

人間避難行動の動力学的シミュレーションに関する実験的研究

九州大学工学部 学 ○井上 裕章 九州大学大学院 正 善 功企  
九州大学大学院 正 陳 光斉 九州大学大学院 正 笠間 清伸

1. はじめに

災害時の人間避難行動は、多くの要素（例えば、人の行動力、心理要素、環境要素）の影響で非常に複雑な現象である。これまでの研究においては、磁場モデル<sup>1)</sup>やポテンシャルモデル<sup>2)</sup>など多くの避難行動モデルが提案されている。その一方で、避難行動は3つの物理量（時間、速度、距離）間の関係で表され、動力学的观点からアプローチすることができる。

そこで、本研究では、避難時の人間行動を動力学的に捉え、避難行動をより現実的にシミュレーションでできるシステムの開発を目的としている。今回は、避難環境における人間行動特性を求めるため、避難行動を対象とした各種走行実験を行った。

2. 動力学モデル

平常環境で人間が全力前進する場合、速度の変化パターンは図-1(a)のように、加速期・全速期・減速期とに分けられる。一般的に避難時間は長くないため、減速期を除くと、人間固有の能動力  $F$  と速度に比例する抵抗係数  $k$  の導入によって、式(1)のような動力学微分方程式で表現することができる。

$$m \frac{d^2 \bar{u}}{dt^2} + k \frac{d\bar{u}}{dt} = \bar{F} \quad (1)$$

初期条件、 $t=0$  ;  $v=0$  の下で式(1)を解くと、

$$v = v_{\max} (1 - \exp(-\frac{k}{m}t)) \quad (2)$$

また、条件、 $t \rightarrow \infty$  ;  $v=v_{\max}$  において、

$$k = \frac{F}{v_{\max}} \quad (3)$$

ここで、 $m$  : 質量(kg)  $k$  : 抵抗係数(kg/s)  $F$  : 能動力(kg・m/s<sup>2</sup>)

一方、避難環境における走行速度の変化パターンは、避難経路中にある障害及び周囲の避難者からの影響等により、図-1(b)のように複雑な曲線になる。この複雑な速度変化を表す影響要因を抵抗力  $\bar{f}_i(t)$  として、それを式(4)に示す運動微分方程式に導入して表現する。

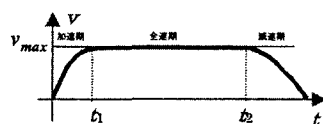
$$m \frac{d^2 \bar{u}}{dt^2} + k \frac{d\bar{u}}{dt} = \bar{F} + \sum \bar{f}_i(t) \quad (4)$$

式(4)において、能動力  $F$  及び抵抗係数  $k$  のほか、避難行動の抵抗力  $\bar{f}_i(t)$  を導入することにより、避難行動を動力学的にモデル化できる。

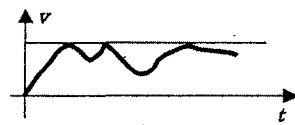
3. 実験概要

以下の2点の基礎的な走行実験を行い、平常走行時の抵抗係数  $k$  と能動力  $F$  及び階段昇降時の周囲の人間から受ける抵抗力  $\bar{f}_i(t)$  を算出した。

- i) 個人の能動力に関する実験として、20代男性 11 人による 50m 全力走行実験及び階段昇降実験を行い、速度低減割合を調べた。階段は計 21 段の階段(蹴上げ/踏み面=0.47)で行い1段ずつ昇降することとした。
- ii) 20人・50人・100人の集団における階段走行実験を行った。階段はスタートから1階分昇った(降りた)後の計 12 段の階段(蹴上げ/踏み面=0.56)における、集団 1 人ひとりの平均速度を計測した。この実験は避難時を想定して行った。



(a) 平常環境での速度変化



(b) 避難環境での速度変化

図-1 速度の変化パターン

表-1 平均・分散・相関係数

		平均 分散	
		平均	分散
50m全力 走行	質量(m)	64.55	54.07
	速度(v)	7.68	0.48
	抵抗係数(k)	73.71	290.87
	能動力(F)	558.42	8815.01
階段上り	質量(m)	64.55	54.07
	速度(v)	1.41	0.03
	抵抗係数(k)	144.11	2678.20
	能動力(F)	203.68	5578.56
階段下り	質量(m)	64.55	54.07
	速度(v)	1.53	0.06
	抵抗係数(k)	126.14	2415.91
	能動力(F)	193.97	7670.04

50m全力 走行	相関係数			
	質量(m)	速度(v)	抵抗係数(k)	力(F)
質量(m)	1.0000	-0.4812	0.8813	0.8743
速度(v)	-0.4812	1.0000	-0.7037	-0.3458
抵抗係数(k)	0.8813	-0.7037	1.0000	0.9060
能動力(F)	0.8743	-0.3458	0.9060	1.0000

