

建築火災時の避難安全に係わる評価技術の開発

山口 純一

Development of Evacuation Safety Evaluation Methods for Building Fire

Jun-ichi Yamaguchi

Abstract

This article discusses the problems with the calculation method that is generally used in evacuation safety design based on an engineering method. It also introduces simple calculation methods for the evacuation behavior and smoke dispersion prediction that have been developed in recent years. This evaluation method has the following features: 1) it can predict the pre-movement time for a fire room with a complex shape; 2) it can calculate the queuing time for a fire room in consideration of a crowd in the corridor; and 3) it can evaluate the necessary stair width and area.

概要

本稿では、避難シミュレーション等の予測手法を用いて避難安全性を評価する設計手法（ルートC）に関わる各種予測技術について、現在一般に使用されている告示計算法（ルートC）の課題を示すとともに、その課題解決を目的として近年開発した避難行動予測および煙拡散予測に関わる評価法を紹介した。本評価法の特長は以下の通りである。1)複雑な平面形状を持つ火災室の避難開始時間の予測が可能である。2)廊下の滞留状況を考慮した火災室の滞留解消時間の予測が可能である。3)階段幅および階段面積の評価が可能である。

1. はじめに

建築火災を対象とした避難安全設計では、火災発生時の在館者の避難安全性を確保するため、建物の空間特性や在館者の特性に応じて適切な避難経路を確保し、その避難経路を保護するための対策を講じることが重要である。避難安全設計の設計ルートは、建築基準法に定められた仕様基準に基づき設計する方法（ルートA）と、設計火源と避難安全性に関わる許容値（一般的には、避難完了時点の煙層下端高さ \geq 床面+1.8m）を定め避難シミュレーション等の工学的手法を用いて避難施設等の設計を行う方法（ルートBまたはC）がある。後者の方法によって避難安全性が確かめられた場合、ルートAにおける避難関連規定の一部を適用除外とすることができる¹⁾。

後者においては、シナリオ（工学的予測の難しい人の判断を伴う行動）と許容安全基準（限界煙層高さなど）は避難安全性を決定する2要素である。広い意味では予測計算法に含まれる安全率も安全性に影響を与えるが、予測計算法には一見して分からないような安全率が組み込まれていることが多く、安全性を確保する仕組みが一般の設計者等には見えにくい。上記の2要素に基づき安全性をコントロールするのが一般的である。

予測計算法の役割は2つある。1つは、避難行動や煙流動のイメージを具体化することである。もう一つは、避難計画や煙制御計画の効果を定量的に示し、それらと避難安全性（許容基準）とを結びつける役割である。一般的な予測計算法として、平成12年告示第1441号または第1442号に定められる避難安全検証法（以後、告示計

法）がある。しかし、告示計算法は、床面積が小さい程検証が成立し難く床面積が大きくなるほど検証が成立し易いこと、室形状が考慮されないこと、出口配置や出口幅の下限値が評価できないことなどの課題がある。そのため、告示計算法を用いる場合には、室形状や階段幅等について学会が定めた基準²⁾または各評価機関が定める内規（以後、学会基準等）に適合することが必要となる。

そこで本稿は、学会基準等に適合しない場合においても使用可能なより高度な予測計算法の整備を目的として開発した避難安全に係わる評価技術を紹介する。なお、本稿で紹介する予測計算法は既に幾つかのプロジェクトに適用され、コストダウンやレンタブル比の向上に貢献している。

2. 評価法の概要

本評価法の特長を告示計算法と比較して Table 1 に示す。本評価法は、居室避難（火災室から廊下に至るまでの避難）および階避難（廊下から階段に至るまでの避難）を対象とする。居室避難、階避難ともに、避難完了時間の予測に関わる計算法を開発・改良した。避難完了時間は、避難開始時間 t_{start} [s]、歩行時間 t_{travel} [s] および滞留解消時間 t_{queue} [s] に基づき予測されるが、以下では特に避難開始時間 t_{start} と滞留解消時間 t_{queue} を予測する上での課題、告示計算法および本評価法の扱いを示す。

(1) 居室避難－避難開始時間－テナント事務所や商業施設における間仕切り壁の位置や形態は多様である。避難安全性の観点では、貸室内が複数の居室に間仕切られ、さらに複雑化すると非火災室在館者の火災覚知

が遅れ、それに伴い危険性が高くなる (Fig. 1 参照)。このような覚知の遅れが想定される場合、告示計算法に基づき避難開始時間を設定すると、火災室と非火災室の避難開始時間に一定の遅れ (一般に一律 180s を加算) を見込むため、特に非火災室である居室の検証が成立しにくいという課題がある。また、短時間で検証結果を得ることが可能な予測計算法があれば便利である。これらの課題に対して、本評価法は、貸室内が複数の居室に間仕切られた (非火災室が発生した) 場合の避難安全検証において、室形状を考慮した煙拡散性予測に基づき非火災室の避難開始時間を予測する簡易計算法を開発し、Fig. 1 のような空間の予測を可能とした。

(2) 居室避難—滞留解消時間— 居室 (火災室) の滞留解消時間は、Fig. 2 に示すように、廊下の滞留の影響や非火災室在館者の合流の影響を受ける。告示計算法では、廊下等に在館者全員を収容可能な滞留面積が確保されていることを前提とし、それを満足しない場合には廊下等を無視して階段等のネックにおける流出速度 (以後、流動量[人/s]) に合流等の影響を考慮して滞留解消時間を予測する。そのため、滞留面積が足りない場合には廊下の設置の有無に関わらず滞留解消時間が長くなる結果となる。また、それを回避するためには、特に在館者数の多い物販店舗等において、床面積の大きい廊下が必要となる。これらの課題に対して、本評価法は、廊下等の滞留性状を非火災室在館者の流入等を考慮して予測する簡易計算法を開発し、廊下等の滞留面積が不足する場合でも予測することを可能とした。

