

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ことになるからである。

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。

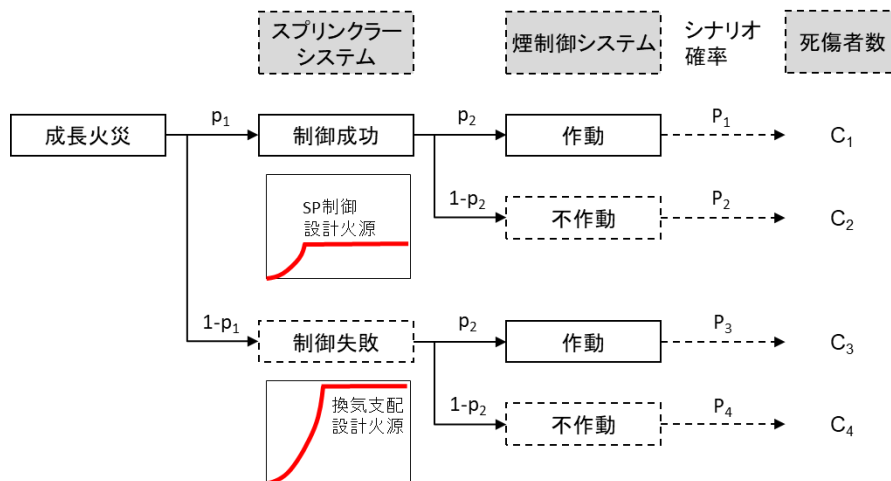


図 7.1 防火設備システムの作動／不作動に基づく火災シナリオ

(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 α_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 α 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 α_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 α_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 : α_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 α 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 α 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。

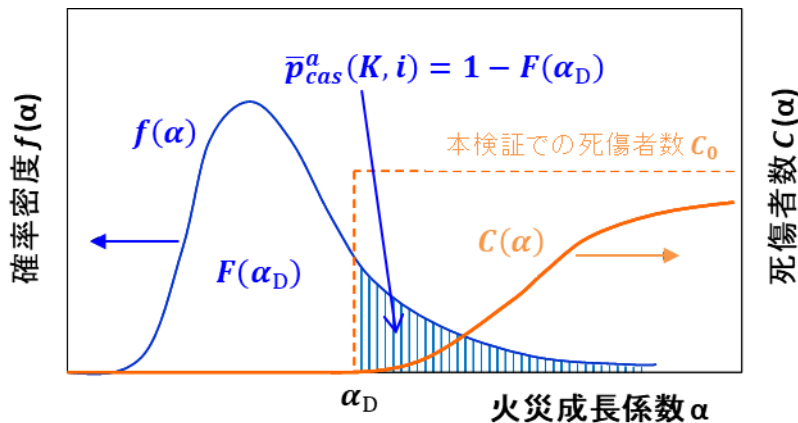


図 7.2 シナリオ i の火災成長係数の確率密度分布および火災成長係数と死傷者数の関係

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/不作動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 (α) 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/不作動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

- α_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。