超高層ビルを対象とした全館避難時のエレベーター利用に関する研究

STUDY ON EVACUATION USING ELEVATORS IN A HIGH-RISE BUILDING

中 濱 慎 司*, 関 澤 愛**, 池 畠 由 華***, 野 竹 宏 彰****

*Shinji NAKAHAMA, Ai SEKIZAWA, Yuka IKEHATA
and Hiroaki NOTAKE*

In many past fires, not a few people used elevators for their evacuation, although they were often told not to use elevators for fire evacuation. On the other hand, the number of people, who have difficulty to use stairs, has been larger year by year not only in usual buildings but also in high-rise buildings as well, since the aged people have been rapidly increasing along with improved accessibility for disabled people. Also, the potential demand of elevator use in evacuation from a high-rise building has been growing recently especially after the collapse of WTC towers on September 11th, 2001. The evacuation using elevators in case of a fire is still a controversial issue, because the safe operation of elevators is not always secured during evacuation in a fire. In the context of this situation, we developed a simplified model to simulate the operation of multiple elevators for calculating evacuation time by elevators. And, we conducted some case studies with this elevator operation model to examine the feasibility and issues of elevator use for evacuation mainly from the viewpoint of its transportation efficiency of occupants rather than fire safety aspects during the operation.

Keywords : Elevator, Stairs, Evacuation model, High-Rise Building, Total Evacuation

エレベーター, 階段, 避難モデル, 高層ビル, 全館避難

1. 研究の背景と目的

1.1 エレベーター利用避難をめぐる動向

わが国において、火災時における超高層ビルの避難計画は、従来特別避難階段による避難が前提であり、エレベーター（以降、EVと記す）を利用した避難は考えられていない。また、EVの避難時利用は法令上禁止されてはいないものの、日本エレベーター協会等の自主規制により利用を控えることが一般的である。しかしながら、1996年に発生した広島基町高層住宅火災¹⁾のように、火元に近い部分に居住していた人の半数以上が実際には避難時にEVを利用した事例もあり、初期火災の段階でEVを用いて避難を行ったケースも見受けられる。

一方で、高齢者人口の急増、障害を持つ人の社会参加の拡大、および一般建築へのアクセシビリティ改善などにより、公共建築だけでなく百貨店や高層事務所建築においても、車いす利用者等の火災時に階段を利用して避難することが困難な人達が在館者の中に次第に増えつつある。こうした背景の中で、日本建築学会に設置された「避難安全のバリアフリーデザイン特別調査委員会」²⁾、または、東京消防庁の火災予防審議会人命安全対策部会での「高齢社会の到来を踏まえた高層建築物等における防火安全対策のあり方」³⁾において、自力歩行困難者の避難支援手法としてEV利用の検討を行なう等、徐々に避難時にEVを利用することへの関心が高まっている。

国内外で、特にEV利用避難への関心が高くなった事例としては、2001年9月11日に発生した世界貿易センタービルへの飛行機衝突

によるビル崩壊が挙げられる。この事件以降、米国では超高層ビルであっても、従来のような火災階近辺の一時的かつ部分的な避難に留まらず、スムーズな全館避難の要求が高まり、EVの緊急時避難利用の検討が始められ、2004年にNIST（米国標準技術研究所）とASME（米国機械工学会）が協同でワークショップを開催し、消防隊専用のEVと在館者避難用EVの火災時の安全性と有効性について議論が行なわれた⁴⁾。これらの動きがもとになり、米国で最も普及している建築基準であるICC（International Code Council）のIBC（International Building Code）2009年版において、消防隊専用EVの技術基準と設置基準が定められた⁵⁾。さらに、420ft（約128m）以上の新築の高層ビルは3つ目の避難階段を設置せねばならないことになったが、その一つを在館者用避難EVに代替できる緩和規定を設けており、米国での新築の高層ビルでは今後在館者用避難EVの設置が増える可能性がある。

1.2 既往の研究

火災時におけるEV利用避難を体系的に検討した例として、日本建築学会EV利用避難特別研究委員会の指針案が挙げられる⁶⁾。この指針案では、EVを避難に利用するに当たっての要求性能が避難計画、煙制御計画、運用面からまとめられ、病院を対象にケーススタディを実施している。しかし、この研究では介護が必要な患者と管理側との対応に主眼を置いており、一般建物内でのEV避難を対象としていないという課題がある。一般建物、特に超高層ビルを対象としたEV避難に関する検討として、河合等によるEV輸送能

* 大成建設技術センター 修士(環境科学)

** 東京理科大学 教授・工博

*** 大成建設技術センター 博士(工学)

**** 清水建設技術研究所 博士(工学)

Taisei Technology Center, Taisei Corporation

Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

Taisei Technology Center, Taisei Corporation, Dr. Eng.

Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

力算定⁷⁾、三浦等のEV避難モデルの提案⁸⁾、Edwin R. Galea 等による超高層建物を対象とした避難モデルと運行方法の提案がある⁹⁾。

河合等による研究では、高層住宅を対象にEV4台（乗用2台、非常用2台）を利用して、自力歩行困難者がある一定割合居住していると想定し、EVの輸送能力を算定している。この研究では、EV避難モデルは避難階からEVのサービス階に停止し、避難階まで再び戻ってくるまでの一往復に掛かる時間の算定のみであり、全館避難を対象としたEVの運行方法による輸送能力の効果を分析することは行っていない。三浦等の研究では、53階建ての超高層事務所ビルを対象に複数台のEVによる移動を考慮した避難モデルを提案している。しかし、本モデルは複数台のEV避難を扱えるモデルとしているが、EV避難の完了時間は単に1台の移動に台数分の能力を単純に掛けただけのものであり、個別の複数台の運行オペレーションを考慮できないという課題がある。

Edwin R. Galea 等による研究では、50階建ての超高層事務所ビルを対象に、避難者個々の移動と個々のEV運行を両立させたモデルを提案している。この研究では、運行パターンを10例取り上げ、スカイロビー形式が階段避難時間と比較して約50%の削減効果があることを示している。しかし、この研究における計算対象のEVは乗用EVのみであり、多数ある乗用EVを利用した場合の運行モードと避難完了時間の関係が主な焦点となっている。

1.3 研究の目的

わが国では、EVの避難時利用については検討が始まったばかりであり、全館避難時を対象としたEV避難のあり方については十分に検討されていないのが現状である。しかし、わが国では超高層ビルには非常用EVが設置されており、消防隊の利用を前提としたものではあるが、火災時の避難あるいは救助目的の利用が可能である。その一方で、超高層ビルにある既存施設としての非常用EVを火災避難に利用した場合に、特別避難階段のみ利用の避難と比べてEV利用避難のパターンがどの程度有効であるかを調べた研究はこれまでなかった。

本研究では、超高層ビルにおける全館避難時に、特別避難階段のみ利用の避難と比べて種々のEV利用避難のパターンがどの程度有効であるかを調べることを目的として、超高層ビルを対象にケーススタディを行った。EV利用避難の有効性は、全館避難時における特別避難階段と乗用または非常用EVによる避難時間の比較により検討した。そして、ケーススタディを実行するに当たり、EV利用避難モデルの開発¹⁰⁾やEV乗降時の流動係数の調査を実施した。

2. EV利用避難の運行方法に関する比較検討ケーススタディ

2.1 ケーススタディの設定条件

(1) 検討対象建物

EV利用避難における運行方法の比較検討のケーススタディを行うにあたり、実存する超高層事務所ビルを参考として検討対象となる超高層ビルを設定した。検討対象建物の平面図とEV構成を図1に示す。

検討対象建物は、1Fを避難階として57Fを最上階、階高は3.65m（1Fのみ7.0m）とした。基準階床面積は2,629㎡（内1,680㎡が事務所用途）で、コアに乗用EVや非常用EV、特別避難階段が配置されたセンターコア形式とした。避難階である1Fを除き、各階の在館

者数は、事務所面積1,680㎡/階に在館者密度0.125人/㎡を掛けた210人と設定し、全館では11,760人（56階層分）の在館者となる。また、EV構成は図1に示すようにサービス階が異なる4つの乗用EVバンクと、全ての階に停止する2つの非常用EVとした。

図1 検討対象建物の平面図とEV構成

(2) EVおよび特別避難階段の設定条件

乗用EVおよび非常用EV、さらに特別避難階段の設定条件を、表1および表2に示す。なお、これら設定条件も実存する超高層事務所ビルを参考に設定した。

表1 EVの設定条件

	単位	Aバンク	Bバンク	Cバンク	Dバンク	非常用EV
サービス階	階	1～15	16～29	30～43	44～57	1～57
サービス階人数	人	2940	2940	2940	2940	11760
EV台数	台	8	8	8	8	2
EV収容人数	人/台	22	22	22	22	32
定格速度	m/s	4	5	6	7	3
加速度	m/s ²	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
減速度	m/s ²	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
EV扉幅	m	1.1	1.1	1.1	1.1	1.9
EV扉開時間	s	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
EV扉閉時間	s	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
流動係数	乗車	人/m/s	1.07	1.07	1.07	1.07
	降車	人/m/s	1.22	1.22	1.22	1.22

表2 特別避難階段の設定条件

	単位	特別避難階段1	特別避難階段2
最大水平移動距離	m	44.0	44.0
水平速度	m/s	1.0	1.0
最大垂直移動距離	m	207.75	207.75
階段降下速度	m/s	0.2	0.2
階段幅員	m	1.2	1.2
出入口有効幅員	m	1.08	1.08
階段流動係数	人/m/s	1.3	1.3
出入口流動係数	人/m/s	1.5	1.5

EVの台数は、乗用EVが設置されるA～Dバンクでは各8台、非常用EVは2台、合計34台とした。また、EV利用のサービス階は、A～Dバンクにおいて1Fおよび14階層分、非常用EVは1～57Fの全ての階とした。これより、A～Dバンクでは、EV利用可能人数が2,940人、非常用EVでは11,760人となる。

