

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

A study on applicability of a potential-based multi-agent system for evacuation simulation coupled with disasters

東城峻樹^{*1}
Takaki Tojo

城明秀^{*1}
Akihide Jo

新谷祐介^{*1}
Yusuke Shintani

中村尚弘^{*2}
Naohiro Nakamura

井上修作^{*1}
Shusaku Inoue

鈴木琢也^{*1}
Takuya Suzuki

中村壮志^{*1}
Soshi Nakamura

木村謙^{*3}
Takeshi Kimura

^{*1} 竹中工務店
Takenaka Corp.

^{*2} 広島大学
Hiroshima Univ.

^{*3} エーアンドエー
A&A Co.

In railway station vicinities where redevelopment accelerates, evacuation planning under disasters is an important problem because there are complicated underground mall and others. Evacuation simulation using a potential-based multi-agent system is proposed as one of refuge countermeasure technique. However, specialized knowledge about applicability under the disaster situations which vary from hour to hour is insufficient. In this paper, the applicability of the potential-based multi agent system under disasters is examined by conducting evacuation simulation coupled with fire disaster which analyzed by using a physics model called computation fluid dynamics.

1. はじめに

近年、都市再開発が進む駅周辺の複合施設などにおいては、地下街が複雑に入り組むなど地震や火災などの災害時における避難計画および避難対策技術の整備が重要な課題となっている。災害時の避難計画および対策の立案にあたっては、あらかじめ災害時の人の行動を予測しておくことで、具体的な避難時間や、避難計画上障害となりやすいエリアの把握、有効な一時避難場所を確保することが必須であり、建築設計においても、適切な手法を用いてこれらの検討を行うことが求められている。

災害時の避難行動の予測に際し、マルチエージェント型の避難行動システム(以後、MAS)を用いたシミュレーション技術は有効な設計手法の一つとして、実設計においても使用されてきている。MASについては、これまで複数の手法が提案されており、例えば、個別要素法を用いた清野らの手法^[清野 1996]、セルラ・オートマトンを群衆行動シミュレーションに用いた近田らの手法^[近田 2000]、ポテンシャルを用いた木村らの手法^[木村 2009]などが挙げられる。

一方で、これらの MAS を用いて避難シミュレーションを行う際には、想定される災害のモデル化および災害が人の避難行動に及ぼす影響、すなわち災害-避難行動が連成する現象をどう取り込むかということも、避難行動予測手法の精度向上という点では、非常に重要な要素であるが、現状では、災害時のシナリオを精度良くかつ容易にモデル化する方法は確立されていない。そのため、実務設計では、避難行動の検討時に設計者判断に基づき災害状況をトップダウン的に与えざるを得ないことも多く、実災害時に想定されるような時々刻々変化する災害状況下での避難シミュレーション手法を構築することは急務であると言える。

近年は、時々刻々変化する実災害を避難シミュレーション上

に考慮する観点から、汎用解析コードなどを用いて津波あるいは火災といった種々の災害についてあらかじめ数値計算を行い、避難シミュレーションと重ね合わせて結果を表示することで、時刻歴に応じた避難状況を可視化する試みが報告されている^{例えは[渡辺 2002]}。さらに、数値計算より得られた災害結果に対し人の行動ルールを定義し、災害が人の行動に与える影響を考慮した研究例が報告されてきている^{例えは[井田 2015]}。

しかし前述の検討においては、各種の災害に応じて、それぞれ異なる行動ルールを定義する必要があり、モデル構築の簡便性という観点からみると、災害の種類によらず統一的にモデル化できるような仕組みが整備されることが望ましい。

そこで、本研究では、事前に行った災害シミュレーションの数値計算結果に対し、木村らが開発した避難解析コード SimTread^[木村 2009](ポテンシャル型の MAS)における障害物のモデル化手法を適用し、比較的簡便に災害結果を避難シミュレーション上に反映する方法を提案する。ここで、災害については、まずは火災(住宅など建物またはその収容物が焼損する状態を指す)を想定し、汎用流体解析コード FDS^[NIST 2015]による計算結果を用いる。さらに、提案手法を用いて、火災-避難の連成シミュレーションを行い、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様子を確認することで、汎用的な災害-避難連成シミュレーションの確立に向けたポテンシャル型の MAS の適用性を検討する。以降では、提案手法および得られた結果について報告する。

