セルオートマトンによる歩行行動モデルの避難シミュレーション適用化検証
避難行動シミュレーションの開発 その2APPLICATION OF CELLULAR AUTOMATA TO WALKING BEHAVIOR MODELING
IN EVACUATION SIMULATION

Development of evacuation behavior simulation Part 2

篠崎 喜彦*, 小山 維之**, 森下 信***

Nobuhiko SHINOZAKI, Shigeyuki KOYAMA and Shin MORISHITA

Cellular Automata (CA) has been applied to walking behavior modeling of people in evacuation simulation from rooms with several exits, pathways and stairways in business buildings. The simulation results by this CA model were compared with predicted values by public evacuation calculation methods, and the validity of the results was verified. As a result, the reduction of flow rate of the exit as an inductive emergent phenomenon was shown in the simulation. Furthermore, this CA model was applied to the evacuation planning of a high-rise business building, and it was verified in practical design process.

Keywords : Evacuation simulation, Cellular Automata, Evacuation movement time, Room-Floor-Building evacuation, Reduction of flow rate, Super high-rise building

避難シミュレーション, セルオートマトン, 避難行動時間, 居室・階・全館避難, 流率低下, 超高層建築物

1. はじめに

現在, 確立している避難時間の予測方法の基本的な考え方は, 避難予測モデルの理論¹⁾に示されているが, 具体的な計算法としては, 新・建築防災計画指針の避難計算法²⁾(以下「指針法」と避難安全検証法³⁾(以下「検証法」)がある。どちらの計算法においても避難時間は避難開始時間と避難行動時間の和となっているが, 本研究の対象は後者の避難行動時間である。避難行動時間は更に歩行時間と出口通過時間により算出するが, 先ず指針法における避難行動時間は, 居室避難では歩行時間と出口通過時間の最大値を採用し, 階避難では避難計算グラフを用いて具体的な避難状況を明示し, どちらも実態に近い避難行動時間を算出している。しかし指針法は全館避難時間の算出ができず, また多くの条件で避難計算を行うことは実務上困難であるため, 建築基準法では2000年6月に検証法を施行し, 全館避難を含めた簡易計算法を示している。検証法における避難行動時間は指針法と異なり, 簡易的に歩行時間と出口通過時間の和として, 実際の避難行動時間よりも長い安全側の指標値を示している。いずれにしてもこれらの静的な計算法では, 動きのある避難行動状態を想像により補うことが余儀なくされるが, 本研究では具体的な避難行動時間の予測手段として, この避難行動状態の再現を行うことを目的としている。その再現手法を考える場合, 先ず検証法は簡易計算法であるため, そのまま当て嵌めることは不向きである。一方, 具体的な避難行動を想定して避難時間を予測する指針

法は, 再現手法として適しているが, 階段流入以降の予測方法を示していないため, そのままでは全館避難行動の再現はできない。シミュレーションでは再現対象を明確にすることが不可欠であるが, 本避難シミュレーションは指針法, 検証法そのものの再現ではなく^{注1)}, 指針法, 検証法が前提としている避難行動状態の再現を目的としている^{注2)}。この再現目的とする避難行動状態, 即ち本避難シミュレーションにおける避難行動モデルの具体的な考え方は次章に示す。前報⁴⁾では, その避難行動状態を再現するために, セルオートマトン(Cellular Automata)において, 歩行者の前方に90cm四方のパースナルスペースを設定し, 歩行者の移動確率を調整することにより, 指針法, 検証法及び既往研究⁵⁾に示される歩行者の密度と速度と流率の関係を再現した歩行行動モデルの詳細を提案した。またその実用有効性を確認するために, 4方向の一方向流の流動, 出口通過の流率, T字路の合流, 階段部分の流動・合流について検証し, 避難シミュレーションへの適用可能性と適用範囲を示した。

本報では, 先ず前報で提案した歩行行動モデルに「複数の出口がある場合の避難行動ルール」を追加設定した^{注3)}。次に本歩行行動モデルを具体的な建築計画の避難シミュレーションとして適用し, 指針法, 検証法が前提としている避難行動状態の再現結果の妥当性を検証した。更に高層事務所ビルにおける所与の避難階段配置計画の定量的な比較評価に適用し, 本避難シミュレーションの実用有効性について検討した結果を報告する。

* アルモ設計建築設計部

** 横浜国立大学大学院 大学院生

*** 横浜国立大学大学院環境情報研究院 教授・工博

Architectural Design Division, ARMO Architects & Engineers

Graduate Student, Yokohama National University

Prof., Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, Dr. Eng.