EVカゴの収容人数は、A～Dバンクの乗用EVで22人、非常用EVで32人の設定とした。また、乗用EVの定格速度は高層階をサ

ービス階とするバンクほど速い値となり、Aバンクでは4m/s、Dバンクでは7m/sとした。非常用EVは実状に合わせて、定格速度を3m/sと乗用EVより遅い値とした。加速度・減速度は全てのEVで同じである。扉幅は、乗用EVで1.1m、非常用EVで1.9mとした。

EVの乗降時間の算定には、EV扉の流動係数が必要となるが、EV内部は閉鎖空間であるため、通常の建物扉の流動係数と異なると考えられる。そこで、EV扉の流動係数は、EV利用者の乗降調査に基づいて設定した。乗降調査の詳細は2.4節で示す。

特別避難階段は2ヶ所設置され、設定条件は同じである。階段内の移動は垂直移動として表し、最大垂直移動距離を207.75m、階段内の降下速度を0.2m/sとした。また、階段内および出入口での流動係数をそれぞれ1.3人/m/s、1.5人/m/sとした。

(3) 運行方法

運行方法は3つの避難手段（乗用EV、非常用EV、特別避難階段）を組合せ、火災階やEVの移動優先階に基づき、大きく以下の4ケースを設定した。各ケースの計算条件を表3に示す。なお、各ケースにおいて火災階を指定しており、火災階を最優先にEV利用するべきであるが、本ケーススタディでは火災による煙流動や熱による影響は考慮せず、運行方法や避難手段による避難完了時間の違いを分析するため、EVの運行方法は最上階優先をベースとした。

①ケース1：各避難手段による避難完了時間の比較

ケース1では、対象建物の中で最も高層に位置するDバンクサービス階を計算対象として取り上げ、バンクに滞在する在館者が乗用EV、非常用EV、特別避難階段を利用した場合の避難完了時間を計算する。なお、乗用EVのサービス階の最下階（44F）で火災が発生したと想定する。また参考ケースとして、乗用EVや非常用EVを利用せず、A～Dバンクのサービス階に滞在する全ての在館者が、特別避難階段で全館避難した検討も比較対象とする。

②ケース2：非常用EVの運行方法による影響

ケース2は、ケース1と同様にDバンクサービス階を計算対象に取り上げ、Dバンクサービス階での避難方法を以下の3パターン想定することで、非常用EVの運行方法や到着階の違いによる影響を把握する。

1) 最上階優先運行

この運行方法は、非常用EVをDバンクサービス階の最上階から優先的に移動させて順次下層階へと移動させる。なお、ケース1における非常用EVでのDバンクサービス階の条件と同じである。

2) EV火災階および直上2F優先運行

この運行方法は、非常用EVを火災階最優先として移動させる。火災階の避難が完了した後、次の移動優先階を直上2階層として非常用EVが移動する。なお、これらの階の在館者が全て避難完了した場合、非常用EVの優先階はDバンクサービス階の内、最上階から順次下階へと移行する。

3) 中間避難階移動

この運行方法は、火災階直下階（43F）を中間避難階と設定し、Dバンクサービス階の避難者を一旦中間避難階まで避難させ、その後2つの特別避難階段を利用して1Fまで避難させる。

③ケース3：非常用EVのサービス階の限定による影響

ケース3では、建物全館（1～57F）を計算対象として取り上げ、非常用EVを数フロア通過させるスキップ運転をした場合の避難時

間に及ぼす影響を検討した。非常用EVの通過する階数を1～13まで変化させて、非常用EVの乗降回数や利用者数を限定させた場合の避難完了時間への影響を、特別避難階段による避難完了時間との比較から把握する。例えば、通過階数を1とした場合のサービス階数は27、通過階数を13とした場合のサービス階数は5となる。なお、非常用EVのサービス対象階から外れた階は特別避難階段を利用して避難する。

④ケース4：非常用EVの利用率による影響

超高層ビルにおいて、非常用EVをより現実的なものにするためには、非常用EV2台の内、1台は避難用、残りの1台を消防隊専用として利用することが考えられる。さらに、全ての在館者を対象とするのではなく、限定的な利用による避難完了時間の短縮が図れると考えられる。

そこで、ケース4では各階の在館者数の内、非常用EVの利用人数を10%刻みで0～100%に変更した場合の影響を、特別避難階段による避難完了時間との比較から把握する。

表3 各ケースの計算条件

ケース	火災階	計算対象 バンク	避難手段*	EV台数(台)、 階段数(箇所)	EV運行方法		利用者数 (人)
					優先階	停止階(階)	
No.1	44階	D	非EV	2	最上階優先	1, 44～57	2,940
			乗用EV	8	最上階優先	1, 44～57	2,940
			特避	2	—	—	2,940
		A～D	特避	2	—	—	11,760
No.2	44階	D	非EV	2	最上階優先	1, 44～57	2,940
			非EV	2	火災階および 直上2階優先	1, 44～57	2,940
			非EV +特避	非EV 2 特避 2	最上階優先	44～57, 43階から特避	2,940
No.3	2階	A～D	非EV	2	最上階優先	各階～13階層毎	840～5,880
			特避	2	—	—	5,880～10,920
No.4	2階	A～D	非EV	1	最上階優先	1～57	0～11,760
			特避	2	—	—	0～11,760

