階避難安全検証法に規定される特性値および予測式に含まれる 安全率に関する考察

建物火災に対する目標避難安全水準の分析 その1

A CONSIDERATION ON THE SAFETY FACTORS IMPLEMENTED IN CHARACTERISTIC INPUT VALUES AND PREDICTION FORMULA DETERMINED IN VERIFICATION METHOD FOR EGRESS SAFETY FROM A FIRE FLOOR

An analysis of target safety level for egress during building fires Part 1

水野 雅之*¹, 島村 誠*², 徳永 英*³, 西田 朋子*⁴

南部 晶子*⁵, 原田 和典*⁶, 若松 孝旺*⁷

*Masayuki MIZUNO, Makoto SHIMAMURA, Takeshi TOKUNAGA, Tomoko NISHIDA,
Akiko NANBU, Kazunori HARADA and Takao WAKAMATSU*

The Ministry of Construction's Notification 1441 (2000) on "Verification Method for Egress Safety from a Fire Floor" is composed of a set of prescribed characteristic input values for fire load density, occupant density and so on, coupled with simplified formula to calculate fire and egress behavior. By combining them with building design variables such as room area and ceiling height, nominal escape time margin is calculated. To clarify the degree of safety implemented in the verification method, the stochastic variability in input values and uncertainties in calculation formula have been examined. Based on existing research and survey results, variability and uncertainty are expressed in terms of probability density functions. This work has clarified that: (1) Two variables (fuel load density and occupant density) are recognized as type A variables which contains inevitable stochastic variation. Six variables (walking velocity, specific flow rate, time to start escape, fire growth rate over combustible contents, fire growth rate over lining materials and time to smoke filling) are recognized as type B variables, which contain knowledge uncertainties due to incompleteness of prediction method. (2) The coefficients of variation are large in both type A and type B variables ranging 13 to 235 %. There is a need to reduce uncertainties associated with type B variables. (3) The partial safety factors vary in the range of -0.45 to 4.97. There is a possibility to rearrange the partial safety factors to obtain better balance between variables.

keywords : target safety level, egress safety, partial safety factors, probability density functions

目標安全水準, 避難安全, 部分安全率, 確率密度関数

1 はじめに

建築基準法の性能規定化により、火災時における在館者の避難安全性能を建物個別の条件を考慮して検証する方法が階避難安全検証法と全館避難安全検証法の2つの告示として制定された¹⁾。告示に適合すれば排煙設備、避難上の歩行距離の制限、避難階段の必要合計幅といった仕様規定の一部が適用除外になるため、多数の設計事例に適用され始めている。

階避難安全検証法（以下、単に検証法と記す）は、特性値（規定の入力値）と簡易化された予測式とで構成され、設計案の可否を一義的に判断できる。特性値は、在館者密度や可燃物密度等の本来的に変動

のある変数に対して、適切なパーセンタイル値を含むように入力値を設定したものと考えられ、暗黙のうちにある程度の安全率を包含している。一方、避難行動や火災（煙）性状の算定には、簡易化された予測式が使われる。これらは、理論的・実験的な研究成果にある程度の安全率を付加したものと考えられる。

従って、告示の計算体系においては、特性値と予測式の中に隠蔽された安全率の組み合わせによりある水準の安全性を求めていることになる。最終的に求められる安全水準は、あるひとつの社会的許容リスクと考えられるが、目標水準の具体的な言及はない。

構造設計の分野では、限界状態設計法²⁾にみられるように、入力条

*¹ 東京理科大学 大学院生・工修
（日本学術振興会 特別研究員）
*² 関東天然瓦斯開発(株) 工修
（研究当時 東京理科大学 大学院生）
*³ 名古屋大学 大学院生
（研究当時 東京理科大学 学部生）
*⁴ 東京理科大学 大学院生
*⁵ 損害保険料率算出機構 工修
*⁶ 京都大学 助教授・博士(工学)
*⁷ 東京理科大学 教授・工博

Doctoral Student, Tokyo University of Science, M. Eng.
(JSPS Research Fellow)
Kanto Natural Gas Development Co., Ltd., M. Eng.

Graduate Student, Nagoya University

Graduate Student, Tokyo University of Science
Non-Life Insurance Rating Organization of Japan, M. Eng.
Assoc. Prof., Kyoto University, Dr. Eng.
Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

件の変動を確率的に捉えた上で、失敗確率（超過確率）を許容水準以下とする設計法が提案されている。火災安全の分野では、例えば、リスク分析の手法を適用して安全水準を定量的に表現する手法が Magnusson 等により示されており³⁾、Frantzich はこれを用いて複数設計案の安全性をリスクの相対比較により評価している⁴⁾。

性能設計を明示的に行うためには、まずは目標水準（あるいは許容失敗確率）を明らかにすることが必要と筆者らは考える。そこで、本研究では、階避難安全検証法（以下、単に検証法と記す）に適合する設計案が最低限保有する安全率を信頼性工学の方法⁵⁾により分析し、検証法が担保する安全性、換言すれば検証法が目標とする安全水準を明らかにする。そのための第一段階として、本論文（その1）では、検証法に用いられる入力変数の変動と予測式の精度を既往の実験・調査結果から推定し、確率密度関数（probability density function 以下、pdf）の形で表現するとともに、検証法の特長値および予測式の中に含まれる安全率を明らかにする。

