

避難訓練の調査とCAに基づく避難行動シミュレーション

辻原 治¹・今北 智基²・松川 知憲²・澤田 勉³

¹正会員 博士(工学) 和歌山工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒644-0023 御坊市名田町野島77)

E-mail:tsujihara@wakayama-nct.ac.jp

²非会員 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒644-0023 御坊市名田町野島77)

³正会員 工博 徳島大学工学部教授 建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

E-mail:sawada@ce.tokushima-u.ac.jp

本研究は、実際の避難訓練をシミュレーションでどの程度再現できるかの検討を行うことを目的とした。和歌山工業高等専門学校の学生寮において火災を想定して実施された避難訓練を調査した。約500名の寮生が参加している。学生寮の玄関に設置されている防犯カメラおよびビデオ撮影による屋外からの定点観測による映像から、指定のポイントを通過する人の数と時間との関係を明らかにした。そして、CA(Cellular Automata)に基づくシミュレーションを行い、建物内および屋外の避難行動について調査結果と比較した。

Key Words : evacuation training, Cellular Automata, evacuation simulation

1. はじめに

地下街、デパート、病院等の人が多く集まる場所を設計する際、地震や火災等の災害時の避難行動を予測し、避難路や非常扉の設置場所等を計画することが重要である。また、津波災害が想定される地域において、避難場所や避難経路設定、避難誘導のためのサインの設置等を行う必要があり、避難に要する時間を割り出したり、被害を予測することも重要となる。しかし、一般に災害の状況を模擬した大規模な実験を行うことは容易ではなく、数回の実験が必要ともなると、ほとんど不可能である。また、実際の災害事例の調査を参考にすることも考えられるが、災害の状況は個別のものであり限界がある。

一方、近年、災害時の避難行動をシミュレートする研究が実施されるようになった。それらはポテンシャルモデルを応用した方法¹⁾、個別要素法を応用した方法^{2,3)}や CA(Cellular Automata)に基づく方法^{4,5,6,7)}等である。これらのうち、CAに基づく方法は、いわゆる複雑系のシミュレーション手法として発展したセルオートマトン法⁸⁾を適用したもので、簡単なモデルと規則からは予測もできない程の複雑な現

象や状態を表現し得る方法として近年注目されている。このようなシミュレーションによって避難行動を精度良く予測することができれば、避難経路や避難場所の設定および災害時の被害予測や防災対策の策定等に大きく貢献する。

しかし、これらの既往の研究において、実際の避難行動とシミュレーションを比較した研究は意外と少なく、計算の精度について十分な検討がなされているとは言い難い。今後このような研究を発展させていく上で、実際の大規模な避難行動とシミュレーションの整合性を比較検討することが重要と考えられる。

本研究は、2004年10月28日に約500人の学生が参加して実施された和歌山高専学生寮の避難訓練を調査し、CAに基づく避難行動シミュレーションによってどの程度再現できるかについて検討することを目的とした。

2. 避難訓練の概要と調査

和歌山高専は機械工学科、電気情報工学科、物質工学科、環境都市工学科の4学科から成る。学生定

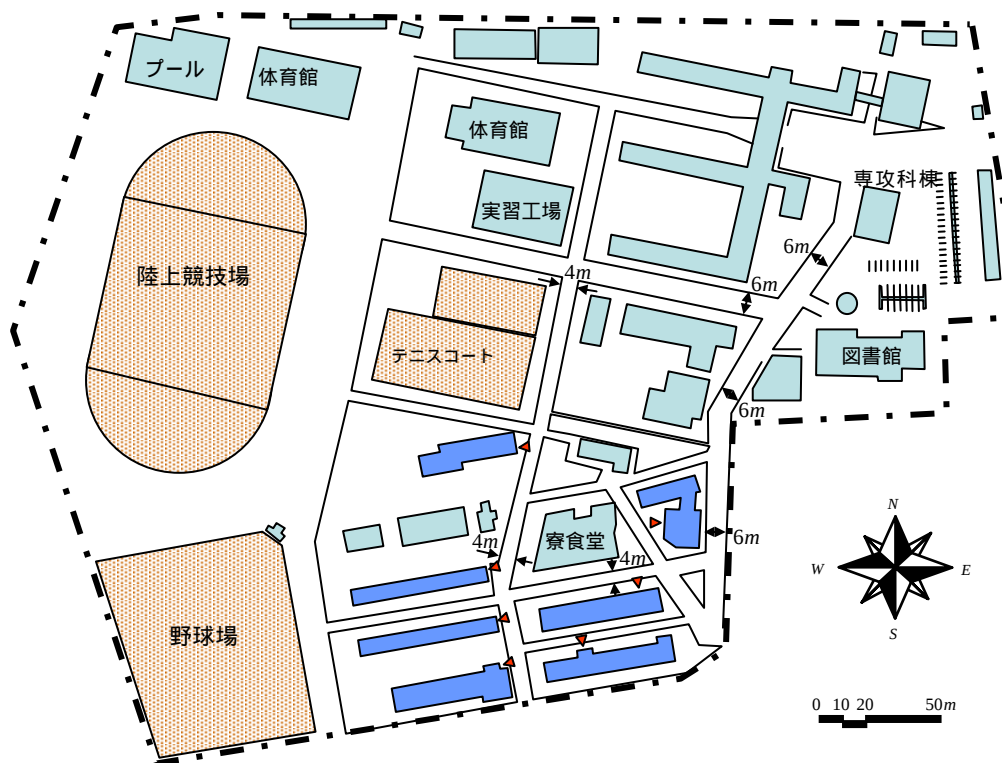


図-1 和歌山高専構内の平面図（○の中の数字が寮の号館を表す）

員 800 名の内 500 名を超える学生が、校内に併設された計 7 棟の学生寮に寄宿している。図-1 に構内の平面図を示す。図中の丸印の数字が学生寮の号館を表す。また、三角の印は各号館の出入り口の位置を表す。

