

津波群集避難の創発解析のためのMASの利用 方法に関する基礎的検討

田上直樹¹, 堀宗朗², マッデゲデラ・ラリス³, 市村強⁴, 田中聖三⁵,

¹大学院生, 東京大学社会基盤工学専攻,

E-mail: tagami-n@eri.u-tokyo.ac.jp

²教授, 東京大学地震研究所, 文京区弥生 1-1-1, 113-0032)

E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

³准教授, 東京大学地震研究所, 文京区弥生 1-1-1, 113-0032)

E-mail: lalith@eri.u-tokyo.ac.jp

⁴准教授, 東京大学地震研究所, 文京区弥生 1-1-1, 113-0032)

E-mail: ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp

⁵特任助教, 東京大学地震研究所, 文京区弥生 1-1-1, 113-0032)

E-mail: stanaka@eri.u-tokyo.ac.jp

さまざまな事態を想定した群集避難の社会実験を繰り返し実行することは不可能である。このため、群集避難の数値解析が、円滑化を検討する手法となっている。本研究では、津波避難の円滑化を図ることを目的に、MASを使った創発解析の利用方法を提案した。この方法は、所定の地震・津波のシナリオ下での避難状況を把握することと、遅延があった場合にその遅延を引き起こした要因を抽出することの二つを目的とする。2011年東日本大震災の事例を基に、津波避難シミュレーションを行い、避難状況の把握および遅延を引き起こした要因の抽出を試み、創発解析の検討を行った。

Key Words: multi-agent simulation, emergence, Great East Japan Earthquake

1. はじめに

津波による人的災害軽減のための、避難の円滑化の重要性は論じる必要もない。その一方で、そもそも地震と比べても津波は低頻度であるため、過去の群集避難の事例は決して多くない。さらに、津波の街区侵入もさまざまな場合がある他、避難人数・経路は季節・時間帯等によって異なる¹⁾²⁾³⁾。さまざまな事態を想定した群集避難の社会実験を繰り返し実行することは不可能である⁴⁾。このため、群集避難の数値解析⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾が、円滑化を検討する手法となっている。

群集避難解析の難しさは、群集の相互作用の結果、群集全体の避難挙動が一人の人間の避難挙動の単純な総和にとどまらない点にある⁹⁾。一般に、部分の性質の総和とはならない性質が全体に現れることは創発(emergence)と呼ばれる。群集避難解析ではこの創発を正しく解析しなければならない。創発の解析、すなわち、創発解析が必要なのである。なお、交通解析¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾は創発解析の典型例であり、土木工学の分野で創発解析は決して新規な解析ではない。

数値解析の分野では、マルチエージェントシステム(Multi-Agent System, MAS)が創発解析に適している。MASは人・組織等を模擬したエージェントと都市等のモデルであるエンバイロンメントから構成され、エー

ジェント同士やエージェントとエンバイロンメントとの相互作用を使って、創発を再現・予測することを一つの目的としている。

著者のグループでは、群集避難の創発解析に特化したMASの開発を進めている。これはKISS原理(“Keep It Simple, Stupid”)¹⁴⁾を逸脱した複雑なコードであり、大規模並列計算も実行可能である。このようなMASを使った群集避難の創発解析は新しい研究である。コード開発が一段落した現在、津波避難の円滑化を検討する手法とするために、MASの利用方法を確立することが課題となっている。他の解析手法と比較してより有効な創発解析が可能なMASの特徴を活かした利用方法を考案することが重要である。

以上を背景に、本論文は、群集避難の創発解析の具体的な利用方法を提案する。創発解析は群集避難の円滑化を目的とし、創発解析の解析手法としてMASを用いる。利用方法の概略は、最初に特定の地震・津波のシナリオを設定した上で設定避難状況を把握し、ついで避難の円滑化を阻害する要因を抽出する、というものである。本論文は以下のように構成される。第2章と第3章で、本論文で提案する群集避難の創発解析を抽出しと創発解析に使われるMASを説明する。第4章で、実際の避難事例を基に、提案された創発解析の利用方

