

# セル空間上における避難所シミュレータの開発と 避難者空間行動に関する分析

○ 民谷啓 (名古屋工業大学) 市川学 (国立保健医療科学院)

酒井宏平 (立命館大学) 兼田敏之 (名古屋工業大学)

## Development of Shelter Simulator and an Analysis on Refugees' Spatial Behavior Using SOARS with Cell Space Representation

\* K.Tamiya(Nagoya Institute of Technology),M.Ichikawa (National Institute of Public Health)

K.Sakai (University of Ritsumeikan) and T.Kaneda (Nagoya Institute of Technology)

**Abstract**— In this study, We have developed a simulator to analyze how to manage an evacuees' shelter by introducing the cell space representation to the agent modeling platform SOARS. And it aims to analyze the occupied space layout and the queue length of the toilet and the distribution through simulations. For occupancy layout, four sides buffer model, two sides buffer model, for a random layout model have been compared from the viewpoints of the evacuees capacities and the distance costs. As for the waiting time of toilets and distributions, it has also been carried out a comparative analysis.

**Key Words:** Evacuees' Shelter Model, Agent Simulation Platform, Cell Space Representation

### 1 研究の背景と目的

東日本大震災後、以前にも増して巨大地震が発生した際の避難について考慮しておく重要性が高まっている。

災害対策基本法では、市町村自治体は地域防災計画に基づき、避難所の指定・運営・管理を行うこととされている。しかし、行政の支援は災害発生後の2～3日以降となることが多く、発生初期は住民自らが避難所の運営を担うことになる<sup>1)</sup>ため、避難所シミュレータの開発に意義がある。

本研究では、エージェントモデリングプラットフォームSOARSにセル空間表現を導入することによって、避難所運営のあり方を検討するシミュレータを開発する。そして占有空間レイアウトと、トイレ及び配給の待ち行列のあり方をシミュレーションにより探ることを目的とする。本研究の成果が災害時の避難所運営の支援と合わせてSOARSの機能拡張の両面を実現する。

### 2 エージェントモデリングプラットフォームの概要とその改良

#### 2.1 SOARSの概要及び課題

##### (1) SOARSのアーキテクチャ

本研究では、シミュレーションにSOARS (Spot Oriented Agent Role Simulator) を使用した。SOARSは三階層のモデリングフレームワークを持っており、大規模かつ高速にシミュレーションを実行できるよう設計されている。下位層はJava言語、中位層は核となるSOARSスクリプト言語とステージモデル、そして言語の開発実行環境を担うモデルビルダーから構成され、上位層はビジュアルスクリプティング環境であるビジュアルシェルをGUI環境として持っている。中位層でエージェントの役割行為を記述しており、そのエージェントが移動し、相互作用する場として「スポット」という独自の概念を取り入れている<sup>2)</sup>。

##### (2) スポットの設計と視覚的課題

スポットは社会を構成する局所的な場所として表現

され、それが各々の役割(ロール)を持ったエージェントの所在地となるよう設計されている。また、エージェント同様に属性を持ち、ルールを記述することも可能である<sup>2)</sup>。

避難時は人と人のインタラクションが非常に複雑になるため、エージェントが相互作用する場であるスポットの概念を持つSOARSでモデルを構築することに意義がある。また、より広範囲での避難を考慮した大規模モデルへの拡張性も考慮すると、SOARSの高速なシミュレーションの活躍が期待できる。

しかしSOARSは他のシミュレーション言語で多く採用されているセル型の空間表現をとっていない。スポットは物理的な場所として記述することができるが、距離や隣接スポットの関係に関しては具体的に定義しない構造のため、避難所等の空間における細かい時間軸上の人間の行動プロセスを明示的に表現するのは難しい。

#### 2.1 セル空間の実装

##### (1) xyz軸系の導入

そこで本研究では、Javaを用いてSOARSにxyz軸系の概念を実装し、従来のSOARSの概念をさらに拡張する形でセル型の空間表現を追加して、1スポットで1セルを表現することとした。各セルを表すスポットのxyz座標の設定については、xyz座標や隣接スポット変数などの必要となる変数を持たせた親スポットを座標系の数だけ複製した後、各セルに対してCSVに記載された情報を変数情報として読み込ませた。

