

学生寮の火災対処をシミュレーションする Simulation for coping with a fire

海上保安大学校 本科 64 期 佐藤 祐貴
指導教官 岩永 佐織 教授

I はじめに

私たち海上保安大学校の学生は、年 2 回行われる防火訓練や日々の学習を通じて避難方法、消防設備・消火設備の使用方法、救護方法を習得し、学生寮での火災を想定した訓練を行っている。私たちは、将来現場で指揮官となるため、訓練では最上級生が指揮者として、周囲の学生に指示を出している。

しかしながら、火災を体験したことがなく、映像でしか見たことがないため、火災発生時に適切な対応が行えるか、また、適切な指示を出せるか私は確信できない。人命を優先するのであれば、火災発生と同時に避難を開始することで命は助かる。しかし、海上にある船で火災が発生した場合は、避難することは船体放棄することに繋がるため、出火後直ちに避難を開始することは現実的でない。どうしても消火活動を考慮した上で最終手段として避難を考えることになる。特に、どの程度消火に時間を割くべきかについては、ある程度の判断基準が必要だと考える。

火災は、出火位置、周囲の環境・要因によって左右されるため、平沢（1996）¹は、消防科学研究所などで実際に火を着けて研究している。実際に学生寮に火を着けて火災を起こして検討することはできないため、本研究では、学生寮における火災発生時のマルチエージェントシミュレーション（以下「MAS」という。）を作成し、集合行為を分析し、火災対処についての課題を考察する。

II 研究方法

1. MAS と集合行為

MAS (Multi Agent Simulation)²は、エージェントの集合行為を示すことができる。火災発生時には、火は燃え広がったり煙を発生させたりし、その火や煙が人に避難や消火等の行動をとらせるが、視界を制限したり怪我を負わせたり人に危害を加える。このように、火や煙、人は、相互に作用していることから「火災対処」は一種の集合行為だと考えられるため、MAS を用いて分析を行う。

2. 本研究の目的と対象

学生寮における火災対処手法は図 1 の通りである。本研究では、学生を対象として、学生寮での火災発生を想定したモデルを作成し、それを用いて避難時間を求める。そして、学生寮で火災が発生した場合に逃げ切れるのか、また、消火に使用できる時間はどれくらいあるのかの目安を検討することを目的とする。

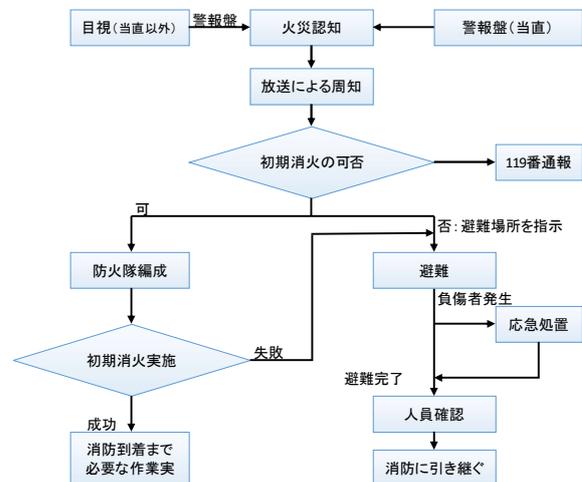


図 1 学生寮における火災対処

3. シミュレーションの評価方法

本研究において、シミュレーションの評価基準として、東京消防庁(2009)「予測活動限界時間を活用した自衛消防訓練実施基準」³を用いた。東京消防庁(2009)では、避難誘導完了予測活動限界時間として、火災発生時において、熱感知器発報から、全員が避難完了するまでにかけられる時間 T_c を、出火階の居室及び廊下の面積 ($A[m^2]$) を用いて次の式で算出できるとしている。

$$T_c = 8\sqrt{A}$$

学生寮3・4階においてこの T_c を計算した結果は次の通りである。

$$T_c = 8\sqrt{A} = 290.65443 \cong 290.7[\text{秒}]$$

また、学生寮2階は、3・4階と比較すると面積が広い為、 T_c は 341.3[秒]と長くなる。本研究においては、全員無事に避難することを前提とするため、安全側をとって、避難誘導完了予測活動限界時間を 290.7[秒]とした。

