【論文】

高層事務所ビルの避難訓練時の階段避難流動分析に基づく順次避難の改善 ～高層建築物からの全館避難を円滑化するリアルタイム技術の可能性～

Improvement of Phased Evacuation Scenario based on Analyses of Pedestrian Flow in Stairwell during Drills in High-rise Office Building

- Possibility of real-time technique for facilitation of high-rise building evacuation -

朴聖経(学生会員), 水野雅之(正会員), 藤井皓介(非会員)*,

門倉博之(非会員)**, 佐野友紀(非会員)***, 田中俊成(学生会員), 関澤愛(非会員)

SeongKyung Park, Masayuki Mizuno, Kosuke Fujii*,
Hiroyuki Kadokura**, Tomonori Sano***, Toshinari Tanaka and Ai Sekizawa

Abstract

In Japan, a standard on the minimum capacity of escape staircases according to occupant load is not regulated except for some building uses. Therefore, staircases can't contain all occupants in an emergency case. Even though they attempt to evacuate building, most of them must wait in staircases and/or corridors for a long time, which must cause heavy congestion. Thereby, the phased-evacuation method has been recommended for preventing it, but there is no specific method or standard related to the strategic plan. In order to improve a sequential evacuation plan, evacuation drills were conducted at a high-rise office building in Tokyo, and year by year the scenarios of evacuation guidance were advanced a lot better. However, having several unexpected reasons or behaviors; not following broadcasting order, walking slow for chatting and having disability, some drills hadn't been carried out as predicted. The purpose of this study is to consider the real-time control method of changing the scenario for providing guidance flexibly in a sequential evacuation using security device such as attendance management system and security cameras in the future.

Key Words

Phased evacuation, High-rise building, Evacuation drill, Evacuation scenario, Real-time control

2020年 01月23日受付

2020年 09月04日掲載決定

東京理科大学大学院 理工学研究科
〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

* 消防庁消防研究センター

〒182-8508 東京都調布市深大寺東町 4-35-3

** 東北学院大学工学部

〒985-8537 多賀城市中央一丁目 13-1

*** 早稲田大学人間科学学術院

〒359-1192 埼玉県所沢三ヶ島 2-579-15

Tokyo University of Science

2641, Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510 Japan

* National Research Institute of Fire and Disaster, 4-35-3,
Jindaiji Higashimachi, Chofu, Tokyo, 182-0012 Japan

** Tohoku Gakuin University

1-13-1, Chuo, Tagajo, Miyagi, 985-8537 Japan

*** Waseda University, 2-579-15, Mikajima, Tokorozawa,

1. はじめに

1.1 研究背景

日本の建築物は、一部の用途を除き、建物の収容人数に応じて避難階段の最低容量に関する基準を設けていないため、高層建築物では階段が負担する人数が大きい場合がある。例えばアメリカでは、建築物の収容人数の規模に応じて階段系統数を増やす基準が規定されている¹⁾。一方、日本では階段までの歩行距離を制限することで、階数とは無関係に平面規模の増大に応じて階段数を増やす基準が規定されている²⁾。例えば火災によって全館一斉避難の指示が出された場合、階段に避難者が集中し、また階段につながる廊下でも長蛇の列を形成することが予想される。これらに加えて、煙の侵入や人がパニックを起こすと群集災害や体調不良(熱中症等)を引き起こす可能性もある。また、火災では万が一堅穴を介した煙流動が起これば、上層階の在館者が

煙に曝される恐れがある。東日本大震災の際には東京都内のある超高層オフィスビルで自動火災報知器が作動し、放送により全館一斉避難が指示された。結果的に局所的な小火であったものの階段では大混雑を引き起こし、全館避難の流動制御の重要性を露呈した。こうしたことを踏まえ、段階的に在館者を避難させる順次避難計画を推奨する必要があると考える。しかしながら、順次避難計画を立てる方法については、各階の在館者人数や出火階の変化により避難シナリオを適宜変える必要があると予想されるが、その具体的な方法やそれに関連する基準はない。

そこで、我々の研究グループでは、建物火災時における順次避難計画を立案するための手法を開発することを目標として、高層事務所ビルにおける全館避難訓練に順次避難計画を取り入れ、その避難流動を調査する研究を継続的に実施してきた^{3),4)}。階段を降下する避難流動量の把握や階段室に入る流れと階段を降下する流れとの合流比等を分析してきた⁴⁾。このほか、階段を降下して避難する避難流動を調査した既往の研究には、本研究と同じように避難訓練における避難者の流れを観察したもの、実験的研究として避難者役の被験者が階段を降下する状態を観察したものがある。前者は、計算モデルを提案し、その結果について避難訓練における避難流動の再現性を確認する内容である⁵⁾。後者は、前述した階段降下と階段流入との合流比を調査した研究が幾つかあり、一般的な構造の階段において概ね等しい流量比で合流したこと⁶⁾や階段扉の配置や階段降下の避難者の列数を変えることで合流比や流動量が変わる結果を得ている⁷⁾。これらの研究成果の順次避難計画への活用については、実際の避難流動にどのように影響を及ぼすかを考慮しながら検討する必要がある。

