

# 避難経路上の障害物による避難時間の遅れの影響を考慮した避難安全性評価手法

本研究で提案する避難安全性評価手法は、避難経路をネットワークモデル化し、①避難距離の増大による避難経路の信頼性の低下 ②扉、段差、隘路などの避難障害による避難経路の信頼性の低下 を同時に考慮するところに、新規性と独創性がある。ビルディングタイプの特性や、自力避難が困難な高齢者や障がい者の避難行動能力を反映した避難安全性評価が可能になるため、上位の目標である“避難安全のバリアフリー”の評価手法としても活用可能である。

## 1. はじめに – 研究の社会的背景

日本は、先進国で最も急速に高齢化が進み、2018年の高齢者（65歳以上）の人口は3,558万人で、総人口に占める割合（高齢化率）は28.1%に達している。このような社会状況を踏まえ、ハードビル法（1994年）と交通バリアフリー法（2000年）を発展的に統合した「高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律」（バリアフリー法）が2006年12月に施行さ

れ、ハード・ソフト双方の総合的なバリアフリーの施策が推進されてきたが、2020年に東京オリンピック・パラリンピック、2025年に大阪万博開催控え、健康者と比べて避難行動能力が低い高齢者や障がい者、日本語が理解できない外国人観光客などの避難安全を確保することは喫緊の課題である。現在、建築基準法には、従来の仕様規定による方法（ルートA）、告示で定められた

検証方法（ルートB）、告示で定められた検証法以外を用いて国土交通大臣の認定を受ける方法（ルートC）の三つの避難安全性評価法が規定されているが、いずれの方法も原則として健康者の避難を前提にしており、避難経路上の扉、段差、狭隘部等による高齢者や障がい者等の避難行動への影響や障害物による避難時間の遅れは、ほとんど考慮されていない。

## 2. 避難経路上に存在する避難障害の影響

避難経路上には扉、段差、傾斜、家具類や物品等による狭隘部、通路の折れ曲がり等、さまざまな避難障害が存在する。また、同じ避難障害でも、避難者の身体上の障がいの有無・程度、年齢、体格、体力等によりその影響の程度が異なる。表1に示す建設省の「住宅防火安全性評価法」は、住宅の平面をノードとパスでネットワークモデル化し、避難経路となるパス上に存在する扉、階段、窓等、18種類の“個別

経路信頼度”の値を与えている点で画期的である。だが、この評価法は ①健康者の避難を前提としており、避難行動能力の違いや扉の種類の違いによる信頼度の差が考慮されていない ②住戸内部の避難を想定したもので大規模な建物の避難安全性評価には適さない 等の問題点がある。また、ここでの“信頼度”は確率で定義されるような厳密なものではなく、ただ安全らしさの程度についての相対的序列を表すだけの

便宜的な尺度に過ぎないため、簡便な評価法であるが、高い精度は期待できない。

表1 個別経路信頼度の一例  
【出典】日本建築学会 建築計画委員会：安全性の評価手法、p.34、彰国社、1987年

分類	図解		信頼度
	断面	平面	
内部空間 ↓	1. 開口		0.8
	2. 2枚引違い扉		0.6
内部空間	3. 1枚ドア		0.5
	4. 階段		0.1

## 3. 避難距離による信頼度の低下モデル

指数関数  $r(d)$  は、避難経路の信頼度の距離減衰を表すモデルに必要な、以下の数学的性質を有している。

- [1]  $\lim_{d \rightarrow 0} r(d) \rightarrow 0$
- [2]  $r'(d) < 0$  (単調減少関数)
- [3]  $\prod r(di) = r(\sum di)$

図1は、[3]により頂点A～B間の任意の位置に頂点を追加あるいは削除しても、頂点A～B間の信頼度が変化しないことを示す。すなわち、ある避難経路間に新たな避難経路を接続する、避難経路の接続位置を変

