

# マルチエージェントモデルを用いた火災-避難シミュレーション

○東城 峻樹\*<sup>1</sup> 城 明秀\*<sup>1</sup> 新谷 祐介\*<sup>1</sup>  
鈴木 琢也\*<sup>1</sup> 中村 壮志\*<sup>1</sup> 木村 謙\*<sup>2</sup>

キーワード：マルチエージェント ポテンシャル 避難シミュレーション 連成解析

## 1. はじめに

災害時の避難対策は重要な課題である。都市再開発などで複雑な街区が形成される中、災害状況に応じた柔軟な避難対策の検討手段の一つとして、避難シミュレーションが位置づけられる<sup>1)</sup>。中でも、避難者を個々のエージェントとして扱い群集流動が再現できるマルチエージェントモデル(MAモデル)は、有効な手法の一つと考えられる。MAモデルを用いることで、手計算レベルの検討では困難な、時々刻々の各エージェントに関する歩行性状、避難時に滞留しやすい場所の把握やその結果の可視化が可能になるという利点がある。

近年では、MAモデルに加えて、津波や火災など各種の災害に応じた被災状況の変化を連成させた避難シミュレーションが行われるなど高度化が図られている<sup>例えば 2)</sup>。このような詳細な解析は、対象とする災害時の避難計画をより実態に近い解析に基づいて策定するためのツールとしての活用が期待される。更に、現行設計では考慮していないものの、安全性に影響を与える可能性が高いシナリオについて検討する手段としても有効であると考えられる。西野らは、南海トラフ地震を対象に、地震および津波と火災の複合災害時の影響をMAモデルにより検討している<sup>3)</sup>。また、中野らは火災時において、建築基準法等に基づくデータに関する防火対策の信頼性が、現実よりもやや高めに設定されている可能性を指摘しており<sup>4)</sup>、設計時に想定された機能が現実に発揮されない可能性も考えられるが、これらの事象は、未だ十分に検討されているとは言い難い。

上記の背景を踏まえ、著者らは、これまでにポテンシャル型のMAモデルと数値流体解析を組合せた火災-避難連成シミュレーションの開発・検討を行ってきた<sup>5),6)</sup>。本稿では、既報にて開発した解析手法を用いて、設計時に想定されていない防火シャッター(防火SH)の不作動が、避難安全性に与える影響について検討した結果を報告する。

## 2. 解析手法の概要<sup>5),6)</sup>

### 2.1 解析フロー

本解析は、火災による熱や煙の拡散による状況変化を、予め数値解析により求めて置き、その結果を避難シミュレーションに反映する手順で行う。

火災の計算は、数値流体解析コードFDSを用いる<sup>7)</sup>。避難の計算には、ポテンシャル型のMAモデルに基づく解析

コードSimTreadを用いる<sup>8)</sup>。SimTreadでは、目的地までの距離に基づくポテンシャル値によって進路を決定する。

図1に、FDSからSimTreadへ結果を変換させる際のフローを示す。FDSでは、3次元空間の格子点において種々の時刻歴データが求まる。それに対し、SimTreadは2次元モデルであることから、FDSモデル上における任意の高さ $Z=z_i$ 平面における格子点を対象として、時刻 $t$ における任意の格子点 $k^i$ の出力値 $V_t^k$ を変換する。この時、出力値を変換する閾値を $V_{cr}$ として(1)式(閾値を二つとする場合は(2)式)を満たす場合には、(3)式で計算される面積 $A$ を可変障害物、可変速度領域(詳細は後述)として生成する。

$$V_t^k \geq V_{cr} \quad (V_t^k \leq V_{cr}) \quad (1)$$

$$V_{cr}^2 \geq V_t^k \geq V_{cr}^1 \quad (V_{cr}^2 \leq V_t^k \leq V_{cr}^1) \quad (2)$$

$$A = (dx_k + dx_{k+1}) \cdot (dy_k + dy_{k+1}) \quad (3)$$

ここに、 $dx_{k,k+1}$ 、 $dy_{k,k+1}$ は、格子点 $k^i$ を囲む格子幅とする。

If  $V_t^k \geq V_{cr}$  (or  $V_{cr} \leq V_{cr}$ ) in FDS, Variable Block (or Variable Velocity area) is modeled on SimTread.

