

# 予測避難所要時間に基づく 災害リスクの新たな評価指標を用いた 進行型災害に対する避難判断支援の試み

谷口 寿俊, 川野 浩平

豪雨災害などの進行型災害において、自治体はさまざまな情報を基に避難情報発令の対象やタイミングを判断する必要がある。しかし、定性的な根拠に基づく判断では適切な避難情報発令は困難である。適切な避難情報発令には、定量的な根拠に基づいて判断を行うことが望ましい。そのためには、さまざまな情報から災害リスクを定量化して評価する必要がある。本稿では、避難時の災害リスクの定量化を目的として、避難所要時間に着目した災害リスクの新たな評価指標を開発するとともに、その避難判断支援における有用性について検討した事例について概説する。

キーワード：豪雨災害, 避難判断支援, 避難所要時間, 脆弱性, 災害リスク

## 1. はじめに

豪雨災害は雨の降り始めから被害発生までに時間的猶予（リードタイム）がある進行型の災害であり、災害や被害の規模を事前にある程度予測することができるため、被害発生までの猶予時間内に住民の避難を完了することで人的被害の発生を防ぐことができる。そのため、各自治体は、内閣府が策定した「避難情報に関するガイドライン（令和3年5月）」[1]（以下、ガイドライン）を参考にして高齢者等避難、避難指示、緊急安全確保など（以下、避難指示等）の発令基準や伝達方法、防災体制などを検討し、人的被害の軽減に努めている。ガイドラインでは、対象とする災害の特定、避難指示等の対象とする区域の設定、避難指示等の発令基準の設定の三つの作業の流れに従い、避難指示等の発令対象区域や発令基準の例が示されている。特に避難指示等の発令基準については大雨警報や河川の水位、土砂災害警戒情報などの情報、およびそれらから予想される被害状況をもとに避難指示等の発令に係る意思決定（以下、避難判断）を行うこととされている。しかし、ガイドラインには、必ずしも明確な基準が示されている訳ではなく、「危険が及ぶおそれがある場合」などの定性的で曖昧な表現も含まれているため、防災責任者など意思決定者の経験に基づいた主観的な判断を必要とする場面がある。そのため、意思決定者ごと

に避難指示等の発令内容やタイミングなど判断結果が異なり、災害対応の経験が浅い場合には的確な避難判断ができない事態が想定される。そのため、意思決定者の経験の蓄積に依存しない、安定的かつ的確な避難判断を実現するために、いわゆる「災害の危険性」という定性的で曖昧な尺度を何らかの定量的な指標に則り判断する手法を検討する必要がある。

災害とは、豪雨や河川氾濫・土砂崩れなど自然の災害現象（以下、「ハザード」）を誘因として発生するものである。近年は、こうしたハザードを災害の危険性として捉えるのではなく、社会科学的な要素が人々をハザードに対して脆弱にするという観点を重視する脆弱性アプローチによって、災害の危険性を把握する先行研究が数多く進められている。これらの研究においては、災害による人や資産などへの危険性を「災害リスク」と称し、ハザードと脆弱性を組み合わせて評価する方法が用いられている。

豪雨災害におけるハザードの種別には、河川水位および流量の増加によって発生する水災害や、土中に降雨が過度に浸透することによって発生する土砂災害などがある。各自治体は、気象庁が降水量予測に基づいて発する大雨警報や洪水警報、土砂災害警戒情報および土砂災害危険度情報などから、これらの災害のハザードを定量的に把握している。

一方で、脆弱性の基本的な考え方についてはさまざまな考え方があり、ワイズナーら[2]は「脆弱性を左右する代表的な要素に、性差・年齢格差・健康状態と身体的な障害・民族あるいは人種もしくは国籍、カーズトや宗教、社会経済的な地位がある」と示し、脆弱

たにぐち ひさとし, かわの こうへい  
九州大学大学院工学研究院附属アジア防災研究センター  
〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744  
taniguchi@doc.kyushu-u.ac.jp,  
kawano@doc.kyushu-u.ac.jp

