

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じましましたが、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10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。

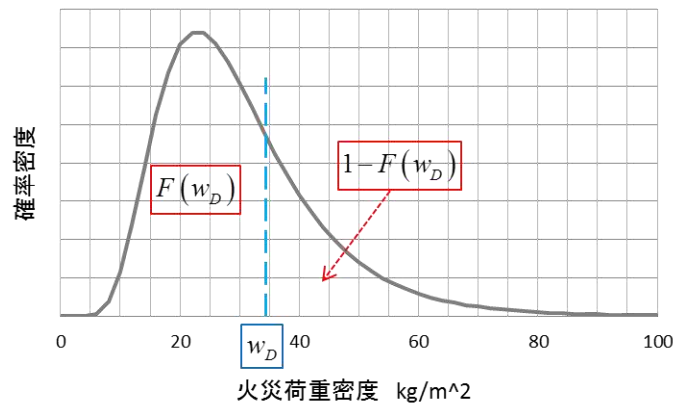


図 許容崩壊確率 $P_{a,fail} \{= 1 - F(w_D)\}$ と設計火災荷重密度(w_D)

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:

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

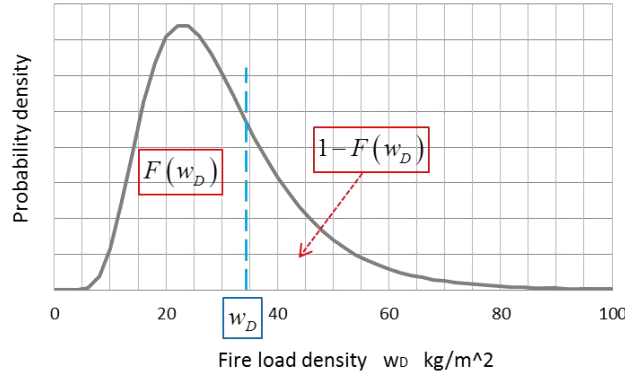
(4) Design fire load density

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
- 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 ²)
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 ²)
$A_w\sqrt{H_w}$: 区画の開口因子
k	: 区画部材の熱伝導率 (kW/mK)
ρ	: 区画部材の密度 (kg/m ³)
c	: 区画部材の比熱 (kJ/kgK)
I_B	: 火災区画周壁の熱慣性
Φ	: 区画の温度因子(= $A_w\sqrt{H_w}/A_T$)
τ	: 加熱時間 (min.)
τ_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)
α	: 熱拡散率 (= $k/\rho c$) (m ² /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

1. 耐火設計の源流

建築物の火災安全設計の中で、耐火設計が担当する範囲は何処までと意識されているのであろう。火災による建築物の崩壊防止は主目的として当然含まれるが、その他にも建物内あるいは都市内の延焼防止、更には避難安全にも関係する。

このように耐火設計は火災安全設計の基盤とも言えるので、基盤の確りした体系の構築が必要である。現在、建築基準法の施行令第 107 条にしる、耐火性能検証法にしる、耐火設計に不可欠な基盤になっているのは主要構造部の耐火試験データである。今後耐火設計をどう発展させて行くべきかは関係者の間で大いに議論すべきことであるが、耐火設計が現在のようになった歴史について知っておくことは、望ましい形の耐火性能検証法を構築して行く上で参考になると考えられる。

1.1. 米国の大火

米国はかつては都市大火が頻発する国であった。特に有名なものを幾つか挙げて見るだけでもニューヨーク大火(1835)、シカゴ大火(1871)、ボストン大火(1872)、ボルチモア大火(1904)などが起っている。多くの不燃建築物もこれらの大火に巻き込まれて無残に破壊され被災跡に残る焼けビルとなった。

この頃、米国では多くの保険会社が火災保険を引き受けていたが、あまりにも大火が頻発することから多くの保険会社が倒産することになった。そこで建物の質を上げない限り、保険業務の運営は不可能だとして、ニューヨークの保険業者が共同で作り始めた建築基準 (Building Code Recommended by National Board of Fire Underwriters) が後に米国のモデル建築コード(National Building Code)の基となった。この 1900 年の初頭ころは、NFPA (National Fire Protection Association) もモデル建築コードを作成するなど、米国で建築基準の作成活動が盛んに行われた時期であった。

ASTM (American Society for Testing and Materials) が、耐火試験法の開発に乗り出したのは、この建築基準作成の動きと関係している。



図 1.1 ボルチモア火災(1904)⁴⁾

1.2. Ingberg (NBS) の実大火災実験と ASTM の耐火試験温度

ASTM は 1905 年、標準耐火試験法を開発するための委員会を組織した。これは主として床構造の耐火試験を行う目的だったようである。当時の不燃建物はヨーロッパと同様に、壁は石造やレンガ造であっても床は木造や鉄骨造が多かったのではないかと思われる。

なお、試験法はガス炉が使って部材を加熱するものだったので、加熱温度は現在の耐火試験の加熱温度曲線と類似であったが、実際の建物火災の温度との関係は不明であった。そのため、実際の火災における評価法として妥当か否かについて多くの議論があった。この段階では、実火災との関係は不明であるが、どのような部材の耐火性が高いかどうかに、ランキングすることは可能だろうとの意見に押されて採用されたようである。

一方、1914 年、NBS (National Bureau of Standards)において Simon H. Ingberg(Chief, Fire Resistance Section, U.S. Bureau of Standards) を長として火災研究が始められるようになった。Ingberg は実大の建築物の火災実験に情熱に注いだ人である。彼は、事務所、住宅、資料室などを想定し、異なる可燃物を設定して多くの火災実験を行い、火災温度を測定したが、その情熱は NBS 退職後も衰え

ず、自宅のガレージを使って火災実験を続けたと言われている。

下図 1.2 は彼が実施した多くの実大火災における可燃物の設置の例である。



Fig. 1. The interior of the small test building arranged to represent a typical office with meta furniture on a cement floor. (Used with permission of NFPA.)

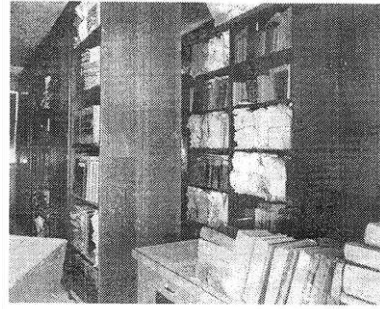


Fig. 2. Steel shelving in the small fire test building arranged to represent a records room (Used with permission of NFPA.)

図 1.2 Ingberg の実大火災実験における可燃物のレイアウト (左：事務室、右：資料室) 2)

下図のグラフで ASTM の記号は Ingberg が ASTM の標準耐火試験法作成のために選定して渡した測定データと言われる。90 分までのデータであるが、温度の時間履歴は標準耐火試験温度とは大きな差がある。ASTM の温度曲線はそれぞれの火災条件での温度のピークをカバーするように連ねたものかも知れない。

唯一、例外として NO.8 の資料室だけは ASTM の耐火試験温度に近いが、図 1.2 (右) の可燃物レイアウトを見ても、図 1.3 のように火災が初期から急速に拡大するためには余程特殊な着火条件を設定しなければ不可能なように感じられる。

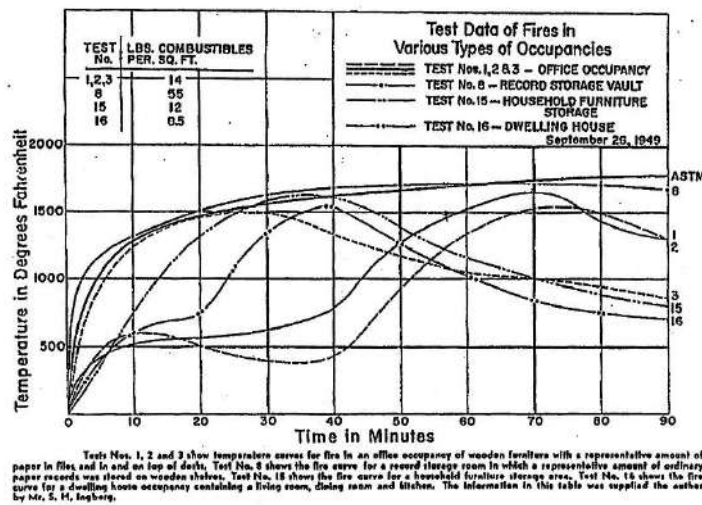


図 1.3 ASTM の標準耐火試験温度 (E119) の元になった Ingberg のデータ 9)

1.3. 耐火試験の導入と世界的広がり

ASTM は 1900 年代初頭に、耐火試験の温度・時間曲線 E119 を作成したが、欧州では同時期に英国の BFPC (the British Fire Prevention Committee) が 1903 年、幾分同様な耐火試験法の提案を行っているようである。ただ、英国なりの必要が有ったのか、米国との研究交流の結果なのかは不明である。

E119 に倣った耐火試験法は第 II 次世界大戦の後、欧州を中心とする各国に急速に広まっていった。これらは単に新規な技術に知的好奇心を刺激されたからという理由ではなく、戦後復興のための建築技術開発の一環であったと考えられる。大戦によって夥しい建築物が失われた欧州各国は、戦後復興における建設に、従来の伝統的工法でのんびりと時間を掛けていることは出来ず、住宅を始めとする大量の建築物を安価に短期間で生産する必要があった。このため大戦後には、我が国の建設省建築研究所と似たような、建設技術開発を目的とする研究所が多くに設立され、建築物の耐火性の研究もこれらの研究所で実施された。

急いで成果を出すためには先行する米国の方法を参考にするのが効率的である。下図は各国の標準耐火試験温度であるが、概していえばこれらの国々の温度・時間曲線に大差はない。微妙に異なっている国々があるのは、耐火炉の炉材の種類や厚さなどの仕様が幾分異なっているのか、あるいは、それぞれの国で研究の結果を考慮して独自の変更が加えられたのか、どちらかであろう。

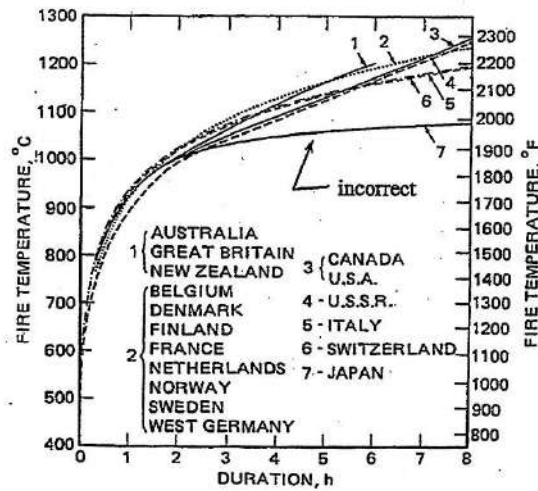


図 1.4 各国の標準耐火試験温度・時間曲線⁵⁾

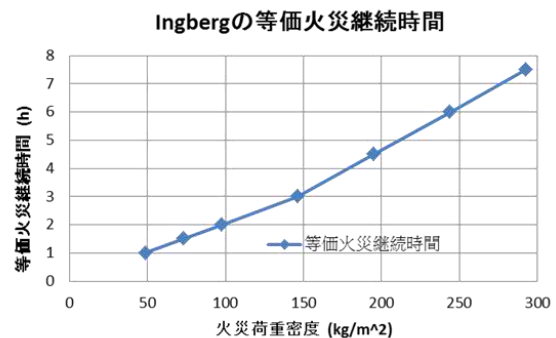
各国の標準耐火試験・温度曲線は ASTM E119 と同じく、加熱時間が 8 時間までと言う非常に長い時間まで定められていることである。

実は ASTM は耐火温度・時間曲線は作成したが、耐火時間の基準、すなわち建築部材が耐火試験での加熱に何時間耐える必要があるかのクライテリアは決めなかった。一方、Ingberg は火災の厳しさ (Fire severity) は火災荷重に比例すると考えており、下表のように 7.5 時間までの火災荷重密度との関係を示していた。この火災荷重密度は積載火災荷重だけ考えれば非常に大きな値であるが、固定火災荷重も含めた値とすれば妥当な値だったのかも知れない。

あるいは、Ingberg に時代の建築物の床が木材等で構成され、火災で燃え抜け易かったとすれば、上階の積載火災荷重が出火区画に落下することによって長時間火災が継続するという事も実際に在って、そのような火災経験が反映されたのかも知れない。

表 1.1 Ingberg の火災荷重密度と等価火災継続時間⁹⁾

Fire Load		Assumed Combustible Load		Equivalent Fire Duration
(lb/ft ²)	(kg/m ²)	(Btu/ft ²)	MJ/m ²	
10	48.8	80,000	907.9	1 h 00 min
15	73.2	120,000	1361.9	1 h 30 min
20	97.6	160,000	1815.8	2 h 00 min
30	146.5	240,000	2723.7	3 h 00 min
40	195.3	320,000	3631.7	4 h 30 min
50	244.1	380,000	4312.6	6 h 00 min
60	292.9	432,000	4902.7	7 h 30 min



1.4. 日本における耐火設計の経緯

日本は、都市を木造建物で造って来たこともあって、昔から頻繁に市街地大火による膨大な被害に悩まされてきた国である。明治時代になって、西洋に倣った不燃建築の建設を進めてきたが、東京の丸の内、銀座界限をはじめ不燃化が進んだ地域であっても、関東大震災では多くの不燃建築が延焼を受けて焼け落ちている。

第 II 次世界大戦における空襲では、欧州各国も甚大な火災被害を受けた国であるが、最大の被害を受けたのは日本である。被害は全国主要都市の殆どに及んだが、関東大震災から復興して間もない東京も再び焼け野原となってしまった。

日本の耐火研究はこの空襲の焼け跡に残った焼けビルの再利用可能性の診断が目的であったと聞いているが、そのためには先ず建築物における区画火災の性状を明らかにすることが必要であった。

この研究は、戦地から復員してきた川越邦雄を中心として、関根孝など建築研究所のメンバーによって実施され多くの成果をあげた。特に川越・関根による区画火災における可燃物の質量燃焼速度と換気因子の関係の発見は、画期的の成果であり、区画火災の発熱速度や継続時間の予測を可能にし、世界の火災研究に非常に大きな転機をもたらした。

この川越・関根の研究が BRI Research Paper No.27 に発表されたのは 1958 年であるが、これ以後各国で関係する多くの研究が行われている。下図はその 1 例に過ぎないが、火災荷重と開口の大きさ変えた場合の火災継続時間と区画火災温度の関係について調べた実験結果である。なお図中の 60(1/2)などの記号は、可燃物密度=60kg/m² (開口面積/側壁面積=1/2) のように読む。

開口が小さい方が火災継続時間が長くなるのは、燃焼速度が開口因子に比例するとする川越・関根の結果に一致する傾向である。ただし、図は文献 5.からの引用であり、温度も同時に高くなる理由については基の論文を調べていないので不明である。

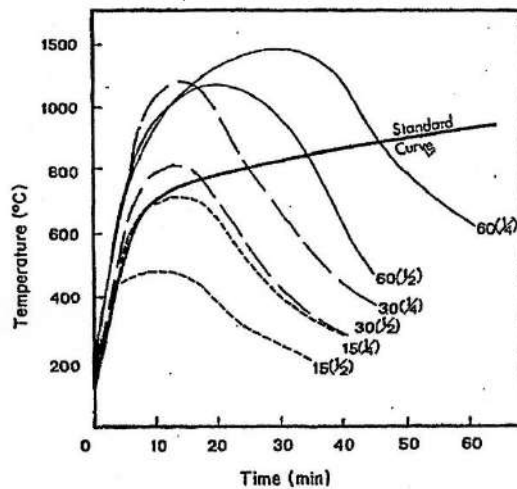


図 1.5 火災荷重道度および開口面積と火災温度および火災継続時間⁸⁾

まとめ

歴史的に見れば、建築物の耐火性の評価の必要性は、いずれの国でも市街地火災との関連で起きたものと言えるであろう。しかし市街地火災は着火源であって、建築物を破壊するエネルギー源は建物内部の火災荷重であろう。

耐火試験の標準加熱温度は耐火炉の温度上昇特性を反映したものであって、実際の建築物の火災性状に基づいてはいない。その点を十分認識した上で、実務的に上手く利用する工夫が必要と考えられる。

[参考文献]

1. D. Gross: Fire Research at NBS: The First 75 Years, Invited Lecture, Fire Safety Science, The 3rd International Symposium
2. D. Evance, D. Gross and R. Wright: Test of the Severity of Building Fires, <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/sp958-lide/028-032.pdf>
3. J. R. Lawson: A History of Fire Testing, NIST Technical Note 1628, 2009
4. J. L. Gross, Fire-Structure Interaction: U.S. Perspective, Operation Tomodachi – Fire Research, NIST, 2015.3
5. L.Y. Cooper, K.D. Steckler: Methodology for developing and implementing alternative temperature curves for testing the fire resistance of barriers for nuclear power plant application, NUREG-1547, NBSTIR 5842.

6. ASTM E119; American Society for Testing and Materials: Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials, Philadelphia, 1918.
7. Kunio Kawagoe: Fire behavior in rooms, Report of the building research institute No.27 1985.
8. Butcher, E.G, Chitty, T.B., and Ashton, L.A.;; The Temperature Attained by Steel in Building Fires, Fire Research Technical Paper No. 15, H.M. Stationery Office, London, 1966.
9. S. H. Ingberg, Tests of the Severity of Building Fires, Q. Natl. Fire Prot. Assoc. 22, 43-61, 1928.

2. 耐火基準により確保される安全性のレベル

2.1. 建築基準法の耐火規定

周知のように建築基準法では施行令第 107 条により下図 2.1 のように、最上階から数えた階数によって 1, 2, 3 時間の耐火時間を要求している。

	非損傷性		遮熱性	遮炎性	
	柱・はり	床・耐力壁	壁、床	外壁	屋根
最上階	1時間	1時間	1時間 <small>(ただし非耐力壁の外壁で延焼のおそれのある部分以外の部分は30分間)</small>	1時間 <small>(ただし非耐力壁の外壁で延焼のおそれのある部分以外の部分は30分間)</small>	30分
4					
14	2時間	2時間			
GL	3時間				

図 2.1 施行令第 107 条の耐火規定 4)

施行令第 107 条は昭和 36 年 (1961) に規定されたものである。それ以前にも耐火構造の建築物は多少存在したが、耐火性能は規定されておらず、西洋式の様式で造ったレンガ造建物あるいは RC 造建物が耐火造として慣習的に理解されていたに過ぎなかった。

耐火時間のような幾分性能的指標の導入が必要となったのは、耐火規定が導入される前年に、それまで定められていた建築物の高さ 31m (≒100 尺) の制限が撤廃されたことによる。それ以降は経験の無い高さの建築物が続々と建設されていくことが予想される中で、それらの建築物にどんなレベルの耐火性を求めるべきかの検討が行われた。その過程で着目されたのが当時存在していた 2 種類の耐火造建物、すなわち高さ制限の中で建てられていた RC 造建物、および大戦後の都市不燃化の中で全国的に建設が進められていた RC 造の公営共同住宅であった。

前者は 31m の高さ制限によって実質 9 階建が限度であったが、これに関しては 1950 年 (昭和 25 年) に制定された建築基準法施行令第 107 条に鉄筋のかぶり厚さが規定されており、これが 90 分の火災に耐えるものとされていた。また後者は戦後 GHQ の軍事物資の中からセメントなどの資材の提供を受けて、高輪に建設された 2 棟の 4 階建共同住宅を始まりとするが、こちらは 1 時間の火災に耐えるものと判断された。この 4 階で 1 時間、9 階で 1.5 時間を基に外挿すれば 14 階で 2 時間となるので、15 階以上は 3 時間ということになった。

柱・梁の
要求耐火時間

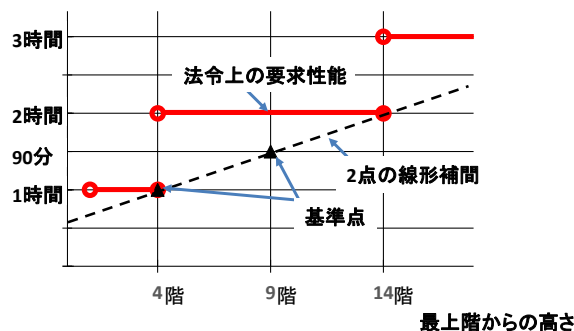


図 2.2 建基法施行令第 107 条の耐火規定の根拠と見られる考え方

こうして導入された耐火規定は 4-5 階、14-15 階の間で要求耐火時間が突如 1 時間も増加する、そもそも耐火 2 時間なら 14 階建てであっても許されるものが 5 階建てにまで要求される、また元々 3 階以下の建築物では防火上の地域や建物規模によって耐火構造としなくて良いが、この規定だと全て 1 時間の耐火構造とする必要があるように思える、などの疑問点は多々ある。想像するに、図 2 の耐火規定は飽くまで高層建築物を適用対象とした規定であって、低層の建築物へも適用されることは考えられていないものと思われる。

このように、施行令第 107 条の要求耐火時間の規定には不合理な点は少なくないが、崩壊した場合に及ぼす影響が大きい高層の建築物ほど崩壊確率を小さくする、という観点でみれば、階数が大きいほど大きい耐火時間を要求することは基本的方向として正しいと考えられる。

