エスカレータを用いた上方避難に関する実験研究

FEASIBILITY OF UPWARD EVACUATION BY ESCALATOR - AN EXPERIMENTAL STUDY

岡田 尚子*, 長谷見 雄二**, 森山 修治***, 岡本 衣未****

*Naoko OKADA, Yuji HASEMI, Shuji MORIYAMA
and Emi OKAMOTO*

A series of on-site experiments are conducted on the upward evacuation by escalator of groups of 50 subjects including 12 simulated aged people. Two escalators, 49.5m long and 22m tall one, and 12.3m long and 5.7m tall one with parallel stairs in a large convention facility in downtown Tokyo, were used. The experiments revealed the following.

1. Upward walking velocity on a still escalator, 0.78-0.79m/s for normal subjects, is nearly identical with that on normal stairs.
2. Upward walking velocity on an escalator running at 0.50m/s is reduced by 5 – 10% from that on a still escalator.
3. Upward walking velocity is virtually independent from the distance from the entrance within the range of 22m in height for normal and simulated aged pedestrians in spite of the height and length of each step significantly larger than those of stairs.
4. Effective flow coefficient at the entrance is around 1.15 persons/ms for a still escalator and 1.78p/ms for a one running at 0.50m/s.
5. The effective flow coefficient at the entrance of an escalator is reduced by the increase of the escalator length for the local congestions generally seen in long escalators.

Keywords : Escalator, Underground, Group, Fire, Evacuation, Instant-senior

エスカレータ, 地下, 群集, 火災, 上方避難, インスタントシニア

1. 研究の背景と目的

地下空間の大規模化や地下鉄道の深深度化、交通機関における利用者数の増加、バリアフリー環境の普及促進等に伴い、現在、エスカレータは公共施設における鉛直方向の歩行者輸送の一般的な手段となってきた。こうしたエスカレータの多用を背景に、階段を見つけない施設や、エスカレータを使用せずには地上に辿り着くことが困難な深い地下鉄駅なども多く出現している。こうした施設で火災等の災害時にエスカレータを避難に使わざるを得なくなる可能性は大きい。現在、エスカレータは建築基準法上、避難施設に該当しないため、災害時にどう利用すべきかはほとんど検討されておらず、避難時のエスカレータの適切な操作方法、一般の階段に比べてステップの蹴上げ及び踏み面寸法の大きいエスカレータの歩行可能性や危険性、入口及び出口付近で不均一な蹴上げが与える影響、ステップ幅の狭いエスカレータ上での追い抜き行動上の特徴等、エスカレータを用いた避難には未だ多くの検討課題がある。また、現在、エスカレータは、非常時には停止させることを前提としており、避難活用を検討する場合も、停止した状態で階段の代わりに使うことを想定することが多いが²⁾、災害時に避難すべき方向に走行させ

て安全に利用することができれば、大深度地下等において、避難時間の短縮に大きな効果があるだけでなく、階段での避難に困難がある高齢者や身体障害者の避難にも有効であると考えられる。

本研究は、以上を踏まえ、災害時にエスカレータが避難に使われる可能性が特に高い場合として地下駅等の地下空間を想定し、高齢者等、歩行速度の遅い避難者も混在する群集の避難への利用可能性を具体的に検討する上で必要な避難行動諸特性を、実験的に把握しようとするものである。実験は、実際の地上施設のエスカレータを用い、擬似高齢者を含む群集について、エスカレータ上昇歩行速度並びにエスカレータ入口での被験者の有効流動係数等、避難計画に必要な基礎データの把握を行った。尚、実験では下降歩行実験も行ったが、本論文では対象外とする。

2. 実験方法

2.1 概要

実験は、都内大型施設にある長さ等の異なる2つのエスカレータを用いて、2007年8月15日午前9時から午後5時の間に、通常照明及び空調のある状態で実施した。被験者は大学生50名を公募し

本論文の実験は2008年度大会研究発表会で発表した(文献1)。

* ㈱日建設計 工修

(研究当時 早稲田大学大学院 修士課程)

** 早稲田大学理工学術院 教授・工博

*** 早稲田大学理工学研究所 招聘研究員・博士(工学)

**** 東京都 工修

(研究当時 早稲田大学大学院 修士課程)

Nikken Sekkei Ltd., M. Eng.

(Formerly Graduate School, Waseda University)

Prof., Department of Architecture, Waseda University, Ph. D.

Visiting Researcher, RISE, Waseda University, Ph. D.

Tokyo Metropolitan Government, M. Eng.

(Formerly Graduate School, Waseda University)

た。実験は、被験者をエスカレータ前に整列させ、スタートの合図でエスカレータに流入を開始し、エスカレータを通過し終えるまでの行動を1回とし、エスカレータの稼動・停止状態、被験者の配置、階段使用の有無等、条件と場所を変えて25回実施し、各所に設置したビデオカメラの映像より、各被験者の歩行時間の測定・軌跡の把握、エスカレータ入り口での通過人数の測定、エスカレータ上での歩行者密度の測定等を行った。

2.2 用語の定義

用語の定義を表1に示す。

2.3 被験者の条件

被験者は学生50名（男性35名、女性15名／平均年齢21歳）であり、うち12名(24%)はインスタントシニア³⁾を装着させた。インスタントシニアは、健常者が装着することにより、概ね75歳から80歳の高齢者と同等の体力及び感覚状態を擬似体験できる装備であり、本研究では装着者を群集に混在させることで、歩行速度の遅い歩行者が群集全体の歩行に及ぼす影響を把握する。装着者には、過去に装着体験のある者のみを選定したが、実際の高齢者を被験者としなかったのは事故の危険性を考慮したためであり、インスタントシニアを群集避難行動実験に使用した場合の高齢者能力の再現性