性の評価を取り込んだ災害リスクに関する先行事例を次の四つに分類している。

一つ目は、脆弱性を、安全性を向上させる内在的な能力とみなすものである。二つ目は、防災のための計画や政策決定への利用を目的として、脆弱性を評価する事例 [3, 4] であり、起きてはならない最悪の事態を想定したうえで、これを回避するための備え（避難経路上の路面整備状況や、避難所の物資充足率、都市計画の進捗率など）に関する定量的な値を算定し、それをもって脆弱性 [5] とするものである。三つ目は、脆弱性を「統計学的に求められた確率で表される弱さ」として定量化し、ハザードの定量的な強度を乗じるなどして災害リスクの評価に利用する事例 [6-9] である。四つ目は、「脆弱性が高い人々の集団」という静的な概念や「脆弱な状況」という動的な概念などの「脆弱である要素」を定性的な評価により、チェックリストとして整理し、これをカテゴリー化して脆弱性として評価する事例 [5] である。

しかしながら、以上のような四つに大別された一般的な脆弱性の評価方法の考え方は、いずれも静的な評価であり、時々刻々と変化する避難の脆弱性を定量的に表現できるものではないため、避難判断の意思決定に活用できる避難に着目した定量的な脆弱性の評価には適さないと考えられる。このような観点から、避難判断に活用するための災害リスクを評価するために必要となる脆弱性の評価に際しては、先行事例にない新しい「避難に着目した新たな脆弱性」の考え方を導入する必要があると考えられる。

先に述べたように災害リスクの構成要素であるハザードについては気象庁からの防災気象情報などを利用できるため、具体的かつ定量的な指標として活用できる。しかしながら、避難判断の指標となるような定量的な脆弱性を考える場合には、前述した脆弱性の評価手法の適用が難しいことから、人の避難行動に着目した脆弱性を新たに定義することが必要となる。そこで、まず、避難の構成要素について整理する。

避難の構成要素は、避難指示等を発令する自治体側の視点に基づき整理すると、「把握した被害状況や危険性などに基づく、避難などの意思決定」「避難対象者への周知・伝達」「避難対象者を安全に避難させるための避難誘導」の三つに大別できる。自治体は、時々刻々とリアルタイムに変化する状況に応じて、三つの要素を踏まえて住民が安全に避難を完了するまでに要する時間から逆算して避難指示等の発令タイミングを決定する。そのため、情報を受け取った住民が安全に避

難を完了するまでに必要とする時間を自治体があらかじめ把握しておくことが重要であると指摘されている。一つ目の要素と二つ目の要素はタイムラインの作成やリスクコミュニケーションなどの自助努力 [10, 11] によって改善・短縮が期待できる。しかし、三つ目の要素に含まれる「避難対象者が避難を完了するまでに要する時間（以下、避難所要時間）」は一定以上の改善・短縮が期待できないため、三つの要素の中で最も支配的であると考えられる。

この「避難所要時間」に着目し、避難の脆弱性を定量的に評価することで、どの地域に対してどのようなタイミングで避難指示等を発令すべきか相対的に提示できる可能性がある。また、避難所要時間を用いて災害リスクを評価することで適切な発令を可能とする定量的な指標となる可能性がある。

以上の観点から、著者らは、人的被害の発生を防ぐために自治体が把握すべき各住民の避難所要時間に着目し、これを基に脆弱性を表現することで災害リスクを定量的に評価できる新たな指標の開発を行った。また、本指標を茨城県常総市における平成 27 年 9 月関東・東北豪雨時の河川氾濫による浸水予測に適用し、避難判断支援におけるその適用可能性や有用性の検討を行った。本稿では、それらの取り組み内容について概説する。

## 2. 災害リスクの評価方針

本取り組みでは、新しい災害リスクを「立退き避難の困難さ」として定義し、避難所要時間を指標とした脆弱性とハザードを組み合わせて評価する。具体的には、図 1 に示すフローに従い、まず、避難経路の設定と避難先の設定を行う。次に、ハザードおよび避難経路と住居構造から立退き避難の必要性を判定し、避難の必要がない場合は災害リスクを 0 とする。避難の必要がある場合は、移動時間を用いてハザードを考慮した避難所要時間を算出し、その値を基に災害リスクを評価するものとする。

なお、移動時間の予測は、自動車および徒歩の二つの避難手段別に行い、人の属性は考慮しないこととする。これは、避難時の移動速度は避難グループの構成や属性などの特徴によって変化するものの、実際の災害時にそれらの特徴を特定することは困難なためである。