2. 火災-避難連成シミュレーション手法の構築

ここでは、まず火災解析、避難解析に用いられる計算手法の概要と避難解析上における障害物のモデル化手法を示し、次にそれぞれの連成方法について説明する。

2.1 火災解析の概要

火災の計算には、FDS(Fire Dynamics Simulator)と呼ばれる数値流体力学(CFD)を用いた汎用解析コードを使用する。

連絡先: 東城峻樹, 竹中工務店, 千葉県印西市大塚 1-5-1, 0476-77-1384, 0476-47-6460, toujou.takaki@takenaka.co.jp

FDS は、米国商務省の標準技術研究所 (NIST: National Institute of Standards and Technology) が公開している火災を対象としたオープンソースのソフトウェアであり、計算精度についても他のオープンソースとの比較などにより検証されてきた実績がある^{例えば[北風 2012]}。FDS では低マッハ数近似を仮定した圧縮性の Navier-Stokes 方程式、質量保存式、エネルギー保存式、化学種保存式を解いており、空間微分項の離散化には 2 次精度中心差分スキーム、対流項には局所クーラン数をパラメータとした風上差分スキームが用いられる。時間積分は 2 次精度の予測子・修正子法による陽解法を使用しており、計算格子は矩形の直交格子を採用している。

2.2 避難解析および障害物のモデル化の概要

避難行動の計算には、汎用解析コード SimTread を用いる。SimTread で採用されているポテンシャルに基づく避難行動の計算方法および障害物のモデル化手法について示す。

SimTread では、目的地までの距離をポテンシャルの算定に使用している。ポテンシャルは、目的地の値を 0 としてスタートし、周囲のメッシュを距離に応じて埋めてゆく方法で計算する。例えば図 1(a)の状態のポテンシャルを表示すると、図 1(b)のように、目的地のポテンシャルが一番低く、離れるに従ってポテンシャルが高くなる。この時、エージェントは、ポテンシャルの高い方から低い方へ移動する。

次に、災害解析を避難シミュレーション上に反映させる時に用いる可変障害物のモデル化方法について説明する。例えば、火災時においては、火災の燃え広がりにより、ある時刻において、本来通行可能であった領域を、人が回避・迂回しようとする状況が発生する。前述の状態は、災害の発生により、その領域のポテンシャルが通常に比べ、一時的に高くなる状態を意味しており、これを解析空間上に任意の時刻に発現、消失が可能な可変障害物としてモデル化する。具体的には、図 1(a)で設定した可変障害物の領域には、ある時刻で図 1(b)のように、人が外から領域内に入らないよう、周囲と不連続な高さのポテンシャルが生成される。また、領域内で勾配を有するのは、発生した段階で内部にいるエージェントが外へ出るようにするためである。