法に従って状況把握と要因抽出を行う。この結果から利用方法の実効性を議論する。第5章で結論を述べる。

2. 群集避難の創発解析

一般に、群集避難解析から推定される避難時間は、個々の避難者モデルの避難時間の単純な総和とは異なるものとなる。この意味で通常の群集避難解析は創発解析と考えることができる。比較的単純な避難者モデルを使った解析でも、適切なモデルパラメータを設定することで、避難者モデルの相互作用によって創発を精度よく再現することができる。しかし、単純な数値解析では、創発の予測の精度は設定するモデルパラメータの良否に依存してしまう。したがって、予測を目的とする創発解析では、モデルパラメータの設定を極力排した高度な数値解析手法が必要となるのである。

避難の円滑化を検討する手法としての群集避難の創発解析は、津波侵入や避難人数等のさまざまな事態を想定したシミュレーション¹⁵⁾が可能である。このシミュレーションの結果は、想定された事態での避難状況を把握することに利用できる。もし避難状況が円滑でない場合、すなわち、渋滞が発生した箇所がある場合、渋滞を引き起こした要因を抽出することができる。要因とは、例えば、一つの避難箇所への集中¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾である。この避難箇所集中した避難を分散させることで渋滞が緩和されるのであれば、この避難箇所への集中が円滑化を阻害した要因として抽出されたことになる。

状況把握と要因抽出は、群集避難の予測が必須であり、前述のように、モデルパラメータの設定を極力排した高度な数値解析手法が必要となるのである。この数値解析手法の候補がMASである。数値解析手法が高度になればなるほど、モデルパラメータの数は多くなる。しかし、MASのモデルパラメータの多くは、さまざまな事態で共通して適用できる値を持つ。すなわち、事態に応じたモデルパラメータの修正が不要なのである。事態によってモデルパラメータの修正が必要な単純な数値解析手法と異なり、MASは多様な事態のシミュレーションを実行することができる。

本論文では、群集避難の創発解析のMASに人-自動車相互作用を実装した。この相互作用は、モデルパラメータの種類・数が多いものの、一度設定すると修正の必要がないというMASの特徴を示す好例である。次章で説明するように、本論文で利用するMASは、人と自動車に自律性の高いモデルを使っている。自律性を高くするためには多数のモデルパラメータが必要であるが、このモデルパラメータにはさまざまな事態に適用できるような固有の値を選ぶことができるのである。自律性が高いとはいえ、MASが、個々の人や自動車の

行動を正確に予測することはできない。しかし、群集全体を対象とする創発解析には、他の数値解析手法より優位である点は強調したい。

3. 創発解析のためのMAS

群集避難を対象とするMASは、人・自動車を模擬したエージェントと、道路ネットワークを模擬したエンバイロメントから構成される。創発解析のためには、他のエージェントやエンバイロメントとの相互作用を合理的にモデル化することが重要である。以下、開発されたMASの特徴を整理する。

(1) エージェント

本論文のMASのエージェントは、速度・判断等の能力に関するデータと、見て・考えて・行動するという3つの機能¹⁹⁾を持つ。個々のエージェントは、能力に応じて各々独自の避難をすることになる。エージェントとエンバイロメントとの相互作用は、勾配によって速度が変わる他、曲がり角を見た場合、最短経路を考えて角を曲がることもある。人とのエージェントの相互作用は衝突回避を目的としている。他のエージェントが影響範囲内に入ったことを見ると、Optimal Reciprocal Collision Avoidance(ORCA)²⁰⁾に従って最適な方向を考えて、必要があれば減速しながら移動する。影響範囲はパラメータである。ORCAは衝突回避の標準的なアルゴリズムであるが、影響範囲内に多数のエージェントがいる場合でも最適な方向を決めることができるよう工夫を加えている。

人と自動車のエージェントの相互作用も衝突回避を目的としている。上記と同様、影響範囲内に他のエージェントが入るのを見た時、ORCAに従って最適な方向を考え、必要があれば減速して移動する。人のエージェントが自動車のエージェントとの衝突回避をするよりも、自動車のエージェントが人のエージェントとの衝突回避をするほうを重視しており、自動車のエージェントの影響範囲は大きく、また、減速する場合も多い。この結果、人のエージェントがなお、人と自動車のエージェントの相互作用は、歩道と車道が区別されていない狭い道路に対応したエンバイロメントとしている。