III シミュレーション設計

1. モデルの設計

本研究では、artisoC 上で諫山(2015)4のモデルを参考にしてシミュレーションを作成した。

artisoC 上に壁エージェントを配置した空間 Map に、火、煙、人(学生)、の3種のエージェントを配置し「学生寮モデル」を作成した。学生寮は4階建てでエレベーター、エスカレーターは無く、各階には図2のように東西に延びる廊下を挟んで自習室、寝室等が存在し、4階まで続く階段が東側と西側それぞれに1箇所ずつ存在している。空間 Map を1～4階までの4つの Layer(層)で構成した。学生(206名)を対象とし、学生の居住区画である2～4階の東西

洗面所及び談話室のいずれか1箇所を出火位置とした。また、避難時には学生は南側の寮前広場に整列するため、1階の寮前広場に繋がる東西出入り口のどちらかにたどり着くことで避難完了とする。

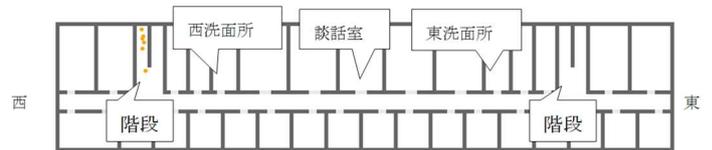


図2 学生寮モデル

2. コントロールパネルの設計

火や煙の伝播速度は、出火位置やその周囲の状況で変化するため、図3のコントロールパネルを用いてある任意の値の中で自由に設定できるように作成した。

「出火位置」では、出火位置として2～4階の東西洗面所及び談話室のいずれか1箇所を選択できる。



図3 コントロールパネル

防火扉は、学生寮の各階の東西階段に設置されている。本モデルで防火扉は炎及び赤煙・黒煙の伝播を抑える役割を持つが、薄い煙は通す設計にした。「防火扉」ボタンを押下状態で防火扉が作動する。

延焼確率及び煙の伝播に関するボタンについては、次の「3. エージェントの設計」にて述べる。

「出火位置の把握状況」は、全学生のうち火災発生及びその出火位置を把握できる者の割合を百分率にて設定するものであり、学生寮には全体に周知できる放送機器の設備があることから、本研究においては初期値を100とした。

「声の大きさ」については、出火位置を把握している学生が声によって周知をした場合に、その声が何m先まで届くかを設定するものである。本研究においては、「出火位置の把握状況」を100としたため、初期値を0とした。

学生寮には4～5名に1室の自習室が割り当てられている。「部屋にいない人」は各学生が自習室にいない割合を百分率にて設定するものであり、部屋にいない学生は2～4階のランダムな位置に配置する。本研究では初期値を100にして、全学生を2～4階のランダムな位置に配置した。

3. エージェントの設計

火、煙、人、壁、出入り口、扉口、階段、東階段、西階段をエージェントとした。これらのうち、壁、出入り口、扉口、階段、東階段、西階段にはルールを記載せず、初期値設定を用いてその位置を設定し、人や煙のルールに動作させた。

(1) 火エージェントのルール

火は、壁を避けるようにして、ある速度で延焼する。その速度は、延焼確率という形で、1ステップで1セル進む確率、すなわち0.5秒以内に0.5m進む確率を1として表現した。たばこなどが原因で起こる無炎燃焼は、炎が燃え広がらず煙のみ広がるため、延焼確率は0となる。本研究は消火を前提としており、また、避難時間を求めるために作成していることから、人の避

難に支障をきたさないように、延焼確率を0.02と設定した。

(2) 煙エージェントのルール

煙は、煙の持つ役割によって薄い煙、赤煙、黒煙の3種類に色を分けて作成した。薄い煙は、焦げた臭い等、人に火災発生を認知させたり人の視界を制限したりする役割を、赤煙は人に怪我をさせ、黒煙は人を動けなくさせる役割を持たせた。

煙は、出火位置から天井に張り付くように広がり、時間の経過とともに地上に降りてくる。従って、3種類の煙は、薄い煙の伝播をベースにして、薄い煙からのある一定時間が経過すると赤煙に変わり、さらに一定時間が経過すると黒煙と変えていくように設計した。

