

津波避難ゲームの提案と教育効果

東北大学大学院工学研究科 家護谷駿
東北大学災害科学国際研究所 奥村誠

1. はじめに

自然災害からの避難に関する従来の研究は、危険性を伝えて人々にいかに避難行動を取らせるのかという避難前の段階に焦点を当てたものが多かった。しかし東日本大震災を契機として、少なくとも津波に関しては「沿岸部で地震を感じたら直ちに避難する」という意識が高まり、「多数の住民が避難行動をとる」ことが多く、その後には生じる課題に着目した研究が必要となる。すなわち、多数の避難者が同時に移動して道路容量を超過し、渋滞が発生して避難に長い時間がかかるという問題の解決策を研究し、安全な避難に繋げていく必要がある。ただし、この避難問題には、「避難の究極の目的は、全ての人々の命を守ることであり、各個人が最適と考える行動をとるのでは、この全体的な目的が達成できない可能性がある」、さらに「地震による道路の寸断や堤防等の破損による浸水域の変化が起こる可能性があり、状況に応じて臨機応変に対応することが不可欠となる」という特性があり、「一部の専門家が検討しても、個人的な目的と全体的な目的を両立させるような避難方法を示せるわけではない」。そのため、住民に、これらの問題の特性に加えて、「各自が事前によく考えて、迅速かつ適切に行動をとる必要がある」ことを理解させるような教育が必要となる。

教育学分野では、学習過程の中で失敗を経験させることが、より自分の問題として対応策を深く考えることにつながり、高い教育効果が期待できることが報告されている。実際の津波避難の中で失敗を経験させることは生命に直結する危険を伴うため、その代わりに仮想的に失敗を安全に体験できるボードゲームを用意し、失敗を繰り返しながら効果的に学習させることを目指す。

ここでの教育効果としては、上述した理解してもらいたい特性、すなわち「避難行動の重要な目的は全体としての安全性の達成であること」、「その達成のために、個人的な安全性の追求を目指すだけではうまくいかない場合があること」、「道路の通行可能性や渋滞の発生などの状況に応じて臨機応変に判断する必要があること」、「あらかじめ複数の避難経路を持つておくことが有効であること」などの認識を、ゲームの参加者が持つようになることであると考える。

9	8	7	6	5	4	3	2	1	
緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	緑	一
緑	緑	オレンジ	緑	緑	オレンジ	緑	緑	緑	二
緑	オレンジ	オレンジ	オレンジ	緑	オレンジ	オレンジ	オレンジ	緑	三
オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	四
オレンジ	オレンジ	オレンジ	赤	赤	赤	赤	オレンジ	オレンジ	五
オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	六
オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	オレンジ	七
オレンジ	オレンジ	オレンジ	1	2	2	2	1	オレンジ	八
オレンジ	1	2	2	2	2	2	1	オレンジ	九

図 1 ゲームの盤面と駒の初期配置

2. ボードゲームの内容

本研究で提案した津波避難ゲームは、9×9の盤面上の下部に設定された居住地域に初期配置された20の住民駒を、高台の安全地帯へいかに迅速に避難させるかに挑戦させるものである。

盤面構成を図1に示す。盤面下が海岸側、上が内陸側である。黄色および黄土色のマスは沿岸の居住地域で、ここに住民を表す20個の駒を初期配置する。緑色のマスは安全地帯であり、他の色の全てのマスは危険地帯である。赤色のマスは通行止めを意味する。1ターンにつき、全ての駒を前後左右のいずれか1マス分だけ移動させることができる。各マスには最大2つまでしか駒を配置できないという制約により、道路の交通容量制約を表現している。このゲームの目的は、全ての駒を緑色の安全地帯に入れるまでに必要なターン数の最小化である。

図1の盤面によるゲームを標準ゲーム。赤い通行止めマスの存在しない、操作方法を確認するためのゲームを予備ゲームと呼称する。なお、予備ゲームでは、7九、3九の住民は安全地帯までに8ターンを要することから、予備ゲームの最適解は8ターンである。

標準ゲームでは、個人にとって最適な移動と全体にとって最適な移動が一致せず、一部の個人を最適とは異なる移動をさせることの必要性を体験的に理解できるようになっている。