## 3. 平常時の移動時間の予測

### 3.1 自動車での移動時間の評価

移動時間は、経路の特徴や地域の特性などの多くの

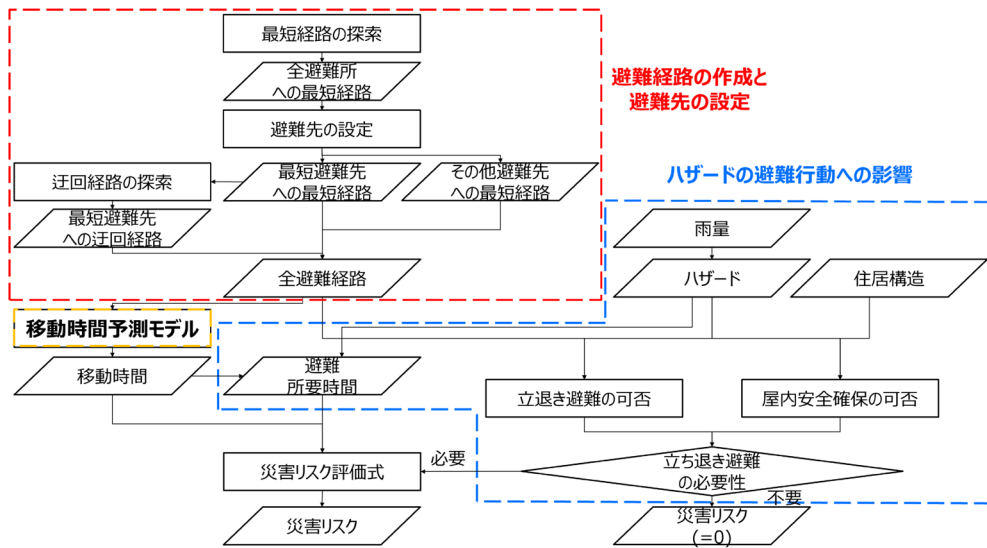


図1 災害リスク評価のフロー

表1 避難経路の特徴を表す項目とその区分

項目	項目ごとの区分
道路幅員	19.5m 以上 (W1), 13m~19.5m(W2), 5.5m~13m(W3), 3m~5.5m(W4), 3m 未満 (W5), 幅員不明 (W6)
縦断勾配	-9%以下 (S1), -9%~-7%(S2), -7%~-5%(S3), -5%~5%(S4), 5%~7%(S5), 7%~9%(S6), 9%以上 (S7)
曲率半径	15m 未満 (B1), 15m~60m(B2), 60m~150m(B3), 150m 以上 (B4)
土地利用	農業地域 (Zone_Agri), 森林地域 (Zone_Fore)
交差点	箇所数 (Inter), 直進回数 (Straight), 右折回数 (Right), 左折回数 (Left), 信号交差点箇所数 (Signal)

表2 実測時間と Google 時間の比較を行ったルート

対象地域	ルート数	距離 (m)
福岡市	494	450
糸島市	504	650
東峰村	397	620

要素によって変化すると考えられるため、予測モデルは説明変数が多く、データ数が少ない場合でも過学習が起きにくい Random Forest (以下、RF) を用いて作成する。モデル作成に必要な教師データとなる移動時間には、対象地域内を自動車で行き計測した移動時間 (以下、実測時間) を用いる。計測する経路は地域内の指定避難所までの避難経路を可能な限り網羅できるように設定する。説明変数は、移動時間との相関が強く、全国規模でのデータ入手が比較的容易と想定される表1の5項目とする。各項目は、表1に示す区分

でさらに細分化し、経路上に占める距離の割合や箇所数を算出して説明変数とする。以上の手法で、福岡県東峰村で予測モデルを作成したところ、予測モデルの正解率が88.7%と高い精度で移動時間を予測できることを確認できた。

