階段シミュレータの開発

DEVELOPMENT OF AN EVACUATION CALCULATION TOOL “STAIRS SIMULATOR”

井田卓造 — * 1 桑名秀明 — * 2
澤 由季 — * 3

Takuzo IDA — * 1 Hideaki KUWANA — * 2
Yuki SAWA — * 3

キーワード：
避難時間予測, シミュレーション, 避難安全検証法, 時刻暦, 流動係数, 合流

Keywords:
Prediction (estimate) for evacuation time, Simulation, Japanese verification methods for Determining safe evacuation of a floor and building, Time-history, Flow rate, Confluence

We have developed an evacuation calculation tool “stairs simulator”. This is a tool for dividing the space in stairs with a small space where has the capacity for “the number of the people who can move inside the stairs within one minute”, (which this paper calls cell), and calculating the events which mean the residents’ entrance into the stairs on every floor, the confluence with the evacuator from upper floors which occurs when they enter the stairs and going out of the stairs on the evacuation floor by using time-history in sequence. It can show the floor direction distribution of evacuator within the facilities and the influence on evacuation of distribution in the horizontal direction in graphs and animations by using short-time input and calculation time.

1 はじめに

超高層、複合施設、高層かつ巨大な平面プレートを有す施設などの防災設計では、施設の避難時間がある程度正確に予測することが求められている。既に高度なシミュレーションや避難安全検証法などが存在しているが、上記のような施設の場合、避難時間の予測精度と実務面（計算スピード）のバランスに課題を残している。

我々は、階避難時間および全館避難時間の実務的な計算法として「階段シミュレータ」を考案しここに紹介する。例えば高層建物で収容人数の総数は同じであっても、人口の多い階が低層階に配置されるか高層階に配置されるかによりその階の階避難時間は異なるはずである。そうしたことを簡便な入力と短い計算時間でわかりやすいアウトプットとともに示すことができる。

2 既存の避難時間予測法と課題について

2-1 マルチエージェントシミュレーション

既存のいくつかのシミュレーション^{注1)}では、各階のプランで避難者の分布を入力し避難時間を予測するものであるが、次の点が課題である。

一に、計算精度との引き換えに入力の手間の煩雑さと長い計算時間が挙げられる。二に、各階における避難開始の時間差について十分な決め手にかけることである。これはシミュレーションの問題というより火災現象に特有の再現性の難しさが原因である。三に、各階の人の流動は一定の精度で予測できても、階→階段への避難行動に関する予測精度に、階段での合流以降の予測精度が追いつかないという問題がある。これはマルチエージェントに限らない避難シミュレーション全般に共通する課題である。

2-2 階避難安全検証法、全館避難安全検証法

建築基準法では、避難安全検証法¹⁾、大臣認定による高度な検証方法（ルートC）がある。ルートCの避難行動予測では避難安全検証法を下敷きにすることが多い。性能評価にて推奨されていること、計算が比較的簡便で実務的であることによる。この計算法は建築計画によるが、次の点が課題となる。

一に、階段配置が偏っている場合、階段への避難者の集中の偏りを計算できないこと。二に、在館者数に比べて階段容量(数、幅)が少ない場合、全館避難の出口通過時間の計算にて有効流動係数が小さくなる問題である。なお一つ目は危険側に、二つ目は安全側に振れることが多く、両者が相殺することで結果的にやや安全側の評価となる場合が多い。三に、階避難と全館避難を別々に計算するため、階層方向の避難者数の分布が反映されていないことである。

3 階段シミュレータの考え方

階段シミュレータは、「1秒間に階段内を移動できる人数」すなわち「流動係数×階段幅(人/秒)」の小空間（本稿ではセルと呼ぶ）によって階段内を分割し、階段内の避難者は1秒ごとに避難方向のセルに移動していくモデルが基本である^{2) 3)}。階段の収容人数(階段面積を0.25で除する^{注2)})をセルの人数で除した数が総セル数である。各階の在館者の階段への進入、進入の際に起こる上階からの避難者との合流、避難階での退出といったイベントを時刻暦で逐次計算するツールである。

