

中央大学工学部情報工学科

卒業研究論文

高層ビルにおける避難シミュレーションの構築と評価

学籍番号 02D8101001H

小塩 佳奈

指導教員 田口 東 教授

2006年3月

あらまし

本研究では、火災発生時の高層ビルにおける避難シミュレーションを作成する。まず、ビル内の空間をフロア、階段、踊り場に分け、それぞれの空間における避難者の動きをモデル化する。また、避難時に想定される混雑に着目し、各空間の合流箇所を、待ち行列を用いることにより、避難者の混雑を表現する。次に、合流箇所では、フロアからの避難者と階段を下降してくる避難者の合流、階段を上昇してくる避難者と階段を下降してくる避難者の合流の 2 つに分け、各合流を優先度によりモデル化する。最後に、火災発生時の避難者の人数や合流における優先度を変更し、シミュレートする。その結果から、高層ビルにおける避難について考察する。

キーワード：高層ビル，混雑，待ち行列，避難シミュレーション

目次

第1章 序論	1
第2章 高層ビルにおける避難シミュレーションモデル	2
2.1 概要.....	2
2.2 フロア.....	3
2.2.1 空間モデル.....	3
2.2.2 避難者モデル.....	4
2.3 階段.....	5
2.3.1 空間モデル.....	5
2.3.2 避難者モデル.....	5
2.4 合流.....	6
2.4.1 空間モデル.....	7
2.4.2 避難者モデル.....	7
2.5 火災.....	10
2.5.1 延焼.....	10
2.5.2 避難者の移動ルール.....	10
2.6 避難モデルの実装.....	11
2.6.1 データ構造.....	11
2.6.2 避難処理.....	11
第3章 シミュレーションを用いた高層ビルにおける避難結果の分析	16
3.1 避難行動の分析.....	16
3.1.1 シナリオ設定.....	16
3.1.2 避難優先度と制限人数による避難比較.....	17
3.2 延焼による避難の影響.....	21
3.3 各階滞在分布による避難比較.....	22
3.3.1 シナリオ設定.....	22
3.3.2 火災発生階と避難完了時間.....	23
3.3.3 火災発生階と死亡者数.....	24
第4章 結論	26
謝辞.....	27
参考文献.....	28

第1章 序論

現在，日本ではオフィスが都心部に集中している．それに伴いオフィスビルの高層化，在館者の増加が見られる．そのためビル内で火災が発生したとき，混雑を避けることが困難になっている．高層ビルが立ち並ぶ副都心では，災害に備えて総合防災訓練を実施している．しかし2001.9.11の世界貿易センター（WTC）事件をきっかけに，部分的な避難ではなく高層ビル全体を考慮した階層避難の対策が必要であることが認識された．したがって，効果的な避難態勢を立案する必要がある．そこで本研究では，高層ビルでの災害対策として避難シミュレーションを構築し，効果的な避難態勢を評価する．

本論は，4つの章から成っており，以下にその概要を示す．

第2章では，高層ビルにおける避難シミュレーションのモデルについて述べる．ここでは避難者の動きを表現するために，ビル内における空間をフロア，階段，合流箇所に分け，それぞれについて空間モデルと避難者モデルを定義する．特に合流箇所においては，避難者の行動を優先度パラメータという指標を用いてモデル化する．また，延焼による空間への影響と避難者の行動をモデル化する．

第3章は，火災発生時のシナリオを変更し，シミュレーションを実行する．ここでは，合流における避難者の優先度パラメータと階段と合流箇所の制限人数の組み合わせによって，避難完了時間と死亡者数の分析を行う．また，避難者の各階の初期滞在者分布と火災発生階による，避難完了時間と死亡者数の分析を行う．

第4章では，本論文の結論と今後の課題を述べる．

第2章 高層ビルにおける避難シミュレーションモデル

2.1 概要

高層ビルで火災が発生したとき、在館者は館外へ避難を行う。このとき、混雑すればするほど避難者は館外へ出るのに時間がかかる。この混雑によって引き起こされる滞留は、避難者の生死をわける要因となる。本研究では、ビル内の混雑に着目し、高層ビルの避難モデルを構築する。

一般に避難者は、滞在場所からフロア内を移動し、階段へ向かう。階段に到着後は、踊り場を経由し、階段内へ入り、下の階に移動すると考えられる。そこで、本モデルでは、全ての避難者が下の階に移動する避難を考える。また、多くの人がこの避難行動を同時に開始するとき、フロアからの避難者と、階段内の避難者の合流箇所での混雑は避けられない。よって高層ビルにおける避難モデルを、フロアにおける避難行動、階段内における避難行動、避難者の合流に分けて考える。フロアにおける避難行動は、避難者の水平方向の移動により特徴付けることができる。また、階段内の避難行動は避難者の垂直方向の移動により特徴付けることができる。そして、フロアの避難者と階段内の避難者の合流は、どちらの避難者を優先するかで特徴付けることができる。これらを、ビル内の避難空間として図 2.1 に示す。ここでは、紫色の部分はフロアを表し、黄色の部分は階段を表し、緑の部分は踊り場を表し、ピンクの部分はフロアの待ち行列を表している。図中の矢印は、避難者の移動方向を表す。

本モデルでは、フロアの 1 階滞在者は、即時に館外へ脱出可能であることから、フロアの 2 階以上の滞在者が避難対象者とする。また、1 階の踊り場を経由し、館外へ出た避難者を避難完了者とする。

まず、2.2 節では、フロアの空間モデルと避難者が水平方向に移動するときのルールについて述べる。2.3 節では、階段内の空間モデルと避難者の垂直方向の移動ルールについて述べる。2.4 節では、フロアと階段の合流モデルについて述べる。2.5 節では、火災の延焼に伴う避難行動について述べる。

各階には複数の階段があるものとする。それらのうちの 1 つを階段 s と表記する。また、 k 階と $k+1$ 階のフロアを結ぶ階段全てを k 階段と表記する。 k 階の階段 s と表記した場合には、 k 階段の中で、ある 1 つの階段 s を指すものとする。

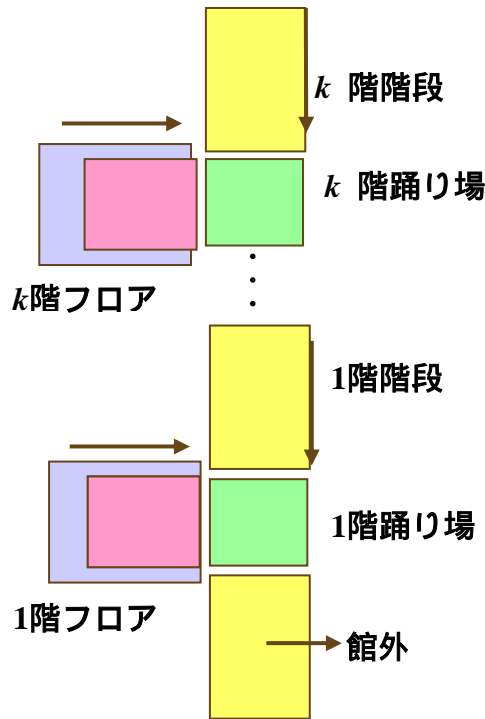


図 2.1 ビル内の避難空間

2.2 フロア

2.2.1 空間モデル

フロアにいた人々は火災を認知したときに避難を開始し、階段を目的地とする行動を行う。このとき、フロアが十分広ければ、それぞれの避難者は他の避難者の影響を受けずに、自由に行動することができる。しかし、一般に階段はフロアに比べ狭いので、階段付近では、混雑が発生する。そのため、混雑により階段内に入れない避難者は、階段前で待ち行列を形成すると考えられる。

一般に、フロアは 2 次元空間として表現されるが、モデルの単純化のために、フロア内の移動空間が、各階段までの距離で定義される 1 次元空間として表現する。そして、フロア内の移動空間を自由歩行可能なフリー空間と階段前の待ち行列に分ける。このモデルを図 2.2 に示す。一つのフロアにもし複数の階段が存在する場合には、各階段間の距離を d_{ij} [m] ($i, j = 1, \dots, n$) とし、これをフリー空間と待ち行列の和とする。ここで、 n は階段数とする。

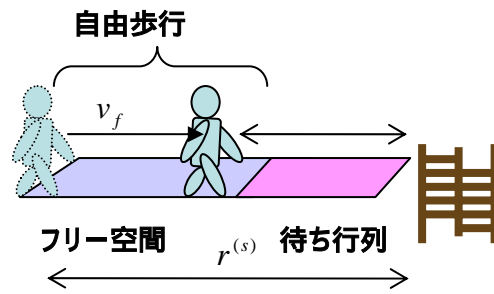


図 2.2 避難状況

2.2.2 避難者モデル

一般に人間の歩行速度は $3.6\text{km/h}(=1.0\text{m/s})$ とされている．そこで，フロアでの移動は空間が広い混雑の影響を受けにくいと仮定し，フロア内のフリー空間での歩行速度を，

$$v_h = 1.0 \text{ [m/s]} \quad (2.1)$$

とする．

次に，避難者の移動ルールについて考える．フロアでの避難行動は，フロアのフリー空間での移動，フリー空間から待ち行列に入るときの移動，待ち行列での移動の 3 つに分けられる．