こうした避難流動の調査は、これまでビデオカメラで録画した映像に基づいて分析されてきたが、その動画を機械学習させて画像認識により人の動きを把握する方法の開発も進んでおり、我々の研究グループでも取り組んできた⁸⁾。今後、こうした画像認識技術をシミュレーションや計算プログラム等とIoT技術によってリアルタイムで連動させることで、順次避難計画を最適化する技術を確立させられると考えており、その方向性を本稿で取り上げる。なお、リアルタイムに情報を集積することで、各階からの避難者数の増減、階段室に流入するタイミングの遅れや早まり、高齢や傷病等により移動速度が遅い人を含むことによる避難流動の低下などを把握し、逐次予測計算により避難シナリオを修正でき、それをフェイズ毎の避難開始指示を出す放送のタイミング調整に反映させられる。本稿において、フェイズとは、同時に避難指示を受ける階等のグループを表す。また、事前の予測ばかりでなくリアルタイムによる状況把握を反映させるシステムの必要性を考える端緒となった、避難訓練において確認された様々な予想外の行動例についても報告する。

1.2 研究目的

本稿では、これまでに実施してきたある高層事務所ビルでの全館避難訓練の調査結果を示し、順次避難計画における避難開始シナリオの最適化プロセスを報告する。また、本研究では、階段内の避難流動に着目して調査分析し、同調査によって確認され

た様々な予想外の避難行動について、より適切な順次避難計画を立案する視点から考察する。加えて、将来において開発が期待される防犯カメラなどのセキュリティ機器などを活用した順次避難計画における避難開始シナリオのリアルタイム制御手法について考察する。

なお、本稿におけるシナリオの最適化とは、階段内で避難者が滞留する時間を短くすること、及び避難階である1階での階段からの避難者の流出が途切れたり低下しないことを対象とする。

2. 避難訓練調査

2.1 避難訓練の調査対象建物の概要

調査建物は、東京都内の某企業の本社ビルであり、全館避難訓練の調査協力を得ることができた。建物は、地下3階、地上25階建てであり、9階以下の階は機械室や会議室、応接室、社員食堂などが入り、10階以上に事務室が存在する。そのため、10階以上に主に避難者が存在し、避難訓練参加者数も異なるため、各階からの避難者数がばらついた。なお、階段室の寸法は、階高が3.8mの事務室用途の基準階である7～25階の代表値では、階段の蹴上げが0.173m、踏面が0.28m、幅が1.2mで、階段の扉幅が1mであった。また、Fig. 1に示した通り、避難階段はコアの南北両端に2カ所設置されていた。

火災が発生した場合、一般的に、2つの階段のうち各在館者から近い方へ避難するが、避難訓練では放送での指示により片方の階段のみから避難した。これにより2つの階段を使用した場合よりも一部の在館者は長い距離を移動して階段に到達するため、階段への到着時間分布のばらつきが大きくなる可能性がある。しかし、実際には2つの廊下から1つの階段に避難者が集まるため、避難者は階段出口から廊下にかけて列をなして待つ状況が生じる。今回の避難訓練でもほとんどの階で階段への出口前で待つ状況が生じたため、階段までの移動距離が延びたことによる階段到着のばらつきが大きくなったことの影響はなかったといえる。

Fig. 1 Floor plan of typical office floor

2.2 避難訓練の撮影エリア

本研究では、避難訓練時の階段内における避難者の流動状況を、各階から階段踊り場に流入する流動状況も含めて撮影するために、全ての階の踊り場(階段扉あり)をビデオカメラで撮影した。また、中間踊り場(階段扉なし)や段部も一部の階について撮影した。動画は、プライバシーに配慮し、個人を特定しにくいように上方から撮影され、さらに解像度を低く変換した。また、本調査の実施は事前に周知された上で社員は避難訓練に参加した。

Fig. 2 の左に示した踊り場(Landing)においては、上階から下りてきた避難者が段部(A flight of stairs)から踊り場に入る境界線(緑)、その階の避難者が階段外から踊り場に入る境界線(青)、そしてこれらの避難者が踊り場から段部に出る境界線(赤)を設定し、それらの境界線を通過する避難者の人数を 1 秒間隔で時間に紐付けてカウントした。なお、避難者が階段室から出ていく 1 階では、青の境界線において踊り場から階段外に出る境界線の通過人数をカウントした。

