

ダム情報の住民避難への影響：2018 年西日本豪雨災害における肱川流域水害を例に（日本語訳）

Effect of Communication Regarding Dam Operation on the Evacuation of Residents: A Case Study of the 2018 Inundation of the Hijikawa River in Japan

中村 功¹, 森岡 千穂²

¹ 東洋大学 ² 松山大学

Geosciences 2019, 9, 444; doi:10.3390/geosciences9100444 www.mdpi.com/journal/geosciences

Received: 27 August 2019; Accepted: 15 October 2019; Published: 18 October 2019

要約

ダム操作に関する情報は、ダム下流で発生する洪水において、住民避難を促進するために重要である。本論文では、ダム操作に関する情報が避難に及ぼす影響を検証するために、2018 年に愛媛県肱川流域で発生した洪水の事例を検討した。情報伝達過程と警告メッセージを確認した後、水害の被害を受けた住民を対象にアンケート調査を実施した。調査結果は次のとおりである。1) ダムからの放流警報を聞いた人はほとんどおらず、放流警報を聞いた人でさえも避難する傾向がなかった。ダム管理者の発した放流警告は効果がみられなかった。2) ダム管理者からの放流通知を受けて、地方自治体は避難指示を発したが、こちらの方は避難を促進した。避難の最も効果的な引き金は、消防団による戸別訪問であった。ダム管理者からの情報は、自治体の避難指示の発出を促し、それが消防団の戸別訪問を作動させた。したがって、ダムの情報は間接的に避難を促進したといえる。4) 携帯電話の緊急速報メール(PWS)は、それが使用された大洲市では避難指示の伝達に一定の効果があつた。5) しかし今回発せられたメッセージは、放流警報・避難指示ともに、具体性とわかりやすさにおいて不十分であった。この問題を解決するためには、ダムの放流量を考慮した洪水シミュレーションを作成する必要がある。

1. Introduction

2018 年 7 月、西日本では南からの湿った空気によって大雨となり、愛媛県西予市では 24 時間雨量が 347.0mm を記録した(気象庁, 2018)。愛媛県の肱川流域では、上流の野村ダムと中流の鹿野川ダムの 2 つのダムの放流をきっかけにして氾濫が発生し、9 名の犠牲者が出る災害となった(愛媛県災害対策本部, 2018)。

ダムからの放流が始まると、川の水位が急激に上昇するため、下流の洪水が発生する前に住民を避難させるためには、ダム操作に関する情報の伝達が極めて重要である。本論では肱川の洪水を例に、ダムの情報が住民の避難に果たした機能とその問題点について明らかにしたい。具体的にはどのような情報・警報がどのようなメディアで発信され、どの程度伝達され、どの程度避難に結びついたのかを明らかにする。

災害社会学においては、警報とそれに対する住民の反応は、主要なテーマの 1 つであり、多くの研究がなされてきた。たとえば Quarantell (1982) は警報プロセスの要素として、assessment, dissemination and response の 3 つを挙げ、特にどのような条件が住民の response に結びつくかをまとめている。あるいは Mileti and Sorensen (1990) は the warning response process として hearing, understanding, believing, personalizing, deciding and responding, confirming の 6 つの過程を概念化している。こうした研究はヨーロッパでもなされている(eg. Parker et al., 2009)。これらの研究は、本研究と同様に、警報

の効果に関心があり、それらから多くを学ぶことができる。

近年では携帯電話の緊急速報メール Public Warning System (PWS)を使った alerts and warnings 警報がそのダイレクトで geo-targeted な性質から注目され、実験的研究 (eg. Jagtman, 2010)や関係する研究の整理 (eg. Beanet.al.2015, National Academies of Sciences, 2018)がなされている。

他方ダムの警報については、Dam failure についての研究はあるが(Graham et al.1983, Wayne et al. 2008)、ダムの放流警報についての文献は少ない。基礎的な資料としては、各ダムに備えられているマニュアル(「操作規則」「操作細則」「ただし書き操作要領」等)には行うべき情報伝達について書かれてあり、それらのマニュアルを解説する書籍もある(e.g. ダム水源地環境整備センター, 2004; United Nations, 2008)。またこれまでの災害研究を踏まえたダム管理者向けのガイドブック(Mileti and Sorensen, 2015)はあり、ダム防災情報伝達の際の原則や伝達上の実務的注意が記されている。一方、水害時の避難に関する調査報告の中には、ダムの操作をめぐる自治体及び住民の意識について述べたものがある(吉井他,2007)。これまでダムの放流の警告を分析した出版物は少ししかない(例、片田と桑沢、2009 [13])。

ダムの放流による洪水は、河川の水位が急速に上昇するという点で鉄砲水(flash flood)と似ている。たとえば、Gruntfest (1977 [18]) は、鉄砲水が発生した場合の警告と避難の関係に関する社会学的研究を行っている。さらに、天気予報技術の開発に伴い、高度な鉄砲水の早期警報システムが開発されている(Carpenter et al., 1999 [19]; Georgakakos, et al. 2006 [20]; Liu et al. 2018 [21])。しかし、ダムの放流による洪水は、洪水を引き起こすダム管理者自身によって警告が発行されるという点で、鉄砲水とは異なっている。

しかしダムの放流情報の避難への影響の実態を研究したものは少ない。そこで本論では肱川水害において、どのような情報が発信されたかを文献から整理したうえで、その受け取り方を住民アンケート調査で明らかにしたい。

2. Materials and Methods

2.1. 調査地域

肱川は全長 103km、流域面積 1210km² の川で、上流の西予市に野村ダム、中流の大洲市に鹿野川ダムがある(図 2)。野村ダムの有効貯水容量は 12,700,000m³ で鹿野川ダムの有効貯水容量は 29,800,000m³ である。野村ダムの下流の西予市野村地区には約 8,000 人、大洲市には約 43,000 人の住民がいる。今回の洪水で、野村ダムの下流では 70ha, 650 戸が浸水し、鹿野川ダムの下流では 925ha, 3053 戸が浸水した(国交省 a)。肱川はかつて 1995 年、2004 年、2005 年、2011 年にも氾濫している。(国土交通省、2012 年[23])。

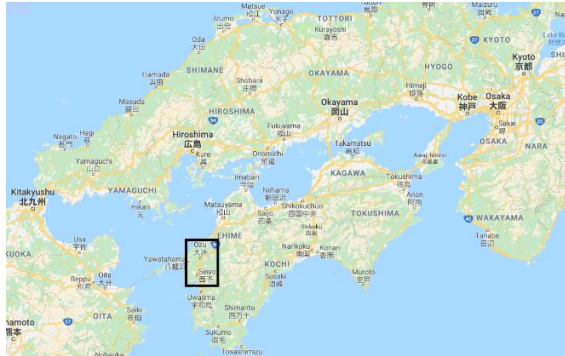


図 1 西日本における肱川の位置

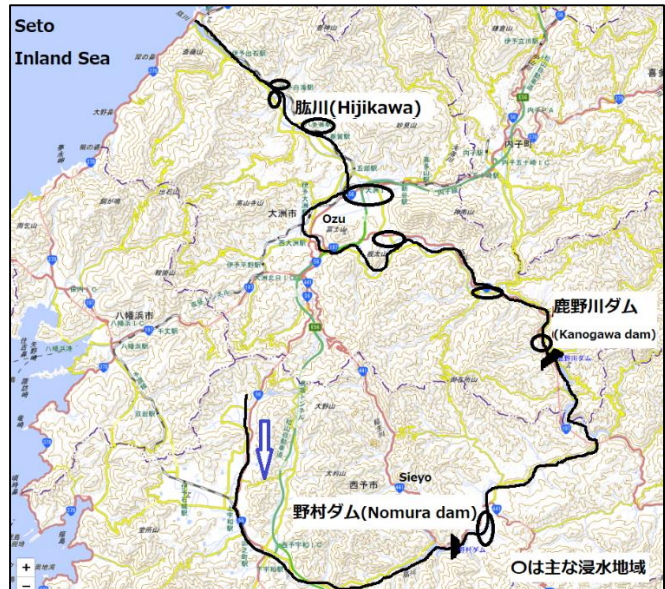


図 2 肱川流域図



Figure 3. 鹿野川ダム(左 ダム事務所)

2.2 警報と伝達ルート

2018 年 7 月の洪水の場合、ダム管理者が提供した最も重要な情報は、「異常洪水時防災操作」(ただし書き操作)に関する情報であった。「異常洪水時防災操作」は以下本論では **FCOEF (Flood Control Operation for Extreme Floods)** と略する。FCOEF は、ダムの水位がサーチャージ・レベルを超えると予測される場合に、水位に応じてゲート进行操作することにより、放流量を流入量まで増加させる操作である (MLIT [24])。サーチャージ水位は、洪水時に一時的にダムに貯めることができる最高水位のことで、ダムが損傷しない最大水位よりわずかに低く設定されている。ダムへの流入量は、ダムの水位の時間的変化から計算される。放流量は、ゲートが開く角度によって増減される。FCOEF 中の流量は、流入量に応じて時間とともに増減する。

