

地方小規模都市における豪雨災害に対する人的被害軽減に関する研究

赤松良久¹・神谷大介²
Yoshihisa AKAMATSU and Daisuke KAMIYA

¹正会員 工博 山口大学大学院准教授 理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 工博 琉球大学准教授 工学部環境建設工学科(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)

本研究では過疎化が進行した地方中小河川として山口・島根豪雨災害によって甚大な被害が発生した須佐川を対象として、水害時避難支援計画策定を目的とした地域分析を行った。具体的には、避難時の安全性の観点から避難場所および避難経路の安全性を評価するとともに、避難行動要支援者支援を考慮した防災行政情報の発令タイミングについて検討した。その結果、急激に浸水が広がる過疎地域においては、公的な避難支援には限界があり、近隣住民の協力による避難支援が必要であることを明らかにした。また、当該地区の雨量および河川水位情報だけで避難の判断を行うことは難しく、近隣地区等の情報を有効に活用する必要性を示した。

キーワード：豪雨災害、避難経路、浸水深、避難判断

1. はじめに

近年、死者が発生するような甚大な豪雨災害が多発しており、大雨の頻度はさらに増加すると予測されている¹⁾。また、地方中小河川流域においては、過疎化・高齢化が進行していることから、災害に対する社会的脆弱性も高まっていると考えられる。

牛山ら²⁾は水害被災者に関する調査より、死者の大半は屋外であることを示し、避難中の対策が必要と述べている。近藤ら³⁾は豪雨災害の被害にあった山間地域でアンケート調査を行い、避難開始時刻や避難行動要支援者支援等、過疎・高齢化が進行した地域に特化した対策を講じる重要性を示している。人口減少・高齢社会および気候変動に鑑みれば、豪雨災害に対する人的被害軽減は喫緊の課題であるといえる。

以上の認識の下、本研究では過疎化が進行した地方中小河川として山口・島根豪雨災害によって甚大な被害が発生した須佐川を対象として、水害時避難支援計画策定を目的とした地域分析を行う。具体的には、避難時の安全性の観点から避難場所および避難経路の安全性を評価するとともに、避難行動要支援者支援を考慮した防災行政情報の発令タイミングについて検討する。

2. 対象地区と災害の概要

(1) 萩市須佐地区の概要

須佐地区は山口県北部に位置し、三方を山に囲まれた小規模集落である。平成22年国勢調査⁴⁾より人口は2465人、高齢化率は39%と高く、後期高齢者率は23%と非常に高い。また、高齢者独居世帯が185世帯と全世帯の約2割を占める。当地区は図-1に示すように、集落の中央を須佐川が貫流しており、家屋は水害時に垂直避難が不可能な木造平屋建てが多い。萩市指定の指定避難所は須佐緑地等管理センター、須佐漁村センター、須佐総合事務所、須佐公民館・須佐文化センター（以下、須佐公民館）、須佐中学校の5つである。避難所は右岸側にしかないことがわかる。

(2) 2013年山口・島根豪雨災害の概要

当時は中国地方を中心にあたたかく湿った空気が流れ込み、雨雲が急速に発達したため、山口と島根の両県で非常に激しい雨が降った。特に須佐では積乱雲発生条件となる、大気条件が極めて不安定であったこと、大気下層に渦が発生しやすかったこと、という2つの条件を有していたため、高度15kmの積乱雲が発生した。この時の須佐地区での雨量と河川水位を図-2に示す。須佐総



図-1 須佐地区

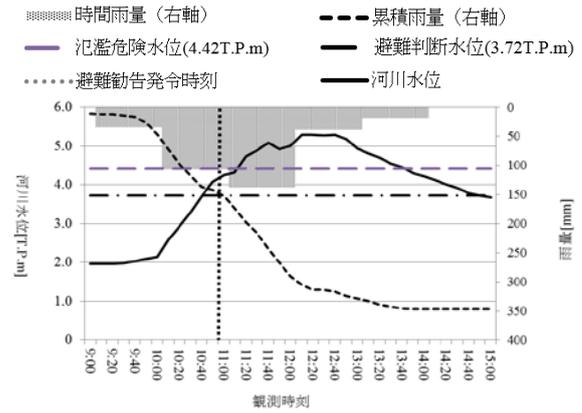


図-2 河川水位と雨量（7月28日）

表-1 避難判断基準⁵⁾

	避難準備情報	避難勧告	避難指示
1時間雨量	30mm/hr以上	50mm/hr以上	100mm/hr以上
累積雨量	連続100mm以上を超えたとき	連続100mm以上を超えたとき	連続150mmを超えたとき
河川水位	氾濫注意水位	氾濫注意水位，また水位上昇が見込まれる避難判断水位，また水位上昇が見込まれる	氾濫危険水位を超えたとき また，避難判断水位であっても急速に水位上昇が見込まれるとき
その他			河川堤防が決壊