2.3 避難流動のデータ化

前項に記載した境界線の通過人数を時刻に紐付けてカウントすることにより、各時刻の避難流動量を把握することができる。ただし、1 秒毎にカウントしているものの、1 秒間に通過する人数は 0 人、1 人、2 人の 3 パターンで、それが変動するため、単に人が通過しているか否かがわかるデータにしかない。そこで、既発表の論文³⁾を参考に 15 秒毎に区切った上で、その間の通過人数を 15 秒で除して単位時間当たりの流動量[p/s]を算定した。なお、1 階層を下りるのに速い人でも 15 秒程度を要したため、各階を順に通過する状況を最低限把握できるように 15 秒間隔を採用した。なお、前述の境界毎に次の通り名称を設定した。

- ・緑の境界線: Tread to Landing (T to L)
- ・青の境界線: Floor to Landing (F to L)
- ・赤の境界線: Landing to Tread (L to T)

2.4 トレーサーによる避難流動の把握

各階の避難群集の先頭集団にトレーサーとして調査員と一緒に避難させ、階段に入ってから各階の踊り場に到着する毎にストップウォッチを用いてラップを刻み、1 階層を降下する時間を測定した。これを時刻と紐付けすることにより、任意の階からの避難群集が階段に入った後、スムーズに階段を降下できたか、ある階を降下するのに長時間を要したかを把握することを試みた。

なお、一部の階には、先頭集団だけでなく、その階の最後尾や中間と思われる避難者に付くトレーサーも配置した。

2.5 順次避難シナリオの設定とその改善

避難訓練は 2014 年まで特別避難階段 2 つを使用していたが、参加者数の減少を受けて、2015 年に実施した避難訓練を皮切りに、片方の階段のみを避難訓練に使用し、毎年試行錯誤しながら順次避難シナリオを設定し避難訓練を実施してきた。本稿では 2015～2018 年の調査データを分析した。なお、調査対象建物の収容人員は 6000 人規模であるが、実在館者数は 4000 人規模であったため、実際の全館避難では 1 階層を大凡 2000 人が通過する見込みである。ただし、Fig. 1 のように平面計画は点対称であるが、各階の在館者分布によって両階段の使用人数は異なるため増減が見込まれる。調査した避難訓練の参加者数は、後述の通り約 900～1600 人であった。

2015 年の避難訓練では、Fig. 3 に示したシナリオで避難開始の指示を防災センターから館内放送を用いて実施した。第 1 フェイズと第 2 フェイズとの間は 2 分、第 2 フェイズと第 3 フェイズとの間は 5 分のインターバルを設けた。前者の 2 分は、次のような理由で設定された。一つは、第 1 フェイズに対する避難指示として、4 階で火災が発生して初期消火に失敗したために 4～6 階の在館

者に避難を指示する内容の放送を日本語と英語で 2 回繰り返して行うが、これに 2 分弱を要したためである。また、訓練では 4～6 階から避難する在館者はほとんどいないため、3 階層からの避難に要する時間が長くなることを考慮する必要がなかった。第 2 フェイズは、第 1 フェイズのすぐ上の火災による延焼リスクが高い 7～12 階の 6 階層と、建物内の煙汚染のリスクが高い最上階を含む 21～25 階の 5 階層とした。7～12 階は実質 10～12 階の 3 階層から多くの在館者が避難した。また、21～25 階は一部の階から多くの在館者が避難したが、他はそれほど多くない。第 3 フェイズの指示は第 2 フェイズから 5 分遅れとしたが、これが結果的に十分なインターバルでなかったために第 2 フェイズの避難者との合流による混雑を生じたことと、13～20 階の 8 階層が同時避難したこととで同一フェイズ内での合流による混雑も生じた。

この 2015 年の避難訓練の結果を受けて、2016 年以降は第 3 フェイズの 8 階層を 2 分割して、17～20 階の 4 階層を第 3 フェイズ、13～16 階の 4 階層を第 4 フェイズとし、第 2 と第 3、第 3 と第 4 のフェイズ間のインターバルを調整した(Fig. 4)。結果として、

Fig. 2 Shot areas in staircase

Fig. 3 Evacuation scenario in 2015 drill

Fig. 4 Evacuation scenarios in 2016 – 2018 drills

2016 年はそれらのインターバルを長く取り過ぎたために、階段 1 階出口からの避難流動が途切れる現象が発生した。これを踏まえて、避難効率を高めて避難時間を短縮するためにシナリオを改善した。実際には避難訓練の参加者数が年々減少したことも影響したが、2018 年は目立った混雑もなく、1 階出口で避難流動が途切れることもなく成功した一例といえる。