は、廊下等、水平面の歩行については実験的に検証されている³⁾。本論では、以下、インスタントシニア装着者を「シニア」と略す。被験者は安全の為、長袖及び長ズボン、運動靴を全員に着用させ、健常者には軍手を着用させた。被験者識別の為、ナンバープレート付の色帽子を着用させた。

2.4 実験に使用したエスカレータ

高さ約22m、長さ約49.5mの「長距離エスカレータ(写真1、図1、表2)」と、高さ約5.7m、幅2.5mの階段が併設された「短距離エスカレータ(写真2、図2、表2)」の2種類のエスカレータを使用した。以下、前者における実験を「長距離エスカレータ実験」、後者における実験を「短距離エスカレータ実験」と呼ぶ。両者の幅は若干異なるが、概ねステップ幅1m、手すり間距離1.2mであり、2名並行して歩行できる。長距離エスカレータは、深層地下鉄駅で使われている非常に長いエスカレータを再現することを目的としており、エスカレータ端部からの歩行距離に応じて被験者の歩行速度が変化するかどうかの確認を行うため、全体を5つの区間に分割し、区間ごとの歩行速度(移動速度)を計測した。短距離エスカレータ実験では、図2のように階段が併設されていることを活用し、両者の歩行行動を比較すると共に、エスカレータ・階段の選択性の把握を試みた。

図1(1) 長距離エスカレータ断面図(mm)

図2(1) 短距離エスカレータ断面図(mm)

図1(2) 長距離エスカレータ平面図(mm)

図2(2) 短距離エスカレータ平面図(mm)

写真1 長距離エスカレータ

写真2 短距離エスカレータ

表1 用語の定義

用語	単位	定義
単位幅あたり通過人数	(人/s・m)	入口等において、単位時間・単位幅あたり通過する人数。
入口通過人数	(人/s)	入口等を単位時間に通過する人数。実測値等であり、入口幅で割って、単位幅通過人数、流動係数等を算定する。
流動係数	(人/s・m)	入口等において通過前に滞留が生じ、通過後に滞留が生じない条件で、単位時間・単位幅あたり通過できる人数。開口部等自体の歩行者通過能力を表す。
有効流動係数	(人/s・m)	入口等において通過前、通過後の両方に人が滞留する場合に単位時間・単位幅あたり通過できる人数。通過後の滞留の状態の影響を受け、流動係数よりも小さい値となる。告示避難安全検証法を含め、避難計算等で一般に使われている。
歩行者流量	(人/s)	エスカレータ上やエスカレータ前の空間を単位時間に通過する人数。
搬送可能流量	(人/s)	単位時間にエスカレータが搬送可能な人数。
歩行速度	(m/s)	単位時間に歩行する距離。
移動速度	(m/s)	静止した床面から測った歩行者が移動する速度。
		エスカレータ停止時 「歩行者の歩行速度」に一致。
		エスカレータ稼動時 「歩行者の歩行速度」と「エスカレータ走行速度(通常速度0.5m/s)」の合計値に一致。
歩行者密度	(人/m ²)	進行方向(長さ方向)平面内における単位面積当りの人数。

表2 エスカレータ・階段寸法(mm)

	長距離実験		短距離実験	
	エスカレータ	エスカレータ	階段	
高さ	22 m	5.7 m		
斜面長さ	49.5 m*1	12.3 m	14.5 m*2	
蹴上げ	200 mm	200 mm	150 mm	
踏み面	400 mm	400 mm	300 mm	
ステップ幅	1,015 mm	990 mm	2,500 mm	
手摺間幅	1,205 mm	1,190 mm	2,528 mm	
入口枚数*3	2 枚	1 枚	—	
出口枚数*4	3 枚	1 枚	—	

*1 長距離エスカレーター：
水平床距離(入口320mm、出口420mm)を含む
*2 短距離エスカレーター併設の階段：
踊り場(1,800mm)を含む
*3 入口枚数：入口において水平なステップの枚数
*4 出口枚数：出口において水平なステップの枚数

2.5 実験条件の設定

本実験では、「エスカレータの稼動・停止状態」「被験者の配置」「階段の使用（短距離エスカレータ実験のみ）」「エスカレータ前手摺設置（短距離エスカレータ実験で実施）」の条件を変化させ、計25 ケースの実験を計画した。表3に実験ケース毎の条件を示す。

(1) エスカレータの状態

実験は、エスカレータが停止している状態と通常速度（30m/s＝0.50m/s）で上方に動いている状態の2つの状態で実施した。

(2) 被験者の配置

まず、エスカレータ停止・稼動状態でそれぞれ、被験者を単独歩行させ、被験者個々の能力の把握を行ったうえ、健常者及びシニアを混在させ、群集で歩行させた。表4（1）に群集実験時の被験者配置を示す。配置A(写真3)は、被験者を正方形に並べ、シニアを全体にランダムに配置しており、歩行速度の遅い歩行者（シニア）が全体の歩行に及ぼす一般的な影響を把握すると共に、エスカレータ入口に歩行者が殺到した場合の有効流動係数の把握を行うことを目的とする。配置Bは、被験者を2列に整列させ、シニアを両列にランダムに配置したもので、配置Aと、歩行速度並びにエスカレータ入口での単位幅あたり通過人数を比較し、整列がエスカレータ上の群集歩行に及ぼす影響を把握する。配置Cは、被験者を2列に整列させるが、シニア全員を右列に配置して、配置Bと、歩行速度並びにエスカレータ入口での単位幅あたり通過人数を比較し、歩行速度の遅い歩行者（シニア）を片側に限定した場合の群集歩行行動への影響を把握することを目的としている。また、全体を通して、ステップ幅の狭いエスカレータ上でシニアが群集歩行をどう決定付け、シニアを健常者はどのように追い越すか等の把握を試みた。

