

中央大学博士論文

洪水時の水文・避難情報が
避難行動に及ぼす影響の地域特性の分析と
適時性に優れた氾濫予測手法の提案

Yoshimasa Morooka
諸岡 良優

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
都市環境学専攻

平成30年度
2019年3月

第1章 序論

第1章 序論	5
1-1 はじめに	5
1-2 既往研究のレビュー	7
1-3 本研究の目的	8
1-4 本論文の構成	8
参考文献	10
第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査	11
2-1 概説.....	11
2-2 水害時の避難行動に関する既往調査	12
2-3 水害時の避難行動と情報取得状況に関する実態調査	13
2-3-1 洪水常襲地域における住民の避難行動に関する調査 -京都府福知山市-	13
2-3-2 平地における住民の避難行動に関する調査 -茨城県常総市-	17
2-3-3 中山間地における住民の避難行動に関する調査 -福岡県東峰村・朝倉市-	20
2-4 調査結果の概要.....	24
2-4-1 洪水常襲地域（福知山市）における住民の避難行動と情報取得状況.....	24
2-4-2 平地（常総市）における住民の避難行動と情報取得状況.....	32
2-4-3 中山間地における住民の避難行動と情報取得状況	40
2-5 まとめ	53
参考文献	55
第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析	57
3-1 概説.....	57
3-2 住民の避難行動へ影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性	58
3-3 平地における避難行動へ影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性	58
3-3-1 地域分類	59
3-3-2 地域ごとの避難状況	60
3-3-3 地域ごとの避難のきっかけ	60
3-3-4 地域ごとの避難のきっかけ（事実情報と確率情報）	61
3-3-5 地域ごとの避難せず自宅にいた理由	62
3-3-6 地域ごとの情報取得状況と避難状況の時系列.....	63
3-4 避難行動と浸水状況の関係.....	66

第1章 序論

3-4-1 年代と避難行動の関係.....	68
3-4-2 情報取得状況と避難行動の関係	68
3-4-3 地域特性と避難行動の関係	69
3-5 水平・垂直避難と浸水状況の関係.....	69
3-5-1 本研究における垂直避難の定義	69
3-5-2 水平・垂直避難と年代の関係.....	70
3-5-3 水平・垂直避難とハザードマップ確認状況の関係	71
3-5-4 水平・垂直避難と避難場所決定状況の関係	71
3-6 避難のタイミング	72
3-6-1 避難のタイミングと年代の関係	72
3-6-2 避難のタイミングと取得情報の関係.....	73
3-6-3 避難のタイミングと避難場所決定状況の関係.....	73
3-6-4 避難のタイミングと地域特性の関係.....	74
3-7 避難行動に効果を及ぼした情報	74
3-7-1 解析手法.....	74
3-7-2 解析結果.....	75
3-8 まとめ.....	79
参考文献.....	81
第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動.....	83
4-1 概説.....	83
4-2 鬼怒川の河道特性と2015年9月洪水時による被害の概要	84
4-3 2015年9月洪水における鬼怒川流域の水位・流量の再現計算	86
4-3-1 解析手法	87
4-3-2 再現計算結果.....	92
4-4 ダムの有無が下流の水位に及ぼす影響.....	92
4-5 降雨規模が下流の水位に及ぼす影響	93
4-6 支川の氾濫が市街地住民の避難行動に及ぼした影響.....	94
4-6-1 八間堀川の概要	94
4-6-2 水海道市街地の浸水状況.....	95
4-7 浸水状況と避難状況の再現.....	96
4-7-1 浸水状況の再現	96
4-7-2 解析手法.....	96

第1章 序論

4-7-3 解析結果	97
4-7-4 避難状況の再現	98
4-8 浸水状況と避難タイミングの関係	100
4-9 まとめ	100
参考文献	102
第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案	103
5-1 概説	103
5-2 防災意識の経年変化	103
5-2-1 ハザードマップ確認状況	104
5-2-2 避難場所決定状況	105
5-3 災害時に住民が望む情報	106
5-3-1 平地の住民が望む情報	106
5-3-2 中山間地の住民が望む情報	107
5-4 リアルタイム氾濫域予測シミュレーション手法の構築	108
5-4-1 地形適合格子モデルと従来の氾濫解析モデルの比較	108
5-4-2 地形適合格子モデルの概要	109
5-4-3 地形適合格子モデルの基礎式における各項のオーダー比較	111
5-4-4 地形適合格子の生成	112
5-4-5 解析条件	113
5-4-6 解析結果	113
5-5 まとめ	115
参考文献	117
第6章 結論	119
6-1 本論文で得られた成果	119
謝辞	122

第 1 章 序論

第1章 序論

1-1 はじめに

わが国では、時間雨量が 100mm を超える豪雨の発生回数が増加しており、さらに土地利用の高度化と相まって、水害発生の可能性および水害の被災リスクが高まっている。一般に、防災対策にはダム・堤防・防潮堤・耐震補強等の構造物による被害軽減手法である「ハード対策」と①災害時の(1)水防活動、(2)避難（救援）および(3)水防・避難（救援）の情報伝達と経路確保、に加えて②災害前（普段から）の(1)防災意識の向上、(2)災害情報伝達システムの完備、(3)避難場所・体制の確立および(4)こうした情報の提供（ハザードマップ）、さらには③災害後の(1)応急復旧、(2)被災者支援に挙げられるような「ソフト対策」がある¹⁾。日本においては、戦後の復興期から1991年（平成3年）に発生した阪神・淡路大震災までの間、防災対策はハード対策を中心に考えられてきた。このようなハード対策中心の防災対策について、牛山²⁾は以下に示す、一般的な問題を指摘している。

- ・一般的に整備に多くの費用が必要。
- ・多額の費用を投じて整備しても、いつ必要になるか分からない。
- ・「計画を超える規模の現象」（計画超過外力）には耐えられない。
- ・人間活動の拡大に伴い、対策を実施すべき「危険箇所」が増加し、整備が追いつかない。

さらに、激甚化した豪雨により河川の施設能力を上回る洪水が近年頻発しており、今後も、気候変動の影響等により、施設能力を上回る（ハード対策では防げない）洪水の発生頻度が高まることが予想されている。

このような現状を踏まえて国土交通省は、2015年（平成27年）12月に『各地域において、河川管理者・都道府県・市町村等からなる協議会等を新たに設置して減災の

第1章 序論

ための目標を共有し、ハード・ソフト対策を一体的・計画的に推進する』という水防災意識社会再構築ビジョンを提言している³⁾。この中では、住民が自らリスクを察知し主体的に避難できるよう、より実効性のある「住民目線のソフト対策」の推進が明確に示されている。

このように、洪水時の的確な住民の避難行動を促す取り組みが行われているにも関わらず、2016年（平成28年）8月に発生した台風10号による北海道および岩手県で発生した水害や、2018年（平成30年）7月に発生した西日本豪雨においても逃げ遅れた多くの住民が亡くなるといった水害時の避難行動に関する問題が発生している。

一般に避難行動のタイミングとその目的は災害の種類によって異なり、地震時の避難は、地震発生後に身の安全を確保した後、仮住まいができる場所へ移動すること、津波発生時の避難は、津波が到来する前に高所へ避難して命を守ること、そして、洪水時の避難は、洪水で溺死しないよう、浸水しない場所へ避難して命を守ることが目的であるというように、自然災害の種類によって異なることが指摘されている⁴⁾。

災害発生メカニズムについても、突発的に発生する地震や津波と異なり、河川洪水は、降雨、河川への流出・流下、氾濫という順を追って被害が発生する進行性の災害であるために、どういう状況になったら危険であるかを認知しづらいという特徴がある。一方で、事前にある程度被害の発生を予測できる雨量分布や河川水位の変化、さらには河川のリアルタイム映像等の水文情報や避難指示や避難勧告等の避難情報が複数あり、降雨から災害発生までのリードタイムに的確な行動をとることができれば、被害を軽減することは可能であり、最低限人命を守ることができるはずである。さらに、平常時には、洪水時の避難行動を予め検討できるように、洪水ハザードマップや浸水想定区域図が住民へ提供されているが、これらの事前からあるリスク情報が必ずしも避難行動へ活かされていないという現状があることが指摘されており、例えば片田ら⁵⁾は住民へのヒアリング調査を行い、気象情報や河川情報が詳細かつ迅速にテレビやインターネットを通じて提供されても、多くの住民は避難勧告が発令されるまで何の対応もしていなかったことを明らかにしている。また、近年発生した水害においても避難行動に関する問題がクローズアップされている。例えば2016年（平成28年）8月台風10号によって発生した岩手県岩泉町での水害では、高齢者施設において避難準備情報（現：避難準備・高齢者等避難開始）の意味が伝わらず、適切な避難行動が取られなかったことにより9名の人命が犠牲になっている。これは、避難に関する情報が発令されても、その内容を理解していない人が多く、結果として適切な避難行動へ結びつかなかったという例である。さらに、2009年（平成21年）8月台風9号によって発生した兵庫県佐用町での水害では、避難所への移動中に用水路等に

第1章 序論

流された9名（うち子供が5名）が亡くなるという悲劇が発生した⁶⁾。これは、住民が日没後に避難したことで用水路に流されてしまった事例であり、2013年（平成25年）に災害対策基本法における「屋内避難（垂直避難含む）」が位置付けられたきっかけとなった事故である。このように避難行動をとってもそれが適切な行動でない場合には、かえって身を危険にさらしてしまうということもある。これに関連して、牛山は⁷⁾2004年からの10年間に洪水によって亡くなった131人の被災場所のうち、67.2%が、移動や避難を目的とした行動中に、河道外で浸水、洪水流に巻き込まれて死亡したことを明らかにし、洪水は屋外で被災する比率が大きいことに留意し、洪水避難を考える必要があることを指摘している。

また、近年頻発している集中豪雨により引き起こされる中山間地の土砂災害時には、雨が降り始めてから災害の発生までの時間が短く、的確な避難行動が人命に直結するため、避難行動を促す情報の重要性が高いと言える。

1-2 既往研究のレビュー

激甚化する水害に対するソフト対策として、住民一人一人が的確な避難行動をとることができれば、最低限人命は守られるであろう。今日までに、水害時の避難行動とそれを促す様々な情報の関係について、多くの研究がなされている。以下にその一例を示す。

廣井は⁸⁾、住民が警報を受け取ってから避難に至るまでには、「警報への接触→情報確認→被害予想→避難の有効性の評価→避難の実行可能性の評価→避難」という心理プロセスがあると説明し、このプロセス全てをクリアしなければ人々は避難しないということを指摘している。

片田ら⁹⁾は、2000年（平成12年）東海豪雨時における住民の避難行動を分析し、住民に避難を促すためには、避難情報等により住民に自らが置かれている状況や以降の浸水の危険性を正しく伝えることで、住民に適切な危機意識を醸成させ、避難の必要性を認識させることが重要であると指摘している。

これらの研究では、想定している災害の種類が異なるが、避難を促す避難指示や避難勧告等の避難情報は、内容が具体的かつ重大性と切迫性を住民へ印象づける必要があるという共通の指摘をしている。

また、人間の心には、自分に迫りくる危険を「自分は大丈夫」「まだ大丈夫」などと過小に評価して心の平穏を保とうとする強い働きがある。世界中の災害において、「正常化の偏見」あるいは「正常性バイアス」と呼ばれるこの心の働きによって、多くの人が逃げ遅れていることが指摘されている¹⁰⁾。

第1章 序論

一方で、片田ら¹²⁾は、2004年（平成16年）新潟豪雨災害等の複数の豪雨災害時における住民の避難行動に関する調査から、激しい雨が降り続き内水浸水が相当に進んだ状況にあっても、河川からの越水が生じる事態に及んでも避難しない住民が多く「避難情報がなかった」ために避難しなかったと回答する住民がほとんどで、さらに「情報があれば避難をした」と回答する住民が極めて多いという実態を示している。しかし、実際には避難勧告等の避難情報が発令されており、それでも避難しない住民が大多数であるという現実が、水害後の避難行動調査のたびに明らかになることであることが指摘されている。

1-3 本研究の目的

以上を背景に、本研究では、洪水時の水文情報及び避難情報が住民の避難行動に及ぼす影響について、洪水常襲地域、平地、中山間地の3つの流域において調査・分析を行い、的確な避難行動を促す情報の地域特性の把握および住民の的確な避難行動を促す情報の提案を目的とする。

1-4 本論文の構成

本論文の構成および各章での成果は下記に示す通りである。

第1章では、本研究の背景・目的と位置付けおよび構成を述べた。

第2章では、災害の種類や地域特性の異なる3つの地域において、洪水時の避難状況および浸水状況と情報の取得状況、日頃の防災意識等に関する調査を実施した。対象地域は、①2013、2014年と2年続けて由良川が氾濫するなど、1945年から2017年までの約70年間で13回浸水被害が生じている洪水常襲地域である京都府福知山市、②2015年9月関東・東北豪雨において鬼怒川の溢水および堤防の決壊により市内の約3分の1の面積が浸水し、逃げ遅れた住民約4,300人（内ヘリコプターで約1,300人）が救助された茨城県常総市、③2017年九州北部豪雨において、山腹崩壊・土石流による直接的な被害に加えて、崩壊・土石流による土砂流出や中下流域河道において激しい流路変動や水・土砂・流木の氾濫が引き起こされ42人が亡くなった、中山間地である福岡県朝倉市・東峰村である。

第3章では、中山間地と比べて避難に要するためのリードタイムが長い平地においては、その氾濫域内においても避難行動へ及ぼす要因について地域特性があると考え、本章では常総市における調査結果について詳細に分析を行った。さらに、その時点以降に何らかの事象の発生確率が高いことを伝える情報である「確率情報」と、その時点までに発生・観測された事実を伝える情報である「事実情報」、さらには自宅が浸

第1章 序論

水したからといった「周囲の状況」に分けて避難のきっかけと避難のタイミングについて、小さいスケールでの地域特性について分析を行った。また、調査結果にベイズ推定を用いることで洪水時に発信される様々な情報が避難行動に及ぼす効果を定量的に評価することを可能とした。

第4章では、上流に雨が降ってから約半日後に下流で氾濫が発生するという時間スケールで生じたために、避難をする時間が十分にあったにも関わらず多くの住民が逃げ遅れて救助された、鬼怒川洪水による茨城県常総市を対象に、降雨流出および氾濫現象について詳細な分析を行った。また、降雨規模が下流の水位・流量へ及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実測ハイエトグラフの波形は変えずに総降雨量のみを0.5倍、0.8倍、1.2倍に引き延ばして流出計算を行った。そして、洪水氾濫解析を実施し、第2章の調査で取得した洪水時の住民の避難行動の時系列を用いて、浸水状況と避難行動について分析を行った。

第5章では、住民の的確な避難行動を促す情報としてリアルタイム浸水域予測手法の構築を行った。リアルタイム浸水域として、地形適合格子モデルを採用し、従来、本モデルの課題であった格子形成に長時間要するという点を、OSM財団が公開しているライセンスフリーのデータベースであるOpenStreetMapの「道路中心線」データを用いて対象領域を分割することで、格子形成に要する時間を大幅に短縮した。

第6章では、結語として、本研究で得られた成果を総括した。

第1章 序論

参考文献

- 1) 辻本哲郎：豪雨災害と治水安全度・耐水危機管理，河川技術論文集，Vol.7, pp.1-6, 2001.
- 2) 牛山素行：豪雨の災害情報学，古今書院，p.9, 2008.
- 3) 国土交通省社会資本整備審議会：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について（答申），2015.
- 4) 岡本俊彦：洪水時の命を守る確実な避難の実現に向けて，REPORT OF JAPAN INSTITUTE OF COUNTRY-OROLOGY AND ENGINEERING, Vol. 32, pp.76-79, 2018.
- 5) 片田敏孝，児玉真，浅田純作：東海豪雨災害における住民の情報取得と避難行動に関する研究，河川技術論文集，Vol.7, pp.155-160, 2001.
- 6) 命を守る水害読本編集委員会：命を守る水害読本，毎日新聞出版，2017.
- 7) 牛山素行：豪雨災害による人的被害，土木学会 2015 年度水工学に関する夏季研修会，A-2, pp.1-19, 2015.
- 8) 廣井脩：災害情報と社会心理，p.149，北樹出版，2004.
- 9) 広瀬弘忠：人はなぜ逃げおくれるのか -災害の心理学，集英社，2004.
- 10) 児玉真，木下猛，片田敏孝：避難準備情報の導入に伴う避難情報の段階的発令とその住民受容に関する研究，災害情報学会誌，Vol.6, pp.51-60, 2008.
- 11) 土木学会編集委員会編：これからの安全・安心 -災害情報を生かす-，土木学会，2008.

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得 状況に関する実態調査

2-1 概説

近年発生した2016年（平成28年）8月台風10号や2018年（平成30年）7月西日本豪雨のように、逃げ遅れにより多数の死者や経済損失が発生している。このように全国各地で豪雨が頻発・激甚化していることに対応するため、国土交通省社会資本整備審議会は、「施設整備により洪水の発生を防止するもの」から「施設では防ぎきれない大洪水は必ず発生するもの」へと意識を根本的に転換し、ハード・ソフト対策を一体として、社会全体で水防災意識社会の再構築への取り組みが必要であると提言している。この中で、洪水時の逃げ遅れによる人的被害を無くす「逃げ遅れゼロ」という目標に向けて、住民が自らリスクを感知し主体的に避難できるよう、より実効性のある「住民目線のソフト対策」への転換が進められている。ハード対策は、治水設備を設置することや、その機能・性能を向上させることで減災・防災効果を発揮できると言える。例えば、治水ダムのように工事が完了した時点ですぐに豪雨に見舞われても、計画通りの洪水調節を行うことが可能である。一方で、ソフト対策は、そのシステムを設置および機能・性能を向上させるだけでは直接的な防災・減災に結びつかない。例えば、洪水時における情報は、その受け手自らが理解し判断・行動に結びつけて初めてその受け手にとっての情報となる¹⁾。第1章で述べたように、河川洪水は、降雨、河川への流出・流下、氾濫という順を追って被害が発生する進行性の災害であるために、どういう状況になったら危険であるかを認知しづらいという特徴がある一方で、事前にある程度被害の発生を予測できる雨量分布や河川水位の変化等の水文情報や避難指示・避難勧告等の避難情報が複数あり、降雨から災害発生までのリードタ

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

イムに的確な行動をとることができれば、被害を軽減することは可能であり、最低限人命を守ることができるはずである。つまり、河川洪水時には、ソフト対策としての避難行動を促す情報が非常に重要であると言える。特に、中山間地における土石流等は降雨のピークから災害発生までの時間が短く、事前の情報を受けて的確に避難行動をとらなければ、人命に直結する被害を受けてしまう。これまでに、洪水および土砂災害による水害時の避難行動に関する実態調査が行われ、個々の水害時における避難行動や情報提供の実態が明らかにされてきている。

2-2 水害時の避難行動に関する既往調査

水害時の避難行動は、住民の心理によって支配される要素が大きく、加えて情報の伝達状況や浸水状況等の多くの要因が絡み合っており、様々なケースを想定して避難行動時の問題点を検討する必要がある。水害時に避難行動に関する問題が生じた際には、的確な避難行動の検討資料としてアンケート調査やヒアリング調査によって資料の蓄積が行われている。以下に、水害時の避難行動に関する既往の調査研究の一例を示す。

長尾ら²⁾は、愛知県を流れる日光川流域の住民を対象とした水害に対する意識調査を実施し、「都市型地域」においては指定された避難所を選択する傾向が強く、「農村」では避難所までの移動距離が長いことから、「都市型地域」と比較して自主的な判断で避難所を選択する傾向があることを指摘している。

吉本ら³⁾は、1988年（昭和63年）の御船川水害と1990年（平成2年）の六角川水害における避難行動に関する調査を実施し、洪水経験が豊富で過去の氾濫流速が小さい場所の住民は自らの意思で避難しない傾向があることを指摘している。

浅田ら⁴⁾は、住民が避難勧告・指示に従わない理由は、避難命令やそれに至る事前の河川情報によって、住民自らがその置かれている状況や直後に自分の身に起こる危険を正しく認識せず、避難の必要性を感じないためであることを指摘している。

片田ら⁵⁾は、2000年（平成12年）の東海豪雨における避難行動に関する調査を実施し、過去に床上浸水を経験した住民は家屋への浸水がはじまったと同時に身の危険を感じた一方で、過去に経験した被害が軽微な床下浸水であった住民は家屋浸水時に危険を感じた住民の割合が低いことを指摘している。

廣井⁶⁾は、風水害時には、大災害にならないだろうとか自分は大丈夫だろうと考えてしまう「正常化の偏見」が強く働き、危険が迫る前に避難しようという気持ちになかなかならないため、多くの人が避難のタイミングが遅れ、ギリギリの段階ではじめて避難を決心するということを指摘している。

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

千葉ら⁷⁾は、2006年（平成18年）7月豪雨により発生した土砂災害における調査を行い、平常時から、どこが危険なのか・どういった土砂災害現象が起こりうる土地なのかといった県からの情報を、市や住民と共有していた地域では自主避難した人が多いことを示し、土砂災害警戒区域内の住民と危機意識の共有を日常的に維持することが重要であると述べている。

2-3 水害時の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

一般に、水害時の避難行動に関する調査研究は、緊急調査的な性格が強く、収集したデータの使用目的が異なることや、時間的にも地域的にもランダムに水害が発生することから、研究者によって或いは研究者は同じでも調査実施の時期が異なるために違った視点からデータが集められ、複数のデータ間での比較が困難であるという課題があると指摘されている³⁾。そこで本研究では、洪水時の水文情報および避難情報が住民の避難行動に及ぼす影響の地域特性を明らかにすることを目的として、洪水常襲地域、平地、中山間地の3つの流域において、同様の質問内容による住民の避難行動の実態調査を行い、その結果を比較した。

2-3-1 洪水常襲地域における住民の避難行動に関する調査 -京都府福知山市-

前出のように、吉本ら³⁾や片田ら⁵⁾によって、水害常襲地域では小さな浸水に慣れが生じていることや、過去に床上浸水を経験したことがある住民は自宅の浸水開始と同時に身の危険を感じた一方で、過去に経験した被害が軽微な床下浸水であった住民は浸水開始時の危険意識が低かったことが指摘されている。そこで、洪水常襲地域の住民の避難行動の特性や日頃の防災意識に関するヒアリング調査を実施した。

(1) 対象地域

洪水常襲地域における洪水時の避難行動の実態を明らかにすることを目的として、京都府福知山市を対象にヒアリング調査を実施した。福知山市は1945年から2018年までの約70間に、市内を流れる一級河川の由良川の洪水氾濫により13回の浸水被害が発生している⁸⁾洪水の常襲地域である。

由良川は、丹波高原の北東端に位置する杉尾峠に発し、北桑田の山間部を流れ、高屋川、上林川等と合流して京都府綾部市域を貫流し、福知山盆地で土師川が合流した後北流して日本海の若狭湾に注ぐ一級河川である。幹川流路延長146km、流域面積1,880km²（京都府の面積の約1/4）であり、流域の約89%が山地である典型的な山地河川の特徴を有する。流域の地形は、綾部地点よりも上流では深い峡谷と河岸段丘の発達が見られ、中流域の福知山市から綾部市にかけて福知山盆地が形成されている。

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

福知山盆地より下流側では幅 200~300m の谷底平野が河口部まで続き、自然堤防が発達している。由良川流域は、戦前まで大規模な河川改修が行われず、ほとんど無堤に近い状態であった。また、前述のように綾部地点より上流では河川勾配が級であり、綾部・福知山間の中流部では盆地であるために勾配が緩く、福知山から下流部では山間部を流れるために河道幅が狭く、さらに河川勾配が非常に緩くなるという地形的特徴を有する。このような地形特徴により、由良川流域では水害に繰り返し見舞われてきた地域であり、歴史的にも江戸時代の 233 年間（寛永 2 年～慶応 4 年）に 106 回の水害の記録が残されており、約 2 年に 1 回水害に見舞われていたという記録がある⁹⁾。

(2) 対象洪水

福知山市内において 2 年続けて浸水被害がもたらされた 2013 年（平成 25 年）台風 18 号水害および 2014 年（平成 26 年）8 月豪雨を対象とした。

(a) 2013 年台風 18 号

2013 年台風 18 号は 2013 年 9 月 13 日に小笠原近海で発生し、勢力を強めながら北上した後、日本の南で向きを東に変え、16 日午前 8 時前に愛知県豊橋付近に上陸した。近畿地方では 15 日から 16 日の昼ごろまでの雨量が平野部の多いところで 300mm、山沿いの多いところで 500mm を超える大雨となった。その結果、近畿圏の広い範囲で河川の増水、土砂崩れ、浸水、冠水被害が発生した。福知山市内では、家屋の全壊・半壊・大規模半壊が 332 棟、床上・床下浸水が 779 棟の被害が生じた¹⁰⁾。

図 2-1 に 2013 年台風 18 号水害時における由良川流域の累積雨量（気象庁 C バンドレーダによる観測雨量）の空間分布を示す。

2013/9/15 0:00~9/16 23:50 の累積雨量

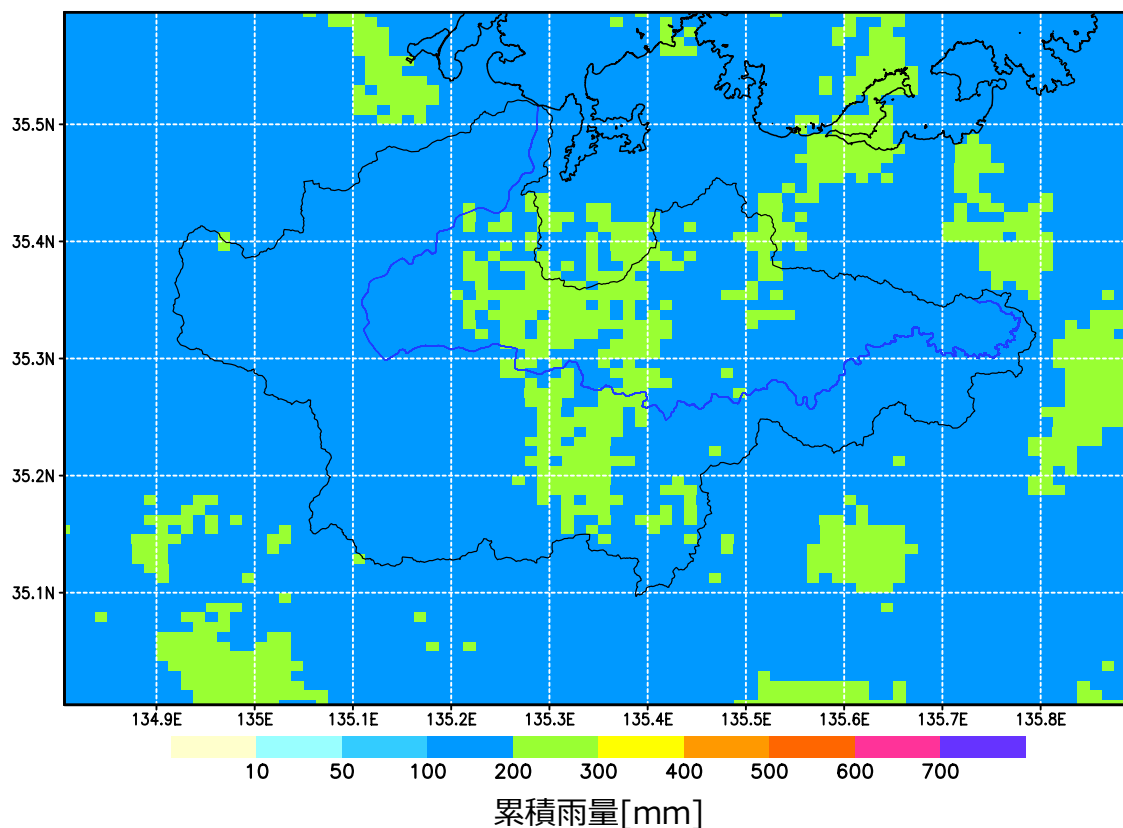


図 2-1 2013 年台風 18 号水害時における由良川流域の累積雨量の空間分布

(b) 2014 年 8 月豪雨

2014 年 8 月豪雨は 2014 年 8 月 16 日から 17 日にかけて近畿地方に停滞した前線に湿った空気が流れ込み、近畿地方や北陸地方で局地的な大雨に見舞われた。特に福知山市では、16~17 日の 24 時間雨量が 300mm を超え、平年の 8 月の 1 ヶ月雨量の約 2.5 倍に達した。この大雨により、市中心部を中心に広い範囲で冠水し、家屋の全壊・半壊・大規模半壊が 4,253 棟、床上・床下浸水が 4,500 棟の被害が発生した¹¹⁾。

図 2-2 に 2014 年 8 月豪雨時における由良川流域の累積雨量（気象庁 C バンドレーダによる観測雨量）の空間分布を示す。2013 年台風 18 号水害と比較して、上流域における累積雨量は小さく、福知山市周辺で大きな累積雨量がもたらされていることがわかる。2 日間で累積雨量が 500~600mm の豪雨であり、2013 年に続いて 2 年連続で水害に見舞われた。

2014/8/16 0:00~8/17 23:50 の累積雨量

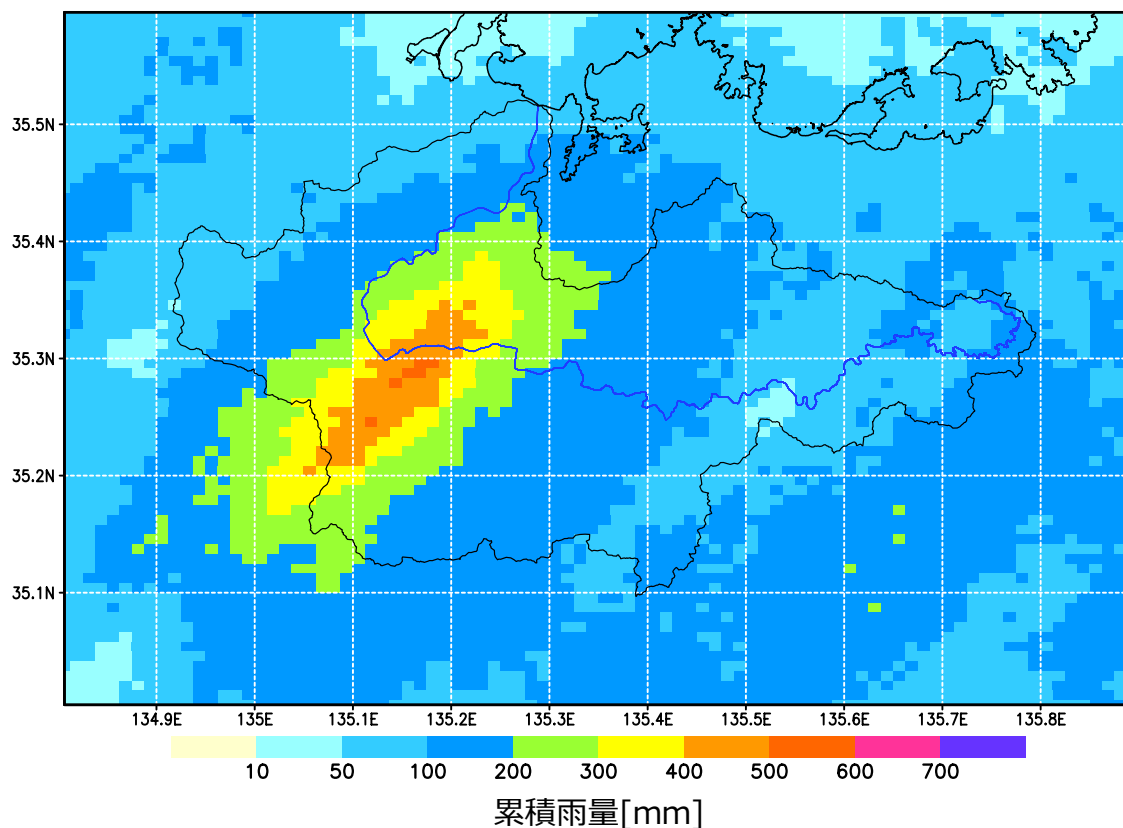


図 2-2 2014 年 8 月豪雨時における由良川流域の累積雨量の空間分布

(3) 調査の概要

福知山市内の 2013 年台風 18 号水害及び 2014 年 8 月豪雨時における浸水地区および由良川の浸水想定区域に住む住民（福知山市街地および遷喬地区）を対象に，空間的な人口分布がほぼ均等となるような間隔での自宅訪問による対面形式でのヒアリング調査を実施した．調査期間は，2015 年（平成 27 年）8 月 29~30 日の 2 日間である．また，調査員は中央大学河川・水文研究室の学生 10 名である．主な調査項目は，①浸水状況及び避難状況の実態，②災害情報及び避難情報の取得状況の実態，③日頃の防災意識，④回答者属性の 4 項目約 30 問で，215 件の回答を得た．福知山市の人口は 79,916 人¹²⁾（2016 年 2 月末現在）である．

図 2-3 にヒアリング調査を実施した住宅の分布を示す．

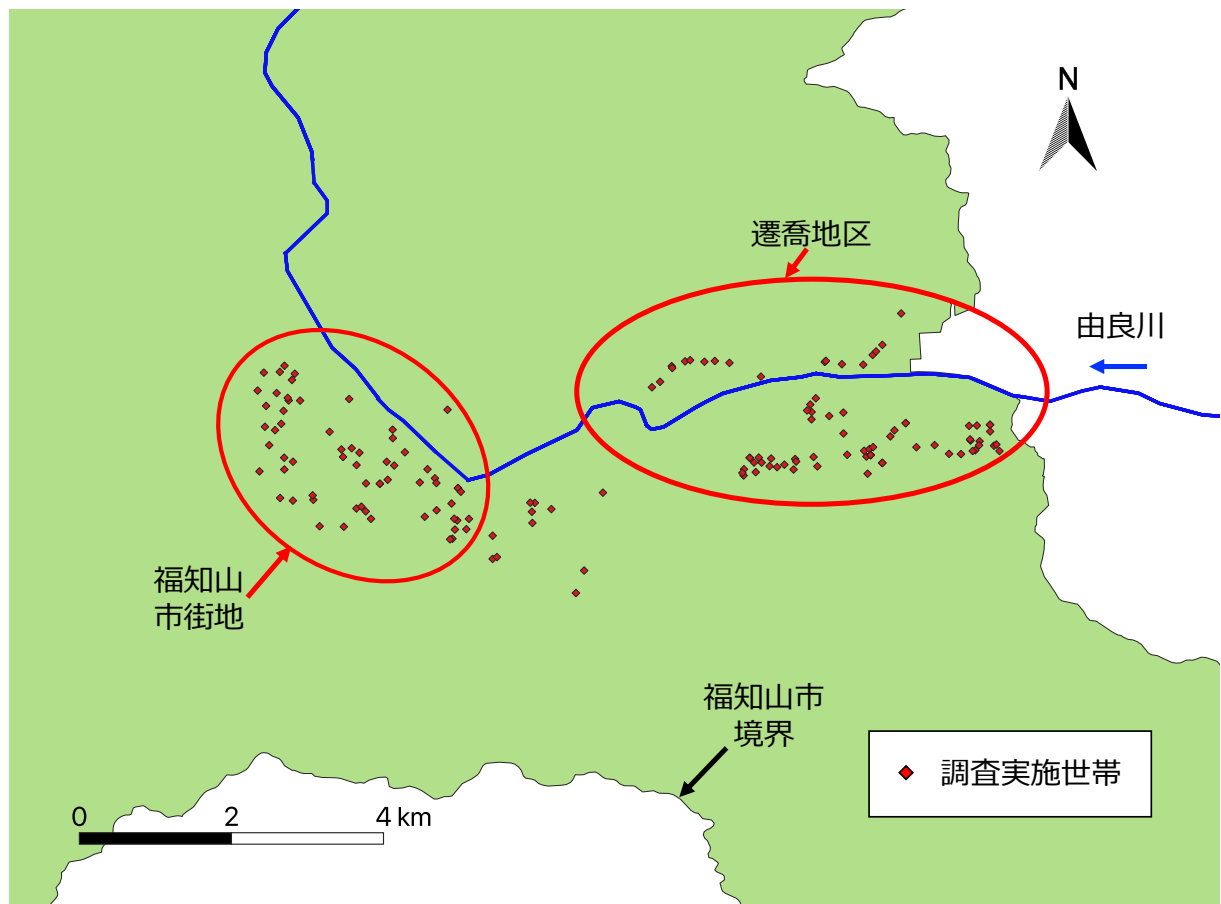


図 2-3 福知山市におけるヒアリング調査を実施したエリア

2-3-2 平地における住民の避難行動に関する調査 -茨城県常総市-

平地は一般的に流域の中流から下流に形成されているため、上流で豪雨がもたらされても、雨が河川に流出・流下し、氾濫するまでに時間があるため、避難をするための十分な時間があると言える。しかし、近年の水害時に平地で多くの住民が逃げ遅れているという現実があり、平地における洪水時の避難行動の実態を明らかにすることを目的として、茨城県常総市を対象にヒアリング調査を実施した。

(1) 対象地域

常総市は鬼怒川流域の最下流部に位置し、市内を鬼怒川と小貝川が流れている。約30年前の1986年（昭和61年）には小貝川の堤防決壊による浸水被害が発生した。

鬼怒川は、栃木県日光市鬼怒沼（標高2,040m）を水源として、栃木県と茨城県を流れ、利根川に合流する一級河川である¹³⁾。幹川流路延長：177km、流域面積：1,760km²であり、流域全体の64.5%が山地部で、残りの35.5%が平野部である。流域人口は約55万人で、支川に大谷川（流域面積256 km²）や田川（流域面積260 km²）がある。

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

また、土地利用は山地：61%，農地：22%，市街地：9%，その他：8%である。上流には4つのダム（五十里ダム，川俣ダム，川治ダム，湯西川ダム）があり，上流部では深い溪谷が見られ，中流部では川幅が広がり（約 700m），礫河原が形成されている。沖積平野に位置する下流部では自然堤防が発達し，狭い川幅（約 300m）の河道である。鬼怒川は，江戸時代初期までは小貝川と合流し，常陸川（今の利根川）に注いでいた。しかし，利根川付け替え工事によって，1629年には大木台地（茨城県守谷市）を掘削し，鬼怒川と利根川がつながられたことにより，鬼怒川と小貝川は分離された。常総市の人口は2015年（平成27年）10月1日現在で64,854人（23,170世帯）¹⁴⁾である。

(2) 対象洪水

常総市内で逃げ遅れた約4,300人がヘリコプターやボートで救助されることとなった，2015年9月関東・東北豪雨を対象とした。2015年9月に接近・来襲した台風17・18号に伴って，西日本から北日本の広範囲で大雨となり，日本全国で死者8名，家屋被害約2万棟という甚大な被害が発生した。特に栃木県・茨城県を流れる鬼怒川では溢水及び堤防の決壊が発生し，鬼怒川流域の最下流に位置する茨城県常総市の広範囲で洪水氾濫が発生した。

台風18号は2015年9月7日に沖ノ鳥島の東海上で発生し，9日の10時には愛知県渥美半島に上陸し，同日15時には日本海に抜け温帯低気圧となった。これと同時に発生していた台風17号により，南から暖かく湿った空気が流れ込んだことにより，幅100~200kmの南北に伸びた線状降水帯が，関東~東北地方に形成・維持され記録的な豪雨をもたらした。

この線状降水帯によって，栃木県日光市では総降水量（9月7~11日）が600mmを越え，月降水量平年値の2倍となった。流域平均3日間雨量は，鬼怒川の石井地点上流で501mm，思川で428mm，巴波川では379mmとなり，これまでの最多を記録した。

図2-4に2015年9月関東・東北豪雨時における利根川流域と鬼怒川流域における累積雨量（気象庁Cバンドレーダによる観測雨量）の空間分布を示す。鬼怒川流域に沿って累積雨量の大きい領域が形成され，特に上流域で600mmを超える大きな累積雨量がもたらされていたことが確認できる。

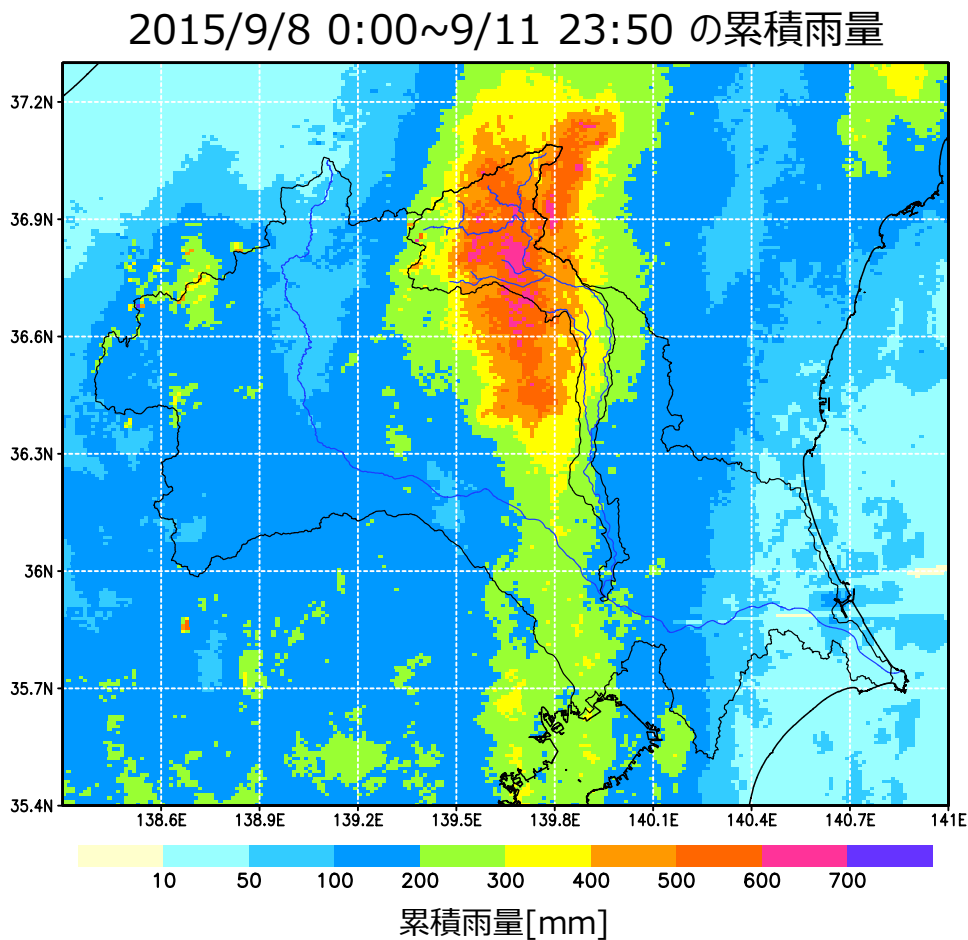


図 2-4 2015 年 9 月関東・東北豪雨時における
利根川・鬼怒川流域の累積雨量の空間分布

(3) 調査の概要

常総市内の浸水地区及び避難勧告・指示が発令された地区について、空間的な人口分布がほぼ均等となるような間隔での自宅訪問による対面形式でのヒアリング調査を、発災から2カ月後の2015年（平成27年）11月21~23日の3日間実施した。調査員は中央大学工学部河川・水文研究室の学生20名である。主な調査項目は、①浸水状況及び避難状況の実態、②災害情報及び避難情報の取得状況の実態、③日頃の防災意識、④回答者属性の4項目約30問で、516件の回答を得た。なお、①・②については時系列でその状況を整理できるような設問とした。図2-5にヒアリング調査を実施した住宅の分布を示す。