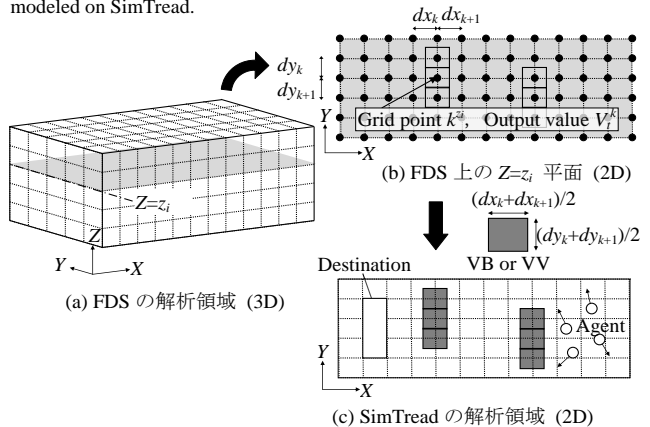


図1 FDSからSimTreadへの変換フロー<sup>5)</sup>

### 2.2 避難時の火災のモデル化方法

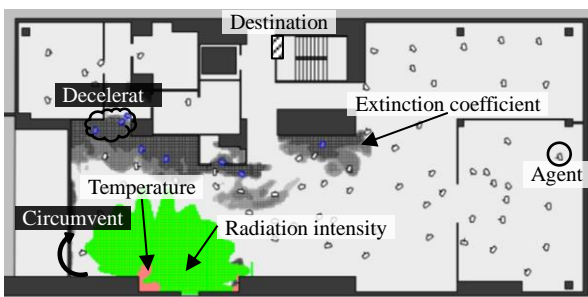
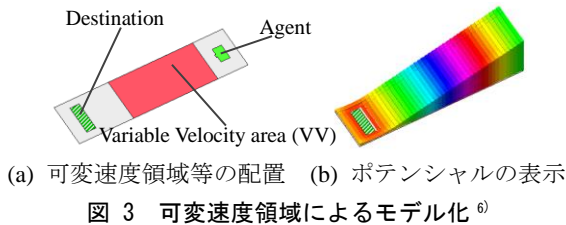
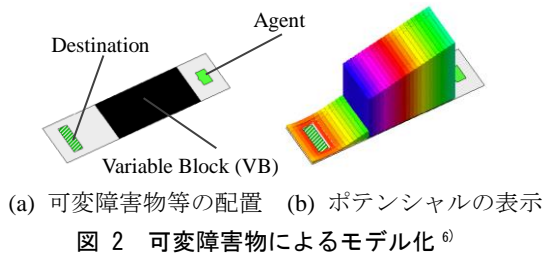
ここでは、避難シミュレーション上における、火災のモデル化方法を示す。

図2に可変障害物(以下、VB)を用いた場合のモデル化手法を示す。VB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(a)では、歩行エリアに対し、エージェントと目的地およびその中間にVBを設けている。同図(b)には、VB出現時のポテンシャルを示す。同図より、目的地に向かって、小さくなるポテンシャルが、障害物部分では、不連続に大きくなってい

る（通常、図 3 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ず、迂回するなど回避行動をとる。

図 3 に可変速度領域（以下、VV）を用いたモデル化手法を示す。同図(a)の配置は、図 2 と同様であるが、VB 部分を、VV に変更している。VV は、VB と同様に任意の時刻に出現可能であるが、領域内の歩行速度（あるいは初期速度に対する倍率）を予め与える。同図(b)には、VV 出現時のポテンシャルを示す。図より、目的地に向かって、ポテンシャルが滑らかに小さくなるよう分布している。VV では、出現前に生じている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、領域上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となる。