3-1 入力データと出力内容

入力データは次に示すとおり、

- ・階数 ・各階の人数(各階段に割り当てる) ・階段幅
- ・階段面積と歩行距離(1層分) ・階段への各階からの扉幅

¹⁾ 鹿島建設(株)建築設計本部 グループリーダー
(〒107-8502 港区赤坂6-5-30)

²⁾ 鹿島建設(株)技術研究所都市防災風環境グループ 主任研究員

³⁾ (株)アルモ設計建築設計部

¹⁾ Group Leader, Kajima Corporation Architectural Design Division

²⁾ Research Engineer, Kajima Technical Research Institute Disaster Prevention and Wind Engineering Group

³⁾ ARMO Architects & Engineers, Architectural Design Division

・階段の避難階出口幅 ・水平進入率 ・各階の避難開始時間
である。

出力で、避難開始後の各時刻(秒)における階段内の人数、階の人数を出力することが可能であり、各階、全館の避難時間を容易に得られる。なお計算結果の見やすさを考え

- ・各階の人数の減少や階段内の避難者の進入具合を動画で表示
 - ・各階の人数の減り具合・階段内の人数を折れ線グラフで表示
 - ・各階から階段への1秒間の進入者数を折れ線グラフで表示
- 等の表示を行う(図-1)。簡単な入力・短時間の計算で豊かな結果を目指した。「見せるシミュレーション」でなく設計実務で様々なパタンの安全性を確認し、避難安全設計に役立てるためである。

3-2 避難者の水平方向・垂直方向の偏在(在館人数分布)

階段シミュレータでは、階段ごとに避難時間を計算する。計算にかかる前に、各階ごとに避難者数を複数の階段に割り付ける作業を行う。防火区画や各種間仕切り、用途に着目して割り付ける。

また、建物の階数、各階に設定された人数、避難開始時間の階ごとの差によって生まれる各階の状態を階避難と全館避難を同時に時刻暦で計算することで明らかにする。建物の縦方向の施設構成や階数設定等に重要な示唆を与える。これまでブラックボックスに近かった階段内の避難プロセスに光を当てることが期待できる。

3-3 水平進入率と各階の避難開始時間について

避難は実験による再現等が極めて難しい分野である。階段での上階からの避難者との合流、また火災階・非火災階の避難開始時間等は、避難者の特性や施設の認知度合い、火災発生場所や火災規模などその場の状況によって振れ幅が大きく、避難計算に資するような法則が得られにくいと考えた。階段シミュレータではこれら指標をパラメータとして扱い、階段での合流や避難開始において任意に設定可能とした。パラメータを変えながら最も安全側の選択や、「こうした動きはありえる／ありえない」といった直感と照らし合わせることが可能である。動画やグラフなどビジュアル機能を強化しているのはそのためである。なお階段での合流については、独自に「水平進入率」という指標を考案した。

4 階段シミュレータの計算の仕組み

4-1 3つの基本的な動き

階段シミュレータは次の3つの基本的な動きよりなる。

- ・階から階段への進入
- ・階段内を下行進
- ・避難階での屋外方面への退出

本稿ではこれらを順に[進入]、[行進]、[退出]と呼ぶ。

[進入]……ある階が避難開始以降、階に接続するセルに対して、1秒間に「階段への流動係数×階段への出口幅」(人/秒)が進入。本稿では流動係数を1.5(人/㎡秒)^{注3)}とする。なお、セルの定員をC(人/秒)とすると、Cを超えて進入できないこととする。階段への出口幅を B_i とすると、[進入]可能な人数は最大で $\min[C, 1.5B_i]$ (人/秒)である。なお当該階の人数が0になれば進入は行われない。

[行進]……階段内を1秒ごとに一つずつ下のセルに下降移動。[行進]の速度 v は、階段内が密度4人/㎡の状態での歩行速度と考え、下記の式を v について解いて得られる数値とする。