学生寮では、火災発生等を想定した避難訓練を毎年実施している。避難訓練の概要を以下に示す。

1) 避難訓練実施日時

平成 16 年 10 月 28 日 16:30～

2) 想定

火災（出火場所；3 号館 3 階）

3) 実施要領等

3-1) 火災発生連絡

16:30 に指定された学生が 3 号館 3 階で非常ベルをならす。それと同時に 2 号館 1 階にある寮事務室に待機中の教員が現場へ急行し確認後、寮事務室に戻って館内放送により、火災発生につき避難するよう指示を出す。

3-2) 事前教育等

避難訓練の日時、避難経路や避難場所等は予め寮生に館内放送や掲示などで周知している。また、当日の訓練実施中、指導寮生（指導的役割をする寮生のことをいう）や教員がいくつかのポイントに立ち、進行方向を指示する。それぞれの号館からの避難経路を図-2 に示す。

4) 調査方法

避難訓練の調査は、以下に示す 3 つの手段で行った。

- それぞれの号館の玄関に設置されている防犯カメラによる映像
- 専攻科棟 3 階からビデオカメラによる撮影
- 避難場所で記入された学生寮のフロアごとの点呼票

点呼票は、常時朝晩に指導寮生がそれぞれのフロアにおいて点呼をとる際に用いるもので、寮生の部屋番号と氏名が印刷されており、○か×を記入するようになっている。

5) 調査結果

5-1) 避難訓練参加者

避難訓練に参加した人数を点呼票から集計した。これを表-1 に示す。1～5 号館は 3 階、6 号館が 5 階、7 号館が 1 階の建物になっており、それぞれのフロアごとの推定参加人数を示している。合計で 485 名の寮生が参加している。

5-2) 館内

それぞれの号館の玄関に防犯カメラが設置されている。これらの記録映像を分析し、それぞれの建物から出て行く人の数と時間との関係を求めた。これを図-3 に示す。記録映像は、非常ベルが鳴る 16 秒前からのものを用いている。

グラフより、避難行動を開始するタイミングは号館によって少しずつれていることがわかる。これは、

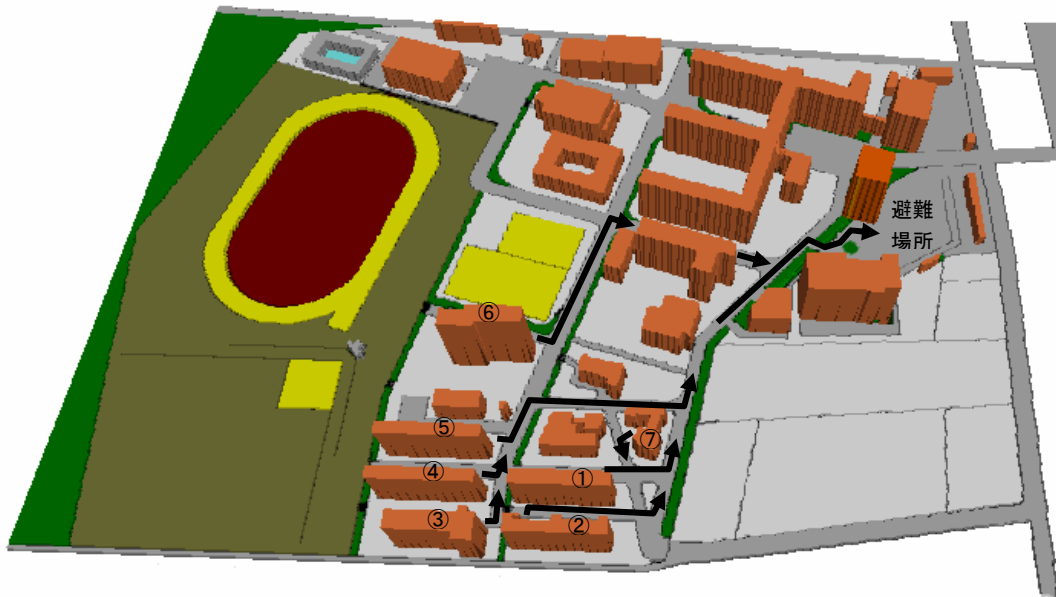


図-2 和歌山高専構内の鳥瞰図と避難経路

表-1 点呼票から推定した避難訓練参加人数

	1号館	2号館	3号館	4号館	5号館	6号館	7号館
1階	27	11	26	16	19	12	22
2階	31	28	34	16	19	25	
3階	32	20	38	19	19	24	
4階						22	
5階						24	
小計	90	59	98	51	57	108	22
合計	485						

事前教育において、避難行動を開始するタイミングが十分に周知されていなかったためと考えられる。非常ベルが鳴った時刻と火元を確認後に非常放送で避難を指示した時刻に約 90 秒のずれがあり、非常ベルを聞いて行動する者と非常放送を聞いて行動する者がいたと推定される。1, 2, 4 および 6 号館では約 120 秒を境に館内から出ていく人数の増加傾向に変化があり、同じ号館内でも行動パターンが異なっていたことが伺える。これには、事前教育の不足以外に、毎年 2 回このような訓練をしていることによる緊張感の欠如にも原因があると考えられる。

防犯カメラの記録映像からカウントした各号館からの避難人数と表-1 に示す点呼票から推定した人数を表-2 に示す。一部違いが出ていることがわかる。この理由として、住居棟以外の棟から直接避難場所に向かった、既にクラブ活動を開始していた者がグラウンドなどの活動場所から直接避難場所に向かった、避難場所での点呼の間違い等が考えられる。