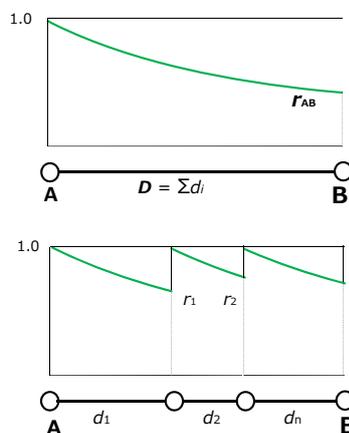


図1 2頂点間のパス上に任意の頂点を追加・削除した場合の2頂点間の信頼度

信頼度の距離減衰を指数関数  $r(d)$  とすると、 $A \rightarrow B$  の信頼度

$$r_{AB} = r(D) = r(\sum di)$$

$$= \prod r(di) = \prod ri \quad \dots (1)$$

式(1)は、避難経路の信頼度の距離減衰を指数関数でモデル化することで、頂点A～B間（距離D、通過信頼度  $r_{AB}$ ）の任意の位置に複数の頂点を追加したり既存の頂点を削除したりしても、 $A \rightarrow B$ 間の通過信頼度  $\prod ri$  の値は一定（ $r_{AB}$ ）であることを表す。



# 避難経路上の障害物による避難時間の遅れの影響を考慮した避難安全性評価手法

える、避難経路を削除する等の操作を加えても、その避難経路の信頼度の距離減衰に影響しない。

さらに、避難経路の信頼度の距離減衰を指数関数でモデル化することは、以下に示す利点がある(図2)。

距離が  $d_1$  から  $\Delta d_1$  だけ増加すると、信頼度は  $r(d_1)$  から  $r(d_1 + \Delta d_1)$  に低下する。同様に、距離  $d_2$  から  $\Delta d_2$  だけ増加すると、信頼度は  $r(d_2)$  から  $r(d_2 + \Delta d_2)$  に低下

する。

$r(d)$  は指数関数であるから、 $\Delta d_1 = \Delta d_2$  であれば  $d_1, d_2$  の値によらず、常に

$$\frac{(d_1 + \Delta d_1)/r(d_1)}{= r(d_2 + \Delta d_2)/r(d_2)} \dots (2)$$

が成り立つ。これは、避難経路 A → B 間の信頼度の低下は、避難障害の位置に影響されない(距離減衰に影響を与えない)ことを意味する。

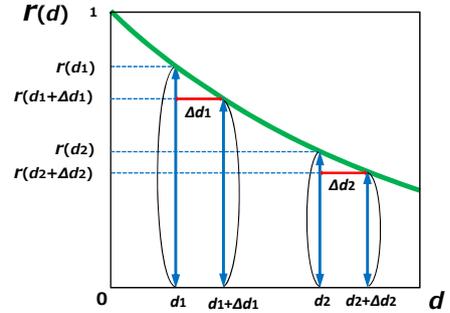


図2 避難障害の位置と信頼度の関係

## 4. 避難障害の通過信頼度のモデル

避難経路の信頼度の値が、避難経路上の避難障害の存在により不連続的に低下する現象を、以下の方法でモデル化する。

避難経路上の  $d_i$  地点に存在する障害物により、信頼度が避難距離が  $r(d_i)$  から  $r(d_i + \Delta d_i)$  に不連続的に低下する場合を考える。

図3は、信頼度が  $r(d_i)$  から  $r(d_i + \Delta d_i)$  に不連続的に低下すること、避難距離が  $\Delta d_i$  (m) だけ長くなるのが同等であることを表す。避難障害を通過することは、通過による時間損失  $t$  (秒) と通過時の避難速度  $v$  (m/秒) の積だけ避難距離が長くなることと同等とみなし、避難距離の増分を  $\Delta d_i$  (m) として  $r(d_i + \Delta d_i)$  の値を求め、避難経路上

の  $d_i$  地点に存在する避難障害物の通過信頼度を、以下の式で定義する。

$$h_i = r(d_i + \Delta d_i) / r(d_i) \dots (3)$$

式(3)より、避難障害の通過信頼度は障害の通過による時間損失と避難障害を通過するときの平均速度を計測し、その積である避難距離の増加を求めることで得られる。また3で示したように、 $\Delta d_i$  の値が同じであれば、通過信頼度  $h_i$  の値は避難障害の位置 ( $d_i$  の値) に影響されない。

避難経路上に  $n$  個の避難障害がある場合の避難経路の信頼度  $r_n$  は、障害がない場合の信頼度と各障害の通過信頼度の総乗の積になり、次式(4)で表される。

$$r_n(d) = r_0^{d/d_0} \cdot \prod h_k \dots (4)$$

( $k = 1, 2, \dots, n$ )