(3) 階避難—滞留解消時間— 火災が発生した階 (以後、火災階) における避難 (以後、階避難) における滞留解消時間も居室避難と同様、Fig. 3 に示すように、階段内の滞留の影響や非火災階在館者の合流の影響を受ける。告示計算法は、(a) に示すように、非火災階在館者の合流の影響を考慮しない代わりに、階段や付室において十分な滞留面積が確保されていることを前提としている。一方、本評価法は、(b) に示すように、非火災階在館者の合流を考慮して滞留解消時間を予測することにより、階段幅や付室の滞留面積を評価する手法である。

なお、避難安全検証のためには、各室の用途、床面積、天井高さ、開口寸法、排煙設備や防火設備の設置の有無などの情報が必要であるが、一般にこのような情報が確定するのは詳細設計の段階であり、その段階になると階段計画 (階段幅や階段床面積) の見直しは難しい。そこで本評価法では、比較的情報量の少ない基本計画段階において、階段計画の妥当性を簡易に評価する手法の提案も行う。

3. 予測計算法

3.1 居室避難 (火災が発生した居室の避難)

(1) 検証単位 居室避難の検証単位は遮煙区画で囲われた範囲毎を基本とし、遮煙区画内に間仕切壁が設

Table 1 本評価法の特長
Outline of This Evaluation Method

	検討課題	告示計算法	本評価法	
居室避難	避難開始時間	火災の状況が視認できない居室の部分において火災覚知が遅れる (Fig. 1参照)	室形状を矩形に制限する、または覚知の遅れを見込み避難開始時間を予測する	室形状 (壁) の影響を考慮した煙拡散性予測に基づき避難開始時間を予測する
	滞留解消時間	廊下等において、非火災室在館者の流入に伴い滞留が発生し、火災室在館者の避難が遅れる (Fig. 2参照)	在館者全員を収容可能な廊下等が確保されていることを前提とした計算法に基づき避難時間を予測する	廊下等における非火災室在館者の合流を考慮して滞留性状を予測する
階避難	滞留解消時間	階段内において、非火災階在館者の流入に伴い滞留が発生し、火災階在館者の避難が遅れる (Fig. 3参照)	階段内が一番混雑している状態を想定して避難時間を予測する	階段内における非火災階在館者の合流を考慮して滞留性状を予測する

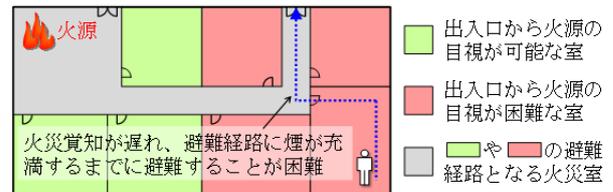


Fig. 1 居室避難における避難開始時間
Pre-Movement Time of Room Evacuation

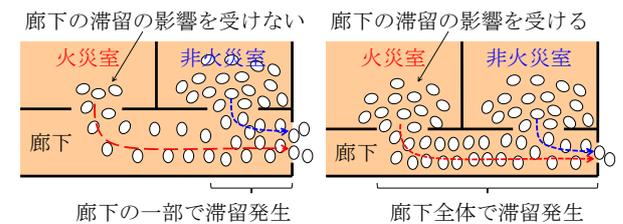
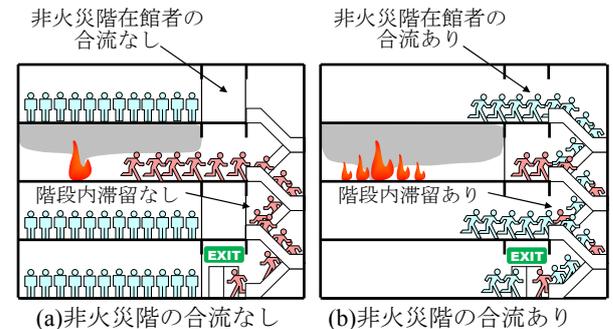


Fig. 2 居室避難における滞留解消時間
Queuing Time of Room Evacuation



(a)非火災階の合流なし (b)非火災階の合流あり
Fig. 3 階避難における滞留解消時間
Queuing Time of Floor Evacuation

置られる場合は室単位でも評価する。ここで、遮煙区画とは、準耐火構造の壁又は不燃材料で覆われた壁（フロートガラス等、火災時の加熱で容易に破損するものは不可）または令第112条第14項第二号に適合する防火設備で構成された区画である（以後、同じ）。

(2) 避難行動予測 本検証で前提とした避難行動予測に関わる条件を以下に示す。また、これらについて告示計算法の条件と比較したものをTable 2に、その計算法をTable 3を示す。

- 1) 在館者の属性：在館者は特定もしくは不特定で、非就寝かつ自力避難可能な在館者を対象とする。
- 2) 在館者の分布：居室内に均等に分布していることを前提とする。
- 3) 火源の位置：告示計算法は出口近傍に火源を想定している。本評価法は、計画によっては出口近傍以外の部分で火災が発生した場合の避難行動が遅くなる場合があることを考慮して、出口近傍と出口遠方で火災が発生した場合それぞれを想定する。
- 4) 避難開始：告示計算法は在館者のざわめきによる火災覚知を前提としているため単純な室形状のみを評価対象としている。本評価法は複雑な室形状にも対応できるよう煙の拡散に応じた避難を想定する。
- 5) 居室出口集結：最寄り出口を選択する。
- 6) 居室出口通過：告示計算法は、廊下等の滞留面積が十分確保されていることを前提としている。廊下等の滞留面積が確保されていない場合は、非火災室在館者の合流の影響を考慮するなど安全側の計算法を採用している。本評価法は、廊下等の滞留性状を考慮して出口の流動量を予測する。他室からの合流については、非火災室の在館者が避難開始するまでに火災室の避難が完了できることを前提とする。