FCOEF は、ダムごとに決められた水位 (洪水制御に使える水量の約 80%) を超えると開始される。FCOEF の開始時刻と放流量を予測するために、集水域全体の平均雨量とその予測値が使用される。FCOEF が開始されると、ダムは水を貯留する能力を失い始め、水がサーチャージ水位に達したとき、ダムは水を貯留する能力を完全に失う。FCOEF は必ずしもダムの越流やダムの崩壊を意味するものではないが、FCOEF 開始後の大量の放流はしばしば下流の浸水を引き起こす。たとえば、2018 年 7 月の豪雨では、日本の 8 つのダムが FCOEF を実施し、そのうち 3 つのダムの下流で浸水災害が発生した。FCOEF は 2008 年から 2017 年までの 10 年間に日本で 40 回実施された (読売新聞 2018. 7. 12 [25])。日本では 2011 年、2013 年、2014 年に FCOEF による大規模な洪水が発生した。肱川では 2004 年と 2005 年に FCOEF が実施されている (Okamura et al., 2006 [26])。

ダム操作マニュアルではダム管理者は FCOEF の開始予告(放流警報)を自治体や住民に伝えることになっている。この情報は、ダムから直接住民に伝えるルート、ダムから地元自治体を経由して住民に伝えるルート、およびテレビ局や国土交通省のウェブサイトを通じて伝えるルートの 3 種類がある。今回、テレビは FCOEF について放送しておらず、国のウェブサイトは FCOEF を知らせていたが、それを見た住民がほとんどいないため、本論では 1 番目と 2 番目のルートに焦点を当てる。

2.3 発信された情報と手段

被災後に国・自治体・専門家により検証委員会が作られ、資料がまとめられた(国交省 a, b, c)。それによると、ダムからの情報は次のように発信されていた(表 1)。野村ダムでは 7 月 7 日午前 2 時 30 分に、異常洪水時防災操作は避けられない、操作開始は 6 時 50 分頃の予定である、と西予市に伝えている。使われたのは市の幹部が持つ携帯電話(ホットライン)である。市ではこれを受けて 3 時 30 分に、避難指示を出すことを決め、5 時 10 分に避難指示を発表する(表 3.C)。その周知方法は防災無線 Indoor Receiver of Disaster Prevention Radio Broadcasting System(DRS)の戸別受信機(図 3)と消防団 Volunteer fire corps による Route alerting (house to house visit)戸別訪問である。ダム事務所は 5 時 15 分にダムが管理するサイレンとスピーカー(図 4)を使って住民に緊急のダム操作を開始する旨を伝えた(表 2.A)。そしてダムは 6 時 20 分から異常洪水時防災操作を始め、その直後から氾濫が始まった。

表 1 ダムから出された情報の時系列一覧 (国交省 a より作成)

時刻	主体	事項	伝達方法	内容
<野村ダム>				
2:30	ダム→市	異常洪水時防災操作が不可避と伝達	HL	
3:30	市	避難指示を 5:00-5:30 の間に出すことを決定	-	
5:10	市→住民	避難指示を発表 (5:35・6:01 にも放送)	DRS, Rout alerting	(C)
5:15	ダム→住民	緊急放流を住民に広報(by	S & L	(A)
6:20	ダム	異常洪水時防災操作を開始	-	
<鹿野川ダム>				
5:10	ダム→市	異常洪水時防災操作の可能性を伝達	HL	
6:18	ダム→住民	緊急放流を住民に広報	S & L	(B)
6:20	ダム→市	既往最大の放流量となる見込み	HL	
6:50	ダム→市	鹿野川ダム 6000 トンの放流見込み	HL	
6:58	ダム→市	水位予測を送信	e-mail	
7:30	市→住民	避難指示発表	DRS, Rout alerting	(D)
7:35	ダム	異常洪水時防災操作開始		
8:43	市	避難指示発信	PWS	(D)

HL=Hot Line of Mobile Phone; S&L=siren and Loudspeaker;

DRS=Disaster Prevention Radio Broadcasting System

PWS= Public Warning System to Mobile Phone (WEA or EU-Alert)

表 2 ダム管理者からの放流警報のメッセージ内容 (国交省 b より)

A. <野村ダム> こちらは、野村ダム管理所 dam operation office です。現在、洪水調節 flood control を行っておりますが、ダムへの流入量は今後も一層増加することが予想されますので、緊急のダム操作に移行する予定です。下流河川の水位が急激に上昇するおそれがありますので厳重な警戒をお願いします。 B.< 鹿野川ダム> 鹿野川ダムよりお知らせします。ダムは現在洪水調節中ですが、ダムの流入量は今後も一層増加することが予想されるため、異常洪水時の操作に移行する予定です。川の水が急激に増えま

すので、厳重に警戒してください。もう一度繰り返します。

表 3 市役所からの避難指示のメッセージ内容 (国交省 c より)

C.< 西予市>

西予市災害対策本部からお知らせします。肱川が氾濫する恐れのある水位に達しましたので、野村地区に避難指示を発令しました。野村中学校、野村小学校及び野村公民館を避難所として開設しています。ただちに避難を開始してください。また避難所への避難が危険な場合は、近くの安全な場所に避難するか、屋内の高いところに避難してください。(繰り返し)

D.< 大洲市>

こちらは、防災大洲市役所です。大洲市災害対策本部から、避難指示をお知らせします。肱川の水位が上昇し、堤防を越えることが予想されます。今回の水位は、過去最大の水位で、これまで浸水していない場所も、浸水の恐れがあります。直ちに、避難所に避難するか、高い所へ避難せよ。

他方、鹿野川ダム事務所でも 7 日午前 5 時 10 分に、異常洪水時防災操作をする可能性をホットラインで大洲市に伝えている(表 1)。ダム事務所は 6 時 18 分から異常洪水時のダム操作をする予定をサイレンと拡声器で住民に伝えている。その後ダム事務所はホットラインやメールで予想される放流量や水位が既往最大になることを大洲市に伝えた。それを受けて大洲市は 7 時 30 分に避難指示を発表し、それを防災無線の屋外拡声器 (図 5)や消防団による戸別訪問により住民に伝えた(D)。そして 7 時 35 分に異常洪水時防災操作が開始され、直後から下流部の氾濫が発生した。大洲市が緊急速報メールで避難指示を住民に発信したのは、発表から 1 時間以上たった 8 時 43 分であった(図 6)。



図 4 Indoor receiver of DRS
(Seiyo City)



図 5 Siren & Loudspeaker
of dam operator



図 6 Loudspeaker of DRS
(Ozu City)

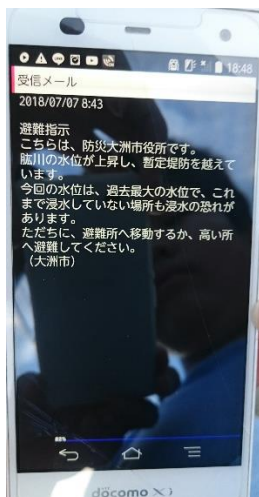


図 7 PWS Message to mobile phone
(Ozu City)

2.4 アンケート調査概要

ダム管理者や自治体が発信したこれらのダム情報が住民にどう受け取られたのかを明らかにするために、住民にアンケート調査を行った。調査の対象者は、西予市及び大洲市の仮設住宅の住民で、その中でも洪水被害にあった人たちである。仮設住宅は地方自治体によって建設され、災害により住宅がひどく破損した居住者に2年間無料で提供される。仮設住宅を申請したほとんどの申請者は、仮設住宅に移動することができた。したがって、本研究で調査した住民は、洪水リスクが最も高い地域に住んでいる住民である。限られた財源でアンケートの回答率を高めることができ、洪水被害を減らすために有益な結果を得ることができるため、このような住民に焦点を当てた。調査は2019年の2月に行った。当時西予市には74世帯、大洲市には60世帯の仮設住宅があったが、未入居世帯や洪水被害以外での入居者があったために、対象とした世帯は、西予市で68世帯、大洲市で53世帯合計121世帯であった。各世帯で一人を任意に選んでもらい、その人にアンケート調査を行った。したがって対象者は121人である。配布は戸別訪問で行い、回答は自記式の郵送法で行った。その結果、西予市で35人、大洲市で44人の計79人の回答を得た。回収率は全体で65.2%(西予市51.5%、大洲市83.0%)であった。

表 4 アンケート調査概要

調査対象	大洲市・西予市の仮設住宅に住み洪水の被害を受けた住民
	各世帯から1名 121人
回収	79人(大洲44人・西予35人)
回収率	65.2%(大洲83.0%・西予51.5%)
方法	自記式、訪問配布・郵送回収法
調査時期	2019年2月
主な調査内容	自家被害、ダム運営者からの警告、避難指示、避難時、防災気象情報、ダム運営時、防災時、フェイスシート。

3. Results

3.1 The Discharge Warning from Dam Operator

すでに述べたようにダム管理者は事前に「異常洪水時防災操作」の予告を住民に行っており、それはダムの操作規則にも沿ったものであった。では、その情報は住民の避難に効果があったのだろうか。アンケート調査でダム管理者からの放流警報を聞いたかをたずねると、「聞いた」とした住民は33%しかいなかった(図7)。つまり第一段階として、聞こえていない人が多かったということになる。その理由の1つは、住宅地に関係なくスピーカーが川沿いに設置されていたことがある(図9)。