2.2. 耐火性能検証法

耐火性能検証法では仕様のな要求耐火時間の代わりに室の用途に応じた設計火災荷重密度を規定して、空間の面積に応じた積載火災荷重と固定火災荷重の下で火災性状予測を行い、主要構造部の耐火上の安全性、つまり耐火性能を検証する。

火災性状は出火空間の開口条件、周壁の吸熱特性等の特徴によって大きく異なるので、これらの特徴を考慮して合理的、かつ自由な耐火設計[耐火性能検証]が可能なのは、建築物の階数のみで一律に要求耐火時間を規定する令第 107 条と比較すれば大きな利点と言える。

しかし、設計火災荷重密度を室の用途のみで一律に定めることは、仮に 2~3 階程度の小規模な建築物でも、100 階建ての大規模建築であっても主要構造部の耐火性能は基本的に同じで良いとしていることと同義である。しかし、積載火災荷重密度は空間用途が同じであっても、下図の例のように確率的にかなり広く分布するので、設計火災荷重密度として或る 1 つの値をとれば実際の火災荷重密度が設計値を超過する確率が残る。このような設計火源の設定は、その残存確率を許容可能であると判断することに他ならない。

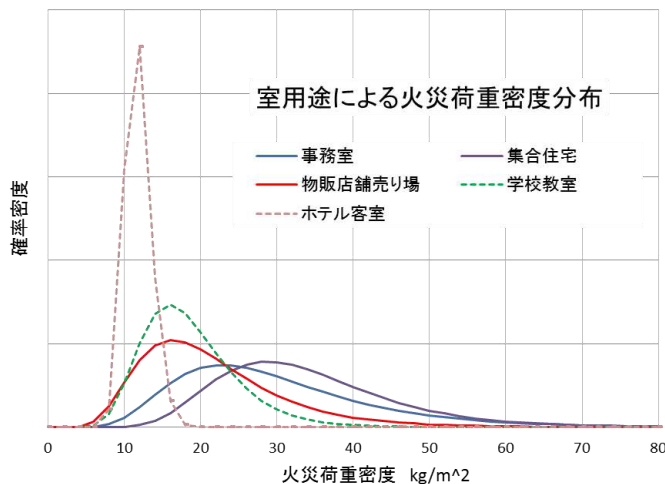


図 2.3 可燃物調査データに基づく空間用途による火災荷重密度の確率密度分布

[参考文献]

1. 建築基準法施行令第 107 条
2. 水上点晴：Q.390 耐火性能、規基準の数値は「何でなの」を探る 第 3 巻、建築技術、2015.11
3. 鈴木貴良：Q.391 高層区画、規基準の数値は「何でなの」を探る 第 3 巻、建築技術、2015.11
4. 日本建築学会：建築火災安全設計の考え方と基礎知識、丸善、2019（共著）

2.3. 耐火試験と区画火災

(1) 耐火試験の温度と区画火災温度（詳細については **Annex 5** 参照）

耐火試験における加熱温度時間曲線は、建築基準法において‘通常の火災’の温度と呼ばれることもあるが、時間毎の温度の値が数値、あるいはその近似式で規定されているだけで、建物内で発生した火災現象における物理的意味は説明されていない。しかし、MQH 区画火災モデルを換気支配火災に適用してみれば、

$$\frac{\Delta T}{T_\infty} = 6.0 \left(\frac{\Phi}{I_B} \right)^{1/3} \tau^{1/6} \quad (2.1)$$

ただし $\Phi = A_w \sqrt{H_w} / A_T$, $I_B = \sqrt{k\rho c}$, τ =加熱時間(min.)

この式で $\Phi / I_B = 0.0175$ とすると ISO834-1 の温度曲線と殆ど等しいことが分る。

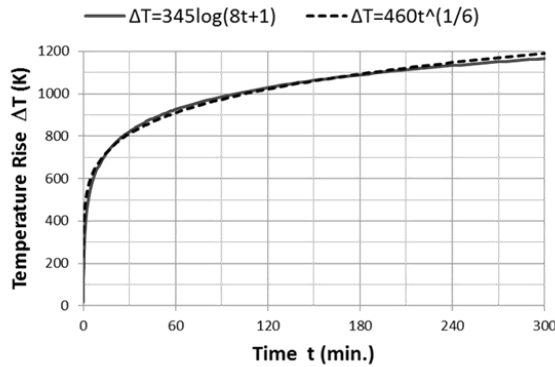


図 2.4 式 2.1 と ISO834 の温度時間曲線の比較

(2) 標準火災区画(Benchmark fire compartment)

耐火試験の装置と加熱温度曲線からは具体的な火災区画を想像することは難しいが、式(2.1)で $\Phi / I_B = 0.0175$ の条件に対応する火災区画を特定することは容易なので、これを仮に標準火災区画（Benchmark fire compartment, 規模を問わず存在する）と定義すれば、ISO834 シリーズの耐火試験で加熱を受ける部材は、標準火災区画において同じ温度に曝される部材と見做すことが出来、また、任意の火災区画と耐火試験における建築部材の加熱条件の差は、標準区画の Φ / I_B との差によって評価が可能になる。

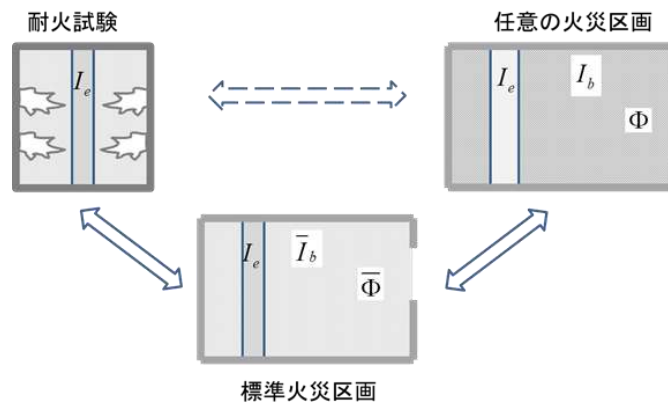


図 2.5 耐火試験と標準火災区画（Annex A7 参照）

(3) 耐火試験における耐火時間と区画火災の火災継続時間

区画火災では室内の火災の継続に伴って火災荷重が減少する。その質量燃焼速度 m_b が火災中一定であれば火災荷重が燃え尽きる時間が火災継続時間 τ_D である。この火災継続時間 τ_D と耐火試験における耐火時間とはどんな関係にあるのだろうか？

耐火試験からは火災継続時間の情報は勿論得られないが、標準火災区画を想定すれば、良く知られた川越・関根による可燃物の質量減少速度、 m_b 、の関係が使えるから

$$m_b = \frac{wA_{FLR}}{\tau_D} \approx 6A_w\sqrt{H_w} \quad (2.2)$$

ここに、 w = 火災荷重密度 (kg/m²)、 A_{FLR} = 火災区画の床面積(m²)、 τ_D = 火災継続時間(min.)

従って、火災継続時間 τ_D に対応する火災荷重密度 w は

$$w = \frac{6A_w\sqrt{H_w}}{A_{FLR}}\tau_D = 6\left(\frac{A_w\sqrt{H_w}}{A_T}\right)\left(\frac{A_T}{A_{FLR}}\right)\tau_D = 6\left(\frac{\Phi}{I_B}\right)\left(\frac{A_T}{A_{FLR}}\right)I_B\tau_D \quad (2.3)$$

ここで、標準火災区画では上記のように火災区画の規模に関わらず $\Phi/I_B = 0.0175$ であるが、 (A_T/A_{FLR}) は規模によるので、事務所と共同住宅の平均的形状の区画の面積がそれぞれ 1500m² と 72m² の場合の例について概算すると次のようになる。(Annex A10 参照)

$$\frac{A_T}{A_{FLR}} = \begin{cases} 2.43 & (H = 4m: \text{事務所}) \\ 3.5 & (H = 3m: \text{住宅}) \end{cases} \quad (2.4)$$

これらの値を用いて標準火災区画の火災荷重密度 w の減少量の計算結果を表 2.2 に示している。

事務所では1時間当たりの減少量は区画壁が普通コンクリートの場合 26.2kg/m²、軽量コンクリートの場合 16.4kg/m²となる。また共同住宅では、普通コンクリートの場合 37.7 kg/m²、および軽量コンクリートの場合 23.6 kg/m²となる。

表 2.1 中の構造部材の崩壊確率の値は、時間 τ_D 迄の燃焼によって消費されないで積載火災荷重が残っている確率を計算して構造部材の崩壊確率としたものである。例えば、耐火試験で1時間の加熱に耐えた建築部材は、標準区画の事務室の区画壁が普通コンクリートであれば、積載火災荷重密度が 26.2kg/m²消費されるまでの加熱に耐えたに過ぎないので、火災荷重密度がこれを超える確率、すなわち構造部材の崩壊確率は 54.4%になり、軽量コンクリートであれば 16.4 kg/m²消費されるまでの加熱に耐えたに過ぎないので、崩壊確率は 88.6%となる。

但し、この結果はあくまで標準火災区画での議論である。実際の空間では $A_w\sqrt{H_w}$ の値によって、式(2.3)の Φ/I_B 値が大きくなり、積載火災荷重密度の消費速度が増える場合が多い。また、構造部材に作用する荷重は、耐火試験時と同様に長期に許容される最大の荷重が作用しているとの前提に基づいている。一般に、耐震設計された建築物においては、建築物の柱の長期荷重に対する作用荷重の比は低層階ほど大きく、梁では小さくなる。鉄骨造の柱、梁の長期許容荷重に対する作用荷重の比(荷重比)は、90%タイル値で概ね 50%程度であり、実際の構造体は耐火試験時に比べて余裕がある。

表 2.1 標準区画火災における火災継続時間に対する積載火災荷重密度の減少量と構造部材の崩壊確率

耐火時間 h	普通コンクリート				軽量コンクリート			
	事務所		共同住宅		事務所		共同住宅	
	火災荷重密度	崩壊確率(%)	火災荷重密度	崩壊確率(%)	火災荷重密度	崩壊確率(%)	火災荷重密度	崩壊確率(%)
0	0	100	0	100	0	100	0	100
1	26.2	54.4	37.7	31.7	16.4	88.6	23.6	82.2
1.5	39.3	20.1	56.6	4.5	24.6	60.2	35.3	39
2	52.4	6.6	75.4	1.7	32.8	33.9	47.1	12.7
3	78.6	0.7	113.1	0	49.2	8.7	70.7	9

表 2.2 収納可燃物調査データによる火災荷重密度の平均と標準偏差

建物用途 室用途	事務所 事務室	集合住宅 居室	物販店舗 売り場	学校 教室	ホテル 客室
火災荷重密度 平均 μ_w	30.1	34.0	21.5	18.6	11.8
標準偏差 σ_w	13.5	11.7	9.6	6.2	1.7
対数正規分布 平均 $\mu_{\ln,w}$	3.3129	3.4704	2.9772	2.8705	2.4578
標準偏差 $\sigma_{\ln,w}$	0.4281	0.3345	0.4264	0.3246	0.1433

表 2.3 鉄骨造建物の構造部材の長期許容荷重に対する作用荷重の比(90%タイル値)

	柱の荷重比	梁中央部の荷重比
1 時間耐火構造	0.3	0.5
2 時間耐火構造	0.4	0.4
3 時間耐火構造	0.5	0.3

[参考文献]

1. B.J. McCaffrey, J.G. Quintiere, M.F. Harkleroad: Estimating room fire temperature and the likelihood of flashover using fire test data correlations, *Fire Technology*, 17,2, pp98-119, 1981
2. 田中哮義：第3版 建築火災安全工学入門、日本建築センター、令和2年3月
3. 大内富夫ら：建築構造物の長期設計荷重時応力 その1～4、日本建築学会大会梗概集、1997

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

リスクという言葉は日常生活や色々な分野で頻りに読み聞きする言葉である。それだけ多義的に使われる用語なのであろう。最も多くの場合に意味されるのは、何かしら危険なこと、損失、失敗などネガティブなことが起る可能性のことではなかろうか。このような不都合なことが起る可能性が危惧される場合でも、それに対して何ら具体的な行動を起こすことなく心配するだけで済まされるものも多い。

一方で、何等かの対応策を講じるかどうかの意思決定が必要なときには、その不都合なことが発生する可能性の高さ、発生した場合の結果の深刻さの度合い、発生を防ぐための対応策やそのコストの現実性などが総合的に検討されるであろう。

前者の場合のリスクは不都合なことが起る確率を意味し、後者の場合のリスクは不都合なことが起る確率と同時に起きた時の結果の重大性を合わせ考えていることになるであろう。この意味でのリスク評価を考える場合、一般には確率と結果の大きさの両方とも利用可能なデータを得られない困難が伴う場合が多いと思われる。しかし、建築火災のリスクについては十分ではないにしても、ある程度の統計データは存在するし、損失規模の最大も建築物の規模のオーダーであり、また損失防止対策についての技術的・経済的対応についても殆ど困難は無いレベルにある点で有利性があると考えられる。

3.1. リスクの定義

ここで用いるリスクは損失の規模とその発生確率の積、すなわち損失の期待値の意味で使う。これは数式では次式で明快に表される

$$R=PC \quad (3.1)$$

ここに R : 損失リスク
 P : 損失の発生が生起する確率
 C : 損失の規模

病気、事故、自然災害など、どんな種類のリスクもゼロには出来ないから、リスクへの対応策とは、リスクを許容可能レベル以下に抑制することに他ならない。耐火設計[耐火性能検証]も同様であり、火災に因る建物崩壊のリスクを許容可能レベル以下に抑制するための対応策である。式で表現すれば

$$R(=PC) \leq R_a \quad (3.2)$$

ここに R_a : 許容リスク

これから分るように、リスク R を許容値以下に抑制するには確率 P あるいは損失の規模 C のいずれか、または両方、を必要なだけ小さくすれば良い。

3.2. 建築物の崩壊リスク

建物構造は多数の構造部材で構成されるので、一部の構造部材が火災加熱で崩壊しても建築物が崩壊しない場合も十分考えられるが、簡単のため耐火性能検証法に倣って、構造部材の崩壊をもって建物崩壊と見做す。従って、建物崩壊リスク R は式(3.1)に当てはめて次のように定義する。

$$R = (\text{構造部材の崩壊確率}) \times (\text{建物崩壊による損害規模})$$

(1) 構造部材の崩壊確率

火災による構造部材の崩壊は、

通常時→出火→初期消火の失敗→室火災へ成長→室火災の抑制失敗→火災加熱による温度上昇により構造部材が崩壊

という一連のステージを経て生起するものであり、各ステージの移行にはそれぞれ確率が生じる。構造部材の崩壊確率はこれらのステージ移行確率の積となる。

(2) 建物崩壊による損害規模

崩壊によって発生する損害には、当該建物の人的・経済的損害、建物倒壊が周辺に及ぼす損害、当該建物が社会的に対して果たしていた機能の喪失など、色々なものが考えられるが、いずれもその損害規模は

概ね建築物の階数×床面積に比例する程度になると考えられる。

(3) 火災による建築物の崩壊リスク

以上を考慮すれば確率 P と損害 C の部分はそれぞれ次のようになる。

$$P = (p_f A_f^{1/2}) Y_L P_{FO} P_{n-sup} P_{fail}, \quad C = N \cdot A_{FLR} \quad (3.3)$$

ここに p_f : 単位面積当たりの成長火災（小火は除く）の1年当たりの発生確率

A_f : 火災区画（防火区画）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による温度上昇により崩壊する確率

A_{FLR} : 階の床面積

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）

従って、建物崩壊リスク R は次のように書ける。

$$R(= PC) = (p_f A_f^{1/2}) Y_L P_{FO} P_{n-sup} P_{fail} (N \cdot A_{FLR}) \quad (3.4)$$

なお、 $(p_f A_f^{1/2})$ は出火区画での出火率であるが、単純に面積 A_f に比例するというより、 A_f が大きくなるに従い出火率の増加が鈍る傾向にあることを考慮した（Annex 11 参照）

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

式(3.2)により、如何なる建築物も崩壊リスク R の値は、許容リスク R_a 以下でなくてはならない。許容リスク R_a の値は、火災による崩壊リスクが許容レベルにあると認められる建築物を選定して標準建物（Benchmark building）とできれば、その条件を式(3.4)に代入して下式のように求められる。

$$R_a = (\bar{p}_f \bar{A}_f^{1/2}) \bar{Y}_L \bar{P}_{FO} \bar{P}_{n-sup} \bar{P}_{fail} (\bar{N} \cdot \bar{A}_{FLR}) \quad (3.5)$$

なお、この式中の変数の頂部アクセントは標準建物の値であることを示す。すると、 $R \leq R_a$ の条件から任意の建築物について

$$(p_f A_f^{1/2}) Y_L P_{FO} P_{n-sup} P_{fail} (N \cdot A_{FLR}) \leq (\bar{p}_f \bar{A}_f^{1/2}) \bar{Y}_L \bar{P}_{FO} \bar{P}_{n-sup} \bar{P}_{fail} (\bar{N} \cdot \bar{A}_{FLR}) \quad (3.6)$$

これから任意の建築物の構造部材の許容崩壊確率を $P_{a,fail}$ とすると

$$P_{a,fail} = \bar{P}_{fail} \left(\frac{\bar{p}_f}{p_f} \right) \left(\frac{\bar{A}_f}{A_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{Y}_L}{Y_L} \right) \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{\bar{P}_{n-sup}}{P_{n-sup}} \right) \left(\frac{\bar{N} \cdot \bar{A}_{FLR}}{N \cdot A_{FLR}} \right) \quad (3.7)$$

すなわち、任意の建築物の許容崩壊リスクがその構造部材の許容崩壊確率に帰着される。

3.4. 設計火災荷重密度

許容崩壊リスクを与える標準建物の条件が特定出来れば、式(3.7)によって任意の建築構造部材の許容崩壊確率 $P_{a,fail}$ が決定できる。次の課題は、この $P_{a,fail}$ を耐火設計[耐火性能検証]においてどう反映させるかである。

性能的耐火設計[耐火性能検証]では、設計火災荷重密度 w_D を設定し、その下で構造部材の崩壊が起らないことを工学的に検証する。この w_D は実際には確率分布する火災荷重密度 w の中から1つの値を選んで定めたものであるから、 $w > w_D$ となる確率は存在する。耐火設計[耐火性能検証]では、その場合の安全性は保証しないのであるから、設計火災荷重密度 w_D を設定することは、構造部材が火災で崩壊する確率が

一定程度残ることを許容することでもある。下図 3.1 に示す $1 - F(w_D)$ がその確率である。式で表せば

$$P_{a,fail} = \int_{w_D}^{\infty} f(w)dx = 1 - \int_0^{w_D} f(w)dx = 1 - F(w_D) \quad (3.8)$$

そこで、 $F(w_D) = P_{a,fail}$ (許容崩壊確率) とすれば、それ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。この w_D の計算は、確率密度関数 $f(x)$ を対数正規分布とすれば、

$$w_D = \ln^{-1}(1 - F(w_D), \mu_{\ln w}, \sigma_{\ln w})$$

として求めることができる。(Annex 3, 4 参照)

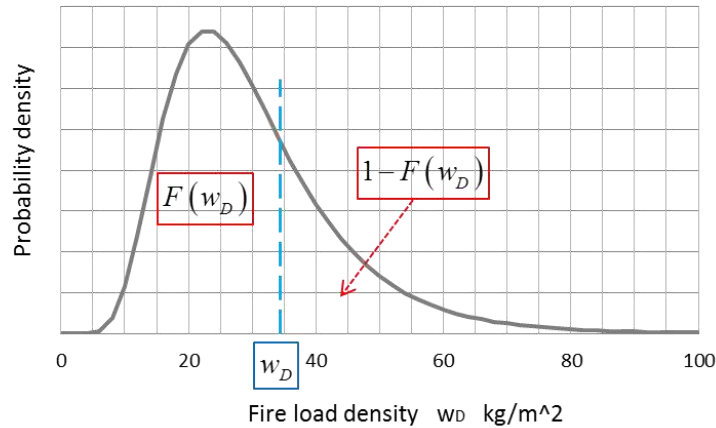


図 3.1 許容崩壊確率と設計火災荷重密度

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

許容崩壊リスク R_a は数値で定義することも不可能ではないが、それだと抽象的で許容されている崩壊リスクとはどの程度ものなのかが直観的に捉えにくい。一方、その許容崩壊リスク R_a を代表する建築物が具体像として示されれば、その建築物が火災で崩壊する可能性や生ずる損害の規模がイメージでき、耐火設計[耐火性能検証]の目標が把握し易くなる。このような建築物を標準建物あるいは **Benchmark building** と言うことにする。言わば標準建物は許容崩壊リスクという抽象的な基準を具体的に可視化するような建築物である。

標準建物は、多くの人にイメージし易い一般的な建築物で、火災による崩壊で重大な損害を生じる可能性が十分小さいが経験的に知られているものを選ぶようにする。

(1) 建基法施行令第 107 条による耐火規定による場合

建基法 107 条の耐火規定は昭和 36 年 (1961) に制定されたが、2.1 で記述したように、ベースになったのは 1 時間耐火構造とされた 4 階建ての RC 共同住宅と 1.5 時間耐火構造とされた 9 階建て RC 造建物 (おそらく大半は事務所などの用途) であった。これらは標準建物の有力候補となるが、令第 107 条の耐火規定は階数のみによる規定なので、許容崩壊確率の式(3.7)は次のような簡単な式となる。

$$P_{a,fail} = \overline{P_{fail}} \frac{\bar{N}}{N} \quad (3.9)$$

先の標準建物の 2 つの候補について、 $\overline{P_{fail}}$ には先の表 2.2 に示した崩壊率の値を使えば、

$$P_{a,fail} = \begin{cases} 0.2 \left(\frac{9}{N} \right) & (\text{基準: 9 階、火災区画} = \text{事務所}) \\ 0.32 \left(\frac{4}{N} \right) & (\text{基準: 4 階、火災区画} = \text{共住}) \end{cases} \quad (3.10)$$