5-3) 屋外

避難場所に設定されたのは、構内の東側にある図

書館棟と専攻科棟の間にある駐車場である。普段は職員が使用しているが、当日は避難訓練のためにすべて空けられていた。また、このスペースは一段高くなっている場所にあり、構内の南側にある寮から避難場所に行く場合、階段を利用することになる。この階段を上がりきったところが避難場所として設定されていた。

この避難場所は専攻科棟に隣接しており、当日は同棟の 3 階にビデオカメラを設置し、階段付近を定点撮影した。このビデオ映像を分析して、避難場所に到達した人の数と時間との関係を求めた。これを図-4 に示す。ビデオカメラが、階段を上がる人を斜めから撮影するような角度に設置されていた関係で、映像分析から通過人数をカウントする際、若干の誤差を含んでいる可能性がある。

3. 避難行動のシミュレーション

CA は、1940～1950 年代にフォン・ノイマンらによって提案されたものとされている。セルを格子状

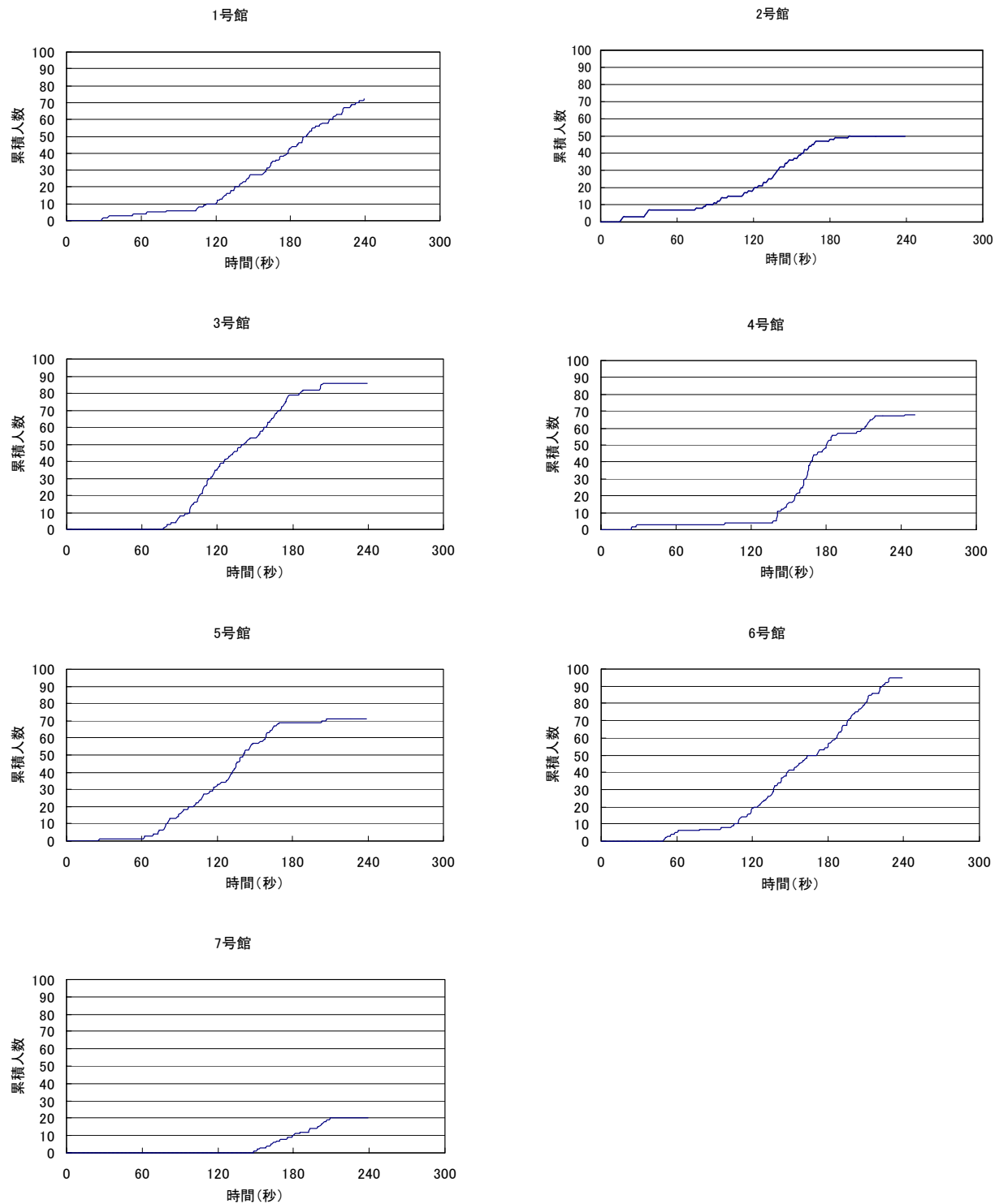


図-3 建物の出入口から出て行く人数と時間の関係

表-2 防犯カメラの映像から推定される避難訓練参加人数

	1号館	2号館	3号館	4号館	5号館	6号館	7号館	合計
点呼表	90	59	98	51	57	108	22	485
防犯カメラ	72	50	86	68	71	95	20	462