フロアのフリー空間での移動では，避難者 i は避難に使用する階段 s を選択する．そして，避難者 i は，滞在場所から階段 s までの距離 $r_i^{(s)}$ [m] を，歩行速度 v_h で移動する．図 2.2 に移動状況を示す．

フリー空間から待ち行列に入る移動について述べる．階段 s に移動してくる避難者 i の階段までの距離を $r_i^{(s)}$ [m] とし，階段 s 前の待ち行列の長さを $l^{(s)}$ [m] とする．ここで，階段前の待ち行列の長さ $l^{(s)}$ [m] は，待ち行列の最後尾にいる避難者 j の階段 s までの距離 $r_j^{(s)}$ [m] とする．避難者 i がフリー空間から待ち行列に入るための条件は，

$$r_i^{(s)} \leq l^{(s)} \quad (2.2)$$

である．待ち行列にいる避難者は，1 列に並ぶものとし，避難者間の間隔を Δr [m] とする．したがって，フリー空間から待ち行列に入った避難者 i の階段までの距離 $r_i^{(s)}$ [m] は，

$$r_i^{(s)} = l^{(s)} + \Delta r \quad (2.3)$$

となる．

待ち行列での避難者の移動では，前方に並んでいる避難者から順に階段内に入って行く．避難者 i は，階段までの距離 $r_i^{(s)}$ [m] を，歩行速度 v_h で移動する．避難者 i が待ち行列から踊り場内へ入るときの条件は，階段までの距離を $r_i^{(s)}$ [m] としたとき，

$$r_i^{(s)} \leq 0 \quad (2.4)$$

となる。

2.3 階段

2.3.1 空間モデル

一般的な階段は図 2.3 に示すように傾斜した複雑な構造になっている。本研究では、モデルの単純化のために垂直方向の移動に着目し、階段内の空間は、階段の高さで定義される 1 次元空間として表現する。このことにより、フロア間の高さを H [m]としたとき、階段に滞在している避難者 i の位置は階段内の高さ h_i [m] ($0 \leq h_i \leq H$) で表すことができる。

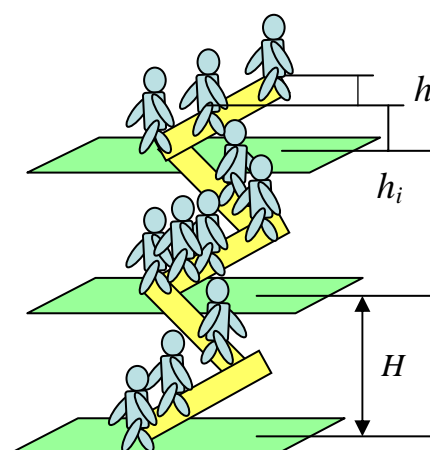


図 2.3 階段内における避難

次に、階段の処理能力を考える。階段は幅が狭く、単位時間あたりに通過できる人数が制限され、混雑が発生する。火災でパニックになった避難者が一斉に階段へ押し寄せた場合、避難者の人数が階段の処理能力を超え、避難者は身動きをとれない状況になってしまう可能性がある。このような状況を避けるために、階段内にいる人数を制限する。ここで、階段内の制限人数は L_1 [人] とする。

2.3.2 避難者モデル

一般に歩行速度は混雑度との関係が非常に強く、混雑していれば遅くなる(岡田[2], 日本火災学会[3])。そこで階段内の歩行速度 v_v [m/s] は、階段内の密度 ρ [人/m²] による関数とし、

$$v_v = f(\rho) \quad (2.5)$$

とする。本シミュレーションでは、 f の関数形を、

$$f(\rho) = 0.5 - 0.075 \times \rho \quad [\text{m/s}] \quad (2.6)$$

とし、密度は、

$$\rho = N_k / S \quad (2.7)$$

により計算する．ここで、 $S [m^2]$ は階段内の総面積を表す．式(2.6)は標準歩行速度を $0.5 [m/s]$ とし、階段内の密度 ρ が増すとともに、避難者の歩行速度が減速することを表している．

次に階段内の移動ルールについて述べる．本モデルは階段内の避難行動に関して次の仮定を設ける．

- 階段内の避難は1列で行われる
- 避難者同士の追い越しは禁止する
- 前方避難者との間隔を一定距離以上あける

もし対象施設によって階段の幅が広く n 列での避難が可能な場合には、同じ段数にいる避難者は一緒に行動すると仮定し、 n 列での避難をシミュレートすることも可能である．

階段内の移動条件について説明する．避難者同士は、最低 $\Delta h [m]$ 空けて移動するものとする．したがって、階段内が密集した状態では、避難者 i の階段内の位置が $h_i [m]$ であるとき、その後方避難者の階段内の高さは $h_i + \Delta h [m]$ となる．階段内の避難者は、フロア間の高さ $H [m]$ を、歩行速度 v_v で移動する．

次に、避難者が階段から踊り場へ移動するときの条件について述べる． $k + 1$ 階の階段にいる避難者 i の(単位時間)移動後の階段内の位置を $h_i [m]$ としたとき、 k 階の踊り場へ移動するときの条件は、

$$h_i < 0 \quad (2.8)$$

である．

2.4 合流

2.2節では、フロアにおける避難者の水平方向の移動を、2.3節では、階段内における避難者の垂直方向に下降する移動を説明した．ところで、火災が発生し階段内で延焼が起きているときは、下階段の延焼に気づいた避難者は火災を回避するために、下降してきた階段を引き返す行動をとると考えられる．そこで、本節では、この3つの移動により生じる合流を考える．本研究では、延焼により階段内を上昇してくる避難者がいるときには、フロアでこの階段に入ろうとしていた避難者は、別の階段に移動すると仮定し、以下の2つの合流をモデル化する．

(A) フロアを移動する避難者と階段を下降してくる避難者の合流

(B) 階段を下降してくる避難者と延焼により階段を上昇してくる避難者の合流

2.4.1 空間モデル

(A) , (B)の合流における移動には , 上階からの避難者の流れ , 下階からの避難者の流れ , フロアからの避難者の流れの 3 つがある . この 3 つの流れを図 2.3 に示す . ここで , 図 2.3 における矢印は , 各避難空間からの避難者の流れを表している . この図から明らかなように 3 つの流れには合流する場所が存在する . そこで , 本研究では , その合流する場所を踊り場と定義する .

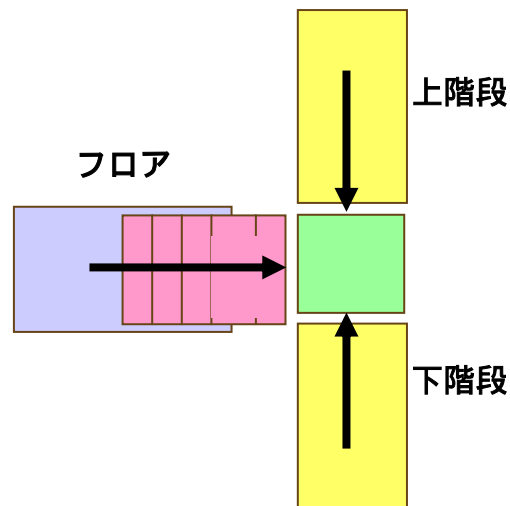


図 2.3 合流場所

次に , 合流する場所として定義した踊り場の処理能力を考える . 踊り場は幅が狭く , 単位時間あたりに通過できる人数が制限されると考えられる . 避難者が一斉に踊り場へ押し寄せた場合 , 踊り場の処理能力は超え , 避難者が身動きとれない状況になることが考えられる . この状況を避けるために , 踊り場にいる人数を制限する . 踊り場の制限人数は L_2 [人] とする .

2.4.2 避難者モデル

この節で用いる変数を以下に示す .