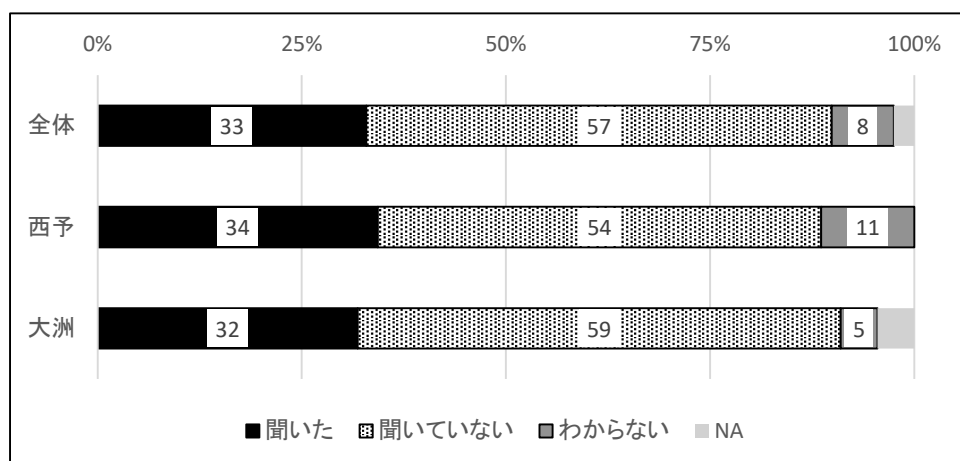


図8 ダムの放流情報の聴取率(%) n=79

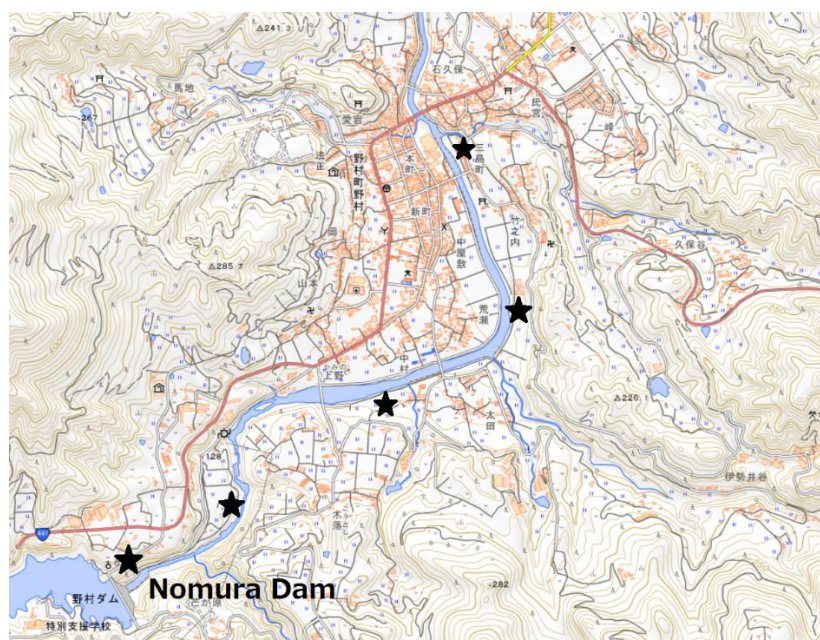


図9. 西予市の浸水地域におけるスピーカーの位置

この地図は、国土地理院が発行したデジタル地図に基づく

★：ダム運営者のスピーカー 赤：住宅街

次に放流情報を聞いた人 26 人に、それを聞いてどう感じたかを聞いたところ、62%の人が「いつもと同じ程度の放流だと思った」と回答し、39%の人が「何を言っているか聞き取れなかった」と答えた(図 8)。逆に「いつもとは違う危機感を感じた」という人は 23%に過ぎなかった。放流警報を聞いた人すら、危機感を感じていないということになる。

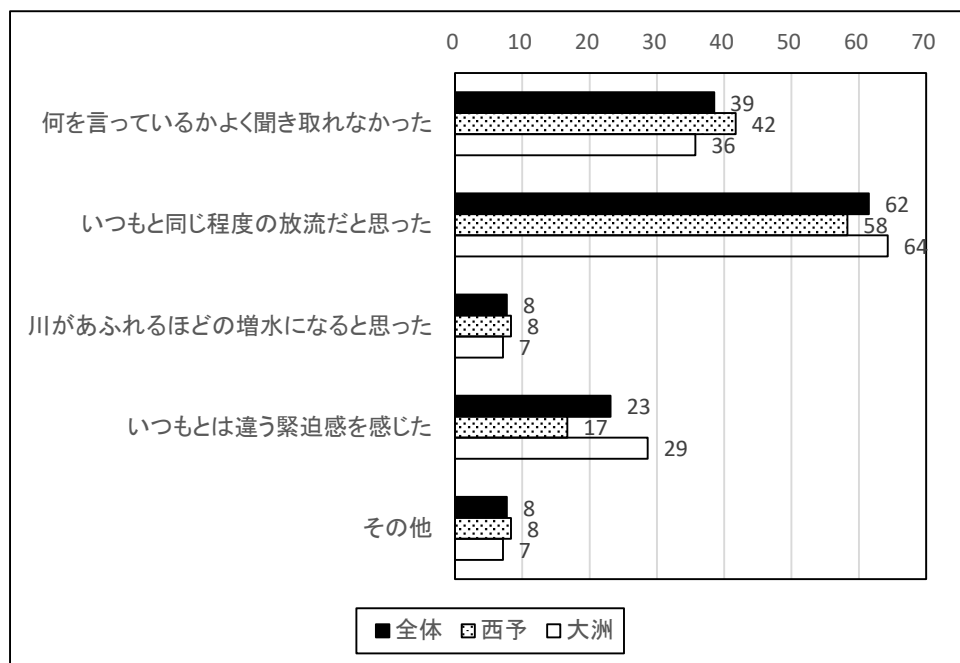


図 10 放流情報を聞いてどう思ったか(%) n=26

さらに、被災前に避難(事前避難)したかどうか、と放流通知の聴取の有無をクロス集計して、放流通知の影響を調べた。その結果、放流通知を聞いた人の事前避難率は 61%、聞かなかった人の避難率は 60%とほとんど変わらなかった(図 9)。 χ^2 乗検定をしても有意差はなかった。つまり、放流通知は聞いた人も少なければ、聞いた人でも避難は全く促されなかった、ということになる。

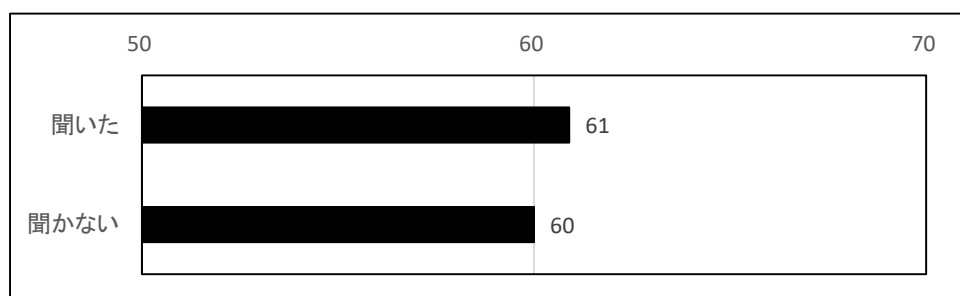


図 ダムの放流情報の聴取の有無と事前避難率 n=73 χ^2 ; n.s.

3.2 The Evacuation Order issued by Local Government

日本では The Evacuation Order にあたるものとして”evacuation recommendation”と” evacuation instruction (emergency)”がある。後者の方がより緊急性が高いが、どちらも法的な拘束力を持っていない。自治体はダムからの情報を受けて、氾濫の前に避難指示を出したが、これを聞いたかをたずねたところ、全体で 47%人が聞いていた(図 10)。ダムの放流情報に比べると聴取率は若干高いが、聞いた人は半