2.6 画像認識プログラム

撮影した映像は 1 秒間につき 30 フレームの画像で構成されており、その動画を機械学習によって人の頭(頭髪の色等、ヘルメットの着用等の条件を学習させた)を認識し、階段踊り場での移動軌跡を把握できるプログラムを導入した(Fig. 5)。本プログラムでは、避難者が階段踊り場を通過する様子を撮影した映像から避難者の流動状態を把握するものであるが、避難者の角度や大きさが異なるため、画像処理を使った形状の一致具合を使って物体を捉えることが難しいと判断し、物体認識のアルゴリズムとしてディープラーニングを使った物体認識 SSD (Single Shot MultiBox Detector)を採用した⁸⁾。SSD は、オープンソース機械学習プラットフォームである TensorFlow + Keras を実装し、頭髪の色や量が異なる人々、ヘルメットをかぶった人々の頭部を認識可能とした⁹⁾。

Fig. 5 Evacuation flow analysis through vision recognition

3. 調査結果

3.1 トレーサーの階段降下履歴の分析

Fig. 6 と Fig. 7 は、それぞれ 2015 年と 2018 年の避難訓練においてトレーサーが階段内を降下する状況を表示したものである。右肩下りのグラフが急な傾斜は途中で立ち止まったり、他の避難者が階段に入ることによる合流の影響を受けずスムーズに階段を降下している様子(1 階層の降下が 20 秒程度)を表している。傾斜が緩やかになっているところは、次の下の階に到達するまでに長時間を要したことを表しており、滞留が発生した箇所と見なすことができる。例えば、Fig. 6 の 420 秒に灰色の点線が引いてあり、これは第 3 フェーズの避難開始の放送開始時点を表しているが、その頃に第 2 フェーズの 21～25 階からの避難者が第 2 フェーズの 7～12 階からの避難者(正確には 12 階の踊り場での滞留)に追いついたために滞留したことがわかる。特に 10～12 階の連続する 3 階層は避難者が多かったため、グラフにそれらの階から階段室に列をなして避難した時間帯を表示したように 12 階では長時間の滞留が発生した。例えば、第 2 フェーズの上層部から最初に階段を下りてきた 21 階のトレーサー(21F-1)は 13 階まで急な

傾きで、13 階から 12 階、12 階から 11 階に到達する部分では長時間を要したため傾きが緩やかで、11 階通過以降は再び急な傾きとなった。そして、その滞留が生じた場所は第 2 フェーズの 21～25 階から遅れて階段に入ったトレーサーほど上の階になっていたことがわかる。さらに、第 3 フェーズの 13～20 階からの避難者は、それらの階における階段室が第 2 フェーズの 21～25 階からの避難者によってある程度占有されていたために、階段に入った後すぐに滞留することを余儀なくされた。すなわち、第 3 フェーズの 13～20 階のトレーサーはそれぞれ階段室に入る時間に差があるが、Fig. 6 に描かれたグラフの始点から右肩下りの傾斜が緩やかに描かれ、その後傾斜が急になりスムーズに避難した状態になる。そして、スムーズに避難し始めた時間は、大凡 13 階で 650 秒、15 階で 850 秒、16 階で 900 秒、18 階で 1000 秒、19 階で 1100 秒となり、上層階ほど遅くなった。

これに対して、Fig. 7 のグラフでは、ほとんどのグラフが右肩下りの傾斜が急な状態のグラフとなっており、トレーサーが階段室に入った後スムーズに階段を降下できたことがわかる。グラフに表示した 10～12 階から階段室に列をなして避難した時間帯は、特に 12 階で大きく短縮され、第 2 フェーズの 21～25 階から避難したトレーサーへの影響がわずかにあったものの、階段室内で停滞することなく避難した。

Fig. 6 Tracers' descending on stairs with time in 2015 drill

Fig. 7 Tracers' descending on stairs with time in 2018 drill

3.2 階段室の1階出口からの避難流動状況の分析

2015年から2018年までの避難訓練における階段1階出口からの避難者の累積人数をFig. 8に示す。同出口からの避難者の累積人数によれば、2015年の参加者は1596人であったが、2016年は1111人、2017年は1003人、そして2018年は939人と減少した。

Fig. 8 Cumulative number of evacuees at staircase exit on 1F

階段1階出口からの避難者の累積人数のグラフは、実施年によって異なるが、どの年も概ね300秒を過ぎた辺りから避難者が継続的に1階出口から避難し、累積人数が増大し始めた。第1フェイズの避難者はほとんどいなかったため、グラフは300秒過ぎまで横ばいだったが、第2フェイズの避難者が1階出口に到達し始めて累積人数が増大し始めた。4本のグラフの内、2015年(黒)と2018年(緑)のグラフは累積人数が継続的に増大しているが2016年(青)と2017年(赤)は一時的にグラフが横ばいになり、増大傾向が緩やかになった時間帯(概ね900秒前後)が存在した。これは、1階からの避難者の流出が途切れ途切れとなったことに起因する。また、グラフの最後は2016～2018年では累積人数の増大傾向が緩やかになったのは、後から遅れて階段に入ってきた人々がまばらに存在し避難したためである。