下図 3.2 は式(3.10)の 2 つの式で許容崩壊確率が建築物の階数によってどう変わるかを比較したものである。9 階事務所を基準にした方が全体的に緩めになるが、大局的にはどちらでも大差は無いと言えるで

あろう。

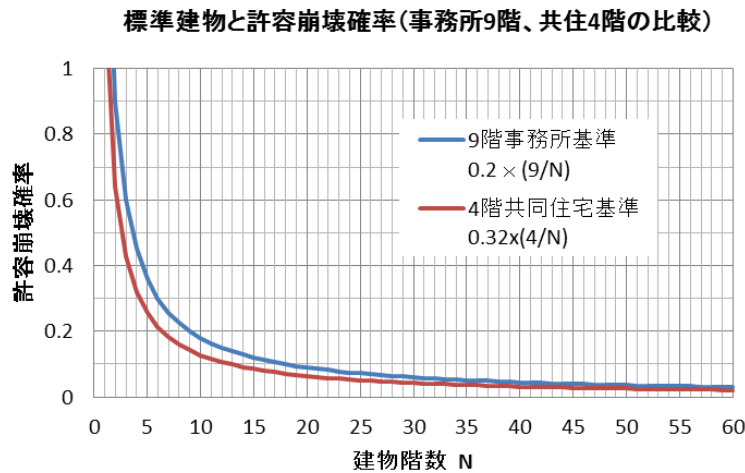


図 3.2 許容崩壊率の比較（4 階共住と 9 階事務所を標準建物とした場合）

(2) 崩壊リスクに関わる因子を組み込んだ場合

(2-1) 許容崩壊率の基準

施行令第 107 条の耐火規定のように階数だけで構造部材の許容崩壊確率が決まるシステムだと、構造物を火災から護るための様々な因子が評価に反映されないので、設計する建築物の特徴を生かして、より合理的・効果的な耐火設計[耐火性能検証]を工夫するインセンティブが損なわれることになる。

建築物は構造骨組みだけで出来ているのではなく、骨組みに支えられた多くの空間と一体となって建築物の耐火性を性格づけている、実際、表 2.2 の崩壊確率を計算するにも、火災区画の形状を仮定する必要があった。それらの空間の性格が構造骨組みに火災危険をもたらす原因ともなり、逆に保護する役目を担っているのである。

構造的観点だけで言えば、標準建物として一応 4 階建ての共同住宅と 9 階建て事務所建築が候補になるが、50 階規模の建築物は普通に見られ、更に高層の建築物も増加して行く潮流にある状況の中では、4 階の小規模な共同住宅を標準建物とするのは余りにかけ離れて過ぎている感がある。また共同住宅は用途の性格から空間構成的にも画一性が高いので、耐火設計[耐火性能検証]における選択肢の幅も狭い。

一方、事務所は共同住宅より歴史が古く、明治時代初期から存在しており、高さはほぼ 31m に制限されて来たものの、多様な用途に使われて来た実績があるので、9 階建て事務所用途ビルを標準建物に選ぶ方が適切であろう。そこで、式(3.7)に 1.5 時間耐火性能の崩壊確率を用い $\overline{P}_{fail}=0.2$ とすれば

$$P_{a,fail} = 0.2 \left(\frac{\overline{p}_f}{p_f} \right) \left(\frac{\overline{A}_f}{A_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\overline{Y}_L}{Y_L} \right) \left(\frac{\overline{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{\overline{P}_{n-sup}}{P_{n-sup}} \right) \left(\frac{\overline{N} \cdot \overline{A}_{FLR}}{N \cdot A_{FLR}} \right) \quad (3.7')$$

(2-2) 許容崩壊率式の各パラメタの値

式(3.7') の右辺の各パラメタにおいて分子は標準建物に対する値、分母は任意の建築物に対する値であるが、式(3.7') の許容崩壊確率はそれらの比で与える形を取っている。

分子の値は標準建物を特定すれば具体的な値を代入することが可能である。しかし、式中のパラメタはこのまま比の形にしておく方が、設計対象の建築物が標準建物と比較して、どの面で、どのくらい有利なのか不利なのか解り易い点で便利である（比の値が大きいくほど有利、小さいほど不利）。また、例えば建物崩壊による被害規模など、正確に見積ることが実際には困難なパラメタでも比を取れば見積もりに共通する因子は相殺されて単純化されることも利点である。

(\bar{p}_f/p_f) : 単位床面積当たりの空間用途別年間出火率比

このパラメタの p_f は空間の単位床面積当たりの年間出火率である。実際の数値を見せられてもイメージがわからない位に小さい値になるが、対象建物と標準建物とで比をとることで親しみやすい範囲の数値になる。

建築空間の用途には出火が起り易い用途と起り難い用途がある。単位床面積当たりの出火率は、出火の起り易さに関する空間用途の特性を建物崩壊リスクに反映させるためのものである。

出火率が火気を使用する空間は高く、火気を使用しない空間は低いなどは容易に推察されるが、その他にも様々な要因が関係すると思われるので、火災統計に基づいて定める。空間用途別の出火率比は池島、野竹等により火災統計の分析を基に、戸建住宅を基準として求められているが、下表 3.1 はその値を事務所を基準として書き直したものである。

因みに、小火は構造耐火の問題には影響しないので、ここでの出火は、成長火災のみを対象とする。但し、いずれの用途でも概ね‘成長火災数 \propto 全出火火災数’と考えれば、このパラメタを比の形で扱う以上、総出火数を対象として算出した値としても大きな誤差は生じないと思われる。

表 3.1 事務所を基準とした代表的空間用途での面積当たり出火率比

	集合住宅	飲食店	物販店舗	事務所	ホテル	病院	学校	劇場
(\bar{p}_f/p_f)	0.37	0.12	1.75	1	0.75	2.2	2.4	0.3

(\bar{A}_f/A_f) : 防火区画の床面積比

出火率は空間用途の特性に加えて空間の面積に依存する。ここでは出火空間の面積 A_f は防火区画の面積とし、防火区画の面積はわが国では従来 1500m² を最大としてきたので標準建物では $\bar{A}_f = 1500 \text{ m}^2$ とする。防火区画内には普段の使用上色々な間仕切りも出来るが、それらの延焼防止性能は一般に高くはないし、また随時の変更も有り得るためである。

出火空間の出火率は床面積の 1/2 乗に比例するものとする。もし、出火源となる様々な火気やエネルギー源が空間規模とともに増えるのであれば出火率は面積に比例すると考えられる。しかし、例えば住宅のようにキッチンのように、特定の火源の出火の影響が圧倒的な空間であれば出火率は面積に関わらず一定に近いであろう。統計的に表れる出火率はこれらの 2 タイプの出火源の影響が混在していると考えられる。(Annex A11 参照)

(\bar{Y}_L/Y_L) : 建築物の耐用年数の比

建築物が使用される年数が実際何年になるかは良く分らない。時々修理や改修を繰り返しながら百年を超して使い続けられる建築物もあれば、新築後さほど年月は経っていても機能の陳腐化や経済環境の変化によって短時間で解体・除却されてしまう建築物もある。

耐用年数の統計データを見つけることは難しいが、税法上の減価償却に関して構造別に法定耐用年限が定められており、経済的、技術的な状況を考慮して時々見直しが行われている。これは建築物の物理的耐用年限とも実際に使用されている年数とも異なるが、経済的な状況の変化なども考慮されている点で、より現実性がある。税法上の耐用年数なので実際の使用年数とは組織的誤差が存在すると思われるが、ここで使うのが標準建物との比なので、実際との誤差は酷く大きくならないと思われる。

(\bar{P}_{FO}/P_{FO}) : 成長火災が区画盛期火災となる確率の比

発生した火災は全て成長して区画盛期火災となる訳ではない。成長の途中で自然鎮火したり、人によって消火されるものもあり、またスプリンクラー (SP) が設置されていればその効果で鎮火したり火勢が抑制される場合もある。山口、池島など^[4]によれば SP が有効に火災の制御に成功する確率は 80% とされ、

またカナダ国立研究所 (NRCC) による北米の火災調査⁴⁾によれば、スプリンクラーが設置された室では設置されない室に比較してフラッシュオーバーの発生確率が 1/5~1/3 くらいに低減するようである。これらを考慮して、ここでは成長火災が区画盛期火災となる確率の比を下記のように定める。

$$\left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}}\right) = \begin{cases} 1 & (\text{Sprinkler 有り}) \\ 4 & (\text{Sprinkler 無し}) \end{cases}$$

$(\bar{P}_{n-sup}/P_{n-sup})$: 消防隊による火災抑制失敗確率の比

建築物に備えられた各種防火設備は作動失敗の可能性を無視できないが、消防隊の出動が盛期火災段階になっても無いということはある得ない。しかし、盛期火災を有効に抑制できるか否かは、火災規模と消火力との力関係次第である。

火盛り期の区画火災の規模は火災区画の大きさ程度と考えて、しごく合理的であろう。一方で消火力は公設消防の有する人員・装備の量が最大値となるが、それが全て有効に機能するとは限らない。

①低層の建築物、あるいは建築物の低層部の火災であれば建物周囲の地上から放水可能なので持てる消火力を有効に発揮できる可能性が高い。しかし、これが可能なのは精々3階くらい迄ではなかろうか。

②出火階がそれ以上の高さになれば梯子車からの放水に依るか建築物に進入しての放水になるので、消火力は格段に落ちてくる。更に

③出火階が梯子車の届かない高さになると建物内部に進入しての放水のみになるので消火力は極めて限定されることになる。

しかも、これらは楽観的な評価である。建築物が密集した市街地に立つ状況を考量すれば、

① 出火室が公道など消防隊が放水可能な空地に面していない可能性も大きい。

② 地上からの高さだけ見れば梯子車が架梯可能な高さであっても、実際に架梯可能な室は限られており。建物内部に進入して放水するしかない室が多い。

③出火室が梯子車の架梯高さを越えた階にある場合は建物内部からの放水のみになるが、大きな区画でも火災時に放水ポイントとなる開口はごく限定されている。

以上のように、このパラメタについては検討すべきことが結構多いので今後の課題として、今回は評価方法を保留しておく。但し、消防隊による消火に関する因子は非常に重要と考えられる。

$(\bar{N} \cdot \bar{A}_{FLR} / N \cdot A_{FLR})$: 建築物の階の総床面積 (出火階以上の階)

建築物が崩壊した場合の被害は、人命、財産、社会的影響など多岐に亘るが、具体的にそれがどれだけの値になるかの算出は難しい。しかし、大まかには崩壊した建築物の規模に比例すると考えることには合理性があるであろう。すると算出方法が具体的に決まらなくても、比をとれば建築物の規模だけの関係となる。標準建物の階床面積は、階の床面積=防火区画面積(1.500m²) + 共用部分と考えて、その共用部分を500m²とした。すなわち $\bar{N} \cdot \bar{A}_{FLR} = 9 \times 2000$ である。

近年は階の床面積が4000~6000m²にもなる大規模な高層建物も多く出現しているが、それでも高層建物全体の中では稀であろうし、まして現在の耐火基準が出来た1961年以前の建築物の中では大きい部類に属する床面積と考えられる。

因みに対象建物の床面積が階によって異なるときは、 A_{FLR} を平均しても良いし、合計 $\sum_{i=1}^N A_{FLR}(i)$ を取っても良い。

(2-3) 階数以外のパラメタ値が標準建物と同じ建築物の階数と許容崩壊確率と設計火災荷重密度

設計の対象建物で式(3.10)のパラメタ値が標準建物と同じと言うことは普通はないが、仮に建物階数(N)以外のパラメタ値が全て同じならば、構造部材の許容崩壊確率 $P_{a,fail}$ は式(3.9)の上の式

$$P_{a,fail} = 0.2 \left(\frac{9}{N} \right) \quad (3.10')$$

に帰する。

この場合の $P_{a,fail}$ と建物階数(N)との関係を示す下図 3.3 のようになる。なお表中の破線は耐火性能検証法における許容崩壊確率であるが、設計火災荷重密度 w_D を階数に依らず一律に 35kg/m^2 としているため、高層の建築物でも大きな崩壊確率が許容され、反面で低層の建築物でも小さな崩壊確率しか許されない構造となっている。(参照 Annex A1、Annex A2)

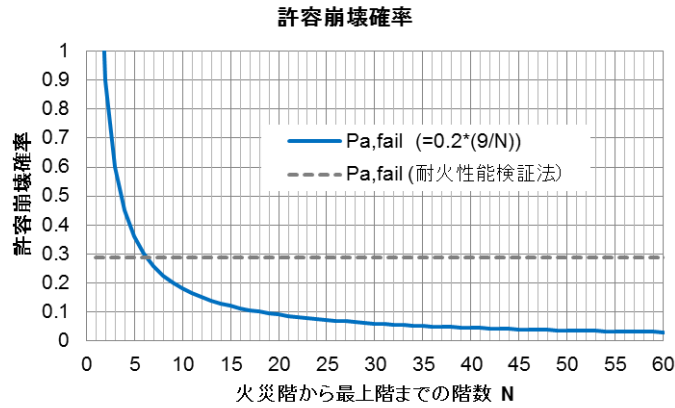


図 3.3 建物階数 N と構造部材の許容崩壊確率 (階数以外は標準建物と同じ場合)

上図 3.3 の許容崩壊確率に対応する設計火災荷重密度 w_D を示せば下図 3.4 のようになる。)破線は上述した耐火性能検証法の設計火災荷重密度である。

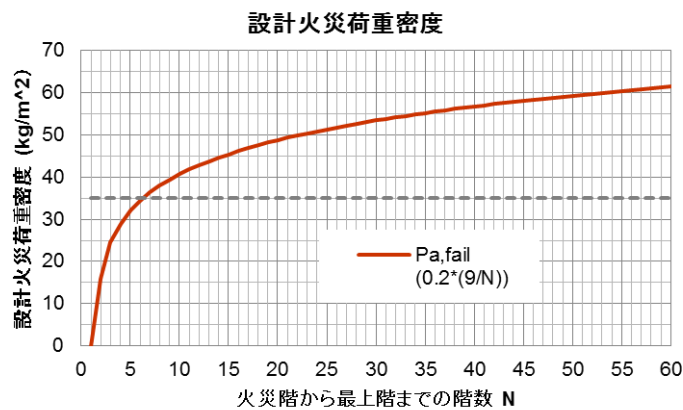


図 3.4 建物階数 N と設計火災荷重密度 (階数以外は標準建物と同じ場合)

3.6. 設計火災荷重密度の計算手順

今回の手法の目的は、建築物の規模、火災抑制機能、空間用途に依る出火率を考慮した建築物の崩壊リスクに基づいて、耐火設計[耐火性能検証]に求められる設計火災荷重密度を決めることであり、その手続きは下記に示すような(1)~(3)の非常に簡単な手順のみである。

(1) 構造部材の許容崩壊確率 $P_{a,fail}$ の計算

耐火設計[耐火性能検証]の対象となる建築物の条件に依るパラメタの値を下式に代入して構造部材の許容崩壊確率を計算する。

$$P_{a,fail} = 0.2 \left(\frac{\bar{p}_f}{p_f} \right) \left(\frac{\bar{A}_f}{A_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{Y}_L}{Y_L} \right) \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{\bar{P}_{n-sup}}{P_{n-sup}} \right) \left(\frac{\bar{N} \cdot \bar{A}_{FLR}}{N \cdot A_{FLR}} \right) \quad (3.7'再掲)$$

(2) 設計火災荷重 w_D の計算

積載火災荷重密度 w の確率密度関数を対数正規分布として、許容崩壊確率 $P_{a,fail}$ から設計火災荷重密度 w_D を次式により逆算する。エクセルでは下記に依れば計算出来る。

$$w_D = \text{LOGNORM.INV} (1 - P_{a,fail}, \mu_{\ln,w}, \sigma_{\ln,w})$$

表 3.2 建物空間用途による火災荷重密度のデータ

建物用途 室用途	事務所 事務室	集合住宅 居室	物販店舗 売り場	学校 教室	ホテル 客室
火災荷重密度 平均 μ_w	30.1	34.0	21.5	18.6	11.8
標準偏差 σ_w	13.5	11.7	9.6	6.2	1.7
対数正規分布 平均 $\mu_{\ln,w}$	3.3129	3.4704	2.9772	2.8705	2.4578
標準偏差 $\sigma_{\ln,w}$	0.4281	0.3345	0.4264	0.3246	0.1433

(3) 設計火災荷重 w_D の下で耐火性検証

設計火災荷重 w_D の下で通常行われている耐火性能検証を行う。

(今回の手法では手順(3)以降の手順は対象としない。従って、実質的に手順は(1)、(2)のみが対象)

[参考文献]

1. J. L. Gross, Fire-Structure Interaction: U.S. Perspective, Operation Tomodachi – Fire Research, NIST, 2015.3
2. 国土交通省住宅局建築指導課等編集：2001年版 耐火性能検証法の開設及び計算例とその解説、井上書院、平成13年3月
3. 野竹宏彰、池畠由華、山口純一、田中哮義：住宅・共同住宅火災の統計的分析に基づく設計避難リスクの算出—火災安全設計における設計避難リスクに関する研究—、日本火災学会論文集、Vol.61、No.2、pp1-12、2011
4. 池畠由華、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—火災安全設計における設計避難リスクに関する研究—、日本火災学会論文集、Vol.61、No.2、pp37-46、2011
5. J. Gaskin and D. Yung: Canadian and U.S.A. Statistics for Use in the Risk-Cost Assessment Model, Internal Report (NRCC, Institute for Research in Construction), 1993-01

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

上記 3. では建築物の崩壊リスクを許容レベル以下に抑制するという観点にたつて、耐火設計[耐火性能検証]で設定すべき設計火災荷重密度を定める方法を提案した。しかし、このような方法は、安全面でも技術・経済面でも、妥当なものとして耐火設計[耐火性能検証]実務で受容されるようであれば実務的な価値が生じない。ここでは、この方法によって実際の耐火設計[耐火性能検証]が可能か否かをケーススタディによって検討する。

現行の耐火規定は既に半世紀に亘る長期間運用され、それに基づいて多くの建築物が建設されて来ている。その間、耐火上特に深刻な問題を生じた事例は殆ど無かったと言っても過言ではないであろう。また当初は有ったかも知れない耐火建物の設計・建設に関する技術上・経済上の諸課題にも現在では殆ど対応が出来ていると考えられる。社会的に許容される耐火性能のレベルについて明確な定義は無いが、このような状況が社会的に許容されたレベルと言うべきであろう。

現行の耐火基準に様々な不合理や不経済はあるが、経験に裏打ちされない新たなシステムには想定外の初期故障も潜在している可能性がある。実際の建築物を建造することは紙上に絵を描くこととは違うのであるから、まずは従来の経験と近いところから出発し、研究と経験を蓄積しながら慎重に合理化を進めて行くのが賢明であろう。

以下のケーススタディでは、特に高層建物として計画される頻度が高い、事務所建築と集合住宅建築についてリスク基盤の設計火災荷重密度設定がどのレベルの耐火要求につながるのかを調べることを目的としている。

ケーススタディでは上記 3.6 の方法に従って建物階数・規模による設計火災荷重を設定し、SP の有無、火災区画の温度因子が異なる場合の火災継続時間を計算している。なお、

- 本方法の理解のし易さのために、火災荷重は積載火災荷重のみを対象とした。(実際の設計では固定火災荷重は別個に考慮すれば良い)
- 構造部材の許容崩壊確率の式については、耐用年限と消防活動による火災抑制効果に関する因子を割愛した次式とした。

$$P_{a,fail} = 0.2 \left(\frac{\bar{p}_f}{p_f} \right) \left(\frac{\bar{A}_f}{A_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{\bar{N} \cdot \bar{A}_{FLR}}{N \cdot A_{FLR}} \right) \quad (4.1)$$

以下のケーススタディの説明および結果の考察には幾つかの数式や用語が出てくる。これらの殆どは区画火災の条件に関するものであり、上記 2.、3. 節および Annex に既出であるが読者の便宜のために主なものを下記に挙げておく。

A_f	: の出火空間 (防火区画) の床面積[m ²]
A_{FLR}	: 階の合計床面積[m ²]
A_T	: 火災区画の周壁 (床、天井、壁) 面積[m ²]
$A_w \sqrt{H_w}$: 火災区画の換気因子[m ^{5/2}]
I_B	: 火災区画周壁の熱慣性
Φ	: 温度因子 (= $A_w \sqrt{H_w} / A_T$) (注)
Φ / I_B	: 温度因子 (注)
N	: 建物最上階から火災階までの階数
P_{fail}	: 構造部材の許容崩壊確率
P_{FO}	: 出火した火災が区画火災に拡大する確率
p_f	: 出火空間の単位面積当たり出火率
τ_D	: 火災継続時間 [min]
w	: 火災荷重密度 (木材換算) [kg/m ²]
w_D	: 設計火災荷重密度 [kg/m ²]