表4（1） 被験者配置

単独	単独歩行	1列に整列させ、一定の間隔を開けて順に歩行
A	群集歩行（7×7 ランダム配置）	50 49 42 35 28 21 14 7 48 41 34 27 20 13 6 47 40 33 26 19 12 5 46 39 32 25 18 11 4 45 38 31 24 17 10 3 44 37 30 23 16 9 2 43 36 29 22 15 8 1
	インスタントシニア12人(24%)	進行方向 →
	表4(1)及び表4(2)で共通	
B	群集歩行（2列 ランダム配置）	進行方向 → 50 47 45 43 41 39 38 35 33 31 30 27 25 23 22 19 17 15 14 11 9 7 6 3 1 49 48 46 44 42 40 37 36 34 32 29 28 26 24 21 20 18 16 13 12 10 8 5 4 2
C	群集歩行（2列 片側配置）	進行方向 → 49 47 45 43 41 39 37 35 33 31 29 27 25 23 21 19 17 15 13 11 9 7 5 3 1 50 48 46 44 42 40 38 36 34 32 30 28 26 24 22 20 18 16 14 12 10 8 6 4 2
1	健常者（インスタントシニア未装着者）	1シニア（インスタントシニア装着者）

表4（2） 手摺設置時の様子

A'	手摺設置時 群集歩行（7×7ランダム配置：配列は表4（1）のAに同じ）	
		健常者（インスタントシニア未装着者） シニア（インスタントシニア装着者）
	歩行方向 →	手摺高さ：90cm 手摺長さ：右側2.4m 左側3.0m 手摺間距離：1.2m
	エスカレータ	

表5 実験器具一覧

使用器具等	個数	備考
色帽子	50（個）	被験者は前・上・後ろの3箇所にナンバープレートの付いた色帽子(5色)を着用。色と番号は被験者識別のため。
ナンバープレート	150（個）	健常者が転倒時ケガ防止のために着用
軍手	38（セット）	
インスタントシニア	12（セット）	
ボールパーテーション	4（個）	エスカレーター前手摺再現時に使用
ビデオカメラ	14（台）	

(3) 階段の併用（短距離エスカレータ実験のみ）

エスカレータは、ステップの蹴上げと踏面寸法(200・400mm)が一般の階段(150・300mm)より大きいうえ、出入口付近の蹴上げ寸法が不均一であるため、階段に比べて歩き辛いと予想した。そこで、階段と比べて歩行速度が低下したり、入口付近で歩行者の滞留が生じ易くなる可能性を検討するため、階段と停止状態のエスカレータにおける歩行の比較を行った(ケース7と10、ケース9と18)。また、エスカレータと階段前に、被験者を配置Aで整列させ、スタートの合図で任意に経路を選択させて上昇歩行させる実験も行い(ケース14、15)、経路選択の偏りやエスカレータの状態による経路選択の変化の把握を試みた(写真4)。

(4) エスカレータ前手摺の設置（短距離エスカレータにて実施）

駅プラットフォームのエスカレータ前に設置されている手摺(写真5)は、通勤時間帯等の混雑時に、エスカレータ入口に殺到する歩行者の流れを整流するためのものであるが、人の流れを整流することで、流動係数の改善にも効果がある可能性を考えた。そこで、この効果の有無・程度を検証するため、エスカレータ前に手摺に模したボールパーテーションを設置し、配置Aで群集を流入させた(表4（2）、写真6)。配置Aで手摺付けを行い、手摺のない場合の配置A、配置Bと、エスカレータ入口での単位幅あたり通過人数を比較することにより、手摺がエスカレータを使用する群集避難行動に与える影響を把握する（ケース18と20、ケース19と21）。

表3 実験ケース

	ケース	エスカレーター	階段	被験者の配置	備考
長距離実験	1	停止		単独	
	3	稼動			
	5	停止		A	
	6	稼動			
短距離エスカレーター実験	7		使用	単独	
	9			A	
	10	停止		単独	
	12	稼動			
	14	停止	使用	A	経路任意選択
	15	稼動			
	18	停止		A	
	19	稼動			
	20	停止		A'	手摺設置
	21	稼動			
	22	停止		B	
	23	稼動			
	24	停止		C	
	25	稼動			

注(1) ケース16 および17はビデオ映像が不鮮明のため未解析

注(2) ケース2、4、8、11 および13は、下降歩行実験であるため、本論文では対象外とする

注(3) ケース6と7の間に1時間ほどの休憩を設けた

写真3 配置A

写真4 経路選択様子

写真5 JR山手線新橋駅

写真6 手摺設置時の流動

2.6 測定の項目と方法

実験に使用した用具を表5に示す。

(1) 移動速度

本論文では、「静止した床面から測った歩行者が移動する速度」を「移動速度」と定義する(表1)。エスカレータ停止時の移動速度は、「歩行者の歩行速度」に一致し、エスカレータ稼動時は、「移動速度」と「エスカレータ走行速度(通常速度 0.50m/s)」の差が「歩行者の歩行速度」となる。移動速度は、エスカレータ上で被験者の移動を観測した範囲の長さ(移動距離(m))を、移動時間(s)で除して算出した。移動時間は各所に設置したビデオカメラの映像より測定した。「平均移動速度」は健常者 38 人、シニア 12 人、それぞれ属性ごとの平均値であり、「単独移動速度」は、単独で歩行した際の移動速度をまた、「群集移動速度」は群集で歩行した際の各被験者の移動速度を表す。

