

逃げ遅れが生じる場合の避難・救助シミュレーション —水害時の京都御池地下街を事例として—

Eishiro Higo

Department of Civil Engineering
University of Waterloo, Waterloo, Canada
ehigo@uwaterloo.ca

Norio Okada

School of Policy Studies
Kwansei Gakuin University, Osaka, Japan
kyotookanori@gmail.com

Keith W. Hipel

Department of Systems Design Engineering
University of Waterloo, Waterloo, Canada
kwhipel@uwaterloo.ca

Liping Fang

Department of Mechanical and Industrial Engineering
Ryerson University, Toronto, Canada
lfang@ryerson.ca

Abstract—これまで数多くの避難シミュレーションが開発されてきたが、避難者が生存の淵に立たされる状況を精緻に分析したものはなかった。本研究では、自力での避難が困難になった状態（生存臨界状態）での避難者間での協力的な避難・救助方法を分析するための新しいシミュレーションモデルを提案する。そのためにまず、生存臨界状態における避難行動を再現するために、生命体システムモデルに依拠して避難エージェントモデルを作成する。生命体システムモデルとは、諸組織を生命体として見立てた上で、その組織の生存のために必要な戦略を三つの基本的な要素で説明する概念モデルである。それらの三つの要素とは生命力 (Survivability), 生活力 (Vitality), 共生力 (Conviviality) である。それらを順序良く使い、最終的には同時にすべてを発揮することで生存臨界状態であっても生存が可能になると考える。本研究では地下街での水害時の避難を事例として、避難者一人一人を生命体システムであると捉え、移動可能性、筋持久力、協力的な避難・救助戦略をそれら三要素としてシミュレーションを行う。その上で、生存臨界状態での効果的な避難・救助戦略を分析し、戦略ごとの効果をシミュレーション結果として視覚化する。この研究を進めていくことで、逃げ遅れが発生する状況をも想定した、多重的な避難・救助計画を策定することが出来る。

Keywords- 生命体システムモデル; 生存臨界状態; 避難; 救助; 地下空間; マルチエージェントシミュレーション

I. 背景

東日本大震災以降、想定を超える災害にどのように対処するのが問題となっている。今回の災害の規模をも想定に入れることも考えられるが、制約条件の中で被害を減らすという「減災」という考えが重要となる。特に人命を守ることが最重要事項であり、その主要な分析手法としての避難シミュレーションがより注目されてきている。

これまで多くの避難シミュレーションが開発されてきたが、生きるか死ぬかの瀬戸際を精緻に分析出来るものはほとんどない。洪水時のシミュレーションの場合、避難が困難になる高さにまで水位が達するとその時点で避難者は命を失ってしまうという仮

定を置くシミュレーションが殆どである。そこには、身動きが取れなくなった後に救助される可能性は想定されていない。しかし実際には、自力での避難が不可能になった後にも辛うじて命を繋ぎ無事に救助されることがある。2004年の台風16号では、身動きの出来なくなったバスの屋根の上で37名の乗客・乗員が一夜を明かし、無事全員が救助された [1]。東日本大震災においても、電信柱によじ登り生存した事例が報道されている [2]。これらの事例を「奇跡」として捉えることも出来るが、このような生存例を増やすためにはどうすればよいかを考え、従来の対策と並行して多重の防災対策を行うことが、巨大災害のリスクに対峙するために必要な姿勢であると考えられる。

本研究では自力での避難が不可能になる状態（生存臨界状態）をも分析出来るシミュレーションを提案する。このシミュレーションモデルを使うことによって逃げ遅れが発生する場合の効果的な救助方法を比較分析出来るようになる。より具体的には、逃げ遅れた避難者は近くの一時避難所（自販機、電信柱等の通常の用途と異なるものも含む）に逃げ込み助けを待つことが出来ると仮定し、その避難者をいかに救助するのかを分析する。生存臨界状態の避難を再現出来るエージェントモデルは、Okada [3]が提案する生命体システムモデルを基に構築する。地下街の水害発生時のシミュレーションを事例として、生存臨界状態での有効な戦略を生命体システムモデルの三つの要素、生命力 (Survivability), 生活力 (Vitality), 共生力 (Conviviality) を軸として分析する。

II. 関連研究

避難シミュレーションはこれまで多くの研究者によって作成されてきた。それらは手法からいくつか分類出来、Gabriel and Benigno はそれらをフローベース、セルオートマトン、エージェントベース、アクティビティベースの四つに分類した [4]。フローベース

モデル, セルオートマトンモデル, はマクロの視点から群衆の行動を分析し構造物の設計に使われてきた. エージェントベースモデルはミクロの個人個人の行動から相互に影響しあう集団の行動を分析してきた. 本研究ではエージェントベースモデルを基に避難シミュレーションを作成した.

A. エージェントベース避難シミュレーションモデル

近年, agent-based modelsは避難シミュレーション研究に広く用いられるようになってきた. 不均一な避難者, 避難者間のコミュニケーション, 限定的な環境に対する知識などへの自由度が高いため様々な条件を考慮することが出来る. 例えば, 体力的な問題を考慮した場合 [5] [6], 誘導する避難者がいる場合 [7] [5] [8],そして避難者の属性ごとに行動様式を変えた場合 [9]などがある. 上記のように様々な要素が考慮されてきたがこれらを一つのモデルとして体系だてて説明したものはこれまで存在しなかった. 生命体システムモデルを基にすることで上記の例では, 最初の要素は生活力, 二番目は共生力として捉えることが出来る.