図 4 に、FDS より時々刻々得られた熱量（放射強度）および煙層温度を VB として、煙濃度（減光係数）を VV としてモデル化した場合の事例を示す<sup>6)</sup>。図より、それぞれ、前者はエージェントが障害物を迂回し、後者は速度が低下している様子（速度低下したエージェントは、青色に変化）がわかる。



### 3. 検討概要

#### 3.1 対象建物

図 5 に、検討対象とする避難シミュレーションモデルを示す。対象とした建物は、避難安全検証を用いて、設計された、平面寸法が約 120m×35m のオフィスビルであり、本

稿では、設計時の仕様を基にその基準階（用途は事務室）をモデル化している。設計時には、火災範囲を限定するため、図中に示す防火区画によって 3 分割（図中エリア 1~3）し、避難者が、防火区画を通過する際は、区画の中央にある防火扉（SD 1~4：幅 1.2m）を通る想定としている。特別避難階段は、両端に 1 ヶ所ずつの計 2 ヶ所に配置している。また、直天井とすることで、蓄煙部分を確保するとともに、梁型により煙の拡散を抑制する計画としている。

本稿では、設計時の想定外の事象として、上述の防火区画を行うために設置された、防火 SH の不作為が避難性状に及ぼす影響について検討する。検討時には、図 5 に示す通り、実際に使用される状況を想定し、キャビネットなど歩行性状に影響があると考えられる什器類を併せて配置している。出火場所は、最も厳しい条件を想定し、エリア 1 の北側避難階段に通じる出口付近を想定する。

#### 3.2 火災における解析条件 (FDS)

火災条件は、設計時と同様に事務室用途で内装が準不燃を想定し、平成 12 年建設省告示第 1441, 1442 号で規定された避難安全検証法（以下、告示法）に定める火災成長率 ( $\alpha = 0.113\text{kW/s}^2$ ) を用いて発熱速度  $Q$  を算定する。ただし、式(4)に示すように上限  $Q_{\max}$  を 19,900kW とする。

$$Q = \min(\alpha t^2, Q_{\max}) \quad (4)$$

FDS のメッシュ分割は、10cm 四方とする。防火 SH は、SH 近傍の天井部分に設置した煙感知器に連動して作動する設定とする。本検討では、一部の SH の不作為を想定するため、図 5 の SH 1 と 2 の双方が正常に作動する場合、SH 2 のみが正常に作動する場合の 2 ケース解析を行う。

#### 3.3 避難における解析条件 (SimTread)

次に、SimTread を用いた避難時の解析条件を示す。告示法による設計時の条件に対し、実際の使用状況を想定した上で、それを包絡するよう以下の通り設定する。

- ・在館者（エージェント）の数は、事務室を想定した在館者密度 ( $0.125 \text{人/m}^2$ ) を上回る 599 人とする。
  - ・エージェントの歩行速度は 1.3 m/s とする。
  - ・エージェントは、図 5 に示す目的地（南北の階段に通ずる出口）を既知とし、それぞれに対し距離に応じたポテンシャル（最短経路）に従い避難する（ただし、火災拡大に伴い、結果的に 1 方向避難となる）。
  - ・避難開始時間は、告示法で用いる避難開始時間を最遅避難時間と考え、エリア 1 は、居室避難時の条件に従い 74 秒 ( $2\sqrt{A_1}$  (秒)) とし、エリア 2 および 3 の在館者については、階避難検証時の避難開始時間の式に従い、それぞれ約 5 分 ( $2\sqrt{A_{\text{total}}}+180$  (秒)) とする。それに加え、実際にはエリア 1~3 の避難者が、ある程度段階的に避難することを想定し、それぞれ 74 秒, 103 秒 ( $2\sqrt{A_{1+2}}$ ), 129 秒 ( $2\sqrt{A_{\text{total}}}$ ) とするケースを併せて行う。
- ここに、 $A_i$ ：火災発生室の床面積とする。