2. 本避難シミュレーションにおける避難行動モデル

本避難シミュレーションが再現目的とする“指針法，検証法が前提としている避難行動状態”，即ち本避難シミュレーションにおける避難行動モデルの具体的な考え方は，以下に示す通りである。

- 1) 避難者は全て自力避難可能で，全員が同一の避難者特性を有し，原則として設計者が計画した避難路を整然と混乱なく避難する¹⁾。
- 2) 水平部，階段部ともに自由歩行状態（速度一定）及び群集流動状態（流率一定）の再現を行う。
- 3) 自由歩行速度は，水平部では $v=1.3\text{m/s}$ または $v=1.0\text{m/s}$ ，階段部下りでは $v=0.78\text{m/s}$ ，階段部上りでは $v=0.58\text{m/s}$ を上限とする²⁾³⁾。
- 4) 群集流動状態における密度 ρ ，速度 v ，流率 f の関係，及び出口流率 f は，水平部では $f=\rho v=1.5\text{人}/\text{m}\cdot\text{s}$ ，階段部では $f=\rho v=1.33\text{人}/\text{m}\cdot\text{s}$ を基準とする²⁾³⁾⁵⁾。
- 5) 密度が $4\text{人}/\text{m}^2$ 程度以上となる場合は，流率は低下し³⁾⁶⁾，密度 $5.5\text{人}/\text{m}^2$ で完全停止する^{注4)}。
- 6) 出口までの歩行経路の取り方は，原則として最短距離となる求心型経路とする¹⁾。

3. 複数の出口がある場合の避難行動ルール

本モデルでは，原則として避難者は最も近い出口へと避難するが，複数の避難出口がある場合，各出口の幅や配置等の条件により各出口における避難時間に著しい差が生じる場合がある。避難者は緊急の事態下においてはできるだけ早く安全な場所へ避難したいと考え

図1 複数の出口がある場合の避難行動ルール

るため¹⁾，本報では，複数の出口がある場合に，各出口の流出速度，及び各出口前の滞留人数を考慮して，最も早く避難できると予測する出口へ避難出口を変更する避難行動ルールを追加設定した。

図1(a)の通り，任意の避難者 A を設定し，最も近い出口への避難を選択するとして，その選択出口幅を $B_i(\text{m})$ ，出口流率を $N_i(\text{人}/\text{m}\cdot\text{s})$ ，選択出口から流出した人数を $P_{i, \text{out}}(\text{人})$ ，避難者 A より選択出口に近い位置にいる他の避難者人数を $C_i(\text{人})$ とすると，避難者 A の任意の時間ステップ $t(\text{s})$ における残りの避難終了予想時間 $T_1(\text{s})$ は式(1)の通りとなる。一方で，図1(b)の通り，初期在室者人数を $P(\text{人})$ ， n 個の出口がある室を設定し，その選択出口幅を $B_i(\text{m})$ ，出口流率を $N_i(\text{人}/\text{m}\cdot\text{s})$ ，選択出口から流出した人数を $P_{i, \text{out}}(\text{人})$ とすると，室全体の任意の時間ステップ $t(\text{s})$ における残りの最短避難終了予想時間 $T_{\min}(\text{s})$ は，全ての出口から同時に全員が避難終了する場合の時間であるため，式(2)の通りとなる。

ここで避難者はできるだけ早く避難したいため，避難出口を選択した直後からこの T_1 と $T_{\min}$ を逐次比較すると考える。但し避難者は精密な計算機ではないので，当初の選択出口からの避難予想時間が，他の出口に比べて直感的に“明らか”に遅いと感じた時点 (T_1 と $T_{\min}$ の差が十分大きくなった時点) で選択出口の変更を開始すると考える。まず， $D=(T_1-T_{\min})/T_{\min}$ とおくと，この D は経過する時間ステップ毎にその割合を大きくしていくこととなる。この D が一定値(本報では 10% に設定) に達した時点“明らか”に他の出口より遅いと感じて，選択出口の変更を判断する時点と設定する。当初の選択出口の変更後は，図1(c)の通り，各出口の中で最も早く避難できると予想する出口を選択して移動を開始する。ここで各出口前の滞留人数を $C_i(\text{人})$ ，各出口までの距離を $L_i(\text{m})$ ，自由歩行速度を $v(\text{m}/\text{s})$ とすると，各出口の避難終了予想時間 $T_i(\text{s})$ は式(3)の通りとなる。

4. 居室避難シミュレーション

4-1. 平面モデルと設定条件

居室避難シミュレーションが本モデルにより可能なことを示すために，図2に示すような A 室（出口 1 箇所）と B 室（出口 2 箇所）の 2 つの単純な矩形居室を設定して検証した。在室者人数は A 室では 1~81 人の 81 通り，B 室では 1~162 人の 162 通りとして，最大在室者密度 $1.5\text{人}/\text{m}^2$ までのシミュレーションを行った。在室者は出口から最も遠い位置に 1 人配置し，残りの在室者は室内に様に分布するように任意に配置し，避難開始後，在室者を一斉に自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ で最も近い出口へ向かい移動させ，避難開始から最終退出者が出口を通過するまでの避難行動時間を計測した。また B 室

図2 居室避難シミュレーションモデル

においては、前章の「複数の出口がある場合の避難行動ルール」を適用して、避難者は最も早く避難できると予測する出口へ避難出口を変更できるものとした。シミュレーションはそれぞれ10回ずつ行いその平均値を算出し^{注5)}、シミュレーション結果の妥当性を確認するために、予測計算による避難行動時間と比較した。比較対照とする予測計算方法は、歩行時間 t_1 と出口通過時間 t_2 の最大値 $\max(t_1, t_2)$ を避難行動時間とする指針法と、歩行時間 t_1 と出口通過時間 t_2 の和 (t_1+t_2) を避難行動時間とする検証法とした。尚、本シミュレーションでは居室を退出した先の空間に面積制限は無く、避難者の収容が十分にできることを前提とした。