(注) : 川越・関根により区画火災性状に関する換気因子 ($A_w \sqrt{H_w}$) が発見された 1950~1960 年頃には温度の支配因子として $A_w \sqrt{H_w} / A_T$ が定着したようである。しかし、軽量コンクリートなど断熱的区画材が普及した現在では、温度評価に熱慣性 I_B を考慮する必要があるが生じている。(Annex A5 参照)

4.1. 事務所建物のケーススタディ

ここでは許容崩壊確率の式(4.1)を事務所建物に適用してケーススタディを行う。

式(4.1)は事務所建物を標準建物 (Benchmark building) とした式であるが、対象建物も事務所建物なので出火室も事務所として用途による出火率比 $\bar{p}_f / p_f = 1$ とする。火災区画 (=防火区画) の面積は一律に標準建物と同じく $A_f = 1,500 \text{ m}^2$ とする。

スプリンクラー (SP)については設置される場合と設置されない場合の両方について考える。事務所用途の建築物は規模、階数ともに幅が広いので、階の総床面積については $A_{FLR}=2000, 3000, 4000\text{m}^2$ の3ケース、階数は1~100階を対象として計算した。具体的には下式による計算である。

$$P_{a,fail} = 0.2(1)(1)^{1/2} \left(\frac{\bar{p}_{FO}}{p_{FO}} \right) \left(\frac{9 \times 200}{N \times A_{FLR}} \right) \quad (4.2)$$

表 4.1.1 事務所建築のケーススタディの条件

出火率比 \bar{p}_f/p_f	出火室(防火区画)面積 A_f	区画火災拡大確率比 \bar{P}_{FO}/P_{FO}	階床面積 A_{FLR}	建物階数 N
1	1500	1, 4	2000, 3000, 4000	1 ~ 100

(1) 構造の許容崩壊確率

下図 4.1.1 は構造部材の許容崩壊確率、 $P_{a,fail}$ 、の建物階数 1~100 階に対する計算結果である。式 4.1 の形からも容易に分るように、 $P_{a,fail}$ 、は階数に反比例して減少する。低層建物では $P_{a,fail}$ は非常に大きくなり 1 を超える場合が出てくるが、この場合は耐火性能は要求しなくて良いことになる。階の面積によるが、図の結果からはスプリンクラー (SP) が無くても概ね階数 $N=2$ 程度まで、SP が有れば $N=7$ 程度まで耐火性能は不要となるので木造の事務所でも可能ということになる。但し、この計算条件では $A_f = 1,500 \text{ m}^2$ が前提となるので $1,500 \text{ m}^2$ 以内ごとの防火区画は必要となる。

なお直線は耐火性能検証法の許容崩壊確率で比較のため示している。耐火性能検証法では、階数や階床面積、更には SP の有無に拘らず、事務所の設計火災荷重密度は一律に 35kg/m^2 であるから、火災荷重密度の確率密度分布から、崩壊確率は 0.286 と計算される。

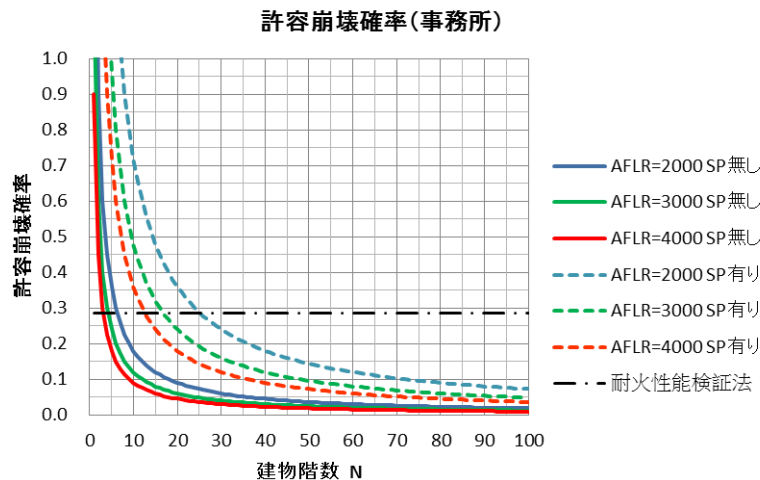


図 4.1.1 事務所建物の許容崩壊確率 $P_{a,fail}$ の例

(2) 設計火災荷重密度

耐火設計[耐火性能検証]のためには構造部材の許容崩壊確率($P_{a,fail}$)を設計火災荷重密度 (w_D) に変換する必要がある。記述のように、この計算はエクセル関数を使って次のようにとすれば計算できる。

$$w_D = \text{LOGNORM.INV} (1 - P_{a,fail}, \mu_{ln,w}, \sigma_{ln,w}) \quad (4.3)$$

下図 4.1.2 は設計火災荷重密度 (w_D) の計算結果である。階数が多くなるに従い大きくなるほど耐火設計[耐火性能検証]における設計火災荷重密度 w_D の値は大きくとる必要が有る。

因みに、図中の直線は耐火性能検証法における設計火災荷重密度の値 ($=35\text{kg/m}^2$) である。

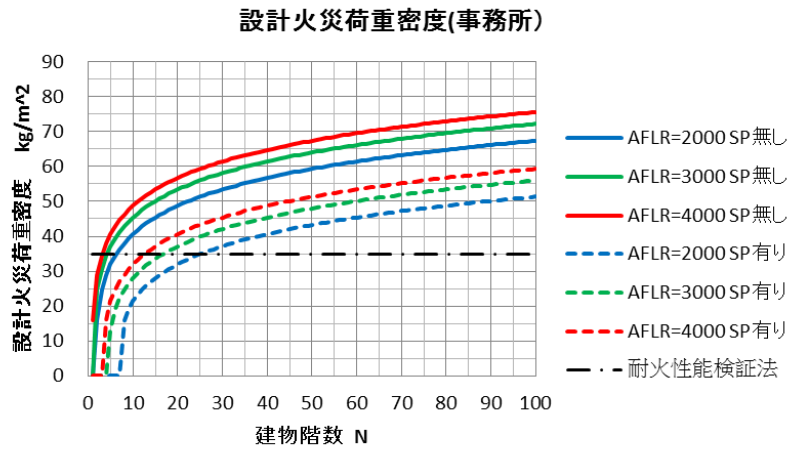


図 4.1.2 許容崩壊確率 ($P_{a,fail}$) から計算される設計火災荷重密度 (w_D)

(3) 通常の火災における火災継続時間

図 4.1.2 のように与えられる設計火災荷重密度 (w_D) は、高層建築の場合だと、耐火性能検証法の設計火災荷重密度の値 ($=35\text{kg/m}^2$) よりかなり大きくなるので、その設計火災荷重密度 (w_D) による火災継続時間 (τ_D) が幾らになるかは先ず興味のあるところである。

火災継続時間 (τ_D) は火災荷重密度が同じでも火災区画の条件に依存するので、その条件次第で長くも短くもなる。どこで先ず、比較の基となる‘通常の火災’における τ_D を明らかにしよう。

行政用語として‘通常の火災’と言う語は度々耳にする。その定義は必ずしも明確ではないが、耐火の分野に限れば火災温度が標準耐火試験の温度・時間曲線に従う火災と定義することも出来るであろう。区画火災で標準耐火試験の温度を生ずるのは、既に 2.3 に記したように、火災区画が $\Phi/I_B = 0.0175$ の条件にある場合である。

区画火災における質量燃焼速度に関する川越・関根の関係をを用いれば、火災継続時間 (τ_D) は次のように書ける。(参照：2.3、Annex A 7)

$$\tau_D = \frac{w_D A_f}{6 A_w \sqrt{H_w}} = \frac{w_D}{6 \frac{A_w \sqrt{H_w}}{A_T} \frac{A_T}{A_f}} = \frac{w_D}{6 \left(\frac{\Phi}{I_b}\right) I_b \frac{A_T}{A_f}} \quad (4.4)$$

ここで A_T/A_f は火災区画における床面積と周壁の総面積の比であるが、 1500m^2 の防火区画を標準火災区画としたから、ここではその平均的な形状を考えて、 $A_T/A_f \approx 2.44$ と見積ると (参照 Annex A10)。¹ ‘通常の火災’ (標準火災区画における火災) の継続時間 τ_D (min.) は

$$\tau_D = \frac{w_D}{6 \times 0.0175 \times 2.44 I_b} = 3.9 \frac{w_D}{I_b} \quad (4.5)$$

となる。(参照 Annex A10)。

しかし、 τ_D はなお周壁の熱慣性 I_b に依存するので、周壁が

(a) 普通コンクリート ($I_b = 1.71$) および (b) 軽量コンクリート ($I_b = 1.07$)

の場合について‘通常の火災’の継続時間 τ_D を計算した結果が、図 4.3 (a) および (b) である。この τ_D は部材が標準耐火試験と同じ温度に暴露される時間と考えて良い。

なお同図には比較のため、施行令第 107 条の耐火時間を実線で付記している。

(a) 区画周壁：普通コンクリート ($I_b = 1.71$)

図 4.3 (a)から、SP 設置が無い場合、階床面積が大きい建築物で階数が多くなると、火災継続時間、 τ_D 、は施行令第 107 条の耐火要求時間(3 時間)に近くなる場合も出てくるが、階床面積が 4000m^2 程度までのところ 100 階の建築物でも、施行令第 107 条の耐火時間以下となることが分る。実際には高層建築では消防法により SP の設置が求められるので、その場合は 100 階の建築物でも施行令第 107 条よりかなり短い 2 時間前後の継続時間となる。

因みに、耐火性能検証法の設計火災荷重密度は建物階数に依らず $35\text{kg}/\text{m}^2$ なので、これによる火災継続時間は、 $\tau_D = 3.9(35/1.71) \approx 80 \text{ min. } (\approx 1.33 \text{ h})$ と、SP 設置の場合に比較してもかなり短い値となる。

通常火災の継続時間(普通コンクリート壁)

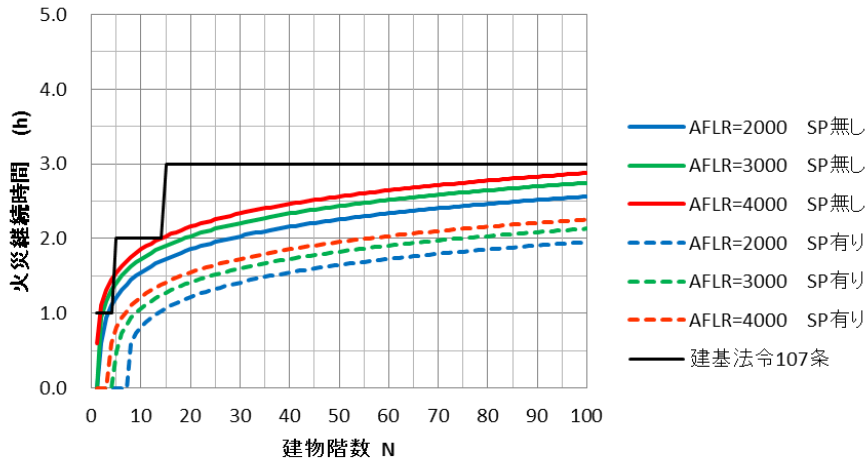


図 4.1.3(a) 通常の火災の継続時間 (区画周壁：普通コンクリート、 $I_b = 1.71$)

(b) 区画周壁：軽量コンクリート ($I_b = 1.07$)

高層建物では区画壁に普通コンクリートが使用されることは稀で、熱特性的には軽量コンクリートレベルの材料が主体と考えられるから上記、図 4.1.3(a)の結果より、下図の方が実際の建築物の条件に近い結果となる。区画周壁が軽量コンクリートの場合は、SP 設置が有っても火災継続時間が施行令第 107 条の要求耐火時間を上回るケースが少なくない。これは、軽量コンクリートは断熱性が高いため、火災温度を高めるための燃料消費量が少なく、同一の火災荷重量で長時間の火災を維持できるためである。

なお耐火性能検証法の火災継続時間は $\tau_D = 3.9(35/1.07) \approx 128 \text{ min. } (\approx 2.13 \text{ h})$ となる。

通常火災の継続時間(軽量コンクリート壁)

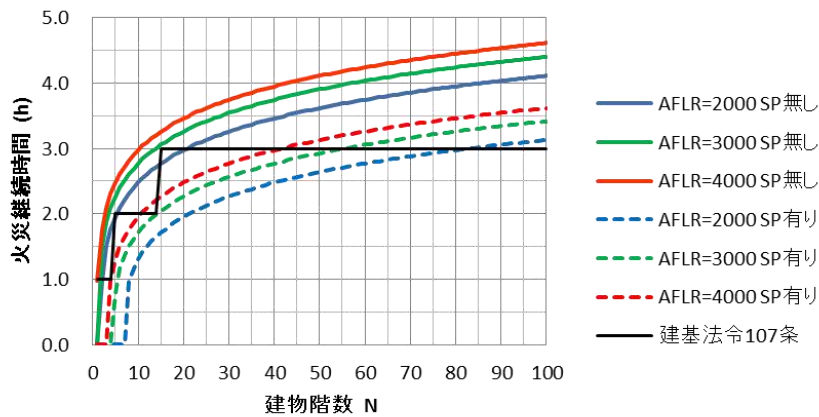


図 4.1.3.(b) 通常の火災の継続時間 (区画周壁：軽量コンクリート、 $I_b = 1.07$)

(4) 区画条件 Φ/I_B 値と火災継続時間

上記(3)では、‘通常の火災’の温度をもたらすような区画条件、すなわち $\Phi/I_B=0.0175$ 、の下での火災継続時間を算定したが、この条件は一般の建築物の‘通常の’居室では相当に開口面積の小さい区画となる。実際の事務室では開口が大きいため、換気因子、 $A_w\sqrt{H_w}$ 、の値も大きい場合が多いので、温度は高くなるが、燃焼速度が大きく火災継続時間 τ_D は短くなることが多い。

区画条件 Φ/I_B が任意の場合の火災継続時間 τ_D は式(4.3)に、その条件での Φ/I_B の値を用いて算定できるが、 τ_D は Φ/I_B に反比例して短くなることが分る。

下図 4.1.4 (a)、(b)はいずれも Φ/I_B の値が異なるときの τ_D を計算した結果を示している。階床面積は $A_{FLR}=3000\text{m}^2$ で同じであるが、周壁がそれぞれ(a)普通コンクリートおよび(b)軽量コンクリートの場合である。注意すれば、いずれの図でも τ_D は、 Φ/I_B に反比例していることが知られる。

下図 4.1.4 (a)の普通コンクリート周壁の場合、 $\Phi/I_B = 0.0175$ のときは火災区画条件が標準のときなので、火災継続時間 τ_D は 4.3 (a)で $A_{FLR}=3000\text{m}^2$ の時と同じであり、黒の実線で示す施行令 107 の耐火時間に比較的近いが、 $\Phi/I_B > 0.0175$ となる場合の τ_D は、これより大幅に短くなる。

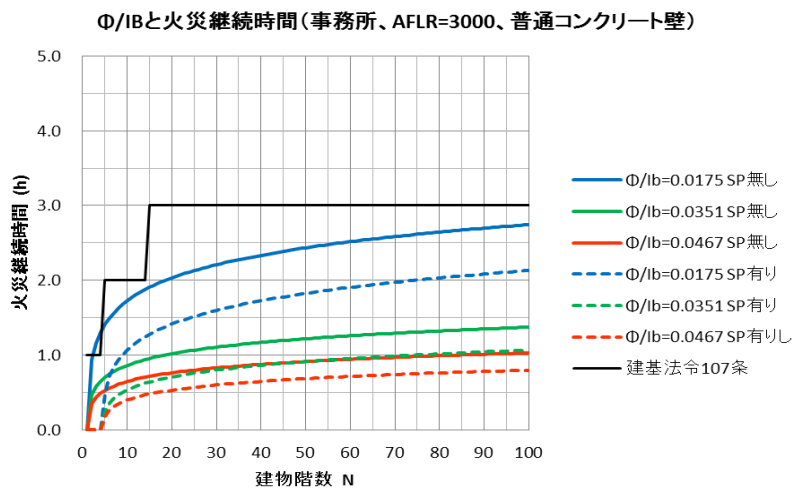


図 4.1.4(a) 区画条件 Φ/I_B と火災継続時間（区画周壁：普通コンクリート、階床面積： 3000m^2 ）

下図 4.1.4(b)は区画周壁が軽量コンクリートの場合で、高層建物では比較的現実的な条件であるが、普通コンクリートの場合に比較して火災継続時間 τ_D がかなり長くなる。しかし高層建物ではSPが設置されること、概して開口が大きいことなどを考慮すれば、耐火設計[耐火性能検証]上、特に過大な要求を生じることが無いと考えられる。

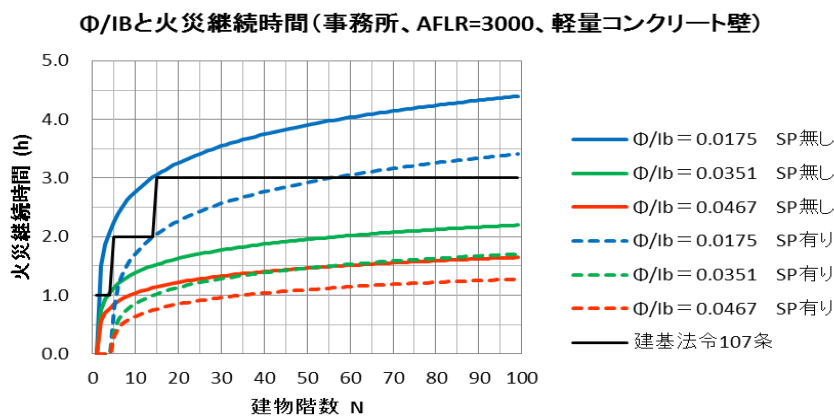


図 4.1.4(b) 区画条件 Φ/I_B と火災継続時間（区画周壁：軽量コンクリート、階床面積： 3000m^2 ）

4.2. 集合住宅建築のケーススタディ

ここでは許容崩壊確率の式(3.1)を集合住宅建築に適用してケーススタディを行う。主な目的は、事務所建物を標準建物（Benchmark building）として展開した設計火災火災荷重の設定方法が集合住宅建物に適用したときにも妥当な解を与えるかどうかを検討することにある。

事務所建築を標準とした出火率比は表 3.1 から $\bar{p}_f/p_f = 0.37$ である。また集合住宅建築では共住区画がなされるので各住戸を出火防火区画とし、この例ではその面積を 72 m^2 と仮定する。

集合住宅では事務所建築のような大きな階床面積は稀と考えられるので $A_{FLR}=500, 1000, 2000 \text{ m}^2$ のケースを対象とした。許容崩壊確率の具体的な計算式と計算条件は下記の通りである。

$$P_{a,fail} = 0.2(0.37) \left(\frac{1500}{72} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{p}_{FO}}{p_{FO}} \right) \left(\frac{9 \times 2000}{N \times A_{FLR}} \right) \quad (4.6)$$

表 4.2.1 集合住宅ケーススタディの計算条件

出火率比 \bar{p}_f/p_f	出火室(防火区画)面積 A_f	区画火災拡大確率比 \bar{P}_{FO}/P_{FO}	階床面積 A_{FLR}	建物階数 N
0.37	72	1, 4	500, 1000, 1500	1~100

(1) 許容崩壊確率

集合住宅は、事務所建物に比較して単位床面積当たりの出火率が高いことが許容崩壊確率を小さく（厳しく）する反面、火災区画や階床面積が小さいことが許容崩壊確率を大きく（緩く）する傾向を生じる。

図 4.2.1 に階数・階床面積と構造部材の許容崩壊確率、 $P_{a,fail}$ （これを建築物の許容崩壊確率と見做している）の計算結果を示す。集合住宅建物は各住戸ごとに区画が細かく入るので、SP 設置がなくても許容崩壊確率はかなり大きめ（緩め）となる。因みに、許容崩壊確率が $P_{a,fail} \geq 1.0$ となる場合は、出火率、建物規模等の条件から特に耐火性能を持たなくても許容崩壊リスクが満足されることになる。但し、今回の例では火災区画が 72 m^2 に区画されることが前提になっているので、延焼防止のための耐火性は必要となる。

なお図中に付記した $P_{a,fail}=0.157$ の一点鎖線は、耐火性能検証法の設計火災荷重密度 45kg/m^2 を集合住宅の火災荷重密度分布に基づいて計算した構造部材の許容崩壊確率である。これは事務所用途に対する許容崩壊確率に比較してかなり低い（厳しい）値となっている。これは、検証法の設計火災荷重密度の殆どが、概ね各用途の火災荷重密度分布の「平均+標準偏差」に設定されているにも関わらず、事務所用途だけ低い値に設定されているためである。

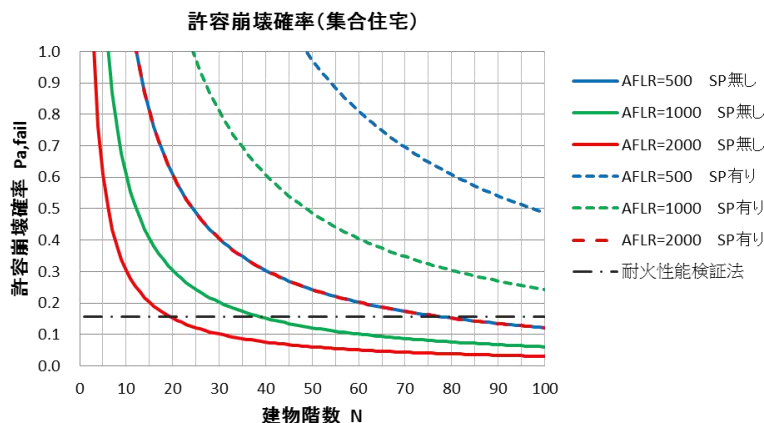


図 4.2.1 集合住宅の許容崩壊確率

(2) 建物階数・床面積と設計火災荷重密度

下図 4.2.2 は図 4.2.1 に示す構造部材の許容崩壊確率に対応する設計火災荷重密度の計算値である。

階数が少なければ設計火災荷重が 0 となる場合があるが、これは耐火性が要求されないことを意味している。但し、共住区画による防火区画があることが前提となるのは上記(1)と同様である。

