

# 建築研究報告

*REPORT OF THE BUILDING RESEARCH INSTITUTE*

No. 152

*October 2022*

---

## 建築物の耐火設計における火災リスク基盤の 火災荷重の設定方法

Risk-based Design Fire Load Density for Performance-based Structural  
Fire Safety Design

田中哮義、水上点晴

Takeyoshi TANAKA, Tensei MIZUKAMI

---

国立研究開発法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

Incorporated Administrative 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

耐火建築物の歴史は明治時代の都市大火の防止対策に始まっています。江戸時代の日本が頻繁な都市大火に苛まれていたことは良く知られていますが、幕末・明治になり、欧米の都市についての諸情報に接するようになってからは、欧米のような不燃都市の建設で大火を撲滅することが為政者の悲願となり、石造・レンガ造建築の建設、また銀座煉瓦街や丸の内の不燃オフィス街の造成など様々な事業が熱心に行われました。

これらの努力に依って、首都東京では徐々に不燃建築は増加して行きましたが、技術や資金の不足のため、当然ながら望んだほどには都市不燃化は進まず、都市全体としてみれば耐火造建物は、言わば焚き木の海の中に孤立した島のような存在だったので、大正 12 年の関東大震災でも、日米戦争末期の空襲火災でも、市街地大火に巻き込まれて大半が焼失してしまいました。

日本における建築耐火の研究は、川越邦雄を中心とする建築研究所の研究チームが実施したのが先駆けであり、当初の課題は戦災による焼けビルの耐力評価であった。因みに、建築耐火に関する研究は、日本より米国が少し先んじましたが、その目的は、当時の米国で頻発していた市街地大火に巻き込まれた焼けビルの診断でした。

日本の都市の不燃化が本格的に進んだのは戦災都市の復興事業においてであり、産・官・学・政が一体となった全国的な都市不燃化運動の高まりの中でした、その皮切りは戦後の建設省の公営住宅建設への補助政策における不燃住宅への優遇措置であろうと思います。これにより全国津々浦々まで鉄筋コンクリート造の建設技術が普及することになりました。その後 1950 年に設立した住宅金融公庫による融資制度、住宅公団による不燃共同住宅の建設、防災建築街区造成法（1961 年）など様々な施策が、経済復興が相まって都市の不燃化が急速に進むことになりました。

その後、耐火建築物に大きな変化をもたらす契機となったのは昭和 36 年の特定街区制度による容積率の緩和であろうと思います。これは戦後の経済成長によって都市内の建築需要が増加する一方、それに見合った道路や緑地等の都市インフラの確保が困難になってきたことから、公共空地という形で私有地を公共に提出させる見返りに、それまで 31m に抑えられていた高さ制限を撤廃したものです。

これに伴って建築物の階数によって必要耐火時間を 1, 2, 3 時間とする規定が導入されました。実はそれまで耐火構造は材料や部材寸法が仕様書的に定められており、その耐火性能については知られていなかったのですが、この時初めて耐火試験によって主要構造部等の性能が評価されるようになりました。

平成 10 年(1998)の建築基準法の改正に伴う耐火性能検証法の導入も大きな変化です。これにより従来の階数によって一律に規定される要求耐火時間に代わって、告示に規定される収納可燃物の発熱量密度(本報告でいう、設計火災荷重密度)の下で火災性状を予測することによって建築物の耐火性能を検証する道が開かれました。火災性状は建築空間の形状や材料などの諸条件によって異なるので、これらの条件を耐火設計[耐火性能検証]に反映できることは大きなメリットです。

建築研究所は設立以来、独自の基礎研究や総合技術開発プロジェクトの研究を通じて、上記のような建築物の耐火基準や耐火設計[耐火性能検証]法の発展に積極的役割を果たして来ましたが、建築物の耐火性能については未だ多くの課題が残されており、より適切な基準や設計法の構築に向けて研究を継続して行く必要があると考えています。

令和 4 年 1 0 月

国立研究開発法人 建築研究所  
理事長 澤地 孝男

## 概要

建築基準法施行令第 107 条（以下、令第 107 条）に規定される耐火性能に関する技術的基準（耐火規定）は、建築物の主要構造部材一柱を例にすると、その要求耐火時間を建築物の階数に応じて 1 時間、2 時間、3 時間と一律に定めている。一方、1998 年の建築基準法の改正に伴って導入された耐火性能検証法（令第 108 条の 3、平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1433 号）は、従来の仕様規定による要求耐火時間に代わって、用途に応じて収納可燃物の床面積当たりの発熱量（本報告では、設計火災荷重密度と定義する。）を規定し、その条件の下で火災に曝される荷重支持部材や区画構成部材の安全性を工学的に検証する方法である。