(3) 避難開始時間 避難開始時間は、火災室の在館者は避難開始の遅れを見込まない ($2\sqrt{A_{\text{area}}}$) とするのが一般的であるが、室形状が複雑で見通しの悪い場合も想定される。そこで本評価法においては室形状を考慮して、在館者が煙を目視した時点で避難開始すると考えている。

煙の拡散する速さは、総合防火設計法（第3巻）⁷⁾によると0.5m/s、盛期火災時は1.0m/sとされているが、火災の

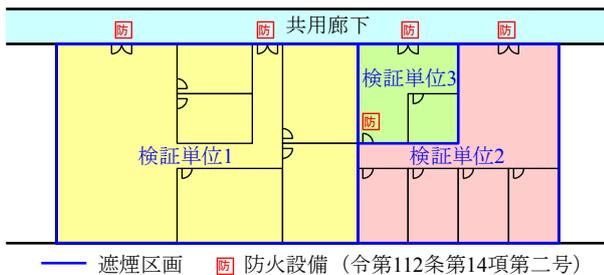


Fig. 4 検証単位の設定例
Setting Example of Evaluation Unit

Table 2 避難行動予測に関わる条件（居室避難）
Condition of the Evacuation Behavior for Room Evacuation

項目	設定方法等		
	告示計算法	本評価法	
①在館者の属性	特定／不特定，非就寝，自力避難		
②在館者の分布	在館者が居室内に均等に分布		
③火源位置	出口近傍	出口近傍/出口遠方	
④避難開始	情報伝達手段	ざわめき	煙拡散
	避難開始のタイミング	一斉（在館者全員が一斉に避難する）	随時（火源に近い者から随時避難する）
⑤居室出口集結	経路・出口選択条件	最寄りの出口を選択する	最寄りの出口を選択する ^{※1}
⑥居室出口通過	避難先での滞留の扱い	考慮（廊下等が十分確保されていることが前提）	考慮（廊下等の滞留性状の変化を考慮）
	他室からの合流の設定	あり	あり ^{※2}

※1: 在館者数が50人以上³⁾または床面積が200㎡を超える居室は2以上の出口を設置することを前提とする。
 ※2: 非火災室在館者が避難開始するまでに居室避難が完了することを前提とする。

Table 3 避難時間の計算法（居室避難）
Calculation Method of Evacuation Time for Room Evacuation

	告示計算法	本評価法
避難開始時間 $t_{\text{escape}(R)}$	$t_{\text{start}(R)} = 2\sqrt{A_{\text{area}}}$ A_{floor} : 当該居室の床面積[㎡]	$t_{\text{start}(R)} = t_{\text{smoke}}^4)$ →(3) 避難開始時間に詳細を示す
歩行時間 $t_{\text{travel}(R)}$	$t_{\text{travel}(R)} = \max\left(\sum \frac{l_j}{v}\right)$ l_j : 避難経路の部分ごとの歩行距離[m], v : 歩行速度[m/s]	同左
滞留解消時間 $t_{\text{queue}(R)}$	$t_{\text{queue}(R)} = \frac{P_{(R)}}{N_{\text{eff}} B_d}$ (a) $P_{(R)} \leq \rho_{\text{co}} A_{\text{co}}$ の場合 $N_{\text{eff}} = 1.5$ (b) $P_{(R)} > \rho_{\text{co}} A_{\text{co}}$ の場合 $N_{\text{eff}} = 1.3 \frac{B_{\text{neck}}}{B_d} \frac{\rho_{\text{co}} A_{\text{co}}}{P_{(R)}}$	(a) $P_{(R)} \leq \rho_{\text{co}} A_{\text{co}}$ の場合 $t_{\text{queue}(R)} = \frac{P_{(R)}}{N_d B_d}$ (b) $P_{(R)} > \rho_{\text{co}} A_{\text{co}}$ の場合 ⁵⁾ $t_{\text{queue}(R)} = \frac{\rho_{\text{co}} A_{\text{co}}}{N_d B_d} + \frac{P_{(R)} - \rho_{\text{co}} A_{\text{co}}}{N_{\text{neck}} B_{\text{neck}}}$ →(4) 滞留解消時間に詳細を示す
	A_{co} : 避難経路等の床面積[㎡], B_d : 居室出口幅[m], B_{neck} : ネットの幅[m], N_d, N_{neck} : 最大流動係数 (0.9 (階段降り), 0.67 (階段上り), 1.5 (開口部・通路) [人/m/s], N_{eff} : 有効流動係数[人/m.s], $P_{(R)}$: 当該居室の在館者数[人], ρ_{co} : 避難経路等の最大滞留密度 (=3.0) [人/㎡]	
避難完了時間 $t_{\text{escape}(R)}$	$t_{\text{escape}(R)} = t_{\text{start}(R)} + t_{\text{travel}(R)} + t_{\text{queue}(R)}$	出口近傍出火の場合 ⁶⁾ $t_{\text{escape}(R)} = \max(t_{\text{start}(R)} + t_{\text{travel}(R)}, t_{\text{queue}(R)})$ 出口遠方出火の場合 ⁴⁾ $t_{\text{escape}(R)} = \max(t_{\text{start}(R)}, t_{\text{travel}(R)} + t_{\text{queue}(R)})$
その他	—	階の避難開始までに居室避難が完了することを前提とする。 $t_{\text{escape}(R)} \leq t_{\text{start}(F)}$ または $t_{\text{travel}(R)} + t_{\text{queue}(R)} \leq 180[s]$

