

# 建築研究報告

*REPORT OF THE BUILDING RESEARCH INSTITUTE*

No. 154

*March 2023*

リスク基盤の避難安全検証法に関する研究

A Study on Risk-based Evacuation Safety Design Method

田中哮義、出口嘉一、仁井大策、久次米真美子

Takeyoshi TANAKA, Yoshikazu DEGUCHI, Daisaku NII, Mamiko KUJIME

国立研究開発法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

National Research and Development Agency, Japan

国立研究開発法人建築研究所、関係機関及び著者は、読者の皆様が本資料の内容を利用することで生じたいかなる損害に対しても、一切の責任を負うものではありません。

## はしがき

我が国は古来火災の多い国でしたが、昭和 7 年の白木屋の火災以前に建物火災の避難が大きな話題となった記録は今まで見ていません。避難の問題はむしろ都市大火に際して発生しています。

江戸時代は大火が頻発したことで有名ですが、明暦の大火(1667)では当時の江戸の人口 50 万人のうち 3~10 万人が焼死したと言われていました(諸説あり)。当時、江戸市内には物資の運搬のための水路が張り巡らされており、その上に陸上交通のための橋が多く架けられていましたが、それらの橋が焼け落ちてしまったため避難経路が断たれてしまったことが大きな原因の 1 つです。江戸では、この後も何千人、時には 1 万人を超す死者を出す大火が発生しています。

一方で、江戸では歌舞伎座や芝居小屋など多くの観客を収容する施設などもあったのですが、それらの施設で多数の犠牲者を出した火災は知られていません。当時の建物一般が低層でかつ開放的であったために避難上の問題が比較的起きにくかったのかも知れません。

欧米では古くから多層階の建物が建てられて来たので、火災時の避難対策が重要だったと思うのですが、避難階段などを設けると言うことは近代まで一般的ではなく、道路側の窓から消防隊が救助するというような方法であったようで、建築物の高さ制限が、消防隊が持ち運べる梯子の長さや梯子車が届く高さに基づいていることや、米国の古い建物で外壁に取り付けられた鉄製の外階段が見受けられるのも、その名残かと思えます。

建物が更に高層化して梯子車も届かなくなると、米国で **Smoke proof tower** が考え出されます。日本の特別避難階段はこれに倣ったものですが、その名称から考えると元々は建物部分とは別に煙や火熱から遮断された塔状の構造物を付設して、そこに避難者を逃げ込ませるという発想の施設のように考えられます。

高層建築の火災経験の乏しかった我が国では、米国を初めとする諸外国の法規を勉強して種々の用途の建築物の避難基準を検討していましたが、避難施設の重要性についてはあまり実感が湧かず、不燃構造であれば火災の問題は全く起きないと思っていたようで、特殊建築物耐火構造規則(1923)では劇場、映画館、その他の用途についても耐火性の基準以外何も述べていません。

避難施設の重要性が認識されたのは、戦災復興が軌道に乗るに従い不燃建築が増加し、伴って多くの犠牲者を生じるビル火災が頻発するようになってからのことです。この状況に対応して建築研究所では戸川喜久二等による火災時の避難行動、若松孝旺等による煙流動・制御の研究など、建築物の避難安全に関する多くの研究が行われ、数々の知見を明らかにして来ましたが、火災時に多く見られる防火設備不作動の問題など、未だ解決すべき多くの課題が残されています。

平成 12 年(2000)年の建築基準法改正に伴う避難安全検証法は、建築物の避難安全設計における自由度を大きく広げました。しかし、現在の建築物の高層化・大規模化の勢いは止まるところがありません。2011 年の東日本大震災の時、東京の超高層ビルでは避難に 2~3 時間を要したものも多かったと聞きますが、更に大規模化が進行した現在では、それ以上の時間を要するビルも少なからずあると考えられます。建築研究所としましても、建物火災時の避難安全はどうあるべきか、根本的に問い直してみる必要があるように感じている次第です。

令和 5 年 3 月 22 日

国立研究開発法人 建築研究所  
理事長 澤地 孝男

# リスク基盤の避難安全検証法に関する研究

田中哮義\*1、出口嘉一\*2、仁井大策\*3、久次米真美子\*4

## 概要

建築物は人々を種々の危険から安全に保護する上で不可欠のものであるが、火災によって逆に深刻な危険をもたらしてきたことも否定できない事実である。建築火災からの安全確保のために昔から様々な努力が積み重ねられてきたが、次第に建築法規に防火基準を導入することで火災安全を確保するための主要な手段になって現在に至っている。しかし、建築に関する種々の技術や諸環境が急速に変化してゆく中で、火災安全対策を法規の仕様書の基準のみで合理的に処理し続けることは無理なことが次第に明らかとなり、そのため性能的方法による建築物の火災安全設計への期待と導入への動きが世界的な潮流となってきた。しかし、それはなお発展途上の方法であり、検討・改善すべき点を多く残している。

建築基準法の避難安全に関する規定は多くあるが、それらの目的や、意義は明白に述べられていないので、防火関係者の間ですらそれらの意義や有効性に関する認識が必ずしも一致しない。一方で平成12年(2000)に導入された避難安全検証法では避難安全設計が避難時間と煙の降下時間の問題に単純化され、その計算のための避難者人数と設計火源を規定したが、設計火源の妥当性についての根拠は曖昧であり、また各種防火設備の信頼性の問題についても殆ど考慮がなされていない。

耐震設計であれば観測される地震の震度の大きさや頻度を基にして設計地震荷重を定めるであろう。火災の場合にも火災統計は存在するのであるから、それを活用することが現実離れした設計火源の設定を行う危険を避けるための賢明な方法であろう。また、国内外を問わず、多くの犠牲者を出した建築火災の事例の殆どで、防火設備が正常に機能しなかったことが原因として挙げられている。通常時は起動されない防火設備が、いざ火災と言う時に作動しない可能性があるのは言わば防火設備の宿命とも言えるので、避難安全設計ではその可能性を十分考慮に入れる必要がある。

リスク基盤の避難安全性能検証法は、建築火災時に避難確保が困難になるリスクを許容レベル以下に抑制するために、避難安全検証で設定すべき設計火源と設計火災シナリオを決定するための方法論である。ここで対象とするのは、この設計火源と設計火災シナリオの合理化であり、現在の避難安全検証法で採られている決定論的検証システムと避難および煙性状計算法は踏襲する。

本報告におけるリスク基盤の避難安全性能検証法の概要は以下の通りである。

### 1. 避難リスクと死傷確率

#### (1) 避難リスク $R$ と死傷確率 $p_{cas}$

任意の空間の‘避難リスク’ $R$ を火災の発生確率 $P$ と死傷者数の期待値 $C$ の積、火災により発生する死傷者数の期待値 $R = PC$ として定義する。また $C$ は、当該空間の在館者数 $C_0$ と火災（小火を除く）が発生した場合の死傷確率 $p_{cas}$ の積 $C = p_{cas}C_0$ とする。

#### (2) 許容避難リスクと標準建物空間 (Benchmark building space)

建築空間はその規模、用途などに関わらず、何れも火災による避難リスク $R$ は等しく一定の許容リスク $R_a$ 以下でなくてはならない。すなわち $R \leq R_a$ 。

$R_a$ は、火災による避難リスクが許容可能なレベルにあるとして一般が認める建物空間を標準建物空間として選び、その空間での火災発生確率と火災が発生した場合の避難リスクの値として定める。なお、ここでは標準空間(H)は平均的な戸建住宅とする。

### (3) 設計ベースの許容避難リスク $R_a^D$ 、許容死傷確率 $p_{cas}^a$

避難リスク $R$ は火災発生確率 $P$ を含むが、避難安全設計は火災が発生したことを前提に作業が始まる。その場合の避難リスクを設計ベースの避難リスク $R^D(=R/P)$ と定義する。すると、設計ベースの許容避難リスク $R_a^D$ は、 $R_a^D = R_a/P$ 、許容死傷確率 $p_{cas}^a$ は、 $p_{cas}^a = R_a^D/C_0(=R_a/PC_0)$ で与えられる。

#### 2. 許容死傷確率と設計火源

設計火源は避難安全検証法と同様に $t^2$ 火源、すなわち $Q = \alpha_D t^2$ とする。ただし、火災区画の発熱速度の最大値 $Q_{max}$ は換気支配の発熱速度やスプリンクラー設備（SP）で頭打ちになることを考慮に入れるものとする。

避難人数や避難出口などの条件が同じでも、設計火源の成長係数 $\alpha_D$ の値の取り方で避難安全計画の適切性についての評価が別れるため $\alpha_D$ の設定根拠は明確でなくてはならない。本報告での $\alpha_D$ は火災統計データに基づいた火災成長係数 $\alpha$ の確率密度分布において $\alpha > \alpha_D$ となる確率が許容死傷確率 $p_{cas}^a$ と等しくなる時の $\alpha_D$ を設計火源の火災成長係数としている。

#### 3. 防火システムの作動／不作動に基づく火災シナリオ

建築空間はスプリンクラー、排煙設備、防火戸などの防火設備が設けられているが、実際の火災発生時にはそれらの全てが正常に機能するとは限らない。それら各種防火システムが正常に作動するか否かによって生ずるシナリオ毎に火災の条件や避難環境が劇的に異なる。

建築空間の避難リスクはこれらのシナリオにおける避難リスクの集合であるが、それらのシナリオはイベントツリーを作成することで特定できる。また関連する防火システムの作動確率 $p$ を用いれば、各シナリオ $i$ の生起確率 $P_i$ が算出できる。

シナリオ $i$ の設計ベースの避難リスクは $R^D(i) = P_i \times \bar{p}_{cas}(i)C_0$ 、従って死傷確率は $\bar{p}_{cas}(i) = R^D(i)/P_iC_0$ となる。

#### 4. 建物空間の許容避難リスク $R_a^D$ の各シナリオへの分配

シナリオが一般に $N$ 個あるとき、建物空間の設計ベースの避難リスク $R^D$ は、 $N$ 個のシナリオにおける避難リスク $R^D(i)$ の総和となる。 $R^D$ が当該空間の許容避難リスク $R_a^D$ を超えることは許されないので、 $R^D = \sum_1^N R^D(i) \leq R_a^D$ の制約が課される。 $R^D(i)$ に課される制約はこれだけであるから、これを満たす $R^D(i)$ の組み合わせには大きな自由度がある。そこで、その制約の下で $R_a^D$ を各シナリオに分配し、それぞれのシナリオ毎に避難安全検証すれば良い。

これは、避難リスクの代わりに死傷確率を用いても同じであるから、 $\sum_1^N \bar{p}_{cas}(i) \leq p_{cas}^a$ の制約の下で空間の許容死傷確率 $p_{cas}^a$ をシナリオ毎に分配して各シナリオの許容確率とし避難安全を検証することが出来る。

上記の検証には、2.の方法で各シナリオの許容死傷確率に対応する設計火源を算出し、その下で火災性状と避難行動の予測を行い、死傷者が0となることを示せば良い。

#### 5. ケーススタディー

本報告の目標は避難安全検証法における設計火源を適切に定める手法および防火設備システムの作動と不作動のシナリオを避難安全性の評価に導入する手法を開発することである。それらの手法は実際的な建物条件に適用したときの実務的妥当性が支持されるものでなくてはならない。その確認のため今回の手法を居室避難および階避難の検証に適用したケーススタディーを行った。その結果、今回の方法によって導かれる設計火源、設計火災シナリオ、火災安全設計解は現状の安全レベルを損なうものでも、また技術的・コスト的に過度に厳しい要求を強いるものでもないことが確認されたと考える。

なお全館避難についてもケーススタディーを載せるべきであったが、検証すべきシナリオが多くて現状では少し複雑であることから、本報告では割愛した。

## 6. Annex

上記1.～4. の記述の煩雑さを避けるため、リスク基盤の避難安全性能検証法に関して行った技術的検討は内容の一部を Annex として纏めている。

## 7. 付録

火災階避難検証のケーススタディーの実施のために必要となった火災室・火災階の煙層降下予測のためのエクセルプログラムおよび火災階避難時間予測の簡易計算法について記述している。

\*1 京都大学 名誉教授

\*2 国土技術政策総合研究所 建築研究部 防火基準研究室 主任研究官

\*3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助教

\*4 株式会社日建設計 設計監理部門 セーフティデザインラボ（防災計画） ディレクター

# A Study on Risk-based Evacuation Safety Design Method

Takeyoshi TANAKA\*<sup>1</sup>, Yoshikazu DEGUCHI\*<sup>2</sup>, Daisaku NII\*<sup>3</sup>, Mamiko KUJIME\*<sup>4</sup>

## ABSTRACT

While buildings are indispensable to protect people from various dangers, it is undeniable that the buildings have adversely induced dangers by fire. Since ancient times, people have made various efforts to prevent the dangers of building fire. Currently, the dominant means for ensuring fire safety is to control building features by imposing prescriptive regulations. On the other hand, due to the rapid change of various environment surrounding buildings, e.g., building technologies, economic activities, people's lifestyle, it has come to be gradually recognized that the prescriptive regulations are not always efficient means to safeguard building and application of performance-based fire safety design method (P-B FSD) has come increasingly the worldwide trend. Nevertheless, P-B FSD is not a completed but developing method, so there remains a lot to do before its completion.

It is not always easy even for fire experts to exactly understand the purposes, significance, effectiveness for safety, etc. of the prescriptive provisions for evacuation safety since those are not explicitly stated. On the other hand, the verification method of evacuation safety performance, 2000, reduced the evacuation safety design to simply the issue of evacuation time and smoke filling time and prescribed occupant load density and design fire according to type of occupancy, while the basis of the design fire is ambiguous and the reliability issue of fire safety systems is untouched.

The design seismic load for seismic design of a building will be determined based on the observed seismic intensities and frequency, with additional consideration on the importance of the building. Since fire data are available from fire investigation, the design fires for evacuation safety design should be determined based on such fire data for avoiding unrealistic setting of design fires.

As often reported, non-operation or malfunction of fire safety systems tend to be involved in the event of serious fire incidents. Since fire safety systems do not operate in normal time, it may be inevitable that some of them may not operate in the event of fire. Such inconvenient possibility should be well taken into consideration in evacuation safety design.

The risk-based verification method of evacuation safety performance is the methodology to determine the design fire and fire scenarios to be selected. The subjects are to rationalize the design fire and fire scenarios.

Risk-based Verification Method of Evacuation Safety Performance in this report is outlined as follows:

### 1. Evacuation risk and Casualty probability

#### (1) Evacuation Risk $R$

In this method, 'Evacuation risk' of a building space,  $R$ , is defined as the product of fire occurrence probability,  $P$ , and expected casualty,  $C$ , where the fire is limited to hazardous fire for evacuation excluding small fires, and  $C$  is the product of the number of occupants in the space,  $C_0$ , and the casualty probability when a fire occurred in the space,  $p_{cas}$ .

#### (2) Acceptable evacuation risk, $R_a$ , and Benchmark building space

Evacuation risk of any building space,  $R$ , must be smaller than a unique acceptable value,  $R_a$ , regardless size and occupancy type.

It is necessary to select a benchmark building space to determine the value of the acceptable evacuation risk,  $R_a$ . The benchmark building space is selected from the building spaces of which the evacuation risk is generally agreed to be at acceptable level. Then,  $R_a$  is obtained from the fire occurrence probability,  $P$ , occupants' number,  $C_0$ , and casualty probability,  $p_{cas}$ , of the space. Here, detached house with ordinary size is selected as the benchmark building space.

#### (3) Design base acceptable evacuation risk, $R_a^D$ , and acceptable casualty probability, $p_{cas}^a$ .

Although the evacuation risk,  $R$ , include fire occurrence probability,  $P$ , evacuation safety design of a building space starts taking occurrence of fire as a given. Let the evacuation risk in this case be the design base evacuation risk,  $R^D \equiv R/P$ . Then the design base acceptable evacuation risk,  $R_a^D = R_a/P$ , and the design base acceptable casualty probability  $p_{cas}^a = R_a^D/C_0$ .

## 2. Acceptable casualty probability and design fire

A usual t-square type fire,  $Q = \alpha_D t^2$ , is used as the design fire, except that the heat release rate,  $Q$ , reaches plateau restricted by the condition of ventilation or sprinkler.

If the conditions of occupant load and exits of a space are the same, the evaluation of the adequacy of the evacuation plan can differ depending upon the design fire. So it is important to determine the fire growth factor,  $\alpha_D$ , based on sound basis, particularly for the early stage of fire. In this risk-based method,  $\alpha_D$  which makes the probability of  $\alpha \geq \alpha_D$  equal to the acceptable casualty probability,  $p_{cas}^a$ , is selected.

## 3. Design fire scenarios according to success and failure of fire safety systems

Several kinds of fire safety systems, e.g., sprinkler, smoke vent, fire door, are installed in building spaces. However, it is not always certain that all of those systems normally operate in the event of actual fire. Depending on whether they work normally or not, fire behavior and evacuation environment can differ greatly.

The evacuation risk of a building space is a set of evacuation risk of each scenario caused by such fire safety systems. Using event tree is a convenient way to identify the scenarios and the occurrence probability of each scenario,  $P_i$  can be calculated if the actuation probabilities of the fire safety systems are known.

The design base evacuation risk,  $R^D(i)$ , and casualty probability,  $\bar{p}_{cas}(i)$ , of a scenario  $i$  is given by  $R^D(i) = P_i \times \bar{p}_{cas}(i)C_0$  and  $\bar{p}_{cas}(i) = R^D(i)/P_iC_0$ , respectively.

## 4. Allocation of design base acceptable risk, $R_a^D$ , to each scenario

If the number of scenarios involved in the fire in a building space is  $N$ , the evacuation risk of the space,  $R^D$  is the summation of evacuation risk of the  $N$  scenarios. Since  $R^D$  cannot be greater than acceptable evacuation risk,  $R_a^D$ , restriction of  $R^D = \sum_1^N R^D(i) \leq R_a^D$  is imposed. On the other hand, since this is the only restriction for  $R^D(i)$ , a lot of freedom exists in the combination of  $R^D(i)$  to satisfy the restriction. Therefore, it is possible to allocate  $R_a^D$  to each scenario and verify the safety by each scenario.

It is possible and more straight forward to allocate the acceptable casualty probability of building space,  $p_{cas}^a$ , to each scenario under the restriction of  $\sum_1^N \bar{p}_{cas}(i) \leq p_{cas}^a$ .

Once  $\bar{p}_{cas}(i)$  is determined, the design fire for scenario  $i$  can be obtained following the procedure described in 2. above, which follows the verification to confirm that no casualty arises in any scenario.

## 5. Case studies

The objectives of this study on evacuation safety assessment is two folds; one to develop a method to rationally determine the design fire; and the other to develop a method to take the effects of operational reliability of fire systems into account.

The methods are not enough unless they are usable in actual evacuation safety planning of buildings. Hence, case studies are carried out applying the methods to fire room evacuation and fire floor evacuation to examine if the methods are practicable in actual evacuation safety design practices.

By the way, case studies should have been done for total building evacuation too, but it was given up in this report due to the lack of time for the work

## 6. Annex

A part of the technical studies and data concerning the development of the risk-based verification method of evacuation safety performance are added as Annexes to avoid the complication of the main text.



\*1 Professor Emeritus, Kyoto University, Dr. Eng.

\*2 Senior Researcher, Fire Standards Division, Building Department, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.

\*3 Assistant Professor, Department of Architecture & Architectural Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

\*4 Director, Safety Design Lab, Architectural Design Department, Nikken Sekkei Ltd, Dr. Eng.

## 目次

1. リスク基盤の避難安全検証法に関する研究の背景と目的	1
1.1. 建物火災による死亡率	1
1.2. 建築物の大規模化と火災リスクの増大	1
1.3. 防火設備システムの効果的設計	1
1.4. 避難リスクの許容	2
2. 性能的避難安全設計法の基本構成	3
2.1. 性能的避難安全設計法の基本手順	3
2.2. 設計火災条件と安全判定基準の特徴	4
3. リスク基盤の避難安全検証法の手続き	5
4. リスク基盤の避難安全設計における設計火源	6
4.1. 性能的火災安全設計における設計火源	6
4.2. 最大発熱速度 $Q_{max}$	6
4.3. 火災成長係数 $\alpha$ の確率密度分布	6
5. 許容避難リスクと設計火源	8
5.1. 設計火源の意味とは	8
5.2. 火災時の避難リスク	8
5.3. 許容避難リスク	9
6. 許容避難リスクと設計火源の決定	12
6.1. 火災成長係数 $\alpha$ が設計値 $\alpha_D$ を超える確率	12
6.2. 設計火源の火災成長係数	12
6.3. 設計火災成長係数 $\alpha_D$ の最大値	13
7. 設計火災シナリオへの許容避難リスクの配分	14
7.1. 防火設備システムの作動／不作動に基づく火災シナリオ	14
7.2. 各シナリオへの部分許容リスクの配分	15
7.3. 設計火源の設定方法	17
7.4. リスク基盤の避難安全検証法の手続きのまとめ	18
8. リスク基盤の避難安全検証のケーススタディー	19
8.1. ケーススタディー：居室避難	19
8.2. ケーススタディー：事務所ビルの階避難	23
9. 全館避難の安全検証に関する検討	42
9.1. 全館避難設計の許容避難リスク	42
9.2. 避難階段の安全に関わるシナリオ	43
謝辞	45
Annex A 火災成長係数 $\alpha$ の確率密度分布	46
Annex B 出火率と空間面積	51
Annex C 空間用途別出火率比	52
Annex D 対数正規分布の確率密度関数	53
付録. 出火階の煙性状と避難時間の簡易計算法	58

## [用語]

避難対象者	: ある空間で出火した時、避難が必要なエリアにいる在館者
避難安全基準	: 避難者が安全に避難できることを判定するための閾値
危険な火災	: 避難することが必要となる規模の火災（小火などを除く）
死傷者	: 火災による死亡者、傷害者（重傷だけでなく軽傷も含む）
避難リスク	: 火災発生による死傷者の期待値（=‘危険な火災’の発生確率×死傷者数）
許容避難リスク	: 避難リスクの許容値
許容死傷確率	: 火災により死傷者が発生する確率の許容値（=許容避難リスク／避難者数）
設計ベースの〇〇	: 出火が生じたことを前提としたときの〇〇
標準空間	: 許容避難リスクを定める上での基準（Benchmark）となる空間
シナリオイベントツリー	: 防火設備の作動／不作動により生ずるイベントツリー
設計火災シナリオ	: 避難安全検証のために想定される防火設備の作動／不作動のシナリオ
シナリオ生起確率	: あるシナリオが生起する設計ベースの確率
シナリオ許容避難リスク	: あるシナリオに割り当てられる許容避難リスクの値
シナリオ許容死傷確率	: あるシナリオに割り当てられる許容死傷確率の値
設計火源	: 避難安全検証のために設定される火源
火災成長係数	: 火源の発熱速度が時間の2乗に比例するとしたときの係数
最大発熱速度	: 火源の発熱速度が換気やスプリンクラーの効果で頭打ちになる値
SP 制御設計火源	: スプリンクラー（SP）が作動するまでもない火源の最大発熱速度
用途別出火率	: 空間用途による単位面積当たり‘危険な火災’の出火確率
出火率比	: 戸建住宅の出火率／任意の用途の出火率
SP	: スプリンクラー

[数式記号]

$R$	: 出火確率も含めた実際の避難リスク
$R^D$	: 設計ベースの（危険な火災の出火を前提とした）避難リスク
$R_a$	: 実際の許容避難リスク
$R_a^D(K)$	: 避難対象空間における設計ベースの許容避難リスク
$R_a^D(K, i)$	: 対象空間 $K$ シナリオ $i$ における設計ベースの許容避難リスク
$P$	: ‘危険な火災 (hazardous fire)’ の発生確率
$P_i$	: あるシナリオ ( $i$ ) の生起確率
$p_j$	: 防火設備 $j$ の作動確率
$C$	: 危険な火災が発生した場合の死傷者数の期待値
$C_0(K)$	: 避難対象空間の在館者人数
$p_{hf}$	: ‘危険な火災’ の単位床面積当たりの発生確率（小火は除く）
$p_{cas}$	: 避難対象人数の死傷確率 ( $C/C_0$ )
$p_{cas}^a(K)$	: 避難対象空間 $K$ における許容死傷確率
$\bar{p}_{cas}(K, i)$	: 対象空間 $K$ のシナリオ $i$ における死傷確率
$p_{cas}^a(K, i)$	: 対象空間 $K$ のシナリオ $i$ における部分許容避難確率
$A_f$	: 出火室面積
$Q$	: 火源の発熱速度
$\alpha$	: 初期火源成長因子
$\alpha_D$	: 設計火源の初期火災成長因子
$f(\alpha)$	: 初期火源成長因子の確率密度分布
$F(\alpha_D)$	: 火災成長因子が $\alpha_D$ より小となる確率 ( $\equiv \int_0^{\alpha_D} f(\alpha) d\alpha$ )
$t$	: 時間
$Q_{max}$	: 設計火源の発熱速度の最大値
$\rho$	: 在館者密度
$A$	: 居室床面積
$K$	: 任意の避難対象空間
$H$	: 標準空間（ベンチマーク空間）

## 1. リスク基盤の避難安全検証法に関する研究の背景と目的

平成 12 年(2000)に導入された現行の避難安全検証法では、建物火災時の避難を居室避難、火災階避難、全館避難のステージに分類して安全検証を行っている。建築物の用途・形態は多様であるから、これらの分類による検証が必ずしも最適と言えない場合もあるかも知れないが、多くの建築物では実務的で効率的な方法であろう。しかしこれら各ステージの安全検証に掛ける労力は避難上の重要性和バランスしておらず、寧ろ重要性和逆転している。

### 1.1. 建物火災による死亡率

建物火災時の避難リスクは、居室避難に関しては多くの場合非常に低い。日本の火災統計では、住宅でも小規模な火災も含めて出火件数は年間約 0.4 件/1000 世帯程度以下、すなわち特定の世帯では 2500 年に 1 回程度である。火災の死者は約 9 割が住宅で発生しているが、全ての火災を含めても、死者は年間約 1,200 人程度である。絶対数では多いと思うかも知れないが、日本の人口を考えれば凡そ 10 万人に 1 人、すなわち特定の個人にとってみれば、火災で死ぬのは 10 万年に 1 回より小さい確率に過ぎない。10 万年というと即座にイメージ出来ないであろうが、メソポタミア文明やエジプト文明が約 5 千年前のことであるからその 20 倍もの大昔にあり、人類の祖先はまだアフリカを出ていなかった。

現在、日本での火災による死者の大半が住宅火災によるのは、幼児から老人まで色々な特性の居住者が就寝も含む様々な状態で起居しているという住宅の特性を考えれば、容易に納得できるであろう。しかし、基本的に健常者が起床状態で使用する小規模な事務室などで火災が発生し、そこで死亡者が出る危険性は格段に小さいと考えられる。実際、このような居室で多くの犠牲者が発生した事例を目にしたことがない。しかし、こと大規模な物販店舗、飲食店、集会施設等、大規模な居室での火災となると話は違って来て、大事故の事例も少なくない。居室避難であっても、規模が大きく確りした避難安全設計の必要性が高まってくる。

### 1.2. 建築物の大規模化と火災リスクの増大

建物の個々の居室の火災時避難に関するリスクは小さい場合でも、階や全館に関するリスクは大きくなる可能性がある。特定の空間での出火率や在室者は少なくとも、階や建物には複数の空間があるため、その数に比例して出火率や潜在的避難者数が増加するためである。例えば、各階に 10 室を有する 10 階建ての建築物では、1 室の場合に比較して階や全館での出火率はそれぞれ 10 倍、100 倍、また在館者数も同様に 10 倍、100 倍になるので、出火率×潜在的犠牲者、すなわち人命リスクは階につき  $10 \times 10 = 100$  倍、建物全体では  $100 \times 100 = 10,000$  倍となるのである。そのように大きなリスクが潜在しているからこそ、各種防火設備の設置によって、そのリスクが顕在化しないように対策が取られている訳である。

現在の避難安全検証で重点が逆転している原因の 1 つは、現在の検証法に火災リスクの観点が欠けているためと考えられる。潜在的なリスクが大きいなら、そのような事態が起こる確率を小さくするというのは自然の考え方である。従来法規では小規模な空間に対する規制は緩やかに、大規模な空間、共用廊下、階段などやの制限は厳しくするなど、経験的ながらも、このような火災リスクに対する健全な考慮が働いていたと考えられる。

### 1.3. 防火設備システムの効果的設計

防火戸、煙制御設備、スプリンクラー (SP) 設備などの防火設備は、潜在的に火災リスクが大きい空間に対して、危険な火災状態が生起する確率を低減するための主要な手段であるが、現在の建築基準法や避難安全検証法では、防火戸の閉鎖や排煙設備の作動は前提とする反面で SP の効果は評価に入っていない。しかし、個々の防火設備の作動信頼性は、100%でも 0%でもないにも関わらず、このような現実を軽視して成される避難安全設計は歪んだものになる可能性がある。何時起きるかも分からない火災に対して、何時起こっても確実に機能するように設備を維持管理しておくことはもちろん必要であるが、生易しいことではないのも現実である。個々の設備は作動の失敗が有り得ることを認識した上で、これらを組み合わせた、冗長的防火設備システムを構築し、そのシステムとしての信頼性を向上させることが有効であろう。

建築基準法や消防法によって種々の防火設備の設置基準が定められているが、それらが具体的に火災

のどんな場面で、どの程度有効なのかは殆ど誰も明確に説明できていない様に感じる。防火設備はコスト無しで設置される訳ではないので、防火設備が必須となる火災シナリオとそこで求められる性能を明確にする必要がある。防火設備の役割がより明確に理解されれば、より合理的で効果的な防火設備設計が可能になる。

#### 1.4. 避難リスクの許容

避難安全検証法は、設計火源および安全評価基準を導入することで、仕様書の基準によっていた時代に比較して、火災安全設計に柔軟性と合理性を与え得る大きな可能性を拓いたと言えよう。しかし、現状では重要度や確率的側面に対する考慮が不足している。これらの側面を考慮しないなら、小さな戸建住宅でも大規模な建物と同様に種々の防火設備が必要と言うことにもなりかねない。

建築基準法の防火規定や消防法規の目的は火災リスク全般の制御である。性能的避難安全設計はその部分であり、その目的は火災時の避難リスクの制御である。この避難リスクをゼロリスクにすることを目標にすれば建物の避難安全設計は非現実的なものになる。妥当なレベルの避難リスクを許容することが合理的な避難安全設計を可能にするのである。

## 2. 性能的避難安全設計法の基本構成

提案するリスク基盤の避難安全検証法は、一般的な性能的避難安全設計法の手続きを踏襲しており、現行の避難安全検証法の枠組みを根本から改めるものではない。詳細は3節に後述するが、簡単に説明すると火災リスクの観点を導入することによって、設計火源の設定方法の改良と、検証すべき設計シナリオの明確化を意図したものである。ここでは、先ず性能的避難安全設計法の基本的構成を整理しておく。

### 2.1. 性能的避難安全設計法の基本手順

一般に性能的避難安全設計の手続きは、図 2.1 に示すような手順に要約される。すなわち、建築設計（案）が規定の設計火源の下で安全性の評価に掛けられ、安全基準を満足していることの確認を持って認定される。

(a)安全検証は‘決定論的’手順によって実施される（注 2.1）。

(b)安全要件への適合判定のための性能的安全基準は設計火源および安全判定基準の組み合わせで規定される(注 2.2)。

(c)適合検証の方法は安全側であれば足りる(注 2.3)。

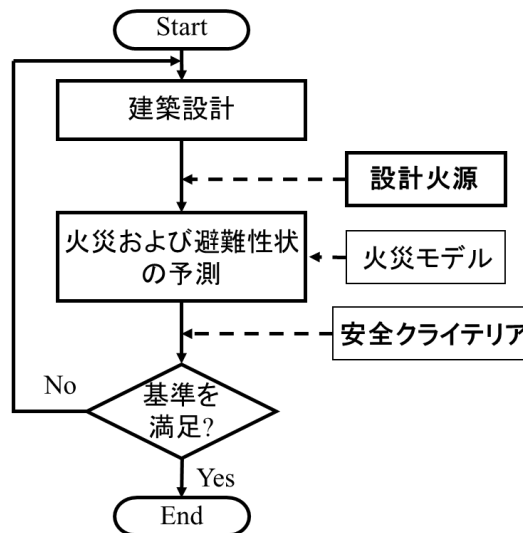


図 2.1 性能的避難安全設計の基本的手順

(注 2.1) 建築の設計手続きが煩雑だと設計コストが増加し、性能的設計を行う利点が失われてしまう。安全検証手順の決定論的性格は火災安全設計実務の効率上非常に重要である。

(注 2.2) 火災安全性のレベルは、設計火源および安全判定基準の組み合わせの如何で決定される。例えば、安全判定基準が厳しくても設計火源が緩やかなら基準を満たすことは容易となる。‘厳しい安全判定基準と緩やかな設計火源’の組み合わせは‘緩い安全判定基準と厳しい設計火源’の組み合わせと同等となるので、同一の安全レベルを達成するためにはどちらの方法によっても良い。ただし避難安全に関しては、人命に絡む問題なので安全判定基準が厳しめに取られる方が心情的に受け入れられ易いと思われる。

(注 2.3) 設計は創作のアイデアを具体的に表現する手段であって科学的真理の探究が目的ではない。避難安全検証においては、避難安全上の要求を満たすための厳密解を求める必要はなく、要求が安全側に満たされることが検証されれば足りる。その結果、厳密な扱いをする場合に比較して、空間プランや設備に幾分厳しい要求が課される結果となったとしても、建設側で受け入れ可能な限り構わない。

## 2.2. 設計火災条件と安全判定基準の特徴

現在の性能的避難安全設計あるいは避難安全検証での設計火源やシナリオの設定および安全判定条件には、一般に次のような特徴がある。

(a)居室の在館者数は満室状態を仮定して設定される。

建築空間における在館者数には季節や時間による変動があることが多く、火災は常に在館者が最も多いときに発生する訳ではない。しかし避難安全検証での在館者数は空間用途毎に規定される在館者密度（人/m<sup>2</sup>）を基に設定される。この値は殆ど空間に在館者で満たされている場合に対応する値である。

(b)避難安全に関する安全判定クライテリアは、煙に曝されない、あるいは些少にしか曝されない、などの厳格な基準が設定される。

わが国の避難安全検証では、避難の安全判定基準は煙層の高さが床上 1.8m とされているが、諸外国の性能設計でも避難安全の判定クライテリアは煙層高さ 2.0m 以上などの形で規定されていることが多いようである(注 2.4)。

(c)設計火源は、常に‘危険な火災’として成長する火災が設定される。

火災統計によれば出火した火災の大半は小火で終わるが、避難安全設計での設計火源としては、少なくとも避難が必要とされるほどには、危険なレベルに成長する火源が設定される(注 2.5)。

(注 2.4) ISO/SC3 (火災毒性) などでは、煙に対する人の生理的危険度のデータに基づき LC50 などをクライテリアとして使う提案もなされているが、必要排煙量の算定などを行う設計実務では、煙層高さを規定値以上に保つための設計は出来ても、LC50 以下に抑制するような設計方法は分からないと思われる。また煙に曝される条件下では避難行動の予測自体が不可能である。

煙に曝されても直ちに死亡する訳ではないが、煙に曝されない、あるいは些少にしか曝されない程度の厳格な条件を設定する方が、避難計算の妥当性がより説得性を持ち、煙制御設計などの工学的扱いを明確にする上でメリットがある。煙に曝さない要求の方が LC50 による要求より厳格であるが、どちらを選んでも建設コスト的に許容可能なように設計火源を調整しなければならないので結局は同じことである。

但し、煙の存在する空間での避難行動の性状については殆ど何も分っていない。パニック等相当な混乱も有り得るので煙層高さを安全基準としているのは便宜的措置に過ぎないことは念頭に置くべきである。

(注 2.5) 避難安全設計では小火、燦燃火災などを対象としても避難経路や排煙設備などの設計に対して何らの指針も得られないので無視されるのは当然である。しかし、個々の空間を取ってみれば、火災が発生する危険性は著しく低いことが多く、これを無視しては常識的な議論が成り立たない。例えば、もし寝室で必ず危険な火災が発生することを前提にすれば、確実に避難安全を確保する現実的な手段は存在しないであろう。実際、国によっては居室の一部の避難を自己責任による火災と見做して性能設計の対象から除外しているようである。しかし実質的には、このような答えが無いようなシナリオを、火災発生確率が極めて小さいとして、リスクを許容すると言うことだと考える。



