

# 災害-避難連成シミュレーションに向けたポテンシャルに基づく マルチエージェントモデルの適用性検討 その2

## A study on applicability of a potential-based multi-agent system for evacuation simulation coupled with disasters (part 2)

東城峻樹\*<sup>1</sup>  
Takaki Tojo

城明秀\*<sup>1</sup>  
Akihide Jo

新谷祐介\*<sup>1</sup>  
Yusuke Shintani

鈴木琢也\*<sup>1</sup>  
Takuya Suzuki

中村壮志\*<sup>1</sup>  
Soshi Nakamura

木村謙\*<sup>2</sup>  
Takeshi Kimura

\*<sup>1</sup> 竹中工務店  
Takenaka Corp.

\*<sup>2</sup> エーアンドエー  
A&A Co.

Evacuation planning is an important issue at the time of disaster. In Japanese evacuation provision guideline<sup>[MILT 2016]</sup>, evacuation simulations were seen as a means of examining effective evacuation provision. However, specialized knowledge about applicability of the simulation under disaster situations which vary from hour to hour is insufficient. In this paper, evacuation simulations coupled with fire disaster based on a new method and existing method<sup>[Tojo 2016]</sup> are conducted. The new method where walking speed variation in disaster hit area is considered is employed on the evacuation simulations. From the result of the simulations, the impact both methods on evacuation behavior is examined.

### 1. はじめに

災害時の避難対策は重要な課題である。2014年には、国土交通省より、地下街の安心避難対策ガイドラインが発表されている。同ガイドラインでは、災害状況に応じた柔軟な避難対策を検討するための手段の一つとして、避難シミュレーションが位置付けられている<sup>[国土交通省 2014]</sup>。一方、現時点において、避難シミュレーション上で災害状況を適切に考慮する手法は確立されておらず、より多くの知見を蓄積する必要があると考える。

著者らは、既報<sup>[東城 2016]</sup>にて、ポテンシャル型のマルチエージェントシステム(以後、MAS)を採用した、汎用避難解析コード SimTread<sup>[木村 2009]</sup>を用いて、実災害時に想定される時々刻々変化する災害状況下を考慮した避難シミュレーション手法を提案した。そこでは、火災-避難の連成シミュレーションを行い、火災状況を任意の時刻に出現、消失する障害物として避難行動中にモデル化することで、経路が限定される状況や、火災を回避する(迂回する)行動を模擬できる可能性があることを示した。一方、先の検討では、危険エリア付近で滞留するなど合理性を欠く行動や、それにより避難完了時間が増大し、結果的に火災の影響を過大評価した可能性も懸念される。本報では、この点についても、以降に示す検討内で、より詳細に確認している。

ここで、上記の要因の一つとして、火災による状況変化(温度上昇や視認性低下)を全て障害物として表現する、すなわち、歩行そのものを遮断する手法(2.1節参照)を採用したことが挙げられる。これに対し、避難時の行動制限を表現する方法の一つに、被災時の歩行速度の変化を考慮することが考えられる。

北後ら<sup>[北後 2011]</sup>は、落下物や停電の影響について、歩行速度に着目した実験を行っている。それによると落下物がある場合は歩行速度が約半分に低下し、停電時(非常照明下)避難では、その影響は比較的小さいものの、通常照明時と比べ、5~10%程

度、歩行速度が低下する結果が示されている。また、竹内ら<sup>[竹内 2014]</sup>は、避難行動に及ぼすスプリンクラーの影響について、実数型セルオートマトン法を用いた避難シミュレーションに、煙濃度に応じて、歩行速度を低下させる手法を適用し評価している。

本報では、上記を参考に、従来手法に加えて、新たに災害状況に応じて速度変化を考慮した手法をシミュレーションに適用し、各手法が避難行動に及ぼす影響について、検討する。具体的には、火災時避難を想定し、汎用流体解析コード FDS<sup>[NIST 2015]</sup>を用いて計算した結果に対し、火災-避難の連成シミュレーションを行う。ここで、時々刻々変化する災害状況に応じて、避難行動が制限される状態を以下のように想定した。

