

建物の火災危険度評価手法の開発

- シミュレーションによる工場の火災リスクの定量化 -

はじめに

平成12年6月の建築基準法性能規定化の導入など、建物火災に関する火災性状の予測式の開発や予測に必要な各種データの整備が格段に進んできている。平成13年3月には、事務所ビル、旅館など一般的な建築物の火災危険性を定量的かつ容易に評価する手法として、火災予防審議会答申『建築物の防災特性に応じた防火安全性の総合評価』¹⁾(以下、「東消モデル」と呼ぶ)が公表され、損害保険業界も個別の建物の火災危険度を確率的に評価する手法の開発に力を入れている^{2),3)}。

図0.1.1に示すように、建物火災の件数を用途別に見ると、住宅火災の件数が57%と最も多くなっているが、図0.1.2に示すように、高額な損害をもたらした火災に限定して見ると、工場の火災が最も多いことが分かる⁴⁾。また、大規模な工場には、火気管理・防災管理体制が充実しているものもあり、そのような工場については火災の危険性を個別に評価することが求められている。

そこで、当会研究部では、火災工学的手法を用いた建物の火災シミュレーションモデルを開発し、工場の火災リスク評価を行ったのでその概要を紹介する。

1. 工場の特徴と評価要因

他の用途の建物と比較すると、工場建物は、大規模な空間を持つ鉄骨造建物が多い。また、工場内には作業機械や収容動産の特徴的な配置があり、危険物やダンボールなどの多様な可燃物が大量かつ不均一に収容

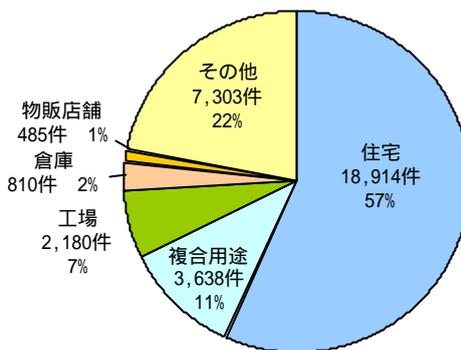


図0.1.1 建物火災件数

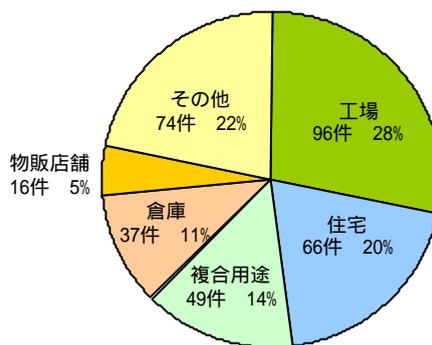


図0.1.2 損害額5,000万円以上の建物火災件数

されている場合が多い。

このような工場の特徴を踏まえ、本モデルでは、大規模な空間を持つ建物にも適用可能であること、建物内の収容物を自由に配置できるという前提条件のもと、以下の要因を評価することを目指すこととした。