に配置させ、任意のセルの状態を周囲のセルの状態から決定し、各セルを同期的に動作させることで対象領域全体の状態を決定させるものである。その挙

動が微分方程式等の支配方程式で表されるような問題に対しては、差分法や有限要素法等を用いて解くことは一般に行われるが、そのような定式化が困難

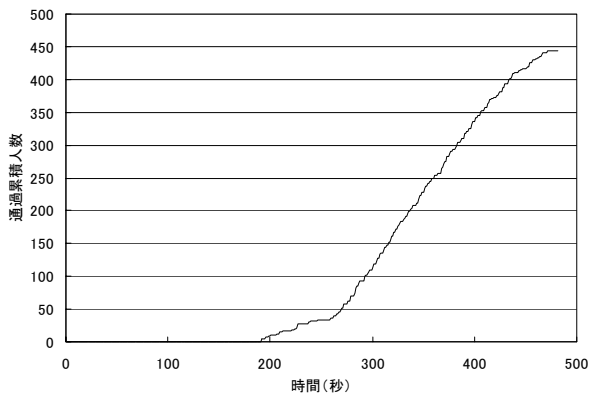


図-4 避難場所前階段を通過した人数と時間との関係

な現象に対して、特にセルオートマトン法の効果が発揮される。

この方法によって複雑な現象を簡単なセル間の局所的相互作用から再現できるようになるため、様々な現象を解析できるようになった。生体、遺伝、拡散現象、結晶成長等の一般分野から道路網交通シミュレーション等の工学分野に渡る広い分野で研究がなされている。

CA によるシミュレーションを行うにあたって、対象領域を縦横等間隔の格子線で分割する。それぞれの格子がセルであり、セルの状態として、「障害物」、「通路」等が割り当てられる。「通路」のセルには「人」を配置させることができる。CA によるシミュレーションにおいては、「人」の移動規則をどのように設定するかが重要である。本研究では、「人」の視野の範囲内で目標となるセルを目指して進行するという考え方⁹⁾を基本とした。

3.1 CA によるシミュレーションの方法

以下に、本研究で用いた「人」の移動規則等について説明する。

1) セルの状態

それぞれのセルには、「通路」、「障害物」、「サイン」、「ゴール」のいずれかの状態量が割り当てられている。「障害物」のセル以外は「人」を配置することができる。「サイン」は標識と考えればよく、避難誘導者がいる場合や避難誘導のための標識がある場合等に、このセルにその役目をさせる。「ゴール」は目的地を表すセルに割り当てられる。

2) セルの状態と人の移動規則

2-1) 人の進行方向と移動速度

移動可能な方向は、図-5 に示すように、セルの並びに対して直行方向と 45 度をなす方向の計 8 方向とし、1 計算ステップで 2 セルまで進行することが

できることとした。ただし、斜め方向には 1 計算ステップで 1 セル分しか進めないものとしている。

避難訓練の調査から、人の移動速度が概ね 1.4m/sec であることがわかった。そこで、本研究では 1 セルの大きさを 0.7m × 0.7m とし、1 計算ステップを 1 秒に換算することとした。

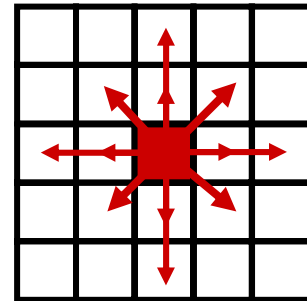


図-5 人の移動方向

2-2) 視野の設定

一般には、視野をどの程度広く取るかは計算に影響を及ぼすため重要であるが、本研究で対象とするのは寮生の生活空間であり、かつ避難経路も決まっていることから、視野の影響はそれ程ないと考えられる。本研究では、文献 9) を参考にして図-6 に示すように視野の範囲を設定することとした。

2-3) 障害物と死角

障害物がある場合、その背後は死角になり、視野の範囲外という扱いをする。死角になるセルは、視野内のそれぞれのセルの中心と対象とする人のセルの中心を結ぶ線分が障害物のセルを横切るかどうかで判定させている。障害物の位置を変えた場合の死角を図-7 に示す。