また、xyz座標をキーとして、セル空間を表現する全てのスポットをマップ変数に格納することで、各セルへのアクセスを実現した。また、各セルに持たせた隣接スポット変数に上下東西南北のセルを登録することでさらに他セルへのアクセスを容易にし、メソッドの拡張性を高めた。いわば、セルはxyz座標や他セルとの隣接関係が導入されたスポットである。

xyz軸系を導入するために必要となるスポットの保持変数をTable 1に示す。

Table 1: xyz 軸系導入に必要なスポットの保持変数

保持変数名	説明
x 座標 y 座標 z 座標	セルの x,y,z 座標を示す変数. CSV に記載された情報を読み込ませ, 数値変数でそれぞれをセルに持たせる.
上下東西 南北スポット	セルの上下東西南北に位置するセルをそれぞれ格納しておくスポット変数. 隣接関係を持たせ, アクセスを容易にする.
上位スポット	下位スポットが属するその集合の名前. 例えば, 占有空間集合を表すセルの1つであれば, そのセルの上位スポットは「占有空間」となる.
空間マップ	複製したスポットを統括するリーダースポットが持つマップ変数. 各スポットの xyz 座標情報をキーとして, 各セルを値に登録する.

(2) セル上の経路探索メソッドの実装

隣接セル上を動くエージェントの経路探索にはダイクストラ法を組み込んだメソッドを導入した. それぞれのセルに種類を表す変数を持たせ, 自占有空間を含む移動及び通路セル上はコスト 1, 占有空間と通路セル間はコスト 5, 占有空間内部はコスト 10 として隣接リストを作成した. 隣接リストをもとにダイクストラ法による経路探索を経て, コストが最短の経路となるスポットの順をリストとして返す仕様になっている. また, 隣接リストに登録されていない場所での移動に関しても別の移動メソッドを複数用意することで, 状況に応じて経路を取得できるようにした.

以上のように SOARS の拡張をモデル実装に先立ち行った.

3 避難所シミュレータの基本モデル

3.1 避難所空間のモデル概要

避難所シミュレータの避難空間は小学校の体育館と外部トイレから構成されるとし, 1セル 40cm 四方で全体が横 80 セル×縦 80 セルの空間を作成した. 体育館の避難所空間は横 52 セル×縦 74 セルとした. その中で配給を受け取る受付の場所を上部に固定し, 残りの横 52 セル×縦 69 セル内で占有空間 (長辺 5 セル×短辺 4 セル) のシミュレーションを行った. 時間は 1 ステップ 1/3 秒で朝の 6 時から昼の 15 時半までを想定した計 105690 ステップ行った.

実際にシミュレータ上でエージェントが避難空間を移動するシミュレーションの様子を Fig.1 に示す.

3.2 エージェントの保持変数と意思決定フロー

本研究におけるエージェントは避難所で避難生活行動を行う人間である. 各エージェントは体育館の出入口に生成され, 各占有空間を確保した後, トイレ及び配給の受け取りを行う. エージェントがトイレを利用する際に発生する時間は全エージェント共通の値とし, 男女大トイレには 750 ステップ (250 秒), 男子小トイレには 90 ステップ (30 秒), 女子小トイレには 300 ステップ (100 秒) の実行時間を有するものとする. 同様に, 配給は 180 ステップ (60 秒) の実行時間を共通の値として持つ.

トイレに行く間隔は, エージェントの初期設定時に 21600 ステップ (2 時間) から 32400 ステップ (3 時間) の間のランダム値を各エージェント固有の間隔値とす