4-2. シミュレーション結果と考察

A 室、B 室の避難行動時間のシミュレーション結果を図3に示す。シミュレーション結果は、A 室については指針法による予測計算値とほぼ一致した結果が得られた。一方、B 室については、一般的に指針法による予測計算値より一定程度遅い結果となった。これは予測計算における出口通過時間は、各出口幅に応じて避難者人数を按分した理想的な最小値を算出するが、複数の出口があるシミュレーションの場合は、前章の「複数の出口がある場合の避難行動ルール」により各出口の通過時間の差を縮小しているとはいえ、各出口の出口通過時間には差があるため、最終退出時間が予測計算における理想的な最小値よりも長くなることにより発生した。また在室者人数が多くなるに従って遅くなる傾向を示した。但し全体的には A 室、B 室とも、全てのケースで指針法の予測計算値と近似した値を示し、また安全側の指標である検証法の予測計算値以下となり、妥当なシミュレーション結果が確認できた。

(a) A 室 (出口 1 箇所)

(b) B 室 (出口 2 箇所)

図3 居室避難シミュレーション結果

5. 居室避難を含めた階避難シミュレーション

5-1. 平面モデルと設定条件

居室避難を含めた階避難シミュレーションが、本モデルにより可能なことを示すために、図4に示すような3つの同一の居室と廊下と階段からなる簡単なフロア平面を設定して検証した。在室者人数はA室、B室、C室それぞれ1~30人(階合計3~90人)の30通りとしてシミュレーションを行った。在室者は各居室出口及び階段入口から最も遠い位置に1人配置し、残りの在室者は各居室内に様に分布するように任意に配置した。避難開始は全室同時とし、避難開始後、在室者を一斉に自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ で居室出口へ向かい移動させた。居室出口を通過した後は、廊下を通り階段へ向かい避難させ、避難開始から最終退出者が各居室出口及び階段入口を通過するまでの避難行動時間を計測した。シミュレーションはそれぞれ10回ずつ行いその平均値を算出し、シミュレーション結果の妥当性を確認するために、予測計算による避難行動時間と比較した。比較対照とする予測計算方法は、居室については前章で示した方法と同様とした。階については「避難計算グラフによる階避難の計算」を用いて算出する指針法と、歩行時間 t_1 と出口通過時間 t_2 の和 (t_1+t_2) を避難行動時間とする検証法とした。また、指針法における廊下の歩行速度は $v=1.0\text{m/s}$ であるが、本計算では検証法における設定に統一して、滞留がない状態における廊下の自由歩行速度を居室避難と同等の $v=1.3\text{m/s}$ とした。尚、本シミュレーションでは階段空間に面積制限は無く、避難者の収容が十分にできることを前提とした。

図4 居室避難を含めた階避難シミュレーションモデル

5-2. シミュレーション結果と考察

(1) 居室避難

各居室における避難行動時間のシミュレーション結果を図5(a)に、階在館者90人(A~C各室30人)における避難行動状態を図6に示す。シミュレーション結果は、B室、C室において、指針法及び検証法の予測計算値を大幅に上回る結果を示した。これは先ず居室出口先の廊下部分において、他の室からの避難者と合流が発生することにより、居室出口における流率が低下するためである。図6(a)~(c)に示す通り、A室からの避難者との合流の影響しか受けないB室に対し、A室、B室からの避難者との合流の影響を受けるC室の方が大きな避難行動時間の遅れを示した。またこの遅れは初期在室者人数が5人程度以下の極少人数の場合を除き、ほぼ全てのケースで発生していることが確認できた。もう一つの原因は、この合流による廊下部分の避難者の滞留の最後尾が避難方向とは逆方向に伝播し、隣室の出口先付近の空間にまで及ぶことで、隣室出口の流率が低下するためである。初期在室者人数が概ね20人以上の場合では、A室においても避難行動時間の遅れを示した。これらの各居室出口における流率低下の差異の発生については、城らの実験的再現⁷⁾におい

て、廊下部分における避難者偏在による密度差の発生と、廊下出口方向に近い居室出口ほど避難時間を要するという同様の傾向が確認できた。但し本シミュレーションでは、廊下面積は 37.8m^2 （実質的な内法有効面積でも $18\text{m} \times 1.5\text{m} = 27\text{m}^2$ ）あり、階最大人数 90 人の場合でも「階避難者人数 $\times 0.3\text{m}^2/\text{人} \leq$ 廊下面積」となり、指針法における必要な廊下面積は満たしており、また検証法においても出口の N_{eff} （有効流動係数）は低下しないことになっている。指針法及び検証法では、図 6(b)～(d)に示すような同一空間内において逐次的に偏在する密度の差異の計算はできないため、簡易的に避難経路部分の滞留面積チェックを行っているが、出口位置や廊下幅等の具体的な平面プランによっては、指針法及び検証法における静的な予測計算法では把握できない避難行動状態が発生する可能性があることが、シミュレーションにより確認できた。

(2) 階避難

階における避難行動時間のシミュレーション結果を図 5(b)に示す。シミュレーション結果は、全てのケースにおいて、指針法の予

図5 居室避難を含めた階避難シミュレーション結果

図6 階在館者90人における避難行動状態

測計算値以上、且つ検証法の予測計算値以下となり、妥当なシミュレーション結果が確認できた。階段入口の流率については、設定条件上、階の合計人数が 72 人を超えると「階避難者人数 $\times 0.25\text{m}^2/\text{人} >$ 直下階までの階段面積」となり、検証法では階段入口の N_{eff} が低下することになっているが、流率の低下は発生しなかった。