なお、火災などの災害が拡散していく状況と考えた場合、図

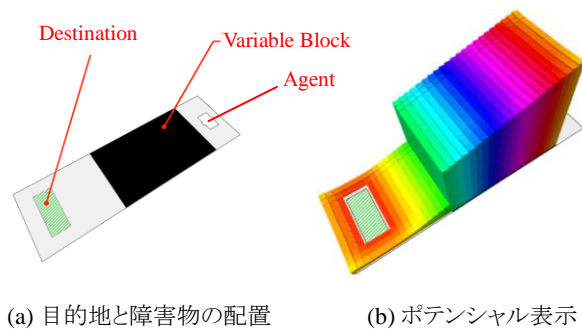


図 1 障害物のモデル化手法の概念図

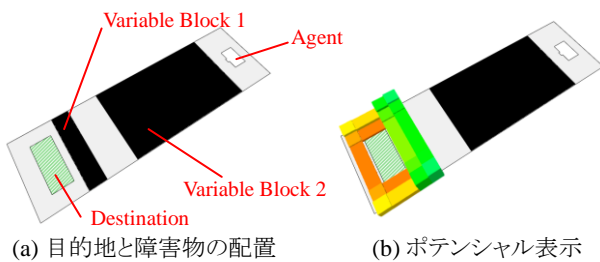


図 2 二重に可変障害物をモデル化する場合の例

2(a)のように目的地までの間に、災害状況に応じて可変障害物が複数現れることも想定される。この時、目的地に近い可変障害物 1 の後方に、可変障害物 2 が後から発現した場合には、図 2(b)のように、目的地からのポテンシャルが閉ざされ、可変障害物 2 の領域には、ポテンシャルが発生せず、この領域内をエージェントが通行している場合には、行動ができなくなる。ただし、可変障害物 2 が可変障害物 1 に隣接する場合には、ポテンシャルは生成されることには、留意が必要となる。

2.3 火災-避難の連成方法

FDS による解析結果を避難解析コード SimTread 上に連成させる方法を示す。具体的には、FDS における解析出力結果を SimTread 上に読み込めるように、2.2 で示した可変障害物としてデータ形式を変換させることになる。以下では、図 3 に示した変換手順について説明する。

FDS では、3 次元空間における各格子点において、解析より得られた種々のデータを時刻歴で出力できる。一方、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 $Z=z_i$ で切断した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 の出力値 T_k^t を変換することを考える。この時、出力値を変換するか否かの判定値を T_{cr} として(1)式を満たす場合には、(2)式で計算される面積 A の可変障害物を生成する方法を採用する。

$$T_k^t \geq T_{cr} \text{ or } T_k^t \leq T_{cr} \quad (1)$$

$$A = (dx_k + dx_{k+1}) \cdot (dy_k + dy_{k+1}) / 4 \quad (2)$$

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

なお、(1)式において、 T_{cr} 以上および以下の双方があるのは、例えば温度に対し判定値を設定する場合は、一定温度を超える時に、可変障害物として発現させ、視認距離を設定する場合には、逆に一定の距離を下回る場合に発現させるなど、選択する出力の種類に応じて、変更されるからである。また、災害の進行に応じて、格子点が(1)式を満たさなくなる場合があるため、その瞬間に消失することも可能としている。切断高さ $Z=z_i$ についても設定する判定値の種類に応じて、必要な断面を一つあるいは複数決めることになる。

If $T_k^t \geq T_{cr}$ (or $\leq T_{cr}$) in FDS, Variable Block is modeled on SimTread.

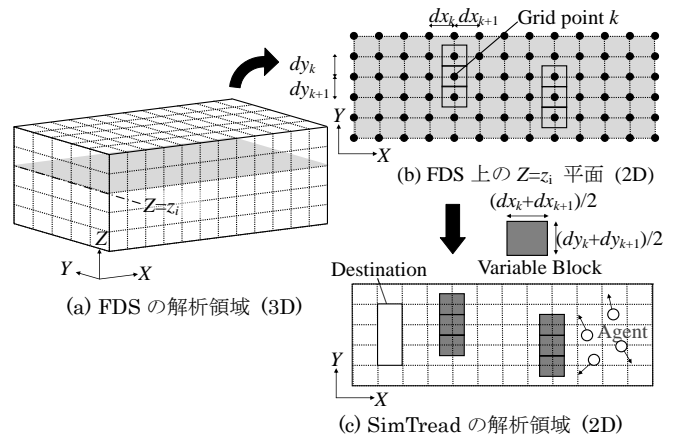


図 3 FDS から SimTread への変換方法

3. 建物モデルによる検討

小規模な建物モデルを作成し、前述した火災-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場合の MAS の適用性を検討する。