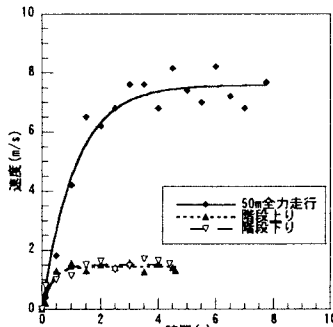


図-2 50m 全力走行・単独階段昇降

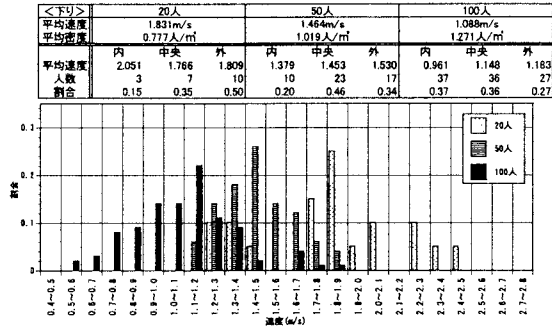


図-3 集団階段下り走行

#### 4. 実験結果および考察

i) 50m 全力走行実験と階段昇降実験の結果をそれぞれ表-1 及び図-2 に示す。ここで、単独走行時の最高速度  $v_{max}$  と抵抗係数  $k$  は、実験値を式(2)で回帰して算出した。平常環境下では 5 秒前後で最高速度に達し、その後ほぼ一定となる。また、階段昇降では上り・下りとも 1.5 秒前後で最高速度に達し、最高速度は大きく減少して平常環境下の約 1/5 程度になる。平常環境下では、質量  $m$  と抵抗係数  $k$  の相関係数は 0.88 でかなりの相関があり、 $k = 2m - 60$  の関係があった。階段昇降における質量と抵抗係数の相関はほとんど見られなかった。

ii) 集団走行時の代表的な実験結果として、階段下りの場合の走行結果を図-3 に示す。上り・下りとも、平均速度に関しては 20 人 > 50 人 > 100 人となった。図-4 は階段における周囲の人間から受ける力を  $\bar{f}_i(t)$  として表したものである。この場合の抵抗力  $\bar{f}_i(t)$  は、式(2)で回帰して得られた単独昇降実験の避難を想定した場合の最高速度  $v_{max}$  と抵抗係数  $k$  をもとに、式(3)より能動力  $F'$  を求め、 $F' - F = \bar{f}_i$  として算出した。1 人 < 20 人 < 50 人 < 100 人と密度が大きくなるにつれて、受ける力が大きくなることを示している。20 人下りの場合の受ける力が単独昇降の場合より若干大きいのは、使用階段が異なったためであると考えられるが、20 人下りの平均密度は約 0.8 人/m<sup>2</sup>なので、20 人程度までの階段下行ではそれほど周囲の影響はないと予想される。

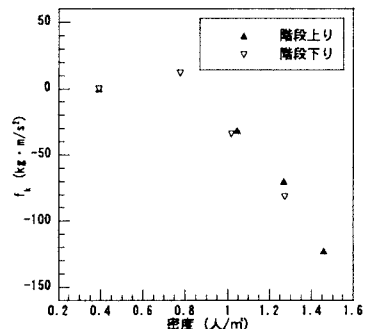


図-4 密度と周囲の人間から受ける抵抗力の関係

#### 5. 結論

避難行動モデルを動学的に解明し、実験値を用いて平常走行時と階段昇降時の抵抗係数  $k$  及び能動力  $F$ 、また、階段昇降時の周囲の人間から受ける抵抗力  $\bar{f}_i(t)$  を算出した。動力学モデルは、人間固有の能動力  $F$  及び抵抗係数  $k$  のほかに、避難時の避難行動の障害となる要因、例えば、階段やコーナーや路面状況、周囲の避難者による影響などを抵抗力  $\bar{f}_i(t)$  として、式(4)で表される運動微分方程式に導入することによって、より現実的な避難行動シミュレーションが可能となることがわかった。

#### 6. あとがき

避難環境における人間行動特性を求めめるため、20 代男性における平常環境を想定した 50m 全力走行実験と避難環境を想定した階段昇降実験を行い、それらを比較した。今回は、20 代男性のみのデータを用いたが、今後は、性別や各年齢層におけるデータを得たうえで、それらを動力学微分方程式に導入することにより、人間避難行動を動力学モデル化することが可能であると思われる。また、抵抗係数  $k$  や能動力  $F$  の関係を解明し、方向変更や路面状況などさまざまな避難環境を想定した抵抗力  $\bar{f}_i(t)$  を算出することが課題である。

<参考文献> 1) 岡崎甚幸: 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 - その1 磁気モデルの応用による歩行モデル、日本建築学会論文報告集、第 283 号, pp111-117, 1979 など 2) 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄: 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用、土木学会論文集、No.513/1-31, pp225-231, 1995