6. 居室避難、階避難を含めた全館避難シミュレーション

6-1. 建物モデルと設定条件

居室避難、階避難を含めた全館避難シミュレーションが、本モデルにより可能なことを示すために、図 7 に示すような「5. 居室避難を含めた階避難シミュレーション」で使用したフロア平面を持つ 5 階建の建築物を設定して検証した。但し 1 階における避難は階段を使用しないため検証から除外した。在室者人数は各階の A 室、B 室、C 室それぞれ 1～30 人（階合計 3～90 人、全館合計 12～360 人）の 30 通りとしてシミュレーションを行った。在室者は各居室出口及び階段入口から最も遠い位置に 1 人配置し、残りの在室者は各居室内に一樣に分布するように任意に配置した。避難開始は全階・全室同時とし、避難開始後、在室者を一斉に自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ で最も近い出口へ向かい移動させ、居室出口を通過した後は、廊下を通り階段へ向かい避難させた。階段流入後は 1 階の階段出口へ向かい避難させ、避難開始から最終退出者が各居室出口、各階階段入口及び 1 階階段出口を通過するまでの避難行動時間を計測した。シミュレーションはそれぞれ 10 回ずつ行いその平均値を算出し、シミュレーション結果の妥当性を確認するために、予測計算による避難行動時間と比較した。比較対照とする予測計算方法は、居室、階及び全館とも前章で示した指針法及び検証法とした。但し指針法では、階段における計算方法を示していない。そのため比較対照とする予測計算方法は、階段部を廊下と同様に平面上に展開した建物プランを想定した上で、「避難計算グラフによる階避難の計算」を用いて算出する指針法に基づく方法とした。また階段部下り方向の歩行速度は $v=0.78\text{m/s}$ 、階段出口の流動係数は $f=1.33\text{人}/\text{m} \cdot \text{s}$ とした。尚、本シミュレーションでは階段出口先の空間に面積制限は無く、避難者の収容が十分にできることを前提とした。

図7 居室避難、階避難を含めた全館避難シミュレーションモデル

6-2. シミュレーション結果と考察

(1) 居室避難

各居室における避難行動時間のシミュレーション結果を図 8(a)に、全館在館者 360 人（各階 90 人）における避難行動状態を図 9 に示す。シミュレーション結果及び図 9(a)～(c)に示す避難行動状態は、各階においてほぼ同様の結果を示し、また前章の図 5(a)に示す階避難シミュレーションにおける居室避難のシミュレーション結果ともほぼ一致した結果を示した。

(2) 階避難

階における避難行動時間のシミュレーション結果を図 8(b) に示す。シミュレーション結果は、5 階においては前章の図 5(b) に示す階避難シミュレーションと同様のシミュレーション結果が確認できた。また 2~4 階においては、72 人前後を境に避難行動時間が長くなり、検証法における Neff 低下と類似した創発現象が再現された。この部分を考察すると、先ず検証法では直下階までの階段 1 層分の床面積に対して、密度 4 人/m² までは階段入口の流率は一定 ($f=1.5$ 人/m²・s) であるが、密度 4 人/m² を超える場合は、密度の増加に伴い階段入口の流率が低下することとしている。一方、本シミュレーションにおいて階の避難者が占有する階段面積は、当該階避難者が直下階避難者との合流後に直下階避難者が持ち分とする階段面積に侵

入する領域と、当該階避難者が直上階避難者と合流後に当該階避難者が持ち分とする階段面積に侵入される領域が、時間の経過とともに変化するが、全階同時避難かつ全階の平面プラン及び避難者人数を同一の設定条件としているため、これらの変化は相殺されることとなる。従って、当該階避難者が占有する階段面積は、理論上では時間の経過に関わらず、直下階までの 1 層分の床面積 18m² 同等のまま一定となる。ここで本モデルでは、密度 4 人/m² 程度までは群集流動状態の流率が一定となることを再現目標として設定しているため、当該階避難者が占有する階段面積が 18m² のまま一定であるならば、検証法と同様、避難者人数 (階段面積 18m² × 4 人/m²) 72 人までは階段入口の流率に変化が無く、72 人を超える場合は階段内の合流における密度に応じて、階段入口の流率が低下することとなる。以上