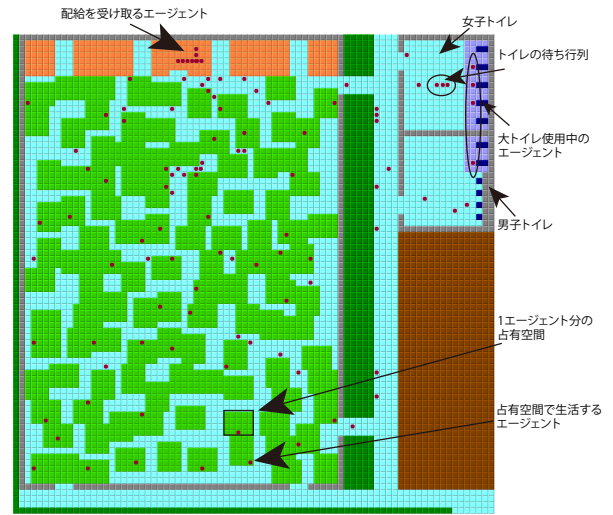


Fig. 1: セル空間を用いた避難所シミュレータ実行の様子

る. また, 配給の受け取りは午前 7 時から始まり, 午前 7 時から数えて 1 ステップ (1/3 秒) から 1800 ステップ (10 分) の間のランダム値を各エージェント固有の待機時間とする. さらに, 配給受け取りに並んでいる人数が一定人数以下のときのみエージェントが移動を開始するよう, 各エージェント固有の移動開始意思決定のための待ち行列最大待ち人数を 1 人から 20 人の間からランダムで決定し, エージェントの視野判定を取り入れることでモデルの妥当性を高めた. これらの各保持変数の説明を Table 2 に示す.

Table 2: エージェント内部の保持変数

保持変数名	説明
占有空間集合	各エージェントが避難所での生活のために占有する長辺 5 セル × 短辺 4 セル分のセルリストが格納されている.
大トイレ実行時間	全エージェント共通の, 大トイレを実行するのにかかるステップ数を表す. 750 ステップ (250 秒) で一定.
小トイレ実行時間	全エージェント共通の, 男子小トイレを実行するのにかかるステップ数を表す. 男子は 90 ステップ (30 秒), 女子は 300 ステップ (100 秒) で一定.
配給受け取り実行時間	全エージェント共通の, 配給の受け取りを実行するのにかかるステップ数を表す. 180 ステップ (60 秒) で一定.
トイレ行動間隔	各エージェントが持つ, トイレ行動をとるステップ間隔. 21600 ステップ (2 時間) から 32400 ステップ (3 時間) の間で決定.
配給行動間隔	各エージェントが持つ, 配給開始から待機するステップ間隔. 1 ステップ (1/3 秒) から 1800 ステップ (10 分) の間で決定.
配給意思決定待ち人数	各エージェントが持つ, 配給受け取り意思決定を下す際に配給に並んでいる待ち行列の最大待ち人数. 1 人から 20 人の間で決定.

また, エージェントが生成されてから自分の占有空間を確保したのち, 避難所での生活を行う際の一連の意思決定フローを Fig. 2 に示す.

3.3 シミュレーションのケース別モデル説明

占有空間レイアウトとトイレの待ち時間についてのシミュレーション分析を行うため, 以下 (1) ~ (3) の 3 つのモデルを作成した. また (4) は, 避難者数の

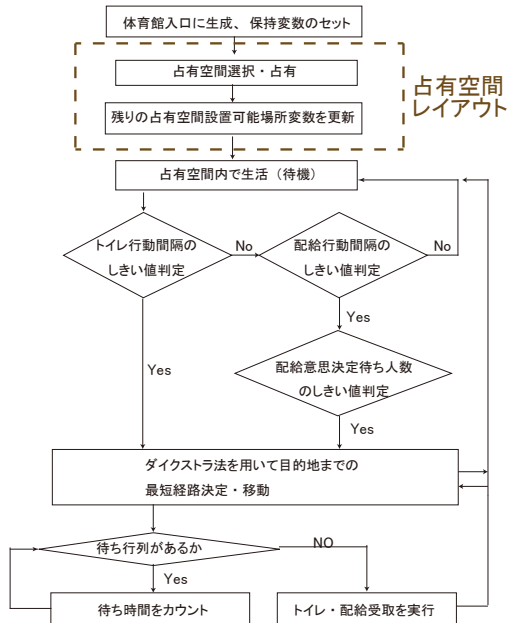


Fig. 2: エージェントの意思決定フローチャート

目安を示すため事前に占有空間レイアウトを指定した参考モデルである。

(1) 4 辺バッファモデル

占有空間の全ての辺が通路に面している占有方法である。方向を問わず、6 セル×7 セルが全て通路セルであるか判定した上で、中央の 4 セル×5 セルを占有空間とする。避難者の総数は少ないものの、避難所への移動開始当初は何も指示がなければこうした占有方法を取りがちである。この占有方法のイメージ図を Fig.3 に示す。