- M_{fl} : フロアから踊り場へ移動してくる避難者の人数 (fl は floor を表す)
- M_{ds} : 上階段から踊り場へ移動してくる避難者の人数 (ds は down stairs を表す)
- M_{us} : 下階段から踊り場へ移動してくる避難者の人数 (us は up stairs を表す)
- Q_k : k 階の踊り場に滞在している避難者の人数
- N_{k-1} : $k-1$ 階に滞在している避難者の人数
- $v_v^{(k-1)}$: $k-1$ 階で移動している避難者の歩行速度 (2.3.2 節)

L_2 : 踊り場の制限容量 (2.4.1 節)

L_1 : 階段の制限容量 (2.3.1 節)

h [m] : 階段内での避難者間の最低間隔

H [m] : フロア間の高さ

h_i [m] ($0 < h_j < H$) : k 階の踊り場から $k-1$ 階段に移動した避難者 i の階段内の位置

h_j [m] ($0 < h_j < H$) : $k-1$ 階段で最後尾にいる避難者 j の階段内の位置

p_1 : (A)における優先度を表すパラメータ

p_2 : (B)における優先度を表すパラメータ

合流では、誘導者がいるという理想的な状況を仮定する。このとき、合流する避難者は、合流する前で誘導者の指示に従う。誘導者は、合流してくる避難者の状況と、合流場所である踊り場の状況を知っていると仮定する。こうすることにより、避難者は状況を把握している誘導者の誘導により合流ができる。ここでは、2.4 節の(A)(B)の合流における避難者の移動ルールを説明する。

まず、(A)の合流について避難者が踊り場へ移動する条件について述べる。ここでは、 k 階踊り場に移動するときの状況を以下の2つに分けて考える。

- 移動してくる避難者は、踊り場の制限人数を超えていないため、全員が踊り場に移動できる
- 移動してくる避難者は、踊り場の制限人数を超えているため、避難者を選抜し移動する

前者の場合は、

$$M_{fl} + M_{ds} \leq L_2 - Q_k \quad (2.11)$$

が成り立つ。ここで左辺は、フロアから踊り場へ移動してくる避難者の人数と上階段から踊り場へ移動してくる避難者の人数の合計を表し、右辺は、踊り場への移動可能人数を表している。後者の場合は、

$$M_{fl} + M_{ds} > L_2 - Q_k \quad (2.12)$$

が成り立つ。このとき避難者を選抜する優先度を表すパラメータ p_1 を導入する。 p_1 は1から0の値をとる。本研究では、 p_1 の値として以下の3通りを考える。

$p_1 = 0$: フロアから踊り場に移動してくる避難者が優先的に踊り場に移動する。

$p_1 = 0.5$: フロアからの避難者と階段からの避難者を交互に合流させる。

$p_1 = 1$: 階段から踊り場に移動してくる避難者が優先的に踊り場に移動する。

次に、踊り場へ合流した避難者は、踊り場から階段内へ移動する。このときの移動について述べる。 k 階踊り場から $k-1$ 階段に移動するときの条件は、

$$N_{k-1} < L_1 \quad (2.13)$$

となる．ここでは， k 階踊り場から $k-1$ 階段に移動したときの避難者 i の階段内の位置について考える．避難者 i は，歩行速度 $v_v^{(k-1)}$ で移動する．このとき， k 階段に移動するときの状況を以下の 2 つに分ける．

- 避難者 i が歩行速度 $v_v^{(k-1)}$ で移動したとき， $k-1$ 階段で最後尾にいる避難者 j を追い越してしまう場合．
- 避難者 i が歩行速度 $v_v^{(k-1)}$ で移動したとき， $k-1$ 階段で最後尾にいる避難者 j を追いつかない場合．

前者の場合は，

$$H - h_j \leq v_v^{(k-1)} dt \quad (2.14)$$

が成り立つ．左辺は，階段内で移動可能な高さ $H - h_j$ [m] を表している．右辺は，避難者 i の歩行速度 $v_v^{(k-1)}$ である．後者の場合は，

$$H - h_j > v_v^{(k-1)} dt \quad (2.15)$$

が成り立つ．式(2.13)と式(2.14)を満たすときには，ここでの追い越しを禁止するため，避難者 i の階段内の位置は，

$$h_i = h_j + h \quad (2.16)$$

とする．一方，式(2.13)と式(2.15)を満たすときには，避難者 i の階段内の位置は，

$$h_i = H - v_v^{(k-1)} dt \quad (2.17)$$

とする．

次に，(B)の合流について避難者が踊り場へ移動する条件について述べる．ここで， k 階踊り場に移動するときの状況を以下の 2 つに分けて考える．

- 移動してくる避難者は，踊り場の制限人数を超えていないため，全員が踊り場に移動できる
- 移動してくる避難者は，踊り場の制限人数を超えているため，避難者を選抜し移動する

前者の場合は，

$$M_{us} + M_{ds} \leq L_2 - Q_k \quad (2.18)$$

が成り立つ．ここで左辺は，上階段から踊り場へ移動してくる避難者の人数と下階段から踊り場へ移動してくる避難者の人数の合計を表し，右辺は，踊り場への移動可能人数を表している．後者の場合は，

$$M_{fl} + M_{ds} > L_2 - Q_k \quad (2.19)$$

が成り立つ．このとき避難者を選抜する優先度を表すパラメータ p_2 を導入する． p_2 は 1 か

ら 0 の値をとる．本研究では， p_2 の値として以下の 3 通りを考える．

$p_2 = 0$: 下階段から踊り場に移動してくる避難者が優先的に移動する

$p_2 = 0.5$: 下階段からの避難者と上階段からの避難者を交互に合流させる．

$p_2 = 1$: 上階段から踊り場に移動してくる避難者が優先的に移動する．

次に，階段 s から踊り場へ合流した避難者は，踊り場からフロアへ移動する．このときの移動について述べる．踊り場へ合流した避難者は，次のステップでフロア内へ移動し，他の階段 s' を選択し避難を行う．避難者 i は，選択した階段 s' までの距離 $d_{ss'}$ [m] を歩行速度 v_v で，フロア内を移動する．

2.5 火災

2.5.1 延焼

火災が発生したとき，延焼による被害の影響は大きい．ビルにおける火災では，延焼の影響で避難に使用する階段が，使用できないような状態になることも考えられる．そこで本研究では，火災が発生する場所を k 階の階段 s とし，その階段が利用できなくなると仮定する．火は，垂直方向に E [m/s] で延焼する．火の進行状況により，使用不可能な階段は増える．

2.5.2 避難者の移動ルール

火災が発生したとき，一般的に避難者は火災の被害を避け避難行動を行うと考えられる．そこで，延焼による避難者の行動を以下の 3 つのパターンに分けて考えていく．

- (1) 避難者が，火災を回避するために，下降してきた階段を引き返す行動をとる場合
- (2) フロアで階段内に入ろうと待っている避難者が，延焼により階段内を上昇してくる避難者を見た場合
- (3) 避難者が，階段付近まで到着し，階段が使用不可能であることを知った場合

(1) では，避難者 i は，フロア間の高さ H [m] から，避難者 i の階段内の位置 h_i [m] を引いた $H - h_i$ [m] の距離を，歩行速度 v_v で上昇する．このとき，踊り場に移動できる条件は，

$$H - h_i < 0 \quad (2.20)$$

である．このときの移動は，2.4 節の(B)の合流に従う．

(2) では，階段前の待ち行列で並んでいる避難者 i は，進もうとする階段 s 内の状況に気づき，階段 s 前の待ち行列で待たずに，他の階段 s' での避難を行う．ここで，階段 s' の選

択は、ランダムに行うものとする。避難者 i は、選択した階段 s' までの距離 $d_{ss'}$ [m] を歩行速度 v_v で、フロア内を移動する。

(3) では、フロアのフリー空間を移動してくる避難者 i は、進もうとする階段 s が使用不可能であることを知り、他の階段 s' を選択し避難を行う。避難者 i は、選択した階段 s' までの距離 $d_{ss'}$ [m] を歩行速度 v_v で、フロア内を移動する。

2.6 避難モデルの実装

本節では、避難モデルを計算機上に実現するための実装について述べる。まず、実装の概要を示す。本研究では、ビルにおける避難モデルを、手続き型の処理により実装する。その際、用いたプログラム言語は C 言語である。この節では、避難シミュレーションの基本的な処理を説明する。

2.6.1 データ構造

まず、避難者を表す Person 型を定義し、その実体を person とする。

➤ Person 型

- ◇ 避難者の ID
- ◇ 目的地 (階段もしくは踊り場) までの距離
- ◇ 歩行速度
- ◇ 避難している階段 ID

次に、これらが空間を移動する状況 (待ち行列を含む) を Person 型リストにより表現する。ここでは、空間を各フロアの階段ごとに次の通りに分ける。

- ◇ 踊り場
- ◇ 階段
- ◇ フロアのフリー空間
- ◇ フロアの待ち行列

空間での移動処理は、それぞれのリストの更新 (挿入, 削除) により実現する。つまり、移動する前の空間のリストから person を削除し、移動後の空間のリストに挿入する。

2.6.2 避難処理

まず、2.6.1 節に従い対象とするビルを各フロアの階段ごとに分割する。そして、それぞれの空間ごとに避難処理を行う。このときの処理は下階から順に行う。フロアに複数の階

