

# 水災害時の共助避難行動を考慮した 意思決定モデルの開発と評価

伊藤 和大<sup>1</sup>・加藤 哲平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 元 埼玉大学 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区大久保255)  
E-mail:k.ito.620@ms.saitama-ac.jp

<sup>2</sup>正会員 埼玉大学 助教 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区大久保255)  
E-mail:tkato@mail.saitama-u.ac.jp

本研究は、水災害が発生した際に、短期的な情報提供、共助避難と情報待ちを考慮した避難行動モデルを提案するものである。本研究のモデルは佐藤ら<sup>1)</sup>が提案した避難行動モデルをもとに構築した。佐藤らのモデル<sup>1)</sup>は、『避難・待機中・情報待ち』を考慮した地域住民の意思決定モデルである。本研究は佐藤らのモデル<sup>1)</sup>を拡張したものであり、『避難・待機中・情報待ち』だけではなく『共助避難』を考慮したモデルである。佐藤ら<sup>1)</sup>の理論から共助避難コストを導出することが困難だったので、本研究は共助の有無によって共助避難コストを再帰的に算出する方法を提案する。私たちは数値実験によって構築したモデルを検証する。本研究のモデルを用いると、地域住民の持つ共助避難の性質と情報取得による避難行動への影響を推定することができるので、本研究のモデルは避難計画の作成の手助けになる。

**Key Words** : *evacuation, stay(non-evacuation), awaiting information, disaster, corporative, cost*

## 1. 研究背景と目的

日本は毎年多くの水災害に見舞われている。近年では、2019年10月台風19号に見舞われ、河川の氾濫による洪水災害や土砂災害が引き起こされた。家屋の全壊、半壊、床上浸水などの建物被害だけでなく、死者を含む多くの人的な被害も発生した。大きな被害の原因として、記録的な雨量による河川の氾濫が広範囲で起きたことやスーパー豪雨による長時間の雨が降ったことだけでなく、住民の避難が遅れたことにある。住民の避難が遅れた原因として、情報待ちによる逃げ遅れたことと避難勧告が遅れたことがある。本研究では、水災害が発生した際の最適な避難計画の作成に向けて、避難行動の意思決定（避難の有無）と共助避難、避難勧告に対する情報待ち行動を数理的に表現し災害時の避難行動モデルを構築することを目的とする。

佐藤ら<sup>1)</sup>は、情報待ち行動を考慮した避難行動の意思決定モデルを提案している。このモデルは、意思決定者が被害対策に必要な費用を考慮することで被害の発生確率を不当に低く見積もるような認知の歪み（心理的不協和）を数理的に表現したAkerlofら<sup>2)</sup>のモデルを応用している。さらに、避難勧告といった外部情報を得る前後の時間帯を分けることで、情報待ち行動を表現可能な枠組

みに拡張している。

内田ら<sup>3)</sup>は、短期的な雨量情報による予測雨量の更新を考慮した、住民の避難所選択モデルを提案している。予測雨量の更新には、ベイズ統計学を応用した方法が用いられている。また、避難所の選択問題をロジットモデルで表現することで、住民の期待コストがログサム変数により表現されている。この期待コストを用いて、避難所の最適配置に関する分析を行っている。

共助避難行動とは災害が発生した際に住民同士が助け合う行動のことである。共助行動は災害発生した際に情報待ちなどによって逃げ遅れた人々を減らすものだと考えられている。

本稿の構成を示す。第2章で、本研究でベースとしている佐藤ら<sup>1)</sup>のモデルの概要を示す。第3章で、本研究で新たに取り入れた共助避難行動について示す。第4章で、構築したモデルの妥当性・挙動を確認するために行った数値実験の結果を示す。数値実験では、住民の移動費用と客観的な被災確率について、内田ら<sup>3)</sup>のモデルに則って決定している。ただし、本研究の新規性はあくまで共助避難行動の記述にあるため、本稿ではこの内容について詳述しない。第5章で、本研究のまとめを行う。

## 2. 心理的不協和モデル<sup>1)</sup>

本章では、まず本研究がベースとする佐藤ら<sup>1)</sup>の提案したモデル（以降では心理的不協和モデルと呼称する）を概説する。その後、本研究で新たに取り入れた共助避難行動について説明する。

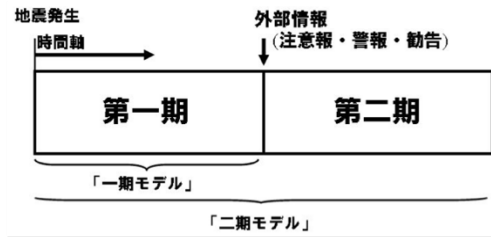


図-1 心理的不協和モデルの概略図<sup>1)</sup>

### (1) 心理的不協和モデルの概要

心理的不協和モデルは、「人々の合理的意思決定メカニズム」と「認知的不協和」と「情報待ち」の3点に着目した避難行動の意思決定モデルである。「合理的意思決定」とは複数選択肢の中で自身を最も満足させる選択肢を選ぶことである。これはコスト最小化や効用最大化に基づく行動のことである。「認知的不協和」とは認知を構成する要素間に不協和（不適合）が起こることである。ここでは、心理的に不快に感じると人はそれを低減する方向に自身の認知を修正して行動すること<sup>2)</sup>を考慮している。「情報待ち」とは避難行動を遅らせて避難勧告などの情報等を待つこととしている。