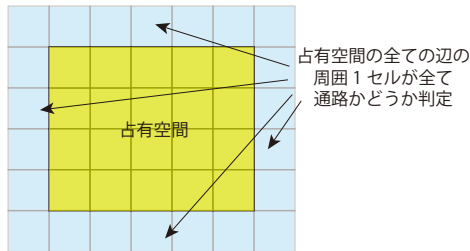


Fig. 3: 4 辺バッファ法イメージ図

(2) 2 辺バッファモデル

方向を問わず、5 セル×6 セルが全て通路セルであるか判定した上で、上辺と左辺の 1 セルを残して右下の残りのスポット群を占有空間とする占有方法である。避難所への移動開始から少し時間が経過し避難者数が増えてくると、多少間隔を詰めて占有を行うことを考慮したモデルである。この占有方法のイメージ図を Fig.4 に示す。

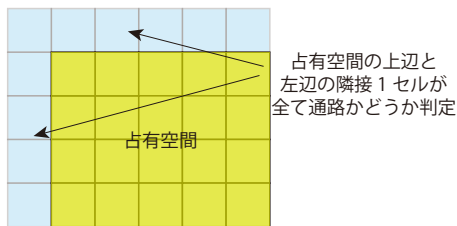


Fig. 4: 2 辺バッファ法イメージ図

(3) ランダムモデル

占有空間の周囲セルの中で、体育館の右上出入口セル及び配給入口セルに接続しているスポットを 1 セル以上持ち、かつ既に占有済みの他エージェントの占有空間も同様に体育館の右上出入口及び配給入口セルへの接続が認められるスポットを 1 つ以上保持しているかどうか判定し占有するモデル。Fig. 1 がこのランダムモデルの占有様子を示している。通路幅は非常に狭くなってしまうが、接続可能通路を維持したままで避難空間を可能な限り埋める占有方法である。次節で述べるペナルティポイントを比較することで、占有空間のレイアウト効率を分析することができる。

(4) 4 行 4 列モデル (参考)

通路幅を 3 セルに固定し、4 行×4 列の通路を先に確保した上で残りの空間から占有空間をレイアウトするモデルで、収容人数は 112 人である。この占有方法のイメージ図を Fig. 5 に示す。

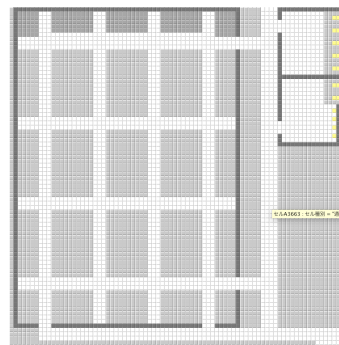


Fig. 5: 4 行 4 列モデルイメージ図

3.4 他者侵入ペナルティポイントの定義

2 章でも述べた通り、通路の隣接リストは自占有空間を含む移動及び通路セル上はコスト 1、占有空間と通路セル間はコスト 5、占有空間内部はコスト 10 として作成した。特にランダムモデルでは、全ての占有空間が体育館の右上出入口セル及び配給入口セルに接続しているスポットを 1 セル以上持つが、占有方法によっては通路セル上のみを移動するよりも他者の占有空間を通過したほうがコストを低く抑えられる場合がある。

そこで、各エージェントの占有空間から目的地までの移動コストと移動回数の差を他者侵入ペナルティポイントとして定義する。目的地までの移動コストと移動回数は変数としてエージェントに保持させ、ダイクストラ法によって最短経路を探索した際に計算する。これらの保持変数の説明を Table 3 に示す。

Table 3: 他者侵入ペナルティポイントに関するエージェント内部の保持変数

保持変数名	説明
目的地までの移動コスト	目的地までのエージェントの移動にかかるコストを表す。
目的地までの移動回数	目的地までのエージェントの移動回数を表す。

## 4 占有空間レイアウトに関するシミュレーション分析

### 4.1 避難者収容人数の比較

3章で述べた3つのモデルでそれぞれ25回のシミュレーションを行った。占有空間を確保できたエージェントの総数を避難者収容人数とし、各実験における避難者収容人数の平均値を算出した上で、モデル毎にさらにその平均値を算出したグラフを Fig. 6 に示す。

