

特集 「火災に強い都市をめざして」

火災リスクの概念に基づく避難安全設計法に関する研究

山口 純一 村岡 宏
小宮 英孝

Evacuation Safety Design Method Based on Fire Risk Concept

Jun'ichi Yamaguchi Ko Muraoka
Hidetaka Komiya

Abstract

Fire scenarios and safety criteria for performance-based fire-safety design have been established to maintain the fire risk of buildings below an acceptable level. The fire scenarios differ depending on the fire-safety objectives, i.e. evacuation safety, fire resistance of structure or fire fighters' safety. This paper describes a methodology for appropriately selecting design fire scenarios and acceptable risk, RA, for evacuation safety design. The following were produced: 1) an event tree of fire scenarios for evacuation from an on-fire room, as shown in Figure 1, 2) a design fire scenario set up under the condition that a fire has occurred, 3) a design fire scenario in which it is assumed that initial fire extinguishment fails and the fire spreads, 4) an evacuation risk statistic of 0.56 [person/fire] under the condition of a major fire, and 5) a method to determine fire growth rate α_p of design fire under which evacuation safety should be verified is proposed.

概 要

本研究では、性能的避難安全設計の枠組みの中に火災リスクの概念を導入することを最終的な目標として、設計火源の決定方法ならびに許容リスクに関する検討を行った。概要は以下の通りである。1)居室火災時に生じ得る事象を避難安全設計の対象となる各対策との関連で整理し、火災シナリオを作成した。2)設計火災シナリオとして、初期消火等に失敗し、部分焼以上の拡大に至る火災を対象とした。3)安全性の検証方法として、避難不能者数期待値Rと許容リスク R_A を比較する方法を提案した。4)避難不能者を、現状の避難安全設計との整合性を考慮して軽傷以上と定義すると、火災統計資料を分析した結果から部分焼以上の火災に対する避難不能者数期待値は、建物規模に関わらず0.50-0.66(平均0.55) [人/火災]となる。5)火災成長率の分布を平均の指数分布と仮定し、リスクの概念に基づき設計火災成長率の決定方法を提案した。

1. はじめに

2000年に施行された建築基準法の火災安全基準の性能規定以降、性能的火災安全設計を利用した建築物が盛んに計画されている^{1),2)}。性能的火災安全設計では、規定の設計火源の下で許容安全基準を満たすことが必要である。避難安全検証法³⁾にあつては、可燃物密度と内装材料のグレードに応じて火災成長率が設計火源として規定され、この下で「避難完了時間 \leq 煙降下時間」の基準を満足することが確認されれば、許容レベルの避難安全性があると認められる。

一方で、従来の仕様基準では、大規模な建築物や重要な部分ほど基準を厳しくするなど、明示的ながらも火災リスクの考えが反映されていた。火災時に大人数の生死が関わる大規模な建物では、その様な事故の発生確率を極力小さくするために防火基準は厳しく、逆に少人数しか影響を受けない小規模な建物では、基準は幾分緩やかとなるのが自然である。しかし、現在の決定論的な設計法にはこのような考え方については殆ど考慮されず、規模に関わらず同一のクライテリアを満足すれば安全と見なされる設計法と

なっており、全館避難の対策は比較的容易にパスし、小さな居室は対策に苦慮する場合もある。

ここで、「火災リスク」を火災により損失が発生する確率と損失の大きさの積、すなわち火災損失の期待値の意味である。対象を避難安全の問題に絞れば、火災リスクは火災による人命損失の期待値となる。設計火源や許容安全基準は、それぞれ建物の構造設計における設計荷重や許容応力・変形と同様、本質的に建築物の火災リスクをある値以下に抑制するために設定されるものである。少人数の居室と大人数の建物の避難安全検証のための設計火源が同じで良いか否か再検討が必要である。

リスクの概念に基づく評価法は数多く提案されており、建築火災時の安全性評価に限っても幾つか提案されている⁴⁾。しかし、建築物にどれだけの火災リスクを許容できるのか明確にされていないこともあって、未だ実際の火災安全設計に適用されたものはない。

そこで、本研究では、性能的避難安全設計の枠組みの中にリスクの概念を導入するため、居室火災時の避難安全性に関わる設計火災火源及び許容安全基準の決定方法に関する検討を行った。なお、避難安全設計での火災の想定は、

当然のことながら、出火し、火災が拡大することを前提としている。そこで、本研究の設計火災シナリオ及び許容安全基準も、出火し、火災が拡大することを前提としている。

2. 本研究で対象とする避難安全対策

建築物の避難安全対策は、設計段階において設計者の判断で計画できる建築的対策や設備的対策のみならず、建物管理者等に依存する人為的対策、更には消防隊による消火救助活動に因るところも大きい。しかし、建物管理者や公共消防の効果は設計対象にすることは困難なので、本研究で想定する設計法の対象は、避難安全検証法と同様、建築的対策及び設備的対策に限定する。

表1は、建築火災時の火災リスクに影響を及ぼす対策のうち、本研究の対象とする避難安全対策を示したものである。ここでは避難安全対策を、火源の拡大を抑制するための火災制御対策、煙危険を緩和するための煙制御対策及び円滑な避難行動を促すための避難支援対策に分類し、さらに避難安全検証法³⁾の枠組みと同様に、出火室からの避難（居室避難）、出火階からの避難（階避難）及び出火建物からの避難（全館避難）のフェーズ毎に分類した。