図-1 入力画面とアウトプット

$$4A_{st} = C \times L / v \quad \dots\dots (i)$$

A_{st} : 階段面積(1層分) C : セルの定員
 v : 歩行速度 L : 階段の歩行距離(1層分)

[退出]……避難階では、1秒間に「流動係数×出口幅」(人/秒)ずつ屋外方面に退出。本稿では流動係数を全館避難安全検証法の中、地上に通ずる出口通過で用いられる $N_{eff}=80$ (人/㎡分)から $80/60$ (人/㎡秒)とする。 $80/60=1.333\dots$ であるが表現が煩雑となるため、本稿では1.3として表記する^{注4)}。なお、セルの定員 C を超えて退出できない。階段からの出口幅を B_i とすると、[退出]可能な人数は最大で $\min[C, 1.5B_i]$ (人/秒)である^{注5)}。

4-2 [進入]、[行進]、[退出]の相互作用と「ダルマ落とし」

[進入]、[行進]、[退出]は避難開始直後等を除き相互に影響を及ぼす。[退出]によって生じた最低部セルの「空き」を埋める形で階段内で下降[行進]が生じ、さらにそれに伴って階からの[進入]が行われる連鎖的な一種の「ダルマ落とし」である。以降で具体的に述べる。

4-3 同一時間における複数の状態「遷移」

まず、非常に簡易なモデルを使って説明する。

- ・階段内のセルは5つ、セルの定員は10人
- ・2階と3階からは1秒間に6人が接続するセルに進入可能
- ・1階階段出口では1秒間に6人が退出可能
- ・現在、階段内は満員(各セルに定員)
- ・最初の時点で2階と3階に50人ずついる

実際にこのようなケースはありえないが、説明しやすさの点からこのような設定としたことを了承願いたい。

(1) 2階から水平進入しないケース

上記前提の状態を時刻 t の状態とし上図では①に該当する。①の状態から1秒後に避難階にて6人が[退出]、それに伴い最上部のセ

ルに 6 人分の空きが生じ(②)、3 階から 6 人が進入した(③)。ここで②③はともに①の状態から 1 秒後である。この同一時間内の複数の状態([退出]と[進入])を本稿では「遷移」と呼ぶことにする。②から③への遷移をさらに細かく観察すると下図のようになる。

セルが 5 個なので、1 回の退出に伴う遷移は 5 つのステップとなる。セル内の人数および各階の人数を上記のように列ベクトルで表現可能である。列ベクトルは各ステップごとに遷移を繰り返し、階と接続するセルにて階からの水平進入などのイベントが生じる。

(2) 2 階から水平進入するケース

2 階と接続するセルにて、階段内の直上セルよりも優先して水平進入がある場合は下記のようになる。

(3) 2 階から一部が水平進入するケース

2 階と接続するセルにて水平進入と直上セルからの下降の両方が起こる場合を考える。2 階からの水平進入を 2 人に制限する。

上記の(1)(2)(3)は、[進入]、[行進]の合流する際の折り合いのパターンと考えられる。階段内を[行進]が優先する場合、[進入]が優先する場合、一定の割合で[進入]を許す場合の 3 つである。

(4) 複雑なダルマ落としと遷移

簡易なモデルを使って説明する。

- ・階段内のセルの定員は 10 人
- ・現在、階段内は各セル 8 人
- ・水平進入は考えない（避難階近傍のセルで水平進入はない）
- ・1 階階段出口では 1 秒間に 2 人が退出可能

[退出]により複雑な遷移が見られる例である。ダルマ落としによって最下セルから一定の高さまでセルが定員(10 人)となっていく。列ベクトルを使う逐次計算を行わないとこの振る舞いは予測しにくい。

4-4 階からの水平進入者の調整

(1) 水平進入率の考え方(合流に関するパラメータの設定)