### 3. リスク基盤の避難安全検証法の手続き

今回提案する‘リスク基盤の避難安全検証法’の前提や検証の手続きは 2 節に記述した現行の性能的避難安全検証と基本的に同じである。若干の違いは、下記の点に纏められる。すなわち、‘リスク基盤の避難安全検証法’では

- (a) 出火空間の規模、用途に伴う出火率、および避難対象人数に基づいて、許容避難リスクを決定し、その許容避難リスクが満足されることを検証するために必要な設計火源を定める（注 3.1）。
- (b) 防火扉、スプリンクラー（SP）、排煙設備等の作動/不作動によるイベント分岐によって検証が必要な避難シナリオを抽出する（注 3.2）。

なお、許容避難リスクおよび設計火源を定める上で必要となるデータベースはわが国における火災統計データなどを使用して構築する。

こうして、設計火源と避難シナリオが決定された後は、現行の避難安全検証法と同じ手続きに沿って検証作業を行う（注 3.3）。

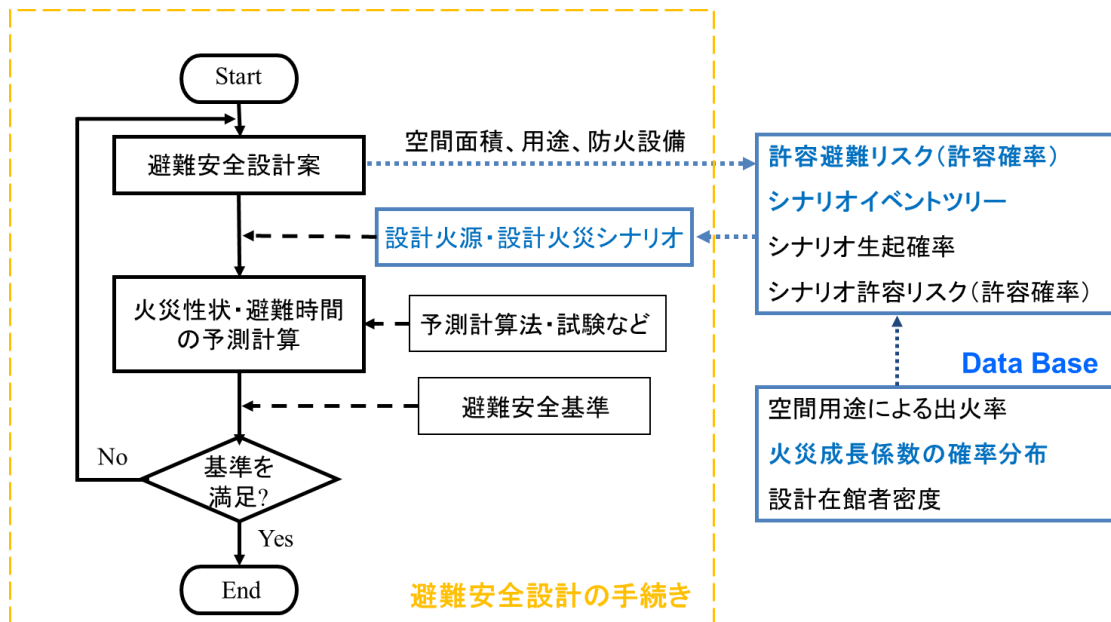


図 3.1 リスク基盤の避難安全検証法の枠組み

(注 3.1) 現行の避難安全検証における設計火源では、その下での避難設計が不十分なのか過剰なのか評価出来ない。

(注 3.2) 避難設計には種々のシナリオが関係する。どのようなシナリオまで考えるべきかが頻繁に問題となるが、各人ごとの主観によって意見がかなり分かれる。どこまで考慮するかによって設計への影響が変わるので、ある程度共通の合意が得られるようにするためにはシナリオ選択のガイドラインとなるような何らかの指標が必要である。なお、ここでは火災シナリオを確率的に取り扱い、避難シナリオは確率的に取り扱っていない。

(注 3.3) 予測計算法、避難安全基準は、現行のままとする。但し、改善の余地は多々あると思われる。

## 4. リスク基盤の避難安全設計における設計火源

### 4.1. 性能的火災安全設計における設計火源

一般に、性能的火災安全設計における設計火源のモデルは、図 4.1 に図解されるようなものである。この設計火源では、小火など無視され、常に危険な火災として出火直後から発熱速度 $Q$ が時間の2乗に比例して増加し、その後は換気支配、燃料支配、SP制御の条件によって一定となる。すなわち式で表せば

$$Q = \min(\alpha t^2, Q_{max}) \quad (4.1)$$

ここに、 $\alpha$ ：火災成長係数(kW/s<sup>2</sup>)、 $t$ ：時間(s)、 $Q_{max}$ ：最大発熱速度(kW)である。

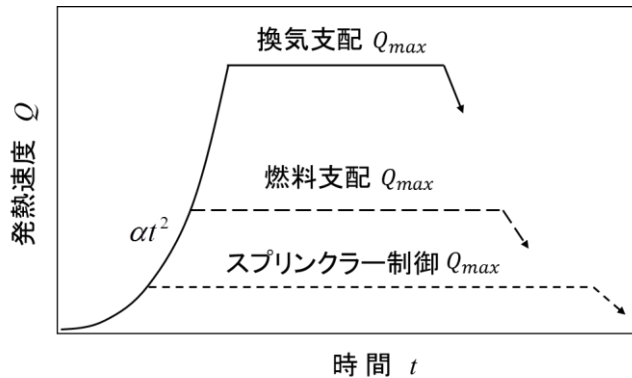


図 4.1 性能的火災安全設計における設計火源

### 4.2. 最大発熱速度 $Q_{max}$

この設計火源モデルは、現在世界各国の性能的火災安全設計において概ね似通った形のものが使われている。但し、設計火源を決定する際のSPの効果の扱いについては確立しておらず、無視しているものもある。その場合SP制御の最大発熱速度 $Q_{max}$ は存在しない。

- (a) 換気支配の $Q_{max}$ ：区画内での発熱速度の上限が火災空間への外気流入速度で決まるので比較的簡単に見積もることが出来る。
- (b) SP制御の $Q_{max}$ ：SPが作動しない上限の発熱速度として見積もることとする。SPが作動しない規模であっても避難上危険な火災は多くあると思われる。これらの火災の成長速度、経過は様々であろうが、ここでの $Q_{max}$ は、これら多様な小規模火災の発熱速度のいずれも安全側に包含するものとする。  
(Annex A 参照)
- (c) 燃料支配の $Q_{max}$ ：区画火災でも燃料支配の火災は多いと思われるが、いわゆる局所火災から換気支配火災まで幅が広く複雑で、現段階では実務的に利用可能な知見が乏しいため、今回は使わない。

### 4.3. 火災成長係数 $\alpha$ の確率密度分布

火災初期段階の成長速度は避難にとって影響が大きい、実際の建物火災の成長係数 $\alpha$ は様々な着火源や、着火物となる建物内収納可燃物の性質などへの依存が大きい。図 4.2 に示す NFPA (National Fire Protection Association) による例のように、家具等を始めとする様々な収納物の火災拡大性状は、燃焼実験で発熱速度を測定することにより調べられており、性能的火災安全設計に対しても貴重なデータが提供されている。しかしそれらは、あくまで燃焼実験で人為的に着火した燃焼性状である。実験では供試可燃物を確実に燃焼させるため十分な火力を持った着火源が使われるが、着火源の火力が強ければ燃焼速度も当然大きくなる。

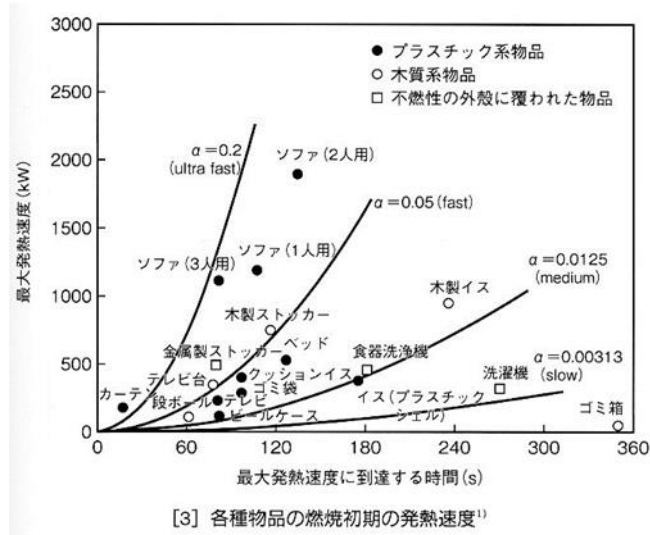


図 4.2 各種可燃物の火災成長係数 $\alpha$  (NFPA)\*<sup>1</sup>

現実の火災では、どのような可燃物がどのような着火条件で燃焼しているのかの頻度が分からないので、実際の火災ではどのくらいの成長速度の火源が、どの位の頻度で発生しているのかは分からない。図 4.3 は総務省の火災報告のデータを基に初期火災の成長係数 $\alpha$ の確率密度分布を推定した結果である。これによれば、火災成長係数 $\alpha$ の確率密度分布は、室用途に関わらず、最頻値を $\alpha = 0.005$  付近とする対数正規分布に良好に近似される。 $\alpha$ の確率密度は最高値位置から大きくなるに従い確率は急激に減少して、 $\alpha > 0.1$ のものは実質上ゼロと言える程に小さくなる (Annex A 参照)。

室用途による特徴が $\alpha$ の確率密度分布に現れないのは、たとえ用途によって室に積載される可燃物の種類が多少異なっても、実際の火災において着火源や着火物になり易い物品は似通っているためではないかと思われる。また $\alpha$ の大きな値の頻度が少ないのは、着火源として頻度が高い種類の物品の火力では家具や可燃内装などを大きな可燃物を着火させるのは難しいのかも知れない。理由は何であれ、火災の成長係数 $\alpha$ の値について、室用途による違いにそれ程神経質にならないで良いとすれば実務上かなり便利である。

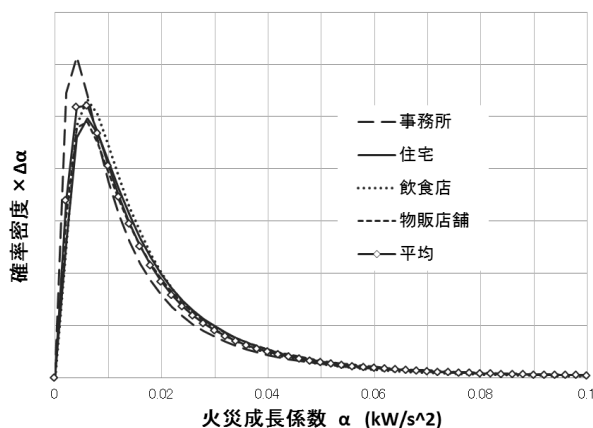


図 4.3 火災報告に基づく火災成長係数 $\alpha$ の確率密度分布

参考文献

- 1) 日本火災学会編：建築と火災、共立出版、2002

## 5. 許容避難リスクと設計火源

リスク基盤の避難安全検証法は、建物火災に対する避難安全設計が許容レベルの避難安全性能を有していることを、性能的避難安全設計の枠組みの中で検証するための設計火源を提案することを目的としている。その設計火源は

‘許容避難リスク’ → ‘許容避難失敗確率’ → ‘設計火源’

を順次決定して行く手順で決定される。

設計火源が決定された後は、現行の避難安全検証法と同様に工学的予測計算法を用いて避難安全を検証すれば良い。

### 5.1. 設計火源の意味とは

先ず問題を明確にするために図 5.1 のような居室の避難出口の設計に関する簡単な例をとってみると、設計火源が過小ならどんな出口も OK、設計火源が過大ならどんな出口も NG となってしまう。どんな原理で設計火源を設定するかは結構難しい問題である。室用途が同じとすれば、避難者人数も出火率も室面積が大きいほど大きくなるにも関わらず、現行の避難安全検証法での火災成長係数 $\alpha$ は空間規模等によらず用途毎に一律の値である。つまり、避難出口の要求は、規模の小さい室には厳しい反面、大きい室では著しく緩いものになってしまう可能性がある。

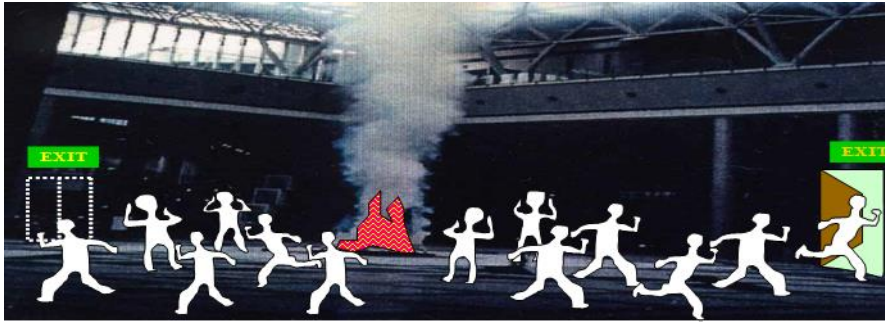


図 5.1 避難出口が適切であることを検証するために設計火源をどう選べば良いか

### 5.2. 火災時の避難リスク

‘避難リスク’ という語は幾分違和感のある語かも知れないが、リスクが何かしら良くないことが発生する危惧があることを言うネガティブな意味を持つ語であるから、ここで言う‘避難リスク’は、火災により発生する死傷者の期待値と考える。

ここでは避難リスクを $R$ として、次式で定義する。

$$R = PC \quad (5.1)$$

ここに  $P$  : 避難を必要とするほどに‘危険な火災’の発生確率（小火など、避難行動の発生に至らない規模の出火は除く）

$C$  : 危険な火災が発生した場合の死傷数の期待値（死亡や重傷に限らず、煙を吸い込む程度の軽傷も含む）

上記の $P$ および $C$ の定義は、建築物の性能的火災安全設計において、設計火源としては危険なレベルまで成長する火源が想定され、安全判定には‘煙に全く曝されない’あるいは‘ごく軽微にしか曝されない’ための基準が用いられることに対応している。

ここで、上記の避難リスク $R$ を建築空間に適用する下記の議論において混乱を避けるために、任意の出火空間  $K$  と避難対象空間  $K$  について図 5.2 に図解しておく。一般に、建物の任意の空間( $K$  とする)で火災が発生したとき、その火災による危険は、出火空間  $K$  だけでなく建物全体に及ぶ可能性がある。従って、死傷者が発生する危険がある領域も避難安全設計も建物全体が対象となる。しかし設計作業の

複雑化を避けるため便宜上、居室避難、階避難、全館避難に分けて考える。その各々の場合に対象となる避難者数 $C_0(K)$ は、それぞれ出火室、出火階、出火建物の在館者数となる。以下では、出火空間  $K$  における火災で避難が必要となる対象空間も  $K$  の記号で表している。

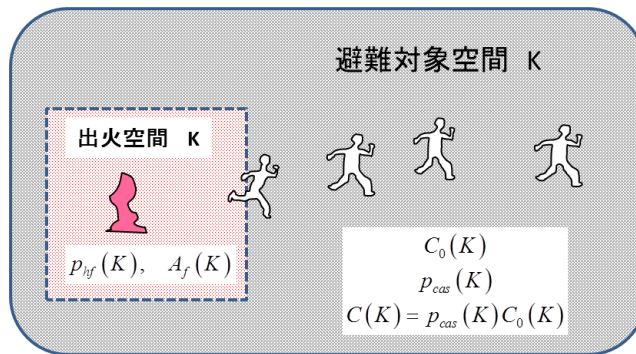


図 5.2 出火空間と避難対象空間

上記(5.1)の定義を任意の出火空間  $K$  に適用すれば避難リスク $R(K)$ は

$$R(K) = P(K)C(K) \tag{5.2}$$

上式において、出火空間  $K$  の出火率 $P(K)$ は出火空間の用途による出火特性と床面積に依存するとして

$$P(K) = p_{hf}(K)A_f(K)^{1/2} \tag{5.2a}$$

ここに、 $p_{hf}(K)$ :出火空間  $K$  における出火室の単位床面積当たり ‘危険な火災’ の出火率

$A_f(K)$  ; 出火空間  $K$  における出火室の床面積

なお、 $A_f$ に 1/2 乗の指数が掛かっているのは、出火率が出火空間の面積 $A_f$ に対し、比例より緩やかな増加を見せる傾向があるためである (Annex 2 参照)。

また $C(K)$ については避難対象空間の在館者数 $C_0(K)$ と出火による死傷確率 $p_{cas}(K)$ の積として

$$C(K) = p_{cas}(K)C_0(K) \tag{5.2b}$$

のように書く。この $p_{cas}(K)$ の値を小さくすることが避難安全設計の役割であると言える。

### 5.3. 許容避難リスク

上記(5.2)から、任意の出火空間  $K$  に対する避難リスク $R(K)$ は、次のように纏められる。

$$R(K) = P(K)C(K) = p_{hf}(K)A_f(K)^{1/2} \times p_{cas}(K)C_0(K) \tag{5.3}$$

ここでは、この避難リスク $R(K)$ の許容値について考える。

#### (1) 許容避難リスクの標準建物空間 (Benchmark building space)

任意の建物空間の避難リスク $R(K)$ は空間の用途や規模に関わらず、ある許容値 $R_a$ を超えてはならないものとする。すなわち

$$R(K) \leq R_a \tag{5.4}$$

ここで問題となるのはこの $R_a$ の値をどう定めたら良いかという点であるが、これは標準建物空間 (Benchmark building space) を選択すれば、その避難リスクに関わる値から定められる。

標準建物空間とは、ある程度火災の発生はあっても犠牲者は発生していても安全性を向上させる対策のコストや効果を考慮すれば、現状で満足すべきだと社会一般が判断するような建物空間である。この標

準建物空間として、ここでは戸建住宅を選ぶ。住宅は数が多く年間の火災による死傷者が最も多い建物でありながら、死傷者数は安定しており、避難上の法規制が殆どなく、規制の強化も議論されないことから、火災による避難リスクについて社会的に許容されているレベルにあると判断される（注 5.1）。

すると、戸建住宅の避難リスクを $R(H)$ として

$$R_a = R(H) = p_{hf}(H)A_f(H)^{1/2} \times p_{cas}(H)C_0(H) \quad (5.5)$$

従って、式(5.4)の関係を具体的に書くと

$$R(K) = p_{hf}(K)A_f(K)^{1/2} \times p_{cas}(K)C_0(K) \leq p_{hf}(H)A_f(H)^{1/2} \times p_{cas}(H)C_0(H) = R_a \quad (5.6)$$

## (2) 設計ベースの許容避難リスク

式(5.6)は出火率も含む実際の避難リスクであるが、性能的火災安全設計では出火率は問題にせず、出火を前提として、そこから検討が始まる。そこで式(5.6)の左辺の出火率の部分を実数に置き、任意の空間 $K$ の設計ベースでの避難リスク $R^D(K)$ とする。すなわち

$$R^D(K) \equiv p_{cas}(K)C_0(K) \leq \frac{p_{hf}(H)A_f(H)^{1/2}}{p_{hf}(K)A_f(K)^{1/2}} \times p_{cas}(H)C_0(H) = R_a^D(K) \quad (5.7)$$

式(5.7)の設計ベースの避難リスクは、対象空間の出火率の因子を既に右辺に取り込んでいるので、避難リスクは出火が起きたところから考えれば良い。この右辺は設計ベースでの許容避難リスクと考えればよいので、 $R_a^D(K)$ と書くことにする。

$A_f(H)$ は戸建住宅全体を1つの出火空間と見做して延べ床面積を取る。総務省統計局(2006)によれば、戸建住宅の延べ床面積の平均は126.4m<sup>2</sup> (H17年度)で、分布としては100-150m<sup>2</sup>が38.6%と最も多いが、150m<sup>2</sup>超のものも25.5%ある。 $A_f(H)$ を小さく取ると、法規上避難に関する制約が掛らない住宅が許容避難リスク $R_a^D(K)$ を超える矛盾が生じて不都合だが、 $A_f(H) = 175 \text{ m}^2$ ならばほぼ支障がないであろう（注 5.2）。

在館者密度については避難安全検証法の値を用いることとすれば、住宅の在館者密度 $\rho(H)$ は

$$\rho(H) = 0.06 \text{ 人/m}^2$$

また火災統計の調査に拠れば、一般住宅における危険な火災による死傷者発生確率 $p_{cas}(H)$ は

$$p_{cas}(H) = 0.14 \quad (5.8)$$

従って

$$p_{cas}(H)C_0(H) = 0.14 \times (0.06 \times 175) \approx 1.5 \quad (5.9)$$

これらを式(5.7)に用いれば、設計ベースの許容避難リスク $R_a^D(K)$ は次のようになる。

$$R_a^D(K) = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{A_f(H)}{A_f(K)} \right\}^{1/2} C_0(H) = 1.5 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{1/2} \quad (5.10)$$

すなわち、式(5.7)において、仮に空間の設計が変更されても、出火空間の面積 $A_f(K)$ や避難対象人数 $C_0(K)$ が変わらない限り、 $R^D(K) \leq R_a^D(K)$ とすることが出来るのは死傷確率 $p_{cas}(K)$ のみである。従って $p_{cas}(K)$ は許容死傷確率 $p_{cas}^a(K)$ でなくてはならない。

$$p_{cas}(K) = p_{cas}^a(K) \quad (5.10)$$

念のため、許容死傷確率の式をかいておくと

$$p_{cas}^a(K) = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{1/2} \frac{C_0(H)}{C_0(K)} \quad (5.11)$$

この式に含まれる‘危険な火災’の単位面積当たりの出火率比は、火災統計の調査・分析結果に基づいて表 5.1 の値とする。



表 5.1 危険な火災の単位面積当たりの出火率比 $\{p_{hf}(H)/p_{hf}(K)\}$

出火室の用途	戸建住宅	集合住宅	飲食店	物販店舗	事務所	ホテル	病院	学校	劇場
$\left\{\frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)}\right\}$	1.0	1.5	1.0	7.0	4.0	3.0	9.0	10.0	1.2
在館者密度(*)	0.06	0.06	0.7	0.5	0.125	0.16	0.13	0.7	1.5

(\*) 在館者密度は建設省告示 1441 号(平成 25 年)

(注 5.1) 一般には標準空間を法規から選ぶ方法も考えられる。しかし、建基法施行令 107 条のように建物条件と耐火基準の関係が比較的明確な場合と異なり、避難規定は建物部位に関する仕様書的基準の寄せ集めの性格が強く、建物空間全体と避難基準との関連が体系的にまとめにくい。また、現状では分析に使用可能なデータを入手することが極めて困難であることもあり、標準建物空間の設定については、さらなる検証が必要である。

(注 5.2) 今回の方法でも在館者密度については、現行の建設省告示 1441 号と同じ値を使うので、面積が  $175\text{m}^2$  だと  $0.06 \text{ 人/m}^2 \times 175\text{m}^2 = 10.5$  人、 $200\text{m}^2$  だと 12 人となる。実際の世帯人数  $C_0$  はこれ程多くないので実際の住宅は面積が大きくても、 $R_a$  は平均的住宅と大差無いであろう。

## 6. 許容避難リスクと設計火源の決定

先に 4.2 で記述したように、火源の火災成長係数 $\alpha$ は確率密度関数 $f(\alpha)$ が対数正規分布に従う確率変数と見做せる (Annex A 参照)。

その確率分布をとる $\alpha$ から 1 つの値を取って、設計火源の火災成長係数 $\alpha_D$ とし、 $Q = \alpha_D t^2$ の下で避難上の安全性を確認することは、 $\alpha \leq \alpha_D$ の場合についての安全性は保証すること、具体的には全ての在館者が避難終了まで煙にまかれぬ設計だということである。逆に、 $\alpha > \alpha_D$ の場合はその保証の限りではないということでもある。

但し、安全を保証しないと云っても、 $\alpha$ が $\alpha_D$ より少し大きいだけなら、煙に巻かれる避難者が少し生じるだけであろう。一般には $\alpha > \alpha_D$ のときの死傷者数 (煙に巻かれる人数)  $C$ は $\alpha/\alpha_D$ の関数 $C(\alpha/\alpha_D)$ になるのかも知れない。しかし、具体的にどんな関数形になるかは空間や避難者の条件など多くの要素に依存すると思われるので、本質的に不明である。そこで、ここでは $\alpha > \alpha_D$ のときは安全側に在館者全員が避難不能になると仮定し、 $C(\alpha > \alpha_D) = C_0$  (在館者数) とする。

### 6.1. 火災成長係数 $\alpha$ が設計値 $\alpha_D$ を超える確率

下式は 5 節に示した許容死傷確率 $p_{cas}^a(K)$ を再掲したものである。

$$p_{cas}^a(K) = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{1/2} \frac{C_0(H)}{C_0(K)} \quad (5.11 \text{ 再掲})$$

ここでは死傷者の発生は火災の成長が速いことによって生じると見なしている。設計火源の成長係数 $\alpha_D$ の下で避難安全検証されたとき (避難安全基準が満足されること)、 $0 \leq \alpha \leq \alpha_D$ では死傷者は0とし、 $\alpha_D \leq \alpha$ では安全側に在館者全員が死傷すると見なす。すると確率密度分布の中で $\alpha_D \leq \alpha$ となる確率は許容死傷確率 $p_{cas}^a(K)$ でなければならない。図 6.1 はこの概念を説明したものであり、ハッチング部分が $p_{cas}^a(K)$ である。

火災成長係数 $\alpha$ の確率密度関数を一般に $f(\alpha)$ 、累積確率密度関数を $F(\alpha)$ とすれば、

$$\int_{\alpha_D}^{\infty} f(\alpha) d\alpha = \int_0^{\infty} f(\alpha) d\alpha - \int_0^{\alpha_D} f(\alpha) d\alpha = 1 - F(\alpha_D) \quad (6.1)$$

であるから、 $\alpha_D \leq \alpha$ となる確率、すなわち許容死傷確率、 $p_{cas}^a(K)$ 、は

$$p_{cas}^a(K) = 1 - F(\alpha_D) \quad (6.2)$$

確率密度関数 $f(\alpha)$ を対数正規分布とすれば、上式の $F(\alpha_D)$ はエクセル関数を使って次のようにして計算出来る。

$$F(\alpha_D) = \text{LOGNORM.DIST}(\alpha_D, \mu_{\ln\alpha}, \sigma_{\ln\alpha}, \text{TRUE}) \quad (6.3)$$

ここに  $\mu_{\ln\alpha}$  および  $\sigma_{\ln\alpha}$  はそれぞれ対数 $\ln\alpha$ の平均および標準偏差 (Annex A, Annex D 参照)。

### 6.2. 設計火源の火災成長係数

ここでの目的は許容避難リスクに対応する設計火源を求めることであるから、そのためには 6.1 節とは逆に、許容死傷確率 $p_{cas}^a(K)$ を与えて設計火源の火災成長係数 $\alpha_D$ を求める必要がある。そのためには、式(6.2)から

$$F(\alpha_D) = 1 - p_{cas}^a(K) \quad (6.4)$$

なので、エクセル関数を利用して $\alpha_D$ を

$$\alpha_D = \text{LOGNORM.INV}(1 - p_{cas}^a(K), \mu_{\ln\alpha}, \sigma_{\ln\alpha}) \quad (6.5)$$

のように逆算すれば良い。



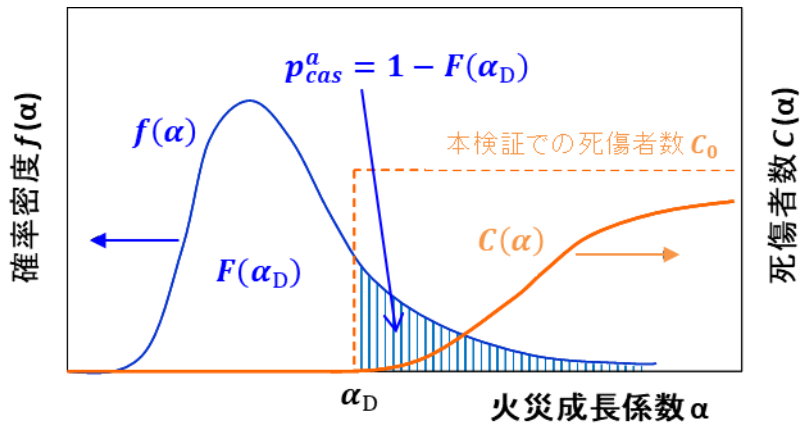


図 6.1 火災成長係数の確率密度分布および火災成長係数と死傷者数の関係

### 6.3. 設計火災成長係数 $\alpha_D$ の最大値

式(5.11)からも伺えるように、対象空間の避難者数 $C_0(K)$ が大きくなるほど許容死傷確率の値は小さくなり、伴って、図 6.1 でも分るように、設計火源の $\alpha_D$ が大きくなるが、対数正規分布は、その性質上 $\alpha$ が大きい領域で確率密度が非常に低い値の尾を引くので、式(6.5)で計算した $\alpha_D$ の値が、火源の成長係数としては非現実的に大きな値として算出される可能性がある (Annex A 参照)。

非現実的な設計火源の設定は避難安全設計に非現実的な要求を課す原因になるので、ここでは上記の手続きで計算される $\alpha_D$ の値に最大限界値を設定する。既に 4.3 節の図 4.3 でも見たように、実際の火災報告に基づくデータには成長係数 $\alpha$ に 0.1 を超すデータは皆無に近い。さらに、燃焼実験の結果を基にした NFPA のモデル火源の Ultra fast が $\alpha = 0.2$ であることも考慮に入れて、

$$\alpha_D \leq 0.2 \quad (6.6)$$

と限っておいて十分安全側と考えられる。

最終的に、設計火源の発熱速度は次のような形とすることになる。

$$Q = \min(\alpha_D t^2, Q_{max}), \quad \alpha_D \leq 0.2 \quad (6.7)$$

## 7. 設計火災シナリオへの許容避難リスクの配分

性能的避難安全検証では、発生した火災は小火で鎮火することではなく、必ず避難にとって危険な火災に成長することを前提として、煙の拡大と避難の時間との比較で建物の避難安全性、より具体的には避難経路計画の妥当性が評価される。

避難経路計画の妥当性とは避難時に火災からの安全が保たれることであるが、そのためにSP設備、防火扉、排煙設備などで構成される防火設備システムの役割は大きい。しかし、それを避難安全確保のために有効に機能させるための検討は組織的にはなされて来ていない。防火設備システムの設置基準に関する法規制が先行したことで、研究への関心が向かなかったと思われる。

性能的火災安全設計においては設計火源と同様に設計火災シナリオが重要であることは、国外でも認識されているようであるが、火災シナリオを性能的火災安全設計に組み込むための方法論は未だに確立していない。火災シナリオとして、具体的にどのようなシナリオに注目すべきかについても、考える人毎に相違がある。

避難安全設計に関しては防火設備システムが正常に作動するか、作動しないかによるシナリオが最も重要であると考えられる。過去の重大な火災事例の殆どで防火設備の作動失敗が関係していることを考えれば、防火設備に常に作動することを期待するのは明らかに楽観的すぎる。防火設備が作動するか否かによるシナリオが重要なのは、それによって火災の条件が異なり、伴って避難環境が劇的に変わるようになるからである。

### 7.1. 防火設備システムの作動／不作動に基づく火災シナリオ

防火設備の作動／不作動により生ずるシナリオは、イベントツリーを作成してみれば明確になる。図7.1は成長火災が発生した空間に防火設備システムとしてスプリンクラー（SP）設備と煙制御設備が備えられている場合のイベントツリーの例である。SPにつき作動と不作動の2つのケースがあり、それぞれのケースにつき煙制御の作動と不作動の2ケースがあるので計4ケースのシナリオが生じ、一般には防火システムがN個あれば $2^N$ 個のシナリオが生じる。またこれらの各シナリオ $i$ が生起する確率 $P_i$ は各防火設備 $j$ の作動確率 $p_j$ によって決まる。

5節で導入した設計ベースの火災は、‘危険な火災’の発生を前提とした火災であるが、その‘危険な火災’はその性状が図7.1のような確率的シナリオの下で影響を受ける火災の集合である。つまり、‘危険な火災’の避難に対する危険は、シナリオに依り厳しい場合も緩い場合もある。

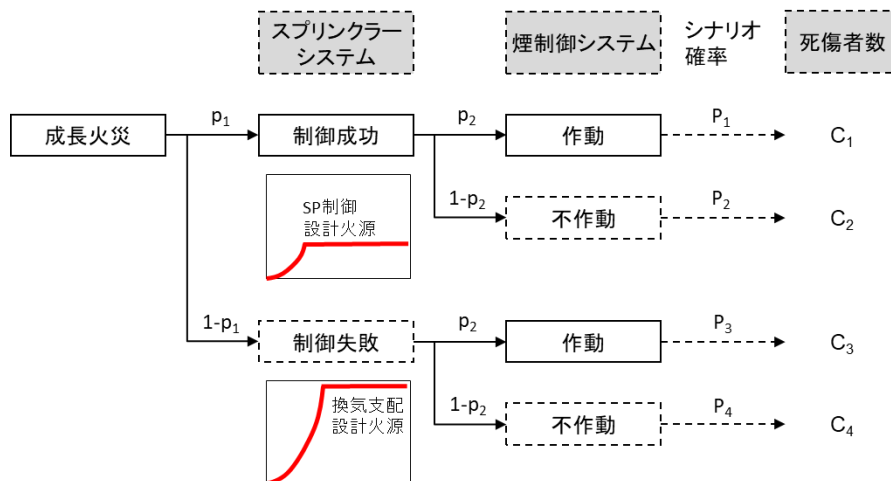


図 7.1 防火設備システムの作動／不作動に基づく火災シナリオ

(注 7.1) SPが作動しても完全に鎮火に至らない場合もあり、またSP設備自体は正常でも火源の発熱速度が、SPが作動する規模に至らない場合もある。避難上はそのような火災規模でも十分危険な火災となり得るので、図7.1ではそれらの規模の火災を全てひっくるめて[制御成功]としている。

## 7.2. 各シナリオへの部分許容リスクの配分

### (1) シナリオの生起確率

イベントツリーは色々なシステムの解析に使われる手法であるが、イベントが分岐するときの確率を評価することは必ずしも容易ではないので、概念的分析には有効であっても定量的分析に使うことは難しいことが多い。上記の防火設備の場合にも必要な作動確率のデータを得ることは容易とは言えないが、現場点検やメンテナンス記録、あるいは火災調査データなど、意識的に取り組めば、ある程度具体的な数値を得ることに活用できるデータは存在すると考えられる。このような防火設備の作動確率 $p$ を用いれば、図7.1のような防火設備の作動／不作動に基づくイベントツリーに現れる各シナリオの生起確率 $P_i$ が算出できる。因みに、上図の例でのシナリオ生起確率 $P_i$ は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 p_2 \\ p_1 (1 - p_2) \\ (1 - p_1) p_2 \\ (1 - p_1) (1 - p_2) \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

なお、このシナリオは‘危険な火災’の発生を前提とした時のシナリオなので、生起確率 $P_i$ の合計は1となる。

### (2) 任意のシナリオ*i*における死傷確率

避難設計の対象としている空間 $K$ で、防火設備の作動／不作動によって生ずる各シナリオを*i*、その時の死傷確率を $\bar{p}_{cas}(K, i)$ 、また空間の避難者数を $C_0(K)$ とすれば、シナリオ*i*における設計ベースの避難リスク $R^D(K, i)$ は

$$R^D(K, i) = P_i \times \bar{p}_{cas}(K, i) C_0(K) \quad (7.2)$$

従って、

$$\bar{p}_{cas}(K, i) = \frac{R^D(K, i)}{P_i C_0(K)} \quad (7.3)$$

### (3) 空間の許容避難リスク $R_a^D(K)$ の各シナリオへの配分

対象空間 $K$ に防火設備の作動／不作動によって生ずる火災シナリオの数が一般に $N$ 個あるとき、全シナリオでの避難リスク $R^D(K)$ は、それら $N$ 個のシナリオ*i*の避難リスクの集合として

$$R^D(K) = \sum_{i=1}^N R^D(K, i) \quad (7.4)$$

と書けるが、対象空間 $K$ の避難リスク $R^D(K)$ は当該空間の許容避難リスク $R_a^D(K)$ を超えてはならないので、火災シナリオの避難リスク $R^D(K, i)$ には次の制約が課される。

$$\sum_{i=1}^N R^D(K, i) \leq R_a^D(K) \quad (7.5)$$

各火災シナリオの避難リスク $R^D(K, i)$ に課される制約条件は式(7.5)だけであるから、これを満たす $R^D(K, i)$ の組み合わせには大きな自由度がある。そこで、対象空間に課されている許容リスク $R_a^D(K)$ を、各シナリオへ部分許容リスク $R_a^D(K, i)$ として分配し、その総和が対象空間の許容リスク $R_a^D(K)$ を越さない条件、すなわち

$$\sum_{i=1}^N R_a^D(K, i) \leq R_a^D(K) \quad (7.6)$$

の条件で、それぞれのシナリオ毎に次式の条件を満足させれば良い。

$$R^D(K, i) \leq R_a^D(K, i) \quad (7.7)$$

式(7.7)の条件が満足されることを検証するには、 $R^D(K, i)$ に対応する設計火源 $\alpha_D$ を、6節に既述した

方法で設定して、火災性状と避難行動の予測を行い、死傷者が発生しないことを検証する。

#### (4) 各シナリオにおける許容死傷確率

6.2 節で既述のように、火災成長係数 $\alpha$ の確率密度分布と許容避難リスクから、任意のシナリオ $i$ の設計火源 $\alpha_D$ を求めるためには、シナリオ $i$ の許容死傷確率 $\bar{p}_{cas}^a(K, i)$ を知る必要がある。

