

歩行者シミュレーションを用いた避難訓練の評価

勝野 幸司* 大瀬 治毅**

Evaluation on Emergency Drills with Pedestrian Simulation

Koji Katsuno*, Haruki Ose**

Though emergency drills should be executed to conceive several conditions, it only gets executed in a single evacuation route.

In order to cover this shortcoming, this study make an evaluation on emergency drills by using a pedestrian simulation software, and suggest more better methods of drills. As the result of simulation of the action of drill of Yatsushiro Campus, conclusions are as follows.

- 1) The result of simulation is quite similar to practical actions of pedestrians, so that the software “SimTread” is useful for predicting the actions.
- 2) By using “SimTread”, we could find the evacuation method at a much faster time than at present.

キーワード：歩行者シミュレーション，避難訓練

Keywords：Pedestrian simulation, Emergency drill

1. はじめに

1.1 背景および目的

学校における防災・減災対策として、避難訓練は主たる手段である。一方で、例えば時間割によって利用が集中する校舎や、机の配置などの条件が多様な教室、歪みや崩壊により利用できない出口などの不測の事態に対して、今日実施されている避難訓練では十分対応できるとも言い難い。一方で、コンピュータによる群集歩行シミュレーションは、現実では実測が困難な状態での歩行流動を視覚的に予測・分析できるため、有用な方法の一つとされている。本研究では、歩行者シミュレーションソフトの一つである SimTread を用いて複数の避難方法を検討し、避難時に起こる諸問題を抽出することで、学校の避難計画を物理的側面と人的側面の双方から問題点を抽出し、避難訓練方法の評価・改善につなげることを目的とする。

1.2 方法

本研究では歩行者シミュレーションソフトとして SimTread を用いる。

SimTread を用いる利点として、①実際の訓練ではでき

ない複数の異なる状況（避難場所、経路、歩行速度、避難を阻害する物理的障害物など）を設定できる。②避難完了に要する時間や滞留箇所の表示など、具体的なデータを取得できる。③シミュレーション結果の視覚化により訓練企画者や参加者に結果や問題点を説明しやすい点が挙げられる。

2. ソフトウェアの再現性の検証

本章では、SimTread がどの程度実際の人間の動きを再現できているか、その再現性を評価するために本校八代キャンパスで実施された避難訓練計画に基づいたシミュレーションを行い実際の避難行動と比較分析する。

2.1. SimTread の概要

SimTread は、CAD ソフトである Vectorworks のプラグインとして使用する。本研究では Mac OS 版を採用した。CAD で描画した図面上に歩行者（空間内での位置、方向、最高歩行速度）や空間（壁体や什器など歩行者が進入出来ない領域である障害物）、目的地（各歩行者が目指す地点、領域）等をオブジェクトとして配置し設定し、シミュレーションの事前準備が整う。

行動ルールの定義は、個々の歩行者についてアルゴリズムに従って行われ、群集としての振る舞いは個々の歩行者の動作の結果として現れるものである。アルゴリズムの詳細は文献 (1) に示されている通りであるが紙面の都合上ここでは割愛する。

* 建築社会デザイン工学科
〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627
Dept. of Architecture and Civil Engineering
2627 Hirayama, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

** 専攻科生産システム工学専攻
〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627
Production System Engineering Course
2627 Hirayama, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

2.2 訓練時の動きの検証

(1) 訓練計画の概要

分析対象とした避難訓練の概要は表1の通りである。尚、各クラスは下記の経路で屋外に避難するよう計画に盛り込まれている。

1年各クラス（1階）：西側玄関から屋外に避難する。

2年各クラス（3階）：東側階段を1階まで下り、東側通路から管理棟へ避難する。

3年各クラス（2階）：2階東側通路から管理棟へ避難する。

(2) 避難者の動きの記録

訓練時の避難者の動きを定点および移動しながらの動画により記録した。定点で動画を撮影した箇所は下記の①～④である。()内は、避難開始から撮影地点までの時間と通過人数を示す。⑤は学生1名が避難しながら撮影したものである。