図1の盤面において、それぞれの住民が他者

9	8	7	6	5	4	3	2	1	
									一
		1				1			二
	1	2	1		1	2	1		三
1	2	3	2	1	2	3	2	1	四
2	3	4	×	2	×	4	3	2	五
3	4	5	4	3	4	5	4	3	六
4	5	6	5	4	5	6	5	4	七
5	6	7	6	5	6	7	6	5	八
6	7	8	7	6	7	8	7	6	九

図2 プレーヤーが個人最適な移動に期待する所要ターン数

9	8	7	6	5	4	3	2	1	
									一
		1				1			二
	1	2	1		1	2	1		三
1	2	3	2	1	2	3	2	1	四
2	3	4	×	2	×	4	3	2	五
3	4	5	4	3	4	5	4	3	六
4	5	6	5	4	5	6	5	4	七
5	6	7	6	5	7	7	6	5	八
6	7	8	9	8	10	8	7	6	九

図3 個人最適な移動により実現する所要ターン数

9	8	7	6	5	4	3	2	1	
									一
		1				1			二
	1	2	1		1	2	1		三
1	2	3	2	1	2	3	2	1	四
2	3	4	×	2	×	4	3	2	五
3	4	5	4	3	4	5	4	3	六
4	5	6	5	4	5	6	5	4	七
5	6	7	8	5	8	7	6	5	八
6	7	8	7	8	8	8	7	6	九

図4 全体最適な移動により実現する所要ターン数

の存在を考慮せずに経路を選択できると考える場合に期待する所要ターン数を図2に示す。赤枠で囲われている中央6マスの住民の個人的な最短経路は、中央の5五地点を通過する経路である。彼らの全てがこの最短経路を通過しようとするすると5六地点で競合が発生し、図2のターン数での避難は実現できない。渋滞の結果実現する各住民の所要ターン数の一例を図3に示す。6八、4八、および5九の位置にいる住民は、同時に5六地点を通過できないため、ここでは6八、4八、5九の順で通過させている。同様に6九、4九も同時に通過できないため、6九、4九の順で通過させている。最終的に避難が完了するのは4九の住民の10ターンである。

一方で、全体最適な移動により8ターンで避難は終了する。各住民の所要ターン数を図4に示す。相対的に余裕がある6八および4八の住民に5五地点を避けた迂回経路を使わせることで、渋滞の発生を避けることができる。これらの住民には迂回による+2ターンの悪影響が出るが、これにより6九、4九の住民の避難を迅速に行うことが可能になり、全員の避難が8ターンで完了する。なお、迂回させる住民の選びからには注意が必要である。仮に余裕の小さい6九及び4九の住民を迂回させると+2ターンの悪影響があり、避難完了するのは9ターンとなって全体最適は実現できない。

この渋滞の問題は中央6マスの住民によってもたらされており、どの住民が相対的な余裕を持っているかを考えて迂回させることが、標準ゲームの本質となっている。そこで、本質的な中央6マスの住民のみを初期配置した簡略化ゲームを作成した。この簡略化ゲームを行わせることで、標準ゲームの全体最適解に到達することが容易となる。

標準ゲームの最適解に到達した段階で時間的余裕がある場合には視点を反転させ、立入禁止マスを複数個配置して、終了ターン数を増加させる反転ゲームを行わせた。

3. 最適化モデル

教育実践の中でプレーヤーへの指導を行う上で、あらかじめゲームの最適解を把握しておくことが有用である。そこで、前章で説明した津波避難ボードゲームにおいて、任意の安全地帯のマス目配置、任意の初期人口配置、及び任意の通行禁止制約に対して最小ターン数を求めるための最適化モデルを定式化する。

まず添字として、マス目の位置を i 列、 j 段で、ターンを t 時点で表す。定数としてマス目危険度: $R_{i,j} \in \{0,1\}$, 初期人口配置: $D_{i,j}$, 人口収容容量: $C_{i,j}$, および断面交通容量: $S_{i,j}$ を与える。