数以下であった。

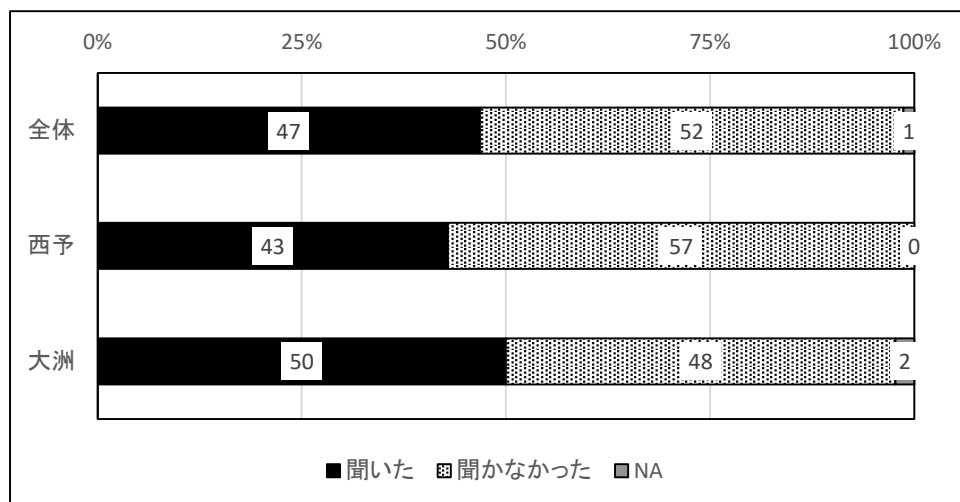


図 11 避難指示の聴取率

避難指示を聞いた人に、どう思ったか、をたずねたところ、「危険性があることが分かった」という人が全体の 22%だったのに対して、「避難しなくては」と思った人が 49%と約半数に達した(図 11)。危険性はあまり伝わらなかったが、避難しなくてはならないと思った人が少なくないという、やや奇妙な結果である。

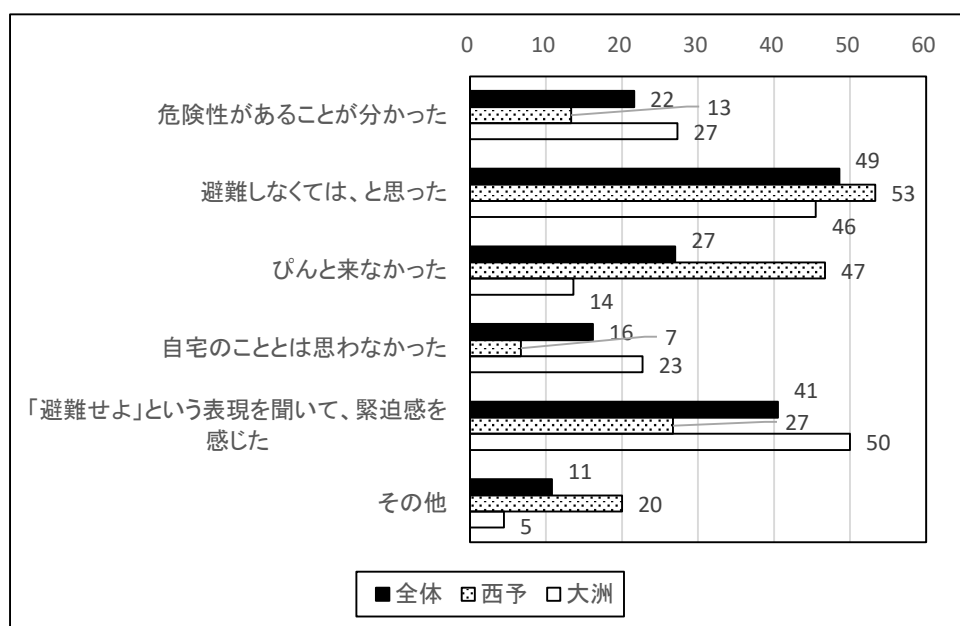


図 12 避難指示を聞いてどう思ったか

避難指示を聞いた人にその手段をたずねたところ、西予市では 60%と最も多くの人々が「消防・警察・役場の人」と答えた(図 12)。これは具体的には消防団 Volunteer Fire Corps の効用である。日本では一般的に消防団は水防団 Flood Fighting Corps を兼務している。消防団の本部は、住民に避難を勧めるために、各家を訪問するようメンバーに求めている。また 27%の人が戸別受信機で聞いていた。一方大洲

市では、屋外スピーカーが 55%、緊急速報メールが 41%、「消防・警察・役場の人」が 41%と 3 つの手段に分散している。

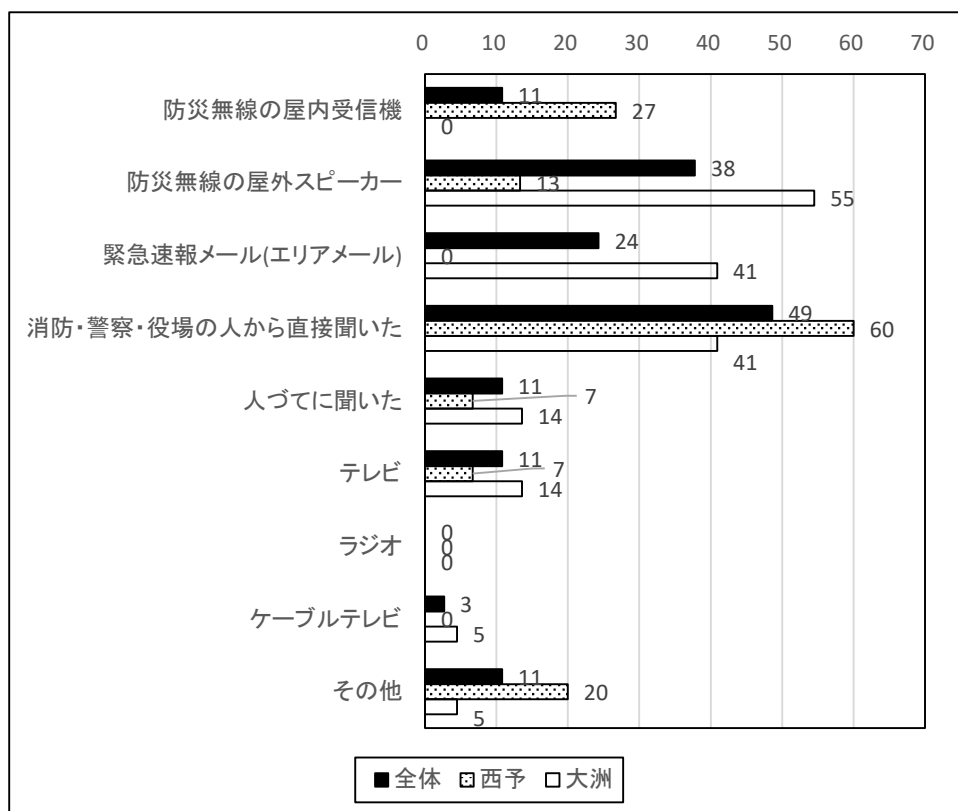


図 13 避難指示を聞いた手段 MA (%) n=37

避難指示の聴取の有無と事前避難率とをクロス集計したところ、避難指示を聞いた人の事前避難率は 77%、聞かなかった人の事前避難率は 50%と、避難勧告を聞いた人の避難率が高かった(図 13)。 χ^2 検定でもこの差は有意($p<0.05$)なものであった。これをみると、避難指示は事前の避難を促進していたといえる。

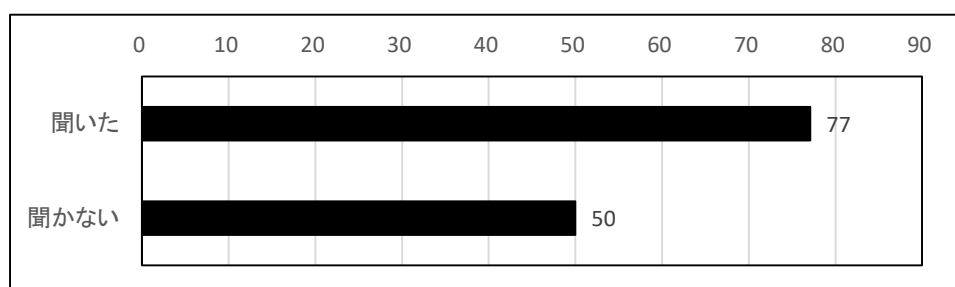


図 避難指示の聴取の有無と事前避難率(%) n=73 χ^2 ; $p<0.05$

さらに、ロジスティック回帰分析を使って、潜在的な交絡因子を同時に制御した後、 p 値とオッズ比 (95%信頼区間) を計算した。モデルで考慮された従属変数は早期避難の有無であり (した: 1, しなかった: 0)、共変量は放流警告を聞いたか (はい: 1, いいえ: 0)、避難指示を聞いたか (はい: 1, いいえ: 0)、自宅の洪水リスクを認識していたか (はい: 1, いいえ: 0)、および居住都市 (大洲: 1, 西予: 2) である。さまざまなテスト (オムニバステスト、Cox-Snell R-square テスト、Hosmer および Lemeshow のテスト、および推定の的中率) は、モデルの適合度が高いことを示している。その結果 (表 5)、避難指示の聴取と住んでいた都市は、早期避難と有意に関連していた ($p<0.01$)。オッズ比によると、避難指示を聞いた人は 7.8 倍早く避難する可能性が高く、西予に住んでいた人は 13 倍早く避難する可能性が高かった。しかし、放流の警告を聞き、自宅への洪水リスクを認識す

ることは、早期避難との間に有意な関係はなかった ($p > 0.05$)。したがって、避難指示が早期避難を促進したと考えられる。

表5.早期避難に関連する変数 (1) (ロジスティック回帰分析)

	B	Standard error	Wald	Degrees of freedom	P value	Odds ratio
Discharge warning	-1.368	0.754	3.290	1	0.070	0.255
Evacuation instructions **	2.059	0.771	7.131	1	0.008	7.834
Recognizing flood risk to the home	0.831	0.744	1.247	1	0.264	2.296
City ***	2.568	0.703	13.338	1	0.000	13.043
Constant	-3.634	1.075	11.431	1	0.001	0.026

: $p < 0.01$, *: $p < 0.001$

Dependent variable: Early evacuation (yes: 1, no: 0)

Covariates:

I heard the discharge warning (yes: 1, no: 0)

I heard the evacuation instructions (yes: 1, no: 0)

Before this flood, I was aware of the danger to my home of being affected by a flood (yes: 1, no: 0)

The city which I live (Ozu: 1, Seiyō: 2)

Goodness of fit: Omnibus test: $p < .001$, Cox & Snell R- square test: 0.290,

Test of Hosmer & Lemeshow: $p \geq 0.05$, Percentage of correct estimation: 77.8%.