成長の程度（火災成長率 α ）によって煙の拡散速度は異なること、煙性状予測手法として二層ゾーンモデルが馴染みやすいことを考慮して、田中により提案されている簡易予測式⁸⁾を用いる。なお、火災初期の煙はある厚さを持った熱気流が天井面下を水平に移動する（以後、天井流）が、式(1)では、天井流が火災室全体に拡散する時間と田中の簡易予測式において煙層が所定の厚さ（≒天井流厚さ Z_c ）になる時間は等しいと見なしている。なお、天井流は水平伝播の過程で新鮮空気を巻き込むため、実際の煙拡散時間は下式で算定した値より幾分速くなる⁹⁾。

$$t_{smoke} = \left\{ \frac{5}{2} \cdot \frac{\rho_{\infty} A_{smoke}}{C_m \alpha^{1/3}} \left(\frac{1}{(0.9H_f)^{2/3}} - \frac{1}{H_f^{2/3}} \right) \right\}^{3/5} \quad (1)$$

A_{smoke} ：煙拡散実効面積[m²]、 C_m ：巻き込み係数(=0.076) [kg/kJ^{1/3}・m^{5/3}・s^{2/3}]、 H_f ：天井高さ[m]、 t_{smoke} ：煙拡散時間[s]、 α ：火災成長率[kW/s²]、 ρ_{∞} ：煙層密度(=1.0) [kg/m³]

天井流の厚さ Z_c は、天井流の巻き込みを無視する場合は、天井高さの10%程度¹⁰⁾とすれば良いとされている(式(2))。ただし、このような想定が可能なのは、検証対象室における天井流が周壁の影響のない無限天井空間の流れと同等と見なせる場合である。

$$Z_{s-f} = 0.1H_f \quad (2)$$

H_f ：天井高さ[m]、 Z_{s-f} ：天井流厚さ[m]

なお、式(1)の煙拡散時間を計算する際の火災室の床面積 A_f は、式(3)により火災室の壁周長 L_{w-f} に比例すると安全側に仮定すれば、S字型¹¹⁾、コの字型やロの字の空間¹²⁾および大平面空間¹³⁾にも適用可能である。

$$A_{smoke} = (L_{w-f}/4)^2 \quad (3)$$

A_{smoke} ：煙拡散実効面積[m²]、 L_{w-f} ：火災室の壁周長[m]

(4) 滞留解消時間⁵⁾ 滞留解消時間は、居室避難完了者数が避難経路収容可能人数に達するまでは居室の出口の流動量($N_d B_d$)、居室避難完了者数が収容可能人数を超えてからは避難経路の幅またはその先の空間への出口の流動量($N_{neck} B_{neck}$)で制限されると考え、式(4)または式(5)により与える。

(a) $P_{(R)} \leq \rho_{co} A_{co}$ の場合

$$t_{queue} = \frac{P_{(R)}}{N_d B_d} \quad (4)$$

(b) $P_{(R)} > \rho_{co} A_{co}$ の場合

$$t_{queue} = \frac{\rho_{co} A_{co}}{N_d B_d} + \frac{P_{(R)} - \rho_{co} A_{co}}{N_{neck} B_{neck}} \quad (5)$$

A_{co} ：避難経路等の床面積[m²]、 B_d ：居室出口の幅[m]、 B_{neck} ：ネックの幅[m]、 N_d, N_{neck} ：最大流動係数(0.9(階段降り)、0.67(階段上り)、1.5(開

口部・通路)[人/m/s]、 $P_{(R)}$ ：当該居室の在館者数[人]、 ρ_{co} ：避難経路等の最大滞留密度(=3.0) [人/m²]

(5) ケーススタディ Table 4に示す条件に基づき本計算法と告示計算法に基づき避難完了時間を算定した結果をFig. 8およびFig. 9に示す。なお、告示計算法については、避難開始の遅れ(180s)を見込まずに計算している。Fig. 8, 9より、本計算法の結果は、400m²以下を除き、告示計算法より安全側に予測されることが分かる。告示計算法は床面積が小さいほど検証が厳しく、床面積が大きくなるほど検証が緩くなるのが仕様基準(ルートA)との不整合を助長する原因と指摘されているが、本評価法によればそれが改善される。なお、Fig. 1の様に避難開始の遅れが生じる計画とする場合に、告示計算法では一律180sを加算するため、告示計算法を用いた場合の避難完了時間は本評価法より大幅に長くなる。

3.2 階避難

(1) 検証単位 階避難の検証単位は階または防火区画及び遮煙区画で囲われた範囲とする。

(2) 避難行動予測 本検証で前提とした避難行動予測に関わる火災条件を以下に示す。また、これらについて告示計算法の条件と比較したものをTable 5に、その計算法をTable 6を示す。