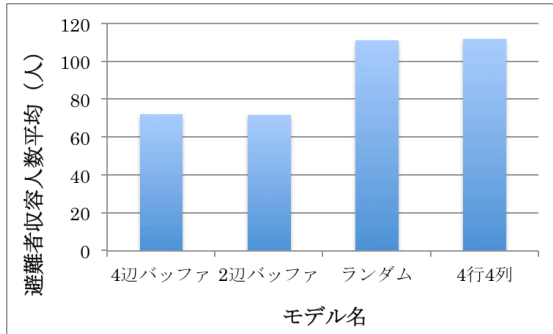


Fig. 6: モデル別避難者収容人数の平均

2 辺バッファモデルは 4 辺バッファモデルよりも占有条件を緩和したものの、4 辺バッファモデルの方が避難者収容人数の平均値がわずかに高い結果となった。しかしながら、後述する占有空間からトイレ及び配給を受け取る受付までの距離とコストを参照しても、あまりこの2つの占有方法に違いはないことがわかる。

ランダムモデルは出入口への接続を維持しつつ可能な限り占有する方法のため、4 行 4 列モデルが 112 人収容できることを考慮すると、最大限に収容人数を確保できていることがわかる。

### 4.2 占有空間からトイレ及び配給を受け取る受付までの距離とコスト

各占有空間からトイレ及び受付までの距離とコストを算出し、それらの平均値と標準偏差を求めたものを Table 4 に示す。

4 辺バッファと 2 辺バッファは距離とコストの差がほぼなく、標準偏差も小さいためエージェントが安定し

Table 4: 占有空間からの距離及びコスト

	4辺バッファ	2辺バッファ	ランダム
トイレまでの距離			
平均値(セル)	76.50	76.66	88.93
標準偏差	1.20	1.23	2.79
受付までの距離			
平均値(セル)	50.25	50.26	64.90
標準偏差	0.74	0.94	5.19
トイレまでのコスト			
平均値(セル)	82.25	82.43	115.68
標準偏差	1.41	1.35	9.51
受付までのコスト			
平均値(セル)	55.63	56.04	115.68
標準偏差	1.44	1.08	9.51

て通路を移動していることがわかる。これらの場合について他者侵入ペナルティポイントの分析をしてもあまり意味がないため、本研究ではランダムモデルに限って他者侵入ペナルティポイントの分析を行う。

### 4.3 レイアウトの問題点を考察すべき実験の抽出

4 辺バッファモデルと 2 辺バッファモデルに関しては、他者侵入ペナルティポイントがほとんど発生しないため、本研究では特にランダムモデルにおける他者侵入ペナルティポイントにより焦点を当てて避難者占有空間レイアウトについて分析する。