ここで、避難支援対策として火災感知設備、誘導灯や非常放送設備も考えられるが、避難安全検証法等の従来の避難安全設計と同様に設計の対象外と見なした。なお、排煙設備や防火設備が火災感知設備と連動して作動するシステム構成である場合は、火災感知設備も設計対象の一部となる。

3. 設計火災シナリオ

建築火災時の主要な避難安全対策であるスプリンクラー設備や排煙設備等の設備的対策は、信頼性の高いもの、低いものもあるが、100%の信頼性を有するものはない。これらの設備的対策が正常に機能するか否かは、火災性状、煙性状に大きな影響を与えるため、火災シナリオにはこれらの成功、失敗も含める必要がある。しかし、避難のフェ

ーズ（居室避難、階避難または全館避難）によって火災制御対策や煙制御対策の内容及び重要度が異なるため、全てのフェーズに対応する火災シナリオは複雑である。そこで、本研究においては、第一歩として、居室避難時の設計火災シナリオについて検討を行った。

図1は、居室火災時に生じ得る事象を避難安全設計の対象となる各対策との関連で整理し、イベントツリーに図示したものである。この中の各要素について以下で説明をする。

3.1 出火

建物の出火率は建物用途や建物規模に応じて変化し、複合用途や不特定多数の人が利用する用途は高い傾向を示し⁵⁾、建物の延床面積が大きくなるほど床面積当たりの出火率は小さくなる傾向がある⁶⁾。しかし、建物の避難安全設計では、出火率を低減させることは出来ない。避難安全設計の目的は、火災時を想定して各々の避難安全対策が有効に機能するように計画し、火災時の火災リスクをある値以下に抑えることである。従って、本研究においては、避難安全検証法など従来の避難安全設計の枠組みと同様、出火を前提とした設計火災シナリオを設定した。

3.2 初期消火

一般に、出火後、初期消火等に成功し小火となる確率は7割を超える⁵⁾。これは、消防設備対策、居住者や建物管理者等の初期消火の効果に因るところが大きいと思われる。しかし、これを設計の段階で見込むことは現実的に難しいと考えられる。そこで、ここでは、さらに初期消火等にも失敗して火災が拡大することを前提とした。これも従来の避難安全設計における考え方と同様である。

3.3 拡大火災

拡大する火源の基本形として、先ずスプリンクラー設備による火災制御の存在しない場合を考え「局所火源」と「成長火源」の2つに分類し設計火源とする。

局所火源： 室内可燃物の一部のみが延焼するもので、可燃物密度が低く可燃物の分布がまばらなロビー等で発生する。発熱速度 Q_p は、火災初期は時間の2乗に比例し、可燃物量が制限されているため、燃焼がピークに達した以降は一定で継続すると想定する。⁷⁾

成長火源： 燃焼が室内可燃物に次々と延焼拡大し室全体の火災に迄至るもので、複数の可燃物が近接して置かれる店舗や事務室等で発生する。発熱速度は、火災初期は時間の2乗に比例し、燃焼が室全体に達した時点で収納可燃物量もしくは換気量で定まるピーク値となると想定する。⁸⁾

Table 1 本研究で対象とする避難安全対策

Evacuation Safety Measures in Building Fire

	火災制御対策	煙制御対策	避難支援対策
居室避難	SP設備、内装制限	排煙設備、蓄煙容積	出口幅、廊下等の容量、廊下等までの歩行距離
階避難	SP設備、内装制限	排煙設備、防煙区画、防火設備	階段出口幅、避難階段等の容量、階段等までの歩行距離
全館避難	SP設備、内装制限	排煙設備、防火設備、防煙区画	階段幅、避難施設の容量、屋外出口幅