### 3.2 日時変動を考慮した自動車での移動時間予測

3.1節において提案した手法 (以下、前手法) では、各対象地域で実測時間の収集が必要であり、全国への適用は困難である。また、曜日や時間帯による移動時間の変化を考慮できていないという課題がある。そこで、前手法に対し、これらの課題を解決する方策を検討した。まず、移動時間のデータ収集について、実測ではなく Google Maps を利用することとし、その適用性を確認した。Google Maps が予測する移動時間 (以下、Google 時間) と実測時間を3地域 (福岡市、糸島市、東峰村) の表2に示すルート数で比較した結果、3地域とも90%以上のルートで実測時間と Google 時間の差が1分未満となった。以上から、両者に有意な差はなく、Google 時間を学習データとして利用可能であることを確認した。

次に、RF に学習させる説明変数に日時を表す項目を追加して予測モデルの作成を行った。対象地域で設定した経路において、1週間、毎正時に Google 時間を収集すると、168 (=24×7) 個の Google 時間を得る。各経路における168個の Google 時間を用いて予測モデルを作成した。茨城県常総市を対象として表1に示す項目のみで作成したモデルと、日時の説明変数を追加して作成したモデルの予測を比較した結果、予測値

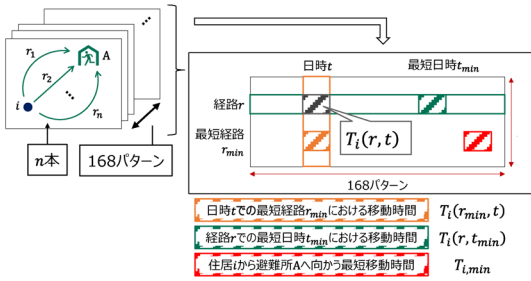


図2 避難所 A への移動時間のパターン

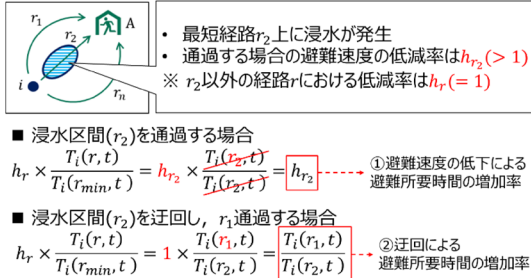


図3 要素①・②の評価とその考え方

と正解値の差が1分未満のルートが、前者で57%、後者で74%となった。このように、表1の説明変数に対して、曜日や時間帯の説明変数を追加することで予測誤差が小さくなることを確認した。

### 3.3 徒歩での移動時間の評価

徒歩での移動は加減速が発生しても、移動時間への影響は小さく、速度はおよそ一定と考えられており、既往の研究でも歩行速度としてさまざまな値が提案されている。本検討では、最新の事例かつ災害時の実績が用いられているなどの理由から、巨大地震対策検討ワーキンググループ [12] と同様の「2.24 km/h」を採用することとした。

## 4. 災害リスクの新たな評価手法

### 4.1 災害リスクの評価指標の考え方

災害リスクが高まる要因には、ハザードによる避難速度の低下や迂回が考えられる。また、移動時間は住居によって異なり、同じ住居であっても日時によって変化する。以上を踏まえ、①避難速度の低下による避難所要時間の増加率、②迂回による避難所要時間の増加率、③後述する地域内での相対的な移動時間の比率、④日時による移動時間の変化率の四つの要素から災害リスクを評価する。

ここで、①～④の評価に必要な移動時間の考え方を整理する。移動時間は避難経路によって異なり、同じ

避難経路であっても日時によって変化する。そのため、避難経路が  $n$  本ある住居  $i$  から避難所へ向かう際の移動時間には  $n \times 168$  パターンの移動時間が考えられる。ここで、日時  $t$ 、経路  $r$  での移動時間を  $T_i(r, t)$  と定義する。また、日時  $t$  での移動時間 ( $n$  個) の中で最短の移動時間となる経路を最短経路と呼び、その最短経路での移動時間を  $T_i(r_{min}, t)$  とする。経路  $r$  での移動時間 (168 個) の中で最短の移動時間となる経路を最短日時と呼び、その日時での移動時間を  $T_i(r, t_{min})$  とする。住居  $i$  からの移動時間 ( $n \times 168$  個) の中で最短の移動時間を最短移動時間と呼び、 $T_{i,min}$  とする。以上から、図2に示す3種類の移動時間を定義する。