図 2-5 常総市におけるヒアリング調査を実施した住宅の空間分布

2-3-3 中山間地における住民の避難行動に関する調査 -福岡県東峰村・朝倉市-

一般に、中山間地における土石流等は降雨のピークから災害発生までの時間が短く、事前の情報を受けて的確に避難行動をとらなければ、人命に直結する被害を受けてしまう。そこで、中山間地域の住民の避難行動の特性や日頃の防災意識を明らかにすることを目的としたヒアリング調査を実施した。

(1) 対象地域

福岡県朝倉郡東峰村は、村内を筑後川支川の大肥川と宝珠山川が流れている中山間地域である。村の面積約 52 km²のうち、約 86%が山林原野である。村内は標高 500~900m の急峻な山地に面し、その谷間を大肥川と宝珠山川が流れている¹⁵⁾。

福岡県朝倉市は、福岡県の中南部である筑後地域に位置し、脊振山地と三郡山地の間に存在している地域である。脊振山地は福岡県と佐賀県の県境にまたがる山地であ

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

り、標高 800~1000m 程度の山が多くある。市内を赤谷川、白木谷川、寒水川等の抽象河川が流れている。

(2) 対象洪水

2017年7月九州北部豪雨は、2017年7月5日から6日にかけて、梅雨前線に向かって暖かく非常に湿った空気が流れ込んだ影響等により、線状降水帯が形成・維持され、ほとんど同じ場所に猛烈な雨が継続してもたらされ、九州北部地方で記録的な大雨となった。特に福岡県朝倉市から大分県日田市北部において強い雨がもたらされ、多くの雨量観測所で観測市場1位の雨量を記録した。本豪雨において、短時間に集中的に降る傾向が顕著であり、12時間雨量で見ると気象庁朝倉雨量観測所で511.5mm、日田雨量観測所で329.5mm、国土交通省鶴河内雨量観測所で532mmを記録した。また、7月5日~7日の累加雨量は北小路公民館で894mmを記録するなど、2012年(平成24年)7月九州北部豪雨を大きく上回った豪雨である¹⁶⁾。また、福岡県朝倉郡東峰村では、斜面崩壊による土砂災害や村内を流れる宝珠山川と大肥川が氾濫し、床上・床下浸水181棟の家屋被害と死者3名の人的被害が発生した。

東峰村の人口は2018年(平成29年)10月1日現在で2,188人¹⁷⁾、朝倉市の人口は53,706人¹⁸⁾である。

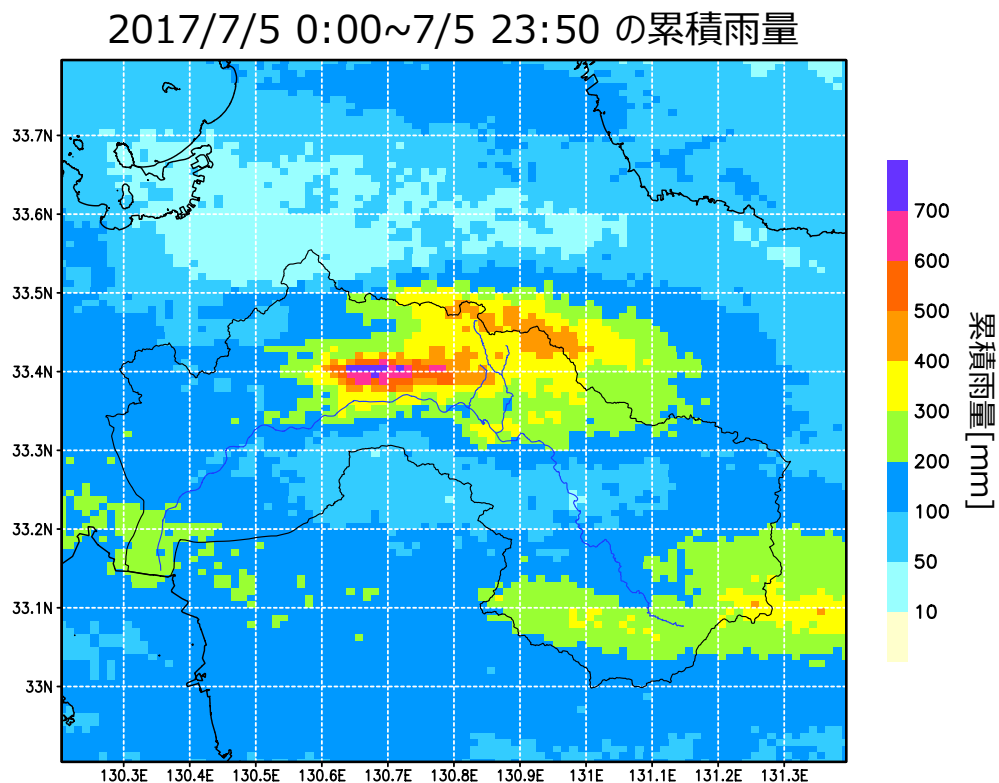


図 2-6 2017 年 7 月九州北部豪雨時における筑後川流域の累積雨量の空間分布

図 2-6 に 2017 年 7 月九州北部豪雨時における筑後川流域における累積雨量（気象庁 C バンドレーダによる観測雨量）の空間分布を示す。線状降水帯により 700mm を超える大きな累積雨量がもたらされていたことが確認できる。

(3) 調査の概要

(a) 福岡県朝倉郡東峰村

福岡県朝倉郡東峰村内の高校生以上の全村民を対象にアンケート調査を発災から約 5 ヶ月後の 2017 年 12 月 1 日~14 日に実施した。なお、アンケート調査は村内の自治会における連絡員が配布・回収を行い、配布数 1920 部に対して 1275 部回収した（回収率 66.4%）。主な調査項目は、①浸水・土砂災害の被災状況及び避難状況の実態、②災害情報及び避難情報の取得状況の実態、③日頃の防災意識、④回答者属性の 4 項目約 50 問である。なお、①・②については時系列でその状況を整理できるような設問とした。図 2-7 に東峰村内における住宅の空間分布を示す。

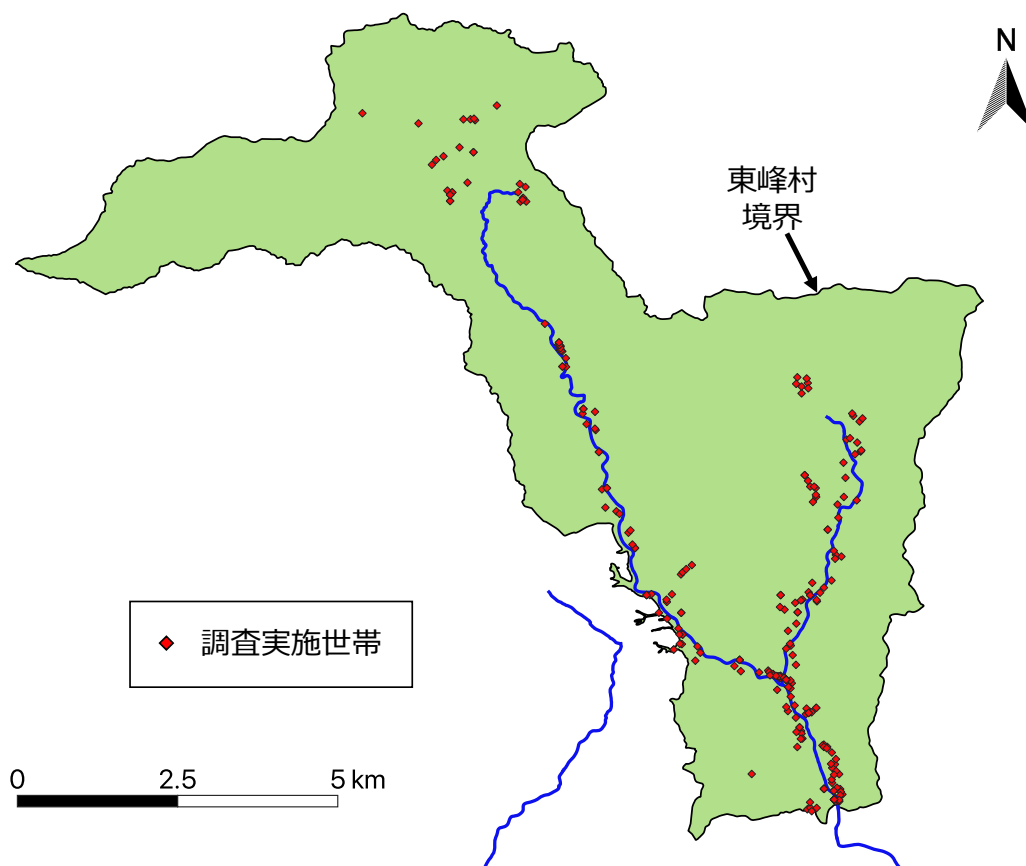


図 2-7 東峰村における住宅の空間分布

(b) 福岡県朝倉市

福岡県朝倉市において赤谷川，乙石川，白木谷川による激甚な被害を受けた松末・杷木地区を対象に，空間的な人口分布がほぼ均等となるような間隔での自宅訪問による対面形式でのヒアリング調査を，発災から約1年後の2018年（平成30年）6月に実施した．調査員は中央大学河川・水文研究室の学生と九州大学九州北部豪雨災害調査・復旧・復興支援団で構成されたグループが複数日に亘って調査を実施した．主な調査項目は，①浸水・土砂災害の被災状況及び避難状況の実態，②災害情報及び避難情報の取得状況の実態，③日頃の防災意識，④回答者属性の4項目約40問であり，728件の回答を得た．なお，①・②については時系列でその状況を整理できるような設問とした．

図 2-8 に朝倉市杷木・松末地区において調査した住宅の空間分布を示す．

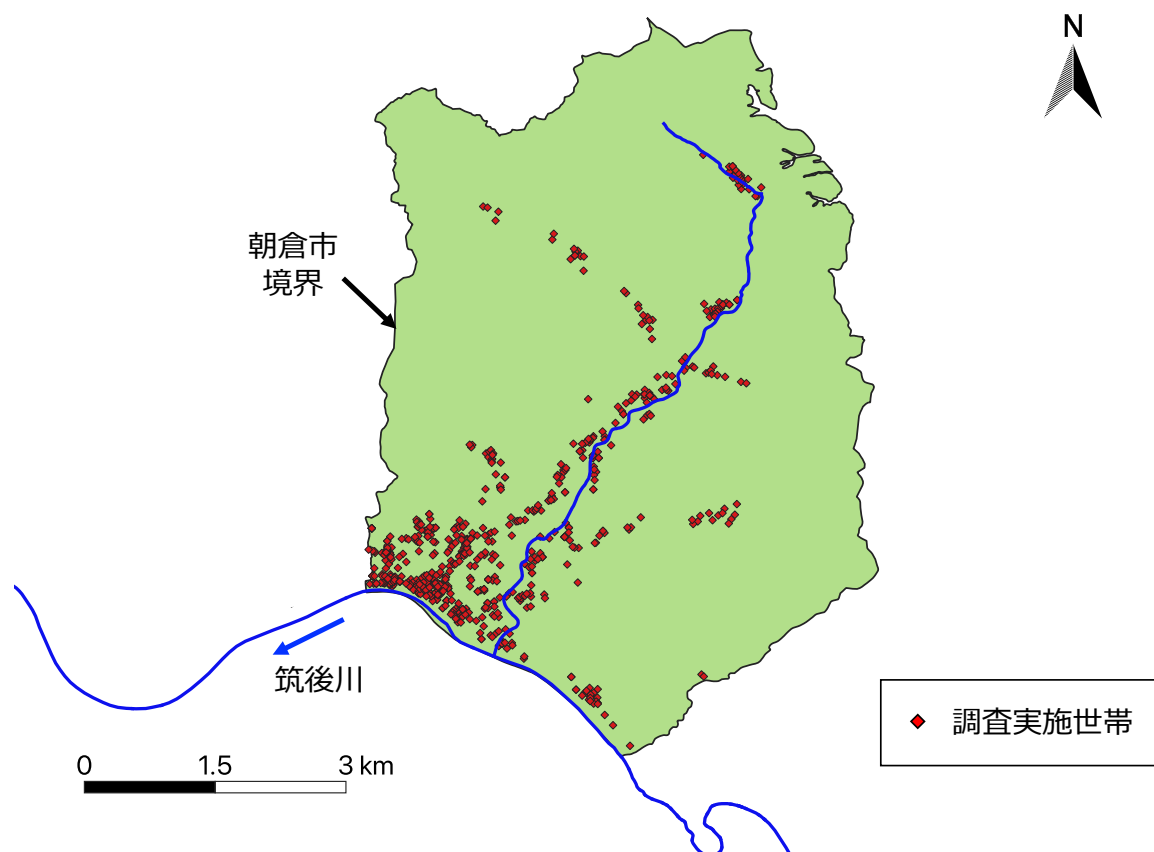


図 2-8 常総市におけるヒアリング調査を実施した住宅の空間分布

2-4 調査結果の概要

福知山市（洪水常襲地域），常総市（平地），朝倉市・東峰村（中山間地）における調査の単純集計結果を以降に示す．なお，本章において，避難所等の自宅以外の安全な場所へ移動することを「避難行動」と定義した．つまり，自宅の2階以上へ避難する垂直避難は避難行動へ含めず，水平避難のみを避難行動とした．

2-4-1 洪水常襲地域（福知山市）における住民の避難行動と情報取得状況

(1) 浸水状況

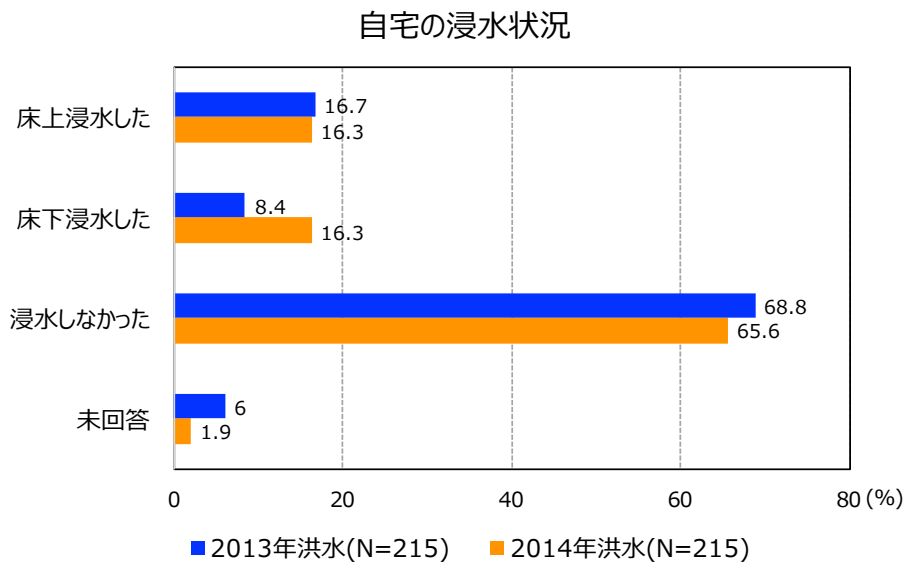


図 2-9 自宅の浸水状況

図 2-9 に洪水常襲地域（福知山市）における自宅の浸水状況を示す。

2013 年台風 18 号災害時における自宅の浸水状況について、「床上浸水した」住民が約 17%、「床下浸水した」住民が約 8%、「浸水しなかった住民」が約 69%であった。以上より、調査を実施した世帯のうち、約 25%で浸水被害があった（約 69%で浸水被害がなかった）ことが明らかとなった。

また、2014 年 8 月豪雨時における自宅の浸水状況について、「床上浸水した」住民が約 16%、「床下浸水した」住民が約 16%、「浸水しなかった住民」が約 66%であった。以上より、調査を実施した世帯のうち、約 32%で浸水被害があった（約 66%で浸水被害がなかった）ことが明らかとなった。

2013 年洪水と 2014 年洪水において浸水状況は概ね同様の傾向であるが、2013 年洪水時と比較して 2014 年洪水において床下浸水した住民の割合が 2 倍多いことがわかった。

(2) 避難状況

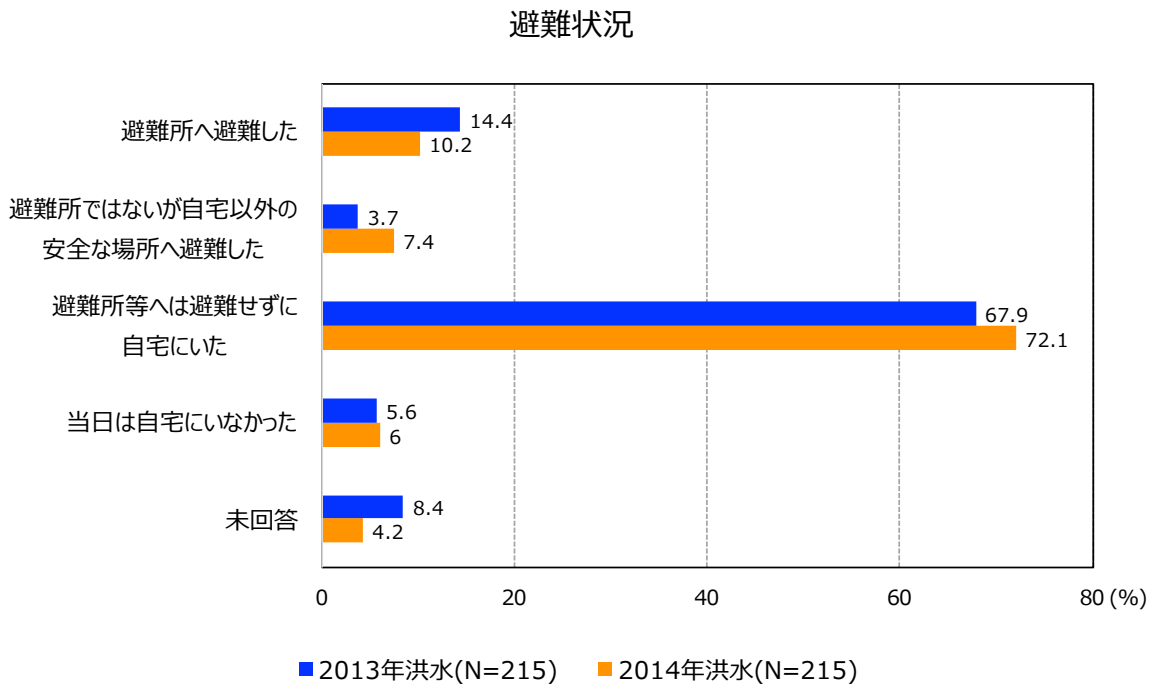


図 2-10 避難状況

図 2-10 に洪水常襲地域（福知山市）における避難状況を示す。

2013 年洪水時における避難状況について、「避難所等へは避難せずに自宅にいた」住民が約 68%で最も多く、「避難所へ避難した」住民が約 14%で、「避難所ではないが自宅以外の安全な場所へ避難した」住民が約 4%であった。以上より、約 18%の住民が自宅以外の安全な場所へ避難した（約 68%が避難せずに自宅にいた）ことが明らかとなった。

また、2014 年洪水時における避難状況について、「避難所等へは避難せずに自宅にいた」住民が約 72%で最も多く、「避難所へ避難した」住民が約 10%で、「避難所ではないが自宅以外の安全な場所へ避難した」住民が約 7%であった。以上より、約 17%の住民が自宅以外の安全な場所へ避難した（約 72%が避難せずに自宅にいた）ことが明らかとなった。

2013 年洪水と 2014 年洪水において避難状況は概ね同様の傾向であることがわかった。

(3) 避難のきっかけ

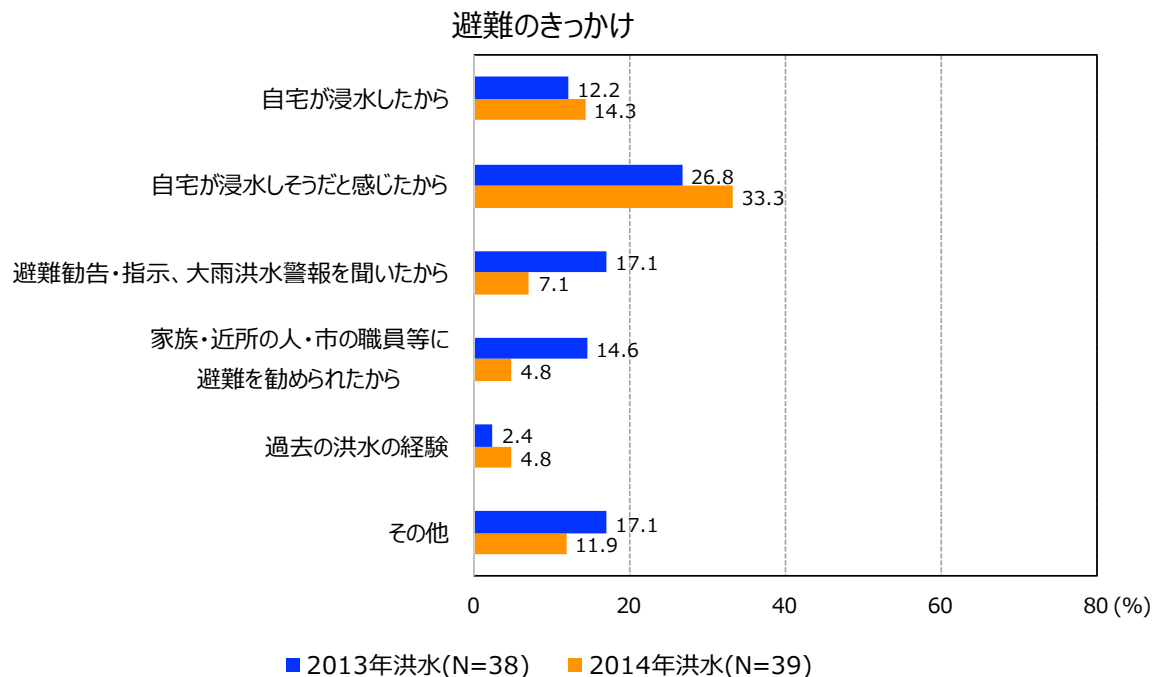


図 2-11 避難のきっかけ

図 2-11 に洪水常襲地域（福知山市）における避難のきっかけを示す。

2013 年洪水時における避難のきっかけについて、「自宅が浸水しそうだと感じたから」が約 27%で最も多く、次いで「避難勧告・避難指示、大雨洪水警報を聞いたから」が約 17%であった（母数は 2013 年洪水時に避難した住民）。以上より、自宅が浸水する危険を感じて自発的な判断で避難した住民が多いことが明らかとなった。

また、2014 年洪水時における避難のきっかけについて、「自宅が浸水しそうだと感じたから」が約 33%で最も多く、次いで「自宅が浸水したから」が約 17%であった（母数は 2014 年洪水時に避難した住民）。以上より、2013 年洪水時と同様に自宅が浸水する危険を感じて自発的な判断で避難した住民が多いことが明らかとなった。

(4) 避難しなかった理由

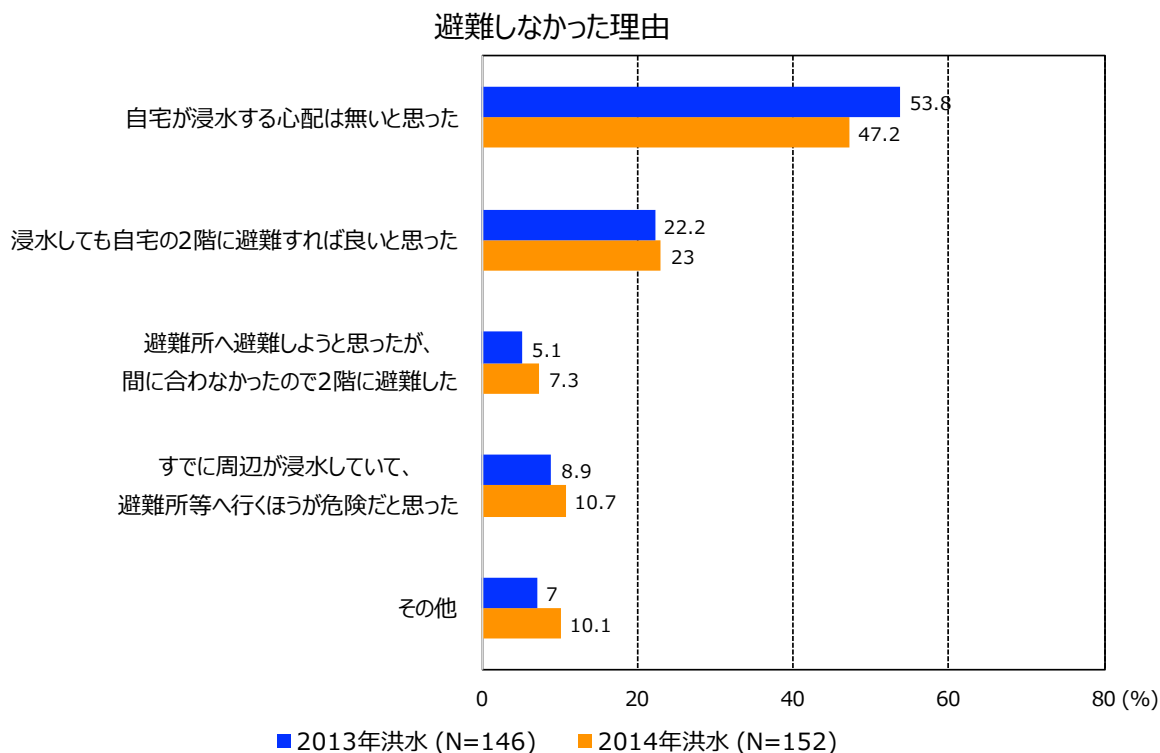


図 2-12 避難しなかった理由

図 2-12 に洪水常襲地域（福知山市）における避難しなかった理由を示す。

2013 年洪水時に避難せずに自宅にいた理由について、「自宅が浸水する心配はないと思った」が約 54%で最も多く、次いで「浸水しても 2 階に避難すれば良いと思った」が約 22%であった（母数は 2013 年洪水時に避難せずに自宅にいた住民）。以上より、避難せずに自宅にいた住民の約半数が、自宅が浸水しないと思っていたために避難しなかったことが明らかとなった。

また、2014 年洪水時に避難せずに自宅にいた理由について、「自宅が浸水する心配はないと思った」が約 47%で最も多く、次いで「浸水しても 2 階に避難すれば良いと思った」が約 23%であった（母数は 2014 年洪水時に避難せずに自宅にいた住民）。以上より、2013 年洪水と同様に、避難せずに自宅にいた住民の約半数が、自宅が浸水しないと思っていたために避難しなかったことが明らかとなった。

(5) 避難情報の取得手段

(a) 2013年洪水

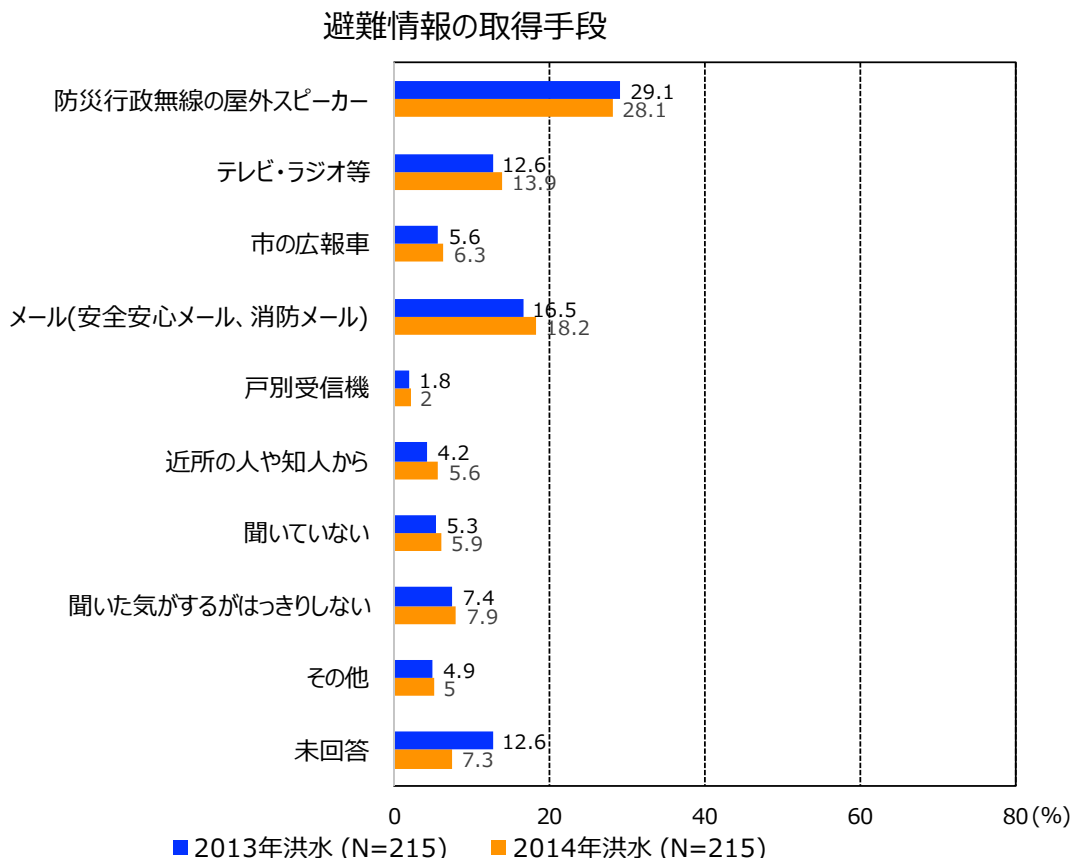


図 2-13 避難情報の取得手段

図 2-13 に洪水常襲地域（福知山市）における避難情報の取得手段を示す。

2013年洪水時における避難情報の取得手段について、「防災行政無線の屋外スピーカー」が約29%と最も多く、次いで「メール（安全安心メール・消防メール）」が約17%、「テレビ・ラジオ等」が約13%であった。以上より、避難指示や避難勧告等の避難情報を防災行政無線のスピーカーから取得して住民が最も多いことが明らかとなった。

また、2014年洪水時における避難情報の取得手段について、「防災行政無線の屋外スピーカー」が約28%と最も多く、次いで「メール（安全安心メール・消防メール）」が約18%、「テレビ・ラジオ等」が約14%であった。以上より、2013年洪水時と同様に避難指示や避難勧告等の避難情報を防災行政無線のスピーカーから取得して住民が最も多いことが明らかとなった。

(6) 日頃の防災意識

「避難判断水位」の認知度 (N=215)

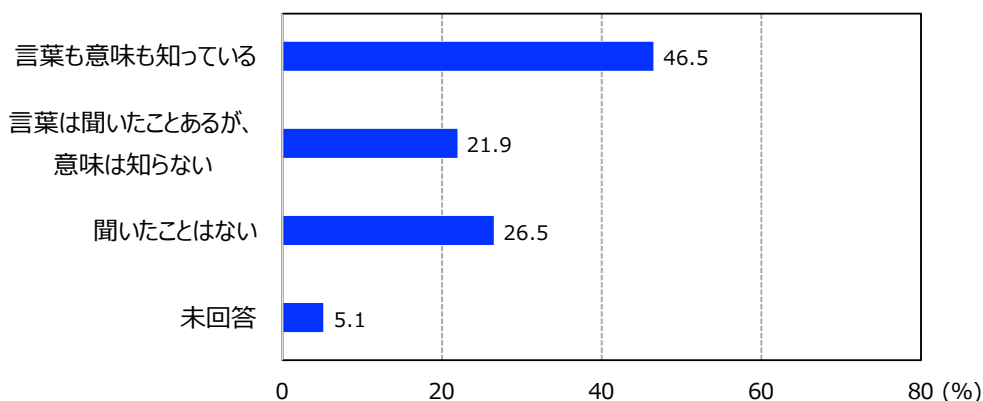


図 2-14 「避難判断水位」の認知度

図 2-14 に洪水常襲地域（福知山市）における「避難判断水位」の認知度を示す。

河川の基準水位の認知度について、「避難判断水位」という言葉について「言葉も意味も知っている」という住民が約 47%で最も多く、「聞いたことがない」住民が約 27%であった。以上より、約半数の住民が避難判断水位という言葉を理解していることが明らかとなった。

ハザードマップの確認状況 (N=215)

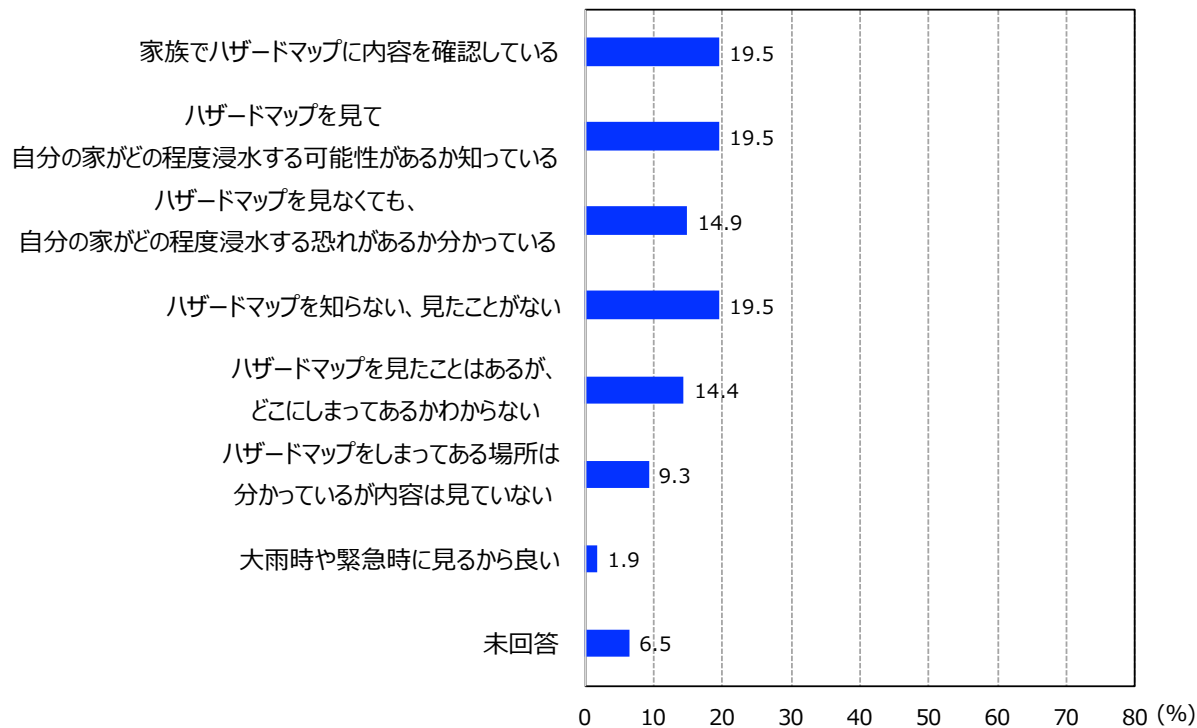


図 2-15 ハザードマップの確認状況

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

図 2-15 に洪水常襲地域（福知山市）における日頃のハザードマップの確認状況を示す。

洪水ハザードマップの認知度について「家族でハザードマップの内容を確認している」、「ハザードマップを見て自分の家がどの程度浸水する可能性があるか知っている」、「ハザードマップを知らない、見たことがない」と回答した住民が約 20%であった。以上より、約 4 割の住民がハザードマップを見たことがあり、約 2 割の住民がハザードマップを見なくても自宅がどの程度浸水する恐れがあるか分かっているということが明らかとなった。また、約 2 割の住民がハザードマップを知らない・見たことがないことが明らかとなった。

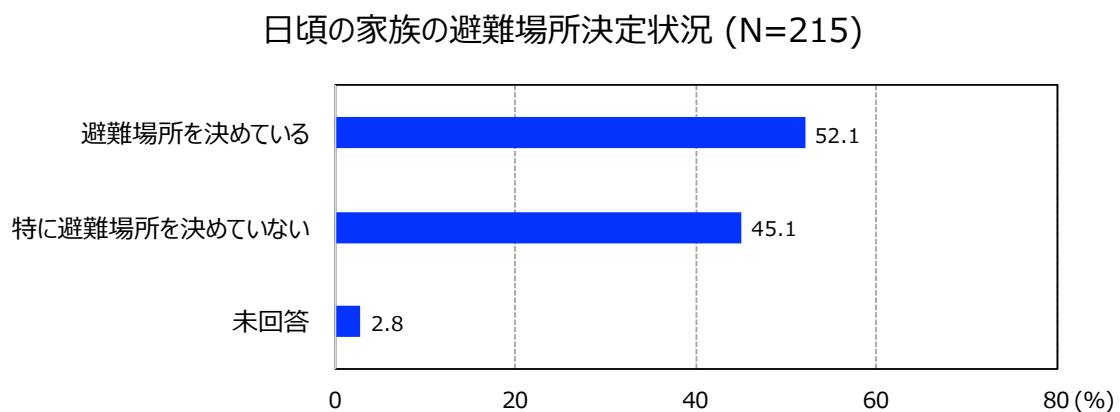


図 2-16 家族の避難場所決定状況

図 2-16 に洪水常襲地域（福知山市）における日頃の家族の避難場所決定状況を示す。

日頃の家族の避難場所決定状況について、「決めている」住民が約 52%であった。つまり、約半数の住民が日頃から家族の避難場所を決めていることが明らかとなった。

2-4-2 平地（常総市）における住民の避難行動と情報取得状況

(1) 浸水状況

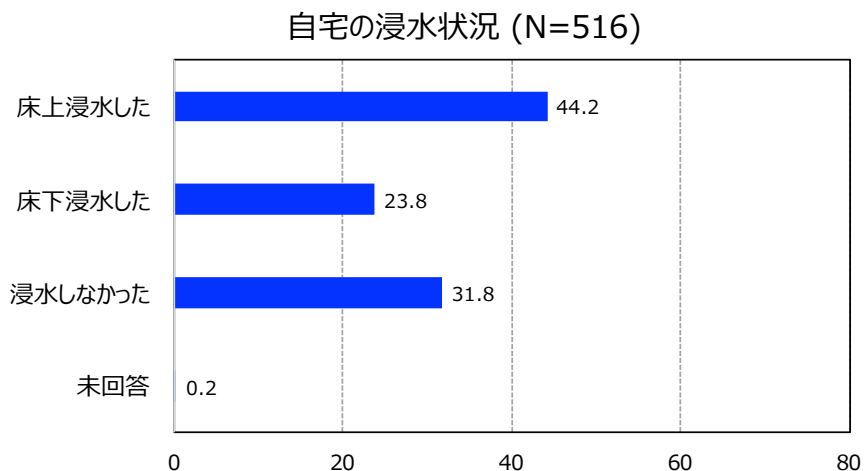


図 2-17 自宅の浸水状況

図 2-17 に平地（常総市）における自宅の浸水状況を示す。

自宅の浸水状況について、「床上浸水した」住民が約 44%、「床下浸水した」住民が約 24%、「浸水しなかった住民」が約 32%であった。以上より、調査を実施した世帯のうち、約 68%で浸水被害があった（約 32%は浸水しなかった）ことが明らかとなった。

(2) 避難状況

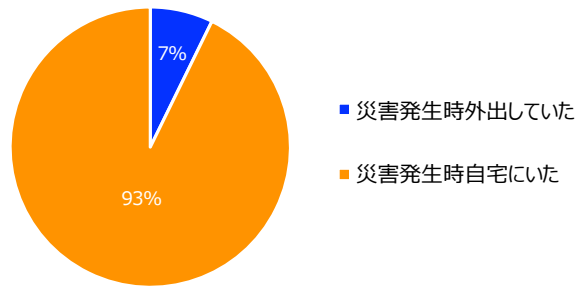
図 2-18 に平地（常総市）における避難状況を示す。

避難状況について、災害時に自宅にいた住民と外出していた住民に分けて整理した。災害発生時に「自宅にいた」住民は約 92%、災害時に「外出していた」住民は約 8%である。次に、災害発生時に「自宅にいた」住民の避難状況について、「避難所等へは避難せずに自宅にいた」住民が約 42%で最も多く、「避難所ではないが自宅以外の安全な場所へ避難した」住民が約 30%、「避難所へ避難した」住民が約 29%であった。以上より、災害発生時に自宅にいた住民の約 58%が自宅以外の安全な場所へ避難した（約 42%が避難せずに自宅にいた）ことが明らかとなった。

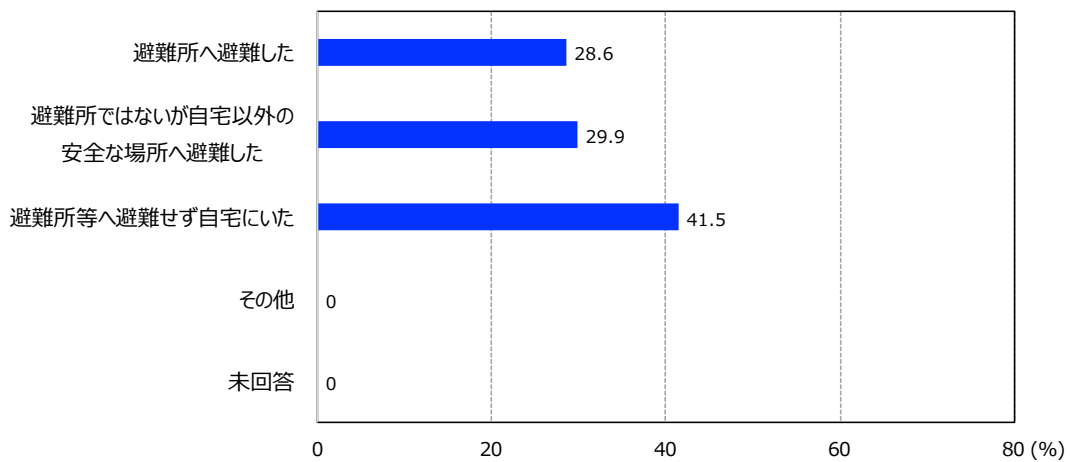
災害時に「外出していた」住民の避難状況について、「自宅に戻ってから避難した」住民が約 29%、「外出先から避難所ではないが自宅以外の安全な場所へ避難した」住民が約 26%、「外出先から避難所へ避難した」住民が約 11%であった。以上より、災害発生時に外出していた住民の約 66%が自宅以外の安全な場所へ避難した（約 24%が自宅に戻りそのまま過ごした）ことが明らかとなった。