段が存在する場合は、それらを独立に扱い、適当な順序で処理を行う(図 2.5)。

なお、延焼の処理は 2.5 節に従うものとする。

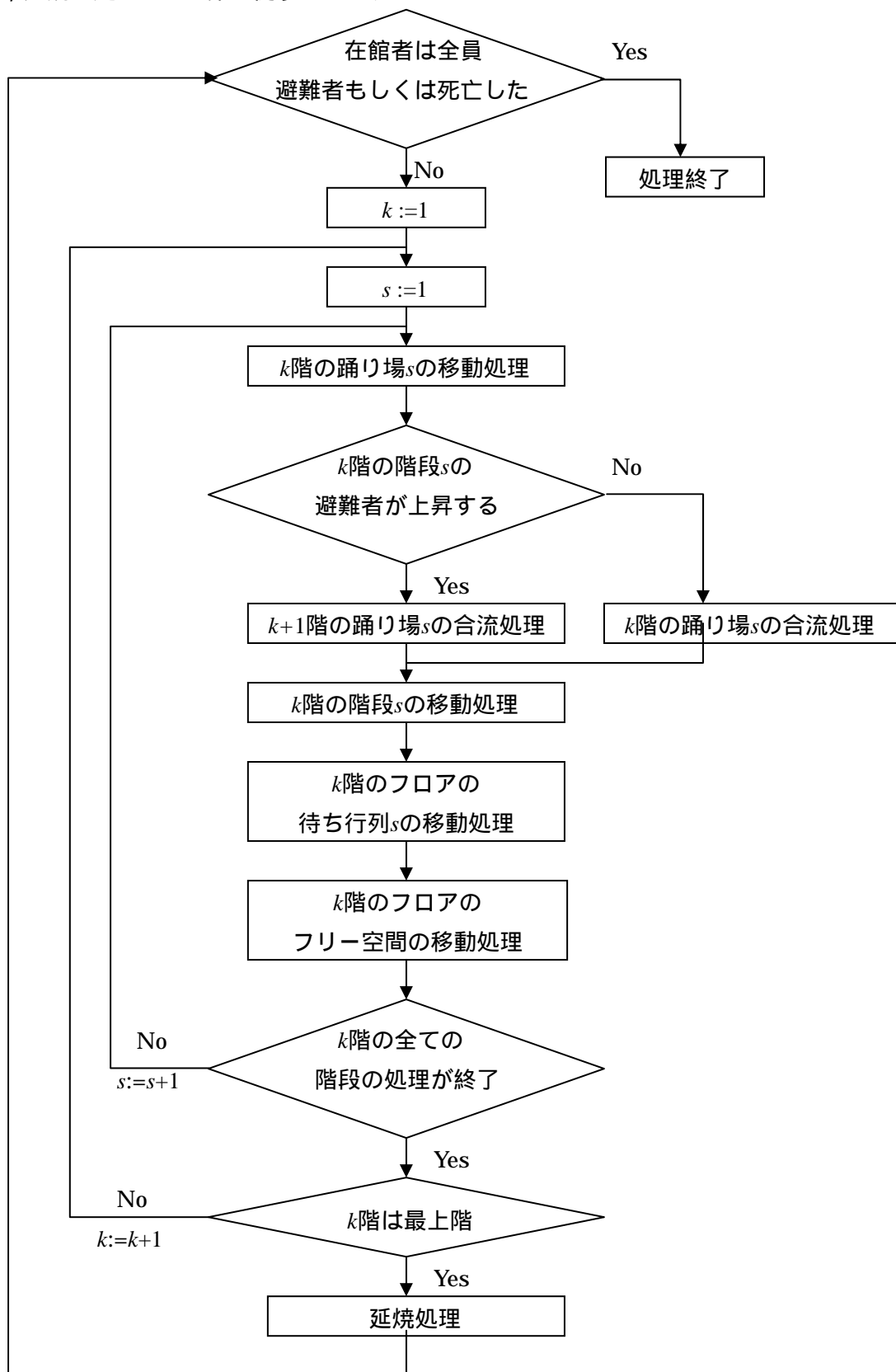


図 2.5 ビル在館者の移動処理

各空間での処理は、リストに存在するすべての person に対して行われる。ここでは、図 2.5 に示した各空間での、避難者の移動処理を以下に示す。

- k 階の踊り場 s の移動処理 (図 2.6)
 - ◇ 避難者は、 k 階の踊り場 s から $k-1$ 階の階段 s へ移動する。
- $k+1$ 階の踊り場 s の合流処理
 - ◇ k 階の階段 s の避難者が、上昇してきたら、 $k+1$ 階の階段 s から移動してくる避難者と k 階の階段 s から移動してくる避難者を、優先度に応じて選抜する。
- k 階の踊り場 s の合流処理
 - ◇ k 階の階段 s から移動してくる避難者と k 階のフロアの待ち行列 s から移動してくる避難者を、優先度に応じて選抜する。
- k 階の階段 s の移動処理 (図 2.7)
 - ◇ k 階の階段 s から $k-1$ 階の踊り場 s に向かって避難者が移動する。
 - ◇ $k-1$ 階の階段 s から $k-1$ 階の踊り場に上昇してきた避難者は、合流の候補者ならば、 $k-1$ 階の踊り場 s に移動する。そうでなければ、 $k-1$ 階の階段 s 内で待機する。
 - ◇ k 階の階段 s から $k-1$ 階の踊り場に下降してきた避難者は、合流の候補者ならば、 $k-1$ 階の踊り場 s に移動する。そうでなければ、 k 階の階段 s 内で待機する。
 - ◇ 避難者が移動中、または待機中に k 階の階段 s が延焼したら、避難者は死亡する。
- k 階のフロアの待ち行列 s の移動処理 (図 2.8)
 - ◇ k 階の階段 s が延焼していたら、避難者は、 k 階のフロアの待ち行列 s から k 階のフロアのフリー空間へ移動する。
 - ◇ k 階の階段 s が延焼していなかったら、 k 階のフロアの待ち行列 s から k 階の踊り場 s へ移動する。
- k 階のフロアのフリー空間の移動処理 (図 2.9)
 - ◇ k 階のフロアの待ち行列 s で避難者が待っていたら、避難者は、 k 階のフロアのフリー空間から k 階のフロアの待ち行列 s へ移動する。
 - ◇ k 階のフロアの待ち行列 s で避難者が待っていなかったら、避難者は、 k 階のフロアのフリー空間から他の階段 s' を選択し階段 s' へ移動する。
- 延焼処理
 - ◇ ある階段から発生した火災は、 E [m/s] で垂直方向に延焼していく。