2 信頼性工学から見た階避難安全検証法の分析

図1に示すように、居室において発生が予測される火災において、在館者が計画された避難経路を通して安全に避難できることを確認することが検証法の基本概念である。検証法に適合するためには、避難完了時間 t_e が、避難限界時間（避難経路に煙が降下するまでの時間 t_s ）より短いことが求められる[注1]。

$$t_e \leq t_s \quad (1)$$

$$\begin{aligned} t_e &= t_{start} + t_{travel} + t_{queue} \\ &= f(A_{area}, A_{co}, A_{room}, A_{load}, A_{st}, B_{neck}, B_{load}, B_{room}, B_{neck}, \\ &\quad l_i, a_n, N, p, q_i, v) \end{aligned} \quad (2)$$

$$t_s = f(A_{room}, H_{room}, w, q_i, \alpha_m) \quad (3)$$

ここで、式(1)の両辺の差を避難余裕時間 t_{margin} として定義すれば、次式が検証法を満たすための条件となる。

$$t_{margin} = t_s - t_e \geq 0 \quad (4)$$

図1 階避難安全検証法の基本概念

検証法においては、入力値（在館者密度、可燃物密度など）として規定の値を使うことにより避難余裕時間 t_{margin} は確定的に算出される。また、現実の多くの火災事例が示すように、防災設備（防火扉、排煙設備など）の故障や不作為が被害を招くことが多いが、検証法においては各種防災設備が正常に作動することを前提にしている。

しかし、実態論として考えれば、避難余裕時間は確定値ではなく、入力変数の変動に伴うばらつきが生ずる。また、防火戸の開鎖失敗といった事象により計画通りの避難ができない確率が存在する。本研

究においては、これらのうち前者によるばらつきを定量化することを目的とし、個々の設備機器の作動信頼性は別途方策により確保されるものと考え、本論文の範疇では扱わない[注2]。

式(4)を確定値ではなく、入力変数の変動を考慮に入れて確率的に計算すれば、ある頻度で避難余裕時間が負値となり、避難に失敗するという結果を得る。従って、入力変数の変動を定量化した上で、式(4)により避難余裕時間の変動を調べれば検証法の求める安全水準が失敗確率（避難余裕時間が負値となる確率）として得られる。

検証法の入力変数を分類すると、図2に示すように、床面積や扉幅といった設計値として確定するものと、不確定なものに分けられる。さらに、不確定なものは、本質的な変動が避けがたいもの（ p, q_i ）と、予測式の誤差に代表されるような不確実性を表すもの（ $v, N, t_{start}, \alpha_f, \alpha_m, t_s$ ）とに分類される。信頼性工学の方法では、前者をタイプA変数、後者をタイプB変数と呼んで区別される。タイプA変数の変動は、減らすことが不可避であり、いかなる設計法を採るにしても何らかの安全率を考えておくべきものである。一方、タイプB変数のばらつきは、予測技術の進歩に伴い将来的に縮小できるものである。

図2 信頼性工学の方法に基づく入力変数の分類

3 変数の変動とばらつきの実態調査

前節において、タイプAおよびタイプBに分類された変数について、その変動の実態を既往の文献データを集計してpdfの形で表現することを試みた。以下、その結果を示す。

3.1 タイプA変数

タイプA変数に分類される確率変数は、在館者密度（ p ）、収納可燃物の発熱量密度（ q_i ）の2つであり、検証法においては室用途毎に特性値が定められている。データが比較的揃っている用途として事務室を選び、既往の文献から該当する調査結果を集計してpdfを求めた。

3.1.1 在館者密度 p [人/㎡]

在館者密度に関する既往の調査結果には、居室に属する登録人数に対する在館者数の比率を時間帯別に調べた結果⁶⁾、登録人数を居室面積で除した値を業種別、建物規模、居室面積別に調べた結果^{7,8,9)}などが存在する。本研究では、これらのうち、事務作業を主とする空間の調査結果（以下、事務系事務室）のみを抽出してヒストグラムを作成した[注3、4]。

結果を図3に示す。平均は0.122人/㎡、標準偏差は0.07人/㎡である。全部で393個の標本が得られ、ヒストグラムの形状から対数正

規分布

$$p = \text{LogNormal}(0.122, 0.07) \text{ [人/m}^2\text{]} \quad (5)$$

に従うものと推定される。検証法の規定値は $0.125 \text{ [人/m}^2\text{]}$ であり、ほぼ平均値に対応する。

図3 在館者密度 $p \text{ [人/m}^2\text{]}$ の調査結果と確率密度関数(事務系事務室)

3.1.2 収納可燃物の発熱量密度 $q_l \text{ [MJ/m}^2\text{]}$

既往の事務室の調査結果は、管理部門等の事務系事務室と設計等の技術系事務室とに分けて整理されることが多い。本研究もこれに倣い、技術系と事務系とにわけて調査結果^{(10),(11)}を整理した。