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

災害時の所在 (N=516)



災害時に自宅にいた住民の避難状況 (N=489)



災害時に外出していた住民の避難状況 (N=38)

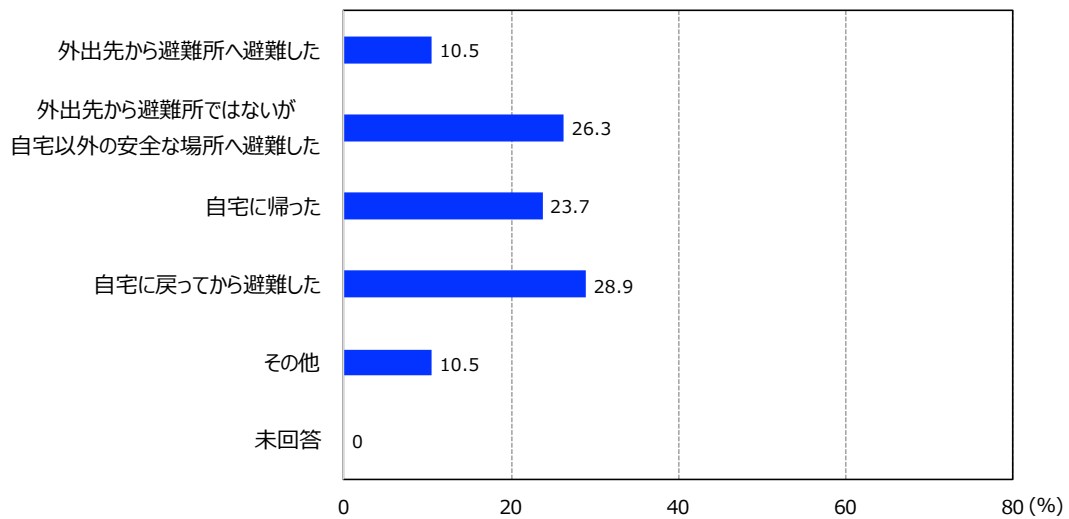


図 2-18 避難状況

(3) 避難のきっかけ

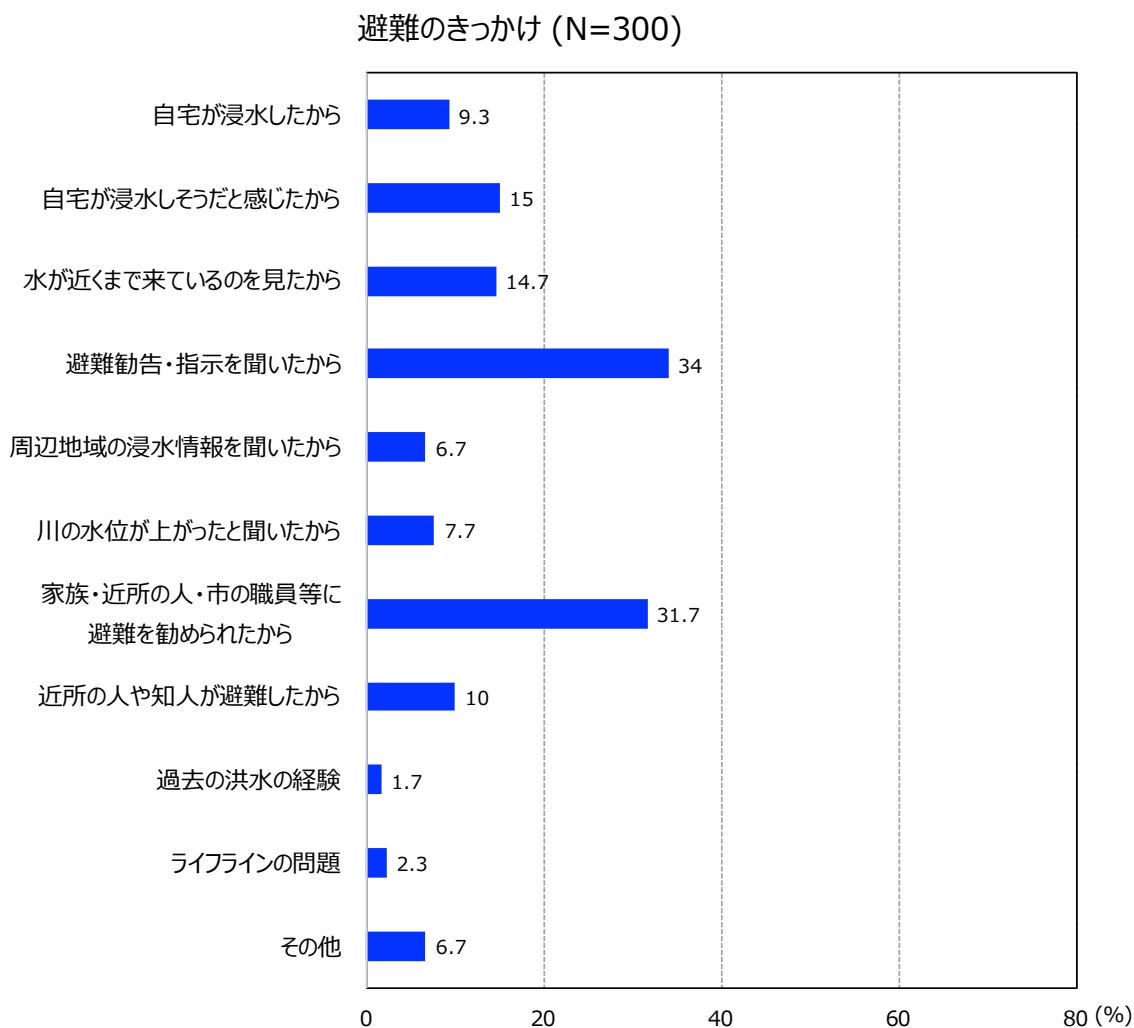


図 2-19 避難のきっかけ

図 2-19 に平地（常総市）における避難のきっかけを示す。

避難したきっかけについて、「避難勧告・避難指示を聞いたから」が約 34%で最も多く、次いで「家族、近所の人、市の職員等に避難を勧められたから」が約 32%であった（母数は避難した住民）。以上より、自発的な判断よりも避難情報や他者からの勧めがきっかけで避難した住民が多いことが明らかとなった。

(4) 避難しなかった理由

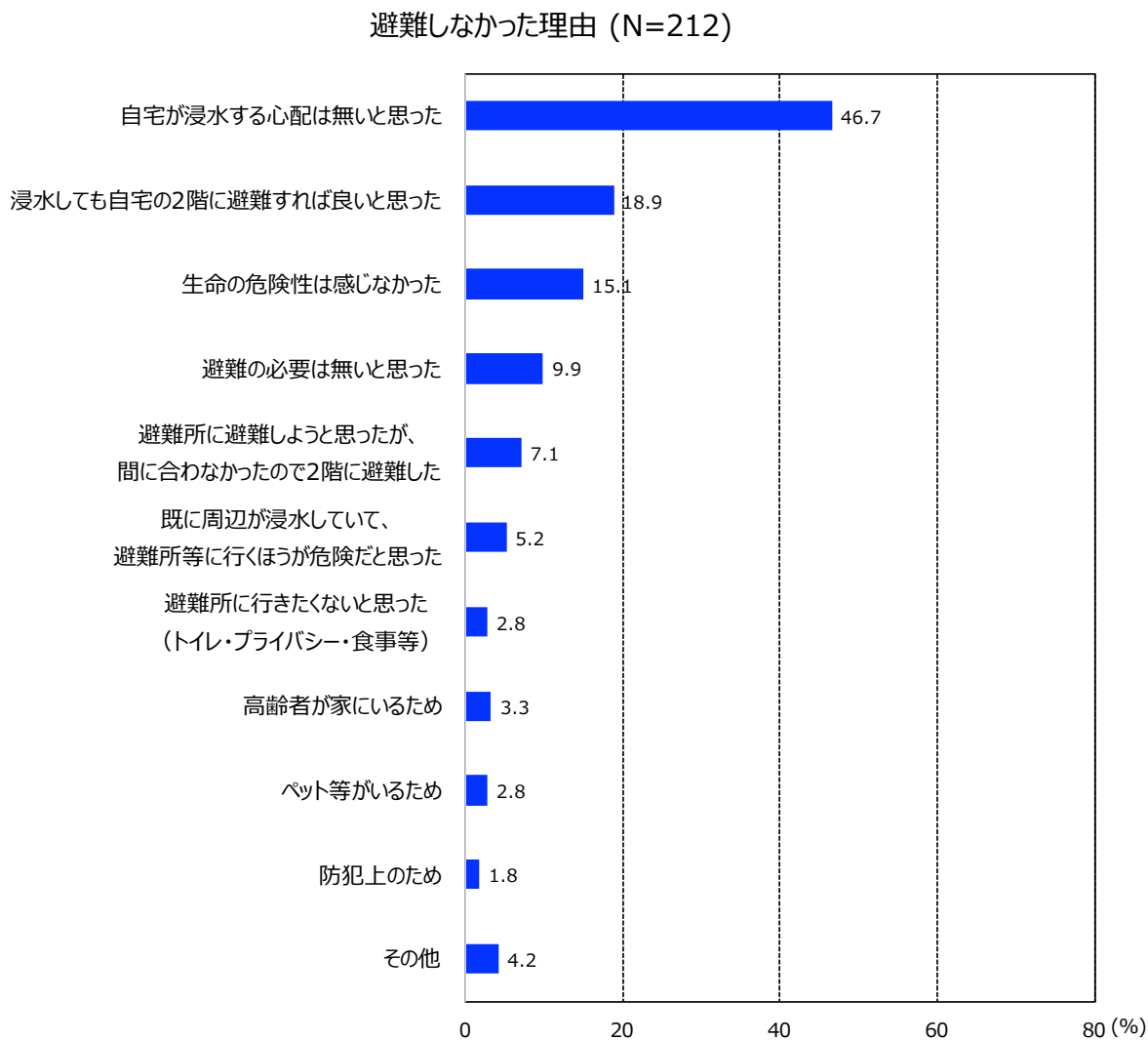


図 2-20 避難しなかった理由

図 2-20 に平地（常総市）における避難しなかった理由を示す。

避難せずに自宅にいた理由について、「自宅が浸水する心配はないと思った」が約 47%で最も多く、次いで「浸水しても2階に避難すれば良いと思った」が約 19%、「生命の危険性は感じなかった」が約 15%であった（母数は避難せずに自宅にいた住民）。以上より、避難せずに自宅にいた住民の約半数が、自宅が浸水しないと思っていたために避難しなかったことが明らかとなった。

(5) 情報取得状況

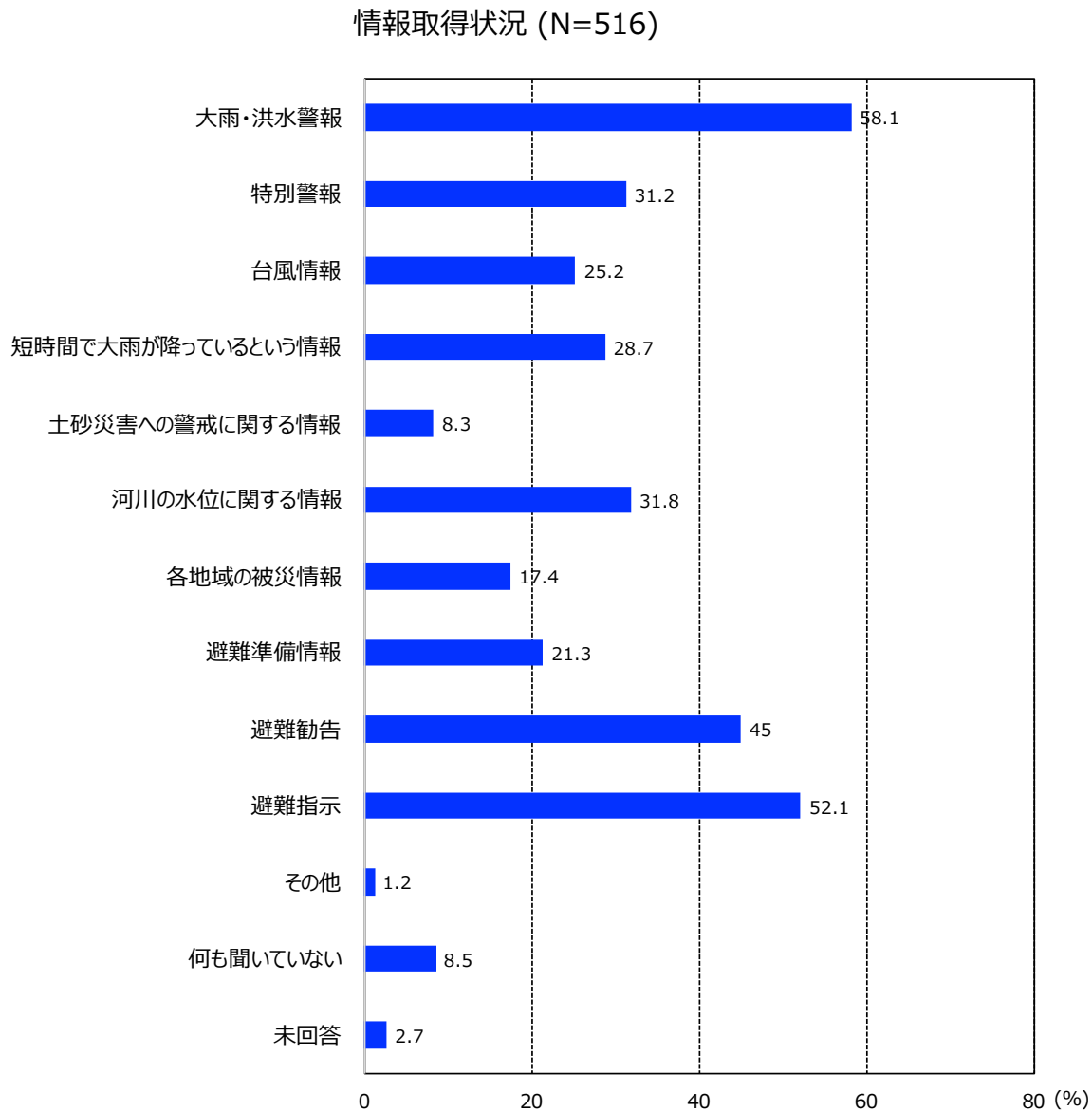


図 2-21 情報取得状況

図 2-21 に平地（常総市）における情報取得状況を示す。

災害時に取得していた情報について、「大雨・洪水警報」が約 58%で最も多く、次いで「避難指示」が約 52%、「避難勧告」が約 45%であった。以上より、住民の約半数が避難指示や避難勧告等の避難情報を取得していたことが明らかとなった。

(6) 避難情報の取得手段

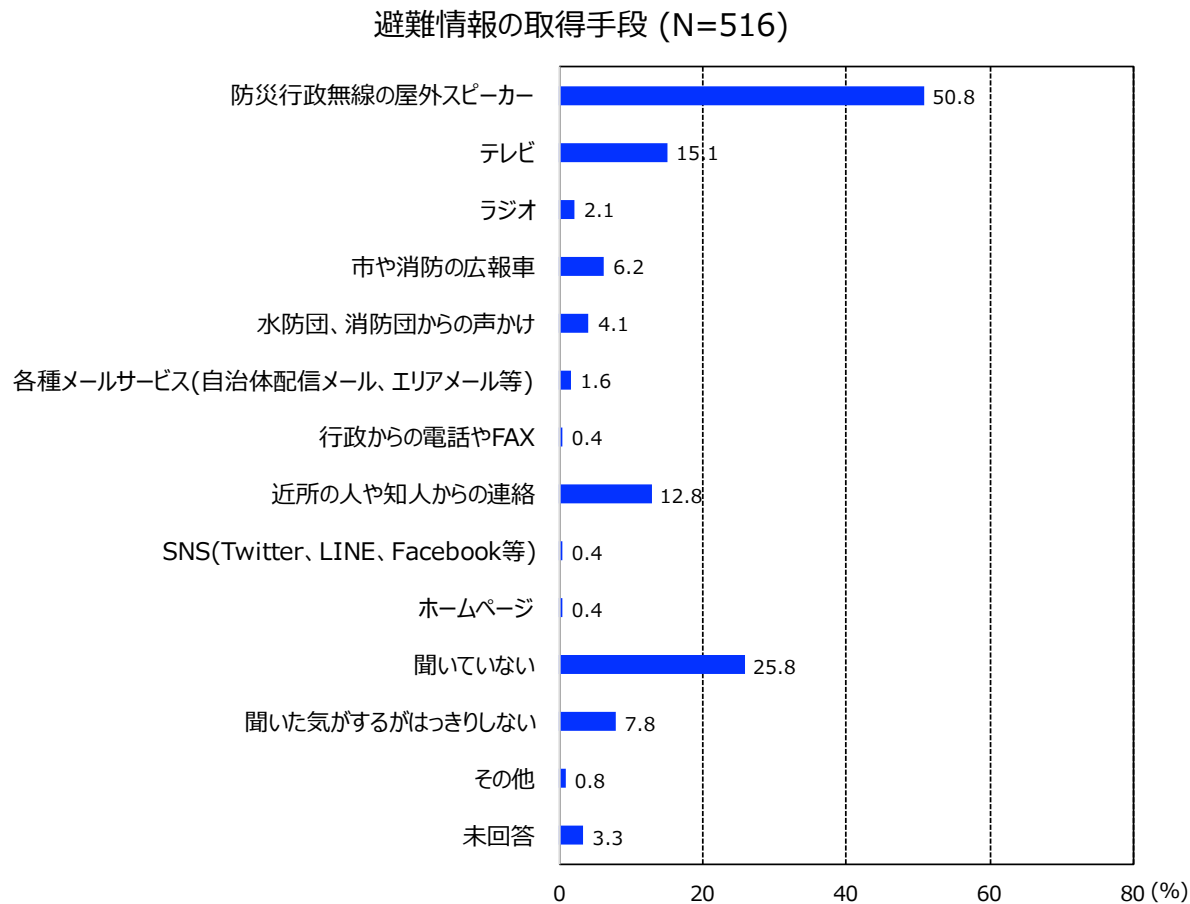


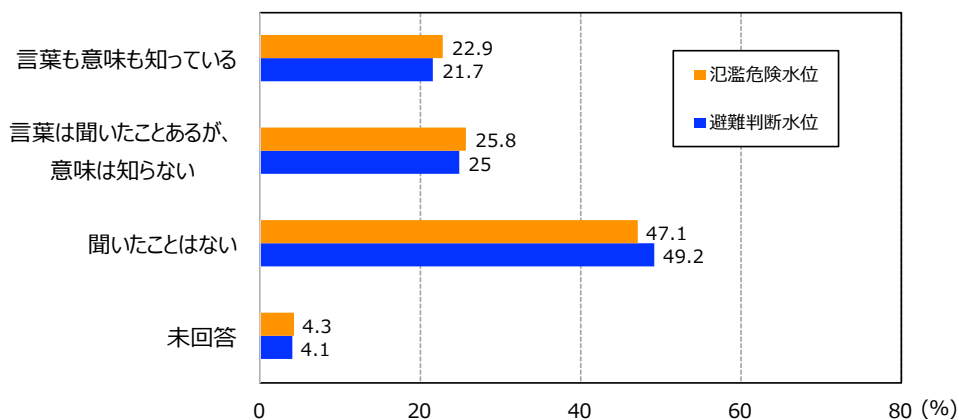
図 2-22 避難情報の取得手段

図 2-22 に平地（常総市）における避難情報の取得手段を示す。

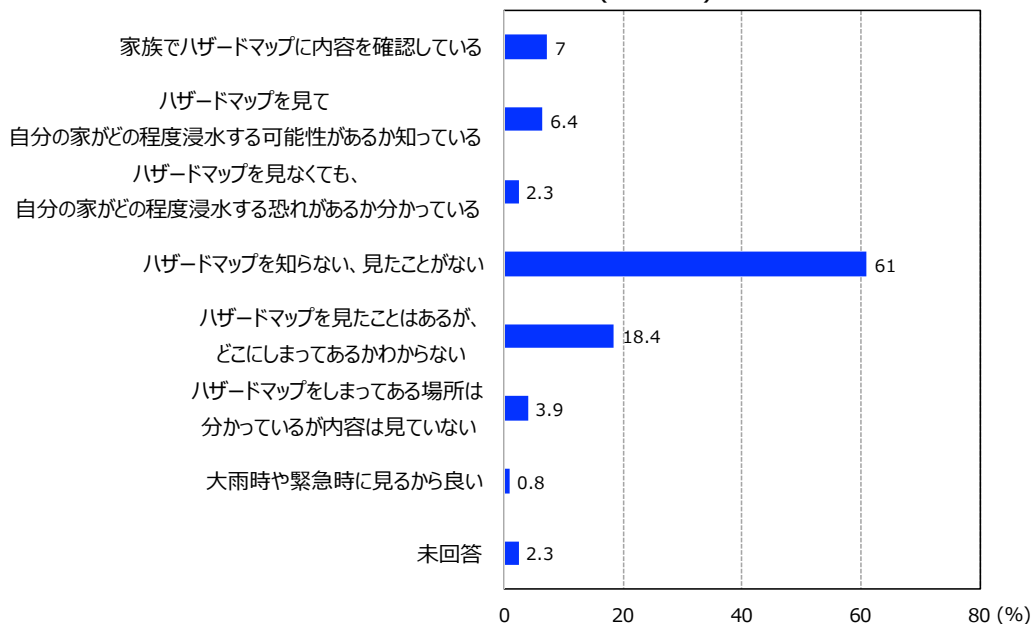
避難情報の取得手段について、「防災行政無線の屋外スピーカー」が約 51%と最も多く、次いで「テレビ」が約 15%、「近所の人や知人からの連絡」が約 13%であった。一方で「聞いていない」と回答も多く、約 26%であった。以上より、住民の約半数が避難指示や避難勧告等の避難情報を防災行政無線のスピーカーから取得していたことが明らかとなった。

(7) 日頃の防災意識

防災に関する用語の認知度 (N=516)



ハザードマップの確認状況 (N=516)



日頃の家族の避難場所決定状況 (N=516)

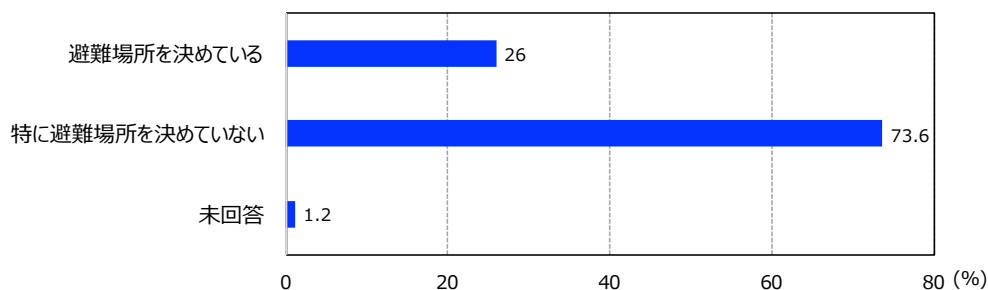


図 2-23 日頃の防災意識

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

図2-23に平地（常総市）における日頃の防災意識を示す。

河川の基準水位の認知度について、「避難判断水位」という言葉を「聞いたことがない」住民が約50%であり、「言葉は聞いたことがあるが意味は知らない」という住民が約25%であった。以上より、約75%の住民が避難判断水位という言葉を理解していないことが明らかとなった。また、「氾濫危険水位」についても避難判断水位とほとんど同様の結果が得られた。

洪水ハザードマップの認知度について「ハザードマップを知らない、見たことがない」という住民が61%で最も多かった。また、「家族でハザードマップの内容を確認している」と回答した住民が7%、「ハザードマップを見て自宅がどの程度浸水する可能性があるか分かっている」と回答した住民が約6%であった。以上より、ほとんど（約6割）の住民が洪水ハザードマップを知らない・見たことがないことが明らかとなった。

日頃の家族の避難場所決定状況について、「特に避難場所は決めていない」住民が約74%であった。つまり、ほとんど（約7割）の住民が日頃から家族の避難場所を決めていないことが明らかとなった。

2-4-3 中山間地における住民の避難行動と情報取得状況

(1) 被災状況

(a) 東峰村

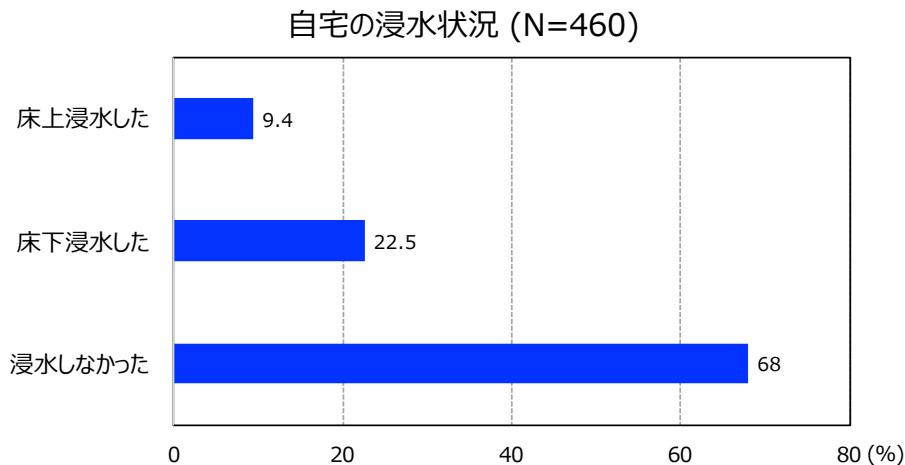


図 2-24 浸水状況 (東峰村)

図 2-24 に中山間地 (東峰村) における浸水状況を示す。

自宅の浸水状況について、「床上浸水した」住民が約 9%、「床下浸水した」住民が約 23%、「浸水しなかった」住民が約 68%であった。以上より、調査を実施した世帯のうち、約 32%で浸水被害があった (約 68%は浸水しなかった)ことが明らかとなった。

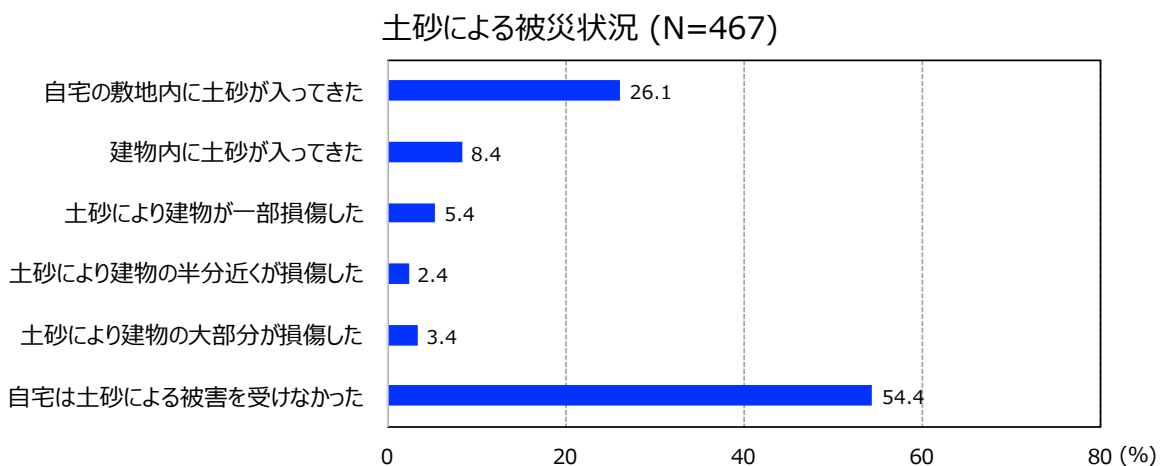


図 2-25 土砂による被災状況 (東峰村)

図 2-25 に中山間地 (東峰村) における土砂による被災状況を示す。

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

自宅の土砂による被災状況について、何らかの「土砂による被害を受けた」住民が約46%で、「土砂による被害を受けなかった」住民が約54%であった。

(b) 朝倉市

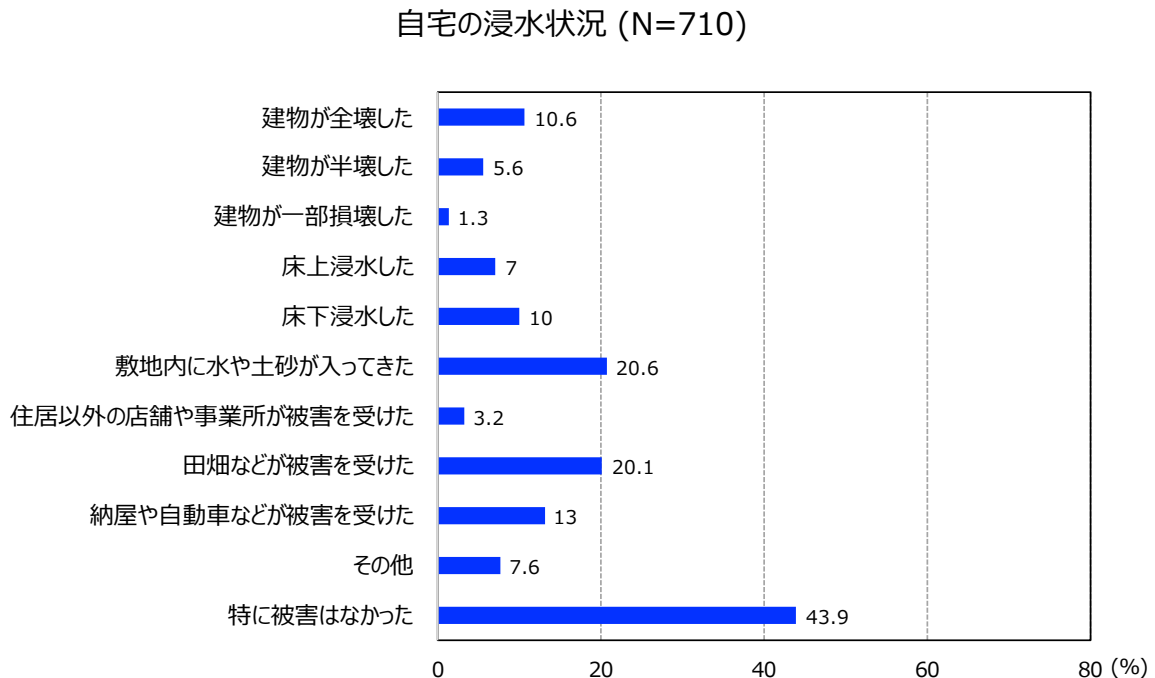


図 2-26 被災状況 (朝倉市)

図 2-26 に中山間地 (朝倉市) における被災状況を示す。

自宅や所有する建物・敷地の被害状況について、「特に被害はなかった」住民が約44%であった。残りの約56%の住民が何らかの被害を受けており、「敷地内に水や土砂が入ってきた」住民が約21%、「田畑等が被害を受けた」住民が約20%である。以上より、調査を実施した世帯のうち、約56%で浸水や土砂による被害があった(約44%は浸水や土砂による被害を受けなかった)ことが明らかとなった。

(2) 避難状況

(a) 東峰村

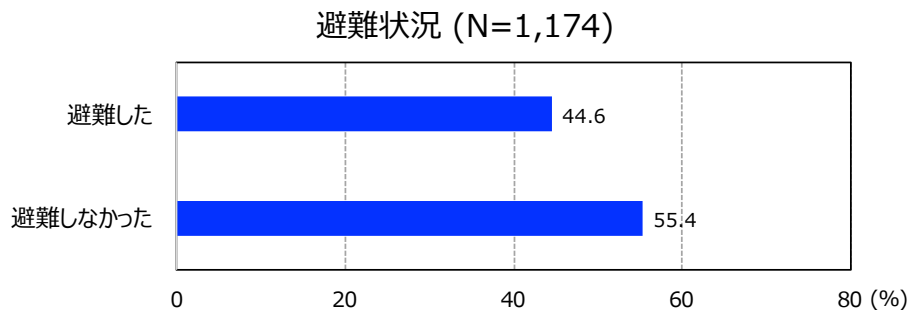


図 2-27 避難状況（東峰村）

図 2-27 に中山間地（東峰村）における避難状況を示す。

避難状況について、「避難所等の安全な場所へ避難した」住民が約 45%で、「避難しなかった」住民が約 55%であった。以上より、約 45%の住民が自宅以外の安全な場所へ避難した（約 55%が避難せずに自宅にいた）ことが明らかとなった。

(b) 朝倉市

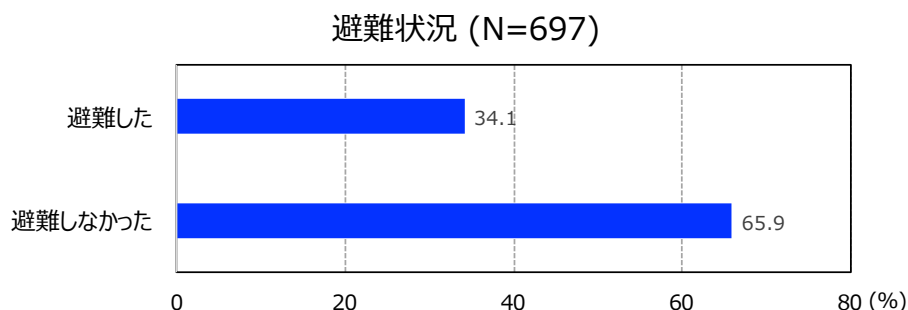


図 2-28 避難状況（朝倉市）

図 2-28 に中山間地（朝倉市）における避難状況を示す。

避難状況について、「避難した」住民が約 34%で、「避難しなかった」住民が約 66%であった。以上より、約 34%の住民が自宅以外の安全な場所へ避難した（約 66%が避難せずに自宅にいた）ことが明らかとなった。

(3) 避難のきっかけ

(a) 東峰村

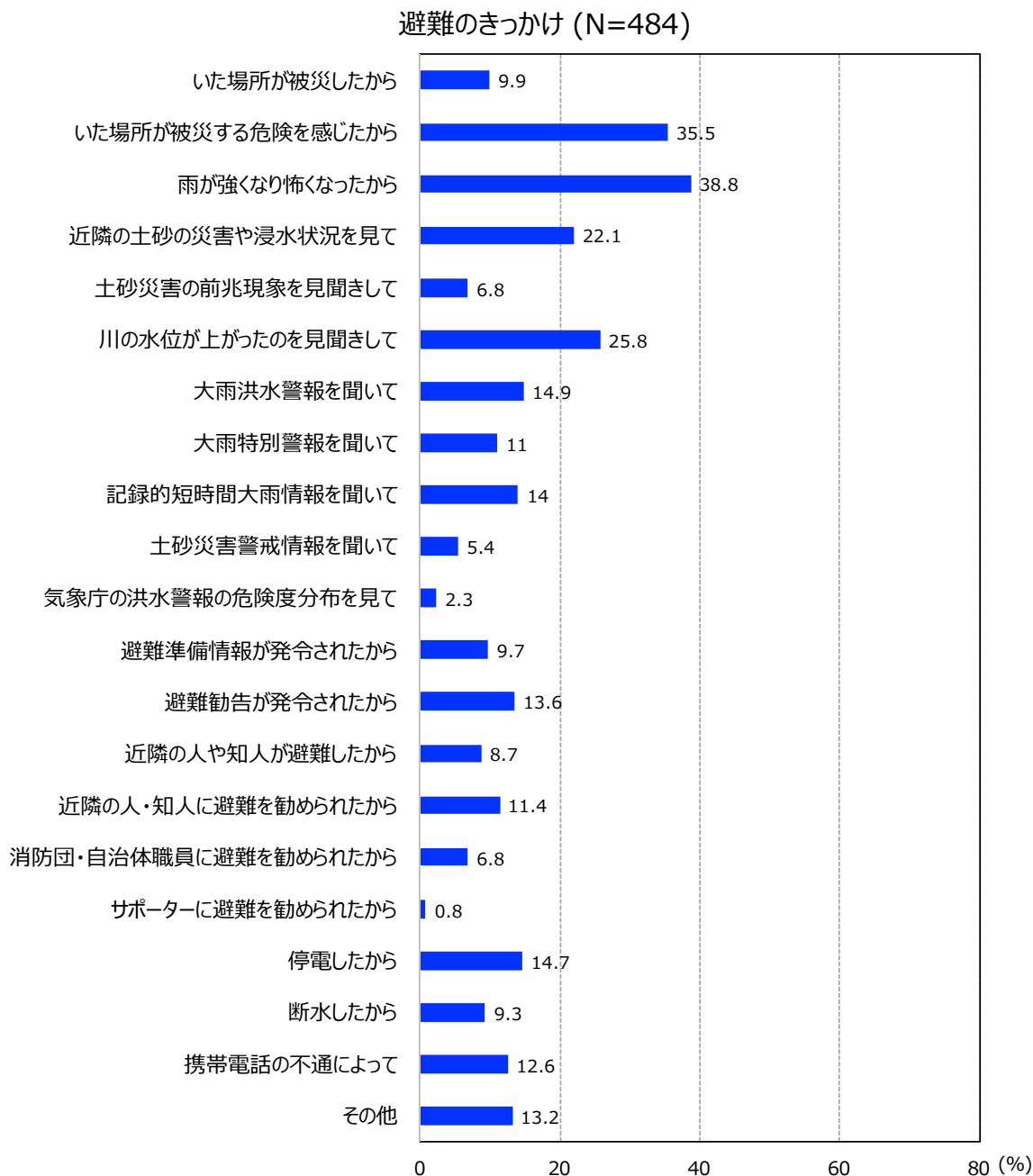


図 2-29 避難のきっかけ (東峰村)

図 2-29 に中山間地 (東峰村) における避難のきっかけを示す。

避難したきっかけについて、「雨が強くなり怖くなったから」が約 39%で最も多く、次いで「いた場所が被災する危険を感じたから」が約 36%であった (母数は避難した

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

住民)。一方で、避難勧告や避難指示等の避難情報を聞いたことが避難のきっかけであった住民は約10%で少なかった。以上より、避難情報よりも周囲の状況から自らの判断で避難した住民が多いことが明らかとなった。

(b) 朝倉市

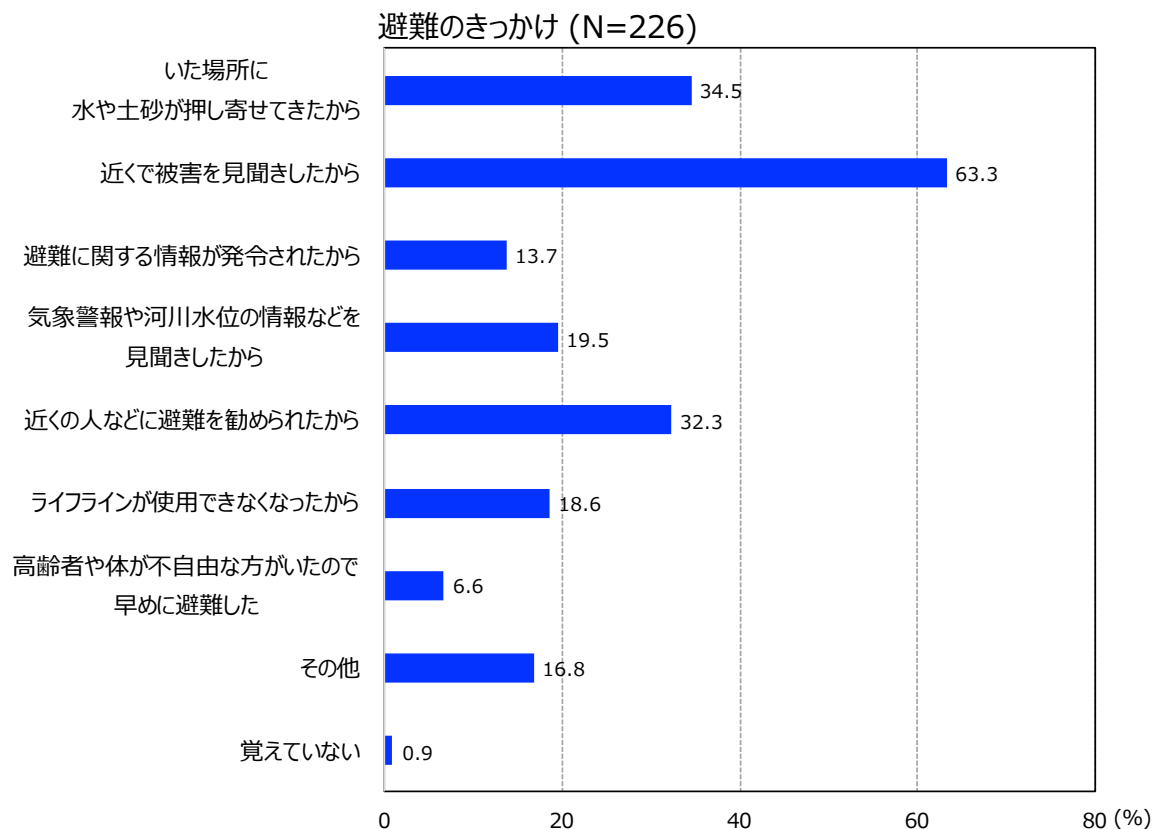


図 2-30 避難のきっかけ (朝倉市)

図 2-30 に中山間地 (朝倉市) における避難のきっかけを示す。

避難したきっかけについて、「近くで被害を見聞きしたから」が約63%で最も多く、次いで「いた場所に水や土砂が押し寄せてきたから」が約35%であった (母数は避難した住民)。一方で、避難勧告や避難指示等の避難情報を聞いたことが避難のきっかけであった住民は約13%で少なかった。以上より、東峰村と同様に避難情報よりも周囲の状況から自らの判断で避難した住民が多いことが明らかとなった。

