

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 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
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。

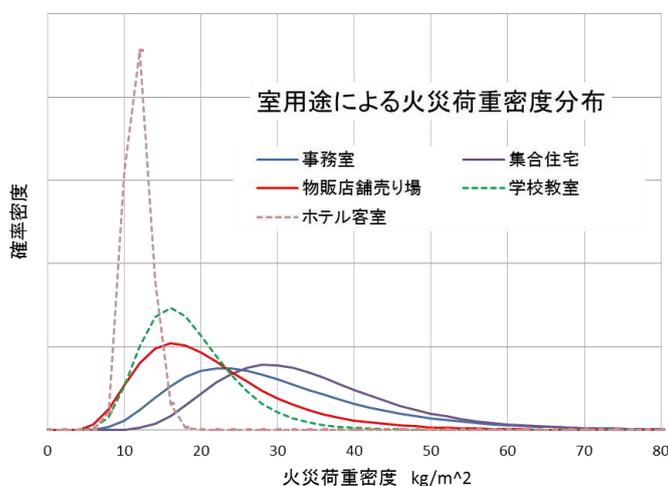


図 A1.1 室用途と火災荷重密度の対数正規確率密度分布

[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

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

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。

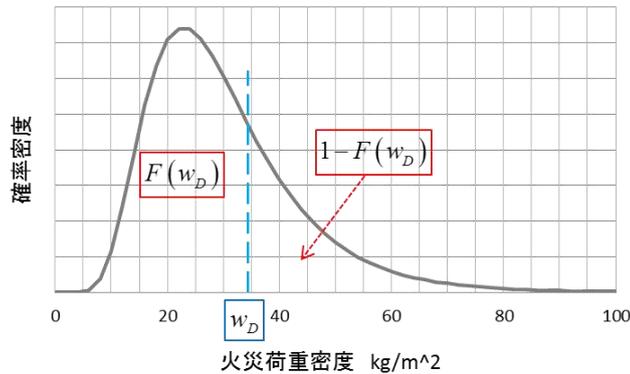


図 A4.1 火災荷重密度の確率分布の例と設計火災荷重密度

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。

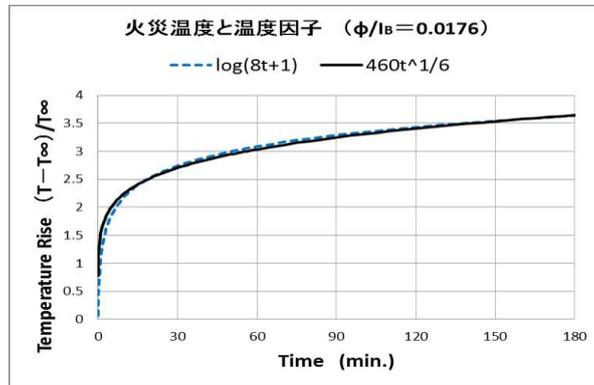


図 A5.1 ISO834 標準火災温度と換気支配火災に適用した MQH 式 (IB=0.0175) の温度

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°C 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。

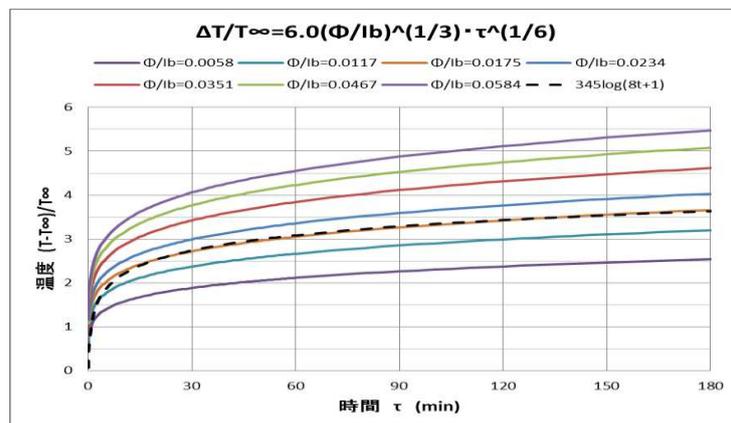


図 A5.2 Φ / I_B の値と MQH 式による区画火災温度

[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) 水上点睛、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。