シナリオ $i$ の設計ベースの避難リスク $R^D(K, i)$ は、式(7.2)で与えられる。この $R^D(K, i)$ にシナリオ $i$ に分配される許容リスク $R_a^D(K, i)$ を代入すると、シナリオ $i$ において許容される死傷確率 $\bar{p}_{cas}^a(K, i)$ となる。

$$\bar{p}_{cas}^a(K, i) = \frac{R_a^D(K, i)}{P_i C_0(K)} \quad (7.8)$$

この式の $R_a^D(K, i)$ は、元となる対象空間 $K$ の許容避難リスク $R_a^D(K)$ の一部をシナリオ $i$ に分配したものである。念のため $R_a^D(K)$ を再掲すれば次式である。

$$R_a^D(K) = p_{cas}^a(K) C_0(K) \quad (7.9)$$

避難対象空間 $K$ が決まれば右辺の $C_0(K)$ は変わらないので、許容避難リスク $R_a^D(K)$ を定めることは許容死傷確率の値 $p_{cas}^a(K)$ を定めることに他ならない。従って空間 $K$ に対する許容死傷確率は

$$p_{cas}^a(K) = \frac{R_a^D(K)}{C_0(K)} \quad (7.10)$$

また、シナリオ $i$ に分配された許容避難リスクからシナリオ $i$ の許容死傷確率 $p_{cas}^a(K, i)$ は

$$p_{cas}^a(K, i) = \frac{R_a^D(K, i)}{C_0(K)} \quad (7.11)$$

従って、式(7.8)のシナリオ $i$ における許容死傷確率 $\bar{p}_{cas}^a(K, i)$ は、避難対象空間 $K$ の許容死傷確率のシナリオ $i$ への分配 $p_{cas}^a(K, i)$ をシナリオ生起確率で割ったものとなる。

$$\bar{p}_{cas}^a(K, i) = \frac{R_a^D(K, i)}{P_i C_0(K)} = \frac{p_{cas}^a(K, i)}{P_i} \quad (7.12)$$

式(7.12)の $\bar{p}_{cas}^a(K, i)$ は、シナリオ $i$ が生起したという条件の下での許容死傷確率である。シナリオ生起確率 $P_i$ が小さいほど $\bar{p}_{cas}^a(K, i)$ が大きくなるので、配分される許容死傷確率の値 $p_{cas}^a(K, i)$ が小さくても緩い設計火源での避難安全検証が出来る可能性がある。設計火源を定めるにはシナリオ毎に 6.節に記述した手順に依れば良い。

因みに、避難対象空間の許容避難リスク $R_a^D(K)$ を各シナリオに対して分配した後は、設計火源の $\alpha_D$ を決定するために結局のところ式(7.10)によって許容死傷確率 $p_{cas}^a(K)$ を求めることになるので、直接 $p_{cas}^a(K)$ を分配の方が効率的である。その場合の制約条件も $R_a^D(K)$ を分配する場合の式(7.6)と同様に次式(7.12)の関係を満たすことである。

$$\sum_{i=1}^N p_{cas}^a(K, i) \leq p_{cas}^a(K) \quad (7.13)$$

### 7.3. 設計火源の設定方法

以上の議論に基づいて設計火源の設定方法を整理すると以下のようになる。なお、理解のし易さのため、次式を再掲しておく。

[避難対象空間 $K$ の許容死傷確率のシナリオ $i$ への分配]

$$\bar{p}_{cas}^a(K, i) = \frac{R_a^D(K, i)}{P_i C_0(K)} = \frac{p_{cas}^a(K, i)}{P_i} \quad (7.12 \text{ 再掲})$$

ここに  $R_a^D(K, i)$  : 避難対象空間 $K$ の許容避難リスクのシナリオ $i$ への配分

$p_{cas}^a(K, i)$  : 避難対象空間 $K$ の許容死傷確率のシナリオ $i$ への配分

$\bar{p}_{cas}^a(K, i)$  : 避難対象空間 $K$ のシナリオ $i$ の許容死傷確率

[設計火源]

$$Q = \min(\alpha_D t^2, Q_{max}), \quad \alpha_D \leq 0.2 \quad (6.7 \text{ 再掲})$$

[設計火源の設定方法]

- (1)  $1 \leq \bar{p}_{cas}^a(K, i)$  ( $P_i \leq p_{cas}^a(K, i)$ ) のとき : 検証計算不要 (適合が自明)
- (2)  $0 < \bar{p}_{cas}^a(K, i) < 1$  ( $0 < p_{cas}^a(K, i) < 1$ ) のとき :  $\alpha_D$  を求めて、 $Q = \min(\alpha_D t^2, Q_{max})$  の設計火源で検証
- (3)  $\bar{p}_{cas}^a(K, i) = 0$  ( $p_{cas}^a(K, i) = 0$ ) のとき :  $Q = \min(0.2t^2, Q_{max})$  の設計火源で検証

(備考 1) これらの設計火源は防火設備の作動/不作動の条件の違いに基づく各火災シナリオに対応して設定されるので、安全検証すべき設計火災シナリオとそれに対応する設計火源が同時に定まったことになる。

(備考 2) 上記の設計火源設定方法(1)、(2)、(3)の直観的理解を目的として図 7.2 を示す。この図において  $\bar{p}_{cas}^a(K, i) = 1 - F(\alpha_D)$  である。従って、 $\bar{p}_{cas}^a(K, i) = 1$  は  $\alpha_D = 0$ 、すなわち火源の成長係数 $\alpha$ の値に関わらず避難リスクが許容値以下となることは自明、逆に  $\bar{p}_{cas}^a(K, i) = 0$  は  $\alpha_D = \infty$ 、すなわち $\alpha$ が最大限に大きい火源の下で安全検証を行う必要があることを意味している。

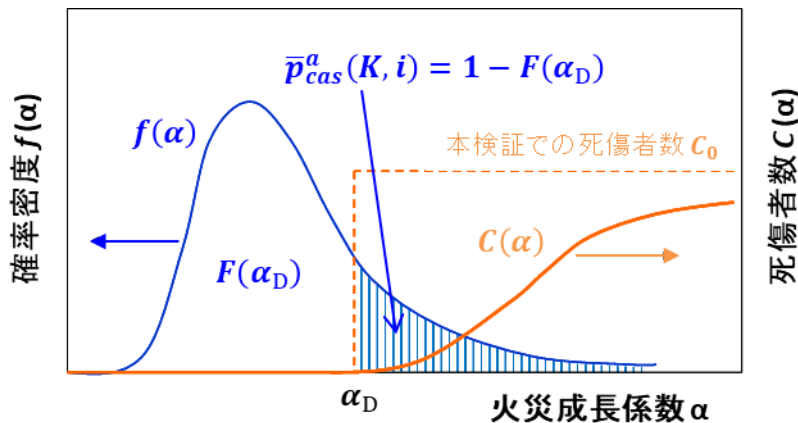


図 7.2 シナリオ $i$ の火災成長係数の確率密度分布および火災成長係数と死傷者数の関係

## 7.4. リスク基盤の避難安全検証法の手続きのまとめ

以上に議論したリスク基盤の避難安全検証法の手続きに関する要点を下記にまとめておく。

### 7.4.1 リスク基盤の避難安全検証法の基本要素

- (a) 基準建物空間 (Benchmark building space) :  $H$
- (b) 避難対象空間 ( $K$ ) の設計ベースの許容避難リスク :  $R_a^D(K)$
- (c) 避難対象空間 ( $K$ ) の許容死傷確率 :  $p_{cas}^a(K)$
- (d) 防火設備の作動確率 ( $p$ )
- (e) 防火設備の作動/不作用に基づく火災シナリオ ( $i$ ) の生起確率 :  $P_i$
- (f) 火災成長係数 ( $\alpha$ ) の確率密度関数 :  $f(\alpha)$

### 7.4.2 避難安全検証手順

- (1) 避難対象空間の設計ベース許容避難リスクと許容死傷確率の計算

許容避難リスク :

$$R_a^D(K) \equiv p_{cas}(K)C_0(K) = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{1/2} C_0(H) \quad (5.9 \text{ 再掲})$$

許容死傷確率 :

$$p_{cas}^a(K) = \frac{R_a^D(K)}{C_0(K)} = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{1/2} \frac{C_0(H)}{C_0(K)} \quad (5.11 \text{ 再掲})$$

- (2) 火災シナリオの同定 ; 防火設備の作動/不作用に基づくイベントツリー  
 (3) 同定された火災シナリオの生起確率 ( $P_i$ ) の計算  
 (4) 各火災シナリオへの部分許容避難リスク  $R_a^D(K, i)$  (部分許容死傷確率  $p_{cas}^a(K, i)$ ) の分配  
 許容シナリオ生起確率

$$\bar{p}_{cas}^a(K, i) = \frac{R_a^D(K, i)}{P_i C_0(K)} = \frac{p_{cas}^a(K, i)}{P_i} \quad (7.12 \text{ 再掲})$$

ただし

$$\sum_{i=1}^N \bar{p}_{cas}^a(K, i) \leq p_{cas}^a(K) \quad (7.13 \text{ 再掲})$$

- (5) 各シナリオにおける設計火源の決定

- $\alpha_D$ を求める

$$\alpha_D = \text{LOGNORM.INV}(1 - \bar{p}_{cas}^a(K, i), \mu_{\ln\alpha}, \sigma_{\ln\alpha})$$

- 設計火源

$$Q = \min(\alpha_D t^2, Q_{max}), \quad \alpha_D \leq 0.2 \quad (6.7 \text{ 再掲})$$

- (6) 各シナリオで決定された設計火源を用いて、従来の検証手続きにより、死傷者数が 0 となることを検証

(注 7.2) 避難における死傷者発生の確率は許容死傷確率  $p_{cas}^a(K, i)$  (あるいは許容避難リスク  $R_a^D(K, i)$ ) によって既に控除されているので、設計火源を定めた後の避難安全検証では死傷者がゼロでなくてはならない。

## 8. リスク基盤の避難安全検証のケーススタディー

リスク基盤の避難安全検証法は、避難安全検証において設計火源の設定を適切に行う手法を提案することを目的としている。その考え方と方法については既に説明した通りであるが、実際にどのように使えるかについて理解することを目的としてケーススタディーを行う。

現在の避難安全検証では、避難のステージを居室避難、階避難、全館避難の3段階に分けて検証が行われている。もちろん建物のタイプは様々で、例えば居室避難が殆ど全館避難となるような建物などもある。それぞれの実情に合わせて適宜工夫すれば良い訳だが、この3段階のステージへの分類は避難計画を考える場合に最も基本的で、多くの建物で避難上の課題の整理に有効な方法であろう。

この中で、全館避難については未だ検討を必要とする課題が多く残っていると考えられるので、ここでは取り敢えず、居室避難と階避難に関するケーススタディーを紹介する。

### 8.1. ケーススタディー：居室避難

居室避難は、場合によっては別の室で出火した時の非火災室の避難も含まれるかも知れないが、ここではある1つの居室で出火した場合の当該室から階の共用廊下へ脱出するまでの避難とする。従って、火災室避難と呼ぶ方が明確なのかも知れない。

事務室などではスプリンクラー（SP）設備や排煙設備が設けられていることも多いが、居室避難は開始してから精々1~2分程度の時間の話しであることを考えると、これらの設備がその時間内に作動して火災室避難の安全に重要な寄与をする場合は多くないと考えられる。

但し、大規模物販店舗などではそれらの防火設備が意味を持つかも知れないが、より重要な働きをする可能性があるのは、寧ろその後の段階の避難に対してであろう。

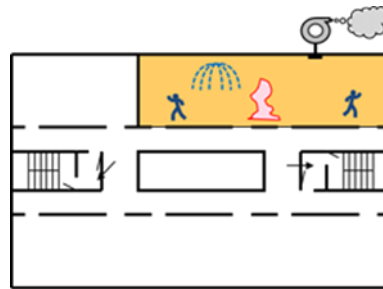


図 8.1 居室避難

#### (1) 出火室の面積と居室避難の許容死傷確率

出火室避難の安全検証を通常の手続きで行う場合は、設計火源を定めて煙性状予測を行う必要がある。今回のリスク基盤の避難安全検証では設計火源の火災成長係数 $\alpha_D$ を許容死傷確率に基づいて定める。許容死傷確率は式(5.11)で次のように与えられている。

$$p_{cas}^a(K) = \frac{R_a^D(K)}{C_0(K)} = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{1/2} \frac{C_0(H)}{C_0(K)} \quad (5.11 \text{ 再掲})$$

この式で、任意の空間  $K$  の条件を特別に標準建物 ( $H$ ) と同じとすれば、全てのパラメータの値が両者で等しくなるので、許容死傷確率 $p_{cas}^a(K) = 0.14$ となるが、一般には用途によって出火率や面積は異なる。居室避難の場合は、出火室と避難対象室は同一であるから

$$\frac{C_0(H)}{C_0(K)} = \frac{\rho(H) \times 175}{\rho(K) A_f(K)} \quad (8.1)$$

となることを考慮すると式(5.11)は



$$p_{cas}^a(K) = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{3/2} \frac{\rho(H)}{\rho(K)} \quad (8.2)$$

この式に含まれる出火率比と在館者密度は用途毎に異なるが、表 8.1 は表 5.1 から事務所、物販店舗、飲食店の用途の値を抜粋したものである（5.3 および Annex C 参照）。

表 8.1 危険な火災の単位面積当たりの出火率比と在館者密度

出火室の用途	事務所	物販店舗	飲食店	戸建住宅 (基準)
出火率比 $\left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\}$	4.0	7.0	1.0	1
在館者密度 $\rho(K)$	0.125	0.5	0.7	0.06

表 8.1 の用途毎の値を式(8.2)に使うて、居室面積による許容死傷確率 $p_{cas}^a(K)$ を計算した結果が表 8.2 である。表 8.2 には許容死傷確率に対応する設計火源の成長係数 $\alpha_D$ も参考のため示している（6.2 参照）。

同一の面積で見れば、これら 3 用途の中では事務所、物販、飲食の順に許容される死傷確率が大きくなり、それに伴って緩い火災成長係数 $\alpha_D$ の下で避難安全検証を行うことが出来る。これは出火率と在館者密度の値に依っていることは言うまでもない。但し、 $\alpha_D > 0.2$ は非現実的に大きな火災成長率であるから、実際には $\alpha_D = 0.2$ を最大値として良い（6.3 参照）。また、 $p_{cas}^a(K) > 1$ の場合は、許容避難リスクが満足されることは自明であるから検証を行う必要が無い（7.3 参照）。

表 8.2 出火室の面積と居室避難の許容死傷確率（ $p_{cas}^a(K)$ ）および設計火源の成長係数（ $\alpha_D$ ）

面積 m <sup>2</sup>	事務所		物販		飲食	
	許容死傷確率	$\alpha_D$	許容死傷確率	$\alpha_D$	許容死傷確率	$\alpha_D$
50	1.7960	—	0.7857	0.006	0.0401	0.057
100	0.6350	0.007	0.2778	0.024	0.0142	0.083
250	0.1606	0.031	0.0703	0.056	0.0036	0.128
500	0.0568	0.057	0.0248	0.090	0.0013	0.171
1000	0.0201	0.094	0.0088	0.134	0.0004	0.221
1500	0.0109	0.122	0.0048	0.166	0.0002	0.256

表中の（—）は検証不要を意味する

## (2) 避難安全検証を必要としない居室面積

避難安全検証法では小さい単純な居室についても逐一避難時間と煙層降下計算を行うことになっている。しかし、極めて特殊な条件を持つ室は例外としても、ごく一般的な用途、形態の小規模な室で火災による避難の危険を日頃から危惧している在室者は殆ど居ないであろう。それは火災による避難リスクは非常に小さいことを在室者が感覚的に知っているからである。

避難リスクを減らすことは、上記(1)のように、死傷確率を小さくすることでも可能であるが、居室面積を小さくすることでも出来る。設計される居室の面積は大小様々なので、それらの中で避難リスクが許容レベルにあることが面積だけで判断出来るものがあれば、避難安全設計の労力をより重要な課題に振り向けることが出来る。

### (2.1) スプリンクラーなどの防火設備が無い場合

最も簡単な場合として、居室に SP などの防火設備が無い場合を考える。この場合は火災の条件を変える要素が無いので、火災が成長して室火災に至るシナリオのみになる。



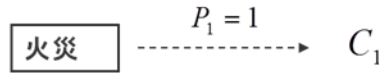


図 8.1 防火設備が無い場合の居室避難シナリオ

任意の居室の避難リスク $R(K)$ は、標準となる空間（戸建住宅）の避難リスク $R(H)$ を超えてはならないので $R(K) \leq R(H)$ 、これを具体的に表現すると式(5.6)から

$$p_{hf}(K)A_f(K)^{1/2} \times p_{cas}(K)C_0(K) \leq p_{hf}(H)A_f(H)^{1/2} \times p_{cas}(H)C_0(H) \quad (8.3)$$

ここで、居室避難では出火空間と避難対象空間は同一であるから、式(8.1)の関係を使うと $A(K) = A_f(K)$ として、面積 $A(K)$ が下式を満たす任意の空間 $K$ は避難リスクが許容値以下となる。

$$A(K) \leq \left[ \left( \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right) \left( \frac{\rho(H)}{\rho(K)} \right) \left( \frac{p_{cas}(H)}{p_{cas}(K)} \right) \right]^{2/3} A(H) \quad (8.4)$$

住宅で危険な規模の火災が発生したときの死傷率（軽傷を含む） $p_{hf}(H)$ は、火災統計から 0.14 程度となっている。住宅以外の用途では十分なデータが無いが、一般に住宅は、使用者の恣意に任せて自由に使われ、また多様な避難能力を有する老若男女の住民が就寝を含む様々な状態で起居するなど、火災時の避難上最も不利なタイプの用途の空間と考えられる。

そこで、他の用途では戸建住宅で火災が発生した場合より有利な条件 $p_{cas}(K) \leq p_{cas}(H)$ にあると考えれば、下式の $A(K)$ が許容される面積となる。

$$A(K) \leq 175 \left[ \left( \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right) \left( \frac{\rho(H)}{\rho(K)} \right) \right]^{2/3} \left( \frac{p_{cas}(H)}{p_{cas}(K)} \right)^{2/3} \quad (8.5)$$

一方で、検証が免除されれば空間が全く自由奔放に使われ、最悪、戸建住宅以上に避難に不利な条件も起こり得ることを懸念して死傷確率 $p_{cas}(K) = 1$ と仮定すれば

$$A(K) \leq 175 \left[ \left( \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right) \left( \frac{\rho(H)}{\rho(K)} \right) \right]^{2/3} \left( \frac{0.14}{1} \right)^{2/3} \approx 47 \left[ \left( \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right) \left( \frac{\rho(H)}{\rho(K)} \right) \right]^{2/3} \quad (8.6)$$

## (2.2) スプリンクラーが設置された居室の火災シナリオ

居室に SP 設備がある場合は、その成功/失敗の場合によって火災発生後のシナリオが2つに分かれる。

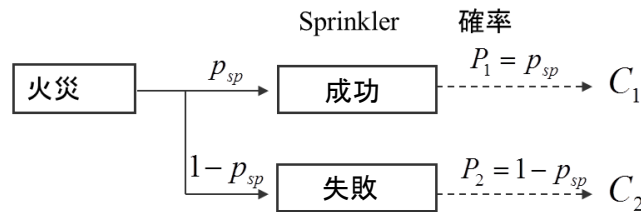


図 8.2 SP が設置された居室の火災シナリオ

このときは、設計ベースの避難リスクの満たすべき条件は次式で表される。

$$R^D = \sum_1^2 P_i C_i = P_1 C_1 + P_2 C_2 \leq R_a^D \quad (8.7)$$

そこで部分許容避難リスクを次のように分配する。

$$P_1 C_1 = p_{sp} C_1 = 0, \quad P_2 C_2 = (1 - p_{sp}) C_2 = R_a^D \quad (8.8)$$

すなわち、シナリオ1では発熱速度がSP制御の最大値に制約される火源設定となる。この場合の避難リスクは小さいのでここでは簡単のため、このシナリオでは死傷率は0と仮定し、避難許容リスク $R_a^D$ を全てSPが消火に失敗したシナリオ2に分配する。

すると、このシナリオに対する避難リスクの許容条件は次のように書ける。

$$R^D = p_{cas}(K) C_0(K) \leq \frac{1}{1 - p_{sp}} \left( \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right) \left( \frac{A(H)}{A(K)} \right)^{1/2} p_{cas}(H) C_0(H) = R_a^D \quad (8.9)$$

これは $C_0 = \rho A$ を用いて更に整理すると、避難リスクが許容される空間面積が下式のように得られる。

$$A(K) \leq 175 \left\{ \frac{1}{1 - p_{sp}} \left( \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right) \left( \frac{\rho(H)}{\rho(K)} \right) \left( \frac{p_{cas}(H)}{p_{cas}(K)} \right) \right\}^{2/3} \quad (8.10)$$

### (3) 検証計算を不要とする面積の評価

上記‘2.1 SP設備の無し’と‘2.2 有り’の場合について検証計算不要の空間面積の上限値を計算すると表8.3のようになる。なお在館者密度は避難安全検証法の値を用い、SPの有効確率を $p_{sp} = 0.8$ （すなわち失敗確率=0.2）とした。また死傷率 $p_{cas}(K)$ は上記(1)の場合と同様な考察により $p_{cas}(K) = 0.14, 1$ の場合について示している。

表 8.3 検証免除の面積制限値の試算例

空間用途	出火率比 phf(H)/phf(K)	在館者密度比 $\rho_0(H)/\rho_0(K)$	空間面積(m <sup>2</sup> )			
			$p_{cas}(K)=0.14$		$p_{cas}(K)=1$	
			Sp無し	Sp有り p <sub>sp</sub> =0.8	Sp無し	Sp有り p <sub>sp</sub> =0.8
戸建住宅	1	1	175	441	47	119
共同住宅	1.5	1	229	578	62	156
事務所	4	0.48	270	681	73	184
物販店舗	7	0.12	156	393	42	106
飲食店舗	0.5	0.086	21	54	6	15
ホテル	3	0.375	189	477	51	129
劇場	1.2	0.04	23	58	6	16
病院	9	0.46	451	1137	122	307
学校	10	0.086	158	399	43	108

これらの中でどの値を検証不要の面積として使うべきかが問題になる。先ずSP設置有りの場合は、一応参考のために計算はしたが、居室避難という短時間の中にSPが作動することを期待することは難しいのではないと思う。従ってSP設置が有る場合でも、SP無しの場合の値が現実的な選択肢であろう。

また $p_{cas}(K)$ の値については、住宅ほど不利な条件で使用される居室空間は一般的には極めて稀であろうと思われる。表8.3の用途の中で、共同住宅の使われ方は戸建住宅と同様と考えられる。ホテル、学校、事務所、物販店舗、飲食店舗については、建築法規による規制が無くても居室が予想外の設計や使われ方がされる可能性は極めて低く、また避難能力は住宅より高いと思われるので、 $p_{cas}(K) = 1$ の場合の値を用いれば安全側であろう。しかし、病院、高齢者施設など避難能力が極端に低い特殊な場合は、出火確率だけで評価出来ないため、設計火源を設定して煙性状や避難性状を評価する必要が生じる。

## 8.2. ケーススタディー：事務所ビルの階避難

居室避難の避難対象者は出火室の在室者だけであるが、階避難では出火室が何処であれ、階全体の在館者が避難対象者数 $C_0(K)$ となる。許容避難確率は次式

$$p_{cas}^a(K) = R_a^D(K) / C_0(K) \quad (7.10 \text{ 再掲})$$

なので、 $C_0(K)$ が大きくなれば、避難リスクを許容値 $R_a^D(K)$ に収めるための許容死傷確率 $p_{cas}^a(K)$ は小さくならざるを得ない。

死傷確率を許容値 $p_{cas}^a(K)$ 以下に抑えるためには、円滑な避難行動を可能にするための避難経路が不可欠であるが、加えてこれら避難経路を保護するための SP、排煙、防火戸などの防火設備の重要性が高くなる。しかし、如何なる防火設備も作動信頼性は 100%ではないから、作動失敗のケースを含めたシナリオを考える必要がある。この節のケーススタディーではリスク基盤の避難安全検証法によって、事務所用途建物の階避難安全検証において、検証すべきシナリオや設計火源を適切に特定することが可能かどうかを検討する。

### 8.2.1 対象空間と設定条件

避難対象空間は高層建物の一般階とし、階の平面プランとしては図 8.3 のようなごく標準的なものを考える。事務所ビルの一般階の多くでは階避難の避難経路が

事務室（居室）→共用廊下→付室→階段

となっているのが標準的であり、廊下は火災室、非火災室を含めた階の在館者にとっての共用避難経路となる。従って、ここでの安全検証の対象は具体的には階の共用廊下である。

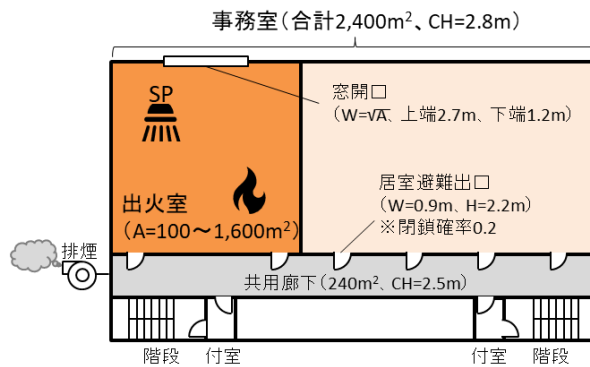


図 8.3 階避難ケーススタディーの対象プラン

今回のケーススタディーの対象階の諸元を表 8.4 に示す。

表 8.4 階の空間関係諸元等

項目	設定値	備考
合計居室面積	2,400m <sup>2</sup>	—
在館者数	300人	0.125人/m <sup>2</sup> × 2,400m <sup>2</sup>
廊下面積、天井高	240m <sup>2</sup> 、2.5m	合計居室面積2,400m <sup>2</sup> × 0.1
居室避難出口	幅0.9m、高さ2.2m	室面積200m <sup>2</sup> 毎に1避難出口 居室避難後の閉鎖確率0.2
廊下最大歩行距離	50m	廊下面積240m <sup>2</sup> /幅2m/階段2本-10m
階段付室扉	幅0.9m、高さ2.2m × 2か所	—
出火室面積、天井高	100~1,600m <sup>2</sup>	—
出火室親室率	1.0	—
窓開口	上端高さ：2.7m、下端高さ 1.2m、幅：√出火室面積	親室率の階避難への影響は無視

## (2)防火設備

階避難の安全に関連する防火設備として下記のものがあるものとする。

- ・スプリンクラー（居室）
- ・防火扉（or 防煙扉）（居室－廊下）
- ・排煙（廊下）

これらの設備の火災時における作動確率（SP：作動、防火扉：閉鎖、排煙：起動）については十分なデータがあるとは言えず、色々と議論があるところだが、ここでは一律に作動確率=0.8（不作動確率=0.2）とする（注 8.1）。

防火扉は閉鎖の場合でも幅 1cm、高さ扉高の隙間を見込む（注 8.2）。

排煙（廊下）は、廊下での煙層高さが  $0.9H_c$  となった時点で作動するものとする（ $H_c$ =廊下の天井高さ）。また、排煙風量は状況に応じて設定する。

## (3) 避難開始時間、安全判定基準

避難開始時間および安全判定基準は $Z_s$ を床からの煙層下端高さとして下記のように定める。

### (a)火災室および非火災室の避難開始時間

- 火災室：火災室で $Z_s = 0.9H_f$ となった時点（ $H_f$ =居室の天井高さ）
- 非火災室：廊下で $Z_s = 0.9H_c$ となった時点（ $H_c$ =廊下の天井高さ）

### (b) 火災室避難および階避難の安全の判定基準

- 火災室：火災室で $Z_s > 1.6 + 0.1H_f$ （ $H_f$ =居室の天井高さ）
- 非火災室：廊下で $Z_s > 1.6 + 0.1H_c$ （ $H_c$ =廊下の天井高さ）

（注 8.1）この値は、実際の防火設備の作動確率が平均的にこれ位あるという訳ではなく、今回のケーススタディーは設計火源の設定方法を示すことが目的なので、値によって結果にバイアスが掛からない方が良く考えたためである。作動確率については今後データの充実や作動確率の向上を図ることが必要である。

（注 8.2）因みに防火扉は、階避難に関する限りは避難終了までの間、出火室からの煙流出を防止できるものであれば良い。実際の建築物にはこれら以外の防火設備が設けられることもあるが、設備の数を増やすとシナリオの数がそれだけ多くなるので、今回のケーススタディーでは上記の最小限に絞った。

## 8.2.2 許容死傷確率と扉の開放確率

事務所建物には、様々な面積の事務室が配置される可能性があり、それによって出火確率や扉数が異なることを考慮する。

### (1) 許容避難リスク

$A_f(K)$ を出火室の面積として、設計ベースの許容避難リスクを次式で計算する。5.2 節、表 5.1 から事務所の出火率比は 4.0 であるから $R_a^D(K)$ は

$$R_a^D(K) = 1.5 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{1/2} = 1.5 \times 4.0 \left\{ \frac{175}{A_f(K)} \right\}^{1/2} \quad (8.11)$$

### (2) 許容死傷確率

階避難は階全体の在館者が対象となる。従って、表 8.4 から階の全居室の面積を $A_f(K) = 2400\text{m}^2$ として

$$C_0 = \rho(K)A_F(K) = 0.125 \text{ (人/m}^2\text{)} \times 2400\text{m}^2 = 300 \text{ 人}$$

なので、許容死傷確率を次式で計算する（注 8.3）。

$$p_{cas}^a(K) = R_a^D(K)/C_0(K) = R_a^D(K)/300 \quad (8.12)$$

### (3) 居室扉の枚数と閉鎖失敗確率

居室の扉開口数は基本的には居室の通常時の使い勝手から決まり、これが火災時の避難出口ともなるが、避難上の必要性からの追加もある。出口数には幅があるが、ケーススタディーでは床面積 200m<sup>2</sup> 毎に 1 出口を追加する想定とした。なお扉数が増加する境界居室面積では増加前の出口数と + 1 をした数の両方について検討した。

階避難段階では出火室避難の後の扉が開放状態か閉鎖状態かが安全性に大きく影響する。8.2.1 節では、全ての防火設備の作動確率を 0.8 と仮定したから、扉 1 枚当たりの閉鎖確率は 0.8、開放確率は 0.2、従って、 $n$  枚の扉が  $p$  枚開放状態となる確率を下式で計算する。

$$p_D(n, p) = \binom{n}{p} 0.2^p 0.8^{n-p}$$

表 8.5 に出火室の面積毎の許容死傷確率の計算値を示す（注 8.4）。

表 8.5 居室（出火室）面積と許容死傷確率および扉開放数と生起確率

階人数 = 300人				
出火室面積 m <sup>2</sup>	許容死傷確率	扉条件と確率		
		扉数	開放数	生起確率
100	0.02646	1	0	0.8000
200	0.01871		1	0.2000
200	0.01871		0	0.6400
300	0.01528	2	1	0.3200
400	0.01323		2	0.0400
400	0.01323	3	0	0.5120
600	0.01080		1	0.3840
800	0.00935		2	0.0960
1000	0.00837		3	0.0080
1000	0.00837	4	0	0.4096
1200	0.00764		1	0.4096
1400	0.00707		2	0.1536
1600	0.00661		3	0.2560
1800	0.00624		4	0.0016

（注 8.3）階避難では  $C_0 = 300$  で一定だが、階のどの室で出火するかによって出火室面積  $A_f(K)$  が異なり、 $A_f(K)$  が大きくなるにしたがって許容避難リスク  $R_a^D(K)$  は小さくなるため、許容死傷確率  $p_{cas}^a(K)$  も小さくなる。

（注 8.4）実際には種々の条件に依存するが、火災区画面積が小さいほど死傷確率の許容値が大きいので、基本的には小規模に区画するほど避難計画上有利と言える。

### 8.2.3 許容避難確率の各シナリオへの配分と避難安全検証

火災室面積が 100~1600m<sup>2</sup>、避難扉の数が居室面積に応じて 1~4 有る場合を想定して、検証すべきシナリオとそれに対応する設計火源の特定、および選定された設計火源および設計火災シナリオの下での避難安全性検証について考察する。

検証には今回ケーススタディーの実施に当たって新たに開発したエクセル簡易煙流動予測プログラムおよび階避難時間簡易予測計算法を使用した。問題となるのは階避難時間中の煙層高さが安全基準高さ以上であるか否かである。なお検証予測では下記の仮定をしている。

- ① 階避難は廊下の煙層厚さが廊下天井高さの 10%になったとき一斉に開始する (注 8.5)
- ② 廊下の設備は遅くとも廊下の煙層厚さが廊下天井高さの 10%になるまでに作動させられる (注 8.6)
- ③ 火災室の温度が 300℃になったときは火災室の窓ガラスが破損する (注 8.7)

(注 8.5) 既に 8.2.1(3) 避難開始時間、安全判定基準に記した仮定である。

(注 8.6) 今回の検証例では排煙設備は廊下に設けられているものとしている。居室排煙を居室避難段階で作動させることは難しいが、階避難段階であれば起動システムの工夫によって作動する確率を高められると思われるので、階避難のための排煙設備を居室に設けることも有効になる可能性がある。

(注 8.7) 火災室の窓ガラスが破損すると自然排煙口と同じ働きをすることになり、階避難にとっても有利になることが多い。ガラスの種類によって破損はもっと低い温度で破損する場合もあるが、300℃は安全側に見た設定と考えている。

### 8.2.4 居室—廊下間の扉数 = 1 の場合 (居室面積=100m<sup>2</sup>、200m<sup>2</sup>)

#### (1) シナリオと許容死傷確率の配分

扉数 = 1 に対応する居室面積は 100m<sup>2</sup> と 200m<sup>2</sup> とした。表 8.6 は面積 A=100、200m<sup>2</sup> に対する避難対象空間の許容死傷確率 (表 8.5 の値)、防火設備の作動/不作動に基づく各シナリオの生起確率、および許容避難死傷確率の配分値 (案) を示している。設計ベースでのシナリオ確率の合計値は常に 1 であるが、各シナリオの許容死傷確率は表 8.5 に見られるように 1 よりかなり小さい。従って、殆どのシナリオではその生起確率より小さい許容死傷確率を配分せざるを得ない。

建物の階避難にとって、防火設備システムの作動 (今回は SP による火災規模制御、廊下排煙の作動、居室—廊下間の扉閉鎖) が全て失敗したシナリオは最も不利で対応が困難であるため、シナリオ 2-2-(2) にはシナリオ確率と等しい許容死傷確率を配分した。この場合、検証計算は不要である (注 8.8)。

階避難にとって出火室の扉が閉鎖していることは、それだけでかなり有利な条件であり、避難安全を図ることは容易であると考えられるので許容死傷確率からの配分を 0 とする。すなわち、火災成長係数  $\alpha_D$  が最大の  $\alpha_D = 0.2$  の設計火源を設定する (注 8.9)。全てのシナリオのうち扉が閉鎖したシナリオは 4 あるが、その中で最も不利なものはそれ以外のシステムが全て失敗したシナリオ、すなわち 2-2-(1) のケースであるから、この条件で安全を検証しておけば他は自動的により安全である。残りの扉が開いているシナリオに対して、不利なものに出来るだけ多くの許容死傷確率を配分した (注 8.10)。