解析ケース一覧を表 1 に示す。Case 1 は、防火 SH が正

常に作動するものとし、Case 2 は、SH 1 の不作動を想定する。Case 2 では、避難する際に最も厳しい条件を考え、不作動の SH 1 の直下は障害物等の影響で通行不可とし、避難者は防火扉 (SD 1, 2) のある部分のみ通行するものとする。更に、各条件に対し、エリア 2, 3 の避難開始時間が同一の場合、および段階的に避難開始時間を変える場合の 2 通りを考慮し、全 4 条件の解析を行う。表中に、SH の作動可否に加え、FDS で算定した SH 作動時間を併せて示す (Case 1 の SH 2 は、作動していない)。

FDS より SimTread に反映したパラメータの一覧を表 2 に示す。放射強度は、告示法における火源の拡大により有効出口幅が一定時間経過後 0 となる状況を再現するため、煙層温度および減光係数は、限界煙層高さ以下に煙が降下することによる影響を再現するため、既往の検討等<sup>2),9)</sup>を参考にそれぞれモデル化している。

#### 4. 検討結果

先述の火災-避難シミュレーションを用いて、防火 SH の不作動による、避難安全性への影響を検討する。

図 6~9 に、各条件の代表時刻における避難状況を示す。また、図 10(a),(b)に、防火扉 (SD 4) および南側出口 (Exit (S)) における通過人数の時間経過を示す。図 6 の Case 1-1 は、SH 1 が作動する直後の 205 秒、ならびに Case 2 で SH 2 が作動する直後の 311 秒の様子を、他の Case は 311 秒の様子のみを示している。図中の色分けは、図 4 に示したものと同様である。

はじめに防火 SH が正常に作動する、Case 1 (図 6,7) に着目する。図 6 より、SH 1 が正常に作動することで、205~311 秒に至るまで、エリア 1 の煙濃度や煙層温度が上昇しているものの、他のエリアは最遅避難時間として設定した初動時刻 (305 秒) を過ぎても、正常に避難が可能であり、防火 SH が避難上重要な機能を果たしていることがわかる。

図 10(b)より、Case 1 の南出口の通過人数を確認すると、300 秒付近以降、Case 1-2 では、時刻に応じて人数が比例的に増加するのに対し、Case 1-1 では一時停滞し、やや遅れて同様に増加し、初動時間が遅れるほど、避難完了時間が遅くなる傾向が窺える。

次に、一部の防火 SH の不作動を想定した Case 2 (図 8, 9) に着目する。Case 2 では、Case 2-1 のエリア 2 の避難開始時刻 (305 秒) 直後の 311 秒時点において、SH 1 が作動しない影響により、煙濃度が大きく上昇していることがわかる。一方、避難者に着目すると、Case 2-1 では、エリア 2 の避難者の多くが煙に晒されるのに対し、Case 2-2 においては、Case 1-2 と同様、既に南出口にほぼすべての避難者が滞留しており、SH の不作動による影響はあまりないことがわかる。これは、避難開始時刻が早いことに加え、直天井により煙の拡散を抑制していることの効果による

と考えられ、フラットな天井で煙が速く拡散する場合には、防火 SH の不作動の影響は大きくなると考えられる。

図 10 を見ると、同図(a)より、Case 2-1 では、避難開始直後に SH 2 が作動するためエリア 2 の避難者が SD 4 内を通過し、通過人数は 300~430 秒付近まで増加する。また、この時、歩行速度が低下した状態で通過するため、人数の増加率は、同図(b)の各条件に比べ小さい。次に、同図(b)の南出口の通過人数の経過を見ると、Case 2-1, 2-2 は、それぞれ Case 1-1, 1-2 とほぼ同様となっている。本モデルでは、南出口付近での滞留が全体の避難時間に及ぼす影響が支配的であるのに対し、Case 2-1 では、エリア 2 からの避難開始が遅く、同エリア内での歩行性状に大きな影響が生じるものの、SH 2 が作動し、滞留が生じるエリア 3 への煙の拡散が抑制されることで、全体避難時間への影響が小さかったものと考えられる。