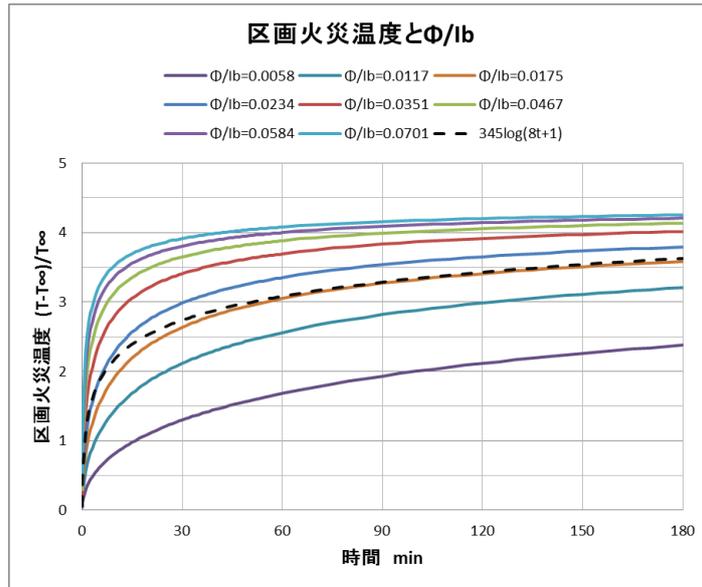


図 A6.1 区画の熱量保存に基づく簡易計算式による火災温度の予測結果例

[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

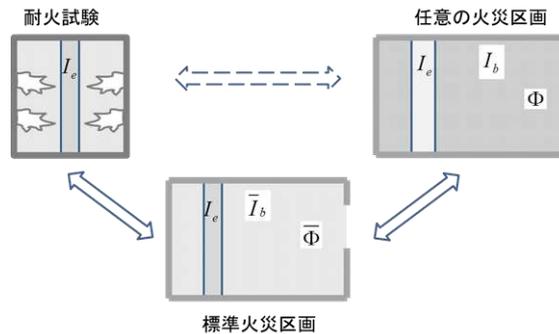
Annex A 7 火災継続時間

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**)

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

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。

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

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。

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

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。

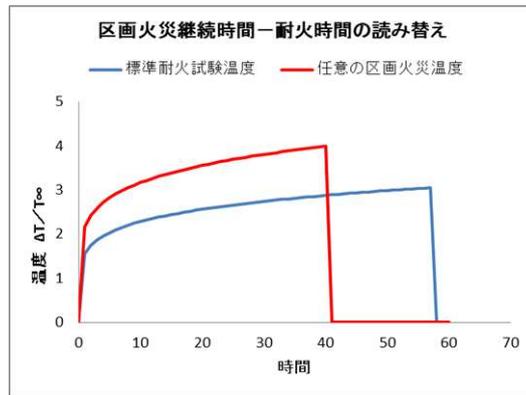


図 A8.1 区画火災と耐火試験の温度と継続時間

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

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

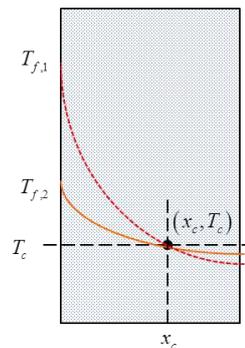


図 A8.2 加熱温度が異なる部材内の温度

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。

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

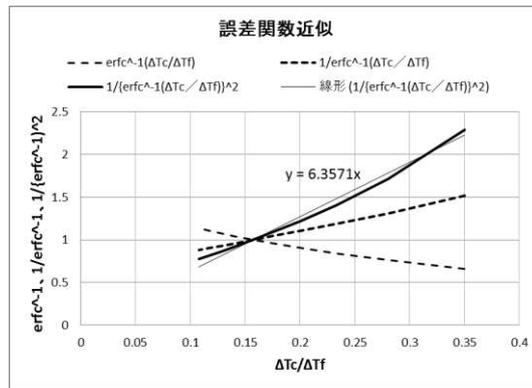


図 A8.3 補誤差関数に関する値： $\text{erfc}^{-1}(\Delta T_c / \Delta T_f)$ 、 $1 / \text{erfc}^{-1}(\Delta T_c / \Delta T_f)$ 、 $1 / \{ \text{erfc}^{-1}(\Delta T_c / \Delta T_f)^2 \}$ 、

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)