今まで救助活動はシミュレーション内で殆ど考慮されてこなかった. 少ない先行研究の一つとして, 鎌田は老人ホームでの火災時の避難・救助行動をシミュレーションを基に分析した [10]. その中で, 自力避難が困難な避難者, 出口から遠い避難者を優先することで救助が効果的に行えることが示され, またそのための準備として考えられる方法も考察された. しかし, 鎌田の研究では生存臨界状態での避難・救助行動までは考慮されておらず, 亡くなる直前にそれまでの避難行動を変えることは出来ない.

B. 生命体システムモデル

生命体システムモデルとは総合防災の捉え方を示す新たな概念モデルである [3]. このモデルは組織, 地域もしくは国などの主体を一つの生命体に見立てて, その組織が生存するために必要な能力とその使い方を分析するための枠組みを提供する. 様々なリスクに晒されている組織の生存戦略を考えることこそが, 総合防災の要諦であると主張している. このモデルは生存に必要な能力を生命力 (Survivability), 生活力 (Vitality), 共生力 (Conviviality) の三つで

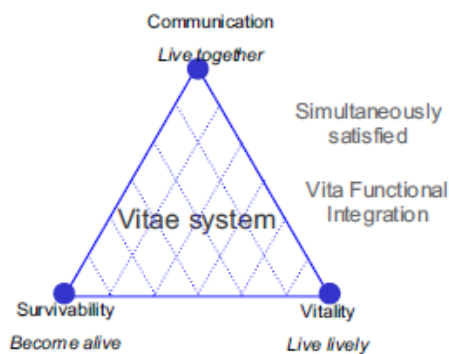


図 1. 生命体システムモデル [3]

代表出来ると仮定し, それらをバランスよく蓄えておくことと緊急事態に効果的に発揮出来ることが大事であるとしている. ここでいう生命力とは災害の外力に対抗する能力のことであり, 防災対策, 特にハードでの対応がここに該当する. 生活力とは組織の維持に必要な活力のことであり経済力, もしくは防災における生活必需品の備蓄能力が該当する. 最後に共生力であるがこれは他の組織と協力して場合によっては先の二つの能力を融通し合うことの出来る能力のことであり, 他組織との連携能力や緊急時の通信能力であると捉えられる. 本研究では生命体システムモデルを災害時の避難者に適用して避難シミュレーションモデルを開発する.

C. 生存臨界状態におけるシミュレーションモデル

生存臨界状態における避難行動は間接的にはあるが LIFESim [11]の中で考慮されている. LIFESimは人命の損失を測るために開発されたシミュレーションモデルである. 建物から避難出来なくなった避難者はその建物内で垂直避難をすると仮定して水害時の生存確率を計算している. しかし, このモデルは確率的に避難成功者数を計算しているに過ぎず, 避難・救助過程をシミュレーションすることは出来ない.

生存臨界状態における避難・救助過程を再現する手法として, 生命体システムモデルを基に作成したシミュレーションが提案されている [12] [13] [14] [15] [16]. Liu et al. [12]は洪水時の歩行速度が水位によって変化することに着目し, 歩行が困難になる水位と実際の水位の差によって生命力を関数として定義した. また生活力は, 一時避難所を利用するために必要な力として線形の関数を便宜的に定義した. その上で地下街における浸水時の避難シミュレーションを作成し, 避難者が移動困難になった後も近くの一時的避難所に逃げ込むことが出来れば時間稼ぎが出来ることをシミュレーションで示した. 李 [13]は Liu et al. が作成したモデルを基に避難者間の救助アルゴリズムを作成し河川の親水公園における増水時の避難シミュレーションを行った. その結果, 避難を終えた救助者が河道内の逃げ遅れた避難者を親水公園の堤防の上から救助出来ることを示唆した. Higo et al. [14]はこれらのモデルを基に外部からの救助がどのような過程で行われるのかを分析した. Higo and Okada [15]は救助者が過酷な状況に置かれていればいるほど救助が困難になることを生命力, 生活力の関数を基にシミュレーションで示した. Higo et al. [16]は避難者間での救助をシミュレーションし, 地下街の浸水時には命を落とす危険性を高めてしまうことを示した. また, 一時避難所の効果的な設置場所, 避難失敗の原因を示した.

III. 生命体システムを基にしたエージェント

本研究では上述の通り生命体システムモデルを基にした避難エージェントを用いる. 生命体システムモデルは生存臨界状態における避難者の生存に必要

な要素と行動を単純化して表現することが出来る。まずは出口を目指し、生存臨界状態では近くの一時避難所で辛うじて生きながらえ救助を待つ。そのような避難者の行動を再現するべく以下のように避難エージェントを作成した。避難者モデルの中で、生命力は歩行が困難になる水位と実際の水位の差によって関数として定義され、生活力は最大静的握力発揮の減少曲線から一時避難所で自分の体重を支えるために必要とされる握力を引いて出来る関数として定義され、また共生力は避難・救助の戦略とグループ形成時の生命力の共有方法とされている。

A. 基本設定

避難者の身体能力を文部科学省の資料 [17]より設定した。標準として40代男性の値を用い、身長(H)170cm, 体重(W)70kg, 最大瞬間握力(G_{MAX})50kgとした。また身長, 体重, 握力の関係をそれぞれ関数として求め、身長を決めることで他の二つの数値も一意に決定されるようにモデルを簡素化した [16]。このことで、0から1までの数字として与えられる「正規化された身長」のみで連続的なエージェント属性を操作することが出来る。標準的なエージェントが移動困難になる水位は70cmとした [18]。頭の天頂から口までの高さは20cmとした。

B. 生命体システムモデルの三つの要素

先行研究を基に三つの要素を定義していく。生命力はLiu et al. [12], 生活力はHigo and Okada [16]を基にしている。

1) 生命力 (Survivability)