なお、図中の鎖線は、比較のため耐火性能検証法の集合住宅に対する設計火災荷重密度 45kg/m^2 を付記したものである。

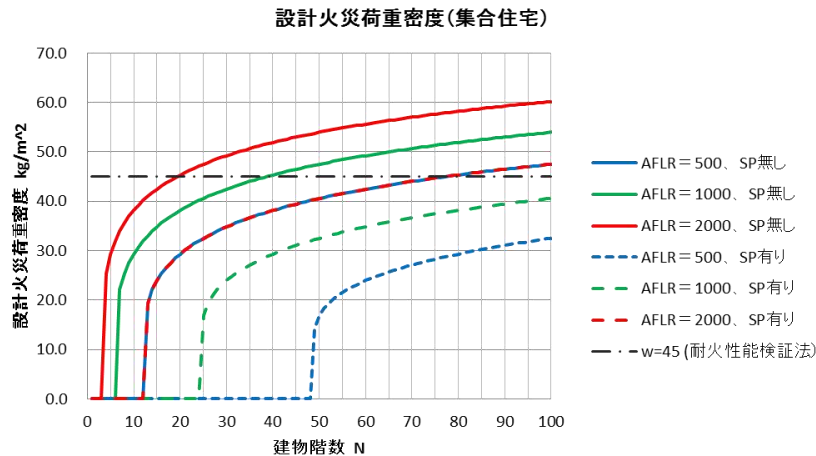


図 4.2.2 集合住宅の設計火災荷重密度

(3) 通常火災の継続時間

通常火災（標準火災）の継続時間, τ_D , は事務所のケーススタディで記述したのと同様にして計算できるが、ここでの火災区画は 72m^2 の住戸としたので、その平均的な形状を考えて $A_T / A_f \approx 3.5$ とすれば

$$\tau_D = \frac{w_D}{6 \left(\frac{\Phi}{I_b}\right) I_b \frac{A_T}{A_f}} = \frac{1}{6 \cdot 0.0175 \cdot 3.5} \frac{w_D}{I_b} \approx 2.72 \frac{w_D}{I_b} \quad (4.7)$$

下図 4.2.3(a) は、火災区画壁が普通コンクリートの場合 ($I_b = 1.71$) の火災継続時間, τ_D , を図 4.2.2 に示す設計火災荷重密度を上式に代入して算定したものである。なお黒の実線は施行令第 107 条の耐火時間を実線で付記したものである。

図 4.2.3(a) から、周壁が普通コンクリートの場合は SP の設置が無い場合でも、通常火災の継続時間は 1.5 時間程度以下で施行令第 107 条の要求耐火時間よりかなり短いことが分かる。

一方、耐火性能検証法の設計火災荷重密度を基にした火災継続時間は、建物階数や階床面積 A_{FLR} に関わらず $\tau_D = 2.72(45/1.71) \approx 72 \text{ min.} \approx 1.2 \text{ h}$ であるから、SP 無しの場合の計算結果と似通っている。

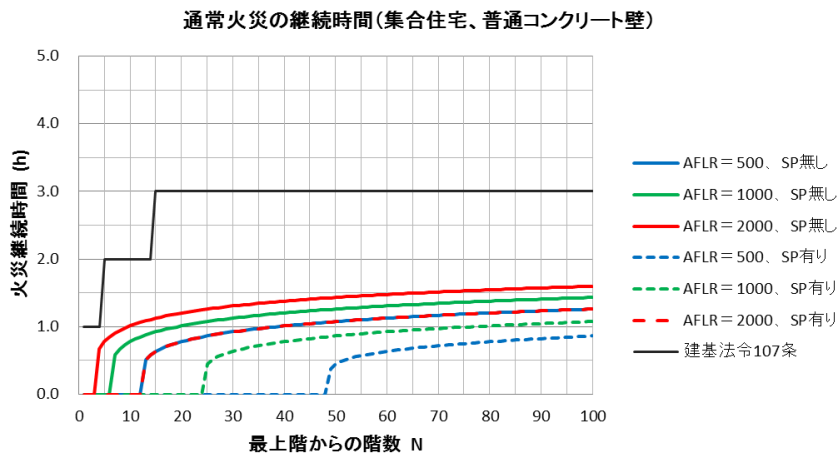


図 4.2.3(a) 集合住宅の通常火災の継続時間（周壁：普通コンクリート）

下図 4.2.3 (b)は区画周壁が軽量コンクリートの場合の通常火災の継続時間、 τ_D 、である。SP 設置無し
 のとき、集合住宅の階面積が大きいと、 τ_D の計算値は施行令第 107 条の要求耐火時間に比較的近くなる。

一方、耐火性能検証法の火災継続時間、 τ_D 、は $\tau_D = 2.72(45/1.07) \approx 107 \text{ min.} \approx 1.9 \text{ h}$ であるから、SP
 無しの場合の計算値に比較的近いと言えよう。

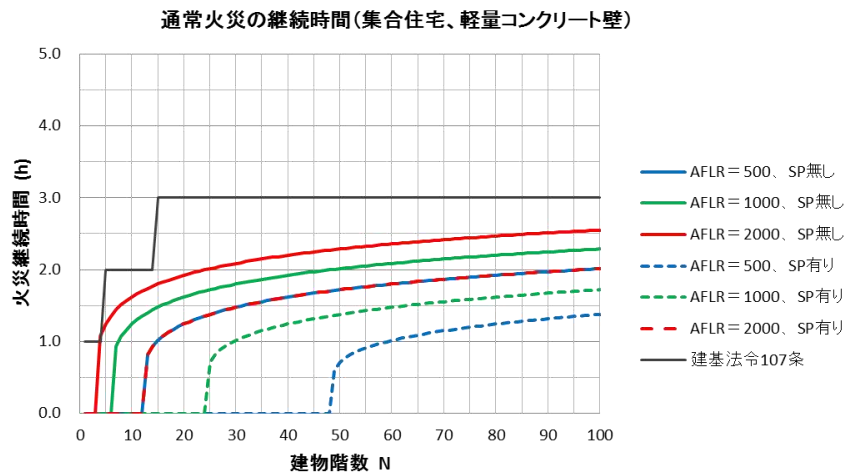


図 4.2.3(b) 集合住宅の標準火災耐火時間 (周壁：軽量コンクリート)

(4) Φ/I_b と火災継続時間

上記(3)の通常火災継続時間は、 $\Phi/I_b = 0.0175$ のときの結果であるが、現実の集合住宅の居室には採光
 等のため、区画条件の Φ/I_b 値は 0.0175 よりかなり大きくなり、従って燃焼速度も大きくなる。ここでは、
 階床面積が 1000m^2 の場合を選び、 Φ/I_b の値が異なるときの火災継続時間を計算してみる。

図 3.2.4(a)および(b)は、周壁が普通コンクリートおよび軽量コンクリートの場合の、 Φ/I_b による火災継続
 時間を示している。なお、図中には施行令第 107 条の要求耐火時間も比較のため付している。

集合住宅の共住区画の壁は、中・低層建物では普通コンクリート、高層建物では軽量コンクリートにな
 るかも知れないし、階数を問わず軽量コンクリートになるのかも知れないが、いずれの場合でも火災継続
 時間は建基法の要求耐火時間より格段に小さい。これは集合住宅の住戸面性や、階の総床面積の規模の
 小さいため建築物の崩壊リスクが小さいことに因っている。

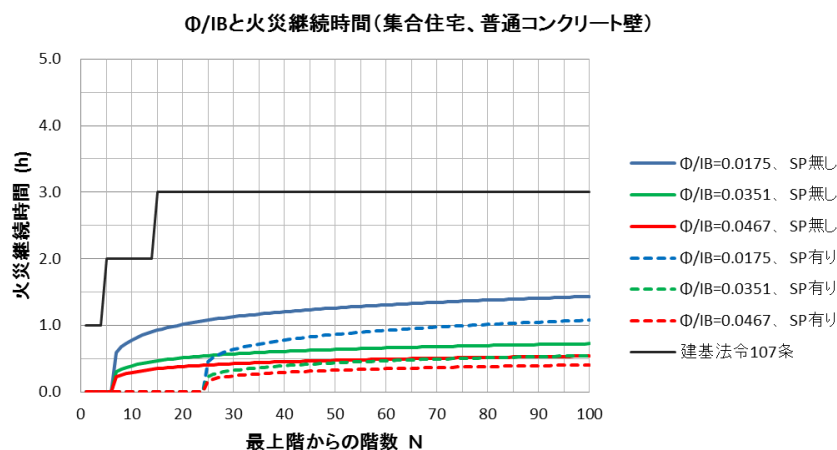


図 4.2.4(a) 区画条件 Φ/I_b と火災継続時間 (周壁：普通コンクリート、階床面積 1000m^2)

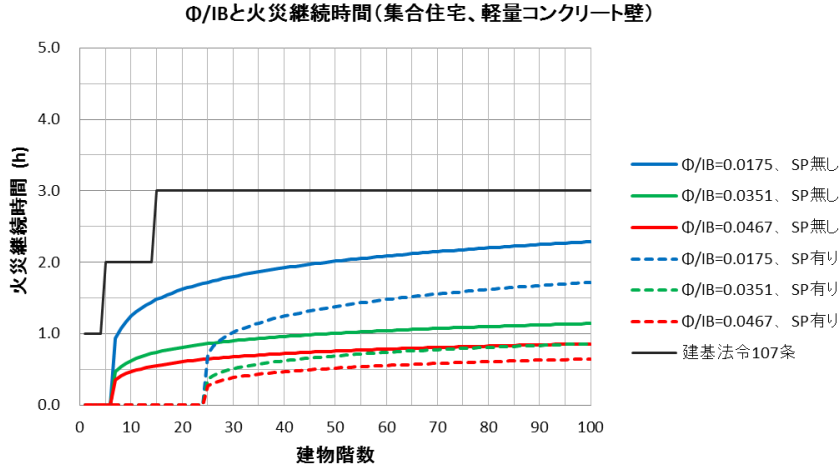


図 4.2.4(b) 区画条件Φ/I_bと火災継続時間 (周壁：軽量コンクリート、階床面積 1000m²)

4.3. 火災継続時間の耐火時間への読み替え

上記 4.1 の事務所建築のケーススタディでも 4.2 の集合住宅建築のケーススタディでも、火災継続時間は区画条件Φ/I_bの値に依存して異なる。しかし、異なるΦ/I_bの値は火災継続時間だけでなく区画火災の温度も変える。温度が違えば加熱時間は同じでも、部材が受けるダメージは異なる。

構造部材を始めとする耐火性が要求される建築部材の性能は最終的には耐火試験によって確認される必要があるが、耐火試験では規定の標準加熱温度以外で試験することは、不可能とは言えないまでも非常に難しい。そこでΦ/I_bの値により生ずる標準加熱温度との違いを、加熱時間を調整することで同等の加熱効果を得られるとするのが等価火災時間である。

この等価火災時間は耐火試験が始まった頃からあったアイデアであるが、最初に導入したのは Ingberg である。彼は温度×時間の積分が等しい時間を持って等価耐火時間とした。式で書けば

$$\int_0^{\tau_1} (T_{f,1} - T_{\infty}) dt = \int_0^{\tau_2} (T_{f,2} - T_{\infty}) dt \quad (4.8)$$

加熱温度が時間的に変化するので積分の形になるが、ここでは簡単のため平均化して次のように書くことにする。

$$(T_{f,1} - T_{\infty}) \tau_1 = (T_{f,2} - T_{\infty}) \tau_2 \quad (4.9)$$

これから、次のように火災継続時間τ₂を等価火災時間τ₁に読み替えることが出来る。

$$\tau_1 = \frac{(T_{f,2} - T_{\infty})}{(T_{f,1} - T_{\infty})} \tau_2 \quad (4.10)$$

その後、この式のT_∞をある限界温度T_cに替えた次のような式も提案されていた。

$$\tau_1 = \frac{(T_{f,2} - T_c)}{(T_{f,1} - T_c)} \tau_2 \quad (4.11)$$

また、耐火性能検証法では温度に代り部材表面への入射熱流束を用いる考え方が導入された。

$$\tau_1 = \frac{q_2}{q_1} \tau_2 \quad (4.12)$$

これら(4.10)、(4.11)、(4.12)のいずれの式でも、加熱の強いほど耐火時間を長くする点では目的に適合していると言えよう。しかし、耐火試験結果の等価読み替え方法については、1900年頃から最近まで議論が続いている問題であり、未だ有力な方法についての結論は出ていない。議論の中では式(4.11)、(4.12)

タイプの読み替え案には理論的根拠が薄弱であるとして強い反対意見も出されており、更には火災条件に依存して異なる強さの加熱を受ける材料の耐火性能を一律の加熱温度で評価することは無理だとする意見すらある。

等価読み替えの方法については、今少し検討が必要と考えるので、今回のケーススタディでは敢えて耐火時間への読み替えを行わなかった。しかし、火災温度が耐火加熱温度より高くなった時の等価耐火時間の増加率は概ね 2~3 割程度と考えられる。(参照：Annex A8)

4.4. ケーススタディのまとめ

事務所と集合住宅の 2 用途について平均的な建物条件を選びケーススタディを行った。本手法の提案は建築物の許容崩壊リスクの値に応じて耐火設計[耐火性能検証]の設計火災荷重密度を決定することなので、本来は設計火災荷重密度の計算例を示すところまでが目的である。しかし、この設計火災荷重密度から導かれる火災継続時間が建築基準法耐火規定に比較してどの程度の差を生じるかを確認しておくため火災継続時間の予測を加えた。

今回の提案の方法で定められる設計火災荷重密度は耐火性能検証法の設計火災荷重よりかなり大きくなることも多い。しかし、建築基準法の耐火規定は建築物の階数のみで定められており、階の床面積の規模、防火区画の面積、用途による出火率、区画の開口率や区画材の熱特性、SP の設置の有無、など建築物の安全性に関わる多くの要素が考慮されていない。実際の建築物におけるこれらの実情を考慮すると、設計火災荷重密度が耐火性能検証法よりかなり大きくても、火災継続時間が建基法耐火規定の耐火時間を上回ることはないので、耐火設計[耐火性能検証]上の技術的、経済的困難は無いと考えられる。

建築物の階数が少ないケースでは、許容崩壊確率が 1 を超すことで全く耐火性が求められない場合も部生じるが、低層、小規模の建築物は実際には現行法規でも耐火性の要求が無いか、あるいは大幅に緩和されている領域であり、特に大きな矛盾は無いと考えられる。

(1) 事務所建築のケーススタディ

今回のリスク基盤の設計火災荷重密度の決定手法では、建築物の階数が多いとき耐火性能検証法に比較し、かなり大きい設計火災荷重密度が算定される。しかし、現在の一般的な高層建物の規模や空間条件、設備の状況を考慮すれば、結果として要求される耐火時間は現状のレベルを超すことは殆ど無く、寧ろ緩和されると考えられる。

同じ設計火災荷重密度でも火災区画の熱的性質によって火災継続時間にかなり大きな差が出ることは現行の耐火規定が予想していなかったことだと思われるが、その場合でも結論は変わらない。

(2) 集合住宅のケーススタディ

集合住宅の単位面積当たりの出火率は事務所建築に比較して約 3 倍高い。しかし、階床面積の規模が事務所建築に比較して小さいこと、住戸間が共住区画で細かに防火区画されること、および住戸の開口率が高いことで火災継続時間が短くなり、その結果火災継続時間は建基法の耐火規定を大幅に下回る。火災による崩壊リスクに限って言えば、超高層建築でも SP の設置は必要なく、適度な耐火構造で十分なレベルにあると考えられる。

謝辞

本研究は建築物の耐火設計[耐火性能検証]における設計火災荷重の適切な設定のためには、リスクの概念を導入する必要性があることを痛感して2000年過ぎ頃から考え始めたものである。諸般の事情もあって、研究の進捗は必ずしも円滑ではなく、それから既に長い年月を要したが、特に近年多くの若手研究者からの貴重な協力を頂いてやっと本報告を纏められる段階に至ることが出来た。

特に下記の方々の貢献無くしては、本報告の形に研究を纏めることは困難であったと感じる。ここに記して衷心からの謝意を表したい。

(敬称 略)

池島由香	大成建設技術センター
角谷三夫	関西建築防災研究所
新谷祐介	竹中工務店技術研究所
水野雅之	東京理科大学理工学研究科

Annex A1 積載可燃物の調査データ

火災荷重は耐火設計（耐火性能検証）にとって重要な基礎データであるから、わが国でも今まで幾つか実測調査が行われている。性能的耐火設計[耐火性能検証]が導入された現在では、火災荷重のデータの重要性は非常に高まっているが、実際に使用中の建物空間で火災荷重の実測を行うことは容易ではなく、そのデータの蓄積は未だ十分と言うには程遠い。

(1) 既往の可燃物調査データ

下表 A1.1 にわが国で今迄に行われた火災荷重の調査データを要約している。耐火検証法ではこれ以外の用途についても設計火災荷重密度が示されているが、我が国において実測調査されている火災荷重データはこの表に示すものだけである。これによれば住宅と学校に関してはかなりの数の調査がなされているが、その他の用途での調査データは多くなく、統計処理に適しているか疑問なものがあるかも知れない。また、実測数が多いものでも調査時期から既に年月が経っており、現在とは状況が大きく変わっている可能性もある。

表 A1.1 火災荷重密度の平均と標準偏差¹⁾

建物用途	室用途	室数	火災荷重密度		出典	
			平均 μ_w	標準偏差 σ_w	文献	発表年
事務所	事務系事務室	10	17.1	7.6	[1]	1986
	技術系事務室	6	22.3	4.7	[1]	1986
	行政事務室	5	45.3	4.6	[1]	1986
	設計室	5	36.5	4.1	[1]	1986
	事務系事務室	18	23.7	6.7	[2], [3]	1996、2000
	技術系事務室	11	46.7	10.5	[2], [3]	1996、2000
住宅	共同住宅	214	33.9	11.7	[4]	1986
	公団賃貸	139	28.8	11.3	[5]	1974
	公団分譲	121	33.8	10.3	[5]	1974
	社宅	238	37.2	11.5	[4]	1986
物販店舗	売場	6	21.5	9.6	[1]	1986
学校	教室	185	18.6	6.2	[6]	1975
ホテル	客室	15	11.8	1.7	[1]	1986

[1]国土開発技術研究センター編、建築物の総合防火設計法、第4巻耐火設計法

[2]油野健志など、実態調査に基づく可燃物量とその表面積の分析、日本建築学会計画系論文集、第483号、1996.5

[3]松山賢、性能的火災安全設計に用いる火災性状モデルの構築と火災安全性能評価への応用、東京理科大学学位論文、2000

[4]日本建築センター：新都市型躯体構造システム報告書、1998年3月

[5]日本住宅公団：高層住宅の防火総合計画に関する研究、1974年8月

[6]日本鋼構造協会：学校建築可燃物量実態調査報告書、1975年3月

(2) 火災荷重密度の確率分布

表 A1.1 に示した調査データの中、事務室については事務室の用途を 4 タイプに区別した調査データがあるが、火災荷重密度にかなりの差がある。また事務系と技術系の用途タイプについて 2 回の調査が行われているが、これらの火災荷重密度の間でも小さくない差がある。一口に事務室と言っても、業務内容は多種・多様であり、また時とともに変化するので、それが火災荷重に反映することは十分考えられるが、建築物の設計段階で予想することは困難である。

このため、耐火設計[耐火性能検証]用の設計火災荷重密度の基礎データとしては、事務室の用途タイプについて細かく分類するより事務室用途として 1 つに統合し、また集合住宅については 4 つのタイプ別の調査データがあるが、火災荷重密度の値に大きな差は無いのでこれも 1 つに統合する方が良いであろう。

表 A1.1 の火災荷重調査の元データは既に存在せず、出典に記載の段階で統計処理され平均 μ_w と標準偏差 σ_w の形で与えられているので、これらの調査データを統合するには既に統計処理されたデータを基に

するしか方法が無い、(Annex 2 参照) 結果を表 A1.2 に示す。

表 A1.1 の火災荷重調査の元データが失われていることから、それらがどんな分布をしていたのかは知り得ないが、ここでは、火災荷重密度の確率密度は対数正規分布をしているものと仮定する。海外においても、火災荷重密度の確率密度は正領域しか分布しないことを考慮して、対数正規分布やガンベル分布にフィットさせることが多いが、これらの分布がかなり良い近似となっている。

下表 A1.2 は、表 A1.1 のデータを正規分布および対数正規分布の平均と標準偏差、および設計火災荷重密度を‘平均+標準偏差’としたとき、および耐火性能検証法の値としたときの許容崩壊確率の計算値を示している 2),3)。

表 A1.2 空間用途別の火災荷重密度分布の平均 ($\mu_{ln,w}$) および標準偏差 ($\sigma_{ln,w}$)