エージェントがトイレに移動する際に発生する他者侵入ペナルティポイントの平均値を表す散布図を Fig. 7 に示す。

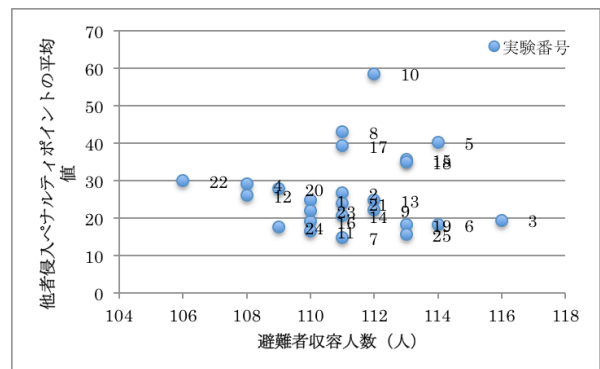


Fig. 7: トイレ移動時に発生する、避難者収容人数に対する他者侵入ペナルティポイントの平均値

実験番号 10 は他の実験よりもかなり他者侵入ペナルティポイントが高いため、占有空間レイアウトのどこかに深刻な問題となる箇所が存在していることが推測される。

逆に、実験番号 3 は他者侵入ペナルティポイントが比較的低いが避難者収容人数は最大値を示しているため非常に効率がよいことがわかる。

また、エージェントが配給を受け取る際に発生する避難者収容人数に対する他者侵入ペナルティポイント

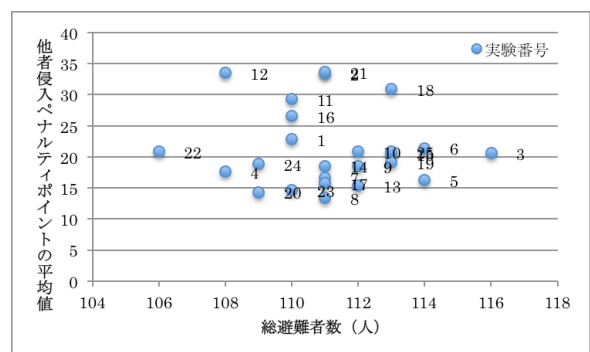


Fig. 8: 配給時に発生する、避難者収容人数に対する他者侵入ペナルティポイントの平均値

の平均値を表す散布図を Fig. 8 に示す。

実験番号 12 では、避難者数が少ないが他者侵入ペナルティポイントの平均値は他と比べてほぼ最大値を示しているため、非常に無駄が多い占有空間レイアウトになっていることが予想できる。

逆に、実験番号3や5では、避難者数が多いが他者侵入ペナルティポイントの値はそれほど大きくないため、非常に効率の良い占有空間レイアウトになっていることが予想できる。

本研究では、特にレイアウト効率の悪いものに焦点を当ててより深い分析を行う。特に、トイレ移動時については実験番号10を扱い、配給時については実験番号12を扱うものとする。

#### 4.4 対象の占有空間レイアウトの再現と考察

実験番号10と実験番号12における占有空間レイアウトを再現した図をそれぞれFig. 9, Fig. 10に示す。

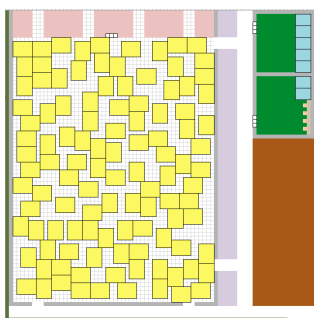


Fig. 9: 実験番号10の占有空間レイアウトの再現

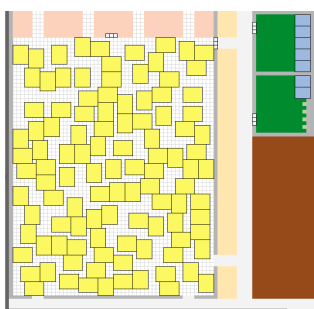


Fig. 10: 実験番号12の占有空間レイアウトの再現

トイレへ移動する際の他者侵入ペナルティポイントの高いレイアウトを再現した Fig.9 では、体育館の右と下に2つずつある出入口の中トイレに一番遠いもの以外の出入口付近が全て占有空間の密集によって封鎖されており、一番通り左下の出入口を使用して回り道経路を選択するよりも他者の占有空間を横切った方がコストを低く抑えられることが容易に読み取れる。

配給受け取り移動時の他者侵入ペナルティポイントの高いレイアウトを再現した Fig.10 では、配給受付周辺の左側に占有空間が密集したため、全ての移動を通路セルのみで行おうとすると、体育館右上あたりのエージェンツ以外は外通路を通る必要がある。それでは大きな回り道になるため、多くのエージェンツが他者の占有空間を横切って配給へ向かったと想定される。