①と②は、経路  $r$  上の浸水区間における所要時間の増加率を  $h_r$  と定義し、図3の考えから式(1)で表す。

$$h_r \cdot T_i(r, t) / T_i(r_{min}, t) \quad (1)$$

③は、住居を最寄りの避難先別にグルーピングしてエリア分けし、エリア内の最短移動時間の平均値を  $T_{avg}$  と定義して、式(2)で表す。

$$T_{i,min} / T_{avg} \quad (2)$$

ここで、各住居の避難手段は、式(2)が1未満、つまり移動時間がエリア平均より短い場合は徒歩避難、それ以外は自動車避難とする。

④は、図2の  $T_i(r, t)$ 、 $T_i(r, t_{min})$  から、式(3)で表す。

$$T_i(r, t) / T_i(r, t_{min}) \quad (3)$$

ハザードによる避難の困難さは、ハザードが発生しない限り0と考えられるため、式(1)から1を引いた値を用いる。また、脆弱性に関する式(2)、式(3)で表される要素は、ハザードにより生じた避難の困難さを増大、または軽減させるように作用すると考えられる。これにより、避難の困難さを示す災害リスクの評価式は式(4)で表現される。

$$\min_r \left( h_r \cdot \frac{T_i(r, t)}{T_i(r_{min}, t)} - 1 \right) \cdot \frac{T_{i,min}}{T_{avg}} \cdot \frac{T_i(r, t)}{T_i(r, t_{min})} \quad (4)$$

式(4)で算出された災害リスクが0の場合は、平常時と同様の条件で避難所まで避難が可能と解釈できる。また、災害リスクが0.5の場合で、さらに③および④が1の場合には、避難所要時間が移動時間の1.5倍となることから、避難は可能であるが、その困難さは通常の1.5倍の状態であると解釈できる。

## 4.2 避難経路の作成と避難先の設定

避難経路には、ある同一の避難所へ避難する場合でも無数の経路が考えられ、それら経路の中からハザードの影響がなく最も安全な経路を選択しなければならない。そのため、時々刻々と変化する冠水や道路閉塞などのハザードの影響を考慮して、それらを避ける最も安全な経路を避難経路とすることが理想的である。しかしながら、災害時に経路をリアルタイムかつ逐次探索することは困難である。一方、避難経路としては無数の経路が考えられるが、実際問題としては災害発生前に想定したいくつかの経路の中から最も安全な経路が選択されると考えられる。

そのため、本検討では、避難経路の候補となる各避難所までの最短経路をあらかじめ作成しておき、それらから最も災害リスクが低い経路を避難経路として選択することとする。経路は、探索アルゴリズムであるダイクストラ法 (Dijkstra's algorithm) [13] を用いて各住居から全避難所までの最短距離となる経路を探索したうえで、それらの経路距離が閾値内に収まる避難所を避難先として設定する。

ダイクストラ法では、グラフにコストを与えたネットワーク上で最短経路問題を解く。グラフとは、複数の点とそれを繋ぐ線から形成され、点のことを節点またはノードと呼び、節点を繋ぐ線を枝あるいはリンクと呼ぶ。また、グラフはノードの集合  $V$ 、リンクの集合  $E$  によって、一般に式 (5) で定義される。

$$G = (V, E) \quad (5)$$

リンクに対して数値や属性情報が付与しているグラフをネットワーク、付与する値をコストと呼ぶ。本検討では距離をコストとする。

グラフのリンク  $(i, j) \in E$  がコスト  $a_{ij}$  をもつとき、あるノード  $s \in V$  から別のノード  $t \in V$  への経路の中で、最小のコストとなる経路を見つける問題を最短経路問題という。ただし、ノード  $s$  からノード  $t$  への経路とは、ノードの列  $P = (s, i, j, \dots, k, t)$  において、 $(s, i) \in E, (i, j) \in E, \dots, (k, t) \in E$  を満たすものであり、それらのリンクの長さの和は式 (6) で表される。

$$a_{si} + a_{ij} + \dots + a_{kt} \quad (6)$$

これを経路  $P$  の長さとして定義する。小規模なネットワークでは、可能な経路のコストをすべて算出することにより、最短経路を導出できる。しかし、節点や枝が複雑に構築されている大規模なネットワークでは、すべての経路のコストを算出することは現実的ではない