操作変数は t 時点のマス目 i,j から方向 $k \in \{F,R,L\}$ の移動量: $m_{k,i,j,t}$ であり、その他の内生変数として、 t 時点のマス目 i,j 内人口: $p_{i,j,t}$, t 時点のマス目 i,j からの出発人口: $u_{i,j,t}$, t 時点のマス目 i,j への到着人口: $v_{i,j,t}$, および避難の終了時刻 (ターン数): f を考える。

以上を用いて、以下のような線形計画問題を定式化できる。

目的関数: 避難終了時刻の最小化

$$\min f \tag{1}$$

避難終了時刻後の危険領域人口不在:

$$\sum_i \sum_j R_{i,j} p_{i,j,t} \leq 0, \quad \forall t \geq f \tag{2}$$

避難終了時刻後の移動の禁止:

$$\sum_i \sum_j u_{i,j,t} \leq 0, \forall t \geq f \quad (3)$$

人口の連続条件：

$$p_{i,j,t+1} = p_{i,j,t} - u_{i,j,t} + v_{i,j,t}, \quad \forall i,j,t \quad (4)$$

移動人口の連続条件：

(添字が領域外に出ないように調整が必要)

$$u_{i,j,t} = m_{F i,j,t} + m_{R i,j,t} + m_{L i,j,t}, \quad \forall i,j,t \quad (5)$$

$$v_{i,j,t} = m_{F i,j-1,t} + m_{R i-1,j,t} + m_{L i+1,j,t}, \quad \forall i,j,t \quad (6)$$

マス目の人口収容容量制約：

$$p_{i,j,t} \leq C_{i,j}, \quad \forall i,j,t \quad (7)$$

移動量制約：

$$m_{k i,j,t} \leq S_{i,j} = 2, \quad \forall i,j,k,t \quad (8)$$

初期人口：

$$p_{i,j,1} \geq D_{i,j}, \quad \forall i,j \quad (9)$$

式 (2), (3) の制約条件は、適用範囲が内生変数 f に依存する制約条件であり、標準的な LP 計算ツールではサポートされないが、数理計画ソルバー Gurobi では Index 変数を用いた制約式として扱うことができる。

4. 子供行事における教育実践

2025 年 10 月中旬に、3 日間にわたり本ゲームを小学生にプレイさせる機会を得た。

(1) 10 月 11 日 片平まつり災害研の体験ブース

東北大学の附置研究所・研究センターでは、一般市民向けの研究紹介行事「片平まつり」を隔年に実施している。災害科学国際研究所では、4 つの研究部門から子供を対象とする企画を出展している。今回、5 つの企画の 1 つとして「津波ひなんゲームで遊ぼう」という企画を出展し、9:30 から 16:00 の間に研究所に来場した来客者に呼びかけて、ゲームへの参加を促した。

参加者の多くは小学生で、未就学児のきょうだいと 2 人並んで参加するという例も多かった。また来場者が途切れた時間帯には、災害研のスタッフにも参加していただいた。1 組ごとに学生 AA が対応し、約 40 組の参加を得た。

平均的には約 30 分の中で、予備ゲーム 5 分、標準ゲームが 2 回程度で 20 分、簡略化ゲームとまとめて 5 分を使うことが多かった。多くの参加者は標準ゲームの 2 回のプレイでは最適解に辿り着けなかった。その一方で、ルールを確認して若干の思考したのちに 1 回のプレイで最適解に辿り着いた小学生が 2 人、大人の参加者が 2 人居た。

研究所の行事全体の運営方法との関係で、本ゲームへの個別の感想を得ることや学習効果の確認を行うことはできなかったが、終了時の口頭の感想としては、「面白かった」、「案外難しい

と感じた」という意見が多かった。

(2) 10月14日 秋休み子供科学キャンパス（1日目）

仙台市では小中学校を2学期制としており、10月中旬の連休に連続して学期間の秋休みを設けている。仙台市教育委員会は、この秋休みの期間中に小学6年生の児童を対象に大学での研究活動を体験させる「秋休み子ども科学キャンパス」行事を東北大学工学部と共催している。工学部の5学科から合計6つの体験学習（2時間程度）のテーマを提供し、市内の各小学校で参加者を募り、10月14日の午後と15日の午前にそれぞれ72名の児童を受け入れ、テーマごとに12名の児童に参加してもらった。本テーマでは、12名の児童を2名ずつの6組に分け、2組ごとに1名の学生をAAとして配置した。

