

説明可能な機械学習モデルを用いた豪雨時における避難/非避難選択行動の要因分析

塚本 満朗¹・高木 朗義²

¹学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

E-mail:a4523020@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学教授 社会システム経営学環 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1)

E-mail:a_takagi@gifu-u.ac.jp (Corresponding Author)

近年の豪雨災害時において、住民が適切に避難行動していないことが指摘されている。住民の避難行動についてはこれまでも多くの研究が行われているが、問題の解決には至っていない。本研究では、塚本・高木が統計分析に代わる手法として構築した避難場所を予測する住民避難選択行動モデルを改善し、避難と非避難の2分類を予測するモデルを構築した。そのうえで、平成30年から令和3年に発生した豪雨災害時の避難行動に対するアンケート調査データを対象に、XAI (説明可能なAI) という技術を用いて住民の避難/非避難行動に影響をもたらす要因を抽出した。その結果、災害による被害を身近に経験していることや避難の経験があること、災害の危険性に対する意識が既に高いことが避難行動に大きな影響を与えていることが明らかとなった。また本研究の結果と同じデータを用いた統計分析の結果と概ね一致することもわかった。

Key Words :evacuation behavior,heavy rain disaster,factor analysis,machine learning,eXplainable AI

1. はじめに

近年頻発する豪雨災害において様々な要因により住民避難が遅れ、人的被害が発生している。平成30年7月豪雨では岡山県倉敷市真備町において、浸水被害により51名が死亡した。倉敷市真備町内を流れる小田川に対する浸水想定区域が実際の浸水範囲とほぼ一致していることや、土砂災害による被害者の9割が土砂災害警戒区域等で被災したことが明らかとなっている。避難情報が発令されたにも拘わらず、人的被害が発生している地域もある¹⁾。令和2年7月豪雨では熊本県南部において球磨川の氾濫により67名が死亡・行方不明となった。熊本県人吉市では多くの住民が河川整備が進んだことにより洪水の危険性を考慮していなかったことや、球磨川からある程度離れた地域まで浸水することを想定していなかったことが現地調査等により判明している²⁾。以上のように住民の豪雨災害に対する危険性の認知が十分でないことが指摘されており、住民避難の現状を改善するためにも、住民避難行動について様々な視点や方法により分析する必要がある。

近年、様々な分野においてディープラーニング技術に

代表される教師有り機械学習技術の発展がめざましい。しかし、従来のAIはブラックボックスモデルと呼ばれ、なぜその結論にたどり着いたのかという内部の過程が不透明であった。そのようなAIの不透明性を払拭するため、2004年から現在に至るまで、世界中でブラックボックスモデルのプロセス全体や各工程の内容が誰にでもはっきり分かるという説明可能性を取り入れたAIの研究が行われており、技術そのものや研究分野全体を総称して、説明可能なAI(eXplainable AI, 略してXAI)と呼ばれている^{3,4)}。

特に交通、医療、金融などの品質保証が特に重要であり、ミス的重要性が高い分野においては、現状の推定・予測した理由を明らかにできない通常のAIではクリティカルな業務を人間に置き換えることは難しく、世界中で解釈性の高いAIが求められている。その他にも、土木工学、農林水産、製造業などの分野においても、AIの社会実装に向けて説明可能性の高いAIが必要とされている。

国内及び海外において、XAIを用いた災害時の避難行動分析に関する研究を行っている事例は見つかっていない。災害時の最適な避難経路探索や、避難時の意思決定に影響を与える要因の分析には主にエージェントモデルが用いられている。道頭ら⁵⁾は、水害経験が住民の避難

行動に関する意思決定に与える影響を分析するため、コンピュータ上で模擬された水害経験から強化学習により避難判断基準を獲得していくエージェントモデルを構築し、自宅が浸水するケースについて浸水に合わずに避難所に到達できた場合にのみ報酬を与える学習方法が、最も確実な避難基準を獲得できる可能性が高いことを明らかにしている。Fligg ら⁹⁾は、ニューラルネットワークやファジー理論、GIS などの空間モデリング手法を組み合わせたエージェントモデルと、人口移動や経済空間、居住地分布などを考慮したダイナミクスモデルを用いて、安全な避難経路や洪水時において被災リスクの少ない領域の探索を行っている。防災分野以外では、行動心理学分野において XAI を用いて従来の機械学習モデルの性能を検証している。Ramon ら⁷⁾は、金融取引データから心理的特性を分類するモデルに対して XAI を適用してモデルの性能を検証し、XAI の分析結果が既存の分類モデルの改善に寄与する可能性を示唆している。

塚本ら (2022)⁸⁾は、住民避難行動分析における主な手法である統計手法に代わり、住民避難行動を機械学習技術によりモデル化し、XAI を用いて分析することで、住民避難行動における避難場所選択に影響をもたらす要因を抽出している。研究の課題として、モデルの精度が不安定であり、統計分析に代わる手法としては不十分であることが挙げられている。この原因として、1地域あたりのサンプル数が2,000~4,000程度であるのに対して、予測の目的変数となる避難場所が6,7種類存在し、1つの避難場所に分類されるサンプル数が少ないことが原因であると考えられる。

しかし、現状の住民避難行動分析においては、避難選択行動の様々な選択肢に影響を与える要因を明らかにすることよりも、「避難しない」から「避難する」という意思決定がなされるよう行動変容を促すための知見を得ることが求められている。そのため、従来の住民避難行動分析においては、避難場所を避難と非避難の2つにまとめた上で分析が行われることが多い。