(2) エンバイロメント

道路ネットワークを模擬するエンバイロメントは、道路ネットワークの幾何形状に応じて複雑になる。このため、街区図等の利用できるデジタルデータから、エンバイロメントが自動構築されることが望ましい。本論文のMASはこの点を重視し、自動構築のモデュー

ルを開発している。なお、街区図等を含むデジタルデータはたき多様なものがあるが、データの主要な利用は図示であるため、道路一本一本には始点・終点の位置と幅程度のデータしか与えられていない。道路の接続情報はなく、ネットワークとすることは容易ではない。

図示できるという街区図等のデジタルデータの特徴を利用し、本論文のMASでは、エンバィロメントをラスターデータとして構築している。すなわち、対象地域を共通の寸法の格子で分割し、道路に含まれる格子には0、含まれない格子には1とする（正確にはbooleanのtrueとfalseを使う）。道路の両端の線が与えられるため、含む/含まないの判定には塗りつぶしのアルゴリズムを使うことができる。1m程度の寸法の格子を使うことで、幅員や接続がさまざまな道路群の形状を正確に現したエンバィロメントを構築することができる。

本論文のMASでは、ラスターモデルからベクトルモデルのエンバィロメントを自動構築する。ラスターモデルは道路群の形状を表わすことには適しているが、始点・中間点・終点から構成される避難経路を表わすことには適していない。また、対象領域の面積に比例して格子数が増えてしまう。ベクトルデータのエンバィロメントでは、道路一本一本は二つの節点データで与える²¹⁾。節点は位置データであり、個々の道路は節点のIDを二つ持つことになる。ラスターデータからベクトルモデルの自動変換は、シンニングのアルゴリズムが基となっている。

4. 創発解析の試行的利用

2011年東日本大震災の宮城県石巻市門脇町・南浜町での津波避難の事例を対象にMASを使った津波避難の創発解析を行う。この創発解析は、対象地域の津波避難の状況把握と、円滑な避難を阻害する要因抽出に利用される。状況把握は、「混雑が発生するか否か」、「発生する場合、どこにどの時点か」を調べる。要因抽出は、この混雑を引き起こす要因（例えば、一つの避難場所への過度の集中）を探す。

(1) 状況把握

東日本大震災を考慮し、昼間時に主に在宅中の住民が徒歩ないし自動車を使って所定の避難場所へ避難するシナリオを考える。外出先からの避難、通過交通と集団避難も含む。このシナリオに基づき、MASのエージェントは、1) 徒歩と自動車を使う住民に対応した人と自動車のエージェント、2) 外出先から自動車避難する住民に対応した自動車のエージェント、3) 住民外



図-1 MASで設定されたエンバィロメントの概要

出者の車両一時帰宅避難、4) 通過交通に対応した自動車のエージェント、5) 徒歩の集団避難に対応した人のエージェント、とする（表-(1)参照）。エージェントの総計は4,890である。対象地域の道路ネットワークのエンバィロメントを示す（図-1参照）。避難経路を指定する際は、ネットワークをグラフを使ってモデル化し、相互作用を扱う際は、道路空間をグリッドとしてモデル化する。

津波避難の創発解析の状況把握では、1) 全エージェントが所定の避難場所へ移動する避難完了の時間推移と、2) エージェント密度（エンバィロメントの単位面積の当たりのエージェント数）が限界値を超えた渋滞発生、を調べる。避難完了の時間推移は、該当地区の避難状況全般を示す指標になる。エージェントの相互作用による渋滞がなく、群集避難は各エージェントが単独で避難する場合の重ね合わせとなるため、時間推移は単調増加の滑らかな曲線となる。渋滞が生じて、時間が短く局所的な場合は、時間推移がこの曲線からずれる度合いは小さい。逆に、渋滞の時間が長く広い場所となる場合、時間推移はこの曲線からずれることになる。

図-2に避難完了の時間推移を示す。各エージェントの避難距離・避難速度・遅延時間から計算される渋滞が全く無い場合の時間推移を合わせて示す。若干のずれがあるため、無視できない規模の渋滞が発生したことがわかる。MASのシミュレーションでは2箇所の渋滞が確認された（図-3参照）。1箇所目は自動車のエージェントが地震発生から約10分後に引き起こしたものである。2箇所目は集団避難の人のエージェントが地震発生から約20分後に引き起こしたものである。表-2に避難場所別の避難完了時間を示す。避難完了時間の最大値は人のエージェントの63分に対して、自動車のエージェントは倍の120分である。