We conducted all analyses using IBM SPSS version 24.

3.3. 避難のきっかけと有効な伝達手段

避難状況を聞くと、事前避難率(自宅が被災する前に避難した人)は全体では 58%で、西予市で 77%と特に高くなっている(図 14)。ダムの放流情報や避難指示を聞いた人が半数以下で、危険性もあまり伝わらなかったわりには、特に西予市では 8 割近くの人が避難しており、事前に避難した人は意外と多かったといえる。

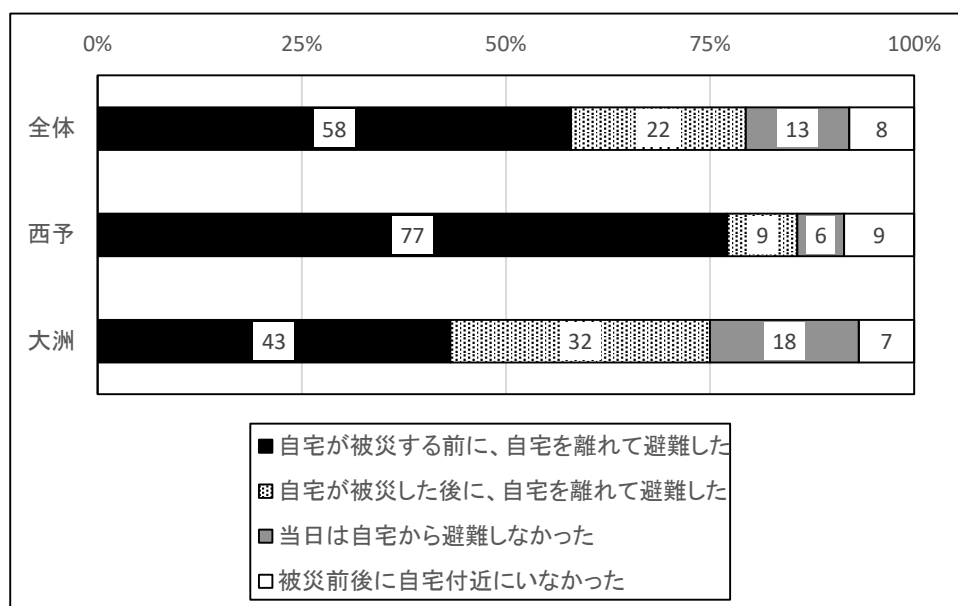


図 14 避難率(%) n=79

自宅が被災する前に避難した人に避難のきっかけ trigger をたずねたところ、消防団等に勧められてという人が 61%と最も多かった(図 15)。その他は川の水位を見て 33%、自宅付近が浸水したのを見て、30%、家族や近所の人に勧められては 30%であった。これを見ると消防団の勧めが最も有効な手段であったことがわかる。消防団は市の指揮の下、避難指示の発表をきっかけに動いていたことから、間接的

にダムからの情報を生かす手段となっていたといえる。また西予市と大洲市を比べると差がみられる。西予市では消防団等に勧められて、が 70%であったのに対して大洲市では 47%と少ない。逆に大洲市では 68%と最も多くの人がかっけとして答えたのが「自宅付近が浸水したのを見て」であった。大洲市では消防団の勧めが不十分であったために逃げ遅れ気味となったものと思われる。これは、避難指示の発表が、西予市では FCOEF の 1 時間 10 分前であったのに対して大洲市では 5 分前と、消防団が巡回する時間が不足していたためと思われる。さらに、表 5 によれば、他の変数を制御した後、西予市の早期避難の確率は大洲市のそれより 13 倍高い。この違いは、大洲市での避難指示の発行の遅れによっても説明できる。

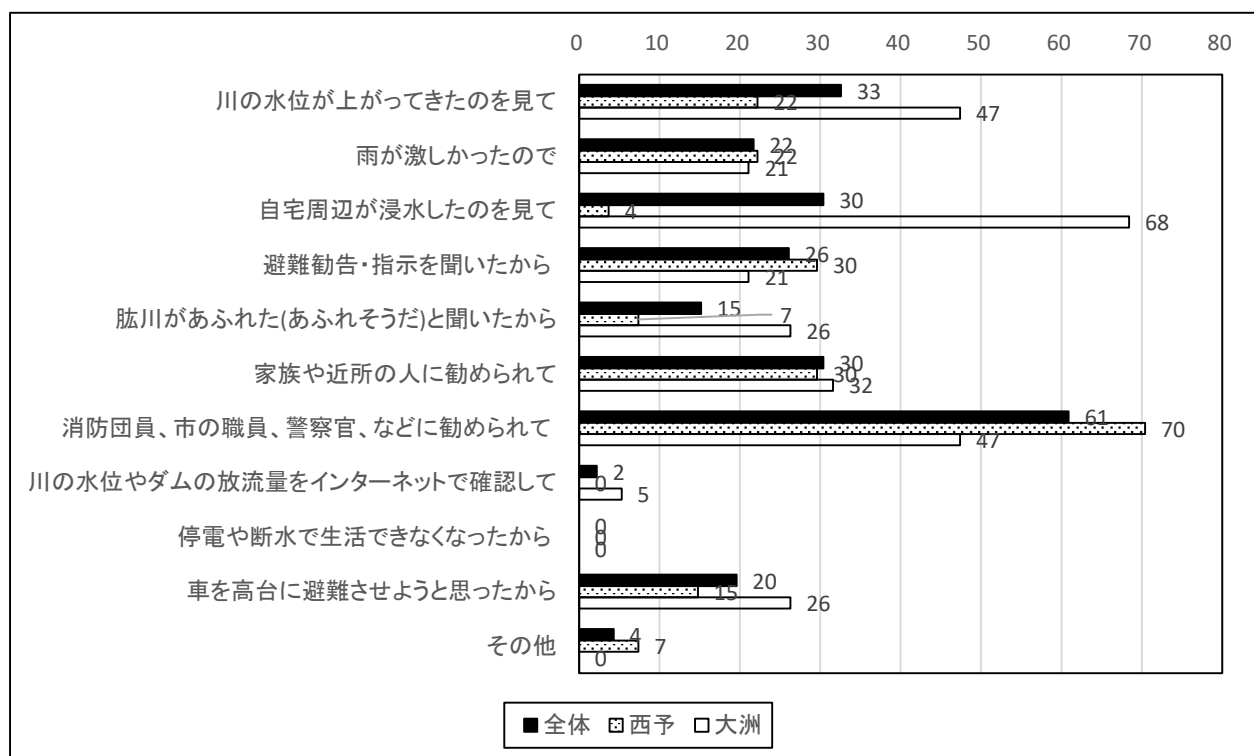


図 15 事前避難した人の避難のきっかけ(%) n=46

つぎに避難指示を聞いたメディアごとに事前の避難率をクロス集計したところ、消防団等から直接避難指示を聞いた人の事前避難率が 87.5%で、消防団等から避難指示を聞かなかった人の事前避難率の 56.1%より高かった(図 16)。この差は χ^2 検定においても 5%水準で有意であった。消防団等の避難の勧めは有効であることがここでも明らかになった。防災無線の屋内受信機で聞いた人の事前避難率が 100%と高くなっているが、屋内受信機で聞いた人数が 4 人と少ないため、有意差はなかった。その他のメディアでも有意な差はなかった。

さらに、ロジスティック回帰分析を使って、早期避難の促進に効果的な伝達メディアを探った。モデルで考慮された従属変数はここでも早期避難の有無である(した:1, しなかった:0)。共変量は放流警告を聞いたか(はい:1, いいえ:0)、避難指示をそれぞれのメディアで聞いたか(はい:1, いいえ:0)、自宅の洪水リスクを認識していたか(yes:1, no:0)、および居住都市(大洲市:1, 西予市:2)である。このモデルの適合度は各種テストでは十分であった。分析の結果、避難指示が伝達されたメディアのうち、「消防・警察・役人」によって伝えられた経路のみが有意であり($p < 0.05$)、そのオッズ率は 11.2 で

あった（表 6）。戸別受信機をによる効果はオッズ比では非常に高かったが、このメディアで聞いた居住者はわずか（4 人のみ）であったため、p 値は有意性を示さなかった（ $p > 0.05$ ）。これらのデータは、消防団の呼びかけ効果的であることを示している。