表中のセルに赤字で示しているのがそのシナリオで設定すべき設計火源であり、

$$\alpha_D t^2 + Q_{sp} \quad \text{および} \quad \alpha_D t^2 + Q_{vt}$$

は、いずれも発熱速度が初期には時間の 2 乗で増加するが、その後はそれぞれスプリンクラー制御火源の最大発熱速度  $Q_{sp}$  および換気支配の最大発熱速度  $Q_{vt}$  で頭打ちになることを示している。

表 8.6 居室－廊下間の扉数＝1 の場合のシナリオと生起確率、許容死傷確率の配分、設計火源（例）

シナリオ NO	防火設備システムと作動確率				シナリオ 確率	A=100m <sup>2</sup>		A=200m <sup>2</sup>	
	SP	廊下排煙	扉（居室－廊下）			確率配分 0.02646	設計火源	確率配分 0.01871	設計火源
			開放数	確率					
1-1-(1)	成功 0.8	作動	0	0.8	0.512	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-1-(2)		0.8	1	0.2	0.128	0	$0.2t^2 + Q_{sp}$	0	1-2-(2)
1-2-(1)		不作動	0	0.8	0.128	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-2-(2)		0.2	1	0.2	0.032	0	$0.2t^2 + Q_{sp}$	0	$0.2t^2 + Q_{sp}$
2-1-(1)	失敗 0.2	作動	0	0.8	0.128	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
2-1-(2)		0.8	1	0.2	0.032	0.01846	$0.0077t^2 + Q_{vt}$	0.0107	$0.0161t^2 + Q_{vt}$
2-2-(1)		不作動	0	0.8	0.032	0	$0.2t^2 + Q_{vt}$	0	$(0.2t^2 + Q_{vt})$
2-2-(2)		0.2	1	0.2	0.008	0.008	—	0.008	—
計=					1.0	0.02646		0.01871	

（注 8.8） 普段の避難安全設計や性能検証で、そこまでの条件は考えなくて良いだろうと漠然と考えられていることを定量的に客観化したものとも言える。

（注 8.9） 6 節、7 節などを参照。

（注 8.10） 許容死傷確率が大きいほど設計火源が緩やかになる。

(2) 検証計算の例 (扉数=1、A=100 m<sup>2</sup>、200 m<sup>2</sup>)

表 8.6 でシナリオ 2-2-(2)は最も不利な場合のため、シナリオ生起確率と等しい値の許容死傷確率を分配することで検証免除した。また扉閉鎖の条件を持つシナリオは、扉に幾分隙間はあるものの、非常に有利なシナリオのため、ここでの検証計算例は次の2つのシナリオ、1-2-(2)と2-1-(2)について行った。

(2.1) シナリオ 1-2-(2) : SP 成功、廊下排煙不作動、扉 (1 枚) 開放

下図は左が火災室内、右が階の避難経路である廊下の煙層高さおよび温度および避難時間の計算結果である。なお、ピンクと緑の横線はそれぞれ火災室の避難者および非火災室の避難者の避難期間である。SP 制御された火源なので温度はそれ程高くないが、 $\alpha_D = 0.2$ の火源の拡大は非常に速いので居室の避難にも余裕が殆ど無い。また階避難者 300 人の殆どが非出火室の避難者で避難に時間がかかるため、かなりの人数が煙に曝される結果となった。

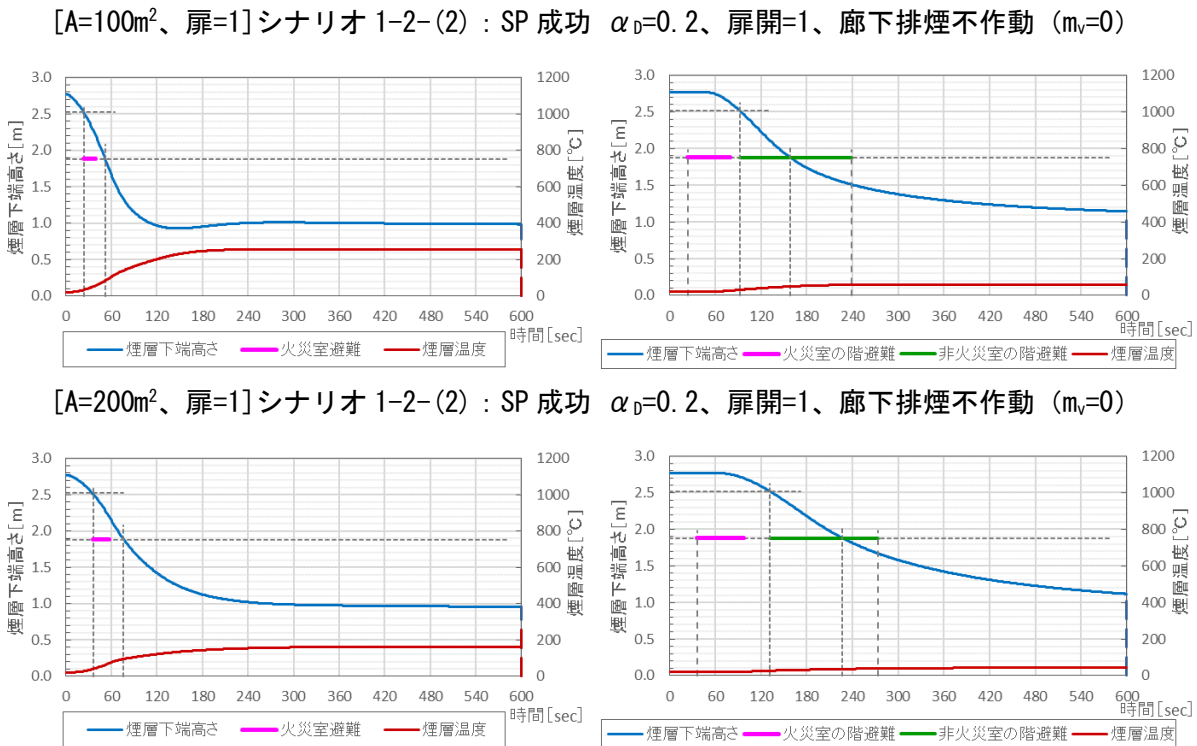


図 8.4 計算結果 (シナリオ 1-2-(2))

このような場合には、避難環境を改善するための何らかの方法を講じて煙に曝される避難者の発生を 0 にする必要がある。例えば、火災室扉の閉鎖信頼性を向上させる、階段に至る避難経路を拡充する等、色々な方法が考えられる。

ここでは、現行法規で居室排煙が要求されているので、居室機械排煙 (排煙風量 120m<sup>3</sup>/min、火災室の煙層厚さが天井高さの 10%になると作動) の効果を調べて見よう。すると下図のように廊下でも避難者が煙に曝されることは無くなり、階避難の安全確保への効果が確認される。ただし、このように新たに防火設備を追加するときは、その作動/不作動の確率を考慮する必要があるので、本来は表 8.6 が変更される。



[A=100m<sup>2</sup>、扉=1]シナリオ 1-2-(2) : SP 成功  $\alpha_D=0.2$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )  
 例：居室排煙 (120m<sup>3</sup>/min) を追加した場合

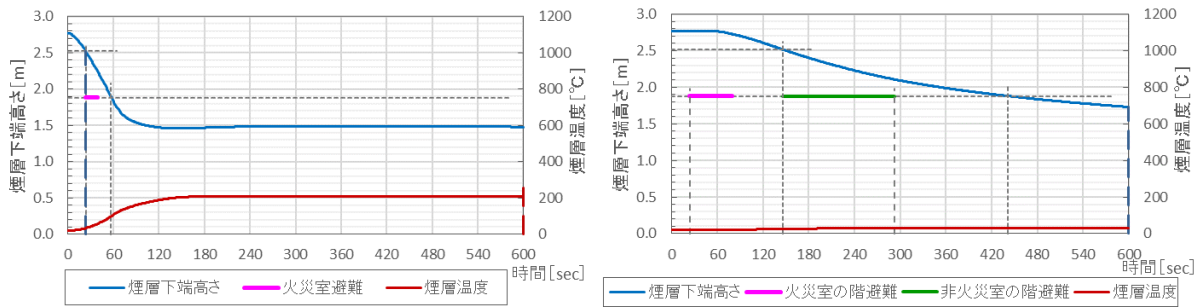
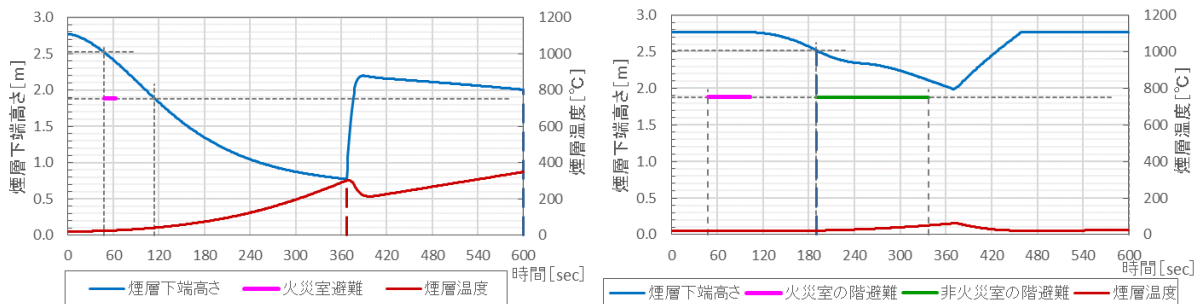


図 8.5 計算結果 (シナリオ 1-2-(2)+居室排煙)

(2-2) シナリオ 2-1-(2) : SP 失敗、排煙作動、扉(1枚)開放

このシナリオは、火源の SP 制御、扉閉鎖に失敗している不利なシナリオである。しかしながら、設計火源の拡大速度が比較的緩やかなこと、および廊下の機械排煙が作動する条件であることが寄与して、死傷者数は 0 となる。ちなみに、360 秒を超えたあたりで火災室窓ガラスが温度上昇で割れて居室排煙が有ると同様になったことも寄与している (注 8.11)。

[A=100m<sup>2</sup>、扉=1]シナリオ 2-1-(2) : A√H 支配  $\alpha_D=0.0077$ 、扉開=1、廊下排煙作動 ( $m_v=120$ )



[A=200m<sup>2</sup>、扉=1]シナリオ 2-1-(2) : A√H 支配  $\alpha_D=0.0161$ 、扉開=1、廊下排煙作動 ( $m_v=120$ )

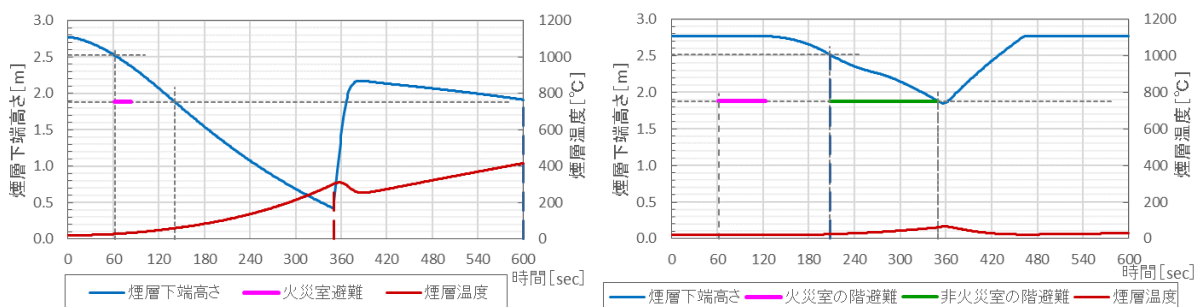


図 8.6 計算結果 (シナリオ 2-1-(2))

(注 8.11) シナリオ 1-2-(2) (SP による火災拡大抑制有効、排煙不作動) と 2-1-(2) (SP による火災拡大抑制失敗、排煙作動) の 2 つのシナリオについては、避難安全設計上どちらが難しいかが具体的な空間の条件による可能性がある。それを考慮すれば、許容死傷確率をシナリオ 2-1-(2) ではなく、シナリオ 1-2-(2) の方に配分、あるいは両方に分割配分の方が優れている可能性もある。

## 8.2.5 居室一廊下間の扉数=2 の場合 (A=200m<sup>2</sup>、300m<sup>2</sup>、400m<sup>2</sup>)

### (1) シナリオと許容死傷確率の分配

表 8.7 に示すように、出火室面積の増加と共に許容死傷確率が小さくなり、また出口扉の数の増加によりシナリオの数が増す。対象空間面積 A=200m<sup>2</sup>、300m<sup>2</sup> の場合には空間の許容死傷確率を非常に不利なシナリオである 2-2-(2)、2-2-(3)に配分して検証不要にすることが出来るが、A=400m<sup>2</sup> の場合には許容死傷確率が少し不足する。

表 8.7 居室一廊下間の扉数=2 の場合のシナリオと生起確率、許容死傷確率の配分、設計火源 (例)

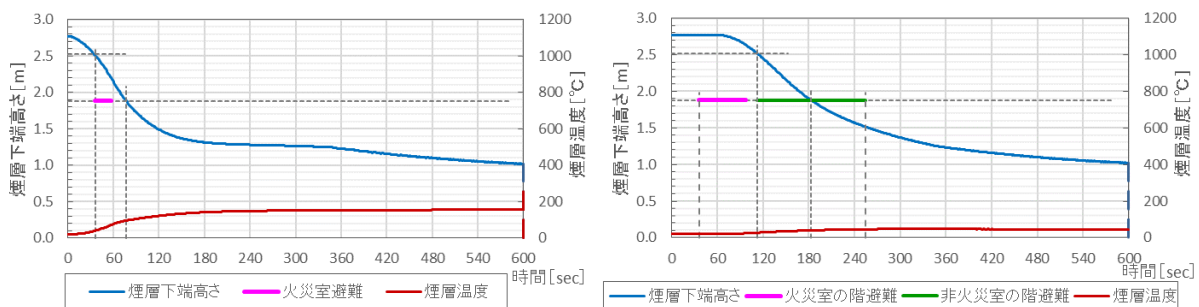
シナリオ NO	防火設備システムと作動確率				シナリオ 確率	A=200m <sup>2</sup>		A=300m <sup>2</sup>		A=400m <sup>2</sup>	
	SP	廊下排煙	扉 (居室一廊下)			確率配分	設計火源	確率配分	設計火源	確率配分	設計火源
			開放数	確率							
1-1-(1)	成功 0.8	作動 0.8	0	0.64	0.4096	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-1-(2)			1	0.32	0.2048	0	1-2-(3)	0	1-1-(3)	0	1-1-(3)
1-1-(3)			2	0.04	0.0256	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>
1-2-(1)		不作動 0.2	0	0.64	0.1024	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-2-(2)			1	0.32	0.0512	0	1-2-(3)	0	1-2-(3)	0	1-2-(3)
1-2-(3)			2	0.04	0.0064	0.0064	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0
2-1-(1)	失敗 0.2	作動 0.8	0	0.64	0.1024	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
2-1-(2)			1	0.32	0.0512	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	2-1-(3)
2-1-(3)			2	0.04	0.0064	0.0064	0.0043	0.0057t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.0009	0.0356t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0
2-2-(1)		不作動 0.2	0	0.64	0.0256	0	(0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub> )	0	(0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub> )	0	(0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub> )
2-2-(2)			1	0.32	0.0128	0.0128	—	0.0128	—	0.0116	0.002t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>
2-2-(3)			2	0.04	0.0016	0.0016	0.0016	—	0.0016	—	—
計=					1.0	0.01871		0.01528		0.01323	

### (2) 検証計算の例 (扉数=2、A=200m<sup>2</sup>、300m<sup>2</sup>、400m<sup>2</sup>)

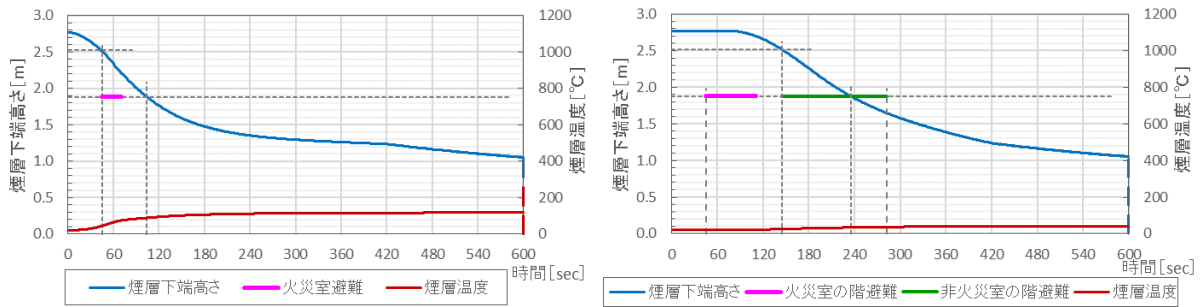
#### (2-1) シナリオ 1-2-(3) SP 成功、廊下排煙不作動、扉 (2 枚) 開放

煙性状計算の結果によれば排煙不作動のシナリオでは階避難時間が避難安全のための条件を満たさないため、8.2.4 (2-1)と同様に何らかの改善対策を講じる必要がある。

[A=200m<sup>2</sup>、扉=2]シナリオ 1-2-(3) : SP 成功 α<sub>0</sub>=0.2、扉開=2、廊下排煙不作動 (m<sub>v</sub>=0)



[A=300m<sup>2</sup>、扉=2] シナリオ 1-2-(3) : SP 成功  $\alpha_D=0.2$ 、扉開=2、廊下排煙不作動 ( $m_V=0$ )



[A=400m<sup>2</sup>、扉=2] シナリオ 1-2-(3) : SP 成功  $\alpha_D=0.2$ 、扉開=2、廊下排煙不作動 ( $m_V=0$ )

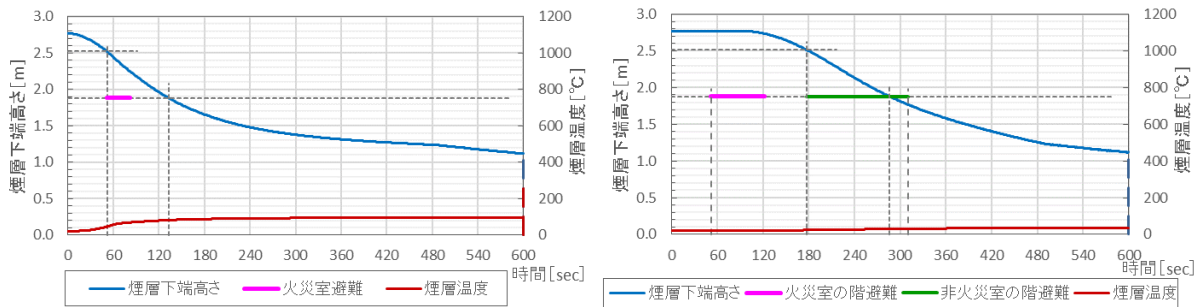
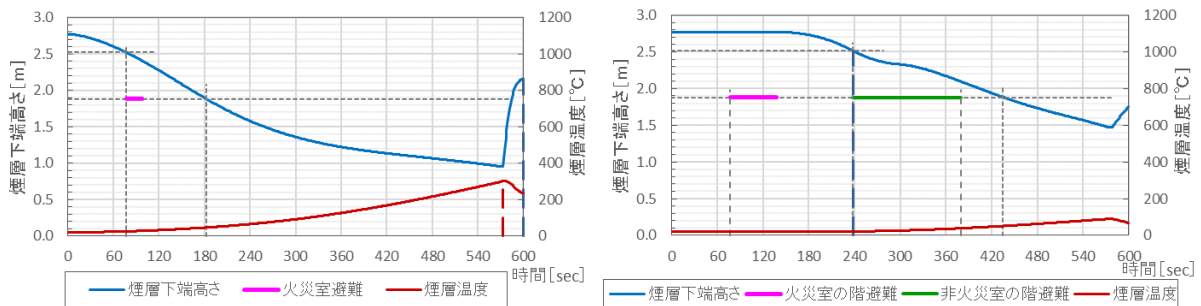


図 8.7 計算結果 (シナリオ 1-2-(3))

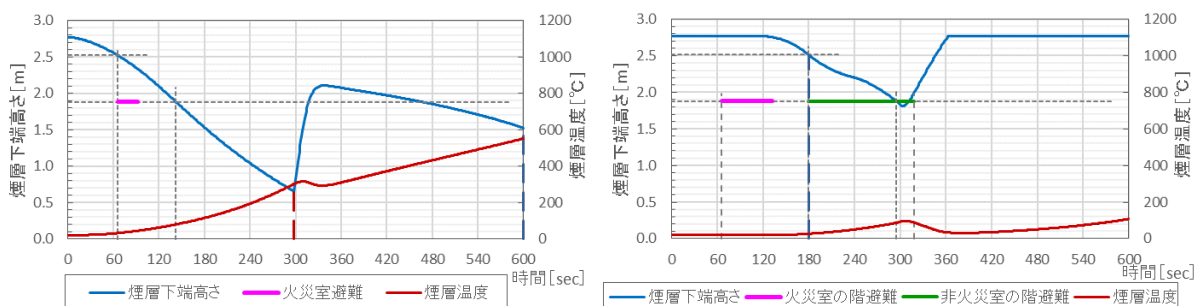
(2-2) シナリオ 2-1-(3) : SP 失敗、廊下排煙作動、扉 (2 枚) 開放

SP による火災制御が失敗し、かつ火災室-廊下扉も 2 枚開いている不利なシナリオであるが、火災室温度の上昇で窓ガラスが破損して煙が流出すること、廊下排煙が作動する条件であることにより階避難中の安全は確保される。但し、火災が拡大を継続して換気支配火災に至る条件なので、最終的には廊下の安全は失われる。階避難後に廊下を消防隊の活動空間とするなら別の手段を講じる必要がある。

[A=200m<sup>2</sup>、扉=2] シナリオ 2-1-(3) : A√H 支配  $\alpha_D=0.0057$ 、扉開=2、廊下排煙作動 ( $m_V=120$ )



[A=300m<sup>2</sup>、扉=2] シナリオ 2-1-(3) : A√H 支配  $\alpha_D=0.0356$ 、扉開=2、廊下排煙作動 ( $m_V=240$ )



[A=400m<sup>2</sup>、扉=2]シナリオ 2-1-(3) : A√H 支配  $\alpha_D=0.2$ 、扉開=2、廊下排煙作動 ( $m_v=120$ )

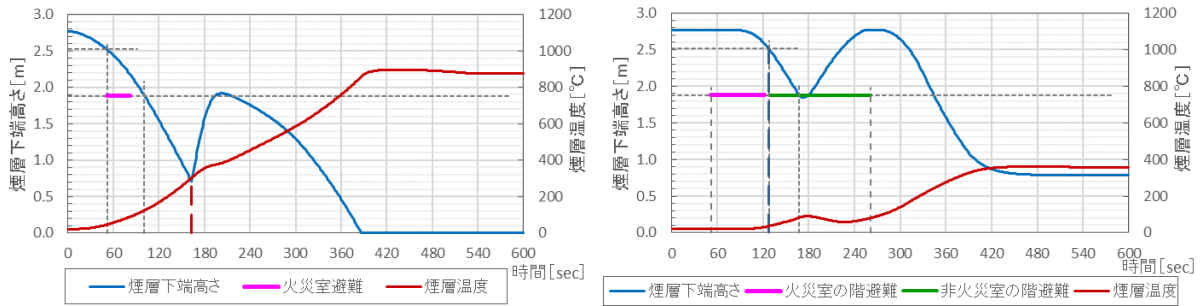


図 8.8 計算結果 (シナリオ 2-1-(3))

(2-3) シナリオ 2-2-(2) : SP 失敗、廊下排煙不作動、火災室-廊下扉 1 枚開放

火災室面積 400m<sup>2</sup> のシナリオに配分した許容死傷確率の値はシナリオの生起確率に近い。このため火災の成長速度は緩やかになり、階避難の安全は確保される。ただし、この成長速度の緩やかさを考えれば、許容死傷確率の一部を他のシナリオに分配することが出来たかも知れない。

[A=400m<sup>2</sup>、扉=2]シナリオ 2-2-(2) : A√H 支配  $\alpha_D=0.002$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )

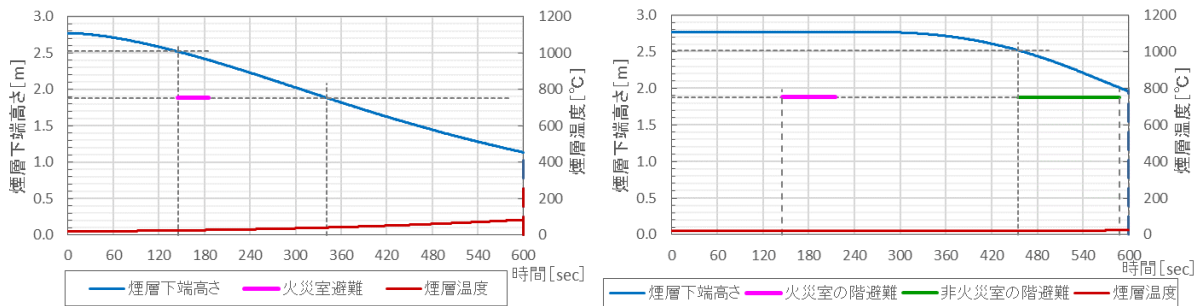


図 8.9 計算結果 (シナリオ 2-2-(2))

## 8.2.6 居室－廊下間の扉数＝3 の場合のシナリオ、(A=400m<sup>2</sup>、600m<sup>2</sup>、800m<sup>2</sup>、1000m<sup>2</sup>)

### (1) シナリオと許容死傷確率の分配

扉数が3の場合、閉鎖失敗の数が2、3枚となるときのシナリオの生起確率は小さいが、出火室面積がこの規模だと許容死傷確率が小さくなる。このためSPによる火災制御が失敗した時、扉が1枚開いているシナリオ2-2-(2)の検証計算を不要とするための余裕が無くなる。

またSP成功だが、廊下排煙不作動のときのシナリオ1-2-(4)にも許容死傷確率を配分することが難しいので、SP成功、廊下排煙不作動の場合の全てのシナリオへの配分は0とした。なお、この中で最も不利なのは全ての扉が開放のシナリオ1-2-(4)であるから、このシナリオで避難安全基準が満足されれば、他のシナリオ1-2-(1)～1-2-(3)は自動的に満足される。

表 8.8 居室－廊下間の扉数＝3 の場合のシナリオと生起確率、許容死傷確率の配分、設計火源 (例)

シナリオ NO	防火設備システムと作動確率				シナリオ 確率	A=400m <sup>2</sup>		A=600m <sup>2</sup>		A=800m <sup>2</sup>		A=1,000m <sup>2</sup>	
	SP	廊下排煙	扉 (居室－廊下)			確率配分 0.01323	設計火源	確率配分 0.0108	設計火源	確率配分 0.00935	設計火源	確率配分 0.00837	設計火源
			開放数	確率									
1-1-(1)	成功	0.8	0	0.512	0.3277	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-1-(2)			1	0.384	0.2458	0	1-1-(4)	0	1-1-(4)	0	1-1-(4)	0	1-1-(4)
1-1-(3)			2	0.096	0.0614	0	1-1-(4)	0	1-1-(4)	0	1-1-(4)	0	1-1-(4)
1-1-(4)			3	0.008	0.0051	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>
1-2-(1)	0.8	不作動	0	0.512	0.0819	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-2-(2)			1	0.384	0.0614	0	1-2-(4)	0	1-2-(4)	0	1-2-(4)	0	1-2-(4)
1-2-(3)			2	0.096	0.0154	0	1-2-(4)	0	1-2-(4)	0	1-2-(4)	0	1-2-(4)
1-2-(4)			3	0.008	0.0013	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>
2-1-(1)	失敗	0.8	0	0.512	0.0819	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
2-1-(2)			1	0.384	0.0614	0	2-1-(4)	0	2-1-(4)	0	2-1-(4)	0	2-1-(4)
2-1-(3)			2	0.096	0.0154	0	2-1-(4)	0	2-1-(4)	0	2-1-(4)	0	2-1-(4)
2-1-(4)			3	0.008	0.0013	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.0009	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>
2-2-(1)	0.2	不作動	0	0.512	0.0205	0	(0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub> )	0	(0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub> )	0	(0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub> )	0	(0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub> )
2-2-(2)			1	0.384	0.0154	0.0091	0.0074t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.0066	0.0119t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.0052	0.016t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.0042	0.0198t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>
2-2-(3)			2	0.096	0.0038	0.0038	—	0.0038	—	0.0038	—	0.0038	—
2-2-(4)			3	0.008	0.0003	0.0003	—	0.0003	—	0.0003	—	0.0003	—
計=					1.0	0.01323	0.0108	0.00935	0.00837				

### (2) 検証計算の例 (A=400m<sup>2</sup>、600m<sup>2</sup>、800m<sup>2</sup>、1000m<sup>2</sup>)

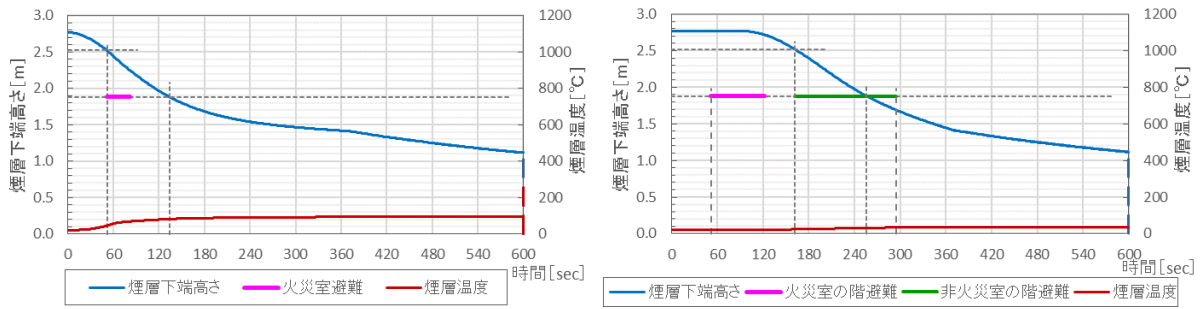
#### (2-1) シナリオ1-2-(4)：SP成功、廊下排煙不作動、火災室－廊下扉3枚開放

この場合の煙と避難性状の計算結果を図8.10に示す。設計火源の発熱速度はいずれの面積においても $\alpha_D t^2 + Q_{sp}$ でSP制御火源の最大値であるが、出火室面積が大きくなるほど、出火室、廊下とも煙層の降下は緩やかに、また温度は低くなる。伴って、A=400m<sup>2</sup>のケースでは避難安全基準を満たすには若干至っていないが、面積が大きくなるほど避難に余裕が生じている。

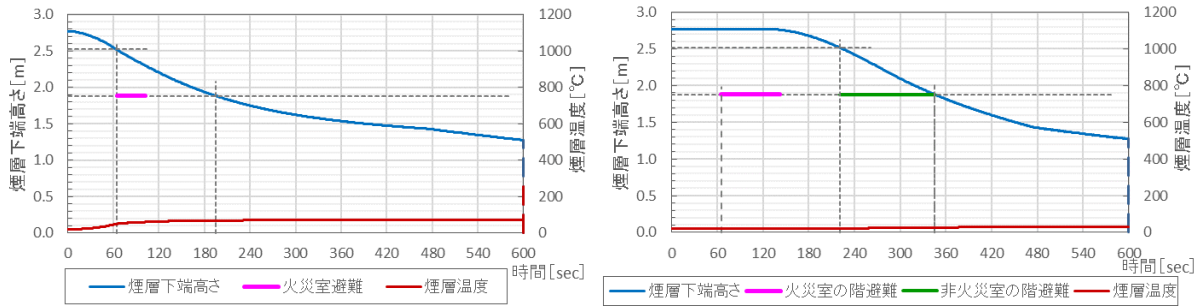
これは火災の拡大がSP制御の効果で抑制されることに加えて、出火室の面積が大きいくほど、出火室が大きな煙だめの役割を果たして廊下への煙流出速度を小さくすること、及び遅れて避難を開始する非出火室からの避難者数が少なくなるためである。



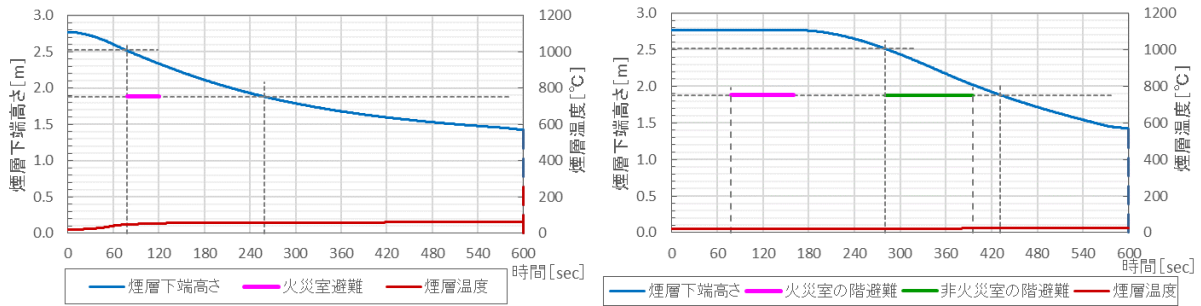
[A=400m<sup>2</sup>、扉=3] シナリオ 1-2-(4) : SP 成功  $\alpha_D=0.2$ 、扉開=3、廊下排煙不作動 ( $m_V=0$ )



[A=600m<sup>2</sup>、扉=3] シナリオ 1-2-(4) : SP 成功  $\alpha_D=0.2$ 、扉開=3、廊下排煙不作動 ( $m_V=0$ )



[A=800m<sup>2</sup>、扉=3] シナリオ 1-2-(4) : SP 成功  $\alpha_D=0.2$ 、扉開=3、廊下排煙不作動 ( $m_V=0$ )



[A=1000m<sup>2</sup>、扉=3] シナリオ 1-2-(4) : SP 成功  $\alpha_D=0.2$ 、扉開=3、廊下排煙不作動 ( $m_V=0$ )

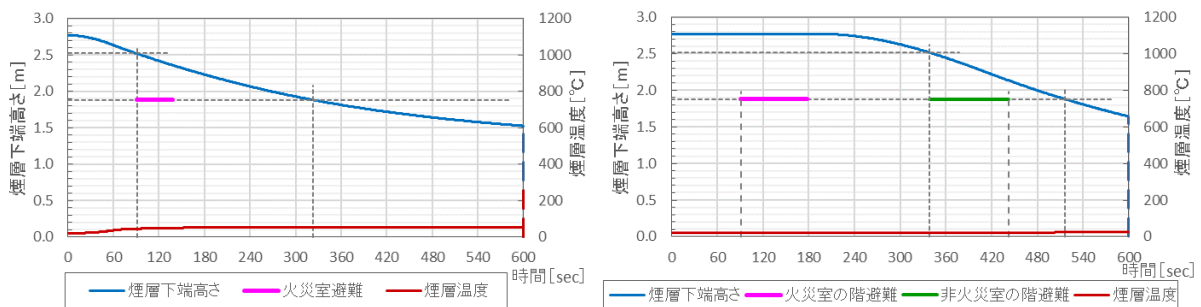


図 8.10 計算結果 (シナリオ 1-2-(4))

(2-2) シナリオ 2-2-(2) : SP 失敗、廊下排煙不作動、火災室－廊下扉 1 枚開放

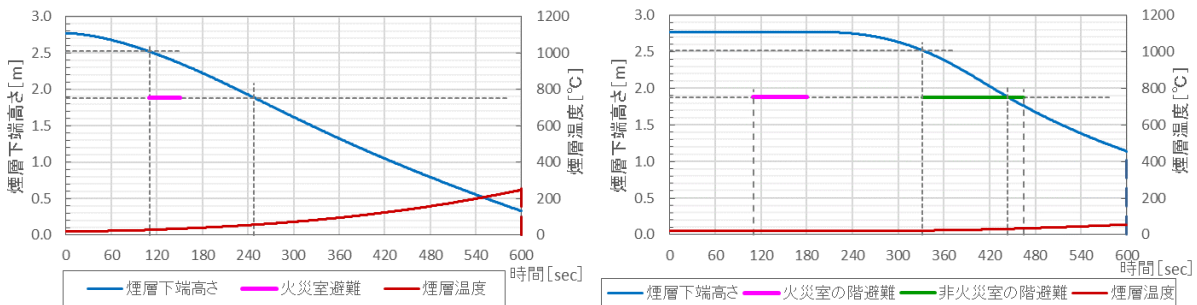
このシナリオは SP による火災抑制に失敗した上に、廊下排煙不作動、火災室扉 1 枚付閉鎖と、かなり条件の厳しいシナリオであるが、ある程度許容死傷確率を配分出来るので火災の拡大速度が比較的緩やかな設計火源の設定が可能である。