合事務所は10:40に避難判断水位を超えたことを確認し、11:00に避難勧告を発令した。避難準備情報は発令されていない。表-1に示すように、萩市地域防災計画⁵⁾では、避難勧告の発令基準に雨量基準も設けられているが、実際には河川水位のみで判断されていた。

被害は萩市で死者・行方不明者3人、床上・床下浸水が954棟と多くの被害が発生している。著者ら⁹⁾の調査より、避難者のうち約4割が避難勧告発令を受けて避難していた。また、避難者のうち約6割が浸水深40cm以上の状況の中で避難をしており、危険な行為であったことがわかる。このことから安全な避難経路の選定が必要であるといえる。

3. 氾濫解析を用いた避難所・経路の安全性

(1) 最短避難経路

まず、避難経路の基準として、各戸から避難所までの最短経路をウォーシャル・フロイド法⁷⁾を用いて算出した。アルゴリズムは以下の通りである。ここで、 L_{ij} はノード*ij*間の距離を表し、単位はmである。 n はノードの総数であり、各戸、避難所、交差点に設けている。

- 手順1 $L_{ij}^{(0)} = L_{ij}, m = 1, (i, j = 1, 2, \dots, n)$
- 手順2 $L_{ij}^{(m)} = \min(L_{ij}^{(m-1)}, L_{im}^{(m-1)} + L_{mj}^{(m-1)})$
- 手順3 $L_{ij}^{(m)} < 0$ のとき終了
- 手順4 $m = n$ ならば終了。
 $m < n$ ならば2)から $m = m + 1$ として繰り返す

最短避難経路の算出結果を図-3に示す。最も利用される避難所は須佐公民館であり、353戸である。また、左岸側の住民は避難のために川を渡らなければならない。

(2) 氾濫解析と結果の概要

水害の進展過程について、大槻ら⁸⁾は被災地踏査、ヒアリング調査、測量を行い、被災状況の再現解析を行っている。氾濫解析にはMIKE by DHIを用い、MIKE FLOODモジュールを用いて、流出・一次元洪水流解析と二次元氾濫解析をカップリングして同時解析を行っている。これらにより、降雨に対する氾濫の状況を時空間的に表現している。避難勧告発令時刻である11時の解析結果を図-4に示す。この時点で浸水深1mを超える場所も存在し、避難するには非常に危険な時間帯である。

(3) 浸水深を考慮した避難所・経路の課題

道路ネットワークのリンクに氾濫解析によって得られ



図-3 最短避難経路

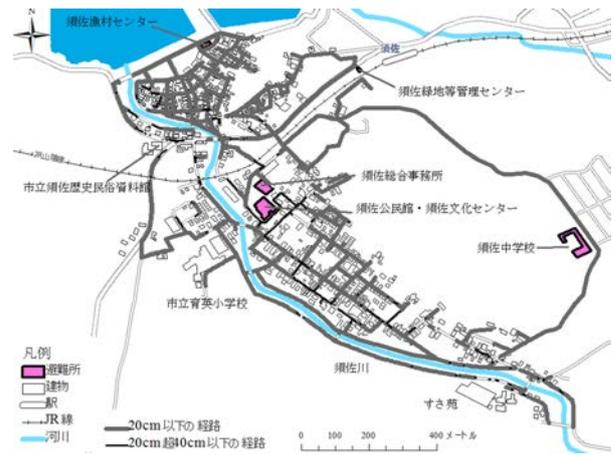


図-5 道路の利用可能性評価 (10時30分)



図-4 氾濫状況 (11時)⁸⁾



図-6 道路の利用可能性評価 (11時)