表6.早期避難に関連する変数（2）（ロジスティック回帰分析）

	B	Standard error	Wald	Degrees of freedom	P value	Odds ratio
Discharge warnings	-0.686	0.896	0.586	1	0.444	0.503
Evacuation instructions via an indoor receiver of the DRS	19.840	18913.978	0.000	1	0.999	413509581.300
Evacuation instructions via a loudspeaker of the DRS	-1.006	1.521	0.437	1	0.508	0.366
Evacuation instructions via the PWS	0.336	0.931	0.130	1	0.718	1.399
Evacuation instructions from a firefighter, police officer or official *	2.417	1.161	4.334	1	0.037	11.210
Evacuation instructions from another person	2.427	1.858	1.707	1	0.191	11.326
Evacuation instructions via television	1.033	1.841	0.315	1	0.575	2.808
Evacuation instructions via cable television	-19.693	40192.970	0.000	1	1.000	0.000
Recognizing flood risk to the home	1.316	0.804	2.678	1	0.102	3.730
City **	2.110	0.721	8.560	1	0.003	8.250
Constant	-0.686	0.896	0.586	1	0.444	0.503

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

Dependent variable: Early evacuation (yes: 1, no: 0)

Covariates:

I heard the discharge warning. (yes: 1, no: 0)

I heard the evacuation instructions via an indoor receiver of the DRS. (yes: 1, no: 0)

I heard the evacuation instructions via a loudspeaker of the DRS. (yes: 1, no: 0)

I heard the evacuation instructions via the PWS alerting my mobile phone. (yes: 1, no: 0)

I heard the evacuation instructions from a firefighter, police officer or official. (yes: 1, no: 0)

I heard the evacuation instructions from another person. (yes: 1, no: 0)

I heard the evacuation instructions via television. (yes: 1, no: 0)

I heard the evacuation instructions via cable television. (yes: 1, no: 0)

Before this flood, I was aware of the danger of my home being hit by a flood (yes: 1, no: 0)

The city where I live (Ozu: 1, Seiyō: 2)

Goodness of fit: Omnibus test: $p < 0.01$, Cox & Snell R- square test: 0.303,

Test of Hosmer & Lemeshow: $p \geq 0.05$, Percentage of correct estimation: 77.8%.

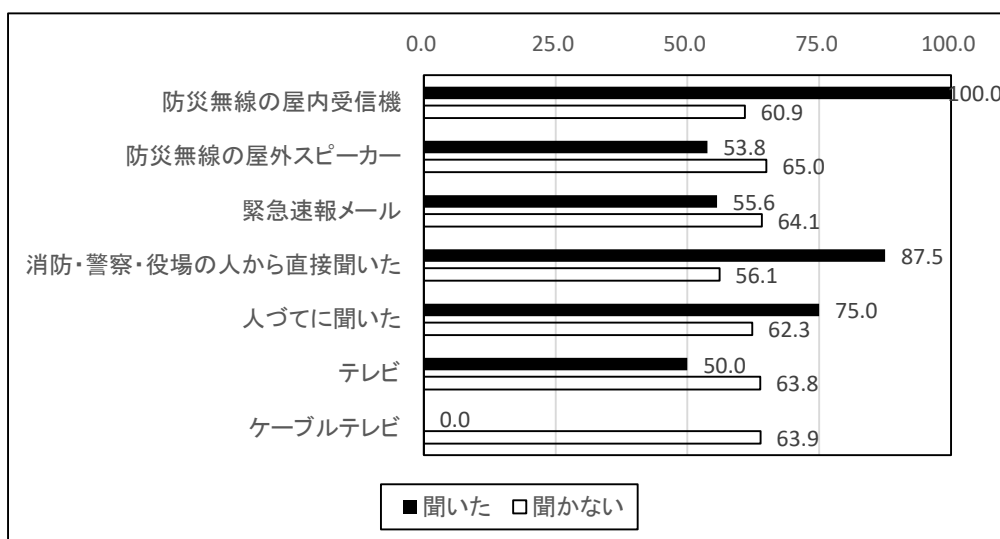


図 16 避難指示聴取メディア別の事前避難率(%) n=73 * χ^2 : p<0.05

さらに、コミュニケーションの重複効果を調査するために、避難指示が聞かれる最も使用頻度の高い 3 つのメディアの重複を調査した。すなわち、①防災無線 DRS (拡声器)、②緊急速報メール PWS、および③「消防/警察/職員」である。ベン図 (図 16) は、各カテゴリーの住民の早期避難率の割合を示している。DRS (拡声器) と PWS を使用した場合、早期の避難率がわずかに高かったことがわかる。しかし、「消防士/警察官/役人」チャンネルの場合、他のチャンネルを重複して使用しても避難率は上がらなかった。「消防士/警察官/職員」によるチャンネルだけで、早期避難が促進されたといえる。

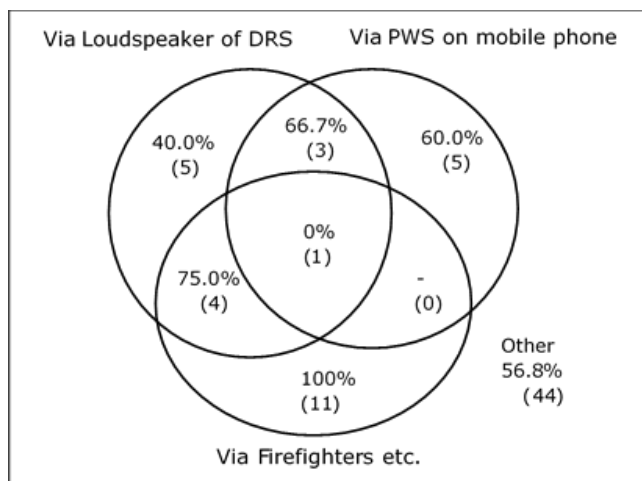


図 17. 主要な通信チャンネルの早期避難率と重複効果、n = 73
カッコ内の数字は、カテゴリ内の人数

4. Discussion

以上から、ダムの情報が避難に役立ったかどうかについては次の 3 点にまとめられる。第 1 に、ダム管理者からの放流警報は、聞いた人も少なく、聞いた人も避難が促されなかったもので、役に立っていなかった。第 2 に、自治体の避難指示も半数の人にしか伝わらず、聞いた人も危険は感じなかったが、聞いた人の避難率の向上には役に立っていた。第 3 に、それにもかかわらず事前の避難率は比較的高く、最も避難を促したのは消防団の勧めであった。ダムの情報は、避難指示につながり、それが消防団の勧めを起動させたという意味においては、住民の避難に役に立っていたといえる。

しかしその一方で様々な問題があることも明らかになった。Mileti and Sorensen(2015)によれば警報と人々の対応行動の過程は、警報発令までの時間、警報周知の時間、住民の対応行動始動までの時間の 3 つの時間区切りに分けられる。今回はそれぞれの段階に問題があった。すなわち、第 1 段階の問題としては、自治体が FCOEF の予告を受けてから避難指示を出すまでに時間がかかってしまったことがある。これは、結果的に最も有効だった消防団の呼びかけの時間を短くしてしまった。第 2 段階の問題としてはダム管理者の放流警報や自治体の避難指示が住民にうまく伝わらなかったというメディアの問題がある。第 3 段階の問題としては警報を受け取って住民すら危機感を持つことがなかったという、伝達内容の問題がある。ではどうすればよいのだろうか。

第 1 の段階としては、Mileti and Sorensen(2015)は自治体の防災担当者は住民の対応行動のリストを作り、洪水危険度のレベルを作り、基準(しきい値)を作ることを推奨している。例えば①FCOEF の予測の有無と予測される放流量による氾濫の危険度によって危険レベルを設定し、②それに従った警告レベルを設定し、③その段階によりどの範囲の住民が避難するべきかをあらかじめ決めておくことが考えられる。これらのことによって警報発令の遅れを防ぐことができるだろう。

第 2 の段階としては、メディアの有効な活用が求められる。今回は消防団の戸別の呼びかけが最も有効だったが、消防団の呼びかけには不思議な説得力がある。すなわち消防団から避難指示を聞いた人も危険性は感じなかったが、避難しなくてはならないと感じたことだ。すなわち、危ないという認識がないままに説得されて行動した人が相当数居たということである。その例として、ある住民はアンケートの自由回答欄で次のように答えている

まさか、自分宅がと思いましたが、消防の方がしらせていただいたので早目に避難した。(中略)自分の宅は 3 階なので避難しないと思ったのですが高齢なので組内の方にめいわくをかけてはいけないと思い消防の方の通りにしました。(西予市の住民・自由回答)

これは、パーソナル・コミュニケーションによる、いわゆる「信念のない説得」(Persuasion without conviction, Lazarsfeld, et al.1948)の結果と言える。しかし消防団による呼びかけには限界がある。各戸を回るには時間がかかり、カバーできる範囲が限られるからだ。今回、西予市野村地区では消防団員 77 人が 912 戸を訪問して避難の呼びかけを行ったという(愛媛新聞 2018.9.14)が、これが限界であろう。さらに都市部では消防団員の数が少なく、この手段は現実的ではない。