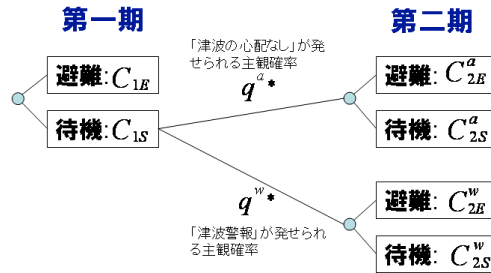


図-2 二期モデルの意思決定樹形図<sup>1)</sup>

### (2) 心理的不協和モデルの計算過程

図-1のように、第1期を災害発生から情報取得までの時間とし、第2期を情報取得後の時間とし、離散的な時間経過をを考慮する。第1期で待機を選択した場合は、第2期でまた避難行動を決定するため、第1期の意思決定は、第2期のコストに影響を受ける（図-2）。避難行動の意思決定は第1期と第2期のそれぞれで避難コストと待機コストを比較しコストが小さい方の行動を選択する。

まず、第1期・第2期における、避難・待機コストをそれぞれ定義する。

#### a) 第1期におけるコスト

避難する場合のコストを構成するものとして、以下の2つを考える。

① 避難完了までに感じる不安感コスト： $(P_1^*/P_1) \cdot C_{fe}$

② 移動コスト： $C_m$

ここで、 $C_{fe}$ は避難完了時の不安感パラメータを表し、 $P_1^*$

および $P_1$ はそれぞれ死亡主観確率および死亡客観確率を表す。死亡主観確率は、客観的な死亡確率を認知的不協和によって減じた確率である。①に示した通り、避難完了までに感じる不安感コストは津波による死亡主観確率 $P_1^*$ を死亡客観確率 $P_1$ で除したものに比例するものと仮定している。

待機する場合のコストを構成するものとして、以下の3つを考える。

① 待機中の不安感コスト： $(P_1^*/P_1) \cdot C_{1fs}$

② 期待死亡コスト： $P_1 \cdot C_d$   
 ③ 第2期のコストの期待値： $(1 - P_1^*) \cdot X$

ここで、 $C_{1fs}$ は第1期における待機中の不安感パラメータ、 $C_d$ は死亡コスト、 $X$ は第2期のコストの期待値を表す。

①に示した通り、待機中の不安感コストも避難完了までに感じる不安感コストと同様に死亡主観確率 $P_1^*$ を死亡客観確率 $P_1$ で除したものに比例するものと仮定している。期待死亡コストは津波による死亡主観確率に死亡コストを乗じたものである。③は第2期のコストの期待値 $X$ に第1期に死亡がない確率 $1 - P_1^*$ を乗じたものである。

第2期では、外部情報が得られた後の状況を表している。具体的には、第2期では避難勧告が発生しているかしていないかという2つの状況の内どちらかに決定される。各状況において、合理的な意思決定がなされるため、コストの小さい方の選択肢が選択される。したがって、第2期のコストの期待値 $X$ は、第2期の状況 $i$ における避難コスト $C_{2E}^i$ と待機コスト $C_{2S}^i$ の小さい方にその状況の発生確率 $q^i$ を乗じた期待値であり、以下のように表される。

$$X = \sum_{i \in (a, w)} q^i \cdot \min[C_{2E}^i, C_{2S}^i] \quad (1)$$

$i \in (a, w)$  |  $a$ : 津波警報あり |  $w$ : 津波警報なし

第2期のコストに関しては、第1期のコストから $X$ を消去し、客観被災確率や移動コストなどの時間帯に依存するパラメータを読み替えた値となり、各状況に対して定義される。重複するため、ここでは詳述しない。

#### b) 主観被災確率の定義

Akerlofら<sup>2)</sup>が示した心理的不協和の考え方にに基づき、主観被災確率を定義する。具体的には、住民は避難・待機のいずれかの選択肢を選択した場合、そのコストを最小化するように認知を歪め、主観被災確率を修正する。

このような想定により、例えば保険に入らない個人が被災あるいは事故のリスクを客観的な確率より不当に低く見積もるような状況を再現することができる。コストが最小となる選択肢を取るため、第1期のコスト $C_1$ は以下のように表現できる。

$$C_1 = \min[C_{1E}, C_{1S}] \quad (2)$$

避難コストと待機コストの不等号問題から、避難を選択する際における死亡主観確率の範囲が以下のように表現できる。

$$P_1^* \geq \frac{C_m - X}{C_{1fs} - C_{fe} + C_d \cdot P_1 + X \cdot P_1} \cdot P_1 \quad (3)$$