建物用途	事務所 事務室	集合住宅 居室	物販店舗 売り場	学校 教室	ホテル 客室
火災荷重密度 平均 μ_w	30.1	34.0	21.5	18.6	11.8
標準偏差 σ_w	13.5	11.7	9.6	6.2	1.7
対数正規分布 平均 $\mu_{ln,w}$	3.3129	3.4704	2.9772	2.8705	2.4578
標準偏差 $\sigma_{ln,w}$	0.4281	0.3345	0.4264	0.3246	0.1433
設計火災荷重密度($w_D = \mu_w + \sigma_w$)	43.6	45.7	31.1	24.8	13.5
許容崩壊確率	0.140	0.147	0.140	0.147	0.156
検証法 設計火災荷重密度 w_D	35	45	30	25	15
許容崩壊確率	0.286	0.157	0.160	0.142	0.140

注： $\mu_{ln,w}$ 、 $\sigma_{ln,w}$ ：対数正規分布の平均、標準偏差

なお、火災荷重密度の確率密度分布を対数正規分布と仮定した時の各用途空間における確率密度分布は下図 A1.1 に示すようになる。

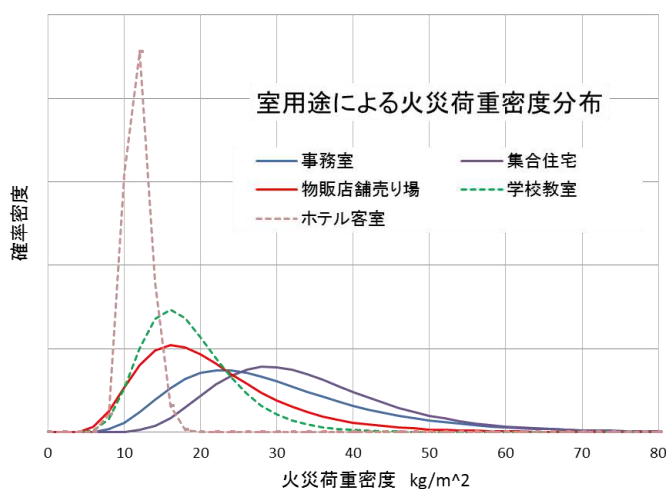


図 A1.1 室用途と火災荷重密度の対数正規確率密度分布

[参考文献]

- (1) 水上点晴、新谷祐介、水野雅之、田中哮義：耐火性能検証法への確率統計的手法の導入、日本火災学会論文集、Vol.66、No.2(2016)
- (2) E. Zalok, G.V. Hadjisophocleous and J. R. Mehaffey: Fire loads in commercial premises, Fire Mater. 2009, 33 など
- (3) Christoophe Thauvoeye, Bim Zhao, Jochen Klein and Mario Fontana: Fire load Survey and Statistical Analysis, Fire safety science, Proc. of the 9th International Symposium, pp 991-1002

Annex A 2 火災荷重密度の既存統計データの統合について

既往の火災荷重密度の調査データの中には、幾つかの異なるグループに分かれて統計処理されているものがある。これらを1つに統合したデータ集合の平均、分散がどうなるのか考察する。

簡単のためA、Bの2つのグループを考え、それぞれに属するデータの数をそれぞれ a, b 、データ値を下記とする。

$$\begin{aligned} A: & x_1, x_2, \dots, x_a \\ B: & x'_1, x'_2, \dots, x'_b \end{aligned} \quad (\text{A2-1})$$

これらを統合したデータ集合をN、データ総数を n とすると

$$n = a + b \quad (\text{A2-2})$$

グループA、Bのデータの平均および分散（既知）、および統合データ集合Nのデータの平均および分散（未知）をそれぞれ下記とする。

$$\begin{aligned} A: & \bar{x}_a, s_a \\ B: & \bar{x}_b, s_b \\ N: & \bar{x}_n, s_n \end{aligned} \quad (\text{A2-3})$$

これらに基づき、統合データ集合の平均 \bar{x}_n と標準偏差 s_n は次のように得られる。

1. 統合データの平均値 \bar{x}_n

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^a x_i + \sum_{i=1}^b x'_i \right) = \frac{1}{n} (a\bar{x}_a + b\bar{x}_b) \quad (\text{A2-4})$$

従って、既知であるデータ集合A、Bの平均値とデータ数を用いて統合データの平均値が得られる。

2. 統合データの分散 s_n^2

$$s_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^a (x_i - \bar{x}_n)^2 + \sum_{i=1}^b (x'_i - \bar{x}_n)^2 \right) \quad (\text{A2-5})$$

右辺の第1項（グループA）を下記のように展開すると

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^a (x_i - \bar{x}_n)^2 &= \sum_{i=1}^a \{(x_i - \bar{x}_a) + (\bar{x}_a - \bar{x}_n)\}^2 \\ &= \sum_{i=1}^a \left\{ (x_i - \bar{x}_a)^2 + 2(x_i - \bar{x}_a)(\bar{x}_a - \bar{x}_n) + (\bar{x}_a - \bar{x}_n)^2 \right\} \\ &= \sum_{i=1}^a (x_i - \bar{x}_a)^2 + 2(\bar{x}_a - \bar{x}_n) \sum_{i=1}^a (x_i - \bar{x}_a) + \sum_{i=1}^a (\bar{x}_a - \bar{x}_n)^2 \\ &= (a-1)s_a^2 + 0 + a(\bar{x}_a - \bar{x}_n)^2 \end{aligned} \quad (\text{A2-5a})$$

第2項（Bグループ）についても同様に計算して

$$\sum_{i=1}^b (x'_i - \bar{x}_n)^2 = (b-1)s_b^2 + b(\bar{x}_b - \bar{x}_n)^2 \quad (\text{A2-5b})$$

従って、統合データの分散は下記のようになる。

$$s_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 = \frac{1}{n-1} \left\{ (a-1)s_a^2 + (b-1)s_b^2 + a(\bar{x}_a - \bar{x}_n)^2 + b(\bar{x}_b - \bar{x}_n)^2 \right\} \quad (\text{A2-6})$$

あるいは、データ数が小さいため $a-1$ 、 $b-1$ 、 $n-1$ の代わりに a 、 b 、 n を使うときは

$$\begin{aligned} s_n^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 = \frac{1}{n} \left\{ a s_a^2 + b s_b^2 + a(\bar{x}_a - \bar{x}_n)^2 + b(\bar{x}_b - \bar{x}_n)^2 \right\} \\ &= \frac{1}{n} \left[a \left\{ s_a^2 + (\bar{x}_a - \bar{x}_n)^2 \right\} + b \left\{ s_b^2 + (\bar{x}_b - \bar{x}_n)^2 \right\} \right] \end{aligned} \quad (\text{A2-6'})$$

統計データのグループが 3 以上のときも、同様にして得られる。

Annex A 3 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) が離散的値を取る場合と異なり、確率変数 (X) が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 が或る値の範囲を取る確率が存在することになる。

3.1 確率密度関数

確率変数を x 、発生確率を P とするとき

$$f(x) = \frac{dP}{dx} \quad (\text{A3-1})$$

となる関数 $f(x)$ を x の確率密度関数と言う。

ある X の範囲を取った時の確率は確率密度関数を次式のように積分して求められる。

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (\text{A3-2})$$

確率密度関数を $-\infty < X < \infty$ で積分すれば

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (\text{A3-3})$$

3.2 確率密度関数の平均と分散

$$\text{平均} \quad E[x] (\equiv \mu) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx (\equiv \mu) \quad (\text{A3-4a})$$

$$E(x^2) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx \quad (\text{A3-4b})$$

$$\text{分散} \quad E[(x - \mu)^2] (\equiv \sigma^2) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (= \text{分散}) \quad (\text{A3-4c})$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (x^2 - 2\mu x + \mu^2) f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - 2\mu \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx + \mu^2 \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - 2\mu \cdot \mu + \mu^2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - \mu^2 \end{aligned} \quad (\text{A3-5})$$

3.3 正規分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A3-6})$$

3.4 対数正規分布

(1) 確率密度関数

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

$$Y = \ln x \quad (\text{A3-7})$$

としたとき $f(Y)$ は次のような正規分布となる。

$$f(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(Y-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \quad (\text{A3-8})$$

ここに μ_Y 、 σ_Y は $Y(=\ln x)$ の平均、標準偏差。

式(A3.8)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。

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{dP}{dx} \\ &= \frac{dY}{dx} \cdot \frac{dP}{dY} \\ &= \frac{d(\ln x)}{dx} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \\ &= \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y x} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \end{aligned} \quad (\text{A3-9})$$

(2) 平均 (μ_x)

$$\mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y x} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx \quad (\text{A3-10})$$

ここで $\ln x = t$ とおくと、

$$x = e^t, \quad dx = e^t dt \quad (\text{A3-11})$$

だから上式に代入して

$$\begin{aligned} \mu_x &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(t-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} e^t dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{t^2 - 2\mu_Y t + \mu_Y^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{t^2 - 2(\mu_Y + \sigma_Y^2)t + \mu_Y^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t - (\mu_Y + \sigma_Y^2)\}^2 - (2\mu_Y\sigma_Y^2 + \sigma_Y^4)}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t - (\mu_Y + \sigma_Y^2)\}^2}{2\sigma_Y^2}} \cdot e^{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2} dt \end{aligned} \quad (\text{A3-12'})$$

ここで $t - \sigma_Y^2 = s$ とおけば

$$\begin{aligned}\mu_x &= e^{\frac{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(s-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} \cdot ds \\ &= e^{\frac{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2}{2}}\end{aligned}\tag{A3-12}$$

(3) 標準偏差 (σ_x)

分散は

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - 2\mu_x \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx + \mu_x^2 \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - \mu_x^2\end{aligned}\tag{A3-13}$$

なので

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 + \mu_x^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx \\ &= \int_0^{\infty} x \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} dx\end{aligned}\tag{A3-14}$$

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

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 + \mu_x^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(t-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} e^{2t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{2t - \frac{t^2 - 2\mu_Y t + \mu_Y^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{\frac{t^2 - 2(\mu_Y + 2\sigma_Y^2)t + \mu_Y^2}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{\frac{\{t - (\mu_Y + 2\sigma_Y^2)\}^2 - 4(\mu_Y \sigma_Y^2 + \sigma_Y^4)}{2\sigma_Y^2}} dt \\ &= e^{2\mu_Y + 2\sigma_Y^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{\{t - (\mu_Y + 2\sigma_Y^2)\}^2}{2\sigma_Y^2}} dt\end{aligned}\tag{A3-15'}$$

ここで $t - 2\sigma^2 = s$ とおけば

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 + \mu_x^2 &= e^{2\mu_Y + 2\sigma_Y^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(s-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}} ds \\ &= e^{2\mu_Y + 2\sigma_Y^2}\end{aligned}\tag{A3-15}$$

式(A3.12)から

$$\mu_x = e^{\frac{\mu_Y + \frac{1}{2}\sigma_Y^2}{2}}$$

を考慮して、式((A3.15)に式(A3.12)を使えば

$$\sigma_x^2 = e^{2\mu_y + 2\sigma_y^2} - \mu_x^2 = e^{2\left(\mu_y + \frac{1}{2}\sigma_y^2\right)} e^{\sigma_y^2} - \mu_x^2 = \mu_x^2 (e^{\sigma_y^2} - 1) \quad (\text{A3-16})$$

これから、分散 σ_y^2 および標準偏差 σ_y はそれぞれ次のように得られる。

$$\sigma_y^2 = \ln \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right\} \quad \text{および} \quad \sigma_y = \sqrt{\ln \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right\}} \quad (\text{A3-17})$$

また平均 μ_y は式(A3.12)から

$$\ln \mu_x = \mu_y + \frac{1}{2} \sigma_y^2 \quad (\text{A3-18})$$

であるから、式(A3.17)の σ_y^2 を代入して

$$\mu_y = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \sigma_y^2 = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \ln \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right\} = \ln \frac{\mu_x}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2}} \quad (\text{A3-19})$$

(4) まとめ

以上の結果をまとめれば対数正規分布の

$$\text{確率変数 } x \text{ を用いた確率密度関数: } f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y x} e^{-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}}$$

ここに

$$\begin{aligned} \text{平均: } \mu_y &= \ln \frac{\mu_x}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2}} \\ \text{標準偏差: } \sigma_y &= \sqrt{\ln \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right\}} \end{aligned}$$

Annex A 4 設計火災荷重密度と許容崩壊確率

火災荷重密度は空間用途は同じであっても空間の使い方によりかなりのバラツキがあり、経年的にも変化する。すなわち、火災荷重密度は確率的に分布する性格のものである。

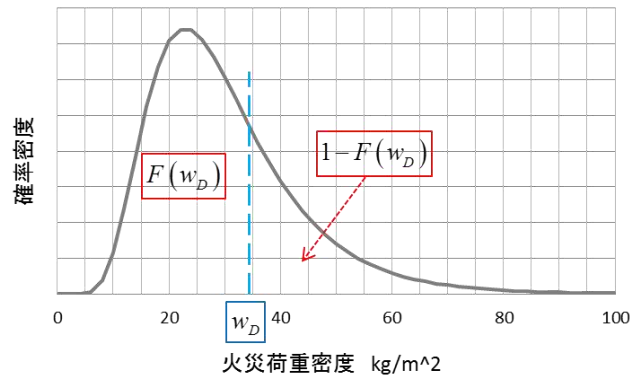


図 A4.1 火災荷重密度の確率分布の例と設計火災荷重密度

耐火性能検証では、火災荷重密度 w のある値 w_D を設計火災荷重密度として、その条件の下での火災に対して構造部材の安全性を検証するが、確率分布する火災荷重密度の中で、ある 1 つの値を設計火災荷重密度として定めることは、実際の火災荷重密度が w_D を超過することが在った場合には構造体の安定を保証しないことを意味している。言い換えれば、設計火災荷重密度を設定することは、あるレベルの構造崩壊リスクを許容（あるいは受忍）することに他ならない。

火災荷重密度の確率密度分布が対数正規分布に従うとすると、構造体が厳密に w_D の設計火災荷重に耐えられるレベルに設計されたとすれば、構造体の崩壊確率は火災荷重密度 w が w_D を超過する確率として、次式で計算される $F(w_D)$ となる。

$$F(w_D) = \int_{w_D}^{\infty} f(w)dw = 1 - \int_0^{w_D} f(w)dw \quad (A4-1)$$

ただし $f(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln w} w} e^{-\frac{(\ln w - \mu_{\ln w})^2}{2\sigma_{\ln w}^2}}$ (A4-2)

$$\mu_{\ln w} = \ln \left\{ \mu_w / \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w} \right)^2} \right\}, \quad \sigma_{\ln w} = \sqrt{\ln \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w} \right)^2 \right\}} \quad (A4-3)$$

火災荷重密度 w が w_D を超過する確率、 $F(w_D)$ 、はエクセル関数を使えば

$$F(w_D) = 1 - \text{LOGNORM.DIST}(w_D, \mu_{\ln w}, \sigma_{\ln w})$$

として計算できる。

また許容崩壊確率の値を $F(w_D)$ としたい時、それに対応する設計火災荷重密度 w_D を求めるには

$$\int_0^{w_D} f(w)dw = 1 - F(w_D)$$

を w_D について解けば良いが、エクセル関数を使えば

$$w_D = \text{LOGNORM.INV}(1 - F(w_D), \mu_{\ln w}, \sigma_{\ln w})$$

として計算出来る。

Annex A 5 MQH(McCaffrey, Quintiere, Harkleroad)区画火災温度予測式

建築部材の耐火性能は世界各国や ISO により規定されている耐火試験によって評価される。これらの試験の加熱温度履歴は標準温度時間曲線として定められているが、いずれも 1910～1920 年代に行われた Ingberg (NBS、米国) の実大火災実験の結果を基にしているため、いずれの国でも大差なくほぼ似通っている。しかし、建築空間の形体は多様であり、個々の条件によって火災温度や継続時間も異なる。性能的耐火設計[耐火性能検証]では、先ずそのように多様な区画条件の下での火災性状を予測する必要がある。

区画の条件が火災性状に最も大きく影響するのは盛期火災、とりわけ換気支配の盛期火災であり、それはまた耐火上最も影響が大きい火災形態である。

(1) ISO 834 標準火災温度

耐火加熱試験の標準耐火加熱温度は加熱後の時間ごとの温度上昇値を規定しているが、近似式も幾つかある。例えば ISO 834 近似式の 1 つは次式で表わされる。

$$\Delta T = 345 \log(8\tau + 1) \quad (\text{A5-1})$$

ただし、 τ は時間 (min)、 ΔT は上昇温度 (K または $^{\circ}\text{C}$)

(2) MQH 区画温度式

一方、Quintiere 等は MQH モデルと通称される次のような区画火災温度予測式を提案している。

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 0.023 \left(\frac{Q}{A_w \sqrt{H_w}} \right)^{2/3} \left(\frac{A_w \sqrt{H_w}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k\rho c} \right)^{1/6} \quad (\text{A5-2})^1$$

ここに時間 t は時間 (sec) である。これを換気支配火災に適用して発熱速度を $Q = 1500 A_w \sqrt{H_w}$ とすれば次式の形となる。

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 3.0 \left(\frac{A_w \sqrt{H_w}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k\rho c} \right)^{1/6} \equiv 3.0 \left(\frac{\Phi}{I_B} \right)^{1/3} t^{1/6} \quad (\text{A5-3})$$

但し、 Φ 、 I_B はそれぞれ下式に示す区画の温度因子、周壁の熱慣性である。

$$\Phi = A_w \sqrt{H_w} / A_T, \quad I_B = \sqrt{k\rho c} \quad (\text{A5-4})$$

耐火分野では時間の単位を min. とすることが多いので、上式の時間を $t[\text{sec}]$ から $\tau[\text{min.}]$ に変更すれば

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 6.0 \left(\frac{\Phi}{I_B} \right)^{1/3} \tau^{1/6} \quad (\text{A5-5})$$

すなわち、MQH 式によれば、換気支配区画火災の温度は火災区画の幾何学的パラメタ Φ と区画周壁の熱特性パラメタ I_B によって決定されることになる。

(3) 耐火試験の標準加熱温度と MQH モデルの区画火災温度

ここで、式(A5-5)に標準耐火加熱温度の 60min の値 (925°C) を使って Φ/I_B の値を決めると

$$\left(\frac{\Phi}{I_B} \right)^{1/3} = \frac{\Delta T / T_{\infty}}{6\tau^{1/6}} \approx \frac{925/300}{6 \cdot 60^{1/6}} \approx 0.2597 \quad (\text{A5-6})$$

よって

$$\Phi / I_B \approx 0.0175 \quad (\text{A5-7})$$

このとき区画火災温度は耐火検証法で周知の次式となる。

$$\Delta T \approx 6.0(\Phi / I_B)^{1/3} T_\infty \tau^{1/6} \approx 6.0 \cdot (0.0175)^{1/3} \cdot 293 \tau^{1/6} \approx 460 \tau^{1/6} \quad (\text{A5-8})^2$$

図 A5.1 は式(A5-1)の ISO834 標準加熱温度と MQH 式を展開した式(A5.5)の 180min (3h) までの値を比較したものであるが、両者は非常に良く一致している。すなわち ISO 834 標準耐火加熱温度は式(A5-5)のような区画条件に対応する換気支配区画火災温度であると考えられる。

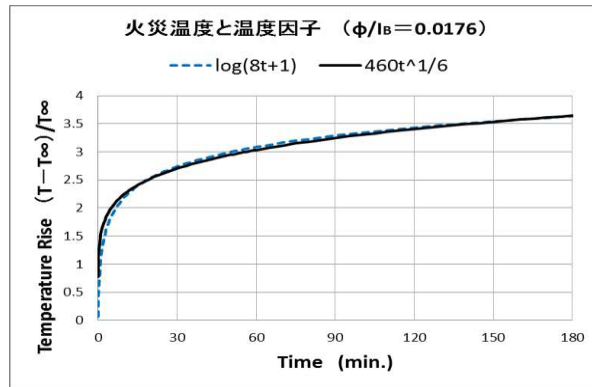


図 A5.1 ISO834 標準火災温度と換気支配火災に適用した MQH 式 (IB=0.0175) の温度

耐火試験の標準火災温度には火災区画の幾何学条件や区画壁の熱特性による火災性状への影響についての情報は存在しないが、MQH 式には火災性状の支配要素が組み込まれているので、火災区画の条件が異なる場合にも適用できる。しかし、MQH 式は半実験式であり、式中の係数値は実験測定値のを回帰分析によって求められた。それらの実験データの殆どは温度が 600℃以下のものである¹⁾。この温度では開口からの輻射失熱の影響は比較的小さい。火盛り期の区画火災温度はもっと高くなることが多いので、式(A5-5)の適用可能範囲については確認が必要である。

図 A5.2 は様々な Φ / I_B の値に対する MQH 式 {式(A5-5)} の値をプロットしたものである^{2、3)}。式の形から当然ながら、どの時点を取っても温度は Φ / I_B の値に比例する。また、あくまで換気支配火災の前提の下だが、 Φ / I_B の値が大きいと温度が非現実的に高くなる予測となる。