(2) エスカレータ 途中区間ごとの移動速度

エスカレータのステップの蹴上げ及び踏み面寸法は、一般的な階段よりも大きいため、疲労が生じ易いと予想した。特に、大深度地下駅等にある長距離のエスカレータを上昇する場合、疲労から途中で歩行速度が低下したり、歩行を停止する歩行者が発生すると、群集避難に著しい影響を与える可能性がある。そこで、出発地点からの歩行距離に応じて、被験者の移動速度に変化が現れるかどうかを確認するため、長距離エスカレータを5つの区間に分割し、区間ごとの移動速度を計測し、比較した。区間の境界線上には、被験者の位置確認のため帯状の垂れ幕(図1、写真7)を設置した。区間1と区間5はそれぞれ、下階・上階の床に接する緩勾配部分を含む。

(3) エスカレータ入口での単位幅当たり通過人数

「単位幅当たり通過人数(人/(s・m))」は、最初と最後に流入した5人ずつを除いた40人に着目し、入口通過人数(40人)を、40人のエスカレータ入口通過時間(s)とエスカレータの「ステップ幅(m)」で除して算出した。通過時間は、ビデオ映像より測定した。

(4) 歩行者密度

「進行方向(長さ方向)平面内における単位面積当たりの人数」を「歩行者密度」と定義する。本論文で報告する「歩行者密度(人/m²)」は、ケース18と19において、先頭部分を除いた群集について、連続する10名前後の被験者に着目し、その人数(人)をその人数の占有する面積(m²)で除した値であり、約7名間隔で4回繰り返し算出し(例：7～16番目、14～23番目、21～30番目、28～37番目)、4回の平均値より求めた。占有面積はビデオカメラ映像の静止画より占有段数を測定し、それをもとに算出した。

図3 区間ごとの平均移動速度の比較

3. 実験結果と考察

実験より得られた平均移動速度を表6に、エスカレータ入口での単位幅当たり通過人数を表7に、また、歩行者密度を表8に示す。

表6 エスカレータ上の平均移動速度(m/s)

長距離エスカレータ *1 全長 (区間1から区間5の合計)				
	ケース1 【単独/停止】	ケース3 【単独/稼動】	ケース5 【A/停止】	ケース6 【A/稼動】
健常者	0.79	1.26	0.54	1.01
シニア	0.50	0.93	0.47	0.93

短距離エスカレータ				
	ケース10 【単独/停止】	ケース12 【単独/稼動】	ケース18 【A/停止】	ケース19 【A/稼動】
健常者	0.78	1.21	0.54	0.95
シニア	0.53	0.93	0.48	0.90

	ケース20 【A整流/停止】		ケース21 【A整流/稼動】	
健常者	0.51		1.03	
シニア	0.46		0.92	

	ケース22 左列	ケース23 右列	ケース23 左列	ケース23 右列
健常者	0.55 (19人)	0.55 (19人)	1.03 (19人)	1.03 (19人)
シニア	0.49 (6人)	0.53 (6人)	0.96 (6人)	0.98 (6人)

	ケース24 左列	ケース25 右列	ケース25 左列	ケース25 右列
健常者	0.68 (25人)	0.51 (13人)	1.18 (25人)	1.02 (13人)
シニア	0.50 (12人)	0.50 (12人)	0.96 (12人)	0.96 (12人)

短距離エスカレータ実験

	ケース7 単独	ケース9 A
健常者	0.75	0.68
シニア	0.51	0.54

*2 表内は、ケース22～25を除き、健常者38名、シニア12名の平均値

表7 エスカレータ入口での単位幅当たり通過人数 (人/(s・m))

長距離エスカレータ		稼動時 配置 (ケース)	
停止時 配置 (ケース)		1.62	A (ケース6)
1.07	A (ケース5)		

短距離エスカレータ		稼動時 配置 (ケース)	
停止時 配置 (ケース)		1.78	A (ケース19)
1.16	A (ケース18)	1.64	A' 手摺 (ケース21)
1.12	A' 手摺 (ケース20)	1.63	B (ケース23)
1.15	B (ケース22)	1.68	C (ケース25)
1.26	C (ケース24)		

*3 先頭と最後尾の5名を除いた40名より算出

*4 幅はエスカレータのステップ幅で定義

表8 エスカレータ上の歩行者密度(人/m²)

短距離エスカレータ		稼動時 配置 (ケース)	
停止時 配置 (ケース)		1.95	A (ケース19)
1.98	A (ケース18)

写真7 長距離エスカレータにおける垂れ幕の様子

3.1 移動速度及び歩行速度

エスカレータ停止時の単独移動速度は、健常者が約 0.8m/s、シニアが約 0.5m/s であり、エスカレータ稼動時(通常速度 0.50m/s)の単独移動速度は、健常者が約 1.2m/s、シニアが約 0.9m/s であった(表 6)。また、群集移動速度(配置 A)に関しては、健常者、シニア、共に、エスカレータ停止時は約 0.5m/s、エスカレータ稼動時は 0.9～1.0m/s であった。エスカレータを稼動させると、停止時に比べ移動速度は 0.4m/s 余増加し、シニアが 24%混在する群集の歩行時は、全体の歩行速度がシニアの歩行速度にほぼ一致するという見解が得られた。以下、測定結果について検討する。

(1) 歩行距離に応じた移動速度の変化 (図 3)