待機を選択する際には、0から式(3)の右辺までが死亡主観確率の範囲となる。ここで、避難コスト自体を最小化する死亡主観確率は0であるが、そのような死亡主観確率をとる場合には待機を選択することになる点に注意したい。Akerlofら<sup>2)</sup>に基づくと、住民は避難コストと待機コストが最小になるように自身の認知を修正するため、避難または待機を選択した際における死亡主観確率は以下ようになる。

避難を判断したとき：

$$P_1^* = \frac{C_m - X}{C_{1fs} - C_{fe} + C_d \cdot P_1 + X \cdot P_1} \cdot P_1 \quad (4)$$

待機を判断したとき：

$$P_1^* = 0 \quad (5)$$

主観確率は正の値であるため、式(3)の右辺が0未満となるときは、 $P_1^* = 0$ とする。つまりこの場合は、主観確率は0となり、かつ必ず避難を選択することを意味している。以上から、第1期のコストは以下のように定義できる。

$$C_1 = \min \left[ \frac{C_m - X}{C_{1fs} - C_{fe} + C_d \cdot P_1 + X \cdot P_1} \cdot C_{fe} + C_m, P_1 \cdot C_d + (1 - P_1) \cdot X \right] \quad (6)$$

第2期についても、上記と同様に状況 $\Omega$ におけるコストが以下のように求められる。

$$C_2^i = \min \left[ \frac{C_m}{C_{2fs}^i - C_{fe} + P_2^i \cdot C_d} \cdot C_{fe} + C_m, P_2^i \cdot C_d \right] \quad (7)$$

ここまで、用いてきた第1期における死亡客観確率は、第2期における死亡客観確率の期待値として、以下のように表される。

$$P_1 = q^a \cdot P_2^a + q^w \cdot P_2^w \quad (8)$$

ただし、 $q^a + q^w = 1$ である。

### (3) 一期モデル

一期モデルは、第1期と第2期を合わせた一つの期間のみを考慮したモデルである。第2節と同様にして、1期モデルにおけるコストは以下のように求められる。

$$C = \min \left[ \frac{C_m}{C_{1fs} - C_{fe} + 2P_1 \cdot C_d} \cdot C_{fe} + C_m, 2P_1 \cdot C_d \right] \quad (9)$$

ここで、 $q$ を死亡客観確率 $p$ に乘じているのは一期モデルと第2節で示したモデル（二期モデル）の対象としている期間の差を考慮するためである。二期モデルは情報取得前の第1期と情報取得後の第2期をそれぞれ対象としているのに対して一期モデルはそれら2つを一つにまとめた期間を対象としている。そのため、時間的な意味で対象期間を揃える必要がある。同様の理由により、待機中の不安感コスト $C_{1fs}$ にも $q$ を乘じている。

## 3. 研究方法

本研究では、水災害発生時の共助避難行動と情報待ちを考慮した個人の意思決定モデルの構築を目的とする。構築したモデルを用いて、仮想空間を対象とした数値実験を行うことによってモデルの妥当性を検証し、最適な避難計画・情報提供手法の策定に向けたインプリケーションを示す。災害発生から情報取得までの期間を第1期、情報取得後の期間を第2期とし、2章で示したモデルを用いた避難・待機の意思決定問題を考える。

### (1) 共助避難行動

共助避難行動は災害発生時に起こる助け合い行動のことである。この節では、共助避難行動のモデル化を行う。対象地域に住む2人の個人Aと個人Bについて考える。また、個人Aが個人Bを助けることを想定する。個人Aは避難する際は1人での避難ではなく、共助避難を行うと決めた時点で、共助避難か待機のみを考慮した意思決定を行うと仮定する。このとき、個人Aの意思決定において、避難コストの中に共助避難コスト $C_h$ が内在していると考えられる。無論、避難行動には共助避難以外の行動も発生しうるが、詳細については後述する。共助避難行動が発生する条件として、『①個人Aが避難する行動を選択すること、②個人Bが待機する行動を選択する、③個人Aが個人Bの立場で意思決定を行った際に避難を選択すること』の3つの条件を仮定する。また、条件③を考える際に『④個人Aは個人Bの被災確率を自身の意思決定において決まる主観的な被災確率と同一であると考えられること、⑤個人Aからみて個人Bは避難するか待機するかは二択しか考えていないこと』の2つの状況を仮定する。⑤より、個人Bの意思決定は2章で示されたモデルによって表されるため、ここでは示さない。