業種	作業工程
火気管理状態	建物の規模・構造
可燃物の管理状態	収容設備の配置
危険区画	隣棟間隔
私設消防力	公設消防力

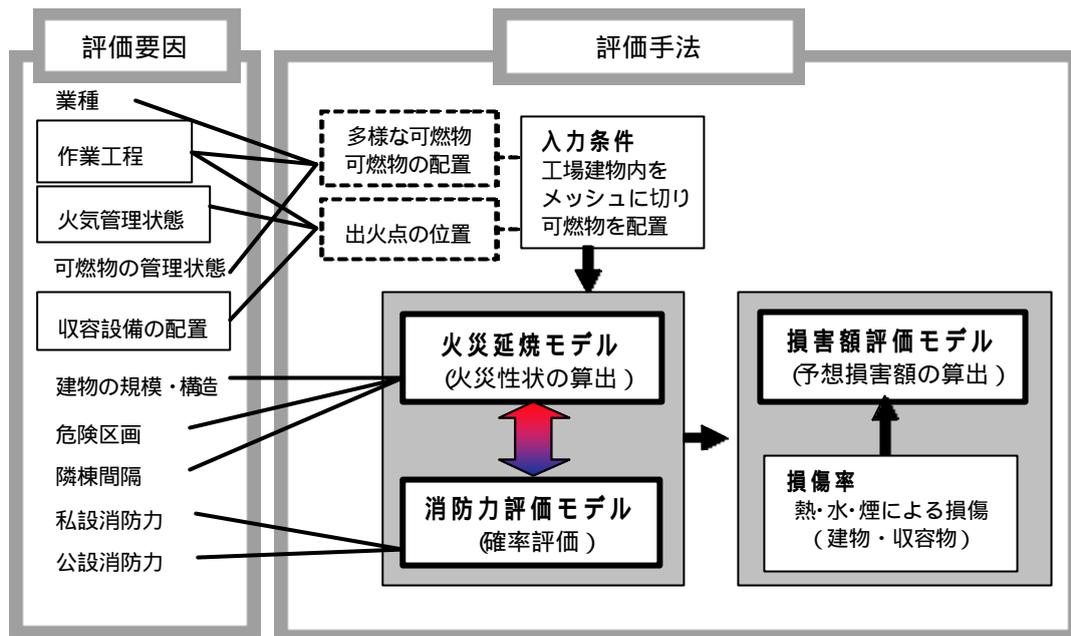


図2.1.1 火災シミュレーションモデルの構成

2. 火災シミュレーションモデルの構成

図2.1.1に示すように、本火災シミュレーションモデルは、火災延焼モデル、消防力評価モデル、損害額評価モデルの3つの評価モデルにより構成されており、以下の手順で計算を行う。

- 1) 火災延焼モデルでは、火災工学的理論に基づき、可燃物の量・質・配置、建物の規模・構造に応じて時々刻々と変化する火災性状を表す、焼損面積等のパラメーターを算出する。
- 2) 消防力評価モデルでは、東消モデルに基づき、消火設備等の設置状況や消火活動に従事する人の特性等を考慮した初期消火および公設消防の消防力を求め、火災延焼モデルで算出した火災性状を確率的に評価する。
- 3) 損害額評価モデルでは、火災延焼モデルで算出された焼損面積に、煙および水によって汚損する範囲を加えた罹災範囲を求め、その範囲内の価額と損傷率の積より損害額を予測する。

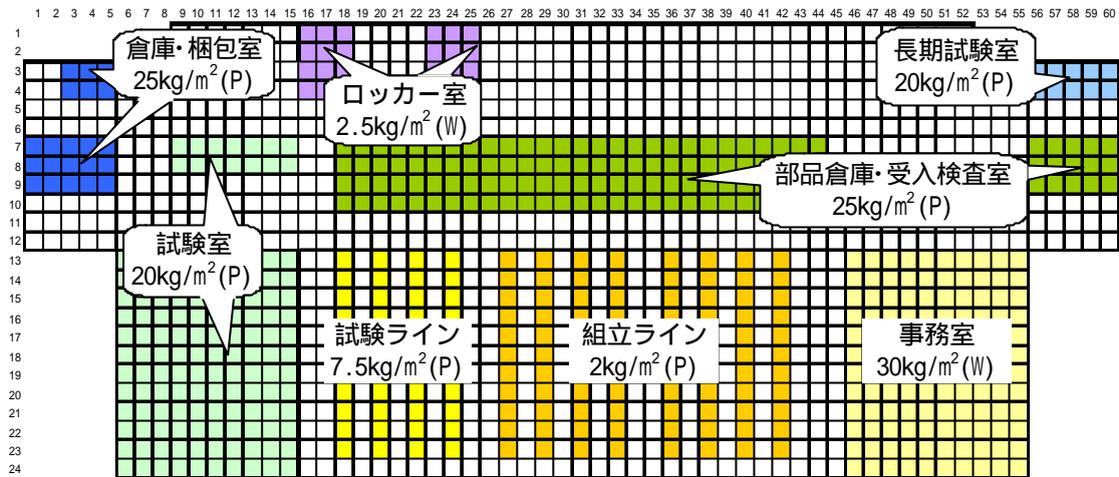
以下、延べ床面積1,276m²、階高3.8mの鉄骨造平屋建の一般機械器具製造業の工場を想定したケーススタディを通して、火災シミュレーションモデルの概要を説明する。

3. 火災シミュレーションモデルの概要

3.1 入力条件

3.1.1 収容可燃物と価額

計算対象の工場内を1m角のメッシュに区切り、各メッシュの用途に応じて、可燃物の量(kg/m²)と質(木質系もしくはプラスチック系)といった可燃物特性、機械・設備、収容品の価額を入力する。図3.1.1～図3.1.3は、想定したモデル工場について、工場の実態を勘案して設定した可燃物特性および工業統計等をもとに設定した価額である。なお、建物の価額分布は建物全体で一様とみなした。