2-4) 「サイン」のセル

避難誘導の標識等があった場合には、その付近で指示された方向に向きを変えることになる。本研究

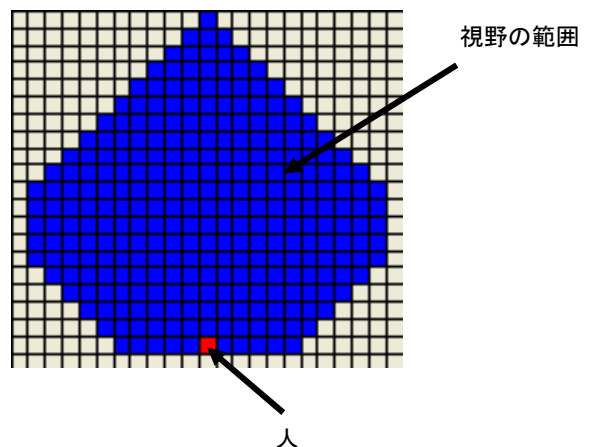


図-6 人の視野

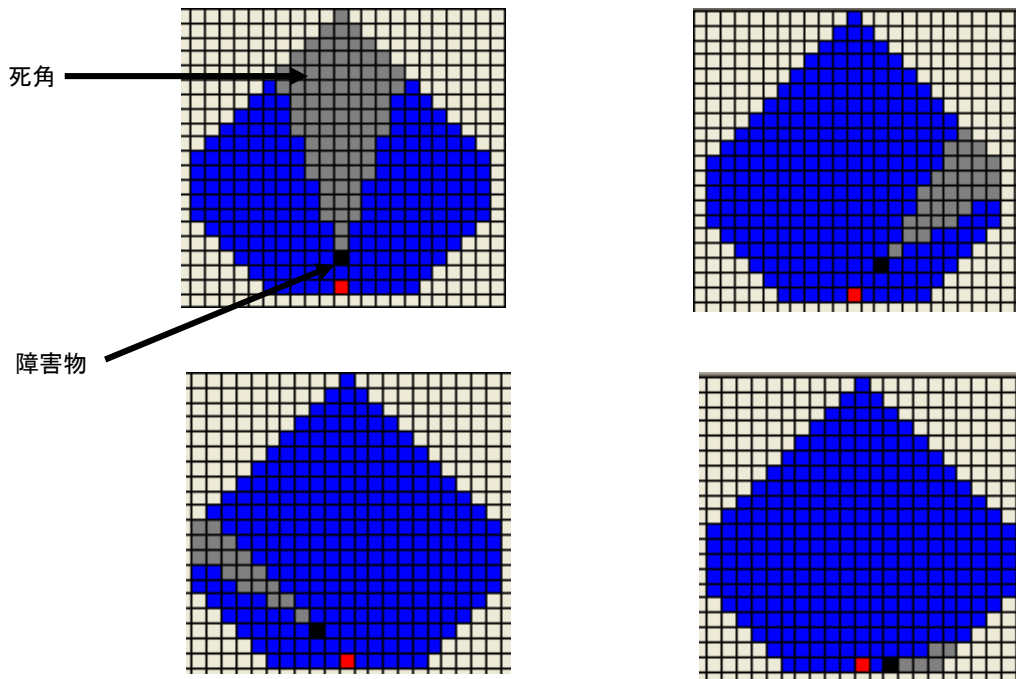


図-7 障害物と死角

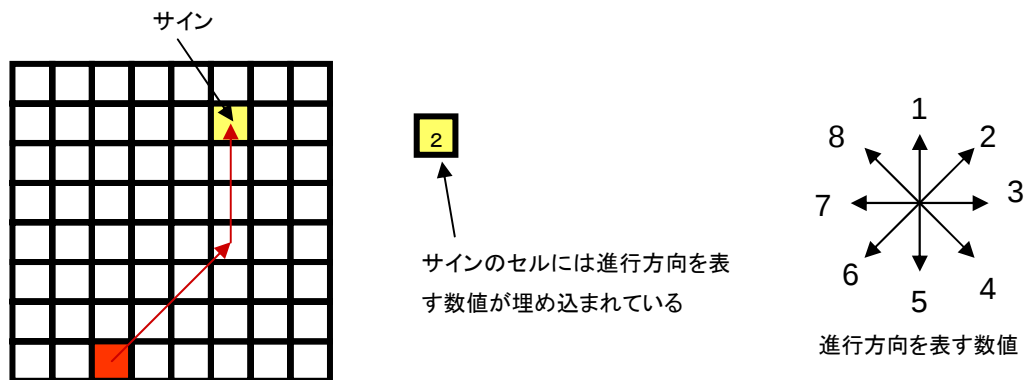


図-8 「サイン」のセルとそこからの移動方向の指示

では、この役割を持つ「サイン」のセル設けることとした。視野内に「サイン」のセルがあれば、これを目標セルとして移動させ、指示に従って進行方向を変えさせる。「サイン」のセルには、1～8の数値が埋め込まれており、図-8 に示すようにそれぞれの数値に対応した方向を指示できるようにしている。

2-5) 「ゴール」のセル

「ゴール」のセルは、建物内からの避難であれば出口に、また屋外であれば、指定された避難場所の入口に割り当てる。

2-6) 人の移動規則

それぞれの人の視野内において目標となるセルを探し、そのセルを目指して移動させる。目標セルが複数ある場合は、次のように優先順位をつける。

- ゴールが見えた場合は、それを目指す。
- サインが見えた場合は、それを目指す。

障害物の背後にできた死角のセルがある場合は、それに隣接するセルを目指す。

目標セルが無い場合は、視野の先端に位置するセルを目指す。

このような規則を基本とするが、さらにつぎに示すような工夫をしている。

- a) 死角に隣接するセルは視野内に複数ある場合が多い。そのような場合は、現在の進行方向からの角度が最も小さいものを選択する。
- b) 視野内において、上記 ~ の目標セルが見つからない場合は、進行方向の ± 45 度の方向で探す。それでも見つからない場合は、 ± 90 度の方向で探す。最終的に目標セルが見つからない場合は上記の に従う。ただし、視野の先端のセルが不可視の場合、つまり、行く手が障害物で塞がれていると判定できる場合

は、進行方向を 180 度回転させ、逆方向で目標セルを探す。

- c) 堂々巡りを避けるため、一度目標になったセルの近傍を再度目標にする場合は、優先度を低くする。
- d) 目標セルに向けて移動する際に、移動先のセルが障害物あるいは他の人で塞がっている場合は、隣接するセルに移動する。そこも塞がっている場合は待機する。

3.2 迷路からの脱出のシミュレーション

和歌山高専学生寮の避難訓練のシミュレーションを行う前に、前節に述べた方法の有効性を検討するために、いくつかの迷路作成し、そこから脱出するシミュレーションを行った。図-9 に迷路の一例を示す。ここでは、人の探索能力について調べることを目的とし、「サイン」のセルは設けていない。また、人は一人だけ配置することとした。シミュレーションの結果を図-10 に示す。図には、移動の軌跡とゴールまでの経路を示す。経路を見ると、可能性のあるところを探索しながら、最終的にゴールにたどり着いていることがわかる。