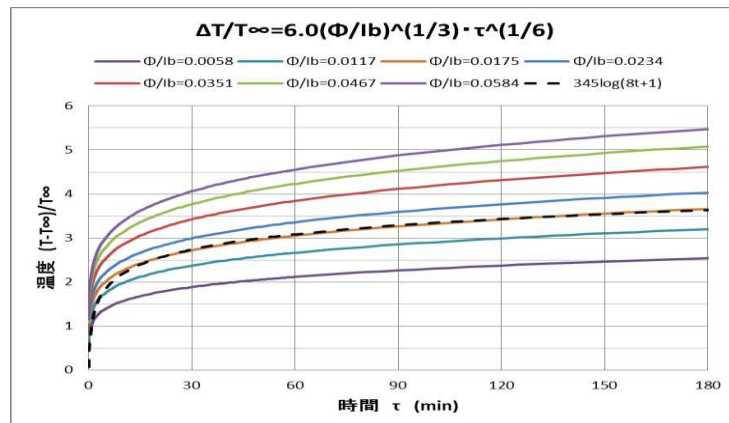


図 A5.2 Φ / I_B の値と MQH 式による区画火災温度

[参考文献]

- 1) B.J. McCaffrey, J.G. Quintiere, M.F. Harkleroad: Estimating room fire temperature and the likelihood of flashover using fire test data correlations, Fire Technology, 17,2, pp98-119, 1981
- 2) 水上点晴、田中哮義：標準加熱曲線下で得られる耐火試験データを活用した任意の区画条件下における保有耐火性能の推定に関する検討 (1) 耐火性能検証法による耐火時間読み替えの方法論と課題、日本火災学会論文集、Vol. 68、No.1、2018
- 3) 田中哮義：第3版 建築火災安全工学入門、日本建築センター、令和2年3月

Annex A 6 区画の熱量保存式に基づいた火災温度式

MQH 式による区画火災温度予測で、 Φ/I_B の値が大きい場合の温度が高くなり過ぎる原因の 1 つには開口部からの輻射失熱が無視されていることも関係していると思われる。そこで開口部からの輻射失熱、 Q_r も考慮に入れて、もう少し詳細に火災区画の熱量保存を考察する。

(1) 区画火災の熱量保存、

$$Q - Q_g = c_p m_g (T - T_\infty) + Q_B + Q_r \quad (\text{A6-1})$$

ただし、 Q 、 Q_g 、 m_g 、 Q_B 、 Q_r は、それぞれ発熱速度(kW)、可燃物の熱分解における気化熱吸収速度(kW)、換気によるガス流出速度(kg/s)、周壁への熱損失速度(kW) 開口部からの輻射失熱速度(kW)。

(2) 各要素過程の定式化

上式(A6-1)の各項で表される各熱移動過程について以下のように定式化してみる。

(a) 周壁への熱損失

MQH 式の方法のアイデアに倣って、火災区画周壁を半無限固体と仮定して周知の理論解を用いれば吸収熱速度 Q_B は

$$Q_B = qA_T = (T - T_\infty) \sqrt{k\rho c / \pi} A_T \quad (\text{A6-2})$$

この式は加熱側の表面積温度が瞬時に火災温度 T に上昇するとの仮定に基づいている。しかし、区画火災の温度は経時的に上昇し、それを受けて周壁の表面温度も経時的に上昇するので、厳密な意味では式の前足を満足していない。従って、特に火災温度の変化が大きい初期段階では、ある程度の誤差は許容する必要がある。

(b) 窓開口を通した輻射熱損失

火災区画内ガスおよび外気は黒体ガスと考えて良いので

$$Q_r = \sigma(T^4 - T_\infty^4)A_w = h_r(T - T_\infty)A_w \quad (\text{A6-3})$$

ここに h_r は輻射熱伝達率であるが、区画火災の温度範囲では下式で十分良好な近似が得られる。

$$h_r = \sigma(T^2 - T_\infty^2)(T + T_\infty) \approx 1.6 \times 10^{-7}(T - T_\infty)^2 \quad (\text{A6-4})$$

(c) 窓開口を通した換気流量

火災区画の窓開口を通じた換気量については従来 m_a 、 m_g を流入空気量、流出ガス量として

$$m_a = m_g \quad (\text{A6-5})$$

の質量保存式から求められることが多い。この場合は、周知のように区画温度 $T_g > 400^\circ\text{C}$ 位の範囲で

$$m_a = m_g \approx 0.5A_w \sqrt{H_w} \quad (\text{A6-6})$$

となる。しかし盛期火災時には区画内の可燃物が盛んに熱分解して大量の可燃ガスが発生するから、これが換気量に与える影響が無視できない可能性がある。これを考慮する場合の質量保存式は m_b を質量燃焼速度として次のようになる。

$$m_a + m_b = m_g \quad (\text{A6-7})$$

換気支配火災時の m_b について、ここでは平均的なものとして川越・関根による次式を採用しておく。

$$m_b \approx 0.1A_w \sqrt{H_w} \quad (\text{A6-8})$$

質量燃焼速度 m_b が加わった場合は、 m_b が無い場合に比較して区画内の圧力が上昇することで中性帯が下がり、流出ガス量、 m_g 、が増加する一方流入空気量、 m_a 、が減少することで式 3-14 が満足されることになる。この m_g の増加量と m_a の減少量について、より厳密な考察は可能であるが、ここでは両者はほぼ

等しいと考えて良いので

$$m_g = 0.5A_w\sqrt{H_w} + m_b/2 = 0.55A_w\sqrt{H_w} \quad (\text{A6-9})$$

$$m_a = 0.5A_w\sqrt{H_w} - m_b/2 = 0.45A_w\sqrt{H_w} \quad (\text{A6-10})$$

(d) 可燃物の発熱速度 Q 、 Q_g

現在の火災実験はガスや液体の燃料を火源とすることが主流となっているが、以前の区画火災実験の多くは木材クリブを始めとする木質系材料を燃料として実施されてきた¹⁻⁵⁾。木質系材料の燃焼は炭素残渣が残る、熱分解潜熱が大きいなど、ガスや液体燃料の場合に比較して複雑である。酸素消費法が一般化する以前の火災解析では、発熱速度の見積もりを‘可燃物の発熱量×質量燃焼速度’によって行っていたが、この方法だと恐らく温度が高くなり過ぎるため、燃焼効率という因子を導入して実効発熱量を 10.75 MJ/kg くらいに低減していたようである。木材の発熱量を 16.4MJ/kg とすると、この燃焼効率の値は $10.75/16.4 \approx 0.66 \approx 2/3$ くらいになる。

この燃焼効率がどんな要因により決まるのかは定かでないが、 Q を酸素消費量当たりの発熱量に基づいて見積ると、熱分解潜熱を別に評価して差し引く必要がある。すなわち Q の代わりに、 $Q - Q_g$ を実質的な発熱速度と見ることになる。

木材の熱分解潜熱は Thomas 等、何人かによって測定されているが値の幅は約 400~5000 kJ/kg と広く、平均値は 2300 kJ/kg とされる。この平均値を用いると

$$Q - Q_g \approx 3000m_a - 2300m_b \quad (\text{A6-11})$$

ここで $m_b \approx 0.1A_w\sqrt{H_w}$ 、 $m_a = 0.45A_w\sqrt{H_w}$ とすれば

$$Q - Q_g \approx 3000 \times 0.45A_w\sqrt{H_w} - 2300 \times 0.1A_w\sqrt{H_w} \approx 1120A_w\sqrt{H_w} \quad (\text{A6-12})$$

上記の実効発熱量 10.75 MJ/kg を用いた場合、 $Q = 10.75 \times 10^3 m_b = 10.75 \times 10^3 \times 0.1A_w\sqrt{H_w} = 1075A_w\sqrt{H_w}$

となり、式(A6.12)の値はこれと非常に近い。従って実効発熱量の実体は木材の熱分解潜熱でほぼ説明できると思われる。

式(A6-3)、(A6-9)、(A6-10)、(A6-12)を保存式(A6-1)に代入すれば区画火災温度が次のようになる。

$$T - T_\infty = \frac{1120A_w\sqrt{H_w}}{c_p 0.55A_w\sqrt{H_w} + \sqrt{\frac{k\rho c}{\pi t}} A_T + h_r A_w} \approx \frac{2036}{1 + \frac{1.8}{\frac{A_w\sqrt{H_w}}{A_T} \sqrt{\frac{\pi t}{k\rho c}}} + h_r \frac{1.8}{\sqrt{H_w}}} \quad (\text{A6-13})$$

これを更に少し整理すれば

$$\frac{T - T_\infty}{T_\infty} = \frac{T - 300}{300} \approx \frac{6.8}{1 + \frac{1}{(\Phi/I_B)t^{1/2}} + h_r \frac{1.8}{\sqrt{H_w}}} \quad (\text{A6-13})$$

この式は見かけ上単純だが、実際には右辺分母の h_r が温度 T の関数になっているので、解析式の形では温度を求められない点が MQH 式に比較して不便であるが、エクセルなどを用いて数値的に逐次計算できる。

図 A6.1 は式(A6.13)を用いて、 Φ/I_B の値の異なる区画の火災温度（無次元、上昇値）を計算した例を示している。比較・参考のため ISO 834 の標準火災温度曲線も示している。これによれば最大の温度上昇を示す例でも 1300°C を超えないレベルとなる。この値は過去の経験とのギャップも比較的小さいので耐火設計[耐火性能検証]で想定する温度として、それほど違和感がないのではなかろうか。因みに、ISO 834 の温度曲線と最も近い区画条件は MQH 式の場合と同様に $\Phi/I_B \approx 0.0175$ のときである。

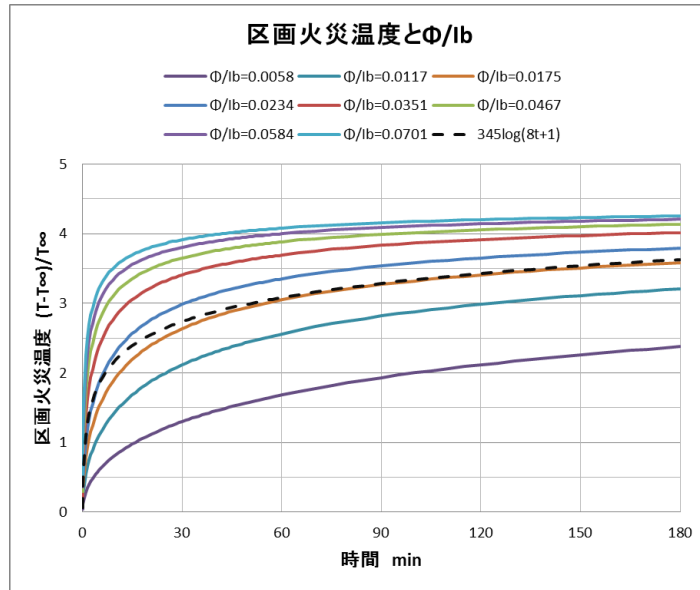


図 A6.1 区画の熱量保存に基づく簡易計算式による火災温度の予測結果例

[参考文献]

- 1) SFPE Handbook, 4th edition, Chapter 6, p3-207
- 2) P.H. Thomas, L. Nilsson :Fully developed compartment fires – New correlations of burning rates, FRN979, 1973
- 3) B. BOHM: Fully developed polyethylene and wood compartment fires with application to structural design, technical University of Denmark, 1977
- 4) Hugget, C.:Estimation of rate of heat release by means of Oxygen consumption method, Fire and Materials, Vol. 4, No. 20, 1980
- 5) Kawagoe, K. and Sekine, T.: Estimation of fire temperature curve in concrete building with different thermal conductivity of wall, Buletin of JAFSE, Vol. 3, No.2, 1954

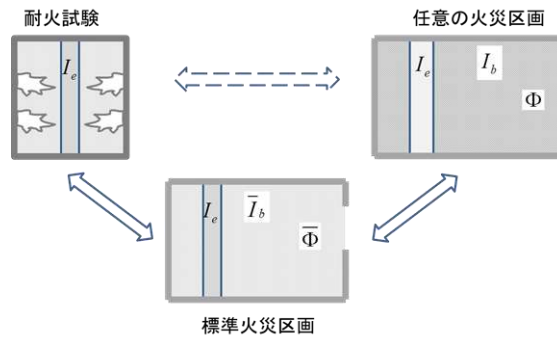
Annex A 7 火災継続時間

耐火試験装置と区画火災の外見はかなり異なっているので、耐火試験による結果が如何なる区画火災を想定したものかをイメージすることは難しい。しかし Annex 5 および 6 によって、標準耐火試験の温度は換気支配区画火災の温度を与える式(A5-5、Annex 5)

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 6.0 \left(\frac{\Phi}{I_b} \right)^{1/3} \tau^{1/6} \quad (A7-1)$$

において、火災区画の条件が $\Phi/I_b = 0.0175$ のときの温度と一致することが知られた。

この条件を有する火災区画を標準火災区画（耐火試験炉同等区画）とする概念を導入することにより、任意の区画における換気支配火災の性状の把握や耐火上の対策の評価が具体的に行い易くなる。



図]A7.1 標準火災区画の概念

(1) 火災継続時間

設計火災荷重密度が w_D のとき、火災継続時間 τ_D (min.) は、川越・関根による有名な質量燃焼速度と開口因子の関係を用いて次式のように評価出来る。

$$\tau_D = \frac{w_D A_{FLR}}{m_b} = \frac{w_D A_{FLR}}{6 A_w \sqrt{H_w}} \quad (A7-2)$$

しかし、これだけだと具体的な火災区画との関係がイメージしにくいので、次のように変形してみる。

$$\tau_D = \frac{w_D}{6 \frac{A_w \sqrt{H_w}}{A_T} \frac{A_T}{A_{FLR}}} = \frac{w_D}{6 \left(\frac{\Phi}{I_b} \right) I_b \frac{A_T}{A_{FLR}}} \quad (A7-3)$$

この式は換気支配区画火災の性状に関する基本的な因子の関係を表していると言えよう。右辺に現れる (Φ/I_b) は区画火災温度の支配因子、 I_b は区画壁の熱特性、 A_T/A_{FLR} は区画の幾何学的特性、 w_D は言うまでも無く可燃物密度である

区画火災の火災継続時間 τ_D はこれらの因子の値が与えられれば求められる。例えば標準火災区画 ($\Phi/I_b = 0.0175$) の面積を 1500m^2 、平均的形状を考えて、 $A_T/A_{FLR} = 2.44$ 、 $I_b = 1.71$ (普通コンクリート)、 $w_D = 35$ とすれば

$$\tau_D = \frac{35}{6 \times 0.0175 \times 1.71 \times 2.44} = 80 \text{ (min.)}$$

となるが、もし $\Phi/I_b = 0.035$ 、 $I_b = 1.07$ (軽量コンクリート) なら

$$\tau_D = \frac{35}{6 \times 0.035 \times 1.07 \times 2.44} = 64 \text{ (min.)}$$

などとなる。

(2) 火災荷重密度の消費量

式(A7-3) を火災継続時間から火災荷重密度の消費量 (減少量) を求める式に変換すれば

$$w_D = 6 \left(\frac{\Phi}{I_b} \right) I_b \frac{A_T}{A_{FLR}} \tau_D \quad (A7-4)$$

これを用いて、条件は(1)と同じ標準火災区画で可燃物密度の1時間($\tau_D = 60 \text{ min.}$)当たりの減少量を計算してみると次表に示すようになる。

表 A7.1 標準火災区画における火災荷重密度の減少量 (kg/h)

火災室の区画壁	事務室	集合住宅
普通コンクリート ($I_B = 1.71$)	26.3 kg/h	37.7 kg/h
軽量コンクリート ($I_B = 1.07$)	16.4 kg/h	23.6 kg/h

標準火災区画は耐火試験炉と同等の火災区画であるから、耐火試験での1時間の加熱は標準火災区画において上の表 A7.1 の火災荷重密度の減少量に相当する加熱時間となるが、設計火災荷重密度はこれらの値より多いので、可能性としては区画火災の継続時間は耐火試験時間より長くなることがある。

しかし、我が国の実際の建築物では Φ / I_b の値が標準の 0.0175 よりかなり大きい場合が多いように思われる。この場合は火災荷重密度の減少量が大きくなるので火災継続時間が短くなる。ただし、温度は標準の場合より高くなるので、耐火試験の時間に読み替える場合はその補正が必要となる。

[参考文献]

1. 川越邦雄、関根孝、飯塚幸治：コンクリート造建物の室内火災温度、日本建築学会論文報告集 89 号、昭和 38 年

Annex A 8 等価火災継続時間

建築部材の耐火性能は非損傷性、遮熱性、遮炎性の3性能からなるが、どのような部材も冷間ではそれぞれの機能を保持している。それらの機能が失われるのは基本的には火災加熱による温度上昇により部材の機械的、熱的特性などが変化することが原因であると言える。

例えば耐火被覆された鉄骨構造の非損傷性は載荷試験で評価されるとしても、結局被覆の奥にある鋼材の温度上昇による強度低下が安定性を左右する。コンクリート構造では鉄筋が異なる深さに多く配筋されるので、複数の位置の鉄筋の温度上昇の程度が総合的に影響する可能性があるが、その場合でも破壊の原因が温度上昇であることは変わらない。

区画火災の温度と継続時間はそれぞれの条件によって異なるが、部材の耐火性能は標準耐火試験によって評価されるので、性能設計において予測される区画火災の温度と継続時間は標準耐火試験での等価火災継続時間（耐火試験でどれだけの加熱時間に相当するのか）に読み替える必要がある。

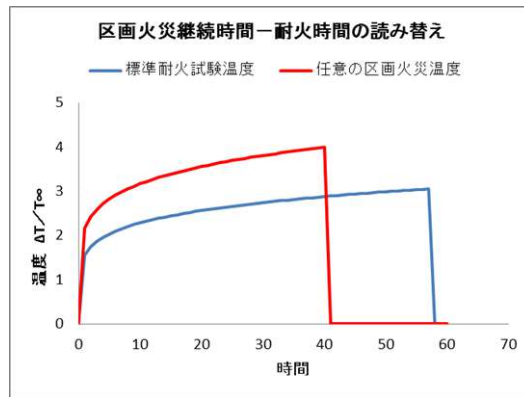


図 A8.1 区画火災と耐火試験の温度と継続時間

表面から火災加熱を受ける建築部材を加熱側表面温度が突如 T に上昇する半無限固体と仮定する。耐火性判定の基準位置（非加熱側の裏面温度など検査位置） x_c で判定基準温度 T_c になる時間を τ とすれば、熱伝導の理論解から

$$\frac{T_c - T_0}{T - T_0} = \operatorname{erfc} \left(\frac{x_c}{2\sqrt{\alpha_e \tau}} \right) \quad (\text{A8-1})$$

従って時間 τ は

$$\tau = \left\{ \frac{\frac{x_c}{2\sqrt{\alpha_e}}}{\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{T_c - T_0}{T_f - T_0} \right)} \right\}^2 \quad (\text{A8-2})$$

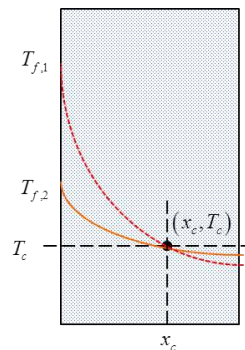


図 A8.2 加熱温度が異なる部材内の温度

同一部材に対して式(A8-2)を加熱温度がそれぞれ異なる、条件1、2に適用して時間 τ の比をとれば、部材の熱特性、 α_e 、や基準温度判定位置、 x_c 、は共通であるから

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\left\{ \frac{x_c}{2\sqrt{\alpha_e}} \right\}^2 \left\{ \frac{x_c}{2\sqrt{\alpha_e}} \right\}^2}{\left\{ \text{erfc}^{-1} \left(\frac{T_c - T_0}{T_{f,1} - T_0} \right) \right\}^2 \left\{ \text{erfc}^{-1} \left(\frac{T_c - T_0}{T_{f,2} - T_0} \right) \right\}^2} = \frac{\left\{ \text{erfc}^{-1} \left(\frac{T_c - T_0}{T_{f,2} - T_0} \right) \right\}^2}{\left\{ \text{erfc}^{-1} \left(\frac{T_c - T_0}{T_{f,1} - T_0} \right) \right\}^2} \quad (\text{A8-3})$$

すなわち、同一材料が温度条件の異なるに加熱に曝される時、基準位置での温度が両条件で等しくなる時間は加熱温度 ($T_f - T_0$) に対する判定温度 ($T_c - T_0$) の比のみによって決まる。基準位置での温度の比が部材の熱特性に依らないことは同一材料なので当然であるが、一般に熱特性データを測定することは容易でないので、非常に便利な性質である。(注)

(1) 加熱温度が時間的に依らず一定と近似した場合

耐火試験の温度も計算で予測される区画火災温度も初期を除けば時間的な変化は大きくはない。また変化の大きい初期の温度は低いので建築部材への影響は小さい。これを考えれば、実務的には加熱温度は時間的に一定と近似する選択も十分に考慮に値する。

もし火災温度上昇 $T_{f,1} - T_0$ および $T_{f,2} - T_0$ が、それぞれ時間に依らず一定であれば、式の右辺は定数であるから時間 τ の読み替えは即座に出来る。そこで、上式(A8-3)の右辺に含まれる補誤差関数の近似式を探して見ると、図 A8.3 に見られるようになり、耐火性の判定温度の範囲を $0.1 < (T_c - T_0) / (T_f - T_0) < 0.35$ 程度なら、次式はかなり良い近似となっていると言えよう。

$$\frac{1}{\left\{ \text{erfc}^{-1} \left(\frac{T_c - T_0}{T_f - T_0} \right) \right\}^2} \approx 6.36 \left(\frac{T_c - T_0}{T_f - T_0} \right) \quad (\text{A8-4})$$