薄い煙の伝播に関して、松下(1994)⁵は、「煙の先端部の位置の進行が次第に遅くなっていることから、時間の経過とともに煙の進行速度が低下」するとし、また、日本火災学会(2007)⁶は、「一般に、廊下を流れる煙の伝播速度は0.5～1.0m 毎秒程度と言われるが、煙は流れる間、壁や天井などへ失熱しながら移動し、煙先端の伝播速度は徐々に遅くなる」としていることから、本研究において薄い煙の伝播速度は、5.0m 毎秒とし、火元から15m 遠ざかると0.3m 毎秒に変わるように設定した。

赤煙の伝播に関しては、火元から直接広がるものと、薄い煙の時間経過により広がるものの2つの要因が考えられる。火元から直接広がるものはコントロールパネル上の「赤煙の伝播速度」で調整し、薄い煙の時間経過により広がるものは、「赤煙の拡散度合」

と「赤煙の変化点」の2つで調整する。薄い煙の時間経過により広がるものは、薄い煙に **memstep** という関数を持たせ、毎ステップ「赤煙の拡散度合」を足していき、**memstep** が「赤煙の変化点」に到達すると、薄い煙が赤煙に変化するようにプログラムを作成した。このように2つの値で調節することで、赤煙が薄い煙の時間経過により広がらない場合、すなわち「赤煙の拡散度合」が0である場合の0割り計算によるプログラムエラーを防ぐことができる。参考にする値として、人に怪我をさせるような赤煙の伝播速度に関しては、平沢（1996）¹が行った建物の地下1階の倉庫を火点とする火災実験の結果が「熱気の到達速度が最大 0.5m 毎秒」であったため、本研究は「赤煙の伝播速度」を 0.2、「赤煙の拡散度合」を 1、「赤煙の変化点」を 60 に設定して行った。

黒煙の伝播に関しては、赤煙の時間経過によりのみ広がるように作成し、赤煙と同様にコントロールパネル上の「黒煙の拡散度合」と「黒煙の変化点」の2つで調整できるように作成した。黒煙の伝播に関しては参考となる資料はなかったため、「黒煙の拡散度合」を 1、「黒煙の変化点」を 100 に設定して行った。

(3) 人エージェントのルール

人に関しては、その状態を色によって表示した。避難を開始する前をピンク色、避難中をオレンジ色、避難完了を緑色にし、薄い煙に囲まれて視界が制限されている状態を黄色、赤煙に囲まれて怪我した状態を赤、火や壁、黒煙で囲まれて動けなくなる（死亡する）状態を黒にした。

通常の避難行動中における歩行速度を 1.2m 毎秒とし、前方の混み具合によって 0.8~0.5m 毎秒に歩行速度を変えるようにした。また、視界制限状態では、神（1974）⁷の実験結果を参考にして、通常の歩行速度の 0.6 倍になるようにした。

また、全学生の様子が視覚的に分かるように、次の図4のような円グラフをリアルタイムで作成するように設計した。

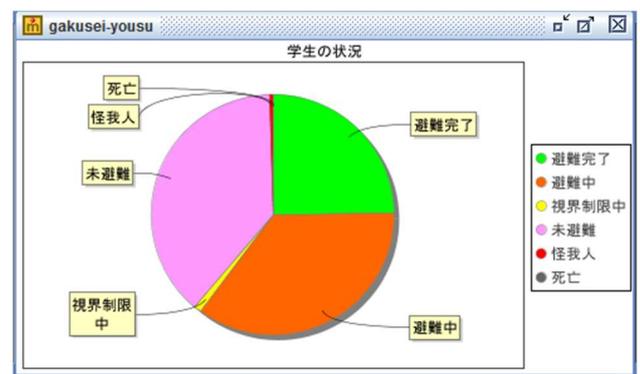


図4 学生の様子を表した円グラフ

4. 避難行動

本シミュレーションにおいて、避難行動に関しては、図5のフローチャートを基本とした。人は、出火位置を知ったと同時に避難行動を開始し、出火階より上の階にいれば火元から遠い方の階段を、出火階と同じ階にいれば火元を通らない方の階段を、出火階より下の階にいれば自身の位置から近い方の階段を選択して1階まで避難するように作成した。