出火室面積が大きくなると、許容死傷確率が小さくなるので火源の拡大速度が大きくなるが、逆に出火室内での煙の拡大が遅くなるので、出火室面積が大きくなることの影響は相殺される傾向にある。

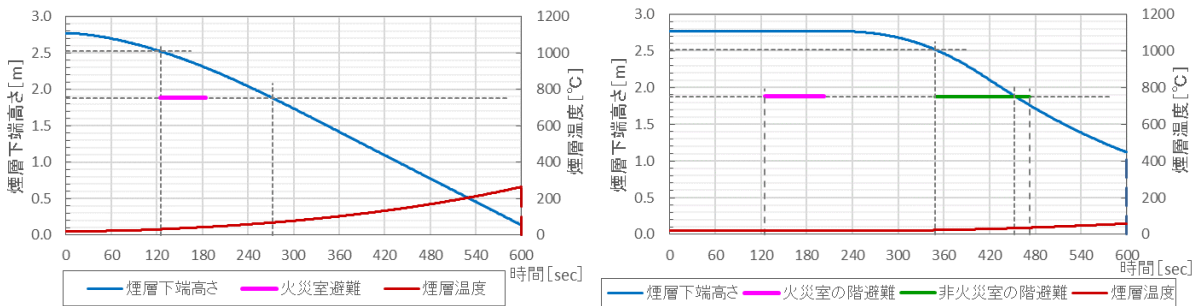
図 8.11 の計算結果によれば、 $A=400\text{m}^2$ 、 $600\text{m}^2$  のケースで幾分避難安全基準を満たさないが、例えば非火災室の避難開始時間を早める対策等で改善は可能であろう。

なお、このシナリオの火災は成長火災であるから、このまま推移すれば最終的には廊下は避難や消防活動が困難になる。消防活動の確保のためには避難階段付室の煙制御なども考慮した計画が必要かも知れない。

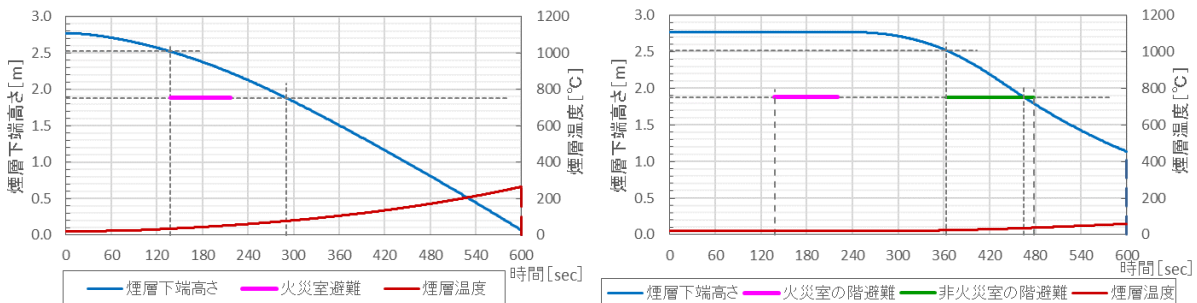
[ $A=400\text{m}^2$ 、扉=1]シナリオ 2-2-(2) :  $A\sqrt{H}$  支配  $\alpha_D=0.0074$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[ $A=600\text{m}^2$ 、扉=1]シナリオ 2-2-(2) :  $A\sqrt{H}$  支配  $\alpha_D=0.0119$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[ $A=800\text{m}^2$ 、扉=1]シナリオ 2-2-(2) :  $A\sqrt{H}$  支配  $\alpha_D=0.016$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[A=1000m<sup>2</sup>、扉=1]シナリオ 2-2-(2) : A√H 支配  $\alpha_D=0.0198$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )

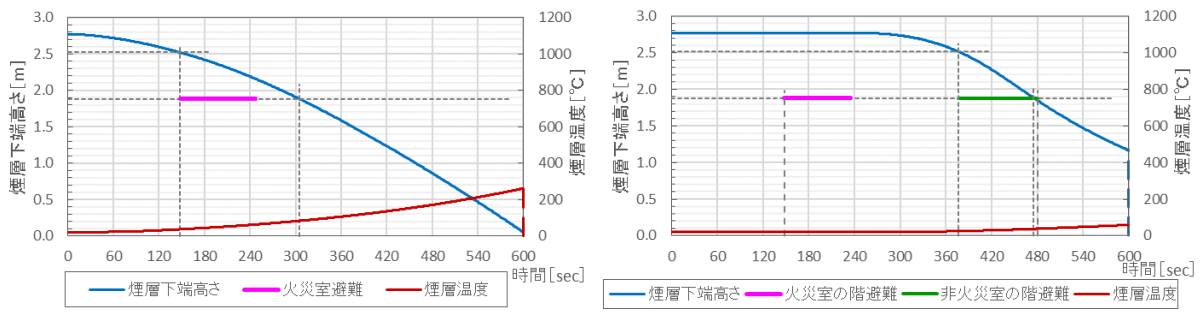


図 8.11 計算結果 (シナリオ 2-2-(2))



## 8.2.7 居室－廊下間の扉数=4 の場合のシナリオ、(A=1000m<sup>2</sup>、1200m<sup>2</sup>、1400m<sup>2</sup>、1600m<sup>2</sup>)

### (1) シナリオと許容死傷確率の分配

この検証計算例は前記 8.2.6 節の検証計算(例)と類似である。

SP 失敗、廊下排煙不作動の条件では、A=1000m<sup>2</sup>、1200m<sup>2</sup>、1400m<sup>2</sup> の場合の、シナリオ 2-2-(3)、2-2-(4)、2-2-(5)を検証不要に出来るように許容死傷確率を配分することが出来る。また、この配分の余剰を 2-2-(2)に配分すればその値に応じて、設計火源の拡大速度を緩和できる。

一方、A=1600m<sup>2</sup> の場合にはシナリオ 2-2-(3)を検証不要にするためには許容死傷確率の持ち分が不足する。そこで若しシナリオ 2-2-(4)、2-2-(5)に配分した残りを全てシナリオ 2-2-(3)に配分したとすれば設計火源は非常に緩やかなものになり、避難安全の判定基準を満足することは極めて簡単になる。しかし、そうするとシナリオ 2-2-(2)には配分出来る許容死傷確率の手持ちがなくなるので、配分を 0 として極めて厳しい設計火源の下で避難安全の判定基準を満足することが必要になる。

そこで、A=1600m<sup>2</sup> の場合には、シナリオ 2-2-(4)、2-2-(5)に配分した許容死傷確率の残りをシナリオ 2-2-(2)と 2-2-(3)の設計火源がバランス良く緩やかになるように配分した。更に、A=1400m<sup>2</sup> の場合はシナリオ 2-2-(3)の検証計算を不要にするよう配分することは可能だが、するとシナリオ 2-2-(2)の設計火源が厳しいものになるので、シナリオ 2-2-(2)と 2-2-(3)の設計火源のバランスが取れるように許容死傷確率の配分を工夫した。

表 8.9 居室－廊下間の扉数=4 の場合のシナリオと生起確率、許容死傷確率の配分、設計火源 (例)

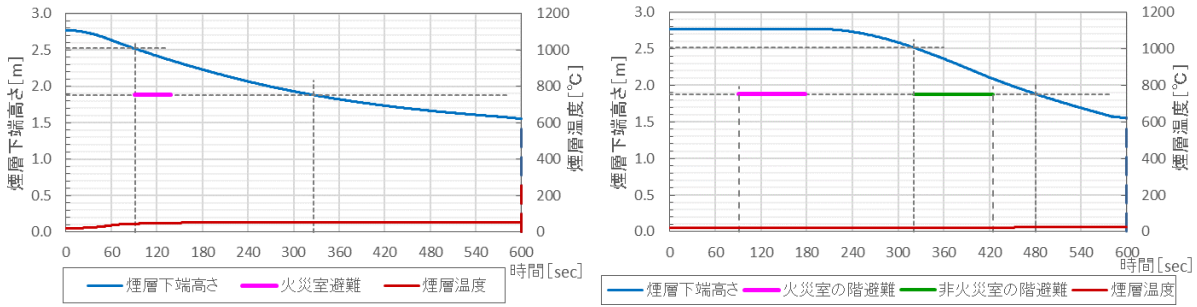
シナリオ NO	防火設備システムと作動確率				シナリオ 確率	A=1,000m <sup>2</sup>		A=1,200m <sup>2</sup>		A=1,400m <sup>2</sup>		A=1,600m <sup>2</sup>	
	SP	廊下排煙	扉 (居室－廊下)			確率配分 0.00837	設計火源	確率配分 0.00764	設計火源	確率配分 0.00707	設計火源	確率配分 0.00661	設計火源
			開放数	確率									
1-1-(1)	成功 0.8	作動 0.8	0	0.410	0.2621	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-1-(2)			1	0.410	0.2621	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)
1-1-(3)			2	0.154	0.0983	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)
1-1-(4)			3	0.026	0.0164	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)	0	1-1-(5)
1-1-(5)			4	0.002	0.0010	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>
1-2-(1)		不作動 0.2	0	0.410	0.0655	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-2-(2)			1	0.410	0.0655	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)
1-2-(3)			2	0.154	0.0246	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)
1-2-(4)			3	0.026	0.0041	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)	0	1-2-(5)
1-2-(5)			4	0.002	0.0003	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>sp</sub>
2-1-(1)	失敗 0.2	作動 0.8	0	0.410	0.0655	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
2-1-(2)			1	0.410	0.0655	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)
2-1-(3)			2	0.154	0.0246	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)
2-1-(4)			3	0.026	0.0041	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)	0	2-1-(5)
2-1-(5)			4	0.002	0.0003	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>
2-2-(1)		不作動 0.2	0	0.410	0.0164	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	0.2t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0	2-2-(2)	0	2-2-(2)
2-2-(2)			1	0.410	0.0164	0.00113	0.0222t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.0004	0.0369t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.00403	0.022t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.0036	0.0244t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>
2-2-(3)			2	0.154	0.0061	0.0061	—	0.0061	—	0.0020	0.0171t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>	0.0019	0.0173t <sup>2</sup> +Q <sub>vt</sub>
2-2-(4)			3	0.026	0.0010	0.0010	—	0.0010	—	0.0010	—	0.0010	—
2-2-(5)			4	0.002	0.0001	0.0001	—	0.0001	—	0.0001	—	0.0001	—
計=					1.0	0.00837	0.00764	0.00707	0.00661				

(2) 検証計算の例 (A=1000m<sup>2</sup>、1200m<sup>2</sup>、1400m<sup>2</sup>、1600m<sup>2</sup>)

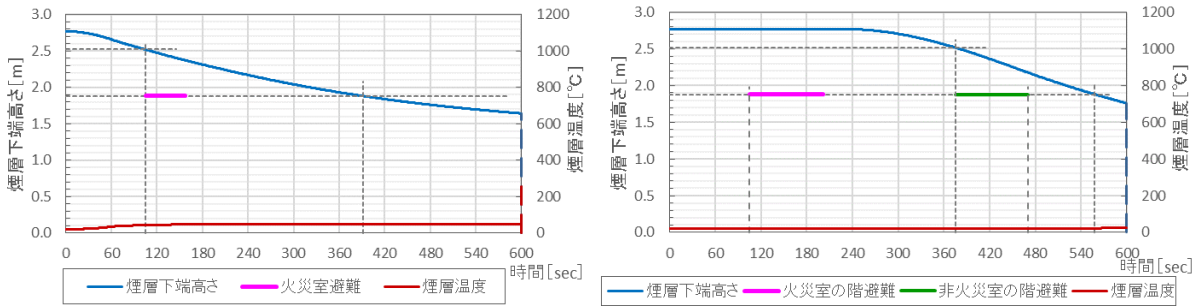
(2-1) シナリオ 1-2-(4) : SP 成功、廊下排煙不作動、火災室-廊下扉 4 枚開放

面積がこの規模で、火災の拡大が SP により抑制されたシナリオでは、火災室の面積が大きいことと自体が煙の廊下への拡大を抑制しており、居室のみならず、階避難のためにも十分な時間を与えていると言えよう。また火災階の全避難者の多くの部分が火災室避難の段階から連続的に階避難に移って避難を完了させてしまう点も、非火災室避難者の階避難にとって有利な側面であろう。

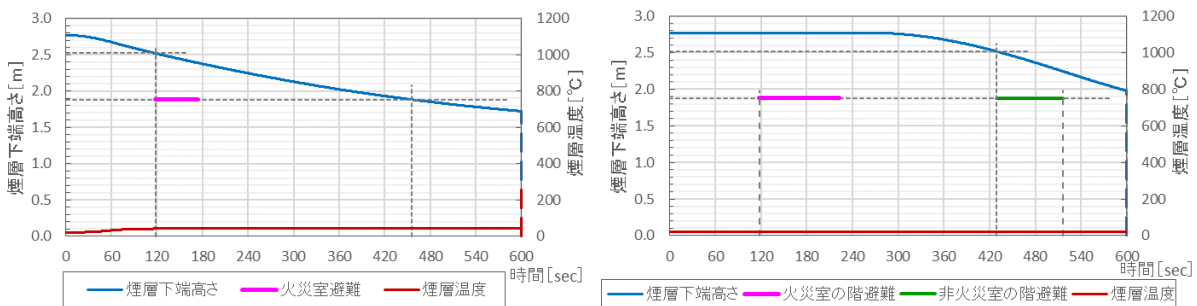
[A=1000m<sup>2</sup>、扉=4] シナリオ 1-2-(4) : SP 成功  $\alpha_0=0.2$ 、扉開=4、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[A=1200m<sup>2</sup>、扉=4] シナリオ 1-2-(4) : SP 成功  $\alpha_0=0.2$ 、扉開=4、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[A=1400m<sup>2</sup>、扉=4] シナリオ 1-2-(4) : SP 成功  $\alpha_0=0.2$ 、扉開=4、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[A=1600m<sup>2</sup>、扉=4] シナリオ 1-2-(4) : SP 成功  $\alpha_0=0.2$ 、扉開=4、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )

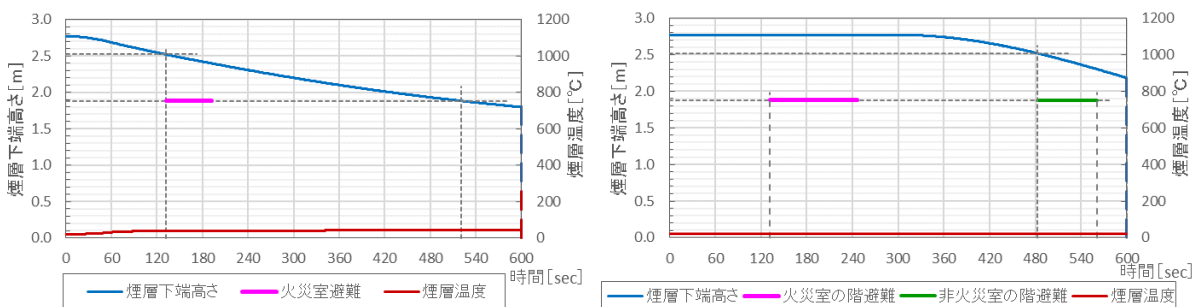
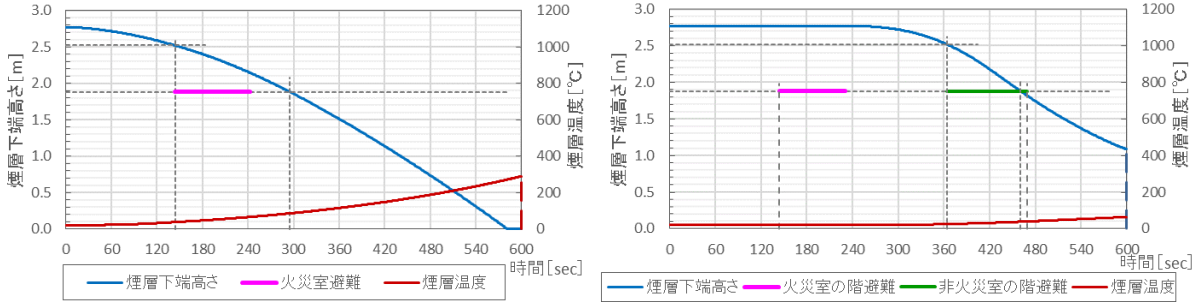


図 8.12 計算結果 (シナリオ 1-2-(4))

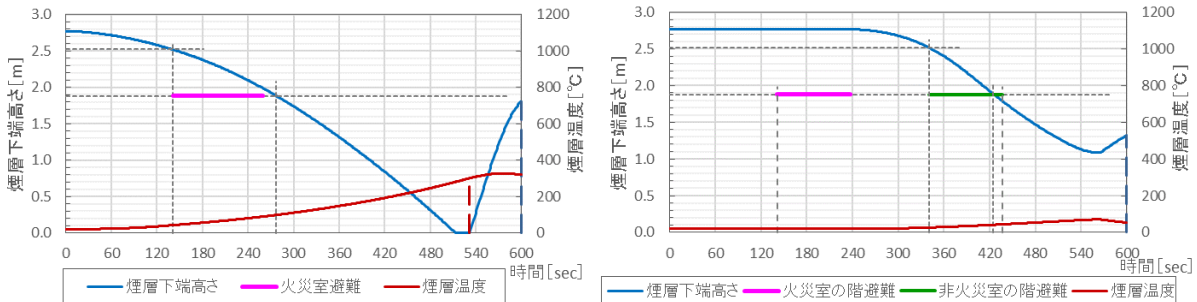
(2-2) シナリオ 2-2-(2) : SP 失敗、廊下排煙不作動、火災室－廊下扉 1 枚開放

このシナリオでは、火源はSP制御は効いていないので、火災は換気支配になるまで成長し続けるが、設計火源の成長係数 $\alpha_D$ がそれ程大きくないので煙の伝搬も温度上昇も緩やかであり、火災室避難、階避難とも基本的に問題ない。また非火災室の階避難で階避難時間と煙層降下時間が近接しているのは避難開始時間を廊下の煙層厚さで決めているためであるが、非火災室の避難開始と出火室在館者の階避難終了とはかなりの時間差があるから実際には避難開始を早める手段を採用することも可能と考えられる。

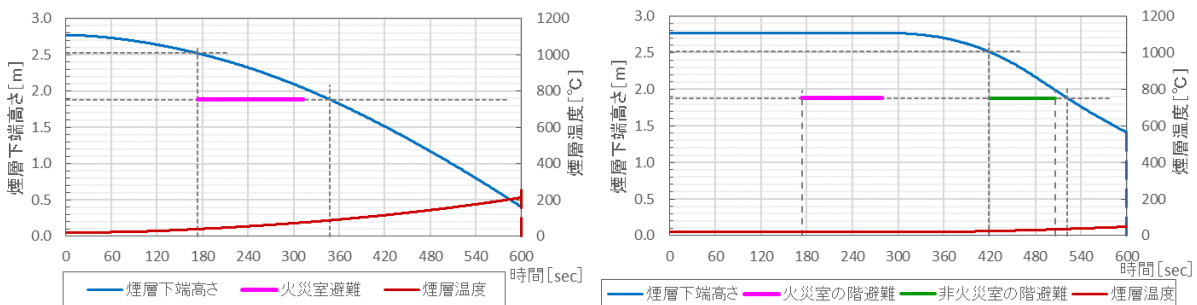
[A=1000m<sup>2</sup>、扉=1]シナリオ 2-2-(2) : A√H 支配  $\alpha_D=0.0222$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[A=1200m<sup>2</sup>、扉=1]シナリオ 2-2-(2) : A√H 支配  $\alpha_D=0.0369$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[A=1400m<sup>2</sup>、扉=1]シナリオ 2-2-(2) : A√H 支配  $\alpha_D=0.022$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[A=1600m<sup>2</sup>、扉=1]シナリオ 2-2-(2) : A√H 支配  $\alpha_D=0.024$ 、扉開=1、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )

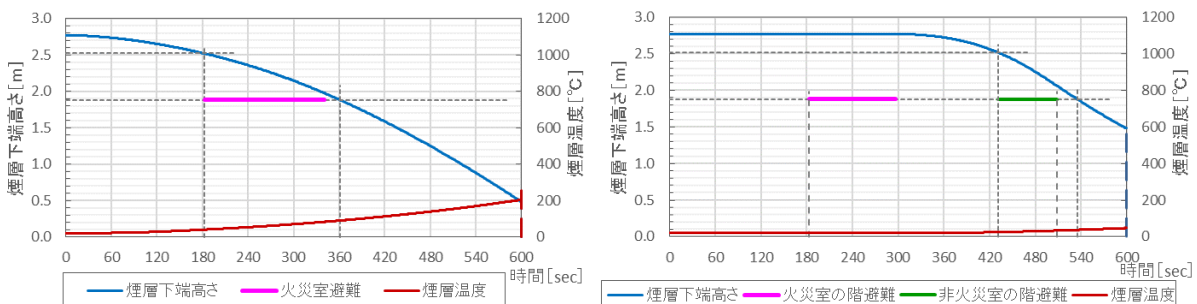
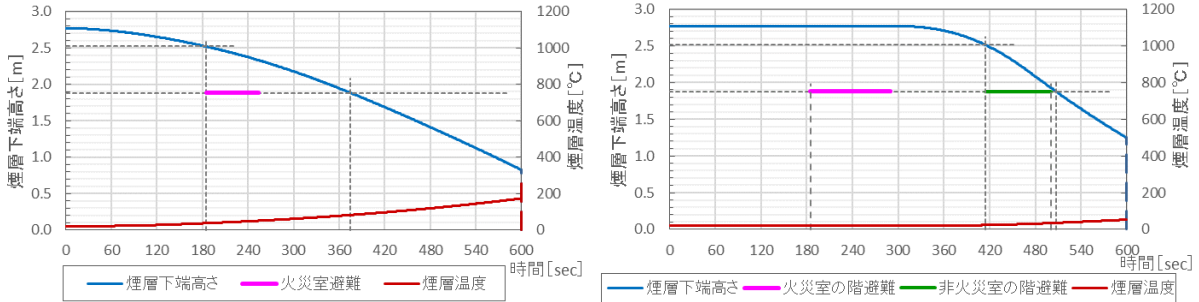


図 8.13 計算結果 (シナリオ 2-2-(2))

(2-3) シナリオ 2-2-(3) : SP 失敗、廊下排煙不作動、火災室－廊下扉 2 枚開放

これは火災室の面積  $A=1400\text{m}^2$ 、 $1600\text{m}^2$  の場合で扉が 2 枚開放されたシナリオの計算結果であるが、先に表 8.9 に関して説明したように、シナリオ 2-2-(2)との間で許容死傷確率の配分を調整した結果、火災室避難、階避難とも避難安全の判定基準を満たしている。

[ $A=1400\text{m}^2$ 、扉=2]シナリオ 2-2-(3) :  $A\sqrt{H}$  支配  $\alpha_D=0.0171$ 、扉開=2、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )



[ $A=1600\text{m}^2$ 、扉=2]シナリオ 2-2-(3) :  $A\sqrt{H}$  支配  $\alpha_D=0.0171$ 、扉開=2、廊下排煙不作動 ( $m_v=0$ )

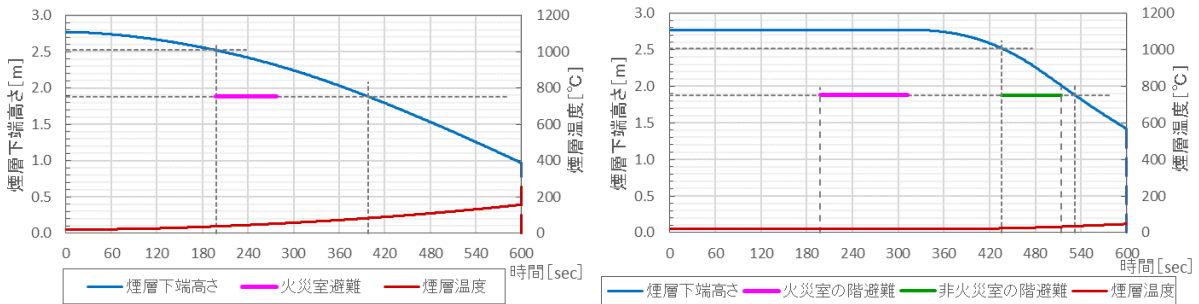


図 8.14 計算結果 (シナリオ 2-2-(3))

## 8.2.8 階避難ケーススタディーのまとめ

今回のケーススタディーでは、事務所用途の建物に防火設備としてスプリンクラー（居室）、扉（居室－廊下）、排煙（廊下）が備わっている場合を想定して、これらの作動／不作動によって生じるシナリオについて階避難の安全性が確保出来るか否かを検討した。

これらの防火設備の作動確率は何れも 0.8 と仮定したが、その値には十分なデータの裏付けがある訳ではないので、そのデータの充実は今後の課題となる。しかし、もし作動確率がこれ以下だと避難リスクを許容値以下に抑えられる解を見つけるのが容易でないかも知れない。

具体的な建築設計の避難安全について関係者が議論するとき、‘安全である’とか‘危険である’とかが定量的な論拠に基づいて議論されることは殆ど無い。また、例えば排煙量が適切かどうか議論されるときも、法規の基準値より多いか少ないかは議論されるが、‘どんな火災シナリオの下で’と言うことが論理的に明確に示されることは皆無に近いと言って良い。

対して今回の方法では、現段階では防火設備の作動確率が今回の仮定であっても、対処が難しいシナリオや易しいシナリオを具体的に特定し、それらに対処するために排煙設備にどれくらいの排煙量が必要となるか、扉の閉鎖信頼性がどれくらい重要な意味を持つのかなど、防火設備が避難安全設計の意義と有効性を理解する上で助けとなる。

排煙設備など防火設備がどの段階までに作動すれば良いかが明確になれば、手動による起動の操作性を向上することなども含めて、防火設備の作動確率を高める工夫も可能になると考えられる。

## 9. 全館避難の安全検証に関する検討

一般的には建物の空間構成は様々であるから、一棟の建物の或る空間で火災が発生したとしても必ずしも全ての在館者に火災危険が及ぶ訳ではない。しかし、典型的な高層建築物では重層する全ての階が数本の階段などの堅シャフトで繋がっているのも、もしこれらの階段に火災の煙や熱が侵入すれば多数の在館者が避難不能な状況に陥ってしまう。

従って、避難安全設計において避難階段を火災の煙や熱の侵入から保護する設計は極めて重要度が高いが、現状では比較的簡単な問題と考えられているようで、それ程深く研究されてはいない。しかし、高層建物の全館避難は、数時間にも亘る可能性のある避難であり、精々数分以内の居室避難や階避難では考える必要が無かったことも問題となる可能性がある。

全館避難に対する避難計画は真剣に考えて行くと関連する要素が多すぎて未だ旨く問題が整理出来ないが、ここでは、避難階段の安全を検証するための設計火災条件を定める際に課題となる可能性のある要素について避難リスクの観点から考察しておく。

全館避難の経路は端的に言えば避難階段であり、全館避難計画は避難階段を煙や熱の侵入から保護することに他ならないが、そのためには種々の防火設備の性能、必要な性能や信頼性のレベルを明確にしなければならない。

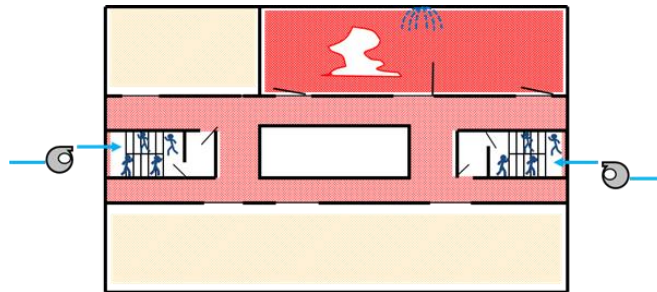


図 9.1 全館避難に係る防火設備のイメージ

### 9.1. 全館避難設計の許容避難リスク

全館避難の場合も階避難の場合と同様に許容避難リスクは次式のように書ける。

$$R_a^D(K) \equiv p_{cas}(K)C_0(K) = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{A_f(H)}{A_f(K)} \right\}^{1/2} C_0(H) \quad (5.9 \text{ 再掲})$$

ここに  $A_f(K)$  : 出火空間の面積

$C_0(K)$  : 避難対象となる在館者数

もし階を1つの火災室と見なすのであれば  $A_f(K)$  は居室の合計面積にとれば良いが、一般には階には面積や用途の異なる複数の居室があり、出火率や開口条件などの諸条件が複雑になる可能性があるため、原則的にはそれぞれの室での出火を想定した安全検証が必要であろう。

なお、 $A_f(K)$  は出火空間の面積であるが、 $C_0(K)$  はその出火により潜在的に建物外への避難を余儀なくされる在館者の数、すなわち建物の総在館者数である。全館避難では、この  $C_0(K)$  が大きいため、火災が発生した場合の死傷確率を非常に小さくする必要がある。

上記の許容避難リスクに対応する許容死傷確率  $p_{cas}^a(K)$  は次式で与えられる。

$$p_{cas}^a(K) = 0.14 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{A_f(H)}{A_f(K)} \right\}^{1/2} \frac{C_0(H)}{C_0(K)} \quad (5.11 \text{ 再掲})$$



## 9.2. 避難階段の安全に関わるシナリオ

### (1) 階段室の安全性に影響する廊下の火災性状

火災は殆ど全てが居室あるいはその他の諸室で発生し、それが拡大することで全館避難経路である避難階段に危険を及ぼす。高層の建物では付室を備えた特別避難階段になっているが、低・中層の建物の場合には、避難階段が付室を介さず直接居室に面している場合や、共用廊下を介して面している場合が多い。このような差がある理由は明示的に説明されていないが、暗黙裡に建物規模による避難リスクの差が考慮されているのであろう（注 9.1）。

階段室の避難環境が問題となるのは火災室から廊下に出た煙や火熱に階段室が曝される場合である。そのような状況がどのような確率で起こるかは、既に階避難で検討したように、基本的には防火設備システムの作動信頼性と性能に依存するが、全館避難は建物規模によって数 10 分から数時間にも亘る避難なので、防火設備には防火戸や防火区画含めて検討する必要がある。

階段室の避難環境は出火空間の火災を源として一連の連続関係にあるが、‘出火室→廊下’および‘廊下→階段室’の 2 段階に分けて整理する方が考え易いであろう。

階避難は避難者が廊下に居る数分程度の時期であるが、SP 制御火源のシナリオのような火災性状が著しく厳しいという状況でなくても避難に支障が出るシナリオは生じ得る。しかし避難者が既に階段の中に居る全館避難の段階では、SP 制御火源によって廊下に煙が流出するシナリオの場合でも、煙の温度は低いので、階段の中に居る避難者にとって大きな脅威になる可能性は大抵の場合無視出来るとして良いのではなかろうか。

図 9.2 は上記を考慮して階段内の避難者に脅威を及ぼす火災シナリオを整理したもので、図中の  $p'_1$ ,  $p'_2$ ,  $p'_3$  はそれぞれ、SP の火災制御、扉閉鎖、扉の延焼防止が成功する確率を示す。

出火室の火災が廊下に及んで、避難階段内の避難者に危険を及ぼすシナリオと確率は、SP による火災制御が失敗し、火災が室火災にまで成長した場合で、かつ

シナリオ 3 : 出火室の扉は閉鎖→延焼防止失敗 :  $P_3 = (1 - p'_1)p'_2(1 - p'_3)$

シナリオ 4 : 出火室の扉が開放 :  $P_4 = (1 - p'_1)(1 - p'_2)$

の場合となる（注 9.2）。

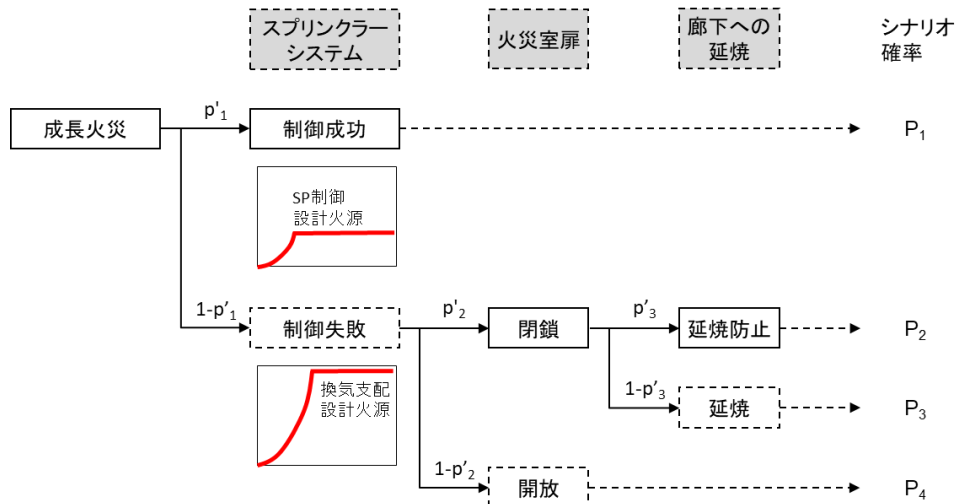


図 9.2 階段内の避難者に脅威を及ぼす火災シナリオ

### (2) 廊下の火災に対する階段室の避難安全に関わるシナリオ

廊下における火災に対して階段室保護する防火設備としては一般に付室扉、階段扉、煙制御システムがあるものとして、それらの作動/不作用によって生ずるシナリオを作成したものが図 9.2 である。これらのシナリオの生起確率、 $P_1 \sim P_8$ 、は、各防火設備の作動確率の値  $p_1 \sim p_3$  が与えられれば計算できる。

最近の高層建築では階段や付室の扉は常時閉鎖のものが多くなっているため閉鎖確率は一般部分の扉よりかなり高くなっていると思われるが、階避難や居室避難に比較して時間的には余裕があるので手動閉鎖も加えて作動確率を更に向上させることも可能であろう。但し、閉鎖してもある程度の隙間はあると思われるし、煙だけでなく熱の侵入も防ぐ必要がある（注 9.3）。

このシナリオに基づく安全検証の手続きは 8.2 節の階避難と類似である。但し、前段には 9.1 節に示した‘火災室→廊下’の段階があるので、これを合わせた一連のシナリオの生起確率は、9.1 節のシナリオ 3 と 4 の確率

$$P_3 = (1 - p'_1)p'_2(1 - p'_3) \quad \text{または} \quad P_4 = (1 - p'_1)(1 - p'_2)$$

に図 9.3 の確率  $P_1 \sim P_8$  を乗じることになる。

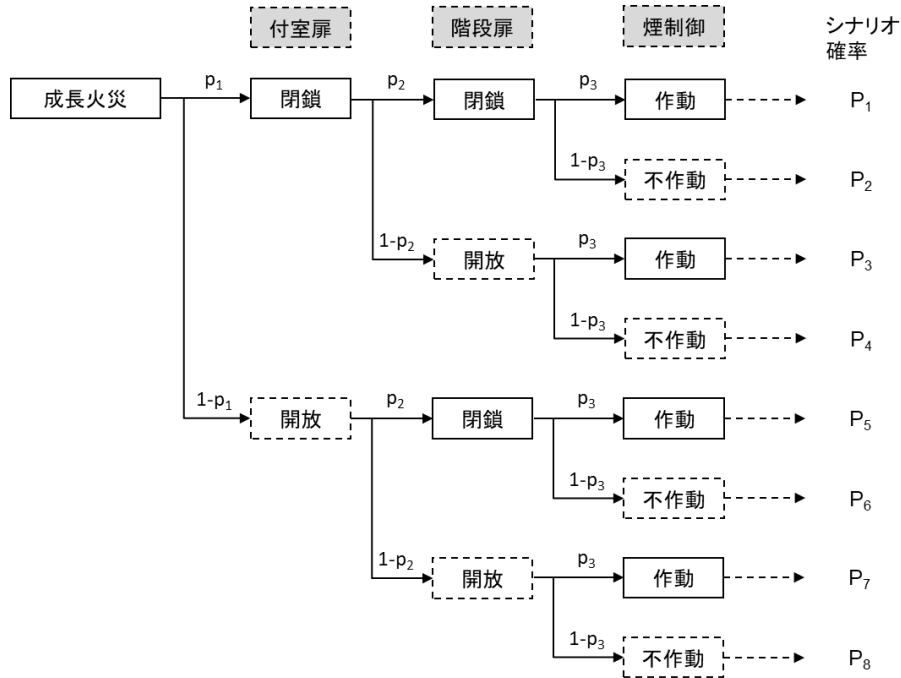


図 9.3 廊下の火災に対する階段室内の避難環境に関するシナリオ

（注 9.1）低・中層の建物の階段が付室を要求されないことと高層建物が付室を要求されることの妥当性が、許容避難リスク（許容避難確率）の観点から説明されることが望ましい。