### 5 トイレ及び配給の待ち時間に関するシミュレーション分析

4章と同シミュレーション内で、トイレ及び配給の待ち時間分析も行った。トイレの便器数は、男子大トイレが1つ、男子小トイレが2つ、女子トイレが3つとした。

また、上部にある配給の受付は3つとし、どちらも待

ち行列の形態は並ぶ列を1つにして空いたトイレ及び受付に行列の先頭が移動するフォーク並びとした。

#### 5.1 男子大トイレの待ち時間の分布

モデル別男子大トイレの待ち時間平均の分布を示すグラフを Fig. 11 に示す。

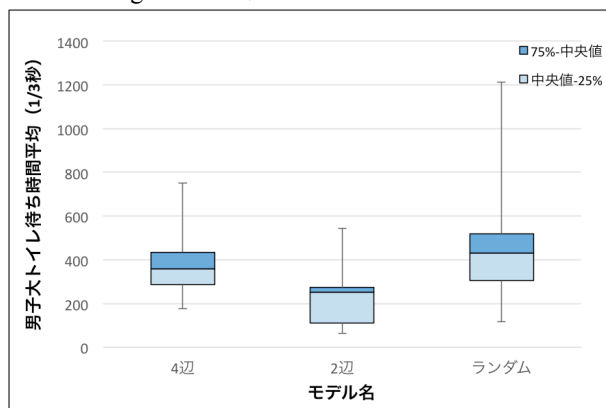


Fig. 11: モデル別男子大トイレ待ち時間平均の分布

便器数が1つと少ないためどのモデルにおいても待ち時間が発生しており、ランダムモデルでは最大で約1200ステップ（400秒）の待ち時間平均値を示した実験もある。

ランダムモデルは他と比べて避難者数が多いため値のばらつきが大きいことがわかるが、中央値は約432ステップで、最小の2辺は約251ステップのため、およそ80秒~145秒程度の待ち時間の分布がある。

#### 5.2 男子小トイレの待ち時間の分布

モデル別男子小トイレの待ち時間平均の分布を示すグラフを Fig. 12 に示す。

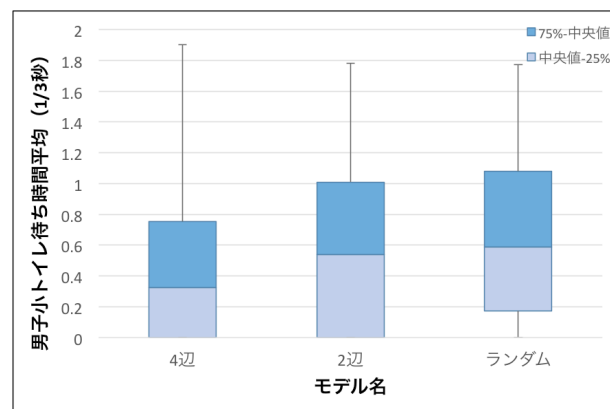


Fig. 12: モデル別男子小トイレ待ち時間平均の分布

小トイレは便器数が2つのみであるが、待ち時間はほとんど発生していない。最大でも約0.6秒のみのため、便器が必要数以上使用可能であれば、避難可能な人数内では待ち時間はほとんど考慮する必要がないことがわかる。

#### 5.3 女子トイレの待ち時間の分布

モデル別女子トイレの待ち時間平均の分布を示すグラフを Fig. 13 に示す。

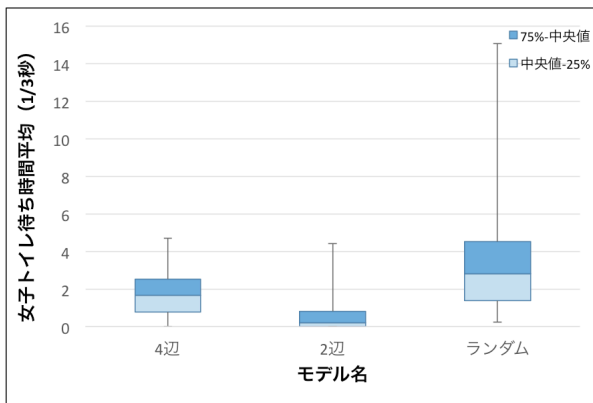


Fig. 13: モデル別女子トイレ待ち時間平均の分布

女子トイレは便器数が3つのため、実行時間が長くてもあまり待ち時間が発生していない。ただし分布を見るとランダムモデルにおいてはばらつきが大きく、各実験の最大値を参照すると最大で約70秒待機しているエージェントもいるため、避難者数の増加と便器数の減少に伴い待ち時間は大きく変動していくことが予想できる。