1ステップを 0.5 秒、単位長さを 0.5m とし、1×1 四方の空間を1人の学生が占めるスペースとした。

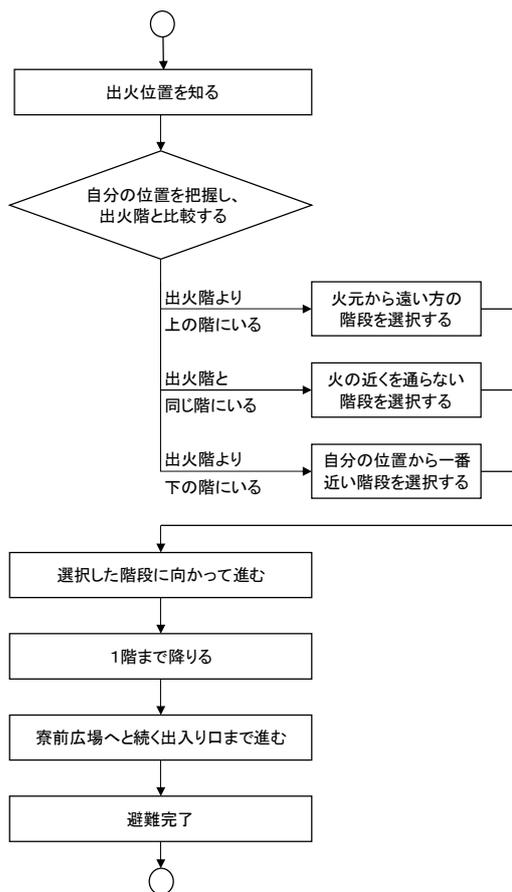


図5 避難行動フローチャート

5. シミュレーションの設定

① 避難のみを行う場合

全学生を2～4階のランダムな位置に配置した初期状態から、全員が放送により出火位置の周知を受けて、同時刻に避難行動を開始してから避難完了するまでの時間を「避難に要する時間」とし、出火位置ごとにそれぞれ10回ずつシミュレーションを試行した。それを避難誘導完了予測時間 T_c (290.7秒) と比較することで、学生寮で火災が発生した場合に全学生が逃げ切れることができるのかを検討した。

② 消火活動を行う場合

消火活動を考慮した避難に関する検討を行った。消火活動は、たくさん

の学生が固まって行くことはできないため、出火位置にある程度の人数を残すこととした。その場合、消火活動を行う学生が避難完了するまでに要する時間を求め、それを避難誘導完了予測時間 T_c (290.7秒) と比較することによって、消火に使用できる時間や必要な学生数の目安を検討することができる。

消火にあたる人数の学生は、5人から50人まで5人ずつ増やしていき、その学生を出火位置付近に配置した。

この学生の配置方法として、まず、消火活動において退路を確保して消火活動を行うことの重要性を確認した。出火位置を談話室に設定すると、ほぼ等しい距離に東西階段があるため、洗面所1箇所に限定する。出火位置の階段側に学生を配置した場合(階段が火元に遮られないよう退路を確保した時)と出火位置付近にランダムに配置した場合(退路を確保しなかった時)について、消火にあたった学生全員が避難完了するまでの時間を比較した。

さらに、出火位置を変えて、退路を確保した状態で学生をランダムに配置し、消火にあたった学生の全員が避難完了するまでの時間を「消火を行う学生の避難に要する時間」とし、出火位置、人数ごとにそれぞれ10回ずつシミュレーションを試行した。また、学生寮においては、全学生を各階に東と西の2班ずつ計6つの班にわけている。談話室においては、東側に退路を確保する東側の班をE班、西側に退路を確保する西側の班をW班とした。

IV シミュレーション結果

① 避難に要する時間

全員が避難完了にかかった時間の出火位置ごとの平均値と標準偏差を表1に示す。

表1 避難に要する時間

出火階	出火位置	西洗面所	談話室	東洗面所
2階	平均値	122.4	104.2	133.2
	標準偏差	3.3	8.8	7.9
3階	平均値	118.6	107.3	133.1
	標準偏差	2.7	11.8	6.6
4階	平均値	110.6	111.5	115.7
	標準偏差	8.6	11.3	9.3