注)Wは木質系可燃物、Pはプラスチック系可燃物を表す。外側の数字はメッシュの座標を表す。

図3.1.1 可燃物特性の設定例

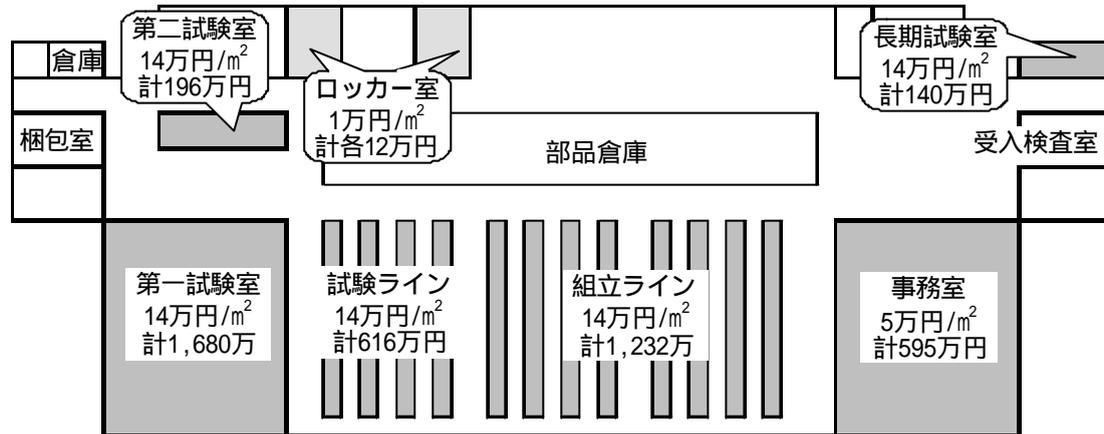


図3.1.2 機械・設備の価額設定例
(計4,483万円)

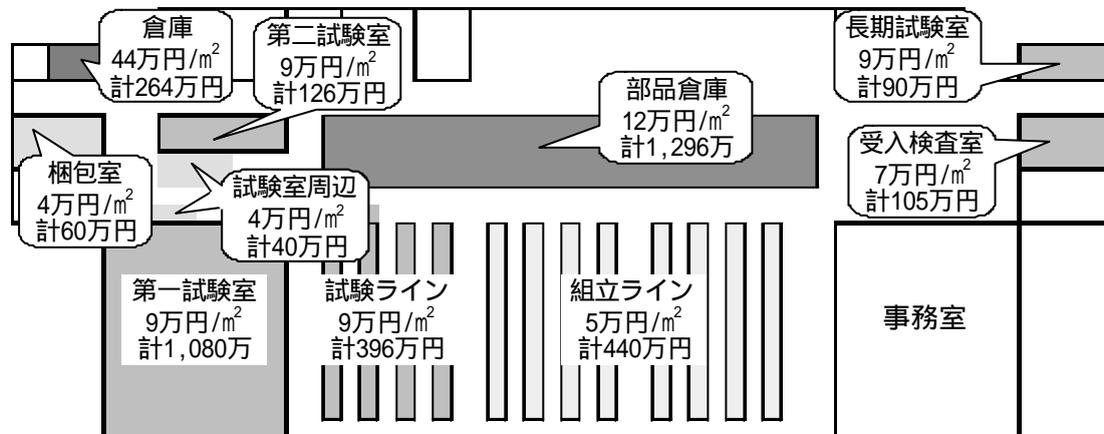


図3.1.3 収容品の価額設定例
(計3,897万円)

表3.1.1 建物の特性および防災特性の設定例

	入力項目	値の種類	モデル工場入力値	備考
建物の特性				
	床面積	数値[m]	1276	
	階高	数値[m]	3.8	
	開口の高さ	数値[m]	2.2	
	開口の幅	数値[m]	110.4	
	壁・床・天井の材質	選択項目1	普通コンクリート	
消火設備の設置状況				
	自動火災報知設備(感知器)の機能	選択項目2	熱感知器差動式1種	
	消火器	有無	有(無)	
	スプリンクラー設備	有無	有(無)	
	屋内消火栓設備	有無	有(無)	
	設備の維持管理度	選択項目3	標準	
自衛消防隊・防災センターの状況				
	自衛消防隊・防災センターの設置の有無	有無	有(無)	
	対象建物常駐人数	数値[人]	2	最大2名
	対象建物常駐者種類	選択項目4	従業員	
<自衛消防隊・防災センター 有 の場合のみ記入>				
	自衛消防隊・防災センター常駐人数	数値[人]	2	最大2名
公設消防の状況				
	最寄の消防署までの道のり	数値[km]	1.2	
	消防車両寄りつき場所	指定	消防拠点までの距離 ^{注)}	
	連結送水管位置	指定	50[m]	

注) 消防車両の寄り付き場所から、連結送水管位置を経由した消防拠点までの距離をいう。

3.1.2 建物の特性と防災特性

3.1.1で説明した入力条件の他に、建物の特性、消火設備の状況、自衛消防隊・防災センターの状況、公設消防の状況の4項目に関する条件を入力する。モデル工場の入力条件の設定例を表3.1.1に示す。

3.2 火災延焼モデル

3.2.1 火災延焼モデルの概要

火災延焼モデルでは、可燃物の燃焼過程と火災の拡大を計算し、時々刻々と着火するメッシュの数、室内の温度、煙層の高さ等の火災性状を算出する。ここでは、火災延焼モデルの基本的な部分である可燃物の燃焼過程と火災の拡大について説明する。