図4に、事務系事務室の調査結果を示す。平均は 14.1 kg/m^2 (235 MJ/m^2)、標準偏差は 4.1 kg/m^2 (65.4 MJ/m^2) である。データ数が不十分で分布形の推定は困難であるが、構造積載荷重が対数正規分布に従う⁽¹²⁾と考えられていることを考慮して、対数正規分布

$$q_l = \text{LogNormal}(235, 65.4) \text{ [MJ/m}^2\text{]} \quad (6)$$

をあてはめた結果を図中の実線により示した。検証法の規定値は、 35 kg/m^2 (560 MJ/m^2) であり、変動範囲に対してかなり大きな値が設定されている。

図4 火災荷重 $q_l \text{ [MJ/m}^2\text{]}$ の調査結果と確率密度関数(事務系事務室)

3.2 タイプB変数

タイプB変数として認識されるものは、避難開始時間 t_{start} 、収納可燃物の火災成長率 α_f 、煙降下時間 t_s 、歩行速度 v 、流動係数 N 、内装用建築材料の火災成長率 α_m の6個である。これらのうち、避難開始時間 t_{start} 、収納可燃物の火災成長率 α_f 、煙降下時間 t_s の3つは、明示的な変数ではなく、予測式の誤差として認識される。これを定量化するにあたり、予測式の補正係数を次式により定義する。

$$f_{var} = \frac{\text{(実験・調査による値)}}{\text{(実験・調査条件を検証法の予測式に代入して得られる値)}} \quad (7)$$

ここに、添字 var は予測される変数名に対応し、 t_{start} 、 α_f 、 t_s のいずれかである。

タイプA変数と同様に、タイプB変数も用途特性に依存すると考えられるので、以下では事務室を対象とした調査結果を集計した結果を示す。

3.2.1 歩行速度 $v \text{ [m/min]}$

歩行速度に関する調査結果は多数存在するが、事務所用途の特徴として、1) 日常的に当該建築物を利用し、2) 成人で自力避難が可能の人が大多数を占めるということが挙げられる。また、在館者密度はそれほど高くないから、高密度の群集歩行状態は考えにくい。

従って、特定者の利用する建物における調査^{(13),(14)}のうち、歩行者密度が 1.2 人/m^2 以下の結果を集計した。結果を図5に示す。平均値は 73.1 m/min で検証法の規定値 78 [m/min] よりわずかに小さい。また、標準偏差は 9.5 m/min でありそれほど大きくない。

図5 歩行速度 $v \text{ [m/min]}$ の調査結果と確率密度関数(歩行者密度 1.2 人/m^2 以下の場合)

3.2.2 流動係数 $N \text{ [人/m} \cdot \text{min]}$

扉通過時の流動係数の測定値として、電車降車時と劇場退出時の調査結果^{(15),(16)}が存在する。両者を比較した結果、前者の方が大きい値を示した。これは、前者の方が早く扉を通過したいという心理が作用したためと考えられ、火災時の避難状況に対応していると言える。よって、前者の流動係数の測定値を採用し pdf を求めた。結果は図6に示すように、

$$N = \text{Normal}(111, 18.3) \quad (8)$$

となり、検証法の規定値 $90 \text{ [人/m} \cdot \text{min]}$ は平均値より小さい。

図6 流動係数 $N \text{ [人/m} \cdot \text{min]}$ の調査結果と確率密度関数

3.2.3 避難開始時間の補正係数 $f_{tstart} \text{ [-]}$

検証法における避難開始時間は、出火室の床面積 A_{room} の平方根を

用いて次式で計算される。

$$t_{start,D} = \sqrt{A_{room}} / 30 \quad [\text{min}] \quad (9)$$

しかし、避難開始時間は、床面積だけでなく、火災性状とその結果生ずる煙や炎の発見のしやすさ等に関連するものと推測される。ただし、現状においては火災状況と関連させて避難開始時間を調査した結果が十分に集積しているとは言い難い。そこで、居室避難に関して、実態に近いと思われるモデルを考え、想定される空間条件に対して計算を行い、調査の代替とする。

事務室空間においては、ある程度は見通しがあり、在館者は覚醒状態であるから、火災現象として煙または火炎を認識した後に避難を開始すると考える。そこで、火災現象の認識としては、1) 煙層厚さが天井高さの 1/10 になる時刻、2) 火災の発熱速度が 600kW となり火炎が容易に視認される時刻、の 2 つのうち短い方を採る。