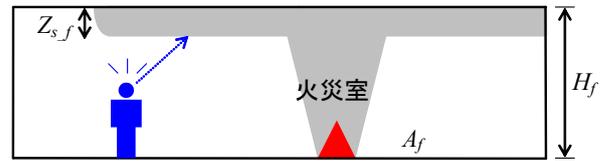


Fig. 5 避難開始時間の概念図 (Z_{s-f} ：煙層の厚さ)
Conceptual Diagram of Pre-Movement Time

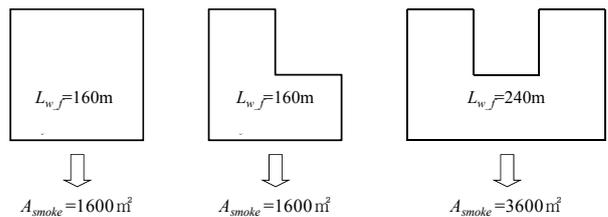


Fig. 6 煙拡散実効面積 A_{smoke} の算定例
Example of Smoke Diffusion Area

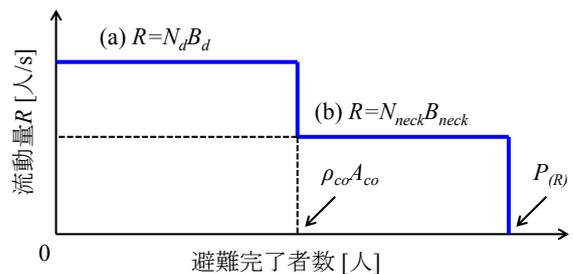


Fig. 7 滞留解消時間の概念図³⁾
Conceptual Diagram of Queuing Time

- 1) 在館者の属性：居室避難に掲げた属性に加えて就寝用途も対象とする。就寝および異種用途の部分については非就寝に比べ長い避難開始の遅れを見込む。
- 2) 在館者の分布：階の居室全体に均等に分布していることを前提とする。
- 3) 火災室：階の全ての火災室を想定する。
- 4) 避難開始：火災感知器等による情報伝達を考慮している。なお、避難開始時間は許容避難時間との関係

Table 4 ケーススタディの計算条件
Calculation Condition

	事務室	物販
床面積	100~3,000㎡ (@100㎡)	
室形状	矩形 (アスペクト比2:1)	
天井高さ	2.7m	
歩行距離	居室端部に出口設置 (上限50m)	居室端部に出口設置 (上限40m)
出口幅	床面積400㎡当たり0.9m	床面積100㎡当たり0.9m

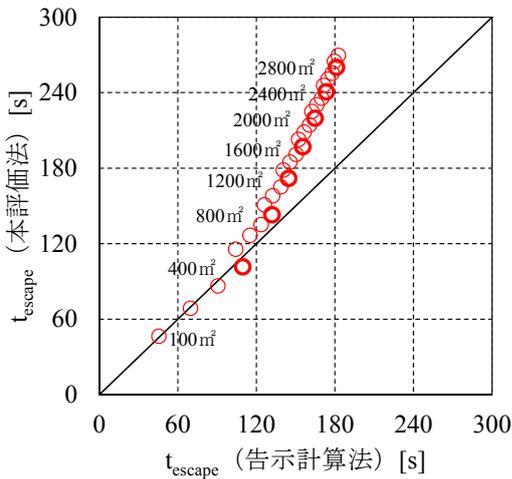


Fig. 8 予測結果 (事務室)
Calculation Result (Office)

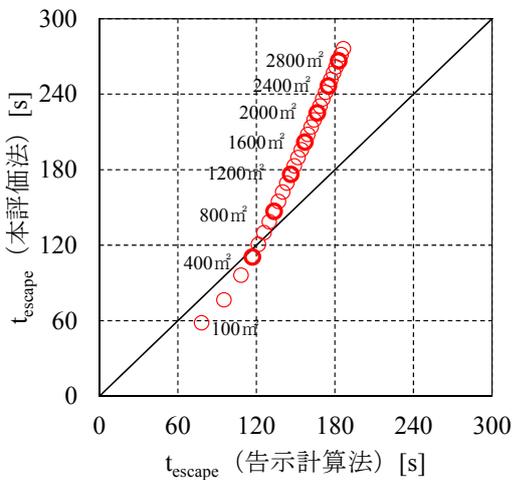


Fig. 9 予測結果 (物販)
Calculation Result (Shop)

- や設計法における位置づけを考慮して設定される。
- 5) 階段への出口集結：告示計算法は出口集結と出口流出における出口選択方法が異なるが、本検証ではそれらを共通とする。各階段の単位幅当たりの負担人数が概ね等しくなるよう集結領域を設定し、集結領域毎の最長の歩行距離を設定する。
- 6) 階段への出口通過：階段内の滞留については、他階からの合流がない場合においては、階段扉からの流入量と階段の流動量の小さい方で決定する。非火災階からの合流については、非火災階の在館者が避難開始するまでに火災階の避難が完了すること（非火災階の合流の影響を受けずに階避難完了すること）を基本とするが、合流が発生する場合は各階の階段への合流を考慮して流動量を低減する。

(3) 全館避難を前提とした滞留解消時間¹⁴⁾

火災階の避難中に全館避難が始まった場合の階段内の滞留状況は、フェーズ1（階段集結後から全館避難開始まで： t_{queue1} ）、フェーズ2（全館避難開始から階段内が滞留状態になるまで： t_{queue2} ）、フェーズ3（階段内が滞留状態になってから火災階在館者が階段内に避難完了するまで： t_{queue3} ）に分解して考えられる。従って、全館避難を前提とした階避難の滞留解消時間($t_{queue(F)}$)は、各フェーズの継続時間の和として得られる。

$$t_{queue(F)} = t_{queue1} + t_{queue2} + t_{queue3} \quad (6)$$

t_{queue1} ：階段への集結が完了してから全館避難が開始されるまでの時間[s]、 t_{queue2} ：階段内が自由歩行の状態から滞留状態になるまでの時間[s]、 t_{queue3} ：全館避難が発生している状況下で滞留状態が解消されるまでの時間[s]