図8 居室避難, 階避難を含めた全館避難シミュレーション結果

図9 全館在館者360人における避難行動状態

が 72 人前後を境に避難行動時間が長くなった原因であり、特に 3 階において検証法の予測計算値とほぼ一致した結果が確認できた。3 階よりも 4 階において更に避難行動時間が長くなるのは、先ず 72 人前後から発生する 3 階の階段入口の流率低下は 4 階避難者との合流により発生しているため、一方の 4 階避難者側の流れにも同様に流率低下が発生する。図 9(d) に示す通り、その流率低下は階段内で上階へ伝播し、4 階避難者は既に流率が低下した流れに合流することになり、その結果として 4 階では 3 階以上の流率低下が発生するためである。2 階は 3, 4 階と異なり下階での合流による流率低下は無く、また 1 階の階段出口幅は階段幅と同じ 1.2m であるためネック部分による滞留も無く、階段入口の流率低下は専ら上階からの避難者との合流によるため、避難行動時間の変化は 3, 4 階ほど急激ではなかった。5 階で流率低下が発生しないのは、図 9(b)～(d) に示す通り、5 階避難者は上階からの避難者との合流が無い一方で、直下階避難者との合流後に直下階避難者が持ち分とする階段領域に侵入することにより、階最大人数 90 人のケースに対しても、動的な階段面積が十分な余裕を保てたためである。これらの階毎の避難行動時間の差異については、掛川らの全館避難のケーススタディ⁸⁾において、各階在館者人数は 200 人であるが、本シミュレーションと同様の 5 階建、階段 1 箇所 (3×6m) の全館同時避難のケーススタディが行われている。このケーススタディでは上階ほど階段内の流率が低下することが指摘されているが、1 階を除く各階避難人数 90 人までの避難完了時間との比較では、上階ほど階避難に時間を要するが、5 階については 2 階よりも早く階避難が完了する本シミュレーションと同様の傾向が確認できた。

(3) 全館避難

全館における避難行動時間のシミュレーション結果を図 8(c) に示す。シミュレーション結果は、全てのケースにおいて、指針法に基づく方法の予測計算値以上、且つ検証法の予測計算値以下となり、妥当なシミュレーション結果が確認できた。階段出口の流率については、設定条件上、全館の合計人数が 288 人 (各階 72 人) を超えると「全館避難者人数×0.25m²/人>階段合計面積」となり、検証法では階段出口の Neff が低下することになっているが、流率の低下は発生しなかった。居室避難、階避難における出口流率低下は、それぞれの避難先空間である廊下や階段における滞留面積や、他の空間からの避難者との合流により発生することが確認できた。従って、全館避難における Neff 低下も避難者人数に対する階段面積の割合によって発生するのではなく、階段出口先の空間における滞留面積や、当該階段以外からの避難者との合流により発生すると考えられる。

7. 高層事務所ビルにおけるケーススタディ

7-1. 目的

建築基準法の仕様規定では、15 階建て以上の事務所ビルの場合、階段出入口に付室 (またはバルコニー) を設置した特別避難階段の構造が必要となる。また 15 階以上の階における階段に対しては、付室 (またはバルコニー) を加えた面積について、その階の居室床面積の 3/100 以上の面積が必要となる。但し、超高層建築物に対して、階数、面積等の建物規模に応じた避難施設を更に厳格に要求する規定は特に無い。そのため、例えば 15 階建て事務所ビルと同じ基準階プランで 100 階建ての超高層建築物を計画することも可能となる。

図10 高層事務所ビルの平面プランと断面模式図

一方、建築基準法では任意ではあるが、性能規定として火災時の避難安全性能の検証を行う避難安全検証法³⁾があり、これにより超高層建築物等の避難安全性能の確認が可能となっている。但し、避難安全検証法は、自由度のある避難施設計画を行い仕様規定の一部を適用除外しても良いこととしているため、避難安全性能の評価方法として十分な機能を果たしているが、必ずしも建物規模に応じた避難施設を要求する手法とはなっていない。そのため2005年頃から国土交通大臣認定における審査基準において、避難階段数や合計幅の最低限度について制限が加えられるようになり、検証法を活用した極端な避難階段等の削減には、避難計画の慎重な検討が求められるようになっている⁹⁾。ここではその検討方法の提案のために、仕様規定を満足させた階段配置計画を有した高層事務所ビルに対して、2つの異なる階段配置計画を提案し、それぞれの避難施設面積（付室＋階段面積）と避難安全性（階・全館避難行動時間）の定量的比較を、検証法、シミュレーションのそれぞれにおいて行った。本避難シミュレーションにより、避難施設面積を削減させても避難安全性を維持または向上させることが、建築設計におけるハード面の工夫により可能であることの一例を検討した結果を報告する。

7-2. 建物モデルと設定条件

図10に示すCASE-1～3の3通りの31階建ての高層事務所ビルを設定して検証した。但し1階における避難は階段を使用しないため検証から除外した。本ケーススタディは、階段配置計画についての比較検証を主眼としているため、コア計画や廊下等の二次的な要素は、階段配置決定以降の基本～実施設計段階において、ネック部分等の本シミュレーション結果を阻害する要因を設けないことを前提として簡略化している。CASE-1は、仕様規定を満足させた階段配置計画とした。それに対してCASE-2では、建物を低層、中層、高層の3層に分け、それぞれの層においてCASE-1における3つの階段を2つずつ組み合わせた階段配置計画とした。CASE-3では、18階を中間階として建物を低層、高層の2層に分け、それぞれの層から単独に避難階に通じる2つずつの階段を設置した。全てのケースにおいて、各階の在室者人数は400人（全館合計12,000人）として、在室者は各居室出口から最も遠い位置に1人配置した上で、残りの在室者は各居室内に様に分布するように任意に配置した。避難開始後、まず在室者を一斉に自由歩行速度 $v=1.3\text{m/s}$ で求心型の歩行経路で最も近い居室出口（幅 $w=0.9\text{m}$ ）へ向かい移動させた。各居室出口は離れていて互いに視認できないケースもあるため、前述した「複数の出口がある場合の避難行動ルール」は適用しないこととした。居室出口を通過した後は付室を通り階段入口（幅 $w=0.9\text{m}$ ）へ向かい、幅員 $w=1.2\text{m}$ の階段に流入させた。階段流入後は1階の階段出口（幅 $w=1.2\text{m}$ ）へ向かい避難させ、避難開始から最終退出者が各階階段入口及び1階階段出口を通過するまでの避難行動時間を計測した。尚、本シミュレーションでは1階の階段出口流出にて避難完了とし、また階段出口先の空間に面積制限は無く、避難者の収容が十分にできることを前提とした。階避難におけるシミュレーションは、出火階のみを先行して避難させる時間差避難と、出火階と非出火階を同時に避難させる一斉避難の2通りとした。また時間差避難を想定した階避難シミュレーションにおいて、階段位置・個数が他の階と同一となる場合、それぞれのシミュレーション条件は全く同一の設定と