火災を認識してから避難行動を起こすまでの時間は人によるばらつきが不可避である。その程度は不確かであるが、対数正規分布 LogNormal(1, 2) を想定する[注 5]。ただし、上記の火災状況は、いずれも切迫しており、火災を認識すれば直ちに避難行動を開始することが想定されるので、平均値に相当する 1 分を差し引く。その結果、次式により避難開始時間を計算する[注 6]。

$$t_{start,cal} = \min \left\{ \left(\frac{(0.9H_{room})^{-2/3} - H_{room}^{-2/3}}{0.028(\alpha_f + \alpha_m)^{1/3} A_{room}^{-1}} \right)^{3/5} + 60, \frac{600}{\alpha_f + \alpha_m} + 60 \right\} + \text{LogNormal}(1,2) - 1 \quad (10)$$

$$\alpha_f = \max(0.0125, 2.6 \times 10^{-6} q_i^{5/3}) \quad (11)$$

計算にあたっては、一般的な事務室を想定し、床面積 A_{room} は 50～1500m² の範囲からランダムサンプリングした値、天井高さは 2.66m[注 7]、内装用建築材料の火災成長率 α_m は 0.014kW/s² (準不燃材料に対応する値)、収納可燃物の火災成長率 α_f は、収納可燃物の発熱密度 q_i を式(6)に従ってランダムサンプリングした値を検証法に規定される式(11)に代入して求めた値とした。

1000 回の計算を行った結果を、式(9)による値と比較して図 7 に示す。ばらつきは大きいものの、式(9)の値を 2 倍すればモデルにより計算した避難開始時間の平均値となる。同一の結果をヒストグラムとして表現した結果が図 8 である。分布形は少し異なるが、避難開始時間が極端に大きくなる場合の頻度が無視できないことから対数正規分布を当てはめることにする。

図 7 避難開始時間の補正係数 ($A_{room}=50 \sim 1500 \text{ m}^2$, $H_{room}=2.66 \text{ m}$, $q_i=\text{LogNormal}(235,65.4) \text{ MJ/m}^2$, $\alpha_m=0.014 \text{ kW/s}^2$, 1000 samples)

図 8 避難開始時間の補正係数 f_{start} の予測結果と確率密度関数

3.2.4 収納可燃物の火災成長率 α_f [kW/s²]

検証法においては、収納可燃物の火災成長率は発熱密度の関数として式(11)により計算される。発熱密度と火災成長率の両者が明らかかな実火災実験は 4 例ある¹⁷⁻²⁰⁾。

また、発熱速度が明記されていないが火災室の温度上昇よりフラッシュオーバー (以下、F O) 時間が読み取れるものが 11 例ある²¹⁻²⁵⁾。これらについては、F O 時間から発熱速度を逆算して火災成長率を推定した。McCaffrey らによれば火災温度と発熱速度の関係は次式で与えられる²⁶⁾。

$$Q = (\Delta T / 0.0236 T_{\infty})^{3/2} (A_T \sqrt{k_{pc} A \sqrt{H}})^{1/2} t^{1/6} \quad (12)$$

実験時の条件を上式に代入して F O 時の発熱速度を求め、実験データから読み取った F O 時間 (区画内温度が 600℃ に達した時刻、あるいは急激な温度上昇が生じた時刻) の二乗で割って火災成長率 $\alpha_{f,exp}$ を求めた。

一方で、実験における可燃物密度を検証法の予測式(11)に代入して火災成長率 $\alpha_{f,D}$ を求め、実験結果からの推定値 $\alpha_{f,exp}$ との比率 $f_{\alpha_f} (= \alpha_{f,exp} / \alpha_{f,D})$ を求め、全部で 15 例の実験結果を図 9 にプロットした。平均値は 0.442 に対して標準偏差は 0.521 となり、火災成長率の予測精度はあまり高くない。

図 9 収納可燃物の火災成長率の補正係数 f_{α_f} [-] のばらつきと確率密度関数

3.2.5 内装用建築材料の火災成長率 α_m [kW/s²]

内装用建築材料の発熱速度は、検証法においては材料の区分 (不燃、準不燃、難燃、木材等) に応じて規定値が定められている。しかし、同一区分の材料であっても燃え広がり方に差がある。そこで、内装用建築材料表面に沿った燃え広がりを簡易にモデル化し、種々の材料の火災成長率を予測した結果から pdf を求めた。

通常の事務室空間を考えると、準不燃材料を用いることが一般的である。すると、着火後に激しく上方火炎伝播が起こるような材料は排除される。従って、直近の収納可燃物の燃焼により生じた火炎が接触した部分が順次燃焼すると考える。すなわち、任意の時刻 t における内装用建築材料の発熱速度 $Q_m(t)$ [kW] は、接炎面積の増加速度 $dA_w(t)/dt$ と、材料に接炎し着火した後の単位表面積あたりの発熱速度 $q_w(t)$ とを時間毎に掛けて足し合わせたものとなる。

$$Q_m(t) = \int_0^t \frac{dA_w(t-\tau)}{d\tau} q_w(\tau) d\tau \quad (13)$$

接炎面積については、図 10 に示すように、室の隅角に火源がある状況を考え、火源の発熱速度 $Q_f(t)$ 、火源半径 R_f [m] を次式で想定して計算を行った[注 8]。

$$Q_f = (1/4)\alpha_f t^2 \quad [\text{kW}] \quad (14)$$

$$R_f = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_f} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{Q_f}{1600}} = \sqrt{\frac{\alpha_f}{400\pi}} t \quad [\text{m}] \quad (15)$$

