 の通りであり、限界曝露時間を示す提案関数DLE_Fは、実データをよく表現していると言える。

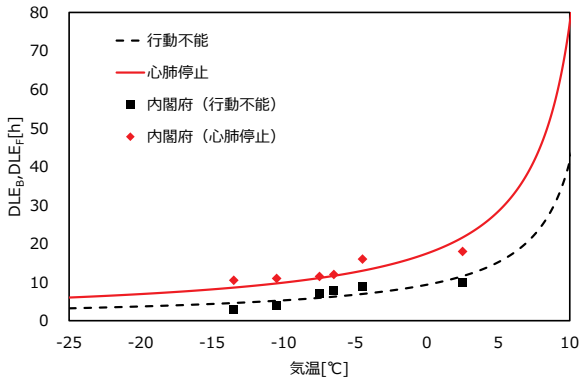


図 4.　山岳遭難時と心肺停止までの限界曝露時間DLE_F

(3) 服装及び活動状況によるDLE_Fの変化

表 1 より被災者の服装を変えて、DLE_B及びDLE_Fの変化を検証した。風速は 11.5m/s とする。

なお、検証に際し、服装による限界値（危険外気温）を境に、限界曝露時間が急激に低下する現象を確認するため、本来$T_a \leq 10.0$ ℃の範囲での適用が推奨されている DLE であるが、-25 ℃$\leq T_a \leq 30.0$ ℃の範囲でグラフを描写している。結果を図 5、6 に示す。

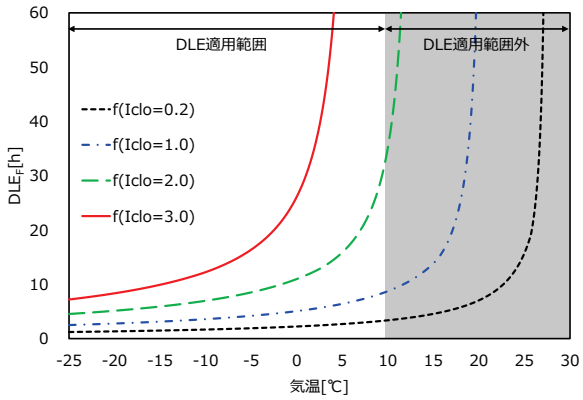


図 5.　服装によるDLE_Bの変化

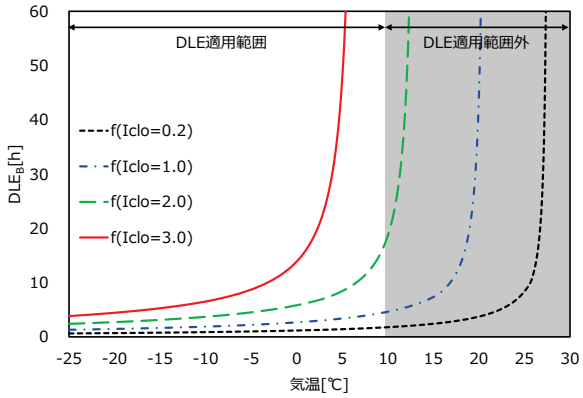


図 6.　服装によるDLE_Fの変化

急激に傾きが変化している気温の限界値（以下、危険外気温という。）を境に、被災者のDLE_Fが大きく低下しており、例えば軽装に該当する$I_{clo} = 1.0$で被災した場合は、DLE の適用範囲である$T_a \leq 10.0$ ℃では、曝露環境が危険外気温以下となっており、低体温症発症リスクが高い環境に晒されていると見なせる。

ウェザーニューズの調査 [18]（調査期間：1/23～1/29、回答者数：23,089 名）よると、回答者の約 55%が普段の居室室温 20℃以上であり、地域別にみると北海道が 20.73℃と全都道府県で最も室温が高い。また、部屋での服装は 39%が上着を羽織っておらず、北海道における半袖＋短パンの割合は6%であり、全国的に見ても高い水準となっている。以上の結果は、自宅で被災した被災者が、通常在宅時には$I_{clo} = 1.0$、就寝時には$I_{clo} = 0.2$等といったDLE_Fの短い服装で被災する可能性が高いことを意味する。

(4) 気温及び風速によるDLE_Fの変化

DLE_Fは、式(1)～(9)より、気温及び風速に依存する関数である。ここでは、参考として通常在宅時の服装を想定した$I_{clo} = 1.0$の場合において、気温及び風速を変化させたDLE_Fの三軸グラフを図 7 に示す。

グラフより、DLE_Fは風速にも影響を受けるが、気温とより強い相関関係があることが見て取れる。また、低温ほど傾きが緩やかとなるのは、危険外気温以下であり、DLE_Fがこれ以上急激に低下しないことを表している。