$h_k$  :  $k$  番目の避難障害の通過信頼度  
 $d_0$  : 基準距離

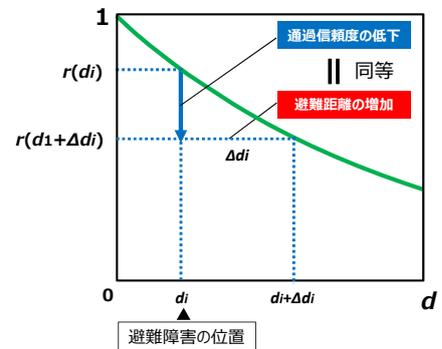


図3 避難障害の通過信頼度のモデル化の概念図

## 5. 基準距離と基準辺の信頼度の設定

避難経路の信頼度を式(4)で評価するため、評価対象建物の機能特性や空間特性に応じて、式(4)に含まれる次式(5)の  $d_0$  と  $r_0$  の値を設定する(図4・図5)。

$$r(d) = r_0^{d/d_0} \dots (5)$$

$d_0$  : 基準距離 (m)

建物用途別に建築基準法に定められた直通階段までの最大歩行距離 (30, 40, 50, 60 等)

$r_0$  : 基準距離  $d_0$  における基準辺の信頼度 ( $0 < r_0 \leq 1$ )

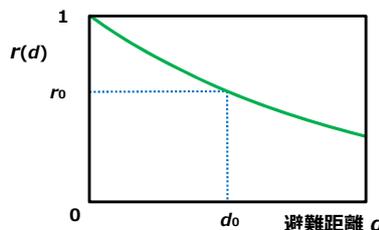


図4 基準距離  $d_0$  と基準辺の信頼度  $r_0$  の関係

$d_0$  : その用途に要求される避難安全性が高いほど小さく設定する(6の計算では60mを採用)  
 $r_0$  : 避難経路の管理状態が悪い用途ほど小さく設定する(6の計算では0.6を採用)

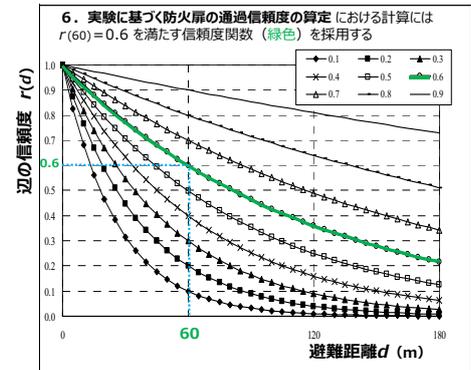


図5  $d_0$  と  $r_0$  による信頼度関数の決定

# 避難経路上の障害物による避難時間の遅れの影響を考慮した避難安全性評価手法

## 6. 実験に基づく防火扉の通過信頼度の算定

片まひ者23名を被験者とし、6mの直線経路上に設置した防火扉を押して通過する場合・引いて通過する場合（取手は図6の4種類）の6mの移動時間と扉がない場合の移動時間の差（遅れ時間）を計測し、

[遅れ距離] = [歩行速度] × [遅れ時間] を求めた（表2）。取手が a. ケースハンドル の場合の遅れ時間、遅れ距離の結果をそれぞれ図7・図8に示す。図7と図8のばらつきを変動係数CV（=標準偏差/平均値）

で比較すると [遅れ時間のCV] > [遅れ距離のCV] となることが確認できる（他のタイプの取手でも同様）。図8の平均遅れ距離  $\Delta d = 5.18$  (m) を式 (3) に代入し、通過信頼度  $h = 0.957$  を得る（表3）。



図6 防火扉の取手の種類（取り替え可能）

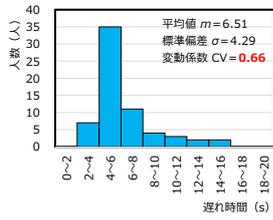


図7 引いて開ける防火扉の遅れ時間（取手がケースハンドルの場合）

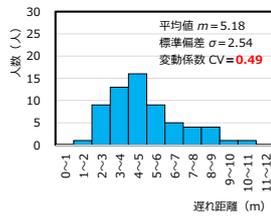


図8 引いて開ける防火扉の遅れ距離（取手がケースハンドルの場合）

表2 防火扉の通過実験の概要

被験者の属性	片まひ者23名（左まひ13名・右まひ10名）	43~84歳
実験内容	6mの距離を移動するのに要する時間の計測	
設定条件	実験1：6mの直線経路上に扉なし 実験2：扉を押して通過 実験3：扉を引いて通過（a~dの4種類の取手について実験）	