属性	シナリオ	発生地点・エリア	徒歩人数・車台数	避難場所	移動速度
1	住民の徒歩避難	エリア1-5	1,450人	直近の高台	70% 1.3m/s 30% 1.0m/s
2	住民の車両避難	エリア1-5	1,230台	車起終点2,3に各50%の割合で避難	40km/h
3	住民外出者の車両一時帰宅避難	エリア1-5	370台	車起終点2,3に各50%の割合で避難	40km/h
4	通過車両の避難	車起終点1	60台	車起終点4	40km/h
		車起終点4	240台	車起終点1	
		車起終点5	240台	車起終点4	
5	大事業所からの徒歩避難	大事業所避難開始点	1,300人	高台6	1.3m/s

表-1 MAS で設定されたエージェントの特性

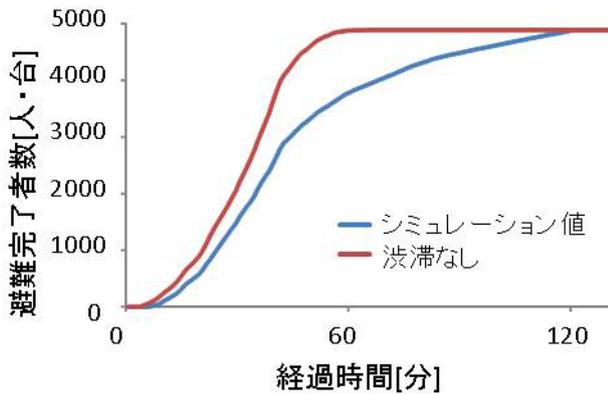


図-2 避難完了の推移

避難手段	避難場所	避難者数・台数	避難完了時間
徒歩	高台1	66人	55分
	高台2	315人	59分
	高台3	560人	63分
	高台4	303人	57分
	高台5	122人	57分
	高台6	1,384人	54分
車	車起終点1	240台	59分
	車起終点2	791台	120分
	車起終点3	809台	120分
	車起終点4	300台	118分

表-2 避難完了時間

上記の結果から、無視できない渋滞が発生した避難状況であることが結論される。自動車のエージェントの渋滞は、3方向から自動車の流れ込む交差点であり、この交通の集中による速度低下が原因である。人のエージェントの渋滞は集団避難の避難場所である。この避難場所は集団避難の目的地であるため、この渋滞が他に人に及ぼす影響はないと考えられる。人のエージェントに比べ、自動車のエージェントの避難の遅延が顕著であった。この理由は、渋滞が発生した交差点において、人のエージェントが優先され、自動車のエージェ



図-3 発生した渋滞の位置

ントが減速・停止を余儀なくされたためである。人と自動車のエージェントの相互作用の結果であり、定性的には納得できる。しかし、遅延の度合いは設定された相互作用に依存するため、この結果が定量的にも妥当であるとは結論できない。

(2) 要因抽出

状況把握より、自動車のエージェントの交差点での速度低下と、集団避難を行う人のエージェントの集中の二つが渋滞の要因として抽出された。この要因が避難遅延に及ぼす影響を定量的に検討するため、この要因に関わるシミュレーションの条件を変更し、変更前後での避難状況の変化を比較する。交差点での速度低下に関しては、自動車のエージェントを他の避難場所へ誘導し避難の分散を行う。具体的には、車起終点5より発生する通過車両が地点Bを經由しないようにした(ケース(a))。人のエージェントの集中に関しては、集中を避けるため、集団避難の開始時間より前に避難を始める、在宅と外出先の人と自動車のエージェントの避難場所を変更した。具体的には、車起終点2と3を、それぞれ、車起終点1と2へ変更する(ケース(b))。