長距離エスカレータ実験における、区間 2～4 の平均移動速度を比較した結果、エスカレータの状態や単独・群集等の歩行の状態によらず、健常者もシニアも、歩行距離の増加に伴う移動速度の低下は見られず、移動速度はほぼ一定であることが分かった(図 3)。また、長距離エスカレータ実験と短距離エスカレータ実験の移動速度は、その他の歩行条件が同じ場合、ほぼ一致しており、この程度の長さのエスカレータでは、歩行距離による移動速度の違いは生じないと判断できる。この傾向はシニアでも認められるから、日常的な歩行速度や歩行上の障害・制約条件にはよらないと考えられる。但し、インスタントシニアで長距離歩行時の高齢者の疲労まで再現できるかどうかは明らかではなく、実際の高齢者の歩行行動に対する距離の影響については今後の検討が必要である。

(2) エスカレータ稼動による移動速度の変化 (表 6)

エスカレータを速度 0.50m/s で稼動させると、平均移動速度は停止時に比べ、0.40～0.47m/s 増加することが確認できた。どの実験でも、エスカレータ稼動時の歩行速度が、停止時より僅かではあるが、低下する結果となったのは興味深い。

(3) シニア(遅い歩行者)が全体の歩行に及ぼす影響 (図 4, 表 6)

短距離エスカレータ停止時の単独移動速度(ケース 10)と群集移動速度(配置 A～C、ケース 18,22,24)を被験者毎に比較した結果を整理して、図 4 に示す。シニアは単独歩行時に比べて群集歩行時の移動速度がやや低下するものの、その変化は僅かであるのに対し、健常者は、先頭の被験者を除き全体的に移動速度が低下する。

配置 A 及び B では、健常者の移動速度は、ほぼシニアの移動速度に拘束され、ステップ幅が並行歩行に余裕のないエスカレータ上にシニアが点在すると、後続の被験者がシニアの影響を受ける様子を確認できる。特にシニアが 2 名横に並んだ場合は後続の歩行者が前方のシニアを追い抜けないことが顕著であり、シニアが並んでいなければ追い抜きを行う被験者も複数、存在した。配置 C は、シニアを右列のみに配置したため、左列の健常者はシニアの影響を受けずに歩行でき、混在時に比べて移動速度の低下を抑えることができた(図 4(c) 左列健常者 0.68m/s、右列健常者 0.51m/s、右列シニア 0.50m/s)。エスカレータ稼動時にも同様の結果が得られた。

なお、門倉らによる停止エスカレータ上の群集上昇歩行実験²⁾によると、高齢者やシニアを混在させた時の歩行速度は 1 層分のエスカレータでは平均 0.72m/s、4 層分の長距離エスカレータでは平均 0.70m/s であり³⁾、本実験の配置 A,B の場合よりかなり大きく、配置 C の場合に近い。本実験では、被験者 50 名中 12 名がシニアであるのに対し、門倉らの実験では、1 層分の実験では、被験者 41 名中

高齢者が 6 名、4 層分の実験では被験者 81 名中シニアが 2 名となっていて、高齢者・シニアの割合が小さいから、シニアの追い抜きの頻度は本実験よりも少なく、シニアが群集全体の歩行に及ぼす影響も相対的に軽微だったと考えられる。これより、歩行速度の異なる集団がランダムに混在する群集の歩行速度は、混在率の影響を受け、本実験のシニア混在率 24%では、ほぼ、歩行速度の遅い集団の影響が群集全体を支配すると判断できる。

3.2 歩行者密度およびエスカレータ歩行者流量 (表 8、表 9)

(1) 歩行者密度 (表 8、図 5)

歩行者密度を、エスカレータ入口での単位幅あたり通過人数の多い配置 A で求めると、エスカレータ停止時が 1.98 人/m²、稼動時が 1.95 人/m²と、停止時の方が僅かに密度が高いものの、ほぼ、2.0 人/m²であり、大きな差は見られない(表 8)。

エスカレータ上を定常的に歩行する上での、エスカレータ上の歩行者密度の上限は、ステップ 2 段当り 2 人、2.5 人/m²(図 5(1))と考えられるが、これは、「前の歩行者が上の段に足を踏み出すと同時に、後続の歩行者も上の段に足を踏み出す」という状態が、エスカレータ上の全歩行者で継続的に行われる場合であり、シニアの混在する群集では、ほぼ不可能と考えられる。実験値 2.0 人/m²は、2 段当り約 1.6 人(図 5(2))であり、シニア混在時にエスカレータ上を円滑に歩行できる密度の上限を表すと解釈できる。

図 4 短距離エスカレータ停止時の単独移動速度と群集移動速度の比較

図 5 エスカレーター歩行時の歩行者の様子

(2) 歩行者流量 (表 9)

エスカレータ上の歩行者流量 Mv (人/s)は下式で与えられるが、実験結果から Mv を計算すると、表 9 のように、歩行者の移動速度にほぼ比例する。

$$Mv=PeWVp=PeW(Ve+Vw) \quad \cdots \text{式(1)}$$

Pe

歩行者密度(人/m²)

W

エスカレータステップ幅(m)

Vp

エスカレータ上の歩行者の移動速度(m/s)

Ve

エスカレータ走行速度(m/s)

Vw

エスカレータ上の歩行速度(m/s)

表 9 エスカレータ入口通過人数と歩行者流量の比較
(短距離エスカレータ [W=1.0m])、ケース 18, 19

項目	停止時	稼働時
入口通過人数実測値, 人/s	1.16	1.78
歩行者密度実測値(Pe), 人/m ²	1.98	1.95
歩行速度実測値(Vw), m/s	0.51	0.42
エスカレータ走行速度(Ve), m/s	0.00	0.50
歩行者流量(Mv=PeW(Vw+Ve)), 人/s	1.01	1.78