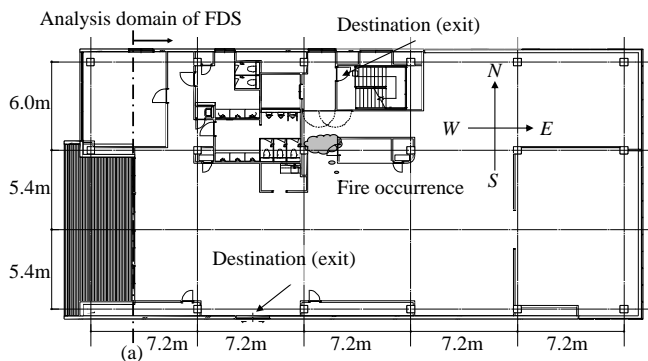


図4 建物モデル概要

3.1 解析モデル

解析に用いた建物モデルの概要を図4に示す。建物は、平面規模が床面積約600m²、天井高さが2.8mの小規模な事務所ビル1フロアを対象とした。避難時の出口(目的地)は、南北方向に2か所とし、火災の出火場所は、中央上部の通路付近としている。

3.2 解析条件

(1) FDS

FDSにおける火源の解析条件は、以下とする。

本検討では、発熱速度(Heat Release Rate)と呼ばれている単位時間あたりの放出される熱量を入力条件としており、次式で評価する。

$$Q = \min(\alpha t^2, Q_{\max}) \quad (3)$$

ここで、 α : 火災成長率(=0.05kW/s²)、 Q_{\max} : 最大発熱速度(=1000kW)としている。

解析領域は図4のライン(a)より東側としている。FDSの解析モデルを図5に、上記の入力条件および解析で得られた、発熱速度の時刻歴を図6に示す。

(2) SimTread

SimTreadにおける解析条件を、以降に示す。

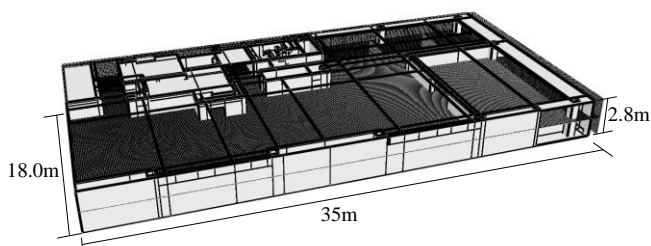


図5 解析モデル (FDS)

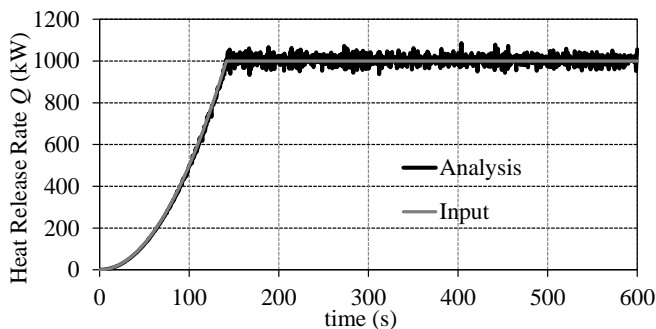


図6 発熱速度の時刻歴

- エージェントの数は、68人(=0.125A_{eff})とし^[日本建築センター 1995]、フロア全体に配置する。
- エージェントの歩行速度は1.3 m/sする^[日本建築センター 1995]。
- エージェントは、目的地(避難出口)を既知とし、それぞれの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49秒(=2√A_f)後とし^[日本建築センター 1995]、エージェントは、避難開始時刻まではその場で待機する。
- 解析の終了時間は10分とする。

ここに、A_{eff}: 居室として有効な床面積、A_f: 火災発生空間の床面積である。SimTreadの解析モデルを図7に示す。

FDSにより得られた火災の進行状況を可変障害物としてモデル化する判定値は、格子点における温度(Case 1)と視認距離(Case 2)の二つの場合を想定し、判定する際の格子点高さは、それぞれ1m、1.8mとした。障害物のモデル化については、判定値を満たした時刻に発現し、満たさなくなると消失する場合と、一度発現したら消失しないものとする場合の2つを実施する。設定した解析ケースを、表1に示す。なお、Case 0はFDSの結果を考慮しない場合を示す。