階段1階出口からの避難者の流動量[p/s]の推移をFig. 9に示した。流動量が一時的に減少した原因は次の通りである。2015年(黒)では、555秒で0.33 p/sとなり、これは第3フェイズの3階から避難した視覚障害者とその介助者が主に第2フェイズの避難群集に合流し、彼らの前方に隙間が生じたためであった。2016年(青)では、900秒で0 p/sとなり、これは第2フェイズの上層部から避難した後方の避難群集と第3フェイズの避難群集が階段で交わらず、その間に避難者が存在しない隙間が生じたためであった。また、1065秒で0.47 p/sとなったのは、第2フェイズの一部の避難者が遅れて避難(第2フェイズの避難指示から8分以上遅れて24階から避難)して第3フェイズの17階からの避難群集に合流し、前者の階段降下が遅かった(横に並んで会話しながらの階段降下が原因)ために前を行く人との間隔が開いたためであった。1140秒で0.6 p/sとなったのも、第3フェイズの後方の避難群集のある避難者(17階から避難。第4フェイズの前方の避難群集がこの後ろにつながる)の階段降下が遅かった(他者との会話が原

因)ために前を行く人との間隔が開いたために流動量が一時低下した。また、2017年(赤)では、885秒で0.53 p/sに一時低下したのは第2フェイズの上層部からの避難群集に対して、第3フェイズの避難群集が交わったところで避難者数が減少し密度が低下したためであった。960秒で0.6 p/sに一時低下したのは、第3フェイズの一部の避難者が遅れて避難(第3フェイズの避難指示から5分程度遅れて18階から避難)し、彼らの後方に続いて第4フェイズの避難群集が避難したが、彼らの前方に隙間が生じたためであった。

これらの流動量が一時的に低下した現象を整理すると、2016年と2017年は第2フェイズと第3フェイズの避難群集との間に隙間が生じたためであり、避難開始指示のインターバルを縮めたことで2018年には解決された。その他は、一部の避難者の階段降下が遅かったために前方に隙間が生じたためであった。また、2015年と2018年は継続的に避難者が階段1階出口から流出した時間帯では0.8 p/s未満に流動量が低下しなかった。

Fig. 9 Flow rate at staircase exit on 1st floor

3.3 階段の途中階での流動量の分析

3.1節で述べたとおり、2015年は第3フェイズの13～20階からの避難者は階段室に入ったところで滞留し、スムーズに階段を下り始めるまで上階ほど時間を要したことが、トレーサーの階段降下履歴から分かった。そして、この状況を改善すべくフェイズ分けを2016年以降に第3フェイズ17～20階、第4フェイズ13～16階に変更した。その効果を階段内の避難流動状態から分析するため、その代表階として13階と17階(2016年以降の第3と第4フェイズの最下階)を選定し、上階から踊り場に入る流動量(T to L)をグラフに示した(Fig. 10, Fig. 11)。

2015年は、13階の流動量が、第3フェイズの放送前の390秒で第2フェイズの上層部からの避難者が到達したことにより0.93 p/sに一時的に上昇した後、第2フェイズの下層部からの避難により12階で滞留が生じていたため低下した。その後、第3フェイズの放送以降に11階から階段への避難終了が500秒、12階から620秒、そして13階から960秒になり、それぞれにタイムラグを経て13階の上階から踊り場への流動量(13F T to L)が段階的に上昇し、1020秒以降に概ね定常状態で1.2 p/sとなり、そして1500秒以降に通過する避難者が減り、流動量も小さくなった。17

階も同様に、第 3 フェイズの放送前に第 2 フェイズの上層部からの避難者の通過により流動量が上昇し、そして第 3 フェイズの放送が開始された後、第 2 フェイズの上層部からの避難者が通過し滞留したことで流動量が 0 p/s になった。その後、第 3 フェイズからの避難者が階段に避難し始めたことで 750 秒に 0.87 p/s に回復した後、13 階から階段に避難している状態で 12 階以下及び 14～17 階では階段への避難は終了していたため、流動量は 13 階と同等に回復しているものの、13 階から 17 階までの階段内の避難者が断続的に滞留して動いたり止まったりを繰り返したために上昇と低下の繰り返しが続き、避難者が通過し終えたことで 1215 秒に流動量が 0 p/s になった。

一方、2018 年は、第 3 フェイズの放送を早めたことでその前後での流動量の低下は、13 階及び 17 階において見られなかった。そして、その流動量は一時的に低下するような挙動を示さず、第 2 フェイズの上層部からの避難者の到達に伴い山なりを描くように上昇してから、17 階は第 3 フェイズの避難者の通過終了、13 階は第 4 フェイズの避難者も通過終了を経て低下した。