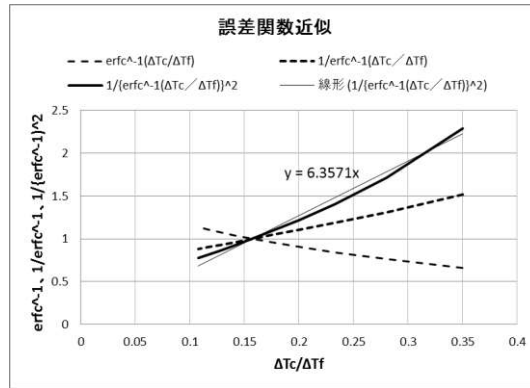


図 A8.3 補誤差関数に関する値： $\text{erfc}^{-1}(\Delta T_c / \Delta T_f)$, $1 / \text{erfc}^{-1}(\Delta T_c / \Delta T_f)$, $1 / \{ \text{erfc}^{-1}(\Delta T_c / \Delta T_f) \}^2$,

これを式(A8-3)に使うと、

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\left(\frac{T_c - T_0}{T_{f,1} - T_0} \right)}{\left(\frac{T_c - T_0}{T_{f,2} - T_0} \right)} = \frac{T_{f,2} - T_0}{T_{f,1} - T_0} \quad (\text{A8-5})$$

すなわち、耐火時間の比はほぼ加熱温度の比の逆数となる。

これは耐火性能の検査位置 x_c における温度が判定基準温度 T_c に到達する時間 τ が加熱温度にほぼ逆比例することを示している。言い換えれば、条件 2 を任意の区画火災、条件 1 を耐火試験と同等の区画火災とすると、任意の区画火災の火災継続時間 τ_2 を耐火試験の加熱時間 τ_1 に読み替えるには、判定温度 T_c に関係なく、 τ_2 を（任意の区画火災の加熱温度／耐火試験の加熱温）倍すれば良い。

(2) 加熱温度の時間変化を考慮する場合

実際の加熱温度は、区画火災でも耐火試験でも時間的に変化するので、ここでは以下のような時間 $0 \leq t \leq \tau$ の間の平均を採ると

$$T_{f,1} - T_0 = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} (T_{f,1} - T_0) dt, \quad T_{f,2} - T_0 = \frac{1}{\tau_2} \int_0^{\tau_2} (T_{f,2} - T_0) dt \quad (\text{A8-6})$$

これを式(A8-5)に代入すれば

$$\int_0^{\tau_1} (T_{f,1} - T_0) dt = \int_0^{\tau_2} (T_{f,2} - T_0) dt \quad (\text{A8-7})$$

(a) 温度の時間変化が MHQ 式に従う場合

ここで、もし窓開口からの輻射失熱を無視し、加熱温度（耐火試験、区画火災）が MQH 式

$$\frac{\Delta T}{T_\infty} = 6 \left(\frac{\Phi}{I_B} \right)^{1/3} \tau^{1/6} \quad (\text{A8-8})$$

に従うとすれば、式(A8-7)は

$$\left(\frac{\Phi}{I_B} \right)_1^{1/3} \tau_1^{7/6} = \left(\frac{\Phi}{I_B} \right)_2^{1/3} \tau_2^{7/6} \quad (\text{A8-9})$$

すなわち

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left\{ \frac{\left(\frac{\Phi}{I_B} \right)_2^{1/3}}{\left(\frac{\Phi}{I_B} \right)_1^{1/3}} \right\}^{6/7} = \left\{ \frac{\left(\frac{\Phi}{I_B} \right)_2}{\left(\frac{\Phi}{I_B} \right)_1} \right\}^{2/7} \quad (\text{A8-10})$$

ただし、下付の 1, 2 は異なる加熱条件を表すので、例えば 1 を標準火災、2 を任意の区画火災の温度とすることができる。

(b) 開口からの輻射失熱を考慮する場合

換気支配の区画火災の温度は、高温になるに従い開口からの輻射失熱のため MHQ 式に従わなくなる。**(Annex A6 図 A6.1 参照)**。この場合、(A8.7)右辺の任意の区画火災の温度の解析的積分は困難だが、数値的に積分することは可能である。

一方、標準耐火試験温度に関する左辺は $\Phi / I_B = 0.0175$ とした MQH 式で非常に良く近似されるので、次のように積分して τ_1 のときの値が得られる。すなわち

$$\int_0^{\tau_1} \frac{(T_{f,1} - T_0)}{T_\infty} dt \approx 6 \left(\frac{\Phi}{I_B} \right)^{1/3} \int_0^{\tau_1} t^{1/6} dt = 6 \times 0.0175^{1/3} \times \frac{6}{7} \tau_1^{7/6} = 1.335 \tau_1^{7/6} \quad (\text{A8-11})$$

これから式(A8-7)の τ_1 に対する読み替え式は次のようになる。

$$\tau_1 = 0.78 \left\{ \int_0^{\tau_2} \frac{(T_{f,2} - T_0)}{T_\infty} dt \right\}^{6/7} \quad (\text{A8-12})$$

下図 A8.4 に火災継続時間が 0~180min. (3h) の読み替え時間 τ_1 の大まかな値を示している。区画条件

Φ/I_B の値が大きいほど温度が高くなるが、輻射失熱のため次第に $(\Phi/I_B)^{1/3}$ への比例から外れて行く。このため実際の Φ/I_B の値の範囲で τ_1 の増加は2~3割が限度であろう。(Annex 6、 図 A6.1 参照)

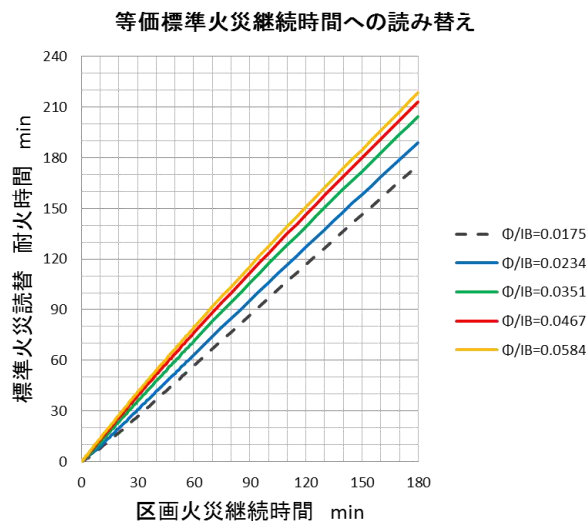


図 A8.4 異なる Φ/I_B の値に対する火災継続時間と等価耐火時間

図 A8.4 に見られる Φ/I_B の値に依る τ_1 の増加の割合は、標準火災 ($\Phi/I_B = 0.0175$) との温度の差と似通っているので、実務的には τ_2 から τ_1 への読み替えは単純に式(A8-5)の加熱温度の比によっても問題ないと思われる。

図 A8.5 には、 Φ/I_B の値によって、区画火災温度が標準火災の温度からどれくらい隔たるかを見たものである。 Φ/I_B の値が標準より大きい条件で火災継続時間が長くなるほど Φ/I_B の値による差が小さくなるのは、Annex A6 の図 A6.1 に見られるように、窓開口からの輻射によって温度の上昇が抑制されるためである。なお、この割合は下図のように仔細にみれば火災の初期段階では標準火災温度との差が幾分大きくなるが、初期段階は元々温度が低くて加熱強度が小さい時期なので、差は大きくても耐火上の重要性は低い時期と考えて良い。

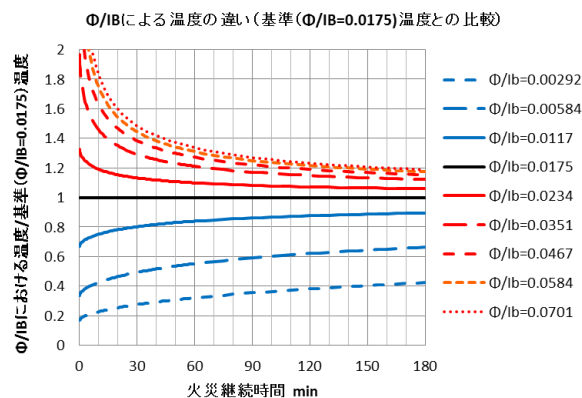


図 A8.5 Φ/I_B の値による区画火災温度と標準温度との差

(注) 区画部材を耐火性評価の対象とする場合は、区画部材の熱慣性 I_B が区画火災の温度を決める要因の1つであることに考慮が必要である。予め熱特性が分っていれば理想的であるが、難しいことも多いので、区画火災温度を予測する際にはなるべく真値に近い値を選ぶように努めるべきである。但し、式(A8-8)から知られるように、 I_B の温度への影響は I_B の1/3乗に反比例の関係なので、誤差が比例的に区画火災温度の予測誤差に繋がる訳ではない。また温度が高いほど輻射熱損失が区画火災温度の支配要因として比重を増すので、相対的に I_B の誤差の影響は減少する。

Annex A 9 吸収熱量一定の仮説に基づく等価耐火時間

耐火性能検証法では、耐火試験温度と異なる区画火災温度下の耐火時間の等価読み替えに、‘吸収熱量一定’の等価仮説を用いている。すなわち異なる条件 1 と 2 で加熱される部材の吸収する熱量が、

$$\int_0^{\tau_1} q_1'' dt = \int_0^{\tau_2} q_2'' dt \quad (\text{A9-1})$$

のときの時間 τ_1 、 τ_2 を耐火上等価の火災継続時間としている。この 1 と 2 の一方、例えば 1 が標準耐火試験の条件のとき、 τ_1 は τ_2 の等価標準耐火時間である。

火災加熱に曝される部材を近似的に半無限固体として、この仮説の妥当性レベルを確認してみよう。熱伝導理論によれば、表面温度（≡火災温度） T の固体が吸収する熱流束 q'' は次式で与えられる。

$$q'' = \frac{k}{\sqrt{\pi\alpha t}} (T - T_0) \quad (\text{A9-2})$$

従って、時間 0～ τ の間で固体が固体が吸収する熱量は

$$\int_0^{\tau} q'' dt = \frac{k}{\sqrt{\pi\alpha}} (T - T_0) \int_0^{\tau} t^{-1/2} dt = \frac{2k}{\sqrt{\pi\alpha}} (T - T_0) \tau^{1/2} \quad (\text{A9-3})$$

温度 $T (=T_f)$ で加熱される部材の耐火性判定基準点 x_c だが判定基準温度 T_c に達する時間を τ とすれば

$$\frac{1}{\tau^2} = \frac{x_c/2\sqrt{\alpha_e}}{\text{erfc}^{-1}\left(\frac{T_c-T_0}{T_f-T_0}\right)} \quad (\text{A9-4})$$

であるから、時間 0～ τ までに吸収される熱量は

$$\int_0^{\tau} q'' dt = \frac{2k}{\sqrt{\pi\alpha}} (T_f - T_0) \tau^{1/2} = \frac{kx_c}{\alpha\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{T_f - T_0}{\text{erfc}^{-1}\left(\frac{T_c - T_0}{T_f - T_0}\right)} \right\} \quad (\text{A9-5})$$

加熱される材料の熱特性は共通なので、もし加熱温度 T_f は異なっても上式の { } 内が一定なら温度が判定基準値 T_c に達する時間を τ までの熱吸収量が一定となり、耐火性の読み替え指標として熱吸収量を用いることの妥当性が肯定されることになる。

下図 A9.1 は判定温度を ISO834 の裏面温度 $\Delta T_c (\equiv T_c - T_0) = 140\text{K}$ とし、火災温度 $\Delta T_f (\equiv T_f - T_0)$ を変えて計算してみた結果を示している。図の結果は、加熱温度 ΔT_f とともに熱吸収量が一貫して増加することを示している。すなわち、ごく簡単な検討なので断定は出来ないが、この結果に因る限りでは吸収熱量一定の仮説は耐火時間の読み替え指標として適切とは言えないように思われる。

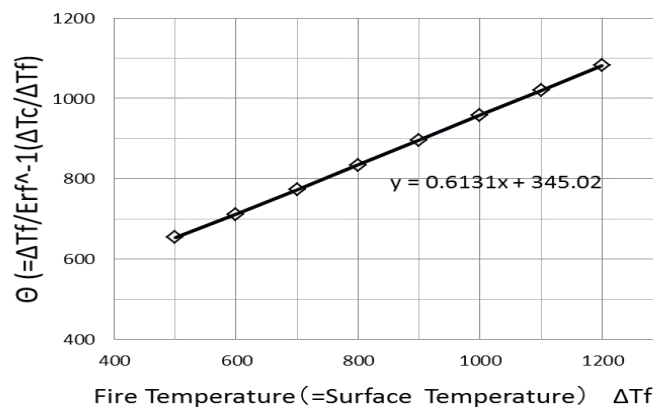


図 A9.1 火災加熱温度と耐火時間までの吸収熱量

Annex A10 区画の床面積と総表面積との比率

区画周壁は区画内で発生した熱量の主要な吸収体であり、その面積は火災温度の決定に大きく影響する。室の形状は様々だが、代表的形状として図のような矩形区画をとり総周壁面積と床面積の割合を試算してみる。区画平面縦横比を $k (= W/D)$ とすると、床面積 A_{FLR} と総面積 A_T はそれぞれ

$$\begin{aligned} A_{FLR} &= DW = kD^2 \\ A_T &= 2(DW + HD + HW) = 2\{kD^2 + (1+k)HD\} \end{aligned} \quad (A10-1)$$

従って A_T/A_{FLR} は

$$\frac{A_T}{A_{FLR}} = \frac{2\{kD^2 + (1+k)HD\}}{kD^2} = 2 \left(1 + \frac{1+k}{k} \frac{H}{D} \right) \quad (A10-2)$$

例として $k=2$ と仮定し、天井高さを事務所では $H=4\text{m}$ 、集合住宅では $H=3\text{m}$ とすると、それぞれ

$$\text{事務所: } \frac{A_T}{A_{FLR}} = 2 + \frac{12}{D} \quad \text{および} \quad \text{集合住宅: } \frac{A_T}{A_{FLR}} = 2 + \frac{9}{D} \quad (A10-3)$$

なお、 $1 < k < \infty$ なので $1 < (1+k)/k < 2$ であるが、 $k=2$ では $(1+k)/k = 1.5$ なので、平均的な値と言えよう。

$$A_{FLR} = D \cdot kD = 2D^2 \quad (A10-4)$$

から

$$D = \sqrt{\frac{A_{FLR}}{k}} = \sqrt{\frac{A_{FLR}}{2}} \quad (A10-5)$$

なので、火災室の床面積が大きいほど、周壁の総面積に占める壁面積の比重は下がり、床と天井の面積が大半を占めるようになるので、式(A10.3) の (A_T/A_{FLR}) の値は 2 に近くづく。逆に床面積が小さいほど壁面積の比重が上って熱移動上無視できなくなる。

防火区画の実際的な床面積を考慮すると、 A_T/A_{FLR} の値は事務所では概ね 2.4~3 辺り、集合住宅では概ね 3~4 くらいの範囲の値となることが多いと考えられる。

例として、面積区画の上限である $A_{FLR} = 1500\text{m}^2$ の区画（縦横比=2）に式(A10.5) を使ってみると

$$D = \sqrt{1500/2} \approx 27.4 \quad (A10-6)$$

$$\text{従って、} \frac{A_T}{A_{FLR}} = 2 + \frac{12}{D} \approx 2 + \frac{12}{27.4} \approx 2.44 \quad (A10-7)$$

同様にして面積 72m^2 の集合住宅の住戸区画について計算すれば $A_{FLR} = 2D^2 = 72$ から $W=6\text{m}$ 。従って

$$\frac{A_T}{A_{FLR}} = 2 + \frac{9}{D} = 2 + \frac{9}{6} = 3.5$$

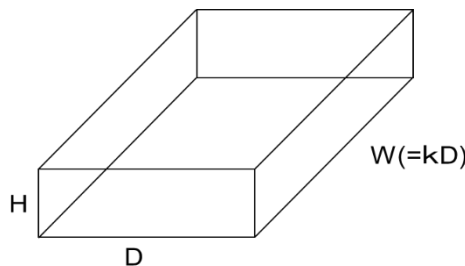


図 A10.1 火災区画の図解

Annex A11 出火率の空間面積への依存関係

ある空間での火災の発生率は空間の用途および規模に関連することは容易に理解される。空間用途によって、火源の数や種類、使用時間、火源の管理状態の特性が異なれば出火率に差異が生ずるのは当然であろう。また同一の用途でも空間規模が大きければ空間内の火源の数が増すため出火率が増えることは、建築物が多い都市ほど出火数が多いのと同様である。従って、もし出火率が空間規模に比例すると仮定すると、 P は次式のように書ける。

$$P = p_f A_f \tag{A11-1}$$

ただし p_f : 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 : 出火空間の床面積

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、従って概ね面積に比例すると考えられるが、個々の住居毎にみると面積が増加しても、出火率は面積に比例して増加はしないであろう。主に火気を使う台所などが比例して増える訳ではないためである。

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て見たものである。建物面積は出火空間のみの値ではなく、恐らく建物内の多くの室の面積を合計したものであろう。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ので、もし出火空間の面積のみを取ることが出来れば、更に低下傾向は大きくなると考えられる。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、出火源が面積に比例して増えない火源があるためと考えられる。一方、面積の大きくなるに従い低下傾向が小さくなるのは、電気器具や煙草など面積に比例して数が増える火源があるためと思われる。

このデータに含まれる建築物の用途など詳細は分からないので、単純に面積あたりの出火率 p_f と面積との関係の傾向だけを調べてみると、 $p_f \propto A_f^{-2/5}$ でも $p_f \propto A_f^{-1/2}$ でも大差は無い。建物全体でなく、出火室だけを取れば面積に対する低下傾向は更に大きくなると考えられることと、簡単のため、ここでは後者を採用することにする。すなわち

$$P = p_f A_f^{1/2} \tag{A11-2}$$

ただし、 p_f は空間用途によって定まる定数とする。

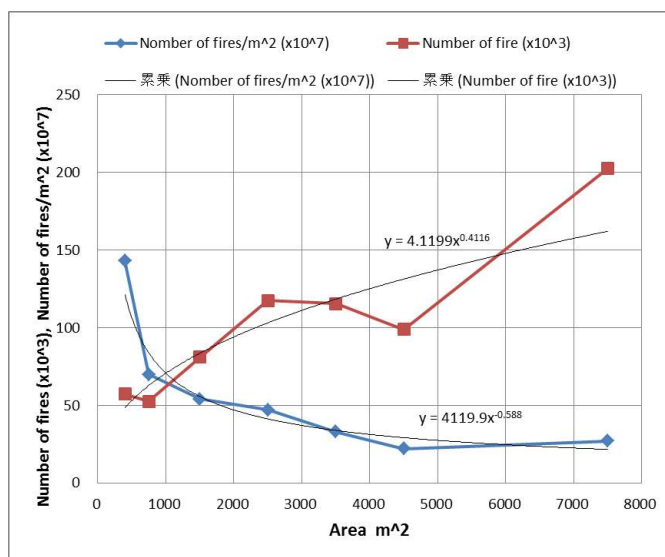


図 A11.1 東京消防庁管内の 1995～2002 年間における建物面積と出火数

[参考文献]

1. 野竹宏彰、池島由華、山口純一、田中哮義：住宅・共同住宅火災の統計的分析に基づく設計避難リスクの算出－火災安全設計における設計避難リスクに関する研究－、日本火災学会論文集、Vol.61、No.2、pp1-12、2011
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－火災安全設計における設計避難リスクに関する研究－、日本火災学会論文集、Vol.61、No.2、pp37-46、2011

Annex A12 集合住宅建築の階数と階当り住戸数

国土交通省「建設統計年報」から推計した資料によれば、2008年の時点で集合住宅のストックの平均は66m²/戸とされるが、その後の推移もあるので少し大きめに見積もって概ね70m²/戸とする。階の床面積は、これに廊下、バルコニーなどの面積を加えれば、住戸区画部分の3割増し程度であろう。

集合住宅についても階当たりの床面積のデータは少ないが、下表 A12.1 は下記の参考文献中の図 2.1.1.8 と 2.1.1.21 から1階当たりの平均戸数を試算したものである。階当たりの平均戸数は分譲と賃貸で幾分差が見られるが、概ね10戸/階程度とみて良いであろう。従って、階の床面積の平均は1000m²前後ではなかろうか。

表 A12.1 建物階数と階当り住戸数

	階数範囲	平均階数	平均戸数	平均戸数/階
分譲	3~5	4.0	44.0	11.0
	6~9	7.5	88.0	11.7
	10~19	14.5	153.0	10.6
	20~29	24.5	261.0	10.7
	30~40	35.0	312.0	8.9
賃貸	3~5	4.0	36.7	9.2
	6~9	7.5	63.1	8.4
	10~19	14.5	101.3	7.0
	20~29	24.5	238.0	9.7
	30~40	35.0	428.0	12.2

<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/155/2.pdf>、(図 2.1.1.18、2.1.1.21)

表 A12.2 事務室を基準とした代表的空間用途での面積当たり出火率比

	集合住宅	飲食店	物販店舗	事務所	ホテル	病院	学校	劇場
$\left\{ \frac{\bar{P}_f}{P_f} \right\}$	0.37	0.12	1.75	1	0.75	2.2	2.4	0.3

© 建築研究報告 第 152 号

令和 4 年 10 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)