表 3 ハザードのレベルと避難行動への影響

レベル	立退き避難への影響		垂直避難の可否	
	徒歩	自動車	平屋	2階建て以上
3	×	×	×	×
2	×	×	×	○
1	△※	×	○	○
なし	○	○	—	—

※避難所要時間の増加率  $h_r = 1.75$

ため、効率的なアルゴリズムが必要である。まず、ダイクストラ法では、リンクのコストを式 (7) と仮定し、負の値をとらないことが前提となる。

$$a_{ij} \geq 0 ((i, j) \in E) \quad (7)$$

ノード  $s$  からノード  $i \in V$  への最短経路の長さを  $d(i)$ 、ノードの集合を  $S, V \setminus S = \bar{S}$  とした場合に式 (8) とおく。

$$S := \emptyset, \bar{S} := V, d_{(s)} := 0, d_{(i)} := \infty (i \in V \setminus \{s\}) \quad (8)$$

ここで、 $S = V$  のときは、計算を終了する。それ以外の場合は、 $d_{(v)} = \min \{d_{(i)} | i \in \bar{S}\}$  となるノード  $v \in \bar{S}$  を選択する。次に、 $S := S \cup \{v\}, \bar{S} := \bar{S} \setminus \{v\}$  とし、 $(v, j) \in E$  かつ  $j \in \bar{S}$  であるすべてのリンク  $(v, j)$  に対し、式 (9)、式 (10) として、式 (8) に戻る。

$$d(j) := d(v) + a_{vj} (d(j) > d(v) + a_{vj}) \quad (9)$$

$$p(j) := v (d(j) > d(v) + a_{vj}) \quad (10)$$

この手順を繰り返し行うことで、出発点から近い順にノード  $j$  までの最短経路のコスト  $d(j)$  が確定し、最短経路を得られる  $p(j)$  が決定される。

本検討では、各住居の避難先の閾値を 2.24 km に設定する。これは自治体の避難計画における「災害時の悪条件を考慮して避難速度を 2 km/h と想定し、その速度で 1 時間以内に移動できる距離」が適切な避難距離であるという考え方に対して、本検討内で調査した徒歩の移動速度を適用して設定したものである。

## 4.3 ハザードの避難行動への影響の設定

本検討では、ハザードとして河川氾濫を想定する。なお、ハザードの規模は、浸水深によりレベル 1~3 (30 cm 未満, 70 cm 未満, 70 cm 以上) に区分し、その規模における立退き避難への影響および屋内安全確保の可否は、既往文献 [1, 14, 15] を参考として表 3 のとおり設定する。また、立退き避難の必要性は、屋内安全確保か立退き避難のどちらかが不可となるタイミングの数時間前に判定するものとし、今回は、気象庁が提供している大雨警報 (土砂災害) の危険度分布情報で