3.2.2 可燃物の燃焼過程

1つのメッシュ内にある可燃物を1個の可燃物と考え、その燃焼過程を計算する。可燃物の燃焼の程度を表すパラメーターとしては発熱速度を用いる。1個の可燃物の発

熱速度は着火後、時間の2乗に比例して増加し⁵⁾、やがてピークを迎え、その後減衰する⁶⁾。この過程は式(1)～(3)で表される。

$$Q_{growth} = 0.0125t^2 \quad \dots (1)$$

$$Q_{peak} = 90m_0^{2/3} \quad \dots (2)$$

$$Q_{decay} = 16000Km(t) \quad \dots (3)$$

ここで、 Q は可燃物の発熱速度[kW]、 m_0 は初期重量[kg]、 K は比例定数[-]、 $m(t)$ は時刻 t における可燃物重量[kg]である。

図3.2.1に初期重量が50kgの可燃物が燃焼した場合の燃焼過程を示す。

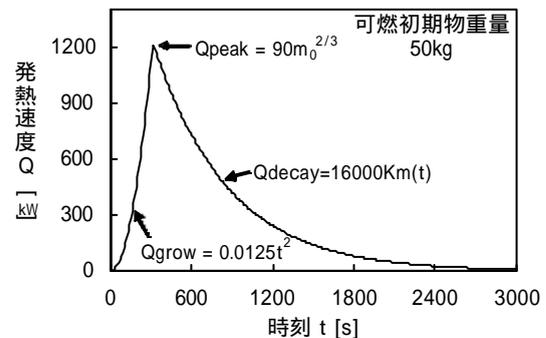


図3.2.1 可燃物の燃焼過程

3.2.3 火災の拡大

着火した可燃物(燃焼可燃物)の周辺にある着火していない可燃物(未燃可燃物)は、燃焼可燃物からの放射熱を受ける。火災延焼モデルでは、図3.2.2に示すように、未燃可燃物が周囲の燃焼可燃物から受ける放射熱により順次着火するとして火災の拡大を計算する。

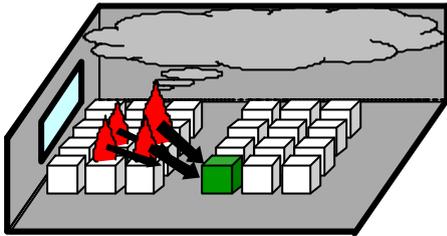


図3.2.2 未燃焼可燃物への放射

燃焼可燃物から未燃可燃物へ入射する熱量(I)は(4)式により求める⁵⁾。 I が(5)式で与える着火限界条件⁷⁾を超えたとき、その未燃可燃物は着火したとみなす。

$$I = \frac{Q/3}{4\pi X^2} \quad \dots (4)$$

X : 可燃物間の距離[m]

$$\int I^2 dt = 60,000 \quad \dots (5)$$

3.3 消防力評価モデル

3.3.1 フェイズの定義と限界の火災性状

消防力評価モデルでは、東消モデルを参考に、初期消火活動および公設消防による消火活動が成功する確率と、消火活動が成功する場合に予想される最大の被害を求め、それらの積から被害の期待値を求める。

東消モデルでは、各消火活動で消火可能な火災の段階を『フェイズ』と呼び、火災の進展挙動を8段階のフェイズで区切って考える。本モデルでは、図3.3.1に示す4段階のフェイズを定義し、同図に示すようにフェイズ1からフェイズ3の各消火活動で消せる限界の火災性状を設定した。想定した