建築物の火災性状は建築空間の形状や材料などの諸条件によって異なるので、部材の耐火性能評価にこれらの条件を考慮できる点では耐火性能検証法が令第 107 条の耐火規定よりも合理的である。しかし、実際の建築物内の収納可燃物の床面積当たり総量（積載火災荷重密度）は確率的に分布する値であるが、設計火災荷重密度を用途毎に一律に規定とすることは、実際の積載火災荷重密度が設計火災荷重密度を超過した場合には、建築物が崩壊することを許容することに他ならない。建築物が崩壊した場合の人命・財産の損失や近隣・社会一般の生活や経済活動への不利益は、建築物が大規模であるほど大きく、小規模であるほど小さいのであるから、火災時リスクの観点からは階数や規模によって耐火性能の要求レベルを変えている、仕様規定の方が合理的ともいえる。

### 1. リスク基盤の設計火災荷重密度の設定

耐火性能検証法と令第 107 条の仕様規定の双方の考え方の長所は、建築物の崩壊リスクに基づいて設計火災荷重密度を決定することで無理なく融合することが出来る。この報告書はその方法により、耐火設計〔耐火性能検証〕の設計火災荷重密度を決定する方法を検討したものであり、その概要を下記に要約する。

#### (1) 火災による建築物の崩壊リスク $R$

ここでは火災による建築物の崩壊リスク  $R$  を次式のように定義する。すなわち火災による建築物の崩壊で発生する損失の期待値である。

$$R = PC$$

ここに  $C$  : 火災による建築物の崩壊で生ずる損失の規模、 $P$  : その崩壊が発生する確率

#### (2) 許容崩壊リスク $R_a$

建築物はその規模、用途などに関わらず、何れの建築物も火災による崩壊リスク  $R$  は等しく一定の許容崩壊リスク  $R_a$  以下でなくてはならないものとする。すなわち

$$R(= PC) \leq R_a$$

#### (3) 許容崩壊確率

許容崩壊リスク  $R_a$  は、火災による崩壊の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築物を標準建物（Benchmark building）として選び、その火災による崩壊確率と崩壊による損害規模を用いて次のように定める。

$$R_a = \bar{P}\bar{C} = (\bar{P}_f\bar{P}_{fail})\bar{C}$$

ここに、 $\bar{P}_f$ 、 $\bar{P}_{fail}$ 、 $\bar{C}$  はそれぞれ標準建物における区画火災の発生確率、区画火災による建築物の崩壊確率および建物崩壊による損害規模。

すると  $R(= PC) \leq R_a$  の関係から任意の建築物で許容される崩壊確率  $P_{a,fail}$  は下式の条件を満足することが求められる。

$$P_{a,fail} \leq \bar{P}_{fail} \frac{\bar{P}_f \bar{C}}{PC} \quad (1)$$

#### (4) 設計火災荷重密度

耐火設計[耐火性能検証]で、設計火災荷重密度 $w_D$ を設定することは、火災荷重密度 $w$ が $w_D$ より大きくなった場合は建物崩壊を許容することを意味する。そこで、 $w > w_D$ となる確率を構造部材の崩壊確率 $F(w_D)$ と見做す。火災荷重密度 $w$ の確率密度分布を下図とすれば $1 - F(w_D)$ がその確率である。式で表せば

$$P_{a,fail} = \int_{w_D}^{\infty} f(w)dw = 1 - \int_0^{w_D} f(w)dw = 1 - F(w_D) \quad (2)$$

ここに $f(w)$ は火災荷重密度の確率密度関数。そこで、 $F(w_D) = 1 - P_{a,fail}$  (許容崩壊確率) とすれば、許容崩壊リスクに対応する設計火災荷重密度 $w_D$ が逆算して求められる。