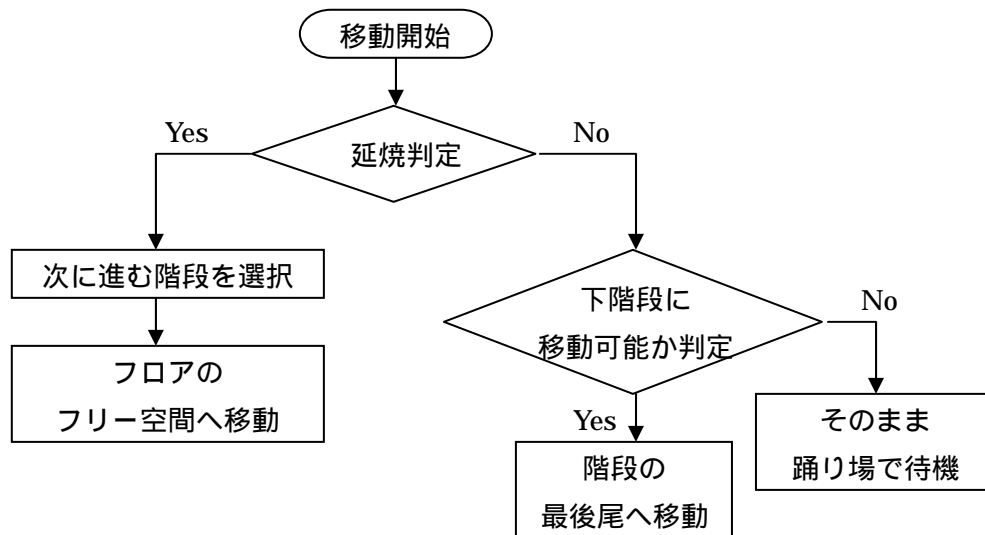


図 2.6 踊り場にいる避難者の移動処理

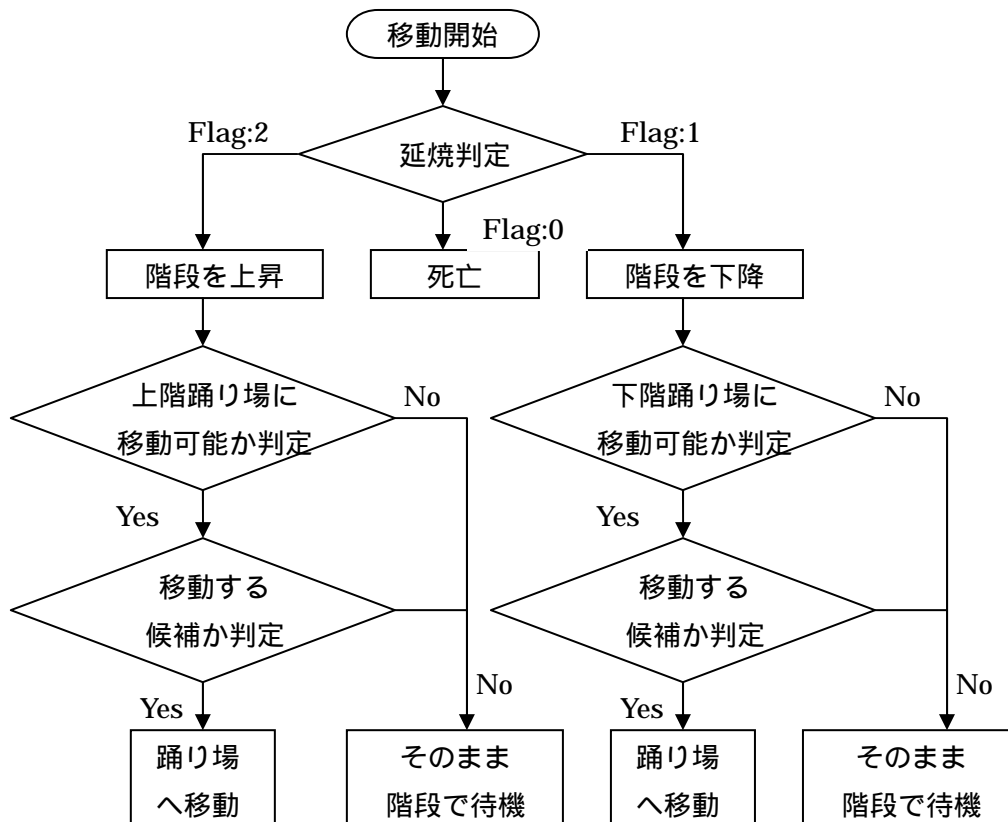


図 2.7 階段にいる避難者の移動処理

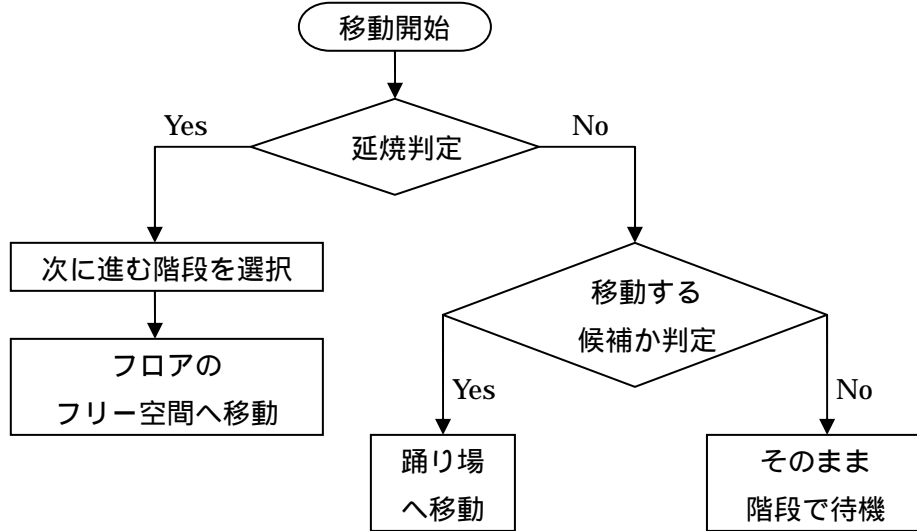


図 2.8 フロアの待ち行列にいる避難者の移動処理

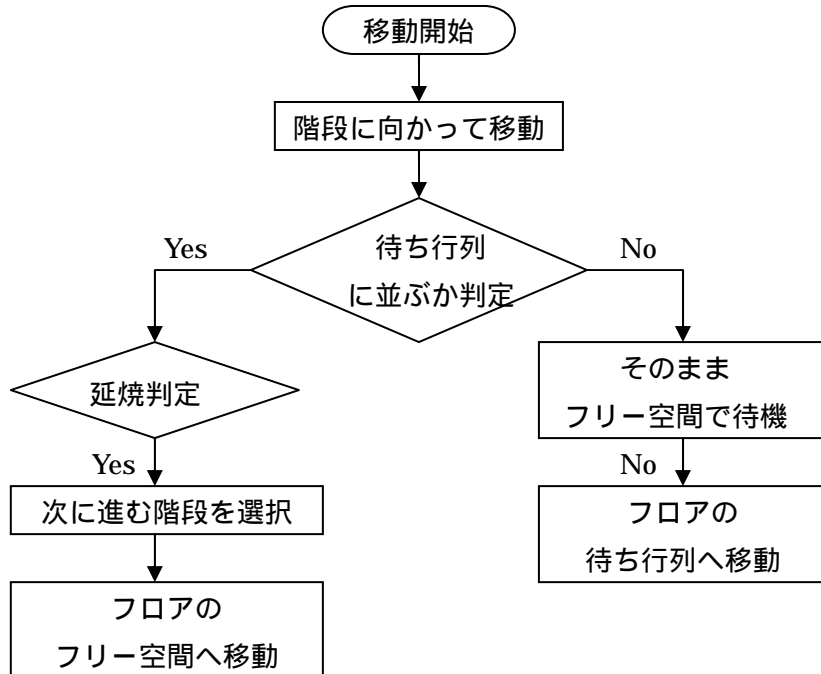


図 2.9 フロアのフリー空間にいる避難者の移動処理

第3章 シミュレーションを用いた

高層ビルにおける避難結果の分析

3.1 避難行動の分析

多くの人と同時に避難を行う場合、避難者同士の合流が起こる。このとき、どの避難者を優先して避難させるかは避難行動に大きく影響を与えられとされる。また階段と踊り場のような制限人数が設けられた避難空間では、滞在できる避難者の人数により混雑状況に差が出ると考えられる。そこで、階段の制限人数と踊り場の制限人数及び、合流における優先度のパラメータの組み合わせによって、避難完了時間と死亡者数を観察する。ここでは、2つの合流において優先度を表すパラメータを p_1 、 p_2 とする。ここで p_1 は、フロアから階段内に入ってくる避難者と上階から下降してくる避難者が踊り場で合流するときの優先度パラメータを表し、 p_2 は、延焼の影響で階段を逆流し、上昇してくる避難者と上階から下降してくる避難者が踊り場で合流するときの優先度パラメータを表す。ここでは p_1 、 p_2 をそれぞれ、0、0.5、1 の3つに分け、9通りのパターンの避難について観察する。なお p_1 、 p_2 の優先度は、2.4.2節に従うものとする。ここで、延焼の影響で階段を上昇してくる避難者は、その間に階段内で延焼に巻かれた場合は、死亡者とする。

3.1.1 シナリオ設定

施設設定を表3.1に示す。シナリオ設定を表3.2に示す。ステップ毎に各経由地点に滞在する避難者をカウントする。また一階の踊り場を経由し館外へ出た避難者を避難完了者としてカウントする。ビル内生存者全員が館外に出たときの時刻を避難完了時間とする。延焼の影響で、逃げ切れなかった者は死亡者とする。

表 3.1 施設設定

建物の階数		21
階段数 n		4
フロアの高さ H [m]		4
階段内の面積 S [m ²]		15
階段間の距離	$d_{AB}, d_{AC}, d_{BD}, d_{CD}$ [m]	100
階段間の距離	d_{BC}, d_{AD} [m]	141
階段前の待ち行列における人の間隔 r [m]		0.1
階段における人の間隔 h [m]		0.1

表 4.2 シナリオ設定

垂直方向の延焼 E [m/s]	50
発火階	3
使用不可能階段	B
各階滞在者数(2-21 階)	各 150

3.1.2 避難優先度と制限人数による避難比較

まず、避難完了時間について観察する。優先度による 9 通りのパターンを避難完了時間により比較した結果、大きな違いが見られなかった。そこで例として、フロアからの避難者を優先し ($p_1 = 0$)、下階段からの避難者と、上階段からの避難者を交合に合流させる ($p_2 = 0.5$) 場合の階段制限人数と避難完了時間の関係を図 3.1 に示す。図 3.1 では、踊り場の制限人数が 1 人の場合とその他で避難完了時間に大きな違いが見られる。踊り場の制限人数が 1 人の場合は、1 ステップ(1 秒)で踊り場に入れる避難者が 1 人に制限されるため階段に入れる人数も限られる。これにより階段内の制限人数が変化しても、避難完了時間に大きな変化は見られない。踊り場の制限人数が 2 人以上の場合には、階段の制限人数が大きくなるにつれて、避難完了時間は短くなる。これは階段内の制限人数により同時に多くの避難者が避難を行えることが影響していると考えられる。

もう少し詳しく見てみよう。踊り場の制限人数が 2 人の場合は、階段の制限人数が 20 人以上になると避難完了時間に変化が見られない。これは、階段内に 20 人以上滞在している状況が発生しないためと考えられる。

踊り場の制限人数が 3 人以上の場合、階段の制限人数が 35 人になるまで、避難完了時間は同じような値をとって減少している。そして、階段の制限人数が 35 人以上になると、踊り場の制限人数が 3 人の場合と 4, 5 人の場合とで違いがみられる。前者の場合には、35 人以上で避難完了時間は、一定の値をとり、後者の場合には、階段の制限人数が大きくなるにつれて、避難完了時間は増加している。これは、階段内の密度によって避難者の歩行速度が遅くなるからである。このことから、階段の制限人数や踊り場の制限人数は、避難完了時間に影響を与えることがわかる。ここでは、階段の制限人数が 35 人、踊り場の制限人数が 4, 5 人のとき、もっとも避難完了時間が短いことがわかる。