SP設備：スプリンクラー設備

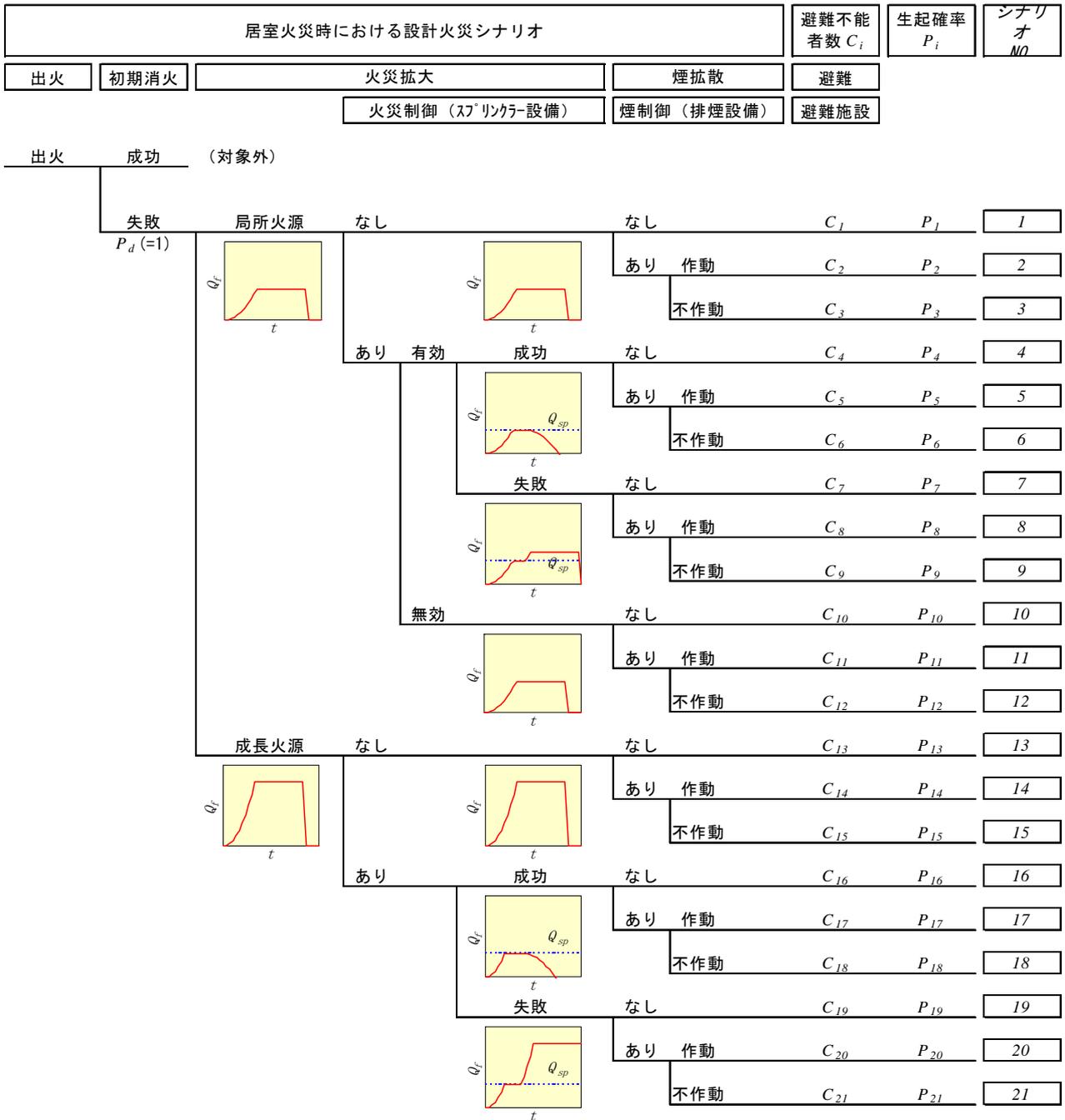


Fig. 1 居室火災時における火災シナリオのイベントツリー
Event Tree of Fire Scenarios in Evacuation from the Fire room

3.4 火災制御 (スプリンクラー設備)

スプリンクラー設備は、感熱部の温度が作動温度以上になった時点で作動する。そのため、感熱部の作動温度、天井高さ、スプリンクラーヘッドの設置間隔によってスプリンクラー設備の作動に必要な火源発熱速度 (以後、作動限界発熱速度 Q_{sp} とする。) が異なる⁹⁾。そこで、発熱速度が作動限界発熱速度に達するか否かに応じて「有効」、「無効」の2つに発熱速度を分類した。さらに、発熱速度が「有効」と見なせる状態にある場合は、スプリンクラー設備が

作動して発熱速度の抑制に「成功」する場合と、抑制に「失敗」する場合の2つに発熱速度を分類した。なお、これらの定義をまとめるとFig. 2となる。

有効： 火源発熱速度 Q_f が作動限界発熱速度 Q_{sp} に達し、スプリンクラー設備が作動する条件下にある場合。

無効： 火源発熱速度 Q_f が作動限界発熱速度 Q_{sp} に達せず、スプリンクラー設備が作動する条件下にない場合。

成功： 消火に成功、または火源発熱速度を作動限界発熱速度 Q_{sp} 以下に抑制することに成功した場合。

失敗： スプリンクラー設備が故障で作動しない、またはスプリンクラー設備が作動したにもかかわらず火源発熱速度の抑制に失敗した場合。

3.5 煙制御（排煙設備）

排煙設備は、火災感知→排煙口開放→排煙機起動が連動する1つのシステムで構成される。システム構成要素のどこか1箇所にも不具合が発生すると、システム全体が機能しなくなる。

煙制御は煙拡散による避難者への危険を緩和する手段である。しかし、緩和の程度は排煙能力と火源の大きさ（火源発熱速度）に依存し、また最終的な効果は避難条件によって異なる。

そこで、排煙設備のシナリオは、排煙設備のシステムが正常に「作動」する場合と、システムの不具合により作動しない場合（「不作動」）の2つのみに分類した。

作動： 排煙設備が正常に作動する場合

不作動： システムの不具合により排煙設備が作動しない場合

3.6 避難不能者数

避難不能者数 C_i は、火災室から非火災室に避難するまでの間に、避難安全上支障のある煙または熱に曝された避難者数である。現在の避難安全検証法では支障の有無を、煙層下端高さ1.8[m]以上³⁾や二酸化炭素濃度が0.5%以下¹⁰⁾等で判定する。

3.7 生起確率

生起確率 P_i は、各イベントの分岐確率の積で表される。本研究においては、各イベントの分岐確率は、決定論的に定まるもの及び確率論的に定まるものの2つとした。

決定論的に定まるもの： スプリンクラー設備の有効性⁹⁾

確率論的に定まるもの： 局所火源の発生確率、スプリンクラー設備の作動確率、排煙設備の作動確率¹¹⁾

なお、局所火源となるか成長火源となるかの確率は、本来、着火物や収納可燃物密度に依存すると考えられるが、局所火源の発生確率に関する有用な知見が得られない場合は、積載可燃物密度や内装の種類によって0または1として決定しても良い。