生存臨界状態に陥る前後で生命力を二種類定義する。まず生存臨界状態の前の段階では、前出の通り、歩行が困難になる水位と実際の水位の差によって関数として定義される。ここでは正規化して0から1ま

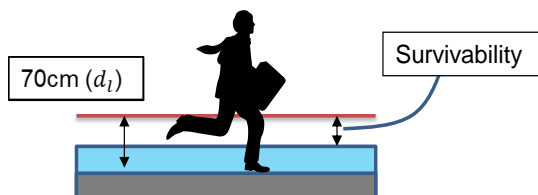


図2. 通常時の生命力

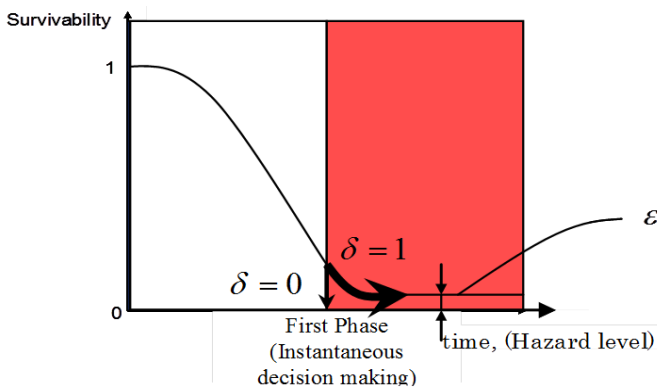


図3. 生存臨界状態に陥る瞬間に機転が利くかどうかで変化する生命力 [14]

での数値として以下のように定義する:

$$S(t) = r_H \cdot d_l - d(t) \quad (0 \leq d(t) \leq d_l) \quad (1)$$

ここで $d(t)$ 時刻 t における水深; d_l 歩行可能な水位の限界値(70cm); r_H は正規化された身長である (図2)。

生命力の定義により、避難者の歩行速度は生命力の関数として捉えることが出来る。水中での歩行速度を求める先行研究 [19] [20] [21]より、以下の式で時刻 t における歩行速度($v(t)$)を決定する:

$$v(t) = v_0 \times [S(t) \times \lambda(\text{walk}, t)] \quad (2)$$

$$\lambda(\text{walk}, t) = 1.0 / \{0.982 + e^{1.12t - 4.0}\} \quad (3)$$

ここで v_0 は標準的な歩行速度; $\lambda(\text{walk}, t)$ は時刻 t における疲労による歩行速度の減少の度合い; v_0 は初期速度 $v_0 = 1.4 \times r_H [m/s]$ として計算する。

次に生存臨界状態以降の生命力を定義する。その前にまずは生存臨界状態において避難者はどのような状況に置かれているのかを詳しく説明する。実際の水位が避難者にとって困難になってしまう水位にまで達したとき、従来の避難モデルにおいてはそこで避難が失敗に終わってしまうと考える。しかし、本研究では、近くに一時避難所があり且つそれを瞬時に利用しようとする機転がある場合においては、避難者は辛うじて生き残ることが出来ると考える。先行研究ではこの状況を $\epsilon - \delta$ 問題としてモデル化している [14]。辛うじて生き残っている状況をそれまでの歩行可能な状況と区別するために、正ではあるが極小の値 ϵ (たとえば0.000001) を基に新たな生命力を以下のように定義する:

$$S(t) = \epsilon \delta (d_m(r_H) - d(t)) \quad (d_l \leq d(t) \leq d_m(r_H)) \quad (4)$$

ここで $d_m(r_H)$ は最大限生存可能な水位を表す。 δ は避難者の機転が利くかどうかを表す関数で、0と1の二値を持つ。1は避難者がとっさに一時避難所に避難出来ることを表し、その時のみ極僅かな生命力 ϵ を保持して救助を待つための時間稼ぎが出来る (図3)。

2) 生活力(Vitality)

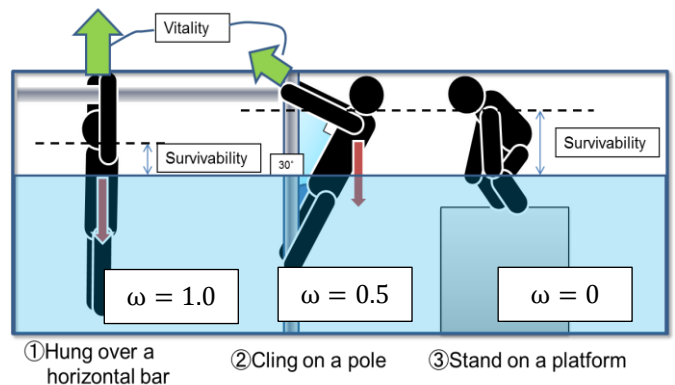


図4. 一時避難所の種類: 水平な棒; 垂直な棒; 台 [16]

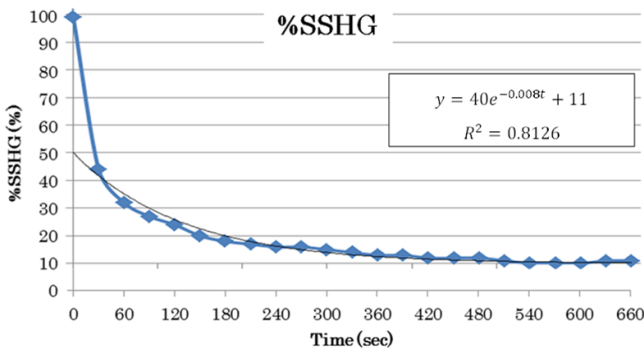


図5 最大静的握力発揮の減少関数 $G(t)$ [16]