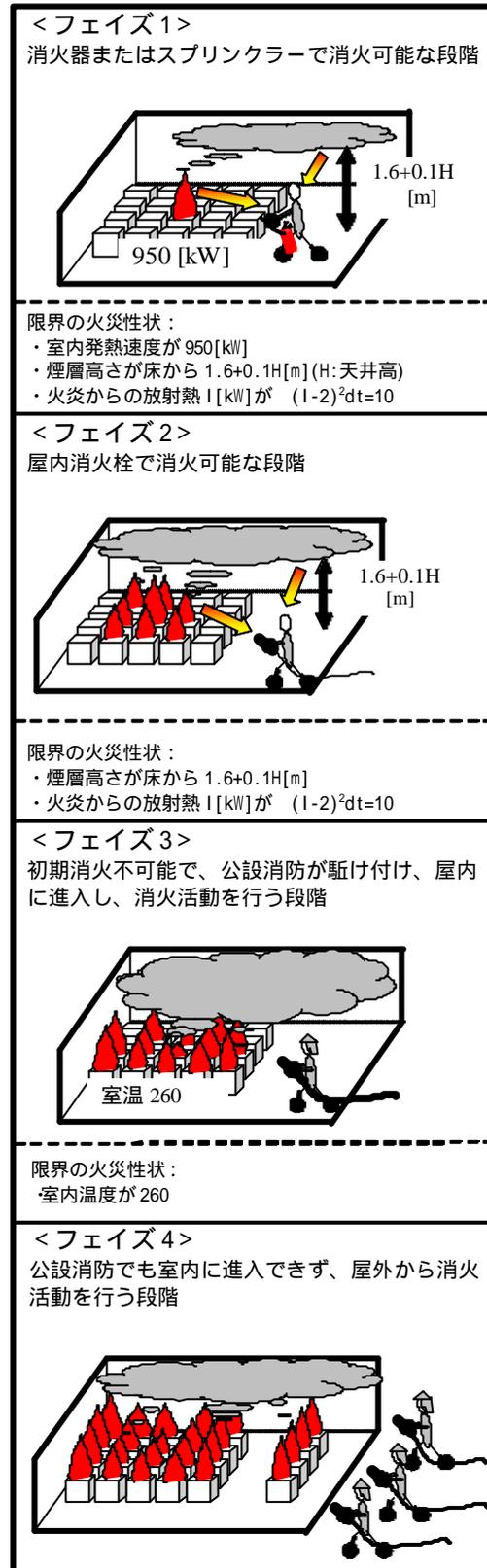


図3.3.1 フェイズの限界時間条件

火災は、フェイズ1から始まり、火災延焼モデルで算出される火災性状がそのフェイズの限界の火災性状になるまでに適切な消火活動が行われない場合、次のフェイズに移行する。

3.3.2 フェイズの生起確率

火災が各フェイズに留まる確率および各フェイズを超過する確率(超過確率)から、各フェイズの生起確率を求める。

フェイズに留まる確率とは、限界の火災性状に達するまでに消火活動が成功する確率であり、図3.3.2に示すように、自動火災報知設備の作動確率や各消火設備の作動・従事・奏功確率、および消火活動がフェイズの限界時間に間に合う確率から求める。

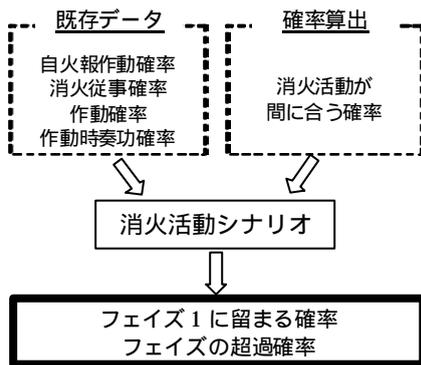


図3.3.2 超過確率の算出過程

例として、3.1で説明したモデル工場内中央から出火した場合の、フェイズ1に留まる確率および超過確率、そして生起確率を求める。

各消防設備の作動・奏功等の確率は火災予防審議会で検討された表3.3.1の値¹⁾を用いる。

消火活動が間に合う確率は、消火活動を行う人数や出火点までの距離等の諸条件から消火活動を開始するまでの時間を求め、消火行動時間分布¹⁾とフェイズの限界時間を対比することにより求める。図3.3.3により、フェイズ1の場合は0.806となる。

フェイズの生起確率は、前段階のフェイズの超過確率と現段階のフェイズに留まる確率の積により計算される。モデル工場については、図3.3.4より、フェイズ1に留まる確率は0.548となり、フェイズ1の生起確率は0.548となる。フェイズ2の生起確率は、フェイズ1の超過確率とフェイズ2に留まる確率の積により計算される。フェイズ3についても同様の手順により求める。フェイズ4の生起確率はフェイズ1~4の生起確率の和が1になるように求める。

表3.3.1 消防設備の作動等の確率

	自火報知設備	消火器
作動	0.939	0.997
従事	-	0.932
奏功	-	0.780

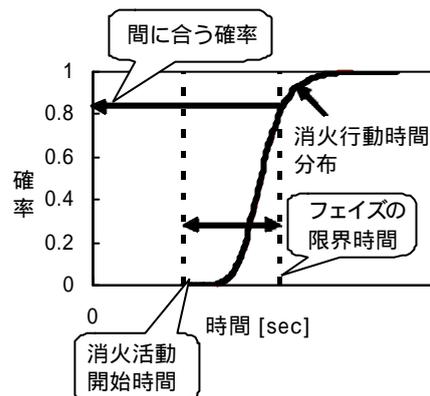
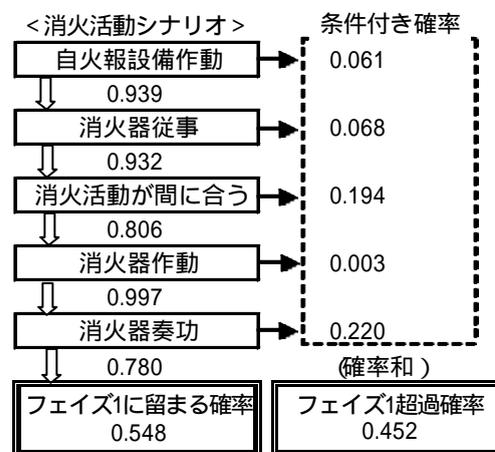