- 1) 火災による温度上昇に応じて、高温エリアを可変障害物とし、その部分の通行を不可とする(従来手法)。
- 2) 煙に応じて、視認性が低下するエリアは、可変障害物とし、その部分の通行を不可とする(従来手法)。または可変速度領域とし、歩行速度を制限する(本報にて新たに提案)。

以降、はじめに、それぞれのモデル化手法について示す。次に、各手法を建物モデルに適用した場合の避難シミュレーションを実施し、結果について、先の課題も踏まえて考察する。

### 2. 火災-避難連成時のモデル化概要

避難解析コード SimTreadでは、目的地を0とし、目的地までの距離に応じて大きくなるポテンシャルを与える<sup>[木村 2009]</sup>。以降で、SimTreadにおける火災解析結果のモデル化手法(FDS結果の変換手法)をポテンシャルの変化と併せて概説する。

#### 2.1 可変障害物によるモデル化

図1に、可変障害物を用いたモデル化手法を示す<sup>[東城 2016]</sup>。同図(a)に、歩行エリアに対し、歩行者(エージェント)と目的地およびその中間に可変障害物を設けた例を示す。可変障害物は、任意の時刻に通行不可能領域として、出現(あるいは消失)する障害物を指す。同図(b)には、可変障害物出現時のポテンシャルを示す。図より、出口(目的地)に向かって、小さくなるポ

テンシャルが、可変障害物部分では、不連続に大きくなっている(通常、図 2 のように滑らかに分布する)。これより、障害物手前のエージェントはその部分を通行できないため、迂回するなど回避行動をとる。

## 2.2 可変速度領域によるモデル化

図 2 に本報で提案する、可変速度領域を用いたモデル化手法を示す。同図(a)の配置は、図 1 と同様であるが、可変障害物ではなく、可変速度領域を配置している。可変速度領域は、可変障害物と同様、任意の時刻に出現可能であり、領域内の歩行速度(あるいは初期速度に対する倍率)を与える。同図(b)には、可変速度領域出現時のポテンシャルを示す。図より、出口(目的地)に向かって、小さくなるポテンシャルが、滑らかに分布している。可変速度領域では、ポテンシャルは変化せず、歩行速度のみに影響を与えることとし、障害物手前のエージェントは、目的地に向かって進み続けることが可能である。

## 2.3 火災-避難の連成方法

火災解析(FDS)は 3 次元の解析であり、解析結果も 3 次元で出力される。一方、SimTread は、2 次元解析であるため、連成時には次元の低下を考慮する必要がある。今回、2.1 節の可変障害物、2.2 節の可変速度領域の双方とも、既報に示した方法と同様に変換する。具体的には、3 次元空間において、ある高さ平面上に対し、出力(クリテリア)を指定し、任意の時刻に、設定したクリテリアの基準を超えるか否かでモデル化する方法を採用した<sup>[東城 2016]</sup>。

## 3. 建物モデルによる検討

建物モデル(平面寸法 17m×36m 程度)により、前章で示した火災-避難連成シミュレーション手法を用いて時々刻々変化する災害状況を考慮した解析を実施する。解析に用いた建物モデルの詳細については、既報を参照されたい<sup>[東城 2016]</sup>。