2時間の体験学習時間を前後半に分け、前半では主催者のあいさつと概要説明に10分、予備ゲーム10分、標準ゲームが2回程度で20分、簡略化ゲームと確認のための標準ゲーム1回で5分ののち、図-2を用いた標準ゲームの最適解の解説を5分程度で行った。5分の休憩を挟み後半の55分間では、35分程度で反転ゲームを実施し、当方のまとめと関連する実際の研究活動の紹介を10分で行ったのちに、10分程度で市教委担当者からの挨拶と感想アンケートの記入してもらった。

全体として、(1)の行事に比べて意識が高い子供が多く、理解度は高く、最適解を見出す速度も速かった。ただし、組ごとに進捗速度にばらつきがあり、前半時間内に反転ゲームに移行した組や、簡略化ゲームによる復習が後半時間にずれこんだ組もあった。

参加者からの感想アンケートは市教委が回収し、全体行事の閉会式でテーマごとに1名が代表して発表した。

(3) 10月15日 秋休み子供科学キャンパス（2日目）

2日目も12名の児童に対し、同様の内容でゲームを実施した。時間配分も同様としたが、理解の早い児童が多かったこと、ターン内での駒の移動ルールが理解できた後に迅速に駒を移動させた組が多かったこと、ゲームの途中で残る移動が前進のみになった段階で、必要ターン数を数えて避難終了ターン数を確認する組が多かったことから、前日より進行スピードは早くなった。

前日の段階で反転ゲームの禁止マス4までの最適値が明らかになっていたため、この日の後半では、禁止マス数を5以上のケースについての最適解の探索も行わせた。

最後の口頭での感想では、「面白かった」「案外簡単だった」という声が多く、「難しいと感じた」という意見はなかった。

(4) 市教委によるアンケートの結果

(2)(3)のイベント終了時に市教委が実施したアンケートについて、後日自由記述式の回答内容を入力することができた。参加した児童24名のうち、約8名が、「避難行動は個人だけでなく全体を考える必要もあるため容易ではなく、状況に応じて慎重に判断する必要がある」といった趣旨の回答を記述した。この結果から、本ゲームを通じて、避難における全体的視点の重要

性に対する理解が深まったことが示唆された。

5. まとめ

(1) 本研究の成果

以上、本研究では、避難計画問題のエッセンスを取り込んだボードゲームを用いた能動的な学習を提案した。2025年10月中旬の3回のこども行事における教育実践を通して、小学生でも無理なく理解できる平易なルールとなっていることを確認した。さらに、想定経路の利用可能性が不確実であること、同時に避難する避難者との競合で交通混雑・渋滞が発生する可能性があること、これらの問題を回避するために事前に複数の避難経路を準備しておくべきことなどを、本ゲームを楽しむ中で理解させることができたと考える。

渋滞を想定した避難計画問題は、行政だけの力では解決が難しく、市民一人一人の意識を変えていく必要がある問題である。すべての市民が全体最適につながる避難方法を考え、実際に最適な避難を実現することは容易ではないが、まずは、ボードゲームを通じて、多くの市民が津波避難計画に対する関心を持ち、この問題が抱える本質的な難しさや全体最適の考え方を知る機会となることを目指していく。

(2) 今後の展望

最後に、本研究の今後の展望について述べる。これまで3回の試行的な実施に限られ、アンケートやテストによる教育効果の定量的評価には至っていない。今後、本研究の教育効果の明確化と測定方法の検討が必要である。また、ボードゲームを実際にプレイしてもらう場を設けることが重要である。そのため、ゲームの電子化を進め、プレイ機会をより容易に確保できるようにしたいと考えている。

さらに、一部の自治体は津波避難において自動車避難を容認していることを踏まえ、自動車避難の導入について検討している。歩行者に比べて高速な自動車の動きを表現する方法や、自動車に乗り込むために必要なターン数を考えていきたい。