図3.3.3 消火活動が間に合う確率算出例



注) ◻ はYes、◻ はNoを示す。

図3.3.4 留まる確率・超過確率算出例

表3.3.2 各フェイズの生起確率と焼損面積

フェイズ	限界時間 [min]	フェイズに 留まる確率 [-]	超過確率 [-]	生起確率 [-]	焼損 メッシュ数 [-]	焼損面積 [m ²]	火災室温度 [°C]	煙層高さ [m]
1	4.6	0.548	0.452	0.548	1	2.2	23.1	3.02
2	8.2	0.447	0.553	0.202	9	20.0	29.1	2.26
3	20.1	0.094	0.906	0.052	158	351.2	260.4	2.26
4	-	-	-	0.198	574	1276.0	689.1	2.26

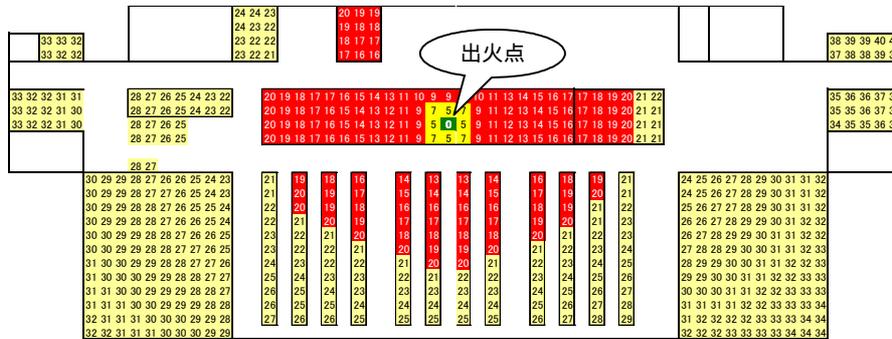


図3.3.5 各メッシュの着火時間 [min]

3.3.3 焼損面積の算出

各フェイズの焼損面積は、式(6)に示すように、全可燃物メッシュに対する焼損メッシュの割合を床面積に乘じることにより求める。

$$\text{焼損面積} = \frac{\text{焼損メッシュ数}}{\text{全可燃物メッシュ数}} \times \text{床面積} \quad \dots (6)$$

表3.3.2に各フェイズの生起確率および焼損面積の算出結果を示す。また、図3.3.5に各メッシュの着火時間を示す。図中の数字は出火後そのメッシュが着火するまでの時間を示している。

3.4 損害額評価モデル

火災発生に伴う建物、機械・設備、収容品の損害額を評価する際、火熱による焼損のみならず、煙損、消火にともなう水損をも評価する必要がある。そこで、煙損については床面からの煙層高さに応じて、水損については図3.4.1のように、焼損部分からの距離に応じて損傷率を仮定し、該当するメッシュの価額にかけて損害額として計上した。

以上の結果から、各フェイズにおける工場内にある機械・設備、収容品、建物の損害額は表3.4.1に示すように求められる。

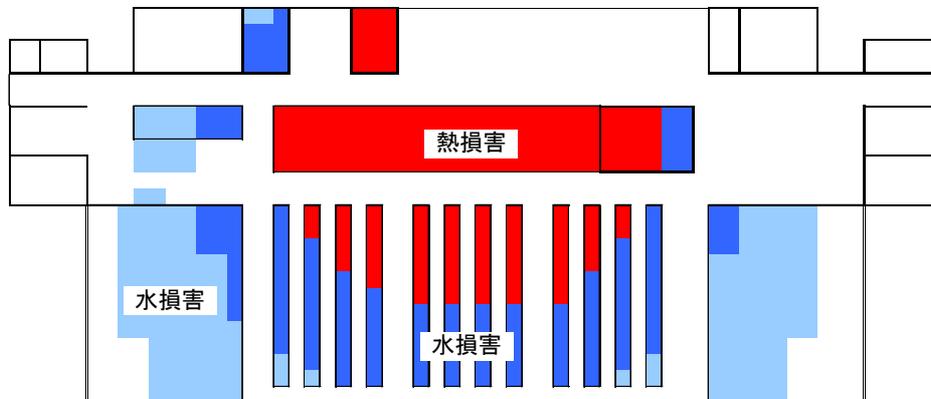


図3.4.1 熱・水による損傷評価
(部品倉庫中央で出火)

表3.4.1 損害額評価結果

フェイズ	損害額[万円]			
	機械設備	収容品	建物	計
1	11	502	8	521
2	139	760	71	970
3	1,101	2,035	1,252	4,388
4	4,483	3,897	4,548	12,928



図4.1.1 工場内用途別の出火割合

4. 一建物の火災危険性の評価

4.1 用途別出火割合による重み付け

工場建物内では、作業工程や用途に応じて出火危険性（出火割合）が異なると考えられる。工場建物内の火災危険性を評価するために、ある一点のみではなく、出火可能性のある全ての点を出火点としてシミュレーションを行い、それらの出火割合に応じて、結果の重み付けを行う。