①1階東階段付近（1分33秒，133名）

②2階東階段付近（2分2秒，120名）

③3階東階段付近（2分25秒，134名）

④管理棟玄関（3分49秒，269名）

⑤3AC 学生（2分0秒（屋外避難完了時間））

(3) 避難行動の考察と訓練計画との相違点の抽出

避難訓練時の動画から避難者の動きを分析した結果、避難計画と異なる点や避難完了時間に影響を及ぼしたと考えられる以下の点が確認された。

- ・3階避難者の120人中100人が2階避難者と同じ避難経路を通った。
- ・2階中央廊下に面した室のドアが開いた状態で、歩行の妨げとなっていた。
- ・1階避難者が、教室前で整列した後避難を開始した。

2.3 シミュレーションによる避難訓練の再現

計画とは異なった訓練時（前節3）参照）の動きも踏まえ、SimTreadを用いてシミュレーションによる避難訓練の再現を行う。

(1) 諸条件の設定

避難者の人数は、学生全員が着席した状態に教員を含めて402名を想定する。

シミュレーション対象となる本校の共通教育科棟（図1）については、CAD上で正確に再現した。廊下の幅は最大で2700mm、最小（柱突出部）で2450mm、各階の床は平坦で、スロープや段差はないため廊下での歩行速度は一定とする。歩行者の教室ならびに廊下の歩行速度は避難訓練時に計測されたもののうち最も速かった1.0m/s、階段では0.5m/s（引用文献⁽²⁾）とする。

机は寸法400mm×600mmのものを各教室の実際の配置および個数を用意し、訓練時と同数の人間（学生および教員）を設定する。

尚、前節3）にある通り、2階中央廊下のドアが開いていたため、図1内の吹き出し部分の通りにドアが開いた状態を再現している。

表1 避難訓練の概要

実施日時	平成24年10月9日（火）15時15分～16時
実施場所	熊本高専八代キャンパス共通教育科棟および管理棟
災害発生想定	同共通教育科棟3階多目的実験室からの出火（図1）

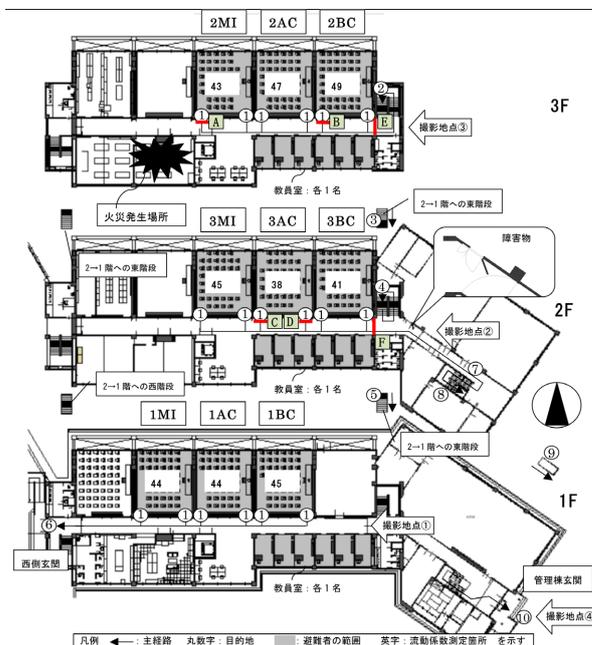


図1 訓練概要と記録箇所等

(2) 避難方向の設定

SimTreadでは、各教室の廊下側扉や建物から屋外へ出る出口など開口部を目的地として設置することで、歩行者を誘導する。本報での避難経路は、避難訓練時の動きを基に設定した（図1に主経路を示す）。

・教室から廊下に出る

教室から出る際は、西側出口と東側出口の2方向から出るように、出入り口に目的地①（図1図中：以下同様）を設置し、グループ化する。このとき、歩行者の「目指す目的地」を目的地①に設定することで、目的地①をたどった歩行者は、目的地①に設定してある「次の目的地」に向かう（「次の目的地」をしていない場合、より大きな目的地番号の目的地を若い番号から順にたどる）。歩行者の設定で、たどる目的地を指定することもできる。

階段では、ワーブ機能を用いる（平面図を用いたシミュレーションにおける階段では、「ワーブ領域」と「目的地」を使って上下階をつなげる）必要があるため、西階段と東階段に目的地②～⑤を、管理棟階段に目的地⑧、⑨を設定する。