そこで、塚本らが構築した住民避難選択行動モデル（以下、NNモデルと呼ぶ）の目的変数を避難と非避難にまとめることで、先行研究の課題であったサンプル数の乖離を解消できると考える。そのように、避難に分類されるデータのサンプル数を確保した状態で学習を行った NNモデルと XAI の技術を用いて、避難行動に影響を与える要因を抽出することが本研究の目的である。本研究では、九州北部で大きな被害をもたらした令和3年度の豪雨災害に関する住民避難行動アンケート調査データも加えて分析を行う。

本稿は、本章を含めて5章構成とする。以降、2.では住民避難選択行動モデルと使用データについて示し、3.では住民避難選択行動に影響を与える要因について分析

表 1 各地域データの対象地域

年度	サンプル数	人的被害 (人)		
		死者	行方不明	負傷者
H30	1,964	423	8	4,351
R1	4,000	129	3	1,243
R2	998	119	9	968
R3	1,514	13	0	17

する。4.では本研究をまとめた上で、今後の課題について述べる。

2. 住民避難選択行動モデル

(1) 使用データとアンケート項目

本研究で用いるデータの概要を表 1 に示す。本研究では、平成 30 年 6 月 28 日から 7 月 8 日にかけて被害をもたらした平成 30 年 7 月豪雨、令和元年 10 月 6 日から 10 月 13 日にかけて発生した令和元年台風 19 号、令和 2 年 7 月 3 日から 7 月 31 日にかけて被害をもたらした令和 2 年 7 月豪雨、令和 3 年 8 月 13 日から 8 月 14 日にかけて被害をもたらした令和 3 年 8 月豪雨を対象とする。使用するデータは、H30、R1、R2、R3 の豪雨災害時における住民避難行動アンケート調査のデータである。

これらのデータは、畑山ら⁹⁾が今後の災害時の行動調査のひな型となりうる調査項目を提案しており、平成 30 年 7 月豪雨時の関西・四国・中国地方 11 府県の被災地域の住民 (N=3,000) と令和元年台風 19 号災害時の関東・東北地方 17 都県の被災地域の住民 (N=4,000)、令和 2 年 7 月豪雨時の九州地方 7 県の被災地域の住民 (N=4,000)、令和 3 年 8 月豪雨時の長野県および北九州地方の被災地域の住民 (N=2,000) に対し、Web 形式のアンケートを実施して得たものを用いる。データの中には、災害の影響を受けなかった人の回答も含まれているが、自身に被災のリスクがないと分かっている状況であれば非避難を選択することは明らかである。本研究では豪雨災害によって被災の危険性がある状況に置かれた人らの避難行動にどのような要因が影響を与えたのかを明らかにしたい。そのため、災害の影響を受けなかったグループに属するサンプルを除き、H30 では N=1,964、R2 では N=998、R3 では N=1,514 のサンプルだけを対象として分析を行う。

R3 のデータは未実施であるが、統計的検定手法によるアンケート調査の分析をした結果、H30 から R2 で共通する避難に有意な項目が以下のように得られた。「土砂災害や浸水による自宅被害があること」、「避難情報を取得した手段として近所や地域の方の訪問と離れた場所に住む知人からの連絡があったこと、防災訓練や講演会へ参加していること」、「災害への備えをしていること」などが挙げられた。また相違点として、H30 におい

てのみ、「洪水警報の危険度分布図を災害前から知っており、閲覧したことがある」「避難情報の危険度の違いを災害前から知っていた、災害後に知った」という項目が避難に有意、H30 と R1 では「自宅から最も近い河川までの距離」という項目において、自宅から 100m の距離に自宅がある場合は避難に有意という結果が得られたが、R2 のみ有意差がみられなかった。

表 2 に各地域のアンケート調査に採用されている項目を示す。本研究で対象とする項目は、H30 の項目を基準にすべての年度のデータで共通する項目で、表 2 に青色で示す項目である。なお、このうち本災害以降の意識など災害時の避難行動の意思決定に影響が少ないと思われる項目と、避難行動に直接的な影響を与えその他の要因の影響を正しく考慮できない可能性がある避難および非避難の理由に関する項目については本研究の対象外とする。

(2) 住民避難選択行動モデルの概要と予測精度

本研究で用いる NN モデルの概念図を図 1 に示す。NN モデルは指定避難所、高台、垂直避難など避難に関する避難場所を避難、避難しなかったや、できなかったなど非避難に関する選択肢を非避難として 1 つの目的変数に統合しており、住民避難行動調査アンケートの項目を説明変数としてモデルに入力することで避難と非避難を予測するモデルである。このモデルに XAI の考え方を取り入れることで住民避難行動アンケート調査に含まれる項目のうち、避難と非避難の予測に影響を与える要因を抽出する。AI モデルは本来、予測性能に特化したモデルであり統計モデルのように入力と出力の関係を説明することを苦手とする。そこで、AI モデルに XAI の手法を適用することで、入力と出力の構造を説明する補助的な分析が可能となり、入力と出力の因果関係を明らかにすることができる。

避難場所別のサンプル数の割合を図 2、NN モデルの予測精度を表 3 に示す。すべての年度において「避難しなかった」を選択したサンプルが多くを占めており、避難に属するサンプルが相対的に少なくなっている。そのため、すべての年度において非避難の予測精度が 8 割を超えており、NN モデルはほとんど非避難を予測結果として出力するモデルになっている。避難の予測精度は H30 では 4 割程度であり、R3 にかけて徐々に精度が低下している。

表 2 アンケート項目一覧 (H30 基準)