一時避難所に逃げ込むことが出来た後は、避難者は生命力と生活力の両方を同時に発揮する必要がある。生活力を発揮出来る握力から一時避難所で必要とされる握力を引いて出来る関数として定義した。時刻 t における生活力 ($V(t)$) は以下のように定義される。

$$V(t) = G_{MAX} \times G(t) - W \times \omega(R_k) \quad [kg] \quad (5)$$

ここで、 G_{MAX} は瞬間最大握力; $G(t)$ は時刻 t における最大静的握力発揮; W は標準的体重; $\omega(R_k)$ は R_k タイプの一時避難所に滞在するために必要な握力を体重から算出するための係数である。一時避難所の模式図を図 4 に示す。最大静的握力発揮とは、ある被験者が常に最大限の握力を発揮し続けることを課されている時の時系列に沿った計測値である。最大静的握力発揮の減少関数 $G(t)$ は山次らの実験的研究の結果を基に定式化した (図 5) [22]。 $\omega(R_k)$ は 75 人の

被験者を基にした鉄棒にぶら下がっていられる限界の時間を計測した実験の結果 [23] を基に算出した [16]。正規化されて 0 から 1 の値として定義された生活力の関数 $V^*(t)$ は以下ようになる。

$$V^*(t) = 6e^{5.1r_H} \times (40e^{-0.008(t-t_1)} + 11) \times 10^{-5} - 1.4e^{3.4r_H} \omega(R_k). \quad (6)$$

3) 共生力 (Conviviality)

一人での避難が困難になり一時避難所で時間稼ぎをする避難者は、水が引いて自力での避難が再び可能となる場合以外では、他者に救助して貰う必要がある。共生力としてはいろいろな要素が関わってくる。まず救助を呼ぶ声の範囲、捜索してくれる知人の存在等が考えられる。Higo and Okada では駆けつけてくれる救助者の救助能力を基に関数を設定した [16]。本研究ではより広い意味での共生力として避難・救助の行動規範を操作し、その戦略の効果を分析する。特に、最悪の事態を想定して、外部からの救助が急激に進む浸水の速度に間に合わない中での避難者間での救助行動の持つ効果を計った。具体例として三つの戦略を実験した。一つ目は協力なしの各自での避難、二つ目は避難経路上で出会った人々が集団になって避難する戦略、三つ目はまず各自が自分の避難を優先しボトルネックとなる階段を上りきった者がそこからロープを使って他の避難者を救助する戦略である。また、二つ目の戦略では新たにグループでの生命力 $S_G(t)$ と歩行速度 $v_G(t)$ を以下のように定義した：

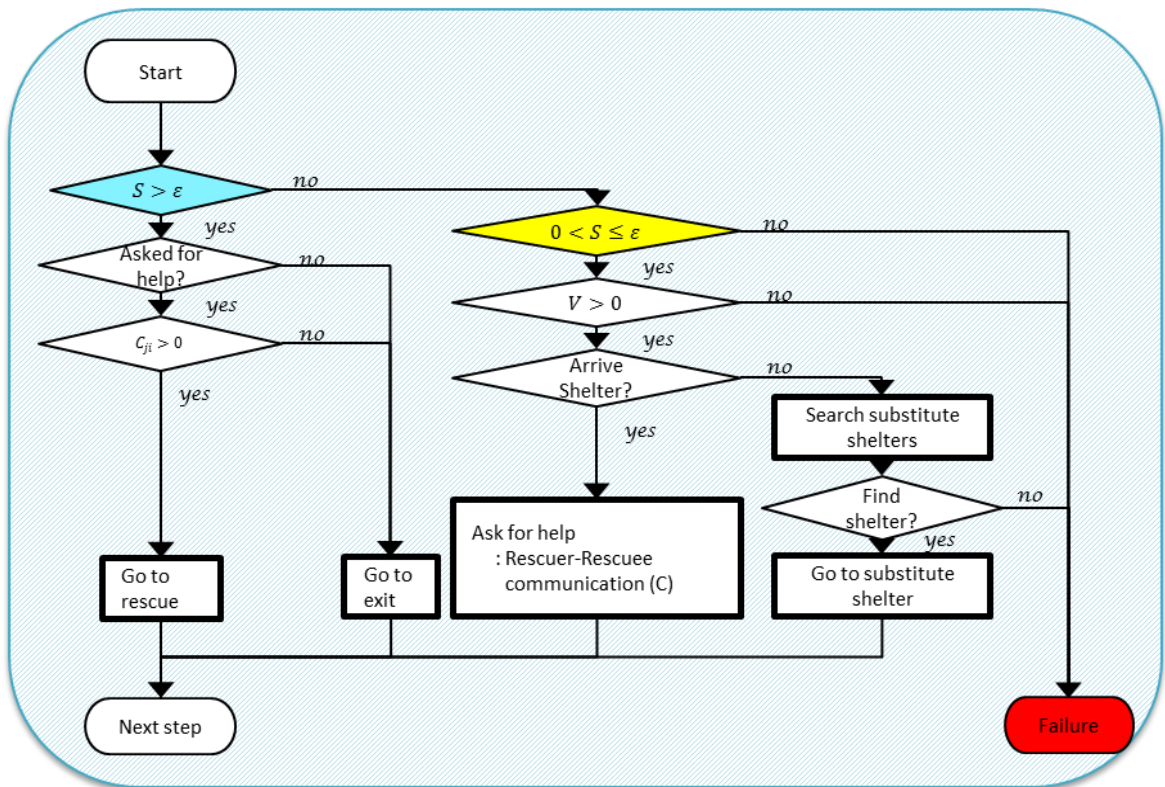


図 6. 生命体システムモデルを基にした避難エージェントのアルゴリズム [16]