4. 安全性の検証

4.1 避難不能者数期待値

図1によると、居室火災時の避難安全性に関わる設計火災シナリオは合計21シナリオとなる。安全性の検証は、それぞれの設計火災シナリオの避難不能者数と生起確率の積の総和である避難不能者数期待値 R を避難不能者数期待値に対する許容安全基準 R_A と比較することにより検証する。すなわち、

$$R = \sum C_i P_i < R_A \tag{1}$$

を満たせば安全と考える。1つの居室火災時の安全性を検証するために21のシナリオ全てを計算するのは一見複雑に思えるが、実際には排反の事象も多く含まれるので、全て計算する必要はない。

なお、避難安全設計では、出火して拡大する火災を前提としているため下式が成り立つ。

$$\sum P_i = 1 \tag{2}$$

4.2 設計の手順

Fig. 3は避難安全設計の手順を示したものである。これに従って火災制御計画、煙制御計画、避難計画の妥当性を検証するが、避難不能者数期待値 R が許容リスク R_A を上回る場合は、火災制御計画、煙制御計画、避難計画の全てを

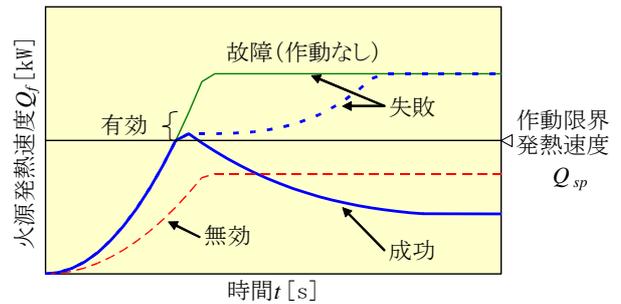


Fig. 2 スプリンクラー設備と火源発熱速度の関係
Fire Source Heat Release Rate with Sprinkler System Installed

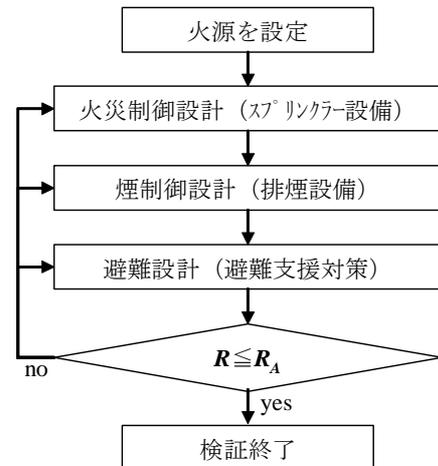


Fig. 3 避難安全設計の手順
Procedure of Evacuation Safety Design

見直しても良いし、一部を見直しても良い。どのシナリオの生起確率もしくは避難不能者数に注目して計画を見直せば有効を判断するには、Fig. 1のイベントツリーが助けになる。

5. 許容安全基準

建物の避難安全設計の妥当性を判断するためには、客観性を持つ許容安全基準が必要となる。

社会的に受容された許容安全基準は、火災による死亡者数の災害統計から決定する方法¹²⁾や現行基準（建築基準法等）の要求との同等性から決定する方法¹³⁾がある。なお、本研究においては、従来の避難安全設計と同様に、火災が拡大することを前提としているため、許容安全基準もこの前提の基で値を決定する必要がある。

5.1 火災統計から見た避難不能者期待値

Table 2は、東京消防庁の保有する火災調査資料から、平成12年～平成16年の5年間に東京消防庁管轄内にある耐火建築物で発生した火災（9921件）のうち、出火件数の多い複合用途建築物4299件（特定複合用途建築物3026件、非特定複合用途建築物1273件）を、建物規模、火災規模、死傷者数について整理したものである。なお、建物規模の括弧内の数値は、各規模に属する建物の平均延床面積である。

また、Table 3は、Table 2を基に、火災規模、建物規模別に死傷者発生率（死傷者数／火災件数）を算出した結果を示したものである。

5.2 避難安全設計における許容リスク

火災統計から見た火災リスク（死傷者発生率）は、火災成長率、出火時の在館者数、消防隊による消火救助活動など、様々な条件の基で発生した火災に対する結果である。しかし、避難安全設計で用いる、火災成長率や在館者数などの条件は、実際の火災時における平均的な数値よりもかなり厳しく（安全側に）設定される。また、避難安全設計では消防隊による消火、救助活動の効果を考慮しないことが多いが、実際の火災では消火、救助活動が行われている場合が多い。従って、前述の火災統計から許容リスク R_A を類推する場合は、これら条件の違いを考慮して決定することが必要である。

一方、100㎡以下の住宅（100㎡以内毎に区画された共同住宅を含む）では、排煙設備等の火災安全対策は基本的に要求されていないため、100㎡以下の住宅で想定される火災リスクは法的に許容されていると考えても良いであろう。住宅は就寝用途であること、また屋外への出口のない2階で就寝することが多いことなど、避難安全上不利な条件が多い。住宅等が避難安全設計の対象になることは少ないが、仮に避難安全設計で前提とするようなかなか厳しい条件で安全性を評価した場合、避難不能者数期待値は限りなく出火前の在館者数に近くなる。すなわち、避難安全検証法で定められている住宅の在館者密度0.06[人/㎡]より、