なるため、シミュレーション結果も同一の値とした。シミュレーションはそれぞれ10回ずつ行いその平均値を算出し、検証法による予測計算値との比較検討、及び各シミュレーション結果における比較検討を行った。

7-3. シミュレーション結果と考察

(1) 階避難

階における避難行動時間のシミュレーション結果を図11及び表1に示す。時間差避難に対しては、比較対象として検証法による予測

図11 階避難行動時間のシミュレーション結果

表1 階避難行動時間のシミュレーション結果のまとめ

CASE No.	CASE-1			CASE-2			CASE-3			
階段名称	A階段	B階段	C階段	A階段	B階段	C階段	A階段	B階段	C階段	D階段
検証法による予測計算値	2～31F：4.04分			2～31F, 15～22F, 24～31F：8.52分 14F, 23F：3.28分			2～17F, 19～31F：8.52分 18F：2.35分			
シミュレーション結果 (時間差避難)	2～31F：2.04分	2～31F：1.61分	2～31F：2.12分	23～31F：3.17分 14～22F：2.55分	14～22F：2.28分 2～13F：2.39分	23～31F：2.96分 2～13F：2.41分	19～31F：3.10分 18F：1.50分	2～17F：3.11分 18F：1.49分	2～17F：2.94分 18F：1.49分	19～31F：2.97分 18F：1.50分
シミュレーション結果 (一斉避難の場合の最大値)	30F：28.64分	30F：27.10分	30F：27.38分	30F：29.43分	21F：34.10分	30F：28.72分	30F：22.30分	16F：27.26分	16F：27.71分	30F：21.72分

表2 全館避難行動時間のシミュレーション結果のまとめ

CASE No.	CASE-1			CASE-2			CASE-3			
階段名称	A階段	B階段	C階段	A階段	B階段	C階段	A階段	B階段	C階段	D階段
検証法による予測計算値	85.44分			94.20分			63.88分			
シミュレーション結果	42.88分	41.73分	42.07分	43.17分	44.12分	44.28分	35.49分	34.75分	35.01分	35.30分

計算値も併せて示す。まず各階の時間差避難については、CASE-1では、予測計算値4.04分に対してシミュレーション結果は1.61～2.12分、CASE-2では、予測計算値8.52分（14階、23階は3.28分）に対してシミュレーション結果は2.28～3.17分（14階、23階も2.28～3.17分）、CASE-3では、予測計算値8.52分（18階は2.35分）に対してシミュレーション結果は2.94～3.11分（18階は1.49～1.50分）となり、予測計算に対してシミュレーションでは大幅に早く避難完了できる結果を示した。この時間の差異は、5章「(2)階避難」で示した通り、設定条件上、「階避難者人数×0.25m²/人>直下階までの階段面積」となり、検証法では階段入口のNeffが低下することになっている一方で、シミュレーションにおいては時間差避難により他の階からの避難者との合流は発生せず、流率が低下しなかったことによるものである。

一方、他の階からの避難者との合流が発生する一斉避難については、流率低下により階段入口前での滞留が発生した。階避難行動時間は概ね全てのケースにおいて上階になるに従い一定の割合で増加する傾向を示し、また各階段の最上階の直下階で最大となり、CASE-1では28.64分、CASE-2では34.10分、CASE-3では27.71分となった。

(2) 全館避難

全館における避難行動時間のシミュレーション結果を表2に示す。また比較対象として検証法による予測計算値も併せて示す。まず、CASE-1では、予測計算値85.44分に対してシミュレーション結果は42.88分、CASE-2では、予測計算値94.20分に対してシミュレーション結果は44.28分、CASE-3では、予測計算値63.88分に対してシミュレーション結果は35.49分となり、予測計算に対してシミュレーションでは大幅に早く避難完了できる結果を示した。この時間の差異は、設定条件上、「全館避難者人数×0.25m²/人>階段合計面積」となり、検証法では1階階段出口のNeffが低下することになっている一方で、シミュレーションにおいては階段出口先の空間に面積制限は無く、避難者の収容が十分にできることを前提としたため、前章「(3)全館避難」にて示した同様の理由により、1階階段出口の流率が低下しなかったことによるものである。

(3) 検証法と本避難シミュレーションの比較検討

以上のケーススタディにおけるCASE-1を基準とした避難施設面積（付室+階段面積）と避難安全性（階・全館避難行動時間）について、検証法の予測計算値に基づく定量的比較を表3に、シミュレ