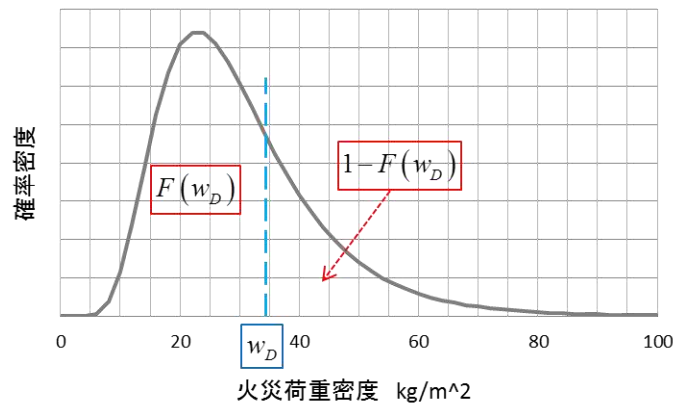


図 許容崩壊確率 $P_{a,fail} \{= 1 - F(w_D)\}$ と設計火災荷重密度( $w_D$ )

建築物の火災による崩壊リスクを許容値レベルに制御するために、耐火設計[耐火性能検証]法で設定すべき設計火災荷重密度を求める手順は極めて簡単である。すなわち、

(式1) によって許容崩壊確率 $P_{a,fail}$ を計算する。

(式2) から許容崩壊確率 $P_{a,fail}$ に対応する設計火災荷重密度 $w_D$ を求める

## 2. リスク基盤の設計火災荷重密度の設定方法の妥当性に関するケーススタディ

上記1. の方法で決定する設計火災荷重密度が、もし現状の耐火設計[耐火性能検証]に比較して過重な要求となるようだと実務上の問題を生ずる可能性がある。このため、事務所建築と共同住宅建築について建築物の階数および階の床面積の規模を変えてケーススタディをおこなった。

その結果、設計火災荷重密度は、当然ながら、階数や階の床面積が増えるほど大きくなり、後に示す標準建物より高層になれば、耐火性能検証法の設計火災荷重密度を超えるが、仮に階数が100を超える大規模な建築物であっても、換算される耐火時間は令第107条の要求耐火時間を超えることはない。

また耐火性能検証法では、低層の建築物でも高層の場合と同じ耐火性能が要求されることになるのに対し、今回の方法では、建築物が小規模なら構造部材への耐火性能要求が不要もしくは低く、階数と規模の拡大に伴って高くなる。

## 3. Annex

上記1. および2. の記述を成るべく簡潔にするため、リスク基盤の設計火災荷重密度の設定方法に関して行った技術的検討は内容ごとに Annex として纏めている。

## ABSTRACT

Article 107 of the enforcement order, Building Standard Law (BSL), requires that the fire rating of main structural members of buildings be 1, 2 and 3 hours according to the number of stories. On the other hand, the introduction of the verification method of fire resistance performance in 2000 into BSL has made it possible to use fire safety engineering methods to verify the fire resistance performance of buildings under the design fire load densities prescribed according to the type of occupancy of building space.

Building fire behaviors differ depending on various conditions, e.g., geometries, materials, etc. of building spaces, hence the verification method of fire resistance performance is superior to Article 107 in terms of the possibility to take such various conditions into consideration. However, live fire load density is not a constant but a stochastic value which scatters significantly. It implies to accept the collapse of a building when fire load density happens to exceed the design fire load density. Considering that the damages to human lives, properties, societal benefits, etc., the larger a building, generally the greater the impact of the collapse of the building, Article 107, which requires different level of fire resistance performance according to building height is more prudent.

### 1. Risk-based selection of design fire load density

The advantages of the verification method of fire resistance performance and Article 107 of the enforcement order can be merged without conflict by selecting the design fire load density for resistance design of buildings based on the risk of building collapse by fire. The outline of the method is as follows:

#### (1) Risk of building collapse by fire: $R$

The risk of building collapse by fire,  $R$ , here is defined as follows, i.e. the expectation of the damage due to building collapse by fire:

$$R = PC$$

where  $C$ : magnitude of the damage due to building collapse by fire,  $P$ : probability of occurrence of the collapse.

#### (2) Acceptable risk of building collapse, $R_a$

Let the risk of building collapse by fire,  $R$ , be equal or less than a common value of acceptable risk,  $R_a$ , i.e.

$$R(= PC) \leq R_a$$

The  $R_a$  is determined by the  $C$  and  $P$  of the benchmark building which is generally regarded as a building whose scale and fire resistance performance represents the acceptable risk of building collapse. i.e.

$$R_a = \bar{P}\bar{C} = (\bar{P}_f\bar{P}_{fail})\bar{C}$$

where  $\bar{P}_f$ ,  $\bar{P}_{fail}$ ,  $\bar{C}$  are probability of occurrence of compartment fire, failure probability of structural member, and magnitude of damage due to building collapse, respectively.