### (2) 個人Aの意思決定

個人Aは個人Bを助けに行くこと（共助避難行動）を想定するので、第2章の第1期と第2期の避難コストに共



助避難コスト  $C_{h1,2}$  を加える。共助避難行動を表現するために、第1期で個人Aが個人Bの意思決定を評価するモデルを二期型モデル、第2期で個人Aが個人Bの意思決定を評価するモデルを一期型モデルとする。個人Aからみて個人Bの避難行動は避難と待機の二択のみなので、これを表現するために心理的不協和モデルの一期モデル (=二期型モデル) に基づいて構築する。(図-3) また一期モデルを用いることで⑤を満たすことができる。モデルの単純化するために仮定として個人Bは第1期と第2期で常に待機状態にあるとする。

a) 二期型モデル

第2章の一期モデルを用いることで、⑤を表現し、④より個人Aの主観被災確率から個人Bの主観被災確率および避難コストと待機コストを求める。本項で使用される  $P_{1A}^*$  は個人Aが自身の状況から判断した主観被災確率である点に注意したい。したがって、第1期に個人Aが判断する個人Bの各コストは主観被災確率  $P_{1A}^*$  の関数として表現される。

$$C_1 = \min \left[ \begin{array}{l} \frac{P_{1A}^*}{2P_{1B}} \cdot C_{fe} + C_{mB}, \\ \frac{P_{1A}^*}{2P_{1B}} \cdot 2C_{1fs} + 2P_{1B} \cdot C_d \end{array} \right] \quad (10)$$

二期型モデルでは、第1期と第2期の2つの期間を考慮するので、客観被災確率と不安感パラメータに対して2を乗じた。合理的意思決定から避難コストと待機コストの小さい方を選択する。

b) 一期型モデル

前項と同様に考える第2期に状況  $h$  時に個人Aが判断する個人Bの各コストは主観被災確率  $P_{1A}^*$  の関数として表現される。

$$C_2^i = \min \left[ \begin{array}{l} \frac{P_{2A}^i}{P_{2B}^i} \cdot C_{fe} + C_{mB}, \\ \frac{P_{2A}^i}{P_{2B}^i} \cdot C_{2fs} + P_{2B}^i \cdot C_d \end{array} \right] \quad (11)$$

合理的意思決定から避難コストと待機コストの小さい方を選択する。

(3) 共助避難コストの算出方法

ここでは、第2期について考える。まず個人Aが避難する際は一人 (= 単独避難) ではなく共助避難を行うと考えている状況を考える。このとき、個人Aは共助避難か待機のいずれかを選択する意思決定を行う。第2期における各状況下の避難 (= 共助避難) コストと待機コストの定式化を行う。

①避難完了までに感じる不安感コスト:  $(P_{2A}^*/P_{2B}^i) \cdot C_{fe}$

②移動コスト :  $C_{mA}^i$   
 ③第2期における共助避難コスト :  $C_{2h}^i$

待機コストに関しては第2章で示したものと同様であるため、ここでは示さない。合理的意思決定に基づいて、避難コストと待機コストが最小になるような意思決定がなされるので避難・待機でとりうる主観被災確率は以下のようなになる。

避難を判断するとき:

$$P_{2A}^{i*} = \frac{C_{mA}^i + C_{2h}^i}{C_{2fs}^i - C_{fe} + P_{2A}^i \cdot C_d} \cdot P_{2A}^i \quad (12)$$

待機を判断するとき:

$$P_{2A}^{i*} = 0 \quad (13)$$

避難 (= 共助避難) 行動をとる場合の主観被災確率が共助避難コスト  $C_{2h}^i$  によって変化する点に注意したい。個人Aはコストが最小の選択肢を選択するため、第2期における期待費用は以下のように与える。

$$C_{2A}^i = \min \left[ \begin{array}{l} \frac{C_{mA}^i + C_{2h}^i}{C_{2fs}^i - C_{fe} + P_{2A}^i \cdot C_d} \cdot C_{fe} + C_{mA}^i + C_{2h}^i, \\ P_{2A}^i \cdot C_d \end{array} \right] \quad (14)$$

以上のことは、個人Aが避難する際に単独避難ではなく共助避難を行うと決めた状況における個人Aのコストに関する議論である。ただし、そこでは共助避難が発生する場合の共助避難コスト  $C_{2h}^i$  が既知であるとしていた。以降で、共助避難コスト  $C_{2h}^i$  の具体的な値を決定する方法を示す。

個人Aの意思決定は、単独避難・共助避難・待機の3つ存在する。待機する場合は、前節までに述べたように決められるため、詳述しない。単独避難と共助避難の場合分けは、個人Aが判断した個人Bの待機コストが避難コストよりも小さい場合は単独避難となり、その逆は共助避難となる。ただし、先述した通り共助避難を行うと決めた時点の自身の主観被災確率が共助避難コスト  $C_{2h}^i$  に依存している。ここで、個人Aが共助避難を行う際は、必ず個人Aが判断した個人Bの選択行動の結果が避難になっている点に注目する。意思決定には直接的に用いないが、個人Aが判断する個人Bの主観被災確率  $P_{2h}^{i*}$  を求める。仮定④より個人Bの主観被災確率  $P_{2h}^{i*}$  は、個人Aの主観被災確率に等しい。したがって、以下の等号が成立する。

$$P_{2A}^{i*} = P_{2h}^{i*} = \frac{C_{mA}^i + C_{2h}^i}{C_{2fs}^i - C_{fe} + P_{2A}^i \cdot C_d} \cdot P_{2A}^i \quad (15)$$