3.3 避難訓練のシミュレーション

1) 建物内のシミュレーション

3 号館は火元と想定された建物であり、非常ベル作動後に 2 号館の寮事務室から火元確認のため教員が駆けつけることになっていた。このこともあって、他の号館とは異なる緊張感があったものと思われる。そこで、3 号館を対象として棟内の避難行動シミュレーションを行い、調査結果と比較することとした。図-11 に 3 号館各階の平面図を示す。各階の平面を階段で結ぶようにして、図-12 のようにモデル化した。水平の 3 段のラインがそれぞれ 1~3 階の廊下部分を表し、縦のラインが階段を表す。階段部分の膨らみは踊り場を表している。階段は 1 段を 1 セルとした。廊下および階段では人が 2 人並んで歩ける程度であり、幅は 2 セルで表している。

廊下では、前方が空いていれば 1 計算ステップ（1 秒に相当）あたり最大 2 セルまで進むことができ、階段では 1 セルしか進めないことにした。寮は日常の生活空間であり迷うこともないので、主な所にサインを配置し、廊下を逆行して出口を探す等の混乱が生じないようにしている。

寮室は 3 種類あり、南側で談話室に近い側の小さな部屋は個室であり、それ以外は 2 人部屋である。南側にある横長の部屋には両サイドに出入口があるが、他は 1 部屋に出入口は 1 つである。また、1 階

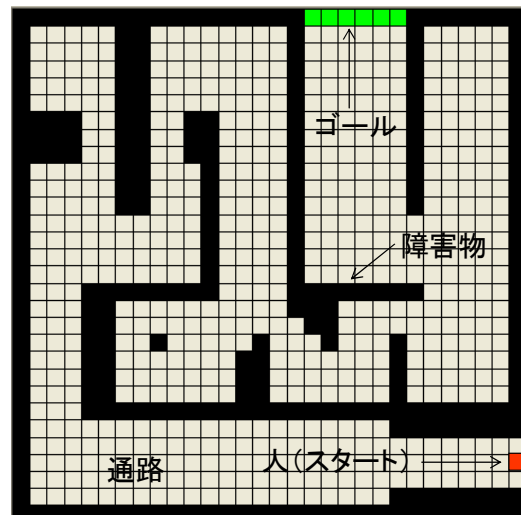


図-9 迷路のモデル

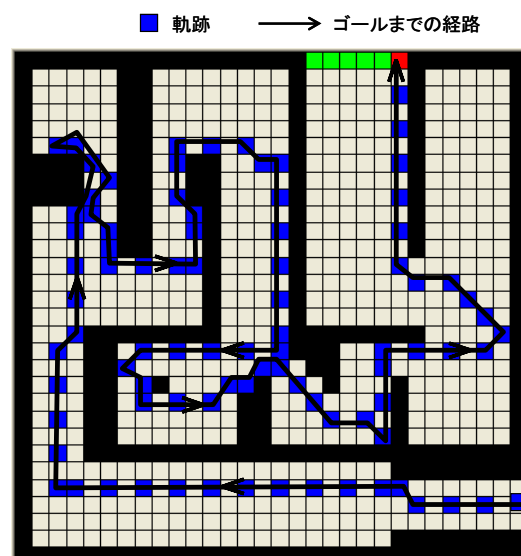
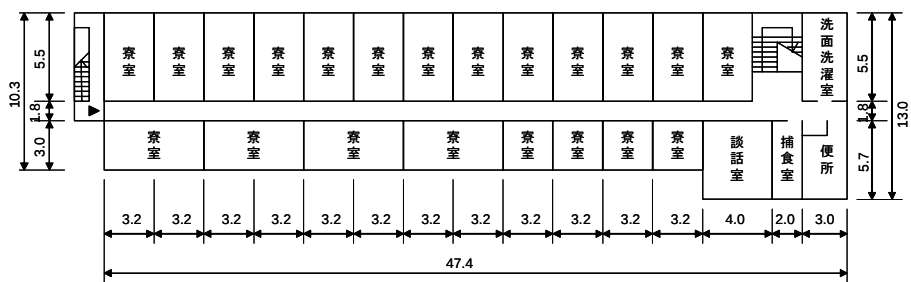


図-10 移動の軌跡と経路

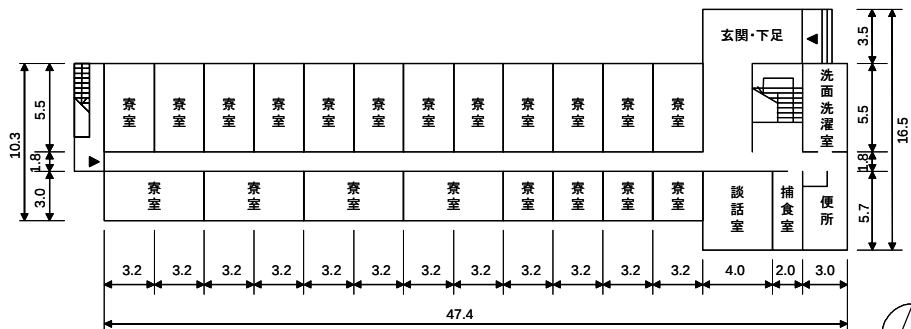
の出入口は同時に 2 人以上が出入りすることはできない。西側に非常階段があるが、これは使用させていない。

点呼票から、人を自室の前の廊下に配置している。ただし、避難訓練の当日、野球部がクラブ活動を始めており、部員がグラウンドから直接避難場所に向かったため、3 号館の部員 9 人については除いている。

シミュレーションの 1 シーンを図-13 に示す。また、シミュレーションによる結果を、出入口に到達した人数と時間ステップとの関係で整理し、防犯カメラの映像から分析したものと比較した。これを図-14 に示しており、概ね対応している。詳細に見ると、シミュレーションでは一定時間経過後、時間と累積人数がほぼ比例の関係になっている。60 秒前後までは調査結果とよく対応しているが、それ以降、少し差が現れている。60 秒前後は建物の出入