2015 年と 2018 年を比較すると、通過した避難者数の違いがあったことは確かであるが、2015 年は流動量が上昇した後に一時的に低下したこと、また 17 階では流動量が回復した際に上昇と低下を繰り返したことが、2018 年の流動量の変化と明確に異なっていた。

Fig. 10 Flow Rate of T to L on 13F and 17F in 2015 drill

Fig. 11 Flow Rate of T to L on 13F and 17F in 2018 drill

4. 調査結果の考察と議論

4.1 避難シナリオの変更による階段内の混雑の改善

Fig. 6 より、2015 年の避難訓練では、第 2 フェイズの上層階 21～25 階から避難した人々は、第 2 フェイズの低層階 7～12 階(実

質 10～12 階)からの避難者に合流し、しかも遅れて階段を下りてきた人は階段内で滞留した時間が長くなった。例えば、25 階から避難したトレーサーは 16 階から 15 階に下りるまで概ね 200 秒を要した。23 階から避難した 2 番目のトレーサー(23F-2)は、19 階から 18 階に下りるのに 254 秒を要した。一方、第 3 フェイズの 13～20 階からの避難については、階段に入った当初から第 2 フェイズの避難者が第 3 フェイズの階の階段室内に滞留していたため、早期に階段に入れたとしても、滞留している階段の下の方の階から順に滞留が解消されるまで待つ必要があった。例えば、20 階から避難した 1 人目のトレーサー(20F-1)は、19 階に下りるまで 225 秒を要した。また、18 階から避難したトレーサーは、階段入室が 725 秒で第 3 フェイズの避難指示放送から約 5 分を要しており、他の階と比較して 3 分程度遅れた。さらに 14 階や 17 階に至っては、避難し始めた頃に階段内が混雑していたため、階段扉を開いてから階段に進入するのを諦め、混雑が解消されるまで待った。そのために、それぞれ 1243 秒、1111 秒に階段に入室した。第 3 フェイズの放送開始からそれぞれ 823 秒、691 秒遅れての階段入室であった。階段内のみならず廊下において列をなして待機せざるを得ない状況が生じたと考えられる。したがって、同一フェイズで上層部と下層部に分けた場合、上層部からの避難者が下層部の階への到達も考慮し、また上層部と下層部の間の階から次のフェイズで避難させる場合には、その階数や避難開始のタイミングを、それらの合流や滞留時間の抑制を考慮して設定する必要がある。

また、階段上部からと各階からの避難群集が合流すると、それぞれの流動量が半減し、その比率は 1 対 1 に分配されたことが既調査で報告された¹⁰⁾。本調査においても、例えば Fig. 10 に示した 13 階の踊り場に下りてくる流動量は、960 秒に 13 階から階段への避難が終了するまでは 780 秒からの時間帯では平均で 0.6 p/s を上回る程度であったが、1020 秒以降では 1.2 p/s を上回る程度となり、13 階からの避難群集の合流により半減されていた。そして、2 つの階で合流が生じ、その間の階段が高密度状態で満たされると、合流のあった 2 つの階のうち下の階では流動量が半減されて 1/2 となり、上の階ではさらに流動量が半減されて 1/4 となる。さらに 3 つの階で合流が生じ、その間の階段が高密度状態となると、3 つの合流のうち最も上の階では流動量が 1/8 に低下する。Fig. 10 において 300 秒頃に 17 階を通過した第 2 フェイズの上層部からの避難者が 360 秒頃に 13 階に到達したことで流動量が上昇したが、Fig. 6 に示したように同時刻には 10～12 階から避難しており 3 つの階で合流が生じたため 12 階の踊り場への避難流動が理論的に 1/8 に低下し、12 階から 13 階までも高密度状態となった。これにより 13 階の流動量は一時的に 0 まで低下し、動画を確認すると実質的に長い間止まっており、滞留状態を引き起こした。したがって、3 つの階で合流が起こり、かつその間の階段が高密度となる時間を抑制することにより避難者が停止するような滞留時間を抑制することができると考える。

こうした状況を避難フェイズ分けとシナリオを改善することで解消されたことは明らかであり、2018 年の避難シナリオは適切なものであったといえる。ただし、単に滞留の発生を抑制することだけ

を考慮すると、階段の避難流動の途切れや低下が生じるため、その分だけ全体の避難完了時間が遅れることになる。例えば、2016年と2017年の避難訓練がそれに相当した。したがって、避難者を合流させてある程度の滞留を引き起こすことを許容しつつも、極端に長時間に及ぶ滞留を生じないように順次避難計画を立案することが肝要である。また、フェイズ間の避難指示のインターバルの影響ではなく、一部の避難者の階段降下が遅かったために彼らの前方に隙間が生じ流動量が低下した現象は、避難中の会話を行わないなど避難者の意識改善を図る必要がある一方、身体的な能力に起因するものは不可避であるため、そうした影響度を評価することも課題といえる。