最終目的地に到達した歩行者または「次の目的地」の設定を [end] とした歩行者は避難完了となり、消滅する。

・1階からの避難

1階の歩行者は、西側玄関に向かう。よって「次の目的地」の設定を [①, ⑥, end] とする。

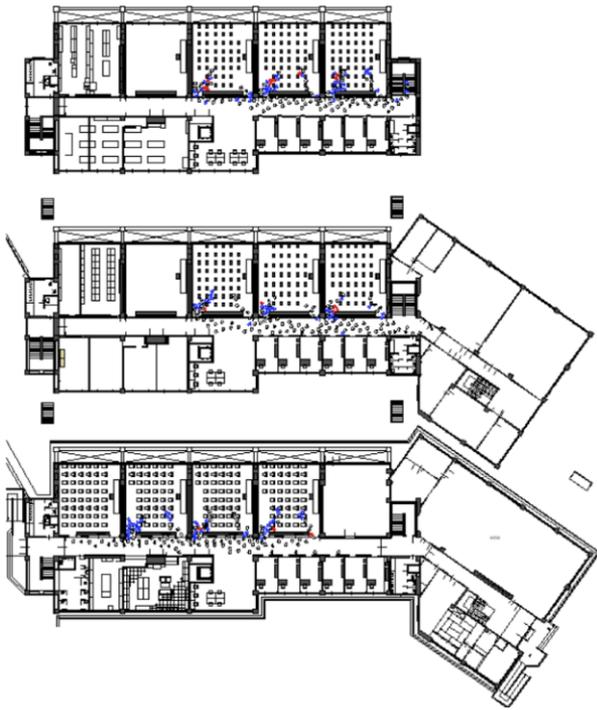


図2 避難性状 (避難開始10秒後)

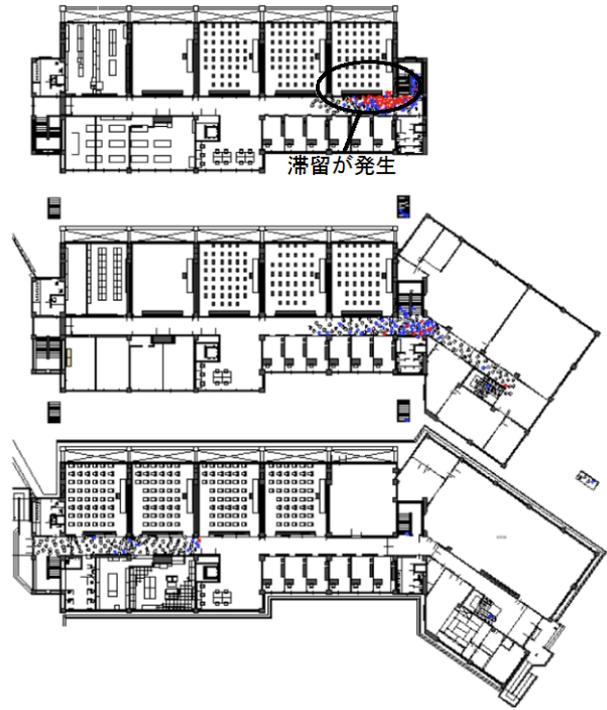


図3 避難性状 (避難開始36秒後)

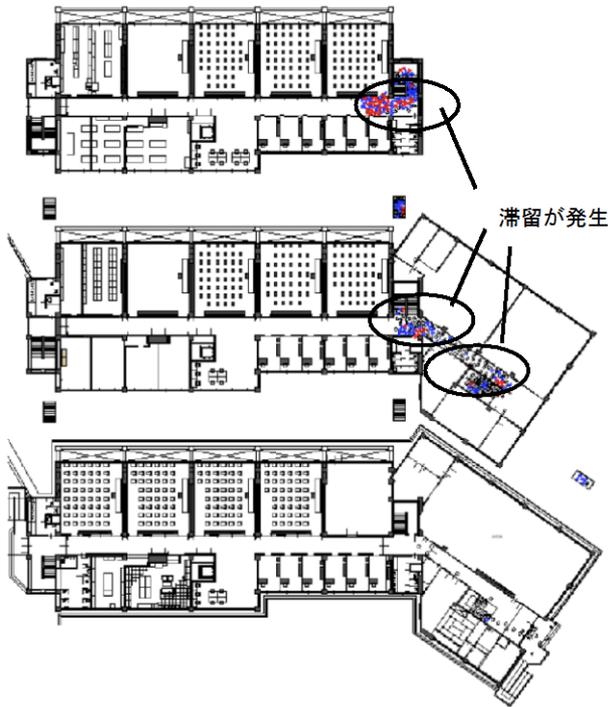


図4 避難性状 (避難開始1分8秒後)