(b) 2階および3階



(a) 1階

図-11 3号館各階の平面図（単位；m）

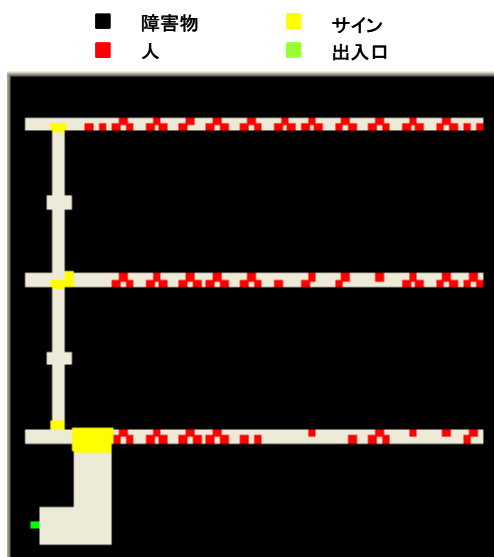


図-12 3号館の解析モデル

り口付近が混雑しはじめる時間帯であり、実際の災害であればパニックが予想され、そこで事故を発生させる可能性がある。訓練の場合は緊迫感が薄く、参加者に精神的な余裕があるため、そのような事態を回避しようとして、自身の行動を意識的に遅らせていることが考えられ、このことがシミュレーションと調査結果の差に現れてたともみることできる。

2) 建物の出口から避難場所までのシミュレーション

前章でも述べたように、避難行動を開始するタイミングが号館によって少しずつれている。しかし、そ

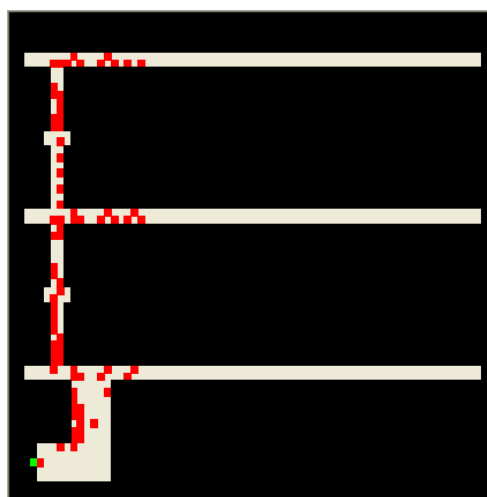


図-13 3号館のシミュレーションの1シーン

れを建物内のシミュレーションで表現することは困難である。そこで、屋外の避難場所までの避難行動のシミュレーションを行うに際して、各号館の防犯カメラの映像を分析して作成した図-3 を用いることとした。つまり、同図のグラフに示す時間と人数の関係を計算のステップと同期させて、それぞれの号館の出口から人を通路に流入させる。

図-15 に屋外の解析モデルを示す。255×263 セルで構成されている。位置関係を表すために、建物をはめ込んでいるが、解析においては、出入口以外は障害物として扱われている。

シミュレーションにおいて、102, 192, 296 および 372 の時間ステップにおける避難状況を図-16 に

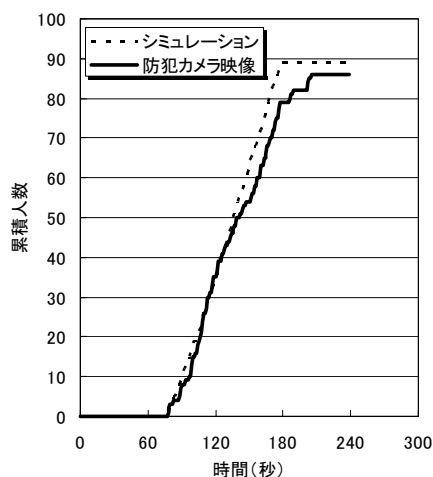


図-14 3号館の避難行動のシミュレーションと防犯カメラの映像の分析結果の比較

示す．一定時間経過後に避難場所前の階段が混雑しはじめ，後続に人の列ができることはビデオ映像や目視によって確認されているが，計算においても同様の現象が再現できている．避難場所に到達した人数と時間との関係について，シミュレーションとビデオ映像の分析を比較した結果を図-17に示す．シミュレーションと調査結果は概ね対応しているが，計算の後半において若干の差が認められる．このよう

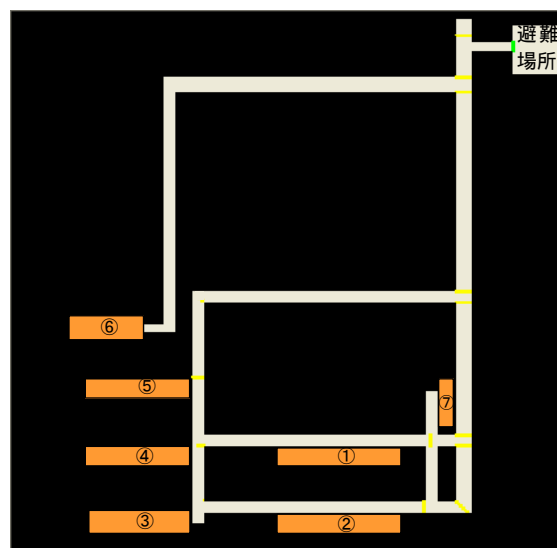
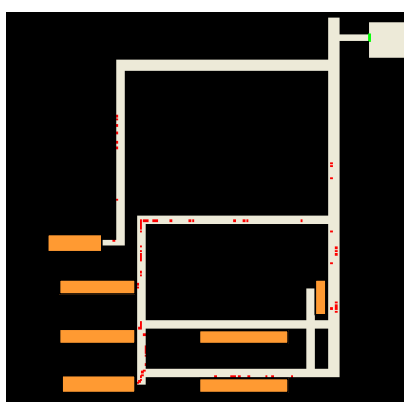