Table 5 避難行動予測に関わる条件 (階避難)
Condition of Evacuation Behavior for Floor Evacuation

項目	設定方法等	
	告示計算法	本検証
①在館者の属性	特定/不特定, 就寝/非就寝, 自力避難	
②在館者の分布	階全体 (居室) に均等	
③火災室の設定	全ての火災室	
④避難開始	情報伝達手段	非常ベルまたは自動火災報知設備
	避難開始のタイミング	一斉 (火災室以外の在館者は全員一斉に避難する)
⑤階段への出口集結	経路・出口選択条件	最寄の出口 (階段) を選択する
⑥階段への出口通過	階段内の滞留の扱い	考慮 (流動量の低減) / 考慮 (階段内で滞留が発生する場合は流動量を低減)
	非火災階からの合流の設定	なし / あり ^{※1}

※1: 非火災階在館者の影響を受けずに階避難が完了することを前提とする。

ここで、全館避難が開始されるまでの時間 $t_{start(B)}$ と階の避難時間に着目すると、

$$t_{start(B)} = t_{start(F)} + t_{travel(F)} + t_{queue1} \quad (7)$$

$t_{start(B)}$ ：全館の避難開始時間[s], $t_{start(F)}$ ：階の避難開始時間[s], $t_{travel(F)}$ ：階の歩行時間[s], t_{queue1} ：階段への集結が完了してから全館避難が開始されるまでの時間[s]

従って、階段への集結が完了してから全館避難が開始されるまでの時間 t_{queue1} は、下式により得られる。

$$t_{queue1} = t_{start(B)} - t_{start(F)} - t_{travel(F)} = \Delta t_{start} - t_{travel(F)} \quad (8)$$

Δt_{start} ：全館避難開始時間と階避難開始時間の差[s]

階段内が自由歩行の状態から滞留状態になるまでの時間 t_{queue2} は、下式により得られる。ただし、移行中の流動量の計算は難しいので階段において非火災階からの在館者の合流がないと見なした場合の流動量として扱う。

$$t_{queue2} = \frac{A_{st}(\rho_{st} - \rho_0)}{R_{d2}} \quad (9)$$

$$R_{d2} = \min(N_{st}B_{st}, N_d B_d) \quad (10)$$

A_{st} ：階段面積[m²], B_{st} ：階段幅[m], B_d ：出口幅[m], ρ_0 ：自由歩行時の密度(=1.5) [人/m²], ρ_{st} ：階段の最大滞留密度(=3.0) [人/m²], R_{d2} ：階段において非火災階からの在館者の合流がない場合の流動量[人/s], N_d, N_{st} ：最大流動係数 [人/m.s]

t_{queue3} は滞留状態が解消されるまでの時間である。なお、非火災階の避難開始までに階段もしくは付室への避難が完了する場合は $t_{queue3}=0$ [s]となる。以下では、非火災階の避難開始までに階段もしくは付室への避難が完了しなかった場合について示す。階段内が滞留した状態では、避難階以外の各階において階段への合流が発生する。この時、火災階の階段出入口の流動量 R_{d3} は、屋外への出口を有する階(以後、避難階)におけるネックの流動量を R_{neck} 、上階から下りてくる者の流動量 R_{i+1} と各階から合流する者の流動量 R_i から算出する合流率を β ($= R_i / (R_i + R_{i+1})$)、火災階の階数を M とすると、下式の通り与えられる。

$$R_{d3} = R_{neck}(1-\beta)^{M-1} \beta \quad (11)$$

i ：任意の階, M ：火災階以下の階の階数の合計, R_{d3} ：階段において非火災階からの在館者の合流がある場合の流動量[人/s], R_{neck} ：避難階におけるネックの流動量[人/s], β ：合流率[人/人]

ネックの流動量 R_{neck} は、告示計算法によれば屋外出口幅 B_{d1} に対して経験的に $1.3B_{d1}$ として与えている。しかし、階段内の最大流動量 $R_{st(0)}$ がネックの最大流動量 $R_{neck(0)}$ より小さい場合には、告示計算法で想定している流動量が発生しない場合がある。そこで本評価法では、階段内の

Table 6 避難時間の計算法(階避難)
Calculation Method of Evacuation Time for Floor Evacuation

	告示式	計算式
避難開始時間 $t_{start(F)}$	$t_{start(F)} = 2\sqrt{A_{floor}} + 180$ A_{floor} ：当該階の床面積 [m ²]	$t_{start(F)} = t_{start(R)} + 180$ $t_{start(R)}$ ：居室の避難開始時間[s]
歩行時間 $t_{travel(F)}$	$t_{travel(F)} = \max\left(\sum \frac{l_i}{v}\right)$ l_i ：避難経路の部分ごとの歩行距離[m], v ：部分ごとの歩行速度[m/s]	同左
滞留解消時間 $t_{queue(F)}$	$t_{queue(F)} = \frac{P_{(F)}}{R_d}$ $R_d = 1.3B_{st} \left(\frac{\rho_{st} A_{st}}{P_{(F)}} \right)$ A_{st} ：階段面積[m ²], B_{st} ：階段幅[m], B_d ：出口幅[m], $P_{(F)}$ ：当該階の在館者数[人], ρ_{st} ：階段の滞留密度[人/m ²]	$t_{queue(F)} = \frac{P_{(F)}}{R_d}$ $R_d = \min(N_{st}B_{st}, N_d B_d)$ B_{st} ：階段幅[m], B_d ：出口幅[m], $P_{(F)}$ ：当該階の在館者数[人] → (3) 全館避難を前提とした階避難時間に詳細を示す
避難完了時間 $t_{escape(F)}$	$t_{escape(F)} = t_{start(F)} + t_{travel(F)} + t_{queue(F)}$	
その他	—	非火災階在館者の影響を受けずに階避難が完了することを前提とする。 → (4) 非火災階在館者の影響を受けずに階避難が完了するための条件に詳細を示す