* 非EV:非常用EV、特避:特別避難階段

2.2 EV利用避難モデルの概要

今回のケーススタディを実施するにあたり、乗用EV、非常用EVの両方を含めたEV利用避難の全館避難時間を算出するためのEV利用避難モデルを開発した。以下にその概要を示す。

(1) 前提条件および計算フロー

①前提条件

本研究で開発したEV利用避難モデルは、以下の前提条件に基づき、EVを避難に利用した場合の避難完了時間を算出する。

- ・EVの運行に際し、火災や煙の影響は受けない。
- ・各階のEVホールまたは非常用EV兼用付室に滞在する在館者の人数は事前に把握されている。
- ・全てのEVは避難階（1F）から移動を開始し、各EVに設定された目的階へ移動を開始する。
- ・EVが満員の場合には1Fへ直行し、カゴ内の利用者を全て降ろす。その後、EVは次の目的階へ移動する。
- ・EVの収容人数が満員でない場合は1Fに直行せず、次の目的階に移動する。

②計算フロー

EV利用避難モデルの計算フローを図2に示す。計算フローは図2

に示すように大きく 4 ステップ (STEP) から構成される。以下、各 STEP の概要を示す。

図 2 EV 利用避難モデルの計算フロー

STEP① 初期設定データの読み込み

ここでは、EV 利用避難による避難完了時間を計算する条件を設定する。条件の設定としては、建物側のデータと EV 側のデータに分類される。建物側のデータとしては、各階において階高、滞在人数、EV を優先的に移動させる順位を設定する。なお、EV の優先移動階の設定を特にしていない場合、最上階から順次下の階に優先順位が設定される。EV 側のデータとしては、各 EV において EV カゴの収容人数、定格速度、加減速度、扉開口幅、EV 扉の開閉時間、乗車および降車時の流動係数を設定する。

STEP② EV 経過時間の並び替えおよび各 EV の移動目的階の設定

本 EV 利用避難モデルの特徴は、同じ EV バンク内にある EV の複数台の運行を計算することが可能な点である。本モデルでは、EV が移動開始階から移動目的階に到達して乗降が完了した時点で、各 EV の所要時間を相互比較し、その所要時間が短い EV から移動計算を優先させるロジックで次のステップでの移動計算順位を決定づける。そして、EV カゴ内が満員の場合、目的階は避難階 (1F) となり、満員でない場合は初期設定された移動優先階を目的階とする。なお、既に在館者が居ない優先階には移動せず、次の順位の階に移動するように設定をしている。また、EV 利用避難の開始時では、EV は全て避難階 (1F) に着床しているものとし、計算の順番も EV 番号順に計算される。

STEP③ 各 EV の移動時間および乗降時間の計算

移動目的階の設定後、各 EV はある一定の加速度で目的階に向けて移動を開始する。そして、移動距離に応じて EV は定格速度で移動し、さらに減速して目的階に到着する。そして、目的階が避難階では避難者は降車し、その他の階の場合は EV カゴ内に乗車する。

STEP④ EV 利用による避難完了時間の計算

STEP①から③の計算が行われた後、最後の EV 利用者が避難階で EV カゴから降車し、EV 扉が閉まった時点で EV 利用避難の計算は完了する。そして、各 EV の中で最も時間が掛かった避難完了時間を EV 利用による避難完了時間とする。

(2) 移動時間の算定

今回開発した EV の移動モデルは、EV の定格速度への到達状況に応じて 2 パターンに分類される。図 3 と図 4 に EV の移動モデルの概念図を示す。

図 3 は、EV が移動開始階から移動目的階までの間に、加速段階、定速段階、減速段階の 3 つの段階に至る場合の移動速度の時間変化を示したものである。一方、移動開始階から移動目的階までの垂直移動距離が短い場合、図 4 に示すように EV が定格速度に達する前に EV は減速移動をするモデルとした。なお、本モデルでは加速度及び減速度を一定値と設定し、定速速度は EV バンクに応じて変更させた。

図 3 定速移動がある EV 移動モデル

図 4 定速前に減速移動がある EV 移動モデル

本 EV 利用避難モデルでは、移動開始階から移動目的階までに移動する時間を、上述のように加速段階、定速段階、減速段階に各々分けて算出する。そして、最後の EV 利用者が避難階に到着するまでこれら移動時間を加算する。EV の移動時間に関する算定式を式 1～7 に示す。なお、式中の記号の意味は文末に示す。

式 1 は、ある 1 台の EV が移動を開始して目的階までに移動するまでの時間を表す。この時間は、EV の加速段階 t_1 、定速移動の段階 t_2 、定速から減速に至る段階 t_3 を加算して求められる。そして、各段階の時間は、移動開始から移動目的階までの距離算定式 (式 5)、