4.2 順次避難(Phased Evacuation)を実施する上での課題

順次避難に関する記述としてロンドン消防が発行した政策(1991年発行、2015年確認。)においては、出火階とその直上階をまず避難させ、続いてその上階に向かって2階層ずつ避難させ、最上階まで避難させた後に出火直下階から下階に2階層ずつ避難させる方針が示された¹¹⁾。一方で、全館避難を前提とせず、火災ゾーンと称する出火階を含む火災の影響範囲を設定し、延焼や煙拡大もそのゾーンの境界を超えないように対策を施し、その上で火災ゾーンの範囲の在館者に火災ゾーン外に避難を指示する考え方も提案された¹²⁾。また、避難シミュレーションソフトを用いた検討では、出火階を優先させて、直上階は20秒遅れ、その上階は40秒遅れ、さらにその上階と火災階の直下階は120秒遅れ、さらに上階と下階を交互あるいは同時に避難させるようにアルゴリズムを提案した研究成果もあった¹³⁾。このように順次避難計画に関しては統一的な手法が周知されている訳ではなく、またそのシナリオの計画法も同様に確立されていない。本研究においては、2.5節に記載の通り、同一フェイズの階からの階段への避難流動の合流によって過度な滞留が生じないように配慮したフェイズ分けを採用し、さらに火災による延焼リスクと煙伝播リスクに配慮した避難シナリオを計画した。ロンドン消防は、火災階から段階的に上階に避難開始階を移行させる方針を打ち出しているが、万が一煙が壁などの隙間から堅穴空間に進入すれば、浮力のある煙は容易に最上部に到達することになる。また、火災ゾーンを設定し、その範囲の在館者を他のゾーンに避難させる手法に関しても、初期消火が失敗するようなケースでは、高温ガスが発生し続け、熱も加わることになる。防火防煙区画によるパッシブ対策が高い信頼性を持って火災ゾーンの境界で煙伝播を抑制することは、実質的に困難であることを前提に避難シナリオを採用すべきであると考えられる。具体的には、火災ゾーンからの避難者の内、身体的に余裕のある者は階段を降下し続け、建物からの避難を実行すべきで、休憩や介助が必要な者について非火災ゾーンへの一時退避方式を採用すべきである。加えて、火災ゾーンよりも上階にある階は煙伝播リスクを考慮すべきであり、特に建物の最上階やエレベーターのサービス階(停止階)の内の最上階やその周辺階は煙伝播リスクへの配慮が必要である。また、避難シミュレーションを用いたケーススタディを通して順次避難アルゴリズムを提案した研究にあっては、避難開始のトリガーの与え方に検討の余地がある。本研究で調査した避難訓練においては、館内放送(火

災時には非常放送が用いられる)が使用されていたが、音声アナウンスでは伝えるべき情報量に応じて所要時間も異なり、さらに例えば正確に意図が伝わるように内容やその伝える順番も重要となる。例えば、自動火災報知設備により「火災が発生しました。落ち着いて避難して下さい。」と全館自動放送が流れた後に、手動に切り替え順次避難の指示を与えようとしても混乱をきたすことになる。したがって、実効性も考慮して避難シナリオを立案する必要がある。

4.3 リアルタイム技術の適用に関する課題

順次避難シナリオを運用するには、各階の避難者数を把握した上で、出火階を設定し、流動計算や避難シミュレーションによる予測によって円滑な避難が可能なシナリオを抽出することが可能である。ここに、予測においては、事務所ビルの在館者は個々の移動特性のばらつきが比較的小さいものの、移動速度が遅い人に群集流動が制御されることを考慮してパラメータを設定する必要がある。ただし、何か事が起きたときに在館者数の見積を誤れば、避難状態の変化に影響を及ぼすことになる。したがって、前提条件のランダム性も考慮し順次避難シナリオのリダンダンシーについても評価する仕組みが求められる。その一方で、オフィスビル等において、勤怠システムやビーコンを活用した位置情報を捉えるシステムが普及すれば容易に前提条件を得ることが可能となるため、ばらつきは人の行動に起因することになる。こうした人の行動を把握しその影響を評価する手法として、セキュリティ技術の一層の普及による防犯カメラ映像の活用が挙げられる。Fig. 5に示したような画像解析によって人流状態を把握できれば、適切な避難行動を促す放送が可能となり、その結果を反映したリアルタイムシミュレーションの実行により避難シナリオを調整する可能性もある。具体的には、ある階からの避難者の進入が滞っていた場合(2015年調査における14階や17階)、早期避難を促す放送を流したり、あるいはそうした避難遅れを考慮した場合の階段内避難流動への影響を、その後の避難シナリオの設定に反映することも可能である。こうしてより円滑な全館避難の実現を可能とするシステムの構築が将来期待できる。