平均値は、避難誘導完了予測活動限界時間 T_c の 290.7 秒よりも小さい値であることから、出火と同時に出火位置の適切な周知ができれば、どの位置で出火しても、全員避難ができることを確認できた。

また、出火位置によって避難に要する時間が異なることが分かった。下の階で火災が発生した場合の方が、上の階で火災が発生した場合に比べて、20秒近く避難に時間がかかる。学生は出火階より下の階にいる場合は、自身の位置から近い階段から避難できるが、出火階以上にいる学生は避難行動が制限されるためだと考える。このことから、火災発生時には、出火階よりも上の階にいる学生に注意する必要があり、優先的に早く避難を始める等の対策を考えるべきである。さらに、出火位置が談話室ではなく東西洗面所であった場合、出火位置側の階段は避難に使用できないため、全学生が避難完了するまでに時間がかかることが分かった。

② 消火を行う学生の避難に要する時間

上記結果から求めた避難に要する時

間の平均値は、117.4 秒であり、3階西洗面所で出火した場合の避難時間が最も近かったことから、出火位置を3階西洗面所にした。出火位置の西側に学生を配置した場合（退路確保時）と出火位置付近にランダムに配置した場合（退路不確保時）についての消火にあたった学生の全員が避難完了するまでの時間の平均値と標準偏差を表2及び図6に示す。

表2 退路確保・不確保時の避難時間

	学生数[人]	5	10	15	20	25
退路確保時	平均値[秒]	49.2	53.2	54.8	56.2	58.5
	標準偏差	4.0	4.8	5.4	7.3	2.8
退路不確保時	平均値[秒]	66.5	72.1	73.5	75.3	76.5
	標準偏差	7.4	1.8	3.7	3.3	2.6
	学生数[人]	30	35	40	45	50
退路確保時	平均値[秒]	60.6	61.5	64.9	65.9	66.6
	標準偏差	2.5	1.1	3.1	2.8	0.7
退路不確保時	平均値[秒]	78.1	77.8	80.4	81.6	82.6
	標準偏差	2.4	2.4	1.5	3.1	3.0

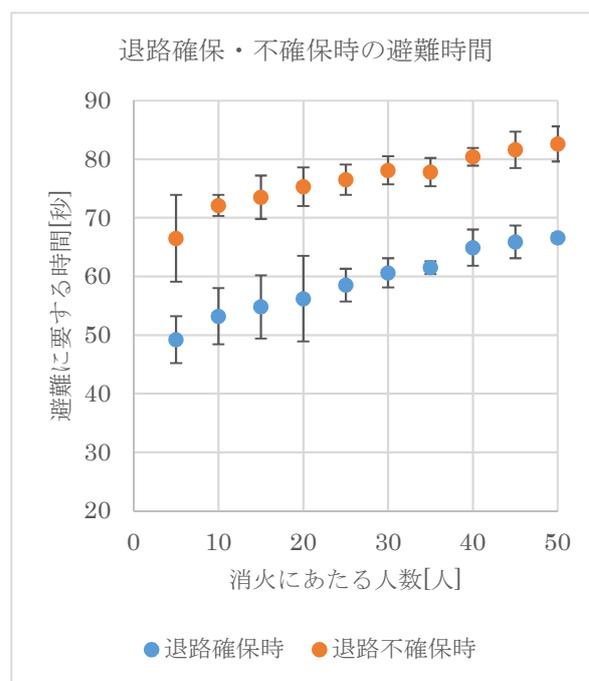


図6 退路確保・不確保時の避難時間

図 9 から、退路を確保せずに消火活動に当たった場合には、退路を確保して消火活動に当たった場合に比べて 20 秒程避難にかかる時間が多くかかってしまうことが分かり、消火活動において退路を確保して消火活動を行うことの重要性が確認できた。

また、退路を確保して消火活動を行う学生が避難に要する時間の平均値と標準偏差を表 3 及び図 7 に示す。

1 つの班あたりの人数は 30~40 人であり、消火活動を 1 つの班が行った場合、消火にあたった学生の全員が避難完了するまでの時間は多くとも 100 秒であることがわかる。そして、避難誘導完了予測限界時間 T_c (290.7 秒) から 100 秒を引いた 190 秒は、少なくとも消火に時間を割くことができる。