図7 御池地下街の地理

$$S_G(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i(t)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{H,i} \cdot d_i - d(t) \quad (0 \leq d(t) \leq d_i) \quad (7)$$

$$v_G(t) = v_0 \times [S_G(t) \times \lambda(\text{walk}, t)]. \quad (8)$$

ここで N はグループ内の避難者の人数, $S_i(t), r_{H,i}$ はそれぞれ避難者 i の生命力と正規化された身長である。

C. エージェントアルゴリズム

図6には1ステップ(2秒)での各エージェントのアルゴリズムが示されている。まず生命力と生活力の二つの状態によって選択肢が絞られる。自力での避難が可能な時にはもっとも近い出口を探しそこに向かう。生存臨界状態に陥った場合、近くに一時しのぎ出来る避難所がありかつその避難者が機転を利かせることが出来たら、すぐさま一時避難所に逃げ込む。そしてその後は助けを求めながら、自分の生命力もしくは生活力が0になるまで救助を待つ。

IV. シミュレーションモデル

本研究のシミュレーションは `artisoc3.0` で構築されている [24]。洪水時の地下街での浸水時の事例を用いて生命体システムモデルを基にした避難シミュレーションを作成した。

事例として京都市にある御池地下街を対象にしたシミュレーションを行った。御池地下街の特徴としてまず挙げられるのが川に隣接していることである。それに加えて地下三階とそこに続く階段部分が袋小路状の狭い閉鎖空間となっており、流入してきた水が集中し水位が急激に上昇してしまうことが予想される。

A. 御池地下街の地理と構造

御池地下街は東側に鴨川が流れており外水氾濫の危険性がある(図7)。地下街は地下三階構造となっており、地下一階は買い物街と地下鉄の改札と駐車場、地下二階は駐車場、地下三階は地下鉄のコンコースがある。地下三階からは地下一階に通じる長い階段とエスカレータが計三つありそれらが地下鉄のコンコースからの避難経路となる。地下一階と地下二階は約 $650\text{m} \times 40\text{m}$ 、地下三階は約 $100\text{m} \times 8\text{m}$ 高さ 2.7m の広さを持つ。構造は図8のようにシミュレーション空間に反映されている。また一時避難所に成り得るものとして地下三階では自販機($\omega = 0$)と排水用の柱状管($\omega = 0.5$)、階段では手摺($\omega = 0.5$)を想定した。

B. 浸水データ

本研究で使用する浸水データは、鴨川の御池橋の上流側から $100\text{m}^3/\text{s}$ の規模の外水氾濫が起こった場合を想定したToda [18] による1/100スケールの水理模型実験の結果より得ている。この浸水は特に地下三階にいる避難者に厳しいもので、浸水開始から15分で階段を使用した脱出がほぼ不可能となる。そして20分を過ぎると水位は天井にまで迫る。

C. 評価基準

各シミュレーションは地下三階に成年エージェント($r_H = 1.0$)10人、老年エージェント($r_H = 0.7$)10人をランダムに配置するところから始まる。地下一階に浸水が始まった時点を目安とし、シミュレーション

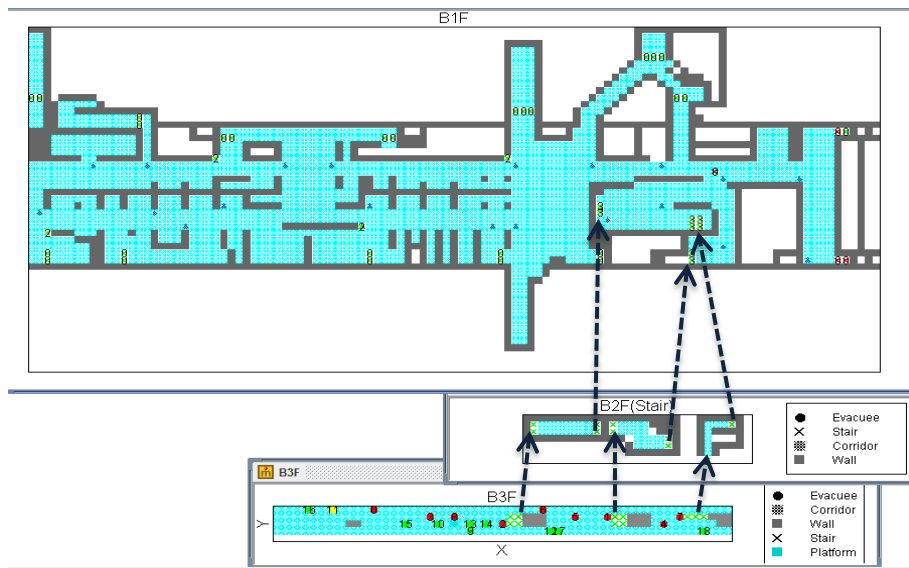


図8 シミュレーション空間

ンの開始時刻はシミュレーション毎に操作する．各結果の評価指標として二つの数値を計算する．一つ目はシミュレーション終了時（浸水開始から30分後）に各避難者がどこに何人いるのかを集計した数値である．設定上，地下街に取り残された避難者はシミュレーション終了時までには生命力か生活力が無くなった状態となる．二つ目はその人数に重みを付けて足し合わせた，避難の達成度を表す数値である．その重みは以下のように設定する：

$$E_i = \begin{cases} 3, & \text{if agent } i \text{ evacuates to outside} \\ 2, & \text{if agent } i \text{ reaches to B1F} \\ 1, & \text{if agent } i \text{ reaches to a staircase to B1F} \\ 0, & \text{if agent } i \text{ does not escape from B3F} \end{cases} \quad (9)$$