（注 9.2）シナリオ 3 の場合に関連して、ここでは複雑化を避けるために扉の燃え抜けなど延焼防止性能だけしか触れなかったが、火災室－廊下間の区画壁の耐火性能によっては、扉のみならず区画壁の燃え抜け（あるいは遮炎性の喪失）の可能性についても考慮する必要が生じる。耐火試験において裏面温度で評価される耐火時間が同じでも、コンクリート系の壁が燃え抜けることは無いが、石膏ボードの壁の燃え抜け時間は耐火時間と殆ど変わらない。また、扉開放のシナリオ 4 においても、区画壁の燃え抜けが加われば廊下の火災性状が更に激しくなる恐れがある。

区画壁が必要な延焼防止性能を有するか否かの検証のための設計火災としては換気支配火災モデルを使うことにしても、継続時間は収納火災荷重によって変わる。避難安全設計の中で実務的に使える検証方法としては、なんらか簡易な手法を工夫する必要がある。

（注 9.3）多数の避難者が階段内に密集するとすれば、火災による熱の侵入とともに、人体の発熱による温度や湿度に対する人体の耐限値についての考察が必要となるかも知れない。



## 謝辞

本研究は建築物の避難安全設計の健全な発展のためにリスクの概念を導入する必要性があることを痛感して2010年頃から始めたものであり、それから既に10年以上の時間が経過した。その間多くの研究者による協力を得て、貴重な成果の提供を受けることができた。諸般の事情があつて研究を纏める作業の進捗は円滑では無かったが、特に下記の方々については、その協力無くしては本報告の形に纏めることは困難であつたと感じている。

ここに記して衷心からの謝意を表したい。

池島由華	大成建設技術センター
抱 憲誓	鹿島建設技術研究所
角谷三夫	関西建築防災研究所
野竹宏彰	清水建設技術研究所
山口純一	大林組技術研究所

(敬称略)

## Annex A 火災成長係数 $\alpha$ の確率密度分布

設計火源の最大発熱速度も火災成長係数も本来は一律に定められる値ではなく種々の条件によって変わる確率変数であるが、これらを両方とも確率変数として扱うのは複雑すぎる。そこで、ここでは、区画火災の最大発熱速度は、比較的変動幅が小さく、区画の設計条件等により一律に定まるものと見做す。

換気支配の区画火災における区画内での発熱速度の上限は空気流入速度で決まるが、これは比較的簡単に見積ることが出来る。スプリンクラー(SP)制御の最大発熱速度は、Alpertの結果に基づいて、SPが作動しない上限の発熱速度として見積ることが出来るであろう。SPが作動しない規模の火災であっても避難上危険である可能性があり、これらは様々な成長速度、経過をたどるものが考えられる。ここではこれら多様な小規模の火源に加えて、作動して火災拡大を抑制したけれども完全な消火迄に至らなかった火災の発熱速度を全て安全側に包含するものとしてSP制御火災とする。

燃料支配の火源の最大発熱速度は、火災の初期段階なら燃焼物の材料特性と大きさが支配的要因になるであろう。しかし現段階では燃料支配の火源の最大発熱速度を見積る手法が開発されていないので、ここでは燃料支配の火源は当面扱わないことにする。

火災初期段階の火源の成長速度は避難にとって影響が大きい。家具等を始めとする様々な収納物の火災拡大性状は、燃焼実験で発熱速度を測定することにより調べられており、性能的火災安全設計に対しても貴重なデータが提供されている。しかしそれらは飽く迄ある実験条件の下で人為的に燃焼させた燃焼性状である。実際の建物火災の成長因子は様々な着火源や、着火物となる建物内収納可燃物の性質などへの依存が大きい。現実の火災では、どの様な可燃物がどの様な着火条件で燃焼しているのかの頻度が分からないので、それだけでは実際の火災がどのくらいの成長速度で、どのくらいの頻度で発生しているのかは分からない。

出口等<sup>5)</sup>は総務省消防庁の火災報告データを基に先ず燃焼面積の拡大速度を求め、可燃物の単位面積当たりの発熱速度を合わせて火災成長係数の確率密度分布を推定した。

下表は出口等が、火災報告による出火時間、消火開始時間、燃焼面積等から先ず火災初期の燃焼面積( $A_f$ )の拡大率( $A_f/t^2$ )を事務所、住宅、飲食、物販の用途別に統計的に求めた結果である。

表 A.1 火災統計分析による燃焼面積拡大率、 $A_f/t^2$

Property		Office	Residence	Restaurant	Store
Data number		601	11,598	564	313
Burned Area Growth Rate $A_f/t^2$ ( $\times 10^{-5}$ )					
mean	$\mu$	7.6	8.1	7.4	9.7
standard deviation	$\sigma$	11.0	9.3	7.8	12.2
minimum		0.077	0.069	0.077	0.069
75 percentile		3.9	5.4	5.0	5.3
90 percentile		9.4	10.4	10.2	12.3
95 percentile		18.3	17.4	17.0	22.6
99 percentile		57.2	45.4	37.3	59.5
maximum		224.0	131.1	45.3	70.9
L-N distribution	$\lambda$	-9.15	-10.85	-9.89	-9.72
	$\zeta$	1.19	0.92	0.87	0.97

### (a) 燃焼面積拡大率 $A_f/t^2$ の確率分布

初期火災の燃焼面積拡大率 $A_f/t^2$ の確率分布は、対数正規分布の形状により良く近似することが出来る。表 A.1 の下段 2 行はそのときの平均 ( $\lambda$ ) および標準偏差 ( $\zeta$ ) である。この値を用いて、それぞれの用途における $A_f/t^2$ 確率分布を描くと下図のグラフのような分布となる。

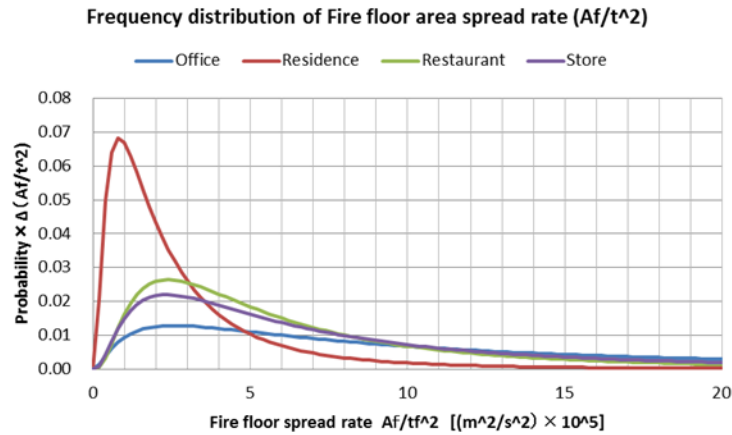


図 A.1 火災報告に基づく火源面積の拡大率 $A_f/t^2$ の対数正規分布近似

(b) 火源の成長係数( $\alpha$ )の確率分布

上記(a)における火災報告データからは、焼損面積の拡大率の確率分布が限界である。設計火源を定めるためには火源の成長係数 $\alpha$ の確率分布を必要とするが、これは火災報告データからだけでは得られない。

火災成長係数 $\alpha$ と焼損面積の拡大率の関係は下式のようなになる。

$$\alpha = \frac{Q}{t^2} = q'' \frac{A_f}{t^2} \quad (A.1)$$

- ここに  $Q$  : 火源の発熱速度 (kW)  
 $A_f$  : 焼損床面積 (m<sup>2</sup>)  
 $q''$  : 単位床面積当たりの火源発熱速度 (kW/m<sup>2</sup>)  
 $t$  : 時間 (s)

ここで $q''$ が単位床面積当たりの火源発熱速度であることが面倒なところである。燃焼している可燃物が木質系と仮定すれば、単位面積当たりの発熱速度は多めに見ても 100 kW/m<sup>2</sup> 程度であるが、積載可燃物は床上に立体的に立ち上がっているため、可燃物の表面積はどれだけと見れば良いのかが問題となる。しかし、これについては木材換算の火災荷重密度 ( $w$  kg/m<sup>2</sup>) と表面積との関係について既往の調査が幾つかあり、その中で栗岡等<sup>7)</sup>による次の結果を用いた。

$$\phi = 0.7w^{-2/3} \quad (\text{m}^2/\text{kg}) \quad (A.2)$$

すると単位床面積当たりの火源発熱速度 $q''$ は多めに 100 kW/m<sup>2</sup> とみて下記程度となる。

$$q'' = q_s'' \phi w^{1/3} = 70w^{1/3} \quad (\text{kW}/\text{m}^2) \quad (A.3)$$

従って、火災成長係数 $\alpha$ は下記のように与えられる。

$$\alpha = \frac{Q}{t^2} = 70w^{1/3} \frac{A_f}{t^2} \quad (A.4)$$

この方法により $\alpha$ の確率分布を算出したものが下図のグラフである。これらのグラフからは、いずれの用途においても $\alpha$ の確率密度分布は概ね似通っており、顕著な差異は感じられない。

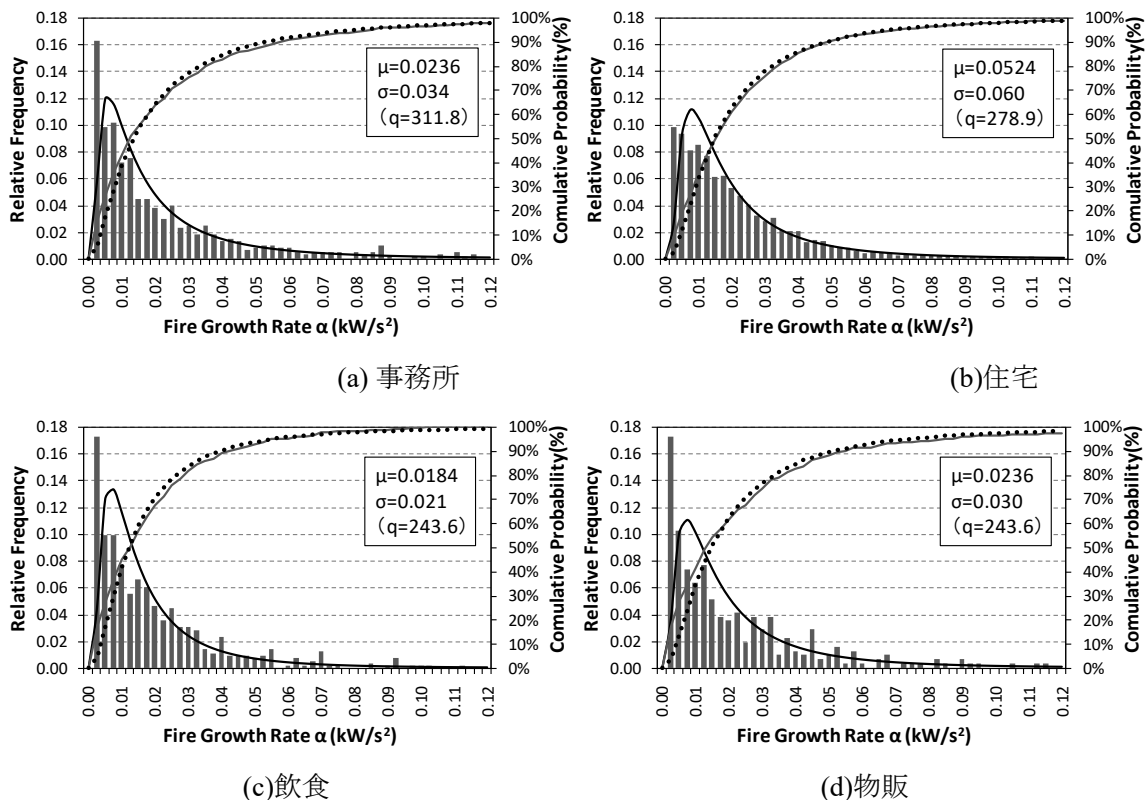


図 A.2 火災報告データに基づく火源成長係数の頻度分布<sup>5)</sup> (出口 et.al)

出口等による上記の算定では火災荷重密度  $w$  として、事務室用途では最も火災荷重密度の大きい技術系事務室の値を用い、その他では検証法に規定される設計火災荷重密度を用いており、幾分一貫性に欠けるところがある。そこで、我が国で実施された火災荷重調査による値を用いて上式中の  $w$  を決め、火災成長係数  $\alpha$  の分布を再計算した。

ただし、飲食店舗については、火災報告データから燃焼床面積の拡大率は推定できるものの、我が国では既往に火災荷重調査が行われておらず、火災荷重密度  $w$  のデータが存在しない。そのため、ここでは事務室用途と同程度と仮定している。

上式による  $\alpha$  の推定のために用いる  $w$  としては、平均値を用いるのが自然のように見えるが、実際の火災では積載可燃物のみでなく、内装などの固定可燃物も一定程度燃焼しているのでその分の割り増しも必要かも知れない。また、ここでの目的は避難安全設計のための設計火源を確立することであるから、ある程度安全側の数値を選択しておくことには問題が無い。そこで、上式で用いる火災荷重密度  $w$  は平均値  $\mu$  に標準偏差  $\sigma$  を加えて  $w = \mu + \sigma$  とした。

この算定に関わるデータと結果は表 A.3 にまとめて示している。この算定の最終的な目的は最下段に示す火災成長係数  $\alpha$  の対数正規確率密度分布であるが、各用途における分布の平均および標準偏差の値はいずれも似通っているように思われるので、これらを平均した値も計算しておいた。

なお、出口等による火災成長係数  $\alpha$  の結果は平均で  $\alpha = 0.02 \sim 0.05$  程度、 $\alpha > 0.1$  となるケースは事実上皆無である。このように火災統計を用いた火災成長係数の推定の研究は、外国でも行われた例があるが、 $\alpha$  の平均値の結果は概して  $\alpha = 0.02$  より小さい。また、例えば放火を入れたとしても  $\alpha > 0.05$  となる場合は殆ど無い結果となっている<sup>1)</sup>。

表 A.3 火災成長係数の対数正規分布の平均  $\lambda$  および標準偏差  $\zeta$

	Office	Residence	Restaurant	Store	(Average)
Fire load density: $w$ (kg/m <sup>2</sup> )					
Average $\mu$	30.1	34	30.1*	21.5	
Standard dev. $\sigma$	13.5	11.7	13.5*	9.6	
$\mu + \sigma$	43.6	45.7	43.6*	31.1	
HRR density: $q''$ (kW/m <sup>2</sup> )					
$q''$	246.4	250.3	246.4	220.1	
Fire area spread rate: $Af/t^2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )					
Average	0.000076	0.000081	0.000074	0.000097	
Standard dev.	0.000110	0.000093	0.000078	0.000122	
Fire growth rate: $\alpha$ (kW/s <sup>2</sup> )					
Average	0.01872	0.02027	0.01823	0.02135	0.01965
Standard dev.	0.02710	0.02327	0.01922	0.02686	0.02411
Log( $\alpha$ ) Normal dist.					
Average $\lambda$	-4.54280	-4.31894	-4.37819	-4.32083	-4.38937
Standard div. $\zeta$	1.06290	0.91696	0.86439	0.97392	0.95859

\* 飲食店舗は、火災報告データは在るが、火災荷重調査データが無いのでオフィスと同程度と仮定した。

下図には、これらの値を用いた確率密度分布のグラフを示している。これによれば事務所以外の用途および平均の分布は殆ど一致している。事務所の  $\alpha$  の確率分布は、これらより幾分小さい方に寄っているが大差はない。結果として、用途を問わず全て平均の確率密度分布一つのみで代替しても問題ないということになる。

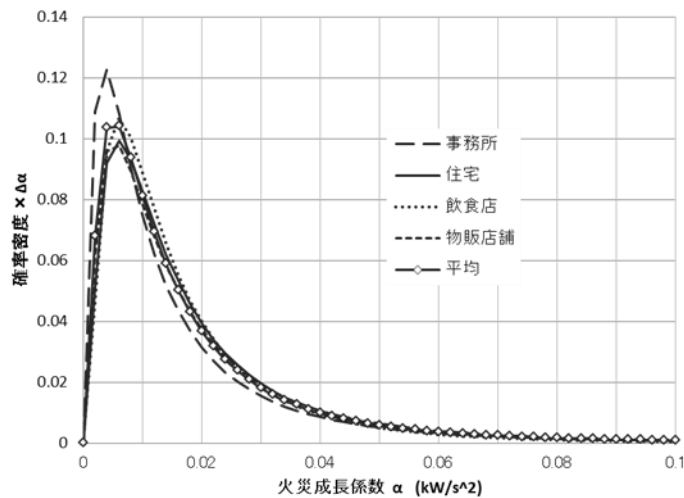


図 A.3 火災報告データに基づく火災成長係数の対数正規確率密度分布

因みに対数正規分布の確率密度関数は下式である。(Annex D 参照)

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta\alpha} \exp\left\{-\frac{(\ln\alpha - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right\} \quad (A.5)$$

ここに

$$\lambda = \ln\left\{\frac{\mu_\alpha}{\sqrt{1 + (\sigma_\alpha/\mu_\alpha)^2}}\right\}, \quad \zeta = \sqrt{\ln\{1 + ((\sigma_\alpha/\mu_\alpha)^2)\}}$$

(c) 燃焼実験による火災成長係数と火災報告による火災成長係数

1990年頃から酸素消費法による発熱速度の測定技術が導入されたことにより、種々の可燃物品や家具等の発熱速度の測定可能になり、これらのデータを基に火源の成長係数が求められた。

下図 A.4 は NFPA により種々の可燃物品の火災成長係数  $\alpha$  が分類された結果である。しかし、燃焼実験は、その性格上着火源が大きく設定される傾向を持つが、着火源が大きければ火災拡大速度が大きくなる。一方で実際の火災における着火源は偶然のものであり、火力が大きいのものもあれば小さいものもある。出口等による試算では実験による火災成長係数  $\alpha$  が大きい火源の頻度は、火災報告データに比較して著しく高いようである。実際の火災で火災成長係数  $\alpha$  が大きいものの頻度が小さいのは、火力が小さい着火源では大きな家具等を着火させるのが難しいためではないかと思われる。

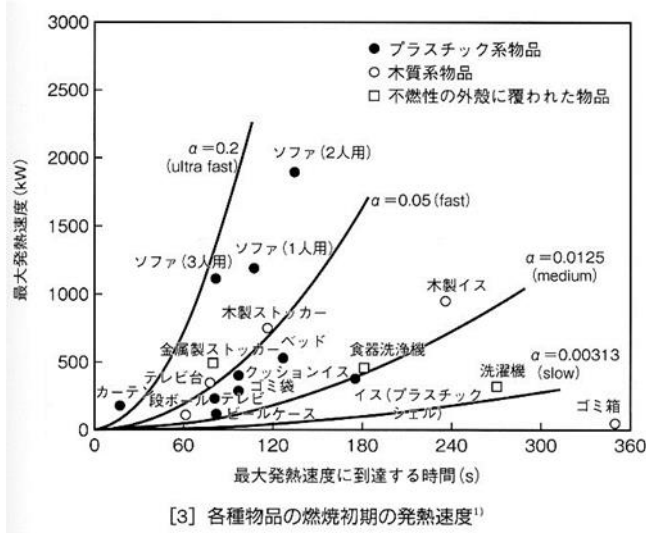


図 A.4 NFPA（米国防火協会）による種々の可燃物の火災成長係数の分類

参考文献

- 1) Martin Nilsson, Nils Johansson and Patrick Van Hee: A new method for quantifying growth rates using statistical and empirical data – Applied to determine the effect of arson, Fire Safety Science, Proc. of the 11<sup>th</sup> International Symposium, IAFSS, 2012
- 2) Alpert, R. L.: Calculation of response time of ceiling mounted fire detector, Fire Technology, Vol.8, 1972
- 3) 日本火災学会編：建築と火災、共立出版、2002
- 4) NFPA 29B – Smoke management system in malls, atria and large areas, 1991 edition, NFPA.
- 5) 出口嘉一、野竹宏彰、山口純一、抱憲誓、仁井大策、山口純一、池島由華：リスクの概念に基づく避難安全設計法に用いる火災成長率の分布の推定、日本火災学会論文集、Vol.61、No. 2、2011
- 6) Y. Deguchi, H. Notake and N. Kakaie: Statistical Estimations of Distribution of Fire Growth Rate –Study on Risk-based Evacuation Safety Design Method Part 2 –, Fire safety science – Proc. of the 10<sup>th</sup> International Symposium, pp.1081 -1100, IAFSS, 2011
- 7) 栗岡均など：可燃物の調査結果：事務所ビルの避難安全設計火源に関する研究 その1、日本建築学会学術講演梗概集、構造系（A-2）、2002
- 8) 掛川、矢代、笠原、池島、佐藤、栗岡：事務所の避難安全設計火源に関する研究、清水建設研究報告、第76号、平成14年

## Annex B 出火率と空間面積

ある空間での出火率には空間の用途および規模が関連しそうなことは容易に想像される。空間用途によって、火源の数や種類、使用時間、火源の管理形態の特徴が異なり、また同一の用途でも空間規模が大きければ、それだけ潜在的に出火源となり得る事物の数も多くなるからである。

もし‘危険な火災’ (hazardous fire) の出火率 $P$ が空間面積に比例すると仮定すれば

$$P = p_{hf} A_f \quad (B.1)$$

ただし  $p_{hf}$  : 空間用途による単位面積当たりの‘危険な火災’の出火率  
 $A_f$  : 出火空間の面積

しかし、出火率が単純に空間面積に比例するか否かは明確ではない。例えば多くの世帯が入居する集合住宅を棟全体で見れば出火率は世帯数、従って概ね棟の面積に比例すると考えられるが、個々の住戸毎にみると面積が増加しても、最も多く火気を使う台所などが比例して増える訳ではないので、出火率は面積に比例して増加しないであろう。

下図は東京消防庁管内の 1995～2002 年間における建物面積と出火数のデータを基に、面積当たりの出火率を算出したものである。建物面積については資料に言及は無いが、出火空間のみの値ではなく、建物の延べ床面積と考えられる。それでも面積の増加とともに単位面積当たりの出火率は下がる傾向にある。面積の小さい範囲で特に面積当たりの出火率の低下傾向が大きいのは、面積が増えても火源の量はあまり変わらないことを反映し、面積が大きくなるに従い低下傾向が小さくなるのは室数の増加に伴い火源の数も増えることの反映と思われる。

このデータに含まれる建物の用途などは分からないので、面積あたりの出火率の面積への依存の傾向を調べてみると  $A_f^{-2/5}$ 、でも  $A_f^{-1/2}$  でも大差は無い。ここでは簡単のため、出火率の式の形を下式と仮定する。

$$P = p_{hf} A_f^{1/2} \quad (B.2)$$

ただし、 $p_{hf}$  は空間用途によって定まる定数とする。

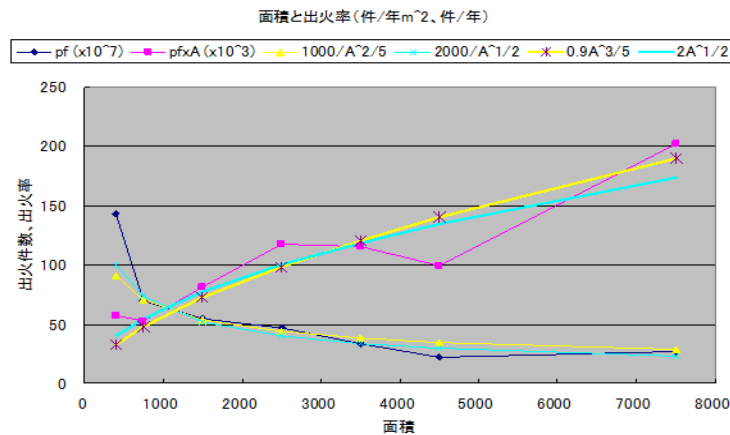


図 B.1 空間面積と出火件数、面積当たり出火率

[https://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-yobouka/kasaikikenboukaanzen/1703\\_32-07.pdf](https://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-yobouka/kasaikikenboukaanzen/1703_32-07.pdf)

(備考) 因みに、出火率の面積依存についての結果は式(B.2)と同じではないが、統計解析によって式の形を出している研究は国外にも存在する<sup>1),2)</sup>。

### 参考文献

- 1) M. Manes and D. Rush: A critical Evaluation of BS PD 7974-7 Structural Fire Response Data Based on USA Fire Statistics, Fire Technology, 55, 124301293, 2019
- 2) Kati Tillander: Utilisation of statistics to access fire risks in buildings, VTT Publications 537, 2004

## Annex C 空間用途別出火率比

池島等<sup>1)</sup>は総務省火災報告のデータと建設統計を分析することにより用途毎の単位面積当たりの‘危険な火災’の出火率を算出した。それを基に戸建住宅を基準としたときの各用途の出火率の比を求めたものが表 C.1 である（注 C1）。

なお、‘危険な火災’とは、出火した全ての火災の中で、小火など避難を必要とするまでもなく消し止められた出火を除いたもので、避難をしなければ危険な火災を意味する。従って、表の数値は用途毎の全出火件数のデータから小火の件数を除いた数の比である。この比は基準建物の出火率を分子にしているため、誤解が生じないように補足しておくこと、数値が大きい方が出火率（面積当たり）が低い、すなわち、規模が同じなら、許容される避難リスクの値が大きいタイプの用途であることを意味している（注 C2）。

表 C.1 危険な火災の単位面積当たりの出火率比  $\{p_{hf}(H)/p_{hf}(K)\}$

出火室の用途	戸建住宅	集合住宅	飲食店	物販店舗	事務所	ホテル	病院	学校	劇場
$\frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)}$	1.0	1.5	0.5	7.2	4.1	3.1	9.0	9.7	1.2

表 C.1 の数値は少数 1 桁まで示されているが、出火率は年ごとに多少は変動し、そこまでの精度が維持される数値でもないため、本文の方法で使う場合には表 C.2 のように少し数値を丸めた値としている。

表 C.2 危険な火災の単位面積当たりの出火率比  $\{p_{hf}(H)/p_{hf}(K)\}$

出火室の用途	戸建住宅	集合住宅	飲食店	物販店舗	事務所	ホテル	病院	学校	劇場
$\frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)}$	1.0	1.5	0.5	7	4	3	9	10	1.2

（注 C1）大まかには‘危険な火災’の件数と全出火件数の比はどんな用途でも大きくは変わらないかも知れない。そうであれば、表のように出火件数を比の値として使う限り、全出火件数の比としても値はそれ程変わらないと思われる。

（注 C2）出火率の絶対値ではなく、戸建住宅の出火率を基準にして比で表しているのは、設計ベースのリスクを計算に手間省けることもあるが、単位床面積当たりの出火率の値は  $10^{-6}$  件/m<sup>2</sup>年とか  $10^{-7}$  件/m<sup>2</sup>年とかのような数値になるので、実感が湧かない数値になってしまうためである。それより、例えば‘事務所は住宅より出火率が 1/4 程度に低い’と言う方が分かり易いであろう。

### 参考文献

- 1) 池島由華、野竹宏彰、山口純一、田中哮義：リスクの概念に基づく避難安全設計手法の開発—統計データに基づく設計許容避難リスクの算出、大成建設技術センター報、第 43 号、2010
- 2) 池島由華、野竹宏彰、山口純一、田中哮義：統計データに基づく用途別の避難リスクの算出、日本火災学会論文集、Vo.61、No.3、2011



## Annex D 対数正規分布の確率密度関数

サイコロを振ってある数が出る確率のような確率変数 ( $X$ ) が離散的値  $x_i$  を取る場合と異なり、連続的値を取る場合は、特定の値に対する確率は存在せず、 $X$  が或る値  $x$  の範囲を取る確率が存在することになる。

### 1. 確率密度関数

変数を  $x$ 、発生確率を  $P$  とするとき

$$f(x) = \frac{dP}{dx} \quad (\text{D.1})$$

となる関数  $f(x)$  を  $x$  の確率密度関数と言う。

ある確率変数  $X$  の範囲を取る時の確率は次式の確率密度関数の積分として求められる。

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (\text{D.2})$$

確率密度関数の ( $-\infty < X < \infty$ ) に対する積分値は 1 である。

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (\text{D.3})$$

### 2 確率密度関数の平均と分散

確率変数  $X$  の期待値は  $E[X]$  と表現される。同様に  $E[X^2]$  は  $X^2$  なども期待値であり、任意の次数の  $X^n$  についても期待値  $E[X^n]$  は考えられ、 $n$  次モーメントとも言われる。1 次の期待値、あるいは 1 モーメントは一般に平均と言われる。

$$\text{平均: } E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx (\equiv \mu) \quad (\text{D.4})$$

$$E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx \quad (\text{D.5})$$

$E[X^n]$  は変数  $x$  の原点、 $x = 0$ 、に対するモーメントであるが、変数  $x$  の平均値  $\mu$  に対する 2 次モーメントは一般に分散と呼ばれ、 $V[X]$  と書かれる。

$$\text{分散: } V[X] = E[(X - \mu)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx (\equiv \sigma^2) \quad (\text{D.6})$$

$$\begin{aligned} E[(X - \mu)^2] &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (x^2 - 2\mu x + \mu^2) f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - 2\mu \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx + \mu^2 \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \quad (\text{D.7}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - 2\mu \cdot \mu + \mu^2 \cdot 1 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - \mu^2 \end{aligned}$$

従って、式(D.4)、(D.5)、(D.6)の各期待値の間には次の関係がある。

$$E[(X - \mu)^2] = E[X^2] - E[X]^2 \quad (\text{D.8})$$

### 3 正規分布

正規分布は確率密度関数 $f(x)$ が次式で与えられる確率分布である。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{D.9})$$

#### (1) 平均

正規分布であるから期待値 $E[X]$ をとれば、式中の $\mu$ になる筈である。

$$\begin{aligned} E[X] &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu + \mu) f(x) dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu) e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx + \mu \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu) e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx + \mu \cdot 1 \end{aligned} \quad (\text{D.10})$$

第3段目の第2項で $\mu$ に罹っている部分は正規分布の確率密度を $(-\infty < x < \infty)$ で積分したものであるから1になる。

最後の段の第1項は

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (\text{D.11})$$

とおくと、次式のように、積分される式が奇関数になるので、 $(-\infty < x < \infty)$ で積分すれば0になる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu) e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} y e^{-\frac{y^2}{2}} \sigma dy \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} y e^{-\frac{y^2}{2}} dy \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{D.12})$$

従って、

$$E[X] = \mu \quad (\text{D.13})$$

#### (2) 分散

次に、平均 $\mu$ に対する2次モーメント $E[(X - \mu)^2]$ が分散 $\sigma^2$ になることを確認しよう。 $y$ を式(D.11)のように置いて下記のように演算して行くと、2段目のを部分積分して出てくる3段目の第1項が0になって消えるので最後に1項だけ残る。

$$\begin{aligned} E[(X - \mu)^2] &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \\ &= \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} y \cdot y e^{-\frac{y^2}{2}} dy \\ &= \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \left[ -y e^{-\frac{y^2}{2}} \right]_{-\infty}^{\infty} + \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right\} \\ &= \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \end{aligned} \quad (\text{D.14})$$

この最後の1項は下記のガウス積に今回の場合の $a = 1/2$ を使うと

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ay^2} dy = \sqrt{\frac{\pi}{a}} = \sqrt{2\pi} \quad (\text{D.15})$$

従って、

$$E[(X - \mu)^2] = \sigma^2 \quad (\text{D.16})$$

#### 4 対数正規分布

##### (1) 確率密度関数

対数正規分布は変数  $x$  の対数が正規分布する確率密度関数である。すなわち確率変数  $Y$  を

$$Y = \ln x \quad (\text{D.17})$$

としたとき  $Y$  の確率密度関数  $f(Y)$  が次のような正規分布となる。

$$f(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(Y-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \quad (\text{D.18})$$

ここに  $\mu_Y$ 、 $\sigma_Y$  はそれぞれ  $Y (= \ln x)$  の平均、標準偏差。

上式の確率密度関数は下記のようにして確率変数  $x$  を用いた表現に改めることが出来る。

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{dP}{dx} = \frac{dY}{dx} \cdot \frac{dP}{dY} \\ &= \frac{d(\ln x)}{dx} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y x} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \end{aligned} \quad (\text{D.19})$$

##### (2) 平均 ( $\mu_x$ )

まず、式(D.19)の確率密度関数の平均  $\mu_x$  を計算してみると、

$$\mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y x} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx \quad (\text{D.20})$$

ここで  $t = \ln x$  とおくと、 $x = e^t$ 、 $dx = e^t dt$  なので、これを上式に代入して

$$\begin{aligned} \mu_x &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(t - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} e^t dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{t - \frac{t^2 - 2\mu_Y t + \mu_Y^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{\frac{\{t - (\mu_Y + \sigma_Y^2)\}^2 - (2\mu_Y + \sigma_Y^2)\sigma_Y^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{\frac{\{t - (\mu_Y + \sigma_Y^2)\}^2}{2\sigma_Y^2}} e^{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2} dt \\ &= e^{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t - (\mu_Y + \sigma_Y^2)\}^2}{2\sigma_Y^2}} dt \end{aligned} \quad (\text{D.21})$$

ここで  $s = t - \sigma_Y^2$  とおけば、最後の段の積分は正規分布の確率密度関数の積分であることが分かる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t-(\mu_Y+\sigma_Y^2)\}^2}{2\sigma_Y^2}} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{s-\mu_Y\}^2}{2\sigma_Y^2}} ds = 1 \quad (\text{D.22})$$

従って、式(D.21)は

$$\mu_x = e^{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2} \quad (\text{D.23})$$

(3) 標準偏差 ( $\sigma_x$ )

標準偏差 $\sigma_x$ を直接計算することは出来ないので先ず分散 $\sigma_x^2$ を求め、その平方根として求めることになる。先の(D.8)から

$$E[(X - \mu)^2] = E[X^2] - E[X]^2 \quad (\text{D.8 再掲})$$

であるが、より具体的に書けば

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - \mu_x^2 \quad (\text{D.24})$$

である。この $f(x)$ の具体形は式(D.19)なので、式(D.24)は

$$\begin{aligned} \mu_x^2 + \sigma_x^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y x} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx \end{aligned} \quad (\text{D.25})$$

平均の計算の場合と同様に $t = \ln x$ とおけば $x = e^t$ ,  $dx = e^t dt$ なので

$$\begin{aligned} \mu_x^2 + \sigma_x^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(t-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} e^{2t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{2t - \frac{(t-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{t^2 - 2(\mu_Y + 2\sigma_Y^2)t + \mu_Y^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t - (\mu_Y + 2\sigma_Y^2)\}^2 - 4(\mu_Y + \sigma_Y^2)\sigma_Y^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t - (\mu_Y + 2\sigma_Y^2)\}^2}{2\sigma_Y^2}} e^{2(\mu_Y + \sigma_Y^2)} dt \\ &= e^{2(\mu_Y + \sigma_Y^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t - (\mu_Y + 2\sigma_Y^2)\}^2}{2\sigma_Y^2}} dt \end{aligned} \quad (\text{D.26})$$

ここで $s = t - \sigma_Y^2$ とおけば

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t - (\mu_Y + 2\sigma_Y^2)\}^2}{2\sigma_Y^2}} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(s - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} ds = 1 \quad (\text{D.27})$$

従って、

$$\mu_x^2 + \sigma_x^2 = e^{2(\mu_Y + \sigma_Y^2)} \quad (\text{D.28})$$

(4) 対数正規分布の平均と分散

式(D.19)では対数正規分布の平均 $\mu_Y$ 及び分散 $\sigma_Y^2$ が確率変数  $x$  を用いた表現になっていないので、これについて次に考える。