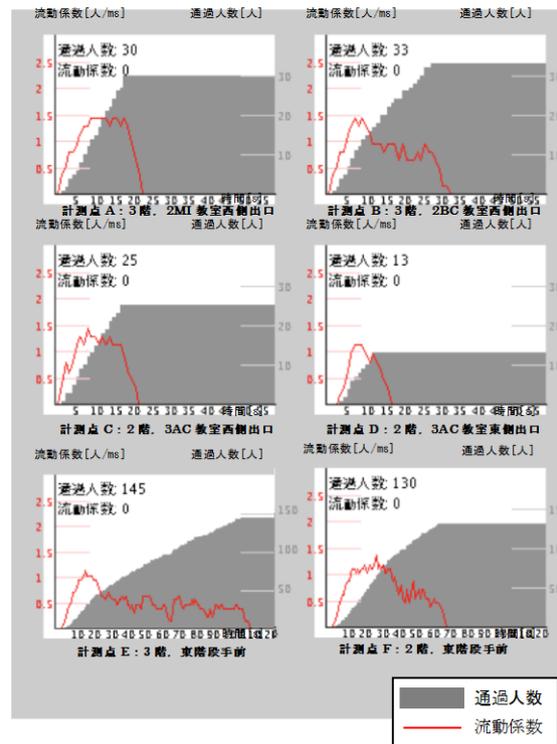


図5 通過人数と流動係数の時間変化

・2階からの避難

2階の歩行者は、管理棟の階段を通過して管理棟玄関へ向かう。よって「次の目的地」の設定を〔①, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, end〕とした。

・3階からの避難

3階の歩行者は、東階段を通過して管理棟玄関へ向かう。よって「次の目的地」の設定を〔①, ②, ③, ④, ⑤, ⑩, end〕とする。実際の訓練時は、前節3)に挙げた通り3階避難者の120人中100人が2階避難者と同じ避難経路を通過したため、100人の避難者については「次の目的地」の設定を〔①, ②, ③, ④, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩, end〕とした。

(3) 流動係数測定箇所の設定

視覚的に流量や通過状況の判断が困難な開口において、流動係数や通過人数のデータを取得するために、教室の出入口や廊下・階段で、避難者の交錯が予想される以下の個所に流動係数の測定ラインを設ける(図1中)。

- A: 3階, 2MI 教室西側出口
- B: 3階, 2BC 教室西側出口
- C: 2階, 3AC 教室西側出口
- D: 2階, 3AC 教室東側出口
- E: 3階, 東階段手前
- F: 2階, 東階段手前

(4) シミュレーション結果と考察

(1) ~ (3) に設定した条件でシミュレーションを実施した。402名全員の避難(屋外退避)が完了したのは、開始から3分47秒後であった。以下、時間を追って考察を行う。

図2の避難性状では2, 3階の避難者が階段付近に到達した様子が確認できる。避難開始から36秒後(図3), 避難者の教室・教室からの退出が完了すると同時に、3階の先頭の避難者が1階に到着する。この頃から3階の避難者(人シンボル)が停止を示す赤に染まり始め、計測点E・3階東側階段手前においても流動係数が小さくなり、通過人数を示すグラフの勾配が変化したことから、滞留が生じ始めたことが読み取れる。滞留が生じることは避難安全上好ましくないため、避難行動の障害となる反面、避難安全性を評価するための重要な現象の一つである。

図2で教室の中を見ると、西側と東側の2つの出口から流出の様子が確認できることから、2方向避難がなされている。しかし、机が教室後方に多いため、教室前方2列の避難者は東側出口へ、教室後方4列の避難者が西側出口へ退出した。図5の計測点C・3AC 教室西側出口と計測点D・3AC 教室東側出口の比較でも、C・3AC 教室西側出口は通過人数、流動係数共に上回っていることが分かる。また、出口の流出先に避難者が存在すると、開口からの流出を妨げるような滞留が生じるため、全ての教室で同時に退出が完了することはなく、ズレが生じた。図5での計測点A・3階2MI 教室西側出口と計測点B・3階2BC 教室西側出口を比較すると、教室出口に階段へ向かう避難者がいないAは流動係数が大きく、退出が完了する時間も7秒以上早い。