#### (3) Acceptable probability of building collapse

From (2) above, acceptable probability of collapse of any building,  $P_{a, fail}$ , is required to be as follows:

$$P_{a, fail} \leq \bar{P}_{fail} \frac{\bar{P}_f \bar{C}}{PC} \quad (1)$$

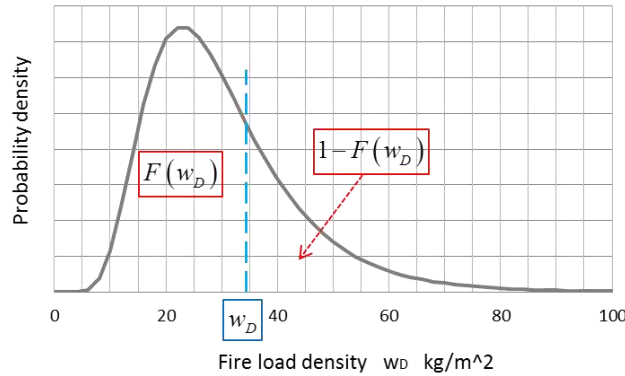
#### (4) Design fire load density

Setting design fire load density,  $w_D$ , in fire resistance design implies to tolerate building collapse in the event that actual fire load density,  $w$ , happens to be greater than  $w_D$ . Hence, regarding the probability of building collapse,

$P_{a,fail}$  be the probability that  $w$  exceeds  $w_D$ ,  $F(w_D)$  as illustrated in the figure below. In terms of formula,  $F(w_D)$  is given by

$$P_{a,fail} = \int_{w_D}^{\infty} f(w)dw = 1 - \int_0^{w_D} f(w)dw = 1 - F(w_D) \quad (2)$$

where  $f(w)$  is the probability density function of fire load density,  $w$ .



Design fire load density( $w_D$ ) v.s. Acceptable probability of building collapse  $P_{a,fail} \{= 1 - F(w_D)\}$

#### (5) Procedure to determine the design fire load density

The procedure of setting the design fire load density by the risk-based method is simply as follows:

- 1) calculate the acceptable fire load density,  $P_{a,fail}$ , by Eq. (1)
- 2) solve the design fire load density,  $w_D$ , corresponding to  $P_{a,fail}$  by (Eq. 2)

#### 2. Case studies on practicability of the risk-based design fire load density

Case studies are performed for office and collective dwelling buildings to check if the risk-based method for setting design fire load density may cause unreasonable fire resistance requirements. The results show that while design fire load densities increase as the floors and area of a building increase the required fire resistance does not increase proportionally, and even if a building has over 100 stories the required fire resistance rating is very likely to be less than 3 hours. Besides, fire resistance requirement to low-rise building is generally loose unlike the verification method of fire resistance performance.

#### 3. Annex

For simplicity of the main text, the results of technical studies conducted during the development of the risk-based setting of design fire load density are summarized in Annexes by each topic.

## 建築物の耐火設計における火災リスク基盤の火災荷重密度の設定方法

はじめに

建築基準法は、法第 27 条により建物火災時の避難安全の観点から、また法第 61 条（防火地域及び準防火地域内の建築物）によって都市防火の観点から、一定規模以上の建築物を、延焼防止性能を有する建築物（耐火建築物等）とすることを求めている。そして、いずれの条文の規定に因るものであれ、耐火建築物としなければならない建築物の主要構造部材の要求耐火時間は、施行令第 107 条において建築物の階数により一律に規定されており、最上階から数えた階数に従い要求耐火時間が 1 時間、2 時間、3 時間と段階的に増加する。

一方、1998 年の建築基準法の改正に伴って導入された耐火性能検証法では、従来の耐火時間による規定に代わって、設計火災荷重密度による基準が導入された。火災性状は建築空間の形状や材料などの諸条件によって異なるので、耐火設計〔耐火性能検証〕にこれらの条件を考慮できることは設計火災荷重密度を基準とすることの大きなメリットである。しかし、設計火災荷重密度が建築物の規模に関係なく一定とされている点では施行令第 107 条の耐火時間による仕様基準より後退した面もあるのではないかと疑問が残る。