表 3 消火活動を行う学生の避難に要する時間

		学生数[人]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
2 階	東洗面所	平均値[秒]	51.5	54.4	57.1	56.8	66.4	58.9	68	68.7	70.1	76.3
		標準偏差	14.7	13.6	10.6	13.3	12.1	12.0	13.2	15.4	10.7	19.7
	談話室 (E 班)	平均値[秒]	51	55	57.2	59	63.3	63.7	67.5	64.4	70.6	68.1
		標準偏差	2.8	2.3	2.1	2.4	1.3	1.3	1.3	1.4	2.3	1.2
	談話室 (W 班)	平均値[秒]	41.3	43.4	44.3	47.9	49.7	51.1	52.6	53.5	56.8	56.7
		標準偏差	8.4	6.6	4.7	6.1	6.6	6.2	5.4	3.4	6.6	3.6
	西洗面所	平均値[秒]	41.9	42.8	47.2	56	53.5	50.9	54.8	53	57.6	58.1
		標準偏差	10.5	12.6	11.4	16.3	10.9	6.7	14.3	8.3	10.8	9.8
3 階	東洗面所	平均値[秒]	56.8	59.5	70.9	72.7	81.6	70.5	75.9	81.2	84.9	80.5
		標準偏差	7.3	9.3	13.9	14.2	20.3	11.0	10.7	11.8	14.2	8.3
	談話室 (E 班)	平均値[秒]	65	70	73.3	73	73.5	76.7	76.9	80	83.8	81
		標準偏差	2.5	2.8	2.1	1.5	2.9	1.2	1.5	1.7	1.1	1.8
	談話室 (W 班)	平均値[秒]	52.2	55.9	57.5	60.8	63.6	65.3	68.8	71.1	71.4	74.8
		標準偏差	5.3	5.9	3.9	5.3	3.1	4.8	2.4	2.6	3.7	1.5
	西洗面所	平均値[秒]	49.2	53.2	54.8	56.2	58.5	60.6	61.5	64.9	65.9	66.6
		標準偏差	4.0	4.8	5.4	7.3	2.8	2.5	1.1	3.1	2.8	0.7
4 階	東洗面所	平均値[秒]	68.1	76.8	85.4	82.6	85.7	88.6	93.8	92.7	91.6	91.5
		標準偏差	8.2	11.9	11.4	13.6	9.6	12.0	7.5	14.2	8.3	9.0
	談話室 (E 班)	平均値[秒]	78.7	83	86.3	88.3	91.7	94.6	98.6	99	105.4	103.9
		標準偏差	3.3	2.7	10.7	2.8	2.6	1.4	2.1	4.4	1.7	10.8
	談話室 (W 班)	平均値[秒]	60.7	64	74	70.7	72.7	76.1	77.7	83.3	84.1	89.8
		標準偏差	4.4	3.8	3.5	5.3	2.4	4.6	5.8	3.5	5.9	1.6
	西洗面所	平均値[秒]	60.3	61.5	71.2	69.7	73.4	74.8	77.4	80.7	82.7	84.7
		標準偏差	3.3	2.7	10.7	2.8	2.6	1.4	2.1	4.4	1.7	10.8