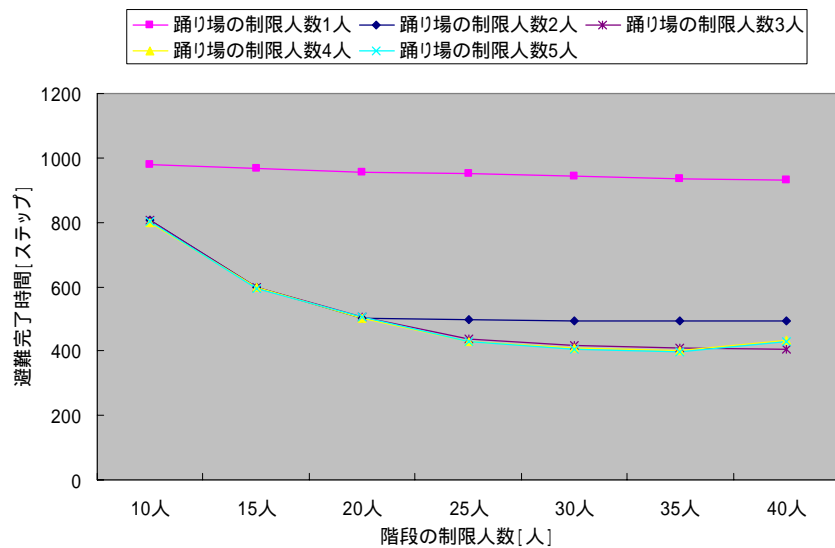


図 3.1 フロア優先/上階と下階を交互にした場合避難完了時間

次に、死者数について観察する。図 3.2 に 9 通りの優先度パラメータ p_1 , p_2 の組み合わせにおける死者数と階段の制限人数の関係を示す。ここでは、優先度のパラメータの変化により死者数の違いがみられた。図 3.2 の 9 つのグラフにおいて、踊り場の制限人数の増加に伴い、死者数が減少する傾向が見られる。これは、階段内の制限人数の増加に伴い、同時に多くの避難者が階段を下降できるようになることと、延焼に追われて階段を上昇する避難者が踊り場前で待機することが少なくなることが、影響していると考えられる。その結果延焼に巻き込まれる避難者が減少する。

次に、図 3.2 のグラフにおいて、優先度パラメータ p_1 , p_2 の組み合わせによる比較を行う。

[A : 階段優先/上階優先][B : 階段優先/交互][C : 階段優先/下階優先]のグラフ、つまり優先度パラメータ p_1 を階段優先とし、優先度パラメータ p_2 を変化させたときの各グラフの共通点と、相違について観察する。まず、共通点として以下のような特徴がみられる。

- 踊り場の制限人数が 1, 2 人の場合と、踊り場の制限人数が 3 人以上の場合で違いがみられる。
 - ◇ 踊り場の制限人数が 1, 2 人の場合は、階段の制限人数に依らず死者数は、ほぼ一定している。
 - ◇ 踊り場の制限人数が 3 人以上の場合は階段の制限人数が増加するにつれて、死者数が増加する。

踊り場の制限人数が 1, 2 人の場合では、踊り場の制限人数が限られているため、階段内に入れる人数も限られる。そのことにより、延焼で階段を上昇してくる避難者が少ないことが影響していると考えられる。

次に相違について調べる。踊り場の制限人数が 3 人以上の場合では、階段内の制限人数

による死亡者数の変化がみられる。まず、上階優先させた避難 A に比べ、交互に避難させた B の方が、死亡者数が少ない傾向にある。さらに、交互に避難させた B に比べ、下階段を優先させた C の方が死亡者数が少ない傾向にある。すなわち、延焼の影響を受ける下階からの避難者を優先させず、上階からの避難者を優先させた A では、多くの死亡者が出る事がわかる。

[D : 交互/上階階段][E : 交互/交互][F : 交互/下階優先]のグラフについて比較する。ここでは、優先度パラメータ p_1 を交互とし、上記と同様の観察を行う。

➤ 踊り場の制限人数が 1 人以上の場合は階段の制限人数により死亡者は増加する。

踊り場の制限人数が 2 人以上では、階段内の制限人数による死亡者数の変化が見られる。ここでは、上記の A, B, C の比較と同様に、延焼の影響を受ける下階からの避難者を優先させた方が、死亡者数が少なくなることがわかる。

[G : フロア優先/上階階段][H : フロア優先/交互][I : フロア優先/下階優先]のグラフについて、比較する。ここでは、優先度パラメータ p_1 はフロア優先とし、上記と同様の観察を行う。

踊り場の制限人数が 2 人以上では、階段内の制限人数による死亡者数の変化が見られる。ここでは、上記の A, B, C の比較と同様に、延焼の影響を受ける下階からの避難者を優先させた方が、死亡者数が少なくなることがわかる。

以上の 3 つの比較により、優先度パラメータ p_2 が下階優先のときには、延焼の影響を受ける避難者が先に避難でき、死亡者数が少ないことがわかる。これを踏まえた上で、次に、優先度パラメータ p_1 の変化についてみていく。ここでは、優先度パラメータ p_2 を下階優先とし、優先度パラメータ p_1 を変化させた[C : 階段優先/下階優先][F : 交互/下階優先][I : フロア優先/下階優先]のグラフについて、比較する。このとき、以下のような特徴がみられる。

➤ 踊り場の制限人数が 1, 2 人の場合では、C と F, I で違いがみられる。

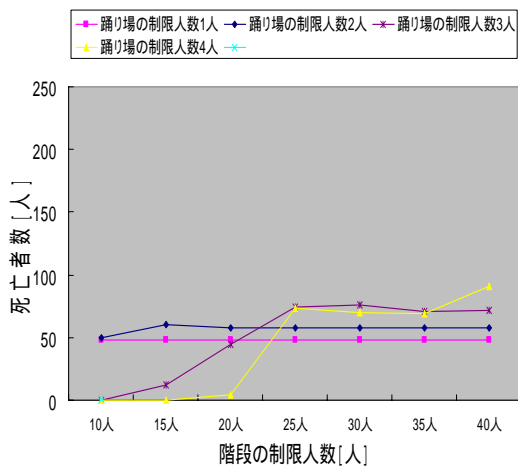
◇ [C] : 階段の制限人数に依らず死亡者は、ほぼ一定している

◇ [F, I] : 階段の制限人数が増加するにつれて、死亡者が増加する。

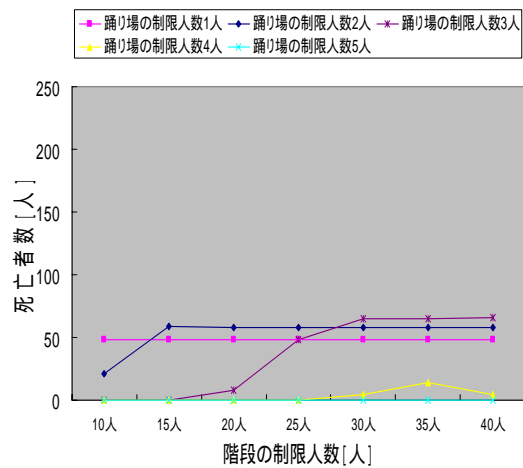
➤ 踊り場の制限人数が 3 人の場合では、大きな違いはみられない。

➤ 踊り場の制限人数が 4, 5 人の場合では死亡者は出ていない。

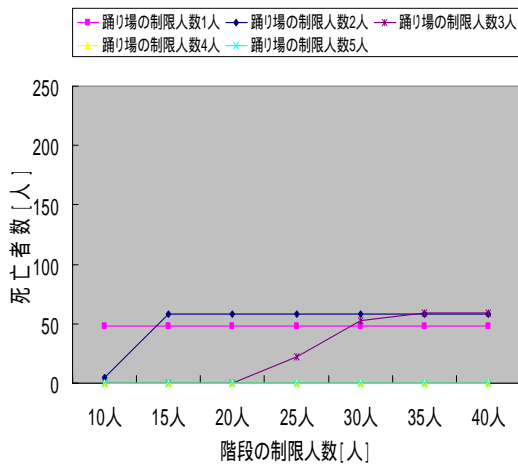
また、踊り場の制限人数が 1, 2 人の場合では、階段を優先させた避難 C は、交互に避難させた F や、フロアを優先させた I に比べ、死亡者数が少ない傾向にある。これは、各シナリオにおける、階段内の避難者の密集度によると考えられる。階段優先の C では、避難者は、階段内で滞留することなく下降できる。その一方で、フロア優先の I では、上階から踊り場に入ることができずに、階段内で避難者が密集する。したがって I では混雑度による避難の遅れが発生し、死亡者数が多くなるものと考えられる。