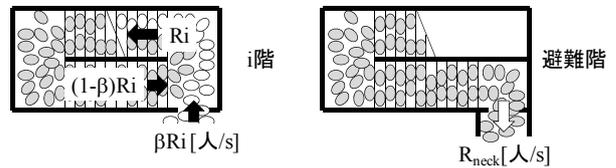


Fig. 10 階段出入口の避難者の流動
Flow of the Stairs Doorway

最大流動係数 $N_{st(0)}$ は、近年の実験的研究¹⁵⁾で得られた0.88~1.07[人/m.s]を参考として、 $N_{st}=0.9$ [人/m.s] (水平路における最大流動係数 $N_d=1.5$ [人/m.s]の60%)として、下式によりネックの流動量を与える (Fig. 11参照)。

$$R_{neck} = \min(N_{st}B_{st}, N_d B_{d1}, N_d B_{d2}) \quad (12)$$

B_{d1} ：階段出口幅[m], B_{d2} ：屋外出口幅[m], B_{st} ：階段幅[m], R_{neck} ：避難経路上のネックの流動量[人/s]

Fig. 12はネックの流量 R_{neck} を1.5人/s、合流率 β を0.5とした場合の各階における流動量 R_d [人/s]の計算例である。ここで、告示計算法によると、有効流動係数 N_{eff} は0.2~1.3人/sとなるのが一般的なので、告示計算法は2~5階建て程度の建物を想定していることになる。

以上より、全館避難が発生している状況下で滞留状態が解消されるまでの時間 t_{queue3} は下式により得られる。

$$t_{queue3} = \frac{P_{(F)} - R_{d2}(\Delta t_{start} - t_{travel(F)}) - A_{st}(\rho_{st} - \rho_0)}{R_{d3}} \quad (13)$$

A_{st} : 階段面積[m²], $P_{(F)}$: 当該階の在館者数[人], R_{d2} : 階段において非火災階からの在館者の合流がない場合の階段出入口の流動量[人/s], R_{d3} : 階段において非火災階からの在館者の合流がある場合の階段出入口の流動量[人/s], Δt_{start} : 全館避難開始時間と階避難開始時間の差[s], $t_{travel(F)}$: 当該階の歩行時間[s], ρ_0 : 階段内自由歩行時の密度 (=1.5) [人/m²], ρ_{st} : 階段内滞留時の最大密度 (=3.0) [人/m²]

(4) 非火災階在館者の影響を受けずに階避難が完了するための条件¹⁴⁾ 非火災階の在館者が避難を開始し、非火災階在館者の影響を受ける前までに火災階在館者の避難が完了するための条件を検討する。

全館避難が開始されたフェーズ2における火災階在館者の階段への流入は、階段内に滞留するための容量が確保されており、かつ階段内が最大滞留密度に達するまでは、非火災階の在館者の影響を受けないと考えられる。また、階避難における避難計画の評価対象は階段幅および階段面積(滞留面積)であるため、階段幅の評価につながるフェーズ1、階段面積の評価につながるフェーズ2を評価対象とすること、すなわちフェーズ3に移行しないことを非火災階在館者の影響を受けずに階の避難が完了するための条件とすれば合理的である。

フェーズ3に移行しないためには、式(13)の分子が正の値にならない、すなわち、

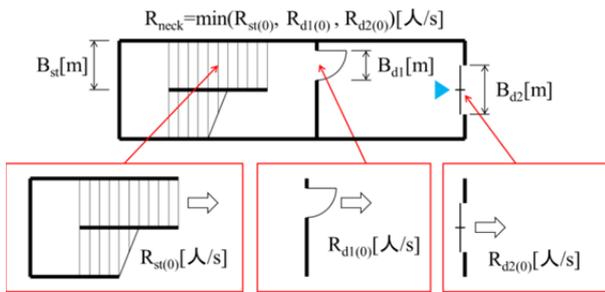


Fig. 11 ネックの流動量の概念図

Conceptual Diagram of Flow Rate at the Neck

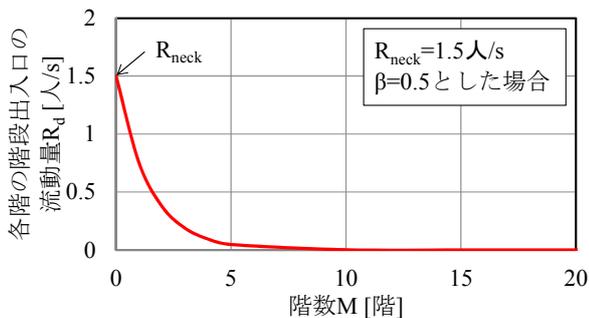


Fig. 12 各階の階段出入口での流動量

Flow Rate at the Stairs Doorway of each floor

$$P_{(F)} \leq R_{d2}(\Delta t_{start} - t_{travel(F)}) + A_{st}(\rho_{st} - \rho_0) \quad (14)$$