避難開始から1分8秒後、1階の歩行者の避難が完了し、その時点で3階東階段付近、2階東階段付近、管理棟階段の3箇所滞りが確認できた(図4)。管理棟階段で確認できた滞留は回り階段による複雑な経路によるものだと考えられる。2階東階段付近で滞留が発生した原因は、扉が開いていた事で障害となり、避難を妨げていたためである。そのため障害物から管理棟階段までは、滞留が発生する事無くスムーズに移動している。3階では階段前で滞留が発生したことで、避難者が3階から避難したのは避難開始から2分25秒後となった。



図6 訓練時の滞留の様子
(左: 2階管理棟階段/右: 同廊下)

表2 シミュレーション結果と訓練結果の比較

		避難訓練	シミュレーション
教室からの退出時間		0:30*	0:29
1階東玄関への到達時間	一人目	0:18*	0:15
	全員	1:33*	1:08
2階東階段への到達時間	一人目	0:10*	0:07
	全員	1:21	1:30*
3階東階段への到達時間	一人目	0:14*	0:10
	全員	2:25*	2:16
管理棟玄関への到達時間	一人目	0:39	0:39
	全員	3:49*	3:42

2.4 避難訓練とシミュレーションの比較

実際の訓練時の動きとシミュレーションの結果を比較し、シミュレーションソフトの再現性の検証を行う。

(1) 所要時間

避難訓練とシミュレーションを比較するために、まず地点ごとの避難に要した時間を集計した(表2)。

最大の誤差が生じたのは1階避難者の避難完了時間: 25秒である。これは避難訓練時に1階の避難者が、教室前で整列した後避難を開始したことが大きな原因であると考えられる。整列に要した時間は31秒だったため、差し引いた場合大きな誤差にはならないと考えられる。

それ以外では10秒以上の誤差は無いが、全体的にシミュレーションの方が早く避難を終えているといえる。訓練で、より避難完了に時間がかかった要因として、①警報が鳴ってから、動き出すまでの時間をシミュレーションが再現していない、②着席状態から立ち上がって歩行を開始するまでをシミュレーションが再現していない、③今回シミュレーションで使用した歩行速度を避難訓練時に計測したもので最も速かった1.0m/sとした、などが挙げられる。一人

一人がより迅速に行動すればシミュレーションを上回る結果が得られると考える。

(2) 滞留の発生箇所

シミュレーションで滞留を確認できたのは各教室西側出口，3階東階段付近，2階東階段付近，管理棟階段の4箇所である。対して，避難訓練で滞留を確認できたのは3階東階段付近，2階東階段付近の廊下（図6右），管理棟階段（図6左）の3箇所である。滞留箇所はほとんど一致しており，発生していた時間も一致していた。シミュレーションで教室出口に滞留が発生していたのは，机が教室後方に多いことで，教室前方2列の避難者は東側出口へ，教室後方4列の避難者が西側出口へ退出したためだと考えられる。避難訓練時は一人一人がバラバラで，出口の混み具合を見越した行動だったため，スムーズに移動していた。

2.5 まとめ

以上の結果から，シミュレーションソフトが十分に実際の動きを再現していると判断する。SimTreadが実態を再現できる主な点としては，以下の通りである。

- ・避難に要する時間。
- ・滞留が発生する箇所と及び発生している時間。
- ・障害物が避難行動に与える影響。

一方で，以下の点についてはソフトウェアの仕様でもあるため，再現が出来ない。避難訓練の評価に用いる場合はこの点を除外して利用する必要があると考える（注釈⁽¹⁾）。

- ・狭小な開口を通過できない。
- ・滞留の中を移動する際，列を成すなどの一体的な移動ができない（歩行者は隙間を詰めるように行動する）。
- ・目的地を設定していない場合や目的地が複数ある場合は最も近い出口に向かうなど，時間経過と判断によって行動パターンを遷移できない。
- ・複数の集団が交錯した際に行動不能になる。

3. シミュレーションによる避難訓練の評価

3.1 避難訓練の限界とシミュレーションの有効性

避難訓練はあくまでも訓練であるため，円滑に避難が完了するよう事前に一定以上のプログラムを組む傾向にある。実際，実施された避難訓練は各階の学級毎に避難に用いる階段を分け，同じ階段や出口に多数の避難者が殺到しないよう検討されたと推察される。そのため，比較的円滑に避難ができる条件のはずであったが，それでも滞留が発生するという事は，例えば全階同じ方向に移動する等より危機的な状況を設定した場合，予測のつかない事態が発生する可能性がある。以下ではより危機的な状況をはじめいくつかの条件のもとでシミュレーションを行い，その結果から現行の避難訓練の評価を行う。