ただし、式(11)においては $q_f=560\text{MJ}/\text{m}^2$ を用い $\alpha_f=0.0989$ とした。

図 10 内装用建築材料の燃焼範囲のモデル化

材料の単位表面積あたりの発熱速度 $q_w(t)$ については、ルームコーナー試験の結果を参照して求めた。準不燃材料の発熱速度は図 11 に示すように、バーナーの発熱速度を 100kW から 300kW に増加させた直後にピークが出る。ピーク部分の発熱速度を、100kW 時と 300kW 時の接炎面積の差で割って試験された材料毎に $q_w(t)$ を求めた。

図 11 ルームコーナー試験における準不燃材料の燃焼パターン

分析は、総プロ報告書²⁷⁾所載のデータのうち、準不燃材料のカテゴリに入る 11 個について行った。結果は図 12 に示すように、

$$\alpha_m = \text{LogNormal}(0.034, 0.044) \quad (16)$$

となり、平均値は 0.034 であり、検証法の値より若干大きい。極端に大きな値となるものもあり、ばらつきはかなり大きい。

図 12 内装用建築材料（準不燃材料）の火災成長率 α_m [kW/s²] のばらつきと確率密度関数

3.2.6 煙等降下時間の補正係数 f_{ts} [-]

検証法における煙等降下時間は、室上部に蓄煙可能な体積を単位時間当たりの煙蓄積量（発生量と排出量の差）で割ることにより次式で計算される。

$$t_s = \frac{(H_{room} - H_{lim}) \cdot A_{room}}{\max(V_s - V_e, 0.01)} \quad (17)$$

上式は見かけ上簡易化されているが、基本的には初期火災時のプルームによる煙層降下時間を計算するものである。そこで、既往の実大実験における煙層降下時間の測定結果²⁸⁻³⁵⁾を $t_{s,exp}$ とし、実験時の条件を式(17)に入力して得られる値 $t_{s,D}$ との比 $f_{ts}(=t_{s,exp}/t_{s,D})$ を求めた[注 9]。結果を、室の煙制御方式により、蓄煙、自然排煙、機械排煙の 3 つに分類して示す。

蓄煙の場合には、28 個の実験結果が得られた。結果をそのまま単純集計して pdf を作成しても良いが、図 13 に示すように室床面積に対して明確な相関関係が見られる。床面積が大きな室では、補正係数はおよそ 2 となるが、小さな室では補正係数が極めて大きくなる傾向が見られる。従って、床面積に対する依存性をべき乗で近似し、その残差を図 14 に示すようにランダム誤差とみなして pdf を求めた。最終的に、煙降下時間の補正係数として次式を得た。

$$f_{ts} = 5.644 A_{room}^{-0.144} + \text{Normal}(0, 0.586) \quad (18)$$

自然排煙および機械排煙についても、床面積等の空間形状への依存性が推測されるが、得られたデータ数が自然排煙で 5 ケース、機械排煙で 8 ケースしかなく、相関を導くには不十分であった。そのため、自然排煙と機械排煙については床面積への依存性を無視して単純集計により pdf を導いた。ヒストグラムを図 15、16 に示す。両者とも平均値は 2 をすこし越えたところにあり、検証法の予測式はおおむね安全側の予測となる。

図 13 煙降下時間の補正係数 f_{ts} と室床面積 A_{room} の相関

図 14 煙降下時間（蓄煙方式）の補正係数の残差 ($f_{ts}-5.64A_{room}^{-0.144}$) と確率密度関数

図 15 出火室の煙降下時間（自然排煙方式）の補正係数 f_{ts} [-] のばらつきと確率密度関数

図 16 出火室の煙降下時間（機械排煙方式）の補正係数 f_{ts} [-] のばらつきと確率密度関数

4 考察

4.1 各変数の変動係数

3.1 および 3.2 節で求めたタイプA変数、タイプB変数の pdf を表

1 にまとめて示す。同時に、確率変数のばらつきを比較するため、変動係数 η_x を次式により求めた。

$$\eta_x = (\sigma_x / \mu_x) \times 100 \quad [\%] \quad (19)$$

タイプA変数の変動係数は、収納可燃物の発熱量密度が 28%、在館者密度が 57% となり、両者とも変動は小さくない。

タイプB変数のうち、歩行速度と流動係数のばらつきは小さいが、他の変数（出火室の避難開始時間の補正係数、収納可燃物および内装用建築材料の火災成長率、煙降下時間の 4 つ）については変動係数が 100% を越えており、極めて大きなばらつきがある。これら 4 つの予測精度の改善が望まれる。

4.2 各変数の規定値に対応する部分安全率と超過確率

各変数 $x = \{p, q, v, N, t_{start}, \alpha_f, \alpha_m, t_s\}$ の規定値 x_D に対応する部分安全率 γ_x （各変数の規定値が、平均値 μ_x から標準偏差 σ_x の何倍離れているかを示す係数、図 17 参照）を

$$\gamma_x = (x_D - \mu_x) / \sigma_x \quad (20)$$

により計算し〔注 10〕、超過確率 P_{ex} を 3 節で求めた pdf から求めた。

結果を表 1 の右側 3 列に示す。超過確率が大きいのは、在館者密度 (37.7%)、歩行速度 (48.2%)、避難開始時間 (57.9%)、内装用建築材料（準不燃）の火災成長率 (65.5%) である。逆に、収納可燃物の発熱量密度 (0.1 以下)、煙降下時間の補正係数 (12.7%、0.1% 以下、9.7%) は超過確率が小さく設定されている。