図-15 屋外の解析モデル

な後半の差異については，図-14に示す屋内のシミュレーションでも認められ，同様の原因が考えられる．

4．結論

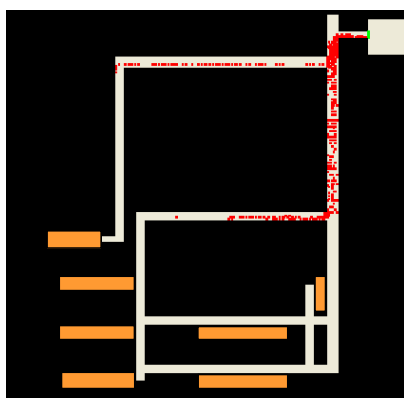
本研究では，和歌山高専学生寮で実施された避難



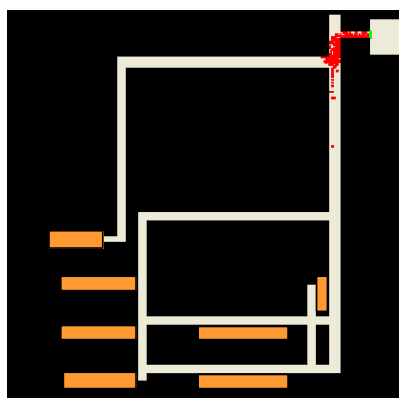
(a) 102ステップ



(b) 192ステップ



(c) 296ステップ



(d) 372ステップ

図-16 シミュレーションによる屋外の避難行動の動態

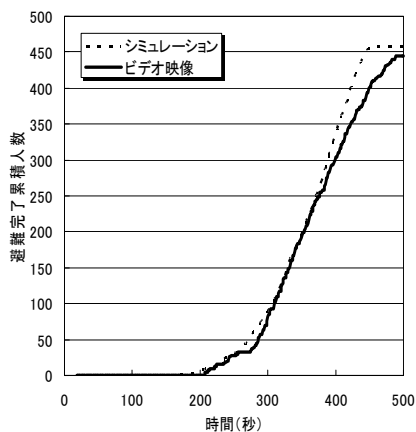


図-17 屋外の避難行動のシミュレーションと防犯カメラの映像の分析結果の比較

訓練を調査し，CA に基づくシミュレーションによる再現性について検討した．以下に得られた結果を要約する．

- (1) 7 棟ある学生寮において，それぞれの玄関に設置されている防犯カメラとビデオカメラの映像等から避難訓練の調査を行って，シミュレーションと比較するためのデータを作成した．
- (2) 建物内および屋外におけるシミュレーションは，目標地点を通過する時間と人数の関係において，調査結果と概ね対応する結果が得られたが，シミュレーションの後半部分で若干の差異が認められた．

避難訓練は，一般に事前教育がなされているため混乱やパニックもなく，実際の災害時の避難行動とは異なるところもある．しかし，避難訓練であっても，シミュレーションによって一定の再現性を確保できるがわかったことで，今後の避難行動シミュレーションの発展の可能性を示すことができたと考える．

視野の設定の問題を含め個人の避難行動パターン

の研究が進めば，行動モデルに反映させることで，さらに精度の高いシミュレーションが可能になる．

参考文献

- 1) 横山秀史，目黒公郎，片山恒雄：避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用，土木学会論文集，No.513/I-31, pp.225-232, 1995.
- 2) 清野純史，三浦房紀，瀧本皓一：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，土木学会論文集，No.537/I-35, pp.233-244, 1996.
- 3) 清野純史，三浦房紀，八木宏晃：個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション被災時の群衆避難行動シミュレーション，土木学会論文集，No.591/I-43, pp.365-378, 1998.
- 4) 山本英臣，森下信，中野孝昭：セルオートマトンによる人の流れシミュレーション，日本機械学会機械力学計測制御講演会論文集，98, 8, pp.261-264, 1998.
- 5) 松田泰治，大塚久哲，樺木武，内田広明：セルオートマトン法を用いた地下街の避難行動シミュレーションに関する一考察，地域安全学会論文集，No.2, pp.95-100, 2000.
- 6) 近田康夫，廣瀬智士，城戸隆良：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，Vol.9, pp.19-30, 2000.
- 7) 井面仁志，白木渡，堂垣正博，有友春樹：CA による災害時の人間行動を考慮した避難シミュレーション，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要，I-242, pp.483-484, 2004.
- 8) 加藤恭義，光成友孝，築山洋：セルオートマトン法 - 複雑系の自己組織化と超並列処理 - ，森北出版，第 2 刷，1999.
- 9) 森下信：セルオートマトン - 複雑系の具象化 - ，pp.135-137，養賢堂，2003.

(2005.3.10 受付)

INVESTIGATION OF EVACUATION TRAINING AND SIMULATION OF HUMAN BEHAVIOR BASED ON CA DURING EVACUATION

Osamu TSUJIHARA, Tomoki IMAKITA, Tomonori Matsukawa and Tsutomu SAWADA

The purpose of this study is to discuss the accuracy of simulation of evacuation training. The investigation of evacuation training, which was held assuming a fire in the dormitory of Wakayama National College of Technology, was carried out. About 500 students participated. The investigation is based mainly on the analysis of videotapes which were recorded by the security cameras installed in the dormitory and the video camera set up near the place of refuge. The relationship of time and the number of evacuees that pass through some selected points is analyzed. Simulation of evacuation both inside and outside of the dormitory based on CA (Cellular Automata) is performed, and the results are compared with the investigation.