上記の2つのケースでの避難場所別と属性別のシミュレーション結果を表-3と表-4に示す。参考のため、こ

表-3 条件を変更したシミュレーションでの避難場所別避難完了時間

避難手段	避難場所	避難完了時間			
		初期設定	ケース(a)	ケース(b)	ケース(c)
徒歩	高台1	55分	55分	55分	55分
	高台2	59分	59分	59分	59分
	高台3	63分	63分	63分	63分
	高台4	57分	57分	57分	57分
	高台5	57分	57分	57分	57分
	高台6	54分	54分	54分	54分
車	車起終点1	59分	56分	87分	86分
	車起終点2	120分	102分	94分	81分
	車起終点3	120分	102分	59分	53分
	車起終点4	118分	69分	91分	53分

表-4 条件を変更したシミュレーションでの属性別避難完了時間

属性	避難完了時間			
	初期設定	ケース(a)	ケース(b)	ケース(c)
1	63分	63分	63分	63分
2	120分	102分	94分	86分
3	120分	102分	94分	86分
4	118分	69分	91分	86分
5	42分	42分	42分	42分

これらの表には、条件変更を同時に行った場合（ケース(c)）の結果も示している。同様に避難完了の推移を図-4に示す。ケース(a)では自動車のエージェントの避難完了時間は全ての避難場所において短縮された。特に車起終点4において約49分短縮された点は注目値する。ケース(b)では車起終点2, 3, 4において避難完了時間が短縮された。しかし、新たな避難場所になった車起終点1において約28分の遅延が発生した。ケース(b)と同様、ケース(c)でも、車起終点2, 3, 4での避難完了時間の短縮と、車起終点1での遅延が発生した。一方で、属性別の場合ではケース(b)・(c)ともに全ての属性において避難完了時間が短縮された。また、地震発生から60分後の避難場所別と属性別の避難完了率を図-5と図-6に示す。ケース(a)では、車起終点2, 3において表-3の避難完了時間でみられた避難時間の短縮がほとんどなかった。また、属性別の避難完了率においても属性2, 3の避難時間の短縮がほとんどなかった。ケース(b)では避難完了時間と同様の結果が得られた。また、状況把握より渋滞が確認された時間におけるケース(a), (b)の避難の様子を図7と図8に示す。ケース(a)では地点Bにおける交通の分散により渋滞が緩和された。ケース(b)では地点Cにおいて集団避難者を避けるように車を誘導したところ、渋滞の距離が短縮された。しかし、図9に示すように、新たに避難場所になった車起終点1付近において新たな渋滞が確認された。

上に示した結果より、交通が集中する交差点での速度低下を起こした要因は、この交差点に交通が集中す

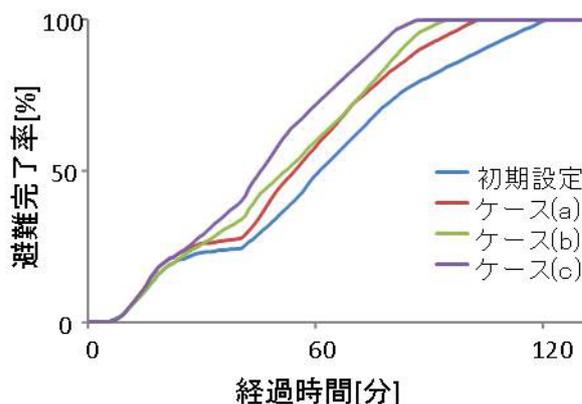


図-4 条件を変更したシミュレーションでの避難完了の推移

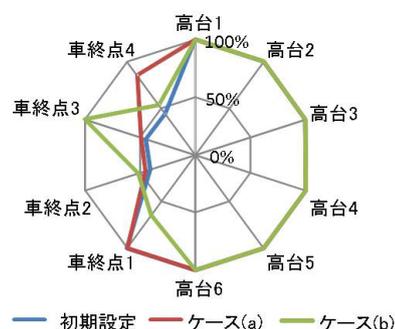


図-5 条件を変更したシミュレーションでの避難場所別避難完了率

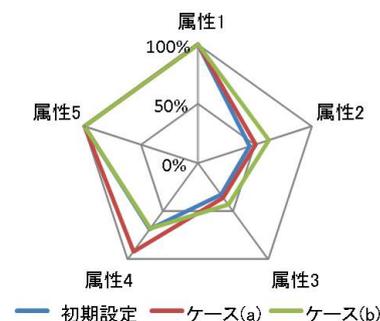


図-6 条件を変更したシミュレーションでの属性別避難完了率

ることであると考えられる。この要因を除去することで避難完了時間が49分短縮されたことから、要因は無視できないものである。一方、集団避難による渋滞を引き起こす要因は、避難場所が適切に設定されていなかったことであると考えられる。この要因を除去するため、避難場所への割り振りを変更すると、全般的に避難時間の短縮が見られた。しかし、一部では予期せぬ渋滞が新たに引き起こされた。これは、部分の性質の総和とはならない性質が全体に現れるという創発の性質であり、MASが群集避難の創発解析に適用できるこ