水平進入率 α の概念を導入する。1 秒間に $\alpha \times 1.5 \times \text{扉幅 (人/秒)}$ を階段内の降下者に優先させて進入させることとする。セルの「空き」を超えた人数は進入できないが、十分な「空き」が生じた場合、 $\alpha \times 1.5 \times \text{扉幅 (人/秒)}$ を超えて進入する。

(2) 水平進入率の設定と実際の[進入]

階に接続するセルの「空き」($C - C_i$)と「直上セルの人数 C_{i+1} 」と階からの進入者数の合計の大小関係によって水平進入者数と直上セルからの下降者数を調整する(図-6)。

4-5 列ベクトルの漸化式

階段内のセルの数を n とすると、セル内の人数を n 行の列ベクトルで表現できる。各階の人数では、階と接続する列に階の人数、他は 0 を入れ、 n 行の列ベクトルとする(4-3 の各表現参照)。時刻 t での列ベクトルの i 番目の遷移状態を階段と階についてそれぞれ $V_i(t)$ 、 $U_i(t)$ と表す。 $V_i(t)$ 、 $U_i(t)$ は互いに人数をやり取りする。

このように、同一時刻の遷移と時刻を 1 秒ずつ進める二段階の漸化式によって「ダルマ落とし」が進行する。漸化式を図-7 に示す。

4-6 歩行状態のシミュレーションではなく避難時間の計算法

[進入]、[行進]、[退出]により、実際は階段内で粗密状態が断続的に進行して行くと考えられる。一方、階段シミュレータは[進入]、[退出]による階段内の詰まり具合から実務的に避難時間を予測するものである。階段での合流や避難開始の時間差など確度の高い知見が十分得られていない分野については、一定の範囲でパラメータスタディを行い、「実際の避難の様相」から各計算結果を照射することで避難時間の予測精度を高めていく方法としたい。詳細なシミュレーションとは別の道筋で「実際の避難」に近づけるものと考えた。

5 階段での合流、水平進入率に関する考察

4-5 で水平進入率 α を定義したが、実際に階段での合流に際してどのように水平進入が行われているかについて考察する。

5-1 実流動係数

階から階段に対しての[進入]で、1 秒間の進入者数を階段への出入り口幅で除した値を本稿では実流動係数 N_f と呼ぶことにする。

$$N_f \times \text{出入り口幅} = \text{実際の進入者数} \quad \dots\dots (ii)$$

実流動係数 N_f は階と経過時間によって決まる変数(関数)である。

5-2 水平進入率 α と実流動係数 N_f の関係

下記の設定条件で、階段シミュレータにて計算を行った(図-2)。

・階数	…… 9 階
・基準階人数	…… 125 人
・階段幅	…… 2m
・階→階段の流動係数	…… 1.5 人/m秒
・階→階段の出入り口幅 B_i	…… 0.8m
・避難階での階段出口の流動係数	…… 1.3 人/m秒 ^{注3)}
・避難階での階段出口幅 B_1	…… 0.8m、2m
・水平進入率 α	…… 0%、20%、50%、100%
・避難開始時刻	…… 一斉避難(時刻0から一斉避難)

$\alpha = 0\%$ とすると上階から優先的に[進入]。 $\alpha = 100\%$ では、逆に低層から[進入]が始まる。 $\alpha = 20\%$ の場合、低層から5層ずつ前後[進入]し、高層部へ繰り上がる。 $\alpha = 50\%$ の場合、避難階出口が0.8mの時、低層から2層ずつの[進入]、避難階出口が2.0mの時は、低層から5層ずつの[進入]となる。 α は定数であるが実流動係数 N_f は経過時間に従い、また階ごとに変化する。階→階段と避難階の出口幅が等しい時、避難開始直後、 $N_f = 1.5$ で[進入]できるが、階段内が詰まると階段出口の流動係数1.3が[進入]の上限となる。