定格速度の算定式（式 6）を用いることで、式 2～3 で表される。なお、図 4 に示すように EV が定速に達する前に減速段階に移行する場合、定速段階の移動時間の算定式（式 3）は 0 として扱われる。これら移動開始階から移動目的階までの移動時間の計算を、各 EV に対して建物の在館者が全て避難完了するまで繰り返し計算を行う。

$$t_{move} = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{V_{max}}{\alpha} + \frac{\left(L - \frac{(V_{max})^2}{2\alpha} - \frac{(V_{max})^2}{2\beta} \right)}{V_{max}} + \frac{V_{max}}{\beta} \quad (1)$$

ここで、

$$t_1 = \frac{V_{max}}{\alpha} \quad (2)$$

$$t_2 = \frac{\left(L - \frac{(V_{max})^2}{2\alpha} - \frac{(V_{max})^2}{2\beta} \right)}{V_{max}} \quad (3)$$

$$t_3 = \frac{V_{max}}{\beta} \quad (4)$$

$$L = \frac{1}{2} \alpha t_1^2 + V_{max} t_2 + \frac{1}{2} \beta t_3^2 \quad (5)$$

$$V_{max} = \alpha t_1 = \beta t_3 \quad (6)$$

(3) EV 乗降時間の算出

用語の定義として、EV 扉が開閉して避難者が EV へ流入または流出に要する時間をそれぞれ乗車時間、降車時間とし、その合計値を乗降時間とする。

EV が移動を開始して目的階に到着し、EV 扉が開き EV 利用者が乗車して扉が閉まるまでの時間を式 7、EV 扉が開き EV 利用者が降車して扉が閉まるまでの時間を式 8 に示す。これら EV の乗降時間は、建物の在館者が全て避難完了するまで、各 EV に乗降がある度に計算が行われる。

$$t_{flow_in} = t_{open} + t_{close} + \frac{P_{in}}{W_D N_{in}} \quad (7)$$

$$t_{flow_out} = t_{open} + t_{close} + \frac{P_{out}}{W_D N_{out}} \quad (8)$$

2.3 階段利用避難モデルの概要

(1) 前提条件

階段避難モデルは、前述した EV 利用避難モデルとは別に Excel ベースで構築し、特別避難階段を利用した場合の避難完了時間の算定が行える。以下にモデルの前提条件を示す。

- ・階段内は火災や煙の影響は受けない。
- ・避難者は健康者と自力歩行困難者といった属性は考慮しない。
- ・避難開始時間は各階全て同時（0 秒で開始）とする。
- ・居室から階段室への移動は考慮しない。
- ・階段内の避難者と付室から階段室へ流入しようとする避難者との合流や階段内の滞留密度による歩行速度変化は考慮せず、一定とする。

(2) 算定式

特別避難階段による避難完了時間の算定式を式 9 に示す。なお、階段内の移動は垂直移動で表すものとし、垂直移動距離と避難者の垂直移動速度から時間が算定される。全館避難完了時間は、2F から避難階（1F）までの垂直移動時間と、階段内の流出時間または 1F の階段扉での流出時間の最大値との合計、さらに最上階からの移動距離時間を比較して、その最大値とした。

$$t_{stairs} = \max \left(\frac{L_s}{V_s}, \frac{L_{2F \rightarrow 1F}}{V_s} + \max \left(\frac{\sum_{i=2}^n P_i}{N_{stairs} \cdot W_{stairs}}, \frac{\sum_{i=2}^n P_i}{N_{exit} \cdot W_{exit}} \right) \right) \quad (9)$$

2.4 EV 乗降の流動係数に関する調査

(1) 調査目的

EV 利用避難モデルでは、EV 乗降時間を式 7,8 より算出する。しかし、EV 扉の場合、通常の建物出入口扉とは異なり、EV の内部が閉鎖空間であるため、EV 内の滞留密度により流動係数が異なると考えられる。そこで、EV への乗車および降車時の流動係数を得るために、EV 利用者の乗降調査を実施した。

(2) 調査概要

EV 利用者の乗降調査は、実在する超高層事務所ビルに設置された乗用 EV を対象とした。調査対象の EV バンクの平面図を図 5、EV 仕様を表 4 に示す。

図 5 調査対象の EV バンク平面図

表 4 調査対象の EV 仕様

用途	乗用
容量	1,450kg 最大定員22名
速度	4m/s～7m/s
かご内法	間口1,870mm×奥行2,100mm
出入口	幅1,100mm×高さ2,100mm
戸形式	二枚戸中央開き

なお、調査の時間帯は多くの EV 利用者が見込まれ、かつ利用者の乗降が一定方向になる出勤時および昼食時を対象とした。調査方法の概要を以下に示す。

- ・調査日時：2007 年 4 月 6 日(金) 11:45～12:15, 17:30～18:00
2007 年 4 月 9 日(月) 8:20～ 9:15, 11:45～12:45
- ・調査場所：超高層事務所ビル内の乗用 EV
1F, 6F（食堂階）、17～31F（乗車のみ調査）
- ・調査方法：EV への乗降者人数、およびストップウォッチにより EV 利用者が EV 扉を通過する時間を計測した。