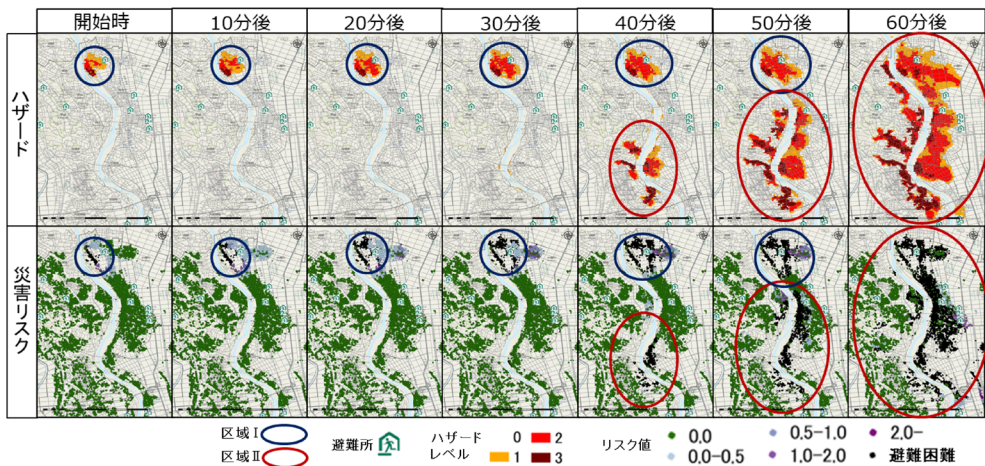


図4 ハザードと災害リスクの変化

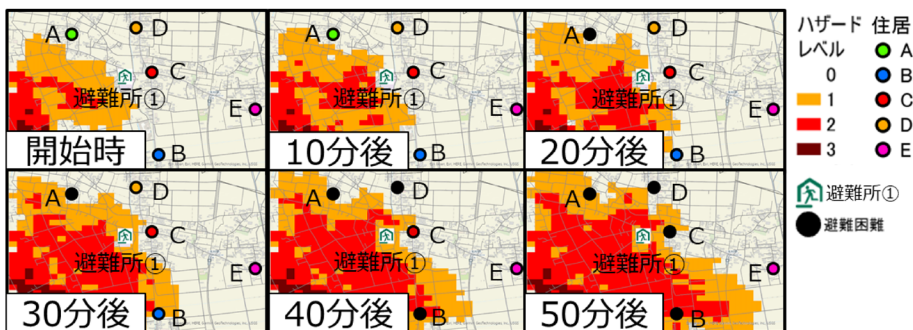


図5 避難所付近の五つの住居とハザードの変化

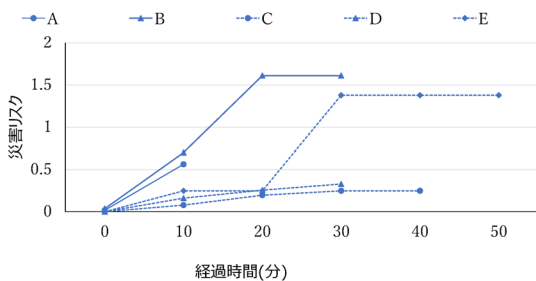


図6 五つの住居の災害リスクの時系列変化

ある土砂キキクルの考えに倣い、2時間前から立退き避難が必要かを判定する。ここで、立退き避難が必要な状況において、ハザードの影響により徒歩および自動車の二つの避難手段で全避難経路が通行不可となった場合、立退き避難不可と判定する。さらに、屋内安全確保も不可となった場合には、避難困難と判定する。

### 5. 対象地域における災害リスクの評価

茨城県常総市を対象として、検討した手法を用いて

災害リスクの評価を行った。災害リスク評価に必要な時間変化するハザードのシナリオには平成27(2015)年9月関東・東北豪雨時の雨量をもとにした10分間隔で15時間分の河川氾濫による浸水予測を用いた。ハザードは、シナリオ開始と同時に北部で発生し、時間経過に伴い南部に広がっていく。本稿では、最も災害リスクの上昇が大きかった金曜日17時にシナリオを開始した場合の評価結果について述べる。

常総市北部のハザードと災害リスクの変化を図4に示す。区域Iではハザードが徐々に広がり、ハザードが到達していない住居において、徐々に災害リスクが増加していく様子がわかる。一方、区域IIではハザードが一気に広範囲に広がり、多くの住居で災害リスクが0の状態から避難困難へと状況が急変した。これらから、災害リスクがハザードの進行速度に応じて変化していることがわかる。そのため、区域Iのような徐々に立退き避難が困難になる状況においては、災害リスクが比較的高い地域から順に避難指示等を発令し、区域IIのように安全に立退き避難が可能な状態から状況

が急変する場合には、一度に広域に避難指示等を発令するなど、災害リスクの経時的な変化を定量化し可視化することで、発令のタイミングや発令対象とする区域に対して状況に応じたアダプティブな判断が可能となることを確認できた。

次に、ある一つの避難所と付近の住居に着目したハザードの変化を図5、当該箇所における災害リスクの時系列変化を図6に示す。図6より各住居で災害リスクの数値が時間経過に伴い増加していることがわかる。図5で確認すると、住居A、C、Dではそれぞれ20分後、50分後、40分後に最寄りの避難所へ避難困難となった。一方、住居B、Eでは、それぞれ20分後、30分後に最寄りの避難所への避難に対してハザードの影響が発生した。これにより、最寄りではない避難所への避難経路の方が低リスクとなり、避難先が変更されたが、避難所要時間が増加したことで、避難先の変更前と比較して災害リスクが増大し、事態が切迫していることがわかる。