分類	項目	年度			
		H30	R1	R2	R3
個人属性と災害の経験	性別	○	○	○	○
	年齢	○	○	○	○
	居住地域	○	○	○	○
	婚姻状況	○	○	○	○
	子供の有無	○	○	○	○
	職業	○	○	○	○
	同居家族	○	○	○	○
	避難したかどうか	○	○	○	○
	これまでに避難所での生活経験があるか	○	○	○	○
	以前に災害による被害を受けたことがあるか	○	○	○	○
自宅の属性と被害状況	本災害以前に避難したことがあるか	○	○	○	○
	自宅の住居形態	○	○	○	○
	自宅の立地特性	○	○	○	○
	自宅から一番近い河川までの距離	○	○	○	○
	自宅の標高と一番近い河川の堤防の高さとの関係	○	○	○	○
	自宅は土砂災害(特別)警戒区域に指定されているか	○	○	○	○
	土砂災害による自宅への被害があったか	○	○	○	○
浸水による自宅への被害があったか	○	○	○	○	
生活の支障	災害によって仕事ができなかった期間があったか	○			
	仕事の休止期間は何日程度か	○			
	停電があったか	○			
避難の理由と非避難の理由	避難した理由は何か	○	○	○	○
	誰と一緒に避難したか	○	○	○	○
	最初に避難した場所までどのような手段で行ったか	○	○	○	○
	避難経路を選んだ理由は何か	○	○	○	○
	避難中に危険はあったか	○	○	○	○
避難や気象に関する情報について	避難しなかった、できなかった理由は何か	○	○	○	○
	地域が取得した避難情報	○	○	○	○
	避難/非避難を決めた時、避難情報を取得したか	○	○	○	○
	避難情報を何から取得したか	○	○	○	○
	大雨特別警報の意味をいつから理解していたか	○	○	○	○
災害に関する知識や関心について	洪水危険度分布図についていつから知っていたか	○	○	○	○
	避難に関する情報の危険度の違いについていつから知っていたか	○	○	○	○
	災害前に水害や土砂災害に関心があったか	○			
	災害前に洪水ハザードマップを見たことがあるか	○	○	○	○
	災害に対してどのような備えをしていたか	○	○	○	○
	災害前に防災訓練や防災講演会に参加していたか	○	○	○	○
	災害前にどのような近所づきあいをしていたか	○	○	○	○
	災害前にコミュニティの防災活動はどうなっていたか	○	○	○	○
土砂災害が発生した場合、自宅は被害を受けやすいと思うか	○	○	○	○	
災害以降の意識	災害以前に自宅が風水害被害をどれくらい受けやすいと思ったか	○	○	○	○
	現時点での程度自宅が風水害被害を受けやすいと思っているか	○	○	○	○
	今回の災害以降でも、避難情報を取得したか	○			
	今回の災害以降でも、避難は行ったか	○			
災害に関する意識	次回、避難情報が発令された場合どのような行動をとるか	○	○	○	○
	実際に避難をするために必要な情報は何かと思うか	○	○	○	○
	災害に対する考え方	○	○	○	○
災害に関する意識	防災に関して今後、行政にどのような取り組みを望むか	○	○	○	○

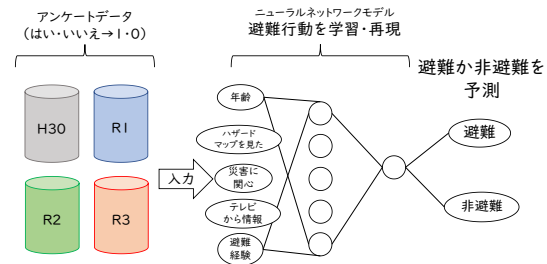


図 1 NN モデルの概念図

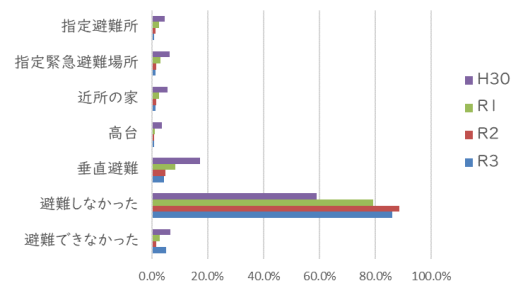


図 2 避難場所別 サンプル数割合

3. 住民避難選択行動に影響を与える要因

(1) PI 分析

図 3 に PI 分析のイメージ図を示す。本来のデータを入力し予測した精度と、ある項目のデータに格納された 0 と 1 という入力をランダムに入れ替えて予測した精度を比較し、ランダムに入れ替えて予測した精度が大きく低下していれば、項目の乱れによりモデルは正常に予測が出来なかったとみなし、その項目が本来予測に影響をもたらすものであると判断する方法である。このような作業を説明変数の個数分繰り返すが、予測の乱れが大きいほど出力される数値（以下、影響度とする）は大きく表示され、その項目が予測に強く影響していることを示す。

表 4～表 7 に各年度の PI 分析の結果を示す。分析ごとに出力される数値の偏差を考慮し平均的に影響度が高い要因を抽出するため PI 分析を 3 回繰り返し影響度の平均を算出する。影響度の平均が大きい順に 30 項目をその年度における避難行動に影響を与える要因と認める。なお、この時点では避難に対する影響であるのか非避難に対する影響であるかは明らかになっていない。各年度において予測に対する影響力が比較的大きい要因は、H30 では「地域に避難勧告が発令されていた」、「避難情報を近所や地域の方の訪問で取得した」、「自宅が一戸建て（平屋）」。R1 では「災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある」、「災害前、土砂災害に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っていた」、「地域に避難情報は発令されていなかった」。R2 では「災害時に避難情報は発令されていなかった」、「災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある」、「災害前、避難場所や経路を確認して災害に備えていた」。R3 では「災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある」、「災害前、非常用持ち出し品を準備して災害に備えていた」、「性別が男性」であった。住民避難行動の選択に影響を与える要因として抽出したこれらの項目が、避難と非避難のどちらの選択に影響を与えるのかを次の PD 分析で明らかにする。