る浸水深の情報を与えることにより、避難経路の浸水深を求める。ここでは自動車での移動を考慮した浸水深20cmとおおむね膝下程度から浸水深40cmを設定した。11時の浸水深を用いた道路の利用可能性評価の10時30分と11時の結果を図-5、6に示す。両図では、浸水深が40cmを超える経路は表現していない。これらより、最短経路問題において最も多くの利用者が想定される須佐公民館周辺では10時30分から40cm以上の浸水が見られ、11時には完全に孤立していることがわかる。つまり、避難勧告発令時には主要な避難所がその機能を果たしていないということである。また、市立須佐歴史民俗資料館（以下、資料館）周辺と右岸側の河口付近においては10時30分より浸水深40cmを超えており、早期避難が必要である。

4. 最少危険度避難経路の導出

(1) 避難経路の最小危険度問題

実際の避難行動および最短経路問題と氾濫解析の結果より、浸水した状況下において避難しなければならない

状況が想定されることが明らかになった。このため、ここでは浸水深20cmを通行可否の閾値とし、その上で浸水深を重みとして最短経路問題を解くこととする。具体的には第3章(1)の手順(1)の L_{ij} を式(1)により wL_{ij} に置き換える。 D_{ij} は氾濫解析より得られたノード ij 間の浸水深を意味する。また、豪雨時に川を渡ることは危険であることより、川を渡るリンクにおいて浸水深は無限大としている。ウェイト α は、個人の運動能力や流速等を想定しているが、ここでは10としている。

$$wL_{ij} = \alpha D_{ij} \times L_{ij} \quad (1)$$

また、左岸側に公的施設、かつ、RC造2階建て以上の建物という条件から資料館と市立育英小学校の2つを避難所として加え、計7つの避難所で避難経路を導出する。

(2) 最少危険度避難経路と避難困難家屋

避難勧告が発令された11時と10時30分における最少危険度避難経路を図-7、8に示す。これより、避難勧告発令の30分前からほとんどの家屋が避難経路を失っていることがわかる。図-9は図-8に示した最少危険度避難経路を利用して、避難困難となった家屋に着色を行った図で



図-7 最小危険度避難経路 (10時30分)

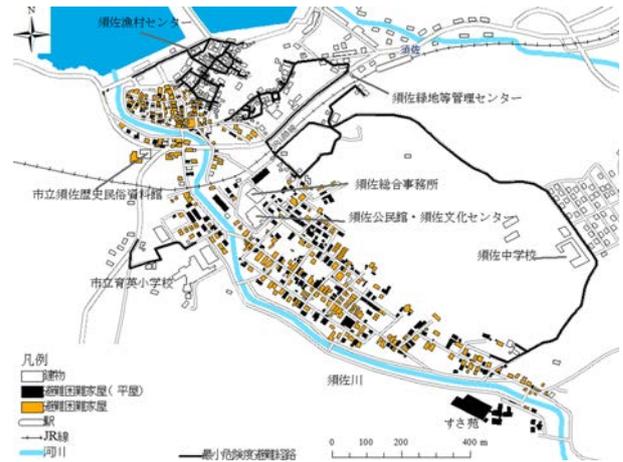


図-9 避難困難家屋 (11時)



図-8 最小危険度避難経路 (11時)

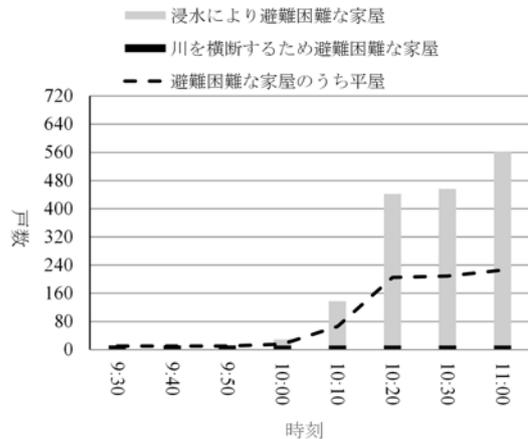


図-10 各時刻の避難困難家屋数

ある。これより、11時では全720戸のうち、川を渡ることから11戸、避難経路の浸水により550戸が避難困難となった。これらのうち226戸が垂直避難不可能な平屋である。