上記より、共助避難コスト  $C_{2h}^i$  が以下のように求められる。

$$C_{2h}^i = \frac{P_{2h}^{i*}}{P_{2A}^i} \cdot (C_{2fs}^i - C_{fe} + P_{2A}^i \cdot C_d) - C_{mA}^i \quad (16)$$

共助避難が発生するときの主観被災確率  $P_{2h}^{i*}$  の範囲を求める。共助避難時の主観被災確率  $P_{2h}^{i*}$  を用いたときの個人Aの避難コストが待機コストよりも小さくなることから主観被災確率  $P_{2h}^{i*}$  は以下の式(17)を満たす。

$$0 \leq P_{2h}^{i*} < \frac{P_{2A}^i \cdot C_d}{C_{2fs}^i - P_{2A}^i \cdot C_d} \cdot P_{2A}^i \quad (17)$$

個人Aが判断する個人Bが避難を選択する際的主観被災確率の範囲は以下となる

$$\frac{C_{2mB}^i}{C_{2fs}^i - C_{fe} + P_{2B}^i \cdot C_d} \cdot P_{2B}^i \leq P_{2h}^{i*} \quad (18)$$

式(17)と式(18)から個人Aが判断する個人Bの主観被災確率  $P_{2h}^{i*}$  の取り得る範囲は以下の2通りがある。

$$\frac{C_{mB}^i}{C_{2fs}^i - C_{fe} + P_{2B}^i \cdot C_d} \cdot P_{2B}^i \leq P_{2h}^{i*} < \frac{P_{2A}^i \cdot C_d}{C_{2fs}^i + P_{2A}^i \cdot C_d} \cdot P_{2A}^i \quad (19)$$

$$\frac{P_{2A}^i \cdot C_d}{C_{2fs}^i + P_{2A}^i \cdot C_d} \cdot P_{2A}^i \leq \frac{C_{mB}^i}{C_{2fs}^i - C_{fe} + P_{2B}^i \cdot C_d} \cdot P_{2B}^i \quad (20)$$

式(19)が成り立つとき、認知的不協和により個人Bの主観被災確率が最小とする値になる。個人Aが判断する個人Bの主観被災確率  $P_{2h}^{i*}$  は以下のように表される。

$$P_{2h}^{i*} = \frac{C_{mB}^i}{C_{2fs}^i - C_{fe} + P_{2B}^i \cdot C_d} \cdot P_{2B}^i \quad (21)$$

式(17)と式(20)が同時に成り立つとき、認知的不協和を考慮すると個人Bの主観被災確率は0になる。ただし個人Aの意思決定を行う際は必ず避難することになる。しかし個人Aが個人Bを助けに行くことを想定するときは個人Bの待機コストの中に第2期の避難・待機の選択による影響を受けないため、個人Bが避難を選択する際に主観被災確率が0にはなり得ない。このことからこの範囲では、人の心理が認知的不協和は働かず逆に不安や恐怖などを高める方向に傾くと考えられる。その結果、主観被災確率のとり得る限界値が個人Bの主観被災確率になる。

$$P_{2h}^{i*} = \frac{P_{2A}^i \cdot C_d}{C_{2fs}^i + P_{2A}^i \cdot C_d} \cdot P_{2A}^i \quad (22)$$

これまでの話を整理する。個人Aの意思決定は、単独

避難・共助避難・待機の3つある。待機するかどうかは、個人Aの避難・待機的意思決定問題より求められる。単独避難か共助避難かどうかは個人Aが判断する個人Bの意思決定問題により決定する。個人Aの共助避難コストは式(16)のように与えられる。上記のように考えると、単独避難・共助避難・待機が発生する場合における被災確率の範囲が求められる。さらに、避難勧告の有無におけるコストが求められる。これに避難勧告の発生確率をかけて足し合わせたものが、第1期の待機コストに含まれる第2期の期待コスト  $X$  として定義される。第1期においても同様の論理によって単独避難・共助避難・待機的意思決定問題を解くことができ、さらに各選択肢を選択した際の個人Aの第1期のコスト関数も定義することができる。同様の論理であるため、ここでは個人Aの第1期の意思決定問題は詳述しない。