各変数の影響度（感度）にも依存するが、避難開始時間や在館者密度等の避難行動に関わる変数の設定が平均値に近いのに対して、収納可燃物の発熱量密度や煙制御（煙降下時間の補正係数）といった火災物理現象に関わる変数の設定には大きな安全率が含まれている。

図 17 検証法の規定値に対応する部分安全率と超過確率

表 1 タイプA、タイプB変数の確率密度関数の一覧

タイプ	確率変数	標本数	確率密度関数	変動係数 [%]	検証法の規定値		
					規定値	部分安全率	超過確率 [%]
A	収納可燃物の発熱量密度: q_i [MJ/m ²]	5	LogNormal (235, 65.4)	28	560	4.97	0.1 以下
	在館者密度: p [persons/m ²]	393	LogNormal (0.122, 0.070)	57	0.125	0.043	37.7
	歩行速度: v [m/min]	62	Normal (73.1, 9.51)	13	72	0.116	48.2
B	流動係数: N [persons/m/min]	343	Normal (111, 18.4)	17	90	1.14	12.7
	出火室の避難開始時間の補正係数: f_{ts} [-]	1000*	LogNormal (2.00, 2.61)	131	1	-0.383	57.8
	収納可燃物の火災成長率の補正係数: α_f [kW/s ²]	15	LogNormal (0.442, 0.521)	118	1	1.07	9.0
	内装用建築材料（準不燃）の火災成長率: α_m [kW/s ²]	11	LogNormal (0.034, 0.044)	129	0.014	-0.455	65.5
	煙降下時間の補正係数: f_{ts} [-]	蓄煙	$5.64A_{room}^{-0.144} + \text{Normal} (0, 0.586)$	223	1**	2.23**	12.7**
		自然排煙	LogNormal (2.350, 0.470)	235	1	2.87	0.1 以下
		機械排煙	LogNormal (2.202, 0.875)	220	1	1.37	9.7

* モデル計算のサンプル数、** $A_{room}=500\text{m}^2$ とした時の値

図 18 は、各変数の規定値に対応する部分安全率と変動係数との関係を示したものである。変動係数の大小にはほとんど相関なく部分安全率は-0.45 から 4.97 の範囲でばらついている。一般的な工学的システムでは、部分安全率を 0~2 とすることが多いが、ここで示された値は通常の範囲を逸脱しており、もう少しバランスの良い設定を行う余地がある。

図 18 確率変数毎の変動係数と部分安全率の関係

5 結論

本研究では、階避難安全検証法の計算体系を信頼性工学の手法を用いて分析し、タイプA（確率変数）、タイプB変数（予測のばらつき）として認識される変数のばらつきを定量化し、確率密度関数（pdf）として表した。その結果、以下の性質が明らかになった。

（1）タイプA変数として、収納可燃物の発熱量密度、在館者密度の2つが認識され、タイプB変数として、歩行速度、流動係数、出火室の避難開始時間、収納可燃物の火災成長率、内装用建築材料の火災成長率、煙降下時間の6つが認識される。

（2）タイプA、B変数とも変動係数は大きく、13%~235%の範囲にある。特に、タイプB変数の変動係数が小さくなるように研究結果の蓄積に応じた予測式の改良が望まれる。

（3）現状で設定されている部分安全率は、変動係数との相関は特に見られず、-0.45~4.97の範囲にある。

6 付記

上記の結論（3）に関連して、部分安全率、すなわち入力値の設定については個々の確率変数の変動が避難余裕時間の変動に与える感度を含めて最適なバランスを考えることが可能であり、詳細は続報において検討する。

記号

<英字>

A_{area}	階避難計算の対象部分の床面積 [m ²]
A_{co}	廊下の床面積 [m ²]
A_{load}	階の居室床面積の合計 [m ²]
A_{room}	居室の床面積 [m ²]
A_T	室の内表面積 [m ²]
A_{st}	階段室の床面積 [m ²]
A_w	内装材料への接炎面積 [m ²]
$A\sqrt{H}$	開口因子 [m ^{3/2}]
B_{load}	廊下に面する居室出口扉幅の合計 [m]
B_{neck}	避難経路上の最小出口幅 [m]
B_{room}	居室の出口幅 [m]