(3) 調査結果

乗降時の流動係数と EV カゴ内密度の関係を図 6 および図 7 に示す。なお、図 6 と図 7 の EV 内密度は、乗車時では各階での乗車前

に EV カゴ内に乗車している利用者の密度を示し、降車時では降車開始時点に EV カゴ内に滞在する利用者の密度を示す。

図 6 乗車時の流動係数と EV 内密度との関係

図 7 降車時の流動係数と EV 内密度との関係

乗車時の流動係数と EV 内密度との関係 (図 6) をみると、乗車時の流動係数にばらつきも見られるが、EV 内密度が大きくなると流動係数が小さくなる傾向がみられた。Fruin によると一人あたりの面積が $0.32\text{m}^2/\text{人}$ ($3.12\text{人}/\text{m}^2$) に達すると、EV カゴ内の人々は混雑を感じると示されており¹¹⁾、本調査でも $3\text{人}/\text{m}^2$ を超えたあたりから減少の度合いが大きくなる傾向がみられた。一度の乗車人数が 10 人以上のケースに限定した場合 (図 6 の●)、流動係数は $0.8\sim 1.4\text{人}/\text{m/s}$ の範囲に分布し、流動係数の平均値は $1.07\text{人}/\text{m/s}$ となった。乗車時の流動係数が、避難計算で用いられる流動係数 $1.5\text{人}/\text{m/s}$ より値が低くなった理由として、EV カゴ内が閉鎖空間であり、EV 利用者が EV カゴ内の空いたスペースをみつけて乗車するためと考えられる。

降車時の流動係数と EV 内密度との関係 (図 7) をみると、流入時と同様に EV 内密度が大きくなると流動係数がやや高くなる傾向がみられた。しかし、乗車時と比較すると密度の影響は小さく、大部分のデータが $0.8\sim 1.4\text{人}/\text{m/s}$ の範囲に分布している。一度の降車人数が 10 人以上のケースに限定した場合 (図 7 の◆) の流動係数は $1.0\sim 1.4\text{人}/\text{m/s}$ であり、その平均値は $1.22\text{人}/\text{m/s}$ となった。

降車時の流動係数が乗車時より大きい値となった理由として、EV 内に乗車する場合、EV カゴ内の閉じた空間に順次利用者が入り込むのに対し、EV から流出する場合は EV ホールにある程度の移動空間が確保されているためと考えられる。EV 利用避難モデルでは、上記調査で得た乗降時の流動係数の平均値を、モデル内の設定値として用いることとした。

2.5 計算結果と考察

①ケース 1：各避難手段による避難完了時間の比較

D バンク EV サービス階の滞在人数 $2,940$ 人が、非常用 EV、乗用 EV、特別避難階段を利用した場合の避難完了時間の比較を図 8 に示す。図 8 より、D バンクサービス階での非常用 EV による避難完了時間は $7,722$ 秒、乗用 EV では $1,943$ 秒、特別避難階段では $1,027$ 秒となった。今回の条件設定においては、D バンクサービス階の在館者全てを EV で避難させるのではなく、特別避難階段を利用した方が早く避難が完了する結果となった。なお、全館の避難者 $11,760$ 人が特別避難階段を利用した場合の全館避難完了時間は $3,805$ 秒となり、D バンクサービス階のみ非常用 EV を利用して避難をした場合の約半分の値となった。非常用 EV は乗用 EV と比較して、付室の設置等の火災対策が取られているが、定格速度が遅いために全館の在館者を利用対象とした場合、避難完了時間が非常に長くなることが分かった。

図 8 ケース 1 (各避難手段による避難完了時間の比較)

このような結果となった理由として、特別避難階段を利用した避難では式 9 で示されるように、階段内で滞留が発生する場合、避難完了時間は垂直移動時間では決定されず、単位時間あたり一定量で避難者が避難階に到着する。一方、EV 利用避難の場合は 1 往復あたりの垂直移動時間は階段利用避難よりも短い、EV 利用者数が多くなると往復回数が多くなり、さらに断続的に避難者が避難階に到着するため、結果として避難完了時間が階段利用避難よりも長くなったと考えられる。

②ケース 2：非常用 EV の運行方法による影響

D バンクの最下階 (44F) で火災が発生したと想定し、3 つの運行方法別に避難完了時間を計算した。運行方法別の計算結果を図 9

図 9 ケース 2 (非常用 EV の運行方法による影響)

に示す。なお、中間避難階（43F）を考慮した運行方法では、簡易的に値を算出するために、43FまでのEV利用避難に要した時間と階段利用時間を各々足し合わせた値とした。

計算の結果、最上階優先の運行と火災階および直上2階優先の運行による避難完了時間の差はほとんどみられなかった。この理由として、非常用EVによる避難完了時間は往復回数による影響が大きく、各階に滞在する在館者数が変わらない場合、運行パターンの影響はほとんどないことが挙げられる。

また中間避難階を43Fとし、そこから特別避難階段で避難した場合には、避難完了時間は3,954秒と上記2つの運行方法よりも約3,780秒（63分）早い結果となった。このような状況となった理由として、非常用EVの垂直移動距離が他の運行パターンよりも短いため、避難完了時間の短縮につながったことが挙げられる。