(2) PD 分析

図 4 に PD 分析のイメージ図を示す。PD 分析は、PI 分析で抽出した項目を対象として、内部に格納されているデータを全て 0 と 1 に置き換える。PI 分析と同様に、すべて 0 になったデータとすべて 1 になったデータの予測結果を比較する。PI 分析と異なる点として、NN モデルは避難と非避難を予測するときにも避難を 1、非避難を 0 というラベルで出力するが、PD 分析の予測結果の比較においては出力されたラベルの平均値が避難を表現する

表 3 NN モデルの予測精度

	H30	R1	R2	R3
避難	40.9%	38.6%	23.5%	16.7%
非避難	85.7%	95.9%	99.5%	98.7%

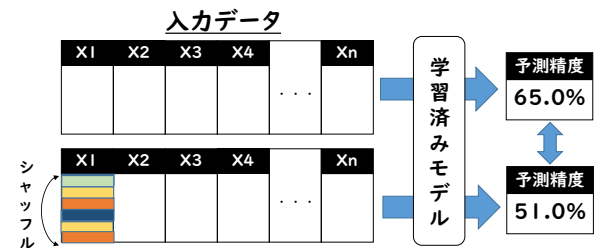


図 3 PI 分析 イメージ

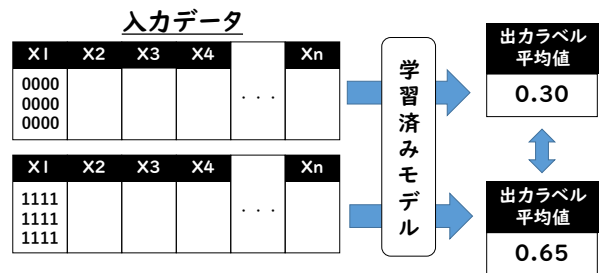


図 4 PD 分析 イメージ

1 に近い非避難を表現する 0 に近いで表現する点である。データがすべて 1 にしたときにラベルの平均値も 1 に近いということは、その項目があることで避難の予測がされやすいと判断できる。この時、データを全て 0 にしたときのラベル平均値とデータを全て 1 にしたときのラベル平均値の標準偏差をとる。データを全て 1 にしたときのラベル平均値と標準偏差との差を偏差としたとき、それが正の値かつ偏差/標準偏差=10%以上ある場合にその要因は避難に影響を与える要因であると認める。

表 8～表 11 に H30 から R3 の PD 分析の結果を示す。青色で示す項目は、避難に影響を与える要因と判断できる基準を満たす項目である。避難に影響を与える要因として抽出されたのは、H30 で 9 項目、R1 で 7 項目、R2 で 8 項目、R3 で 2 項目であった。R3 のみ抽出された要因の数が比較的小さいが、すべての年度の中で避難に関するモデルの精度が最も低く出力ラベルの平均値がほとんど 0 に近い値として出力されたことが原因であると考えられる。以下で、各年度における避難に影響を与える要因の特徴を整理し考察する。

a) H30

表 8 より、「災害時の浸水によって自宅が全壊・大規模半壊した」、「災害前、自宅が強風による被害を受けたことがある」という要因から、災害によって自宅に被害が生じた経験が避難の選択に影響を与えると考えられる。「避難/非避難を決めた時、避難指示（緊急）を取得していた」、「地域に避難準備・高齢者等避難開始が発令されていた」という要因から、避難情報として危険

表 4 H30 の PI 分析結果

項目	影響度
地域に避難勧告が発令されていた	0.0363
避難情報を近所や地域の方の訪問から取得した	0.0243
自宅が一戸建て（平屋）	0.0219
災害時の浸水によって自宅が全壊・大規模半壊した	0.0185
災害以前に避難を行ったことがある	0.0177
避難/非避難を決めた時、避難指示（緊急）を取得していた	0.0177
災害時の土砂災害によって自宅が一部損壊した	0.0176
地域に避難情報が発令されていたが知らなかった	0.0169
自宅は傾斜地の中腹に立地している	0.0168
災害前、近所とは挨拶をする程度の付き合いだった	0.0145
年齢が 50～59 歳	0.0135
避難に関する情報の危険度の違いについて災害後に知った	0.0123
避難情報を防災行政無線から取得した	0.0122
災害前、土砂災害に関するハザードマップを見たことがあるが内容は把握していない	0.0118
災害前、積極的に自治会活動に参加したり親しく話したりする近所づきあいだった	0.0117
災害前、防災訓練や講演会などに時々参加していた	0.0117
自宅が風水害被害を受ける可能性は 31～69%程度あると思っていた	0.0116
避難/非避難を決めた時、避難情報は発令されていなかった	0.0115
災害前、自宅が風水害被害を受ける可能性は 0%だと思っていた	0.0113
災害前、自治会等の地域単位で防災に関する取り決めがあった	0.0109
地域に避難準備・高齢者等避難開始が発令されていた	0.0103
災害時の土砂災害によって自宅が半壊した	0.0098
避難情報をテレビから取得した	0.0094
自宅は一戸建て（2階以上）	0.0087
災害前、土砂災害に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っていた	0.0087
土砂災害ハザードマップを参考にしても、自宅は被害を受けやすいと思う	0.0085
災害前、自宅が強風による被害を受けたことがある	0.0084
災害前、同居家族にペット（犬、猫）がいた	0.0080
災害前、近所づきあいとして高齢者・障害者や子育て支援に参加していた	0.0079
性別が男性である	0.0076