以上から、提案した指標は、災害リスクの経時的な変化を表現できるとともに、避難に影響が生じ始めるタイミング、避難先・避難経路の変更を余儀なくされるタイミングや避難困難となるタイミングなどを事前に把握できることを確認できた。

## 6. おわりに

本稿では、人的被害の発生を防ぐために自治体が把握すべき各住民の避難所要時間を新たな脆弱性の指標として提案し、これを適切に予測する手法について概説した。また、簡易な災害シミュレーションを用いて、この避難所要時間予測手法の適用性について検討した結果、時々刻々と変化するハザードと避難所要時間の組合せから、災害リスクを新たな定量的指標として提供できることを示した。本評価指標は、地域において、どのような地域が脆弱であり、避難指示などの判断に際しては、どの地区に優先的に避難指示などの情報を提供すべきかを定量的に判断できることから、自治体の避難判断の支援の一つとして機能すると考える。

本成果は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」の取り組みの中で開発された「市町村災害対応統合システム」に実装されている。今後は、アプリケーションとしてさら

なる高度化を図るとともに、全国の各自治体へシステムとしての社会実装・普及を図っていく予定である。

**謝辞** 本稿の取り組みは、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」の一部として実施されたものである。

## 参考文献

- [1] 内閣府(防災担当), 避難情報に関するガイドライン, 2021.
- [2] ベン・ワイズナーほか(岡田憲夫監訳), 『防災学原論』, 築地書館, 2010.
- [3] 国土交通省水管理・国土保全局, 国土政策総合研究所, 水害リスク評価の手引き(試行版), 2018.
- [4] 藤原広行, 中村洋光, 河合伸一, 森川信之, 前田直浩, 内藤昌平, 岩城麻子, 土肥裕史, 先名重樹, はお憲生, 東宏樹, 内山庄一郎, 大角恒雄, 平田賢治, 佐伯琢磨, 清水智, 小丸安史, 若浦雅嗣, 時実良典, 菊地ひめか, 麻生未季, 早川譲, 山崎雅人, “南海トラフで発生する地震・津波を対象とした広域リスク評価手法の検討,” 防災科学技術研究所研究資料, 444, 2020.
- [5] 内閣官房国土強靱化推進本部, 脆弱性評価の結果, 2018.
- [6] B. Behlert, R. Diekjost, C. Felgentreff, T. Mandandhar, P. Mucke, L. Pries, K. Radtke and D. Weller, World Risk Report 2020, <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WorldRiskReport-2020.pdf> (2021年5月7日閲覧)
- [7] 菊本統, 下野勘智, 伊藤和也, 大里重人, 稲垣秀輝, 日下部治, “わが国の自然災害に対する統合的リスク指標,” 土木学会論文集 F6 (安全問題), **73**, pp. 43–57, 2017.
- [8] 伊藤和也, 菊本統, 永松伸吾, 小山倫史, 今井龍一, 吉川直孝, 日下部治, 稲垣秀輝, 大里重人, 文部省科学研究費補助金研究成果報告書「自然災害安全指標(GNS)構築のための脆弱性評価の確立と防災戦略への反映」(代表:伊藤和也, 課題番号:16H03156), 2019.
- [9] Asian Development Bank, Asian Water Development Outlook 2020, <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/663931/awdo-2020.pdf> (2021年8月13日閲覧)
- [10] 片田敏孝, 及川康, 渡邊寛, “洪水リスク統括マップ(気づきマップ)の提案とその作成手法に関する研究,” 土木学会論文集 F5 (土木技術者実践), **67**, pp. 130–141, 2011.
- [11] 片田敏孝, 及川康, 兎玉真, “行動指南型ハザードマップの開発,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), **67**, pp. 528–541, 2011.
- [12] 中央防災会議, 防災対策実行会議, 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震対策検討ワーキンググループ, 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震の被害想定項目及び手法の概要, 2021.
- [13] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische Mathematik*, **1**, pp. 269–271, 1959.
- [14] 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室, 水害ハザードマップ作成の手引き, 2016.
- [15] 日本建築防災協会, 地下街等浸水時避難計画策定の手引き(案)【例編】, 2004.