Table 2 複合建築物における死傷者数^{注1), 注2), 注3)}
Casualties of Building Fire
in the Compound Use Building

建物規模 延床面積A[㎡] (平均値)	火災 件数	火災規模		死傷者数 [人]				
		程度	火災 件数	軽傷	中等 傷	重傷	死亡	合計
A ≤ 150 (119)	79	小火	55	12	4	1	0	17
		部分焼以上	24	9	4	2	0	15
150 < A ≤ 300 (232)	410	小火	270	43	11	6	1	61
		部分焼以上	140	39	23	2	11	75
300 < A ≤ 500 (402)	537	小火	358	28	16	5	2	51
		部分焼以上	179	61	14	13	8	96
500 < A ≤ 1000 (721)	770	小火	542	67	19	8	0	94
		部分焼以上	228	83	17	12	7	119
1000 < A ≤ 1500 (1, 235)	447	小火	335	60	14	4	0	78
		部分焼以上	112	40	9	5	3	57
1500 < A ≤ 3000 (2, 156)	641	小火	510	49	9	4	0	62
		部分焼以上	131	48	16	7	6	77
3000 < A ≤ 6000 (4, 179)	374	小火	297	23	6	3	2	34
		部分焼以上	77	30	9	4	8	51
6000 < A (45, 356)	1041	小火	938	67	28	5	2	102
		部分焼以上	103	34	8	5	5	52

Table 3 複合建築物における死傷者発生率^{注1), 注2), 注3)}
Casualty Rare of Building Fire
in the Compound Use Building

火災 規模	建物規模 延床面積A[㎡]	死傷者発生率 [人/火災]				
		軽傷	中等傷	重傷	死亡	合計
部分焼 以上	A ≤ 150	0.38	0.17	0.08	0.00	0.63
	150 < A ≤ 300	0.28	0.16	0.01	0.08	0.54
	300 < A ≤ 500	0.34	0.08	0.07	0.04	0.54
	500 < A ≤ 1000	0.36	0.07	0.05	0.03	0.52
	1000 < A ≤ 1500	0.36	0.08	0.04	0.03	0.51
	1500 < A ≤ 3000	0.37	0.12	0.05	0.05	0.59
	3000 < A ≤ 6000	0.39	0.12	0.05	0.10	0.66
	6000 < A	0.33	0.08	0.05	0.05	0.50
	平均	0.35	0.10	0.05	0.05	0.55
小火 (※)	A ≤ 150	0.22	0.07	0.02	0.00	0.31
	150 < A ≤ 300	0.16	0.04	0.02	0.00	0.23
	300 < A ≤ 500	0.08	0.04	0.01	0.01	0.14
	500 < A ≤ 1000	0.12	0.04	0.01	0.00	0.17
	1000 < A ≤ 1500	0.18	0.04	0.01	0.00	0.23
	1500 < A ≤ 3000	0.10	0.02	0.01	0.00	0.12
	3000 < A ≤ 6000	0.08	0.02	0.01	0.01	0.11
	6000 < A	0.07	0.03	0.01	0.00	0.11
	平均	0.11	0.03	0.01	0.00	0.15

※参考値。本研究で想定している設計法の対象外。

注1) 平成13年9月の明星56ビル火災の死者44名は除外した。

注2) 火災規模の定義は以下の通りである。

全 焼：建物の70%以上を焼損したもの又はこれ未満であっても
残存部分に補修を加えても再使用できないもの

半 焼：建物の20%以上70%未満を焼損したもの

部分焼：全焼、半焼及びぼやに該当しないもの

小 火：建物の10%未満を焼損したもので、かつ焼損床面積若しくは焼損表面積が1㎡未満のもの又は収容物のみを焼損したもの

注3) 重傷には重篤傷も含まれている。

住宅の在館者数から算出した場合の許容リスクは、最大で $100\text{m}^2 \times 0.06[\text{人}/\text{m}^2] = 6[\text{人}]$ となる。

6. 設計火源と許容リスク

設計火源や許容安全基準は、建築物の火災リスクをある値以下に抑制するために設定されるものである。しかし、許容安全基準を適切に設定したとしても、通常起こり得る火災に比較して過小な設計火源を想定したならば、設計された建物の通常起こり得る火災に対する危険性は高くなる。従って、設計法が適切に機能するためには、設計火源と許容リスクそれぞれがバランス良く設定されることが必要である。

6.1 火災成長率の確率分布

避難安全検証法³⁾では、火災成長率を積載可燃物密度や内装の仕上げの種類に応じて決定している。一方で、家具等の燃焼実験で得られた知見によると、可燃物の火災成長率 α は、成長が非常に速いもので概ね $\alpha = 0.20$ 、遅いもので $\alpha = 0.001$ が対応するが、たいていのものはこの $0.001 < \alpha < 0.2$ の範囲に収まるとされている¹⁴⁾。

火災成長率は、可燃物密度等によって確定論的に決まるものではなく、可燃物の形状や寸法、構成材料の種類や密度にも依存すると考えられる。そのため、様々な可燃物が混在する建築空間で出火した場合の火災成長率 α は何らかの確率分布を持つと考えるのが自然である。そこで、本研究では、火災成長率にはある分布が存在するとして検討を行う。