設計火災荷重が建物規模に関わらず一定で良いとするのは、耐火性能レベルが建物規模に関わらず一定で良いと言っていることに他ならない。しかし、建物規模が大きいほど耐火要求を厳しくするのは、日本の建築基準法だけでなく殆ど全ての諸外国の規定にも共通した扱いであり、そこには大規模な建築物であるほど、万が一崩壊した場合には直接被害として人的・物的損害が大きくなると同時に、間接被害としても社会一般の生活や経済活動など様々な面に大きな不利益を生ずる恐れがあることへの配慮が含まれていると考えられる。また逆に、低層小規模な住宅建築やその他の施設に大規模な超高層建築と同じ耐火性能のレベルが求められたら建築主は困惑するであろう。

一般にある望ましくない事象が生じた場合に予想される損害が大きいほど、そのような事象が生起する確率を小さくするため高いレベルの対策を考慮するのは、個人でも社会でも常日頃から常識として行っていることであり、建築物の耐火設計〔耐火性能検証〕と言う非常に重要な問題についてのみ例外とされるのは理解し難いことである。

本報告書のタイトルには‘火災リスク’という語が入っているので、中には苦手に感じる向きが有るかも知れない。しかし、ここでのリスク、 $R$ 、は部材が火災加熱によって崩壊する確率、 $P$ 、とその場合の損害規模、 $C$ 、の積、 $R=PC$ 、すなわち損害規模の期待値を意味しているに過ぎず、これが一定の許容値、 $R_a$ 、以下になるように設計火災荷重密度、 $w_D$ 、を決めようと言うのが本報告の提案である。この内容に確率論やリスク論について高度な知識や議論が含まれている訳ではなく、有るのは一般生活者や社会人としての常識的な感覚を客観化しようとする試みだけである。

本報告は、建築物の耐火要求を現在より厳格にすべきだと主張するものではない。建築物の耐火性能の在り方を火災リスクの観点から考察することで、耐火設計〔耐火性能検証〕における設計火災荷重の設定方法の合理化を図ることが目標であり、それによって、より一般常識に合致する耐火性能を有する建築物が可能になると考えている。



## 目次

1. 耐火設計の源流.....	1
1.1. 米国の大火.....	1
1.2. Ingberg (NBS) の実大火災実験と ASTM の耐火試験温度.....	1
1.3. 耐火試験の導入と世界的広がり.....	2
1.4. 日本における耐火設計の経緯.....	3
2. 耐火基準により確保される安全性のレベル.....	6
2.1. 建築基準法の耐火規定.....	6
2.2. 耐火性能検証法.....	7
2.3. 耐火試験と区画火災.....	8
3. 耐火設計[耐火性能検証]におけるリスク基盤の設計火災荷重密度の設定方法.....	11
3.1. リスクの定義.....	11
3.2. 建築物の崩壊リスク.....	11
3.3. 建築物の許容崩壊リスクと構造部材の許容崩壊確率.....	12
3.4. 設計火災荷重密度.....	12
3.5. 標準建物 (Benchmark building) と構造部材の許容崩壊確率式のパラメタ値.....	13
3.6. 設計火災荷重密度の計算手順.....	18
4. リスク基盤の設計火災荷重密度設定の妥当性に関するケーススタディ.....	19
4.1. 事務所建物のケーススタディ.....	20
4.2. 集合住宅建物のケーススタディ.....	24
4.3. 火災継続時間の耐火時間への読み替え.....	27
4.4. ケーススタディのまとめ.....	28
謝辞.....	29
Annex A1 積載可燃物の調査データ.....	30
Annex A2 火災荷重密度の既存統計データの統合について.....	32
Annex A3 確率密度関数.....	34
Annex A4 設計火災荷重密度と許容崩壊確率.....	38
Annex A5 MQH (McCaffrey, Quintiere, Harkleroad) 区画火災温度予測式.....	39
Annex A6 区画の熱量保存式に基づいた火災温度式.....	41
Annex A7 火災継続時間.....	44
Annex A8 等価火災継続時間.....	46
Annex A9 吸収熱量一定の仮説に基づく等価耐火時間.....	50
Annex A10 区画の床面積と総表面積との比率.....	51
Annex A11 出火率の空間面積への依存関係.....	52
Annex A12 集合住宅建築の階数と階当り住戸数.....	54