一方、市の防災無線(戸別・屋外)は伝達に一定の効果を上げたが、音声なので降雨時の雨音に弱い弱点がある。一方いつも手元にある携帯電話に送る PWS は大雨時にも強いはずだが、今回は有効に使われなかった。大洲市の発信は避難指示から大きく遅れたし、ダム事務所や西予市では全く使われなかった。

警報伝達メディアには多くのものがあり、それぞれ長所と短所がある。ダム警報の伝達は容易ではなく、今回のように降雨があり、夜間となれば、なおさらである。

そこで、ここでは 4 つの技術的特徴に従って主要なチャンネルを比較してみる。すなわち、通知を強制する能力、大雨での通知の聞きやすさ、カバレッジエリア、およびチャンネルの使いやすさである(表 7)。まず、防災無線 DRS と携帯電話では、居住者が情報を検索する意図がない場合でも警告が自動的に受信されるため、通知を強制する能力が高くなる。第 2 に、大雨の音は、屋内のスピーカーや携帯電話を介した通知は聴取を大きく妨げることはない。第 3 に、職員の巡回警告による通知は都市の一部のみに届き、DRS、PWS、および地方自治体からの電子メールは都市全体をカバーし、テレビおよびモバイルアプリケーションは全国をカバーしている。第 4 に、DRS とテレビは使用するのに複雑な操作を必要としないが、地方自治体からの防災メールは登録を必要とし、防災アプリもあらかじめダウンロードしておく必要がある。このように考えると、警報伝達チャンネルには一長一短あり、警報の伝達にはあらゆるメディアを使って伝達するべきといえる。

表 7 Characteristics of Major Dissemination Channels

伝達メディア	Capability to Force Notification	Ease in Hearing Notification in Heavy Rain	Coverage Area	Ease in Using the Channel
戸別受信機(防災無線)	Forced	Moderately difficult	Limited	Easy
屋外拡声器(防災無線・ダム)	Forced	Difficult	Limited	Easy
消防団による戸別訪問	Forced	Easy	Limited	Easy
エリアメール	Forced	Easy	Medium	Moderately difficult
登録メール	Forced	Easy	Medium	Difficult

TV/データ放送	Intentional	Moderately difficult	Widespread	Easy
ウェブ	Intentional	Easy	Widespread	Difficult
スマホアプリ	Forced	Easy	Widespread	Difficult

(Constructed under the concept of Mileti and Sorensen, 2015)

第 3 の段階としては、住民の避難を促すメッセージが必要である。一般に住民は警報を聞いたときにすぐに避難行動を起こさないなので、適切なメッセージ内容を早い段階から頻繁に流すことが必要である (Mileti and Sorensen, 2015)。Mileti and Sorensen(2015)によれば、警報メッセージには発信元(source)、発生しうる事態と影響、場所、対応行動(protective action to take)、有効期限の 5 つの要素が必要である。そしてメッセージのスタイルには具体性 specificity(e.g. with place-name)とわかりやすさ clarity (free from jargons as "10000m³/s flow" or "spillway")が最も重要だという。彼らは携帯電話向けのテキストメッセージをイメージした短い文例と、より長い文例を挙げている(表 8)。

表 8 ダム放流時のメッセージ例 (Mileti and Sorensen, 2015)

Short Example(短縮バージョン): Jackson Co EMA. Evacuate away from Crystal River now. Water release from Parker Dam Flooding downstream to US79. Warning expires 6 PM CST (ジャクソン郡災害対策課。今すぐクリスタル川から避難してください。パーカーダムからの放流が US79 号線まで洪水を起こしています。有効期限は中部時間午後 6 時)
Longer Example(長いバージョン): Director of Emergency Management, Jackson County. The Parker Dam north of Kingston on Crystal River will release a large amount of water beginning at 5:00 PM CST. This will cause flooding downstream. The water will reach the Parkside Marina at about 6:03 PM, the Overland Bridge at 6:42 PM, and the northern boundary of Kingston at 6:53 PM. Some structures and roads one-half mile to either side of the river will be flooded to a maximum depth of 3 feet. Roads will be dangerous to travel on or not be passable. The flooded areas will include: from Parker Dam to Kingston's boundary at U.S. 79, and extend from the Crystal River for one-half mile on both sides of the river. The flooded area on the west will include River Bend Road and Bluff Ridge Hwy. On the east, the floodwaters will almost reach Highway 321. If you are in this area, evacuate now. Do not travel on roads along the river or on bridges that cross it. People west of the river should evacuate toward Centerville. People east of the river should evacuate to Highway 321. Take your pets, prescription medications, and important papers with you. You should be out of the evacuation area by 5:00 PM to avoid being impacted by the floodwaters. Do not drive onto water-covered roads because your car may be washed away. Move to the highest level of your home if you cannot evacuate. If you are not in the area, stay out. Keep listening to local media for more information and official updates. This message will be updated in 1 hour, or sooner if new information is available. (こちらはジャクソン郡緊急災害対策課です。クリスタル川のキングストン郡北部のパーカーダムは、中部標準時の午後 5 時から大量の水を放出します。これにより、下流で洪水が発生します。水は、午後 6 時 3 分にパークサイドマリーナに、午後 6 時 42 分にオーバーランドブリッジに、午後 6 時 53 分にキングストン郡の北の境界に到達します。川の両側 0.5 マイル内の構造物や道路は、最大 3 フィートの深さまで浸水します。道路は、走行するのが危険であるか、通行不可能です。浸水地域には、パーカーダムから米国 79 号線のキングストンの境界までが含まれ、クリスタル川の両側 0.5 マイルまで延びます。西の浸水地域には、リバーベンドロードとブラフリッジハイウェイが含まれます。東では、洪水はほぼハイウェイ 321 に達します。このエリアにいる場合は、今すぐ避難してください。川沿いの道路や川を渡る橋を渡らないでください。川の西の人々はセンタービルに向かって避難する必要があります。川の東の人々はハイウェイ 321 に避難する必要があります。ペット、処方薬、重要な書類を持参してください。洪水の影響を受けないように、午後 5 時までに避難場所から出てください。車が洗い流される可能性があるため、水で覆われた道路を運転しないでください。避難できない場合は、家の最高レベルに移動してください。あなたがその地域にいない場合は、地域外にとどまってください。詳細と公式アップデートについては、地元のメディアを聴き続けてください。このメッセージは 1 時間以内に更新されますが、新しい情報が利用可能であればより早く更新されます。)

こうしたメッセージの原則や文例と比べると、今回発せられたメッセージは具体性とわかりやすさの両面で不十分であるといえる。例えばダム管理者の警報(表 2)では、「下流河川の水位が急激に上昇する」と言う時の場所や結果(氾濫を含む)があいまいで、「厳重な警戒」という時の行動が具体的ではない。また「洪水調節 flood control」「緊急のダム操作」は専門用語で分かりにくい。自治体の避難指示(表 3)で

は、「肱川が氾濫する恐れのある水位に達しましたので」というときその原因、深刻度、氾濫の可能性、時刻などがあいまいである。「これまで浸水していない場所も、浸水の恐れがあります。」というときの場所も具体性に欠けている。こうした欠陥のために住民の危機感も高まらなかったと思われる。警報メッセージの改善が必要である。

確かに、浸水地域を正確にシミュレートすることは容易ではない。しかし、ダムの場合、放流は数時間前に予測されるので、放流に対応したシミュレーションが実施された場合、特にダム放流が河川の水位に直接影響を与えるダムのすぐ下流の領域で効果的に使用されるであろう。

またメッセージの送信頻度も問題である。今回は警報を時折流しただけであった。すなわち、ダムの放流情報は1度流しただけであり、避難指示は3回流したがダムの危険を察知してから避難指示の発表まで何も送らなかった。これでは聞き逃しも発生しやすいし、危機感も高まらない。住民の避難にはより頻繁なメッセージの送信が必要である。

また、送信者の信頼性も、避難を促進する上で重要である (Mileti and Sorensen, 1990 [6], Quarantelli, 1980 [32], Stallings, 1984 [33])。洪水前のダム運営者の信頼性は明らかではないが、今回のアンケート調査では、回答者の82.3%が「ダムの排水操作が不適切である」と答え、68.4%が「ダム情報が不十分である」と答えている。したがって、現在ではダム運営者の信頼性は低くなっている。

この研究で明らかにされた消防団の有効性は、これまでの社会学的研究の結果と一致している。また、PWS が警告の普及に一定の役割を果たしたことも予想どおりであった。一方、ダムの運営者が住民に提供する直接的な情報は効果的ではないという新たな発見があった。

本研究には限界もある。たとえば、PWS および戸別受信機の送信機能が完全に機能しなかった理由を明らかにすることはできなかった。さらに、このケーススタディには、消防団が比較的活動している農村地域のみを対象としているために地理的な限界がある。ダムの流出情報と新しい伝達メディアの効果的な使用に関するさらなる実証研究が必要である。