#### 5. まとめ

本稿では、開発した火災-避難連成シミュレーションを用いて、防火 SH の不作動が避難性状に及ぼす影響について検討した。その結果、本条件では、防火 SH の不作動について、やむを得ず煙の侵入を許すエリアについては早期の避難を誘導する、直天井により煙の拡散を抑制し、滞留の大きいエリアへの煙の侵入を防止するなどの対策を有効に行うことが、避難安全上重要であることが示唆された。

#### [参考文献]

- 1) 国土交通省：地下街の安全避難対策ガイドライン，2014。
- 2) 天野和洋他：熱煙流動を考慮した避難シミュレータの開発，日本火災学会研究発表会梗概集，日本火災学会，pp. 182-183，2013. 6
- 3) 西野智研他：火災気流を考慮した市街地火災避難モデルの地震動，火災および津波の複合災害への拡張，日本建築学会計画系論文集，日本建築学会，第 79 巻，第 699 号，pp. 1079-1088，2014. 5
- 4) 中野美奈研他：統計調査に基づく防火対策の信頼度に関する研究，日本建築学会計画系論文集，日本建築学会，第 525 号，pp. 1-7，1999. 11
- 5) 東城峻樹他：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 1-2)，人工知能学会大会論文集，日本人工知能学会，2016，2017。
- 6) 東城峻樹他：ポテンシャル型のマルチエージェントシステムを用いた火災-避難連成シミュレーション，日本建築学会学術大会梗概集，防火，pp. 385-386，2017. 7
- 7) National Institute of Standards and Technology: Fire Dynamics Simulator (Ver. 6) User's Guide, NIST, 2015.
- 8) 木村謙他：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，第 74，第 636 号，pp. 371-377，2009. 2
- 9) 神忠久：煙の中での歩行速度について，火災，vol. 25, No. 2，pp. 44-48，1975