エスカレータ入口通過人数が停止時に少ないのは、入口手前の水平面上の歩行速度の方がエスカレータ上の移動速度よりも大きく、入口で滞留が発生するためである。シニアの混在率や分布が変化すれば群集移動速度が変化し、歩行者流量も変化すると考えられるが、3.1(3)の考察より、本実験のシニア混在率 24%では、ほぼ、歩行速度の遅い集団の影響が群集全体を支配すると判断できたため、 Vw の観測値は、本実験条件のもとでは、移動速度の上限と判断できる。また、3.2(1)の考察より、 Pe の観測値はエスカレータ上を円滑に歩行できる密度の上限を表すと解釈でき、よって、表 9 に示す停止時の歩行者流量は、本実験条件のもとでは、その上限に達している。また、停止時のエスカレータ上の歩行者流量は入口通過人数より少ないが、入口手前からエスカレータ斜路部分まで進む間に歩行速度が増加して歩行者密度が低下し、エスカレータ上を一定人数が通過する時間が増加するためである。エスカレータ稼働時は、入口通過人数とエスカレータ上の歩行者流量が一致し、入口手前にも停止時のような滞留は認められなかったが、 Pe 値は停止時とほとんど変わらないから、稼働時の歩行者流量の観測値も、ほぼその上限に達していると解釈できよう。

3.3 エスカレータ入口の有効流動係数

(1) エスカレータの走行速度と入口の有効流動係数の関係

エスカレータ入口での単位幅当たり通過人数は、エスカレータ停止時は 1.1~1.2 人/(s・m)、稼働時は 1.6~1.8 人/(s・m)であった(表 7、配置 A)。前節の考察より、この単位幅当たり通過人数は入口先方のエスカレータ上の歩行者流量が制約されることによる有効流動係数を表すと解釈できる。更に、エスカレータ入口の有効流動係数はエスカレータ上の歩行者の移動速度に支配され、前項のように、入口通過可能な人数は、エスカレータ上の歩行者流量をやや上回るとすると、有効流動係数 Fe は、入口通過人数が、式(1)右辺の歩行者密度に、その上限値 $Pec=2.0$ 人/m²を代入して計算した Mv 値に一致するように設定すれば、安全側の計画を誘導する推定値が得られると考えられる。即ち、

$$Fe=Pec(Ve+Vw) = 2.0(Ve+Vw) \quad \cdots \text{式(2)}$$

但し、式(2)によると、エスカレータ走行速度を増加させると Fe が単純増加することになるが、 $Ve+Vw$ が増加すれば、 $PecW(Ve+Vw)$ が入口で通過可能な人数の限界を超えて歩行者密度が低下するはずである。エスカレータの走行速度が現状より著しく増加するとは考え難いが、本研究で対象とするシニアが混在した群集に比べると、健常者だけの群集の歩行速度は大きくなるであろうから、今後は、エスカレータの一般的な稼働条件の範囲で、群集の状態によって、 Fe 値が更にどう変化するかを把握することが望まれる。

(2) エスカレータの長さとの入口の有効流動係数の関係 (図 6、図 7)

表 7 のように、エスカレータ入口での単位幅当たり通過人数は、長距離エスカレータの方が短距離エスカレータよりも、停止時・稼働時とも 8~9%小さい結果となった。群集歩行速度は、表 6 のように短距離エスカレータの方が長距離エスカレータよりやや小さいので、このエスカレータ入口での単位幅当たり通過人数の違いは、短距離エスカレータの方が平均歩行者密度が高かったことを意味すると解釈できる。そこで、両方のエスカレータ稼働時の入口付近の長さ 1.2mの部分の密度の時間変化の様子を整理して、図 6 に示す。図 7 中の時刻は、先頭が測定区域に入った瞬間を基準とする経過時間である。群集密度が上下することに注目すると、短距離エスカレータでは、密度は最低でも 1.67 人/m²にしか低下しないが、長距離エスカレータでは、0.83 人/m²まで低下することが分かる。これは、長距離エスカレータでは、シニア混じりの群集が歩行する間にシニアの粗密が生じ、シニアが多い部分では追い抜きが困難になるため、群集が、シニアの粗密に対応するグループに分かれる傾向を示すのに対し、短距離エスカレータでは、歩行時間が短いため、群集の分

図 6 エスカレータ稼働時の入口付近群集密度の変化

図 7 (a) 出口到着順の到着時間差(停止)

図 7 (b) 出口到着順の到着時間差(稼働)

裂までには至らず、全体が、高い密度で歩行する傾向を示すためと考えられる。エスカレータ出口に被験者が到着する時間間隔($\Delta T_n = T_{n+1} - T_n$, T_n : n 番目に到着した被験者の到着時間)が、エスカレータの長さの違いによってどう変化するかを稼動・停止両条件について比較すると図 7 のようになるが、長距離エスカレータでは、5 秒を超える到着間隔が頻繁に発生し、それらの間の被験者がグループを形成しているのに対し、短距離エスカレータでは、目だって長い到着間隔は、集団の先頭と最後部の付近以外には見られない。このように、シニアが混在する群集の入口通過人数が、エスカレータの長さによって変わるの、エスカレータ上の群集歩行の特性に起因すると考えられるので、有効流動係数は、エスカレータの長さに依存すると結論できる。なお、ステップ幅は長距離エスカレータの方が約 2.5%大きい、通過をより容易にするほどの差とはいえない。

(3) 入口前の手摺設置・整列乗り入れが有効流動係数に及ぼす影響

手摺を設置(配置 A)したり、整列乗り入れ(配置 B)した場合、表 7 に示すように、エスカレータ入口での単位幅当り通過人数はやや低下し、低下率は稼動時に大きくなった。これは、手摺・整列乗り入れにより、入口手前の群集の歩行者流量が、団塊型の配置 A より低下するためと考えられる。