表 5 R1 の PI 分析結果

項目	影響度
災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある	0.0761
災害前、土砂災害に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っていた	0.0246
地域に避難情報は発令されていなかった	0.0240
地域に避難情報が発令されていたが知らなかった	0.0182
自宅はマンション・アパート（3階以上に居住）	0.0175
災害前、特に災害による被害や脅威を受けたことはない	0.0161
避難情報を離れた場所に住む知人や家族からの連絡で取得した	0.0143
地域に避難指示（緊急）が発令された	0.0136
災害前、ほとんど近所づきあいはなかった	0.0134
災害前、自宅が地震の揺れによる被害を受けたことがある	0.0114
自宅は河川の付近に立地している	0.0109
自宅は平野部に立地している	0.0084
災害時の浸水によって自宅が半壊した	0.0084
地域に避難勧告が発令された	0.0082
災害前、挨拶をする程度の近所づきあいだった	0.0076
土砂災害が発生しても、自宅は危険箇所から離れているので問題ないと思う	0.0074
災害前、土砂災害に関するハザードマップを見たことがあるが、内容は把握していない	0.0072
災害前に、土砂災害に関するハザードマップを見たことがない	0.0065
避難情報を近所や地域の方の訪問から取得した	0.0064
災害前に、洪水に関するハザードマップを見たことがない	0.0063
自宅が風水害を受ける可能性は 31～69%程度あると考えていた	0.0060
災害時の土砂災害によって自宅が一部損壊した	0.0059
自宅は傾斜地の中腹に立地している	0.0059
性別が男性	0.0058
災害前、家族との連絡方法を確認して災害に備えていた	0.0058
避難情報を都や県の登録制メールから取得した	0.0056
災害前、自宅は無事だったが周辺地域（生活圏）で強風による被害があった	0.0054
土砂災害ハザードマップを参考にしても、自宅は被害を受けやすいと思う	0.0053
自宅は一戸建て（2階以上）	0.0050
同居家族に介護の必要な方がいた	0.0049

度が高いことを意味する避難指示（緊急）（現在の警戒レベル 4 に位置する避難指示）や避難準備・高齢者等避難開始（現在の警戒レベル 3 に位置する高齢者等避難）は住民の避難行動を促す情報として機能していると考え

表 6 R2 の PI 分析結果

項目	影響度
災害時に避難情報は発令されていなかった	0.0289
災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある	0.0261
災害前、避難場所や経路を確認して災害に備えていた	0.0135
これまでに避難所で生活した経験がある	0.0123
災害前、土砂災害に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っている	0.0112
災害時に避難勧告が発令された	0.0100
年齢が 60～69 歳	0.0097
自宅は土砂災害（特別）警戒区域に指定されていない	0.0088
災害時に避難準備・高齢者等避難開始が発令された	0.0083
避難/非避難を決定した時に避難情報は発令されていなかった	0.0083
災害前、洪水に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っている	0.0083
土砂災害が発生しても、自宅は危険箇所から離れているので問題ないと思う	0.0081
同居家族にあってはまるものはない	0.0078
自宅が土砂災害警戒区域に指定されている	0.0076
避難情報を緊急速報メール（エリアメール）から取得している	0.0076
土砂災害ハザードマップを参考にしても、自宅は被害を受けやすいと思う	0.0071
災害前、自宅が豪雨による浸水の被害を受けた	0.0064
自宅が風水害被害を受ける可能性は 1～30%程度だと考えていた	0.0062
災害前、特に災害による被害や脅威を受けたことがない	0.0062
災害前、近隣の指定避難所までの避難経路の検討をして災害へ備えていた	0.0062
自宅が土砂災害特別警戒区域に指定されている	0.0059
避難情報が発令されていたが知らなかった	0.0059
自宅が一番近い河川までの距離は 500～1000m 程度	0.0057
大雨特別警報の意味を災害後に知った	0.0057
性別が男性	0.0055
自宅は河川の付近に立地している	0.0055
避難情報の危険度の違いについて災害前から知っていた	0.0050
避難情報を市町村のホームページや SNS から取得している	0.0050
年齢が 70～79 歳	0.0047
避難情報の危険度の違いについて災害後に知った	0.0047

表 7 R3 の PI 分析結果

項目	影響度
災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある	0.0456
災害前、非常用持ち出し品を準備して災害に備えていた	0.0165
性別が男性	0.0139
自宅は土砂災害（特別）警戒区域等に指定されていない	0.0133
地域に避難指示が発令されていた	0.0121
自宅は 1 戸建て（2階以上）	0.0104
自宅が土砂災害（特別）警戒区域等に指定されているか分からない	0.0096
地域に高齢者等避難が発令された	0.0090
自宅が一番近い河川までの距離が 50～100m 程度	0.0088
近隣の指定避難所までの避難経路を検討して災害に備えていた	0.0083
災害前、自宅は無事だったが周辺地域（生活圏）で豪雨による浸水被害があった	0.0079
自宅の標高は自宅が一番近い河川の堤防と比べて高い	0.0071
地域に避難情報が発令されていたが知らなかった	0.0071
避難/非避難を決定したときに避難情報が発令されていたが知らなかった	0.0068
自治会等の地域で防災に関する取り決めがあるかどうか知らない	0.0068
災害前、同居家族にペット（犬、猫）がいた	0.0065
災害前、特に災害による被害や脅威を受けたことはない	0.0065
洪水危険度分布図について、今初めて知った	0.0059
避難/非避難を決めた時、避難情報は発令されていなかった	0.0058
自宅はマンション・アパート（1階に居住）	0.0055
自宅が風水害被害を受ける可能性は 0%程度と考えていた	0.0055
自宅はマンション・アパート（3階以上に居住）	0.0053
年齢が 50～59 歳	0.0051
自宅付近に川がない	0.0050
同居家族に乳幼児がいた	0.0049
自宅の標高は自宅が一番近い河川の堤防と同じくらい	0.0048
避難情報を行政以外のホームページや SNS、アプリから取得	0.0048
これまでに避難所で生活経験がある	0.0048
洪水危険度分布図について災害後に知り閲覧したことがない	0.0046
避難情報を緊急速報メール（エリアメール）から取得	0.0046