### 3.1 解析条件

FDS における火源の出火条件は、既報に従い以下とする<sup>[東城 2016]</sup>。本報では、出火場所を、以降で示す A~D の 4 か所において、いずれか 1 か所から出火した場合を想定し解析を行う。

$$Q = \min(\alpha t^2, Q_{\max}) \quad (1)$$

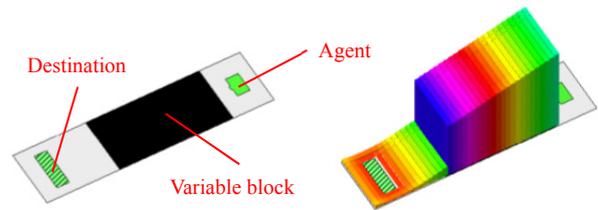
ここに、火災成長率  $\alpha=0.05\text{kW/s}^2$ 、最大発熱速度  $Q_{\max}=1000\text{kW}$  である。

SimTread の解析モデルを出火エリアと併せて図 3 に示す。SimTread における解析条件を、以下に示す。

- エージェントの数は、68 人(≒0.125A<sub>f</sub>)とし<sup>[国土交通省 2001]</sup>、全体に配置する。
- エージェントの歩行速度は 1.3 m/s する<sup>[国土交通省 2001]</sup>。
- エージェントは、目的地(避難出口)を既知とし、それぞれ目的地のポテンシャルは 0 とする。
- 避難開始時刻は、火災発生から 5 秒後とし、さらに 5 秒間隔で、10 秒~25 秒後と変えた場合を併せて実施する。エージェントは、避難開始時刻までその場で待機する。

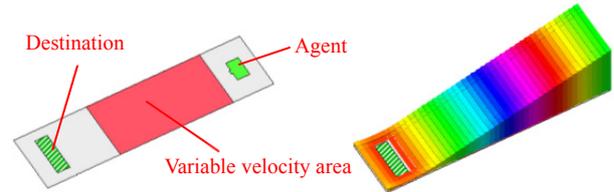
ここに、A<sub>f</sub>: 火災発生空間の床面積とする。解析の終了時間の上限は 5 分とする。

表 1 に解析ケース一覧を示す。火災解析の連成時のクリテリアおよびモデル化手法は、煙層温度 50℃を超えた場合は、可変障害物(VB)の 1 ケース(T-1)とし、視認距離が 20m を下回る場合は、可変障害物(VB)、可変速度領域(VV)の双方に変換し、2 ケース(T-1,2)を行う。更に、温度と視認距離双方を考慮した 2 ケース(B-1,2)を実施する。FDS 変換時の断面高さは限界



(a) 目的地と可変障害物の配置 (b) ポテンシャル表示

図 1 可変障害物によるモデル化



(a) 目的地と可変速度領域の配置 (b) ポテンシャル表示

図 2 可変速度領域によるモデル化



図 3 解析モデル (SimTread)

表 1 クリテリアの設定とモデル化手法

Case	Parameter	Criterion	Conv. height	Method*
N-1	Evacuation analysis only (not considering fire disaster)			
T-1	Temperature	$T > 50 [^\circ\text{C}]$	1.8m	VB
V-1	Visibility	$S < 20 [\text{m}]$		VB
V-2				VV**
B-1 (T-1&V-1)	Temperature or Visibility	$T > 50 [^\circ\text{C}]$ or $S < 20 [\text{m}]$		VB (Temp.) VB (Vis.)
B-2 (T-1&V-2)			VB (Temp.) VB (Vis.)	

\* VB: Variable block, VV: Variable velocity area

\*\* In VV area, walking speed is limited at most 0.8 m/s

煙層高さを参考に、1.8m とした<sup>[国土交通省 2001]</sup>。なお、両手法とも、クリテリアを満たした場合に出現、外れた場合に消失する。可変速度領域内の最大歩行速度は、0.8m/s に設定する<sup>[竹内 2014]</sup>。

### 3.2 出火エリア別の避難時間の比較

出火エリア別の避難完了時間を比較する。図 4 に、出火エリアを変えて、各ケースで算定した避難完了時間の比較を示す。避難開始時間を 5 秒~25 秒と変えて実施し、図中凡例の色が薄いほど、避難開始時間が遅いことを示す。なお、300 秒に達するものは、避難未完了を表す(破線は、避難開始時点で、既に被災し、移動できない歩行者が生じたものであり、注意が必要)。