Fig. 4は、実火災時の火災成長率の発生確率の分布を示した概念図である。火災成長率の分布は、火災成長率 α の小さい火災の発生頻度は高く、火災成長率 α の大きい火災の発生頻度は低い分布 (ex. ポアソン分布) を示すと考えられる。しかし、火災成長率 α の小さな火災は問題となることは少ないため、これ以降の議論では、計算の便宜上、火災成長率 α は指数分布を示すと仮定した。すなわち、火災成長率 α の確率分布 $P(\alpha)$ は、

$$P(\alpha) = \lambda e^{-\lambda\alpha} \quad (3)$$

で与えられるとする。ここで、 λ はパラメータと呼ばれ、火災成長率の平均値 $\bar{\alpha}$ を用いて

$$\lambda = 1/\bar{\alpha} \quad (4)$$

である。

火災成長率の平均値 $\bar{\alpha}$ は、従来の避難安全設計³⁾と同様に、火災室の用途に応じて決定される性質を持つと考えられる。なお、ポアソン分布もしくは指数分布は、火災成長率の平均値 $\bar{\alpha}$ のみによって特徴付けられるため、平均的な可燃物レイアウトの燃焼実験により得られた火災成長率を平均値 $\bar{\alpha}$ とみなすことができるため実用上の利便性が高い。

6.2 避難不能者数

火災室からの避難は出火後間もない時間にかかるため、避難不能者数は火災成長率に大きく依存する。

Fig. 5は、火災成長率 α と避難不能者数 $C(\alpha)$ の関係を概念的に示したものである。火災成長率が小さい時の避難不能者数は0であるが、ある火災成長率 α_c (以後、限界火災成長率と言う。)を超えると避難不能者は増加し始める。そして、出火前の在館者 C_0 に達した以降は一定となる。なお、限界火災成長率 α_c は火災安全対策に応じて異なる。

6.3 設計火災成長率 α_D

火災成長率が確定論的に与えられる場合の避難不能者数は、避難計算と煙性状計算によって評価できる。しかし、火災成長率 α に分布が存在する場合、避難不能者数は火災成長率 α の分布ごとに逐次避難計算と煙性状計算を行うことが必要となる。

6.3.1 設計火災シナリオが1つの場合 初めに最も基本的な条件を考える。成長火源のみが発生し、スプリンクラー設備、排煙設備ともに設置されていない場合を考えると、設計火災シナリオは、Fig. 1よりシナリオ13となる。シナリオ13の生起確率 (P_{13}) は $P_{13} = 1$ であるため、避難不能者数期待値 R は、火災成長率 α の確率分布 $F(\alpha)$ と火災成長率 α の時の避難不能者数 $C(\alpha)$ の積を積分することにより得られる。すなわち、

$$R = C_{13} P_{13} = C_{13} = \int_0^{\infty} F(\alpha) C(\alpha) d\alpha \quad (5)$$

ここで、Fig. 5に示すように、火災成長率 α が限界火災成長率 α_c 以下では、避難不能者 $C(\alpha)$ は0であるので、

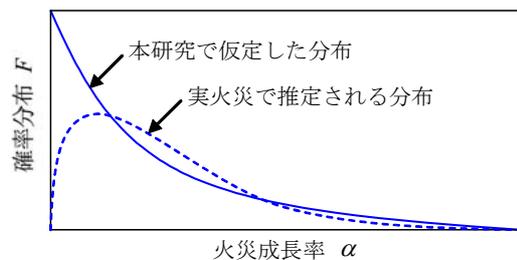


Fig. 4 火災成長率 α の確率分布の概念図
Probability Distribution of α

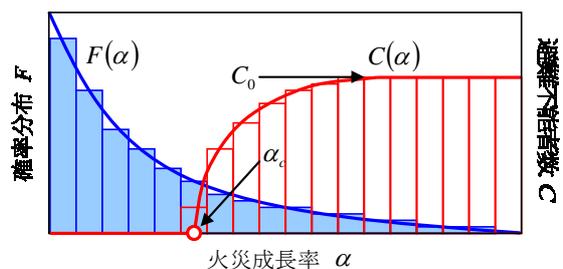


Fig. 5 火災成長率と避難不能者数の関係
Relation between α and Casualties

$$R = \int_0^{\alpha_c} F(\alpha)C(\alpha)d\alpha + \int_{\alpha_c}^{\infty} F(\alpha)C(\alpha)d\alpha \quad (6)$$

$$= \int_{\alpha_c}^{\infty} F(\alpha)C(\alpha)d\alpha \leq R_A$$

であることを検証すれば良い。避難不能者数を火災成長率に対して逐次算出するのは困難であるが、その場合は、Fig. 5に示すように、火災成長率の区間毎に確率分布と避難不能者数を区間の平均値として算出し合算することも可能である。

しかし、幾分安全側の想定となるが、次のような簡便な方法を考えるのが实际的であろう。避難不能者数 $C(\alpha)$ は出火前の在館者数 C_0 を超えることはないので、式(6)の条件は、

$$R = \int_{\alpha_c}^{\infty} F(\alpha)C(\alpha)d\alpha \leq C_0 \int_{\alpha_c}^{\infty} F(\alpha)d\alpha \leq R_A \quad (7)$$