(4) 避難しなかった理由

(a) 東峰村

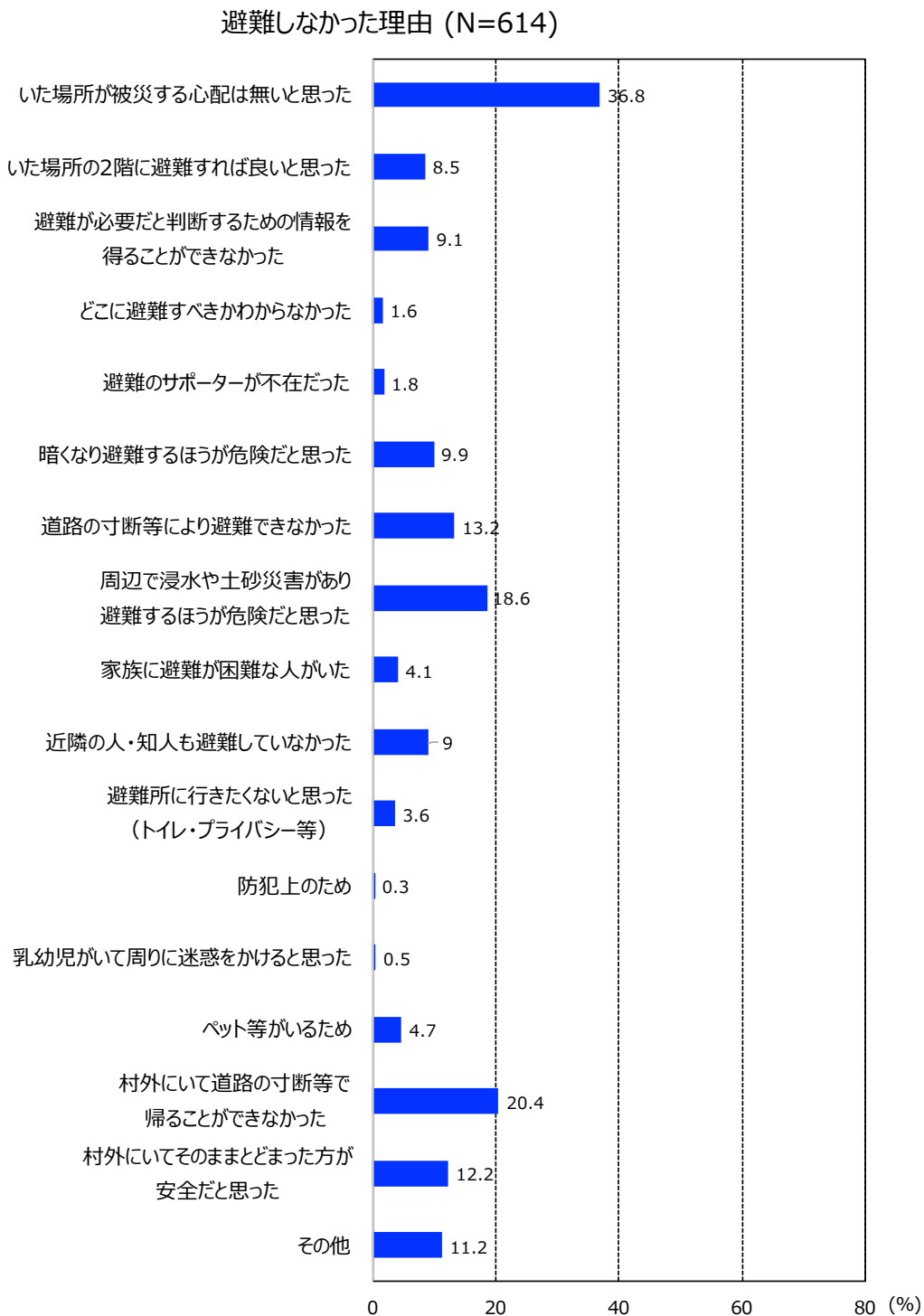


図 2-31 避難しなかった理由 (東峰村)

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

図2-31に中山間地（東峰村）における避難しなかった理由を示す。

避難せずに自宅にいた理由について、「いた場所が被災する心配はないと思った」が約37%で最も多く、次いで「村外にいて道路の寸断等で帰ることができなかった」が約20%、「周辺で浸水や土砂災害があり避難する方が危険だと思った」が約19%であった（母数は避難しなかった住民）。以上より、避難しなかった住民の約4割が、自宅が被災する心配はないと思っていたために避難しなかったことが明らかとなった。

(b) 朝倉市

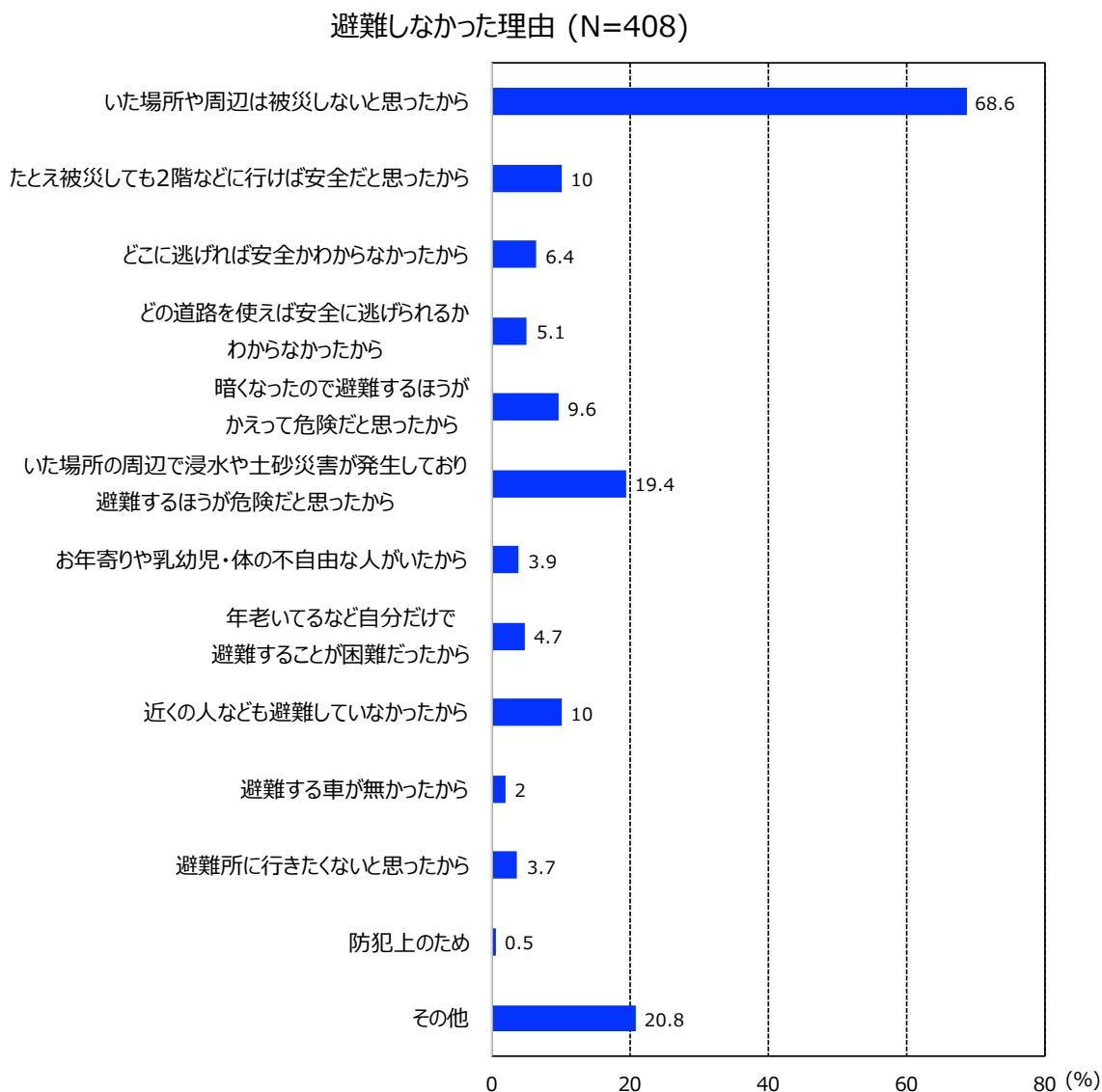


図2-32 避難しなかった理由（朝倉市）

図2-32に中山間地（朝倉市）における避難しなかった理由を示す。

避難せずに自宅にいた理由について、「いた場所や周辺は被災しないと思った」が約69%で最も多く、次いで「いた場所の周辺で浸水や土砂災害が発生しており避難する方が危険だと思った」が約19%であった（母数は避難しなかった住民）。以上より、避難しなかった住民の約7割が、自宅が被災する心配はないと思っていたために避難しなかったことが明らかとなった。

(5) 情報取得状況

(a) 東峰村

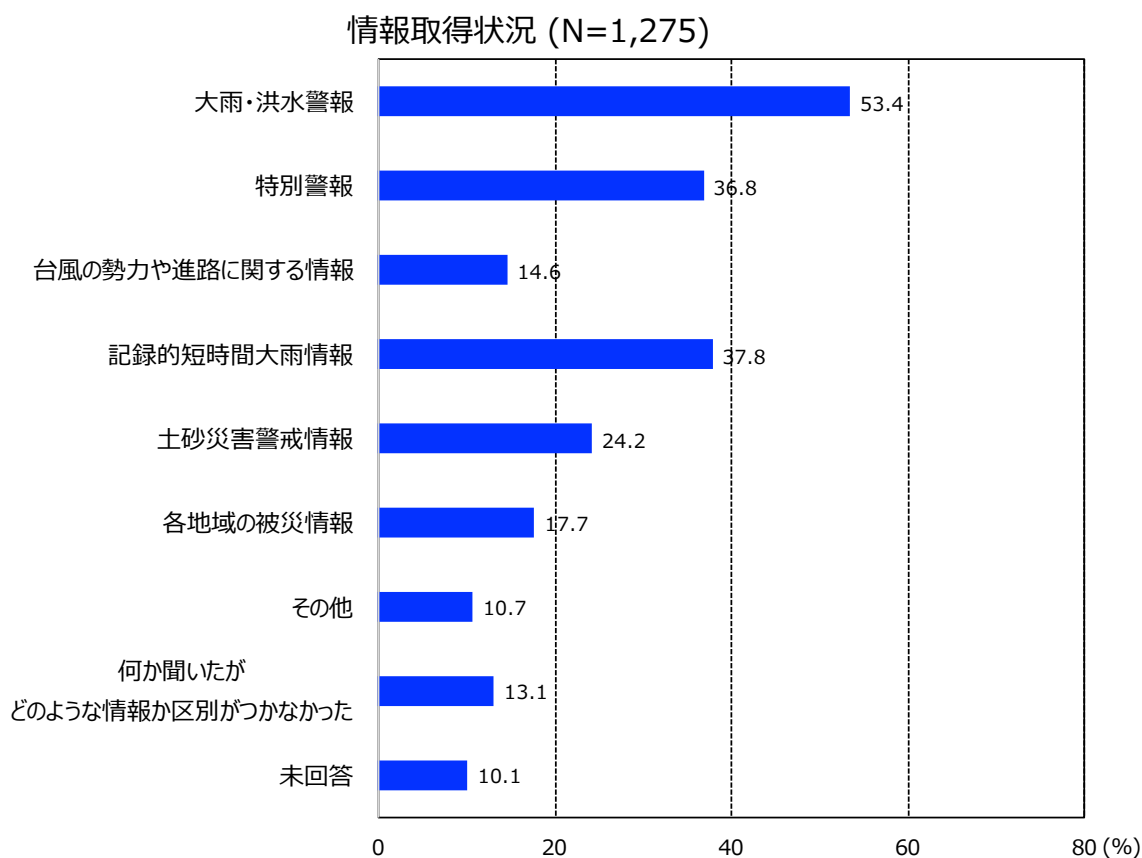


図2-33 情報取得状況（東峰村）

図2-33に中山間地（東峰村）における情報取得状況を示す。

災害時に取得していた情報について、「大雨・洪水警報」が約53%で最も多く、次いで「記録的短時間大雨警報」が約38%、「大雨特別警報」が約37%であった。また、「避難準備情報」および「避難勧告」に気づいた住民はそれぞれ約41%と約42%であった。以上より、住民の約半数が大雨・洪水警報を取得し約4割が避難情報である避

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

難勧告や避難準備情報を取得していたことが明らかとなった。

(b) 朝倉市

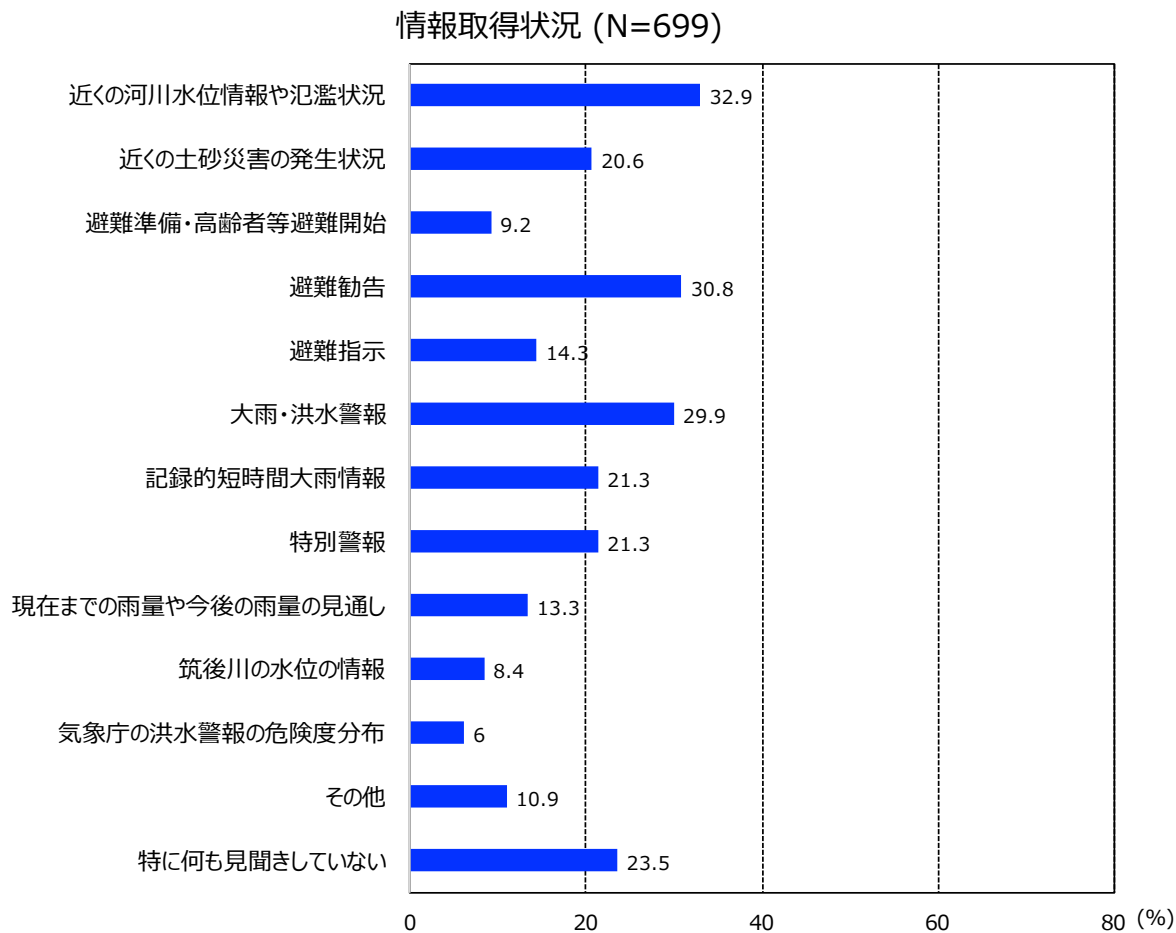


図 2-34 情報取得状況 (朝倉市)

図 2-34 に中山間地 (朝倉市) における情報取得状況を示す。

災害時に取得していた情報について、「近くの河川水位上昇や氾濫の状況」が約 33% で最も多く、次いで「避難勧告」が約 31%、「大雨洪水警報」が約 30%であった。また、「特に何も見聞きしていない」住民が約 24%であった。以上より、多くの住民が近くの河川水位や氾濫の状況に関する情報を取得していたことが明らかとなった。

(6) 避難情報の取得手段

(a) 東峰村

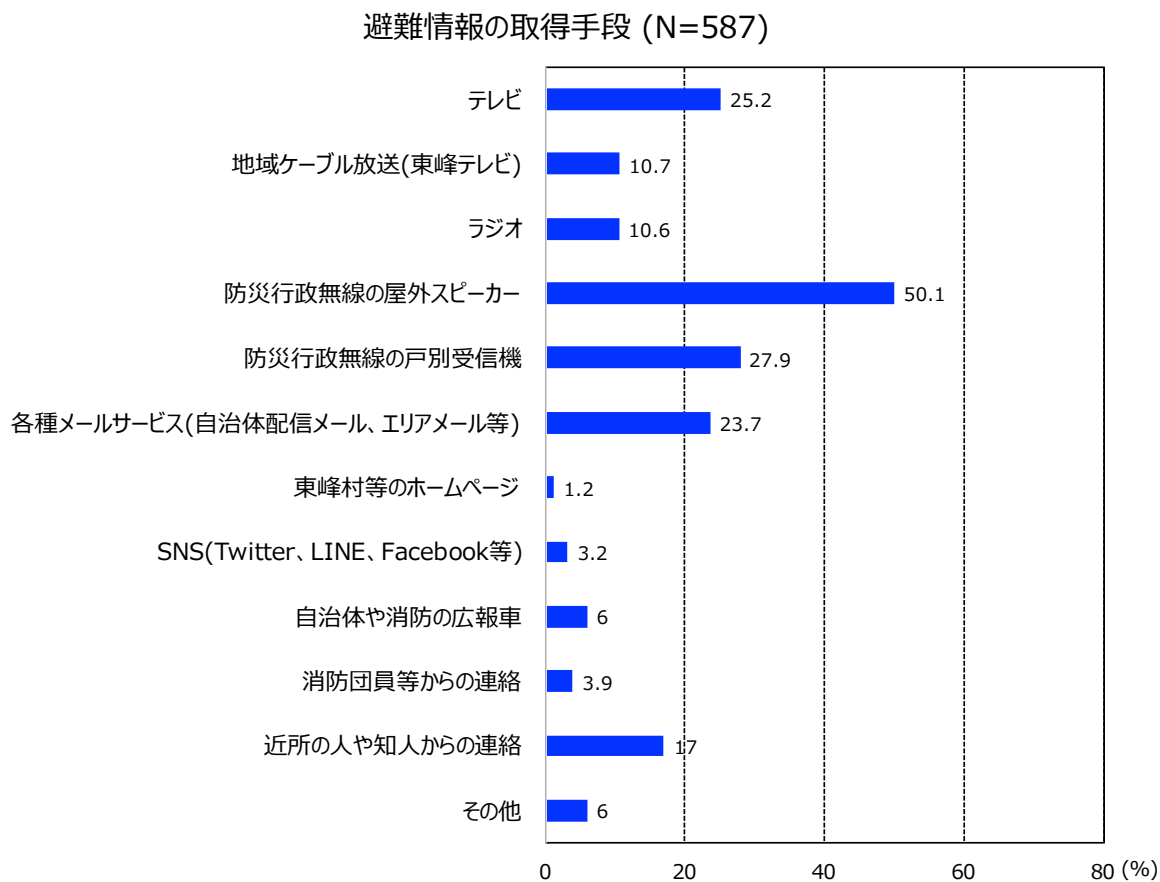


図 2-35 避難情報取得手段 (東峰村)

図 2-35 に中山間地 (東峰村) における避難情報取得手段を示す。

避難情報の取得手段について、「防災行政無線の屋外スピーカー」が約 50%と最も多く、次いで「防災行政無線の戸別受信機」が約 28%、「テレビ」が約 25%であった。以上より、住民の約半数が避難情報である避難勧告と避難準備情報を防災行政無線のスピーカーから取得していたことが明らかとなった。

(b) 朝倉市

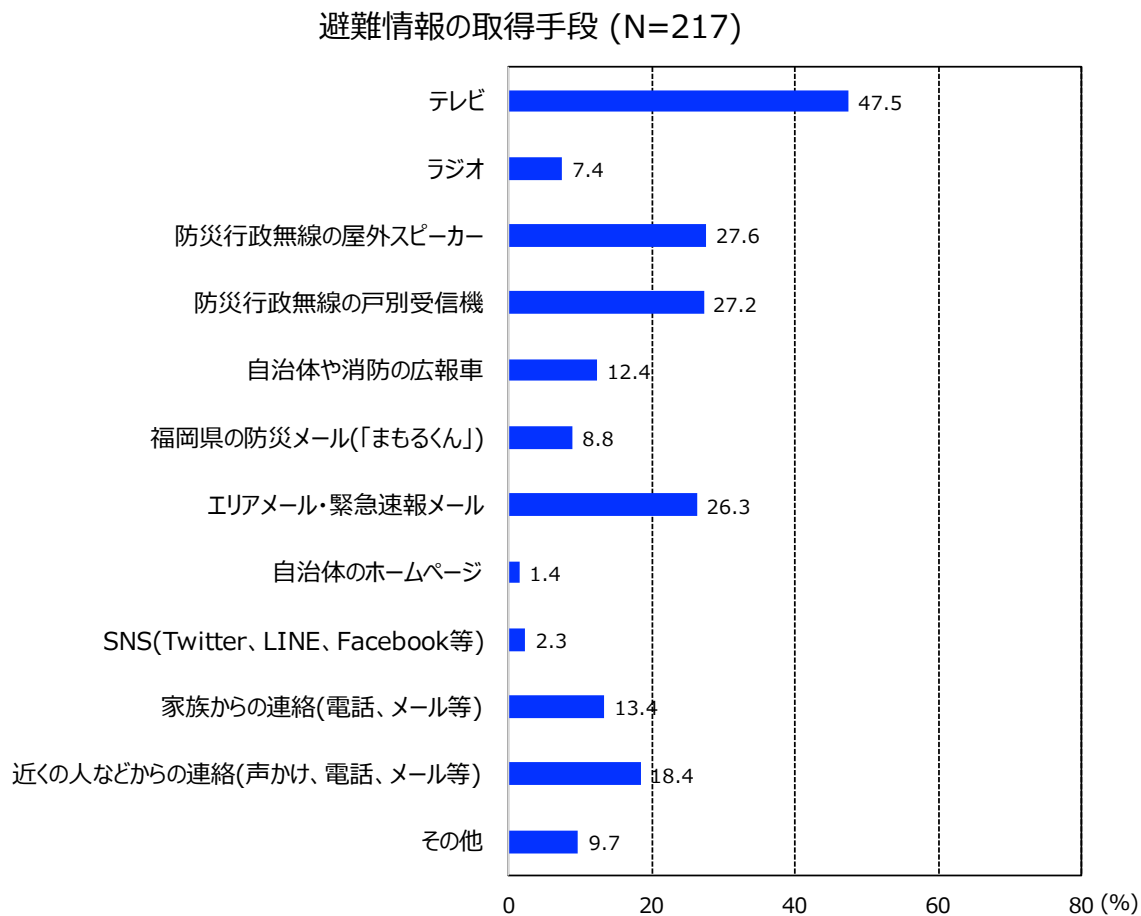


図 2-36 避難情報取得手段 (朝倉市)

図 2-36 に中山間地 (朝倉市) における避難情報取得手段を示す。

避難情報の取得手段について、「テレビ」が約 48%と最も多く、次いで「防災行政無線の屋外スピーカー」が約 28%、「防災行政無線の戸別受信機」が約 25%であった。以上より、住民の約半数が避難情報である避難勧告と避難準備情報をテレビから取得していたことが明らかとなった。

(7) 日頃の防災意識

(a) 東峰村

土砂災害ハザードマップの確認状況 (N=1,035)

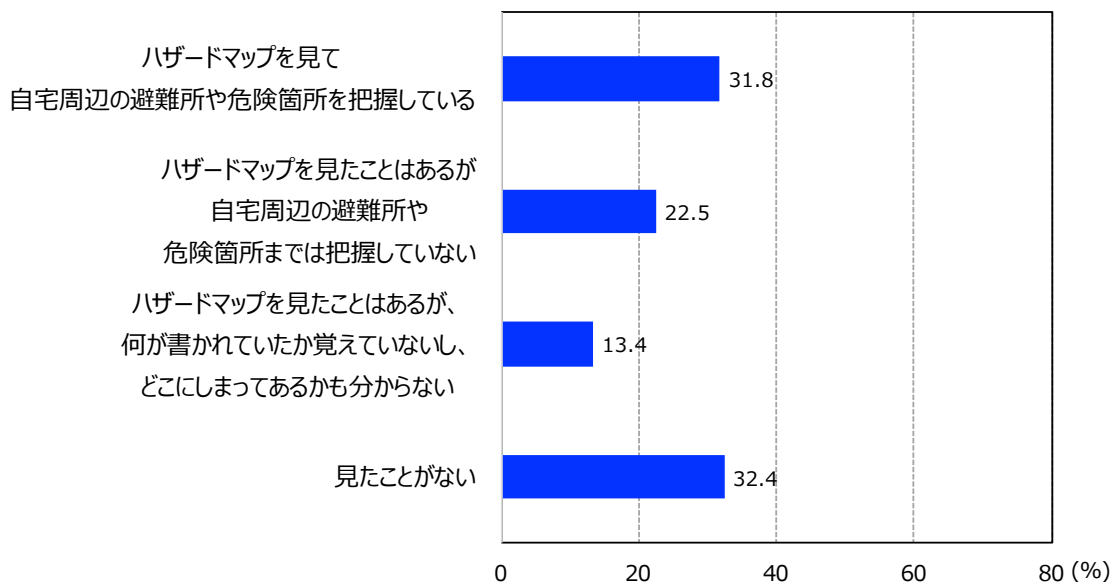


図 2-37 土砂災害ハザードマップの認知度 (東峰村)

土砂災害ハザードマップの認知度について「ハザードマップを知らない、見たことがない」という住民が約 32%で最も多かった。また、「ハザードマップを見て自宅周辺の避難所や危険箇所を把握している」と回答した住民が約 32%、「ハザードマップを見たことはあるが自宅周辺の避難所や危険箇所までは把握していない」と回答した住民が約 23%であった。以上より、約 7 割の住民が土砂災害ハザードマップを見たことがある (約 3 割が土砂災害ハザードマップを見たことがない)ことが明らかとなった。

(b) 朝倉市

洪水ハザードマップの確認状況 (N=675)

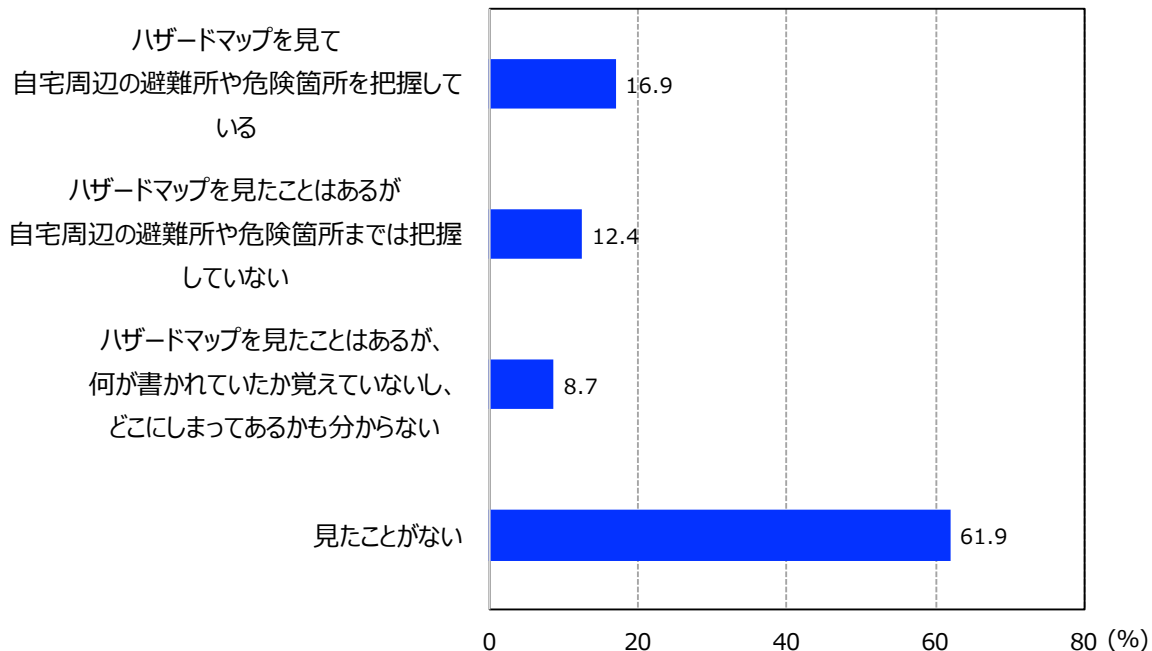


図 2-38 洪水ハザードマップの認知度 (朝倉市)

洪水ハザードマップの認知度について「ハザードマップを見たことがない」という住民が約 62%で最も多かった。また、「ハザードマップを見たことがあり、自宅近くの危険箇所を把握している」と回答した住民が約 17%、「ハザードマップを見たことはあるが自宅近くの危険箇所までは把握していない」と回答した住民が約 12%であった。以上より、約 6 割の住民が洪水ハザードマップを見たことがない（約 4 割が洪水ハザードマップを見たことがある）ことが明らかとなった。

自主防災マップの確認状況 (N=675)

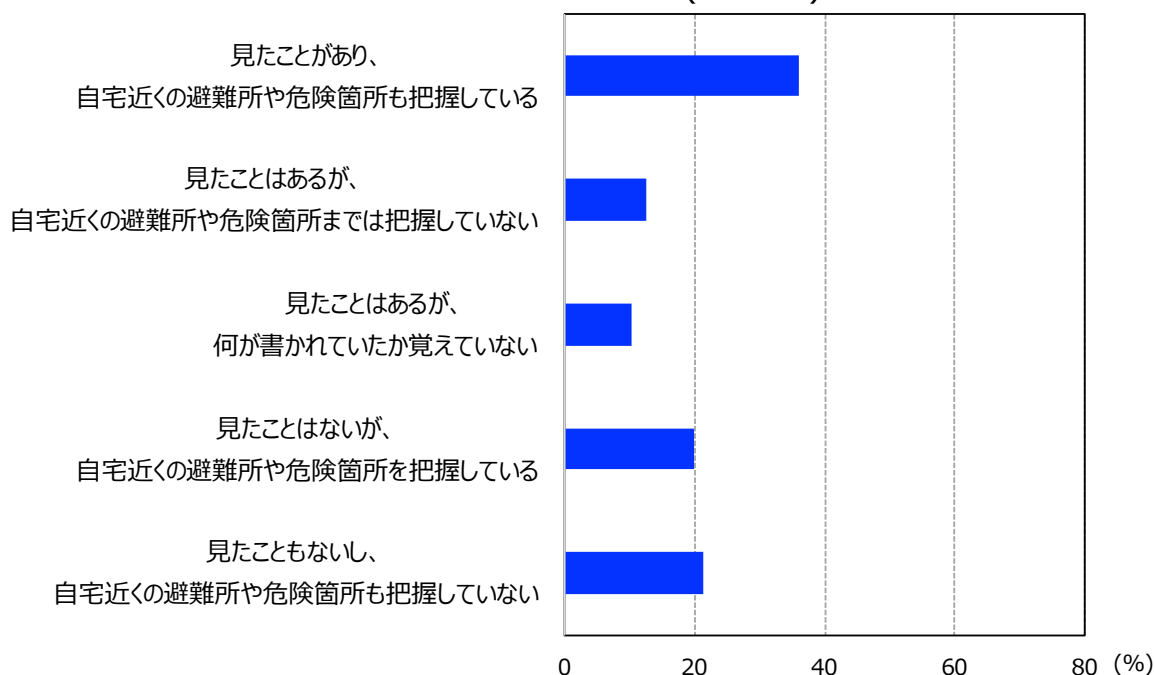


図 2-39 自主防災マップの認知度 (朝倉市)

一方、水害・土砂災害を対象とした自主防災マップの認知度について「見たことがあり、自宅近くの避難所や危険箇所を把握している」という住民が36%で最も多かった。また、「見たことはあるが、自宅近くの避難所や危険箇所まで把握していない」と回答した住民が約13%、「見たことはあるが何が書かれていたか覚えていない」と回答した住民が約10%であった。以上より、約6割の住民が自主防災マップを見たことがある（約4割が自主防災マップを見たことがない）ことが明らかとなった。

2-5 まとめ

本章では、災害の種類や地域特性の異なる3つの地域において、洪水時の避難状況および浸水状況と情報の取得状況、日頃の防災意識等に関する調査を実施した。対象地域は、①2013、2014年と2年続けて由良川が氾濫するなど、1945年から2017年までの約70年間で13回浸水被害が生じている洪水常襲地域である京都府福知山市、②2015年9月関東・東北豪雨において鬼怒川の溢水および堤防の決壊により市内の約3分の1の面積が浸水し、逃げ遅れた住民約4,300人（内ヘリコプターで約1,300人）が救助された茨城県常総市、③2017年九州北部豪雨において、山腹崩壊・土石流による直接的な被害に加えて、崩壊・土石流による土砂流出や中下流域河道において激しい流路変動や水・土砂・流木の氾濫が引き起こされ42人が亡くなった、中山間地で

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

ある福岡県朝倉市・東峰村である。

その結果、①洪水常襲地域では、周囲が浸水する前の早いタイミングで「自宅が浸水しそうだから」という自発的な判断で避難した住民が多いこと、②平地では、「避難勧告や避難指示を聞いたから」や「家族、近所の人、市の職員等に避難を勧められたから」という避難情報や他者からの勧めで避難した住民が多いこと、③中山間地では、「雨が強くなったから」や「いた場所が被災する危険を感じたから」といった情報ではなく周囲の状況の変化で避難した住民が多いことを明らかにした。つまり、避難のきっかけは地域の特性により異なることを明らかにした。また、避難せずに自宅で過ごした理由はどの地域でも共通で「自宅が被災する心配はないと思った」からであることを明らかにした。さらに、住民自らが作成に参画した「自主防災マップ」の認知率は、行政が作成したハザードマップの認知率より高いことを明らかにした。

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

参考文献

- 1) 布村明彦：水害発生時等の情報の収集・伝達・活用，水循環 貯留と浸透，Vol.106, pp.4-8, 2017
- 2) 長尾正志，橋本健二：水害への住民意識と避難行動の統計的分析-濃尾臨海低平地でのアンケート調査による研究-，自然災害科学，Vol.5, No.2, pp.19-34, 1986.
- 3) 吉本俊裕，笛田俊治，須見徹太郎：氾濫特性の異なる流域での避難行動，土木学会水工学論文集，Vol.37, pp.233-238, 1993.
- 4) 浅田純作，片田敏孝，桑沢敬行，及川康：平成10年8月郡山水害における住民避難から見た河川情報に関する考察，土木計画学研究・講演集，Vol.22, No.2, pp.167-170, 1999.
- 5) 片田敏孝，児玉真：2000年東海豪雨災害の進展過程における住民の浸水被害想定の変遷とその対応行動への影響，土木計画学研究・講演集，Vol.24, No.2, pp.929-932, 2001.
- 6) 廣井脩：土砂災害と避難行動，砂防学会誌，Vol.51, No.5, pp.64-71, 1999.
- 7) 千葉幹，片山祐二，三木洋一，高梨和行：土砂災害時の警戒避難に関する情報共有について，砂防学会誌，Vol.60, No.6, pp.33-37, 2008.
- 8) 国土交通省福知山河川国道事務所：由良川主要洪水記録，http://www.kkr.mlit.go.jp/fukuchiyama/river/shiryoukan/kouzui_kiroku.html（2018年12月1日閲覧）。
- 9) 国土交通省福知山河川国道事務所：由良川風土記，pp.20-23, 2004.
- 10) 福知山市：平成25年台風第18号 災害の記録，p.21, 2014.
- 11) 福知山市：平成26年8月豪雨 災害の記録，p.8, 2015.
- 12) 福知山市：福知山市行政区別人口世帯集計表（平成28年2月末現在），2016.
- 13) 国土交通省関東地方整備局：第2回鬼怒川・小貝川有識者会議資料，2006.
- 14) 常総市：常総市平成27年度地区別世帯数・人口集計表（平成27年10月1日現在），2015.
- 15) 東峰村：東峰村の概要，http://www1.vill.toho.fukuoka.jp/info/prev.asp?fol_id=4783（2018年12月1日閲覧）。
- 16) 京都大学防災研究所：2017年九州北豪雨災害調査報告書，2018.
- 17) 東峰村：統計情報（2018年11月末現在），2018.
- 18) 朝倉市：住民基本台帳による人口（平成29年度），2018.

第2章 水害時の住民の避難行動と情報取得状況に関する実態調査

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

3-1 概説

末次¹⁾は、水害時には「状況がよく分からなくても、何か危機的な様子が伺える」場合には避難行動を開始するのが危機回避の鉄則であり、危機的状況の予兆を把握する必要があると指摘している。また、洪水の水位上昇速度に着目すると、大河川では3m/hour以上、中小河川で2m/10minutes以上が危機的状況の予兆の1つの目安であるとされている。しかしこれらの予兆は流域面積や河床勾配等によって異なるため、その流域に応じて洪水発生の予兆には様々な特性がある。つまり、住民の避難行動のきっかけとなる要因についてもその流域に応じて異なることが推測される。中村²⁾は①危険な場所の人が、②危険が襲う前に、③安全な方法で、④安全な場所に、⑤危険が去るまで移動することを「避難」と定義している。さらに、水害時には「なぜ避難しなかったか」という視点で避難行動を分析すると、「雨」「寒い」「濡れる」から外に出たくないという通常の流れで人は行動しており、住民は根本的に避難しないことが指摘されている³⁾。前述のように、突発的に発生する地震や津波と異なり、河川洪水は、降雨、河川への流出・流下、氾濫という順を追って被害が発生する進行性の災害であるために、どういう状況になったら危険であるかを認知しづらいという特徴がある。一方で、事前にある程度被害の発生を予測できる雨量分布や河川水位の変化等の水文情報や避難指示や避難勧告等の避難情報が複数あり、降雨から災害発生までのリードタイムに的確な行動をとることができれば、被害を軽減することは可能であり、最低限人命を守ることができると考えられる。そこで、本章では第2章で実施した調査において、中山間地と比較して避難に要するためのリードタイムが長い平地に

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

においては、その氾濫域内においても避難行動へ及ぼす要因について地域特性があると考え、常総市における調査結果について詳細に分析を行った。

3-2 住民の避難行動へ影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性

第2章で実施した調査において、洪水常襲地域，平地，中山間地の住民の避難のきっかけを表3-1に示す。

表3-1 各地域における避難のきっかけと避難せず自宅で過ごした理由

地域	避難した人の割合・きっかけ	避難しなかった理由	ハザードマップ確認状況
洪水常襲地域 (福知山市)	2割が避難 浸水する前の早いタイミングで避難	浸水しないと 思った	確認している or 確認しなくても 浸水リスク知っている
平地 (常総市)	6割が避難 情報がきっかけで避難	浸水しないと 思った	6割が知らない
中山間地 (東峰村・朝倉市)	3~4割が避難 周囲の状況の変化が きっかけで避難	被災しないと 思った	6割が知らない 自主防災マップは 見ている

表3-1より、洪水常襲地域である福知山市における避難のきっかけは「自宅が浸水しそうだから」という自発的な判断であり、平地である常総市における避難のきっかけは「避難勧告や避難指示を聞いたから」や「家族、近所の人、市の職員等に避難を勧められたから」という避難情報や他者からの勧めであることがわかった。さらに、中山間地である東峰村・朝倉市における避難のきっかけは「雨が強くなったから」や「いた場所が被災する危険を感じたから」といった周囲の状況の変化であることがわかった。また、避難せずに自宅で過ごした理由については、どの地域においても同様に「自宅が浸水する心配はないと思ったから」が最も多かった。

3-3 平地における避難行動へ影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性

第2章では地域特性の異なる3つの流域において避難行動に関する調査結果の比較を行ったが、中山間地と比べて避難に要するためのリードタイムが長い平地においては、その氾濫域内においても避難行動へ及ぼす要因について地域特性があると考え、本章では常総市における調査結果について詳細に分析を行った。

3-3-1 地域分類

平地における住民の避難行動に対する地域特性と水文情報及び避難情報が及ぼした効果について分析を行うため、常総市で実施したヒアリング調査実施範囲を、**図 3-1**に示すように地域 A：溢水箇所周辺（原宿・小保川・本石下・若宮戸）、地域 B：鬼怒川堤防決壊箇所周辺（新石下・東野原・三坂町・三坂新田・大房・山口・平内・収納谷）、地域 C：鬼怒川堤防決壊箇所と水海道市街地の間（沖新田町・中妻町・中山町）、地域 D：水海道市街地（相野谷町・森下町・橋本町・小山戸町・淵頭町・本町・栄町・宝町・山田町・諏訪町・高野町・天満町・川又町）の 4 つの地域に分類した。ここで分類した 4 つの地域には以下のような特徴がある。地域 A は、自然堤防が掘削されソーラーパネルが設置されており住民が周辺地域の浸水リスクを容易に想像できる。地域 B 及び C は堤防から越水が始まっても、堤防決壊がどこで発生するかは不確実であるために浸水する区域を予想しにくい。そして地域 D は鬼怒川の堤防決壊箇所から距離が遠いことに加えて、八間堀川の内水氾濫が住民の避難行動へ影響を及ぼした地域である。

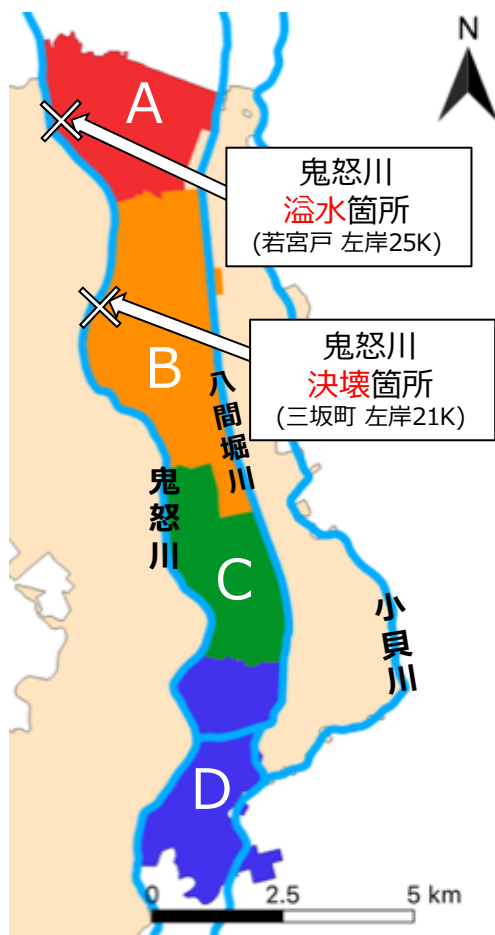


図 3-1 ヒアリング調査を実施した地域の区分図

3-3-2 地域ごとの避難状況

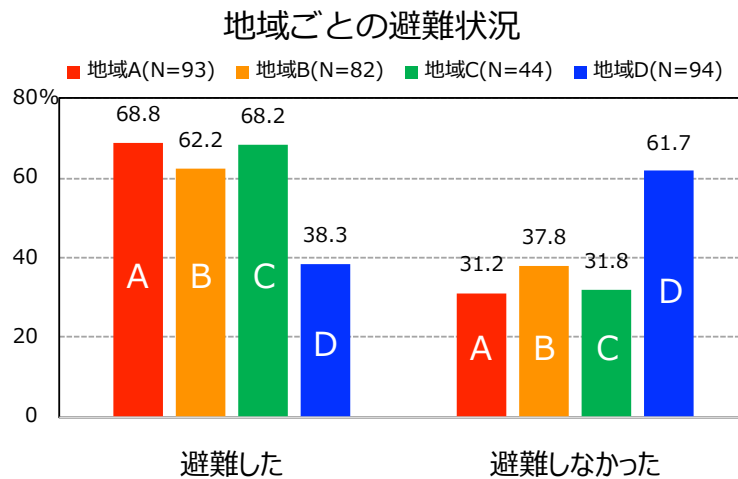


図 3-2 常総市における地域ごとの避難状況

図 3-2 に常総市における地域ごとの避難状況を示す。常総市全体においては、約 59% が避難所等へ避難し、約 41% が避難せずに自宅にいたが、地域ごとに避難状況を整理すると地域 D において避難せずに自宅にいた住民の割合が大きいことがわかる。