図より、全体的に、避難開始時間が遅くなるほど、避難完了時間が遅れる傾向がみられる。出口付近の出火エリア A~C では、避難開始時間が遅くなると、障害物が生じる T-1、V-1 および B-1,2 では、避難完了時間が顕著に大きくなる傾向にある。更に、B,C のように通路上で出火する場合、避難開始時間に

らず避難未完了の割合が多くなる。出口から遠い D では、避難開始時間の遅れと、避難完了時間がほぼ対応し、影響が小さい傾向にある。

次に、出火エリア A~C について、避難完了時間の増加が大きい、V-1 および B-1 に着目すると、両者の避難完了時間の増加傾向は概ね対応する。また、T-1 と B-2 も同様の対応関係がみられる。これは、B-1,2 は、それぞれ、T-1 (温度上昇により障害物が生じる)に加え、更に V-1,2 (視認性悪化に伴い、障害物または速度低下が生じる)の影響を併せて考慮しており、前者は温度上昇(T-1)、後者は視認性低下(V-1)の影響が支配的であるためと考えられる。ここで、被災状況を詳細に反映することが想定される B-1,2 の方が、避難完了時間が短くなる場合がみられた。この理由については、3.4 節で考察する。

火災非考慮の N-1 の結果に最も近い、V-2 (速度低下のみ考慮)をみると、出火エリアによる違いは小さい。北側出口付近のエリア B, C では、避難開始時間が遅くなるほど、N-1 よりも、やや避難完了時間が増加していく傾向にあるが、その影響は比較的小さい。一方、出火エリアによっては、V-2 に加えて温度上昇を考慮する B-2 と差異があり、この点は注意が必要と考えられる。

以上の結果をまとめると以下の傾向が得られた。

- 1) 出火エリアが出口に近く、歩行通路付近ほど、避難開始時間の遅れに伴う、避難完了時間の増大が顕著である。
- 2) 設定した温度および視認性に関するクライテリアに対し、一方を考慮することで、他方の影響を包絡する場合があることが推察される。
- 3) 災害状況を速度制限のみで避難シミュレーション上に反映する際、影響が小さく評価される可能性がある。

### 3.3 出火エリア C に関する検討

3.2 節より、出口付近かつ通路上の出火エリア B, C では、避難開始時間によらず、避難未完了となるケースが増大する傾向がみられた。ここでは、この傾向について、代表としてエリア C のケース B-1 (5 秒後に避難開始)の状況を確認する。

図 5(a),(b)にエリア C で出火した場合の、30 秒時点における FDS の視認性コンターおよび SimTread のスナップショットを示す。同図(a)より、中央通路付近の出火点から、北側出口にかけて煙が滞留するとともに、視認性が低下しており、これが同図(b)の灰色で示される部分となる。同図(b)より、北側出口に向かって進む歩行者が、火災(障害物)の発生に伴い、煙に巻かれて、動けなくなる様子がわかる。このように比較的狭い通路を出火エリアとした場合には、煙が滞留しやすく、早期に避難開始した場合でも、煙に囲まれた避難者が行動できず、避難完了時間が増大するケースが多くみられた。

### 3.4 出火エリア A に関する検討

出火エリア A を対象に、図 4 の避難完了時間に着目すると、避難開始を 5 秒後とした場合(■)、V-1 のみが避難未完了となっている。この理由は、以降でまとめて考察する。次に、避難開始を 20 秒後とした場合(■)、T-1 の避難完了時間が他のケースとやや大きく乖離する。この条件に着目し、乖離する理由を検討するとともに、3.2 節より得られた 1)~3)の傾向について確認する。