氾濫解析の10分毎の結果を用いて避難困難家屋数の推移を図-10に示す。10時から浸水により避難困難となる家屋が6戸発生している。また、10時10分から10時20分までの10分間で避難困難家屋が305戸増加していることが分かった。このことから避難のタイミングが約10分間遅れることで、多くの住民が避難困難となることを示している。これらの情報より、早期浸水と平屋との関係がわかり、行政が有する避難行動要支援者名簿を合わせることで、避難行動要支援者支援の順番を決定することができる。また、すさ苑周辺は左岸側に避難所を追加しても川を渡る必要性から避難困難となっている。福祉施設は避難行動要支援者が多数利用する施設であることから、水害リスクを考慮した場合には不適切な立地であるといえる。現地での利用を継続するのであれば、早期の避難が必要であることがわかる。

5. 避難支援の検討

(1) 公的避難支援の検討

須佐地区は後期高齢者率が23%であり、さらに高齢者単居世帯が多いことより、避難に支援を要する人が多数存在することが想定される。ここではまず、行政による避難支援を考える。具体的には、最も遠い家屋に避難行動要支援者が居住していると想定し、須佐総合事務所から避難支援に向かう場合を考える。このときの経路を図-11に示す。また、福祉関係事業所のデイサービスで送迎を行っている方へのヒアリング調査より、家庭到着から乗車完了までに約10分の時間を要することがわかった。これより、移動時間を考慮すると、一人の支援のために約15分の時間が必要となる。

避難行動要支援者の特定ができないため、ここでは要介護認定者率より、避難行動要支援者数を仮定する。つまり、要介護認定者を避難行動要支援者とみなすということである。山口県における要介護認定者数は73,347人(平成22年)⁹⁾であり、県総人口の約5%である。したがって、須佐地区の人口にあてはめると、避難行動要支援者は124人となる。須佐総合事務所が所有する乗用車

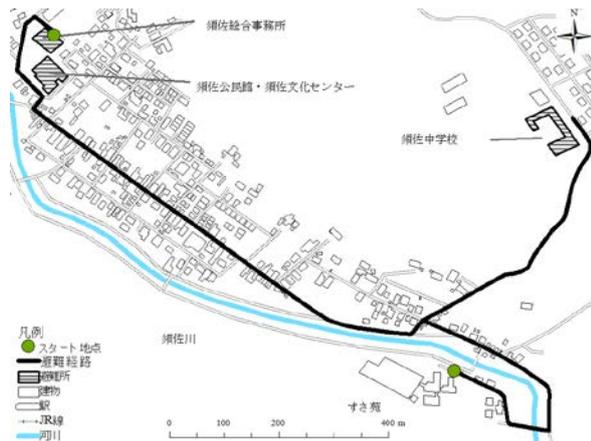


図-11 避難行動要支援者の最長避難経路

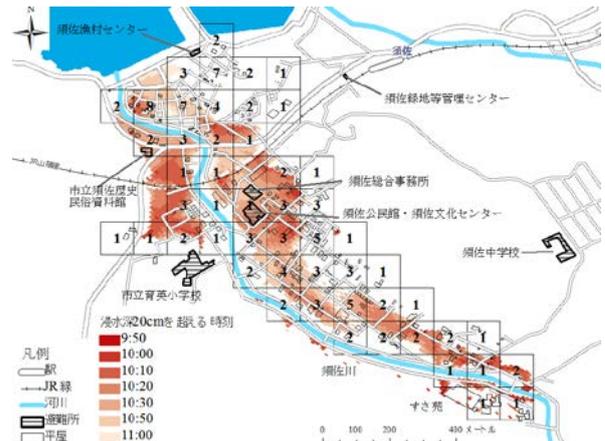


図-12 避難行動要支援者と早期浸水時刻

は12台⁵⁾であることから、車1台で約10人を支援することとなる。1人あたりの乗車時間が10分であるとすると、避難支援のために必要な時間は乗車時間だけで約100分となる。浸水による避難困難家屋が10:00から発生することから、乗車時間だけを考慮しても8時20分以前には避難支援を開始しなければならないことになる。8時台ではほとんど雨が降っていないことより、河川水位および当該地区降水量をもとに公的支援のみによる避難行動要支援者支援を行うことは現実的でないことがわかる。