3-3-3 地域ごとの避難のきっかけ

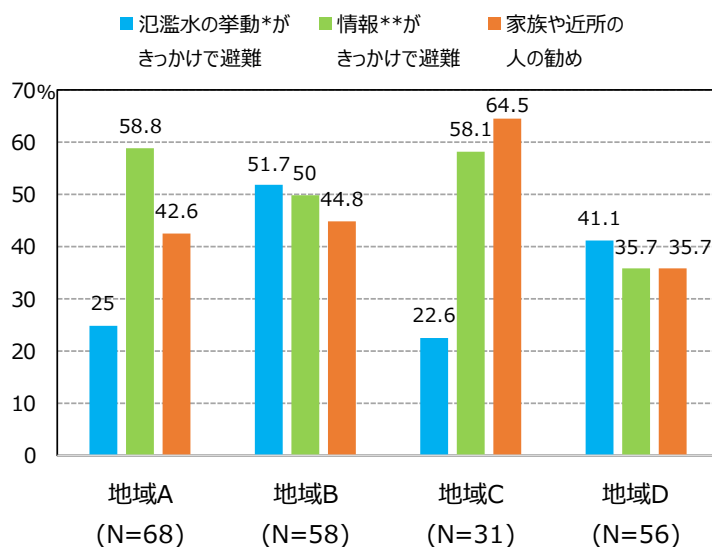


図 3-3 常総市における地域ごとの避難のきっかけ

図 3-3 に常総市における地域ごとの避難のきっかけを示す。地域 A では避難情報や河川水位情報で避難した住民が多く、地域 C では家族や近所の人の勧めで避難した住

民が多いことが明らかとなった。さらに、地域Dでは情報ではなく自宅周辺の浸水といったような氾濫水の挙動がきっかけで避難した住民が多いことが明らかとなった。以上より、同じ洪水でもその流域内の地域特性によって避難のきっかけが異なることが明らかとなった。

3-3-4 地域ごとの避難のきっかけ（事実情報と確率情報）

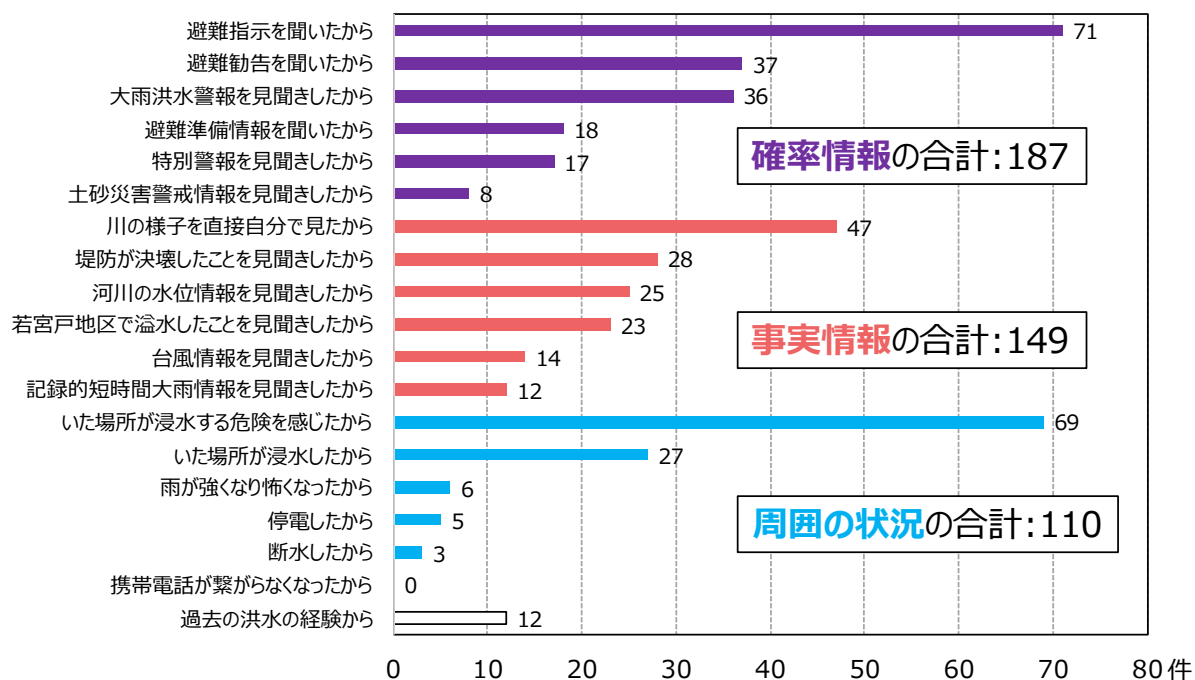


図 3-4 避難のきっかけの分類（事実情報・確率情報・周囲の状況）

奥村ら⁴⁾は、災害情報には、その時点以降の何らかの事象の発生確率が高いことを伝える情報である「確率情報」とその時点までに発生・観測された事実を伝える情報である「事実情報」の2種類があることを示している。そこで、避難のきっかけに関する設問の回答を、①「避難勧告・指示を見聞きしたから」・「大雨特別警報を見聞きしたから」のようなその時点以降の何らかの事象の発生確率が高いことを伝える情報である「確率情報」と、②「河川水位情報を見聞きしたから」・「堤防が決壊したことを見聞きしたから」のような、その時点までに発生・観測された事実を伝える情報である「事実情報」、さらに③「自宅周辺が浸水する危険を感じたから」・「自宅周辺が浸水したから」のような「周囲の状況」の3つに分類した。その結果を図3-4に示す。

これより、常総市全体における避難のきっかけは、「確率情報」の合計が最も多く、次いで「事実情報」、「周囲の状況」の合計であることが明らかとなった。

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

次に地域 A~D における避難のきっかけを図 3-5 に示す。

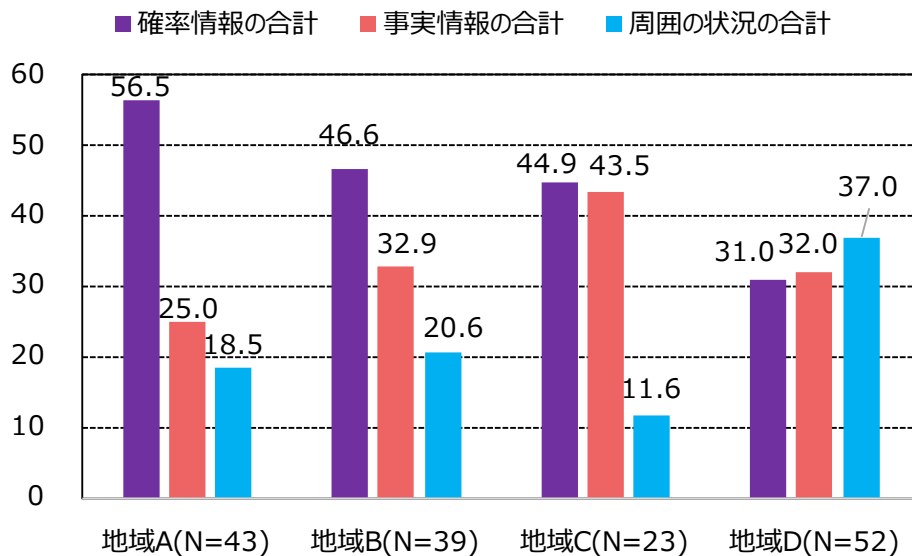


図 3-5 地域ごとの避難のきっかけの割合

地域 A において、避難のきっかけとして「確率情報」が最も多いことがわかる。さらに、地域 D においては避難のきっかけが情報ではなく「周囲の状況」であることがわかる。また、地域 C においては「確率情報」と「事実情報」が同程度の割合で避難のきっかけとなっていたことが明らかとなった。

3-3-5 地域ごとの避難せず自宅にいた理由

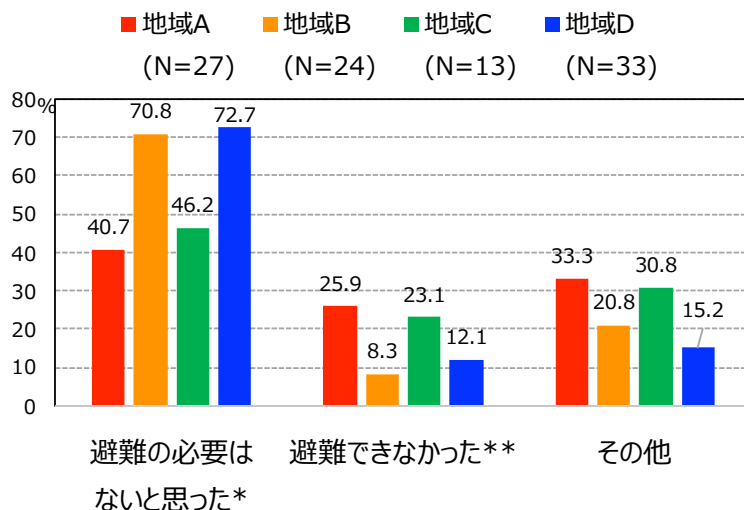


図 3-6 地域ごとの避難せずに自宅にいた理由

図 3-6 に常総市における地域ごとの避難せずに自宅にいた理由を示す。A~D の全地

域において、「避難の必要はないと思った」から避難しなかった住民の割合が大きいことがわかる。また、地域 A と C において「避難できなかった」住民の割合が相対的に大きいことがわかる。

3-3-6 地域ごとの情報取得状況と避難状況の時系列

(1) 地域 A

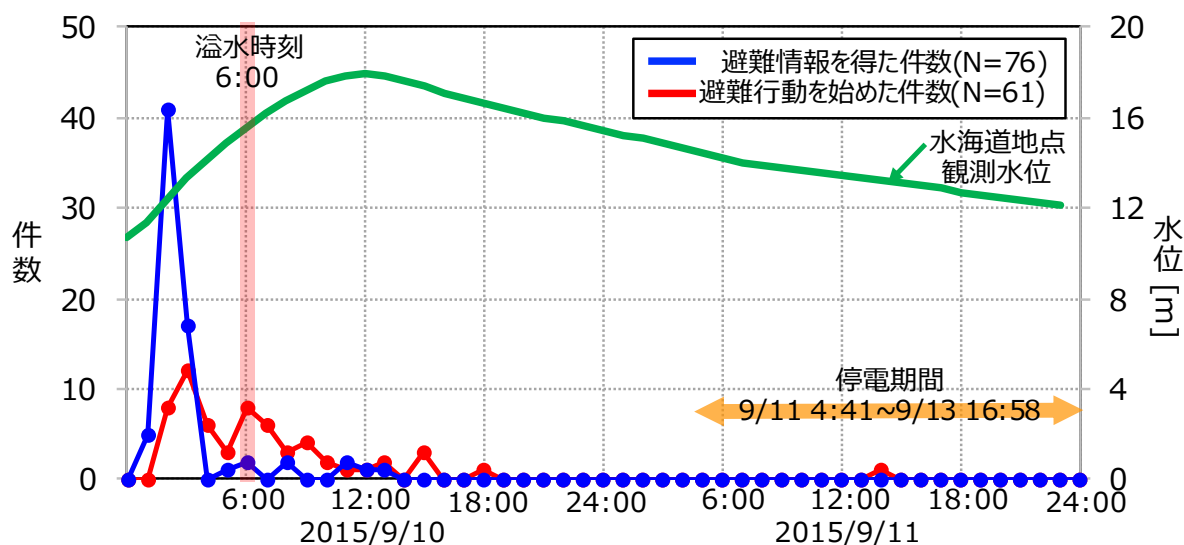


図 3-7 地域 A における避難開始時刻と避難情報取得状況

地域 A では、避難準備情報が 2015 年 9 月 10 日 1:40 に、避難指示が 9 月 10 日 2:20 に発令された。そして、9 月 10 日 6:00 過ぎに若宮戸地点から溢水が始まった。図 3-7 にヒアリング調査により得られた、地域 A における避難情報（避難準備情報・避難勧告・避難指示）の取得状況と避難状況の時系列を示す。これより、地域 A の多くの住民が避難を開始した時刻は 9 月 10 日 3:00 であり、避難準備情報・避難指示が発令されてから約 1 時間後であることが分かる。また、次に多くの住民が避難を開始した時刻は溢水が始まった 9 月 10 日 6:00 であることが分かった。つまり、地域 A では情報を取得した直後に避難した住民が多いことが明らかになった。さらに、図 3-5 より地域 A における避難のきっかけは「確率情報」が最も多いことが分かる。

以上より、溢水箇所周辺である地域 A では、自然堤防が掘削され鬼怒川の水位上昇時には住民が周辺地域の浸水するリスクを容易に想像することができることから、「確率情報」を得たことで避難した住民が多いと推察できる。

(2) 地域 B

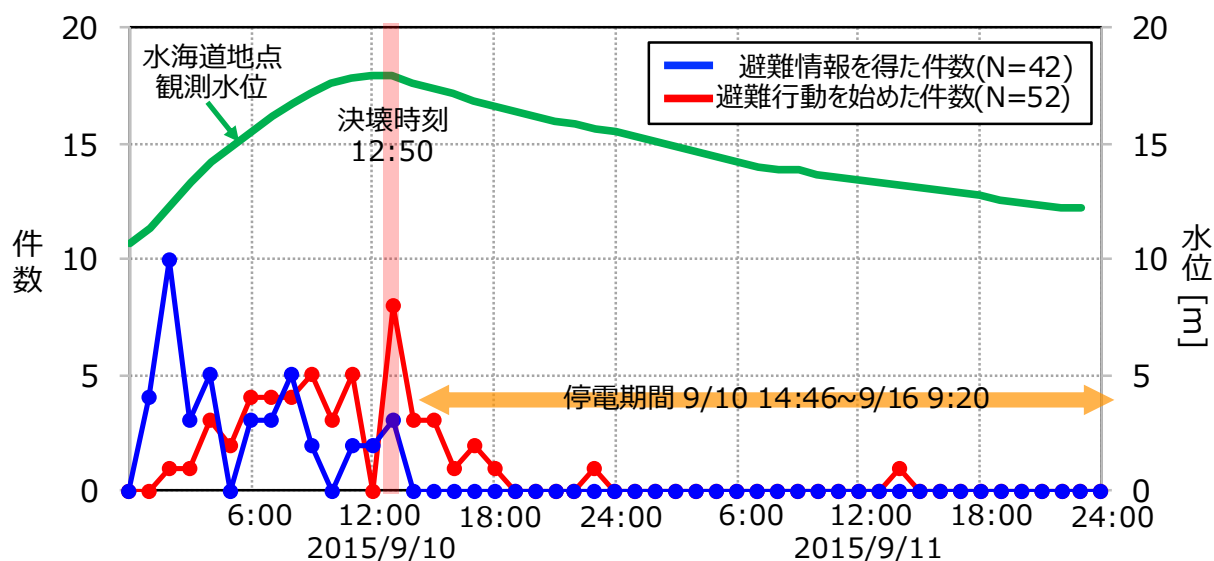


図 3-8 地域 B における避難開始時刻と避難情報取得状況

地域 B では、避難勧告が 2015 年 9 月 10 日 4:00 に、避難指示が 9 月 10 日 10:30 と 13:08 の 2 回にわたって段階的に発令された。そして、9 月 10 日 12:50 に鬼怒川の堤防が決壊した。図 3-8 にヒアリング調査により得られた、地域 B における避難情報の取得状況と避難状況の時系列を示す。これより、地域 B の多くの住民が避難を開始した時刻は 9 月 10 日 13:00 であることが分かった。つまり、地域 B では鬼怒川の堤防が決壊した直後に避難した住民が多いことが明らかになった。さらに、図 3-5 より地域 B における避難のきっかけは「確率情報」が最も多いことが分かる。一方で、地域 A と比較して、「事実情報」が避難のきっかけであった割合が大きい。

以上より、決壊箇所周辺である地域 B では、堤防が決壊する箇所やその後の浸水地域を予想しにくいため、決壊直後に発令された「確率情報」である避難指示と「事実情報」である堤防が決壊したという情報を得たことで避難した住民が多いと推察できる。

(3) 地域 C

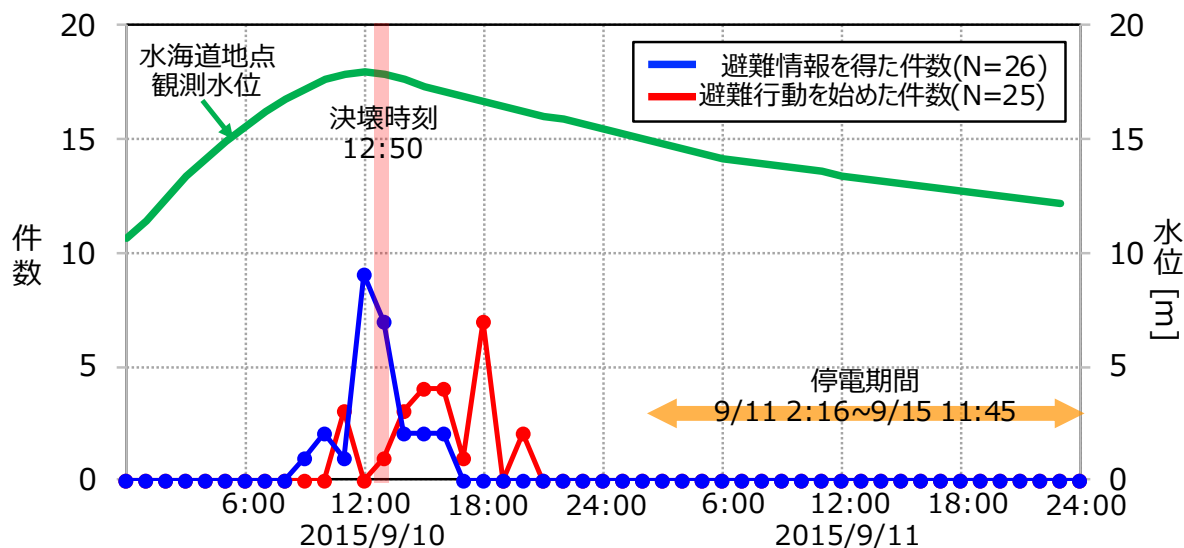


図 3-9 地域 C における避難開始時刻と避難情報取得状況

地域 C では、避難指示が 2015 年 9 月 10 日 13:08 に発令された。図 3-9 にヒアリング調査により得られた、地域 C における避難情報の取得状況と避難状況の時系列を示す。これより、地域 C の多くの住民が避難を開始した時刻は 9 月 10 日 18:00 であることが分かった。つまり、地域 C では鬼怒川堤防の決壊から約 5 時間後に避難を開始した住民が多いことが明らかになった。さらに、図 3-5 より地域 C における避難のきっかけは「確率情報」と「事実情報」が同割合で多いことが分かる。

以上より、堤防決壊箇所と水海道市街地の間である地域 C では、情報を得てから避難するまでの時間が長いことと、避難のきっかけとして「確率情報」と「事実情報」が多いことから、様々な情報を総合的に判断して避難した住民が多いと推察できる。

(4) 地域 D

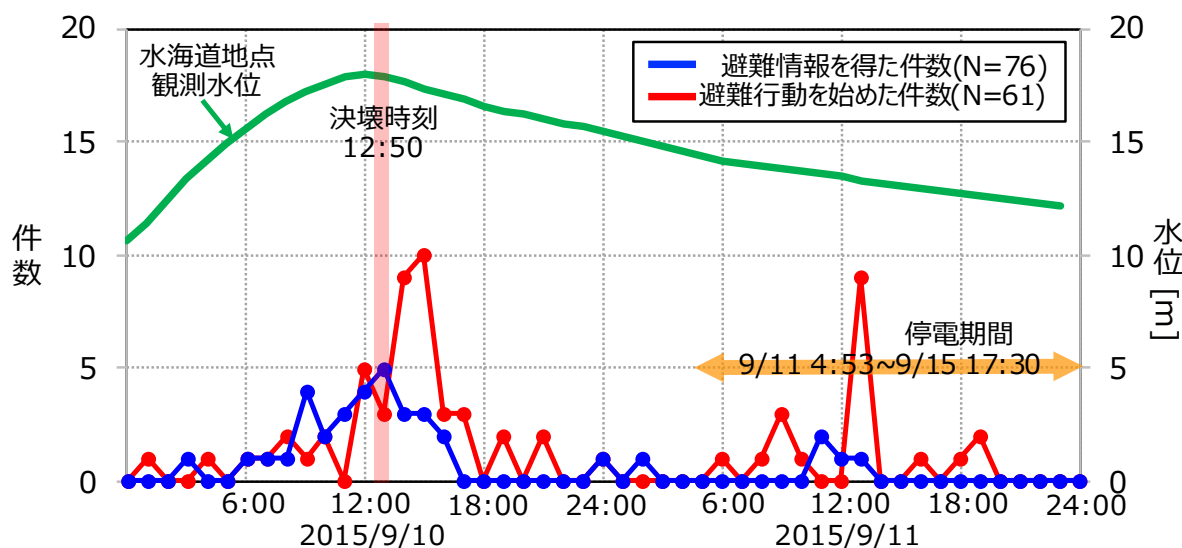


図 3-10 地域 D における避難開始時刻と避難情報取得状況

地域 D では、避難指示が 2015 年 9 月 10 日 9:50 と 13:08 の 2 回にわたって段階的に発令された。図 3-10 にヒアリング調査により得られた、地域 D における避難情報の取得状況と避難状況の時系列を示す。これより、地域 D の多くの住民が避難を開始した時刻は 9 月 10 日 16:00 であることが分かった。また、次に多くの住民が避難を開始した時刻は、翌日の 9 月 11 日 12:00 であることが分かった。つまり、地域 D では鬼怒川堤防の決壊から約 2 時間後と翌日のお昼に避難した住民が多いことが明らかとなった。さらに、図 3-5 より地域 D における避難のきっかけは情報ではなく「周囲の状況」が多いことが分かる。

以上より、堤防決壊箇所から離れていることに加えて、八間堀川の内水氾濫が生じた地域 D では、八間堀川の氾濫による浸水や鬼怒川の氾濫水が到達したことによる「周囲の状況」で避難した住民が多いと推察できる。

3-4 避難行動と浸水状況の関係

次に、本洪水時における避難行動が安全な行動だったか否かについて検討を行う。ここで、避難状況と浸水状況を一覧（表 3-2）にして整理すると、本洪水時の避難行動は以下の 4 つに分類できる。①安全な行動：「水平避難した」かつ「浸水被害にあった」住民、②最も安全な行動：「水平避難した」かつ「浸水被害にあわなかった」住民、③危険な行動：「避難しなかった（垂直避難を含む）」かつ「浸水被害にあった」住民、④たまたま安全であった：「避難しなかった（垂直避難を含む）」かつ「浸

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

水被害にあわなかった」住民である。また、常総市全体における各避難行動の割合を図3-11に示す。

表 3-2 避難状況と浸水状況の一覧

避難状況	浸水状況	結果
①水平避難した (N=303)	浸水した(N=227)	安全な行動(浸水以前の避難が理想)
	浸水しなかった(N=75)	最も安全な行動
②避難しなかった (垂直避難を含む) (N=209)	浸水した(N=120)	危険な行動
	浸水しなかった(N=89)	たまたま安全であった

常総市における避難行動の割合 (N=512)

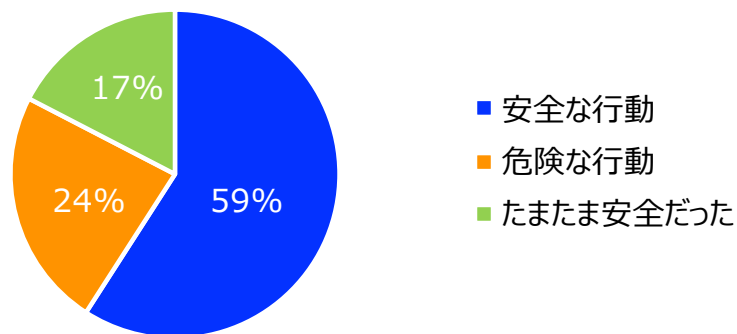


図 3-11 常総市における避難行動の割合

これより、常総市全体において、約 59%の住民が安全な行動をしていた。また、たまたま安全であった住民が約 17.4%で、危険な行動をとった住民が約 24%であることが明らかとなった。各避難行動について、どのような住民が当てはまるか検討を行う。

3-4-1 年代と避難行動の関係

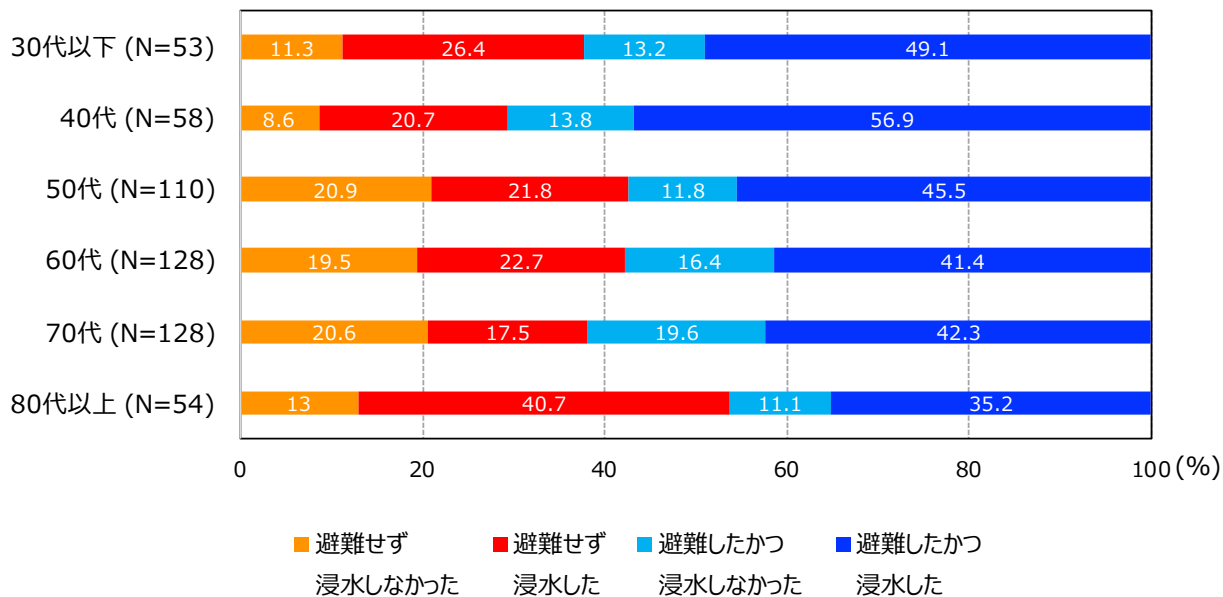


図 3-12 年代別の避難行動

図 3-12 に年代と各避難行動の関係を示す。これより、最も安全な行動をとった年代は40歳代の住民であることがわかる。また、80歳代以上の住民は危険な行動（「避難しなかった」かつ「浸水した」）をとった割合が高いことが明らかとなった。

3-4-2 情報取得状況と避難行動の関係

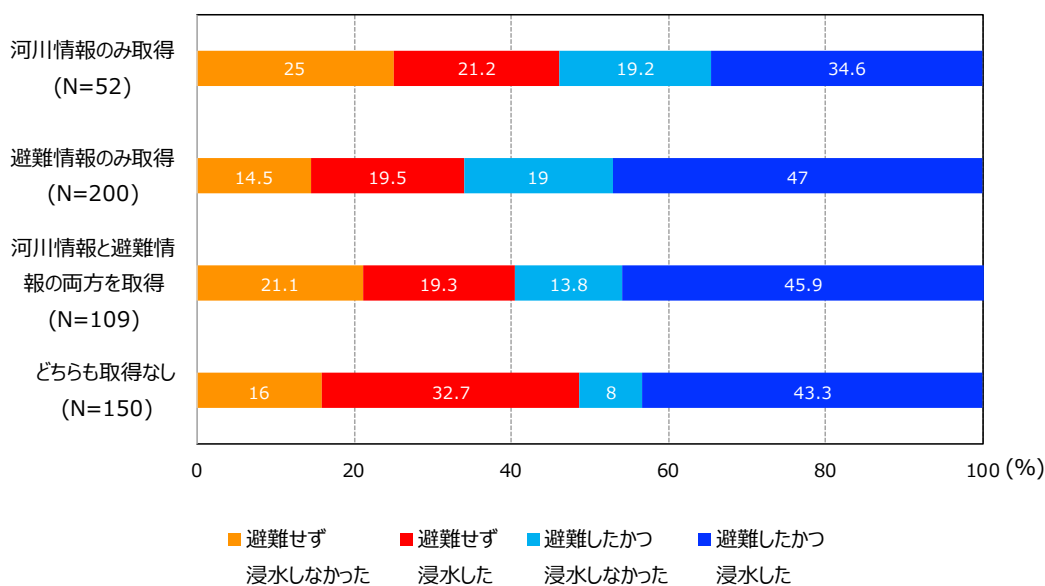


図 3-13 情報取得状況と避難行動の関係

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

図 3-13 に情報取得状況と各避難行動の関係を示す。これより、情報を取得していない住民は危険な行動（「避難しなかった」かつ「浸水した」）をとった割合が高いことが明らかとなった。

3-4-3 地域特性と避難行動の関係

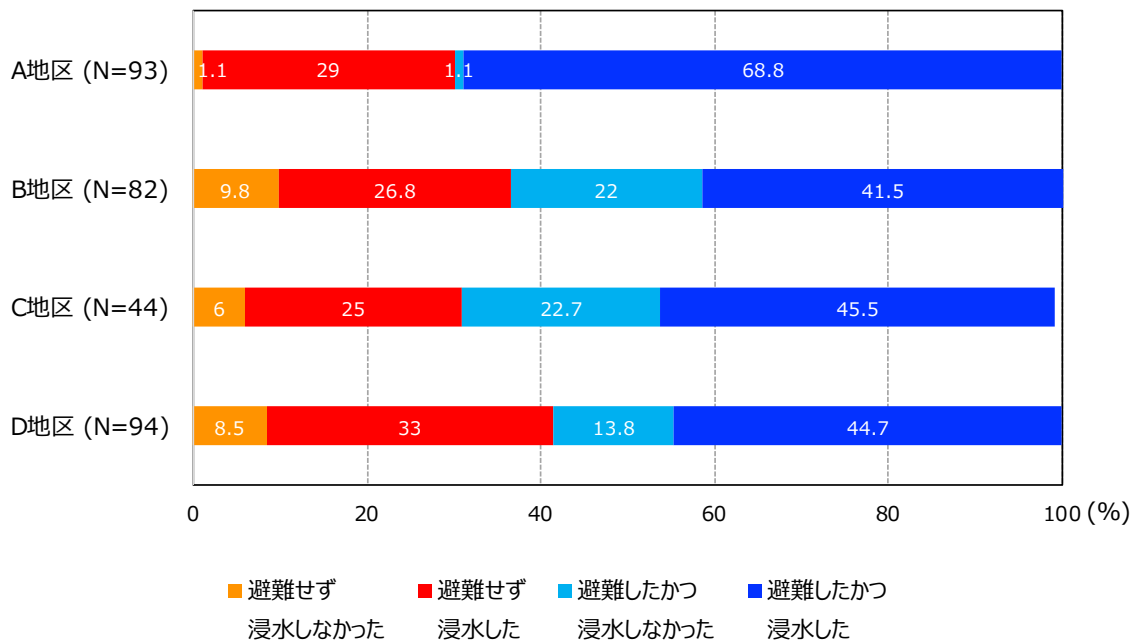


図 3-14 地域特性と避難行動の関係

図 3-14 に地域特性と各避難行動の関係を示す。これより、地域 A の住民の約 7 割は安全な避難行動をとっていることがわかった。また、地域 D の住民は危険な行動をとっていた住民が他の地域と比較してわずかに多いことがわかった。

3-5 水平・垂直避難と浸水状況の関係

次に、水平避難と垂直避難に焦点を当てて分析を行う。第 2 章では、避難所等の自宅以外の安全な場所へ移動することを「避難行動」と定義した。つまり、自宅の 2 階を避難場所とする垂直避難は避難行動へ含めず、水平避難のみを避難行動とした。内閣府中央防災会議は、安全を確保するための行動のうち「その場を立ち退く」行動には、垂直避難と水平避難があることを明記している。そこで本章では、本洪水時に水平避難した住民と垂直避難した住民の特徴について分析を行った。

3-5-1 本研究における垂直避難の定義

本研究で実施したヒアリング調査において、垂直避難したか否かを問う設問は無い。

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

そこで、(水平)避難しなかった住民へ対しての設問である「(水平)避難せずに自宅にいた理由」のうち、「避難所に避難しようと思ったが、間に合わなかったので2階に避難した」、「浸水しても自宅の2階に避難すれば良いと思った」と回答した住民を垂直避難した住民と定義した。常総市における水平避難者と垂直避難者の割合を図3-15に示す。

常総市における避難行動の割合 (N=403)

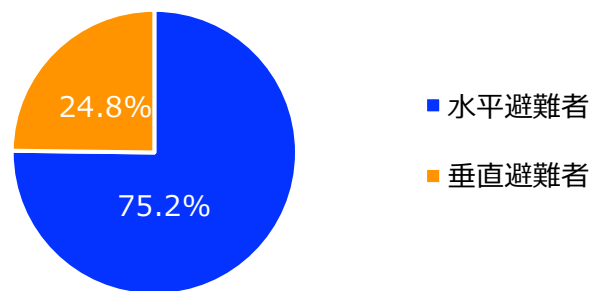


図3-15 水平避難と垂直避難の割合

3-5-2 水平・垂直避難と年代の関係

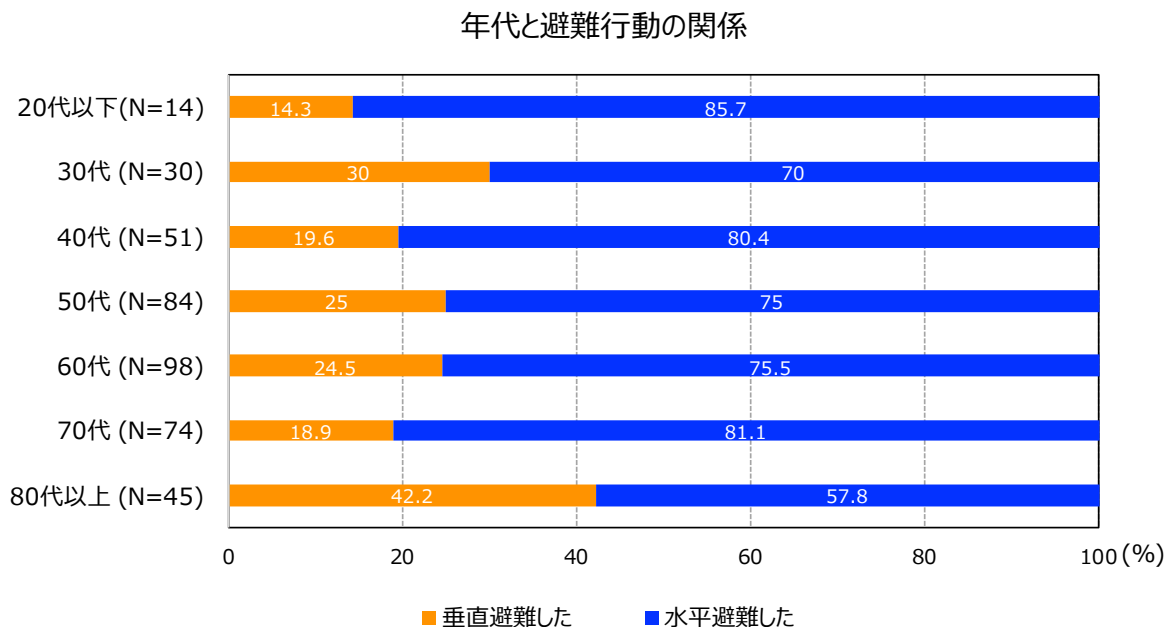


図3-16 年代と水平・垂直避難の関係

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

図 3-16 に年代と水平・垂直避難の関係を示す。これより、全ての年代において、「水平避難した」住民の割合が多いことがわかった。また、80代以上の住民が「垂直避難した」割合が最も多いことがわかった。

3-5-3 水平・垂直避難とハザードマップ確認状況の関係

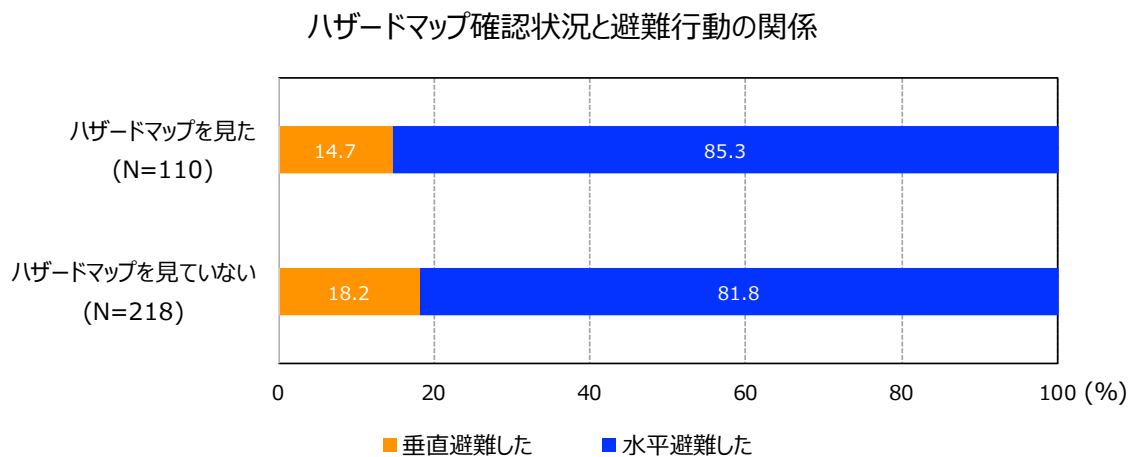


図 3-17 ハザードマップ確認状況と水平・垂直避難の関係

図 3-17 にハザードマップ確認状況と水平・垂直避難の関係を示す。これより、ハザードマップ確認状況と水平・垂直避難は関係がないと言える。

3-5-4 水平・垂直避難と避難場所決定状況の関係

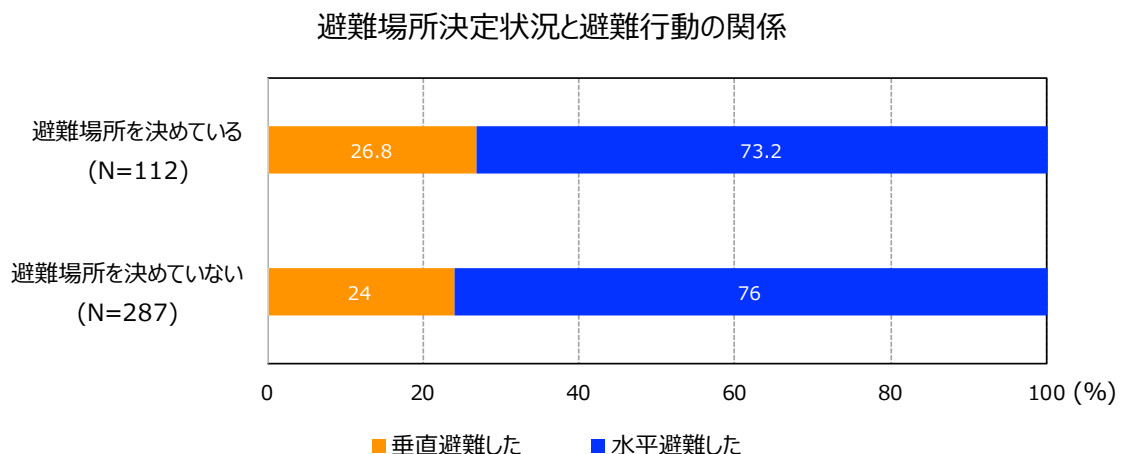


図 3-18 避難場所決定状況と水平・垂直避難の関係

図 3-18 にハザードマップ確認状況と水平・垂直避難の関係を示す。これより、ハ

ザードマップ確認状況と水平・垂直避難は関係がないと言える。

3-6 避難のタイミング

2009年8月台風9月によって発生した兵庫県佐用町での水害では、避難所への移動中に用水路に流されて9名（うち子どもが5名）が亡くなるという悲劇が生じた。これは、これらの住民が日没後に避難したことで用水路に流された事例であり、2013年に災害対策基本法における「屋内避難（垂直避難含む）」が位置付けられたきっかけとなった時刻である。このように避難行動をとっても、それが適切な行動でない場合には、かえって身を危険にさらしてしまう。一般に、浸水深が30cm程度になると、車のマフラーに水が入り車での避難が困難となる。また、浸水深が50cm（大人の膝程度の高さ）の場合、氾濫流速が0.7m/s以上になると歩いての避難が困難であることが示されている⁵⁾。つまり、周辺が浸水するよりも前に避難することが重要である。そこで、本洪水時における住民の避難のタイミングと情報の取得状況等の関係について分析を行った。