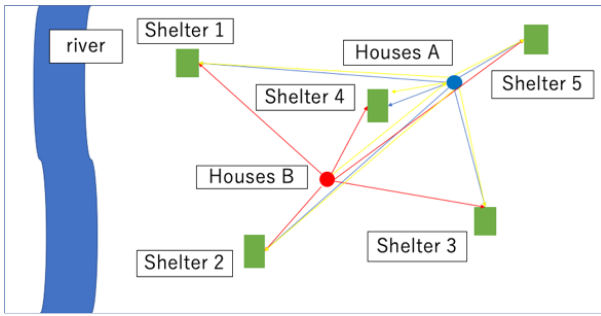


図-3 対象地域

|         | 世帯 (個人) |     | 避難所 |      |      |      |     |
|---------|---------|-----|-----|------|------|------|-----|
|         | A       | B   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5   |
| 標高(m)   | 25      | 20  | 20  | 25   | 22   | 25   | 30  |
| 距離(m)   | 800     | 500 | 800 | 1000 | 1500 | 800  | 150 |
| 収容人員(人) |         |     | 100 | 50   | 40   | 50   | 100 |
| 安全性指標   | 35      | 25  | 30  | 35   | 37   | 40   | 35  |
| 経路距離(m) | 800     |     | 400 | 350  | 1000 | 1200 | 500 |

表-1 安全性指標

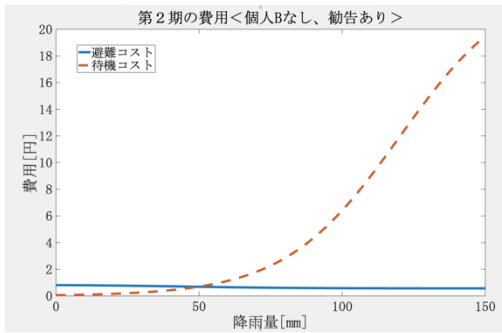


図-4 共助避難を考慮しない個人Aの費用

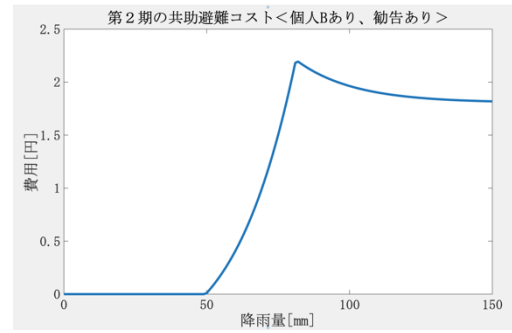


図-6 共助避難コスト

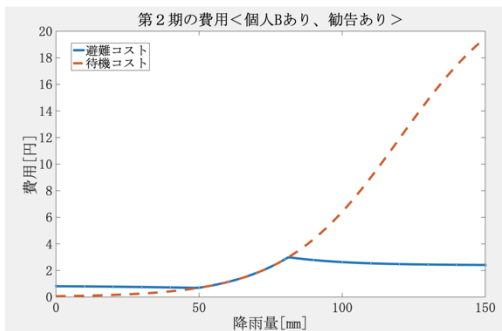


図-5 共助避難を考慮した個人Aの費用

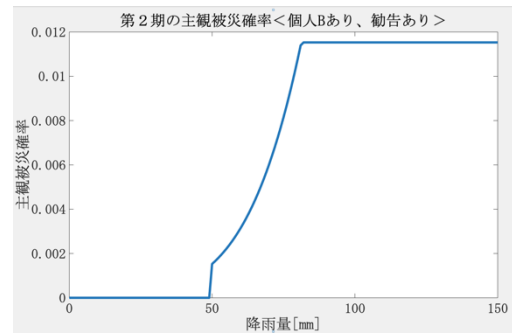


図-7 個人Aの主観被災確率

#### 4. 分析結果

河川と避難所と世帯の位置関係を図-3のように設定した。世帯Aから各避難所への避難行動が赤矢印、世帯Bから各避難所への避難行動が青矢印、世帯Aから世帯Bへ行き各避難所への共助行動が黄色矢印として表記してある。各避難所と世帯A, Bの安全性指標は内田論文<sup>3)</sup>で使用した施設情報を参考に設定した。その具体的な数値は表-1にまとめる。

数値計算例として、各パラメータを  $(C_{fe}^a, C_{1mA}^a,$

$C_{2mA}^a, C_{2mB}^w, C_{1mB}^a, C_{2mB}^a, C_{2mB}^w, C_{1fs}^a, C_{2fs}^a, C_{2fs}^w,$

$) = (0.3000, 0.5576, 0.1115, 0.6134, 2.3321, 0.4664, 2.5653, 0.5000, 0.4000, 0.9000)$  としてモデルの挙動を確かめた。ここで、移動コストは避難所選択モデルから導出されるパラメータであるが、紙面の都合上その導出についてここでは詳述しない。

#### (1) 第2期について

第2期の客観被災確率は内田モデル<sup>3)</sup>を参考に作成した。このときの客観被災確率は降雨量に比例する性質がある。ここでは客観被災確率の導出方法に関して詳述はしない。