図7 解析モデル (SimTread)

表1 解析ケースと火災解析反映時の判定値

CASE	Criterion		Status of Variable Block*
	Relation of T_k^i and T_{cr}	Height	
0			
1-1	$T_k^i \geq 50 [^\circ\text{C}]$	1.0m	Disappear
1-2			Not disappear
2-1	$T_k^i \leq 20 [m]$	1.8m	Disappear
2-2			Not disappear

*When the value of $T_k^i < 50 [^\circ\text{C}]$ in case 1-1, 1-2, $T_k^i > 20 [m]$ in case 2-1, 2-2, whether Variable Block is to disappear or not.

3.3 解析結果

表1に示す解析ケースについて火災-避難連成シミュレーションを実施した。表2に各ケースにおける、避難行動の比較を示す。また、図8に各解析ケースにおける避難開始から76秒経過時点のスナップショットを、同時刻におけるFDSの温度および視認性コンター図と併せて示す。

表2より、火災の影響を考慮しないCase 0に比べて、影響を考慮する場合はそれぞれ、避難完了までの時間が増えており、エージェントの避難行動に影響が出ていることがわかる。これは、図8に示すように、エージェントが各時刻の状況に応じて火災(高温、低視認エリア)を迂回して、目的地に向かうためである。

温度を判定値としたCase 1-1と1-2に着目すると、避難開始76秒時点での避難未完了人数はほぼ同じであるが、避難完了時刻には約20秒の差が出ている。これはCase 1-1(図8(b))では、温度上昇および下降に対し、障害物の発現と消失を行うよう精緻にモデル化したことで、北側の目的地に関するポテンシ

ヤル変化に応じて、エージェントが周囲の行き来を繰り返すため時間に差が出たものである。また、視認性を判定値とした Case 2-1 と 2-2 はともに、避難未完了者が多数出る結果となった。これは、南北両側の出口が障害物で埋まってしまうためであり、実際の火災時において、煙に巻かれて出口が確認できない状態をやや極端に再現したことに相当すると考えられる。

以上より、ポテンシャルに基づく MAS を用いて火災影響を考慮した避難行動が概ね適切かつ簡便に評価可能と考えられる。

表 2 各解析ケースにおける避難行動の比較

Case	Number of people*		Evacuation time of all agents
	76 (s)	600(s)	
0	0	0	76(s)
1-1	12	0	116(s)
1-2	11	0	94(s)
2-1	56	50	Not completed
2-2	65	65	Not completed

*Those who still remained at 76 & 600 (s) after evacuation starts.

4. まとめ

本報では、ポテンシャル型の MAS を用いて、災害-避難連成シミュレーションが統一的な手法で評価できる可能性を示した。しかし、比較的安全な目的地に迂回せず右往左往するなど合理性を欠く行動や、全ての目的地が消失する場合の行動評価などについて課題が確認されたため、今後も検討していきたい。

参考文献

- [清野 1996] 清野純史ほか: 被災時の群衆避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について, 土木学会論文集, 土木学会, 1996.
- [近田 2000] 近田康夫ほか: CA を用いた歩行シミュレーションモデルの構築, 土木情報システム論文集, 土木学会, 2000.
- [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.
- [渡辺 2002] 渡辺真知子ほか: バーチャルリアリティ空間を利用した市街地の総合環境評価システム, 大林組技術研究所報, 大林組, 2002.
- [井田 2015] 井田卓造: 階段シミュレータ および 人・熱・煙連成避難シミュレータ (PSTARS), 日本火災学会誌 65(3), 日本火災学会, 2015.
- [NIST 2015] National Institute of Standards and Technology: Fire Dynamics Simulator (Ver. 6) User's Guide, NIST, 2015.
- [北風 2012] 北風慎吾ほか: オープンソース CFD による火災ブルームの数値計算, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 2012.
- [日本建築センター 1995] 日本建築センター: 新・建築防災計画指針, 1995.