ーション結果に基づく定量的比較を表4に示す。

まず、表3に示す検証法の予測計算値に基づく比較検討において、CASE-1に対してCASE-2は、避難施設面積の432m²減(17%減)に対して、階避難行動時間は4.48分増(111%増)、全館避難行動時間は8.76分増(10%増)となり、避難施設面積の大幅な削減と避難安全性の低下が示された。CASE-1に対してCASE-3は、避難施設面積の153m²減(6%減)に対して、階避難行動時間は4.48分増(111%増)、全館避難行動時間は21.56分減(25%減)となり、避難施設面積の削減はCASE-2より少なかったが、避難安全性については、全館避難行動時間の大幅な短縮が示された。

一方、表4に示すシミュレーション結果に基づく比較検討において、CASE-1に対してCASE-2は、避難施設面積の432m²減(17%減)に対して、階避難行動時間は1.05分増(50%増)、全館避難行動時間は1.4分増(3%増)となったが、階・全館避難行動時間とも1分程度の増加に留まり、避難施設面積を削減した上で、CASE-1と同程度の避難安全性が維持できることが示された。またCASE-1に対してCASE-3は、避難施設面積の153m²減(6%減)に対して、階避難行動時間は0.99分増(47%増)、全館避難行動時間は7.39分減(17%減)となった。避難施設面積の削減はCASE-2より少なかったが、避難安全性については、階避難行動時間は1分程度の増加に留まり、全館避難行動時間は大幅な短縮が示され、避難施設面積を削減した上で、CASE-1以上の避難安全性を有することが確認できた。また一斉避難の階避難行動時間の最大値も0.93分減(3%減)となった。

表3 CASE-1を基準とした検証法による定量的比較

CASE No.	CASE-1	CASE-2	CASE-3
付室+階段面積	2,511m ² (1.00)	2,079m ² (0.83)	2,358m ² (0.94)
階避難行動時間	4.04分 (1.00)	8.52分 (2.11)	8.52分 (2.11)
全館避難行動時間	85.44分 (1.00)	94.20分 (1.10)	63.88分 (0.75)

表4 CASE-1を基準としたシミュレーションによる定量的比較

CASE No.	CASE-1	CASE-2	CASE-3
付室+階段面積	2,511m ² (1.00)	2,079m ² (0.83)	2,358m ² (0.94)
階避難行動時間 (時間差避難)	2.12分 (1.00)	3.17分 (1.50)	3.11分 (1.47)
階避難行動時間 (一斉避難の場合の最大値)	28.64分 (1.00)	34.10分 (1.19)	27.71分 (0.97)
全館避難行動時間	42.88分 (1.00)	44.28分 (1.03)	35.49分 (0.83)

※注：表3、表4共に()内数値はCASE-1を1.00とした場合の比率を示す。

以上、検証法と本避難シミュレーションの両者を比較すると、先ず検証法は精緻な避難時間の算出よりも、避難安全性能の合否判定のために安全側の指標値を示すことを優先した簡易計算法であるため、本避難シミュレーションに比べCASE-2の避難安全性が適正に評価できず、またCASE-3の全館避難行動時間においては極端な時間短縮が示された。一方、本避難シミュレーションは、CASE-1に対するCASE-2、CASE-3の避難安全性（階・全館避難行動時間）を定量的に比較評価でき、また検証法では把握できない一斉避難における各階避難行動時間も具体的に提示できた。本ケーススタディのような比較検討に対して、本避難シミュレーションによる定量的比較がより有効であることが確認できた。

8. 結論

本報では、前報⁴⁾において提案した歩行行動モデルを避難シミュレーションとして適用し、指針法、検証法が前提としている避難行動状態の再現性を検証した。更に高層事務所ビルにおける所与の避難階段配置計画の定量的な比較評価に適用し、本避難シミュレーションの実用有効性を検討した。その結果、以下の内容を確認した。

- 1) 居室避難、階避難、全館避難における避難行動時間は、全てのケースで指針法の予測計算値以上、且つ検証法の予測計算値以下となり、再現目標通りのシミュレーション結果が確認できた。また検証法におけるNeff（有効流動係数）が低下する現象は確認できなかった。
- 2) 階避難、全館避難における居室避難では、検証法において出口のNeffが低下しないことになっている「避難者人数×0.3m²/人≤廊下面積」のケースにおいてもNeffが低下する現象が確認できた。
- 3) 全館避難における階避難では、検証法の設定と同様の「階避難者人数×0.25m²/人>直下階までの階段面積」となるケースにおいて、Neffが低下する現象が確認できた。
- 4) 全館避難では、検証法において出口のNeffが低下することになっている「全館避難者人数×0.25m²/人>階段合計面積」のケースにおいて、Neffが低下する現象は確認できなかった。
- 5) 高層事務所ビルのケーススタディにおいて、本避難シミュレーションにより避難施設面積（付室+階段面積）と避難安全性（階・全館避難行動時間）の定量的な比較評価が可能であり、避難施設面積を削減させても避難安全性を維持または向上させることが可能であることが確認できた。また実用有効性については、所与の避難階段配置計画において有効な実用事例が確認できた。