##### a) 避難勧告あり

図-4は共助避難を考慮しないときの個人Aの費用の推移を示し、図-5は共助避難を考慮するときの個人Aの費用の推移を示している。図-5から51mm/h未満は待機行動とり、51mm/h以上では避難行動をとることがわかる。図-4と図-5では、避難行動が共助避難か単独避難かの区別ができない。図-6は共助避難コストの推移を示している。共助避難コストが見られたとき共助避難は起こるので、図-6から51mm/hから共助避難が発生したことがわかる。この設定上では、第2期で個人Aは共助避難と待機の二択のみの避難行動をとることがわかる。図-7は主観被災確率の推移を示した図である。51mm/hから徐々に上昇していき、82mm/hからある一定値に収束する。

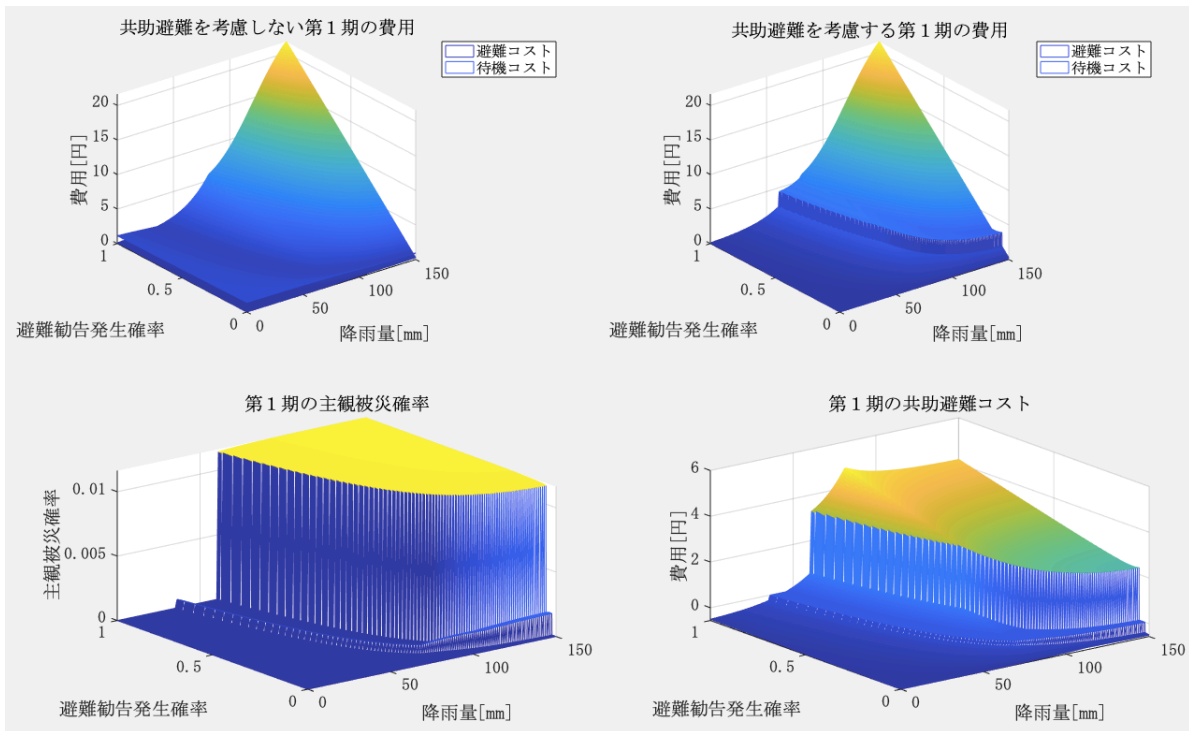


図-8 第1期

## b) 避難勧告なし

避難勧告なしの状況下でも似た実験データを観測することができた。

## c) 第2期のまとめ

共助避難は単独避難よりもリスクを負うため、避難コストが増加する方向に働いた。客観被災確率が上がると、共助避難コストも上がっていくがその後減少していくことがわかった。これはある被災確率までは避難中に不安や恐怖などを感じるが、その後、認知的不協和や共助による保護欲や現実逃避によって主観被災確率を歪めている。主観被災確率が一定値になるのは2者間の客観的な被災の割合に違いが見られなくなるためである。途中で減少していくのは許容被災の限界に到達し、

実験結果から主観被災確率が0.002を超えると共助避難が起き、主観被災確率が0.002以下なら待機行動をとる。このときの客観被災確率は0.0023程度のなので被災確率を低く見積もることも表現できた。

## (2) 第1期について

図-8は第1期の数値実験の結果を表したグラフとなっている。左上図は共助避難を考慮しないときの第1期の費用、右上図は共助避難を考慮するときの第1期の費用、左下図は共助避難を考慮したときの第1期の主観被災確率、右下図は第1期の共助避難コストを示している。

左上図と左下図から形状がある地点から急速に変化していることがわかる。この地点から共助避難が発生したと考えられる。右下図から第1期の共助避難コストは客

観被災確率よりも情報（避難勧告）の有無に左右されていることがわかる。

この結果から、避難勧告が発令されたとき共助避難コストの面積が大きくなるので共助避難を促進させらる。逆に避難勧告がなされないと共助避難コストは小さい値になるが共助避難コストの面積が小さくなる。その結果、避難勧告がなされないと共助避難は起きづらい。避難勧告と共助避難の関係性があることがわかった。