られる。

b) R1

表 9 より、「避難情報を離れた場所に住む知人や家族からの連絡で取得した」、「避難情報を近所や地域の方

表 8 H30 の PD 分析結果

項目	予測されたラベルの平均値		偏差/標準偏差
	データ全て 0	データ全て 1	
地域が避難勧告を取得していた	0.409	0.271	-0.240
避難情報を近所や地域の方の訪問から取得した	0.308	0.546	0.276
自宅が一戸建て (平屋)	0.320	0.255	-0.068
災害時の浸水によって自宅が全壊・大規模半壊した	0.314	0.534	0.298
災害以前に避難を行ったことがある	0.292	0.473	0.196
避難/非避難を決めた時、避難指示 (緊急) を取得していた	0.267	0.382	0.123
災害時の土砂災害によって自宅が一部損壊した	0.319	0.265	-0.244
地域に避難情報が発令されていたか知らなかった	0.315	0.446	0.281
自宅は傾斜地の中腹に立地している	0.327	0.225	-0.128
災害前、近所とは挨拶をする程度の付き合いだった	0.332	0.293	-0.086
年齢が 50~59 歳	0.330	0.254	-0.025
避難に関する情報の危険度の違いについて災害後に知った	0.310	0.332	0.013
避難情報を防災行政無線から取得した	0.307	0.338	0.055
災害前、土砂災害に関するハザードマップを見たことがあるが内容は把握していない	0.327	0.291	-0.071
災害前、積極的に自治会活動に参加したり親しく話したりする近所づきあいがあった	0.311	0.328	0.087
災害前、防災訓練や講演会などに時々参加していた	0.325	0.241	-0.163
自宅が風水害被害を受ける可能性は 31~69%程度あると思っていた	0.305	0.336	0.099
避難/非避難を決めた時、避難情報は発令されていなかった	0.320	0.220	-0.140
災害前、自宅が風水害被害を受ける可能性は 0%だと思っていた	0.318	0.301	-0.032
災害前、自治会等の地域単位で防災に関する取り決めがあった	0.321	0.306	-0.051
地域に避難準備・高齢者等避難開始が発令されていた	0.269	0.400	0.158
災害時の土砂災害によって自宅が半壊した	0.316	0.414	0.305
避難情報をテレビから取得した	0.343	0.291	-0.101
自宅は一戸建て (2階以上)	0.277	0.335	0.110
災害前、土砂災害に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っていた	0.335	0.272	-0.060
土砂災害ハザードマップを参考にしても、自宅は被害を受けやすいと思う	0.288	0.404	0.075
災害前、自宅が強風による被害を受けたことがある	0.313	0.363	0.127
災害前、同居家族にペット (犬、猫) がいた	0.337	0.234	-0.084
災害前、近所づきあいとして高齢者・障害者や子育て支援に参加していた	0.324	0.239	-0.054
性別が男性である	0.311	0.316	0.029

表 9 R1 の PD 分析結果

項目	予測されたラベルの平均値		偏差/標準偏差
	データ全て 0	データ全て 1	
災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある	0.088	0.419	0.654
災害前、土砂災害に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っていた	0.142	0.081	-0.276
地域に避難情報は発令されていなかった	0.116	0.460	0.597
地域に避難情報が発令されていたか知らなかった	0.118	0.361	0.506
自宅はマンション・アパート (3階以上に居住)	0.138	0.053	-0.447
災害前、特に災害による被害や脅威を受けたことはない	0.153	0.101	-0.204
避難情報を離れた場所に住む知人や家族からの連絡で取得した	0.120	0.267	0.381
地域に避難指示 (緊急) が発令された	0.097	0.195	0.337
災害前、ほとんど近所づきあいはなかった	0.131	0.102	-0.125
災害前、自宅が地震の揺れによる被害を受けたことがある	0.132	0.090	-0.188
自宅は河川の付近に立地している	0.117	0.134	0.070
自宅は平野部に立地している	0.125	0.123	-0.006
災害時の浸水によって自宅が半壊した	0.122	0.299	0.422
自身の住む地域に避難勧告が発令された	0.113	0.129	0.067
災害前、挨拶をする程度の近所づきあいがあった	0.136	0.109	-0.107
土砂災害が発生しても、自宅は危険箇所から離れているので問題ないと思う	0.146	0.098	-0.197
災害前、土砂災害に関するハザードマップを見たことがあるが、内容は把握していない	0.131	0.095	-0.162
災害前、土砂災害に関するハザードマップを見たことがない	0.143	0.095	-0.201
避難情報を近所や地域の方の訪問から取得した	0.121	0.175	0.181
災害前、洪水に関するハザードマップを見たことがない	0.123	0.125	0.009
自宅が風水害を受ける可能性は 31~69%程度あると考えていた	0.125	0.123	-0.006
災害時の土砂災害によって自宅が一部損壊した	0.132	0.088	-0.201
自宅は傾斜地の中腹に立地している	0.126	0.102	-0.103
性別が男性	0.114	0.128	0.058
災害前、家族との連絡方法を確認して災害に備えていた	0.121	0.132	0.042
避難情報を都や県の登録制メールから取得した	0.125	0.101	-0.107
災害前、自宅は無事だったが周辺地域 (生活圏) で強風による被害があった	0.127	0.102	-0.112
土砂災害ハザードマップを参考にしても、自宅は被害を受けやすいと思う	0.115	0.136	0.083
自宅は一戸建て (2階以上)	0.113	0.128	0.061
同居家族に介護の必要な方がいた	0.127	0.104	-0.099