北後らは実験をもとに「定常段階の流率合流比率は60%程度」⁴⁾としている。流率合流比率と水平進入率の関係は以下の式となる。

$$\phi = \frac{1.3}{1.5} \alpha + 1 - \frac{B_1}{B} + 1 \quad \dots\dots (iii) \quad \begin{array}{l} \phi : \text{流率合流比率} \\ B : \text{階段幅} \\ B_1 : \text{階→階段の出入り口幅} \end{array} \quad \begin{array}{l} \alpha : \text{水平進入率} \end{array}$$

ϕ を60%、 $B = 1.2\text{m}$ 、 $B_1 = 0.8\text{m}$ として(iii)式から $\alpha \approx 65\%$ を得る。 ϕ を少し小さく見て50%の場合は、 $\alpha \approx 52\%$ を得る。

6 ケーススタディ

超高層で、貸会議室や社員食堂など、在館者数が飛びぬけて多い階の設定が避難時間に与える影響についてケーススタディを行う。

6-1 設定条件

・階数	……20 階
・基準階人数、面積 $A_{1\text{floor}}$	……375 人、3000 m^2
・特異階(在館者数多)人数	……2100 人
・特異階(火災階)	……3 階、10 階、18 階のいずれか
・階段 箇所数	……2 箇所
・階段 幅、面積	……1.2m/箇所、15 m^2 /階・箇所
・階→階段の出入り口幅 B_i	……0.8m
・避難階での階段出口幅 B_1	……1.2m (屋外への出口幅の計10m)
・流動係数	……5-2 の設定と同じ
・水平進入率 α	……パラメータ(0~100%)
・避難開始時刻	……一斉避難: 時刻0から一斉避難開始 時間差避難: 非火災階は火災階(時刻0で避難開始)より $6\sqrt{A_{1\text{floor}}}$ (秒)の遅れ ^{注6)}

水平進入率 α および避難開始時刻をパラメータとして、特異階(3 階、10 階、18 階)の階避難時間および全館避難時間を求めた。

6-2 計算結果と分析

10 階に特異階があり、 α が60%で一斉避難の場合のグラフは図-4である。 α を0から100%まで変化させて3 階、10 階、18 階の階避難時間のグラフを描く(図-3)。

一斉避難では、水平進入率 α が30%以下では、階避難に最も時間がかかるのは特異階が3 階の場合であり、次いで特異階が10 階の場合であった。 α が50%以上の場合は逆転し、特異階が上階にある場合の方が階避難時間が長くなる。

時間差避難も同様である。特異階で避難開始後、330 秒後に他の階が全て避難を開始し、特異階の階段への実流動係数 N_f が低下(合

図-2 水平進入率 α と実流動係数 N_f

流速度が低下する)。特異階の人数と一般階との人数の差が縮まれば、一般階の[進入]以前に特異階の[進入]が終了する場合もある。

階段での合流について、佐野らの研究⁵⁾では「流れに沿う」合流と「逆方向の合流」とを比べ、流れに沿う順方向の合流が容易であるとしている。また、階段室への扉が90度近くまで開く状態であれば、階段への進入者の流動係数が上がるとしている。この流動係数は前章で定義した実流動係数 N_f である。このように階段と扉、階段の避難時の回り方向など階段の構造が水平進入率に大きく影響を与えると考えられる。「流率合流比率は60%程度(北後)⁴⁾」および5-2 (iii)式などより、水平進入率 α は階段の構造により50~70%程度の範囲をとると推定する。この条件では、特異階が高層部にあると階避難時間が長くなる。特異階はなるべく低層部に配置すべきであろう。なお、特異階が高層部にある場合の階避難時間は水平進入率の影響を受けにくい(水平進入率が極端に小さな場合を除く)。

複合公共施設等、低層階に避難弱者を多く含む階があるケースでは、低層階の水平進入率(α)を小さく見る必要があると思われる。この場合、階避難時間が逆に長引く(図-3)。階段の扉に対する工夫や、上階と合流しない低層専用階段の検討が必要である。