\*1 株式会社竹中工務店

\*2 エーアンドエー株式会社

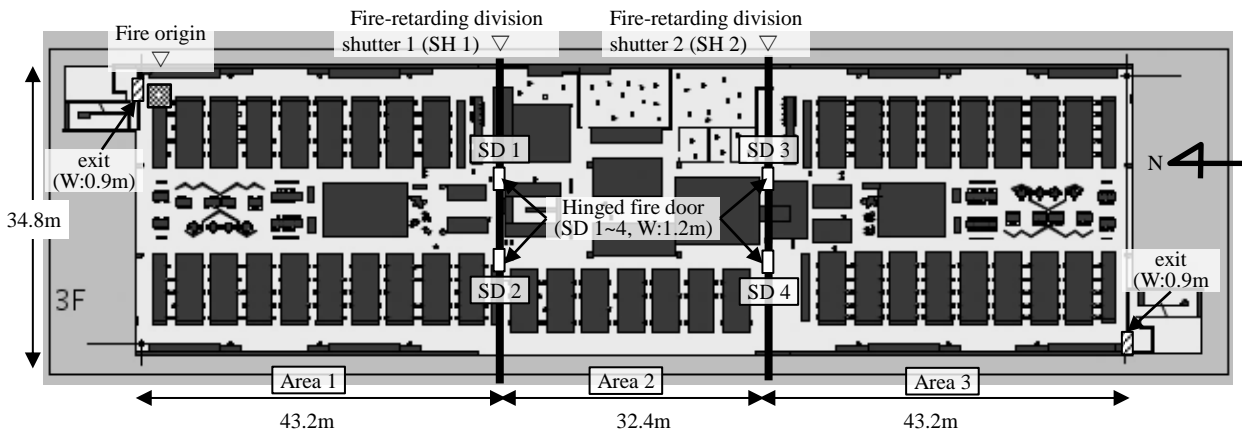


図 5 検討モデル

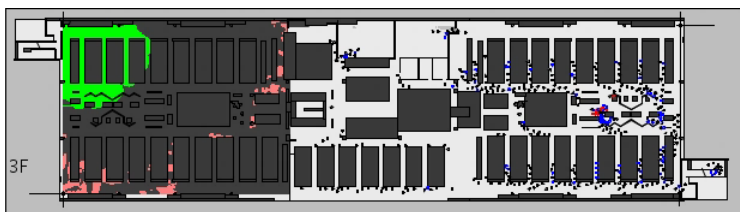
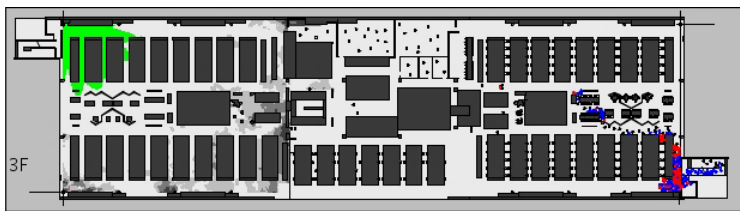


図 6 Case 1-1 の避難状況 (上:  $t = 205\text{sec}$ , 下:  $t = 311\text{sec}$ )



図 7 Case 1-2 の避難状況 ( $t = 311\text{sec}$ )



図 8 Case 2-1 の避難状況 ( $t = 311\text{sec}$ )



図 9 Case 2-2 の避難状況 ( $t = 311\text{sec}$ )

表 1 解析ケース一覧

Case	Shutter (actuation time (sec))		$T_{\text{start}}$ (sec)			
	1	2	Area			
1-1	Nomal (204)	Nomal (-)	74	1	2	3
1-2	(204)	(-)		103	129	305
2-1	Fault	Nomal (310)		305		
2-2				103	129	

表 2 変換するパラメーター一覧

Parameter	Criterion	Conv. height	Method
Radiation intensity	$U \geq 3$ [ $\text{kW/m}^2$ ]	0.5m	VB
Temperature	$T \geq 50$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1.8m	VB
Light extinction coefficient	$K \geq 0.25 \sim 1.0$ [ $1/\text{m}$ ]		VV*

\*  $V_{\text{max}} = 1.0\text{m/s}$  ( $0.5 > K \geq 0.25$ ),  $0.8\text{m}$  ( $1.0 > K \geq 0.5$ ),  $0.3\text{m}$  ( $K \geq 1.0$ )

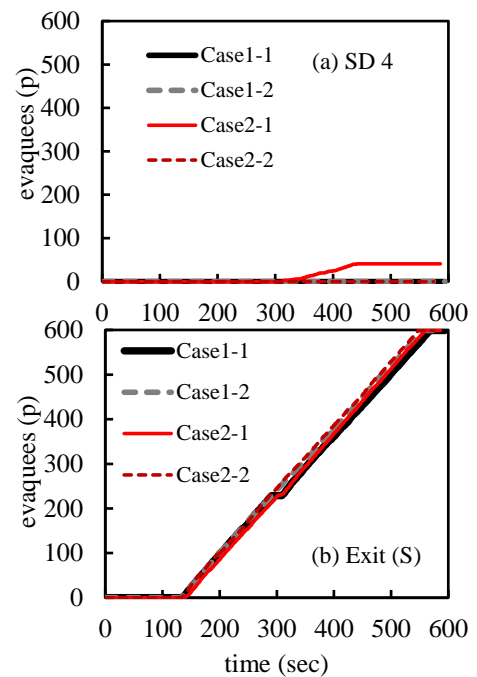


図 10 防火扉および出口の通過人