References

1. 気象庁 (2018), 災害をもたらした気象事例 平成 30 年 7 月 13 日
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/jyun_sokuji20180628-0708.pdf (accessed on 2 August 2018)
2. 愛媛県災害対策本部, 平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について (第 43 報), 2018.7.13.
<http://ehime.force.com/servlet/servlet.FileDownload?file=00P0K000011c7gBUAQ> (accessed on 2 August 2018)
3. Drabek, T.E. Human System Responses to Disaster: An Inventory of Sociological Findings; Springer-Verlag New York: Berlin Heidelberg, Germany, 1986.
4. Perry, R.W. A Model of Evacuation Compliance Behavior. In Disasters, Collective Behavior, and Social Organization; Dynes, R.R., Tierney, K.J., Eds.; Associated University Press: Plainsboro, NJ, USA, 1994; pp. 85–98.
5. Quarantelli, E.L. People's reactions to emergency warnings. University of Delaware Disaster Research Center, Preliminary Paper #75, 1982. Available online: <http://udspace.udel.edu/handle/19716/452> (accessed on 2 August 2019).
6. Mileti, D.S.; Sorensen, J.H. Communication of Emergency Public Warnings: A Social Science Perspective and the State of the Art Assessment; Oak Ridge National Laboratory: Oak Ridge, TN, USA, 1990. [CrossRef]
7. Sorensen, J.H.; Sorensen, B.V. Community Processes: Warning and Evacuation, In Handbooks of Disaster Research; Rodríguez, H., Quarantelli, E.L., Dynes, R.R., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2006; pp. 183–199.

8. Parker, D.J.; Priest, S.J.; Tapsell, S.M. Understanding and enhancing the public's behavioural response to flood warning information. *Meteorol. Appl.* 2009, 16, 103–114. [CrossRef]
9. Jagtman, H.M. Cell broadcast trials in the Netherlands: Using mobile phone technology for citizens' alarming. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2010, 95, 18–28. [CrossRef]
10. Bean, H.; Sutton, J.; Liu, B.F.; Madden, S.; Wood, M.M.; Mileti, D. The study of mobile public warning messages: A research review and agenda. *Rev. Commun.* 2015, 15, 60–80. [CrossRef]
11. National Academies of Sciences. *Emergency Alert and Warning Systems: Current Knowledge and Future Research Directions*; National Academies Press: Washington, DC, USA, 2018.
12. Wayne J. Graham, P.E., The Teton Dam Failure—An Effective Warning and Evacuation, For Presentation at the Association of State Dam Safety Officials 25th Anniversary Conference, Indian Wells, California, September 7–11, 2008. Available online: http://damfailures.org/wp-content/uploads/2015/07/075_The-Teton-Dam-Failure.pdf (accessed on 2 August 2019).
13. Katada, T.; Kuwasawa, N. Development of Simulation System for Flood Control that Considers Dam Effect in Downstream Area. *J. Jpn. Soc. Civ. Eng.* 2009, 65, 280–292. (In Japanese) [CrossRef]
14. ダム水源地環境整備センター, ダム管理の実務, 光和, 2004. Available online: http://www.wec.or.jp/library/image/Dam_management_practices.pdf (accessed on 12 September 2019). (In Japanese).
15. United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP), 2008, Guideline for Reservoir Operation in Relation to Flood Forecasting. Available online: http://typhooncommittee.org/docs/publications/WMO_TD1471_2008.pdf (accessed on 2 August 2019).
16. Mileti, D.S.; Sorensen, J.H. A Guide to Public Alerts and Warnings for Dam and Levee Emergencies, 2015. Available online: <https://www.jma-net.go.jp/matsuyama/saigai/H30/sokuho20180709.pdf> (accessed on 2 August 2019). (In Japanese)
17. 吉井博明他 (2007), 2006 年 7 月豪雨災害における災害情報の伝達と住民の対応, 災害情報調査研究レポート Yoshii, N.; Tanaka, A.; Nakamura, I.; Fukuda, M.; Sekiya, N.; Jibiki, Y.; Morioka, C.; Chida, Y. The Problem of Information Dissemination and Inhabitant's Behaviors in Heavy Rainfall Disaster in July 2006. *Disaster Inf. Manag. Res. Cent.* 2007, 12, 1–163.
18. Grunfest, C., What people did during the Big Thompson Flood. Working Paper #32 prepared for the Urban Drainage and Flood Control District, 1977, Institute of Behavioral Science, University of Colorado. Available online: <https://www.google.com.hk/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=2ahUKEwjFlmRzJ3lAhVBzmEKHTByBSIQFjADegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ilankelman.org%2Fbluecover%2Fnhcwp32.pdf&usg=AOvVaw1Qxo-VHqy3ThxL6nJ66nGQ> (accessed on 2 August 2019).
19. Carpenter, T.M.; Sperflage, J.A.; Georgakakos, K.P.; Sweeney, T.; Fread, D.L. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. *J. Hydrol.* 1999, 224, 21–44. [CrossRef]
20. Georgakakos, K.P. Analytical results for operational flash flood guidance. *J. Hydrol.* 2006, 317, 81–103. [CrossRef]
21. Liu, C.; Guo, L.; Ye, L.; Zhang, S.; Zhao, Y.; Song, T. A review of advances in China's flash flood early-warning system. *Nat. Hazards* 2018, 92, 619–634. [CrossRef]
- Geosciences 2019, 9, 444 19 of 19
22. 国土交通省四国地方整備局 (国交省 a), 野村ダム・鹿野川ダムの操作に関わる情報提供等に関する検証等の場 (とりま

- とめ) 参考資料, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLITa), The Investigation on Information regarding the operation of Nomura Dam and Kanogawa Dam (Summary of Discussions), conference material. Available online: <http://www.skr.mlit.go.jp/kasen/kensyounoba/matomesankou.pdf> (accessed on 2 August 2019).
23. 国土交通省四国地方整備局, 山鳥坂ダム建設事業の検証に関わる検討報告書, 2012, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), 2012, Study report on verification of Yamatosaka dam construction project. Available online: https://www.skr.mlit.go.jp/kasen/kensyou_yamatosaka/houkokusyo/houkokusyo.html (accessed on 12 September 2019). (In Japanese)
24. 国土交通省, 川の防災情報, ダム諸量データとは, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) website, River Flood Information. Available online: <https://www.river.go.jp/kawabou/reference/index10.html> (accessed on 12 September 2019).
25. 読売新聞, 西日本豪雨 8ダム満杯 緊急放流, 2018年7月12日朝刊, Heavy Rainfall in Western Japan 8 Dams Full Emergent Release. Yomiuri Shimbun, 12 July 2018; 1. (In Japanese)
26. 岡村幸弘他, 平成 16, 17 年異常洪水対応と課題, リサバー, 2006.3, spring, 3-8, Okamura, Y.; Sunahachi, S.; Kasuya, J.; Nitta, A.; Mizuguchi, T.; Kitano, S. Roundtable: Response to Extreme Flood in 2004 and 2005, Reservoir, 2006.3, 3-8. Available online: http://www.dam-net.jp/reserver_pdf/Vol_9.pdf (accessed on 12 September 2019). (In Japanese).
27. 国土交通省四国地方整備局 (国交省 b), 第 1 回 野村ダム・鹿野川ダムの操作に関わる 情報提供等に関する検証等の場資料, 平成 30 年 7 月 19 日, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLITb), The Investigation on Information regarding the operation of Nomura Dam and Kanogawa Dam (a material of first conference) 19 July 2018. Available online: <http://www.skr.mlit.go.jp/kasen/kensyounoba/setsumeisiryou.pdf> (accessed on 2 August 2019).
28. 国土交通省四国地方整備局・愛媛県・大洲市・西予市 (国交省 c) 第 2 回 野村ダム・鹿野川ダムの操作に関わる 情報提供等に関する検証等の場資料, より有効な情報提供や住民への周知のあり方について Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Ehime Prefecture, Ozu City, Seiyō City (MLIT c), The Investigation on Information regarding the operation of Nomura Dam and Kanogawa Dam (A Material of Second Conference), On Measures for More Effective Dissemination of Information. Available online: <http://www.skr.mlit.go.jp/kasen/kensyounoba/02setumei0202.pdf> (accessed on 2 August 2019).
29. Lazarsfeld, P.F.; Berelson, B.; Gaudet, H. The People's Choice; Columbia University Press: New York, NY, USA, 1948; p. 157.
30. 愛媛新聞, 西予・野村、避難誘導後も 39 人残留 犠牲含む 34 人救助不能, 2018 年 9 月 14 日, 39 persons were left after the evacuation guidance. Available online: <https://www.ehime-np.co.jp/article/news201809140064> (accessed on 15 August 2019). (In Japanese).
31. 日本災害情報学会 Japan Society for Disaster Information Studies (JASDIS), Report of JASDIS Research Group on Disaster by Heavy Rainfall in July 2018, Tokyo, Japan. (In Japanese)
32. Quarantelli, E. L., Evacuation behavior and problems: Findings and implications from the research literature. Available online: <http://udspace.udel.edu/handle/19716/1283> (accessed on 2 August 2019).
33. Stallings, R.A. Evacuation behavior at Three Mile Island. Int. J. Mass Emergencies Disasters 1984, 2, 11–26.