と書ける。また、火災成長率の確率分布が式(7)に従う場合、

$$\int_{\alpha_c}^{\infty} F(\alpha)d\alpha = \int_{\alpha_c}^{\infty} \lambda e^{-\lambda\alpha} d\alpha = e^{-\lambda\alpha_c} = e^{-\alpha_c/\bar{\alpha}} \quad (8)$$

よって、これを式(7)に代入すると

$$C_0 e^{-\alpha_c/\bar{\alpha}} \leq R_A \quad (9)$$

さらに、式(9)を限界火災成長率 α_c について解くと、

$$\alpha_c \geq \bar{\alpha} \times \ln \frac{C_0}{R_A} (\equiv \alpha_D) \quad (10)$$

を得る。ここで、式(10)の右辺を設計火災成長率 α_D と定義する。

式(10)より、避難不能者数期待値 R が許容リスク R_A 以下となるためには、限界火災成長率 α_c を設計火災成長率 α_D 以上にすることが必要である。限界火災成長率 α_c は、避難不能者が発生しない限界の火災成長率であるため、少なくとも、設計火災成長率 α_D における避難不能者数は0になることが必要となる。すなわち、

$$Q_f = \alpha_D t^2 \quad (11)$$

なる設計火源を用いて避難計算と煙性状計算を行い、避難不能者数 C が0であるか否かを確認する。そして、避難不能者数 C が0であれば自ずと式(5)を満足することになるのでこの時点で検証は終了し、避難不能者数が0より大きければ避難計画を見直して再検証することとなる。

なお、避難不能者数 C は火災室の出火前の在館者数 C_0 を超えることはないので

$$C_0 \leq R_A \quad (12)$$

を満足する場合は、計算を省略することできる。

6.3.2 設計火災シナリオが2つの場合 次に、成長火源のみが発生し、排煙設備のみ設置されている場合を考えると、設計火災シナリオは、Fig. 1より、排煙設備が作動する場合(シナリオ14)と排煙設備が作動しない場合(シナリオ15)になる。ここで、排煙設備が作動する場合(シ

ナリオ14)及び排煙設備が作動しない場合(シナリオ15)の生起確率をそれぞれ P_{14} 、 P_{15} とする。

Fig. 6は、排煙設備が作動する場合(シナリオ14)と排煙設備が作動しない場合(シナリオ15)それぞれの避難不能者数 $C(\alpha)$ と火災成長率 α の関係を示した概念図である。避難不能者数 $C(\alpha)$ は排煙設備が作動する場合(シナリオ14)と作動しない場合(シナリオ15)とでは異なり、排煙設備が作動する場合の避難不能者数 $C_{14}(\alpha)$ は、煙の危険が緩和される分だけ、排煙設備が作動しない場合の避難不能者数 $C_{15}(\alpha)$ よりも小さくなる。

排煙設備が作動する場合(シナリオ14)と作動しない場合(シナリオ15)の避難不能者数期待値をそれぞれ R_{14} 、 R_{15} とすると、式(5)より、

$$R_{14} = P_{14} \int_0^{\infty} F(\alpha)C_{14}(\alpha)d\alpha \quad (13)$$

$$R_{15} = P_{15} \int_0^{\infty} F(\alpha)C_{15}(\alpha)d\alpha \quad (14)$$

となる。

ここで、「5.3.1 スプリンクラー設備なし、排煙設備なしの場合」と同じ展開を行うために、許容リスクを設計火災シナリオ毎に設定することを考える。すなわち、

$$R_{A(14)} + R_{A(15)} \leq R_A \quad (15)$$

となるように、許容リスク $R_{A(14)}$ 、 $R_{A(15)}$ を設定する。式(17)を満たす範囲内であれば、設計者は自由にそれぞれの許容リスクを設定することができる。

従って、式(13)及び式(14)の満たすべき条件は、それぞれ、

$$R_{14} = P_{14} \int_0^{\infty} F(\alpha)C_{14}(\alpha)d\alpha \leq R_{A(14)} \quad (16)$$

$$R_{15} = P_{15} \int_0^{\infty} F(\alpha)C_{15}(\alpha)d\alpha \leq R_{A(15)} \quad (17)$$

となる。さらに、式(5)～式(9)と同様の展開を行うことにより、排煙設備が作動する場合(シナリオ14)の限界火災成長率 $\alpha_{c(14)}$ は、

$$\alpha_{c(14)} \geq \bar{\alpha} \times \ln \frac{P_{14}C_0}{R_{A(14)}} (\equiv \alpha_{D(14)}) \quad (18)$$

また、作動しない場合(シナリオ15)の限界火災成長率

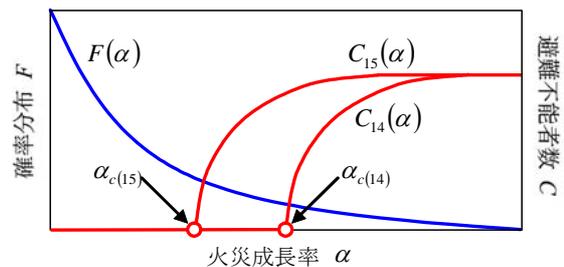


Fig. 6 排煙設備設置時の火災成長率と避難不能者数
Relation between α and Casualties

$\alpha_{c(15)}$ は、

$$\alpha_{c(15)} \geq \bar{\alpha} \times \ln \frac{P_{15} C_0}{R_{A(15)}} \quad (\equiv \alpha_{D(15)}) \quad (19)$$