3-6-1 避難のタイミングと年代の関係

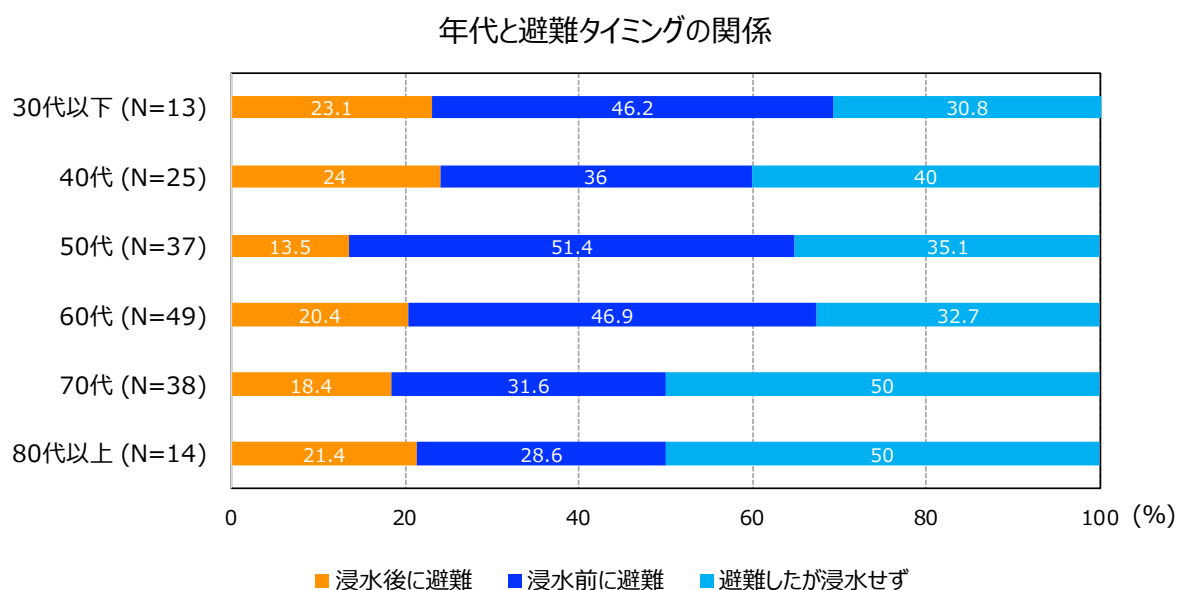


図 3-19 年代と避難のタイミングの関係

図 3-19 に年代と避難のタイミングの関係を示す。これより、「浸水する以前に避難した」住民は50歳代が最も多く、30歳代が次に多いことがわかった。「浸水した後には避難した」住民は30歳代と40歳代が多い。

3-6-2 避難のタイミングと取得情報の関係

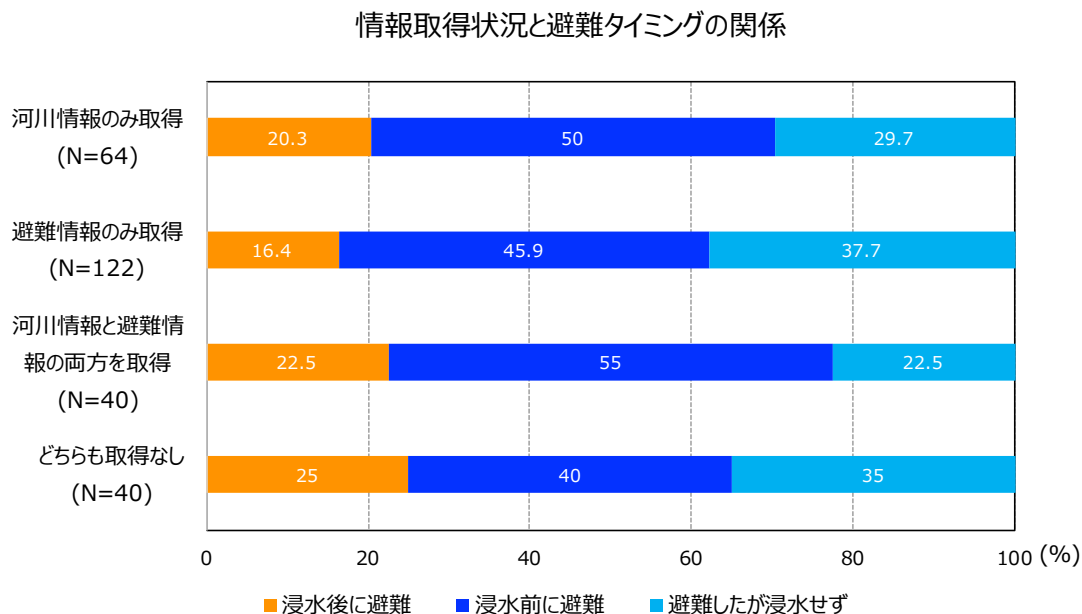


図 3-20 取得情報と避難のタイミングの関係

図 3-20 に取得情報と避難のタイミングの関係を示す。これより、「河川に関する情報と避難情報の両方を取得した」住民は「浸水する前に避難した」住民が多いことがわかった。また、「河川に関する情報と避難情報のどちらも取得していない」住民は、「浸水した後に避難した」住民が多いことがわかった。

3-6-3 避難のタイミングと避難場所決定状況の関係

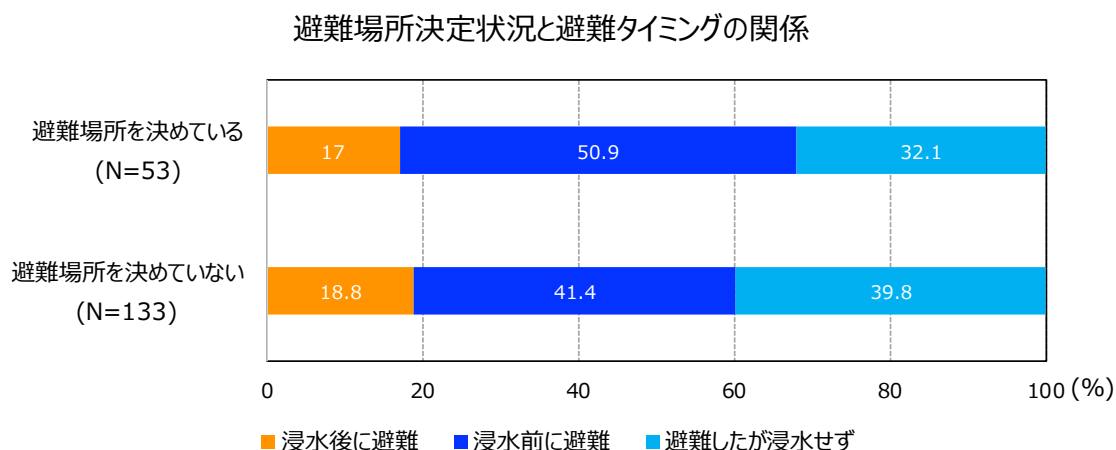


図 3-21 避難場所決定状況と避難のタイミングの関係

図 3-21 に避難場所決定状況と避難のタイミングの関係を示す。これより、「避難場所を決めている住民」はそうでない住民と比較して「浸水する前に避難した」住民の割合が約 10%多いことがわかった。

3-6-4 避難のタイミングと地域特性の関係

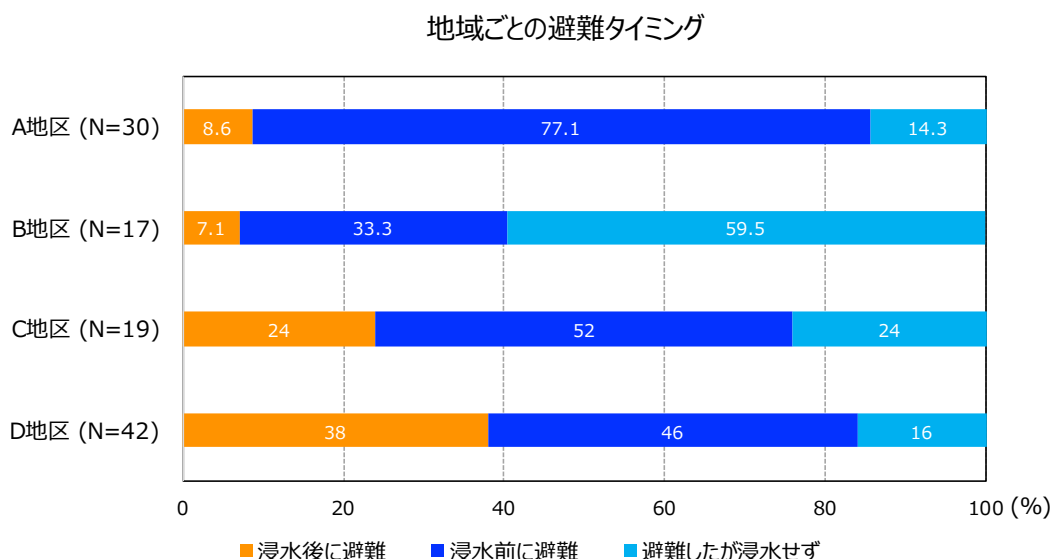


図 3-19 地域特性と避難のタイミングの関係

図 3-19 に地域特性と避難のタイミングの関係を示す。これより、地域 A で「浸水する前に避難した」住民の割合が約 77%で最も多く、地域 D で「浸水した後に避難した」住民の割合が 38%で最も多いことがわかった。

3-7 避難行動に効果を及ぼした情報

次に、結果から原因を推定するベイズ推定を用いて、「住民が災害時に取得した情報」から「避難に効果のあった情報」について分析を行った。

3-7-1 解析手法

本研究においては、事象 x を「避難した」、事象 y を「〇〇情報を取得した」とすると、条件付確率 $p(y|x)$ は「避難した住民が取得した情報の割合（確率）」となり、ヒアリング調査により各情報についてその値が分かっている。ここで(3-1)式に示すベイズの定理^{例えば 6)}により求まる事後確率である「〇〇情報を取得して避難した住民の割合（確率）」： $p(x|y)$ から、事前確率である「避難した住民の割合（確率）」： $p(x)$

を引いた値を本研究では「避難行動へ及ぼした情報の効果」と定義した。

$$p(x|y) = \frac{p(y|x)p(x)}{\sum_x p(y|x)p(x)} \quad (3-1)$$

3-7-2 解析結果

ここでは、本研究結果を他の水害被災地域で用いることを想定し、「その地域で避難する住民の割合（確率）」である事前確率： $p(x)$ を0~100%として計算を行った。また、下に凸の曲線を描いている情報は「それを得て避難しなかった情報」であり、避難行動にマイナスに作用した（その情報を取得したことで避難しなくなった）情報である。

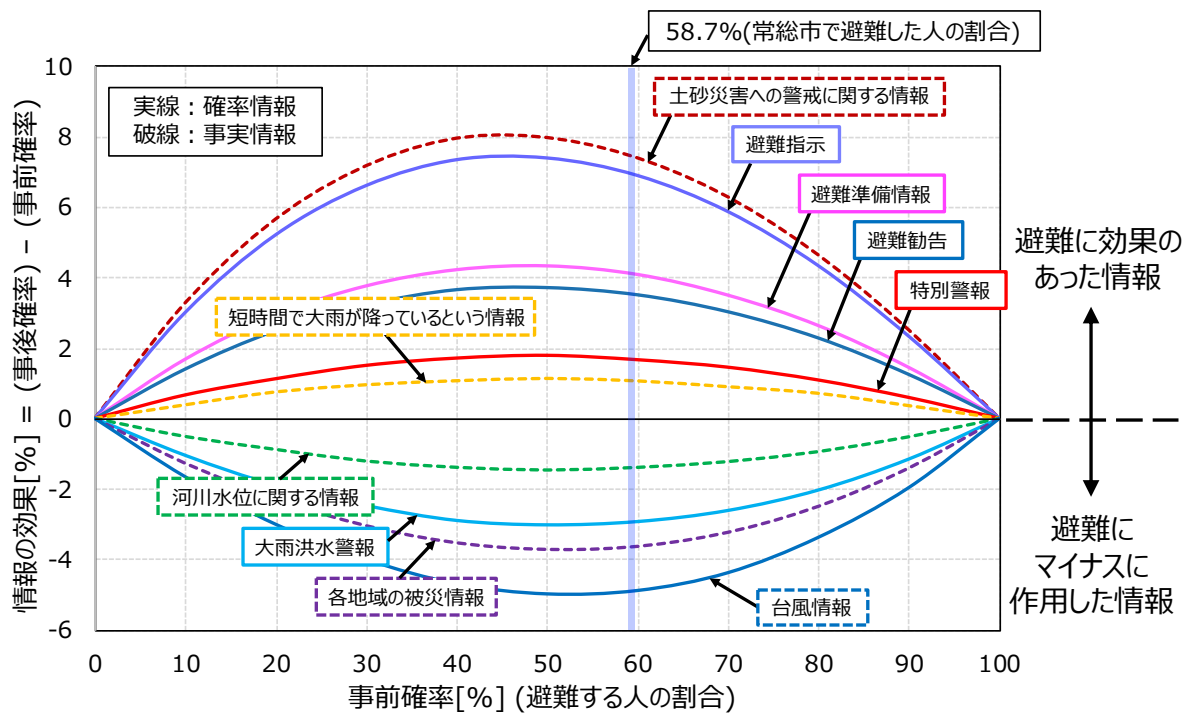


図 3-20 常総市における避難行動に及ぼした情報の効果

図 3-20 に常総市全体における「避難行動へ及ぼした情報の効果」を示す。常総市全体として避難に効果のあった情報は、「土砂災害への警戒に関する情報（事実情報）」、「避難指示（確率情報）」、「避難準備情報（確率情報）」、「避難勧告（確率情報）」、「特別警報（確率情報）」、「短時間で大雨が降っているという情報（事実情報）」であり、事実情報よりも確率情報が避難行動に効果のあった情報であることが分かった。一方で「河川水位に関する情報」、「大雨洪水警報」、「各地域の被災情報」、

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

「台風情報」は避難行動にマイナスに作用した情報であることが分かった。このように調査結果にベイズ推定を用いることで洪水時に発信される様々な情報が避難行動に及ぼす効果を定量的に評価することが可能となった。

以下に、それぞれの地域における「避難行動へ及ぼした情報の効果」を示す。

(1) 地域 A

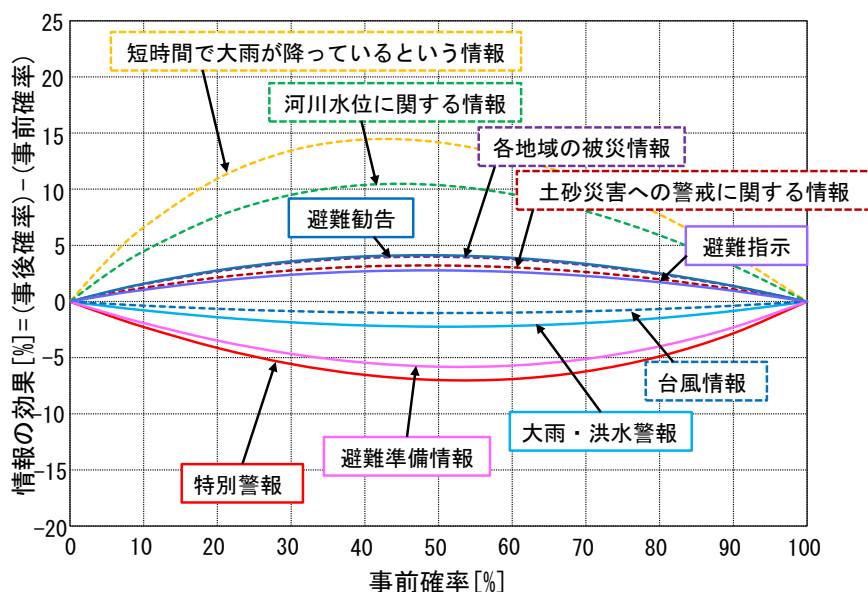


図 3-21 地域 A における避難行動に及ぼした情報の効果

地域 A における避難行動に効果のあった情報（図 3-21）は、「短時間で大雨が降っているという情報（事実情報）」、「河川水位に関する情報（事実情報）」、「各地域の被災情報（事実情報）」、「避難勧告（確率情報）」、「土砂災害への警戒に関する情報（事実情報）」、「避難指示（確率情報）」であることが分かった。一方で「台風情報（事実情報）」、「大雨・洪水警報（確率情報）」、「避難準備情報（確率情報）」、「特別警報（確率情報）」は避難行動にマイナスに作用した情報であることが分かった。

以上より、地域 A において避難のきっかけで最も大きい割合を占めていた情報は確率情報であったが、避難に効果のあった情報は事実情報であることが明らかとなった。

(2) 地域 B

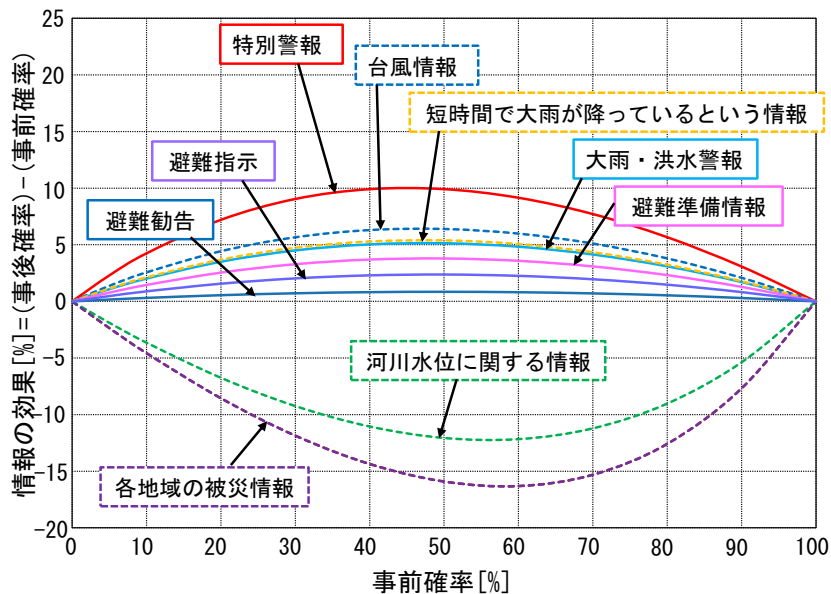


図 3-22 地域 B における避難行動に及ぼした情報の効果

地域 B における避難行動に効果のあった情報（図 3-22）は、「特別警報（確率情報）」、「台風情報（事実情報）」、「短時間で大雨が降っているという情報（事実情報）」、「大雨・洪水警報（確率情報）」、「避難準備情報（確率情報）」、「避難指示（確率情報）」、「避難勧告（確率情報）」であることが分かった。一方で「河川水位に関する情報（事実情報）」、「各地域の被災情報（事実情報）」は避難行動にマイナスに作用した情報であることが分かった。

(3) 地域 C

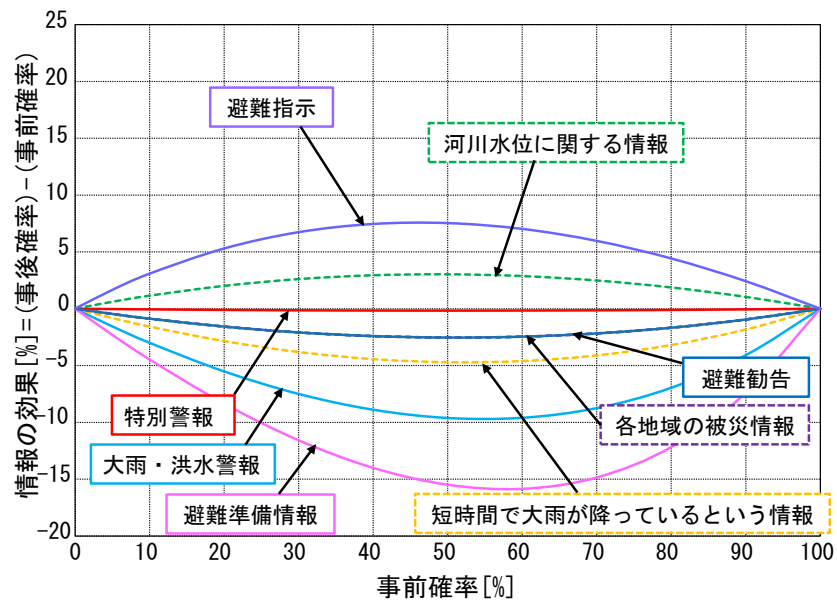


図 3-23 地域 C における避難行動に及ぼした情報の効果

地域 C における避難行動に効果のあった情報 (図 3-23) は、「避難指示 (確率情報)」、「河川水位に関する情報 (事実情報)」のみであることが分かった。一方で「特別警報 (確率情報)」、「避難勧告 (確率情報)」、「各地域の被災情報 (事実情報)」、「短時間で大雨が降っているという情報 (事実情報)」、「大雨・洪水警報 (確率情報)」、「避難準備情報 (確率情報)」は避難行動にマイナスに作用した情報であることが分かった。

(4) 地域 D

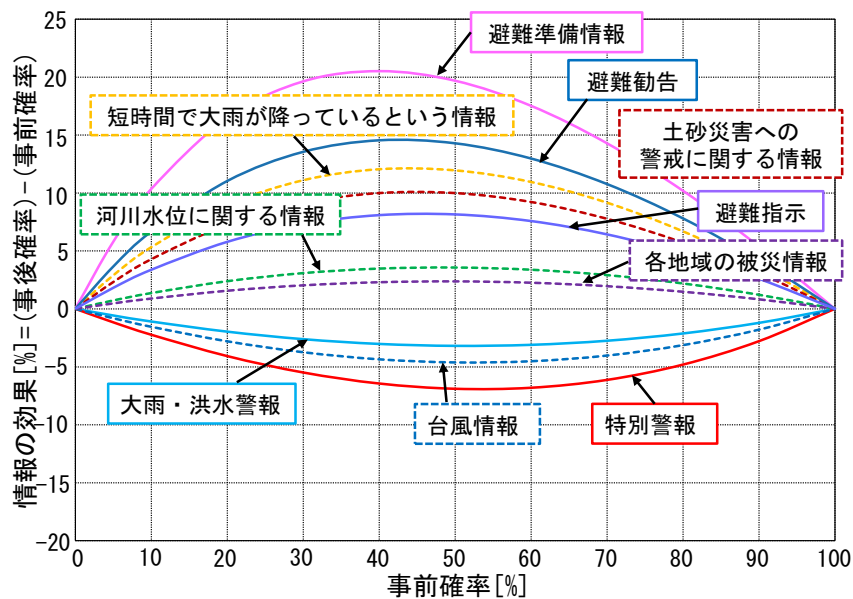


図 3-24 地域 D における避難行動に及ぼした情報の効果

地域 D における避難行動に効果のあった情報 (図 3-24) は、「避難準備情報 (確率情報)」、「避難勧告 (確率情報)」、「短時間で大雨が降っているという情報 (事実情報)」、「土砂災害への警戒に関する情報 (事実情報)」、「避難指示 (確率情報)」、「河川水位に関する情報 (事実情報)」、「各地域の被災情報 (事実情報)」であることが分かった。一方で「大雨・洪水警報 (確率情報)」、「台風情報 (事実情報)」、「特別警報 (確率情報)」は避難行動にマイナスに作用した情報であることが分かった。

3-8 まとめ

第2章で実施した調査結果を用いて、リードタイムの長い平地である常総市を対象に氾濫域内の地域特性について分析を行った。ここでは、その時点以降に何らかの事象の発生確率が高いことを伝える情報である「確率情報」と、その時点までに発生・観測された事実を伝える情報である「事実情報」、さらには自宅が浸水したからといった「周囲の状況」に分けて避難のきっかけと避難のタイミングについて、小さいスケールでの地域特性について分析を行った。その結果、①自然堤防が掘削され鬼怒川の水位上昇時には住民が周辺地域の浸水リスクを容易に想像できる地域では、確率情報で避難した住民が多い。②堤防決壊箇所周辺の地域では、どこで決壊が生じるか予測が難しいため、堤防が決壊した直後に発令された避難指示と堤防が決壊したという

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

事実情報で避難した住民が多い。③堤防決壊箇所から離れた市街地の住民は、情報がきっかけで避難した住民は少なく、周囲の浸水等の状況の変化で避難した住民が多いことを明らかにした。さらに、調査結果にベイズ推定を用いることで洪水時に発信される様々な情報が避難行動に及ぼす効果を定量的に評価することを可能とした。避難に効果を及ぼした情報は地域によって異なることや、避難行動へマイナスに作用した情報があることから、その地域や川の特성에応じて、住民が敏感に反応する情報を発信することが重要であることが推察される。

表 3-2 常総市における地域ごとの避難行動のまとめ

地域	特徴	避難行動	避難のきっかけ	避難に効果のあった情報
A	洪水時には周囲が浸水するリスクを容易に認識できる	情報を聞いてすぐに避難	確率情報	事実情報
B	決壊地点の予測は難しい	堤防決壊直後に避難	確率情報	確率情報 事実情報
C	決壊地点から離れている	堤防決壊から5時間後に避難	確率情報 事実情報	少ない
D	堤防決壊地点から遠い膝下程度の八間堀川の氾濫により、避難のタイミングを見誤った	避難した住民は少ないが、避難した人は八間堀川の氾濫と停電	周囲の状況	確率情報 (特に避難情報)

参考文献

- 1) 末次忠司：水害に役立つ減災術 -行政ができること住民にできること-, 技報堂出版, p.37, 2011.
- 2) 中村功：災害危機管理論入門, 吉井博明・田中淳編, 弘文堂, pp.156, 2008.
- 3) 関谷直也：避難をめぐる諸問題, 水工学に関する夏期研修会講義集, Vol.47, pp.A8_1-16, 2011.
- 4) 奥村誠, 塚井誠人, 下荒磯司：避難勧告の信頼度と避難行動, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.2, pp.311-316, 2001.
- 5) 利根川研究会編：利根川の洪水 -語り継ぐ流域の歴史, 山海堂, 1995.
- 6) 松原望：入門ベイズ統計-意思決定の理論と発展, 東京図書, 2008.

第3章 水害時の避難行動に影響を及ぼす水文・避難情報の地域特性の分析

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

4-1 概説

近年の豪雨の特徴として、局所的に長時間豪雨が降り続く点が挙げられる。甚大な被害が発生した2012年（平成24年）九州北部豪雨や2013年（平成25年）8月秋田・岩手豪雨、さらには2014年（平成26年）広島豪雨において「線状降水帯」により引き起こされたことが指摘されている。2015年（平成27年）9月関東・東北豪雨や2017年（平成29年）九州北部豪雨、2018年（平成30年）西日本豪雨でも線状降水帯が確認されている。線状降水帯に厳密な定義は存在していないが、津口¹⁾は「幅20~50km、長さ50~200kmであり、数時間に亘ってほぼ同じ場所にとどまるもの」としている。また、津口ら²⁾は、1995~2009年の4~11月の期間を対象として、解析雨量データを用いて集中豪雨の事例を客観的に抽出し、降水域の形状について統計解析を行っている。その結果、台風による直接的な事例を除くもののうち約2/3（261事例中168事例）で線状の降水域が確認されている。この豪雨をもたらす線状降水帯は、一般に、大気の状態が不安定な時に発生するため、現代の数値予報モデルを用いても、ある区域内のこの辺りで生じやすいということは予測できるが、この時刻にここで発生する、という具体的な予測は困難である。本研究で対象としている2014年（平成26年）福知山豪雨、2015年（平成27年）関東・東北豪雨、2017年（平成30年）九州北部豪雨も線状降水帯によりもたらされた豪雨である。

線状降水帯の予測は困難である一方で、一般に平地では上流に雨が降ってから洪水が流下してくるまでに約1日から数日の時間を要するため、中山間地と比べて避難に要するためのリードタイムが長い。そこで、本章では本研究で対象とする3つの地域

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

のうち、最もリードタイムが長いにも関わらず、多くの住民が逃げ遅れて救助された鬼怒川流域を対象に降雨流出解析および氾濫解析により災害当時の状況を再現し、浸水状況と住民の避難行動について分析を行う。

4-2 鬼怒川の河道特性と2015年9月洪水時による被害の概要

本研究で対象とする鬼怒川は、栃木県日光市鬼怒沼（標高 2,040m）を水源として、栃木県と茨城県を流れ、利根川に合流する一級河川である³⁾。幹川流路延長：177km、流域面積：1,760km²であり、流域全体の64.5%が山地部で、残りの35.5%が平野部である。流域人口は約55万人で、支川に大谷川（流域面積256km²）や田川（流域面積260km²）がある。また、土地利用は山地：61%、農地：22%、市街地：9%、その他：8%である。上流には4つのダム（五十里ダム、川俣ダム、川治ダム、湯西川ダム）があり、上流部では深い渓谷が見られ、中流部では川幅が広がり（約700m）、礫河原が形成されている。沖積平野に位置する下流部では自然堤防が発達し、狭い川幅（約300m）の河道である。

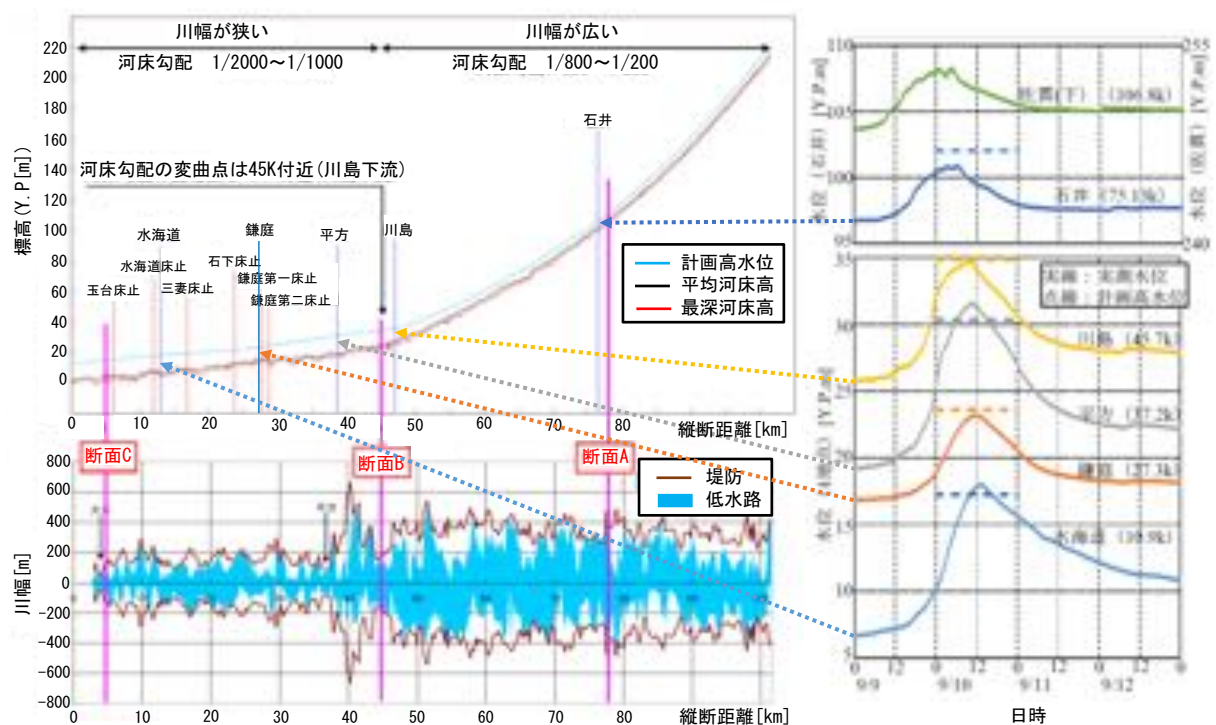


図4-1 鬼怒川の河道縦断形および川幅の縦断変化（左）と本洪水時の水位ハイドログラフ（右）※文献⁴⁾より引用・加筆

鬼怒川の河道縦断形及び川幅の縦断変化を図4-1に示す。これより、河床勾配は45K（以下、Kはキロポストである）より上流側では1/800~1/200となっている一方で、

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

下流側では 1/2000~1/1000 となっており、45K 付近が河床勾配の変化点となっていることが分かる。Yatsu⁵⁾は 45K で河床粒径が不連続になっていることを明らかにし、鬼怒川は河床縦断形が2本の指数曲線になっている世界的に類を見ない平衡河川であることを指摘している。川幅については、45K 付近より上流側では 700m 前後であるが、45K 付近で 300m 程度に狭くなり、40K まで再び 700m 程度に広がるが、40K より下流側では 300m 程度となる。つまり、45K 付近を境に、その下流側では川幅が半分程度に狭くなっていることが分かる。

2015 年 9 月関東・東北豪雨災害は河川構造物に大きな被害をもたらしたことが特徴である。被害状況の全体像を表 4-1 に示す。

表 4-1 2015 年 9 月洪水による河川構造物の被害状況 ※文献⁴⁾より引用

	国管理						県管理河川			
	利根川水系				那珂川水系	荒川水系	茨城県	栃木県	埼玉県	千葉県
	鬼怒川	利根川	小貝川	他	那珂川他	都幾川				
決壊	1			0			8	4		
溢水	7	2		0			4	10	8	
越水	0			0		1	17	1		
漏水	23	1		0			4	0		
法崩れ・すべり	7	2	7	2			126	8	2	
堤防・河岸洗掘	31	6	3	5	54		0	0	1	2
その他	28	1	7	9	3		0	1	2	

ここでは、関東地方を対象に、国管理河川では利根川水系（鬼怒川，利根川，小貝川他）や那珂川水系，荒川水系，県管理河川では主な被害が生じた茨城県，栃木県，埼玉県，千葉県についてまとめられている。被害内容は、堤防決壊，溢水，越水，漏水，のり面崩れ，堤防洗掘，河岸洗掘，その他に分類されている。なお，これらは，国土交通省や県が発表している資料に基づき，2015 年関東・東北豪雨災害土木学会・地盤工学会合同調査団関東グループにより，まとめられたものである。

これより，河川被害は，国管理河川では鬼怒川が，県管理河川では茨城県が最も被害が大きいことが分かる。被害項目として，決壊は鬼怒川 1 カ所，県管理河川では茨城県で 8 カ所，栃木県で 4 カ所において発生した。この鬼怒川の決壊は，関東地方の一級河川では 1986 年に生じた小貝川での決壊以来 29 年ぶりのことである。溢水や越水も各河川で生じており，数の上では，のり面崩れや堤防・河岸洗掘が多いが，漏水が鬼怒川で集中的に発生した。また，鬼怒川流域と隣接して流れる小貝川では，本災害ではほとんど被害が発生しておらず，のり面崩れなどが生じるに留まった。

鬼怒川では，1 カ所で決壊，7 カ所で溢水が生じた。二瓶ら⁶⁾は，高精度の GPS (VRS 方式 RTK-GNSS) を用いた河道痕跡水位調査を行っている。その結果を図 4-2 に示す。

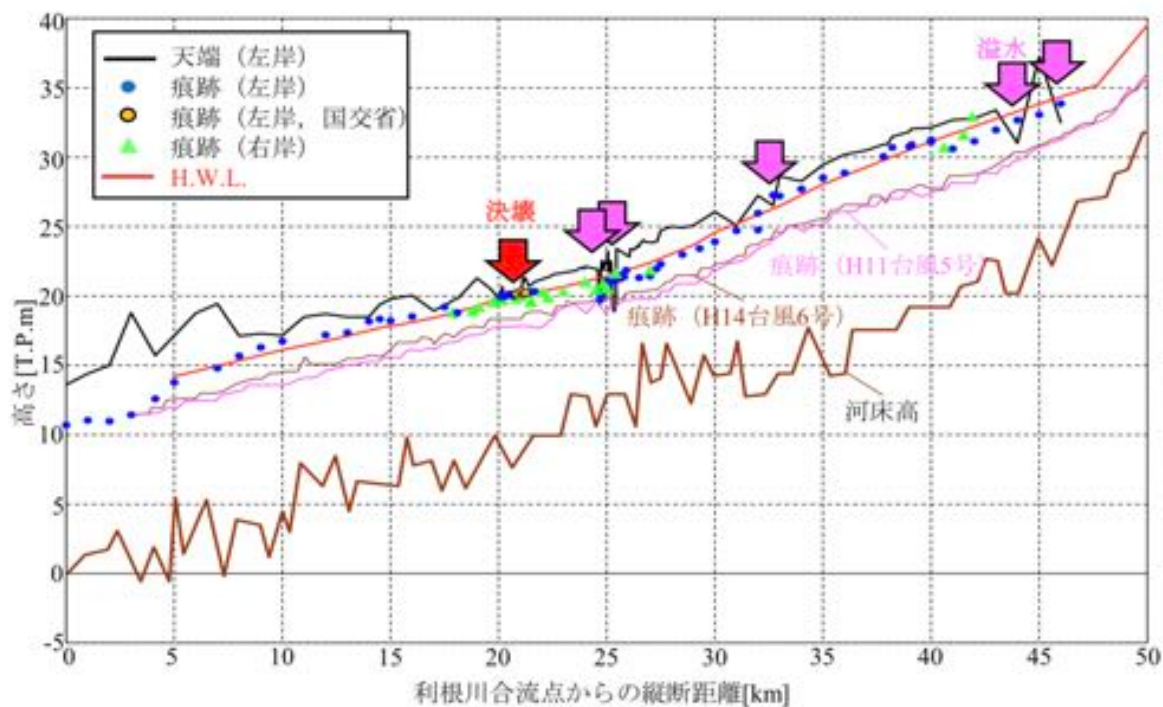


図 4-2 2015 年 9 月洪水時と過去の洪水における痕跡水位の縦断分布

※文献⁶⁾より引用

これより、本災害における痕跡水位は、8K~18K、20~21K、32~40K にて計画高水位を上回っており、広範囲に亘って超過洪水となっていたことが明らかである。また、本災害に痕跡水位は過去の洪水（1999 年（平成 11 年）、2002 年（平成 14 年））の水位よりも 3~4m 高いことが分かる。

次に、本洪水時の各観測所における水位ハイドログラフ及び各地点の天端高と計画高水位を図 4-1（右）に示す。ピーク水位と計画高水位を比較すると、中流域の石井地点でのピーク水位は計画高水位よりも 1m 以上低かったが、下流域では 2 地点（川島、鎌庭）で計画高水位と同程度で、他の 2 地点（平方、水海道）で計画高水位を上回った。つまり、下流側で水位が高くなっていたことが分かる。また、水位の上昇量も下流側で大きいことが分かる。

4-3 2015 年 9 月洪水における鬼怒川流域の水位・流量の再現計算

本豪雨の降雨流出特性を明らかにするため、鬼怒川流域を対象に降雨流出解析を実施した。図 4-3 に本豪雨時に形成・維持された線状降水帯の時空間分布（気象庁 C バンドレーダによる観測値）を示す。

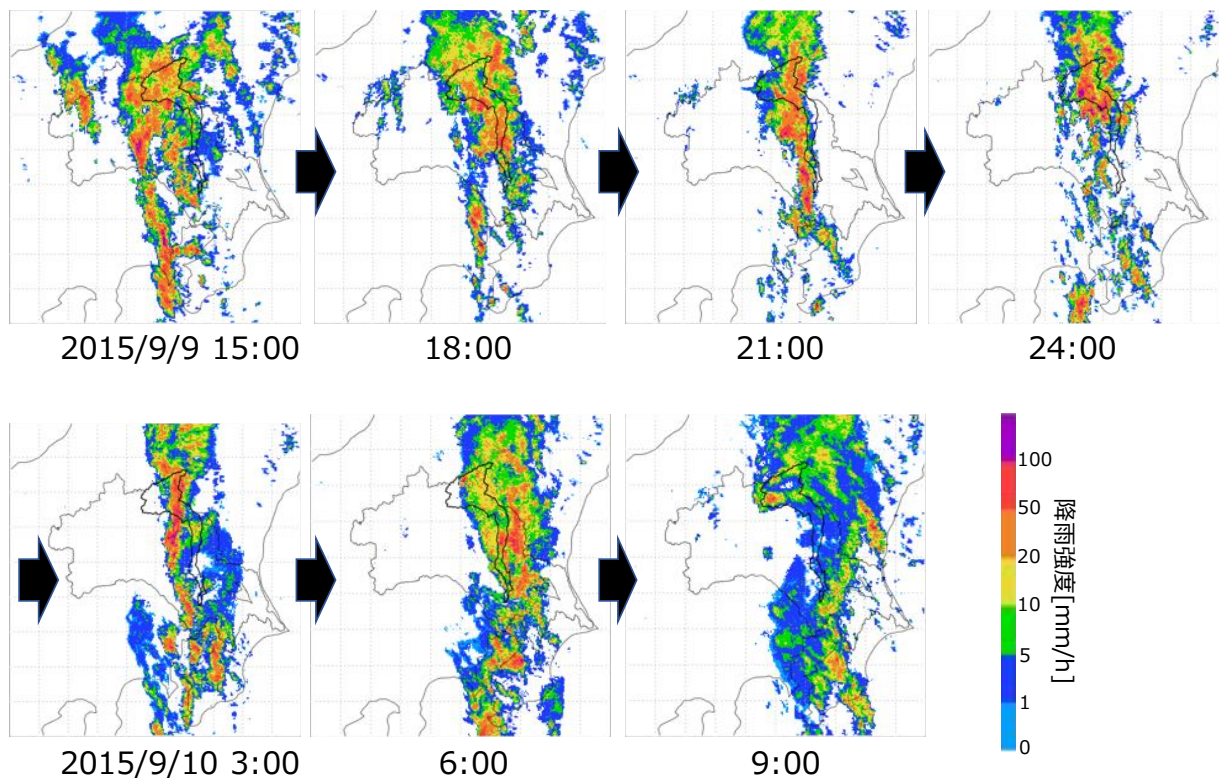


図 4-3 2015 年 9 月関東・東北豪雨時洪水時の降雨の時空間分布

4-3-1 解析手法

(1) 流出解析

流出計算では斜面計算には鉛直浸透機構と斜面計算を分離した降雨流出の基礎式を用いた。以下、その概要を説明する。

山田⁷⁾は従来から流域の最小スケールを単一斜面とし、斜面流下方向流れを **kinematic wave** とし、単一斜面における一般化した降雨流出の式を提案している。以下にその概要を示す。連続式は式(4-1)で表現される。単一斜面に対して幅広矩形断面を想定するとともに、様々な流出形態に対応するために運動則を式(4-2)に示すように、断面平均流速は水深のべき乗に比例するという形式で表現する。式(4-1)と式(4-2)より単位幅流量： q についての式(4-3)を得る。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (4-1)$$

$$v = \alpha h^m, \quad q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + aq^\beta \frac{\partial q}{\partial x} = aq^\beta r \quad (4-3)$$

$$a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}, \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (4-4)$$

ここに、 v ：断面平均流速[mm/h]， h ：水深[mm]， $q(t)$ ：単位幅流量[mm²/h]， $r(t)$ ：有効降雨強度[mm/h]， m ：流出パラメータ， α ， β ：流出特性を表すパラメータである。直接流出は流出寄与域（河道及び河道近傍の湿潤領域）のみからの流出と考えると，斜面長は実地形上の斜面長より十分短いと考えられ，式(4-5)に示す変数分離型の近似式が仮定できる。

$$q(t, x) \cong xq_*(t) \quad (4-5)$$

ここに、 q_* ：流出高[mm/h]である。また，流出寄与域の斜面長 L の末端で考え $x=L$ として式(4-5)を用いると，偏微分方程式である式(4-3)は式(4-6)に示すように流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r - q_*) \quad (4-6)$$

$$a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1) \left(\frac{\alpha}{L} \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (4-7)$$

式(6)が一般化された単一斜面からの降雨流出の基礎式となる。土壌・地形特性を示す流出パラメータ a と m の値に関して，志村ら⁸⁾は，鈴木^{9),10)}，窪田ら¹¹⁾の不飽和浸透理論と kinematic wave 法の式展開を比較することにより式(4-8)，(4-9)で示されるように，土壌・地形特性から決定できることを示している。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma} \quad (4-8)$$

$$\gamma = m + 1 \quad (4-9)$$

ここに i : 斜面勾配, D : 表層土層厚[mm], k_s : 飽和透水係数[mm/h], w : 有効空隙率, γ : 土壌の透水性を表す無次元パラメータである. これにより, 斜面流下方向の流れに関して中間流を対象とする場合, 土壌・地形特性から流出パラメータを決定し降雨流出計算を行うことが可能である.