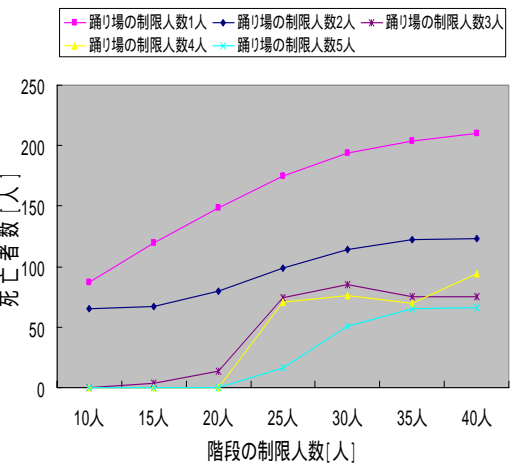
A: 階段優先/上階優先



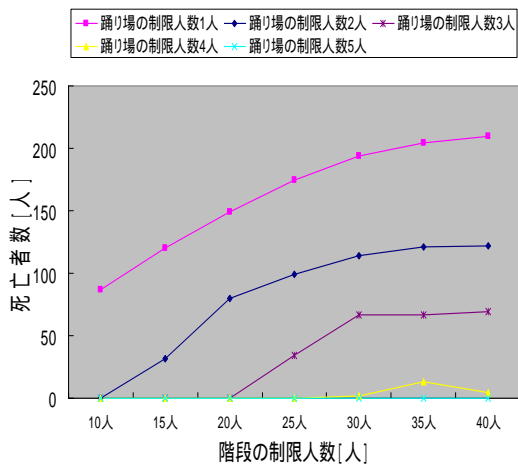
B: 階段優先/交互



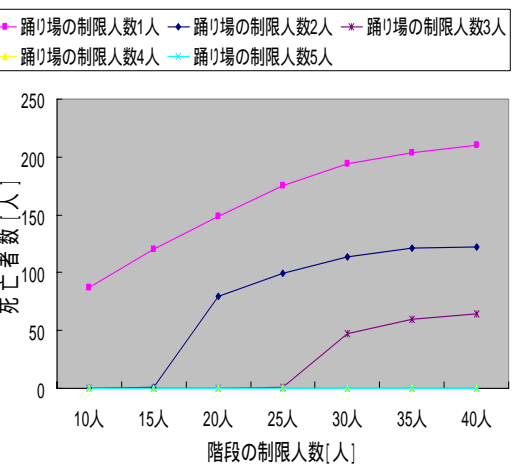
C: 階段優先/下階優先



D: 交互/上階優先



E: 交互/交互



F: 交互/下階優先

図 3.2 優先度パラメータ p_1 , p_2 による死亡者数

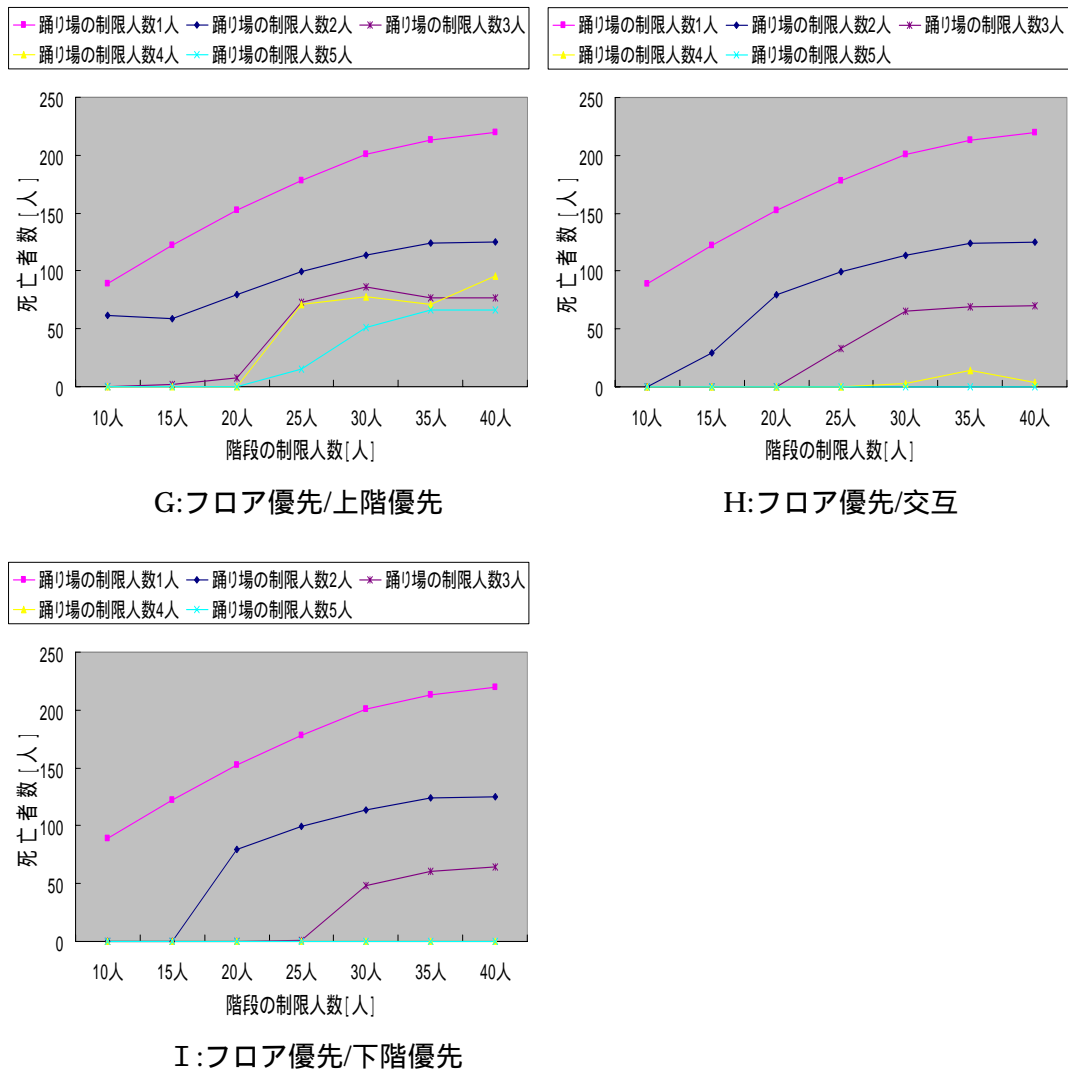


図 3.2(つづき)優先度パラメータ p_1 , p_2 による死亡者数

3.2 延焼による避難の影響

この節では、延焼における避難完了時間と死亡者数を観察する。施設設定は、3.1.1 節の表 3.1 に従う。3.1.2 節において、避難完了時間が一番短く、死亡者数が少なかった以下のパラメータを設定する。

階段の制限人数 : $L_1 = 35$ [人]

踊り場の制限人数 : $L_2 = 4$ [人]

優先度パラメータ p_1 : $p_1 = 1$ (上階優先)

優先度パラメータ p_2 : $p_2 = 0$ (下階優先)

延焼時間と避難完了時間及び死亡者数との関係を図 3.3 に示す。図 3.3 では、延焼時間

が長くなるにつれて、死亡者数が減少する傾向が見られる。また避難完了時間では、ほぼ減少している。延焼時間により使用不可能な階段は増える。このことから、延焼速度が速ければ速いほど、次々に使用不可能な階段が増えていく。このとき階段内の避難者の多くは、階段を上りきれず延焼に巻き込まれてしまうため、死亡者が多発していると考えられる。延焼時間が短ければ短いほど死亡者が増すことから、延焼を少しでも食い止めることができるようなビル構造であることが望ましい。

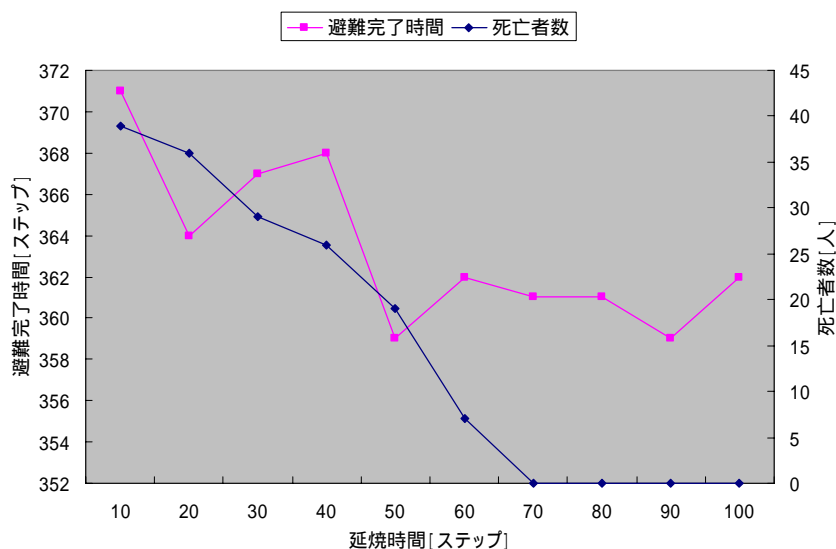


図 3.3 延焼時間による避難完了時間と死亡者数

3.3 各階滞在分布による避難比較

火災が発生した階に多くの人滞っていた場合と、そうでない場合では、避難状況が異なってくると考えられる。この節では、各階の初期滞在者の分布と火災が発生した場所を変化させ、避難完了時間と死亡者数について観察する。

3.3.1 シナリオ設定

施設設定は、3.1.1 節の表 3.1 に従う。シナリオ設定は、表 3.3 及び各階滞在者人数を示す図 3.4 とする。3.1.2 節において、避難完了時間が一番短く、死亡者数が少なかった以下のパラメータを設定する。

- 階段の制限人数 : $L_1 = 35$ [人]
- 踊り場の制限人数 : $L_2 = 4$ [人]
- 優先度パラメータ p_1 : $p_1 = 1$ (上階優先)
- 優先度パラメータ p_2 : $p_2 = 0$ (下階優先)