③ケース3：非常用EVのサービス階の制限による影響

非常用EVの通過する階数を1～13まで変化させた、スキップ運転による全館避難完了時間への影響を検討した。計算結果を図10に示す。図10より、7階層毎に停止階を設定した場合（非常用EVは6階層分を通過）、非常用EVの利用人数の限定と移動時間の短縮によって、EV利用避難の方が階段避難よりも早く完了する結果となった。

これより、非常用EVであっても、スキップ運転を行うことで移動や乗降時間が短縮され、非常用EV利用者は特別避難階段の避難者より早く避難が完了することも可能であることが分かった。

図10 ケース3（非常用EVのサービス階の制限による影響）

④ケース4：非常用EVの利用率による影響

超高層建物でのEV利用避難において、より現実的な運行方法を考え、2台の非常用EVの内、1台を避難用として利用、残り1台は消防隊専用としての利用を想定し、特別避難階段による避難時間との比較を行った。避難完了時間の比較結果を図11に示す。

図11より、EV利用率を0～100%に変化させた時、非常用EVによる避難完了時間は直線的に増加し、両者の避難完了時間が同等となるEV利用率は約8%となることが分かった。

これより、定格速度が乗用EVよりも遅い非常用EVでサービス階を全館（各階を停止階）とした場合であっても、各階での非常用EVの利用を制約することで移動時間や乗降時間が短縮され、非常用EVを利用せずに特別避難階段で避難する場合より、短い時間での避難も可能であることが分かった。

これより、超高層ビルの避難計画において、健常者は特別避難階

段を利用して避難階まで移動し、自力歩行困難者は介助者とともに非常用EVを利用する方法を採ることで、自力歩行困難者の迅速な避難、階段内の混雑の解消が図られると考えられる。

図11 ケース4（非常用EVの利用率による影響）

3. まとめと今後の課題

本研究では、超高層ビルにおける全館避難時に、階段のみを利用する避難に比べて種々のEVを利用する避難のパターンがどの程度有効であるかを明らかにすることを目的に、実存する超高層事務所ビルを参考にケーススタディを行った。ケーススタディを実施するに当たり、EV利用避難モデルの開発やEV乗降時の流動係数に関する調査を実施し、避難時間の短縮という観点から、全館避難時におけるEV利用のパターンについて考察した。以下にまとめを示す。

- ・EV利用避難モデルにより、Dバンクサービス階（44～57F）に滞在する2,940人を対象に、非常用EV、乗用EV、特別避難階段の各々の方法による避難完了時間を比較した。計算の結果、非常用EVを利用した場合の避難完了時間は他の避難方法よりも長く、全館（A～Dバンク、滞在人数11,760人）を対象に特別避難階段で避難させた時間のほぼ倍となった。また、乗用EV8台による避難であっても特別避難階段による避難の方が早い結果となり、今回のケースでは特別避難階段による避難が最も早い結果となった。
- ・非常用EVの通過する階数を1～13まで変化させた、スキップ運転による全館避難完了時間への影響を検討した。その結果、今回のケースでは非常用EVの停止階を7階層毎に設定（非常用EVは6階層分を通過して移動）することで移動時間や乗降時間が短縮され、非常用EV利用者は特別避難階段の避難者より早く避難が完了することも可能であることが分かった。
- ・非常用EVの1台を消防用、残りの1台を避難用と想定し、特別避難階段による全館避難時間との比較を行った。その結果、今回のケースでは、各階の非常用EVの利用率を限定的に約8%内に収めれば、サービス階を全館（各階を停止階）とした場合でも、非常用EVを利用せずに特別避難階段で避難する場合より、短い時間での避難も可能であることが分かった。
- ・今回のケーススタディを実施するに当たり、乗用EV、非常用EVの両方を含めてEVの複数台運行を模擬するEV利用避難モデルを開発した。このモデルにより、超高層ビルにおける全館避難時のEV利用避難の様々な運行状況の予測が可能となった。
- ・EV扉の流動係数は、EVの内部は閉鎖空間であるため、通常の建物出入口扉の流動係数と異なると考えられるため、実存する建物

で EV 利用者の乗降調査を行い、流動係数を測定した。その結果、避難計画でよく利用される建物出入口扉における値 1.5 人/m/s よりも、乗車時で 1.07 人/m/s、降車時で 1.22 人/m/s となり、いずれも避難計算で用いられる値よりも低いことが分かった。