特に、エスカレータ稼動時は、入口手前で群集が整列する場合の入口手前の群集歩行速度が、エスカレータ上の移動速度より小さいから、エスカレータ入口通過人数は、エスカレータ手前の群集の歩行者流量に支配されると考えられる。一方、エスカレータ停止時には、水平面のシニアの群集歩行速度が $0.6 \sim 1.0 \text{ m/s}$ ³⁾ と本実験におけるエスカレータ上の歩行速度より大きいことから、エスカレータ手前の健康者を含む群集歩行速度は、エスカレータ上よりも大きく、エスカレータ入口通過人数は、手摺・整列等のない場合と同様、エスカレータ上の搬送可能流量によって決まると考えられる。表 7 にはエスカレータ停止時と稼動時のエスカレータ入口での単位幅当り通過人数を示したが、停止時のエスカレータ入口での単位幅当り通過人数に対する手摺設置・整列乗り入れの影響が軽微なのは、そのためと考えられ、シニアを片側配置した時にエスカレータ入口での単位幅当り通過人数が顕著に増加するのは、エスカレータ上でシニアの追い抜きが容易になり、シニアがランダムに存在する場合に比べて搬送可能流量が増大するためである。

3.4 階段・エスカレータの歩行速度の比較と併設時の経路選択

(1) 階段・エスカレータの歩行速度の比較 (図 8)

階段と併設されている短距離エスカレータにおいて、エスカレータ停止時の移動速度と階段の移動速度を被験者毎に比較して図 8 に示す。単独歩行時(ケース 10)は、階段を一段飛ばしで歩いた場合を除いて、健康者もシニアも、移動速度が階段(ケース 7)と大きくは変わらないが、78%の被験者において、停止エスカレータ歩行の方がやや速い結果となった(図 8 (a))。エスカレータは蹴上げ寸法が大きい分、一段で上昇できる距離が大きく、また、階段のように踊り場がないために歩行のテンポが一定である点は、特に健康者に対しては歩行速度を高める要因になっていると考えられる。エスカレータを歩行して上るという行為自体は、一般に予想されるほど困難ではないことが分かった。なお、シニア以外の階段平均歩行速度は 0.54 m/s であるが、階段の群集上昇歩行の既往実験では、健康者の歩行速度は、 0.46 m/s (文献 4・5)^{注 2)}、 0.56 m/s (文献 6)^{注 3)} となっ

おり、文献 4・5 が幅の狭い階段を使ったことにより、追い抜きが困難になったための歩行速度低下が認められる点を除き、本実験と大きな差はみられない。

一方、群集歩行時(ケース 18)は、逆に、停止エスカレータの方が、階段(ケース 9)より移動速度が遅い結果となった(図 8 (b))が、今回実験を行った施設は、エスカレータのステップ幅が約 1mであったのに対し、階段幅は 2.5m と広く、階段の方がエスカレータに比べ、歩行者密度も低く各自の自由な歩行が可能であり、追い抜き等もし易かったことに起因すると考えられる。階段であれエスカレータであれ、群集歩行速度は、遅い歩行者を追い抜けるかどうか大きく支配されるが、エスカレータはステップ幅がほぼ固定されているので(2名用なら約 1.0m)、幅が調整可能な階段に比べ、この影響が顕著に現れると解釈できる。

(2) エスカレータ・階段併設時の経路選択 (図 9)

エスカレータと階段の選択は、図 9 のように概ね被験者の目の前のものが選択された。この傾向は、エスカレータ停止時と稼動時とで特に変化はなく、更に、シニアの経路選択も、稼動時を含めて同様であった。こうした結果になったのは、高低差実験が 5.7m と比較的小さく、階段を上ってもあまり負担にならないこと、また、結果から見て被験者の行列とエスカレータ及び階段の入口の間隔が短く、経路選択が制約された可能性があることも影響していよう。

(a) 単独歩行時(ケース 7 と 10) (b) 群集歩行時(ケース 9 と 18)
● 階段を一段飛ばしで歩行した被験者

図 8 階段と停止エスカレータの比較

図 9 経路の選択

4. 結論

本実験より、エスカレータを利用する上方への避難について、以下のように結論できる。

- (1) エスカレータ停止時の単独歩行速度は、健康者が $0.78 \sim 0.79 \text{ m/s}$ 、シニアが約 $0.50 \sim 0.53 \text{ m/s}$ であり、階段の上方歩行時と特に変わらない。
- (2) エスカレータ稼動時の単独歩行速度は、健康者が $0.71 \sim 0.76 \text{ m/s}$ 、シニアが約 0.43 m/s と、停止時に比べて、各々僅か