B_{st}	階段室への出口幅 [m]
f_{tstart}	避難開始時間の補正係数 [-]
f_{ts}	煙降下時間の補正係数 [-]
f_{cf}	収納可燃物の火災成長率の補正係数 [-]
H_{room}	天井高さ [m]
H_{lim}	限界煙層高さ [m]
$\sqrt{k\rho c}$	室周壁材料の熱慣性 [kW/s ^{1/2} ・m ² ・K]
l_l	出口までの歩行距離 [m]
LogNormal(μ, σ)	平均 μ 、標準偏差 σ の対数正規分布確率密度関数
Normal(μ, σ)	平均 μ 、標準偏差 σ の正規分布確率密度関数
p	在館者密度 [persons/m ²]
q_l	収納可燃物の発熱量密度 [MJ/m ²]
q_w	内装材料に接炎後の単位面積あたりの発熱速度 [kW/m ²]
v	歩行速度 [m/min]
N	流動係数 [persons/m・min]
t_e	避難完了時間 [min]
t_s	煙降下時間 [min]
t_{start}	避難開始時間 [min]
t_{travel}	避難出口までの歩行時間 [min]
t_{queue}	避難出口の通過時間（滞留時間） [min]
v	歩行速度 [m/min]
V_e	煙排出量[m ³ /min.]
V_s	煙発生量[m ³ /min.]
w	排煙風量 [m ³ /min]
<ギリシャ文字>	
α_f	収納可燃物の火災成長率 [kW/m ²]
α_m	内装用建築材料の火災成長率 [kW/m ²]
<添字>	
exp	実験値
D	検証法の規定値

注釈

- [1] 避難完了時間および避難限界時間の計算方法は文献1を参照されたい。
- [2] 建築基準法の枠組みの中では、各種防災設備の作動信頼性は個々の設備毎の技術基準により作動信頼性が確保されていることを前提として検証法が適用される。本論文で行う分析でも、個々の設備毎の作動信頼性は別途確保されているとの立場をとることにより、検証法そのものが保有する安全率を明らかにする。
- [3] 文献6の調査結果には銀行の執務室も含まれているが、密度が他の業種に比べてきわめて小さい。来客ロビーの床面積が含まれていると推察されるのでここでの集計からは除外した。
- [4] 文献7、8の調査結果 また、通常の執務時間においては、在館者数は登録人数の95%程度⁹⁾であったので、登録人数を床面積で割って在館者密度とした。
- [5] 火災を認識してから避難を決定するまでの時間については、定量的な議論をするデータが揃っていないと言え難い。ここでは、階避難安全検証法における避難開始時間が、対象床面積の平方根の1/30に3分を足していることと、既往の調査結果^{35,37)}がおおむね平均1分、標準偏差2分程度であることからLogNormal(1,2)とした。ただし、火災危険が切迫するまでの時間はすでに考慮されているので、本文中に述べたように、平均値の1分を差し引き、ばらつきのみを与えることとした。
- [6] 式(10)の第1項の前半は煙層厚さが天井高さの1/10になる時刻、後半は火災の発熱速度が600kWに達する時刻を意味する。前者は、 t^2 火源（その発熱速度 Q [kW]は、時間 t [s]を用いて $Q=(\alpha_f+\alpha_m)t^2$ と表す）から生ずる火災ブルームによって形成される煙層の降下予測式³⁸⁾において、到達煙層下端高さを $0.9H_{room}$ とし、種々の定数を丸めて時間について解いた式である。後者は、発熱速度 $Q=(\alpha_f+\alpha_m)t^2$ を600kWとして時間について解いた式である。
- [7] 既存の事務室の天井高さを公表された資料から調査したところ、ばらつきは小さいので平均値2.66mを採用した。

[8] 通常の固体可燃物では既往の実験結果等から類推して、単位床面積あたりの燃焼速度はおよそ 0.1 kg/m^2 程度と考えられている。これに木質系可燃物の単位重量あたりの発熱量を掛けて単位床面積あたりの発熱速度を 1600 kW/m^2 として火源半径 R_f を求めた。

[9] 式(17)は通常は成長火源 $Q=(\alpha_r+\alpha_m)t^2$ に対して適用されるが、既往の実験の多くは、一定速度で燃焼する定常火源を用いている。しかし、式(17)を導く過程で、煙発生量が等しくなる定常火源の発熱速度を $Q_\alpha=21\alpha A_{room}$ として求め、 Q_α なる定常火源に対する蓄煙時間を求めている¹⁾。従って、実験データから f_{15} を求めるためには、実験における発熱速度をそのまま Q_α に代入した。

[10] 部分安全率の符号は、変数 x の非超過確率を増加させる向きを正とする。すなわち、 x が増加すると避難時間の余裕 t_{margin} が減少する向きを正とする。