## [用語]

- 耐火造建物 : 令第 107 条 (1961) の制定以前に、一定の火災に耐えるとされた仕様書式的構造で建てられた建物
- 耐火建築物 : 令第 107 条 (1961) の制定以後、耐火の概念に加わった、火災に耐える時間を念頭において建てられた建物として、上記と区別する
- 危険な火災 : 区画火災に成長する火災 (小火などを除く)
- 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 : 事務所の用途別出火率 / 任意の空間の用途別出火率
- 区画火災 : 防火区画で囲われた空間における盛んな火災
- 建物崩壊リスク : 火災発生による建築物の崩壊で生じる損失の期待値
- 許容崩壊リスク : 建物崩壊リスクの許容値
- 構造部材の崩壊確率 : 建築物の荷重を支える主要構造部材が火災加熱により崩壊する確率
- 建築物の崩壊確率 : 簡単のため、構造部材の崩壊確率と同じと仮定している
- 設計ベース : 「危険な火災が発生したことを前提とした条件」をいう。
- 標準建物 **Benchmark building** : 許容崩壊リスクを定める上での基準 (**Benchmark**) となる建物
- 火災荷重密度 : 建物内部に存在する床面積当たりの可燃物の量
- 固定火災荷重密度 : 上記の内、内装材等、建築物本体に由来するもの
- 積載火災荷重密度 : 上記の内、家具や書類など竣工後に持ち込まれるもの
- 設計火災荷重密度 : 耐火性能検証のために設定される積載火災荷重密度
- 標準火災区画(**Benchmark fire compartment**) : 火災発生時の室の平均的な温度が、標準加熱温度曲線を再現せしめる条件( $\Phi/I_B = 0.0175$ )に対応する仮想的な火災区画

## [数式記号]

- $R$  : 出火確率も含めた実際の建物崩壊リスク (= 構造部材の崩壊確率 × 建物崩壊による損害規模)
- $R^D$  : 設計ベースの (危険な火災の出火を前提とした) 建物崩壊リスク
- $R_a$  : 実際の許容避難リスク
- $P$  : 建物崩壊の発生確率
- $C$  : 火災による建物崩壊が発生した場合の損失の規模
- $p_j$  : 単位面積当たりの成長火災 (小火は除く) の出火率
- $A_f$  : 出火区画 (防火区画) の床面積 ( $m^2$ )
- $A_{FLR}$  : 階の床面積 ( $m^2$ )
- $Y_L$  : 建築物の耐用年数
- $P_{FO}$  : 出火した火災が区画火災に成長する確率
- $P_{n-sup}$  : 消火活動による室火災の制圧が失敗する確率
- $P_{fail}$  : 構造部材が区画火災の加熱で崩壊する確率
- $P_{a,fail}$  : 許容崩壊確率
- $N$  : 構造部材の崩壊で支持を失う階の数 (最上階から火災階までの階数)
- $w, w_D$  : 火災荷重密度、設計火災荷重密度 ( $kg/m^2$ )

$f(w)$	: 火災荷重密度 $w$ の確率密度関数 (対数正規分布)
$F(w_D)$	: 累積分布関数 (対数積分布)
$A_w$	: 区画の開口面積(m <sup>2</sup> )
$H_w$	: 区画の開口高さ (m)
$H$	: 区画の高さ (m)
$A_T$	: 区画表面積 (m <sup>2</sup> )
$A_w\sqrt{H_w}$	: 区画の開口因子
$k$	: 区画部材の熱伝導率 (kW/mK)
$\rho$	: 区画部材の密度 (kg/m <sup>3</sup> )
$c$	: 区画部材の比熱 (kJ/kgK)
$I_B$	: 火災区画周壁の熱慣性
$\Phi$	: 区画の温度因子(= $A_w\sqrt{H_w}/A_T$ )
$\tau$	: 加熱時間 (min.)
$\tau_D$	: 火災継続時間 (min.)
$m_b$	: 可燃物の質量減少速度 (kg/s)
$m_g$	: 換気によるガス流出速度 (kg/s)
$m_a$	: 換気による流入空気量 (kg/s)
$Q$	: 発熱速度 (kW)
$Q_g$	: 可燃物の熱分解における気化熱吸収速度 (kW)
$Q_B$	: 周壁への熱損失速度 (kW)
$Q_r$	: 開口部からの輻射失熱速度 (kW)
$h_r$	: 輻射熱伝達率 (kW/mK)
$\alpha$	: 熱拡散率 (= $k/\rho c$ ) (m <sup>2</sup> /s)
$x$	: 壁体の厚さ (m)
$T_f$	: 加熱表面温度
$T_c$	: 温度上昇制限値
$T_0$	: 初期温度