6-3 避難安全検証法(告示)との比較

避難安全検証法の計算結果との比較を図-5に示す。避難階の階段出口幅(合計2.4m)より最終出口幅(合計10m)が大きく、告示による全館避難時間は階段シミュレータよりも短い結果が出た。一方、告示で階避難は全館避難より長い269(分)となった。特異階の有効流動係数が計算上極度に小さくなるためである。

7 地階がある場合

地階を有す場合で、避難階にて地上と地下の階段が合流する場合も対応可能である。避難出口に接続するセルにて、地上階からと地下階からの合流を直上・直下のセルからの進入人数で按分し、屋外方面への[退出]を時刻暦で計算する。本稿では詳しい説明は省く。

8 まとめ

- ・階避難と全館避難を同時に時刻暦で計算することで階(垂直)方向の在館者の分布と各階の避難を関連付けて示すことが出来た。
- ・水平進入率(合流時の流動係数)は階避難時間に大きく影響する。
- ・在館者の多いフロア(特異階)が低層部にあるか高層部にあるかによって、特異階の階避難時間は大きく変わる。
- ・全館避難時間は水平進入率の大小による影響が少ない。
- ・水平進入率が小さい場合、低層部の階避難時間は長くなる。

超高層オフィスなどは、階段容量が十分でないケースが多く(階段は2箇所程度が多い)一方、上下階の延焼や煙の上階侵入は発生しにくい構造になっていることから、火災階の階避難をまず重視すべきであろう。階段シミュレータで階避難と全館避難を同時に計算することにより防災計画に資する準備を整えたと考えられる。一方、各階の避難開始は非常放送等である程度誘導できることを考えると、超高層ビルの避難誘導の最適化などの分野にも寄与していきたい。

9 あとがき

京都大学の田中哮義教授、(独)建築研究所の萩原一郎席研究員

図-3 水平進入率 α と特異階の階避難時間

	階段シミュレータ		告示1441号、1442号	
	階避難時間	全館避難時間	階避難時間	全館避難時間
一斉避難	15.5~49 (分)	47.5~50.5 (分)	269 (分)	47 (分)
時間差避難	16~49 (分)	49~54 (分)		

図-5 避難安全検証法(告示)との比較
(階避難時間は特異階を表示、またいずれも避難開始時間を除いて表示した)

アイエヌジー(株)の高橋済社長には貴重なアドバイスを頂いた。生活産業(株)の山田直樹氏にはプログラム作成でお世話になった。

注

- 注1) 歩行者群衆シミュレータ(LEGION STUDIO)、超高層ビル用火災時避難シミュレーションシステム(構造計画研究所)など。
- 注2) 階避難安全検証法に関する建設省告示1441号第3 2項
- 注3) 階避難安全検証法に関する建設省告示1441号第7 2項
- 注4) 実際の計算プログラムでは1.333...を用いる。
- 注5) 階段出口通過の流動係数1.3を用いるため、[退出]後、地上までの避難経路上で廊下幅の減少等による滞留が生じないことが前提。
- 注6) 火災階では告示1441号第5、非火災階では告示1442号第1の避難開始時間とし、その差 $1/10 \times \sqrt{A_{\text{floor}}}$ (分)を秒表示にしたもの。

参考文献

- 1) 建築基準法施行令第129条の2、第129条の2の2、告示1441号、1442号
- 2) (財)国土開発技術センター「建築物の総合防火設計法第3巻避難安全設計法」pp.122
- 3) 田中哮義「建築火災安全工学入門」(財)日本建築センター 2002年 pp.342~343
- 4) 北後明彦、久保幸資、室崎益輝「階段における2群集の合流に関する実験的研究」日本建築学会計画系論文集 pp.37~43、1985年12月
- 5) 佐野友紀、竹市尚之、木村謙、大宮喜文、吉田克之、渡辺仁史「高層建築物避難を想定した階段室における在館者群集の合流特性」日本建築学会計画系論文集 pp.51~56、2005年

図-6 水平進入率と[進入]の考え方

図-7 列ベクトルの漸化式

[2010年2月19日原稿受理 2010年5月10日採用決定]