また、EV 利用を考慮した全館避難に関する検討に関して、今後の課題を以下に示す。

- EV 利用避難モデルに関して、今回のケーススタディでは、階毎の避難誘導（避難開始の働きかけや、EV 利用者の振り分け、待機者への指示等）が機能しているという前提の下で、EV 利用者は EV ホールに整然と待機し、順次乗り込むという状況を想定した EV 利用避難モデルを構築した。しかし、こうした前提が成立しない状況下においては、避難者の EV ホールへの到着遅れや各階での EV の呼び出しタイミングが異なること等によって、EV の運行サイクルが乱れ、EV 利用避難時間へ影響を及ぼすこと等が考えられる。より複雑な想定にも対応できるように、今後更に汎用性ある EV 利用避難モデルに向けた改良が課題である。
- EV 利用避難の運用面に関して、上記の課題とも関連するが、EV 利用避難に関しては、運用上の条件、例えば防災センター要員による非常用 EV 運転、各階との情報伝達、介助者の自力歩行困難者への対応行動等、様々な対応行動のシナリオが、結果としての避難時間を大きく左右する可能性がある。実効性を確保するための方策等も含め、EV 利用避難の運用面をより明示的に考慮したケーススタディの検討も、今後の課題である。

国際的には、中東やアジアでの超々高層ビルにおいて、EV を利用した避難計画が実現している。日本での EV 利用避難の導入は、ハードだけでなくソフト面での対応等を十分に検討し、その導入には慎重を期するべきと考えるが、筆者らは将来の高齢社会に伴う自力歩行困難者の増加に対応するために、非常用 EV の限定的利用を含めた EV 利用避難に関する検討を進めていくべきと考える。

謝辞

三菱電機株式会社の田辺公男氏には、エレベーターの運行に関する内容について、貴重なご意見やご助言を頂戴しました。ここに記して謝意を表します。

記号

L : EV が出発階から目的階まで移動する垂直距離[m], L_i : 階段利用避難における最大垂直移動距離[m], $L_{2F \rightarrow 1F}$: 2F から避難階（1F）までの垂直移動距離[m], N_{exit} : 避難階段の 1F 扉の流動係数[人/m/s], N_{in} : EV へ流入する際の流動係数[人/m/s], N_{out} : EV から流出する際の流動係数[人/m/s], N_{stairs} : 階段内平均流動係数[人/m/s], P_i : i 階の階段利用避難人数[人], P_{in} : EV へ流入する人数[人], P_{out} : EV から流出する人数[人], t_1 : EV が加速段階における移動時間[s], t_2 : EV が定速段階における移動時間[s], t_3 : EV が減速段階における移動時間[s], t_{move} : EV が出発階から目的階まで移動する時間[s], t_{flow_in} : EV 扉が開き EV 利用者が乗車して扉が閉まるまでの時間[s], t_{flow_out} : EV 扉が開き EV 利用者が降車して扉が閉まるまでの時間[s], t_{open} : EV 扉の開時間[s], t_{close} : EV 扉の閉時間[s], t_{stair} : 階段利用の避難時間[s], V_{max} : EV の定格速度[m/s], V_s : 垂直移動速度[m/s], W_d : EV の扉幅[m], W_{exit} : 1F 扉の有効出口幅[m], W_{stairs} : 有効階段幅[m], α : EV の加速度[m/s²], β : EV の減速度[m/s²]

参考文献

- 1) 中野美奈, 久保田勝明, 海老原学, 野竹宏彰, 金子弘幸, 大宮喜文: 広島基町高層住宅火災時における避難行動調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.107-110, 1997. 7
- 2) 日本建築学会社会ニーズ対応推進委員会: 避難安全のバリアフリーデザイン調査委員会公開委員会記録, 2013. 4
- 3) 東京消防庁: 高齢社会の到来を踏まえた高層建築物等における防火安全対策のあり方, 火災予防審議会人命安全対策部会答申, 2013. 4
- 4) 萩原一郎: 火災時等の非常時におけるエレベータ利用に関するワークショップ参加報告, 火災 Vol. 54 No. 3 (通巻 270 号), pp. 51-55, 2004
- 5) 関澤 愛: 高層建物の火災時における全館避難とエレベータ利用避難について, 月刊フェスク, 2012. 10
- 6) 日本建築学会防火委員会: 火災時のエレベータを利用した避難計画指針(案), 2006. 9
- 7) 河合清司, 小西正彦, 岩田雅史, 林和博, 豊岡俊一郎, 秋山誉一: 高層住宅を対象とした火災時のエレベーター利用避難方法, 日本機械学会, 技術講演会講演論文集, 2008
- 8) 三浦龍二, 出利葉大輔, 金子裕良, 阿部 茂: 階段とエレベータを併用したビルの避難シミュレーション, 日本機械学会, 技術講演会講演論文集, pp. 51-54, 2009. 1
- 9) Michael J. Kinsey, Edwin R. Galea and Peter J. Lawrence: INVESTIGATING THE USE OF ELEVATORS FOR HIGH-RISE BUILDING EVACUATION THROUGH COMPUTER SIMULATION, Human Behaviour in Fire Symposium, pp.85-96, 2009
- 10) Ai Sekizawa, Shinji Nakahama, Manabu Ebihara, Hiroaki Notake and Yuka Ikehata: Study on Feasibility of Evacuation by Elevators in a High-Rise Building, Workshop on the Use of Elevators in Fires and Other Emergencies, 2004.3
- 11) JOHN J. FRUIN: 歩行者の空間 理論とデザイン, p.70, 鹿島出版会, 1974.12

(2013年7月10日原稿受理, 2013年8月14日採用決定)