そこで、モデル工場内を電気系作業、ガス・石油系作業、炉・ボイラー系作業、その他の作業、機械・電気室、倉庫、事務室、更衣室等の用途に分類し、過去の統計データを利用して、各用途に応じた出火割合を設定し(図4.1.1)、これとフェイズの生起確率の積からフェイズの発生確率を求める。

4.2 焼損面積期待値と損害額期待値

モデル工場内の全可燃物メッシュを順次出火点として、一連のシミュレーションを繰り返す。これにより得られるフェイズの発生確率と焼損面積の積を焼損面積予測値と呼ぶ。出火点についてフェイズ1～4までの焼損面積予測値を合計すると、出火点ごとの焼損面積予測値が得られる。これを全可燃物メッシュについて合計したものが、一建物内の焼損面積の期待値である。同様に損害額についても出火点ごとの損害額予測値を求めることができ、結果として表4.2.1に示すように、モデル工場の焼損面積期待値は147.7[m²]、損害額期待値は約2,050[万円]となる。

表4.2.1 焼損面積期待値と損害額期待値

出火メッシュの座標	フェイズ	発生確率 ($\times 10^{-3}$)[-]	焼損面積 [m ²]	損害額 [万円]	焼損面積予測値 [m ²]	損害額予測値 [万円]
9-30 (部品倉庫)	1	0.097	2.2	507	0.0002	0.0491
	2	0.036	11.1	752	0.0004	0.0268
	3	0.011	384.6	5,396	0.0041	0.0577
	4	0.034	1276.0	12,928	0.0429	0.4344
	9-30計					0.0476
18-13 (第一試験室)	1	1.867	2.2	722	0.0042	1.3478
	2	0.688	20.0	1,445	0.0138	0.9942
	3	0.170	335.7	5,171	0.0572	0.8808
	4	0.681	1276.0	12,928	0.8694	8.8088
	18-13計					0.9445
...
					焼損面積期待値 [m ²]	損害額期待値 [万円]
計		1			147.7	2,050

5. 火災シミュレーションモデルの利用方法

5.1 消火設備評価

本モデルでは、消防設備の種類および設置の有無に応じた焼損面積期待値および損害額期待値の違いを求めることができる。これにより、消火設備の効果を定量的に評価することが可能となる。

図5.1.1および図5.1.2にSPおよび屋内消火栓の有無によるモデル工場の焼損面積期待値および損害額期待値の違いを求めた結果を示す。ここで、消火器はいずれの場合においても設置されているものとし、条件は以下の3通りとする。

- 条件1. SP、屋内消火栓が設置されている
- 条件2. 屋内消火栓のみ設置されている
- 条件3. SP、屋内消火栓が不設置である

5.2 最大被害予測点の評価

焼損面積期待値および損害額期待値を算出する際、全可燃物メッシュを順次出火点として、出火点ごとの焼損面積予測値および損害額予測値を求めるため、これらが最大となる点を検出することができる。これにより、防災強化すべき箇所の評価が可能となる。モデル工場における、焼損面積予測値および損害額予測値が最大となる点を求めると図5.2.1に示す結果となった。

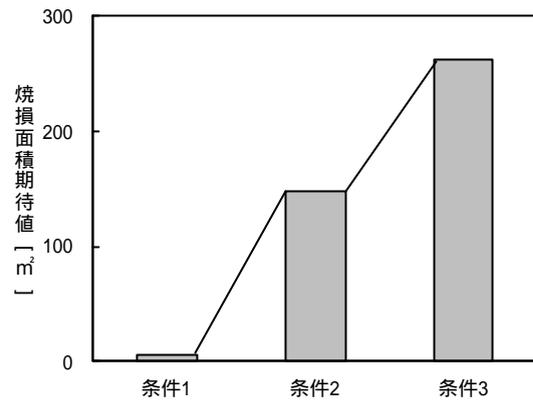


図5.1.1 消火設備による違い
(焼損面積期待値)

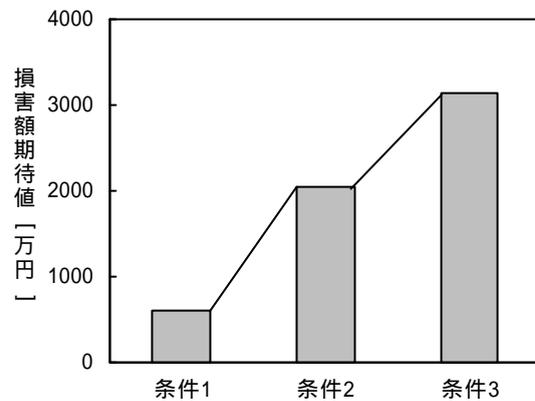


図5.1.2 消火設備による違い
(損害額期待値)