となる。よって、それぞれのシナリオ毎に設定される設計火災成長率 α_D の基で避難不能者数を算出し、それぞれ $C=0$ であることを確かめれば良い。なお、式(19)は、式(10)と同様に排煙設備が作動しない場合の設計火災成長率である。これらの違いは、排煙設備の作動確率が考慮されているか否かであり、排煙設備を設置した場合は、排煙設備の不作動確率に応じて、設計火災成長率を低く見積もることができるのである。

6.3.3 設計火災シナリオが3つ以上の場合 設計火災シナリオが3以上となる場合も、シナリオ毎に許容リスク $R_{A(i)}$ を設定して同様の検討を行えばよい。この時、各シナリオの生起確率を P_i とした場合、シナリオ i における限界火災成長率 $\alpha_{c(i)}$ は、

$$\alpha_{c(i)} \geq \bar{\alpha} \times \ln \frac{P_i C_0}{R_{A(i)}} \quad (\equiv \alpha_{D(i)}) \quad (20)$$

となる。ここで、許容リスク $R_{A(i)}$ は

$$\sum R_{A(i)} \leq R_A \quad (21)$$

を満足する必要がある。

7. まとめ

本研究では、性能的避難安全設計の枠組みの中に火災リスクの概念を導入することを最終的な目標として、居室火災シナリオの決定方法ならびに避難安全性に関わる許容リスク（避難不能者数期待値に関する許容安全基準）に関する検討を行った。概要は以下の通りである。

- 1) 居室火災時に生起し得る事象を避難安全設計の対象となる各対策との関連で整理し、火災シナリオを作成した。
- 2) 設計火災シナリオとして、初期消火等に失敗し、部分焼以上の拡大に至る火災を対象とした。
- 3) 安全性の検証方法として、避難不能者数期待値 R と許容リスク R_A を比較する方法を提案した。
- 4) 避難不能者を、現状の避難安全設計との整合性を考慮して、軽傷以上と定義すると、火災統計資料を分析した結果から部分焼以上の火災に対する避難不能者数期待値は、建物規模に関わらず0.50-0.66(平均0.55) [人/火災]となる。
- 5) 火災成長率 α の分布を平均 $\bar{\alpha}$ の指数分布と仮定し、リスクの概念に基づき設計火災成長率 α_D の決定方法を提案した。平均 $\bar{\alpha}$ の値の決定は今後の課題として残る。

謝辞

火災統計調査を行うにあたり東京消防庁の皆様には多大なご尽力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉田俊之他：性能規定化にともなう避難安全検証法の活用の現状に関する調査研究，日本建築学会学術講演梗概集（東海）A-2，pp.215～p216，（2003）
- 2) 日本建築センター：建築基準法防火規定関係の性能評価の現況，ビルディングレターNo.445，（2003.03）
- 3) 平成12年建告第1441号、同第1442号
- 4) 志田弘二他：火災発生に伴う人命危険の評価法，日本建築学会計画計論文報告集No.368，pp.69～78，（1986.10）
- 5) 小林正美：建築火災安全のシステム分析-第1報-物的被害軽減システムの分析，日本建築学会論文報告集No.341，pp.91～97，（1984.7）
- 6) 朴哲也他：日本建築学会構造系論文報告集No.418，pp.117～126，（1990.12）
- 7) 名取晶子他：可燃物の燃焼性状の分類と考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）A-2，pp.117～120，（2004.8）
- 8) 大宮喜文他：建築物の空間および可燃物特性を考慮した設計火源，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）A-2，pp.117～120，（1998.9）
- 9) 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.173～175，（1993）
- 10) 避難安全性能業務方法書，日本建築センター，（2000.6）
- 11) ISO Guidance on Fire Risk Assessment
- 12) 掛川秀史：火災シナリオに基づく避難安全性能評価手法に関する研究，名古屋大学博士論文，（1997）
- 13) 田中哮義他：居室における2以上の避難出口の要求，日本建築学会計画計論文集No.491，pp.17～22，（1997.1）
- 14) NFPA92B - Smoke Management System in Malls, Atria, and Large Areas, 1991 Edition, NFPA, (1991)

凡例

- A : 建築物の延床面積[m²]
 C_0 : 火災発生前の在館者数[人]
 C_i : 設計火災シナリオ i の避難不能者数[人]
 $C_i(\alpha)$: 設計火災シナリオ i の火災成長率 α に対する避難不能者数[人]
 C_{max} : 避難不能者数の最大値[人]
 $F_i(\alpha)$: 火災成長率 α の確率分布
 Q_f : 火源発熱速度[kW]
 Q_{sp} : スプリンクラー設備の作動限界発熱速度[kW]
 P_i : 設計火災シナリオ i の生起確率[1/火災]
 R : 避難不能者数期待値[人/火災]
 R_i : 設計火災シナリオ i の避難不能者数期待値[人/火災]
 R_A : 許容リスク[人/火災]
 $R_{A(i)}$: 設計火災シナリオ i 毎に任意に設定する許容リスク[人/火災]
 t : 火災発生からの経過時間[s]
 α : 火災成長率[kW/s²]
 α_c : 避難不能者が発生する限界の火災成長率[kW/s²]
 α_D : 避設計火災成長率[kW/s²]
 $\bar{\alpha}$: 指数分布における平均火災成長率[kW/s²]