上記の検討にから、式(D.23)と(D.28)によるが次の関係が分っている。

$$\mu_x = e^{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2}, \quad \mu_x^2 + \sigma_x^2 = e^{2(\mu_Y + \sigma_Y^2)} \quad (\text{D.23, D.28 再掲})$$

これを考慮すると分散 $\sigma_x^2$ は

$$\sigma_x^2 = e^{2(\mu_Y + \sigma_Y^2)} - \mu_x^2 = e^{2(\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2)} e^{\sigma_Y^2} - \mu_x^2 = \mu_x^2 (e^{\sigma_Y^2} - 1) \quad (\text{D.29})$$

これから、 $Y(= \ln x)$  の分散 $\sigma_Y^2$ および標準偏差 $\sigma_Y$ はそれぞれ次のように得られる。

$$\sigma_Y^2 = \ln \left\{ 1 + \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right\}, \quad \sigma_Y = \sqrt{\ln \left\{ 1 + \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right\}} \quad (\text{D.30})$$

また平均 $\mu_Y$ は式(D.23)から

$$\ln \mu_x = \mu_Y + \frac{1}{2} \sigma_Y^2 \quad (\text{D.31})$$

であるから、式(D.30)の $\sigma_Y^2$ を代入して

$$\mu_Y = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \sigma_Y^2 = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \ln \left\{ 1 + \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right\} = \ln \frac{\mu_x}{\sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2}} \quad (\text{D.32})$$

(5) まとめ

以上の結果をまとめれば対数正規分布の

確率変数  $x$  を用いた確率密度関数：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y x} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}}$$

ここに

$$\text{平均:} \quad \mu_Y = \ln \frac{\mu_x}{\sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2}}$$

$$\text{標準偏差:} \quad \sigma_Y = \sqrt{\ln \left\{ 1 + \left( \frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right\}}$$

## 付録. 出火階の煙性状と避難時間の簡易計算法

### 付 1. 概要

リスク基盤の避難安全検証法の目的は、避難計画の安全検証において設定すべき設計火源と設計火災シナリオを、経験的裁量ではなく客観的な基準に基づいて決定する方法論を構築することである。その設計火源と設計火災シナリオが決定された後は、従来と同様に煙性状と避難時間の予測計算を中心とする工学的手法を用いて避難者が火災の危険に曝されないことを検証することになる。

そのような計算法は学術的に妥当性が認められるものであれば良い訳であるが、ここでは火災階避難検証のケーススタディーのための計算の実施と結果の表示を効率的に行うために火災階煙層降下および火災階避難時間の予測を組み込んだエクセルプログラムを作成した。

このエクセルプログラムは、煙層性状および避難時間について現在広く使われている確立した知見に基づいて作成されている。対象とする空間は火災階の避難経路が、'出火室→廊下→階段付室'と連結する構成のものに限られるが、事務所ビルなど、我が国では非常に多くみられる一般的な空間構成であり、また SP、扉、煙制御の作動/不作動の場合の条件に対応できる汎用性が高いものとなっている。

#### 付 1.1 プログラムの特徴と機能

本プログラムの特徴、対象とする建物空間、予測内容の詳細については同プログラムのエクセルシート中に「使い方マニュアル」として記載されている。下記の概要はその一部を転載したものである。

### 煙流動計算プログラム 使い方マニュアル

#### 1. プログラムの特徴

本プログラムは、設計火源の大きさや設備の作動状況等異なる複数のシナリオに対して避難安全検証を行う「**リスク基盤の避難安全検証**」の利便性を向上するために開発されたものです。計算内容を簡易にした「非定常の煙流動予測プログラム」および「階避難時間の簡易算定法」を用いており、データの入出力も容易であることが特徴となっています。分かりやすい入力画面を用いてデータを入力し実行ボタンをクリックするだけで、煙流動性状と避難時間の結果がすぐに得られ、グラフ等で確認することができます。

#### 2. プログラムが対象とする建物

##### 1) 本プログラムが対象としている空間

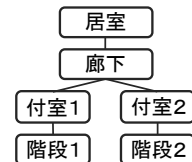
- 片コアやセンターコアなど、居室が面する避難経路としての廊下が1ヶ所のフロアを対象としています。ダブルコアなど階段につながる廊下が複数存在するフロアには利用できません。(付室の無い避難階段は、現時点对応していません。)

##### 2) 本プログラムを使用するのに適する空間

- 原則として事務所ビルの基準階を想定しています。特に階避難時間の簡易算定では典型的なオフィス基準階を想定しているため、変則な形状の場合は歩行距離のデータなどを実際のプランから拾って入力することをお勧めします。

##### 3) 本プログラムでできること

- 入力：居室扉と煙流動計算用扉、機械排煙設備と機械給気設備の有無、居室のスプリンクラーの有無、居室-廊下間には複数の開口を設定
- 出力：煙層下端高さ、煙層温度の時間変化、限界煙層降下時間の算定、ある時刻における圧力差分布の表示、火災室避難時間と階避難時間、付室滞留の有無



## 付 1.2 メインプロシージャ

メインプロシージャ【SMOKE】では、計算対象時間内の時間ステップの管理、各サブプロシージャの呼び出し及びデータの出力を行う。

メインプロシージャである Sub SMOKE は、下記のような入力インターフェースを有しており、これから煙性状予測および避難時間予測のために必要な全てのデータを入力することが出来る。

また、8節のケーススタディーで示したような結果のグラフ表示での出力をはじめ、他の様々な情報の出力を行う。

(詳細はエクセルプログラムツール付属の「使い方マニュアル」参照)

煙流動計算プログラム

データの入力  
【1入力(基本)】(本シート)にデータを入力します。

プログラムの実行  
**実行**

シミュレーション結果  
【3出力(簡避難)】で結果(煙層高さ・温度、時間)を確認します。

2016.03.11

行列表示  
非表示 表示

シート計算  
再計算

---

### ■計算ケース

建物名	ABCビル
階	基準階
ケース	

### ■用途と人数

居室面積合計	2,000 m <sup>2</sup>
用途	事務所
人口密度	0.125 人/m <sup>2</sup>
避難対象人数	250 人

### ■諸元入力

**●機械排煙**

機械排煙量	作動開始時刻(秒)	
自動計算	手入力	
火災室	0 m <sup>2</sup> /分	30
廊下	0 m <sup>2</sup> /分	廊下の煙 40
付室1	0 m <sup>2</sup> /分	降下10% 50
付室2	0 m <sup>2</sup> /分	60

**●機械給気**

加圧給気量	作動開始時刻(秒)	
自動計算	手入力	
廊下	0 m <sup>2</sup> /分	11
付室1	0 m <sup>2</sup> /分	廊下の煙 12
付室2	0 m <sup>2</sup> /分	降下10% 13

定格風量到達時間: 60 秒

初期温度 (°C)

居室	廊下	付室	外気
デフォルト	20	20	20
手入力	25	26	27

**●設計火源**

成長係数 α	0.2 kW/秒 <sup>2</sup>
スプリンクラーの効果	無し
SP効果による上限発熱速度	- kW
換気支配による上限発熱速度	83120 kW
単位面積あたりの発熱速度	500 kW/m <sup>2</sup>

**●時間の設定**

	自動計算	手入力
火災室の避難開始 t <sub>start</sub>	室煙10%	31
非火災室の避難開始 t <sub>st</sub>	廊下煙10%	32
火災室窓の破損	火災室温度	33

**●実行時間**

時間刻み Δt	0.5 秒
最大実行時間 t <sub>max</sub>	1800 秒

---

### ■平面図 (空間データの入力)

**窓 <1-0> 事務室→外気**

幅(煙)	25 m
高さ(上端)	2.8 m *
(下端)	1.1 m *
窓破損温度	300 °C

**扉 <1-2> 事務室→廊下**

幅(避難)	0.8 m × 3
(煙)	0.8 m × 2
高さ(上端)	2.4 m *

**扉 <2-0> 廊下→外気**

幅(煙)	0 m
高さ(上端)	2.3 m
(下端)	1.1 m

**1 空間 火災室**

室面積	500 m <sup>2</sup>
避難率	50 %
天井高さ	2.8 m *
天井の仕上げ	1:石膏ボード, 2:軽質コンクリート
上記以外の場合 k <sub>p,c</sub> 値を直接入力	k <sub>p,c</sub> 0.123 kW <sup>2</sup> s/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>
避難人数	63 人

**空間 非火災室全体**

面積	1,500 m <sup>2</sup>
人数	187 人

**2 空間 廊下**

室面積	200 m <sup>2</sup>
天井高さ	2.6 m *

**3 空間 付室1**

室面積	15 m <sup>2</sup>
天井高さ	2.4 m *

**4 空間 付室2**

室面積	15 m <sup>2</sup>
天井高さ	2.4 m *

**扉 <2-3> 廊下→付室1**

幅(避難)	1.5 m
(煙)	1.5 m
高さ(上端)	2.1 m *

**扉 <2-4> 廊下→付室2**

幅(避難)	1.5 m
(煙)	1.5 m
高さ(上端)	2.1 m *

**給排気 <3-0> 付室1→外気**

幅(煙)	0.9 m
高さ(上端)	0.9 m
(下端)	0 m

**給排気 <4-0> 付室2→外気**

幅(煙)	0.9 m
高さ(上端)	0.9 m
(下端)	0 m

**扉 <3-0> 付室1→外気**

幅(避難)	0.85 m
(煙)	0.85 m
高さ(上端)	2.1 m *

**扉 <4-0> 付室2→外気**

幅(避難)	0.85 m
(煙)	0.85 m
高さ(上端)	2.1 m *

**<凡例>**

- データを入力
- 自動計算値
- 手入力。自動計算値より優先されます。

●単純式の計算値  
●単純式の計算値

●火災室の避難 (m)

火災室内の歩行距離	自動計算	手入力
	する	5

→ 1.5 × √(火災室面積)

●非火災室の避難

非火災室の扉幅合計 (m)	する	6
⇒ 非火災室の扉幅単位	0.8 m	
⇒ 扉1枚あたりの室面積の想定	190 m <sup>2</sup>	
非火災室内の最大歩行距離 (m)	する	7

→ 2 × √(1枚あたりの想定面積) (ただし最大30)

●廊下・付室の歩行距離 (m)

廊下の最大歩行距離	する	8
⇒ 廊下幅	2 m	
付室内歩行距離	する	9

→ (廊下面積 / 廊下幅) × 0.75 (ただし最大40m)  
→ (付室面積合計 / 一般的な階段幅2.5) / 2

付図 1 計算条件の入力インターフェース

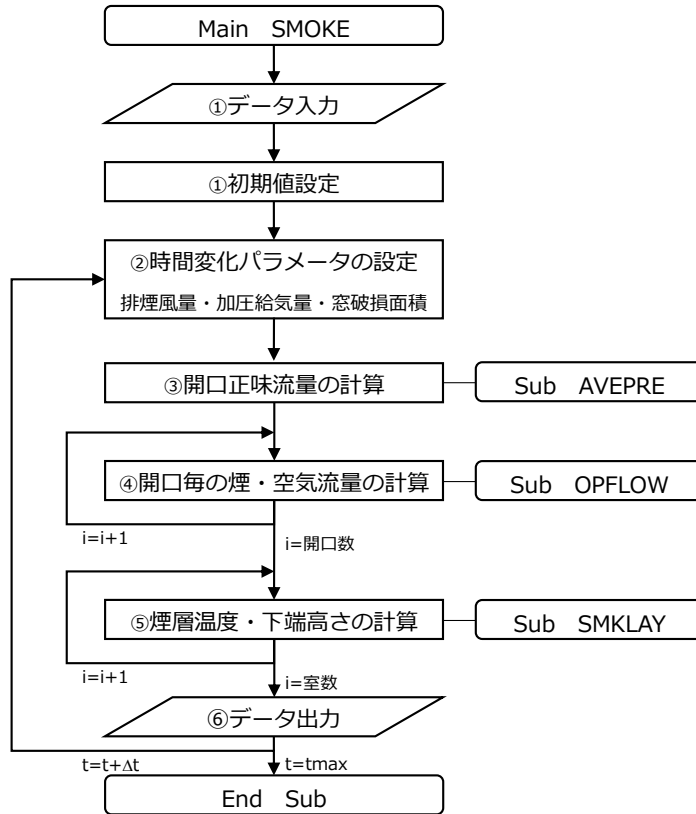
59

## 付2 煙性状予測プログラム

本ツールでの煙層降下予測は二層ゾーン概念に基づく煙流動予測手法で、メインプログラムを **Sub SMOKE** とし、これに各開口における煙・空気開口流量、出火室・廊下・付室の煙層温度と高さを計算するサブプロシージャ (**Sub AVEPRE**, **Sub OPFLOW**, **Sub SMKLAY**) を組み込んだ構成となっている。これにより下図のフローチャートに示される計算の流れで各室（出火室、階の共用廊下、階段付室）の煙層下端高さや温度を予測する。なお、

- 下部の空気層の温度は変化しない。
- 居室で出火するものとし、その発熱速度は計算条件として与える\*。

※デフォルトでは、 $\alpha t^2$  火源として与えると、最大発熱速度が火災室窓が温度で破損した場合の開口因子または SP 成功時の発熱速度で頭打ちとなる火源となる。



付図 2.1 煙層降下予測プログラムのフローチャート



## 付 2.1 煙性状予測計算の全体フロー

予測計算の全体的なプロセスは以下の①～⑨の順となっている。

### ① データ入力及び初期値設定

入力するデータはツール付属の「使い方マニュアル」を参照のこと。

### ② 時間変化するパラメータを設定する。(排煙流量・加圧給気量・火災室窓面積)

排煙流量及び加圧給気量は起動のタイミングを

- ・ 0 秒から起動
- ・ 火災室の煙層下端高さが天井高さの 10%の時点で起動
- ・ 廊下の煙層下端高さが天井高さの 10%の時点で起動

の 3 種から選択可能\*。

また、起動時間に達してから定格風量に達するまでにデフォルトでは 60 秒\*を与えている。(※手動で起動時間を入力した場合は、こちらを優先する。)

火災室の窓は火災室の煙層温度が最初に入力値に達した時点で破損・全開になるものとする。

### ③ 各室内の空間温度を一様と仮定し、各室での質量収支を満たすように各室の平均圧力と開口を通じた正味の質量流量を計算する。(サブプロシージャ【AVEPRE】)

### ④ 各開口において、開口部前後の煙層下端高さ及び煙層温度から、①で計算された正味の質量流量と等しくなるように煙層および空気層に流出入する質量流量が求まる。(サブプロシージャ【OPFLOW】)

### ⑤ 各室において、煙層の質量および熱収支式から煙層温度の増分 $dT_s(i)$ および煙層下端高さの増分 $dZ_s(i)$ を計算する。(サブプロシージャ【SMKLAY】)

### ⑥ 各室の煙層下端高さ及び煙層温度を計算する。

$$Z_s(i)^{(t+\Delta t)} = Z_s(i)^{(t)} + dZ_s(i)$$

$$T_s(i)^{(t+\Delta t)} = T_s(i)^{(t)} + dT_s(i)$$

ただし、煙層下端高さ  $Z_s$  が天井高さ  $H_c$  より大きくなることや 0 を下回ることがある。本ツールでは  $Z_s > H_c$  の場合は  $Z_s = 0.99H_c$ 、 $Z_s < 0$  の場合は  $Z_s = 0$  として便宜的に計算結果を修正する。

### ⑦ 計算結果を「4 出力(リスト表示)」シートに出力する。

出力項目

各 室：煙層下端高さ  $Z_s(i)$ 、煙層温度  $T_s(i)$ 、平均圧力  $p(i)$

各開口：層ごとの質量流量  $m_{aa}$ 、 $m_{as}$ 、 $m_{sa}$ 、 $m_{ss,12}$ 、 $m_{ss,21}$ 、床面圧力差  $\Delta p_{op}(i)$

### ⑧ ②～⑦までを計算終了時間まで各時間ステップで行う。

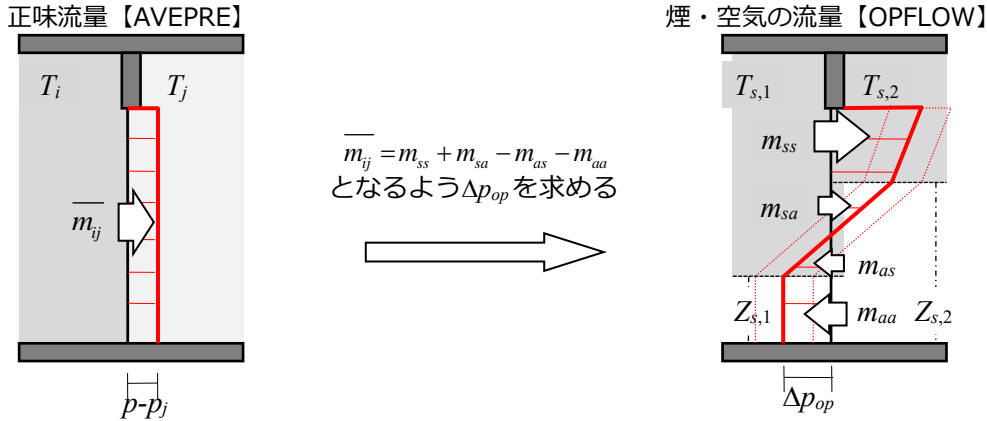
### ⑨ 計算終了

付 2.2 サブプロシージャ

(1) サブプロシージャ【AVEPRE】

(1-1) 計算目的

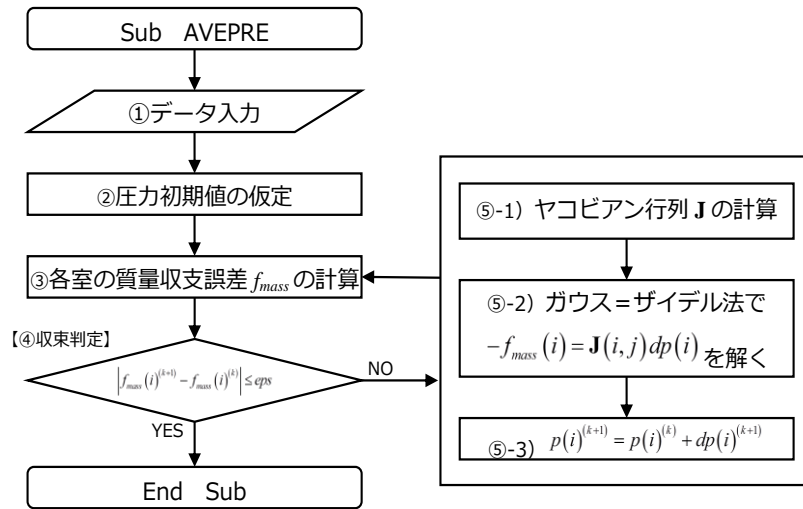
サブプロシージャ AVEPRE は開口寸法及び排煙量・給気量から開口を通過する正味流量 $m_{ij}$ を求めるための各室の平均圧力  $p(i)$ を計算する。このサブプロシージャで求める平均圧力及び正味流量と後述のサブプロシージャ OPFLOW で求める床面圧力及び層ごとの流量との関係を図示したものが下図である。



付図 2.2 サブプロシージャ AVEPRE と OPFLOW との関係

(1-2) Sub AVEPRE の Job フローチャート

各室の圧力は各室の質量収支が同時に満足されるように定まる。Sub AVEPRE は火災室、廊下、階段付室からなる複数の室の質量収支が満足される室内圧を付図 2.3 に示す逐次近似法で求める。



付図 2.3 Sub AVEPRE の Job フローチャート

(1-3) Sub AVEPRE の Job の内容

付図 2.3 のフローチャート中に番号①～⑤で示される Job の具体的内容は下記の通りである。

① データ入力

記号	VBA 引数	意味	単位	備考
$H_{d,u0}(i)$	o_opu(i)	室 $i$ と外気との開口の上端高さ	[m]	
$H_{d,l0}(i)$	o_opb(i)	下端高さ		
$B_{d0}(i)$	o_opw(i)	幅		
$H_{d,u}(op)$	opu(op)	室間の開口の上端高さ	[m]	op=1⇒火災室-廊下 op=2⇒廊下-付室 1 op=3⇒廊下-付室 2
$H_{d,l}(op)$	opb(op)	下端高さ		
$B_d(op)$	opw(op)	幅		
$S(i)$	sply(i)	室 $i$ での給気量	[m <sup>3</sup> /min]	
$w(i)$	exht(i)	室 $i$ での排煙量	[m <sup>3</sup> /min]	
$T_0$	T0	空気温度	[°C]	
$T_s(i)$	TS(i)	室 $i$ の煙層温度	[°C]	
$C$	coef	収束計算における緩和係数 =0.7	[-]	このサブプロシージャのみ
$eps$	eps	収束判定条件 (質量流量の絶対誤差) =0.001	[kg/s]	このサブプロシージャのみ

その他、本サブプロシージャのみで用いるパラメータとして以下がある。

$$\rho_a = \frac{353}{(273+T_0)}, \quad \rho_s(i) = \frac{353}{(273+T_s(i))} \quad (\text{密度の計算})$$

$$m_{sup}(i) = S(i) \cdot \rho_a / 60, \quad m_{exh}(i) = w(i) \cdot \rho_s(i) / 60 \quad (\text{排煙・加圧の体積流量} \rightarrow \text{質量流量})$$

$$\lambda_0(i) = C_d \cdot B_{d0}(i) \{H_{d,u0}(i) - H_{d,l0}(i)\} \cdot \sqrt{2\rho(i)} \quad (\text{室-外気間開口の換気特性値})$$

$$\lambda(op) = C_d \cdot B_d(op) \{H_{d,u}(op) - H_{d,l}(op)\} \cdot \sqrt{2\rho(i)} \quad (\text{室間開口の換気特性値})$$

② 各室の平均圧力の初期値仮定

各室の平均圧力  $p(i)$  の初期値を次式で与える。

$$p(i) = \text{sgn}[S(i) - w(i)] \cdot \left( \frac{|S(i) - w(i)|}{\lambda_0(i)} \right)^2$$

③ 各室での平均圧力を変数とした質量収支を計算し、誤差を求める

$$f_{mass}(i)^{(k+1)} = \left( \begin{array}{l} \text{sgn}[\Delta p(1)] \lambda_{21} \sqrt{|\Delta p(1)|} - \text{sgn}[p(1)] \lambda_{10} \sqrt{|p(1)|} + (m_{sup}(1) - m_{exh}(1)) \\ - \text{sgn}[\Delta p(3)] \lambda_{32} \sqrt{|\Delta p(3)|} - \text{sgn}[\Delta p(4)] \lambda_{42} \sqrt{|\Delta p(4)|} \\ - \text{sgn}[p(2)] \lambda_{20} \sqrt{|p(2)|} - \text{sgn}[\Delta p(1)] \lambda_{21} \sqrt{|\Delta p(1)|} + (m_{sup}(2) - m_{exh}(2)) \\ \text{sgn}[\Delta p(3)] \lambda_{32} \sqrt{|\Delta p(3)|} - \text{sgn}[p(3)] \lambda_{30} \sqrt{|p(3)|} + (m_{sup}(3) - m_{exh}(3)) \\ \text{sgn}[\Delta p(4)] \lambda_{42} \sqrt{|\Delta p(4)|} - \text{sgn}[p(4)] \lambda_{40} \sqrt{|p(4)|} + (m_{sup}(4) - m_{exh}(4)) \end{array} \right)$$

ここで、 $\Delta p(i)$  は廊下 (室 2) を基準とした圧力差  $\Delta p(i) = p(2) - p(i)$  である。

④ 収束判定

次の収束判定式を満たせば⑥へ

$$|f_{mass}(i)^{(k+1)} - f_{mass}(i)^{(k)}| \leq eps$$

満たさない場合は、

$$f_{mass}(i)^{(k)} = f_{mass}(i)^{(k+1)}$$

として計算ステップを進める。

⑤ ガウス=ザイデル法で平均圧力の補正値を計算し、③に戻る

ヤコビアン行列  $\mathbf{J}$  を次式のように定義し、③で求めた質量収支式から各要素を計算する。

$$\mathbf{J}(4,4) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \frac{\partial f_1}{\partial p_2} & \frac{\partial f_1}{\partial p_3} & \frac{\partial f_1}{\partial p_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial p_1} & \frac{\partial f_2}{\partial p_2} & \frac{\partial f_2}{\partial p_3} & \frac{\partial f_2}{\partial p_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial p_1} & \frac{\partial f_3}{\partial p_2} & \frac{\partial f_3}{\partial p_3} & \frac{\partial f_3}{\partial p_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial p_1} & \frac{\partial f_4}{\partial p_2} & \frac{\partial f_4}{\partial p_3} & \frac{\partial f_4}{\partial p_4} \end{bmatrix}$$

ただし、 $p(i)=0$ 、 $\Delta p(op)=0$  の場合は、発散を防ぐため、便宜上、圧力または圧力差を

$$p(i) = \left( \frac{eps}{\lambda_0(i)} \right)^2, \quad \Delta p(op) = \left( \frac{eps}{\lambda(op)} \right)^2$$

に修正後計算する。

また、ヤコビアン行列の対角成分  $\mathbf{J}(i,i)=0$  の場合の発散防止のため、

$$\mathbf{J}(i,i) = - \frac{\sum_j^i (\Sigma \lambda_0(j))^2}{\sum_j^i (-w(j) + S(j))}$$

に置き換える。

ヤコビアン行列  $\mathbf{J}$  を用いると、平均圧力の近似解は次の連立方程式で表され、

$$-f(i) = \mathbf{J}(i,j) (p(i)^{(k+1)} - p(i)^{(k)}) \equiv \mathbf{J}(i,j) dp(i)^{(k+1)}$$

これをガウス=ザイデル法により  $dp(i)^{(k+1)}$  を求めると、

$$dp(i)^{(k+1)} = \left( \frac{\partial f_i}{\partial p_i} \right)^{-1} \left\{ -f(i) - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial f_i}{\partial p_j} dp(j)^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f_i}{\partial p_j} dp(j)^{(k)} \right\}$$

となるので、次ステップの平均圧力は

$$p(i)^{(k+1)} = p(i)^{(k)} + dp(i)^{(k+1)}$$

と表される。これを③の質量収支式に代入し、④の収束条件を満たすまで反復計算を行う。

⑥ 計算終了

収束条件を満足した  $p(i)$  をメインプロシージャに返す。

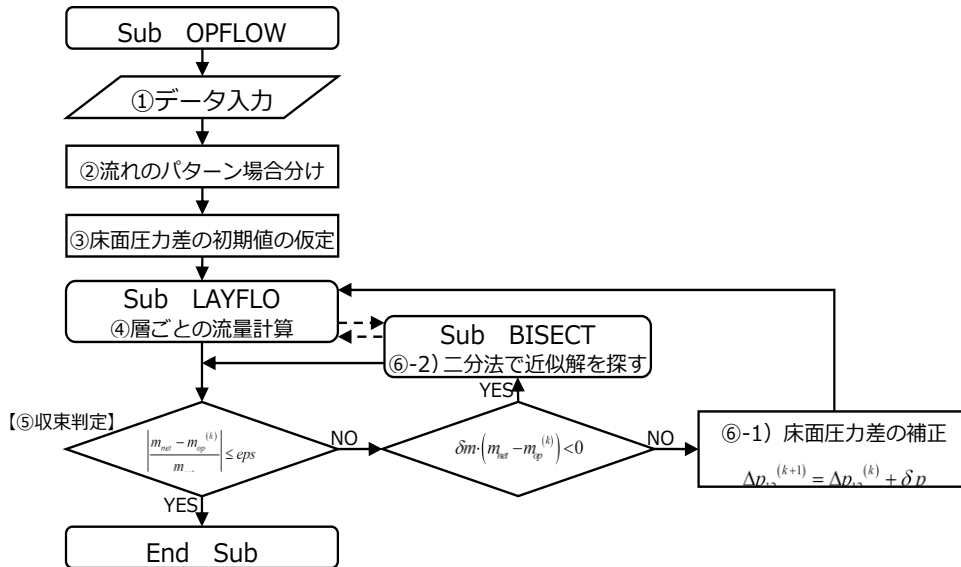
記号	VBA 引数	意味	単位	備考
$p(i)$	press(i)	室 $i$ の平均圧力	[Pa]	

(2) サブプロシージャ【OPFLOW】

(2-1) 計算目的

Sub OPFLOW は、各開口において、床面圧力差 $\Delta p_{op}$ を求め、Sub AVEPRE で計算した正味流量を煙と空気の質量流量  $m_{aa}$ 、 $m_{as}$ 、 $m_{sa}$ 、 $m_{ss,12}$ 、 $m_{ss,21}$  に変換する。

ここで、 $m_{ss}$  は煙層から隣室の煙層への質量流量であるが、圧力勾配によっては双方向の流れとなるため、2種類の質量流量を定義している。



付図 2.4 Sub OPFLOW の Job フローチャート

(2-2) Sub OPFLOW の Job 内容

付図 2.4 のフローチャート中の①～⑥における Job 内容は下記の通りである。

① データ入力

記号	VBA 引数	意味	単位	備考
$H_{d,u}$ $H_{d,l}$ $B_d$	Hdu Hdl Bd	室間または室-外気間の開口の上端高さ 下端高さ 幅	[m]	
$p(i)$	press(i)	室 $i$ の平均圧力	[Pa]	AVEPRE で計算済み 外気の場合は 0 を代入
$T_s(i)$ $T_a(i)$	Tsm(i) Tar(i)	室 $i$ での煙層温度 空気層温度	[°C]	
$Z_s(i)$	Zsm(i)	室 $i$ の煙層下端高さ	[m]	
eps	eps	収束判定条件 (質量流量の相対誤差) = 0.001	[kg/s]	このサブプロシージャのみ

その他、本サブプロシージャのみで用いるパラメータとして、次のものがある。

流量係数  $\alpha=0.7[-]$ 、重力加速度  $g=9.8[m/s^2]$

② 開口の上端高さ、下端高さ及び両室の煙層下端高さの関係から流れをパターン分けする

a) 室  $i$  と室  $j$  の煙層高さで場合分け (煙層が低い室を室 1、高い室を室 2 と便宜上定義)

$Z_{s,i} < Z_{s,j}$  なら

idt=1 (idt : 煙層高さの識別子)

$TS1=T_{s,i}$ ,  $TA1=T_{a,i}$ ,  $TS2=T_{s,j}$ ,  $TA2=T_{a,j}$

$Z1=Z_{s,i}$ ,  $Z2=Z_{s,j}$ ,  $P1=p(i)$ ,  $P2=p(j)$

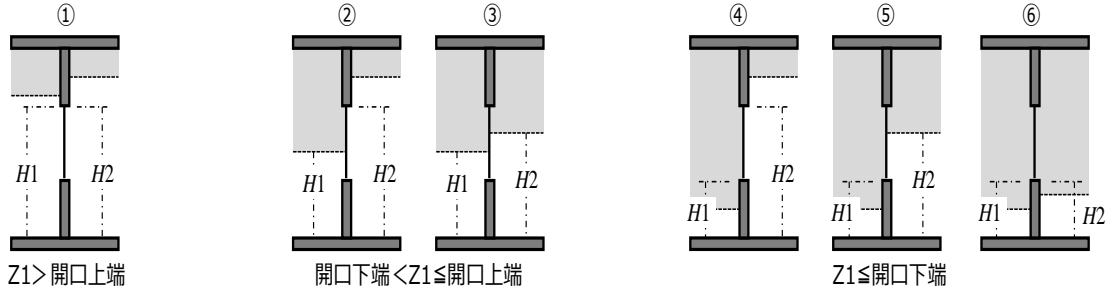
$Z_{s,i} \geq Z_{s,j}$  なら

idt=-1

$TS1=T_{s,j}, TA1=T_{a,j}, TS2=T_{s,i}, TA2=T_{a,i}$

$Z1=Z_{s,j}, Z2=Z_{s,i}, P1=p(j), P2=p(i)$

b) 煙層下端高さ と 開口高さ の位置関係で場合分け (開口部上下端間だけ切り出す)



付図 2.5 煙層下端高さ と 開口高さ の位置関係

$Z1 > H_{d,u} \rightarrow H1 = H_{d,u}, H2 = H_{d,u}$  (パターン①)

$H_{d,u} \geq Z1 > H_{d,l} \rightarrow H1 = Z1$

$Z2 \geq H_{d,u} \rightarrow H2 = H_{d,u}$  (パターン②)

$H_{d,u} \geq Z2 > Z1 \rightarrow H2 = Z2$  (パターン③)

$H_{d,l} \geq Z1 \rightarrow H1 = H_{d,l}$

$Z2 \geq H_{d,u} \rightarrow H2 = H_{d,u}$  (パターン④)

$H_{d,u} \geq Z2 > H_{d,l} \rightarrow H2 = Z2$  (パターン⑤)

$H_{d,l} \geq Z2 \rightarrow H2 = H_{d,l}$  (パターン⑥)

c) 密度の計算

$\rho_{s,1} = 353 / (TS1 + 273), \rho_{s,2} = 353 / (TS2 + 273), \rho_a = 353 / (TA1 + 273) = 353 / (TA2 + 273)$

$\Delta\rho_{as} = (\rho_a - \rho_{s,1}), \Delta\rho_{ss} = (\rho_{s,2} - \rho_{s,1})$

③ 開口間の床面圧力差の初期値を仮定

- 床面圧力差:  $\Delta p_{op} = 0$  と仮定する。
- 計算上の誤差の初期値: 質量収支誤差  $\delta m = 0$ 、圧力誤差  $\delta p = 0$

④ 煙及び空気の質量流量 ( $m_{aa}, m_{as}, m_{sa}, m_{ss,12}, m_{ss,21}$ ) の計算 (サブプロシージャ 【LAYFLO】)

(④-1)  $m_{aa}$  の計算

$$m_{aa} = \text{sgn}[\Delta p_{op}] \cdot \alpha B_d \sqrt{2\rho_a |\Delta p_{op}|} (H1 - H2)$$

(④-2)  $m_{sa}, m_{as}$  の計算

◇  $H2 = H1$  の場合

$$m_{sa} = 0, m_{as} = 0$$

◇  $H2 \neq H1$  の場合

$$\text{中性帯高さ: } Zn = H1 - \frac{\Delta p_{op}}{\Delta\rho_{as} g}$$

$Zn \leq H1$  の場合

$$m_{as} = 0$$

$$m_{sa} = \frac{2}{3} \alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,1} \Delta\rho_{as} g} \left\{ (H2 - Zn)^{3/2} - (H1 - Zn)^{3/2} \right\}$$

$H1 < Zn \leq H2$  の場合

$$m_{as} = -\frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_a \Delta\rho_{as} g} (Zn - H1)^{3/2}$$

$$m_{sa} = \frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,1} \Delta\rho_{as} g} (H2 - Zn)^{3/2}$$

H2 ≤ Zn の場合

$$m_{as} = -\frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_a \Delta\rho_{as} g} \left\{ (Zn - H1)^{3/2} - (Zn - H2)^{3/2} \right\}$$

$$m_{sa} = 0$$

(4-3)  $m_{ss,12}$ 、 $m_{ss,21}$  の計算

◇ H2 =  $H_{d,u}$  の場合

$$m_{ss,12} = m_{ss,21} = 0$$

◇ H2 ≠  $H_{d,u}$  の場合

$$\text{中性帯高さ : } Zn = H2 - \frac{\Delta p_{op} + \Delta\rho_{as} g (H2 - H1)}{\Delta\rho_{ss} g}$$

Zn ≤ H2 の場合

•  $\Delta\rho_{ss} \geq 0$

$$m_{ss,12} = \frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,1} \Delta\rho_{ss} g} \left\{ (H1 - Zn)^{3/2} - (H2 - Zn)^{3/2} \right\}$$

$$m_{ss,21} = 0$$

•  $\Delta\rho_{ss} < 0$

$$m_{ss,12} = 0$$

$$m_{ss,21} = -\frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,2} |\Delta\rho_{ss}| g} \left\{ (H1 - Zn)^{3/2} - (H2 - Zn)^{3/2} \right\}$$

H2 < Zn ≤  $H_{d,u}$  の場合

•  $\Delta\rho_{ss} \geq 0$

$$m_{ss,12} = \frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,1} \Delta\rho_{ss} g} (H1 - Zn)^{3/2}$$

$$m_{ss,21} = -\frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,2} \Delta\rho_{ss} g} (Zn - H2)^{3/2}$$

•  $\Delta\rho_{ss} < 0$

$$m_{ss,12} = \frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,1} \Delta\rho_{ss} g} (Zn - H2)^{3/2}$$

$$m_{ss,21} = -\frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,2} \Delta\rho_{ss} g} (H1 - Zn)^{3/2}$$