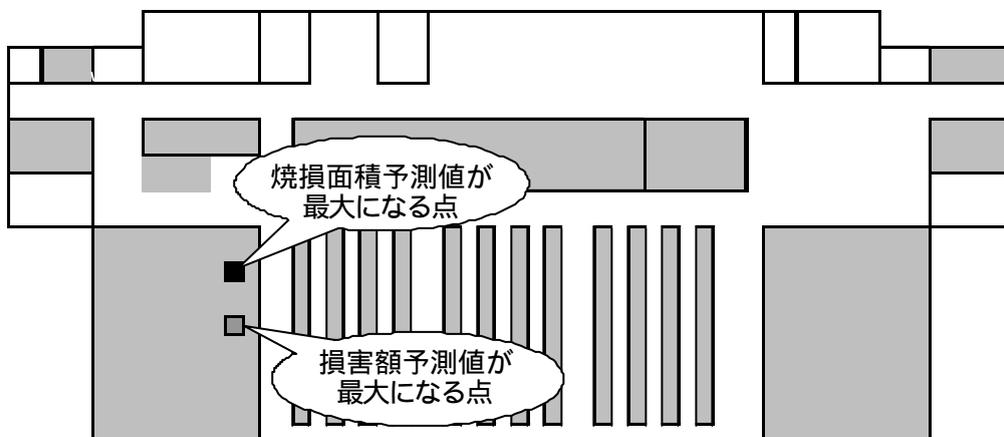


図5.2.1 出火点ごとの予測値が最大となる点

5.3 リスクカーブ・損害割合

出火点別・フェイズ別に算出した発生確率と焼損面積および損害額を用いると、焼損面積および損害額についてのリスクカーブの作成や損害割合の予測が可能となる。モデル工場においてSP設置なしの場合の結果を図5.3.1～図5.3.3に示す。

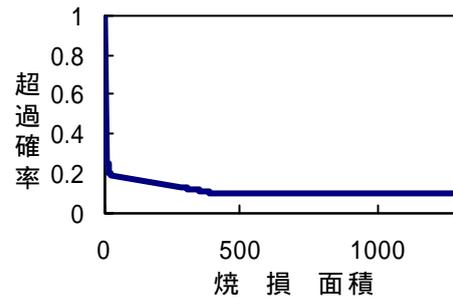


図5.3.1 超過確率と焼損面積

6. おわりに

1回の事故による被害が甚大となる可能性がある建物の火災危険度評価の一環として、建物内で作業を行う工場の火災被害を予測する、火災工学的理論に基づいた火災シミュレーションモデルを開発した。本モデルでは、個別の工場における建物内の状態、消火設備・防災管理体制に応じた焼損面積および損害額の予測が可能である。またこれにより、消火設備や防災管理体制の評価、建物内の危険箇所の推定、さらにリスクカーブの作成・損害割合の予測といった多用途についての利用が可能となる。

今後は、火災建物から隣接建物への延焼評価および出火頻度の検討を行うことにより、工場構内の評価ツールへと発展させ、更には工場のみならず、その適用範囲を広げたいと考えている。

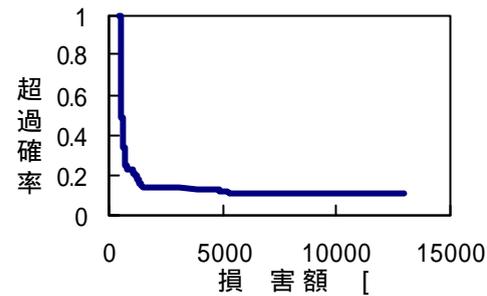


図5.3.2 超過確率と損害額

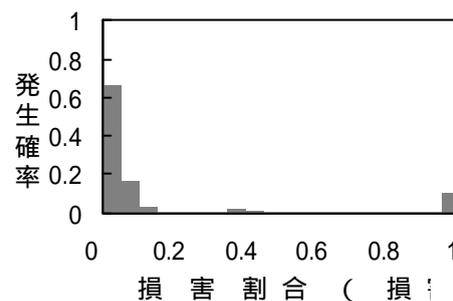


図5.3.3 発生確率と損害割合

謝辞

本モデルを構築するにあたり、災害科学研究会建物部会の若松孝旺委員、関沢愛委員、東京理科大学の森田昌宏教授、同大学松山賢氏には多数のご意見およびご指導を賜りましたことをここに厚くお礼申し上げます。

(研究部研究第一グループ)

【参考文献】

- 1) 建築物の防災特性に応じた火災安全性の総合評価-火災予防審議会答申-, 東京消防庁火災予防審議会, 平成13年3月.
- 2) 吉池ら: 確率論的火災リスク評価システムの開発, 火災vol.252, 日本火災学会, 2001.6.
- 3) 渡部ら: 火災リスク定量化モデルの開発, 火災vol.252, 日本火災学会, 2001.6.
- 4) 自治省消防庁: 平成11年火災年報, (財)日本防火研究普及協会発行.
- 5) 田中哮義: 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, 1993.
- 6) 水野智之: 椅子の燃焼速度について, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol.363, 1986.
- 7) 長谷見雄二: 火事場のサイエンス, 井上書院, 1988.