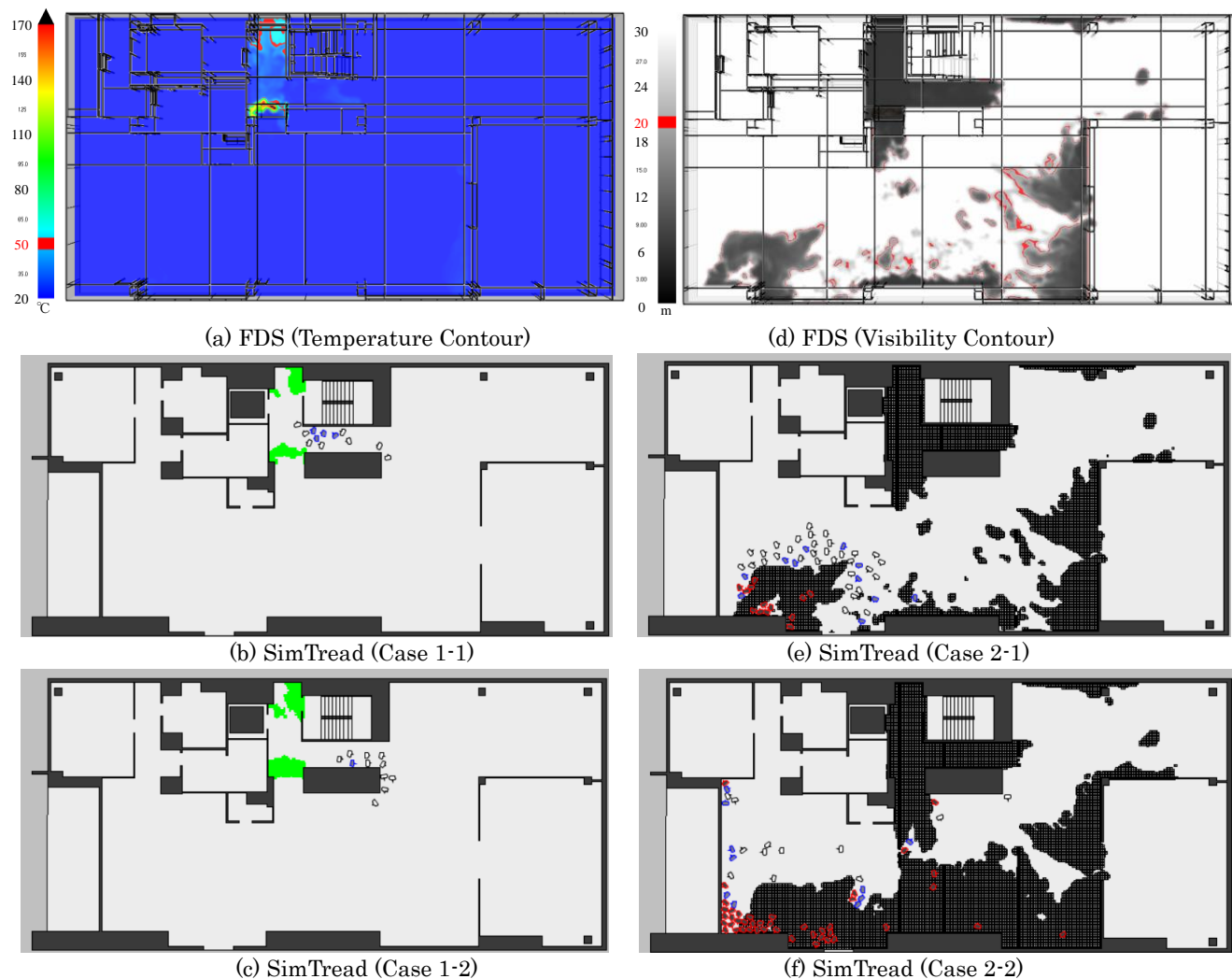


図 8 避難開始から 76 秒後における解析結果