(2) 避難支援の優先度

避難行動要支援者率が一様分布だと仮定すると、居住地区は図-12のメッシュ内の数字になる。同図には浸水深20cmを超える時刻と平屋を示している。これより、垂直避難が家屋の構造および身体的特徴より困難な人の分布が把握でき、避難行動要支援者支援の優先順位の設定に活用することができる。具体的には右岸河口付近には8名の避難行動要支援者がいるメッシュが存在し、かつ、10時には浸水深が20cmを超えている。このためこのメッシュの避難支援を優先的に行う必要性が高いと考えられる。

(3) 共助を考慮した避難支援の検討

当該地区の情報だけで避難を基に公的支援のみでの避難行動要支援者支援が困難であることより、ここでは共助として近隣住民による支援を活用し、隣接地区の防災気象情報の活用を検討する。

まず、10時には避難困難家屋が存在すること、乗車時間として10分必要であることより、避難行動要支援者の避難開始のトリガー情報となる避難準備情報は9時40分までに発令されなければならないことがわかる。この時、10分雨量2.5mm、累積雨量16mm、河川水位2.02T.P.mとなり、避難準備情報発令基準として用いることは現実的ではないであろう。しかし、図-13および表-2に示すように、隣接する萩市むつみ地区は9時26分に記録的短時



図-13 隣接市区町村

間大雨情報が発表されており、それより前に避難勧告が発令されている。図-10に示すように、急激に、避難不可能な家屋が多数発生するような状況が生まれる地形の地区においては、隣接する地区や市町村の情報活用が必要だと考えられる。例えば、隣接地区で避難勧告が発令されたならば、少なくとも避難準備情報を発令する仕組みができれば、避難行動要支援者支援は可能となる。

6. おわりに

本研究では氾濫解析と最短避難経路問題を組み合わせることにより、戸別の浸水危険度だけでなく避難経路の利用可能性を考慮した戸別の水害危険度を表現した。さらに、これに避難行動要支援者分布や家屋属性を考慮することにより、避難行動要支援者支援の優先度決定の考え方が表現できることを示した。また、急激に浸水が広がる過疎地域においては、公的な避難支援には限界があり、近隣住民の協力による避難支援が必要であることを明らかにした。また、当該地区の雨量および河川水位情報だけで避難の判断を行うことは難しく、近隣地区等の情報

表-2 隣接市区町村における防災気象情報発表と避難勧告発令時刻

市区町村	大雨警報 (浸水害)	大雨警報 (土砂災害警報)	洪水警報	土砂災害 警戒情報	記録的短時間 大雨情報	避難勧告
萩市須佐地区	4:48	6:36	4:48	7:17	10:24	11:00
萩市田万川地区					9:26	7:55
萩市むつみ地区						
阿武郡阿武町					8:20	9:54
山口市		4:48		6:20	8:54	10:00
鹿足津和野町	4:20	6:30	4:20	6:55	9:55	6:50
益田市				10:38	-	11:48

を有効に活用する必要性を示した。

一方、本研究では浸水準に対するウェイトを一例として示したが、実際には流速や個人の運動能力に依存するものである。このため、ウェイトの決定方法については実験等により検討することが必要であり、今後の課題とする。

参考文献

- 1) 気象庁：気候変動監視レポート,2014.
- 2) 牛山素行・高柳夕芳：2004～2009年の豪雨災害による死者・行方不明者の特徴,自然災害科学, Vol.29, No.3, pp.355-364,2010.
- 3) 近藤観慈・金田明香里・林拙郎：山間地域における豪雨災害時の住民避難—2004年9月台風21号三重県宮川村災害の事例—,砂防学会誌,Vol.59, No.4, p.32-42,2006.

- 4) 総務省統計局 e-Stat：平成22年国勢調査
- 5) 萩市防災会議：萩市地域防災計画,2012
- 6) 神谷大介, 赤松良久, 渡邊学歩, 大槻順朗, 二瓶泰雄, 上鶴翔悟：小規模集落における豪雨災害に対する課題と支援方策～萩市須佐地区を対象として～,土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.5, p.1_87-I_94,2014.
- 7) 繁野麻衣子：応用最適化シリーズ4—ネットワーク最適化とアルゴリズム—,pp.59-66,朝倉書店,2010
- 8) 大槻順朗, 二瓶泰雄, 赤松良久：2013年7月山口・島根豪雨による須佐川における被災状況調査と解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp.I_1447-I_1452, 2014.
- 9) 厚生労働省老健局介護保険計画課：介護保険事業状況報告 (暫定),2010.