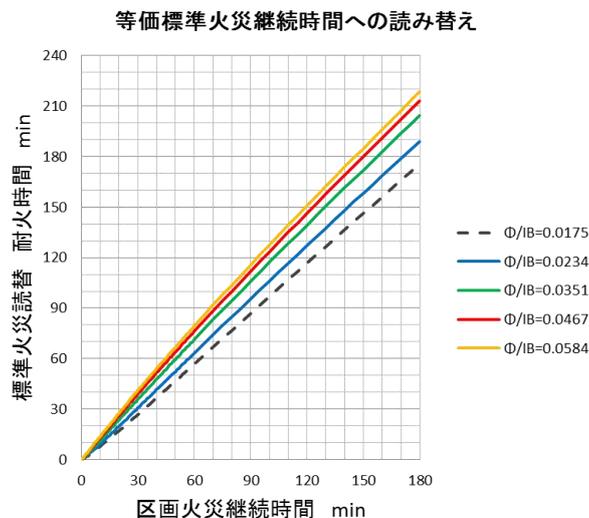


図 A8.4 異なる Φ/I_B の値に対する火災継続時間と等価耐火時間

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。

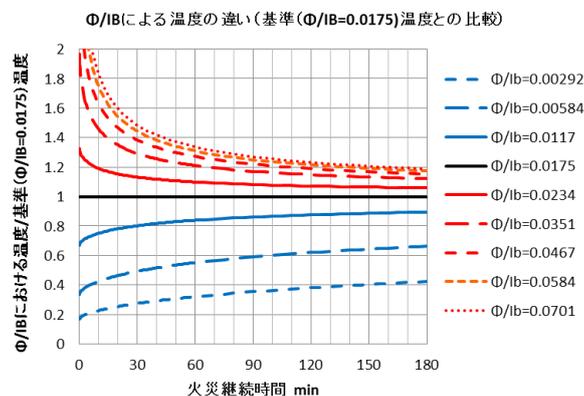


図 A8.5 Φ/I_B の値による区画火災温度と標準温度との差

(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 で判定基準温度 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。

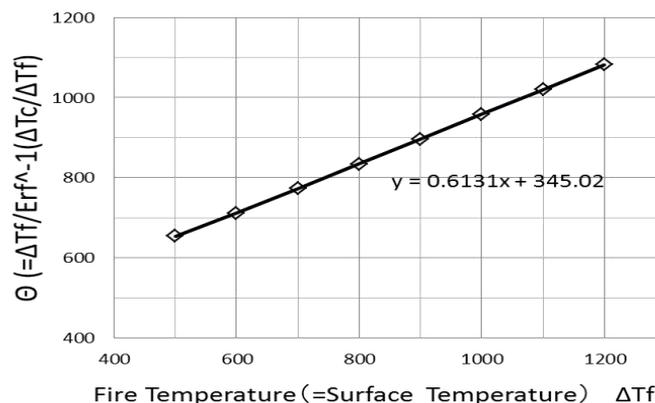


図 A9.1 火災加熱温度と耐火時間までの吸収熱量

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

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

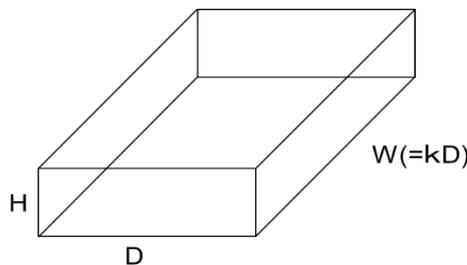


図 A10.1 火災区画の図解

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。

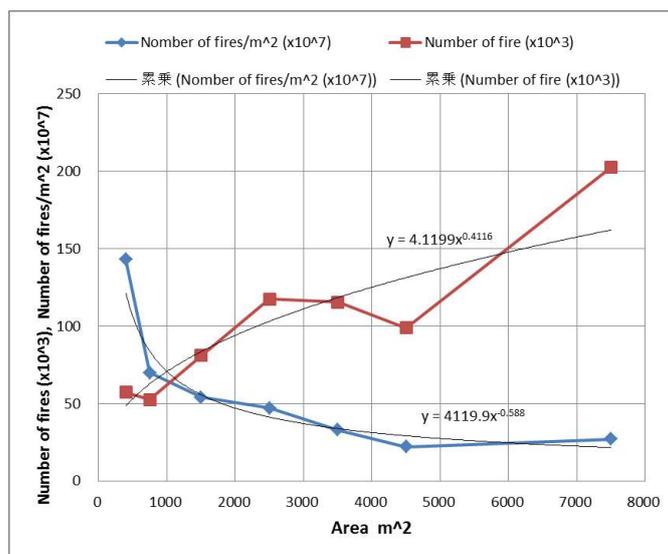


図 A11.1 東京消防庁管内の 1995～2002 年間における建物面積と出火数

[参考文献]

1. 野竹宏彰、池嶋由華、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. 池嶋由華、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