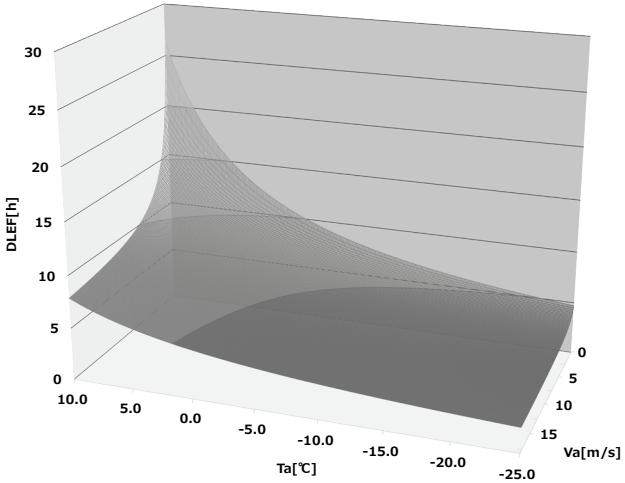


図 7. 気温・風速によるDLE_Fの変化

5．まとめ

本研究の結果、地震等で建物に閉じ込められた被災者や、屋外に避難したものの、暖をとることができない被災者について、その服装や活動状況に応じた寒冷環境限界曝露時間を評価することが可能となった。特に、北海道のような寒冷かつ、建物の断熱性能が高く、暖房設定温度（室温）も高い地域においては、在宅時に軽装で生活する習慣があり、寒冷環境曝露に対して不利な服装で被災する可能性が高く、被災時の凍死による死者が発生する危険性が高まる。

今後は、本手法を実災害時の被害推定に拡張するとともに、推定結果を用い、低体温症に関する減災施策について立案・効果検証を実施していく所存である。

一方で、気温と凍死までの猶予時間の相関を示すデータは、本研究で採用した内閣府 [3]のデータ以外に乏しいのが実情である。今後の人的被害推定精度向上のため、必要な項目を整理したうえでの、データの蓄積と活用が望まれる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 20H02403 の助成を受けたものである。また、大城和恵氏（山岳医療救助機構 代表、北海道大野記念病院循環器内科・山岳外来、日本大学医学部 兼任講師）からの提供データを用い内閣府が作成した「山岳遭難における体感温度と寒冷曝露から心肺停止時間」データ [3] を使用した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 門廻, 今村, 土木学会東北支部技術研究発表会, Ⅳ-1, 東日本大震災における宮城県での死因体系化の試み
2) Furukawa H, Kudo D, et al.: Hypothermia in victims of the great East Japan earthquake: a survey in Miyagi prefecture. Disaster Med Public Health Prep. 2014 Oct;8(5):379-89.
3) 内閣府（防災担当）, 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震対策検討ワーキンググループ（第 6 回）, 被害想定手法について（案）（積雪寒冷特有の影響を踏まえた被害想定手法）
4) ISO11079: 2007 Ergonomics of the thermal environment - Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects.
5) 外間正浩, 災害時の寒冷ストレスに起因する危険の回避に資する情報の提案, 情報科学技術フォーラム(FIT), 福祉情報工学(3) 視覚・一般, K-026, 2008
6) 村山 雅己, 中橋美智子, 海洋暴露環境における人体の温熱制御に関する基礎的研究(第 1 報), 日本造船学会論文集 1993(173), 433-439, 1993
7) 村山雅己, 中橋美智子, 海洋曝露環境における人体の温熱制御に関する基礎的研究(第 2 報), 日本造船学会論文集 00178, 617-628, 1995-12
8) 村山雅己, 福地信義, 中橋美智子, 海洋暴露環境における人体の温熱制御に関する基礎的研究(第 3 報), 日本造船学会誌 796(0), 754, 1995
9) Nishi, Y. & Gagge, A. P. (1971) Humid operative temperature. A biophysical index of thermal sensation and discomfort, J. Physiol. Paris, 63, 365-368
10) Ainsworth BE, Haskell WL, Whitt MC, Irwin ML, Swartz AM, Strath SJ, O'Brien WL, Bassett DR Jr, Schmitz KH, Emplaincourt PO, Jacobs DR Jr, Leon AS. Med Sci Sports Exerc. 2000, 32(9 Suppl):S498-504. Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities.
11) Burton, A. C. & Edholm, O. G. (1969) Man in a Cold Environment, Facsimile of 1955 ed., Hafner Publishing. Co. New York.
12) 松岡脩吉, 平均皮膚温と「ぬれ面積」との関係, 第 8 回人間熱環境シンポジウム報告集, pp. 73-76, 1984
13) Nishi, Y. & Gagge, A. P. (1970) Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, J. Appl. Physiol., 29, 830-838
14) Nishi, Y. & Gagge, A. P. (1970) Moisture permeation of clothing-a factor governing thermal equilibrium and comfort, ASHRAE Trans., 76, 137-145.
15) Holmer, I., Required Clothing Insulation (IREQ) as an Analytical Index of Cold Stress, ASHRAE Transactions, 1984 Winter Meeting - Atlanta, GA Volume 90, Pt.1, 1116-1128
16) B.W.Olesen, 訳 長谷部ヤエ, 温熱環境と衣服の快適性, 繊維学会誌, 1987 年 43 巻 6 号 p. P210-P221
17) SHONAN-AREA MEDICAL CONTROL COUNCIL, 偶発性低体温症ガイドライン 2018, 初版
18) 株式会社ウェザーニューズ, 部屋の温度×セツデン調査結果 (http://weathernews.jp/s/seasons/2011winter/setsuden_results.html, 2022.04.01 閲覧)