3.2 複数条件下でのシミュレーションと考察

以下の3条件の下で，シミュレーションを行った。

条件1：避難訓練時の歩行速度の条件を変更したシミュ

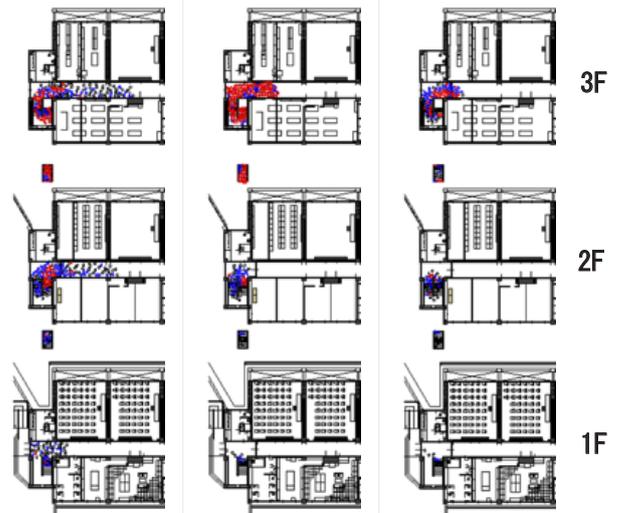


図7 条件2：1分後（左），2分後，3分後（右）の避難性状態シミュレーション

条件2：現時点で考えられる最も危機的な状況を想定したシミュレーション

条件3：現時点で考えられる最も早く避難が完了できるシミュレーション

(1) 条件1：歩行速度の変更

本校の避難訓練では，避難者（学生）の歩行速度が本来の年齢15～18歳の男女の自由歩行状態の平均速度とされる1.4m/s（引用文献⁽²⁾）よりも遅い1.0m/sであり，2でのシミュレーションにおいてもこれを採用した。ここでは，歩行速度1.4m/sの場合のシミュレーションを行った。経路は2のシミュレーション（訓練時を再現したもの）と同条件とした。また，シミュレーションは各5回行い，平均の避難完了時間を算出した。

結果は，歩行速度が1.4m/sの場合の避難完了時間は3分27秒で，実際の訓練時の経路（3分49秒）よりも約20秒早くなった。

(2) 条件2：1階段のみを使用した避難

避難訓練よりも危機的な状況を想定するために，東階段が使用できない状態でシミュレーションを行った。条件は避難訓練と同じで歩行速度1.0m/sで設定し，5回解析を行い平均の避難完了時間を算出した。

全体の避難が完了するには4分45秒かかり，本校の避難訓練（3分49秒）より1分近く遅くなった。図7は避難開始から1分後，2分後，3分後の避難性状態である。避難は1階の避難者，2階の避難者，3階の避難者の順に完了した。1階西側玄関付近では滞留が発生する事は無く，2，3階の階段で発生した。1階避難者の避難が完了するのは避難開始から1分12秒，避難開始から55秒後には3階の避難者が2階に達するので，その頃から2,3階の滞留が始まった。2階の滞留が解消するのは避難開始から2分10秒後で，それまで3階の避難者は全く動く事ができなかった。

(3) 条件3：より早く避難を完了する方法

最も短時間で避難が完了すると考えられる経路を3パ

ターン設定しシミュレーションを行った。条件は避難訓練と同じで歩行速度1.0m/sで設定し、5回解析を行い平均の避難完了時間を算出する。

①条件3-1 (図8)

1階の避難者を西 (訓練時と同じ)、2階の避難者を東 (訓練時と同じ)、3階の避難者を西 (訓練時と逆) に避難させる。この場合の避難完了時間は3分10秒で、滞留は3階西階段で発生した。実際の訓練時 (3分49秒) および訓練と同条件のシミュレーション (3分42秒) よりも、30秒以上短縮された。

②条件3-2 (図9)

条件3-1とは対称に1階の避難者を東、2階の避難者を西、3階の避難者を東へと交互に避難させる。避難完了時間は3分16秒で、滞留は1階東階段、2階西階段、3階東階段で発生した。3箇所滞留が発生したものの、条件3-1とは6秒程度の差であった。これは、3階での滞留発生時間が最も長く、最後に避難が完了するのが3階の避難者となるためである。3階の滞留が解消する頃には1階の滞留が解消しているため、1階東階段から管理棟玄関までの距離と、3階教室と西階段までの距離 (3階の教室は東に寄っているため) の差の分だけ6秒の差が生じたと考えられる。