図-7 地震発生から 10 分後の避難の様子 (ケース (a))



図-8 地震発生から 20 分後の避難の様子 (ケース (b))



図-9 新たな渋滞の様子 (ケース (b))

とを裏付けるものである。

本論文で利用した MAS が使うエージェントというモデルの妥当性は確認されたものではない。モデルを変えることで、本章で示したシミュレーション結果も大きく変わる可能性があることは 0 ではない。勿論、基本的な検証はすませているため、シミュレーション結果が全く信頼できないということでは決してない。本論文で提案された創発解析の利用方法の有効性を検討するとともに、この MAS が群集避難円滑化の検討に供するという目的に適した精度を持つことを確認することは重要な課題である。

5. おわりに

津波避難の円滑化を図ることを目的に、本論文は、MAS を使った創発解析の利用方法を提案した。MAS の創発解析は、人のエージェント同士の相互作用や人のエージェントと自動車のエージェントの相互作用が引き起す避難の遅延をとらえることを目的とする。提案された創発解析の利用方法は、所定の地震・津波のシナリオ下での避難状況を把握することと、遅延があった場合にその遅延を引き起こした要因を抽出することの二つを目的とする。

2011 年東日本大震災の事例を基に、提案された創発解析の利用方法を検討した。避難状況の把握に関しては、避難完了の時間推移が定量的な指標であることを示した。これは、相互作用がない理想的な避難を行った場合の時間推移との差が、遅延の度合いを定量的に示すからである。要因抽出に関しては、局所的に発生する渋滞の様子を観察することで、遅延を引き起こす要因の候補が分かることを示した。さらに、この要因を変えることで、渋滞の様子も変わり、この結果、避難完了の時間推移も変わる。この時間推移の変化から、渋滞要因の影響を定量的に把握する可能性があることを示した。

本論文の数値実験では、遅延を引き越した要因を軽減したとしても、全般的には避難が円滑化するものの、局所的には更なる遅延を引き起こすことがあることが示された。これはエージェントの相互作用が単純ではなく、まさに、部分の性質の総和とはならない性質が全体に現れることは創発である。しかし、MAS という数値解析の特性上、本論文で示したシミュレーション結果は、エージェントのモデルの特性を反映したものである。このモデルが実際の避難を再現・予測する精度に関して、十分な検証が必要であることは当然である。精度が限られていることは認めつつも、MAS の創発解析は、津波からの避難の円滑化を図る道具の候補である。さまざまな地震・津波のシナリオで状況把握と要因抽出を行うことで、道具の有効性を検討することも必要である。

謝辞: 本論文の結果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」(課題番号:25220908)、JSPS 科研費 25220908 の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 白木渡: 避難行動データ解析に基づく危機管理対策, システム制御情報学会, システム制御情報学会誌, Vol. 58(1), pp. 24-29, 2014.
- 2) 細川和彦, 内藤恵, 苫米地司: 積雪条件が避難行動に及