#### 5.4 配給の待ち時間の分布

モデル別配給受け取り待ち時間平均の分布を示すグラフを Fig. 14 に示す。

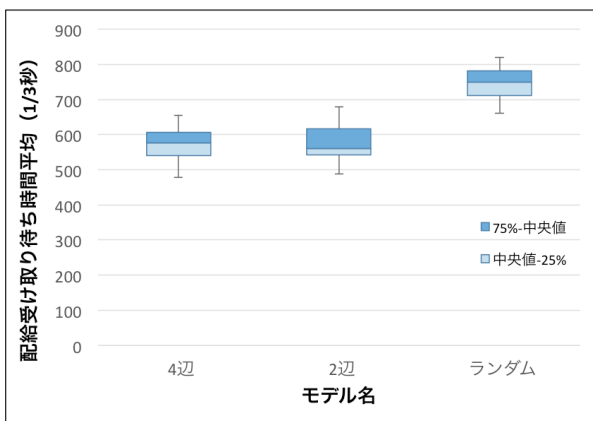


Fig. 14: モデル別配給受け取り待ち時間平均の分布

配給受け取りの受付は女子トイレと同数で3つあるが、女子トイレとは違い配給は同時刻にエージェントが一気に集まるため待ち時間の値は大きい。

分布のばらつきはどのモデルもあまりなく、単純な避難者数の差によって待ち時間の差が発生している。

## 6 結語

本研究では、SOARSのセル空間表現の拡張及び避難所シミュレータの開発を行った。また、これを用いたシミュレーションを通じて、避難者生活空間の占有レイアウトと、トイレ及び配給の待ち時間に関する分析を行った。

占有レイアウトに関しては、(1) 4辺バッファモデルと2辺バッファモデルでは避難者収容人数においてあまり差がないこと、(2) ランダムモデルでは、避難

者数上限の参考として事前にレイアウトを指定した4行4列モデルと比べても避難者数は劣らず、最大限に収容できていること、(3) ただしランダムモデルでは出入口付近に占有空間が密集すると他者占有ペナルティポイントが非常に高くなってしまったことを示した。

また、トイレ及び配給の待ち時間に関しては、(1) 男子大トイレは便器数が1つでは待ち時間が大きいこと、(2) 男子小トイレは便器数が2つではほとんど待ち時間が発生しないこと、(3) 女子トイレは便器数が3つでは待ち時間はあまり発生しないが、ランダムモデルにおける最大待ち時間は大きく、分布にばらつきが生じやすいこと、(4) 配給受け取り時の待ち時間には分布はあまりばらつきがなく、避難者収容人数による影響が大きいことを示した。

今後の課題としては、時間の経過に従い占有レイアウトの方法が変化していくことや、トイレの使用可能状況が変化していくことを考慮する必要がある。

今後の展望としては、周辺の避難所間とのネットワークを考慮したマクロな視点にモデルを広げ、大規模な避難シミュレーションを行う環境を整えていくと同時に、本研究でのモデルにおけるエージェントの基本機能やその他の避難時のイベントを拡張していき、より現実性を高めることでマイクロな視点での分析もより現実性を持ったシミュレーションを行えるようにしていく必要がある。

## 謝辞

この研究は JSPS 科研費 26282083 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 渡辺裕子：震災時に想定される避難所運営の課題 - 防災訓練参加者調査から、駿河台経済論集第23巻第1号、77/102 (2013)
- 2) 田沼英樹, 出口弘：エージェントベース社会シミュレーション言語 SOARS の開発, 電子情報通信学会論文誌 D, J90-D-0, 2415/2422 (2007)
- 3) 北川啓介, 米沢隆：日常を失った生活空間～東日本大震災における身の置きどころのたち現れかた～, 建築と社会 2011/5, 日本建築協会, 30/39 (2011)
- 4) 市川 学, 後藤 裕介：社会システムの研究動向 5-研究のためのツール-シミュレーション言語の特徴と比較, 595/600, 2013
- 5) 愛知県：愛知県避難所運営マニュアル (2013)
- 6) 久富 敏明, 安森 弘昌, 田頭 章徳, 尹 智博：大規模災害時における避難所空間のデザイン開発/仮設空間の単位としての収納家具の建築設計開発, 神戸芸術工科大学紀行「芸術工学 2013」 (2013)
- 7) 内閣府防災担当：避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針 (2013)
- 8) 大野 彩, 垣野 義典：機能・設備面からみた小学校の避難所運営に関する研究 - 豊橋市の小学校を事例として -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 371/372 (2013)
- 9) 浅野 菜邦, 村上 正浩：女性を配慮した避難所運営のあり方の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 131/132 (2013)