図 6 に前記の条件における避難開始から 40 秒後の各ケースのポテンシャルマップを示す。ここで、同図(a)に示す、火災非考慮の N-1 と速度低下のみ生じる V-2 は時刻によらず、一定のポテンシャルとなる。また、温度上昇のみ障害物として生じる T-1 と B-2 は各時刻のポテンシャルの変化は共通で(b)となる。更に、(c)の視認性低下が障害物として生じる T-1 と B-2 においても、両者の変化は同じとなる。これは、今回の条件では、温度上

昇範囲が視認性低下範囲に包絡されたためと考えられる。同図(a),(b)より N-1・V-2、T-1・B-2 は、南側と北側それぞれの出口に向かってポテンシャルが小さくなるのに対し、同図(c)の V-1・B-1 は、北側出口のみに対しポテンシャルが小さくなる。(b),(c)で差が生じるのは、南側出口が、完全に塞がるか否かで、ポテンシャルを考慮する範囲(出口)が異なるためと考えられる。

図 7 に、同時刻における T-1,V-1,B-1,2 ケースのスナップショットを示す。同図(a),(b)より、T-1,B-2 では、図 6 で示したポテンシャルに従い一部の歩行者が南出口に向かい進むため、3.3 節のエリア C のように、出口付近で発生した煙に巻かれ早期に動けなくなる。先述の避難開始を 5 秒後とした V-1 も同様の理由による。一方、速度低下を考慮した B-2 では、出口付近で速度が低下することで、先を行く歩行者が滞留する間に、別の歩行者が出口をスムーズに通過、あるいは迂回する様子がみられた。これが詳細にモデル化した後者が、避難完了時間が早くなる要因の一つと考えられる。また、同図(c),(d)より、温度上昇が視認性低下に包絡され、両ケースがほぼ差がないことがわかる。

以上より、3.2 節の傾向について、1)は、出口付近に進む歩行者が、煙に巻かれて行動できなくなる影響が大きい。2)は、図 6 のポテンシャルの一致によるところが大きいと考えられるが、詳細なケース(B-2)の避難完了時間が早くなる場合がある要因は、速度低下などで後続の歩行者の行動に影響を及ぼすためと考えられる。3)は、速度低下のみでポテンシャル変化のない場合、経路は火災非考慮の場合と変わらず、今回の条件では、影響が小さく評価されやすいと考えられる。

## 4. まとめ

本報では、ポテンシャル型の MAS において、災害-避難連成シミュレーションを行い、異なる手法で火災状況をモデル化し、その影響を検討した。その結果、前述の 1)~3)の傾向が得られた。ただし、傾向 1)について、出火エリア A のような、比較的開けた南側出口付近での火災は、十分な迂回経路があるにもかかわらず、既報と同様、避難完了時間の増大が散見された。これは、図 6(b)に示すような出口付近のポテンシャルと災害状況(安全性)の乖離が要因と推察される。この点は、今後も引き続き検討予定である。

## 参考文献

- [国土交通省 2014] 国土交通省: 地下街の安全避難対策ガイドライン, 2014.
- [北後 2011] 北後明彦ほか: 地震直後の物品散乱を想定した通路歩行実験(その 1), 日本火災学会研究発表会梗概集, 日本火災学会, 2011.
- [木村 2009] 木村謙ほか: マルチエージェントモデルによる群衆歩行性状の表現, 日本建築学会計画系論文集, 日本建築学会, 2009.
- [東城 2016] 東城峻樹ほか: 災害-避難連成シミュレーションに向けたポテンシャルに基づくマルチエージェントモデルの適用性検討, 人工知能学会大会論文集, 日本人工知能学会, 2016.
- [竹内 2014] 竹内裕貴ほか: 区画火災の避難行動に及ぼすプリンクラーの影響, 日本火災学会論文集, 日本火災学会, 2014.
- [NIST 2015] National Institute of Standards and Technology: Fire Dynamics Simulator (Ver. 6) User's Guide, NIST, 2015.
- [国土交通省 2001] 国土交通省: 2001 年版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 2001.