## 5. まとめ

本研究では、佐藤ら<sup>9)</sup>が開発したモデルをもとに、共助行動および避難勧告の有無の情報の取得を考慮に入れた水災害時の避難行動意思決定モデルを構築した。この中で、モデルの枠組みを損なわずに、共助避難に対するコストを再帰的に算出することができた。

本研究で構築したモデルでは、災害発生時、避難しない（待機する）人が自分は被災しないと思いつむ認知的不協和の作用、時間経過後の自身の避難行動の意思決定を考慮することで情報待ちの作用と自分以外の他者を想定して自身の意思決定に基づき他者の避難行動を評価する方法を提案することで共助行動の作用を数理的に説明した。



付録：利他モデル<sup>6)</sup>

利他的な行動のモデルの一例としてこの研究で挙げられている利他モデルについて説明する。このモデルは、個人的意思決定を対象としたモデルである。自分と相手の効用の差が大きいかほど不効用が生じるという利他的選好（不平等回避選好）の枠組みを反映した個人の効用を、以下のように表現している。また、ここではランダム効用理論に基づく各選択肢の選択確率を導出することを目的に、効用の誤差項を導入している。

<効用関数>

$$V_n(a_n) = u_n(a_n) - \sum_{m \in N_n} J_{n,m} |u_n(a_n) - u_m(a_n)| + \varepsilon_{a_n} \quad (1)$$

- $J_{n,m}$  : 意思決定者  $n$  にとっての他者  $m$  の重み
- $a_n$  : 意思決定者  $n$  の選択肢の効用
- $N_n$  : 不効用が生じる他者の集合
- $\varepsilon_{a_n}$  : 誤差項

不平等回避選好により、二者間の効用の差が不効用となり、意思決定に影響を与える。そのため  $J_{n,m}$  が正であれば、この効用の差を減らす行動が選択されやすくなる。こうした項により、利他的な行動を表現している。

本研究に利他モデルを当てはめると重みの部分が共助避難コストになる。このことから以下の等式が成り立つ。

$$C_{1h} = - \sum_{B \in N_A} J_{A,B} |C_E(a_A) - C_E(a_B)| \quad (2)$$

このことから図-9のグラフが得られた。客観被災確率がおもみと共助避難コストにほとんど影響を与えないことがわかった

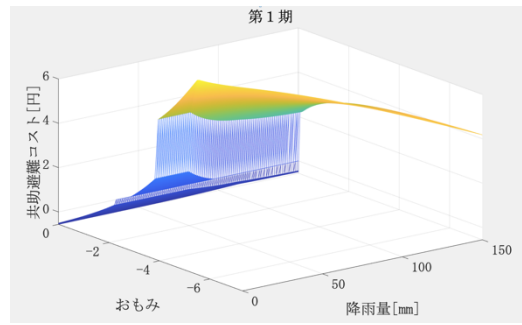


図-9 利他モデルと共助避難コスト

参考文献

- 1) 佐藤太一, 河野達仁, 越村俊一, 山浦一保, 今村文彦: 心理的作用を考慮した津波避難開始における意思決定モデルの開発, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 69, No. 2, 64-80, 2013.
- 2) Akerlof, G. A. and Dickens, W. T.: The economic consequences of cognitive dissonance, *The American Economic Review*, Vol.72, pp.307-319, 1982.
- 3) 内田賢悦: X バンドレーダ情報が火災害時の避難行動に与える影響に関する研究
- 4) 内田賢悦: 津波発生時の一時避難所の最適配置問題に関する研究, 北海道河川財団
- 5) 内田賢悦, 谷口良好: 降雨による洪水・土砂災害発生時の一時避難所の最適割り当て問題に関する研究
- 6) 浦田淳司, 羽藤英二: 豪雨災害時の避難開始選択における他者避難と人的ネットワークの影響評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.73, No.1, 24-39, 2017

(2009. 7. 1 受付)

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF THE DECISION MODEL IN CONSIDERATION OF INDIVIDUAL AND CORPORATE EVACUATION BEHAVIOR UNDER A FLOOD DISASTER.

Kazuhiro ITO and Teppei KATO

In this study, it is intended to build the decision model of evacuation behavior under a flood disaster. I build my model based on the decision model of Sato and others<sup>1)</sup>. Their model is a model in consideration of “evacuation action”, “stay action” and “action awaiting information”. My model is a model in consideration of Sato’s model’s consideration of actions and “assistance action”. The assistance action cost depends on having assistance action or not. It is found by a difference of the evacuation cost of having assistance action or not. Knowing the property of the assistance action, it comes to be able to promote the mutual assistance evacuation of local inhabitants. Besides, it comes to be able to promote a evacuation action by a property of the information.