この重みを考慮して各階の避難者数を足し合わせたものを E_{Total} として以下に定義する：

$$E_{Total} = \sum_{i=1}^{20} E_i \quad (10)$$

条件毎にシミュレーションを10回繰り返し，上記二指標に対する平均を分析の対象とする．

V. 結果

三種類の避難・救助戦略についてシミュレーションを行った．一つ目は自力避難のみの場合，二つ目は避難経路で出会った人たちでグループを作っていく固まって避難する場合，三つ目はまずは自分の避難を優先し，ボトルネックである地下一階へ通じる階段を上りきる事が出来たらそこからロープを使って階段途上の避難者を救助する場合である．

A. ケース1（自力避難のみ）

避難者が自力のみで避難する場合をシミュレーションした．まずは避難開始時刻を変化させて避難開始が遅くなっていくと避難の成功具合がどのように変化していくのかを分析する．図9はシミュレーション終了時（浸水開始から30分後）に各避難者がどこに何人いるのかを集計した数値を視覚化したものである．縦軸が人数を表し横軸はシミュレーションの開始時刻が浸水開始から何分後かを示している．11分後に避難を開始した場合，一部の老年エージェントが避難しきれなくなった．12分後から避難を始めた場合80%もの老年エージェントと20%の成年エージェントが避難しきれなかった．13分から始めた場合，状況は急激に悪化し，誰一人として地上まで辿り着けなかった．特に地下一階へと通じる階段に取り残されるエージェントが多く，この階段が避難のボトルネックになっていることが改めて示された．

B. ケース2（グループを形成しながらの避難）

避難経路上で他の避難者に出会ったらそこでグループを形成し，一緒になって避難する場合をシミュレーションした．グループでの移動速度は老年エ

ージェントより早く成年エージェントより遅くなる．図10にあるように，11分から避難を始めると殆どの避難者は逃げ切れ，12分から避難を始めた場合でも，65%の避難者が逃げ切れた．しかし13分以降に避難を始めた場合，誰一人として逃げ切れたものはいなかった．

図12は避難達成度の合計 E_{Total} をケース2と1とで比較したもので，ケース2がケース1よりどれだけ効果的かを示している．比較的早い段階においてはケース2の救助方法は効果的であるが，生存臨界状態になる直前でこの戦略を取ると逆に避難の達成度は低