- ぼす影響, 日本建築学会, 日本建築学会北海道支部研究報告集. Vol. 75, pp.215–220, 2002.
- 3) 小川圭一, 前川貴哉, 松野真樹, 塚口博司, 安 隆浩: 歴史都市における観光客のための避難経路の抽出方法に関する研究/京都市東山区を対象として, 立命館大学歴史都市防災研究所, 歴史都市防災論文集, Vol. 8, pp. 181–188, 2014.
 - 4) 佐野友紀, 今西美音子, 布田健, 萩原一郎: 群集行動実験によるデータ収集と避難行動シミュレーション妥当性検討の問題点, 日本建築学会, 学術講演梗概集, E-1, pp.1–4, 2009.
 - 5) 門倉博之, 末松孝司, 関沢愛, 海老原学, 高橋済: 避難シミュレーションを用いた地下駅構内の避難性状の分析 地下駅空間における火災時の避難安全性の検証: その1, 日本建築学会, 学術講演梗概集, A-2, pp. 225–226, 2005.
 - 6) 小野祐輔, 清野純史, 金子愛: 人的被害低減を目的とした津波避難シミュレーション, 地域安全学会, 地域安全学会論文集 (11), pp. 363–368, 2009.
 - 7) NISHINARI Katsuhiko, KIRCHNER Ansgar, NAMAZI Alireza, SCHADSCHNEIDER Andreas: Extended Floor Field CA Model for Evacuation Dynamics, 電子情報通信学会, IEICE transactions on information and systems, E87-D(3), pp. 726–732, 2004.
 - 8) LIU Yuling, OKADA Norio, TAKEUCHI Yukiko: Dynamic Route Decision Model-based Multi-agent Evacuation Simulation: Case Study of Nagata Ward, Kobe, 日本自然災害学会, Journal of natural disaster science, Vol. 28(2), pp. 91–98, 2006.
 - 9) 服部宏充, 栗 聡: エージェント研究におけるシミュレーション, 人工知能学会, 人工知能学会誌, Vol. 28(3), pp. 412–417, 2013.
 - 10) 森下信: 交通流・人流のマルチエージェントシミュレーション, システム制御情報学会, システム制御情報学会誌, Vol. 46(9), pp. 532–538, 2002.
 - 11) LIN, Z.-S., HSU C.-C., CHIOU, Y.-C., and LAN, L.W.: Exploring Traffic Patterns and Phase Transitions with Cellular Automaton, Asian Transport Studies, Vol. 2(4), pp. 395–410, 2013.
 - 12) CHEN, R.-S., CHEN, D.-K., and LIN, S.-Y.: AC-TAM: Cooperative Multi-Agent System Architecture for Urban Traffic Signal Control, 電子情報通信学会, IEICE transactions on information and systems, E88-D(1), pp. 119–126, 2005.
 - 13) LKHOO, H. L., and MENG Q.: Modeling of Vehicle Emission Pricing Strategy Using Multi-agent System, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 8, pp. 883–895, 2010.
 - 14) 寺野隆雄: KISS 原理を超えて, 人工知能学会, 人工知能学会誌, Vol. 18(6), pp. 710–715, 2003-11.
 - 15) 渡辺公次郎, 近藤光男: 津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発, 日本建築学会, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 74(637), pp. 627–634, 2009.
 - 16) 西川太一, 栗本英和: エージェントベース・シミュレーションを用いた共用空間における避難行動分析, 経営情報学会, 全国研究発表大会要旨集 f(0), pp. 86–86, 2010.
 - 17) 榎本満帆, 長谷見雄二, 森山修治, 志村洋樹: 改札外地下通路で接続するターミナル駅の災害時避難計画に関する研究: 複合化する改札外地下通路における避難安全性検証, 日本建築学会, 学術講演梗概集 (防火), pp. 327–330, 2013.
 - 18) BANDINI, S., MANZONI, S., and VIZZARI, G.: Situated Cellular Agents: A Model to Simulate Crowding Dynamics, 電子情報通信学会, IEICE transactions on information and systems, E87-D(3), pp. 669–676, 2004.
 - 19) Leonel E. A. M., Wijerathne M. L. L., Hori, M., Ichimura, T. and Tanaka, S.: On the Development of an MAS Based Evacuation Simulation System: Autonomous Navigation and Collision Avoidance, *PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8291, pp. 388–395, 2013.
 - 20) van der Berg, J., Guy, S. J., Lin, M., Pradalier, D. M. C., Siegart, R., and Hirzinger, G: Reciprocal n-body collision avoidance, *The 14th International Symposium on Robotics Research*, ISRR, Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 70, pp. 3–19, Springer, 2011.
 - 21) Saito, T., and Kagami, H.: Simulation of evacuation behavior from tsunami utilizing multi agent simulation, *Proceedings of the 13th World Conf. on Earthquake Engineering*, Vancouver, 2004.