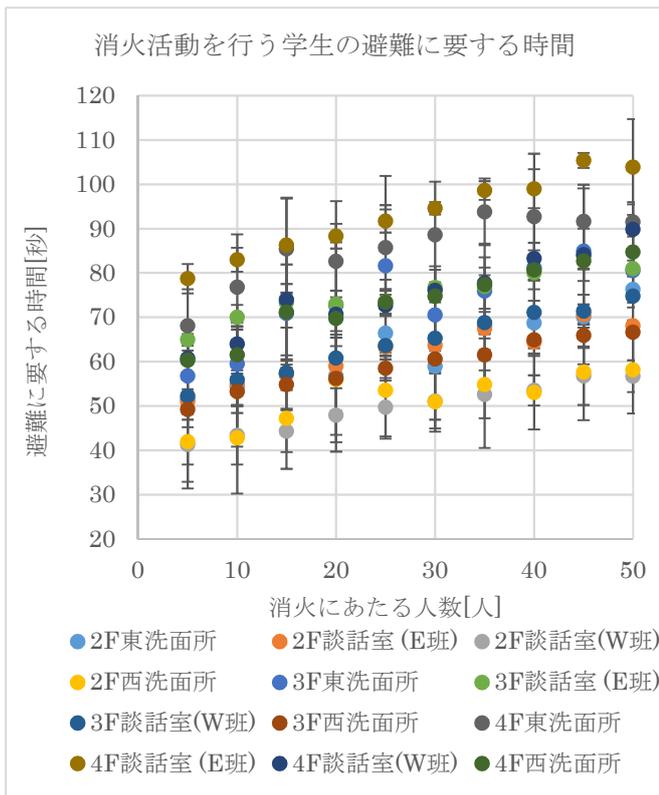


図7 消火を行う学生の避難に要する時間

V まとめ

本研究を通して、学生寮で火災が発生した場合、出火と同時に適切な出火位置の周知ができれば、どの位置で出火しても、約2分で全員が安全に避難できることを確認できた。また、出火位置ごとに全学生が避難するまでにかかる時間が異なることから、洗面所や下の方の階で火災が発生した場合、特に注意を要する必要がある。

また、退路を確保せずに消火活動に当たった場合、退路を確保して消火活動に当たった場合に比べて20秒程避難時間が長くなってしまうため、消火活動において退路を確保して消火活動を行うことの重要性を確認できた。

消火活動を1つの班が行った場合、消火にあたった学生の全員が避難完了するまでの時間は多くとも100秒であることから、避難誘導完了予測限界時間 T_c (290.7秒) から100秒を引いた190秒(約3分)は、

少なくとも消火に時間を割くことができると考える。また、出火階が低かったり、消火に関わる人員を減らしたりすれば、それだけ消火に割く時間を確保することができることも分かった。

VI 今後の展望

本研究においては、熱感知器発報と同時に全学生が出火位置を把握し、速やかに避難するようシミュレーションを作成した。実際の火災では、放送機器が故障したり、放送をかける者がいなかったり、就寝していたり等、火災発生及びその出火位置が把握できない者がいることが予想される。出火位置の把握状況については、出火位置の把握状況及び声の大きさ、部屋にいない人の割合の変化による火災対処の分析も併せて行っていくべきだと考える。

また、今回は赤煙に囲まれて怪我をした人にルールを定めていない。しかしながら怪我人が発生した場合、通常であれば、2名程の学生が怪我した人を搬送して避難する。そのルールを定めて、消火・救護・避難に割く時間や人員のバランスを検討していきたいと考える。

さらに、私たちは多くの学生と一緒に生活していることから、火災対処においては人員管理も重要になってくる。どの学生がどこにいて、どういう状況にあるかを把握し、有事の際には全員が揃って避難できるような人員管理の方法も、本研究で作成したモデルを用いて検討していきたいと考える。

また、本研究を通して、将来指揮官として、火災発生時に備えて、消火設備の設置場所に気を配るとともに、あらゆる事態を想定して、事前の打ち合わせを大切にしていきたい。

参考文献

1. 平沢正己ら (1996)「地下施設火災における煙対策に関する研究 (その4)」, 消防科学研究所報 33号,
<<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-gijyutuka/shyohou2/33/33-05.pdf>> (参照 2017-11-24) .
2. 山影進(2013)『人工社会構築指南 artisoc によるマルチエージェント・シミュレーション入門』改訂新版, 書籍工房早山.
3. 東京消防庁 (2009)「予測活動限界時間を活用した自衛消防訓練実施基準」,
<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-sidouka/data/kijun_jiei02.pdf> (参照 2017-11-24) .
4. 諫山圭司ら (2015)「建物火災時の避難行動に心理的要因が与える影響－正常性バイアス、集団同調性、愛他的行動に着目して－」, 第15回 MAS コンペ.
5. 松下敬幸 (1994)「火災時における避難安全評価のための煙の伝播予測に関する研究」,
<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/168893/2/D_Matsushita_Takayuki.pdf> (参照 2017-11-24) .
6. 日本火災学会 (2007)『はじめて学ぶ建物と火災』, 共立出版.
7. 神忠久 (1974)「煙の中での物の見え方 (その2)」,
<https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiej1917/59/2/59_2_76/> (参照 2017-11-30)