に低下する。

- (3) エスカレータ上の健常者の歩行速度は、高低差 22m までの範囲では歩行距離によって低下することはない。インスタントシニアについても同様であったが、疲労やステップ高さが大きいことが高齢者の長距離上昇歩行に及ぼす影響は今後、解明する必要がある。
- (4) エスカレータのステップ幅は円滑な追い抜きにはやや不足すること、また、シニアが並ぶと追い抜きができなくなることから、歩行速度の異なる集団が混在する場合、群集歩行速度は、歩行速度の遅い集団の歩行速度に近くなる。歩行速度の遅い歩行者がエスカレータ上で並ぶ可能性は、その混在率が高いほど高まるから、歩行速度の異なる集団が混在することによる群集避難行動への影響は、その混在率にも依存すると考えられる。本実験では、インスタントシニアの混在率が 24%と、現在の鉄道利用者の高齢者率より高めになっており、避難誘導をより合理的にするには、健常者のみの群集を含め、混在率と群集避難行動への影響の関係をより詳しく把握する必要がある。
- (5) インスタントシニアが混在する群集のエスカレータ入口の有効流動係数は、エスカレータ停止時で約 1.16 人/(s・m)、稼動時で 1.78 人/(s・m)となり、エスカレータ上の歩行者の移動速度にほぼ比例する。即ち、エスカレータを稼動して避難に利用できれば、移動速度が増加するだけでなく、有効流動係数の増加による避難可能人数の増加を期待できることになる。
- (6) エスカレータ入口手前の水平面に手摺りを設けると、エスカレータ稼動時には、手摺りがない場合に比べて入口通過人数が低下する。これは、群集が整流されると、水平面上の歩行速度が稼動中のエスカレータ上の移動速度よりも低下し、入口手前に滞留が生じなくなるためである。
- (7) エスカレータ入口の有効流動係数は、歩行速度の異なる集団が混在する群集では、エスカレータが長いほど、低下傾向を示す。これは、長距離歩行の間に遅い歩行者の分布に粗密が生じ、追い抜きが極めて困難な場所が局所的に発生することによって、群集全体に粗密が生じるためである。
- (8) 歩行速度の遅い集団の混在率が高い場合、遅い集団をエスカレータの片側に集中させれば、エスカレータ上の歩行者流量は目だって増加する。
- (9) エスカレータを円滑に上昇歩行する時の歩行者密度の上限は約 2.0 人/m²である。
- (10) エスカレータ手前に手摺を設けたり、予め歩行者を 2 列に整列させたりすると、群集が団塊状になる場合に比べ、入口手前の歩行者流量が減少し、エスカレータ入口の通過人数が減少する。この影響は、エスカレータ稼動時に特に大きい。これは、エスカレータ稼動により、入口の有効流動係数が上昇し、手前の単位幅当り水平歩行者流量が有効流動係数に及ばなくなるためと考えられる。
- (11) 歩行者を 2 列に整列させ、シニアをその一方に集中させた場合、健常者のみの列の群集歩行速度は 0.68m/s と、健常者単独歩行時にやや接近する。入口手前の健常者の水平歩行速度も上昇するため、エスカレータ停止時の入口通過人数は、シニア混在時に比べ、顕著に増加する。

以上、本実験では、歩行速度の遅い歩行者を含む群集についてエスカレータによる上昇避難の可能性を検討するための基本的な諸量を把握し、エスカレータを避難方向に稼動させて活用することの効果について見通しが得られた。本実験では、群集におけるシニアの割合を一定 (24%) としたが、エスカレータ上の群集歩行性状は、シニアの割合に大きく影響されると予想されるため、シニア率と群集歩行行動の関係の把握等も今後の重要な課題である。一方、エスカレータの避難利用には、避難方向と逆に走行するエスカレータの停止、その逆走への転換が必要である。このうち、エスカレータを停止することは、エスカレータを階段代わりに避難に利用する場合も必要であり、これらを安全に行うための装置の性能と運転方法の検討も必要である。また、本実験では、地下からの避難を想定して上昇避難だけを考慮したが、地上駅舎等にも見られるエスカレータのみの昇降路では、下方避難にも使われる可能性があるから、下方避難時の歩行行動についても同様の検討が必要である。

謝辞

本実験は、セコム科学技術振興財団の助成研究「都心地下空間のセキュリティ・ハザードマップ」により実施し、分析の一部は、科学研究費補助金「都心地下空間における街区・地下道一体型防災計画手法の開発」により実施した。実験施設の利用については、株式会社東京ビッグサイトに多大な協力を頂きました。実験・分析にあたり、当時、早稲田大学大学院生の平川和孝、武盛功太、蛇石貴宏、盧韻琴他、早稲田大学長谷見研究室の各位に多大な協力をいただきました。

参考文献

- 1) 森山修治・岡田尚子・長谷見雄二・他：エスカレータを用いた避難行動特性に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2 分冊 pp.67-70,2008.9
- 2) 門倉博之，佐藤歩，岡部弘志，西田幸夫，辻本誠，関沢愛：停止エスカレーターにおける避難行動特性に関する実験的研究 その3 エスカレーターの高低差と歩行速度，日本火災学会研究発表会梗概集，pp.68-69,2008.5
- 3) 古川容子，土屋伸一，稲原攝雄，長谷見雄二：高齢者擬似体験用具による高齢者の群集時歩行行動の再現可能性 高齢者が混在する群集の避難行動モデル化に関する研究：日本建築学会計画系論文集，NO. 581，pp.9-14,2004.7
- 4) 土屋伸一，森山修治，浜曉也，渡辺大地，長田悠平，小川純子，神忠久，長谷見雄二：津波避難ビルにおける階段歩行特性に関する実験研究 その1 実験概要及び階段上昇時の単独歩行特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，E-1 分冊，pp905-906,2006
- 5) 森山修治，長田悠平，土屋伸一，小川純子，浜曉也，神忠久，渡辺大地，長谷見雄二：津波避難ビルにおける階段歩行特性に関する実験研究 その2 階段上昇時の群集歩行特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，E-1 分冊，pp907-908,2006
- 6) 萩原一郎，北後明彦：地下空間からの避難計画 階段における連続昇降実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，A 分冊，pp1327-1328,1992

注

- 注1) 歩行速度は、エスカレータ出入り口の水平路を除いた斜路部分のみで測定した結果である。
- 注2) 被験者 50 名中インスタントシニア役 12 名の群集で実験を行った。シニア役の配置は本論文の実験と類似したランダム配置である。歩行速度は斜面速度を表す。
- 注3) 論文内では、歩行速度が水平方向 0.5m/s、垂直方向 0.26m/s と表わされているので、斜面速度に換算した。被験者数 23 名で、全員が 50 歳未満である。

(2010年11月9日原稿受理，2011年6月21日採用決定)