本避難シミュレーションにおける避難行動モデルは、指定性能評価機関が提示している避難安全性能評価業務方法書における避難行動時間の予測方法に従っており、将来、国土交通大臣認定の評価ツールへ発展することを目指している。そのため避難行動時間だけでなく、経過時刻毎の具体的な避難行動状態が把握できる性能評価資料の体裁整備が今後必要である。また階避難、全館避難において避難方向が避難状況に応じて逐次的変化する「複数の出口がある場合の避難行動ルール」適用の検討、及び商業施設、競技場等の他の建物用途・広域避難計画等のケーススタディを更に進め、再現精度の向上、及び適用範囲の拡大を図ることが今後の課題である。

注

- 注1) 指針法、検証法で予測計算が可能なのは、自由歩行、群集流動、出口通過における単純な一方向流までであり、避難先空間において既にいる在室者や他の空間からの避難者との合流により滞留が発生する場合は予測計算ができないため、指針法では廊下、付室の必要滞留面積を制限し、検証法では廊下、付室、階段の設計面積が必要滞留面積を下回る場合はNeff（有効流動係数）を低下させることで簡易的に安全側評価ができる工夫を行っている。これらの安全側評価を含む指針法、検証法の設定をそのままシミュレーションに組み込んだ場合、それらの安全側評価と必ず一致した妥当な再現結果が得られるが、一方でシミュレーションが目的とする指針法、検証法の予測可能範囲を超える避難行動状態の解析はできないこととなる。
- 注2) 本避難シミュレーションが目的としている“指針法、検証法が前提としている避難行動状態の再現”とは、指針法、検証法の設定そのものの再現以外に、指針法、検証法では予測できない避難先空間において既にいる在室者や他の空間からの避難者との合流により滞留が発生する場合における避難行動状態の再現を含んでいる。本研究では指針法、検証法では予測できない避難行動状態の解析のために、複雑系モデルにより生じる創発現象を利用しているが、その創発現象は複数の要素の相互作用による再現であるため、再現結果の妥当性が論証できないジレンマを抱えている。本研究ではその解決のため、先ず水平路及び階段の一方向流における歩行者の密度と速度と流率の関係を再現目標とし、その再現目標と一致した歩行行動状態が各歩行者同士の相互作用により創発される個体モデルを分析し、目標通りの再現結果が得られる一方向流モデルを設定している。その上でこの一方向流モデル同士を合流させ、そこで発生した創発現象にも問題がないことを確認し⁴⁾、その創発現象によって指針法、検証法の予測可能範囲を超える避難行動状態の再現を行っている。このように本避難シミュレーションでは、複数の要素を総合して上位の階層へボトムアップする際に生じる誤差をできる限り抑制・排除するために、目標通りの再現結果が得られる下位の複雑系を要素とする2段階の複雑系モデルを注意深く構築し、更に適用範囲を限定している避難予測モデルの理論、指針法及び検証法の基本設定に倣うことによりモデルの構成要素や設定条件を必要最小限に限定して、実用上、十分に利用可能となる相当程度正確な避難行動時間を得ることを試みている。
- 注3) 本報における「複数の出口がある場合の避難行動ルール」の適用は居室避難までとして、居室避難以降の階避難、全館避難シミュレーションでは予め計画した避難経路に変化がないことを前提とした。
- 注4) 本モデルのセルの設定は30cm×30cmであり、最大で11.1人/m²までの密度設定が可能であるが、本研究では前報⁴⁾の記載通り、計画密度は最大で5.5人/m²までとした。
- 注5) 平均値のばらつきは試行回数を増やすことで小さくなると考えられるが、一方でできる限り少ない試行回数で妥当なシミュレーション結果が再現できることによって、シミュレーションの実用性を示すことも本研究の目的であるため、本報におけるシミュレーションでは試行回数は10回と設定した。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター監修：建築物の総合防火設計法 第3巻 避難安全設計法，日本建築センター，第4章，1989
- 2) 建設省住宅局建築指導課ほか監修：新・建築防災計画指針—建築物の防火・避難計画の解説書，日本建築センター，第5章，1995
- 3) 建築基準法施行令第129条の2，129条の2の2，平成12年建設省告示第1441号，第1442号
- 4) 小山維之，篠崎喜彦，森下信：セルオートマトンによる群集流動の特性に基づく歩行行動のモデル化 避難行動シミュレーションの開発 その1，日本建築学会環境系論文集 第78巻 第691号，pp.669-677，2013.9
- 5) 戸川喜久二：群衆流の観測に基づく避難施設の研究，学位論文，1963
- 6) 日本建築学会編：建築設計資料集成 [人間]，丸善，2003
- 7) 城明秀，峯岸良和，竹市尚広，吉田克之，木村謙，佐野友紀：マルチエージェントモデルと群集実験との比較，日本建築学会大会学術講演梗概集. A-2，pp.205-206，2011.8
- 8) 掛川秀史，海老原学，関沢愛，野竹宏彰：階段内歩行モデルによる全館避難の検討 煙流動・避難行動連携モデルに関する研究—その8—，日本建築学会大会学術講演梗概集. A-2，pp.293-294，2006.9
- 9) 日本建築学会編：建築ストック社会と建築法制度 防火避難規定の課題を中心に，技報堂出版，2013

(2013年8月10日原稿受理，2014年2月24日採用決定)