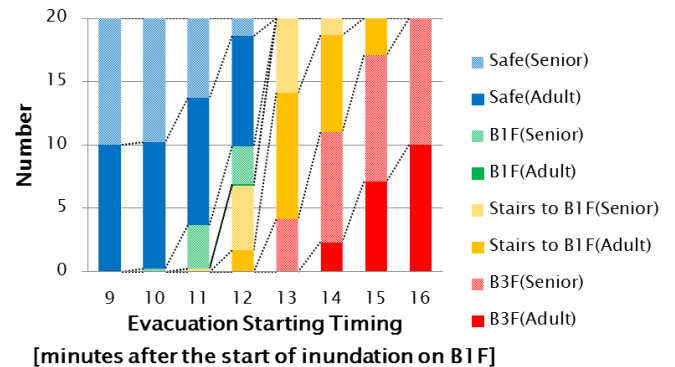


図9 ケース1の結果

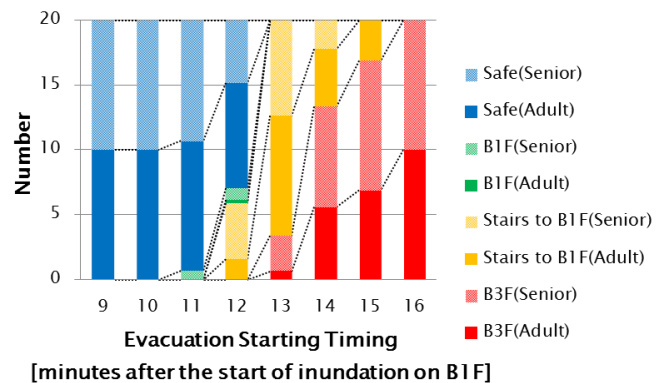


図10 ケース2の結果

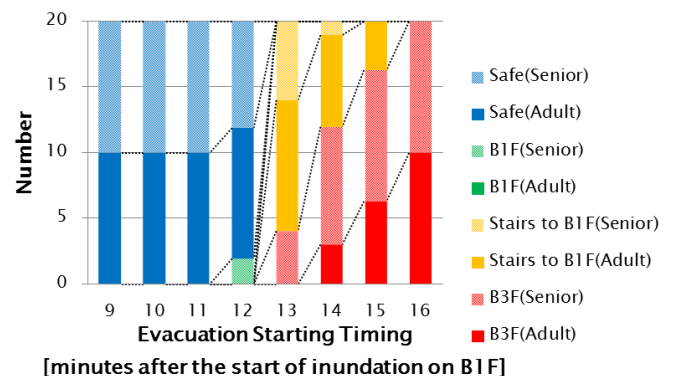


図11 ケース3の結果

下してしまう．特に救助する側の成年エージェントの避難達成度は老年エージェントの達成度の上昇と

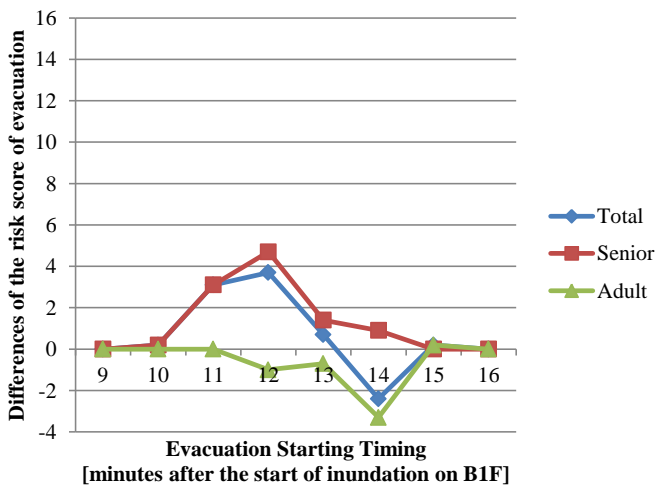


図 12 合計した避難達成度のケース 2 と 1 の違い

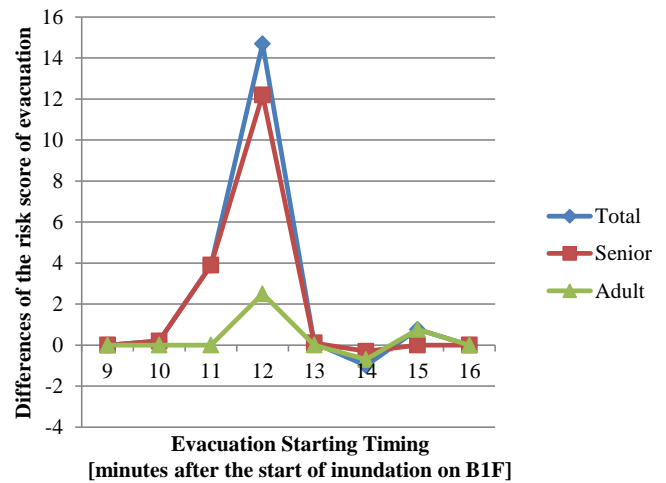


図 13 合計した避難達成度のケース 3 と 1 の違い

引き換えに悪化しているの、救助者にも生存臨界状態に陥る危険性がある場合には問題がある。

C. ケース 3 (安全な場所からの救助)

まずは自分の避難を優先し、ボトルネックである地下一階へ通じる階段を上りきる事が出来たらそこからロープを使って階段途上の避難者を救助する場合をシミュレーションした。避難を12分後から始めた場合であっても殆どのエージェントが避難しきれたが、13分以降に避難を始めた場合、これまで同様、すべての避難者が地下に取り残されてしまった。

ケース1と避難達成度を比較すると、14分後に始めた場合に若干悪化するものの、他のすべての状況で避難状況を改善出来ることが示された(図 13)。これは成年エージェントのみの結果を見ても同様、救助者にとっても安全な戦略であることが分かる。さらに、13分後以降に避難を始める場合にも階段上部に救助出来るエージェントがいる設定にすると、階段で立ち往生してしまった避難者は地下一階まで救助される避難者もいた。

VI. 結論

本研究では、生命体システムモデルを基にしたマルチエージェントシミュレーションを構築した。身動きが困難になる生存臨界状態においても一時避難所に逃げ込むことによって辛うじて生きながらえる行動を再現するエージェントモデルを作成し、実装した。そして具体例として、地下街における水害時の生存臨界状態での効果的な避難・救助戦略を分析した。

避難・救助戦略において判明した主な点を以下にまとめる:

- ① 「自分の避難を優先し、ボトルネックである地下一階へ通じる階段を上りきる事が出来たらそこからロープを使って階段途上の避難者を救助する」という戦略は、救助者のリスクを高めてしまうことなく全体の避難達成度を向上させる

ことが出来る。従って避難経路上のボトルネックの出口(本研究では地下一階へと通じる階段の最上部)に救助用のロープ若しくは滑車の様な救助装置を設置しておけば避難者同士で効果的な救助活動を行える。

- ② 「避難経路上で他の避難者に出会ったらそこでグループを形成し、一緒になって避難する」という戦略は、救助者のリスクを高めてしまいかつその効果も限定的である。特に避難者にはいつ自分が生存臨界状態に陥ってしまうのかが予測出来ないの、場合によっては救助者がただ巻き添えになってしまうという結果にもなりうる。この戦略が有効な状況は、生存臨界状態になるまでに時間の余裕がある場合と生命力が格段に高い、例えば装備を持ったプロの救助者がいる場合に限られる。

今後の研究の課題として三つ挙げる。

まず閉鎖空間におけるシミュレーションを開空間におけるものに発展させることが考えられる。東日本大震災以後、避難タワーの存在を考慮した避難を計画する自治体が多く出てきている中で、本研究を発展させたシミュレーションを活用することでより精緻な分析が可能となる。例えば、畑山ら [25]は高知県黒潮町における津波避難を緻密な聞き取り調査とエージェントシミュレーションを基に分析した。そこでの成果の一つに、「階段を自力では登れない避難者が避難タワーに到着してからどのように上まで救助するのか」という隠れていた問題を明らかにした点があるが、そこでの救助過程を本研究のモデルを使ってシミュレーションすることが出来る。また有効な避難策の案として、健常者と要支援者がグループを作りながら避難することを挙げているが、本研究の知見を考慮すると、その戦略には状況を見極めながら取り組む必要があることが分かる。この部分も本研究を発展させることによってより詳しい分析が出来る。

二つ目に、一つ目とも関連するが、本研究はプロの救助者の戦略を分析することにも発展出来る。東日本大震災において救助活動をしていた人たちが犠牲になるという痛ましい出来事があったが、例えば救助を打ち切る判断をどのように行うかの基準を作ったり、プロの救助者にとっても効果的な救助戦略を分析したり出来る。Higo *et al.* [15] と Higo and Okada [16] は既に救助する側とされる側の二者間での救助行動を分析しているので、その研究を発展させることが必要である。