$H_{d,u}$  < Zn の場合

•  $\Delta\rho_{ss} \geq 0$

$$m_{ss,12} = 0$$

$$m_{ss,21} = -\frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,2} |\Delta\rho_{ss}| g} \left\{ (Zn - H2)^{3/2} - (Zn - H1)^{3/2} \right\}$$

•  $\Delta\rho_{ss} < 0$

$$m_{ss,12} = \frac{2}{3}\alpha B_d \sqrt{2\rho_{s,1} |\Delta\rho_{ss}| g} \left\{ (Zn - H2)^{3/2} - (Zn - H1)^{3/2} \right\}$$

$$m_{ss,21} = 0$$

⑤ 収束計算

サブプロシージャ AVEPRE で計算した各室の平均圧力  $P1$ 、 $P2$  から求められる開口を通過する正味の質量流量  $m_{net}$

$$m_{net} = \text{sgn}[P1 - P2] \alpha B_d \sqrt{2\rho_a |P1 - P2|} (H_{d,u} - H_{d,l})$$

と、開口前後の床面圧力差 $\Delta p_{op}$ を仮定することにより求めた開口流量 $m_{op}^{(k)}$

$$m_{op}^{(k)} = m_{aa} + m_{as} + m_{sa} + m_{ss,12} + m_{ss,21}$$

が次の判定式を満たせば収束したものとし、⑦へ進む。

$$\left| \frac{m_{net} - m_{op}^{(k)}}{\max(m_{net}, 1)} \right| \leq eps$$

※ $m_{net}$ が1未満の場合、収束が遅くなること及び0で除算される恐れがあることから、この場合に限り絶対誤差で収束判定を行う。

⑥ 収束しない場合の床面圧力差補正

初回の $m_{op}^{(1)}$ の計算時のみ床面圧力差の基準補正值 $\delta p$ を求める。

$$\delta p = \frac{m_{net} - m_{op}^{(1)}}{\alpha B_d \sqrt{2\rho_a (H_{d,u} - H_{d,l})}}$$

a)床面圧力差の補正

$\delta m \cdot (m_{net} - m_{op}^{(k)}) \geq 0$  の場合、次の処理を行い、④に戻る。

$$\delta m = m_{net} - m_{op}^{(k)}, \Delta p_{12}^{(k+1)} = \Delta p_{12}^{(k)} + \delta p$$

b)二分法で近似解を探す

$\delta m \cdot (m_{net} - m_{op}^{(k)}) < 0$  の場合、床面圧力差の区間 $[\Delta p_{op}^{(k-1)}, \Delta p_{op}^{(k)}]$ での近似解を二分法（サブプロシージャ【BISECT】）により求める。⑤の収束判定を満たすまで二分法により床面圧力差の補正と開口流量 $m_{op}^{(k)}$ の計算を繰り返し、収束後⑦へ進む。

⑦ 計算終了

煙層高さの識別子 idt=-1 なら、室  $i \rightarrow j$  の流れを正とするため  $m_{aa} \sim m_{ss,21}$  までの各質量流量の符号を逆にし、 $m_{aa} \sim m_{ss,21}$  及び床面圧力差 $\Delta p_{op}$ をメインプロシージャ【SMOKE】に返す。

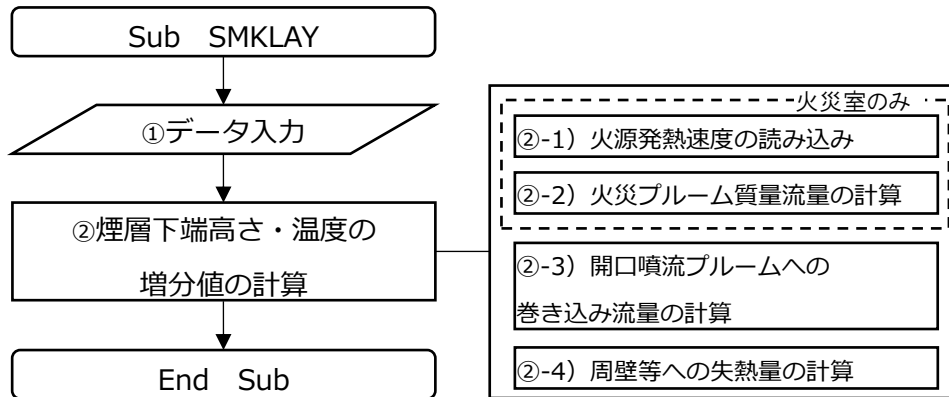
記号	VBA 引数	意味	単位	備考
$m_{aa}$	AA	室 $i \rightarrow j$ の質量流量		負の数値は流れの向きが逆を意味する
$m_{sa}$	SA		空気層 $\Rightarrow$ 空気層	
$m_{as}$	AS21		煙層 $\Rightarrow$ 空気層	
$m_{ss,ij}$	SS12		空気層 $\Rightarrow$ 煙層	
$m_{ss,ji}$	SS21		煙層 $\Rightarrow$ 煙層	
$\Delta p_{op}$	opdp	開口間の床面圧力差	[Pa]	



(3) サブプロシージャ【SMKLAY】

(3-1) 計算目的

各室において、Sub OPFLOW で計算した煙と空気の質量流量から次の時間ステップの煙層下端高さ  
と温度を計算する。



付図 2.6 Sub SMKLAY の Job フローチャート

(3-2) Sub SMKLAY の Job 内容

付図 2.6 のフローチャート中の①および②-1)～4)の具体的内容は下記の通りである。

① データ入力

記号	VBA 引数	意味	単位	備考
$Q_f$	Qf	火源の発熱速度	[kW]	
$w(i)$	exht(i)	室 $i$ での排煙量	[m <sup>3</sup> /min]	
$k\rho c$	kpc	壁体の熱慣性	[kWsec <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> K <sup>2</sup> ]	デフォルト値 石膏ボード：0.16 軽量コンクリート：1.33
$T_s(i)$ $T_a(i)$	Tsm(i) Tar(i)	室 $i$ での煙層温度 空気層温度	[°C]	
$Z_s(i)$	Zsm(i)	室 $i$ の煙層下端高さ	[m]	
$A(i)$	area(i)	室 $i$ の床面積	[m <sup>2</sup> ]	
$H_c$	ceih(i)	室 $i$ の天井高さ	[m]	
$H_{d,u0}(i)$ $H_{d,l0}(i)$ $B_{d0}(i)$	o_opu(i) o_opb(i) o_opw(i)	室 $i$ と外気との開口の上端高さ 下端高さ 幅	[m]	
$N_w$	opwln	火災室と廊下間の開放された扉の枚数	[-]	
$m_{sa}$ $m_{ss,ij}$ $m_{ss,ji}$	Msa Mss12 Mss21	室 $i \rightarrow j$ の質量流量 煙層⇒空気層 煙層⇒煙 層 煙層⇒煙 層	[kg/s]	負の数値は流れの向きが逆を意味する
$\Delta p_{op}$	opdp	開口間の床面圧力差	[Pa]	

② 煙層の質量収支及び熱収支から導かれた次の式を時間  $t$  に置いて前進差分で離散化し、次時間ステップの煙層下端高さ  
と温度の増分値  $dT_s$ 、 $dZ_s$  を計算する。なお、標記の簡略化のため、以下では室番号を示す記号  $i$  を省略する。

煙層温度

$$c_p \rho A (H_c - Z_s) \frac{dT}{dt} = Q_f - Q_w + c_p \sum_j m_{in,ji} (T_j - T) + c_p \left( m_p + \sum_j m_{ent,ji} \right) (T_a - T)$$

煙層下端高さ

$$c_p \rho_a T_a A \frac{d(H_c - Z_s)}{dt} = Q_f - Q_w + c_p \sum_j (-m_{out,ij} T + m_{in,ji} T_j) + c_p \left( m_p + \sum_j m_{ent,ji} \right) T_a - c_p w T$$

なお、煙層温度増分値の計算時に  $H_c - Z_s$  が小さいと、時間刻みによってコントロールボリューム（検査

体積)の質量に対して数値上過大な熱移動が加わり計算が発散する恐れがある。その回避のため、便宜上煙層温度の増分値の計算時に限り、 $0.9 H_c < Z_s$  の場合には  $H_c - Z_s \doteq 0.9 H_c$  とする。

(2-1) 火源発熱速度の読み込み (火災室のみ)

設計火源の発熱速度は

$$Q_f = \min(\alpha t^2, Q_{max})$$

であり、火災成長率 $\alpha$ 及び最大発熱速度  $Q_{max}$  は入力条件である。本ツールでは、エクセルシート上で計算した発熱速度  $Q_f$  を各時間ステップで読み込んでいる。

ここで、最大発熱速度  $Q_{max}$  は

$$Q_{max} = \begin{cases} 150H_c^{3/2} & \text{[スプリンクラー作動時]} \\ 1500B_{d0} (H_{d,u0} - H_{d,l0})^{3/2} & \text{[上記以外]} \end{cases}$$

で与える。これは、スプリンクラー作動時には、気流温度  $T_g$  が  $100^\circ\text{C}$  になった時点で作動するものと仮定し、Alpert の定常天井流の温度計算式を

$$T_g - T_a = \frac{5.38Q_f^{2/3}}{H_c r^{2/3}}$$

と変形し、火源とスプリンクラーヘッドの水平離隔距離  $r$  に 2.6m を代入すれば、

$$Q_f = \left( \frac{T_g - T_a}{5.38} \right)^{3/2} r H_c^{3/2} \approx \left( \frac{100 - 20}{5.38} \right)^{3/2} \cdot 2.6 H_c^{3/2} \approx 150 H_c^{3/2}$$

と求めることができる。また、スプリンクラー作動時以外は、換気支配型燃焼になるものとして火災室の開口因子より計算するものである。

(2-2) 火災プルームの質量流量の計算 (火災室のみ)

火災室の煙層に流入するプルームの質量流量  $m_p$  [kg/sec] は

$$m_p = 0.08Q_f^{1/3} (Z_s + z_0)^{5/3}$$

である。ここで、仮想点熱源距離  $z_0$  は、Heskestad の式を用いて

$$z_0 = 1.02D - 0.083Q_f^{2/5}$$

とする。なお火源半径  $D$  は、発熱速度  $Q_f$  が火源面積に比例すると見なし次式で計算する。

$$D = \sqrt{4Q_f / \pi q''}$$

ここで  $q''$  は単位面積当たりの発熱速度 [kW/m<sup>2</sup>] (デフォルト値  $q''=500$ ) である。

(2-3) 開口噴流プルームへの巻き込み流量の計算

当該室の煙層下端高さが隣室よりも高く、かつ、隣室の煙層から当該室の空気層への流れがある場合、開口噴流に巻き込まれる空気の流量を計算する。

開口噴流プルームへ巻き込まれる下部層の空気の流量  $m_{ent}$  は

$$m_{ent} + m_{sa} = 0.08Q_d^{1/3} \{ (Z_s - Z_s(j)) + z_{d,0} \}^{5/3}$$

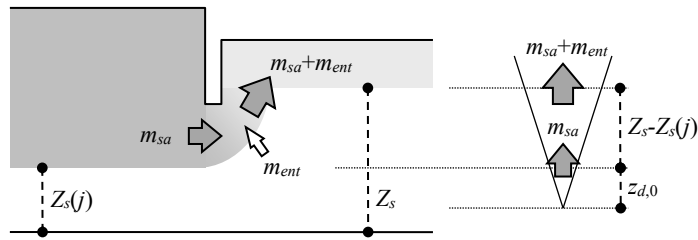
ただし、 $Q_d$  は開口噴流の熱流量 [kW]

$$Q_d = c_p m_{sa} \{ T_s(j) - T_a \}$$

および仮想点熱源  $z_{d,0}$  は

$$z_{d,0} = 4.56 (m_{sa}^3 / Q_d)^{1/5}$$

である。この  $z_{d,0}$  は  $Z_s - Z_s(j) = 0$  のとき  $m_{ent} = 0$  となるよう求めたものである。



付図 2.7 開口噴流プルームの捲き込みモデル

(2-4) 周壁等への失熱量の計算

周壁等への失熱量  $Q_w$  は、廊下と付室は周壁への熱伝達は天井面のみとするが、火災室においてはこれに窓面からの放射失熱を考慮し、

$$Q_w = \begin{cases} h_k (T_s - T_a) A + \frac{1}{2} \sigma T_s^4 B_{d0} (H_{d,u0} - H_{d,l0}) & [T_s \leq T_{break}] \\ h_k (T_s - T_a) A + \sigma T_s^4 B_{d0} (H_{d,u0} - H_{d,l0}) & [T_s > T_{break}] \end{cases}$$

で求める。右辺第 2 項は放射失熱を意味し、火災室のみで発生する項であり、ガラス破損前はガラスからの再放射を考慮している。また、周壁への実効熱伝達率  $h_k$  は下記とする。

$$h_k = \max\{\sqrt{k\rho c/\pi t}, 0.02\}$$

③ 計算終了

メインプロシージャに  $dT_s$  及び  $dZ_{si}$  を返す。

記号	VBA 引数	意味	単位	備考
$dT_{si}$	dT	室 $i$ の煙層温度の増分値	[K]	
$dZ_{si}$	dZs	室 $i$ の煙層下端高さの増分値	[m]	

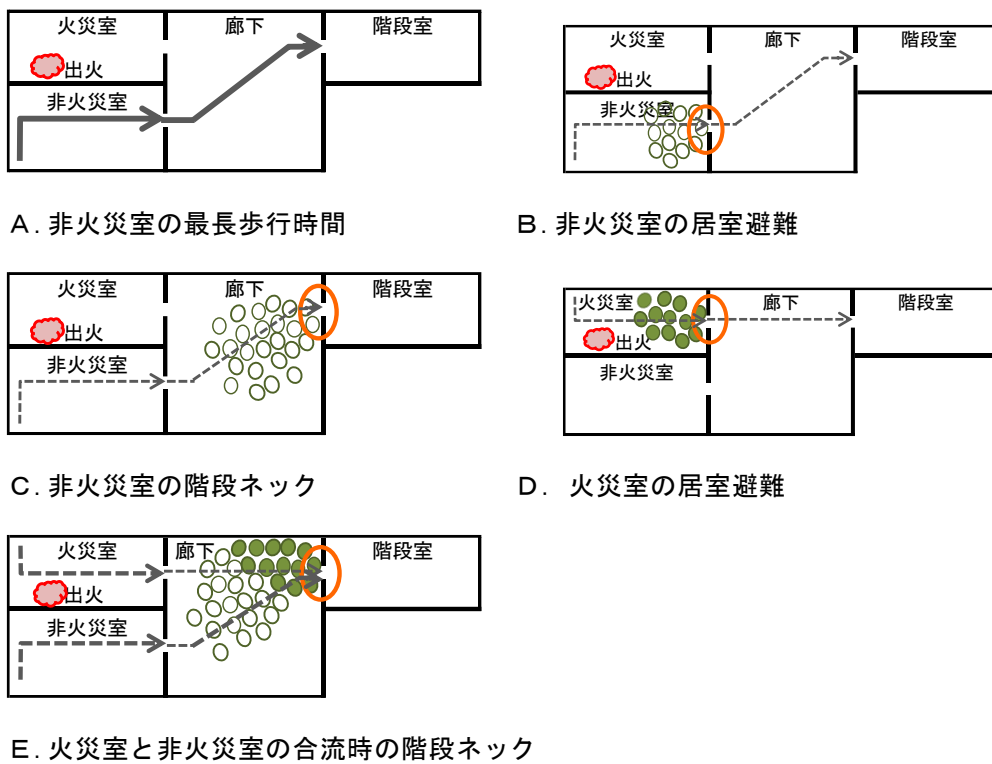
### 付 3. リスク基盤検証法で用いる階避難時間の簡易算定法

#### 付 3.1 簡易計算法作成のための階避難の考え方

まず、火災階の避難のシナリオを整理する。

- ・階避難時間は避難開始時間と避難行動時間の合計とする。
- ・非火災室は火災室より遅れて避難開始する。火災室および非火災室の避難開始時間は煙層降下状況による覚知など任意に設定できるとする。

次に避難行動時間を算定する方法を考える。本簡易法の目的は、廊下において避難者が煙降下の影響を受けないことを確認することであるから、指針法のバーチャートのように各室の流れを詳細に知る必要はなく、付室や階段への避難完了時間が分かればよい。よって指針法の避難流動の考え方をもとにしなが、階避難時間を決定する要因として次の5つの避難時間を算定し、その最大値を階避難時間とするとした。付図 3.1 に5つの時間の概念図を示す。



付図 3.1 階避難時間を決定する5つの要因

非火災室では火災室より避難開始が遅れるため、一般に階避難時間は非火災室の流れで決まることが多いと考えられる。A～Cは非火災室の流れに着目した時間である。

A. 非火災室から階段までの最長歩行時間  $t_{eA}$  (秒)

B. 非火災室の居室扉がネックとなる時間  $t_{eB}$  (秒)

C. 非火災室からの避難者が、階段扉でネックとなる時間  $t_{eC}$  (秒)

通常、火災室避難者は早い段階で階避難完了すると予想されるが、火災室人数が多いなどのために避難に時間がかかることも考えられる。D,Eは火災室からの流れの影響を考慮した時間である。

D. 火災室の居室避難時間 $t_{eD}$  (秒)

E. 火災室と非火災室の合流を考慮した階段扉がネックとなる時の時間 $t_{eE}$  (秒)

A,B,C は非火災室の避難開始時間 $t_{sr2}$  (秒)に、D,E は火災室の避難開始時間 $t_{sr1}$  (秒)に、それぞれ避難行動時間を加算し、A~E の最大値を階避難時間 $t_e$  (秒)とする。

$$t_e = \max(t_{eA}, t_{eB}, t_{eC}, t_{eD}, t_{eE}) \quad (1)$$

### 付 3.2 階避難時間を求める簡易算定式の作成

#### (1) 指針法に準じた階避難時間の算定式

まず、付室が無い階段室への5つの要因の算定式を作成する方法を考える。付図 3.2 は指針法で用いられる避難の流れを表すバーチャートで、5つの時間がそれぞれ階避難時間として決定する状況を表した図である。縦軸は火災室と非火災室および階の合計、横軸は経過時刻(秒)である。太い実線は居室からの流出時間、細い実線は廊下歩行時間、点線は階段到着時間、二重線は階段扉による流入計算値を表す。

例えば C は階段扉の流入計算値による時間で階避難が決まっている。最大時間を決める要因となる各時間（ブルーの網掛け）を加算すれば階避難時間を求めることができる。式(2)～(6)は、まだ間仕切り位置を想定した非火災室 n からの流れを忠実に再現した式として表したものである。

#### A. 非火災室の最長歩行時間

$$t_{eA} = t_{st2} + \max\left(\frac{L_{C(n)}}{v} + \frac{L_{R2(n)}}{v}\right) \quad (2)$$

#### B. 非火災室の居室扉のネックによる時間

$$t_{eB} = t_{st2} + \max\left\{\left(\frac{L_{C(n)}}{v}\right) + \frac{P_{R2(n)}}{NB_{R2(n)}}\right\} \quad (3)$$

#### C. 非火災室の階段扉のネックによる時間

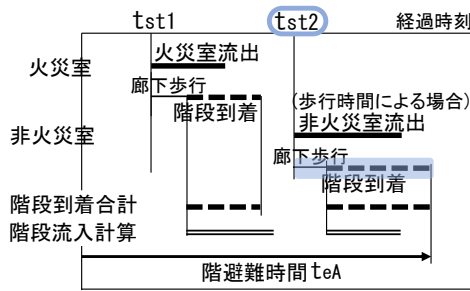
$$t_{eC} = t_{st2} + \max\left(\frac{L_{C(n)}}{v}\right) + \frac{P_{R2}}{NB_S} \quad (4)$$

#### D. 火災室の居室避難による時間

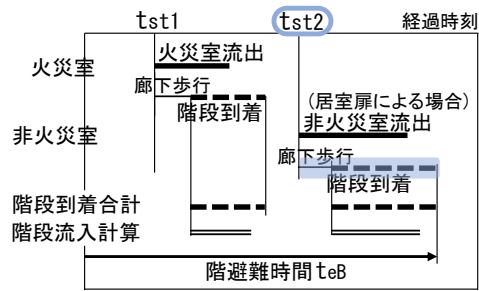
$$t_{eD} = t_{st1} + \frac{L_{C(1)}}{v} + \max\left(\frac{L_{R1}}{v}, \frac{P_{R1}}{NB_{R1}}, \frac{P_{R1}}{NB_S}\right) \quad (5)$$

#### E. 火災室と非火災室の合流時間

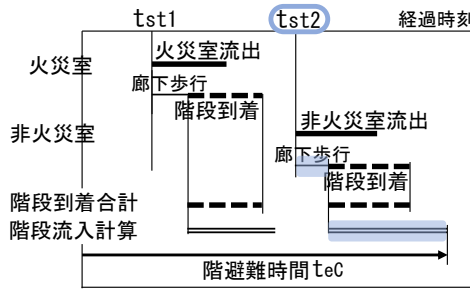
$$t_{eE} = t_{st1} + \frac{L_{C(1)}}{v} + \frac{P_{R1} + P_{R2}}{NB_S} \quad (6)$$



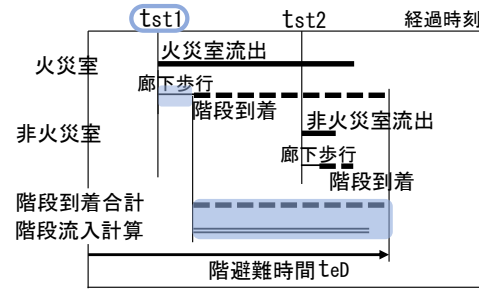
A. 非火災室の最長歩行時間



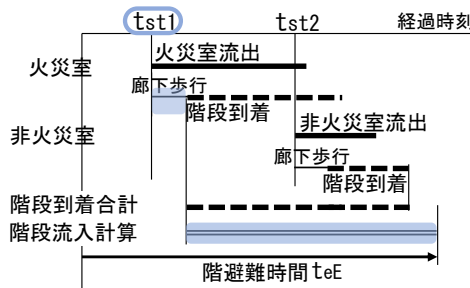
B. 非火災室の居室避難



C. 非火災室の階段ネック



D. 火災室の居室避難



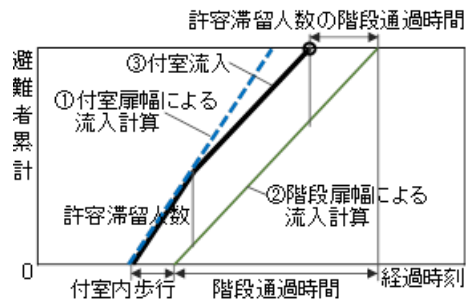
E. 火災室と非火災室の合流時の階段ネック

付図 3.2 階避難時間を決定する要因を表すバーチャート

(2) 付室滞留を考慮した付室流入の算定式

特避階段の付室がある場合、付室流入時点で階避難完了とできる<sup>2)</sup>。付室扉幅が階段扉幅以下の時、付室流入時間は付室面積に影響されることなく付室扉による流入時間で決まる。しかし一般に付室面積は小さく一時滞留できる人数に限られるため、階段扉幅が付室扉幅より小さい場合には付室内で滞留し廊下で待ちが発生する可能性があるため、付室への流入時間を修正する必要がある。

付図 3.3 は、付室扉幅が階段扉幅より大きい時の避難者数累計のグラフである。縦軸が避難者累計(人)、横軸が経過時刻(秒)である。ライン①は付室扉幅による流入、ライン②は階段扉幅による流入である。付室人数が付室の許容滞留人数を超えた時点で、付室への流入容量は階段への流出容量と同じになるため、実際の付室流入はライン③となる。ライン③の終了時間、つまり付室流入時間は、付室歩行時間に階段通過時間を加算した値から、付室許容滞留人数の階段通過時間を差し引けば求めることができる。



付図 3.3 付室扉幅が階段扉幅より大きいときの付室流入

従って付室流入時間は、付室扉幅流入による通過時間の計算値、付室滞留を考慮した付室流入時間のうち大きいほうの値を採用すればよい。(ただし  $P_{R2} - P_V \geq 0$  とする。)

$$t_V = \max\left(\frac{P_{R2}}{NB_V}, \frac{L_V}{v} + \frac{P_{R2} - P_V}{NB_S}\right) \quad (7)$$

### (3) オフィスプランを想定した簡易式の作成

上述の式(2)～(6)を用いればプログラムによるシミュレーションを実施することなく階避難時間を求めることができるが、室の間仕切り位置を決めて歩行距離や居室の扉幅等のデータを入力しなければならない。しかしオフィスビルを想定するなら平面パターンは概ね決まっており、例えば次の方法で仮に代表的なデータを与えることができる。

#### ①非火災室の居室扉幅

非火災室の居室扉幅は、扉 1 ヶ所あたりに計画される居室面積  $A_{R0}$  を設定すれば概ね扉幅を知ることができる。

$$B_{R2} = B_{R0} \times A_{R2} / A_{R0} \quad (8)$$

#### ②居室内の歩行距離

居室の形状をおよそ正方形とみだてて扉が 1 辺の中央にあるとすれば歩行距離は次式で算定できる。ただし大面積の場合に長くなり過ぎる結果となるが、実際には扉が複数箇所計画されることから、最大 30m とした。

$$L_{R1} = 1.5\sqrt{A_{R1}} \quad (9)$$

$$L_{R2} = 1.5\sqrt{A_{R2}}$$



### ③廊下歩行距離

廊下歩行距離は、オフィスプランの廊下は概ねコアに沿って細長く計画されるため廊下幅を与えれば廊下長さを知ることができる。安全側の評価を得るため廊下長さの 3/4 を最大歩行距離とおいた。

$$L_{C\max} = 0.75 \times \frac{A_C}{L_{C,w}} \quad (10)$$

付室内滞留を考慮した付室流入の算定式(7)、および仮のデータを与える式(8)~(10)を式(2)~(6)に代入して書き換え、以下の通り簡易式(11)~(15)を作成した。これらの式を用いれば、エクセルの煙流動プログラムの中で少ないデータで容易に階避難時間を求めることが可能となる。なお、居室を大部屋 1 部屋で使う場合は、火災室 1 室の設定となるため時間 D のみを算定すればよい。

$$A. \quad t_{eA} = t_{st2} + \frac{L_{C\max}}{v} + \frac{L_{R2}}{v} \quad (11)$$

$$B. \quad t_{eB} = t_{st2} + \frac{L_{C\max}}{v} + \frac{P_{R2}}{N \cdot B_{R0} (A_{R2}/A_{R0})} \quad (12)$$

$$C. \quad t_{eC} = t_{st2} + \frac{L_{C\max}}{v} + \max\left(\frac{P_{R2}}{NB_V}, \frac{L_V}{v} + \frac{\max(P_{R2} - P_V, 0)}{NB_S}\right) \quad (13)$$

$$D. \quad t_{eD} = t_{st1} + \frac{L_{C\max}}{v} + \max\left(\frac{L_{R1}}{v}, \frac{P_{R1}}{NB_{R1}}, \frac{P_{R1}}{NB_V} \frac{L_V}{v} + \frac{\max(P_{R1} - P_V, 0)}{NB_S}\right) \quad (14)$$

$$E. \quad t_{eE} = t_{st1} + \frac{L_{C\max}}{v} + \max\left(\frac{P_{R1} + P_{R2}}{NB_V}, \frac{L_V}{v} + \frac{\max(P_{R1} + P_{R2} - P_V, 0)}{NB_S}\right) \quad (15)$$

### (3.3) 簡易計算法を用いた階避難時間のケーススタディー

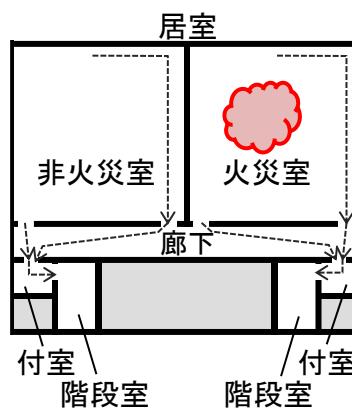
#### (1) スタディの条件

付図 3.4 に示す廊下 1 ケ所の典型的なオフィスプランを対象にスタディを行った。居室面積や火災室面積、付室扉幅など条件が異なる 15 ケース (付表 3.1) の階避難時間を算定し、指針法による階避難時間との比較および煙降下時間に対する避難安全評価のスタディを行った。

- ・人口密度は滞留状況を確認するため告示検証法で定められた事務所の人口密度である 0.125 人/m<sup>2</sup>よりも多い 0.25 人/m<sup>2</sup>とした。
- ・指針法の廊下歩行距離(最小,最大)は case.a:5m,13m、b:7m,25m、c:10m,30m とした。
- ・避難開始は、両方法とも火災室は火災室の煙層 10%降下、非火災室は廊下の煙層 10%降下の時点とし、本稿連報その 2 のプログラムによる煙降下時間を用いた。
- ・居室、廊下、付室とも無排煙とし、評価結果が NG の時は廊下排煙時の時間も算定した。

付表 3.1 スタディの条件

case	居室 面積 (㎡)	火災室 面積 (㎡)	廊下 面積 (㎡)	付室 面積 (㎡)	付室 扉幅 (m)	階段 扉幅 (m)
a-1	500	450	50	無し	—	0.85
a-2		250				
a-3		100				
b-1	1,000	900	100	15	0.85	0.85
b-2		500				
b-3		200				
b-4	1,000	900	100	15	1.5	0.85
b-5		500				
b-6		200				
c-1	2,000	1,900	200	15	0.85	0.85
c-2		1,000				
c-3		200				
c-4	2,000	1,900	200	15	1.5	0.85
c-5		1,000				
c-6		200				



付図 3.4 モデルプラン

(2) スタディの結果

付図 3.5 に簡易法と指針法の階避難時間、煙降下時間の結果を表した。本スタディでは簡易法の階避難時間が指針法に近い範囲で全て上回り安全側の値となった。

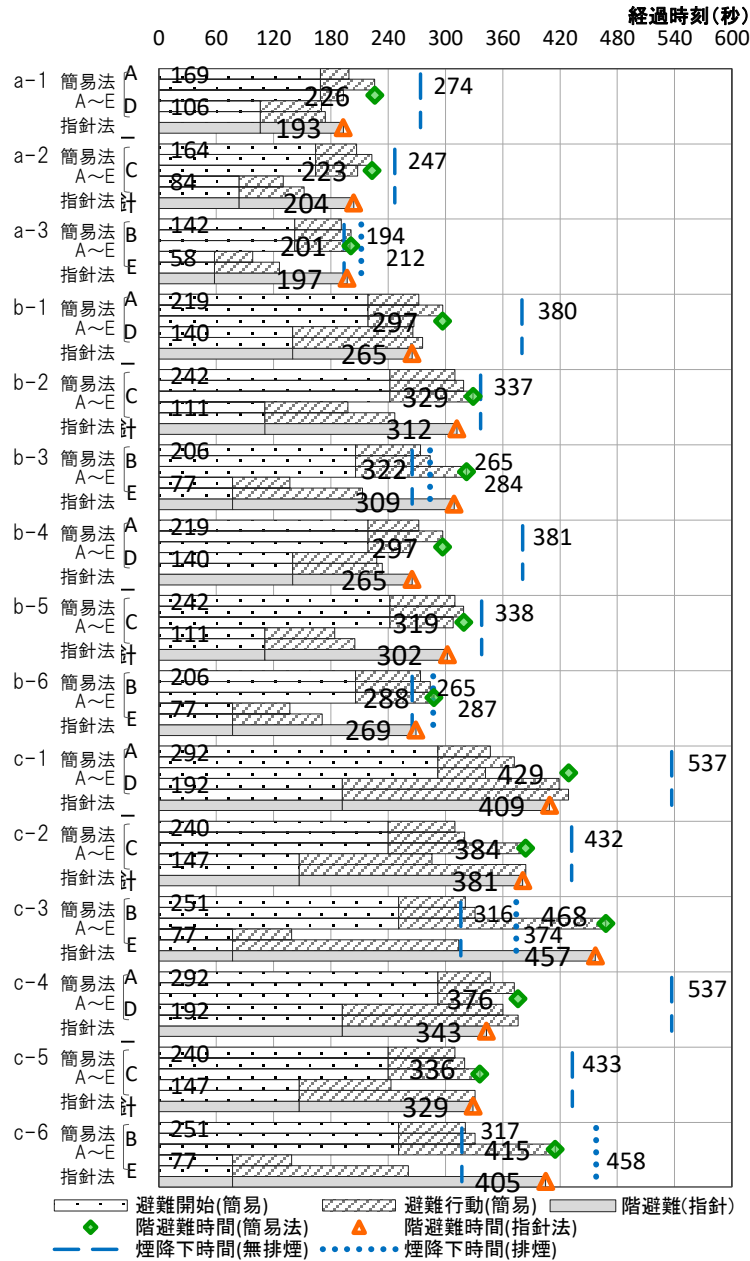
表 2 は簡易法による階避難時間の煙降下時間に対する評価の結果である。無排煙時に階避難が NG となるケース (case a-3,b-3,b-6,c-3,c-6) でも、廊下排煙をすることで OK となったり (case a-3,b-6,c-6)、case c-3 のように廊下排煙を行っても NG となった場合も case c-6 のように付室を一時滞留場所として位置付けることができれば評価が OK となり改善されたりするなどの状況が確認された。

付表 3.2 煙降下時間と比較スタディ

case	階避難 時間 (秒)	煙降下時間と評価			
		I.排煙無 (秒)	評価	II.排煙有 (秒)	評価
a-1	226	274	OK		
a-2	223	247	OK		
a-3	201	194	NG!	212	OK
b-1	297	380	OK		
b-2	329	337	OK		
b-3	322	265	NG!	289	NG!
b-4	297	381	OK		
b-5	319	338	OK		
b-6	288	265	NG!	292	OK
c-1	429	537	OK		
c-2	384	432	OK		
c-3	468	316	NG!	381	NG!
c-4	376	537	OK		
c-5	336	433	OK		
c-6	415	317	NG!	458	OK

(3.4)まとめ

居室全体と火災室と廊下の面積、付室と階段の扉幅といった少ないデータで階避難時間を算定する簡易法を作成した。スタディにより典型的なオフィスプランで指針法の時間に近い安全側の値が確認された。煙流動プログラムと同じエクセル上で煙降下時間と階避難時間の比較評価が容易となり、設計および評価の利便性が高まると考えられる。



付図 3.5 簡易法と指針法の階避難時間の評価スタディ

## 記号:

$t_{srl}$ :火災室の避難開始時刻(秒)	$P_{R1}$ :火災室の避難人数(人)	$B_{R0}$ :非火災室の扉 1 枚の幅(m)
$t_{sr2}$ :非火災室の避難開始時刻(秒)	$P_{R2}$ :非火災室の避難人数合計(人)	$B_V$ :付室の扉幅(m)
$L_{R1}$ :火災室の居室内歩行距離(m)	$P_{R2(n)}$ :非火災室 n の避難人数(人)	$B_S$ :階段室の扉幅(m)
$L_{R2(n)}$ :非火災室 n の居室内歩行距離(m)	$P_V$ :付室内の許容滞留人数(人)	$v$ :歩行速度(m/秒)
$L_{C(n)}$ :非火災室 n の廊下歩行距離(m)	$N$ :流動係数(人/m 秒)	$A_{R2}$ :非火災室面積合計(m <sup>2</sup> )
$L_{C(1)}$ :火災室の廊下歩行距離(m)	$B_{R1}$ :火災室の扉幅(m)	$A_{R0}$ :居室扉 1 ヶ所あたりの非火災室面積の設定値(m <sup>2</sup> )
$L_{Cmax}$ :最長廊下歩行距離(m)	$B_{R2}$ :非火災室の扉幅計(m)	$A_C$ :廊下面積(m <sup>2</sup> )
$L_V$ :付室内歩行距離(m)	$B_{R2(n)}$ :非火災室 n の扉幅(m)	

## 参考文献

- 1) 建設省告示第 1441 号避難安全検証法, 2000
- 2) 建設省住宅局建築指導課ほか監修, 新・建築防災計画指針—建築物の防火・避難計画の解説書—, 1995

---

© 建築研究報告 第 154 号

令和 5 年 3 月 印刷・発行  
編集・発行 国立研究開発法人建築研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは下記まで  
国立研究開発法人建築研究所企画部企画調査課  
〒305-0802 茨城県つくば市立原 1 番地  
電話(029)864-2151(代)