5. まとめ

本研究では、ある高層事務所ビルで実施された順次避難計画を採用した全館避難訓練の調査を実施した。その際適用される避難シナリオを改善することによって、避難流動が円滑(個別の避難の混雑度や長時間化が抑制された状態)かつ建物全体からの避難完了時間を延長させない、より適切な避難シナリオを実際の避難訓練に適用できたことを報告した。2015年の避難訓練においては、第3フェイズで8階層からの同時避難により長時間の滞留を生じたことから、2016年以降は4階層ずつ第3と第4フェイズに分け実施した。しかしながら、第3と第4フェイズの避難指示の放送のタイミングを必要以上に遅らせたため、1階の階段からの避難流動が一時的に途切れたり、流動量が低下した。2017年および2018年においては、そのタイミングを早めたことでその避難流動が途切れたり、流動量が一時的に低下しないように調整することができた。

2015 年の避難訓練では、長時間に及ぶ滞留が発生したが、これは階段での合流によって流動量が半減し、3 つの階で合流が生じたことで流動量が 1/8 に低下したことを確認し、そうした状態が生じる時間を抑制することで避難者が長時間停止するような滞留を抑制できることを明らかにした。そして、階段内の過度な滞留が一部の階から長時間階段に避難しない状況を生じさせたことや、避難開始の指示の遅れが 1 階の階段出口からの避難流動を途切れさせたり、また予想外の避難行動が生じたことを受けて、同一フェイズに割り振る階数や避難開始のタイミングを合流と滞留時間の抑制を考慮して設定する必要があることを指摘した。その上で、避難シミュレーション等の予測技術と、建物内の在館者人数分布を把握する技術を考慮することに加え、防犯カメラ映像を活用することによって、予測計算のみならず、リアルタイムで人流状態を把握し予想外の避難行動が生じた場合の対処やその影響を反映して順次避難を円滑化させる可能性について言及した。

謝辞

避難訓練調査は、実施関係者や参加者の皆様、また東京理科大学、早稲田大学、東北学院大学の学生の協力の下に実施した。また、本研究は、JSPS 科研費(課題番号:17K06722)の助成を受けた。ここに記し謝意を表す。

なお、本論文に関して開示すべき利益相反関連事項はない。

参考文献

- 1) Life Safety Code 101 (Number of means of egress), NFPA, 2002.
- 2) 建築基準法施行令第 120 条(直通階段の設置)
- 3) 門倉博之, 関澤愛, 佐野友紀, 藤井皓介: 高層建築物での順次避難における階段室内の流動状況と滞留発生に関する研究 -全館避難訓練時の行動実態観測に基づく分析と考察-, 日本建築学会環境系論文集 2015;716: 849-856.
- 4) Tomonori Sano, Masanori Yajima, Hiroyuki Kadokura and Ai Sekizawa, Human behavior in a staircase during a total evacuation drill in a high-rise building, FIRE AND MATERIALS 2017; 41: 375-386.
- 5) Xuan Xu, Weiguo Song, Staircase evacuation modeling and its comparison with an egress drill, Building and Environment 2009; 44: 1039-1046.
- 6) Karen E. Boyce, David A. Purser and T. Jim Shields, Experimental studies to investigate merging behaviour in a staircase, FIRE AND MATERIALS 2012; 36: 383-398.
- 7) NAOHIRO TAKEICHI, YOSHIYUKI YOSHIDA, TOMONORI SANO, TAKESHI KIMURA, HITOSHI WATANABE, and YOSHIFUMI OHMIYA, Characteristics of Merging Occupants in a Staircase, FIRE SAFETY SCIENCE, IAFSS 2005; 591-598.
- 8) Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu and Alexander C. Berg, SSD: Single Shot MultiBox Detector, European Conference on Computer Vision, 2016; 21-37.
- 9) Martin Abadi, Ashish Agarwal et al., TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems, Preliminary White Paper, Google Research, 2015.
- 10) Tomonori Sano, Enrico Ronchi, Yoshikazu Minegishi, Daniel Nilsson, A pedestrian merging flow model for stair evacuation, Fire Safety Journal 2017 ; 89: 77-89.
- 11) LFB (London Fire Brigade): Phased evacuation of office building, 21 Feb. 1991 (Reviewed as current: 24 Nov. 2015).
- 12) P. Sharma, K. Dhanwantri and S. Mehta, Evacuation Patterns in High-Rise Buildings, Int. J. of Civil Eng. Research, 2014; 5:255-260.
- 13) Marina Gravit, Ivan Dmitriev, and Kirill Kuzenkov, Phased evacuation algorithm for high-rise buildings, MATEC Web of Conferences, 2018; 245:1-9.