③条件3-3 (図10)

1階では1MIの避難者を西、1ACと1BCの避難者を東、2階では2MIの避難者を西、2ACと2BCの避難者を東、3階では3MIと3ACの避難者を西、3BCの避難者を東へというように、各階3クラスを2方向に分けて避難させる。避難完了時間は2分43秒で最も早く、滞留は軽微なものであるが3階西階段、管理棟玄関で発生した。管理棟玄関での滞留は初めて確認されたが、最後に避難したのは西側玄関であったため、全体の避難完了時間に影響は無かった。

3.3. まとめ

訓練とは異なる経路でシミュレーションを行った条件2および3については避難完了時間を表3に一覧としてまとめた。3つの条件下でシミュレーションを行った結果、以下のことが確認できる。

- ①歩行速度を速くすることにより避難完了時間が短くなる (但し、転倒などの危険も生ずるので一概に速くすることがよいとは言えない)。
- ②最後に避難が完了するのが3階の避難者であるため、避難完了時間は3階の避難者に大きく影響されることが滞留の様子から確認された。
- ③各階2方向避難 (同一階のクラスを東西の階段に割り振る避難) を行った場合に最も早く避難が完了する。

4. 結論

(1) 避難訓練検証の上でのソフトの有用性と課題

群集歩行シミュレーションソフト SimTread は、個人単位で行動パターンを設定でき、当初の期待通り、障害物が避難行動に与える影響など視覚的に様々なことが確認でき



図8 条件3-1 : 1分後 (左), 2分後 (右) の避難性状



図9 条件3-2 : 1分後 (左), 2分後 (右) の避難性状



図10 条件3-3 : 30秒後 (左), 1分30秒後 (右) の避難性状

表3 異なる経路でのシミュレーション結果

経路条件	避難完了時間	滞留発生場所
2	4:43	2階西階段, 3階西階段
3-1	3:10	管理棟階段, 3階西階段
3-2	3:16	1階東階段, 2階西階段, 3階東階段
3-3	2:43	管理棟玄関

た。また、詳細な条件を変更することにより、最終的な結果が異なることが今回の検証より明らかになった。特に複数階での避難を想定できる点や階段など局所的な歩行速度の変更をできる点、既存の図面に書き加えるだけで空間を設定できる点は、様々な事態や複雑な状況の想定がシミュレーションにより可能であり、避難訓練を補う手法として活用することができることが確認された。時間経過によって行動パターンを遷移できない等の仕様上の不足点は、その各々の場面（時間）になるべく多くのより危機的な状況を組み合わせる等で、今後対応することとしたい。

(2) 避難訓練の評価と課題

今回熊本高専八代キャンパスで実施された避難訓練とは異なるいくつかのパターンでシミュレーションを行った。その結果、訓練の計画よりも更に危機的な状況においては避難完了時間が遅くなる一方で、訓練の計画よりも更に早く避難する方法が発見できた。本研究の成果を訓練方法の改善につなげる場合の有用なデータとして提示することができる。このように、シミュレーション結果と実際の訓練結果の比較に基づく訓練方法の評価は他の学校建築や他の建築種においても転用できる有効であると考え、今後の研究につなげていく。

(平成25年9月25日受付)

(平成25年12月3日受理)

謝 辞

本研究は平成24年度本校研究プロジェクト「八代地域における地震防災のための対策手法の開発」の一部として資金的援助を受けたものである。

参考文献

- 1) 木村謙・佐野友紀・林田和人・竹市尚広・峯岸良和・吉田克之・渡辺仁史, マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現—歩行者シミュレーションシステム SimTread の構築—, 日本建築学会計画系論文集 636号, p371-377, 2009
- 2) 日本建築学会=編, 建築設計資料集成 [人間], 丸善株式会社, p59, 2003
- 3) 大瀬治毅, 歩行者シミュレーションを用いた学校建築の避難安全性評価に関する研究, 熊本高等専門学校平成24年度専攻科特別研究, 2013.3

注 釈

- 1) 本論文に使用した SimTread のバージョンは1.0であるが、現最新版の2.0以降ではこのうちいくつかの点は改善されている。

※本論文は参考文献3) に加筆修正したものである。