を満足すれば良い。従って、式(14)が非火災階在館者の影響を受けずに階の避難が完了するための条件となる。

さらに、階段出入口の流動量 R_{d2} は、階段入口がネックにならないことを前提とすれば、下式により与えられる。

$$R_{d2} = N_{st} B_{st} \quad (15)$$

以上より、非火災階在館者の影響を受けずに階の避難が完了するための階段幅 B_{st} の条件は、式(16)により与えられる。ここで、 $P_{(F)}$ は当該階の在館者数[人], $A_{st}(\rho_{st} - \rho_0)$ は階段内の滞留可能人数[人]および $N_{st}(\Delta t_{start} - t_{travel})$ は階段1mあたりに全館避難開始までに階段への避難が完了可能な人数[人/m]である。全館避難開始時間と階避難開始時間の差 Δt_{start} は、現行法の水準に合わせ、180sとした¹⁴⁾。

$$B_{st} \geq \frac{P_{(F)} - A_{st}(\rho_{st} - \rho_0)}{N_{st}(\Delta t_{start} - t_{travel(F)})} \quad (16)$$

式(16)を使うと、比較的情報量の少ない基本計画段階において、階段計画(階段の容量)の妥当性を簡易に評価することができる。例えば、床面積が2,000m²の物販店舗の階段幅 B_{st} を知りたい場合は以下の手順で検討する。

- 1) 当該階の在館者数 $P_{(F)}$ は、在館者密度0.5人/m² × 2,000m² = 1,000人である。
- 2) 階段内の滞留可能人数 $A_{st}(\rho_{st} - \rho_0)$ は、過去の実績から床面積 A_{st} は在館者1人当たり0.1m²程度となるので $A_{st} = 100$ m²とすれば、100(3.0-1.5) = 150人となる。
- 3) 階段1mあたりに全館避難開始までに階段への避難が完了可能な人数 $N_{st}(\Delta t_{start} - t_{travel})$ は、 $N_{st} = 0.9$ 人/m.s, $\Delta t_{start} = 180$ sおよび $t_{travel(F)}$ は現行基準(歩行距離40m)に従う場合は40sであるため、126人/mとなる。
- 4) 以上より階段幅 B_{st} は、(1000-150)/126 = 6.75m(仕様規定(ルートA)の12mより44%減)となる。

4. まとめ

本稿では、避難シミュレーション等の工学的手法を用いて避難安全性を検証する設計手法(ルートC)に関わる各種予測技術について、現在一般に使用されている告示計算法の課題を示すと同時に、その課題解決を目的としてより高度化された避難行動予測および煙拡散予測に関わる評価法を紹介した。本評価法の特長は以下の通りである。

- 1) 複雑な平面形状を持つ火災室の避難開始時間の予測が可能である。
- 2) 廊下の滞留状況を考慮した火災室の滞留解消時間の予測が可能である。
- 3) 必要階段幅および必要階段面積の評価が可能である。

参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課他編集:2001年度版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 海文堂, 2001
- 2) 火災安全性能維持管理の手引きー避難安全検証による建築物の維持管理と簡易確認方法, 日本建築学会, 2012
- 3) 田中哮義, 萩原一郎, 三村由夫:居室における2以上の避難出口の要求 2方向避難経路の基準に関する性能的考察 その1,日本建築学会計画系論文集 No.491, pp. 17-22, 1997.1
- 4) 山口純一, 長岡勉, 野竹宏彰, 桑名秀明, 池島由華, 高橋済, 佐野友紀, 萩原一郎:新しい避難安全検証手法の開発 その1 避難開始時間の設定方法, 日本建築学会大会学術講演集(A-2), pp. 287-290, 2010.9
- 5) 佐野友紀, 池島由華, 山口純一, 吉野撰津子, 長岡勉, 城明秀, 広田正之, 桑名秀明, 高橋済, 萩原一郎, 竹市尚広:避難安全検証における滞留解消時間に関する検討 その1~5, 平成23年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 140-149, 2011.5
- 6) 三編宏徳, 大宮喜文, 田村祐介, 山口純一:煙拡散を考慮した避難行動時間の簡易計算法, 日本建築学会大会学術講演集(A-2), pp. 383-386, 2013.9
- 7) 建築物の総合防火設計法 第3巻 避難安全設計法, 日本建築センター, pp. 142-155, 1989
- 8) 田中哮義:改訂版建築火災安全工学入門, 日本建築センター, pp. 232-235, 2002
- 9) 山口純一, 他:火災初期の煙拡散性状に関する研究, 平成21年度日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 106-107, 2009.5
- 10) 山口純一, 村岡宏:火災初期の煙拡散性状予測手法の開発, 大林組技術研究所報 No.73, 2009
- 11) 山口純一, 長岡勉, 仁井大策, 水落秀木, 大宮喜文, 萩原一郎:室形状を考慮した煙流動性状に関する検討, 平成23年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 130-131, 2011.5
- 12) 山口純一, 吉野撰津子, 村岡宏:煙拡散・避難シミュレーションモデルの開発, 平成24年度日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 156-161, 2012.5
- 13) 水落秀木, 広田正之, 掛川秀史, 鈴木圭一, 野竹宏彰, 池田憲一, 大宮喜文:実大規模平面における火災時の煙流動に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集 15(31), pp. 761-766, 2009.10
- 14) 山口純一, 鈴木匡, 大宮喜文:避難階段の計画手法に関する基礎的研究(その2), 平成26年度日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 174-177, 2014.5
- 15) 門倉博之, 関澤愛, 佐野友紀, 藤井皓介, 関澤健太, 増田誠良, 安藤翔:高層事務所ビルの全館避難訓練時における階段歩行に関する実測調査とその分析 その8 ー順次避難訓練における階段内の滞留発生に関する分析ー, 平成25年度日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 42-43, 2013.5
- 16) 吉野撰津子, 山口純一, 村岡宏:マルチエージェントモデルによる火災時避難安全性能評価技術の開発, 大林組技術研究所報 No.77, 2013