一方で, 山地流域における流出現象では, 表面流より中間流が卓越することが知られている. このため, 大規模出水もしくは斜面深層の流れを考慮した流出計算を行うためには, 斜面多層流れを多層構造として扱う必要がある. そこで吉見・山田¹²⁾は, 以下に示す流出計算手法を用いて再現性の向上を試みた. まず, 山腹斜面が複数の層で構成されていると考え, n 層目における鉛直浸透について考える. $n-1$ 層目から n 層目への浸透量: V_{n-1} ($=b_{n-1}S_{n-1}$), n 層目から $n+1$ 層目への浸透量: V_n ($=b_n S_n$) と各層における流出に寄与する雨量の連続関係から式(4-10)を得る.

$$\frac{dS_n}{dt} = V_{n-1} - r_{nm} - V_n \quad (4-10)$$

また, 各層の流出に寄与する降雨量は式(4-11)に示すように土層内水位: S_n が各層の保水力を表す土層内の側方成分までの高さ: h_{nm} を超えた時点で発生するとしている.

$$\begin{cases} r_{nm} = 0 & (s_n < h_{nm}) \\ r_{nm} = a_{nm}(s_n - h_{nm}) & (s_n \geq h_{nm}) \end{cases} \quad (4-11)$$

さらに, 式(4-11)中の r_{nm} を式(4-10)に示す基礎式に, 斜面流出に寄与する降雨として与えることで, 各層における斜面計算を行う.

$$\frac{dq_{nm}}{dt} = \alpha_{nm} q_{nm}^{\beta_{nm}} (r_{nm} - q_{nm}) \quad (4-12)$$

ここに, n : 層数, m : 各層における側方成分の数である. また, S_n : 各層の土層内水位[mm], a_{nm} , b_n : 各側方成分浸透成分の比例定数[1/h], h_{nm} : 流出成分発生の閾値[mm], r_{nm} : 斜面流出に寄与する雨量[mm/h], V_n : 鉛直浸透量[mm/h], α_{nm} , β_{nm} : 単一斜面における降雨流出の基礎式の a_0 , β にそれぞれ対応する各側方成分, 鉛直浸透成分の比

例定数である。この鉛直浸透機構は、降雨が流出に寄与するまでの遅れ時間や損失雨量を表現することが出来る。このような構造をとることにより、鉛直浸透に起因する非線形性、側方流出に起因する非線形性を表現可能となった。以上の計算過程の概念図を図4-4に示す。

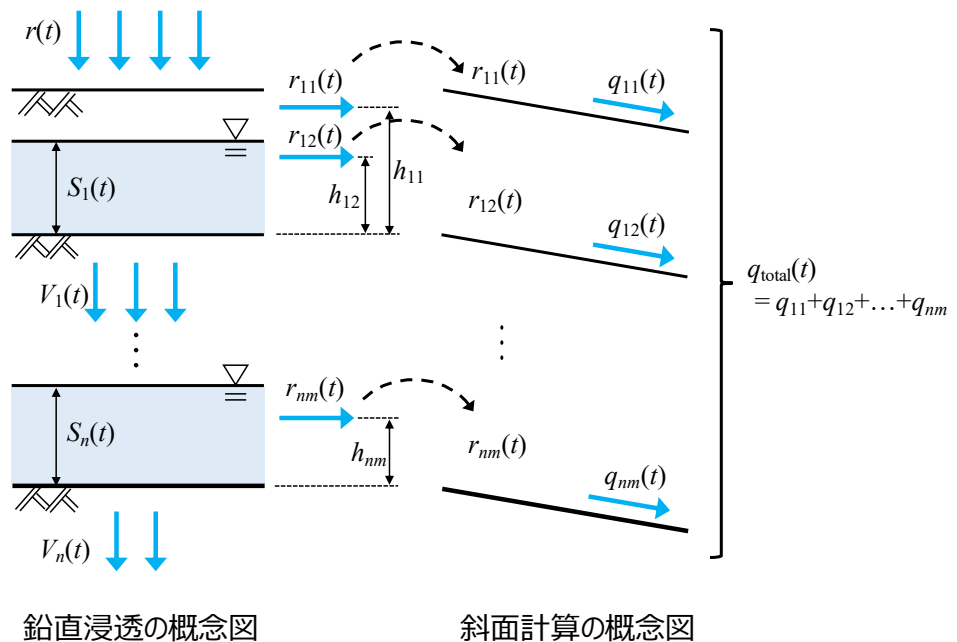


図4-4 鉛直浸透機構を考慮した降雨流出モデルの概念図

図4-4に示すように表面流出、中間流出、鉛直浸透流を表現することができる。また、中間流出は層構造によって早い中間流出成分、遅い中間流出成分が表現可能なモデルである。

(2) 河道計算

河道部では前述の斜面流出計算の結果を上流端に与え、(4-13)式に示す連続式と(4-14)式に示す運動量方程式による次元不定流計算を行った。水位計算点と流量計算点を異なる格子で定義する6-point Abbot Schemeによって差分化した。

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4-13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (4-14)$$

ここに、 α : 運動量補正係数, H : 水位[m], g : 重力加速度[m/s²], R : 水理学的径深[m], n : Manning の粗度係数[m^{-1/3}s]である.

なお、河道計算には DHI 社の MIKE11 を用いた.

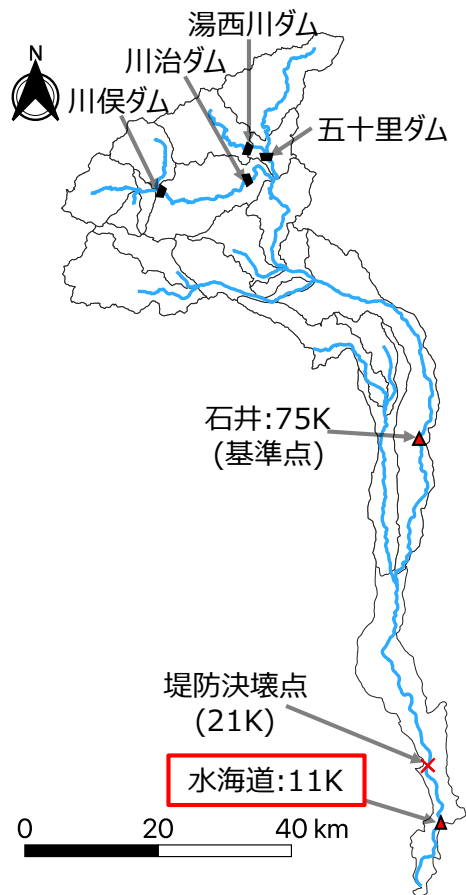


図 4-5 降雨流出計算に用いた鬼怒川流域におけるサブ流域の分割図

鬼怒川流域を図 4-5 に示すように 19 のサブ流域に分割し、各サブ流域における C バンドレーダで観測された流域平均雨量を流出計算の入力値として与えた。本研究では前述の吉見・山田モデルのうち、2 段 3 層構造の降雨流出モデルを用いた。2 段 3

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

層構造降雨流出モデルには 14 のパラメータが存在するが、鬼怒川上流域の川俣ダム（流域面積約 179 km²）と湯西川ダム（流域面積約 102 km²）において、それぞれのダム流域の過去の流域平均降雨量を用いて実測ダム流入量データと計算値の差が最小になるように推定したもののパラメータを全てのサブ流域に一様に与えた。下流端の境界条件は利根川合流部にある芽吹橋の観測水位を与えた。河道断面は実測のデータを用い、Manning の粗度係数は河川環境財団が発行しているレポート¹³⁾を参考に上流においては 0.04[m^{-1/3}s]、下流において 0.025[m^{-1/3}s]を与えた。なお、本解析では堤防からの溢水及び決壊は考慮していない。

4-3-2 再現計算結果

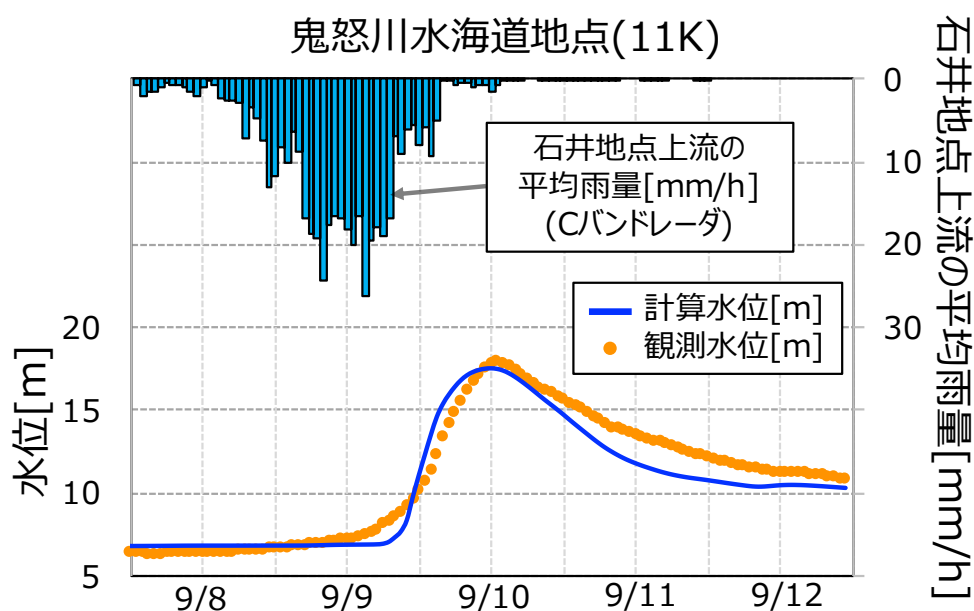


図 4-6 2015 年 9 月洪水における鬼怒川水海道地点の水位の再現計算結果

鬼怒川水海道地点における再現計算結果を図 4-6 に示す。観測値と比較して計算値はピーク水位の生起時間は約 40 分早く、ピーク水位が約 20cm 小さいが、現象を概ね再現できていると考えられる。以降、ここで構築した流出モデルを用いて検討を行っていく。

4-4 ダムの有無が下流の水位に及ぼす影響

本豪雨時において、ダムの有無が下流の水位へ及ぼした影響を明らかにするため、鬼怒川上流の 4 ダムが仮想的に無い場合の降雨流出解析を実施した。ダム有りの計算は前述の再現計算のことである。また、ダム無しの計算は、河道計算の上流端が含ま

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

れているサブ流域での斜面計算の結果を河道上流端の境界条件として与えた。計算結果を図4-7に示す。

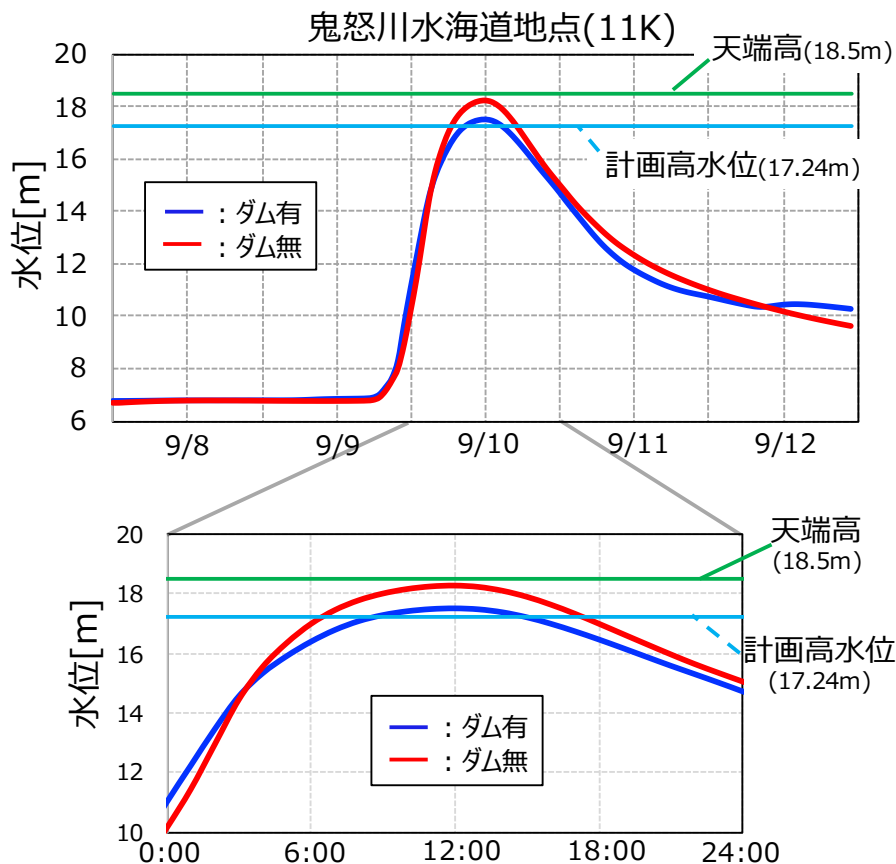


図4-7 ダムの有無による鬼怒川水海道地点の水位の比較

図4-7よりダム有りの計算ではダム無しの計算と比較して、鬼怒川水海道地点のピーク水位が約60cm低くなった。また、計画高水位を超える時間はダム無しの計算で約11時間、ダム有りの計算で約6時間（観測値は約5時間）であることが分かった。以上より、鬼怒川上流のダム群によってピーク水位は約60cm低くなり、計画高水位を超える時間も約5時間短くなったことが明らかとなった。

4-5 降雨規模が下流の水位に及ぼす影響

次に降雨規模が下流の水位へ及ぼす影響を明らかにするため、Cバンドレーダで観測された図4-5に示す各サブ流域における流域平均雨量を0.5倍、0.8倍、1.2倍に引き伸ばした値を用いて流出計算を行った。鬼怒川水海道地点における水位の計算結果を図4-8に示す。

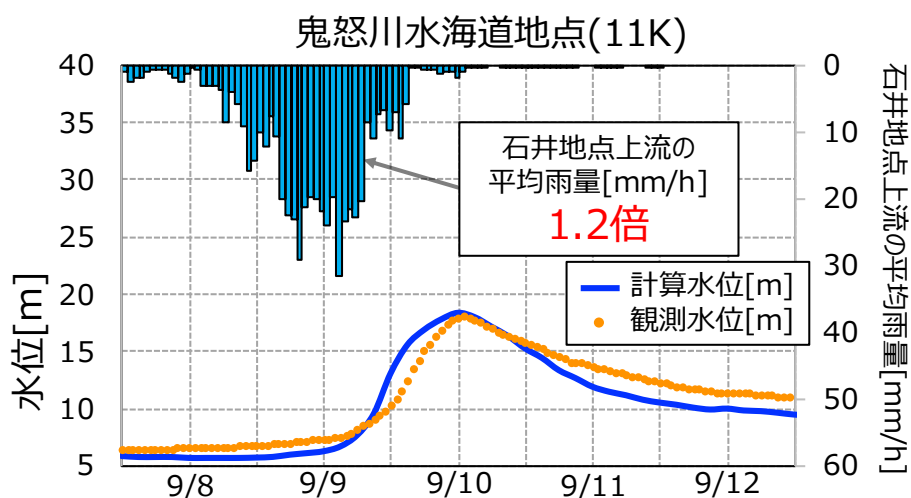


図 4-8 各サブ流域における流域平均雨量を引き伸ばした降雨流出計算結果

図 4-8 より同じ雨の降り方でも、その降雨規模が大きくなるとピーク水位が大きくなるとともに、ピーク水位の生起時間が早くなっている（例えば、流域平均降雨量を 1.2 倍にするとピーク水位は約 1.2m 大きくなり、ピーク水位の生起時間は約 1 時間早い）ことが分かった。

4-6 支川の氾濫が市街地住民の避難行動に及ぼした影響

4-6-1 八間堀川の概要

常総市内には図 4-9 に示すように鬼怒川と小貝川の他に、「幹線排水路」である八間堀川が流れている。八間堀川は寛永 12 年（1635 年）頃に人工的に開削された水路であり、低平地の排水を目的としている¹⁴⁾。一方で、鬼怒川・小貝川の氾濫時には堤内地の氾濫水を収集し、鬼怒川へ戻す役割を担っている。八間堀川は、昭和 3 年（1928 年）に旧河川法による準用河川の指定を受け、それまでの呼称である「八間堀」から「八間堀川」へ変更された。さらに、昭和 36 年（1961 年）に発生した集中豪雨による甚大な湛水被害を契機に、昭和 38 年（1963 年）に中小河川（1 級河川）に指定され、水海道市（現：常総市）湊頭地先から石下町（現：常総市）本豊田地先まで 10.6km 及び水海道市橋本から相野谷までの 1km の間について、中小河川八間堀川改修工事として昭和 39 年（1964 年）に起工された。

4-6-2 水海道市街地の浸水状況

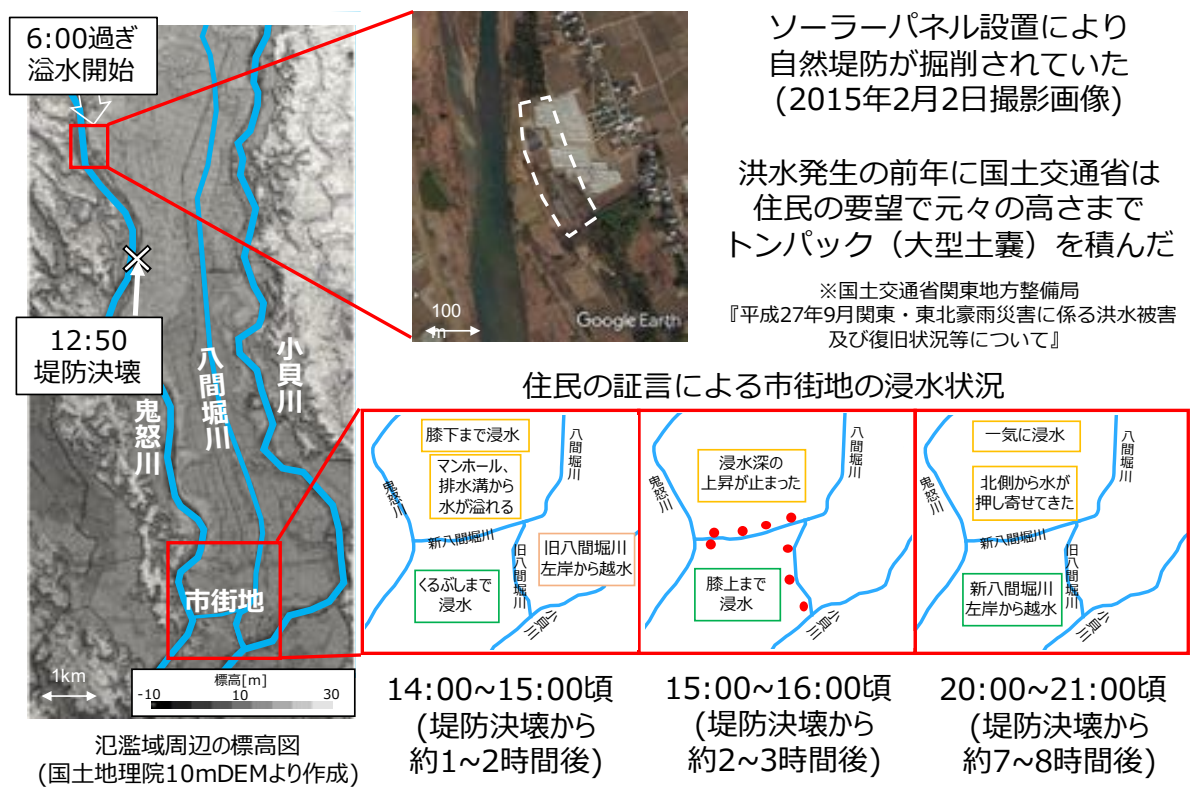


図 4-9 水海道市街地の浸水状況

次に、ヒアリング調査により明らかになった水海道市街地の浸水状況について述べる。水海道市街地は鬼怒川堤防の決壊地点から約 10km 下流に位置している (図 4-9) が、多くの住民が逃げ遅れて孤立し救助された。幹線排水路である八間堀川でも堤防からの越水・決壊が生じていたため、水海道市街地の住民には浸水の詳しい状況についてヒアリングを行った。以下に、ヒアリング調査により明らかとなった水海道市街地の浸水状況を示す。

- ① 9月10日 14:00~15:00 (鬼怒川堤防決壊から約 1~2 時間後) には、新八間堀川の北側で「マンホール・排水溝から水が溢れ出していた」、新八間堀川の南側で「くるぶしまで浸水していた」、「旧八間堀川の左岸から越水していた」という証言を多くの住民から得た。
- ② 9月10日 15:00~16:00 (鬼怒川堤防決壊から約 2~3 時間後) には、新八間堀川の北側で「浸水深の上昇が止まった」、「鬼怒川の洪水はこの程度だと思った」という証言を多くの住民から得た。
- ③ 9月10日 20:00~21:00 (鬼怒川堤防決壊から約 7~8 時間後) に新八間堀川の北

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

側で「一気に浸水した」, 「北側から水が押し寄せてきた」という証言を多くの住民から得た.

また, 常総市安全安心課に実施したヒアリング(2015年11月18日実施)によると, 「9月10日の14:00頃に住民たちの手で旧八間堀川及び新八間堀川沿いの8つの樋管内の水門が一斉に閉じられた」とのことであり, その結果, 八間堀川から市街地への内水の流入が止まったことで「浸水深の上昇が止まった」ということが推察される.

以上より, 水海道市街地の住民は八間堀川からの氾濫水の浸水深の上昇が止まったことで, 住民が安心して避難しなかったところに, しばらくして鬼怒川本線の氾濫流が水海道市街地に到達し, 逃げ遅れて孤立してしまったという浸水状況が明らかとなった.

4-7 浸水状況と避難状況の再現

4-7-1 浸水状況の再現

前節において, 堤防決壊地点から10km下流に位置する水海道市街地で多くの住民が逃げ遅れた要因は, 鬼怒川堤防決壊の約1時間後に発生した八間堀川の氾濫であることを明らかにした. そこで本節では, 数値計算による浸水状況の再現を行い, 鬼怒川洪水時における常総市内全域の浸水状況の再現, 及びヒアリング調査により明らかになった水海道市街地の浸水状況の妥当性を確認する.

4-7-2 解析手法

本研究では, 河道から氾濫原への氾濫水の供給を適切に再現すること, 及び八間堀川が下流の浸水状況へ及ぼした影響を再現するために, 河道と氾濫原を一体的に取り扱うことのできる平面2次元の氾濫解析を行った. 基礎式は(4-15)式に示す連続式と(4-16)および(4-17)式に示す摩擦項にManning則を用いた運動量方程式からなる2次元浅水流方程式である.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4-15)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{h} \right) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4-16)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{h} \right) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4-17)$$

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

計算対象領域は、水位及び流量が観測されている鎌庭地点（27K）と鬼怒川水海道地点（10.5K）間の浸水域が収まる長方形の領域とした。計算対象期間は、2015年9月10日4:00~20:00の16時間とし、鬼怒川の河道地形は国土交通省により計測された定期横断測量、八間堀川を含む氾濫原は国土地理院で公開されている5m数値標高モデルより作成した10mの計算格子を設定した。また、Leap-Frog法により基礎式を離散化した。

境界条件は、上流端である鎌庭地点に実測の流量ハイドログラフ、下流端である鬼怒川水海道地点に実測の水位ハイドログラフを与えた。八間堀川については、上流端に単一斜面における貯留関数法と同型のモデル(4-6)式による流出解析によって得られた流量ハイドログラフを与え、下流端である鬼怒川との合流地点の八間堀川排水機場に実測の水位ハイドログラフと実測の排水量を与えた。また、常田¹⁵⁾の調査結果を参考に、決壊地点の開口幅の時間変化を与えた。

初期条件は、計算対象期間の開始時刻における実測流量を十分な時間与え続けた不等流水深を鬼怒川の河道内に与えた。

粗度係数は、計算領域内全域で一様に $0.03[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ とした。

4-7-3 解析結果

解析結果を図4-10に示す。9月10日6:00過ぎに若宮戸地点（25.35K）から溢水が始まり、その氾濫水が10:00頃に八間堀川へ流入している様子が分かる。その後、12:00頃には八間堀川の下流で浸水が見られ、14:00頃には新八間堀川の北側や旧八間堀川の周辺で浸水が発生している。これは、前節に示した住民へのヒアリング調査で明らかとなった水海道市街地の浸水状況と一致しており、本氾濫解析の妥当性が確認された。これより、常総市内の浸水状況は、6:00過ぎに若宮戸地点（25.35K）から溢水した氾濫水が八間堀川を伝って流下し、水海道市街地において早いタイミングで浸水始まったことが明らかとなった。また、大槻ら¹⁶⁾は八間堀川を水路として考慮した場合としない場合の氾濫シミュレーションを実施・比較し、八間堀川を介して氾濫水が下流へ高速で伝搬したことを確認している。

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

4-7-4 避難状況の再現

住民の避難行動について、前述のヒアリング調査において「避難した」と回答した住民303件のうち、避難経路・避難開始時刻・避難場所到着時刻について回答を得た71件に加え、①避難経路と避難開始時刻の回答を得た住民、②避難開始時刻と避難場所到着時刻及びその避難場所の回答を得た住民を対象として、避難経路を再現した。①については移動方法（徒歩・車）と移動距離から到着時刻を推定し、②については自宅から避難場所へ最短経路で移動したと仮定し、全161件の避難経路を再現した。避難状況と浸水状況の再現結果を図4-10に示す。

その結果、溢水地点に近い地域Aの周辺の住民は浸水が始まる以前の早いタイミングで避難していること、水海道市街地の地域Dや鬼怒川・小貝川沿いでは避難した住民が少ないことが明らかとなった。また、浸水域内の避難所に避難した住民が多くいることがわかる。

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

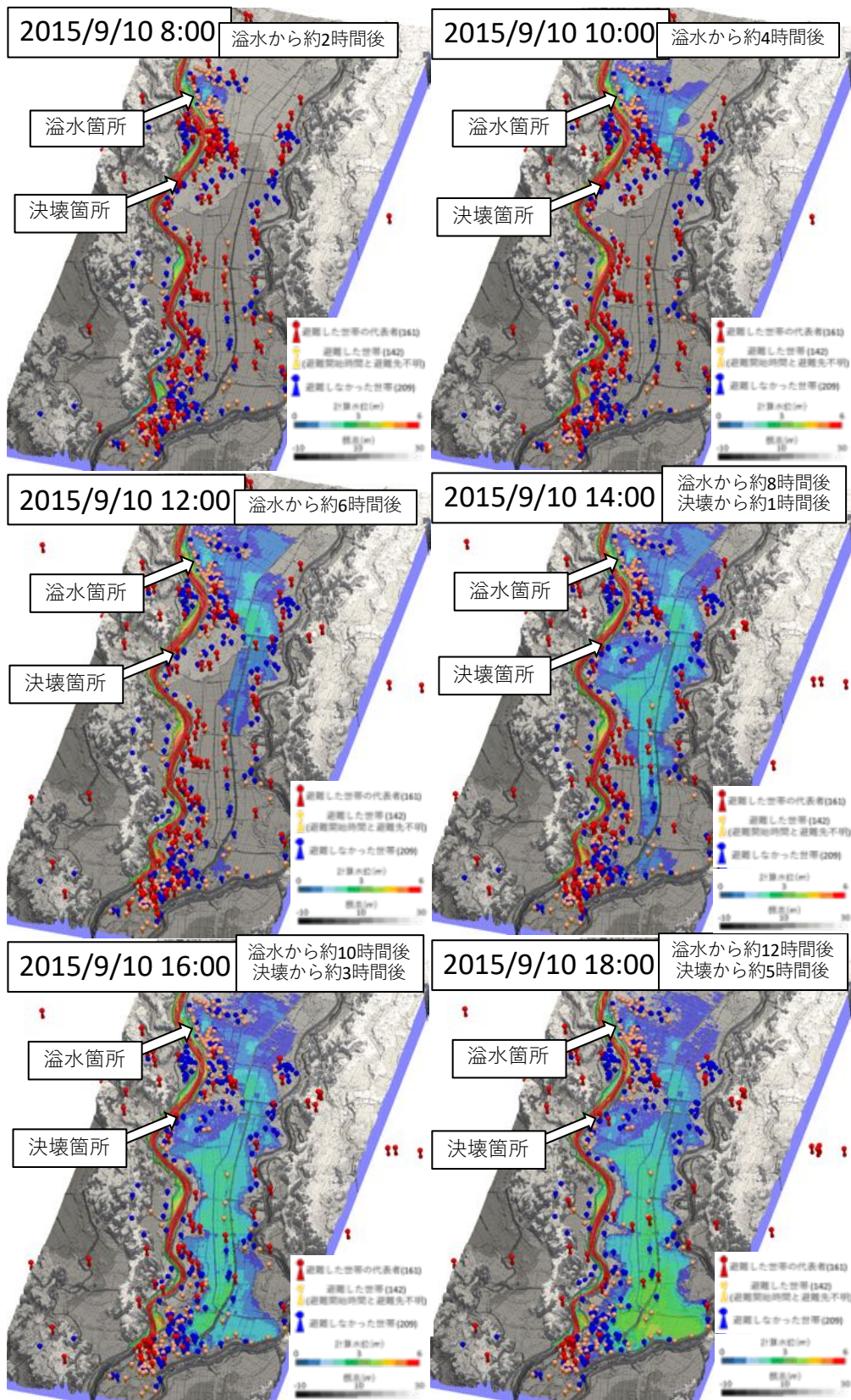


図 4-10 浸水状況と避難状況の再現計算結果

4-8 浸水状況と避難タイミングの関係

次に、前述の氾濫解析と住民の避難行動の調査結果を用いて、浸水状況と避難のタイミングについて整理を行った。図中のA~Dは地域A~Dを示しており、Eはそれ以外の常総市内の住民である。図4-11より、地域Aの住民が最もまとまったタイミングに避難しており、地域BおよびCの順にそのタイミングが分散していく。そして、地域DおよびEでは広く分散していることがわかる。

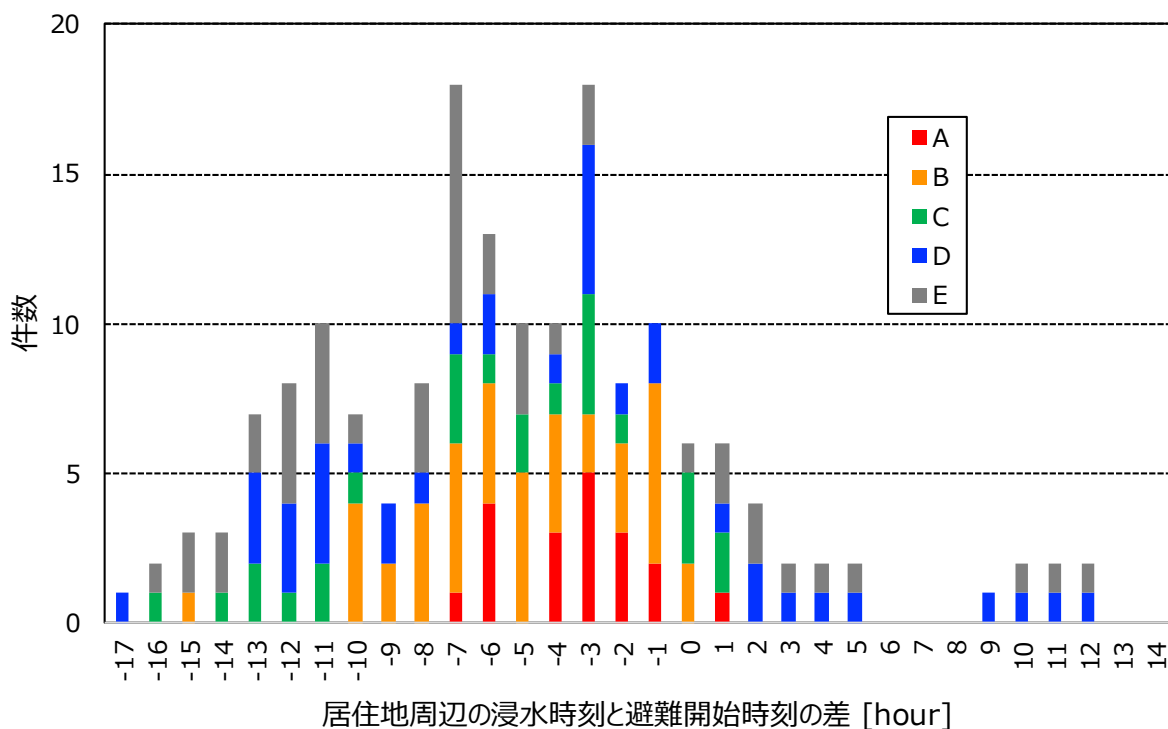


図4-11 居住地周辺の浸水時刻を0とした場合の避難開始時刻の状況

4-9 まとめ

本章では、上流に雨が降ってから約半日後に下流で氾濫が発生するという時間スケールで生じたために、避難をする時間が十分にあったにもかかわらず多くの住民が逃げ遅れて救助された。鬼怒川洪水による茨城県常総市を対象に、降雨流出および氾濫現象について詳細な分析を行った。鬼怒川は上流と下流で河床高の縦断分布が45K付近で不連続（上流が急勾配で下流が緩勾配）となり、川幅も上流と比べて半分程度に狭くなるという特徴があり、降雨流出解析を実施した結果、下流の水位が堤防天端高を超えていても上流では水位が上がっていないことが明らかになった。その結果、常総市において、上流の河川水位が避難行動へマイナスに作用した情報（第3章）である要因は、上流の水位が高くなかったためであることが推察された。また、降雨規模が

第4章 平地における降雨流出氾濫特性と住民の避難行動

下流の水位・流量へ及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実測ハイトグラフの波形は変えずに総降雨量のみを0.5倍、0.8倍、1.2倍に引き延ばして流出計算を行った。その結果、同じ雨の降り方でも、降雨量が大きくなると基準点におけるピーク水位が大きくなると同時に、ピーク水位の生起時間が早くなることが明らかとなった。さらに、ダムの効果を検証するため、上流のダムが無いと仮定した場合の数値シミュレーションを行った。その結果、ダムが無かった場合には基準点におけるピーク水位の生起時間は1時間早くなり、ピーク水位の値は約60cm大きくなることが明らかとなった。また、計画高水位を超える時間は観測値と比較して約3時間長くなることが明らかとなった。次に、洪水氾濫解析を実施し、第2章の調査で取得した洪水時の住民の避難行動の時系列を用いて、浸水状況と避難行動について分析を行った。その結果、鬼怒川から溢水した氾濫水が、常総市内を流れる幹川排水路の八間堀川に流入・流下し早いタイミングで下流の市街地に伝播し早期の浸水を引き起こしていたことを明らかにした。これは、第2章で実施したヒアリング調査結果とも一致しており、氾濫計算の妥当性が確認できた。

参考文献

- 1) 津口裕茂：線状降水帯，天気，63, pp.11-13, 2016.
- 2) 津口裕茂，加藤輝之：集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析，天気，61, pp.455-469, 2014.
- 3) 国土交通省関東地方整備局：第2回鬼怒川・小貝川有識者会議資料，2006.
- 4) 二瓶泰雄，大槻順朗：平成27年9月関東・東北豪雨による関東地方災害調査報告書 4.3節 決壊・溢水状況，p.86, 2015.
- 5) Eiju Yatsu：Rock Control in Geomorphology, SOZOSHA, 1966.
- 6) 二瓶泰雄，大槻順朗：平成27年9月関東・東北豪雨による関東地方災害調査報告書 4.3節 決壊・溢水状況，p.85, 2015.
- 7) 山田正：山地流域の非線形性に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol.44, pp.259-264, 2003.
- 8) 志村光一，大原憲明，松本浩志，山田正：水理計算に基づく大規模河道網の流出特性に関する研究，水文・水資源学会誌，Vol.14, No.3, pp.217-228, 2001.
- 9) 鈴木雅一：山地流域における基底流出逡減特性(I)，日林誌，Vol.66, pp.174-182, 1984.
- 10) 鈴木雅一：山地流域における基底流出逡減特性(II)，日林誌，Vol.66, pp.211-218, 1984.
- 11) 窪田順平，福嶋義宏，鈴木雅一：山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化(II)～水収支及び地下水発生域の検討～，日林誌，Vol.70, No.9, pp.381-389, 1988.
- 12) 吉見和紘，山田正：鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の長短期流出解析への適用，土木学会水工学論文集，Vol.70, pp.367-372, 2014.
- 13) 河川管理財団：鬼怒川の河道特性と河道管理の課題，pp.16-25, 2009.
- 14) 八間堀川沿岸土地改良区：八間堀川沿岸土地改良区史 水と闘う，p.19, 1985.
- 15) 常田賢一：2015年9月関東・東北豪雨による鬼怒川の越流破堤要因および模型実験による粘り強い堤防構造の検討，平成28年度近畿地方整備局研究発表会論文集 防災・保全部門，Vol.13, 2016.
- 16) 大槻順朗，二瓶泰雄，M.A.C. Niroshinie：2015年関東・東北豪雨における鬼怒川氾濫による常総市の洪水氾濫状況，河川技術論文集，Vol.22, pp.315-320, 2016.