表 3.3 シナリオ設定

垂直方向の延焼 E [秒]	50
使用不可能階段	B

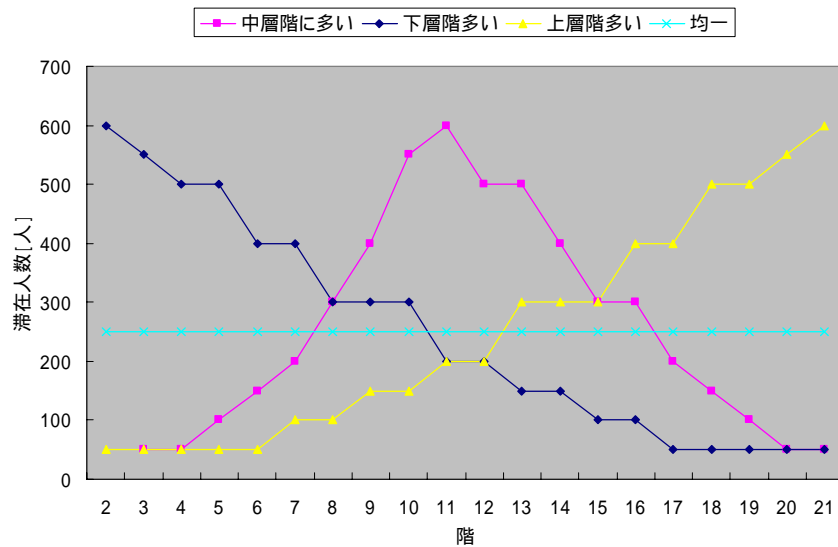


図 3.4 各階滞在者分布

3.3.2 火災発生階と避難完了時間

ここでは、火災発生階と避難完了時間について観察する。各階の滞在者分布による避難完了時間と火災発生階の関係を図 3.5 に示す。まず各階滞在者分布の比較では、下層階に多くの人がいればいるほど、早く館外に避難できる在館者が多いことから、避難完了時間は他のシナリオ設定に比べて短い。また、火災発生階による比較では、階が上がるとともに避難完了時間が、減少する傾向が見られる。これは、延焼による影響の度合いが関係すると考えられる。火災が下層階で発生すればするほど延焼による被害が拡大し、階段が使用できなくなる。このことから、下層階の火災は、上層階からの避難者に延焼の影響を与えたと考えられる。

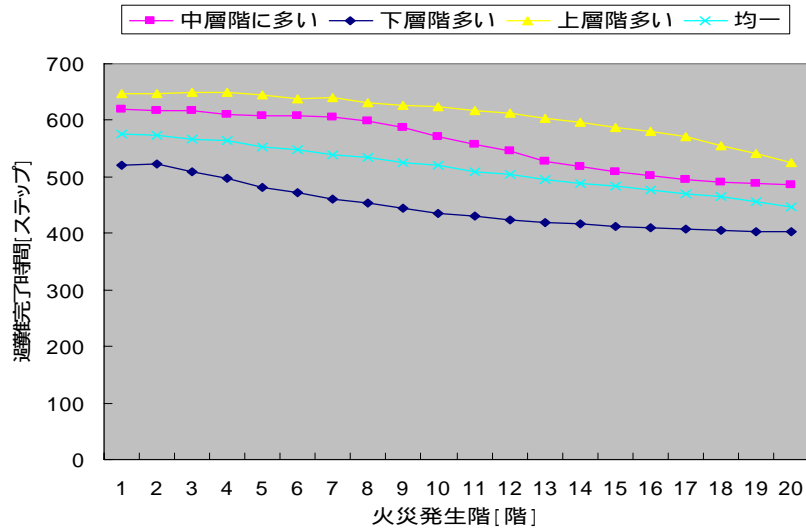


図 3.5 各階滞在者分布による火災発生階と避難完了時間

3.3.3 火災発生階と死亡者数

次に，火災発生階と死亡者数について観察する．各階の滞在者分布による死亡者数と火災発生階の関係を図 3.6 に示す．図 3.6 では，中層階に滞在者が多い場合と下層階に滞在者が多い場合と上層階で滞在者が多い場合のそれぞれのグラフは，横軸方向に平行移動したようなグラフが見られた．この 3 つは最も滞在者が多い階より，数階下の階が火災階だった場合に最も死亡者が多くなっている．これは，滞在人数が多い階から一斉に下降してきた避難者は，数階下で起きた火災の延焼の影響をうけるからであると考えられる．避難者は，延焼に気づき，階段を上昇する避難行動を起こす．この行動を起こす避難者が多いほど，避難に時間がかかり，死亡者が出てしまう．もし火災発生階に滞在人数が多かった場合には，火災の判断が早めに行えることから，フロアの広い空間で火災の影響を回避することができる．一方，各階の滞在人数が均一の場合には，下の階で火災が起きるほど，延焼の影響をうける避難者が多い．このことから下の階で火災が起きるほど死亡者も増加傾向にあると考えられる．

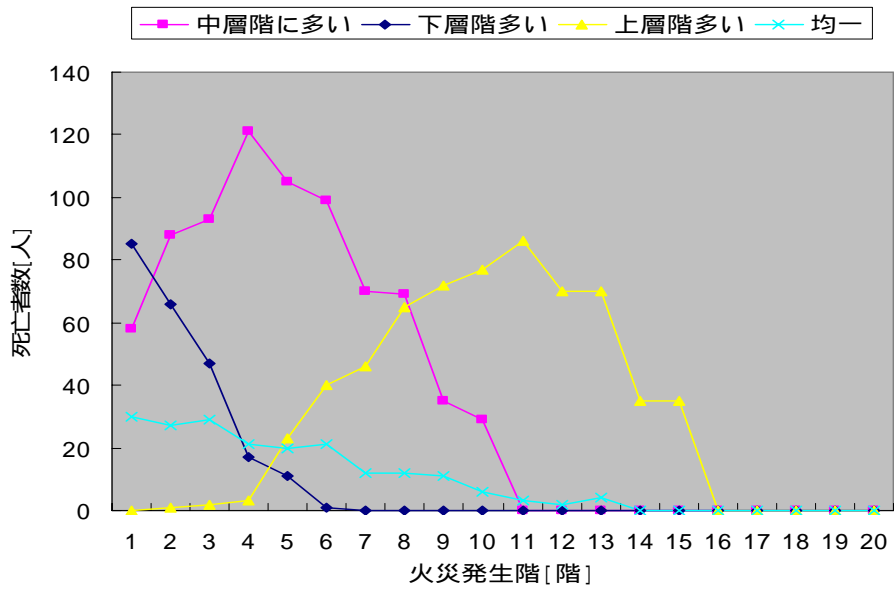


図 3.6 各階滞在者分布による火災発生階と死亡者数

第4章 結論

本研究では、ビル避難時に想定される混雑に着目し、避難シミュレーションを作成した。その際、ビル内の混雑を、フロアでの混雑、階段内での混雑、合流での混雑に分け、モデル化を行った。特に合流では、フロアからの避難者と階段からの避難者、上階から下降してくる避難者と延焼により上昇してくる避難者、両者においてどちらの避難者を優先して避難を行うかを、優先度パラメータを用いてモデル化した。本研究では、避難シミュレーションを用い、この優先度パラメータとともに、階段内の制限人数、踊り場の制限人数を変化させ、それぞれの場合について、避難完了時間、死亡者数を観察した。その結果として、以下の知見が得られた。

- 制限人数の増加とともに、避難完了時間は減少するが、制限人数がある一定の値を超えると、避難完了時間は増加する。特に、踊り場の制限人数が4,5人で、階段の制限人数35人のとき、最短時間で避難が行える。
- 延焼の影響を受ける下階段からの避難者を優先させる避難では、死亡者数が少なくなる。特に、踊り場の制限人数が4,5人の場合において大きな違いがみられた。
- 階段からの避難者を優先させることで、死亡者数が少なくなる。特に、踊り場の制限人数が1,2人の場合において大きな違いがみられた。

今後の課題としては、以下のことが挙げられる。

- 避難行動を階段で下方向に移動するものだけでなく、上方向に移動するものを考える。
- 階ごとに優先度パラメータを変化させ、避難完了時間と死亡者数を観察する。
- 火災発生時の避難者の経路選択を考慮したモデルを作成する。
- 追い越し、追従を考慮した避難モデルを考える。
- 延焼のモデルを考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くのご指導，ご助言をいただきました中央大学工学部情報工学科田口東教授に深く感謝の意を表します．また，多くのご助言ご協力をいただきました鳥海重喜氏，円地隆之氏，川口真由氏，小池光太郎氏をはじめとする田口研究室院生の方々，及び学部生の皆様に深く感謝いたします．

参考文献

- [1] 高橋幸雄，森村英典，“混雑と待ち”，朝倉書店，東京，2001．
- [2] 岡田公孝，“個人行動をベースにした歩行モデルと高密度シミュレーション”，東京工業大学修士論文，2003．
- [3] 日本火災学会，“火災と建築”，共立出版，東京，2002．