の訪問から取得した」という要因から、身近な人からの声掛けが避難を促進するきっかけとして有力であることが考えられる。「地域に避難指示 (緊急) が発令された」という要因から、H30 の特徴と同様に避難指示 (緊急) が避難行動を促す情報として機能していると考えられる。

c) R2

表10より、「自宅が土砂災害特別警戒区域に指定されている」、「土砂災害ハザードマップを参考にしても、自宅は被害を受けやすいと思う」という要因から、自宅が土砂災害によって被災するリスクを既に認識していることが避難の促進に影響を与えていると考えられる。この項目に「はい」と回答している人はいずれも、自宅が

土砂災害によって被災するかどうかを知るために土砂災害に関する情報を事前に入手していることになる。つまり、少なからず災害に対する関心があったことが災害時の避難行動につながった可能性も考えられる。

d) R3

表 11 より、「災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある」、「これまでに避難所での生活経験がある」という要因から、これまでに被災や実際の避難の経験があることが、避難の選択に影響していることが考えられる。

すべての年度で共通する避難に影響を与える要因は、「災害前または発生中に命を守るための避難をしたこと

表 10 R2 の PD 分析結果

項目	予測されたラベルの平均値		偏差/標準偏差
	データ全て 0	データ全て 1	
災害時に避難情報は発令されていなかった	0.038	0.030	-0.240
災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある	0.036	0.050	0.273
災害前、避難場所や経路を確認して災害に備えていた	0.037	0.036	0.129
これまでに避難所で生活した経験がある	0.033	0.044	0.294
災害前、土砂災害に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っている	0.034	0.038	-0.200
災害時に避難勧告が発令された	0.034	0.036	0.213
年齢が 60~69 歳	0.036	0.025	-0.176
自宅が土砂災害(特別)警戒区域に指定されていない	0.037	0.023	-0.085
災害時に避難準備・高齢者等避難開始が発令された	0.036	0.023	0.000
避難/非避難を決定した時に避難情報は発令されていなかった	0.034	0.038	-0.280
災害前、洪水に関するハザードマップで自宅付近や周辺地域の危険度の確認を行っている	0.036	0.049	-0.164
土砂災害が発生しても、自宅は危険箇所から離れているので問題ないと思う	0.036	0.023	-0.034
同居家族にあてはまるものはない	0.036	0.034	-0.115
自宅が土砂災害警戒区域に指定されている	0.044	0.034	0.091
避難情報を緊急速報メール(エリアメール)から取得	0.036	0.045	-0.200
土砂災害ハザードマップを参考にしても、自宅は被害を受けやすいと思う	0.036	0.040	0.164
災害前、自宅が豪雨による浸水の被害を受けた	0.036	0.038	0.200
自宅が風水害被害を受ける可能性は 1~30%程度だと考えていた	0.038	0.036	-0.069
災害前、特に災害による被害や脅威を受けたことがない	0.036	0.036	-0.123
災害前、近隣の指定避難所までの避難経路の検討をして災害へ備えていた	0.029	0.044	0.016
自宅が土砂災害特別警戒区域に指定されている	0.033	0.042	0.243
避難情報が発令されていたか知らなかった	0.037	0.023	0.275
自宅が一番近い河川までの距離は 500~1000m 程度	0.034	0.061	-0.231
大雨特別警報の意味を災害後に知った	0.036	0.038	-0.091
性別が男性	0.033	0.050	-0.123
自宅は河川の付近に立地している	0.032	0.044	-0.164
避難情報の危険度の違いについて災害前から知っていた	0.034	0.050	0.016
避難情報を市町村のホームページや SNS から取得している	0.036	0.032	0.000
年齢が 70~79 歳	0.034	0.051	-0.240
避難情報の危険度の違いについて災害後に知った	0.036	0.033	-0.127

がある」のみだった。H30 から R2 で共通する避難に影響を与える要因は、「災害時または以前に浸水、土砂災害によって自宅に被害が生じた」、「地域に避難情報が発令されていたか知らなかった」の 2 つであった。このことから、過去に避難の経験があることや災害による被害を身近に経験していることが避難に影響を与える一般的な要因であると考えられる。「地域に避難情報が発令されていたか知らなかった」という要因は、地域に避難情報が発令されていたか知らないことが避難の選択に影響を与えるということになり直感に反する結果である。

同じデータを対象に統計的分析手法を用いて避難に有

表 11 R3 の PD 分析結果

項目	予測されたラベルの平均値		偏差/標準偏差
	データ全て 0	データ全て 1	
災害前または発生中に命を守るための避難をしたことがある	0.028	0.046	0.254
災害前、非常用持ち出し品を準備して災害に備えていた	0.033	0.036	0.045
性別が男性	0.036	0.035	-0.009
自宅は土砂災害(特別)警戒区域等に指定されていない	0.038	0.030	-0.111
地域に避難指示が発令されていた	0.033	0.035	0.037
自宅は 1 戸建て(2 階以上)	0.036	0.034	-0.018
自宅が土砂災害(特別)警戒区域等に指定されているか分からない	0.035	0.038	0.034
地域に高齢者等避難が発令された	0.037	0.024	-0.204
自宅が一番近い河川までの距離が 50~100m 程度	0.035	0.034	-0.009
近隣の指定避難所までの避難経路を検討して災害に備えていた	0.034	0.036	0.018
災害前、自宅は無事だったが周辺地域(生活圏)で豪雨による浸水被害があった	0.035	0.035	0.000
自宅の標高は自宅が一番近い河川の堤防と比べて高い	0.035	0.035	0.000
地域に避難情報が発令されていたか知らなかった	0.036	0.029	-0.096
避難/非避難を決定したときに避難情報が発令されていたか知らなかった	0.035	0.035	0.000
自治会等の地域で防災に関する取り決めがあるかどうか知らない	0.036	0.033	-0.046
災害前、同居家族にペット(犬、猫)がいた	0.035	0.035	0.000
災害前、特に災害による被害や脅威を受けたことはない	0.036	0.031	-0.075
洪水危険度分布図について、今初めて知った	0.035	0.035	0.000
避難/非避難を決めた時、避難情報は発令されていなかった	0.035	0.025	-0.167
自宅はマンション・アパート(1 階に居住)	0.035	0.038	0.034
自宅が風水害被害を受ける可能性は 0%程度とと考えていた	0.035	0.035	0.000
自宅はマンション・アパート(3 階以上に居住)	0.036	0.027	-0.140
年齢が 50~59 歳	0.035	0.035	0.000
自宅付近に川がない	0.036	0.035	-0.009
同居家族に乳幼児がいた	0.035	0.035	0.000
自宅の標高は自宅が一番近い河川の堤防と同じくらい	0.033	0.039	0.086
避難情報を行政以外のホームページや SNS、アプリから取得	0.035	0.036	0.009
これまでに避難所で生活経験がある	0.031	0.047	0.200
洪水危険度分布図について災害後に知り閲覧したことがない	0.035	0.035	0.000
避難情報を緊急速報メール(エリアメール)から取得	0.038	0.034	-0.053