謝辞

本研究を行うにあたり、国土交通省 国土技術政策総合研究所の萩原 一郎博士には避難行動関係、山名俊夫氏には煙流動実験関係、吉田正志氏には文献[27]の試験データについてご助言を頂いた。また、(株)大林組技術研究所の山口純一氏には煙降下時間に関して貴重な示唆を頂いた。研究当時、東京理科大学若松研究室に所属した川畑仁生君および鎌崎晃君には、文献調査やデータ整理などの協力を頂いた。なお、本研究費の一部は、平成13年度文部科学省科学研究費(基盤研究 12555163)の補助を受けた。紙面を借りて感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 平成12年建設省(現、国土交通省)告示第1441号(2001年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説、井上書院、2001)
- 2) (社)日本建築学会編、鋼構造限界状態設計指針・同解説、1998
- 3) Sven-Erik Magnusson, Hakan Frantzich and Kazunori HARADA, "Fire Safety Design Based on Calculations: Uncertainty Analysis and Safety Verification", Fire Safety Journal, Vol. 27, pp.305-334, 1997
- 4) Magdalena Angerd, Hakan Frantzich, "The Use of Uncertainty Analysis in Performance Based Design", Proceedings of the 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, pp.179-189, Melbourne, Australia (2002)
- 5) Alfredo Hua-Sing Ang, Wilson H. Tang, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Wiley (New York), 1975
- 6) 岡田光正、吉田勝行、柏原士郎、辻正矩、建築と都市の人間工学 第4章、鹿島出版会、pp249-251, 1977
- 7) 長倉康彦、原担、石毛誠：オフィスビルにおける館内人口に関する二、三の考察、日本建築学会論文報告集第121号、pp.47-53, 1966
- 8) (社)日本火災学会：各種建築物の在館者人数の推定に関する調査、pp.33-58, 1992
- 9) 日本建築センター編：新・建築防災計画指針 1985年版、pp.42-43, 1985
- 10) manu 都市建築研究所：建築物内の可燃物量に関する実態調査、1983
- 11) 油野健志、山中秀利、大宮喜文、高橋清、田中孝義、若松孝旺：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、pp.1-8, 1996
- 12) (社)日本建築学会・編構造委員会・限界状態設計法小委員会、建築物の限界状態設計指針(案)第1版、1999
- 13) J. J. フルーイン、歩行者の空間、第3章、鹿島出版会、1974
- 14) 小関憲章、鉄道技術研究所速報、鉄道技術研究所、1968
- 15) 岡田光正、吉田勝行、柏原士郎、辻正矩、建築と都市の人間工学 第1章、鹿島出版会、1977
- 16) 植竹徹、渡部孝、奈良松範：出入口および階段降り口における群集の流動係数について、日本火災学会論文集、Vol.44, No.1-2, 1996
- 17) 火災予防審議会人命安全対策部会：三菱銀行金杉橋支店火災実験結果報告書、1974
- 18) 東京消防庁：千代田生命実験、東京消防庁、1974
- 19) 東京消防庁火災予防審議会：富国生命実験、東京消防庁、1976
- 20) 東京消防庁：歳前国技館火災実験結果報告書、東京消防庁、1985
- 21) 日本鋼構造協会鉄骨耐火特別委員会：鋼構造実建物の火災実験、日本鋼構造協会、1969
- 22) 神戸市消防局：ビル火災等実験報告、神戸市消防局、1969
- 23) A British Steel Technical, Fire Research Station Collaborative Project: *Natural Fires on Large Scale Compartments*, Department of Environment Building Research Establishment Fire Research Station, 1992
- 24) A European Joint Research Programme: *The Behaviour of Multi-storey Steel Framed Buildings in Fire*, 1999
- 25) 内田祥三：鉄筋コンクリート造アパートの火災実験報告(1)鉄筋コンクリート造アパートの火災実験について、建築雑誌、1918年4月
- 26) McCaffrey, B., J., Quintiere, J., G., Harklroad, M., F., "Estimating Room Temperatures and Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations", Fire Technology, 17(2), pp. 98-119, 1981
- 27) 建設省建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト 防・耐火性能評価技術の開発報告書、No.9-3, 日本建築センター、1998
- 28) Richard D. Peacock, Walter W. Jones and Richard W. Bukowski: *Verification of Model of Fire and Smoke Transport*, Fire Safety Journal, Vol.21, 1993
- 29) John A. Rockett, Masahiro Morita and Leonard Y. Cooper: *Comparisons of NBS/Harvard VI Simulations and Data from All Runs of a Full-scale Multi-room Fire Test Program*, 1989
- 30) Toshio Yamana, Takeyoshi Tanaka: *Smoke Control in Large Scale Spaces*, Fire Science and Technology, Vol.5(1), Science University of Tokyo 1985
- 31) 田中孝義、山名俊男、中村和人：科技博バビリオンにおける実大排煙実験、建設省建築研究所、1986
- 32) Bjorn Karlson and James G. Quintiere: *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, 1999
- 33) Johan Lundin: *Uncertainty in Smoke Transport Models*, Swedish Fire Research Board (BRANDFORSK), 1997
- 34) 建設省総合技術開発プロジェクト：建築物の防火設計法の開発(煙制御・避難設計法の開発)報告書、1986
- 35) Ken Matsuyama, Masayuki Mizuno, Takao Wakamatsu, Kazunori Harada, "A Systematic Experiments of Room and Corridor Smoke Filling for Use in Calibration of Zone and CFD Fire Models for Engineering Fire Safety Design of Buildings", Fire Science and technology, Vol. 21(1), pp. 43-55, Science University of Tokyo, 2001
- 36) 中野美奈、萩原一郎：避難安全性能の検証に用いる避難開始時間の設定に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集・防火部門、pp.97-100, 2001年9月
- 37) Frantzich, H., Reaction Times Prior to Evacuation for Shops, Restaurants and Public Dance-Halls, LUTVDG/TVBB 3071 SE, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 1993
- 38) 田中孝義：火災安全工学入門、(財)日本建築センター、pp.197-199, 1997年7月

(2002年7月10日原稿受理、2002年10月30日採用決定)