三つ目として、実際の被害時において生存臨界状態に陥った避難者がどのように行動するのかをより厳密に分析する必要がある。本研究では一時避難所付近の避難者がたまたま生きながらえることが出来ると仮定したが、どの段階で一時避難所に逃げ込む判断をするのか、どれくらいの割合の人が一時避難所の存在に気が付くことが出来るのかが分かると、シミュレーションモデルの正当性をより高めることが出来る。

なお、この報告書の元となった論文は“Cooperative Survival Principles for Underground Flooding: Vitae System Based Multi-Agent Simulation”の題目で近日投稿する予定である。

謝辞

本研究は構造計画研究所より artisoc3.0 を教育用無償貸与して頂くことにより遂行出来た。また御池地下街の浸水データを京都大学防災研究所の戸田圭一教授に提供して頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] J. Hays, "FACTS AND DETAILS, TYPHOONS IN JAPAN," 2009. [Online]. Available: <http://factsanddetails.com/japan/>. [Accessed 3 July 2014].
- [2] 毎日新聞, “電柱に救われた命,” 7 July 2011.
- [3] N. Okada, "City and Region Viewed as Vitae System for Integrated Disaster Risk Management," *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 49 B, 2006.
- [4] S. Gabriel and A. E. Benigno, "A Critical Review Of Emergency Evacuation Simulation Models," University of Delaware Disaster Research Center, 2004.
- [5] 押野麻由子, “マルチエージェントモデルを用いた避難行動のシミュレーション,” 中央大学卒業論文, 2005.
- [6] 新井健, 増田浩通, 落合哲郎, “災害弱者を考慮したマルチエージェント避難シミュレーションモデル,” *MAS コミュニティ - 第3回 MAS コンベ*, 2003.
- [7] 大鑄史男, 小野木基裕, “セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション,” *日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌*, 第 巻 51, pp. 94-111, 2008.
- [8] 藤岡正樹, 石橋健一, 梶秀樹, 塚越功, “津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価,” *日本建築学会計画系論文集*, 第 巻 562, pp. 231-236, 2002.
- [9] J. Tsai, N. Fridman, E. Bowring, M. Brown, S. Epstein, G. Kaminka, S. Marsella, A. Ogden, I. Rika, A. Sheel, M. E. Taylor, X. Wang, A. Zilka and M. Tambe, "ESCAPES - Evacuation Simulation with Children, Authorities, Parents, Emotions, and Social comparison," *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, no. 2, 2011.
- [10] 鎌田智之, 糸井川栄一, “マルチエージェントモデルによる介護保険施設における火災時の避難誘導に関する研究,” *地域安全学会論文集*, 第 巻 10, pp. 183-193, 2008.
- [11] A. Maged and D. S. Bowles, "LIFESim: a tool for estimating and reducing life-loss resulting from dam and levee failures," *Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials "Dam Safety 2008" Conference*, Indian Wells, CA, 2008.
- [12] Y. Liu, N. Okada, D. Shen and S. Li, "Vitae System Based Agent Modeling and Simulation of Survivability-Critical Evacuation in Underground Flooding," *IEEE SMC*, 2010.
- [13] 李碩奇, “急激な増水下の親水型河川空間における Survivability を考慮した避難行動シミュレーション,” 京都大学都市社会工学専攻修士論文, 2010.
- [14] E. Higo, N. Okada, M. Hatayama and Y. Liu, "Analysis of Self-Evacuation to Rescuing Process under Survivability-Critical States in Underground Flooding by Vitae System Based Agent Modeling and Simulation," *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2011 IEEE International Conference*, pp. 3056-3063, 2011.
- [15] E. Higo and N. Okada, "Vitae System Based Agent Modeling and Simulation of Rescuer-Rescuee Communication Process under Survivability-Critical States in Underground Flooding," *International Transactions on Systems Science and Applications*, vol. Volume 7, no. Number 3/4 December 2011, pp. 222-237, 2011.
- [16] E. Higo and N. Okada, "Agent Modeling for Evacuation and Amateur Rescue under Survivability-Critical States," *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012 IEEE International Conference*, pp. 2768-2774, 2012.
- [17] 文部科学省, “平成 22 年度体力・運動能力調査,” 2010. [オンライン]. Available: <http://www.e-stat.go.jp/>.
- [18] K. Toda, "Urban flooding and measures," *Journal of Disaster Research*, Vol.2, No.3, pp143-152, 2007.
- [19] Y. Liu, "Multi-agent Based Modeling and Simulation of Flood Evacuation Decision-Making Considering Dynamics of Urban Life," *Dissertation*, Department of Urban Management,

Kyoto University, 2010.

- [20] K. Nishihara, "River Engineering Research on Evacuation System Based on Flood analysis," Dissertation at Kyoto University, 1983.
- [21] J. Fruin, "Pedestrian Planning and Design, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners," New York, 1971.
- [22] 山次俊介, 出村慎一, 長澤吉則, 中田征克, 吉村喜信, 松澤甚三郎, 豊島慶男, "持続性最大握力発揮における静的筋持久力の評価変数の検討," *体育学研究 = Japanese journal of physical education*, 第巻45, 第6, pp. 695-706, 2000.
- [23] 松田克治, "懸垂運動の健康づくり効果について," *Journal of Faculty of Liberal Arts, Shinshu University*. Part I, Cultural science Part II, Natural science, No.14, 201-213, 1980.
- [24] 構造計画研究所, "MAS コミュニティ," [オンライン]. Available: <http://mas.kke.co.jp/>. [アクセス日: 11 June 2014].
- [25] 畑山満則, 中居楓子, 矢守克也, "エージェント技法を用いた津波避難評価システムの開発," *京都大学防災研究所年報. Disaster Prevention Research Institute Annuals*, 第巻 B 56, 第 B, pp. 45-51, 2013.