表3 遅れ距離の平均値から求めた防火扉の通過信頼度

	実験2	扉を引いて通過			
		実験3a	実験3b	実験3c	実験3d
平均遅れ距離 $d$ (m)	2.99	5.18	4.45	4.34	3.82
防火扉の通過信頼度 $h$	0.975	0.957	0.963	0.964	0.968

## 7. 評価事例：実火災建物を対象としたケース・スタディ

### ●評価対象建物の概要（図9・図10）

30人の死者が出た鉄筋コンクリート造3階建てのホテル火災の3階平面を評価対象とする。305~308号室の客は緑側の外の2階レベルにあるバルコニーに飛び降りて助かったが、浴室と301~303号室にはバルコニーがなかったため、室内で計15人が死亡した。

避難距離には、障害による増分  $\Delta d_i$  を加味した値を用いる。避難障害による  $d_0$  と  $r(d_0)$  は、以下のように設定する。

- $d_0$  : ①ホテル ②居室及び避難路の内装が準不燃材料 ③14階以下に該当する建築基準法の直通階段に至る歩行距離の上限値で

ある60(m)とする

$r(d_0)$  : 避難経路の管理状態が悪いと仮定し、 $r(60) = 0.6$  とする（図5の緑色の線）

### ●評価結果

各頂点からいずれかの避難完了頂点に至る避難経路の信頼度の最小値  $q_{min}$ （最小避難可能確率）で、避難安全性を評価する。実際の計算過程は複雑であるためここでは割愛し、表4に結果の一部を示す。バルコニーの追加が効果的であることがわかる。

このように、中廊下の危険性、避難経路の冗長性を高めることの有効性等の定量的な比較検討が可能である。

表4 避難安全対策による最小避難可能確率\*の向上

避難安全対策	避難経路の状況	最小避難可能確率 $q_{min}$
対策なし (火災当時と同じ状態の平面)	すべての辺が通行可能	0.728
	廊下に煙が充満し通行不能	0 (避難不能)
	頂点14が通行不可	0 (避難不能)
屋外避難階段を1か所追加 (中廊下の両端から屋外避難階段に避難可能)	すべての辺が通行可能	0.853
	廊下に煙が充満し通行不能	0 (避難不能)
	頂点14が通行不可	0 (避難不能)
両端で屋外避難階段に接続する連続バルコニーを追加	すべての辺が通行可能	0.960
	廊下に煙が充満し通行不能	0.712
	頂点14が通行不可	0.712

\* 最小避難可能確率は、障害物（ここでは扉）による避難距離の増分  $\Delta d_i$  を加味した各辺の通過信頼度をもとに計算している

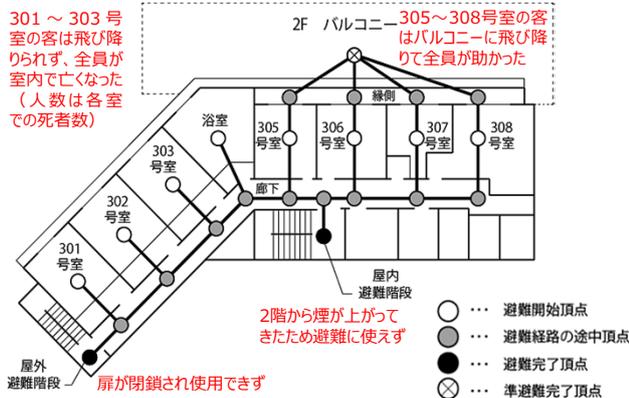


図9 火災発生時のホテル3階平面状況とそのネットワークモデル

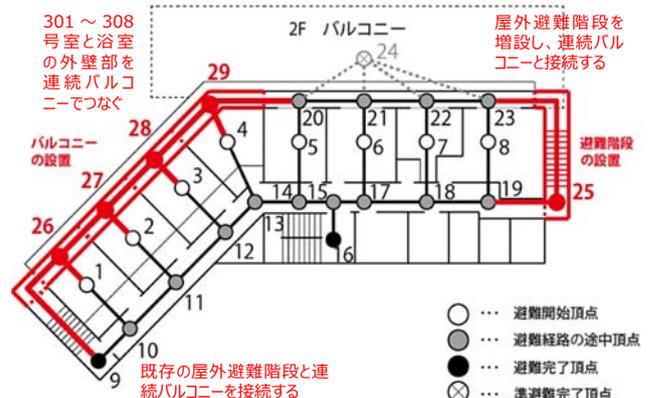


図10 避難安全対策を反映した3階平面のネットワークモデル