意な項目を抽出した結果との比較を行った。なお、R3 のデータに関しては分析を未実施である。H30 から R2 にかけて、本研究で得られた要因と統計分析の結果は概ね一致していることを確認したが、R2 の「地域に避難情報が発令されていたか知らなかった」のみ統計分析では有意差のない項目であった。本研究と統計分析で異なる結果が得られた要因であるが、手法の違いによる結果の差を説明できる根拠がないことに加えて直感に反する結果であるため現状は解釈が難しい。

4. おわりに

本研究では、従来のNNモデルの目的変数を簡略化したモデルとXAIの手法を用いて避難に影響を与える要因を抽出し、各年度における要因の特徴と各年度で共通する避難に影響を与える一般的な要因を明らかにした。各年度の特徴として、H30では、災害によって自宅に被害が生じた経験や避難指示（緊急）と避難準備・高齢者等避難開始という避難情報に関する要因が避難に影響すること。R1では、近所の人や親戚など身近な人からの声掛けに関する要因や、避難指示（緊急）という避難情報を取得することが避難に影響すること。R2では、自宅が土砂災害によって被災するリスクがあるかどうかを確認していることが避難に影響すること。R3では、これまでに被災や実際に避難した経験があることが避難に影響することを明らかにした。

すべての年度を通じて、過去に避難の経験があることや災害による被害を身近に経験していることが避難に影響を与える一般的な要因であることを明らかにした。

統計手法を用いた住民避難行動分析の結果と本研究の分析結果を比較することで、XAIと統計手法の結果は概ね一致することを改めて確認できた。

地域に避難情報が発令されたか知らなかったことが避難に影響を与えているということが結果から明らかになったが、直感的に反する結果であるものの現状ではこれを説明できるデータが不足しているため、この結果についての解釈は今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（21K04301, 研究課題名：説明可能な機械学習モデルを用いた住民避難行動分析と促進策、代表：高木朗義）の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 30 年 7 月豪雨における被害等の概要, 2018. https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hazard_risk/dai01kai/dai01kai_siryu2-1.pdf (2021 年 2 月 5 日閲覧)。
- 2) 国土交通省九州地方整備局八代河川国道事務所：令和 2 年 7 月球磨川豪雨検証委員会 第 2 回 令和 2 年 10 月 6 日開催 説明資料 (3/4), 2020. http://www.qsr.mlit.go.jp/yatusiro/site_files/file/bousai/goukensho/20201006shiryu3.pdf (2021 年 2 月 5 日閲覧)。
- 3) A. Amina, B. Mohammed: Peeking Inside the Black-box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI), *IEEE Access*, Volume 6, pp.52138-52160, 2018.
- 4) 原聡：【記事更新】私のブックマーク「説明可能AI」, 一般社団法人人工知能学会, 令和元年7月, https://www.ai-gakkai.or.jp/resource/my-bookmark/my-bookmark_vol34-no4/, (令和3年11月2日閲覧)
- 5) 道頭理緒奈・堀智晴：水害経験が避難の意思決定に及ぼす影響に関する強化学習分析, *土木学会論文集B1 (水工学)*, 77巻, 2号, p. I_1483- I_1488, 2021.
- 6) Fligg, R. & Barros, J. (2016). A case study of flooding in the Limpopo River Basin, Xai Xai, Mozambique. *Applied Spatial Modelling and Planning*. In: John, R. Lombard, Eliahu Stem, Graham Clarke. *Applied Spatial Modelling and Planning*, 29. London, Routledge.
- 7) Ramon, Y., Matz, S. C., Farokhnia, R. A. & Martens, D. (2021). Explainable AI for Psychological Profiling from Behavioral Data: An Application to Big Five Personality Predictions from Financial Transaction Records. *MDPI Journals Information*, Volume 12, Issue 12, 518.
- 8) 塚本満朗, 高木朗義：説明可能な機械学習モデルを用いた豪雨時における住民避難選択行動の要因分析, *土木計画学研究・論文集*, 77 巻, 5 号, pp. I_181- I_191, 2022.
- 9) 畑山満測・高木朗義・梶谷義雄・杉浦聡志：平成 30 年 7 月豪雨災害における被災地域住民の行動分析, *土木計画学研究発表会・講演集*, Vol.59, 104, 2018.

(Received --, 2022)

ANALYSIS OF FACTOR ON EVACUATION/NON-EVACUATION CHOICE BEHAVIOR DURING HEAVY RAINFALL USING AN EXPLAINABLE MACHINE LEARNING MODEL

Michiro TSUKAMOTO and Akiyoshi TAKAGI