第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

5-1 概説

洪水によって浸水が発生した際に、浸水状況をリアルタイムで把握することは、自治体による災害対応や、住民の安全な避難行動にとって重要な情報である。現行の洪水予測は、降雨から河川流量や水位を予測することに主眼が置かれており、堤防決壊等に伴う洪水氾濫が発生した場合には、どのように浸水が広がるか精度よく推定することは実現できていない¹⁾。また、住民に配布されるハザードマップの浸水想定範囲は、事前に想定したシナリオ（氾濫流量の外力条件）に基づく氾濫シミュレーションの結果を包含するものであり、現実には発生する浸水の状況を時々刻々と表現するものではない。したがって、現状において浸水の状況を自治体が把握するためには、断片的に入手される現場からの情報を頼りに経験的に推定するより他はないということが指摘されている¹⁾。近年では、被害の情報を効率的に収集・共有できる災害情報システムの導入を検討する自治体も多くなっている^{例えば 2)}が、浸水に関する情報は特定の地区や地点における情報に限られており、浸水深の空間分布をリアルタイムで俯瞰的に把握することは困難である。そこで、本章では、住民の避難行動を的確に促す情報として、適時性に優れた氾濫予測手法の提案をする。

5-2 防災意識の経年変化

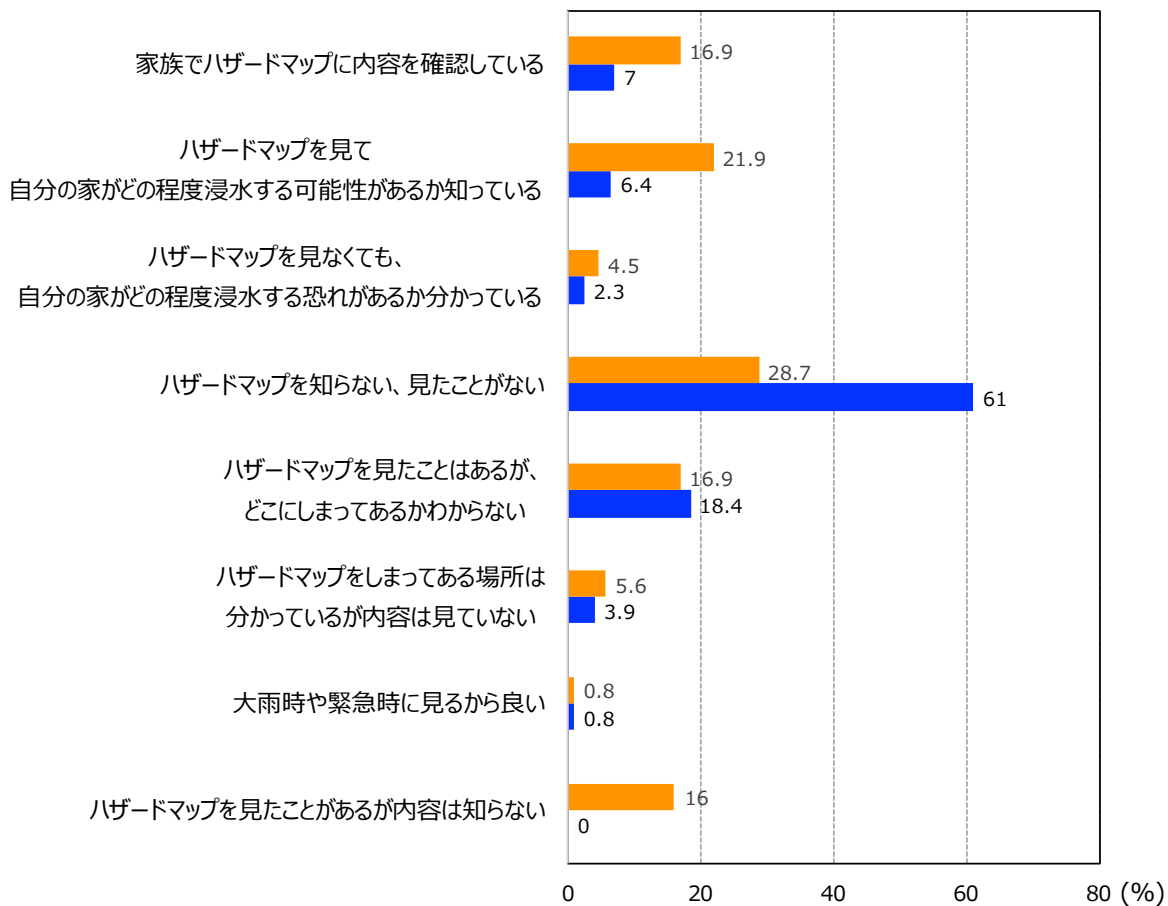
防災意識の経年変化および今後の水害時に住民が望む情報を把握することを目的として、茨城県常総市において発災から約2年後の2017年11月23日～25日に前調査と同一世帯を対象としたヒアリング調査を実施し、前調査で回答を得た516件のうち357件の回答を得た。調査項目は日頃のハザードマップ確認状況、日頃の家族の避

第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

難場所決定状況および今後の水害時に住民が望む情報である。

5-2-1 ハザードマップ確認状況

ハザードマップの確認状況の経年変化 (N=357)



ハザードマップを見たタイミング (N=357)

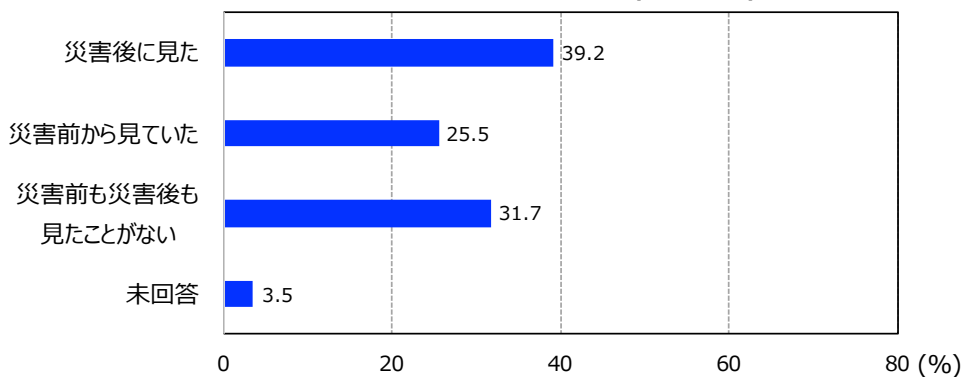


図 5-1 日頃のハザードマップの確認状況の経年変化

第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

図5-1に日頃のハザードマップ確認状況の経年変化を示す。発災から2ヶ月後の調査では、「洪水ハザードマップを知らない・見たことがない」と回答した住民が約61%で最も多かったが、発災から2年後の調査では、その割合が約29%に小さくなっていることが明らかとなった。また、「ハザードマップの内容を確認している」住民が約13%から約39%に増加した一方で、「ハザードマップを見たことがあるが、内容を知らない」と回答した住民が0%から約16%に増加した。ハザードマップを災害後に見るようになった住民は約39%であった。

以上より、ハザードマップを見たことのある住民は増えたが、内容まで見ていない人が多くいることが明らかとなった。さらに、ハザードマップの内容まで広く普及することが今後の課題であることが明らかとなった。

5-2-2 避難場所決定状況

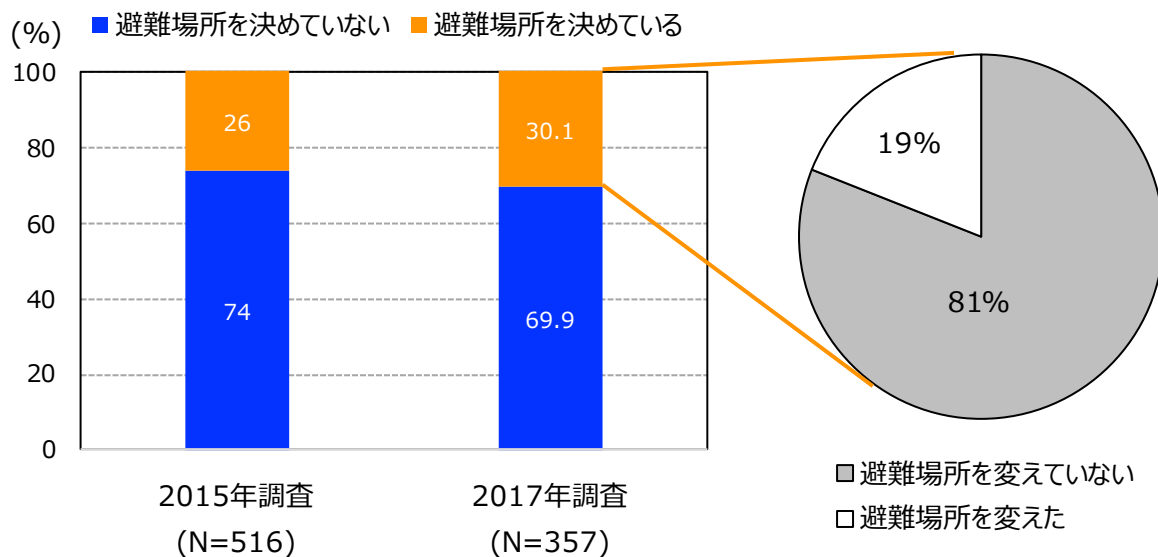


図5-2 日頃の家族の避難場所決定状況の経年変化

本洪水時には、多くの避難者がいるにも関わらず浸水した避難所があった。本洪水で浸水した地域は鬼怒川と小貝川に挟まれた地域であり、洪水時の安全な避難場所を検討する必要がある。そのための基礎情報として、本洪水を経験した住民の避難場所決定状況の経年変化について調査を行なった。図5-2に発災から2ヶ月後と2年後の調査における日頃の家族の避難場所決定状況を示す。発災から2ヶ月後の調査では、「日頃から家族の避難場所を決めている」と回答した住民が約26%であったが、発災から2年後の調査ではその割合が約30%であり、ほとんど変化がないことが明らかと

第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

なった。また、「日頃から家族の避難場所を決めている」と回答した約30%の住民のうち、約19%が「災害を経験して、前の避難場所が危険だと感じたから」・「災害時に避難が困難だったから」という理由で2年前から避難場所を変えていることが分かった。しかし、全体としての割合は小さいことから、本洪水を踏まえて安全な避難所を家族で決めるようになった住民は少ないことが分かった。

5-3 災害時に住民が望む情報

常総市の住民に対して発災から2年後に実施したヒアリング調査において、ハザードマップの確認状況および避難場所決定状況について、変化がないことが明らかとなった。そこで、平地と中山間地において水害時に住民がどのような情報を望んでいるのか整理した。なお、中山間地の住民が望む情報はそれぞれの調査で回答を得ている。

5-3-1 平地の住民が望む情報

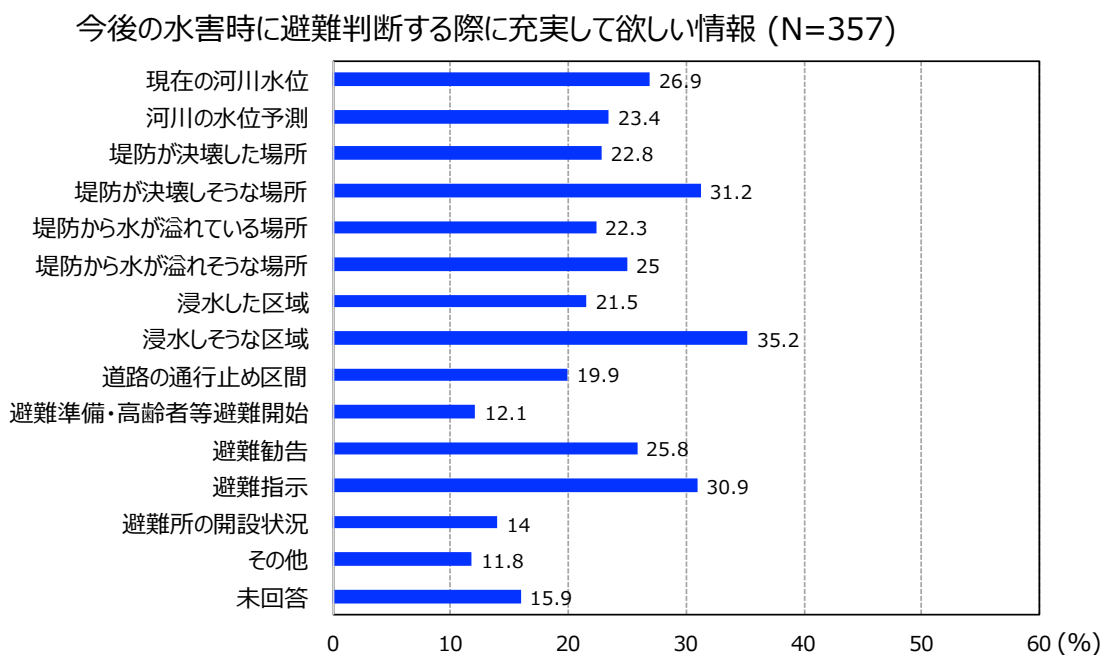
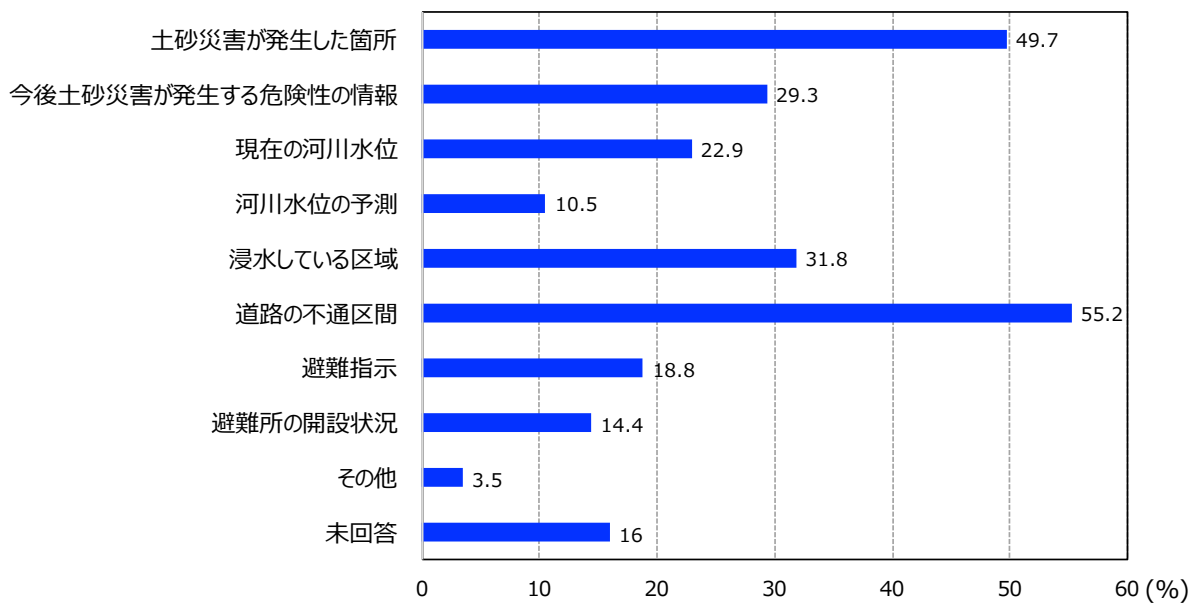


図 5-3 平地（常総市）の住民が今後の水害時に避難判断する際に充実してほしい情報

常総市の住民が、今後避難判断をする際に充実してほしい情報は「浸水しそうな区域」が約35%で最も多く、次いで「堤防が決壊しそうな箇所」が約31%であった（母数は追加調査の回答者全員）。以上より、平地の住民が水害時に望む情報は、これから何かが起きそうであるという予測情報であることが明らかとなった。（図 5-3）

5-3-2 中山間地の住民が望む情報

今後の水害時に避難判断する際に充実して欲しい情報 (N=1,275)



今後の水害時に避難判断する際に充実して欲しい情報 (N=728)

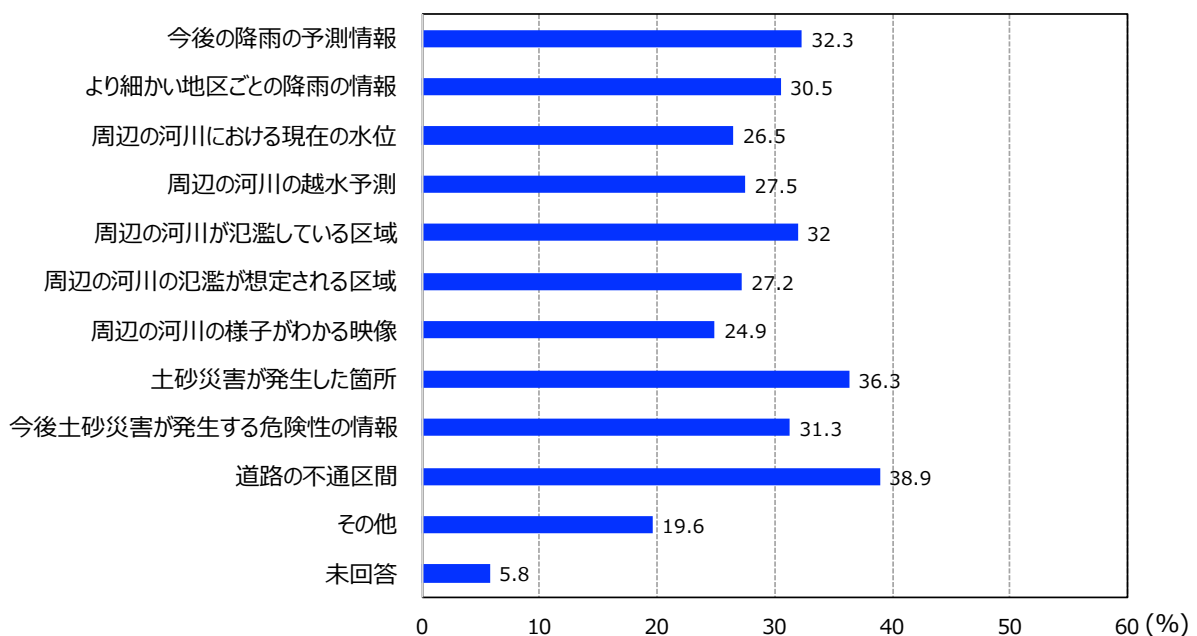


図 5-4 中山間地（上：東峰村，下：朝倉市）の住民が今後の水害時に避難判断する際に充実してほしい情報

東峰村の住民が、今後避難判断をする際に充実してほしい情報は「道路の不通区間の情報」が約 55%で最も多く、次いで「土砂災害が発生した箇所の情報」が約 50%で

第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

あった（母数は回答者全員）。

また、朝倉市においても、「道路の不通区間の情報」が約39%で最も多く、次いで「土砂災害が発生した箇所の情報」が約36%であった（母数は回答者全員）。

以上より、中山間地の住民が水害時に望む情報は、道路の不通区間の情報と土砂災害が発生した箇所の情報であることが明らかとなった。

5-4 リアルタイム氾濫域予測シミュレーション手法の構築

前述のように、平地において避難判断を行う際に欲しい情報は「避難勧告・指示」や「河川水位」の他に、「浸水しそうな区域」や「堤防が決壊しそうな箇所」のような予測情報であることが明らかとなった。そこで、本節では住民の適確な避難行動を誘導するためのリアルタイム浸水域予測を行うための基礎的な検討として、常総市内の浸水域を対象に、高精度かつ高速演算が可能な「地形適合格子モデル」による氾濫解析を行い、第4章で実施した2次元浅水流モデルによる氾濫解析結果と比較した。

5-4-1 地形適合格子モデルと従来の氾濫解析モデルの比較

川池は、既往の4つの氾濫解析手法（①デカルト座標系モデル、②一般曲線座標系モデル、③非構造格子モデル、④街路ネットワークモデル）について、各解析手法の長所と短所をまとめている³⁾。以下、川池に倣い各解析手法の概要を示す。

デカルト座標系モデルは、氾濫解析に広く一般的に用いられているが、これは格子形成の簡便さに起因すると考えられる。つまり、地形図上で原点と格子幅を決定すれば解析格子は一意的に決まるため、格子形成に要する時間や労力が少なく済むモデルである。さらに、国土地理院が公開している数値標高モデル（DEM）はデータが格子状に並んでおり、容易に格子形成を行うことが可能となってきている。しかし、市街地にデカルト座標系モデルを適用する場合には、格子の大きさよりも小さな幅員の道路を認識することができず、その場合には道路と建造物を同一の格子内に混在させることになり、これらの影響を考慮した氾濫解析を行うことができない。道路と建造物を別々の格子に属性分けできる程度に細かく格子分割することも考えられるが、計算機への負荷が大きくなる。

一般曲線座標系モデルを市街地に適用する場合、座標軸を適切にとることができれば格子毎に道路と住区（建造物を含む）の属性分けがある程度可能となる。したがって、デカルト座標系モデルと比較して、市街地での詳細な氾濫解析に適したモデルであるといえる。しかし、座標軸は ξ 、 η の2本に限られるので、考慮できる道路の方向はおのずと制限される。この点は、対象とする道路網の形状に大きく左右される条

第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

件である。また、格子形成に関して、林³⁾が座標線の内挿法を用いて省力化を試みているが、デカルト座標系モデルと比較してかなりの労力が必要となる。

非構造格子モデルを氾濫解析へ適用する際、長所として、境界や形状の複雑な領域に対して格子を形成しやすいということや、計算上重要でない領域は格子を荒くとることで格子数を節約できることなどが挙げられる。そのため、航空工学等の分野では、非構造格子を用いた解析が一般的になりつつある。さらに、都市域においては、複雑に流れる中小河川網やその堤防、また鉄道や道路などの連続盛土が存在し、氾濫水の挙動に大きな影響を及ぼす。これらの線状構造物の形状を適切に取り入れた氾濫解析を行うにも、複雑な境界にも柔軟に対応できる非構造格子の適用が有利である。しかし、非構造格子モデルでは、解析格子の不規則性のために、格子の形状や接続関係などを記述したデータが必要であり、格子形成に膨大な時間と労力を要する。

街路ネットワークモデルは、密集市街地への適用を目的として開発された。密集市街地では建造物が道路の両側に林立し、氾濫水は主に道路を伝って市街地を伝播していく。街路ネットワークモデルではこの点に着目して、まず道路だけを取り出してノードとリンクからなる街路ネットワークを形成する。したがって、道路格子と住区格子の区別は明確である。また、一般曲線座標系モデルや非構造モデルと比較してもかなり細かな道路まで考慮に入れることができる上、その道路を縦断方向にさらに分割するため詳細な浸水深や流速の情報が得られる。その反面、非構造格子モデルと同様の格子形状に関する記述と、ノード・リンク・住区間の相互の接続関係などを記述したデータが必要なため、格子形成には4手法の中で最も煩雑な作業を要する。

5-4-2 地形適合格子モデルの概要

安田ら⁴⁾は従来の氾濫解析手法と同精度かつ高速で演算を行うことが可能である、地形適合格子による高速洪水氾濫予測モデルを提案している。地形適合格子モデルによる解析法は、任意の多角形格子の使用が可能である上に、座標軸に依存することなく柔軟に格子を構成できるという特徴がある。さらに、同じ計算領域内において異なる格子辺長及び形状による格子分割が可能であるため、地形形状の近似度を格段に向上させられるだけでなく、一様な格子間隔の細分化された矩形格子を用いた場合よりも効率的に格子分割でき、格子数が大幅に減少するために、計算時間の大幅な短縮が可能である。

一般に、拡散型の氾濫において、移流項は他の項と比較して無視できるほど小さなオーダーであるが、非線形項であるためその計算に時間がかかる。そこで、地形適合格子モデルによる解析法の基礎式は、(4-15)~(4-17)式に示した浅水流方程式における

第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

運動方程式から移流項を除いた式を1次元で表した(5-1)および(5-2)式である。

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^N Q_j \quad (5-1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + ghl \frac{\partial \eta}{\partial s} = - \frac{gn^2 |Q| Q}{h^{7/3} l} \quad (5-2)$$

ここに、 A ：格子面積、 l ：格子辺長、 Q ：隣接格子からの流入量、 s ：隣接格子の図心間距離、 η ：浸水位、 h ：浸水深、 g ：重力加速度であり、格子上における変数の定義を図5-5および図5-6示す。

地形適合格子は格子毎にその形状が異なるため、格子毎の格子辺長や隣接格子との対応関係を整理した構造化された格子構成に関する情報が必要になるものの、この情報に基づけば(5-1)および(5-2)式に示した1次元流れの式によって計算が可能となる。さらに、このような構造化された情報を用いることにより、効率的な計算が可能となるため、結果として高速演算にも寄与している。

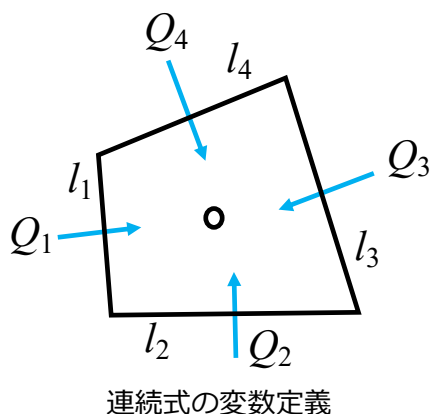


図5-5 地形適合格子における連続式の変数定義

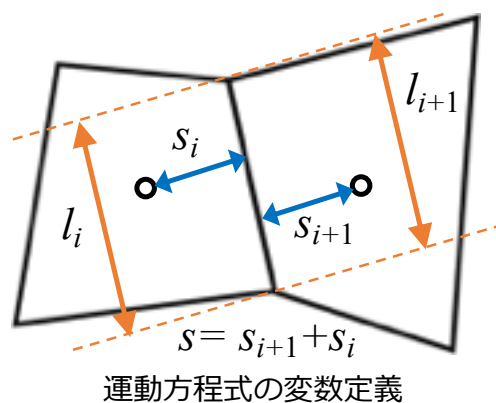


図5-6 地形適合格子における運動方程式の変数定義

また、道路やアゼのような線状境界の影響は、それを挟む格子の水位と線状境界の高さ関係について、表5-1および図5-7のように考え、(5-2)式中でその効果を考慮した。

表 5-1 線状境界における変数の定義

	$d_{i+1} > 0$	$d_{i+1} \leq 0$
$d_i > 0$	$h = (d_i + d_{i+1}) / 2$	$h = d_i / 2$
$d_i \leq 0$	$h = d_{i+1} / 2$	$Q = 0$

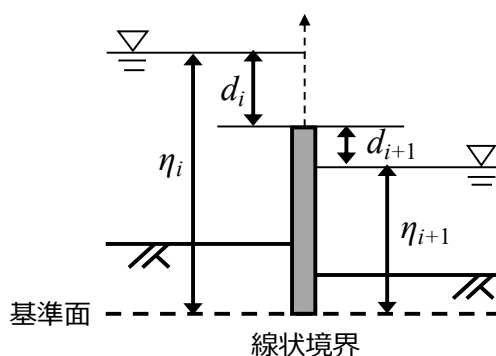


図 5-7 線状境界における変数の定義

5-4-3 地形適合格子モデルの基礎式における各項のオーダー比較

末次による破堤氾濫流の流速調査によると、その流速は 0.16~0.36 m/s 程度であることが示されている⁵⁾。本洪水時の氾濫流速については、ヒアリング調査により、破堤箇所からの氾濫水が約 10 km 下流の市街地の到達した時間が約 8 時間であったことから、 $10 \text{ [km]} / 8 \text{ [h]} \doteq 1.25 \text{ [km/h]} = 0.35 \text{ [m/s]}$ となる。

安田は、浅水流方程式における移流項の重要度について考察し、波動方程式から得られる解を用いて局所項と移流項のオーダーの比較を行うと特別な場合を除き、

$$\frac{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right)}{\frac{\partial M}{\partial t}} < 1 \quad (5-3)$$

なる関係が成立することを示しており、氾濫流速の小さな拡散型の氾濫においては移流項を省略する近似が妥当であることを示している。

5-4-4 地形適合格子の生成

地形適合格子モデルは前述のモデルのうち、非構造格子モデルに属する。そのため、格子形成に多大な時間を要する。福岡ら^{6)~8)}は、氾濫解析において、道路やアゼはその幅員や周囲の地盤高との高低差によって、①流路の役割を果たす場合と、②氾濫水伝播の障害となる場合とに分類して考える必要があることを指摘している。本研究で対象とする茨城県常総市内には、幅員が広くその両縁に建造物が林立する道路はほとんど存在しないことから、道路やアゼ等は②氾濫水伝播の障害となるとみなし、線状境界として格子辺上に組み込んだ。

ここで、従来は地形形状を見ながら手作業で地形適合格子を形成していたために、膨大な時間を要していた。そこで、本研究では OSM 財団が公開しているライセンスフリーのデータベースである OpenStreetMap の「道路中心線」データを用いて対象領域を分割することで、格子形成に要する時間を大幅に短縮した。OpenStreetMap は「道路地図などの地理情報データを誰でも利用できるよう、フリーの地理情報データを作成することを目的としたプロジェクト」(wiki.osm.org)であり、このデータを用いて格子分割を行い、氾濫解析を実施した前例は見当たらない。

図 5-8 に作成した格子を示す。



図 5-8 OpenStreetMap により分割した地形適合格子

5-4-5 解析条件

本解析において、第4章で実施した氾濫解析によって得られた溢水地点および破堤地点の流量を対応する辺に与えた。粗度係数は、対象領域全域で $0.03[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ とした。

5-4-6 解析結果

解析結果を図 5-9 に示す。第4章で実施した矩形格子を用いた浅水流モデルによる氾濫解析結果と比較して、道路中心線により格子を生成した地形適合格子モデルによる再現計算においても氾濫水のフロントの様子を概ね再現できていることがわかる。16 時間の再現計算を、浅水流モデルでは約 24 時間、地形適合格子モデルでは約 10 分の計算時間である。つまり、地形適合格子モデルによる再現計算は浅水流モデルと比較して約 150 倍の高速計算が可能であることが明らかとなった。これは、例えば 6 時間先の浸水域の予測が数分で実施できるということであり、本モデルはリアルタイムの浸水域予測が可能であることを示している。なお、浅水流モデルによる再現計算

第5章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

では支川の八間堀川を伝って下流へ氾濫水が早いタイミングで伝播したことを前述したが、本研究では地形適合格子モデルでは排水路網を考慮せず、道路網のみで格子を生成したために、下流の市街地における早期の浸水は確認できない。また、ポンプによる排水や氾濫水の河川への流入を考慮していないため、計算時間終盤において浸水深が大きくなるが、ここではリアルタイムの浸水域予測を目的としているため、浸水域の広がり方のみに注目する。また、粗度係数は氾濫原内で一様に $0.03[\text{m}^{-1/3}\text{s}]$ としているため、格子内の土地利用に応じた粗度係数を与えることや、水路を格子として組み込むことで再現精度を向上できると考えられる。

今後は、本研究で提案した手法を用いて、日本全国で高精度のリアルタイム氾濫計算を誰でも実施できるように、オープンプラットフォームである CommonMP 上に本解析モデルを実装する予定である。

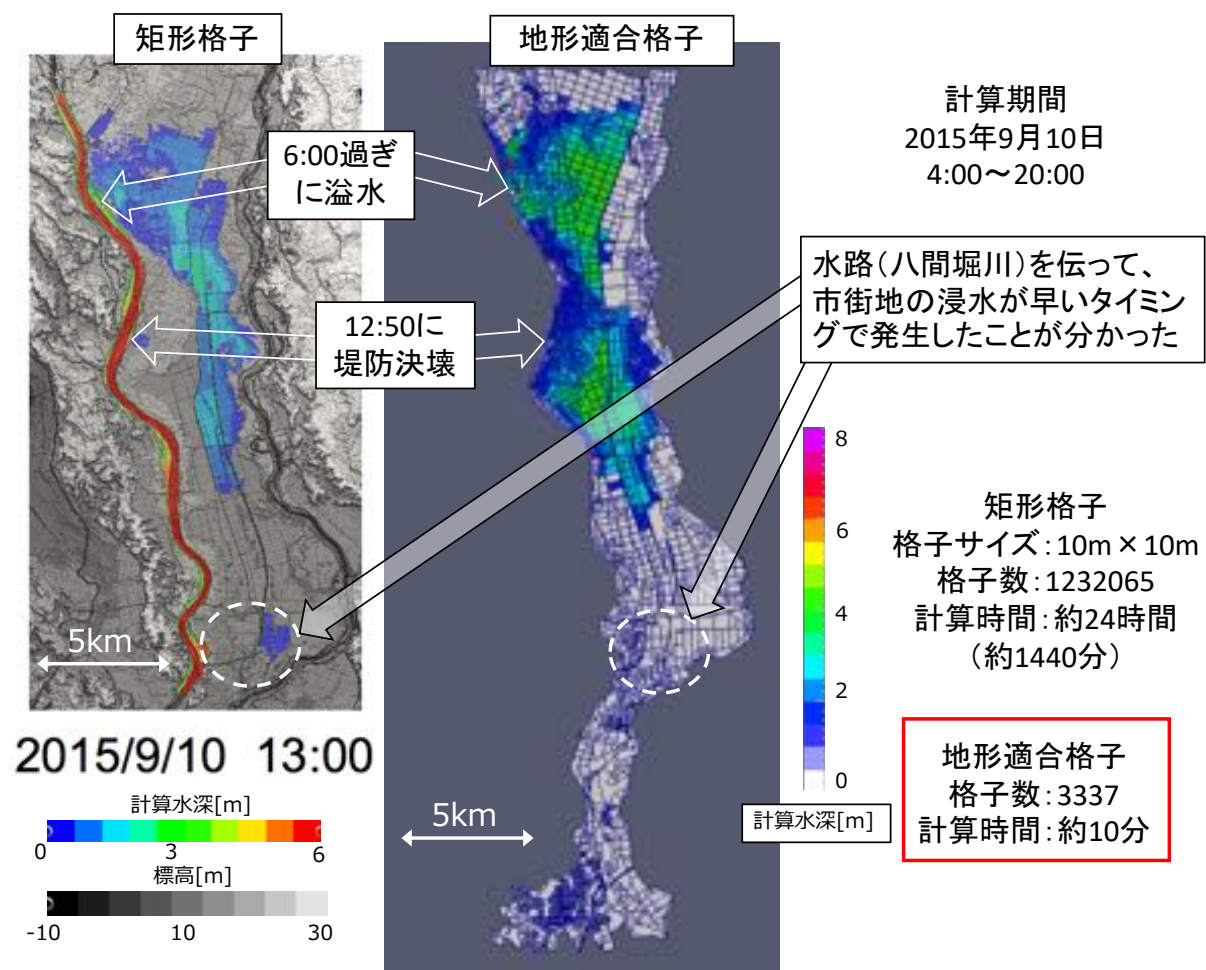


図 5-9 矩形格子と地形適合格子モデルによる再現計算結果の比較

5-5 まとめ

本章では、今後の洪水時に住民が望む情報について明らかにした。平地の住民が水害時に望む情報は、これから何かが起きそうであるという予測情報であり、中山間地の住民が水害時に望む情報は、道路の不通区間の情報と土砂災害が発生した箇所の情報であることを明らかにした。

そして、住民の的確な避難行動を促す情報としてリアルタイム浸水域予測手法の構築を行った。リアルタイム浸水域として、地形適合格子モデルを採用し、従来、本モデルの課題であった格子形成に長時間要するという点を、OSM 財団が公開しているライセンスフリーのデータベースである OpenStreetMap の「道路中心線」データを用いて対象領域を分割することで、格子形成に要する時間を大幅に短縮した。本モデルによる再現結果と第4章で実施した矩形格子を用いた浅水流モデルによる氾濫解析結果を比較すると、道路中心線により格子を生成した地形適合格子モデルによる再現計

第 5 章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

算においても氾濫水のフロントの様子を概ね再現できていることがわかる。また、16 時間の再現計算を、浅水流モデルでは約 24 時間、地形適合格子モデルでは約 10 分の計算時間行うことができた。つまり、地形適合格子モデルによる再現計算は浅水流モデルと比較して約 150 倍の高速計算が可能であることが明らかとなった。これは、例えば 6 時間先の浸水域の予測が数分で実施できるということであり、本モデルはリアルタイムの浸水域予測が可能であることを示している。今後は、本研究で提案した手法を用いて、日本全国で高精度のリアルタイム氾濫計算を誰でも実施できるように、オープンプラットフォームである CommonMP 上に本解析モデルを実装する予定である。

参考文献

- 1) 佐山敬洋, 寶馨: リアルタイム浸水ハザードマッピングのための現地情報同化技術, 水文・水資源学会 2017 年度研究発表会要旨集, pp.18-19, 2017.
- 2) 栗林大輔, 大原美保, 佐山敬洋, 近者敦彦, 澤野久弥: 「洪水カルテ」による地区ごとの洪水脆弱性評価および対応案の検討手法の提案, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.73, No.1, pp.24-42, 2017.
- 3) 川池健司: 都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究, 京都大学博士学位論文, p.28, 2001.
- 4) 安田浩保, 白土正美, 後藤智明, 山田正: 水防活動の支援を目的とした高速演算が可能な浸水域予測モデルの開発, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.1-17, 2003.
- 5) 末次忠司: -現場で役立つ実践的減災読本- 河川の減災マニュアル, 山海堂, p.218, 2005.
- 6) 福岡捷二, 川島幹雄, 松永宣夫, 前内永敏: 密集市街地の氾濫流に関する研究, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.51-60, 1994.
- 7) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教: 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策に関する研究, 土木学会論文集, No.600/II-44, pp.23-36, 1998.
- 8) 戸田圭一, 井上和也, 村瀬賢, 市川温, 横尾英男: 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.1-10, 2002.

第 5 章 適時性に優れた氾濫域予測手法の提案

第6章 結論

6-1 本論文で得られた成果

第1章では、近年の豪雨災害対策における避難行動に関する既往研究のレビューを行い、本研究の背景・目的と位置付けおよび本論文の構成を述べた。

第2章では、災害の種類や地域特性の異なる3つの地域において、洪水時の避難状況および浸水状況と情報の取得状況、日頃の防災意識等に関する調査を実施した。対象地域は、①2013, 2014年と2年続けて由良川が氾濫するなど、1945年から2017年までの約70年間で13回浸水被害が生じている洪水常襲地域である京都府福知山市、②2015年9月関東・東北豪雨において鬼怒川の溢水および堤防の決壊により市内の約3分の1の面積が浸水し、逃げ遅れた住民約4,300人（内ヘリコプターで約1,300人）が救助された茨城県常総市、③2017年九州北部豪雨において、山腹崩壊・土石流による直接的な被害に加えて、崩壊・土石流による土砂流出や中下流域河道において激しい流路変動や水・土砂・流木の氾濫が引き起こされ42人が亡くなった、中山間地である福岡県朝倉市・東峰村である。①洪水常襲地域では、周囲が浸水する前の早いタイミングで「自宅が浸水しそうだから」という自発的な判断で避難した住民が多いこと、②平地では、「避難勧告や避難指示を聞いたから」や「家族、近所の人、市の職員等に避難を勧められたから」という避難情報や他者からの勧めで避難した住民が多いこと、③中山間地では、「雨が強くなったから」や「いた場所が被災する危険を感じたから」といった情報ではなく周囲の状況の変化で避難した住民が多いことを明らかにした。つまり、避難のきっかけは地域の特性により異なることを明らかにした。また、避難せずに自宅で過ごした理由はどの地域でも共通で「自宅が被災する心配はないと思った」からであることを明らかにした。さらに、住民自らが作成に参画した「自主防災マップ」の認知率は、行政が作成したハザードマップの認知率より高いこ

第6章 結論

とを明らかにした。

第3章では、第2章で実施した調査結果を用いて、避難に効果を及ぼした情報について、ベイズ推定を用いて分析を行い、避難に効果を及ぼした情報は地域によって異なることや、避難行動へマイナスに作用した情報があることを明らかにした。次に、リードタイムの長い平地である常総市を対象に氾濫域内の地域特性について分析を行った。ここでは、その時点以降に何らかの事象の発生確率が高いことを伝える情報である「確率情報」と、その時点までに発生・観測された事実を伝える情報である「事実情報」、さらには自宅が浸水したからといった「周囲の状況」に分けて避難のきっかけと避難のタイミングについて、小さいスケールでの地域特性について分析を行った。その結果、①自然堤防が掘削され鬼怒川の水位上昇時には住民が周辺地域の浸水リスクを容易に想像できる地域では、確率情報で避難した住民が多い。②堤防決壊箇所周辺の地域では、どこで決壊が生じるか予測が難しいため、堤防が決壊した直後に発令された避難指示と堤防が決壊したという事実情報で避難した住民が多い。③堤防決壊箇所から離れた市街地の住民は、情報がきっかけで避難した住民は少なく、周囲の浸水等の状況の変化で避難した住民が多いことを明らかにした。

第4章では、上流に雨が降ってから約半日後に下流で氾濫が発生するという時間スケールで生じたために、避難をする時間が十分にあったにも関わらず多くの住民が逃げ遅れて救助された、鬼怒川洪水による茨城県常総市を対象に、降雨流出および氾濫現象について詳細な分析を行った。鬼怒川は上流と下流で河床高の縦断分布が45K付近で不連続（上流が急勾配で下流が緩勾配）となり、川幅も上流と比べて半分程度に狭くなるという特徴があり、降雨流出解析を実施した結果、下流の水位が堤防天端高を超えていても上流では水位が上がっていないことが明らかになった。その結果、常総市において、上流の河川水位が避難行動へマイナスに作用した情報（第3章）である要因は、上流の水位が高くなかったためであることが推察された。また、降雨規模が下流の水位・流量へ及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実測ハイエトグラフの波形は変えずに総降雨量のみを0.5倍、0.8倍、1.2倍に引き延ばして流出計算を行った。その結果、同じ雨の降り方でも、降雨量が大きくなると基準点におけるピーク水位が大きくなると同時に、ピーク水位の生起時間が早くなることが明らかとなった。さらに、ダムの効果を検証するため、上流のダムが無いと仮定した場合の数値シミュレーションを行った。その結果、ダムが無かった場合には基準点におけるピーク水位の生起時間は1時間早くなり、ピーク水位の値は約60cm大きくなることが明らかとなった。また、計画高水位を超える時間は観測値と比較して約3時間長くなることが明らかとなった。次に、洪水氾濫解析を実施し、第2章の調査で取得した洪水

第6章 結論

時の住民の避難行動の時系列を用いて、浸水状況と避難行動について分析を行った。その結果、鬼怒川から溢水した氾濫水が、常総市内を流れる幹川排水路の八間堀川に流入・流下し早いタイミングで下流の市街地に伝播し早期の浸水を引き起こしていたことを明らかにした。これは、第2章で実施したヒアリング調査結果とも一致しており、氾濫計算の妥当性が確認できた。

第5章では、常総市の住民を対象に防災意識の経年変化を明らかにすることを目的としたヒアリング調査を実施した。その結果、発災から約2年が経過して、ハザードマップを見たことがある住民の割合は増えたが内容を確認したことがある住民の割合は大きくないことや、洪水による浸水を経験しても日頃から家族の避難場所を決めている住民の割合は変化していないことを明らかにした。また、洪水時に住民の的確な避難行動を促す情報について検討を行った。ヒアリング調査において、洪水時に平地（常総市）の住民が望む情報は、避難情報の他に「浸水しそうな区域」や「堤防が決壊しそうな箇所」のような予測情報であるという結果を受け、住民の的確な避難誘導を支援するためのリアルタイム浸水域予測の検討を行った。ここでは、既往の研究で開発された高速演算が可能な氾濫解析モデルである地形適合格子モデルを用いた。本研究において、従来は地形図を見ながら手作業で格子を生成していたために、数週間を要するという迅速なリアルタイム浸水域予測の妨げになっていた点について、ライセンスフリーのデータベースである **OpenStreetMap** を用いることで、格子生成に要する時間を大幅に短縮した。本モデルを用いた氾濫計算は一般的に用いられている浅水流方程式を解く方法と比較して約150倍高速かつ同等の精度の計算が可能であることが明らかとなった。また、常総市を対象とした場合には24時間の計算が約10分で可能であり、例えば6時間先の予測が約3分で実施できることが確認できた。以上に示した解析手法および格子生成方法を用いることで、住民が望む情報である迅速なリアルタイム浸水域予測を、あらゆる流域で実施できることを示した。

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり、最後まで懇切丁寧にご指導いただいた中央大学理工学部教授山田正先生に深甚の感謝の意を表します。山田先生には、研究の方針や内容について日常的に熱いご指導をいただきました。また、学問や研究のみならず研究者・技術者としてあるべき姿や人間関係の重要性等、多くの事を教えていただきました。言葉で申し尽くせるものではありませんが、ここに深甚の感謝の意を表します。

中央大学理工学部教授佐藤尚次先生、中央大学理工学部教授谷下雅義先生、中央大学理工学部教授鎌倉稔成先生、群馬大学大学院理工学府教授清水義彦先生には、ご多忙の中、論文審査を通じて有益なご指摘とご助言を賜りました。心より御礼を申し上げます。

中央大学研究開発機構教授福岡捷二先生には論文審査のみならず、研究発表会や勉強会において解析法や研究の取りまとめ方、水理学の基礎から実務への応用に到るまでご指導いただきました。心より御礼を申し上げます。

中央大学研究開発機構教授布村明彦先生には、洪水や地震等の数々の被災地調査に同行させていただき、被災された住民や行政の方々の実体験を聞かせていただいたり、現地の音や匂いを感じることで自然災害の恐ろしさを感じることで、自分の研究の重要性を認識する貴重な機会を与えていただきました。心より御礼を申し上げます。

新潟大学准教授安田浩保先生には、数値解析法やコンピュータリテラシー、さらには研究に取り組む姿勢について多くのご助言、ご指導をいただきました。心より御礼を申し上げます。

富山県立大学准教授手計太一先生、呉修一先生には研究に対するご助言のみならず、研究室の先輩として他の先輩方との交流の場を設けていただきました。心より御礼を申し上げます。

北海道大学准教授山田朋人先生には、研究発表会や勉強会において研究の取りまと

0 謝辞

め方や研究に対する姿勢などご指導いただきました。また、先生の研究室の学生との交流の場を多く設けていただき、刺激を与え合うことのできるいいライバル・いい仲間との出会いを作っていただきました。心より御礼を申し上げます。

中央大学理工学部助教成岱尉先生には、本学位論文をまとめるにあたり、内容に対して有益なご指摘をしていただいたのみならず、学内予備審査や公聴会の日程調整、書類の作成など私が論文執筆に全力で取り組めるようサポートしていただきました。中央大学研究開発機構専任研究員寺井しおり氏には研究内容に対しての有益なご指摘とご指導を賜りました。また、日頃の生活や後輩への指導すべきこと等多くを教えていただきました。心より御礼を申し上げます。

また、研究室の学生諸兄には日頃の観測や調査に際し多大なご支援をいただきました。心より御礼を申し上げます。

最後に、博士後期課程への進学を迷っていた私の背中を押し、いつも私を支えてくれた家族に心より感謝いたします。